

# エネルギーの外部性と原子力

Externalities of Energy and Atomic Power



社団法人 日本原子力学会

(表紙の言葉)

みずみずしいレタスはさわやかな食感が好まれ、サラダの主力として健康な食品の代表の感がある。現在キャベツ、白菜に次ぎ最もよく食べられている葉菜であるが、かすかな苦味の元がカフェインであり、それが発がん性を持つことは案外知られていない。さらにカリウム40などの自然放射線源も含むし残留農薬も怖い。水洗いしただけで生で食べられるので成分も残留農薬もそのまま体内に入るが、直線閾値なし仮説(本文参照)に従えば、実はそれらの発ガン率は、本体(カフェイン) > カリウム40などの自然放射線 > 残留農薬の順でそれぞれ圧倒的な差がある。もちろんそれ以上に、得られるビタミンなどの成分の効果、食物繊維に代表されるがんの抑制効果も期待される。植物は、葉を食べられるのを防ぐために、有毒で苦いアルカロイドで自衛し、食べる動物はその対抗能力をもつ。我々は、ほんの50年前にはマツタケ並みの高級品であったレタスを、食べて得られるエネルギーより大きな1個当たり数10ccの石油にあたるエネルギーを投入し、高原を切り開くことで毎日食べられるようになった。100円玉で買える野菜一つが、思ってもいない効果を体にも、環境にも、社会にも及ぼしている。こんなところにも外部性の切り口を見ることができる。

(小西)

# エネルギーの外部性と原子力

Externalities of Energy and Atomic Power

社団法人 日本原子力学会

社団法人 日本原子力学会  
『エネルギーの外部性と原子力』  
(2006年9月27日発行)

本書「はじめに 執筆者所属リスト」において以下のような誤りがありました。  
ここに訂正してお詫びいたします。

誤	正
西川 雅史 (6.4) 大阪大学大学院	西川 雅史 (6.4) 埼玉大学

## はじめに

小西 哲之

本報告書は、2002年4月から2006年3月までの日本原子力学会「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会の2期4年間の活動をもとにまとめられたものである。本委員会は、エネルギー技術が単にエネルギー供給にとどまらず、社会と環境にさまざまな形で非常に大きな影響を与えること、したがってエネルギーについて考察する場合に、単にその経済的な価値や効果のみでは評価として適切ではないという認識のもとに、「外部性」という最近注目されている問題でエネルギー、とくに原子力について検討することを目的として設置された。「外部性」は、市場経済を介さない形での影響や価値を表すものとして、本来経済学で用いられてきた用語であるが、まだ十分に社会や分野外の専門家、たとえば原子力学会の会員にとっても、認知された用語とは言いがたい。しかし、たとえば今日の原子力がおかれた問題は、電力の供給・売買という市場経済よりも、むしろほかの経路での影響や価値によるものといえそうである。外部性は、原子力のような巨大技術を考察するとき、単なるコスト比較や市場原理による選択では説明のできない問題を分析するときの有力な視点として最近注目されている問題であり、専門分野を超えた約40名の研究者によって本委員会の検討が開始された。原子力は、地球環境問題に対する認識の高まりに対して、その役割が重要視されるエネルギー源ではあるが、将来に向けてそのエネルギー供給と地球環境問題への貢献に対する期待が社会の共通のものになっているとは言い得ない状況である。原子力の抱える諸問題、特に原子力に対する社会の選択を分析、理解し、社会の適切な判断に資するためには、この「外部性」という問題自体の研究を深めつつ、原子力というエネルギー技術を他のエネルギー技術と公平に客観的に分析することが必要であるというのが最初の共通認識であった。

この方針のもとに委員会での検討は幅広く進められ、2年間で8回の委員会が開催された。検討を進めるうち、問題の範囲は当初想定されたよりはるかに広いことが理解され、原子力に関する所期の目的となった分析だけでも十分に行うには本格的なプロジェクト研究が必要であることが認識された。しかし、検討の方針についての考察と、特に主要な問題についての基本的な理解は大きな進展を得て、いくつかの重要課題が抽出された。低線量放射線の被ばく影響の総合的評価はその代表的な課題である。一方、社会的な外部性など、まだ多くの問題が着手されたばかり、あるいは研究自体が存在していないため近い将来に結果が得られると期待できない課題もあった。そこでさらに2年間検討期間を延長し、6回の委員会が開催されたほか、委員会の活動を軸にしたさまざまな研究活動が徐々に展開されるようになった。

以上のような「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会の活動の成果をまとめたものが本書である。原子力、エネルギー、外部性にまつわる広範な話題について、外部講師も含め、委員会で発表報告された内容をもとに文章化し、分野ごとに整理した。原子力学会の研究委員会として、それぞれの内容は各著者の研究成果をボランティアに集めたものであって、全体として体系的に行ったプロジェクト研究ではない。相互に矛盾するものや方法論の違うものもあるであろうし、分野を完全に網羅できているわけではない。しかし原子力エネルギーに関連した問題を分析し、原子力を外から見ることのできる新たな研究分野として、新たな学際的分野が形成されつつあるのは確かであり、その分野を概観し、その主要課題と検討手法を明らかにしたという点で本委員会の成果は重要であると考えられる。本報告書に示す結果は日本原子力学会をはじめとして、エネルギー・環境・社会に関心を持つ多くの研究者、技術者、さらには一般の専門外の読者にも有意義な内容を含んでいるものと本委員会では期待している。本書が、エネルギー・環境問題を考えるさまざまな人の何らかの参考になることを願うものである。

## 本書の構成と執筆担当者

本書は、委員会での検討に基づいて、その分野を大きく分けて全体を再構成している。まず、

### 第1章 エネルギー外部性研究の概要

### 第2章 環境影響と環境外部性

において、これまで世界で展開されてきた外部性研究の内容を概説した。これまでのエネルギーの外部性についての検討は欧米ではかなり進んでいるが、その重心は環境影響の評価にある。外部性についてあまりなじみのない読者にとっては、格好の解説であり、既知の読者にとっても知識の整理に役立つものと考えられる。

次に続く4つの章は、本委員会が新たに検討した分野である。

### 第3章 低線量被ばくの生体影響と外部性

では、特に原子力エネルギーの外部性においてもっとも大きな問題となる低線量放射線の影響について、従来の考え方を見直し、新たな見方を提示するものである。生体や社会に対する影響として、原子力の外部性を他のさまざまなリスクと同じ基盤で評価することも可能となると期待される。

### 第4章 社会経済影響としての外部性

は、本委員会が新たに提示する、エネルギー外部性の社会的なさまざまな側面についての考察である。これまで重視されてきた環境影響のほかに、エネルギーは安定供給やセキュリティなどさまざまな側面を含んでいることがわかる。

### 第5章 エネルギー技術の評価

では、エネルギー技術が環境、社会に与える影響を外部性の視点から考察したものである。未来のエネルギーに対する評価が同一基準で行われるにはまだ程遠いが、さまざまなエネルギー技術で未来のエネルギーシステムの最適な構成を考える上では参考になる視点を含んでいると期待される。

### 第6章 社会の選択と意思決定

ここでは、外部性の考え方など、エネルギー技術についての多角的な分析結果をもとにして、その情報を社会が意思決定や総合的な評価を行い、実際の政策決定や研究開発計画を策定する際の考え方を紹介している。

### 第7章 外部性研究の今後の課題と展開の方向

では、これらの4年間の検討結果をまとめ、今後の研究の展開についての考えを示している。

以上の各節は、それぞれ委員会での発表者によって執筆されており、委員会における議論は経ているものの、それらは相互に調整を行ったものではないし、委員会としての意思統一を行ったものでもない。したがって、各節の内容は独立しており、その責任はすべて各節ごとの著者に帰すべきものであって、相互に矛盾したり、意見の相違を含む可能性があることに留意されたい。

以下に、各節ごとの執筆者の一覧を示す。また全体の構成、編集は、「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会報告書編集事務局として行ったものである。

## 執筆者所属リスト（あいうえお順、敬称略）

池本 一郎	(2.3)	(財) 電力中央研究所
一政 祐輔	(3.4)	茨城大学
伊東 慶四郎	(1.2、2.1、7)	(財) 政策科学研究所
入江 一友	(4.1)	(独) 日本貿易振興機構
内山 洋司	(4.5)	筑波大学
大森 良太	(4.2)	(独) 科学技術振興機構
岡野 邦彦	(5.1、5.6)	(財) 電力中央研究所
勝木 知里	(2.1)	(財) 政策科学研究所
金澤 晃	(4.3)	(独) 原子力安全基盤機構
川島 啓	(2.1)	(財) 政策科学研究所
岸本 充生	(2.2、6.5)	(独) 産業技術総合研究所
小西 哲之	(はじめに、5.5、6.3)	京都大学
酒井 一夫	(3.2)	(財) 電力中央研究所
篠田 佳彦	(5.3)	(独) 日本原子力研究開発機構
關 哲雄	(2.5)	立正大学
高橋 祥次	(6.2)	立教大学
武田 哲明	(5.4)	(独) 日本原子力研究開発機構
武田 洋	(3.3)	(独) 放射線総合医学研究所
手塚 哲央	(4.4)	京都大学
時松 宏治	(2.4)	(独) 産業技術総合研究所
西川 雅史	(6.4)	大阪大学大学院
別所 泰典	(4.3)	(独) 原子力安全基盤機構
松木 良夫	(1.1)	コンサルタント
松原 純子	(3.1、3.5)	(財) 放射線影響協会
萬金 修一	(6.6)	(有) あげぼの
柳澤 和章	(6.2)	(独) 日本原子力研究開発機構
山形 浩史	(6.1)	資源エネルギー庁
山田 明彦	(5.2)	(財) 新エネルギー財団

「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会報告書編集事務局  
 京都大学エネルギー理工学研究所  
 財団法人 政策科学研究所 主席研究員（元京都大学客員教授）  
 京都大学生存基盤科学研究ユニット

小西 哲之  
 伊東 慶四郎  
 亀井 敬史

## エネルギーの外部性と原子力 — 目次 —

## 第1章 エネルギー外部性研究の概要

1.1. 発電システムに係わる外部性研究の概要	3
1.1.1. 欧米における外部性に関する研究	3
1.1.2. 欧米の研究の水準と現状	3
1.1.3. エネルギー外部性の概念とその用途	4
1.1.4. エネルギー外部性の評価手法	6
1.1.5. 石油、石炭、水力、原子力及びその他のエネルギーの比較	15
1.1.6. 重要な影響経路	20
1.1.7. 外部性研究の課題	25
1.2. 外部性研究が挑戦すべき新たな課題への対応-概念枠組の拡張試論	33
1.2.1. はじめに	33
1.2.2. ExternE 研究のレビューを通じて得られた三つの示唆	34
1.2.3. 次世代の外部性研究に対する社会経済的ニーズの検討 (伊東, 2006)	37
1.2.4. 次世代の外部性研究の範囲と社会経済的影響分析概念の類型化	38
1.2.5. 次世代の外部性研究の概念枠組考察事例	43
1.2.6. まとめ	47

## 第2章 環境影響と環境外部性

2.1. ExternE プロジェクト研究の詳細分析とわが国への示唆	53
2.1.1. 研究の歴史的背景と目的 (伊東, 2002)	53
2.1.2. 広大な研究の範囲とシステム開発の3つのフェーズ (伊東, 2002)	55
2.1.3. 環境外部性の解析・評価方法論-影響経路アプローチ (伊東, 2002)	58
2.1.4. 主要汚染物質別環境影響の解析・評価手法等の概要	61
2.1.5. 各国の環境損害費用の構成と GDP に占めるシェア	70
2.1.6. 環境影響と損害費用の詳細分析事例-GT 複合火力と軽水炉発電	75
2.1.7. ExternE で指摘された課題とわが国の外部性研究推進の方向	87
2.2. 大気汚染物質による健康影響の定量評価の現状と課題	93
2.2.1. はじめに	93
2.2.2. PM 疫学調査の進展	93
2.2.3. 日本における大気汚染問題への適用	97
2.2.4. 大気汚染物質と閾値	98
2.2.5. 課題と展望	100
2.3. 京都メカニズムと原子力-中国への原子力 CDM モデル分析	103
2.3.1. はじめに	103
2.3.2. 京都メカニズムにおける原子力の位置づけ	103
2.3.3. 京都メカニズムにおける今後の原子力の方向	104
2.3.4. CDM を活用して途上国に原子力を導入するための試算	105
2.3.5. おわりに	110

2.4. エネルギー環境DNEモデルとCO <sub>2</sub> 削減評価	111
2.4.1 SRES シナリオ以前の IPCC シナリオ	111
2.4.2 SRES シナリオ [IPCC00, 森田 00, Morita00]	113
2.4.3 Post-SRES シナリオ [Morita00]	117
2.5. 環境外部性の経済的価値付け手法	119
2.5.1. はじめに	119
2.5.2. 外部費用の概念	119
2.5.3. 外部費用の評価 — 環境の経済的評価 (価値付け) 法 —	121
2.5.4. おわりに — 環境の価値 —	123
第3章 低線量被ばくの生体影響と外部性	
3.1. はじめに	127
3.2. DNA 損傷と修復	129
3.2.1. 放射線の生物効果の標的としての DNA	129
3.2.2. DNA 損傷とその修復	129
3.2.3. 低線量影響を考えるにあたっての問題点	131
3.2.4. おわりに	132
3.3. 放射性核種の生体内挙動と被ばく線量評価	133
3.3.1. はじめに	133
3.3.2. 放射性核種 ( <sup>3</sup> H及び <sup>14</sup> C) のラット体内における挙動	133
3.3.3. <sup>3</sup> H及び <sup>14</sup> Cの被ばく線量評価と化学形の違いによる相対危険度の評価	135
3.3.4. 人体におけるトリチウム ( <sup>3</sup> H) 代謝のモデル化と線量係数の算定	137
3.3.5. これからの研究	139
3.3.6. おわりに	140
3.4. トリチウムの環境生態系挙動	141
3.4.1. 腸内細菌によるトリチウムガスの体内移行と体内トリチウムガスの酸化	141
3.4.2. 抗生物質の投与によるトリチウムガス酸化の抑制	141
3.4.3. 嫌気性細菌によるトリチウムガスの酸化	141
3.4.4. 野外土壌環境からのトリチウムガス酸化菌の分離	142
3.4.5. 各地の土壌からのトリチウムガス酸化菌の分離	142
3.4.6. 土壌からの分離菌株の種の同定	142
3.4.7. トリチウムガスの野外環境での酸化速度の測定実験	143
3.4.8. 日本における野外放出実験	143
3.4.9. 今後の課題	144
3.5. 低線量放射線の人への影響	145
3.5.1. はじめに	145
3.5.2. LNT 仮説の問題点	145
3.5.3. 低線量放射線の人体影響の実態を科学的に把握・議論する試み：疫学調査結果	147
3.5.4. 放射線生物学の新しい潮流：動物実験	149
3.5.5. 社会の中の公衆と専門家と放射線	154
3.5.6. まとめ	154

<b>第4章 社会経済影響としての外部性</b>	
4.1. エネルギーセキュリティ	159
4.1.1. はじめに	159
4.1.2. セキュリティとは	159
4.1.3. 日本におけるエネルギーセキュリティ	160
4.1.4. エネルギーセキュリティにおける原子力の意義	163
4.1.5. ニュークリアセキュリティ	164
4.1.6. おわりに	164
4.2. 東アジアのエネルギー危機シナリオ分析とエネルギー技術の評価	167
4.2.1. エネルギー外部性の評価とシナリオ・プランニングの活用	167
4.2.2. シナリオ・プランニングによる東アジアのエネルギー危機の分析	168
4.2.3. 危機シナリオに基づくエネルギー技術の評価	173
4.2.4. おわりに	175
4.3. 原子力防災	177
4.3.1. わが国における災害対策	177
4.3.2. 原子力防災に関する課題	177
4.3.3. 原子力災害対策特別措置法	178
4.3.4. オフサイトセンター	180
4.3.5. 防災訓練	180
4.4. エネルギーシステム評価のための標準化手法－第三者による評価結果の理解のために－	183
4.4.1. はじめに　－外部性評価の難しさ－	183
4.4.2. エネルギー問題の変遷	183
4.4.3. エネルギーシステム研究としてのシステム評価	185
4.4.4. 「エネルギーシステム評価支援センター」構想	186
4.4.5. おわりに	188
4.5. エネルギー安定供給問題	189
4.5.1. エネルギー供給の基本要件	189
4.5.2. 基本要件からみたエネルギー源の特徴	191
4.5.3. 過去における石油供給の脅威	195
4.5.4. 燃料価格の高騰がもたらす産業影響	196
<b>第5章 エネルギー技術の評価</b>	
5.1. エネルギー技術の特性比較の試み	201
5.1.1. はじめに	201
5.1.2. 評価基準	201
5.1.3. いろいろな評価軸における評価とランキング	202
5.1.4. 評価結果	209
5.2. 発電技術の評価からの新エネルギー	213
5.2.1. 太陽光発電	213
5.2.2. 風力発電	215
5.2.3. バイオマスエネルギー	217
5.2.4. まとめ	218

5.3. 高速炉と燃料サイクル	219
5.3.1. 定量的評価手法の開発	219
5.3.2. フェーズⅡの進め方と実用化候補概念の評価	226
5.3.3. FS フェーズⅡにおける研究開発の重点化の結果と今後の研究開発	229
5.4. 高温ガス炉と核熱利用	231
5.4.1. 日本の一次エネルギーと水素エネルギー需給	231
5.4.2. HTTR プロジェクト	232
5.4.3. 高温ガス炉を用いた水素製造技術	235
5.4.4. 水素社会への移行	239
5.5. 核融合エネルギーの外部性	243
5.5.1. はじめに	243
5.5.2. 核融合のCO <sub>2</sub> 削減効果	243
5.5.3. 核融合の資源	244
5.5.4. 安全性と核融合の外部性	245
5.5.5. 廃棄物	247
5.5.6. エネルギーセキュリティ	247
5.5.7. 核拡散抵抗性	248
5.5.8. まとめ	249
5.6. エネルギーシステムのコンジョイント分析	251
5.6.1. はじめに	251
5.6.2. コンジョイント分析の概念	251
5.6.3. ペアワイズ評定法	252
5.6.4. 解析結果	254
5.6.5. 統計解析からみた現状の質問法の問題点	256
5.6.6. 回答者の属性について	257
5.6.7. おわりに	257
第6章 社会の選択と意思決定	
6.1. 原子力の社会的受容とベイズ理論	261
6.1.1. はじめに	261
6.1.2. ベイズ定理	261
6.1.3. 原子力発電所の信頼度	263
6.1.4. 信頼形成過程	264
6.1.5. 情報操作	266
6.1.6. 外部に放射線影響のある事故とない事故の区別	269
6.1.7. おわりに	270
6.2. 原子力研究開発の社会・経済的評価	271
6.2.1. 基本的考え方	271
6.2.2. 日本原子力研究所（原研）における社会・経済評価の経済的評価の試み	272
6.3. 核融合研究開発の経済的意義と評価	285
6.3.1. 研究の投資効果の一般論	285
6.3.2. 影響経路とメカニズム	286

6.3.3. 核融合エネルギーの意義と効果	287
6.3.4. 開発戦略との関連	288
6.4. 意思決定の外部性	291
6.4.1. 外部性と財産権	291
6.4.2. 内部化コスト	291
6.4.3. 内部化メリット	292
6.4.4. 全員一致と代替不可能性	293
6.5. 規制に関する政策評価の動向	295
6.5.1. 規制影響分析とは	295
6.5.2. RIA の制度化	295
6.5.3. 米国の RIA	297
6.5.4. 英国の RIA	299
6.5.5. 欧州の RIA	300
6.5.6. 日本における経緯	301
6.5.7. RIA 制度化の課題	302
6.6. システム論的考察と対応の可能性	303
6.6.1. 序論	303
6.6.2. 原子力エネルギー外部性	304
6.6.3. システム論的アプローチ	309
6.6.4. 原子力エネルギー外部性への対応と社会の選択、意思決定	313
6.6.5. 結論	316
第7章 外部性研究の今後の課題と展開の方向	
7.1. 次世代の革新的な外部性研究の課題	321
7.2. 今後の研究展開の方向	324
おわりに	327
索引	329

# 第1章

## エネルギー外部性研究の概要

---



## 1.1. 発電システムに係わる外部性研究の概要

松木 良夫

### 1.1.1. 欧米における外部性に関する研究

欧米ではこれまでの十数年間に、原子力とその他の発電システムの外部性を評価する為のプロジェクトが幾つか実施されている。まず米国では、既に 1990 年代初頭に幾つかの州の公益事業委員会が発電事業に伴うひとの健康と環境に関する外部性の評価結果の提出を電気事業者に指導している。初期の外部性評価手法は、この米国の制度の下、確立されたものである（例えば New York State 1993 a~e）。これに続き、米国エネルギー省（DOE）の予算で実施されたオークリッジ国立研究所と NGO リソース・フォー・ザ・フューチャーによる ORNL/RFF プロジェクト（ORNL/RFF 1992~1998）では、貨幣価値換算法などの重要な評価技術が改良されると共に、有害物質放出から健康・環境影響の貨幣価値換算と外部性の評価に至る手順がより体系化された。ORNL/RFF プロジェクトは、当時の欧州連合（EU）による後述する ExternE プロジェクトの初期のグループと情報交換を行い、これに影響を与えた。一方、国際原子力機関（IAEA）のプロジェクト X（当時の IAEA 内の予算コード名。後にプロジェクト C）では、これら欧米の研究グループの他に旧ソ連、東欧、中国、アフリカの研究グループを交え、独自に原子力発電と他の発電システムのリスク比較研究を行なった（Matsuki 2002）。この研究プロジェクトの中で、IAEA は外部性研究手法の有効性に着目し、これを加盟国に普及すべくその手法の整理と解説を行い、ガイドライン図書を刊行している（IAEA 1999）。本節の後半では、IAEA のガイドライン図書（IAEA1999）と IAEA による研究成果の概要を紹介する。

米国から EU に受け継がれた電気事業の外部性評価は、1990 年代の EU 電力市場の拡大の動きの中で次第に勢いを増し、参加国を増やした。1996 年には 15 カ国から 50 以上のチームが参加するまでに至った。1990 年代の終りには、EU の研究者グループは独自の計算コード（ECOSENSE）を開発し、欧州での計算評価に用いるだけでなく、これを用いて南米と中国でのケース・スタディを行っている。その評価の対象も広く、また深くまで追求し、米国では研究されなかった化石燃料発電から放出される微細粒子の大気中での二次変化にまで評価範囲は及んで行った。同様に、地球温暖化の影響評価範囲も米国における研究の範囲を超えて広がった。貨幣価値換算の手法も米国での研究成果を更に発展させ、統計的な命の価値（Value of Statistical Life）を用いて死亡者数を数える方法でなく、寿命が短くなる点を貨幣価値に換算する手法（Years of Life Lost : YOLL）が開発された。これに関連し、投資の予測計算に用いられる割引率の概念が導入されるなど、貨幣価値換算の手法が充実したものとなった。一方、参加研究チームが増えるに連れ、評価結果が蓄積され、欧州におけるおおよその外部性のパターンが認識されるようになった。この点に着目し、人口分布などの主要な要素と外部性の相関を分析した結果を用いた簡易な外部性評価コード（IAEA の Simplified Package for the evaluation of environmental costs of electricity generation : SIMPACTS）も開発されている。

### 1.1.2. 欧米の研究の水準と現状

外部性評価の動機は、まず電力売買の市場化の進む米国の数州で電力料金を決める州の公益事業委員会が電力会社に外部性評価を指導したことであった。次に欧州では EU が拡大し、電力の競争市場が大規模に形成されるようになった場合、米国で検討されていたような外部性が、欧州ではどの程度の大きさになるかを知ることが関心事であった。これら欧米での外部性評価の対象と範囲は、研究が進むにつれ外部性の数え落としが無いようにと、より広くより深い内容が追求されて行

った。しかし、評価手法そのものはこのような緊急な要請を充たす為に在来の評価手法を再編成したものである。言わば急ごしらえの部分もあり科学的な根拠のはっきりしない部分もある。例えば、低放射線量による放射線障害の発生数評価に閾値無しの説を採用し、結果を大き目に見積もることを意図したものもある。全般的にこれらの評価結果を見ると、化石燃料の燃焼による地球温暖化の影響と、同じく化石燃料の燃焼による有害物質の放出による健康障害が、他を凌駕する評価結果を示す。これは、死亡者と障害者の数を数えることでなく、一年間寿命が縮まることの貨幣価値(YOLL)を求める手法が変更されたことの影響も大きい。特に、化石燃料燃焼に伴う化学物質の放出に起因する呼吸器系疾患による晩発性障害の発生が、この寿命短縮の貨幣価値換算により、大きくクローズアップされている。

一連の外部性評価のノウハウは、国際原子力機関が刊行したガイドライン図書(IAEA, 1999)に整理されている。この手法は電気事業に伴う副次的な環境と健康への影響を、発電施設からの有害物質の環境放出を基に順次計算して行くものである。まず環境・健康への影響が物理的な指標で示され、次いでこれらが貨幣価値に換算される。この次のステップでは、在来の電力料金の体系には含まれない外部性が区別される。この他、同ガイドライン図書には、各種電力オプションの選択に必要な情報を整理する方法と、国のエネルギー政策や民間の事業計画の検討を支援する為のマルチ・クライテリア・アナリシス手法が示されている。国際原子力機関のプロジェクトXは、全加盟国百二十数ヶ国が出資する一般拠出金により賄われる長期的プロジェクトで、我が国も拠出額から見れば、米国に次ぐ第二の資金拠出国であった。しかし、当時我が国におけるケース・スタディは発表されなかった。

### 1.1.3. エネルギー外部性の概念とその用途

電力の市場化が進む米国や欧州連合と異なり、我が国では電力会社に供給責任が課され、市場競争によらずに電気料金が設定されていた。しかし近年我が国でも、一部が自由化されるなど、電気事業全体を取り巻く環境が変わって来ている。もし仮に、電気市場が競争市場になれば、消費者が発電事業者を選択する余地が生まれる。また、例えば外部性評価の結果が公表され、ある特定の電気事業者の発電事業による副次的な環境と健康に関する影響が他に比べて大きいと分かれば、消費者がその影響を忌避し、需要が下がる可能性が出てくる。あるいは、電気事業者側がその低減対策にコストをかけ、売電価格を上げる可能性もある。電力が競争市場で売買され、外部性評価結果が公表されるようになると、環境・健康への影響、原油供給確保の為の対策費用などの大小が、市場における電力の取引量と価格を直接左右する可能性が出てくる。

電力の競争市場で外部性の大小を知るの意味は四つある。第一は、市場価格に含まれない外部性がどの程度の大きさかを知ることである。一般に競争市場の商品価格が上がるに従い、その商品市場における供給量(同市場に商品を供給する色々な会社の供給量の合計)は増える(図 1.1.1 の右上がりの供給直線または供給曲線)。一方、消費者側は、競争市場における商品価格が下がれば消費意欲が増し、需要を増す(図 1.1.1 の右下がりの需要直線または需要曲線)。競争市場では、これら供給者の原価と消費者の支払おうとする金額の釣り合う点が市場価格(図 1.1.1 の P1、Price equilibrium)と市場供給量(図 1.1.1 の Q1)である。ここで、仮にこの価格に含まれていない外部性(図 1.1.1 の Marginal external cost)が存在することが分かったとしよう。例えば、火力発電所から放出される粒子状物質などによる、すぐには目に見えて現われない(晩発性)呼吸器疾患による健康被害を推定し、損害額を計算したとしよう。もし、これが従来考慮されていなかったもので、またその額が電気の商品価格に対して、無視出来ない大きさであることが分かれば、その対策として、例えば、電気事業者は被害者に対する賠償金を支払う為の予算を原価に加える方策を考

えることになる。あるいは発電量を保とうとするならば、粒子状物質などの放出低減対策を施さなくならなくなる。そこで、外部性の分が市場価格に含まれれば、その分の価格は上がる（図 1.1.1 の P2）。しかし消費者に選択の自由のある市場では、価格が上がれば消費意欲が衰え、市場への電力供給量も以前のレベルより低いレベルに落ち着く（図 1.1.1 の Q2）。このように、競争原理の働く電力市場では、外部性の大小は、従来の原価に加え、電力の価格と供給量を決める要素になる可能性がある。

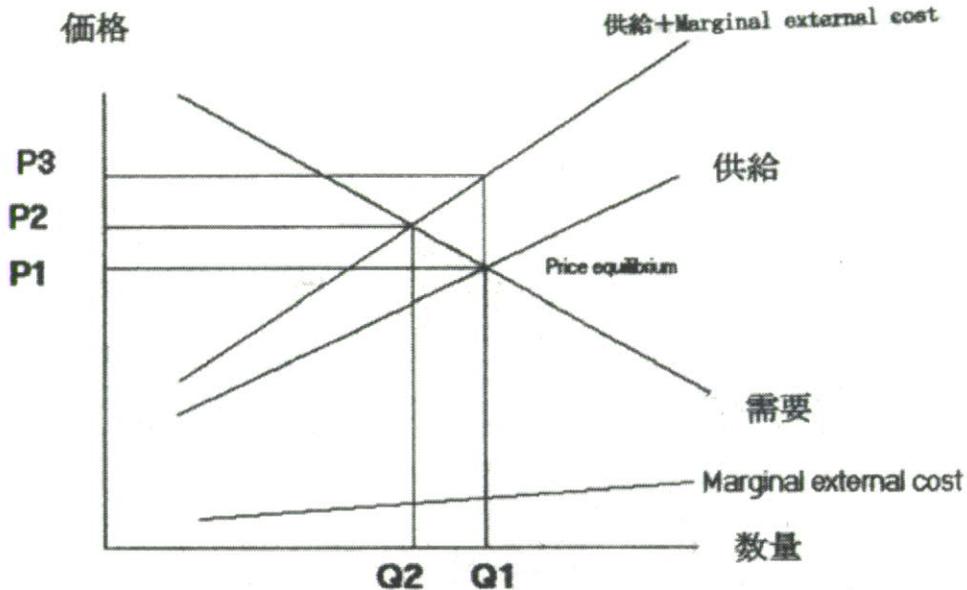


図 1.1.1 需要、供給および外部性

外部性の大小を知ることの第二の意味は、それを計算評価する段階で外部性の内容を検討し、把握できることである。例えばまだ起きていない事故のリスクを外部性にとらえた場合、事故による金銭的損害、精神的な痛みや苦しみのような金銭上の損害でないもの、子供などの直接生産活動に従事していない人々の死、破壊・汚染された環境の修復・清掃作業費用、生態系の損害、予想される事故への忌避など、どこまでを範囲に含めるべきか、それぞれどのような方法で貨幣価値に換算出来るかを調査研究する必要がある。

外部性評価を行なうことの第三の意味は、今まで見落とされていた外部性を市場経済に盛り込む為の制度作りの検討を行なうことにある。例えば、事故のリスクを民間の保険制度により原価に盛り込んだり、地球温暖化リスクを温室ガスの排出権の売買により原価に盛り込むなどの制度作りを行ったりすることによって外部性を小さくすることが出来る。

第四の意味は、上の第一の意味に関連し、競争市場の中で外部性が認識されることで変化するかもしれない需要と供給のバランスを、政府が生産者に対し助成金を交付したり、消費税を消費者から徴集したりする方法で調整する為の市場介入策を検討することにある。例えば、事故のリスクを保険制度によって原価に反映しても、まだ外部性として市場価格に反映出来ない部分がある。そのような部分の外部性が計算により求めれば、価格の上昇とそれに伴う供給量の低下分が予

測される。もし供給量の低下を取り戻す必要があれば、政府の何らかの助成制度（図 1.1.1 の P3-P2 の分を政府が助成）を行い、供給量を最初のレベル（図 1.1.1 の Q1）にまで戻すことを検討することになる。

#### 1.1.4. エネルギー外部性の評価手法

以下に、IAEA ガイドライン（IAEA 1999）に示されたエネルギー外部性評価手順の概要を紹介する。まず、影響経路（損害関数）法を用いて物理的な環境影響を計算し、次いでこれを貨幣価値換算して外部性の大きさを評価する。最後に、これらの結果をマルチ・クライテリア・アナリシス手法によって整理し、エネルギー政策検討の材料作りを行なう。

##### （1）影響経路（損害関数）法

影響経路（損害関数）法は、燃料採掘活動、燃料製造・加工、発電所運転、廃棄物処理・処分などの一連の過程における通常操業時と事故時の有害物質の環境への放出、環境中の濃度変化、並びに同濃度変化に伴う環境や健康への影響とその貨幣価値換算値としての損害額を計算するものである。放出量の計算に際しては、実在の施設を対象にすることも、また、仮想的なものを想定する場合もある。健康影響を計算する段階では、プラント周辺の実際の人口分布を用いる。評価結果である環境や健康への影響およびこれらの損害額は、一般に、発電施設の寿命を通じて発電する発電量により規格化し、表示され、各種発電システムからの損害額同士の比較が行なわれる。

影響経路（損害関数）法は、次の3つの主要なステップから構成される：

- ・ 燃料サイクル、燃料チェーン、並びにそれらに用いられる技術、設備・施設の性格、特性の評価
- ・ 有害物質による環境汚染濃度増加・変化、並びにその他のリスク要素（事故やエネルギー供給の問題など）の推定
- ・ 予想される影響の計算

図 1.1.2 に影響評価手法の概念フロー・チャートを示す。

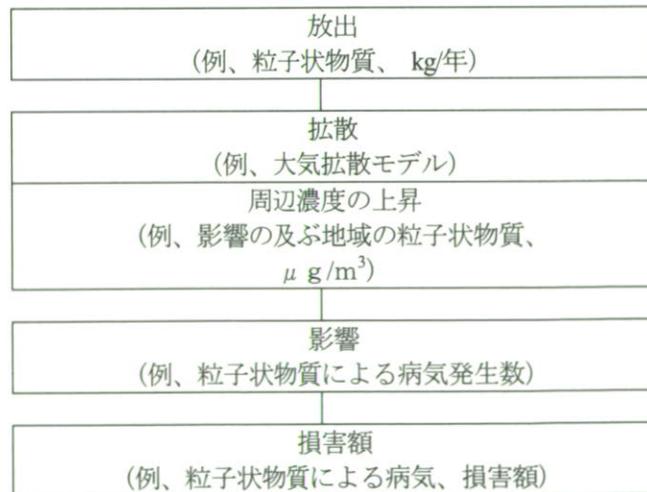


図 1.1.2 影響経路（損害関数）法の概念フロー・チャート

影響経路（損害関数）法の作業手順は次の通り：

- ① プロジェクトの範囲と規模の設定
  - ・ 検討事項と調査内容の仕様書作り
  - ・ 必要な人材・資金、資材の特定
- ② 分析事項のスクリーニング
  - ・ 燃料サイクル・燃料チェーンの活動全般のサーベイ
  - ・ 重要な影響を及ぼす有害物質の放出経路の抽出と選定
- ③ 燃料サイクル・燃料チェーン及びそれらに用いられる技術、設備・施設の特徴把握
  - ・ 使用される技術、設備・施設の性能と燃料サイクル・燃料チェーンの事業活動規模の把握
  - ・ 有害物質放出の種類と量の把握
  - ・ 被害を受ける公衆や家畜・動物、環境に関するデータの把握
- ④ 有害物質の環境中汚染濃度変化・上昇の推定
  - ・ 一次大気汚染物質（粒子状物質として放出される分）
  - ・ 放射性物質
  - ・ 事故
  - ・ 二次大気汚染物質（一次大気汚染物質が放出後、化学変化によりエアロゾル化したもの）
  - ・ 淡水の汚染する過程のモデル化
- ⑤ 環境と健康への影響の推定計算
  - ・ 一般公衆への影響
  - ・ 自然環境への影響
  - ・ 事故発生とそのリスク
  - ・ 感覚的な影響の大きさの把握
  - ・ 地球温暖化
  - ・ エネルギー供給危機
  - ・ 遠い将来への影響
- ⑥ 不確かさの解析
  - ・ 不確かさの原因の把握
  - ・ 不確かさに関する情報の整理
  - ・ 重要な結果の選別と特定
- ⑦ 得られた結果の総合評価

この手法の特徴は、作業を通じて重要度の高いものとそうでないものを仕分けし、重要度の高いものは詳細に、そうでないものは概略を評価する点である。このような重要度分類を行なうには、主に二つの理由がある。第一の理由は、どの研究プロジェクトも資金や情報資源に限界がある為、第二の理由は、過去の調査の例から見る限り、殆どの発電システムの燃料チェーンにおいて、全ての放出経路がそれぞれ大きな影響を与える事はなく、幾つかの有害物質と放出経路が、環境と健康への影響に関して重要であることが判明している為である。

例えば、原子力発電が幾つかのオプションの中の本命であるなら、詳細な環境影響評価が必要である。一方、もし原子力発電が本命でなく、原子力に関する情報が報告書に盛り込まれていることが望ましい、といった程度の必要度であれば、原子力に関しては過去に発表された研究成果報告を少し見直した結果を簡単に報告すればよい。このような場合には世界の原子力事故の歴史データを単純に計算して平均的な事故発生確率を求め、それにこれらの事故の影響に関する大き目の推定

結果を組み合わせて報告書に加えることでも充分許される。とは言っても、引用される発電施設は、検討対象となっている発電施設と同種類のものとするべきであって、分析者は引用する過去の研究成果報告書との違いがないかどうか、また放出量や有害物質の種類などの、環境影響評価結果に大きく影響する要素が引用する過去の報告書のそれらと比べて大きな違いがないかどうかを評価する必要がある。

影響経路（損害関数）法は、環境と健康への影響の定量化に結びついている点で、多くの環境影響に関するステートメントや環境影響アセスメントと異なる。従来の環境影響ステートメントや環境アセスメントは、設置する発電施設や産業施設が環境に与える可能性のある影響の詳細な定性的記述を行なうものではあるが、その一方では定量的な記述に欠ける。これに比較して、影響経路（損害関数）法は、最も重要でかつ定量化できる幾つかの環境影響評価の側面に焦点を当てたものであるが、全ての環境影響を網羅することは出来ない。

ひとの健康と環境に対する影響は、一般的な記述や寓話的な説明、もしくは個人の印象に基づくものであってはならず、むしろ科学的な知見や解析・分析に基づくものでなければならない。このことは、一般論としてトップダウン・アプローチよりも影響経路（損害関数）法のようなボトムアップ・アプローチを用いるべきであることを示唆している。ボトムアップ・アプローチは、実際に起きる事象を詳細に記述する点で、事象のひとつひとつを考慮せずに想定された因果関係をもとに影響を評価するトップダウン・アプローチよりも望ましい方法である。

影響経路（損害関数）法では、有害物質の放出、拡散、これらによる健康障害の増加、損害額（ある場合は放射線ホルミシス効果のような利益も含め）を一連のつながりとする環境影響経路が特定される。そのことから、同法は発電施設の設置地点特有の状況を反映した評価ができる。しかし、国全体のエネルギー政策作りの参考とする為の一般的な説明が必要な場合には、特定地域の特徴を強く反映するという点で限界がある。これに対し、トップダウン・アプローチは広範囲にわたる影響、損害の平均値をまず推定し、次いでそれを異なる有害物質発生源毎に振り分けて行く。影響経路（損害関数）法の詳細については、IAEA（1999）を参照されたい。

## （2）貨幣価値換算と外部性評価

発電事業に起因するひとや環境への影響の貨幣価値換算の例は、大気中のオゾン濃度レベルの増加に伴う穀物の収穫減少に伴う損害額や、硫化物の放出に伴う建物の経済的価値損失などである。このような貨幣価値を与える為の手法は、次の二つのカテゴリーに分かれる：

- ・ 損害に基づく値付け（Damage based valuation）
- ・ 抑制コストに基づく値付け（Control cost valuation）

米国政府による Office of Technology Assessment 1994 の紹介する貨幣価値換算手法に基づき、以下にこれらの手法について述べる。

### ① 損害に基づく値付け

損害に基づく値付けは、1990年代に入り、環境と健康への影響の外部性を電力会社各社の総合的な資源計画に際し定量評価するようにとの指導のあった米国の数州で採用されたもので、WTP（Willingness to pay：個人がリスクを回避する為に対価を支払う意志）の概念を用いて行なうものである。米国におけるこの電力会社による外部性の計算プロジェクトを通じて実践的な影響経路（損害関数）法が確立され、結果として環境への損害を測定する一手法であった抑制コストに基づく値付け手法（後述）を不要なものにした。（なお、抑制コストによる値付け手法も、放出低減対策による便益との比較を行なう目的では依然重要ではある。）

損害に基づく値付けの考え方をとるアプローチには、直接的な方法（市場価格法：Market price method、条件評価額法：Contingent valuation）と、間接的な方法（快適度価格付け法：Hedonic pricing、旅行費用法：Travel cost method）がある。表 1.1.1 に推薦される貨幣価値換算法の一覧を示す。

表 1.1.1 推薦される貨幣価値換算法の一覧 (IAEA 1999)

種類	手法	実質的な市場	例
記述された好み・選択 (直接法)	条件評価額法	インタビュー	土地を野生のままにしておき、使用しない事の価値
目にみえて現われた好み・選択 (間接法)	快適度価格付け法	不動産	騒音を回避したいとする意志に従い、支払おうとする対価 (WTP) を不動産価値の下落の程度によって推定する。
	旅行費用法	リクリエーション産業	リクリエーションを与える場所としての値打ち：リクリエーションの目的で訪れる場所で使う時間や費用をもとに推定する。この場合、異なる環境の質を比較することになる。

### 市場価格法

市場価格法は、実際の市場のデータを環境影響の貨幣価値換算に用いる直接的なアプローチである。応用例のひとつは、電気事業に起因する大気汚染による穀物の収穫減少とその損害額の評価である。この手法の利点は、実存する市場のデータを用いる為、応用が比較的容易であることである。一方、不利な点は、市場で取り引きされるものにしかこの手法が適用出来ず、また環境影響の全てが市場で取り引き出来るものではないことである。例えば、ひとによっては絶滅の危機に瀕している動植物や水没する土地の保護に非常に高い価値を見出しているかもしれないが、これらは市場で取り引きされるものではない為、この手法を適用した評価はできない。

### 条件評価額法

条件評価額法は、インタビューなどに基づいた直接的な貨幣価値換算法である。個人に環境の質の改善に対価を支払う意志があるか（あるいは質の悪化に耐えられるか）どうかについての一連の実験的な質問に答えてもらい、その結果を整理し貨幣価値を付ける。言い替えれば、仮想的な市場を想定する。このような仮想的な市場で、まず質問者は回答者に対して環境の質の変化に対する価値の金額案を出し、回答者がこの金額を支払うかどうかを質問する。質問者は続いて代替の金額を提示し、最高値〔若しくは最低値〕が決まるまでこれを続ける。この実験で求まる値は個人の WTP（最高値）もしくは WTA（最低値：個人が環境の質の低下を受け入れる最も低い額）である。

以上のインタビューによるサーベイの後、サンプル集団から得られた貨幣価値推定値を統計処理する。インタビューの回答者の年齢、職業等の経済・社会的な情報を含め、多重回帰分析を行い、WTP の予想値を評価する。サンプル集団から求められた WTP または WTA を更に大きなグループ（例えば、水力発電所の建設に影響を受けるような全ての集団に）に普遍化出来るかどうかを検討する。

この手法の利点は、仮説的な市場を想定する為、今まで市場価値がなかったような多くの種類の環境影響に関する外部性を推定できることである。また、これが「使用することの価値」と「使用しないことの価値」の両方を取り扱うことができる利点もある。不利な点は、これが仮想的な状

況を基にした評価である為、環境の質の改善について回答された内容と、実際の個人の WTP（対価を支払って環境の質を改善したいとする意志）の間に食い違いが起る可能性のあることである。また、この手法の実施には時間と費用がかかる。

### 快適度価格付け法

この手法は、不動産価値や賃金基準などを調べ、地域環境の快適さへの影響を間接的に求める方法である。例えば、不動産の場合は環境の特定の属性や属性間の違いに影響する環境影響の貨幣価値を特定する為に、統計的なモデルを用いる。この手法は、時として「属性の値付け」手法とも呼ばれる。理由は、土地の市場価値がこれら属性に起因する「利益」もしくは「利用価値」に直接関係するためである。この手法で求められる値は、環境の質改善に対する個人もしくは社会の WTP の代弁者と考えられる。この方式の利点は、既に十分な研究成果が報告されており文献が豊富なことである。また、これは美観上の快適さなどの環境の属性の価値の影響に関する値を求める目的にも有効である。

この手法の限界のひとつは、環境の快適さを得る為に対価を支払いたいとする意志（WTP）の意味ある測定の目安を求める為には、当該 WTP に影響するかもしれない全ての変数を一定としないなければならないことである。例えば、送電線の下にある環境の特定の属性の価値（家の大きさ、庭の大きさ等）への影響を推定する為にはこれらの全ての属性を知る必要があり、また意味のある WTP を求める為には、関心のある属性を除いては全て一定であるようにして解析しなければならない。

### 旅行費用法

旅行費用法は、WTP を表現する為に時間の価値を用いる間接的な貨幣価値換算法である。従来、リゾート地の改善の得失評価にしばしば用いられて来た。環境影響評価に用いる際は、環境の快適さを享受する為に個人がリゾート地へ旅行したいとする意志を貨幣価値に表す。必要なデータは、インタビューなどのサーベイ、並びに質問状により収集される。土地の状況に関する情報も必要である。

この手法の利点は既にこれを用いた多くの文献があることである。一方、不利な点はこの手法については実に多くのモデルがあり、モデルによって評価値が異なる点である。

#### ② 抑制コストに基づく値付け

抑制コストに基づく値付けとは、規制の対象となる汚染物質に起因する環境影響の貨幣価値の代弁者として、現行の規制値に合せた汚染物質排出抑制用設備の設置と運転に必要な費用を用いる手法である。この手法の支持者は、現行の環境保護基準の下では、最新の排出低減装置の費用または最大の費用こそが環境保護と質の向上に対する社会の WTP の推定値になると言う。この考え方の裏には、既に規制監督者が色々な質の環境から得られる利益を評価しており、また排出低減費用の変化と環境の受ける損害額の変化の比較をもとに、規制の最適レベルを特定していると仮定されている。

抑制コストに基づく値付けの一種に「緩和コストに基づく値付け（Mitigation cost valuation）」法がある。抑制コストに基づく値付けとの違いは、緩和コストに基づいて値付けされた貨幣価値は、将来起きるかも知れない環境影響を緩和する為の措置に関連している点である。この手法は炭酸ガス放出の影響コストの推定に広く応用されている。米国政府の Office of Technology Assessment 1994

は、炭酸ガス放出を少しでも吸収させる為の植林にかかる費用を推定し、炭酸ガス放出に伴う費用であるとしている。

### ③ 外部性の識別

まず、以上までの手順で求められた各種影響経路からの環境・健康影響の内、明らかに外部性でないものを除外する。この段階では、制度や賠償により電気料金に含まれているかどうかの判定が難しく、議論になるような損害額を取扱う。

#### a) 外部性の意味

外部性とは、製品やサービスについて、生産者でも消費者のいずれでもない第三者の快適さや利益に与える影響のことである。外部性と汚染物質の放出、汚染物質の環境中濃度、環境・健康影響との間には多くの違いがあり、論理的な序列がある。発電所などの発電施設が建設されると、騒音や土地利用による環境の侵蝕等の影響が現われる。また、これらから放出される多くの有害物質は化学変化を起し放出源の隣接地域に拡散される。この拡散により、環境中の有害物質の濃度はこれらの施設建設前のレベルに比べ高くなる。一般公衆、生態系及び建物や道路等のインフラは、これらの増加した有害物質に被ばくし損害を受けるかも知れない。これらの影響は多くの場合貨幣価値で表現することが出来るが、貨幣価値で表現される限りこれらの影響は損害 (damages) である。損害の内の幾つかについては電力や燃料の市場価格に含まれていない。このような損害を外部性 (Externality) と呼ぶ。外部性の損害に占める割合はどのような市場 (損害額を明確に示す保険、規制条件など) を想定するかにより異なり、0から100%までの巾がある。

影響経路を決める作業では、解析者は上のような違いに留意する必要がある。その理由は、これらのひとつひとつが影響経路の論理的な展開を与える為である。表 1.1.2 に影響経路の例を示し、放出、環境中濃度の変化、影響、損害及び外部性の違いを説明する。例えば、炭酸ガス自体は、化石燃料を燃焼させることによる「影響」ではなく、地球温暖化現象に起因する生態系の変化、海岸線の後退、及び農業活動の変化に伴う飢餓などによる病気や死亡などが「影響」である。

表 1.1.2 放出、環境中濃度の変化、影響、損害及び外部性の違いの例 (IAEA 1999)

放出	濃度の変化	影響	損害	外部性
CO <sub>2</sub>	大気中のCO <sub>2</sub> 濃度の増加	推定値はいまだが、海岸生態系の変化、農作物生産性の変化、洪水や干ばつの増加に伴う飢餓などの影響がある。	影響の経済的価値	多くの国で、この影響は経済に内部化されていない。従って、全ての損害は今のところ外部性である。
SO <sub>2</sub>	例えば硫酸塩の生成と拡散	硫酸塩の呼吸吸入に伴う呼吸器障害による疾病と死亡リスクの増加	疾病と死亡の予想される増加に関する経済的価値：この価値は単なる医療費と仕事が出来なくなることに伴う収入の低下だけでなく生活の質の低下・損失を含む。	この損害を経済活動に内部化していない地域では、外部性は損害額に等しい。米国では、SO <sub>2</sub> 放出権の市場取引により或る程度は経済に内部化されている。
放射能 (原子力事故の場合)	数千キロメートルに及ぶ範囲の放射能濃度の上昇	特定の癌による疾病と死亡リスクの増加	癌の予想される発生数の増加に伴う経済的価値	米国では、プライス・アンダーソン法により一部が経済に内部化されている。
風力タービンの騒音	風力発電所付近の騒音レベルの増加	聴覚の好ましくない効果	個人が騒音を回避する為に対価を支払おうとする意志を、例えば風力発電所付近の不動産価格の下落などから推定出来る。	これらを経済に内部化する市場原理が無いので、全ての損害は外部性である。
ダム建設の結果減る滝の水量	ダム建設の結果減る滝の水量	滝の美観の低下	美観の減少の経済的価値を、例えば個人のWTPを条件評価額法で評価することが出来る。	これらを経済に内部化する市場原理が無いので、全ての損害は外部性である。

b) 外部性の推定

影響経路（損害関数）法の最後は、推定された損害額から外部性の部分を見分ける作業である。多くの環境リスク研究の動機は、環境・健康保護の観点から市場経済の不備を修正する政策判断を支援する為の情報を提供することにある。その為、外部性の分析は非常に重要である。幾つかの環境影響・損害は、政府の規制措置、特別な税制、民間保険、及び職業リスクの見返りとしての特別賃金等を通じて、既にエネルギー市場価格に内部化されている。

損害額の推定値の内、どの部分が外部性であるかを特定する為の単純な数式は無く、個々の影響経路をひとつひとつ評価する必要がある。この作業は、対象となる損害を取り引きする市場があるか、市場価格に損害額が反映されるような財政上もしくは規制上のシステムがあるかを調べることから始まる。表 1.1.3 は、損害の幾つかを市場経済に内部化し、商品価格に含める為の方法の例を示すものである。

表 1.13 損害を経済システムに内部化させる方法 (IAEA 1999)

影響と損害の内容	損害を経済システムに内部化させる方法	例
晩発性の障害を含む職業人の疾病・負傷	賃金と医療保険	石炭鉱山のリスクの増加分の一部は、雇用者が支払う高い賃金と医療保険により石炭の経済システムに内部化される。雇用者は、このコストを燃料購入者に対する価格の一部として上乗せする。
炭坑からの流出物による水棲動植物への損害	許容できる放出レベルを規制する規則の設定	多くの国は水質管理規制を実施するが、効率性の観点からはこれらの規制は過剰か不足かも知れない。また、外部性を規制する規制は無い。
大気汚染によるひとの健康への影響	放出規制、地域環境の最大許容濃度基準の設定	米国の National Ambient Air Quality Standard 及びそれに似た他の国の規則は、外部性を低減させたが、必ずしもやさしい解決法ではない。
CO <sub>2</sub> による地球温暖化の影響	税金	例えば、ノルウェイには炭素税がある。
石油流出による損害	賠償金もしくは罰金	米国では、Oil Pollution Act が責任のある組織に石油流出の損害額を支払うように定めている。少量の石油流出の場合には、どの会社が出させたものかが分からないこともあるので、損害は経済システムに内部化出来ない。
原子力発電所事故の影響	保険、要求事項	米国では、Price-Anderson Act が電力会社に対して、事故の損害を或る限度まで保障出来るだけの保険をかけることを義務付けている。
SO <sub>2</sub> 放出に伴う生態系とひとの健康への影響	市場取引可能な放出権	米国ではSO <sub>2</sub> 放出権の取引が出来る。また、カリフォルニア州南部ではNO <sub>x</sub> 放出権も取引可能である。しかし、放出権の取引は必ずしも全ての外部性を経済システムに内部化することが出来ない。なぜなら、それらの大きさは放出の場所と影響を受ける環境と周辺公衆に依存する一方、放出権の取引ではケースバイケースの手当てが出来ず、常に全てを保障することが出来ないからである。
全種類の損害	有害物質放出低減装置の自発的設置	多くの電力会社が、例えばガス洗浄装置や沈殿装置を設置する。プラントの運転者は放出低減装置を自発的には設置しないかもしれない。その理由は、それが電力の価格に跳ね返るからである。一方、将来の規制強化に事前に対応する為に、放出低減装置を先取りして設置するかもしれない。

このような操作によっても、なお価格に含まれない額が外部性である。たとえ全ての外部性が経済システムに内部化され、無くされたとしても、経済の効率の原理から、損害の幾らかは外部性として残る。この問題は炭坑の例に見られる。多くの国では、炭坑夫の賃金は技能や教育レベルを考慮すると他の職業に比べて高いが、この高目の賃金は炭坑夫の職業的な死亡や障害のリスクを償うものである。そこで、ある解析者は「炭坑夫の死亡や障害リスクに対応する外部性は、すでに労働者市場を通じて石炭や電力の価格に内部化されている」と議論する。しかし、他のグループは、「炭坑夫は職業を変えられないという意味で、またリスクに関する情報も充分与えられていない」という点で、不完全な労働市場に置かれている」と反論する。後者の意見をとりれば、損害のいくらかは、依然市場経済に内部化出来ずに、外部性として存在することになる。

もう一つの例として、騒音や美観に対する影響が、極めてサイトに依存した局地的なものである点が挙げられる。騒音の量は、風力タービンの数などのそれを発生するプロジェクトの種類や規模に依存するが、騒音の影響は周辺の人口や位置に依存する。若干のケースについては施設設置者

と周辺公衆の間の話し合いにより設置許可の過程で騒音問題が保障され、こうした外部性が経済に内部化されることもある。しかし、実際問題として全ての損害を経済システムに内部化することは不可能で損害の内のある部分は外部性として残る。

### (3) マルチ・クライテリア・アナリシス

マルチ・クライテリア・アナリシス（以下「MCA」）は、環境と健康への影響の包括的な比較評価、および等価交換（Trade off）の検討を行なう手法である。これはエネルギー政策オプションを検討する為に開発されたもので、通常あるような等間隔の尺度でない様々な判断基準を用い、異なる単位を持つ各種影響計算値を比較する手法である。MCA には二つのカテゴリーがある。第一は、健康・環境影響評価の一部として解析者が行うもの、第二は、マルチ・クライテリア政策判断の過程の一部として、政策決定または政策立案の為に用いられるものである。

MCA を用いることにより、全ての影響について貨幣価値換算が行われていないような場合でも、発電システムの計画の場で性格の異なる環境影響を比較することが出来る。また、MCA は環境影響評価結果を他の種類の影響、例えば社会経済的な影響と比較することにも用いられる。

MCA の主な目的は次の通り：

- ・ 影響を直接定量化することが難しい場合にそれに準じる何らかの定量的な情報を用意する。
- ・ 別々の影響評価値の間に存在し得る費用対効果を示す。
- ・ 影響評価値の比較と等価交換（Trade off）の検討を行う。
- ・ 様々な影響に解析者が付けた価値を理解する。

MCA の作業手順は次の通り：

#### 問題の構造化

- a) 評価すべきオプションを定義する。
- b) 比較評価の為に判定基準（もしくは影響の表示基準）を定義する。
- c) 判定基準または評価基準に基づいて影響の大小を評価する。

#### スクリーニングと改善の為に等価交換（Trade off）の検討

- d) 最低線の基準に合うオプションまたは、受容できないようなオプションを除外する。
- e) 環境改善やその他の合意・解決にかかる費用を理解する為に費用対効果曲線を作る。
- f) 他の代替案と比較して劣勢なオプションを除外する。

#### 価値判断の適用

- g) 影響推定値をひとつの価値尺度で翻訳する（幾つもの単位で表現された影響推定値をひとつの価値の関数で表現する）。
- h) 重み付けの方法を選ぶ。幾つもの重み付けの手法があるが、それぞれ適用のしやすさ、検討中の課題に適用出来るかどうか、及び検討に参加する研究者の好みに応じてどれを用いるかを選ぶ。MCA 解析者は、各オプションの相対的な重要性に従い、重みを付けて行く。
  - i) 重みにより修正された影響評価値を用い、暫定的なオプションのランキングをつける。
  - j) 上のランキングを別の解析者にも作ってもらい、これらを比較し修正した上でその結果を政策決定者に示す。

MCA の詳細については、IAEA 1999 及び HOBBS et al. 1994 を参照されたい。

### 1.1.5. 石油、石炭、水力、原子力及びその他のエネルギーの比較

本項では、2000年3月に開催されたIAEAの専門家会議がまとめた内容を示す。

#### (1) 化石燃料発電システム

化石燃料発電システムの環境および健康への影響の外部性のほとんどは発電所から放出される大気汚染物質に起因する。主な影響経路は地球温暖化と一般公衆の健康である。一方、発電所以外の施設からの影響は比較的小さく、おおよそ温室ガスによる外部性の10%程度である。化石燃料発電システムの廃棄物からの経済的な損害額は、今のところ定量化されていない。CO<sub>2</sub>を除けば、損害額は主に健康影響に関するもので、特に死亡に伴うものである。健康影響は、有害物質が放出される地域の人口を対象に計算される為、他の地域での先行例を利用する場合には評価された損害額を人口密度・分布に合わせて修正する必要がある。

表 1.1.4 に、放出される有害物質の単位 Kg 当たりの原価と、新型の発電所で発電された電気の単位発電量 (kWh) 当たりの損害額 (地球温暖化、健康影響などの損害額) を示す。これらは特定の施設に対応するものではなく、大雑把に EU の水準を満たすものである。粉碎された石炭 (Pulverized coal) と蒸気タービンの組み合わせが石炭発電システムの例として想定されている。仮により高価なガス化とガス・コンバインド・サイクルを用いると、粒子状物質による健康影響は下がるが地球温暖化の影響は増す。硫黄の放出については、工業技術のみならず燃料中の硫黄の含有量にも依存して変化する。石炭の不純物の含有量には大きな開きがある。そこで、硫黄の放出は石炭の燃焼前の処理により大幅に低減できる。「現在の代表的な工業技術」の定義の難しさは、GE が提案しているガス・コンバインド・サイクルによると、NO<sub>x</sub> 放出量が 0.08 g/kWh から 0.24 g/kWh まで変化することがそのことを良く示している。

有毒金属の放出は極めて不確かさが大きく、石炭により大きく変る。その為、表 1.1.4 に示される数値が典型的なものとは言えない。しかし、化石燃料発電所からの有毒金属の放出は少量で、環境と健康への損害額の全体に占める割合は小さい。

表 1.1.4 典型的なヨーロッパのサイトに設置された新型の発電所を想定した化石燃料チェーンに起因する大気汚染に伴う損害額推定値 (IAEA 2000)

汚染物質	原価 Euro/kg	石炭 pulverized coal boiler + steam turbine, ESP, FGD, low NOx		石油 gas turbine combined cycle, oil with 1% S, ESP, FGD, low NOx		ガス gas turbine combined cycle, low NOx burner	
		放出 g/kWh	損害額 mEuro/ kWh	放出 g/kWh	損害額 mEuro/ kWh	放出 g/kWh	損害額 mEuro/ kWh
CO <sub>2</sub>		30+850 <sup>a</sup>		10+610 <sup>a</sup>		10+390 <sup>a</sup>	
CH <sub>4</sub>		3		0.04		1.5	
温室ガス合計、 CO <sub>2</sub> 等価 <sup>b</sup>	0.029	940	27.3	621	18.0	430	12.5
粒子状物質	15.4	0.2	3.1	0.02	0.3	ng	0.0
SO <sub>2</sub> <sup>c</sup>	10.2	1.0	10.2	1.0	10.2	ng	0.0
NOx (NO <sub>2</sub> 等価) <sup>d</sup>	16.0	2.0	32.1	1.0	16.0	0.7	11.2
有毒金属 砒素	171	≈2x10 <sup>-5</sup>	≈3.4x10 <sup>-3</sup>		ng		ng
有毒金属 カドミウム	20.9	≈1x10 <sup>-6</sup>	≈2.1x10 <sup>-5</sup>		ng		ng
固体、液体廃棄物	?	?	?	?	?	?	?
土地利用 (特に 採掘に伴う土地 利用制限)	極めて サイト 固有		?		?		?
定量化されたコストの合計			72.7		44.5		23.7

a 2つの数字の内、小さなものは発電所以前の燃料採掘所、精練所などの施設からの寄与。大きなものは発電所からの寄与。

b GWPを20と仮定した。

c 燃料中のS(硫黄)の含有量次第では、FGD無しで10倍高い値になる可能性がある。

d 触媒により3分の1に低減可能。但し従来型の燃焼炉ではNOxは表の値の1.5倍から2倍の値になり得る。

FGD flue gas desulphurization

ESP electrostatic precipitator

ng. 無視し得る値

## (2) 原子燃料サイクル

以下に、2000年現在、フランスで使用されている原子力発電技術(再処理を含む原子燃料サイクル)の評価結果を示す。原子燃料サイクルからの影響は地域規模から地球規模までの巾があり、それらの多くは遠い将来の世代へも影響を与える。遠い将来への影響については、実際の影響の大きさと将来の世代の社会がそれを割り引いて受止めるかどうかについての難しい議論がある。表 1.1.5 では、これらを一緒にせずに空間と時間の枠組み(それぞれ短期、中期、長期、並びに地区、地域・地方、地球規模の区分)に分けて評価結果を示した。なお、割引率については、ゼロを仮定(将来に渡ってリスクは割り引かれないと仮定)した例を示す。

表 1.1.5 原子燃料サイクルからの影響 (DREICER et al. 1995)  
(時間、影響地域の 카테고리別集計、割引率 0%)

## i) 職業人、一般公衆、環境別

	死者数/TWh	mEuro/kWh
職業人、放射線被ばくによらない影響	0.019	0.07
職業人、放射線被ばくによる影響	0.02	0.07
一般公衆、合計	0.65	2.38
環境	-	無視し得る大きさ
	合計	2.52

## ii) 時間と地域の大きさ別

時間	距離	mEuro/kWh
短期間 (1年以内)	局地的規模	0.068
	地域的規模	0
	地球規模	0
中期間 (1年から100年)	局地的規模	0.084
	地域的規模	0.06
	地球規模	0.19
長期間 (100年から10万年)	局地的規模	0.026
	地域的規模	0.002
	地球規模	2.1
	合計	2.52

表 1.1.5 は、原子燃料サイクルからの影響推定値について廃棄物や事故の影響まで全てを合計した値である。(なお、廃棄物や事故の影響までを足し合せて表現して良いかどうかは、これらの推定値そのものが議論の対象となる為、判断の難しい問題である。) なお、環境への影響の推定値は無視し得る値である。

表 1.1.5 では、職業人 (Workers) の死亡率について、放射線からの影響である職業人の発癌率と、放射線に関係の無い作業中の事故 (例えば、原子炉の建設中に足場から作業者が転落する事故) による職業人の死亡率がほとんど同じである点が興味深い。原子力を将来のベース・ロード電力の供給源として評価した場合、もし原子燃料サイクルの採掘から廃棄物処分までの全ての施設における産業活動の為の電力供給も原子力でまかなうと仮定した場合も、原子燃料サイクルからの放射性物質以外の有害物質の放出量の推定値はほとんど無視出来る程度である。廃棄物貯蔵の影響は、全体の約 1%に過ぎない。

工業技術の違いにより評価結果には細かい違いが出来る (ExternE 1999)。しかし、大まかに言えば現在の工業技術を用いた原子燃料サイクルの通常運転時の影響は小さく、電気料金の数パーセントに過ぎない。もちろんこのような結果を導く前提として、安全規制がきちんと満たされていることが保障される、安定で充実した政治システムがなければならぬ。一方、外部性の評価値が小さいことが、事故、長寿命放射性廃棄物、将来の世代に影響を課すことの権利、及びテロリストやならず者国家からのリスクに対する憂慮を鎮めることにはつながらぬ。理由は、これらの事柄は、評価とは別の「受け入れられるかどうかの問題」であるからである。

(3) 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーには、水力、風力、バイオマス及び種々の太陽熱利用システムなどの多様な工業技術がある。この他、生活廃棄物を利用したシステムもあるが、その多くは熱供給プラントもしくは熱供給も含めた多目的な施設である為、この検討からは除外した。しかし、最近の工業技術では、このような施設からの環境影響も低く抑えられている。水力、風力、及び太陽熱発電は、資源が尽きないというだけでなく、環境や健康への影響が一般にごくわずかである点で特別である。もちろん、これらが環境や健康に対して本当に良性であるかどうかを判断する為には、より詳細な調査が必要である。表 1.1.6 の示す ExternE の評価結果 (ExternE 1999) は、通常の場合は再生可能エネルギーが環境と健康に対して良性である点を示しているが、常にそうであるとも限らない。

バイオマスについては、蒸気タービンと燃焼の組み合わせ、またはガス化とガス・タービンの組み合わせが、現在考えられる工業技術である。発電所や燃料の製造、輸送に用いられる機械から放出される有害物質による重大な健康影響がある。バイオマスの栽培過程そのものからの温室ガス排出はゼロである。しかし、栽培活動に必要な機械や自動車からは温室ガスが排出される。

水力発電、太陽電池及び風力発電についてはそれらの発電所からの有害物質放出はもちろん無い。しかし、発電所資材を製造する過程で有害物質が放出される。これらの発電システムから受ける騒音などの生活の快適さに関わる影響については極めて場所に固有な問題であるが、特に発電施設周辺の住民には問題になる。水力発電システムからの影響は、地形や人口分布などに応じて大きく変化する為、表 1.1.6 に示した数字でさえ一般的な指針にならない。水力発電の影響は、灌漑、洪水対策、リクリエーション施設などによる付加的な利益がある一方、ダム建設により上流の住民が賠償無しに移住させられ、またダムが崩壊して洪水になる場合には極めて有害なものとなる。ダムの質は多様で、新しい設計のダムの崩壊リスクが古いダムのそれよりも数倍も低い場合もある。もちろん、検討対象のダムの特徴が評価に考慮されなければならない点は言うまでもない。

表 1.1.6 再生可能エネルギーによる外部性 (mEuro/kWh)

	発電施設			発電施設以外の施設、活動			計
	快適さ、騒音	生態系への影響	健康	健康	地球温暖化	その他	mEuro/kWh
水力	0-2 SD	0-4 SD	事故 SD	0.01-1	0.4 <sup>a</sup>	SD	0.4-7.4 SD
風力	0-1 SD	ng		0.3-0.9	0.2		0.5-2.1 SD
太陽電池	ng	ng		0.3-0.9	1		1.3-1.9 SD
バイオマス			1-10	0.1-3	0.3	利益 <sup>b</sup>	1.4-13.3

ng 無視し得る大きさ。

SD 極めて敷地固有の値。

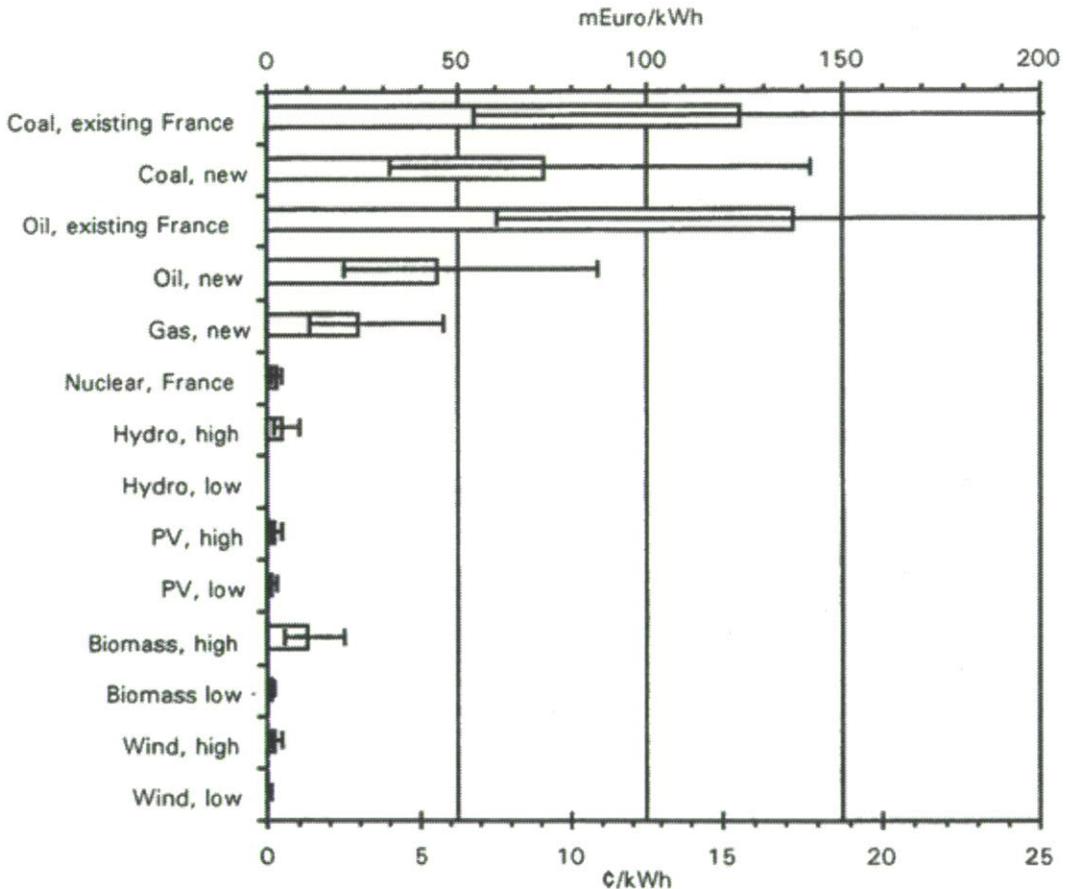
a 温室ガスの放出は地域の状況に依存する。例えば、貯蔵庫に入れる前に植物をせん断するかどうか、貯蔵庫は深いかどうか、新しいか古いか、土壌の性質などの影響を受ける。寒い環境では 15g (CO<sub>2</sub>等価) /kWh が典型的な放出量であるという研究成果がある。

b もしバイオマス農場がトウモロコシなどのより多くの農薬や化学肥料を必要とする穀物を置き換えるようなことがあれば利益である。

註：水力発電の外部性は極めて設置地点の属性に依存する。生活の快適さに関する外部性も同様である。発電以外の施設、活動は主に施設の建設、及び資材・物資の製造と輸送に関連した放出を含む。

## (4) 比較評価

各種燃料発電システムの外部性の包括的な比較を図 1.1.3 に示す。色々な不確かさにより 4 倍程度の評価結果の開きが認められるが、それにしても化石燃料発電システムの外部性が大きい点是否定できない。ExternE プロジェクト (ExternE 1999) によれば、新しい工業技術をもってしても、石炭火力発電システムによる損害コストは電気の市場価格と並ぶ大きさを持っている。天然ガスは石炭と比較するとより清浄なエネルギーであると言え、推定損害額は約 2 倍から 4 倍、石炭のものより低い。石油は石炭と天然ガスの中間にある。また、排出制限が無いかわずかしか低減対策が施されていない古いプラントからの推定損害額は更に大きい。これと対比的に、原子力とほとんどの再生可能エネルギーの推定損害額は電気料金と比較して小さい。再生可能エネルギーの中では、バイオマスの燃焼が比較的高い推定損害額を示している。これは発電所並びにバイオマス製造と輸送の為の機械からの有害ガスの放出に伴うものである。



註：原子力に関する評価値は割引率 0%を仮定したもの。ヨーロッパにおける典型的な電気料金は 40 から 80mEURO/kWh である。

図 1.1.3 外部性の比較 (mEURO/kWh) (ExternE 1999)

## 1.1.6. 重要な影響経路

以下に、IAEAの専門家会議（IAEA, 2000）が抽出した重要な影響経路を示す。各種燃料による発電システムにはそれぞれ様々な影響経路が存在する。例えば、石炭火力発電システムについては、影響経路は炭坑の粉塵に起因する肺塵症から、石炭輸送トラックによる舗装道路の破損、SO<sub>2</sub>などの大気汚染物質に起因する小児の咳、更には地球温暖化にまで及ぶ。また、同じ影響経路においても、工業技術の違い、地形や人口分布などの違いにより影響の大小がある。

表 1.1.7 各燃料チェーンにおける重要な影響経路（IAEA 2000）（!!!が最大）

燃料チェーン	発生源	影響	重要度
石炭	CO <sub>2</sub>	地球温暖化	!!!
	SO <sub>2</sub> 及びNO <sub>x</sub> 放出に伴い生成する硫酸塩及び硝酸塩	死亡率と疾病発生率の増加	!!!
	一次粒子の放出に伴う粒子状物質	死亡率と疾病発生率の増加	!!
	放出されたNO <sub>x</sub> から生成されるオゾン	疾病発生率の増加と死亡率の増加の可能性	!!
	石炭採掘	石炭粉塵による疾病	!!
	石炭採掘	炭坑事故における死傷	!!
	鉄道とトラックによる石炭輸送	事故にともなう死傷	!!
	トラックによる石炭輸送	トラックによる大気汚染 道路舗装の破損	! !
石油	CO <sub>2</sub>	地球温暖化	!!!
	SO <sub>2</sub> 及びNO <sub>x</sub> 放出に伴い生成する硫酸塩及び硝酸塩	死亡率と疾病発生率の増加	!!!
	一次粒子の放出に伴う粒子状物質	死亡率と疾病発生率の増加	!!
	放出されたNO <sub>x</sub> から生成されるオゾン	疾病発生率の増加と死亡率の増加の可能性	!!
	石油輸入	エネルギー供給確保に伴う費用	!!
	石油漏出事故	水棲生物の損害	!
ガス	CO <sub>2</sub>	地球温暖化	!!!
	NO <sub>x</sub> 放出から生成する硝酸塩	死亡率と疾病発生率の増加	!!!
	放出されたNO <sub>x</sub> から生成されるオゾン	疾病発生率の増加と死亡率の増加の可能性	!!
	設備またはパイプラインからの漏洩	事故に伴う損害	!-!!
		地球温暖化	!
原子力	大事故の起こる可能性	死傷及び財産の損害のリスク	!***
	使用済燃料再処理	長期間（数千年間）の死亡率と疾病発生率の増加	!!
	廃棄物処分	長期間（数千年間）の死亡率と疾病発生率の増加	!
バイオマス	NO <sub>x</sub> 放出から生成する硝酸塩	死亡率と疾病発生率の増加	!!
	一次粒子の放出に伴う粒子状物質	死亡率と疾病発生率の増加	!!
	放出されたNO <sub>x</sub> から生成されるオゾン	疾病発生率の増加と死亡率の増加の可能性	!!
	植物の輸送	道路の破損と事故 大気汚染	!! !!
水力	土地利用	地域の環境の変化	!-!!!
風力	風力タービンの操業	騒音	!
太陽電池	機材製造過程からの放出	死亡率と疾病発生率の増加、地球温暖化	!

注：\*\*もし一般公衆が大きなリスクに対して強い嫌悪感を持つ場合は!!!になる。

多様な影響経路の中には特に重要なものがある。これら重要な影響経路を表 1.1.7 に示し、以下にその概略を紹介する。影響の中には、動植物への影響など定量化が極めて難しいものもある。これらについてはごく限られた地域・地区における詳細調査を行なうことが最善策である。

### 化石燃料発電システム

ほとんどの場合、化石燃料発電システムからの一番重要な影響経路は、地球温暖化と粒子状物質による健康影響である。

CO<sub>2</sub>及びその他の温室ガスの放出に伴い、大気中のそれらの濃度が増加する。これらの天候や気候への影響の推定には、幾つかの段階を経た計算作業が必要で不確かさが多い。まず放出量の増加に伴い大気中の濃度が増加する。次に大気中の温室ガス濃度の増加に伴い気温が上昇し、最後に気温上昇に伴う影響が現われる。大気中のガス濃度の増加と気温の上昇は直線比例関係になく、濃度の平方根のような変化をすると考えられている。しかし、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) などの調査結果によると、21 世紀中にはCO<sub>2</sub>濃度が現在の 2 倍になると予想されている。これは世界中の気温を 1 度ないし 2 度上昇させる。この気温上昇に伴う植物、農業への影響、繁殖した細菌の感染などによるひとの健康への影響、及び海面の上昇に伴う損害は世界中にわたり一様でなく、地域毎に大きな巾があると推定される。これらの影響にひとが適応する能力とも関連し、損害の大小は異なるはずであるが、一般にこれらの影響は大きいと考えられている。また、洪水、干ばつ、ハリケーンなどの増加は、更に地球温暖化から受ける損害を大きくするであろう。地球規模の気温変化に対するCO<sub>2</sub>及びその他の温室ガスの影響の推定は大きな不確かさを伴う。また、気温上昇に伴う経済活動への影響は更に分っていない。

化石燃料の燃焼に伴う健康影響に関する過去半世紀にわたる疫学研究の発端は、1947 年に米国ペンシルベニア州Donoraで、また 1952 年にロンドンでそれぞれ発生した大気汚染事故である。これらの事故の調査、並びにその後の類似事故の調査の結果、健康に対する急性障害が確認された。死亡率は、大気中の有害物質の濃度増加の最中または直後に上昇することが分っている。しかし、最も壊滅的な健康への損害は、恐らく長期間の有害物質の吸入に伴う呼吸器障害に伴う死亡と疾患であろう。本来これらの影響は地域の有害物質濃度と死亡率の相関から確認されるべきものであるが、この種の調査には幾つかの推定に伴う不確かさを導く要素がある。例えば、地域により喫煙の率が異なり、これが正確な相関関係を見出すことを妨げる。しかし、1993 年の米国の 6 都市における調査結果 (DOCKERY et al. 1993) 及び 1995 年の米国癌学会の調査 (POPE et al. 1995) の二つは中でも比較的説得力がある。これらは個人の喫煙の習慣などの特徴を考慮し、個人毎に調査を行っている。しかし、これら個人の追跡調査の結果も一般的な屋外の有害物質濃度の代表的な値と比較されている点で限界がある。最もよく相関が現われているものは、2.5 μm 未満の微細粒子と死亡率の関係である。これは考慮すべき科学的知見と言える。微細粒子は容易に呼吸器官に吸収される。モルモットによる動物実験によると、SO<sub>2</sub>よりも硫黄の粒子の方が肺に対する刺激性があり、また微細粒子は粗い粒子よりも刺激が強い。

粒子状物質が化石燃料発電システムから放出される際、この放出を抑制する設備はあるにはあるが、選択的に比較的重くて粗い粒子を除去するだけである。従って、微細粒子の放出低減はあまりされていない。更に重要な事実は、大量の微細粒子が発電所から放出されていることである。これは化学反応によりSO<sub>2</sub>とNO<sub>x</sub>が硫酸塩と硝酸塩のエアロゾルに変化したものである。これらの微細粒子は浮揚性があり、風に乗って移動し、重力や雨により地面に沈着するまでに数千キロメートル風下に運ばれる。

粒子状物質の属性のどれがひとの健康に影響を与えるかについては未だに良く分かっていない。影響を及ぼすものは粒子そのもの、粒子状物質の酸性、或いはその化学的な特性かも知れない。例えば硫酸塩が問題を起すという点に疑問を持つ科学者はほとんどいない。一方、硝酸塩の健康影響に関する疫学的な根拠は乏しい。その理由はSO<sub>2</sub>が発電所の排気筒から取り出してモニター出来るのに対し、NO<sub>x</sub>のモニターがそれほど容易でなく、硝酸塩のモニタリング・ネットワークが確立していない為である。しかし、1999年に発表されたExternEプロジェクト (ExternE 1999) では、硫酸塩と硝酸塩のエアロゾルを含む全ての粒子状物質が健康に対して危険であると仮定している。米国では、極めて低い環境中濃度でも急性障害と晩発性障害の両方が発見されている為、低レベルの有害物質被ばくに対しても閾値の無い直線比例の被ばく-効果関係を用いることが薦められる。このようなモデルは証明されていず、また一様にどのようなケースにも受け入れられるものではないが、低いレベルにおける直線比例関係は、最近の全ての解析評価の前提条件に仮定されている。

化石燃料発電システムのリスクに大きく寄与するものは、死亡を導く微細粒子（一次有害物質と二次有害物質<sup>1</sup>）である。これについてExternEプロジェクト (ExternE 1999) は、年齢別の死亡率を調査した1995年の米国癌学会の調査結果 (POPE et al. 1995) を用いている。この調査では、理由を問わず、絶対的な死亡率の上昇が高年齢層に見られる。そこで、このような相対的な死亡率の上昇を考慮して、ExternEプロジェクトの1999年の成果報告では、YOLL (Years of Life Lost) を計算している。この概念が使用出来る根拠が、余生の少ない高年齢層については残りの寿命に期待する年数が少ないことである。なお死亡率程ではないが、大気汚染に起因する疾病も化石燃料発電システムのリスクである。

放出されたNO<sub>x</sub>から形成されるオゾンからの影響も検討の対象である。高レベルのオゾンは呼吸器系の疾患を招き死亡率も増加させる。オゾンの被ばく-効果関係は、粒子状物質のそれと比べて更に分かっていず、閾値がある可能性もある。高いレベルのオゾンは、穀物の収穫にも影響を及ぼす。オゾン濃度を上昇させるNO<sub>x</sub>の働きは複雑で、例えばある地域ではオゾンの減少も起こり得る。しかし、ほとんどの場合NO<sub>x</sub>濃度が増加するとオゾン濃度も増加する。特にNO<sub>x</sub>に対する非メタン有機化合物の比率が高い地域程、その傾向が強い。ExternEプロジェクト (ExternE 1999) ではEMEPモデルを基にオゾンの影響を推定している。その方法についてはRABL et al. 1998に示されている。SO<sub>2</sub>による急性障害についても調査されており、これにより縮まる寿命はわずか9ヶ月と推定されている。

以上の有害物質に加え、これらよりも小さな影響が米国EPAが"criteria pollution"と呼ぶAs<sup>10</sup>, Cd, Cr, Ni及びダイオキシンからもあるとされている。これらの影響はEPAの線量-効果関係により求められる (HEAST 1995)。

幾つかの国または地域では、汚染された液体の放出が大気汚染と同様、重大な問題である可能性があるがこれらの定量化は更に難しい。鉛、水銀、砒素などの重金属の放出には、多くのばらつきがありそうである。これらの金属は、もしその濃度が高い場合は、非常に危険である。砒素を継続的に被ばく・摂取した場合の長期的な影響については、最近世界中で研究成果が発表されている。

もうひとつの顕著な影響は、燃料採掘や輸送などの発電の前段階からのものである。検討対象となる地域や地方の燃料採掘状況に応じ事故が頻繁に起こり、石炭の粉塵に起因する肺塵症のリスクも高くなる可能性がある。地球温暖化は石炭火力発電システムだけでなく石油及び天然ガスによる発電システムでも重要事項である。しかし単位発電量当たりの影響は石炭のそれに比べて小さい。

<sup>1</sup> 一次有害物質は燃料チェーンから直接放出された粒子状物質などの有害物質。二次有害物質は大気中に放出された一次有害物質が空気中で化学反応を起こし、エアロゾル状に変化したもの。

理由は、天然ガスの場合、生成されるエネルギーの半分は水素成分の燃焼によるものでCO<sub>2</sub>の生成量は半分になるからである。また、最新型のガス・コンバインド・サイクル・ガス・タービンのエネルギー効率は、石炭の燃焼と粒子抑制装置の組み合わせよりもはるかに高く、天然ガス火力発電所からのkWh当たりの放出を更に低減する。同様に、これらの発電所の放出低減対策の効率次第では放出される一次有害物質と二次有害物質からの健康リスクは重大なものになり得る。またこれらの発電システムにも輸送モードがあり、石油漏出事故、天然ガスパイプラインからの漏洩、また爆発の可能性さえある。

石油輸入国ではエネルギーの供給源確保は重要な問題である。環境と健康への影響のみならず、このようなエネルギー源確保の為のコストも大きいはずである。これらのコストは競争原理に基づかないカルテルなどにより形成された石油の価格、並びにオイル価格ショックに輸入国の経済が適応できないことに関連して発生するものである。

### 原子力

原子燃料サイクルでは原子炉事故及び廃棄物貯蔵が最大の関心事である。大事故の影響は、それが万が一発生した場合には大きい、最近のリスク評価手法を用いて計算された平均的な損害推定値は非常に小さい。理由は単に大規模な放出を伴う事故の発生確率が低い為である。原子炉事故の発生確率は、チェルノブイリ事故以外に歴史的な事故はなく充分小さい。このような確率はPSA（確率論的安全評価）を用いて詳細に計算するしか求める方法がない。しかし、一般公衆の感覚的な理解はしばしば専門家の判断と食い違ふことがある。このことはリスク（一回の事故当たりの損害及びその発生確率）には二つの部分があることを意味する。一般公衆の多くが大きな事故のリスクに忌避感を示すことからチェルノブイリ事故は重大である。この事故では全ての放射性ガスと3分の1の揮発性固体（セシウム）が蒸発し世界中に拡散した。また4分の1の固体は原子炉の外へ放出されている。当事国以外の世界にとっては、このような事故はこれ以上考えられないほど最悪のものである。初期の幾つかの誤った研究レポートでは30万人が致死性の癌にかかるかと推定されたが、最近の調査では直線比例の線量-効果関係を仮定して2万5千人が癌にかかるかと計算されている。閾値を想定したり、因果関係のはっきりしている癌のみに限定したりすればその数は1000人未満となる。一方、イベント・ツリー解析を基にしたPSAは概念的には単純なものであるが、同時にこれは一般公衆には広く受け入れられていない。

再処理施設の幾つかからは低レベルのC-14が放出される。これは天然のC-14に比べてわずかの量でしかなく、場合によってはバックグラウンドの変動巾の範囲内である。しかし、直線比例の線量-効果関係を仮定し、地球全体の人口について被ばく線量を合計し、更に数世紀に渡りこれを積算して行くと、この放出は長期間の健康リスクを無視できない程度にまで増加させる。一方、長期間の積算をICRPが勧告する様に数百年に限るか、割引率を3%~5%に設定すると、これらのリスクははるかに小さくなる。

原子力発電所や使用済燃料再処理施設などの原子力施設の運転事業者は、核分裂性物質の盗難とそれらの兵器への転用などを防ぐ予防策をとらなければならない。このような予防策は資本費と運転費を増加するが、既に種々の防護対策や保障措置によって経済に内部化されているので、IAEAの検討では考慮していない。

YOLLの概念である寿命の短縮の予想に関連し、IAEAで2000年3月に開催された本プロジェクトの最終専門家会議では、ロシア（クルチャトフ研究所）から興味深い報告がされている。この報告では、ロシアでの1日の寿命短縮を50 EUROと仮定し、10<sup>4</sup>のリスクに対しては20から40 EUROの損害であるとし、また放射線被ばくのコストを20から40 EURO/人・Svであるとしている。

### バイオマス

バイオマス燃料発電システム（燃焼またはガス化）の最大の外部性は、NO<sub>x</sub> と粒子状物質の放出、並びに輸送作業による影響である。これらは化石燃料サイクルからのこれらの物質による影響と同様に、死亡率と疾病の発生率を増加させる。輸送に際しては、トラックによる道路舗装の破損と事故の影響が有り得る。

樹木や貯蔵植物の燃焼による定常状態における正味のCO<sub>2</sub>の放出量はもちろんゼロである。しかし、木々の伐採に用いられる軽油を用いた機器の使用などにもなうCO<sub>2</sub>の増加がある。その他、バイオマスの利点は古い樹木を伐採することによる腐食（メタンなどのガス発生源）の低減などであろう。動植物数の減少を含む生態系への影響は極めて各々の地域固有であり、環境を改善する効果がある場合もあれば、環境を破壊する場合も有り得る。

### 水力、風力及び太陽電池

再生可能エネルギーからの影響は、いずれもその種類と大きさの点で各サイト固有のものである。既存のダムの改造や水流を分けるような小さな構造物建設からの影響と比べ、新しいダムの建設のような大規模プロジェクトの影響は極めて大きい。建設中の事故やダムの崩壊、またそれに伴う洪水は地域レベルでは重大なものであるが、プラント寿命全体を通じては一般的には小さい。

風力発電は騒音や景観の妨害を生む可能性があり、特に人口密集地や観光地では邪魔な存在になり得る。

太陽電池プロジェクトは広い土地を必要とし、多くの物資・機材を用いる。これら物資・機材の製造に際しては大気やその他環境への放出が伴われる。大規模太陽電池プロジェクトは土地利用の点では壊滅的な影響と言えるかも知れない。

### まとめ

以上の種々の影響については巾がある。この巾に影響を与える要因には以下のものがある：

- ・ 放出量
- ・ 解析の対象とする地域・面積の境界、及び人口の地理的分布
- ・ 線量-効果関係、特に二次粒子と晩発性疾患に関するモデル
- ・ 地球温暖化の影響推定
- ・ 大事故の発生確率
- ・ 価値のある生態系の存在の有無
- ・ 以上の要素ほど重要ではないが、次のような幾つかの影響要素も関係する。
  - 発生源のパラメータ（例えば、排気筒高さ、直径、排出速度）
  - 有害物質のバックグラウンド・レベル及び大気中の化学変化
  - 気象
  - 地域の地勢
  - 環境中濃度を推定する為の拡散・輸送モデル
  - 線量-効果関係に閾値を考慮するかどうか
  - 貨幣価値換算

### 1.1.7. 外部性研究の課題

#### (1) 世代を超える影響

ここでは、IAEA での検討の成果 (RABL et al. 1999) を紹介する。

全ての発電システムについて、その環境と健康への影響の中には今日起きるものの他に次の世代で起きるはずのものがある。しかし未来の世代に及ぼす影響を評価することは難しい。理由は影響の発現までの長い時間に幾つもの要素が絡むことと、これらが常に意識に上るものではないことにある。しかし、わずかの情報しか得られない将来の影響も見逃さず分析評価する必要がある。何故なら、未来の世代は今現在の政策決定に加わることが出来ないからであり、これらの世代に及ぼす影響のことを考えずに現在の政策決定を行うべきではないからである。未来の世代に及ぼす影響として現時点で評価しておかなければならないものは、長寿命の放射性物質からの影響、地球温暖化、大事故の影響、廃棄物処分、土地利用、及び資源の枯渇の問題である。

将来起きる影響を考える際に必要なことは、幾つかの時間枠を設定することである。実際のところ、政策決定を行う今の世代とその決定の影響を受ける未来の世代を区別する明確な区分はないが、一応 50 年間程度が目安と考えられる。この種の影響として重要なもののひとつの地球温暖化は数世紀の期間に及ぶ。長寿命放射性物質の中には、数千年から数百万年の時間を経て影響を及ぼすものもある。影響評価の対象が遠い将来になればなるほどその推定に伴う不確かさは一般に大きくなる。そこで評価結果は異なる時間枠毎に別々に示す必要がある。ごく自然な感覚で近い将来と遠い将来を分ける境目は、地球温暖化の起きる時間間隔であろう。無論、これも正確に定義出来るものではないが、100年から200年の単位で区切るのが適当である。

#### (2) 低線量による健康影響

ここでは、IAEA ガイドライン (IAEA 1999) の内容の一部を紹介する。

影響評価の基本は線量-効果曲線である。評価作業では有害物質の濃度に応じた人への健康と生態系の変化を記述する線量-効果関係を特定するため、疫学と生態学に関する文献を調査が必要である。線量-効果関係は、一般公衆の死亡率や疾病発生率の増加、環境中における魚の数の減少、樹木・森林の損害、景勝地の視界の悪化などに関する定量的推定値で示される。有害物質の種類、環境における有害物質の受け手、及び受け手に到達するまでの経路に応じて影響の種類も異なる。なお、生態系の変化についての線量-効果関係は必ずしも良く分っていない。線量-効果関係の殆どは、有害物質の濃度の微少な増加に対し、直線比例もしくはそれに近い形で反応するものである。この線形性が計算を簡潔にしている。幸い、従来の欧米での研究で多くの線量-効果関係に関する科学的な文献調査が済んでいるので、手始めとしてはこれらの前例を引用し既に検討の終っている線量-効果関係を使用すれば良い。そこで、線量-効果関係の検討自体の手間は解析作業から省くことが出来る。もちろん新たな研究が行われ、線量-効果関係も新たなものが発見され、改善されるはずである。その為、解析者は常に最新の文献を引用する必要がある。しかし、発見したての線量-効果関係に飛びつくのは危険で、使用する前にまだ分かっていない不確かな要素や、食い違いのある点を充分検討する必要がある。一般に、学会や専門家の集団は、新たに発表された線量-効果関係に対しては懐疑的である。このような雰囲気は次のような疫学上の限界に起因している。

- 生物学的、医学的な知識は、観察される疫学的な因果関係を常に裏付けない。例えば、 $\text{SO}_2$  や微粒子の影響については多くの研究により疫学上の関連があるとされるが、いずれも決定的な生物学的メカニズムが解明されていない。 $\text{NO}_x$  については、更に議論百出の状況にある。

- ・ 疫学研究は変動し得る状況において行われるものである為、その研究成果を普遍的なものとしてとらえることが出来ない。外挿法は全てのコントロールされた変数が把握されている場合にのみ有効である。
- ・ 統計値（入院した人数、薬の消費量、医療行為の回数等）を基にして測られた健康影響は、健康管理システムの地域的な組織の違いに大きく依存する。

線量－効果関係に関連し、もうひとつの健康・環境影響評価のポイントは閾値である。閾値（もしくはS型線量－効果関係）は、生物が有害物質から受ける損害を予防ないし一定のレベルに食い止める修復機能を有する時に起きる。高い線量では損害は一定になる可能性がある。低い線量では肥料の効果（害でなく、有益な影響を与える効果）さえある。このような線量効果関係はNO<sub>x</sub>及びSO<sub>2</sub>の穀物に対する影響の線量－効果関係に観察されている。これらの物質の低線量被ばくは収獲を増やす効果もある。

検討の対象となる影響に閾値があるかどうかは大問題である。例えば、検討対象になっている影響に直線線量－効果関係を仮定すると、単純な計算では有害物質が有害性の減衰や吸収が起こらない状況で地面と大気逆転層の間に放出されると、その健康影響の総和は対数的に無限大になる。解析者はこのような点に注意を払うべきである。過去に規制当局が汚染物質の閾値について行なった考慮には不整合な点がある。1977年に国際放射線防護委員会（ICRP）は、突然変異誘導効果（mutagenic effects）または放射線被ばくに起因する癌に対して閾値は存在しないと勧告した。この勧告は世界中の殆どの国で取り入れられている。殆ど同じ頃、米国環境保護庁（EPA）は、発癌性物質については閾値を仮定しないことを勧告し、米国食料・薬剤局（FDA）がこれに追従した。ここで注意しなければならないことは、閾値が存在するかもしれないという仮定は粒子状物質のような他の物質に対しては今までも仮定されてきていることである。ひとつの閾値はひとつの有害物質とその影響にあるかも知れないが、他の物質にはないかもしれないという点に解析者は常に留意しなければならない。

解析者は、影響に閾値がある場合と無い場合の両方について計算することを勧める。例えば、ORNL/RFF 1994cでは粒子状物質の閾値が  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  に設定されると、健康影響の評価値は40%減るとしている。（この閾値はTSP：Total Suspended Particulate Matterについて適用されている。IAEAガイドラインではPM1またはこれが得られない場合はPM10を粒子状物質の空気汚染の測定に用いるべきであるとしている。 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ のTSPの閾値は、TSPの部分集合であるPM1やPM10のような  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  よりも小さな粒子を考慮から外すことになる。）しかし、地中海北部のヨーロッパ（ロシアのウラル山脈地域を含む）、ミシシッピ河東部、南は米国バージニア州リッチモンドと北はカナダのモントリオールの間、幾つかの地方では、粒子状物質濃度の下限は既に多くの科学者が最も高い推定閾値と信じているよりも高い値にある。

閾値はオゾンの影響解析に重要である。何故なら、夏季の一日の内の一部がオゾンの影響の閾値を超えるからである。幾つかのソフトウェアではオゾンの閾値を求めることが出来る。

殆どの線量－効果関係の限界は、これらが相乗作用を扱う事が出来ない点である。例えば、森林への酸性雨の効果は土壌の組成や寄生動物及び干ばつなどの他の種類のストレスとの相互作用に依存するが、そのような関係は簡単に計算モデル化出来ない。

### （3）事故のリスク評価

ここではIAEAガイドライン（IAEA 1999）の一部を紹介する。

原子燃料サイクル全体が人間の健康、生活及び環境に及ぼす影響の内、大事故の影響はごくわずかの割合を占める。このような状況にも関わらず、ほとんどの一般公衆の関心は直接事故の方に

向くようである。そこで、もし一般公衆が特定の発電システム（例えば原子力）の事故のリスクを社会的に受け入れられないと考えるならば、その開発は停滞するか停止することは明らかである。どのリスクが受け入れられ、どのリスクが受け入れられないかに答えることは難しい。この答えは、エネルギー問題の専門家が説明する事故発生確率とその影響に関する客観的評価に終るものではなく、一般公衆の感覚的理解にも関わるものである。一般公衆の感覚的理解の対象としては、大規模で破滅的な事故、癌のような特定の病気、遺伝的な病気、及び環境破壊に対する嫌悪感などが重要なものである。

一般公衆の感覚的理解が政策決定に影響を及ぼすものである一方、客観的で科学的な評価も政策決定の基礎情報として重要なものである。この観点から IAEA 等による国際的な調査・研究が進められて来た。IAEA は原子力安全に関するプログラムの中で、事故のリスク評価に対する客観的な報告書作りに焦点を当てた活動をして来ている。この数年間の専門家達の作業を通じ、異なるエネルギーシステムの事故リスクを比較する為の情報整理されている。

過去の事故データや PSA（確率論的安全評価）に基づいて得られるリスク推定値は、リスクレベルの工学技術的な秤である。PSA では、リスクは事象毎にその影響の大きさにその発生確率を単純に掛け算したもので、これらを更に全ての事象に関するリスクに渡って足し合せれば包括的なリスクを求める事が出来る。しかし、極めて大きな損害や喪失の可能性に対して個人が持つ嫌悪感は、個人の行動に無視出来ない影響を与える。経済学者、社会学者は、データを統計処理した証拠に基づき、個人のリスクへの忌避を考慮する重要性を強調している。例えば、投資の判断に迫られている個人は、投資の結果得られるものだけでなく、失敗し失うものについても考慮することは明らかである。

リスク忌避（Aversion）の考慮は、原子力発電の役割を議論する際に重要である。原子力の破滅的な大事故は広範な土地の放射能汚染を長期間に渡って招き、更に定量可能な健康への害や経済的損害を超え、社会的な問題を起す。しかし、現在用いられている経済評価モデルは、社会的な損害を包含していない。また、専門家の幾人かは、事故に伴う経済的損害の推定には、社会的な側面を含める為、リスクに対する個人または社会の忌避の動機分析を加えることが必要であるとしている。しかし、これらの点を定量評価に含めないことが好ましくない一方、これらの問題を評価に加えることが、現在の知見では充分に出来ないことも事実である。

過去の研究成果報告の幾つかは、社会的なリスクを忌避する傾向を評価に含む意味で、非常に大きな影響を伴う事故については重みを付ける操作を行っている。このようなリスクへの嫌悪の要素は、数式上は指数の肩の値として表現される。つまり、損害の大きさにリスクを忌避する傾向を考慮する場合には、損害の大きさのリスク忌避指数によるべき乗を想定する。従って、その定義からすると、リスク忌避指数は少なくとも 1 以上で、ほとんどの研究成果報告書で見ると、2 を超えることはない。リスク忌避指数が 2 の場合は、10 人の死者を出す事故は、1 名の死者を出す事故が 100 回起きると等価であると見なすことになる。もし、リスク忌避指数が大きな値をとる場合は、それは工学的な推定値をはるかに上回る感覚的リスクがあることを意味する。

KRUPNICK et al. (1993) は、「専門家の予想する損害 (Expert expected damage) アプローチ」及び「予想される効用 (Expected utility) アプローチ」のそれぞれの方法に基づいて推定された値の違いを議論している。「期待される効用」の概念は、個人は事故発生確率を考慮しながら事故のある無しの場合を比較し、個人の利益の期待値が最大になるような選択を行うと仮定するものである。「専門家の予想する損害」の概念は、専門家は事故が起きた後の快適感が損なわれる程度を推定すると仮定するものである。

KRUPNICK et al. (1993) の研究成果報告は二通りのリスクを定義し比較しているが、これらの二つが互いに相補的な関係にあると考えることが妥当であろう。伝統的なアプローチは、損害の期待値を求める方法、すなわち、もし事故が起きたとしたらどうなるかに関する大きさの程度に、このような事故の発生する確率に関する専門家の推定値を掛け算して求める方法が土台になっている。工学的観点からは、このような推定値が最も科学的に正当化出来るものである。

しかし、このような専門家の推定値は、一般公衆がリスクに対して持つ忌避感や、一般公衆が評価するリスクの感覚を反映出来ない。一方、リスクの貨幣価値換算が個人の WTP を土台にして求めるものであるように、一般公衆の感覚的リスク評価も専門家の評価もどちらも意味のあるものであり、ただ単に異なるだけという議論も有り得る。

#### (4) エネルギー供給確保の問題

IAEA ガイドライン (IAEA 1999) では、エネルギー供給確保の問題として、カルテルと長期的な石油輸入コストの関係、並びに石油市場崩壊による被害の二つが紹介されている。

まずカルテルと長期的な石油輸入コストについては二通りの見方がある。第一は、カルテルの力は無視できないとする見方である。この見方の支持者は、歴史的なデータにもとづく石油生産コストの推定値が実際の輸入国内の市場価格よりも低い点、石油資源の枯渇の問題は、技術改良や努力により解消出来る為、これが価格を釣り上げる可能性が少ない点をその根拠としている。LEIBY et al. (1997) は、OPEC からの石油を輸入しないことによる利益を計算し、これをカルテルの影響として評価した。米国に対する OPEC の石油供給エラスティシティ (価格の変化に対して変化する供給される石油量の率。図 1.1.1 の  $(\Delta Q/Q) / (\Delta P/P)$ ) を 5 とすると、カルテルの収益は、1 バレル当たり 0.9 米ドル (1993 年価値)、また供給エラスティシティを 1 とすると 1 バレル当たり 2.86 米ドルであると計算し、このようなカルテルの影響があるとすれば、これがエネルギー供給確保の為のコストの一部であるとしている。

カルテルと長期的な石油輸入コストに関する第二の見方は、カルテル収益は大きいはずもなく、政策にも無関係とするものである。これも過去のデータを分析した結果の意見で OPEC 以外の石油産出国の競争力を無視できないとするものである。更に、仮に少しでも OPEC にカルテル収益 (カルテルの効果) があつたとし、米国が国内石油価格を抑える為の何らかの対策を行なったとしても、そのコストは大きくないとする意見もある。

石油市場崩壊の影響についても二つの見方がある。第一の見方は、石油市場崩壊は価格に跳ね返るはずだが、これは通常国内の石油の需要と供給から成るミクロ経済市場の価格に反映されていないとするものである。LEIBY et al. (1997) は、1 バレル当たりゼロから 2.11 米ドルの輸入コスト増加を推定している。また、石油市場崩壊は、エネルギー全体の価格と消費量によってはマクロ経済に大きな影響を与えるとする意見もある。石油価格が上がろうとする場合、国全体のマクロ経済がこれを抑えようとし、国内の石油ミクロ経済市場以外に何らかのコストが発生するはずである。もし石油価格が急激に上昇すれば、国のマクロ経済全体に影響を及ぼし失業者が増え、国の経済全体の生産性が落ちる。LEIBY et al. (1997) は、石油輸入価格暴騰に伴うマクロ経済による国内石油価格修正の為のコストは大き目に見て 1 バレル当たりゼロから 6.48 米ドルであると推定している。

石油市場崩壊に関する第二の見方は、石油輸入価格の暴騰は、石油先物市場などにより防ぐことができ、マクロ経済に影響を与える可能性は無いとするものである。エネルギーのプライスショックによるマクロ経済への影響を統計的に調べても、石油ミクロ市場経済に内部化されたコストと外部性のコストを区別することは出来ない。そこで出来ることは、プライスショックによるグロス

のマクロ経済コストの大きさとその重要度を評価し、外部性に相当する部分の統計的な重要度を推定することである。その為に、例えば 1970 年代のオイルショックを分析し、マクロ経済への影響を調べることは出来る。しかし、これらのオイルショックの事例は決してエネルギーと経済の関係を代表するものではなく、また国によってそれへの対応策が異なる為、マクロ経済モデルを用いて石油価格暴騰の影響を調べても、デフレーションによるマクロ経済政策の効果と混同される可能性がある。

#### (5) 我が国固有の課題

ここでは IAEA の研究プログラム (Matsuki 2002) を実施した本節の著者がまとめたものを述べる。外部性研究の範囲は広く、調査研究の対象となる事項は極めて多い。重点とする問題をどれに置くかにより、研究の方向と成果を左右する可能性がある。以下は、現在我が国固有に考えられる研究課題である。

##### a) 我が国固有の発電技術と燃料の効果の反映

我が国固有の発電技術と我が国が輸入する原油や天然ガスの成分により、放出物質の成分が異なる可能性がある為、従来の欧米での研究成果を我が国固有の状況を考慮して評価し直す必要がある。また、核融合炉について有力な将来の発電技術として評価する必要がある。

##### b) 我が国固有の地勢の効果の反映

電気事業の外部性は、地理と人口・産業分布に影響される為、我が国の国土と人口分布に基づいた計算評価が必要である。また化石燃料の輸入依存の効果の検討が必要である。

##### c) 定量化可能な外部性の評価技術の精度向上

外部性については定量化可能なものとそうでないものがある。定量化可能なものについては、国際原子力機関が整理した手法 (IAEA, 1999) により、計算を行なうことが出来る。定量化手法もその欧米における普及と共に改良され、この十年間に進歩を遂げている。しかし、コンセンサスが十分とれていないものもある。貨幣価値換算、集団の平均的なリスクを個人のリスクに置き換える考え方、集団の統計上の生命の価値を個人にあてはめる考え方 (Value of Statistical Life)、健康障害の貨幣価値を命が短くなる統計的な期間として評価する考え方 (Years of Life Lost)、事故発生の確率をリスクの貨幣価値に持ち込む考え方、世代に渡る将来への影響評価に投資分析に用いる割引率の概念を用いる方法、科学的に証拠のはっきりしない低いリスクを長期間に渡り多くの人口について集積する考え方など、我が国の文化や風土への適用出来るかどうかの検討も含め、最新の科学的知見をもって常に見直して行く必要がある。これには我が国における医学、科学、経済学、法学などの多方面に渡る専門家の貢献が求められる。

##### d) 我が国固有の制度作りの研究

欧米で進められている電力市場の自由化を仮に日本に導入した場合、価格と供給量の変化が予想される。これに対応する為には、従来の我が国の電力供給制度からの円滑な移行の為の新たな制度作りが必要である。例えば次の分野における制度研究が望まれる。

- ・ 原子力損害賠償制度：米国のプライス・アンダーソン法に基づく保険制度では一事故当たり最高総額約一兆円の賠償額支払いが可能である。民間保険制度の最高支払い可能額一兆円を超える場合、連邦政府からの援助はされず、議会の判断に委ねられる。我が国では、

最高 600 億円までを電気事業者が負担し、それを超える場合は政府が支出することになっている。

- ・ 消費者への課税、電気事業者への課税：外部性が考慮されることにより、仮にそれが市場価格に含まれるようになると、特定の発電システムの価格が上昇し、これに適正な供給量が現在のものよりも下がる可能性がある。この供給量の低下を是正する為に、特定の電気事業への助成金を交付する方法もある。燃料税、放出税、廃棄物税などの適正な組み合わせを研究する必要がある。
- ・ 研究・技術開発の助成：発電システムの経済効率改善は、電力価格の低減と供給量の増大につながる。研究開発への助成は、適切な市場価格と供給量を維持する為の長期的な対策として必要である。放出低減技術、効率的な発電技術に関する原価と外部性評価の研究が必要である。
- ・ 地球温暖化対策：地球温暖化の影響評価の内容については議論百出の観がある。しかし、これについても、外部性評価、放出権の売買などの制度作りを含め、研究を続ける必要がある。

#### 参考文献

- 1) DOCKERY et al. 1993: DOCKERY, D.W., et al., An association between air pollution and mortality in six US cities, N. Engl. J. Med. 329, 1753-1759 (1993)
- 2) DREICER et al. 1995: DREICER, M., TORT, V. and MARGERIE, H., "Nuclear fuel cycle: implementation in France". Final report for ExternE Programme, contract EC DG12 IOU2-CT92-0236. CEPN, F-92263 Fontenay-aux-Roses (1995)
- 3) ExternE 1999: Externalities of Energy, European Commission, Directorate General XII, Science, Research & Development, Luxembourg (1999). Three volumes on national implementation, methodology update, and global warming effects.
- 4) HEAST 1995: HEAST, "Health Effect Assessment Summary Table (HEAST)", United States Environmental Protection Agency. Report EPN540/R-95/036. May 1995. Washington, DC 20460 (1995)
- 5) HIRSCHBERG et al. 1999: HIRSCHBERG, S., STRUPCZEWSKI, A., Comparison of Accident Risks in Different Energy Systems: How Acceptable? IAEA Bulletin, Vol. 41, Nr. 1, pp. 25-30 (1999)
- 6) HOBBS et al. 1994: HOBBS, B.F., MEIER, P., Integrated Resource Planning and the Environment: A Guide to the Use of Multi-Criteria Decision Methods, Rep. ORNUSUB/94/03371, Oak Ridge Natl Lab., TN (1994)
- 7) IAEA 1999 : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Technical Reports Series No. 394, Health and Environmental Impacts of Electricity Generation Systems: Procedures for Comparative Assessment (1999)
- 8) IAEA 2000 : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Working Material, IAEA's Activities on Comparative Studies of Health and Environmental Risks Associated with Electricity Generation Systems, Procedures on the Technical Committee Meeting to summarize the achievement of a five year study of impacts and risks of energy systems (methods and data), organized by the IAEA held in Vienna, from 20 to 22 March 2000, IAEA-TC-733.7 (2000)
- 9) KRUPNICK et al. 1993: KRUPNICK, A., MARKANDYA, A., NICKELL, E., The external costs of nuclear power: Ex ante damages and lay risks, Am. J. Agric. Econ. 75, 1273-1279 (1993)
- 10) LEIBY et al. 1997: LEIBY, P.N., JONES, D.W., CURLEE, T.R., LEE, R., Oil Imports: An Assessment of Benefits and Costs, Rep. ORNL-6851. Oak Ridge, Natl Lab., TN (1997)
- 11) Matsuki 2002: MATSUKI, Y., Comparison of health and environmental impact of energy systems", International Journal of Risk Assessment and Management, Vol. 3, No. 1, pp. 1-15 (2002)

- 12) New York State 1993 a : RCG/HAGLER, BAILLY, INC., TELLUS INSTITUTE, New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 1: Externalities Screening and Recommendations, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY (1993).
- 13) New York State 1993 b : RCG/HAGLER, BAILLY, INC., TELLUS INSTITUTE, New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 2: Methodology, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY (1994)
- 14) New York State 1993 c : RCG/HAGLER, BAILLY, INC., TELLUS INSTITUTE, New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 3A: EXMOD User Manual, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY (1995)
- 15) New York State 1993 d : RCG/HAGLER, BAILLY, INC., TELLUS INSTITUTE, New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 3B: EXMOD Reference Manual, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY (1995)
- 16) New York State 1993 e : RCG/HAGLER, BAILLY, INC., TELLUS INSTITUTE, New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 4: Case Studies, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY (1995)
- 17) Office of Technology Assessment 1994 : OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT, Studies of the Environmental Costs of Electricity, Rep. OTA-ETI-134, US Govt Printing Office, Washington, DC (1994)
- 18) ORNL/RFF 1992 a: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RESOURCES FOR THE FUTURE, U.S.-EC Fuel Cycle Study: Background Document to the Approach and Issues, Rep. No.1, Oak Ridge National Lab., TN (1992)
- 19) ORNL/RFF 1994 b: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RESOURCES FOR THE FUTURE, Estimating Fuel Cycle Externalities: Analytical Methods and Issues, Rep. No.2, McGraw-Hill Utility Data Inst., Washington, DC (1994)
- 20) ORNL/RFF 1994 c: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RESOURCES FOR THE FUTURE, Estimating Externalities of Coal Fuel Cycles, Rep. No.3, McGraw-Hill/Utility Data Inst., Washington, DC (1994)
- 21) ORNL/RFF 1998 d: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RESOURCES FOR THE FUTURE, Estimating Externalities of Natural Gas Fuel Cycles, Rep. No.4, McGraw-Hill Utility Data Inst., Washington, DC (1998)
- 22) ORNL/RFF 1996 e: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RESOURCES FOR THE FUTURE, Estimating Externalities of Oil Fuel Cycles, Rep. No.5, McGraw-Hill Utility Data Inst., Washington, D.C. (1996)
- 23) ORNL/RFF 1994 f: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RESOURCES FOR THE FUTURE, Estimating Externalities of Hydro Fuel Cycles, Rep. No.6, McGraw-Hill Utility Data Inst., Washington, DC (1994)
- 24) ORNL/RFF 1998 g: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RESOURCES FOR THE FUTURE, Estimating Externalities of Biomass Fuel Cycles, Rep. No.7, McGraw-Hill Utility Data Inst., Washington, DC (1998)
- 25) ORNL/RFF 1995 h: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RESOURCES FOR THE FUTURE, Estimating Externalities of Nuclear Fuel Cycles, Rep. No.8, McGraw-Hill Utility Data Inst., Washington, DC (1995)
- 26) POPE et al. 1995: POPE, C.A., THUN, M.J., NAMBOODRI, M.M., DOCKERY, D.W., EVANS, J.S., SPEIZER, F.E., and HEITH, C.W. "Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults". Amer. J. of Resp. Critical Care Med. (1995)
- 27) PSI 1998: PAUL SCHERRER INSTITUT, Severe Accidents in the Energy Sector, Hirschberg et. al. (1998)
- 28) RABL et al. 1998: RABL, A. AND EYRE, N., " An Estimate of regional and global O3 Damage from Precursor NOx and VOC Emissions". Environment International, vol.24, 835-850 (1998)
- 29) RABL et al. 1999: RABL, A., DREICER, M., Long-term Health and Environmental Impacts of Energy Systems: An Eye to the Future, IAEA Bulletin, Vol. 41, Nr. 1, pp. 31-34 (1999)
- 30) STRUPCZEWSKI 1999: STRUPCZEWSKI, A., Comparative Assessment of Emissions from Energy Systems: Benefit & Burdens, IAEA Bulletin, Vol. 41, Nr. 1, pp. 19-24 (1999)



## 1.2. 外部性研究が挑戦すべき新たな課題への対応-概念枠組の拡張試論

伊東 慶四郎

### 1.2.1. はじめに

前述のように、欧州委員会は、1991年から1998年にかけて、米国エネルギー省の協力も得つつ、発電システムが、大気汚染、放射能汚染及び気候変動など都市・地域・地球規模の環境や人の健康に与える影響（環境外部性）の評価を可能とする新たな方法論の体系化や解析・評価システムの開発を行った。ここでの解析方法論は、環境負荷の排出とその波及影響の分析など影響経路法に基づくもので、その内容は、主に発電事業のアウトプット面に着目した「環境リスク」の経済的価値付けにある。この環境外部性面でのわが国の主な課題は、日本列島固有の気象条件や中国大陸の大気汚染の影響にも配慮した独自の環境影響の統合解析・評価システムの開発と運用にある（2.1節参照）。

一方、エネルギーセキュリティ面では、現在、中国・インドな途上国の経済発展によるギガトレンド時代を迎え、わが国を含む資源輸入国では、原油等燃料の供給抑制による価格高騰等などインプット面での「経済リスク」（外生要因による市場を介した波及損失）に直面し、中・長期的なセキュリティ戦略の確立とその展開が喫緊の課題となってきた。また、近年、エネルギー・原子力政策分野においては、新たな社会的・政治的・制度的なリスクや核拡散・核テロ等の国際政治上のリスクが顕在化し始め、電力の安定供給や国際安全保障面で看過し得ない政治経済的な波及影響を及ぼしてきており、その的確な対処方策の確立と実施が、上記と同様、喫緊の課題として問われ続けている（伊東, 2005）。

これらの社会的・政治的な外生要因による「社会リスク」は、「環境リスク」とはその性格が基本的に異なった政治経済的な波及影響（広義の外部性）現象をもたらしてきており、その学術的な知識基盤の整備と総合評価研究の推進が、適切なエネルギー・原子力政策の形成と実施及びその評価、ならびに国民への説明責任の履行上、重要な政策研究課題として問われ始めてきている。なお、チェルノブイリ事故は、上記の「社会リスク」と「環境リスク」の二つの側面を併せ持った原子力関連の種々の外部性の歴史的な複合現象であり、原子力分野における上記総合評価研究の最も重要な分析対象の一つとして位置付けられる。この事故の影響については、本年4月、国連の専門家グループが事故後20年を契機に環境影響、健康影響及び社会経済影響に関する膨大なレビュー報告を組織的に取りまとめ刊行している（WHO, 2006a・2006b；IAEA, 2006a・2006b）。それ故、それらを総合レビューし将来の原子力政策の歴史的教訓として活かしていくことが、次世代の外部性研究展開の最も重要なミッションの一つとして問われ始めてきている。

政府、関係学会及び企業は、その責務として、影響経路アプローチによるこれら「環境リスク」や「社会リスク」の自然的あるいは社会・経済的な波及影響の総合分析と評価、及びそのガバナンスのあり方などに多角的な検討を加え、その成果を政府のエネルギー・原子力政策や関連企業の経営政策の形成と実施及びその評価に活用すると共に、広く公衆や消費者に開示し対話を深めることにより、国民への説明責任を果たしていくことが求められてきている。それは、開かれた熟慮型民主主義のもとでのエネルギー・環境政策の形成や企業の経営リスク管理上の必須要件であり、次世代の外部性研究のミッションでもある。

米国下院科学委員会は、議会への報告（1998），“Unlocking our future: Towards a New Science Policy”において、21世紀の科学の第4の役割が、従来の3つの役割—国家安全保障、健康、及び経済—に加え、「社会の適切な意思形成の支援」におかれるべきであると勧告した。そして、この新たな役割の実現に向けて科学政策の重点をシフトし、科学と国家社会・公衆との関係の強化を進めるよう

提言 (US-HCS, 1998) した。次世代の外部性総合評価研究の実施とその社会の意思形成への反映は、まさにここで科学の第4の役割に該当する営みである。

日本原子力学会では、この科学の第4の役割を踏まえ、2002年、原子力エネルギーの外部性研究専門委員会を発足させた。この委員会の主な狙いは、わが国における「エネルギー関連の環境・社会リスクの自然的・社会経済的な波及影響の包括的な分析と評価、及びそのガバナンスのあり方等に関する研究」(次世代の外部性研究)の展開に資する点にあった。その研究スコープは、環境・健康リスク、社会的・政治的・制度的なリスク、エネルギー・電力の安定供給上のリスク、公的な研究開発の投資効果であり、将来の課題として、国家的研究支援プログラムの発足や学術研究のネットワークの確立を指向していた。

リスク論や政策評価面からみた次世代の外部性研究の推進は、21世紀のエネルギー・原子力政策にとって不可欠な課題である他、公衆に信頼される科学技術としての原子力平和利用推進上の必須要件でもある。ここでは、ExternE研究のレビューを通じて得られた三つの示唆、次世代の外部性研究に対するニーズ、リスク論面から見た研究のスコープと社会経済的な影響分析概念の類型化、及び次世代の外部性研究の概念枠組考察事例を紹介することにより、今後の研究の展開に資する。

### 1.2.2. ExternE研究のレビューを通じて得られた三つの示唆

#### (1) ExternE研究の概要

欧州委員会は、前述のように、1991年、米国エネルギー省の協力も得つつ、発電などエネルギー供給システムがもたらす環境外部性の評価(環境リスクの経済的評価)に必要な方法論や解析・評価システムの組織的な研究開発に着手した。以後、1998年まで7ヶ年の歳月をかけて、発電システムが人の健康や環境に及ぼす影響の評価に関する評価システムを開発するとともに、欧州連合15ヶ国におけるその国別適用研究を終了した。その研究成果は、数千頁にのぼる欧州委員会のエネルギー外部性(ExternE: Externalities of Energy)研究報告(Vol.1~Vol.10)として開示されている(伊東,2000)。

この研究の背景、目的、理念、研究の経緯、評価の概要及び新たな展開動向は、概ね、以下の通りである。

- ① ExternEとは一エネルギーシステムの環境外部性評価システムの研究開発プロジェクト
  - ・ 背景: 広域の大気汚染、チェルノブイリ災害、気候変動リスク
  - ・ 目的: エネルギー生産と消費に関連した環境影響と外部費用の定量化
  - ・ 政策理念: 外部費用の内部化による市場における資源の最適配分の実現
- ② ExternE解析・評価システムの研究開発と適用検討の経緯
  - ・ 1991~1992年: フェーズⅠ-欧州委員会(EC)と米国エネルギー省との共同研究
  - ・ 1993~1995年: フェーズⅡ-ECによる研究継続(フェーズⅠに着手した方法論やD.B.の開発と整備、12の燃料サイクル解析手法の適用可能性の実証、成果報告書No.1-6の刊行)
  - ・ 1996~1998年: フェーズⅢ-方法論の拡張、15カ国における国別実施、成果報告書No.7-10の刊行
  - ・ 1999~2003年: 手法の適用検討-NEWEXT、ExternE-Pol、MAXIMA
- ③ Impact Pathway Approachに基づく環境外部性の評価システム及びその適用結果の概要(後掲2.1節参照)
- ④ ExternE研究の新たな展開動向
  - ・ 2004-2008年: ライフサイクル分析(LCA)との使い易い統合ツール開発プロジェクトNEEDSとして継続実施中

- ・ 2005年～ : 欧州連合の政策・規制等の環境・経済・社会影響を対象とした Impact Assessment Guidelines (EC, 2005b) 実施への貢献

## (2) ExternE 研究のレビューを通じて得られた3つの示唆

1991-98年にわたって展開された上記 ExternE 研究のレビューの結果(後掲2.1節参照、エネルギーセキュリティのレビュー結果は含まず)、以下の三つの重要な示唆が得られた。この内、第②項の「原理的な発想転換が必要なエネルギーセキュリティ問題へのアプローチ」、及び第③項の「原子燃料サイクルの外部性評価—学術の倫理に違背、新たなアプローチ方策の検討が必要」は、ExternE 研究など従来の外部性研究の原理的欠陥や盲点ともいえる課題で、本委員会設置の背景ともなった学術的問題意識でもある。

### ① わが国の環境外部性評価研究推進への示唆

- ・ 大気汚染物質の影響評価→リージョナルな影響解析の実施が可能な日本固有のモデル(中国からの影響解析にも対応)の開発とデータベースの整備、欧米の曝露・応答関数(ERF)の移転評価と独自のERF研究の推進、わが国固有の支払意思額(統計的生命の価値等)に関する多角的な調査研究の推進
- ・ 温室効果ガスの影響評価→当面、対策コスト法を基本として対処すべき、損害費用推計手法は科学的不確実性が高すぎるため中・長期的な研究開発が課題

### ② 原理的な発想転換が必要なエネルギーセキュリティ問題へのアプローチ

- ・ 上記の環境外部性の評価は、発電事業のアウトプット面に着目した評価であるが、資源小国のわが国では、外生的リスク要因の作用により、石油等燃料の安定供給などそのインプット面でより一層多大なリスクを負ってきたという歴史がある。
- ・ ExternE 研究では、このエネルギーセキュリティ問題に、従来の技術的外部性概念(後述)に基づく市場取引を介さない損害関数法を適用して失敗し中断している(EC, 1999a)。
- ・ OPEC 等による原油等燃料の供給抑制・削減・中断による価格高騰問題は、市場経済の範疇を超えた国際政治上の外生的リスク要因の影響が、国際的な市場取引を介して資源輸入国の消費者に波及する政治経済現象である。それ故、この経済的波及影響は、広義的外部性(金銭的外部性; 後述)現象として捉えることができるが、経済学でいういわゆる技術的外部性現象には該当しない。
- ・ この問題への対策の基本は、新たな技術開発やエネルギー源転換など、原油等の供給抑制・削減といった外生的なリスク要因に対する技術経済的なリスク回避対策にあるため、環境問題における外部費用の内部化問題とは基本的に異なった、機会費用概念に基づく分析・評価手法の構築や対策の検討が必要となる。

### ③ 原子燃料サイクルの外部性評価—学術の倫理に違背、新たなアプローチ方策の検討が必要

- ・ ExternE の国別実施ドイツ版(IER, 1997; EC, 1999c)における原子燃料サイクルの外部性評価では、科学的根拠が定かでない放射線防護上の便宜的な線形閾値無し(LNT)仮説を現実の死亡リスク推計に適用し、西独で原発の重大事故が発生した場合、将来、欧州全域で、数万(several ten thousands)人も一般公衆が致死性がん死亡するかもしれないと、何らの特記説明もないまま公表
- ・ 原子力界のリスク解析研究者によるこのリスク推計結果は、現代社会の技術倫理に抵触するリスクとして、緑の党やグリーンピースなどの政治集団に反原発の倫理的根拠を提供し、政治家、一般公衆、メディアの記者等の原子力リスク忌避心理を助長し、重大な社会経済的な影響

を誘発してきた。(事例:チェルノブイリ事故後の介入基準の過度の強化(I. V. Filyushkin, 1996)、原子力フェーズアウト政策、原発立地地域の住民投票への影響等—社会的外部性:後述)

- ・ ExternE の Methodology 2005 Update (EC, 2005a) では、非 OECD 諸国と OECD 諸国にわけ、前者は Chernobyl 事故ベースで約 9~30 千人の死亡推計値を、後者は PSA ベースで最大約 5 千人の改訂死亡推計値を公表。OECD 諸国のリスク推計には、炉形式の差を反映したようであるが、放射線防護上の LNT 仮説を現実の死亡リスク推計に適用している点は変わらない。

- ・ LNT 仮説を低レベル放射線による平均的な健康リスク係数として適用するにたる科学的根拠があるのか。フランスの科学アカデミーと医学アカデミーは、2005 年 3 月、共同報告「低線量電離放射線の線量・効果関係及び発がん影響の推計」(AS and NAM, 2005) を取りまとめ、低線量域 (<100mSv)、特に極低線量域 (<20 mSv) の健康リスク推計への LNT の適用は、生体の防御メカニズムを無視しているため正当化されず、推奨してはならないと指摘している。

- ・ この低レベル放射線による健康リスクの評価に関して、チェルノブイリ事故の健康影響について国連としての総合的なピアレビュー (17 部門、45 人が参加) を統括した世界保健機構 (WHO) も、その fact sheet (WHO, 2006a) において、世界の「自然放射線の量は、だいたい年間 1mSv から 10mSv の範囲で地域的に変動している。しかも、高バックグラウンド放射線地域に住む人たちの受ける自然放射線の量は一年間に 20mSv を越えることもある。しかし、この高い自然放射線への曝露が健康に悪い影響を与えたことを示す証拠は見つかっていない。」と指摘している。

- ・ この問題に対しては次の 3 つの側面からの対応が必要である。その 1 つは、生体防御機構面からみた低レベル放射線の健康影響に関する科学的エビデンスのシステマティックレビューの実施、及び中・長期的な国家的総合基礎研究プログラムの立案とその推進である。2 つ目は、LNT 仮説、ALARA の原則、線量限度、介入基準等の放射線防護上の規範概念や防護基準が及ぼす社会的外部性 (精神的・心理的な健康影響や社会的・政治的・経済的な波及影響) を対象とした規制の影響評価 (RIA) 面からみた総合評価研究の実施である。3 つ目は、これらの知見を踏まえた低レベル放射線域における新たな放射線防護上の価値規範や適切な判断基準の提案、及び一般公衆や各界の専門家との多角的な対話の場の創設である。

原子力エネルギーに係わる外部性研究が、わが国のみならず、国際的にも行き詰まり気味な背景には、「技術的外部性」(後述)概念に基づくアプローチしか単純適用してこなかった欧米の外部性評価研究の限界と、どちらかといえば、その概念枠組や解析評価システムの輸入ベースでしか研究が進められてこなかった、わが国の原子力外部性研究の現実がある。

原子力が 21 世紀の基幹的なエネルギー供給源として、社会に広く受け入れられ定着していくためには、その妥当性や正当性を支える学術基盤面でのブレークスルーと、それに基づく政策の形成や一般公衆との多角的な対話の場の創設が求められてきている。次世代の外部性総合評価研究は、その歴史的ミッションに応える責務を負っている。

### 1.2.3. 次世代の外部性研究に対する社会経済的ニーズの検討(伊東, 2006)

(1) 近年、新たに出現してきた多様な社会リスク低減ニーズへの対応

近年、わが国内外で、新たな社会的・政治的・制度的リスクや核拡散・核テロ等のリスクが顕在化し始め、電力の安定供給や国際安全保障面で、深刻な社会的・政治経済的影響を及ぼしてきている。これらは環境リスクとはその性格が大きく異なったものであるが、技術的外部性問題としての

性格を有しているものも多い。しかし、全体としては、外生的リスク要因がもたらす社会的・政治経済的波及影響問題（広義の外部性問題）として位置付け、次世代の外部性評価研究面からその概念枠組の在り方に考察を加え、その分析・評価システムや適切な対処枠組の研究開発を推進していくべき課題であるといえる。

① 社会的・政治的・制度的なリスク低減ニーズへの対応

- ・ LNT 仮説による低レベル放射線の健康リスク評価がもたらす社会的外部性問題
- ・ 事業者の虚偽報告・データ改竄・原子力施設事故等による国民の信頼喪失問題
- ・ 拘束力のない住民投票による電源立地やプルサーマル事業実施の困難化問題
- ・ 市場自由化や安全規制等に係わる制度設計の不備、企業統治・技術者倫理問題

② エネルギー・電力の安定供給上のリスク低減ニーズへの対応

- ・ 内外で多発する電力供給のセキュリティ問題  
米国加州の電力危機：電力市場自由化の制度設計の欠陥により市場機構が異常作動  
東電の原発全基停止：安全規制制度と企業統治の複合問題とその社会的・政治的波及
- ・ ギガトレンド時代を迎えた国際エネルギー市場における価格高騰問題

③ 核拡散・核テロ等の安全保障上のリスク低減ニーズへの対応

- ・ 放射性物質拡散兵器（RDD）テロ等による社会経済的波及影響やその抑止問題
- ・ 核拡散や限定核戦争の政治経済的な波及影響やその抑止問題

（2）エネルギー・原子力政策の社会経済的インパクト分析ニーズへの対応

我が国では、2002年、行政機関が行う政策の評価に関する法律（政策評価法）が施行された。また、2004年には、政策評価としての「規制の影響分析」（RIA）の試行的実施が閣議決定され、2004年8月から2005年6月までに、10府省で79件のRIAが実施された。さらに、2005年3月には、内閣府総合科学技術会議において「国の研究開発評価に関する大綱的指針」の改訂案が検討され、決定された。

エネルギー・原子力政策領域におけるこれらの政策評価、規制の影響分析及び研究開発の評価は、環境・健康リスクの低減、社会的・政治的リスクの低減、エネルギー・電力の安定供給上のリスクの低減、及び核拡散・核テロ等のリスクの低減などの政策効果の分析と評価を主要な課題としている。それ故、次世代の外部性総合評価研究は、これらの課題への包括的な対応をいかに可能とするかを、常に考慮しつつ、その概念枠組と方法論の体系化を図っていく必要がある。

① 政策評価法の施行(2002.4) への対応

- ・ 政策効果の把握の手法に関する調査、研究及び開発の推進を要請
- ・ 政策のマネジメント・サイクルへの制度的な組み込みを要請

② 政策評価としての「規制影響分析(RIA)」の試行的実施要領(2004.8) への対応

- ・ 規制の費用（行政費用、遵守費用、社会的費用）と便益（産業界・国民の便益、社会的便益：死亡・疾病リスクの低減等）の分析実施を要請

③ 「国の研究開発評価に関する大綱的指針」の改訂（2005.3）への対応

- ・ 研究開発プログラム、施策及び政策の評価の推進及び追跡評価の充実
- ・ 研究開発の社会経済的アウトカム・インパクト分析と評価の実施

### 1.2.4. 次世代の外部性研究の範囲と社会経済的影響分析概念の類型化

#### (1) 次世代の外部性研究の範囲

エネルギー・原子力政策分野における種々のリスク要因による環境・健康影響や社会経済影響、及びその低減効果に係わる分析・評価概念は、政策のマネジメント・サイクル面からみた場合、社会と共進化が可能な循環型のアクション・プログラム（種々のリスクとその波及損失の顕在化→リスク低減技術や方策の研究開発→リスク低減施策の形成と実施→リスク低減効果の発揮→新たなリスクの出現とそれへの対応→）のもとで体系化していく必要がある。また、公的な研究開発施策の政策効果は、これらリスク低減施策の形成と実施を介した種々の社会経済的なリスク低減効果として、あるいは、コスト低減によるこれらリスク低減技術の市場による普及可能性改善効果等として位置付け分析していく必要がある。

ここではこれらの点を考慮し、エネルギー・原子力政策分野における種々のリスク要因を、図 1.2.1 に示すように、大きく次の4つの領域、① 環境・健康リスク：通常時・事故時の環境負荷排出とその波及損害、② 社会的・政治的・制度的リスク：LNT 仮説の不適切な適用、企業の倫理違反行為、制度設計の不備・欠陥等が公衆の心理・行動や社会集団の行動に及ぼす影響、③ エネルギー・電力

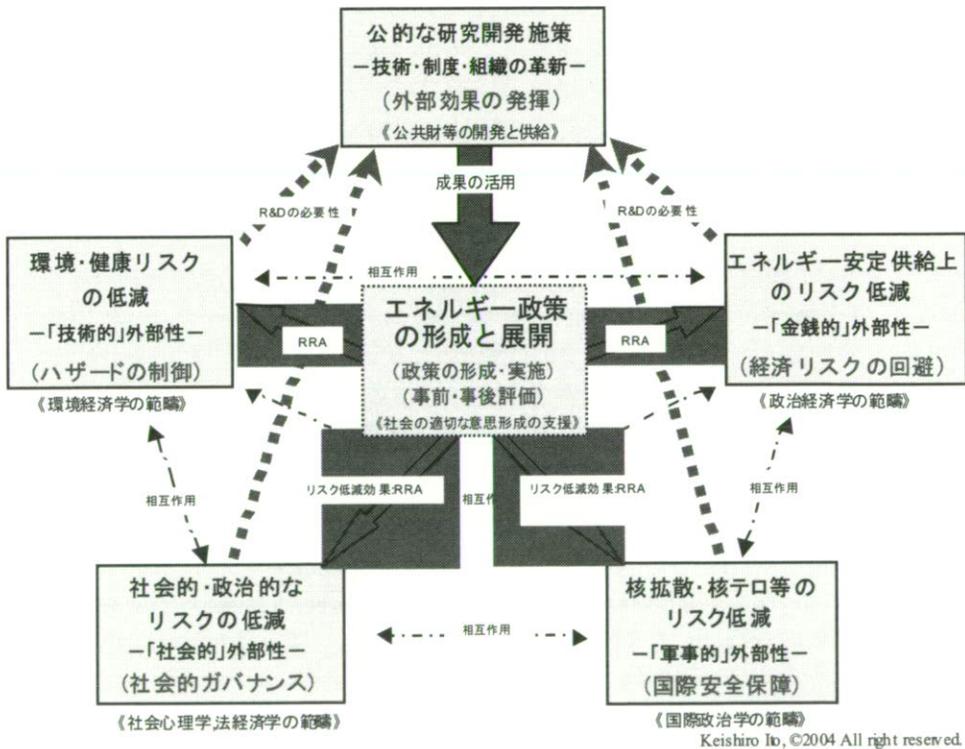


図 1.2.1 エネルギー・原子力政策における次世代の外部性研究の範囲（伊東, 2005）  
—リスク論面からみた次世代外部性研究の概念枠組試案—

の安定供給上のリスク：内外の外生的リスク要因による経済的波及損失、④ 核拡散・核テロ等のリスク：社会的・政治的・経済的な波及影響、に区分して位置付けることができる。

## (2) 次世代の外部性研究における社会経済的な影響分析概念の類型化

波及影響 (impact) 概念の一つである外部性について、環境経済学者 岡敏弘は、「外部性は普遍的な現象であり、市場経済の方が、むしろ、広大な外部性の海に浮かぶ小島に過ぎない。外部性は、市場にとっての『環境』であるといってもよい。」(岡敏弘, 2002) と示唆している。

経済学では、この外部性 (波及影響・効果) に関連した概念として、歴史的に全く異なった二つの概念—マーシャルの金銭的外部性 (pecuniary externalities: Marshall, A., 1920) ) とピグーの技術的外部性 (technological externalities: Pigou, A.C. 1932) —が登場し (Tibor Scitovsky, 1954) 、それぞれ重要な波及影響現象の分析概念として用いられてきている。

前者の金銭的外部性とは「市場取引を介した波及効果」概念で、現在では主に「経済波及効果」と呼ばれているが、専門的には、なお、そのまま用いられたりもしている (赤井伸郎, 金本良嗣, 1999)。

また、後者の技術的外部性は一般によく用いられている「市場取引を介さない波及影響」概念である。その代表的な事例として、環境分野では、生産・消費活動等に伴う環境負荷の排出による環境影響や気候変動影響が、また研究開発分野では、研究開発によって獲得された知識のスピルオーバー効果 (対価を伴わない知識の溢出による社会経済的便益の創出) などがあげられる。

一方、近年、これら経済学の範疇のみでは位置づけがたい社会的、政治的及び制度的なリスク要因 (threat, peril) による社会経済的な波及損失問題 (JCO 臨界事故-大塚直, 2000; 電源立地の住民投票問題-西川雅史, 2002) が多発してきている。また、チェルノビル原子力発電所の事故影響面でも、精神的・心理的な健康影響が一般公衆の最大の公衆衛生上の問題として指摘 (WHO, 2006b) され、その最重要原因として、政治的・制度的なリスク要因 (I. V. Filyushkin, 1996) の関与が明らかになってきている。

ここでの波及影響とは、社会的・政治的なリスク要因の作用に伴う社会心理的な意識・情報伝播過程や政治過程を介した心理・意識・行動面での影響現象であったり、制度的なリスク要因が市場機構の適切な作用を制約し至めることにより危機的な異常事態を生み出したり、さらには、これらの影響が複合化した現象であったりしている。

これらの点を考慮すると、社会経済的な影響に係わる基礎的な分析概念については、概ね次の3つに類型化することができるように考えられる。

- ◇ 類型Ⅰ—外生要因の作用下での市場取引を介した経済的な波及影響 (金銭的外部性、例: OPEC等の原油等燃料の供給制限による価格高騰と資源輸入国の消費者余剰の低下)
- ◇ 類型Ⅱ—市場取引 (対価、補償) を介さない環境・健康・社会経済への影響 (技術的外部性、公的な研究開発に伴う知識のスピルオーバー効果等を含む)
- ◇ 類型Ⅲ—心理・意識・行動面での社会的・政治的な波及影響 (社会的外部性)

これら広義の外部性面からみた3つの影響分析概念は学術的にはそれぞれ全く性格の異なったものであるが、いずれも、エネルギー・原子力政策分野における政策や研究開発施策の立案、あるいはこれらの実施と評価の過程において、当該政策・施策の性格を明確にし、その体系化を図るにあたって、また代替案の比較分析にあたって不可欠な基礎概念であると考えられる。

またこれらの概念は、開かれた熟慮型民主主義のもとで、わが国の政府、企業及び関係学会が、公衆や消費者への包括的な説明責任を果たし、そのエネルギー・環境政策、原子力政策及び電気事業経営に対する透明性を高め、一般公衆の信頼を回復していく上での、不可欠な学術的基礎概念で

もある。

ここでは、エネルギー・原子力政策分野における次世代の外部性研究の展開に資するため、これら3つの社会経済的影響概念の名称、影響の原因、影響経路・場、及び影響・効果の事例を、表 1.2.1 に類型化し取りまとめた。その概要は、以下に示す通りである。

① 類型Ⅰ：外生要因の作用下での市場取引を介した経済的な波及影響

市場取引を介した経済的な波及効果・影響は、技術革新や産業立地投資に伴う波及効果など、ある経済主体の活動が、市場取引を介して（価格の変化等を媒介にして）、他の経済主体に影響を及ぼす現象で、通常、市場機構が正常に作動していることの証左であるといわれている（植田和弘,1996）。

◇ 正の波及影響の事例

- ・ 技術革新に伴う産業全体としての費用低減・収穫逓増
- ・ 情報通信や送配電分野におけるネットワーク外部性：需要の側の規模の経済（田中辰雄，矢崎敬人，他、2003）
- ・ 産業立地・電源立地・高速道路建設投資等の波及効果

表 1.2.1 次世代の外部性研究における社会経済的影響分析概念の類型化  
—エネルギー・原子力政策分野における事例分析—

影響概念の名称	影響の原因例示	影響経路・場の例示	影響・効果の例示
類型Ⅰ；外生要因の作用下での市場取引を介した経済的な波及影響 (外生要因+金銭的外部性)	原油等燃料の供給抑制・削減	国際エネルギー市場	燃料価格の高騰、燃料転換技術開発の進展
	制度の不備・欠陥(市場機構異常作動)	国内電力市場	米国加州の電力危機の発生(価格高騰、停電費用等)
	公的研究開発による技術革新、コスト低減	市場普及促進過程	省エネ・環境技術等の自律的普及による政策効果の発現
類型Ⅱ；市場取引を介さない波及影響 (技術的外部性)	環境負荷排出	自然的波及影響過程	環境・健康損害、気候変動損害
	公的研究開発活動	対価を伴わない知の伝播	公共財としての知の活用による利益取得
類型Ⅲ；心理・意識・行動面での社会的・政治的な波及影響 (社会的外部性)	LNT 仮説による健康リスク評価結果の公表	メディアの情報伝播空間 政治的選択	介入基準強化、強制移住 公衆の不安、原発立地中断等
	虚偽報告、データ改竄 原子力事故の発生	メディアの情報伝播空間 地域の政治過程	国身の信頼喪失、原発の運用停止、波及的な経済損失
	拘束力なき住民投票	社会心理・政治過程	原発立地・プルサーマルの中断 環境政策目標の達成困難化

しかし、外生的リスク要因が、市場取引を介して（生産物・生産要素の需給を通じて）、国民経済や地域経済に不測の損失をもたらす負の波及効果の事例が考えられる。ここでの事例として、OPEC 諸国等の軍事的・政治的・社会的な要因（戦争、政変、国際カルテル、ゼネスト等）による原油等の（不意の）供給の抑制・削減・中断、米国カリフォルニア州における電力市場自由化の制度設計の失敗による電力取引市場における危機的な異常事態の出現などがあげられる。

また、JCO 臨界事故時における風評被害（波及損害）の発生は、類型Ⅲの社会的波及影響として

のリスク忌避意識とそれに基づく購買忌避行動が、類型Ⅰの市場取引過程を介して地域経済に看過し得ない経済損失をもたらした継起的複合影響現象として位置付けることができる。

#### ◇ 負の波及影響の事例

- ・ 原油等燃料の供給の抑制・削減・中断による価格高騰
- ・ 米国カリフォルニア州の電力危機に伴う経済損失
- ・ JCO 臨界事故時における地域的風評被害（波及損害）の発生

上記の内、原油等燃料の供給抑制・削減・中断リスクは、国際エネルギー市場における原油等の価格（異常）高騰、及び消費国の電力市場や非電力市場を介して消費者にまで波及し、国民所得の移転損失や消費者余剰を低下させる。また、エネルギー資源の乏しい発展途上国に対しては、国民の社会的厚生改善に深刻な影響を及ぼす恐れがある。

このような原油等の一次エネルギーの適切な価格での安定購入を阻害する外生的要因は、消費者は言うに及ばず、消費国の政府にとっても、その政策的なコントロールが困難な要因である。それ故、第1次石油危機以降、現在までこのような外生的リスク要因の内、戦争・政変・ゼネスト等に伴う短期的な供給中断・削減に対しては、燃料備蓄と緊急時放出により供給を保証するなどスレートの影響緩和方策によって、また、中・長期的な供給抑制に対しては、省エネルギー化の推進や代替エネルギーへの転換など、スレートの影響緩和・回避により経済損失の低減を図る政策によって対応が図られてきている。

#### ② 類型Ⅱ：市場取引を介さない波及影響

この市場取引を介さない波及影響・効果（技術的外部性）の概念について、関・庭田（2000）は、「外部効果とは、生産者や消費者（政府も含む）というある経済主体が行う市場取引を目的とした経済活動が、その取引そのもの範囲を超えて（市場メカニズムを経由しないで）、他の経済主体に正の、ないし負の影響を及ぼす副次的な効果のことをいう。」と指摘している。ここで他の経済主体に対して正の影響を与える外部効果として、以下のような事例がよく挙げられる。

#### ◇ 正の波及影響の事例

- ・ 社会に溢出（スピルオーバー）した新たな知識（研究開発成果等）の第三者の企業による自由活用とその便益の顧客への波及（US-DOC-NIST, 2003）
- ・ 養蜂業者と果樹園の市場を介さない蜜生産・受粉の相互依存関係
- ・ ある人の美しい庭園が通行人に与える癒しの効果

ここでの研究開発等により得られた新たな知識が社会に溢出し、第三者の企業が対価を支払うことなく自由に活用することにより得られた利益や顧客への波及便益（スピルオーバー効果）については、社会的に見て私的な研究開発へのインセンティブが小さくなり過小投資となることを防ぐため、特許制度が設けられ、企業の収益機会が保護されてきた。また、外部性やリスクの大きな研究開発分野では、本来、社会的に必要な研究開発投資が過小となることを防ぐため、政府の研究開発への関与が必要とされてきた。

また、負の波及影響の例としては、広域・複合型大気汚染による健康損害の発生、温室効果ガスの濃度上昇に伴う異常気象現象の増加などグローバルな気候変動による損害がその典型例として挙げられる。

#### ◇ 負の波及影響の事例

- ・ 大気汚染物質や化学物質の排出による健康・資産及び環境の損害
- ・ 地球温暖化に伴う異常気象現象の増加などグローバルな気候変動による損害

ここで、前者の大気汚染の場合、環境負荷の排出と環境・健康損害発生の因果関係が概ね明らかであったため、その環境負荷の排出抑制（＝健康損害の抑制）は、損害費用アプローチに基づく費用便益分析の枠組みのもとで、主に環境基準と排出規制を組み合わせた規制的手法により達成されてきた。この大気汚染による健康損害の推計は、市場メカニズムを介した動学的で不確実な波及影響現象とは異なり、静学的な現象で限界分析に適しているので個々の技術の経済性分析でよく用いられている。ExternE で開発され欧州全域をカバーしたエコセンスモデル（EC,1999a）は、このような大気汚染による環境・健康影響の推計と価値付けを目的とした代表的なモデルである。

一方、後者の気候変動問題の場合、その原因物質である温室効果ガスの排出と将来の気候変動損害との具体的な関係は、科学的な不確実性が高いため（EC, 1999b）、確度の高い推計はなお今後の中・長期的な課題となっている。それ故、温室効果ガスの排出抑制は、予防原理と対策費用アプローチに基づく費用効果分析の枠組みのもとで、国際的な排出権取引やクリーン開発メカニズム（US-DOE/EIA, 1998）など、新たな経済的・制度的枠組のもとでの解決が指向されている。

### ③ 類型Ⅲ；心理・行動面での社会的・政治的な波及影響

ここでの社会的な波及影響の概念は、公衆にとって重大かつ不確実な事件・事故の発生やその蓋然性を秘めた社会環境のもとにおける、事業者の虚偽報告や違法行為が、また、予防原理に基づく行政当局の規制関連行為が、あるいはメディアの配慮に欠けた報道等が、市場を介することなく、地域住民・消費者・一般公衆の社会心理・意識・行動に波及的な影響を及ぼす現象として、概ね、捉えることができる。

また、この社会的な波及影響現象の場合、引き続き、首長の判断や議会の決定、あるいは拘束力のない住民投票などの地域の政治過程（集合的意思形成過程）を介して、当該事件・事故に係わる事業者や産業の活動に看過し得ない経済的負担をもたらす、その負担が、最終的には市場を介して広く消費者や国民に転嫁されるなど、政治経済的に重要な問題となる事例が多い。

この社会的・政治的な波及影響現象に該当する事例としては、以下のような事例が挙げられる。原子力関連では、虚偽報告、データ改竄、原子力事故等による国民の事業者や行政への信頼喪失問題、住民投票による電源立地の中断問題、JCO 臨界事故の発生と 10km 屋内退避勧告による地元産品の購買忌避意識の拡大問題などが挙げられる。

#### ◇ 社会的波及影響の事例

- ・ 虚偽報告、データ改竄、原子力事故等による国民の事業者や原子力行政への信頼喪失問題
- ・ JCO 臨界事故時の 10km 屋内待避勧告による風評被害（波及損害）の拡大事件
- ・ 法的拘束力を有しない住民投票による電源立地等の中断問題

また、地域社会における電源立地等の意思決定の局面において、地域住民の原子力リスク忌避意識に重大な影響を及ぼし続けてきた要因の一つとして、原子力発電所の重大事故時における広域・長期の低線量放射線による健康リスク評価への LNT 仮説の適用問題（EC, 1999c; EC, 2005a）があげられる。この問題については、ExternE 研究のレビューを通じて得られた 3 つの示唆の内の一つとして前述したように、外部費用の定量化を指向した従来の原子燃料サイクルに関する外部性評価の在り方を、根本的に転換する必要性を提起してきている。

この問題は、一見すると、客観的な健康リスク問題と受けとられがちであるが、その本質は、科学的エビデンスが欠如した放射線防護上の LNT 仮説を、何百万人から何億人という一般公衆の、極低レベル放射線被ばくによる健康リスク評価に適用し、その結果を何の限定もなしに公表したことに伴う深刻な社会的外部性問題である。チェルノブイリ事故の精神的・心理的な健康影響（WHO, 2006b）や社会経済的影響（IAEA, 2006a）を深刻化させたソ連最高幹部会議における介入基準の過

度の強化 (I. V. Filyushkin, 1996) の背景にも、LNT 仮説を前提とした ICRP の線量限度問題が深く関わっており、その歴史的現実がこの問題の重要性を如実に明らかにしつつある。

### 1.2.5. 次世代の外部性研究の概念枠組考察事例

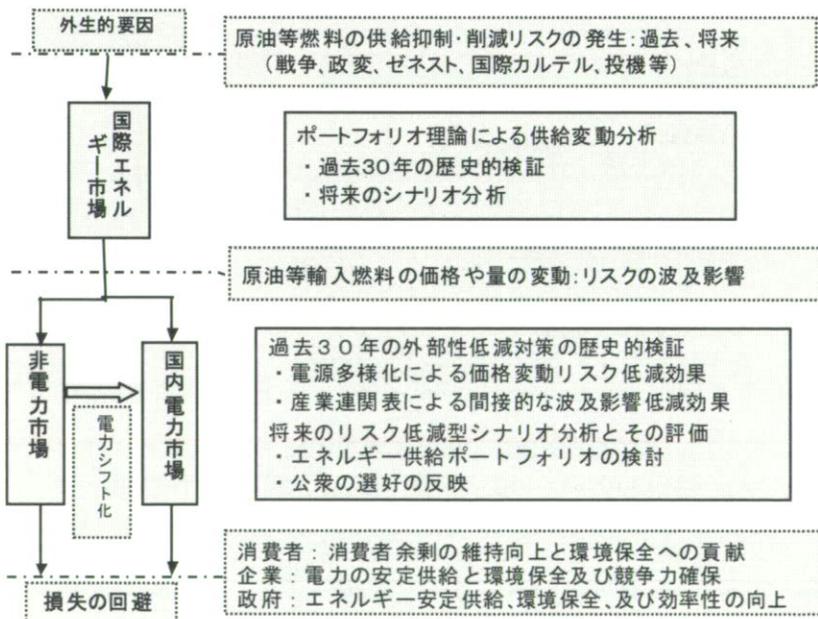
ここでは、次世代の外部性研究の展開に資するため、環境・健康リスク領域以外の、エネルギー安定供給上のリスク領域、及び社会的・政治的・制度的なリスク領域における概念枠組考察事例を以下に紹介する。なお、1990年代半ば以降、従来の経済学の範疇では位置づけがたい社会的・政治的・制度的なリスクに伴う広義の外部性問題が多発し、重大な社会・政治経済問題化し、その危機管理や社会的ガバナンスのあり方が問われてきた。それ故、ここでは、後者のリスク領域の事例として、重大事件・事故時における社会経済的影響の発生・波及プロセス、及び広域・長期の低線量放射線による一般公衆の健康リスク評価への放射線防護上の線形閾値無し仮説の適用がもたらす社会的・政治経済的波及影響、の2つの考察事例を紹介した。

#### (1) 概念枠組考察事例-1：エネルギー安定供給上のリスク領域

一原油等燃料の供給削減・中断が及ぼす社会経済的波及影響とその低減方策

外生的リスク要因が、市場取引を介して（生産物・生産要素の需給を通じて）、国民経済や消費者に不測の損失をもたらす典型例として、前述のように、OPEC 諸国の軍事的・政治的な要因（戦争、政変、ゼネスト、国際カルテル等）による原油等の供給抑制・削減問題が挙げられる。

この供給抑制・削減を契機として、国際エネルギー市場における原油等の価格が異常高騰し、マクロ経済上の調整ロスとともに、その影響が国内の電力市場や非電力市場を介して、消費者に波及（消費者余剰が減少）する。このような外生的リスクが及ぼす波及影響の評価研究フレームを参考事例として次図に示す。



Keishiro Ito, ©2003 AI

図 1.2.2. 原油等燃料の供給抑制・削減による経済的波及影響の分析フレーム（伊東,2003a）  
—外生要因による経済損失低減策の事後評価と将来のシナリオ分析—

この概念枠組は、わが国の歴史的なエネルギーセキュリティ政策に関する公衆や消費者への説明責任を果たし、かつ、開かれた熟慮型民主主義のもとで将来の様々な供給リスクと国民の選好にも配慮した適切なエネルギー政策の形成に役立てていくことを目的として、構成したものである。

このフレームにおける社会経済的波及影響分析は、大きく二つのプロセスに分かれる。第1の国際市場プロセス分析の狙いは、当該リスクが国際エネルギー市場を介して、わが国の輸入燃料の価格や量にいかなる変動をもたらしてきたか、歴史的に検証すること、及び今後、いかなる影響を及ぼすと見込まれるか、将来のシナリオ分析を行う点にある。

また、第2の国内市場プロセス分析の狙いは、このような輸入燃料の価格や量の変動に対して取られてきた過去30年の波及影響低減対策（電源多様化、石油代替等）の効果を歴史的に検証すること、及び、将来のリスク低減型シナリオ分析を行い、開かれた参加型政策形成のもとで、公衆の選好にも配慮した適切なエネルギー政策の形成やその選択に役立てていく点にある。図1.2.3は、過去30年間の電源多様化政策の経済効果分析の試行結果を歴史的検証の参考イメージとして示したものである。

$$P \times D(P) = \left[ \sum_G (v_G \times X_G + f_G \times K_G) + C_0 \right] (1 + R_p)$$

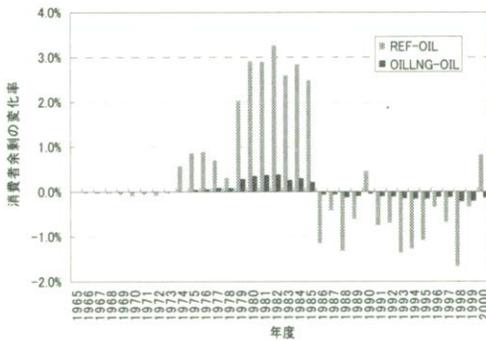
$$D(P) = \sum_G (X_G + X_0) (1 - \eta)$$

$$CS = \frac{1}{2} \times D(P) \times \left( \frac{A}{B} - P \right) - D(P) \times P$$

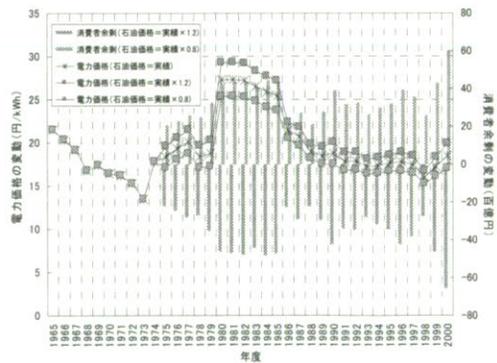
$v_G$ : 電源Gの可変費（燃料コスト分）  
 $f_G$ : 電源Gの固定費単価（設備コスト分）  
 $C_0$ : 発電以外のコスト（流通設備コストなど）  
 $R_p$ : 適正利潤率

$X_G$ : 電源Gの発電電力量（G=石油火力、ガス火力、石炭火力、原子力）  
 $X_0$ : その他電源の発電電力量（その他火力、地熱・水力他）  
 $D(P)$ : 電力需要

$P$ : 電力価格  
 $\eta$ : 送配電損失率



電源多様化による消費者余剰への効果



石油価格変動の消費者余剰影響

資料) 川島啓、伊東慶四郎、内山洋司 (2004) 「政策科学研究所自主研究資料」

図 1.2.3 わが国における電源構成の多様化政策の経済効果分析のイメージ (参考)  
 —過去30年間の消費者余剰や価格変動影響の計測事例—

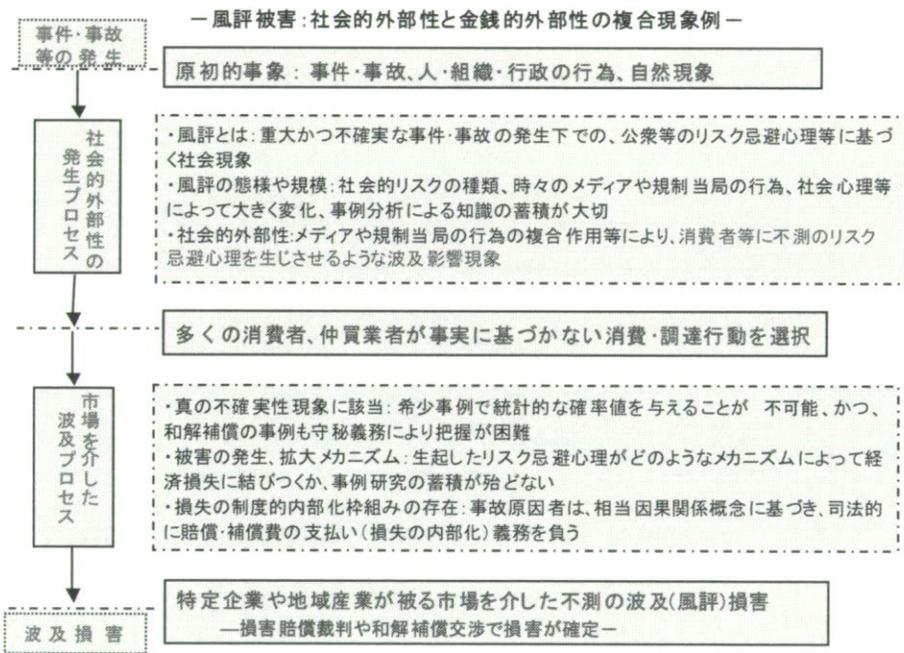
(2) 概念枠組考察事例-2: 社会的・政治的なリスク領域

—重大事件・事故時における社会経済的影響の発生・波及プロセス

ここでは、社会的外部性と金銭的外部性の複合現象例として位置づけられる重大事件・事故 (JCO 臨界事故時の風評 (波及) 被害、O-157 カイワレ大根説事件、所沢野菜ダイオキシン汚染報道事件等) 時の社会経済的影響の発生・波及プロセスの特徴を図 1.2.4 に示す。

ここでの社会経済的影響の発生・波及プロセスは、大きく二つのプロセスに分かれる。最初の社会的外部性の発生プロセスは、公衆にとって重大かつ不確実な事件・事故のもとでの、公衆等のリスク忌避心理に基づく社会現象である。この現象は、当該事件・事故の当事者のみならず、メディアや規制当局の行為との複合作用如何により、消費者等に不測のリスク忌避心理や行動を生じさせ、大きな社会問題化する恐れを秘めている。

また、後半の市場を介した波及影響プロセスは、重大事件・事故の発生・波及プロセスそのものが偶発的で希少事例であるのみならず、地政学的要因によっても大きく左右されるため、経験的事実に基づく統計的な確率値を与えることができない。それ故、予測（事前評価）は困難で事後評価が基本となる。事故原因者や汚染原因者は相当因果関係概念に基づき、司法的に賠償・補償費の支払い義務を負うが、不測の波及損失の拡大に寄与したアクターの行為に係わる費用負担責務については定かではなく、損害賠償の制度的あり方に関する検討が、今後の重要課題として残されている。



Keishiro Ito, ©2003 All rights reserved.

図 1.2.4 重大事件・事故時における社会経済的影響の発生・波及プロセス（伊東, 2003a）

### （3）概念枠組考察事例－3：社会的・制度的なリスク領域

－低レベル放射線による健康リスク推計への線形閾値無し仮説適用の社会的外部性

欧州委員会の ExternE（エネルギー外部性）プロジェクト研究の一環として、ドイツはその国別実施研究において、原子力発電所（1375MW の PWR）重大事故時の外部性評価を行った。このドイツの国別実施報告書では、「ICRP の線形リスク係数を用いると、（ドイツの原子力発電所において重大事故が発生した場合）、一つの重大事故が、事故後 200 年間に（欧州全域の）3.35 億人の被ばく人口ベースで、数万もの人に致死性ガンの発生を引き起こすことになる。」（EC, 1999b）と指摘している。問題は、この推計結果が、広域・長期の極低レベル域の放射線被ばくに、放射線防護上の線形閾値無し（LNT）仮説を適用する限り、論理必然的に出てくるものである点、また、社会心

理学や政治学からみて、原子力の平和利用に対して極めて重大な影響を及ぼすこの結果が、何の限定もまた代替案もなしに、欧州委員会の研究プロジェクトの成果として、社会に公表されてきた点にある。

しかし、低レベル放射線の健康影響について、松原（2003）は、近年の生体防御機構に関する先端的なライフサイエンスや基礎医学の研究成果を踏まえ、「低線量域においては、放射線防護の原則と放射線の健康影響の実態とは別であり、専門家や国はそれらを区別して、それぞれを的確に公衆に説明する必要がある」と指摘している。

それ故、リスク論に基づく次世代のエネルギー外部性研究においては、この LNT 仮説の現実の健康リスク評価への適用に伴い、社会的心理的及び政治的に誘発される社会的外部性の典型的な事例の一つとして明確に位置づけ、規制の影響評価の観点から多角的な検討を深めていくこと、また、様々な形で公衆との対話や異分野専門家との熟慮の場を設け、放射線に対する社会の理解を深めていくことが求められる。

表 1.2.2 は、このような対話の材料として、LNT 仮説の現実の健康リスク評価への適用が、いかに重大な社会的・政治的な影響や経済的な波及影響をもたらすか、またその影響を防止するためには、低レベル放射線等によるがん等の発症機構やその多重防御機構の解明とコミュニケーションの推進等が求められることを示したものである。

表 1.2.2 放射線防護上の線形閾値無し仮説の適用による社会的経済的波及影響と対処方策  
—技術・生命・社会システムを俯瞰した新たな多重防御理念の形成—

原初的契機 (背景要因)	外部性の原因 (行為要因)	学会、政府及び企業の社会的責務		
		影響経路分析と情報の開示		健康リスク評価システムの開発と公衆との対話
		社会的・政治的過程	継起的経済過程	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・高線量放射線被ばくによる健康影響の深刻さと影響の線型性(広島・長崎の原爆被爆者の疫学調査結果)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重大事故時等の広域・低線量被ばくによる現実の健康リスク推計に LNT 仮説を適用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・社会運動過程における政治的喧伝材料としての意図的使用</li> <li>・一般公衆の原子力リスク忌避意識の高まり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電源立地・運用事業の遅延・中断に伴う投資回収損失等の発生と消費者負担の増加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低レベル放射線によるがん等の発症機構や多重防御機構の解明とコミュニケーションの推進</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・低線量域での健康影響の科学的不確実性と疫学による統計的検定の困難性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・過大なリスク評価値の算定とその無限定・代替案無し公表(例: EC-ExternE- 独自の重大事故時の影響試算例: 数万人もの致死性がん患者が発生)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・行政・企業と公衆との関係の硬直化、原子力規制制度改革の立ち遅れ</li> <li>・度重なる事故・事件の発生と信頼の崩壊(規制と遵守の失敗)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・事故時の過度のリスク回避行動による不測の風評被害の発生と経営リスクの顕在化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・健康文化の醸成、予防医学の振興、がん治療技術向上支援等</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・低線量放射線による健康リスク評価への放射線防護上の線形閾値無し(LNT)規制仮説の不適切な適用</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子力施設の立地や運用の困難化</li> <li>・安定供給上の支障</li> <li>・環境政策目標(CO2)達成の困難化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・環境政策目標達成上の資源利用効率の低下に伴う消費者・国民の費用負担の増加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・早期検診・早期治療の効果、ガン治療技術・治癒率の現状等の統計調査と情報の開示</li> <li>・食品・化学物質等の他のリスク評価との連携</li> <li>・放射線等による健康リスク評価システムの研究開発と公衆との対話の場の創設</li> </ul>

資料) 伊東慶四郎 (2003) 「低線量放射線の健康リスク評価システムの開発について」、Atoms for Peace for Japan/Asia 会議 (日本原子力学会主催) での講演資料 を一部訂正

なお、前述のように、チェルノブイリ事故後のソ連最高幹部会議による LNT 仮説に基づく ICRP の線量限度とそれに基づく強制移住等に係わる介入基準の過度の強化は、WHO がそのピア・レビューにより、チェルノブイリ事故の最大の公衆衛生上の問題として提起した精神的・心理的な健康影響 (WHO, 2006b) の最も重大な原因の一つとなっている。また、IAEA が同事故の社会経済的影響 (IAEA, 2006a) において提示した数千億ドルにも上る巨額の経済損失の、最も重大な原因の一つでもある。

一方、WHO は、前述のように、その fact sheet (WHO, 2006a) において、チェルノブイリ事故の影響を受けた地域住民の事故による放射線被ばく量は殆どが世界の高い自然放射線地域における被ばく量以下であるが、この高い自然放射線地域における被ばくにより有意な健康リスクが増加したとの証拠は見いだされていないと指摘している。

それ故、LNT 仮説とそれに基づく ICRP の ALARA の原則や線量限度問題については、規制の影響評価の典型的な対象事例として取り上げ、新たな放射線防護上の規範概念の創設に向けて、その社会心理的、政治的、及び経済的な波及影響も視野にいたした総合レビュー作業を展開し検討を深めていくことが、第 2 の Atoms for peace 時代における放射線防護の在り方に対する歴史的な要請として問われ始めてきているものといえる。

### 1.2.6. まとめ

2002 年から開始された「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会の評価研究活動はエネルギー・原子力政策に関連したさまざまな評価研究のレビューと概念枠組の構築及び情報交換の場として、また、学際的な共同研究の機会を探る場として、ボランティアな形で 4 年間にわたって展開されてきた。その結果、今後の課題として次世代の外部性 (環境・健康・社会経済影響及びその低減効果) に関する総合評価研究を中・長期の国家的な研究プログラムとして形成・推進し、社会と共進化が可能な原子力政策のマネジメント枠組の確立を支援していく必要性の高いことが明らかとなってきた。

特に、低レベル放射線が一般公衆の健康に及ぼす影響の評価や放射線防護上の LNT 仮説の社会的外部性とその低減方策に関する検討は、これまでわが国では看過され気味であった。しかし、国際的にはチェルノブイリ事故後 20 年間の地域住民の放射線被ばくとその健康影響の現実、及び強制移住等の精神的・心理的影響や社会的・経済的影響の現実に関する国連の専門家グループによるピア・レビューやエキスパート・レビュー結果 (WHO, 2006a・2006b ; IAEA, 2006a・2006b) を踏まえ、第 2 の Atoms for Peace 時代に向けた最重要ミッションの一つとして浮上してきている。

また、エネルギー・電力の安定供給上のリスク及び核拡散・核テロ等の安全保障上のリスクの波及影響やその低減方策の検討、及びリードタイムの長い原子力関連の研究開発施策に関する投資効果や波及効果の分析・評価システムの開発等も、ギガトレンド時代における各国の一般公衆への説明責任や効果的・効率的な政策の立案とその運営管理上、ここでの総合評価研究の重要課題として位置付け、多角的な検討を深めていくことが求められてきている。

このような重要課題をめぐる学際的な総合評価研究プログラムは、学会間連携、産学官連携、府省連携、及び国際連携のもとで、多角的・重層的に立案し推進していくことが求められる。それ故、今後、各界でその検討を深めるとともに、適切な予算措置を講じて、その連携を段階的に築き上げていくことが期待される。

参考文献

- (1) AS and NAM(2005), “Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation.”, Joint Report of the Académie des Sciences (Paris) and of the Académie Nationale de Médecine , March 30, 2005
- (2) EC(1999a), ExternE ; Vol. 7 Methodology 1998 update, European Commission
- (3) EC(1999b), ExternE ; Vol. 8 Global Warming, European Commission
- (4) EC(1999c), ExternE ; Vol. 10 National Implementation, European Commission
- (5) EC(2005a), ExternE ; Methodology 2005 update, European Commission
- (6) EC(2005b), Impact Assessment Guidelines, European Commission
- (7) IAEA (2006a), Chernobyl’s Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, The Chernobyl Forum: 2003–2005 Second revised version.
- (8) IAEA (2006b), Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience, Report of the UN-Chernobyl Forum Expert Group ‘Environment’
- (9) ICRP Com.1 TG (Dec. 10, 2004), “Low-dose Extrapolation of Radiation-Related Cancer Risk: Draft.”
- (10) IER (1997) ; ExternE National Implementation-Germany
- (11) I. V. Filyushkin (1996), “The Chernobyl Accident and the resultant long-term relocation of people”, Health Physics Vol.71 No.1
- (12) J E Berry et al. (1998) ; Power Generation and the Environment - a UK Perspective, Vol. 1, AEA Technology.
- (13) Marshall, A.(1920), Principles of Economics, 8th ed., London
- (14) O. Hohmeyer et al. (1988) ; Social Costs of Energy Consumption, Springer-Verlag.
- (15) Pigou, A.C. (1932), The Economics of Welfare, 4th ed., London
- (16) Sen. Amartya K. (1970), Collective Choice and Social Welfare, Holden-Day Inc. (志田基与師訳(2000)「集合的選択と社会的厚生」、けい草書房)
- (17) Tibor Scitovsky (1954), Two concepts of external economies, The Journal of Political Economy, April 1954
- (18) US-DOC-NIST (2003), A Toolkit for Evaluating public R&D Investment-Models, Methods and Findings from ATP’s First Decade, NIST GCR 03–857, p. 96.
- (19) US-DOE/EIA (Oct. 1998), Impacts of the Kyoto Protocol on U.S. Energy Markets and Economic Activity.
- (20) US-DOE (2005), “Low Dose Radiation Research Program”, DOE Radiological Protection Workshop, Office of Science, U.S.DOE, Nov. 2005
- (21) US-EPA(1999), The Benefits and Costs of the Clean Air Act: 1990 to 2010, EPA Report to Congress
- (22) US-HCS (1998), Unlocking our future : Towards a New Science Policy, The House Committee on Science
- (23) US-NRC (2006), “Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2”, Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Board on Radiation Effects, Research Division on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academies.
- (24) WHO (2006a), Health effects of the Chernobyl accident : an overview
- (25) WHO (2006b), Health Effects of the UN-Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes,

## Report of the UN-Chernobyl Forum Expert Group 'Health'

- (26) 赤井 伸郎, 金本 良嗣(1999)「第4章 費用便益分析における地域開発効果」、『費用便分析に係わる経済学的基本問題』、社会資本整備の費用効果分析に係る経済学の問題研究会、1999年11月
- (27) 池田三郎(2003)「新規環境・技術リスクへの社会的ガバナンス」、第4回社会技術研究フォーラム資料
- (28) 池本一郎(2003)「京都メカニズムと原子力」、AESJ 第4回外部性研究専門委員会報告
- (29) 市川節子(2002)「欧米での大気汚染物質に対する健康影響の定量評価 および我が国への適用と今後の研究課題」、AESJ 第2回外部性研究専門委員会報告
- (30) 伊東慶四郎(2000)「総論：エネルギー外部性研究の概要」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (31) 伊東慶四郎(2003a)「リスク論に基づくエネルギー外部性研究の範囲とその現状」、AESJ 第5回外部性研究専門委員会報告
- (32) 伊東慶四郎(2003b)「低線量放射線の健康リスク評価システムの開発について」、Atoms for Peace for Japan/Asia 会議（日本原子力学会主催）
- (33) 伊東慶四郎(2005)「リスク論に基づくエネルギー政策評価に係わる新たな学術研究領域の創設に向けて」、AESJ「2005年春の年会」総合講演「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会
- (34) 伊東慶四郎(2006)「エネルギー外部性研究の概要と今後の推進方向-第2のAtoms for Peace 時代への戦略的対応-」、(社)原子力産業会議第457回総合企画委員会講話用資料
- (35) 植田和弘(1996)「環境経済学」、現代経済学入門、岩波書店
- (36) 内山洋司(2000)「環境影響評価の方法論」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (37) 大塚直(2000)「東海村臨界事故と損害賠償」、ジュリスト 2000.10.1 (No.1186)
- (38) 岡敏弘(2002)「第4章 外部負経済論」、岩波講座「環境経済・政策学」第1巻 環境の経済理論
- (39) 川島啓(2000)「重大事故リスクの評価」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (40) 神田啓治, 入江一友(2002)「エネルギー安全保障」、AESJ 第3回外部性研究専門委員会報告
- (41) 岸本充生(2002)「大気汚染物質による健康影響の定量評価および金銭的評価の現状と課題」、AESJ 第1回外部性研究専門委員会報告
- (42) 田中辰雄, 矢崎敬人, 他(2003)、「ネットワーク外部性の経済分析」、競争政策研究センター共同研究, 2003.9
- (43) 關哲雄, 庭田文近(2000)「外部費用評価の理論的側面-環境の経済的評価手法」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (44) 高橋真吾(2002)「ソフトシステムズ・アプローチの動向」、AESJ 第2回外部性研究専門委員会報告
- (45) 谷口武俊(2000)「わが国における発電システムの外部性評価の実施に向けて」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (46) 時松宏治(2002)「エネルギー環境モデルとCO2削減評価」、AESJ 第3回外部性研究専門委員会報告
- (47) 西川雅史(2002)「住民投票の限界と外部性」、会計検査研究 No.26
- (48) 松川勇(2000)「外部費用評価の実証的側面：公衆の健康損害に関するエネルギー外部性の評価手法」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (49) 松原純子(2001)「低線量の放射線影響の実態」、日本原子力学会誌 Vol.43, NO.8
- (50) 松原純子(2003)「日常の放射線被ばくと放射線影響の実態」、私たちの健康と放射線被ばく-低線量の放射線影響を考える、内閣府原子力安全委員会主催討論会講演要旨集、平成15年3月14日



# 第2章

## 環境影響と環境外部性

---



## 2.1. ExternE プロジェクト研究の詳細分析とわが国への示唆

伊東 慶四郎、川島 啓、勝木 知里

### 2.1.1. 研究の歴史的背景と目的 (伊東,2002)

#### (1) ExternE 研究の歴史的背景

近年、エネルギーシステムの外部性、なかでも発電システムの外部性が、様々な角度から注目を集め始めてきている。それは、過去 20~30 年間の環境関連諸科学の進歩や経験の蓄積により、エネルギー利用が、人の健康、自然生態系及び人工環境を含む広範な受容体に様々な損害を引き起こすものであることが、次第に明らかになってきたからである。しかも、これらの損害の多くが、当該エネルギーの市場価格に反映されていない外部費用であり、それが各国の環境政策や競争政策の決定過程に、また社会的な選択の過程に適切な形で反映されていないのではないかと、この懸念が高まってきたからである。また、このような動向を背景にして、わが国でも電力市場の自由化、環境税や排出権取引等の検討、エネルギー・環境規制の政策評価等の様々な分野でエネルギー外部性に対する関心が急速に高まってきたからである。(EC,1999a)

しかし、この問題に立ち入るにあたっては歴史的に留意しておくべき点がある。それはこの問題が、ピグーの外部不経済論などエネルギー・環境政策の原点ともいえる重要な課題でありながら、その計測の困難さ故に、過去数十年もの長きにわたって保留され続けてきた課題であるという点である。それが、近年の欧州連合のエネルギー外部性 "ExternE : Externalities of Energy" 研究 (EC,1999a) において、また米国環境保護庁の修正大気浄化法 1990 に基づく環境規制の費用便益分析 (US-EPA,1997 & 1999) 等において、何故、計測可能になってきたのであろうか。それは、かつて環境影響の解析や損害の価値付けを阻んでいた科学的知識の欠落や不確実性の壁が、近年の情報処理技術の飛躍的進歩を背景とした種々の環境影響解析モデルの開発やデータベースの整備、低濃度域の曝露・応答関数の決定に必要な膨大な疫学研究成果の長期的蓄積や広範な関連諸科学の進歩、及び統計的生命の価値や環境資産等の価値付けに係わる環境経済学の理論や手法の発展等により、次第に克服可能となってきたからである。

また、東西冷戦の終焉期を迎え、従来看過されがちであった広域・複合型大気汚染の健康被害、チェルノブイリ原発事故等の発電システムに関する様々な重大事故、及びオゾン層の消滅や気候変動などの地球規模の環境問題が、国際政治の表舞台でも取り上げられるようになり、エネルギー外部性、なかでも人の命や健康、農林漁業、自然生態系等に及ぼす影響の評価に向けた社会的ニーズが急速に高まってきたからである。

#### ① 広域・低濃度複合汚染の健康影響に関する科学的立証の困難さ

大気汚染問題が、典型的な外部性問題の一つとして、OECD 主要国で共通の政治的争点になり始めたのは 1960 年代である。それは、工業化・都市化の進展と大量消費社会への移行に伴い、これら諸国における化石燃料消費量と大気汚染物質排出量が急激に増加し、深刻な健康被害の発生や大気汚染の差し止め訴訟 (わが国では四日市・川崎・尼崎等) が頻発したからである。

この結果、1970 年頃、米国では国家環境政策法が制定され、わが国でも環境政策法体系の整備が図られた。また、1972 年には国際的な環境倫理や越境汚染に対する国際法整備を訴えた国連人間環境会議の「人間環境宣言」が、1974 年には OECD から「汚染者支払原則の実施に関する理事会勧告」が出されるにいたった。この勧告は、その生産ないし消費の過程において環境汚染を引き起こす財やサービスの価格に、「公的機関により定められた受忍可能な状態に環境を保つ」上で必要な諸措置の実施費用を反映させることにより、環境資源の合理的利用と国際経済の適切な競

争秩序の維持を両立させようとしたものであった。この結果、OECD 諸国の大気汚染状況は次第に改善されるにいたった。

しかし、この勧告は、反面、各国の政治経済的調整の産物としての「受忍可能な状態に環境を保つ上での環境基準や排出基準」に抵触しない限り、汚染負荷は相当量排出しても構わないことを意味していた（例えば、超高層煙突による広域・越境拡散、無数の移動排出源による汚染負荷など）。その結果、比較的低濃度ではあるが広域の複合大気汚染の進行を押しとどめることができず、欧米のような大陸国家（中国も同様）、特に米国においては問題が深刻化し、慢性疾患を主体とした膨大な健康被害の発生を招くこととなった。そして、このような事態の進行を許した背景要因として指摘されるのが、広域の低濃度・複合汚染による健康影響に関する科学的立証が、当時の時点では著しく困難であった点である。

### ② チェルノブイリ原発事故と O. Hohmeyer らの先駆的研究

一方、中東戦争を引き金とした石油危機の発生（1973）は、エネルギー安全保障とコスト競争力の両面から主要国に原子力発電の導入を促した。だが、TMI 原発の炉心溶融事故（1979）や体制災害としてのチェルノブイリ原発事故（1986）の発生は、重大事故を最大の外部性要因としてクローズ・アップし、原子力の平和利用に複雑な影を投げかけるにいたった。特に、ドイツの O. Hohmeyer らがチェルノブイリ原発事故の2年後に刊行した「エネルギー消費の社会的費用」（O. Hohmeyer et al., 1988）は、次の点で衝撃的なものであった。

それは、まず、この研究の基本スタンスが、論理的には正当なピグーの外部不経済論（Pigou, A.C. 1932）の見地、すなわち深刻な市場の欠陥により相当の社会的費用が発生し、資源の最適配分が保証されないような場合には、政府は適切な政策手段によりそのような費用を内部化すべく市場メカニズムを正さなければならない、との観点に立っていた点にある。さらに、この研究の成果が、従来困難とされてきた発電システムの外部費用を系統的に推計した最初の重要な試みの一つであったからである。一方、この研究で実際に適用された外部費用の推計手法は、具体的な技術的諸条件やサイト条件の違いを捨象し、しかもアプリオリな枠組みや粗い仮定のもとで、極めて過大な、あるいは過小な推計を恣意的に行い、社会や政策決定者の判断を決定的に誤らせかねないような結論を導き出していたからである。

### ③ グローバルな気候変動影響への警鐘

さらに、欧州においては、ソ連による東欧への大量の核ミサイルの配備と NATO による対抗ミサイルの配備決定（1979）、レーガン政権による戦略防衛構想（1983）と西独議会における核ミサイルの国内配備決定など息詰まるような限定核戦争危機が顕在化した。このような状況に警告を発するため、ユネスコ傘下の環境問題科学委員会は、世界の科学者を結集して、核のグローバルな気候変動影響のシミュレーション結果を「核戦争の環境への影響」（核の冬）と題して1986年に公表、引き続き同年、「温室効果・気候変動・生態系」を出版、温室効果ガスによる気候変動に警鐘を鳴らした。また、翌1987年、「環境と開発に関する世界委員会」は「Our Common Future（我ら共通の未来）」を公表、さらに、1988年には気候変動問題が国際政治の表舞台（トロント会議）で主要議題として採り上げられ、IPCC の設立にいたった。

これらは、欧州委員会が米国エネルギー省の協力も得つつ様々な発電用燃料サイクルの環境外部費用推計手法の組織的な研究開発の立ち上げを迫られるに至った主な背景である。なお、米国議会は、その前年（1990年）、修正大気浄化法1990により、同国の環境保護庁に対して環境規制の費用便益分析の実施とその議会への報告を義務付けていた。

## (2) ExternE 研究の目的

欧州委員会は、発電システムに関するエネルギー外部性 (ExternE) 研究を、1991～98 年の 7 ヶ年、3 期にわたって展開した。第 I 期 (91～92) は、欧州委員会と米国エネルギー省の共同研究として、環境影響の解析や価値付け手法など発電システムの外部費用計測方法論の開発やデータベースの整備に重点がおかれた。その後、外部性研究は、欧州連合設立条約、欧州委員会の白書「成長、競争力、雇用及び 21 世紀への進路」や第 5 次環境行動計画「持続可能性に向けて」等における明確な位置づけのもとで推進されることになった。この第 II 期 (93～95) には、主な発電方式 (石炭と褐炭、石油、ガス、原子力、水力、風力) を対象とした方法論の継続開発と適用可能性の実証研究が行われた。そして第 III 期 (96～97) には、欧州 15 カ国から 50 以上のチームが参加し、方法論の拡張検討と外部性研究の方法論の「国別実施」が行われ、各国や欧州連合における現実の政策形成の支援に役立てられる段階に入った。

この欧州委員会におけるエネルギー外部性 (ExternE) 研究の目的は、概ね、以下の 3 点におかれているが、社会的にみて特に重要な点は、米国下院科学委員会が打ち出した社会のエネルギー選択に係わる適切な意思形成の支援にあるものといえる。

第 1 は、大気汚染物質、温室効果ガス、放射性物質等の環境影響の解析とその価値付けに必要な統合的な方法論や解析モデルの開発、曝露・応答関数の系統的な整備、及び広域の環境データベースの構築である。これは従来計測が困難であるとされてきた限界外部費用の定量化を目指したものである。

第 2 は、様々な発電システム増設時の外部費用評価にこの方法論を適用し、社会の適切な意思形成の支援に役立つ資料を提供する点である。この点は、米国の下院科学委員会が "Unlocking Our Future: Towards a New Science Policy" (1998) において打ち出した安全・健康・経済に続く 21 世紀の科学の第 4 の役割—社会の適切な意思決定の支援—に関するものである。

第 3 は、エネルギー源や技術の社会的政策選択過程における外部費用への配慮、費用便益分析による様々な政策手段の評価や最適化の支援などである。

### 2.1.2. 広大な研究の範囲とシステム開発の 3 つのフェーズ (伊東, 2002)

#### (1) 外部性研究の範囲—広大な範囲

欧州委員会が、米国エネルギー省の協力も得つつ、ExternE の解析・評価システムの研究開発に 7 ヶ年もの歳月を要した理由は、研究対象領域や解析・評価方法論面からみたその俯瞰性、統合性、先端性、不確実性、広域性、長期性など、環境外部性の評価面では、従来、前例のない範囲の壮大さと奥深さによっている。従って、我が国における外部性研究の推進にあたっては、これらの点に充分留意して対処していくことが望まれる。このような ExternE 研究の範囲面からみた特徴は、概ね、以下のとおりである。

##### ① 発電システムの検討範囲

ExternE プロジェクトは、立地点や技術を特定した燃料サイクルに関する「揺りかごから墓場まで」の完結した分析に取り組んできている。事故時の影響も含め、燃料の採掘と処理から発電と廃棄物処理にいたる一連のプロセスを、そして幾つかの燃料サイクルに対しては送電まで考慮に入れている。石炭の燃料サイクルでは、採鉱、石灰石の採石 (燃焼ガス脱硫用)、石炭や廃棄物等の輸送、火力発電所の建設・運転及び廃棄物の処理、送電が評価項目として採り上げられている。重要な外部性要因であると見込まれる場合は、建設資材の製造や大量の資材と人の輸送に関連した環境負荷や健康影響も考慮される。これは太陽光発電や風力発電等の場合で、その外部性計測手法は LCA とほぼ同様である。

1996-97年の国別実施プロジェクトでは、15ヶ国が60ケースを超える発電システムの検討を行った。ここで取り上げられた燃料は次の12種類である。

- (a) 化石燃料：石炭、褐炭、ピート、石油、オリマルジョン、天然ガス
- (b) 原子燃料：軽水炉（PWR）
- (c) 再生可能エネルギー：バイオマス、水力、風力、太陽光（PV）
- (d) その他：都市ゴミ

## ② 影響要因の検討範囲と本検討への示唆

このExternEプロジェクトにおいて環境外部性は広義に定義され、人々の厚生に影響を及ぼす環境関連活動によってもたらされる全ての負荷を含んでいる。それ故、この用語は公衆や職業人の健康、農作物、建築材料、騒音、景観、生態系等に及ぼす汚染物質の影響を含んでいる。そして、現状では定量化が困難であるとしても、帰結としての生態系の変化がレクリエーションや輸送等の様々な可能性に、また生物多様性の保全にいかに関与するか、まで検討対象として取り上げている。この分析作業における影響と損害は限界影響や限界コストベースで算定され、各発電システムの新たな増設投資の参考資料として役立つようになってきている。

## ③ 方法論や評価対象面からみた研究範囲

ExternEにおける発電システムの環境外部性の解析と評価は、現代社会の主要な解析・評価手法の多くと密接に関わっているのみならず、現状では不確実性が大きいため今後も先端的な学術研究を展開していくことが不可欠な多くの研究分野と深く関わっている。

- (a) 各発電システムのライフサイクルインベントリーの解析手法
- (b) 広域の大気拡散・反応・移送モデル等の開発と環境データベース等の構築
- (c) 種々の環境負荷が農作物・建造物・森林・生態系等に及ぼす影響メカニズムの評価
- (d) 種々の環境負荷が人の健康に及ぼす影響メカニズムの評価：疫学、基礎医学、遺伝学
- (e) 発電等関連要素技術の確率的リスク評価やリスクコミュニケーション手法
- (f) 原子力重大事故に関する公衆の社会心理学的、政治・経済学的リスク評価のあり方
- (g) 喪失余命の価値や状況依存型価値など人の命や疾病・傷害、環境財等の価値付け手法
- (h) グローバルで不確実な気候変動影響の解明と損害のシミュレーション手法

## (2) 外部性（ExternE）研究の三つのフェーズ

ExternEプロジェクト研究は1991年から1999年まで9年間にわたって展開されてきたが、この内、発電システムの環境外部性計測システムの体系的整備がほぼ完了し、国別適用研究が実施された第Ⅲ期（1996-98年）までの概要は以下の通りである。なお、この後、1998-99年には輸送システムに焦点をあてた研究が継続実施されている。

### ① フェーズⅠ：1991～1992年

1991年2月、欧州共同体委員会と米国エネルギー省の合意に基づき、発電用燃料サイクルに関する外部性計測システムの共同研究開発プロジェクトとして開始された。米国側からは、オークリッジ国立研究所（ORNL）とResources for the Future（RFF）が参加した。研究開発の目的は、電力生産に伴う外部性比較分析の方法論を開発し、8つの燃料サイクル（石炭、石油、天然ガス、原子力、太陽光、風力、バイオマス、小規模水力）及び4つの省エネルギーオプションの外部性を評価する点におかれた。原子力、太陽光、風力は欧州側が、石炭と省エネルギーオプションは両者がそれぞれ、その他は米国側が担当した。この段階で重点のおかれた事項は、燃料サイクルの外部性評価方法論、様々なDose Response関数の情報収集、損害の経済的価値付け研究成果の収集と分析、及び石炭燃料サイクルや原子燃料サイクルの影響経路や影響評価点の確定などである。

## ② フェーズⅡ：1993～1995年

フェーズⅠの共同研究を引き継いで、欧州側で研究が続けられた。フェーズⅠに着手された方法論やデータベースの開発や整備が行われ、各燃料サイクルに関する方法論の適用可能性を実証した6冊の報告書（サマリー、方法論、石炭と褐炭、石油とガス、原子力、水力と風力）が刊行された。

- ・ European Commission DG X II Science, Research and Development (Sept.1995) ,  
"ExternE: Vol. 1, SUMMARY"
- "ExternE: Vol. 2, METHODOLOGY"
- "ExternE: Vol. 3, COAL & LIGNITE"
- "ExternE: Vol. 4, OIL & GAS"
- "ExternE: Vol. 5, NUCLEAR"
- "ExternE: Vol. 6, WIND & HYDRO"

## ③ フェーズⅢ：1996～1998年

フェーズⅢでは、1996年1月から1998年半ばにかけて、欧州15ヶ国から50以上のチームが参加して、三つのプロジェクト研究が展開され、1999年に以下に示す成果が内部報告書として取りまとめられた。

- ・ European Commission DG X II Science, Research and Development (1999) ,  
"ExternE: Vol. 7 : Methodology 1998 Update"
- "ExternE: Vol. 8 : Global Warming Damages"
- "ExternE: Vol. 9 : Waste, PV, NPT and End Use Technologies"
- "ExternE: Vol. 10 : National Implementation"

## (a) コア・プロジェクト：計算枠組みの拡張と方法論の改善

このプロジェクトでは、計算枠組みの維持管理、手法の改善、適用範囲の拡大、及び意思決定への適用研究などが行われ、次の中間報告書が取りまとめられている。

- ・ ExternE Core Project (Dec.1997) , "Extension of the Accounting Framework: Final Report"

## (b) 国別実施プロジェクト

このプロジェクトは以下の点を目的として実施され、結果の互換性を保証するための統一された外部性の解析手法としてエコセンス・モデルが用いられている。

- ・ ExternE 方法論の全ての国での適用と普及
- ・ 様々な国の発電システムをカバーした比較可能なデータの作成：国別集計用
- ・ 欧州連合全体のデータの外部性データベースへの追加
- ・ 意思決定や政策形成プロセスへの適用可能性を検討するためのデータの提供

この国別実施には、欧州15ヶ国の研究チームが参加し、それぞれ各国の主な燃料サイクルの外部コストを試算した。主要国の報告書は以下のとおりであり、この内、多排出源エコセンス・モデルが適用された英国と独については、詳細なデータベースが添付され、算出基礎のより詳細な検討が可能である。

- ・ U.K. (June, 1998) , " Power Generation and the Environment - a UK Perspective".
- ・ Germany (Nov. 1997) , " ExternE National Implementation".
- ・ France (Jan.1998) , " External Cost of Energy : Application of the ExternE Methodology in France".
- ・ Denmark (Dec. 1997) , " ExternE National Implementation".
- ・ Austrian (Dec.1997) , "The National Implementation of the ExternE Accounting Framework".

## (c) 輸送プロジェクト

このプロジェクトでは、ExternE の方法論の適用を輸送部門のエネルギー利用システムにまで拡張した。この研究では主に適切な方法論の開発と多くの事例研究を用いて適用可能性を実証する点に焦点が当てられ、その成果は輸送に関する予備的報告書（小論）として取りまとめられた。なお、この研究は、1998-99年に継続実施されている。

## 2.1.3. 環境外部性の解析・評価方法論－影響経路アプローチ（伊東,2002）

ここでは、以下、ExternE 等における発電システムの環境外部性評価の方法論の概要を紹介する。

ExternE における環境外部性評価の方法論の基本をなす影響経路手法"Impact Pathway Approach"は、欧州委員会と米国エネルギー省が系統的な研究開発を積み重ね確立してきたものである。この手法は、電源立地点を中心とした広域の環境データベースや特定の燃料サイクルの技術データを、汚染物質の拡散モデル、受容体の分布、線量・応答関数等に関する詳細な情報とともに使用する。それは、燃料サイクルの各段階の活動による物理的・化学的・生物学的及び社会的な影響を計算することができるようにするためである。そして、ここで得られた影響評価値に、統計的な喪失余命の価値（VOLY）や状況依存型価値付け法（CVM）等の経済的価値付け手法を適用することにより、金銭的な損害費用（外部コスト）を算定している。

図 2.1.1 に示す影響経路手法は、追加排出量 1 単位あたりの損害額、すなわち限界的な環境損害費用の推計が可能のため、様々な政策手段の費用便益分析やその最適化検討など、広範な政策課題への適用が可能である。この図は、主に排ガスや排水等の環境汚染物質による外部性の解析を目的とした影響経路手法の代表的なフローを示したもので、各ステップの特徴は以下に示すとおりである。

## ① 汚染影響のシミュレーション

大気圏や水中における汚染物質等の拡散・伝搬や濃縮・反応等による物理・化学的諸量の変化を推計する。平常時のバックグラウンド濃度、各種の拡散・移送・反応モデル、立地点の気象・水象データ、風況・流況マップなどが必要となる。

ここで、留意すべき点は、大気汚染による健康損害の範囲が、図 2.1.2 に示すように広域にわたる多くの排出源による複合汚染の結果として数千 km にも及び、従来の環境アセスメントで理解されてきた健康影響をはるかに上回るものであることが明らかになってきた点である。

これは、移動排出源も含め様々な排出源からの亜硫酸ガスや窒素酸化物、その二次生成物質である硫酸塩や硝酸塩等からなるエアロゾルや粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）、及び窒素酸化物起源のオゾンが、大陸全体を覆う広域・低濃度・複合汚染状況をもたらしていること、その結果、大気汚染による呼吸器系の慢性的な健康被害が非常に数多く発生していることが、近年の様々な環境科学研究－物理的性状研究、大気環境調査、疫学研究等－を通じて明らかになってきた点によっている。

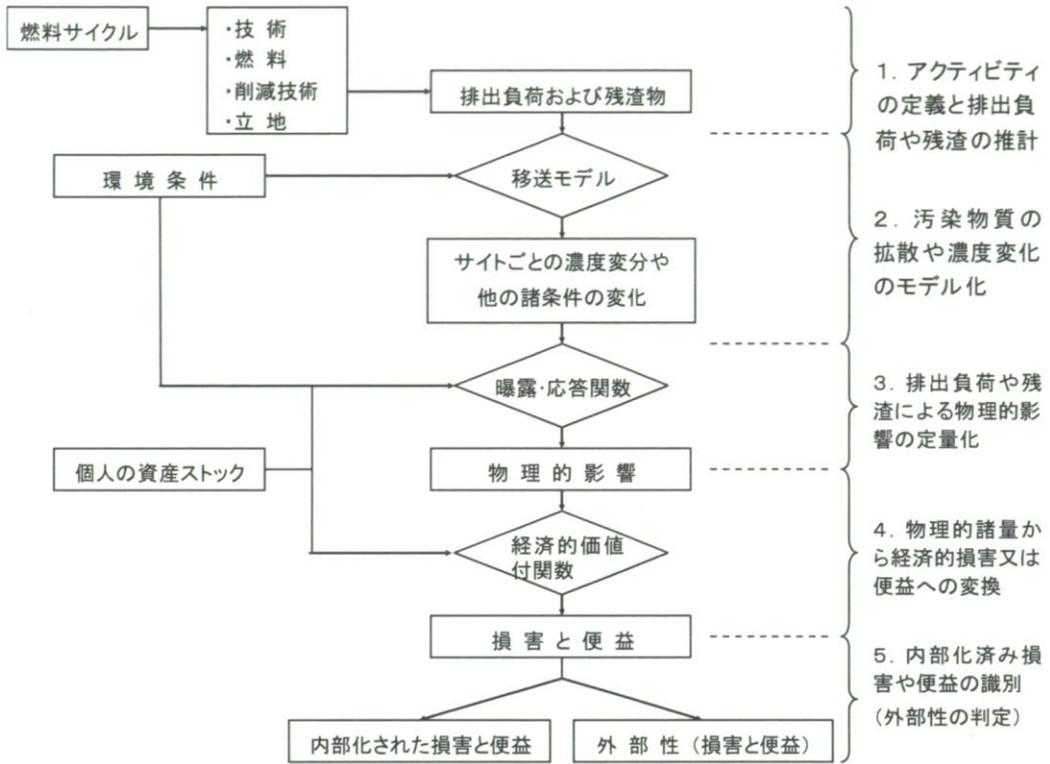


図 2.1.1 影響経路アプローチによる環境外部性の推計 (US-DOE & EC,1995)

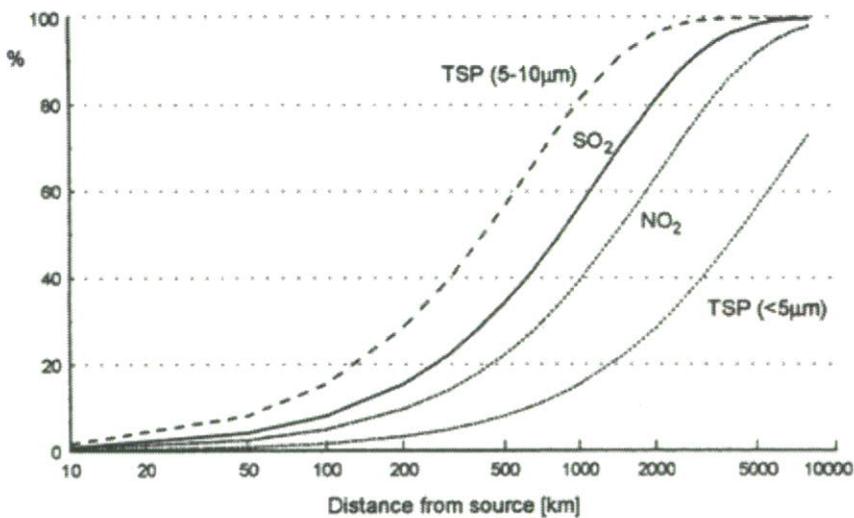


図 2.1.2 排出源からの距離に依存した累積損害率 (EC,1999a)

② 線量・応答関係の特定と影響分析

影響要因に関連した様々な受容体（人、農作物、畜産物、建築材料、森林、生態系等）の分布状況（数量含む）や、疫学データ・臨床例・実験データ等に基づく線量・応答関数等を用いて、影響要因の濃度等の変化に伴う環境構成要素への影響を定量化する。

ここで、留意すべき点は、エネルギー外部性の解析にあたっては、数百～数千 km にも達する広域の、あるいは、グローバルなレベルでの膨大な受容体（人口等）への複合汚染影響を積分し算定することが求められるため、低濃度域における線量・応答関数の特性が線形であるか、二次曲線であるか、閾値があるか、また肥沃化効果やホルミシス効果があるか否か等によって、影響（損害）の評価値が著しく左右され、評価が全く異なったものとなる可能性がある点である（図 2.1.3 参照）。

この線量・応答特性の解明研究は、先端的な遺伝学、細胞学、基礎医学、疫学、農学等の広義のライフサイエンス分野で、今後もなお多角的な研究を継続的に展開していかなければならない最重要課題の一つである。

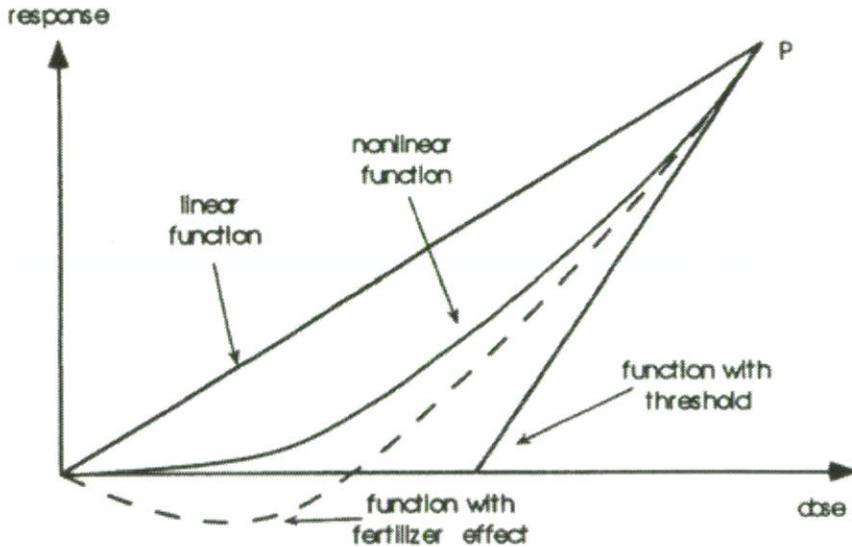


図 2.1.3 低線量下での線量・応答関数の想定されるパターン (EC,1999a)

③ 経済的価値付け

様々な受容体への影響（健康被害や死亡、農作物・木材の収穫量減少、建築材料損耗、騒音影響等）が、損失余命の価値 (VOLY)、状況依存型価値付け法 (CVM)、ヘドニック価格法 (HPM) などを用いて貨幣価値換算されている。

これら健康・環境影響の経済的価値付け手法の研究は、環境経済学の分野で 1980 年代から 90 年代に急速に発展してきた分野である。なお、ここでの VOLY や CVM には、諸個人の主観的な支払い意思額 (WTP) が用いられているが、この値はその性格上、大きな分散傾向（図 2.1.4 参照）を有し、ケースバイケースで異なるため、外部性の不確実性を規定する最も大きな要因の一つであると評価されている (EC,1999a : US-EPA,1999)。

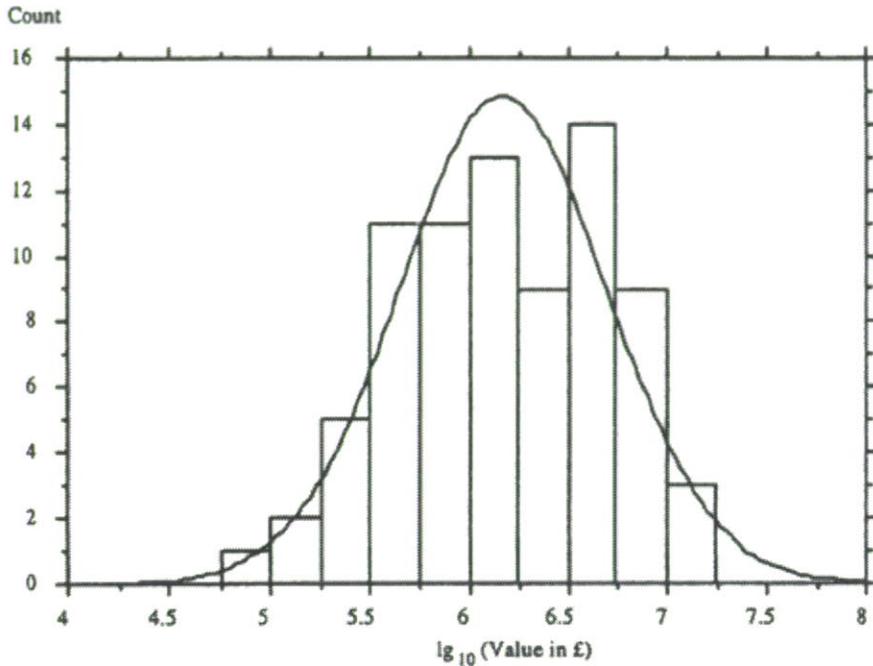


図 2.1.4 人の命の経済的価値付け事例 (78 研究) の対数正規分布 (1 £ 1990=1.78US\$)  
 —Ives らのレビュー (1993) による : EC,1999a—

#### ④ 外部性の識別

貨幣価値換算された損害や便益が、何らかの手段により内部化されているか否かを識別し、外部費用として計上する損害と便益を最終的に明確にする。

ExternEではこのステップの評価が明示的にはほとんど行われていないが、それは、この評価を行うためには、各国の各燃料サイクル別に、種々の保険やリスク手当等の他、環境税、CO<sub>2</sub>税、課徴金等のコントロールコストも絡んだ諸条件の詳細な検討が必要になり、一義的には算定しがたかったからではないかと考えられる。その結果、ExternEでは、職業人の労災事故や物流過程での公衆の交通事故など、種々の保険等によりかなり内部化されていると想定される損害の識別が定かではない。

### 2.1.4. 主要汚染物質別環境影響の解析・評価手法等の概要

#### (1) 大気汚染物質の影響解析・評価手法—EcoSense モデル

欧州において最も重要な政策課題であった大気汚染物質の影響解析については、Stuttgart 大学が開発した EcoSense モデルが、ExternE プロジェクトに共通適用された。このモデルは、環境影響を分析する様々なモデルを1つのシステムとして統合したもので、13種類の大気汚染物質による健康、穀物、建築資材、森林及び生態系に対する環境影響および外部費用を解析することができる (図 2.1.5 参照)。また、周辺および広域の環境影響をエネルギー供給施設のサイト毎に分析でき、対象とする地域における標準的な外部費用が算出できるといった特徴がある。ただし、確率論的リスク評価による重大事故評価、放射性物質の影響、及び地球温暖化の解析は対象外である。

このモデルの基本機能は、種々の技術・環境・受容体データベースへの入力、拡散方程式や化学反応式等による局所及び広域の汚染影響のシミュレーション、線量応答関数による影響の定量化、及び種々の影響（損害）の貨幣換算値による価値付けと集計から成っている。ここで、環境データベースと大気質モデルの概要は以下に示す。

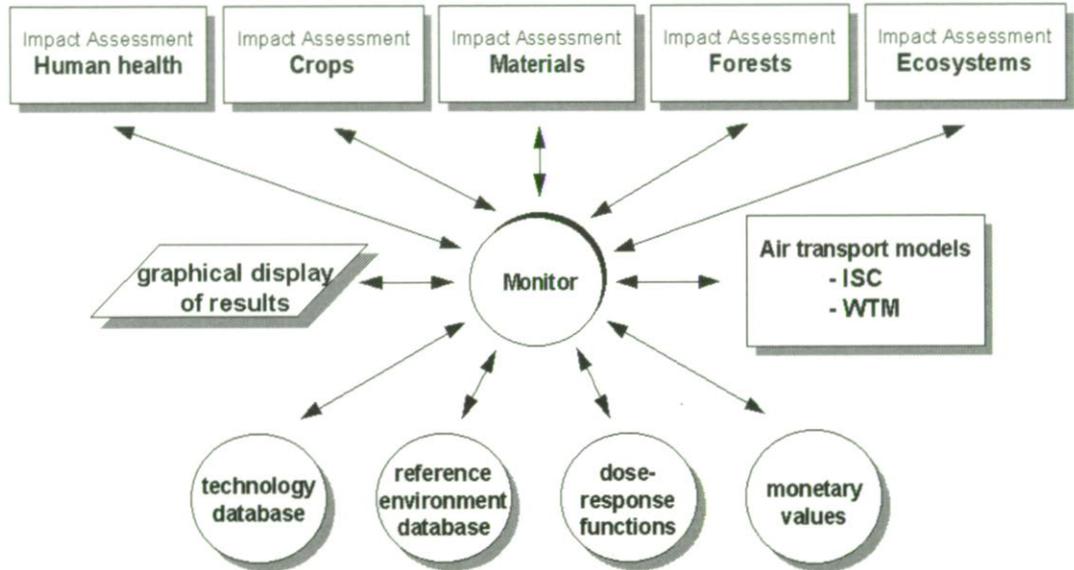


図 2.1.5 大気汚染による健康影響等解析用 EcoSense モデルの枠組み (EC,1999a)

① 環境データベース

欧州規模の排出調査記録と同様にレセプターや気象の分布に関するデータを提供しているエコセンス・データベースの中核要素である。すべての地理的情報は、EUROグリッド座標システムを使用することで組織化されている。そしてそれは、10000 km<sup>2</sup>と 100 km<sup>2</sup>の正積図法の投影グリッドセルを定義し、全EUと欧州の非EU諸国を網羅している。

人口分布と農作物に関するデータは、EUROSTAT 地域データベースから得られ、国民統計からの情報を用いて更新されてきた。建築材料目録は、代表的建築物の評価により被ばくした材料面積として定量化される。いくつかの欧州の都市の建築物に使用されている材料の調査結果が、欧州中の異なった建築材料のタイプに関する利用状況を考慮するのに用いられた。窒素蓄積に関する臨界負荷図は、異なる生態系の9種類に関して利用可能であり、地中海沿岸の低木地からアルプスの牧草地を通してツンドラ地帯まで含んでいる。受容体データへのアクセスを簡略化するため、影響を及ぼす領域は、EUROSTAT NUTS 分類体系にならって管理単位（例えば、地方や国）に従って全データを表す。そのシステムは、グリッド・システムと各管理単位の間で自動的にデータを伝送する。

受容体データに加えて、環境データベースは、ガウスのプルーム・モデルを使用するのに必要な 10×10 kmグリッド上の全欧州の海拔データを提供する。そしてそれは、気象データ（降水量、風速、風向）や、二酸化硫黄と窒素酸化物とアンモニアに関する欧州規模の排出負荷インベントリー（EUROGRID 形式に移転されている EMEP 1990 からのデータ）も同様に提供する。

## ② 大気質モデル

異なる汚染物質と異なる規模を網羅するために、エコセンスは、そのシステムの中に完全に統合された2つの大気移動モデルを包含している。

### (a) 工業系排出源複合モデル (ISC)

発電所からの排出される汚染物質（二酸化硫黄、窒素酸化物、微粒子）に対しては、米国環境保護庁によって整備されたガウスのブルーム・モデルが適用されている (Brode=Wang, 1992 年)。発電所の煙突から放出される汚染物質は、地上百数十メートルの高さから放出するために、自動車や家庭といった地表面から排出される汚染物質とは挙動が異なっている。発電所に近い 10～50km の範囲では、これら主要な汚染物質の地表大気中濃度は、垂直方向で実際に交換される大気の状態に大きく依存する。大気中での拡散式の基礎となるのは、フィックの法則である。拡散は地面に対し鉛直方向、水平方向、流れ方向に起こり、拡散係数の値もそれぞれの方向と位置により異なる。これを考慮すると基礎式の一般形は偏微分方程式となり、解は複雑なものになる。ガウス拡散モデルは、点源としての連続的な排出物質が地域的に広がっていく濃度を見積もるのによく使われている。風下、水平、鉛直方向にそれぞれ座標を  $x$ 、 $y$ 、 $z$  ととり、拡散係数は  $y$ 、 $z$  方向のみを考え一定値として解を求めると、 $x$  のある点における濃度分布は、分布の様相をガウス分布とみなし、拡散係数の代りに標準偏差（拡散幅）を用いて表すことができる。大気に連続的に放出される汚染物質の地表面における濃度分布は、以下の式で表わされる。

$$c = Q / (2 \pi u \sigma_y \sigma_z) \cdot \exp(-y^2 / \sigma_y^2) \cdot \exp(-h^2 / 2 \sigma_z^2)$$

ここで、

$c$  : 大気中の濃度、 $Q$  : 排出速度 [ $\text{m}^3 / \text{s}$ ]、 $u$  : 風速 [ $\text{m} / \text{s}$ ]、 $h$  : 煙突高さ [ $\text{m}$ ]、  
 $\sigma_y$  : 風方向断面の標準偏差、 $\sigma_z$  : 垂直方向の標準偏差

### (b) 風配軌道モデル (WTM)

このモデルはイギリスのハーウェル研究所で発展したハーウェル軌道モデルの風配図アプローチに基づいており利用者による設定が可能なモデルである (Derwent, Dollard, Metcalfe, 1988 年)。この風配軌道モデルはガウスのブルーム・モデルの適用限界 (概ね排出源から 50km) を超えた欧州全域への影響解析用に用いられるモデルで、発電所の煙突から 50km を越えた距離では汚染物質は一般に大気混合層の範囲内で垂直に混合されると仮定して解析されている。この風配軌道モデルは、ハーウェル軌道モデルの大気化学現象に併せて設定され、欧州全域での酸性物質の濃度と蓄積を評価するために用いられる。風配軌道モデルを走らせるために必要な全ての投入データは、エコセンス・データベースによって提供され、サイト特有の気象データの集合は、ISC モデルを使用する局地規模のモデリングを動かすため、利用者によって追加入力される。大気質モデルによって算出された濃度と酸性物質の蓄積の場の情報は、環境データベースの中に蓄積される。拡散・反応及び移送された汚染物質が受容体に与える影響の大きさは、線量 (暴露) 応答関数と損害関数によって見積もられる。受容体には、農作物、建築素材、森林、生態系、および健康影響がある。その中で健康に与える影響は、呼吸機能障害、生体化学変化、空気伝染による感染症などのメカニズムを考慮して気管支炎、喘息、咳などの症状が発生する割合を推計し、最終的には罹患率と死亡率を求めて評価されることになる。

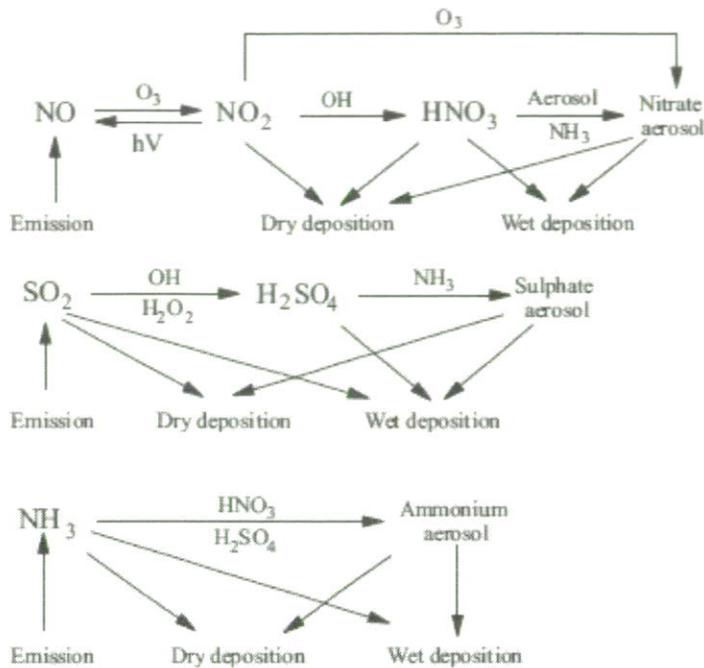


図 2.1.6 風配軌道モデルにおける化学的図式 (EC,2005a)

評価された被害は、生命の統計的価値、社会活動が制限される価値、喘息日数の価値など経済的な価値付けによって金額で表わされる。損害費用の結果は、被害を受ける地域の人口密度によって大きく影響される。

### (2) 放射性物質の影響解析・評価手法

放射性物質には半減期の長いものがあるため、様々な経路によって人間への健康に影響を与える (図 2.1.7 参照)。気体で放出された放射性核種の人間への健康影響は、空気を介する場合や地上に堆積して農作物を介しての場合が考えられる。液体で排出される核種は、河川、地下水、海によって拡散され魚や海産物、農作物を介して人間に摂取される。人間への健康影響は、他の汚染物質の影響経路にも見られる食物連鎖による。固体廃棄物は、土壤に排出されたものが外部被ばくとして影響を及ぼすものと、農作物を介して影響を与えるものがある。

放射線による健康影響は、確定的影響と確率的影響の2つに分けられる。確定的影響は、ある一定の被ばく線量 (しきい値) 以上で起きる健康影響である。影響は被ばく線量が大きいくほど深刻になり、その度合いは線量・応答関数で表される。確定的影響のしきい値以下の被ばく影響は、確率的影響の範疇となる。このような被ばく領域では放射線による確定的な影響は見られず、影響の可能性があるだけである。確率的影響では、放射線量は影響の深刻さに関係しない。ガンの発生は確率的影響の一つの例で、線量レベルがその発生確率に影響する。

ExternEにおけるイギリスやドイツの国別実施報告書 (EC,1999c) では、放射性物質による公衆への超長期の健康影響が、通常時における原子燃料サイクルの外部コストの支配的な要因 (割引率 0%時) となっている。この太宗を占めているのが<sup>222</sup>Rnによる低線量被ばくである。

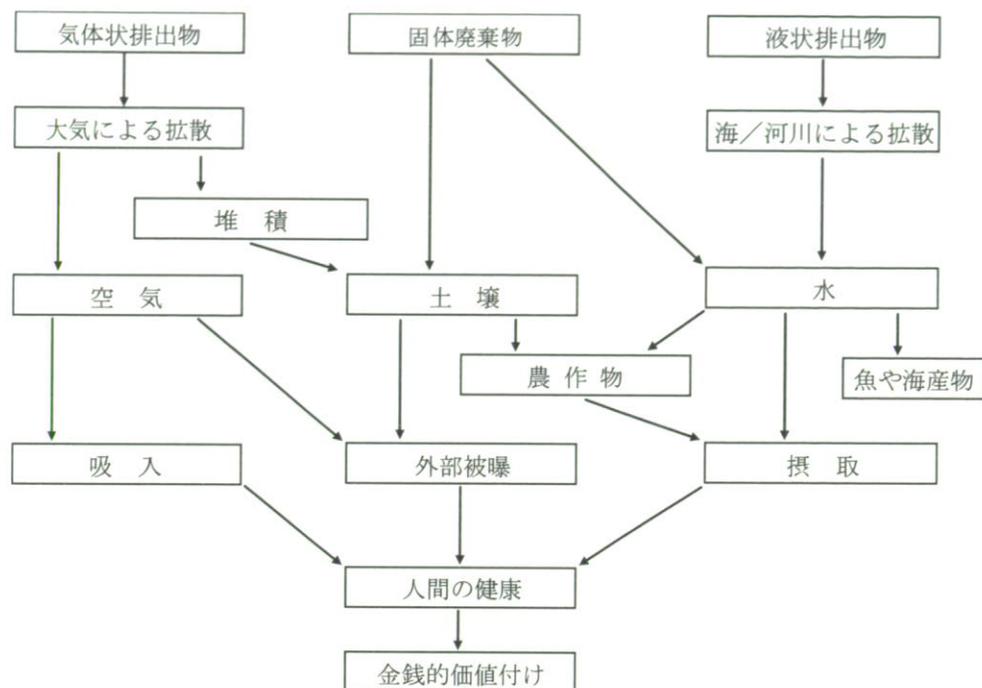


図 2.1.7 放射性排出物の環境における影響経路 (EC,1995)

この $^{222}\text{Rn}$ は、主に採掘されたウラン鉱石の粉碎・選鉱残さから放出されている。その半減期は92時間と短い、その排出ははるか将来まで継続する。それは、それぞれ半減期が1620年及び76,500年の $^{226}\text{Ra}$ や $^{230}\text{Th}$ といったウラニウムからの崩壊連鎖上の前駆物質を有しているからである。

この粉碎・選鉱残さからの $^{222}\text{Rn}$ の放出、及びその帰結としての集団線量は、他の核種のそれより4桁も大きい (UNSCEAR,1993)。UNSCEARの線量計算は、ウラニウム鉱山周辺の典型的な人口密度についての仮定に基づいており、鉱山の100km以内では3人/km<sup>2</sup>、鉱山から100-2000kmの範囲では25人/km<sup>2</sup>である。92時間の半減期でも $^{222}\text{Rn}$ は2000km以遠に十分到達するが、2000kmを超える距離での線量評価は、UNSCEARによっても行われていない (J.E.Berry et al., 1998)。

このような ExternE における原子燃料サイクルの環境損害費用の推計にあたって、大前提として仮定されている条件は、以下の通りである。

- ・非常に僅かな線量の環境放射線への曝露による健康リスクも線形応答 (LNT) と仮定
- ・人の放射線曝露による線量・応答関数は、将来も現在と同じと仮定
- ・死に至るガンの割合は将来も過去と同じと仮定
- ・放射線による被ばく者 (外部、内部) は将来もライフスタイルが今日と同じ状態であると仮定

これらの健康リスク推計上の仮定は、以下に示すように、その科学的妥当性面で看過することのできない根本的な問題点を含んでいる。

- ・最も重要な仮定の一つである低レベル放射線の健康リスク推計への放射線防護上の線形閾値無し (LNT) 仮説の適用については、最近、フランスの科学・医学アカデミーや米国エネルギー省の科学局から、科学的根拠に基づく根本的な疑問が提起されてきている。

- ・WHO も、チェルノブイリ事故の健康影響に関する fact sheet (WHO, 2006a) において、同事故の影響を受けた地域住民の事故による放射線被ばく量は殆どが世界の高い自然放射線地域における被ばく量以下である。同高自然放射線地域における被ばく量は1年間に20mSv/年を超えることもあるが、有意な健康リスク増加の証拠は見いだされていないと指摘している。
- ・現代医学の飛躍的進歩を無視して、将来のがん死亡率の推計に、過去の広島・長崎等のがん死亡率統計を用いており、将来推計の科学的妥当性に欠ける。また、公衆が最も懸念する遺伝的影響については、近年、その発症リスクそのものが大幅に下方修正されてきている。
- ・他の燃料サイクルの健康リスクの場合、比較的短期でその科学的エビデンスが比較的しっかりしているが、長期～超長期にわたる低レベル放射線の被ばくによる健康リスクの場合は、その科学的エビデンスが定かでない。

ExternE 研究においては、広域・長期の低レベル放射線の健康リスク評価が求められ、上記のような仮定のもとで算定されているが、現時点において評価すると、将来推計の基本的な在り方で余りにも問題が多い。原子力重大事故の健康リスク評価にあたっては、これらの点が重大な影響を与えるため、ExternE 研究における放射線の健康リスク評価の在り方については、後述するように根本的な見直し求められる段階に入ってきたものといえる。

### (3) 温室効果ガスの影響解析・評価手法 (EC,1999b)

採り上げられた温室効果ガスはCO<sub>2</sub>、メタン、N<sub>2</sub>Oである。NO<sub>x</sub>とSO<sub>2</sub>による温暖化影響は不確実性が大きいために研究では検討されていない。NO<sub>x</sub>は大気中におけるメタンの寿命を短くしOHラジカル濃度を高めてグローバルな冷却効果をもたらすといわれているが、この効果を定量化する方法はまだない。SO<sub>2</sub>は温室効果ガスではないが硫化エアゾールを生成する役割がある。エアゾールは太陽光線を反射するため冷却効果があるが、エアゾールによる太陽光線の変化はまだ正確には観測されていない。排出される温室効果ガスが影響を与える温暖化は、気候モデルの既存パッケージソフトであるSTUGEモデルを最初の100年間について、そして100年以降はスプレッドシート法によって解析している。

STUGEモデルは、元々IPCCにおいて気候変動を科学的に解明するために開発されたもので、炭素循環モデルと海洋モデルとを結びつけることで、赤外線輻射の時間変化を考慮した気温変化が推計できるといった特徴がある。炭素循環モデルでは、過去のCO<sub>2</sub>排出量であるバックグラウンドに依存しており、それによって大気濃度、赤外線放射、気温の変化が大きく影響を受ける。バックグラウンドは、IPCCが設定したCO<sub>2</sub>排出量を1990年の数値に維持する「一定排出」シナリオに設定している。バックグラウンドに対して、CO<sub>2</sub>排出量の増分が常に一定となるシナリオを別途設定し、両者の差から増分排出量の影響が計算できることになる。

スプレッドシート法は、放出される温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの崩壊速度と海洋吸収から大気中濃度を推計し、各温室効果ガスの赤外線吸収能力と輻射の熱平衡の関係式から気温の上昇温度を求めるものである。スプレッドシート法の最も大きな欠点は、上昇温度を求める際にグローバルな温度変化を遅らせる海洋の効果を考慮していないことである。STUGE法とスプレッドシート法の結果の違いについて調べてみると、100年後の場合、気温はスプレッドシート法が約25%大きくなっている。

温暖化影響の限界損害費用の推計は、アムステルダムIVMが開発したFUNDモデル(ver.1.6)とオックスフォードのECUが開発したOpen Framework for Climate Change Impact Assessmentモデ

ル (ver.2.2) である。ある時期における排出量の増加が将来の気候変動に与える限界影響を計算している。限界損害は、気候変動の水準と速さで影響と損害の関係を関数化して計算によって求めている。

過去の最も一般的な方法は、温室効果ガスの大気濃度が2倍になったときの気候シナリオを基にして静的な平衡解析計算を行なうものである。使われた2つのモデルは基本的にはこの在来手法を基にしている。FUND モデルは、季候変動の水準と速さの両方が協調できる動的モデルである。それに対して Open Framework モデルは、気候変動のシナリオとリンクした枠組みで国別に分析するモデルで、一次オーダーの影響と経済的価値付けが求まる。

FUNDと Open Frameworkの結果は、別々に表され、異なるモデル構造で許される範囲で比較されている。これまで述べられた温暖化問題の複雑さから、今回の計算で得られた値でもって温室効果ガスのマージナルな損害を評価することは適切ではない。損害評価に対する共通の“基準ケース”は、IPCC IS92aシナリオを使って、1990-2100 までの地域的な公平性を考慮した重みづけ損害（多くの割引率）によって設定されている。両者のモデルに対して、正味の損害価値は、地域と影響対象による費用のブレークダウンで表される。加えて言えば、マージナルな損害は温室効果の大きな要因となっている3つのガス (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O) に対して、割引率、排出時、公平性の重みの関数として計算している。

不確実性に関しては、その範囲が非常に大きい。割引率と集計ルール（公平性の重み）は結果に大きな影響を与える。さらに、潜在的に重要な問題である非線形な影響による阻害、社会的不可測な事態による損害、エコシステム損害等は全く含まれていない。それゆえ、気候変動の損害推計の外部性評価への適用は、現状では余りにも不確実なため、損害関数法ではなく対策費用法（コントロール・コスト法）を適用すべきであろう。ここでは、参考のため、上記の二つのモデルで試算された損害費用の推計結果を表 2.1.1 に示す。

表 2.1.1 FUND と Open Framework モデルによる温暖化の損害コスト比較

温室効果ガス	損害の単位	モデルによるマージナルな損害			
		FUND		Open Framework	
		1%	3%	1%	3%
CO <sub>2</sub>	ECU/t C	170	70	160	74
	ECU/t CO <sub>2</sub>	46	19	44	20
CH <sub>4</sub>	ECU/t CH <sub>4</sub>	530	350	400	380
N <sub>2</sub> O	ECU/t N <sub>2</sub> O	17000	6400	26000	11000

注) 解析条件：%は割引率、IPCC IS92a シナリオ、1995～2005 年までのガス放出、2100 年までの損害を計算

#### (4) 経済的価値付け手法—統計的生命の価値と関連指標

環境影響の経済的価値付け手法は、一般に以下のように整理することができる (表 2.1.2)。ここでの直接的か間接的かの類型は、当該環境影響に関する経済的価値を直接評価しているか、あるいは代理市場を用いて間接的に評価するかの区分である。一方、顕示選好アプローチとは支出額や売上などの現実のデータ (Revealed preference データ) を用い人々の経済行動から間接的に経済的価値を算定する手法で、表面選好アプローチとはアンケートや面接などによって人々に環境等の価値を尋ねることによって直接評価する手法である。

表 2.1.2 環境影響の経済的価値付け手法の分類

	顕示選好アプローチ (Revealed preference approach)	表明選好アプローチ (Stated preference approach)
直接的 (Direct method)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生産高変化法</li> <li>・ 費用削減アプローチ</li> <li>・ 機会費用アプローチ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ CVM (状況依存型価値付け法、又は仮想評価法)</li> </ul>
間接的 (Indirect method)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 防止支出アプローチ</li> <li>・ 旅行費用法</li> <li>・ ヘドニック価格法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ コンジョイント分析</li> </ul>

ここでは、これらの説明は別項に委ね、経済的価値付け面で支配的な要因である統計的生命の価値の理論的基礎とその関連指標についてのみ、以下に概説する。なお、ここでの統計的生命の価値や関連指標の支払い意思額の計測にあたって、欧米では、上記のヘドニック価格法、状況依存型価値付け法 (CVM)、防止支出アプローチ等が用いられてきている。

① 統計的生命の価値 (VSL)

環境損害がもっとも問題となるのは人間の健康に悪影響を及ぼす時である。健康損害は大別して致死性影響と非致死性影響とに分けることができる。致死性影響とは被害を受ける人口の平均余命が減少する影響を言い、急性疾患による死亡と慢性疾患による早期死亡とに分けることが可能である。非致死性影響とは死亡の原因とはならない慢性疾患を引き起こす影響を言う。健康損害の評価では死亡リスクを伴う致死性影響には統計的生命の価値 (value of statistics life: VSL) を、非致死性影響には医療費用法 (COI) を利用するのが一般的である。

VSL とは死亡確率の削減に対する平均的な WTP を、その死亡確率の変化量で割った数値であり、アメリカ大気浄化法やイギリス大気環境戦略の費用便益分析等に適用されている。また、ExternE の国別評価では一人あたり 3.1 百万 ECU という値が欧州における共通の死亡リスク評価値として参照されている。VSL は死亡リスクの確率が比較的小さな範囲で増減する場合において有効な概念である。なぜならば、1/1,000 の死亡リスクを 1/10,000 以下にするためには膨大な費用をかける必要があるが、現実問題として個人で対策を施す際の費用を考えれば、意味のある WTP を得ることができる確率変動の範囲は限られるからである。

VSL は、期待効用理論によって導出することができる (Freeman III, 1993; 岡, 1997)。現在  $j$  歳の消費者が  $t$  歳まで生存する確率を  $q_{jt}$ 、 $t$  歳の時の消費  $c_t$  から得る効用を  $U(c_t)$  とすると、現在から生存可能な最高年齢  $T$  までの期間における期待効用の現在価値総額  $V_j$  は、

$$V_j = \sum_{t=j}^T (1 + \rho)^{j-t} q_{jt} U(c_t)$$

で与えられる。ただし、 $\rho$  は主観的時間割引率 (時間選好率) を表す。利子率を  $r$ 、 $t$  歳の時の所得を  $y_t$ 、初期資産を  $W_j$  で表し、予算制約

$$\sum_{t=j}^T (1 + r)^{j-t} q_{jt} c_t = \sum_{t=j}^T (1 + r)^{j-t} q_{jt} y_t + W_j$$

の下で最大化された期待効用の現在価値総額を  $V_j^*$  とすると、これは、パラメータ  $q_{jt}$ 、 $r$ 、 $\rho$ 、 $y_t$ 、 $W_j$  の関数  $V_j^*(r, \rho, q_{jt}, \dots, q_{jT}, y_j, \dots, y_T, W_j)$  によって表すことができる。このとき、生存確率が  $q_{jt}$  から  $q'_{jt}$  へ改善することに対する WTP ( $WTP_{jt}$  とする) を

$$V_j^*(r, \rho, q_{jt}, \dots, q'_{jt}, y_j, \dots, y_T, W_j - WTP_{jt}) = V_j^*(r, \rho, q_{jt}, \dots, q_{jT}, y_j, \dots, y_T, W_j)$$

と定めることができる。

生存確率の増加を  $\Delta q_{jt}$  とすると、VSL は

$$WTP_{jt} / \Delta q_{jt}$$

で与えられる。VSL は、 $WTP_{jt}$  と  $\Delta q_{jt}$  の 2 つの数値を求めることによって算定される。、 $WTP_{jt}$  の計測には、ヘドニック価格法 (賃金リスク法) や CVM 等が適用される。

## ② VSL の問題点

### (a) リスクの性質

死亡リスクの評価に対して VSL を適用する場合、リスクの性質に注意が必要である。個人の力で削減できるリスクは「自発的 (voluntary) リスク」、削減することができないリスクは「非自発的 (involuntary) リスク」とそれぞれ呼ばれる。例えば、交通事故の死亡リスクは安全運転の励行、エアバックの装着、鉄道の利用等によって削減することができるため、自発的リスクと考えられる。これに対して、地震、台風などの自然災害によるリスクは、個人の努力によって被害を回避することが困難であるため、非自発的リスクである。ExternE では大気汚染による公衆健康影響は非自発的リスクとして扱われている。

非自発的リスクを減らすことに対する評価は、自発的リスクを減らすことに対する評価に比べて高いことが予想される。このため、リスクの性質によって損害が異なる可能性がある。また、リスクに対処する能力の個人差を考慮した評価も必要になる。さらに、WTP が計測される文脈では個人の選択が前提とされているため、個人の力で制御できない非自発的リスクの評価に VSL を適用することは不適切であるとの見方もある (岡, 1999)。

### (b) 個人属性の影響

年齢・所得・資産等の個人属性によって VSL が異なる可能性がある。たとえば、死亡リスクに対する回避度は、年齢とともに上昇する可能性や、所得の高い人ほど WTP が高い可能性が考えられる。また、死亡リスクの削減に対する WTP が年齢に応じて変化する可能性もある (Cropper and Sussman, 1990)。さらに、年齢による消費の差を考慮したが必要になる場合も考えられる VSL (Johansson, 2001)。

## ③ VSL に関連した指標

### (a) VOLY (value of life-year lost; 喪失余命の価値)

VOLY は、VSL を期待余命で割ることによって求められる「VSL の年平均値」である (US-EPA, 1999, H-9)。たとえば、期待余命を 35 年、VSL を 7 億円とすると、割引率ゼロの場合 VOLY は 7 億円 ÷ 35 年 = 2000 万円となる。VSL のみの損害評価では年齢による余命の差を考慮することが困難である。これに対して VOLY は、期待余命の差によって損害額が異なるため、年齢の差を明示的に反映した損害評価ができる。ExternE では、大気汚染の健康損害評価に対して VOLY を適用している。なお、余命の代わりに寿命を対象とし、寿命 1 年の延伸に対する WTP を計測する

方法もある (Johannesson and Johansson, 1996)。

(b) QALY (quality-adjusted life years; 健康状態で調整した余命)

QALY は、生活している時の健康状態によって変化する個人の効用を考慮した指標である (US-EPA, 1999)。たとえば、0 から 1 までの数値によって健康状態を評価し、0.7 の場合には VOLY に 0.7 をかけて求めた数値が QALY になる。もともと病気がちな人が汚染によって受ける損害は、健康な人に比べて小さいことが予想される。VSL ではこのような健康状態の差を損害評価に反映することが困難である。QALY には、健康状態による損害額の差を考慮して評価できる利点がある。

QALY は医療や保健政策の費用便益分析に適用されており、アメリカを対象とした Cutler and Richardson (1997, 1998) の研究では、1970 年から 90 年にかけて一人あたり 10 万ドルから 20 万ドルの健康改善が示されている。また、わが国を対象とした岡 (2000) の研究では、ダイオキシンが神経障害や生殖影響等に及ぼす影響として健康生存年の損失を算定している。健康状態を考慮した損害評価の研究として、このほか Garber and Phelps (1997) では個人属性の影響を包括的に取り扱った理論モデルを提案しており、Dow et al. (1999) では途上国の保健プログラムの評価手法を提案している。

### 2.1.5. 各国の環境損害費用の構成と GDP に占めるシェア

ExternE プロジェクトでは、前述のような影響経路アプローチに基づく環境外部性の解析・評価手法を駆使して、1996-98 年の第Ⅲ期に、15 ヶ国が参加した国別実施 (National Implementation) プロジェクトが展開され、12 の燃料サイクル、60 ケースを超える適用研究が行われた (EC, 1999c)。取り上げられた燃料サイクルは、①化石燃料：石炭、褐炭、泥炭、石油、オリマルジョン、天然ガス、②原子燃料：軽水炉 (PWR)、③再生可能エネルギー：バイオマス、水力、風力、太陽光 (PV)、④その他：都市ゴミ発電、である。ここでは、この国別実施研究における外部コストの試算結果の要点を紹介する。

#### (1) 主な発電用燃料サイクルの環境損害費用の水準と構成—英国の試算例

ExternE の国別実施プロジェクトの中で、多排出源 EcoSense モデルを駆使して環境損害費用の分析を行ったのはイギリスとドイツの 2 ヶ国であり、なかでも、イギリスは半年以上も研究期間を延長し充実した報告書を取りまとめている。ここでは、以下、このイギリスの試算例 (表 2.1.3、図 2.1.8) を取り上げ、ExternE 研究における主要燃料サイクルの環境損害費用の水準や構成がいかなるものか、紹介する。

表 2.1.3 発電用燃料サイクルの環境損害費用試算結果 (英国)

項 目	(単位: mECU/kWh)						
	石炭	石油	オリマルジョン	ガス	原子力	風力	バイオマス
公衆の健康	23.50	19.80	17.30	3.30	2.08	0.78	4.70
職業人の健康	0.85	0.26	0.01	0.10	0.10	0.26	0.01
農作物	0.79	0.28	0.44	0.16	0.00	0.00	0.15
建築材料	0.65	0.41	0.34	0.03	0.00	0.00	0.02
騒音	0.15	0.15	0.15	0.03	0.00	0.07	0.10
地球温暖化*	28.70	20.90	23.60	12.90	0.37	0.25	0.49
その他	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq
小 計	54.6	41.8	41.8	16.5	2.55	1.36	5.47

\* : 割引率 3 % ケースと 1 % ケースの値の中央値、 nq : 定量化されず  
出典) J E Berry et al. (1998)

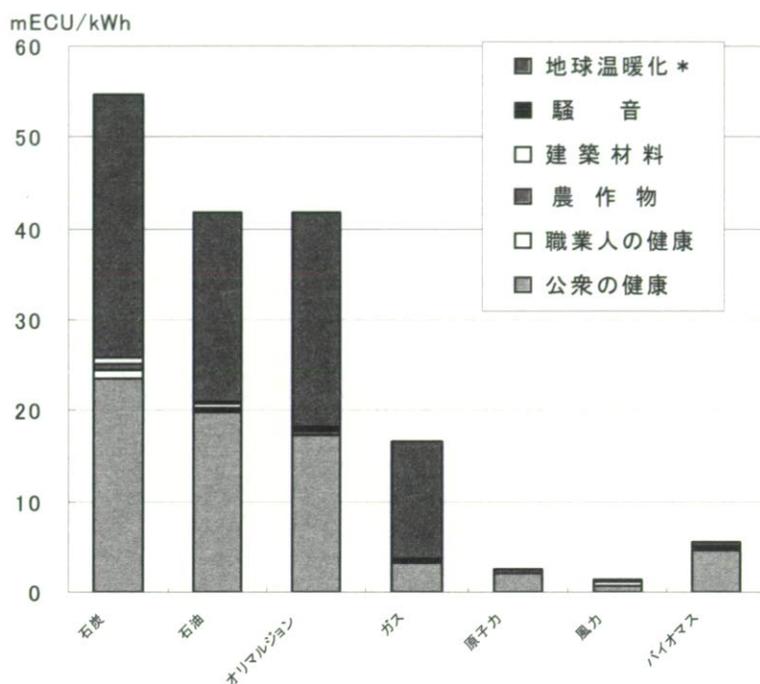


図 2.1.8 発電用燃料サイクルの環境損害費用の比較 (英国) (EC,1999c)

### ① 環境損害費用の集計費目と割引率

まず、環境損害費用の集計費目であるが、公衆の健康、職業人の健康、農作物、建築材料、騒音、地球温暖化、その他の7つに区分されている。そして将来の損害の現在価値への割引条件としては、地球温暖化の場合、割引率3%ケースと1%ケースの中央値が、また放射線による公衆の健康損害(評価期間1万年)の場合、割引率0%の値が採用されている。ここで後者の割引率0%は、経済学的判断と言うより倫理的な選好によっており、今後見直しを要する点の一つである。

### ② 石炭・石油火力発電システム

石炭と石油の発電システムの環境損害費用(55&42mECU/kWh)の水準は、イギリスにおける電気事業の発電コスト(30~45mECU/kWh)と同等か、やや上回るほどであると報告している。これらの環境損害費用を全面的に内部化した場合、これらの電源は競争力を失い急速にフェーズアウトされる。これは、米国DOE/EIAの下院科学委員会報告(1998)が、米国では炭素排出権取引価格の内部化のみで同様の事態が発生すると指摘している点も考慮すると、確度の高い見通しであるといえる。なお、これらの電源の環境損害費用の内訳は、大気汚染によるものと地球温暖化によるものとがほぼ同等の値として報告されている。

### ③ 天然ガス発電システム

天然ガス発電システム(CCGT)の環境損害費用は、16.5mECU/kWh(石炭の30%)で、この内、地球温暖化損害が78%、公衆の健康損害が20%を占めている。この内、大気汚染による健康損害は、主にPM2.5(硫酸塩、硝酸塩等)やオゾンといった二次生成物質によっている。この環境損害費用を全面的に内部化した場合、英国の天然ガス発電費用は、概ね、4割前後上昇するものと想定される。なお、地球温暖化損害の割引率1%及び3%時の環境損害費用は、それぞれ22及び11mECU/kWhである。

## ④ 原子力発電システム

原子力発電システムの環境損害費用は、2.55mECU/kWh（石炭の4.7%）で、この内、公衆の健康損害が81%、職業人の同損害が4%、気候変動損害が14%を占めている。ここで公衆の健康損害2.08mECU/kWh（評価期間1万年、割引率0%）の92%は、通常運用時のウランの採掘・精錬段階において排出されるラドンによっている。この損害は割引率3%の場合、約1/400の0.005mECU/kWhに急減し、全環境損害費用も0.5mECU/kWhとなる。

なお、英国は重大事故の環境損害費用を試算していない。従って、この点に関しては、確率論的リスク評価に基づくドイツの試算結果0.0034mECU/kWh（割引率0%）等を参照しつつ、別途検討を深める必要がある。

## ⑤ バイオマス発電システム

バイオマス発電システムの環境損害費用は、5.47mECU/kWh（石炭の10%）で、公衆の健康損害が86%、農作物の損害が3%、地球温暖化損害が9%を占めている。地球温暖化損害は再生可能燃料であるため少ないが、公衆の健康損害は比較的大きい。これは、今後実用化が期待されているガス化複合発電システム（8MW）の採用に伴い、その環境影響がクリーンな天然ガス複合火力をかなり上回るを得ないからである。

## ⑥ 風力発電

風力発電の環境損害費用は、1.36mECU/kWh（石炭の2.5%）で、この内、公衆の健康損害が57%、職業人の同損害が19%、地球温暖化損害が18%を占めている。なお、風力発電や太陽光発電等については、環境損害費用評価の歴史が浅いため、今後、さらなる評価事例の蓄積が期待される。

## (2) 各国の環境損害費用試算結果

ここで各国が取り上げた電源は、発電技術や公害防止技術面で非常に幅があるのみならず、立地でも欧州大陸の中央部と周縁等の違いがあるため、その環境損害費用は、結果的に著しく異なったものとなっている（表2.1.4、図2.1.9）。ちなみに、石炭火力についてみると、多くのプラントが電気集塵機や脱硫・脱硝設備、あるいは低NO<sub>x</sub>バーナーを設置し、適切な環境対策を講じている。しかし、ベルギーはこれらの環境対策を一切講じていないプラントも対象ケースに含めているため、150mECU/kWhという異常に高い環境損害費用を示している。なお、フランスの石油火力の環境損害費用が特に高いのは、影響を受ける地区の人口密度が高いためであると指摘されている。ちなみに、人口分布等の地理的要因の違いが排出NO<sub>x</sub>1トン当たりの損害（損失余命の価値基準）に与える影響（石炭・ガス火力の場合）を見てみると、大陸周縁の英国が5,800ECU前後であるの対し、大陸中央部のドイツでは13,500ECU前後と英国の2.3倍にも達している（EC, 1999c）。

表 2.1.4 各国の主要燃料サイクルの環境損害費用試算結果 (mECU/kWh) (EC,1999c)

国名	石炭 褐炭	石油		原子力	バイオ マス	水力	太陽光		都市ゴミ (ECU/t- waste)
		泥炭	オリマル ジョン				ガス	PV	
オーストリア				11-26	24-25	0.04**			
ベルギー	37-150			11-22	4.0-4.7				
ドイツ	30-55		51-78	12-23	4.4-7.0	28-29	1.4-3.3	0.5-0.6	
デンマーク	35-65			15-30		12-14		0.9-1.6	
スペイン	48-77			11-22	29-52*			1.8-1.9	(15-24)
フィンランド	20-44	23-51			8-11				
フランス	69-99		84-109	24-35	2.5	6-7	6		(67-92)
ギリシャ	46-84		26-48	7-13		1-8	5.1	2.4-2.6	
イタリア			34-56	15-27			3.4		(46-77)
オランダ	28-42			5-19	7.4	4-5			
ノルウエー				8-19		2.4	2.3	0.5-2.5	
ポルトガル	42-67			8-21		14-18	0.3		
スウェーデン	18-42					2.7-3	0.04-7		
イギリス	42-67		29-47	11-22	2.4-2.7	5.3-5.7		1.3-1.5	
			31-52***						

\* : 褐炭と混焼されたバイオマス

\*\* : 便益 (0.78-8.3mECU/kWh) を含まず

\*\*\* : オリマルジョン

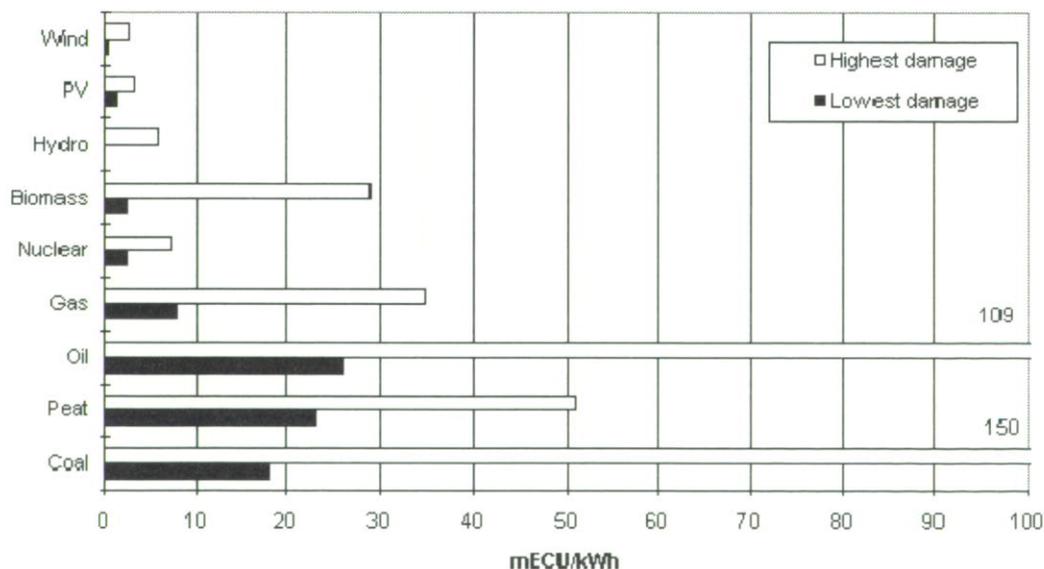


図 2.1.9 欧州諸国の燃料サイクル別環境損害費用の評価範囲 (EC,1999c)

(3) 各国の発電システムの環境損害費用集計値と GDP に占めるシェア

各国の発電システム全体の環境損害費用 (mECU/kWh : 図 2.1.10 参照) は、国によって著しく異なっている。この点を各国の GDP に占める比率面で見てみると、東独 27-30% (1990)、デンマーク 2.0-2.9% (1995)、英国 1.9-2.4% (1995)、西独 0.7-1.2% (1990)、フランス 0.5-0.6% (1995)、ノルウェー 0.4% (1995)、スウェーデン 0.2% (1994) となっている (表 2.1.5)。

これは、当然のことであるが、水力や原子力など非化石燃料電源による供給シェアが高い国は、環境外部性が格段に低いこと、デンマークのように風力発電等の再生可能エネルギー発電を推進しているが、石炭火力への依存度が高い国はかなり高い環境外部性を示すことを物語っている。

なお、酸性雨等による森林の枯死など体制崩壊の一因ともなった東ドイツの環境損害費用の GDP シェアは驚愕すべき高い値を示しているが、これは 1990 年のもので、近年は削減対策を講ずることにより、大幅に改善されてきているとのことである。

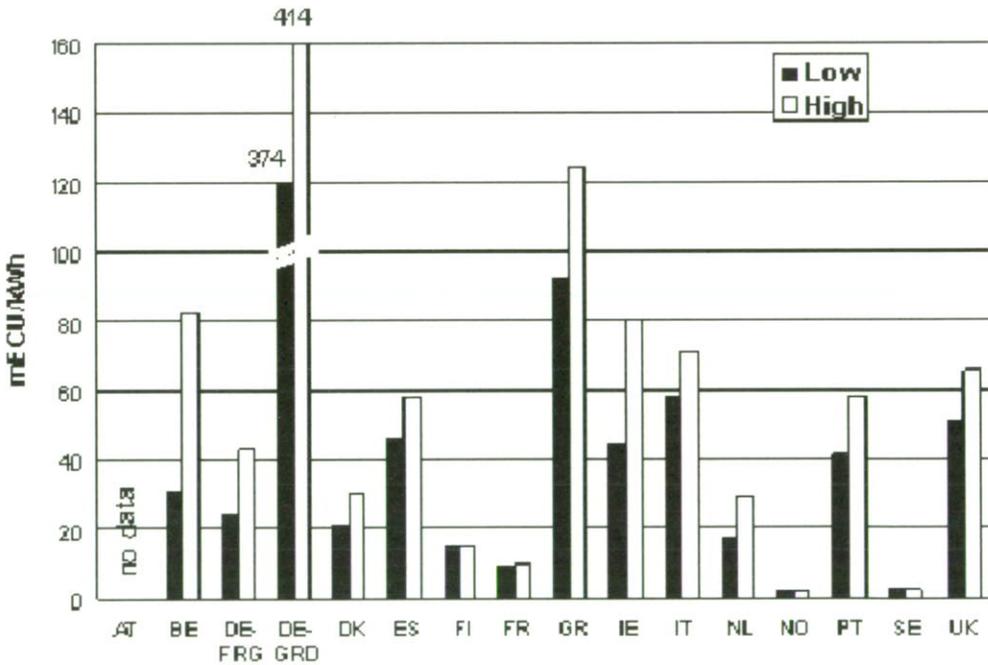


図 2.1.10 各国の発電システムの環境損害費用 (国別集計値 : EC,1999c)

表 2.1.5 各国の発電システムの環境損害費用と GDP に占めるシェア (EC,1999c)

Country	Electricity generated (TWh/yr)				External (damage) costs (MECU/yr)				% GDP (1994)
	Fossil	Nuclear	Renew	TOTAL	Fossil	Nuclear	Renew.	TOTAL	
AT	no aggregation was carried out								
BE (1995)	26.6	39.2	0.05	65.8	1,893-5148	158-183	ng	2,050-5,411	1.2-3.1
DE (1990) (FRG)	270	147	ng	417	9,900-17,118	121-691	ng	10,021-17,809	0.7-1.2
(1990) (GDR)	94	5	ng	99	37,002-41,003	4-24	ng	37,006-41,027	27-30
DK (1995)	83.8	-	1.4	85	1,706-2,401	-	1.4-1.8	1,776-2,530	2.0-2.9
ES (1996)	66.1	53.7	41.6	161	7,137-9,107	171	83	7,391-9,361	1.6-2.1
FI (1995)	23.6	18.1	18.9	61	829*	ng	91	920*	1.3
FR (1995)	36.2	385	81	502	4,106-5,085	19	243	4,364-5,347	0.5-0.6
GR (1995)	36.4	-	3.8	40	3,711-5,005	-	7.7	3,719-5,013	3.9-5.2
IE (1996)	15.4	-	1.0	16.4	720-1,300	-	ng	720-1300	1.7-3.1
IT (1990)	181	-	38	225	13,000-16,000	-	ng	13,000-16,000	1.5-1.8
NL (1994)	76.6	3.9	1.54	82	1,490-2,670	28	3.5-4.5	1,522-2,703	0.6-1.1
NO (1995)	-	-	123	123	-	-	286	286	0.4
PT (1995)	20.9	-	10	31	1,274-1,783	-	2.7-3.0	1,277-1,786	1.3-1.8
SE (1994)	7.7	70.2	60	138	162*	23	117	302*	0.2
UK(1995)	236	89	7.7	334	17,414-21,931	214-240	12.5-12.8	17,640-22,184	1.9-2.4

\*化石燃料の結果は限られたレンジでの高位推計値でのみ計算された (46MECU/t)

### 2.1.6. 環境影響と損害費用の詳細分析事例—GT 複合火力と軽水炉発電

本項では、ExternE における発電システムに関する環境損害費用の詳細解析事例の内、天然ガス GT 複合サイクル発電システム、および軽水炉 (PWR) 発電システムに関する環境損害費用の詳細解析結果を参考のため紹介する。

#### (1) 英国の天然ガス GT 複合発電システムの詳細分析事例

英国は、欧州大陸周辺の島国で我が国と似通った立地条件を有している。ExternE では、この英国における火力発電が欧州全域に及ぼすことになるか、また、立地条件 (気象条件を含む) によって単位汚染負荷あたりの環境影響がいかに異なるか、を国別実施結果により明らかにしている。

ここでは、この英国における火力発電の内、環境に優しい 21 世紀の主力電源の一つとして期待されてきた天然ガス GT 複合サイクル発電 (ACC) システムを取りあげ、その詳細な解析データベース (J.E.Berry et al., 1998) の分析・統合化作業を実施し、環境損害費用推計の総括表を作成した。その結果を表 2.1.6 に、その概要を以下に示す。

＜主な定量化要因と影響経路の概要＞

火力発電システムでは、その燃料サイクルの全過程において排出される大気汚染物質や温室効果ガスの他、種々の事故が、一般公衆や職業人の健康、農作物、建築物、森林等に様々な影響を与えている。その影響の定量化や価値付けにあたっては、環境負荷の定量化と受容体への影響の定量化を影響経路別に解析し、損害関数法等によって金銭評価する必要があるが、このためには、以下に示す一連の複雑なプロセスを逐次詳細に検討し、定量化作業を行わねばならない。

◆ 環境影響の定量化要因の選定

英国における天然ガス GT 複合発電 (ACC) システムを対象とした環境影響の推計とその価値付けにおいては、以下の要因が検討の対象として取りあげられている。

【天然ガス GT 複合発電 (ACC) システムに関する影響定量化要因】

1. 気候変動による影響
2. 大気汚染による影響 ・人の健康に及ぼす影響：硝酸塩、硫酸塩、オゾンの影響 ・農作物に及ぼす影響：オゾン影響、施肥影響 ・建築材料に及ぼす影響：酸性雨による腐食等 ・森林や生態系に及ぼす影響：
3. 事故による影響 ・職業人や公衆の事故傷害・死亡 ・重大事故：洋上基地、輸送過程
4. その他の影響 ・水系環境影響、騒音の影響、視界・景観影響

◆ 環境負荷の定量化

- ・負荷排出量の定量化：排出負荷の同定、負荷排出量の算定
- ・影響経路別環境負荷の定量化：影響経路の同定、定量化方法の選定、海面上昇・環境濃度推計

◆ 受容体への影響の定量化

- ・受容体及び影響項目の同定：公衆・職業人の健康、インフラ損害、農作物・建築材料損害等
- ・様々な受容体への影響のメカニズム分析：健康影響、インフラ影響、事故影響、生態影響等
- ・曝露・応答関数の設定：死亡率・罹患率 (気管支炎、喘息等)、収穫量減少、維持補修面積等
- ・影響値の算定

◆ 損害費用の推計

- ・価値付け手法の選定：統計的生命の価値 (VSL)、支払意思額 (WTP)、市場価格法、その他
- ・損害費用の推計・評価

ここで対象とされた大気汚染物質については、ばいじん (1次、2次)、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、それにオゾンである。一般に、これらの汚染物質による公衆への健康影響についてよく行なわれる疫学調査は、健康影響と汚染物質の大気濃度との関係を調べたものである。これは本格的な調査が求められるが公に実施しやすい利点があり、曝露・応答関数の基礎データとして活用されている。

### <天然ガス燃料サイクルへの EcoSense モデル適用結果>

英国の研究チームは、欧州全域への大気汚染による環境影響解析用に開発された EcoSense モデルを駆使して、天然ガス GT 複合発電システムに適用し、同発電システムの燃料サイクルの段階別に、また環境負荷の定量化から影響解析、損害の価値付けにいたる影響経路手法の段階別に、データ分析作業を実施した。その解析結果の総括表は表 2.1.6 に示すとおりであるが、この総括表（ここでは地球温暖化損害の割引率 3% ケース）に基づけば、大気汚染による広域的な健康影響等による損害に関して、以下の点が指摘される。

#### ① 各影響要因の損害費用全体の中でのシェア

天然ガス発電システム (CCGT) の損害コストは、0.0112 ECU/kWh で、この内、地球温暖化損害が 65%、大気汚染による公衆の健康損害が 32% を占め、残りの 3% は農作物の損害 1.4%、重大事故 0.45%、建築材料損害 0.3%、その他（通常事故、騒音等）からなっている。

なお、ここでの重大事故は、燃料サイクルの内、ガスの採取段階での洋上基地（北海油田パイパーアルファ基地等）事故が主体で、その死亡者数は、史上最悪といわれるチェルノブイリ原発事故における事故処理作業員の急性放射線症や小児の甲状腺がんによる死亡者の実績を大きく上回っている。また、ここでの通常事故や重大事故に伴う損害は、一般に保険や損害補償の対象になっているため、外部費用はこれらによっては、填補されなかった部分に限定される。ExternE プロジェクトでは様々な損害費用が算定されているが、そのどこまでが外部費用であるか否かの識別は、国によって、損害項目によって、事業者の保険如何によっても異なるので行われていない。

#### ② 健康影響に占める汚染物質別シェア

上記の大気汚染による公衆の健康損害 32% の内、汚染物質別内訳を見てみると成人の硝酸塩による慢性早期死亡が 21.2%、成人の硫酸塩による慢性早期死亡が 3.4%、オゾンによる疾病損害が 3.0%、成人の硝酸塩による慢性気管支炎が 1.8%、オゾンによる死亡損害が 1.7% 等となっている。

ここで、成人の硝酸塩による慢性早期死亡が 21.2% と高いのは、複合サイクル発電に使われるガスタービンのサーマル NOx によっており、クリーンと言われる天然ガス複合火力であっても、その健康影響が無視しえないことを裏付けている。

表2.1.6 天然ガスGT複合サイクル発電システムの環境損害費用推計（英国の国別実施例；その1）

燃料サイクルの段階	負荷の定量化					影響の定量化			外部(損害)コストの評価			
	排出の定量化		影響経路別負荷定量化			受容体&影響項目	品種・応答係数	影響値	価値付け手法	参照値	詳細値 mECU/kWh	割合 %
	排出物質	排出量	影響経路	定量化の方法	負荷量							
<b>ガスの採査</b> 1. 温室効果ガス 2. 大気汚染物質 3. 事故 ○通常事故 死亡 重傷 軽傷	na negligible	na negligible	資源探査活動 洋上ボーリング 洋上開発	事故統計	2,38E-03 人/TWh 7.18E-02 人/TWh 3.46E-01 人/TWh	1. 公衆への影響 2. 職業人への影響 ①通常事故による死亡 ②通常事故による重傷 ③通常事故による軽傷	na negligible	VSL(UK,1998) WTP(EC,1997) WTP(EC,1997)	3,14MECU 95000ECU 69700ECU	7,41E-03 8,82E-03 2,41E-03	0,07% 0,08% 0,02%	
<b>ガスの採取</b> 位置: Caisterガス田 英国、北海南部海域 ガス田の生産量: 12.5億m <sup>3</sup> /年 運用寿命: 15年 海上基地総重量: 1350トン ガス組成: メタン: 83%、重炭: 3% エタン: 3%、CO <sub>2</sub> : 0.3% H <sub>2</sub> O: 1%、H <sub>2</sub> S: na	1. 温室効果ガス CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O 2. 大気汚染物質 3. 事故 ○通常事故 死亡 重傷 軽傷 ●重大事故 死亡	5,20E+00 g/kWh 1,10E-01 g/kWh 1,00E-03 g/kWh negligible	大気拡散 海洋との相互作用 生態・物理系影響	スプレッドシート法 STUGEモデル MAGICCモデル	気温上昇 気候変動 海面上昇等	1. 公衆及び3. 環境への影響 2. 職業人への影響 ①通常事故による死亡 ②通常事故による重傷 ③通常事故による軽傷 ④重大事故による死亡	<割引ケース> GW-low GW-mid 3% GW-mid 1% GW-High	<複合適用> 損害関数手法 対策コスト手法 その他手法	ガス採取除 離分含む	4,31E-02 2,04E-01 1,58E+00	1,82%	
<b>ガスの輸送</b> 輸送方法: パイプライン (距離: 70km+70km) 輸送能力: 3.4million m <sup>3</sup> /日 (パイプ直径: 26吋) 加圧ステーション: 1ヶ所 パルプステーション: 3ヶ所	1. 温室効果ガス CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O 2. 大気汚染物質 3. 事故 ○通常事故 死亡 重傷 軽傷	2,02E+00 g/kWh 1,70E-01 g/kWh 1,00E-03 g/kWh negligible	大気拡散 海洋との相互作用 生態・物理系影響	スプレッドシート法 STUGEモデル MAGICCモデル	気温上昇 気候変動 海面上昇等	1. 公衆及び3. 環境への影響 2. 職業人への影響 ①通常事故による死亡 ②通常事故による重傷 ③通常事故による軽傷	<割引ケース> GW-low GW-mid 3% GW-mid 1% GW-High	<複合適用> 損害関数手法 対策コスト手法 その他手法	ガス採取除 に含む			
<b>発電</b> 位置: イングランド、West Burton 発電技術: GT複合サイクル方式 出力: 651MW、効率: 48%(HGV/GP) 設備利用率: 90%、技術寿命: 30年 ガス消費量: 1.1billiom <sup>3</sup> /年 排ガス処理: 乾式脱NOx燃焼器 冷却方式: 湿式冷却方式(18m <sup>3</sup> ) 取水(H2O): 39800m <sup>3</sup> /年 蒸発ロス: 14000m <sup>3</sup> /年 煙突高さ: 85m(3本集合煙突) 大気排出: 煙道ガス温100℃ 煙道ガス量: na Nm <sup>3</sup> /kWh CO <sub>2</sub> : 383g/kWh, NOx: 0.48g/kWh Sulphur: 2.14mg/Nm <sup>3</sup> Subhar: 2.14mg/Nm <sup>3</sup> (参考: 排炭火力CO <sub>2</sub> 効率: 48% (HGV/GP)、ガス量336Nm <sup>3</sup> /kWh)	1. 温室効果ガス CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O 2. 大気汚染物質 NOx PM SO <sub>2</sub> Sulphur Subhar 排ガス量 蒸発ロス	3,93E+02 g/kWh negligible g/kWh 1,30E-02 g/kWh negligible g/kWh none g/kWh 2,14 mg/Nm <sup>3</sup> na Nm <sup>3</sup> /kWh 14000 m <sup>3</sup> /日	大気拡散 海洋との相互作用 生態・物理系影響 エコセンス・モデル(欧州適合全域用) ・解析圏域: 数千km <sup>2</sup> エリア ・影響解析対象: 人の健康、農作物、 建築材料、森林、生態系 ・大気移送モデル ガウシアンプルームモデル: ~50km 風速軌道モデル: 50m~数千km ・データベース(欧州適合全域) 環境: 人口、農作物、植生、建物、 食糧生産、地球気象等 排出量技術、最悪・応答関数 金銭的価値付け関数・率値	スプレッドシート法 STUGEモデル MAGICCモデル	気温上昇 気候変動 海面上昇等	1. 公衆への影響 ①成人/傾聴域(NOx)/慢性YOLL ②成人/傾聴域(SO <sub>2</sub> )/慢性YOLL ③全人口/オゾン(NOx)/疾病 ④成人/傾聴域(NOx)/慢性気管支炎 ⑤全人口/オゾン(NOx)/死亡YOLL ⑥成人/傾聴域(NOx)/活動日制限 その他 <注>健康 応答係数の単位: YOLL-年死亡率の变化(μg/m <sup>3</sup> )、その他-件/年・μg/m <sup>3</sup> 3. 環境への影響 (1) 農作物の損害 ①全農作物/オゾン(NOx)/収穫量減少 ②小麦/オゾン(NOx)/収穫量減少 ③その他 (2) 建築材料の損害 ①重鉛メッキ鋼/SO <sub>2</sub> (傾聴域?)/維持補修面積 ②ベンキ/SO <sub>2</sub> (傾聴域?)/維持補修面積 ③モルタル/SO <sub>2</sub> (傾聴域?)/維持補修面積 ④下塗り/SO <sub>2</sub> (傾聴域?)/維持補修面積 ⑤その他	<割引ケース> GW-low GW-mid 3% GW-mid 1% GW-High	<複合適用> 損害関数手法 対策コスト手法 その他手法	1,49E+00 7,07E+00 1,81E-01 5,46E-01 643300ECU 643300ECU 1050000ECU 750ECU 1,80E-01 du/TWh 3,23E+02 m <sup>2</sup> /TWh 3,96E+02 m <sup>2</sup> /TWh 3,22E+01 m <sup>2</sup> /TWh 1,89E+01 m <sup>2</sup> /TWh	2,17E-04 2,38E-04 1,81E-04 2,01E-01 2,01E-01 1,70E-01 7,30E-02 3,79E-02 1,80E-01 1,80E-01 1,80E-04 2,85E-02 1,56E-02 1,13E-02 9,84E-04 5,20E-04 1,34E-04	0,00% 0,00% 0,00% 63,10% 32,05% 21,17% 3,37% 3,03% 1,79% 1,70% 0,85% 0,34% 1,43% 0,00% 0,00% 0,25% 0,14% 0,10% 0,01% 0,00% 0,00%	

表2.1.6 天然ガスGT複合サイクル発電システムの環境損害費用推計(英国の国別実施例:その2)

燃料サイクルの段階	負荷の定量化				影響の定量化			外部(損害)コストの評価									
	排出物の定量化		影響経路		影響項目	暴露・応答係数	影響値	価値付け手法	参照値	評価値	割合%						
	排出物等	排出量	影響経路	影響経路別負荷定量化 定量化の方法								負荷量					
発電(焼き)	2. 大気汚染物質(焼き)		エコサンス・モデル(欧州適合全域用) -解析領域:数千kmエリア -影響解析対象:人の健康、農作物、 建築材料、森林、生態系 -大気輸送モデル ガウシアンプルームモデル:~50km 風配軌道モデル:50km~数千km		(3) 森林の損害 ①森林全体/大気汚染/木材減少  (5) 生態系の損害 ①植生別/NOx/気象条件超過地域 ②全植生/NOx/NO <sub>2</sub> 超過地域 ③全植生/SO <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> 超過地域	4.98E+00 m <sup>3</sup> /Twh  km <sup>2</sup> /Twh km <sup>2</sup> /Twh km <sup>2</sup> /Twh	市場価格法  CVM法 トラブルコスト法	na na na na	2.90E-04	0.00%							
	3. 事故 ○交通事故 死亡 6.70E-04 人/TWh 重傷 1.40E-02 人/TWh 軽傷 2.50E-01 人/TWh  ○作業上の事故 死亡 1.00E-03 人/TWh 重傷 1.50E-02 人/TWh 軽傷 8.80E-02 人/TWh		発電所外での交通事故統計 交通事故統計  発電所での日常作業上の事故 事故統計								1. 公衆への影響(職業人含む) ①交通事故による死亡 ②交通事故による重傷 ③交通事故による軽傷  2. 職業人への影響 ①所内事故による死亡 ②所内事故による重傷 ③所内事故による軽傷	1.0E-03 人/TWh 1.5E-02 人/TWh 8.8E-02 人/TWh  6.7E-04 人/TWh 2.4E-02 人/TWh 2.5E-01 人/TWh	VSL(UK,1998) WTP(EG,1997) WTP(EG,1997)  VSL(UK,1998) WTP(EG,1997) WTP(EG,1997)	3.14MECU 95000ECU 69700ECU  3.14MECU 95000ECU 69700ECU	3.14E-03 1.43E-03 4.74E-04  2.10E-03 2.28E-03 1.74E-03	0.03% 0.01% 0.00%  0.02% 0.02% 0.02%	
	4. その他 ○騒音		周辺への伝搬								na	na	na	na	na	na	0.24%
	3. 事故 ○交通事故 死亡 2.9E-04 人/TWh 重傷 3.0E-03 人/TWh 軽傷 1.5E-02 人/TWh  ○作業上の事故 死亡 2.5E-02 人/TWh 重傷 7.8E-02 人/TWh 軽傷 3.7E-01 人/TWh		発電所外での交通事故統計 交通事故統計  発電所での日常作業上の事故 事故統計								1. 公衆への影響 ①交通事故による死亡 ②交通事故による重傷 ③交通事故による軽傷  2. 職業人への影響 ①所内事故による死亡 ②所内事故による重傷 ③所内事故による軽傷	2.9E-04 人/TWh 3.0E-03 人/TWh 1.5E-02 人/TWh  2.5E-02 人/TWh 7.8E-02 人/TWh 3.7E-01 人/TWh	2.9E-04 人/TWh 3.0E-03 人/TWh 1.5E-02 人/TWh  2.5E-02 人/TWh 7.8E-02 人/TWh 3.7E-01 人/TWh	VSL(UK,1998) WTP(EG,1997) WTP(EG,1997)  VSL(UK,1998) WTP(EG,1997) WTP(EG,1997)	3.14MECU 95000ECU 69700ECU  3.14MECU 95000ECU 69700ECU	9.11E-04 2.85E-04 1.05E-04  7.85E-03 7.41E-03 2.58E-03	0.01% 0.00% 0.00%  0.07% 0.07% 0.02%
発電所の建設	1. 温室効果ガス 2. 大気汚染物質 3. 事故 タービンモジュールあたり必要材料 コンクリート:20000m <sup>3</sup> 鉄筋:2500トン 構造鋼材:3500トン 配管材料等:20000m <sup>2</sup>		na na na		na na na		na na na		na na na		na na na						
金ステーヂ	1. 水系環境負荷 負荷数示有り (温排水無し) 2. 境界・景観負荷 3. その他		na na na		na na na		na na na		na na na		na na na						
合計					気候変動による損害、割引率3%ケースの外部(損害)コスト			YOLLベース VSLベース		1.12E+01 2.31E+01		100.0%					

(2) ドイツの軽水炉 (PWR) 発電システムの詳細分析事例

欧州大陸中央部に位置しているドイツでは、チェルノブイリ原発事故の政治経済的影響が深刻であったこともあり、原子力発電システムに関する ExternE の国別実施においては、同国の軽水炉 (PWR) 発電システムを取り上げ、その重大事故の健康リスク評価も行われた。ここでは、このドイツにおける軽水炉 (PWR) 発電システムの環境影響とその価値付けに係わる詳細な解析データベース (IER, 1997) の分析・統合化作業を実施し、環境損害費用推計の総括表を作成した。その結果を表 2.1.8 に、その概要を以下に示す。

<主な定量化要因と影響経路の概要>

重要な汚染物質等の環境への排出がどのような経路で拡散し各受容体に影響を与えるのか、影響経路 (大気、水、土壌) を確定する。原子燃料サイクルにおける影響経路は、想定する経路により影響を受ける受容体 (人、動植物、建物、自然環境など) が様々に変化すること、また、経路によって影響を受ける受容体の数 (密度) が変化し、その密度の濃淡により最終的な価値付け結果も変化する。例えば、影響を受ける人口が多ければ、当然、外部性が高くなることとなることなどから、影響経路を詳細に検討することが重要となる。

◆ 環境影響の定量化要因の選定

ドイツにおける軽水炉 (PWR) 発電システムを対象とした環境影響の推計とその価値付けにおいては、以下の要因が定量化の対象として取りあげられた。これらは、燃料サイクルの各段階で排出される放射性物質と放射線による公衆や職業人への健康影響、及び各段階での通常事故による職業人の健康への影響、ならびにシステムのライフサイクル面から見た公衆への影響や気候変動影響等からなっている。原子燃料サイクルにおける支配的な影響要因は放射線による「人の健康」への影響であるが、ライフサイクル分析 (LCA) 面からみたその他の影響要因も無視できない。

【原子燃料サイクルに関する定量化要因】

1. 放射線による健康影響		
・採掘・精錬/転換/濃縮/燃料成型	公衆への影響、	職業人への影響
・発電 通常運転時	公衆への影響、	職業人への影響
重大事故時	公衆への影響、	職業人への影響
・再処理	公衆への影響、	職業人への影響
・廃棄処分/輸送	公衆への影響、	職業人への影響
・建設と解体		職業人への影響
2. 大気汚染による健康影響		
・燃料サイクルの全段階 (LCA)	公衆への影響	
3. 気候変動による影響		
・燃料サイクルの全段階 (LCA)	温暖化による影響	
4. その他		
・通常事故：燃料サイクルの全段階		職業人への影響

- ◆ 環境負荷の定量化
  - ・ 負荷排出量の定量化：排出放射性物質の同定、排出放射性物質量の算定
  - ・ 影響経路別環境負荷の定量化：影響経路の同定、定量化方法の選定、内部・外部被ばくの推計
- ◆ 受容体への影響の定量化
  - ・ 受容体及び影響項目の選定
    - 放射性物質・放射線—公衆・職業人：致死性がん、非致死性がん、遺伝的影響
    - 大気汚染物質—公衆：気管支炎、喘息等、 温室効果ガス—地球温暖化損害
  - ・ ヒトへの健康影響のメカニズム分析：高線量域、低線量域
  - ・ 線量・応答関数の設定：放射線の影響、大気汚染の影響、気候変動影響
  - ・ 影響値の算定
- ◆ 損害費用の推計
  - ・ 価値付け手法の選定：喪失余命の価値 (YOLL)、統計的生命の価値 (VSL)、支払意思額 (WTP)、市場価格法、その他
  - ・ 損害費用の推計・評価

#### <原子燃料サイクルの概要>

燃料サイクルの外部性推計上の技術的バックグラウンド情報については、ドイツとイギリスで行われた例を表 2.1.7 に示す。廃炉段階で発生すると予想される放射性核種、輸送段階における大気汚染物質、事故リスク等、正確なデータの収集が困難ではあるが、最終的な価値付けに比較的影響が大きいと思われるものもいくつかある。どのように燃料サイクルの段階を設定するかで結果が左右されることもありうるので、核分裂炉における燃料サイクルの段階をどう設定するかは、重要な課題であると指摘している。

表 2.1.7 ドイツの原子燃料サイクル (PWR) の概要

段 階	条 件
採掘・精製	採掘—必要なウラン鉱石：23.7t/TWh、産出国：カナダ、鉱石のグレード：0.84% 採掘方法：露天掘り
転換	運営—COMURHEX, France UF4 への転換—立地：Malvesi, France、能力：11000t/yr UF6 への転換—立地：Pierrelatte, France、能力：87000t/yr 必要な UF6：20.03t/TWh
濃縮	ガス拡散法—運営：EURODIF, France、立地：Pierrelatte, France、電気利用：原子力発電、Tricastin, France
燃料成形	UO <sub>2</sub> 燃料—運転：FBFC、立地：Pierrelatte, France、容量：600t UO <sub>2</sub> /yr 必要な UO <sub>2</sub> ：2.29t/TWh (24.6t/yr)
発電	燃料：UO <sub>2</sub> 、技術：PWR、立地：Southwest of Germany、出力：1400 MWe 稼働率：89%、燃焼度：50 MWd/kg
再処理	運転：COGEMA、立地：La Hague, France、手法：PUREX UP3 プラントの能力：800 t/yr、発電プラント必要量：2.29 t/TWh
廃棄物処分	地下、地表
輸送	全ての輸送プロセス：道路、鉄道
建設・解体	放射性物質と通常事故の両者を評価

### ＜原子燃料サイクル（軽水炉（PWR）発電システム）への適用結果＞

ドイツの研究チームは、同国の軽水炉（PWR）発電システムを取り上げ、同発電システムの燃料サイクルの採掘・精錬、転換、濃縮、燃料成型、発電、再処理、廃棄処分、及び建設と解体にいたる各段階別に、また環境負荷の定量化から、健康リスク等の定量化、さらに損害の価値付けにいたる影響経路手法の段階別に、損害費用の推計作業を行った。その解析結果の総括表は表 2.1.6 に示すとおりであるが、この総括表（地球温暖化損害の割引率は3%ケース）に基づけば、大気汚染による広域的な健康影響等による損害に関して、以下の点が指摘される。

#### ① 各影響要因の損害費用全体の中でのシェア

軽水炉（PWR）発電システムの損害費用は、0.0046ECU/kWh で、この内、地球温暖化損害が7.6%、大気汚染による公衆の健康損害が12.4%、通常事故による健康損害が1.2%を占め、残りの78.8%を放射性物質による健康損害が占めている。

#### ② 放射性物質による健康損害の構成

ここでの放射性物質による健康損害の内、採掘・精錬段階における一般公衆に与える広域・長期の損害が79%と支配的な影響要因（2.1.4 項の放射性物質の影響解析・評価手法参照）となっている。続いて、再処理段階における一般公衆に与える広域・長期の損害が16%であり、この両者で放射性物質による全健康損害の95%を占めている。

なお、重大事故に伴う放射性物質の放出による欧州全域での事故後200年間にわたる累積健康損害の比率は非常に小さな工学的な事故確率をかけている関係で0.08%と通常事故による健康損害を下回っているが、チェルノブイリ事故のような重大事故は人為的災害であって工学的な確率事象ではないため、ここでの損害推計の考え方は根本的な見直しが必要である。また、ここでの通常事故や重大事故に伴う損害は、一般に、保険や損害補償の対象になっているため、外部費用はこれらによっては、填補されなかった部分に限定される。ExternE プロジェクトでは様々な損害費用が算定されているが、そのどこまでが外部費用であるか否かの識別は、国によって、損害項目によって、事業者の保険如何によっても異なるので行われていない。

#### ③ 低レベル放射線による健康影響評価の在り方について

ドイツの研究チームは、同国内の軽水炉（PWR）発電プラントを取り上げ、COSYMA コードを用いて重大事故の損害推計を行った。このドイツの設計想定外事故の解析例では、放射線防護上の線形リスク係数を用いる限り一度の重大事故で、向こう200年間にわたって欧州全域の3.35億人の被ばく者の中から数万人の致死性ガン患者が発生することになると指摘している（IER, Nov.1997）。しかし、工学的な事故確率をかけた重大事故による損害額は、放射性物質による全損害額の0.1%と非常に低い値となっている。これらは、広域かつ長期にわたる低レベル放射線の健康リスク推計に、放射線防護上の線形閾値無しリスク係数を適用することの問題点のみならず、一般の常識では受容しがたいような事故の影響規模との関係で、専門家と一般市民との間に原子力リスクに対する深い倫理的対立関係を生み出す原因ともなっている。

これらは、これまでの原子力界における放射性排出物に関するリスク評価手法の重大な問題点の所在を示唆しており、低レベル放射線の健康影響評価の在り方については、第2の Atoms for Peace 時代に向けて、改めて抜本的な再検討に着手することが急務となってきている。

特に、広域・長期にわたる低レベル放射線被ばくによる健康影響の評価については、最近、相反する見解が並立するにいたっている。国際放射線防護委員会 (ICRP) や米国の研究評議会 (NRC) は、主に放射線防護面から従来の線形閾値無し (LNT) 仮説を支持しているが、フランスの科学・医学アカデミーは世界の医学、分子生物学、動物実験、疫学等の分野の膨大な調査・試験研究成果のピア・レビュー結果に基づき、また米国エネルギー省の科学局は低レベル放射線の健康影響関連の長期にわたる多角的な基礎研究プログラムの成果に基づき、低レベルの放射線被ばくの場合には、生体防御機構が効果的に作用し始めるため、LNTモデルが成り立たなくなると指摘している。

また、ExternE 研究では、放射線被ばくによる致死性ガン、非致死性ガン及び遺伝的影響の発生確率に、前述のように現代医学の飛躍的進歩を無視した過去のがん死亡統計を用いて、一般公衆に与える将来の健康リスクを試算している。それ故、この ExternE における放射線の健康リスク評価の在り方は、現状では根本的な問題を含んでおり、今後、その評価の在り方の抜本的な見直しに着手すべき段階に入ってきているものといえる。

なお、低レベル放射線被ばくによる健康影響の科学的エビデンスが定かでない以上、化石燃料サイクルのように、そのエビデンスが比較的しっかりした他のサイクルとの損害費用の比較分析は、その妥当性や正当性に欠けるため、当面、慎むべきではないかと考えられる。

表2.1.8 軽水炉（PWR）発電システムの環境損害費用の推計（ドイツの国別実施例：その1）

燃料サイクルの段階	負荷の定量化					影響の定量化			外部（補償）コストの評価			
	排出の定量化		影響経路別負荷定量化			受容体&影響項目	リスク・応答係数	影響値	価値付け手法	参照値	評価値(DRPs) m€CU/kWh	割合
	排出	排出量	影響経路	定量化の方法	負荷量							
採掘・精錬 参照サイト カナダ ウラン鉱石探採量 23.7t/TWh ウラン鉱石のグレード 0.84% 探採のタイプ 露天掘り	放射性物質	Rn-222 2.00E+01 TBq/TWh	大気による拡散	質量変換係数(Sv/Bq) (UNSCEAR,1993)	1.83E+01 manSv	1. 公衆への影響 ①致死性ガン	ICRP係数 0.05	8.2E+01 人/TWh	YOLL VSL	1.50E+00	32.54%	
			吸入 外照射	—	—							②非致死性ガン ③遺伝的影響
	通常事故	死亡 軽傷 重傷	3.10E-04 人/TWh 6.80E-03 人/TWh 1.40E-01 人/TWh	統計	統計	3.10E-04 人/TWh 6.80E-03 人/TWh 1.40E-01 人/TWh	2. 職業人への影響 ④通常の事故による死亡 ⑤通常の事故による重傷 ⑥通常の事故による軽傷	統計値 統計値 統計値	3.1E-04 人/TWh 6.8E-03 人/TWh 4.80E-04	YOLL VSL WTP	9.60E+04 2.60E+04 4.80E-04	0.02% 0.01% 0.01%
転換 運転 COGNEUREX, France UF4への転換 立地: Malvesi, France 能力: 11000t/yr UF6への転換 立地: Pierrelatte, France 能力: 87000t/yr 発電プラントに必要なUF6 20.03t/TWh	放射性物質	U-225 1.50E-08 TBq/TWh	大気による拡散	質量変換係数(Sv/Bq)	2.90E-05 manSv	1. 公衆への影響 ①致死性ガン	ICRP係数 0.05	1.5E-06 人/TWh	YOLL VSL	2.80E-06 4.70E-06	0.00%	
			吸入 外照射	—	—							②非致死性ガン ③遺伝的影響
	通常事故	死亡 軽傷 重傷	1.30E-04 人/TWh 1.70E-03 人/TWh 5.00E-02 人/TWh	統計	統計	1.30E-04 人/TWh 1.70E-03 人/TWh 5.00E-02 人/TWh	2. 職業人への影響 ④通常の事故による死亡 ⑤通常の事故による重傷 ⑥通常の事故による軽傷	統計値 統計値 統計値	1.3E-04 人/TWh 1.7E-03 人/TWh 5.0E-02 人/TWh	YOLL VSL WTP	4.00E-04 6.40E-05 1.70E-04	0.01% 0.00% 0.00%
濃縮 方式 ガス拡散 運転: EURODIF, France 立地: Pierrelatte, France 電気利用 原子力発電	放射性物質	U-225 8.90E-09 TBq/TWh	大気による拡散	質量変換係数(Sv/Bq)	2.40E-05 manSv	1. 公衆への影響 ①致死性ガン	ICRP係数 0.05	1.2E-06 人/TWh	YOLL VSL	2.20E-06 3.70E-06	0.00%	
			吸入 外照射	—	—							②非致死性ガン ③遺伝的影響
	通常事故	死亡 軽傷 重傷	2.80E-04 人/TWh 3.80E-03 人/TWh 1.00E-01 人/TWh	統計	統計	2.80E-04 人/TWh 3.80E-03 人/TWh 1.00E-01 人/TWh	2. 職業人への影響 ④通常の事故による死亡 ⑤通常の事故による重傷 ⑥通常の事故による軽傷	統計値 統計値 統計値	2.8E-04 人/TWh 3.8E-03 人/TWh 1.0E-01 人/TWh	YOLL VSL WTP	5.50E-07 9.30E-07 4.10E-07	0.00% 0.00% 0.00%

表2.1.8 軽水炉 (PWR) 発電システムの環境損害費用の推計 (ドイツの国別実施例: その2)

燃料サイクルの段階	負荷の定量化					影響の定量化			外損(補償)コストの評価			割合	
	排出の定量化		影響経路別負荷定量化			受容体&影響項目	暴露・応答係数	影響値	価値付け手法	参照値	評価値 (DPA/D)		
	排出	排出量	影響経路	定量化の方法	負荷量								
燃料成型 燃料 UO2 運転: FBFC 立地: Pierrelatte, France 能力600t UO2/yr 発電に必要なUO2 2.29t/TWh (24.6t/yr)	放射性物質	U-235	1.30E-10 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) ---	5.70E-06 manSv	1. 公衆への影響 ①放射ガン	ICRP係数 0.05	2.9E-07 人/TWh	YOLL	5.30E-07	0.00%	
		U-234	1.80E-09 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 3.90E-08 2.00E-06		②非致死性ガン ③遺伝的影響	0.12 0.01	8.8E-07 人/TWh 5.7E-08 人/TWh	YOLL WTP VSL	9.00E-07 3.10E-07 1.80E-07	0.00%	
		U-238	4.40E-10 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 3.60E-08 1.90E-06								
		通常事故					2. 職業人への影響 ①放射ガン	ICRP係数 0.04	1.8E-04 人/TWh	YOLL	3.30E-04	0.01%	
		死亡 軽傷 重傷	1.30E-04 人/TWh 1.70E-03 人/TWh 5.00E-02 人/TWh		統計	1.30E-04 人/TWh 1.70E-03 人/TWh 5.00E-02 人/TWh	2. 職業人への影響 ④通常の事故による死亡 ⑤通常の事故による重傷 ⑥通常の事故による軽傷	統計値 統計値 統計値	1.3E-04 人/TWh 1.7E-03 人/TWh 5.0E-02 人/TWh	YOLL VSL WTP VSL	4.00E-04 6.40E-05 1.70E-04	0.01% 0.00% 0.00%	
発電 燃料 UO2 発電 PWR 立地: Southwest of Germany 出力: 1400 MWe 稼働率: 89% 燃費率: 50 MWh/kg	放射性物質	C-14	7.30E-03 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 5.60E-10 5.60E-10	6.30E-01 manSv	1. 公衆への影響 ①放射ガン	ICRP係数 0.05	3.2E-02 人/TWh	YOLL	5.90E-02	1.28%	
		H-3	7.90E-02 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 1.80E-11 1.73E-11		②非致死性ガン ③遺伝的影響	0.12 0.01	7.6E-02 人/TWh 6.4E-03 人/TWh	VSL WTP VSL	8.90E-02 3.40E-02 2.00E-02	0.74% 0.43%	
		I-131	9.50E-07 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 2.20E-08 1.30E-06								
		希ガス エアロゾル					2. 職業人への影響 ①放射ガン	ICRP係数 0.04	1.6E-02 人/TWh	YOLL	2.80E-02	0.63%	
		放射性物質(重大事故) GRS.1994シナリオ別 イベントリー				KeSer.1994 による事故発生確率	3. 重大事故による公衆への健康影響 ⑦重大事故による致死性ガン ⑧重大事故による非致死性ガン ⑨重大事故による遺伝的影響	ICRP係数 0.05 0.12 0.01	8.5E-04 人/TWh 2.3E-03 人/TWh 1.9E-04 人/TWh	YOLL VSL WTP VSL	1.70E-03 2.80E-03 1.00E-03 5.80E-04	0.04% 0.02% 0.01%	
	通常事故	死亡 軽傷 重傷	7.80E-04 人/TWh 1.70E-02 人/TWh 8.10E-01 人/TWh		統計	7.80E-04 人/TWh 1.70E-02 人/TWh 8.10E-01 人/TWh	2. 職業人への影響 ④通常の事故による死亡 ⑤通常の事故による重傷 ⑥通常の事故による軽傷	統計値 統計値 統計値	7.8E-04 人/TWh 1.7E-02 人/TWh 8.1E-01 人/TWh	YOLL VSL WTP VSL	2.40E-03 6.40E-04 2.70E-03	0.05% 0.01% 0.06%	
再処理 運転 COGEMA 立地 La Hague, France 手続き PUREX UP3プラントの能力 800 t/yr 発電プラント必要量 2.29 t/TWh	放射性物質	C-14	3.80E-02 人/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 5.60E-10 5.60E-10	3.30E+00 manSv	1. 公衆への影響 ①放射ガン	ICRP係数 0.05	1.6E-01 人/TWh	YOLL	2.80E-01	8.29%	
		H-3	2.40E-02 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 1.80E-11 1.73E-11		②非致死性ガン ③遺伝的影響	0.12 0.01	4.0E-01 人/TWh 3.3E-02 人/TWh	VSL WTP VSL	5.00E-01 1.80E-01 1.00E-01	2.17%	
		I-129	2.70E-05 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 1.10E-07 6.70E-08								
		I-131	3.80E-07 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 2.20E-08 1.30E-06								
		I-133	1.70E-07 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) ---								
		Pu-238	5.40E-12 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 2.60E-07 6.20E-05								
		Pu-239	1.20E-11 TBq/TWh	大気による拡散 吸入 外部被曝	総量変換係数 (Sv/Bq) 2.60E-07 6.80E-05								
		希ガス											

表2.1.8 軽水炉（PWR）発電システムの環境損害費用の推計（ドイツの国別実施例：その3）

燃料サイクルの段階	負荷の定量化					影響の定量化			外部(損害)コストの算出		割合
	排出の定量化		影響経路別負荷定量化			受容体&影響項目	暴露-応答係数	影響値	算出付け手法	参照値	
	排出	排出量	影響経路	定量化の方法	負荷量						
(続く)			職業人の被曝	モニタリングによるデータ	9.30E-04 manSv	2. 職業人への影響 ①致死ガン	ICRP係数 0.04	3.7E-05 人/TWh	YOLL VSL	8.80E-05	0.00%
	通常事故	死亡 軽傷 重傷		統計	4.00E-04 人/TWh 5.40E-03 人/TWh 1.40E-02 人/TWh	2. 職業人への影響 ④通常の事故による死亡 ⑤通常の事故による重傷 ⑥通常の事故による軽傷	統計値 統計値 統計値	4.0E-04 人/TWh 5.4E-03 人/TWh 1.4E-02 人/TWh	YOLL VSL	1.20E-03 2.00E-04 4.80E-05	0.03% 0.00% 0.00%
商業施設	放射性情質		職業人の被曝	モニタリングによるデータ	1.40E-01 manSv	1. 公衆への影響 ①致死ガン	ICRP係数 0.05	7.0E-03 人/TWh	YOLL VSL	1.30E-02	0.28%
地下 地表			職業人の被曝	モニタリングによるデータ	1.20E-02 manSv	2. 職業人への影響 ①致死ガン	ICRP係数 0.04	4.8E-04 人/TWh	YOLL VSL	8.80E-04	0.02%
						②非致死性ガン ③遺伝的影響	0.12 0.006	1.7E-02 人/TWh 1.4E-03 人/TWh	WTP VSL	7.70E-03 4.30E-03	0.17% 0.09%
輸送	放射性情質		職業人の被曝	モニタリングによるデータ	1.30E-03 manSv	1. 公衆への影響 ①致死ガン	ICRP係数 0.05	6.5E-05 人/TWh	YOLL VSL	1.20E-04	0.00%
全ての輸送段階 道路輸送・鉄道輸送			職業人の被曝	モニタリングによるデータ	1.20E-03 manSv	2. 職業人への影響 ①致死ガン	ICRP係数 0.04	4.8E-04 人/TWh	YOLL VSL	8.80E-05	0.00%
						②非致死性ガン ③遺伝的影響	0.12 0.006	1.4E-03 人/TWh 7.2E-05 人/TWh	WTP VSL	6.30E-05 2.20E-05	0.00% 0.00%
濃縮と燃焼	放射性情質		職業人の被曝	モニタリングによるデータ	2.20E-02 manSv	2. 職業人への影響 ①致死ガン	ICRP係数 0.04	8.6E-04 人/TWh	YOLL VSL	1.60E-03	0.03%
	通常事故	死亡 軽傷 重傷		統計	7.80E-04 人/TWh 1.70E-02 人/TWh 8.10E-01 人/TWh	2. 職業人への影響 ④通常の事故による死亡 ⑤通常の事故による重傷 ⑥通常の事故による軽傷	統計値 統計値 統計値	5.7E-03 人/TWh 1.6E-01 人/TWh 6.5E+00 人/TWh	YOLL VSL	1.80E-02 8.00E-03 2.20E-02	0.39% 0.13% 0.48%
金スチージ	非放射性情質 CO2 NOx PM10 SO2	1.87E+04 g/kWh 7.00E+01 g/kWh 7.00E+00 g/kWh 3.20E+01 g/kWh				1. 公衆への影響 ①喘息・呼吸器障害			YOLL VSL	5.70E-01 2.70E+00	12.36%
						3. 地球温暖化影響 ①温暖化による損害(低位推計) ②温暖化による損害(中位3%推計) ③温暖化による損害(中位1%推計) ④温暖化による損害(高位推計)				7.50E-02 3.50E-01 9.10E-01 2.70E+00	7.59%
合計									YOLLベース (VSLベース)	4.81E+00 (6.03E+00)	100%

※温暖化による損害(中位3%推計)を利用

### 2.1.7. ExternE で指摘された課題とわが国の外部性研究推進の方向

#### (1) ExternE 研究において指摘された課題

1991年に開始された欧州委員会の ExternE プロジェクト研究では、広大なスコープを有したエネルギー外部性の解析と評価に係わる研究とその実証に多額の資源を投入してきた。しかし、この解析と評価は、科学的知見の進歩に応じて絶えず更新していく必要があるとして、以下のような点が、今後の継続検討課題として提起されている（EC,1999a）。

##### ① 輸送外部性評価用ツールのさらなる開発

輸送の分野では、EcoSense モデルに匹敵するような首尾一貫したツールを開発することが、将来の優先課題として位置づけられる。このモデルは道路輸送に加えて鉄道輸送、航空及び海運を含む。（筆者注：すでに 1998-99 年に検討が実施されている。）

##### ② 線量・応答や価値付け等に関する情報の更新

プロジェクトの成果は、システム内に保有されたデータが最新の情報に更新され続ける限り、有用性を失わないであろう。この分野の研究が近年進歩してきたのと同じ速度で、専門家の判断、なかでも健康、生態環境、価値付け及び気候変動における情報が確保されることが最も重要である。（筆者注：低レベル放射線の線量・応答関数や広域・長期の累積的影響の評価については、生体防御機構面から見た最新の生命科学・動物実験・医学・疫学等の科学的エビデンスに基づく再検討に着手することが必要。）

##### ③ 複雑なオゾン用モデルの緊密な統合

Phase III で提供された方法論の改訂版は、現時点での欧州における代表的な結果を提示できる光化学モデルの結果に基づく一般化された手法を採用している。さらなる改善が、局所、地域及び地球規模でのオゾンの広範な変異の故、必要とされる。

##### ④ 地球温暖化評価の改善

地球温暖化評価の改善は、よりよい入力データと洗練されたモデリング手法が役立てうるようになるので、数年間かけて行われることになろう。（筆者注：気候変動による影響については損害関数法に基づく推計の科学的不確実性が余りに高すぎるため、次善の策として対策費用法（コントロール・コスト法）に基づく分析が必要）

##### ⑤ モデリング・アプローチを確実なものとする

モデル解析をさらに確実なものとする活動を通じて、推計結果ができる限り正確であることを保証し、かつ不確実性の記述に役立つようにすることが必要である。

##### ⑥ LCA との方法論上の調和と持続可能性指標の利用

LCA のよりよい統合と持続可能性指標の利用が、分析の適用範囲を広め、方法論をより厳密なものにするであろう。（筆者注：この課題については、NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability) プロジェクトとして、2004 年 9 月から 4 年間にわたって、63 のパートナーの参加、700 万ユーロの予算を投じて実施されつつある。）

##### ⑦ エネルギーシステムの最適化

ExternE における幾つかの研究は、再生可能エネルギーの競争力に関して、すでにエネルギーシステムの最適化問題に取り組んでいる。欧州委員会と UNECE は、外部性評価を温室効果ガス

削減のような単一争点への対応から、酸性化、富栄養化及び地表レベルオゾンも含む複合汚染物質評価の方向にシフトさせることに合意している。

#### ⑧ 途上国への方法論の外挿適用

ExternE で開発された方法論を、途上国等により広く普及させようとする強いニーズがある。この点は中国のような幾つかの地域では開発が急速なので特に緊急を要している。(筆者注：すでに IIASA による試行解析が実施済みである。)

### (2) わが国における今後の外部性研究推進の方向

#### ① 環境外部性に係る解析・評価研究の推進

##### (a) 大気汚染物質による環境外部性の解析・評価システムの開発について

欧州では広域の環境外部性評価を可能とするため、ガウスのプルーム・モデルと風配軌道モデルとを統合化した EcoSense モデルを独自に開発し、欧州全域 (1500~2000km 程度) の広域的な大気環境影響の解析と損害評価を可能としている。一方、我が国においては、ローカルなモデルとグローバルなモデルは運用されているが、EcoSense モデルのような環境外部性評価に必要なリージョナルなモデルは未開発なままである。日本列島の場合、特異な固有の地形・地域気象特性を有しているため、欧米の大陸国家に比べ、その広域的な健康損害は比較的小さいと見込まれるが、中国からの影響の解析も可能なリージョナルなモデルの開発の必要性は高い。また、わが国独自の曝露・応答関数や統計的生命の価値等の経済的価値付けに係わるデータベースを多角的な調査研究を通じて整備し、わが国の地域環境に適した環境外部性に係る評価システムを構築していくことが期待される。

##### (b) 低レベル放射線による広域・長期の健康影響の評価について

前述のように、広域・長期にわたる低レベル放射線被ばくによる健康影響の評価については、最近、相反する見解が並立するにいたっている。国際放射線防護委員会 (ICRP, 2004) や米国の研究評議会 (US-NRC, 2006) は、主に放射線防護面から従来の線形閾値無し (LNT) 仮説を支持しているが、フランスの科学・医学アカデミーは世界の医学、分子生物学、動物実験、疫学等の分野の膨大な調査・試験研究成果のピア・レビュー結果 (AS and NAM, 2005) に基づき、また米国エネルギー省の科学局は低レベル放射線の健康影響関連の長期にわたる多角的な基礎研究プログラムの成果 (US-DOE, 2005) に基づき、低レベルの放射線被ばくの場合には、生体防御機構が効果的に作用し始めるため、LNT モデルが成り立たなくなると指摘している。

また、ExternE 研究では、放射線被ばくによる致死性ガン、非致死性ガン及び遺伝的影響の発生確率に、前述のように現代医学の飛躍的進歩を無視した過去のがん死亡統計を用いて、一般公衆に与える将来の健康リスクを試算している。この ExternE における放射線の健康リスク評価の在り方は、現状では根本的な問題を含んでいる。それ故、今後、わが国としてもフランスの科学・医学アカデミー共同報告や米国エネルギー省科学局の研究成果のレビューを参照しつつ、わが国独自の低線量放射線に関する健康影響の国家的な研究プログラムの立案と実施、及び健康リスク評価のあり方に関する本格的な調査研究に着手することが求められてきているものといえる。

##### (c) 温室効果ガスによる気候変動損害の推計について

ExternE の方法は、ボトムアップ法と呼ばれるもので大気汚染には適している。しかし、地球規模の気候変動損害をボトムアップ法で推計するには限界がある他、様々な要因が未だ明確にな

っていないので科学的不確実性が非常に大きい (EC,1999b) ため、現状では損害を適切に評価することが困難である。それ故、今後の気候変動問題への対応にあたっては、気候変動損害推計手法の調査研究を中・長期的に推進するとともに、当面は、市場価格法を基本としたコントロール・コストアプローチによる対策費用の研究とそのデータベース整備が重要となる。この後者の典型的な研究事例としては、米国エネルギー省エネルギー情報局が、1998年に下院科学委員会に報告した排出量取引に基づく京都議定書の米国エネルギー市場への影響評価事例 (US-DOE/EIA, 1998) が挙げられる。

## ② 次世代の革新的な外部性評価研究の推進

一般社会で理解されている広義の外部性の概念は、環境・健康影響のみならず、どちらかという、外生的リスク要因による社会的、政治的、経済的な波及影響 (負の効果と正の効果の両者) まで含んでいる。それ故、以下の分野でも検討を深めていくことが期待されるが、この場合、ExternE プロジェクトがその基本前提としてきたピグーの外部性概念 (Pigou, A.C., 1932) のみではその包摂は困難であり、波及効果を基本としたマーシャルの金銭的外部性の概念 (Marshall, A., 1920) の他、社会心理学や政治学の範疇である社会的外部性概念 (§ 1.2 参照) まで含めた、次世代の革新的な外部性評価研究の概念枠組みの検討を深めていくことが必要である。

なお、昨年 (2005 年)、数年間の試行期間を経て策定された欧州委員会の Impact Assessment Guidelines (EC, 2005b) は、欧州連合の主要政策を対象として、その環境、経済及び社会への包括的な影響評価を義務付けており、ここでの次世代の外部性要因をも包摂したものとなっている。

### (a) 国際的なエネルギーセキュリティ分野

ギガトレンド時代における OPEC 諸国等の原油等燃料の供給抑制・削減・中断等の外生要因による資源輸入国の国民所得の移転損失リスク、及び長期的な資源枯渇リスクに対する中・長期のエネルギーセキュリティ対策の検討

### (b) 社会的・政治的・制度的なリスク要因による電力の安定供給分野

社会的・政治的・制度的なリスク要因による原子力リスク忌避問題、電源立地・プルサーマルの中断問題、JCO 臨界事故時等の風評被害問題、電力市場自由化制度の欠陥による米国加州の電力危機問題、及び安全規制制度の不備とその遵守違反による東電の原発全基停止問題、ならびにこれら諸問題の事前防止や対処方策の検討。なお、ここでの社会的・政治的・制度的なリスク要因による影響問題には、放射線防護上の LNT 仮説の適用による社会的外部性問題が含まれる。

### (c) 国際的な安全保障上のリスク要因に係わる分野

核拡散や核テロ等の国際的な安全保障上のリスク要因による政治経済的波及影響問題、およびこれらの保障措置や核物質防護対策などの検討

参考文献

- (1) AS and NAM(2005), "Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation.", Joint Report of the Académie des Sciences (Paris) and of the Académie Nationale de Médecine, March 30, 2005
- (2) Cropper, M. and F. Sussman, (1990), "Valuing Future Risks to Life," *Journal of Environmental Economics and Management*, 19
- (3) Cutler, D. and E. Richardson, (1998), "Measuring the Health of the U.S. Population," *Brookings Papers: Microeconomics 1997*
- (4) Dow, W. et al., (1999), "Longevity Complementarities under Competing Risks," *American Economic Review*, 89
- (5) EC(1995), ExternE ; Vol. 2 Methodology, European Commission
- (6) EC(1999a), ExternE ; Vol. 7 Methodology 1998 update, European Commission
- (7) EC(1999b), ExternE ; Vol. 8 Global Warming, European Commission
- (8) EC(1999c), ExternE ; Vol. 10 National Implementation, European Commission
- (9) EC(2005a), ExternE ; Methodology 2005 update, European Commission
- (10) EC(2005b), Impact Assessment Guidelines, European Commission
- (11) Freeman III, A. M., (1993), "The Measurement of Environmental and Resource Values, Resources for the Future"
- (12) Garber, A. and C. Phelps, (1997), "Economic Foundation of Cost-effectiveness Analysis," *Journal of Health Economics*, 16, 1-31.
- (13) IAEA (2006a), Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, The Chernobyl Forum: 2003-2005 Second revised version.
- (14) IAEA (2006b), Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience, Report of the UN-Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'
- (15) ICRP Com.1 TG (Dec. 10, 2004), "Low-dose Extrapolation of Radiation-Related Cancer Risk: Draft."
- (16) IER (1997) ; ExternE National Implementation-Germany
- (17) I. V. Filyushkin (1996), "The Chernobyl Accident and the resultant long-term relocation of people", *Health Physics* Vol.71 No.1
- (18) J E Berry et al. (1998) ; *Power Generation and the Environment - a UK Perspective*, Vol. 1, AEA Technology.
- (19) Johannson, P., (2001), "Is There a Meaningful Definition of the Value of a Statistical Life?", *Journal of Health Economics*, 20
- (20) Johannesson, M. and P. Johannson (1996). "To Be, or Not to Be, That is the Question: AN Empirical Study of the WTP for an Increased Life Expectancy at an Advanced Age," *Journal of Health Economics*, 20
- (21) Marshall, A.(1920), *Principles of Economics*, 8th ed., London
- (22) O. Hohmeyer et al. (1988) ; *Social Costs of Energy Consumption*, Springer-Verlag.
- (23) Pigou, A.C. (1932), *The Economics of Welfare*, 4th ed., London
- (24) Sen. Amartya K. (1970), *Collective Choice and Social Welfare*, Holden-Day Inc. (志田基与師訳(2000)「集合的選択と社会的厚生」、けい草書房)
- (25) Tibor Scitovsky (1954), Two concepts of external economies, *The Journal of Political Economy*, April

1954

- (26) US-DOC-NIST (2003), A Toolkit for Evaluating public R&D Investment-Models, Methods and Findings from ATP's First Decade, NIST GCR 03-857, p. 96.
- (27) US-DOE/EIA (Oct. 1998), Impacts of the Kyoto Protocol on U.S. Energy Markets and Economic Activity.
- (28) US-DOE (2005), "Low Dose Radiation Research Program", DOE Radiological Protection Workshop, Office of Science, U.S.DOE, Nov. 2005
- (29) US-EPA(1999), The Benefits and Costs of the Clean Air Act: 1990 to 2010, EPA Report to Congress
- (30) US-HCS (1998), Unlocking our future : Towards a New Science Policy, The House Committee on Science
- (31) US-NRC (2006), "Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2", Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Board on Radiation Effects, Research Division on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academies.
- (32) US-DOE & EC (1995), Estimating externalities of nuclear fuel cycles, Report No.8 on the external costs and benefits of fuel cycles,
- (33) WHO (2006a), "Health effects of the Chernobyl accident : an overview
- (34) WHO (2006b), " Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes"
- (35) 赤井 伸郎,金本 良嗣(1999)「第4章 費用便益分析における地域開発効果」、『費用便益分析に係わる経済学的基本問題』、社会資本整備の費用効果分析に係る経済学の問題研究会、1999年11月
- (36) 池本一郎(2003)「京都メカニズムと原子力」、AESJ 第4回外部性研究専門委員会報告
- (37) 市川節子(2002)「欧米での大気汚染物質に対する健康影響の定量評価 および我が国への適用と今後の研究課題」、AESJ 第2回外部性研究専門委員会報告
- (38) 伊東慶四郎(2000)「総論：エネルギー外部性研究の概要」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (39) 伊東慶四郎(2002)『 環境外部性評価の目的と方法の概説—環境損害低減便益の計測』、「外部性研究の全体構造と ExternE からの発展」、AESJ 第1回外部性研究専門委員会報告
- (40) 伊東慶四郎(2003a)「リスク論に基づくエネルギー外部性研究の範囲とその現状」、AESJ 第5回外部性研究専門委員会報告
- (41) 伊東慶四郎 (2003b)「低線量放射線の健康リスク評価システムの開発について」、Atoms for Peace for Japan/Asia 会議（日本原子力学会主催）
- (42) 伊東慶四郎 (2006)「エネルギー外部性研究の概要と今後の推進方向—第2の Atoms for Peace 時代への戦略的対応—」、(社)原子力産業会議第457回総合企画委員会講話用資料
- (43) 植田和弘(1996)「環境経済学」、現代経済学入門、岩波書店
- (44) 内山洋司(2000)「環境影響評価の方法論」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (45) 大塚直(2000)「東海村臨界事故と損害賠償」、ジュリスト 2000.10.1 (No.1186)
- (46) 岡敏弘(1997)「厚生経済学と環境政策」、岩波書店
- (47) 岡敏弘(1999)、「環境政策論」、岩波書店
- (48) 岡敏弘(2002)「第4章 外部負経済論」、岩波講座「環境経済・政策学」第1巻 環境の経済理論
- (49) 勝木知里(2000)「各発電システムの外部費用—原子力発電システム」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (50) 川島啓(2000)「重大事故リスクの評価」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (51) 岸本充生(2002)「大気汚染物質による健康影響の定量評価および金銭的評価の現状と課題」、

AESJ 第1回外部性研究専門委員会報告

- (52) 關哲雄, 庭田文近(2000)「外部費用評価の理論的側面—環境の経済的評価手法」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (53) 谷口武俊(2000)「わが国における発電システムの外部性評価の実施に向けて」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (54) 時松宏治(2002)「エネルギー環境モデルとCO<sub>2</sub>削減評価」、AESJ第3回外部性研究専門委員会報告
- (55) 松川勇(2000)「外部費用評価の実証的側面：公衆の健康損害に関するエネルギー外部性の評価手法」、エネルギー・資源 Vol.21 No.6
- (56) 松原純子(2001)「低線量の放射線影響の実態」、日本原子力学会誌 Vol.43, NO.8
- (57) 松原純子(2003)「日常の放射線被ばくと放射線影響の実態」、私たちの健康と放射線被ばく—低線量の放射線影響を考える、内閣府原子力安全委員会主催討論会講演要旨集、平成15年3月14日

## 2.2. 大気汚染物質による健康影響の定量評価の現状と課題

岸本 充生

### 2.2.1. はじめに

浮遊粒子状物質 (Particulate Matter: PM) 曝露の疫学調査が数多く行われ、データが蓄積してきたことにより、大気汚染物質による健康影響の定量評価の試みが欧米で多くなされるようになった。その背景には、欧米で規制影響分析 (Regulatory Impact Analysis / Assessment: RIA) が制度化され、規制を導入しようとする省庁は、規制導入によって得られる便益を定量的に、さらには金銭的などのくらの大きさであるかを説得的に示す必要に迫られたことがある。そのために、疫学調査や動物実験、あるいは調査結果を解析するための統計手法の開発に大きな予算と人員が投入された。本節では、PM への曝露による健康影響の定量評価の方法と現状についてまとめるとともに、日本の大気汚染状況への適用を試みる。なお、本節では PM を浮遊粒子状物質の総称として用いる。PM10 は粒径が  $10\mu\text{m}$  以下の粒子のうち、カットオフ粒径 50% のもので、日本において PM の環境基準値が設定されている SPM とはカットオフ粒径 100% のものである。粒子サイズが小さいほど健康影響との関連が強いと言われており、粒径が  $2.5\mu\text{m}$  以下の粒子を PM2.5 と呼ぶ。ディーゼル排気粒子は PM2.5 の大部分を占めているとされている。

### 2.2.2. PM 疫学調査の進展

#### (1) 短期曝露から長期曝露へ

当初は、大気中 PM 濃度の日々の変動と、住民の呼吸器系疾患への罹患率や死亡率との相関を地域レベルで時系列的に明らかにする短期曝露研究 (時系列研究) が世界各地で実施され、PM 濃度と死亡率に相関があることが見出された (Pope and Dockery 1999)。ただし、短期曝露研究が拾い上げる「死者」には、大気汚染がなくとも近いうちに死亡するはずであった人々の死期を数日あるいは数週間だけ早めたにすぎない場合が多く含まれていると考えられる。他方、PM への慢性曝露による健康影響を見逃しているという欠点もあった。

近年、長期に渡る追跡調査を実施した長期曝露研究 (前向きコホート研究) の結果が報告され、PM への曝露と健康影響との相関をより強固なものとした。そのひとつが、全米 6 都市のおよそ 8 千人を 14~16 年間追跡した「ハーバード 6 都市研究」(Dockery et al. 1993) であり、もうひとつが全米 154 都市のおよそ 50 万人を 8 年間追跡した「全米がん協会 (ACS) 研究」(Pope et al. 1995) である。ともに、PM 曝露と死亡率の間に、短期曝露研究の結果よりも大きな相対リスク値 (Relative Risk: RR) が導出された。これらに基づいて、米国環境保護庁 (Environmental Protection Agency: EPA) は、従来の PM10 の環境基準に加えて、新たに PM2.5 の環境基準値を提案した。このとき提出された RIA では、年間およそ 15,000 人が救命されると推計された (U.S. EPA 1997a)。ところが、莫大な対策費用がかかるこの提案に対して産業界は強く反発し、先に紹介した 2 つの長期曝露研究に疑いの目を向け、疫学調査で収集されたデータの開示を求めた。そこで、産業界と政府が資金を提供している非営利団体である健康影響研究所 (Health Effects Institute: HEI) が中立的な分析を行うことになった。HEI が 2 つの長期研究で用いられたデータを再解析した結果、もとの研究とほぼ等しい結果を得た (Health Effects Institute 2000)。

全米がん協会 (ACS) 研究ではその後もコホート集団の観察が続けられ、2002 年には観察期間をおよそ 16 年に延ばした続報が報告された (Pope et al. 2002)。Pope et al. (1995) では微小粒子濃度と肺がん死亡率の間には統計的に有意な相関を見出すことはできなかったが、Pope et al. (2002) で

は「すべての死因」「循環器系・呼吸器系疾患による死亡」だけでなく、「肺がんによる死亡」についても統計的に有意な相対リスク値が導出された(表 2.2.1)。さらに、Pope et al. (2004) では、Pope et al. (2002) で「循環器系・呼吸器系疾患による死亡」としてひとくくりにされていた死因を細かく分類したデータが発表された。PM2.5 濃度と循環器系疾患の間にははっきりとした相関が見られた一方で、呼吸器系疾患との間には相関が見られないことが分かった。

表 2.2.1 PM2.5 が  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  上昇するときの調整相対リスク (ACS研究)

死因	調整相対リスク (95%信頼区間)		
	PM2.5濃度の指標 1979-1983	PM2.5濃度の指標 1999-2000	PM2.5濃度の指標 両者の平均
すべての原因	1.04 (1.01-1.08)	1.06 (1.02-1.10)	1.06 (1.02-1.11)
循環器系・呼吸器系疾患	1.06 (1.02-1.10)	1.08 (1.02-1.14)	1.09 (1.03-1.16)
肺がん	1.08 (1.01-1.16)	1.13 (1.04-1.22)	1.14 (1.04-1.23)
その他	1.01 (0.97-1.05)	1.01 (0.97-1.06)	1.01 (0.95-1.06)

出典) Pope et al. (2002) の Table 2 を引用

他方、ハーバード6都市研究でも、Laden et al. (2006) において観察期間を1998年まで延ばした結果が報告された(表 2.2.2)。ここでも、観察期間を延ばすことによって「肺がんによる死亡」の相対リスクが大きくなった。また、Dockery et al. (1993) では「循環器系・呼吸器系疾患による死亡」としてひとくくりにされていた死因を循環器系と呼吸器系に区別し、「循環器系疾患による死亡」には強い相関が見られるが、「呼吸器系疾患による死亡」とは統計的に有意な相関が見られないことが明らかになった。

表 2.2.2 PM2.5 が  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  上昇するときの調整相対リスク (6都市研究)

死因	症例	調整相対リスク (95%信頼区間)		
		モデル1	モデル2	
		全期間(1974-1998) 平均PM2.5濃度	第1期(1980-1988) 平均PM2.5濃度	両期間の平均 PM2.5濃度の減少
すべての原因	2,732	1.16 (1.07-1.26)	1.18 (1.09-1.27)	0.73 (0.57-0.95)
循環器系疾患	1,196	1.28 (1.13-1.44)	1.28 (1.14-1.43)	0.69 (0.46-1.01)
呼吸器系疾患	195	1.08 (0.79-1.49)	1.21 (0.89-1.66)	0.43 (0.16-1.13)
肺がん	226	1.27 (0.96-1.69)	1.20 (0.91-1.58)	1.06 (0.43-2.62)
その他	1,115	1.02 (0.90-1.17)	1.05 (0.93-1.19)	0.85 (0.56-1.27)

出典) Laden et al. (2006) の Table 3 を引用

## (2) 健康影響の定量評価

疫学調査の蓄積により、それらの結果を使って、実際の健康影響の大きさや対策の効果の大きさを定量的に見積もる試みが現れた。1994年、New Scientist 誌にイングランドとウェールズにおいてPM10への曝露によって年間1万人が死亡しているという記事が載り話題になった。1996年には、

ブループリント・シリーズの第5巻として『道路交通の真のコスト』が刊行され、自動車走行に起因する大気汚染によって英国で年間およそ 6,700 人が死亡していると推計された。米国でも同年、環境NGOの自然資源防衛委員会 (NRDC) が主要 239 都市において、PM10 への曝露により年間 64,000 人が死亡しているとする報告書を発表した。

他方、公的機関でも同様に、健康影響や対策による効果の定量的な推計が行われた。英国の健康省 (Department of Health) は、PM10 の排出により年間 8,100 人が死亡しているとする報告書を発表した。米国 EPA では、環境規制の便益が費用を上回ることを示すために、PM への曝露が減ることによる健康影響、特に死亡者数の減少を積極的に定量化および金銭価値化を行っている。表 2.2.3 に初期の定量評価の事例を示した。

表 2.2.3 PM10 への曝露による健康影響の定量化の初期の事例

文献	対象地域	対象物質	健康影響の推定結果
Brown (1994) (New Scientist誌)	イングランド、 ウェールズ	PM10	年間およそ10,000人が死亡
Maddison et al. (1996) ("Blueprint 5: The True Costs of Road Transport")	英国	PM10, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , オゾン, ベンゼン, 鉛	道路交通起因の大気汚染によって年間 およそ6,700人が死亡
Natural Resources Defense Council (1996) (米国の主要な環境NGO)	米国主要 239都市	PM10	年間64,000人が死亡
U.S. Environmental Protection Agency (1997b)	米国	PM10, オゾン, CO, 鉛, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	大気清浄法 (Clean Air Act) の1970~ 1990年までの効果を計算。1990年時点で 184,000人が救命。
U.K. Department of Health (1998)	英国	PM10, SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , オゾン	PM10により年間8,100人, SO <sub>2</sub> により年間 3,500人が死亡。
U.S. Environmental Protection Agency (1999)	米国	PM10, オゾン, CO, 鉛, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	大気清浄法 (Clean Air Act) の1990~ 2010年までの効果を計算。2010年時点で 23,000人が救命。
Kunzli et al. (2000) (Lancet誌)	スイス, フランス, オーストリア	PM10	1年間にオーストリアで5,600人, フランス で31,700人, スイスで3,300人が死亡。

### (3) 子供を対象とした疫学

近年では、人口全体ではなく、胎児、子供、すでに病気を持っている人といった生物学的弱者に焦点を当てた疫学調査も多く行われるようになった。子供に注目する理由として Schwartz (2004) は次のような点を挙げている。(1) 肺は生まれてすぐに完成するものではなく、6 歳くらいでやっと成熟する。肺胞の数は、成人が 2 億 5700 万であるのに対して 4 歳時点ではまだ 2400 万である。このため肺の上皮層が薄く、汚染物質が浸透しやすい。また、体重あたりの肺の表面積が成人よりも大きく、体重あたりの吸入量は成人の 1.5 倍である。(2) 免疫系も同様に不完全なまま生まれ、その後発達する。(3) 子供は成人よりも多くの時間を屋外で過ごし、また活発に動くことで呼吸量を増す。これは特にオゾンへの曝露において重要となる。PM は簡単に室内にも入ってくるので濃

度差はないが、オゾンは室内ではほとんど曝露しない。

PM曝露の胎児への健康影響に関する疫学調査は Glinianaia et al. (2004a) において、PM曝露の新生児の死亡率への影響に関する疫学調査は Glinianaia et al. (2004b) においてレビューされている。前者では、彼らの定めた基準に合致した 12 の疫学研究からははっきりとした結論はいえないとされた。後者では、彼らの定めた基準に合致した 15 の疫学研究から一貫性のある結論は得られなかったが、生後 28 日から 1 年以内の乳幼児突然死症候群 (SIDS) や呼吸器系疾患による死亡率に関して PM 濃度との間に強い相関が見られた。

後者で取り上げられた Woodruff et al. (1997) で得られた相対リスクを用いて、Kaiser et al. (2004) は、米国の 23 都市の 25 カウンティ (人口総計はおよそ 4000 万人) において、1995~1997 年に生まれ、新生児期間 (生後 1 ヶ月) を生き延びた 70 万人の零歳児を対象に、PM曝露による死亡者数を推計した (表 2.2.4)。PM10 が  $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下の地域については寄与死亡者数の計算は行われなかった。 $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  というのは、Woodruff et al. (1997) で観察された濃度の最低値 ( $=11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) に相当する。

表 2.2.4 米国 23 都市における PM 曝露による新生児 (生後 1 ヶ月~1 年) 死亡者数の推計

死因	推計された寄与割合 (AF)	寄与死亡者数
すべての原因	6% (3~11%)	106人 (53~185人)
乳幼児突然死症候群 (SIDS) (通常体重児)	16% (9~23%)	79人 (46~111人)
呼吸器系疾患 (通常体重児)	24% (7~44%)	15人 (5~27人)

出典) Kaiser et al. (2004) の Table 1 や本文中より作成 (括弧内は 95%信頼区間)

Valent et al. (2004a) は、欧州の子供を対象に、大気汚染、室内空気汚染、不十分な水道衛生、鉛曝露、傷害による疾病負担 (burden of disease) を計算する中で、大気汚染については、大気中の PM10 への短期曝露による 0~4 歳児の死亡者数が計算された。5 つの疫学文献から曝露反応関係をモデル化し、0~4 歳児の 1 日あたり死亡リスクをエンドポイントとすると、PM10 濃度が  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  上昇するとき、日々の死亡率が 1.66% (95%信頼区間 0.34~3.00) 増加することが分かった。閾値として次の 2 つが考えられた。ひとつは人為発生源がない場合のバックグラウンド濃度としての  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  である。この場合、得られた件数は寄与死亡者数 (attributable mortality) と解釈される。もうひとつは欧州が 2010 年までに達成することを目標としている年間平均値である  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  である。この場合は得られた件数は回避可能死者数 (avoidable mortality) と解釈される。結果を表 2.2.5 に示した。

表 2.2.5 欧州における大気汚染による 0~4 歳児の死亡者数の推計

地域	死亡者数 (閾値:10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	死亡者数 (閾値:20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	全死因に対する 割合 (閾値:20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	10,000人あたりの 死亡者数 (閾値:20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
地域A (西)	541	178	0.8%	0.08
地域B (中)	12,770	10,617	7.5%	5.91
地域C (東)	3,811	3,001	5.8%	2.64
合計 (平均)	17,122	13,796	6.4%	2.68

出典) Valent et al. (2004a) の Table 3 & 6 より作成

### 2.2.3. 日本における大気汚染問題への適用

#### (1) SPM 曝露による肺がんリスク

Pope et al. (2002) で得られた肺がんの調整相対リスクを用いて、日本においてSPM曝露によって追加的に肺がんで死亡する人数の推計を試みる。利用するデータは、各県ごとの一般測定局の平均SPM濃度 (1998年から2002年までの5年間平均値) から予測したPM2.5濃度と県別人口 (2002年) である。各県の人口すべてが、同じ濃度に曝露しているという前提であるが、これは、沿道での曝露を過小評価し、過疎地域の曝露を過大評価していることになる。SPM濃度のうち、バックグラウンド濃度を12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と仮定する。用量反応モデルは、米国EPAが採用している対数線形モデルである次式を利用する。

$$\Delta\text{mortality} = - [y_0 \times (e^{-\beta \times \text{PM}_{2.5}} - 1)]$$

ここで、 $y_0$ はベースライン死亡者数で、30歳以上の県別肺がん死亡者数 (2002年) である。 $\beta = \text{LN}(\text{RR}_{10})/10$  であり、PM2.5濃度が10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇するときの調整相対リスク値である $\text{RR}_{10}$ には1.14 (1.04~1.23) (表 2.2.1 参照) を用いる。PM2.5濃度は、県別の平均SPM濃度を、 $\text{PM}_{2.5} = \text{SPM} \times 0.782$  という関係式に従って変換して求めた。この係数は、根津・坂本 (2000) において測定された7地域計14回の測定データの平均値である。計算の結果、人為的な排出源による年間肺がん死亡者数は、8,152人 (2,851~11,343人) となった。これは日本における年間肺がん死亡者数の14.4% (5.0~20.2%) に相当する。

#### (2) SPM 曝露による零歳児の健康リスク

先に取り上げたKaiser et al. (2004) による零歳児の死亡リスク計算を、カウンティを県に置き換えて日本に適用する。データは2002年のものを使った。式は次のような対数線形モデルで、バックグラウンド濃度を12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ とした。

$$\Delta\text{post neonatal mortality} = - [y_0 \times (e^{-\beta \times \Delta\text{PM}_{10}} - 1)]$$

ここで、 $y_0$ はベースライン死亡者数で、零歳児の非事故死亡者総数とする。2002年には3,277人であった。 $\beta = \text{LN}(\text{RR}_{10})/10$  であり、PM10濃度が10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇するときの調整相対リスクである $\text{RR}_{10}$ には1.04 (1.02~1.07) (Woodruff et al. 1997) を用いる。 $\Delta\text{PM}_{10}$ は県別の一般測定局の平均

濃度を用い、SPMは次の式に従ってPM10に換算した。根津・坂本(2000)より平均PM2.5/SPM=0.782、松下(2003)より平均PM2.5/PM10=0.643、すなわちPM10=1.22×SPMである。計算の結果、SPMの人為発生源寄与分を $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上だとすると、人為的な排出源による年間死亡者数は102人(54~163人)となり、推定された寄与割合(attributable fraction: AF)は7.0%(3.7~11.2%)となった。

### (3) SPM曝露による幼児の健康リスク

次に、Valent et al. (2004a, 2004b)の以下の式を用いて日本における0~4歳児の死亡リスクの推計を試みる。

$$\text{寄与割合 (AF)} = (\sum P_i \times RR_i - \sum P_i' \times RR_i) \div \sum P_i \times RR_i$$

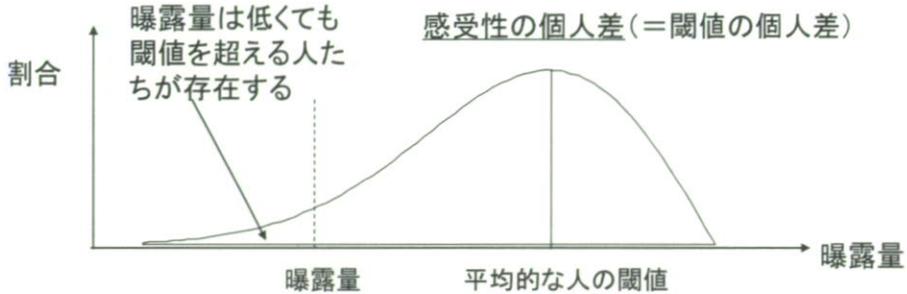
ここで、 $P_i$ は曝露カテゴリー*i*の人口割合(県別に計算するので*i*=1~47)、 $P_i'$ は介入や変化後の曝露カテゴリー*i*の人口割合、 $RR_i$ は参照レベルに対する曝露カテゴリー*i*の相対リスクである。また、寄与死亡者数*E*は $\sum AF \times B \times P$ で表され、*B*はベースライン非事故死亡者数、*P*は人口総数である。すなわち、 $B \times P$ は0~4歳児の非事故死亡者総数(平成14年で4,181人)となる。PM10が $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇するときの相対リスクは1.0166(1.0034~1.0300)であり、Valent et al. (2004a, 2004b)によって5つの疫学研究の結果から求められたものである。ここでも $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上について計算した。計算の結果、人為的な排出源による年間死亡者数は133人(28~236人)、推定された寄与割合(AF)は3.2%(0.7~5.6%)となった。

#### 2.2.4. 大気汚染物質と閾値

化学物質のリスク評価では、遺伝子損傷性を持つ発がん性物質については、原点を通る線形の曝露反応曲線が仮定され、遺伝子損傷性を持たない発がん性物質や非発がん性物質については、これ以下ならば健康影響がないという閾値があると仮定される。しかし、PMやオゾンといった大気汚染物質の近年の疫学調査では、非常に低い濃度領域まで閾値が見つからない場合が多い。そのため、本節で試算に用いたような連続的な曝露反応関数が採用されることになる。

毒性メカニズムの観点からは個人レベルでは閾値があると考えられるにもかかわらず、社会全体を対象とした疫学において閾値が見出されない理由としては以下の2つが考えられる。ひとつは、通常、個人曝露濃度を地域の大気汚染濃度で代表させるが、様々なライフスタイルを持つ個人レベルでは曝露量に分布ができてしまうことである。たとえ曝露量の平均値が閾値以下であったとしても、曝露量に大きな分布があれば、平均値がどんなに低くても、少数の高曝露集団が閾値を超えてしまうのである。もうひとつは、化学物質曝露に対する感受性に個人差があることである。社会は様々な感受性を持つ人々の集団であり、感受性の高い個人は低い閾値を持ち、感受性の低い個人は高い閾値を持つ。その結果、様々な閾値の集合としての社会は閾値の分布を持ち、事実上社会全体としての閾値はなくなる(Ostro 1994)。言い換えると、個人レベルでは「個人の閾値」が存在する可能性が高いものの、集団レベルで考えると「集団の閾値」が事実上存在しないと考える(U. K. DoH 1998)。概念図で示すと、図2.2.1のようになる。A)はすべての人の曝露量が一定のケース、B)はすべての人の感受性(閾値)が一定のケースを表している。本来は、曝露量にも感受性にも個人差があり、それらが合わさって、社会全体では閾値が無いように見えると解釈できる。

## A) 曝露量が一定のケース



## B) 感受性が一定のケース

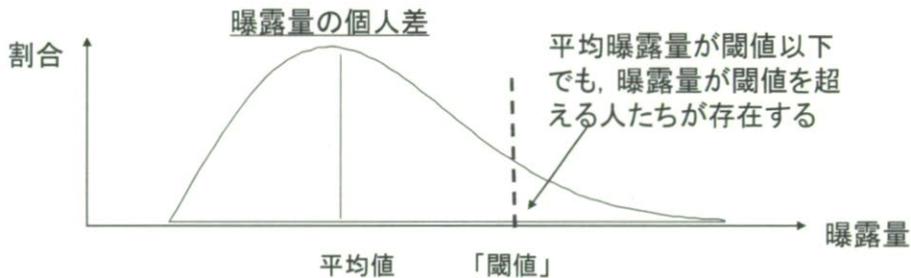


図 2.2.1 曝露量と感受性の個人差

例えば、全米 98 都市について 1987～2000 年までの期間、オゾンへの短期曝露と死亡率の関係を調べた Bell et al. (2006) では、4 つのアプローチでの解析結果を比較することによって、社会としての安全レベル、つまり閾値があったとしても相当低い濃度レベルであることを示した。多くの大気汚染疫学で採用されているのは 1) 線形アプローチである。Bell らは、これに替えて、2) サブセット・アプローチ、3) 閾値アプローチ、4) スプライン・アプローチの適用を試みた。2) はオゾン濃度があるレベル以下の日々のみのサブセットデータを用いて解析を行うもので、「安全」なオゾンレベルとは、オゾン濃度と死亡率に相関が見られないレベルを指す。その結果、現在の環境基準値の半分以下まで統計的に有意な相関が見られた。3) は、様々なレベルの閾値を仮定して解析が試みられたが、線形アプローチよりも適合度が良いモデルは見つからなかった。4) はスプライン関数を用いて解析が行われたが、非常に低いレベルまでプラスの相対リスクがあることを示した。

### 2.2.5. 課題と展望

本節では、PM 曝露による健康影響を定量的に評価する手法を紹介した。いくつかの注意点を指摘しておきたい。PM は化学物質そのものではなく、物理的な定義であるため、その発生源によって有害性の大きさが異なる可能性がある。これまで行われてきた主要な疫学調査の多くは米国か欧州のものであり、そこで得られた相対リスクを日本に適用することには大きな不確実性が伴う。また、いくつかの研究では PM を PM そのものではなく、大気汚染全体の代理変数として扱っているものもある。欧米では PM は大気汚染物質の中で最も健康リスクの大きいものとして認識されているからである。

近年、PM に次いで注目されているオゾンは、1970 年代から光化学スモッグの原因物質として規制対象とされていたが、最近の疫学調査では短期曝露と死亡率上昇との間に強い相関関係が指摘されている。単一都市における時系列研究だけでなく、それらを集めたメタアナリシス (Bell et al. 2005) や同一の分析方法で多数の都市の時系列研究を行うマルチシティ研究 (Bell et al. 2006) も行われている。日本では、30 年前に決まった環境基準値は形骸化しており、再検討と基準値の更新が必要である。

疫学調査の弱点の 1 つは、動物実験や臨床テストなどと異なり、実験を行うことができないことである。そのため、曝露と症状の間の相関関係は証明できても、因果関係を証明することはできない。しかし、工場が閉鎖されたり、規制が緩和・強化されたりするなど、社会実験のような状況が生まれることがあり、その前後の変化を捉えると、因果関係に関する重要な示唆が得られる場合がある。このような研究を介入研究 (intervention study) と呼ぶ。例えば、Clancy et al. (2002) では、アイルランド共和国のダブリンにおいて 1990 年に実施された石炭販売禁止の前後で、呼吸器系および循環器系疾患による死亡率に統計的に有意な減少が見出された。Friedman et al. (2001) は、米国アトランタにおいてオリンピック開催中に道路交通が規制されたことによりオゾン濃度が下がるとともに、子供のぜんそく発作が減ったことを示した。

ここでは詳しく紹介することはできなかったが、大気汚染による健康リスクを定量的に表す方法として、障害調整生存年数 (Disability Adjusted Life-Years : DALYs) や質調整生存年数 (Quality Adjusted Life-Years: QALYs) が用いられるケースも増えている。また、金銭価値化については、欧米では RIA やプロジェクト評価を通じて制度化されており、確率的生命価値 (Value of Statistical Life: VSL) については公式値が定められている (岸本 2005)。ただし、これらは事故リスクの文脈において導出された数値であるため、大気汚染リスクについても同じ値が適用できるかどうかについては議論があり、余命 1 年の価値の推計や年齢別の VSL の導出などが提案されている。

## 参考文献

- (1) Bell, M. L. Dominici, F. and Samet, J. M. (2005) A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study. *Epidemiology* 16: 436-45.
- (2) Bell, M. L., Peng, R. D. and Dominici, F. (2006) The exposure-response curve for ozone and risk of mortality and the adequacy of current ozone regulations. *Environmental Health Perspectives* 114: 532-6.
- (3) Brown, W. (1994), Dying From Too Much Dust, *New Scientist*, 12 March, 12-13.
- (4) Clancy, L., Goodman, P., Sinclair, H. and Dockery, D. W. (2002). Effects of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study. *The Lancet* 360: 1210-1214.
- (5) Dockery DW, Pope CA 3rd, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG Jr, Speizer FE. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England Journal of Medicine*. 329(24):1753-9.
- (6) Friedman, M. S., Powell, K. E., Hutwagner, L., Graham, L. M. and Teague, W. G. (2001). Impact of changes in transportation and commuting behaviors during the 1996 Summer Olympic Games in Atlanta on air quality and childhood asthma. *JAMA* 285: 897-905.
- (7) Glinianaia, S. V., Rankin, J., Bell, R., Pless-Mulloli, T. and Howel, D. (2004a). Particulate air pollution and fetal health: a systematic review of the epidemiologic evidence. *Epidemiology* 15: 36-45.
- (8) Glinianaia, S. V., Rankin, J., Bell, R., Pless-Mulloli, T. and Howel, D. (2004b). Does particulate air pollution contribute to infant death? a systematic review. *Environmental Health Perspectives* 112: 1365-1370.
- (9) Health Effects Institute (2000). Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. A Special Report of the Institute's Particle Epidemiology Reanalysis Project. Final version.
- (10) Kaiser R, Romieu I, Medina S, Schwartz J, Krzyzanowski M, Kunzli N. (2004). Air pollution attributable postneonatal infant mortality in U.S. metropolitan areas: a risk assessment study. *Environmental Health: A Global Access Science Source*. 3(1):4.
- (11) 岸本充生 (2005). 確率的生命価値の公的利用—英国と米国の場合. *会計検査研究* 31: 221-234.
- (12) Kunzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Herry, M., Horak, F. Jr, Puybonnieux-Texier, V., Quenel, P., Schneider, J., Seethaler, R., Vergnaud, J. C. and Sommer, H. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet* 356:795-801.
- (13) Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F. E. and Dockery, D. W. (2006). Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard Six Cities Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 173: 667-672.
- (14) Maddison, D., Pearce, D., Johansson, O., Calthrop, E., Litman, T., and Verhoef, E. (1996), *Blueprint 5: The True Costs of Road Transport*, Earthscan, London.
- (15) 松下秀鶴(2003). I-1 生活環境中の粒子状物質等による個人暴露量測定手法の開発に関する研究, 第5期(平成12~14年度)の調査研究成果(平成14年度実施分).
- (16) Natural Resources Defense Council(1996).*Breath-Taking: Premature Mortality Due to Particular Air Pollution in 239 American Cities*.
- (17) 根津豊彦, 坂本和彦 (2000). 大気中微小粒子 (PM2.5) 質量濃度の測定. *大気環境学会誌* 37(1): A1-A12
- (18) Ostro, B. (1994), *Estimating the Health Effects of Air Pollution: A Methodology with an Application to Jakarta*. Policy Research Working Paper 1301, World Bank, Washington DC.
- (19) Pope CA 3rd, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE, Heath CW Jr. (1995). Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 151: 669-74.

- (20) Pope, C.A. and Dockery, D. W. (1999), Epidemiology of particulate effects, in Holgate, S. T., Smet, J. M., Koren, H. and Maynard, R. L. eds. *Air Pollution and Health*, Academic Press.
- (21) Pope CA 3rd, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*. 287(9):1132-41.
- (22) Pope, C. A. 3rd., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Godleski, J. J. (2004) Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*. 109(1):71-7.
- (23) Schwartz J. (2004). Air pollution and children's health. *Pediatrics*. 113(4 Suppl): 1037-43.
- (24) U. K. Department of Health (1998), Quantification of the Effects of Air Pollution on Health in the United Kingdom, Committee on the medical Effects of Air Pollutants, The Stationery Office.
- (25) U.S. EPA (1997a), National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, Final Rule. *Federal Register*, 61, 65637-65713.
- (26) U.S. Environmental Protection Agency (1997b), The Benefits and Costs of the Clean Air Act, 1970 to 1990, Prepared for U.S. Congress.
- (27) U.S. Environmental Protection Agency (1999), The Benefits and Costs of the Clean Air Act, 1990 to 2010, Prepared for U.S. Congress.
- (28) Valent F, Little D, Bertollini R, Nemer LE, Barbone F, Tamburlini G. (2004a). Burden of disease attributable to selected environmental factors and injury among children and adolescents in Europe. *Lancet*. 363:2032-9.
- (29) Valent F, Little D, Tamburlini G, Barbone F. (2004b). Burden of disease attributable to selected environmental factors and injuries among Europe's children and adolescents. *Environmental Burden of Disease Series No. 8*.
- (30) Woodruff TJ, Grillo J, Schoendorf KC.(1997). The relationship between selected causes of postneonatal infant mortality and particulate air pollution in the United States. *Environmental Health Perspectives*. 105(6):608-12.

## 2.3. 京都メカニズムと原子力—中国への原子力 CDM モデル分析

池本 一郎

### 2.3.1. はじめに

1997年12月に京都で行われた気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP-3)で地球温暖化の緩和に向けた歴史的かつ画期的な国際合意である京都議定書が採択された。その中で先進諸国における厳しい地球温暖化ガスの排出量削減が合意された一方で、それを達成するための柔軟な措置が認められた。すなわち、第1約束期間と呼ばれる2008~2012年の5ヶ年平均で先進諸国の温暖化ガスの排出量を1990年のレベルに比べて平均で5.2% (日本は6%)削減するという拘束力のある厳しい数値目標を決定すると同時に、具体的な温暖化防止策に関しては、共同実施(JI:先進国間のプロジェクト)、クリーン開発メカニズム(CDM:途上国のプロジェクト)、温暖化ガスの排出権取引(先進国間)、森林による温暖化ガス吸収分の算入という柔軟性のある措置が認められた。このうち、JI、CDMおよび排出権取引については「京都メカニズム」と呼ばれている。

京都メカニズムが合意されたことは、温暖化ガス排出に関する外部コストの内部化、すなわち温暖化ガスに具体的な値段がつくことになる。このことは、途上国におけるエネルギー・インフラを整備するうえで最大の障害となっている資金調達や技術移転の手段として、京都メカニズムが活用できる可能性を持つことを意味しており、その意義は大きい。

本節では、COP会議での原子力の取り扱いをレビューし、今後向かうべき方向について述べるとともに、途上国に原子力を導入する上で最大の障害となっている資金調達的手段としてCDMを活用した場合の効果を試算する。

### 2.3.2. 京都メカニズムにおける原子力の位置づけ

CDMに原子力を適用することによって途上国への原子力導入を加速し、温暖化ガスの削減と電源の多様化によるエネルギーセキュリティの向上を図ることが期待できる。すなわち、CDMの目的である「途上国の持続可能な開発に資する」ことができるが、現在のところ原子力は京都メカニズムの手段として認められていない。COP会議における原子力の議論を歴史的に紐解いてみると、COP-1からCOP-4までは各国の政府及び非政府組織(NGO)の利害が絡むことから、本会議では政治的に議論を避けてきたという事実がある。

COP-5は原子力がネガティブに取り扱われはじめた最初の会議であった。1999年にドイツのボンで開かれたCOP-5では、直前に発生した東海村燃料転換加工工場の臨界事故(JCO事故)が議論に大きく影響し、本会議においてオーストリア、デンマーク、ドイツ、ギリシャ、イタリア、スウェーデン、ノルウェー等が、原子力はCDMやJIの対象として選択すべき技術ではないと公式に表明した。フランスなどの原子力積極推進国も原子力に対する意志表示をしなかった。その結果、COP-5の総括においてCDMにおける原子力の適格性(Eligibility)に疑問を呈する共同声明が発表された。

2000年11月にオランダのハーグで開かれたCOP-6では、京都メカニズムにおける原子力の取り扱いを含めた京都議定書の具体的な制度設計の議論がされた。ワトソンIPCC議長の「安全と環境に配慮した原子力は、コスト/ベネフィットに優れたエネルギーであり二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)削減に有効」との基調講演がされたにもかかわらず、CO<sub>2</sub>吸収源や途上国問題、CDMにおける原子力の取り扱いなどで各国の意見が収斂せず、国際的合意に至ることができなかった。

COP-6で合意できなかった主な原因として、交渉の当事者である3極の思惑が全く一致していなかったことがあげられる。例えば、原子力CDMの取り扱いについてみれば、参加者の大勢が環境

保護主義者である EU 諸国や東欧、また原子力ではメリットがない産油国や島嶼国などは原子力を CDM の手段として認めることに反対した。これに対して日、米、加などのアンブレラ諸国は、「CDM における持続可能性の具体的内容はホスト国（受け入れる途上国）が投資国との相談で決めることであり、京都議定書内で規定するべきではない」と主張した。また、既に原子力の開発を行っている中国、インドを除いて、途上国は原子力の位置づけ（メリット）を理解していない国が多く、援助資金増額を主張するだけで、京都メカニズムの制度設計にはそれほど興味がなかった。

このため、ブロンク議長（オランダ）が COP-6 を一時中断し、COP-6 の再会合で再び議論をすることを提案し、議論のベースとなる裁定案を出した。その裁定案の中には、「CDM においては再生可能エネルギーや省エネルギーを優先し、原子力を用いないことを宣言する。」という原子力に対する強い疑問を呈する表現が含まれていた。2001 年 7 月にボンで開かれた COP-6 再会合では、議論のベースとなった議長裁定案の内容に沿って、「JI と CDM において原子力施設に関連するプロジェクトを差し控える（refrain）」ことが合意された。

2001 年 10-11 月にモロッコのマラケシュで開催された COP-7 では、京都メカニズムの運用に関する議論が行われ、利用に関する実質的な制限は少ない形で合意されたが、原子力の取り扱いだけは COP-6 再会合の議長裁定案の影響が残る形で、「JI および CDM については、第 1 約束期間（2008 年～2012 年）の数値目標達成のために原子力を用いることを差し控える」ことが合意された。

このように、COP-5 から COP-7 にかけて、京都メカニズムの制度設計に関する議論が行われ大枠が合意されたが、その結果として米国の離脱や原子力のネガティブイメージ（environmentally unsound, unsafe など）ができあがるなど、失ったものも少なくない。

### 2.3.3. 京都メカニズムにおける今後の原子力の方向

原子力 CDM 反対国は、原子力を技術的、資金的なインフラが未整備な途上国で推進する場合、

- 十分な安全性を確保する技術と制度を有しているか
- 安全文化（Safety Culture）の概念が徹底できるか
- 防災、損害賠償制度が整備されているか
- 放射性廃棄物処分をどうするか
- 核拡散を促進してしまい世界の安全保障を脅かすのではないか

などの懸念があり、「途上国の持続的な開発に資する」ものでないと指摘している。しかし、これらの懸念のために途上国の原子力利用を封じ込めるとするのは少々筋違いであろう。先進国が途上国に対して積極的に働きかけをしなくても、現に一部の途上国は自ら進んで原子力開発・利用に取り組んでいる。原子力利用を途上国が先進国から「孤立して」行うことは、むしろ原子力の健全な開発・推進や安全保障上好ましくないといえる。

たとえば、後述するように原子力に対して温暖化ガス排出削減クレジットを付与することにより、先進国が途上国の原子力導入に積極的に関与することが期待される。このとき、先進国が途上国における原子力の安全な運用、放射性廃棄物処分および平和利用への限定などに関する支援や監視を行うことができる。また、受け入れる途上国は、原子力の運転・保守に関する技術や原子力システムを運用するのに必要な技術的・制度的なインフラが整備できる。

CDM における原子力の適格性について制度的にみると、原子力を京都議定書第 12 条第 2 項にうたわれている「途上国の持続可能な開発に資する」ものであると認証するか否かである。第 12 条第 4、5 項によれば、この認証は CDM の執行委員会（Executive Board of CDM）によって監督され、その際の基準は、

- 各関係締約国が承認した自主的参加であるもの
- 気候変動の緩和に関する実質的で、測定可能な、長期的な利益があること
- 当該事業活動がない場合と比較して追加的な排出削減があること

と規定されている。原子力は明らかにこの基準に該当しており、適用対象となることが適当と考えられる。今後 COP 会議に於いて開始されるべき第 1 約束期間以降の京都メカニズムの制度設計に向けた議論が待たれるところである。

#### 2.3.4. CDM を活用して途上国に原子力を導入するための試算

途上国の主力電源は石炭火力であり、大気汚染の防止やエネルギー源の多様化によるセキュリティ確保、さらには温暖化ガスの排出削減の観点から原子力の導入に期待を寄せている。しかし、原子力は先端的な技術を集約した大規模な発電システムであること、核燃料物質・放射性物質を多量に取り扱うことなどから、その導入に当たっては技術的に高度なインフラが必要であることに加え、他の発電プラントに比べて多額の建設資金が必要であるという特徴を有する。したがって、途上国が原子力導入を進めるためには先進国の財政的および技術的支援が望まれている。

一方、先進国においては原子力プラントの輸出による原子力技術の継承・発展、産業維持が喫緊の課題となっており、さらには将来予想される温暖化ガス排出権価格の高騰への対応からも、CDM を活用した途上国への原子力プラント建設が期待されている。

このことから、先進国が資金を出して途上国が運転中あるいは計画中の石炭火力発電所を原子力に転換した場合に、原子力への転換によって削減される温暖化ガスの排出権を先進国が得ることができるよう CDM の制度設計がされるならば、温暖化ガスの排出権価格次第で、先進国は原子力プラントの輸出と安価な温暖化ガス排出権を得ることができ、途上国は原子力の建設資金や運転・保守技術を導入できる、というように双方とも利益を得ることができる。

これを定量的に検討するためのケーススタディとして、中国の石炭火力（電気出力 100 万kW相当）を同出力の原子力に転換するのに必要な資金を日本が出資するケースを想定し、得られる温暖化ガスの排出権価格によって回収できる資金や期間について試算した。原子力としては軽水炉を対象とし、簡単のため温暖化ガスとしてはCO<sub>2</sub>のみを考える。なお、今後途上国では温暖化ガス排出の少ない発電手段として天然ガスが原子力と競合すると予想されるため、石炭火力を天然ガス複合発電（ACC）に転換した場合の試算も行い投資効果を比較する。

各発電プラントのCO<sub>2</sub>排出量を図 2.3.1 のように想定した<sup>(1)</sup>。また、試算に用いた仮定をまとめて表 2.3.1 に示す。排出権価格を 100 ドル/トン-C (27.3 ドル/トン-CO<sub>2</sub>) と仮定し、プラント建設費はOECD/IEA/NEAのデータ<sup>(2)</sup>を使用した。

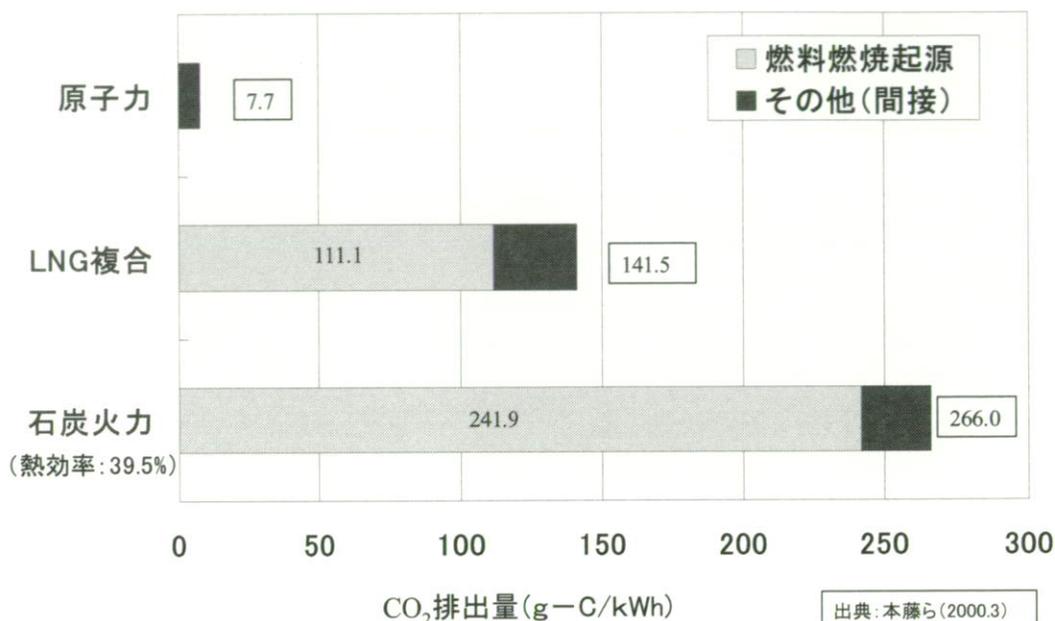


図 2.3.1 発電プラントのCO<sub>2</sub> 排出量

表 2.3.1 プラント建設費調達の試算 (仮定)

・ 中国の 100 万 kWe 相当の石炭火力プラントを同規模の原子力または天然ガス複合火力で置き換え		
・ CO <sub>2</sub> の削減量		
-原子力で置き換え	256	g-C/kWh
-天然ガス火力で置き換え	126	g-C/kWh
・ CO <sub>2</sub> 排出権価格 (仮定)	100	ドル/トン - C (27.3 ドル/トン-CO <sub>2</sub> )
・ プラント建設費 (注)		
-新鋭石炭火力 (中国)	966	ドル/kWe
-軽水炉 (日本)	2848	ドル/kWe
-天然ガス複合火力 (日本)	1703	ドル/kWe

(注) 出典: OECD (1998)

100 万kW相当の石炭火力(熱効率 39.5%)を同出力の軽水炉に転換すると、原子力、石炭火力ともプラントの設備利用率を 75%と仮定して、毎年 170 万トン-C相当のCO<sub>2</sub>が削減されることになる。CO<sub>2</sub>の排出権価格が 100 ドル/トン-Cであるため、原子力転換により削減されるCO<sub>2</sub>量に見合う排出権価値として毎年 1.7 億ドルがプラントの運転期間を通して得られることになる。この場合の運転期間中に得られる全排出権価値をプラント運転開始時に割引いた現在価値と、プラントの運転年数の関係を、割引率をパラメータにして図 2.3.2 に示す。

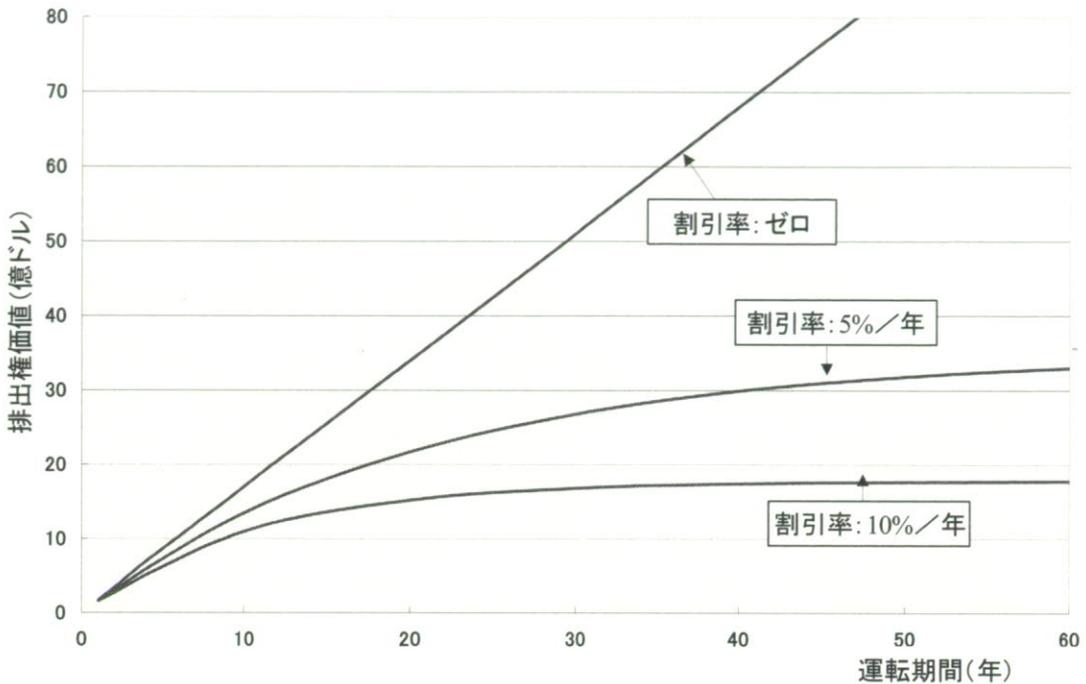


図 2.3.2 運転開始時における全排出権価値 (原子力)

たとえば割引率が 5% の場合、プラントを 30 年間運転すれば運転開始時の現在価値に換算して 27 億ドル、60 年間運転すれば 33 億ドルの排出権が期待できることになる。割引率がゼロであれば、それぞれ 51 億ドル、102 億ドル、割引率が 10% であれば、17 億ドル、18 億ドルの排出権が期待できる。運転期間が長くなれば得られる全排出権の現在価値は高くなるが、割引率が 10%/年のケースでは 30 年以上運転しても現在価値はほとんど増えない。

ここで、中国の石炭火力を原子力に転換し、原子力の建設費を日本が負担するケースを考え、得られる CO<sub>2</sub> の排出権価格によって日本がその資金を回収するのに要する期間を試算した。

まず、運転中の石炭火力を原子力に転換する場合を想定し、日本が原子力の建設費全額（建設費 2848 ドル/kWe：表 2.3.1）を負担したケースを図 2.3.3 に示す。割引率がゼロの場合には 16 年間、5%/年のばあいには 35 年間プラントを運転すれば、建設費を全額負担しても資金の回収が可能である。このケースの場合、中国は建設費ゼロで同出力の原子力を導入できることになる。割引率 10%/年の場合には建設費全額の回収は出来ない。

つぎに、中国で計画している石炭火力発電所（建設費 966 ドル/kWe：表 2.3.1）を日本の軽水炉に転換する場合を考えて、中国が石炭火力の建設費相当分を出資し、日本が原子力と石炭火力の建設費の差額分を負担するケースと、全額負担するケースの建設資金回収期間の比較を図 2.3.4 に示す。割引率は 5%/年と仮定した。前述のとおり全額負担したケースでは回収に 35 年必要であるが、差額分負担ケースでは 16 年で日本の出資分を回収できる。差額分負担ケースでは、中国は石炭火力の建設費分を出すことによって、同出力の原子力発電所を建設することが出来ることになる。

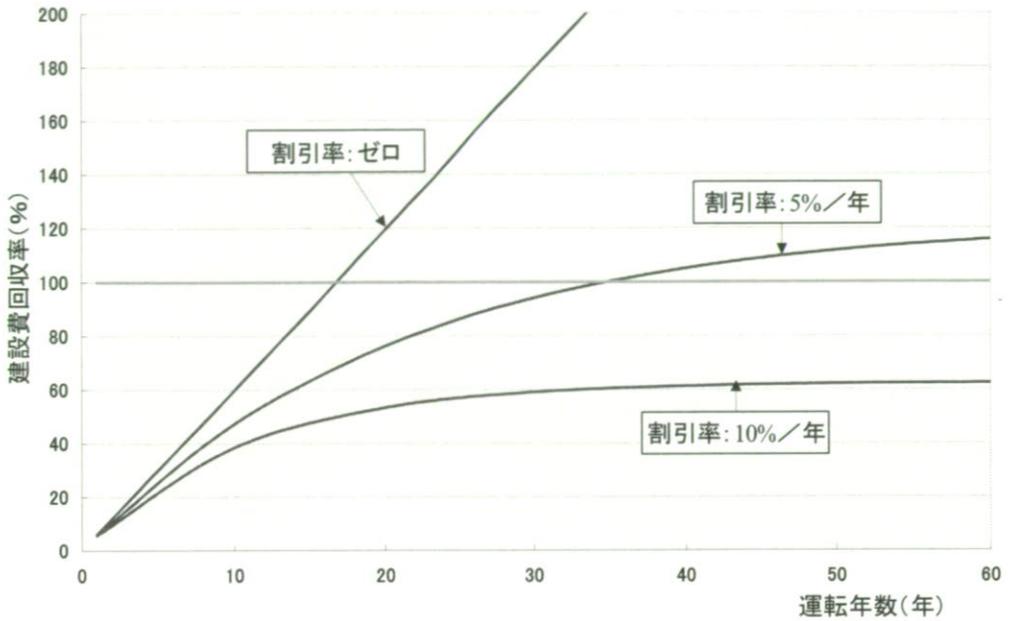


図 2.3.3 建設費回収率と運転期間 (原子力)

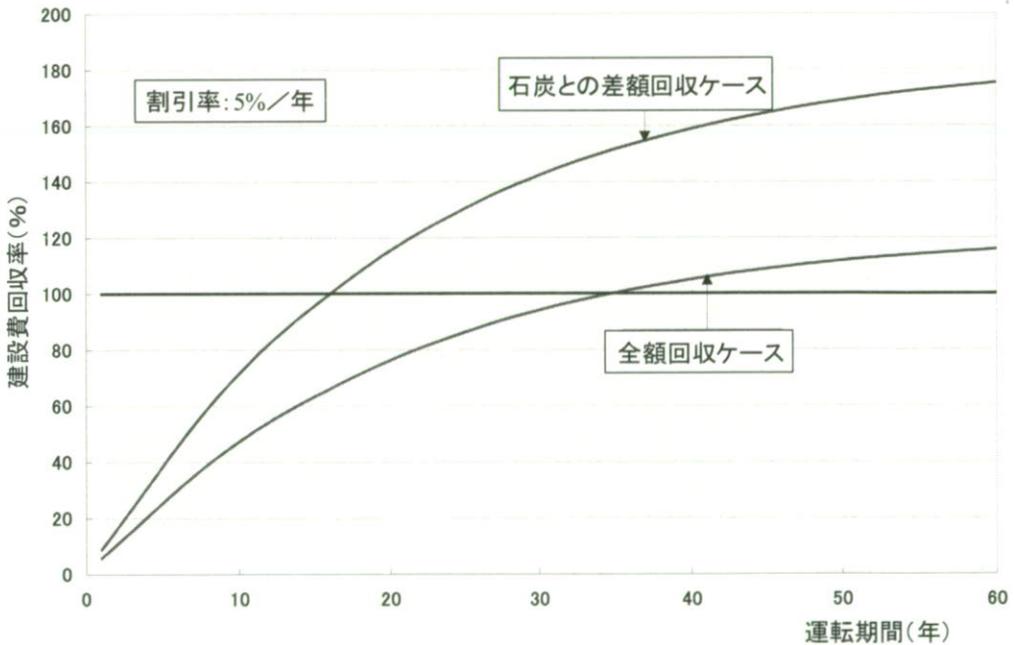


図 2.3.4 建設費の差額回収との比較 (原子力)

つぎに、原子力との比較のため、100万kW相当の石炭火力(熱効率39.5%)を同出力の天然ガスACCに転換するケースを試算する。表2.3.1より、天然ガスACCに転換すると毎年81万トン-C相当のCO<sub>2</sub>が削減されることになるため、削減されたCO<sub>2</sub>量に見合う排出権価値として毎年8100万ドルがプラント運転期間を通して得られることになる。

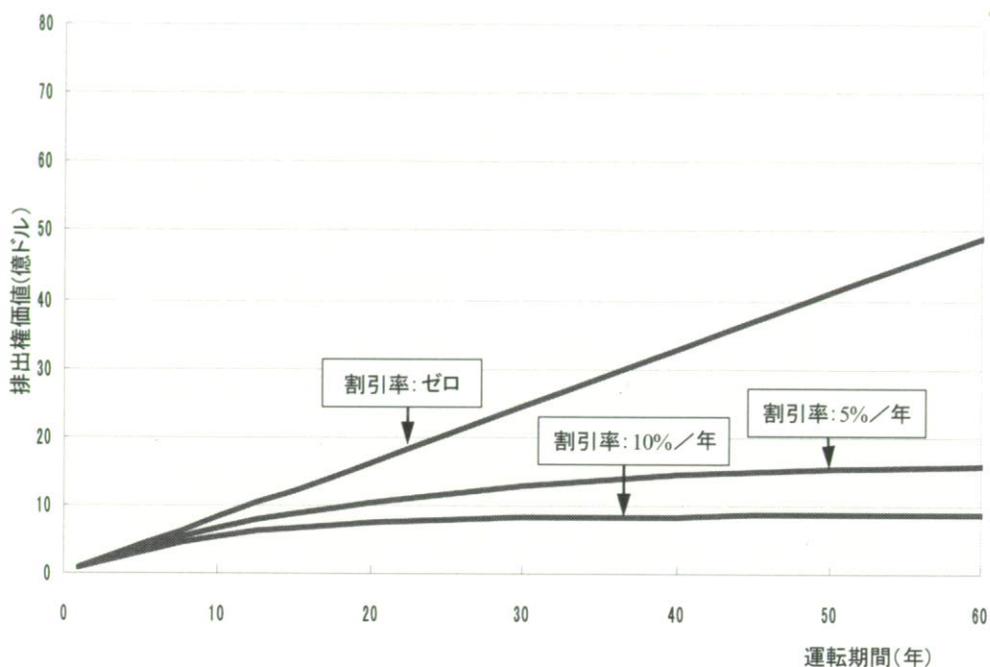


図 2.3.5 運転開始時における全排出権価値 (天然ガス ACC)

図 2.3.5 に示すように、石炭火力を天然ガス ACC に転換した場合に運転期間中に得られる全排出権価値をプラント運転開始時に割引いた現在価値は、割引率が 5% の場合、30 年運転で 13 億ドル、60 年運転で 16 億ドルの排出権が期待できる。割引率がゼロの場合にはそれぞれ 25 億ドル、49 億ドル、割引率が 10% の場合には、8 億ドル、9 億ドルの排出権が期待できる。

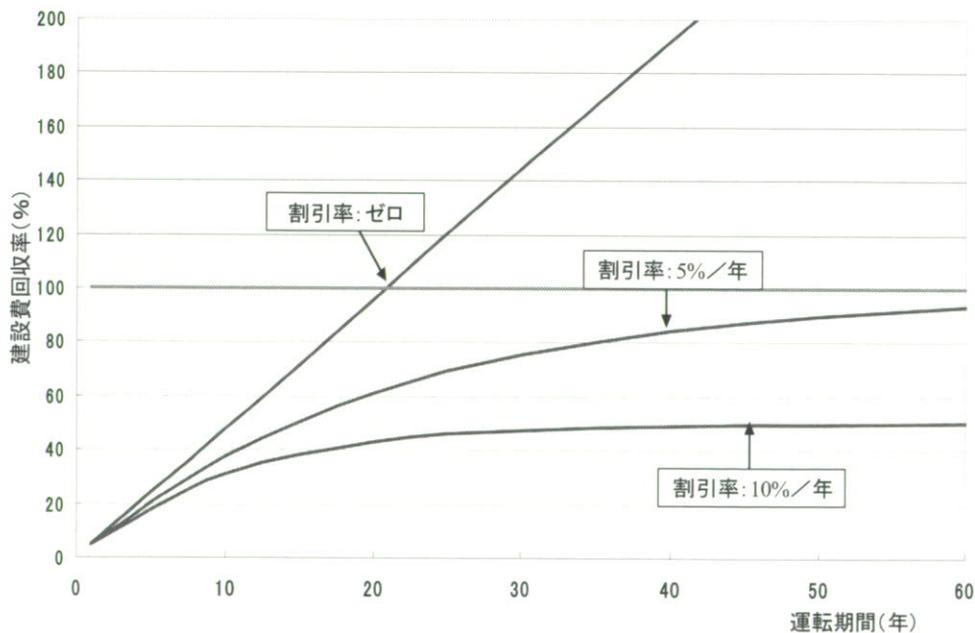


図 2.3.6 建設費回収率と運転期間 (天然ガス ACC)

また図 2.3.3 と同様に、日本が建設費を出資して中国で運転中の石炭火力を天然ガス ACC (建設費 1703 ドル/kWe:表 2.3.1)に転換する場合の建設費の回収率と運転期間の関係を見たものが図 2.3.6 である。原子力に比べて、割引率が 5%/年のケースでも 60 年間運転しても全建設費の回収はできない。原子力の方が天然ガス ACC より効果的に建設費の回収が可能であることがわかる。

### 2.3.5. おわりに

COP 会議における現在までの原子力の議論は、JCO 事故の影響もあってネガティブなイメージが植え付けられ、第 1 約束期間においては JI や CDM の手段として認められなかった。これは、欧州の環境保護勢力が COP 会議のイニシアティブを握っていたことによるところも多いが、途上国の意識の問題もある。将来原子力を利用する可能性がある途上国は多いが、CDM において原子力を利用する意味(メリット)を理解していない国が多く、原子力に好意的な勢力が見えなかったことが問題として挙げられる。

しかし、COP-3 で合意された先進国の温暖化ガス削減量は決して小さな値ではないため、その達成は極めて難しいと考えられ、達成目標時期である第 1 約束期間の頃には温暖化ガス排出権価格が高騰することが予想される。この状況は第 1 約束期間以降も続くことが予想され、前述の CDM を活用して中国の石炭火力発電所を原子力に転換するケーススタディの結果を見ても、原子力を CDM の手段として活用することは、世界にとっては温暖化ガスの削減、途上国ではエネルギー源多様化によるエネルギーセキュリティ確保と最新発電技術の導入、先進国では原子力産業維持やプラント輸出など、三者とも利益が得られるような制度の運用が可能となる。

これを達成するためには今後の COP 会議での第 2 約束期間に向けての活動が重要となる。すなわち、原子力を JI と CDM の温暖化ガスの削減手段として正当に位置づけていかななくてはならない。このためには、欧州の環境保護勢力を説得するよりも、CDM の当事者である途上国に原子力の持つ意義を説明し、COP 会議での原子力の復活に向けて共に活動してゆくことが重要であろう。

#### 参考文献

- (1) 本藤、内山、森泉：電力中央研究所研究報告 Y99009 (2000)
- (2) OECD/IEA/NEA：“Projected Costs of Generating Electricity”, OECD Publications, Paris(1998)

## 2.4. エネルギー環境DNEモデルとCO<sub>2</sub>削減評価

時松 宏治

本節では世界全体での地球温暖化の排出シナリオとエネルギーシステムによる対策に関するレビューを紹介する。紹介するのは IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) により 2000 年にまとめられた SRES (Special Report on Emission Scenario) と、その後引き続き行われた Post-SRES シナリオが中心である。なお、本稿がカバーする排出シナリオについての最新のレビュー論文は、Nabojsa Nakicenovic *et al*, "Assessment of emissions scenario revisited" *Environmental Economics and Policy Studies* 7 (2006) 137-173 (DOI 10.1007/s10018-005-0112-0) にあるので、詳細はそちらをご覧ください。また、現在 IPCC の第 5 次報告書作成に合わせて、新しい排出シナリオ作成に向けて準備が始められている。詳しくは IPCC のウェブサイト <http://www.ipcc.ch/> を参照されたい。

### 2.4.1. SRES シナリオ以前の IPCC シナリオ

IPCC とは気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change) の略称で、世界気象機関 (WMO) や国連環境計画 (UNEP) により 1988 年に設置された。将来の GHG (Green House Gas: 温室効果ガス) と硫黄排出の基準となる見積もりのために、IPCC は過去 1990 年と 1995 年の 2 回にわたり将来シナリオを出版してきた。

1990 年の 4 つの排出シナリオのセットは SA90 シナリオと呼ばれた [IPCC90]。1992 年に将来人口予測、経済成長、エネルギー供給シナリオなどから将来の温暖化効果ガスの排出シナリオが提案された [Leggett 1992, Pepper 1992]。IS92 シナリオと一般に呼ばれる、この予測を含む 6 つの排出シナリオを、IPCC は 1995 年の特別報告書として出版した [IPCC95]。

IS92 シナリオには IS92a~IS92f がある。それらの人為的 CO<sub>2</sub> 排出量、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度、全球平均温度上昇を図 2.4.1 から図 2.4.3 に示す。標準シナリオとされる IS92a でも 2100 年には 700ppm 程度まで上昇する。人口成長・経済成長共に低成長の場合の IS92c や IS92d でも 500ppm 前後になるとしている。

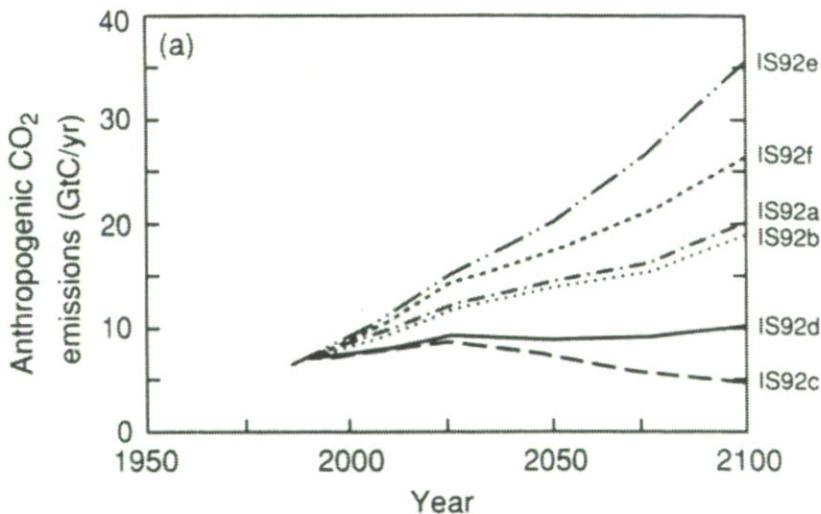


図 2.4.1 IPCC-IS92 シナリオでの人為的 CO<sub>2</sub> 排出量

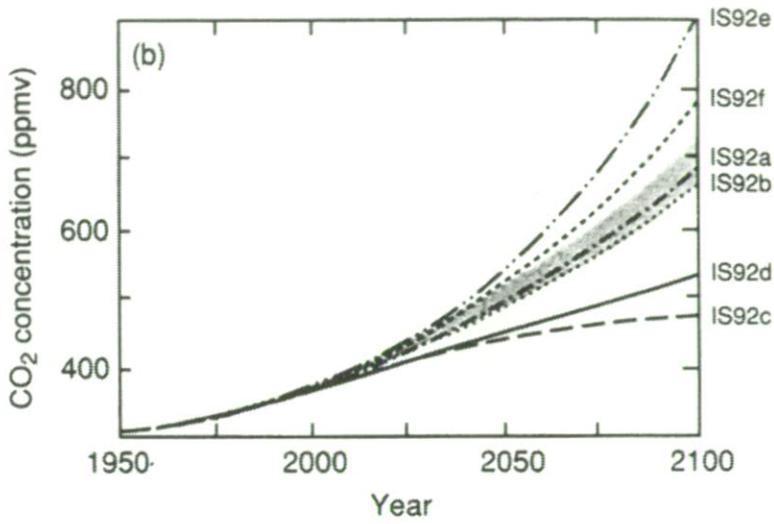


図 2.4.2 IPCC-IS92 シナリオでの大気中CO<sub>2</sub>濃度

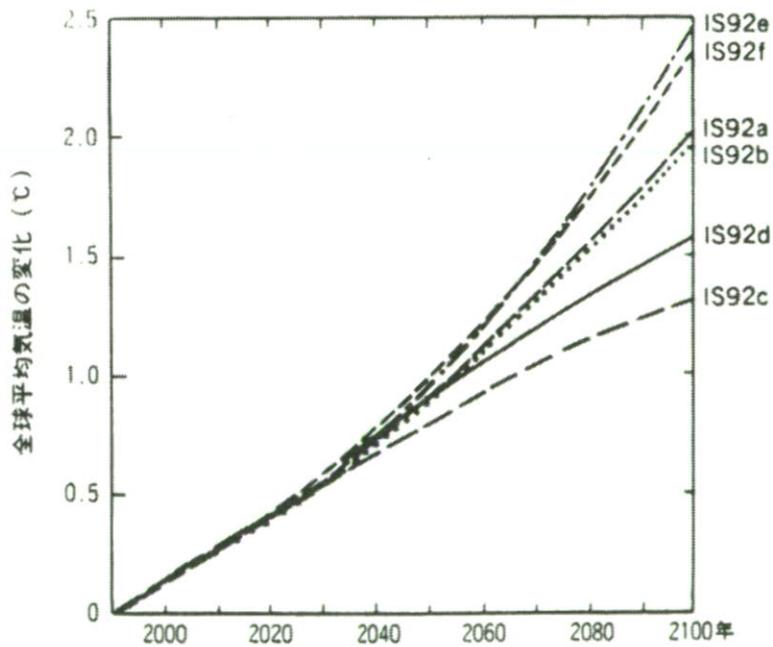


図 2.4.3 IPCC-IS92 シナリオでの全球平均温度上昇

## 2.4.2. SRES シナリオ [IPCC00, 森田 00, Morita00]

'96年には3回目の排出シナリオの構築を決め、3年半の年月がかかって出来たのが SRES シナリオである。SRES シナリオでは将来の異なる経済、社会、技術開発の発展経路に関し定量的な評価がなされているが、気候変動政策や緩和策などを含んでいない。SRES シナリオでは既存排出シナリオのレビュー、ストーリーラインの作成、定量的シナリオの作成、インターネットによる公表と意見聴取（オープンプロセス）、定量的シナリオの改定、というプロセスを経て構築された。

既存の排出シナリオのレビューにおいては約 170 のソースから 400 以上の排出シナリオを収集し、そのうち 2100 年までを推計期間としている 190 のシナリオを分析している。図 2.4.4 はこれらのシナリオの全てについて、二酸化炭素排出シナリオをプロットしたものである。多様な社会経済発展の仮定のもとで非常に大きな幅のシナリオが描かれていることがわかる。これらの多様な仮定や大きな推計幅は、以下の SRES シナリオの作成過程に反映され、このような幅を網羅するシナリオの作成が試みられた。

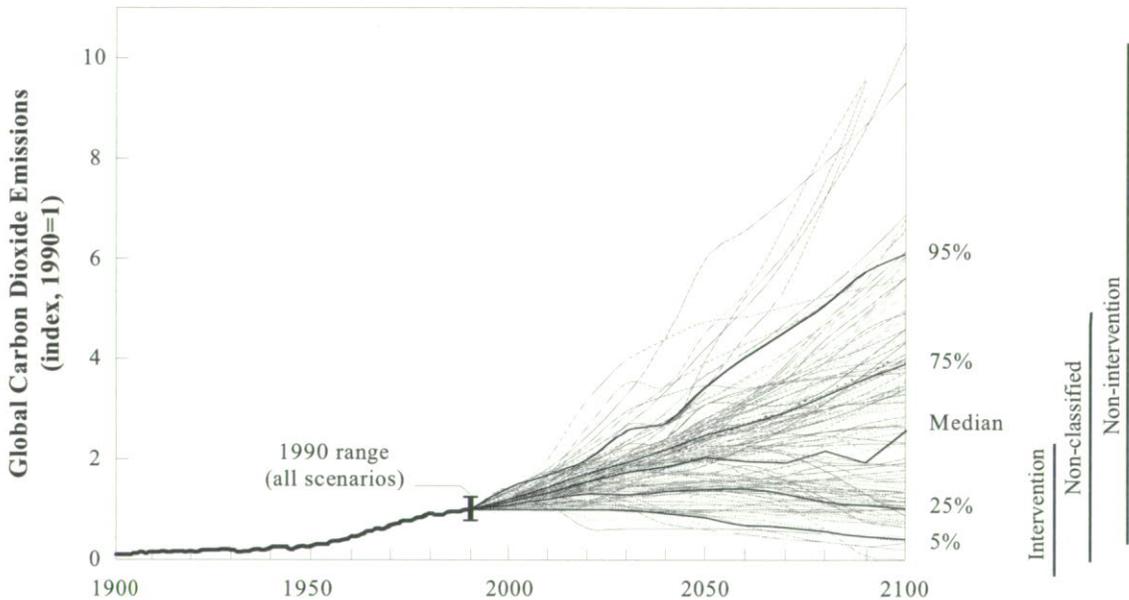


図 2.4.4 既存の研究による二酸化炭素排出シナリオ  
(エネルギー起源及び工業起源二酸化炭素排出)

次に4つのストーリーライン（将来世界像を叙述するストーリーライン。単に「世界」とも呼ばれる）を作成した。ストーリーラインでは社会・経済・技術・環境のパラダイムから、環境重視か経済重視か、グローバリズムかリージョナリズムか、という2軸により BOX 1 に示すように4通り作成された。図 2.4.5 はそれをイメージしたものである。ただし作成にあたっては定量化が難しく可能性も極端に低いと考えられる「大惨事」に至る将来像や、「サプライズ」（奇跡に近い）将来像は除外されている。

この世界（ストーリーライン）をベースにした定量化作業を、アプローチの異なる6つのモデリングチームが取り組んだ。4つの世界（ストーリーライン）を最もよく反映している、異なるモデル推計による「マーカーシナリオ」が選ばれた。他のシナリオはマーカーシナリオの人口、GDP、最終エネルギー消費と調和するように各モデルパラメータを調整した。4つのマーカーシナリオはホームページ上に公開され広くコメントを受けて改定され、36の代替シナリオと併せて計40シナリオが作成された。

#### BOX 1 SRES の描く将来社会像

・A1世界とシナリオファミリーは「グローバリズムかつ経済重視」の「高成長社会」をイメージしている将来社会像である。グローバリズムにより地域間の垣根が縮小することで、マーケットを利用した世界経済の成長が進むと同時に、途上国への技術移転とキャパシティービルディング（能力形成）が進むことで途上国間格差が収束する。途上国の経済が豊かになることで途上国の出生率が下がり人口は減少に向かう。経済の急速な拡大が大量のエネルギー消費を必要とし、資源開発や技術開発への投資が促進されるため技術開発が進められる。なおA1世界は将来技術革新の進展により4つのシナリオに細分された。A1Cはクリーン石炭技術の大幅な技術革新を想定したもの、A1Gは石油と天然ガスにおける技術革新を想定したもの、A1Tは新エネルギー技術における大幅な技術革新を想定したもの、A1Bはこれら全ての技術革新がバランスをとって生じるシナリオである。

・A2世界は「リージョナリズムかつ経済重視」の「多元化社会」をイメージしている将来社会像である。いわゆる政治と経済のブロック化が進む世界であるため、資本や技術、人の移動が制限され、経済発展が遅れる。このため地域間の資源や資産の格差は、所得格差をますます増大するため、途上国の出生率が下がらず人口は増大する。経済成長が低めであるため技術革新は一般的に遅れ気味になる。

・B1世界は「グローバリズムかつ環境重視」の「持続可能社会」をイメージしている将来社会像である。環境重視により脱物質化を志向し、経済構造はサービス産業や情報産業にシフトすると同時に、廃棄物の減量化やリサイクルなどによる環境産業も盛んになる。グローバリズムのため先進国から途上国への教育・キャパシティービルディングおよび技術移転が行われクリーン技術の普及が広まるため、途上国ではいわゆるショートカット効果により公害対策が進んでゆく。

・B2世界は「リージョナリズムかつ環境重視」の「地域共存型社会」をイメージしている将来社会像である。環境保護を志向するが地球環境よりも地域環境を重視し、マーケットに任せず公平性と地域の主体性を重んじ、ローカルな政府が解決を図ってゆく。経済成長はやや低めであり、途上国の死亡率と出生率はいずれも下がり人口増加は緩やかである。

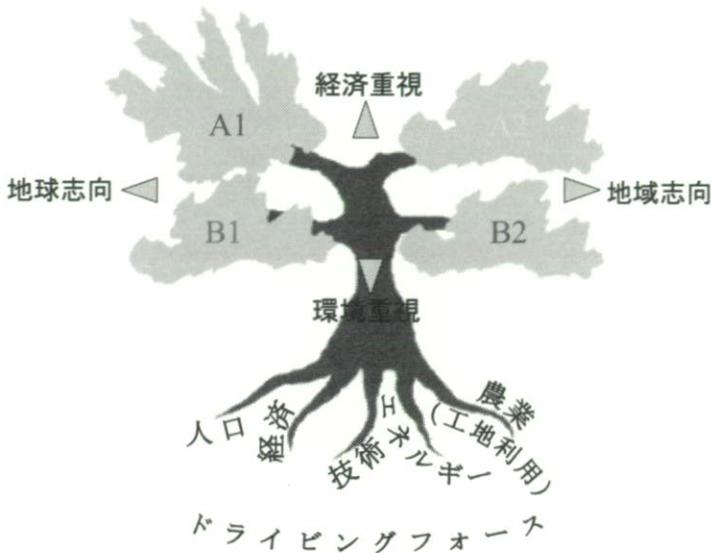


図 2.4.5 SRES の描く将来世界像のイメージ図

表 2.4.1 IPCC-SRES への参加モデルチーム (モデル名、開発者、マーカーシナリオモデル)

モデル名	開発者	マーカー
AIM (Asian Pacific Integrated Model)	森田、松岡、甲斐沼他 日本：国立環境研究所・京都大	A1
ASF (Atmospheric Stabilization Framework)	Pepper, Sankovski 他 米国：EPA	A2
IMAGE (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect)	Alcamo 他 オランダ：RIVM	B1
MARIA (Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation)	森 日本：東京理科大学	
MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact)	Messner, Strubegger 他 オーストリア：IIASA	B2
MiniCAM (The Mini Climate Assessment Model)	Edmonds, Pitcher 他 米国：PNNL	

シナリオ分析の結果を図 2.4.6 と図 2.4.7 に示す。環境重視かつグローバリズムの持続可能型社会である B1 世界は最も CO<sub>2</sub> 排出が少ない。B1 世界では取り立てて温暖化対策を講じなくても温暖化進行は食い止められる。環境重視かつリージョナリズムの、言わば伝統的な環境保護に近い地域共存型社会である B2 世界と経済発展重視型の A1 世界の 21 世紀末での排出量はほぼ同程度である。経済重視でリージョナリズムの多元化社会を目指す A2 世界が最も CO<sub>2</sub> 排出が大きい結果となった。また従来 SO<sub>x</sub> 排出は増大する一方と言われていたが、一人あたりの GDP

が 3000~5000\$ に達すると公害被害の影響から対策が進むという環境クズネツク曲線の効果を含めると、SOx排出が減少することが示された。

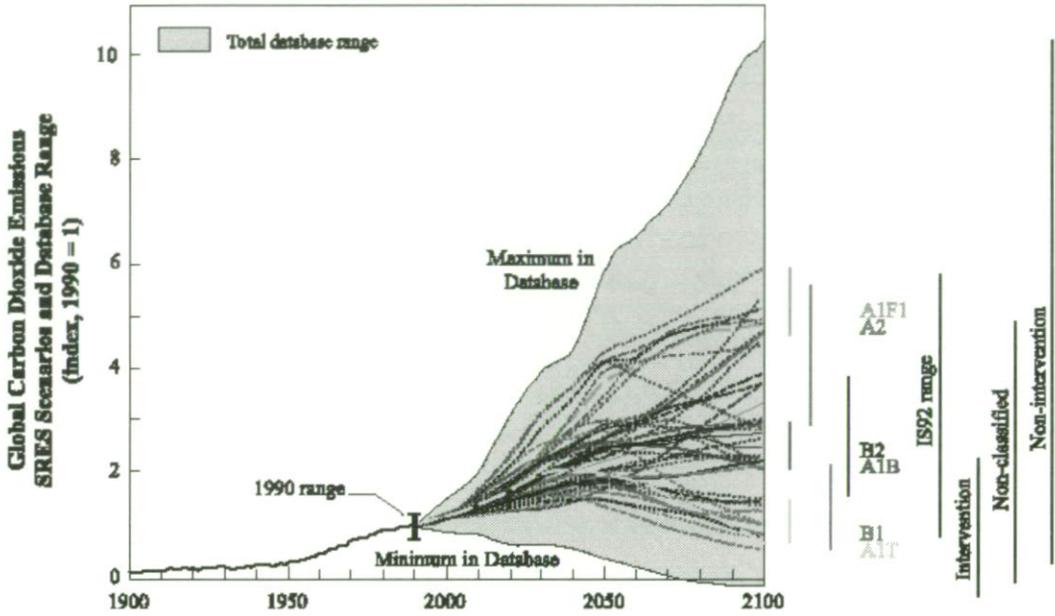


図 2.4.6 既存CO<sub>2</sub>排出シナリオの範囲とSRESシナリオでのCO<sub>2</sub>排出シナリオ

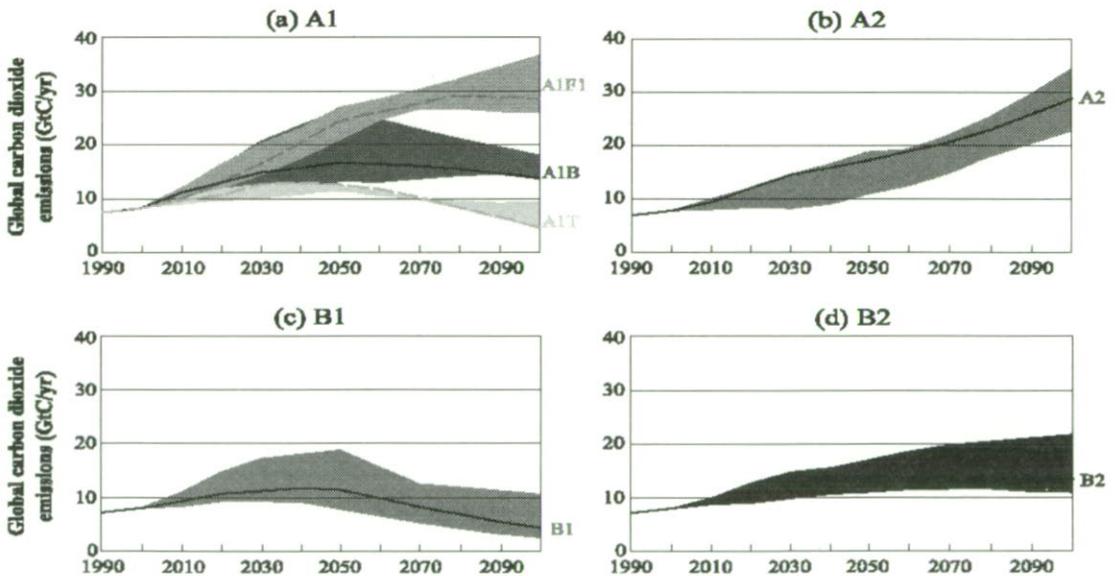


図 2.4.7 各SRES世界でのCO<sub>2</sub>排出量シナリオ

## 2.4.3. Post-SRES シナリオ [Morita00]

‘99年3月から SRES シナリオに基づいた Post-SRES 活動と呼ばれる、気候変動政策および温暖化技術対策を加味した、気候変動緩和・安定化シナリオ構築が始められた。Post-SRES では SRES の6チーム以外に、LDNE、PETRO、WorldScan の各モデルが加わった。GDP、人口、最終エネルギー消費を SRES での値に合わせた上で、2150年における 550ppmv 濃度安定化レベルを最低条件とし、450、650、750ppmv の各濃度安定化をターゲットとしている。

## (1) 安定化シナリオの比較

図 2.4.8(上段:単位GtC)はA1 世界において 550ppmv を達成する緩和シナリオの比較を世界全体、Annex-I<sup>1)</sup>国、非Annex-I<sup>2)</sup>国について、それぞれ示したものである。A1 ベースの 550ppmv 濃度安定化緩和シナリオは比較的モデル間のばらつきが少ない。世界全体と非Annex-I 国では逆U字形、Annex-I 国は右肩下がりのグラフになる。モデル間のばらつきは多少あるが、それは安定化レベルへ達するタイミングの違いと世界全体ではCO<sub>2</sub>削減政策の時間割当の違い、地域的にはCO<sub>2</sub>削減割当の違いが起因していると考えられる。

図 2.4.8 (下段:単位Percent) は 550ppmv 安定化達成のために A1 のベースライン (温暖化対策をとらないときのCO<sub>2</sub>排出量) からの削減量を百分率で表現したものである。世界全体および Annex-I 国ではCO<sub>2</sub>削減を早い時期からスタートするが、モデルにより 21 世紀中頃からスタートするものもある。非Annex-I 国は Annex-I 国より 10~30 年遅れでCO<sub>2</sub>削減をスタートさせるが、その削減割合は Annex-I 国よりも小さい (図 2.4.8 (b))。またモデル間のばらつきがなく殆ど同じである。

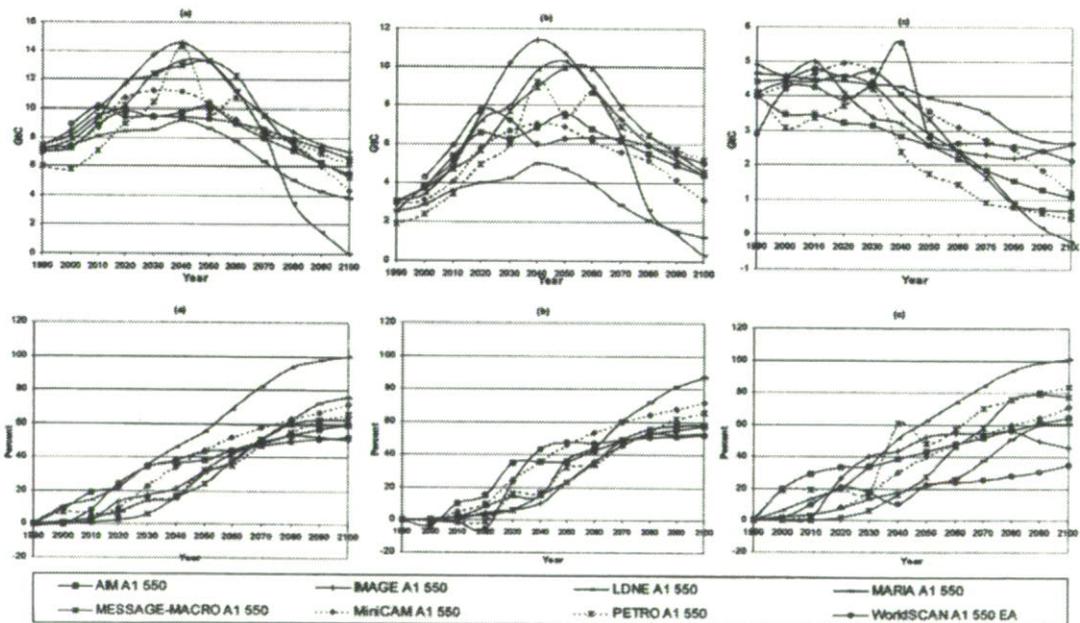


図 2.4.8 A1 世界での 550ppm 安定化時の CO<sub>2</sub> 排出 (上段) および  
ベースライン<sup>2)</sup>からの CO<sub>2</sub> 削減割合 (下段) (a) 世界全体、b) 非Annex-I 国、c) Annex-I 国

- 1) UNFCCC に定められた附属書 1 国で、いわゆる OECD 先進国が主である。
- 2) ベースラインとは CO<sub>2</sub> 排出制約なしの排出シナリオ。「無対策」、「なりゆき」BAU (Business As Usual) ともいう。

## (2) エネルギーシステムによる対策技術の比較

Post-SRES 活動により得られた知見は要約すると次のようにまとめられる。

- 1) 異なる開発発展経路は異なる技術/政策手段を必要とし、また大気中CO<sub>2</sub>濃度安定化ターゲットが同レベルであっても異なる緩和コストを示す。
- 2) CO<sub>2</sub>濃度安定化達成のための緩和オプションの開発、適用と広がりには十分な、ただ1つの特効薬的な手段は存在しない。むしろ技術革新、経済的インセンティブ、制度的な枠組みに基づいたポートフォリオが適用される。
- 3) 気候政策を成功し促進するには、技術、部門、地域にまたがる横断的な政策統合が鍵となる。
- 4) 21世紀にわたる開発発展経路の選択が、21世紀初頭における技術/政策手段のレベルに大きく影響を与える。
- 5) 異なる世界像に共通する、幾つかの“ロバストな”政策オプションが認識された。大規模で絶え間ないエネルギー効率向上と植林は異なるSRES世界に共通する特徴である。低炭素エネルギー、特に21世紀前半の天然ガス、21世紀後半のバイオマスエネルギーの導入は、全てのシナリオに共通する特徴である。A1世界やA2世界では原子力あるいは炭素隔離技術が温室効果ガス濃度安定化に重要になってくるであろう。さらに天然ガス複合発電や水素燃料電池など他の“ロバストな”技術は、将来の技術革新を考慮に入れるべきであろう。

## 参考文献

- 1) [IPCC90] J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraim (eds.), “Climate Change: The Scientific Assessment”, Cambridge University Press, Cambridge.
- 2) [IPCC95] J. Alcamo, A. Bouwman, J. Edmonds, A. Grubler, T. Morita, A. Sugandhy, “An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios, IPCC: 1995, Climate Change 1994”, Cambridge University Press, Cambridge.
- 3) [IPCC00] N. Nakicenovic, J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, et al., “Special report on emission scenarios (SRES): a special report of Working Group III of the IPCC”, Cambridge University Press, Cambridge.
- 4) [Leggett 1992] J. Leggett, W.J. Pepper, R.J. Swart, “Emissions scenarios for the IPCC: an update”, IPCC, climate change 1992, Cambridge University Press, Cambridge.
- 5) [Pepper 1992] W. Pepper, J. Leggett, R. Swart, J. Watson, J. Edmonds, I. Mintzer, “Emissions scenarios for the IPCC, an update, assumptions, methodology, and results”, Intergovernmental Panel on Climate Change”, Working Group I.
- 6) [Morita00] T. Morita et al., “Overview of mitigation scenarios for global climate stabilization based on new IPCC SRES emission scenarios (SRES)”, Environmental Economics and Policy Studies 3(2000)65-88
- 7) [西岡 97] 西岡秀三・原沢英夫編、「地球温暖化と日本 自然・人への影響予測」、古今書院、1997年
- 8) [森田 00] 森田恒幸、「気候変化予測のための排出シナリオ」、気象学会シンポジウム、2000年5月

## 謝辞

本稿の元となる原稿に対して、レビューと貴重なコメントを頂いた国立環境研究所社会環境システム部部長の森田恒幸博士（故人）に、心よりの感謝とご冥福を捧げます。

## 2.5. 環境外部性の経済的価値付け手法<sup>1</sup>

關 哲雄

### 2.5.1. はじめに

近年、環境（保護）問題に対する世界的な関心が高まってきている。これは、生産の持続的拡大に伴う資源の有限性に対する再認識、新しい汚染物質の発見、酸性雨に見られる広域・越境汚染、温室効果によるとされる気候変動、等々の要因が、コンピュータ技術の飛躍的發展に基づく情報化の進展の中で、広く一般に認識され浸透してきたことが背景にあると考えられる。こうした要因のいくつかは、欧米諸国を中心とする世界各国において、（複合）大気汚染の深刻化・広域化による健康被害、酸性雨による森林や歴史的建造物の破壊・腐食、異常気象による自然災害、等々の環境的影響として具現化され、深い危惧・危機感が抱かれている。

これを背景として、発電システムのエネルギー利用に関しても、その環境的影響を評価し、これを国家間にわたる産業政策・環境政策に反映させるべく研究プロジェクトとして設立されたのが、「Extern E」<sup>2</sup>である。Extern Eプロジェクトは、ヨーロッパの発電システムにおけるエネルギー利用から発生する環境負荷要因に関する外部費用の評価方法の確立とデータベースの開発を主たる目的としており、従来の環境政策における法的（直接規制）手段に加え、新たな経済的手段の導入を主張していることが特徴である。

本節では、環境政策における経済的手段の導入・利用に重視する近代経済学の立場から、Extern Eプロジェクトにおいてなされた外部費用の評価を、伝統的な特マイクロ経済学における「外部性」の理論から説明し、またそれに基づく環境経済学の最新成果を用いた外部費用の評価を環境の経済的評価法（価値付け手法）として概説する

### 2.5.2. 外部費用の概念

#### （1）外部性の概念

これまでの節においても「外部性」について述べられているが、経済学における外部性<sup>3</sup>の概念を整理するために、ここで再度定義を確認しておこう。経済学における外部性とは、生産者（企業）や消費者（家計）、政府というある経済主体が行う市場取引を目的とした経済活動が、その取引そのものの範囲を越えて（市場機構を経由しないで）、他の経済主体にプラスないしはマイナスの影響を及ぼす副次的な効果のことをいう。ここで、外部性のプラス、マイナスの2つの効果は、それぞれ外部経済、外部不経済と呼ばれる。前者の外部経済（プラスの外部性）は、ある経済主体の経済行動が、他の消費者の効用を増大させる場合や他の生産者の生産増加に寄与する場合などであり、また後者の外部不経済（負の外部性）は、他の家計の効用を減少させる場合や他の企業の生産費用を上昇させる場合などである。ここで「外部」という用語が付される理由は、それが、経済取引を行う当該の経済主体にとっては第三者（外部）である経済主体との間に生じる現象であると同時に、何らかの制度上あるいは費用上の理由による困難さによって、市場取引の「外」にある現象として見なされるからである。

<sup>1</sup> 本節は、關 哲雄・庭田文近「外部費用の理論的側面—環境の経済的評価法—」『エネルギー・資源』Vol. 21, No. 6 (2000)の修正・加筆したものである。

<sup>2</sup> 1990年初頭、ヨーロッパ委員会を中心として開始・設立。

<sup>3</sup> 経済学では「外部効果」とも称している。

以下では、外部費用との関わりから外部不経済の例を取り上げる。例えば、火力発電所の生産活動について見てみよう。火力発電所では化石燃料を使用するため、その燃焼に際してCO<sub>2</sub>とSO<sub>2</sub>を大気中に放出・発散するが、これらの大気汚染物質は周辺地域の住民にさまざまなマイナスの影響を及ぼすことがある。この場合、発電施設の電力生産活動は、市場機構を経由せず、地域住民に外部不経済（外部費用）を与えることになる。

このように市場機構を経由せずに生じるマイナスの影響の現象は、「市場の失敗」あるいは「市場の欠陥」と呼ばれる。ここで、外部性が「市場の失敗」として問題視されるのは、外部性という現象が存在するとき、市場での取引が社会全体の観点から効率的な生産をもたらさないからである。火力発電所の例を取ると、それは、火力発電所が生産決定の際に考慮する費用、すなわち「私的費用」と、社会全体の観点から考慮すべき費用、すなわち「社会的費用」との間に乖離が生じるからである。この乖離は、地域住民に与えるさまざまなマイナスの影響を示す外部不経済が存在するときに生じ、この外部不経済に対応する費用が、すなわち「外部費用」である<sup>4</sup>。したがって、社会的費用は私的費用と外部費用の和であると考えることができる。外部費用が存在するとき、この社会的費用が、社会全体の観点からの「真」の費用を示すことになる。外部費用が存在する場合、火力発電所の生産活動は過剰生産であり、それは結果として社会全体の資源配分を歪める効果を持つのである<sup>5</sup>。

このため、こうした私的費用と社会的費用との乖離、すなわち外部費用をできるだけ軽減させる手段ないしは対策が必要となる。この手段ないしは対策は、外部不経済（外部費用）を考慮に入れることから、「外部性（外部効果）の内部化」と言われている。以下、これについて簡単に述べる。

## （2）外部性（外部効果）の内部化

外部費用の軽減策には、①当事者間の交渉、②政府による課税、③政府による規制、等の3種類が挙げられる。まず、①の対策には、権利の取り扱いの違いから2つの考え方がある。上記の発電所による大気汚染を例に取れば、(A) 地域住民が清浄な大気を享受する権利と、(B) 発電所が大気を汚染する権利、である。(A) の場合には、大気汚染物質を排出する発電所が地域住民に被害を補償することになり、(B) の場合には、地域住民が発電所に補償金を払って生産活動の縮小を依頼することになる。(A)、(B) の交渉方法は、大気の汚染者と被害者の状況を所得再分配の面で改善ないし改悪するという相違を生み出すが、外部費用を軽減する点においては同じである（コースの定理）。本方法では、もし大気に対する権利（環境権）が規定可能であるならば、当事者交渉による外部性の内部化が可能となる。次に、②の対策としては、政府が発電所に対して課税し、外部不経済を軽減する方法である<sup>6</sup>。このような税はピグー税と呼ばれている<sup>7</sup>。最後に、③の対策としては、政府が環境基準を設定し、発電所にこの基準を遵守させるように生産活動を強制する方法である。この方法の問題点としては、政府による企業の生産活動の自由に対する束縛と、環境設定基準の適切性に対する困難さと疑問がある。この対策は、外部費用の軽減を直接の目的とするよりは、むしろ健康や快適な生活環境を保全・維持することを目的とした一種の福祉基準を設定するものと考えらるべきであろう。

<sup>4</sup> 同様に外部経済に対応する場合は外部便益という。

<sup>5</sup> 外部便益が存在する場合は過小な生産となり、これも資源配分を歪めることになる。

<sup>6</sup> 外部経済が存在する場合は生産活動を促進させるために補助金を与える。

<sup>7</sup> 英国の経済学者、A.C. Pigou (1877-1959) の名に因んでいる。

### 2.5.3. 外部費用の評価 —環境の経済的評価(価値付け)法—

上記の「外部性の内部化」における3つの対策で問題となるのは、どのように外部費用の評価・計測を行なうかということであり、これが可能になって初めて社会的費用を客観的に把握できるようになる。そして、社会的費用が適切に把握されれば環境政策の経済的手段に反映させることが可能となる。しかしながら、外部費用の計測は、これまで大気や水などの環境財の劣化・損害に対する価格評価の困難性から、長年放置もしくは保留されてきたのが実状である。しかし、近年におけるコンピュータ技術の飛躍的進歩による環境関連データベースの整備、環境影響解析モデルの開発の進展、さらに環境経済学の発展、等々により、環境財の劣化・損害の計測と評価が次第に可能となってきたといつてよい。

以下では、環境経済学の理論に基づく外部費用の評価、特に大気や水などの環境財の劣化・損害の経済的評価法について概説する。

#### (1) WTP と WTA の概念

はじめに、環境の劣化・損害の経済的評価法において、しばしば用いられている WTP (Willingness To Pay : 支払い意思額) と WTA (Willingness To Accept : 受入れ意思額) という2つの概念から説明する。

WTPとWTAという概念は、個人の合理的選択という仮定<sup>8</sup>に基礎をおいている。この仮定に基づいて、個人は、環境という市場が存在しないにもかかわらず、環境が提供する種々のサービスの変化を評価(価値付け)することが可能となる。例えば、環境サービスの変化が個人の状態を良好させた場合と悪化させた場合について考えてみる。環境が良好した場合、個人は良好した状態を確保するために出費を厭わず金を支払う(WTP)が、環境が悪化した場合、個人は悪化した状態を容認するための補償を厭わず受け入れる(WTA)ことになる。

WTPとWTAが、環境サービスの経済的評価の一般的測度を表し、環境政策・公共政策において重要な経済的評価法として広く採用されている。以下では、このWTPとWTAを基礎とする環境の経済的評価(価値付け)について述べる。

#### (2) 環境の経済的評価法の分類<sup>9</sup>

代表的な環境の経済的評価法を図2.5.1に示す。環境の経済的評価法は、調査対象の絞込み法の違いから、選好アプローチ(人々の選好に基づいて環境財を評価する方法)と非選好アプローチ(人々の選好に依存せず環境財を評価する方法)に分類される。前者の選好アプローチには、その手法から顕示選好アプローチ(環境に密接に関連する私的財に対する人々の選好からその環境を評価する間接的評価法)と表明選好アプローチ(環境そのものに対する人々の明示的な選好からその環境を評価する直接的評価法)の2種類がある。後者の非選好アプローチは、環境規制の費用や環境属性の保護費用によって環境の価値を評価する方法である。このアプローチは、欧米において環境影響の費用を計上し、政策対応のために伝統的に用いられてきた。

<sup>8</sup> すなわち、個人は自ら欲し必要とするものを熟知しており、自らの厚生に影響を与える選択を最善にすることができるという仮定。

<sup>9</sup> 以下の環境の経済的評価法は、文献5)に一部基づいている。

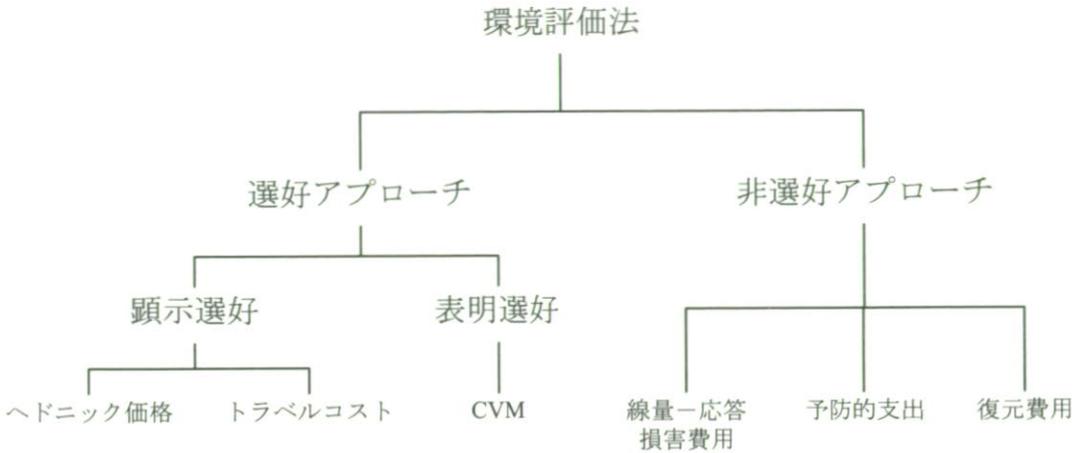


図 2.5.1 環境の経済的評価法

### (3) 顕示選好アプローチ

顕示選好アプローチには、トラベルコスト法とヘドニック価格法がある。まず、トラベルコスト法は、主にレクリエーション地に関する需要をそれに関連する私的財の需要から推定し、その WTP によってレクリエーション地の環境を評価するものである。ここで、レクリエーション地に関する需要は、トラベルコスト（交通費用）によってどのくらいその地域を訪れる回数が増えるかを観察することで評価される。すなわち、環境サービスへの WTP をトラベルコストで代替して評価することができる。この方法は、クリーンな状態のレクリエーション地と汚染された状態のレクリエーション地がもたらす環境サービスを評価することにも適用ができ、その2つの状態の差が、環境の劣化・損害の評価額であると考えられることができる。

次に、ヘドニック価格法とは、ある財の価値はその財のさまざまな属性の組合せから構成されると見なす方法である。例えば、住宅の価格について考えてみると、それは、部屋の数や庭園の有無、商店街へのアクセスの良さ、近隣の環境条件などに依存して決められる。そこで、騒音や大気の汚れなどの環境条件の相違が、周辺地域の住宅価格の相違に反映されているかどうかを観測することで、周辺地域の環境の劣化・損害の状態を評価することができる。なお、ヘドニック価格法には、職業間・産業間の傷害・死亡リスクの差による賃金格差を用いて、傷害・死亡の経済的評価を行なう賃金リスク法も含まれる。

### (4) 表明選好アプローチ

表明選好アプローチには、最近最も注目されている CVM (Contingent Valuation Method) がある。CVM は、アンケートや面接等の調査によって、人々が当該の環境に対してどれだけの価値付けをするかを明示的に観測する方法である。CVM には大きく2つの方法があり、1つは環境サービスを WTA から評価し、もう2つは WTP から評価するものである。前者は、環境の悪化に対して、人々が環境悪化以前の効用水準を保つのに必要な補償額を調査する。これは、環境の悪化に対して人々はどれだけの金銭的補償を受ければ、この悪化した状態を容認できるのかを調査する方法である。後者は、環境の悪化に対して、環境悪化以前の効用水準を保つのに人々が支出してもよいと考える金額を調査する。これは、環境の悪化に対して、人々がその環境を改善することに対してどれくらい金銭的支出を認めるのかを調査する方法である。

### (5) 非選好アプローチ

非選好アプローチには大きく三つの方法がある。まず、線量-応答損害費用であるが、これは、特定の汚染物質の量・濃度の変化が経済活動や人的・物的に及ぼす影響を科学的データに基づき、市場価格あるいは陰の価格を用いて環境を評価する方法である。例えば、大気汚染物質が農作物の生産量に影響を及ぼす場合、その大気汚染物質と農作物に関する線量-応答関数によって農作物の生産量の変化を測定し、その損失を市場価格あるいは陰の（調整ないし代理）価格で評価する。

次に、予防的支出とは、環境悪化の防御に対する予防的な支出で評価する方法で、例えば、道路交通騒音の場合、騒音軽減のための二重窓の設置費用で環境悪化の価値を評価する。

最後に、復元費用アプローチとは、環境の劣化・損害が生じた後に、これを元の状態にまで回復するのに要した費用で環境を評価する方法である。

### 2.5.4. おわりに — 環境の価値 —

これまでに述べてきた経済的評価法は、環境が有するどのような価値を評価しようとするものであろうか。本節の結びとして、この環境が有する価値について簡単に触れておきたい。

まず、環境の価値には、通常2つの価値があると言われている。1つは「利用価値」であり、もう1つは「非利用価値」である。

はじめに、利用価値とは、ある財の消費（利用）に関わる価値である。環境をそれが人々にさまざまな効用（満足）をもたらす1種の財・サービスと考えた場合、利用価値は、利用の時間軸上での位置付けから3つの側面を有していると考えることができる。「現時の利用（current use）」、「期待利用（expected use）」、「可能な利用（possible use）」、等がこれである。例えば、アメリカのグランドキャニオンへの旅行を例にとりて考えてみる。現在、私がグランドキャニオンに来ているとすると、それは現時点でグランドキャニオンの壮大な景観を享受していることになるため、これを「現時の利用」という。また、私が今年の終わりにグランドキャニオンに行く計画を既に立てていれば、これは、まだ実現してはいないものの、確定的に実行することが決まっていることから「期待利用」という。また、私は10年以内にグランドキャニオンに行くかも知れない、あるいは行く可能性があるという場合には、これを「可能な利用」という。

次に、非利用価値とは、ある財を実際に消費（利用）しなくとも、人々に何らかの効用をもたらす価値のことで、これには「存在価値（existence value）」と「遺産価値（bequest value）」の2つがある。ここで、存在価値とは、例えば、希少な動・植物の存在に対して付ける価値であり、遺産価値は、例えば、現世代の人々が未開の大自然を次世代の人々に引き渡す価値である。

以上のこうした環境の価値の分類<sup>10</sup>は、環境が人々に与える価値の複雑性を理解する助けとなり、環境の有する様々な価値の側面を把握できる枠組みを提供するものであると考えることができる。

上記の顕示選好アプローチに基づく評価法は、私的財という市場評価可能な財との関連で環境を評価するため、ここで述べた環境の「利用価値」の評価が可能となる。また、表明選好アプローチに基づく評価法の場合は、環境に対する直接的・明示的選好から環境を評価するため、環境の「利用価値」だけでなく、環境の「非利用価値」の評価についても利用すること可能である。

<sup>10</sup> 以上、本節の価値の分類は、文献9)に一部基づいている。

参考文献

- 1) 大石泰彦・關 哲雄；エレメンタルミクロ経済学、(1998)、英創社。
- 2) 福岡正夫；ゼミナール経済学入門、(1986)、日本経済新聞社。
- 3) ExternE ; Externalities of Energy, vol.2 :Methodology,(1995),European Commission.
- 4) Freeman III, A, Myrick ; The Measurement of Environmental and Resource Values,(1993), Resources for the Future.
- 5) Garrod, Guy and Kenneth G Willis ; Economic Valuation of the Environment,(1999), Edward Elgar.
- 6) Hanemann, W. Micheal ; Willingness To Pay and Willingness To Accept ; How much can They Differ?, American Economic Review, 81-3, (1991), 635-647.
- 7) Hanemann, W. Micheal ; Valuing the Environment through Contingent Valuation, Journal Economic Perspect, 8-4,(1994),19-43.
- 8) Hanley, N., Shogren, J.A. and White B ; Environmental Economics -In Theory and Practice -, (1997), MacMillan.
- 9) Kolstad, Charles D. ; Environmental Economics, (2000), Oxford University.

# 第3章

## 低線量被ばくの生体影響と外部性

---



### 3.1. はじめに

松原 純子

低線量の放射線の影響は原子力開発に対する公衆の否定的関心の大きな部分を占めている。X線が発見されて以来、前世紀初期から放射線利用が進み、人々はその利用と同時に、放射線を不注意に扱えばさまざまな障害が及ぶことを経験し、放射線取扱基準は時代を追って厳しくなってきた。私たち日本人は第二次大戦時に広島および長崎において世界で初めて原子爆弾に被ばくし、放射線に対する関心も強い。戦後は国際放射線防護機関ICRPによって国際的放射線防護基準が勧告され、放射線防護のためのLNT仮説（しきい値なしの線形影響仮説）やALARA原則（合理的に達成できる限り低く）の考え方が普及した。LNT仮説ではどんなに微量でも線量に応じた放射線発がん性があると仮定するため、人々に低線量放射線の発がん性を過度に印象付ける結果となっている。

また、原子力施設境界の放射線レベルは、自然放射線レベル（1.5mSv/年）に比べても充分小さな増加限度（線量目標値0.05mSv/年）に抑えられているが、原子力発電所など隔離された機器の内部には巨大な放射性物質が内蔵されているため、公衆の不安を少しでも和らげるためには、放射線の被ばくレベルと人体影響に関する適切な情報が経常的に施設周辺の人々に提供されていなければならない。

本章では、放射線とくに低線量の放射線影響について、2節では分子ないし細胞レベルの放射線の生体影響としてDNA損傷とその修復について解説し、3節と4節で放射線の臓器や個体への影響推定の基本資料となる、放射性核種の生体内動態（キネティクス）の考え方を、生体の主要成分である水素Hや炭素Cの動態と被ばく評価を通じて紹介してある。放射性物質の人体汚染はチェルノブイル事故時に見られた沃素131の甲状腺蓄積と小児甲状腺がんの発生など、核分裂生成物汚染も重要であるが、別の報告に譲りたい。今回は視野を拡げて、5節において低線量放射線の人への影響一般について、個体実験的情報や人間集団における疫学的情報等を通じて総合的に点検解説を試みた。



## 3.2. DNA 損傷と修復

酒井 一夫

### 3.2.1. 放射線の生物効果の標的としての DNA

放射線の発見の直後から、放射線が大きな生物作用を有することが認識されていた。放射線の生物作用の大きな特徴のひとつに、小さなエネルギーが大きな作用を及ぼすことが挙げられる。たとえばヒトの半数致死線量は 4Gy 程度とされているが、これに相等するエネルギーが均一に吸収されるとすれば、人体の比熱を 1 と仮定すると高々  $10^{3^{\circ}\text{C}}$  程度の体温の上昇をもたらすに過ぎない。このような事実と、放射線の粒子的な性質とから、放射線の生物作用はそのエネルギーが均等に与えられた結果ではなく、集中したエネルギーが細胞内の「標的」をヒットすることによるという考え方が提唱された。これがいわゆる標的説（ターゲット説）と呼ばれる考え方である。

細胞内の標的の実体を明らかにしようという研究の中で、様々な状況証拠から、標的は細胞核の中にあり、DNA が標的であろうとの結論に至った。証拠のいくつかを以下に示す。

① 飛程の短いアルファ線を用いて細胞の部分照射を行うと、細胞質のみの照射では致死効果は小さく、核が照射される場合に大きな致死効果が認められる。

② アメーバを材料として細胞核の摘出・再移植の手法を用いた照射実験を行うと、細胞核のみに照射し非照射の細胞質に戻した場合には、細胞全体の照射と同程度の致死効果が観察されるが、核を除去した細胞質に照射し、そこへ非照射の核を戻した場合には細胞死の程度が低い（図 3.2.1）。

③ トリチウム水や、 $^3\text{H}$  で標識した生体高分子の前駆体を細胞に取り込ませ、放射性核種の崩壊に伴う細胞の致死効果を比較すると、DNA に放射性核種が取り込まれた場合に最も高い致死効果が観察される（表 3.2.1）。

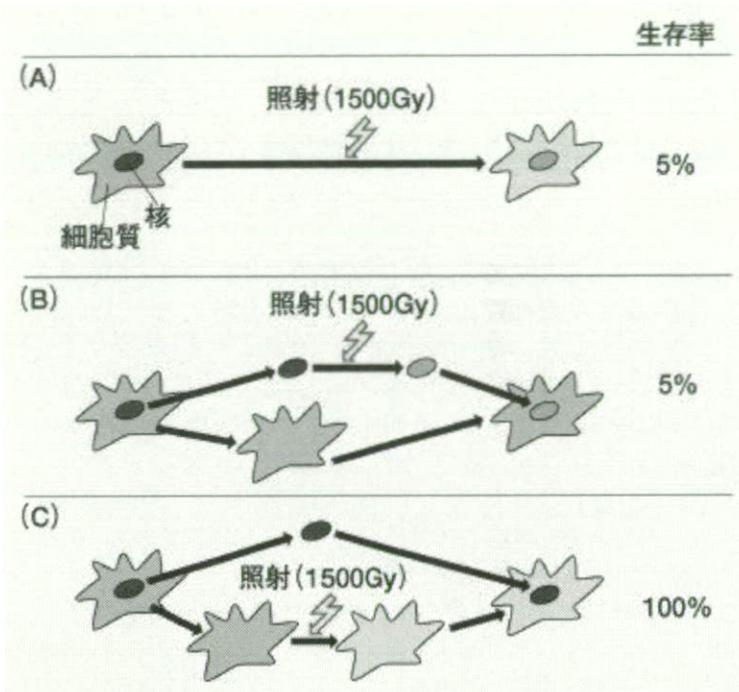
標的分子の概念は、元々は細胞死に関して提唱されたものであるが、突然変異についても同様の証拠から DNA が標的であることが示された（表 3.2.1）。さらに、発がんの過程において突然変異が重要な役割を果たすことから、DNA は発がんに関する標的分子であるとも考えられている。

### 3.2.2. DNA 損傷とその修復

放射線により DNA 分子にはさまざまな変化が生じる。DNA を構成する塩基の変化、DNA の鎖を構成する糖-リン酸結合の切断などである。これらを総称して DNA 損傷とよぶ。DNA 損傷の原因は放射線だけでなく、細胞内での代謝の結果として生じる活性酸素などによっても誘起される。

一方、細胞には DNA 損傷を修復する仕組みが備わっている。一般に DNA 鎖のうち 1 本だけが関わる損傷（1 本鎖切断、塩基の変化や欠失）は速やかに修復されるのに対し、2 本鎖が関わる損傷は修復されにくい、特に複数の損傷が局所的に集中して存在する場合には修復が非常に困難であり、これが放射線の様々な生物作用の原因とされている。

現在放射線防護の分野においては、線量がいかに低くても線量に比例してリスクが増加するという仮定が採用されている。いわゆる「しきい値なし直線仮説（LNT 仮説）」（図 3.2.2）である。この仮定の根拠に DNA 損傷誘発の直線性がある。すなわち、DNA 損傷の誘発は物理化学的なものであり、修復されにくい損傷は確率的に誘起され、線量に比例するという考えである。



核を単離し核だけを照射した後、非照射の細胞質に再移植した場合 (B) には、アメーバ全体を照射した場合 (A) と同様の致死効果が見られるが、細胞質のみに照射して、非照射の核を再移植した場合 (C) の致死効果は小さい。細胞死に関する「標的」が細胞核の部分にあることが示唆される。

図 3.2.1 アメーバの部分照射と致死効果

表 3.2.1 トリチウムの化学型による生物効果の違い

生物効果	化学式	RBE
細胞致死	HTO	1.3
細胞致死	<sup>3</sup> Hアミノ酸	1.7
細胞致死	<sup>3</sup> H-Tdr	3.5
突然変異	HTO	2.4
突然変異	<sup>3</sup> Hアミノ酸	2.6
突然変異	<sup>3</sup> H-Tdr	5.9

トリチウムが細胞内に均一に分布する場合 (HTO) やタンパク質に取り込まれる場合 (アミノ酸) に比べ、DNAに取り込まれる場合 (Tdr:チミジン) の方が細胞致死や突然変異を指標とした生物効果 (RBE) の大きいことが分かる。DNAが「標的」であることを示す状況証拠。

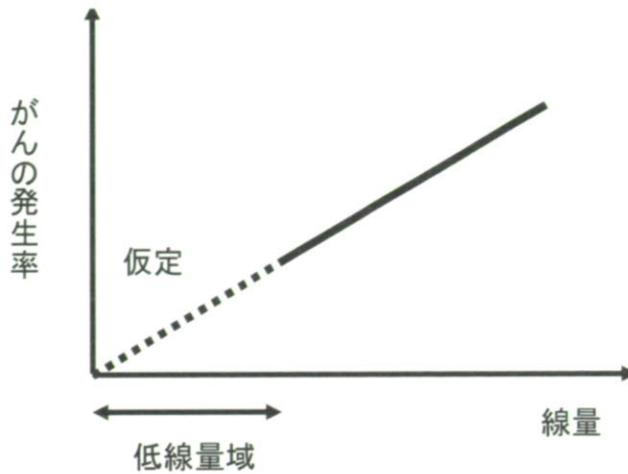


図 3.2.2 しきい値なし直線仮説 (LNT 仮説)

### 3.2.3. 低線量影響を考えるにあたっての問題点

上記に述べたような状況の中で「線量に比例した DNA 損傷の誘起→線量に比例したリスクの増加」という「古典的なパラダイム」が形成されたわけであるが、その根拠は高線量域での知見に基づいたものであり、低線量域での線量と放射線の生物作用の関係は不明のままであった。これが、LNT 仮説が仮説と呼ばれるゆえんであり、しばしば図 3.2.2 にあるように低線量域が破線で示される理由である。放射線生物学の進展とともに、低線量の影響が解析されるようになると、高線量の場合からは予測できないような現象が明らかとなった。その一例が低線量放射線により抵抗性が獲得されるという「放射線適応応答」である。典型例を図 3.2.3 に示す。

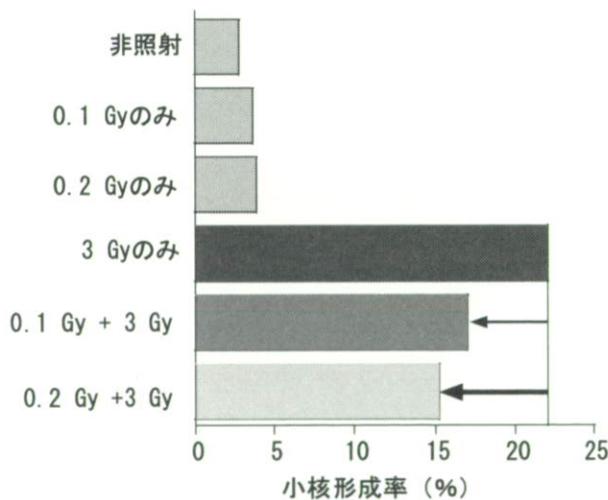


図 3.2.3 培養細胞における小核形成を指標とした適応応答

図3.2.3は、修復されずに後に残った切断に由来すると考えられる「小核」を指標としたものである。3Gyの照射に先立って4時間前に0.1Gyあるいは0.2Gyの線量を照射しておくことによって、小核の形成が抑制されることを示している。この場合にはDNA修復能力が増強されているものと考えられるが、低線量放射線の生物作用やリスクを評価するにあたっては、このような細胞の「放射線応答」を考慮に入れる必要がある。

#### 3.2.4. おわりに

本節では、細胞レベルの現象を取り上げた。LNT仮説の中では、修復できなかった損傷を持つ細胞が直ちにリスクの増加につながると仮定しているが、現実には、修復されない損傷を持った細胞が除去される「アポトーシス」と呼ばれる機構や、がん化した細胞を除去する免疫機能などが備わっている。低線量域の場合には細胞レベルの現象に加え、このような組織・個体レベルの高次機能も考慮する必要がある（3.5節参照）。

### 3.3. 放射性核種の生体内挙動と被ばく線量評価

武田 洋

#### 3.3.1. はじめに

核融合炉では多量のトリチウムが燃料として使用されること、また炉材として使用予定のグラファイト中には炉の燃焼によりかなりの量の炭素-14 が生成することから、この2核種が環境へも漏洩する可能性が指摘されている。将来のエネルギー源として期待されている核融合炉の開発を、国民の安心と安全を確保し社会的受容性のあるものとして進めるには、この2核種に対する安全性評価が重要な課題である。放射性核種による内部被ばくに対する安全性や危険度を評価するためには、これら放射性核種の生体内での挙動を明らかにし、体内組織や全身への被ばく線量を推定する必要がある。ここでは、動物（ラット）実験により、様々な化学形のトリチウムと炭素-14 の生体内挙動を調べ、動物組織への線量評価を行うとともに、人への被ばく線量評価のためのモデル化を行い、このモデルを用いて日本人を対象にした線量係数（IBq 摂取した場合の預託実効線量）を試算した結果を紹介する。なお、放射線被ばくへの防護体系や制限値を勧告している国際放射線防護委員会（ICRP）は次期勧告でこの防護体系の見直しを行う予定である。新たな放射線防護体系では、人以外の生物種を含めた環境・生態系への影響を考慮し、「人の健康」だけでなく「環境」の防護を統合したものとなるよう検討が進められている。したがって、トリチウムや炭素-14 に対しても今後、環境・生態系への影響を評価することが求められる。現在、我々は環境の防護を目的とする研究を開始しており、その研究方針についても紹介しておきたい。

#### 3.3.2. 放射性核種（ $^3\text{H}$ 及び $^{14}\text{C}$ ）のラット体内における挙動

摂取するトリチウム（ $^3\text{H}$ ）及び炭素-14（ $^{14}\text{C}$ ）の化学形の違いによって生体内動態がどのように異なり、体内各組織へ与える線量がどのように異なるかを明らかにするため、無機形として $^3\text{H}$ はトリチウム水、 $^{14}\text{C}$ は重炭酸塩、また有機形として単糖（グルコース）、アミノ酸（グリシン、リジン、ロイシンなど）、脂肪酸（パルチミン酸、オレイン酸）そしてヌクレオシド（サイミジン）の $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ 標識化合物の動物投与実験を行なった。実験動物にはラットを使用し、各 $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ 標識化合物を経口投与した後、動物各組織中の $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ 濃度を約100日間経目的に測定した。その結果を図3.3.1、図3.3.2に示している。ここには、肝臓組織での結果を示しているが、他の組織でも類似した結果が得られている。この図から明らかのように、ラット組織中の $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ 濃度レベルとその時系列変化は投与した化学形によりかなり異なっていた。 $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ に共通して、無機形（トリチウム水および $^{14}\text{C}$ -重炭酸塩）よりは有機形（単糖、アミノ酸、脂肪酸、ヌクレオチド）が、有機形の中では糖やヌクレオチド脂肪酸やアミノ酸の形の方が体内組織への取り込みと残留が高くなる傾向が見られた。 $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ のいずれも最も高い組織への残留が見られたのはアミノ酸であるリジンであった。

【実験】

無機形<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C標識化合物  
 トリチウム水、<sup>14</sup>C-重炭酸Na  
 有機形<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C標識化合物  
<sup>3</sup>H-アミノ酸、<sup>14</sup>C-アミノ酸  
<sup>3</sup>H-脂肪酸、<sup>14</sup>C-脂肪酸  
<sup>3</sup>H-単糖、<sup>14</sup>C-単糖  
<sup>3</sup>H-スクレオチド、<sup>14</sup>C-スクレオチド  
<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C-標識食物  
<sup>3</sup>H-小麦、<sup>14</sup>C-小麦

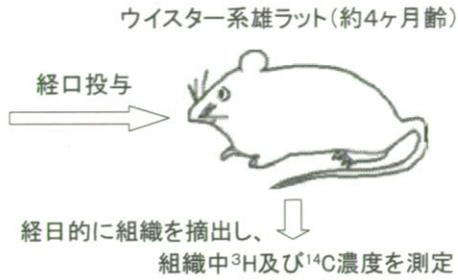


図 3.3.1 動物実験による<sup>3</sup>Hおよび<sup>14</sup>Cの生体内動態の解析

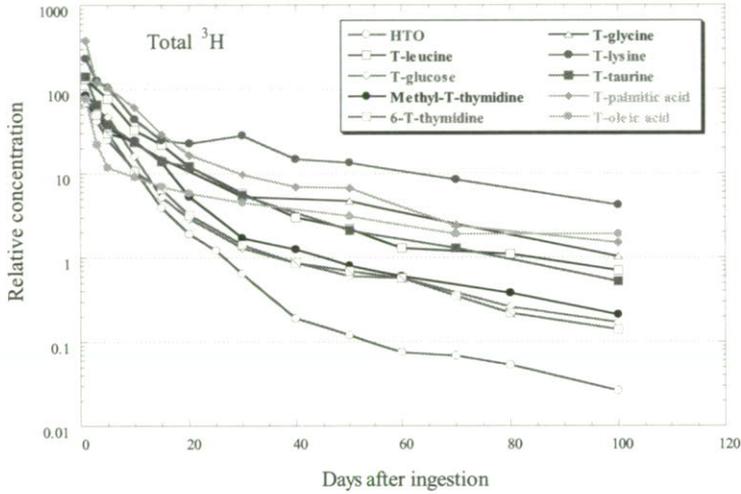


図 3.3.2 <sup>3</sup>H標識化合物投与後のラット肝組織中<sup>3</sup>H濃度変化

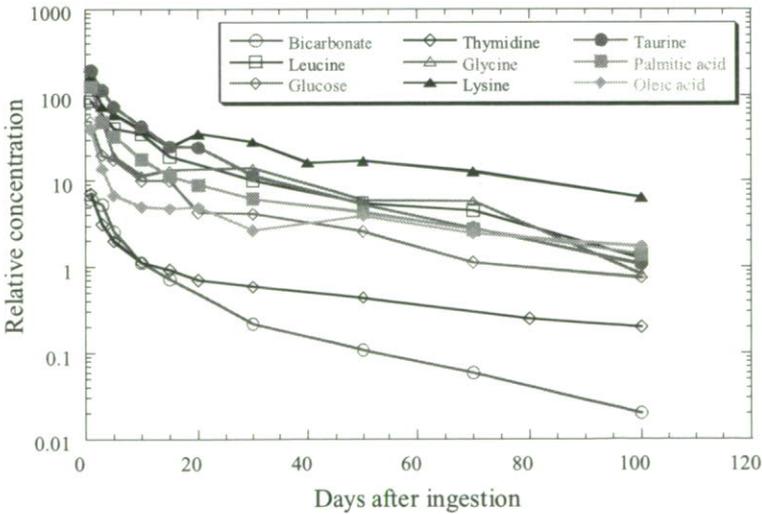


図 3.3.3 <sup>14</sup>C標識化合物投与後のラット肝組織中<sup>14</sup>C濃度変化

3.3.3.  $^3\text{H}$ 及び $^{14}\text{C}$ の被ばく線量評価と化学形の違いによる相対危険度の評価

このような体内組織での $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ 動態の差が各組織へ与える線量にどの程度の差異を与えるかを明らかにするため、各 $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ 標識化合物投与後 100 日間の積算線量を組織毎に算定した。その結果を表 3.3.1、表 3.3.2 に示す。各組織における線量は化学形に依存して差異が見られるが、無機形（HTOや $^{14}\text{C}$ -重炭酸塩）に比べ、有機形の $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ 標識化合物投与の場合に、ほとんどの組織でより高い線量値を示した。なお、脂肪組織においては他の組織とはかなり異なる結果が見られ、特に脂肪酸の形で $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ を投与した場合に著しく高い線量値となることが判明した。

表 3.3.1 各種 $^3\text{H}$ 標識化合物投与後 100 日間の各組織への線量

組 織	ラット体重 g 当たり 37kBq 摂取した場合の線量 (mGy)							
	HTO	$^3\text{H}$ - ロイシン	$^3\text{H}$ - グリシン	$^3\text{H}$ - リジン	$^3\text{H}$ - パルミチン酸	$^3\text{H}$ - オレイン酸	$^3\text{H}$ - グルコース	$^3\text{H}$ - サイジン
肝 臓	12	36	26	68	63	15	15	21
腎 臓	12	39	32	65	42	15	15	20
辜 丸	13	21	25	39	27	10	17	22
脾 臓	12	29	29	80	38	12	14	24
小 腸	12	30	30	65	46	49	—	20
筋 肉	12	35	29	75	32	12	16	16
脳	12	28	24	50	27	9	17	17
脂肪組織	3	10	11	16	334	879	26	8

表 3.3.2 各種 $^{14}\text{C}$ 標識化合物投与後 100 日間の各組織への線量

組 織	ラット体重 g 当たり 37kBq 摂取した場合の線量 (mGy)							
	$^{14}\text{C}$ - 重炭酸塩	$^{14}\text{C}$ - ロイシン	$^{14}\text{C}$ - グリシン	$^{14}\text{C}$ - リジン	$^{14}\text{C}$ - パルミチン酸	$^{14}\text{C}$ - オレイン酸	$^{14}\text{C}$ - グルコース	$^{14}\text{C}$ - サイジン
肝 臓	0.57	8.8	7.8	19	12	3.2	4.1	0.43
腎 臓	0.35	9.2	7.9	15	5.8	2.8	3.5	0.44
辜 丸	0.31	4.3	5.1	8.7	2.2	0.86	2.7	0.27
脾 臓	0.35	12	6.3	21	6.1	2.0	3.4	1.2
小 腸	0.32	8.3	7.7	14	9.4	7.3	3.7	0.92
筋 肉	0.31	7.7	5.6	21	3.8	3.8	2.3	0.22
脳	0.35	6.3	3.5	13	2.7	1.1	3.1	0.21
脂肪組織	0.68	7.4	4.2	7.3	334	214	7.4	0.41

このように、<sup>3</sup>Hや<sup>14</sup>C標識化合物投与後の体内での分布は均等ではなく、組織間で線量値も異なるが、<sup>3</sup>Hおよび<sup>14</sup>Cの化学形の違いによる相対的な危険度評価のため、ここでは全身への平均的な線量を算定した。表 3.3.3、表 3.3.4 には脂肪組織を除く7つの組織での平均線量値を示している。この結果によれば、<sup>3</sup>Hの場合、HTOに比べ<sup>3</sup>H-アミノ酸で2.3–5.2倍、<sup>3</sup>H-脂肪酸で1.4–3.2倍、<sup>3</sup>H-サイミジンで1.7倍、そして<sup>3</sup>H-グルコースで1.3倍高い線量値となった。一方、<sup>14</sup>Cの場合、<sup>14</sup>C-重炭酸塩に比べ<sup>14</sup>C-アミノ酸で23–45倍、<sup>14</sup>C-脂肪酸で8.3–18倍、<sup>14</sup>C-グルコースで9.1倍、そして<sup>14</sup>C-サイミジンで1.4倍高い線量値となることが判明した。

表 3.3.3 各種<sup>3</sup>H標識化合物投与後の平均組織線量とその線量比 (<sup>3</sup>H-化合物/HTO)

<sup>3</sup> H-化合物	脂肪組織を除く組織の 平均線量(mGy)	線量比 ( <sup>3</sup> H-有機化合物/HTO)
トリチウム水	12	1
<sup>3</sup> H-ロイシン	31	2.6
<sup>3</sup> H-グリシン	28	2.3
<sup>3</sup> H-リジン	63	5.2
<sup>3</sup> H-パルミチン酸	39	3.2
<sup>3</sup> H-オレイン酸	17	1.4
<sup>3</sup> H-グルコース	16	1.3
<sup>3</sup> H-サイミジン	20	1.7

表 3.3.4 各種<sup>14</sup>C標識化合物投与後の平均組織線量とその線量比 (<sup>14</sup>C-有機形/<sup>14</sup>C-無機形)

<sup>14</sup> C-化合物	脂肪組織を除く組織の 平均線量 (mSv)	線量比 ( <sup>14</sup> C-有機/ <sup>14</sup> C-無機)
<sup>14</sup> C-重炭酸塩	0.35	1.0
<sup>14</sup> C-ロイシン	8.1	23
<sup>14</sup> C-グリシン	7.9	23
<sup>14</sup> C-リジン	16.0	45
<sup>14</sup> C-パルミチン酸	6.2	18
<sup>14</sup> C-オレイン酸	2.9	8.3
<sup>14</sup> C-グルコース	3.2	9.1
<sup>14</sup> C-サイミジン	0.49	1.4

動物実験では、更に<sup>3</sup>Hや<sup>14</sup>Cで標識した小麦を14週間にわたり連続投与し、その期間のラット各組織中の<sup>3</sup>Hおよび<sup>14</sup>C濃度を測定し、現実的な食物を介する<sup>3</sup>Hや<sup>14</sup>Cによる被ばくを再現する実験を行った。<sup>3</sup>H標識小麦と<sup>14</sup>C標識小麦の体内動態の大きな差は、その代謝産物が<sup>3</sup>H標識の場合はトリチウム水 (HTO) として一定期間内は体液として組織内に留まるのに比べ、<sup>14</sup>C標識の場合には二酸化炭素 (<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>) として呼気で速やかに排出されることによる。組織間分布においては、<sup>3</sup>H標識および

$^{14}\text{C}$ 標識とともに類似性が認められ、各組織の代謝・生理学的特徴が見られた。また、一定濃度の $^3\text{H}$ および $^{14}\text{C}$ 標識食物の摂取により、体内各組織中の放射能濃度は3~10週間でほぼ一定になることが判明した。

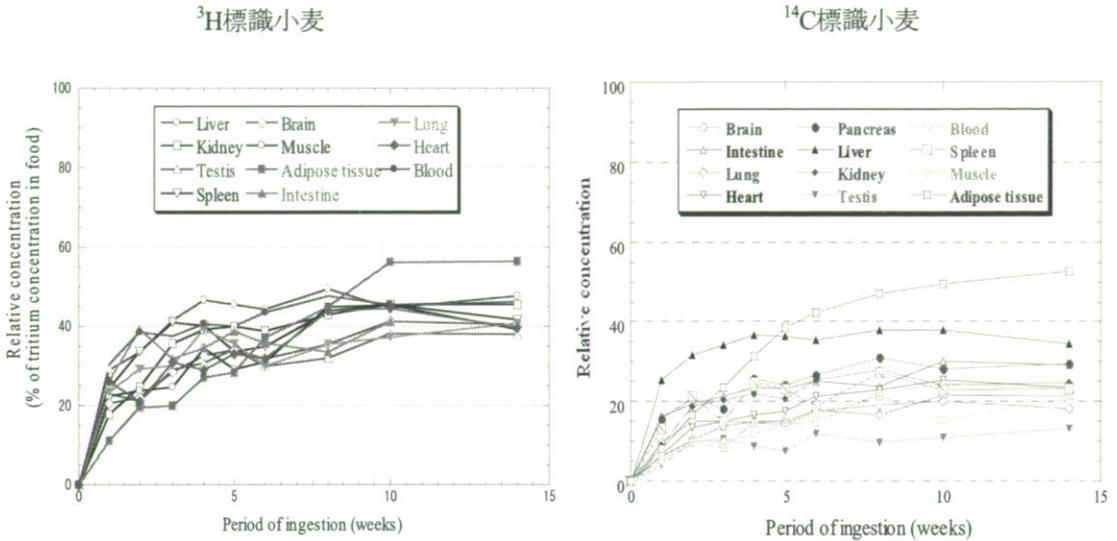


図 3.3.4  $^3\text{H}$ 標識小麦および $^{14}\text{C}$ 標識小麦の連続投与実験

### 3.3.4. 人体におけるトリチウム( $^3\text{H}$ )代謝のモデル化と線量係数の算定

#### トリチウム ( $^3\text{H}$ ) 代謝モデルの構築

動物実験の結果を考慮に入れ設計したトリチウム体内動態モデルの基本構造（ブロックダイアグラム）を図 3.3.5 に示している。このモデルでは、体内のトリチウムをその存在様式の違いにより 5 つのコンパートメントに分け、各コンパートメントにおけるトリチウムの時間変化量を微分方程式で表わしている。

本モデルの特徴としては、①食物に結合したトリチウム（有機結合型 $^3\text{H}$ ：OBT）の摂取を考慮したモデルである。②実験的に得たトリチウム代謝の実態を表す現実的なモデルである。③他のモデルにはないトリチウムの糞からの排出を考慮し、OBT摂取後に見られる糞からの比較的多量のトリチウム排出を考慮したモデルである。

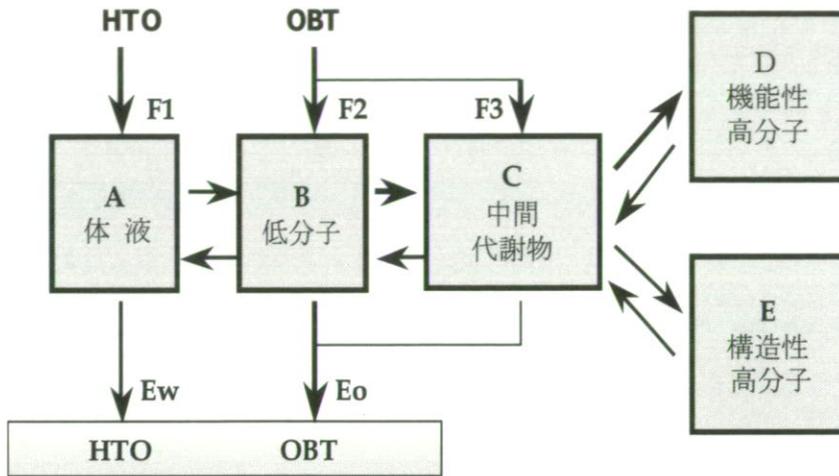


図 3.3.5 トリチウムの体内代謝モデル

この5コンパートメントモデルのパラメータ（移行係数など）を決定するための基礎となる人体における水素バランス（収支）と体内水素分布を表 3.3.5 にまとめた。

表 3.3.5 ICRP 標準人および標準日本人における水素収支

水素バランス 水素の摂取および排出	水素量(g)		代謝モデル上で対応する 摂取と排泄の名称
	ICRP 標準人(70kg)	標準日本人(60kg)	
摂取 (全量)	(346)	(310)	
水分	314	286	F1
炭水化物	20	15	F2
脂質、タンパク質	12	9	F3
排出 (全量)	(346)	(310)	
水分	333	300	Ew
有機物	13	10	Eo
人体内的水素分布 <sup>a</sup>	水素量(g)		代謝モデル上で対応する コンパートメント名
	ICRP 標準人(70kg)	標準日本人(60kg)	
分布 (全量)	(7000)	(6000)	
体液中	4667	4000	A
低分子 <sup>b</sup>	20	16	B
中分子	10	8	C
機能性高分子	470	415	D
構造型高分子 <sup>c</sup>	1780	1560	E

a; 全体重の約 60%が体液、約 19%が脂肪、約 15%が蛋白質、そして約 0.5%が炭水化物、なお有機物中の水素含量は炭水化物 6.2%、脂 質 12.7%、タンパク質 7.0%として計算

b; アミノ酸プールとグルコースでありアミノ酸プールには全蛋白の約 4%、グルコース量は全炭水化物の約 5%

c; 脂肪組織とコラーゲンであり貯蔵脂肪は全体重の約 17%、そしてコラーゲン量は全蛋白の約 30%

### 日本人公衆に対する線量係数の算定

放医研では、放射性物質の環境移行・生体内動態を解析し、人体への組織線量と全身への実効線量を算定するためのモデル解析システム（ERMA）を開発しており、トリチウムの体内動態モデルもこのERMAに上記の代謝・生理学的データに基づいて算出したモデルパラメータを入力することで運用可能である。我々は、ERMA上でトリチウム体内動態モデル（5コンパートメントモデル）を用いて、日本人公衆を対象とする線量係数（1Bq摂取した場合の預託実効線量）を試算し、ICRPにより設定されている線量係数と比較した。その結果は、表3.3.6に示したように、HTO摂取の場合には、日本人の全ての年齢群に対して算定された線量係数値はICRPの設定値にほぼ等しくなったが、OBT摂取の場合には日本人に対して算定された線量係数値の方がICRP設定値より高くなった。この結果は、日本人の代謝的特性によるというより用いたモデルの違いによるものであるが、その差は若い年齢群の方がより大きくなる傾向を示している。これは、5コンパートメントモデルにはICRPモデル（2コンパートメントモデル）にはない長い生物半減期を持つ有機成分のコンパートメントがあり、若年齢群ではこのコンパートメントに取り込まれたトリチウムによる線量寄与がより大きくなるものと推測された。

表 3.3.6 ERMA を用いて試算した日本人を対象とする線量係数値および  
ICRP (Pub.72) により設定されている線量係数値

年 齢	ICRP による線量係数		日本人の線量係数	
	HTO	OBT	HTO	OBT
1 歳	4.8 E-11	1.2 E-10	4.1 E-11	2.1 E-10
5 歳	3.1 E-11	7.3 E-11	2.9 E-11	1.3 E-10
10 歳	2.3 E-11	5.7 E-11	2.2 E-11	8.3 E-11
15 歳	1.8 E-11	4.2 E-11	1.7 E-11	5.5 E-11
成 人	1.8 E-11	4.2 E-11	1.7 E-11	4.7 E-11

### 3.3.5. これからの研究

#### 人以外の生物種及び生態系への被ばく評価

改定が進められているICRPの新たな放射線防護体系では、人以外の生物種を含めた環境・生態系も防護の対象となる。放射線の環境・生態系影響については線量やリスクの概念も確立されていないこともあり、放射性物質に対して設けられる環境防護の枠組みは、予防処置的な考え方を取り入れつつ、他の化学物質等の環境有害因子に対する規制の枠組みと矛盾しないものとする考え方がICRPの報告書にも示されている。したがって、今後の放射線影響研究では、様々な環境有害因子による環境生物や生態系への影響も視野に入れた研究が必要である。我々は、核融合炉施設から一般環境へ漏洩するトリチウムと炭素-14の安全評価のため、以下のような方針で研究を進める予定である。

まずは、環境生物および生態系への被ばく線量評価法については、他の有害因子による環境暴露量とも比較できるような線量の概念を構築し、その指標を開発する。また、特定した環境生物およびモデル生態系を対象に放射性核種の動態モデルを構築し、環境生物と生態系への被ばく線量評価法を確立する。一方で、環境生物やモデル生態系への放射線照射実験を行い、特に低線量率放射線への環境生物や生態系の応答を調べる。

すでに我々は、放射線の環境影響研究の目的で、図 3.3.6 に示すような環境生物やモデル生態系を用いた研究を開始している。3 種微生物で構成されるマイクロコズムを用いた研究では、 $\gamma$ 線負荷による影響を調べており、その線量依存性影響を明らかにするとともに、微生物間の相互作用による間接影響など生態系影響評価において考慮すべき重要な知見を得ている。同じ実験系で紫外線、酸性化及び数種の重金属の負荷実験を行い、その影響を $\gamma$ 線負荷による結果との比較評価も行っている。現在はこの実験系をスケールアップし、ミジンコやメダカ、水草などで構成される水槽サイズのモデル生態系(図 3.3.6)を構築し、トリチウムや炭素-14 の動態を解析するため研究を開始しているところである。

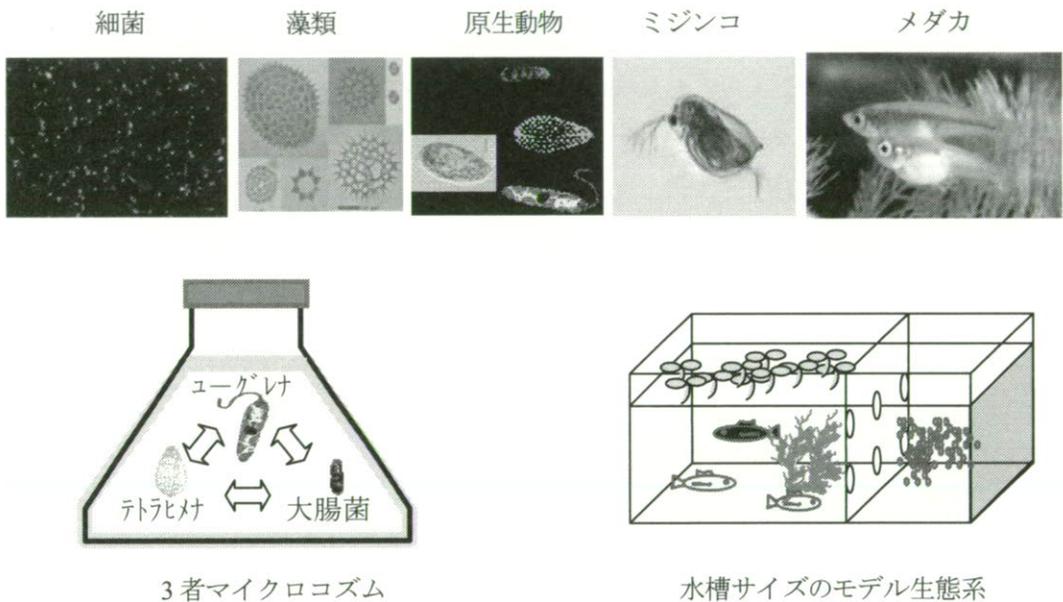


図 3.3.6 環境影響研究に用いる環境生物種とモデル生態系

### 3.3.6. おわりに

トリチウムと炭素-14 は、それぞれ水と二酸化炭素の形態で環境中のあらゆる媒体を自由に移行し、動植物体内にも容易に取り込まれる。更には、有機物の主要構成元素である水素や炭素の同位体として、糖、蛋白質、更に核酸の中にも取り込まれ、被ばくによる線量や影響を評価する上でも他の核種とは区別して対応すべきである。この2つの核種については、再処理施設の稼動に伴い、また計画中の放射性廃棄物地層処分においてもかなりの量が環境への放出することになる。したがって、この2核種に対する人を含む環境・生態系への安全性評価は、核融合炉開発のためだけでなく、早急に対応すべき重要な課題である。

## 3.4. トリチウムの環境生態系挙動

一政 祐輔

トリチウムは放射性同位元素であるが、そのβ線のエネルギーが非常に低いことから、これまで世界的にも安全な核種と考えられてきたが、将来のエネルギー源の燃料として核融合炉で多量のトリチウムガスが使われるのに先立ち、トリチウムガスの環境動態研究が行われている。これらの研究は諸外国に於いても広範囲に実施されているが詳細なことが明らかになってない。そこで、本節では私たちの研究グループで行ってきた研究の概要を紹介しながら解説したい。

### 3.4.1. 腸内細菌によるトリチウムガスの体内移行と体内トリチウムガスの酸化

トリチウムガス (HT)、およびトリチウム水 (HTO) の体内への取り込みを比較する実験では、血液に溶存するトリチウム水の放射活性で評価した。1957年にPinsonとRanghamによって、マウスを使った実験ではトリチウム水はトリチウムガスに比較して約1500倍体内に取り込まれることが報告された。我々は暴露実験に用いるトリチウムガスから混入している微量のトリチウム水を除去してPinsonとRanghamの実験を実験動物にラットを用いて追試したところ、トリチウム水はトリチウムガスに比較して、約2000倍取り込まれることを明らかにした<sup>1)</sup>。

これらの実験から、体内へ移行したトリチウムガスの僅かな量がトリチウム水へ酸化されることが明らかになった。Smithら(1952)によると、トリチウムガスの酸化には酵素・ヒドロゲナーゼが関与して、微生物によって行われることが報告されている。近年、微生物の培養法は著しく進歩して、培養条件を好氣的、嫌氣的条件をかなり自由に選択できることから、我々はラットの諸器官を摘出して、ホモゲナイザーで潰して、トリチウムガスの酸化率を測定した。その結果、ラットの臓器の中で、腸管(内容物を含む)においてその作用が認められ、その測定条件としては好氣的より、むしろ嫌氣的条件の方が高い酸化活性が得られることが明らかとなった。腸内容物は糞として排泄されることから、糞においてもトリチウムガスの酸化力があるか否かを測定したところ、ラットの糞でも、サル糞でも、ヒト糞でもトリチウムガスの酸化力が腸内容物とほぼ同等にあることが明らかとなった。

### 3.4.2. 抗生物質の投与によるトリチウムガス酸化の抑制

各種の抗生物質や抗菌剤をラットに3日間投与して、その後にトリチウムガスに暴露し、トリチウム水への酸化率を測定した結果、クリンダマイシン(0.693mg/gラット体重/日)およびバクシダール(1mg/gラット体重/日)投与でラットの血液、肝臓、尿、糞中のトリチウム水濃度を約5分の1に低下させることができた。この実験から、トリチウムガスの体内での酸化は腸内細菌の作用であるとの結論に至った<sup>2)</sup>。

### 3.4.3. 嫌気性細菌によるトリチウムガスの酸化

SmithとMarshall(1952)はトリチウムガスの酸化能力を、*Streptococcus faecalis*, *Proteus vulgaris*, *Escherichia coli*, *Azotobacter vinelandii* が持つことを明らかにした。1953年には、Smithらはシロネズミの組織のリン酸バッファーのホモジェネートを作って調べたところ、腸の内容物を含んだままでホモジェネートを作った大腸がトリチウムガスの酸化活性が一番強く、他の組織(胸腺、小腸、腎臓、筋、心臓、肺、脳、肝、胃、皮膚、脂肪)では低いか、または殆ど活性がないことを報告した。1960年から1970年代にかけて、嫌気性菌の培養技術が進歩して、腸内菌の研究が進み、その結果、

腸内には *Proteus vulgaris*, *Escherichia coli* は非常に少なく、これらの菌群は嫌気性菌の1万分の1以下の菌数でしか存在しないことが明らかになってきた。

そこで、我々はラットの直腸から採集した糞を GAM 培地に懸濁して、好気条件下と嫌気条件下で培養し、それぞれのトリチウムガス酸化活性を調べたところ、嫌気条件下で培養した方が著しくトリチウムガスを酸化することを見出した。これらトリチウムガスの酸化に寄与している菌を分離し、同定したところ、主要な嫌気性腸内菌群である *Bacteroides* 属に属する菌株のトリチウムガス酸化力は *E.coli* に比較するとやや低いが、腸内の存在比は著しく高かったので、動物の体内で酸化に預かっているのは主にこれらの腸内嫌気性細菌と結論した。

#### 3.4.4. 野外土壤環境からのトリチウムガス酸化菌の分離

環境に放出されたトリチウムガスは、雰囲気的水分中、土壤の水分中および植物の水分中に、濃度は低いがトリチウム水として検出されることから、放出されたトリチウムガスは、上記3.4.2.の結論より、動物によって排泄された腸内細菌や動物の死体に含まれる細菌に由来するものと考えて、土壤から腸内細菌の分離同定を試みた。しかし、そのような細菌を分離することが出来なかった。

そこで、土壤でのトリチウムガスの酸化が生物学的なのか、無生物的なのかを検討し直した結果、次のことが明らかになった。

①土壤のトリチウムガス酸化活性は至適温度があつて、それは土壤によっても若干の変動はあるが35~50°Cにある。

②土壤を90°Cに加熱するとガスの酸化活性は0になり、また土壤を0°Cに保持すると土壤のトリチウムガスの酸化活性は、至適温度のトリチウムガス酸化活性の約1/2に低下する。

③土壤にクロロホルムやシアンを添加すると土壤のトリチウムガス酸化活性が消失する。

以上①②③の結果から、土壤でのトリチウムガス酸化は生物学的に進行していると推察して、関与する微生物の分離と同定を進めた<sup>3)</sup>。各種の培養条件で検討する中で、トリチウムガスを酸化する土壤微生物は主に放線菌に属する菌株であることが明らかとなった。

#### 3.4.5. 各地の土壤からのトリチウムガス酸化菌の分離

土壤によるトリチウムガスの酸化速度が高いことは、その地域のトリチウム水の生成量が多くなることを意味し、結果的にトリチウム水によるヒトの被ばく線量を高めることになる。従つて、地域による土壤のトリチウムガスの酸化力に差異があるかどうかを調査した。

日本（宮崎、鳥取、岐阜、茨城、青森、北海道などの水田、畑、山林、公園土壤）、および海外、ドイツ、イタリア、オーストリア、カナダ、アメリカの土壤とそこから分離した土壤細菌や空中の浮遊菌のトリチウムガス酸化能を調べ、差異はあるものの、酸化することを明らかにした。

分離、同定した多くの放線菌、菌株の中から、トリチウムガス酸化活性の強く、長期間保存できるタイプの菌株を選別して、これらの菌でバイオリクターの試作を行い、トリチウムガス酸化除去装置の開発を行った<sup>4)</sup>。

#### 3.4.6. 土壤からの分離菌株の種の同定

土壤から分離したトリチウムガスを酸化する主な菌株の属名は、*Streptomyces*属の他、*Rhodococcus*属、*Mycobacterium*属、*Kitasatospora*属であつた<sup>5)</sup>。

### 3.4.7. トリチウムガスの野外環境での酸化速度の測定実験

野外環境に放出されたトリチウムガスのトリチウム水への酸化速度を測定する目的で、カナダの AECL の実験場を使って実験を行った。日本からの参加は日本原子力研究所がキーパースンとなつて、我々は研究協力の形で参加した。本放出実験に先立って、AECL 実験場の土壌、空中浮遊菌、植物のトリチウムガス酸化活性を予備調査して、カナダ AECL においてもトリチウムガスを酸化する実体は土壌の放線菌が主体であることを確認した。本実験において、実験圃場には農作物として、ラディッシュ、ミニトマト、小松菜が栽培され、手付かずの雑草園も準備された。トリチウムガスの放出は連続で 12 日間行われた。実験の途中に若干の降雨があつたが、実験は継続して行われた。実験中、気象データ、雰囲気トリチウムガスとトリチウム水の濃度、植物および土壌トリチウム水の濃度が測定された<sup>6)</sup>。

### 3.4.8. 日本における野外放出実験

トリチウムが大気環境に放出された場合、トリチウムの化学形によって動植物への取り込まれ方が異なる。核融合で対象となるトリチウムガスはトリチウム水に比べると極めて取り込まれにくく、環境では主に土壌微生物の働きで酸化されてトリチウム水になって移行する。従つて、環境でのトリチウムガスの酸化の実態解析とトリチウム水の環境動態解析が必要とされる。環境トリチウム水は主として水蒸気として大気中に分布するほか、土壌水として、湖沼、海洋等水圏に分布し、それらから経口、経皮的に直接および植物の光合成や動植物の代謝産物（有機結合型トリチウム）を含む食物連鎖でヒトへ移行する。中でも、大気中のトリチウムの植物への移行、特に農作物への移行と有機化合物への化学形変換そして植物の可食部分への残留はどの程度あるのか正確に把握することは、線量評価に大変重要であるが、データはあまりに少ない。気象など環境条件で植物の生理学的応答は変化するし、それは植物の種類ばかりでなく、成長の過程によつてもいろいろ異なることから野外実験が必要になる。

日本では野外でトリチウムガスを放出することが出来ないので、トリチウムガスの代替として重水素水を使って、野外での放出と環境での重水からの D の植物への移行速度を測定した。茨城大学理学部の中庭に栽培した植物およびポットに栽培した農作物を準備した。準備した農作物は、カナダの野外実験で使つたラディッシュ、ミニトマト、小松菜、および日本に固有の稲、大豆、サツマイモ、温州みかん<sup>7)</sup>などで、重水は昼間の放出実験（実験によつて若干の変動はあるが、午前 8 時から 16 時）、夜間の放出実験（実験ごとに若干の変動はあるが、20 時から 4 時）を行った。

実験圃場の雰囲気水分の平衡時の平均トリチウム水濃度に対する植物中水分のトリチウム水濃度の比を R 値とよび、この R 値を比活性モデルでは使用している。野外での重水実験から、イネの葉、モミの R 値は 0.5 程度で、また果実においても R 値は 0.5 であつた。因みに、NRC モデル（米国）（1977）のガイドラインでは比活性モデルで水分含量を 0.75、と R 値を 0.5 と勧告している。再処理コード（戸川）では R 値を 1、米国の Murphy は R 値を 0.8、サバンナリバーでは R 値を 0.3～0.8 にあるとしている。一方、Belot は空気中トリチウム濃度と植物中トリチウム濃度の比をとつて 0.17～0.49 と報告している。

### 3.4.9. 今後の課題

上記の3.4.7、3.4.8.で述べた実験は、食物を経由してのトリチウム被ばく線量評価の基礎とするために作物の生育時期におけるトリチウムの動的モデルに必要な移行速度を明らかにする実験であるが、これは、トリチウムガス（ガスは低濃度トリチウムではあるが）の事故放出を想定した野外実験としても活用することができた。今後、核融合炉の定常運転時の環境安全性確保の目的から、トリチウムガスを長期間放出した場合の、集団線量の観点からの安全研究が進められることが望ましい。その際、わが国は四方を海洋で囲まれていることから、水生生物へのトリチウム被ばく線量のリスク評価をも視野に入れた研究が行われることが望ましい。ドイツの Raskob は、核融合炉のトリチウム事故放出時の線量評価モデルとして UFOTRI を発表し、核融合炉の定常運転時の線量評価モデルとして NORMTRI を発表している。現在、ITER が国際協力の下で進められているが、わが国の実情に合った、モンsoon地域での核融合炉定常運転時の線量評価モデルの現代版の開発研究が早期にスタートすることが期待される。

#### 参考文献

- 1) Ichimasa, Y. et.al. : Radiat. Protec. Dosim. (1986), 127.
- 2) Ichimasa, Y. et.al. : Int.J.Radiat.Biol. (1995), 481.
- 3) Ichimasa, M. et.al. : J.Radiat.Res.29 (1988), 144.
- 4) M.Ichimasa, et.al. : Fusion.Sci.Technol (2005), 759.
- 5) Komuro,M. et. al. : Fusion Sci.Technol. (2002), 422.
- 6) H.Noguchi, et. al. : Fusion.Tech. (1995), 924.
- 7) Y.Ichimasa, et. al. : Fusion.Tech. (2005), 775.

## 3.5. 低線量放射線の人への影響

松原 純子

### 3.5.1. はじめに

低線量放射線の人体への影響についてどのように考えたらよいだろうか。放射線被ばくの爪あと（医学的症候）は 250mGy 以下ではすぐには観察されないので、低い線量（ここでは 100mSv 以下とする）の放射線による傷害や影響は、長期間（数年以上）を経ての発がんなど、いわゆる確率的影響とみなされ検討されてきた。その結果、放射線は低線量であっても発がん性にしきい値はなく、線量に比例した発がん影響を仮定する「放射線影響に関するしきい値なしの直線仮説」（以下 LNT 仮説と略称）が広く採用され、放射線防護の ALARA 原則と相俟って、低線量放射線影響全般についてしきい値なしの発がん影響を考える風潮が定着している。LNT 仮説は、しきい値のない直線的量反応（linear dose-response）関係を仮定するため、放射線はどんなに微量でも危険であり、低線量の放射線影響は DNA ヒットによる確率的影響と単純に考えやすいため、公衆に低線量の放射線影響について過度な恐怖を与える根拠となってきた。

有害物の生体に対する影響の認識は、生体の受けた傷害のみに注目してきたこれまでの研究や文献で報告された事実に支えられている。現実の生体影響は、有害物の傷害作用と生物側の防御作用とのバランスで定まるゆえ、生体反応の現実には状況に応じて単なる直線ではなく、さまざまな量反応曲線がありうる。この際、理論や仮定よりも、生きた人体実験の証明である疫学調査結果や動物実験結果、すなわち現象自体を直視すべきなのに、LNT 仮説が大前提となり、わが国でも優れた実証的動物実験（Radiat. Res., S. Tanaka ら 2003<sup>(1)</sup>）をしながらも、専門家ですら現状認識や設問のしかたに甘さや偏りがみられる（Radiat. Res., 2004 松原のコメント参照<sup>(2)</sup>）。

LNT 仮説自体に対して、2004 年の国際放射線防護学会（IRPA11）でもほとんど議論されていなかった。しかしながら、たとい長年使い続けている仮説とはいえ、グレイゾーンとして放置せず、常に仮説と現実との整合を吟味することは科学者としての責務である。LNT 仮説に対して疑問を持たず、予防原則 precautionary principle に逃げ込んだり、それを科学という言葉で強調する専門家が多くいたりする現状も残念である。

たまたま、今年はチェルノブイリ原子力発電所事故後 20 周年である。チェルノブイリ事故の際には 10 日間にわたって約  $14 \times 10^{18}$  ベクレル（約 4 億キュリー）もの放射性物質が環境に逸失した<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>。昨年から今年にかけてチェルノブイリ事故の環境および健康影響について IAEA や WHO 等の専門家によって膨大な資料に基づく報告書がまとめられた<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup> など。チェルノブイリ事故こそは、期せずして放射線の人体影響の現実を知り学ぶ貴重な資料を提供している。

これまで、低濃度の有害物質と生体との相互作用について実証的研究や考察を進めてきた私は、仮説ではなく放射線影響の実態についての知見を整理し<sup>(7)</sup>、LNT 仮説についていくつかの問題点に気づき、広く文献を収集し検討してきた<sup>(8)</sup>、<sup>(9)</sup>。まず LNT 仮説の問題点を指摘した上で、低線量の放射線影響の実態を見つめて考察を進めてゆきたい。

### 3.5.2. LNT 仮説の問題点

LNT 仮説の問題点を反証とともに列挙すれば、

①そもそも人間集団は不均一な成員からなるため、個人個人の遺伝的素因やライフスタイルや放射線感受性が異なるので、各成員が異なる放射線しきい値を持つ場合、集団として観察すると一見線形の量反応曲線となる（D. Hattis ら 2001<sup>(10)</sup>）。であるから、すべての成員が放射線に対してしき

い値がないと断定するのは正しくない。しかしながら、一般に専門家は疫学調査において明確なしきい値が観察されない以上、低線量の放射線影響にはしきい値がなく、あったとしてもかなり小さい値と推定している。(D.J. Brenner ら 2001<sup>(11)</sup>, C. E. Land<sup>(12)</sup>)

②広島被ばく者および通常の集団のリンパ球のゲノム疫学調査で、それぞれ成員の2-3%に血液疾患への素因者 (carrier of clonally expanded preleukemic cellsをもつ人) が存在し、素因をもつ人はリスクが高く、素因をもたない人はリスクが小さい可能性がある。(Y. Kodama ら 2001<sup>(13)</sup>)。

③生体は有害物に対して、ある量 (被ばく線量や線量率) に応じてDNA傷害の修復、抗酸化物産生、アポトシス、抗体産生増強などの生理的機構による複数の生体防御反応を示す。したがって細胞実験のみでは個体の反応性を判定できない。(J. Matsubara ら 1987<sup>(14)</sup>, 2000<sup>(15)</sup>)。

④低線量ガンマ線 (1-100mGy) の前照射が、その後の高線量の照射によるDNA傷害を減少させたり免疫系を活性化させることは、DNA傷害は蓄積するという古い考えでは説明できない (E. I. Azzam ら 1994<sup>(16)</sup>, J. Matsubara ら 2000<sup>(7)</sup>,<sup>(15)</sup>, M. Yonezawa ら 1996<sup>(17)</sup>)。

⑤放射線量や線量率と生体反応 (例えば発ガン) に関する動物実験をしたり (T. Nomura, 2002<sup>(18)</sup>)、放射線と発ガンに関する文献を整理したり (H. Tanooka, 2001<sup>(19)</sup>)、詳細に線量率を変えて傷害 (例えば小核形成) をカウントすると (J. Magae ら, 2003<sup>(20)</sup>)、線量率が低いと生体の傷害効率はかなり減少する。

⑥微量の放射線に対して、生体は自身の生存に関しプラスやマイナスの両方の反応をする (S. Wolff ら 1988<sup>(21)</sup>, S.G. Sawant ら 2001<sup>(22)</sup>)。1990年代から放射線によるゲノム不安定性 (Nagasawa, Little ら 1992<sup>(23)</sup>)、近隣細胞効果に関する知見の増加とともに、影響についての慎重論があるのは肯ける。しかし、ゲノム不安定性、近隣細胞効果の両者は細胞のアポトシスや適応応答と深くかかわっており、防御機構との関連もますます明らかになりつつある。近隣細胞反応には小核形成などマイナスの指標のみでなく、ギャップジャンクションを通じた細胞間の情報伝達 (E. I. Azzam ら, 1998<sup>(24)</sup>)、細胞内外のイオンチャンネルや酸化還元因子の変化を通じて防御因子の活性化 (Mothersill ら 2001<sup>(25)</sup>) など、生体にとってプラスの可逆的因子の変化も報告されている。Sawant ら<sup>(22)</sup> は、あらかじめ低線量の放射線を照射するとマイナスの意味での近隣細胞反応が消失することを報告した。

⑦低線量発ガンリスクについての疫学調査では有意差の検出に必要な調査人数の数的制約ばかりが指摘され (A. Gonzalez氏, IRPA11 講演)、高BG地域の疫学調査はIRPA11では、ほとんど評価されていなかったが、高BG地域の疫学調査はリスクの有意な増加はないという現実の確実な検証と同時に、集団成員の生物学的反応度の質的差の研究が重要で、菅原・早田氏ら (2004<sup>(26)</sup>) の染色体変異の質的特性およびそれらの量的差 (高BG地域住民のリンパ球では安定型変異は差がなく、放射線ヒットに特異的な不安定型変異の増加あり) の指摘こそ重要である。その意味するところは、細胞は放射線により確かに変異を生ずるが、人の生涯では放射線よりも環境化学物質や生体自身の代謝活動で生ずる活性酸素などに由来する転座などの変異がより多く蓄積するため、安定型変異の寄与が大きく、結局放射線発ガンの増加は検出できない程度に低いのが実情だと報告されている。こうした生物学的事実から、ある線量以下の低線量域において人は放射線に対して反応はするものの、それがそのまま発ガンに結びついているとは考えにくく、発ガンは複数の防御のプロセスをくぐりぬけ、防御に失敗したごく少数の幹細胞から生ずる (K. Kamiya ら, 1995<sup>(27)</sup>) と考えられる。

以上、①-⑥で指摘したことは、後述するように最新の知見に照らしても、ますます補強されつつある。

2004年のIRPA 11 国際会議では、実効線量の計算に必要な放射線荷重係数 $W_R$ や組織荷重係数 $W_T$ 、および線量・線量率効果係数 (DDREF) を用いた線量推定法に時間をかけて議論しているものの、

なぜその数字が出たか、DDREFの生物学上の意義は何かについては疑問に思われない。例えば、DDREFは急性被ばくでなく慢性被ばく等で線量率が低い場合に用いるが、その事自体が線量率で生物影響が異なることを認めているわけなので、無作為、確率論的、直線という物理的仮定と論理的に矛盾する部分が生じる。実は、「しきい値のあるなし」は生体内で防御作用がどこまで働いているか否かに関係し、生体の防御反応は進化の過程で生物が保持してきた基本的特性であるにもかかわらず、保健物理上は計量化困難ということで生体防御機構の存在は考慮の外に置かれてきた。しかし、現在もっとも必要な研究と考察は低線量放射線の生体影響の現実を、疫学調査結果を通じて直視し、同時に細胞レベルでは見られない個体の防御現象について動物実験で条件別に反応性を計量し、情報を整理することであると思う。

### 3.5.3. 低線量放射線の人体影響の実態を科学的に把握・議論する試み：疫学調査結果

こうした現状のなかで、昨 2005 年 3 月、(財)放射線影響協会主催で「低線量放射線影響研究の現状と将来—LNT 仮説の科学的背景」と題して、国際シンポジウムが開催された。低線量の放射線影響の実態は人間集団の疫学調査と動物実験による情報の両者が必要である。その際、さまざまな人間集団での疫学調査の結果が報告された。主な演者の要点を概略すると、

米国NCIの馬淵清彦氏：広島長崎の原爆被ばく者を対象とする寿命調査 (LSS) (Cf. Prestonら 2003<sup>(28)</sup>) などは、被爆から 60 年を経た今日、被ばく者は高齢化しているが約 45%の方が生存しており、最近DS86に代えてDS02が導入され、この変更により発がんリスクの評価値が約7%低下したが量反応曲線等に大きな影響は出ていない。日本全体のデータと同様に、近年はすべての固形癌で増加傾向がみられる。口腔、胃、結腸、肝、肺、乳房、膀胱、甲状腺、皮膚のがんについては放射線の有意な影響が見られたが、他のほとんどの部位の固形がんリスクは有意に増加していない。

放影協会の巽紘一氏：同協会が受託している日本の原子力発電施設等放射線業務従事者の疫学調査 (Iwasakiら, 2003<sup>(29)</sup>) は、放射線業務従事者では被ばく線量の記録が正確であるため、十分大きなコホート調査は低線量疫学における貴重な科学的知見を提供している。第2期目の研究で前向き調査を行った約12万人のコホートでは、年平均1.4mSv、累積線量は10mSv未満が75%を占め、平均15mSvであった。日本人男性年齢別死亡率と本コホートとを比較した標準化死亡比 (SMR) は全死因で0.94、非がん死亡で0.86といわゆる健康労働者効果 (Healthy Worker Effect) がみとめられ、がんに関しては全部位でも部位別でも、すべて1.0付近で基準日本人男性と差異を認めなかった。死因ごとに累加線量群別内部比較を行ったところ、外因死と食道がん線量増加に応じた有意な関連性が検出され、生活習慣調査で高線量群ほど喫煙率や多飲酒者、有害業務従事歴が多いなど、交絡因子の存在が示唆された。白血病以下、その他のがんには線量との間に増加傾向は認められなかった。

同じく放影協会の金子正人氏：下記の国外の4つの職業被ばくの疫学調査事例、①1957-1981年間に米国原子力船修理に従事した7万人、<sup>(30)</sup> ②米国、英国、カナダの原子力従事者9万5千人、<sup>(31)</sup> ③英国放射線科医1987-1979年間の2698人、<sup>(32)</sup> ④1960-1997年間の欧州8国の航空機乗務員4万4千人<sup>(33)</sup>、それぞれに関する疫学調査結果についてみても、①では5mSv以上の高線量群も、5mSv未満の低線量群とも、SMRは全死因0.76、白血病0.91で米国人一般よりも低い。②はがんの過剰リスクはなく、再処理施設で働いた400mSv以上の群にのみ白血病で過剰が認められたが、化学物質曝露の影響も考えられた。③では、放射線科医の全死因のSMRは0.72で、男性一般や男性臨床医よりも低かった。がん死亡のSMRは一般臨床医と比べて時代を経るに従って1.7から0.7へと減少した。④女性乗務員の全死因のSMRは0.8だが、乳がんは1.1、男性では、全死因1.1、皮膚がん1.9と若干高かった。等の結果で、これらの大規模な疫学調査によっても低線量の放射線に

よる有害な健康影響は確認できず、これらの調査における交絡因子の調整の必要性がわかる。

チェルノブイリ事故の健康影響に関するWHO等の専門家グループ (EGH) 報告書<sup>(5)</sup>によれば、事故時に発電所で勤務ないし消火にかかわった多数の作業者のうち、重篤な放射線被ばくをした28人が死亡し、急性放射線障害を示し病院に運ばれた134人のうちさらに19人が死亡した。事故の公衆への健康影響の第一は小児の甲状腺がんの発生で、1992~2000年の間に旧ソ連3カ国で約4000人以上が発症し、9人以上の子供が死亡し、残りは治療された。また、約17万人の汚染除去作業員で、120~680mGy被ばくした者の中から、被ばく後2.5~3年の間に18名の白血病が出た。今後はチェルノブイリ事故での住民の低線量の放射線被ばくによる将来的発がんの増加(生涯リスク)が問題であるが、どこまで微量の被ばくを発がんのしきい値として集団線量を計算するかで予想値は大きく異なる。表3.5.1にE. Cardis<sup>(5), (34)</sup>による、チェルノブイリ事故関連の被ばく集団の将来のがんおよび白血病の過剰死の予測値をそのバックグラウンド値とともに示す。

表 3.5.1 チェルノブイリ事故で被ばくした作業員集団や汚染地域住民等の放射線被ばくによる生涯リスク(過剰死亡)の推定値 (Cardis et al. 1996, 概要)

集団	人口/平均線量	がんのタイプ	バックグラウンド値	過剰死数
汚染除去作業員 (1986-1987)	200,000人 /100 mSv	固形がん	41,500	2000
		白血病	800	200
避難住民 (30km 域)	135,000人 /10 mSv	固形がん	21,500	150
		白血病	500	10
高度汚染地域住民 (15Ci/m <sup>2</sup> )	270,000人 /50mSv	固形がん	43,500	1500
		白血病	1000	100
他の汚染地域住民	6,800,000人 /7mSv	固形がん	800,000	4600
		白血病	24,000	370

平均100mSv被ばくした事故処理作業員、10-50mSv以上の被ばくをした30km圏内の避難住民や高度汚染地域の人々の総計約60万人を考えれば、過剰死は約4000人、さらに約7mSv程度被ばくが考えられる他の汚染地域(Csの表面汚染密度が370kBq/m<sup>2</sup>の汚染地域)の住民680万人にまで線形比例外挿すれば総計約9000人の過剰発生となる。E.Cardisらの計算を汚染地域外のさらに広い欧州全体の住民をも対象に含めれば推定値は16000人になる<sup>(35)</sup>。かつてチェルノブイリ事故による死者数について数10万人という予測値を発表した学者もいるが、上記の値はそうした値より1-2桁低い<sup>(3)</sup>。

筆者は平均で100mSvも被ばくした汚染除去作業員や高度汚染地の住民からの放射線由来の発がんはある程度の率で予想されるが、平均10mSvあるいはそれ以下しか被ばくしていない避難住民や低汚染地域住民の中から発がんの過剰が出現するとは考えにくいと思う。集団線量と比例影響の単純計算ではなく、生体防御機構の存在を考えれば当然のことではあるが、今春キエフで開催された国際会議での印象からも、当地の人々はチェルノブイリ事故後20年の現実を通じて妥当な値を冷静に知りつつあると感じた<sup>(36)</sup>。

注目すべきことは、チェルノブイリ事故後の唯一の明瞭な人体影響として小児の甲状腺がんの発生であるが、核分裂で生成されたI-131は揮発性のため、容易に環境中に逸失し、かつヨウ素は生長ホルモンであるチロキシン成分であるため、高い濃縮率<sup>(37)</sup>で生長期の乳幼児に多量にとりこまれる生物学的現象と照合している。

## 3.5.4. 放射線生物学の新しい潮流:動物実験

人類の被ばくは低線量・低線量率の連続被ばくが大部分であり、原爆による被ばくとは異なる故、線量・線量率効果は放射線の人体へのリスクを推定する上で重要である。大阪大学の野村大成氏は発がん線量率効果について、一定量のガンマ放射線を線量率のみを変えてマウスに照射し、DDREFを調べた。総線量6.8Gyでは高率に白血病が発生し、線量率の減少に比例して発生は低下し、DDREFは20-45と高いが、総線量2Gyや0.4Gy照射ではDDREFは1.8-2.5程度で、腫瘍の種類で値は異なることを観察した<sup>(18)</sup>。胎内被ばくでも、がん、発生異常、突然変異、継世代発がんに明確な線量率効果が認められた。線量率効果の成因として、DNA二重鎖切断とその修復が重要であることが、修復遺伝子を欠いているSCIDマウスを用いて証明された。また、低線量の放射線による遺伝的障害は広島長崎の被爆者でも動物実験でも認められていない。その発生はグレイあたり自然突然変異発生率の約0.5%の増加と極めて少ない<sup>(38)</sup>。

E. I. Azzamらは、低LET放射線（ガンマ線、100mGy）の照射で、線量率を下げ時間をかけて照射すると、非照射群よりも細胞傷害（小核形成）が少なくなる（図3.5.1参照）こと、また、100mGyを前照射し、1Gyを後続照射すると前照射した細胞は前照射しない細胞より明らかに傷害が少くない（図3.5.2参照）など、放射線適応の存在を立証した<sup>(16)</sup>。松原らや米沢らはすでに90年代に放射線の前照射による個体（マウス）の放射線抵抗性の増大や免疫機能の活性化について報告している（J. Matsubaraら,1987<sup>(14)</sup>, 2000<sup>(15)</sup>, M. Yonezawaら,1996<sup>(17)</sup>）。

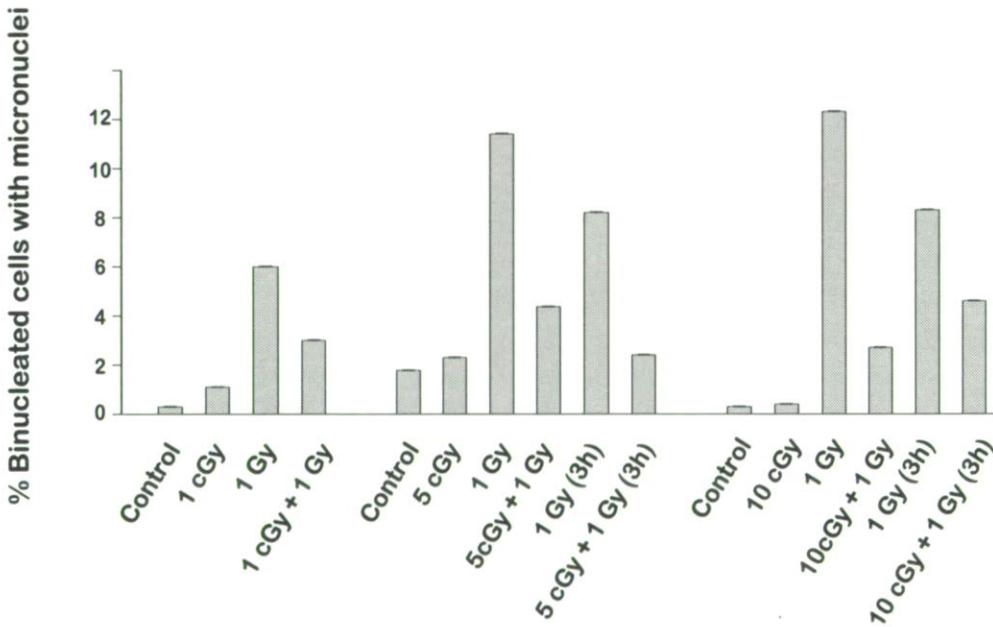


図 3.5.1 ガンマ線の前照射による後続急性放射線照射の傷害減少効果 (E.Azzam ら原図)

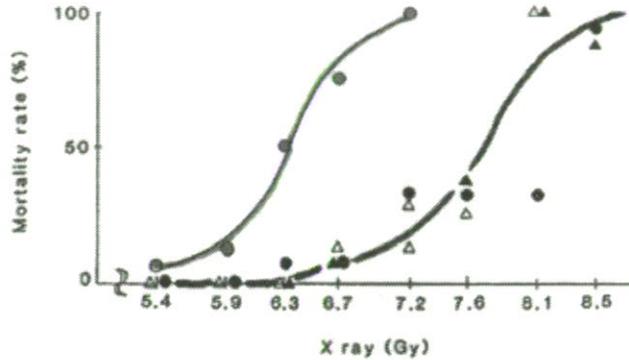


FIG. 1. Dose-response curves of untreated mice and mice given various pretreatments prior to irradiation. ○, group 1: Controls without pretreatment. ●, group 2: 3 mg Cd/kg (CdCl<sub>2</sub> in saline) injected sc. △, group 3: 10 mg Mn/kg (MnCl<sub>2</sub> in saline) injected sc. ▲, group 4: Dermal excision (2 × 2 cm<sup>2</sup> at dorsal skin).

図 3.5.2 有害要因への前曝露による放射線傷害減少効果 (松原ら、1987)

低線量特に 100mSv以下の放射線の人への影響を考えるにあたって必要なことは、現代の放射線生物学で大きなパラダイム変換がおこなわれていることである。図 3.5.3 に示すように、かつては放射線影響でもっとも大きな位置を占め注目された研究の対象は、放射線の標的になった細胞の「DNAの傷害」と「突然変異」であった。しかし現在は、標的の近隣の「バイスタンダー細胞」や「核外(エピジェネティック)効果」へと移り、ギャップジャンクションを通じた「細胞間の情報交流」が重要になってきている。京都大学の渡辺正巳氏は放射線発がんの主経路はDNAの突然変異ではなく、テロメア構成蛋白や膜蛋白の関与が重要だと主張している (M. Watanabe<sup>(39)</sup>)。

注目対象	前 Before(Old)	後 After(New)
核	Nucleus/Chromosome 核・染色体 A target cell 放射線標的細胞 single cell mutation 1個の細胞の突然変異 DNA damage DNAの傷害	Epigenetic effects in microenvironment 核外効果や細胞微環境の影響 Non-targeted cells, cell-population 非標的の近隣細胞や周辺細胞集団 Intercellular communications (GJIC) 細胞間の情報交換 Balance of proliferation, differentiation, apoptosis and adaptive response 細胞増殖、分化、アポトシス、適応反応のバランス Stress- vs. anti-oxidative reactions ストレスと抗ストレス酸化反応のバランス
	Disease of genome 遺伝子病	Disease of homeostasis 恒常性の失調

図 3.5.3 放射線発がんに関するパラダイムシフトとキーワード

発ガンのパラダイムは 1 個の細胞の突然変異イコール発がんという単純図式ではなく、図 3.5.4 および図 3.5.5 に示すとおり、発がんは多段階を経て起こり<sup>(40)</sup>、細胞集団における修復機能や、細胞周辺の微環境を考慮しなければならない<sup>(9)</sup>、<sup>(41)</sup>。長い年数を経て起こる発がんという現象には 1 個の細胞というより、互いに連絡しあった細胞集団の微環境、生体膜上で行われるさまざまな代謝と、それに影響をおよぼす私たちの日常生活のなかの抗酸化代謝活動や環境ストレス、および細胞のアポトシスや個体の免疫機能が重要な役割を果たしているのである。

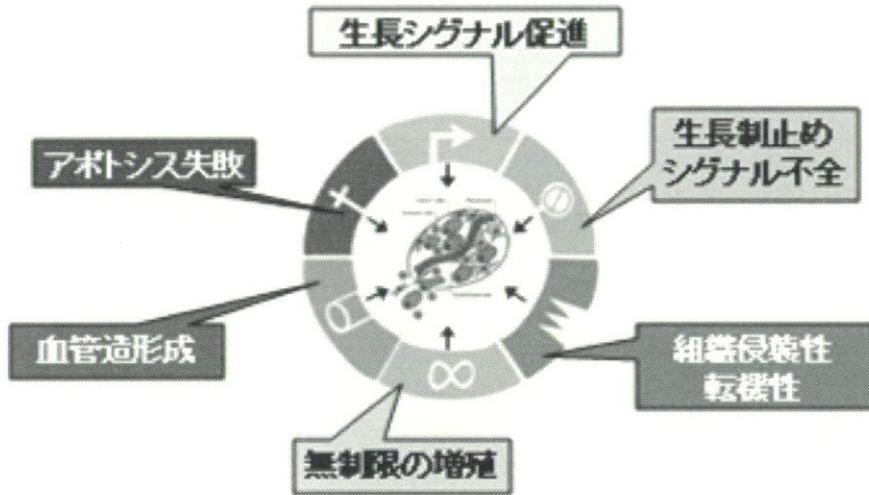


図 3.5.4 多段階の発がん要因

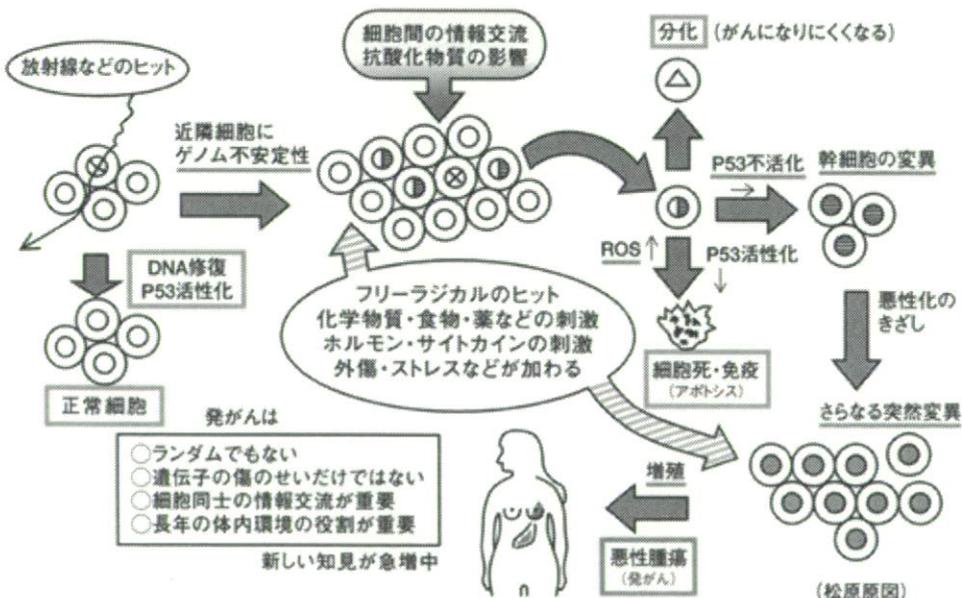


図 3.5.5 放射線発がんの新しいパラダイム

したがって、筆者が従前から主張しているように (J. Matsubara, 2001<sup>(7)</sup>)、発がんは遺伝子病ではあるが、長い視野で見れば、環境有害要因や体内の代謝産物の活性酸素と生体自身が闘う中での恒常性の失調という人間の普通の病気の概念に含まれていくのである。

一方、低フルエンスの高 LET 放射線 (アルファ粒子) をあてた細胞では、その周囲に沢山の DNA 損傷 (p21waf の発現) や子孫への悪影響が認められ、生体影響は線量や線量率、線質で大きく異なることを強調されている。原研高崎の小林氏によれば、高 LET 放射線は生体の中でのエネルギー付与の形が空間分布として低 LET のガンマ線とは大きく異なり、線量は同じでも周りへの拡がりかたが異なる。適応応答は比較的高線量 (γ線では 0.1-1Gy) で起こるし、細胞レベルでみられる逆線量効果は α 線のみでみられるので、放射線の局所的エネルギー付与と生体側の反応性の条件がからむ。したがって、Ne のような重粒子イオンの場合、バイスタンダー効果と適応応答の両者があつたのではないかと思われる。

さまざまな線量率で細胞の小核形成を測定した馬替らによれば、線量や線量率が低い程、生体の応答の差が大きくなり、生体側の細胞周期やさまざまな因子が影響を修飾するという。緒方の開発した MOE モデルに異なる線量率照射での小核形成率のデータをあてはめると、線量率は 1 Gy/h では小核形成の MED (中間効果線量は一定であるが、線量率が小さくなると MED は無限大となり影響効率は非常に低くなる (H. Ogata ら、2005<sup>(42)</sup>)。R. Mitchell は、高 LET 低 LET 放射線の両者を混ぜて低線量というべきでない。低線量ガンマ線の前照射の影響や放射線適応応答は、Tp53 遺伝子の活性化と深く関係しており、放射線適応応答は、dsb の修復機能の向上であり、発がん、遺伝的変異、動脈硬化の進行などに対する防御とも関係しているという (R. E.J. Mitchel ら、1999, 1997<sup>(43)・(44)</sup>)。

「LNT 仮説を否定するにはしきい値の存在を実証すべきだ」と ICRP 委員の Land 博士が言っているそうだが、京都大学の松田文彦氏によれば、人間集団はヘテロであり、DNA 修復にかかわる遺伝子やたんぱく質は無数にあり個人差もあり、確定的影響ですら人により現れ方は異なる。集団の中の極少数の弱者の存在を考えれば、個人的にはしきい値を持っていても集団全体としては低線量域でも直線となりやすく、Land 氏は論理的に無理なことを要求していると考える。

しきい値に関し早田勇氏は高バックグラウンド地域 (HBRA) 調査の経験<sup>(26)</sup>から、年あたり 3mSv の過剰被ばくは化学物質や環境変異原による転座の個人差の中にまぎれて差は検出されず、放射線独特のダメージは非常に少ない。このレベルでは何億人に標本数を増しても有意差は出ないだろうと述べている。誰でも大体 60 歳になると転座型の染色体異常が 100 細胞あたり 12 個くらい出る。この量を放射線の線量に換算すると約 400mSv に相当するという。早田氏は「高放射線地域では不安定型の染色体異常 (2 動原体と環状染色体) が増加していたので放射線の影響にはしきい値がない」と結論されたが、不安定型の染色体異常は致死性で個体の生死とは関係しにくいと思はれる (J.B. Little, 2003<sup>(45)</sup>) ので、細胞内での影響と個体への影響は明確に区別して表現しないと誤解を招きやすい。

図 3.5.6 に示すように、低線量の放射線の個体への影響は、生体の DNA 修復、抗酸化、アポトシス、免疫などの諸機能がかかわり、その最終的影響は図 3.5.7 に示すように個体に刺激を与える有害要因と生体側の防御力とのバランスによって決まる<sup>(7)</sup>、したがって影響の程度や質は線量や線量率や個体側の条件で大きく異なることがやっと認識され始めた。低線量の放射線影響の実態は灰色で、LNT 仮説の真偽は分かりにくいという常識から脱すべきである。

- ① グルタチオン酸化還元酵素系などの生理的抗酸化システムがはたらい余分な活性酵素を除去する。
- ② DNAの傷を修復する酵素系がはたらき、DNAの修復を始める。
- ③ DNAに傷がつくとその情報が細胞の内外に伝わってアポトーシスが起って、異常な細胞は自滅させる。

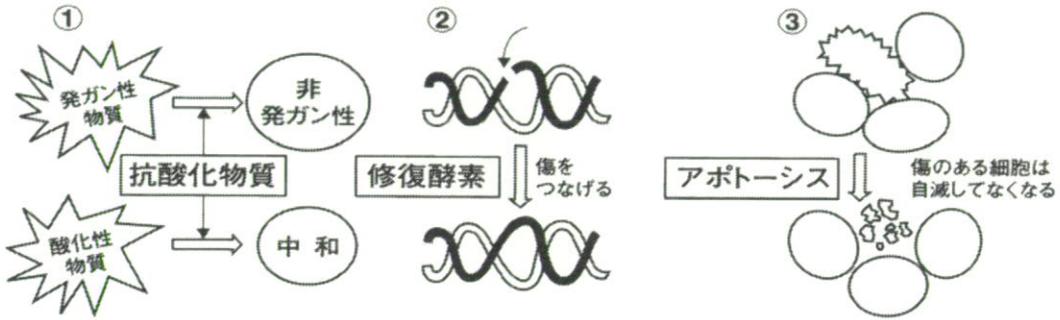


図 3.5.6 放射線の悪影響を防ぐ生体のはたらき

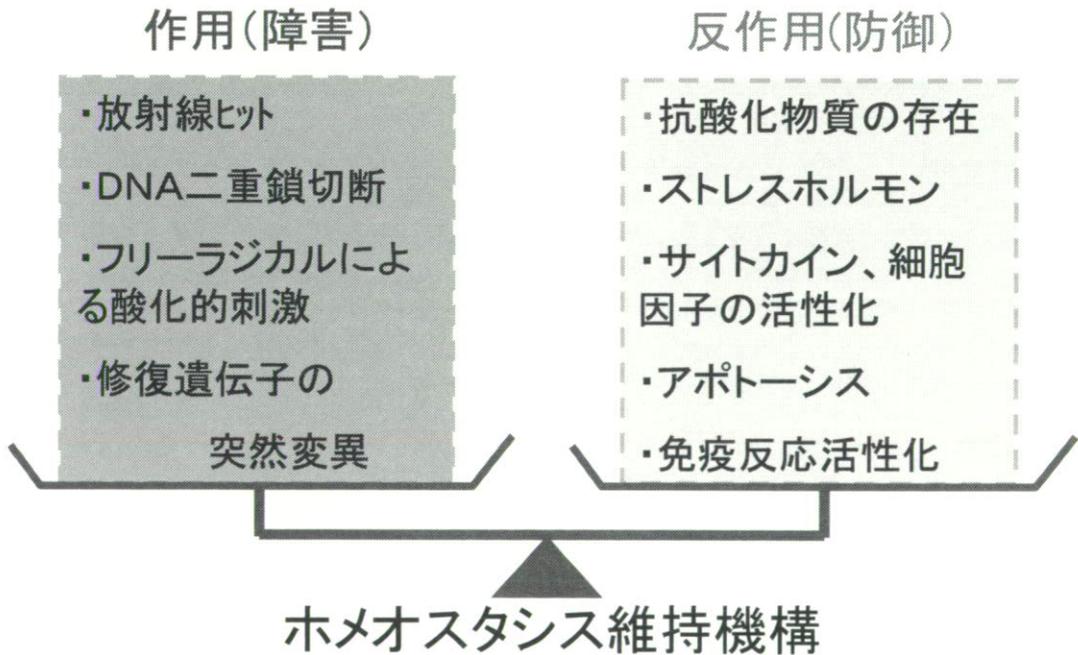


図 3.5.7 低線量放射線に対する生体影響—傷害と防御のバランス—

### 3.5.5. 社会の中の公衆と専門家と放射線

現在、電力の約三分の一が原子力発電によって供給されるとはいえ、原子力利用には不安と不信感を持つ人が多い。その理由は、放射線の影響が怖い、原子力は不安でよくわからないという人々の認識の現実が存在する。その一方、産業や医療における放射線の利用はますます拡大・一般化し、経済規模では9兆円と原子力エネルギー利用を上回るほどになった。なかでも医療におけるCT診断は1回に約2-6mSvの被ばくをもたらすが、体内のミリ単位の異常を被験者に痛みを与えることなく瞬時に、検出できるので、わが国では急速に普及している。こうした社会現象の中で、原子力や放射線に関する基礎教育の確保と公衆のリスク・リテラシーの重要性を考えないわけにはいかない(J. Matsubara, 2004<sup>(46)</sup>)。

ICRP は、LNT 仮説の使用範囲は自然放射線(NB レベル)以上2グレイまでとするといいながら、線量限度はリスクの許容限度(たとえば、1mSvは10万人あたり数人のガン死亡リスクに当たる)とみなす90年勧告を踏襲し、同時にALARA原則を明記した。放射線分野でのリスク概念はすべてNBレベルに上乘せされる部分の過剰リスク(リスクの増加分)で議論しているから、世界的に一桁以上も異なるNBレベルの存在下では議論は歪まざるをえない。最近出されたICRP第1委員会の低線量放射線影響に関する報告書でも、線量が低くても被ばく人口が多ければ線量と人口の積に応じた発ガンを仮定する考えが最初に提示されている。これは低線量域では集団線量は計算しないと雖も、LNTに関する機械的算術を推奨する結果となる。

放射線発ガンを単なる確率論的影響として不問に付すと、発ガンへの複雑なプロセスが見えなくなる。公衆に対しての低線量放射線の影響についての説明は一般的にはLNT仮説にもとづいて行われ、それが科学的に正しいとも正しくないとも言えないという説明は専門家としては無責任ではなからうか。むしろ専門家として自身の立場と意見を率直に表明し、複雑は研究の現状をよりやさしく明確に公衆に対して説明すべきである。専門家は放射線の傷害のみならず、それに対する生体防御の概念を公衆に説明すべきこと、および、生体防御の条件を質的量的に明確にする研究を推進すべきである。放射線特異の生体现象と一般の化学物質発ガンなどを視野に入れつつ、今こそ他分野の知識を取り入れた発ガン機構の総合的検討が不可欠で、公衆との幅広い対話は益々必要となる(J. Matubara, 2002<sup>(47)</sup>, 2004<sup>(48)</sup>)。これまでの傷害のみに着目した情報でなく、低線量では生体側の生理的反応性や生体防御力が重要で、低線量放射線の最終影響は両者のバランスで定まるとするならば、それらの情報を詳細に研究し、できるだけ簡明に公衆に説明する努力も必要と思う。

ちなみに有害化学物質の場合はむしろ現実的で、カドミウムや砒素など検出されてはならない数有害物質のほかは、実質的に安全とみなす量(virtually safe dose)または見かけ上のしきい値に安全係数をかけて規制を行っているようであるが、専門家は根底に横たわる事象を探りつつ現実を直視して判断する初心を大切に、他分野の人々とも日進月歩の情報を交換しあうことが重要だと思う。

### 3.5.6. まとめ

低線量の放射線影響は長い潜伏期を経ての発ガンと考えられるが、低線量の発ガンリスクの過剰分は非常に小さく、疫学調査では証明できない。被ばく線量と発ガンとの関係を精査すると、発ガンは受けた総線量、線量率、個体側のDNA修復にかかわる遺伝的素因、食習慣や喫煙などのライフスタイル、受けた年齢、受けた臓器、などで著しく修飾される。動物実験ではしきい値が明確に存在するガンと、反対にしきい値が低いガンとが区別できる。現実には低線量ではその影響は、放射線以外の原因による発ガンのバラツキのなかに埋もれてしまう。人間の疫学調査では集団の多様性からLNT仮説を否定しにくいデータとなるが、個体の防御機能もあり、低線量放射線の発ガン性は

線量比例的と単純に考えるべきではない。生体の防御機構についても正しく説明すると同時に、発がんはある種の遺伝的特性や複数の環境因子や日々のライフスタイルなど、さまざまな要因の積み重ねで起こるため、公衆も専門家とともに健康的なライフスタイルの探索に向けて、それらの因子を明らかにしていく必要がある。

#### 参考文献

- (1) S. Tanaka et al.: Radiat. Res.: 160,376-, 2003
- (2) J. Matsubara and H. Ogata; Radiat Res. 161, 746- 2004
- (3) 松原純子：医学のあゆみ、チェルノブイリ事故その後 146,587-590 1988
- (4) IAEA: Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Remediation; Twenty Years of Experience (EGE 報告書) Apr. 2006
- (5) WHO: Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programs (EGH 報告書) Apr. 2006
- (6) The Chernobyl Forum 2003-2005: Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts. 2005
- (7) 松原純子:原子力学会誌 低線量の放射線影響の実態 43, 744-753 2001
- (8) 松原純子：日本放射線安全管理学会誌、LNT 仮説の根拠を問う、4, 2-7 2005
- (9) J. Matsubara: Int. J. Low Radiation, 3, 241- 254 2006
- (10) D. Hatis et al.: Risk Analysis21, 585- 2001
- (11) D. J. Brenner et al.: Proc. NAS , 100, 13761-, 2003
- (12) C.E. Land: Estimating Cancer Risks from Low Dose of Ionizing Radiation Science, 209, 1197 – 1203 1980
- (13) Y. Kodama et al.: Radiat. Res.156, 337- 2001
- (14) J. Matsubara et al.: Radiat. Res. 43, 66-, 1987
- (15) J. Matsubara et al.: Radiat. Res. 153, 332-, 2000
- (16) E. I. Azzam et al.: Radiat. Res. 138, 528- 1994
- (17) M. Yonezawa et al.:Mutat. Res., 358, 237-,1996
- (18) T. Nomura: International Congress Series 1236C, 105- 2002
- (19) H. Tanooka, Int. J. Radiat. Biol., 77, 541- 2001
- (20) J. Magae et al.: Radiat. Res. 160. 543- 2003
- (21) S. Wolff: Environ. Health Perspecti. 106, 277- 1988
- (22) S.G Sawant et al.:Radiat. Res. 156, 177- 2001
- (23) H. Nagasawa and J.B.Little: Cancer Res. 52, 6394- 1992,  
ibid, Radiat. Res. 159, 262- 2003
- (24) E. I. Azzam et al.: Radiat. Res. 150, 497- 1998, & Oncogene, 22,7050- 2003
- (25) C. Mothersill and C. Seymour: Radiat Res.: 155, 759- 2001
- (26) I. Hayata et al.: Cytogenet. Genome Res. 104, 237- 2004
- (27) K. Kamiya et al.: Proc. NAS , 92, 1332- 1995
- (28) D. L. Preston et al.: Health Phys., 85(1),43- 2003
- (29) T. Iwasaki et al.: Radiat. Res. 159, 228- 2003
- (30) G. M. Matanoski: Final Report, DOE/EV/10095-T2, 1991
- (31) E. Cardis et al.:Radiat. Res. 142, 117- 1995
- (32) A. Berington et al.: British J. Radiol., 74, 507- 2001
- (33) H. Zeeb et al.: Am. J. Epidemiol., 158, 35- 2003
- (34) E. Cardis et al.: Proc. Int. Conference Vienna,1996 STI/PUB/1001 IAEA 1996

- (35) M. Peplow: Counting the dead, *Nature*, 440,982 – 983 2006/08/29
- (36) National Report of Ukraine:20 years after Chernobyl catastrophe *Future Look* Apr. 2006
- (37) Y. Hiyama and J. Matsubara: *Rec. Oceanog. Works in Japan*,7, 79-106, 1964
- (38) BEIR VII Phase 2 報告書 2005
- (39) 渡邊正巳: 放射線発がんの主経路は突然変異ではない 2006
- (40) D. Weinberg: The Hallmarks of Cancer, *Cell* ,100, 57 – 70 2000
- (41) M. H. Barcellos-Hoff et al.: *Radiat. Res.* 156, 618 – 627 2001
- (42) H. Ogata et al.: *Radioprotection* (in press) 2005
- (43) R. E. J. Mitchel: *Radiat. Res.* 152, 273-1999
- (44) R. E. J. Mitchel et al.:*In Stress-inducible Processes in Higher Eucariotic Cells*, Ed. E. M. Koval, 221- 243 Plenum Press 1997
- (45) J. B. Little: *J. Radiol. Prot.*, 23, 173- 2003
- (46) 松原純子: *FBNews リスク・リテラシーの推進に向けて* No.328、2004
- (47) 松原純子: *日本リスク研究学会誌*、14、 69一、2002
- (48) J. Matsubara: In “*Current Trends in Radiation Protection*” Ed. H. Metivier, pp199-210 IRPA 11, 2004

# 第4章

## 社会経済影響としての外部性

---



## 4.1. エネルギーセキュリティ

入江 一友

### 4.1.1. はじめに

昨今の原子力をめぐる数々の議論を取り上げるとき、そこに原子力利用の多様性、そしてセキュリティ概念の多義性を見て取ることができる。たとえば先の米英を中心としたイラク侵攻は NBC を含む大量破壊兵器の保有疑惑が発端であったし、北朝鮮（朝鮮民主主義人民共和国）をめぐる 6 カ国協議にしても北朝鮮による核兵器の開発・保有への疑念が根底にある。一方、国内では東京電力(株)による原子力発電所不祥事が原子力利用そのものに対する不信感を招く結果をもたらした。これらのトピックスは原子力にかかる議論全体を整合性のある枠組みで捉えることの困難さを示している。本節では、セキュリティ概念を明確に定義することによって、原子力システムのエネルギーセキュリティにおける位置づけを包括的に捉えることを試みる。

### 4.1.2. セキュリティとは

はじめに、議論を最も混乱させる原因となっている言葉の定義を行う。その言葉は「安全」である。「安全」は safety（セーフティ）と security（セキュリティ）の二語の訳語として使われるが、これらの言葉が混在して使われるところに混乱がある。セーフティとは内在的脅威（たとえば原子炉の正の反応度や運転規則の違反）に対する概念であり、セキュリティとは外在的脅威（たとえば他国からの侵略や天災）に対する概念である。本来セキュリティ概念は「国家が外部の軍事的脅威から守られて安全であること」をさしており、ナショナルセキュリティ（国家安全保障）と言われる。安全保障理論を国際政治学の視点から分析したものを表 4.1.1 に示す。表より、リアリズム学派からリベラリズム学派、さらにグローバリズム学派へと移っていく様子がよくわかる。

表 4.1.1 安全保障理論の三学派（神谷万丈の分類法による整理）<sup>(1)</sup>

学派	リアリズム学派	リベラリズム学派	グローバリズム学派
概念	国家安全保障 (national security)	国際安全保障 (international security)	人間の安全保障 (human security) 地球の安全保障 (global security)
主体	一国	諸国家	(地球大の人間社会)
価値	自国の領土・独立 国民の生命・財産	国際システム自体の安定	紛争の未然防止、 全人類が生命や人権の保証 された公正な社会で暮らす
脅威	外敵による軍事的 侵略	(国際システムの混乱)	(紛争) (環境汚染、人権侵害、エイズなど)
手段	軍事力	経済的相互依存の深化、 民主主義の普及、 国際法・国債制度の発達等	(市民の連帯)

注) 弧 () 内は神谷が明示的には示していないが、論旨から類推したもの。

原子力の軍事利用は米国のナショナルセキュリティを確保する過程で始められたものであるが、現在においては米英仏露中（および未確認の数国）でナショナルセキュリティを確保するために原子力の軍事利用が行われており、さらにはインド、パキスタンなどいくつかの国でそれを導入しようとする動きが見られる。これは原子力が大きく二つの側面でナショナルセキュリティの確保に強力に貢献すると考えられるためである。一つは他国を攻撃する際の「破壊力としての軍事利用（戦略・戦術核兵器）」であり、もうひとつは軍事作戦の継続的運用に不可欠な「動力としての軍事利用（原子力潜水艦や原子力空母などの推進力）」である。前者は悲しむべきことながら広島・長崎への原爆投下によりその破壊力が実証されており、後者は主要な軍事艦船に導入されていることからその効果は明白となっている。

#### 4.1.3. 日本におけるエネルギーセキュリティ

このように、セキュリティ（ここではナショナルセキュリティ）は国家の存立を確保するための概念として成立したものであるが、現在、国家の経済社会活動を行ううえで欠くことのできない基盤的要素としてエネルギーがある。すなわちエネルギーの安定供給は一国の存立に関わる重大事項であり、これを確保することをエネルギーセキュリティと呼ぶ。このためエネルギーセキュリティの概念はナショナルセキュリティ概念を拡張させて成立した概念といえることができる。エネルギーセキュリティ概念の時代に伴う変化を表4.1.2に示す。エネルギー政策においては「資源の確保」→「長期的安定性」→「エネルギーコストの低減」→「地球環境の保全」のように問題の関心が変化しているが、いずれの時期区分においてもエネルギーの安定供給確保は重視されてきている。

表4.1.2 エネルギーセキュリティ概念の歴史的変遷<sup>(2)</sup>

時期区分	エネルギー事情	問題関心	エネルギー安全保障概念
萌芽期 (1961-72)	需要急増 エネルギー革命 石油需要急増	石油輸入の安定確保 国産石炭の安定供給寄与	「安定供給」の一部ではあるものの未定義 *低廉供給に次ぐ位置付け
確立期 (1973-82)	石油危機 需要横這い 石油需要減退	緊急時体制の整備 ↓ 資源枯渇に対する長期的安定供給	「輸入エネルギーの不意の供給削減・中断への対応」 ↓ 「長期的安定供給確保」も含む *最優先の課題
変容期1： コスト低減 並置期 (1983-88)	OPEC 原油価格引き下げ 需要増勢 石油需要横這い	長期的安定供給確保 エネルギーコスト削減	「安定供給確保」と同義（「緊急時対応」+「長期的安定供給確保」） *コスト低減要請と並置
変容期2： 地球環境 保全並置期 (1989-)	湾岸危機 需要増勢 石油需要漸増	地球環境保全（特に地球温暖化） エネルギー資源制約	「需要安定化」と同義（需要抑制を含意） *地球環境保全と並置 さらに逆転

エネルギーセキュリティ概念に基づく議論の理解が時として混乱を招く場合があるが、それはエネルギーセキュリティにかかる議論が大きく異なる二つの側面を同一の言葉で論じる場合があるためである。エネルギーセキュリティにはその対象とする時間的規模の違いから短期的セキュリティと中長期的セキュリティとがあり、これらの区別を明確にすることがエネルギーにかかわる安全保

障を理解するうえで極めて重要な点となる。短期的エネルギーセキュリティは、特に輸入エネルギーの不意の供給削減・中断という短期的な脅威に対応してエネルギーの安定供給を図る意味での安全保障であり、中長期的エネルギーセキュリティは、エネルギー資源の枯渇といった中長期的な脅威に対応する安全保障である。いずれの概念にしても、根底には一国のエネルギー供給構造が、輸入資源に頼る場合の脆弱性の克服を念頭に置いている。

短期的セキュリティと長期的セキュリティは、それぞれ狭義のセキュリティ、広義のセキュリティと呼ばれることがある。これは、ナショナルセキュリティから見たときのセキュリティ概念として、「軍事力を維持・運用するために必要な輸入エネルギーの確保の必要性」があり、これを最狭義のエネルギーセキュリティと呼ぶことと関連する。最狭義のエネルギーセキュリティは輸入エネルギーの用途が限定されているという意味で狭義のセキュリティよりもさらに限定された概念である。表 4.1.3 にエネルギーセキュリティ概念の定義を整理する。

表 4.1.3 エネルギーセキュリティ概念の三定義<sup>(3)</sup>

	最狭義	狭義	広義
定義	軍事力を維持運用するために必要な輸入エネルギーの確保	輸入エネルギーの不意の供給削減・中断への対応	エネルギー資源の枯渇に対応する中長期のエネルギー安定供給 (輸入エネルギーの不意の供給削減・中断への対応)
主体	一国	一国	地球社会
手段	軍事力	経済的手段 政治的手段	経済的手段 政治的手段
環境	他国	他国 国際市場 国際企業	地球社会
攪乱作用	輸入エネルギーの不意の供給削減・中断	輸入エネルギーの不意の供給削減・中断	資源枯渇
客体	自国	自国	地球社会
目標状態	供給確保	短期安定供給	中長期的安定供給
対応する 学派 ・概念	リアリズム学派 国家安全保障 (national security)	リベラリズム学派 (International security)	グローバリズム学派 人間の安全保障 (Human security) 地球の安全保障 (global security)

これまでに見たエネルギーセキュリティの議論においては、短期的・中長期的セキュリティのいずれにおいても供給の安定確保に主眼が置かれており、エネルギー利用に伴う地球温暖化などの環境上の課題についてはことさらに言及していない。しかしながら、総合エネルギー調査会答申類における原子力のエネルギーセキュリティ上の意義として、原子力の優れた環境特性についての言及が見られる。これはいわば第三のエネルギーセキュリティの概念であり、環境安全保障という別概念の一部としても今後議論が待たれるところである。

日本におけるエネルギーセキュリティ概念の枠組みを表 4.1.4 に示す。

表 4.1.4 エネルギーセキュリティ概念の枠組み<sup>(3)</sup>

	日本で該当するもの	日本で該当しにくいもの
対象 (何を守るのか)	エネルギーの安定供給による需要者の利益 〔 短期：不意の供給削減・中断（緊急時）への対応 中長期：エネルギー資源枯渇への対応 量的安定性 價格的安定性（需給逼迫時）                 〕	例：エネルギー需要抑制による地球温暖化防止 : 需給非逼迫時のエネルギーコスト低減
脅威 (何から守るのか)	国際的脅威 〔 政治・軍事的要因 経済的要因                 〕	国内的脅威
手段 (何で守るのか)	非軍事的手段 〔 経済的手段 政治的手段                 〕	軍事的手段（注）

注) 軍事的手段は一般にエネルギー政策上の手段には含まれない。特に日本においては、憲法上の制約があり、エネルギーセキュリティのための軍事的手段はそもそも想定しがたい。

エネルギーセキュリティ上の脅威とそれらに対応する施策について表 4.1.5 にまとめる。戦後日本のエネルギーは石炭中心から石油中心に変化してきたが、石油資源の有限性と環境との調和が問題となってきたおり、今後、どのようなエネルギー源を利用することが日本において求められているのか、経済、社会、環境、科学技術など広範囲の検討を進めていく必要がある。

表 4.1.5 エネルギーセキュリティ上の脅威と対応する施策<sup>(3)</sup>

時間軸	脅威	施策
短期 (数ヶ月～数年)	輸入エネルギーの不意の供給削減・中断	備蓄 エネルギー資源転換 (各国ごとの賦存状況に応じて) 資源供給国・輸送路変更 省エネルギー
中期 (数年～数十年)	エネルギー資源枯渇	探鉱 エネルギー資源転換 (世界的な資源賦存量に応じて) 省エネルギー
長期 (数十年～数百年)	エネルギー資源枯渇	技術開発 (エネルギー創出) エネルギー資源転換 (世界的な資源賦存量に応じて) 省エネルギー

#### 4.1.4. エネルギーセキュリティにおける原子力の意義

次にエネルギーセキュリティにおける原子力の意義を見てみる。まず短期的エネルギーセキュリティに対する寄与としては(1) 燃料資源国の政情が安定しており、燃料資源の供給も安定していること、(2) 燃料備蓄が容易であり、意図的な備蓄を行わない場合にも燃料加工過程・燃料装荷による事実上の備蓄効果が期待できること、(3) 発電原価が安定していること、(4) 使用済み燃料の再処理による燃料の回収・再処理が可能であることが挙げられる。

(1) は原子力の燃料資源であるウラン鉱石が、カナダ、オーストラリアなどの民主主義が発達した先進国に多く賦存していることによる。これは石油が政情不安定な中東地域に大きく依存していることとは対照的であり、原子力燃料の供給が不意に途絶える可能性は小さいと考えることができる。また、今後、日本としてウラン資源開発を行う場合でも、政情が安定している先進国において開発するのであれば、開発後の利権の保護が容易であることも重要である。核燃料については、採鉱、精錬、転換、濃縮、再転換、成型加工の各工程があり、それぞれの工程において供給の隘路となる可能性がある。しかし、最も懸念される濃縮工程でも現在は供給過剰傾向と評価されており、リスクは十分に小さいと考えられる。

(2) については、ウラン燃料はエネルギー密度が極めて高いため、安全確保に十分な注意を払う必要があるものの、備蓄の容易性を高めている。かつては輸送の容易性も高く評価されてきたが、物理的な輸送の容易性は現在においても高いものの、混合酸化物(MOX)燃料や高レベル放射性廃棄物については輸送に対する沿岸国の懸念があり、輸送ルート容易に設定できない状況がある。このため、現在では特筆すべき長所とはなっていない。

(3) については、原子力発電の発電原価の大半はプラントの建設費であって燃料費の占める割合が低く、燃料費の変動が発電原価に与える影響が小さいため発電原価が安定している。原子力の発電原価の安定性はエネルギー価格全体の安定性にも寄与し、価格面でのエネルギーセキュリティを向上させると考えられる。

(4) については、未だ実現はしていないものの、使用済核燃料からのPu等の回収・利用は国内で燃料資源を採掘することと同様の意義を有し、燃料資源全体の輸入依存を大幅に減少させる。燃料再処理技術やPuのMOx燃料としての利用技術そのものは既に確立されており、国内での再処理およびMOx燃料の利用が本格化すれば、短期的エネルギーセキュリティの向上に大きく貢献する。

中長期的エネルギーセキュリティに対する原子力の寄与は次のものとなる。(1) 使用済核燃料の再処理による回収・再利用によって燃料資源の有効利用が可能であること、(2) 増殖炉開発により燃料を増殖させる可能性があること、(3) 核融合により地球上に大量に存在する重水素などを燃料資源に変える可能性があることが挙げられる。

(1) については、ウラン資源も石油と同様に枯渇性の鉱物資源であるが、再処理によってPuなどの成分を分離回収することができればウラン資源の枯渇を将来に遠ざけることができるようになることを指す。(2) については、たとえば高速増殖炉によって使用したPu量以上のPuを生成する技術が確立すれば、(1)に比してさらに将来へウラン資源の枯渇時期を延ばすことが可能となる。ただし、高速増殖炉技術については近年、技術的難点の浮上やウラン資源の当面の安定供給の確保により、一部の国を除いては積極的には推進されていない。しかしながら技術的には確立の目処が立っており、中長期的エネルギーセキュリティの有力な手段として期待される。(3)は、核融合が人類の究極的なエネルギー手段であると期待されるものの、現時点ではいまだに技術的な確立を見ているとは言いがたく、既存の燃料資源が使用できる間に研究開発を進める必要がある。

4.1.5. ニュークリアセキュリティ

ここまで、セキュリティの概念としてナショナルセキュリティとその拡張概念としてのエネルギーセキュリティがあり、それらに対して原子力が大きく貢献してきたこと、また今後も貢献し得るものであることを論じてきた。次に原子力システムそのもののセキュリティ、すなわち原子力システムに対する外在的な脅威への対応について述べる。この概念はニュークリアセキュリティ（原子力安全保障）と呼ばれている。原子力システムは原子力施設（原子力発電所、再処理施設、核燃料製造施設など）と核燃料等の放射性物質によって構成されるが、従来からある核物質防護の概念、すなわち核物質を盗難や不法な移転から守ることや原子力施設が破壊されることに伴う核物質の散逸等を物理的に防護することを中心としつつ、さらに核物質の密輸対策や核燃料物質以外の放射性物質（医療用・工業用の放射線源など）の防護措置を包含するに至る概念として定義される。原子力発電によってエネルギーセキュリティを向上させていくためには、原子力システム自体が内包している危険（内在的な脅威）を対象とした安全確保（セーフティ）と並び、原子力システムの外部から加えられる危険（外在的な脅威）を対象とした原子力安全保障（ニュークリアセキュリティ）の両者を確保していくことが重要な前提条件となる。

4.1.6. おわりに

国家安全保障に始まるセキュリティ（安全保障）概念は、エネルギー以外の他の分野でも見ることができる。エネルギーとそれ以外の食料、金属資源との安全保障概念との比較を表4.1.6に示す。ここに見るように、エネルギーセキュリティへの国民の関心はさほど高くない。これは、エネルギー供給に関する危機意識の強い時代にはエネルギーセキュリティのための施策展開に関心が集中するものの、危機意識自体が弱まると、他の施策課題に関心が移行し、エネルギーセキュリティについての議論が下火になることが背景にあると考えられる。

表 4.1.6 経済安全保障概念の三分野の比較<sup>(3)</sup>

	財の性格 (目標状態)	資源の賦存 (手段)	脅威の所在 (攪乱作用)	国際安全保障体制
食糧安全保障	消費財 (国民の関心は高い)	普遍的 (農業資源は各国に賦存) → 自給率向上	普遍的 (輸出国・輸入国双方に脅威)	集団安全保障体制 (食料農業機関: FAO)
エネルギー安全保障	消費財かつ生産財 (国民の関心はさほど高くない)	ある程度偏在的 (エネルギー資源は限られた国に賦存) → 自給率向上、備蓄等	ある程度偏在的 (輸入国にのみ脅威)	冷戦型勢力均衡体制 (石油主出国機構: OPEC 対 国際エネルギー機関: IEA)
金属資源の安全保障	生産財 (国民の関心は低い)	偏在的 (金属資源はきわめて限られた国に賦存) → 備蓄のみ	偏在的 (工業国である少数の輸入国にのみ脅威)	(無し)
軍事的安全保障	消費財 (公共財) (国民の関心は高い)	普遍的 (軍事力は各国が保有)	普遍的 (各国にとって脅威)	集団安全保障体制 (国連: UN)、協調的安全保障 (欧州安全保障協力機構: OSCE)

エネルギーセキュリティの確保のために原子力を平和利用する場合、その安全確保（セーフティ）は大前提となる。これは技術面での十分な裏付けと専門家による判断、適切な規則の運用によって初めて成立し、これに基づいて地域住民や国民一般の安心感を得ることができる。しかし昨今の東京電力㈱の原子力発電所不祥事は地域住民・国民の安心感を大きく損ない、原子力のエネルギーセキュリティ上の意義を発揮させにくくさせた。

原子力を軍事目的に利用する国の場合には、軍事から民生への技術面での波及効果があることや廃棄物処理について国家として責任を持って対処することなど、エネルギーセキュリティへの利点もあるが、他方、核不拡散の努力を払うことに伴う負担も発生する。日本では核の軍事利用を行わないため前者の利益を享受できないが、後者については日本もその負担を負う責務があり、いわば二重のハンディキャップを持っている。

#### 参考文献

- (1) 入江一友・神田啓治、エネルギー安全保障概念の構築と施策の体系化、エネルギー資源、第23巻第4号、pp.230-235、2002年
- (2) 入江一友・神田啓治、エネルギー安全保障概念の形成と変容、日本エネルギー学会誌、第81巻第5号、pp.311-321、2002年
- (3) 入江一友・神田啓治、エネルギー安全保障概念における原子力の評価、日本原子力学会和文論文誌、第1巻第2号、pp.107-108、2002年
- (4) 入江一友、エネルギー安全保障概念の構築に関する研究、エネルギー政策研究、第1巻第1号、pp.1-57、2002年



## 4.2. 東アジアのエネルギー危機シナリオ分析とエネルギー技術の評価

大森 良太

### 4.2.1. エネルギー外部性の評価とシナリオ・プランニングの活用

本節では、(独) 科学技術振興機構 社会技術研究開発センターが (財) 日本エネルギー経済研究所、外部の専門家の方々のご協力を得て実施した「シナリオ・プランニングによる東アジアのエネルギー危機分析」プロジェクト (リーダー 堀井秀之 東京大学大学院工学系研究科教授) の概要を紹介しつつ、シナリオ・プランニングを活用したエネルギー技術の外部性評価の可能性を検討する。筆者は本プロジェクトのサブリーダーを務めた。

本プロジェクトでは、2020 年頃までを視野に、「東アジアのエネルギー安定供給」と「日本の安全・繁栄」の実現に対するリスク要因を総合的に分析し、中国の将来像を分岐点とした二つの危機シナリオ「資源争奪シナリオ」と「極東の島国シナリオ」を作成した。さらに、両シナリオを基に、エネルギー・科学技術政策に求められる視点の抽出、個別研究開発課題例の意義の検討を実施した。

シナリオ・プランニングは未来分析・戦略構築手法の一つであり、様々な分野の専門家やステークホルダーの協働により、対象とする問題領域の未来に影響を及ぼす因子を総合的に検討した上で、特に着目すべき因子をシナリオ分岐として未来世界の可能性を構造化し、複数の未来シナリオとして記述する。本手法の大きな特色は、参加メンバーの知識や将来見通しを一つの未来像に収斂させるのではなく、未来の不確実性や不可知性を前提とし、我々の知識や見通しの反映であるところの未来の可能性を複数のシナリオとして表現し複眼的に捉える点にある (図 4.2.1)。

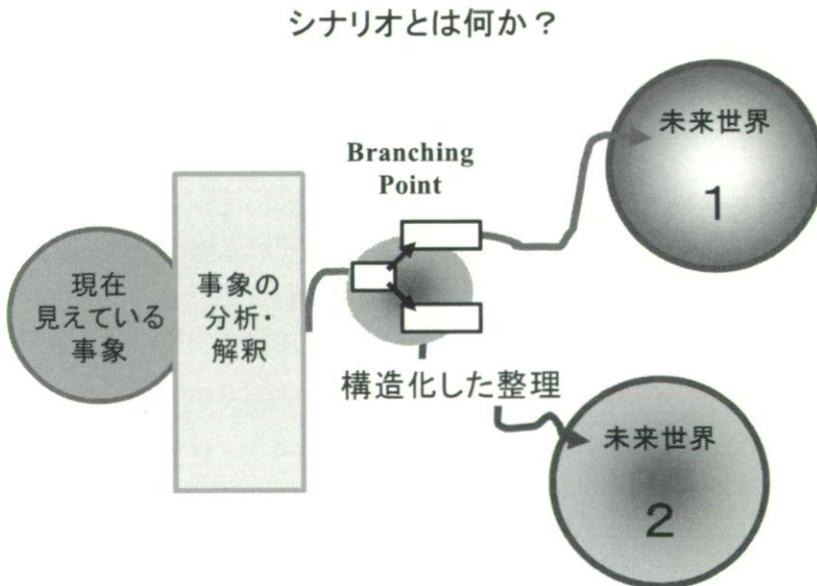


図 4.2.1 未来世界の構造化とシナリオ (日本エネルギー経済研究所作成)

このような未来シナリオは、現在我々が直面している意思決定問題、例えば、エネルギー関連の政策やビジネス戦略の策定において、将来社会の可能性、ニーズ、リスクなどの知見を与えるのみならず、我々が現在保有している技術オプションや政策オプションの意義を検討する際の準拠点ともなる。従来、エネルギー技術の外部性評価においては、エネルギーセキュリティの確保、環境の保全、健康被害の防止といった評価軸をアприオリに定め、個々の技術を比較・評価するやり方が一般的であった。これに対して、本節で述べるシナリオ・プランニング手法は、それらの評価軸を未来シナリオから逆抽出し、その上で個々の技術の意義を検討するものである。

本手法の主なメリットとして以下の3点が挙げられる。

#### ①様々な未来の可能性への対処

我々は将来に向けた意思決定をする際、未来の不確実な要因から無意識に目をそらせたり、過去のトレンドを外挿して単一の未来像を想定したりしがちである。しかし、エネルギー問題は多くの要因が絡む複雑な問題であって、エネルギー問題を取り巻く環境、人々のライフスタイルやニーズ、エネルギー技術に求められる要件の予測には限界がある。この点で、過去のトレンドデータは踏まえつつも、これに過度に依存することなく、未来世界の可能性を構造的に探索するシナリオ・プランニングが有効となる。未来の可能性を複眼的に把握しておくことにより、ロバストな意思決定の構築、環境の変化に対する柔軟な対応が可能となる。

#### ②エネルギー技術の多面的価値の明示化

エネルギー技術の価値は多面的である。この認識こそ外部性研究の根源にあるとも考えられるが、シナリオ・プランニングによって得られたそれぞれの未来シナリオからは、エネルギー技術に対する社会的ニーズ、個々の技術や政策の効用を導出することが可能となる。この作業により、エネルギー技術の価値を様々なコンテキストの上で多面的に評価することが出来る。

#### ③多分野の専門家の協働、知見の融合

シナリオ・プランニングでは、様々な分野の専門家が、それぞれの分野の専門家としての資格で議論に参加するが、シナリオ・プランナーのコーディネーションにより各専門家の知識、問題意識、将来見通しなどが融合され、未来シナリオという作品に昇華される。エネルギー技術の外部性評価は分野融合的な作業であり、多分野の専門家の協働の成否が鍵となる。一般的に、異分野の専門家の知見の融合は困難な作業であるが、シナリオ・プランニングはこれをかなりの程度まで成功させる有効な手法の一つと考えられる。

### 4.2.2. シナリオ・プランニングによる東アジアのエネルギー危機の分析

#### (1) 東アジアエネルギー危機シナリオ検討会および検討手順

本研究ではエネルギー工学、エネルギー経済、科学技術政策、国際関係、安全保障、中国、中東などの分野の専門家10名からなる東アジアエネルギー危機シナリオ検討会を設置し、2004年12月から2005年3月の間に4回の会合を開催した。検討会メンバーは以下の通りである(敬称略)。堀井秀之(リーダー、東京大学大学院工学系研究科)、大森良太(サブリーダー、社会技術研究開発センター)、渥美正洋(世界平和研究所)、氏田博士(エネルギー総合工学研究所)、角和昌浩(フェシリテーター、日本エネルギー経済研究所)、鈴木達治郎(日本エネルギー経済研究所)、角南篤(政策研究大学院大学)、古川勝久(社会技術研究開発センター)、三室戸義光(日本エネルギー経済研究所)、寄元政宏(中東経済研究所、現在は中国電力)。

危機シナリオ作成までの手順を図4.2.2に示す。

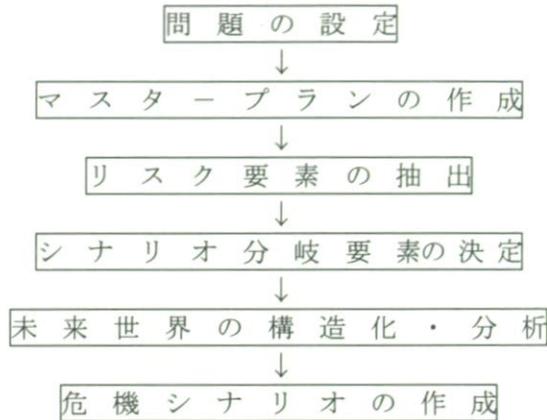


図 4.2.2 危機シナリオ作成プロセス

## (2) 問題の設定とマスタープラン

本検討会では、2020年頃までを視野に入れて東アジアのエネルギー危機シナリオを作成することとした。検討期間を遠い将来にまで拡張すると現在の政策的意思決定への含意が不明確になる。ここで危機の主体や定義が問題となる。本検討会では、東アジア全体の安定を視野に入れつつも、究極的には日本にとっての危機、国益を考えることにした。またエネルギー危機の定義であるが、本研究ではこれを広義に捉え、エネルギー供給支障、環境悪化などの危機のみならず、これらのリスクの低減に向けた各国の行動の結果生じる国力（経済力、国際政治力など）の低下やエネルギー資源を巡る国際対立などもエネルギー危機として扱うこととした。そこで、本検討会でははじめに日本として何を危機から守るべきかについて議論をした。その結果、以下の二つの問題意識を共有化し、日本が目指すべき基本目標を図 4.2.3 のマスタープランとして表現した。

### ○東アジア地域のエネルギー安定供給確保は日本の安全に資する

日本として守るべきもの、すなわち国民一人ひとりの安全や幸福や豊かさ、その前提となる経済の発展や福祉水準の確保は、東アジア地域の繁栄および平和安定と不可分の関係にあり、地域全体のエネルギー安定供給確保はその基盤である。

### ○エネルギー関連技術は国家的資産であり日本の安全・繁栄に向けて有効に活用していくことが重要

日本の有するエネルギー分野の技術および研究開発資源は東アジアのエネルギー危機リスクを低減し、技術や製品の輸出を通じ日本を豊かにし、さらに日本と東アジア諸国の関係を戦略的に構築するための大切な資源であり、これを有効に活用していくことが重要である。これにより東アジア地域全体のエネルギー安全保障に向けた取り組みにおける日本のプレゼンスの維持・向上もはかれる。

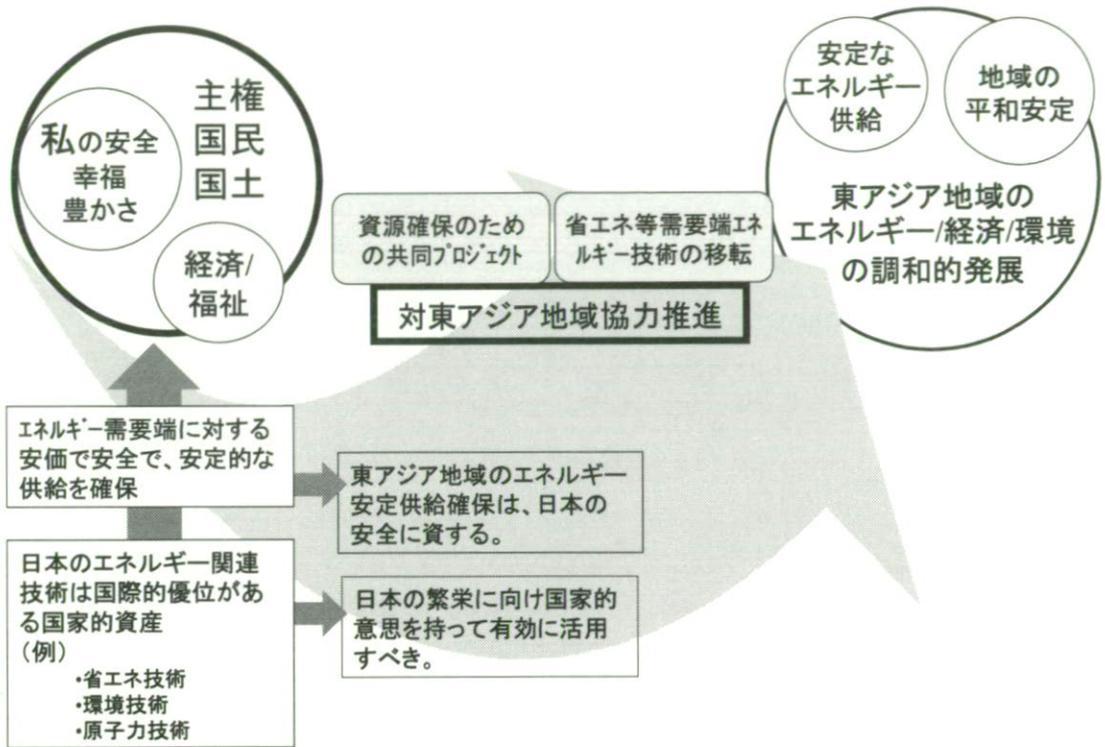


図 4.2.3 マスタープラン

### (3) リスク要素の検討

本検討会で検討するリスクは、図 4.2.3 のマスタープランの実現に対するリスクである。そこで、(1) 中国の資源ナショナリズム、(2) 中国の科学技術体制、(3) 地政学・国際関係、(4) エネルギーインフラ危機 (サプライチェーン)、(5) モータリゼーションの進展、(6) 電力危機、(7) 原子力事故・核拡散、(8) 地球環境・気候変動、の 8 つのカテゴリーを設定し、各カテゴリーについて担当メンバーを決め、現在見えているトレンド、見通しが不確かな点、特に注目すべきリスク要素に関する調査・分析を実施した。これら 8 つのカテゴリーの個々の論点は多様であったがここでは割愛する。調査・分析結果から、特にマスタープランにとって影響が大きく、現時点において見通しが不確実な要素として合意された項目を表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 マスタープランにとって特に影響が大きく不確実性が高い18の要素

	特に影響度と不確実性が大きい要素
中国	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中国がエネルギーセクターに市場メカニズムを導入するか？</li> <li>● 中国が資源確保の手段として外国資源を求め続けるか？</li> <li>● 中国の科学技術体制に政治課題が大きく介入してくるか？</li> <li>● 中国の経済繁栄が国内政治の安定をもたらすか？</li> <li>● 中国が GHGs 排出削減に向けた国内措置を行うか？</li> </ul>
地政学・国際政治	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 朝鮮半島の地政学的情勢？</li> <li>● ロシア資源の北東アジアへの供給？</li> <li>● 米中貿易摩擦？</li> <li>● シーレーン安保を巡る米中間対立</li> </ul>
インフラ・事故・テロ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中東資源輸送ルート確保のために国際協力体制ができるか？</li> <li>● 中国の発電設備建設が間に合うか？</li> <li>● 深刻な原発事故が発生するか？</li> <li>● 東南アジアのテロの規模と頻度？</li> <li>● 東アジア諸国の原子力保障措置が十分にとられるか？</li> </ul>
科学技術・環境問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 日本のエネルギー科学技術の国際的優位性が維持できるか？</li> <li>● ガソリンハイブリッド車の普及・自動車の燃費改善度合？</li> <li>● 消費者の省エネルギー・環境意識が高まるか？</li> <li>● ポスト京都プロトコルの行方？</li> </ul>

#### (4) シナリオ構造の決定 — 「国権的中国」と「オープンな中国」

表 4.2.1 を基に、シナリオ構造、すなわち、未来世界を複数のシナリオによりどのように描き分けるかについて検討した。その結果、われわれのマスタープランの実現にとって最も重要かつ影響が大きいファクターは中国の未来像であり、これをシナリオ軸としてシナリオを構築することで合意した。さらに、各シナリオの基底となる中国の未来像について集中的な検討を行った。その結果、以下の二つの中国像を形成した。

- 統治優先の政治的ロジックをとる「国権的な中国」
- 経済発展重視の科学的・経済的ロジックをとる「オープンな中国」

ここで行ったシナリオ構造の決定プロセスが、シナリオ・プランニング作業において最も決定的かつダイナミックなプロセスであり長時間の議論を経て合意が模索されたところである。このシナリオ軸の選択は一意に決まるものではない。8つのリスクカテゴリーごとに危機シナリオを作成すること、あるいはシナリオ分岐として例えば中東情勢、米中関係、環境意識、技術革新といった他の要素をシナリオ分岐軸とすることも可能であろう。この意味でシナリオ構造の選択はあくまでも検討メンバーの問題意識や見解の反映であると言える。本検討会では、中国の将来像を軸とするシナリオ構造が本研究の目的やマスタープランに照らして最も適切であり、良い議論をするための基盤となると考えた。なお、表 4.2.1 に示されている中国関連以外の要素についてもこのシナリオ構造の中で検討し、その展開については最大限可能な範囲でシナリオの内容に取り入れることとした。

(5) 二つの危機シナリオ - 資源争奪シナリオと極東の島国シナリオ

本研究では「国権的な中国」と「オープンな中国」における基本政策（政治経済、外交、科学技術）とエネルギーシステム（エネルギー政策、エネルギーの需要と利用効率、エネルギー技術の展開）について詳細に分析した上で、図4.2.3のマスタープランの実現に対する危機の様相をそれぞれ、「資源争奪シナリオ」と「極東の島国シナリオ」として叙述した。各シナリオの骨子を図4.2.4に示す。各中国像の分析の詳細や各シナリオの全文（各2000字程度）は文献(1)、(2)を参照されたい。

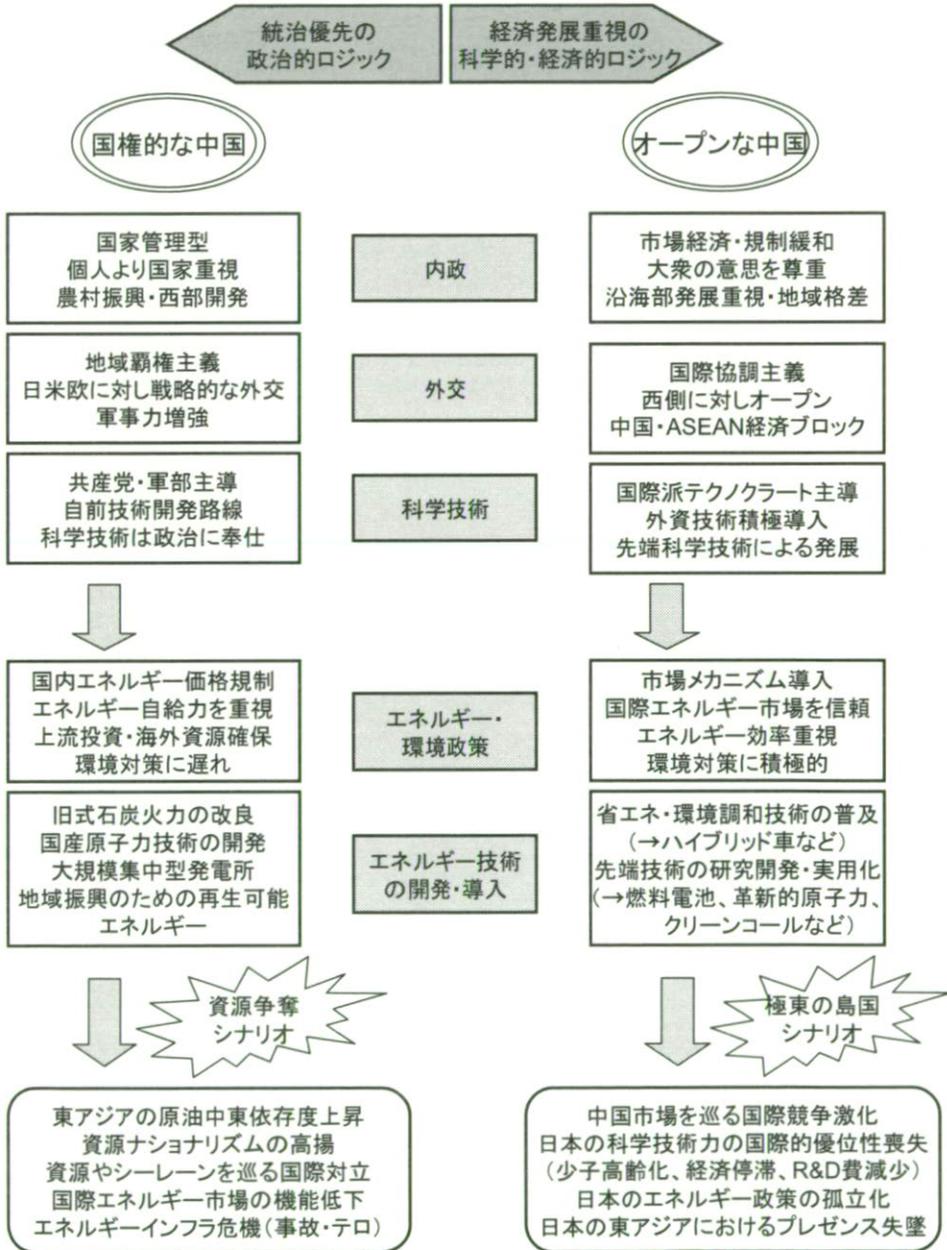


図4.2.4 二つの中国像と危機シナリオ

統治優先の政治的ロジックを指向する「国権的な中国」は国家管理型の政策を推進し、規制緩和や市場経済の導入のスピードは遅い。地域格差の解消が重要な内政課題となり、農村や西部地域の開発を重視していく。また、地域覇権主義的な色彩を強め、日米欧に対し戦略的な外交を展開する。さらに、共産党・軍部の意向が科学技術政策に強く反映され、自前技術開発路線が推進される。このような中国像を前提とする「資源争奪シナリオ」では、中東産原油依存度の上昇など東アジアのエネルギーシステムのさらなる脆弱化、資源やシーレーンを巡る国際対立、国際エネルギー市場の機能低下、エネルギーインフラ危機などが顕在化する。

一方、経済発展を重視する経済的・科学的ロジックを指向する「オープンな中国」は市場経済の導入や規制緩和を積極的に推進していく。国際協調を重視し、国際的なレジームにも積極的に参加する。また ASEAN 諸国と政治的・経済的結びつきを強めていく。国際派テクノクラートが科学技術政策を主導し、外資技術の導入や先端科学技術開発に積極的に取り組む。このような中国像に対応する「極東の島国シナリオ」では、グローバルな競争の激化、日本の科学技術力の優位性喪失（少子高齢化、R&D 費減少）、東アジアにおけるエネルギーセキュリティ確保に向けた地域的取り組みへの影響力低下、日本のエネルギー政策の孤立化などが顕在化する。

### 4.2.3. 危機シナリオに基づくエネルギー技術の評価

本会合では、それぞれのシナリオに描かれた危機の回避に向け、日本の科学技術戦略に必要な視点の検討をした。さらに、燃料電池自動車、革新的原子力システム、クリーンコールを事例として、各シナリオに照らした研究開発・実用化の意義を検討した。なお、これらは検討会では時間的な制約もあり最終的な合意に達するまでには至らず、その後筆者の責任でまとめたものであることを付言する。

#### (1) 科学技術政策に求められる視点

表 4.2.2 に各シナリオから導出された科学技術政策に必要な視点を示す。

表 4.2.2 各シナリオから抽出された日本の科学技術政策に必要な視点

資源争奪シナリオ	極東の島国シナリオ
<ul style="list-style-type: none"> <li>・資源ナショナリズム的な行動への誘引を抑制する技術開発               <ul style="list-style-type: none"> <li>-省エネルギー技術</li> <li>-原油代替エネルギー技術</li> <li>-化石資源の環境調和型利用技術</li> <li>-エネルギーインフラの信頼性・安全性の向上 (原子力安全技術、電力ネットワーク技術、テロ対策技術)</li> </ul> </li> <li>・対中政策で欧米と協調</li> <li>・中国とのテクノクラートら次世代の指導者と多層的な交流を拡大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エネルギー資源輸入量の低下（特に原油）</li> <li>・エネルギー科学技術分野で国際的優位性を維持               <ul style="list-style-type: none"> <li>-エネルギーシステムの更なる効率化</li> <li>-最先端技術開発</li> </ul> </li> <li>・エネルギー技術輸出の拡大</li> <li>・東アジア地域への技術輸出の拡大</li> <li>・外交カードとしての科学技術の活用</li> <li>・国際派テクノクラート育成</li> </ul>

資源争奪シナリオで描写された危機の回避に向けては、中国をはじめ各国が資源ナショナリズムへ向かう誘因を抑制するための基盤技術開発が重要である。これには、省エネルギー技術、原油代替技術、化石資源の環境調和型利用技術など、エネルギー需給や資源・環境制約を緩和するための技術開発があげられる。また、原子力安全技術、電力ネットワーク技術、テロ対策技術などエネルギーインフラの信頼性・安全性の向上に向けた技術開発・実用化も同様に資源争奪への誘引を抑制する。また、このシナリオでは、外交的には地域覇権的で日米欧に対し戦略的な外交を展開し、また、科学技術政策においては自前技術開発路線を指向する傾向が強い中国が仮定されている。わが国としては科学技術分野においても、対中政策における欧米との協調、中国のテクノクラートら次世代の指導者との多層的な交流の拡大、ASEAN 諸国との交流拡大が求められる。

一方、極東の島国シナリオにおいて描写された危機を回避するためには、第一にエネルギー資源輸入量（特に原油）を低下させる技術開発（自己努力）が重要となる。これは資源争奪シナリオの回避に向けた技術と共通する部分が多い。また、資源小国であり最も国際エネルギー市場の恩恵を享受しているわが国としては、東アジア地域におけるエネルギー安全保障確保に向けたイニシアティブに対する影響力を確保する視点から、最先端エネルギー技術開発およびエネルギーシステムの更なる効率化（エネルギー技術分野でアジアの最先進国としての地位を確保）、東アジア地域へのエネルギー技術輸出の拡大（欧米との競争）、科学技術の外交カードとしての利用（戦略的共同研究開発、戦略的技術移転など）、国際派テクノクラートの育成などが重要となる。

(2) 各シナリオにおける研究開発課題例の意義

表 4.2.3 各シナリオにおける研究開発課題例の意義

	資源争奪シナリオ	極東の島国シナリオ
燃料電池自動車	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ほぼ 100%石油に依存している運輸部門の省エネ、脱化石化に大きく貢献</li> <li>● 再生可能エネ、原子力などによる水素製造技術の可能性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 将来の産業競争力や科学技術立国としてのプレゼンスの確保に大きく寄与</li> <li>● 課題となっている水素貯蔵材料研究開発、水素製造技術、および、燃料電池システム商用化で日本はリード</li> </ul>
革新的原子力システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 原子力発電が直面している困難（安全管理、大きな初期投資、廃棄物処分、核拡散、立地制約、ウラン利用率の低さ）を克服する可能性</li> <li>● 東アジアにおける原子力の導入は域内の化石資源（特に天然ガス、石炭）の節約に寄与</li> <li>● 水素製造等多目的利用可能性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● アジア諸国への輸出への期待</li> <li>● 次世代型原子力プラント市場における主導権の確保、日本のプレゼンスの確保</li> <li>● Na 冷却 FBR、高温ガス炉、超臨界圧軽水炉、低減速スペクトル炉などの革新炉研究開発で日本はリード</li> <li>● バックエンド研究開発で日本はリード</li> <li>● 核不拡散への貢献</li> </ul>
クリーンコール	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 石炭利用の環境制約や炭種制約を緩和し、石炭の利用ポテンシャルを拡大</li> <li>● 石炭は東アジアでほぼ自給可能</li> <li>● ガス化・水素製造技術による運輸部門の脱石油化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 今後も多くの東アジア諸国では石炭火力が基幹電源。クリーンコールには環境面から東アジア諸国に大きなニーズ</li> <li>● 京都議定書の発効は CDM を活用した東アジア諸国への CCT 移転を促進</li> <li>● 超臨界圧火力で日本はリード</li> </ul>

表 4.2.2 に基づき、燃料電池自動車、革新的原子力システム、クリーンコールテクノロジーを事例として各シナリオに描かれた危機の回避に向けた意義の検討を実施した。その骨子を表 4.2.3 に示す。詳細については文献 (1) , (2) を参照されたい。これらが図 4.2.2 のマスタープランから出発した今回のシナリオ・プランニング作業によって得られた各エネルギー技術の（多くは外部的な）意義である。

#### 4.2.4. おわりに

本研究では、シナリオ・プランニング手法に基づき、東アジアのエネルギー危機の要因を総合的に分析し、中国の将来像に着目した二つの危機シナリオ—資源争奪シナリオと極東の島国シナリオ—を作成した。さらに、各シナリオに基づき、科学技術政策に求められる視点、個別エネルギー技術の価値を検討した。

シナリオ・プランニングは過去のトレンドに拘束されがちなわれわれの視野を広げ、われわれが関心を寄せる将来世界の可能性を複眼的に把握することにより、不確実な未来に対する（現在なさねばならない）意思決定を支援する。またそれぞれの未来シナリオから逆算的に、個別の技術オプションや政策オプションの意義を多面的に評価することが出来る。

外部性研究に即して言えば、ここで述べた実施事項はエネルギー技術の外部性を評価する観点の抽出、その観点からのエネルギー技術の評価ということになる。外部性評価の視点を未来シナリオと関連させながら論理的に抽出できること、特にこれまであまり議論されてこなかったような視点が得られる可能性が大きいことといった点で、シナリオ・プランニングはエネルギー技術の外部性評価研究に貢献できる手法と考えられる。

今回実施したシナリオ・プランニングはあくまで東アジアのエネルギー危機問題を対象としたものであり、今回導出された各技術の意義も網羅的なものではない。例えば今回の検討ではエネルギーセキュリティや国際関係といった事柄に力点が置かれた反面、環境問題などはメインのトピックスとはならなかった。しかし、様々な専門家の方々のご協力により、分野融合的に有機的なシナリオを作成することには成功したと考えている。国際政治や中国問題といった位相から、個別の科学技術の評価の位相をつなぐ有益な手法、シナリオ・プランニングはこの一つとして位置づけられよう。未来シナリオに唯一解はない。今回の作業が様々な場での議論の材料となれば幸いである。

なお、本節はこれまでの発表文献 (1) - (3) を基にエネルギー技術の外部性評価の視点を大幅に加え執筆したものである。本プロジェクトについての詳細についてはこれらの文献を参照されたい。

#### 関連文献

- (1) 大森良太, 堀井秀之, “シナリオ・プランニング手法による東アジアのエネルギー危機の分析と日本の科学技術戦略”, 社会技術研究論文集 Vol.3, 1-10 (2005)
- (2) 大森良太, “二つの中国像と東アジアのエネルギー危機”, 石油・天然ガスレビュー Vol.39, No.6, 19-28 (2005)
- (3) 堀井秀之, 大森良太, “シナリオ・プランニングに基づく科学技術政策立案支援手法の提案—東アジアのエネルギー安定供給と日本の安全・繁栄を例に—”, 社会技術レポート, No.2 (2006)



## 4.3. 原子力防災

金澤 晃・別所 泰典

エネルギー源として原子力を利用するに際しては、4.1 節で述べたように安全確保が重要であることは言を待たない。安全確保が重要である点は他のエネルギー技術でも同様であるが、米国でのスリーマイル島原子力発電所事故や旧ソ連のチェルノブイリ事故、日本における JCO の臨界事故など、原子力施設の事故は一度発生するとその社会的影響の大きさは他のエネルギー技術との比ではない。本節では、日本における原子力防災の側面から原子力の利用に伴う社会的外部性の評価材料を提供する。

### 4.3.1. わが国における災害対策

日本における災害対策は、昭和 34 年の伊勢湾台風を契機に防災対策の基礎となる法律として昭和 36 年に制定された災害対策基本法に基づいて定められている。本法の総則では、国土や国民を災害から守るために災害予防、災害応急対策、災害復旧に関する責任の所在や必要な災害対策の基本を定めることにより、総合的かつ計画的な防災行政の整備及び推進を図って社会の秩序の維持と公共の福祉の確保に資することを目的とするとうたわれている。またこれに基づいて関連する各種災害関係法規の整備が行われた。実際の防災に関しては、国、地方自治体及びその他の公共機関と住民の協力を得て必要な体制を確立して実施される。国においては中央防災会議が防災基本計画を策定し、都道府県・市町村ではそれぞれ都道府県防災会議と市町村防災会議が地域防災計画を策定する。これに基づいて、指定された国の行政機関や日本銀行、日本赤十字社、さらに各電力会社等の公共機関はそれぞれの防災業務計画を作成する。この法律は震災（地震）や風水害、火山災害、海上災害、雪害などの天災のみならず、人為的災害である鉄道災害、事故災害（航空災害など）、原子力災害にも適用されてきた。原子力災害にこの法律が適用されたことによって防災責任が明確になり、防災組織体制が強化された。

1999 年 9 月 30 日に発生した JCO 東海村ウラン加工施設での臨界事故では、3 名の作業員が重大な放射線被ばくを受け、うち 2 名が死亡するという日本では初めての原子力死亡事故となった。この JCO 事故で顕在化した課題は次のとおりである。すなわち（1）原子力安全規制の抜本的強化の必要性、（2）現行の原子力防災への教訓の二点である。（1）に関しては、核燃料加工施設などにおける臨界阻止のための対応策などの徹底と、対応策の義務を課すだけでなく継続的なチェックによる厳しい緊張感が必要であるという点を鑑みて原子炉等規正法の一部改正が行われた。（2）については、初期動作などにおける国、地方自治体の連携強化の必要性、原子力災害の特殊性に応じた国の緊急時対応体制の強化の必要性、また原子力事業者の防災対策上の責務の明確化の必要性から、同年 12 月に原子力災害対策特別措置法が制定され翌年 6 月に施行された。

### 4.3.2. 原子力防災に関する課題

JCO 事故を教訓とした原子力防災に関する課題を整理すると、（1）迅速な初動対応、（2）事故対策本部の役割の明確化、（3）住民避難・屋内退避の指導助言体制、（4）専門的支援体制、（5）適切な報道対応が挙げられる。JCO 事故当初には、状況把握が十分でなく、また臨界事故に対する認識不足と情報収集・分析の対応も十分でなかった。事故後に政府、現地、緊急技術助言組織により各本部が組織されたものの、本部ごとの役割分担は明確ではなく、たとえば東海村村長の避難判断は適切であったものの、防護措置がどの本部で決定されたものかは分かりにくいものとなってい

た。幸い現地に原研、JNC、原電などの原子力専門機関があったため多数の専門家や装備を動員できたが、他の地域で該当の事故が発生した場合に同様の対応を取れたかは定かではない。事故に関する問い合わせの窓口は明確に定められてはおらず、加えて東京からの情報発信は不十分なものとなっていた。国と自治体間の情報伝達体制が不十分であったために国際対応情報の発信に遅れが生じ、さらには誤った情報の流布も発生した。特に緊急時の情報管理としては、第一に情報収集があり、次に情報の伝達がある。状況を正確に把握し、収集した情報を効率よく蓄積・整理し、刻一刻と変化する最新の情報を活用できるような仕組みと体制を作る必要がある。また収集・整理した情報を伝達するに当たっては、情報伝達経路の多ルート化や、蓄積した情報を伝達化するにあたっての内容確認が可能な情報伝達ルートの整備も求められる。ここでは既存のルートとしてのマスコミや人的ネットワークの活用も可能である。また言葉の取り違いなどによる情報伝達不良を防止する仕組みを構築する必要がある。これには、あらかじめ定義された明確な用語の使用、用語自体の統一や情報伝達ルートの確立、分かりやすい広報、情報伝達化への内容確認が必要となる。

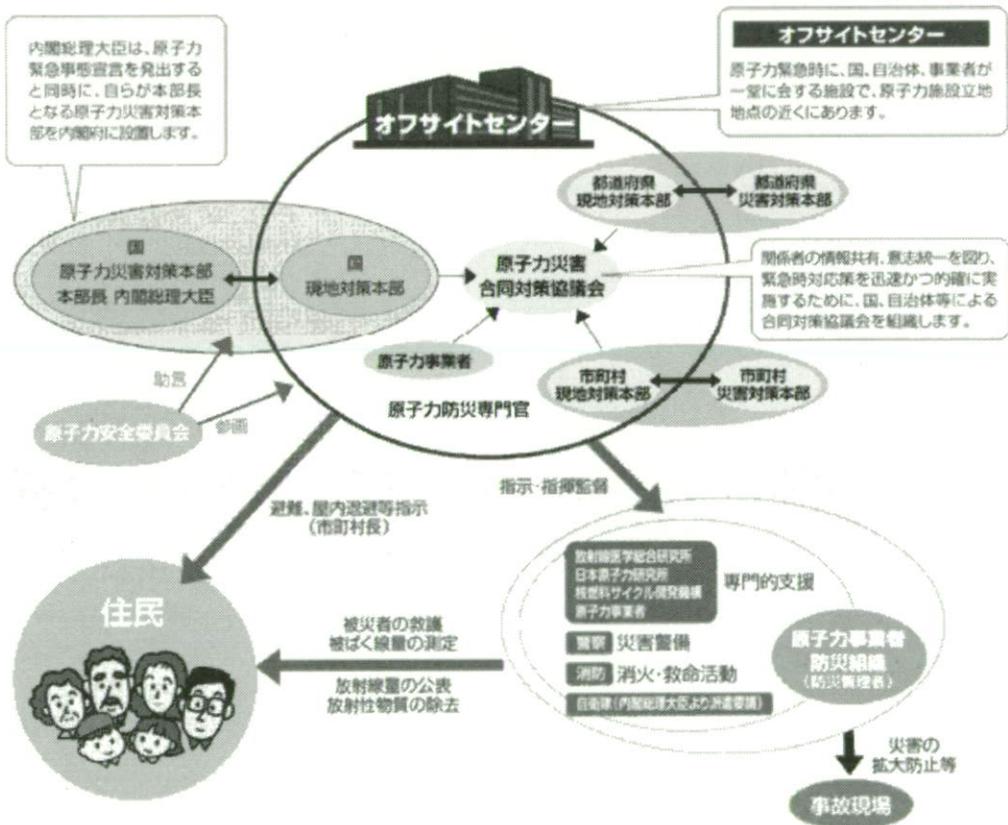


図 4.3.1 災害発生時の防災体制

### 4.3.3. 原子力災害対策特別措置法

原子力災害対策特別措置法では、先にあげた課題に対して次のように対応している。まず迅速な初期動作を行うため、原子力事業者に異常事態の通報義務を定め、原子力緊急事態においては直ちに内閣総理大臣を長とする「原子力災害対策本部」の設置（副本部長：経済産業大臣）を義務付けている。また、国と地方公共団体との有機的な連携を図るため、災害の現地に主務省庁副大臣を長

とする「原子力災害現地対策本部」を設置し、国と自治体の現地対策についての連携を高めるための「原子力災害合同対策協議会」を緊急事態応急対策拠点施設（オフサイトセンターと呼ぶ）に設置する。また、平時の義務として、原子力施設のある現地において原子力防災訓練の実施義務を定めている。国の緊急連絡対応体制の強化のため、本法に位置づけられた原子力防災専門官を現地に常駐させ、主務大臣によるオフサイトセンターの指定を行う。また上述した本部長は関係行政機関、地方自治体に対して必要な応急対策を指示することができる。既存の原子力安全委員会に対しては、その技術的助言に法的な位置づけを付与し、原子力緊急時には各種対応機能を迅速に現場に投入できる体制を整備した。さらに原子力事業者の責務を明確に定義し、そこには原子力災害の通報義務、原子力事業者防災業務計画の策定・届出義務、事業所への原子力防災管理者の配置義務、防災組織の設置と災害応急措置の実施義務が含まれる。災害発生時の防災体制を図 4.3.1 に示す。

原子力災害時の通報・原子力緊急事態宣言発出の基準は原子力災害対策特別措置法および関連の政省令において定められている。まず、通報基準については第 10 条において、発電所敷地境界付近で  $5\mu\text{sv}$  毎時以上の放射性物質を検出した場合、中央制御室等の管理施設が運転不能になった場合、原子力発電所等の固有の事象として制御棒による停止に失敗、原子炉からの熱除去に失敗、電源の異常が 5 分以上継続するなどの場合として定められている。緊急事態宣言の発出基準は第 15 条に定義されている。すなわち、発電所敷地境界付近で  $500\mu\text{sv}$  毎時以上の放射性物質を検出した場合、臨界事故が発生した場合、原子力発電所等で外部への大量の放出に至る兆候を示す事象がある場合、すなわち、原子炉停止機能の喪失、全ての非常用炉心冷却装置の作動に失敗、原子炉からの熱除去に失敗しかつ原子炉格納容器の圧力抑制機能の喪失、炉心の溶融等である。原子力安全委員会は、原子力施設等の防災対策について重点的に充実すべき地域の範囲（EPZ：Emergency Planning Zone）を定義した（表 4.3.1 参照）。

表 4.3.1 防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲

施設の種類の		EPZ のめやすの距離(半径)
原子力発電所、研究開発段階にある原子炉及び 50MW より大きい試験研究の用に供する原子炉施設		約 8~10 km
核燃料再処理施設		約 5 km
試験研究の用に供する原子炉施設(50MW 以下)	熱出力 $\leq 1\text{kW}$	約 50m
	$1\text{kW} < \text{熱出力} \leq 100\text{kW}$	約 100m
	$100\text{kW} < \text{熱出力} \leq 10\text{MW}$	約 500m
	$10\text{MW} < \text{熱出力} \leq 50\text{MW}$	約 1500m
	特殊な施設条件等を有する施設	個別に決定
加工施設及び臨界量以上の核燃料物質を使用する使用施設	核燃料物質(質量管理、形状管理、幾何学的安全配置等による厳格な臨界防止策が講じられている状態で、静的に貯蔵されているものを除く。)を臨界量以上使用する施設であって、以下のいずれかの形状に該当するもの ・不定形状(溶液状、粉末状、気体状)、不定形状(物理的・化学的工工程)で取り扱う施設 ・濃縮度 5%以上のウランを取り扱う施設 ・プルトニウムを取り扱う施設	約 500m
	それ以外の施設	約 50m
廃棄施設		約 50m

#### 4.3.4. オフサイトセンター

原子力災害対策特別措置法第12条第1項の規定に基づく最初のオフサイトセンターは、経済産業省により平成13年6月12日付けで全国14ヶ所に先立ち北海道(北海道原子力防災対策センター)が指定され、以降、平成14年3月29日付けの追加5ヶ所の指定をもって完了した。また、経済産業省と文部科学省が指定した4ヶ所のオフサイトセンターについては、平成14年2月8日付けで「上斎原村オフサイトセンター」が指定され、平成14年3月22日付けの追加3ヶ所の指定をもって完了した。オフサイトセンターは、原子力事業所との距離が20km未満であり、関係者の参集に必要な道路やヘリポートその他の交通手段が確保されていること、またテレビ会議システムや電話、FAXその他の通信設備が具備されていなければならない。また、放射線測定設備や気象及び原子力事業所内の状況に関する情報を収集する設備(SPEEDIやERSSなど)を備えていることが求められる。規模としては原子力災害合同対策協議会の設置場所を含めて床面積800m<sup>2</sup>以上あり、原子力防災専門官の執務室が設置されている必要がある。また、災害時の状況も考慮して関係者の施設内での被爆線量低減のための設置などの措置をとることが求められる。情報発信のために、報道の用に供するに必要な広さの区画を敷地内または近傍に確保すること、また代替施設が移動可能な場所に存在することなどが求められる。

オフサイトセンターに設置が求められるERSSとは緊急時対策支援システム(Emergency Response Support System)である。これは事故発生時の国による原子力災害応急対策を実施するに当たって必要となる事故状況の把握と事故の進展予測を支援するものである。ERSSは、経済産業省内の情報収集システム(ICS: Information Collection System)と原子力安全基盤機構(JNES)内の判断・予測支援システム(DPS: Diagnosis Prognosis System)及び解析予測システム(APS: Analytical Prediction System)から構成される。情報収集システムは事故時に電気事業者から送られてくるプラント情報をリアルタイムに表示し事故の状態を監視する。判断・予測支援システム及び解析予測システムは、情報収集システムが得た情報と事故挙動データシステムがデータベースより抽出した類似事象を基に事故状態を判断し、その後の進展をリアルタイムに事故進展の予測解析を実施する。これらプラント情報や予測解析結果などは、経済産業省をはじめオフサイトセンター内に設置された情報表示装置で表示することができる。

国では発電所や燃料サイクルの事故に対する対応措置を精力的に進めているところである。一方、テロに対する対応措置はこれからの課題である。通報及び原子力緊急事態に係る事象への対応としては、まず総合訓練及び要素訓練において特定の事故シナリオに対する訓練を実施している。また、様々な事故シナリオの解析結果について学習を行う。テロへの対応としては、発電所における出入管理の強化と海上保安庁の巡視船による常時パトロールの実施、またテロ対応そのものの研究に着手したところである。核物質の盗取に対しては、IAEAによる核物質管理と監視の徹底、また輸送ルート秘匿と警察・軍隊による警備の強化が求められる。

#### 4.3.5. 防災訓練

事故や災害を想定した防災訓練により、緊急事態に対処する能力をつけることや、研修・訓練を繰り返し行うことで適切な判断や行動ができるようにすることが防災研修として重要である。原子力関係の防災研修としては、その対象に応じて3つの研修がある。オフサイトセンターの参集要員対象の要員研修と機能班別研修では、オフサイト運営対応研修(原子力発電施設対象の応急対策活動に関する座学)及びオフサイトセンター機能班別訓練(上記座学の演習)が行われる。また、オフサイトセンター机上訓練として、サイクル施設対象のオフサイトセンター運営対応・機能班別研

修が行われる。原子力防災専門官を対象とした研修では、スキルアップとして緊急時対応研修と防災専門官等現地研修が行われる。これはオフサイトセンターの立ち上げ訓練であり、自治体職員も参加する。自治体職員等研修では、核燃料輸送講習会が自治体職員、警察職員、消防職員等を対象として行われる。また核物質防護研修会では、警察、海上保安庁、自衛隊等を対象として行われる。これらのほかに、危機管理研修や緊急時広報対応研修、防災訓練企画立案研修などが行われる。いずれの防災訓練においても、緊急時に情報や時間が不十分である中で適切な判断ができること、職業上の責任感や使命感を養い職業上の立場や役割に基づいた行動をすること、正しい知識を取得することを目的としている。特に放射線に対する恐怖心（目に見えなくて怖いという先入観）への対応は重要で、この先入観によって時として歪曲した流言となり実際の事故以上に二次的・三次的被害をもたらすことがある。防災訓練を行うことで放射線に対する正しい知識と対処法を身につけることが肝要である。

原子力災害対策特別措置法は、施行後同法に基づいて国、地方自治体、事業者等による原子力総合防災訓練を毎年実施することとしている。平成12年度は10月28日に東京及び島根県等において本法施行後初めての同特別措置法等関連法令、防災基本計画等の枠組みに従った原子力総合防災訓練が中国電力(株)島根原子力発電所2号機を対象として実施された。平成13年度は、東京及び北海道などにおいて北海道電力(株)泊発電所1号機を対象として、新たに完成したオフサイトセンターを使用した全国で初めての総合防災訓練が実施された。平成14年度は、関西電力(株)大飯発電所3号機を対象に実施された。

平成15年度は11月26日に九州電力(株)玄海発電所2号機を対象に実施された。11月5日に東京で事前訓練を行っている。参加自治体は佐賀県、長崎県、玄海町他で、参加数は86機関＋住民（約3800名）であった。この訓練では、情報収集・伝達能力の向上及び連携を強化すること、国の現地対応能力を強化すること、緊急事態宣言発出に係る措置の習熟、広報能力の向上、原子力安全委員会の助言機能確認、関係自治体及び原子力事業者の訓練充実を目標とした。事故のシナリオとしては、主給水管の破綻により全給水機能が喪失し（10条相当事象）、さらにすべての原子炉冷却機能が喪失（15条相当事象）し、放射性物質の漏洩にいたるというものである。訓練の実施項目は、第1段階「初動対応に係る訓練（警戒本部設営訓練）」、第2段階「緊急事態発出に係る訓練（緊急事態宣言、勧告措置等）」、第3段階「緊急事態応急対策の各種措置訓練（非難・退避の決定から放射性物質の放出停止までの変更措置）」、第4段階「事後措置に係る訓練」である。

これまで、原子力利用に当たっての防災対策の法整備、防災体制、防災訓練の実情を見てきた。原子力を防災に関する外部性で評価するためには、本節で述べたようなオフサイトセンターの開設・運用に係る外部コストや防災訓練全般にかかる外部コストを定量的に評価すること、またその負担方法の定義など、引き続いて議論が必要である。



## 4.4. エネルギーシステム評価のための標準化手法 —第三者による評価結果の理解のために—

手塚 哲央

### 4.4.1. はじめに —外部性評価の難しさ—

あるエネルギー変換システムの外部性評価を念頭に置いてみよう。そのシステムの外部性評価とは、図 4.4.1 の斜線部分に着目することを意味する。外部性とは、市場取引の当事者以外の人を受け影響のことであるが、もしその効果が大きく、かつ容易に定量評価できるのであれば、取引の外部にはいなかったはずである。そこに外部性評価の難しさがある。

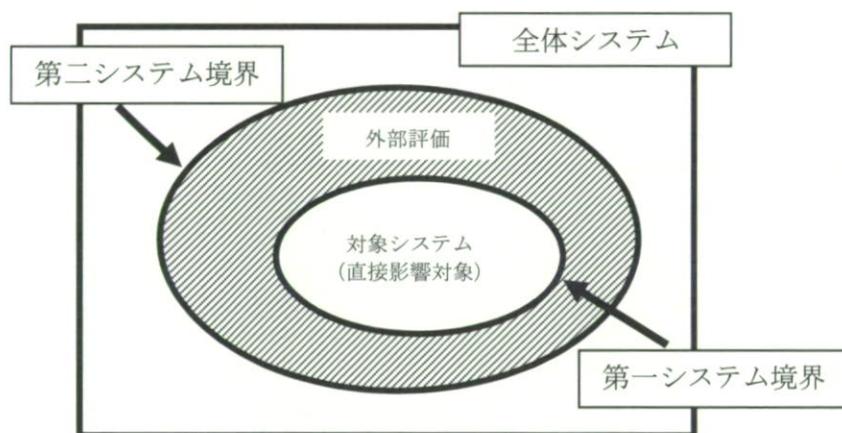


図 4.4.1 外部性評価の対象

人間とは勝手なもので、それほどいろいろなことを同時に考えることはできない。人間社会はなおさらである。一旦重要ではない、と判断されると、その効果が注目されることは、ごく一部の研究者による研究を除いてほとんどない。温室効果ガスの問題も、指摘されはじめたのはそれほど古いことではない。今まで何らかの原因で顧みられなかった効果について、定量分析の必要性、重要性が認識されはじめたとき、外部性の問題が発生するということであろう。

### 4.4.2. エネルギー問題の変遷

まず、エネルギー問題の歴史を簡単に眺めてみよう。図 4.4.2 に日本の一次エネルギー消費量の推移を示す。ここで、薪炭の消費量については、便宜上スケールを 50 倍に拡大して表示している。

さて、図 4.4.2 からは、日本の高度成長期（1960 年～1975 年）が、安価で利用価値の高い石油の普及によるものであったことが理解できる。生活における主要燃料であった薪炭の消費量が石油の導入と共に急速に減少している点からは、その変化が日本人のライフスタイルの大きな変化を伴っていたことも理解される。この頃の日本人の目標は何よりも戦後の経済復興であった。それに伴う環境被害は公にはほとんど取り上げられることのなかった時代であり、また現在の日本におけるエネルギー利用形態の基礎が作られたのもこの時期であった。

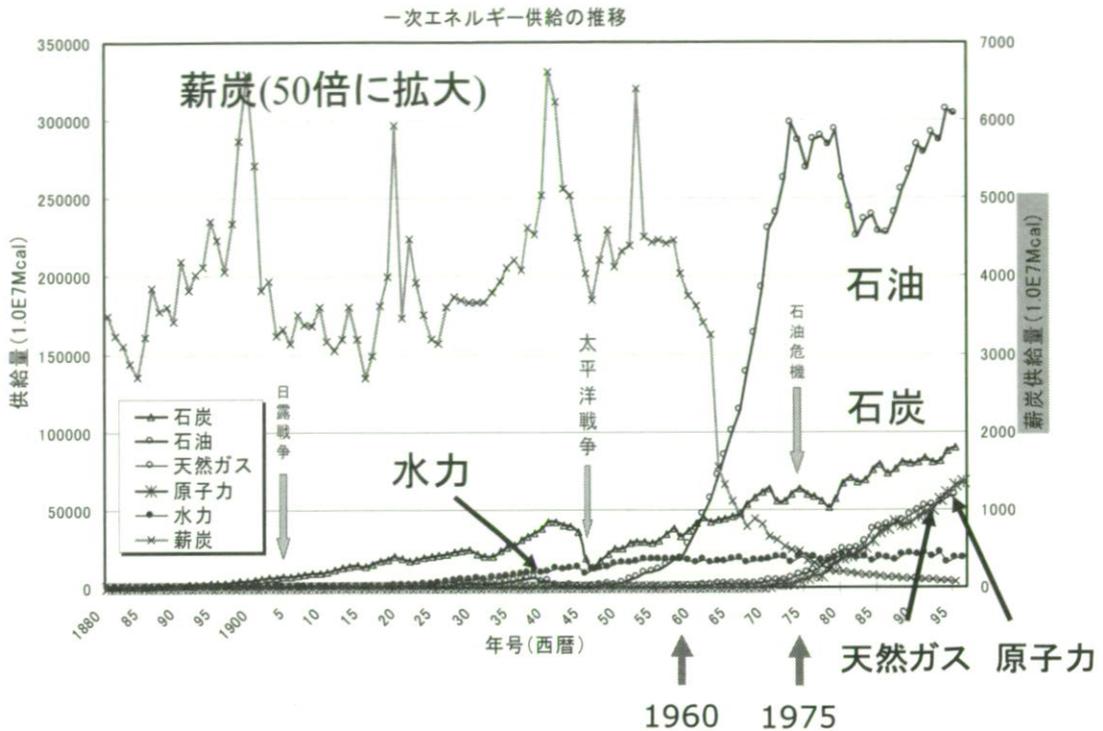


図 4.4.2 日本の一次エネルギー消費量の推移  
(出典：エネルギー経済統計要覧)

公害という言葉が定義されたのは、1967年の公害対策基本法の制定による。三重県四日市市に代表される大気汚染がそのきっかけであった。もっとも当初は、工場からの煤煙は経済発展の象徴であり、そのために多少大気が汚れることがあっても仕方のないものと思われていた。そしてこれを契機として、エネルギーに対する評価軸の一つとして「汚染」が加わることとなった。

この公害問題の発生が局所的であったことは、同じ三重県でも被害が及ばない地域の住民は他人事としてとらえていたという事実から窺い知ることができる。大気汚染の影響が局所的であったために因果関係が誰の目にも明白であり、社会的対策が急速に進むこととなった。大気汚染の原因であった工場の排煙中の亜硫酸ガス濃度は、ちょうど技術開発が進められた排煙脱硫装置の普及により大幅に減少することとなる。ただし排煙脱硫装置の電力消費量は決して少なくはなく、装置の運転を義務づける社会制度なくしては、これほどの効果は得られなかったであろう。社会制度（基盤）構築と技術開発が協同的に作用した公害対策の数少ない成功事例として海外においても頻繁に取り上げられている所以である。一方、道路交通による騒音と大気汚染の問題などのように技術的な対応を伴わない公害問題は依然として数多く残っている。そこでは、社会システムそのものを変える試みが、社会、技術の双方において求められている。

エネルギーの価値観を世界的に大きく変えた出来事として「石油危機」は重要である。それまで消費量削減を真剣に考える必要のなかった原油の値段が、1973年と1978年の2度の石油危機を通して10倍以上に跳ね上がった。この結果、産業部門を中心として省エネルギーが進展することとなる。何しろ、今まで省エネルギーという考え方すらなかったのであるからその影響は大きく、日本

においては GDP の成長をほとんど減速させることなく、エネルギー消費原単位（GDP の 1 単位あたりのエネルギー消費量）を約 3 分の 2 に削減することに成功した。しかし、この事象を経済評価の難しさと捉える傾向が見られなかったのは不思議の一言に尽きる。最近の石油価格の高騰も、石油市場の寡占状況からいつ起こっても不思議ではない現象であったと思われるが、自動車の開発目標が大型車に傾いていたのは不可思議である。

化石エネルギー資源の有限性および大気中の二酸化炭素濃度の上昇については石油危機前から指摘する研究者は存在した。しかし、世界規模でこの 2 つの有限性の問題が取り上げられるようになったのは、1987 年に国連のブルントラント委員会でまとめられた報告書「我ら共通の未来（Our Common Future）」で「持続可能な発展（Sustainable Development）」の概念が提起された頃からである。最近の環境問題の特徴づけているのがこの地球温暖化であるが、これは、エネルギー資源と環境の有限性の問題であり、換言すると、エネルギーを消費している人と、未だ消費していない人（工業化途上国の民衆および我々の子孫）との間の公平性の問題である。これは典型的な外部性の問題である。

#### 4.4.3. エネルギーシステム研究としてのシステム評価

前項から分かるように、エネルギー問題の歴史はエネルギーに対する価値観の変化の歴史ともいえる。それゆえ開発すべき技術課題も変化する価値観の影響を受ける。石油危機の際には、石炭を利用した脱石油技術開発が目標であったのに対し、現在では石炭の利用後に発生する二酸化炭素の隔離・貯留技術が関心を集めている。またバイオマスの特長として、以前は再生可能エネルギーであることが取り上げられていたが、最近ではカーボンニュートラルであることが強調されるようになってきている。

エネルギーシステム研究の全体構成の概要を図 4.4.3 に示す。技術開発と社会制度設計の可能性を考慮して将来エネルギー需給システム像についての合意形成を図り、その将来像を実現するために技術開発と社会制度設計を通して社会に働きかける。そこにはエネルギーシステム研究ならではのいくつかのポイントがある。

まず、新しい技術の可能性、社会制度の可能性を総合して、新しいエネルギー需給システム像を提示することである。そこでは、多様な新規技術を組み合わせることにより有用なシステム構成を提案し、そのシステムの費用や利害関係者間の公平性、環境負荷、社会制度も含めた実現可能性などを、前述の外部性も含めて評価することが必要となる。ライフサイクル分析（LCA）は、各種製品の製造、運転、廃棄に関わる費用や環境負荷の計算を行う手法として知られている。しかし、そのような客観的な側面の評価だけではなく、それを利用する人間社会の視点に立った、将来の不確実性等に対する人間の主観的判断を考慮した評価も重要である。

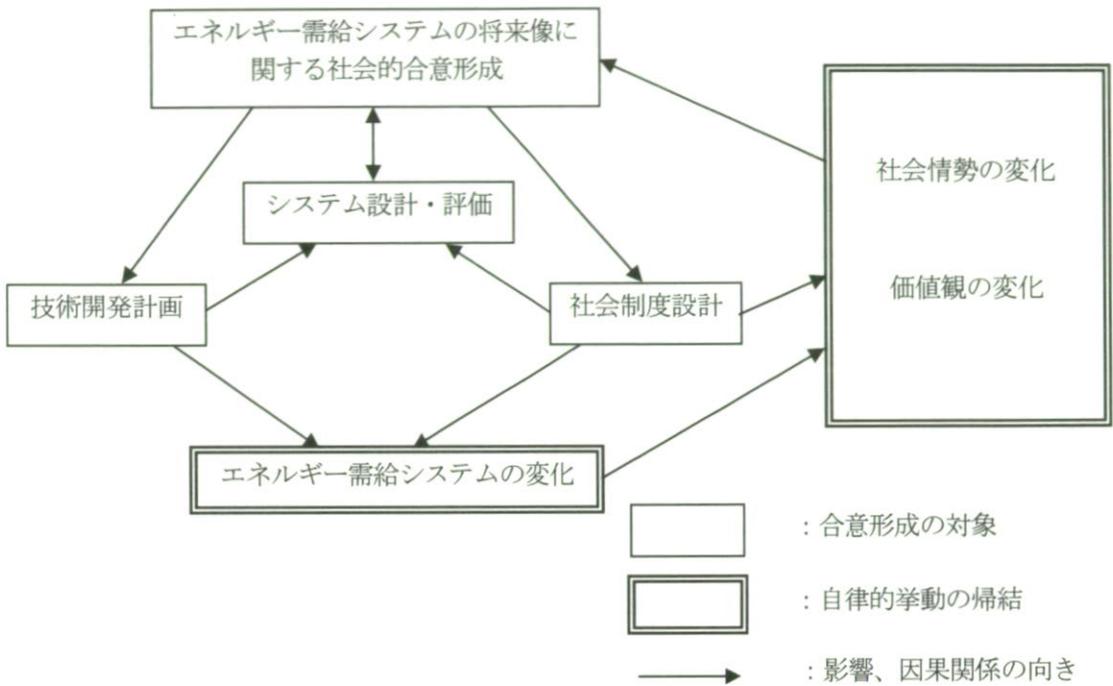


図 4.4.3 エネルギーシステム学の構成

もう一つの問題は、種々の技術開発、社会制度設計、地域の行政などに関わっている専門家の「中立的な」意見を総合して将来の目指すべき方向を決定するという点である。もちろんこの解も一つではなく、また何らかの基準の下での最適解を探すことが目的でもない。複数の将来システム像について、それらの比較評価を通して異なる分野の専門家間で合理的に「合意形成」を図ることが目的であり、文理融合型研究の採るべき一つの方向と考えられる。そのためには、種々の専門家にエネルギー政策決定の場に積極的に参加してもらうことも必要である。その合理的な合意形成を方向付けるものが各種資源やその利用技術に関わる情報であり、各種資源の有限性、原子力技術、エネルギーセキュリティ、環境保全、マイクロ・マクロ経済、人間の生活の質、国際間・世代間の公平などに対する社会における考え方である。しかし、多岐にわたる専門知識の共有という問題の困難さ故に、未だ十分には検討されずに今に至っている。

#### 4.4.4. 「エネルギーシステム評価支援センター」構想

以下では、合意形成に焦点を絞ったモデル分析の枠組を紹介する。この支援にあたる組織を「エネルギーシステム評価支援センター」と呼ぶこととする。これは、あくまでもデータベースやモデル等に関わる情報の管理組織であり、実際にデータベースの内容を提供するのは各モデル作成者である。すなわち、各モデル作成者がこのモデル標準化手法に基づいて作業を行い、その結果をセンターに提供することにより、第三者がその作業結果を活用することができる。また逆にその人は第三者が標準化手法の考え方で実施した結果を利用することができる。これが、センターの基本的構想である。そのためには、参加者がセンター構想に参加することにより、追加的作業が大量に発生しないように、その作業内容をできる限り束縛しないものとする必要がある。

現在プロトタイプを検討しているセンターの4つの基本機能を以下に示す。

- ① エネルギーシステム評価のための継承可能なデータベース構築・管理
  - ②における利用を目的とした、エネルギー消費に伴う環境影響評価のための LCI データベース、エネルギー変換技術特性データベース、地域エネルギー需給データベース等。できる限り1次データにまで遡った情報源を確保することにより、第三者による理解、継承が可能なデータベース構築を目指す。
- ② エネルギーシステム評価手法（モデル構築ルール）の標準化
 

評価の対象となるシステム境界設定や評価の方法論選択など、評価のためのデータ、モデル分析手法・手順について、評価結果の相互比較を可能とするための情報管理の枠組みを明確にする。
- ③ エネルギー・環境（複合領域）の研究・教育の場の創成
  - ①、②に基づく多様なエネルギーシステム評価手法、エネルギー消費の大気環境影響評価手法を整理、教育・研究コースの設立を目指す。またエネルギー・環境に関わる種々の素朴な疑問についての各種専門家との交流の場も提供する。
- ④ エネルギー環境システム分析・評価のための分野横断的組織形成支援
 

エネルギー政策検討のための、各種専門家の随時参加可能な、エネルギーシステム評価組織の形成を支援する。

以下、①、②について簡単に説明する（図4.4.4参照）。

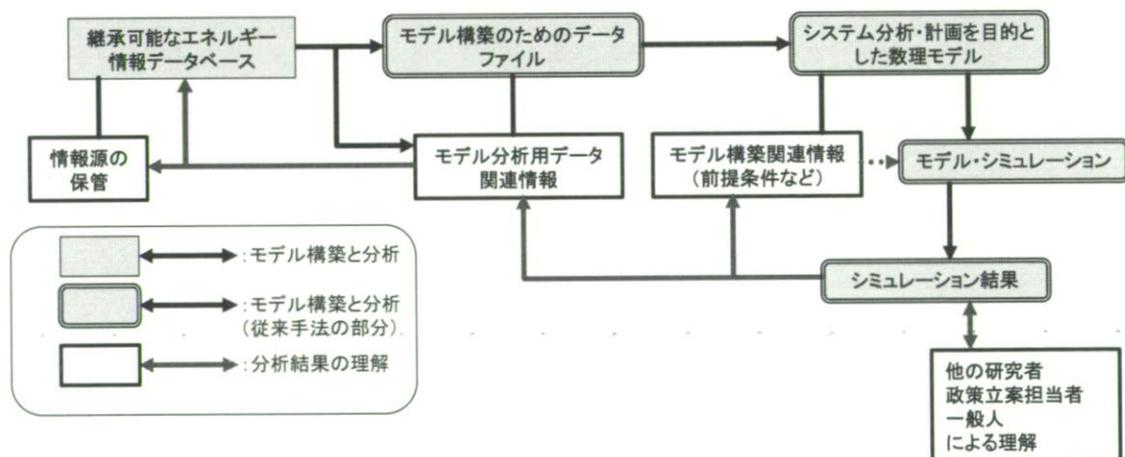


図4.4.4 合意形成指向型モデル分析手順

（①、②：モデル分析結果の共有のための情報を提供する枠組み）

#### （1）継承可能なデータベース

エネルギーシステム分析のためのデータとしては、エネルギー需給、エネルギー変換・利用技術、エネルギーインフラなどに関わるものが含まれる。そして、データベースの第三者の利用を促進するためには、含まれる各データの根拠を第三者にとって理解しやすいものとし、データベースを第三者に継承可能なものにすることが必要である。そのためにはデータの説明はもちろんのこと、その情報のオリジナルな出典をページ番号まで含めて明記するとともに、入手に時間のかかることの

多い（場合によっては入手不可能な場合もあり得る）資料のコピーや原本（電子ファイルを含む）をしかるべき場所に保管することが有効である。

#### （2）エネルギーシステム評価手法の標準化

ある新しいエネルギーシステム導入効果の分析・評価を行う場合、前述のシステム技術の特性データの他に、システム境界、比較対象とするエネルギーシステムの選定、システム評価に際しての種々の前提条件が重要となる。そして、第三者がその分析結果を理解しようとした場合には、その目的に応じた詳細さで、それらの情報を把握する必要が生じる。

多くのエネルギーシステム分析モデルは、通常、エネルギー生産、エネルギー輸送、エネルギー変換、エネルギー貯蔵、エネルギー消費の各プロセスを選択的に含む。そのため、多くの評価作業において共通に利用されると想定される部分のモデル情報を必要なデータと共に随時参照可能な形で公開することは、新たにモデル開発をしようとするものはもちろんのこと、評価結果を比較検討しようとするものにとっても有益である。この共通モデルを「ベースモデル」と呼ぶ。そして、このベースモデルに対して、各分析・評価の対象となるシステムに特化した、ベースモデルの拡張に相当する部分の情報（付加モデル）を添付する。この部分に関しては、ベースモデルとは異なり、各評価結果に付随して公開されることとなる。情報の表現方式については極力負担の少ないものとする必要がある。標準化手法の詳細については、文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

#### 4.4.5. おわりに

大規模な社会システムにおける政策決定のための合理的な合意形成を目的とした、評価手法の標準化とその業務を支援するエネルギーシステム評価支援センター構想を紹介した。本節で述べた評価の枠組は、最初は追加的な労力を伴うこととなる。しかし、その結果として、将来のモデル分析・評価における労力低減と作業結果の有効利用、そしてエネルギー政策策定の際の合意形成を期待することができる。

人類が取り組むべき問題は、地球環境問題、環境ホルモン、エネルギー資源問題、非エネルギー資源問題、経済問題、人口問題、水・食糧問題と、挙げればきりが無い。外部性という言葉からも理解できるように、検討すべきシステム境界も非常に広範囲にわたるものとなっている。しかし、難しくとも人類はその全てに対処していかなければならず、ローカルな情報で曖昧に処理して事足りていた時代は過去のものであり、これらの問題に真剣に取り組むときが来ていると考えられる。そして真剣に取り組もうとするときに、評価に関わる論文や報告書を読んでいただければ、ここで主張する内容をご理解いただけるものと考えられる。

#### 参考文献

- (1) 山崎直子、手塚哲央：エネルギーシステム評価のためのモデル分析手法標準化の検討、第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、pp.515-518（2006）

## 4.5. エネルギー安定供給問題

内山 洋司

### 4.5.1. エネルギー供給の基本要件

私たちは、豊かさと快適さを得るために大量のエネルギーを水や空気と同じように無意識に使っている。しかし、エネルギーは水や空気と違って自然に得られるものではない。エネルギーの供給には3つの基本的な要件が求められている。

それは①「エネルギーセキュリティの確保」：長期にわたり安定に供給していけるエネルギー資源を確保する、②「供給基盤の整備」：入手した資源を使いやすいエネルギー形態に変換するための施設を建設し、信頼性の高いエネルギーサービスを行う、③「社会的受容」：資源をエネルギーとして利用していく一連の工程で環境への影響や事故による被害をなくし、人々が環境や安全の面でエネルギーを安心して利用できるようにしていく、ことである。

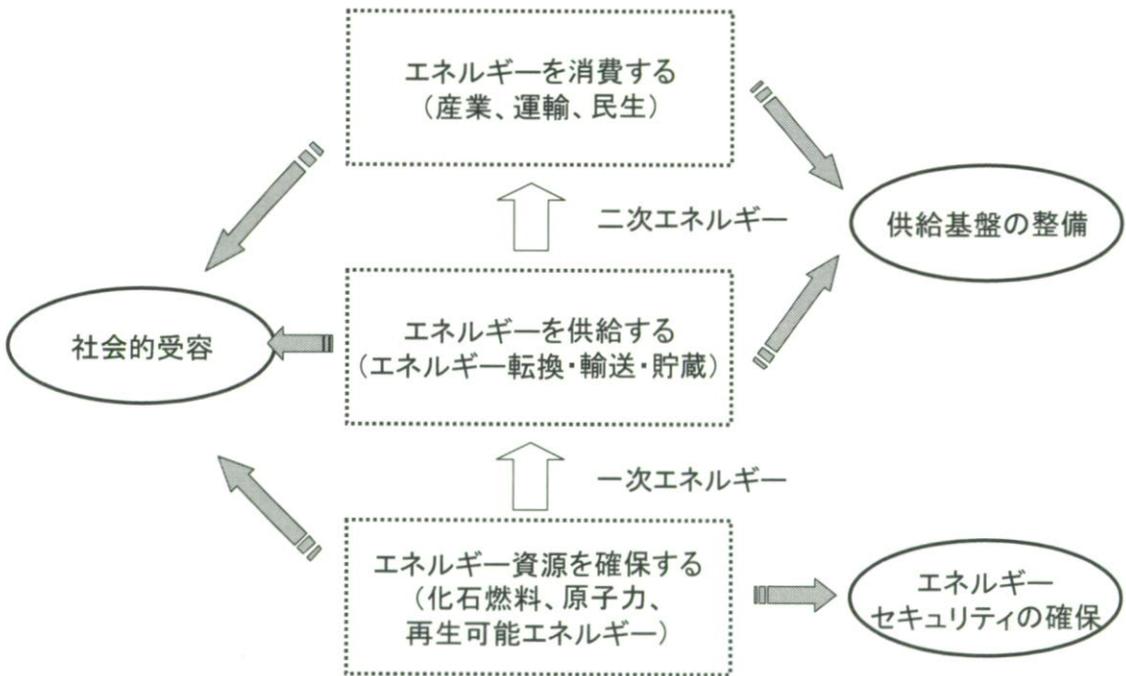


図 4.5.1 エネルギー供給の3つの基本要件

基本要件を完全に満たすエネルギーはないが、社会が持続的に発展していくためには要件を満たす努力が必要になる。各国は基本要件が満たされるように、社会、経済、および技術の面から状況の変化に応じて対策を立てている。しかし、将来、発生する恐れがある不確実なリスクを含めて対策が施されているとは限らない。表 4.5.1 は、それぞれの基本要件に対してわが国において考えられるリスクと対策を示したものである。表に記されているリスク要因のうち、多くのものについては何らかの対策が講じられているが、地球温暖化や核拡散のように具体的な対策がとられていない外

部性問題となっているものもある。

- ①エネルギーセキュリティの確保：長期にわたり安定かつ安価なエネルギー資源を確保していく必要がある。短期的には、化石燃料の資源枯渇の心配はないが、安定供給を脅かす不安要因として、需給逼迫による燃料価格の高騰、中東の政治情勢の変化などによる突発的な石油供給の途絶が考えられる。対策としては、資源探査、石油備蓄、外交活動、それに代替エネルギー開発がある。
- ②供給基盤の整備：消費者のニーズに合ったエネルギーサービスが行えるように、電力、ガス、石油などのエネルギー供給施設を構築し運用していく必要がある。エネルギー源の新たな選択があれば供給施設の再整備が必要になる。原子力発電所や火力発電所など大型施設については立地問題とプラントの老朽化への対応が求められている。
- ③社会的な受容：人々が安心して生活していくためには、エネルギー供給施設の影響を最小にし、事故を発生させない対策が必要になる。化石燃料の消費による大気汚染と浮遊粒子状物質の健康被害、地球温暖化、原子力施設からの放射性物質の漏洩、さらに予期できない重大事故（タンカー事故、原発事故など）への不安が問題になっている。

表 4.5.1 基本要件のリスク要因と対策

	リスク要因	対策
エネルギーセキュリティの確保	資源枯渇（長期） 資源の偏在性 供給途絶（資源保有国、シーレーン） 燃料価格変動	備蓄 資源開発 供給国の分散、予防的な外交 代替エネルギー開発 エネルギー有効利用技術の開発
供給基盤の整備	立地問題 大型設備投資 離島・僻地への供給 高経年化設備 需要変動（負荷率の悪化、季節・時間帯 負荷変動） 停電（自然災害、ヒューマンエラー、輪 番停電）	産消対策（地域振興、相互協力） 長期投資の補償制度 ユニバーサルサービス（*） 設備診断、寿命予測 デマンドサイドマネジメント（需給調整 契約、季節時間帯別料金など） エネルギー貯蔵（化石燃料、電気、熱） 予備力
社会的な受容	事故（炭坑事故、タンカー座礁、ガス爆 発、ダム決壊、原子力事故、風車への落 雷など） 環境汚染（大気、水、土壌） 地球温暖化 高調波・電磁界 風評被害 テロ行為、核拡散	技術開発（安全、環境） 保安管理、モニタリング 緊急時対応システム 代替エネルギー・高効率技術開発 リスクコミュニケーション 国際・国内リスク管理システム

\*ユニバーサルサービス：誰もが平等にエネルギーを利用できるようにしていくサービス。

#### 4.5.2. 基本要件からみたエネルギー源の特徴

社会で使用されているエネルギー源には、化石燃料、原子力、再生可能エネルギーがある。基本要件をすべて満たすことができるエネルギー源はなく、それぞれが異なる利点と欠点を持っている。エネルギー資源の利用とは、経済的な制約を考慮しながら各資源の欠点を克服し、利点を最大限に発揮できる利用方法を考えていくことになる。

##### (1) エネルギーセキュリティの確保

エネルギーセキュリティの面からエネルギー資源の特性を表すと「賦存量」と「安定性」に分類できる。エネルギーは産業活動や人々の暮らしを支えていく上で不可欠なものであり、社会は豊富な賦存量を持つエネルギー資源に頼らざるを得ない。

化石燃料は比較的安価に入手しやすいことから世界で最も広く利用されているエネルギー源となっている。化石燃料には石油、天然ガス、石炭があり、その賦存量を表わす指標の一つである可採年数は石油と天然ガスが数十年、石炭が200年以上になる。原子力のエネルギー源であるウランの可採年数は、石油や天然ガスとほぼ同じである。化石燃料とウランは枯渇資源であるために、長期的に見ればいずれはなくなってしまう資源である。

それに対して、太陽エネルギーなど再生可能エネルギーは枯渇する心配がない。地球表面に降り注ぐ太陽エネルギーは膨大で、その年間エネルギー量は世界のエネルギー消費量の約1万倍にもなっている。このように化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの資源量は豊富なことから、当面はエネルギー資源の枯渇に対しての不安は考えられない。

エネルギー資源の中で化石燃料は、エネルギー密度が高く、採集、輸送、貯蔵において技術的、および経済的に優れた特性をもっている。現在、世界の商業用エネルギーの約9割が化石燃料によって供給されている理由がそこにある。優れたエネルギー特性をもっている化石燃料は、その資源が安定に利用できる間は社会の主要なエネルギー源であることは間違いない。

原子力の燃料であるウランの資源量は、可採年数で約60年となっており石油や天然ガスとほぼ同じような値である。現在の確認埋蔵量からみればウランは長期に安定して供給できる資源であるといはいえない。資源を安定に確保していくためには化石燃料と同じように常に資源を開発していかなければならない。資源開発にはウラン鉱山の新規開発と海水中に含まれているウランを回収する技術開発がある。また、資源量を増大する別の方法として、ウランからプルトニウムを製造する高速増殖炉などの技術開発がある。天然ウランの99.3%は、そのままでは核分裂することができないウランの同位体であるウラン238である。ウラン238に中性子を照射するとプルトニウムが得られる。プルトニウムは軽水炉の中でも生産されているが高速増殖炉を使うことで燃えた燃料以上のプルトニウムを生産することができる。プルトニウムを軽水炉の燃料として利用していくプルサーマルは、既存の原子炉でプルトニウムを有効に活用する技術で、高速増殖炉はプルトニウムを積極的に利用していく技術である。高速増殖炉の燃料サイクルが確立されるとウランの資源量は約60倍にまで増大することになり、その結果、ウランの可採年数は4,000年近くにまで高まる。

原子力の燃料であるウランの特徴はエネルギー密度が大きいことである（正確にはウランは燃料ではない）。原子力は僅かなウランの核分裂反応で大量にエネルギーを取り出すことができる。この優れたエネルギー特性から、原子力の場合、供給コストに占めるウラン費用の割合が小さくなる。例えば新規に建設される原子力発電所の発電コストに占めている核燃料サイクルコストは全体の約2~3割であり、ウラン精鉱費だけでみれば5%以下である。参考までに火力発電所の燃料費の割合は3~6割である。このことから原子力発電は、火力発電のように燃料価格の上下で発電コストが大

大きく変動するといった心配はない。

再生可能エネルギーの種類は豊富で、水力、太陽光、太陽熱、風力、海洋エネルギー、地熱、バイオマスなどがある。再生可能エネルギーの特徴は、豊富な資源量と供給途絶の不安がないことである。しかし、入手できるエネルギーの量となると、気象など自然の影響を受けやすいために国や地域によってその量は大きく異なる。また、エネルギー密度が化石燃料やウランに比べて希薄であるために生産エネルギー量あたりのコストが高いといった問題を抱えている。さらにエネルギーを貯蔵したり輸送したりすることも技術的かつ経済的にみて容易ではない。経済性を考えると再生可能エネルギーは、入手できる場所で直接利用していくローカルエネルギーとしての普及が望ましい。それにはそれぞれの地域で資源のポテンシャルを技術的および経済的な面から見極めていくことが大切となる。

## (2) 供給基盤の整備

エネルギーは需要に見合った供給力を常に確保しなければならない。また、エネルギーは、季節、月、日、時刻などでたえず変動するエネルギー需要に合わせて信頼性を損なうことなく供給していかなければならない。エネルギー供給施設はライフラインとも呼ばれており、水道や道路と同じ社会基盤施設の1つである。「供給基盤の整備」とは、「供給力」となるエネルギー基盤施設の構築と、「信頼性」を高めることで消費者に質の高いエネルギーサービスを行うことである。

エネルギーは自然から与えられた状態のまま使うことは少なく、ほとんどが他のエネルギー形態に変換してから利用されている。石油はガソリンやナフサなどの石油製品に、ウランは発電所で電気に変換されている。使いやすいエネルギーになるまでには、燃料の採掘から精製、貯蔵、輸送、変換など一連の供給施設を建設し運転しなければならない。

化石燃料の中で液体である石油は、貯蔵と輸送が比較的容易な燃料である。気体燃料である天然ガスを利用していくには輸送用にパイプラインやLNG基地（液化設備と気化設備）が、固体である石炭の場合は運搬設備、貯炭場、灰捨て場が必要になる。そういった施設は大型であるために、その整備には巨額な資金を調達するだけでなく地元の合意を得る必要がある。また、化石燃料を運ぶためには、石油タンカー、LNG船、鉱石船といった輸送機関も調達しなければならない。

ウランを燃料とする原子力は、わずかな燃料で大量のエネルギーを発生することができる。例えば発電出力が100万kWの石炭火力発電所を1年間稼働すると230万トンの石炭が必要になるが、原子力発電所の場合、同じ出力の発電所で必要なウラン量は30トンで、そのうち実際に燃えている量はわずか0.9トンである。

原子力発電にはわずかな燃料でエネルギーを大量に発生できるという利点があるが、一方で燃料の製造と廃棄物の取り扱いについては火力発電よりも複雑になるといった問題がある。鉱山で採掘されたウランは、発電用の燃料になるまでには精錬、転換、濃縮、再転換、加工といった過程を経なければならない。また発電した後に発生する使用済燃料は、一時的に貯蔵された後に、再処理によって有用なプルトニウム・ウランを取り出し、残りの高・低レベル廃棄物は処理処分されなければならない。また、すべての施設で放射性物質を扱っているために施設の建設と運転には安全面において十分な対策を施しておく必要がある。

再生可能エネルギーはエネルギーの種類が多いために、使いやすさは種類によって異なっている。木材や有機廃棄物などのバイオマスは、化石燃料と同じように燃料として利用される。木材は伐採、採集・運搬、乾燥などの施設が、廃棄物は収集や分別、ものによっては燃料化の施設が必要になる。バイオマスのエネルギー密度は化石燃料に比べて小さいために、そういった燃料供給施設にかかる費用は化石燃料に比べて割高になる。

バイオマス以外の再生可能エネルギーである水力、風力、太陽光、地熱は、エネルギー源が燃料でないためにバイオマスのような燃料施設は要らない。しかし、太陽熱温水器や太陽光発電のようにその場で直接利用できるもの以外は、生産されたエネルギーは需要地まで運ばなければならない。エネルギーの輸送は、地熱のように熱として運ばれるものもあるが、その多くは電気のように価値の高い二次エネルギーに変換して運ばれている。

再生可能エネルギーの多くに共通した問題点は、希薄なエネルギー源と年間の設備利用率の低さによる発電コストの増加である。一般に、出力あたりでみた変換設備の費用は高く、また年間を通して常時、エネルギーが得られるとは限らないために、発電量あたりの変換設備の費用が割高になる。同じことは輸送設備についてもいえ、経済性を考えると再生可能エネルギーはできるだけローカルエネルギーとして利用していくことが望ましい。

社会のエネルギーの使い方は季節、曜日、時間によって絶えず変動している。その変動に合わせてエネルギーは供給されなければならない。エネルギーの供給不足を回避するためには、燃料の貯蔵と供給設備の整備が必要になる。特にそのままの状態では貯蔵できない電気は、停電すると社会に大きな影響を与えるために、電力の最大負荷に合わせて電力設備を確保しておかなければならない。大型電力設備の建設には時間がかかるために、将来の電力需要をできるだけ正確に予測して事前に適切な電源計画を立てる必要がある。

化石燃料と原子力のように燃料を使って発電する技術は、需要の最大負荷に合わせて電気を供給することができる。再生可能エネルギーのうちバイオマス、水力、地熱も貯えられたエネルギーを利用していることから、需要の変動に合わせてある程度まで供給することができる。しかし太陽光や風力となると間欠的なエネルギーであるためにそうはいかない。風の運動エネルギーを動力に変換する風力発電は、気ままな風に合わせて発電するために電気の供給が自然任せとなってしまう。風力発電の電気出力は気象状態によって変動するため、最大負荷が発生する最も大切なときに発電できるという保証はない。また電気の電圧や周波数も変動しやすいといった課題もある。間欠的なエネルギーである太陽光発電や風力発電によって社会に電気を安定して供給していくには、電力貯蔵技術やバックアップ電源といった補償設備を別に設置しなければならずコスト高となる。

### (3) 社会的な受容

「社会的な受容」は「環境性」と「安全性」に大別できる。「環境性」とは、エネルギーの生産、製造、利用の過程において人々の健康や生態系に与える影響をできるだけ小さくすることである。化石燃料を使ったエネルギー技術は、利用時に窒素酸化物や硫酸酸化物といった大気汚染物質と、地球温暖化の原因といわれている二酸化炭素を放出する。現在、利用している化石燃料の多くは発熱量が高く不純物も少ない比較的良質のものであるが、その資源量には限りがある。私たちの子供や孫の時代になると、消費の増大が進んで良質な化石燃料の資源量も次第に少なくなり、次第に重質油やピートなど質の悪い資源に依存するようになっていく。その場合、化石燃料に含まれている有害物質や大気汚染物質、それに地球温暖化といった環境問題が深刻になっていくおそれがある。化石燃料の利用には事故への対策も必要となる。石油はタンカーの座礁、石炭は炭坑での爆発や落盤事故、天然ガスはガス漏れや火災といった事故が発生する可能性がある。人々が安心して化石燃料を利用していくには、事故を事前に防止する対策と事故が発生しても災害を最小限に食い止める対策が必要となる。

原子力の利用も放射性廃棄物の扱いと安全の問題に課題がある。原子力発電所から排出される核分裂生成物の正味の量は、発電出力が100万kWのプラントで1年間に約1トン程度である。同じ電気出力の石炭火力発電所を1年間運転すると、約400万トンの二酸化炭素と30万トンの石炭灰が

放出される。原子力発電の特徴は、火力発電に比べて廃棄物の量が非常に少ないことである。もちろん量は少ないとはいっても、放射能がある廃棄物は危険である。放射性物質は一旦、外部に漏洩すると長期にわたり生態系や人々の健康に影響を与える恐れがある。低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物の処分に対しては長期間にわたり放射性物質が外部に漏洩しないような対策が必要になる。また原子力施設の事故や、あるいは核拡散に対しても人々が安心できる徹底した対策を構築しなければならない。化石燃料とウランは、「エネルギーセキュリティの確保」と「供給基盤の整備」において優れていたが、「社会的な受容」では環境と安全を守るための対策が不可欠となる。

「社会的な受容」に優れているエネルギーは再生可能エネルギーである。多くの再生可能エネルギーは発電時に汚染物質を出すことはない。また原子力や化石燃料を使う設備よりも安全性は高い。もちろん環境への影響や安全性の問題が全くないわけではない。地熱発電の場合、地下から汲み上げた蒸気あるいは熱水中に環境汚染物質が含まれていることがある。ゴミ焼却炉からはダイオキシンが、バイオマスからは僅かではあるが有害物質や光化学スモッグの原因となる揮発性有機化合物が燃焼時に発生するおそれがある。水力発電はダムを建設すると生態系への影響や景観問題、あるいはダムの決壊といった事故が発生する可能性がある。太陽光発電は、電力系統の停電時や震災などの事故時、あるいは発電設備の廃棄時に自ら発電しているために保守員や作業員が知らずに感電する事故の心配がある（アイランディング事故）。また、半導体シリコンの製造時に洗浄に使用しているフロンは環境対策が必要になる。風力発電の場合は、渡り鳥の被害、高調波による電波障害、騒音、落雷といった問題を解決していく課題がある。

表 4.5.2 基本要件からみた化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの特徴

	化石燃料	原子力	再生可能エネルギー
エネルギーセキュリティの確保 (賦存性、安定性)	<ul style="list-style-type: none"> <li>石炭を含めた資源量は豊富でコストは安価。</li> <li>価格変動が大きく供給途絶への不安がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>プルトニウムを含めた資源量は豊富でコストは安定かつ安価。</li> <li>燃料途絶の不安は小さい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>資源量は潜在的に豊富だがコスト高。</li> <li>供給途絶がない</li> </ul>
供給基盤の整備 (供給力、信頼性)	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料を供給するインフラ施設の整備。</li> <li>設備の信頼性と負荷への追従能力に優れている。</li> <li>発電設備の電気の質も高い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>核燃料サイクル施設の整備。</li> <li>設備の信頼性は高い。</li> <li>発電設備の電気の質は高い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>季節、週、日で出力が変動する。</li> <li>太陽光や風力など間欠的エネルギーによる発電施設の場合、出力、電圧、周波数に変動がある。</li> </ul>
社会的な受容 (環境性、安全性)	<ul style="list-style-type: none"> <li>大気汚染物質と温室効果ガスの放出。</li> <li>タンカーの座礁、ガス爆発、炭坑事故の不安がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性廃棄物の隔離。</li> <li>重大事故と核拡散問題への不安がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最もクリーンで安全とされている。</li> </ul>

#### 4.5.3. 過去における石油供給の脅威

エネルギー安定供給に対する脅威は、おおよそ短期的脅威と中長期的脅威とに分けることができる。短期的脅威とは、輸入エネルギーの不意の供給削減・中断であり、数ヶ月からせいぜい数年間継続するものである。これに対し、中長期的脅威とはエネルギー資源の枯渇であり、数十年以上に及び継続しうるものである。

エネルギー資源の枯渇については、世界の原油生産量が過去数十年で北米地域と旧ソ連地域を除き増加傾向にあるなど、現在までのところ、日本のエネルギーセキュリティに対する深刻な脅威となるには至っていない。一方、輸入エネルギーの不意の供給削減・中断については、原油の需給逼迫や先物取引による価格高騰、日本と中東を結ぶシーレーン海域の紛争の脅威、2001年9月に発生した対米同時多発テロとその報復による中東諸国への影響など、輸入燃料の供給途絶に至るような不安要因が増大しつつある。

日本は主要エネルギーの大部分を海外からの輸入に依存しており、輸入エネルギーの安定供給を確保し国民生活の安全を保障することは、国の当然にして極めて重要な任務である。日本への原油輸入の八割以上を占める中東地域は、政治的に非常に不安定な地域であり、過去においても、第四次中東戦争に伴う第一次石油危機によって、日本国内は輸入原油中断の危機という極めて重大な事態に直面し、国内経済はその後長期にわたって混乱を余儀なくされた。その後も、イラン革命とイラン・イラク戦争に伴う第二次石油危機、イラクのクウェート侵攻に伴う湾岸戦争、それに米国によるイラク攻撃が続き、その度に、日本はその小さからぬ余波を受けてきた。

第一次石油危機は、その発端となったのが第四次中東戦争であり、これはイスラエル対エジプト・シリアの戦争であったが、イスラエル、エジプト、シリアはいずれも日本に対する主要な原油輸出国ではなく、また、第四次中東戦争勃発後に中東産油諸国による原油価格の大幅な引上げと非友好国への原油供給削減が実施されたものの、当時の日本と中東諸国の関係は比較的安定していた。したがって、第一次石油危機において日本に対する原油供給削減・中断の恐れはなく、実際に、第一次石油危機期における原油輸入は量的に最も安定していたにも拘わらず、戦後日本が直面した初めてのエネルギー危機ということもあり、国内に混乱が広まり、また日本政府が強力な総需要抑制政策と金融引締めという誤った対応を取ったため、国内の経済活動はその後長期にわたって停滞した。

第二次石油危機は、イラン革命とそれに引き続くイラン・イラク戦争が発端となって発生した。中東産油国は、第一次石油危機の際と同様に段階的に原油価格の引き上げを実施した。イラン革命とイラン・イラク戦争の当事国であるイランは、当時日本の第二の原油輸入先であった。イランからの原油供給が中断したことで、日本の原油輸入は量的に不安定性を増し、輸入額は原油価格の高騰と相俟って最も不安定になり変動した。しかし日本国内では、第一次石油危機で得られた教訓を生かし、比較的冷静な対処が取られ、国内の混乱は避けられた。

湾岸戦争は、イラクがクウェートに侵攻したことによって発生した事態であり、当時日本の主要な原油輸入先であったイランとクウェートからの原油供給が中断したことにより、日本の原油輸入は量的な不安定性が高まった。しかし、事態に伴う原油価格の高騰が短期でかつ小規模に終わったため、額的には安定していた。国内においても、湾岸戦争に伴うエネルギー問題はさほど深刻視されなかった。

日本のエネルギー輸入に対する脅威は、政治的・軍事的要因に基づくものだけではなく、なって来ている。原油が他の製品と同じように先物市場で取引されるようになってから、原油価格が国際市場の動向によって大きく変動する恐れが出てきている。1999年以降の原油価格の高騰は、消費国の

在庫放出と OPEC 諸国の生産調整が原因で国際市場において需給逼迫が生じたことによる。

1999 年以降の原油価格高騰は、当時の原油価格低迷状況に危機感を持った中東産油国が、中東以外の産油国と共同で減産を実施したことにより発生した事態であった。しかし二度にわたる石油危機や湾岸戦争と異なり、事態の原因となったのが政治的・軍事的要因に基づくものではないため、日本と産油諸国との原油取引は平常的に行われ、日本の原油輸入は額的に最も安定しており、量的にも安定していた。

しかし、2001 年 9 月に発生した対米同時多発テロを契機にして米国によるイラク侵攻は中東諸国の政治情勢を再び悪化させることになった。原油価格は 2003 年から再び高騰し始めた。原油高の原因にはいくつかの要因が考えられる。まず、中国やインドの急激な経済成長による原油需要の高まりがある。中国はすでに日本を抜いて世界第二位の石油消費国になっており、その消費量はさらに増大していくと予測されている。別の要因として、主要な産油国である OPEC（石油輸出国機構）諸国が、大幅な増産に応じず生産量を調整してきたことがある。サウジアラビアなど産油国には 1980 年代後半の石油需要の増大に対応するため生産枠を大幅に増加した結果、原油価格が暴落し中東諸国の経済を悪化するという事態を招いたという苦い経験がある。その他、将来の価格上昇を見込んで原油の現物や先物商品を買占めている投機家の活動、それに、イラク、イラン、イスラエルなど中東諸国の不安定な政情も影響を与えている。原油の生産コストは中東でバレルあたり 4 ドル程度、米国でも 6 ドルから 13 ドルである。2006 年の 6 月には 70 ドル代にまで高騰し、産油国、石油系メジャー、そして一部の投資家が得ている巨大な利益であるオイルマネーが、今後、どのように世界に還元されていくのかが注目される。

#### 4.5.4. 燃料価格の高騰がもたらす産業影響

ここでは原油価格の高騰がもたらす産業への直接間接の経済影響を明らかにすることを目的に、産業連関分析法によって分析した結果を紹介する。産業連関分析法とは、ある産業部門の財貨・サービスの最終需要が変化した場合、産業間の直接間接的な相互依存関係を通して産業全体に与える効果がどの程度になるかを、具体的な数値として部門別に分析する手法である。分析は列数と行数の異なる産業連関表の基本表を、行部門および列部門の統廃合によって正方行列にした。正方行列にした 1975 年（406 部門）、1980 年（405 部門）、1990 年（407 部門）、1995 年（397 部門）の産業連関表を用いて、第一次石油危機期、第二次石油危機期、湾岸危機期、OPEC 生産調整期について、原油価格を実質額で一定額だけ変動させた場合の産業に及ぼす影響を分析した。

図 4.5.2 は短期的脅威の発生によって原油価格の変動が産業へ波及した影響を示したものである。図は過去の変動期において原油価格が標準偏差分だけ変動したとき産業全体に与えた価格高騰の計算結果である。

図から第一次石油危機と第二次石油危機では産業が原油の価格変動に対して非常に大きな影響を受けていることがわかる。その理由として、第一次石油危機期では原油価格の変動額（標準偏差）が 12.3 円、第二次石油危機期では 16.7 円と大きかったのに対して、湾岸戦争期では 4.5 円、OPEC 生産調整期では 3.7 円と小さかったことが挙げられるが、産業構造の違いも大きな要素となっている。

図 4.5.3 は産業構造の違いを調べるために、原油価格を一定額（1 リットルあたり 1 円）だけ変動させたときの産業への波及効果を計算した結果を示したものである。棒グラフは産業全体の結果で、折れ線グラフは原油価格の影響を受けやすいと考えられる石油製品、石油基礎化学製品、自家用旅客自動車輸送、事業用電力部門についての結果である。

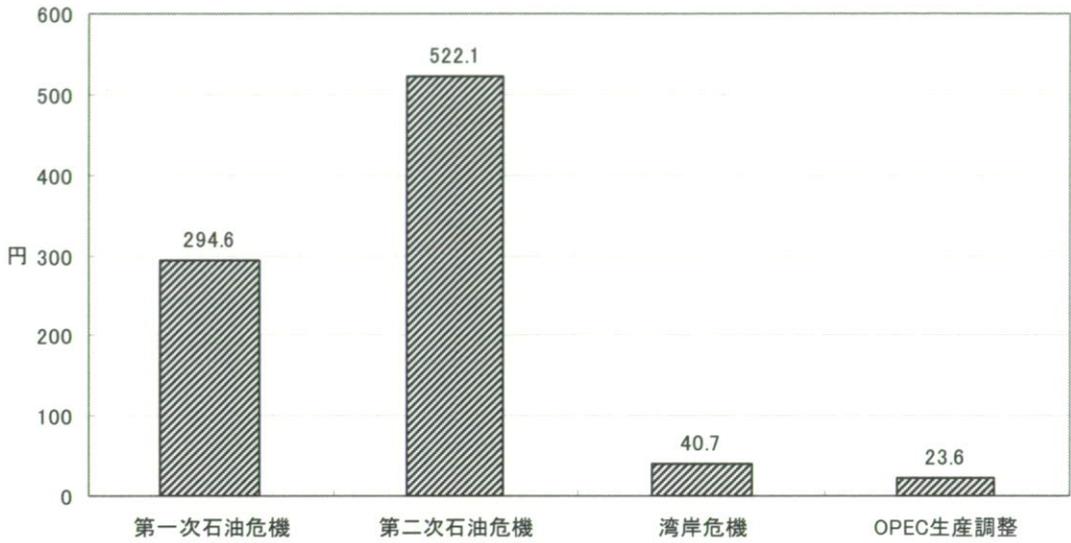


図 4.5.2 原油価格の波及効果 (価格高騰期)

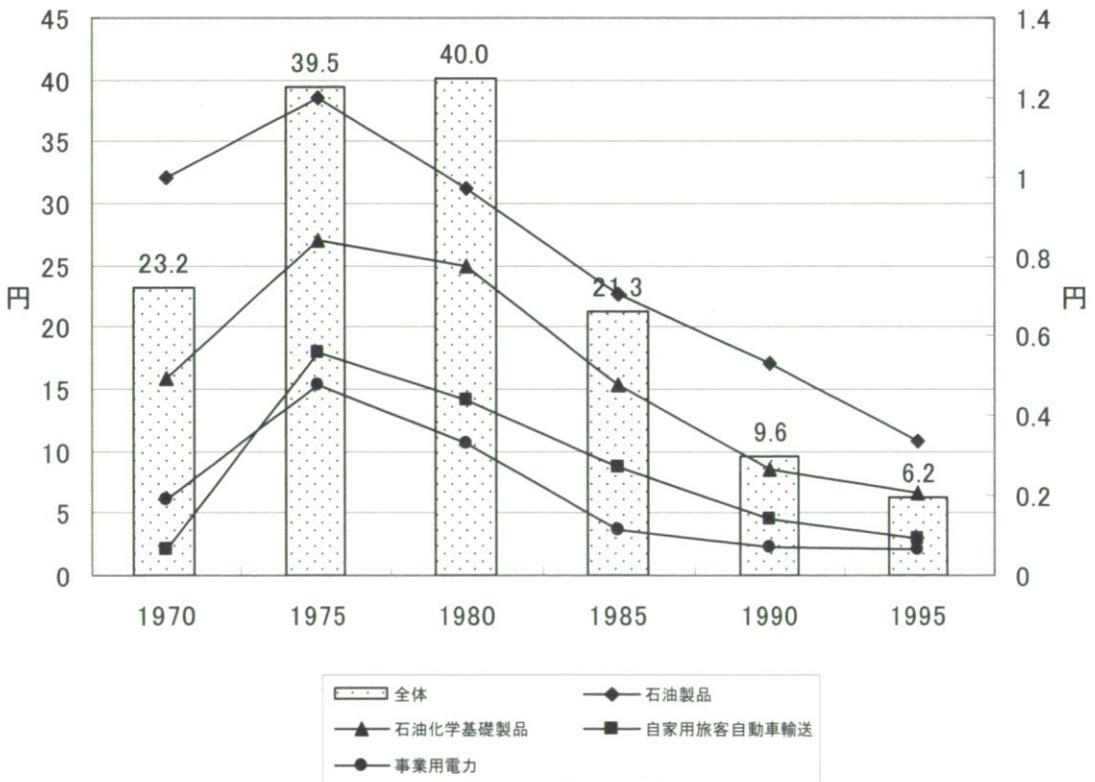


図 4.5.3 原油価格の波及効果 (変動額一定) (棒グラフは左、折れ線は右の指標)

第一次石油危機と第二次石油危機が発生した直後の1975年と1980年は、まだ原油価格の影響を受けやすい産業構造であったために、原油価格が1リットルあたり1円上昇すると産業全体には間接影響で約40円の影響が出ている。しかし、石油危機以降にとられた脱石油政策によって、わが国の産業は原油価格の変動を受け難い構造へと変化したことから間接影響額は次第に小さくなっている。特に、原油価格の影響を直接受ける石油製品、石油化学製品、自家用旅客自動車輸送および事業用電力については、折線グラフからわかるように1980年にはすでに原油価格の影響を受け難い構造に変わっていたことがわかる。脱原油に対しては石油製造部門と石油化学製品部門では、省エネルギー努力のほかにガソリンなどの石油製品や石油化学製品の輸入割合を増やすことで大幅な改善がなされている。また事業用電力部門の脱原油政策はLNGや原子力発電などの代替エネルギー開発の影響が大きい。石油危機を契機にして、わが国の産業構造は原油の短期的脅威に対してエネルギーセキュリティを高める方向へと変化している。

わが国のエネルギーセキュリティは、省エネルギーの進展、産業構造の変化、燃料多様化、石油備蓄等の政策によって次第に高まってきている。今後の原油情勢は短期的に見れば中東諸国の政情の不安定さや市場の需給逼迫によって原油価格の変動の可能性はあるが、それによって日本経済は混乱状態に陥るとは考えられない。しかし、長期的にみると国際政治情勢の変化や中国やインドを中心とするアジア地域の石油需要の高まりによって過去とは異なる不測の事態が発生する恐れもあるために、リスクを回避する対策を事前に実施していくことが望まれる。

(参考資料)

内山洋司「エネルギー工学と社会」放送大学教育振興会(2006)

# 第5章

## エネルギー技術の評価

---



## 5.1. エネルギー技術の特性比較の試み

岡野 邦彦

### 5.1.1. はじめに

基幹となるエネルギー源を提供するエネルギー技術においては、その技術は少なくとも経済的に競合可能な技術でなければならない。しかしながら、エネルギー源に求められるのは決して経済性だけではなく、他のさまざまな特性、たとえば環境特性なども重要であり、それらの総合的評価によってエネルギー技術は評価されるべきである。本節では、エネルギー技術に関連する評価の新しい試みとして、複数の評価軸でエネルギー技術の個々の特性を比較し、それらを並列して見ることによってエネルギー源の特性を表現することを試みる。燃料そのものの特性というよりは、エネルギー技術全体としての特性を評価することを目指している。

評価方法には、ビジネス戦略などで用いられる手法 (Effective Management Method) を用い、一般には数値化しにくい評価軸も含めて比較することを試みる。評価の定量化に関しては、後述のコンジョイント法による方法で一般化された効用曲線の導出を試みているが、ここでは評価手法の概念を構築することを目的としてやや直感的な評価を行うことにする。本研究で設定された評価軸が改良されて、後述のコンジョイント分析に用いられていることには注意されたい。

### 5.1.2. 評価基準

エネルギー源の評価軸として重要な項目を整理し、以下の5点に絞って考えることにした<sup>(1)</sup>；

1. 資源量、偏在性
2. 環境、とくにCO<sub>2</sub>ならびに他の公害物質の排出量。廃棄物量。
3. 経済性 (cost of electricity and capital cost per kW and flexibility in plant size (minimum size) )
4. エネルギー供給の安定性。国際的事象への柔軟度 (less vulnerability)
5. 安心感

また、ここで比較のために取り扱うエネルギー源の例としては以下の5種類を考えている。いずれも現状技術ではなく、将来の環境負荷を下げるための技術として期待されているものである。評価は、その技術が想定通りに実現した場合にどれほどの魅力があるか、という視点で行っていることには注意されたい。

#### 取り扱うエネルギーシステム候補

候補名	略称
1) CO <sub>2</sub> 回収付き先進石炭火力 (Clean Coal Technology)	CCT
2) 太陽光発電または風力発電	Solar/Wind
3) 宇宙太陽光発電衛星	SPS
4) 先進核分裂炉 (海水ウラン利用ワンスルー軽水炉、FBR)	Ad-fission
5) 核融合炉 (トカマク方式を基準とする)	Fusion

### 評価方法

上記の評価軸それぞれに対して、その概念の中で対立しうる表5.1.1のような複数の評価項目をもってその項目でのランクを5段階で評価し、1位に5点、2位に4点、3位に3点、4位に2点、5位には1点を与える。かつ同じ評価軸内の項目には合計で10になるウェイトを与えて評価点数とウェイトの積の和をもってその評価軸での評価を定める方法をとる<sup>(1)</sup>。

なお、日本の視点で考えた場合と、世界的視点で考えた場合で評価が大きく変わる項目については、日本における評価を採用する。

表 5.1.1 評価軸とウェイト付

Main issues	Sub-issues	Weight
Resource	1) Restriction on resource	8
	2) Resource distribution	2
Environmental Issues	1) CO <sub>2</sub> emission	5
	2) Disposability of waste	5
Cost	1) Cost of Electricity (COE)	4
	2) Construction cost	4
	3) Flexibility in plant size	2
Stability of Power Supply	1) Stability of plant (restriction in principle)	8
	2) Vulnerability of operation (to international affairs)	2
Safety and Security	1) Hazard potential during operation	7
	2) Security against improper use or nuclear proliferation	3

### 5.1.3. いろいろな評価軸における評価とランキング<sup>(2-37)</sup>

#### (1) 資源量と偏在性の評価

在来型エネルギー源を利用する石炭と天然ガスを除けば、ここで取り上げた未来エネルギーシステムの供給可能1次エネルギー量はいずれの技術も無尽蔵に近く、極端な差はないとみなせる。むしろ年間供給可能量や資源偏在などで差が現れる。調査結果を表5.1.2、表5.1.3にまとめてある。

#### 資源量

太陽光・風力とSPSについては、資源量は無尽蔵である。ただし、SPSは静止軌道に並べることが出来る衛星の台数によって年間供給エネルギー量では制約を受ける。(表では、2度おきに180台の場合で年間発電エネルギー量を示した)。核分裂(FBRまたは海水ウラン利用軽水炉)、ならびに核融合についても、実質的には資源量は無限大と変わらない。なお、海水ウランのエネルギー供給可能量は、ワンスルーの利用(使用済み燃料を再処理せず処分)を考えても、2600ZJものエネルギー量であることに注意されたい。

**偏在性**

核分裂と核融合のエネルギー資源は、海水から得られるか、または自己増殖であり、偏在性が少ないとみなした。風力エネルギーの利用可能量は、国・地域に強く依存している。SPSはエネルギー源そのものが静止軌道に偏在している。また地上レクテナは非常に広大な土地を要するので土地の確保が制約になる。石炭については、82%が中国、ロシア、米国にあるという点から、化石燃料としてはよいほうではあるが、未来エネルギーとしてはやはり偏在している燃料とみなすべきである。

表 5.1.2 資源量の評価

[Zetta( $10^{21}$ ) Joules: ZJ]

Power Plant	Reserve (tons)	Available energy (ZJ)	Rank
Solar wind	inexhaustible	inexhaustible, but limited by $\sim 0.8$ ZJ/year	1
SPS	inexhaustible	inexhaustible but limited by capacity on GEO ( $\sim 0.006$ ZJ/year)**	1
Fusion	D(seawater): $2.2 \times 10^{13}$ Li(seawater): $2.4 \times 10^{11}$	$5.1 \times 10^6$	1
fission	U (mine): $5.8 \times 10^6$ U(seawater): $4.7 \times 10^9$	280 (FBR) 2600 (LWR-SW one through) $2.3 \times 10^5$ (FBR)	1
Coal	$9.8 \times 10^{11}$	26	5

\*\* 180 satellites at intervals of 2 degree on GEO =180GWe.

表 5.1.3 資源の偏在性評価

Power Plant	Resource availability	Rank
Fission:	U: from seawater Pu: self-breeding	1
Fusion	D & Li: from seawater T: self-breeding	1
Solar/wind	depend on country (See Fig 1)	3
SPS	restriction in siting due to the large space for rectena (see Fig 2)	3
Coal	82% of world resource is in China, USA and former USSR area	5

(2) 環境の評価

図5.1.1ではCO<sub>2</sub>の放出量を比較している。その他公害物質は石炭を除けばマイナーと思われる。放射性廃棄物の「潜在的危険性」によるマイナスは別の項で評価されるべきである。

表5.1.4は廃棄物の量と性質を比較している。ここでは技術上の処理のしにくさとして評価した。

CO<sub>2</sub>排出

図中の低排出グループ (SPS、核分裂、核融合、太陽光・風力) は、すべて1位ランクである。石炭はCO<sub>2</sub>を回収しても排出量は上記グループより多く、またCO<sub>2</sub>の処分への懸念もあるので、最下位にランクした。他の公害排出は、石炭以外はマイナーである。

廃棄物処分の観点からは、太陽光・風力はベストである。SPSについては、軌道上の廃棄物 (2万トン) の処分に懸念がある。核融合は、核分裂に比べれば高レベルでも長寿命でもないが、量としては2万トンの放射性廃棄物が出るとされる。核分裂の高レベル、長寿命廃棄物の処分は困難であり、最下位にランクされる。

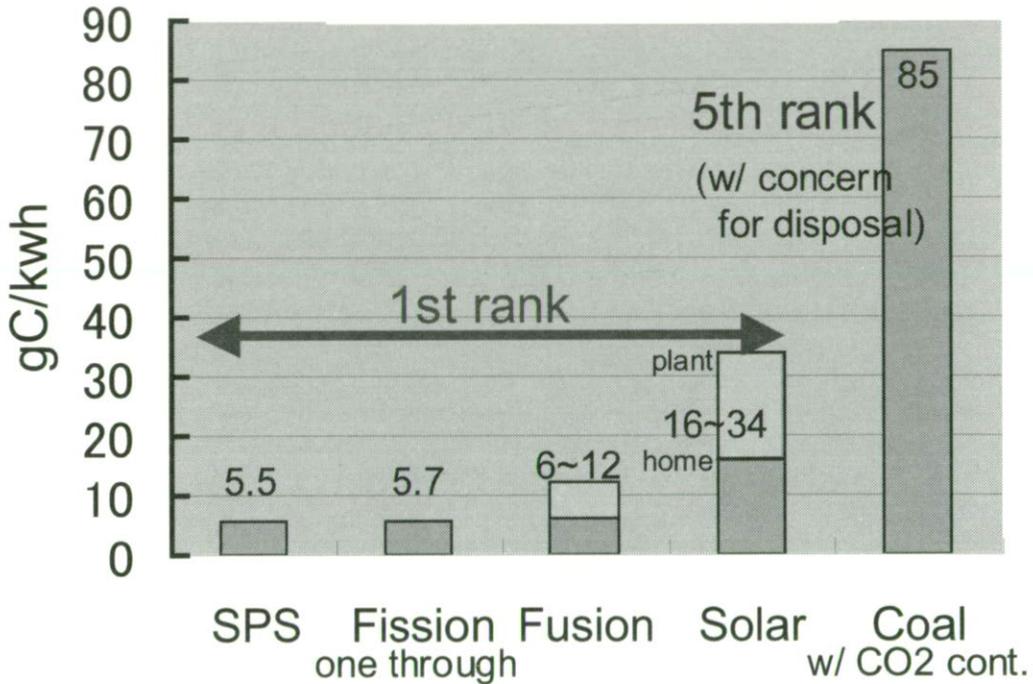


図5.1.1 CO<sub>2</sub>排出量の評価

表5.1.4 CO<sub>2</sub>以外の廃棄物などの評価

Power Plant	Description	Rank
Solar wind	easily disposable and recycled, no radioactivity	1
SPS	2x10 <sup>4</sup> tons on GEO* is difficult to dispose, possibly no radioactivity	2
Coal	huge (2x10 <sup>7</sup> tons from 1 GW plant), very low radioactivity	3
Fusion	large (2x10 <sup>4</sup> tons) and radio- active waste, but neither high level nor long life	3
fission	high level and long life radioactive waste is difficult to dispose	5

### (3) 経済性の評価軸

どの評価軸の項目も、間接・直接にコストにリンクしうる点には注意を要する。たとえば、放射性廃棄物の廃棄コストは核分裂炉、核融合炉のコストには参入されているべきである。

コストをかければさらにCO<sub>2</sub>発生を抑えられるというケースなら、CO<sub>2</sub>発生量の評価軸で評価した性能を出せるコストで経済性を評価する必要がある。すなわち、経済性は他の評価軸で仮定した性能や特性を実現するときのコストで評価する。

#### 経済性（発電単価）

発電単価の評価を図5.1.2に示す。軽水炉（海水ウラン利用）の発電単価（COE）はまだ確定できないので幅をもって示した。核融合のCOEも評価には大きな幅がある。例としては、日本原子力研究機構のA-SSTR2炉や、電力中央研究所のCREST炉の設計評価値を採用した。SPSのCOEはNEDOの評価<sup>19)</sup>を基準としている。

#### 単位出力あたりの建設単価（表5.1.5）

石炭が1位、核分裂が2位、核融合と太陽光・風力が3位、SPSは5位と評価した。

#### プラント規模の自由度（表5.1.6）

太陽光・風力はCOEでは5位であったが、プラント規模自由度は大きく、この項では1位である。SPSはプラントサイズに制約はないが、エネルギー伝送ビームの収束性からレクテナの直径が決まっており、小出力にしても小さくならないことから規模の自由度に制約があることから2位とした。核融合は小型化することが原理的に難しいことから5位としている。

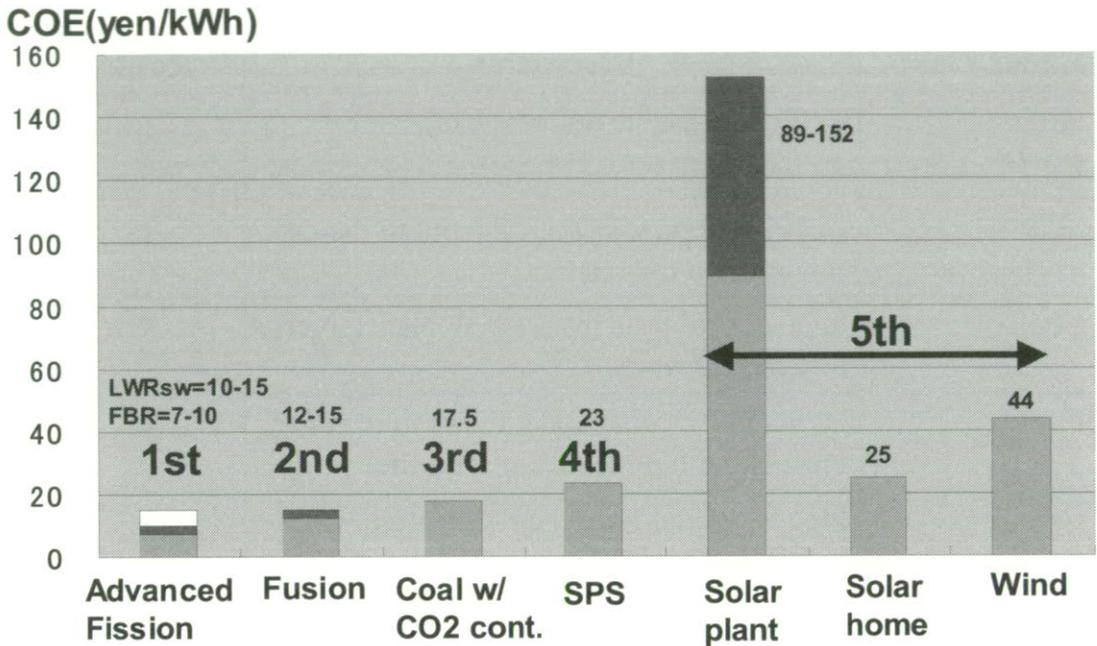


図5.1.2 経済性（発電単価）の評価

表5.1.5 単位出力当たりの建設費

Power Plant	Unit cost of construction for 1GWe plant (10 <sup>4</sup> Yen /kW)	Rank
Coal with CO <sub>2</sub> control	28	1
Advanced fission	32 a value of 1GW LWR is used here	2
Fusion	40~50	3
Solar or wind	Solar: 80~130, ~31 Wind: 50	3
SPS	240	5

表5.1.6 プラント規模の評価

Power Plant	Minimum scale of plant	Rank
Solar or wind	flexible (no scale merit)	1
Coal with CO <sub>2</sub> control	~200 MW (no inherent limit)	2
Advanced fission: FBR,LWR-SW	~300 MW (no inherent limit)	3
Solar Power Satellite	~500 MW (no inherent limit)	4
Fusion	~1000 MW	5

## (4) 安定性の評価軸

第一の評価項目は原理的な運転安定度、第二は新たに導入した考え方で、たとえば国際紛争による障害（燃料供給など）に対する脆弱さ"vulnerability" を考えた。

## 原理的安定度 (表5.1.7)

石炭、核分裂、核融合は原理的に連続運転が可能であり、原理的には制約がない。SPSは、厳密に見れば、秋分春分前後には蝕による停止時間帯があるが、時間的にはわずかでかつ予測可能なのでここでは1位にランクしてある。太陽光・風力は本質的に不安定であり5位とした。

## 国際的事象に対する脆弱性 (表5.1.8)

太陽光・風力、ならびにSPSは国際紛争などによる影響はあまり受けないであろうから1位とした。海水から燃料を得られ、燃料サイクルも個別の炉で閉じる核融合も1位としてある。核分裂もまた脆弱ではないが、燃料サイクル中に国際輸送が必要であるなら、その点で核融合よりはやや脆弱であろう。日本においては、もっとも脆弱なのは石炭であると考えられる。

表5.1.7 プラント運用の原理的安定度

Power Plant	Operational characteristics	Rank
Coal with CO <sub>2</sub> control	stable	1
Fission:	stable	1
Fusion	stable	1
SPS	stable but short discontinuations due to eclipse by the earth	1
Solar or wind	unstable	5

表5.1.8 国際的事象に対する運用の脆弱性

Power Plant	Description	Rank
Solar or wind	invulnerable	1
SPS	invulnerable	1
Fusion	invulnerable	1
Fission	less vulnerable, but if international transports are required for the fuel cycle, there is some vulnerability.	4
Coal	vulnerable to international affair, if imported fuel is used	5

(5) 安心感の評価軸

技術的安全はプラントの絶対要請項目であるので、相対評価はしない。ここでは安心感に関する比較を行う。表5.1.9では潜在的毒性ポテンシャルの観点で安心感を比較してある。一方、毒性ポテンシャルの高低とは別に、悪意ある攻撃や大量破壊兵器等への転用に対する脆弱さの観点で評価しているのが表5.1.10である。

毒性ポテンシャルによる評価 (表5.1.9)

太陽光・風力、SPSは本質的に毒性を内在しないと考えられる。SPSのレクテナ近傍でのマイクロ波電界 (23mW/cm<sup>2</sup>) による人体への影響はないとはいえないが、ここでは無視した。石炭火力に内在する毒性ポテンシャルは化学プラントと同程度とみなし、低いと評価した。核融合と核分裂は大きな毒性ポテンシャルを内在する。ただし、核融合の毒性ポテンシャルは、核分裂の1/1000以下であることは考慮し、ランクは4位と5位に分けている。

悪意ある不適切な利用への脆弱性 (表5.1.10)

太陽光・風力、石炭は、この視点ではなんら脆弱性は見あたらない。核融合も、たとえば軍事目的での利用などを考えてもメリットは見出せない。SPSは地上への1GWのビーム照射装置として使えば、サイバーテロなどに悪用できる可能性はある。ただし、ビーム収束の原理的限界から、生物を殺傷するような電界密度にはならない。核分裂炉は、核拡散の観点で大いに脆弱である。

表5.1.9 安心感としての毒性ポテンシャルの低さの評価

Power Plant	Relative value of hazard potential	Rank
Solar or wind	regarded as 0	1
SPS	regarded as 0 unknown effect by electro- magnetic wave is conceivable, but was excluded here	1
Coal with CO <sub>2</sub> control	regarded as a low value similar to chemical plants	3
Fusion	~1/1000 (radioactive)	4
Fission	1 (radioactive)	5

表 5.1.10 悪意ある不適切な利用に対する脆弱性

Power Plant	Description	Rank
Solar or wind	no insecurity	1
Coal with CO <sub>2</sub> control	no insecurity	1
Fusion	few merit for military use	3
SPS	1GW beam emitter from space might be difficult to be accepted by neighbors	3
Fission	security problem due to Pu and U <sub>235</sub> is essentially unavoidable	5

## 5.1.4. 評価結果

上記のランキングにもとづき配点し、ウェイトをかけて各評価軸の評価をエネルギー技術別に算定した結果が図5.1.3である。

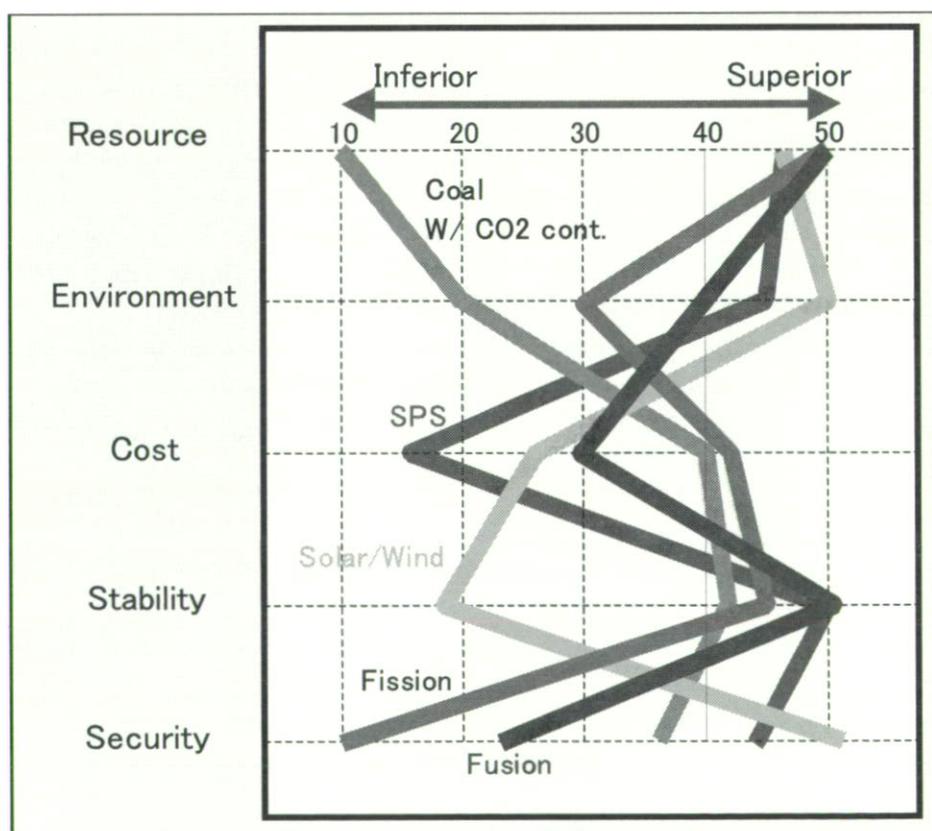


図5.1.3 全体評価の結果

このようなランキングには絶対的な一意性があるとはいえないので、評価には任意性、曖昧性が残ってはいるが、図5.1.3はそれぞれのエネルギー技術のメリットとデメリットをうまく表しているとは言えそうである。評価軸間のウエイトも決定されていないので、5軸評価の総和などによって優劣を決めるのは適切でないが、エネルギー技術の評価においては、利点ばかりを強調した評価では正当な評価は出来ないことがよくわかる。

CO<sub>2</sub>回収石炭火力は、資源と環境の問題を除けば優秀なエネルギー技術である。太陽光・風力は、コストと安定度に問題を持っている。SPSはコストという一点だけに重大な弱点がある。核分裂は、安心感で大きく劣る点をのぞけば、平均的には大変優れたエネルギー源といえる。核融合もその特徴が図にはよくあらわれている。どの評価軸でも単独一位になることがないが、単独最下位になる項目もない。すなわち平均において優れているエネルギーということが出来る。このようなエネルギー源は、今回のような広い視点の評価によって初めて正当な評価が可能になったといえるだろう。

#### 参考文献

- (1) K. Okano, N. Inoue, Y. Ogawa, and Z. Yoshida, J. Plasma and Fusion Research, Vol.71 (1995), pp321-330, in Japanese.
- (2) "Reports on Technical Feasibility of Fusion Energy and Extension of the Fusion Program and Basic Supporting Researches", by The Subcommittee of the Fusion Council for Fusion development Strategy, May 17, 2000, In Japanese (English translation is available from JAERI).
- (3) K. Tomabechi, the report in 4th meeting of Special Committee for the ITER Project, in Japanese.
- (4) K. Yamaji, K. Okada, K. Nagano et al., 'World Energy Resources: Endowments, Supply/Demand, Economics, and Related Technology Development', CRIEPI Report Y94001, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Tokyo, 1994, in Japanese.
- (5) "Nuclear Power Station in Japan", Central Research Institute of Electric Power Industry Nuclear Information Center, Tokyo, Jan 2000.
- (6) "ITER Plant Design Specification and Plant Description Document", ITER Joint Central Team, (2001).
- (7) Y. Uchiyama, 'Life Cycle Analysis of Power Generation Systems', CRIEPI Report Y94009, Central Research Institute of Electric Power Industry(CRIEPI), Tokyo, 1995, in Japanese.
- (8) K. Tokimatsu, H. Hondo, Y. Ogawa et al., "Energy analysis and carbon dioxide emission of Tokamak fusion power reactors", Fusion Engineering and Design 48 (2000) 483-498.
- (9) NEDO Research Report, NEDO-GET-0007, NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 2001-3, in Japanese.
- (10) (株)三菱総研：平成5年度新エネルギー・産業技術開発機構委託業務成果報告書「宇宙発電システムに関する調査研究」、(1994)
- (11) 茅陽一監修、(社)電気学会エネルギー問題検討特別委員会編、「エネルギー技術の新パラダイム」、Ohm社、1995.
- (12) K. Yoshida, I. Kinoshita, N. Ueda, "An Inovative LMFBR Concept Eliminating Intermediate Heat Transport System", The 5th Int. Conf. Nuclear Engineering, ICON-5-2331, Nice, 1997.
- (13) T. Hiraoka, J. Atomic Energy Soc. Jpn., 36 (1994) pp.644.
- (14) T. Sugo, M. Tamada, T. Segichi, T. Shimizu, M. Uotani and R. Kashima, J. Atomic Energy Soc. Jpn., 43 (2001) pp.1011.
- (15) K. Okano, T. Yoshida, Y. Asaoka and K. Tomabechi, Fusion Eng. Design, 51-52 (2000) pp.1025-1032.
- (16) 「ニューサンシャイン計画における太陽光発電技術開発の今後の進め方」、平成9年3月、新

## エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)

- (17) F. Najimabadi and ARIES team, *Fusion Eng. Design* 41 (1998) pp.365-370.
- (18) S. Nishio, K. Ushigusa, S. Ueda, et al. 'Conceptual Design of Advanced Steady-state Tokamak Reactor (A-SSTR2) - Compact and Safety Oriented Commercial Power Plant', in Proc. of 18th IAEA Fusion Energy Conference 'Fusion Energy 2000', FTP2/14, Sorrento, Italy 2000.
- (19) K. Okano, Y. Asaoka, T. Yoshida et al., *Nuclear Fusion* 40 (2000) 635.
- (20) Y. Asaoka, S. Konishi, S. Nishio, R. Hiwatari, K. Okano, T. Yoshida, K. Tomabechi, "Commissioning of a DT Fusion Reactor without External Supply of Tritium", in Proc of 18th IAEA Fusion Energy Conference 'Fusion Energy 2000', PDP/8, Sorrento, Italy 2000.
- (21) 新エネルギー部会報告書、総合資源エネルギー調査会、新エネルギー部会、2001年6月
- (22) 通商産業省(編)、エネルギー'98、電力新潮社、p.45、1998
- (23) [www.undp.org/seed/eap/activities/wea/drafts-frame.html](http://www.undp.org/seed/eap/activities/wea/drafts-frame.html)
- (24) James Larminie and Andrew Dicks, *Fuel Cell Systems Expanded* 2nd ed, John Wiley & Sons Ltd., 2003
- (25) Klaus Hassmann, "SOFC Power Plants, the Siemens-Westinghouse Approach", *Fuel Cell*, Vol. 1, pp.78-84, 2001 s
- (26) 1996 Ballard Annual Report, [http://www.ballard.com/be\\_informed/about\\_ballard/company\\_info/annual\\_and\\_quarterly\\_reports](http://www.ballard.com/be_informed/about_ballard/company_info/annual_and_quarterly_reports)
- (27) M. Koyama et. al, Integrated model framework for the evaluation of an SOFC/GT system as a centralized power source, *Int. J. Energy Res.*, Vol. 28, pp.13-30, 2004
- (28) P. Kuchonthara et. al, Energy recuperation in solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) combined system, *J. Power Source*, Vol. 117, pp.7-13, 2003
- (29) World Energy Council 2004 Survey of Energy Resources, Elsevier, 2004
- (30) J. E. Berry et al., *Power Generation and Environment - a UK Perspective*, (1998), AEA Technology.
- (31) 朝倉一雄、石炭火力発電所微量物質の吸入リスクの評価、電力中央研究所 研究年報 2004年版、p.36
- (32) 本藤祐樹、内山洋司、森泉由恵、電力中央研究所研究報告 Y99009, (2000)
- (33) A. R. Henderson et al., 'Offshore Wind Energy - Review of the State-of Art', Proc. of the Twelfth (2002) Int. Offshore and Polar Eng. Conf, pp.494-498, Kitakyushu, Japan (2002)
- (34) Driscoll et al. MIT report (1982)
- (35) 大井健太 海水リチウム採取技術の開発、日本海水学会誌、Vol.5, pp.285-292, 1997
- (36) 時松宏治、RITE への原研委託研究報告書 (2003)
- (37) 菅生高信、他、日本原子力学会誌、Vol.43, (2001)、p.76-82



## 5.2. 発電技術の評価からの新エネルギー

山田 明彦

新エネルギーは一見、わかりやすい単語である一方、再生可能エネルギーという言葉もあり紛らわしいが、「再生可能エネルギーの中で、石油代替エネルギーを製造、発生、利用すること等のうち、経済性の面で制約から普及が進展しておらず、かつ、石油代替エネルギーの促進に特に寄与するものが新エネルギー」と日本の法律では規定されている。発電技術にかかわるものとしては、「太陽光発電、風力発電、バイオマス発電、廃棄物発電が積極的に導入促進を図るべきもの」と位置付けられている。2003年4月より電気事業者に対して新エネルギー等から発電される電気を一定量以上利用することを義務付けるRPS制度が実施され、新エネルギーの国による普及促進が強化されている。

新エネルギーはとかく、原子力に取って代わるものとして扱われがちであるが、石油代替エネルギーであること、炭酸ガスを排出しないことなど、両者には大きな共通点も有している。一方、相違点の最大なものは、新エネルギーは小規模・分散電源であり、原子力は大規模・集中電源である。出力的に不安定な分散電源が送・配電系統に連係されると、系統の安定性などに影響を与え得るので、分散電源としての容量が大きくなると出力変動対策や安定化対策が必要になるなどの新しい問題が生じてくる。

発電費用の外部コストは、ExternEによると原子力に比べて風力発電は低く、太陽光発電は原材料の使用量が多いことなどにより高く、バイオマスは利用技術によって大きな幅が有するという試算結果が得られている。又、系統側の出力変動対策のために追加の電源を考慮すると、その電源の建設コスト、運転コストを外部コストとしてみる必要がある。特に、この電源が炭酸ガスなどを排出する場合は環境面も含めて総合的に評価することになる。

本節では、新エネルギーの主力として期待されている太陽光発電、風力発電、バイオマス発電に絞って技術面から現状と今後について紹介し評価する。

### 5.2.1. 太陽光発電

#### (1) 発電効率

シリコン半導体などに光が当たると電気が発生する現象を利用し、太陽の光エネルギーを太陽電池で直接、電気に変換するが、民生用に実用化されている太陽電池としては、シリコンを原料とした単結晶型、多結晶型、アモルファス、薄膜型等が主に用いられている。変換効率では、単結晶が最もよいが、我国の住宅、公共建物では面積の制約から、変換効率、価格の点で多結晶型が一番使われており、約10㎡で1KW発電する。アモルファスは、シリコン使用量(膜厚数μm)が少なく、温度特性が結晶型に比べて良いものの、変換効率が悪く、経年劣化の課題もあり期待されたほど伸びていない。膜厚が数十μm程度の薄膜型(従来の結晶型は300μm程度)には(広い意味ではアモルファスも含まれる)、多結晶型、微結晶型等があり、今後の進歩が期待されている。その他、シリコンを使用せず安価で高変換効率が期待できるCIS型等の化合物系がある。

太陽電池は、晴天だけではなく、雨天、曇天など、ある程度、光があれば発電する。結晶型の場合は、温度特性が負であるために、真夏の晴天下では効率が場合によっては20%近く低下する。そのため、冬季の北海道での効率が良く、夏季の沖縄の変換効率がそれほど良くないというようなことにもなるが、一年を通すと我国では地域によって余り差はなく、平均的に1KWの太陽電池から年間1000KWh弱の電力が発生する。(稼働率にすると約11%である。)図5.2.1に太陽光発電の天

候別発電電力量推移を示す。

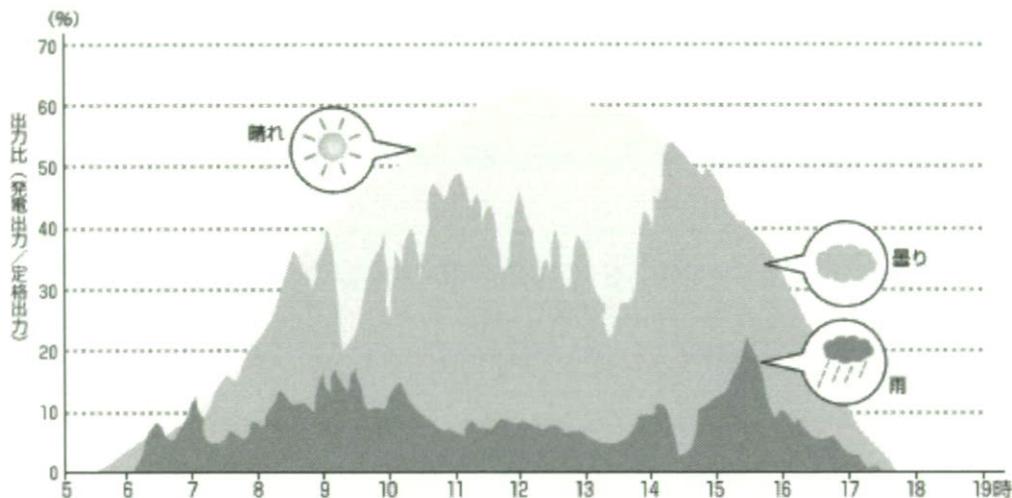


図 5.2.1 太陽光発電の天候別発電電力量推移

設置後の変換効率の経年的な変化はまだ十分な実績が得られていないが、それほど低下はないとみられている。太陽電池から発生した直流を交流に変換するパワーモジュールでの効率は最高で約95%程度である。

(2) 経済性

図 5.2.2 のように住宅用太陽光発電システムの価格はここ 10 年間で約 1/3 に低下し、現在、工事費、配電線とつなぐパワーモジュール代などを含めて約 70 万円/KW 程度である。20 年間の使用を前提とした発電コストはまだ 50 円/KWh 台であり依然高価であるが、国による補助金制度と電力会社による余剰電力買取制度により家庭用電力料金より若干高めめの発電コストになるまでに低下した。

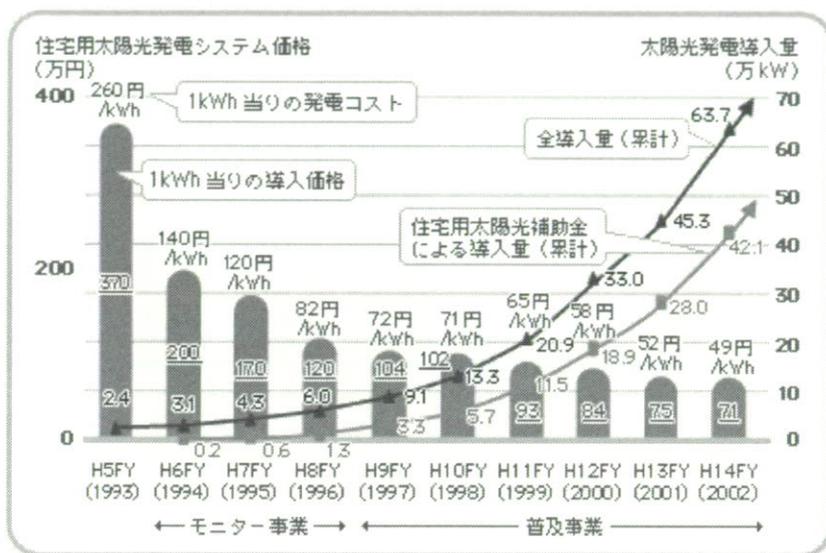
(3) 我国の特徴

我国は、2002 年度末現在、世界一の設備容量の約 64 万 KW で、その 2/3 を住宅用が占めている。住宅用の普及度が高いのは、個人でもって新エネルギーを家庭に容易に設置できること、国民の環境意識の高まりに加えて国の補助金制度、電力会社による余剰電力買取制度、メーカーのコスト削減努力によるものとされている。メーカーの製造能力も世界最大で、マーケットシェアの半分近くを日本のメーカーが占めている。

(4) 今後の見通し等

住宅用の国の補助金制度は 2005 年度で終了するが、電力会社による余剰電力買取制度並びに、RPS 制度による発電費低減策はあるものの、今後の普及拡大の鍵はシステムコスト削減であり、そのためには変換効率の向上、生産コストや流通コストの削減などが必要である。

変換効率は徐々ではあるが向上しつつあるものの、抜本的な向上の為に新素子の開発など技術革新が望まれるところである。生産コスト削減のためには太陽電池の大量生産による量産化並びに材料費の削減策が必要である。太陽電池のコストの約半分はシリコン代といわれており、これまでは IC や LSI 等では使用しない低価な規格外品シリコンを使用してきたが、太陽電池の生産量が大幅に増加してきたために、規格外品だけでは賄えなくなってきており、メーカーは薄膜系の開発に熱心に取り組んでいる。2010 年に発電コストで現在の電灯料金並の 23 円/KWh が業界の目標となっており、そのためにはシステムコストとして 30 万円/KW を達成する必要がある。



出典：メーカーヒアリング等により経済産業省にて試算

図 5.2.2 住宅用太陽光発電システム導入量と価格・発電コストの推移

## 5.2.2. 風力発電

### (1) 発電効率

風力発電機には大きく分けて水平軸型と風向に依存しない垂直型があるが、水平型のプロペラ式が効率が良く、風速の数倍で回転可能なために専ら使用されている。風による風車のエネルギーは風速の三乗に比例するため、コンスタントに強い風の吹くことが風力発電には必須条件であり、年間平均風速が5~6 m/s以上の場所が適地とされている。風力発電機の理論効率は最高59%であるが、実機ベースの最高は43%程度である。風の吹き方は一定でなく、日、月単位の風力発電機の出力変化図(図5.2.3)に示すように、0%から100%の間の変動がはなはだ大きい。

### (2) 経済性

建設費は、機器代だけでなく輸送費(場合によっては取り付け道路の費用を含む)、基礎工事などの工事費用、送電線、配電線との連系費用などであるが、風況の良い場所は辺鄙なところが多く、特に大型の風力発電機の場合は輸送のために費用がかかることとなる。現在、1000KW級の風力発電機で20~30万円/KWである。又、大型化、即ちタワー高さが高くなると、輸送費だけでなく基礎強度、航空法対策等が必要となる。

風力発電機は規模が大きくなるとスケールメリットが効いてくる。最近では、出力規模も1基当たり1000KW級で、同一場所に多数機設置するウィンドファームが多く見られるようになってきており、3万KW級の大規模な場合は10円/KWh程度の発電コストまで来ている。

地方自治体が地元のモニュメント的に建設した場合では、事前の風況調査が十分でなく稼働率の低い例も見られるが、発電目的で十分な風況調査を実施した場合は実績をあげている例も多い。

電力会社への売電単価は公開されていないが、電気のみ価格は火力の焚き増し費相当の3~6円/KWhとされ、環境価値を入れると11円/KWh台で購入されている模様である。

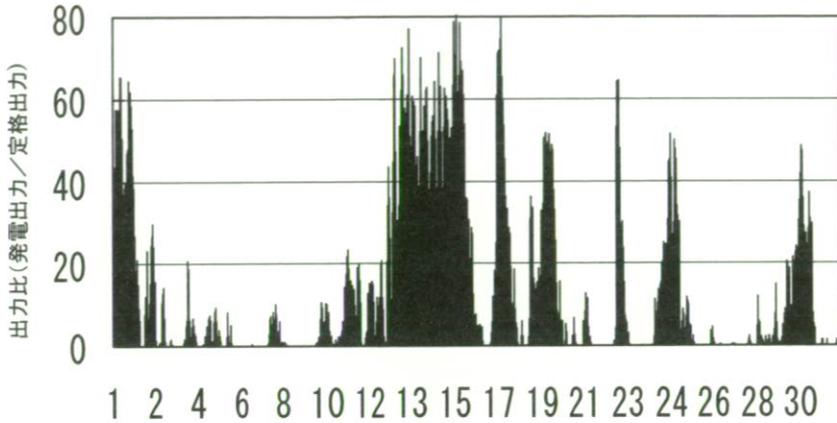


図 5.2.3 竜飛ウィンドパーク 1999 年 8 月の発電出力の推移

(3) 我国の特徴

我国はヨーロッパに比べ、風の乱れ度が大きく安定した出力が得られないだけでなく、日本海地方の冬季雷によるブレードの損傷、台風による損壊等不利な点が多い。

2003 年末の我国の導入量 (図 5.2.4) は 68.4 万 KW で世界 8 位であり、北海道、東北地方に偏在しており、北海道電力、東北電力では系統上の問題から風力発電の購入枠を決め、抽選、入札で購入している状況となっている。設置されている風力発電機の殆どは欧州製で、日本のメーカーは現在のところ 1 社のみである。

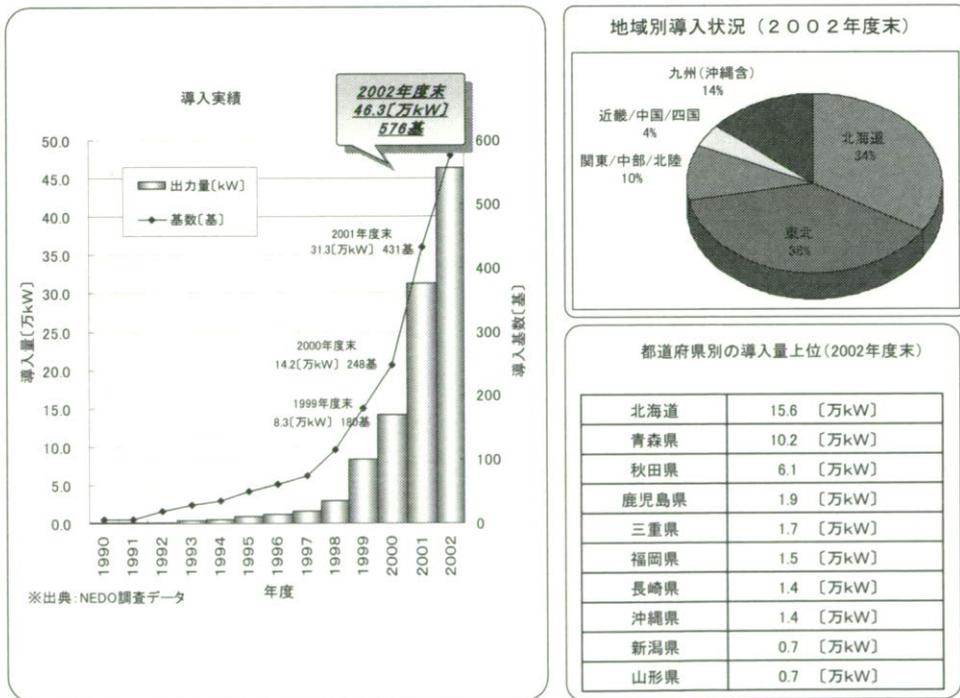


図 5.2.4 国内における風力発電の導入量推移

## (4) 今後の見通し

2010年における国の導入目標は300万KWであるが、現状、風況の良い北海道、東北地区は電力系統との連系が多くなってきており、系統上の制約から設置できない場合も生じてきている。そのため、既存系統の増強、電力品質維持等の対策が必要となるが、公平性を踏まえた費用負担の有り方、管理・運営のルール化など解決すべき課題は多い。現状、設置されている風力発電機の大半は海外製であり、故障、損傷した際の補修に時間のかかることが問題になっている。そのため、我国の風況、気候的な特徴に合致し、輸送、建設が容易な日本型の風力発電機の開発が望まれている。又、風況がよくても、国立公園内、港湾地域などでは、土地利用規制により、立地できない場合が多いので、規制緩和などの対策が議論されている。

## 5.2.3. バイオマスエネルギー

バイオマスの定義は、「化石資源を除く動植物に由来する有機物であり、エネルギー源として利用可能なもの」であり、バイオマスを育成することによって固定されたCO<sub>2</sub>の利用に際して、CO<sub>2</sub>のバランスを考慮しながら利用すれば追加的なCO<sub>2</sub>は発生しないというカーボンニュートラルな特性を有する。バイオマスは、図5.2.5に示すように発生源から大きく分けて木質系、農業・畜産・水産系、建築廃材系の三つに分類される。

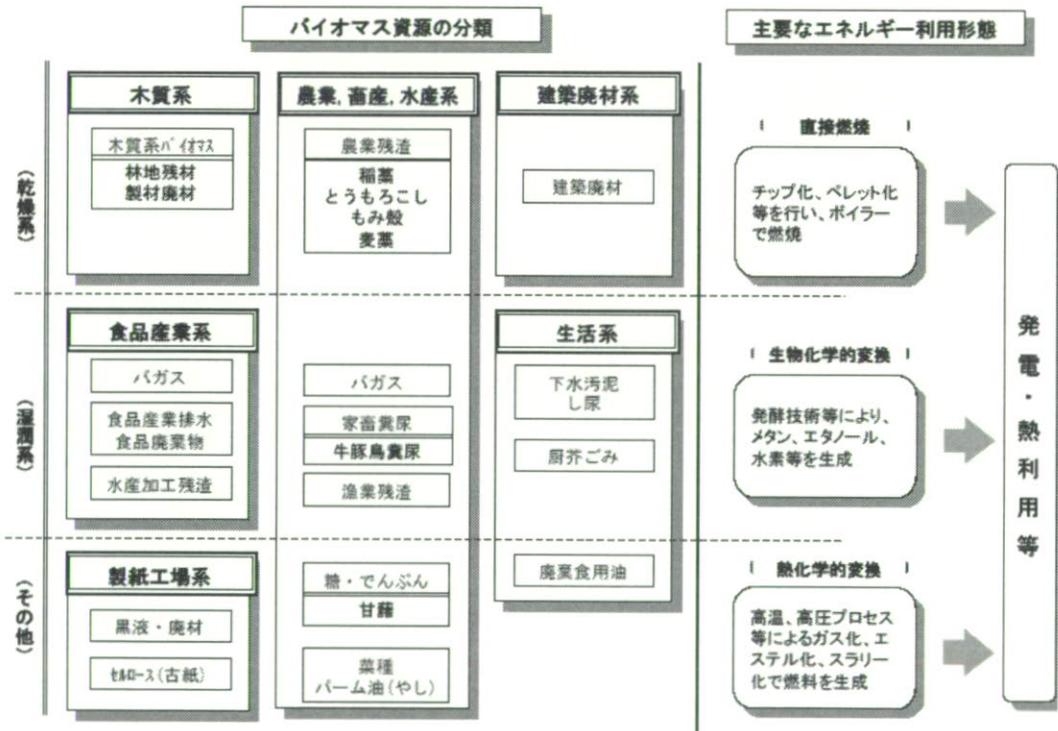


図 5.2.5 バイオマスの種類と利用方法

- ① 乾燥しているものは、チップ化、ペレット化等によりボイラーで燃焼させる直接燃焼
- ② 湿潤なものは発酵技術等によりメタン、エタノール、水素を生成し燃料とする生物化学的変換
- ③ 高温、高圧プロセス等によるガス化、エステル化、スラリー化で燃料を生成する熱化学的変換によって、発電する方式が取られている。

原料としては、発生分布が広く薄い上に容積当りのエネルギー密度が低く、原料の収集・輸送の負担が多い特徴を有する。

#### (1) 効率

バガスなどの農業残渣、間伐材、廃材などを燃料とし、蒸気タービンによる直接燃焼発電は、発電設備が大規模となり、設備費用が高く、所内動力もかかるので効率が低い。(～12%)

家畜の糞尿等から発生したメタンガス等を利用して蒸気タービン、又はガスエンジンによる発電を行うと伴に発電機の冷却水を暖房、給湯などに利用する生物化学的変換は、ガスエンジンでは装置の小型化が可能なことから、小規模でも効率は直接燃焼発電よりも高くなる可能性がある。(15～20%)

#### (2) 経済性

廃材などを燃料とする場合は、逆有償による引取りにより原料コストを引き下げることが可能となり、10円/KWhを切る安価な発電コストとなっている例もあるが、輸送コスト、水分の除去、夾雑物、接着剤等の異物の除去などの必要なことが多いので、家畜糞尿系、食品廃棄物、下水汚泥は10～20円、未利用樹系は20円以上となっており、一般的には従来の電源コストと比べて高い。

#### (3) 我国の状況

バイオマスのエネルギー利用は製紙業からの黒液などを除いて余り進んでいなく、再生可能エネルギーの中でバイオマスの占める割合は欧米に比べて低い。国内メーカーの取組みの歴史は浅く、大半のメーカーが欧米のメーカーと技術提携をしている。

2002年度の発電容量は21.8万KWであり、殆どが自家消費に使われているのが現状であり、2010年度には33万KWが目標となっている。

#### (4) 今後の見通し

利用可能量からみると、木質系バイオマス及びその内の製紙系、食品廃棄物系の利用可能量が多い。技術的には、直接燃焼、メタン発酵による発電は実用化レベルに達しているが、経済性向上のためには今後もバイオテクノロジーの応用などによる一層の技術開発が必要である。バイオマス発電は太陽光発電、風力発電に比べて、環境保全への貢献度が見えにくいので、社会的認知度を向上させる必要がある。バイオマスの原料の特徴である原料収集、輸送コスト低減のために有効である地産地消、地域循環を図ることが課題であり、計画を立てる際の地域との連系、連帯が必須である。

### 5.2.4. まとめ

割高で、使い勝手の悪い新エネルギーをいかに、経済的、技術的に在来電源並みにするように関係者が努力をしているのが現状であるが、環境には良いものの割高で使い勝手の悪い事を認識した上で使用するとか、或いは在来電源と比べて不利な点を関係者が社会的合理性を持って負担し合う社会環境が醸成されれば、新エネルギーの存在は加速的に高まっていくものと思われる。

新エネルギーが、近い将来、現在の原子力の地位にとって変わる可能性は非常に少ないと見られている。しかし、これまでの電力システム、電気事業体制の歴史を見ると、交流発電機の発明による直流送配電から交流送配電、大型火力、原子力発電の導入、はたまたAGCの登場等、技術革新によって大変革が起きており、最近では、電力自由化に伴う託送などの動きが有る。

コンピュータの世界がメインフレームからパーソナルコンピュータの世界になったように、新エネルギーについては分散電源の性格を有しているため、その技術の進展あるいは水素エネルギーとの関係によっては、電源構成、送配電システムなどに、一大変革をもたらす可能性は否定できなく、今後も新エネルギーの動向に注意を払う必要がある。

なお、参照図はいずれも2004年3月資源エネルギー庁資料より抜粋した。

## 5.3. 高速炉と燃料サイクル

篠田 佳彦

日本原子力研究開発機構と電気事業者は、理想的な高速炉サイクル像の追求を目指し 1999 年度から 2005 年度まで高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（以下、FS）のフェーズ I およびフェーズ II を遂行した。（図 5.3.1）高速炉サイクルシステムは、高速炉とそこから生じる使用済燃料を分離する再処理工場及び分離された核物質を燃料に加工する燃料加工工場の異なる施設で構成される。それぞれの施設で様々な方式（技術の選択肢）が存在し（図 5.3.2）、実用化に向けて、どのような性能を実現し、そして、どの方式を候補概念として選定すべきかが重要な問題であった。

そこで、2000 年度までに実施したフェーズ I では、高速炉サイクルシステムの候補概念について幅広く調査、検討し、同時に、定量的な比較評価手法を開発した。

### 5.3.1. 定量的評価手法の開発

ここでは、候補概念の特徴を明確にする種々の評価項目において、各候補概念の優劣判断を目的とし、AHP（階層分析法：意思決定支援手法の一種）を中核とした定量的比較評価システムの開発について記述する。

FS における開発目標と高速炉サイクルシステムの特徴と関連させて高速炉システムの総合的な性能を判断するために評価項目を設定した。高速炉サイクルシステムの評価は、「安全性」、「経済性」、「資源特性」、「環境特性」、「核拡散特性」など種々の基準から行う必要があり、異なる基準からの評価を総合して判定する必要がある。このような特徴を考慮して評価を行う手法として、以下が挙げられる。

- ・ 費用便益分析      便益と費用を金額で評価して比較する手法
- ・ 多基準分析        多様な効果を総合的に勘案する分析手法

費用便益分析は、評価の観点ごとの利得を価値（通常は、金銭）換算することで総合的に評価する。この手法では、金銭換算できるものに限界があり、評価範囲に制限が付きやすい。しかし、定量的に評価されたものには客観性が確保されやすい場合もある。一方、多基準分析は、多様な効果は無次元な得点に換算し、優劣を定める。広い評価基準を扱えるが、必ずしも客観性が保障されるわけではない。これらの特徴を勘案して、FS では、それらを個々に開発し、評価手法ごとの性能を把握し、同時に融合の道を探った。なお、ここでは、客観性の定義として、以下を採用する。強い定義として判断過程において人の意思に依らずに必然的な論理で展開されることを指し、個人差は現れない。また、弱い定義として大多数の人が同一な判断をすることが保障されることであり、個人差が顕著に現れることはない。

費用便益分析は、FS では「投資対効果」（図 5.3.3）として検討した。

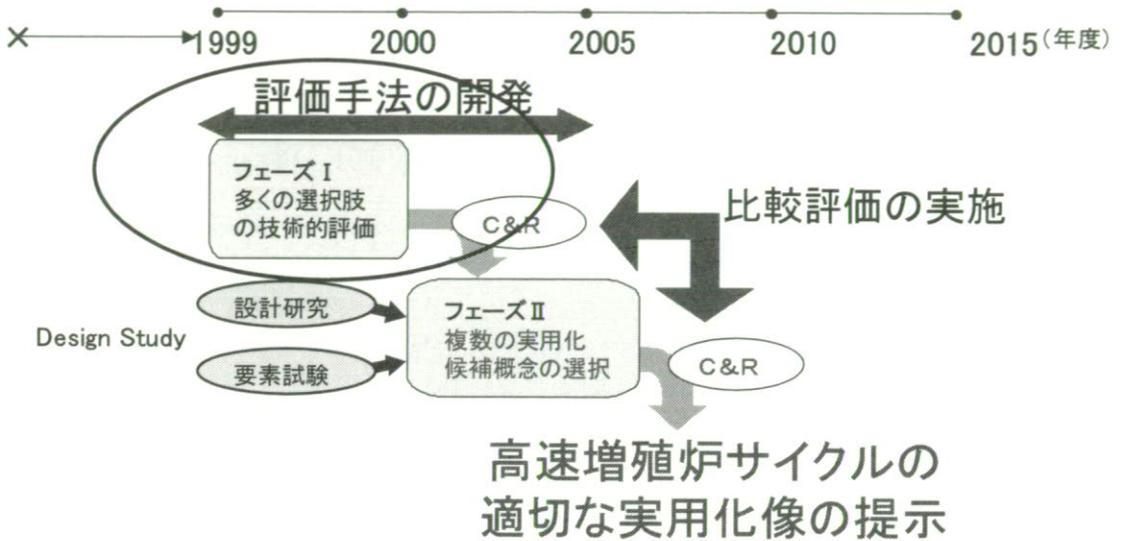


図 5.3.1 高速増殖炉サイクルシステム実用化戦略調査研究の流れ

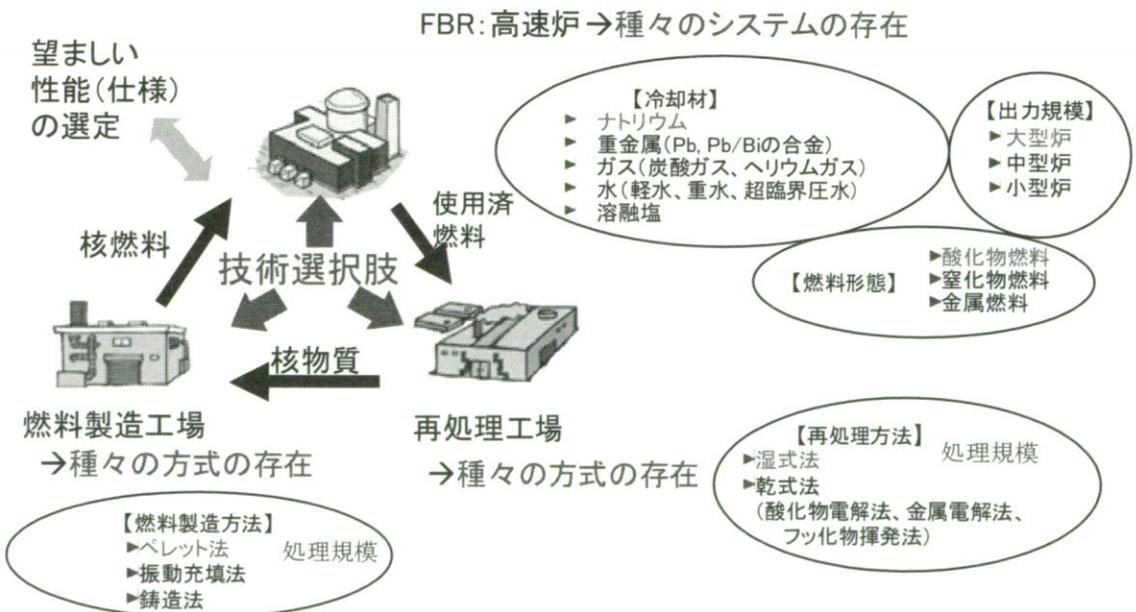


図 5.3.2 高速炉サイクル候補システム選定

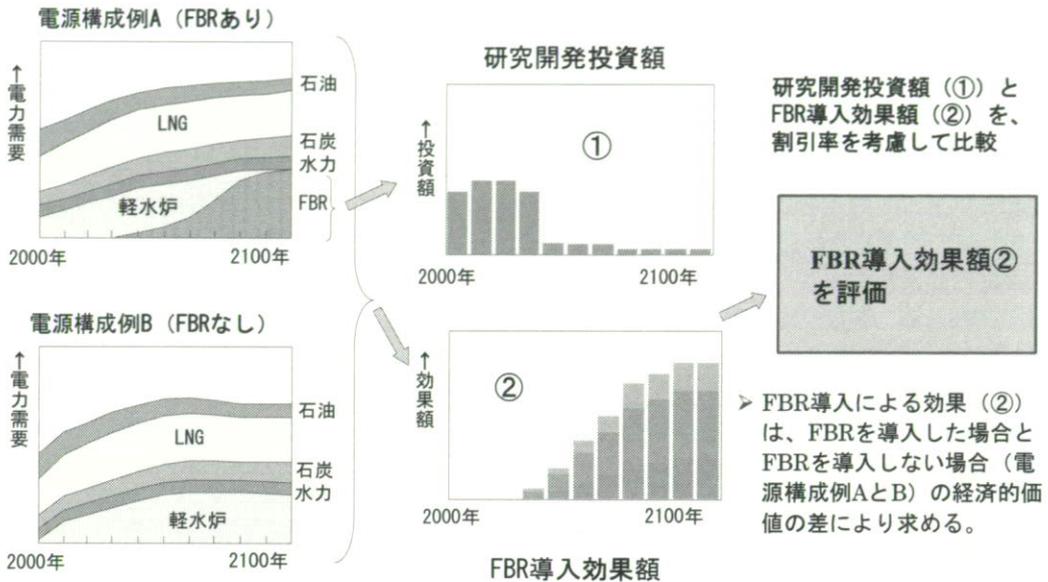


図 5.3.3 費用便益分析の適用：FBR サイクルの投資対効果

ここでは、高速炉導入による効果は、時系列を考慮して、高速炉を導入した場合と高速炉以外の電源で構成した場合 (電源構成例 A と B) の経済的価値の差により求めた。効果としては多様な項目が考えられるが、フェーズⅡ最終評価の例では、導入効果として以下を計上している (FBR は軽水炉を置換すると想定した)。

## ① 発電コスト削減効果

$$\left( \text{ウラン燃料価格上昇を考慮した軽水炉発電原価} - \text{FBR発電原価} \right) \times \text{FBRによる発電量}$$

## ② ウラン燃料価格上昇の抑制効果

$$\left( \text{FBRを導入しない場合の軽水炉発電原価} - \text{FBRを導入した場合の軽水炉発電原価} \right) \times \text{FBRに代替されない軽水炉の発電電力量}$$

## ③ ウラン燃料輸入削減効果

$$\left( \text{FBRを導入しない場合の天然ウラン輸入量} - \text{FBRを導入した場合の天然ウラン輸入量} \right) \times \text{FBR導入時の天然ウラン価格}$$

④ 環境影響低減効果 (CO<sub>2</sub>、SOX、NOX 等の発生量)

$$\left( \text{軽水炉の環境影響物質発生量} - \text{FBRの環境影響物質発生量} \right) \times \text{環境影響物質削減価値} \times \text{FBRによる発電量}$$

## ⑤ 生命リスクの低減効果

$$\left( \text{軽水炉による死亡リスク} - \text{FBRによる死亡リスク} \right) \times \text{統計的生命価値} \times \text{FBRによる発電量}$$

金銭換算された価値とそれを実現するために費やされる労力（金銭換算）の比などが、高速炉サイクルシステムの総合的評価値となる。

FS では、別途、多基準分析による評価手法の開発にも着手した。多くの評価基準で金銭的価値（＝客観的価値）を見出すことはできない。同時に、金銭価値の換算においても、CVM（Contingent Valuation Method）などを用いれば、人の思考、意思が判断に介入する。評価の客観性を絶対視するのであれば、解決せねばならない課題は山積する。多基準分析では、「複数の代替案について、関連する多様な評価基準に基づいて得点を付け、優劣を決める」が、得点化においては客観性を絶対視しない。むしろ、客観的でない“判断”を評価のなかで重視していく。

多基準分析の手順は、

- N種類の代替案（評価対象） $A_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ) とする。
- （ここでは、種々の方式の高速炉サイクルシステム候補概念に相当する）
- M種類の評価基準 $G_i$  ( $i=1,2,\dots,M$ ) とする。
- （ここでは、経済性、安全性、・・・などが該当する）
- 評価基準 $G_i$ において、代替案 $A_j$ の評価点を $G_i(A_j)$  で表す。
- $G_i(A_1) > G_i(A_2)$  ならば第 $i$ 基準に基づく $A_1$ は $A_2$ よりも好ましいと判断する。
- 全ての評価基準で全ての候補概念ごとの評価点を算出する。算出は、
  - 一对評価：多数の代替案から二者択一し、相対比較（定性的判断）を重ね、定量化していく。（詳細は、後述する）
  - 価値関数：各基準の物理量（計量値）を無次元の価値（得点）に変換する。  
無次元の価値は、「効用」となる。
- 評価基準ごとの重要度（重み）を算出する。  
ここでは、評価基準 $G_j$ の重みを $W_j$ で表す。代表的な定量化方策として、一对評価が挙げられる。
- 総合的な評価値として、ここでは加重総和を採用する。

代替案 $k$ の総合的評価点は、 $G(k) = \sum_{j=1}^M W_j G_j(A_k)$  で求めることができる。

定性的な判断結果を一对評価によって、定量化することが可能である。代表的なものとして、T.L. Saaty によって提唱された AHP（Analytic Hierarchy Process, 階層分析法）では、一对評価から定量値を算出していく。AHP とは、階層構造に基づく分析法であり、意思決定に際しては、計量化の難しい「勘」、「フィーリング」による部分が多いことを十分認識した上で、それでも最大公約数的な判断をその中から見いだそうとする手法である。主観的判断とシステムアプローチをミックスした意思決定手法である。この特徴を活かせば、費用便益分析では難しかった評価基準でも、評価が可能となりうる。

AHP では、図 5.3.4 に示すように問題の要素を問題の最終目標、評価基準、代替案にとらえて、階層構造図を作成する。評価基準によっては、複数の因子に分解する場合もある。多階層化によって、評価基準をより明確にし、その評価基準での比較を容易にすることも可能となる。代表的な方法では、評価基準間の重要度（重み）と各評価基準における代替案の得点を一对評価によって求めていく。これらは、主観的判断の定量化でもある。AHP による一对評価の基本は、言語スケールでの段階判断にある。

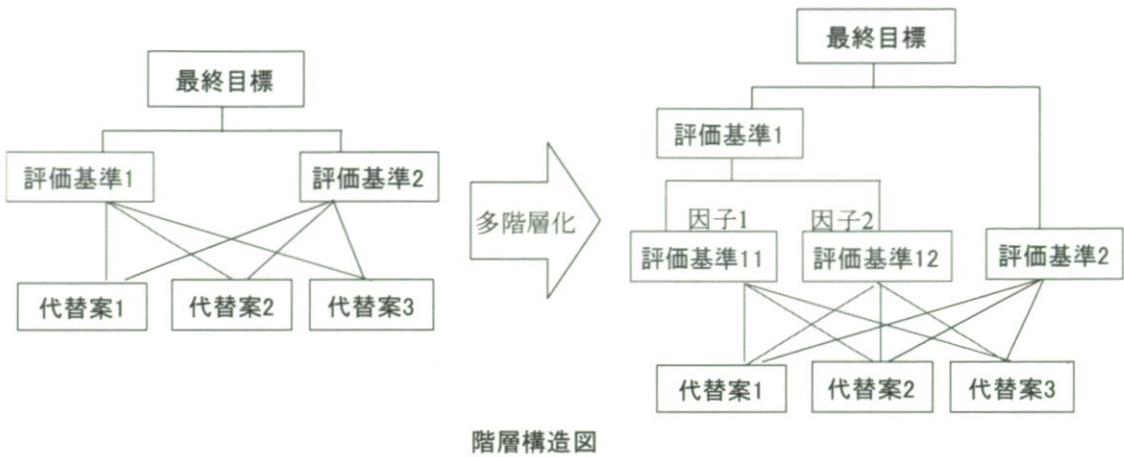


図 5.3.4 AHP の概要 (1)

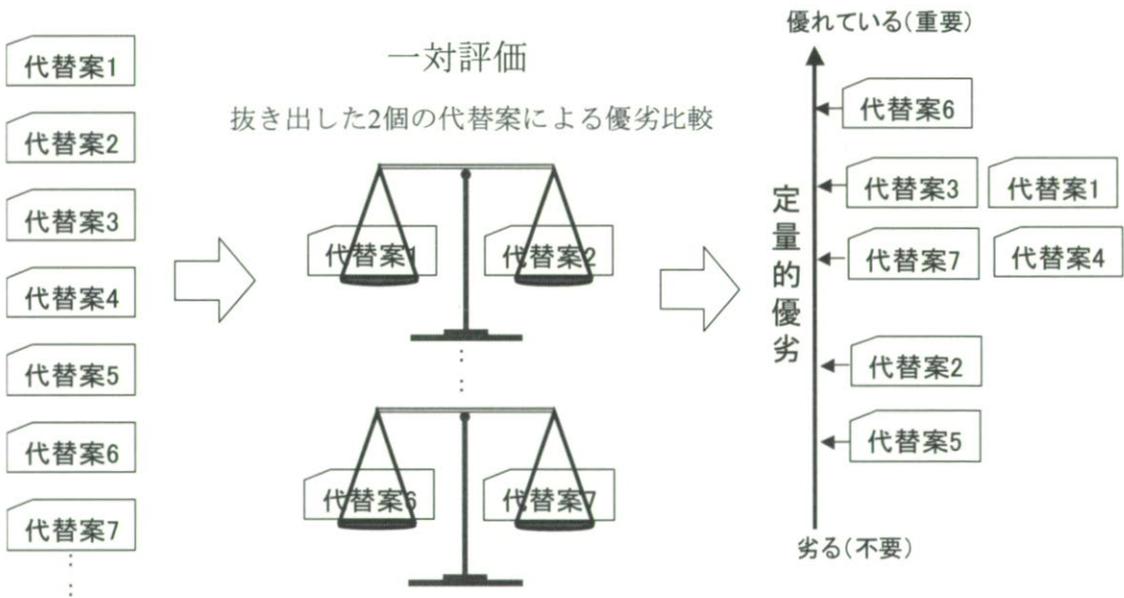


図 5.3.5 AHP の概要 (2)

図 5.3.5 に示すように、 $N$ 個の代替案から 2 個を抜き出す。抜き出した 2 つの代替案を「“ 同じくらい”、“ やや良い”、“ 良い”、“ かなり良い”、“ 絶対的に良い” あるいは、“ 同じくらい”、“ やや悪い”、“ 悪い”、“ かなり悪い”、“ 絶対的に悪い” とした段階尺度を用いて評価基準 $G_j$  ( $j=1 \cdot \cdot M$ ) の観点ごとに優劣を判断する。この比較をすべての組み合わせ ( ${}_N C_2$ 通り) で実施する。段階尺度に数値スケールを当てはめると、評価基準 $G_j$  ( $j=1 \cdot \cdot M$ ) の観点ごとの各代替案の定量的優劣 (得点) を算出することができる。同様な手順で、評価基準の重要度を一対評価で定量化することができる。最終的には、図 5.3.6 に示すように、評価する基準をさらに分解し、各々の観点から代替案の優劣を定めていき、階層構造に則って加重総和していくことで総合的な評価値を定めることができる。

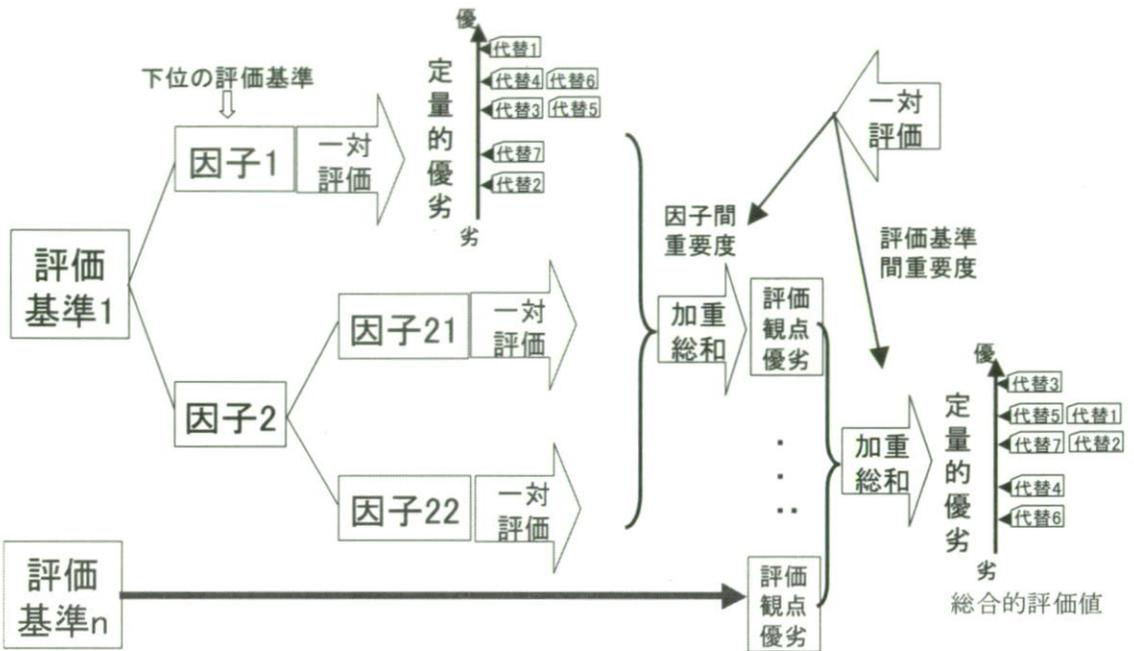


図 5.3.6 AHP の概要 (3)

FS では、幅広い技術の選択肢を考慮して、実際に高速炉サイクルシステムを組み、概念設計を実施したうえで候補技術の方式や仕様（性能）を評価した。そのため、多くの評価基準においては、計量可能な値を設計情報から提示することができる。さらに、技術の選択肢は多種に及び、候補概念数は、多く存在する。同一の方式を用いた候補概念でも異なる性能を目論んで設計したものを別候補概念とすれば、代換案は無数になる。そこで、AHP を適用するにあたり、以下の対応をした。

代換案数が膨大かつ不定であること及び計量値を重視することから、原則として評価項目における代換案の評点は、対評価の代わりに計量値による直接評価を採用する。そこで、評価基準において、特徴を分析することで下位の評価基準を設定し、計量値で評価しえるようにさらに深い階層構造を構築していく。そして、様々な評価項目における代替案の評価では、計量値を用いて評価するために図 5.3.7 に示す価値関数を適用し、0 から 1 の範囲の評価値を得る。

各評価基準の価値関数では、関連する開発目標値と整合をとり、目標値に達していれば、評価値を 1、円滑導入に十分な性能値を十分値とし、その評価値を 0.5、さらに導入意義が無くなる下限性能値を許容値とし、評価値 0 とする。ここでは、他の特性が如何に優れていても許容値を下回るものは評価対象外とすることにした。これらの点を目標に対する達成度、満足度を示す基準とし、価値関数を設定するための評価水準点とした。

価値関数型として、 $U(X) = a - be^{-cX}$  を採用し、上記、3 評価水準点から係数 a,b,c を算出した。これより、代換案としての候補概念において、その評価基準に対する計量値を持って、機械的に評価基準での得点を求めることができる。ここでは、以下に述べる評価基準において、「経済性」、「資源性」、「環境性」など設計情報から計量値を算出できるものについては、価値関数による得点化を行った。高速炉サイクルシステムの特性を評価する上で重要な基準である「核拡散抵抗性」の観点など計量が困難なものもあり、それらの観点では対評価を採用するなど、すべての評価基準

での得点化を目指した。

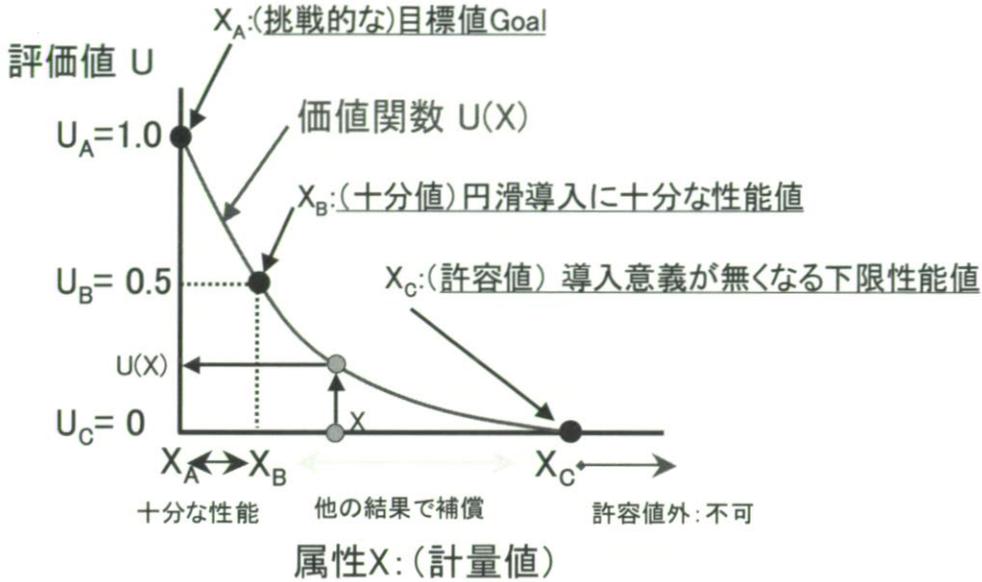


図 5.3.7 価値関数

FS では、高速炉サイクルシステムの特徴を総合的に評価するために、費用便益分析と多基準分析による評価手法の開発を並行して行った。2つの手法を比較すると図 5.3.8 のようになる。評価できる範囲と評価の客観性は相反する。互いの特徴と欠点を理解し、その上で補い合う必要がある。安全性、環境影響、エネルギーセキュリティなどの観点において、外部化したコストを産出することで両者の特徴を活かした上で互いの欠点を補完し、融合する可能性がある。これらを鑑み、評価手法のより一層の精緻化が求められている。

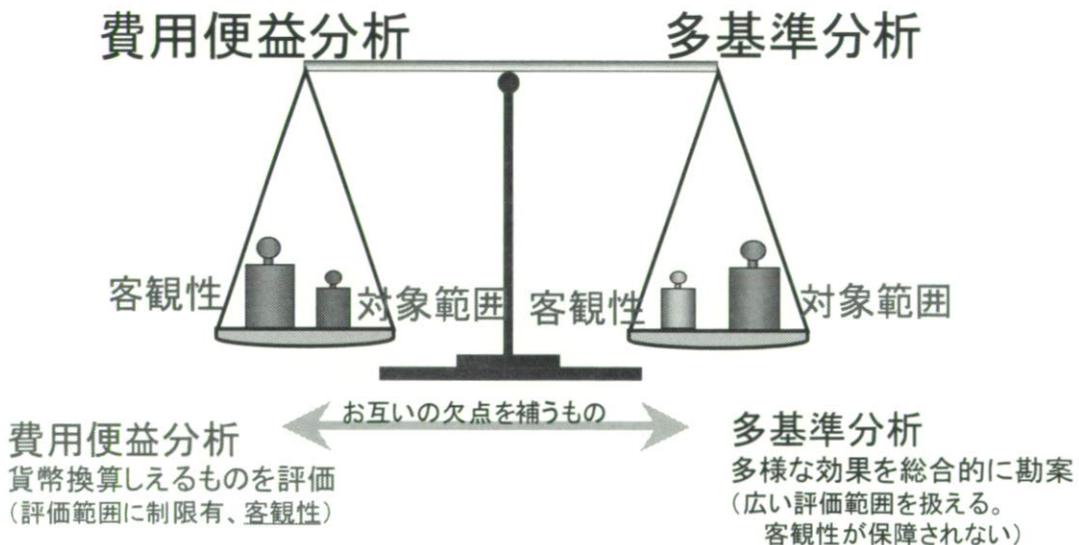


図 5.3.8 費用便益分析と多基準分析の改善

### 5.3.2. フェーズIIの進め方と実用化候補概念の評価

2001年度から5年間実施したフェーズIIでは、フェーズIで開発した考え方にに基づき、さらに研究開発の進捗や各方面の意見を取り入れて具体的な評価手法を開発して多基準分析(以下ではFSでの呼称に従って「多面的評価」と記述)を実施した。このとき、評価視点間の重み付けなどの手法を集団AHPやマーケティングなどの手法を応用して開発した。また、費用便益分析(投資対効果評価)については、導入シナリオ評価と併せて選定した高速増殖炉サイクル概念の導入効果を示すために用いた。以下では、主にフェーズII最終評価における有望な概念選定の流れと概念選定に関わる多面的評価について記述する。なお、フェーズII最終評価におけるFBRサイクルの投資対効果評価では、設計研究に基づく発電コストと投資額の推定(わが国で約1兆円、世界各国で数兆円)を行った場合、高速増殖炉サイクル導入によってわが国では約9兆円、世界各国で約169兆円の効果が生じ、投資額を上回る効果が期待できるという結果を得た。

FSフェーズIIにおける検討の流れを図5.3.9に示す。検討対象となる高速増殖炉システム及び燃料サイクルシステムの各候補概念については、要素技術開発成果に基づき、それぞれの長所を活かすとともに固有の課題を克服することに留意してシステムの設計検討を行い、設計要求への適合可能性及び技術的実現性の評価を踏まえて有望な概念を創出した。

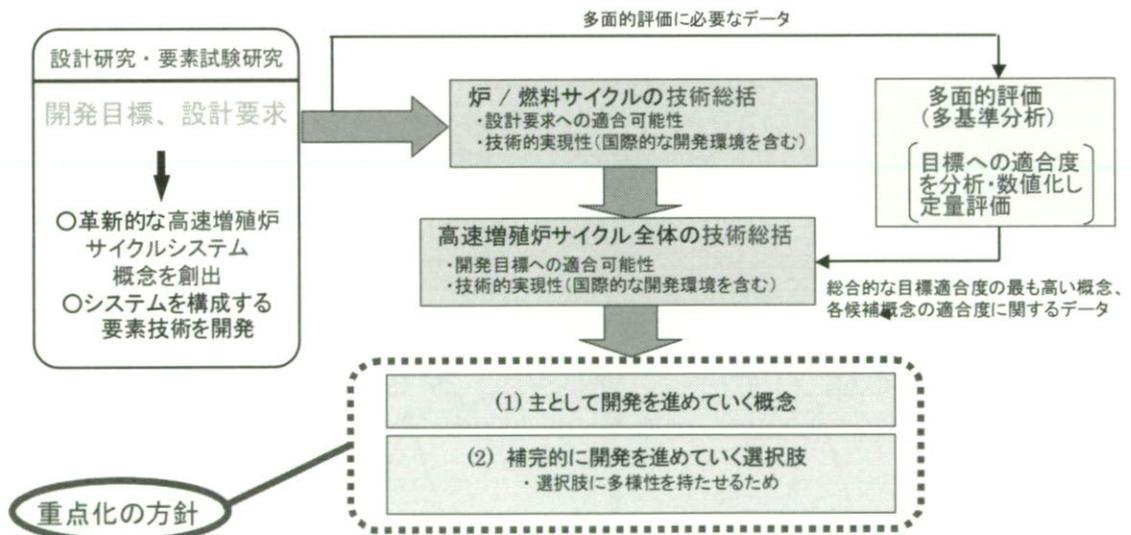


図 5.3.9 フェーズIIにおける検討の流れ

高速増殖炉サイクルシステムの有望概念の選定にあたっては、高速増殖炉システム及び燃料サイクルシステムそれぞれに抽出された有望な概念を組み合わせることで構築した。さらに、それらの高速増殖炉サイクルシステムについて開発目標への適合可能性、技術的実現性などの観点から総合的な技術評価(技術総括)を行ない、最も優れた高速増殖炉サイクルシステムを主概念として選択することとした。また、技術総括では主概念に及ばないものの、将来ニーズとの関係で主概念にはない、若しくは主概念を超える魅力を有する補完概念を選択することとした。

FSフェーズII最終評価では、各候補概念の技術総括と並行して、今後の研究開発の重点化の方針を裏付ける参考データとするため、分析的アプローチ法を用いて開発目標への適合可能性及び技術

的実現性に関する目標適合度（評価得点）を定量的に評価する多面的評価を実施した。また、視点間に将来社会の価値観を想定した重み付けを行い、それらの総和を算出して総合的な目標適合度を定量比較することにより、相対的に最も優れた候補概念を分かりやすく示すこととした。

FS フェーズⅡにおける多面的評価手法の開発と実施にあたっては、原子力機構に加えて、実用化概念の潜在的なユーザーである電力会社や関連研究機関等も交えた広範な議論に基づき、これらの各候補概念について、5つの開発目標（安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性及び核拡散抵抗性）に対する適合度の評価に加えて、技術的実現性も考慮した評価を行った。評価の視点としては、安全性（深層防護を基本とする設計対応により、それぞれのレベルによる判断基準を満足すること）、経済性（発電原価、投資必要額など）、環境負荷低減性（放射性廃棄物発生量、潜在的有害度など）、資源有効利用性（天然U累積需要量、天然U利用効率）、核拡散抵抗性（核不拡散制度への適合可否、難接近性など）、技術的実現性（開発資金、開発期間など）を考慮した。なお、事業容易性と社会的受容性といった視点に関しても手法開発を行って参考評価を実施したが、技術総括を裏付けるための定量的データとしては用いなかった。

評価にあたっては、高速増殖炉システム及び燃料サイクルシステムの設計研究及び要素技術開発の成果に基づき、各々の候補概念を技術的な整合性を考慮して組み合わせる評価対象とする20ケースの高速増殖炉燃料サイクルシステムの候補概念を選定した（表5.3.1参照）。

表 5.3.1 多面的評価の評価ケース

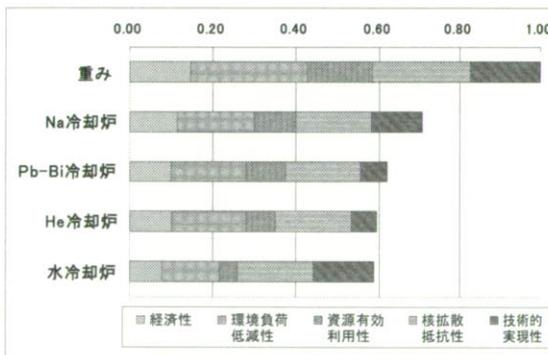
ケース	炉	燃料	再処理		燃料製造	炉心	備考			
			湿/乾	処理規模				方式		
1-1	Na大型炉 (1500MWe × 2基)	MOX	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	資源	Na冷却炉MOX燃料の代表的かつ有望なサイクル概念		
1-2							経済			
1-3							LLFP		FPの分離・回収・核変換を行うサイクルの代表概念	
2-1							資源			
2-2						経済	振動充填	燃料製造法の違いを評価		
3-1						資源				
3-2						経済	先進湿式	簡素化ペレット	資源	経済性においてスケールデメリットはあるものの、導入初期において採用される可能性のある概念
4-1						資源				
4-2			経済	超臨界	簡素化ペレット	資源	湿式サイクルにおいて小規模でも経済性向上が期待される概念			
5-1			資源							
5-2			経済	乾式	小規模 (50t/y)	酸化物電解	振動充填	MOX燃料の最も有望な乾式概念		
6-1			資源							
6-2			経済	金属	乾式	大規模 (200t/y)	金属電解	射出鋳造	資源	酸化物燃料との横並び評価の観点からの金属燃料の大規模サイクル施設概念
7-1			資源							
7-2	経済	小規模 (50t/y)	資源		小規模施設においても高い経済性が期待される概念					
8-1	資源									
8-2	経済	Pb-Bi中型炉 強制循環 (750MWe × 4基)	窒化物	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	資源	Pb-Bi炉の代表的かつ有望なサイクル概念	
9-1	資源									
9-2	経済	Heガス大型炉 (1500MWe × 2基)	窒化物被覆粒子	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	被覆法	資源	Heガス炉の代表的かつ有望なサイクル概念	
10	経済									
10	水大型炉 (1356MWe × 2基)	MOX	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	—	水冷却炉の代表的かつ有望なサイクル概念		

\* 炉心 { 資源：増殖時間を短縮し、より効率的にPuを増殖させる炉心仕様。増殖比1.1程度。(資源重視型炉心)  
 経済：径ブランケット燃料無しで、平均燃焼度向上により燃料サイクルコストの低減を図った概念。  
 増殖比1.0を僅かに上回る。(経済性重視型炉心)  
 LLFP：ターゲット集合体としてLLFPを装置し、核変換することを旨とした概念。

安全性については設計基準事象とこれを超える事象について安全性の確認を行い、各候補概念が安全上の要求を満足し得ることを確認した。残りの4つの開発目標と技術的実現性の5つの視点に対する適合度については、以下のような評価結果を得た。

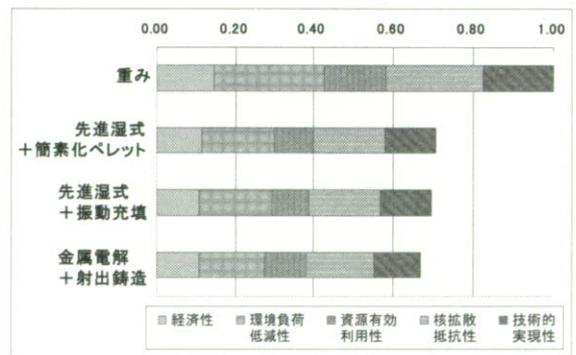
- 普通の市民（約 2200 名）を対象としたインターネットによるアンケート調査により、5 つの視点間相互の重要度比較についての回答を取得し、それを用いて普通の市民の場合の重みを求め、各候補概念の総合的な目標適合度の比較を行った。普通の市民は、環境負荷低減性と核拡散抵抗性を重視する傾向が強い。先進湿式法再処理法と簡素化ペレット燃料製造法と組み合わせた場合の炉型毎の総合的な目標適合度の比較（ヘリウム冷却炉のみ被覆粒子燃料製造との組合せ）、及びナトリウム冷却炉と組み合わせた場合の再処理・燃料製造方法毎の総合的な目標適合度の比較を図 5.3.10 に示す。これらの比較より、「ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット燃料製造法の組合せ（MOX 燃料）」が最も高い総合的な目標適合度を示している。
- 電気事業者（35 名）及び有識者（5 名）を対象とするアンケート調査結果に基づき、それぞれのグループの重みを用いた場合の各候補概念の総合的な目標適合度を求めた結果を図 5.3.11 に示す。いずれの場合も「ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット燃料製造法の組合せ（MOX 燃料）」が最も高い総合的な目標適合度を示している。
- 以上の結果より、将来社会での価値観に基づく重みにはばらつきがあるもののいずれの場合でも、多面的評価においては「ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット燃料製造法の組合せ（MOX 燃料）」が最も高い総合的な目標適合度を示している。

技術総括の結果、「ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造の組合せ（MOX 燃料）」については、「すべての研究開発目標に高いレベルで適合する可能性があり、技術的実現性の見通しも高く、さらに GIF（Generation IV International Forum: 第 4 世代原子力システム国際フォーラム）等の国際的な開発環境を考慮しても総合的に最も優れた概念であると判断された。多面的評価でも、将来社会における価値観の変動に柔軟に対応でき、かつ高い適合可能性を有しており、総合的な目標適合度が最も高い概念と考えられたため、技術総括結果が確認されたと結論付けられた。



炉型毎の総合的な目標達成度の比較 (普通の市民の重み)

〔先進湿式再処理 / 簡素化ペレット製造 (He炉のみ被覆粒子燃料製造) と組合わせた場合。炉心は資源重視型炉心。〕



再処理・燃料製造方法毎 (200t/y) の総合的な目標達成度の比較 (普通の市民の重み)

〔Na冷却炉と組合わせた場合。炉心は資源重視型炉心。〕

図 5.3.10 総合的な目標達成度の炉型別及び燃料サイクル別比較

資源重視型炉心の場合

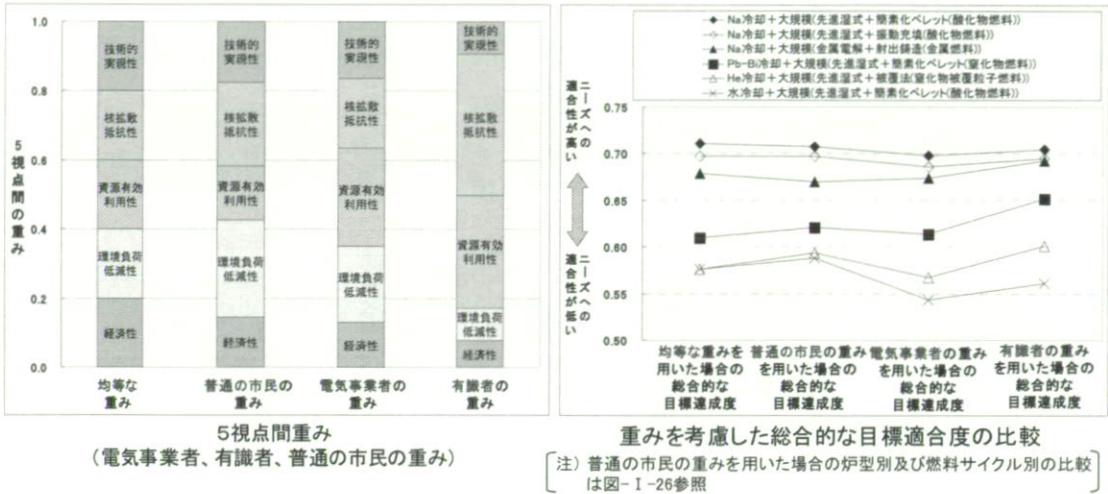


図 5.3.11 社会的属性による重みと総合的な目標適合度の比較

### 5.3.3. FS フェーズ II における研究開発の重点化の結果と今後の研究開発

以上のことから FS フェーズ II においては、「ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット燃料製造法の組合せ (MOX 燃料)」が最も優れた概念である主概念として選択された。主概念については、商用化を目指す最も有望な高速増殖炉サイクルシステムとして、プラント全般にわたり重点的に研究開発を進めることとなる。

補完概念としては、炉心性能の向上により将来のウラン需給が逼迫した場合に柔軟に対応できる能力を有する「ナトリウム冷却炉、金属電解法再処理及び射出鑄造法燃料製造の組合せ (金属燃料)」と高温熱源として多様なニーズに対応できる「ヘリウムガス冷却炉、先進湿式法再処理及び被覆粒子燃料製造の組合せ (窒化物燃料)」が選択された。補完概念については、概念がもつ魅力の達成などのために必要な技術に焦点を絞り、効率的に研究開発を進める。なお、主概念及び補完概念以外の概念については、成立性にかかわる技術課題を対象とした基盤的な研究の進捗状況を把握し、その成果が得られた段階で今後の取り組み方について、適宜、見直していくこととする。

実用化に向けた高速増殖炉サイクルの研究開発計画は、その進捗に応じて図 5.3.12 に示す 3 つの段階 (第 1 段階: 技術体系整備、第 2 段階: 革新技術実証、及び第 3 段階: 実用化推進) を踏んで、徐々にステップアップを図りながら進めることが適切と考えられる。

第 1 段階 (技術体系整備) は、2015 年頃までの高速増殖炉サイクルの技術体系整備の段階であり、要素技術規模で革新技術に関する研究開発の実施により、実用施設の成立性に関わるデータを整備する。また、その研究開発成果を反映した設計研究を実施し、実用施設の概念及び技術仕様を提示する。さらに、第 2 段階の実証試験施設の設計研究を実施することにより、実用化に至るまでの研究開発計画とその具体的な試験内容を提示する。

第 2 段階 (革新技術実証) は、実用化を見通すための高速増殖炉サイクル技術の実証段階であり、第 1 段階で体系化した革新技術を対象として、実用化を見通せる規模での実証試験施設を用いた試験・運転により、同技術の成立性を実証して、開発目標達成の見通しを取得する。また、実証試験の成果を反映した実用施設の設計概念を提示する。

第3段階（実用化推進）は、商業ベースでの本格導入を目指して実用化を推進する段階であり、実用規模の施設の建設・運転を通して、高速増殖炉サイクルの経済性、信頼性などの開発目標の達成を確認する。

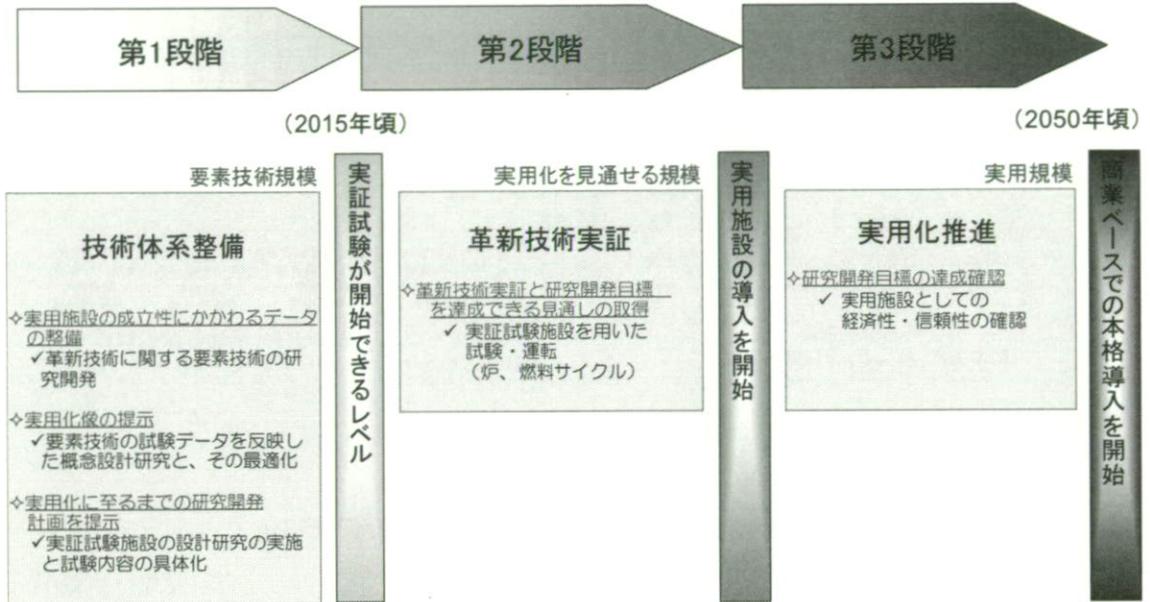


図 5.3.12 高速増殖炉サイクル技術の段階的研究開発

以上の段階的な研究開発においては、各段階の成果を評価し、所定の技術レベルに達していることを確認した上で次の段階へ進むこととする。また、各段階の適切な時期に中間評価を行い、研究開発の進捗状況と方向性を確認する。高速増殖炉サイクルは、高速増殖炉、再処理及び燃料製造の研究開発を一体的に進めることにより、核燃料のリサイクルによる持続的なエネルギー供給と地球環境保持の機能が実現するシステムである。このため、実用化を推進する第3段階までには、各技術の達成レベルの整合性を確保する必要がある。

## 5.4 高温ガス炉と核熱利用

武田 哲明

### 5.4.1. 日本の一次エネルギーと水素エネルギー需給

我が国のエネルギー政策はエネルギー政策基本法<sup>[1]</sup>に示されているが、それは、エネルギーの需給に関する施策に関して、基本方針を定め、並びに国及び地方公共団体の責務等を明らかにするとともに、エネルギーの需給に関する施策の基本となる事項を定めることにより、その施策を長期的、総合的かつ計画的に推進し、もって地域及び地球の環境の保全に寄与するとともに我が国及び世界の経済社会の持続的な発展に貢献することを目的として、エネルギー需給に関する施策についての、基本的な方針として、安定供給の確保、環境への適合、市場原理の活用が掲げられ、施行されている。また、エネルギーの需給に関する基本的な計画（以下「エネルギー基本計画」という。）を定めなければならないと規定されている。

このエネルギー基本計画<sup>[2]</sup>では、エネルギーの需給に関し、長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施策におけるエネルギー需給構造についての長期展望を踏まえた取組の水素エネルギー社会の実現に向けた取組の部分に、水素はその利用段階ではゼロエミッションのエネルギー媒体であり、原理的には非化石燃料からも製造が可能で、その意味で環境的に望ましい二次エネルギーであるとした上で、化石燃料から水素を製造する場合には二酸化炭素等が排出されることとなるため、化石燃料の改質による水素製造技術の改善を進めることや製鉄所の副生ガス等の副生水素の活用、将来的には、二酸化炭素を極力排出しない手段、例えば原子力や太陽光、バイオマスを活用した水素の製造等、化石燃料に依存しない水素の製造が実用化されることが期待されると述べられており、将来的には化石燃料に依存しない原子力などを活用した水素の製造の実用化への期待が国会に報告されている。

1999年12月には、資源エネルギー庁長官の私的研究会として産学官から構成される「燃料電池実用化戦略研究会」が設置され、2001年1月22日に「燃料電池実用化戦略研究会報告」<sup>[3]</sup>が取りまとめられた。この報告書には、2005年、2010年、2020年、2030年（2004年の会議で追加）における燃料電池自動車及び定置用燃料電池の導入目標とともに、必要となる水素需要が示されている。この水素需要は、従来の燃料電池自動車等の導入予測に基づくものではなく、導入目標が達成された場合に必要となる水素量が示されている。

これらの導入目標を達成するため、新エネルギー・産業技術総合開発機構は、2005年6月1日に「燃料電池・水素技術開発ロードマップ」<sup>[4]</sup>を作成し、短期（2007）、中期（2010）、長期（2015～2020）の技術開発課題及びその到達目標を示した。水素製造については、原子力の項目のところ長期的テーマとして研究機関で取組む課題として「高温ガス炉熱化学法（ISプロセス）等」が挙げられている。2020、2030年頃までは水素ステーションでの水素製造や製鉄所等の副生水素で十分賄えると言われているが、それ以降、さらに水素需要が増加するようであれば、新たな大量水素製造プラントが必要になる。したがって、2020～2030年以降というのが、高温ガス炉による水素製造システムを実用化する時期の一つの目安であると考えられる。

水素エネルギー社会への移行により、エネルギー利用の形態、効率、それに伴う環境影響などを大きく変革することが可能となる。この水素の生産に原子力が貢献することは、重要なことであると考えられる。原子力を利用して水素を生産する方法については、現在多くの研究開発が進められている。原子力発電の電力を利用して水の電気分解で水素をつくる方法は現在でも技術的に可能であるが、余剰電力を利用する方法以外は化石燃料起源の水素より高価になると考えられる。原子炉

の高温の熱エネルギーを利用して水を熱化学的に分解して水素をつくる方法は、水を原料とする点から、魅力的なものであるが、まだ開発の段階にある。原料に天然ガスなどの化石燃料を使用し、この水蒸気改質による水素生産に原子炉の熱を利用する方法は、化石燃料節減および二酸化炭素排出抑制が可能で、技術的にも近い将来（2010年代）の実用化が可能と見られている。2020年以降からと予想される水素エネルギー実用期には、これらの方法がそれぞれの特長を生かし、他のエネルギー起源の水素も含めて競合しながら、水素エネルギーを供給することになると考えられる。

#### 5.4.2. HTTR プロジェクト

高温ガス炉では約1000°Cの高温の熱を生産でき、高い熱効率での発電、水からの水素製造等の直接熱利用を可能にすると共に、排熱利用により熱出力の約80%を利用することが可能である。また、燃料の大規模破損や炉心溶融に至る事故が起こらない安全設計が可能であるという安全上優れた特性を有している。世界においても、第四世代原子力システムとして水素エネルギー社会の構築を視野に入れた高温ガス炉システムを最優先の研究開発対象として採りあげている<sup>[9]</sup>。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR）を建設し、高効率発電、水素製造等の熱利用を目指した高温ガス炉システムに関する研究開発を進めてきた<sup>[9]</sup>。

原子力機構における高温ガス炉の開発は、発電用に加え核熱プロセス利用を目指した多目的高温ガス実験炉の開発を目的として1969年に開始された。多目的高温ガス実験炉の設計研究は、炉物理、伝熱・流動、燃料・材料、高温機器等の開発、高温ガス炉特有の設計基準の策定や計算コードの開発と並行して進められ、実験炉設計の詳細化、合理化を重ね、1986年に最終調整を行って終了した。その後、1987年の「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」において、原子力界を取り巻く社会情勢の変化を踏まえ、高温ガス炉開発は21世紀に向けた先導的プロジェクトとしての高温工学試験研究として位置付けられ、試験研究の中核となる施設としてHTTRの建設が謳われた。

原子力機構は、この方針に沿って、多目的高温ガス実験炉に関する研究開発の成果を基盤として、我が国で初めての高温ガス炉であるHTTRの建設に向けた設計、関連研究開発を進め、1990年11月には原子炉の設置許可を取得し、1991年3月に当時の日本原子力研究所・大洗研究所にHTTRの建設を開始した。建設は1996年に完了し、その後、総合機能試験等を経て、1998年11月10日に初臨界を達成した。HTTRは、熱出力30MW、世界で初めて最高950°Cのヘリウムガスを原子炉から取り出すことのできる高温ガス炉である。燃料は、二酸化ウランの燃料核をセラミックスで4重に被覆した被覆燃料粒子を用いたブロック型燃料を使用し、また、炉心構造材には黒鉛を使用している。HTTRの概要と建設の歴史を図5.4.1と図5.4.2に示す。

1998年にHTTRの初臨界を達成後、1999年から出力上昇試験を開始し、10MW、20MWの各出力段階で順次性能を確認しながら定格出力30MWまでの出力上昇を行い、2001年12月に定格出力30MWにて原子炉出口での冷却材温度約850°Cを達成した。その後、原子炉出口冷却材温度950°Cでの運転（高温試験運転）にあたっては、定格運転等の運転データに基づき設計時の燃料最高温度、制御棒及び中間熱交換器の温度等の見直しを行い、高温試験運転が安全に実施できることを改めて確認した後、2004年3月に高温試験運転を開始し、同年4月19日に原子炉出口冷却材温度950°Cを世界で初めて達成した。これにより、熱化学法ISプロセスによる水素製造に必要な温度を達成したこととなり、高温ガス炉による水素製造の実現に向けて大きく前進した。



### 目的

#### ■ 高温ガス炉の技術基盤の確立

- ・ 高温ガス炉の運転性能の把握等

#### ■ 高温ガス炉の技術の高度化

- ・ 固有の安全性の実証等

◇ H10年度 初臨界達成

◇ H13年度 30MW、850°C達成

◇ H14年度 安全性実証試験開始

◇ H16年4月19日 950°C達成

図 5.4.1 高温工学試験研究炉 (HTTR) の概要



図 5.4.2 HTTR 建設の歴史

図 5.4.3 に示すように、今後は、高温ガス炉の実用化に向けて、高温ガス炉の基盤技術の確立と技術の高度化が主要な課題である。高温ガス炉の基盤技術の確立においては、HTTR の長期連続運転等を行い、燃焼に伴う炉心特性変化、ヘリウムガスの不純物管理、高温機器の性能・健全性の確認、保守技術の確立等、運転・保守に係るデータと技術的ノウハウを蓄積し、高温ガス炉の実用化に役立てることが今後の重要な課題である。高温ガス炉の技術の高度化については、実用化に向けて安全性を維持しつつ一層の経済性向上を目指す観点から、HTTR における安全性実証試験、燃料・材料開発が進められている。

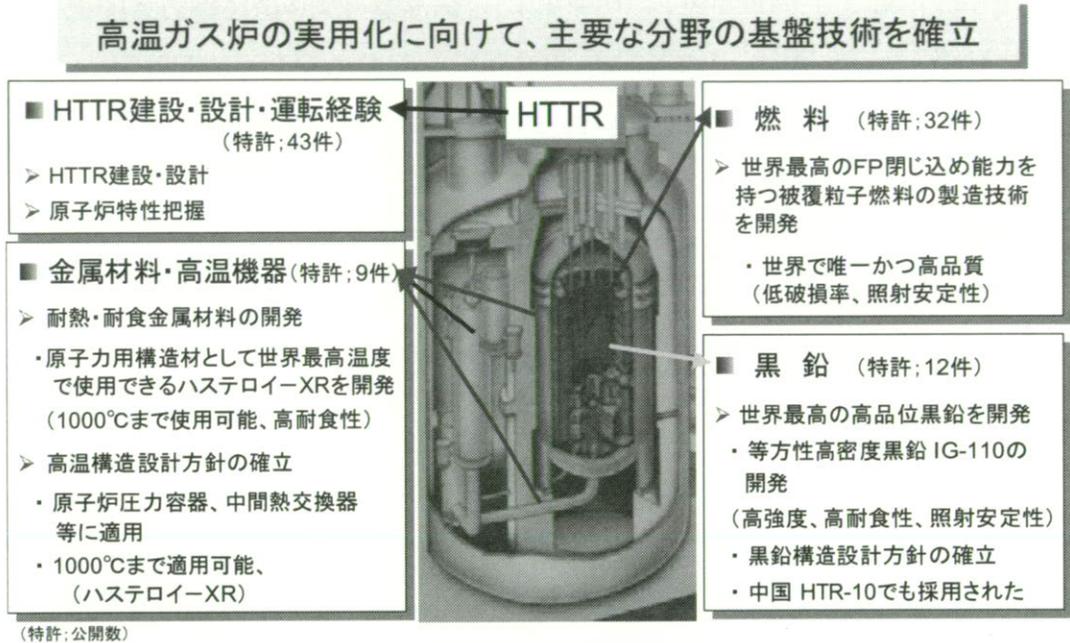


図 5.4.3 高温ガス炉技術開発の内容

HTTR における安全性実証試験は、高温ガス炉が有する高い固有の安全性を実証することにより、高温ガス炉の実用化に際して工学的安全設備の合理化、解析・評価コードの精度向上による合理的な安全設計を実現することを目的として 2002 年度から開始された。試験では、代表的な異常事象として、HTTR の設置許可の範囲内で制御棒引き抜きによる反応度投入、1 次冷却材循環機の停止による冷却材流量の低下を実施し、炉心の負の反応度フィードバックのみにより原子炉出力の急激な上昇が抑制され安定な状態に静定するとともに、燃料温度の変化も緩慢で小さいことを示すものである。2004 年までに、原子炉出力 18MW までの条件下での制御棒引き抜き試験、循環機停止試験が実施されており、今後さらに高出力での試験を行うべく安全解析・評価等が進められている。

高温ガス炉の特徴的なかつ必須の技術として原子力機構が開発してきた燃料、黒鉛、高温金属材料について述べると、燃料技術では、世界最高の核分裂生成物閉じ込め性能を有する被覆燃料粒子の燃料製造技術を開発し、世界において工場規模で生産できるのは日本だけである。黒鉛についても等方で不純物の少ない品質のよい黒鉛 IG-110 を開発してきた。この黒鉛は現在 HTTR のほかに世界で唯一運転されている中国の高温ガス炉 HTR-10 でも使用されている。金属材料では、熱交換器の伝熱管や冷却配管の高温部で 1000°Cまで使用可能な Hastelloy XR を開発してきた。このように、高温ガス炉に必要な主要な分野の基盤技術は原子力機構が国内のメーカーと共同して自前で開

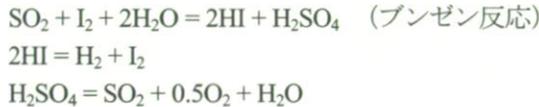
発してきたものである。

現在、燃料に関する研究開発では、高温ガス炉の性能向上を目的として HTTR 用燃料に使用されている炭化ケイ素 (SiC) 被覆燃料粒子よりさらに高温かつ高燃焼度まで使用可能な炭化ジルコニウム (ZrC) 被覆燃料粒子の研究が進められている。材料の研究では、炉心構造材として使用している黒鉛について、健全性の評価を目的として使用中に非破壊的に機械的強度を測定・評価する技術開発が行われている。また、制御棒の被覆管材料について、現在 HTTR で使用している耐熱合金 (アロイ 800H) よりもさらに耐熱性に優れた炭素複合材料の適用が検討されている。さらに、重要な技術として高温ガス炉の運転・保守技術があげられるが、これについても HTTR の試験・運転を通じて必要な技術が蓄積されている。

### 5.4.3. 高温ガス炉を用いた水素製造技術

水の熱分解によって水素と酸素を得るには数千度の高温が必要である。しかし、第3物質を用いて水分解を複数の化学反応 (高温域での吸熱的な化学反応と低温域で発熱的な化学反応) に分割することにより、直接熱分解に必要な温度よりも低い温度の熱のみで水素製造を行うことが可能である。この方法は熱化学法と呼ばれ、1960年代、米国の Funk らにより可能性が検討され、さらに、イスラ研究所の De Beni らにより高温ガス炉を熱源に想定した最初の具体的な熱化学法が提案されたことを皮切りに、各国で研究が進められてきた。

これまでに、硫酸分解を要素反応とする硫黄系熱化学法が有力であることが見出されており、米国 GA 社が提案した以下の反応で構成される IS プロセスは大規模化に適した硫黄系の熱化学法のひとつである。



ここで、ブンゼン反応は低温発熱反応であり、図 5.4.4 に示すように、ヨウ化水素 (HI) と硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 分解反応は高温ガス炉と適合した温度域で吸熱を伴って進行する。

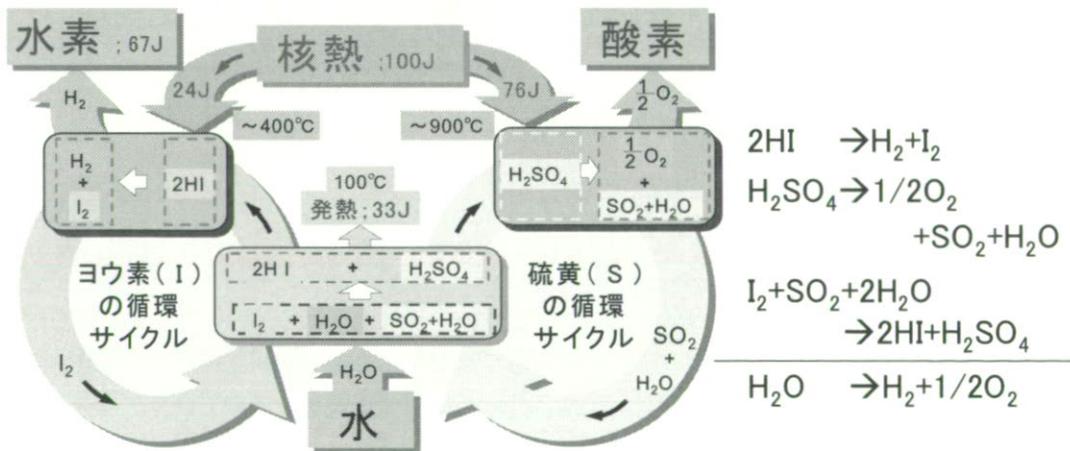


図 5.4.4 熱化学法 IS プロセスの概要

熱化学法の重要な特長として、水以外の反応物質を循環使用する「閉サイクル性」がある。原子力機構では、ISプロセスによる閉サイクル水素製造の研究を進め、基本反応を組み合わせたピーカースケール実験によって、毎時1リットルの水素発生速度で水分解の量論比に等しい割合の水素と酸素を発生させ、1997年にISプロセスの原理を実証した。2003年8月には、ベンチスケール規模のISプロセスで6.5時間の連続水素製造に世界で初めて成功し、ヨウ素反応制御及びプロセス制御方式を新たに考案し、2004年6月に約1週間にわたる毎時30リットル規模の連続水素製造に成功している。図5.4.5は、その試験における水素と酸素の累積発生量を示したものであるが、水分解による水素と酸素を、理論通りの2対1の割合で安定に発生させることができ、本試験によりプロセス制御の基盤技術を確認している。また、腐食性が強いヨウ素や硫酸などには優れた耐食性が要求されるが、候補材料に対して1000時間レベルの腐食データを整備するとともに、分離膜の開発を進め、熱効率の向上を目指している。

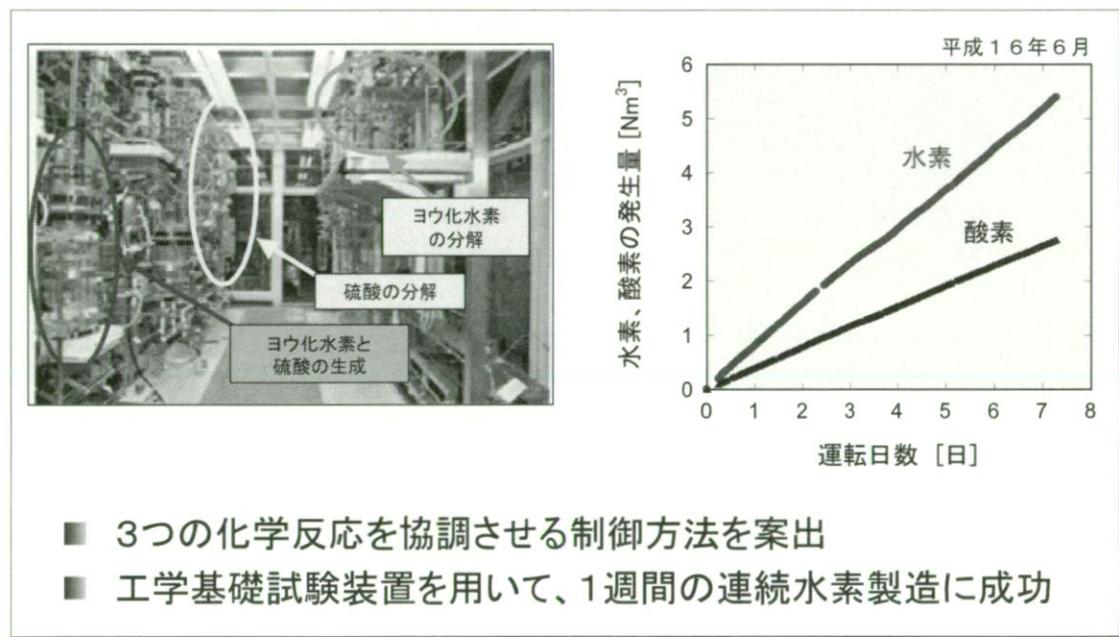


図 5.4.5 工学基礎試験装置と試験結果

原子力機構では、これらの研究成果を総合して次段階に移行することが計画されている。表 5.4.1 に示すように、次段階では HTTR 接続試験の前段階として工業材料製の化学反応器を開発し、実用高圧条件の下で水素製造試験を行う予定であり、水素製造に必要な反応熱は、原子炉を模擬した電気ヒーターで加熱したヘリウムガスによって供給する。本試験の目的は実用工業材料で試験装置を組み上げること、及びヘリウムガスとの熱交換により必要な熱を供給することである。このパイロット試験に向けた要素技術開発では、工業用材料を用いた機器開発として硫酸蒸発器やヨウ化水素蒸留塔の開発、水素製造効率の向上を目指して、ヨウ化水素分解工程においては、電気透析によるヨウ化水素濃縮や水素分離膜の効率、ベンゼン反応工程においては分離膜技術によるベンゼン反応工程の合理化等について研究が進められている。

表 5.4.1 IS プロセス技術開発の状況

## 平成9年:ISプロセスを世界で初めて実証(1リットル/時で24時間)

項目 \ 開発段階	工学基礎試験	パイロット試験	HTTR試験
水素製造量	~ 0.035 m <sup>3</sup> /h	~30 m <sup>3</sup> /h	~1000 m <sup>3</sup> /h
熱供給方式	電気ヒーター	高温ヘリウムガス 熱交換方式 (電気加熱)	高温ヘリウムガス 熱交換方式 (HTTR核熱)
反応器等の材料 硫酸分解器の大きさ	ガラス 触媒層 約 0.3 m	工業材料 触媒層 約1m	工業材料 触媒層 約 3m
プロセス圧力	常圧	高圧	高圧
時期	H11 - H16 (1999 - 2004)	H17 - H22 (2005 - 2010)	H21 - 26 (2009 - 2014)

高温ガス炉水素製造技術を実用化するためには、水素製造設備を高温ガス炉に安全かつ経済的に接続する必要があり、そのための研究も同時に進められている。図 5.4.6 は、システムインテグレーション技術開発の概要を示したものである。

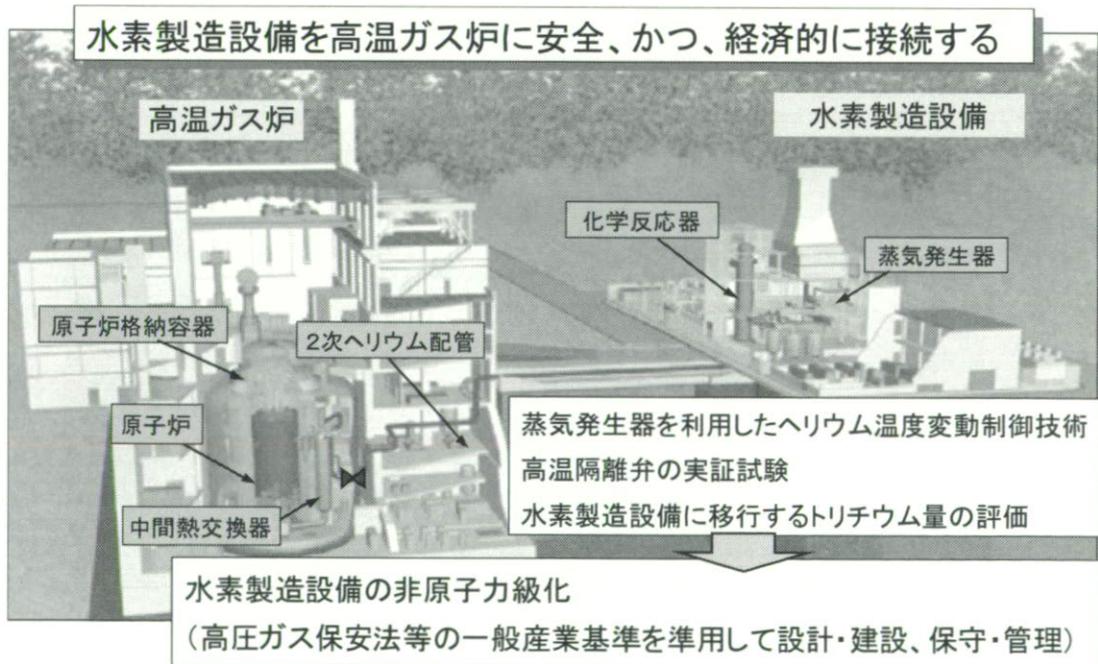


図 5.4.6 システムインテグレーション技術開発の概要

原子炉からの熱は中間熱交換器で1次ヘリウムガスから2次ヘリウムガスへ熱交換を行い、2次ヘリウムガスは水素製造の熱源として水素製造設備へ送られる。原子炉と水素製造設備の接続は世界的にもこれまで例がない。原子力機構では、原子炉と水素製造設備を安全、かつ、経済的に接続するため、a) 可燃性ガス（水素）の火災・爆発に対する原子炉の防護、b) 放射性物質の環境への放出防止、c) 原子炉と水素製造設備を安定に運転するための制御技術について研究開発が行われている。上記の a) については、深層防護の考えに基づき、①可燃性ガスの漏えい防止、②漏えいの拡大防止、③火災・爆発による輻射熱及び爆風圧の影響軽減を考慮して安全設計が進められている。b) については、中間熱交換器伝熱管等を対象として、水素、並びにトリチウムの代わりに重水素を用いた試験を行い、炉心で生成するトリチウムの製品水素への移行の挙動を明らかにするとともに、移行量が安全上問題ないことが確認されている。

原子炉と水素製造設備は、冷却材である1次ヘリウムガス及び2次のヘリウムガスを経由して接続している。水素製造設備の化学反応器において水素製造反応が変動した場合、化学反応器出口で2次ヘリウムガスの大きな温度変動が発生し、この温度変動が中間熱交換器並びに原子炉へ伝播した場合には、原子炉をスクラム停止させる可能性がある。c) については、蒸気発生器を2次ヘリウムガス系の化学反応器の下流に配置することにより、化学反応器で発生する温度変動を蒸気発生器で緩和して原子炉の運転に影響を及ぼさない制御技術を考案し、モックアップモデルを用いた模擬試験により蒸気発生器の温度緩和効果の有効性を確認した。将来的には、水素製造設備は一般産業基準を準用する非原子力設備として設計、建設、保守管理ができることを目指している。

高温ガス炉水素電力併産システムの研究開発では、軽水炉と比べて高い発電効率と優れた経済性を目標とし、かつ、できる限り既存の技術を用いてこの目標を達成することを基本方針として設計が実施された。高温ガス炉ガスタービン発電システムをベースとした水素電力併産システムの全体図を図5.4.7に示す。熱出力600MWの高温ガス炉に水素製造設備、ガスタービン発電設備などを接続し、170MWを水素製造で利用し、残りを発電に利用することが想定されている。低温の排熱を海水淡水化で利用すると80%という高い熱利用率を達成できる。

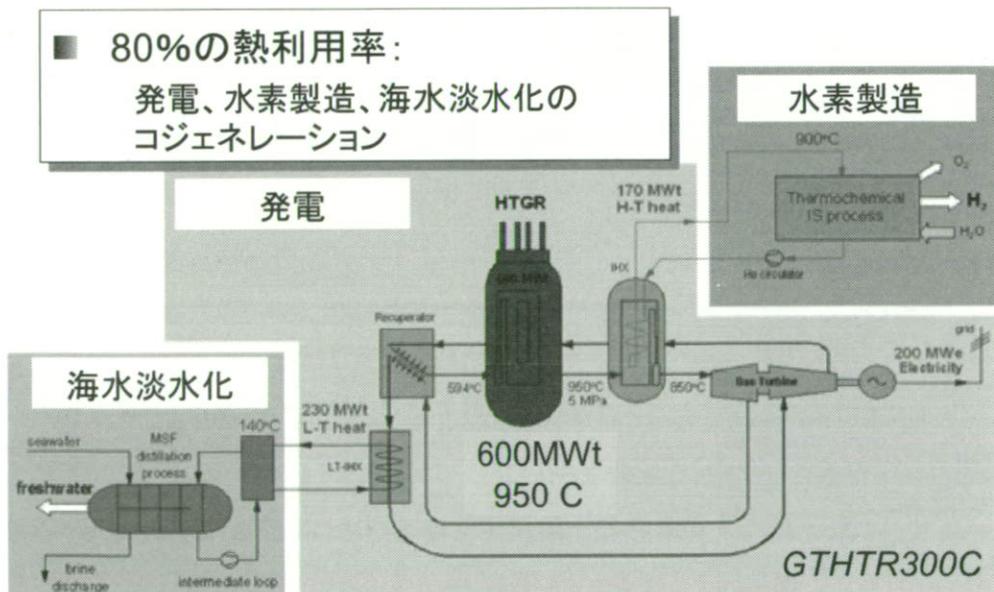


図 5.4.7 水素電力併産システムの概念図

## 5.4.4. 水素社会への移行

水素の導入については、図 5.4.8 に示すような、導入期、普及期、本格普及期の 3 つに分けられている。2020 年頃までの導入期、普及期では、製鉄所のコークスガスに含まれる副生水素、電気分解や都市ガスを用いた水蒸気改質により、水素ステーションにおいてオンサイト法による水素等で供給されるものと考えられている。さらに、2020 年以降の本格普及期では、大量に、しかも広域で水素が必要となると考えられ、この時期に必要な大量の水素は、原子力システム、二酸化炭素を処理する技術を有した化石燃料システムによって供給されるようになることが期待されている。また、それぞれのシステムの特性を生かして、例えば、自然エネルギーが豊富にあり、離島や田舎といった需要密度が薄い地域では、自然エネルギーシステムが活躍することになると考えられる。

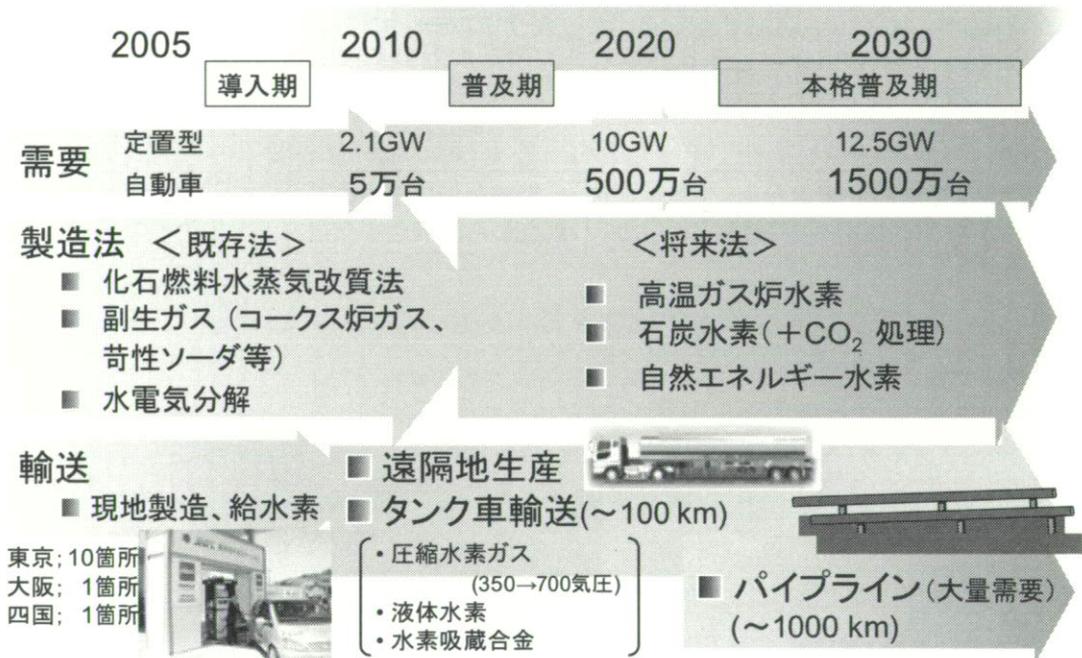


図 5.4.8 水素普及の道筋

高温ガス炉水素製造システムの実現に向け、開発研究の必要な技術とそれぞれの課題を整理すると、図 5.4.9 に示すように高温ガス炉技術として出口温度 950℃を達成した HTTR を用いた安全性実証試験による安全性・信頼性の実証、連続運転の実施による原子炉特性の把握等が挙げられる。また、IS プロセス水素製造技術では、パイロット試験を実施するとともに材料等の高性能化、効率の改善、解析コードの開発が進められ、HTTR と IS プロセスを接続するシステムインテグレーション技術の開発とあわせてこれら 3 つの技術開発を完成させ、HTTR を用いた水素製造を実証する計画とされている。さらに、その先は産業界が実用システムの開発に着手することが可能となり、大量の水素需要が見込まれる 2020 年代以降の高温ガス炉水素製造システムの実用化につながることを期待される。図 5.4.10 は将来の水素社会の概念図であるが、エネルギー資源が少ない日本では水素製造を一つのエネルギー源に頼るのは危険であり、発電と同様に原子力、化石燃料、自然エネルギーの各システムが各々の特性を活かして、水素製造を分担することが適切であると考えられる。

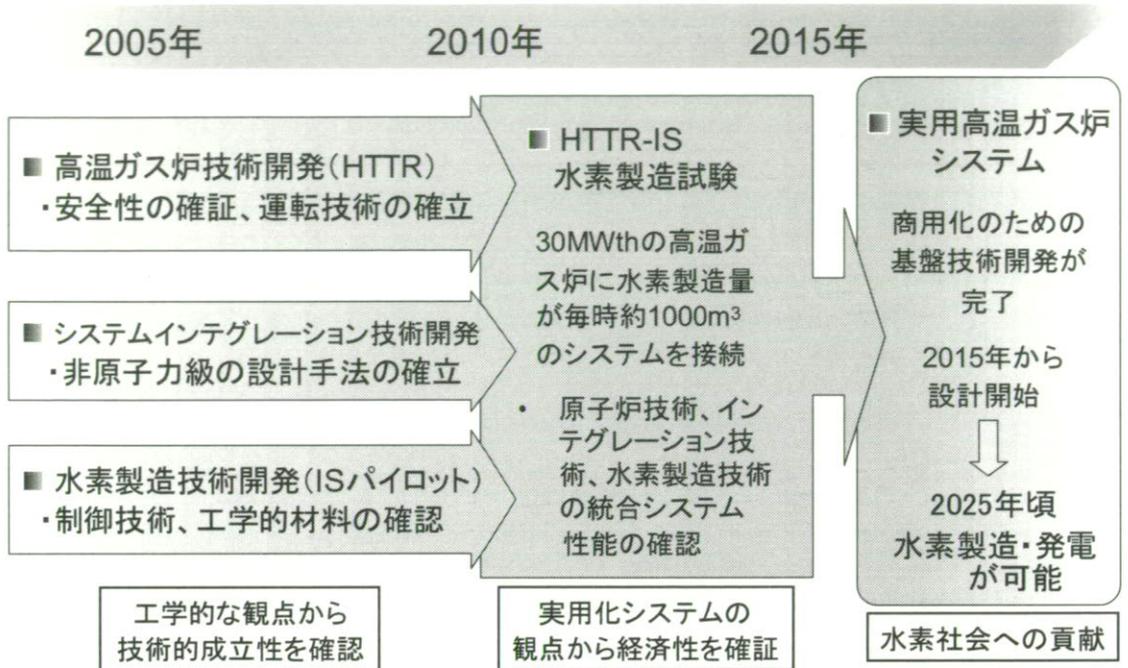


図 5.4.9 高温ガス炉水素製造技術開発のマイルストーン

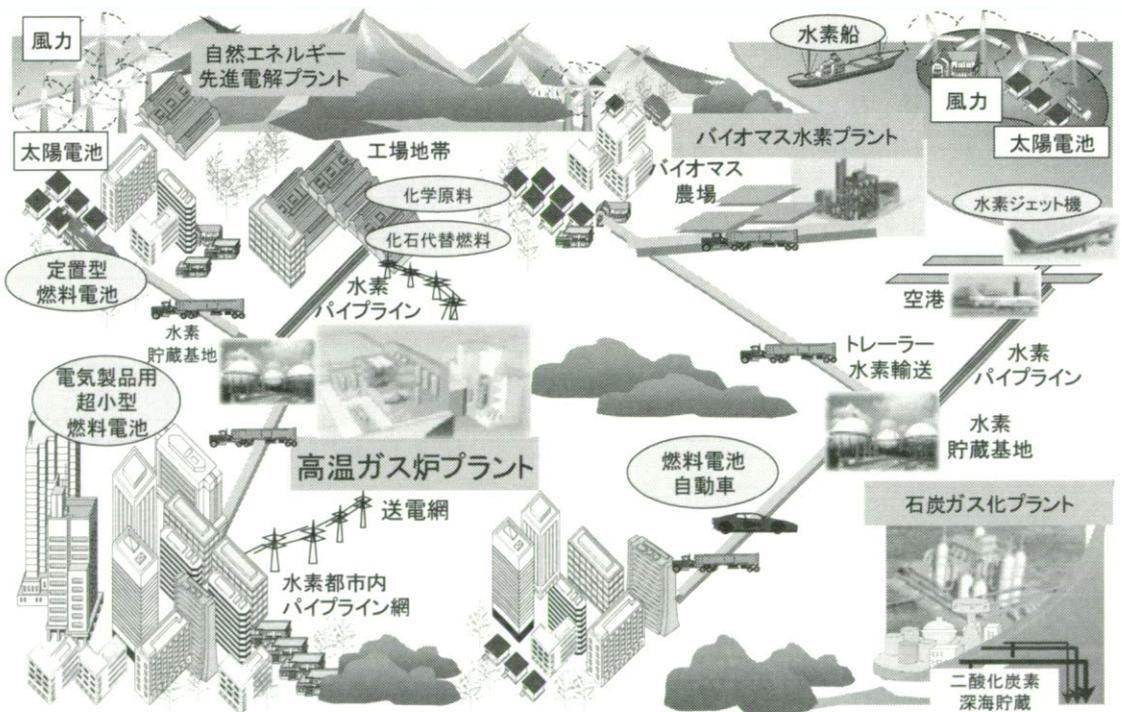


図 5.4.10 将来の水素社会

## 参考文献

- [1] エネルギー政策基本法、  
[http://www.ron.gr.jp/law/law/energy\\_k.htm](http://www.ron.gr.jp/law/law/energy_k.htm)
- [2] エネルギー基本計画、  
[http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0004573/1/0301007energy2\\_.pdf](http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0004573/1/0301007energy2_.pdf)
- [3] 燃料電池実用化戦略研究会、燃料電池実用化戦略研究会報告、  
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g10122bj.pdf>
- [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、第2回燃料電池・水素技術開発ロードマップ委員会資料、  
<http://www.nedo.go.jp/iinkai/gijutsu/gijutsu/roadmap/2/index.html> (2005).
- [5] [http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen\\_iv\\_roadmap.pdf](http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf)
- [6] 日本原子力学会誌、Vol.47, No.5, pp.342-349 (2005).



## 5.5. 核融合エネルギーの外部性

小西 哲之

### 5.5.1. はじめに

核融合はエネルギーとして実用化しておらず、技術的に実現して本格的市場投入が起こったとしても、今世紀後半となると見られている。核融合の環境、社会への影響を論ずるにはそれを具体的に評価する対象がないので時期尚早であるといえるが、一方、現在において核融合を開発する意義、今後核融合エネルギーを開発する方向、を考える上では重要な観点であるともいえる。むしろ、現在核融合や原子力、その他多くのエネルギー技術が、長期的観点から公的資金によって研究開発されていることを考えれば、未来のエネルギー選択を未来の市場に任せるよりも、社会的な望ましさや地球環境問題の観点で、現在考察することが必要であろう。未来エネルギー技術といっても、現在わかっているエネルギーとしての特徴としてだけでも十分考えられる点も多い。ここでは社会が将来エネルギー源を選択する、あるいは現在エネルギー技術の開発を社会的政策として選択する、と言う観点で核融合の外部効果を分析考察する。

### 5.5.2. 核融合のCO<sub>2</sub>削減効果

外部性を考える以前に、将来のエネルギー技術に必要な最低限の条件は、安全性、資源制約、環境負荷、市場性であろう。このいずれもが相対的な問題として、他のエネルギー技術との比較において直接コストとともに間接的な費用、外部性として関係してくると考えられるが、その中のどれが内部化されるかは今の段階ではわからない。たとえば、火力発電において大気汚染などに対する環境対策はすでに内部化されている。各種発電方式のCO<sub>2</sub>放出原単位は内山によって<sup>[1]</sup>、核融合については同様の手法で時松によって<sup>[2]</sup>、図 5.5.1 に示すように評価されている。ライフサイクルを考えれば、核融合のCO<sub>2</sub>放出は軽水炉と同程度と大変わずかで、太陽光などの再生可能エネルギーよりも少ないと予想されている。しかしこのCO<sub>2</sub>放出は炭素税などの導入があれば内部化されるコストであるし、ある程度以上少なくなれば実質的な差はなく、ゼロに近づけても大きな効果はないことには注意を要する。未来の発電技術について二酸化炭素放出が極めて少ないことはほとんど必須条件であって、再生可能エネルギーと原子力、核融合の間で相互に代替があったとしてもCO<sub>2</sub>「削減」効果はないといえる。むしろ、石炭など化石燃料を代替したときの「削減効果」が大きいことを考えれば、化石資源が依然として主力である燃料など、発電以外の分野での利用の効果が大きく、核融合エネルギーが具体的にこのような利用形態で有意なエネルギー供給ができれば、たとえば製鉄で石炭を還元剤として使わなければ（原子力製鉄で検討された水素還元など）環境対策として有効である。5.4 節で述べられた高温ガス炉と同様に、核融合では水素を製造することができる。燃料として化石資源を代替する可能性は、合成燃料の製造能力に依存しており、環境に対するインパクトは、発電よりも質的にも量的にもこちらのほうがはるかに重要である。

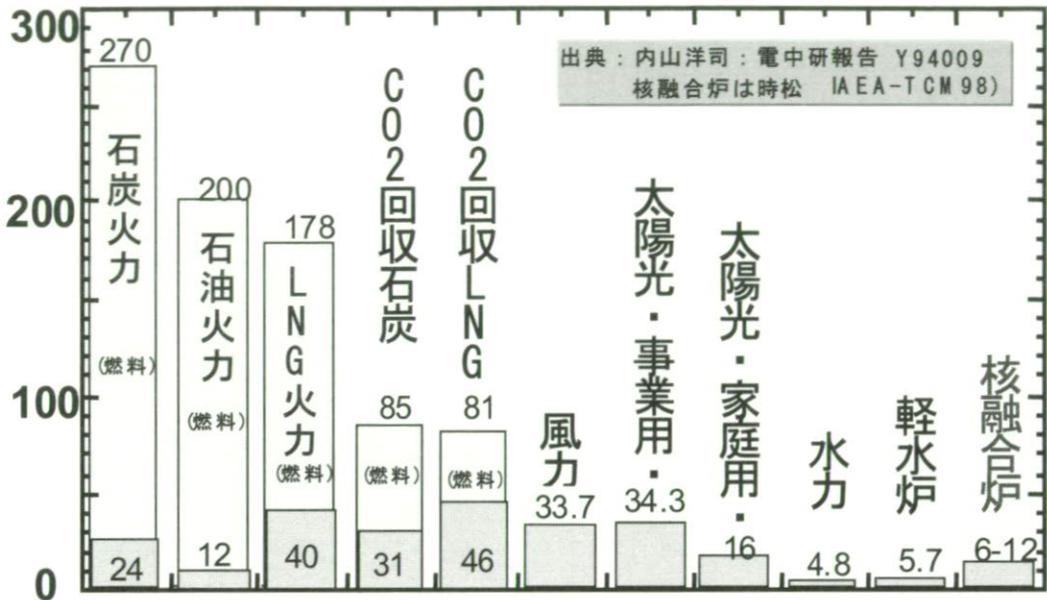


図 5.5.1 各種エネルギー源のライフサイクルでの二酸化炭素放出量 (排出原単位、炭素 g/kWh)

### 5.5.3. 核融合の資源

核融合の燃料資源は無尽蔵とってよい。反応に必要なのは重水素とトリチウムであり、重水素は天然水には多少の差はあってもだいたい 150ppm程度が含まれる。トリチウムは天然資源として存在せず、リチウムから核融合プラント内で生成されるため、消耗性資源としてはリチウムを考える必要がある。これも、海水中の存在量を考えれば、数千万年分といわれるだけ<sup>3)</sup>存在している。このほかに、核融合は数多くの希少な元素を使用する技術であるが、いずれもその建設や運転を制約するものとは考えられていない。

資源量がある程度を超えると、たとえば無尽蔵などという、社会はそれに大きな価値を置かず、1000年分でも10000年分でも大きな差とはならないといえる。このことは、5.6節の岡野の分析により明らかにされるし、また割引率により遠い未来の資源が現在価値としては著しく割り引かれることから理解される。逆説的ではあるが、石油の「可採年数」が常に30年程度であることも、この理由による。言うまでもなくこの可採年数は枯渇するまでの年数とは何の関係もなく、この程度存在することがわかればそれ以上は資源探索や技術開発のインセンティブとしないことを示しているに過ぎない。無尽蔵の資源、という核融合の特徴は直接的なエネルギー源の価値として過大評価することはできない。

しかしながら技術的には、核融合のエネルギー資源については、無尽蔵である以上に、まったく制約がないということができ、この方が影響は大きいかもしれない。核融合プラントにおいて発電のためのタービンを海水冷却で運転したときに取り込まれる海水から、既存技術でリチウムを抽出すれば、事実上プランケットで消費する以上のリチウムが入手できる。さらには重水素は、核融合プラントがトリチウム放出を防止するための巨大な水素同位体プラントであり、かつ大量の水を常時処理しなければならないことを考えると、実質的に外部から重水素を供給しなくとも、あるいは

新たな同位体分離設備を作らずとも、重水素の必要量は運転とともに満たされる可能性があることを筆者は指摘している。初期装荷トリチウムも、必要不可欠な特殊物質ではなく、重水素運転によってプラントが起動できることを筆者らは示した<sup>[4]</sup>。つまり核融合プラントは、一旦動き出せば、外部からの燃料供給を行わなくとも自由に運転ができるのである。これは、供給量を制御できない太陽光や風力をも上回るレベルで、燃料制約をまったく持たないことを意味している。

この「資源制約がない」ということは、むしろ外部性に関連した様々な影響を及ぼしうることは考えられる。全ては核融合がエネルギー源として実用技術とみなせるようになってからのことであるが、たとえばエネルギーセキュリティという面では、資源の枯渇に対して安心感を与えることができる。海水をエネルギー源とみなせることは資源の偏在に起因する現代のエネルギー供給やそれに関連した国際緊張・紛争にかかる懸念の多くを払拭する可能性をもつ。いわゆる「バックストップ」として他のエネルギー価格の暴騰の抑止力となるためにも、潜在的な供給力は必要条件である。即応性には劣るが、燃料資源にかかわる核融合のこのような特徴は、発電コストに関連して考えられるものではないので、広義には外部性に近い性質といえるかもしれない。要するに、設置者のすべてに対して、燃料について一切の懸念を持たせない、というメリットがあるのである。

核融合についての資源制約の本質は、資源が多いとか安価であるということではなく、そのエネルギー価格の大部分は、資源ではなく技術に対するものであるということである。このことは太陽光や風力などの再生可能エネルギーでも共通であるが、コストの大きな部分は発電装置に対するものであって使用する資源ではない。したがって、他の多くの工業製品、それも電化製品や情報機器のような高付加価値製品と同じく、市場競争と累積販売量に従って価格は著しく減少していく傾向にある。一方、価格の大きな部分を資源によるエネルギーは、消費することにより価格は必ず上昇する傾向を持つ。他の化石資源などの高騰が将来に向けて予想される状況では、核融合のように、相対的に先高感がなく技術に依存するエネルギーは、投資先として選好される可能性がある。もつとも、技術依存エネルギーは将来に向けて価格は必ず低下していくものであるため、同様の投資心理としては値下がりを見越した買い控えの恐れも常にあるとも言える。

#### 5.5.4. 安全性と核融合の外部性

安全性も基本的には内部化されているコストであるといえる。安全性はエネルギー技術の必須条件であって、全てのエネルギー技術について、潜在的な安全上の問題は法令、許認可や技術基準によって社会の許容できる安全性を確保された後に導入されるわけであるから、発電方式、エネルギー発生方式のちがいに問わず基本的に社会に対するリスクは同程度となるはずである。つまり理想的には、安全性にかかるエネルギー技術の違いはエネルギー比較の対象とならない。以下に、異常時と、通常時に分けて考える。

(a) 異常時放出：エネルギー技術について事故が起こったとしたときに起こす最大の被害の大きさを評価することは可能である。たとえば放射性物質などの有害物を保有するものであれば、それがいかに想定外であったとしても、全量放出されたときの影響を考えればよいわけである。これをハザードポテンシャルと呼ぶ。火力発電所の燃料タンク、水力発電所の貯水、なども一時にエネルギーを放出すれば大事故になるので同様である。これに、そのような放出事象の起こる確率をかければ事故のリスクとなるので、それを許容される以下の大きさとするように、異常事象の起こる確率を下げるように安全対策を講じればよい。ハザードポテンシャルが大きい、あるいは異常事象の起こる確率が高ければ、安全対策にはコストがかかるし、本来安全性の高いエネルギー源には対策がほとんど不要である。つまり、この同程度の安全性を確保するために必要とされる技術的努力の大きさはエネルギーによって異なることになる。

このことは、安全性そのものは技術によらず同程度であることを意味する。しかしそのための費用が内部化されていたとしても、社会がエネルギー源を見たときの感覚、いわゆる「安心」や、それに付随して発生する社会的忌避や風評被害の問題を発生する。このようなところから、内部化されえない安全性にかかる外部コストが発生しうが、発電施設の立地に際してその地域に対して起こるこのような被害がたとえば漁業権の買取や何らかの地元交付金のような形で金銭化されれば、これも内部化されることがある。

核融合の安全性については、別稿で詳述している<sup>[9]</sup>。核融合は原理的に反応度にかかる異常事象に対しては固有の安全性がある。その上、反応系（プラズマ）に存在するエネルギー量、燃料が高々数秒の反応に相当するだけしかないので、異常なエネルギー放出はほとんど問題とならない。この点が、数年分の燃料および使用済み燃料を保有しうる核分裂炉心とは大きく異なる。核融合においては被害を及ぼしうる物質の最大のもはトリチウムであり、これは高々数日分がプラズマ中を循環している。これは気体ないし水として環境を通して生体に入り、影響を与えやすい核種であり、核融合プラントの保有するkgレベルという量（インベントリー）は周辺環境、住民に大きな被害を与えうるだけのものである。このハザードポテンシャルは核分裂炉に対して1/1000レベルとか研究炉並み<sup>[9]</sup>といわれるが、これはプルトニウムなど核分裂炉の保有する核種よりも生体への影響の少ない核種であるためでもある。

(b) 通常時放出：核融合の安全性については、通常運転時でもこの放射性のトリチウムが放出されることには注意を要する。これも前述の事故時と同様の考察により、基本的には内部化されたコストで安全性が確保されている。ITERの例でも周辺公衆の被ばく量は最大100マイクロシーベルトと、自然放射線と比べても無視できる程度の量ではある。しかし、環境中で検出可能であること、飲料水や農作物などでも検出可能であることから、原子力の外部性の中心的な課題のひとつと現在みなしている低線量被ばくの原因として同定可能となる。環境や農作物での検出は、風評被害や農作物価格への影響も考えられるであろう。これらは全て核融合にかかる負の外部性の大きな要因となりうるものである。

核分裂炉（軽水炉）でもトリチウムなど放射性物質の通常時放出はあるが、事故時の対策のほうに著しく大きく、また放出量自体が小さい（現在の原発周辺で50マイクロシーベルト以下の被ばく量）ため、ほとんど問題となっていない。

実は、ITERや、DEMOプラントで想定できるとほぼ同様のレベルのトリチウム放出は、CANDU型原子炉の周辺ではすでに起きていることである。重水炉は中性子捕獲によりトリチウムを冷却材、減速材中に生成する。それらはプラント内や環境に、水の形で常時わずかず放出されて、制限値をはるかに下回る濃度で、許容レベルより低い被ばくを生じている。重水炉設置国であるカナダ、韓国、ルーマニアなどではいずれも住民の理解が十分であるためか、問題になっていない。わが国でも新型転換炉ふげんが長期間の安全運転の実績を誇っており、また小型ながら重水研究炉も使用されてきた。燃料再処理でも放出される。核融合の導入に際しては、これら重水炉の実績より多い放出は社会的愚念としてできないであろうし、一方著しく下回ることも技術的難易度とコストの点で現実的ではないため、実際核融合プラントの周りではトリチウム放出はほとんど同レベルになるであろうことが想像できる。問題は核融合が将来最終的にエネルギー供給の大きな部分を担うようになってそれが十分許容できるレベルであるかである。欧州では解析例が存在していて問題ないという結論になっているが<sup>[9]</sup>、放出されたトリチウムは環境中で拡散はしても長期間には蓄積される。一方半減期に従った壊変と水圏による同位体希釈、地下水への移行や河川の流れによる生活圏からの隔離などによる減少もあるが、このような長期的な挙動と影響はまだ検討されていない。これまで重水炉で問題になっていないとは言え、それよりはるかに多数のサイトで、これまでよりは

合計で多くの量のトリチウムが環境に存在するようになる。外部性の観点でも検討の必要な課題であろう。

### 5.5.5. 廃棄物

廃棄物についても、以上のプラントに関すると同様のことが言える。核分裂の廃棄物についても、実際に処理処分の際には長期間にわたって放出される放射性核種が公衆に有害な被ばくを与えないようにしなければならないし、そのようにするコストまでは内部化されているといえる。しかし、それらが極めて長い期間、場合によっては地質学的スケールに及ぶことが高レベル廃棄物の複雑な問題を生じている。公衆に及ぼす被ばく影響について、技術的に予見できる以上の時間スケールを含むためである。これらは内部化されたコストの範囲に入らず、外部性と呼べるかもしれない。核融合については高レベル廃棄物の発生はないことになっており、原理的にはこの問題は避けられる。しかし長寿命の核種がまったく生成しないわけではないので、廃棄物については十分な検討が必要であろう。いずれにしても、廃棄物は環境や社会への影響を考慮して処理処分されるわけであるし、適正にそれがなされている範囲では、エネルギー発生部分と同じ扱いで分析を受けるべきであって、廃棄物を特別視するのは合理的とはいえない。核融合の廃棄物は、ほとんどすべてが放射化によるものであるため、材料や遮蔽や設計によって事前の対応がかなりできる。量や寿命はある程度制御可能であるし、部品の再利用やクリアランスなども可能である。長寿命の核種は少なくとも100年単位の管理が必要であるが、歴史的に見越せる以上の期間の管理や地層処分は必要と考えられていない。この意味において、核分裂の技術体系のある国ではもちろん、ない国においても、導入に困難があるとは考えられない。現在世界では長寿命の廃棄物の処分を行っているところはたった一箇所しかない。これに対し、核融合で発生すると考えられる廃棄物と同等のRI廃棄物などは、どの国でも処理処分しうるし、核融合プラントが設置できるのであれば同じサイトでの管理が可能である。むしろ、将来的に核融合プラントを廃止措置するときにはそのサイトは同じような廃棄物を大量に、ある程度の期間は管理しなければならないから同じことなのである。このことは、原子力を導入していない国にとって、核融合との選択となった場合には大きく影響する可能性がある。原子力を新たに導入する国は、その使用済み燃料の処理処分方法を考慮しなければならないからである。これらは内部化されることもあるかもしれないが、多くの社会的なコスト—すなわち外部性の問題を引き起こす。これは新たに原子力を導入する国の外部性問題であって、核融合においてその問題が少ないことは指摘できる。

さらにいえば、核融合については、高速中性子が大量に発生することから、いわゆる核変換によるTRU処理への応用の可能性も知られている。中性子輸送計算によれば、そのような体系を組むことが可能であることが示されている。この特徴は高速炉でも同様であるが、処理の厄介な長寿命核種については、むしろこれまでに作られてしまった廃棄物の処理能力があるということが社会に対して貢献が可能であるということができよう。

### 5.5.6. エネルギーセキュリティ

エネルギーセキュリティは比較的短期間の視点で考えられることが多い。何らかの自由で供給に不安があった場合、数日から数ヶ月で対応できなければ、それより長く考えても意味がないから当然である。しかし、それぞれの国は長期戦略として、エネルギーの国産化、安定確保を志向する。現実にはほとんど外国に依存する状態が長く続いているわが国で、いまさら国産化することによる程度の意義があるかは疑問という考え方もあるが、一方化石エネルギーの需給がやがて必ず逼迫することを考えれば国産化は長期戦略として重要ということになる。セキュリティへの寄与は直接の経

済的利益を生まない。これは社会的な、正の外部効果ということができるであろう。

核融合は資源に依存せず、技術依存のエネルギーであることは既述のとおりである。つまり、燃料資源がほとんどなくとも建設運転できるし、燃料が途絶して運転が続行できないという懸念はほとんどない。必要な場合の資源（部品など）の備蓄もきわめて少量ですむ。この意味で、核融合は実用化すればエネルギーの国産化が可能となる。これはわが国固有のことではなく、核融合エネルギーに多くを依存するようになった国はほとんどすべてがこの効果を楽しむことができる。多くの国がエネルギーの供給に不安を持たない場合には、エネルギーをめぐる国際緊張や紛争の懸念も大幅に減少することになる。この経済的な効果は評価し難いが、かなり大きなものといえる。

例外は技術力である。動いている限りエネルギーの安定供給が保障されるといっても、整備や定期点検、修理なども必要である。核融合技術のいくつかがブラックボックスで、メンテナンスを外国に依存するようではやはりセキュリティは損なわれる。幸い現在のところわが国は核融合開発では世界的にも先進国であり、この技術力を維持することは核融合を長期的なエネルギー国産化戦略の一環と捉えるなら重要であろう。

このことは、核分裂との大きな違いがあることを意味する。原子力を導入しようとする国は、濃縮ウランの供給可能性についての懸念を持つことが考えられる。現在、商用のウラン濃縮を行っている国は非常に限られている。これらでの安定な濃縮役務の供与に懸念のある国は、原子力の導入に躊躇する理由があるのであり、ウラン濃縮まで自国で行う場合は、新たな社会的なコストが必要となる。このような理由から重水炉など、ウラン濃縮を必要としない炉型を選択する国もあるであろう。核融合はこの意味で有効である。

### 5.5.7. 核拡散抵抗性

核融合と核分裂の大きな差異として核拡散への懸念の違いがあげられるであろう。核拡散への対応は、国により著しく異なる。核兵器保有国、核兵器を保有しない原子力利用国に大きく分かれるが、さらに、日本のように再処理によりプルトニウム利用ができる国、韓国のようにできない国、カナダのように再処理やウラン濃縮を行わない国、などさまざまである。特に核兵器に技術を転用する懸念のある国があることは、今後の途上国における大きなエネルギー需要の増大を考えると憂慮すべき問題である。

核融合の技術は核拡散とまったく関係がないということできないが、核融合技術が極めて核兵器開発に転用しがたいことは認識すべきである（利用はされているが）。核拡散防止の本質はロンドンガイドラインに代表される物質管理であり、技術の管理ではない。濃縮ウランやプルトニウムがなければ核兵器は製造できないし、これら核分裂性物質は、天然ウラン、劣化ウラン、トリウムなどの核燃料物質、核原料物質を使わずに作ることはできない。これまでに開発された核兵器は核融合技術が完成される以前に実用化しているわけであるから、核開発を意図する国家や集団は、核融合技術の有無にかかわらず開発を進めるであろう。

核拡散抵抗性が大きいという核融合の特徴は、すでに原子力が導入されている国には大きな影響を与えることはないであろう。しかし、今後新たに核融合と原子力を比較して導入することを意図するような国にとっては、核拡散の懸念を持たれないということは望ましいかもしれない。少なくともエネルギー源の導入を援助しようとする先進国や近隣諸国は、このような選択においては核分裂より核融合を選ぶであろう。将来の世界におけるエネルギー市場を考えたときには、核融合のこの特徴は大きな意味を持つ可能性がある。

### 5.5.8. まとめ

以上見てきたように、核融合エネルギーの利点は、外部性の視点で見たときにはかなり多いことがわかる。単純なエネルギーコストで考えた場合に、核融合の将来は決して楽観できるものではない。むしろ、技術的な困難、装置としての複雑さ巨大さを考えれば、核融合の直接コストは高いものと仮定するべきであろう。しかし、社会的な望ましさの観点で考えると、外部性の多くはその指標を与えることになり、核融合は多くの場合において望ましい特性を持つ。これらの特徴は今後の開発によるところも大きく、十分意識してそれを反映しなければ実用化した核融合がそのような特徴を持つとは限らない。外部性の観点での検討は、核融合のように未来に向けて未定の部分を多く持つエネルギーについて、その開発戦略に指針を与える意味も大きいといえる。

#### 参考文献

- [1] 内山洋司、電力中央研究所報告 Y94009 発電システムのライフサイクル分析, 1995.
- [2] K. Tokimatsu et al., "Evaluation of economical introduction of nuclear fusion based on a long-term world energy and environment model", 19th IAEA Fusion Energy Conference, Lyon 2002, IAEA-CN-77/SEP/03.
- [3] 核融合エネルギーの技術的実現性・計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書(1.3), 原子力委員会核融合会議 開発戦略検討分科会報告書, 科学技術庁 (2000) .
- [4] Konishi S., Asaoka Y., Hiwatari R, and Okano K, "Possible Scenario to start up DT fusion plant without initial loading of tritium" Journal of Plasma and Fusion research Vol.76, 1309-1312 (2000)
- [5] 小西哲之, "核融合動力プラントの安全性についての考察", プラズマ核融合学会誌 vol.78,33-39 (2002).
- [6] G. Borrelli, I. Cook, et al, "Socio-Economic Research on Fusion", EFDA-RE-RE-1, (2001)



## 5.6. エネルギーシステムのコンジョイント分析

岡野 邦彦

### 5.6.1. はじめに

本章最初の 5.1 節において、エネルギーシステムの総合的分析の必要性と、その評価の概念を説明した。ただし、評価の枠組みはできたが、各評価軸の点数は、定量化しにくい特性においては、主観的なものに頼らざるをえなかった。その評価点を合理的に決定するためには、さまざまなエネルギーシステムの特長に対する効用曲線を決定する必要がある。本節では、その効用曲線を、コンジョイント分析なる統計手法とアンケートを用いて決定する試みを紹介する。

エネルギーシステムの評価を行う場合、エネルギー技術専門家は、自分の寄与している技術のメリットを過大に、デメリットを過少に評価しがちであろう。あるいはそうでないとしても、外からはそのように見られてしまうという問題は避けられない。

一方で、一般の方々とは、たとえば、太陽光＝すばらしい（に違いない）、原子力＝危ない（とみんなが言っている）、といった先入観のために、本当の判断を自分自身で引き出せていないようにも思える。これらの先入観がないなら本当はどんな判断をするのだろうか、というのが、本研究の出発点で、ある属性の評価グループに対してのアンケートにより、エネルギー技術特性の各種評価軸に対して、特定のエネルギー技術によらないそのグループにおける評価関数形状（効用曲線）を決めることを試みる。それができれば、その評価方法に各技術特有のパラメータを入力すると、各エネルギー技術の特性が見えるようになる。もちろん、評価者の属性の影響はでるから、どのような対象にアンケートしたかは重要である。今回は、エネルギー技術に直接たずさわらない、一般の方々を対象とした。

### 5.6.2. コンジョイント分析の概念

コンジョイント分析は、マーケティングリサーチの分野で最近よく利用されるようになっている手法である。対象とする商品の一連の属性（価格、性能、外見等々に相当）から構成されるプロファイル（特定の製品に相当）と呼ばれるカードを用い、回答者にプロファイルの効用をたずねる（どちらを買いたいか、など）。その結果の事後の統計処理で、属性単位ごとの効用を評価可能になる。図 5.6.1 には、パソコンを例としてさまざまなプロファイルを示した。

K番目の総合効用関数値 $U_k$ は

$$U_k = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 - a_m m + \varepsilon$$

のような和で表されると考える。ここで $a_i$ は未知の係数、 $\varepsilon$ はアンケートの質問以外の要素の影響を示し、統計的意味のノイズである。

上記の考え方は、 $U_k$ が連続数の評価値 $X$ に対して線形である場合にしか適用できないが、現実には $X$ が線形でない属性や連続数で表せないような属性、たとえば「ブランドイメージ」などもある。そこで、評価値  $X_i(i=1,2,3,4,m)$ に対して、アンケートで用意した選択水準値（不連続値） $X_{ij}(j=1,2,\dots)$ に対し、それぞれ係数 $a_{ij}$ が決定できると考えることにして、以下のように書いておく。

$$U_k = a_{1j}X_{1j} + a_{2j}X_{2j} + a_{3j}X_{3j} + a_{4j}X_{4j} - a_{mj}m_j + \varepsilon$$

被験者による選好結果が十分に集まれば、最尤度法を用いて $a_{ij}$ を推定することが可能である。 $a_{ij}$ が決定されれば、効用曲線は、用意した水準点を折れ点とする折れ線グラフとして表現される。この場合、線形である必要も、増減が単調である必要もない。なお、効用値 (worth:W) は、 $W=\exp(U_k)$ として評価する。Wが2倍のものは好んで選択される確率が2倍となることを意味している。

なお、コンジョイント分析手法の詳細とその統計処理については、本節末の参考文献を参照されたい。

データ K	CPU	メモリ	デザイン	ブランド	価格
1	1.5GHz	256M	デザインA	ブランドA	17万円
2	2.0GHz	256M	デザインA	ブランドB	17万円
3	1.5GHz	256M	デザインB	ブランドA	17万円
4	2.0GHz	256M	デザインB	ブランドB	17万円
5	2.0GHz	768M	デザインA	ブランドA	25万円
6	2.5GHz	768M	デザインA	ブランドB	25万円
7	2.0GHz	768M	デザインB	ブランドA	25万円
8	2.5GHz	768M	デザインB	ブランドB	25万円
評価値	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$m$

$$\text{総合効用関数値 } U_k = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 - a_m m + \varepsilon$$

$a_i, a_m$  は未知の係数、 $\varepsilon$  は統計的意味のノイズ

図 5.6.1 パソコンを例としたプロフィール

### 5.6.3. ペアワイズ評定法

今回の調査では、図 5.6.2 に示すような9属性に対して、2~4の水準を示して回答を求めた。しかし、これほど属性が多くなると、全体を見渡して判断するということは人間の認知力を超えてしまう。事前面接調査により、このような内容の場合、3~4属性までの比較が限度であるとわかった。このような場合には、部分属性を用いたペアワイズ評定型、と呼ばれる方法でコンジョイント解析が可能である。実際には、図 5.6.3 に示すような、3属性のプロフィールを2対比較で示し、どちらを選ぶかを大量に質問するという方法を取る。

アンケートは、262名を対象に、一人あたり20問を回答してもらった。すなわち回答データ数は約5000になる。問題はランダムに生成され、また262名の各人への20問は、全員が異なったものになる。

	属性	水準（レベル）
エネルギー資源	1. 資源量	① ほぼ無尽蔵にある ② 石油の100倍 ③ 石油の10倍 ④ 石油と同程度
	2. 資源のある場所	① 各国に必ずある ② 特定の国や地域にしかない
環境影響	3. CO <sub>2</sub> 排出量	① 石油火力の1/10以下に削減 ② 石油火力の1/2に削減 ③ 石油火力と同じ排出量
経済性	4. 日本全体での電気代	① 年間1兆2千億円減る （1人あたり1万円の負担減） ② 現在と同じ（日本全体で1.4兆円） ③ 年間2兆4千億円増える （1人あたり2万円の負担増）
安定性	5. 自然現象に対する強さ	① 影響を受けない ② 規則的に発電できなくなる ③ 不規則に発電できなくなる
	6. 社会現象(国際社会と地域社会)に対する強さ	① 影響を受けない ② どちらか一方のみに影響を受ける ③ 両方に影響を受ける
運用性	7. 設置場所の自由度	① どこにでも設置可能 ② 限られた場所のみ設置可能
安心感	8. 万が一の事故・災害時の被害	① 死亡者数が1名以下 ② 死亡者数が100名程度 ③ 死亡者数が1000名以上
	9. テロリスト等による悪用の可能性	① 可能性がない ② 可能性がある

図 5.6.2 評価軸と評価水準



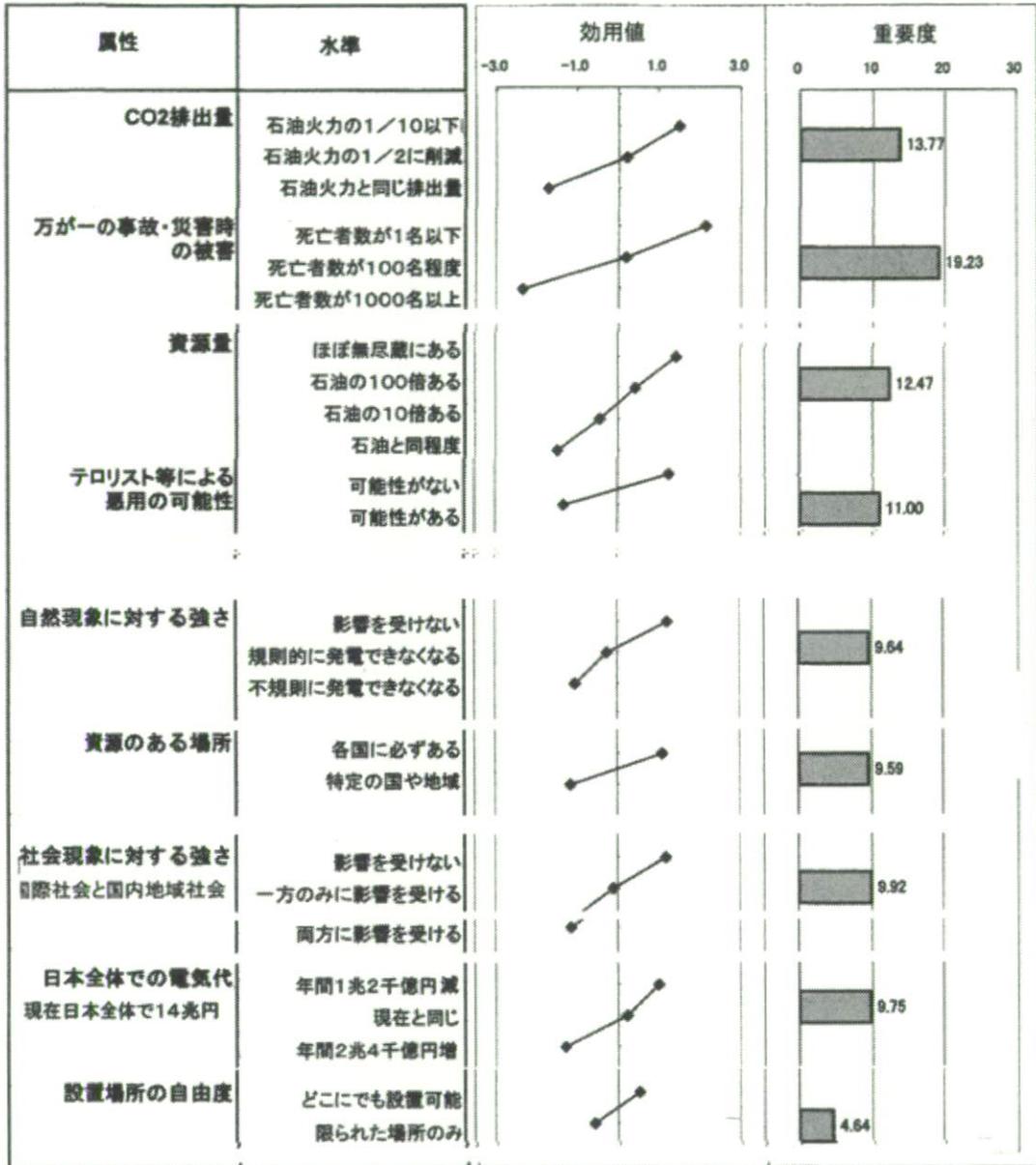


図 5.6.4 コンジョイント分析の結果

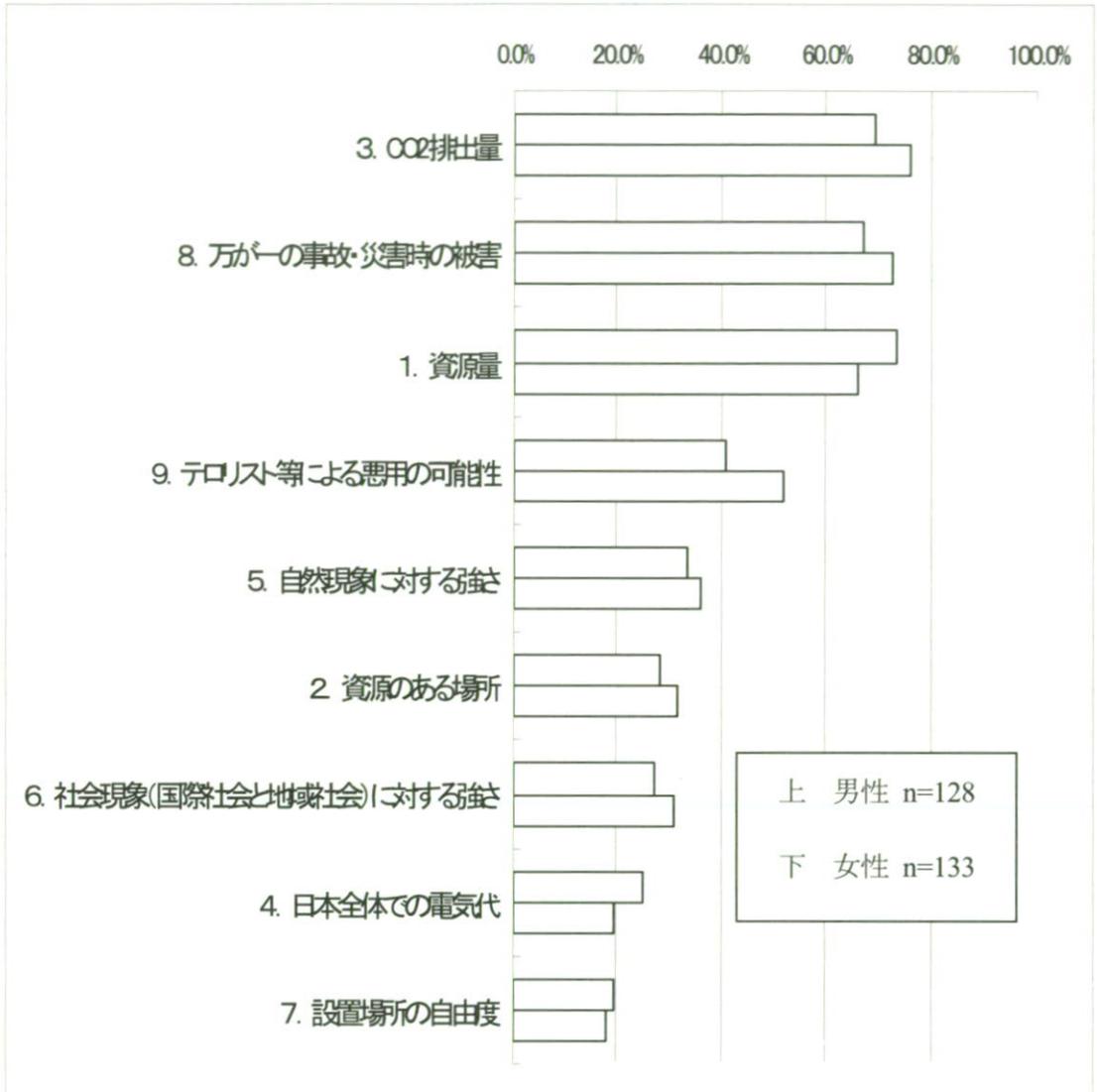


図 5.6.5 重要と考える項目を直接聞いた場合の結果

### 5.6.5. 統計解析からみた現状の質問法の問題点

#### 辞書式選好の傾向

本アンケート結果において、「万一の事故災害での被害」が特別に重視され、他の属性によらず、つねに被害最小の選択をする傾向(＝辞書式選好)があることが、東京工業大学 加藤尊秋の統計解析により示された。このような選択をする人々は、被害人数のみしか見ずに選択をしている可能性が高く、統計的には誤差の原因となる。

質問の仕方が、「死亡者数」という刺激的な表現と数字で記載されていることにも影響されているかもしれない。今後の対策が必要である。

### 属性間相互作用の存在

属性の特徴は他の属性と十分に分離されているように設定しているが、結果から相互作用を測定してみると、以下の3つの組み合わせで回答に、統計的に有意な可能性のある相関が見られた。

- 1) 資源のある場所 × CO<sub>2</sub>排出量
- 2) 資源のある場所 × 自然現象に対する強さ
- 3) 社会現象に対する強さ × テロリスト等による悪用の可能性

これらの相関は統計的に有意性がある可能性が示されたが、なぜ相関があるのかは、あまり明確でない。現時点では回答者数も限られるため、今後、統計数を増やしたアンケートを実施し、それでも同様の相関関係が出た場合には、相関関係がなぜ出るのかを今後解明していく。

### 5.6.6. 回答者の属性について

最後になったが、今回の回答者の属性概要を図 5.6.6 に示す。年代、男女比ともできるだけそろえている。

## 回答者の属性

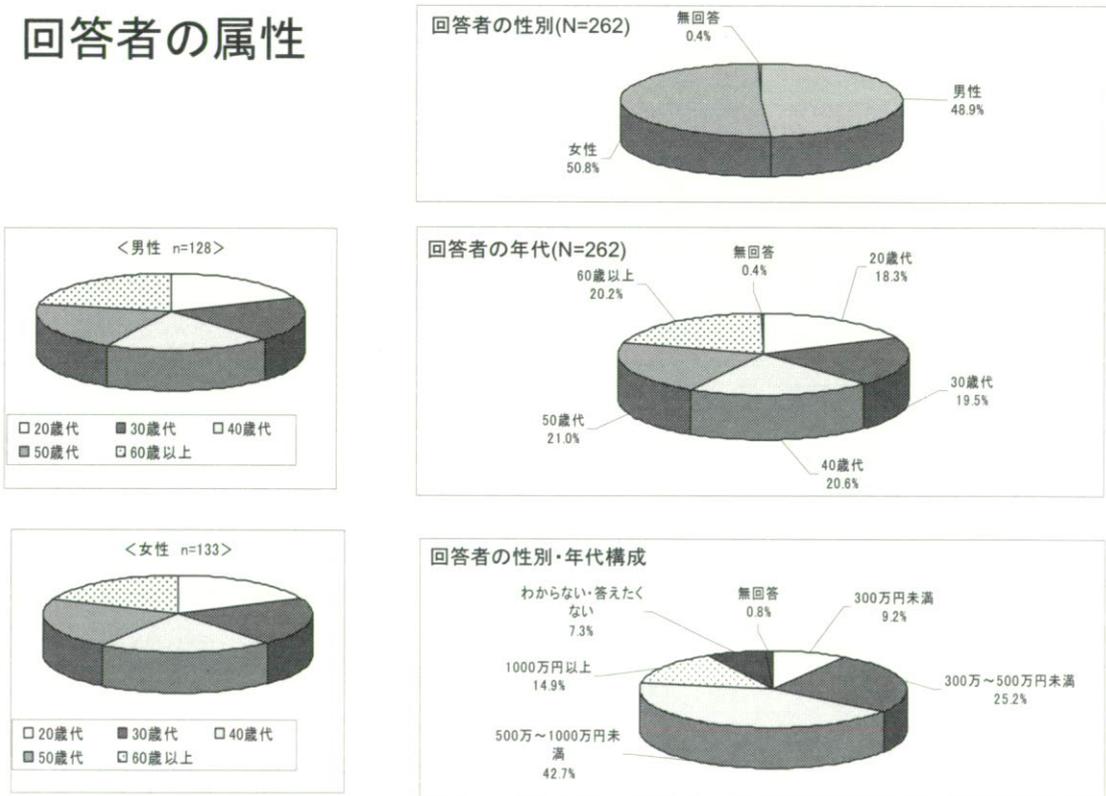


図 5.6.6 回答者属性概要

### 5.6.7. おわりに

マーケティングリサーチの分野での応用が盛んになりつつあるコンジョイント分析の手法を用いたエネルギー技術評価のための効用曲線の導出について、最新の結果の概要を紹介した。現時点では試験段階ではあるが、今後、このようなこのようなツールが完成できれば、専門家の意識と一

般の方の意識の差も明確にわかり、なにを説明することで理解を得られるかの基準になるであろう。また、個別エネルギー技術にここで得たような効用曲線を用いて客観的に評価することで、特定技術への先入観なしに評価した場合の評価の行方がわかる。

一般調査で特定技術名を挙げた調査との乖離が大きいなら、その乖離を、理由を調べて誤解を解いていく足がかりに利用可能ではないか。逆に乖離が大きい技術では、技術知識の差だけが専門家の判断との差でないことが想像され、技術の社会受容性への解決すべき優先課題があきらかになる。

今後は、この手法による評価を元に、各エネルギー技術の利点を生かした導入や開発シナリオの提言をめざす。さらに様々な技術に適用して評価することで、評価軸全体を考えた新しいベストミックス概念の提言をめざしたいと考えている。

本研究は、電力中央研究所、革新エネルギー技術評価研究委員会において実施されたアンケートと解析に基づいています。委員会委員の方々を下記に示します。本解説で紹介した研究は、委員の皆様全員のご尽力によるものです。

電力中央研究所・革新エネルギー技術評価研究委員会

小川雄一	東京大学 高温プラズマ研究センター
岡野邦彦	電力中央研究所 原子力技術研究所
朝岡善幸	電力中央研究所 原子力技術研究所
日渡良爾	電力中央研究所 原子力技術研究所
七原俊也	電力中央研究所 システム技術研究所
谷口武俊	電力中央研究所 社会経済研究所
長野浩司	電力中央研究所 社会経済研究所
後藤直彦	電力中央研究所 研究企画グループ
伊藤浩吉	日本エネルギー経済研究所
加藤尊秋	東京工業大学社会工学
後藤則行	東京大学教養学科
時松宏治	地球環境産業技術研究機構
鈴木英之	東京大学先端エネルギー専攻
小西哲之	京都大学エネルギー理工学研究所
乗松孝好	大阪大学レーザーエネルギー研究センター
崎地宏	大阪大学レーザーエネルギー研究センター
飛田健次	日本原子力研究開発機構
相良明男	核融合科学研究所
大村善治	京都大学宙空電波科学研究センター
伊藤衡平	九州大学
大森良太	文部科学省科学技術政策研究所
植田脩三	(財)放射線利用振興協会
関泰	日本原子力研究所 原子力研修センター
真木紘一	(株)普遍学国際研究所
大隈多加志	地球環境産業技術研究機構
日引 章	国立環境技術研究所

参考文献

- [1]大野栄治 編著、環境経済の実務 勁草書房(2000)  
 [2]酒井隆、図解 アンケート調査と統計解析がわかる本、日本能率協会マネジメントセンター (2003)

# 第6章

## 社会の選択と意思決定

---



## 6.1. 原子力の社会的受容とベイズ理論

山形 浩史

### 6.1.1. はじめに

ここまで外部性の概念の枠組み、具体的な外部性研究事例、また原子力に関するいくつかの外部性の視点について見てきた。どのような技術であっても、それが正しく理解され、また受け入れられるようになるためには技術そのものの説明だけでは不十分である。本節では高速増殖炉もんじゅのナトリウム漏れ事故を題材とし、原子力の社会的な受容の過程をベイズ定理によって説明する。

4.1 節でも見たように、エネルギーセキュリティの観点から見た場合、原子力を発電はきわめて有力なエネルギー源となりうる。特に高速増殖炉はその燃料増倍効果から、限りある鉱物資源であるウランの枯渇時期を将来へ延ばすことが可能となる。ウランの全量を輸入に依存する日本としては、高速増殖炉による核燃料サイクルの構築は必要不可欠である。しかしながら、1995年12月に発生したもんじゅ（高速増殖炉の原型炉）でのナトリウム漏れ事故では、事故そのもののインパクトのみならず、特に事故時の動力炉・核燃料開発事業団の対応が大きな問題となって、日本の原子力政策全般に対する不信を招来する結果となってしまった。国民からの信頼を失うような事態に陥った背景には、技術を社会に受容してもらう技術者自身が、技術の内容を伝える必要性を十分認識していないこと、また適切な伝達方法（コミュニケーション方法）を有していないことが考えられる。さらには、適切に情報を伝達しない結果として生じる信頼の喪失の影響を十分に想像できていないこともコミュニケーションを必要と考えない原因と思われる。本節では、原子力開発における安全性などの信頼が形成されていく過程をベイズの定理を用いて説明する理論的枠組みを構築し、定量的分析を行う。また、原子力に対する信頼の形成に何が必要かを提示する。

### 6.1.2. ベイズ定理

まず本節の核となるベイズの定理について例を用いて説明する。

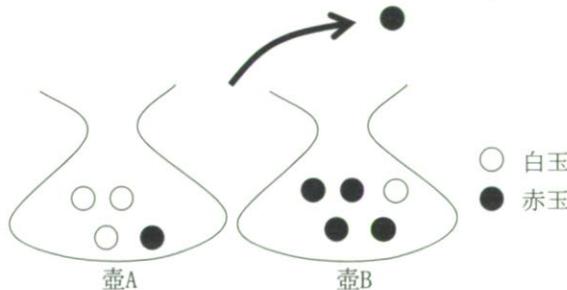


図 6.1.1 壺からの玉の取り出し（ベイズ定理の思考実験）

図 6.1.1 に見るように、壺 A には赤玉が 1 個と白玉が 3 個入っているとす。壺 B には赤玉 4 個と白玉 1 個が入っているとす。ここで、目を閉じた状態でどちらかの壺に手を入れて玉を取り出す。このとき、取り出された玉の色が赤である確率は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 P(\text{赤玉}) &= P(\text{壺A}) \cdot P(\text{赤玉} | \text{壺A}) + P(\text{壺B}) \cdot P(\text{赤玉} | \text{壺B}) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{5} = \frac{21}{40}
 \end{aligned}$$

ここで、 $P(\text{壺A})$  は壺Aを選ぶ確率、 $P(\text{赤玉} | \text{壺A})$  は、壺Aから赤玉を取り出す条件付確率である。これを図で表すと図6.1.2のようになる。ここで、壺の種類や玉の色を Distinction と呼び、Distinction の関係を表した図を Relevance Diagram と呼ぶ。Relevance Diagram にしたがって確率を樹形図に表したものを Probability Tree と呼ぶ。

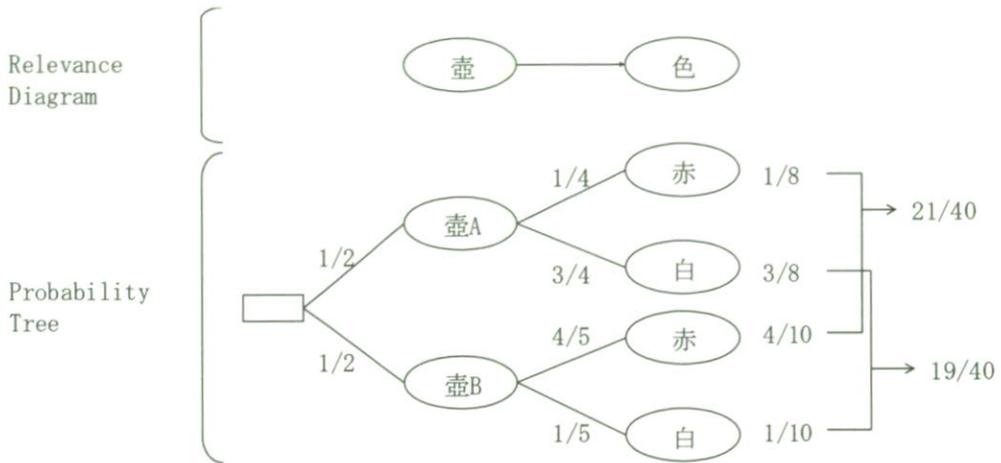


図 6.1.2 Relevance Diagram と Probability Tree (ベイズ定理の思考実験)

今度は、取り出した玉の色からその玉を取り出した壺が AB どちらであったかの確率について考える。例えば取り出した玉が赤であった場合、その玉を壺Bから取り出した確率  $P(\text{壺B} | \text{赤玉})$  がいくらになるかを考える。直感的には壺Bに赤玉が多いので、壺Bから赤玉を取り出す確率が大きいと想像されるだろう。これを正確に求めるには、図6.1.2を逆に考えて図6.1.3を作る。

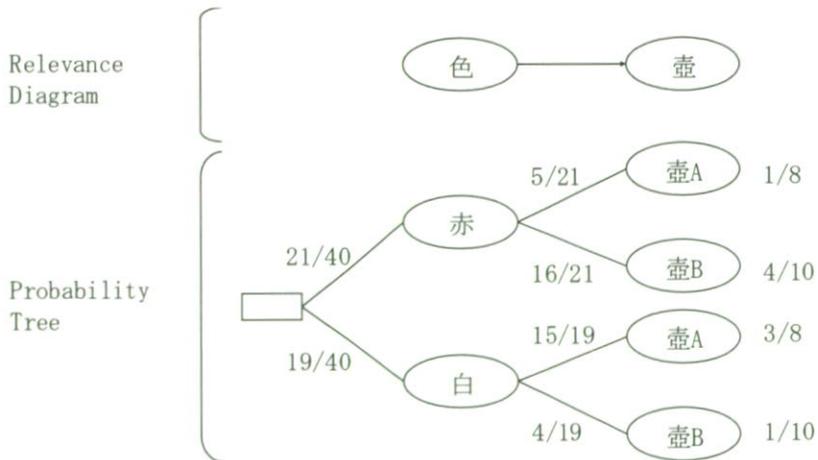


図 6.1.3 Relevance Diagram と Probability Tree の逆 (ベイズ定理の思考実験)

このとき、壺Bから取り出しかつ赤玉である確率  $P(\text{壺B} \cap \text{赤玉})$  など是不変であるとする。取り出した玉が赤かった場合、その玉を壺Bから取り出した条件付確率は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 P(\text{壺}B | \text{赤玉}) &= \frac{P(\text{赤玉} \cap \text{壺}B)}{P(\text{赤玉} \cap \text{壺}A) + P(\text{赤玉} \cap \text{壺}B)} \\
 &= \frac{P(\text{壺}B) \cdot P(\text{赤玉} | \text{壺}B)}{P(\text{壺}A) \cdot P(\text{赤玉} | \text{壺}A) + P(\text{壺}B) \cdot P(\text{赤玉} | \text{壺}B)} \\
 &= \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{5}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{5}} = 0.762
 \end{aligned}$$

結果より、先の直感はある程度正しいことが分かる。これがベイズ定理であり、観測された事象（ここでは赤玉を取り出したということ）と事前知っている確率とを用いて、原因と思われる事象（ここでは壺Bから取り出したのだらうということ）の確率を求めることができる。ここで、 $P(\text{壺}A)$ 、 $P(\text{壺}B)$ を事前確率、 $P(\text{壺}B | \text{赤玉})$ を事後確率という。一般的には、原因事象 ( $C_i$ ) が無限大個の排反事象に分かれる時、観測された事象 ( $E_k$ ) の原因が  $C_i$  である確率は次のように表される。

$$P(C_i | E_k) = \frac{P(C_i \cap E_k)}{P(E_k)} = \frac{P(C_i) \cdot P(E_k | C_i)}{\sum_{j=1}^{\infty} P(C_j) \cdot P(E_k | C_j)}$$

### 6.1.3. 原子力発電所の信頼度

原子力技術者は、原子力発電所の安全性を実験や安全指針及び確率論的安全評価を用いて評価するが、国民は安全性を技術的に評価するわけではない。原子力発電所の運転状況を見て、原因となる原子力発電所の安全性を推測しているものと考えられる。ここで、国民が原子力発電所を安全であるか、危険であるかをどのように判断しているかを運転開始時点からの時系列変化で考えてみる。まず、国民は原子力発電所が安全な場合、危険な場合にそれぞれ事故を起こすか起こさないかという確率を表6.1.1のように想定していると仮定する。

表 6.1.1 安全もしくは危険な原子力発電所が運転開始後 1 年に事故を起こす想定確率

	無事故 ( $E_1$ )	事故 ( $E_2$ )
安全な原子力発電所 ( $C_1$ )	999/1000	1/1000
危険な原子力発電所 ( $C_2$ )	1/2	1/2

原子力発電所の運転開始時点では、(運転主体から技術的には安全であると聞かされていても) 住民はその原子力発電所が安全であるか危険であるかの判断をつけられないため、原子力発電所が安全か危険かの確率を半々すなわち次のように考える (理由不十分の原則)。

$$P_1(C_1) = P_1(C_2) = \frac{1}{2}$$

ここで、 $P$ の添字は年を表す。ただし、年は便宜上用いているだけで特に意味はなく、ある期間を表す単位と考えればよい。運転開始後 1 年後に事故を起こした場合、その原子力発電所がそもそも“危険であった”のだという確率  $P_1(C_2 | E_2)$  はベイズ定理を用いて次のように求めることができる。

$$P_1(C_2|E_2) = \frac{P_1(C_2) \cdot P(E_2|C_2)}{P_1(C_1) \cdot P(E_2|C_1) + P_1(C_2) \cdot P(E_2|C_2)} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1000} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}} = \frac{500}{501} = 0.998$$

これより、原子力発電所の安全性に対する評価が定まらない段階で一度事故を起こすと、その原子力発電所が危険なものであったとみなされる確率は非常に高いと評価される。

一方、運転開始後1年間は無事故で運転をした場合、その原子力発電所が“安全であった”とみなされる確率は上記と同様にして次のように求められる。

$$P_1(C_1|E_1) = \frac{P_1(C_1) \cdot P(E_1|C_1)}{P_1(C_2) \cdot P(E_1|C_2) + P_1(C_1) \cdot P(E_1|C_1)} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{999}{1000}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{999}{1000}} = \frac{999}{1499} = 0.666$$

このように、1年間無事故で運転したとしても、その原子力発電所が“安全なものだった”のだとみなされる確率は極端に高い評価を受けるわけではない。

ここで、1年間の運転状況から国民が評価した原子力発電所が安全であるという確率を「信頼度」と定義する。原子力発電所が安全なものである確率が高いという評価とは「信頼を得た」状態であり、逆に安全であるという確率が低いという評価とは「信頼を失った」状態とすることができる。上記の思考実験は、原子力発電所に対する評価が定まらない状態で一度事故を起こすと、ほぼ完全に国民の信頼を失うが、1年間無事故で運転しても、必ずしも信頼を得るには至らないということを示している。

#### 6.1.4. 信頼形成過程

原子力発電所は1年間だけ運転されるのではなく長期間運転される。長期間の経過に沿って、国民の信頼がどのように変化するかを次に見る。運転開始から1年間無事故運転した後、さらに1年間無事故運転した原子力発電所がそもそも“安全であった”確率 $P_2(C_1|E_1)$ はベイズ定理を用いて次のように求められる。

$$P_2(C_1|E_1) = \frac{P_2(C_1) \cdot P(E_1|C_1)}{P_2(C_2) \cdot P(E_1|C_2) + P_2(C_1) \cdot P(E_1|C_1)} = \frac{0.666 \cdot \frac{999}{1000}}{0.333 \cdot \frac{1}{2} + 0.666 \cdot \frac{999}{1000}} = 0.799$$

ここで注意することは、2年目の事前確率は1年目に無事故運転をしたことによって変わった点である。具体的には先に得られた1年目の事後確率を用いて次のように与えられる。

$$P_2(C_1) = P_1(C_1|E_1) = 0.666$$

$$P_2(C_2) = P_1(C_2|E_1) = 1 - P_1(C_1|E_1) = 0.333$$

n年後の事後確率は同様に次のようになる。

$$P_n(C_1) = P_{n-1}(C_1|E_1)$$

$$P_n(C_2) = P_{n-1}(C_2|E_1) = 1 - P_{n-1}(C_1|E_1)$$

これを用いてn年間無事故運転した原子力発電所が安全なものとみなされる確率 $P_n(C_1|E_1)$ を計

算することができる。その結果を図 6.1.4 に示す。

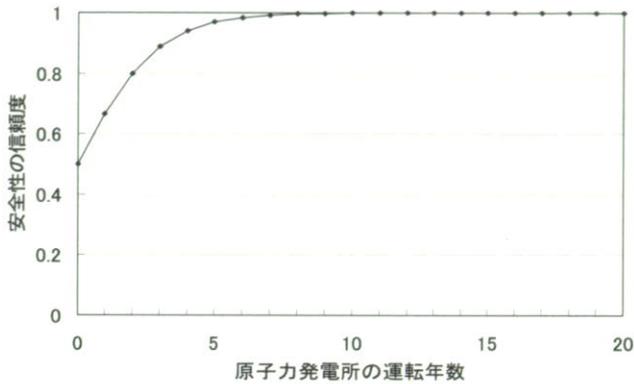


図 6.1.4 無事故の場合の信頼形成過程

このように、原子力発電所の運転状況の経年変化をもとに評価される、原子力発電所が安全なものであるという確率（信頼度）の時系列変化を「信頼形成過程」と定義する。

運転開始から1年間に事故を起こして信頼を失った後、次の1年間無事故運転をした原子力発電所が安全なものである確率 $P_2(C_1|E_1)$ は次のように表される。

$$P_2(C_1|E_1) = \frac{P_2(C_1) \cdot P(E_1|C_1)}{P_2(C_2) \cdot P(E_1|C_2) + P_2(C_1) \cdot P(E_1|C_1)} = \frac{0.002 \cdot \frac{999}{1000}}{0.998 \cdot \frac{1}{2} + 0.002 \cdot \frac{999}{1000}} = 0.004$$

ここで、2年目の事前確率は1年目の事後確率を用いて次のように与えた。

$$P_2(C_1) = P_1(C_1|E_2) = 1 - P_1(C_2|E_2) = 0.002$$

$$P_2(C_2) = P_1(C_2|E_2) = 0.998$$

2年目以降を同様に計算して、1年目に事故を起こした後の信頼度の変化を図 6.1.5 に示す。

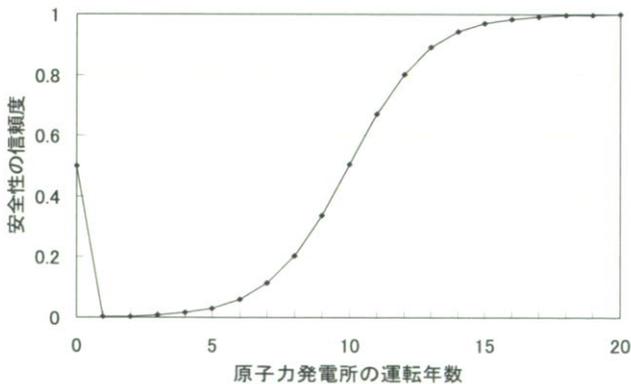


図 6.1.5 運転開始1年目に事故を起こした後、無事故の場合の信頼形成過程

図より、一度失った信頼を回復するには長期間を要することが分かる。このことを「短期間での信頼回復」を目標として見た場合、事故を起こしたのと同じ状態の原子力発電所を長期間無事故運転し続けて信頼を回復するよう努めるより、安全対策を抜本的に見直して、運転している原子力発電所は“もはや以前の原子力発電所とは別のものだ”との認識を国民が持って、信頼形成過程を初めからやり直す方が効率的である。

運転開始後無事故運転を続けて、その原子力発電所は“安全である”との評価を受けた後に事故を起こした場合の信頼度の変化を図 6.1.6 に示す。

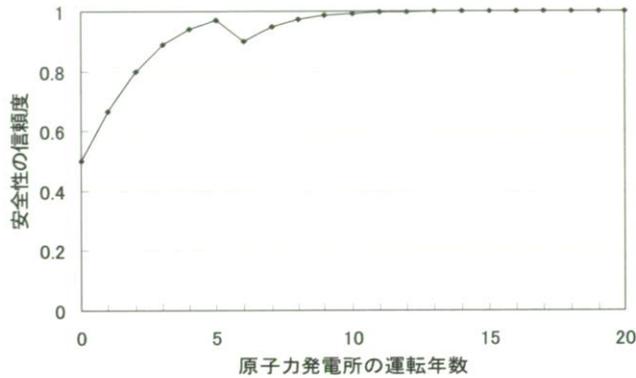


図 6.1.6 運転開始後 6 年間無事故の後に事故を起こし、その後無事故の場合の信頼形成過程

このように、いったん信頼が形成された後の事故による信頼度の低下は小さく、その回復も早いことが分かる。ここまで見たように信頼の形成には一定の期間を要し、一度失った信頼を回復するには相当長期間を必要とする。一方で、信頼を形成した後は、事故を起こしてもその信頼への影響は少ない。

### 6.1.5. 情報操作

これまで見てきた例は、原子力発電所の運転状況（観測された事象）を意思決定者（国民など）が直接把握できることを前提としていたが、実際には観測された事象を意思決定者に伝えるための報告者が介在することが多い。ここで、意思決定者が報告者に対して「情報操作を行っている」とみなした場合に、意思決定者の信頼形成過程にどのような影響を与えるかを考える。（ここでは報告者が実際に情報操作を行っているかは重要ではなく、そのように“みなされた”かが重要である。）

国民が、報告者は無事故の場合はそのとおり報告し、事故を起こした場合はその一部だけしか報告しないとみなしたとする。国民にとっての Relevance Diagram は図 6.1.7 のように表される。

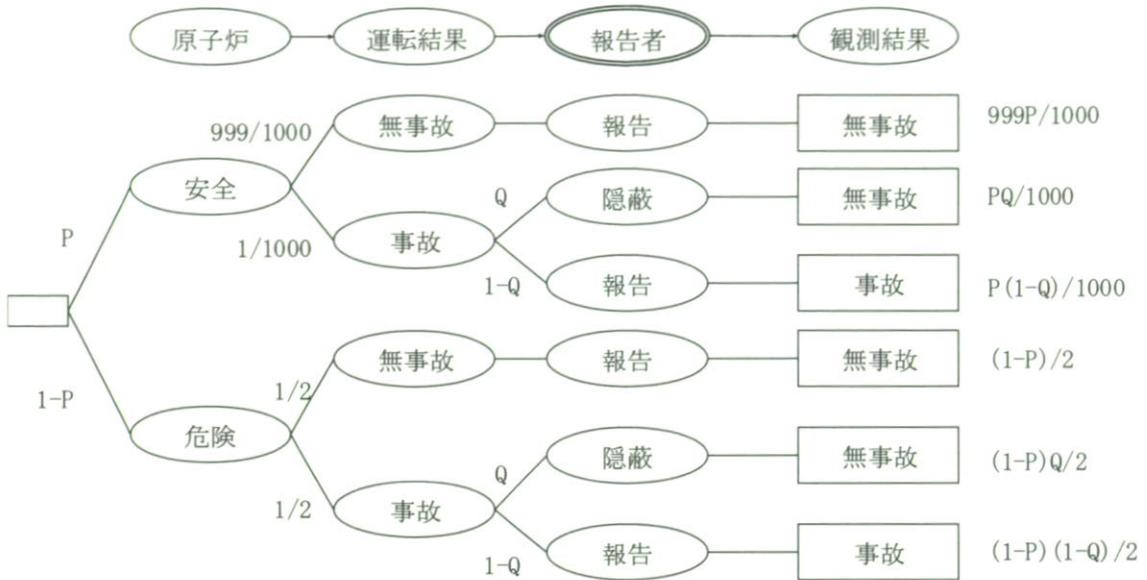


図 6.1.7 報告者を含む場合の Relevance Diagram と Probability Tree

原子力発電所が1年間無事故運転をしたという情報が報告されたとき、その原子力発電所が“安全であった”とされる確率 $P(C_1|R_1)$ は次のように求められる。

$$\begin{aligned}
 P(C_1|R_1) &= \frac{P(C_1 \cap R_1)}{P(C_2 \cap R_1) + P(C_1 \cap R_1)} \\
 &= \frac{P(C_1 \cap E_1) + P(C_1 \cap E_2) \cdot Q}{P(C_2 \cap E_1) + P(C_2 \cap E_2) \cdot Q + P(C_1 \cap E_1) + P(C_1 \cap E_2) \cdot Q} \\
 &= \frac{(999 + Q) \cdot \frac{P}{1000}}{(1-P) \cdot \frac{(1+Q)}{2} + (999 + Q) \cdot \frac{P}{1000}}
 \end{aligned}$$

ここで、 $R_1$ は無事故という報告、 $P$ は原子力発電所が安全であるという事前確率、 $Q$ は報告者が情報操作を行う確率である。仮に $P=0.5$ 、 $Q=0.7$ （10回の報告すべき事故のうち7回は「無事故」と報告する）とすれば、

$$P(C_1|R_1) = \frac{(999 + 0.7) \cdot \frac{0.5}{1000}}{(1-0.5) \cdot \frac{(1+0.7)}{2} + (999 + 0.7) \cdot \frac{0.5}{1000}} = 0.540$$

となる。これは、報告者が介在しない（あるいは報告者が情報操作をしないとみなされる）場合の値（0.666）よりかなり小さくなっている。

さらに、無事故運転が報告されているが、報告者が情報操作を行っているとはみなされた場合の信頼形成過程を示すと図 6.1.8 のようになる。図より、原子力発電所が安全なものである確率は高くなって行くものの、情報操作がないとみなされる場合（図 6.1.4）に比べると信頼形成に時間がかかっていることが分かる。

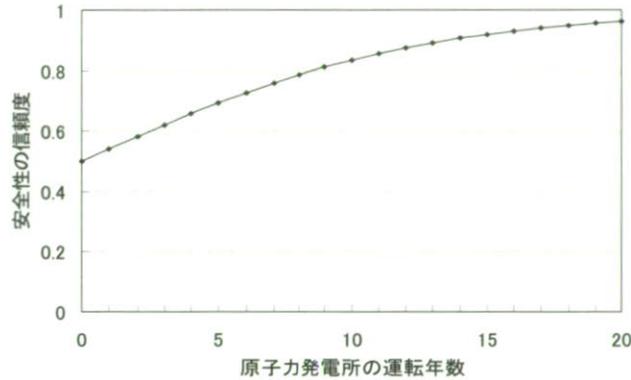


図 6.1.8 情報操作をされるとみなされる報告者を含む場合の無事故運転時の信頼形成過程

次に、1年目に事故を起こし、その後無事故（と報告される）運転を続けるが、国民は報告者が情報操作を行っているとはみなしている場合の信頼形成過程を図 6.1.9 に示す。

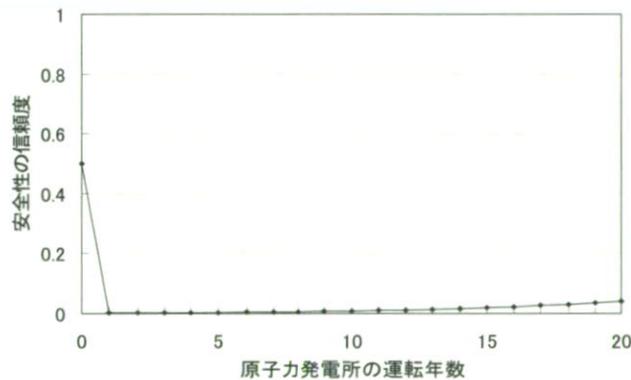


図 6.1.9 情報操作をされるとみなされる報告者を含む場合の初年度事故後の信頼形成過程

このように、原子力発電所の安全性の評価が確立していない段階で事故が起こり、かつ情報操作も行われているとみなされた場合にはもはや原子力発電所が安全だとは思われない。

このような場合に、短期間で信頼を回復するにはどうすればよいただろうか。端的には、報告者を更迭し、国民が「情報操作は行われていない」とみなすようにするほかはない。その場合は、図 6.1.5 と同じ信頼形成過程をたどることができる（報告者自身がもはや以前の報告者ではないとみなされるため）。しかし、実際には報告者は原子力発電所の設置者自身である場合が多いため、完全に情報操作がなくなったとみなされることは困難だが、情報操作の確率（先の  $Q$  の値）を小さくすることは可能である。仮に  $Q$  が 0.5 となった場合の信頼形成過程を図 6.1.10 に示す。

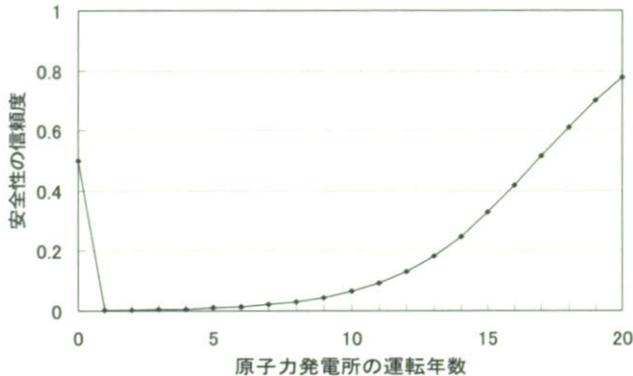


図 6.1.10 情報操作をするとみなされる報告者を更迭した場合の初年度事故後の信頼形成過程

このように、情報操作が行われているとみなされた場合には、そうでない場合に比べて信頼形成過程が全く異なることが分かる。

ここで、報告者は情報操作をしないとして信頼を得ることを妨げる重要な点について述べたい。それは、原子力発電所は「絶対に」安全であると説明することである。このとき、ひとたび事故が起こった場合には報告者としての信頼を失うことは言うに及ばず、後の信頼形成に非常に大きな悪影響を及ぼしてしまう。絶対に事故を起こさないとは、

$$P(E_2 | C_1) = 0$$

を意味する。人間の作ったものに絶対はありえず、もし事故が起こった場合には報告者としての信頼を失うとともに、この原子力発電所が安全なものである確率はベイズ定理を用いて

$$P(C_1 | E_2) = 0$$

となり、その原子力発電所は確実に危険なものとみなされる。

#### 6.1.6. 外部に放射線影響のある事故とない事故の区別

原子力発電所が他の事故（鉄道事故や航空機事故など）と大きく異なる点の一つに放射線影響が挙げられる。放射線は目に見ることができないため、原子力発電所で事故が発生した場合、たとえ外部への放射線影響がなく「人命に影響のない事故」であったとしても国民には単に“事故”として認識され、しかも「人命に影響があるかも知れない事故」とみなされてしまう（ここでは、外部への放射線影響がない場合は「人命に影響がない」とした）。このような事態を回避するためには、外部への放射線影響の有無によらず軽微な事故も積極的に公開し、「原子力発電所は外部への放射線影響のない事故を起こすこともあり、その場合は人命への影響は非常に低いのだ」（安全な原子力発電所）との認識を国民の間に形成していくことが重要である。

仮に、原子力発電所の運転状況を表 6.1.2 のように国民が見積もったとする。

表 6.1.2 安全もしくは危険な原子力発電所が運転開始後 1 年に事故を起こす想定確率 (人命影響考慮)

	無事故 ( $E_1$ )	人命に影響のある事故 ( $E_2$ )	人命に影響のない事故 ( $E_3$ )
安全な原子力発電所 ( $C_1$ )	3/4	1/1000	249/1000
危険な原子力発電所 ( $C_2$ )	0	1/2	1/2

運転開始後 1 年間に人命に影響のない事故を起こした原子力発電所が安全なものである確率  $P(C_1|E_3)$  は次のように求められる。

$$P(C_1|E_3) = \frac{P(C_1) \cdot P(E_3|C_1)}{P(C_1) \cdot P(E_3|C_1) + P(C_2) \cdot P(E_3|C_2)} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{249}{1000}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{249}{1000} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}} = 0.332$$

このように、安全な原子力発電所でも、「人命に影響のない事故」は比較的高い確率で起こすという認識があれば、人命に影響のない事故が人命に影響のある事故と混同されて、安全な原子力発電所である確率が極端に低下することはない。したがって、このような認識を国民が持つためにも、軽微な事故であっても積極的に公開していく必要がある。特に、機械装置は設備稼働初期に「初期故障」の発生確率が高いため (バスタブ曲線)、このような時期には「初期故障」が起こりうるということを十分に説明しておかなければならない。これを行わなければ、人命への影響の有無によらず、全ての事故が人命に影響があるとみなされ、信頼度が極端に低下することとなる。

### 6.1.7. おわりに

これまで見てきたようにベイズ定理による信頼形成過程には一定の傾向があり、以下のように要約できる。

- ・ 国民の信頼は、設置者側の技術的評価ではなく、判定者側の観測結果によって決まる。
- ・ 国民の信頼を得るには長期間を要するが、1 回の事故で容易に信頼を失う。
- ・ 信頼度は初期の事故で著しく低下し回復に長期を要する。
- ・ 情報操作を行うとみなされれば、国民の信頼は得られない。
- ・ 「絶対に」事故は起こらないという説明は、信頼形成過程に悪影響を与える。
- ・ できるだけ多くの情報を提供することが正しい判断につながる。

原子力発電所が社会に受け入れられるためには、実際に原子力発電所が安全であるかどうかとは別の文脈で、安全であると“信頼される”ことが不可欠である。もちろん原子力発電所の安全性を技術面で、また運転面や制度面で高めていく努力を怠ってはならないが、信頼を得るためのコミュニケーションの努力をおろそかにしてはならない。この努力を怠ることによって、たとえ同一の事象であっても、受け入れられるために支払うコストの大小が変わってくることに留意すべきである。

## 6.2. 原子力研究開発の社会・経済的評価

高橋 祥次・柳澤 和章

### 6.2.1. 基本的考え方

#### (1) 社会・経済的評価の要請

科学技術は、今後のわが国経済の潜在成長力を維持する基本的条件との認識から、科学技術基本計画のもとに、厳しい財政条件下にもかかわらず政府は予算を拡大してきている。そのことは同時に、公的資金を使用して研究開発を進める者に対し、納税者に資金が効率的に使用され、国民の要請に込んでいることの説明責任を課していることを意味している。

科学技術に関しては、これまでもピア・レビューを中心に評価が行われてきているが、①研究開発が国民生活と幅広くかかわりを有しているにもかかわらず、科学技術の専門的側面だけの評価になっているのではないか、②成果に対する資金の効率に関する説明が不十分なのではないのか、といった批判をよく仄聞した<sup>(注1-1)</sup>。また、政策評価の考え方の基本にあるニュー・パブリック・マネージメントの視点(Plan-Do-Check)からみて、中間あるいは事後検証がとくに納税者に対する説明責任の観点から不足しているとの指摘がなされた<sup>(注1-2)</sup>。

以上の状況は、原子力研究開発についても例外ではなく、単にピア・レビューにとどまらない社会・経済的評価を行うことの要請が喫緊の課題となっている<sup>(注1-3)</sup>。

#### (2) 社会・経済的評価の視点

原子力研究開発は、基礎から応用を含む幅広い内容を有するが、その社会・経済的評価の視点はどうかあるべきか、基礎研究に焦点をあわせ検討する。

米国予算局は、基礎科学の社会・経済的評価基準として、研究の質、他研究との関連、業績成果(投入する資金、人的資源の相互比較、得られる知見、実験施設の稼働状況など)を挙げている。

2005年に制定されたわが国の「国の研究開発評価に関する大綱的指針」では、必要性(科学的・技術的意義、社会的・経済的意義、国費を用いた研究開発としての妥当性)、効率性(計画実施体制の妥当性、目標・管理体制の妥当性、費用構造や費用対効果の妥当性、研究開発の手段やアプローチの妥当性等)、有効性(目標の実現可能性や達成のための手段の存在、新しい知の創出への貢献、実用化・事業化の見通し、人材の養成等)を評価基準としている。

文部科学省政策科学技術研究所は、科学技術基本計画の実績を検証する中で、社会・経済的評価の内容として、経済的インパクト、社会的インパクト、国民生活へのインパクトに大別し、その内容と程度の把握を試みている<sup>(注1-4)</sup>。

これらの考え方も参考に、特に社会・経済的評価として、以下の視点を提案したい。

#### i) 効果の内容と把握の方法

##### a) 経済への効果

効果の内容として、①有用な知識のストックを増加させること、②技能を持った学卒者を育成すること、③新しい科学施設を建設すること及び方式を作り出すこと、④ネットワークを形成し、社会的な相互交流を刺激、促進すること(生産技術への波及など)、⑤科学技術上の問題の解決能力を高めること、⑥新しい企業を設立すること、が認識される。

効果の把握方法としては、直接効果については、直接投資のGDP寄与額、雇用創出量、育成学卒者数、ネットワーク効果等の把握が、間接効果としては、直接効果の一次的、二次的波及効果を把握することが考えられる。

## b) 国民生活への効果

効果の内容として、社会的ニーズへの対応とその寄与を把握する。例えば、国民の健康、安全に対する寄与、持続可能な生活環境に対する寄与、生活の質の向上に対する寄与等の把握が、考えられる。ただし、いずれも外部経済と外部不経済があることに留意する必要がある。

## c) コミュニティへの効果

特に原子力研究開発に関しては、プロジェクトが立地する住民との関わりをどのような関連について認識し、内容をどう把握するかの観点が不可欠である。

## ii) 時の経過の視点

説明責任は、事前、中間、事後のすべてにかかるとの認識が必要である。また、中間評価によるプロジェクトの見直し、事後評価によるその後のプロジェクト評価への寄与が必要である。特に基礎研究では、事前評価、中間評価で評価が低いものでも、10年後の事後評価では高いものがありうる。

## iii) 比較可能性

客観的比較をするためには、できる限りの金額評価が望ましい。金額評価ができないものについても、定量的な評価、あるいは相対的な段階評価が望ましい。例えば、当該プロジェクトの社会経済目標に対する貢献度として5段階評価はできないだろうか<sup>(註1-5)</sup>。また、金額評価と、それ以外の定量評価を融合させた総合評価（例えば、性能評価を取り入れた総合入札制度のような方法はどうか。その場合、金額評価とそれ以外の評価のウェイトをどうするかは、すべからず政策判断に属すべきことがらと考える。）は、予算制約の下で優先度を判断する一つの基準として有効なのではなからうか。

## 6.2.2. 日本原子力研究所(原研)における社会・経済評価の経済的評価の試み

原研では放射線（ $\beta$ ・ $\gamma$ 線、中性子線等）の種類毎に研究母体を組上げてきた過去の歴史がある。例えば $\beta$ ・ $\gamma$ 線の研究は群馬県高崎市にある高崎研究所が、中性子線の研究は茨城県東海村にある東海研究所及び茨城県大洗にある大洗研究所が主体となって実施してきた。前者については、平成11年度に科学技術庁から原研高崎が特別会計予算を得、 $\beta$ ・ $\gamma$ 線を主体とする放射線の工業・農業・医学・医療利用に関する経済規模をわが国で初めて調査した（①放射線利用の経済的評価<sup>(註2-1)</sup>）。この調査では、Roger H. Bezdek博士が社長を勤める米国MISI（Management Information Services, Inc.）が平成6年に実施した先行研究があり、参考になった<sup>(註2-2)</sup>。平成13年度には②財務費用・便益分析を原研として実施し、軽水炉発電による電力・施設等市場への寄与及び放射線・ラジオアイソトープ（RI）利用市場への寄与を試算した。本報は前者の結果を記載するが、後者について興味のある方は別報<sup>(註2-3)</sup>を参照されたい。

原研の研究成果が寄与した「軽水炉技術」による原子力発電技術は、それまでの水力、火力に加え、新たに安定的な電力供給源となった。さらに、機器メーカーの発電施設等に係る新製品開発を導いた。こうした事実認識のもとに、市場創出効果を以下の考え方により算出した。

## (1) 市場創出効果額の算出

## (1-1) 原発市場規模

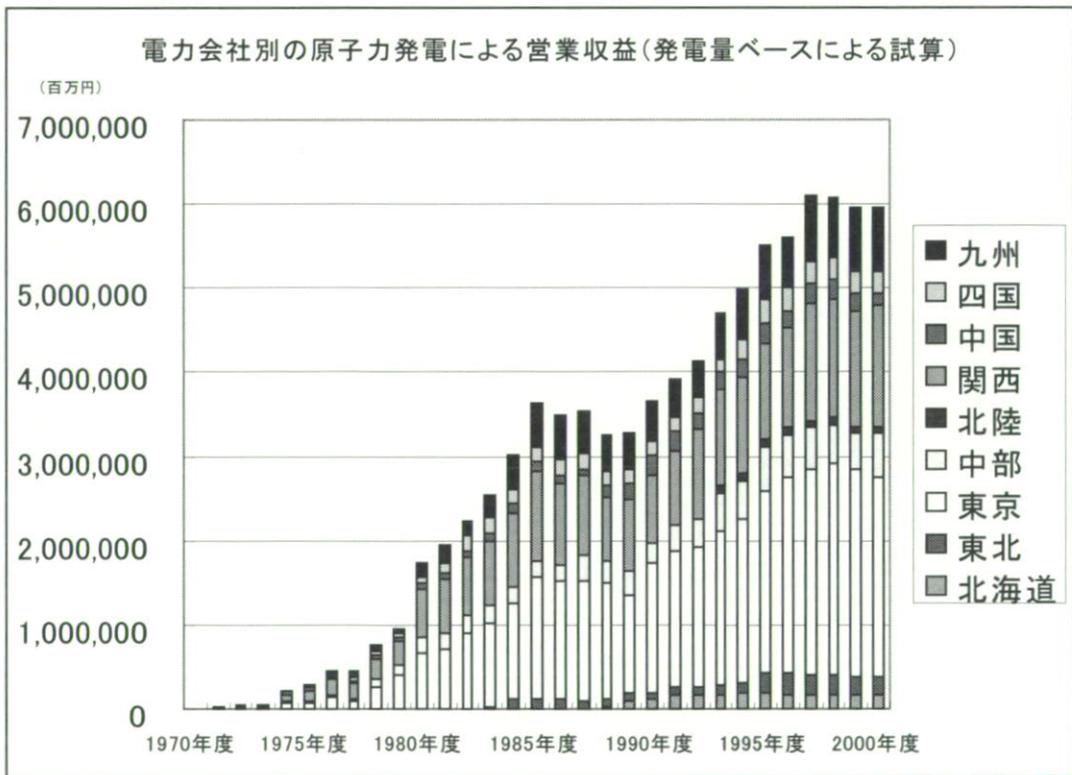
原研が実施してきたプロジェクト及びそれを支える基礎・基盤研究のうち、発電用軽水型原子炉（以下、原発）の市場創出効果を求めてみた。まず市場規模であるが、昭和40年には原電東海発電所（コールドアールホール）の臨界があるものの、我が国の原発の本格的な営業運転は昭和45年の原電敦賀1号機（BWR）及び関電美浜1号機（PWR）からである。従って原発市場の売り上げの調査

開始年は1970年（昭和45年）とし、調査終了年は2000年（平成12年）とした。原子力発電の売上高等は、大蔵省（当時）による有価証券報告書損益計算書電気事業者連合会による資料を参考に次式で求めた。

$$\text{原子力発電の売上高} = \sum \text{年度毎の9電力の電気事業収益} \times \text{原子力発電電力量の割合} \cdots (1)$$

なお、ここでの売上高は、デフレータ補正により1995年実質価格に統一した。

図6.2.1は原発を有する9電力<sup>(注24)</sup>について年度毎に発電量ベースで営業収益をプロットしたものである。図によれば最近では年間で6兆円規模の基幹産業に発展している。式(1)から得られた我が国の原発市場の営業収益の累積額は31年間で約92兆円となっている。



出典：電気事業者連合会資料

図 6.2.1 我が国の電力会社別による原発営業収益

(1-2) 発電施設・機器の市場規模 (1977年～2000年)

原発は電気を取り出すために色々な施設・機器を抱えている。これらは毎年どの程度の市場規模になっているのであろうか。これについては核燃料サイクルの上流側（アップストリーム）から下流側（ダウンストリーム）まで以下の区分で累計する事とした<sup>(註2-5)</sup>。

- 市場規模＝  
核燃料サイクルの
- ①アップストリーム（採鉱から燃料組み立てまで）＋
  - ②炉運転に係わる原子力発電設備等の売上 ＋
  - ③ダウンストリーム（廃棄物処分、再処理等）＋
  - ④その他（建屋、建築物等）・・・(2)

(2) 式の各項目については、日本原子力産業会議が毎年発行している「原子力産業実態調査報告」記載のデータを加工して累計した<sup>(註2-6)</sup>。調査の出発点は出来る限り過去に遡及して、できればわが国の原発運開の5年位前（昭和42年頃）としたかったが、原産報告書が利用できたのは昭和52年（1977年）からであった。参考に言えばこの年の発電施設・機器の年間売り上げは約4,230億円となっていた。表6.2.1に示すように調査開始以前においてすでに13基の原発が稼働していることを考慮すれば発電施設・機器市場に関する本研究の市場規模データは過小評価になる。調査の終了点は平成12年（2000年）とし、デフレーター補正については1995年実績値としての市場規模とした。調査期間は24年間となるが、この間の発電施設・機器売り上げの累計額は約30兆円となった。

原子力発電及び発電施設・機器の市場規模＝92兆円＋30兆円＝122兆円・・・(3)

表 6.2.1 発電施設・機器売り上げ調査開始時点（昭和52年）よりも前に運開している原発一覧

原発(運開年度順)				
番号	運開年月日	発電所	炉型	電気出力 (万kW)
1	S41.7.7	東海	GCR	16.6
2	S45.3.14	敦賀1	BWR	36
3	S45.11.28	美浜1	PWR	34
4	S46.3.26	福島第一1	BWR	46
5	S47.7.25	美浜2	PWR	50
6	S49.3.29	島根1	BWR	46
7	S49.7.18	福島第一2	BWR	78
8	S49.11.14	高浜1	PWR	83
9	S50.10.15	玄海1	PWR	56
10	S50.11.14	高浜2	PWR	83
11	S51.3.17	浜岡1	BWR	54
12	S51.3.27	福島第一3	BWR	78
13	S51.12.1	美浜3	PWR	83

## (1-3) 研究開発費の比率

ここでは売上高に占める研究開発費の比率を売上高に対する研究開発活動の貢献度と仮定した。望ましくは、原子力発電における需要技術がどのセクターによって開発され、重要なハードルがどのセクターによってクリアされたかを分析したデータが入手できることである。ただし、このような技術の成果の実態分析は非常に困難なので、ここでは便宜的に、「軽水炉による原子力発電の研究開発」に、どれだけのお金がおおよそ投入されたか、を把握し、この「資金の総額」と「原子力発電の売上」との比率を、近似値として採用している。

$$(a) \text{ 研究開発費比率} = (a1) \text{ 産官学の研究開発費} / (a2) \text{ 原子力発電売上額} \cdots (4)$$

ここでは表 6.2.2 を使いつつ、1988 年を例として研究開発費の比率の具体的な決め方を以下のように説明する。

表 6.2.2 原発の売上高に対する研究開発費の比率の決め方の例 (1988 年)

原子力発電売上	産官学の研究開発費用
1) 2兆 8,516 億円 (出典:電事連資料)	2)産業界(原研試算) 9 電力、原電、電発、電中研の研究開発費合計 712 億円
	3)官と学 原研及び科学技術庁の予算合計 1,764 億円 (出典:原研 40 年史)
	原研に含まれかつ原発に無関係な核融合等予算規模(約 400 億円)と 科学技術庁予算に計上されずかつ原発に関係する特別会計 (立地と多様化関連)予算規模(約 400 億円)はほぼ等しいので相殺。
	4)産官学の研究開発費投資総額 712+1,764-400+400=2,476 億円
	5)デフレータ(1988 年→1995 年実質値)補正により 2,476 億円→2,733 億円
研究開発費比率(%) = 産官学の研究開発費投資総額(デフレータ補正後) / 原子力発電売上 × 100 = 2,733 億円 / 2兆 8,516 億円 × 100 = 9.6%	

## (a1) 産官学の研究開発費

データの利用が可能だったのは 1978 年(昭和 53 年)からである。

## ・ 1978 年～1993 年(算定可能な 1978 年から揭示)

表からわかる様に原研の試算から推定された原子力関係産業界における R&D 費用は 712 億円であった。原研 40 年史をベースにして推定した原研および科学技術庁の予算額は 1,764 億円であった。しかしながら、原研予算には原発に無関係な核融合、原子力船、放射線利用等が含まれ、科学技術庁予算には原発に関係のある立地・多様化勘定(特会)計上分が含まれていなかったため、相殺が必要となったが、数年の範囲で両者を比較したところ、ほぼ 400 億円という額で等しかった。そこで、原研と科学技術庁予算のみで官と学の研究開発費とする前提を設けた。

## ・1994年～1999年

投資総額データ（出典：総務庁「科学技術研究調査報告」等）を利用した。年度毎に得られた産・官・学の研究開発費2,476億円はデフレータ補正し、1995年実質値2,733億円に変換した。

## (a2) 原子力発電売上

2兆8,516億円（出典：電事連資料）である。

## (a) 研究開発費の比率

1988年における研究開発費の比率として、9.6% (2,733億円/28,516億円\*100)を得た。この1988年に実施したのと同じ作業を1978年から1999年まで繰り返し、その結果を表6.2.3に示している。この結果から、1978年（昭和53年）以降の原発の売上高に関するR&D費の比率（平均値）として6.2%を得ている。

表6.2.3 1978年からの我が国における原発研究開発費の比率（近似値）

西暦	電力売上 (百万円)	研究開発費 実質値(百万円)	研究開発費 比率(%)
1978	918,201	224,815	24.5
1979	1,360,135	238,705	17.6
1980	2,066,113	231,656	11.2
1981	2,094,073	240,016	11.5
1982	2,488,066	240,927	9.7
1983	2,535,674	235,295	9.3
1984	2,856,556	231,006	8.1
1985	3,210,578	249,580	7.8
1986	2,748,679	273,067	9.9
1987	2,886,540	277,665	9.6
1988	2,851,634	273,297	9.6
1989	3,145,395	269,410	8.6
1990	3,879,650	246,904	6.4
1991	4,205,789	243,841	5.8
1992	4,305,420	247,356	5.7
1993	4,797,525	257,453	5.4
1994	5,010,287	204,066	4.1
1995	5,516,949	220,388	4.0
1996	6,148,148	185,151	3.0
1997	6,430,112	149,084	2.3
1998	6,578,770	174,889	2.7
1999	6,590,209	174,520	2.6
合計	82,624,523	5,089,091	6.2

注意：デフレータ補正は1995年で実施

#### (1-4) 原研の寄与率

軽水炉は米国からの導入技術であるため我が国が独自に開発したものではない。それ故「導入された軽水炉技術」の発展への寄与を定量的に評価することは難しい。しかし導入軽水炉技術の定着や安定化という観点から、原研は、動力試験炉（Japan Power Demonstration Reactor, JPDR）を使った種々の試験研究、原子炉安全性研究炉（Nuclear Safety Research Reactor, NSRR）や軽水炉冷却材喪失事故模擬試験装置（Rig of Safety Assessment, ROSA）等の安全性研究施設、研究炉、材料試験炉（Japan Materials Testing Reactor, JMTR）や、照射後試験施設を使った燃料等の健全性研究等、原子炉研修所も含め国内の人材の育成等、極めて重要な役割を果たしてきた。原発導入の初期の頃（昭和45年代）は、電力及びメーカーの一部ではあるが、導入軽水炉の安全性は実証済みとの立場に立ち、原研における軽水炉研究開発の必要性を疑問視するような意見も見られたとのことである。

しかしながら、軽水炉安全性に係る研究プロジェクトは昭和40年代中期から原研内において立ち上がり、実証試験研究、計算コード開発等を通して国の原子力委員会が策定するいわゆる長期計画に則り、様々な安全基準データや安全審査に必要な判断基準データの策定に寄与してきた。これは、軽水炉技術は証明済みといっても、燃料、機器、原子炉に関する技術上のブラックボックス（例えば軽水炉燃料のやきしまり対策、ペレット-被覆管相互作用に起因する燃料破損等）は至る所で散見されたし、国の立場から見れば、いつまでも米国技術に頼るのではなく、国産化技術による自主技術の確立に迫られていたという背景にもよっている。

実際、軽水炉においては、導入後、以下に示すような時として重大な社会問題ともなった国の内外での事故や不具合が生じ、その都度、原研他政府系の研究機関が事故原因の究明活動に参画し、事故の沈静化に貢献してきた。

- 1970年代のPWR燃料の焼きしまりや水素脆化破損、原子炉配管の応力腐食割れ及び1979年米国のスリーマイルアイランド（TMI）原発事故
- 1986年の英国セラフィールド再処理工場での放射能漏洩事故及びソ連のチェルノブイル原発事故
- 1991年の関電美浜2号機の蒸気発生器細管破断事故及び1999年のJCO燃料転換試験棟における臨界事故等
- 2000年代の関電美浜3号機の二次冷却系配管破断事故等

また、地味で目立たないが、人材面からは原子炉研修所における様々な形態の教育（原子炉主任技術者の養成等）面での寄与も大きい。

原研が我が国における軽水炉発電の安定化・定着に、どの程度寄与したのかを知る為には、その時代その時代における技術のブレイクスルーを明らかにし、原研の寄与率を適切に推定する必要がある。しかし、50年近く時間が経過し原子力研究の分野が幅広く拡散している現状を鑑みれば、それは非常に困難なことである。そこで、研究開発の寄与率については、有識者、ユーザーなど長い間原子力研究分野に在籍して、我が国の原子力研究の歴史をよく認識していると思われる国内有識者30人の方々に対して、アンケート及びヒアリング調査を実施し、その結果を参考にして値を決めている。調査は、電事連等電力関係者、機器・燃料・材料メーカー、所管官庁、原子力産業会議、学会・大学等に対して実施された。

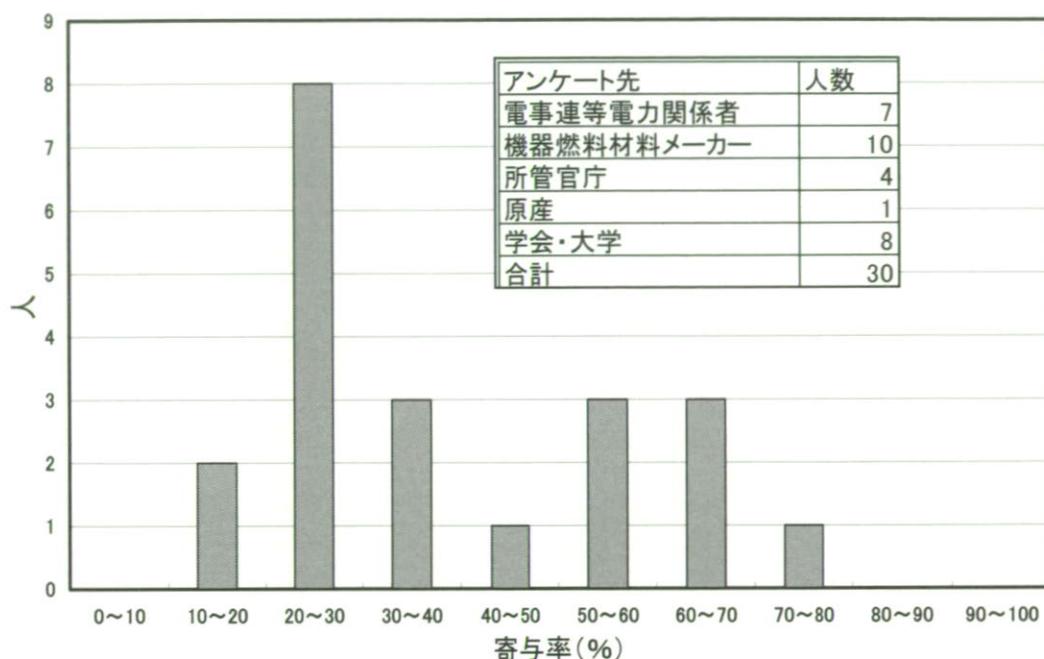


図 6.2.2 原子力界の有識者が回答した我が国の原子力発電定着に対する原研の寄与率

その結果、30人の有識者等の内、70%に相当する21人からコメント付きの有効な回答（図 6.2.2 参照）が得られた<sup>(注 2-7)</sup>。この回答結果によれば原研の軽水炉定着への寄与率に関する有効回答には二つの山が存在し、低い評価の山に属する寄与率帯域 20-30%に卓越した最大値が存在することが明らかとなった。原研ではその帯域幅の中で低い側の端点 20%を原研寄与率として採用している。

(1-5) 市場創出効果額

以上の考察から以下のような結論が導かれる。

➤ 原発市場創出額

$$92 \text{ 兆円 (市場)} \times 0.062 \text{ (研究開発費の比率)} \times 0.2 \text{ (原研寄与率)} = 1.14 \text{ 兆円} \dots (5)$$

➤ 発電施設・機器市場創出額

$$30 \text{ 兆円 (市場)} \times 0.062 \text{ (研究開発費の比率)} \times 0.2 \text{ (原研寄与率)} = 0.37 \text{ 兆円} \dots (6)$$

➤ 市場創出額合計

$$1.14 + 0.37 = 1.51 \text{ 兆円}$$

➤ 市場創出効果額

$$1.14 \times 0.542 \text{ (電力)} + 0.37 \times 0.386 \text{ (メーカー)} = 0.76 \text{ 兆円} \dots (7)$$

(係数 0.542 と 0.386 は 1995 年版の産業連関分析表から得た付加価値率)

原研設立時 1956 年 (昭和 31 年) から、2000 年までに原研が実施してきた軽水炉安定・定着化のための研究を市場創出効果額で表すと (7) 式のように約 7,600 億円となる事が分かる。

(2) 投資総額の算出

(2-1) 人件費

国立・工学系の研究機関における研究者数（技術補助員、事務補助員を含む）は 4,573 人、「人件費総額」は 61,640 百万円から、研究本務者 1 名当たりの人件費支出は  $61,640/4,573=13.5$  百万円（平成 11 年）と見積もった。（出典：総務庁統計局科学技術研究調査報告「組織、学問、研究本務者規模別研究関係従事者数、内部使用研究費、受け入れ研究費及び外部支出研究費（研究機関）」、平成 11 年版研究機関第 1 表）

デフレータ補正

図 6.2.3 から分かる様に、日本原子力研究所の職員数は昭和 42 年に 2,000 人を越えて以後の 34 年間、2,000~2,500 人で推移している。各研究分野により研究の最盛期は異なるものの、全体としては 2,000 人から 2,500 人の範囲で約 34 年間研究活動が推進されてきたと考えられる。そこで、昭和 54 年（1979 年）を原研定員数の中間点とする。この中間点、昭和 54 年のデフレータは 91.5 であり、現在との比率は  $91.5/103.7=0.88$  となる。それ故、原研研究活動に伴って携わった研究者一人あたりの人件費は、11.7 百万円（昭和 54 年）となる。

$$13.5 \text{ 百万円 (H11)} \times 0.88 = 11.7 \text{ 百万円 (昭和 54 年)} \dots \dots \dots (8)$$

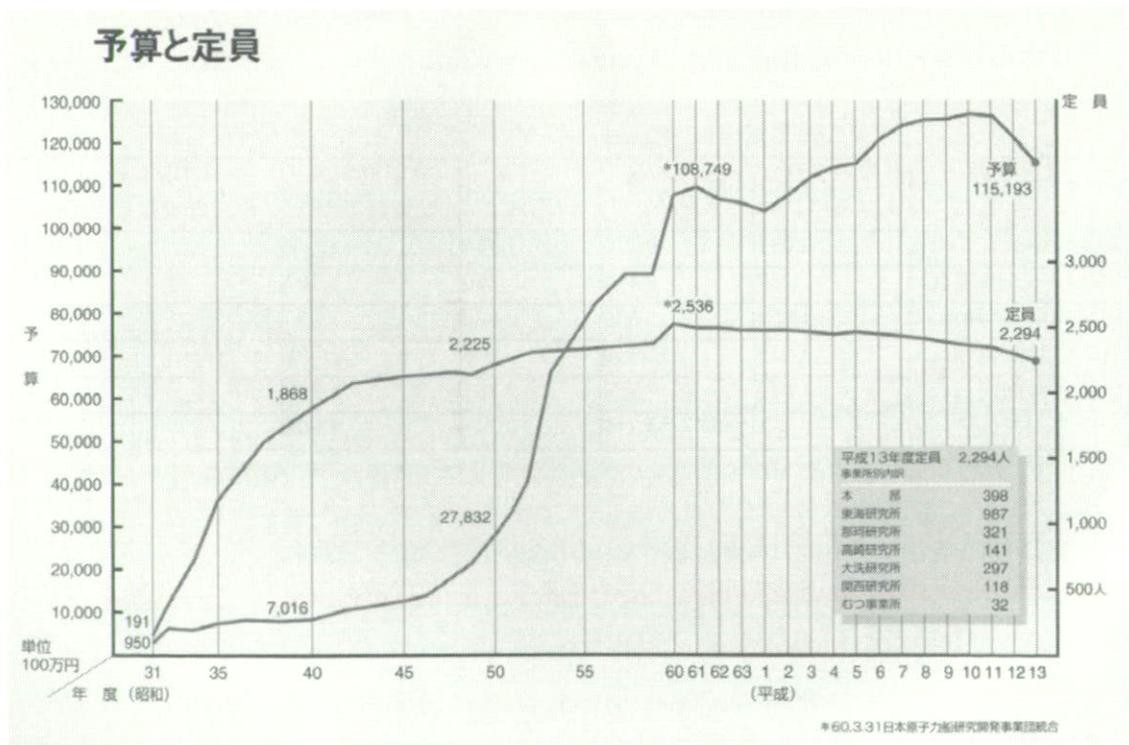


図 6.2.3 原研の予算と定員

(2-2) 研究開発投資額

原研東海研究所を中心として原発の定着や安定化に貢献した部門は表6.2.4に示すように5部門である。

- 安全性研究は、燃料、冷却水、原子炉機器コンポーネント、原子炉压力容器及び格納容器全般に亘って、通常運転時、事故時における原発の安全に係る諸研究を実施してきた。投資金額と人件費の合計は3,142億円となった。研究開発の全てが軽水炉に係るものである。
- エネルギーシステム研究は、昭和38年10月26日に我が国で初めて原子力発電に成功した動力試験炉(JPDR)が前身である。その後、原子炉工学研究や燃料・材料の基礎研究も実施した。すなわち、軽水炉技術の確立と発展のみならず新型炉の開発にも貢献している。研究開発投資額1,487億円の60%に相当する892億円が軽水炉に係る投資と認められた。
- 研究炉開発・利用は、安全性研究、核融合研究、高温ガス炉研究、原子力船研究、基礎・基盤研究等多くの分野に実施される照射ベッドであり、1,990億円の10%に相当する199億円が軽水炉に係る投資と認められた。
- 材料試験炉(JMTR)利用は、燃料及び材料の照射施設として国策を実施していく上で必要な各種の照射試験及び照射後試験を実施してきた。研究開発投資額2,025億円の30%に相当する608億円が軽水炉に係る投資と認められた。
- 物質科学研究は、核データや炉物理、核燃料、炉材料研究を推進した他、レーザを使った原子法によるウラン濃縮研究を実施した。またオメガ計画に基づき、超ウラン元素(TRU)窒化物燃料等の乾式再処理技術開発や放射性廃棄物の抽出分離技術開発に貢献している。研究開発投資額1,299億円の18%に相当する234億円が軽水炉に係る投資と認められた。

表 6.2.4 原発の安定定着化に寄与した原研研究部門における研究開発投資額

研究分野	投資金額 (億円)	投入人数 (人・年)	人件費 (億円)	全研究開発 投資額(億円)	軽水炉に係る 研究開発投資(億円)
安全性研究	2,081	9,070	1,061	3,142	3,142
エネルギーシステム研究	737	6,411	750	1,487	892
研究炉開発・利用	1,304	5,859	686	1,990	199
材料試験炉利用	1,317	6,049	708	2,025	608
物質科学研究	442	7,329	857	1,299	234
合計	5,881	34,718	3,241	8,608	5,075

上記5部門に投資された軽水炉安定定着のための研究開発投資総額 = 5,075億円・・・(9)

(3) 軽水炉発電による電力・施設等市場への投資効果率(費用対効果)

軽水炉発電による電力・施設等市場への投資効果率(費用対効果)は、(7)式を(9)式で割ればよいので、

$$\text{投資効果率} = \text{市場創出効果額} / \text{投資総額} = 0.76 \text{兆円} / 0.51 \text{兆円} = 1.5 \dots (10)$$

となる。

一般に民間企業では「研究開発投資」に、「企業利益」(一般には「粗利益」)を対比する場合が多く、通常は「研究開発投資」の3倍以上の「企業利益」を目指すことが多い。「軽水炉による原子力発電」に対する原研の研究開発投資効率率、民間の研究開発投資の目標と比較すると明らかに低

いが、「不確定要素を含み、困難な課題が多い研究」に取り組んだ結果である。

#### (4) 雇用創出効果

原研の研究開発が、新しい市場を創出し、その結果として生産が誘発され、新しい雇用が創出されるという雇用創出効果の算定結果は表 6.2.5 のとおりである。原研の研究成果は様々な市場創出に寄与しており、波及的に生ずる雇用創出効果は大きい。

表 6.2.5 軽水炉技術の安定・定着化による雇用創出効果

過去～平成 12 年度	市場創出額 (億円)	生産誘発額 (億円)	雇用創出 (人・年)
軽水炉技術の確立	15,105	33,402	101,754

これとは別に、原研が原子力研究の各分野において有為の人材を供給してきたことは、参考文献 *JAERI-Review* 2002-019 で述べているとおりであり、この意義の重要性については改めて強調しておきたい。

**参考1**：原発の売上高の考え方

発電分野では売上高により、経済規模を把握するのは適切でないこともある。そもそも、電力会社の売上高は、電気を利用し受け取る者が、発電、送電、配電など電気を受け取るに必要なすべてのサービスへ支払った対価を合算したものに相当する。この合算の諸源に戻る作業は難物である。売上高のうちの原子力発電の寄与を求めするために、発電種別に公表されている発電費用から原子力発電費用比率を求め、売上高に掛け合わせ、原子力発電の経済規模を求めることも可能ではある。

しかし、送電、配電など電気を作るサービスとは独立のものを、さらには電力会社の利益（電力に限らず売上高には利益も含まれる）までも、原子力発電の比率で分けてしまうのは、電力会社の主たる生業を発電として見る電力会社観に基づくものであり、狭い考え方といわざるを得ない。電力会社の費用のうち、送電や配電など輸送部門が占める割合は大きく、しかも固有のサービスであり、全費用ないしは売上高（総括原価で料金を定めていた電力会社では、費用と売上高は極めて近い数値になっていた）を原子力発電のシェアで分け、原子力発電の経済規模を推定するのは、適切でない。

したがって、ここでは電力会社の売り上げをもとに、原子力発電の経済規模を推定する方式を試算したが、これはあくまで参考値としての位置づけである。（代替案として、原子力発電に要した費用を積算することで、原子力発電の経済規模とする方式を提案し、これを原子力発電の経済規模とする方式もある。ちなみに、売上高を発電比率で配分する参考値は、代替案を用いた試算比べ、原子力発電費用の積算値の3倍程度となる傾向がみられた。）

原子力発電に要した費用を積算する方式は、ここでは電力9社と日本原子力発電の有価証券報告書損益計算書に記載されている原子力発電に関わる費用に基づいている。これは、資本費、運転保守費、燃料費の区分で、電力会社単位で原子力発電に必要な年間の全ての費用が示されており、単純明快なものである。しかも、費用の大半を占める電力9社に関する情報は全ての人アクセスできる公開情報であり、客観性に富む。ただし、これは一つの電力会社が保有する全ての原子力発電プラントを対象に集計したものであり、プラント毎の費用を明らかにするものではない。一般的には、同形式同出力の発電所でも、建設時点が異なれば、インフレなどにより建設費用も異なる。このように、過去に依存する費用は取得時価で合算されたものになっている。とりわけ、減価償却費では、異なる時点で建設されたプラントの資金を長期的に回収するという観点での会計計算（あえて誤解を恐れずに表現すれば、会計計算は見なし計算であり、机上の計算）を行い、個々のプラントから発生する年次展開された費用を計上している。したがって、建設費用の回収が終了している17年以上経過（原子力発電所の減価償却は設備により異なるが、大半のものは15年間または16年間で償却される）した発電所では、運転開始時点の建設費用に対応する減価償却費は計上されない（もちろん、運転開始後に行われた追加投資の減価償却費は計上される）。つまり、資本費は、同じ出力の発電所でも、減価償却が終わったものは費用が安く済むが、償却途上の発電所は費用がかかるといったように、発電能力や発電実績とは独立に、会計上の費用が計上されている点に注意すべきである。

有価証券報告書損益計算書に記載されている原子力発電の費用には、このようにいくつかの留意が必要にはなるが、商業用に用いられる軽水炉原子力発電所の建設・保守、原子燃料の購入・再処理（再処理費用は引当金という形で、将来発生する費用を計上したもの）の全行程（本報告書でいうところのアップストリームからダウンストリームまで）で発生する全ての費用（そのうち、たとえば建設やバックエンドは異時点間で発生する費用で特殊な「見なし」計算が）を会計学の原則により、特定年に割り振った費用である。この意味で、有価証券報告書損益計算書の原子力発電費用は、網羅的なものではある。これに依る経済規模の推計は、発電分野では事業者が高々10社しか存

在せず、しかも電力9社は株式市場へ上場されており、大蔵省に提出した有価証券報告書という公的資料に基づき、原子力発電の費用を確定することができる点で優れている。

なお、原子燃料や原子力プラントについては、電気事業者を中心とする最終需要者が購入するものではあるが、原子燃料の購入は消費ではなく設備投資であり、プラント製作・建設と同様に減価償却で費用が計上されることになっている。ただし、通常の市場規模・経済規模の推定と同様に、原子燃料の加工と原子力発電のプラント製作において、ある年の出荷額、売上高の記録を積み上げることもできるため、これにより参考値ではあるが、経済規模を把握することを行う。

このように売上額、ないしは出荷額ベースの経済規模の推定値は、工学や医療などでの放射線利用と比較可能なものであるため、それなりに意味を持ちうる。ただし、原子力発電プラントの据え付け規模は年毎に大きな変動がみられるため、特定年のみを対象に調査を行うことは不適切である点に留意する必要がある。

(注 1-1) 筆者は、1999—2004年に日本原子力研究所に勤務、財務を担当したが、とくに財政当局からの要求に厳しいものがあつた。

(注 1-2) 2002年12月、「特殊法人等整理合理化計画」が閣議決定され、研究開発を行っている各法人等は、説明責任の一環として研究活動の定量的な費用対効果分析が求められた。

(注 1-3) 米国でも政策評価法(GPRA)が1993年に導入されたのも、同様の背景に基づくものである。この経緯については、高橋祥次『GPRAと基礎科学研究に関する評価』、JAERI-Review 2002-020に纏められている。

(注 1-4) 文部省政策科学研究所『我が国における科学技術の状況と今後の発展の方向性』、NISTEP REPORT NO. 99、2005年5月

(注 1-5) 米国GPRAの中間報告においては、共通の政策目標に対する達成度という意味で、グリーン、イエロー、レッドの評価を示している。

(注 2-1) 調査では、平成11年度にわが国における放射線利用の経済規模を調べ、翌年度では米国における放射線利用の経済規模を調べた。前者の調査結果は例えば原子力図書館げんしろう

(<http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/keyword2.html>)で見ることができる。また、後者の調査結果は、日本原子力学会英文誌(Journal of Nuclear Science and Technology)の39巻9号頁1002(工業利用)、10号頁1106(農業利用)、10号頁1114(医学・医療利用)、10号頁1120(日米比較)で見ることができる。

(注 2-2) MISI; The Untold Story: Economic and Employment Benefits of the Use of Radioactive Materials (1994.3)

(注 2-3) JAERI-Review 2002-019 (2002) .

(注 2-4) 原子力システム研究懇話会：“原子力利用の経済規模”(平成13年)によれば、日本原子力発電については電力会社に卸供給し、電力会社は需要家から電気料金により収入を得ている。日本原子力発電の売り上げを評価すると二重計算となるため、対象外としている。

(注 2-5) 核燃料サイクルについては、例えば原子力システム研究懇話会：“原子力利用の経済規模”(H13.6) pp120-123参照。

(注 2-6) オリジナルデータは基本的には国内原子力関連機器メーカーへのアンケートにより作成されている。本書のような目的に使われることは想定していなかったため、データを幾つか加工する必要が生じた。アップストリームについては、①雇用等の間接効果は見込まない、②納入された製品の売上のうち、製品の流通部門に関わるコストは正確に区別して評価できないことが多いので流

通費込みとする、という前提条件をつけた。

(注2-7) 原研の寄与率を高く評価された方(原子力学会)から戴いたコメント:「軽水炉型原子力発電に関しては、海外からの技術導入による寄与も多いが、やはり日本国内で日本原子力研究所が中心となり、きめ細かな研究・データ収集を行ってきたことが今日の高い安全性・信頼性を有する発電システムの礎となっている(75%)」。原研寄与率を低く評価された方(東大大学院教授)のコメント:「わが国の原子力発電に対して寄与した研究開発活動における原研の寄与率については、各項目について現場においてそれがなければ海外から導入したかどうかを問い合わせて勘定できるのではないのでしょうか。あるいは世界の軽水炉実用化に係わる研究開発投資とわが国の投資額を比較したら、大体分かるでしょう。20-25%と思いますが」。回答できないとされた方(電気事業連合会)のコメント:「我が国の軽水炉は基本的に「導入技術」であり、軽水炉の発展への寄与を定量的評価することは出来ない。一方、導入技術の定着という観点からは、原研のROSA,NSRRをはじめとした大型試験施設による研究の果たした役割は極めて大きいと認識。また、原子炉研修所も含め国内の人材の育成にも極めて大きな役割を果たしたと評価(評価点なし)」。

## 6.3. 核融合研究開発の経済的意義と評価

小西 哲之

### 6.3.1. 研究の投資効果の一般論

少なくとも核融合などエネルギー開発への投資は、エネルギーとしての経済効果を将来得ることを目的になされるものであり、市場の大きさ、意義から大きな投資が正当化されている。

核融合に限らず、未来のエネルギーに向けた開発の経済的価値は、“Value for Money”としてその費用対効果を示すことが求められているし、ある程度定量的に評価することが可能である。研究開発のこうした意味での評価、特に事前評価は従来行われてこなかったが、研究開発のための資源配分という意味で最近重視されている概念であり、ここに示すような方法論の検討は外部性研究の一分野としても重要である。研究開発は結果ばかりでなくその過程でも大きな影響を社会に及ぼす可能性があり、また影響はさまざまな経路で起こる。図 6.3.1 は研究の成果についての研究者と社会からの見方の差を模式的に示したものである。(a) に示すように研究者は自身、あるいは「ピアレビュー」と称してその成果を論文や技術開発の成功、たとえば核融合においては電力の発生によって測りがちであるが、実はそれは本質的なスポンサーである納税者が求めているものとは限らない。

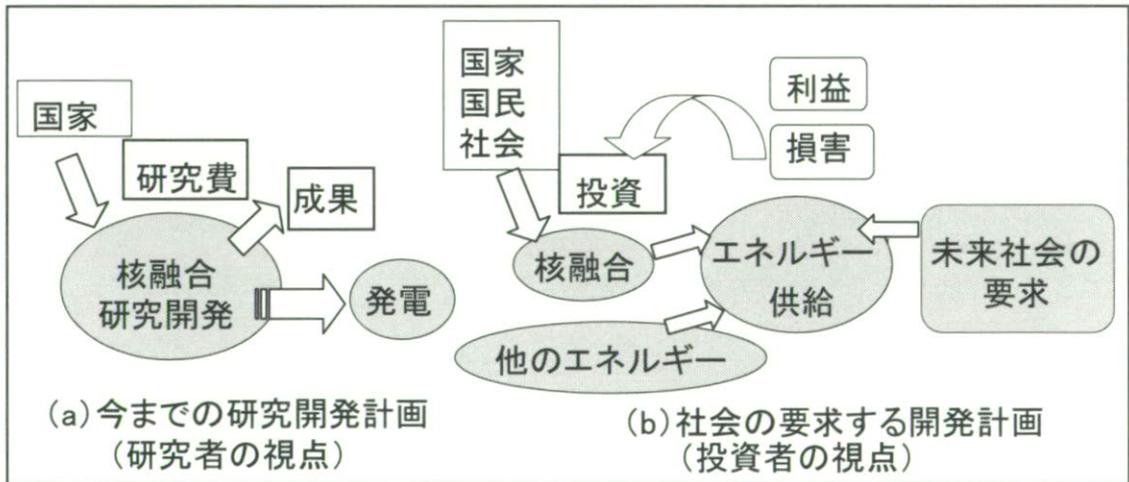


図 6.3.1 (a) 研究者の視点と (b) 投資者の視点から見た核融合研究の評価

全てのエネルギー技術は、未来社会において、社会や消費者によって公平に評価されるものであって、電力であれば、太陽光であろうと原子力であろうと水力であろうと発生できるのであるから、消費者は核融合を特別視してくれるわけではない。もちろん現在再生可能エネルギーがすでにそう見られているように、たとえば「クリーン」であるということで消費者や社会が、少々高くても選好する、あるいは原子力がそうであるように忌避される、と言うことはありえる。つまり、エネルギーとしての価値は、必ずしも市場価値が全てではない。技術的に開発に成功しても、社会的には成立しなかった技術は枚挙に暇がなく、多くの研究開発努力は、技術的成功だけでは社会に成果を還元することはできない。エネルギー供給は、市場価値とともに市場以外を通じて社会へ、産業、環境にも影響する。それが、本委員会が対象とする外部性の拡大された概念、すなわち社会・環境

に対する正と負の影響を総合的に評価する、ということであり、その結果未来社会に想定されるたとえば核融合など開発対象の価値を評価することになる。それを現在価値に割り戻すことで、適正な投資額とスケジュールが将来社会への影響力から評価可能であり、その価値が大きいものには大きく、小さいものにはそれなりの限度で資源を投入することが必要であろう。つまり、拡大された外部性の概念は、研究開発の価値を金銭的に評価することを可能とするのである。従来の、ExternEなどの外部性研究は主に環境への負の影響を重点的に扱っており、二酸化炭素放出を含めても、ある程度クリーンなエネルギーであれば差異を見出しにくかった。これに対し、本委員会で拡大された概念に基づく核融合の外部性は、5.5節に分析してある。それを基にして、ここで示した概念は、より大きな視野で研究開発の事前評価の定量的分析を可能とする方法論である。

### 6.3.2. 影響経路とメカニズム

研究開発の社会的な影響を、経路ごとに考察した結果は図6.3.2に模式的に示してある。ここで、時間スケールで4つの代表的な影響パターンを示している。最初の2種は研究開発に伴う設備投資や雇用の発生などの直接の経済効果である。第一の影響は産業連関表で直接評価できるものであり、政府支出や公共投資などのほかの政策的投資と同列にGDPの増加、景気浮揚効果などで評価するものであり、支出と同時ないし高々2、3年までで影響がみられる。第2の効果は第1の効果が間接的に及ぼす地域社会、経済への影響であり、人口の増加、インフラの整備、産業構造の変化などを通じて長期的には地域社会の発展の形で産業連関表では直接見られないが効果が現れるものであり、数年から10年程度の時間スケールである。これら2種の効果の分析については、政府機関やシンクタンクによって評価手法はおおむね確立され、すでに実際に使用されている。ほかの土木、建設、開発プロジェクトでも見られる効果であり、科学技術開発に特有のものではない。しかし、国際熱核融合実験炉(ITER)のわが国への立地を想定した解析では、一般の道路や橋梁、港湾などのプロジェクトに比べても効果的であるという結果が得られている。これは、先端技術を駆使した付加価値の高い製作物が多く産業の裾野が広いこと、学研都市としての求心力があることからある程度理解できる。ただし受注できる産業技術基盤の有無により、地域によって影響に差が発生する。

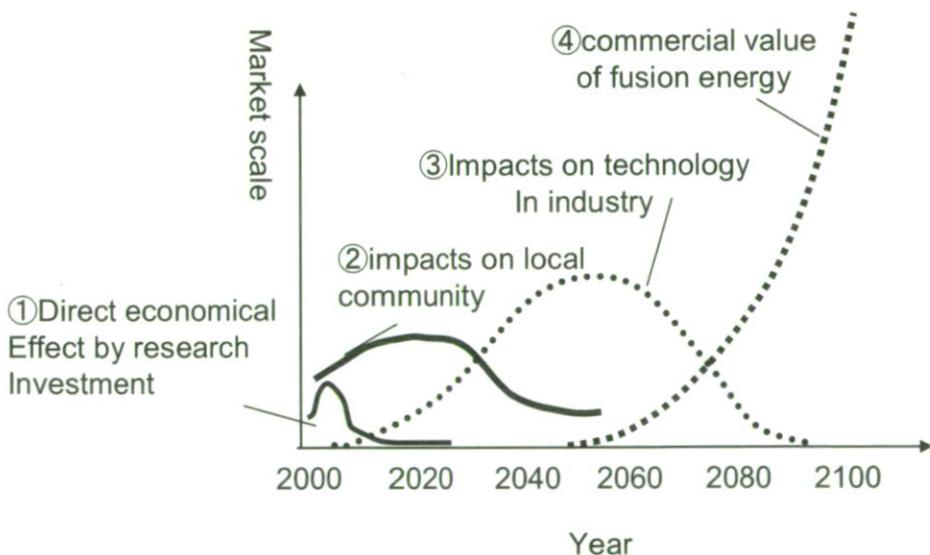


図 6.3.2 核融合研究開発の種々の社会経済的な影響

第3の効果はいわゆるスピノフであり、技術波及効果と呼ばれることもある。外部性の典型例の一つとして扱われている。高度科学技術開発の成果の産業への応用であり、製造技術や新製品として、新たな市場を開発する効果であるので、規模は大きく、時間は長くなる。当初極めて効果であった最先端技術が、更なる技術開発と合理化、習熟によって著しく価格を低下して後はじめて発生することも多い。この過程で当初技術開発以上の投資と開発努力の必要なことも多いため、相対的にオリジナル研究者の占める貢献度はかなり小さくなる。この点の分析は前の6.2節に詳しい。

核融合研究はすでに40年以上にわたり、6000億円以上が投じられている。これについても同様の分析を行い、約180の技術が成果として摘出され、研究者の貢献度で評価しても現在までの開発投資額には満たないまでも同じオーダーの規模があると評価されている<sup>[1]</sup>。同様の効果は、訂正的には欧米でも報告がある<sup>[2]</sup>。核融合技術の産業化は、まだ開発された技術が一般に使用されるまでには時間が十分とはいえないが、多くの高度技術分野に関連していることが特色である。

将来はさらに市場が拡大することが期待されるが、その価値は現在価値に割り引く必要があり、過大評価するべきではない。少なくとも産業技術に関して言えば、より技術が成熟するのを待って短期間に商品開発を行ったほうが費用対効果という意味では有効であることもありえる。核融合のような基礎研究についてはこの技術スピノフによる外部性効果は、研究の貢献度が相対的に低い。逆に言えばこれは産業界による商品開発の成果が圧倒的に大きいということであり、またそのような産業開発力を誘発していること、高度技術を産業化する仮定でわが国の技術競争力を高める効果があるということができよう。

4番目の効果が、核融合研究についてはもっとも最後に現れる、直接目的であるエネルギー市場である。これは潜在的な市場規模は100兆円レベルと莫大であるが、早くとも発生するのは50年後くらいであり、現在価値としては大きく割り引かれることになる。しかし超長期の投資に関しては、割引率の適用に専門家の間でも議論があり、定説はまだ確立していない。この核融合研究の究極の目的であるエネルギーについては、市場化に成功したときのインパクトはきわめて大きく、別途その効果はさまざまな角度から考察する必要がある。

### 6.3.3. 核融合エネルギーの意義と効果

核融合エネルギー市場の大きさについては、図6.3.3にその概要を示すように、時松の分析に基づいて著者らがすでに2100年でグローバル市場の30%近くになりうることを報告している<sup>[4]</sup>。欧州でも同様の報告がある<sup>[5]</sup>。

ここでは、エネルギー市場の大きさではなく、そのもつ多面的な効果を、経済的利益を①直接利益、②間接利益、③波及効果に分けて考えてみる。①エネルギー発生コストの低下は最も簡単な直接利益であり、たとえば電気料金の削減で計られる。将来の化石資源の高騰に対してより安価な電力が得られれば核融合開発は経済的利益を生んだことになる。②間接利益は出資者としての国家や自治体が重視するもので、売上、つまりGDPへの寄与で計られる。大きな市場シェアは大きな売上となるが、コスト低下は売上を減らす。市場創出は評価されるがシェアの奪い合いでは全GDPは増えない。③経済波及効果（spin offではない）は、投資の経済的影響で評価される。発電機器の製造や輸出はGDPに寄与するが、原油代金の外国への支払いは社会に還元されない。同じ売上でも、国内生産、消費の大きなエネルギー技術は社会に再投資され、雇用の創出効果でも大きな経済効果をもつ。

経済性、あるいは公共投資の回収の観点でみると、最終的に得られると期待される市場規模、経済効果が大きければ大きいほど、初期投資の大きさは正当化されやすい。我が国国内の電力の一部のシェアにおいて利幅の狭い低コスト発電炉としての地位をそれも遠い未来に見るのであれば、エ

エネルギー開発に許される現在の投資額は小さくならざるを得ない。しかも、それが他の電源のシェアを奪うものである場合、エネルギー全体の売り上げは必ずしも増えない。経済効果は国家社会、消費者、電力会社では得る利益が異なり、必ずしも一致しない。たとえば低コスト化は消費者の直接利益であるが、GDPは減る。電力会社は短期的には低コストを志向するかもしれないが、コストと電力料金が連動すれば利潤を生むとは限らない。核融合への投資はある種の公共投資とみなすこともでき、②と③の視点での評価も重要となる。この他にも、エネルギーセキュリティなど、まだ評価できていない社会的効果もある。

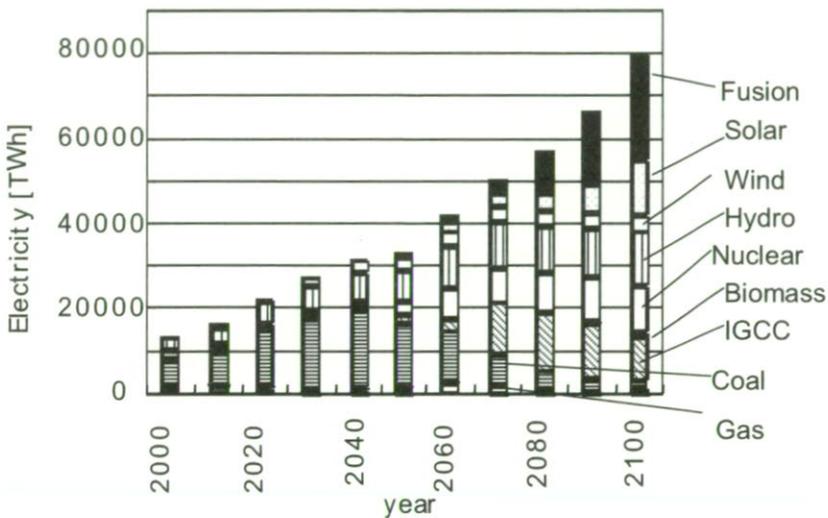


図 6.3.3 環境制約下で推定されるエネルギーミックス遷移

ただ、いずれにしてもこれらの投資効果は、核融合が市場に投入された後、たとえば 2050 年以降に発生する。それに対して、投資は現在行われているのであるから、この経済効果は、現在価値に評価されなければならない。投資の合理性を判断するとき、経済学では「割引率」という概念を使うのが一般的である。これは、投資により得られる利益を再投資する複利のサイクルでどれだけのものが得られるかから逆に初期投資の妥当性を判断する。公共投資の割引率は一般的に低く設定されるが、一方民間投資では見通せない長期について適用される。この考え方に加えて、現在価値を考慮する場合には、開発の失敗する確率も考慮に入れなければならない。技術的に実現しても市場でシェアを得ない場合も投資上は失敗のカテゴリーに入る。

### 6.3.4. 開発戦略との関連

以上は、未来のエネルギーと環境問題を出発点に、21 世紀のエネルギー市場の可能性を考えた一例である。従来、多くの「炉設計」は、開発者側の勝手な希望で作られた technology driven のものが多く、必ずしも実現したからと言って商業化されることは期待できないこともあった。一方、将来社会の要求に核融合を適用させようとしても、技術がそれに答えられるかどうかはわからないし、将来社会がそのような方向に行くかもわからない。

しかし、核融のエネルギー源としての可能性、魅力は単なる先進国の電源として想像していたよりも、量的にも質的にもはるかに大きいことがわかる。これが生かされれば、その潜在的な可

能性の大きさから、大きな開発投資を正当化することができる。我が国の輸出産業の一つとして、発電よりはるかに大きな利用可能性を持ち、しかも地球環境の積極的な再生、食糧問題、人口問題の解決、化石資源の長期的有効利用などのはるかに大きな経済効果の可能性があるとすれば、現在の核融合開発に許される投資は大きくなるであろう。このために重要なことは、まず第1に、設置される国、社会の需要を把握し、それに対応した希望と炉型と導入スケジュールを決定してそれに合わせた開発戦略を策定することである。

一方では、産業革命以来の世界が、エネルギー供給の拡大とともに人口と経済規模の増大を招き、さらにそれがエネルギー需要への圧力を強めてきたという事実を目をつぶるわけにはいかない。クリーンであり、無尽蔵だからといって無制限にエネルギー供給を続けるわけには行かず、社会や環境へのインパクトを考えながら、つまり外部性を考えながら、エネルギー供給の全体像を構築していく必要があるであろう。研究開発の効果の分析は、この視点からも意義があると思われる。

#### 参考文献

- [1] S. Konishi et al, "Evaluation of Fusion Study from Socio-Economic Aspects", Fus. Eng. Des.2005.
- [2] L. M. Waganer et al., "Benefits to US industry from involvement in fusion", Fusion Eng. Des. 63-64 (2002)673-678.
- [3] E. Bogusch et al,m "Benefits to European industry from involvement in fusion", ibid., (2002)679-687.
- [4] K. Tokimatsu et al., "Evaluation of economical introduction of nuclear fusion based on a long-term world energy and environment model", 19th IAEA Fusion Energy Conference, Lyon 2002, IAEA-CN-77/SEP/03.
- [5] P. Lako et al., "The long-term potential of fusion power in western Europe", ECN-C-98-071 (1998).



## 6.4. 意思決定の外部性

西川 雅史

4.1 節で述べたように、エネルギーセキュリティの観点から原子力は有効な選択肢の一つとなりうるが、昨今の原子力に関わる事故や不祥事、またチェルノブイリのような重大な事故の発生により原子力に対する国民の信頼が低下している。一方、1 章で見たようにエネルギーセキュリティを脅かす要因のひとつとして国内の社会的・政治的要因が挙げられる。これは輸入の不意の中断や資源国の政治的・軍事的不安定性、長期的な資源枯渇といった従来から見られる国際的脅威とは異なる文脈の要因であり、主として社会が原子力のようなエネルギーシステムを選択する際の意味決定において考慮すべき外部性要素として捉えることができる。エネルギー源の選択における社会の意思決定支援は、1 章で触れたように ExternE の主要な研究目的のひとつでもあり、そのメカニズムを知ることは重要である。このような国内的脅威要因の特性を鑑み、本節では社会の意思決定における外部性の発生メカニズムについて述べる。なお、本節で述べる用語としての「外部性」は、主として経済学における外部性の意味（ある人の意思決定が、市場で対価を払うことなく、他のものに影響を与えること）で用いていることに留意されたい。

### 6.4.1. 外部性と財産権

社会がエネルギー源を選択する、あるいはエネルギー技術の社会的政策を選択するに当たっては、当事者である国民や政府、地方自治体、社会政治団体や電力企業はエネルギー源に対して意思決定を行っていると考えられるため、まず社会の意思決定が発生する事例として財産権を取り上げる。

人がその生存のために食料を獲得する行為は許されている。食料の元となる獲物（資源）は自然界から取得する。人口が少なく相対的に資源が十分に豊富な場合には、そこで食料獲得活動を行う当事者間が互いに及ぼす影響はないと考えられる。しかし、人口の増加やあるいは食料の取得を自らの食のためだけでなく他への譲渡のために行う（生産力の増強）などして相対的に資源が不足してくると、当事者間の行動が互いに影響を及ぼすようになってくる。

このように一方の当事者の行為が他の当事者に不利益を被らせる事態を負の外部性という。負の外部性が放置されると当事者間に著しい不利益をもたらす恐れがあるため、これを解消しようとする働きが生じることがある。これを外部性の内部化という。内部化の手段としては種々の方法が考えられるが、最も理解が容易な方法として、財に対する財産権（所有権）の設定が挙げられる。財産権は、資源（土地や獲物）に対して独占的に所有と利用を行う権利であり、これによって、当事者の不利益の発生を最小限にとどめることができる。

### 6.4.2. 内部化コスト

ここで、財産権の設定に際して個々の当事者は不利益を全く被らないわけではなく、例えば財産権の設定以前には行使できていたはずの自由な行為を制限されるなどのコストを負うことになる。したがって、外部性の内部化は発生しうる甚大な不利益の解消もしくは低減を期待して行うものではあるが、内部化自体は必ずしも容易に達成できるものではない。ここで、外部性の内部化において発生するコストについて整理する。

- ①財へ財産権(所有権)の設定を決定するコスト
- ②財に対する財産権を設定する技術的コスト

## ③財に対する財産権を保護する技術的成本

①は話し合いのコストであり、財産権を当事者間で設定する最初の段階で発生するものである。②は財産権を証明・明示するための技術であり、③は財産権を設定した後に、それを侵害する可能性のある他者の行為を監視・対応するための技術である。②と③はいずれも財産権を設定した結果として必然的に発生するものであり、これらが無ければ設定した財産権はその効力を発揮することはできない。

財については、規模の経済性や範囲の経済性あるいは歴史的経緯などによって、複数所有者間で共有されることがある。また、より包括的に国家的な規模で管理されることもある。財の共有は、日本の入会地のような場合に見られるし、領海は国家的に所有されている一例である。財が共有される場合は、その財が私的に所有される場合には見られない追加的なコストが発生する。例えば、所有者がその財を利用する際に他の複数の所有者間で取る合意や、第三者が当該の財を利用したい場合に複数の所有者間で行う交渉などである。これらを考慮すれば、先に述べた外部性の内部化コストは以下のように追加・修正される。

- ①財へ財産権(所有権)を付与すると決定し、かつその所有形態(私有か共有)を決定するコスト
- ②財に対する財産権を設定する技術的成本
- ③財に対する財産権を保護する技術的成本
- ④複数所有者がいる場合の共有財の利用方法の決定コスト
- ⑤第三者が当該財を利用するに当たっての交渉コスト

## 6.4.3. 内部化メリット

このような内部化のコストを念頭に置いて、外部性の内部化が実現できない場合を考えてみる。

①の内部化コストは、複数の当事者が自らの生活に必要な資源の分配を話し合いによって決定し、著しい不利益の発生を避けようとする効果を期待して支払われる。しかし、実際には①で決めた財産権の設定や保護に②や③のコストが必要となることや、付与される財産権の大きさに不満がある場合には、上に述べた内部化メリットがトータルの内部化コストを上回らないと判断されることがある。この時は①のコストは支払われず、結果的に共有の資源が浪費されていくことになる。これをコモンズの悲劇(共有地の悲劇)という。このような事例は、たとえば成長著しい中国における河川の私的利用量の増大とそれに伴う河川の汚染の深刻化などに見ることができる。

次に①の財産権設定の話し合いのコストと②と③の技術的成本の合計が内部化のメリットよりも下回ると判断されたとする。このときには自発的な内部化が可能となる。河川の例であれば、きれいな河川の流水に適切な財産権が設定されていれば、汚染者は他者の財産権(きれいな水)を無料で汚染することができなくなるので、流水の使用を諦めるか、財産権の保有者に対して相応の対価を支払うことになる。このように両者をベターオフさせ得ることが内部化のメリットである。

さらに規模の経済性や範囲の経済性あるいは歴史的経緯などによって財が複数所有者によって共有されたとする。例えば団地やマンションなどの集合住宅は、規模の経済性を追及した結果として財を共有している状態である。農業を営む複数の農家がトラクターを共有することや、農作業を共同で行うことも時間や費用の節約となり自発的な共有が発生していると考えられる。私有か共有を問わず、所有された財がその行使によって利益を生じる時には当事者は財を利用しようと試みる。上記のように財が共有されている場合には、その利用方法について複数の当事者間での集会的な意思決定を行う必要が生じてくる(④で示した内部化のコスト)。

#### 6.4.4. 全員一致と代替不可能性

諸般の事情によって共同所有の形態が望ましいと判断されたとしても、集合的な意思決定の合意は、関係する当事者の絶対数が増加するほど当事者間の思惑の相違による不確実性が増大するため必ずしも容易には達成できないことがある。例えば、当事者が50人である場合と1000人である場合には、1000人の合意を取る方が困難であり、集合的意思決定のコストは大きくなる。ここで注意すべきは、合意を取るべき当事者の絶対数だけがコストの増減に寄与しているものではない点である。例えば同じ50人の合意をとる場合でも、1000人の中の50人の合意を取ることは50人の中の50人の合意、すなわち全員一致の合意を取ることもより容易である。これは、合意を取るべき人数の割合が増加することも集合的意思決定コストの増加に寄与することを示している。さらに、全員一致の場合には集合的意思決定のコストが劇的に増加することがある。それは、当事者から順に合意を取り付けていった時、最後の当事者は求められる合意内容に対して断固として反対する、あるいは合意をするために膨大な対価を要求することが起こりうるためである。

集合的意思決定は公共事業の遂行時にも発生するが、このような最後の当事者の反対によって集合的意思決定のコストが膨張し、公共事業の遂行に支障をきたすことが往々にして見られる。しかし、この当事者が合理的な判断によって反対するとき他の当事者はこれを妨げることはできない。このように、ある合理的個人の意思決定が対価を払うことなく他人に影響を与えることを「意思決定の外部性」という。人は自分にとって具体的な便益があり、かつ対価を払う必要のあるコストにしか関心を払わないため意思決定の外部性を放置し、そのため全体として最適であると思われる行動を取らなくなる。

このような意思決定の外部性を内部化するコストの低減方法としては、例えば全員一致の条件を緩和することや財の利用方法を変更するなどの方法がある。前者の例としては居住者区分所有法などに見ることができる。この法律では老朽化したマンションを建て替えようとするときに居住者の4/5以上の賛同が得られればこれを実施することができる。阪神淡路大震災後の復旧過程における集合住宅改修工事においては、この法律を根拠として比較的円滑に集合的合意を得ることができた。後者の例としては成田空港の新滑走路の工事などに見ることができる。成田空港の新滑走路建設においては、当該工事に対して反対の意見を持つ地主の区域が確保できず当初予定の滑走路本数は確保できないものの、部分的な開発によって空港としての新機能を確保することを目指している。

ただし、財の性格によっては全員一致の条件が必須の場合や、利用方法の変更が不可能な場合がある。この場合には外部性は放置され、財の利用はできず、そこから得るべき利益を享受できないという結果に陥る。このような事例として医薬品特許の利用が挙げられる。例えば、ある製薬会社が開発した要素Eがあるとする。ここに他の3つの製薬会社がそれぞれ特許を持つA,B,Cの三要素を統合した新しい要素Dを加えることによって、新薬Fを作ることができるとする。このとき、A,B,Cの特許を持つ各製薬会社がそれぞれ高額な特許料を請求すると、要素Eを開発した製薬会社はその特許料の支払いに躊躇して新薬Fの製造を行わない可能性がある。これは貴重な知的資源である要素Eが使用されずに放置されてしまうことを示している。このとき、各製薬会社は、新薬Fから最終的な便益を受けることができたはずの患者が、その新薬を使用できないがために支払うことになるコスト（例えば、疾病が平癒しない）まで考慮して行動しているわけではない。このように、潜在的な正の外部性が実現しない事態をアンチコモنزの悲劇という。これは研究成果などの知的財産権が過剰に保護されることで、それら有用な知見の利用が妨げられる恐れがあることを示している。

社会がエネルギー源として原子力を選択する場合も、これが複数の当事者の関係する事案である以上、その意思決定には上記に見たような集合的意思決定のコストがかかる。これを低減するに当たっては、全員一致を回避するような政策や制度の工夫するなど、個人を尊重するとの立場に固執し過ぎず、外部性が放置されることのない配慮することが重要である。

## 6.5. 規制に関する政策評価の動向

岸本 充生

### 6.5.1. 規制影響分析とは

規制影響分析 (Regulatory Impact Analysis: RIA) とは、規制を導入することによって得られるプラスとマイナスのすべての影響を、体系的かつ定量的に評価するために用いられる一連の方法を指す (OECD 1995)。対象が規制であれ、組織であれ、個人であれ、評価とはそれがあつた場合 (with) とそれがなかつた場合 (without) の比較から導き出される。規制がない場合をベースラインとし、プラスの影響もマイナスの影響もそこからの差分として表される。

RIA には3つの特徴がある。1つ目は予測である。規制を導入することによって追加的に生じると予想されるありとあらゆる (プラスとマイナス両方の) 影響をできるだけ具体的かつ定量的に示す必要がある。そのためにはシミュレーション技術が必要であり、環境・安全・健康リスクを扱う場合は、リスク評価という「予測の科学」が用いられることになる (岸本 2005)。次は、効率性である。規制によって得られる効果と費用を明らかにし、分配面に問題がない限りにおいて、費用対効果の最も優れた、あるいは純便益の最も大きいオプションを選ぶことで達成できる。この分析は、費用便益分析や費用効果分析の形で行われることが多い。最後に、説明責任である。規制作成過程を透明にし、パブリックコメント制度等により利害関係者からの意見や情報を取り込み、その上で規制が社会にとってプラスであることを国民全体に示すという側面がある。

### 6.5.2. RIA の制度化

#### (1) 制度化の効用

米国では、RIA の義務付けによって、定量的なリスク評価や健康改善効果の金銭価値化の技術が実際に使用され、その過程で発展してきた。例えば、環境保護庁 (Environmental Protection Agency: EPA) が、大気汚染物質の環境基準を強化しようと考えたならば、そのことによってどのくらいの健康リスクが削減され、それは金銭価値化するといくらくらいになり、対策費用との関係はどのようなものになるかについて説明する義務が生ずる。そのためには、必然的に、定量的な用量反応関係を導出するための疫学調査や毒性発現メカニズムを調べるための動物実験に予算を提供し、健康改善効果を金銭価値化するために微小なリスク削減への支払意思額を尋ねるアンケート調査などにも予算を提供する必要がでてくる。このような仕組みが、レギュラトリ・サイエンスの興隆と質の高い RIA の生産につながった (図 6.5.1)。英国や欧州 (EU) においても、疫学調査や金銭価値化手法の研究が進んだ時期が RIA の導入時期と重なっているのは偶然ではない。

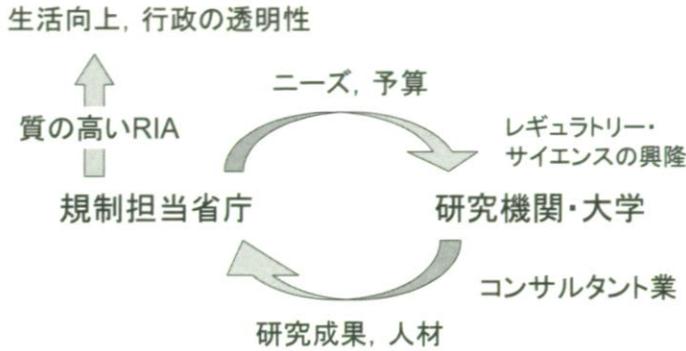


図 6.5.1 RIA 導入により期待される好循環

(2) RIA の枠組み

規制を対象とした評価枠組みはいくつかあり、まず規制制定過程内に行われるものと、規制制定後に実施されるものに分けることができる。前者には、RIA に加えて、RIA のレビューがあり、米国では行政予算管理庁 (Office of Management and Budget: OMB) が行う。後者には、メタ評価とプログラム評価がある。メタ評価とは文字通り評価の評価であり、発表された RIA を、例えば年に 1 回まとめて評価する。RIA における予測が適切であったかどうか事後的に検証するものがプログラム評価である。

表 6.5.1. 規制を対象とした主な評価方式

	評価方式・タイミング	実施主体	評価対象の選定	評価の視点
規制制定過程内	規制影響分析 (RIA) (規制の導入・改廃時)	規制所管府省	対象を定義して 網羅的に実施	必要性、有効性、 効率性等
	規制影響分析の「レビュー」 (規制制定過程内)	第三者的機関		必要性、有効性、 効率性、手続きの 適切性等
規制制定後	規制影響分析の「メタ評価」 (レビューされたものを)	第三者的機関	選択的に実施	規制の遵守状況、 有効性、経済性等
	プログラム評価 (規制導入から一定期間後)	規制所管府省 & 第三者的機関		

出典) 財団法人行政管理研究センター (2004) の図表 1-1 より作成

### 6.5.3. 米国の RIA

#### (1) 歴史的経緯

米国において、RIA が本格的に導入されたのはレーガン政権時代の 1981 年である。大統領令 12291 号において、規制を新たに導入しようとするすべての省庁は規制が社会にもたらす費用と便益を推計し、社会にとっての純便益を最大化するような規制が実施されるべきことが指示された (Reagan 1981)。大統領令の文言を以下に引用する。

#### 第2節 一般的要件

新たな規制の公布、既存の規制のレビュー、規制に関する法案の作成等を行う際には、すべての省庁は、法が許す限り、以下の要件に従わなければならない。

- (a) 行政の決定は、提案された政府活動のための必要性およびその帰結に関する十分な情報に基づかなければならない。
- (b) 規制措置は、規制が社会にもたらす潜在的便益が社会にもたらす潜在的費用を上回らないならば、実施すべきではない。
- (c) 規制の目的は、社会にとっての純便益を最大化するように選択されなければならない。
- (d) 所与の規制目的を達成するための複数の方法の中で、社会に対する費用が最も少ないものが選ばれるべきである。
- (e) 省庁は、社会にとっての純便益を最大化するという目標を持って、規制の優先順位を決めるべきである。ただし、規制の影響を受ける特定の産業の状態、国民経済の状態、将来検討されている他の規制措置をも考慮すべきである。

項目 (b) と (c) は費用便益分析、(d) は費用効果分析、(e) は経済影響分析の実施を指示していると解釈できる。大統領令 12291 号から 12 年後の 1993 年に、クリントン政権は大統領令 12866 号を公布したが、表面的にはほとんど同様の内容であった (Clinton 1993)。しかし、以下の文面からも分かるように、定量的な要素だけでなく定性的な要素をも重視すべきことを指摘し、分配面への影響や衡平性まで含めた広い意味での純便益の最大化を目標としている。また、費用と便益の比較については、「当該規制の便益が費用を正当化する」ことを要求しており、必ずしも狭義の費用便益分析を求めているわけではない。

### 第1節 規制の理念および諸原則の表明

#### (a)規制の理念

…規制の可否および方法を決定する際に、行政機関は規制しないという選択肢をも含め、実施可能な規制上の選択肢に係るすべての費用および便益を評価すべきである。費用および便益は、定量的に評価されるもの（通常推計することができる最大限度で）、定量化は困難であるが考慮することが必須である費用および便益の定性的評価の両方を含むものと理解されなければならない。さらに、複数の代替的な規制方法の中から選択するに際しては、連邦行政機関は法律が他の規制方法を要求しない限り、（潜在的な経済、環境、公衆衛生および安全への影響、その他の利益、分配面への影響、ならびに衡平性を含む）純便益を最大化する方法を選択すべきである。

#### (b)規制の諸原則

(6)各行政機関は、当該規制の費用と便益の両方を評価し、費用と便益の中には定量化の困難なものがあることを認識しつつ、当該規制の便益が費用を正当化するという筋の通った決定に基づいてのみ、規制を提案あるいは採択すべきである。

両者の違いは、マイクロ経済学の教科書どおりの費用便益分析を課した結果、理想と現実とのギャップを認識したことを反映しているのではないだろうか。すなわち、規制の影響の中には定量化や金銭価値化が困難な項目が多く、費用便益分析の結果はあくまで政策決定の補助となるものであり、政治的な政策決定に取って代わるものではないのである（岸本 1997）。

### (2) RIA の特徴

米国では、まず規制の提案ルールが作成され、OMB の審査とパブリックコメントを経て、最終ルールが作成される。再び OMB の審査を受けて、官報に公示され発効となる。対象は、経済への影響が年間1億ドル以上の規制である。RIA は提案ルールと最終ルールの双方に対して実施される。EPA が実施する典型的な RIA の構成は以下のとおりである。

- ・ 規制の内容
- ・ 規制の必要性／非規制的手法との比較
- ・ 規制オプションの列挙
- ・ 対策費用の推計
- ・ 対策効果の推計（排出削減量など）←費用効果分析（=費用÷効果）
- ・ 便益評価（死亡や疾病件数を定量化し、金銭化）←費用便益分析（=便益－費用）
- ・ 経済影響分析（Economic Impact Analysis: EIA）：社会費用の推計、マクロ影響、分配影響
- ・ 衡平性評価（Equity Assessments）：中小企業、地方政府、低所得者層、マイノリティ集団への影響

### (3) RIA における定量評価の内容

OMB がレビューを行った主要な規制の RIA における定量化の程度を表 6.5.2 に示す。1997 年から 2003 年までに作成された 117 の RIA のうち、費用が定量的に推計されたものが 76%、効果が定量的に推計されたものが 69%、効果が金銭価値化されたものは 55%である。

表 6.5.2 近年の主要な規制の RIA のメタ評価 (N=117)

費用の金銭価値化	76%	
効果の定量化	69%	
効果の金銭価値化	55%	

出典) Hahn and Litan (2004) の Table 2 より作成

次に、EPA が実施した化学物質の規制に関する 60 個の RIA について、我々がメタ評価を行った結果を表 6.5.3 に示す。健康リスク削減効果の金銭価値化は 3 分の 1 の RIA でしか行われていないが、その多くは 1990 年代の終わり頃からであり、それ以前は、費用を排出削減トン数で割って得られた 1 トン排出削減費用を指標とした費用効果分析が行われ、過去に実施された同様の対策で得られた数値と比較されていた。また、金銭価値化を行い、費用便益分析までたどりついても、定量化・金銭化できない要素が多いことや、不確実性が大きいことからはっきりした結論は言えないとする注意書きがついているものが多い。そのため、費用効果分析と費用便益分析の両方が行われている場合、費用効果分析の方がシンプルで分かりやすいことが多い。ただし、費用効果分析の場合、複数の物質の排出を同時に削減する際に費用の配分に苦慮している。トン数に比例して分けられていることが多い。

表 6.5.3 EPA の実施した化学物質規制の RIA のメタ評価 (N=60)

規制オプションが複数あるもの	53%	
対策費用を定量的に記述(\$)しているもの	100%	
排出削減量を定量的に記述(ton)しているもの	73%	
費用効果分析(1t排出削減費用)(\$)が計算されているもの	60%	
そのうち、既存対策の数字との比較があるもの	54%	
健康リスク削減効果を定量的に記述しているもの	31%	
健康リスク削減効果を金銭価値化(\$)しているもの	36%	
費用便益分析が行われているもの	28%	
経済影響分析が行われているもの	50%	
社会費用が別途計算されているもの	10%	
衡平性評価が行われているもの	78%	

\*社会費用 (social costs) とは、米国 EPA が用いている用語で、直接費用だけでなく、二次的な影響や波及効果、間接的な費用を含めたものを指す。

#### 6.5.4. 英国の RIA

##### (1) 歴史的経緯

英国では、1985 年に規制緩和イニシアティブが設立され、規制遵守費用評価 (Compliance Cost Assessment; CCA) が行われるようになった。1992 年には規制緩和イニシアティブが強化され、1996 年には費用だけでなく便益の分析も含めた体系的な規制評価制度が導入された。1998 年のブレア政権成立後に政策方針である「政府の近代化」が示され、客観的な証拠に基づく政策の実施が中央政府において義務化された。内閣府の中に規制影響ユニット (Regulatory Impact Unit; RIU) が設けられ、各省庁の中にも省庁別の RIU が設けられた。2001 年には規制改革法 (Regulatory Reform Act 2001)

により、既存規制の改正時の RIA 実施が法制度化された。英国では監査局 (National Audit Office) が事後的に RIA をレビューし、改善に向けた勧告を行う。

(2) RIA の特徴

事業者に影響を及ぼすすべての法律と下位法令が対象となる。法律案段階でまず簡単なイニシャル (initial) 版 RIA が作成される。担当大臣の同意を得れば、パーシャル (partial) 版 RIA が作成され、関係大臣の合意および最低 12 週間のコンサルテーション期間を経て、フル/ファイナル (Full/Final) 版 RIA が作成される。関係大臣の合意と議会審議を通れば、発効される。典型的な RIA の構成は以下のとおりである。

- ・タイトル
- ・目的と意図した効果 (ベースラインの評価を含む)
- ・オプション
- ・規制によって得られる便益
- ・規制によってかかる費用
- ・中小企業との協議：中小企業影響テスト
- ・競争力評価
- ・執行と罰則
- ・モニタリングとレビュー
- ・コンサルテーション
- ・要約と勧告

(3) RIA における定量評価の内容

英国では 1998 年～2003 年半ばまで、900 を超える RIA が実施された (Ambler et al. 2004)。1 年あたりおよそ 200 件である。費用や便益の定量化の程度を表 6.5.4 に示す。費用に関しては多くの場合、定量的な推計が行われているが、便益に関しては定量化されている例はごくわずかである。

表 6.5.4. 英国で実施された RIA のメタ評価 (N=365)

	産業界の費用	消費者や環境の便益
定量化されている		
少しだけ定量化/データ公表されず		
定量化されていない/該当しない		

出典) Ambler et al. (2004) Table 3、Table 5 より作成

6.5.5. 欧州の RIA

欧州 (EU) では、1990 年代に分野別 (健康、環境、雇用、ビジネス等) の影響評価が個別に実施されていた。2002 年 5 月に「影響評価 (Impact Assessment) についての通達文書」が発表され (European Commission 2002)、2003 年 1 月に統合影響評価が開始された。影響評価は、予備的評価 (Preliminary Assessment) と拡大影響評価 (Extended Impact Assessment) からなる。2003 年には 43 件、2004 年には 46 件の拡大影響評価が行われ、2005 年 1 月からは対象がさらに拡大された。EU で実施された最初の 20 件の RIA における定量化の状況を表 6.5.5 に示した。効果の定量化と金銭化

はおよそ半数で実施されている。

表 6.5.5. 欧州で実施された RIA のメタ評価 (N=20)

費用の金銭価値化	13 / 20	65%	
効果の定量化	10 / 20	50%	
効果の金銭価値化	9 / 20	45%	

出典) Hahn and Litan (2004) の Table 6 より作成

### 6.5.6. 日本における経緯

#### (1) 規制改革

日本では、1997年12月に、国の行うすべての公共事業に費用対効果分析を行うべきであると、橋本総理大臣(当時)より指示されたことを受けて、「政策評価に関する標準的ガイドライン」、「政策評価に関する基本方針」が作成された。2002年には「行政機関が行う政策の評価に関する法律」が施行され、その第9条において、評価対象として、公共事業、研究開発、政府開発援助の3分野が挙げられた。さらに、その後の法律施行令で、「10億円以上の費用を要するもの」と規定されたが、この時点では、規制は評価対象とはならなかった。

2004年3月に閣議決定された「規制改革・民間開放推進3か年計画(16~18年度)」において、RIAについて以下のような記述がなされた。

「規制影響分析(RIA)とは、規制の導入や修正に際し、実施に当たって想定されるコストや便益といった影響を客観的に分析し、公表することにより、規制制定過程における客観性と透明性の向上を目指す手法である」

「RIAにおいては、各府省において平成16年度から試行的に実施することとし、評価手法の開発された時点において、「行政機関が行う政策の評価に関する法律」の枠組みの下で義務付けを図るものとする」

これを受けて、2004年8月には「規制影響分析の試行的実施に関する実施要領」が作成され、10月1日より各府省でのRIAの試行が開始された。2005年6月に総務省行政評価局により「規制影響分析(RIA)の試行的実施状況について」に結果がまとめられた。

#### (2) RIAの試行

2004年10月から2005年6月まで、10府省で79件のRIAが実施された。実施要領に書かれた分析項目は以下の6項目である。

- ① 規制の内容・目的
- ② 期待される効果
- ③ 想定される負担
- ④ 想定できる代替手段との比較考量
- ⑤ 備考
- ⑥ レビューを行う時期

規制の内容・目的は「可能な限り全ての規制の設定又は改廃に際して行う」とされ、内訳は、規制の新設が26%、規制の追加・強化・拡充が53%、規制の緩和が18%、規制の廃止が4%であった。想定される効果は「想定され得る効果の要素を可能な限り列挙するとともに、可能な限り当該効果を定量化し推計」とされたが、定量的に記載されたものは4%にすぎなかった。想定される負担も「想定され得る負担の要素を可能な限り列挙するとともに、可能な限り当該負担を定量化し推計」とされたが、定量的に記載されたものは8%にとどまった。規制の不確実な将来影響を定量的に記載することは、これまでの省庁の仕事からは逸脱しており、文化的な側面からの改革も必要である。

### 6.5.7. RIA 制度化の課題

米国型のRIAは効率性の追求、すなわち純便益の最大化を達成するための手段という側面が強い。そのため、ヒト健康や生態系へのリスク削減効果を定量化し、金銭価値化して費用便益分析を行う動機付けは強い。他方、クリントン政権下では、定量化できない要素や分配面への配慮についても取り入れられ始めた。他方、英国や欧州のRIAは、効率性を達成するための道具というよりも、利害関係者の参加・コミュニケーションツールとしての側面がより強調されている。また、国民への説明責任を果たすという効果も期待されている。日本におけるRIAは、今後制度化されるにあたって、米国型よりも欧州型、すなわち、規制作成過程の透明化と説明責任を重視する形が望ましいのではないかと考えられる。もちろんその場合でも、定量的な予測は説明責任を果たすために必要である。

#### 参考文献

- (1) Ambler, T., Chittenden, F. and Obodovski, M. (2004). Are Regulators Raising Their Game? UK Regulatory Impact Assessments in 2002/3. The British Chambers of Commerce.
- (2) Clinton, W. J. (1993). Regulatory Planning and Review. Executive Order 12866. Washington D. C., White House.
- (3) European Commission (2002). Communication from the Commission on Impact Assessment. Brussels. European Commission (COM 2002 276 Final).
- (4) Hahn, R. W. and Litan, R. E. (2004). Counting Regulatory Benefits and Costs: Lessons for the U.S. and Europe. AEI-Brookings Joint Center for Regulatory Studies. Regulatory Analysis 04-07.
- (5) 岸本充生 (1997). 環境政策における費用便益分析の役割—米国環境保護庁での制度化を中心に—. 財政学研究 22: 64-74.
- (6) 岸本充生 (2005). 規制影響分析 (RIA)のための予測の科学. SRI: Shizuoka Research Institute: 明日の静岡県を考える情報誌 82: 16-25.
- (7) OECD (1995). Recommendation of the Council of the OECD on Improving the Quality of Government Regulation. OECD Publications, Paris.
- (8) Reagan, R. (1981). Federal Regulation. Executive Order 12291. Washington D.C., White House.
- (9) 財団法人行政管理研究センター(2004). 規制評価のフロンティア：海外における規制影響分析 (RIA)の動向.

## 6.6. システム論的考察と対応の可能性

萬金 修一

### 6.6.1. 序論

#### (1) システム論とシステム論的アプローチ

「原子力エネルギー外部性の研究」はE.U.に始まったが、敢えて先人の道を辿らず、専門とする「システム論」の立場から研究を試みた。「システム」とは「多数のものが集まって連携し、その相互作用を通じて個々のものについての知識だけからは推し測れないような、新たな特徴、つまり秩序の形成とか、素晴らしい機能の発現などを生み出しているとき、その複合体の全体を指してシステムと呼び、その構成単位を要素という」と定義<sup>[1]</sup>され、多くの学問領域に関与して「システム論」が進展している。従来、原子力エネルギー外部性に関連すると考えられる研究は各々のテーマに関連する学問領域で行われていたが、中でも「システム工学的アプローチ」が政策や行政の支援を目的として学問領域をまたぐシステムモデルを用いた分析やシミュレーションスタディを多用するに至った。しかし、ここで用いられたモデル群には未来の予測能力がなく、シミュレーションスタディに得られる最適解は現実の検証結果に乏しく、これらの社会における信頼性や発言力は低下し、スタディへの期待が減少しているのが現状である。

この分野における「システム工学的アプローチ」の欠陥は工学系では妥当と見なせる「モデル」への過信にあり、工学上の成果をいきなり社会に演繹した際に生じたものである。ここに、社会の進展と複雑化が故に工学上に発生した諸課題や諸問題も工学外のあらゆる領域の進展や成果を取り入れるべきであり、このような観点のもとに「システム論的アプローチ」の学問がある。すなわち、「システム論的アプローチ」とは「社会における複雑難解な問題の解決に向けての実践的なアプローチ/方法論で、問題解決にむけての新しいシステム創造を目的としている学問である。」と定義<sup>[2]</sup>する。この定義を前提とし「原子力エネルギー外部性」にシステム論的アプローチを試み、現在はプリミティブな研究段階ではあるが考察を進め、いくつかの結果を得たので報告する。

#### (2) 意思決定とモデル思考、データ

システム論において「人」の思考や意思決定に関連する領域を「現実領域」（社会での仕事、関心事、リラックス、探求、解決、決定、課題、論点など）、「行動領域」（仕事、楽しみ、意思決定の支援など）、「思考領域」の3領域で表現すると、「現実領域」での色々な物事に対峙したとき、[人]は「思考領域」で「思考のプロセス」（アイデア、問題の設定、種々の理論・手法の参照、モデルの構築、想定・試案・評価、他のデータ・事例の参照など）を繰り返すと考えられ、このプロセスの中に「モデル」と呼べるものが創られる。即ち、人が思考過程で問題を設定し、より実践的な解決を目指す場合に思考の進展と学習・理解・共有を目的として「モデル」を記号、文字、文章、数式、絵や像、図式、モックアップなどで構築する。そして、その役割の一つに「意思決定の支援」<sup>[3]</sup>がある。

扱う問題の規模が大きく複雑な場合には、ここでのモデル群は数学の知識体系や工学的手法を用いることを前提に状態の変化や変化の因果関係を数値や数式で表現して構築することが普遍性や応応性の点で優れていると考えられており、「原子力エネルギー外部性」に関連しても多くの数式モデル群が構築されてきた。しかし、これらのモデルはモデル化と構築過程において、その発想は無論のこと対象の理論的扱い（均衡理論、非均衡理論など）、モデルの目的（シミュレーション、感度解析、シナリオ分析、安定化、ロバスト化、定常/追値/目標値制御、最適化、適応対応、意思決定な

ど)や手法(変分法、最大値原理、数理/線形/準線形/非線形/静的/動的計画法、ファジー理論、モンテカルロ法など)、モデル化の条件となる数学理論(確定論、統計学理論、確率論、あいまい理論、ゲーム理論など)や関数(線形代数/不等式、差分方程式、ARMA、記述関数、SD、微分方程式、偏微分方程式、積分方程式、確率微分方程式、確率偏分方程式など)、前提や範囲(線形/非線形、時不変/時変係数、連続/不連続/離散など)を設定する時点でモデルの持つ特性やモデルを用いる目的の範囲を確定してしまっている点を重視すべきである。

このため、モデルの前提や範囲、手法や数式、データなどが現実の社会や科学の進展を常に反映され、ブラッシュアップされていること、得られた結果をモデル構築の出発点でのモデル発想の思考基盤、モデルの概念、手法の選択などの基本的条件に対比して常に再検討・再確認がなされるべきである。同時にモデルによる推定や予測値(現段階では確率論的な表現以上の壁を越えることができないが)の信頼性を向上する研究に加えて、むしろそれぞれの学問領域における「リアルデータ」探求の研究が重要性を増していると考えられる。

### 6.6.2. 原子力エネルギー外部性

#### (1) 「原子力エネルギー外部性」概念の考察

語彙「外部性、内部性」は広辞苑にはないが、古今東西において人間が社会生活を営むに際して存在する概念として思考・行動を意識した時に自然に捉えられてきた。このとき、「外部性」とは個の内部に形成されて外部に働きかける事物ならびに思考や行動と、外部に形成されて個の内部に働きかける事物ならびに思考や行動と定義することができる。システムとして社会と個を考える時、「外部性」とは個の内部に形成されて外部に働きかける事物ならびに思考や行動と、外部に形成されて個の内部に働きかける事物ならびに思考や行動と定義できる。そして、社会のエレメントとして「個」「小社会」などを設定でき、このとき、小社会から社会へ向けて「小社会による外部性」を、社会から小社会へ向けて「社会から小社会への外部性」を設定することができる。すなわち、社会での事象/事物は、それぞれの個をエレメントとし、そこに視点を置くことによって外部性、内部性を表現できる。また、語彙「原子力エネルギー外部性」を考察する時、「社会」に対応してよりマクロな概念を導入して「原子力エネルギー」に関連する事象/事物を含めて関連を持つ組織/企業/団体/産業などの集合体を要素(エレメント)とする「小社会」と定義できて図6.6.1のように表現できる。思考や行動の変化や変動をベクトルで表現すると外部性は内部性を包含し、いずれの外部性においても、その発生は定常/非定常時にまたがり、市場内/外の経済行動、社会/政治行動、その他の行動/思考、情報発信、さらに実体の変化/変動に関係し、時間依存であると考察される。

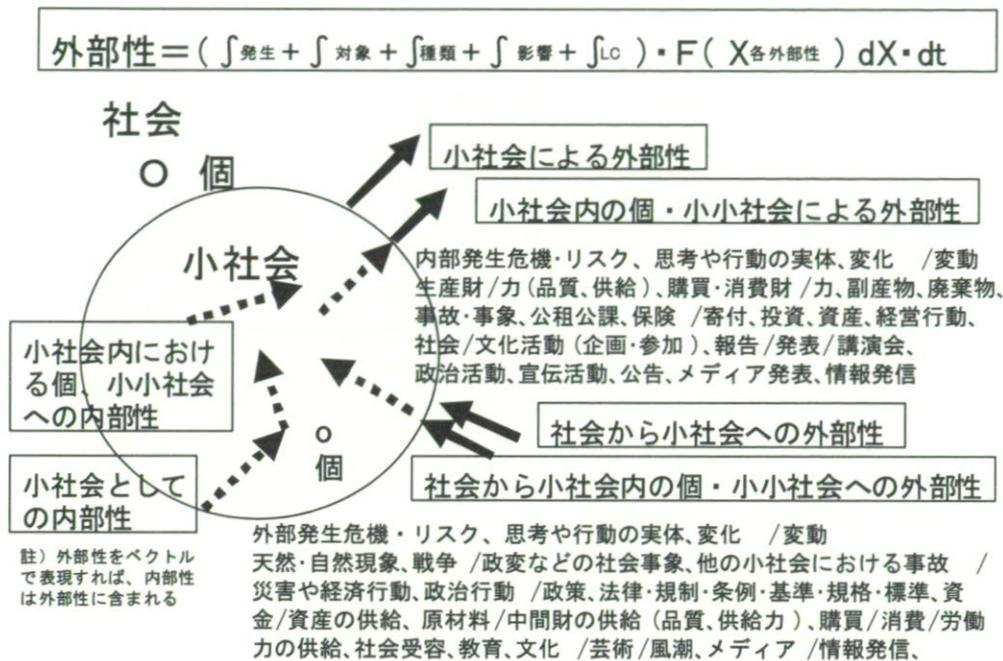


図 6.6.1 小社会（原子力エネルギー組織/企業/団体/産業・・・）における外部性

以上に「原子力エネルギー関連小社会に係る外部性」なる概念が得られたが、このような前提に立って「原子力エネルギー外部性」の考察を進めると、①外部性を表現するために、少なくとも「発生(要因)」「対象(経路)」「種類(分類)」「影響(評価)」の4つのファクターが考えられる。そして、外部性を数量的に表現するならば、これらのファクターごとに時間積分した総和になる。②小社会に発生し社会への外部性には小社会発生の危機/リスク、思考や行動の実体、変化/変動があり、社会に発生し小社会への外部性には社会発生の危機/リスク、思考や行動の実体、変化/変動がある。③外部性の究極の対象は「個」であり、小社会から個に至る「経路」の考察が重要であり、発生に係わる正確な情報や経路の伝達特性が重要になる。④外部性の生起や扱い、性格の考察から、外部性は定常時に確定論的に扱えるものと、非定常時を想定して確率論的に扱うのが望ましいものに二分される。⑤外部性の評価の考察から、評価目的/目標を明確にし、明確な評価目標を持つ問題設定が重要である。また、確率論的な評価値の表現が望ましく、現在の科学の進展情報を加えた信頼性の表現を加えることが望ましい。⑥評価目的/目標の最終端は社会の個であるから社会における個の価値観との関係が重要である。価値観と呼ばれるものを考察すると、物的価値観、政治的/社会的価値観、精神的価値観と呼ばれるものに大別でき、原子力外部性の評価にあたってフィルターのような役割を持つので、外部性の実態を表現するためには常に社会における価値観の変動を観測することが重要となる、などの考察を得た。

#### (2) 原子力エネルギー外部性への対応

以上に得られた考察をもとに、いままでに小社会（「原子力エネルギー関連社会」を指すが、以下「小社会」と記す）に関連して想起された主たる外部性への対応について、発生(要因)、対象(経路)、事象(扱い)の観点から考察した。社会/政治行動や制度/政策/意思決定、技術行動/思考の影

響などに関連する外部性は社会と小社会で発生し、ともに社会、小社会に影響を与えると考えられるが、社会を介する経路アプローチがかなり難解である。放射性物質や環境汚染物質の経路アプローチが科学的に計測し易いのには比して社会における個を要素とする情報や思考など抽象的なものの経路アプローチを社会科学的に如何に扱えるのかは未知の領域にあるように考えられる。経済活動に関する外部性は社会小社会の双方に発生して双方に影響を与えるものであり、ライフサイクルに対応して定常的かつ確定論的に捉えることのでき易いものであるが、エネルギー関連企業の詳細な経営データをベースとする経済行動外部性評価はなく、原子力エネルギー生産の事業性やコスト評価も詳細不明の推定値が公表されているに過ぎないし、環境影響についても同様に、いかに情報公開が重要であるかを示している。危機、リスクに関連する外部性や研究開発投資などの外部性は、その発生が社会、小社会の両面に亘っているばかりか、社会や個へ直接的に与える影響が大きく二次的にも社会/政治行動、制度/政策/意思決定、経済行動などの外部性の発生を誘発するが多い。

そして、これらの外部性への従来の対応は外部性の発生やその影響についての観測情報が得られたときに平常時に対応してきた対応システム（行政や小社会）が平常時と同程度の、あるいは少し拡大した業務範囲で最終評価目標/目的に沿って対応してきた。すなわち、外部性の評価をするとともに影響の削減・縮小、安定化、内部化などの行動を伴った意思決定とそれを支援する業務を実施することによって、外部性発生時の影響である変化を収束し、定常状態を維持したり、目標値に到達するための意思決定や行動を支援してきた。そこで、一例として原子力エネルギー外部性の中でもベクトルが大きく、深く社会に関係している「エネルギー問題」について概観すると、図 6.6.2 に示すように時代と共にいくつかのテーマが変遷してきた。

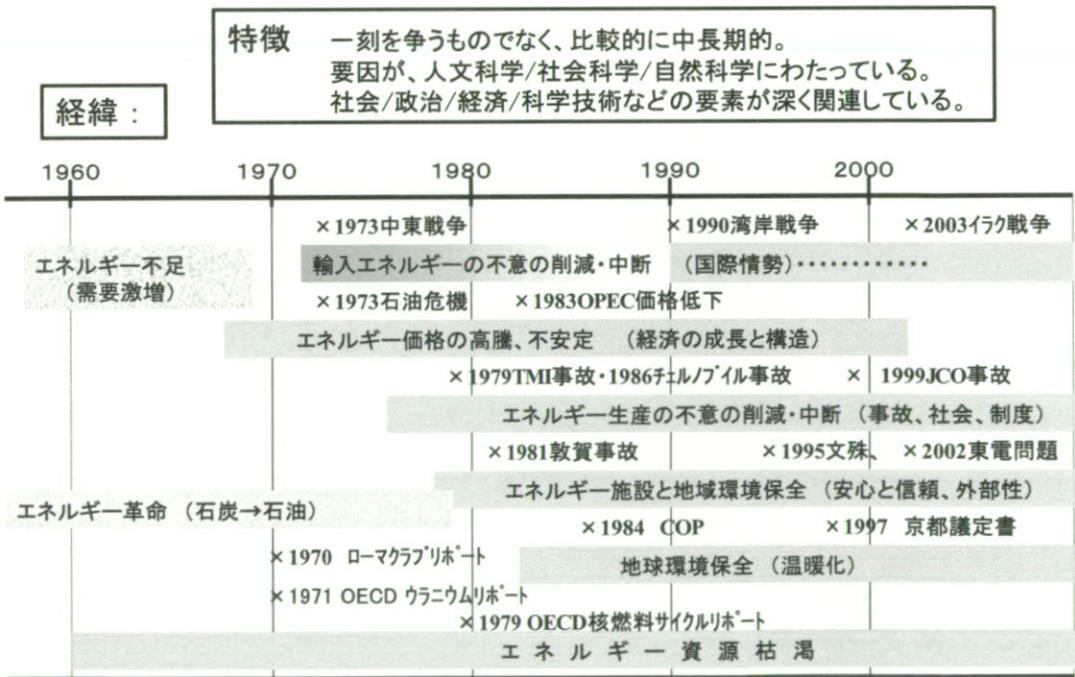


図 6.6.2 原子力エネルギー外部性：エネルギー問題の経緯と特徴

これらのテーマの特徴は、図に示すとおり人文・社会科学領域全体のテーマと考えられるが、そこでのアプローチは少なく、政策決定や実施機関の支援的な立場から小社会の工学領域においてシステム工学的アプローチがなされてきたと考察される。

### (3) システム工学的アプローチの限界と停滞

「システム工学的アプローチとモデル」に焦点を置き、「原子力エネルギー外部性」に関連して従来になされてきた研究経緯を図 6.6.3 に概観した。



図 6.6.3 システム工学的アプローチにおける、モデルの経緯、傾向

1960年代後半頃からソフトシステムズアプローチが始まり、それぞれの学問領域で学習や研究/政策の検討を目的として原子力エネルギー外部性の一部(資源量や発電・核燃料サイクル諸量の需給量、コストや事業性評価など)に数式モデルが用いられていたが、1970年にローマクラブレポート<sup>[4]</sup>が出版されたのを契機に学問領域を越えるシステムモデルが多く構築され始め、その後1973年の第4次中東戦争による石油危機を経て、国際的にもエネルギー問題に関連するシステムモデルを用いた分析やシミュレーションスタディが多用され始めた。同年にはIIASAも設立され、以後、課題が地球温暖化などに拡大されるとともに、多くのシステムモデルが研究、構築され、詳細化や、integrated化されてきた。また、実対象に含まれる複雑性・不確実性が次第に明らかにされるにつれてモデルの「ill-, poor-」の指摘がなされ、これを克服すべく統計学的(stochastic)なもの、あいまい環境下のモデルとしてファジー理論を導入したもの、感度解析に目的をおいたもの、データに確率分布を想定するもの、準線形あるいは非線形計画法を用いるものなどが提案され、システム規模の小さい分野では、確率論を扱ったモデルも構築されてきている<sup>[5]</sup>。しかし、対象の規模が大で、社会科学領域の問題になると問題解決は容易でなく、多くの疑問が出されてここでの進捗が停滞しているのが現状である。

特に社会科学領域に深く関係する具体的な例として「エネルギー危機」や「地球温暖化」問題に関連するモデル群を検討・考察すると、この中でエネルギーシステムモデルはエネルギー生産/変換/需要(消費)などに関連するプラントや機器における入出力エネルギーの収支モデルを出発点に、プラントや機器の投入/産出量、設備量、稼働量などをエネルギー特性、生産/変換などのコスト要因である資本費、運転維持費、燃料費(投入エネルギー媒体のコスト)を経済特性、稼働あたりの環境放出量を環境特性として定義し、要素(エレメント)として一つのプラントや機器を設定して対象とするエネルギーシステムをモデル化するものである。さらにマクロな概念を導入し、地域や国のエネルギーシステムに展開するために、エネルギーの一次供給から最終消費に至るまでに介在するエネルギー生産/変換/需要などに関連するプラントや機器を「技術」で定義してシステム要素(エレメント)とし、一次供給から最終消費にいたるエネルギー媒体の全体フローを技術の選択肢のフローを含めてモデル化する。このとき、エネルギー/経済/環境特性値にその技術に属するプラントや機器の平均値を、将来技術については、想定値を加工して採用する。時間の扱いは期と期間の概念を導入し、それぞれの期間における「技術」の稼働量を変数とする最適化問題として設定する。すなわち、システムの両端における境界条件として現在における一次エネルギー供給量と将来における最終エネルギー需要(想定値)を与え、技術の経済特性や環境放出特性を係数に技術の稼働量を変数として以後の期にわたる制約条件式を加えれば、フローにおけるエネルギー収支から線形連立一次不等式群が得られ、技術の稼働量から期間や種別にわたっての総和を求めるとシステム全体のコストや全体の環境放出量が計算できるので、これらを目標関数として最適化計算を行い最適値とこれをとる変数(技術の稼働量)の値を解として求めるものである。

初期に代表的なものは、変数の稼働量を期に対応する独立変数として静的な最適問題(線形計画法)の範囲でエネルギーシステム全体のコスト最小化や環境放出量最小化を目的として想定する技術が採用される配分を求めるモデル<sup>[6]</sup>であり、我が国のエネルギーシステムを対象とした場合(将来における核熱利用可能性の検討を目的とし、システムのトータルコストとSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>排出量の最小化問題として設定した)の解析<sup>[7]</sup>は、①約50年にわたるエネルギー関連技術を想定し、エネルギー媒体の代替を選択しうるエネルギーシステムをモデル化し、②マクロ計量経済モデルから我が国の長期にわたって想定し得るマクロ経済、エネルギー需要シナリオを求め、③システムコスト/環境放出量を目標関数とし、線形計画法(LP)計算をするものであり、前提のシナリオと評価の重みのケースに対応するシミュレーションスタディになる。結果として、最適値と、これをとる変数の解(技術の稼働量)から将来50年にわたる一次エネルギー供給、最終エネルギー消費、エネルギー変換/生産/消費の各技術の配分構成を得て、目的とする技術(ここでは核熱利用関連技術)の将来における役割や経済性での優位性を示している<sup>[7]</sup>。この種のモデル概念を拡大解釈し、地球温暖化問題などを対象とする課題に展開した場合には、最適化の手法はLPからDPに、線形から一部非線形対象も扱えるものに対応が計られ、扱う範囲の社会規模も我が国から世界へ拡大し、世界の経済モデル、気象/気候モデル、地球温暖化モデルと結合しそれぞれのモデルの計算結果を交換しながら繰り返し計算を行って最終的な解を得るように、モデルの規模が拡大されてきている。そして、これらのシミュレーションスタディに得られた結果には、①評価関数が複数のためトレードオフになる。②コストが安くて、環境放出量が少ないと設定した技術は多く採用。③当然、原子力が多く採用(上限制約値が「解」として採用)。④それぞれの導入量は全体的になだらかなカーブとなり、外挿曲線に近くなる。⑤モデルに想定しない技術は、当然に採用されないなどの特徴をもっていると考えられた。

エネルギーシステムモデル、及び、この種のモデルに経済、気象/気候、環境などのモデルを結合するシステムモデルについての難点と問題点を結論すると、複雑なシステムモデル化と計算解を得

るための多大の労力や資源が投入されたにもかかわらず、モデルの発想や概念、モデル化における設定条件の如何によっては複雑性・不確実性に対応するどころか、複雑なモデルを用いることによって「不確かさ」を増し<sup>[8]</sup>、モデルの目的すら見失ってしまいかねないし、発想の固定化を招くようにも考察される。すなわち、工学領域の専門家ですら理解しがたい複雑なシステムモデルから得られた結果について、人文科学の領域の人や社会一般の個に一方向的に十分な理解を求めるのは無謀とも考えられる。これらの欠点や問題点に対応するには、システムモデルの拡張をする際に、元のモデルの設定条件や、元のモデルの限界を知ること、モデルと実際のギャップに注目すること、モデルの発想が持つリスクを想定すること、主張の信頼性を欠く結果を招かぬように十分な検討がなされるべきと考察される。ここでの問題は上述した特徴から人文・社会科学領域のテーマと考えられ、そこでの協働のもとにエネルギーフローモデル主体の発想を離れてモデルの目的に適した新たな発想のモデル化を指向する努力が必要であると考察された。

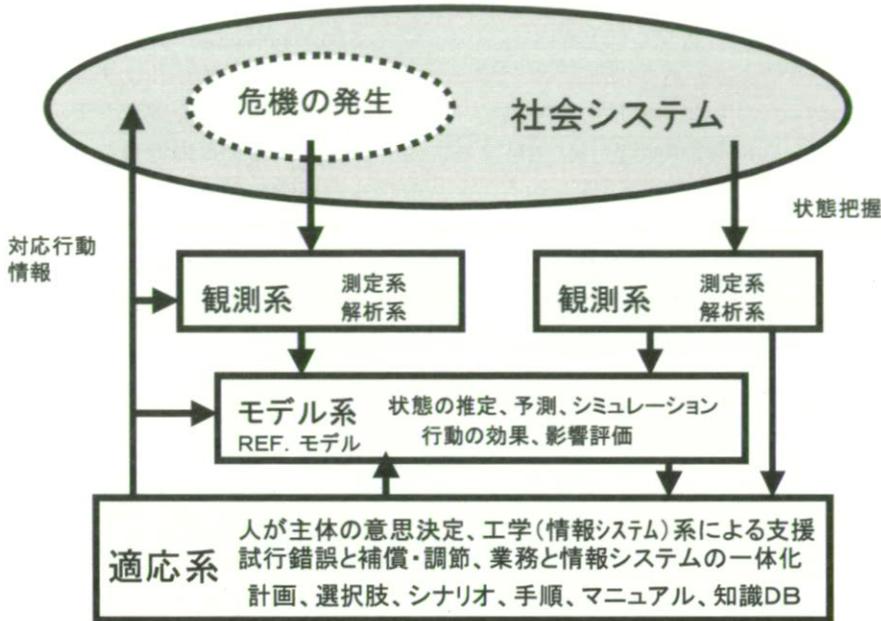
### 6.6.3. システム論的アプローチ

#### (1) 危機への対応システム

一般に、概念が「外部性」の領域に含まれ、外部性と同様に社会と個に係る概念として「危機」がある。そこで、「外部性への対応」の概念を類推するために、危機への対応にあたって実践的になした「システム論的なアプローチ（ここでは「危機マネジメント」と呼ぶ）」について概観する。危機への対応について社会システムを工学系の閉じた系として近似し、システム工学的にアプローチすると、平常時と危機発生時の社会システムを状態・時空間（ヒルベルト空間）における、「状態の変化と対応」として数学的に記述することができ、状態の変化を「定常の状態・出力方程式」の（連続/不連続な）変化や移行としてモデル化してシステム工学的な制御概念を対応させうる。この時、危機対応の問題は、危機発生時の社会システムの変化を収束し、定常状態を回復するための制御の問題となり、危機のライフサイクルを通して定常制御や目標値制御などの制御問題を解いて対応のための工学的な解やヒントを得て意思決定を支援することができる。しかし、危機が想定され発生する「社会システム」やこれらの危機への「対応システム」は、人が主体の「開かれた系」であるために、システム工学の直接的な適用には無理が生じる。特に「対応システム」は「人+支援工学系」であるので、その概念の具体化や設計に工夫が必要であるばかりでなく、危機対応の実効や品質をあげるためには人文科学・社会科学などあらゆる学問領域の進展を反映して「工学系の閉じた系」として扱う前提や近似を修正し、開いた系にも適用しうるように補完しなければならない<sup>[9]</sup>。

#### (2) 危機マネジメントシステム

そこでシステム論的なアプローチを取り入れ、「危機マネジメントシステム」としてシステム工学的アプローチの絶対的で直接的な適用を避け、部分的、間接的に工学手法を適用し、意思決定に必要な情報や知識を揃えたり、意思決定案や選択肢を創出して意思決定を支援する「工学システム」と意思決定を行う「人」が一体化して業務を処理する「対応システム」の概念が必要になる。ちなみに、ここでの工学システムは図 6.6.4 に示すように構成され、対象とリファレンスモデル（シミュレーター）の出力をリアルタイム内に逐次比較処理し、かつ制御動作を補償、調節する「適応制御方式」の概念を発展させたものである。



註)制御工学におけるブロック線図を模して記述。矢印は情報や人の行動の流れを示している。

図 6.6.4 危機マネジメントシステム (適応制御概念とシステム構成)

すなわち、リアルタイムとみなし得る時間内において状態の把握、意思決定、対応行動の与える効果などにおける理論と実際の差違や複雑性や不確実性に適応する機能をモデル上での試行錯誤と逐次繰り返し処理で吸収・補償・調節することを基盤としている。この危機対応システムでは業務の実行にあたって、主体である「人」と、これを支援する工学システム、特に情報システムが一体化している必要があり、経営工学の領域に進展してきた「システムマネジメント」や「業務プロセスの分析、設計法」をシステムの設計法として採用した。すなわち、ここでの危機対応システムは「危機マネジメントシステム」<sup>[9]</sup>として工学システムと合理的な意思決定や試行錯誤、補償、調節などの「人」による業務システムが情報システムを介して一体化したシステムとしている。

ここでの「危機マネジメントシステム」が危機のライフサイクルに展開するにあたって、先ほどの「状態の変化と対応、制御」の概念の適用性についても問題が発生しないかを検討した結果、時間の範囲を $-\infty < t < \infty$ に拡張し、定常と非定常の概念を導入すると、危機発生時の緊急対応時には状態変化の収束と安定化、定常の回復などの制御概念を、復旧・復興システムでは目標値制御概念を再発防止から事前準備までは定常制御概念を対応させ、人が実施することで危機マネジメントシステムの構成が可能であると考察<sup>[10]</sup>された。そこで危機のライフサイクルに展開した将来の危機マネジメントシステムをエージェント技術<sup>[11]</sup>を用いて概念設計してその構成を図6.6.5に示している。

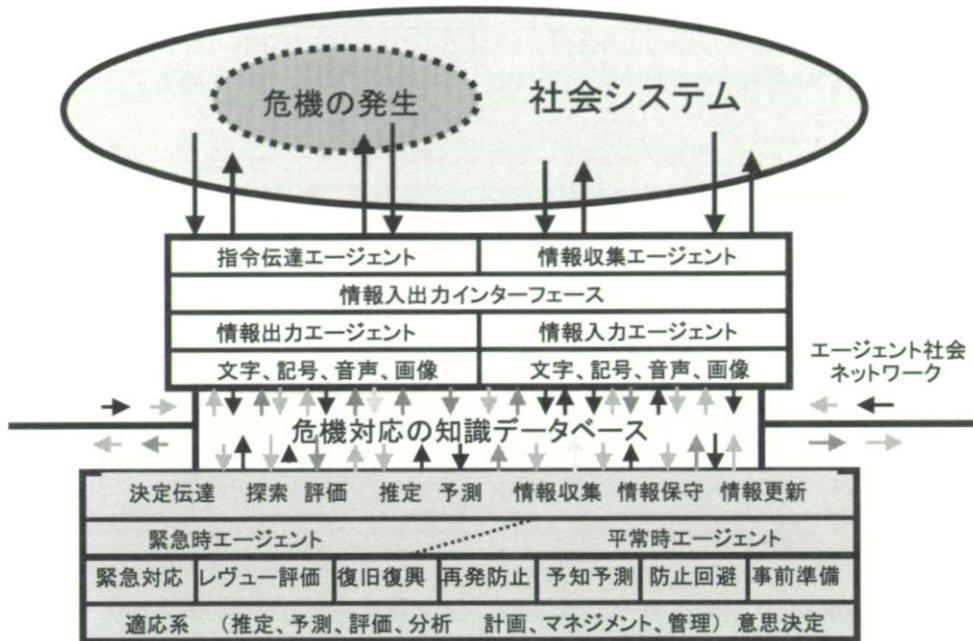


図 6.6.5 危機マネジメントシステム：エージェント社会での展望

測定系、シミュレータ、通信系、情報システムなどから構成する「システムの核」は情報に加えて、それらを処理するアルゴリズムやDBである。また、これらの情報、知識、データを図に矢印で表現する「リクエストエージェント」と「プロバイダーエージェント」でやりとりするエージェント技術を前提としてシステム概念を「エージェントスキーム」で表している。エージェントが仲介する情報は各種各様の危機に対応して多くの地域社会や企業において独自に生産、保持する場合を考慮すると、その数量とコストは膨大なものとなり、とても単独ではまかないきれものではない。各々の社会システム（地域社会、企業・・・）が、各種各様の危機に対応する危機マネジメントシステムを構築し、その情報（データ）や知識（計画から戦略、業務・・・）を危機マネジメントに特化する「インターネットハイウェイ」を通じて瞬時にやりとりできる「危機マネジメントエージェント社会」が展望された。

### (3) 外部性マネジメントシステムとしての可能性

外部性対応システムについて、危機やリスクと同じような対応の概念をあてはめることができないかの検討を中心に考察した結果、①社会を対象とすると一般の「外部性」の概念は「危機」の概念を内包してはるかに広範囲な概念であり、危機に対応するリスクコミュニケーションの範囲をも包括するものである。②「原子力エネルギー外部性」は社会に存在する「危機」の概念に比して小さいが共有領域を持つ概念と見なすことができる。③共に状態空間の変化とそれに対する社会の対応として把握し表現することができるが、共に社会や人と深くかかわりシステム工学的アプローチを直に適用することはできない。④ライフサイクルの観点では、「危機」の場合は社会における認識のプロセスを経て対応すべき意思決定のシステムが想定されているのに比して「外部性」の場合には社会における十分な認識が得られていない段階を含んでおり、意思決定のシステムが未だ「社会」に具体化されていない場合が多い。⑤「原子力エネルギー外部性」の中でも既に社会における認識

が十分に得られている外部性については「危機マネジメントシステム」と同様に対応することができる。⑥認識が十分に得られていない外部性への対応については、危機のライフサイクルの「予防・回避」におけると同様の対応を発展させて独自のマネジメントシステムを構築する必要があるとの知見を得た。

その場合の「マネジメントシステム」は、①明確に対象とする「外部性」を認識できること。②想定する外部性の性格を含めて発生（要因）/対象（経路）/影響（価値）の評価ができること、③外部性の予防・回避方策を立てられること、④それを現実にした場合の効果や影響の評価を含めて外部性の影響の削減、回復の方策を立てられること、もしくは示しうることなどであり、このマネジメントシステムの最終目標は外部性対応の方策や意思決定のしくみを実現する「外部性対応システム」を創ることに向けての社会での意思形成と実現であると考察される。そこで、図 6.6.4 に示した危機マネジメントシステムを参照しながらより具体的に検討すると、前述した「エネルギー問題」のように危機/リスクに近い性格を持つと想定される外部性については全てが未だ想定上の段階であると考察できる。図で「危機の発生」の代わりに「外部性の発生」を想定すると背景の社会/小社会も「想定」であり、図で「適応系」としている部分が「対応システムのできていない実社会」になる。すなわち、この種の危機/リスクの性格をもった外部性については意思決定を最大機能とする適応系に代わって適応系の出来ていない実社会が適応系の必要性を判断し、必要性を認めればそれを創る方向で意見集約がなされ、具体化への意思決定と行動をするシステムであり、この機能を危機マネジメントシステムに対比すると、図 6.6.6 に示すようなシステムであると考察できた。

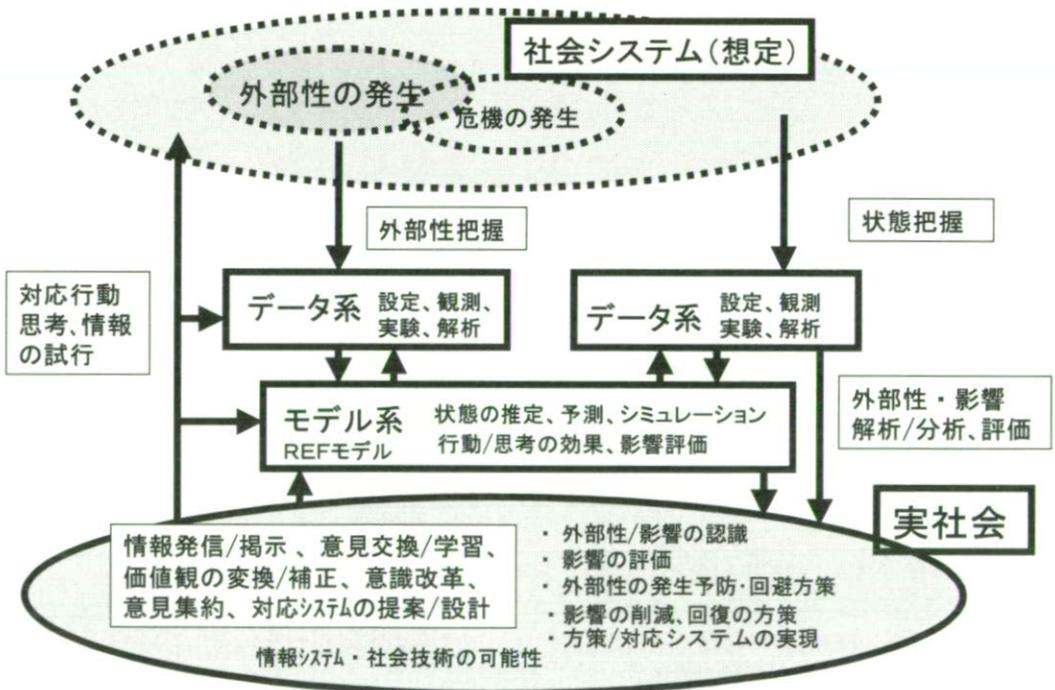


図 6.6.6 原子力エネルギー外部性対応のシステム (適応とシステムの概念)

一つのデータ系ではデータ探求、観測、実験、解析などの機能を持って外部性についての状態把握を目的とし、もう一つのデータ系では同様の機能を持って外部性の発生を想定した場合の社会/小社会の状態把握を目的とする。モデル系では状態の推定/予測/シミュレーションあるいは想定される対応システムの行動/思考（意思決定）の効果を含めた外部性の影響について解析/分析し評価することを目的とする。意思決定をする実社会では外部性と影響の認識、影響の評価、外部性の発生予防・回避の方策、影響の軽減/削減/回復の方策、方法の立案や対応システムの実現などを目的としてデータ系やモデル系からの情報の受発信/提示を受けて意見交換/学習や評価における価値の変換/補正が行われ、そしてさらに理想的に行けば意識改革、意見集約、対応システムの提案/設計、具体化へ向けての実現のプロセスが進むシステムと見なすことができる。そして、データ系やモデル系については「専門領域」と呼んだ方が適していると考察された。

#### 6.6.4. 原子力エネルギー外部性への対応と社会の選択、意思決定

##### (1) 外部性について社会との交信

現実の社会では小社会や同様の目的を持つ小社会の連携のもとに専門領域が存在し、学会や学術誌を介して危機やリスクに関する外部性についての幾多の情報を絶え間なく実社会に発信し、一般社会から疑問や批判の形でフィードバックしてくる情報には再検討、再評価などの結果が再発信されてきた。一例を挙げると、いままでに「エネルギー問題」に関連して専門領域から多くの危機が想定され多くの情報発信がなされ、その結果として原子力発電施設、核燃料サイクル関連施設の建設などが進められてきたが、社会の合意や意思決定を得るために上に述べた「原子力エネルギー外部性対応システム」が構築された例は少ない。現状では、これらの情報は同類の小社会や反対の目的を持つ小社会から発信される情報と混在し本来の価値を低下するばかりでなく、その信頼性すら疑われるという状況を招いているばかりか、実社会での望ましいプロセスである情報発信/提示、意見交換/学習などのプロセスで閉塞状況にあると観察される。これでは情報がエントロピーの法則にゆだねられているばかりで、いくら熟慮型民主主義の社会の到来が予測されても、このままでは図6.6.6から考察された実社会における思考・行動や意思決定の醸成は望むべきも無い状況である。この観点から図に示すシステムを考察した結果、このような問題についても「情報技術」の発展をベースに進展を始めた「社会技術」<sup>[12]</sup>（文献での定義ではここに述べるシステムと目的を異にする）の類に属すると思えるシステムを専門領域と一般社会のバッファとして考慮すべきであるとの結論を得た。

そこで、専門領域と実社会の間に入ってバッファとしての役割を担う「社会技術」の領域を想定し、「専門領域」「社会技術」「一般社会」の各領域での主な役割をプロセス的に分解してそれぞれの領域で互いの領域のプロセスに対応して如何なる役割・研究や業務が必要になるかを考察して図6.6.7に示している。

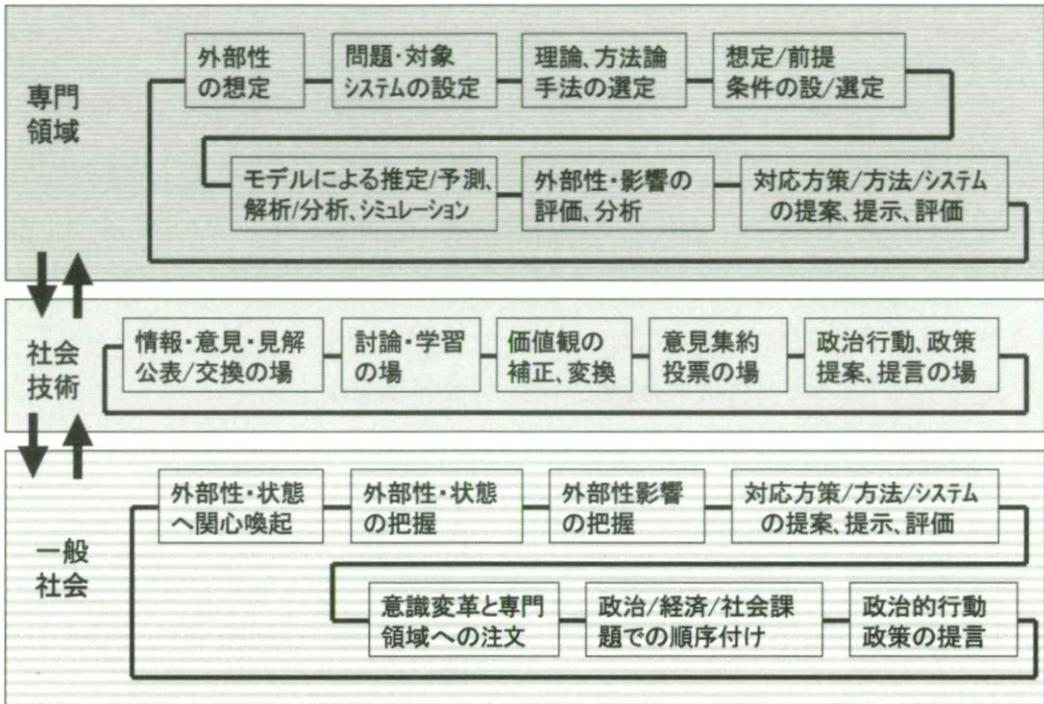


図 6.6.7 外部性への対応（専門領域と一般社会のバッファとしての社会技術）

専門領域では外部性の発見やこれに導かれた想定があり、問題と対象システムの設定、方法論や理論・手法の選定から対応方策/方法/システムの提案や評価へのプロセスを繰り返す。一般社会では外部性への関心の喚起、外部性の状態や影響の把握、意識改革や専門領域への注文、対応方策/方法/システムの提案や賛同、選択や順序付け、政治的行動や政策の提言などのプロセスが期待される。このとき、バッファとしての社会技術には、情報・意見・見解の発信/交換の場や討論/学習の場が必要であり、6.6.2 で触れた価値観の補正や変換を観測する場や意見集約/投票の場、さらに政治的行動や政策提案や提言の場が望まれると考察された。「社会技術」の類と呼んだものに求められる機能やプロセスの実現をより具体化する手段としては情報技術の活用が考えられて検討したところ、必要性の高いものとして、①ネットワーク関連技術：情報の受発信、情報/意見/見解の公表/交換、場の創生、②知識 DB 技術：外部性 DB、討論/学習 DB、価値観 DB、意見集約 DB、その他政策 DB など、③VOTE MACHINE の類：意見集約、仮投票、アンケート調査、④その他、政策行動、政策提案に関連する類：シミュレーション技術など。⑤社会における価値観の変動を観測する技術は未だ不明であるが、米国のマイクロエコノメトリックスの領域において進展している手法に近い将来に実用される可能性をもっていると考えられる。

また、DB については安全性、信頼性、実現の具体性から、外部性/外部性評価/対応方策などについての DB は「専門知識公開 DB」として特化することも考えられる。さらに、具体的な構築を想定した場合にはこれらの要素技術として工学領域外からの応援を比較的に多く必要とするものに、①ネットワークによる場の創生に係わる技術、②学習機構、一般に CAI と呼ばれるものを人文科学的に進めた技術、③人工知能技術、④エージェント社会技術、などが考えられ人文/社会/自然科学の領域を越えた協働が前提となることは言うまでもない。

### (2) 社会の選択と意思決定のシステム

一部において社会技術を「多様な価値観の存在する熟慮型民主主義の時代における、複雑な社会問題の解決のための技術」と定義し、その基盤となる情報技術は「知の活用から知の創造へ」、「知の総動員」、「構造化と可視化」、「学習機構」などが提唱<sup>[11]</sup>されているが、それらに加えて「学習と意見交換などの場の創生」、「意識と発想の変革の場」、「仮想的な社会/政治行動のシミュレーションの場」など「場」<sup>[13]</sup>の機能を持つあらたなシステムを創造する必要があると考察した。そして、これは社会の進展の必然性からも求められてゆくものと思われて検討を進めた。現状では「防災問題」「エネルギー問題」・・・などの複雑な課題が本来の専門領域から遊離して社会問題となり、上に述べたシステムに関連するものとしてメディアが主たる「場」を形成しているように観察できるが、考察したプロセスのプリミティブな段階である「情報/意見・見解の受発信の域」をでていないと観察される。各種各様の原子力エネルギー外部性に対応して上に述べてきた外部性マネジメントシステムは容易には実現しがたいのであるが、当外部性に関与する組織/団体/企業などの小社会の本来の目的を考慮すると、その推進母体として①行政機関：原子力エネルギー外部性関連問題は産業省か文部科学省（研究開発）、②問題に関連する組織/団体：問題が組織/団体の生存目標に直結するため信頼性の評価に直結する、③政党、政治団体：今後の民意を反映した政策立案には不可欠、④ネットワーク産業、シンクタンク：問題解決請負産業、⑤NPOなどの民間団体：原資人材の上で荷が重過ぎるかもしれないが、などが候補として考えられた。

### (3) 社会でのしくみ、システムの構築と展望

原子力エネルギー外部性対応システムの核となる上述してきた「社会技術」の必要性が認められて専門領域と一般社会が結合し外部性マネジメントシステムができるとすれば、それらはどのような形態をとるかを図6.6.8に展望している。危機マネジメントシステムがそうであったように将来に形成されるエージェント社会において専門領域集団が知能（情報）を絶え間なく創出し、関心をもつ小社会/社会を中心に社会技術を駆使して「対応システム」の核が構築され、その情報や知識を外部性マネジメントに特化する「インターネットハイウェイ」を通じて瞬時にやりとりできる「外部性エージェント社会」を表現している。ここで、図は特定の外部性に対応する様子を平面に描いているが、今後も発見、想定されるであろう多種多様な外部性とこれを裏付ける科学技術データベース、専門領域知能集団が無次元に展開しているとイメージすると情報や知識は「個」や「小社会」で保持するよりも、協働と連携によって生産、保持されるべきものであるので公開が前提となり、近い将来には、情報ハイウェイの各所に原子力エネルギー外部性についての知識DBや人工知能が効果的に構築され、想定される外部性への対応についてスムーズな意見交換が行われ、容易に選択や意思決定しうる社会の到来が展望できる。

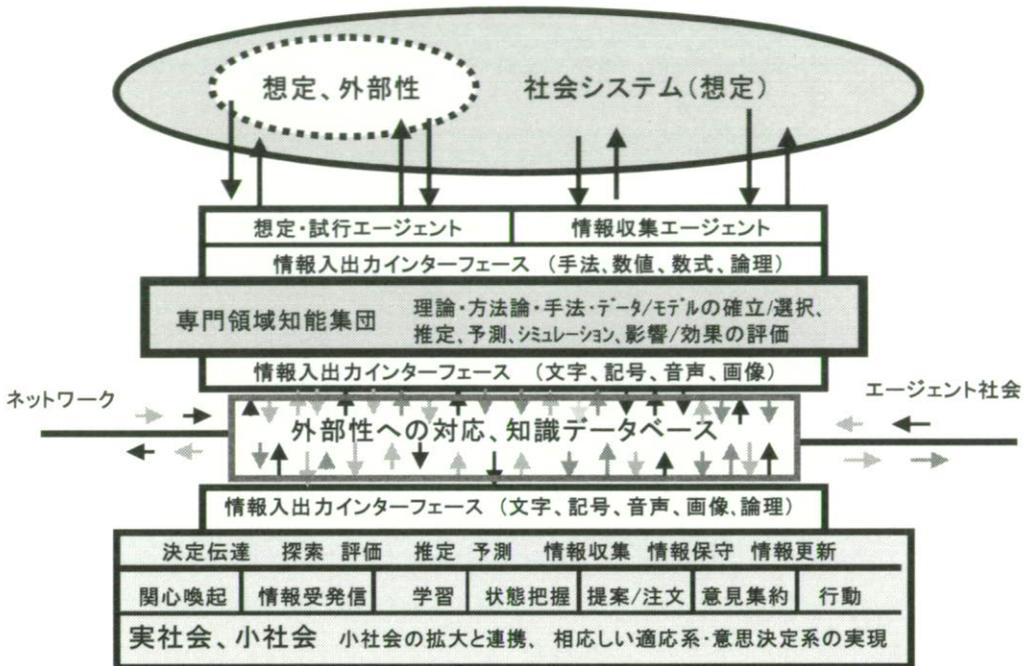


図 6.6.8 原子力エネルギー外部性マネジメントシステム (将来の展望)

### 6.6.5. 結論

システム論的に語彙「外部性」の概念は語彙「危機」の概念ときわめて近い相似的な関係にあるなどの考察を得た。「外部性」は「危機」の概念を包括するが危機とみなされない影響の段階に出発し、危機はリスクの概念を基盤に「影響」が想定を含めて具体的に「損害」をもたらすに至ると社会で認識されている概念であると考察された。次に、「外部性」の一部である「原子力エネルギー外部性」の概念を考察し、一部の外部性については科学的にも未知の領域に及んでいるためにさらなる研究や開発が必要とされること、一部の外部性には情報開示が大きな意味をもつこと、一部の外部性にはシステム工学的に従来から対応がなされてきたが社会に深く関連しているために現在は閉塞状況にあり、なんらかの打開策が必要であることが考察された。

そこで、原子力エネルギー外部性の一部である「エネルギー問題」に関連する外部性を取り上げ、いままでになされたシステム工学的アプローチの経緯と限界について考察していくつかの知見を得た。この外部性はエネルギー分野では「危機」とも呼ばれて上に述べた「相似性」を裏付けるものの一つであるが、その包括範囲は社会における「危機」の概念に比して狭いが共有領域を持つ概念であるとの認識を持った。そこで、システム工学的アプローチに出発し危機対応システムとして実践的に提案している「危機マネジメントシステム」との対比において、この種の外部性に対応するシステムを演繹した。しかし、この種の外部性は社会における認識度が低く、対応するシステムの想定すらできていないところに大きな相違点があることも考察された。将来に発生し社会に大きな影響を与えると想定される外部性にもかかわらず、社会での対応の認識は低く、危機対応におけるような明確な意思決定システムが構築されていないばかりか、その他多勢の諸課題と同様に従来政策/行政機関と一部の意思決定支援者である学識経験者に委ねられている状態である。

この状況は危機ライフサイクルの予防・回避の初期の段階に相当すると考え、危機マネジメントシステムの考察から外部性対応マネジメントシステム概念を導いた。すなわち、この種の外部性に対しては現在の意思決定システムは実社会であり、原子力エネルギー外部性を専門とする知識集団は社会と交信し、共に学習し、社会での選択や意思決定を支援するマネジメントシステムを構築することで原子力エネルギー外部性に対応できるとの結論を得た。そして、その実現には人文・社会科学の領域を越えての協力が求められる。

ここで取り上げた「エネルギー問題」は原子力エネルギー外部性の一例にすぎず、はるかに基礎的で重要な研究課題が山積している。社会への影響の度合いから考察すると、「放射線と人体」の問題は基盤的であり、この分野での基礎から応用に至る科学データの探求と進展はすべての原子力エネルギー外部性に大きな関連をもっているといつて過言ではないので、さらなる研究開発の進展が望まれる。また、システム工学的アプローチについても否定したのではなく、現状の停滞状況を説明したに過ぎない。この分野での研究はいままでになされたシステム工学的アプローチに得られた結果の検証を行うことから次への進展の発想や方向が見えてくるであろうと示唆できるし、方法論的に新たな進展も観察されている。一つはモデルオリエンテッドなアプローチからリアルデータオリエンテッドなアプローチへの進展であり、アセスメント指向の分析が回顧され、相関分析や因子分析の手法の適用も進展している。危機マネジメントシステムに提案した工学系の観測データとモデル系のリアルタイム内における逐次比較処理や補償調節機能は近い過去の統計学的データが持つ近い将来の確率論的に推定可能とみなしうる(予測まではゆかないが)時間領域を少しでも延長し、その内で「危機」への対応を補償/調節しようとするものであり、外部性への対応についても活用できるものと考えている。

システム論の観点にたつての研究のプリミティブな段階に得られた知見のいくつかについて述べた。ここでの報告が諸分野における原子力エネルギー外部性研究にとって、なんらかの示唆やヒントになれば望外の喜びである。なお、この原稿は原子力外部性研究専門委員会第10回会合(2004年7月30日)に発表したものを要約し纏めたもので、その時点以降の進展は反映していない。

## 参考文献

- [1] N・ウイナー (池原訳) : サイバネティックス—動物と機械における制御と通信 (岩波書店、1961)、  
R.ボグスロー (大友立也訳) : システムの生態、(ダイヤモンド社、1972)、  
伊藤正美、須田信英、他 : 自律分散宣言、明日を開くシステムパラダイム (オーム社、1995)
- [2] 高橋安人 : システムと制御 (岩波書店、1968)、高原康彦 : システム工学の理論 (日刊工業新聞社、1974)、  
寺野寿郎 : システム工学入門 (共立出版、1985)、  
危機マネジメント研究会 : 危機マネジメント (ぎょうせい、2002)
- [3] P.Checkland (チェックランド、高原康彦訳) : 新しいシステムアプローチ (オーム社 1985.)
- [4] D.メドウズ (大来佐武郎訳) : ローマクラブレポート—成長の限界、(ダイヤモンド社、1972)
- [5] Tabias Cans : " Fuzzy Linear Programming in DSS for Energy System Planning" IIASA WP-96-132, (Nov.1996)
- [6] G.Fishbone, et al. " Users Guide for MARKAL" ,IEA/ETSAP/USA,KFK/GERMNY,1982
- [7] 萬金修一 : 原子力開発にかかわる戦略分析・アセスメントの為の長期マクロ計量経済モデルの開発 (JAERI-M85-166,1985)、  
萬金修一 : 我が国の長期にわたるマクロ経済およびエネルギーシナリオ、(JAERI-M86-054、1986)、  
S.MANKIN et al.: The Study on the Role of Very High Temperature Reactor and Nuclear Process Heat Utilization in Future Energy Systems, ICIES/IIASA Task Force Meeting, IIASA (July,1987)
- [8] Jeron van der Stuijs: Integrated Assessment Models and Management of Uncertainties (IIASA WP-96-119,1996)、

- 萬金修一：「危機管理へのシステム工学的なアプローチ、その3 システムモデルと外部性についての考察(危機管理システム研究会第3回研究発表会、研究年報第3号、2003)
- [9] 萬金修一：「危機管理へのシステム工学的なアプローチ、その1 災害における緊急対応のケース(危機管理システム研究会第1回研究発表会、研究年報第1号、2001)、  
危機マネジメント研究会：危機マネジメント(ぎょうせい、2002)
- [10] 萬金修一：危機管理へのシステム工学的なアプローチ、その2 危機のライフサイクルへ、緊急対応システムの展開(危機管理システム研究会第2回研究発表会、研究年報第2号、2002)
- [11] 長尾確：「エージェントテクノロジー最前線」(共立出版、2000)
- [12] 堀井秀之：「問題解決のための社会技術」(中公新書、2004/3)
- [13] Kurt Lewin："Field theory in Social Science"(New York, Harper, 1950)、  
遠山、野中：「良い場と革新的リーダーシップ、組織的知識創造についての試論(一ツ橋ビジネスレビュー、2000)

# 第7章

## 外部性研究の今後の課題と展開の方向

---



## 外部性研究の今後の課題と展開の方向

伊東 慶四郎

ここでは、前章までの調査研究報告を参照しつつ、エネルギー・原子力政策に係わる次世代の外部性研究の課題を抽出し、今後の研究活動の展開方向を示す。

「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会（2002年4月～2006年3月）では、自然科学、原子力工学、システム工学、放射線生態学、放射線医学・疫学、環境経済学、エネルギー政策などの学際的専門家集団によるフォーラムを形成し、原子力エネルギーの外部性に関連した様々な分野の研究報告やレビュー報告を受け意見交換を積み重ねてきた。こうした異分野の専門家が集う作業環境の中で、発電システムやエネルギー・原子力政策に係わる様々な外部性問題が議論され、その環境影響や健康影響とともに、原子力利用の社会心理面や政治経済面からみた波及影響の存在とその重要性が指摘された。

その結果、認識された外部性研究に係わる今後の検討課題も、多分野の専門家の意見を反映したものとなった。具体的には、次世代の革新的な外部性評価研究を主導する概念枠組の創設、わが国固有の自然・社会環境条件に適した環境外部性評価研究の展開、低レベル放射線の健康影響評価の基礎となる生体防御機構の多角的な解明と公衆とともに考え歩む研究の推進、エネルギーセキュリティ政策の概念の検討やシナリオ分析の推進及びその政策効果分析・評価システムの開発と運用、核不拡散・核テロなどに関するリスクの評価とその低減対策の効果評価手法の検討、エネルギー・原子力関連の研究開発や施策の政策効果分析の推進などが、今後の検討課題として挙げられた。以下、順にこれら課題の概要と、今後の研究展開の方向を示す。

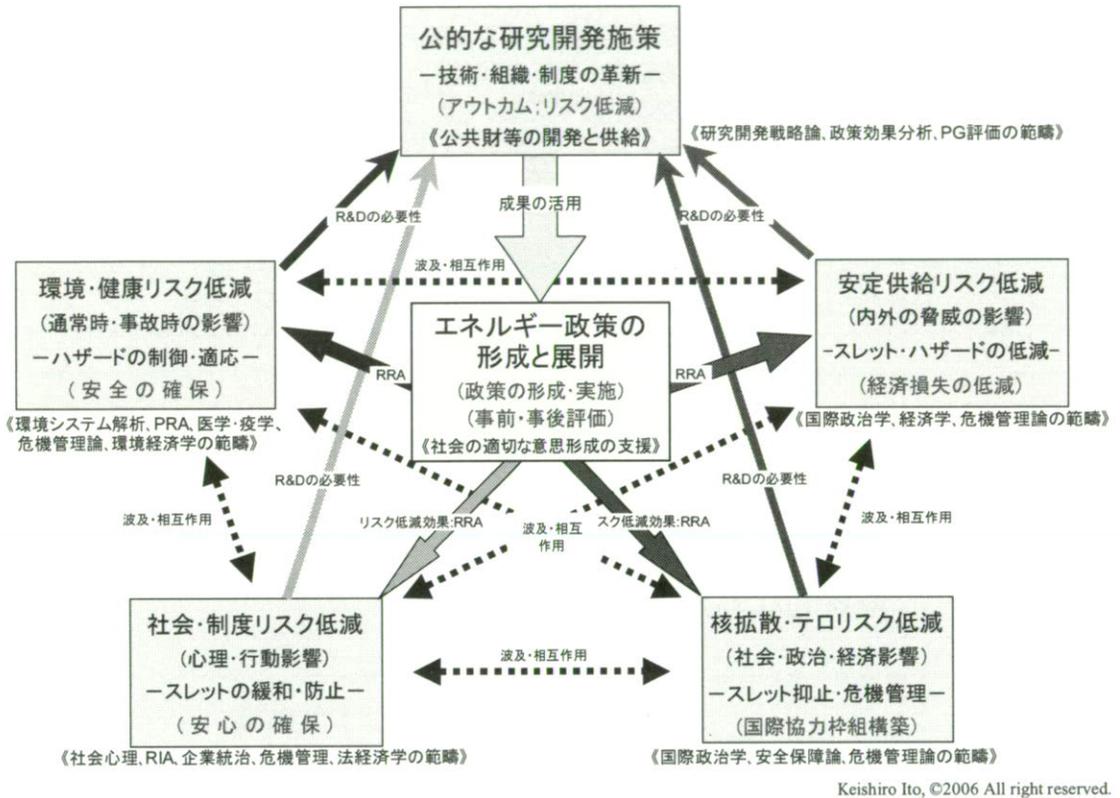
### 7.1. 次世代の革新的な外部性研究の課題

#### (1) 次世代の革新的な外部性研究の概念枠組作り

原子力エネルギーの開発・利用に伴う環境影響や健康影響、社会心理的影響、及び政治経済的波及影響を総合的に分析し評価することを可能とするため、我が国独自の革新的な外部性研究の概念枠組を形成し多角的な議論を深めていく必要がある。欧米における環境外部性の解析・評価システムに特化した研究開発は、電力・エネルギーのマイクロ市場経済を想定しつつ、原子力を含む発電システムが当該市場取引を介さない形で環境や健康に与える損害を社会（外部）費用として金銭的に評価し、その内部化を図るために行われてきた。しかし、原子力エネルギー等の研究開発・利用面から挑戦すべき外部性研究の課題は、このような市場取引を介さない環境・健康損害問題のみでなく、科学的エビデンスに基づかない低レベル放射線の健康リスク評価とその社会的外部性問題、エネルギーセキュリティ面では原油等燃料の供給抑制とその市場取引を介した経済的波及影響問題、核拡散・核テロ等の社会的・政治経済的な波及影響問題、エネルギー・原子力の研究開発と利用に係わる政策効果分析問題など多岐にわたる。これらは従来の経済学固有の概念枠組を大きく超えた新たな学際的な統合アプローチに基づく革新的な外部性評価研究の展開、及びその政策の形成と評価への活用を求めてきている。

それ故、本研究専門委員会では、このような社会的ニーズに応えるため、次世代の外部性研究の概念枠組の創設に向け基礎的な考察を積み重ねてきた。今後、わが国が第2の Atoms for peace 時代にふさわしい革新的な外部性研究を展開していくためには、当該外部性研究のニーズを、チェルノ

ブイリ事故等の歴史的教訓も含む我が国内外の歴史的現実と問題点を踏まえて再整理し、これに基づき新たな概念枠組の構築、解析・評価方法論の分野別体系化、及び当該分野別解析・評価システムの開発やデータベースの構築を押し進めなければならない。なお、これらの研究開発は、時代の要請でもあるエネルギー・原子力関連の国家政策や企業戦略の形成と評価に活用していくことを、常に意識しつつ進めていく必要がある。図7.1は過去数年にわたる次世代の革新的外部性評価研究のスコープや概念枠組に関する筆者の考察結果を試論的に取りまとめ描いてみたものである。



Keishiro Ito, ©2006 All right reserved.

図7.1 原子力政策に係わる次世代の革新的外部性評価研究の概念枠組試案  
 —社会と共通化が可能な原子力政策の展開に向けて—

(2) 我が国独自の環境・健康リスクの経済的評価（環境外部性の評価）

我が国の大気汚染などの環境外部性評価を行う為には、放出源から環境と健康への影響を評価する為の、我が国固有の影響経路を確認し、必要なモデルを作り、放出データを収集し、また、日本人の環境改善に対する支払意思額（willingness to pay）などの評価が必要である。

なお、温室効果ガスの放出に伴う外部性低減効果の評価については、損害関数手法に基づく社会的費用推計の科学的不確実性が余りにも高すぎるため、次善の策として、近年、鋭意研究開発や社会実験が進められつつある、我が国内外の放出低減対策費用の推計手法や知識ベースを活用する必要はある。

### (3) 低レベル放射線の健康影響評価—社会的・制度的なリスク低減への対応

低レベル放射線の健康影響の検討は、従来、主に放射線防護上の観点から行われてきていたが、近年、高自然放射線地域の疫学調査結果、健康診断や医療面の要請への対応を主体としたフランスの科学アカデミー・医学アカデミーによるピア・レビュー結果、世界保健機構によるチェルノブイリ事故が一般公衆に与えた健康影響のピア・レビュー結果など、疫学や医学的エビデンスに基づく健康影響のレビュー活動が行われ、その重要性がますます高まってきている。

それ故、わが国においても、低レベル放射線による被ばくがヒトの健康に及ぼす影響の科学的エビデンスに関する独自の総合レビュー活動を展開する必要がある。また、このレビュー活動を行うためには、分子・細胞学、動物実験学、医学、生物学、疫学、精神病理学、社会心理学を含む多分野の専門家による、多角的な基礎研究の推進が必要である。

まず、低レベル放射線のヒトへの影響評価を行うためには、複雑な生体防御機構に関するより科学的な情報が必要である。ヒトへの放射線の影響は、これまで主に、高いレベルの放射線被ばくを受けた広島・長崎原爆生存者の健康情報をもとに評価されてきた。しかし、この手法の低線量被ばくの影響評価への適用には不確かさが伴うため、より確実な評価手法が求められている。一方、近年、生物の生体防御機能の研究が進歩しつつあるため、ヒトの体内の生物学的なメカニズムを解明することにより、低レベル放射線の影響を評価できる可能性が高まってきている。今後、この分野の研究活動を推進し、低レベル放射線のヒトへの影響を詳細にレビューする必要がある。

また、2006年4月にウクライナ、ベラルーシで開催されたチェルノブイリ原発4号機事故の影響評価に関する国際会議では、個人と集団への精神的・心理的影響、およびこれに伴う健康影響が無視できないことが認識された。特に、今後の各国における原子力防災対策や緊急時対策の検討に向けた歴史的な教訓として、事故時の避難勧告や強制移住などに必要な介入基準については、一般公衆の精神的心理的健康影響及び社会経済的な波及影響にも充分配慮し多面的に分析・評価した上、慎重に設定することが特に重要な課題であることが明らかとなってきた。

今後、低レベル放射線の健康影響評価研究の推進と、その成果の規制面への適用方策の検討にあたっては、政府、専門家、一般公衆および産業界それぞれの役割の認識と、その多角的な連携を深めていく必要がある。

### (4) エネルギー・電力の安定供給上のリスク評価

原油等燃料の安定供給確保問題の本質は、国際エネルギー市場の形成とそれらとの過去30年余の原油等燃料の資源需給の歴史的現実を踏まえた場合、原油等燃料の供給削減・抑制といった外生的リスク要因の作用に対して、いかに国民経済上のリスクを低減し回避していくか、といった点にあるものといえる。エネルギーの供給確保のコストについては、1990年代後半の米国において、カルテルと過去30年の石油輸入コスト、並びに石油市場崩壊の対策を、輸入国である米国内石油市場を事例として解析・評価した例がある。わが国では、過去30年の電源多様化政策を通じて、電力供給の脱石油化が推進されてきたが、この政策のwith・withoutに基づくシナリオ分析は、機会費用面からみた当該政策の妥当性評価の基本的アプローチであるといえる。

本研究専門委員会では、わが国におけるエネルギー・原子力セキュリティの概念、この問題解決の為に原子力の役割、東アジアにおけるエネルギー危機シナリオ分析、過去30年の石油供給の脅威の遡及的分析や燃料価格がもたらす産業影響の分析、及び過去30年の電源多様化政策の政策効果分析の概念枠組の検討を行ってきた。

今後は、我が国の電源構成の多様化動向や原油等燃料価格の動向を見通しつつ、電源多様化政策等のエネルギーセキュリティ政策の国民経済面から見た経済損失低減効果の多角的なシナリオ分

析・評価システムの開発を行い、その妥当性を検証していく必要がある。こうした原油等燃料の供給削減・抑制といった外生的リスク要因の作用に対するエネルギーセキュリティ政策の妥当性評価は、これまでわが国では余り行われてこなかったが、今後は、エネルギー・原子力関連の戦略・施策の妥当性評価や国民への説明責任の履行面から、本格的な検討を開始する必要があるものといえる。また、米国カリフォルニア州の電力危機やわが国の原子力規制制度の不備と東電のコンプライアンス問題等は、これら資源の確保・供給政策の評価とは、本質的に異なった社会的、政治経済的問題であるため、独自の分析枠組の構築が求められる。

#### (5) 核拡散、核テロ等の安全保障とリスクの評価

核不拡散と核テロがエネルギーと電力の安定供給に与えるリスクについては、核不拡散条約、IAEA による保障措置活動などにより、すでに対策が施されている。しかし、こうした体制に参加しない国々とテロ組織による活動が、これに不確かさを与えており、エネルギー・原子力利用関連の外部性要因として認識される。今後、この分野における外部性評価を進め、対策の検討を行う必要がある。これには、核拡散の国際政治上影響や各国の社会経済に与える影響、及びその低減策の検討、ならびにその評価手法の策定が含まれる。

#### (6) エネルギー・原子力関連研究開発や施策の政策効果分析

エネルギー・原子力関連研究開発の政策効果を分析・評価し、研究開発活動に伴う科学技術上の効果や社会経済的効果を定性的及び定量的に多角的に分析し解明する必要がある。そのために、まずこれまで進められてきた研究開発施策に関するアウトカムやインパクトに係わる多角的な情報を収集し、これを総合的に比較分析する必要がある。その上で、その政策効果を多角的に定量評価し、これを研究開発費用と比較する費用効果分析手法が有効である。また、原子力以外の再生可能エネルギーの外部性評価も行い、原子力との組み合わせによる各種再生可能エネルギーの分散型利用の効果を評価する必要がある。

## 7.2. 今後の研究展開の方向

2002年から開始された「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会の評価研究活動はエネルギー・原子力政策に関連したさまざまな評価研究のレビューと概念枠組の構築及び情報交換の場として、また、学際的な共同研究の機会を探る場として、ボランティアな形で4年間にわたって展開されてきた。

その結果、今後の課題として次世代の外部性（環境・健康・社会経済影響及びその低減施策の政策効果）評価に関する革新的な総合研究を中・長期の国家的な研究プログラムとして形成・推進し、社会と共進化が可能な原子力政策のマネジメント枠組の確立を支援していく必要性の高いことが明らかとなってきた。

なかでも、低レベル放射線が一般公衆の健康に及ぼす影響の評価や放射線防護上の LNT 仮説の社会的な外部性とその低減方策に関する検討は、これまでわが国では看過され気味であった。しかし、国際的にはチェルノブイリ事故後 20 年間の地域住民の放射線被ばくとその健康影響の現実、及び強制移住等の精神的・心理的影響や社会的・経済的影響の現実に関する国連の専門家グループによるピア・レビューやエキスパート・レビュー結果を踏まえ、第2の Atoms for Peace 時代に向けた最重要ミッションの一つとして浮上してきている。

---

また、エネルギー・電力の安定供給上のリスク低減方策の分析・評価システムの研究開発、核拡散・核テロ等の安全保障上のリスクの分析・評価手法の検討、及びリードタイムの長い原子力関連の研究開発施策に関する投資効果や波及効果の分析・評価システムの開発等も、メガトレンド時代における各国の一般公衆への説明責任や効果的・効率的な政策の立案とその運営管理上、ここでの総合評価研究の重要課題として位置付け、多角的な検討を深めていくことが求められてきている。

このような重要課題をめぐる学際的な総合研究プログラムは、学会間連携、産学官連携、府省連携、及び国際連携のもとで、多角的・重層的に立案し推進していくことが求められる。それ故、今後、各界でその検討を深めるとともに、適切な予算措置を講じて、その連携を段階的に築き上げていくことが期待される。



## おわりに

本書は、原子力エネルギーがエネルギーの供給という、市場での機能の「外部」で、環境や社会にもたらす利益と不利益、すなわち「外部性」を評価することをひとつの大きな目的としてまとめられた。結果として、エネルギーと人間、環境、社会に関する非常に広い分野を扱うこととなり、ともすれば焦点の定まらない内容と見られるかもしれない。しかし、現在のエネルギー環境問題は、単に二酸化炭素を出さないエネルギーを供給すればよい、というほど単純なものではない。原子力は、温室効果ガスや大気汚染負荷の削減に有力であっても、社会の十分な理解が得られてはいない。その背景には、これまで欧米で行われた原子力発電の環境外部性評価研究における倫理的違背行為が係わっている。それは、重大事故時における一般公衆の健康リスク評価に、科学的エビデンスに欠けた放射線防護上の線形閾値無し仮説を適用し、一般公衆のリスク忌避に直結する過大な死亡リスク評価値を公表してきたからである。このような行為により原子力が社会に忌避される現象そのものも、原子力の外部性問題のひとつであり、新たな概念枠組の構築が求められる所以でもある。

エネルギーの外部性は、環境と社会に関する正負両面の効果を含み、社会が負う費用や受ける便益全体を評価する観点から、統合的に、またエネルギー技術全般を客観的に分析することが必要である。日本原子力学会の研究委員会として、学会のもつ原子力研究開発、安全利用、放射線影響、環境、技術評価、社会経済分析等の分野での高度の研究ポテンシャルを有機的に結合することで、新たな学際領域を迫及したものが本書である。文系の視点も取り入れながらさまざまな観点から、エネルギー評価にかかわる問題点を検討した。検討を進めるうち、外部性にはきわめて広範な学問分野が広がっており、より体系的な取り組みが必要であること、さまざまな側面から他分野の研究者の協力が必要であること、という認識自体が、得られた成果のひとつといえるであろう。研究として完成したもの、というよりも、新たな俯瞰的学際研究の始まりと見ていただければと思う。

本書における成果は、原子力エネルギーに関連したさまざまな評価研究の情報交換、さらには学際的な共同研究の機会を探る場として、学会の研究専門委員会において検討されてきたものである。この専門委員会は、もともと、プロジェクト的、体系的な検討を行うために設置したわけではなく、それらを生み出す概念枠組や知識基盤、方法論および評価研究事例の交流や検討を通じて、新たな研究領域を創設し展開していく機会の提供を意図して運営されてきた。実際、新たな概念枠組の提案やいくつかの共同研究がここから生まれている。このような学際的検討の場は社会の要請にこたえる上でも貴重な活動であったといえるであろう。

しかし、おぼろげながらその概念枠組が見えてきた外部性研究は、到底このようなボランティア的な活動で歯が立つようなものではない、はるかに広大かつ奥の深い学問領域であることも認識されてきている。今後の課題として、次世代の外部性等、環境・健康影響及び社会経済影響の総合評価研究の学際的総合研究プログラムを産学官連携のもとで推進していくことは、時代の要請に応える上で不可欠であり、今後、各界でその検討を深めていくことが期待される。

本書をまとめるにあたっては、日本原子力学会の内外の、多くの執筆者のボランティアな貢献が中心になっている。また、日本原子力学会の事務局、政策科学研究所はじめ各著者の所属機関などの協力によるところが大きい。また発行にあたっては、編集事務局として京都大学エネルギー理工学研究所、生存基盤科学研究ユニットの協力を得ている。ここに、まとめて感謝の意を表したい。

2006年9月27日

日本原子力学会「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会主査 伊東 慶四郎  
幹事 小西 哲之  
報告書編集事務局・京都大学生存基盤科学研究ユニット 亀井 敬史

## 索引

【アルファベット順】		外部コストの内部化.....	103
AHP.....	219	外部性の内部化.....	120
CDM.....	103	外部性への対応.....	305
COP.....	103	外部性マネジメント.....	311
DDREF.....	146	外部費用.....	119
DNA 修復.....	132	核拡散抵抗性.....	248
DNA 損傷.....	129, 152	革新的原子力システム.....	173
Eligibility.....	103	核熱利用.....	231
EPZ.....	179	可採年数.....	244
ERSS.....	180	貨幣価値換算.....	3
HTTR.....	232	環境動態.....	143
IPCC.....	111	環境の価値.....	121
IS プロセス.....	232	危機マネジメント.....	309
LNT 仮説.....	129, 145	気候変動枠組条約締約国会議.....	103
Probability Tree.....	262	規制影響分析.....	295
Relevance Diagram.....	262	規制改革.....	299
RPS 制度.....	213	狭義のエネルギーセキュリティ.....	161
SPEEDI.....	180	京都議定書.....	103
spin off.....	287	共有地の悲劇.....	292
SRES.....	111	極東の島国シナリオ.....	172
WTA.....	121	金銭価値化.....	295
WTP.....	121	経済波及効果.....	287
		継承可能なデータベース.....	187
【五十音順】		軽水炉技術.....	272
アンチコモنزの悲劇.....	293	原研寄与率.....	278
意思決定の外部性.....	291	健康リスク.....	97
ウィンドファーム.....	215	健康労働者効果.....	147
受入れ意思額.....	121	顕示選好.....	121
影響経路.....	6	原子力緊急事態.....	178
影響評価.....	3	原子力研究開発.....	271
疫学.....	93	原子力災害合同対策協議会.....	180
エネルギーシステム学.....	186	原子力災害対策特別措置法.....	178
エネルギーシステム評価.....	183	原子力 CDM.....	103
エネルギーシステム評価支援センター.....	186	原子力発電売上げ.....	275
エネルギーセキュリティ.....	159	高温ガス炉.....	231
エネルギー問題.....	306	高温工学試験研究炉.....	232
オフサイトセンター.....	180	効果.....	295
温室効果ガス排出シナリオ.....	111	広義のエネルギーセキュリティ.....	161
階層分析法.....	219	公共投資.....	287

高速炉サイクルシステム	219	チェルノブイリ事故	145
効用	222	中長期的エネルギーセキュリティ	161
高レベル廃棄物	247	腸内細菌	141
クリアランス	247	低線量	131
クリーン開発メカニズム	103	定量評価	93
クリーンコールテクノロジー	175	適格性	105
最狭義のエネルギーセキュリティ	161	電気事業	3
再生可能エネルギー	213	途上国の原子力導入	104
しきい値なし直線仮説	129	土壌微生物	142
資源制約	243	トリチウムガス	141
資源争奪シナリオ	172	トリチウム水	141
市場機構	119	ナショナルセキュリティ	159
市場創出効果額	272	日本原子力研究所	272
システム工学的アプローチ	309	ニュークリアセキュリティ	164
システム論的アプローチ	309	燃料電池自動車	173
実用化戦略調査研究	220	バイオマス発電	213
私的費用	120	排出権価格	105
シナリオ・プランニング	167	ハザードポテンシャル	245
支払い意思額	121	バックストップ	245
社会・経済的評価	271	発電事業	3
社会的費用	120	発電施設・機器の市場規模	274
社会における意思決定	303	東アジアのエネルギー危機	168
情報操作	266	費用	295
初期装荷トリチウム	245	表明選好	121
食物連鎖	143	費用対効果	271, 285
所有権	291	費用便益分析	222
シリコン	213	風評被害	246
新エネルギー	213	二つの中国像	171
信頼形成	264	浮遊粒子状物質	93
水素製造	231	ベイズ定理	261
スピンオフ	287	便益	295
生体防御	146	防災訓練全般にかかる外部コスト	181
線量－線量率効果	146	放射線発ガン	146
相対リスク	93	放射線利用の経済規模	283
損害関数	6	放線菌	142
第1約束期間	103	未来分析	167
大気汚染	93	メタ評価	296
体内への取り込み	141	モデル標準化手法	186
太陽光発電	213	野外実験	143
第四世代原子力システム	232	余剰電力買取制度	214
多基準分析	222	ライフサイクル分析	249
短期的エネルギーセキュリティ	161	割引率	106, 287

---

エネルギーの外部性と原子力  
Externalities of Energy and Atomic Power

2006年9月27日発行

定価 1,800円

編集 「原子力エネルギーの外部性」  
研究専門委員会報告書編集事務局

発行 社団法人 日本原子力学会

(〒105-0004) 東京都港区新橋 2-3-7 新橋第二中ビル 3F

電話(03)3508-1261 FAX(03)3581-6128

振替・00130-5-55932

ISBN 4-89047-136-7

---