

原子力のエネルギーセキュリティレベル
向上に果たす役割の評価研究

平成 20 年 9 月

東京大学

山田 英司

目 次

	ページ
第 章 本研究の目的及び構成	1
1. 本研究の背景	1
2. 本研究の目的及び構成	2
3. 本研究実施に当たっての視点	3
第 章 わが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究	5
1. 本章の研究の目的	5
2. エネルギーセキュリティに係る概念の多様化	5
3. エネルギーセキュリティに係る評価手法及び試算	8
4. エネルギーセキュリティに係る試算結果	12
5. 今後の課題	25
第 章 リスク要因を踏まえた原子力開発利用シナリオの分析	27
1. 本章の研究の目的	27
2. 原子力を巡るシナリオドライバーの抽出と分岐シナリオの設定	28
3. 各シナリオドライバーに起因するシナリオの概要	31
4. 今後の課題	38
第 章 原子力開発利用シナリオに係るエネルギーセキュリティレベルの評価分析	39
1. 原子力開発利用シナリオの設定	39
2. エネルギー需給に係るモデルの設定	43
3. 各シナリオに係るエネルギーセキュリティレベルの評価	48
第 章 原子力開発利用の今後のあり方に関する考察	57
1. セキュリティレベルを最大化する原子力発電比率の探索	57
2. ウラン資源制約への対応	60
3. 適正な使用済み燃料バランスの確保	68
第 章 結論	72
参考1 米国の原子力開発利用の停滞と回復に係る要因の分析	75
参考2 エネルギーセキュリティレベル評価に用いたデータ一覧表	90
謝辞	92
本研究に係る発表	93

第 章．本研究の目的及び構成

4． 本研究の背景

(1) エネルギー政策とエネルギーセキュリティの概念の変遷

(a) 1973 年の第一次石油危機の際、一次エネルギー供給の 77% を石油に依存していた、油上の樓閣とも言うべきわが国の産業経済及び国民生活は、大きな打撃を受け、これを契機に、わが国では「エネルギーの安定供給」を最優先とする総合的なエネルギー政策が展開されるようになった。その後、1980 年代半ばに石油価格が大幅に下落すると「経済性」を有するエネルギー供給が、また、1980 年代後半に地球温暖化が国際的な政治課題となると「環境保全」が政策の柱として追加され、そのような過程を経て、図 1-1 に示すように、わが国のエネルギー政策は、「エネルギーの安定供給」、「経済性」、「環境保全」が三本柱となり現在に至っている。1990 年代以降は、落ち込んだ経済の建て直しのため規制緩和を手段としてエネルギーコスト削減に重点を置いた政策展開がなされたが、昨今の国際的な石油需給の逼迫、資源争奪の様相を背景に改めて「エネルギーの安定供給」を最優先とする政策展開がなされるようになってきている¹⁾。

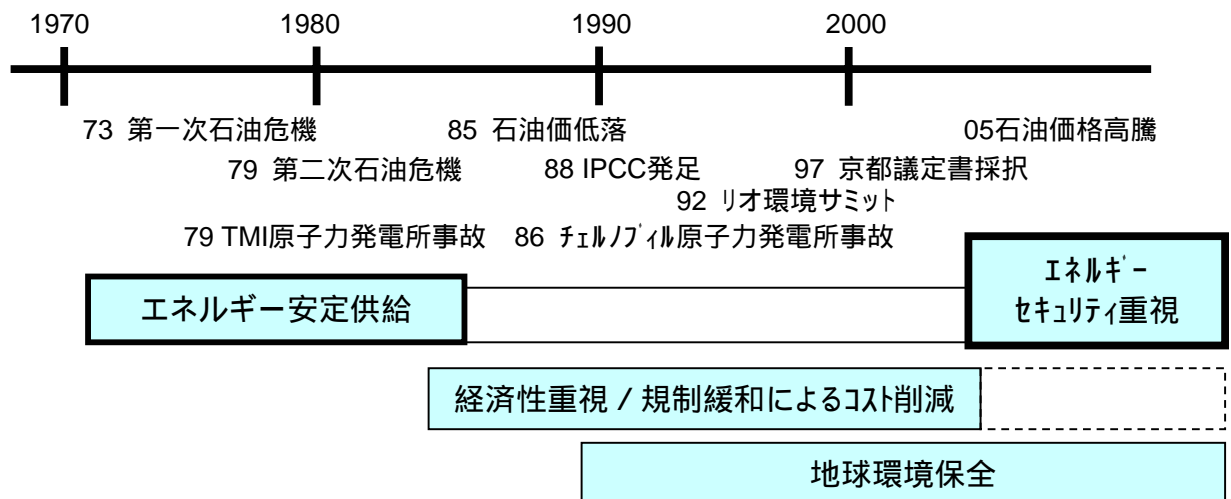


図 1-1 わが国のエネルギー政策の推移

(b) 原子力開発利用は、1960 年代に安価に大量のエネルギーを供給できる新たなエネルギー源として開発利用が開始され、1970 年代においては二度に亘る石油危機を契機に価格が高騰した石油の代替エネルギーとして、「エネルギーの安定供給」を可能とするエネルギー源として開発利用が推進されるようになり原子炉建設は活況を呈した。しかしながら、1979 年の米国スリーマイルアイランド原子力発電所事故（以下、「TMI 事故」という。）、1986 年の旧ソ連チェルノブイル原子力発電所事故（以下、「チェルノブイル事故」という。）を契機に安全性に懸念を生じるようになり、社会的受容性の低下、規制強化に伴う原子力開発利用自体の先行きや所要コストの不透明化等により、世界的には、原子力開発利用は、長い“冬の時代”に入った。その後、各国や各地域特有の状況に応じて紆余曲折を経ながら進捗してきている。

最近では、原油価格の高騰に示される国際的なエネルギー資源に係る需給逼迫、また、地球環境問題が国際社会の共通した問題として認識される状況の下、原子力は、温室効果ガスを排出することなく「環境保全」を可能とし、また、大量なエネルギーを「経済性」をもって供給できるエネルギー源として再評価されるようになり、世界的に“原子力ルネッサンス”と言われる状況にある。米国ではTMI事故以降、途絶えていた発電用原子炉の新規発注がなされる状況にあり、また、推進国及び反対国が相拮抗する欧州においては、フランス及びフィンランドにおいて新規炉建設が進行しつつある。一方、中国、韓国、日本、インド等のアジア諸国では、欧米における“冬の時代”を他所眼に原子力発電開発が着実に進捗しており、1990年代には運転開始した世界の原子力発電容量の約9割以上、2000～05年の間には約6割を占めた²⁾。わが国においても、2000年代は10年間で5基と、1970年代の20基、1980年代の16基、1990年代の15基に比べれば大きく減少しているが、新規運転開始炉がない欧米に比べれば、この間の原子力発電機器の製造及び発電所の建設経験に恵まれたおり、その実績が、現在のわが国の原子炉プラントメーカーの技術力の優位性に繋がっている。

(c) 以上のような変遷を経て、現在では、エネルギー需給のあり方を考える場合、一国の産業経済や国民生活に係るエネルギー需要を、安価に十分に賄う「エネルギーの安定供給」と「経済性」という基本的な要件(狭義のエネルギーセキュリティである「国益」(national energy security))に加え、地球環境問題に対応できるという「環境保全」や、安全・安心に係る社会的な要請の高まりに応える「安全」の確保、また、原子力固有の「核不拡散」や「核ジャック」、原子力に関する懸念が大きいと言わざるを得ない「テロ」対策といった質の面まで含め、グローバルな観点から、エネルギーに対する要請(広義のエネルギーセキュリティである「国際的公益」(global energy security))に対応していくことが求められるようになっている³⁾。

2. 本研究の目的及び構成

(1) エネルギーセキュリティレベルを定量的に評価する方法は未だ確立されていない。

本研究では、エネルギーセキュリティを定量的かつ総合的に評価するため評価軸及び評価指標の設定を行い、その上で、わが国のエネルギーセキュリティレベルを主要な先進諸国との相対的な位置関係から捉えることにより、定量的に評価する手法を開発・提案する。同手法を用いて、

(a) わが国のエネルギー供給及び電力供給に関するセキュリティに係る評点を算定することにより、わが国のエネルギーセキュリティレベルの定量的な評価を行う。

(b) 主要な先進諸国のエネルギー供給に関するセキュリティに係る評点について、1970年以降現在に至るまでの推移を示すとともに、わが国のエネルギー供給に関するセキュリティに係る評点の向上に寄与する要因の分析を行う。

(2) 原子力は多様なリスク要因に取り込まれているところ、将来を担うエネルギー源として原子力開発利用を長期に亘り着実に進めて行くには、いかなる事態が発生しようとも適確な対応を迅速にとることが必要であり、そのためには予めシナリオを想定しておくことは有効である。

かかる観点から、原子力開発利用を取り巻くリスク要因について、先進主要国の原子力開発利用の状況も踏まえて分析・整理を行い、最悪の事態に至る場合も含め、原子力開発利用の方向性に大きな影響を与えるものをシナリオドライバーとして抽出して、それら要因の顕在化に伴って想定される分岐シナリオの設定を行う。

(3) 分岐シナリオに基づき設定したわが国の原子力開発利用上の各シナリオについて、上述のエネルギーセキュリティに係る定量的評価手法を活用して、わが国の将来のエネルギーセキュリティレベルに関し定量的な見通しを行い、原子力が果たし得るエネルギーセキュリティ向上への寄与について評価を行う。

(4) 上記の評価分析手法及び評価分析結果を踏まえ、

(a) エネルギーセキュリティレベルを最大化する原子力発電比率

(b) 原子力開発利用の持続可能性の観点から、原子力開発利用が順調に進展する場合長期的には顕在化が懸念されるウラン資源制約への対応策

(c) 原子力開発利用の継続性維持の観点から不可欠な適正な使用済燃料量のバランスの確保策

など、今後の原子力開発利用のあり方について考察を行う。

3. 本研究を実施するに当たっての視点

(1) わが国のエネルギーセキュリティレベルの評価

本研究は、わが国のエネルギー供給に係るセキュリティレベル、及び、原子力開発利用が果たすわが国のエネルギーセキュリティレベル向上への寄与に関して評価研究することを目的としている。このため、

(a) エネルギー需給を評価する指標は主にわが国の政策に沿ったものを採用している。

(b) 原子力開発利用に係る分岐シナリオを設定する場合、わが国の原子力開発利用の実績や影響等を考慮してシナリオドライバーを採択、配置することにより、同分岐シナリオを策定している。

(2) エネルギー供給構造に係る評価

本研究は、エネルギー供給構造に関し、長期的な観点から評価することを目的としている。このため、送電網や石油・ガスパイプライン等のエネルギー流通インフラに係る評価、石油等の備蓄による供給途絶に対する対応効果等は、短期的な視点あるいは緊急時対応に係るセキュリティ確保の視点からは採用すべきものと考えられるが、本研究では除外している。

また、本研究で採用した5つの指標のうち、需要分野に係るものはエネルギー利用あるいは電力利用に係る効率のみで他の4つは供給構造に係るものである。このため、本論における表記を、エネルギー「供給」、あるいは、電力「供給」のセキュリティレベルに係る評価としている。

(3) 原子力開発利用に係る技術的側面からの評価

原子力開発利用は、核不拡散、核物質防護、放射性廃棄物等の原子力固有のリスクに加え、政治的、経済的、社会的等多岐に亘る様々なリスク要因に取り込まれており、技術的な側面から論ずるだけでは危ういものがあるが、それらのリスク要因については別途検討を行うこととし、本研究では、原子力開発利用自体が有するリスク要因について、主に技術的な側面から評価分析を実施している。

- 参考文献 -

- 1) 経済産業省、“新・国家エネルギー戦略” (2006)
- 2) (社)日本原子力産業協会、“世界の原子力発電開発の動向”、各年度版
- 3) 伊藤憲一、“国家と戦略”、中央公論社、227-231, 271-275 (1985)

第 章 わが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究¹⁾

1. 本章の研究の目的

(1) エネルギーセキュリティの定量的評価に係る先行研究

エネルギーセキュリティを定量的かつ総合的に評価することは、今後の国のエネルギー政策の企画立案や企業の経営戦略を考える上で有効であると考えられる。しかしながら、エネルギーセキュリティに関する先行研究では定量的な評価について行っているものは少数である。

(株)三和総合研究所の研究²⁾では、各エネルギーに係る特定地域の供給比率及び、わが国の同地域からの輸入依存度から各エネルギーの供給リスクを定量的に評価しているが、環境等広義のリスクが対象外である。また、UFJ 総合研究所の研究³⁾においては、先行研究を整理分析した上で、定量評価として、ポートフォリオ理論による輸入先のカントリーリスク評価や、エネルギー供給に係る多様性評価はなされているが、エネルギーセキュリティに係る要素を総合化するような指標や手法は AHP(階層分析法)を用いた評価事例⁴⁾以外は見当たらないとしている。また、戒能による研究⁵⁾では、各エネルギーの供給リスクを、国産分は生産設備の稼働率、輸入分は輸入先国の貿易保険の国別リスクを用いて算定し、供給構成から、わが国のエネルギー供給に係るリスクの総和を定量的に評価しているが、供給安定性の評価に焦点を当てており、総合的なエネルギーセキュリティの評価には至っていない。

なお、上記の研究事例は、AHP を用いた評価事例を除き、いずれも経産省からの委託調査研究、あるいは同省の研究員の調査であり、エネルギーセキュリティの定量的評価が行政上ニーズの高いことが伺える。

(2) 本章の構成

本章では、はじめに、近年のエネルギーセキュリティに係る概念の多様化について分析・検討を行う。次に、このような状況を踏まえてエネルギーセキュリティの評価に関する評価軸及び評価指標の設定を行い、その上で、エネルギーセキュリティレベルを先進諸国間の相対的な位置関係から捉えることにより、総合的かつ定量的に評価する手法について提案する。さらに、同評価手法の適用例として、わが国のエネルギーセキュリティレベルの推移、同レベルを最大化する電力供給に占める原子力の比率について検討を行う。本研究に係る評価手法は、異質な評価指標を包含した総合的な相対評価が可能であり、当該国が有するエネルギー需給上の特性を生かす形で、エネルギーセキュリティ向上を目指す政策オプション選択の判断に資することが期待される。

2. エネルギーセキュリティに係る概念の多様化

(1) エネルギーに係る要因及び関与する者の多様化

エネルギー政策が変遷した要因としては、エネルギーが単なる経済的な財として留まるものでなく、国家存立の基盤となるものであることから、エネルギーに関与する要因が多様化し、さらに、各要因に関与する者(利害関係者)が時代とともに広範になったことによる⁶⁾。

以下、石油、環境及び原子力の分野における推移を述べる。

(a) 石油分野

世界のエネルギー供給の太宗を占め、現代の産業経済や国民生活に不可欠な存在となっている石油には、資源の有限性や偏在性といった問題がある。1960 年代には石油は国際石油会社（メジャーズ）が公示する価格で調達されていたが、石油シェアが国際的にも太宗を占めるようになった 1970 年代には、資源ナショナリズム勃興を背景に二度に亘り石油危機が発生し、国際石油価格の主導権は石油産油国が管理するところとなった。しかし、1980 年代半ばに最大産油国のサウジアラビアが石油需給調整役を放棄してからは、国際石油市場の市場機能を通じて価格が決定されるようになり、石油は、戦略商品から市場商品に変容したとも評価された。

昨今、中国や北米の石油需要が増加し国際的な石油需給の逼迫、それに伴う価格の上昇が起こり、また、石油価格高騰を背景に、世界最大の産油・ガス国であるロシアが資源の国家管理を強化しており、石油は、再び戦略的側面が強調されるようになっている。

以上のように、石油分野では、関与する者は、国際石油会社、石油産油国、国際石油市場、さらに、新興の大需要国としての中国、資源の国家管理を強めるロシアと、時間を追うに連れ多様化してきている。

(b) 地球環境分野

当初、環境問題は局地的な環境汚染問題（公害）であったが、1980 年代半ばのオゾン層破壊防止対応を経て、1980 年代後半からグローバルな視点で環境を捉える地球温暖化問題が注目されるようになった。1988 年には地球温暖化問題に関し科学技術的な視点から検討を行なう IPCC(気候変動に関する政府間パネル)が設置され、1992 年のリオデジャネイロでの「地球環境サミット」開催、1997 年には先進国の温室効果ガスに係る削減数値目標を設定した「京都議定書」が採択されるに至り、地球環境問題はエネルギー需給を考える上で重要な世界共通の考慮要因となっている。

昨今、環境問題は、科学者間の議論の枠を超えて、市民運動の大きな潮流となっている。欧州では、環境重視を掲げる「緑の党」の勢力が伸張し、一部の国では政権に参加し脱原子力政策も含め環境重視の政策を実現している。環境は、国際的な政治経済社会のキーワードの一つともなっている。

以上のように、環境分野では、関与する者は、科学者、各国政府、企業、地方自治体、地域住民、市民運動などへと広範に及ぶようになっている。

(c) 原子力分野

原子力分野は、第 4 章で述べたように、エネルギー需給、経済性、安全性、環境等に係る社会的受容性などの多様な要因に関連があり、原子力施設の立地や運転管理を巡っては、経産省、研究開発機関、事業者、機器メーカー等の推進する者、安全性向上を要請する地方自治体、マスメディア等、それに中立的立場にある規制当局が対峙する状況にあり、さらに核不拡散に係る国際的枠組みなどの係わりも強い。

以上のように、原子力は、他の電源に比べ、関与する者が広範に及んでおり、その推進には、これら関係者の利害を調整する時間と作業が必要となる。

(2) エネルギーセキュリティに係る考え方

一般にセキュリティについて論ずる場合、対象（何を守るか）、リスク（何から守るか）、対策（何により守るか）を明確にする必要がある⁷⁾。

(a) エネルギー分野において守る対象は、前章で述べたように、単に、一国のエネルギーの安定的かつ経済的な需給という「国益」(national energy security)から、国際社会の一員として守るべき環境、安全といった「国際的公益」も含むエネルギーセキュリティ (global energy security) へと、量・質ともに拡大している⁸⁾。

(b) エネルギー需給に係るリスクとしては、表 2-1 に示すように様々なリスクがある。

表 2-1 エネルギー需給に係るリスク

事 項	リ ス ク 要 因
供給	石油・ガス資源の枯渇 資源制約 事故・トラブル、自然災害 1)供給途絶、 2)供給削減
価格	需給逼迫による高騰 供給国のマーケットパワーの行使 市場の機能不全
需要	中印等新興国の需要増大 省エネの停滞
環境	国際的：地球環境問題 環境制約 地域的：酸性雨
技術	日本の国際競争力の喪失
社会・文化	環境重視運動 反原子力運動
国際関係	供給国のマーケットパワーの行使 (再掲) 紛争・革命 国際的な規制措置 (石炭利用の抑制、プルトニウム利用の禁止等)

長期的な観点からは、資源の有限性に伴う資源制約と、化石燃料の燃焼が主要因である地球温暖化に伴う環境制約が指摘される。資源制約については、ピークオイル説が提唱される⁹⁾一方、最近の石油探査・採掘技術の発展による埋蔵量成長による楽観論も提示される¹⁰⁾が、生産が、低コストの在来石油資源からオイルサンド等の高コストの非在来型資源へと移行していくこと¹¹⁾に伴い燃料価格が上昇していくことは大方の見方となっている。この他、途上国等における想定外の需要の増加、技術革新力の低下、深刻な事故等の伴う原子力施設の立地の遅延、核不拡散や環境問題に係る国際的枠組みの強化等がリスク要因として指摘される。これらのリスクに対しては、エネルギー利用効率の向上、非化石エネルギーの利用拡大などによるエネルギー需給構造の強靱化で対応することとなる。

(c) 一方、自然災害、深刻な事故、紛争、テロ等による偶発的な供給途絶などのリスクに対しては、影響緩和あるいは他の供給ソースからの調達等の緊急的な対応が必要となる。また、石油及び天然ガス資源は、世界の確認資源埋蔵量の2/3が政情不安定な中東諸国、エネルギー資源の国家管理を強化するロシアに賦存する¹²⁾という偏在性があり、石油危機に示されるような供給国による意図的な市場操作力(マーケットパワー)の行使も、影響を緩和する対策が必要なりリスク要因である。これらのリスクへの対策としては、備蓄の拡大、送電・送ガスネットワークの多重化など、主にエネルギー供給ネットワークの改善で対応するとなる。

本研究は、エネルギーセキュリティ向上に向け、エネルギー需給構造に関し評価を行うことを目的としていることから、本稿では、前者のエネルギー需給構造の改善に係るリスクに焦点を絞って議論を行う。

3. エネルギーセキュリティに係る評価手法及び試算

(1) エネルギーセキュリティに係る評価軸及び指標の設定

エネルギー政策基本法に基づき策定されるエネルギー基本計画では、エネルギー政策において実現すべき目標として「環境への適合を図りつつ、適切な価格で、十分に安定的な供給を確保する」ことが規定され、また、わが国が目指すべきエネルギー需給に係る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」(経済性)を挙げている。これらは定性的な目標を示すに留まっていることから、その達成度を定量的に示すことが出来る指標を表2-2に示すように設定する。それらの指標とエネルギー政策における目標との関係を図2-1に示す。

表2-2 エネルギーセキュリティに係る指標

評価軸	指標として採用する数値
1. エネルギー利用効率	単位GDP当たりの一次エネルギー供給量
2. 調達の脆弱性	エネルギー輸入に係る特定地域への依存度 本研究では、中東とロシアを特定地域とする。
3. 供給源の多様化	ハーフィンダール・ハーシュマン指数 HHI $= \sum W_i^2 \quad (W_i: \text{各エネルギーのシェア})$ 同指数は、市場の集中度測定手法として活用されている。
4. エネルギー消費に係る二酸化炭素排出	二酸化炭素排出に係る指標 $= \sum W_i \times C_i$ $(W_i: \text{各エネルギーのシェア}, C_i: \text{単位エネルギー消費量当たりの炭素排出量})$
5. 経済への影響	国際市場でのエネルギー輸入価格から算定されるエネルギー輸入額のGDPに対する割合 経済性に係る指標 $= \sum F_i \times P_i / \text{GDP}$ $(F_i: \text{各化石燃料の輸入量}, P_i: \text{各化石燃料の輸入価格})$

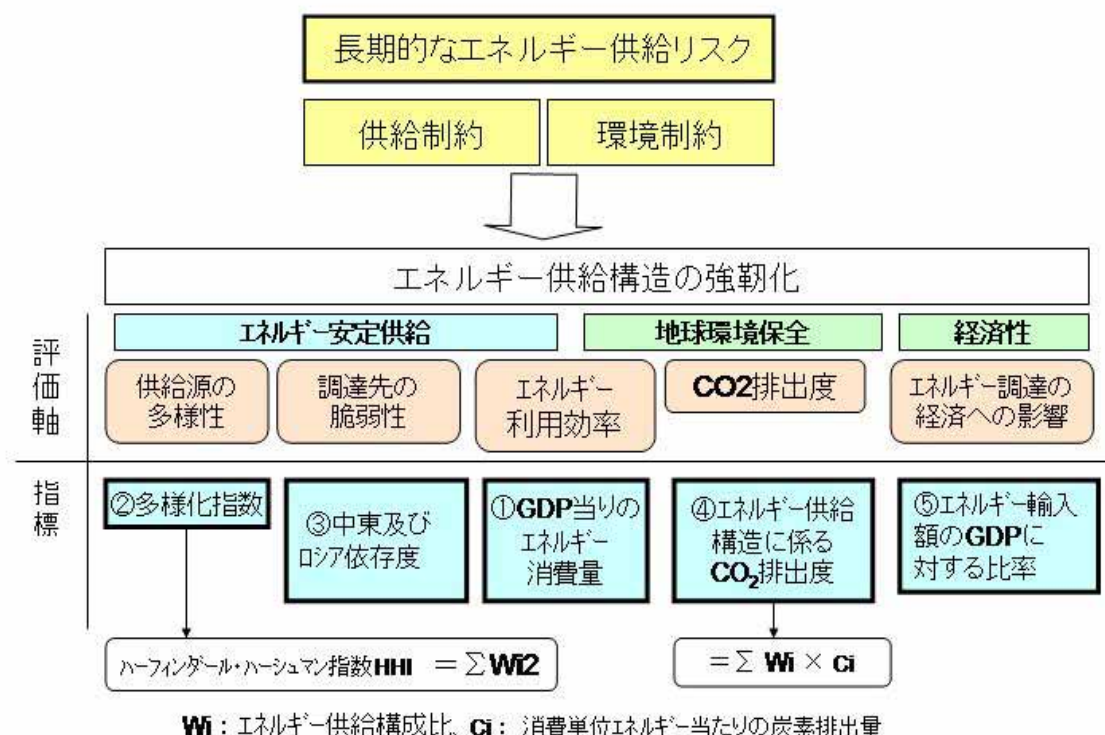


図 2-1 エネルギー政策目標とエネルギーセキュリティに係る指標との関係

(a) エネルギー利用効率

一定の効用を得るのに必要なエネルギー量の低減を図ることは、エネルギーの安定供給及び環境保全の双方に資するもので、従来から、わが国のエネルギー政策の最優先課題である。これまでの官民双方努力の成果として、わが国のエネルギー利用効率は世界のトップクラスにある¹³⁾。

本件に係る指標としては、I E A 統計¹⁸⁾に各国の数値が掲載されている GDP 当たりの一次エネルギー供給量を採用する。

(b) エネルギーの安定輸入

エネルギー政策基本法第 2 条に「石油等の一次エネルギーの輸入における特定地域への過度な依存を低減する」との条項があるが、わが国は石油の約 90% を中東地域から輸入しており、また、米国においても石油輸入の中東地域への依存度が上昇していること (2005 年上期で 22%¹⁴⁾) が問題となっている。一方、欧州は、ロシアに石油供給の約 30%、天然ガス供給の約 20% を依存している。本稿では、中東地域への依存度に加え、最近のエネルギー資源に係る国家管理強化を進めるロシアに対する依存度を指標として採用する。数値は I E A 統計^{15) 16)}に記載される数値を基に算出する。

(2) エネルギー供給構造に関するセキュリティ評価に係る指標

(a) エネルギー源の多様化

上記エネルギー基本計画において、エネルギーの安定供給確保を図るための方針の一つとしてエネルギー源の多様化が指摘されている。わが国の一次エネルギー供給の石油依存度は、1970 年代の石油危機当時約 77%と極めて高く、現在でも 50%と世界平均の 40%¹³⁾と比して依然として高い水準にある。それを低減させるため、これまで、そして、今後も原子力、石炭、天然ガス及び再生可能エネルギーの利用拡大を図ることとしている。

エネルギー源の多様化に関しては、多様化指数として市場の集中度を測定する手法として活用されているハーフィンダール・ハーシュマン指数 HHI を用いる¹⁷⁾。

ハーフィンダール・ハーシュマン指数 $HHI = \sum W_i^2$ (W_i : 各構成因子のシェア)

同指数は、構成する要因の格差が小さい程、また、構成する要因の数は多い程、HHI は小さくなり、当該の場が多様化していることが示される。例えば、わが国の一次エネルギー供給構成をみる場合、下表に示すように、1973 年から 2005 年にかけて石油代替エネルギー開発利用が進み、その結果、HHI も 0.62 から 0.32 へと大きく低減している。なお、エネルギー供給構成要因を 5 つとすると、HHI の最小値は 0.2、最大値は 1 となる。

表 2-3 エネルギー源多様化に伴うハーフィンダール・ハーシュマン指数の変化

	石炭	石油	天然ガス	原子力	再生可能エネルギー	HHI
1973 年	18%	77%	2%	1%	2%	0.62
2005 年	22%	48%	13%	14%	3%	0.32

エネルギー供給源の多様化は、リスク低減の観点から、その時々各エネルギー源の供給リスクや価格などを考慮して、最適な組み合わせ（ポートフォリオ）構築し、それとの比較において多様化の状況を評価することがベストであるが、本研究の場合、対象期間が長期に亘り、また、対象国が多岐にわたるため、その時々、各国の事情に応じたポートフォリオを検討することは困難であるため、供給構成状況に係る数値から算定される HHI を採用している。

(b) 二酸化炭素排出に係るエネルギー供給構成

上記エネルギー基本計画においては、温室効果ガスの約 9 割を占めるエネルギー起源の二酸化炭素の排出抑制の重要性を指摘し、環境への適合を図る基本方針として、エネルギー利用効率の向上、原子力発電等の非化石エネルギーの利用拡大、二酸化炭素排出量の少ないガス体エネルギーへの転換を指摘している。

本件の指標として、各エネルギーに関し、供給シェアを単位エネルギー消費量当たりの炭素排出量により重み付けしたものの総和を指標として採用する。

二酸化炭素排出に係る指標 = $\sum W_i \times C_i$

(W_i : 各構成因子のシェア、 C_i : 単位エネルギー消費量当たりの炭素排出量)

(c) 経済への影響

電力・ガス料金、ガソリン価格などは、国民経済影響を与えるものであり、上記エネルギー基本計画では、市場原理の活用によりエネルギー価格の低減を指向している。エネルギー価格の高騰に対する脆弱性を示す指標として、GDP に占めるエネルギー支出の割合、あるいはエネルギー輸入額の割合が考えられる¹⁸⁾が、エネルギーの国内価格は、各国内の流通システム、補助金、税などの政策要因によるところが大きく、国際的には比較し難い点があるので、本論では IEA 統計^{15) 16)}などに記載される国際市場でのエネルギー輸入価格から算定される化石燃料の輸入額の GDP に占める割合を採用する。なお、わが国の同値は、石油危機当時は 4 % 程度であったが、現在では 2 % 程度¹⁹⁾にまでに低減しており、エネルギーの価格高騰リスクに関し、わが国経済のセキュリティは向上していることが示される。

経済性に係る指標 = $F_i \times P_i / \text{GDP}$

(F_i :各化石燃料の輸入量、 P_i :各化石燃料の輸入価格)

(3) 電力供給のセキュリティ評価に係る指標

原子力は、将来は熱利用、水素製造等の分野での利用も期待されるが、現在は電力供給分野に利用が限定されていることから、本稿では、原子力のセキュリティ向上に資する役割を明らかにするため、エネルギー供給に係るセキュリティの評価と併せて、電力供給に係るセキュリティの評価も実施した。その評価に当たっては、以下に示すように、エネルギー供給に係るセキュリティの評価に用いる指標と同趣旨のものを採用する。

(a) エネルギー利用効率に対応するものとして、GDP 当たりの電力供給量を採用する。

(b) 多様化指数、中東地域及びロシア依存度、二酸化炭素排出に係る指標は、電力供給に関して、エネルギー供給に係るセキュリティと同じ方式により算定される数値を用いる。

(c) 経済性に係る指標としては、エネルギー供給に係るセキュリティと同様に、電力用の化石燃料の輸入額の GDP に占める割合を採用する。

なお、数値は、上述の IEA 統計などに記載される数値を基に算出する。

(4) エネルギーセキュリティに係る評点の算出方法

上述の各評価指標に関し、対象国・地域の間での比較における相対的な位置づけをエネルギーセキュリティに係る評価点とする。本論においては、

(a) 対象は、精度の高いデータが得られる先進 8 ヶ国（日本、韓国、米国、カナダ、英国、フランス、ドイツ、イタリア）及び 1 地域（EU15 ヶ国、東欧諸国は含まない）とする。なお、韓国はサミットメンバー国ではないが、エネルギー供給量が一部のメンバー国を上回るため加えている。また、上述の 8 ヶ国で世界の一次エネルギー供給の約 4 割、OECD の一次エネルギー供給の約 8 割を占める¹³⁾。

(b) 指標毎の評価点の算出方法は、平均値を中央とする正規分布を仮定し、正規分布曲線上の偏差値(平均 50)を評点とする。

偏差値を評点とする手法は、全体の中での位置づけを明確にするために採用されるものであり、尺度が同一であるため異質な指標を含めた総合的な相対的評価を実施することが可能である。偏差値を用いて評価を実施した既往研究例として、多種多様で多数の指標により比較される地域間格差の相対評価に係る研究²⁰⁾、財務諸表に記載されない非財務情報により企業評価を行う手法についての研究²¹⁾などがある。学術論文ではないが、地方自治体や会社のランキング²²⁾などにも広く採用されている。しかしながら、偏差値を用いた評価は、その時点における一定の環境条件下での相対的な評価にならざるを得ず、環境が変化すれば、改めて評価する必要があるという点に留意が必要である。

(c) 選定した指標については、セキュリティの観点から数値が小さい方が良好であるため、各国のそれら指標に係る評点は下記により算出を行う。

a) 各指標に係る i 国の数値を X_i ($i = 1 \sim n$) とする場合、i 国の評点 Y_i は以下により算出される。

$$\text{評点 } Y_i = 50 + 10 \times (X_i - \text{ave } X_i) / \text{stev } X_i$$

ave X_i : $X_1 \sim X_n$ の平均値

stev X_i : $X_1 \sim X_n$ 標準偏差

b) i 国の総合評点 Z_i は、選定した 5 つの指標に係る評点 Y_i の平均値とする。

$$Z_i = \text{ave } Y_i : Y_1 \sim Y_5 \text{ の平均値}$$

4. エネルギーセキュリティに係る評点の試算結果

上述の評価点算出方法により、2005 年データ¹³⁾¹⁵⁾¹⁶⁾を用いて、エネルギーセキュリティに係る評点を試算した結果を示す。

(1) エネルギー供給に関するセキュリティレベルに係る評価

(表 2-4 及び図 2-2 参照)

わが国は、エネルギー利用効率については世界トップの評点であるが、他の評価指標については平均以下の評点であり、総合としても平均を下回る位置にある。

カナダ、英国といった資源国は、中東及びロシア依存度、経済性の指標に関し高い評点を得て全体としても上位に位置している。

その他のエネルギー資源に乏しい 5 ヶ国(日本、韓国、フランス、ドイツ、イタリア)間で比較すると、わが国は、フランス、ドイツに比して劣位にある。フランスは一次エネルギー供給に占める原子力比率が 43% と高く多様化指数では劣るものの、CO₂ 排出に係る指標の評点が極めて高く、

また、ドイツはエネルギー供給構成のバランスがよく供給多様性に優れ、これらの点がわが国に比べ高い総合評価に繋がっている。

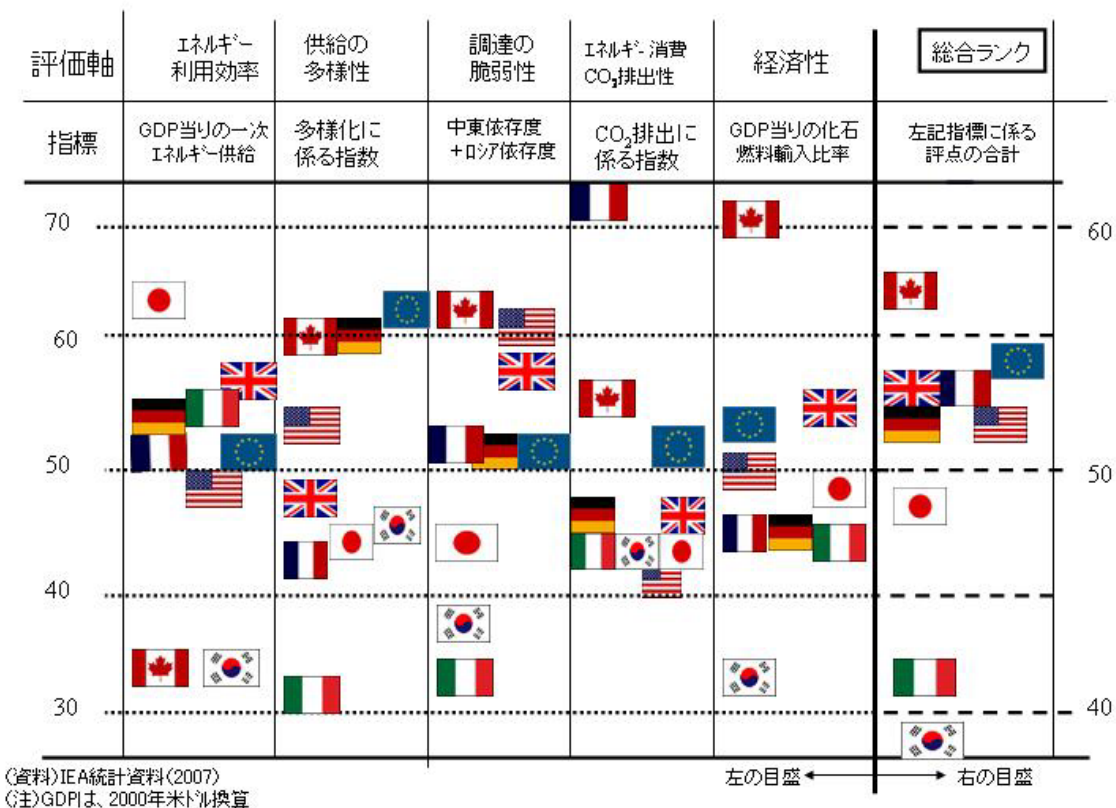


図 2-2 先進諸国のエネルギー供給に関するセキュリティレベルに係る評価

表 2-4 先進諸国のエネルギー供給に関するセキュリティに係る評点(2005 年)

	一次エネルギー供給/GDP	多様化に係る指数	中東及びロシア依存度	CO ₂ 排出に係る指数	化石燃料輸入/GDP	総合
カナダ	0.33(34)	0.25(60)	3.9(62)	0.55(57)	5.7(71)	57
フランス	0.19(52)	0.32(43)	29.0(52)	0.40(74)	3.5(47)	53
ドイツ	0.18(54)	0.26(60)	31.7(51)	0.66(45)	3.4(47)	51
イタリア	0.16(55)	0.36(32)	73.5((33)	0.65(46)	3.8(46)	42
日本	0.11(63)	0.31(45)	45.4(45)	0.66(45)	2.6(49)	49
韓国	0.34(34)	0.30(47)	62.8(38)	0.66(45)	8.7(33)	39
英国	0.14(58)	0.30((49)	13.7(58)	0.65(46)	0.09(55)	53
米国	0.21(49)	0.28(54)	7.6(61)	0.69(42)	2.2(50)	51
EU	0.19(52)	0.25(62)	29.6(51)	0.61(51)	1.0(53)	54

(注) ()内数値は、偏差値算出による評点を示す。

(2) 電力供給に関するセキュリティレベルに係る評価(表 2-4 及び図 2-3 参照)

電力供給構造に関し、エネルギー供給と同様の指標を用いてセキュリティレベルの評価を行う。その結果は表 2-5 及び図 2-3 に示すように、わが国は、電力利用効率と多様化指数が平均を上回り、特に多様化指数はバランスのよい電源構成を反映して高い水準にあり、全体としても、先進各国とほぼ同等の位置を占める。なお、電力供給に占める原子力比率が 79% (2005 年) と高いフランスは、多様化指数では低い評価となるものの、二酸化炭素排出、並びに、中東及びロシア依存度に関して高い評点を得ており、全体としても高い位置を占めている。

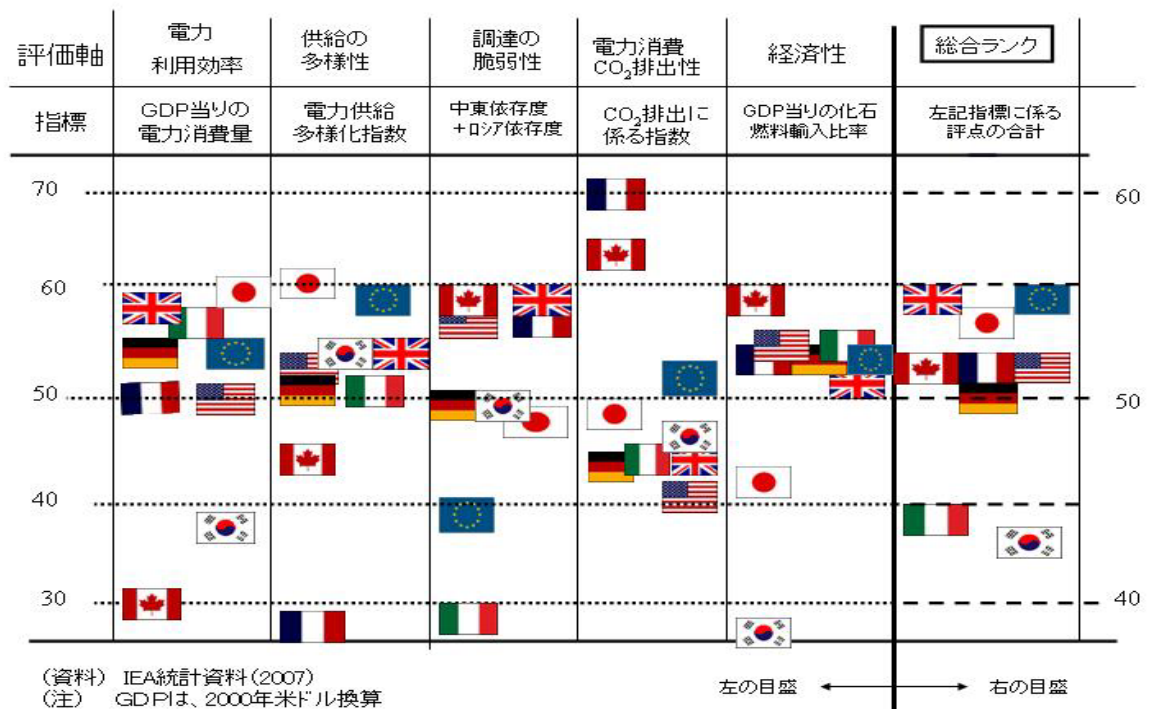


図 2-3 先進諸国の電力供給に関するセキュリティレベルに係る評価

表 2-5 先進諸国の電力供給に関するセキュリティに係る評点 (2005 年)

	電力供給量 /GDP	多様化に係る指数	中東及びロシア依存度	CO ₂ 排出に係る指数	化石燃料輸入/GDP	総合
カナダ	0.76(30)	0.41(45)	0.62(58)	0.23(63)	0.11(58)	51
フランス	0.40(50)	0.64(26)	2.3(57)	0.09(70)	0.24(53)	51
ドイツ	0.31(54)	0.34(51)	15.4(49)	0.59(43)	0.26(53)	50
イタリア	0.26(57)	0.34(51)	52.8(26)	0.58(44)	0.55(56)	44
日本	0.22(59)	0.23(60)	17.2(48)	0.52(48)	0.40(42)	53
韓国	0.61(38)	0.32(53)	14.8(49)	0.54(46)	0.98(27)	43
英国	0.24(58)	0.32(53)	0.0(58)	0.58(44)	0.18(52)	54
米国	0.39(50)	0.33(52)	1.9(57)	0.65(40)	0.15(55)	51
EU	0.32(54)	0.24(59)	19.0(39)	0.44(52)	0.16(53)	54

(注) () 内数値は、偏差値算出による評点を示す。

(3) エネルギー供給に係る評価と電力供給に係る評価の比較

上記の二つの評価結果を比較すると、わが国は、電力供給のセキュリティに係る評点がエネルギー供給に係るものより高く、要因としては、多様化指数に係る評価が良好であることが大きく寄与している。すなわち、図 2-4 に示すように、エネルギー供給では、石油のシェアが50%程度と依然大きいのに対し、電力供給では、石油代替エネルギーの導入利用が着実に進展し、原子力、石炭、天然ガス、石油、水力等再生可能エネルギーの5つの電源のいずれもが特段に大きなシェアを持つこともなく、バランスのよい電源構成を達成しており、これが多様化指数を向上させている。

わが国は資源に乏しいというエネルギー供給上の弱みはあるが、視点を変えればエネルギー選択を自由に実施できる立場にある。電力供給のセキュリティに係る評点の高さは、資源に乏しいわが国でも、エネルギー供給構成の多様化、環境適合性の高い供給構成等を追及することより、広義におけるセキュリティに関しレベルの高いエネルギー供給構成が実現できることを示している。

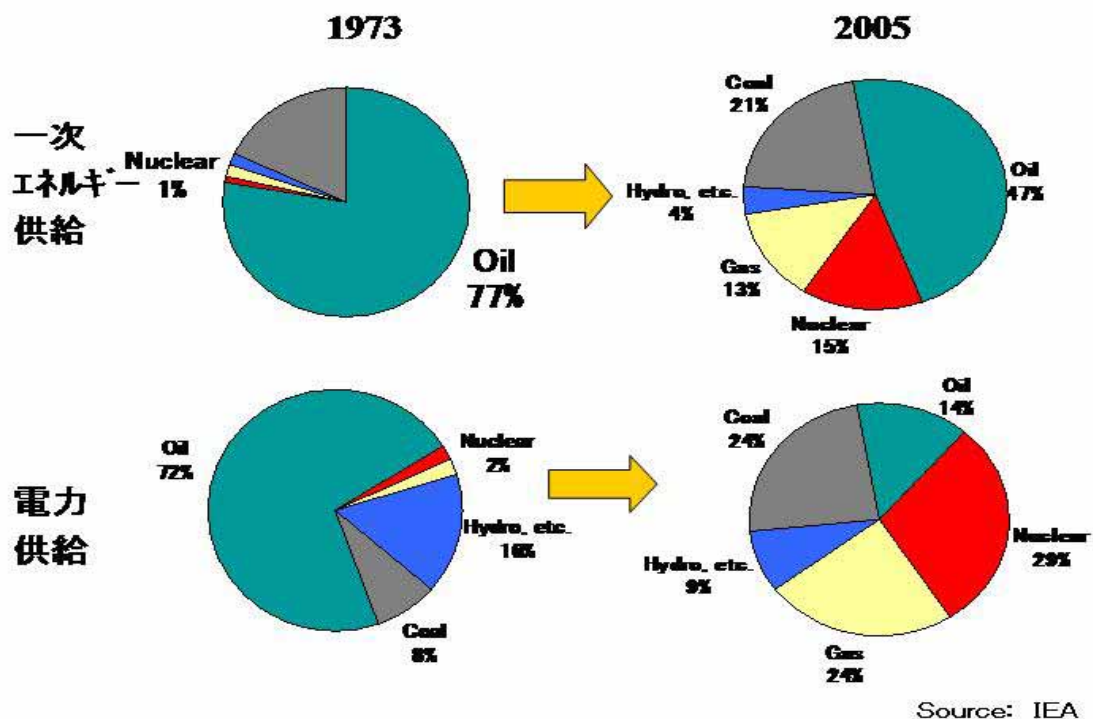


図 2-4 わが国のエネルギー供給構成及び電力供給構成の推移

(4) わが国のエネルギー及び電力供給に関するセキュリティに係る評点の推移

(a) 総合的評価の推移

わが国のエネルギー供給及び電力供給に関するセキュリティに係る評点の過去の推移をみると、それぞれ図 2-5 に示すようになる。対象 8 ヶ国及び1地域に関し、1990 年、2000 年及び 2005 年の各時点での実績値を入力して評価したが、エネルギー供給に係る評点は平均を若干下回る程度で、また、電力供給に係る評点は平均を上回る水準で、概ね横這い、ないしは微増で推移している。

なお、2005 年データは全て IEA 統計によるが、1990 年及び 2000 年については、中東及びロシア依存度を算出する際に利用する世界のエネルギー貿易のデータは EDMC 統計²³⁾ によっている。

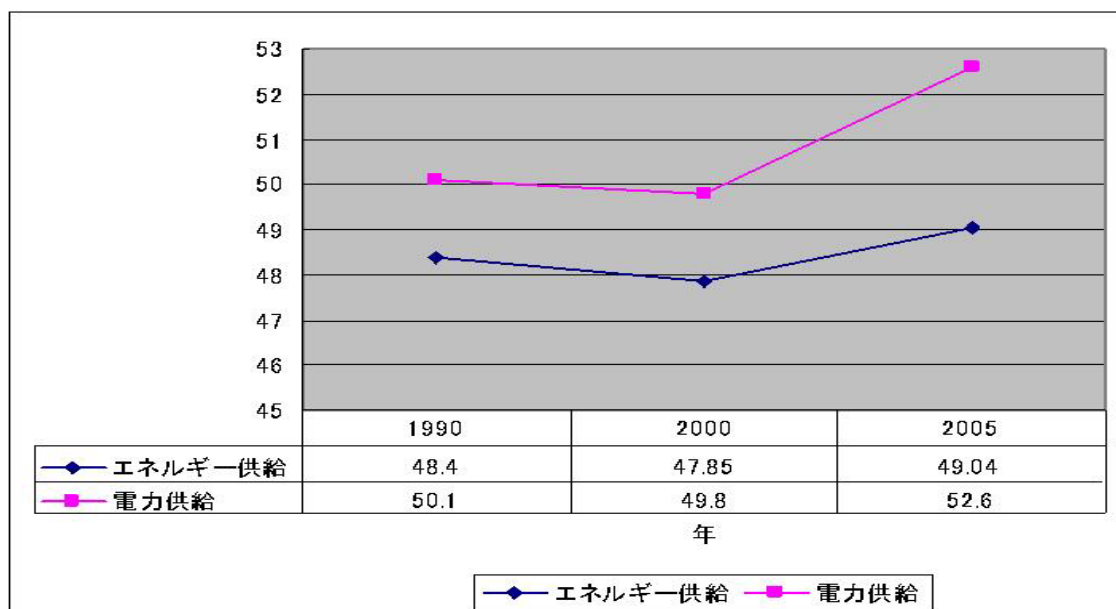


図 2-5 わが国のエネルギー及び電力供給に関する
セキュリティに係る評点の推移

(b) 指標毎の推移

a) エネルギー供給に関するセキュリティに係る評点

指標別の推移を見ると、エネルギー供給に係るセキュリティは、図 2-6 に示すように、1990 年に比して 2005 年は、多様化指数及び中東及びロシア依存度に係る評点が改善している。多様化は、石油依存度は 1990 年の 58% から 2005 年の 47% へと低減していることに示されるように着実に進展しているが、石炭利用の拡大が進展しているため CO₂ 排出に係る評点は左程向上していない。一方、中東及びロシア依存に係る評点は改善しているが、これは、わが国の中東依存度が原油の低価格水準、カタールからの天然ガスの調達等により 1990 年の 35% から 2005 年には 44% へと上昇したものの、欧州諸国のロシア依存度の増加等との相対的な関係により改善したものと考えられる。

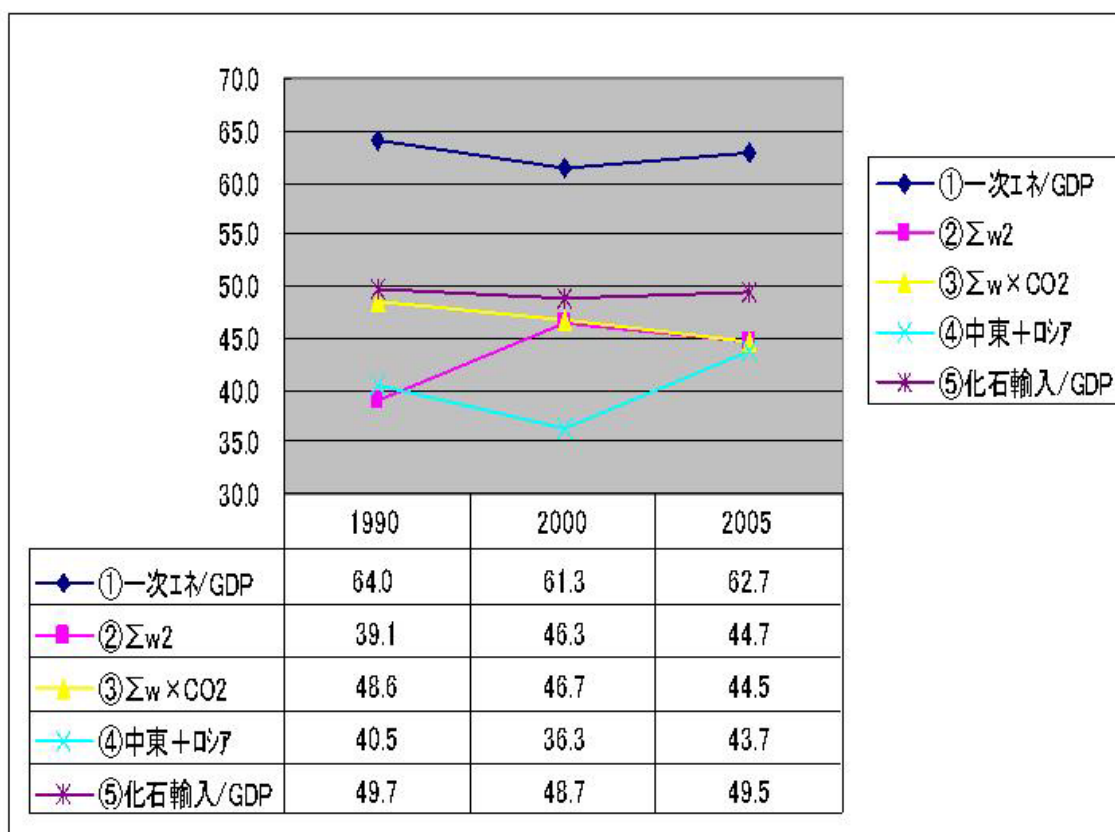


図 2-6 わが国のエネルギー供給セキュリティに関する各指標に係る評点の推移

b) 電力供給に関するセキュリティに係る評点

電力供給に係るセキュリティは、図 2-7 に示すように、1990 年に比して 2005 年水準は、中東及びロシア依存度に係る評点が大きく改善している。エネルギー供給と同様に、電力供給においても、石油依存度は 1990 年の 32% から 2005 年の 13% へと大きく低減しており、これが中東依存度低減に寄与している。一方、多様化指数をみると、多様化指数の絶対値は概ね横ばいで推移しており、評点は 60 台と先進諸国の中では最もバランスのとれた電力構成を維持しているが、他の諸国の多様化の進展との相対的な関係から若干低下してきている。

電力供給に占める原子力発電比率は、発電容量は増加しているものの設備利用率が低迷したため、1990 年代以降 20% 台で推移している。一方、石炭火力発電の比率が、1990 年の 14% から 2005 年には 28% に倍増しており、CO₂ 排出に係る指数の絶対値及び評点とも悪化してきている。

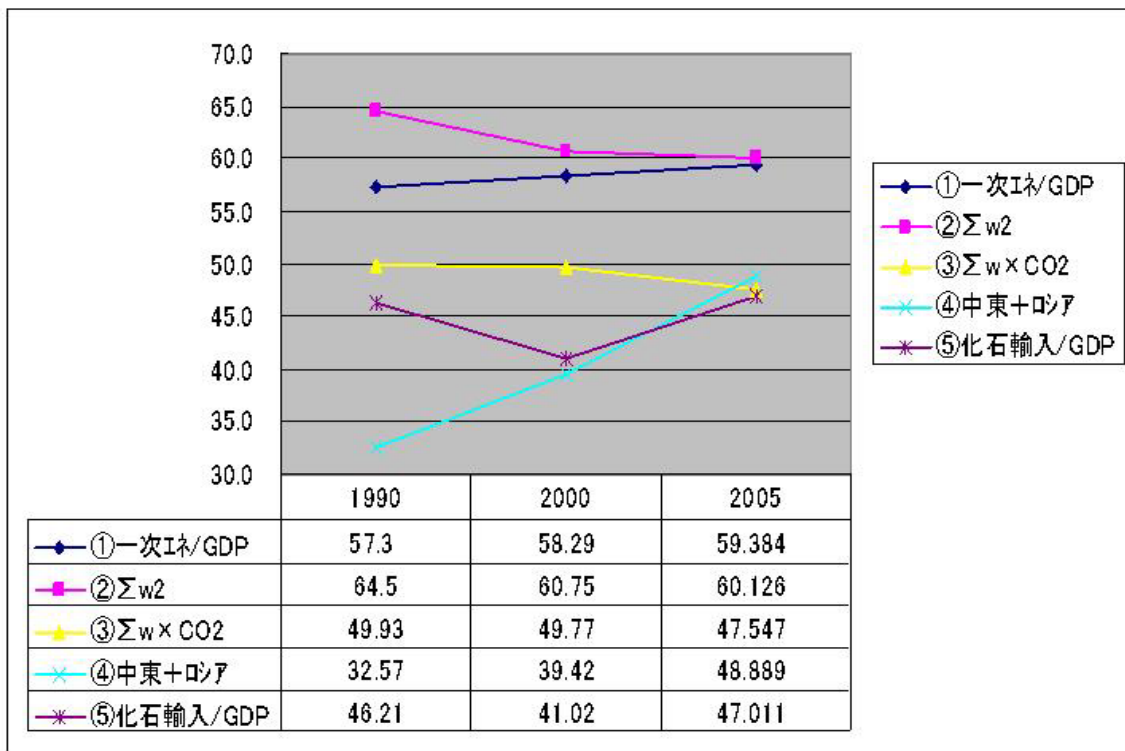


図 2-7 わが国の電力供給セキュリティに関する各指標に係る評点の推移

(5) 1970 年代以降の主要先進諸国のエネルギーセキュリティに係る評点の推移

(a) 総合的評価の推移

さらに長期に亘る過去の推移の評価を行うため、エネルギー関連統計を探索したところ、第一次石油危機が発生した 1973 年のエネルギー供給に係るデータの存在が確認された。しかしながら、

a) 当時 OECD 加盟国でなかった韓国、及び EU のデータが存在しない

b) エネルギー輸出入価格に係る適切なデータが存在しない

ため、比較検討対象を加、仏、独、伊、日、英、米の 7 ヶ国とし、また、単位 GDP 当たりのエネルギー輸入額に代えて、経済面の評価とはならないが、エネルギーに輸入量の割合を示すエネルギー自給率を採用して、上記 7 ヶ国に関しエネルギーセキュリティの評価を行った。

試算結果は、図 2-8 に示すように、わが国のエネルギーセキュリティに係る評点は、1973 年の 44 程度から 2005 年には 48 程度までに着実に上昇してきていることが示される。これは、わが国が、石油危機以降、推進してきた総合的なエネルギー政策の成果と評価されるものと考えられる。

わが国と同様、評点が上昇した国としてはフランスがあり、特に、1970 年代から 1990 年にかけて大きく上昇しているが、これは、同国が原子力発電開発を推進した時期と符合する。

一方、評点が下降した国としては米国があり、これは 1970 年代に国内石油生産がピークを迎え、石油輸入が増加してきたことによるところが大きいと考えられる。

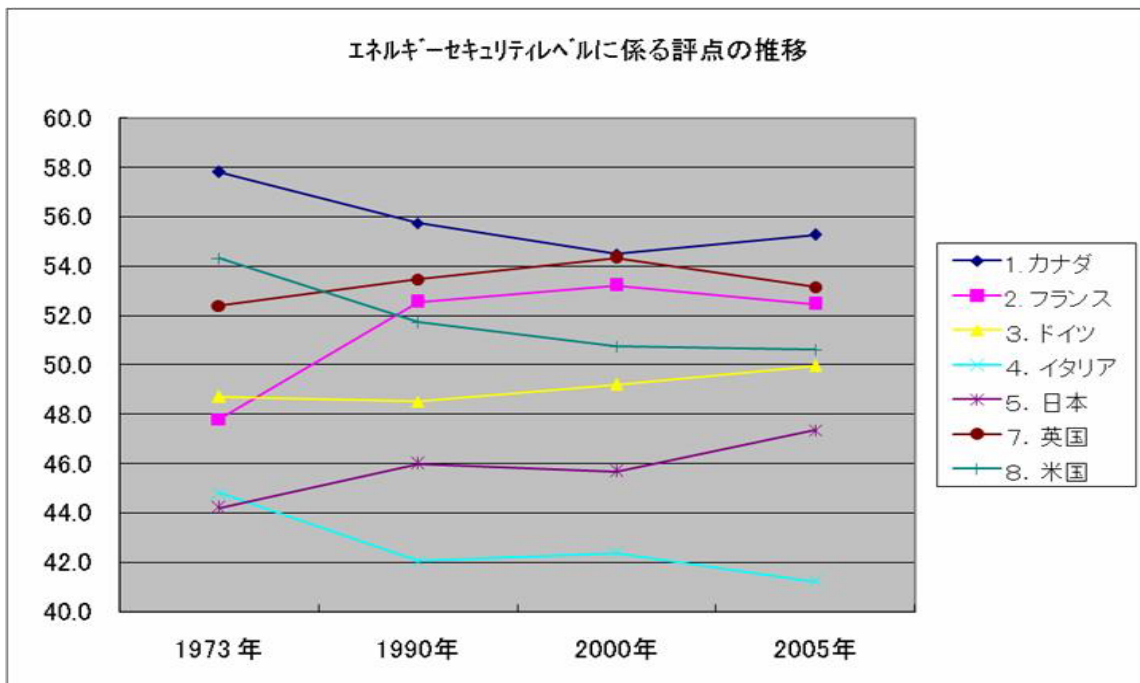


図 2-8 1970 年代以降のわが国のエネルギー供給セキュリティに係る評点の推移

(b) 指標毎の推移

指標毎に見ると、わが国の場合、多様化指数が大きく改善しており、これは、石油代替エネルギー導入による多様化推進の成果と考えられる。また、一次エネルギー供給量/GDPにより示されるエネルギー利用効率は一貫して高水準にある。

わが国以外では、フランスのCO₂排出指数が大きく改善しているが、これは原子力発電の伸長によるものと考えられる。また、英国も1970年代以降の国内石油・天然ガスの増産により中東ロシア依存が大きく改善している。一方、ドイツはエネルギー供給のロシア依存度が高まり中東ロシア依存度が大きく低減している。

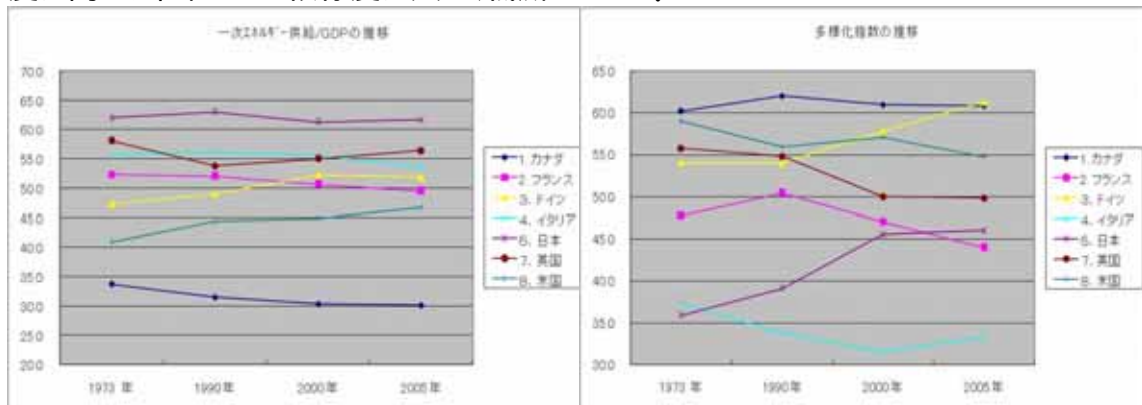


表 2-9-1 一次エネルギー供給/GDPに係る評点の推移

表 2-9-2 多様化に係る評点の推移

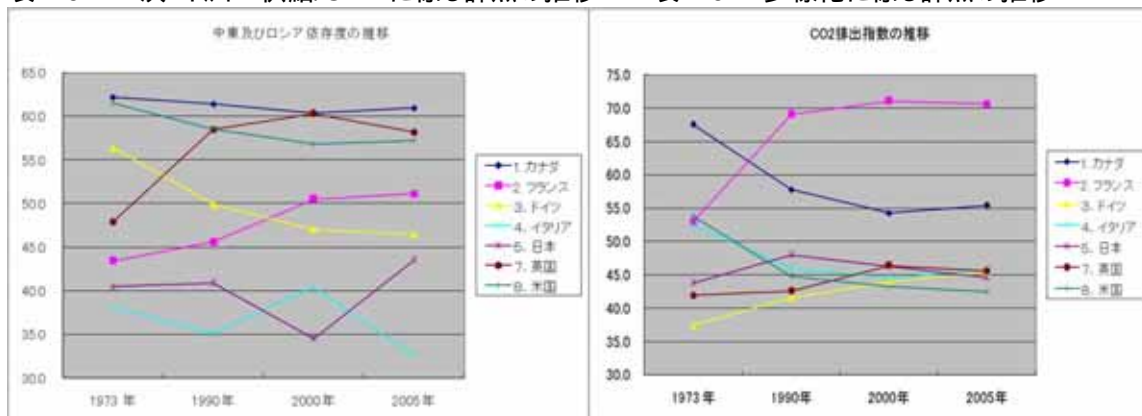


表 2-9-3 中東及びロシア依存に係る評点の推移

表 2-9-4 CO₂ 排出に係る評点の推移

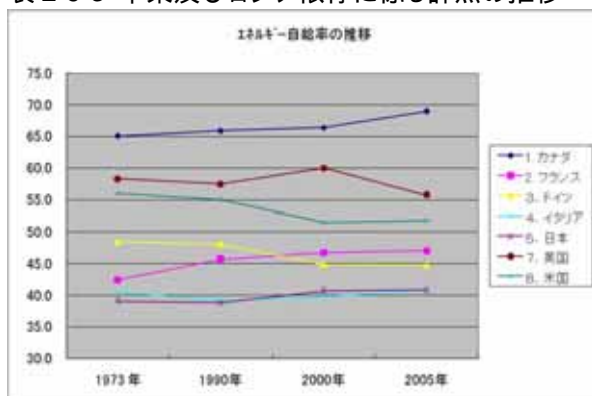


表 2-9-5 エネルギー自給率に係る評点の推移

図 2-10 主要エネルギー消費国のエネルギー供給に関する
セキュリティレベルに係る評価

表 2-6 主要エネルギー消費国のエネルギー供給セキュリティに係る評点

	一次エネルギー供給/GDP	多様化に係る指数	中東及びロシア依存度	CO ₂ 排出に係る指数	化石燃料輸入/GDP	総合
カナダ	0.33(52)	0.26(60)	3.9(58)	0.55(56)	0.58(72)	60
フランス	0.19(55)	0.32(50)	29.0(48)	0.40(71)	0.35(44)	54
ドイツ	0.18(55)	0.26(61)	31.7(47)	0.66(46)	0.33(45)	51
イタリア	0.16(56)	0.36(43)	73.5(30)	0.66(47)	0.39(43)	44
日本	0.11(57)	0.31(51)	45.5(41)	0.66(46)	0.25(47)	48
韓国	0.34(52)	0.30(52)	62.8(34)	0.66(46)	0.87(29)	43
英国	0.14(56)	0.30(54)	13.7(54)	0.65(47)	0.01(55)	53
米国	0.21(55)	0.28(57)	7.6(56)	0.69(44)	0.23(48)	52
EU	0.19(55)	0.25(61)	29.6(47)	0.61(51)	0.25(47)	53
ブラジル	0.31(53)	0.37(42)	0.00(59)	0.44(67)	0.00(55)	55
中国	0.91(41)	0.46(25)	0.19(59)	0.81(32)	0.00(55)	42
インド	0.83(42)	0.31(52)	0.05(59)	0.62(50)	0.00(54)	51
ロシア	1.85(21)	0.37(42)	0.00(59)	0.63(49)	0.05(56)	45

(注) ()内数値は、偏差値算出による評点を示す。

(7) 主要エネルギー消費国のエネルギー供給構造の特徴

主要エネルギー消費各国及び地域のエネルギー供給構造の特徴は、表 2-7 に示すようになる。

表 2-7 主要エネルギー消費 12 ヶ国のエネルギー供給構造の特徴

	エネルギー供給構造の特徴
カナダ	<ol style="list-style-type: none"> 1. エネルギー資源大国であり、石油、石油製品、天然ガスとも輸出国。エネルギー利用効率は劣るが、セキュリティレベルは 8 ヶ国中最も高い。 2. 電力供給は水力が 6 割、原子力が 1/6 を占めることに示されるように、CO₂ 排出度は良好である。 3. 米国と同様、石油消費の約半分が自動車用燃料である。
フランス	<ol style="list-style-type: none"> 1. 原子力比率が電力供給の 8 割、一次エネルギー供給の 4 割超を占める。その結果、多様化に係る評点が低くなる一方、CO₂ 排出度は極めて良好である。 2. エネルギー及び電力利用効率率は平均レベルにある。
ドイツ	<ol style="list-style-type: none"> 1. エネルギー供給は多様化性が高いが、電力は石炭が 5 割。 2. 石油供給の 1/3、天然ガス供給の約 4 割をロシアに依存。 3. 石炭、石油のシェアが高く CO₂ 排出度は良好でない。
イタリア	<ol style="list-style-type: none"> 1. 石炭比率は低く、原子力ゼロで石油、天然ガス依存が高く(電力は約 5 割)、多様性に係る評点が低い。 2. エネルギー供給の約 4 割が中東、約 3 割がロシア依存。 3. エネルギー利用効率が平均を上回る点を除けば評価される点はなく、全体として劣位にある。

日 本	<ol style="list-style-type: none"> 1. エネルギー利用効率に優れるが、石油シェアが約 50%と高く、多様化指数が劣る。また、中東依存度が高く、調達に係る構造は脆弱である。 2. 電力供給は、電力利用効率に優れ、また、バランスがとれ、多様化指数は高い。エネルギー供給に比べセキュリティ度が高い。
韓 国	<ol style="list-style-type: none"> 1. 石油のシェアが日本と同程度、かつ、中東依存度が過半と高く、5つの指標とも平均を下回る。 2. 電力供給は、原子力比率が4割程度あり、多様化指数、CO₂排出度とも平均レベルにあるが、全体として劣位にある。
英 国	<ol style="list-style-type: none"> 1. 近年、石油輸出量が低減しているが、2005 年時点では石油輸出国であり、エネルギー供給、電力供給ともセキュリティレベルは高い。 2. 電力供給は、原子力比率が 20%程度あり、石炭、天然ガス、原子力とバランスも良い。
米 国	<ol style="list-style-type: none"> 1. 石油消費の過半が自動車用燃料であり、石油の安定確保が重要課題。1970 年代以降、石油の生産量が低減傾向にあり、石油の輸入が増加。 2. 電力供給は、石炭が半分を占め、原子力は天然ガスと同程度の約 20%で石炭に次ぐシェアを占める。 3. エネルギー供給、電力供給とも、平均以上のセキュリティ度を有する。
E U	<ol style="list-style-type: none"> 1. 全体としてバランスのとれたエネルギー供給構造であり、多様化の点で優位にある。その他の指標もいずれも平均以上であり、エネルギー供給、電力供給ともセキュリティレベルは高い。 3. 電力供給に占める原子力比率は 30%程度と高いが、域内では推進国と脱原子力国が拮抗している。
ブラジル	<ol style="list-style-type: none"> 1. 一次エネルギー供給の約 4 割が石油であるが、近年、石油生産が増しており、輸入依存度は 4%程度と低い。 2. 電力供給の約 8割が水力であり、エネルギー供給でも 15%程度を占め、これが CO₂ 排出度の向上に貢献している。原子力発電は、2 基、200 万 kWで電力供給に占めるシェアも2%程度である。
中国	<ol style="list-style-type: none"> 1. 石炭がエネルギー供給の 6 割、電力供給の8割を占め、多様化及び CO₂ 排出度が低い要因となっている。 2. 輸入石油が一次エネルギー供給の 7%を占めるに過ぎず、中東依存度も低い、今後は増加が見込まれる。 3. 急速に原子力発電開発を進めているが、2005 年時点では電力供給の 2%程度を占めるに過ぎない。
インド	<ol style="list-style-type: none"> 1. 一次エネルギー供給の約 4 割を国内の石炭、約 3 割を薪等が占め、輸入石油は約 2 割程度で、調達構造は左程悪くない。 2. 電力供給の約 7 割が石炭で、原子力発電の比率は2%程度。
ロシア	<ol style="list-style-type: none"> 1. 資源大国であり、原油・石油製品及び天然ガスの大輸出国で、総輸出量は同国の一次エネルギー供給量にほぼ匹敵する。資源量の豊富さからエネルギー利用効率は極端に低い。 2. 電力供給の約5割が天然ガスであり、原子力発電は 2,300 万 kW の容量で供給の 1/6 を占める。

5．今後の課題

（１）評価軸の選定の裁量性及び相関性

本論では、わが国のエネルギー政策の３つの評価軸、すなわち、安定供給、環境保全、及び、経済性を踏まえて５つの評価指標を設定しているが、この他に、社会受容性、技術開発力等の想定され得る評価軸がある。これらの評価軸については、定量化し難いが、今後、定量化し得る指標設定も含め、採用の可能性について検討が必要である。

また、各評価指標に係る評点を合計して総合評価点を算出するには、評価軸が相互に独立していることが必要である。しかしながら、多様化指数や CO₂ 排出に係る指標は、前述のようにエネルギー供給構成比に依存しており、また、エネルギー利用効率とエネルギー価格高騰の経済への影響度は、GDP 当たりの数値であることから GDP の動向に影響される。このような指標の間には相関係数を設定し評点を調整するような工夫も必要である。

（２） 評価軸のウェイト付け

エネルギー政策における重点は、各国や地域において異なっている。わが国においては、前述のとおり、石油依存度の一層の低減を含むエネルギーの安定供給を最優先とする政策展開がなされている。米国においても、石油輸入の中東依存度の上昇を背景に、2005 年にはエネルギー政策法を制定し、エネルギー自立を標榜し、原子力発電の推進を含む国内のエネルギー供給能力の拡大を政策目標としており、先進再処理技術開発、高速炉開発等によりプルトニウム利用を推進する国際原子力エネルギーパートナーシップ（GNEP）構想も同政策の一環をなすものである。また、中東依存からの脱却を目指し自動車用燃料の多様化を推進する等の政策を推進している。一方、欧州諸国では、気候変動問題に重点を置き対策を強化する政策を進めている。

本論では、５つの評価指標は同等のウェイトを持つとして、各評価指標に係る評点を単純合計して総合的な評点を算出しているが、エネルギー政策に係る重点は、エネルギー需給の状況、国際的な政治経済動向などにより異なっており、その状況に応じた評価指標の重要度に応じて評点を重み付け加算することが適当である。

各評価指標のウェイト付けには階層分析法（AHP）を採用することが考えられ、同法で用いられる一対比較に当たっては、その時々状況分析、あるいは、関係者へのアンケート調査などが必要になる。試みに、安定供給＞環境保全＞経済性という重要度設定を仮定して、階層分析法（AHP）により各指標のウェイト付けを行い、わが国のエネルギーセキュリティに係る評点を加算すると、総合評点は、単純合計が 49.3 であるのに対し、加重加算を行うと 50.3 と若干の増加が見られ、わが国のエネルギー供給に係る政策は、上述のウェイト付けと方向性が概ね一致していることが示される。

参考文献

- 1) 山田英司、“先進諸国との比較におけるわが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究”、日本原子力学会和文論文誌、Vol.6, No.4, 383-392 (2007)
- 2) ㈱三和総合研究所、“石油製品品質需給対策調査(エネルギーセキュリティの定量分析)調査報告書”、(2001)
- 3) UFJ 総合研究所、“政策評価に際しての施策の評価手法の検討(エネルギーセキュリティ向上に対する貢献度の定量的評価手法について)”、(2005)
- 4) 内山洋司、高橋圭子、斉藤雄志、“経済性、セキュリティ、リスクから見たわが国の最適電源構成の検討”、電力経済研究 No.20, (1986)
- 5) 戒能一成、“エネルギー安全保障の定量的評価の研究”、文部科学省学術フロンティア推進事業(慶応大学 G-SEC 黒田班) (2004)
- 6) エネルギー産業研究会編、“石油危機から 30 年 エネルギー政策の検証”、㈱エネルギーフォーラム、(2003)
- 7) 入江一友、“エネルギーセキュリティ”、エネルギーの外部性と原子力、(社)日本原子力学会、160-162 (2006)
- 8) 伊藤憲一、“国家と戦略”、中央公論社、227-231, 271-275 (1985)
- 9) 石井吉徳、“安く豊かな石油時代が終わる - 石油ピークの意味するところ - ”、季報エネルギー総合工学、第 28 巻第 1 号、4 - 13 (2005)
- 10) 本村眞澄、“ピークオイル説を検証する”、季報エネルギー総合工学、第 28 巻第 2 号、75-82 (2005)
- 11) 経産省総合資源エネルギー調査会需給部会(2003 年 12 月 6 日)配布資料
- 12) BP Statistical Review of World Energy 2006
- 13) 国際エネルギー機関 / 経済協力開発機構(IEA/ OECD)、Energy Balances of OECD countries 2007
- 14) Crude Oil imports from Persian Gulf 2005, Energy Information Administration, DOE
- 15) IEA Energy Statistics of OECD countries 2007
- 16) IEA Quarterly Statistics Oil, Gas, Coal & Electricity 2006
- 17) 小田潤一郎、“日本のエネルギー・セキュリティと多様化”、(2002)
- 18) 矢島正之、“エネルギー・セキュリティ”、東洋経済新報社、33 - 34、(2002)
- 19) 経済産業省編 “エネルギー白書 2006 年版”、149 (2006)
- 20) 日下部眞一、“回帰偏差値の考案とその効用: 地域間格差を相対評価する偏差値”、広島大学総合科学部紀要理系編、第 28 巻、109-126、2002 年 12 月
- 21) 京都大学経済学部藤井ゼミナール論文編集委員会、“非財務情報の有用性に関する実証研究”、藤月会論集第 16 号、2007 年 1 月
- 22) ㈱東洋経済新報社「全都市住みよさランキング」、毎年刊行
- 23) (財)エネルギー経済研究所・計量分析ユニット編“EDMC / エネルギー・経済統計要覧”、各年度版

第 章 リスク要因を踏まえた原子力開発利用シナリオの分析

1. 本章の研究の目的

(1) 原子力開発利用を巡っては、多様なステークホルダー(利害関係者)が関与する。議会や行政当局が原子力開発利用の方向性を定める環境の下、電気事業者、原子力プラントメーカー、研究開発機関等が推進する立場に立つのに対し、立地地域においては自治体、議会、地域住民が厳重な安全確保や地域振興を要請し、また、規制当局、国際機関、マスコミ、調査研究機関等が中立的な立場で活動し、さらに、多種・多様な NGO や市民グループが存在する。海外では、これらに加え、米国においては“ウォールストリート”と呼ばれる金融業界は原子力発電所の新規建設に大きな発言力を持つ。また、グリーンピースのような過激な反対派の活動があるほか、原子力施設や核燃料を対象とするテロの懸念も否定できない。これら機関・団体等が、それぞれに推進・慎重・反対の立場をとり、原子力開発利用に係る案件毎に、それぞれの立場から物申す環境にある。すなわち、原子力開発利用は多様なリスク要因に取り囲まれ、エネルギー需給や地球環境問題解決といった技術の観点から論ずるだけでは十分でなく、国や立地地域における政治状況、社会の受容環境、国際関係等におけるバランスの中で推進して行かざるを得ないと言える。

原子力開発利用は、将来の主要なエネルギー源と期待される一方、多様なリスク要因に取り囲まれており、その開発利用の方向やテンポは想定し難い面がある。そのような将来の不確実性に的確に対応して行くには、相当に極端なケースも含めシナリオ設定を行い、それが現実のものとなった場合の対応策を検討しておくことは有効と考えられる。

(2) 先行の研究事例を見た場合、原子力委員会策定の原子力開発利用長期計画に係る平成 17 年改定(「原子力開発政策大綱」という。)の際の審議¹⁾では、使用済燃料処理処分のあり方に関し全量再処理方式と直接処分方式との比較評価を行っているが、基本的には順調な進捗を前提としており、その性格上、リスクの顕在化を考慮した最悪事態の想定は行っていない。池田、田下、氏田及び松井による原子力の役割に係る研究²⁾では、原子力を環境、経済及びエネルギーの枠組みの中で捉え、原子力に関し3つのシナリオ(脱原子力、FBRの有無)を設定し原子力あるいは核燃料サイクルの必要性、原子力が持続可能で主要なエネルギー源であるための要件等について考察しているが、ウラン資源量の制約を除いては原子力を巡るリスク要因について考慮されておらず、また、総合的なエネルギーセキュリティへの影響については CO₂排出量以外は考察がなされていない。大森及び堀井によるエネルギー危機の分析と日本の科学技術戦略に係る研究³⁾では、2030 年頃までに想定されるアジア地域におけるエネルギー危機を検討した上で、シナリオプランニング手法を用いて中国の進む方向を軸にナリオ分析を行った上、新型炉などの革新的原子力システムが想定される危機シナリオの影響緩和に果たす役割に関し評価を行っているが、原子力開発利用自体のリスク要因については分析を行っていない。さらに、わが国のプルトニウム利用については、さまざまな研究者や機関がFBR導入に関し見通しを作成しているが、導入テンポには差はあるがFBRが導入されることを前提にしている。

(3)本章では、原子力開発利用を取り巻く種々のリスク要因に関し主要各国における原子力開発利用を事例に分析を行う。そのうち、わが国の原子力開発利用に大きな影響を与えることが懸念されるリスク要因をシナリオドライバーとして数種のシナリオ設定を行う。

2. 原子力を巡るシナリオドライバーの抽出と分岐シナリオの設定

(1) 前述したように原子力開発利用を巡るステークホルダー(利害関係者)は多様であり、その開発利用を阻害する可能性があるリスク要因も各種ある。図3-1に示すように、それらリスク要因は、発生が予見可能か否かによる時間的な次元、意図的か否かによる主体的な次元により分類できるが、

- (a)実際に発生しているか、
 - (b)発生する蓋然性があるか、
 - (c)原子力開発利用へ与える影響の甚大性
- 等を考慮して重大なリスク要因を抽出する。と表3-1のようになる。

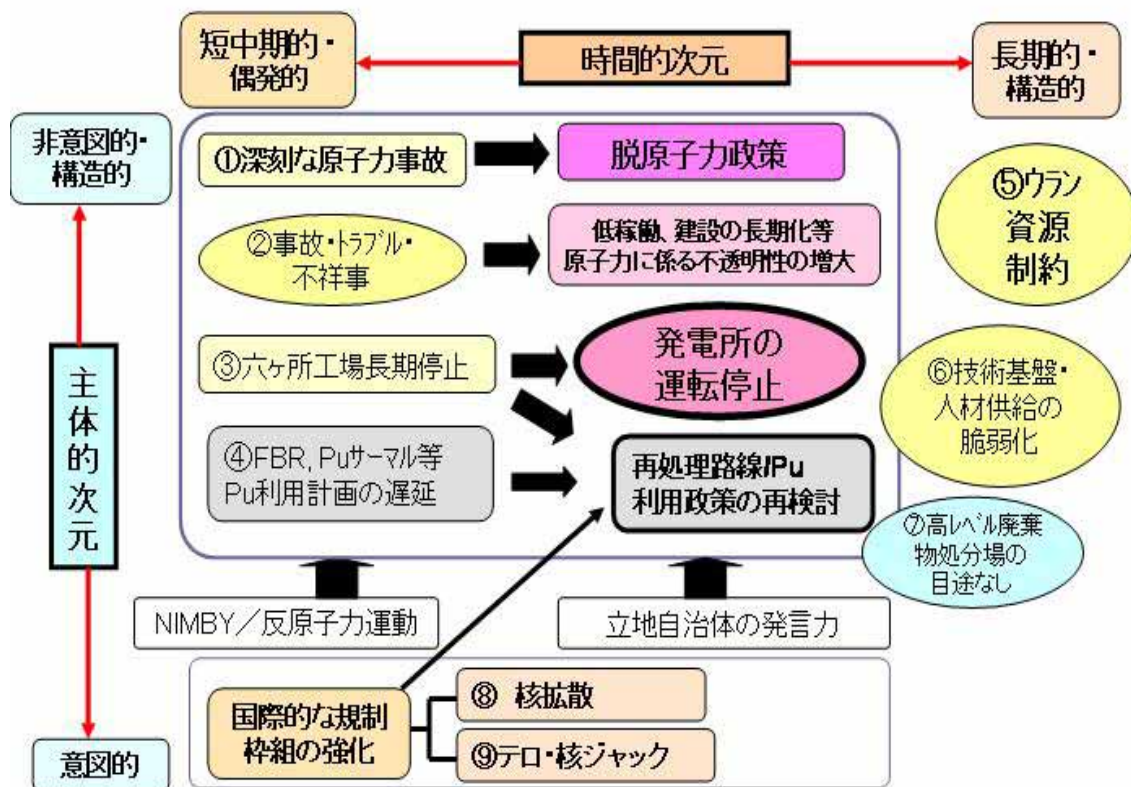


図 3-1 原子力を巡るリスク要因

表 3-1 原子力開発利用に係るシナリオドライバーの抽出

リスク要因	懸念される事態及び事例
1. 深刻な原子力事故	なにより影響が甚大。TMI 事故及びチェルノヴィル事故は、欧米諸国において、原子力の社会的受容性の低下、脱原子力政策への転換等をもたらしている。
2. 運転・建設に係る不透明感	低稼働あるいは建設期間の長期化は、投資回収性の疑問から、原子力が電源の選択肢から除外される懸念が発生。米国では、1980 -90 年代、規制、使用済燃料処分の不透明性から原子力発電は低迷
3. 技術力や人材に係る制約	米国は長い冬の時代に機器の製造能力やプラント建設エンジニアリング能力を喪失した。また、大型圧力容器や蒸気発生器の製造能力の制約は”原子力カルネッサス”の隘路になる懸念あり。
4. 再処理工場の長期停止	プルトニウム利用の遅延あるいは再検討のみならず、サイト内の使用済燃料貯蔵容量に余裕がない場合、原子力発電所の運転停止を余儀なくされる懸念がある。
5. ウラン資源制約	確認ウラン埋蔵量に係る可採年数は約 100 年と、石油 41 年や天然ガス 65 年よりは長い、世界的な原子力発電の増加を考慮すると、ウラン資源量が開発の制約となる懸念あり。

(2) それらのリスク要因をシナリオドライバーとして、時間軸に沿った分岐シナリオを作成する⁴⁾。同シナリオに、先進諸国の現状を当てはめると、図 3-2 のようになる。

分岐シナリオにおいて、シナリオドライバーは、(a)実際に発生したもの、(b)発生する蓋然性がある、(c)発生する場合影響が大きいものの順に並べており、発生の確率を軸とした配置となっているが、時間の観点から見ると、発生に備えて対策の準備に費やすことができる時間的余裕を軸とする配置ともなっている。

各国のシナリオ上の位置を見ると、わが国は、現在、原子力発電所は世界的レベルから見ると低稼働状況にあるが、電源の選択肢から外されることもなく、また、欧米が“冬の時代”にある時も継続的に原子力発電所建設が続いたこともあり、欧米に比して技術力や人材も確保できており、「窓際シナリオ」、「制約シナリオ」に陥ることは免れている。現在（2008 年 8 月）、初の商用再処理工場が運転開始直前の段階にあり、同工場が円滑に運転されるか否かにより、ウラン核燃料の燃焼に伴い生成されるプルトニウムの利用を図ることが可能となるリサイクル社会への道が開けるか、原子力の有する利点を生かせず実力を封じる「実力封殺シナリオ」に陥るかの分岐点に位置していると言える。

ドイツとイタリアは、脱原子力政策により原子力開発利用は差し止められており、それらの国々における政治的な潮流が変わるのを待つ状況にある。

英国は、原子力発電の先鞭をつけた国であり、ガス冷却発電炉路線を推進したが、豊富な国内化石燃料資源（石油・天然ガス・石炭）の存在により、特段、脱原子力政策を採択している訳ではないが、1980 年代半ば以降新規炉の着工はなく、事実上、モラトリアムの状況にあり、分岐シナリオでは「窓際シナリオ」に位置している。

米国は、原子力に係る多様な不透明性が解消し「窓際シナリオ」から脱却して回復期にあるが、20 年以上に及ぶ長い“冬の時代”に製造能力や人材を喪失しており、次のステップである「制約シナリオ」に陥る懸念がある。同図にはないが、大規模な原子力発電計画を有する中国も、その計画に見合った人材(特に品質管理)が確保できるかどうか大きな課題である。なお、1980 年代以降の米国原子力開発利用の停滞と回復に係る要因分析は添付参考で論述する。

カナダは、その豊富なウラン資源から、原子力開発の当初からプルトニウム利用を指向しておらず、また、韓国は、国際的な核不拡散環境の下、商業用再処理を推進する状況にない。

フランスは、国が主導的に原子力開発利用を推進しており、原子力発電、核燃料サイクルとも世界をリードする技術的基盤を形成してきている。

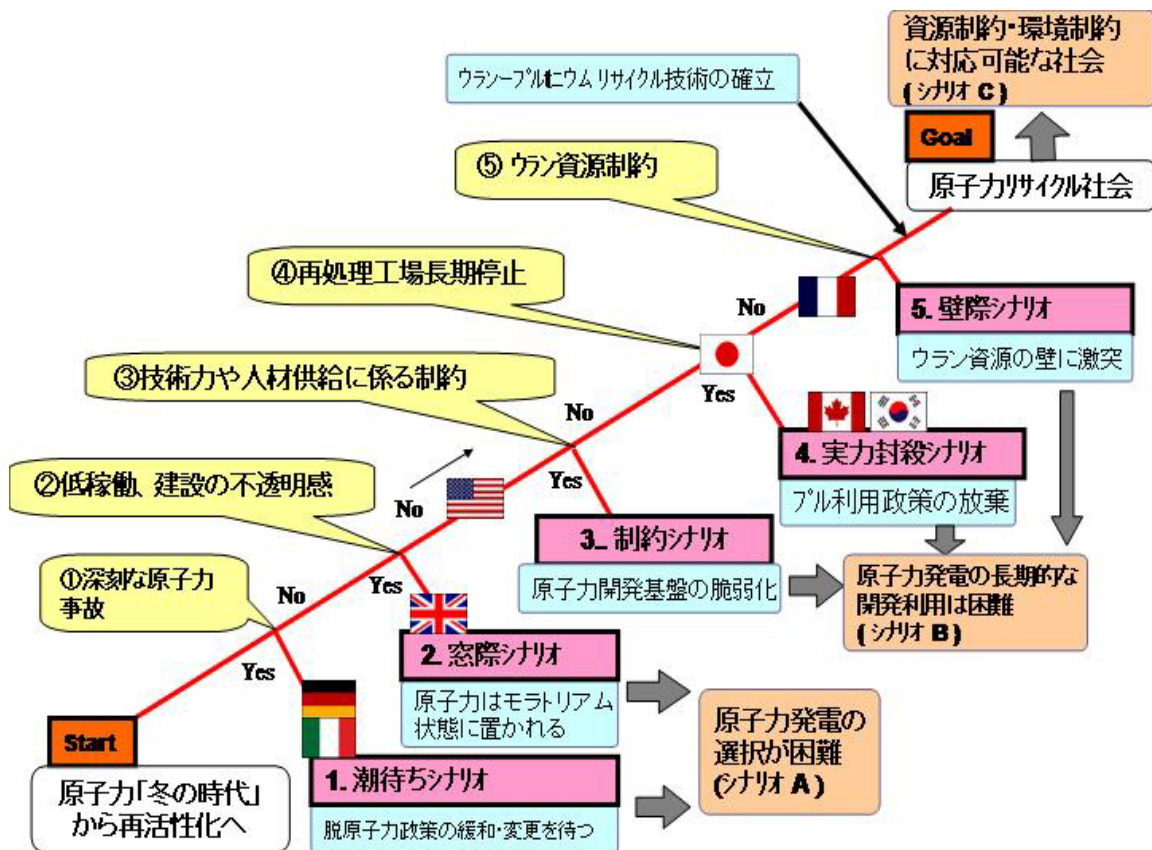


図 3-2 原子力開発利用に係る分岐シナリオ

3. 各シナリオドライバーに起因するシナリオの概要

(1) 深刻な原子力事故に起因する「潮待ちシナリオ」

原子力開発利用にとって、なにより影響が甚大なのは、深刻な原子力事故の発生である。1979年のTMI事故及び1986年のチェルノヴィル事故は、原子力の社会的受容性を著しく低減させた。欧州各国では、表 3-2 に示すように、原子力政策の見直しが行われ、TMI事故を契機にスウェーデンで、また、チェルノヴィル事故を契機にイタリアでは脱原子力政策が選択され、さらに、環境重視の「緑の党」の勢力が伸張り政権に参加し、ドイツでは2002年に、また、ベルギーでは2003年に脱原子力政策が採択されるに至っている。イタリアでは、他の脱原子力政策国と異なり既に商用原子力発電所は廃止されている。

ドイツでは、脱原子力政策に舵切りをした社民党、緑の党等の連立政権が2005年に交代した後も、政策の転換はなされていない。一方、イタリアは電力需要の15%を輸入し、また、エネルギー供給の主力である天然ガス(一次エネルギーの38%、電力の33%を供給)^{5) 6)}輸入に関しロシア及びアルジェリア依存度低減のため、原子力発電導入を進めようという動きはあるが、実現は不透明である。これら諸国が原子力開発利用を推進するようになるには、社会の潮流が大きく変化するのを待つことが必要であると考えられる。

表 3-2 欧州諸国における脱原子力政策の状況

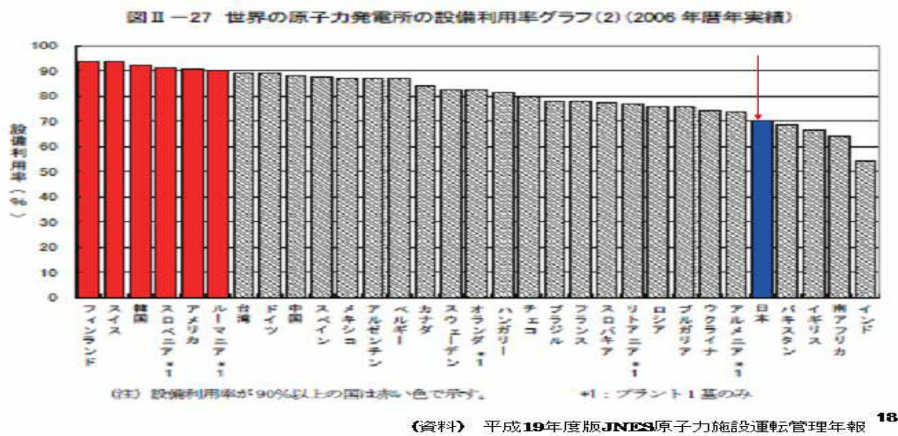
国 名	原子力発電の状況 ()内は 2005 年実績	原子力政策の動向
スウェーデン	10 基, 932 万 kW (発電電力量の 46%)	1. 1980 年の米国 TMI 事故直後の国民投票結果を踏まえ、2010 年までに原子力発電所の廃止を決定 2. 代替電源の見通しが立たず、全廃期限は撤廃されたが、順次、撤廃を予定
イタリア	7 基 611 万 kW (発電電力量の 0%)	1987 年のチェルノヴィル事故直後の国民投票結果を踏まえ、原子力発電所の廃止を決定
ドイツ	17 基 2,137 万 kW (発電電力量の 27%)	1. 2002 年、社会民主党及び緑の党の連立政権の下、脱原子力法が成立。同法に沿って 12 基の原子炉が運転を終了。 2. 推進と脱原子力の大連立政権でも上記政策を継続中
ベルギー	7 基 611 万 kW (発電電力量の 56%)	2003 年、脱原子力法が成立、建設 40 年を経たものから順次閉鎖を予定

(資料) 経産省「エネルギー白書」、IEA 統計資料(2006)、原子力産業協会「世界の原子力発電の動向」等から作成

(2) 原子力開発利用に係る不透明性に起因する「窓際シナリオ」

原子力発電施設における事故、トラブル、不祥事等の発生は、批判的な世論の高まりや立地地域の発言力の増大等の社会的な受容性の低下、規制の合理化の遅延ばかりか規制の強化等により、原子力発電の建設・運転に関し不透明性が高まる。

わが国においては、1990 年代半ば以降の一連の地震災害、トラブル・不祥事等により、設備利用率は、2005 年には 70% 前後と原子力発電国中ワースト第4位まで低下している(図 3-3)⁷⁾。また、立地に係るリードタイム(立地自治体への正式な立地申入れから運転開始までの時間)は、図 3-4 に示すように、1960 年代に立地申入れがなされた炉が 10 年未満であったのに対し、70 年代以降申入れ炉は 20 年を超すようになり、立地担当者にとって「一生一炉」とまで言われるようになってきている。実際、現在、商用原子力発電の 18 サイトのうち、16 が 1960 年代に立地申入れを行ったものであり、今後も新規サイトの確保は容易でないと見込まれる。



【資料】平成19年度版 JNES 原子力施設運転管理年報 18

図 3 - 3 世界の原子力発電設備利用率の比較

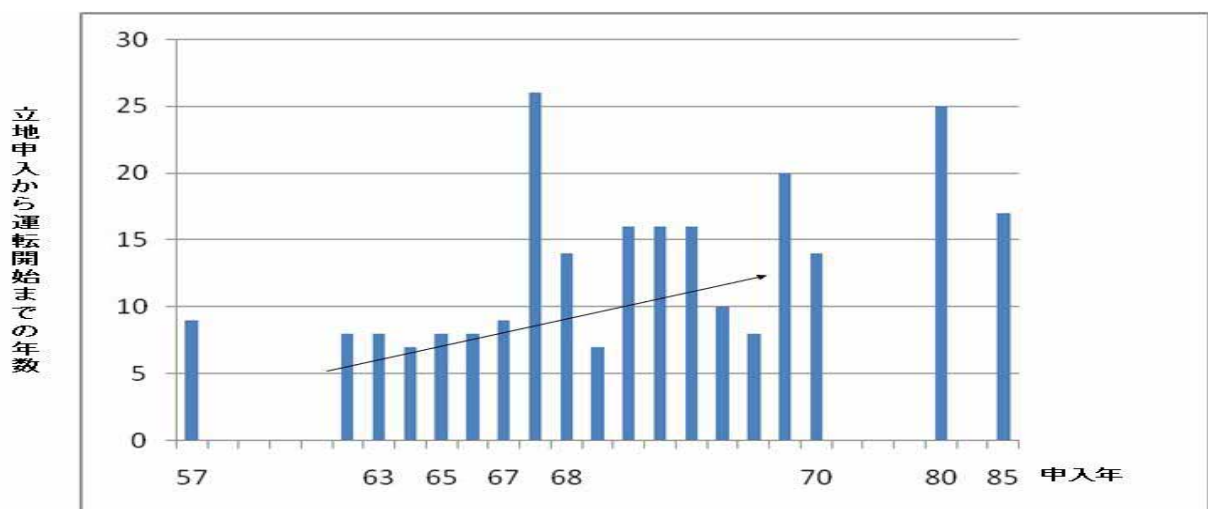
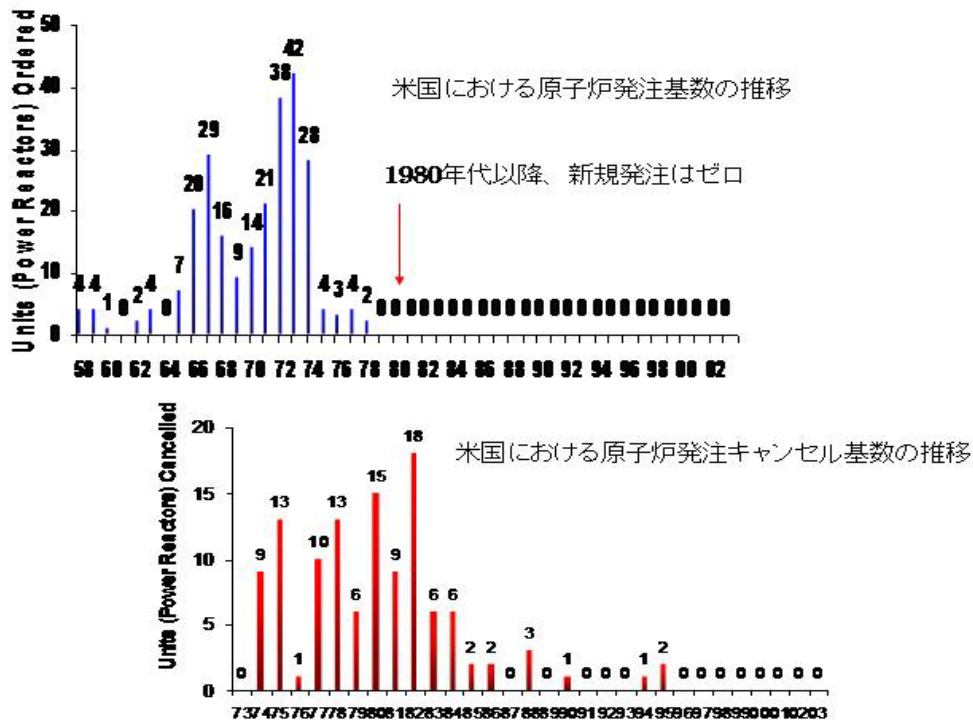


図 3-4 新規サイトの確保(申入れから運転開始まで)に要する年数の推移

米国では、図 3-5 に示すように、1979 年の TMI 事故を契機に、新規発注は皆無となり、既発注分もキャンセルが相次ぐ等原子力発電は新規電源の選択肢から外され、いわゆる“窓際”の状況に追いやられ、長い「冬の時代」が続いた。これは、電力需要低迷や電力自由化の環境の下、規制の強化やバックフィット、NIMBY(Not in my back yard)という言葉に示される立地反対運動等により原子力発電所の立地から運転開始に至る時間的な不確実性が高まりに伴い、投資回収性に疑問が生じ、いわゆる“ウォールストリート”が慎重になったことによるとされる⁸⁾。



(資料) EIA/DOEより作成

図 3-5 米国における原子炉の発注基数及びキャンセル基数の推移

英国は、世界初の商業用原子力発電を行っており、2008 年1月現在、19基、1,195 万kW(世界第 9 位)の原子力発電容量を有し⁹⁾、発電電力量の約 22%を担っている。しかしながら、同国は、豊富な石油・天然ガス・石炭資源を有し、エネルギー自給率は100%を超える状況にある。このため、特段、脱原子力政策を採択しているわけではないが、北海油田・ガス田の生産が本格化した1987年に英国唯一の PWR が着工した以降、新規原子炉建設は途絶え、今後の新規建設計画はなく、英国の原子力開発利用は既存発電施設の利用に留まる、いわゆる、モラトリアムの状況にある。今後、この状況が継続する場合、既に閉鎖されている1950年代から60年代にかけて運転開始したマグノックス炉に加え、1970年代から80年代にかけて運転開始された改良型ガス炉も2020年代には耐用年数を迎えることから、原子力発電容量は徐々に低減していく見込みである。なお、北海の石油・ガス生産の減少、地球環境問題への関心の高まりから、これまでの新規原子力発電所の建設提案はしないという原子力モラトリアム政策を転換して、2008年1月に原子力推進政策を発表した¹⁰⁾が、それに応じて民間投資が行われるか不透明である。

（３）製造能力喪失や人材不足に起因する「制約シナリオ」

中期的な課題としては、原子力機器の製造能力や人材確保が制約要因となる可能性もある。米国では、既設炉の好調な設備稼働や寿命延長等の競争力向上に加え、規制の合理化、使用済燃料処分に係る国の引取責任の法制化等原子炉設置に係る不透明性が減少し、新規発注の動きが出てきている。しかしながら、表 3-3 に示すように、米国の原子力産業は、1980 年代以降の長い冬の時代に原子炉設備の製造能力、プラント建設に係るエンジニアリング能力を喪失している⁸⁾¹¹⁾。単基当たりの原子力発電容量の増大に伴い、高い信頼性を有する大型圧力容器や蒸気発生器の製造施設が限られ、「原子力カルネッサンス」の隘路になるのではないかと懸念もある。

表 3-3 原子力「冬の時代」の米国原子炉メーカーへの影響

維持したもの	失ったもの
○中核となる原子炉設計者 ○原子炉設計評価分析の技術者 ○規制対応の技術者の人材	○原子力機器製造能力 ○プラント建設に係る総合管理ノウハウ ○設計を検証する試験施設

（出所）2005 年 3 月、12 月の米国ワシントン DC における米国政府関係者、原子力プラントメーカー関係者に対するインタビュー調査による。

人材育成は時間を要し、需要に適確に対応して人材供給が可能かどうかに関し懸念がある。米国の場合、図 3-6 に示すように、長い冬の時代には、新規人材の確保は低減し、現時点では働き盛りの 30 歳代の人材が手薄の状況となっている。ただし、原子力特有の炉心設計、規制対応、放射線管理等に係る人材は維持されているとされる¹¹⁾。国際的な原子力産業の再編が進みつつある環境下、継続的なプラント建設経験を通じて製造能力、エンジニアリング能力を維持涵養してきたわが国原子炉プラントメーカーは優位な位置を占めることが期待される。

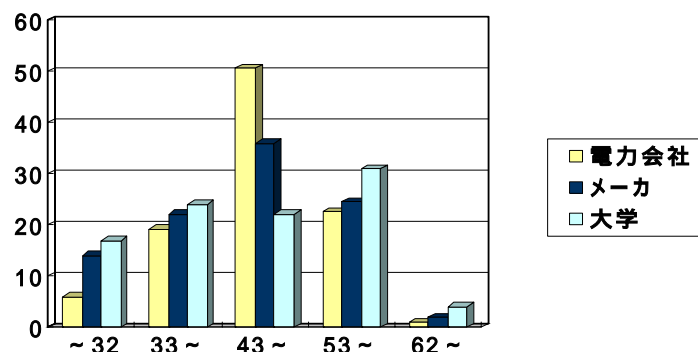


図 3-6 米国における原子力分野人材の年齢別の構成

一方、中国、インド等の途上国は大規模な原子力発電開発計画を有しているが、それらに見合った運転・保守要員が確保されるかどうか問題である。計画の実現のみならず、万一の事故が発生した場合の世界の原子力開発利用への影響などを考慮すると、品質管理に通じた人材の計画的な養成・確保が重要である。

(4) プルトニウム利用の放棄あるいは停滞に起因する「実力封殺シナリオ」

(a) 原子力が化石エネルギー源と異なる最大の利点は、燃料のリサイクル利用、高速増殖炉の開発利用により燃料の増殖が可能点であり、わが国が原子力開発利用を推進する大きな理由の一つもそこにある。プルトニウムは、核拡散リスクを有するが、後述するように、幸いにもわが国は非核兵器国であるが民生用プルトニウム利用が国際的に容認されているというステイタスを有している。

一方、米国は、1970年代後半のカーター政権以降、核不拡散の観点から率先してプルトニウムの民生利用を放棄し、商用再処理工場の建設運転や高速増殖炉開発を中止している。カナダは、自国に豊富な天然ウラン資源を有効利用する重水炉路線を採択しておりプルトニウム利用は行っていない。また、韓国は、現時点では再処理工場を建設する計画はない。

(b) 核燃料サイクル上、最も重要な要因は、使用済燃料及びプルトニウムの需給をバランスさせることである。使用済燃料については、全量再処理の原則の下、使用済燃料は再処理工場に搬出することとされ、一方、プルトニウム需給については、わが国は、使用目的のないプルトニウムは保有しないことを基本方針としており、プルトニウムは、原則、需要に応じて六ヶ所再処理工場で供給されることとなっている。

(c) これらの二つの需給をバランスさせる上で要になるのは六ヶ所再処理工場であり、同工場が順調に稼働する限り、使用済燃料の受入れ 再処理 プルトニウム供給とサイクルは循環していく。しかしながら、一旦、同工場が長期に亘り停止するような場合には、再処理される見込みのない使用済燃料の搬入は認められないとして立地地域自治体が搬入を拒絶すれば発電所サイトから搬出が停止されることとなり、サイト内の貯蔵容量に余裕がない場合、原子炉の停止という最悪の事態にまで発展する可能性がある。なお、表3-4に示すように、使用済燃料の貯蔵の余裕度を、管理容量(貯蔵容量から1炉心分及び1取替分を控除した容量)を取替分使用済燃料発生量で除した値を指標としてみると、2004年3月には同指標が1を割り込む(すなわち、六ヶ所への搬出が1年間停止するような場合は発電所の運転が停止となる。)サイトがあったが、現在では貯蔵容量が拡大しており、そのリスクは低減していると言える。

表3-4 使用済燃料貯蔵の余裕度の推移

年	2003	2004	2005	2006	2007
福島第二	0.9	0.8	2.3	3.0	2.9
浜岡	2.4	2.5	5.3	5.6	4.5
高浜	1.9	1.6	3.5	5.6	4.8

(注) 管理容量とは、貯蔵容量から1炉心分及び1取替分を控除した容量

表の数値は、管理容量と貯蔵量との差分を1取替分で除した数値

(出典)原子力白書各年度版

また、プルトニウム利用サイドでは、1990年代半ば以降、1995年のもんじゅのナトリウム漏洩事故、2001年のBNFLによるMOX燃料の加工データ捏造事件、同年の新潟県刈羽村の住民投票によるプルサーマル計画の否定等、相次ぐ事故・不祥事、立地地域自治体の意向等により、わが国のプルトニウム利用計画は停滞した。今後も、当面のプルト

ニウム需要先であるプルサーマル計画が長期に亘り中断するような場合には、使用目的のないプルトニウムは保有しないという基本方針の下、六ヶ所再処理工場における再処理を停止せざるを得ない事態に至る可能性は否定できない。

(5) ウラン資源制約による「壁際シナリオ」

長期的な課題としては、ウラン資源量が原子力開発利用を推進上のリスク要因として顕在化し、ウラン資源の“壁”にぶつかることが懸念される。ウラン資源制約が顕在化してくる場合、原子力の場合、その克服にはウラン - プルトニウムのリサイクル利用という方策があり、関連技術基盤及び人材を有する国のみが、原子力リサイクル社会の実現が可能となる。

ウラン資源量は、図 3-7 に示すようになる。

- (a) 現時点で存在が確実なのは、「既知資源量」は 550 万トン、及び在庫・備蓄や解体核から得られる「二次資源」100 万トンの計 650 万トンである。
- (b) 確度の高い資源と評価される「予測資源」280 万トン、また、確度の低い「期待資源」770 万トンを加えると、既知、予測及び期待の各カテゴリーに属する在来型資源合計として 1,600 万トン程度（以下「究極資源量」という。）が存賦している。
- (c) 加えて、非在来型資源として、リン鉱石に含まれるウランのうちリン鉱石採掘の副産物として回収されるウランが 40 万トン程度存在し、その他、海水中のウランが存在する。¹²⁾

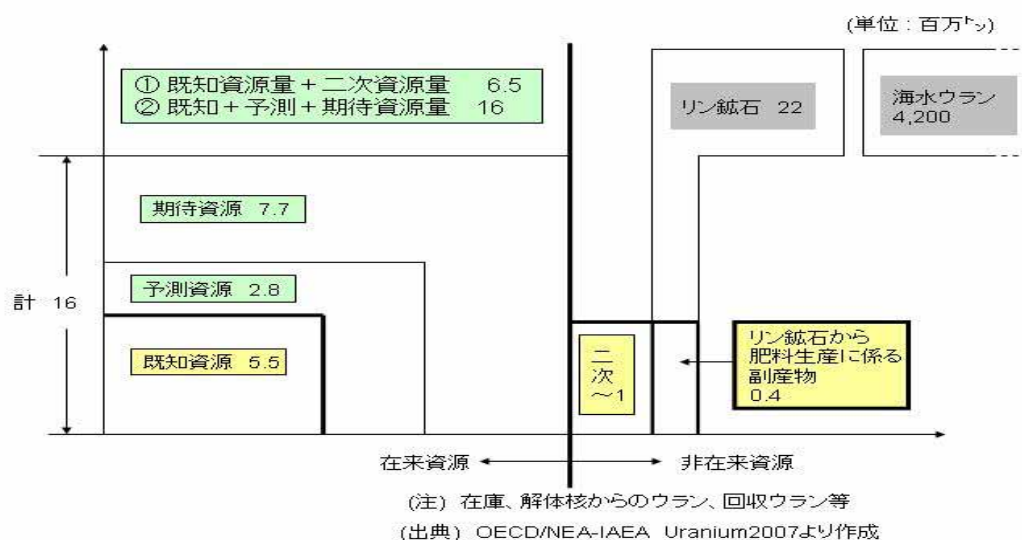


図 3-7 世界のウラン資源量 (カテゴリー別)

ウラン確認資源量の可採年数は約 100 年¹²⁾と算定され、石油の 41 年、天然ガスの 63 年¹³⁾に比べ長いものの、中国、インド等途上国の原子力発電量の増大に伴うウラン資源消費量の増加を考慮すると、今世紀半ば頃にもウラン資源制約が顕在化する可能性も否定できない。世界の主要なウラン鉱山は 1970 年代前後に発見されており、ウラン価格

が低迷し始めた 1980 年以降は採鉱そのものが下火となっていた。1990 年代からは解体核から回収されるウランが市場に供給され価格低下の一因となっていたが、その回収・供給は 2013 年頃には終了し、また、近年のウラン鉱石価格の上昇により、新規鉱山の開発計画が目立つようになってきており、今後、ウラン採鉱開発の進展が期待される。

(6) その他のリスク要因

その他のリスク要因は、以下に述べる状況にあるため、分岐シナリオに係るシナリオドライバーからは除外している。

(a) 「安全・安心」という言葉に示される原子力に係る社会的受容性の確保は、原子力開発利用を推進する上で重要な課題であり、リスク要因と言うより寧ろ前提条件である。本論の分岐シナリオにおいては、シナリオドライバーとして、社会的受容性を著しく損なう「深刻な事故」を採択し、社会的受容性については事故発生の観点から考慮することとしている。

(b) 放射性廃棄物処分は、安全性懸念と並び、原子力開発利用に係る問題として指摘され、その社会的な受容性は十分でなく、現時点でも、処分場立地の見通しは立っておらず不透明要因の一つである。しかしながら、廃棄物処分に係る事業主体の設立及び資金確保といった制度面の整備は済んでおり、また、廃棄物固化体の中間貯蔵施設は運営されており、直ちに原子力発電の運転に支障を及ぼすものでない。

(c) 核拡散は原子力固有のリスクであり、核不拡散体制の強化は、わが国の核燃料サイクルの運営にはマイナス要因になる可能性がある。過去の事例では、1970 年代後半の米国カーター政権の核不拡散政策強化の下に実施された INFCE (国際核燃料サイクル評価) における議論は、わが国が再処理を推進する上で分水嶺とも言えるものであったが、結果として、大規模な原子力発電国 (1980 年当時、20 基、1,500 万 kW) であり計画を有するわが国が再処理を実施することは国際的に容認されるところとなった。その後、核不拡散強化の動きはあったが、主に特定のハイリスクの国を対象としたものと考えられる。わが国の非核兵器国であるが民生用プルトニウム利用が国際的に容認されるというステータスが否定される事態としては、わが国自らが核不拡散条約 (NPT) 規定から逸脱するような行為を行うような場合であろうが、そのような事態は、原子力平和利用というわが国の大方針に反するもので、分岐シナリオからは想定外とする。

(d) 原子力施設へのテロ攻撃や核ジャックなどの犯罪行為は、原子力が有する潜在的なリスクであり、それらの顕在化は原子力の社会的受容性を大きく低下させるものである。しかしながら、対応策や警戒を強化することはあっても、それらの脅威に屈することは現在の社会的な潮流からはないと考えられる。

以上のように、原子力は社会的受容性、国際関係、テロ、軍事面等と関係があり、原子力を技術論だけで論じるのは危ういものがある。それらのリスク回避のためには、国内外の社会や世論の動きを適確に把握し、適切に対応していくことが必要である。

4. 今後の課題

(1) 多様なリスク要因の分析

本論で作成した分岐シナリオにおいてシナリオドライバーとして採用しなかったリスク要因について、情勢の変化を踏まえインパクトの大きさや発生蓋然性について、最新の状況を踏まえて評価を行うとともに、定量的な指標設定も含め採用の可能性について検討が必要である。特に、核不拡散などは、突発的な事件発生に起因して一旦世界的な潮流が発生あるいは変化すると、その流れを押し留めるのは不可能であり、国際的な動向に関し不断の的確な把握が必要である。

(2) 各国の国情に即した分岐シナリオの作成

本論の分岐シナリオは、わが国を含む先進各国が置かれた状況を踏まえて作成したが、各区国とも各リスク要因顕在化の蓋然性は異なり、また、エネルギー需給構造の相違からインパクトも異なる。各国に応じた分岐シナリオを作成することは、リスク要因に係る理解を深めることに資するものと考えられる。

- 参考文献 -

- 1) 原子力委員会新計画策定会議(第6回)資料第4
- 2) 池田一三、田下正宣、氏田博士、松井一秋、“環境、経済、エネルギーの持続的発展のための原子力の役割”、日本原子力学会誌、Vol48, No.5, 14-36
- 3) 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)
- 4) ピーター・シュワルツ、“シナリオ・プランニングの技法”、東洋経済新聞社 (2000)
- 5) 国際エネルギー機関/経済協力開発機構(IEA/OECD)、Energy Balances of OECD countries 2006
- 6) BP Statistical Review of World Energy 2006
- 7) (独)原子力安全基盤機構 “原子力施設運転管理年報 (平成19年版)”
- 8) 山田英司、“米国における原子力開発利用の動向 - 原子力「冬の時代」から回復への足取り - ”、季報エネルギー総合工学、第28巻第2号、83-92 (2005)
- 9) (社)日本原子力産業協会、“世界の原子力発電開発の動向”、各年度版
- 10) (社)海外電力調査会「海外電力」、2008年3月号
- 11) 山田英司、藤井信一、今永隆、“復活する米国原子力産業 - 科学的合理性に基づく規制へ向けた改善の道のり - ”、季報エネルギー総合工学、第29巻第2号、77-86 (2006)
- 12) 国際原子力機関(IAEA)/経済協力開発機構原子力機関(NEA/OECD)、“Uranium 2007: Resources, Production and Demand”、(2008)
- 13) 経済産業省編 “平成19年度エネルギーに関する年次報告”(エネルギー白書2008)

第 4 章. 原子力開発利用シナリオに係るエネルギーセキュリティレベルの評価分析

各シナリオについて、第 3 章で述べたエネルギーセキュリティレベルに関し定量的評価を行う手法¹⁾を活用して、原子力が果たし得るエネルギーセキュリティ向上への寄与について評価を行う。

1. 原子力開発利用シナリオの設定

前章で述べた分岐シナリオを基に、わが国を対象として表 4-1 及び表 4-2 に示す 3 つの原子力発電開発シナリオを設定する。想定される容量の推移を図 4-1、図 4-2 に示す。

(1) 各シナリオにおける原子力発電開発の想定は以下のとおりである。

(a) 原子力減速シナリオ(シナリオ A)

政治的あるいは経済的な理由から原子力発電は選択されないと想定する。脱原子力政策を採用した欧州諸国の前例をみる場合、直ちに原子力発電の運転停止をすることなく、既設原子炉は代替電源が確保されるまでの間、あるいは、原子炉の寿命期間中は運転されるのが通例であり、本シナリオでは、国の電源開発計画に計上され実現の蓋然性が高い建設中の 4 基及び立地が確定している 6 基の新規炉までは、立地地域との約束を履行するとの観点からも建設するが、それ以降の新規炉建設はないとする。

(b) 原子力発電「比率」維持シナリオ(シナリオ B)

計画炉を建設した 2030 年以降は、廃止措置された発電「容量」の見合いで新規炉(単基容量は次世代軽水炉で想定される 170 万 kW²⁾とする。)が代替建設(リプレース)されるとし、原子力発電容量が概ね現状レベルで維持するシナリオである。前章で述べたように、新規サイトの確保には長期の時間を要し、実際、新規サイトの申し入れは 1970 年代以降少数となっている状況を踏まえると、新規炉は既存サイトに建設されることとなる。

本シナリオでは、原子力発電容量は、2030 年頃以降、発電容量は約 6,500 万 kW 程度で推移するが、全発電容量が横ばいから微減で推移するため、原子力発電「比率」は 30 - 40% 台と横ばいで推移することとなる。この場合、単基容量の増大に伴い新規原子炉基数が減少、限定されるため、信頼性、安全性、経済性に関し実績がある軽水炉が採用され、FBR 導入はあまり期待できずプルトニウム利用は限定されたものとなる。

本シナリオは、経産省の原子力立国計画³⁾や新国家エネルギー戦略⁴⁾に示されており、現実的なシナリオとして想定される。

(c) 原子力発電「基数」維持シナリオ(シナリオ C)

計画炉を建設した 2030 年以降は、廃止措置された発電「基数」の見合いで新規炉が建設されるとする。本シナリオは、原子力発電を積極的に推進するものであり、前シナリオと同様、新規炉は既存サイトに既設炉の代替として建設される。原子力発電容量の増加は既設炉を大型容量の炉により代替することにより実現することが現実的であり、既設炉は発電容量が大きい(単基容量は同上で 170 万 kW とする。)新規炉に代替されるため、原子力発電容量は着実に増加していき、電源シェアは 2050 年以降、60% 程度に達することとなる。このような場合、新規炉の建設基数が大きくなるため FBR 導入の余地は大きく、大規模なプルトニウムの商用利用が推進されるシナリオである。

表 4-1 シナリオドライバーによる原子力開発シナリオの設定

シナリオ	内 容
A . 原子力減速 シナリオ	前章の「1. 潮待ちシナリオ」及び「2. 窓際シナリオ」に対応。 深刻な事故による政策的な要因、低稼働による経済的な要因により、 原子力発電は選択されない。
B . 原子力発電 比率維持 シナリオ	前章の「3. 制約シナリオ」、「4. 実力封殺シナリオ」及び「5. 壁際シナリオ」に 対応。 廃止された発電「容量」の見合いで新規炉が建設される。原子力発電 比率は30%台から40%台で推移する。新・国家エネルギー戦略に目標と して設定されるケース(2030 年に 30~40%台)に相当する。この場合、 FBR 導入の余地は小さく、本格的なフルタイム利用は困難である
C . 原子力発電 基数維持 シナリオ	前章の「原子力サイクル社会」に対応。 廃止された発電炉「基数」の見合いで新規炉が建設される。原子力発 電比率は着実に上昇する。FBR 導入余地は大きく、軽水炉と FBR 並 存の下、フルタイム利用が推進される。

(2) 各シナリオにおける原子力発電容量の算出

原子力発電容量の算出に当たっては、既設炉の廃止措置及びリプレイスは、運転期間が 60 年を経た時点で実施されるものと想定し、原子力発電容量は、各期間を 5 年毎に区切り各期間の中央の年度におけるものを示すこととする。

2030 年以降の X 年度における原子力発電容量 $C(x)$ (単位: 万 kW) は、下記の式により算出される。なお、既設炉及び 2030 年までに運転開始が予想される原子炉の運転開始状況を図 4-1 に示す。

- (a) シナリオ A においては、2030 年以降、60 年の寿命を迎え順次廃止措置される図 4-1 左図の原子力発電「容量」相当する容量が順次減少していく。

$$C_A(x) = 6,460 - \sum_{t=2030}^{x-60} C(t)$$

(注) シグマは 1970 年度以降の累計数量 (以下、同じ)

- (b) シナリオ B においては、2030 年以降、60 年の寿命を迎え順次廃止措置される図 4-1 左図の原子力発電「容量」に見合う形で新規炉の建設がなされたと想定している。

$$C_B(x) = 6,460 - \sum_{t=2030}^{x-60} C(t) + \left[\sum_{t=2030}^{x-60} C(t) / 170 \right] \times 170$$

(注) 上記の式中、 $[]$ は除を切り上げた整数値を示す。

- (c) シナリオ C においては、2030 年以降、60 年の寿命を迎え順次廃止措置される図 4-1 右図の原子力発電「基数」に見合う形で新規炉の建設がなされたと想定している。

$$C_C(x) = 6,460 - \sum_{t=2030}^{x-60} C(t) + \sum_{t=2030}^{x-60} U(t) \times 170$$

(注) 上記の式中、 $U(x)$ は廃止措置される原子力発電炉基数を示す。

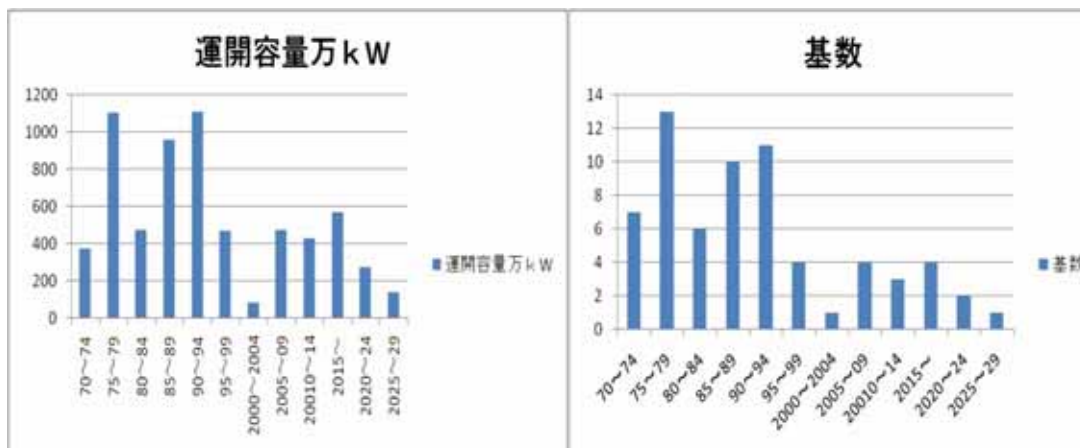


図 4-1 わが国原子力発電開発の実績と 2030 年までの見通し

表 4-2 各シナリオにおける原子力発電容量の推移

～ 2005	2005 ～ 30 年	2030 年 ～
1) 運転中 55 基 4958 万 kW	2) 建設中 4 基 ^{*1} 、 521 万 kW 3) 計画中 6 基 ^{*2} 、 981 万 kW 1)+2)+3) 計 65 基、 6460 万 kW	A: 原子力減速シナリオ (リプレイスなし) 2030～80 年の間、リプレイスがないため、60 年の寿命を迎え次第、順次、廃止されていき、2080 年にはほぼ原子力発電はゼロとなる。 B: 発電比率維持シナリオ (廃止容量分リプレイス) 2030～80 年の間、63 基が廃止され 36 基が建設され、2080 年時点では 6500 万 kW 程度となる。 C: 発電基数維持シナリオ (廃止基数分リプレイス) 2030～80 年の間、63 基が廃止され同数基が建設され、2080 年時点では 11,350 万 kW 程度となる。

(* 1) 建設中 泊 3 号、島根 3 号、大間、敦賀 3 号

(* 2) 計画中⁵⁾ 敦賀 4 号、福島第一 7 号・8 号、東通 1・2 号、上関 1 号

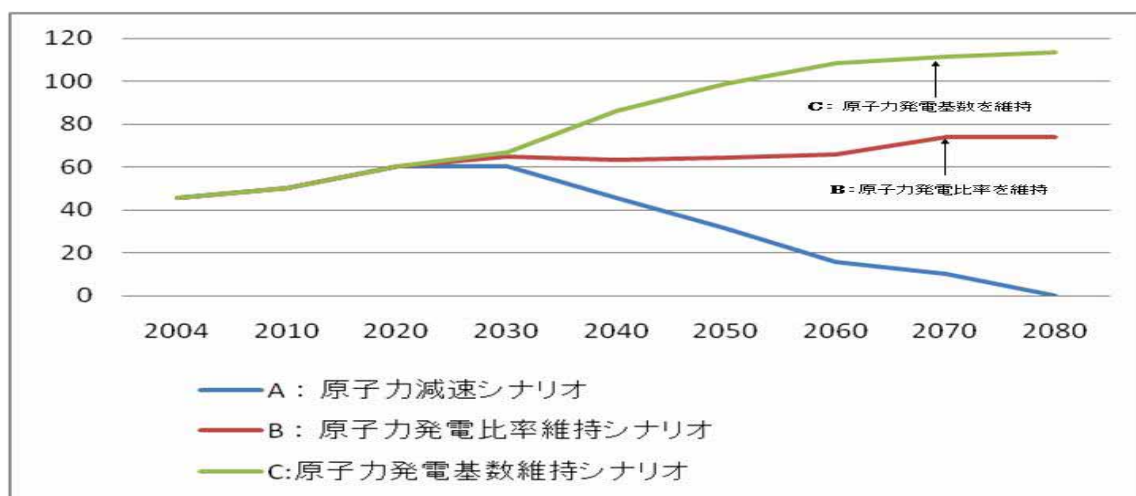


図 4-2 各シナリオにおける原子力発電容量の推移

(3) 原子力発電電力量の算定

原子力は、前項の表4 - 2で述べたシナリオ別の発電容量を有することとし、一方、設備利用率は、固めであるかも知れないが、2030 年まではエネ経研見通しに沿って 80% 台とし、2040 年以降は90%台となって徐々に上昇し、2060 年には次世代軽水炉の開発目標¹⁾とする 90%台半ばまで上昇するものとして発電電力量を算出する。(図 4-3 参照)

原子力発電電力量

= 上記の原子力発電容量 × 年間時間(24 日 × 365 時間) × 設備利用率

なお、本論では、長期的には 90% 台の高い設備利用率が実現すると設定しているが、実際には当該国、送電網で繋がっている場合には当該の地域における電力負荷状況と整合を図る必要がある。現在の原子力発電比率はベースロードの枠内に収まるものであるが、同比率が向上する場合、負荷調整運転を実施し、設備利用率を調整することが要請される可能性があることに留意が必要である。図 2-3 で、フランスの設備利用率が 80% 弱と世界の中位以下に位置するのは、その要因による。

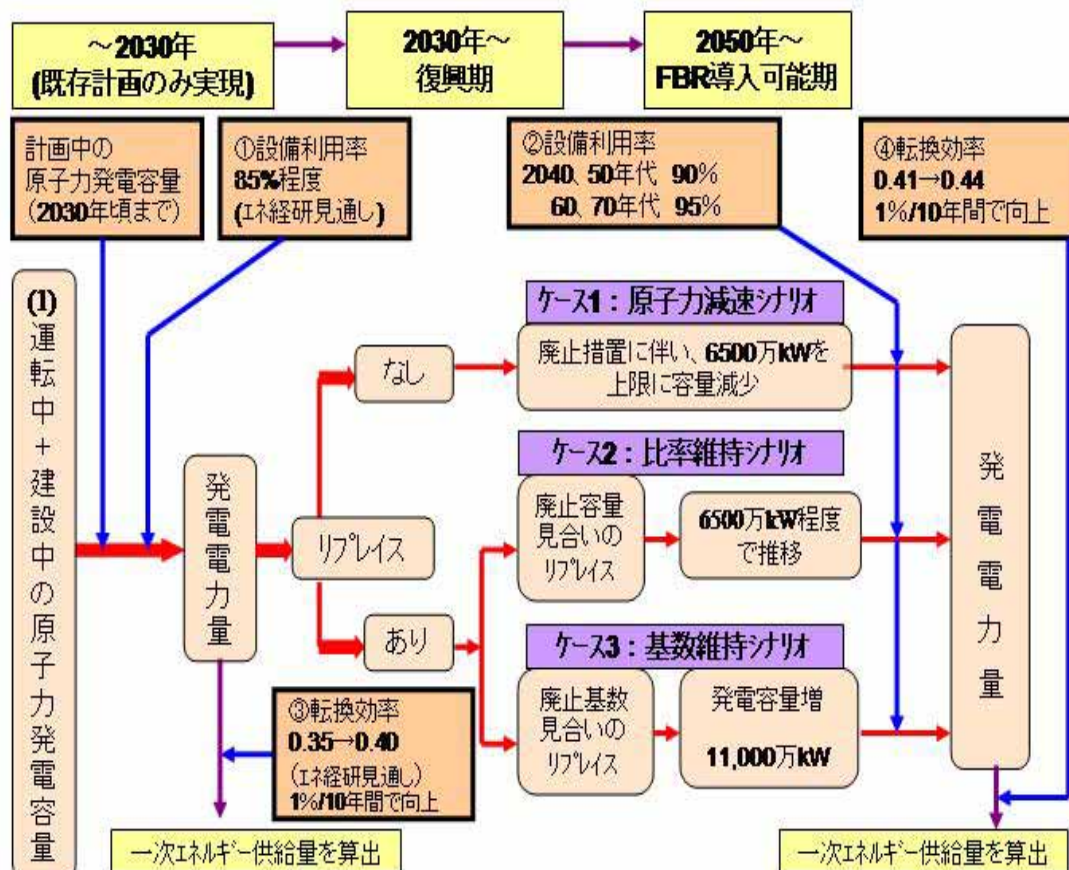


図 4-3 原子力発電量見通しに係る策定フロー図

2. エネルギー需給に係るモデルの設定

(1) エネルギー需給の長期見通しの概要

上記の原子力発電開発計画に関しエネルギーセキュリティレベルの動向を評価するためには、その背景となるエネルギー需給モデルの設定が必要となる。本稿では、2006 年 4 月に(財)エネルギー経済研究所が作成した 2030 年までのエネルギー需給見通し(以下「エネ経研見通し」という。)⁶⁾に基づき発射台の 2004 年から 2030 年までの区間のエネルギー需給に係る指標に係るトレンドを将来に亘って滑らかに繋がるように延長したエネルギー需給モデルを設定した。期間は、2030 年頃までの間に運転開始した原子炉が寿命となる運転期間(60 年を想定)を終える時期にほぼ相当する 2080 年頃までとした。

なお、同研究所の専門家によると、現状を基に積上げによりモデルを駆使して将来予測する方式では、2030 年頃が限界とのことであり、それ以降は「こうなる」という予測は困難であり、むしろ「こうあるべき」という期待を含めた展望を作成し、その実現のため、現在、技術開発を含め所要の準備を行うというバックキャスト方式とならざるを得ないとしている。

(2) 長期のエネルギー需給見通し策定の考え方

(a) 本研究で採用したエネルギー需給に関する所要の指標の変化率の推移を表 4-3 及び表 4-4 に、また、策定のフロー図を図 4-4 に示す。2030 年までは、エネ経研策定の見通しに記載される数値を採用し、一方、2030 年以降は、期間を 10 年間毎に区切り、各期間における GDP、最終エネルギー消費は伸び率が徐々に鈍化するものと仮定して、最終エネルギー消費量を算出した。さらに、同値に、省エネルギー進展率を乗じて電力需要及び各エネルギーに係る燃料需要を算出した。

最終エネルギー消費量 E_{fc} の算出方法は以下のとおり。

$$\begin{aligned} x \text{ 年における最終エネルギー消費量 } E_f(x) \\ = E_{fc}(2030) \times (1 - 0.0141 \times (0.75)^{(x-2030)/10}) \times (1 + 0.0115 \times (0.9)^{(x-2030)/10}) \end{aligned}$$

(b) 最終エネルギー消費は、電力消費と、各種エネルギーで構成される燃料消費とに大別される。

電力消費、及び燃料消費に係る各種のエネルギー消費は、エネ経研見通しにおける 2030 年度までと、ほぼ同一の伸び率で推移することとする一方、上記(a)で推定した最終エネルギー消費量と合致するよう、電力消費、及び燃料消費に係る各種のエネルギー消費について省エネルギー率を設定する。

(c) 燃料消費に係る各種のエネルギー消費には、転換工程におけるエネルギー消費を加算して燃料需要を算出する。また、電力消費については、一定割合(10%)を自家発電用需要とし、事業用電力消費には自家消費及び送配電損失を加算して事業用電力需要を算出する。

$$\begin{aligned} \text{最終エネルギー消費} &= \text{電力消費} + \text{燃料消費} \\ \text{燃料需要} &= \text{燃料消費} + \text{転換工程におけるエネルギー消費} \\ \text{電力需要} &= \text{自家発電電力需要} + \text{事業用電力需要} \\ \text{事業用電力需要} &= \text{事業用電力消費} + \text{自家消費及び送配電損失} \end{aligned}$$

表 4-3 エネルギー需給見通し策定の根拠

指 標	～2030 年(エネ経研見通し)	2030 年～(滑らかに延長)
GDP伸び率	エネ経研見通し (06 年 4 月) 04-10 1とする (2.02 %/年) 10-20 ×0.86 (1.48 %/年) 20-30 ×0.87 (1.15 %/年)	10 年間毎に区切った各期間における年伸び率が×0.9 に鈍化と仮定
最終エネルギー消費 / GDP 伸び率	エネ経研見通し(06 年 4 月) 04-10 1とする (1.98 %/年) 10-20 ×0.78 (1.54%/年) 20-30 ×0.91 (1.41 %/年)	10 年間毎に区切った各期間における年伸び率が×0.75 に鈍化と 仮定
省エネ進展率	エネ経研見通し(06 年 4 月)から各エネルギー別の最終エネルギー消費伸び率を算定	最終エネルギー消費計に合致するよう各エネルギー別に省エネ率を調整し設定
転換工程のエネルギー消費(転換ロイ)	エネ経研見通し(06 年 4 月) 2.92~3.04Mtoe の範囲で推移	2030 年数値(2.75)で一定と仮定
自家消費 + 送配電損	エネ経研見通し(06 年 4 月) 12.5~13.0Mtoe の範囲で推移	2030 年数値(12.74)で一定と仮定

(d) 事業用電力供給の構成について、再生可能エネルギー及び原子力は所与の供給量を設定する。再生可能エネルギー発電量については、太陽光、風力、廃棄物及びバイオマスが、エネ経研見通しに記載される一定の割合(年率1%程度)で継続的に増加するものとする。これら再生可能エネルギーは、分散型電源としての利用が主体とならざるを得ないこと等を考慮すると、社会的な期待を考慮すると小さなものであるが、これに、水力及び地熱による発電電力量を加算して、電力供給の1割程度というのが現実的と考えられる。また、原子力発電電力量については、前項で述べた原子力発電開発に係るシナリオに応じて算出する。

電力需要から、再生可能エネルギー発電量及び原子力発電量を控除して、それらの残余である化石燃料による発電電力量については、エネ経研見通しにおいて2030年時点で設定されている化石燃料比率で按分することとする。その構成比は次のとおり。

石炭 42% : 石油 6% : 天然ガス 52%

なお、石油は、今世紀半ばにも生産量ピークを迎える可能性が指摘されるが、オイルサンド、オイルシェール等の非在来型の石油資源利用拡大の期待もあり、石油代替となる燃料油が実用化されない限り、ピーク電源、離島等僻地対応電源、非常用電源等で一定の役割を果たすものとした。

事業用電力需要

= 化石燃料発電電力量 + 原子力発電電力量 + 再生可能エネルギー発電電力量

石炭火力発電電力量 = 化石燃料発電電力量 × 0.42

石油火力発電電力量 = 化石燃料発電電力量 × 0.06

天然ガス火力発電電力量 = 化石燃料発電電力量 × 0.52

(e) 電力需要は、転換効率で除して、電力に係る一次エネルギー供給量を算出する。

転換効率は、エネ経研見通しでは、2004年 35% 2010年 37% 2020年 38% 2030年 40%と、10年間で1%程度の向上を仮定していることから、2030年以降も1%程度ずつ改善していくと仮定した。その改善は遅いように感じられるが、発電設備は設備利用期間が長いことから、高効率の新鋭発電設備が投入されたとしても、施設のストック全体が代替するには相当長期の期間を要する。

電力に係る一次エネルギー供給 = 電力需要 / 転換効率

一次エネルギー供給 = 燃料需要 + 電力に係る一次エネルギー供給

表 4-4 電力部門における転換効率の見通し

指 標	～ 2030 年 (エネ経研見通し)	2030 年～ (滑らかに延長)
転換効率	エネ経研見通し(06年4月)から エネルギーバランス表を策定し算出 0.35 0.37 0.38 0.40 で推移	10年間で1%ずつ改善と仮定 0.41 0.42 0.43 0.44 で推 移

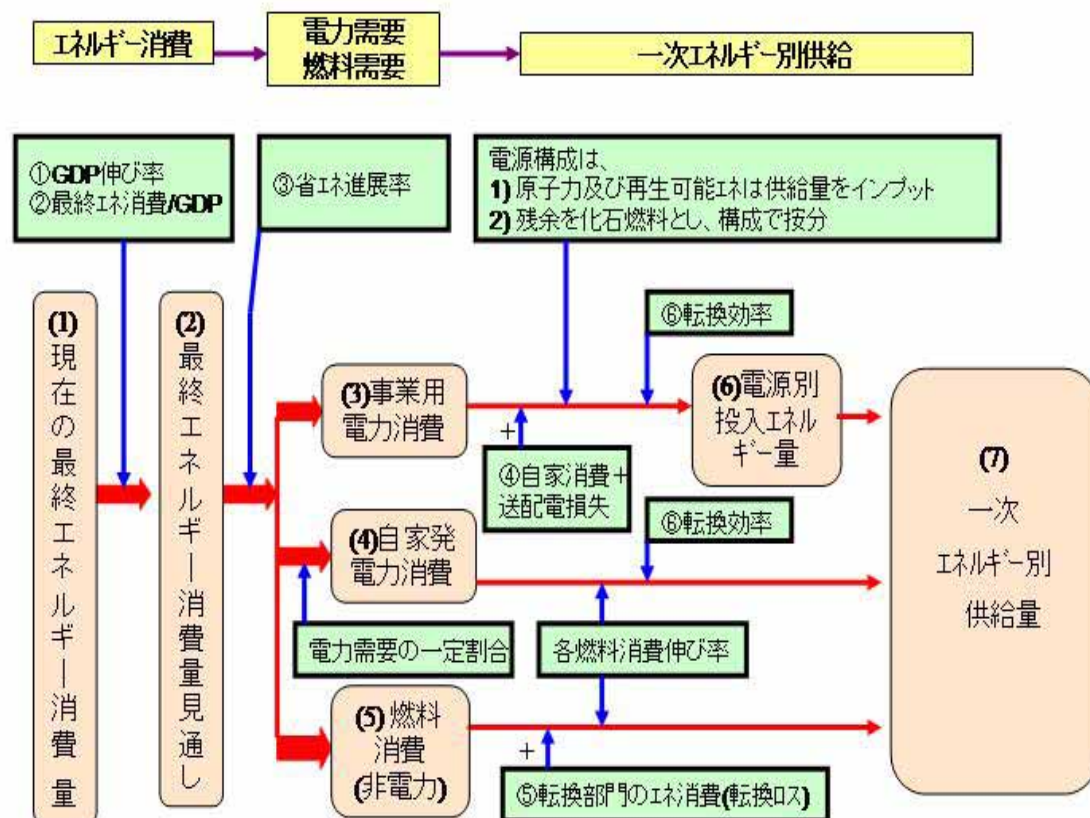


図 4-4 エネルギー需給見通し策定のフロー図

以上のような手法で策定した本研究で採用した長期のエネルギー需給見通しの概要を表 4-5 及び図 4-5 に示す。

また、図 4-6 に、各シナリオにおける電力供給構成の推移を示す。

表 4-5 主要なエネルギー指標の見通し

事 項	2004	2030	2050	2070	2090
GDP	1	1.46	1.70	1.85	1.94
最終エネルギー消費	1	0.96	0.88	0.78	0.71
電力需要	1	1.19	1.46	1.50	1.41

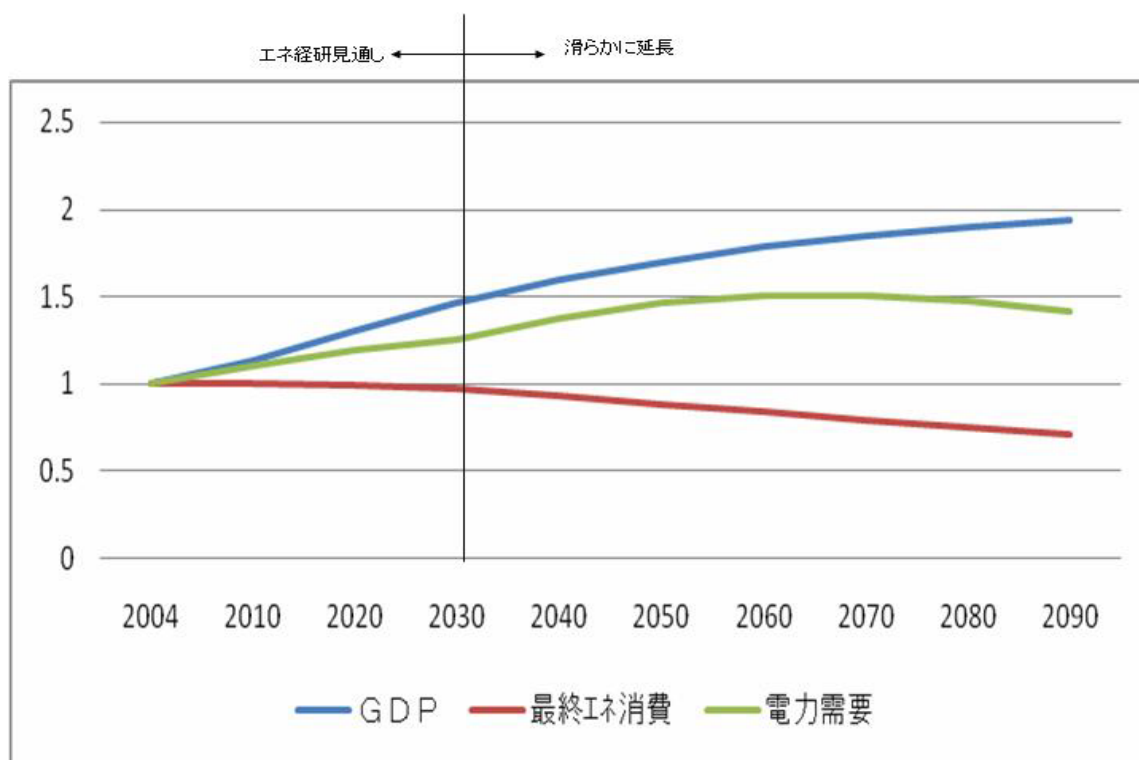


図 4-5 主要なエネルギー指標の見通し

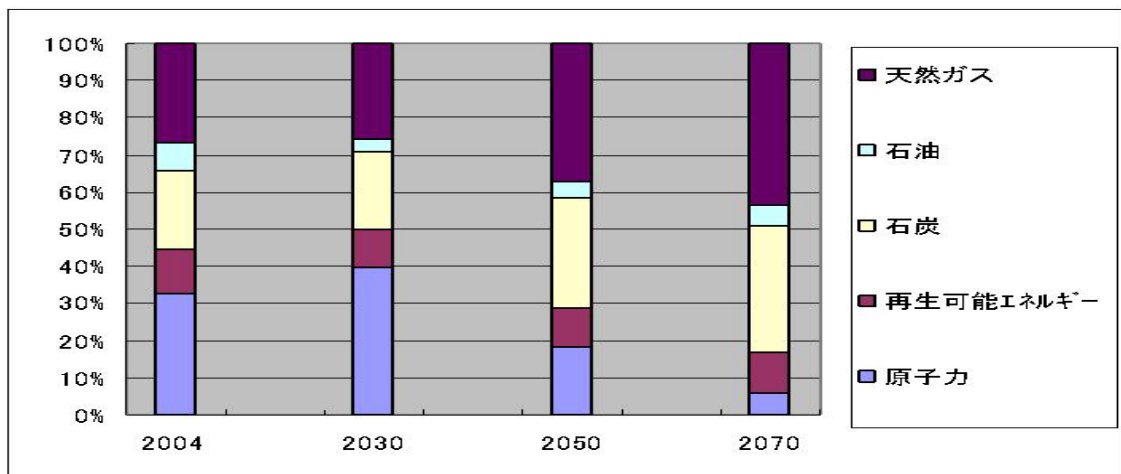


図 4-6-1 シナリオ A(原子力減速シナリオ)における電力供給構成の推移

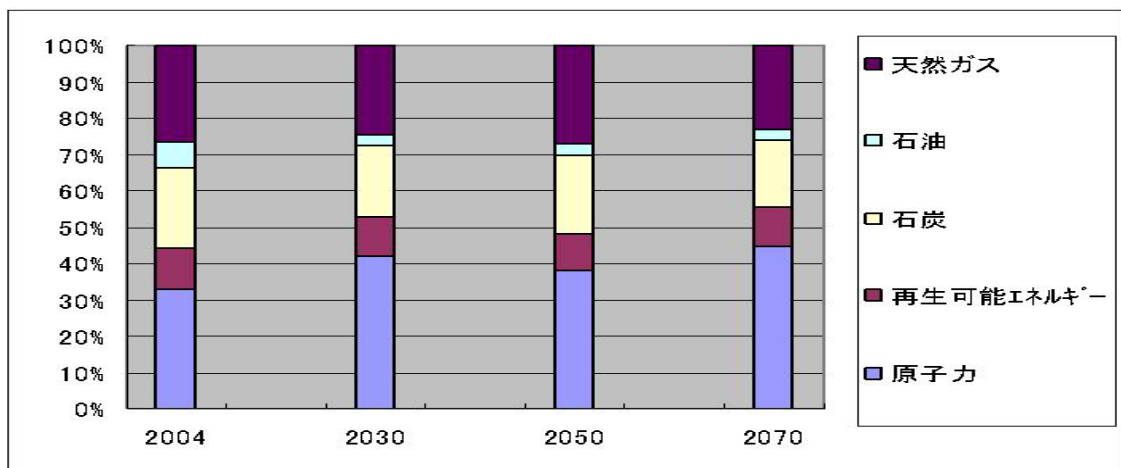


図 4-6-2 シナリオ B(原子力発電比率維持シナリオ)における電力供給構成の推移

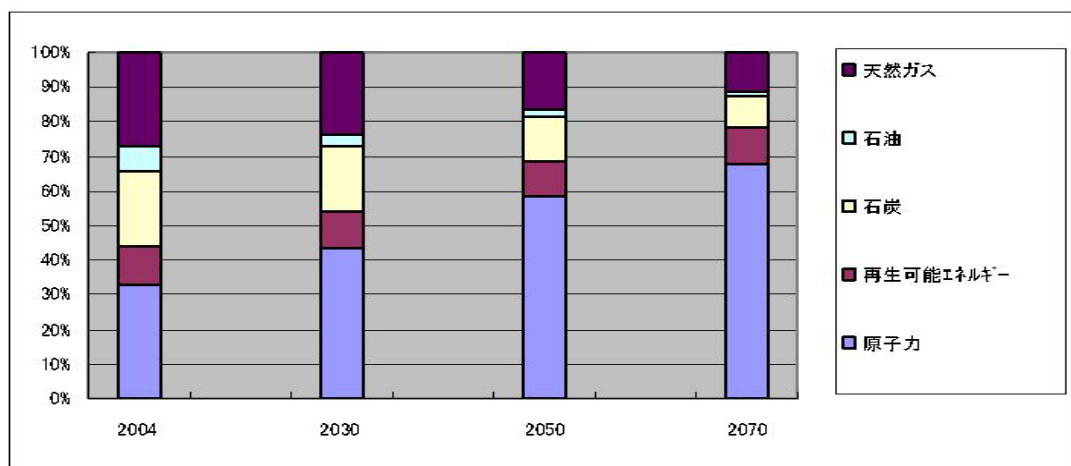


図 4-6-3 シナリオ C(原子力発電基数維持シナリオ)における電力供給構成の推移

3. 各シナリオに係るエネルギーセキュリティレベルの評価

(1) 過去の推移

第 4 章で述べたように、わが国は 1970 年代以降、エネルギーセキュリティの向上を目指し、総合的なエネルギー政策を展開しているが、それら政策の効果を検証する一方策として、1970 年、1980 年、1990 年、2000 年及び 2005 年各時点でのエネルギーセキュリティに係る評点を試算し、わが国のエネルギー供給及び電力供給に係るセキュリティレベルの推移をみる。第 4 章では、各国のデータ⁷⁾が入手可能な 1990 年以降の各時点での各国及び地域のデータを利用して評点を算出したが、今回は、政策効果の検証が目的であることから、比較対象を 2005 年時点における各国及び地域のもので固定する一方、わが国は各時点における数値を使用して比較を行った。

その結果は図 4-7 に示すようになり、わが国のエネルギー供給及び電力供給のセキュリティに係る評点は、1980 年代以降着実に改善しており、エネルギーセキュリティ向上に向けた各種の努力が一定の効果を生み出していることが示される。図 4-8 及び図 4-9 に示すセキュリティに係る指標の推移を見ると、多様化指数、中東及びロシア依存度に係る評点の向上の寄与が大きく、原子力をはじめとする石油代替エネルギーの開発導入がエネルギー供給及び電力供給双方のセキュリティレベルの向上に大きく寄与していることが示される。

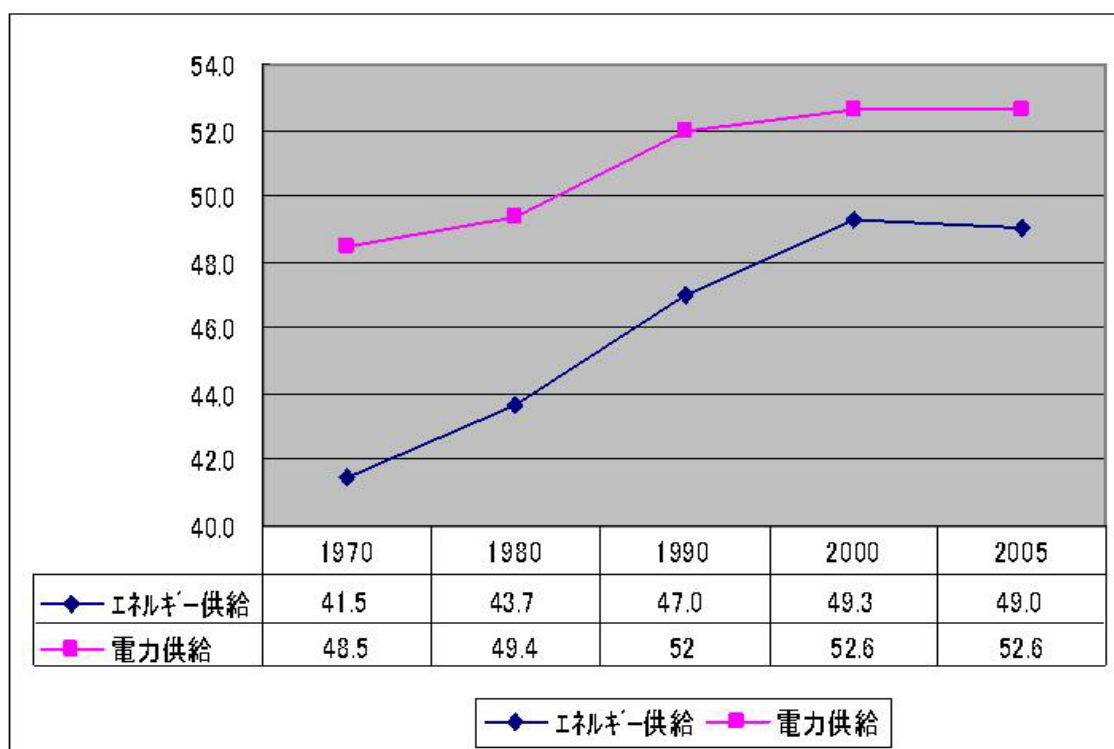


図 4-7 エネルギー供給及び電力供給に関するセキュリティレベルに係る評価の推移

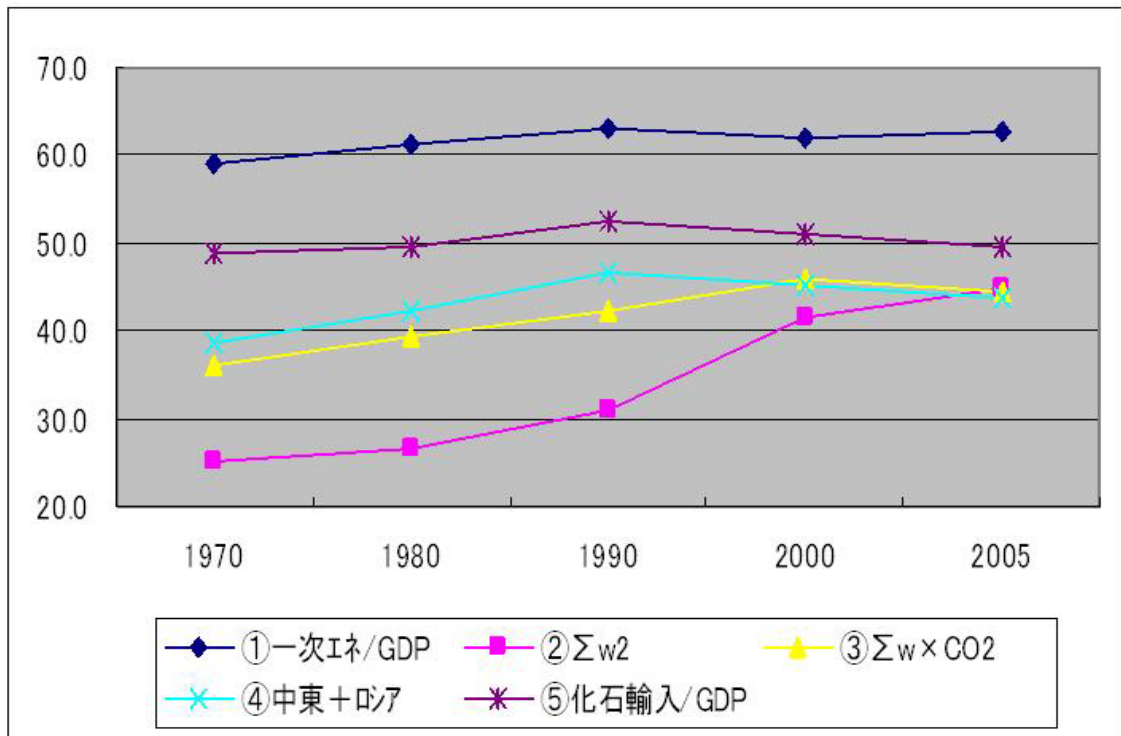


図 4-8 エネルギー供給セキュリティに係る指標の評点の推移

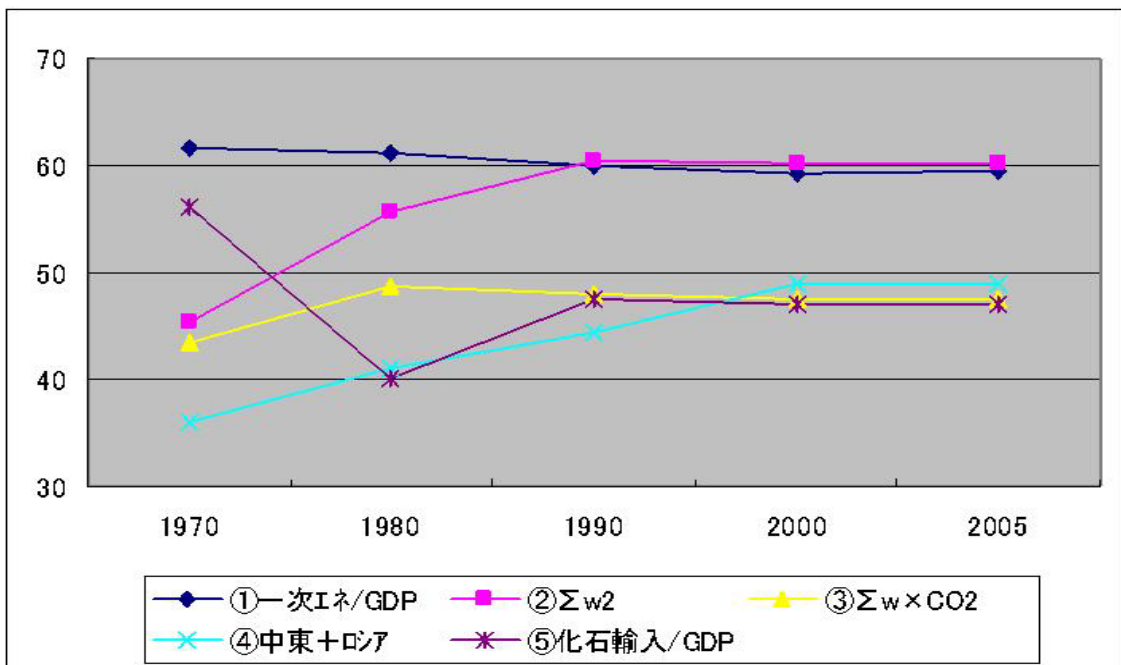


図 4-9 電力供給セキュリティに係る指標の評点の推移

(2) 今後の見通しに係る評価手法

上記1.で示した3つのシナリオに関し、上記2.で設定したエネルギー需給環境を前提として、第 4章で述べた先進諸国との比較による評価手法によりエネルギーセキュリティレベルに関し評価を実施した。

(a) 上記の評価手法は、エネルギー・環境に関し表 4-6 に示す 5 つの指標を設定し、各指標に係る数値を用いて、第 4章で述べた下記(b)の算出方法により先進8ヶ国の中におけるわが国の位置づけを偏差値により算定し、その総計で総合的なエネルギーセキュリティレベルを定量的に評価するものである。

本手法は、質の異なる指標を含めた総合的な評価を行うのに適したもので、同手法によれば、わが国は、先進諸国の間では、エネルギーセキュリティレベルは平均を若干下回るというものであった。

(b) 選定した指標については、セキュリティの観点から数値が小さい方が良好であるため、各国のそれら指標に係る評点は下記により算出を行う。

各指標に係る*i*国の数値を X_i ($i=1 \sim n$)とする場合、*i*国の評点 Y_i は以下により算出される。

a) 評点 $Y_i = 50 + 10 \times (X_i - \text{ave } X_i) / \text{stev } X_i$

ave X_i : $X_1 \sim X_n$ の平均値

stev X_i : $X_1 \sim X_n$ 標準偏差

b) *i* 国の総合評点 Z_i は、選定した5つの指標に係る評点 Y_i の平均値とする。

$Z_i = \text{ave } Y_i$: $Y_1 \sim Y_5$ の平均値

表 4-6 エネルギーセキュリティに係る指標(表 2-2 の再掲)

評価軸	指標として採用する数値
1. エネルギー 利用効率	単位 GDP 当たりの一次エネルギー供給量
2. 調達の脆弱性	エネルギー輸入に係る特定地域への依存度 本研究では、中東とロシアを特定地域とする。
3. 供給源の多様化	ハーフィンダル指数 $H = \sum W_i^2$ (W_i : 各エネルギーのシェア) 同指数は、市場の集中度測定手法として活用されている。
4. エネルギー 消費に係る二酸化炭素排出	二酸化炭素排出に係る指標 = $\sum W_i \times C_i$ (W_i : 各エネルギーのシェア、 C_i : 単位エネルギー消費量当たりの炭素排出量)
5. 経済への影響	国際市場でのエネルギー価格から算定される化石燃料輸入額の GDP に対する割合 経済性に係る指標 = $\sum F_i \times P_i / \text{GDP}$ (F_i : 各化石燃料の輸入量、 P_i : 各化石燃料の輸入価格)

(b) 本評価では、以下のような措置を行っている。

a) 本評価は、原子力発電比率の増減をはじめとするエネルギー供給構造の変化が、わが国のエネルギーセキュリティレベルに与える影響の推移を評価することが目的であるこ

とから、比較対象となる先進諸国のエネルギー・環境に係るデータは、2005 年の数値で固定化する。

b) 上記の指標のうちエネルギー利用効率、経済への影響は、経済成長とともに自然と改善していく性格のものであることから、GDP は 2005 年の数値で固定化する。

c) 中東及びロシア依存度については、各エネルギー源のそれら地域からの輸入依存度は 2050 年までは 2005 年の数値で推移し、2050 年以降は、石油及び天然ガスは需給逼迫が予想されることから、それらの資源分布状況に応じて調達がなされることとする。

d) エネルギー価格については、将来見通しは困難であることに加え、国際市場で連動して変化し、その変動は評価対象国の相対的關係に及ぼす影響は小さいと考えられることから、2005 年価格で固定して評価を実施している。

(3) 今後の見通しに係る評価結果

(a) エネルギー供給に係るセキュリティレベルの推移

本稿で採用した指標に関するエネルギー供給に係るセキュリティレベルの推移は図 4 - 10 に示すようになる。

a) 原子力発電「基数」維持シナリオ(C)は、原子力発電比率が上昇することに伴い、中東ロシア依存度、CO₂ 排出係数に係る評点が向上して行き、高いエネルギーセキュリティレベルを示すこととなるが、2050 年頃に電力供給に占める原子力発電比率が 60%台に至る頃から、多様化指数に係る評価が低下していき、全体としてエネルギーセキュリティレベルは飽和傾向となる。

b) 一方、原子力発電「比率」維持シナリオ(B)では、原子力発電比率は 30 - 40%台で推移することとなる。エネルギーセキュリティレベルは「基数」維持シナリオには及ばないものの、多様化指数は安定的に推移するとともに、中東ロシア依存度、CO₂ 排出係数に係る評点は着実に向上していき、原子力発電比率が 40%台の後半に至る頃には、「基数」維持シナリオ(C)のエネルギーセキュリティレベルとほぼ同等となる。

c) 原子力減速シナリオ(A)は、原子力が減少した分を化石燃料で代替することとなり、各指標の評点が減少していき、全体としてエネルギーセキュリティレベルも減少に向かう。

d) 以上から確認されることとして、一般に原子力発電比率が向上することは、中東ロシア依存度の低減、CO₂ 排出量の抑制により、エネルギー安定供給の確保や地球環境問題の克服に資するものであるが、単一のエネルギー源への過度な依存はエネルギー供給構造の脆弱化に繋がるので、エネルギーセキュリティレベルの維持向上の観点からは、適度なシェアに留めることは適切であるという点である。

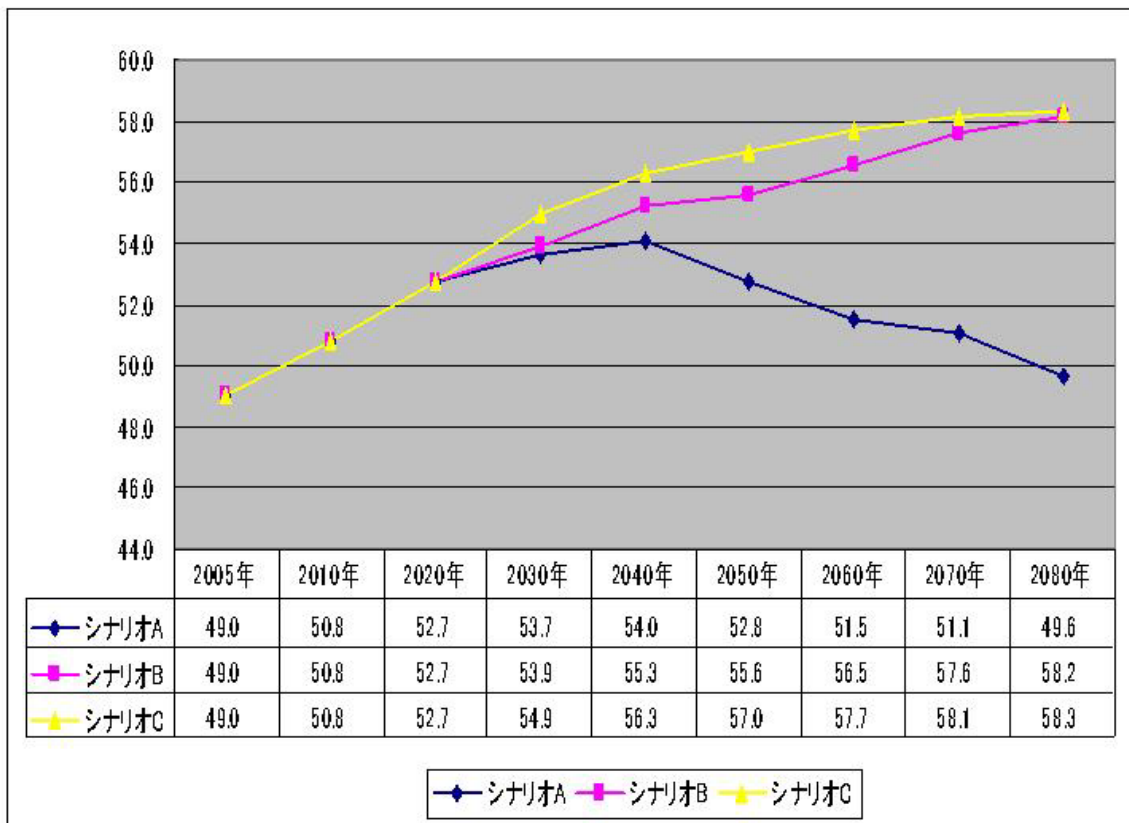


図 4-10 シナリオ別のエネルギー供給に関するセキュリティレベルに係る評価の見通し

以下の各図において、表 4-5 に示す4つの指標について、シナリオ別の推移を示す。なお、エネルギー利用効率に係る指標はシナリオ間に相違がないことから除外している。

原子力発電「比率」維持シナリオ B と原子力発電「基数」維持シナリオ C を比較した場合、CO₂排出、中東及びロシア依存、化石燃料輸入の経済に与える影響に係る評点に関して、原子力発電比率の大きいシナリオ C がシナリオ B を上回り、電力供給に占める原子力発電比率の増加に伴い改善することが示される。一方、多様化に係る評点については、電力供給に占める原子力発電比率が 40% 台となる頃から飽和し、50% 台になる頃から低下に転じており、原子力発電比率の増加は必ずしもセキュリティレベルの向上に寄与しないことが示される。

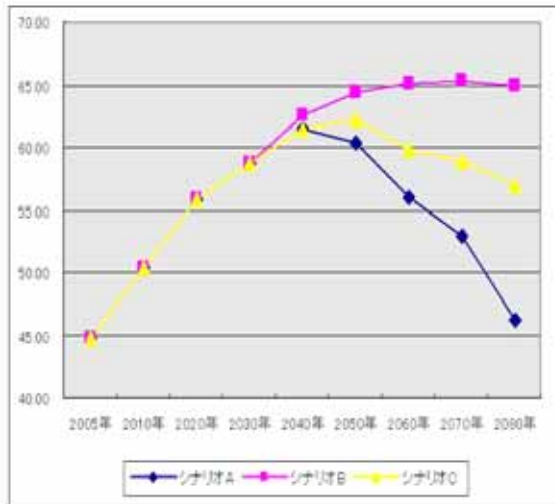


図 4-11-1 多様化に係る評点の推移

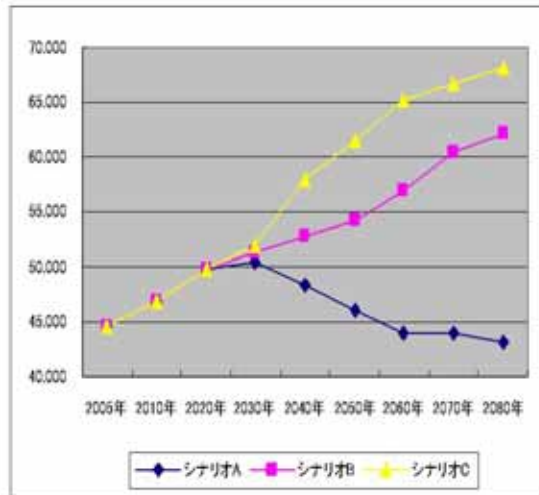


図 4-11-2 CO₂排出に係る評点の推移

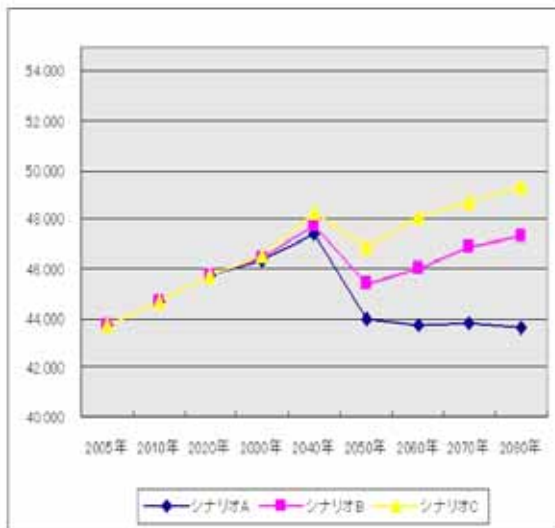


図 4-11-3 中東及びロシア依存に係る
評点の推移

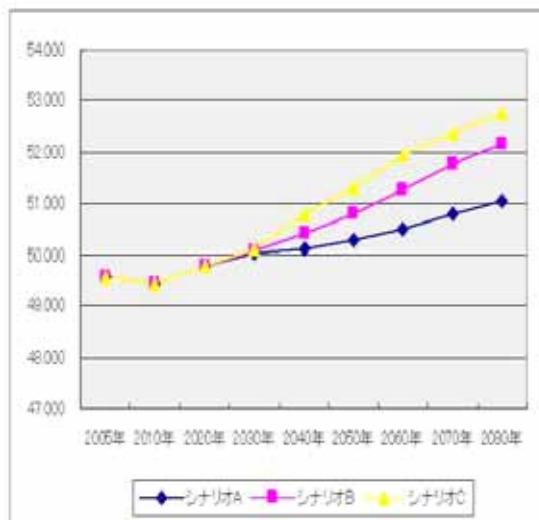


図 4-11-4 化石燃料輸入の経済に与える
影響に係る評点の推移

(b) 電力供給に係るセキュリティレベルの推移

本論で採用した指標に関して電力供給に係るセキュリティレベルを試算すると、その推移は図 4-12 に示すようになる。

電力供給の場合、先進各国とも一次エネルギー供給と比べ相対的にバランスがよくとれており、先進各国の間における相対評価であるセキュリティレベルに係る評点は最高でも 55 ポイント程度であるため、原子力発電比率が高まっていく原子力発電「基数」維持シナリオ C の場合においても、評点が最高水準近くで推移するに留まる。しかしながら、原子力減速シナリオ A、原子力発電「比率」維持シナリオ B と比較すると、原子力発電比率の向上により、電力供給に係るセキュリティレベルが向上する効果が見てとれる。

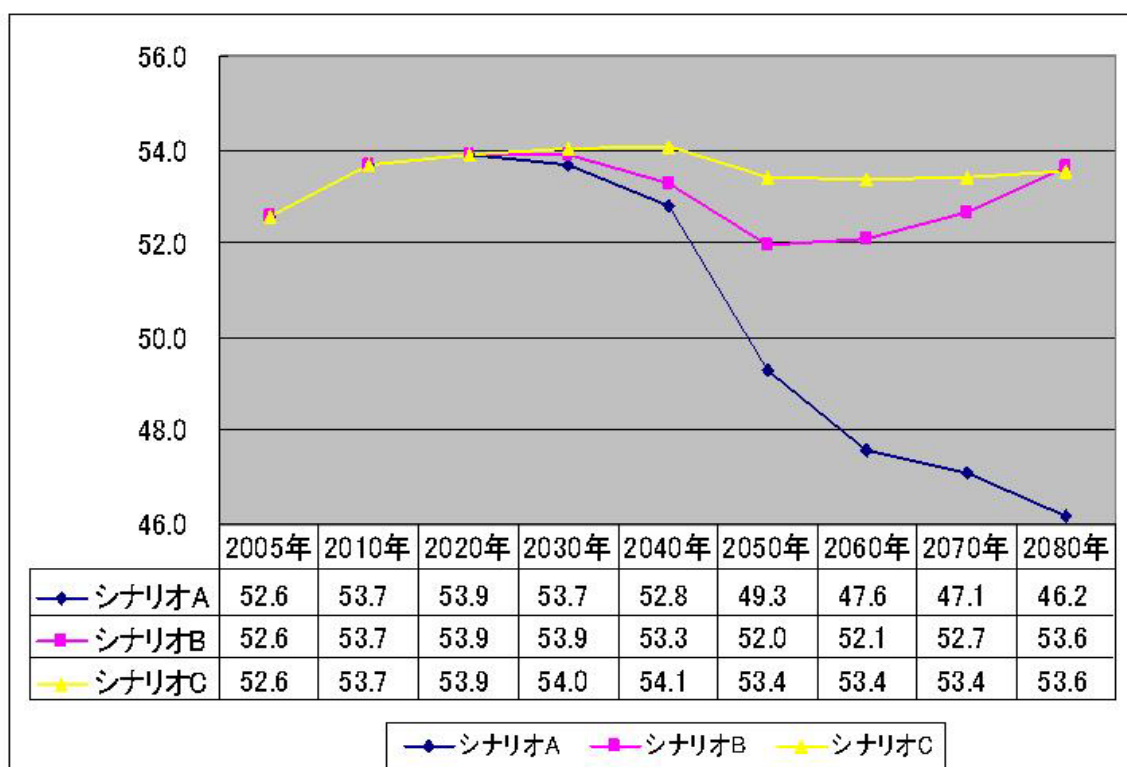


図 4-12 シナリオ別の電力供給に係るセキュリティレベルの推移の見通し

以下の図 4-13 の各図において、表 4 - 5 に示す 4 つの指標について、シナリオ別の推移を示す。なお、エネルギー利用効率に係る指標はシナリオ間に相違がないことから除外している。

指標別の動向は、エネルギー供給に係るものと同様であり、シナリオ B と原シナリオ C を比較した場合、CO₂ 排出、中東及びロシア依存、化石燃料輸入の経済に与える影響に係る評点に関して、原子力発電比率の大きいシナリオ C がシナリオ B を上回るが、シナリオ C の場合、多様化に係る評点については低下しており、前 3 者の増分を相殺し、全体の評点は横ばいとなる結果を招来する結果となっている。

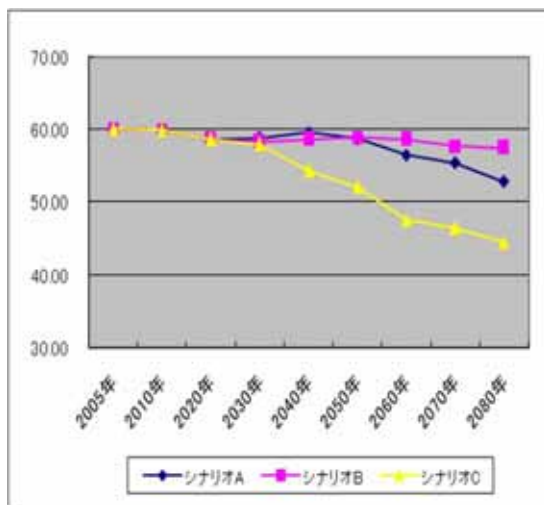


図 4-13-1 多様化に係る評点の推移

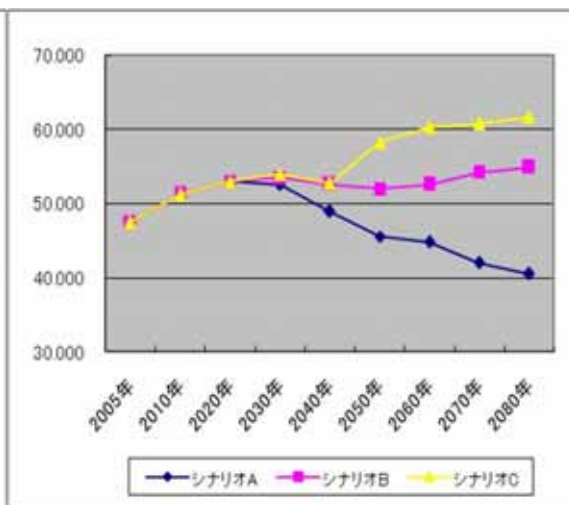


図 4-13-2 CO₂ 排出に係る評点の推移

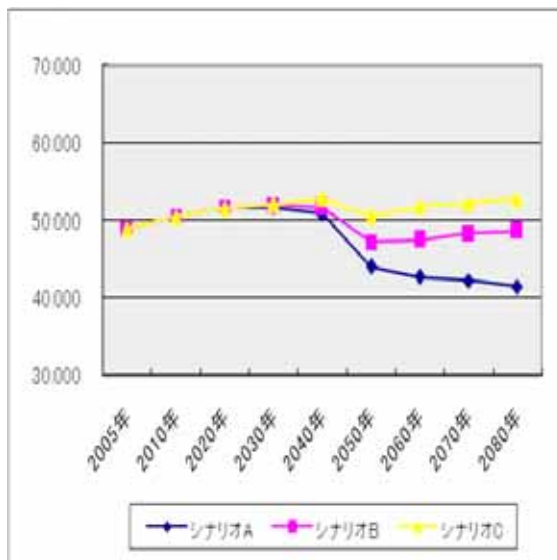


図 4-13-3 中東及びロシア依存に係る

評点の推移

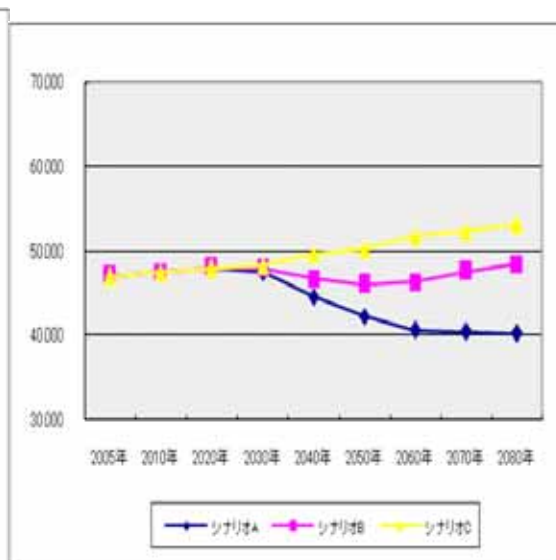


図 4-13-4 化石燃料輸入の経済に与える影

響

に係る評点の推移

(4) 本件評価に係る留意点

本件評価に当たっては、原子力発電比率の増減等エネルギー供給構造の変化が、わが国のエネルギーセキュリティレベルに与える影響の推移を評価することを目的としており、その影響の度合いを明確にするため、比較対象となる国・地域に係る数値、また、将来見通しに関し不透明性の高いエネルギー価格等については固定化して評価を行っている。

第 4 章 4 . (4) で行った実績値を用いた過去の推移に係る試算結果に示されるように、わが国のエネルギーセキュリティレベルは大きく改善していく性格のものとは限らず、本件評価は必ずしも現実的な見通しとなっていない可能性があることに留意する必要がある。

(5) CO₂ 排出量の見通し

2008 年 7 月に開催された北海道洞爺湖サミットにおいて、2050 年における世界の温室効果ガス排出量を現状(2005 年)から半減させるとの目標が、サミット参加の主要先進国首脳間で共有されたが、本項では、各シナリオにおける 2050 年における CO₂ 排出量見通しを算定する。ただし、この算定は、対象が、日本のみ、また、温室効果ガスのうち CO₂ のみであることに留意が必要である。

試算した結果は表 4-7 に示すようになり、再生可能エネルギーの利用を着実に拡大し、原子力発電は基数維持しつつ単基当たりの容量拡大により発電容量を拡大していくという現実的な原子力推進ケースであるシナリオ C の場合であっても、現状の 3 / 4 程度の減少に留まる。世界全体で半減するには、途上国が増加、よくても維持に留まることを考えると、先進国は半減以下に抑える必要があり、同目標を達成するには、石炭火力発電所をはじめとする化石燃料利用施設において炭素回収・貯留(CCS)施設を設置することが不可欠と考えられる。

表 4-7 シナリオ別のわが国の CO₂ 排出量見通し(単位:炭素換算百万トン)

	現状(算定)	2050 年見通し	2050 年 / 2005 年比
シナリオ A	352.3	353.7	1.00
シナリオ B	352.3	312.6	0.89
シナリオ C	352.3	269.8	0.77

- 参考文献 -

- 1) 山田英司、“先進諸国との比較におけるわが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究”、日本原子力学会和文論文誌、Vol.6, No.4, 383-392 (2007)
- 2) 日本電機工業会原子力技術委員会次世代軽水炉開発ワーキンググループ、“次世代軽水炉のコアコンセプトにおける要素技術開発について”、原子力 eye, Vol54, No.1 16-19 (2008)
- 3) 資源エネルギー庁、経産省総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会報告書骨子、平成 18 年 8 月 (2006)
- 4) 経済産業省、“新・国家エネルギー戦略” (2006)
- 5) 関連電気事業者のホームページ
- 6) 伊藤浩吉、森田裕二、“わが国の長期エネルギー需給展望” - 環境制約と変化するエネルギー市場の下での 2030 年までの見通し - 、(財)エネルギー経済研究所第 394 回定例研究会報告 2006 年 4 月 26 日、(2006)
- 7) 国際エネルギー機関 / 経済協力開発機構(IEA/ OECD)、Energy Balances of OECD countries 2007 等の IEA 統計

第 章 原子力の今後のあり方に関する考察

3. セキュリティレベルを最大化する原子力発電比率の探索

本章では、エネルギー供給及び電力供給に係るセキュリティレベルを最大化する原子力発電比率について、次の二つの方式により検討を行う。

- (1) 2005 年断面で原子力発電比率を増減させる方式
- (2) 章で実施したシナリオ別のセキュリティレベル評価結果に基づく方式

(1) 2005 年断面で原子力発電比率を増減させる方式

2005 年の時点におけるデータを基にセキュリティに係る評点の変化を試算する。本試算に当たっては、原子力による電力供給の増減分を、石炭、石油及び天然ガスの化石エネルギーに対し、それらの 2005 年における電力供給比率に応じた按分により増減させる。なお、再生可能エネルギーによる供給は原子力比率の増減により変化は与えていない。化石燃料に係るエネルギー供給シェア X_i は、次式により算定される。

$$X_i = (100 - X_n - X_r) \times X_i / (X_1 + X_2 + X_3)$$

X_i : 化石燃料のエネルギー供給上のシェア $i : 1 \sim 3$, (石炭、石油、天然ガス)

X_n : 原子力のエネルギー供給上のシェア、 X_r : 再生可能エネルギーのシェア

試算結果は図 5-1 に示すように、エネルギー供給に係るセキュリティの評点は、多様化指数に係る評点は原子力発電比率が 60%となる辺りでピークを迎える一方、CO₂排出に係る指標が原子力発電比率の上昇とともに増加していくことから、総合すると 60%辺りで伸びが概ね横這いとなる。一方、電力供給に係るセキュリティの評点は、原子力発電比率増減の影響が顕著に現れており、原子力発電比率の増加に伴い、CO₂排出に係る指標、中東及びロシア依存度及び経済性に係る評点が増加するものの、電源構成が偏ることから多様化指数に係る評点が減少するので、総合した評点は、原子力発電比率が 60%辺りでピークを示すこととなる。

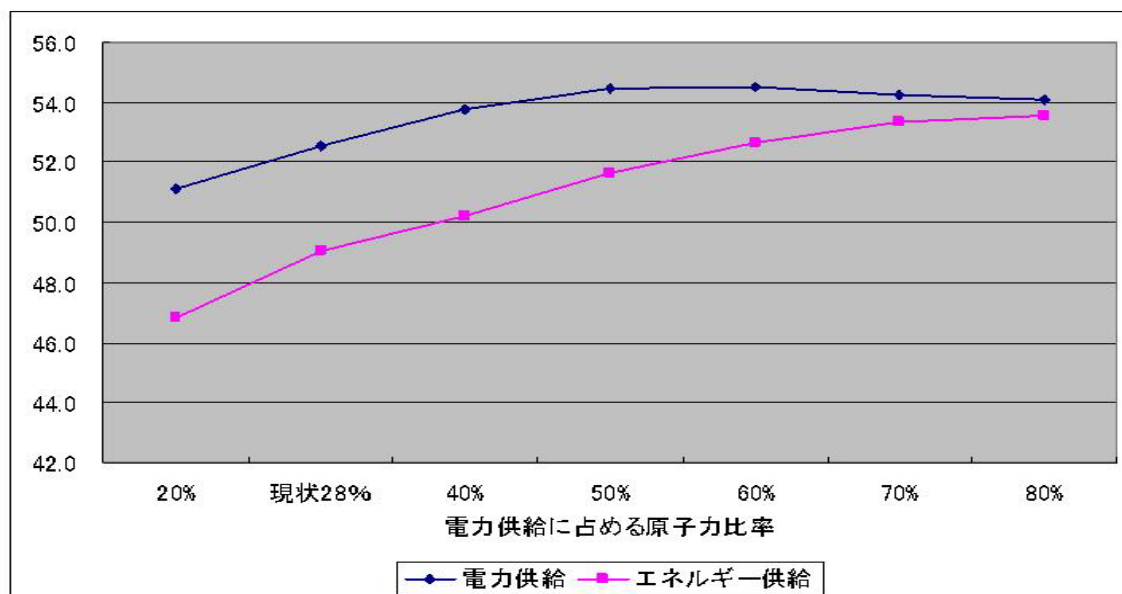


図 5-1 原子力発電比率とエネルギー供給に関するセキュリティレベルの評価との相関

(2) シナリオ別のセキュリティレベル評価結果に基づく方式

前章で実施したシナリオ分析において、電力供給における原子力発電比率のシナリオ別推移を図 5-2 に示す。原子力発電「比率」持シナリオ B では、原子力発電比率は概ね 30～40%台で推移する一方、原子力発電「基数」維持シナリオ C では、原子力発電比率は着実に上昇していき、2060 年以降には 60% 台に達することとなる。

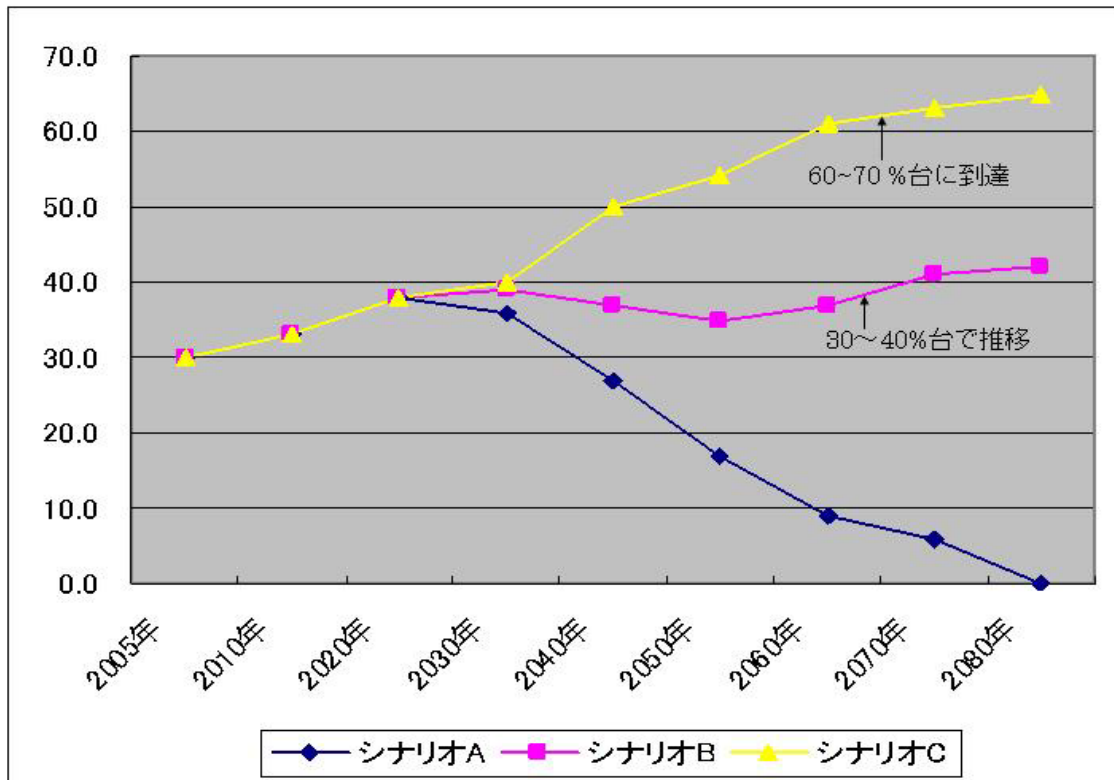


図 5-2 シナリオ別の原子力発電比率の推移

前章で実施したエネルギー供給に係るセキュリティの評点、電力供給セキュリティに係る評点と、原子力発電比率との相関を、シナリオ C についてみると、図 5-3 に示すようになる。エネルギー供給に係るセキュリティの評点は、原子力発電比率の上昇に伴い向上していくが、2060 年頃に原子力発電比率が 60% を超える辺りから伸びは鈍化し、概ね横這いとなる。一方、電力供給に係るセキュリティレベルは、ほぼ最高値のレベルである評点 55 の近傍で推移する。

経済産業省の新・国家エネルギー戦略では、2030 年頃の数値目標として電力供給に占める原子力の割合を 30～40% 程度以上としているが、上記の試算によれば、原子力比率 60% 程度までは、エネルギー供給、電力供給ともセキュリティレベルは向上していくものと考えられ、諸情勢を勘案しつつ、当面は、この辺りを目標として原子力開発利用を推進していくことの有効性が示唆される。

ただし、前述したように、本件試算は、その時点における一定の環境条件下での相対的な評価にならざるを得ず、環境が変化すれば、改めて評価する必要があるという点に留意が必要である。

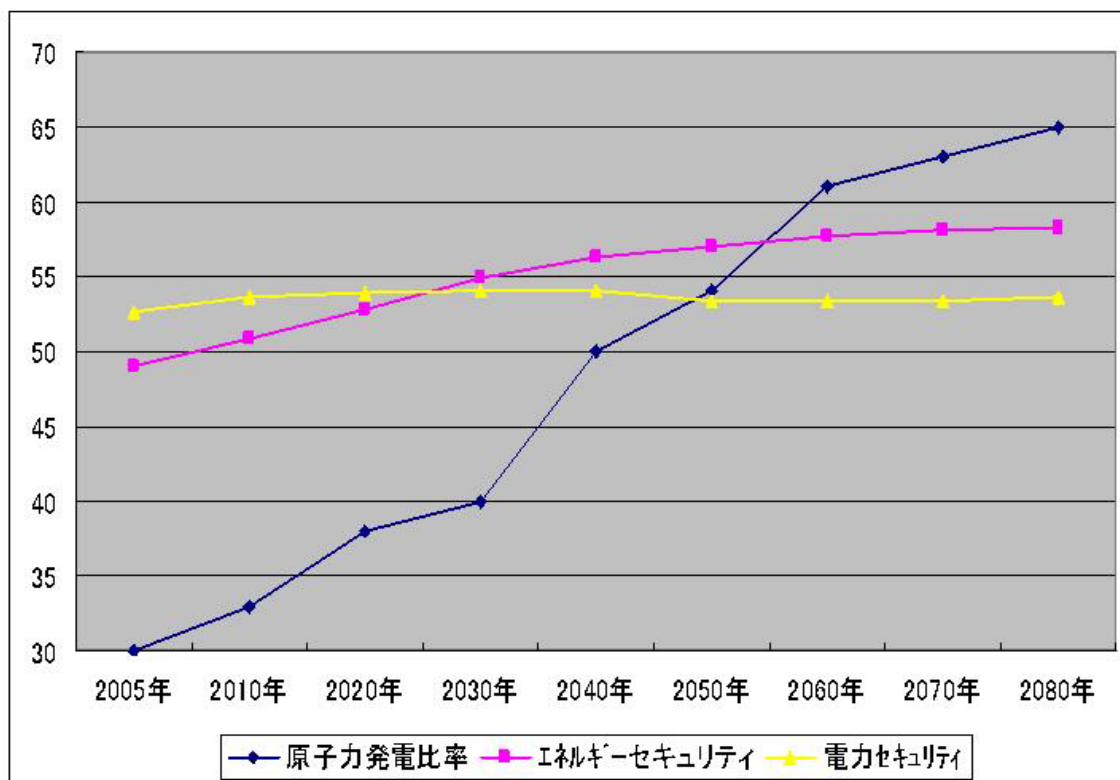


図 5-3 シナリオCにおける原子力発電比率とエネルギー供給に関するセキュリティレベルに係る評点、電力供給に関するセキュリティレベルに係る評点との相関

2. ウラン資源制約への対応

(1) 軽水炉時代が長期化する場合のウラン資源需給の見通し

ウラン資源需給は、原子力開発利用に係る持続性を検討するに当たって主要要因となる。前章で述べた示唆に沿い、エネルギーセキュリティレベル最適化の観点から、原子力発電比率が 60% 台に達するまで原子力発電を推進していく場合に関し、前述の分岐シナリオで指摘したウラン資源制約顕在化の可能性について検討する。

天然ウラン所要量に関し、以下の前提で試算する。

- (a) 表 5-1 に示す炉特性データを使用、(b) わが国においては BWR と PWR が 1:1、
(c) 燃料の装荷時に所要の天然ウランが発生、(d) 期間を 5 年毎に区分し、その期間の中央の年度において新規炉が運転開始し初装荷燃料を装荷する。

表 5-1 天然ウラン所要量算定に用いた炉特性データ^{1) 2)}

	BWR	PWR	平均	備 考
初装荷燃料	111.9	77.1	94.5	単位: tU,
平衡装荷燃料	18.7	17.3	17.0	100 万 kW に係る数値

$$X \text{ 年における天然ウラン累積所要量 } U(x) = \sum_{i=1}^x 17.0 \times C_i / 100 + 94.5 \times S_x / 100$$

C_i : i 年における原子力発電運転容量 (単位: 万 kW)

S_x : x 年までに運転開始した原子力発電容量 (単位: 万 kW)

シナリオ毎の累計天然ウラン所要量は、図 5-4 に示されるようになり、世界におけるわが国の原子力発電容量割合 13% (2006 年末)³⁾に見合ってウラン資源を確保できると仮定すると、

(a) 現時点で存在が確実な「既知資源量」550 万トﾝ及び「二次資源」100 万トﾝを対象とする場合、原子力発電容量見合い(世界の 13%)によるわが国のウラン資源確保可能量は 85 万トﾝであり、2060 年頃(シナリオ C)～2080 年頃(シナリオ B)までのウラン所要量が賄われるに過ぎない。

(b) 一方、確度の高い予測資源 280 万トﾝまでを対象とする場合、同様に算出されるわが国のウラン資源確保可能量は 120 万トﾝであり、シナリオ C においても 2080 年頃まで所要量が賄われ、相当の余裕をもつこととなる。

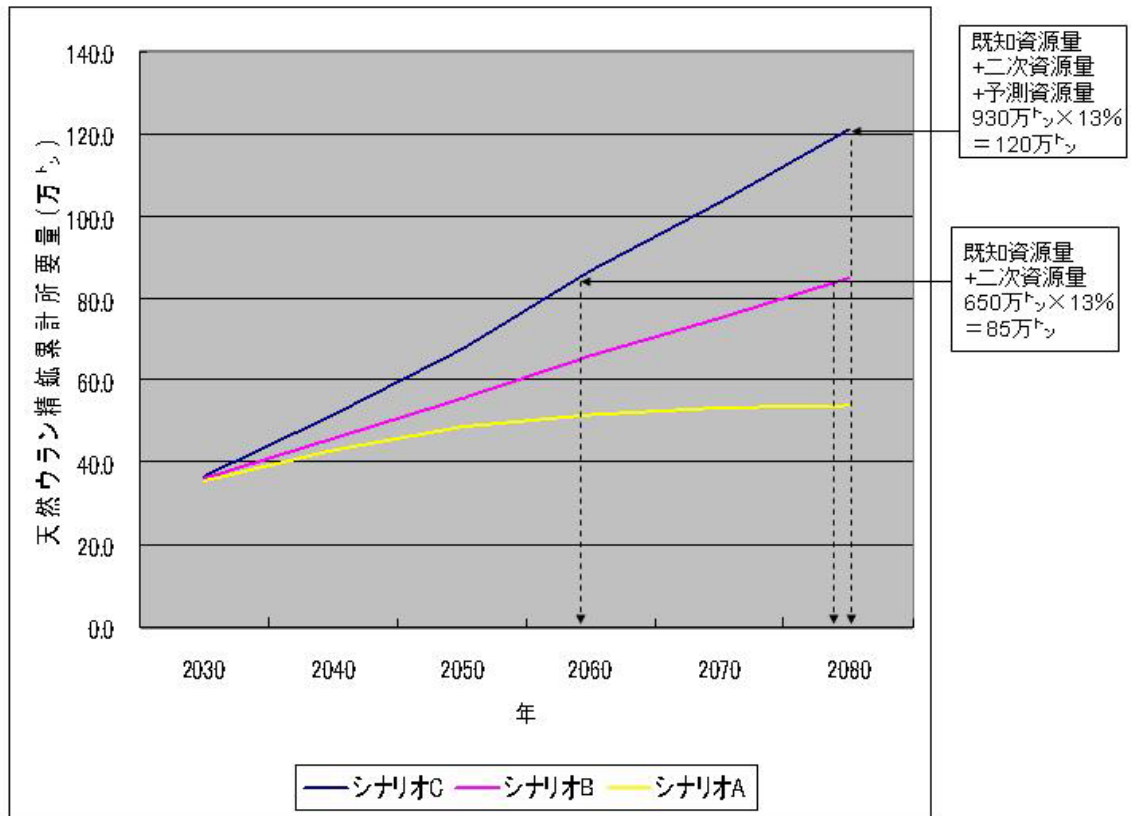


図 5-4 シナリオ別天然ウラン所要量の見通し

(2) ウラン資源制約への対応方策

本項では、各種の技術的な方策により、天然ウラン精鉱所要量の削減状況を示す。

(a) 新型炉導入による効果

a) FBRの開発導入(表5 - 3 のシナリオD)

顕在化が懸念されるウラン資源制約に対応するには、燃料増殖が可能とされるFBR体系への移行が加速することが期待される。しかしながら、軽水炉は既に原子力発電の主流として定着しており、さらに、後述のように、性能の一層の向上、長寿命化が見込まれ、FBRが一旦実用化レベルに達した段階においても、軽水炉体系がFBR体系に移行するには相当長期の時間を要するものと考えられる。さらに、一旦、導入されても、FBRにおいて燃料の倍增時間は30~50年を要する。

FBR実用化を2050年頃とし、実用化後もFBRと軽水炉が並存するとの前提の下、図5-5に示すように、原子力発電「基数」維持シナリオにおいて、2050年以降、軽水炉発電容量は横這いとし、それを上回る容量をFBRとする場合、2080年までにFBRは12基、2,000万kW程度(単基容量170万kWと仮定)導入される(シナリオD)。その場合、新規炉の全てを現行の軽水炉とするシナリオCに比べ、2080年までの累計の天然ウラン精鉱所要量は7%程度低減される。

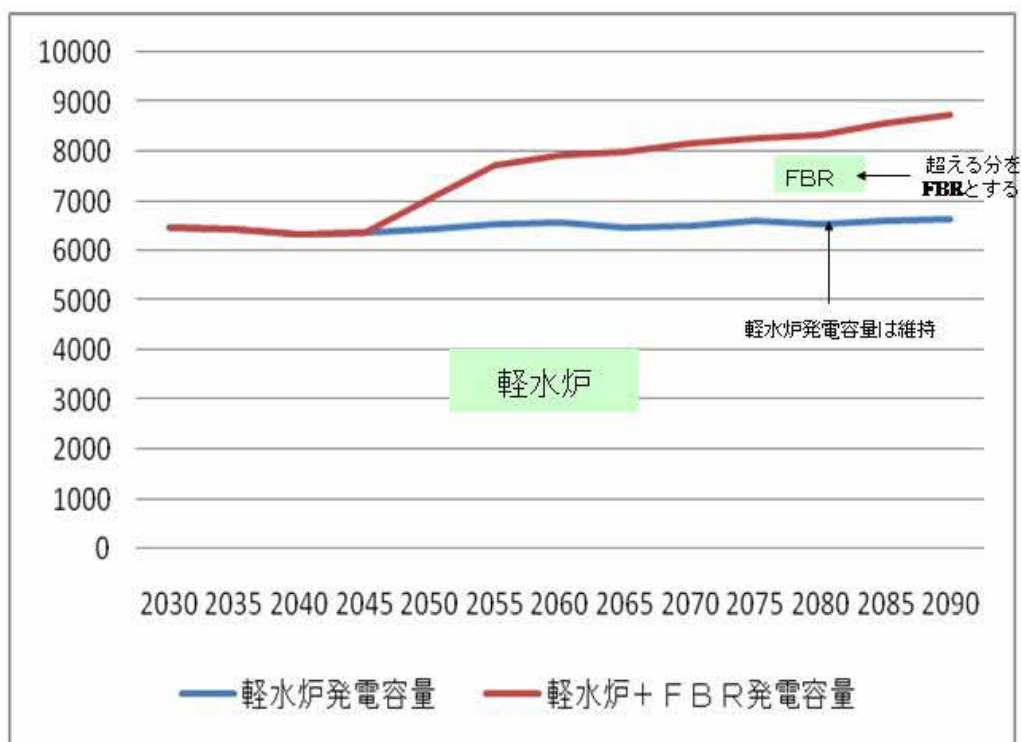


図 5-5 FBR 導入の想定シナリオ

b) 次世代軽水炉の開発導入(表5 - 3 のシナリオE)

わが国では、2030 年頃から見込まれる国内の既設炉のリプレイス建設需要、及び、回復基調にある世界の新規炉建設需要に対応するため、2008 年度から、表 5-2 に示す開発目標を目指し次世代軽水炉の開発に着手している。

同炉においては、免震、寿命80年、パッシブ系及びアクティブ系を組合せた安全システム等の技術開発に加えて、濃縮度5%超の燃料の採用により取出平均燃焼度を現行の40～50 GWd/t から70GWd/t まで向上させ、ウラン精鉱所要量を従来の炉に比して、1割程度低減させるとしている⁴⁾。2030 年以降、同炉が採用される場合、シナリオCに比べ2080 年までの累計で9%程度低減される。

表 5-2 次世代軽水炉の開発目標

項 目	開発目標 (電力要件の事例)
プラント基本条件	出力:170～180 万 kW (80～100 万 kW にも対応可能)
安全性	炉心損傷頻度:10-5/炉年、 格納容器破損頻度:10-6/炉年 シビアアクシデント対策を設計で考慮
経済性	建設単価:成熟期で13 万円/ kW (170 万 kW の場合) 時間稼働率:97% (寿命平均) プラント設計寿命:80 年 建設期間:30 ヶ月以下 (岩盤検査～運転開始)
社会的受容性	事故時退避:短期的避難 10-6/炉年、長期的移住 10-7/炉年 外部事象の考慮(地震、津波、航空機落下対策)
運営・運転・保全性	炉心設計:取出平均燃焼度 70GWd/t 信頼性が高く合理的なメンテナンスが可能、 メンテナンスフリー設計や信頼性重視保全 (RCM)、状態監視保全 (CBM) 保全物量の低減:最新プラントの 50%
国際標準化	国際的な規格基準類へ適合し、諸外国の許認可に対応可能 立地条件によらず標準的な設計が可能

c) 次世代軽水炉開発導入及びFBR開発導入の相乗効果(表 5-3 のシナリオ F)

上記 a) 及び b) の効果を相乗させ、2030 年頃以降は次世代軽水炉の採用、2050 年頃以降は、一定規模で FBR 導入が進められるとする場合、天然ウラン精鉱所要量は、シナリオ C に比べ 2080 年までの累計で 16% 程度削減される。

各種方策による天然ウラン精鉱累計所要量の削減効果の推移を図 5-6 に示す。

表 5-3 シナリオ別の天然ウラン精鉱累計所要量の見通し(単位:千トン)

		2050 年まで	2080 年まで	C との対比
シナリオ C	原子力発電基数を維持	67.9	120.8	1
シナリオ D	2050 年以降 FBR を導入	67.3	112.4	0.93
シナリオ E	2030 年以降、次世代軽水炉を導入	65.2	1,100	0.91
シナリオ F	FBR 及び次世代軽水炉の双方を導入	64.5	1,017	0.84

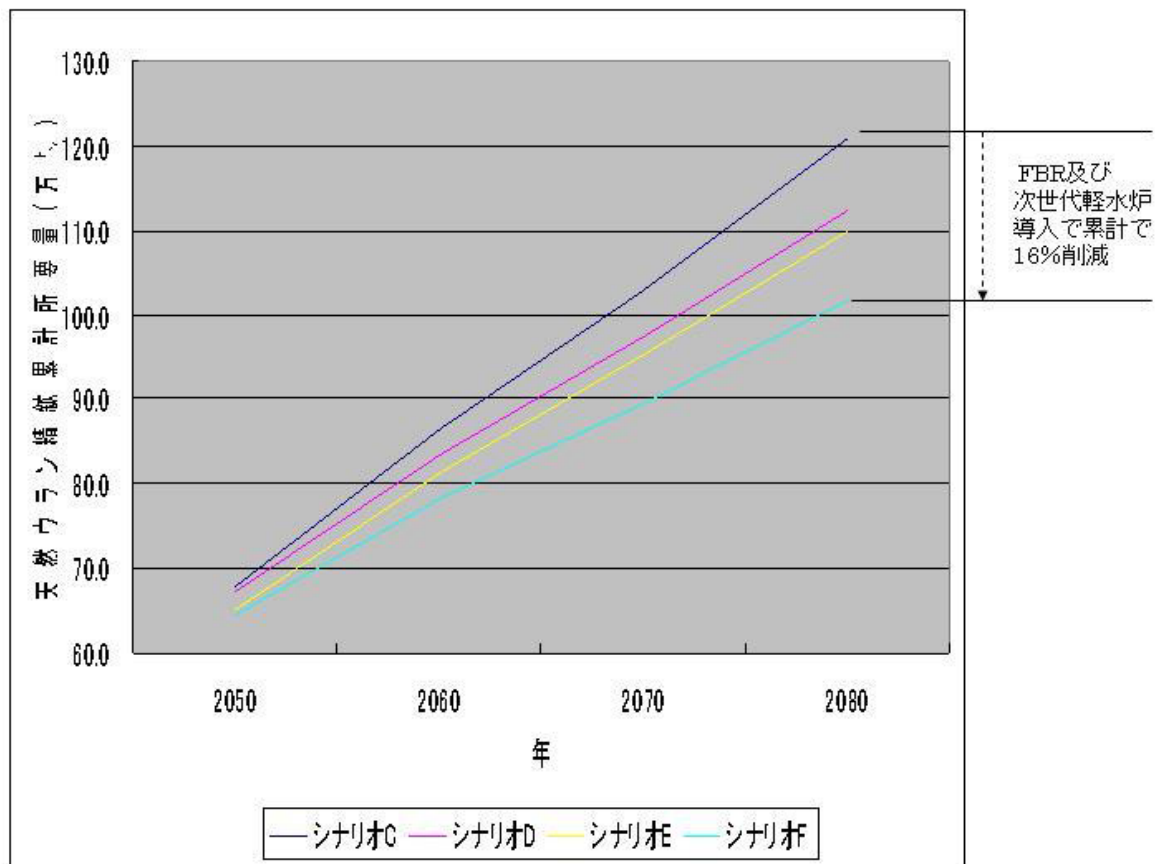


図 5-6 FBR 及び次世代軽水炉導入による天然ウラン精鉱累計所要量の変化

(b) 核燃料サイクルに係る削減方策による効果

a) 濃縮工程における劣化ウラン廃棄濃度の低減(表 5-4 のシナリオ G 及び H)

図 5-7 に示すように、天然ウラン価格が高騰する一方、濃縮役務価格は概ね横ばいで推移する昨今の状況下では、劣化ウラン廃棄濃度を低減させ、濃縮工程でできるだけ多くの核分裂性ウランを抽出することが経済的に有利であり、例えば、劣化ウラン廃棄濃度を現行の 0.3% から 0.15% に引き下げる場合、天然ウラン所要量を 2 割程度削減できる⁵⁾。本効果は、ウラン精鉱価格と濃縮役務価格との相対関係によるもので定常的に天然ウラン精鉱所要量は期待できるものでないが、2030 年以降上記の炉型戦略の方策に本効果を付加する場合、シナリオ C に比べ 2080 年までの累計で 27% 程度削減される。

表 5-4 劣化ウラン廃棄濃度を低減する場合の天然ウラン精鉱累計所要量の見通し

(単位: 千トン)

		2050 年まで	2080 年まで	C との対比
シナリオ C	原子力発電基数を維持	67.9	120.8	1
シナリオ G	次世代軽水炉導入と劣化ウラン廃棄濃度の低減	59.5	95.3	0.79
シナリオ H	次世代軽水炉及び FBR 導入と劣化ウラン廃棄濃度の低減	59.5	87.6	0.73

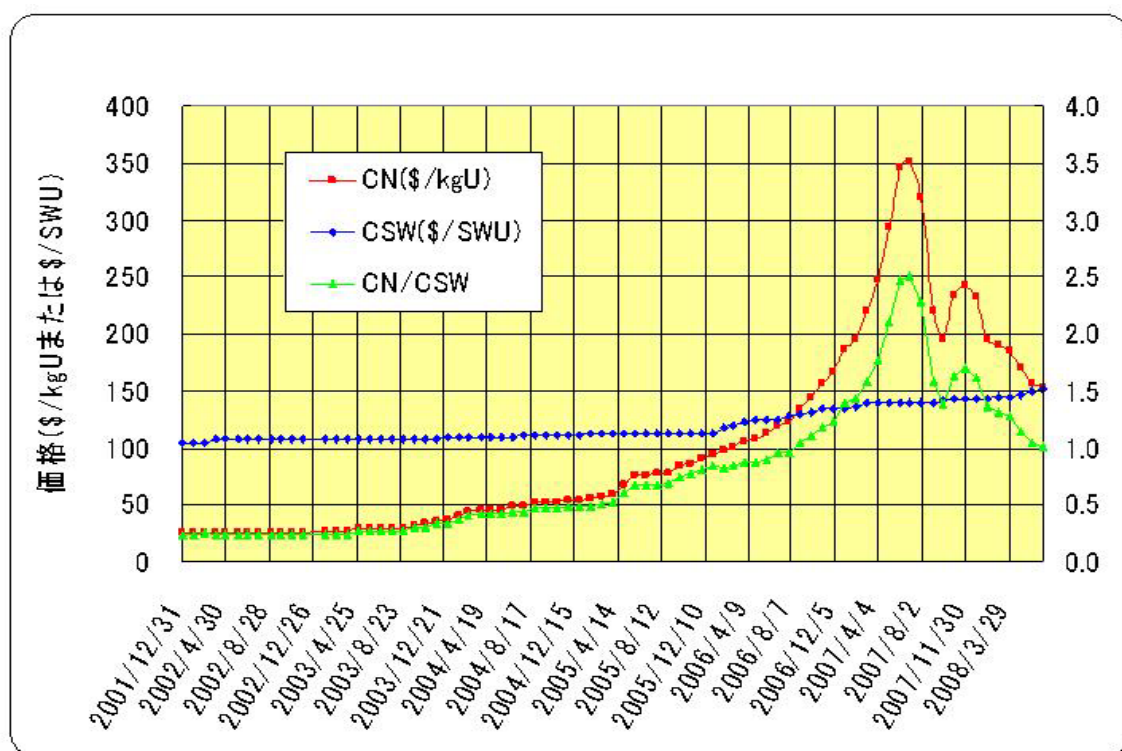


図 5-7 近年の天然ウラン精鉱価格及びウラン濃縮価格の推移

(出典) Nuclear Fuel の情報をもとにエネ総研作成

b) ウラン精鉱所要量削減を図る方策の個別の削減効果を表 5-5 に示す。

シナリオ E 及び F で採用した次世代軽水炉の開発導入に伴う平均取出燃焼度の向上、シナリオ G 及び H で採用した劣化ウラン廃棄濃度の低減の他に、プルサーマル（軽水炉におけるウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の燃焼）による燃料のリサイクル利用により、さらなる低減が可能である。

なお、プルサーマルは、1/3 炉心までの装荷であれば炉心設計を変更することなく実施が可能であるため、プルトニウム需要に応じて実施の選択が可能であり、核燃料サイクルに柔軟性を与える効果を有する。

表 5-5 ウラン資源所要量に係る削減方策

	現行	将来	天然ウラン所要量 削減効果
1 . 平均取出燃焼度の向上 (シナリオ E 及び F)	45~50 GWd/t	70 GWd/t	10%
2 . 劣化ウラン廃棄濃度の低減 (シナリオ G 及び H)	~ 0.3%	0.1 ~ 0.2%	20% ⁵⁾
3 . リサイクル	計画中	プルサーマル、 回収ウランの利用	13% ⁵⁾
総合的節減効果			40 ~ 50 %

(c) 天然ウラン資源確保に向けた努力

これらの方策により直ちにウラン資源制約が克服される訳ではないが、FBR の開発及び導入や、ウラン探鉱開発に関し時間的な余裕を確保することが可能となる。

a) 図 5-7 に示す近年の天然ウラン精鉱価格の上昇に伴い、図 5-8 に示すように在来型のウラン資源の開発が活発化している⁶⁾。また、国際的な原子力発電の再評価、ウラン資源需給逼迫懸念から、国が率先してウラン資源国と関係強化を図る外交努力も進展しており、今後、さらなる進展が期待されるところである。

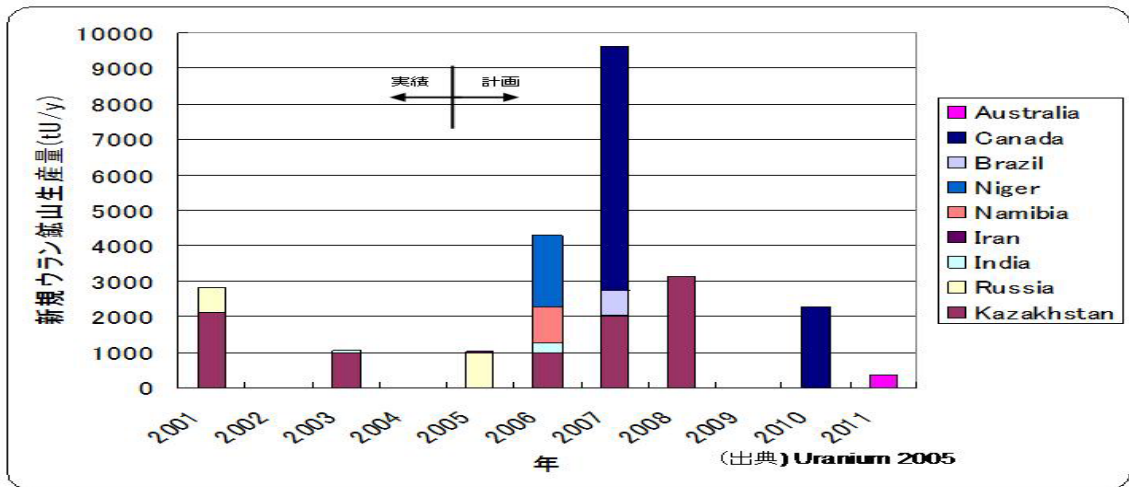


図 5-8 近年の新規ウラン鉱山生産量の推移
(出所) IAEA-OECD/NEA, Uranium 2005

b) ウラン精鉱価格の上昇に伴い、非在来型では、リン鉱石の副産物として回収されるウラン資源の利用、あるいは、低品位のウラン資源の利用が視野に入ってくる。

リン鉱石は肥料の原料として年間 1 億トンを消費されており、副産物としてのウラン回収は、原子力発電の発展期であった 1970 年代に米国やベルギーで実施されていた。その後の天然ウラン価格の低迷により休止しているが、価格高騰に伴い再評価されるようになってきている。なお、世界の肥料生産から推計されるウラン回収量は年間 3700 トン U と、現在の天然ウラン生産量の約 6% に当たり、ウラン鉱山一つ分 (豪州レンジャー鉱山の年間生産量は約 3,800 トン U) に相当する。

c) 天然ウラン資源需給を考える場合、上述したような技術的な方策に加え、需要面では、中国、インドなど経済発展が著しい諸国をはじめとする世界の原子力発電開発利用の動向を把握し、一方、給供面では、天然ウラン精鉱価格の高騰がウラン探鉱開発や FBR の開発及び導入のテンポに及ぼす影響等について検討分析を行い、双方のウラン需給バランスにおいて、原子力開発利用の持続可能性について、さらに分析を行うことが必要となる。

3. 適正な使用済み燃料バランスの確保

(1) 使用済み燃料バランスの重要性

図 5-9 に示すように、原子力発電の運転に伴い必然的に発生する使用済み燃料は、原子力開発利用を円滑に推進する上で、適切に処理・処分することが不可欠である。第 3 章 3.(4) で述べたように、わが国では使用済み燃料を発電所サイトから搬出する目途が立たないような場合、原子炉の停止という最悪の事態にまで発展する可能性がある。また、米国では、法律により使用済み燃料処分の責任が電気事業者から連邦政府へ移されることにより、原子力発電に係る不透明感の一つが解消され、原子炉に係る売買が促進されるようになり、それが米国の原子力再活性化の一因となった経緯がある。(参考 1 を参照)

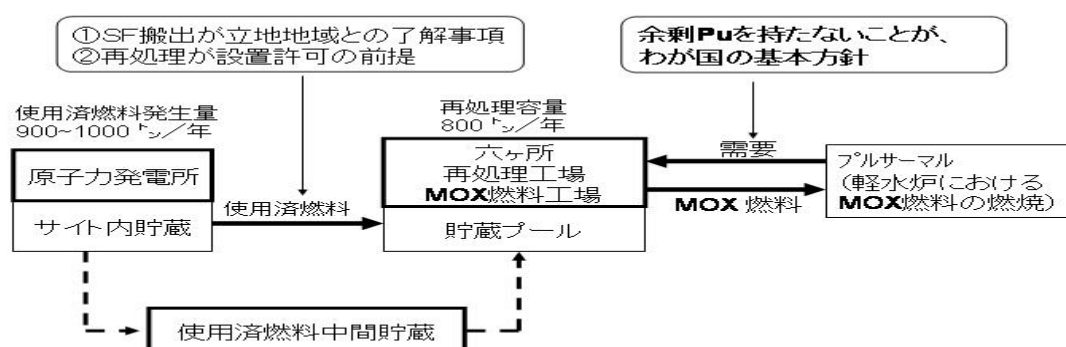


図 5-9 再処理工場を中核とする使用済み燃料及びプルトニウムのフロー

(2) 使用済み燃料中間貯蔵の位置づけ

使用済み燃料貯蔵は、燃料として利用可能なプルトニウムを採掘できる“プルトニウム鉱山”を形成することである。わが国では、使用目的が明確なプルトニウム需要がない限り使用済み燃料は再処理しないという基本方針があるが、使用済み燃料中間貯蔵は、使用済み燃料発生と、需要に応じた再処理との間に生じる時間的なギャップを吸収し、また、再処理工場が停止した場合の対応措置を提供でき、核燃料サイクルの柔軟な運用を可能とするもので原子力政策の重要課題として位置づけられる。

(3) 使用済燃料バランスに係る試算

(a) 試算の前提

前述のシナリオ別に使用済み燃料の累積発生量と、再処理される燃料量及び貯蔵される燃料量との合計のバランスを検討する。同算定に当たっては、表 5-6 に示す事項を前提とし、下記に示す方法により算出する。なお、2030 年頃の運転開始に向け、2008 年度から開発に着手された次世代軽水炉においては、燃焼度の向上により使用済燃料の発生量が3～4割削減される見込みであり、それを見込んだ算定となっている。

表 5-6 使用済燃料バランス算定に当たっての前提

事 項	内 容
1. 発生	
(1) 既設炉 ⁷⁾	平衡取出燃料量 BWR22tU, PWR19tU, 平均 20.5tU (燃焼度 40,000MWD/t, 100 万 kW に係る数値)
(2) 次世代炉 ¹⁾²⁾	同 上 BWR14.7tU, PWR14.7tU, 平均 14.7tU (燃焼度 60,000MWD/t, 同上), 2030 年頃から導入
2. 処分	
(1) 再処理済 ⁸⁾	東海再処理工場 1,111tU, 海外再処理 5,600tU
(2) 六ヶ所再処理工場	年間再処理量 800tU/年
3. 貯蔵容量	
(1) 原子力発電所 ⁸⁾	1. 管理容量 16,940tU (2005 年) (管理容量 = 貯蔵容量 - 1 炉心分 - 1 取替分) 2. 全サイトの管理容量の合計は、1 取替分合計の約 13 倍 ⁹⁾ 3. 新規炉も同程度の貯蔵容量を有すると仮定
(2) 六ヶ所再処理工場	貯蔵容量 3000tU

x 年における使用済燃料累積発生量 $R(x)$

$$= \sum_{i=1}^x 20.5 \times C_i / 100 + \sum_{i=1}^x 14.7 \times N_i / 100 + 94.5 \times D_x / 100$$

C_i : i 年における既設炉の原子力発電運転容量 (単位: 万 kW)

N_i : i 年における次世代軽水炉の原子力発電運転容量 (単位: 万 kW)

D_x : x 年までに廃止措置される原子力発電容量 (単位: 万 kW)

(b) 試算の結果

シナリオBに係る試算結果を図 5-10 に示す。2010 年頃以降、六ヶ所再処理工場が所定の能力で順調に稼働することを前提としても、2030 年前には、使用済燃料の累積発生量が、再処理量及び貯蔵容量の合計を上回ることとなる。なお、この算定では、表 5-6 に記載のように、新規炉には、既設炉平均の貯蔵容量(1取替分の燃料量の 13 倍⁹⁾)を有することとしている。

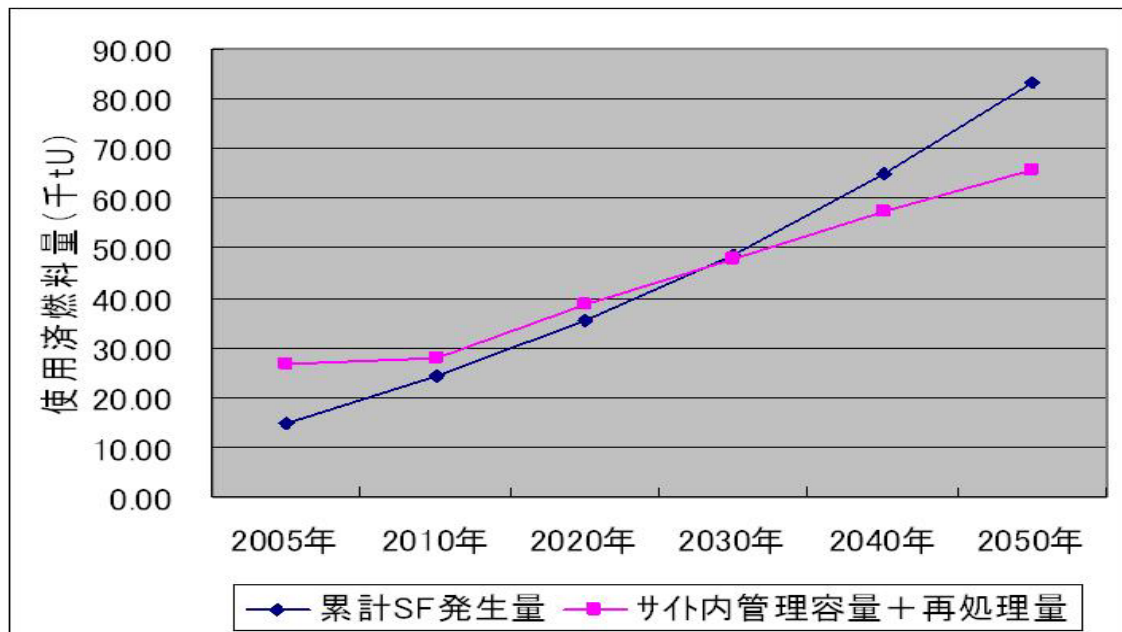


図 5-10 使用済燃料に係る発生量と貯蔵量のバランス(シナリオ B の場合)

(4) わが国では、青森県むつ市において使用済燃料中間貯蔵施設の建設計画(貯蔵容量 5000tU¹⁰⁾)が推進されている。今後の原子力発電開発に伴い使用済燃料発生量が増加することに加え、六ヶ所再処理工場の運転に係る不透明性、次の民間再処理工場の建設時期、容量等の仕様が未定であること、立地地域との関係には不透明性があること等を考慮すると、特定の地域に集中することなく、国内でさらに数ヶ所のサイトの立地が必要である。

前述の原子力分岐シナリオにおいて想定したように再処理工場が長期に亘り停止するような場合には、図 5-11 に示すように、2020 年には 5000tU 程度、2025 年には 10,000tU 程度、サイト内あるいはサイト外の貯蔵容量の追加が必要である。

同施設で採用されるキャスクによる乾式貯蔵方式は、内外で多数の利用実績があり技術的な問題は少ないと考えられるが、原子力施設として立地地域への申入れ及び了解、安全審査等の一連の「安全・安心」に係るプロセスが必要であり、そのプロセスに係る不透明性を考慮すると、十分な時間的な余裕をもって臨むことが肝要である。

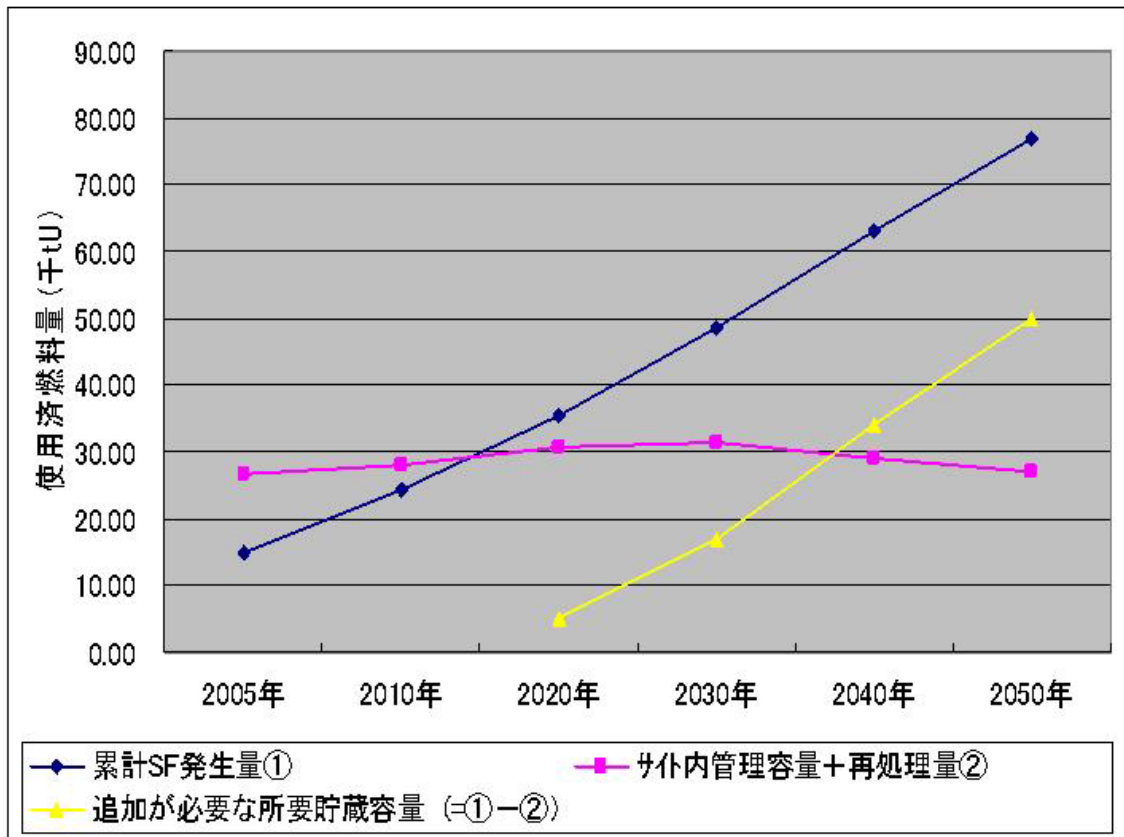


図 5-11 六ヶ所再処理工場が長期停止する場合の使用済燃料バランス

- 参考文献 -

- 1) 核燃料サイクル開発機構、“プルトニウム利用技術に関する調査検討(3)” (1999)
- 2) 同上、“同上(5)” (2000)
- 3) (社)日本原子力産業協会“世界の原子力発電の動向”
- 4) 高橋祐治、“電気事業者から見た次世代軽水炉開発の重要性”、原子力 eye, Vol54, No.1 12-15 (2008)
- 5) (財)エネルギー総合工学研究所による調べ
- 6) 国際原子力機関(IAEA) / 経済協力開発機構原子力機関(NEA/OECD), “Uranium 2005 : Resources, Production and Demand” , (2006)
- 7) 日本原子力産業会議、原子力ポケットブック 2005 年版
- 8) 資源エネルギー庁原子力広報ページ
- 9) 平成 19 年度版原子力白書
- 10) リサイクル燃料貯蔵(株)ホームページ

第 章 結論

1. わが国のエネルギーセキュリティレベルに係る評価

不確実な環境の下、エネルギーを巡る多様なリスクに適確に対応していくには、セキュリティの高いエネルギー需給構造の確立が必要である。エネルギーセキュリティに関し守るべき対象は、一国の産業経済や国民生活に係るエネルギー需要を安定的に経済的に確保するという「国益」(national energy security)から、国際社会の一員として守るべき環境や安全に係る社会的な要請も含めて対応する「国際的公益」(global energy security)へと量・質ともに変化している。

今世紀中に顕在化が懸念されるリスク要因として資源制約と環境制約があり、また、わが国が目標とすべきエネルギー政策の柱として「安定供給」、「環境適合性」、「経済性」が挙げられる。本論では、これらの評価軸に関し状況を定量的に示すことが出来る評価指標として、以下の指標を設定した。

- (1) エネルギー利用効率 (単位 GDP 当たりの一次エネルギー供給量)
- (2) 調達の脆弱性(エネルギー供給に係る中東とロシアへの依存度)
- (3) エネルギー供給源の多様化 (= Wi^2 / Wi : 各エネルギーのシェア)
- (4) 二酸化炭素排出 (= $Wi \times Ci$, Ci : 各エネルギーの単位エネルギー消費量当たりの炭素排出量)
- (5) 経済への影響 (化石燃料輸入額の GDP に対する割合)

上述の各評価指標に関し、主要なエネルギー消費国である先進 8 ヶ国(日本、韓国、米国、カナダ、英国、フランス、ドイツ、イタリア)及び1地域(EU15 ヶ国)の間の比較における相対的な位置づけ(偏差値)を評点とする手法により、2005 年時点におけるエネルギーセキュリティレベルの評価を行った。わが国のエネルギー供給に係るセキュリティレベルは、エネルギー利用効率については世界トップの評点であるが、他の評価指標については平均以下の評点であり、総合としても平均を下回る位置にある。一方、電力供給に係るセキュリティレベルは、5 つの電源がバランスのよい電源構成を達成しており、これが多様化に係る評点を向上させ全体としても、先進各国とほぼ同等の位置を占める。

2. リスク要因を踏まえた原子力開発利用の分岐シナリオの分析

原子力開発利用を巡るリスク要因を抽出・整理し、原子力開発利用の方向性に影響を与える下記のリスク要因をシナリオドライバーとして、原子力リサイクル社会を目指した分岐シナリオを策定した。これらのリスク要因の顕在化により、()内に記載するシナリオに陥ることとなる。

- (1) 深刻な原子力事故 (潮待ちシナリオ)
- (2) 低稼働あるいは建設の不透明感 (窓際シナリオ)
- (3) 技術力や人材に係る制約 (制約シナリオ)
- (4) 再処理工場の長期停止 (実力封殺シナリオ)
- (5) ウラン資源制約 (壁際シナリオ)

世界的に回復基調にある原子力発電であるが、各国はそれぞれ、固有とともに共通のリスクを抱えている。同分岐シナリオにおいて、わが国は、全般としてフランスに次ぐ好位置にあるが、初の商用再処理工場が運転開始直前の段階にあり、同工場が円滑に運転

されるか否かによりリサイクル社会への道が開けるか、原子力の有する利点を生かせず実力を封じる状況に陥るかの分岐点に位置している

3. 原子力開発利用シナリオに係るエネルギーセキュリティレベルの評価

本論で提案した評価手法により、下記の3つの原子力開発利用シナリオに関し、エネルギーセキュリティレベルの推移の試算を行った。

- (1) 原子力減速シナリオ(事故や低稼働により原子力発電が選択されない。)
- (2) 原子力「比率」維持シナリオ(廃止された「容量」の見合いで新規炉が建設され、電力供給に係る原子力発電比率は、30～40%台で推移する。)
- (3) 原子力「基数」維持シナリオ(廃止された「基数」の見合いで新規炉が建設され、電力供給に係る原子力発電比率は60%台まで上昇する。)

その結果、原子力は、電力供給に占める割合が60%程度に達するまでは、わが国のエネルギーセキュリティレベル向上に貢献することも示された。

4. 原子力開発利用の今後のあり方に関する考察

(1) 経済産業省の新・国家エネルギー戦略では、2030年頃の数値目標として電力供給に占める原子力発電比率を30～40%程度以上としているが、上記3.の試算及び2005年断面で原子力発電比率を増減させる方式による試算によれば、原子力発電比率が60%程度に達するまでは、エネルギーセキュリティレベルは向上していくものと考えられ、諸情勢を勘案しつつ、この辺りを目標として原子力開発利用を推進していくことの有効性を示唆した。

(2) その最適比率を目指す場合、ウラン資源面での制約が懸念されるところであり、同制約克服のためには、ウラン精鉱所要量を低減させるFBR及び次世代軽水炉の開発導入等の原子炉戦略及び核燃料サイクル両面からの技術的なアプローチと、非在来型ウラン資源まで視野に入れたウラン資源確保の推進が必要となることを示した。

(3) 使用済燃料中間貯蔵は、使用済燃料発生と需要に応じた再処理との間に生じる時間的なギャップを吸収するとともに、再処理工場が停止した場合の対応措置を提供でき、核燃料サイクルの柔軟な運用を可能とする。同施設は、六ヶ所再処理工場の運転に係る不透明性、次の民間再処理工場の建設時期等が未定であること等を考慮すると、国内でさらに数ヶ所での立地が必要であることを示した。

5. 昨今の原油をはじめとするエネルギー資源の価格高騰や地球環境問題に対する国際的な取組みの進展は原子力には追い風である。現在、原子力は、1980年代以降の長きに亘る停滞期を経て回復期にあるが、この動きを確かなものにするには、原子力開発利用を巡るリスク要因に関し克服策、あるいは顕在化する場合の対応策を予め検討・準備することは有意義である。また、本論では十分な議論を行っていないが、原子力開発利用は、核不拡散や核物質防護等原子力固有のリスクに加え、政治的、経済的、社会的等多岐に亘る様々なリスクに取り巻かれており、原子力を技術的な側面だけで論ずることには危ういものがあり、それらのリスク回避のためには、国内外の社会や世論の動きを適確に把握し、適切に対応していくことが必要である。

(参考1) 米国の原子力開発利用の停滞と回復に係る要因の分析

1. 本章の背景

本論の執筆者は、1998年 - 2000年の3年間に亘り(社)海外電力調査会ワシントン事務所に勤務し、その間、エネルギー省(DOE)、原子力規制委員会(NRC)、原子力エネルギー協会(NEI)、電力の業界団体であるエジソン電気協会(EEI)、電気事業者、エネルギー関係コンサルタント等と米国の原子力の将来像も含めエネルギー・電力を巡る多様な課題について情報交換及び意見交換を行った。その一環として、1998年3月に、米国電力会社の原子力関係者にインタビュー調査を実施した際、同社は、それまで10年を越す長きに亘り、同社の原子力発電所の運転認可期間延長申請に関しNRCと協議をしてきており、認可されるまでには更に同程度の時間を要するであろうと言っていたが、予想に反し、翌1999年には同延長申請が米国初の認可を受けた。また、1998年には、スリー・マイル・アイランド(TMI)1号機が原子力発電所の売買の米国初のケースとなった。回顧すれば、これらの案件に示されるように、同時期は、米国の原子力業界が1980年代以降の停滞から回復へと向かうターニングポイントであったと言える。第4章で論議した原子力開発利用に係る分岐シナリオに即して言えば、現在の米国の原子力開発利用は、「窓際シナリオ」から脱却して、次の「制約シナリオ」へと向かう時期に当たると言える。(図7-1参照)

本章では、本論執筆者が、その米国原子力開発利用のターニングポイント時に米国在勤の間において得た知見、2005年3月及び12月にワシントンにおいて行ったインタビュー調査結果、最近の状況等を基に、そのような原子力開発利用に係るシナリオの転換が起こった要因や関係者の動向についてとりまとめたものである。

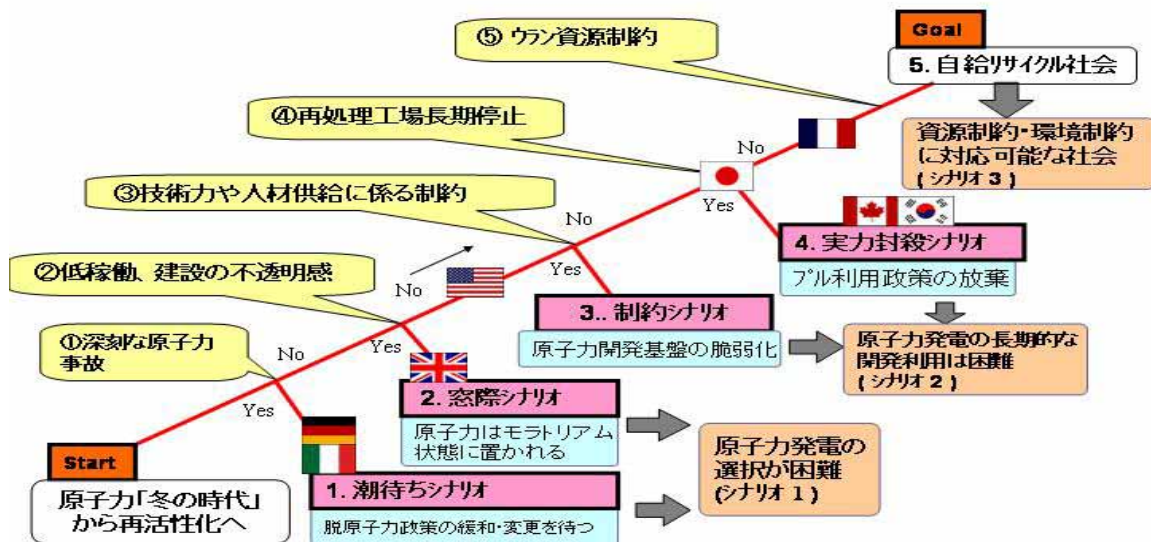


図 7-1 原子力開発利用に係る分岐シナリオ (図 3-3 の再掲)

2. 米国における原子力開発利用の推移

(1) 概要

米国の商業用原子力開発利用は、1960 年における最初の原子力発電炉の運転開始以来、約 50 年が経過している。1960 年代後半から 70 年代前半にかけて、計 140 基程度の原子力発電炉が発注され活況を呈したが、1970 年代半ば以降停滞が始まり、それに止めを刺したのが 1979 年に発生した TMI 原子力発電所事故であり、それを転換点として大量の発電用原子炉がキャンセルされ、新規発注は最近に至るまで途絶え、長い「冬の時代」を迎えるに至った。

現在、米国の原子力開発利用は、既設発電炉は良好なパフォーマンスを示すことで競争力を有する電源として再評価され、新規発電用原子炉の発注がなされるようになり、“原子力ルネッサンス”と呼ばれる復活を享受している。その転換に当たっては、電力規制緩和を背景として電気事業者の経営改革、規制効率化という社会的要請に応えた原子力規制委員会(NRC)の規制改革、原子力発電運転協会(INPO)、原子力エネルギー協会(NEI)などの中立機関が設置され機能したこと等が要因となっている。以下、各項で、それらについて詳細を述べる。

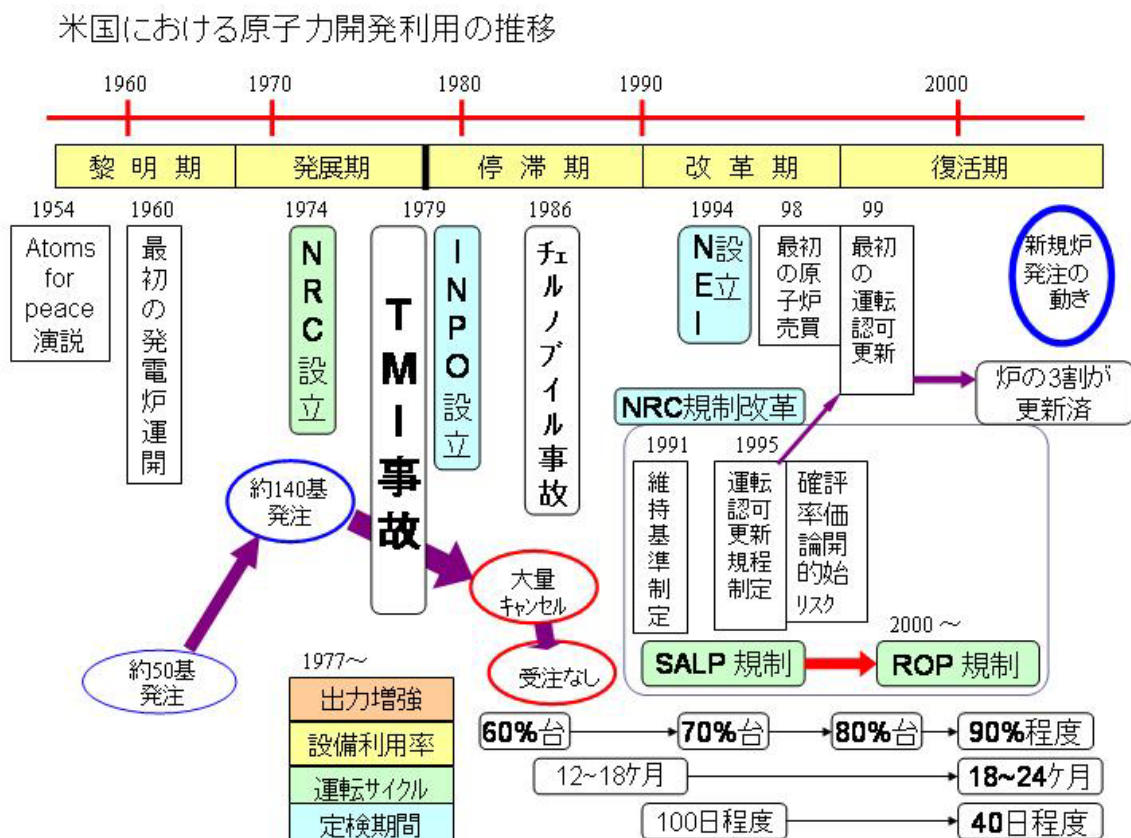


図 7-2 米国における原子力開発利用の推移

(2) 1980 年代:TMI事故以降の「冬の時代」

米国の原子力開発利用は 1979 年に発生した TMI 事故以降、「冬の時代」に入った。

(a) プラント建設の低迷

電気事業者は、原子力プラントに係るライセンスを得るのに長時間を要するようになり、建設中あるいは設計中のプラントは、安全確保の観点から設備変更、新規規制の遡及適用(バックフィット)等が要請され、これが建設期間の長期化、ひいては建設コストの高騰を招来し、多数のプラント建設がキャンセルされた。また、反原子力の社会的な要因も加わり、既発注分は 1980 年代においても建設・運転開始がなされたが、1979 年以降、最近に至るまで発電用原子力プラントの新規発注は途絶えていた。(図 7-3 参照)

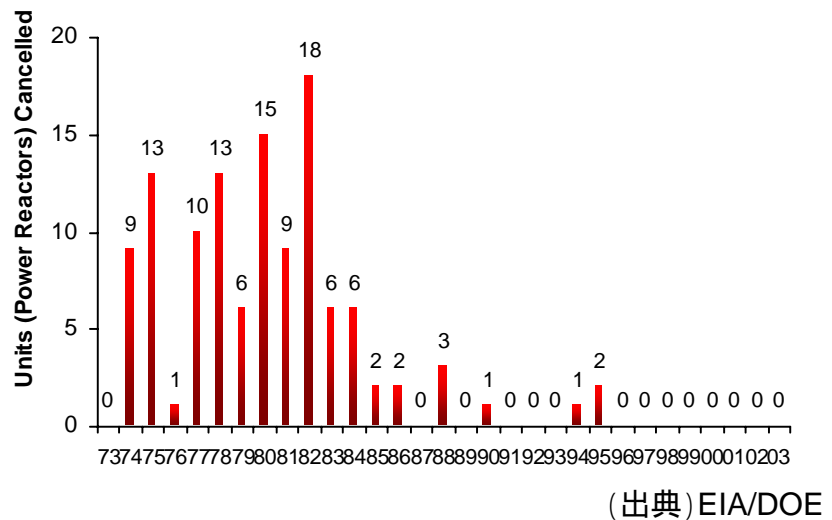
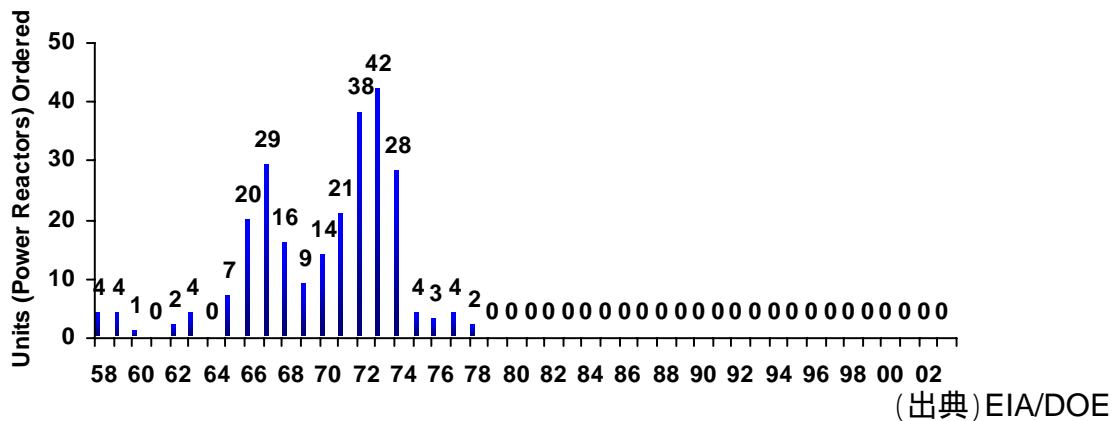


図 7-3 米国における原子炉の発注基数及びキャンセル基数の推移

(b) プラント稼働の低迷

設備利用率も平均で 60% 台に低迷した。要因としては、

a) 短い運転サイクル

12～18 ヶ月が運転サイクルの上限というのが一般的な考え方であった。

b) 長い燃料交換及び定期保全停止期間

運転中の監視保全(オン・ライン・メンテナンス)は殆ど行われておらず、100 日程度は必要というのが一般的な考え方であった。

c) トラブルの頻発、特に、影響の大きかった事故・トラブルは以下のとおり。

1975年 ブラウンズ・フェリー発電所のケーブル火災事故

1979年 炉心溶融を引き起こしたTMI事故

1980年 ブラウンズ・フェリー発電所の制御棒挿入失敗

1983年 セーラム発電所のトリップ失敗

1986年 多量の放射性物質を環境中に拡散したソ連チェルノブイル事故

1987年 運転規律違反によるピーチボトム発電所の長期運転停止

1996 年 マイルストーン発電所の長期運転停止

(3) 1990 年代半ば以降迎えた“原子カルネッサンス”

1990 年代半ば以降、米国の原子力発電所のパフォーマンスは大きく改善し、高設備利用率と低発電コストを達成している。発電電力量は 1980 年の約 3 倍となり、米国の総発電電力量の約 20% を供給し、石炭に次ぐ第 2 位のシェアとなっている。以下に各種指標の改善の推移を示す。

(a) 設備利用率

米国の原子力発電所の設備利用率は、図 7-4 に示すように、1990 年代初めには 70% 台、後半には 80% 台に達し、現在では、平均して 90% 程度と達している。これは、運転サイクルが、1980 年代は 12～18 ヶ月程度であったが、最近では殆どの発電所が 18～24 ヶ月サイクルに移行したこと、燃料交換停止期間が、1980 年代には 100 日程度を要した 90 年代には平均 40 日程度にまで短縮したことによる。

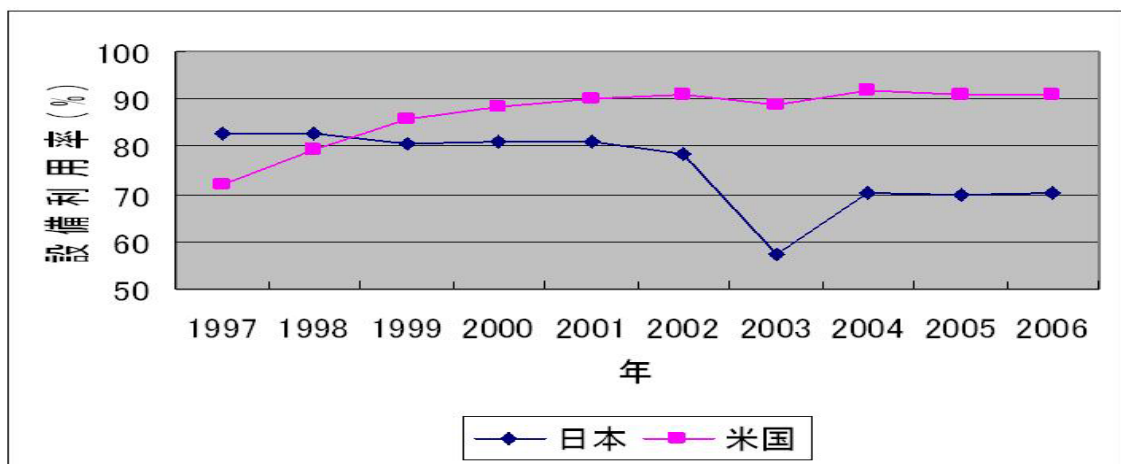


図 7-4 日米の原子力発電所の設備利用率の推移
(出典)(独)原子力安全基盤機構 ”原子力施設運転管理年報 (平成 18 年版)

(b) 原子力発電の発電コスト

1987 年をピークに低下してきており、既設分については他電源と十分な競争力を有する発電資産となっている。

(c) 出力増強

1977 年のカルバート・クリフス発電所を皮切りに熱出力増強が実施されている。図 7-5 に出力増強の累計量の推移を示すが、2007 年 11 月までに増強出力は累計で 113 件、490 万 kW と、原子炉 5 基分に達している。

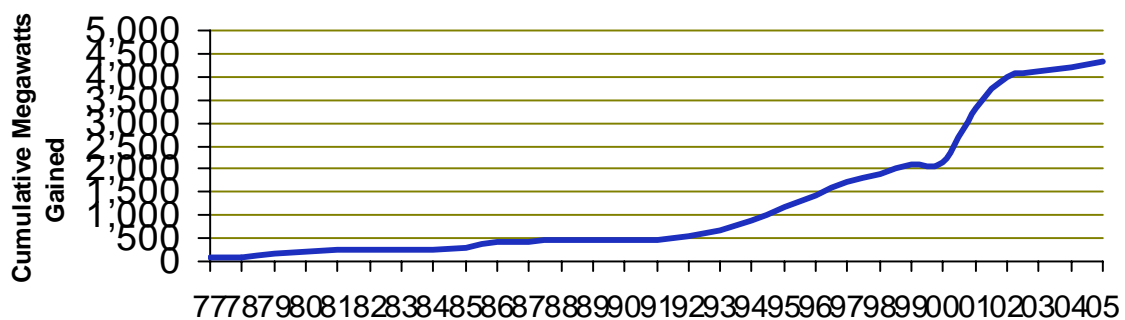


図 7-5 米国原子力発電所の出力増強量累計 (単位:MWe) (出典)NRC

(d) 運転認可期間の延長(40 年 60 年)の延長

1999 年以降、NRC の認可がなされるようになり、米国の発電用原子炉 104 基のうち、2007 年 11 月現在で認可済が 48 基、申請済が 14 基と、ほぼ半数に達している。

3. 原子力稼働改善の原動力

(1) 規制緩和が電気事業者に与えた影響

(a) 1980年代にレーガン政権下で推進された規制緩和政策は、図 7-6 に示すように、民間航空、電信電話、天然ガスの各分野で実施され、1990 年代初頭からは電力業界においても実施されている。

	1980年代	1990年代
民間航空	1978年航空規制緩和 ▽	
電信電話	AT&T分割→長距離電話自由化 ▽	市内回線の自由化 ▽
天然ガス	価格規制廃止・託送義務化 ▽	卸売・輸送・貯蔵の水平分離 ▽
電力		競争原理導入 ▽ 送電線開放 ▽ 州による小売自由化 ▽

図 7-6 米国における規制緩和の実施状況

この規制緩和は、英国のサッチャー政権の国営企業の民営化政策と軌を一にしており、世界的な市場重視の流れを形成してきた。レーガン、サッチャー、中国の鄧小平が主導した「市場主義革命」は、ニューディール政策以降半世紀に亘った、国の関与重視の潮流を覆す動きと評価されると考えられる。

この規制緩和は、これまで規制下にあった産業に大きなインパクトを与え、料金低下や経営の効率化を推進する一方、業界構造に大きな変化をもたらした。例えば、航空業界では、名門パンナム社を含め多数あった航空会社が淘汰され、米国航空市場は、ユナイテッド、アメリカン、デルタの3社が大きなシェアを有するようになった。(2001年の9・11テロ事件以降の航空不況により寡占はさらに進行している。) 電信電話業界では、独占企業体であったAT&Tが長距離電話会社と地域電話会社に分割され、新規通信会社の参入が促進された。

(b) 電力業界の規制改革は、電気事業規制を行う権限を有する州政府単位で実施されてきた。1998年のカリフォルニア州の電力小売自由化を皮切りに、電気料金が相対的に高い東海岸、西海岸を先頭に各地域の実情に応じたアプローチがなされた。

独立発電事業者(IPP)等の新規参入を促進するため、必要経費を消費者に転嫁するレートベースの料金体系が自由化され、1980年代の電気事業者は、保守的な企業体質、年功序列的なトップ人事、多層的な指揮命令系統、そして、なにより経費の料金転嫁が可能であったことによるコスト意識の低さ等が常態であった。また、サイト内の部門間、サイト間、会社間での情報共有や交換が十分でなかった。しかしながら、直面する競争環境下で構造改革を迫られることとなり、ウォール街等社外からの経営者の招致、各発電所サイトに責任者を配置する等の人事改革や従来はメーカーに依存していたプラント運転管理の内製化などの改革が実施された。

(2) 産業界と規制機関の対話の促進

(a) 産業界の動向

1979 年の TMI 事故を契機に、電気事業者により原子力発電運転協会 (INPO) が設立された。同機関は、プラントの運転管理状況について中立的な立場から評価を行い、必要な場合は改善指導を行っており、現在、原子力プラントの稼動改善に大きな役割を果たしている。情報は非公開で、会員である電気事業者間でのみ共有されている。

NRC と産業界との対話は、第一段階として、1986 年に、産業界を代表する機関として NUMARC が設立され、産業界と NRC の対話の窓口として機能した。

第二段階として、1994 年に、原子力エネルギー協会 (NEI) が設立され、NRC のみならず議会、メディアも含めた対応窓口として、産業界の“統一された意見”を発信する機能を担うようになっている。

これら産業界の中立機関である INPO、NEI 及び米国電力研究所 (EPRI) は、約 15 年間にわたり、定期的に会合を持ち、目的の共有、優先順位付けの調整等、産業界に関する事項に関し意見交換を行う場となっている。その中で、EPRI は、電力セクターの NEI や INPO、規制セクターの NRC の双方に対し、技術的サポートを実施している。これは、同機関が有しているプロジェクト・フォーメーション機能によるものであり、そのあり方は、わが国中立機関がモデルとすべきものと考えられる。

(b) 規制行政効率化の要請と規制機関の動向

a) 1990 年代初頭の政府機関業務の“効率と効果”重視の政策は、議会や業界から NRC 業務は非効率と批判されるようになった。1980 年代の米国原子力規制委員会 (NRC) は、定量的なリスク評価を行う技術的基盤を構築しておらず、SLAP (Systematic Assessment of Licensee Performance) と呼ばれるシステムにより規制を実施していたが、事故・トラブル情報の蓄積、産業界との経験・情報共有や、稼動状況、リスク、規制との相関関係の認識が十分でなく、規制当局の主観的な判断、過剰反応や規制がなされがちであった。また、安全上問題を有するプラント・リストに、一時、17 プラントがリストに掲載され、このリストが公開されることで、同炉所有事業者の財政的な評価や、公衆やメディアによる評価を低下させることとなった。

b) このような状況の下、1990 年成立の予算法 (Omnibus Budget Reconciliation Act of 1990) は、NRC に必要経費の約 90% (少なくとも 80% 以上) を、認可取得者と認可申請者から得られる規制行為に係る手数料で賄うよう要請している。これにより、規制は顧客に対するサービスであるとの認識が、規制当局と事業者の間で共有され、NRC も規制の効率性を意識するようになった。

また、NRC の規制のあり方に係る調査も各種実施され、重要なものとして、1986 年の Sillin レポートと 1994 年の Towers Perrin レポートが挙げられる。Sillin レポートは、産業界との協調及びコミュニケーションの重要性を指摘しており、1994 年の NEI 設立、その後の NRC - NEI の協調の道筋をつけるものといえる。一方、Towers Perrin レポートは、NRC の依頼により、NRC 規制のあり方に関し評価検討したもので、NRC 規制全般の見直しの必要性を指摘している。

c) さらに、米国議会において原子力関係の重鎮であるドメニチ上院議員 (ニュー・メキシコ州選出、) の著書⁸⁾によると、1990 年代後半当時、NRC の許認可プロセスは見通しの

付かない長い時間を要し、事業者の原子力開発利用のインセンティブを削ぐものであったので、1998 年、同議員は、上院エネルギー・水資源歳出小委員会議長として NRC の活動状況について評価を行い、ジャクソン NRC 委員長(当時)に同委員会活動の改革を促し、これが契機になり NRC の規制が、運転実態やリスク情報に基づくものに転換し、「規制文化」が変質したとしている。

d) 以上のような改革圧力を踏まえ、1990 年以降、順次、規制改革が行われてきた。

1991 年 維持基準を策定

1995 年 運転認可期間の延長(40 60 年)ルールを策定

1996～2000 年リスクに基づく規制(Risk Informed initiatives)を実施

2000 年 新規規制システムとして ROP(Reactor Oversight Process)を採用

ROP システムは、透明性を基本として、稼働実績、リスク情報に基づく規制で、事象や事項のリスク評価を行う SDP(Significance Determination Process)を経ずに、NRC が恣意的に規制強度を増加させることがない仕組みとなっており、稼働実績、安全性及び規制の状況が、PI(performance indicator)や色分け(color coding)により分かり易く示されるようになっている。

維持基準の策定を手始めに、NRC は、事業者や産業界と、ワークショップ等の場で議論をしつつ規制改革を進める手法(learning approach)を採用するようになり、1994 年の NEI 設立以降は、同機関との議論を通じて、産業界と意見調整を行うようになっている。

(3) 原子力発電運転事業者に係る構造変化

1980 年代当時、原子力発電所は、資産というより債務という評価であったが、1999 年以降、原子力発電所の運転期間の延長(40 年 60 年)が認可され、また、使用済み燃料は政府が引取義務を有することが法律で定められた。電気事業者の観点からは、改善してきた運転実績に加え、安全規制や使用済み燃料処分に係る不透明性が解消したことが、原子力発電所は良好な電力資産と評価されることに繋がったものと考えられる。

かかる環境好転の下、原子力発電施設は、1998 年の TMI1 号機を皮切りに売買がなされるようになり、原子力発電所を電源として積極的に活用する事業者による寡占化が進行している。例えば、2000 年に、原子力発電に積極的であったユニコム社(旧コモンウェルス・エジソン社、本拠地シカゴ)と PECO エネジー社(旧フィラデルフィア電力、本拠地フィラデルフィア)が合併し、エクセロン社となり、原子力発電を電源の中核とする発電ビジネスを推進している。同社は、現在、計 20 基、約 2,071 万 kW(米国の原子力発電容量の約 20%)の原子炉の運転管理を行う米国最大手の原子力発電電気事業者になっている。また、南部の大手電気事業者であるエンタジ - 社も 1998 年以降、稼働中原子炉を買い取り、計 11 基約 990 万 kW(同上約 9%)の原子炉の運転管理を行っている。

かつては、米国の原子力発電は、小規模の電気事業者が少数基の原子炉を所有しており、運転ノウハウの共有や経営効率化が困難とも評されたが、現在では、これら中小規模の電気事業者が連携し、運転保守人材やノウハウの共有を進めたり、あるいは、小規模原子力発電施設が大規模電力会社に集約され、標準化された大規模原子力発電施設(nuclear fleet)の運営がなされるようになっている。現在、上位 5 社で米国原子力発電施設の約 5 割を占めるような寡占化が進行している。⁷⁾(図 7-7、表 7-1 参照)

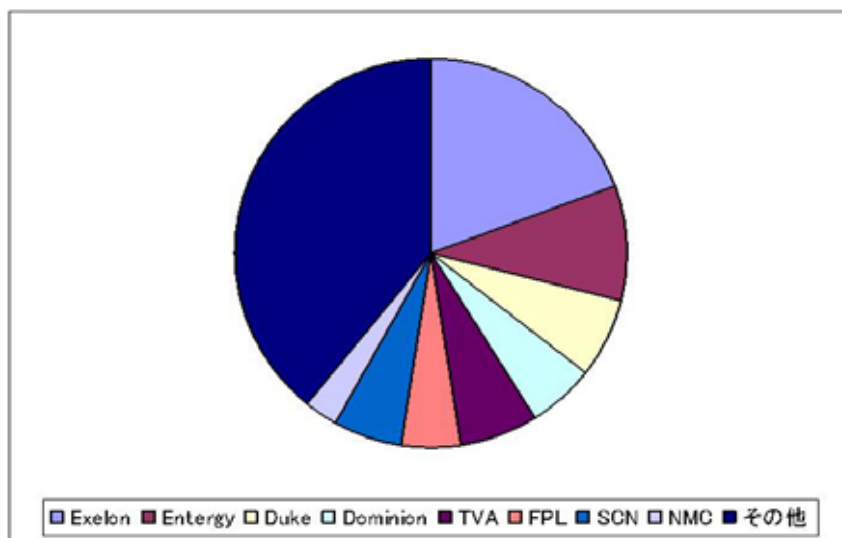


図 7-7 米国における原子力発電所の所有・運転管理に係る寡占の状況
(出典)日本原子力産業協会資料⁷⁾

表 7-1 米国における上位 7 社による原子力発電施設の運転管理状況

会社名	基数	発電容量(万 kW)	シェア(%)
1. エクセロン	20	2,071	19.5
2. エンタジー	11	993	9.5
3. デュークパワー	7	700	6.7
4. TVA	6	680	6.4
5. ドミニオン	7	601	5.7
6. SNC*	6	570	5.4
7. FPL*	6	531	5.0
全米計	104	10,606	100

(出典)図7 - 7と同じ

* 印は、運転管理会社、他は電気事業者

米国における原子力発電所稼働改善に向けた関係機関の動向

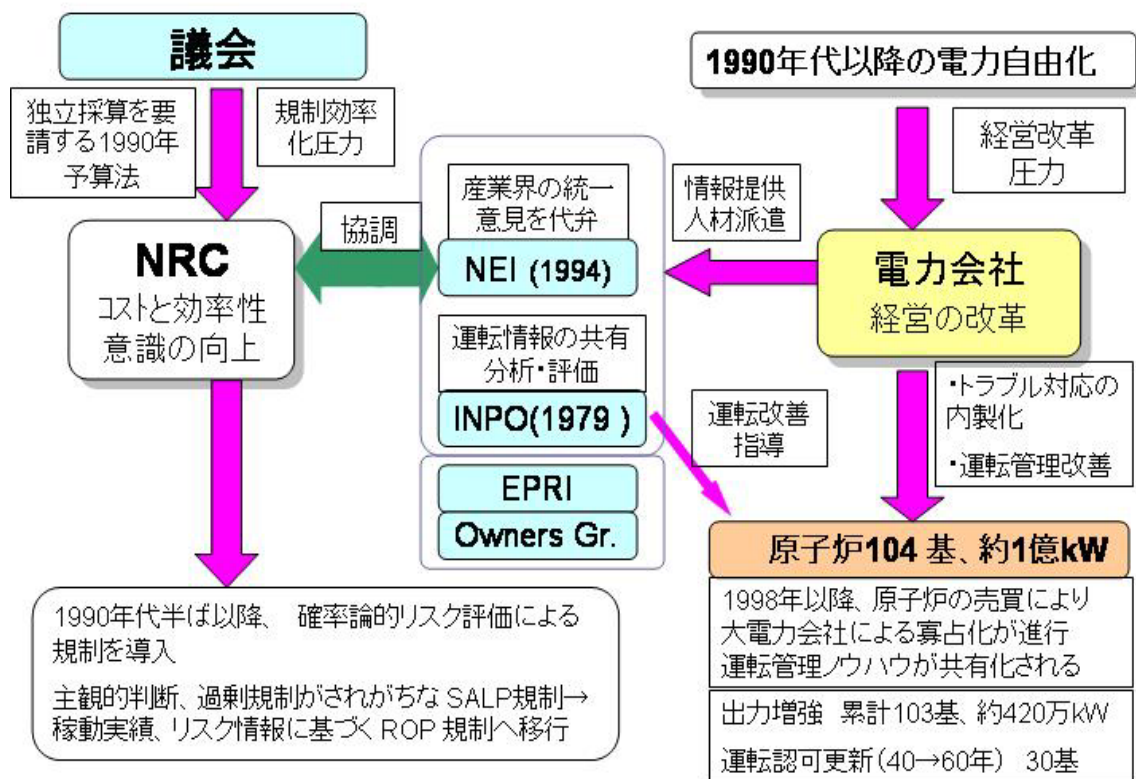


図 7-8 米国原子力開発利用の回復に向けた関係者の動向

4. 原子力「冬の時代」が原子力産業に与えた影響

(1) 米国原子炉メーカーの経営状況の推移

1960年代後半以降、米国内外で軽水炉の建設・運転が活発化し、70年代には、GE、WH各社に関し米国内で平均2基、米国外で1基の原子炉が運転を開始していたが、1979年のTMI原子力発電事故以降、新規受注が途絶え、80年代には既受注分により建設が続いたものの、90年代以降は建設が中断している。

新規受注が途絶えた1980年代以降の「冬の時代」以降における両社の経営状況(表7-2参照)を見ると、明暗が分かれる。

GEは、名経営者とされるウェルチ会長の「選択と集中」の経営方針の下、1980年代前半から、原子炉製造に代わり、燃料供給とサービス事業を強化し、90年代には米国の好景気を反映し、同社の原子力部門も含む電力部門の売上は10年間で3倍増と好調であった。

同会長の著書⁹⁾によると、同氏は、GE会長就任直後の1981年、米国の原子力産業の現実を直視し、新規炉発注がないことを前提に、核燃料供給と保守サービスを提供するだけで事業が成り立つような改革の指示を行い、原子炉製造・建設部門を大幅に縮小を行い、運転保守等のサービス事業に特化させる方針転換を行なった。これが功を奏し、同部門の純利益は、1981年の1400万ドルから1983年には1億1600万ドルまで増加し、同会長は、これをGEの経営改革における成功の前例として、GE全体の会社体質を改善を推進したとしている。なお、製造部門は縮小する一方、新型軽水炉の開発研究は継続している。

一方、WHは、80年代には金融やメディアへの事業展開を図り、90年代には家電は収益性が低いと切り捨てたが、原子力ビジネスは事業展開上重要として存続させ、CBS(メディア部門、米国三大TVネットワークの一つ)とWH Electric Company(電力部門)が並行して事業運営がなされた。しかしながら、電力部門の売上は低迷し、97年には電力関連事業の売却を決定し、タービン部門は独シーメンス社に、また、原子力部門は英国BNFL社に、それぞれ売却された。

表 7-2 GE 及び WH の経営状況の推移

時 期	G E	W H
80 年代	ウェルチ会長の選択と集中の経営の下、サービス事業を強化	金融及びメディアへの事業展開 中国への原子力プラント輸出差止
90 年代	米国景気を反映して好調	経営不振で電力関連事業を売却
2000 年以降	BWR 燃料製造会社を世界的規模で再編 次期炉として ESBWR を推進	BNFL 社が、WH、ABB、CE を取得し、 燃料事業に加え原子炉事業を展開 AP1000 を推進 (NRC の設計認証を取得済)

(2) 「冬の時代」にメーカーが維持したもの、失ったもの

2005年3月、ワシントンにおいて、下記の原子炉メーカー及び電気事業者の元幹部に対し、「冬の時代」が原子力産業の技術開発力及び原子炉製造能力に与えた影響、新規発注が実際になされた場合の米国原子炉メーカーの対応等についてインタビューを行ったので、以下にポイントを記す。

Mr. Howard Bruschi 現 WH 顧問、前 WH 原子力技術担当副社長

Mr. Donald Hintz 前 NEI 議長、前エンタジー社 CEO

(a) 原子炉メーカーの業容の変化

1980年代以降の原子炉の新規発注が途絶えた時期に、原子炉メーカー各社は、原子力機器製造業から、原子力関連サービス業へと事業展開を行い、

a) 燃料の製造及び供給

b) プラント保守サービス

c) NRC 規制認可取得(定格出力増強、運転認可期間延長等)に係る電力会社へのサポート及びコンサルティング

で事業収入の確保に努めた。1980年代は、受注済みのプラントの建設工事もあり、原子力事業は収益のあがる部門であった。

この時期は、電気事業者もプラント運転保守能力を内製化しようとしていた時期である。メーカーは、電気事業者が実施する入札に参加し、落札の場合は複数年契約を締結し、電気事業者との協調の下、コスト削減努力を重ねた。メーカーは各発電所サイトにエンジニアを配置し、迅速な連絡調整に努めた。

(b) 「冬の時代」苦しい時期にも、中核となる原子炉設計者、原子炉設計評価分析の技術者、規制対応の技術者の人材は維持するよう努める一方、原子力機器製造能力、プラント建設に係る総合管理ノウハウ、設計を検証する試験施設は失った。

表 7-3 原子力「冬の時代」の米国原子炉メーカーへの影響(表 3-3 の再掲)

維持したもの	失ったもの
○中核となる原子炉設計者	○原子力機器製造能力
○原子炉設計評価分析の技術者	○プラント建設に係る総合管理ノウハウ
○規制対応の技術者の人材	○設計を検証する試験施設

(c) 米国原子炉市場が復活した場合の対応

喪失した原子力機器製造能力については、まず、原子炉機器製造会社が米国内に出現することを期待するが、そうでない場合は国外メーカーから製品を調達することになる。

プラント総合管理ノウハウは、ベクトル、S&W 社などの建設エンジニアリング会社と組むことで対応可能と考えている。また、設計評価には試験が必要であり、米国エネルギー省から大学に金が流れ、研究施設が充実されたことは評価される。

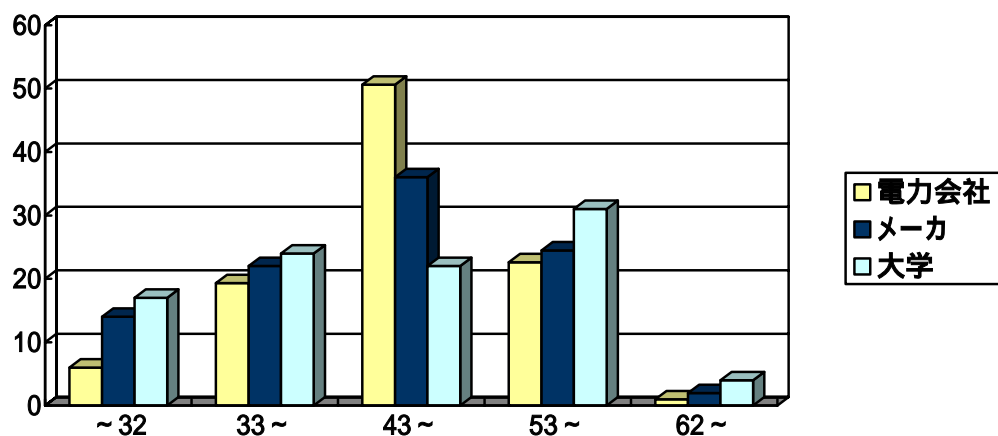
(3) 「冬の時代」が原子力分野の人材に与えた影響

NEI は、2001 年以降、人材に係る調査¹⁰⁾を実施している。2005 年3月、ワシントンにおいて、下記のNEIの同調査担当者に対し、インタビューを行なったので、その結果も含め、同調査のポイントを以下に述べる。

(a)2010 年頃までの 10 年間ににおける人材の需給バランスを予測しており、コンピュータ関係の研究者や技術者等は十分な伸びが予測される一方、原子力工学、放射線健康管理(Health physics)、熟練技能者が不足すると見込まれた。

2001 年以降、大学における人材育成の強化が図られており、DOE による大学への財政支援は、2000 年から 2004 年には倍増している。

(b) 2003 年の調査では、遠くない将来引退する人材を如何に補充していくかが重要な課題と指摘している。また、米国原子力産業の年代別人員構成は、セクター間で相違はあるが、概して言うと、1970～80 年代の大量雇用、その後の「冬の時代」により、人員構成が高齢化しており、30 才代以下の人材の層が手薄である。(図 7-9 参照)メーカーや大学では、今後、5 年間で大量の引退が見込まれるとしている。



(出典)NEI資料

図 7-9 米国原子力セクター別の年代別人員構成(単位: %)(図 3-6 参照)

5. 米国における新規炉建設に向けた動き

(1) 米国のエネルギー政策

米国は、エネルギーの大消費国であるが、石炭、石油、天然ガス等の化石燃料の一大資源国でもあり、自給率約 80%と概ね自給自足状況にある。かかる環境の下、米国には、わが国で言うような「総合エネルギー政策」は存在せず、米国のエネルギー政策の中核は石油政策と核不拡散政策である。核不拡散は国防問題の核心であることは言うまでもなく、石油は、国民生活に不可欠な自動車の代替不能の燃料であり、いずれも、米国の安全保障に直結する案件である。

米国の石油消費は、図 7-10 に示すように、1970 年代以降、産業用は横這いで推移する一方、自動車用も含め運輸用は年々増加してきており、現在、米国の石油消費の約半分を占めている。一方、供給面では、図 7-11 に示すように、近年、原油の国内生産は 1970 年をピークに低減しており、それに伴い、原油輸入が増加し、国内の石油供給の約 60% を中南米や中東から輸入している。米国は、中東原油の約 15% を輸入しており、米国輸入原油のうちペルシャ湾岸諸国の割合は 20% 程度にも達している。

このような状況の下、米国にとって、石油の安定的な供給確保、及び、中東依存度への依存度の低下重要な課題となっている。

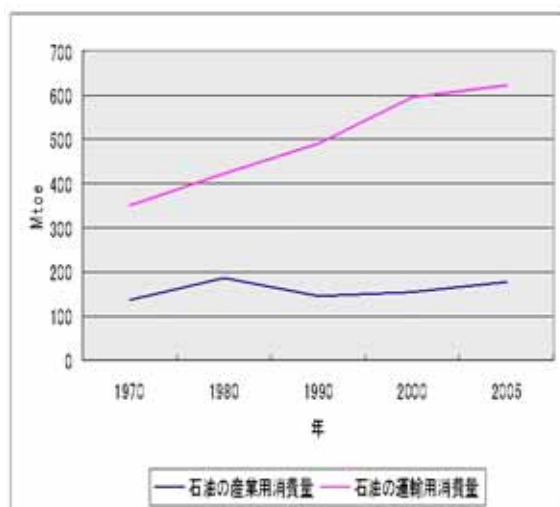


図 7-10 米国の部門別石油消費の推移

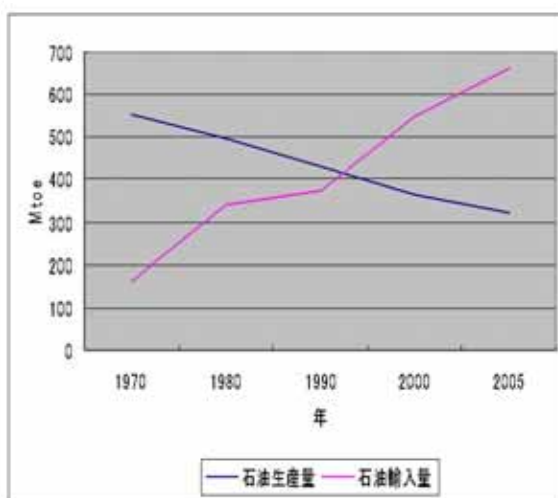


図 7-11 米国の石油の生産及び輸入

(2) 米国の原子力発電の推進政策

米国ブッシュ政権は、原子力発電を推進する方針の下、2001 年 10 月に官民合同の委員会により「Nuclear Power 2010」と題する報告書¹¹⁾を発表している。同報告書に基づき、2002 年 2 月から、2010 年代初頭に少なくとも 1 基の新型軽水炉の建設及び運転開始を目指した「原子力発電 2010 プログラム」が推進されており、第 3 プラス世代の軽水炉開発を目指している。同プログラムでは、原子力発電新規建設に係る財政上の不確実性を低減させることを目指し、表 7-4 に示す NRC 先行許認可プロセスのうち、早期サイト承認 (ESP) 及び建設・運転一括許認可 (COL) に必要な経費の 1/2 を DOE が支援することとしている。

さらに、新規の原子力炉 6 基までを対象に NRC の審査により発生する遅延、あるいは、訴訟による遅延に伴うコストの一部を補償、2021 年までに運転を開始する原子力発電プラントに対し、運転開始後 8 年間発電税を控除するなど、米国政府は、通常は行われない民間企業への国費投入も含め、可能な限りのお膳立てをしている感がある。このような政策支援もあり、新規炉建設の発注をする電力会社は出てきたが、未だ着工に至った事例はなく、原子力発電所の稼動好調な米国でも新規炉は容易でないことが見て取れる。

米国で建設が予定される新規の炉型を表 7-5 に示す。

表 7-4 原子力規制委員会(NRC)の先行許認可プロセス

事 項	内 容
早期サイト承認(ESP)	炉型決定前の立地審査
標準設計認証(DC)	立地サイト決定前の標準設計の審査 ABWR 及び AP-1000 が DC を取得済
建 設・運 転 一 括 許 認 可 (COL)	建設許可と運転認可を一括して実施 9電力会社の 15 基が取得済

表 7-5 米国において新規建設が見込まれる原子炉型

	ABWR	ESBWR	APWR	AP-1000	EPR
企業	東芝、日立、GE	GE - 日立	三菱重工 WH	東芝 - WH	Areva
NRC	DC 取得済	DC 申請中	DC 申請中	DC 取得済	DC 申請中
開 発 状 況	4 基*運転中 大間 審査中 台湾 2 基建設 中		敦賀 3・4 審 査中		フィンランド 1 基建設 中、仏 1 基計画中
出力	135.6 万 kWe	155	153.8	111.7	160
特徴	*) 柏崎刈羽 6・ 7、浜岡 5、志賀 2	自然循環 系、静的安 全系 単純化・大 型化で経済 性向上		静的安 全系 安全系、 サポート設備 を簡素化	シビアアクシデント 対策(コアキャッチャ、 二重格納容器等) 安全系は4トリ 構成で建物も区 分

(参考文献)

1. 山田英司、“米国における原子力開発利用の動向 - 原子力「冬の時代」から回復への足取り - ”、
季報エネルギー総合工学、第 28 巻第 2 号、83-92、(2005)
2. 山田英司、藤井信一、今永隆、“復活する米国原子力産業 - 科学的合理性に基づく規制へ向けた
改善の道のり - ”、季報エネルギー総合工学、第 29 巻第 2 号、77-86、(2006)
3. 米国エネルギー省ホームページ
4. 同省エネルギー情報局(DOE/EIA)資料
5. 米国原子力協会(NEI)ホームページ
6. (社)海外電力調査会「海外電力」各号
7. 日本原子力産業協会編「原子力年鑑」、「世界の原子力発電開発の動向」
8. ピート・V・ドメニチ「ブライター・トゥモロー」ERC 出版、(2005)
9. ジャック・ウェルチ「わが経営」日経ビジネス人文庫、(2005)
10. 米国原子力協会(NEI)“NEI Work Force Survey”(2004)
11. 米国エネルギー省(DOE)「Strategic Plan for light water reactor research and development」
(2004)

(参考2) セキュリティ評価に用いたデータ一覧表(2005 年)

(1) 先進諸国及び地域

	事 項	数量(単位)	構 成 比 (%)				
			石炭	石油	天然 ガス	原子力	再生可能 エネルギー
カナダ	一次エネルギー供給	271.95(Mtoe)	10	36	30	9	15
	電力供給	628.08 (TWh)	17	3	6	15	60
GDP(10 ⁹ 米\$)			中東依存度 (%)			ロシア依存度 (%)	
822.39	一次エネルギー供給		3.2			0.6	
	電力供給		0.4			0.2	
フランス	一次エネルギー供給	275.97	5	33	15	43	4
	電力供給	570.65	5	1	4	79	10
1,430.13	一次エネルギー供給		15.0			14.0	
	電力供給		1.0			1.3	
ドイツ	一次エネルギー供給	344.75	24	36	23	12	5
	電力供給	613.16	50	2	11	27	11
1,961.79	一次エネルギー供給		6.8			24.9	
	電力供給		0.3			15.1	
イタリア	一次エネルギー供給	185.19	9	44	38	0	9
	電力供給	294.38	17	16	51	0	17
1,132.83	一次エネルギー供給		46.9			26.6	
	電力供給		31.2			21.6	
日 本	一次エネルギー供給	530.46	21	47	13	15	3
	電力供給	1,094.19	28	13	21	28	9
4,994.13	一次エネルギー供給		43.8			1.7	
	電力供給		15.4			1.8	
韓 国	一次エネルギー供給	213.77	23	45	13	18	1
	電力供給	387.87	38	7	16	38	1
637.95	一次エネルギー供給		57.4			5.4	
	電力供給		13.0			1.9	
英 国	一次エネルギー供給	233.93	16	36	36	9	2
	電力供給	397.59	34	1	39	21	5
1,626.78	一次エネルギー供給		4.5			9.2	
	電力供給		0			0	
米 国	一次エネルギー供給	2,340.29	24	41	22	9	5
	電力供給	4,268.38	50	3	18	19	9
10,995.80	一次エネルギー供給		6.5			1.1	
	電力供給		1.1			0.8	
E U	一次エネルギー供給	1,875.72	17	37	24	14	8
	電力供給	3,485.20	28	4	21	28	19
9,775.33	一次エネルギー供給		12.3			16.65	
	電力供給		5.0			14.1	

(2) BRICs

	事 項	数量(単位)	構 成 比 (%)				
			石炭	石油	天然ガス	原子力	再生可能エネルギー
ブラジル	一次エネルギー供給	209.53(Mtoe)	7	43	8	1	42
	電力供給	403.03 (TWh)	2	3	5	2	88
GDP(10 ⁹ 米\$)			中東依存度 (%)			ロシア依存度 (%)	
670.5	一次エネルギー供給		0.2			0.0	
	電力供給		0.0			0.0	
中国	一次エネルギー供給	1,717.15	63	19	2	1	15
	電力供給	387.45	3	3	5	3	86
1,889.9	一次エネルギー供給		17.1			2.0	
	電力供給		0.0			0.0	
インド	一次エネルギー供給	537.31	39	24	5	1	31
	電力供給	699.04	69	4	9	2	15
644.1	一次エネルギー供給		5.5			0.0	
	電力供給		9.1			0.0	
ロシア	一次エネルギー供給	646.68	16	21	54	6	3
	電力供給	951.16	17	2	46	16	18
349.9	一次エネルギー供給		0.0			-	
	電力供給		0.0			-	

(3) 化石燃料に係る単位量燃焼当たりの CO₂ 排出量

	石 炭	石 油	天然ガス
単位エネルギー燃焼当たりの CO ₂ 排出量(tC/toe)	1.034	0.782	0.564

(4) 化石燃料に係るエネルギー輸入価格(下表は日本の場合)

石 炭		原 油	石 油 製 品				天然ガス
原料炭	一般炭		LPG	ガソリン	軽油	ナフサ	
米\$/トン	米\$/トン	米\$/bbl	米\$/トン	米\$/bbl	米\$/bbl	米\$/bbl	米\$/MBtu
88.80	62.73	51.57	431.5	62.38	64.35	51.12	6.04

(注)

1. GDP、一次エネルギー供給量、発電電力量及び構成比は、OECD/IEA 統計による。
2. GDP は、為替換算による 2000 年米国ドル価格
3. 石油の欄の数値には、石油製品も含む。
4. 一次エネルギー供給に係る中東依存度及びロシア依存度は、先進諸国及び地域については OECD/IEA 統計から算出、BRICs については BP 統計による(一部推計)
5. 電力供給に係る中東依存度及びロシア依存度は、発電用燃料の構成比、一次エネルギー供給に係る中東依存度及びロシア依存度を基に算出
6. 化石燃料価格は LPG を除き OECD/IEA 統計による。価格は国・地域によって若干異なる。
LPG 輸入価格は JOMO ウェブサイトによる。

謝 辞

本研究は、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻の博士後期課程において行われたものであり、終始、懇切親身なご指導とご鞭撻を賜りました班目春樹教授に心から篤く感謝申し上げます。

本論をまとめるに際して、数々の有益なご教示を戴きました木村浩准教授、西脇由弘客員教授、入江一友客員教授、高橋啓三客員教授に深く感謝申し上げます。

また、本研究を進めるに当たっては、班目・木村研究室所属の教職の方々、大学院生の方々には、貴重なご示唆や激励を賜り、厚く感謝いたします。

本研究全般にわたり、親切丁寧なご意見を戴きました（財）エネルギー総合工学研究所の秋山守理事長、松井一秋理事に深く感謝の意を表します。秋山理事長のご示唆が本研究を始める契機となっており、また、本研究の節目節目で戴いたご指導に改めて感謝申し上げる次第です。また、松井理事には、貴重な参考文献のご示唆やご提供、また、内外の原子力開発利用を巡る動向について最新の情報の提供を戴いたことに改めて深甚な感謝を申し上げます。

また、同研究所の蛭沢重信氏、蓮池宏氏、坂田興氏、鳥飼誠之氏、黒沢厚志氏、楠野貞夫氏、氏田博士氏、波田野守氏、都筑和泰氏の各氏には、貴重なご示唆や参考文献の提供等を戴き、深く感謝いたします。

最後に、博士課程での研究を励まし、終始温かく見守ってくれた妻真美子に深く感謝します。

本研究は、多くの方々のご支援、ご協力の下に行われており、関係の諸氏に改めて感謝の意を表します。

本研究に係る発表

1 . 論文

山田英司、“先進諸国との比較におけるわが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究”、日本原子力学会和文論文誌、Vol.6, No.4, 383-392 (2007)

山田英司、“米国における原子力開発利用の動向 - 原子力「冬の時代」から回復への足取り - ”、季報エネルギー総合工学、第 28 巻第 2 号、83-92、(2005)

山田英司、藤井信一、今永隆、“復活する米国原子力産業 - 科学的合理性に基づく規制へ向けた改善の道のり - ”、季報エネルギー総合工学、第 29 巻第 2 号、77-86、(2006)

山田英司、“リスク要因を踏まえた原子力開発利用シナリオに係る評価研究”、日本原子力学会和文論文誌に投稿済・査読中 (2008 年 8 月末現在)

2 . 講演

山田英司、“原子力開発利用への期待と不確実性”、(財)エネルギー総合工学研究所月例研究会、(2006)