

文部科学省委託調査研究報告書

- 平成 15 年度調査研究報告書 -

原子力の平和利用戦略に係る調査研究（3）

最終報告書

2004年3月

財団法人 日本国際問題研究所  
軍縮・不拡散促進センター

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの委託研究として、財団法人日本国際問題研究所軍縮・不拡散促進センターが実施した平成15年度「原子力の平和利用戦略に係る調査研究」の成果を取りまとめたものです。

従って、本報告書の複製、転載、引用等には文部科学省の承諾手続きが必要です。

## 序

本報告書は、文部科学省の委託事業として平成 13 年度から 3 年をかけて行われた調査・研究の報告書であり、50 年そして 100 年後を展望し、原子力の果たすべき役割と日本のとるべき原子力平和利用戦略の根幹となる事項をまとめたものである。地球環境を維持し、将来の世代に残す負の遺産を最小に抑えるには、原子力の平和利用を進め、核燃料サイクルを確立し、ウラン、プルトニウム等の有効利用を図ると共に、原子炉利用を開発途上国に広げなければならない。そのために我が国を始めとする原子力先進諸国は協力して安全性、経済性、そして核拡散抵抗性を兼ね備えた原子力システムの開発に取り組む必要がある。このような認識に基づき「原子力の平和利用戦略 将来の世代に負の遺産を残さないために」と題する 10 項目の提言をまとめた。

本調査・研究は中込良廣京都大学教授に主査をお願いし、以下に示す多方面にわたる専門家の方々に委員を委嘱し、審議・検討が進められた。

主査	中込 良廣	京都大学原子炉実験所 教授 原子炉安全管理研究部門
委員	岩村 公道	日本原子力研究所 エネルギーシステム研究部長
	菊地 昌廣	核物質管理センター 開発部調査役
	喜多 智彦	原子力産業会議 情報・調査第 3 グループ・リーダー
	小山 堅	日本エネルギー経済研究所 エネルギー動向分析室長
	鈴木達治郎	電力中央研究所 経済社会研究所上席研究員
	滝沢 真之	三菱総合研究所 安全技術研究部原子力安全研究チームリーダー
		—
	松井 一秋	エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部長
	四元 弘子	森・濱田松本総合法律事務所 弁護士
	若林 利男	核燃料サイクル開発機構 国際・核物質管理部長 (13 年度)
	堀 敬一郎	核燃料サイクル開発機構 国際・核物質管理部 核不拡散・保障措置グループ (14 年度)
	井上 尚子	核燃料サイクル開発機構 国際・核物質管理部 核不拡散・保障措置グループ (15 年度)

注) 五十音順 順不同

## エグゼクティブサマリー

## 原子力の平和利用戦略 将来の世代に負の遺産を残さないために

### はじめに

20世紀、先進諸国は化石燃料を不断に消費し、化石燃料依存型の高度経済社会を作り上げた。この間、地球温暖化の兆候が顕著になり、温室効果ガス（以下CO<sub>2</sub>）排出量の規制に関する京都議定書が策定された。先進諸国はその削減に努めてはいるが、CO<sub>2</sub>排出量は年率1.8～1.9%で増加し続けており、このまま続けば50年後に2.5倍、100年後には6倍を越える。たとえ、先進諸国のCO<sub>2</sub>排出量が減少したとしても、この増加傾向が収まるとは考えられない。中国の化石燃料消費量の増加が止まったとしても、インドと東南アジアが続き、南アメリカ、中東、そしてアフリカの経済発展がこれに続く。貧困の解消を目指し、開発途上国援助を進めている先進諸国の支援は化石燃料の消費を前提としたものであり、このままでは地球温暖化が止まることはないであろう。現在観測されている地球の温度上昇はこれまでにないほど急速なものであり、地球上の広範な地域において多くの種の絶滅を引き起こし、回復不能な環境破壊を起すとの警告が発せられている。

21世紀を持続的な経済成長と貧困解消の世紀と位置づけると同時に、運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源に移行するエネルギー革命の世紀と位置づけなければ、将来の世代に多大の負の遺産を引き継ぐことになるであろう。先進諸国はかかるエネルギー革命をリードし、実現させる義務がある。つまり、再生可能なエネルギー源、水素燃料、そして原子力等、運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないあらゆるエネルギー源の実用化を図り、経済的に魅力あるエネルギー源にし、先進諸国のみならず開発途上国にもその導入を進め、CO<sub>2</sub>排出の削減を図る必要がある。

ここ暫くの間石油等の化石燃料は枯渇する事は無いという想定の下に化石燃料依存のエネルギー政策を続けると、政策はいずれ破綻を来す。採算のとれる採掘可能な化石燃料は有限である。問題は将来を見通したエネルギー政策であり、利用可能なエネルギー資源の量と価格、そして排出される廃棄物の安全な処理・処分に要する経費である。太陽光発電、風力発電等再生可能なエネルギー、そして水素燃料による燃料電池は将来のエネルギー源として有望であるが経済的な競争力を持つまでには更なる改善とそれらを支える産業化が必要である。現在の社会を支えているエネルギーは化石燃料であり原子力である。

本調査・研究は、50年後100年後を見通した長期エネルギー政策、そして持続可能な経済成長と地球環境の維持を課題として、原子力利用を取り巻く種々の問題を検討し、原子力の平和利用戦略の根幹となる事項をまとめ、原子力平和利用のスコープと役割を明らかにし、早

期に政策に取りこまなければならない喫緊の課題を整理した。そして本報告書のエグゼクティブサマリーとして、「将来の世代に負の遺産を残さないために」の副題をつけ、原子力の平和利用戦略の策定に際して考慮すべき主要事項を10項目の提言にまとめた。

## 持続可能な経済成長と地球環境の維持

化石燃料を主なエネルギー源として発展した20世紀のエネルギー・システムは、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を上昇させ、地球の温暖化を引き起こした。21世紀は地球環境と経済成長の維持を両立させ、将来の世代に負の遺産を引き継がないエネルギー・システムに移行し、エネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出の関係を断ち切るエネルギー革命の世紀と位置づけなければならない。地球温暖化は、たとえCO<sub>2</sub>排出を止めたとしても数百年にわたって続く負の遺産であり、地球規模の問題である。

### 提言 - 1

21世紀をエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出の関係を断ち切るエネルギー革命の世紀と位置づけ、運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源の産業化を進め、エネルギー革命の主導的な役割を果たせ。

地球温暖化を止めるには、シナリオB1 (Climate Change 2001, Appendix ) に沿ったCO<sub>2</sub>排出量の削減を実現しなければならない。シナリオは現在のCO<sub>2</sub>排出量の増加傾向を抑制していき、2040年頃までに全地球の総CO<sub>2</sub>排出量が減少に転じるようにする。そして、その後も順次削減を進め、2100年には全地球のCO<sub>2</sub>排出量を1980年代後半のレベルまで下げるとするものである (注-1)。

持続的な経済成長を維持するための条件として、エネルギー需要の伸び率を年率1.4%と仮定しても、50年後のエネルギー総需要は2倍、100年後には4倍になる。シナリオB1の許容するCO<sub>2</sub>排出量を考慮しても、地球温暖化を止めるためには、2050年に世界の総エネルギー需要の15%~20%、2100年には70%~80%を運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源で賄う必要があり、電力のみならず、輸送部門を支えるエネルギー源もCO<sub>2</sub>を排出しないものにとって代わってなければならない。

先進国ばかりでなく急速な発展を続けている開発途上国の産業を支え得るエネルギー源は限られており、上記の問題を解決するために現時点で考えられる主な手段は以下の通りである。

省エネの普及

太陽光、風力、バイオマス、地熱等の再生可能エネルギー源の活用

燃料電池の普及

火力発電所が排出するCO<sub>2</sub>の回収および環境からの恒久的な隔離  
原子力の利用拡大

エネルギー市場の自由化等の市場原理を尊重する現在のエネルギー政策が続く限り、今後も引き続き石油等化石燃料の優位が続き、CO<sub>2</sub>排出量は増加していくであろう。CO<sub>2</sub>排出量を抑えるためには発想を転換し、燃料として消費される石油等から生成されるCO<sub>2</sub>が地球温暖化を進める有害な産業廃棄物であると認める必要がある。そして、**21世紀をエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出の関係を断ち切るエネルギー革命の世紀**とするためには、まず、火力発電所等から排出されるCO<sub>2</sub>を回収して環境から恒久的に隔離する手法と手段を開発し、火力発電所等に設置してCO<sub>2</sub>排出しない施設に転換する必要があり、CO<sub>2</sub>の回収・隔離が可能になるまでの間は、広くCO<sub>2</sub>排出税を導入し、燃料としての石油等の消費を抑制する必要がある。このCO<sub>2</sub>排出税の導入により再生可能なエネルギー源の活用は広がる。そして、CO<sub>2</sub>を排出せず、基幹産業を支える安定したエネルギーの供給を可能にし、さらに水素燃料の供給を可能にする原子力の役割も増してくる。地球環境と持続的な経済成長を維持するために、我が国は産・官・学を挙げて運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源の産業化と省エネ技術の普及に向けて世界をリードする必要がある。

注-1)シナリオB1 (Climate Change 2001, Appendix )は2100年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度を560ppm(490ppm~680ppm)に抑え、2000年~2100年の温度上昇を各モデルの平均値で2.0以下に抑えるためのシナリオである。このシナリオを実現するためには、全地球のCO<sub>2</sub>排出量を2020年に10,000Mtce/yr、2040年に12,200Mtce/yr、2060年に10,200Mtce/yr、2080年に7,300Mtce/yr、そして2100年には5,200Mtce/yrにまで削減しなければならない(1990年のCO<sub>2</sub>排出量は5,500Mtce/yr)。

提言 - 2

**21世紀後半を見通した長期エネルギー需給と、地球温暖化を最小にするCO<sub>2</sub>排出削減を前提としたエネルギー環境政策の策定を急げ。そして早期に実施体制を確立し、実行に移す必要がある。いまや、エネルギー政策と環境政策は独立に策定できる政策ではない。**

持続可能な経済の成長は今後20年、30年続けば良いと言うものではなく、将来の世代が現在と同等に経済の成長を享受できるものでなければならない。地球環境の維持も同じである。20世紀、先進諸国は化石燃料を不断に消費し、化石燃料依存型の高度経済社会を作り上げた。この間、地球温暖化の兆候が顕著になり、CO<sub>2</sub>排出量の規制に関する京都議定書が策定された。先進諸国はその削減に努めてはいるが、CO<sub>2</sub>排出量は年率1.8~1.9%で増加し続けており、このまま続けばCO<sub>2</sub>排出量は50年後に2.5倍、100年後には6倍を超える。この傾向が簡単には収まらない。たとえ中国の化石燃料消費の急速な増加が止まったとしても、インドと東南アジアが続き、南アメリカそしてアフリカの経済発展がこれに続く。かかる事態が起きないように、

必要なエネルギー源を確保し、CO<sub>2</sub>の排出を抑え、地球環境を維持するという課題に応えるエネルギー環境政策が求められている。

エネルギー環境政策は、先ず、エネルギー需要が急増している東アジアのエネルギー安全保障と地球環境の維持を実現するものでなければならず、将来の世代が必要とするエネルギー源を残すものでなければならない。

日本政府は50年、100年後を見据えた長期エネルギー環境政策に関する問題を提起し、議論を起し、万民の認める基本政策を定める必要がある(注-2)。そして、基本政策に基づく技術開発を進め、エネルギーならびに環境産業を育成し、今後急増する開発途上国のエネルギー需要に応える手段を提供するため、技術支援を進めていく必要がある。

注-2) 2003年1月、米国エネルギー省(DOE)は、米国下院議会指示(Congressional direction)(下院報告書107-258)への回答として「先端的核燃料サイクルイニシアティブ(AFCI): 使用済み燃料処理および消滅処理の先端技術研究の将来的方向性について」を作成し報告している。議会からの質問は、資源の有効利用と使用済み燃料の処理・処分にかかる事項であり、群分離および消滅処理を含む核燃料のバックエンドにかかる包括的な問題である。

2004年2月、エネルギー・輸送担当のEU コミッショナーを務めるLoyola de Palacio は、EU は今「原子炉を止め、京都議定書の遵守を諦めるか、あるいは原子炉を止めず、京都議定書を遵守する、の何れを選択するかを迫られている」と問題を提起している。“The benefits of an unpopular sector”; Magazine on European Research, RTD info No 40, February 2004

### 提言 - 3

**運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源の導入を急げ。2030年には120万kw原子力発電所100基相当の運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギーを供給し、2040年には830基、そして2050年代には2000基から2500基に相当するエネルギーを供給する必要がある。**

2100年までに大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇を止め、地球の温暖化を止めるための初期条件として、CO<sub>2</sub>排出量を2030年に180Mtce/yr(100万t炭素換算量/年)、そして2040年にはカナダが2000年に排出したCO<sub>2</sub>の総量に匹敵する1,500Mtce/yr、2050年には3,600~4,500Mtce/yrを削減しなければならない。そして、2060年以降はさらにCO<sub>2</sub>排出量を削減し、2100年には全地球の排出量を1980年代後半のレベルまで下げる必要がある。この削減量に相当する全てのエネルギーを発電容量が120万kw原子力発電所で補うとすれば、2030年までには100基、2040年までに830基、そして2050年代には2000~2500基の運用が必要となる(注-3)。2060年以降はさらにCO<sub>2</sub>排出量を削減し、2100年には世界の総エネルギー需要の少なくとも70%~80%を運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源で賄う必要がある。なお、ここでは原子力発電所の稼働率を83%として計算している。

電力の自由化が進むにつれて火力発電の比率が増加し、CO<sub>2</sub>排出削減計画は計画倒れになりつつある。発電中に廃棄物を出さない太陽光発電あるいは風力発電が基幹産業を支えるエネルギー源となるとは考えられない。また、省エネの促進も有力な削減手段であるが、かかる手段による先進諸国のCO<sub>2</sub>削減量が、開発途上国の排出量の増加を上回ることはいできない。原子力の導入は有力な手段であるが、開発途上国への導入に関しては多大な初期投資を可能にする経済基盤の確立、核拡散抵抗性、そして安全保障体制の維持にかかる機微な物資と情報の拡散にかかる対策を急ぐ必要がある。

注3) 2000年に全世界で稼動していた原子力発電所の設備容量は凡そ120万kw発電所290基(350Mkw)である。また、原子炉の増設数は、すでにWEO-2002に組み込まれている運転中にCO<sub>2</sub>を排出しない原子力と再生可能エネルギー利用計画に追加するものであり、2030年の総原子力発電容量は390基(470Mkw)~400基(480Mkw)となる。

#### 提言 - 4

**将来の世代が安心して暮らせる環境を維持し、地球温暖化を抑え、将来の放射線被曝量が現在の管理規準を超えない生活環境を維持するために、受益者負担の原則に基づき、原子力発電及び火力発電に伴い発生する産業廃棄物の安全で、かつ環境から隔離可能な処理・処分技術の実用化を急げ。**

エネルギー政策は、長期にわたるエネルギー安全保障と資源の確保ばかりでなく、廃棄物の処理・処分にかかる安全性と環境破壊のリスクを最小にするものでなければならず、バランスの取れた廃棄物の管理と処理・処分方法であり、将来の世代に処理を委ねる負の遺産を最小にするものであることが広く社会に認められるものでなければならない。

火力発電所等が排出するCO<sub>2</sub>は地球温暖化を引き起こす有害な産業廃棄物であるが、これまで無害な物質として無制限に大気中に排出されてきた。CO<sub>2</sub>は、高レベル放射性廃棄物の処理処分と同様に、受益者の責任で回収し地球環境から隔離可能な態様で処理・処分されるべきものである。

火力発電所で100万kwyrの電力を生産するために排出するCO<sub>2</sub>は660万t(炭素換算:180万t;液化炭酸ガスで東京ドーム約5杯分)に上る。高濃度のCO<sub>2</sub>を排出する発電施設等でCO<sub>2</sub>を回収する技術は既に提案されている。しかし、回収したCO<sub>2</sub>を環境への影響がない方法で隔離する手段は確立されてはいない。深海への投棄が可能であれば容量的には十分であるが、環境への影響等の評価は今後の課題である(深海に投棄されたCO<sub>2</sub>は数百年後には海水表面にまで拡散し、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を高めると推定されている)。CO<sub>2</sub>の回収と輸送、そして環境から隔離(廃棄)する手法の開発研究を進め、産業化を急ぐ必要がある。そして、CO<sub>2</sub>の回収と、回収したCO<sub>2</sub>を環境から隔離可能な手法で処理・処分する経費、そして手法が開発されるまでの

期間、それを貯蔵するためのインフラ整備にかかる経費は受益者が負うべきである。CO<sub>2</sub>の回収と隔離ができない輸送部門あるいは回収設備を備えていない火力発電所等の消費する化石燃料にはCO<sub>2</sub>の回収と隔離に要する経費をCO<sub>2</sub>排出税として徴収し、運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源の開発と普及に当てるべきである。

第1次そして第2次の石油危機以降、エネルギー安全保障を強化する手段として、その導入が加速された原子力も高レベル放射性廃棄物そして直接深地地層処分を必要とする使用済燃料等の産業廃棄物を生成する。これら放射性廃棄物の処理・処分ににかかる将来の安全性に関する危惧が原子力の活用を妨げている要因の1つになっている。

2001年6月に発効した放射性廃棄物等安全条約は「将来の世代に亘って、現在の放射線被曝に関する安全基準を超える被曝が起きないように安全な形態で放射性廃棄物(使用済燃料を含む)を処理・処分しなければならない」と規定している。かかる規定を遵守するためには、放射性廃棄物に含まれている半減期の長い放射能毒性(Radiotoxicity)を持つ核種によって、将来の世代が現在の安全基準を超える被曝を受けない手法で処理・処分しなければならず、その安全性について広く社会の理解を得る必要がある。

幸運にも、原子力発電の核燃料調達にかかる経費の占める割合は20%程度と低く、電力の単価に大きな影響を及ぼすことなくプルトニウム利用を含む多様な核燃料サイクルの形態を取ることが出来る。また、使用済燃料(100万kwyrの発電に必要な低濃縮ウランは21t程度)と高レベル放射性廃棄物等は全て保管・管理(中間貯蔵を含む)されており、GEN-4核燃料サイクルシステムの安全で経済的な使用済燃料の再処理と放射性廃棄物の処理・処分システムの運転開始まで貯蔵することが出来る。

## 我が国のとるべき基本戦略

経済成長の著しい開発途上国のエネルギー消費は増加を続け、2040年頃には先進諸国の消費量を上回る。かかる多量のエネルギー消費の増加を、CO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源でまかなうには、原子力の活用を無視しては不可能に近い。開発途上国のCO<sub>2</sub>排出量削減にかかる支援計画を視野に入れた社会環境と産業界の整備を急ぎ、国内原子力産業の活性化を急ぐ必要がある。

米国は2001年、21世紀後半のエネルギー安全保障を維持する方策として原子力の重要性を再認識し、新たなエネルギー政策を発表した。そして、核拡散抵抗性を重視しつつ、プルトニウム利用と高レベル放射性廃棄物の処理・処分を含む核燃料サイクルの開発研究を開始した。我が国は、原子力は将来の主要なエネルギー源であるとして、長年にわたりプルトニウム利用と高レベル放射性廃棄物の処理・処分を含めた核燃料サイクルの確立を目指し、開発研究を続けてきた唯一の非核兵器国であり、IAEA保障措置の有効性を立証し、平和利用の道を開いてきた

国である。我が国は、これまでの実績を基に、国の政策として世界規模で原子力平和利用を推進していく重要な役割を担っている。

しかし、喫緊の課題は京都議定書の規定しているCO<sub>2</sub>削減目標を達成することであることを忘れてはならない。もし削減目標を達成できなければ、米国と中国の二大CO<sub>2</sub>排出国に対してCO<sub>2</sub>排出量を削減するよう、今後説得する根拠すら失うことになりかねない。

#### 提言 - 5

**経済性と安全性が認められている第 3.5 世代原子炉ABWR そしてAPWR + 等の早期導入、特にアジア地域への導入を図り、アジア太平洋地域のエネルギー安全保障に寄与すると共に、急増する化石燃料の消費を抑え、CO<sub>2</sub>削減に寄与する。かかる施策を実行に移すためにあらゆる措置を取り、開発途上国からの支援要請に応えられるよう原子力産業の整備を急げ。**

2100年に地球温暖化を止めるにはシナリオB1 (Climate Change 2001, Appendix ) に沿った許容排出量以下にCO<sub>2</sub>排出量を抑えなければならない(注-1)。WEO-2002によれば、CO<sub>2</sub>排出量は全世界平均で年率 1.9% (中国を含む開発途上国では年率 3.1%) 増加している。この傾向が続けば 2030年には120万kw原子力発電所100基(180Mtce)、2040年には840基(1,500Mtce)に相当するCO<sub>2</sub>排出量の削減が必要であり、運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源によるエネルギーの供給が必要である(注-4)。

この条件を満たす単純な地域別の原子力発電所増設数の配分は、先進諸国の中では北米地域(米国)の必要とする増設が30基(2030年)、210基(2040年)であり、アジアの開発途上国が38基(2030年)、360基(2040年)と約半数を占めるが、その中でも中国が27基(2030年)、250基(2040年)と突出している。ちなみに開発の遅れている中南米、中東、そしてアフリカ地域では10基(2030年)、そして130基(2040年)に止まるが、これらの地域に本格的に原子力の導入が可能になる社会・経済環境が整うのは2050年以降のことになる。その間、先進諸国は相当する原子炉あるいは再生可能なエネルギー源を導入し、CO<sub>2</sub>の削減(京都議定書を越えた削減)を引き受けざるを得ないことになる。

原子炉の建設決定から運転開始までのリードタイムを考慮すると、2030年から2040年にかけて増設しなければならない原子炉は、すでに建設を許可されているか、あるいは安全審査の準備が整っている原子炉、すなわち第3.5世代原子炉が主流となる。ABWR および APWR + 等の軽水炉は米国の基本特許の下に開発されてはいるが、日本が改良し実用化を進めた MOX 燃料の使用も可能な原子炉である(すでに稼働している ABWR の経済性と安全性は MIT の報告書で第3.5世代原子炉に該当するとしている)。日本(企業)が中国を含むアジア諸国にこれらの原子炉を供給することの出来るよう、日本が主体となって早急に体制を整える必要がある。

注-4) 120万kw原子力発電所の年間稼働率を83%とし、火力発電により100万kwyの発電をすると約

## 第1章 はじめに

本調査・研究は、21世紀がエネルギー安全保障と地球環境にかかる問題の世紀であるとの認識の下に、50年そして100年後を展望し、原子力の果たすべき役割、日本のとるべき原子力平和利用戦略の一端を明らかにすることを目的とし、文部科学省の委託事業として平成13年度から3年計画で開始された。第1年度は、本事業の方向付けを明らかにすることとし、エネルギー安全保障、原子力開発研究の現状を中心に調査し、将来のエネルギー消費と地球温暖化の関連を推量するための情報を収集し分析すると共に、取り組むべき課題を明らかにした。第2年度は「東電問題の本質と教訓」、「第4世代原子力システムの開発と核拡散抵抗性」、「エネルギー需要見通しと原子力(東電問題とエネルギー安全保障)」、経済成長の著しい中国の動向、そして原子力政策を大転換した米国の動向を調査した。

本年度は、まず報告書にまとめる提言の骨子について検討し、地球温暖化とエネルギー需要の動向に関する調査を続けると共に、原子炉の早期導入の必要性、開発途上国支援の障害となっている原子力の輸出規制に係る問題、そして国内の人材育成の現状と課題等、提言の骨子を取り巻く諸問題を調査し、議論を深めた。

原子力の平和利用戦略は、日本のエネルギー政策そして京都議定書の批准に伴う温室効果ガス(以下、CO<sub>2</sub>)排出量の削減政策に係る課題である。しかし、化石燃料消費の増加に伴うCO<sub>2</sub>排出量の増加と地球温暖化に関する問題は一国で解決できる問題ではない。かかる認識の下に定めた調査・研究の指針の第1は、核不拡散と安全保障、エネルギー安全保障、そして地球温暖化に関する問題を包括的に捉え、地球規模のそしてアジア地域の問題として扱うこと。第2は、原子力システムの更なる活用を目指し、米国エネルギー省が提案し日本、英国、フランス、ドイツ、カナダ、韓国等が協力して研究開発を進めている第4世代(GEN-4)原子力システムを中心として検討すること。第3は、開発途上国が原子力システムを導入する場合の条件となる国際条約と二国間協定、さらには原子力供給グループ(NSG)の原子力関連物資の輸出規制にかかわる問題を調査・検討することである。そして、委員会の目標は、平和利用戦略そのものを調査・研究するのではなく、各委員の専門分野の知見と見識を基に、原子力利用を取り巻く種々の問題を検討し、原子力の平和利用戦略の根幹となる事項を明らかにすることである。

エネルギー需要とCO<sub>2</sub>排出量の動向はWEO-2002のデータを中心にし、そしてIEO-2003のデータを参考とした。WEOのデータは2030年までのエネルギー需要とCO<sub>2</sub>排出量の増加を示している。そして大気中のCO<sub>2</sub>濃度と地球温暖化に関するデータはIPCCのClimate Change 2001を用いた。

20世紀、先進諸国は化石燃料を不断に消費し、化石燃料依存型の高度経済社会を作り上げた。この間、地球温暖化の兆候が顕著になり、CO<sub>2</sub>排出量の規制に関する京都議定書が策定された。先進諸国はその削減に努めてはいるが、CO<sub>2</sub>排出量は年率1.8～1.9%で増加し続けており、このまま続けば50年後に2.5倍、100年後には6倍を超える。たとえ、先進諸国のCO<sub>2</sub>排出量が減少したとしても、この傾向が収まるとは考えられない。中国の化石燃料消費の増加が止まったとしても、インドと東南アジアが続き、南アメリカ、中東、そしてアフリカがこれに続く。開発途上国の経済発展は、先進諸国が辿った道を追従し、化石燃料の消費を前提としており、CO<sub>2</sub>排出量の増加を加速する。

経済発展の著しい開発途上国への原子炉の導入が進まない限り、CO<sub>2</sub>排出量は増加を続け、2050年までには倍増する。開発途上国、特にアジア諸国への原子炉の導入を早期に実現させなければ地球温暖化は止まらない。この原子炉の導入計画を実行に移すには核不拡散と安全保障上の懸念を解消しなければならない。懸念を解消する基本条件は導入を計画している国がIAEA保障措置と追加議定書を受諾し、遵守することであり、核物質防護条約の締結とガイドラインを遵守することである。原子力供給グループ(NSG)による機微技術の輸出規制は、核不拡散体制を強化してはいるものの、原子炉の導入にかかる開発途上国支援を困難にしており、原子炉の建設、安全管理等にかかる原子力システムの基本情報を提供する事ですら無条件では許されず、さらに当該諸国の原子力専門家の教育にすら支障をきたしている。この問題の解決には、日米原子力協定に基づき、原子力平和利用に関する二国間協定を締結し、かかる障害を取り除くことである。この二国間協定には我が国が輸出した機微な物資、情報等の再輸出に関する規制も盛り込まなければならない。

3年に亘り進められた原子力の平和利用戦略にかかる調査研究の成果はエクゼクティブサマリーに10項目の提言としてまとめてある。そして、提言を補足する主な事項は第2章以降に順次その理由等をまとめてある。第2章では持続的な発展を維持しつつ、地球温暖化を抑えるには原子力のさらなる活用以外に適切な手段がないことを指摘し、第3章では大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇が起す地球温暖化は、地球規模のエネルギー・環境対策が有効に働かない限り抑えられないこと、そして日本等、先進諸国がとらなければならない対策について検討している。第4章では原子力をめぐる欧米の情勢を概観し、第5章では原子力の早期導入の必要性を指摘している。第6章ではGEN-4原子力システムとして選定された経済的で安全な、そして核不拡散抵抗性を備えている高速炉、改良型軽水炉、高温ガス炉等の概要を紹介している。これら選定された原子炉に燃料を供給するGEN-4核燃料サイクルシステムについては第7章にその概要を、すなわち、核燃料サイクル・クロスカット・グループ(Fuel Cycle Crosscut Group: FCCG)のまとめた報告書の主な結論と勧告、そして革新的核燃料サイクル構想(Advanced Fuel Cycle Initiative: AFCI)の概

## 第2章 今なぜ原子力か

産業革命以前の数千年間は $280 \pm 10$ ppm (ppm : 100万分の1) であった大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 濃度が1999年には367ppmとなり、地球表面の平均気温は $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 上昇し、海水面は10~20cm上昇した。この傾向は今も続いており大規模災害を起す異常気象の発生頻度は増加し、回復不能な環境破壊を起す可能性が大きくなってきた。持続可能な経済発展を維持し続けるための条件は地球環境を維持し続けることであり、地球温暖化が進み、環境が破壊された地球に将来は無い。

持続的な経済発展を支えるためにエネルギー需要は今後も増大して行く。21世紀をエネルギー消費と $\text{CO}_2$ 排出の関係を断ち切るエネルギー革命の世紀と位置づけ、大気中に $\text{CO}_2$ を排出しないエネルギー源の導入に向けてあらゆる手段を講じる必要がある。GEN-4原子力システムの寄与を待つことはできない。日本の改良した原子炉の安全性と経済性は米国でも認められている。早期に原子力の導入を拡大し、地球規模の $\text{CO}_2$ 排出量を抑えなければ、最悪の温暖化シナリオを辿ることになる。

### 1. 地球温暖化と環境破壊

#### 1.1 地球温暖化は進んでいる

大気中の $\text{CO}_2$ 濃度は現在も増加し続けている。たとえ、先進諸国が再生可能なエネルギー源の活用と省エネを進めたとしても、主要エネルギーを石油等に依存する現状が続けば、2050年に $\text{CO}_2$ 濃度は532ppm、そして2100年には856ppmに達し、平均気温は $3.8 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 上昇し、海水面の上昇は平均値で42cm、最大値で74cm上昇する<sup>1</sup>可能性がある。

化石燃料の消費に伴い排出される $\text{CO}_2$ は、 $\text{SO}_x$  (硫黄酸化物) あるいは $\text{NO}_x$  (窒素酸化物)

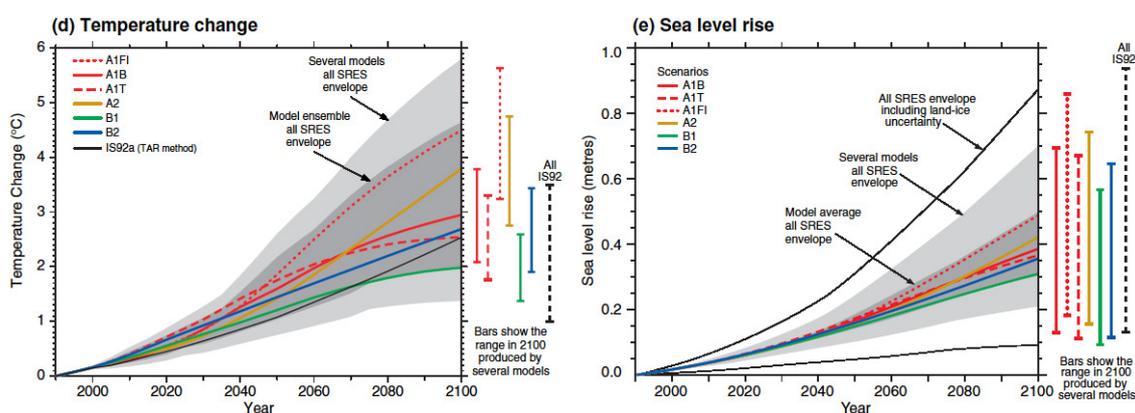


図 2.1 予想される気温と海水面の上昇 (Climate Change 2001)

と異なり、無害な物質として無制限に大気中に放出されており、大気中の $\text{CO}_2$ 濃度は年々

<sup>1</sup> Climate Change 2001、Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

高くなっている。また、地球全体の平均気温も上昇している。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) は大規模な地球環境シミュレーションによって、この地球温暖化は主に大気中のCO<sub>2</sub>が持つ温室効果により生じる現象であると分析し、IPCCの報告書“*Climate Change 2001*”は、図2.1のように気温と海水面が昇すると予測している。

大気中に放出されたCO<sub>2</sub>は、海水に溶解込み、植物に吸収されることにより、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は平衡状態に保たれると見られていた。しかし、1990年から10年間のCO<sub>2</sub>濃度変化から推定した全地球のCO<sub>2</sub>吸収率の平均値は2,300±800Mtce/yr (1Mtce:100万t 炭素換算量)に過ぎない。一方、2000年に排出された総CO<sub>2</sub>量は6,417Mtce/yrに達し<sup>2</sup>、吸収量の3倍に近い量を排出している。また、大気中に拡散したCO<sub>2</sub>は、数世紀後にも、その排出が寄与した濃度上昇部分の約25%は大気中に残り、その影響は数百年間も続く<sup>3</sup>。

かかるIPCCの分析結果(実状)を真摯に受け止め、適切なCO<sub>2</sub>排出削減対策を執らない限り、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は図2.2のシナリオA1FIあるいはA2の増加傾向を示し、2100年の大気中の濃度は856~970ppmに達し、図2.1から明らかなように地球の平均気温は3.8±1.0°C~4.5±1.2°C上昇し、その後も上昇を続ける<sup>4</sup>。

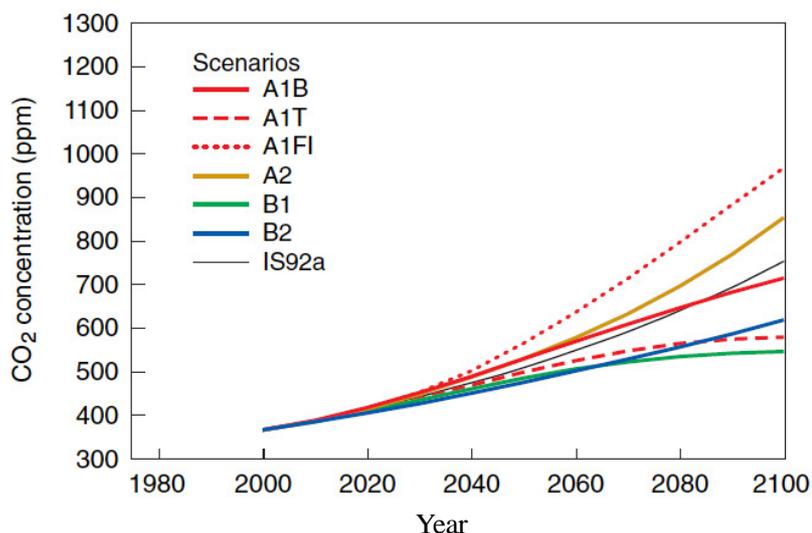


図 2.2 予想される大気中のCO<sub>2</sub>濃度 (Climate Change 2001)

21世紀中に大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇を止め、温暖化を止めるには、Climate Change 2001のシナリオB1<sup>5</sup>の許す濃度以上にCO<sub>2</sub>濃度を高めてはならない。もし、シナリオB1を超えると、2100年になっても大気中のCO<sub>2</sub>濃度は上昇を続ける。

WEO-2002<sup>6</sup>の推定しているCO<sub>2</sub>排出量(標準ケース)はシナリオB1の許すCO<sub>2</sub>排出量を超えており、2030年には180Mtce/yr、2040年にはカナダが2000年に排出したCO<sub>2</sub>の総量に匹

<sup>2</sup> International Energy Outlook 2003 (IEO-2003), May, 2003

<sup>3</sup> The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. Climate Change 2001, Chapter 3

<sup>4</sup> シナリオA2及びA1FI等、Climate Change 2001

<sup>5</sup> シナリオB1 (Climate Change 2001) は2100年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度を560ppm (490ppm~680ppm)に抑え、2000年~2100年の温度上昇を各モデルの平均値で2.0°C以下に抑えるためのシナリオであり、それ以上は上昇させないシナリオである。

<sup>6</sup> World Energy Outlook 2002, OECD/IEA

敵する1,500Mtce/yr、2050年には3,600～4,500Mtce/yrも超過する<sup>7</sup>。ちなみに、シナリオB1の許す全地球のCO<sub>2</sub>排出量<sup>8</sup>は2020年に10,000Mtce/yr、2040年に12,200Mtce/yr、2060年に10,200Mtce/yr、2080年に7,300Mtce/yr、そして2100年には5,200Mtce/yrに抑えなければならない（1990年のCO<sub>2</sub>排出量は5,500Mtce/yr）。

## 1.2 地球温暖化による環境破壊と経済損失

産業革命以降、地球表面の平均気温は $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 上昇した。地球温暖化に伴う過去30年間の気候変化は地上に生息している種の存在に大きな影響を及ぼしており、絶滅の危機に直面している種が増加している。また、異常気象の起きる頻度が急増しており災害の規模も増大している。

地球環境の変化と生態系の適応速度を考慮すると、地球の平均気温上昇は $1.5^\circ\text{C}$ 以下に抑えるべきであり、上昇率は $0.1^\circ\text{C}/10\text{yr}$ 以下に抑える必要がある（既に $0.6^\circ\text{C}$ 上昇している）。しかし、1950年～1993年の夜間最低温度の平均温度上昇率は既に $0.2^\circ\text{C}/10\text{yr}$ （最高温度の平均温度上昇率は $0.1^\circ\text{C}/10\text{yr}$ ）を記録しており、温度上昇率は限界に達していると見るべきである<sup>9</sup>。CO<sub>2</sub>削減計画の実施が遅れば、回復不能な環境破壊を起し、多方面に亘る被害の拡大から経済損失は年々増大する。

地球温暖化は地上に生息する動植物に影響を及ぼす。過去30年間の温暖化は、すでに種の分布する地域と地域内の生存率に大きな変化を示しており、ある種に対しては絶滅に至ると思われる影響を及ぼしている。Chris D. Thomas他は雑誌“Nature”に掲載された論文“気候変化による種の絶滅の危険性 (Extinction risk from climate change)”<sup>10</sup>において地球温暖化が動植物に及ぼす影響の研究結果を報告している。彼らの論文によれば、地球上の約20%をカバーする代表的な地域を選定し、地域内に生息する1103に上る動植物の種を対象に生存（絶滅）の可能性を評価したところ、2050年までに地球の平均気温が $1.6^\circ\text{C}$ 上昇した場合、当該する種が気候変動に合わせ生息地を移動できるとしても (with universal dispersal) 21%～32%の種が絶滅し、移動できない場合は38%～52%もの種が絶滅する。そして、温度上昇が最小 ( $1.0^\circ\text{C}$ ) に抑えられた場合でさえも、9%～13%（移動できる場合）、そして22%～31%（移動できない場合）の種が絶滅するとしている。この論文は地球温暖化が生活環境に及ぼす影響の大きさを示したものであり、地球規模のCO<sub>2</sub>排出量削減の重要性を明らかにしたものである。

地球温暖化は、人類にとっても多大の影響を及ぼし、とりわけ開発の遅れている国々で

<sup>7</sup> WEO-2001 では 2030 年までの推定CO<sub>2</sub>排出量と増加率を与えている。2050 年までの排出量は増加率を用いて外挿した。

<sup>8</sup> Climate Change 2001, Appendix II, Table II.1.1 CO<sub>2</sub> emission from fuel and industrial processes.

<sup>9</sup> Beyond Kyoto : Advancing the international effort against climate change, December 2003

<sup>10</sup> Chris D. Thomas, et al. Extinction risk from climate change; NATURE, Vol. 427, 8 January 2004

は温暖化による生態系の変化に追従することが困難となり、生活環境に破滅的な影響を及ぼすことになろう。また、世界各地で異常気象（集中豪雨、洪水、旱魃、熱波、そして台風とハリケーン等）が頻発し、海水面の上昇と海岸線の侵食によって被害は拡大し、移住を余儀なくさせられる人々の数は知れない。また、砂漠化が住民の生活を脅かし、さらに疾病、なかでもマラリアが急激に蔓延する可能性を否定する根拠は見つからない。

2003年の夏、ヨーロッパを襲った熱波（heat-wave）は、これまで遭遇したことのない異常気象であり、あえて推定すれば450年に1度起きるかどうかという異常な熱波であった。この熱波により少なくとも2万人が死に、130億ドルの経済損失を被った。また、2003年に起きた700件の自然災害の補償として支払われた保険金額は600億ドルに達したとの報告がなされている。このまま有効なCO<sub>2</sub>排出規制が実施に移されなければ、2003年と同規模の異常気象が、2020年には20年に1回、そして21世紀の終わりには2年に1回の頻度で襲来する可能性がある<sup>11</sup>。異常気象による損害事例は多い。ハリケーン・イサベルは米国東海岸地域で36万の家屋を破壊し、5月に米国で発生した一連の竜巻は30億ドルの損害を出した。揚子江の氾濫は65万の家屋を流し、少なくとも70億ドルの損失を被った。また、異常乾燥は森林火災を引き起こし、オーストラリア、ヨーロッパの南西地域、カナダ、そして米国で広大な区域の森林を失った。そしてカリフォルニアの森林火災で保険会社が支払った保険金は20億ドルに達する<sup>12</sup>。そして、2003年に遭遇した極端な異常気象による経済損失は総額550億ドルに達した。かかる異常気象による経済的損失は今後10年毎に倍増し、年間の損失額は、10年以内に1,500億ドルに達するであろうと英国のブレア首相は警告<sup>13</sup>している。

## 2. 地球温暖化を抑えるために

20世紀、先進諸国は化石燃料を不断に消費し、化石燃料依存型の高度経済社会を作り上げた。この間、地球温暖化の兆候が顕著になり、温室効果ガス（以下CO<sub>2</sub>）排出量の規制に関する京都議定書が策定された。

先進諸国はCO<sub>2</sub>排出量の削減に努めてはいるが、その排出量は年率1.8～1.9%で増加し続けており、このまま続けば50年後に2.5倍、100年後には6倍を超える。たとえ、先進諸国のCO<sub>2</sub>排出量が減少したとしても、この増加傾向が収まるとは考えられない。地球温暖化を止めるには地球規模でCO<sub>2</sub>排出量を削減し、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇を抑える以外に方法は無い。

2000年に世界全体で排出されたCO<sub>2</sub>の量は6,200Mtceであったが2030年には約10,400Mtceに達する（WEO-2002）。そして、この増加の大分部は図2.3に見られるように

---

<sup>11</sup> Paul Brown; Environment Correspondent; The Guardian, January 8, 2004

<sup>12</sup> Freak Summers will happen regularly, The Guardian, January 12, 2004

<sup>13</sup> Prime Minister Tony Blair; Sustainable Development and Climate Change, World Nuclear Association, 24 February 2003

中国、インド等、経済発展の著しい開発途上国のエネルギー需要を満たすためのものである。中国等の化石燃料消費量の増加が収まったとしても、東南アジアが続き、南アメリカ、中東、そしてアフリカの経済発展がこれに続く。貧困の解消を目指し、開発途上国援助を進めている先進諸国の支援は化石燃料の消費増大を前提としたものであり、このままでは地球温暖化が止まることはないであろう。

2100年までに大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇を止め、地球の温暖化を止めるための初期条件として、CO<sub>2</sub>排出量を2030年に180Mtce/yr、そして2040年にはカナダが2000年に排出したCO<sub>2</sub>の総量に匹敵する1,500Mtce/yr、2050年には3,600~4,500Mtce/yrを削減しなければならない。そして、2060年以降はさらに排出量を削減し、2100年には全地球の排出量を1980年代後半のレベルまで下

げる必要がある。この削減量に相当する全てのエネルギーを発電容量が120万kw原子力発電所<sup>14</sup>で補うとすれば、2030年までには100基、2040年までに830基、そして2050年代には2000~2500基の運用が必要となる。2060年以降はさらにCO<sub>2</sub>排出量を削減し、2100年には世界の総エネルギー需要の少なくとも70%~80%を運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源で賄う必要がある。

2000年に全世界で稼働していた原子力発電所の設備容量は凡そ120万kw発電所290基(350Mkw)であり、CO<sub>2</sub>削減量は高々500Mtceである。また、原子炉の増設数は、すでにWEO-2002に組み込まれている運転中にCO<sub>2</sub>を排出しない原子力と再生可能エネルギー利用計画に追加するものであり、2030年の総発電容量は390基(470Mkw)~400基(480Mkw)となる。

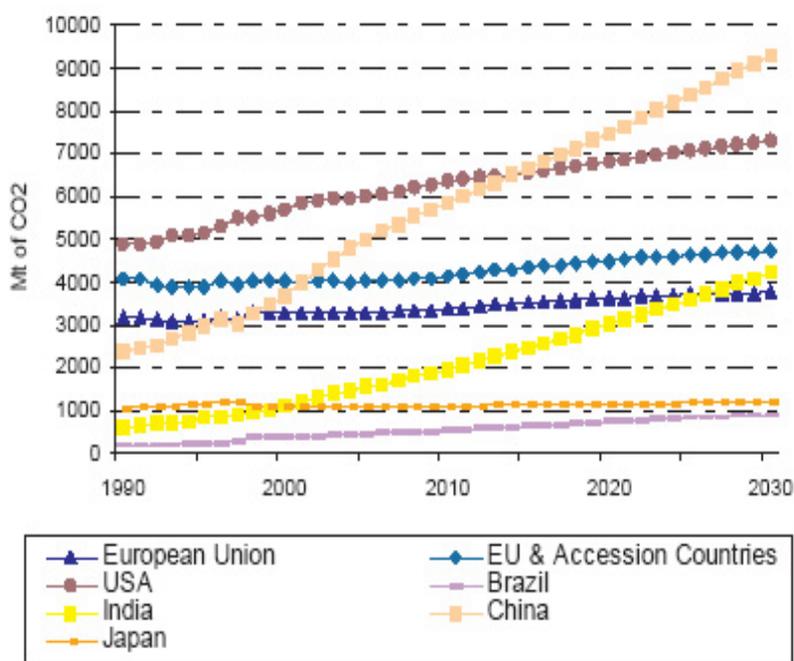


図 2.3 主要な地域及び国のCO<sub>2</sub>排出量と今後の予想

出典：WETO-2030

<sup>14</sup> 原子力発電所の稼働率を83%として計算している。

## 第3章 地球規模のエネルギー・環境政策が必要

### 1. 21世紀はエネルギー革命の世紀

21世紀をエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出の関係を断ち切るエネルギー革命の世紀と位置づけ、運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源の産業化を進め、開発途上国への輸出を我が国の政策とし、エネルギー革命の主導的な役割を果たせ。

化石燃料を主なエネルギー源として発展した20世紀の世界エネルギー・システムは大気中のCO<sub>2</sub>濃度を上昇させ、地球の温暖化を引き起こした。21世紀は地球環境と経済成長の維持を両立させ、将来の世代に負の遺産を引き継がないエネルギー・システムに移行し、エネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出の関係を断ち切るエネルギー革命の世紀と位置づけなければならない。地球温暖化はたとえCO<sub>2</sub>排出を止めたとしても数百年にわたって続く負の遺産であり、地球規模の問題である。運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源により開発途上国の経済成長が維持出来なければ地球温暖化は止まらない。

地球温暖化を止めるには、図3.1のシナリオB1 (Climate Change 2001, Appendix ) に沿ったCO<sub>2</sub>排出量の削減を実現しなければならない。シナリオB1に沿ったCO<sub>2</sub>排出量の制御・管理が可能であれば、2100年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度は解析に用いた各モデルの平均値は560ppmに抑えられ、2000年～2100年の温度上昇は平均値で2.0以下に抑えられる。そして、その後の気温は一定値を保つとしている。

持続的な経済成長を維持する条件として地球規模のエネルギー需要の伸びを年率1.4%と仮定しても、50年後のエネルギー総需要は2倍になり、100年後には4倍になる。シナリオB1の許容するCO<sub>2</sub>排出量の増加を考慮しても、2050年には総エネルギー需要の15%～20%、2100年には70%～80%を運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源で賄う必要がある、電力のみならず輸送部門を支えるエネルギー源もCO<sub>2</sub>を排出しないものにとって代わっていなければならない。

このような条件を満たし、先進国ばかりでなく急速な発展を続けている開発途上国の産業を支

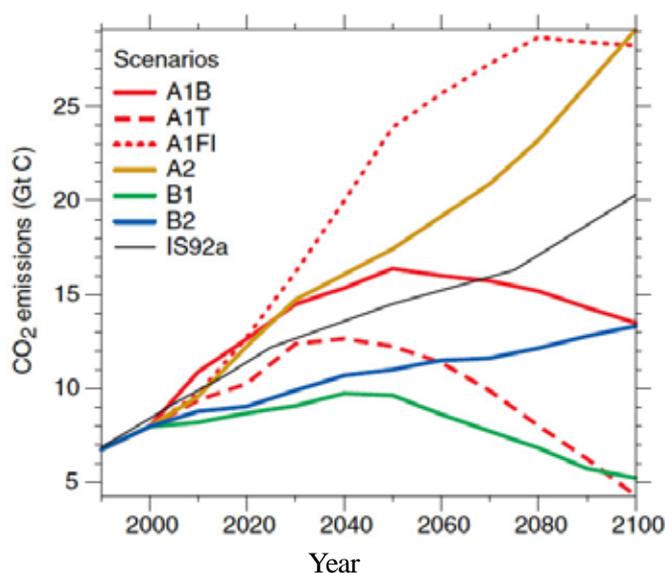


図3.1 CO<sub>2</sub>排出量 (Climate Change 2001)

え得るエネルギー源は限られている。核融合炉をCO<sub>2</sub>削減の有効な手段として組み込むのは時期尚早である。考えられる主な手段は限られている。

省エネの普及、  
太陽光、風力、バイオマス、地熱等の再生可能エネルギー源の活用、  
燃料電池の普及、  
火力発電所が排出するCO<sub>2</sub>の回収しおよび地球環境からの恒久的な隔離、そして  
原子力の利用拡大。

エネルギー市場に導入された市場原理を尊重し、安易なエネルギー政策が続く限り、今後も、石油等化石燃料が主要なエネルギー源の地位を占め、2100年には2000年の総CO<sub>2</sub>排出量の4～6倍を超える膨大な量が排出されることになる。CO<sub>2</sub>排出を抑えるためには発想を転換し、燃料として消費される石油等から生成されるCO<sub>2</sub>が地球温暖化を進める有害な産業廃棄物であると認める必要がある。

そして、まず、火力発電所等から排出されるCO<sub>2</sub>を回収して環境から恒久的に隔離することが可能になるまでの間は、広くCO<sub>2</sub>排出税を導入し、燃料としての石油等の消費を抑制する必要がある。このCO<sub>2</sub>排出税の導入により再生可能なエネルギー源の活用は広がる。そして、CO<sub>2</sub>を排出せず、基幹産業を支える安定したエネルギーの供給を可能にし、さらに水素燃料の供給を可能にする原子力の役割も増してくる。地球環境と持続的な経済成長を維持するために、我が国は産・官・学を挙げて省エネ技術と運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源の産業化を進め、21世紀をエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出の関係を断ち切るエネルギー革命の世紀とするよう世界をリードする必要がある。

## 2. 基幹産業を支える原子力

2100年までに地球温暖化を止めるためにはシナリオB1に沿ったCO<sub>2</sub>排出量の削減をしなければならない。その初期条件として、2030年に180Mtce/yr、そして2040年にはカナダが2000年に排出したCO<sub>2</sub>の総量に匹敵する1,500Mtce/yr、2050年には3,600～4,500tce/yrに相当する量を削減しなければならない。そして、2060年以降はさらにCO<sub>2</sub>排出量を削減し、2100年には全地球の排出量を1980年代後半のレベルまで下げる必要がある。ちなみに1990年のCO<sub>2</sub>排出量は5,500Mtce/yrである。

この削減量に相当するエネルギーを全て発電容量が120万kw原子力発電所<sup>1</sup>で補うとすれば、

<sup>1</sup> 原子力発電所の稼働率は83%としている。また、火力発電により100万kwyの発電をすると約1.8Mtce（炭素換算量で180万トン）のCO<sub>2</sub>を排出する。ここでは消費する化石燃料の割合を石炭30%、石油45%、そして液化天然ガス25%と仮定している。ちなみに日本の場合は1.6Mtceになる。

2030年までには100基、2040年までに830基、そして2050年代に2000～2500基の増設が必要となる。2060年以降はさらに削減し、2100年には総エネルギー需要の少なくとも70%～80%を運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源で賄う必要がある。

ここで示した原子炉の増設数には、すでにWEO-2002に組み込まれている運転中にCO<sub>2</sub>を排出しない原子力と再生可能エネルギー利用計画に追加するものであり、2030年の総原子力発電容量は390基(470Mkw)～400基(480Mkw)にまで拡大しなければならない。なお、2000年に全世界で稼働していた原子力発電所の設備容量は凡そ120万kw発電所290基(350Mkw)であり、削減されたCO<sub>2</sub>排出量は高々500Mtce/yrである。

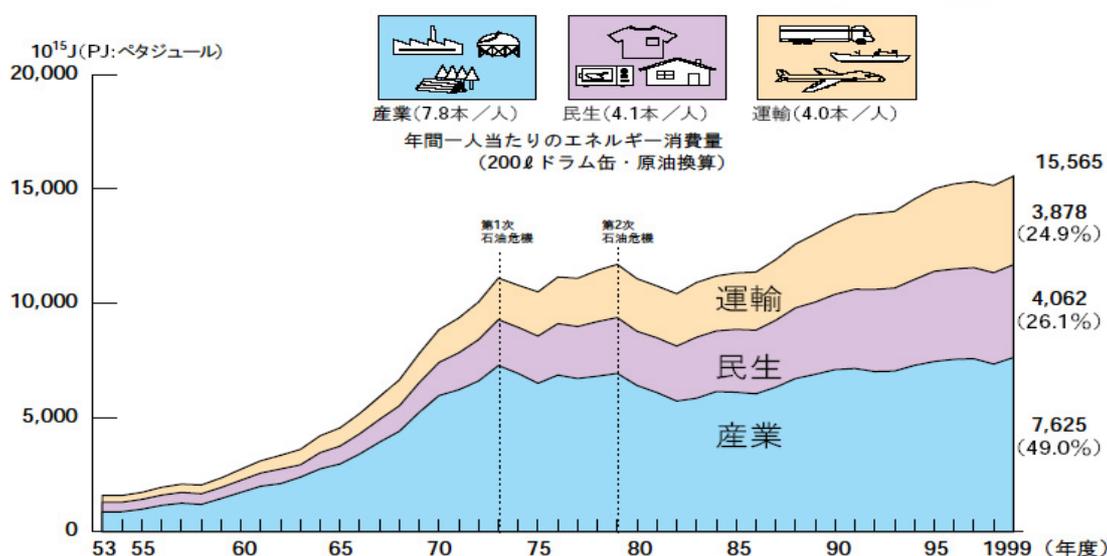


図 3.2 エネルギーの消費形態 (最終エネルギー消費)

出典：総合エネルギー統計 (平成 12 年度版) (原子力図面集 2001-2002)

図 3.2 に見られるように産業活動を支えるために最終エネルギー消費量の約 50%が使われている。このエネルギーは単に量の問題では無く、安定供給の可能な質の良いエネルギーでなければならない。

英国は風力、太陽光そして潮力等、あらゆる再生可能エネルギーの利用を拡大し、再生可能エネルギーのシェアを 2010 年までに 10%、2020 年までに 30%に拡大するとエネルギー白書 (2003 年 2 月) で謳っており、そして欧州全体で 2050 年までにCO<sub>2</sub>排出量を 60%削減し、石油等化石燃料の消費は全エネルギー消費の 20%以下とすることを目標として、関連技術の開発と普及に取り組んでいると英国のブレア首相は表明<sup>2</sup>している。しかし、英国の王立協会そし

<sup>2</sup> Prime Minister Tony Blair; Sustainable Development and Climate Change, World Nuclear Association, 24

て王立工学アカデミーは、温暖化防止に取り組む政府の姿勢は評価するものの、目標を達成するための手段や具体的な施策が明らかにされておらず、原子力発電所の新設が実現しない限り、実現は困難であるとしている。詳細は次章にまとめてある。

環境に優しい再生可能なエネルギー源として脚光を浴びている太陽光発電、風力発電等は運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源であるが、その発電量は天候に強く依存し、安定な電力は得られない。このため、基幹産業の生産活動を支えるエネルギー源とするには無理があり、その利用形態は民生用電力、特に家庭用電力の供給が主体<sup>3</sup>となる。

また、火力発電所等が排出する多量のCO<sub>2</sub>をたとえ回収したとしても、その全量を環境から隔離することは不可能に近い。これらの理由から、地球環境と持続的な経済成長を維持するには、すでに安全で経済的な競争力を備えていると認定されている3.5世代原子炉の導入を急ぎ、CO<sub>2</sub>排出量の削減を進めると共に、GEN-4原子力システムの開発を進め、2050年代以降、順次増加するクリーン・エネルギーの需要を賄うために原子力開発を進める必要がある。

### 3. 長期エネルギー・環境政策の策定が緊急課題

**21世紀後半を見通したエネルギー需給と地球規模のCO<sub>2</sub>排出削減を考慮したエネルギー環境政策の策定を急げ。そして早期に実施体制を立ち上げ、実行に移す必要がある。**

国のエネルギー政策は、少なくとも京都議定書を満たすCO<sub>2</sub>排出削減を可能にし、開発途上国のCO<sub>2</sub>排出削減を助け、経済成長を維持するものでなければならず、その枠の中で自由競争に任せ、より効率的な競争力のあるエネルギー・システムの開発と導入を図るものでなければならない。

20世紀、先進諸国は化石燃料依存型の高度経済社会を作り上げた。この間、地球温暖化の兆候が顕著になり、CO<sub>2</sub>排出量の規制に関する京都議定書が策定された。先進諸国はその削減に努めてはいるが、CO<sub>2</sub>排出量は年率1.8～1.9%で増加し続けており、このまま続けばCO<sub>2</sub>排出量は50年後に2.5倍、100年後には6倍を越える。図2.3に見られるように、この傾向が簡単に収まるとは考えられない。たとえ中国の化石燃料消費の急速な増加が止まったとしても、インドと東南アジアが続き、南アメリカそしてアフリカの経済発展がこれに続く。かかる事態が起きないように、運転中にCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源を確保し、CO<sub>2</sub>の排出を抑え、地球環境を維持するという課題に応えるエネルギー環境政策が求められている。

エネルギー・環境政策は、エネルギー需要が急増している東アジアのエネルギー安全保障と地球環境の維持を伴い満たすものでなければならず、将来の世代が必要とするエネルギー源を

---

February 2003

<sup>3</sup> 再生可能なエネルギー源を安定な電力供給源として活用するためには、大容量蓄電池が実用化されるか、あるいは水素燃料電池等によるバックアップ・システムが導入されるまで待たなければならない。

## 第4章 原子力をめぐる欧米の情勢

### 1. 概要

原子力利用の拡大には、パブリック・アクセプタンスが欠かせない。1979年3月の米国スリーマイル島原子力発電所（TMI）の事故、1986年4月に発生したソ連チェルノブイリ発電所の事故、そして1999年9月に起きたJCOの臨界事故と度重なる事故は“原子力は安全である”との社会的な見方を根底から覆した。

原子力は将来のエネルギー源を確保し、地球温暖化対策として必要かもしれない。しかし、安全が保証されているとの実感は無く、さらに放射性物質を安全かつ恒久的に環境から隔離することが出来ると信じるに足りる根拠が明らかにされてはいない。このような状況の下で、将来の人々に大きな負担を残す可能性がある原子力の導入に賛成することはできない。これが多くの人々の原子力に対する見方であり、原子力利用を妨げている主要な要因である。

他方、拡大するエネルギー需要に備えると共に地球温暖化を避ける手段として原子力利用の拡大が必須であるとの認識が広がりつつあり、社会の見方は揺れている。原子力先進国である英国、フランス、ドイツ、そして米国等の原子炉の多くは既に設計寿命に達し、今後10年、20年間に旧式原子炉は廃炉される。このような状況の中で、原子炉の寿命の延長あるいは原子炉新規建設の動きが見えてきた。米国では「国家エネルギー政策：National Energy Policy」<sup>1</sup>に沿った原子力利用の拡大を図り、原子炉を改造し出力を増強すると共に寿命延長の工事を進めている。さらに、これまで原子炉の新規建設を阻害してきた種々の規制を改定し、原子力産業の寄与を促す「原子力2010イニシアティブ（Nuclear Power 2010 Initiative）」<sup>2</sup>の下に、2010年までに新規原子炉の運転を開始するための準備を進めている。

### 2. 欧州諸国の動向

TMI事故の起きた翌年の1980年、スウェーデンは国民投票により2010年までに原子炉の全廃を決めた。この流れは欧州各国に広がり、風力、太陽光、そして潮力等、再生可能なエネルギー源の開発を進めると共に、エネルギー自給率を維持し改善する方策の検討を進めていた。1986年のチェルノブイリ事故後、ドイツの社会民主党と緑の党の連立政府は脱原子力政策を全面に押し出し、スイスもまた国民投票により原子力推進からの段階的な脱却へと方針を転換し、10年間は新規原子炉の建設を凍結するとの決定を下した。

欧州各国は地球温暖化対策としてのCO<sub>2</sub>削減は必須であると認識し、安易な石炭火力等

<sup>1</sup> National Energy Policy, Report of the National Energy Policy Development Group, May 2001

<sup>2</sup> DOE Press Releases: Energy Secretary Abraham Unveils Nuclear Power 2010, February 15, 2002  
A Roadmap to Deploy New Nuclear Power Plants in the United States by 2010, October 31, 2001

への移行を避け、国情にあった再生可能なエネルギー源を見つけるべく検討を続けてきた<sup>3</sup>が、近年になって、欧州各国の原子力に対する見方が変わりつつある。

## 2.1 北欧諸国（フィンランド、スウェーデン）

2002年になってフィンランド議会は原子力発電所の増設を圧倒的多数で可決した。注目すべきは欧州で広く原子力に反対している緑の党（与党側）が賛成に回ったことである。スウェーデンの世論にも変化が見られ、最近の世論調査によると、2010年までに原子炉を全廃すると決定した国民投票の結果を依然として支持している人たちは20%以下であり約75%が原子力の存続を望んでいる。最大の関心事であった高レベル放射性廃棄物の最終処分候補地の調査が始められることになろう。

## 2.2 ドイツ、ベルギー

ドイツ、ベルギーでも緑の党が主体となって進めてきた脱原子力政策に疑問を持つ勢力が拡大しつつある。ベルギーは2002年に原子力発電所の運転期間を一律に40年とし、原子炉の新規建設は行わないと決定した。しかし脱原子力を達成するには、電力供給の確保に支障をきたさないことを条件としている<sup>4,5</sup>。ドイツにおいても社会民主党と緑の党の連邦政府は2005年を目処に脱原子力への移行を図るエネルギー政策から「原子炉の許容運転期間を32年間とし、政府は高い安全基準の維持および関連法令の遵守し、残存運転期間中に原子力発電所の運転を妨害されない十分な措置をとり、安全なバックエンド処理の実施を保証する」と大幅に譲歩し、かかる施策を反映するよう原子力法を改正することで合意した<sup>6</sup>。すなわち、脱原子力を先送りし、経済的に見合う再生可能なエネルギー源の開発に時間的な猶予を与え、原子力の役割を再検討する機会を将来に残したといえる。

## 2.3 スイス

スイスの取りえる選択肢は少ない<sup>7</sup>。スイスの電力の構成比は水力が約60%、原子力が約38%であり、火力発電の占める比率は極めて少ない。さらに、水力は夏季を中心に稼働し、この間は電力を輸出している。しかし、凍結により発電できない冬季は輸入に頼っている。

---

<sup>3</sup> Energy for the Future: Renewable Source of Energy, White Paper for a Community Strategy and Action Plan, European Commission, COM(97)599 final, November 26, 1997

<sup>4</sup> 海外情報、日本原子力学会誌、Vol.44、No.6、2002

<sup>5</sup> 最近の原子力開発状況をみる、第1回ヨーロッパ、原子力文化 2002年7月号  
<http://www.jaero.or.jp/data/publish/bunka/tuiseki/2002/200207.html>

<sup>6</sup> 河合祐一他、岐路に立つドイツの原子力政策 - 脱原子力政策の現状と行方 -、研究報告、  
<http://eneken.ieej.or.jp/data/old/pdf/enekei/german.pdf>

<sup>7</sup> スイスの原子力政策の現状と今後の動向、ジェトロ・ジュネーブ・事務所、No.445、2003年4月  
[http://www3.jetro.go.jp/ma/tigergate/info/techinfo/pdf/445/445\\_01.pdf](http://www3.jetro.go.jp/ma/tigergate/info/techinfo/pdf/445/445_01.pdf)

この水力も新設の可能性のある地点はほぼ開発済みであり、今後大幅に拡大できる可能性は少ない。再生可能なエネルギー源が冬季に必要な電力を補うものとはなり得ず、その発電容量は将来にわたって小規模なものにとどまると見られている。

#### 2.4 英国

英国の脱原子力に向けた動向は複雑である<sup>8</sup>。2020年時点で1基のPWRを除いて全ての原子炉の運転寿命が来る。これらの原子炉は1960年代から1970年代に設計・建設されたマグノックス炉(AGR)が主体であり、1950年代に開発された炭酸ガス冷却炉(GCR)も含まれている。旧型のこれらの原子炉は経済性が悪く順次閉鎖される。この閉鎖により減少する発電量を補完する新たな原子炉の建設を国の政策としては進めないが(民間企業の自主判断に任せる)、再処理施設(THORP)及びMOX燃料加工施設(SMP)は運転を続けるとしている。英国の主要原子力事業者である原子燃料会社(BNFL)、ブリティッシュ・エナジー社(BE)等が政府の支援下に置かれている現状を考慮すると、この原子力政策は「ブレア政権が原子力政策に対する主導権の放棄をしたものである」と受け取る向きもある。英原子力産業会議(BNIF)は「英国のエネルギー政策を方向転換する機会を逸した」とし、再生可能なエネルギーや省エネに過度に依存するエネルギー政策は非現実的であると非難し、BEはエネルギー安全保障の観点から総発電量の25%は原子力で賄う必要があるとし、廃炉される原子炉は新たな原子炉を建設する方法で更新されるべきであるとし、今後20年間の内に100万kw原子炉10基を建設しなければならないとしている。

英国政府は2003年にエネルギー白書<sup>9</sup>を公開し、風力、太陽光そして潮力等、あらゆる再生可能エネルギーの利用を拡大することにより2050年までにCO<sub>2</sub>排出量を60%削減するとしている。そして、再生可能エネルギーの占めるシェアを2010年に10%、そして2020年には30%に拡大するために関連研究開発を進め、関連機器を商品化し、市場を開発途上国にまで広げる。そして、この新たなエネルギー・システムへの移行に大きな経済負担を課す必要はないとしている。しかし、王立協会と王立工学アカデミーは、温暖化防止に取り組む政府の姿勢は評価するものの、目標を達成するための具体的な施策が明らかにされておらず、原子力発電所の新設がおこなわれない限り、その実現は困難であると指摘している。また、政府の政策評価・革新部門(PIU)のエネルギー政策検討班は、老朽化した原子炉の代替として15基の原子炉を新規に建設すべきである<sup>10</sup>としている。

<sup>8</sup> イギリスのエネルギー事情と政策、原子力百科事典

<sup>9</sup> Energy White Paper, Our energy future-creating a low carbon economy, Department for Transport, UK, February 2003

<sup>10</sup> The Sunday Times, 2001, 11, 4.

## 第5章 原子力の早期導入が必要

将来の世代に負の遺産を残さないためには、2030年には少なくとも180Mtce/yr、そして2040年に1,500Mtce/yrに相当するCO<sub>2</sub>の排出を削減し、かつ、持続的な経済成長を支えるために必要なエネルギーを確保しなければならない。原子力はこの相反する厳しい条件を満たすことができる。合わせて、省エネを進めると共に、導入可能なあらゆる技術を動員し、早期に有効であり実質的な効果が期待できるCO<sub>2</sub>削減に取り組む必要がある。

### 1. 概要

先進国ばかりでなく開発途上国の急速な経済発展によるCO<sub>2</sub>排出量の急増が想定されている。しかし、今後20～30年間の間、CO<sub>2</sub>排出量を削減することが可能な主な手段は限られている。

- ・ 太陽光、風力、バイオマス、地熱等の再生可能エネルギー源の使用を拡大する。
- ・ 燃料電池を実用化し、その使用を拡大する。
- ・ 火力発電所（特に石炭火力）が排出するCO<sub>2</sub>を回収し、地球環境から恒久的に隔離する。
- ・ 原子力利用を拡大する。

これらの手段はいずれもCO<sub>2</sub>削減に寄与する。しかし、その多くは開発段階にあり、急を要する膨大な量のCO<sub>2</sub>排出量削減を可能にするには、既に実績のある原子力利用の拡大に頼らざるを得ない。原子力についても、核燃料サイクル、放射性廃棄物の処理処分等にかかる問題と経済性に係る問題は今後の課題であるが、高レベル放射性廃棄物等（100万kwyrの発電に必要なウランは21トン程度である）は全て保管・管理（中間貯蔵を含む）されていることから今後の研究開発により解決可能である。一方、100万kwyrの火力発電が排出するCO<sub>2</sub>は660万トン（炭素換算：180万トン；液化炭酸ガスで東京ドーム5杯分）に上り、たとえ回収出来たとしても、その膨大な量を環境への影響がない隔離技術が開発されるまでの期間、蓄積し、管理するためのインフラの整備に要する経費は予想すら出来ない。

先ず2030年、そして2040年に実働可能な原子炉について検討する。実用可能な原子炉は、すでに建設を決定しているか、あるいは計画している原子炉、すなわち3.5世代原子炉に限定し、GEN-4システムの革新型原子炉は対象としない。ここでは、CO<sub>2</sub>削減に寄与する他の手段の検討は行なわないが、いずれも将来のエネルギー需要を満たす環境に優しい安全な、そして経済的なエネルギー源となり得るものであり、実用化に向けた研究開発を進めるべきである。

### 2. 導入の時期と規模

2100年までに大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇を止め、地球の温暖化を止めるための初期条件として、2030年に180Mtceに相当する120万kw原子炉100基（年間稼働率を約84%と仮定）そして

2040年には840基を新規に稼働させる必要がある。この増設数は、すでにWEO-2002に組み込まれている運転中にCO<sub>2</sub>を排出しない原子力と再生可能エネルギー利用計画に追加するものであり、2030年の総原子力発電容量は390基(470Mkw)~400基(480Mkw)<sup>1</sup>に拡大しなければならない。

増設しなければならない原子炉の数は、先進諸国および開発途上国の予想されるCO<sub>2</sub>排出の増加量をベースに試算している。ただし、京都議定書の規定しているCO<sub>2</sub>削減目標は考慮していない(日本を含む多くの先進諸国は2002年現在、削減目標を超えるCO<sub>2</sub>を排出している)。

表 5.1 CO<sub>2</sub>削減目標に見合う原子力発電所の数

	2030年	2040年
先進諸国	44	270
EE/FSU	8	80
開発途上国	48	490
世界全体	100	840

注：発電容量 120 万 kw 発電所の基数（稼働率 84%）

EE/FSU：東ヨーロッパ/旧ソ連諸国

表 5.1 の数値はWEO-2002 のCO<sub>2</sub>排出量予想値<sup>2</sup>をベースに算出したものであり、先進諸国は1990年、開発途上国は2000年の排出量を規準とし、全地球のCO<sub>2</sub>予想排出量をシナリオB1の許容レベルにまで削減するよう、CO<sub>2</sub>排出増加量を比例配分し、発電容量120万kw原子炉の数に換算したものである。

先進諸国の中では北米地域(米国)の必要とする増設が30基(2030年)210基(2040年)であり、開発途上国では中国が27基(2030年)250基(2040年)と突出している。ちなみに開発の遅れている中南米、中東、そしてアフリカ地域では10基(2030年)そして130基(2040年)にとどまる。

## 2.1 原子炉の選択

原子炉の新設には建設サイトの選定から安全審査を含む許認可、そして建設等に多くの年月を必要とするため、猶予期間は少なく、2030年実用化を目指す革新的原子炉システム、GEN-4原子炉システムの完成を待つことはできない。このため、既に安全性と経済性が実証されてい

<sup>1</sup>2000年に全世界で稼働していた原子力発電所の設備容量が凡そ120万kw発電所290基(350Mkw)であり、CO<sub>2</sub>削減量は高々500Mtceである。

<sup>2</sup>2040年の数値はWEO-2002の2025年から2030年のCO<sub>2</sub>排出量の伸び率を用いて推定した。

る改良型軽水炉を主体とする3.5世代原子炉<sup>3</sup>に頼らざるを得ない。対象とする原子炉は我が国のABWRやAPWRおよびその後継機であるABWR- とAPWR+、ヨーロッパのESBWRとEPR、そして米国のAP600 およびAP1000 等である。

これらの原子炉を選択することにより、深刻な量の放射性物質を放出する原子炉の大規模炉心損傷事故に対する安全性は大幅に改善され、核燃料集合体の核拡散抵抗性に更なる強化策の追加は必要なく、現状の不拡散体制（追加議定書を含むIAEA 保障措置）で対処可能となり、開発途上国への原子炉輸出の制約が大幅に削減される。また、これらの原子炉はMOX 燃料の照射を前提としており、日本のMOX 利用を促進するばかりでなく、核兵器国が平和利用に転用すると約束している多量の兵器級プルトニウム、及び、英国で再処理を続けているマグノックス燃料から抽出されたプルトニウムを、有用なエネルギー源として活用する道が開ける。

### 3. 経済性

地球温暖化抑止の主な役割を原子力が担うには、競合する他の技術よりも価格が安く環境に優しいものであることが望ましく、特に原子力の経済性は重要な要素となる。

多くの国では、原子力の排出する放射性廃棄物の保管管理と環境からの隔離に関する責任を施設者が負うことを前提に、関連経費を電力価格に組み込むとしている（受益者負担）。他方、火力発電所が放出するCO<sub>2</sub>は環境を破壊する地球温暖化の原因となる産業廃棄物であるにもかかわらず、回収・隔離に関する義務を施設者に負わせていない。

公平な価格競争を促すには、まず、平等な競争条件を整える必要がある。すなわち、CO<sub>2</sub>の回収と環境からの隔離に関する経費を等しく電力価格に反映させる措置を取る必要がある。

#### 3.1 電力料金の比較

米国のMITは原子力および各種火力発電のコスト（電力料金）を比較検討している。このMIT 報告書<sup>4</sup>の経費の算定は、これまでの経験に基づいたパラメーターを使用し（民生用再処理の経験は無い）投資家が想定するであろう条件を考慮している。すなわち、発電所の全寿命を通じて、全ての運転経費や税金、さらに投資家に妥当な水準の配当を支払うのに必要な電力料金の平準価格、あるいは均一化された価格を算定している。表 5.2 に示した比較表では、原子力を含む全ての発電施設の設備利用率を85%、そして商業用発電寿命を40年としている。

ここに示された原子力の標準モデルの経費算定は建設費を\$2,000/kwe、建設期間を5年間、金利を8%、そしてインフレ率を年3%としている。原子力発電のコスト構造は、最初に必要と

<sup>3</sup> 3.5世代原子炉は現在稼働している軽水炉の改良型であり、再処理あるいは廃棄物の処理処分を含む核燃料サイクル全体を包括的に検討するGEN-4 原子力システムとは異なる。

<sup>4</sup> MIT報告書：The Future of Nuclear Power, An Interdisciplinary MIT Study

なる建設費の額に左右されるという特徴がある。一方、天然ガス発電炉で最もコストがかかるのは燃料費、石炭の場合は施設建設費と燃料費が共に寄与しており、原子力と天然ガスの中間に位置する。

表 5.2 の電力価格比較表のなかで 25%の原子炉建設費削減は、米国の新たな申請許可手続きによるものかも知れないが、同一炉型の建設が 5 基目に入ると、技術的な改善を考慮しなくても、この削減率は達成可能と見ている。また、12 ヶ月間の建設期間短縮は日本の ABWR 建設ですでに達成している期間 48 ヶ月を参考にしている。

表 5.2 MIT による電力価格の比較

CO <sub>2</sub> 排出税(\$/tce)	0	100	200
原子力			
標準	6.7	6.7	6.7
建設費 25%削減	5.5	5.5	5.5
建設期間 12 ヶ月短縮	5.3	5.3	5.3
石炭火力	4.2	6.6	9
ガス	4.1	5.2	6.2

(単位:Cents/kwh)、施設の寿命:40 年間 施設稼働率:85%

この表の電力価格は 2002 年当時の燃料価格をベースに求めたものであり、燃料価格の上昇率は、核燃料と石炭が年率 0.5%、天然ガスが 2.5%と仮定している。そして、核燃料廃棄物の処理処分にかかる経費として 1mill/kwhを計上している。さらに、火力発電に伴い発生する廃棄物 CO<sub>2</sub>の回収・隔離に関しては\$200/tceから\$300/tceの経費が必要と見積もられているが、MIT報告書ではCO<sub>2</sub>排出税が政治的に決められるものであることを考慮し、\$100/tce、あるいは\$200/tceを採択することを勧めている。

なお、米国の新規建設の支援は許認可手続きの実証だけにとどまらない。米国議会上院で審議中の包括エネルギー法案には新規の原子力発電所に対する政府の財政支援が盛り込まれ、2020 年末までに運転を開始する原子力発電所を対象に、発電電力量 1kwh 当たり 1.8 セント(約 2 円)の税額控除を 8 年間適用するとしている。米国の電力業界においても初期投資回収の負担は重く、投資の回収にかかる期間が長期にわたる原子力発電所の建設には、投資を確実に回収する仕組みが求められている。

表 5.3 日本の電力価格 (2003 年)

	ケース A	ケース B
原子力	5.3	7.4
石油火力	10.7	12.4
LNG 火力	6.2	7.2
石炭火力	5.7	7.4

出典: 電気事業連合会 (単位: 円/kwh)  
 ケース A: 運転年数; 全て 40 年  
 ケース B: 運転年数; 火力 15 年  
 運転年数; 原子力 16 年

日本では、電気事業連合会が核燃料のバックエンド事業にかかる経費を含む原子力発電単価を試算し、他の発電単価と比較している。表 5.3 に示した価格は 2003 年 12 月、総合エネルギー

一調査会電気事業分科会コスト検討小委員会に提出されたものである。このコスト算定は2003年2月の電気事業分科会の答申に基づき、バックエンド事業の円滑な推進に加え、適切な制度・措置を検討し、整備していくための基礎資料として試算したものであり、処理処分の規準等の未確定な部分に付いても一定の前提を置いて求めたものである。

この前提条件の詳細は定かでないが、バックエンド事業の内、特に電気事業者として責任の取り得る範囲は限られる。数千年、数万年に及ぶ高レベル放射性廃棄物の管理責任を負わせることはできない。国は高レベル放射性廃棄物の処理処分にかかる基準を定め、基準に適合した処理処分後の管理責任は国が負うとの明確な指針を策定する必要がある。

### 3.2 CO<sub>2</sub>排出税

化石燃料の消費により排出され、大気中に拡散したCO<sub>2</sub>は200年、300年と長期間に亘り大気中に留まり、地球温暖化を進め、地球環境を破壊し、10%から30%に及ぶ種が絶滅する可能性があり、人類の将来に大きな負担を負わせる産業廃棄物である。

原子力利用に伴い発生する放射性廃棄物の処理処分は全て発生者（受益者）責任であるとの原則を守るならば、火力発電により発生するCO<sub>2</sub>の回収と隔離にかかる経費\$135～\$320/tce<sup>5,6</sup>も当然電力価格に組み入れなければならない。

CO<sub>2</sub>排出税、あるいはそれと同等の化石燃料取引税制度など（以下CO<sub>2</sub>排出税）の措置を普遍化し、化石燃料の消費を抑える以外に地球温暖化を抑制する道はない。CO<sub>2</sub>排出税の導入は太陽光発電、風力発電等、再生可能なエネルギー源の利用拡大を促進し、原子力の競争力を相対的に高めることになる。最終的なコストは、社会的要請に基づく地球温暖化抑止と化石燃料消費のバランスにかかる選択肢と、CO<sub>2</sub>回収と永久隔離にかかる経費とその実現に向けた技術開発費によってきまる。しかし、最終的にはエネルギー環境政策に基づく政治的な決断により決まることになる。

## 4. 安全性

原子力システムは持続可能な成長を維持するに十分な電力を供給し、エネルギー自給率を改善する有力な手段であり、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加を抑え、地球温暖化を抑止する手段である。しかし、全くリスクの無い原子力システムの設計は出来ない。リスクの低減化は、技術的可能

---

<sup>5</sup> Steve Fetter ; Decarbonizing the Global Energy System ; 炭素換算 1.0 t当りの回収に必要とする経費を\$100～\$260/tce、処分施設への輸送経費は\$5～\$30/tce（米国内での輸送）そして地球環境からの隔離にかかる経費約\$30と算定している。

<sup>6</sup> IEA Greenhouse Gas R&D Programmeの報告書“Ocean Storage of CO<sub>2</sub>”では全体で\$150～\$220/tceと推定している。

性の問題であり、運転にかかる問題である。安全な運転を行なうためには、効果的な規制、安全にコミットしている経営陣、そして優れた技術を持つ労働力の確保が必要である。

原子力システムの安全性を確保する基準として国際原子力機関 (IAEA) は、確率論的安全評価 (PSA) による炉心損傷確率を、既設の原子炉に対しては  $10^{-4}$ /炉年 (原子炉1基当たり1万年に1回の発生確率) 以下、新設の原子炉に対しては  $10^{-5}$ /炉年未満にするよう求めている。

2050年に1000基の原子炉を増設する必要があるとしているMIT報告書の安全基準は、全核燃料サイクルにおいて、深刻な量の放射性物質を放出する事故 (格納容器破損事故) は全世界で50年に1回以下との基準を維持すべきであり、原子炉の炉心損傷事故の発生確率を  $10^{-4}$  から  $10^{-5}$  へと、10分の1に減らせば十分達成可能であるとしている。

日本国内に設置されている原子炉の炉心損傷確率はおおむね  $10^{-6}$ /炉年未満と評価されており、すでに上記の基準を上回っている。さらに、近年の安全性改善要求に応え、炉心損傷率に寄与している安全システムの分析を行ない、寄与率の大きい部分を重点に改善をしたところ、炉心損傷確率を50%~60%改善し  $10^{-7}$  のオーダーにまで低減<sup>7</sup>している。

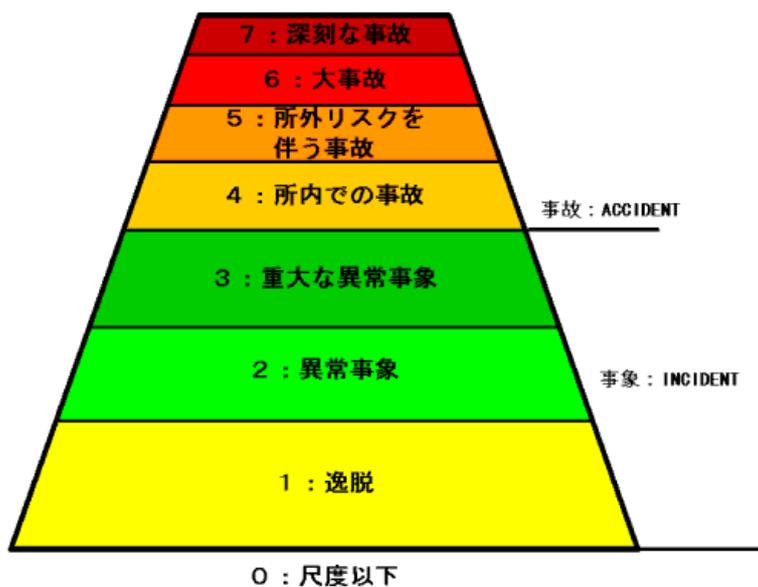


図5.1 原子力施設の事象・事故に対する国際評価尺度

出典：日本原子力研究所ホームページ

図5.1の深刻な事故レベル7)に相当する深刻な量の放射性物質を放出する事故率 (格納容器破損率) は炉心損傷率より1/5~1/10小さい。従って全世界2,000基の原子炉を稼働させたとしても深刻な量の放射性物質を放出する事故を起す頻度 (確率) は  $2 \times 10^{-4}$  となり、5千年に1回程度となることが期待でき、日本の原子炉は3.5世代原子炉の備えるべき安全性に関

する条件を満たしている<sup>8</sup>と言えよう。

<sup>7</sup> アクシデントマネジメント整備後 - 確率論的安全評価報告書 (伊方発電所1号炉及び3号炉) -、四国電力、平成16年3月、及び 敦賀発電所3、4号機の安全性確認、福井県県民生活部原子力安全対策課平成13年9月。

<sup>8</sup> 福井県の原子力、第3章原子力発電所の安全対策 <http://www.athome.tsuruga.fukui.jp>

## 第6章 GEN-4 原子力システム

### 1. なぜ GEN-4 原子力システムか

米国エネルギー省 (DOE) 原子力エネルギー・科学技術局マグウッド局長は 1999 年の米国原子力学会で行ったスピーチで、将来に亘って十分なエネルギーを確保し、世界の原子力技術と産業の主導権を確保するとの観点から、GEN-4 原子力システムの開発を提案した。図 6.1 に示しているように、第 1 世代原子炉とは初期の原型炉的な炉で、 SHIPPINGポート (PWR)、ドレスデン (BWR) 等であり、第 2 世代とはその後の商用炉群で、PWR、BWR の軽水炉、CANDU 重水炉、ロシアの軽水炉である VVER や RBMK である。第 3 世代原子炉は第 2 世代の改良型であり、大型化による経済性の改善を迫及した ABWR や EPR、そして静的安全性を取り入れた中型の AP600 等を示す。

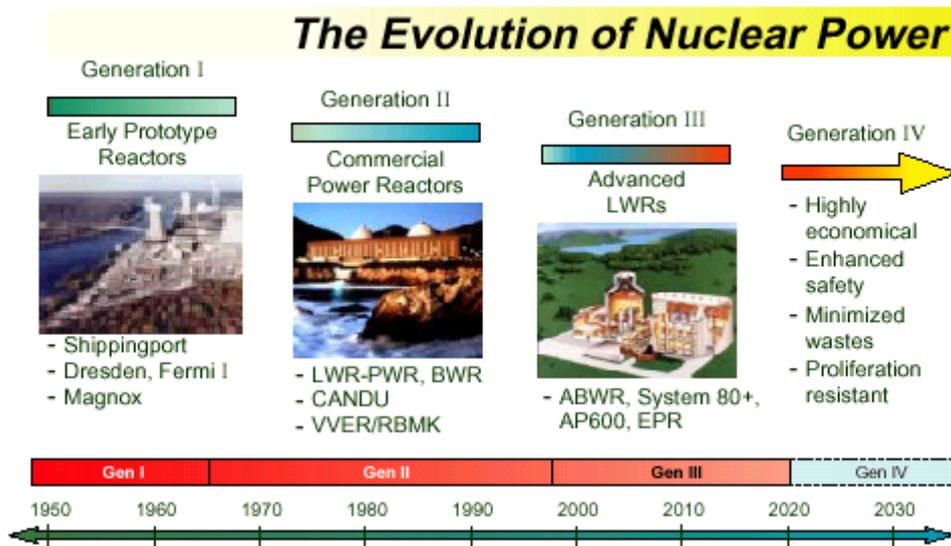


図 6.1 GEN-4 原子力システムの位置付け

GEN-4 原子炉は以下の特徴を備えるものとしている。

天然ガス火力発電と競合できる経済性を持つこと。

より高度な核拡散抵抗性をもつこと。

より高度な安全性を持つこと。

廃棄物の負担を最小化するものであること。

DOE では、2030 年頃の完成を目標 (当初は 2020 年完成) に、電力需要急拡大が確実視されるアジア諸国の市場を対象として、核拡散の恐れと安全性の心配の少ない原子炉システムを米国が主導権を持った国際協力プログラムの下で開発することができるならば、米国の原子力産

業の維持・発展ならびに核拡散政策上の主導権を取ることができると考えていたようである。核拡散抵抗性の強化は米国の識者や議会では原子力再興にとっての必須の条件と目されている。また国立研究所群にとっては原子力関連研究の生き残りゲームという側面もある。

米国の原子力発電実績、設備利用率はここ数年 90%前後と良好であり、電力自由化の中で原子力発電所の評価は上がっている。しかし、1970年代から新規発注がないことから原子力発電のシェア低下が危惧されており、1997年にはCO<sub>2</sub>排出の抑制と原子力技術力の維持・発展という観点からの施策強化の必要性を大統領科学技術諮問委員会（PCAST）が指摘した。

このPCASTの勧告を受け、米国では、1999米国会計年度予算（FY1999）より、革新的原子力研究の促進を目的として提案公募による原子力研究イニシアティブ（NERI）が始められた。この他にも、既存の発電所のプラント寿命延長を目的とする原子力発電プラント最適化プロジェクト（NEPO）が進められている。即ち、大統領科学技術諮問委員会（PCAST）の勧告に基づき、DOE主導による原子力開発が確実に動き始めていると言える。その背景を次のように考えている。

- ・米国にとっても、また今後の世界にとっても、原子力は重要であり、米国の原子力技術の維持・向上が必要である。
- ・米国内で原子力を専攻する学部学生の減少が顕著であり、次世代の人材育成のために学生にとって魅力ある開発プロジェクトを計画する必要がある。
- ・原子力開発や核不拡散で米国の主導権を保持し、世界の原子力開発をリードすることが米国にとって重要である。

このように、GEN-4原子力システムの選定と開発にかかる計画はDOE主導の下に開始され、DOEは広く各国に計画への参加を要請した。そして、平成12年1月27、28の両日、ワシントンD.Cで日、英、米、仏、韓、加、ブラジル、アルゼンチン、南アが参加し、そしてOECD-NEAおよびIAEAがオブザーバーとして参加して、GEN-4原子力システム政府レベル国際ワークショップが開催され、次世代炉開発の必要性及び国際協力の必要性を確認する共同声明を発表した。このようにして、国際協力プログラムとしてGEN-4原子力システム開発計画は開始された。

最終的にGEN-4国際フォーラム（Generation IV International Forum, GIF）においてGEN-IV原子炉システムとして6概念、国際短期導入（INTD）原子炉システムとして16概念が選定された。選定された各原子炉の基本設計概念は以下の通りである。

#### （1）GEN-4原子炉システム：2030年までに導入可能な概念

超臨界圧炉（SCWR）

ナトリウム冷却高速炉（SFR）

鉛合金炉 (LFR)

ガス冷却高速炉 (GFR)

超高温ガス炉 (VHTR)

溶融塩炉 (MSR)

## (2) 国際短期導入 (INTD) : 2015 年までに導入が可能な概念

新型 BWR として、ABWRII、ESBWR、HCBWR、SWR-1000

新型 PWR として、AP600、AP1000、APWR+、APR1400、EPR

圧力管型炉として、ACR-700

一体型炉として、CAREM、IRIS、SMART、IMR

モジュラー型ガス炉として、PBR、PMR

## 2. GEN-4 原子炉とロードマップの概要

GEN-4 原子炉システムとして採択された 6 概念、国際短期導入炉 (INTD) として認定された 16 概念、燃料サイクルの検討結果、及び研究開発について、ロードマップ<sup>1,2</sup> に従ってその概要を以下に述べる。

### 2.1 GEN-4 原子炉システム (GEN-IV) の概念

#### (1) ガス冷却高速炉 (GFR)

GFR は、高速スペクトルとヘリウム冷却、及びクローズドサイクルを特徴としている。GT-MHR や PBMR といった熱中性子ヘリウム冷却炉と同じように、冷却材ヘリウムの高い出口温度は、電気の供給以外にも、水素や、高い効率でのプロセスヒートを供給することが可能である。GFR は発電のために直接サイクルヘリウムタービンを用いており、プロセス熱は水素製造の熱化学反応に利用することが可能である。高速中性子スペクトルとアクチニドの完全なリサイクルの組合せにより、GFR は長寿命放射性核種の発生を最小限とすることができる。GFR の高速スペクトルは、また、利用可能な核分裂性物質と、増殖性物質 (濃縮プラントからの劣化ウランを含む) を、ワンスルー燃料サイクルの熱中性子ガス冷却炉に比べて二桁効率よく利用することができる。GFR のレファレンスは、オンサイトでの使用済み燃料の再処理と燃料製造プラントを備えた方式を想定する。

GFR の技術的な根拠は、多くの熱中性子スペクトルガス冷却炉と共通のものと、いくつかの高速ガス冷却炉特有のものからなる。英国で建設・運転されたドラゴンプロジェクトや、ド

<sup>1</sup> “A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems”, U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum (December, 2002)

<sup>2</sup> 松井一秋、他 “第 4 世代原子炉システム技術開発”, 日本原子力学会誌, Vol.45, No.3 (2003)

ドイツで建設・運転された AVR 及び THTR、米国で建設・運転されたピーチ・ボトム及びフォートセントブレインなどの廃炉となった原子炉を含め、過去には原型炉や実証炉プロジェクトがいくつもあった。コンパクト型燃料を用い 1999 年にフルパワーを達成した日本の HTR (30MWt) や、ペブルベッドを採用した中国の HTR-10 (10MWt) 等の進行中のプロジェクトもある。300MWth のペブルベッドモジュラー型実証プラントが、南アフリカの PBMR チームにより設計が進められており、ロシアのコンソーシアムが、GA の協力のもと 300MWt の CT-MHR の設計を進めている。PBMR と GT-MHR の原子炉、燃料及び材料の設計は、直接ブレイトンサイクル・ヘリウムタービンとプラント設計におけるモジュラー化の実現以外は、実証済技術の延長型である。GFR は、これら技術開発の成果の他、VHTR 向けの革新的な燃料や超高温材料開発の成果も利用できる。開発の流れとしては、熱中性子炉から高速中性子炉への段階として捉えられる。表 6.1 に参照炉の仕様を、図 6.3 にシステムの概念図を示す。

表 6.1 ガス冷却高速炉 (GFR) の仕様 (参照炉)

Reactor Parameters	Reference Value
Reactor power	600 MWth
Net plant efficiency (direct cycle helium)	48%
Coolant inlet/outlet temperature and pressure	490 /850 at 90 bar
Average power density	100 MWth/m <sup>3</sup>
Reference fuel compound	UPuC/SiC (70/30%) with about 20% Pu content
Volume fraction, Fuel/Gas/SiC	50/40/10%
Conversion ratio	Self-sufficient
Burnup, Damage	5% FIMA; 60 dpa

提案されている参照炉は、電気出力 288MWe のヘリウム冷却炉で、出口温度は 850 、熱効率 48% である。炉心はピンまたは板状燃料を用いたブロック型をベースとしている。フランスを中心に検討が進められているが、燃料形状、炉心構造など、概念の基本部分についてはまだ未決定で、燃料サイクル技術を含めて開発要素が多い。

## (2) 鉛冷却高速炉 (LFR)

LFR システムは、高速中性子スペクトルを持つクローズドサイクルの鉛或いは鉛ビスマス合金冷却の原子炉である。LFR としては、50 - 150MWe の出力範囲で長期間隔の燃料交換を行うバッテリー、300 - 400MWe の出力範囲でのモジュールシステム（規格ユニットによる作製システム）、1,200MWe 出力の大型単一プラントが含まれる。

表 6.2 に 4 種類の参照炉の仕様を、図 6.4 にシステムの概念図を示す。

鉛冷却大型炉としてはロシアで開発中の BREST をレファレンス概念としている。また、バッテリー炉は、15～30 年の超長期運転が可能であり、分散電源や水素製造、海水脱塩などを目

表 6.2 鉛/鉛ビスマス冷却炉 (LFR) の仕様 (参照炉)

Reactor Parameters	Reference Value			
	Pb-Bi Battery (nearer-term)	Pb-Bi Module (nearer-term)	Pb Large (nearer-term)	Pb Battery (far-term)
Coolant	Pb-Bi	Pb-Bi	Pb	Pb
Outlet Temperature ( )	~550	~550	~550	750–800
Pressure (Atmospheres)	1	1	1	1
Rating (MWth)	125–400	~1000	3600	400
Fuel	Metal Alloy or Nitride	Metal Alloy	Nitride	Nitride
Cladding	Ferritic	Ferritic	Ferritic	Ceramic coatings or refractory alloys
Average Burnup (GWD/MTHM)	~100	~100–150	100–150	100
Conversion Ratio	1.0	$d \geq -1.0$	1.0–1.02	1.0
Lattice	Open	Open	Mixed	Open
Primary Flow	Natural	Forced	Forced	Natural
Pin Linear Heat Rate	Derated	Nominal	Nominal	Drated

的としている。また、原子炉モジュールは工場生産し現地に据え付け、使用後の炉心はそのまま燃料リサイクルセンターに輸送するもので、核拡散抵抗性にも優れている。

## (3) 溶融塩炉 (MSR)

MSR は、溶融したフッ化物の混合体に溶け込んだフッ化ウランまたはフッ化プルトニウムを

燃料とし、混合体には主としてフッ化ナトリウムとフッ化ジルコニウムが選ばれる。MSR の特徴は以下の通り。

燃料と冷却材の機能を結合し、また、塩は高温で化学的に安定しており、熱輸送を単純化し、高い熱効率が得られる。

中性子経済の点で優れ、アクチニド燃焼および / または高い転換のための代替手段となる。高温での運転のため、熱化学的な水素生産の可能性がある。

溶融フッ化塩は、蒸気圧が非常に低く、容器や配管の受ける応力が低減できる。

フェイルセーフの排出系、受動的な冷却、および燃料内の揮発性核分裂生成物の少ないインベントリーにより、固有の安全性が得られる。

燃料補給、処理、および核分裂生成物の除去が運転中に実行でき、高い稼働率をもたらす可能性がある。

固体燃料原子炉が必要とする希釈や成形加工なしで、均質な塩溶液に、非常にさまざまな組成のアクチニド供給物を加えることができる。

表 6.3 に参照炉の仕様を、図 6.5 にシステムの概念図を示す。

表 6.3 溶融塩炉 (MSR) の仕様 (参照炉)

Reactor Parameters	Reference Value
Net power	1000 MWe
Power density	22 MWth/m <sup>3</sup>
Net thermal efficiency	44 to 50%
Fuel-salt – inlet temperature	565
– outlet temperature	700 ( 850 for hydrogen production )
– vapor pressure	<0.1 psi
Moderator	Graphite
Power Cycle	Multi-reheat recuperative helium Brayton cycle
Neutron spectrum burner	Thermal-actinide

MSRは、1940 年代末から 1950 年代にかけて、航空機の推進用として初めて開発された。1954 年の航空機原子炉実験 (ARE) は、循環溶融フッ化塩システムで高温 (815 ) を実証し、性

能の基準を確立した。熱出力 8 MW の溶融塩炉実験 (MSRE) は、(1) フッ化リチウム / フッ化ベリリウム塩、(2) 黒鉛減速材、(3) 安定した性能、(4) 排ガス系、および (5)  $^{235}\text{U}$ 、 $^{233}\text{U}$ 、プルトニウムなど種々の燃料の使用など、多くの特色を実証した。

電気出力 1000 MWe の大型炉の参照設計では、運転圧力は低圧 (0.5 MPa 以下) であるが、液体燃料の温度は 700 °C であり、高い熱効率が達成できる。ただし、構造材料開発等の課題があり、GEN-4 原子炉の中では実用化は最も遅れる見通しである。

#### (4) ナトリウム冷却高速炉 (SFR)

SFR は、クローズドサイクルの高速中性子スペクトル炉で、高レベル廃棄物の管理特にプルトニウム及びその他のアクチノイドの管理が可能である。

SFR のプラント規模は、数 100 MWe のモジュールシステムから 1,500 - 1,700 MWe の大型炉にわたる広い範囲をカバーしている。ナトリウム炉の代表的な炉心出口温度は 530 - 550 °C である。一次冷却系はプール型配置か、或いはコンパクトなループ配置である。どちらの選択肢も一次冷却材が比較的大きな熱慣性を持っている。冷却材の沸騰に達するまでの大きな余裕がこれらのシステムの持つ重要な安全特性である。もう 1 つの大きな安全上の特徴は、一次系が本質的に大気圧で運転されることである。ナトリウムは空気と、水と化学反応を起こすので、このような反応とその影響に対する可能性を制限するよう設計せねばならない。

表 6.4 に参照炉の仕様を、図 6.6 にシステムの概念図を示す。

表 6.4 ナトリウム冷却高速炉 (SFR) の仕様 (参照炉)

Reactor Parameters	Reference Value
Outlet Temperature	530-550
Pressure	~1 Atmospheres
Rating	1000-5000 MWth
Fuel	Oxide or metal alloy
Cladding	Ferritic or ODS ferritic
Average Burnup	~150-200 GWD/MTHM
Conversion Ratio	0.5-1.30
Average Power Density	350 MWth/m <sup>3</sup>

酸化物燃料と先進湿式再処理方式を組合せた概念と、金属燃料と乾式再処理を組合せた概念がまとめて GEN-IV 概念に採択された。いずれも我が国が FBR サイクル実用化戦略調査研究で

検討している概念である。特に前者の代表的な概念としては、「もんじゅ」開発を踏まえて JNC が検討中の大型ループ型炉があり、原子炉構造のコンパクト化、ループ数削減、一次系機器の合体等による経済性向上を特徴としている。

(5) 超臨界圧水冷却炉 (SCWR)

SCWR は臨界点 (374 °C、22.1MPa) を超える水によって冷却する原子炉である。SCWR は現状の軽水炉に較べて以下のような利点がある。

SCWR では LWR の 33 から 35% の熱効率に対して 44% の高い熱効率が達成できる。

冷却材のエンタルピーが高く、単位熱出力当たりの冷却材流量が少ないので冷却材ポンプ、配管および付属機器のサイズの縮小およびポンプ出力の低減が可能になる。表 6.5 に参照炉の仕様を、図 6.7 にシステムの概念図を示す。

表 6.5 超臨界圧炉 (SCWR) の仕様 (参照炉)

Reactor Parameters	Reference Value
Plant capital cost	\$900/KW
Unit power and neutron spectrum	1700 MWe, thermal spectrum
Net efficiency	44%
Coolant inlet and outlet temperatures and pressure	280 /510 /25 Mpa
Average power density	~100 MWth/m <sup>3</sup>
Reference fuel	UO <sub>2</sub> with austenitic or ferritic-martensitic stainless steel, or Ni-alloy cladding
Fuel structural materials	Advanced high-strength
cladding structural materials	metal alloys are needed
Burnup / Damage	~45 GWD/MTHM; 10-30 dpa
Safety approach	Similar to ALWRs

再循環を必要とせず、冷却材密度を低くできるので冷却材の保有容量が少ない。このことにより格納建屋を縮小できる可能性がある。冷却材に第二相がないことにより、沸騰による問題の発生がなく、その結果通常運転時の炉心内での熱伝達の不連続を避けることができる。

蒸気乾燥器、湿分分離器、再循環ポンプおよび蒸気発生器が不要となり、少数の主要機器からなる単純なシステムで SCWR を構成することができる。

SCWR では高速中性子を用いた設計も可能である。熱中性子利用と高速中性子利用の違いは、炉心内の減速材の量の違いに基づいている。高速中性子炉では炉心内に追加の減速材を用いていないのに対し、熱中性子炉では追加の減速材を用いている。

概念は東大、東芝を中心に我が国が研究を主導している炉型である。参照設計によると、高い熱効率（約 45%）が達成できるとともに、貫流サイクルが採用できるので、気水分離系、再循環系が不要となり、機器の簡素化による経済性向上が図れる。

#### (6) 超高温ガス炉 (VHTR)

VHTR は、熱中性子スペクトルによる黒鉛減速ヘリウム冷却炉である。VHTR は、1000 の炉心出口温度による核熱を供給できる。VHTR の炉心の型式は、日本で運転されているような角柱ブロック炉心又は中国の HTR-10 のようなペブルベッド炉心となる。発電のためには、直接サイクルと呼ばれるようにヘリウムガスタービンシステムが 1 次冷却系に直接設置される。製鉄や製油化学、冶金及び水素生産のためのプロセス熱のような核熱利用のためには、熱利用プロセスは一般に原子炉から中間熱交換器により結合され、これらは間接サイクルと呼ばれている。表 6.6 に参照炉の仕様を、図 6.8 にシステムの概念図を示す。

表 6.6 超高温ガス炉 (VHTR) の仕様 (参照炉)

Reactor Parameters	Reference Value
Reactor power	600 MWth
Coolant inlet/outlet temperature	640/1000
Core inlet/outlet pressure	Dependent on process
Helium mass flow rate	320 kg/s
Average power density	6–10 MWth/m <sup>3</sup>
Reference fuel compound	ZrC-coated particles in blocks, pins or pebbles
Net plant efficiency	>50%

VHTR の基本的な技術は、ドラゴンやピーチボトム、AVR、THTR 及びフォートセントブレインといった先行する HTGR プラントにより既に確立しており、GT-MHR や PBMR 等の概念

に発展している。運転中の日本における 30MWth の HTTR プロジェクトは、最高 950 に達する出口温度を熱利用プロセスと結合することの成立性の実証を意図しているし、中国の HTR-10 は 10MWth の出力レベルで発電とコゼネレーションの実証を行う予定である。ドイツや日本における先行プロジェクトにおいては VHTR 開発に関連したデータを整備している。

水蒸気改質による水素製造技術との結合は、HTTR の試験により実証される計画であるが、市場導入のためには補完的な R&D が必要である。熱化学反応の I-S プロセスは、現状研究室レベルのステージにある。

## 2.2 国際短期導入炉 (INTD) の概念

GEN-IV で選択された原子炉システムは 2030 年の導入を目標としているが、さらに近い将来の導入を目ざして、国際短期導入炉 (International Near Term Deployment : INTD) についても GIF で認定した。

INTD は、以下の 2 つの基準を満足する必要がある。

2015 年までに導入が可能なこと

改良型軽水炉 (ALWR) と同等かそれ以上の性能を有すること

INTD については、16 種類のシステム概念を炉型ごとにまとめて、5 個の概念群として整理されている。

### (1) 新型 BWR 概念

BWR 概念としては、ABWR の発展型である ABWRII、ヨーロッパ型単純化 BWR (ESBWR)、我が国 (原研、東芝、日立) が提案した高転換 BWR (HC-BWR)、単純化 BWR (SWR-1000) が採択された。図 6.9 に高転換 BWR の概念を示す。

### (2) 圧力管型炉概念

カナダで次世代 CANDU 炉として開発中の重水減速軽水冷却圧力管型炉 (ACR-700) で、運転中の燃料交換が可能である。本炉は軽水炉燃料の再利用も可能 (DUPIC 技術) で、燃料サイクルに柔軟に対応できる。

### (3) 新型 PWR 概念

PWR 概念としては、受動的な安全機能を有する AP600、及びその発展型の AP1000、APWR の発展型である APWR+、ABB System80+の発展型として韓国で開発中の APR1400、及びヨーロッパ型 PWR (EPR) が採択された。

## 第7章 GEN-4 核燃料サイクルシステム

GEN-4 核燃料サイクルシステムを包括的に検討するために設立された核燃料サイクルクロスカットグループ（Fuel Cycle Crosscut Group : FCCG）は、GEN-4 原子炉システムを支える原子炉燃料を構成する核燃料の組成の範囲を定めるために、GEN-4 核燃料サイクルの範囲を定め、経済的で安全な、そして持続可能なエネルギーの供給と放射性廃棄物の処理・処分を可能にする GEN-4 原子力システムの全貌、そして研究開発が必要な分野を明らかにしている。

### 1. 背景

GEN-4 原子炉システムは、米国DOEの原子力エネルギー科学技術局が提唱した次世代の原子炉の一般的な概念である。提案の背景は、21世紀には発展途上国における経済水準向上と人口増加による電力需要の増大に対応するために、高い経済性と安全性、放射性廃棄物発生量の抑制、核拡散抵抗性等を具備した革新的原子炉システムの開発が必要であるとの認識に基づいている。そして、運転中に温室効果ガス（以下、CO<sub>2</sub>）を排出しない電力の供給が必要であるとの社会的要請に応えるためである。選定されたGEN-4 原子炉は何れも以下の特性を備えているとされている。

- ・ 天然ガス火力発電と競合できる経済性を持つこと。
- ・ より高度な核拡散抵抗性を備えていること。
- ・ より高度な安全性を備えていること。
- ・ 放射性廃棄物の処理処分にかかる負担を最小化するものであること。

DOE ではかかる特性を備えた原子炉の導入開始目標年次を 2030 年とし、原子力産業の拡大を図り、電力需要が急速に拡大するアジア諸国を中心にその導入を進め、地球温暖化の抑制に寄与するとしている。選定された原子炉は前章に示されているが、

ガス冷却高速炉（GFR）

鉛冷却高速炉（LFR）

熔融塩炉（MSR）

ナトリウム冷却高速炉（SFR）

超臨界圧水冷却炉（SCWR）

超高温ガス炉（VHTR）

であり、新型軽水炉として ABWR、HCBWR、AP600、APWR+等、圧力管型炉として ACR-700、一体型炉として CAREM、IRIS、SMART、IMR、そしてモジュラー型ガス炉として PBR、PMR 等は GEN-4 原子炉の選定基準を満たすものであり、2015 年までに導入が可能な原子炉であるとしている。

FCCG は、上記 GEN-4 原子炉の核燃料を持続的に供給し、経済性と安全性そして核

拡散抵抗性を備え、かつ放射性廃棄物の処理処分にかかる負担を最小にする包括的な核燃料サイクルの確立を目指し、あらゆる技術とその役割を検討し、問題点を特定した。この一連の作業の中で、“予測されるエネルギー需要のシナリオに適合する核燃料サイクルの範囲を網羅し、核燃料資源の安定な入手と原子炉等から出る放射性廃棄物の量”について検討している。

FCCG が検討のベースとした第 1 の情報は、1998 年の IASA/WEC の報告書「今後 100 年間のエネルギー需要（および原子力の占める割合）」、そして多様な可能性を持つ GEN-4 原子炉の動的な組み合わせに関するシミュレーションの結果である。このシミュレーションは、包括的な核燃料サイクルの形態（ワンスルー、部分的リサイクル、完全リサイクル、および超ウラン元素の消滅処理を含む完全リサイクル）を考慮し、物理的に可能な核物質の流れと GEN-4 原子炉と核燃料サイクルの稼動に至る時間差の制約を受けている。現在配備されている原子力システムから理想的な GEN-4 原子力システムへの移行、および GEN-4 原子炉の設計概念の異なる炉型間の核燃料物質の移動とバランスに関する可能な組み合わせについてモデルを作り、必要となる資源の量と放射性廃棄物の蓄積量に付いて評価し、物理的に達成可能なロードマップの基礎を明らかにしている。

第 2 の情報は、現在、世界各国で採用され、あるいは開発中の核燃料サイクルの手法と技術的課題に関する詳細な評価・検討、および開発プログラムを推進している理論的根拠に関する評価・検討によって導き出された結論である。技術的アプローチは異なるものの、世界的に核燃料サイクルの基礎としている動機は、いずれも持続的な経済成長の可能性、安全性と信頼性、そして資源の入手可能性を考慮したものであり、GEN-4 原子力システムの定めた目標に沿うものである。核燃料サイクルは持続可能なエネルギー供給に関する GEN-4 の目標を満たす上で主要な役割を果たしている。

ここで用いた「持続可能」には、資源を効率的かつ環境に優しい方法で活用するばかりでなく、エネルギーの安定供給に関する社会の要求を満たすことが含まれている。核分裂によって、ウランおよびトリウムをエネルギーに転換するが、この転換には放射性廃棄物としての核分裂生成物の生成を伴う。半減期の長い超ウラン元素同位体の生成量は、原子炉の形態と用いられた核燃料の形態に依存する。GEN-4 核燃料サイクルシステムは、処理処分する放射性廃棄物の生成量を削減し、資源をより有効かつ効率的に利用することを目標としている。

現在、ウランとトリウムの価格は、原子力のコストの主な要因ではなく、原子力の拡大の足かせとなっていない。低品位の資源を用いなければならないようになればウラン等の価格は上がり、電力の価格に影響するようになるかもしれない。しかし、現時点で懸念されているのは、原子力利用の拡大に伴い増大する高レベル放射性廃棄

物の貯蔵と処理・処分施設の拡張にかかる経費の増大、そして処理処分施設の設置場所の選定に政治的軋轢を生じるような状況が起きると見られている。原子力利用のさらなる増加には、必要とする高レベル放射性廃棄物処理・処分施設の容量を最小にする原子炉と核燃料サイクル形態の活用が不可欠である。

## 2. FCCG 報告書の主な結論

### 原子力の利用拡大に伴う放射性廃棄物蓄積の増加を抑える。

閉鎖系核燃料サイクル( Closed Nuclear Fuel Cycle )では、使用済燃料を再処理し、プルトニウムおよびウラン等を再利用するため、高レベル放射性廃棄物の量と半減期の長い放射能毒性( Radiotoxicity )が大幅に削減される。さらに、高レベル放射性廃棄物に含まれている放射性核種を群分離し、その形態に適合した管理手法を採用することが出来る。最新の放射性廃棄物の管理戦略には、群分離された半減期の長い核種を短半減期の核種に核変換し、費用対効果の優れた熱管理、柔軟性のある中間貯蔵、深地地層処理処分( 地下貯蔵 )施設の環境に適合するよう調整することなどが含まれている。半減期の長い放射性核種を高レベル放射性廃棄物から回収することにより、深地地層処理処分施設に処分される放射性廃棄物の放射能毒性を少なくとも一桁低減することができる。この放射能毒性の低減、および最適化した熱負荷の管理によって、限られた処理処分施設を効率的に使用することができ、さらに、最終処分された放射性廃棄物の安全性が高められることになる。また、かかる処理により二次的に生成する廃棄物に関しても同程度の削減が可能となる。

最新のワンスルー方式の使用済燃料処理処分( 再処理をしないで使用済燃料を直接深地地層処分する )に関しても、閉鎖系核燃料サイクルよりは小さいものの、処理処分施設の処理能力改善の可能性はある。この改善には、核燃料の燃焼度を上げると共に処理施設の除熱効率を上げることが必要である。

### 資源の持続可能性

ウラン資源は今後数十年にわたって供給できることは確実であるが、21 世紀半ばまでには、現在の価格で調達可能なウラン資源は不足してくるであろう。新規の探査等によって、需要に見合うウラン資源の供給量を拡大することはできるが、価格は上昇するであろう。一方、ウランのより効率的な利用は、環境への負荷と、採鉱や選鉱に従事する労働者の被曝量を低減させ、さらに資源の持続可能性を改善する。より効率的な資源の利用としては、現在多量に抱えている劣化ウランのストックからウラン - 235 を分離・濃縮し核燃料とする、より燃料利用効率の高い原子炉で使用する、そして 使用済燃料を再処理し、回収した核燃料物質を再利用する方法があり、さらに、安全保障上必要ないとされた余剰の核兵器用高濃縮ウランを

低濃縮ウランに変換(ダウン・ブレンディング)したものは一時的な核燃料資源となる(現在、世界の低濃縮ウラン市場の40%はロシア、米国が余剰であると申告した700トンの高濃縮ウランから供給されている)。

原子炉による発電には、核燃料サイクルの占めるコストが電力生産に要する全コストの20%程度しか占めていないという経済上の利点がある。この利点は、持続可能なエネルギー供給を目指すGEN-4システムの、経済性、安全性、そして信頼性を満たすための要件を互いに分離することを可能にし、核燃料サイクルシステムの設計に幅広い柔軟な発想を組み込むことを可能にする。経済性、安全性、そして信頼性の目標にかなう原子炉の設計戦略は、核燃料サイクルの選択により、極わずかで緩やかな影響しか受けない。

### 持続可能なエネルギー・システムへの移行

エネルギー需要は、21世紀末には大幅に増加し、原子力発電は2050年までに現在の5倍から6倍になると予測している。この期間、原子力発電は電力市場のさまざまな要求に応えうるよう、原子炉の形式(熱中性子炉から高速炉まで)、および核燃料サイクルの形態(ワンスルー方式からリサイクル方式まで)の最適な組み合わせに関する提案が求められよう。限られた処理処分施設の収容能力を考慮し、放射性廃棄物の生成を最小にとどめ、資源の有効な利用を進める。そして、原子炉および核燃料サイクルの幅広い組み合わせの選択が、必要とされるエネルギーを経済的に供給するために必要不可欠となる。

好ましい中性子経済(Neutron Economy)は新しい原子炉と種々の核燃料組成の特性を生かす組み合わせによって実現されるであろう。これらの原子炉は、増殖による核燃料の生産、あるいは長い半減期を持つ放射性廃棄物を短半減期のそれに核変換することによって放射能毒性を削減し、原子力システム全体の経済性、安全性、そして信頼性等、社会的要求に応えうるものとなる。例えば、原子炉内の中性子は、親物質(U-238、Th-232)を核燃料物質(Pu-239、U-233)に変え、超ウラン元素を消滅させる等、核燃料サイクルの持つ機能を拡充する。

第3.5世代原子炉は、急速に拡大しつつある電力需要に応え、限られた放射性廃棄物の処理処分施設を有効に使用するために必要である。この種の原子炉は、必ずしもリサイクルに依存する必要はないが、燃焼度の一層の増加や、将来的には閉鎖型核燃料サイクルで作られたリサイクル核燃料を利用できるよう、その安全設計に十分な柔軟性を備えていることが望まれる。

プルトニウムと共にマイナーアクチノイド(MA)のリサイクルや、核分裂生成物のいくつかの核種を混入することによるリサイクル核燃料の汚染(意識的に長半減期核分裂生成物を核燃料に混入)に関する技術は、現在開発中である。高レベル放

放射性廃棄物から長半減期放射性核種を除去し、管理の容易（クリーン）な放射性廃棄物に変換することにより、その放射能毒性は大幅に削減される。これらの先端的な核燃料のリサイクル技術には、あらゆる核燃料製造工程において、強い放射性を持つ核物質の取り扱いが必要となる。このような核分裂生成物等を含む核燃料は、従来、高速炉の燃料として設計されていた。しかし、将来は熱中性子炉にも用いられる可能性がある。GEN-4 システムの研究開発は、高速炉と同様に熱中性子炉用核燃料の遠隔製造技術の開発を行ない、種々のオプションの最適な組み合わせを決め、実施しなければならない。

### 核燃料サイクルの安全性

核燃料サイクル全体における作業従事者への放射線被爆には、採掘／精練から核燃料リサイクル施設における被爆も含まれる。これら放射線作業従事者の被爆量の上限は規制されており、原子炉の運転管理にかかる被曝量の規定と同程度である。原子力利用が増加するにつれて、例えば、すでに採掘されているウラン鉱石を活用することにより、そして費用対効果の高い核燃料の遠隔製造により、放射線被爆の影響をさらに少なくするための開発が一層重要になってくる。

現在、高レベル放射性廃棄物のガラス固化体は、深地地層処理処分施設の設計条件下では、恒久的に安定な壊れ難い物であることが実験的に示されている。ガラス固化体の長期にわたる振る舞い、および潜在的に移動・拡散する可能性を持つ放射性核種を閉じこめる能力は、異なる核燃料サイクル戦略を比較する際に、重要かつ特別扱いすべき問題である（ガラス固化体はIAEA 保障措置を終了しており、単なる放射性廃棄物としてその処理処分が可能である）。

### トリウム

トリウムを核燃料とする熱中性子炉およびウラン高速スペクトル原子炉は、ウラン資源の枯渇のため、長期的には魅力的な選択肢となるかもしれない。さらに、トリウムとウランの両サイクルを一緒に用いることで、超ウラン元素（アクチノイド）の生成を大幅に削減することができるため、最終廃棄物の半減期の長い放射能毒性を大幅に削減することにつながる可能性があると考えられている。

### 3. GEN-4 システムの核燃料サイクルにかかる研究開発についての勧告（結論）

完全な核分裂性物質のリサイクル、および超ウラン元素を含む完全な核燃料リサイクル（以降：完全なリサイクル）は、GEN-4 の目標とする持続可能性の達成に必要である。ワンスルー方式は、完全リサイクルシステムに使用済燃料を供給し、回収した核分裂性物質を再利用することになり、最終的には持続可能な原子力システムの一部に組み込まれることになるであろう。部分的リサイクルは、長期的な完全リサイク

ルへの架け橋として機能する。これらの概観は、現在進められている研究開発の現状に基づき、完全リサイクルの技術的な可能性を示すものである。

核燃料サイクルに関する新たな技術を可能にする“着実な”研究開発は、GEN-4が目指す地球規模の原子力利用の経済性、信頼性、そして安全性の目標を満たす継続的な研究開発として重要である。

### 結論 - 1

原子炉に装荷する核燃料の改良と先端的核燃料の開発は、核燃料サイクルの形態によらず重要である。核燃料集合体は、原子炉と核燃料サイクルとの間をつなぐ原子力システムの重要な要素である。高燃焼度、燃焼過程での低い反応度損失、安い製造コスト等の条件を満たし、さらに高温の冷却材温度に耐える核燃料集合体は、原子力の経済性および持続性目標に直接的に、そして安全性目標には間接的に影響を及ぼすだろう。リサイクルすることを前提としている場合は、使用済燃料の再処理を念頭に入れて核燃料集合体を設計しなければならない。もし、ワンスルー方式を前提とするのであれば、核燃料集合体は非常に高い燃焼度まで燃焼させ、かつ処理処分施設的环境下で、地質学的時間の尺度（少なくとも数十万年）にわたり極めて強い耐久性（extreme robustness over geologic time scales）を持つ容器に納めなければならない。最終的には、プルトニウム、ウラン、そして MA の完全リサイクルによる資源の再利用が図られると予測されるため、これらの核燃料集合体はすべて遠隔技術を用いて作られなければならない。

このような核燃料集合体の開発キャンペーンには、通常、10年ないし15年の期間が必要であり、実用化されるまでに、集合体の照射試験、破壊試験（安全性試験も含めた）等、数多くの試験を行わねばならない。この間、コストは正確に見積れないし、成果も予測できないが、先端的核燃料集合体の開発は、GEN-4の目標に対し、核燃料サイクル（資源および廃棄物の管理）と原子炉（コスト、信頼性、安全性を管理）とを有機的に結合するために不可欠である。酸化ウラン核燃料は、技術的には高度に洗練されており、現在のワンスルー方式の核燃料サイクルを支え、高速炉での使用にも適している。新しいGEN-4原子力システムを構成する原子炉および核燃料サイクルには、他の核燃料形態（炭化物燃料、窒化物燃料そして熔融塩燃料）の可能性を調べ、研究開発を進める機会を与えられなければならない、それを行う研究開発資金はGEN-4研究プログラムの中心的要素である。

### 結論 - 2

核燃料遠隔製造技術に統合されている費用対効果の高い革新的核燃料サイクル構想（Advanced Fuel Cycle Initiative: AFCI）に基づく技術は、GEN-4の持続可能性目標

の達成には重要な技術である。完全リサイクルにおいて、深地地層処理処分施設に送られる廃棄物は、リサイクル過程及び核燃料製造過程から出てくるものである。“クリーンな廃棄物”(核分裂生成物のみ)および、核分裂あるいは核変換をさせるために原子炉に装荷される“汚い核燃料”(全てのMAと、時に、いくつかの核分裂生成物を含んだ核燃料)を製造する技術が求められている。完全リサイクルシステムでは、採掘したウラン資源から最大限のエネルギーを取り出し、核分裂生成物のみを廃棄物として処理処分施設に送る。このようなリサイクル技術は、湿式あるいは乾式再処理手法に基づき、世界中で活発に開発が進められているが、その大部分は開発途上にある。しかし、原子力の経済性の改善や核燃料サイクルにおけるウランやプルトニウムの損失を少なくするための開発研究を続けることは、GEN-4計画の重要な礎石の一つである。

### 結論 - 3

“汚い核燃料”を実用化する核燃料の遠隔製造技術は、単純で数少ない工程で完結するのが望ましい。そしてかかる技術には歩留まりを高め、やり直しを最小限にする誤動作に強い設計手法の導入が必要である。放射性物質の輸送および取扱い量を最小にするため、リサイクルおよび燃料製造施設が同じ場所(サイト)にあることが望ましい。

“汚い核燃料”は高速スペクトル原子炉での利用にふさわしい。しかしながら、熱中性子炉に装荷されるものもあり、高速炉および熱中性子炉の両方が共存する将来的な地球規模の原子力パーク(Nuclear Energy Park)設立の構想がある。従って、リサイクル、核燃料設計、および原子炉の炉心の設計は、熱中性子炉内の中性子の振る舞いが核燃料に混入しているMAおよび核分裂生成物によって阻害されないようにしなければならない。この調整に関する研究開発は、地球規模の原子力パークにおける原子炉および核燃料サイクルのタイプの適切な組み合わせの選択と共に、GEN-4研究開発の中心的テーマとなるべきである。

### 結論 - 4

ワンスルー型使用済燃料の深地地層処理処分施設の設置場所の早期決定と認可、そして操業の重要性を誇張することはできないが、将来に向けて、核燃料サイクル技術の開発は、深地地層処理処分施設の収容能力を拡大すると共に必要となる管理のレベルを低減するために、カスタマイズされた廃棄物の形態と、最適化された崩壊熱管理技術を備えた処理処分施設の設計開発と密接に連携しながら進めていかなければならない。特に、すべての核燃料サイクルで重要な点は、深地地層処理処分施設の収容能力を拡大するための崩壊熱管理手法にある。

深地地層処理処分施設の場所の選定は、常に難しい問題であり、与えられた施設の収容能力を拡大する手法は、施設の経済性および原子力の社会的受容性を高める目標に対して大きな恩恵を与えるものである。収容能力は、質量や体積ではなく、施設の熱負荷対応能力によって決められる。熱源としては、最初の100年間はCsおよびSrの崩壊熱、その後はMAの崩壊熱が支配的である。深地地層処理処分施設に搬入する前に使用済核燃料を中間貯蔵施設に保存する、使用済燃料を再処理し、核燃料はリサイクルする。そして高レベル放射性廃棄物はその形体をガラス固化体に転換（コンディショニング）して中間貯蔵施設に保管する、そして高レベル放射性廃棄物から群分離したMAは原子炉にリサイクルし核分裂を起こさせ核分裂生成物にし、群分離したCs、Sr等はコンディショニングして中間貯蔵施設で保管する、という三つのアプローチは、高レベル放射性廃棄物の処理処分にかかる事前準備として有用な方法である。熱管理および廃棄物の管理に関する上記のアプローチと強く結びついている深地地層処理処分施設の設計は、GEN-4の最優先の開発目標である。

#### 結論 - 5

MA等を混合した核燃料の原子炉へのリサイクルは、平和利用核燃料サイクルから核兵器への拡散を本来的に防ぐものである。MAや核分裂生成物が核燃料に混在していれば、核兵器用核物質としての魅力が低下し、転用が困難になり、盗取に対する防護措置の強化にもなる。そして、防護措置を強化している放射能の強度が維持されている間は当該核物質を中間貯蔵施設あるいは深地地層処理処分施設に送る必要はなくなる。一方で、IAEA保障措置あるいは核物質防護の組織的な手法も排除できず、研究開発には、完全リサイクルに適用可能な、計量管理手法、実在庫量の確定手法等を開発し、かかる手法を核燃料のリサイクルにかかる全ての施設と工程に適用可能な施設の設計を進めて行かなければならない。

#### 4. 革新的核燃料サイクル構想（AFCI）の概要

FCCG報告書の核燃料サイクルシステムの概念は革新的核燃料サイクル構想（Advanced Fuel Cycle Initiative: AFCI）に基づいている。以下にその概要をまとめておく。

AFCIの下では二つの研究開発要素が平行して進められてきた。すなわち、「AFCIシリーズ1」と呼ばれている現在の原子炉技術に応用する先端技術を重視した中期的技術開発と、「AFCIシリーズ2」と呼ばれている放射能毒性および熱負荷の問題の完全な解決に向けた長期的技術開発である。この二つの開発要素を切り離すことはできない。革新的核燃料サイクル研究の目標は、AFCIシリーズ2の技術とGEN-4原子力

システムの開発が成功してはじめて達成される。しかし、ACFI シリーズ 2 は、ACFI シリーズ 1 の研究が実用的レベルまで到達することを前提としている。すなわち、使用済燃料中の大量の放射性物質を処理するために、シリーズ 1 技術が必要となるのである。

ACFI シリーズ 1 は、使用済燃料の処理に関連する中期的な問題を取り扱っている。具体的には、使用済燃料の構成要素の 96% を占めるウランを抽出することによって地層処分を必要とする物質の容積を減らし、また使用済燃料に含まれる Pu の大部分を破壊（核分裂）することで核拡散の危険性を低減させる。これらの技術は現在のインフラの一部として配備することが可能であるし、米国の既存の、および将来の軽水炉原子力発電所と協調して当該インフラの利用が可能である。これらの技術の採用により、ユッカ・マウンテンに計画されている処分場の有効な利用が可能となる。

Office of Nuclear Energy, Science and Technology



## AFCI Goal - Reduce Toxicity of High-Level Nuclear Waste

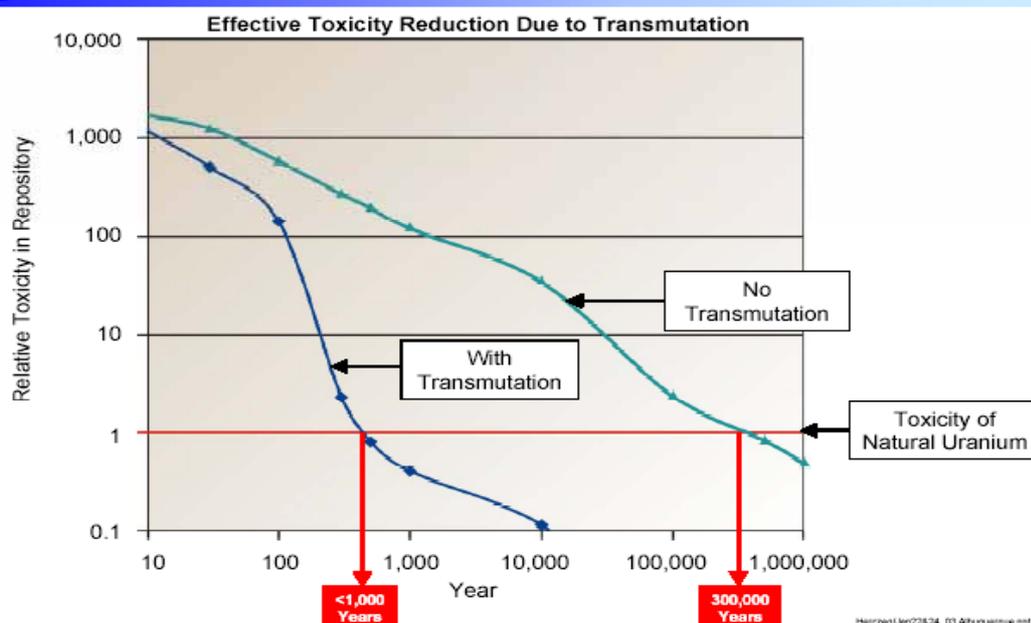


図 7-1 高レベル放射性廃棄物の放射線強度の減衰率

ACFI シリーズ 2 は使用済燃料に関連する長期的な問題を解決する取り組みである。具体的には、地層処分場に送られる高レベル放射性廃棄物の長期的な放射能毒性や熱負荷を大幅に低減可能な核燃料サイクル技術の開発である。これらの技術を可能にするためには、GEN-4 原子力システムの実用化が必要であるため、この技術はより長期的な選択肢として位置付けられるべきである。この技術の完成によって、商業施設から発生し、深地下に処分された高レベル放射性廃棄物の毒性を、約 1000 年後には天

## 第 8 章 核不拡散措置と核拡散抵抗性

核エネルギーの平和利用と軍事利用は表裏一体の関係にあり諸刃の剣である。人類の進歩は火を使うことから始まり、より強力な武器を持つ部族が権力を持ち、経済力を高めてきた。産業革命はエネルギー密度の高い石炭火力の作る水蒸気エネルギーを活用することから始まり、生産性が飛躍的に増大し、現代社会の基礎を形成した。この進歩の中で、強力な火薬、ダイナマイトが発明され、道路、水路建設等の大規模な土木工事を可能にし、経済活動は拡大した。他方、この火薬は、兵器を一新し、地雷から機関銃等の小型武器、長距離砲と爆弾、そしてロケット弾等、現代兵器の開発と高性能化を進め、戦争の形態までも変えてしまった。

1kg のウラン (U-235) が持つエネルギーはおおよそ 20 万トンの化石燃料が燃えた場合に発生するエネルギーに相当する。この核エネルギーは、平和利用に徹すれば、人類社会への貴重な贈り物であり、新たなエネルギー源である。しかし、このエネルギーを悪用すれば地球を破壊に陥れる最悪の凶器となる。核エネルギーをどのように使うかは人類が決めることであり、平和利用を推進するには、人々の、そして国々の利害を超えた英知を結集する必要がある。

原子力の平和利用が開始されてから半世紀、核拡散抵抗性という考え方が出てきてから四半世紀経ったが、この間に原子力を取り巻く状況は大きく変わった。最初の四半世紀は、原子力の研究開発の時期であり、続く四半世紀は軽水炉を中心とした原子力発電が産業として定着する時期であった。そして、IAEA 保障措置制度の有効性を保証する理論を確立し、制度として定着した時期でもあった。原子力の平和利用は、当初使用済燃料を再処理し、回収したプルトニウムを核燃料とする高速増殖炉の活用へと進むと見られていたが、核兵器の拡散を防止するために再処理を止め、軽水炉の核燃料をワンスルー処分とする動きが続いた。再処理をしなければ分離プルトニウムを保有することはできない。そして、プルトニウムに強い放射性物質を混入しておけば、使用済燃料と同様に容易に人が近づけない。この考え方が核拡散抵抗性の強化という概念の基礎となっている。すなわち、平和利用の核物質及び技術等の核兵器開発への転用を防止する手段の一つとして提案されたものである。

IAEA 保障措置が強化され、核物質防護措置の整備が進む中で、ワンスルー処理することによって将来の世代に「盗掘され、プルトニウムが回収される」という核拡散のリスクを負わせるよりも、再処理して、プルトニウムを厳格な不拡散措置の下でエネルギー源として活用すべきであるとの議論が米国内でもおきている (第 7 章 4.3 項)。

最近、保障措置の有効性を再認識する政治的な動きがでてきた。すなわち、2003 年 10 月の

IAEA事務局長の提言<sup>1</sup>であり、2004年2月におこなわれた米国大統領の提案<sup>2</sup>（大統領発言）である。これらの提言と提案は、依然としてIAEAは包括的保障措置協定に基づく限定された査察権限しか行使できていない（許されていない）ことを前提としている。すなわち、IAEA保障措置を強化する必要があるとされている点は「未申告施設および未申告活動を見つけるのに必要な処方と手段（力と権利）を備えていない」とするものである。これらの措置は何れも追加議定書に組み込まれており、IAEAは十分な手段と権利を備えている。

IAEA理事会で追加議定書を承認した時に英国、ドイツ、フランス、そして日本に加えて米国は「追加議定書はIAEAに未申告施設と未申告核物質の有無を検証するために必要な権限を付与し、有効な検認の手法と手段を与えた」と認めた。追加議定書を批准し、履行している国が原子力の平和利用の一環としてウラン濃縮施設あるいは再処理施設を持つことが核不拡散体制を弱体化するという理由にはならない。2003年10月に英独仏の外相は、イランが「追加議定書を批准しその規定を遵守することを条件に、NPTに基づく原子力の平和利用を進める権利」を持っていることを認め、NPTの枠内で原子力利用を支援すると表明<sup>3</sup>した。そして、2004年1月、米国議会上院で行なわれた審議<sup>4</sup>において、追加議定書の規定は未申告の核兵器開発の検知ばかりでなく、核兵器開発に繋がる核物質および技術の拡散に関連する証拠を捜査する有効な手段を定めていると、その批准に向けた前向き議論がなされ、イラン、リビア問題も追加議定書が批准されていれば早期に解決できていたと報告されている。そして、3月には大統領が批准することを承認<sup>5</sup>している。

本章では、核不拡散体制を支えている主要な措置、IAEA保障措置、核物質防護措置、原子力機器の輸出管理、そして核拡散抵抗性についてこれらが整備されてきた経緯と概要、そして現状を紹介する。

## 8.1 保障措置について

### 8.1.1 平和利用の始まり - 国際原子力機関（IAEA）の設立とIAEA憲章 -

原子力の平和利用促進と核不拡散措置の履行を主な目的とし、1957年IAEAが設立された。

<sup>1</sup> IAEA事務局長は、追加議定書に基づく査察権限の強化、核物質輸出規制の強化、濃縮・再処理等の多国間管理等を提言した。

<sup>2</sup> ブッシュ大統領は核不拡散体制の強化策として、核拡散にかかる規制及び国際管理の強化、旧ソ連邦の核弾頭等のセキュリティ強化、実用規模の濃縮・再処理施設を持たない国への関連技術等の移転の制限、IAEAの査察機能の強化等、7項目を提案した。

<sup>3</sup> Iran's Pact: "Full Cooperation", The New York Times, October 21, 2003

<sup>4</sup> Additional Protocol Hearing Opening Statement Senator R. G. LUGAR, January 29, 2004

<sup>5</sup> Ratification of U.S. Protocol Between the United States and IAEA, U.S. DOS Press Statement April 1, 2004

設立に伴い制定されたIAEA憲章では、各国の原子力の平和利用を促進するために、及び、IAEAが供与した核物質<sup>6</sup>が軍事目的に利用されていないことを確認するために、また締約国からの依頼があった場合に保障措置活動を行うことと規定された。

平和利用の促進についてIAEA憲章第3条では「全世界における平和利用のための原子力の研究、開発及び実用化を奨励しかつ援助する」とし、「世界の低開発地域におけるその必要性に妥当な考慮を払った上で、この憲章に従って、物質、役務、設備及び施設を提供する」と規定している。この条文が原子力の平和利用を加速する原動力となった。

一方、平和利用物質が軍事目的に使用されていないことを確認するための措置として、保障措置の適用が平和利用を推進するための条件であると規定されている。すなわち、憲章第12条には、概ね次のように保障措置活動の範囲と目的を規定している。

- 原子力関連設備及び施設の設計を検討し、その設計が軍事目的を助長するものでは無い場合のみ承認すること。
- 原子炉等で照射した物質の化学処理方法を、その処理が軍事目的へ転用するためのものでは無い場合のみ承認すること。回収されたまたは生産された特殊核分裂性物質は、継続的にIAEAの保障措置下で平和目的に利用されるように要求すること。
- 査察官を受領国及び平和利用計画を提出した関係国へ派遣すること。

IAEA憲章に基づく当初の保障措置はモデル保障措置協定文書INFCIRC/26により実施され、平和利用活動が拡大するにつれ、INFCIRC/66に移っていった。このモデル協定に基づく保障措置の目的は「IAEAが提供した特殊核分裂性物質その他の物質、役務、設備、施設及び情報がいかなる軍事目的をも助長するような方法で利用されないことを確保するための保障措置を設定し、かつ、実施すること、及び、いずれかの2国間または多数国間の取り決めの当事国からの要請を受けたときには、その国の原子力の分野における諸活動に対して保障措置を適用すること」となっており、IAEA憲章の保障措置の目的と同じと見ることが出来る。そして保障措置の適用範囲には各国が独自に進める原子力開発は含まれておらず、国内で産出されたウランや当該国の自主技術で生産されたプルトニウムなどは、その国からの要請がない限り、保障措置適用対象とはしない。日本も当初はこの保障措置協定の下で原子力開発を進めていた。しかし、2003年12月現在、この保障措置の適用に拘り続けている国は、イスラエル、インド、パキスタン、キューバの4カ国のみである。

<sup>6</sup> 加盟国から供出され、IAEAの管理下に置かれた核物質は、米国の5,000kg、ソビエト50kg、英国20kg等のウラン等である。David Fischer, "HISTORY OF THE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY", IAEA 1997, ISBN 92-0-102397-9

## 8.1.2 NPT と包括的保障措置協定 - 核兵器への転用の防止 -

原子力の平和利用が解禁されて以来、各国の技術開発が進み、INFCIRC/66 の定める保障措置対象外の核分裂性物質<sup>7</sup>の使用と原子力活動が急速に拡大していった。多くの国は保障措置を適用するようIAEAに要請し、ウラン濃縮、原子炉燃料の製造、再処理等の開発を進めていったが、要請しない国も在った。この状況が更に進めば、義務ではなくボランティアとして申告された施設、核物質にたいする保障措置では核兵器の拡散を抑える事はできないと危惧する国が多くなった。このような状況の下で、1965年にはソ連がNPT(案)をジュネーブの軍縮委員会に提案し、1967年には査察条項(案)を米国とソ連が共同提案し、1998年には国連総会でNPTは採択された。

NPTは1970年に発効し、2003年12月現在189カ国が加入している。NPTの特徴は核兵器を持っている国(核兵器国)と核兵器を持っていない国(非核兵器国)に分割し、核兵器の不拡散及び核軍縮にかかる権利と義務を定めていることにある。NPTに加入している非核兵器国は「核兵器や核爆発装置を受領せず、製造せず、取得せず、さらに製造のための援助を受けないこと」と規定(NPT第2条)している。核兵器国は、当時、核兵器を保有していると自他共に認められていた5カ国、米国、英国、フランス、中国、そしてソ連に限定し、「核兵器国は核兵器の削減交渉を誠実に行うこと」と規定(NPT第6条)している。NPTは不平等条約であるが、日本を始め多くの非核兵器国は新たに核兵器を持つ国を作らないとの強い連帯感からNPTを批准し、NPTの定めるIAEAの包括的保障措置協定(INFCIRC/153)を受諾し、新たな保障措置体制に移行した。

包括的保障措置協定の下でも保障措置の目的は「原子力の平和利用に用いられる核物質が核兵器その他の核爆発装置に転用されることを防止する」ことであり、IAEA憲章の定めた目的と変わらない。しかし、その対象と手法は大幅に変わった。包括的保障措置の下では「非核兵器国の領域内若しくはその管轄下で、又は場所のいかんを問わずその管理の下で行われる全ての平和的な原子力活動に係るすべての原料物質及び特殊核分裂性物質につき、適用される」と規定している(NPT第3条1項)。非核兵器国にある核物質は、全て平和利用目的に限定されていることから、全ての核物質が包括的保障措置の対象になる。そして、国は、全ての核物質の在庫と移動を毎月IAEAに申告し、IAEAはその申告が正しいことを立ち入り査察により確認する。

<sup>7</sup> 特殊核分裂性物質とはプルトニウム-239、ウラン-233、同位元素ウラン-235またはウラン-233の濃縮ウランであり、IAEA憲章第20条で定義されている。

すなわち、包括的保障措置の目的は、有意量<sup>8</sup>の核物質が、核兵器あるいは其の他の核爆発装置の製造のため、または不明の目的のために転用されることを適時に探知<sup>9</sup>すること、及び早期探知の危惧を与えることによりそのような転用を防止することにある（INFCIRC/153 (Corrected) 第27条）。この目的を達成する手段として、核物質の計量を基本的に重要な保障措置手段として、重要な補助手段としての封じ込め及び監視と共に用いる（INFCIRC/153 (Corrected) 第28条）。この包括的保障措置はINFCIRC/66に基づく保障措置とは全く異なり、締約国の原子力活動に特別の制限は付けないが、締約国は保有する全ての核物質をIAEAに申告することを前提に組み立てられている。すなわち、IAEAは各国の申告が正しい事を、帳簿検査、そして核物質の実在庫と受払い量の計量検査を行なうことにより保障措置の目的を達成可能であるとしており、締約国の自己申告が保障措置のベースとなっている。

包括的保障措置協定に基づく査察検認活動の結論は、協定で定められた核物質収支区域の核物質の収支バランスをとり、辻褃の合わない量（MUF: Material Unaccounted For）の大きさと計量（測定）精度に起因する収支バランスの誤差との比較によって判断される。

NPT 締約国である非核兵器国は、長い間、その約束を守り、忠実に核物質の在庫と移動量をIAEAに申告し、IAEAはその申告の正当性を検認するという手法によって保障措置査察を維持し、平和利用核物質から核兵器への転用は抑えられた。湾岸戦争の戦後処理で明らかになったイラク問題は、この自己申告をベースとして成り立っているこの包括的保障措置の弱点を白日に晒した。すなわち、申告された実在庫からの転用は無かったが、未申告の核物質を生産し、条約違反の核兵器開発計画を着々と進めていた。すなわち、意図的な隠蔽工作が施され、虚偽の申告がなされていた。イラクは包括的保障措置協定に違反しており、NPTに違反していたことが明らかになった。この事件が表面化するまで、包括的保障措置協定の下では、加盟国の申告の完全性を確認する措置は必要ないとされていた。「IAEAは加盟国が全ての核物質を申告していると信じ、核物質が申告の通り実在する事を立証する」これが包括的保障措置協定の基本理念であることを忘れてはならない。

#### ・イラク問題

イラクは2つの研究用原子炉（500KWt、5000KWt 何れも1967年に臨界に到達）とホット・セルを持

<sup>8</sup> 有意量；原爆を造るために必要なプルトニウム等の量であり、プルトニウム：8kg、ウラン-233：8kg、ウラン-235：25kg（ウラン-235が20%以上の濃縮ウラン）等であり、加工工程で生ずるスクラップもこの量に含まれている。

<sup>9</sup> 適時に探知とは、転用された核物質が核兵器になる前に探知するという意味であり、酸化プルトニウム等は1ヶ月、ウラン-235の割合が20%以下の低濃縮ウランは1年以内に転用を探知することを意味する。

ち、INFCIRC/66 の下で原子力利用の基礎研究を進めていた。1974 年には包括的保障措置を受諾し、上記2つの原子炉に装荷している核燃料(93%濃縮ウラン 12.3kg、及び80%濃縮ウラン 10kg)と約450tの天然ウランをブラジル、ナイジェリア等から購入し、所有しているとIAEAに申告し続けていた。IAEAは、1991年湾岸戦争が終結するまでは、この申告に基づき査察を行い、申告通りの核物質が有る事を確認し「査察結果から核兵器等に転用していると結論付ける根拠は無かった」とする査察結果をIAEA理事会に報告していた。この結果は、包括的保障措置によりIAEAに付与された権利と義務の下で導かれたものである。

1991年3月湾岸戦争が終結し、安全保障理事会決議687に基づくUNSCOM査察(核物質に対する査察はIAEAが代行)により、未申告の核物質が、未申告の施設から発見された。確認された未申告核物質は約90tの天然ウラン、0.6kgの4%濃縮ウラン、そして3gのプルトニウムである。イラクは研究炉で照射した天然ウランを溶解し、長崎型の原爆に使われたプルトニウムの抽出の試験(再処理技術の確立?)を行っていた。また、広島型の原爆に使われた高濃縮ウランの製造を目指し、ウラン-235の濃縮を試みていた。ウラン濃縮では現在日本等が採用している遠心分離法と、マンハッタン計画で活躍した電磁方を平行して開発しており、試験的ではあるものの、何れの方法でもウラン濃縮に成功している事実が明らかにされた。

### 8.1.3 強化されたIAEA保障措置

イラク問題により、NPTに加盟している非核兵器国(核兵器は造らないし、持たないと約束した国)の申告は信頼できるとする前提条件が崩れ去り、申告された核物質を査察し、申告の信頼性を確認するという手法で実施してきた包括的保障措置(INFCIRC/153タイプの保障措置)の有効性は崩れ去った。意図的に核物質を隠し、申告しなかった場合、隠された核兵器の製造につながる原子力活動を見つけることは難しい。IAEAは、加盟国の申告の正確性(correctness)に加えて、申告の完全性(completeness)を保証する査察手法と手段をもつことが必要となった。

申告の完全性を検証するための手法と手段について本格的な検討が始まったのは1992年であり、未申告活動の検知手段としてイラク問題解決の切り札となった「環境サンプリング」<sup>10</sup>技術をIAEA保障措置の査察手段とするための条件、未申告施設への査察立ち入り条件等に付いてSAGSI(常設IAEA保障措置実施諮問委員会)で検討が開始された時点である。1993年にはIAEA事務局から保障措置強化プログラム「93+2」計画<sup>11</sup>が理事会に提案され、直ちに実現に向けて

<sup>10</sup> 環境サンプリングはウランおよびプルトニウムの取扱中に施設内に飛散し、残留している極微量粒子(直径0.2から5 $\mu$ m)を拭き取り、粒子中のウラン、プルトニウムの同位体組成を分析する技術であり、過去の核物質使用実績を明らかにする。この技術がイラクの行っていた未申告のウラン濃縮を見つけた技術である。

<sup>11</sup> 「93+2」計画の詳細は、「核不拡散への挑戦(3)-NPT体制の強化への着手-」、核物質センターニュース2000.8 Vol.29 No.8を参照されたい。

検討が開始された。

1995 年 6 月には包括的保障措置協定の枠内（申告されている施設内）で採用可能な強化策が理事会に提出され、承認された。この措置が「93+2」計画Part-1<sup>12</sup>である。

未申告施設で行なわれている未申告の原子力活動を探知可能にするためには、新たな査察権限（「93+2」計画Part-2）をIAEAに与える必要がある。前にも述べた様に、IAEAが立ち入り査察できる施設は申告された施設に限定されている。この立ち入り権限にかかる制限を緩和する事は、民間施設に無条件で立ち入り、査察できるとする超法規的な権限をIAEAに与える可能性があり、Part-2 ではこの問題を如何に調整するかが大きな課題であった。1996 年 6 月、理事会は特別委員会（Committee 24：COM-24）を設置し、申告の完全性を検証するために必要となる措置に付いての検討を始めた。すなわち、IAEAの立ち入り権限を合理的な範囲内に制限し、有効かつ効率的な査察手法と手段の検討に入った。1997 年 5 月には、IAEAに新たな法的権限を付与する「包括的保障措置協定のモデル追加議定書」<sup>13</sup>に各国は合意し、追加議定書は署名のために公開された。

この追加議定書は包括的保障措置を強化し、補完するものであり、第 1 条は「この議定書は包括的保障措置協定と一体不可分のものであり、追加議定書の規定を優先する」としている。しかし、包括的保障措置加盟国が自動的に追加議定書の加盟国となる法的根拠はなく、各国はIAEAと新たな協定を結ぶ必要があることに注意しなければならない。

追加議定書では、未申告施設の探知と確認手段を中心に検討が進められた。結果として、申告の完全性を検証するための措置として、第 1 にIAEAが保障措置査察活動に利用可能な情報の範囲を拡大した。すなわち、新聞報道等の公開情報、そして原子力機材の輸出情報から加盟国が提供する機微情報に至るまで、IAEAは入手可能なあらゆる情報を活用出来る<sup>14</sup>とし、加盟国は、核物質の利用を伴わない核燃料サイクル関連の研究開発活動に付いて、その活動が国の原子力開発計画に関連している場合は、官民の如何を問わず、その活動と場所に関する情報を申告する義務を負う等<sup>15</sup>である。第 2 に、IAEAは申告された情報とIAEAが独自に入手した公開情報等を比較検討し、申告漏れの有無を調べる。そして「未申告施設がある」あるいは「未申

<sup>12</sup> 包括的保障措置では核物質を持っているか、持つこととなっている施設内の査察（設計情報の確認）は出来る。この権限の下で、施設内の建物内で未申告の原子力活動を行っていないかどうかを確認するための立ち入りを認める。また、この立ち入りの際に、環境サンプリングを認める。 GOV/2807, 12 May 1995

<sup>13</sup> INFCIRC/540 (Corrected)

<sup>14</sup> 包括的保障措置では、国が申告した情報及び査察で収集した情報以外の情報を利用する事はできない。このため、北朝鮮では、衛星写真で廃液貯蔵施設ではないかと想定されていた未申告施設を査察することは出来ず、イラクでは、公開情報で把握していた未申告施設を査察することが出来なかった。

<sup>15</sup> INFCIRC/540 (Corrected) 第 2 条

告活動が行なわれている」と思われる（疑いがある）場合、「IAEAは当該国にその場所（施設）の実状報告を求め、必要があれば施設に立ち入り、真偽を確認することが出来る」とIAEAの権限を拡大した。この立ち入りによる検証を「補完的なアクセス」と言う。補完的なアクセスでは、包括的保障措置に基づく査察と異なり、核物質の計量管理に係る査察活動は行なわれない。しかし、環境サンプリング等を行い、当該施設で未申告の核物質を使用していたことが有るかどうかは確認することが出来る（イラクで未申告のウラン濃縮が行なわれていたことを見つけた有力な検知手段）。

#### 8.1.4 追加議定書と統合保障措置

統合保障措置は追加議定書の第 1 条「この議定書は包括的保障措置協定と一体不可分のものであり、追加議定書の規定を優先する」の規定を実施に移すために開発されている措置である。先にも示したように、包括的保障措置は「申告の正確性 (correctness)」を検証し、たとえ未申告施設が在ったとしても厳格な計量管理（帳簿検査と計量検査）により、有意量の核物質の転用を適時に探知するようになっている。すなわち、未申告施設が在ることを前提とし、申告された核物質が核兵器等に転用されれば適時に見つける手法と手段を整備し維持している。追加議定書の適用により IAEA が「申告の完全性 (completeness) を保証する査察手法と手段をもつ」ことになり、未申告施設がない（稼動前に見つけることができる）ことを保証する措置の実施が可能になったことから、未申告施設が在ることを前提としていた包括的保障措置と重複している査察目的に関する部分を省略し、有効かつ効率的な保障措置を目指しているのが統合保障措置である。

合理化の 1 例を挙げると、MOX 燃料を使用しない軽水炉の査察回数が大幅に削減される。これは、未申告の再処理施設がなく、さらに、申告済みの再処理施設の査察結果が IAEA の査察評価基準を満たしている場合、未申告のプルトニウムを分離抽出することはできないことから、可能になった合理化である。また、未申告のウラン濃縮施設を見つける有効な手段が開発できれば、軽水炉に使う核燃料の製造工程の査察も大幅に軽減されることになる。IAEA ではすでに合理化のシナリオは作っている。今後は、そのシナリオに適合する条件を満たすよう国内保障措置体制を整備することが課題である。

#### 8.1.5 強化された保障措置の有効性

追加議定書の有効性、すなわち未申告施設と未申告活動を探知し、その有無を検証する能力は、イラン、リビアの追加議定書批准にかかる動きの中で明らかになった<sup>16</sup>。2003 年 10 月、英、

<sup>16</sup>The New York Times, October 21, 2003

独、仏の外相はテヘランを訪問し、イランの原子力活動の将来に付いて協議した。合意事項の骨子は以下の 3 点である。

イランは追加議定書に署名し、批准手続きを開始する。そして、直ちに追加議定書の規定する未申告の施設への立ち入り検査(補完立ち入り)を認め、IAEA の検査活動に協力する。

英、独、仏の外相はこのイランの表明を受けて、NPT に基づき原子力の平和利用を進める権利をイランが持っていることを認め、今後の原子力発電計画の推進に協力することを約束し、

そして、関連分野の最新技術のイランへの導入が容易になるようにする。

米国は追加議定書が未申告の核兵器開発計画ばかりでなく、核物質あるいは機材の不法移転の検知に有効であることを認め、2004 年 3 月 5 日、議会の外交委員会が「追加議定書は非核兵器国の核兵器開発計画、そして核兵器開発につながる核物質および技術の拡散に関連する証拠を捜査する有用な手段を規定している」とし、上院が早急に批准手続きに入るべきであると勧告した。そして、上院は 31 日、圧倒的多数で批准を承認<sup>17</sup>した。

## 8.2 核物質防護

テロリスト・グループが不法に核兵器等を持つことが出来ないようにする最も有効な手段は、原子力施設から核物質を不法に持ち出されない(盗取されない)よう厳重に管理し、核物質を不法に入手できないようにすることである。各国の責任で実施されているこの盗取に対抗する措置が核物質防護措置の始まりである。核物質防護措置には、後に原子力施設を破壊し、施設が持っている放射性核種を環境に飛散させ、放射能汚染を起こし、住民をパニック状態に陥れることを目的とした妨害破壊工作に対抗する措置が組み込まれた。しかし、どのような防護措置も完全であると思ってはならない。平和利用核物質が核兵器を持ちたいと思っている国に渡る可能性はある。このため、原子力先進国グループは、IAEA の包括的保障措置を受け入れていない国、あるいはイラク、北朝鮮のように NPT に違反してでも核兵器を持つと見られている国には、原子力施設を造るために必要な機器・機材の輸出をしないことを申し合わせ、各国は独自に輸出管理規定を作り、NPT 違反の原子力施設の建設を抑えている。

### 8.2.1 核物質の物理的防護

原子力活動で使用されている施設および核物質をテロリスト・グループから守る、すなわち、核物質の盗取や原子力施設への妨害破壊行為を防止する措置は、原子力平和利用を進める条件

---

<sup>17</sup> USINFO.STATE.GOV、04 March 2004、及びUSINFO.STATE.GOV 01 April 2004

として、初期の段階から検討され、平和利用が進むにつれて具体化され、強化されてきた。

1969年、米国は核物質の盗取や原子力施設への妨害破壊行為を防止するための物理的な核物質防護措置<sup>18</sup>を定めた。この措置が、以後、世界各国で採用される事になる「原子力施設および核物質の物理的防護措置」の雛形である。

1972年、IAEAは核物質防護について検討を始め、1977年には「核物質防護(Physical Protection of Nuclear Material)」<sup>19</sup>を各国が自国の責任で整備し、管理する核物質防護措置ガイドライン(指針)を公開した。この指針はその後順次改訂され、1989年には妨害破壊行為の対抗策を強化<sup>20</sup>し、1992年には関連情報の管理指針、および防護対象とする核物質の区分を見直した<sup>21</sup>。

複数の国の間を輸送される核物質、あるいは一つの国では対応の取れない核ジャック等から核物質を守る、また盗取された核物質を取り戻すための国際協力を取り決めた「核物質の防護に関する条約」<sup>22</sup>(以下、条約)は1988年に発効した。この条約により「国際輸送中の核物質の防護義務」および核物質が不法に持ち去られた場合の対応策として、関連各国の「相互協力義務」を定め、「犯罪人等の処罰義務」を定めている。

## 8.2.2 想定しているテロの脅威

核物質防護措置はテロリスト・グループの規模と装備のレベル(脅威のレベル)そして目標とする施設と核物質の魅力度を考慮し、適切な物理的障壁を備え防備する措置である。原子力施設に対するテロの目標は2つのシナリオに大別される。その1つは、不法に持ち出した、あるいは盗み出した核物質で核兵器等を製造するシナリオ(盗取シナリオ)であり、他の1つは、原子力施設等に対する妨害破壊行為により多量の放射性核物質を環境に拡散させ、公衆をパニックに陥れる環境汚染シナリオである。盗取シナリオに係わる魅力度は直接核兵器に転用可能なプルトニウムと高濃縮ウランが最も高く、低濃縮ウランはその次のレベル<sup>23</sup>になる。環境汚染シナリオで最も魅力度の高い施設は原子炉施設、再処理施設、そしてプルトニウム燃料加工施設である。輸送中の使用済燃料の魅力度は、その形態及び輸送容器の安全設計基準等を考慮し、少なくとも施設内にある場合に比べ、脅威のレベルは1ランク低いと見られている。いずれにしても、これら魅力度の評価は相対的なものであり、テロリスト・グループが備えている

<sup>18</sup> 10CFR Part73 “Physical Protection of Plant and Materials”

<sup>19</sup> INFCIRC/225/Rev.1

<sup>20</sup> INFCIRC/225/Rev.2

<sup>21</sup> INFCIRC/225/Rev.3

<sup>22</sup> INFCIRC/274

<sup>23</sup> 低濃縮ウラン(ウラン-235がウラン全体に占める割合が20%以下のウラン)はさらに濃縮し、20%以上にしなければ核兵器等は造れない。したがって、たとえ低濃縮ウランを不法に取得しても、濃縮施設が無ければ核兵器等は造れない。

脅威のレベルにより防護措置が有効であるかどうかが決まる。

想定される脅威のレベルは、長い間、米国の核物質防護措置を定めた 10 CFR Part 73 を参考にし、我が国の実情を考慮して定めてきた。Part 73 の想定している脅威のレベルは、おおむね以下に示す属性および装備を持つ数名のグループが、2 つまたはそれ以上のチームに分かれ活動する能力を持つとしている。

- ・ 特殊訓練（軍事訓練と各種技能を含む）を受けた、信念を持った人々、
- ・ 消音装置を付け、長距離射撃が正確に出来る携帯用自動銃および小型武器の携帯、
- ・ 侵入手段として使用し、また原子力施設及び防護システムの機能を破壊するために使用する爆薬等の携帯、
- ・ テロリスト及び装備品を運搬するための車両の使用、そして、
- ・ 施設の職員（地位の如何を問わず）の援助（インサイダー）、等である。

### 8.2.3 防護措置のレベルを決める基準

テロの目的を効果的に達成する手段としてはプルトニウムあるいは高濃縮ウランの盗取であり、放射性物質の拡散による環境汚染を引き起こす原子炉等の破壊活動であることはすでに述べた。

表 8.1 未照射核物質の防護区分

		区 分		
プルトニウム(1)		2kg 以上	500g を越え 2kg 未満	15g を越え 500g 以下
濃縮 ウ ラ ン (2)	20%以上	5kg 以上	1kg を越え 5kg 未満	15g を越え 1kg 以下
	10%以上 20%未満		10kg 以上	1kg を越え 10kg 以下
	天然ウラン以上 10%未満			10kg 以上
ウラン-233		2kg 以上	500g を越え 2kg 未満	15g を越え 500g 以下

(1) : プルトニウム-238 の同位対比、80%を越えないすべてのプルトニウム。

(2) : ウラン-235 の濃縮度、重量はウラン-235 の量を示す。

核物質防護措置の基礎が確立された1970年代は、盗取に対する防護対策の確立に重点が置かれていた。以下に示す未照射核物質の防護区分は条約及びINFCIRC/225に規定され、現在も国際的に使用している区分である。

最も魅力度の高い区分に属し、最も厳重な防護と管理が必要であるとする核物質は2kg以上のプルトニウム、5kg以上の高濃縮ウラン（ウラン-235の濃縮度が20%以上）、そして2kg以上のウラン-233と定めている。この量は、当該核物質を4ないし5回の盗取等により入手すれば、1つの核兵器を造るに十分な量であるとされている。また、区分以下の核物質は各国の規定に基づき慎重に管理する事になっているが、INFCIRC/225/Rev.3の改訂を協議している際に、ロシアは「15g以下のプルトニウムは慎重な管理下に置く」とするこの基準では不十分であり、5g程度に下げるべきであると変更を要求した。しかし、国が慎重な管理を行っているプルトニウムから、検知されることなく500回以上の盗取（8kgのプルトニウムを集める）を繰り返すことは不可能であり、15gは妥当な量であると米国が主張した。また、日本を始め多くの国は、INFCIRC/225は管理の指針であり、国が区分の範囲を5gまで拡大し防護する必要であると判断する場合は、自国の責任でその範囲を定めればよいと主張し、結果として15gが残された経緯がある。

#### 8.2.4 テロに対抗する防護措置

##### ・盗取に対する防護措置

区分に属する核物質は全て枢要区域内に保管され、使用される。枢要区域は防護区域の中に、そして防護区域は周辺防護区域で取り囲まれ、三重の防護システムで守られている。周辺防護区域内には施設の運転等に直接関係のない施設、例えば事務本館、見学者用展示館等、不特定多数が出入りする建造物を設置することは許されず、24時間/日、365日/年、警備員が駐在し警備している。さらに、周辺防護区域内には侵入検知器および監視システム等が張り巡らされており、異常な動きを検知すると警備員は直ちに原因を解明し、事後措置を採る事が義務づけられている。この監視・警備システムは盗取のみならず妨害破壊行為を行なうテロの侵入を早期に発見する役割を担っている。

区分の核物質を盗み出すには少なくとも3つの防護区域を突破しなければならない（多重防護）。各防護区域には厳重な出入り管理システムが設けられており、当該施設で働いている職員ですら、定められた手続きを取り、許可を得ない限り出入り口のドアは開かない。また、核物質の在庫管理は不法持ち出し等により起きる帳簿在庫と実在庫の差を見つける有効な手段である。国及びIAEA保障措置制度は各原子力施設の核物質をグラム単位で計量管理しており、区分の核物質は毎月、実在庫量を確認している。

## 第9章 リスクアナリシス

リスクは何処にでも潜んでおりリスクを伴わない活動は無い。また、リスクは人の感じ方によって千差万別である。しかし、このリスクは安全性、さらには個人の見解を正当化するための手段として利用されている。個人の甘受するリスクは個人の責任であり、他人がとやかく言う問題では無い。しかし、国の政策によって被るであろうリスクは、その政策がリスクを最小にするものであることを、国は広く国民に周知させる義務がある。エネルギーは現代社会を支える重要な柱の一つであり、国レベルのエネルギー需給と消費にかかるリスクを個人で避けるのは難しい。国のエネルギー政策は持続的な経済成長と地球環境を維持する正に国の政策に基づくものでなければならず、50年後、100年後、さらに将来の世代に対し明るい見通しを示す政策でなければならない。今後5年、そして10年間のリスクが小さければ、それ以降も小さいとする発想は、ことエネルギー問題に関しては成り立たない。

図9.1では典型的な自然災害のリスク(死亡率)と原子炉事故によるリスクを比較している。この中に加える放射性廃棄物によるリスクそして地球温暖化によるリスクのデータは無い。

地球規模のエネルギー消費量は

急増しており、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は上昇を続け、地球温暖化が進んでいる。地球環境の変化と生態系の適応速度を考慮すると、地球の平均気温上昇は1.5以下に抑えるべきであり、上昇率は0.1 /10yr以下に抑える必要がある(既に0.6 上昇している)。しかし、1950年~1993年の夜間最低温度の平均温度上昇率は既に0.2 /10yr(最高温度の平均温度上昇率は0.1 /10yr)を記録しており、気温上昇率は限界に達していると見るべきである<sup>1</sup>。CO<sub>2</sub>削減計画の実施が遅れ

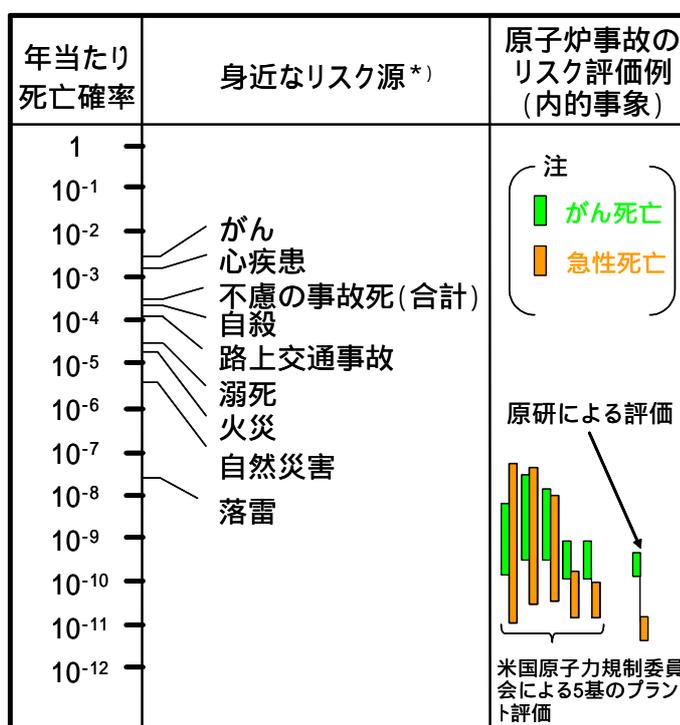


図9.1 原子力発電所のリスクの評価例

\* ) 出典：厚生省人口動態統計、警察白書(平成2~11年版)

<sup>1</sup> Beyond Kyoto : Advancing the international effort against climate change, December 2003

れば、回復不能な環境破壊を起し、多方面に亘る被害の拡大から経済損失は年々増大する。

### 1. リスクアナリシスと統一的な評価基準

エネルギー利用に伴う包括的なリスク評価を急げ。エネルギー不足、原子力利用に伴う放射線被曝、そして地球温暖化による災害と経済損失にかかるリスクとリスク回避手段の有効性に関する統合的な解析・評価を急ぎ、評価結果を公開し、将来の世代に負の遺産を残さず、リスクの最も小さいエネルギー政策を示し、社会の理解を得る必要がある。

個人資産、社会・公共資産、そして人の生命等に及ぼすリスクの源はあらゆる分野に潜んでいる。文明の恩恵を享受しつつ真にリスクの低い安心できる環境を作り、そして将来にその処理を委ねる負の遺産を最小にするエネルギー政策を進めるためには、かかる広範囲に亘るリスクを、互いに比較可能な尺度で総合的に解析し、分析する手法を開発する必要がある。1979年に発生したスリーマイル・アイランド、そして1986年のチェルノブイリ事故以来、原子炉の安全性に対する関心が高まり、原子炉事故に対する確率論的リスク評価手法の研究が進み、今では原子炉の設計、建設、そして運転等の安全にかかる審査規準のベースとなっている。

各エネルギー源のもつ潜在的リスクの包括的な解析と評価は遅れている。化石燃料に過度に依存すればエネルギー安全保障と温暖化による気候変動が人類に及ぼすリスクが増大し、太陽光発電そして風力発電等の役割を過度に期待すれば産業活動を支える安定なエネルギー源の不足による経済活動停滞のリスクが増大する。そして、原子力に依存すれば放射線被曝のリスクが増大する。現在から将来の世代の人々に亘り、健康の維持と死亡率、更に社会的・経済的損害とその復旧にかかる経費等、共通の指標を定め、エネルギー源全般にわたる包括的なリスク評価を行う必要がある。

多量の放射性核種を扱う原子力システムは開発の初期段階から全ての高レベル放射性廃棄物を廃棄すること無く保管し、管理している。しかし、高レベル放射性廃棄物を放射性廃棄物等安全条約<sup>2</sup>の定める規定に従って深地地層処分したとしても、1万年から10万年後の世代が、現在と同様の規準で放射線被曝を避けられる保証はなく、将来の世代に放射線被曝のリスクを引き継ぐとして深地地層処分に反対し、原子力利用に反対する人達は多い。一方、火力発電等に伴い発生するCO<sub>2</sub>は無害ものとして大気中に放出されてきた。この無害であるとされたCO<sub>2</sub>が地球温暖化を引き起こしているとの社会認識は広がりつつあるが、温暖化の及ぼすリスクについての認識は低い。また、東電問題が引き起こした2003年夏の電力供給能力不足は長時間の停電が起きても致し方ない状況にあったが、冷夏であったこと等の幸運もあり、社会生活に大きな支障は来たさなかった。エネルギー安全保障にかかるリスク評価についても、原子炉の安

<sup>2</sup> 使用済み燃料及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約、2003年11月、日本に対して発効した。

全性評価と同じ手法を適用し、結果を公開する。そして、社会全体がそのリスクのレベルを理解し、共に対処する必要がある。

## 2. エネルギー安全保障とリスク

経済成長の著しい東アジア地域では石油の輸入が急増し、2030年には世界の総石油総需要の1/4に及び、輸入依存度は85%にまで上昇すると予想されている。かかる状況はエネルギー安全保障の観点から、そして持続的な発展を続けるために必要なエネルギー源を確保できなくなる可能性（リスク）が大きくなる。そのリスク評価を急ぐ必要がある。

経済成長の著しい東アジアの石油需要は急増し、石油輸出国であった中国は1993年から輸入国になり、インドネシアも2010年以降輸入国になると想定され、東アジア諸国のエネルギー自給率は低下の一途を辿っている。東アジア諸国の総需要は急速に増加し、2020年頃には北米地域の需要と同等の日量2740万バレル、2030年には世界の需要量の1/4を超える日量3200万バレルになり、輸入依存度は85%に達する<sup>3</sup>。エネルギー安全保障を維持するには石油輸入量が増大するにつれて石油備蓄量の積み増しが重要となる。しかし、開発途上国が経済成長に見合う備蓄の積み増しを要求するのは現実的ではないであろう。エネルギー安全保障は適正な価格での調達を妨げる要因を最小にし、かつ供給途絶にかかるリスクを回避するエネルギー・ネットワーク・システム構築へとその概念を拡張しなければならない。ちなみに、米国のエネルギー自給率は約75%、ドイツは約40%、そして日本は20%程度<sup>4</sup>である。

必要なエネルギーを確保するという本来のエネルギー安全保障政策は、エネルギー自由化の波に呑み込まれ、目先のコストを優先せざるをえなくなり、石油等化石燃料の多量消費に向かいつつある。この傾向が今後も続けば、石油等化石燃料のスポット価格の上昇、そして最悪の場合は供給の途絶も起こりうる。エネルギー安全保障の基本は、先ず、エネルギー自給率を高めることである。

供給国地域の政治的安定性と治安、そして輸送経路の安全性確保にかかる問題、さらに不足の事態による需要の逼迫あるいは供給の途絶が起きる可能性（リスク）は年々大きくなっている。かかる問題についてリスク評価が行われ、社会生活および経済活動に及ぼす影響（資産の損失と緊急対策費の算定額等）の報告書は見たことがない。エネルギー危機を誘起する要因は？如何なる事態が起きるのか？そして経済活動に及ぼす影響は？これらの問題を総合的に捉え、リスク評価を行い、広く社会の理解を得るために結果を公表する必要がある。

<sup>3</sup> 世界のエネルギー展望 2002

<sup>4</sup> 深刻化する日本のエネルギー問題、新エネルギー財団、<http://www.nef.or.jp/enepolicy/01.html>

### 3. エネルギー源の選択とリスク

エネルギー政策は、エネルギー需給のバランスを考慮し、安全性と経済性そして健康や環境等にかかわるリスクを総合的に分析し、将来に亘って必要なエネルギーを確保すると共にリスクを最小にするエネルギー源の配分と消費形態を明らかにし、その実施に向けて採るべき措置を決め、何を始めるかを明確に示したものでなければならない。

#### 3.1 化石燃料消費のリスク（環境破壊と経済損失）

産業革命以降、地球の平均気温は $0.6 \pm 0.2$  上昇した。地球温暖化に伴う過去30年間の気候変化は地上に生息している種の生存に大きな影響を及ぼしており、絶滅の危機に直面している種が増加している<sup>5</sup>。また、異常気象の起きる頻度が急増し災害の規模も増大している<sup>6</sup>。エネルギー源の選択により引き起こされるであろうリスクの評価を急ぐ必要がある。

化石燃料は、石炭から石油そして天然ガスへとその利用を広げ、現代文明を担う主要なエネルギー源となった。しかし、化石燃料の多量消費は、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を高め、地球温暖化を引き起こし、異常気象による自然災害の頻発のみならず、地球上の15 - 37%に及ぶ動植物の種の絶滅が予見されるところまで地球環境を破壊しつつある。しかし、日本そして世界各国はそのリスクを真摯に捕らえているとは思えない。

大気中に放出されるCO<sub>2</sub>は地球温暖化を誘起する有害な産業廃棄物である。一度、大気中に拡散したCO<sub>2</sub>の一部は数世紀にわたって大気中に留まる。このCO<sub>2</sub>を経済的に見合う方法で回収し隔離する手段はない。地球温暖化の及ぼすリスクが解明されていないことを理由に有効なCO<sub>2</sub>削減対策を採らず、温暖化が進み、環境破壊の実態が確認されてからでは遅い。

地球環境の変化と生態系の適応速度を考慮すると、許容される気温上昇は1.5 以下に抑えるべきであり（既に0.6 上昇しており、許容範囲は0.9 しかない）、上昇率は0.1 /10yr以下に抑える必要がある<sup>7</sup>としている。1950年～1993年の夜間最低温度の平均温度上昇率は0.2 /10yr（最高温度の平均温度上昇率は0.1 /10yr）を記録しており、温度上昇率は既に限界に達していると思われるべきであろう。CO<sub>2</sub>削減計画の実施が遅れば、回復不能な環境破壊を起し、多方面に亘る被害の拡大から経済損失は年々増大することになる。

地球温暖化は地上に生息する動植物の生息分布に影響を及ぼす。過去30年間の温暖化はすでに種の分布地域と生存率に大きな変化を示しており、ある種に対しては絶滅に至るとされる影響を及ぼしている。陸地の20%をカバーする代表的な地域を選定し、地域内に生息する1103

<sup>5</sup> Chris D. Thomas, et al. Extinction risk from climate change; NATURE, Vol. 427, 8 January 2004

<sup>6</sup> Paul Brown; Environment Correspondent; The Guardian, January 8, 2004

<sup>7</sup> Joseph E. Aldy, et al, Beyond Kyoto – Advancing the International Effort against Climate Chang, PEW Center on Global Climate Change, December 2003

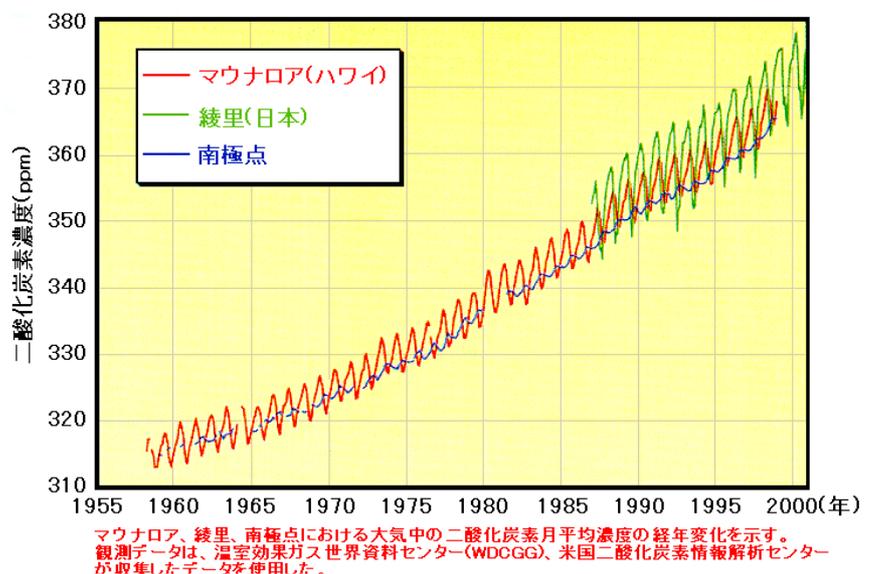
## Annex-1 地球温暖化は止められるか

化石燃料の消費に伴い生成されるCO<sub>2</sub>は、無害な物質として大気中に放出されており、大気中の濃度は年々上り、地球表面を覆う大気の色度は上昇し、地球温暖化を引き起こしている。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)は大規模な地球環境シミュレーションによってこの地球温暖化は主に大気に含まれているCO<sub>2</sub>等が持つ温室効果により起きていることを示し、温暖化のメカニズムを分析<sup>1</sup>している。大気中に放出されたCO<sub>2</sub>は海水に溶け込むか、あるいは植物に吸収され、長い間、大気及び海水中のCO<sub>2</sub>濃度は平衡状態にあったが、1990年から10年間のCO<sub>2</sub>濃度変化から推定された全地球のCO<sub>2</sub>吸収率の平均値は2,300±800Mtce/yr(100万t炭素換算量/年)に過ぎない。

産業革命以後のCO<sub>2</sub>の排出量は徐々に増加し、2000年に排出された総CO<sub>2</sub>量は6,417Mtce/yrに達した。この排出量は全地球のCO<sub>2</sub>吸収量の3倍に近い量である。また、大気中に拡散したCO<sub>2</sub>は、数世紀後にも、その排出が寄与した濃度上昇部分の約25%は大気中に残り、その影響は数百年間も続く<sup>2</sup>。かかるIPCCの分析結果(実状)を真摯に受け止め、適切なCO<sub>2</sub>排出削減対策を執らない限り、2100年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度は755~970ppmに達し、地球の平均気温は3.8±1.0~4.5±1.2 上昇し、その後も上昇を続ける<sup>3</sup>。

### 1. CO<sub>2</sub>濃度観測結果の概要

大気中のCO<sub>2</sub>濃度はハワイのマウナロア等で観測されてきた。そして地球温暖化を引き起こしている温室効果ガスの主成分が長期間に亘り大気中に止まるCO<sub>2</sub>であること、そして気候変動モデルの信頼性の検証を目的とし、各国で精力的にCO<sub>2</sub>濃度の観測が始められ、地球規模の観測データの蓄積が始められた。図A1-1は



図A1-1 大気中のCO<sub>2</sub>濃度測定値の経年変化

出典：気候変動監視レポート、気象庁(編)2000、2001年4月27日

<sup>1</sup> Climate Change 2001

<sup>2</sup> The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. Climate Change 2001, Chapter 3

<sup>3</sup> シナリオA2 及びA1FI等、Climate Change 2001

気象庁が編纂した「気候変動監視レポート 2000」から転載したものであるが、1960年から2000年までの40年間にCO<sub>2</sub>濃度は約55ppm上昇し、10年間当たり14ppmの割合で上昇していることになる。

## 2. CO<sub>2</sub>排出量は増加しつづける

図A1-2は世界の1次エネルギー需要（石油換算料）の年次変化を示している。この図から明らかのように、今後30年間、CO<sub>2</sub>排出量は少なくとも1990年から2000年の増加率を保ち増加していくであろうことを示している。

CO<sub>2</sub>を排出しない再生可能エネルギー源は大幅に増加してはいるが、総需要に占める比率は小さい。そして、原子力は横ばいかむしろ減少傾向を示している。これは欧州諸国の原子炉が老朽化しており、順次廃炉処分をせざるを得ないためであり、廃炉処分する原子炉を補完する新規原子炉の建設計画が未だ決定されていないことが主な理由である。いずれにしても、化石燃料が世界全体を支える総エネルギー需要の90%近くを賄い続けることを示している。

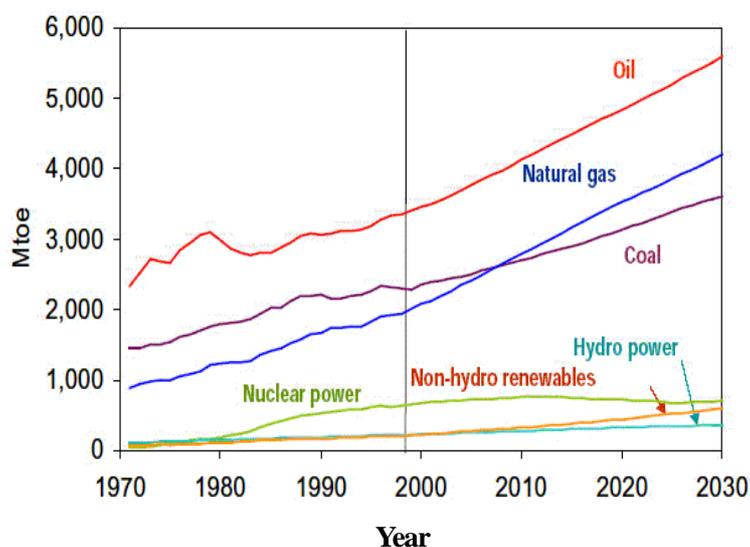


図 A1-2 世界の1次エネルギー需要 (WEO2002)

図A1-3はIPCCのClimate Change 2001のシナリオB1、B2、そしてA2のCO<sub>2</sub>排出量にIEO-2003の排出量データ<sup>4</sup>を追加したものである。IEO-2003は2001年から2025年までの世界の総CO<sub>2</sub>排出量を推定しており、その増加率は年率1.9%である。図に示した数値はこの傾向を2050年まで外挿したものを追加してある。このIEOの示す傾向はIPCCのシナリオA2に沿ったものであることを示している。

シナリオA2(注-1)は現在の社会・経済構造を維持しつつ、化石燃料に依存した経済発展を想定したものと考えられる。そして、IEOの予測は正にシナリオA2に沿ったCO<sub>2</sub>の排出を続けて

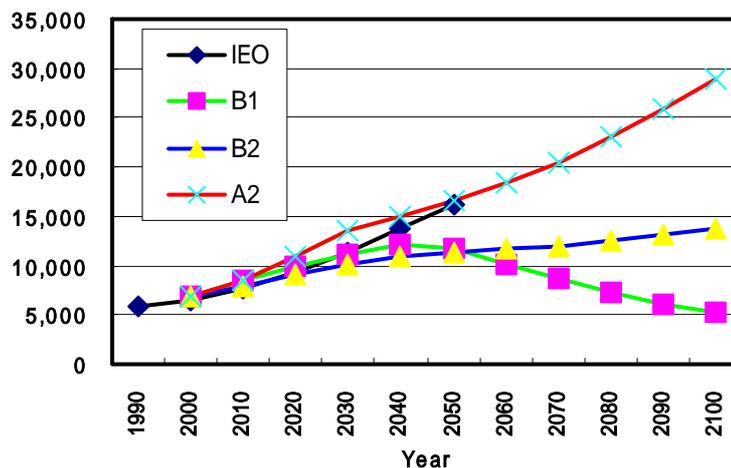
<sup>4</sup> IEO 2003 : Table A10. World Carbon Dioxide Emissions、2030年から2050年までの数値はIEO2003の2001年から2025年までの平均伸び率1.9%を用いて外挿した。

いきつつあることを示している。この傾向が続けば、2100年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度は856ppmに達し、地球の平均気温は3.8 上昇し、その後も上昇を続ける。

シナリオB1（注-2）は、非常に技術志向のシナリオであり、技術革新により脱マテリアル化と経済発展の両立を目指すものである。投資は環境保全を目的とするものが優先され、環境関連産業が伸長する。そして経済構造の核に環境保全を据える形で経済の発展も重視するのであり、高い経済成長率が達成される。このシナリオB1 に沿ったCO<sub>2</sub>排出量の削減を行なった場合、2100年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度は549ppmになり、地球の平均気温は2.0 上昇するが、その後、急激な気温上昇はないと予想されている。

シナリオB2（注-3）は小規模の自立的な生産圏の中で動脈産業と静脈産業が連携をはかり、循環型経済を構築し、経済と環境の調和を目指すものであり、かかる社会・経済構造の変革が可能であるかどうか疑問である。しかし、このシナリオB2 に沿ったCO<sub>2</sub>排出量の削減を行なった場合、2100年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度は620ppmになり、地球の平均気温は2.7 上昇する。その後、急激な気温上昇はないと予想されているが依然として気温は上昇する。

注-1)シナリオ A2 は、国際競争のために従来の社会や経済の枠組みを急激に変化させることを好まず、従来の延長線上での経済発展を目指すシナリオである。したがって、経済は低位で推移するものの、社会の構造変革がなく、内向きの安定した社会となる。また、これまで同様、地方への公共投資が活発に行われる。ライフスタイルとしては、現在と同じ水準での消費活動が継続する。また、都市構造としては人口や資本は複数の中核都市圏に分散しており、地方への公共投資が活発に行われることもあわせて、これらをつなぐ道路交通ネットワークが整備され、人流、物流ともに自動車を中心の社会となる。

CO<sub>2</sub> Emission from Fossil Fuel (MtCe/yr)図A1-3 CO<sub>2</sub>排出率 (Mtce/year)

使用データ：Climate Change 2001、IEO2003

## Annex-2 予想される地球温暖化

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第一作業部会の第3回評価報告書<sup>1</sup>は、気候変動に関する過去の変化を評価・分析し、最近5年間の新しい研究の成果を加えて修正したモデルを用いて推定したものである。そして、気候システムの現状を説明し、将来の予想とその不確実性について述べている。ここでは、報告書から温暖化ガスの気候変動に及ぼす影響を抜粋し、その概要を紹介する。

### 1. 地球平均温度はすでに上昇している

#### 1.1 地球の平均地表温度は20世紀を通じて約0.6 上昇した。

- 地球の平均地表温度（陸地の地表近くの気温と海面温度の平均）は、1861年以来上昇を続けている。20世紀を通じての上昇は図A2-1に見られように、 $0.6 \pm 0.2$ <sup>2,3</sup>である。この数値は、1994年までの期間についてSAR<sup>4</sup>が推定した数値より約0.15 大きい。これは、その後の1995年から2000年の温度が相対的に高かったことと、データ処理の方法が改善されたことによる。これらの数値は、都市のヒートアイランド現象など、いろいろな調整を考慮したものである。温度変化に関する記録は時期によって大きく変動している。たとえば、温暖化の大部分は20世紀の、1920年から1945年と、1976年から2000年という二つの時期に起こっている。
- 地球規模で考えると、1990年代は最も暖かい10年であり、1998年は、1861年以来最も暖かい年であった可能性が非常に高い<sup>5</sup>。
- 北半球のデータの新しい分析によれば、20世紀の温度上昇は過去1000年のどの世紀よりも大きかった。
- 平均気温、及び1861年以前の南半球については、データが少ないので、それほどよくわからない。しかし、平均すると、1950～1993年の陸地の夜間最低気温は10年ごとに

<sup>1</sup> IPCCにおける「気候変動」という用語の用法は、時間と共に起こるあらゆる気候の変化のことをいい、それが自然の変化によるものか人間の活動の結果としてのものかは問わない。この用法は、「気候変動」が、地球の大気の組成を変えるような人間の活動を直接間接の原因とする同時期の自然の気候変化に付加される気候の変化を指す、気候変動に関する枠組み条約での用法とは異なる。

<sup>2</sup> 一般に、温度傾向は単位時間ごとに小数点第2位の数字が四捨五入されるが、データの有無によってその期間は制約を受けることが多い。

<sup>3</sup> 通常、5%の統計的有意水準が用いられ、95%の信頼水準が用いられる。

<sup>4</sup> 政府間パネル（IPCC）第2回評価報告書（the IPCC Second Assessment Report）

<sup>5</sup> 確実性の断定的推定を示すために以下の用語が用いられた：

事実上確実（結果がそうなる可能性が99%より大きい）、可能性が非常に高い（90-99%）、可能性が高い（66-90%）、可能性がある（33-66%）、可能性が低い（10-33%）、可能性が非常に低い（1-10%）、可能性がほとんどない（1%未満）

約0.2 上昇した。これは日中の最高気温の上昇率（10年ごとに約0.1 ）の約2倍である。これによって多くの中高緯度地域で不凍結期間が長くなった。この期間を通じた海面温度の上昇は、平均地表気温の上昇の約半分である。

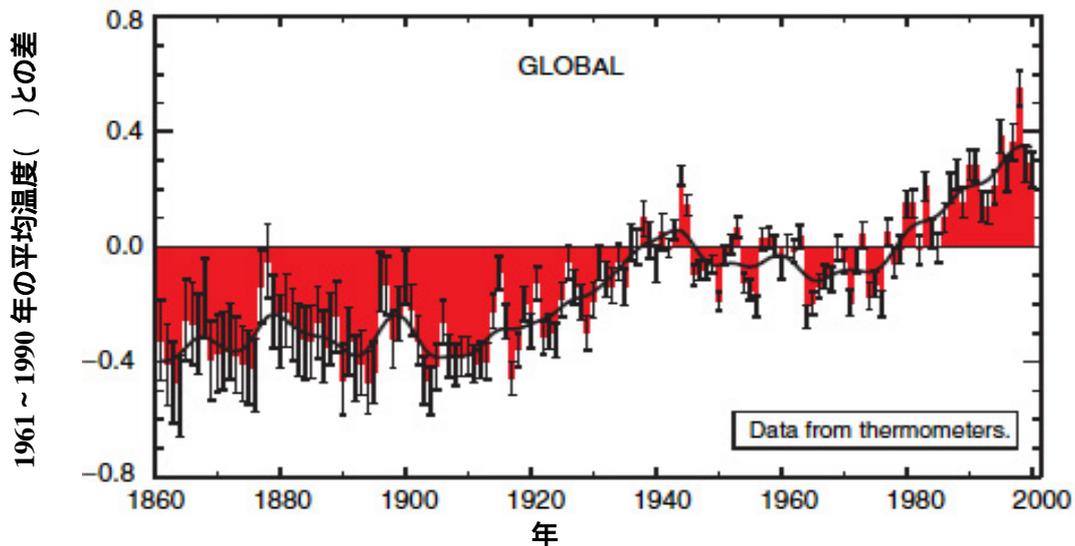


図 A2-1：過去 140 年間及び前世紀の地球表面温度の変化

注) 地球表面温度は、年毎の棒線で示されている。データの途切れ、計器の測定誤差や不確実性、海面温度データ測定における補正の不確実性、及び陸上の都市化、ヒートアイランド現象に関する調整の不確実性のため、年毎のデータには、不確実性がある。しかし、過去 100 年間に地球の平均表面温度は、 $0.6 \pm 0.2$  上昇したと見るのが最も適切な推定である。

[IPCC第一作業部会の第3回評価報告書 第2章の図2.7cに基づく]

## 1.2 気温上昇は、過去40年間、高度8000メートルまで及んだ。

- ・ 気象観測気球による高層観測が行われ始めた1950年代後半以来、全体的な地球の温度上昇は、高度8000メートルまでの大気及び地表温度において、10年に0.1 の割合で上昇している。
- ・ 1979年に気象衛星による記録が始まって以来、気象衛星及び気象観測気球による測定は、共に、地球の高度8000メートルまでの大気平均温度は、10年ごとに $0.05 \pm 0.10$  上昇したことを示しているが、地球の平均地表温度は、10年当たり $0.15 \pm 0.05$  と大きく上昇した。温暖化の速度の違いは、統計的に有意な違いである。この違いは、主に熱帯及び亜熱帯地域で発生している。
- ・ 高度8000メートルまでの大気と地表とでは、成層圏のオゾン層破壊、大気圏の煙霧質、

エルニーニョ現象などの要素が温度変化に影響を及ぼす。したがって、短期間（たとえば20年間程度）では温度上昇の傾向に違いがあり得ると想定するのが物理的に信憑性がある。さらに、空間サンプリング技術も違いの一部を説明し得るが、こうした違いは十分に解明されてはいない。

### 1.3 積雪範囲及び凍結期間は減少した。

- ・ 気象衛星データは、1960年代後半以降、積雪範囲が約10%減少した<sup>7</sup>可能性が非常に高いことを示しており、また、地上観測によっても、20世紀を通じて、北半球の中高緯度地域の湖及び河川の年間の凍結期間が約2週間短縮した可能性が非常に高い。
- ・ 非極地地域の山岳氷河は、20世紀の間に大きく後退した。
- ・ 北半球の春および夏の海氷範囲は、1950年代以降、約10～15%減少した。北極圏の夏の終わりから秋の始めにかけての海氷の厚さは、この数十年の間に約40%減少している。

### 1.4 地球の平均海面は上昇し、海洋の熱含量は増加した。

- ・ 潮位計データは、地球の平均海面が20世紀の間に0.1から0.2m上昇したことを示している。
- ・ 地球の海洋の熱含量は、水面下温度の適切な観測ができるようになった1950年代以降、増加している。

## 2. 産業活動による温室効果ガス及び煙霧質の排出は、気候に影響を及ぼし続けている。

気候の変動は、地球の気候システムの内的変化と外的要因（自然及び人為改変の両方）の両方の結果として起こる。外的要因の気候への影響は、放射強制力（radiative forcing）<sup>6</sup>の概念を用いて比較することができる。温室効果ガスの蓄積が進むことによって生まれるものなどの正の放射強制力は、地表を暖かくし、一定の種類 of 煙霧質（微細な空中の粒子）の増加から生じ得る負の放射強制力は、地表を冷やす傾向がある。

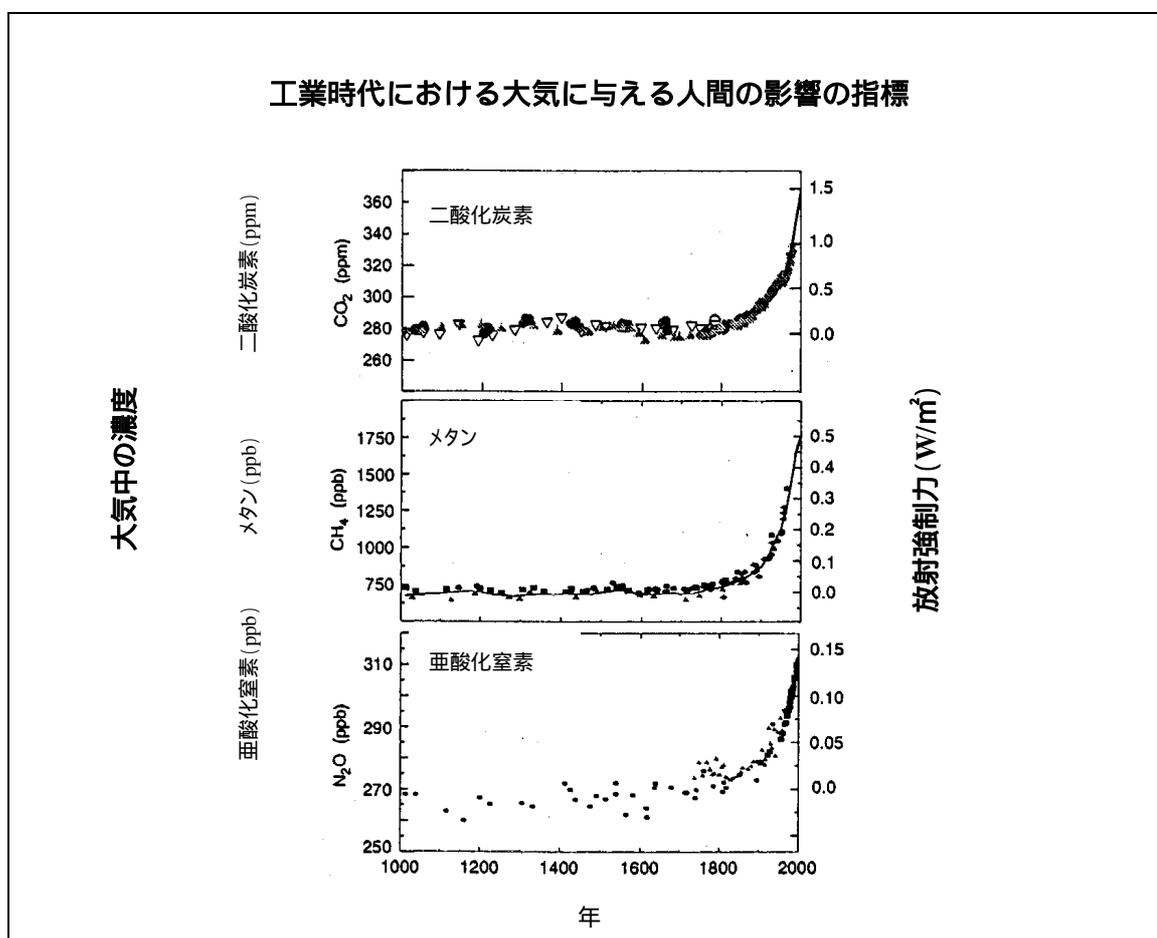
太陽エネルギーや火山の爆発などの自然要因も、放射強制力の変化を引き起こし得る。過去の気候変動を自然の変化の文脈において理解し、これからどのような気候変動が起こるかを予測するためには、これらの気候強制力因子の特徴づけ及び時間と共に起こるそれ

---

<sup>6</sup> 放射強制力は、地球の大気システムにおいて、入ってくるエネルギーと出て行くエネルギーのバランスの変化にある要因が与える影響を測る尺度で、その要因の潜在的気候変動メカニズムとしての重要性の指標である。これは、平方メートル当たりのワット数（W/m<sup>2</sup>）で表される。

らの変化 (図A2-2参照) が必要である。

図A2-2は大気成分の集積及びその他のメカニズムによる放射強制力の現時点での推定を示しており、過去1000年間の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、メタン (CH<sub>4</sub>) 及び亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) の大気中濃度の変化を示している。これらのガスが気候システムに及ぼすと推定される正の放射強制力は、右側の目盛りで示されている。これらのガスは少なくとも10年かそれ以上の間大気中に存続するため、これらは混ざり合っ、その濃度は地球全体を通じた発生源からの排出量を反映する。三つの記録はすべて、工業化時代における人為的な排出の急激かつ加速的な増加の影響を示している。



図A2-2：大気中の温室効果ガス、二酸化炭素、メタン、そして亜酸化窒素の濃度と放射強制力の変化

## 2.1 大気中の温室効果ガスの濃度、及びその放射強制力は増え続けている。

- ・ 大気中のCO<sub>2</sub>の濃度は、1750年以降、31%高くなった。現在のCO<sub>2</sub>濃度は、過去42万年間で最高であり、また、過去200万年間でも最高である可能性が高い。現在の上昇

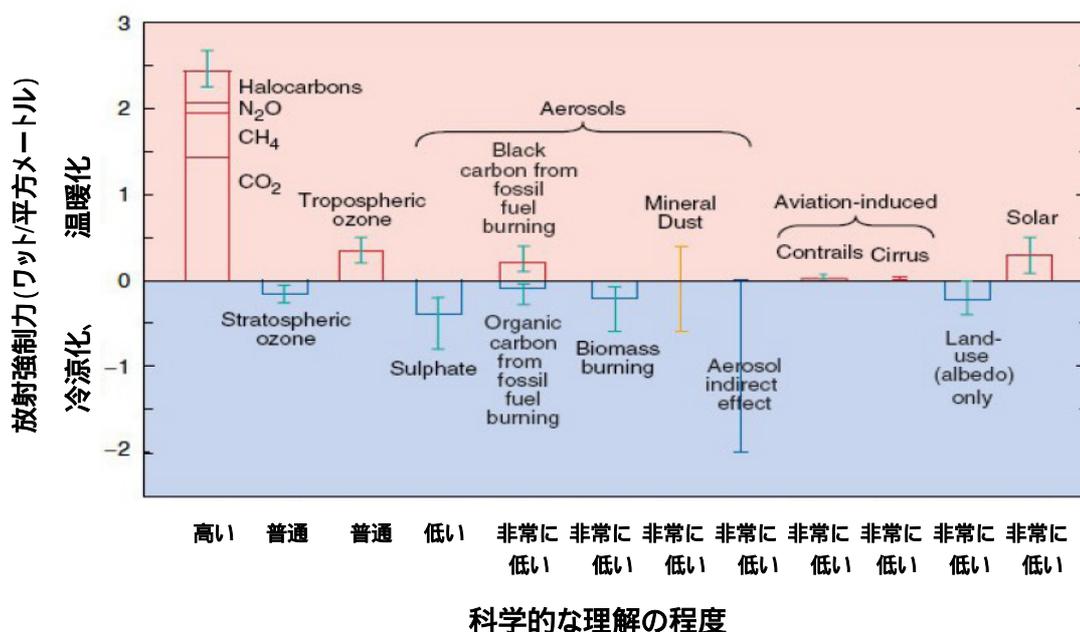
率は、少なくとも過去2万年の中では例のない早さである。

- ・ 20世紀のCO<sub>2</sub>の大気への人為的排出の4分の3は、化石燃料の燃焼によるものである。残りは主に、土地利用の変化、特に森林伐採によるものである。
- ・ 現在、海洋と陸地とが、併せてCO<sub>2</sub>の人為的排出の約半分を取り込んでいる。1990年代、陸地では、人為的CO<sub>2</sub>の取り込みは森林伐採によるCO<sub>2</sub>の放出を超えた可能性が非常に高い。
- ・ 過去20年間の大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇率は、年間約1.5ppm(0.4%)であった。1990年代、年毎の上昇率は0.9ppmから2.8ppmまで、様々であった。この変動の大部分は、陸地及び海洋によるCO<sub>2</sub>の取り込み及び放出に関連した気候の変動要因(たとえばエルニーニョの発現など)によると思われる。
- ・ 大気中のメタン(CH<sub>4</sub>)の濃度は、1750年以来、1060ppb<sup>7</sup>(151%)上昇し、今も上昇し続けている。現在のCH<sub>4</sub>濃度は過去42万年で最高である。1990年代には、1980年代に比べてCH<sub>4</sub>濃度の年毎の上昇速度は鈍化し、変動が大きくなった。現在の大気へのCH<sub>4</sub>排出の半分強は人為的なものである(たとえば、化石燃料、家畜、米作、埋め立ての利用など)さらに、一酸化炭素(CO)の排出も、最近CH<sub>4</sub>濃度を上昇させる原因として確認された。
- ・ 亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)の大気中濃度は、1750年以来、46ppb(17%)上昇し、現在も上昇し続けている。現在のN<sub>2</sub>O濃度は少なくとも過去1000年で最高である。現在のN<sub>2</sub>Oの排出の約3分の1は、人為的なものである(たとえば、農業用地、牧畜飼育場、化学工業など)。
- ・ 1995年以降、オゾン層を破壊しかつ温室効果ガスでもあるハロカーボンガス(たとえばCFC1<sub>3</sub>、CF<sub>2</sub>C1<sub>2</sub>など)の多くは、その大気中濃度の上昇率が鈍っているかあるいは低下しているが、これはモントリオール議定書及びその改正版の規定に基づく排出削減に呼応している。それらの代替化合物(たとえばCHF<sub>2</sub>C1、CF<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>Fなど)及び一部の他の合成品(たとえばペルフルオロカーボン(PFCs)、六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)など)もやはり温室効果ガスであり、それらの濃度は現在上昇しつつある。
- ・ 1750年から2000年までの混合温室効果ガスの増加による放射強制力は、2.43W/m<sup>2</sup>と推定される。内訳は、CO<sub>2</sub>から1.46W/m<sup>2</sup>、CH<sub>4</sub>から0.48W/m<sup>2</sup>、ハロカーボンから0.34W/m<sup>2</sup>、及び

<sup>7</sup> ppm(100万分の1)またはppb(10億分の1)は、乾燥した空気中の分子総数に対する温室効果ガス分子数の割合である。たとえば、300ppmは、乾燥した空気の分子100万個当たり温室効果ガス分子が300個であることを意味する。

$\text{N}_2\text{O}$ から $0.15\text{W}/\text{m}^2$ である（図A2-3には、不確実性も示してあるので参照のこと）。

- 1979年から2000年までに観察されたオゾン層破壊は、負の放射強制力（ $-0.15\text{W}/\text{m}^2$ ）を引き起こしたと推定されている。現在のハイカーボン規制を完全に遵守すると仮定すると、ハロカーボンの正の強制力は、21世紀を通じてオゾン層が回復するにつれ、成層圏のオゾン層破壊からの負の強制力の大きさが減るにもかかわらず、減っていくと思われる。
- 対流圏のオゾン（ $\text{O}_3$ ）の総量は、主としていくつかの $\text{O}_3$ 生成ガス的人為的排出によって、1750年以来、36%増加したと推定される。これは、正の放射強制力 $0.35\text{W}/\text{m}^2$ に相当する。 $\text{O}_3$ の強制力は地域によって大きく異なり、 $\text{CO}_2$ のような寿命の長い温室効果ガスよりも、排出量の変化によりすばやく呼応する。



図A2-3 1750年と比較した2000年の地球平均の放射強制力

図A2-3に示されている放射強制力は、大気成分の変化、土地利用による表面反射率の変化、及び太陽の出力の変化によって変わる。太陽の変化以外は、何らかの形で人間の活動が関わっている。棒グラフはこれら強制力の寄与の推定を示しているが、その中には温暖化を促すものと冷涼化を促すものがある。散発的な火山活動による強制力は、ほんの数年持続するに過ぎない負の強制力を生むが、これは考慮されていない。表示されている煙霧質の間接的影響というのは、雲の粒子の大きさや数への影響である。航空の温室効果ガスへの影響は、個々の棒に表されている長方形の棒の近辺にある垂直の線は、推定の範囲を

示しているが、これは強制力の公表値と物理的理解の普及によって導かれる。一部の強制力は頼りもずっと大きな確実性を持っている。長方形のない垂直線は、不確実性が大きいために最上の推定をすることができない強制力を表している。

各強制力の全体的な科学的理解レベルは、表示のとおり、大きく異なる。CO<sub>2</sub>のように、いくつかの放射強制力の要因は地球規模で混ざり合っており、それによって地球の熱バランスが攪乱される。また、煙霧質のように、その空間的分布のために局地的な特性が強い攪乱要因もある。こうした理由及びその他の理由により、正と負の棒の単純な和が気候システムの実質的影響を表すことは期待できない。この評価報告書のシミュレーション（たとえば図A2-4）は、これらの攪乱の推定される実質的影響は1750年以来地球の気候を温暖化させてきたことを示している。

## 2.2 負の放射強制力を生み出す大部分の煙霧質の寿命は短い

- ・ 人為的煙霧質の主な発生源は、化石燃料とバイオマスの燃焼に伴い排出される煙霧質である。これらの発生源はまた、大気の質の低下にも関係している。
- ・ SAR以降、異なった煙霧質の直接放射強制力の算定に大きな改善が見られた。煙霧質の直接放射強制力は、硫黄については  $-0.4\text{W/m}^2$ 、バイオマス燃焼については  $-0.2\text{W/m}^2$ 、化石燃料有機体炭素については  $-0.1\text{W/m}^2$ 、及び化石燃料から生ずるブラックカーボンについては  $+0.2\text{W/m}^2$  と推定される。煙霧質による温度変化はその排出に素早く反応する。
- ・ 煙霧質は、その直接放射強制力以外にも、雲に対する影響を通じて間接的な放射強制力を持つ。これは負の間接的な影響であるが、その大きさについては非常に不確実である。

## 2.3 過去1世紀、自然の要因は放射強制力の変化にあまり寄与していない。

- ・ 1750年以来、太陽から受ける活動の変化による放射強制力の変化は、約  $+0.3\text{W/m}^2$  と推定され、そのほとんどは20世紀前半に起きた。1970年代後半以降、11年の太陽周期による変動を衛星の観測機器が観測してきた。太陽活動の気候へおよぼす影響のメカニズムが提案されたが、現在のところ理論的に明らかにされたとするには至っていない。
- ・ 火山の爆発から生ずる成層圏の煙霧質は、負の強制力につながり、数年間滞留する。
- ・ 二つの大きな自然の要因（太陽活動の変化と火山の煙霧質）が結びついて放射強制力に与える影響は、20年、そして恐らくは40年に亘って、負であると推定される。

### 3. 気象モデルの検証

気象モデルには局地的気候変動やそのフィードバックの影響の詳細な推定を可能にする複雑な物理学に基づいたモデルが必要である。しかし実用可能なモデルは、気候のあらゆる局面をシミュレートすることはできない。たとえば、1979年以来観察されている地表と対流圏の温度の違いに見られる傾向を十分に説明することはできていない。それでも、将来の気候の予測する機能の信頼性は、検証に用いられた時間および空間の範囲にわたって検証されたことにより向上した。

- ・ 水蒸気、海氷力学、海洋中の熱移動など、気候プロセス及びそれらを気候モデルに組み込むことにより全体のバランスは改善された。
- ・ 最近のモデルは、従来のモデルで使われていた海洋と大気との界面における熱の授受に関する非物理的な調整をする必要なしに、現在の気候の十分なシミュレーションができる。
- ・ 自然及び人為的な放射強制力の推定を含むシミュレーションは、20世紀を通じて地球表面温度の実際のマクロな変化を再現することができた（図4）。しかし、それ以外のいくつかのプロセス及び強制力からの寄与はモデルに含まれていないかもしれない。それでも、モデルと実際の観察とは良く一致しており、これは、温室効果ガス排出シナリオに基づいた今後数十年にわたる予想温暖化率について、信頼できる推定値を得るために使用することができる。
- ・ エルニーニョ、モンスーン現象及び北大西洋変動（North Atlantic Oscillation）、ならびに一定期間の過去の現象にかかるシミュレーションの結果はいくつかの局面で改善された。

#### 3.1 過去50年間の温暖化のほとんどは産業活動が原因である

SARは「自然の放射強制力に起因する気候変動を観測されたデータ（証拠）から差し引きすると、産業活動が地球の気候に及ぼした影響が明らかにされる」としている。気候の自然の変化の中に産業活動に起因する変化の兆候が現れつつあると指摘している。SAR以降、特に、異なる外的要因を識別し、その気候への影響の大きさを測ることにより、モデルの不確実性の減少につながる改善が見られた。SARで確認された不確実性の発生源の多くはまだある程度残っているが、新しい証拠を取り込み、モデルを改善したことにより、気候変動の予測結果の信頼性を裏付けている。

- ・ 長期にわたって綿密に調査された温度変化の記録が編集されたこと、及新しい気候変動モデルが整備された。
- ・ 過去100年間にわたる温暖化は、自然界からの受動的（内部的）変動だけによるもので

## Annex-3 エネルギー源の持つ主な課題

## 1. 原子力の課題

広島、長崎で被曝した多くの人々の惨状は、放射線被曝の恐ろしさを人々の心に焼き付け、放射線アレルギー障害を起している。加えて、多量の放射性物質を撒き散らしたチェルノブイリ原子力発電所の事故、そして JCO の臨界事故と東電問題等々、一連の事故と不祥事が原子力の安全性と信頼性に懐疑心を植え付け、原子力利用に対する社会的な拒絶反応を引き起こしている。この現状認識に立ち、着実に原子力の安全性を立証し、信頼を回復して社会に受け入れられる原子力にする

ためのあらゆる努力を積み重ねる必要がある。

使用済燃料あるいは高レベル放射性廃棄物には半減期の長い放射性核種が含まれていることから、たとえ深地地層処分を完了したとしても、1 万年後、10 万年後の将来の世代が現在の放射線被曝管理と同一レベルで保たれる保証がないと、その安全性に疑問を抱いている人々は多い。

図 A3-1 は PWR で 5MWd/kg(hm) まで燃焼させた使用済燃料の放射線強度を示したものであるが、照射後約 200 年間は

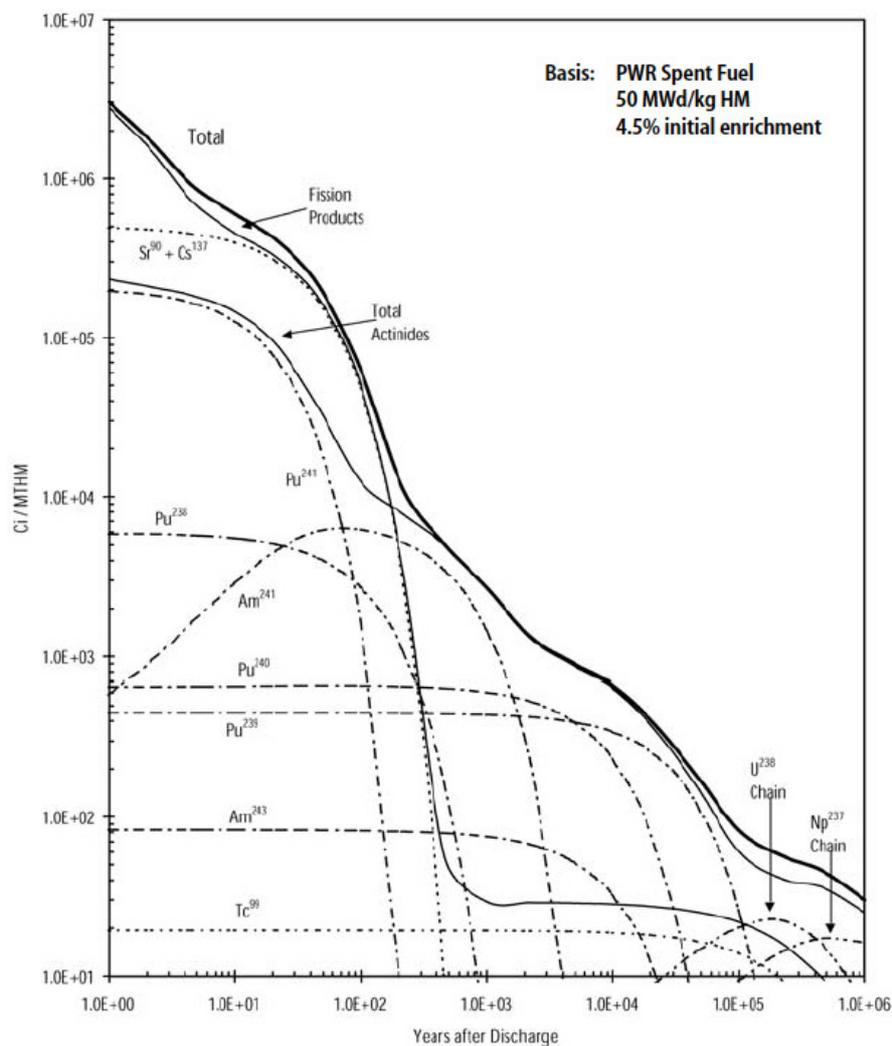


図 A3-1 使用済燃料の放射線強度 (単位: 重金属 1t 当りのカリ-数)

出典: An Interdisciplinary MIT Study: The Future of Nuclear Power

核分裂生成物 (Fission Products) から放出される放射線が強いが、それ以降になると Am-241、

Pu-240、Pu-239 等から放出される放射線が主体となり、10 万年以降はウラン、ネプチニウム等の放射線にその主体が移る。

使用済燃料の再処理廃液である高レベル放射性廃棄物の放射能毒性 (Radio-toxicity) の経年変化が図 A3-2 に示されているが、群分離を行い高レベル放射性廃棄物からマイナー・アクチニド (MA) を除去し

ていない場合、高レベル放射性廃棄物の放射能毒性がウラン鉱石のレベルにまで低下するのに 30 万年の時間が必要である。しかし、MA を除いた高レベル放射性廃棄物 (With Transmutation) の場合は約 500 年でウラン鉱石のレベルにまで下がり、1000 年も経過すれば花崗岩等のレベルにまで下がる。

### AFCI Goal - Reduce Toxicity of High-Level Nuclear Waste

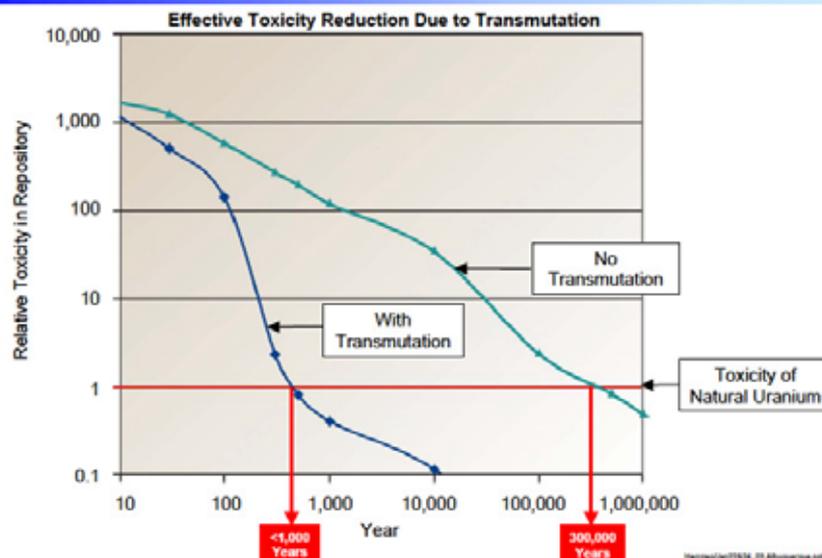


図 A3-2 高レベル放射性廃棄物の放射能毒性の経年変化  
(ウラン鉱石の放射能毒性のレベルに低下するまでの年数)

深地地層処分する使用済燃料あるいは高レベル放射性廃棄物を、将来の世代 (1000 年、1 万年、そして 10 万年後の世代) に対して、現在の放射線被曝管理規準を超える被曝が起きない状態に保つ (放射性廃棄物等安全条約の規定) ことを保証し、直接物理的・化学的な方法で証明し、説明することは難しい。特に放射線アレルギーを患っている人達に、この問題の解決策が妥当なものであるとの理解を得るのは容易ではない。しかし、確率論的安全評価手法によるリスク評価を行えば、深地地層処分された高レベル放射性廃棄物が、将来の世代に亘って、現在の放射線被曝に関する安全基準を超える被曝が起きないように安全な処理・処分の方法であるとの理解を得る道を開く可能性がある。

問題は、産業廃棄物の処理処分は受益者負担で行うとする国の基本方針である。放射性廃棄物の処理・処分を含むバックエンドにかかる問題の解決と経費負担は、受益者の責任で解決すべきであるとする国の基本政策は、電気事業者に千年はおろか 30 万年に及ぶ高レベル放射性廃棄物の管理責任を負わせることを意味し、民間企業に無限責任を負わせているに等しい。各電力会社が、今後 100 年そして 200 年後も、現在の形態で存在し続けている保証はない。まして、民間事業者が 1 万年、10 万年に及ぶ長期間に亘って管理責任を負うことはできない。かかる管

理責任を民間事業者に要請することは国が責任を回避していると思われる見方ではない。

原子力は、我が国のエネルギー政策の中で、今後も基幹電源として重要な役割を占め、核燃料サイクルはエネルギー安全保障の根幹を占めるものであると位置づけられている。電力各社は、受益者負担の原則に則り、バックエンドにかかる経費は負担する。しかし、国が定める条件を満たす態様で、深地地層処分を完了した高レベル放射性廃棄物等の管理にかかる最終責任は国が負うべきであり、民間事業者に負わせるべきものではない。国は、深地地層処分に関する条件を明確に規定し、規定に沿った処理・処分を見届け、処分完了後の管理に要する経費を徴収する。その後は、国の責任で管理する。

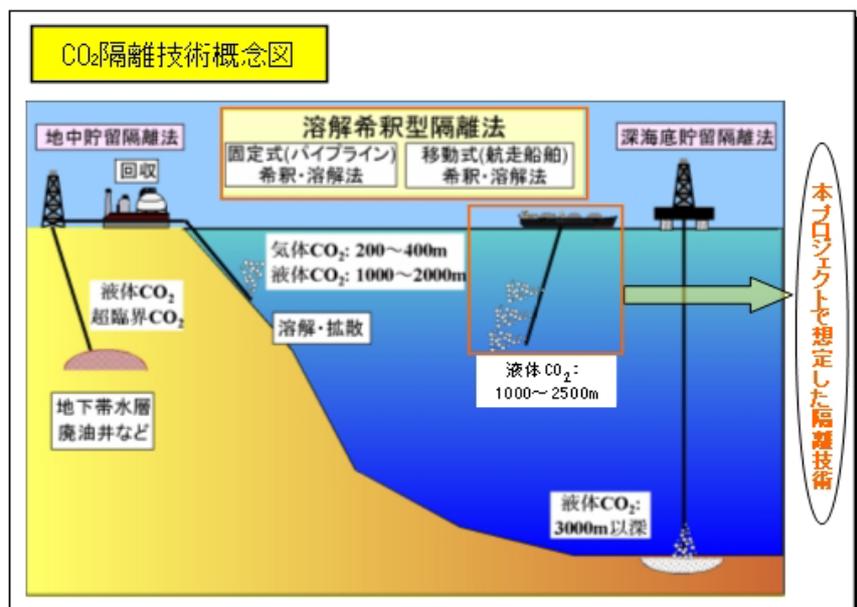
この提案は、バックエンド処理は受益者負担で処理するが、最終的な管理は国が責任を持つとするものであり、原子力の活用に民間事業者の参入を促す条件であり、電力自由化を推進する手段でもある。

## 2. 火力発電の課題（CO<sub>2</sub>の回収と隔離）

火力発電所から排出されるCO<sub>2</sub>を回収し、環境から隔離してしまえば、運転中にCO<sub>2</sub>を排出しない発電所と見なすことが出来る。かつては、日本でも石炭火力発電所等からSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>そして煤煙等を多量に放出し、公害を起していた。

しかし、現在はSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>等は火力発電所で回収され、環境から完全に隔離されている。一方、CO<sub>2</sub>は無害なものであるとして無制限に放出され続けており、地球温暖化を引き起こしている。このCO<sub>2</sub>も火力発電所で回収することは可能であるが、安全に環境から隔離する手段と方法の開発は

今後の課題である。図A3-3 は回収したCO<sub>2</sub>を環境から隔離する手法として提案され、研究開発が進められている技術の1例である。火力発電所等から排出されるCO<sub>2</sub>の回収手段と、回収したCO<sub>2</sub>を地球環境から隔離する手段の研究開発が「財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)」



図A3-3 CO<sub>2</sub>を環境から隔離するための技術の概念図

RITE のホームページより転載

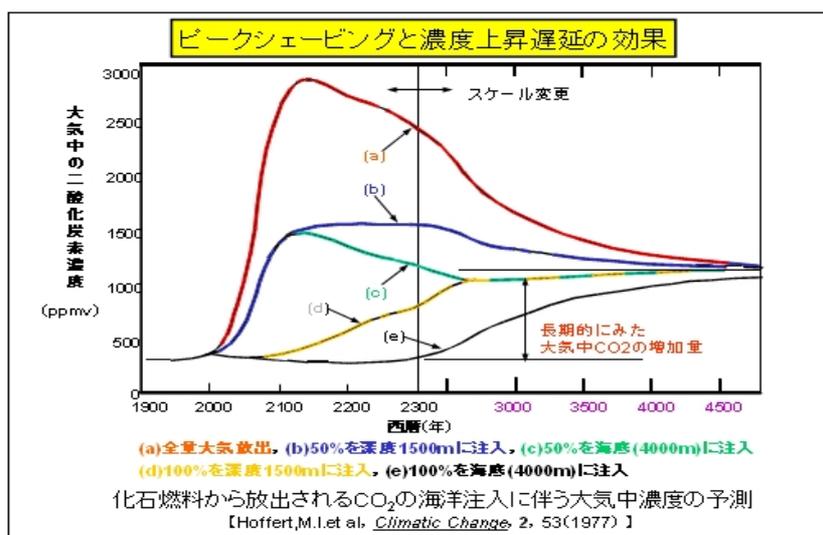
で進められている。RITEのウェブサイト<sup>1</sup>によれば、CO<sub>2</sub>回収方法に関する技術開発はかなり進み、経費の算定に必要な資料を収集する段階に来ていると思われる。ちなみに、100万kwyrの火力発電が1年間に排出するCO<sub>2</sub>は660万トン(炭素換算量では180万トン)に達し、100気圧に圧縮しても3億4000万m<sup>3</sup>となり、液化してもその容量は東京ドーム約5杯分となる。この膨大な量のCO<sub>2</sub>を環境から隔離する有効な手段は開発途上にある。

回収したCO<sub>2</sub>を環境から隔離する直接的な方法は既に生産量の低下している油田等に圧入してCO<sub>2</sub>を封じ込める方法である。しかし、国内に該当する油田が無い場合、この方法は採用できない。海洋に囲まれた国では中深度の海洋あるいは深海(以下:深海)に廃棄する方法も提案されている。

表層海水中のCO<sub>2</sub>濃度は大気中のCO<sub>2</sub>濃度と平衡状態にあるが、深海の海水は平衡状態以下の濃度に保たれている。この深海域に直接CO<sub>2</sub>を投棄し吸収させることにより多量のCO<sub>2</sub>を環境から隔離できるはずである。なぜなら、すでに海水中に溶け込んでいる全CO<sub>2</sub>量が約38,000Gtceに達していることを考慮すると、現在利用可能な化石燃料の推定埋蔵量である約4,000Gtceを全て燃焼させて生成するCO<sub>2</sub>を中深海に投棄したとしても、その増加量は10%程度に過ぎず、今後排出するCO<sub>2</sub>を中深海に投棄することにより環境から隔離することが出来る<sup>2</sup>としている。

CO<sub>2</sub>の深海投棄にも問題はあ。その第1は、たとえ水深4000mの深海に投棄したとしてもCO<sub>2</sub>は徐々に海水中を拡散し、数千年後には大気

と海洋の間で再び平衡濃度に達し、程度の差こそあれ、いずれ温暖化に寄与する。つまり、海洋に投棄されたCO<sub>2</sub>は完全に大気から隔離されたのではなく、大気中のCO<sub>2</sub>濃度上昇を遅延さ



図A3-4 海洋に注入されたCO<sub>2</sub>の大気中への拡散

RITEのホームページより転載

<sup>1</sup> 海洋隔離の有効性：財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE)

<http://www.rite.or.jp/Japanese/home-frame.html>

<sup>2</sup> Ocean Storage of CO<sub>2</sub>, IEA Greenhouse Gas R&D Programme

<http://www.ieagreen.org.uk/oceanrep.pdf>

## Annex-4 人材育成について

原子力の平和利用戦略に係る調査研究委員会では、原子力研究開発そして安全な維持管理の中心的な役割を担う研究者と技術者の人材育成体制について東京工業大学原子炉工学研究所長藤井靖彦教授にお話頂いた。ここにはその講演の要旨と要約をまとめておく。

### 講演要旨

大学の原子力教育体系が脆弱化している。

- ・ 大学院重点化政策の結果、教育体系が量子エネルギー分野に広がり、修士課程修了者と原子力関連技術者の求人数の量的なミスマッチが明らかになってきている。
- ・ 大学での原子力教育体制の維持にとって厳しいのは、原子力工学研究にフロンティアが無いと思っている専門家がいます点である。
- ・ 国立大学の法人化に伴い、予算配分の決定の流れが変化するため、学内で原子力関連の予算獲得が厳しくなると予想される。

原子力教育の体制は、福井県や茨城県のような原子力関連施設立地地域が、地域の原子力関連産業および研究機関と連携して整備していく方向に変わっていくだろう。

### 海外の情勢

- ・ OECD の「Nuclear Education and Training」において、日本のみならず OECD 諸国においても原子力教育が脆弱化しており、近い将来に人材が問題視されることが指摘されている。
- ・ 原子力教育体制が整備されているフランスでは、INSTN（フランス国立原子力科学技術機構）において原子力教育を受けた後の就職先は確保されており、卒業が合理的なキャリアパスになっている。
- ・ 原子力が不人気だったアメリカでは、2000 年を境に人気回復し、現在では原子力関連学科は人気のある学科になっている。

原子力教育システムのネットワーク組織を構築し、各事業者ができることをシェアしながら教育を行っていくべきである。基幹技術者の育成も、現場のニーズと合致したコースを目的に応じて整備し、自主努力で維持していかなくてはならない。

### 講演の要約

#### 人材育成の重要性

原子力の開発、そして原子力施設の運転を継続していくために必要な人材を育成し、確保することは今後の原子力政策を支えるための基礎であり、如何に実現していくかは重要

な課題である。しかし、大学の原子力教育体系は壊れかけている。

### **原子力研究開発における大学の位置付け**

日本の原子力研究開発は、導入した外国技術を商業化することから始まったため、当初から民間主導で進められ、大学の位置付けは限定的なものであった。原子力基本法成立時に、国の原子力開発プロジェクトに大学を入れないという方針（矢内原原則）が決まり、大学の関連研究は旧文部省が支援することになっていた。しかし、原子力の研究が進み、大学以外の研究体制（日本原子力研究所、核燃料サイクル開発機構）が整備されると、矢内原原則に従って大学に回る研究費は年々少なくなるという状況に陥った。

1980年代は核融合研究によって大学の原子力研究開発は活気付いたが、1990年代になると状況はまた厳しくなり、多くの大学の原子力関連学科が名称から「原子力」という言葉を外すようになった。

最近の状況では、実質的に矢内原原則は適用されなくなったと思われる。そのことを示す例として、電源特会の資金が大学にも流れるようになったこと、そして経済産業省の公募研究に大学も含まれたことなどが挙げられる。

### **大学院重点化とミスマッチ**

90年代以降、旧文部省の大学院重点化政策によって、旧制帝大を中心に大学院生の定員が拡大された。原子力関連学科の修士課程修了者数が年間200～300人であるのに対し、主要な原子力関連機関の必要人数は40～50人であり、量的なミスマッチは明らかである。

### **原子力工学研究のフロンティア**

教育体制を維持する者にとって最もつらいのは、今後の原子力工学研究にフロンティアがあるかと問われることである。研究者の立場からすればある。しかし、旧文部省の学術政策の方向性は旧制帝大、特に東大の動きに左右される。東大が原子力開発研究をやめているという現状を反映し、旧文部省の原子力研究開発の必要性に対する意識は厳しい。

### **国立大学法人化の影響**

法人化後の大学の経営を考えると、原子力講座の充実は採算に合わないという見方が強くなり、教育体制を維持することは難しくなってくるだろう。今までは、旧文部省の中でも大学の学術研究を担当する部局と原子力などを担当する学術機関課（旧研究機関課）があり、関連講座は機関課のサポートを受けていた。しかし、今後はそのようなサポートを受けること難しくなるかもしれない。大学に配分された予算は学長に一括して預けられ、