

原子力の革新的技術開発ロードマップ 中間取りまとめ（案）

平成20年3月18日
原子力委員会

目 次

はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・	2
1. 基本的な考え方・・・・・・・・	3
(1) 地球温暖化対策に貢献する原子力技術・・・・・・・・	3
(2) 原子力の革新的技術開発ロードマップの目的について・・・	6
2. 原子力の技術開発が目指す地球温暖化対策への貢献のあり方・	8
(1) CO ₂ 排出削減ポテンシャル・・・・・・・・	8
(2) 地球温暖化対策に貢献する原子力技術のビジョン・・・・・・・・	10
(3) システム性能要求・・・・・・・・	11
(4) ビジョンを実現できる技術システムの候補・・・・・・・・	14
3. 原子力分野における革新的技術開発のロードマップ・・・・・・・・	17
3. 1 技術開発活動の選定・・・・・・・・	17
(1) 既存軽水炉の有効活用を意志・充実していくための・・・・・・・・	17
技術開発活動	
(2) 中期的観点から取り組む技術開発活動・・・・・・・・	18
(3) 長期的観点から取り組む技術開発活動・・・・・・・・	18
(4) 原子力エネルギー供給を持続させるために必要な技術開発・・	19
(5) 革新的エネルギー技術の開発や普及を支える技術開発・・・・・・・・	19
3. 2 課題毎の原子力の革新的技術開発ロードマップ・・・・・・・・	21
4. 実現に向けた推進方策、必要な基盤整備等・・・・・・・・	22
(1) 国民との相互理解と原子力発電の着実な推進・・・・・・・・	22
(2) 他の分野、民間との連携による実用化、普及の促進・・・・・・・・	22
(3) 科学的・合理的な規制の追求、基準の整備・・・・・・・・	22
(4) 国際展開、国際協力に向けた取組・・・・・・・・	23
(5) 環境エネルギー技術革新計画の実現を加速する支援策・・	23
(6) 技術移転、知識管理と人材育成・・・・・・・・	24

はじめに

平成 19 年 6 月にドイツ・ハイリゲンダムで開催された G8 首脳会合では、気候変動問題に対処するために、2050 年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を少なくとも半減することを真剣に検討することが合意された。

国際エネルギー機関（IEA）が平成 19 年 11 月に刊行した World Energy Outlook 2007 は、将来のエネルギー需給に関していくつかのシナリオを示しているが、現行の取組のみで推移するとした標準シナリオでは、世界のエネルギー関連の CO₂ 排出量は、2005 年から 2030 年にかけて 57% 増加するとしているのに対し、一方、気候変動についての科学的な研究の収集、整理のための政府間パネル（IPCC）が、大幅な気候変動を避けるために全球平均気温の上昇幅を 2.4℃に抑えることが必要であること、そのためには、温室効果ガスの大気中濃度を 450ppm で安定化させる必要があるとしていることを踏まえて用意された検討ケース（450ppm 安定化ケース）では、二酸化炭素の排出量を 2050 年までに 2000 年より 50～85%削減しなければならないとしている。この水準の削減を経済社会に破局をもたらすことなく実現するには、全ての国において、持続可能な社会を目指す技術と社会のイノベーションを実現する取組を迅速かつ精力的に進める必要がある。

原子力委員会は、平成 17 年 10 月に、エネルギーの安定供給の確保と地球温暖化対策に貢献している原子力の役割を維持・拡大するために必要な政府と民間の取組の基本方針を「原子力政策大綱」に定めたところであるが、今般、政府が、2050 年までに温室効果ガスの排出量を半減し、究極的には温室効果ガスの排出をゼロにすることを目指して、「環境エネルギー技術革新計画」を策定するとしたことを受けて、これに資するため、地球温暖化対策に貢献する原子力技術の研究・技術開発活動に関して、目指すビジョンとその達成に資する技術候補、それらを実用に至らしめるための道程と克服すべき課題を「原子力の革新的技術開発ロードマップ」として取りまとめた。

今後、原子力関係機関の政策担当者、研究者のみならず、環境エネルギー技術の関係者が、研究開発テーマの設定や原子力の各分野で行われている研究開発との連携の模索、技術と社会のイノベーションを目指す政策の検討に際して、本ロードマップを活用することを期待したい。

1. 基本的な考え方

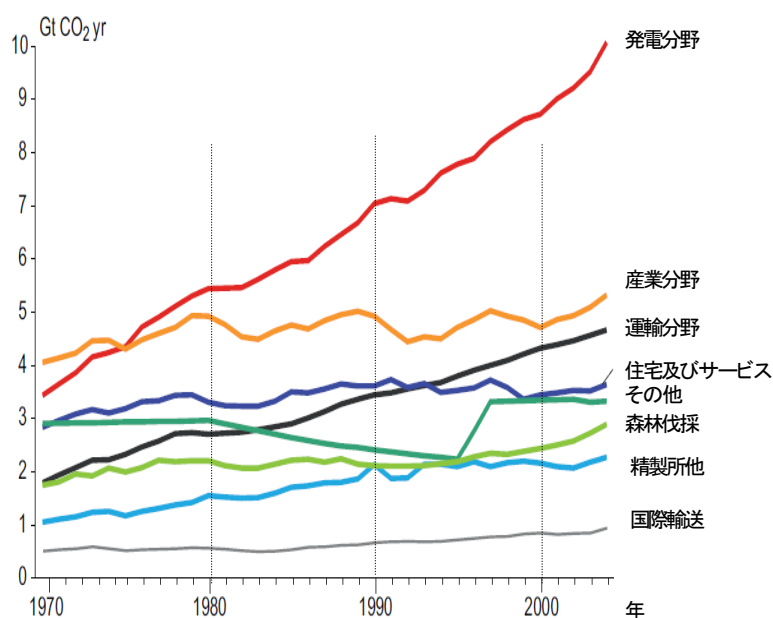
(1) 地球温暖化対策に貢献する原子力技術

人類が持続可能な発展をめざすためには、そのエネルギー供給システムを安全性、経済性に優れ、社会や環境に悪影響を与えないものにしなければならない。特に、エネルギー供給部門が工業化社会の発展に伴って温室効果ガスの排出量を年々増加させてきたことが気候変動の主要因とされ、このまま継続すれば、地球規模の気候変動により後世代の人間活動に困難がもたらされることが予見されるに至っていることを踏まえれば、今後、省エネルギー、エネルギー利用の効率化に努めることはもちろん、エネルギー供給部門においても安全性、経済性に優れていることはもとよりであるが、発生エネルギーあたりの温室効果ガス排出量が小さいエネルギー発生技術の採用を重視していくべきである。

①発電分野での対策としての原子力技術の重要性

図1-1に示される分野別CO₂排出量の推移をみると、発電部門や運輸部門における排出量の増加が著しく、発電分野は、現在、世界のCO₂排出量（直接排出）の約3割を占めている。

図1-1 分野別CO₂排出量の推移(直接排出)

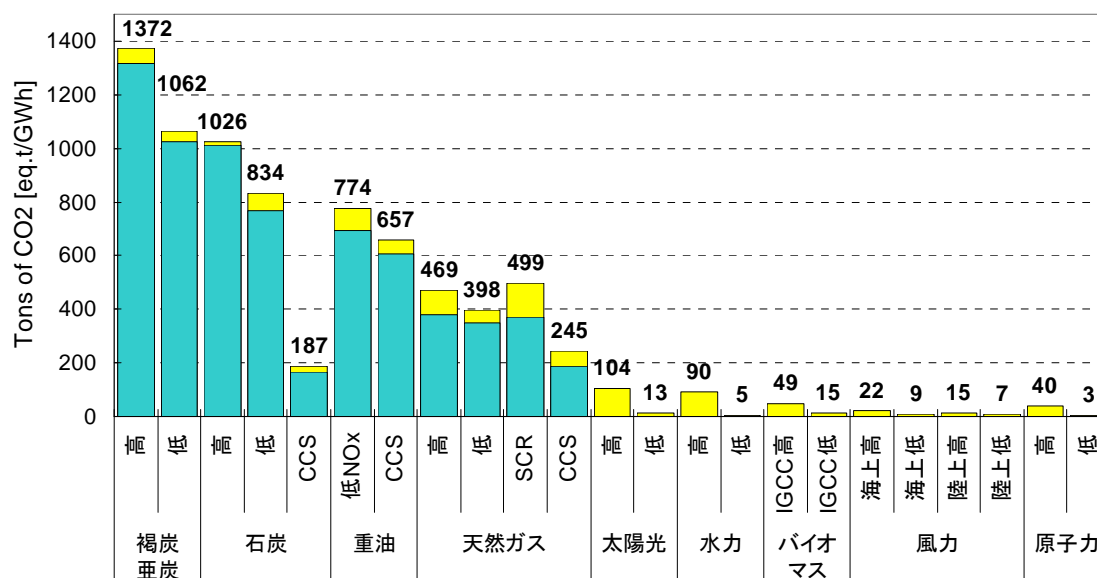


出典: IPCC第4次評価報告第3WG報告書

このことから、地球温暖化対策としては、発生される電力の効率の良い利用技術の採用を推進する一方、低炭素発電技術の導入が急務であり、かつ、将来の需要増が見込ま

れ、発電設備の建設機会が多いはずであるから、その実効性は高いと予測される。低炭素発電技術には、CCS 装置を装備した化石燃料発電技術、原子力、水力、水力以外の再生可能エネルギーに基づく発電技術があり、このうち、実用に供されているもののうちで供給規模の大きいのは、世界の発電量の 16% を担っている水力発電技術と 15% を担っている原子力発電技術である。

図1-2 各電源のCO₂排出特性



各種発電プラントの、ライフサイクル評価に基づくCO₂排出原単位算出結果 (高、低: 同カテゴリ中のプラントで、最大または最小の値)
(CCS: 炭素回収・貯留技術適用プラント)
出典) Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment, WEC, 2004より作成

②原子力発電のCO₂排出量

原子力発電の単位電力発生量当たりのCO₂排出量は、図1-2に見られるように3~40g/kWh程度であり、風力発電と同程度で、最も小さい。

現在、原子力発電の多くは、軽水炉と呼ばれる原子炉を用いて、ウランの制御された核分裂連鎖反応で熱エネルギーを持続的に発生させ、それで得た蒸気で蒸気タービンを回し、これに直結した発電機で発電を行っている。最近では、1基あたり1GW（ギガワット）以上の発電能力を有する設備が標準になりつつあり、世界では、400基以上、計約370GWの設備容量の原子力発電所が稼働している。

原子力発電の燃料は、ウラン鉱石を精錬して得た天然ウラン中のウラン235の濃度を濃縮作業により高めた濃縮ウランを成型加工したものを用いる。また、原子炉に装荷された燃料は数年間炉心に滞在したのち取り出され、使用済燃料となる。この使用済燃

料を高レベル放射性廃棄物として処分することになっている国と再処理工場でウランプルトニウムを回収し、用途のない残渣のみをガラス固化して放射性廃棄物として処分することになっている国がある。

したがって、原子炉の運転自体からはCO₂は発生しないが、原子炉の建設資材の製造、ウラン濃縮作業、再処理、施設の廃止措置とそれらにより発生する廃棄物を含む放射性廃棄物の管理にはエネルギーを要している。このため、これらのエネルギー分を原子力発電のライフサイクルにわたるCO₂発生量として計算しており、こうした工程でのエネルギー使用量により、3～40 g/kWh程度の開きがある。

③安全確保、核不拡散、核セキュリティの取組の必要性

軽水炉は、その安全確保にあたり、人は誤り、機械は故障するとしても、それらによって直ちには公衆災害が発生しない工夫を求める深層防護の考え方に基づく安全設計と運転管理によって、これまで我が国において公衆災害をもたらすことなく運転されてきている。また、経済性の面でも、将来に行われる放射性廃棄物の処理・処分に要する費用を含めて発電費を算定しているが、化石燃料による火力発電と競合できるレベルであり、最近の化石燃料調達費用の上昇により、多くの国で火力発電と比べてその優位性が評価されている。

一方、原子力エネルギーの利用にあたっては、平和利用を担保することが極めて重要であり、世界的な原子力利用の拡大にあたっては、安全確保はもちろん、核不拡散、核セキュリティへの対応が必要不可欠である。現在、「核兵器の不拡散に関する条約 (NPT)」は、非核兵器国における原子力活動が、平和の目的に限定して行われていることを IAEA が検証できるよう、その保障措置活動の下におくことを義務付けている。また、核物質の不法移転を防止する核物質防護の枠組みや、原子力関連資機材・技術について輸出国による輸出管理の取組も行われている。今後、世界的に原子力エネルギーの平和利用が拡大していくためには、こうした活動を一層強化するための国際的な取組みを強化していくことが不可欠である。

④地球温暖化対策としての原子力の積極的利用と我が国の対応

以上をまとめれば、すでに市場において技術的、経済的にも競争力を有している原子力発電は、CCS 装置を整備した化石燃料発電技術、再生可能発電技術と並んで、温室効果ガスの削減ポテンシャルが大きく、今後その供給量を増大できる現実的な可能性も大きい。したがって、安全、核不拡散、核セキュリティを確保しつつ、その導入を着実に進めることは、エネルギー安定供給に貢献するだけでなく、地球温暖化対策としても合理的である。

現在、少なからぬ数の国が、エネルギー安定供給確保及び地球温暖化対策の強化の観点から、原子力発電の規模を増大したり、新たな導入を検討していることや、前述の IEA の 450 p p m 安定化ケースにおいて、省エネルギー技術や化石燃料消費量の少ない民生技術の積極的採用と並んで、再生可能エネルギー及び原子力の積極的な利用の推進を、温室効果ガス排出量の削減目標達成の有力な手段として位置づけているのは、こうした理由によるものである。

原子力発電関連技術では、これまで世界的に原子力発電所の建設が停滞していたこともあり、建設能力のある主要なメーカーは、東芝－WH（米）、日立－GE（米）、三菱－アレバ（仏）の3連合の他、アトムプロム（露）等、数社に集約されてきている。日本は、産業技術力の面でやや先んじているが、米仏露の主要メーカーと比べ、海外市場への対応は遅れており、国際競争力の維持、発展が重要である。今後、日本の高い技術力という長所を活かすとともに、我が国の持つ実績等について、海外に積極的に発信するなど、認知度を高める等の積極的取組が必要である。

ところで、原子力発電所が既に地球温暖化対策に大きく貢献しているという事実は、この分野においてもはや研究開発が不要ということの意味しない。

第一には、高レベル放射性廃棄物の処分場の操業にいまだ着手していないことから、この安全な処分が実現できることについて人々との間で相互理解活動を進めていく根拠となる研究開発が必要であること。

第二には、社会の技術に対する要求は社会の進歩、技術の普及に応じて高度化することから、人類が将来にわたって原子力エネルギー供給技術をその規模を拡大させつつ利用していくとすれば、研究開発活動を通じて絶えず、その性能を高度化する必要があることに加えて、これまでの基礎・基盤的研究を通じて、持続可能な発展に貢献する観点から、より優れた特性を有する原子力技術を追求する研究開発活動を引き続き推進していくことや原子炉を発電以外の用途の熱源として競争力のあるものにしていくための研究開発を推進していくことには合理性があるからである。

さらに、原子力分野における基礎・基盤的な研究開発活動やそのためのインフラは、原子力以外のエネルギー供給・利用技術システムの革新のための新材料や新プロセスの着想を産み、育てることに貢献している。そこで、こうした取組を、原子力分野以外の環境・エネルギー技術開発との連携を積極的に進めつつ、引き続き充実していくことはエネルギー技術の革新に貢献できる。

（２）原子力の革新的技術開発ロードマップの目的について

この原子力の革新的技術開発ロードマップは、実現すべきシステム特性や実現が期待される材料やプロセスの革新をビジョンとして提示するとともに、それを実現するた

めに追及すべき技術課題とその実現に向けた取組を行程図（ロードマップ）に取りまとめたものである。具体的には、

①技術課題と研究開発目標等を時間軸に沿って明らかにすること

②ロードマップの実現に向けた推進方策、必要な基盤整備等について記載することを通じて、技術の実施のみならず、その実用化に向けた道筋（ロードマップ）を明らかにし、これによって、実用化に至る研究開発を効果的、効率的に実施することを目的としている。

また、市場において供給される技術シーズや時期を明らかにすることで、関係者が市場における革新を実現するための戦略を共同して開発することに役立たせる等、研究開発をより効率的に促進するための環境条件の整備に資することも期待される。

2. 原子力の技術開発が目指す地球温暖化対策への貢献のあり方

(1) CO₂排出削減ポテンシャル

現在、もしくは短・中期的なCO₂排出削減ポテンシャル

① 我が国のCO₂排出削減に係る現在の貢献

現在、わが国において稼働中の原子力発電所は発電需要のベースロードに対する供給を担って、年間、3,062 億 KWh の電気を供給している（2005 年度）が、これが同様の機能を有する火力発電所（LNG）によって供給されている場合と比較して、わが国の CO₂排出量を 1 億 27 百万トン引き下げている。これは、2005 年度のわが国の CO₂総排出量の約 1 割に相当する。

② 設備利用率の向上による貢献

わが国の原子力発電所の設備利用率は現在のところ、69.9%（2006 年度）であるが、これを欧米の原子力発電所が 90%程度で運転されていることを踏まえて、仮に、10%引き上げることができ、その分、LNG 火力発電による供給量を減らすことが出来るとすれば、年間 2500 万 t-CO₂の排出量を削減できることになる。

③ 原子力発電所の新增設による貢献

135 万 KW の原子力発電所を増設して、その能力に相当する LNG 火力発電所の運転を取りやめることができれば、1 基あたり、年間 600 万 t-CO₂の排出削減が実現する。

④ 世界におけるCO₂排出削減に係る現在の貢献

現在、世界では、370GW の発電容量（2658TWh の発電電力量）をもつ原子力発電の利用により、同じ電力量を火力発電（LNG）で代替した場合と比較して、年間 11 億トンの CO₂ 排出削減を実現している。また、中東においては、海水脱塩に火力発電所が使われているが、これを原子力発電所に置き換えることができれば、この関係に従って、CO₂排出削減が実現する。

中長期的なCO₂排出削減ポテンシャル

⑤ 2015 年のわが国の原子力発電によるCO₂排出削減ポテンシャル

2015 年のわが国の原子力発電の設備容量を 50GW とし、これが稼働率 80%で運転されるとすれば、この規模の LNG 火力を利用している場合に比べて、CO₂ 排出量が年間約 2 億トン少なくなっている。

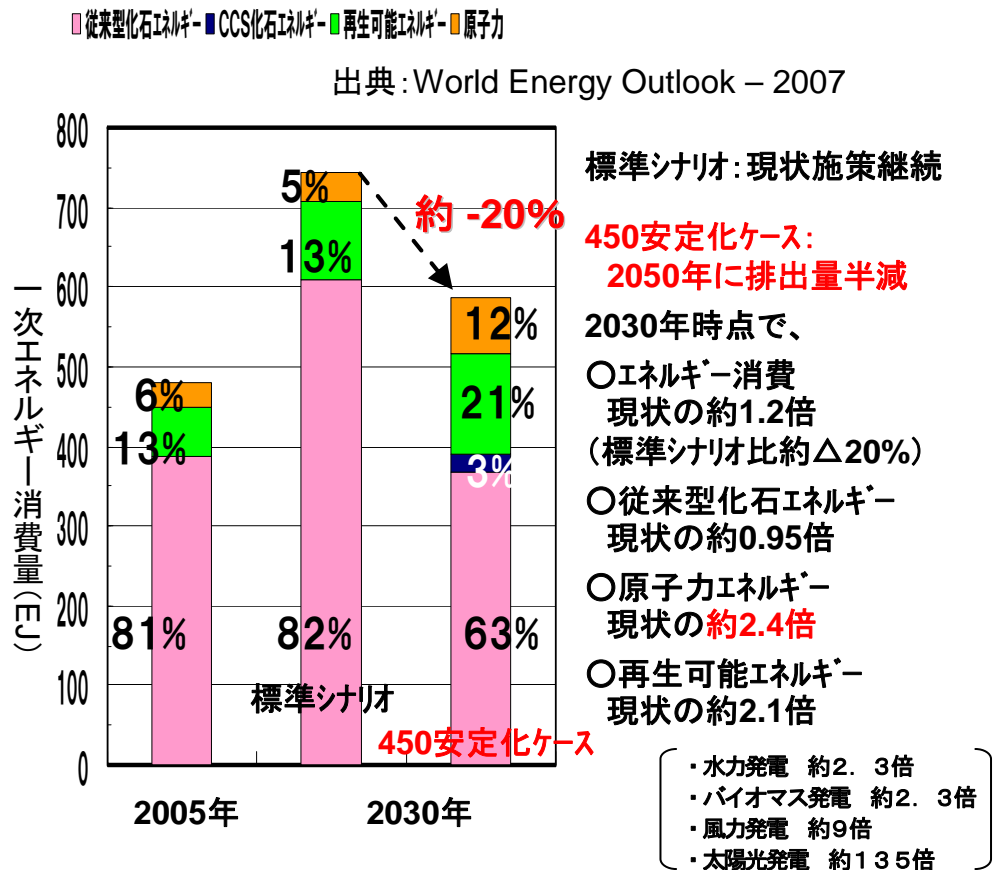
⑥ 2030 年の世界の原子力発電によるCO₂排出削減ポテンシャル

IEA の World Energy Outlook 2007 では、2030 年における世界全体の CO₂ 排出量について、標準シナリオの場合には約 420 億トンに達すること、原子力発電は

現状の1.2倍で、1次エネルギーに占める割合は約5%である。

もし、人類がIPCCによる最も低い温室効果ガス安定化レベルである450ppmを目指して地球温暖化対策に取り組むなら、たとえば、2030年の世界全体の一次エネルギー需要を現状の約1.2倍にとどめるべく省エネルギーを大胆に進めるとともに、再生可能エネルギーを現状の約2.1倍、原子力を現状の約2.4倍に増やして一次エネルギーの約12%を担うようにする必要があるとしている（450安定化ケース）。この時、想定されている原子力発電の電力量は、2030年で6,560TWhであり、これを実現した場合、火力発電（LNG）で代替した場合と比較して、年間27億トンのCO₂排出削減が可能。

図2-1 450ppm安定化ケースにおける一次エネルギー消費の試算



⑦ 輸送部門における原子力のCO₂排出削減ポテンシャル

発電部門に次いでCO₂排出量の伸びが著しいのは、運輸部門である。この部門では電池を使って石油エネルギー源を水素や電力に転換する努力が行われている。電力に転換が行われると電力需要がそれだけ増大することになるが、その増分を

原子力発電や再生可能エネルギーによる発電が担えば、化石燃料由来のCO₂排出量が削減されることとなる。

また、水素製造プロセスについては、現在の天然ガスを用いた水蒸気改質プロセスでは、水素1Nm³を生成する際に、0.9kgのCO₂を排出するが（生成過程由来のみ。投入エネルギー由来を含まず）、これを原子力発電を用いた水の電気分解や、核熱を使って水の熱分解を行って水素を生産する場合、製造過程でのCO₂排出量をゼロにすることができる。

ただし、燃料電池のライフサイクルにおけるCO₂排出量や輸送部門における新技術の普及対策など、輸送部門で実現できるCO₂排出量の削減ポテンシャルについては、総合的な取り組みの議論の中で、述べられるべきものとする。

（２）地球温暖化対策に貢献する原子力のビジョン

地球温暖化対策に貢献する原子力技術の姿については、原子力委員会が策定した原子力政策大綱に多くが語られている。原子力政策大綱は、原子力発電については、エネルギー安定供給の確保及び地球温暖化対策に取り組むことの重要性に鑑みれば、2030年以後も我が国の総発電電力量の3割から4割程度か、それ以上の供給割合を担うことを目指すべきとしている。そして、そのための取り組みを、

第1には現在、すでに、こうした取り組みに貢献している既存の原子力発電施設の安全、安定運転に努め、これをより効果的かつ効率的に利用するための工夫を行うこと、

第2に既存技術システムに代わる実用原子力発電技術を準備して交代、市場拡大に備えること、

第3に持続可能な発展を目指す社会において一段と大きな役割を果たし得るような性能を有する革新的原子力エネルギー技術の研究開発を進めること、
が適切として、それぞれの取り組みを短期、中期、長期の取り組みとして示している。

また、原子力科学技術は、原子炉によるシリコンドーピングのように他のエネルギー技術の実現や量子ビームの原子分子レベルの診断能力を生かした研究開発の進展を通じてエネルギー技術革新にも貢献してきたし、これからも貢献できるので、原子力政策大綱では、原子力科学技術に係る基礎・基盤研究の推進も重要課題としている。

以上の観点を踏まえて、原子力の技術開発が目指すべきところ、すなわち、ビジョンは以下のように整理できる。

- ① 既存の技術である軽水炉による原子力発電技術が、事実上温室効果ガスを発生しない発電技術として、社会に受容されつつ、より効果的かつ効率的に地球温暖化対策に貢献していること

- ② 拡大する電力需要や原子力発電所の取り換え需要に応じて次世代軽水炉技術が国際的にも地球温暖化対策に貢献していること
- ③ 持続可能な発展を目指す社会において、革新的原子力エネルギー供給システムが一段と大きな貢献をなしていること
- ④ この②、③の段階においては、原子力エネルギー供給技術が熱供給技術としても海水脱塩、水素製造等の熱需要に応えていること
- ⑤ 原子力科学技術がエネルギー産業の技術インフラやエネルギー技術革新インフラの一部として、原子力以外のエネルギー技術の供給や革新に貢献していること、である。

(3) システム性能要求

原子力技術システムがこのような貢献を行うためには、その性能が社会に受け入れられるところであり続けることができるのみならず、社会がより受け入れやすいもの、さらには、価値観が今とは異なるかもしれない将来社会においても受け入れられるものでなければならない。こうした観点から、発電技術及び熱供給技術に要求される性能目標を以下に示す。

① 安全性・信頼性

1) 安全性：

原子炉施設の安全性に対する要求については、チェルノブイリ事故が原子力発電に対する公衆の不安感の増幅をもたらし、一部の国が原子力発電から撤退したことを踏まえて、公衆災害の発生可能性が十分小さいことを明示することの重要性が議論され、そのめやすとして定性的及び定量的安全目標案が用意されるようになっていく。

また、阪神淡路大震災以来、地震学の知見が飛躍的に増大していることから、既存施設について、現在、新しい耐震設計審査指針など、新知見を踏まえた耐震安全性の確認が求められている。さらに、地震学の知見の増大は当分止まるところがないこと、地球温暖化に伴って自然現象の激しさが増大していく傾向にあるから、自然の脅威に関する新知見を含む様々な新知見に照らして規格基準を見直したり、既存施設の安全性を定期的に見直す定期安全レビューが重要視されている。

なお、既存の原子炉施設は、人は誤り、機械は故障するものとして、しかもなお公衆災害の発生に至る可能性を十分小さくするために深層防護の考え方を採用している。したがって、人の誤り、設備の故障が発生しても、公衆安全が損なわれるまでには十分な防御機能が残っている。しかしながら、こうした誤りや故障の発生の報に人々が不安を述べる現実がある。このため、この事実について相互理解活動を

行うことが第一義的には重要であるが、こうした誤りや故障の発生頻度が小さいことを安全要求の一部に掲げることもある。

また、点検・保守頻度を高くしなければならない動的機器に対する依存性を減らしたり、自己制御性やフェイルセーフ性を高くしたり、炉内の放射能インベントリを減らしたりして故障や失敗が事故に至る確率や潜在する事故の重大性を軽減する固有の安全特性を強化するということがあるが、これも効果的な安全確保方策と考えられている。

将来の施設の安全性のあり方についてしばしば言及されるのは、例えば、第1には、公衆災害の発生するような重大な事故が絶対に発生しないということとはできないにしても、そうした事態に至るには起因事象が発生してから長い時間を経てからであるようなシステムとすること、第2には、航空機によるテロを含む不法行為によっても公衆災害に至る可能性を十分低くする核セキュリティ、第3には従業員被曝が一層小さいことである。

ロ) 信頼性：

原子炉施設の信頼性に対する要求は、設備利用率、緊急停止の発生頻度、運転開始後燃料交換や設備の検査のために運転を停止するまでの期間の長さ、燃料交換や設備の検査のために運転を停止している期間の長さ、さらには設備の寿命などであらわされる。これらについては、既存施設の運転管理についても将来の市場に向けた施設の設計においても、既存施設の最良値を確実に実現できることを要求に掲げるのが一般的である。

なお、設備の寿命については、最近、既存の軽水炉について、これを80年とするために必要な研究開発課題の議論が開始されており、次世代炉に対する要求として、この数字を掲げることもある。

② 持続可能性

原子力技術システムについて上に述べたビジョンを実現できるためには、これが世界各地で、しかも長期にわたって持続的に利用可能でなければならない。この条件としては、廃棄物処分場の確保可能性、燃料の確保可能性、核拡散抵抗性が、主要な要件となる。

イ) 放射性廃棄物処分場の確保可能性：

原子力施設の運転や廃止に伴って固体状の放射性廃棄物が発生する。これらは、できるだけ減容し、安定化処理した上で、地下に埋設処分される。高レベル放射性廃棄物の場合には地下数百メートルに処分されるが、これが発熱体であるので、この処分場の所要面積は処分体の発熱量に依存する。そこで、将来において、そこかしこで原子力発電が大規模に行われる場合には、この廃棄物の発熱密度を低下させ

ることにより、処分場の開設頻度を大きくしないで済むことになる。これは発熱に寄与するアクチノイド元素や核分裂生成物をなるべく廃棄物に入れないことによって達成可能である。

ロ) 燃料の確保可能性：

炉心に増殖特性を付与して、ウラン資源の利用率を高めることによって発電あたりの核燃料物質の消費量を小さくすることで高めることが出来る。また、ウラン鉱石以外にもウランを含む自然物があるので、これからウランを採取することにより、利用可能なウランを多くすることが出来る。さらにはトリウム資源を利用することもこの可能性の増大に寄与する。

ハ) 核拡散抵抗性：

原子炉によるエネルギー供給を利用する国が増えて、機微な技術や物質を扱う原子力施設が世界各地に分散して多数設置されるようになると、核拡散リスクは増大すると考える人が多い。そこで、国際的な原子力の持続的利用に対応した技術特性としては、核兵器につながる機微な技術や物質を扱う施設の数が増えないようにするか、個々の施設の核拡散抵抗性を高めていくが必要になる。

③ 経済性

エネルギー源の経済性の第一の指標は KWh あたりの発電費用や Kcal あたりの発生費用といった単位エネルギー量の生産コストである。これは資本費と燃料費等から構成され、資本費は設備の建設費とこれを調達する費用（金利）から構成される。原子力技術の利用が進むためには、他のエネルギー供給技術と比べてコスト・投資リスクを低減させるなど、経済性で競争力を持つことが重要である。

石油危機以降、欧米で原子力発電所が建設されなかった理由は、スリーマイルアイランド原子力発電所事故やチェルノブイリ事故が示した重大な原子炉事故の発生の影響にもよるが、原子力発電所の安全対策の充実が求められて建設費が上昇した上に、建設に要する期間が長期化して資金調達費用が増大し、事業リスクが大きくなったのに対して、天然ガスや石炭による火力発電においては、資源採取技術や輸送技術の進歩により燃料費が安定して、世界の多くの地域で原子力発電に比較して安価な電気を供給できたからである。

この化石燃料による火力発電が経済的優位性を享受してきた時代は、最近の化石燃料価格の急速な上昇と炭素税や排出権価格の登場が予測されるに至ってようやく黄昏を迎えようとしているが、原子力発電や原子炉熱供給は世界の広い地域で化石燃料発電や化石燃料による熱供給と経済的に太刀打ちできない限り、大量に導入されることにはならないので、このことを目標に掲げるべきである。そのためには、設計や工法の標準化や工場組み立て作業の増加により建設期間を短縮する等、機能を維持しつつ

効率化を進め、建設費を低減することが重要である。

④ 立地制約

原子炉は、現行の安全審査指針では、その中心からある距離の範囲内は非居住区域とすることが求められている。また、わが国では原子炉施設については耐震安全の観点から、十分な支持性能を持つ地盤上に設置することが要求されている。また、発電機を回転するのに蒸気タービンを使うために、蒸気タービンの下流にある復水器で蒸気を水に戻し、真空を確保するため、これを冷却する低温源が必要であり、河川水や空気が使われることもあるが、わが国では、原子力発電所を海岸に立地して、これに海水を使用している。

今後、原子力発電や原子炉熱供給が多くの地域で普及していくためには、立地制約の少ないことが重要であり、この点で、立地条件に応じて、耐震安全の観点からは免震構造を採用すること、モジュラー化して非居住区域を小さくすること、大陸の内部においても建設できるように冷却塔技術を高度化することなどの工夫を採用して、立地制約を軽減していくことが重要になる。

特に、小型炉については、年間製造基数を多くしないと経済性を確保できないから、このような点に配慮して立地制約の低い標準設計を確立することが重要となる。

(4) ビジョンを実現できる技術システムの候補

原子力エネルギー供給技術システムは、エネルギー発生・変換技術領域、燃料サイクル技術領域、放射性廃棄物管理技術領域、安全確保・核不拡散抵抗性確保技術領域から構成される。

このうち、エネルギー発生技術としては、核分裂原子炉、加速器駆動原子炉、核融合原子炉があり、エネルギー転換技術としては水蒸気タービン技術が選択されている。ただし、ナトリウム冷却炉では水と異なる冷却材を用いたランキンサイクルが、高温ガス炉ではガスタービン技術も研究開発対象になっている。

核分裂原子炉、加速器駆動原子炉の燃料供給技術としては、核燃料物質を採掘して燃料に成型加工する技術、核融合のそれとしては初装荷用トリチウムの生産技術及びリチウムを採取して“燃料”に加工する技術がある。

核燃料サイクル技術は、エネルギー発生部門から取り出された使用済燃料から燃料物質を回収する技術、その過程及びエネルギー発生施設の運転や関連施設の廃止により排出される放射性廃棄物の管理技術からなる。

安全確保・核不拡散抵抗性確保技術は、これらの技術と密接に関連し、同時に達成されるべきものであるが、性能目標の変化に対応して同一のエネルギー供給技術に関しても高度化されていかなければならないものである。

これらの技術には様々な候補があり、それらを組み合わせて一つのエネルギー供給技術システムができるから、それらについてビジョンの実現する観点から定まる時期に所要性能が実現できる可能性を見定めることが必要になる。その際には、(3)に示した所要性能に係る要求水準は、原子力エネルギー供給技術の利用状況や競合技術の性能に応じて変化することにも留意しなくてはならない。

以下には、こうしたことを踏まえて、(2)の各項に示したビジョンを達成する観点から検討対象と考えられる技術システムの候補について検討する。

- ① ビジョン1の達成：このための技術開発活動としては、既存の軽水炉技術、軽水炉の燃料サイクル技術、及び安全確保・核不拡散技術をこのビジョンを実現できる性能要求を満たすようにすることが考えられる。燃料サイクル技術のうち、バックエンド技術については、高レベル放射性廃棄物の処分事業は処分施設立地点の選定活動が始まったところであり、並行して技術実証のための研究開発が行われている段階にある。なお、海外で取り組みが行われている使用済燃料の直接処分技術については、調査研究の対象に位置づけている。
- ② ビジョン2の達成：このための技術開発活動としては、次世代軽水炉、軽水炉の燃料サイクル技術、及び安全確保・核不拡散技術をこのビジョンを実現できる性能要求を満たすものとすることが考えられる。
- ③ ビジョン3の達成：このための技術開発活動としては、国際共同作業で第IV世代の原子炉候補として選定した原子炉技術と燃料サイクル技術、加速器駆動炉技術とその燃料サイクル技術、核融合炉技術とその燃料サイクル技術（以上の炉技術にはエネルギー変換技術も含む）、ならびにそれぞれの安全確保・核不拡散技術をこのビジョンを実現できる性能要求を満たすものとすることが考えられる。わが国としては、第IV世代の原子炉候補のうちからはナトリウム冷却高速炉とその燃料サイクル技術を、核融合炉技術についてはトカマク型磁気閉じ込め方式を重点的に研究開発しており、その他の炉型については、優れた実用化技術候補を探索する基盤的研究の対象としている。なお、海水ウランの採取技術もまた、このビジョンの実現に有効なものへと成長する可能性がある。
- ④ ビジョン4の達成：このための技術開発活動としては、原子炉技術とその燃料サイクル技術及び安全確保・核不拡散技術を、海水脱塩事業や水素製造を含む熱利用事業において原子炉を利用するインセンティブを用意する観点から適切な性能目標を満たすようにすることが考えられる。この活動はビジョン3の活動に重なるところが多いが、水素製造については熱源が高温ガスであることを踏まえた固有技術の開発が考えられる。
- ⑤ ビジョン5の達成：このための技術開発活動としては、電力半導体用シリコンのド

ーピング施設の整備、エネルギー技術に関する技術開発活動に貢献できる量子ビームテクノロジー研究開発活動の推進などが考えられる。

以上の検討から、原子力分野は地球温暖化対策に貢献するビジョンをもっており、それを実現するために必要な性能とそれを実現することを目指して技術開発を行う技術の候補がある。それらの技術候補は以下のように整理できる。

表 2－1 原子力技術開発が目指すビジョンと技術候補の関係

原子力技術開発が目指すビジョン			既存軽水炉技術による貢献 ビジョン 1	次世代軽水炉技術による貢献 ビジョン 2	革新的原子力エネルギー技術による貢献 ビジョン 3	熱供給技術による貢献 ビジョン 4	原子力以外での貢献 ビジョン 5
技術開発を行う技術の候補	A. 原子力エネルギー供給技術の改良と革新	①軽水炉技術	○	○			
		②革新的原子炉技術			○		
	B. 核燃料サイクル技術の改良と革新	③軽水炉燃料サイクル技術	○	○			
		④革新的核燃料サイクル技術			○		
	C. 原子力エネルギー技術を持続可能にするための改良と革新	⑤安全確保・核不拡散技術	○	○	○		
		⑥原子力基盤技術	○	○	○		
	D. 原子炉の非電力利用技術の革新	⑦高温ガス炉を用いた水素製造技術				○	
	E. 革新的エネルギー技術の実用化に役立つ原子力科学技術の充実	⑧量子ビームテクノロジー					○

3. 原子力分野における革新的技術開発のロードマップ

ここでは、前章までに明らかになったビジョンを実現することに寄与することのできる可能性を有する技術候補から、

- 1) ビジョン1の実現という、直ちに成果が求められる短期の技術開発活動、
- 2) ビジョン2の実現というすでに実用化候補技術となっている技術を実際に実用技術にまで発展させて2030年頃には市場においてシェアを確保することを目指す中期的技術開発活動、
- 3) ビジョン3、4の実現という、現在実用化候補の実証を目指した取組がなされている革新的技術を2050年頃には市場に参入できるものとする技術開発活動や、現在、実用化候補技術の探索が行われている技術を21世紀後半には市場に参入できるようにすることを目指しての技術開発活動、
- 4) こうした原子炉エネルギー供給技術に共通して必要な安全確保技術、燃料サイクル技術、核不拡散技術を改良・発展させていく技術開発活動、これらの活動に共通の原子力基礎・基盤技術の開発活動、そして、
- 5) ビジョン5の実現という革新的エネルギー技術の実現に貢献する原子力科学技術の進歩を目指す技術開発活動

の各活動の対象と、ビジョンを実現するための取組みの道筋（ロードマップ）を明らかにする。なお、この取組を円滑に進めてビジョンを実現するためには、技術開発活動そのものではないが、配慮がなされるべきと考えられた事項は第4章に取りまとめることとする。

3. 1 技術開発活動の対象の選定

(1) 既存軽水炉の有効活用を維持・充実していくための技術開発活動

趣旨：現在、我が国で利用されている軽水炉は、発電過程で温室効果ガスを排出せず、大規模かつ安定に電力を供給している。したがって、この軽水炉が安全を確保しつつ、より効果的かつ効率的に電力供給を担えるように細心の注意を払いつつ改良改善を進めることは、地球環境保全とエネルギー安定供給に大きく役立つ。

取組の内容：

- a. 現行軽水炉が高い安全性、信頼性を維持していくことが出来るように、中越沖地震を踏まえた耐震安全確保、高経年化対応、燃料の高燃焼度化、検査制度の改善など、新たな知見、経験を適宜に反映したリスク管理活動を着実に推進するための基盤技術の充実を図る。

- b. 現行軽水炉がより高い設備利用率で運転したり、定格出力を上昇して運転出来るように、運転中機器検査診断技術を開発したり、リスク情報を活用した科学的・合理的な試験・検査計画の評価技術、合理的な安全規制を可能にする基礎・基盤学術の充実を図る。

効果の生まれる時期：取組は実行可能な限り迅速に進め、成果を順次現場に反映していく。

(2) 中期的観点から取組む技術開発活動

① 次世代軽水炉の技術開発

趣旨：2030年前後に見込まれる既設軽水炉の大規模な代替炉建設需要に備えるとともに、世界的な原子力回帰に伴う原子力発電所建設に対応するため、安全性、経済性、信頼性等に優れ世界標準を獲得し得る次世代軽水炉を開発し、国内外の市場に投入することにより温室効果ガス排出量削減により貢献することができる。

成果の反映時期：2030年の市場において優位性を有することを目指す

② 中小型炉の研究開発

趣旨：途上国や島嶼国等において中小規模の発電需要に対応可能なコンパクトで安全性の高い中小型炉を開発することにより、原子力発電導入国の多様なニーズに対応し、国際的な原子力の利用拡大に貢献することができる。

成果の反映時期：2030年頃に新しい市場を生み出すことを目指す

(3) 長期的観点から取組む技術開発活動

① 高速増殖炉（FBR）とその燃料サイクル技術の研究開発

趣旨：安全で信頼性の高い、FBRサイクル技術は、発電過程で温室効果ガスを排出しないという原子力発電共通の特長を有するとともに、ウラン資源の飛躍的な有効利用が可能となり、放射性廃棄物の潜在的有害度の低減に貢献でき、原子力の持続的利用に貢献することができる。

取り組みの内容と成果の反映時期：2050年頃の実用化を目指して、高速増殖原型炉「もんじゅ」の運転再開をはじめ、FBRサイクル技術を実用化するための研究開発を実施する。

② 核融合エネルギーの研究開発

趣旨：原子力発電所で用いられている核分裂エネルギーと比較して、反応が連鎖的に起こる恐れが無く安全性に優れる点、燃料が豊富で地域偏在性がない点、高レベル廃棄物が発生しない点において、より環境に優しく、持続可能なエネルギー源である。

③ 水の熱分解による水素製造技術

趣旨：高温ガス炉により温室効果ガスを排出することなく水素を製造する技術を確立し、従来の水素製造技術を置き換えることができれば、温室効果ガスの排出削減に貢献できる。

取り組みの内容：

- 1) 高温ガス炉技術の高度化
- 2) 水分解による水素製造技術

成果の反映時期：当面、HTTR 等を活用して高温ガス炉及び原子炉熱を利用した水素製造技術を開発し、2020～2030 年頃の実証を目指す。

(4) 原子力エネルギー供給を持続させるために必要な技術開発活動

① 安全確保技術

② 核燃料サイクル技術

- a. 核燃料供給に不可欠なウラン濃縮について、技術の改良・改善、最新技術の導入によって、経済性向上と大規模化を実現し相当規模の自給率を達成することで、安定的な原子力利用の基盤を強化する。
- b. 使用済燃料を再処理し、プルトニウム、ウラン等を回収し有効利用する技術の改良改善を図り、安定的な原子力利用の基盤を強化する
- c. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関して、段階的に技術の実証、安全規制基盤の充実に資する研究開発を進め、事業をスケジュールにそって推進することにより、原子力の持続的な利用の基盤を強化する。
- d. 低レベル放射性廃棄物の処理処分や原子力施設の廃止措置技術の改良改善を目指して技術開発を行って、開発により、より安全で、経済的な方法を実現して、することで、原子力の持続的な利用の基盤を強化する。

③ 原子力基礎・基盤技術

- ・核データ、原子炉設計解析ソフト、安全解析ソフトの整備、革新的材料の照射試験等の継続的实施による充実など、核工学・炉工学の研究、燃料・材料工学の研究、環境・放射線工学の研究など
- ・革新的核燃料サイクル技術の探索。例えば、
 - a. 海水等からのウラン等の有用金属を回収する技術を、技術革新により競争力のある技術とすることができれば、ウランその他有用な鉱物資源の供給を安定的に行うことができる。
 - b. 長寿命核種の分離し、短寿命化等の変換が経済的に実施できれば、放射性廃棄物処分の負担を大幅に軽減することができる。

(5) 革新的エネルギー技術の開発や普及を支える技術開発活動

趣旨：量子ビームは、材料改質や微細加工、微小試料の構造解析、軽元素や磁性体

の解析など物質・材料を原子レベルで「みる」「つくる」ことができる強力な手段であり、量子ビームテクノロジーを高度化・活用することにより、材料開発等、革新的エネルギー技術の開発にブレークスルーをもたらすことが可能である。これを用いて、燃料・太陽電池や水素貯蔵用の高機能性材料の創出など、様々な高機能の地球環境保全技術の開発に貢献している。

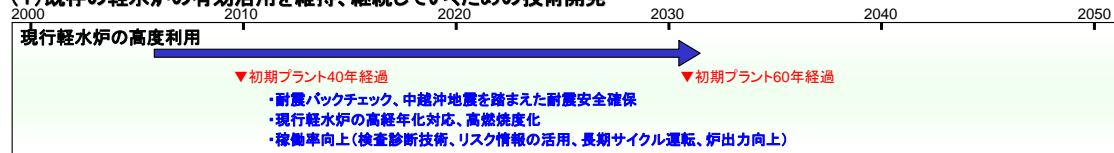
表 3-1 原子力技術開発に求められる性能要求

技術開発活動の対象	技術開発活動の観点		（１）既存軽水炉の有効活用を維持・継続していくための技術開発活動		（２）中期的観点から取り組む技術開発活動		（３）長期的観点から取り組む技術開発活動			（４）原子力エネルギー供給を持続させるために必要な技術開発活動			（５）革新的エネルギー技術の開発や普及を支える技術開発活動
	開発技術		原子力安全確保技術	①次世代軽水炉の技術開発	②中小型炉の研究開発	①高速増殖炉（FBR）とその燃料サイクル技術の開発	②核融合エネルギー	③水の熱分解による水素製造技術	①原子力安全確保技術	②核燃料サイクル技術	③原子力基礎・基盤技術	①量子ビームテクノロジーによる地球環境保全技術の開発	
システム性能要求	安全性・信頼性		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	持続可能性	処分場の確保可能性				○			○	○	○		
		燃料の確保可能性				○	○		○	○	○		
		核拡散抵抗性	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	経済性		○	○	○	○		○		○	○	○	
立地制約		○	○	○	○		○		○				

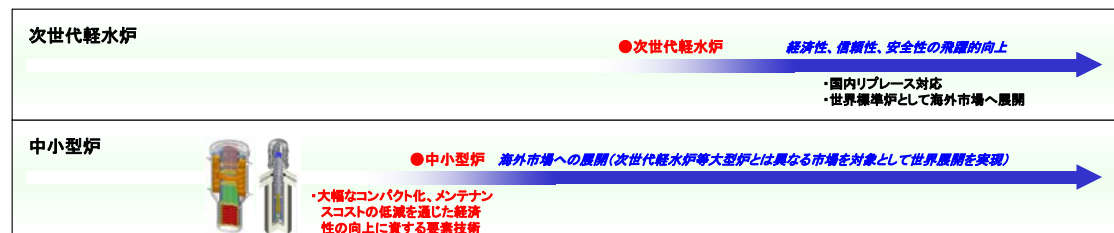
※ 各技術に求められる性能要求については、各ロードマップの中で、今後、具体化していくこととする。

3. 2 課題毎の原子力の革新的技術開発ロードマップの概要

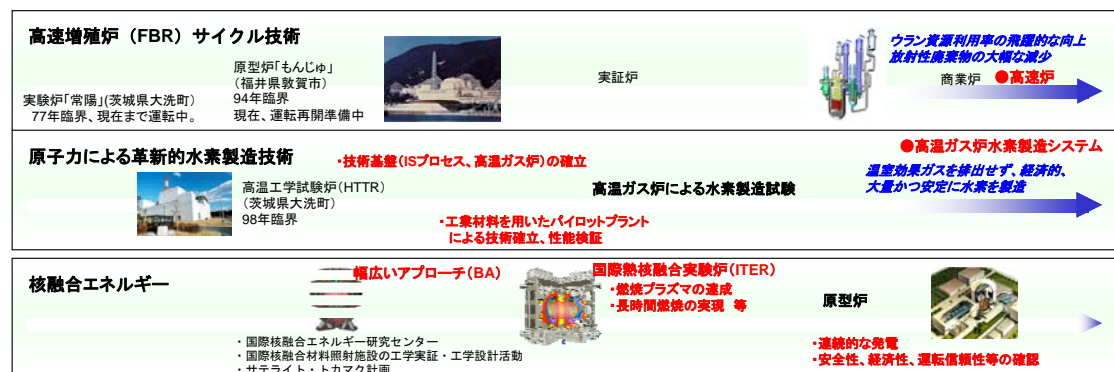
(1) 既存の軽水炉の有効活用を維持、継続していくための技術開発



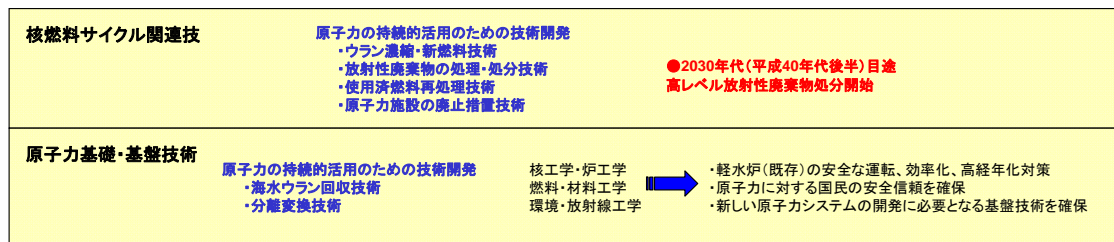
(2) 中期的観点から取り組む技術開発



(3) 長期的観点から取り組む技術開発



(4) 原子力エネルギー供給を持続させるために必要な技術開発



(5) 革新的エネルギー技術の開発や普及を支える技術開発



※ 本ロードマップは、現時点での見込みであり、その推進は、各々の段階での評価等を経て、見直されることを前提としている。

4. 実現に向けた推進方策、必要な基盤整備等

(1) 国民との相互理解活動の充実

地球温暖化対策として原子力利用を推進していくためには、原子力発電所の新增設を着実に進めていく必要がある。このためには、引き続き、原子力の安全性や信頼性について国民との相互理解に努めるとともに、地球温暖化対策としての原子力の位置付けを国民に説明し、原子力エネルギー利用の意義についての理解促進もあわせて行う必要がある。また、新たな原子力技術の利用については、技術の進展に対応した規制等の整備を行うことになるが、この内容についての国民との相互理解活動も重要である。

(2) 他の分野、民間との連携による実用化、普及の促進

原子力技術が地球温暖化対策により大きく貢献できるためには、各種のエネルギー供給技術に原子力技術が生かされるように、原子力分野以外のエネルギー技術分野との連携・共同作業を推進する必要がある。

また、原子炉は温室効果ガスを排出しない熱源として様々な産業分野において利用されるためには、そうした産業分野において使いやすい熱源にしていく工夫や、化石燃料の燃焼による熱源に適応している技術を原子炉を熱源とするように変換するのに必要な知見を提供すること、あるいは原子炉の建設・運転管理のノウハウを持たずして、この熱源を利用したいとする希望を満たす方法を案出することが原子力界に求められる。こうした希望を聞き、その実現にむけて共同作業を実施していくことは、相互裨益の観点から妥当であるばかりではなく、意見、知恵の多様性は問題解決に最も重要であるといわれていることからして、原子力技術が抱える問題解決にも有益である。

(3) 科学的・合理的な規制の追求、基準の整備

既存の原子力発電所の設備利用率向上、定格出力向上等が、現実的かつ即効性がある地球温暖化対策として強く期待されている。これを可能にするためには、そのような取組が安全性を損なわずして実施できるように、必要な工夫を生み出すとともに、それが確かに安全性を損なわないで実施できる条件である技術基準を整備して、安全規制当局がその妥当性を認め、審査・検査基準として採用するところとなるようにしなければならない。このため、産業界は学協会に専門家を結集して、利害関係者としての国民の参加を可能にした公正・公平な手続きの下でその整備を行っていくことが効果的である。なお、新たな原子力技術システムを研究開発の終了後遅滞なく導入普及できるためには、研究開発段階の進展にあわせてその一部としてそのシステムを実用に応用する際の安全基準類の開発を行い、それが時宜を得て規制基準として規制当局の採用するものとなる

ようにしていくべきである。

（４）国際展開、国際協力に向けた取組

現在、少なからぬ数の国が、地球温暖化対策の強化およびエネルギー安定供給確保の観点から、原子力発電の規模を拡大したり、新たな導入を検討したりしている。地球温暖化対策の抜本的強化が人類の課題になってきているのであるから、わが国としては、先進国として率先して温暖化対策の充実に努め、また、その手段として原子力発電を利用することが効果的で効率的であることを示していくべきである。

今後、温室効果ガスの排出量の増分は多くが発展途上国の排出するものとなっていくと予想されていることを踏まえれば、先進国は、こうした国々が温暖化対策を充実させ、そのために原子力発電を導入・拡大することを希望する場合には、それが実現できるように支援するべく、適切な国際的な協力を積極的に進めていく必要がある。

このため、有効な温暖化対策としてのコンセンサスの形成に努め、将来枠組みの議論も念頭に、クリーンデベロップメントメカニズム（CDM）、共同実施（J I）の対象に原子力を加えること、ポスト京都の類似の枠組みにおいては当初より原子力が地球温暖化対策に正しく位置づけられるように働きかけるとともに、原子力利用の前提となる、安全、核不拡散、核セキュリティを確保する体制の強化を図りつつ、原子力を導入しようとする国々の原子力利用のための基盤を整備する取組に我が国としても協力を進めていくことが必要である。

また、我が国としては、わが国原子力産業が国際展開を推進できるように、輸出に係る公的金融の活用、貿易保険の活用等を勧めるべきである。さらに、第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（G I F）、国際原子力エネルギー・パートナーシップ（G N E P）、I T E R計画等の原子力の研究開発に係る二国間、多国間の枠組みを通じて、研究開発の効果的、効率的推進を図るべきである。

さらに、IAEAを中心に、原子力を安定的に利用するための国際的な核燃料供給保証の議論も進んでおり、我が国はこれらに、主要なメンバーとして積極的に参画する必要がある。

（５）環境エネルギー技術革新計画の実現を加速する支援策

2050年までに温室効果ガスを現状の半分にし、究極的にはゼロにするという環境エネルギー技術革新計画を実施する上では、現在、国が実施している研究開発だけでなく、様々なブレークスルーを目指しての大学や研究機関における基礎的、基盤的研究の推進を重視していくとともに、技術の実証にあたっては、民間と連携して実施して、市場からのフィードバックを速やかに受け取ることが重要である。

(6) 技術移転、知識管理と人材育成

エネルギー供給技術は、国が研究開発を行うとしても、民間の活動により市場を通じて普及する。その研究開発にあっては、なるべく早い段階から市場の声を聴いて、これを反映することが重要であり、したがって、それは産学官の役割分担を踏まえつつ柔軟な実施体制で推進されることが重要である。そして、知識・技術の移転には人の移転のみならず、ノウハウの移転のために研究開発施設や設備の民間による利用も重要なことを踏まえて、知的財産を適切に管理しつつ、効果的、効率的な技術移転システム等を構築することが必要である。

また、こうした研究開発の成果として得られる技術の実用化や、これまでに得られた知識・経験を次代において積極的に活用するためには、組織内部あるいは組織間で知識・技術を体系的に管理して、円滑に継承することや、移転することが必要である。したがって、研究開発機関や研究者、技術者は、実用化に向けた努力の早い段階から産学官相互の知的連携が図られるよう研究開発活動の相互乗り入れや相互学習のためのネットワークの整備を心がけ、さらにはこれらを通じ世代を超えた知的財産管理の取組を推進していくべきである。

さらに、我が国の研究開発活動に知識の国際ネットワークの利用も有用であることに鑑み、国内外の人材の流動性の向上、研究データや関連情報の発信等のための基盤整備を進める等、多面的かつ国際的ネットワークも構築・整備していくべきである。

また、事業を進めていくためには適正な質と量の人材を確保することが不可欠であるから、原子力分野の人材の育成のあり方について総合的に検討して関係者に発信し、産業界、教育界において責任ある適切な取り組みが行われるようにすることが重要である。