

地球温暖化対策に貢献する
原子力の革新的技術開発ロードマップ
(案)

平成20年7月8日
原子力委員会

目 次

はじめに	1
1. 基本的な考え方	2
(1) 地球温暖化対策における原子力発電の位置づけ	2
(2) 地球温暖化対策の一つとしての原子力	2
(3) 「原子力の革新的技術開発ロードマップ」について	5
(参考) 原子力技術によるCO ₂ 排出の削減について	7
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	10
(1) 地球温暖化対策に貢献する原子力技術のビジョン	10
(2) ビジョンの実現に必要なシステムの性能要求	11
(3) ビジョンを実現できる技術システムの候補	14
(4) まとめ	16
3. 原子力分野における革新的技術開発のロードマップ	18
(1) 軽水炉の高度利用(短期的観点から取り組む技術開発活動)	18
(2) 中期的観点から取り組む技術開発活動	19
(3) 長期的観点から取り組む技術開発活動	20
(4) 原子力の核熱利用の実現を目指す技術開発活動	20
(5) 原子力の技術開発を持続させるために	21
必要な技術開発活動	
(6) 革新的エネルギー技術のブレークスルーの実現に	21
貢献する原子力科学技術	
4. 実現に向けた推進方策、必要な基盤整備等	24
(1) エネルギー技術の外部性の評価活動	24
(2) 国民との相互理解の充実	24
(3) 科学的・合理的な規制の追求、基準の整備	24
(4) 他の分野、民間との連携による実用化、普及の促進	24
(5) 国際展開、国際協力に向けた取組	24
(6) 国の科学インフラの充実	25
(7) 技術移転、知識管理と人材育成	25

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年間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。

また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が、昨年発行した第 4 次評価報告書では、気候変動の影響を削減し、遅らせ、回避するために達成を目指すべき温室効果ガスの大気中濃度について複数の安定化レベルを示しており、うち最も低いレベル（二酸化炭素換算濃度 445-490ppm）に大気中濃度を安定化させ、全球平均の気温上昇を産業革命以前比で 2-2.4℃に抑えるには、年々増大しつつある世界の温室効果ガス排出量を 10-15 年以内に減少に転じさせ、2050 年頃には 2000 年の排出量の半分以下にすることが必要であるとしている。

このような大きな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が迅速かつ精力的に進められる必要がある。

原子力委員会は、従来より「原子力政策大綱」（平成 17 年 10 月 原子力委員会決定）において、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は、今後ともその役割を増大させていくべきであるとの考え方を示してきている。

今般、原子力委員会では、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、研究開発に取り組むべき技術システムと技術システムに求められる性能、ビジョンの実現に向けた取組の道筋等を検討し、本報告書を取りまとめた。本報告書は、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策定された「環境エネルギー技術革新計画」（平成 20 年 5 月 19 日、総合科学技術会議）と相まって、地球温暖化対策に貢献する研究・技術開発活動の指針を示すものであり、今後、文部科学省、経済産業省等の関係府省においては、本報告書の示すところに則って取組みを行うべきである。また、原子力分野の研究者・技術者、環境エネルギー技術の関係者が、研究開発テーマの設定、各分野で行われている研究開発の連携の模索、原子力技術と社会のイノベーションを目指す施策の検討等に際して、本報告書を参考にされることを期待する。

1. 基本的な考え方

(1) 地球温暖化対策における原子力発電の位置づけ

①温室効果ガス排出量が小さいエネルギー源の必要性

人類の福祉の向上のためには、人々がエネルギーを利用できるようにすることが必要であるが、人類が持続可能な発展を目指すためには、利用できるエネルギーが安全性、経済性に優れ、社会や環境に悪影響を与えないものでなければならない。

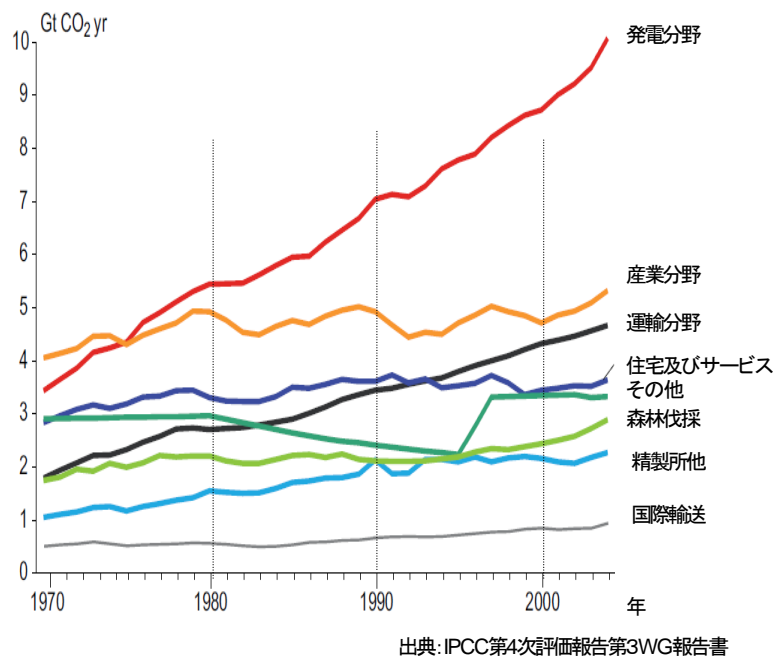
最近に至り、エネルギー供給部門が温室効果ガスの排出量を年々増加させてきたことが地球規模の気候変動の主要因と認識されるようになり、排出を抑制しなければ後世代の人間活動に困難がもたらされるような影響を伴う気候変動が生じることが予見された。このため、人類社会は、省エネルギー、エネルギー利用の効率化に努めることはもちろん、エネルギー供給部門においても発生エネルギーあたりの温室効果ガス排出量が少ない技術の採用を重視していくべきであるとされるようになった。

②発電分野における対策の重要性

図1-1に示される分野別CO₂排出量（直接排出）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大きく、全体に占める割合も大きくなってきている。特に発電分野は、排出量が最大の分野であり、現在、世界のCO₂排出量の約3割を占め、しかもその割合は着実に増加してきている。このことから、地球温暖化対策の観点から、以下の取組みが急務であるとわかる。

- 1) 電力消費を抑制するために効率の良い電力利用技術の採用を推進すること
- 2) 炭素排出量の少ない発電技術（低炭素発電技術）を導入していくこと
 - i) 既存施設を低炭素発電技術で置き換えていくこと
 - ii) 増大する電力消費を満たすために発電設備を新設する際にはできるだけ低炭素電源を導入していくこと

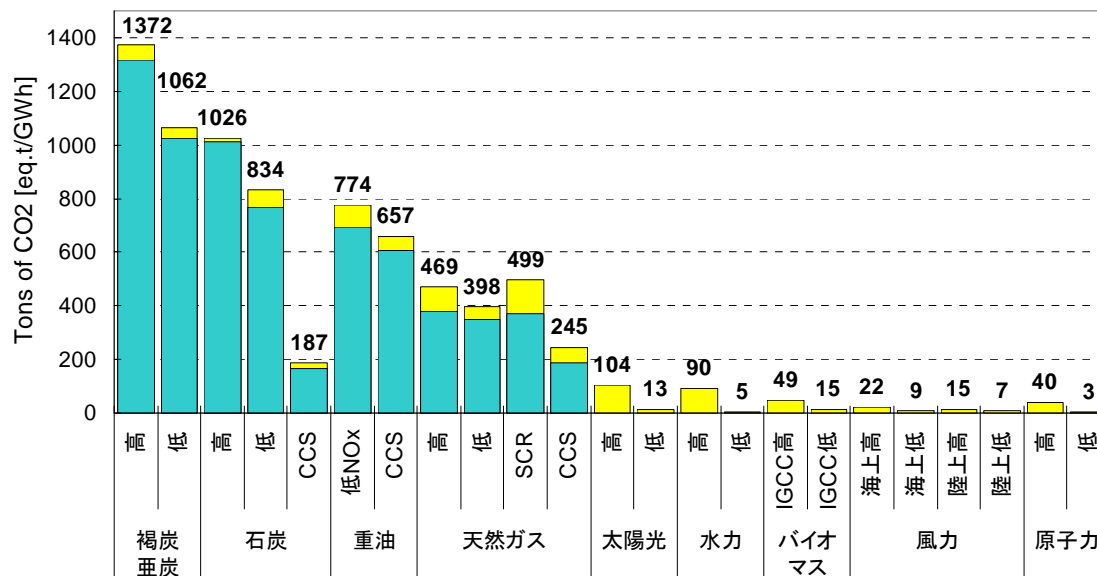
図1－1 分野別CO₂排出量(直接排出)の推移



各電源のCO₂排出特性を比較した図1－2によれば、低炭素発電技術として利用可能な技術としては、①CCS（炭素回収・貯留技術）装置を装備した化石燃料発電技術（ただし、まだ実証段階に至っていない。）、②原子力発電技術、③水力発電技術、④水力以外の再生可能エネルギーに基づく発電技術（太陽光発電技術、風力発電等）が挙げられる。この中で原子力発電は、単位電力発生量当たりのCO₂排出量が3～40g/kWh（キロワット時）程度¹であり、排出量が最も小さい部類に属する。また、原子力発電技術は世界の発電量の15%の供給を担っており、16%を担っている水力発電技術と並んで、実用に供されている低炭素発電技術の中で最も供給規模の大きいものの一つと言える。

¹ 原子炉の建設資材の製造・輸送、ウラン採掘、濃縮、再処理、廃止措置、放射性廃棄物の管理の各過程において動力源や熱源として用いた化石エネルギーからの排出量が考慮されている。

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) 地球温暖化対策の一つとしての原子力

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、原子力発電の規模の増大や新たな導入を検討している。また、前述の IEA の「450 安定化ケース」においては、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等と並んで、原子力の積極的な利用の推進が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られている。

これは、原子力発電は、将来において大規模発電を担うことを目指す他の低炭素発電技術と比較して、経済的には同程度、若しくは低コストであること、大規模な発電技術として、その導入、普及に十分な実績があることから、その導入・規模拡大により、確実に温室効果ガスの削減が可能であると考えられるからである。

しかし、全世界の電力供給のうち原子力発電が担う割合 (約 15%) は、この 10 年間程度あまり変化せず、むしろ低下傾向にある。この理由としては、第一に、急増する電力需要に対して、多くの国において発電コストが安く、建設期間の短い石炭火力や天然ガス火力が選択される傾向が強かったこと、第二には、原子力発電の安全性に対する人々の不安感を背景に、ドイツなどいくつかの国で原子力を選択肢としない政策が採用され

てきていること、第三には、核拡散や核テロへの懸念から、途上国における原子力発電所の建設や原子力発電技術の移転に先進国が慎重であったことが挙げられる。

このような事情を踏まえ、今後、原子力発電が地球温暖化対策の有力な手段として世界で広く利用されていくためには、以下の取組を着実に進めていくことが重要である。

第一は、既設の原子力施設における安全確保である。具体的には、これまでも「人は誤り、機械は故障する」ことを前提に多重の防護を用意する「深層防護」の考え方に基づく安全設計と運転管理が行われてきているが、今後とも安全確保に係る様々な活動に対して、それぞれの安全上の重要度に相応しい資源を配置して取り組む組織文化である「安全文化」の下でこれらの活動を着実に進めていくことである。

第二は、投資リスクの低減である。具体的には、初期投資の大きさ、建設期間や投資の回収期間の長さ等に伴う投資リスクの大きさが、原子力発電に対する投資へのハードルを高くしているため、標準設計の採用をはじめとする投資リスク低減策を講じることである。

第三は、平和利用の担保である。具体的には、各国の原子力活動を国際原子力機関（IAEA）の保障措置活動の下におくこと、核物質の不法移転を防止する核物質防護の枠組を整備すること、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を行うこと、これらに関する国際的な取組のあり方を点検し、必要に応じて強化していくことである。

（3）「原子力の革新的技術開発ロードマップ」について

原子力発電については、我が国産業がその技術的能力を涵養してきているからといって、もはや研究開発に対する公的投資が不要ということにはならない。その理由として、第一には、高レベル放射性廃棄物の処分を進めるためには、安全な処分が実現できることについて国民の理解を得ていくことが最大の課題であり、高レベル放射性廃棄物の処分に係る知見を充実するための研究開発が必要とされていることである。

第二には、高経年化対策に関する研究開発が必要とされていることである。既設の軽水炉については、運転時間が30年を超えたものが出てきており、安全を確保するための機器類の点検、整備等を行うことで60年は運転できると考えられているものの、安全性を確実に確保できることを確認していく観点から研究開発が必要とされている。

第三には、社会の進歩や技術の普及に伴って、技術に対する社会からの要求は高度化することから、原子力エネルギー供給技術が、将来の市場においても長期にわたる安定したエネルギー供給技術として評価されるように、その性能を高度化するための研究開発や新しい市場の獲得を可能とするような革新技術を目指す研究開発を絶えず実施していくことが必要とされることである。

そこで、本報告書においては、今後、原子力が地球温暖化対策に貢献していくためには引き続き原子力分野の研究開発が必要であるとの認識に立って、研究開発に関わる関係者の間で開発目標等についての共通認識を得るため、まず、原子力の技術開発が目指すべきビジョンを考察し、ついで、ビジョンの実現に向けた取組の道筋（ロードマップ）等を取りまとめる。各章の構成は以下のとおり。

- 1) 地球温暖化対策に貢献するために原子力の技術開発が目指すべき5つのビジョンを提示する。(第2章(1))
- 2) ビジョンの実現を担う技術システムの性能として、4つの要求事項を提示する。(第2章(2))
- 3) ビジョンの実現のために研究開発活動に取り組むべき技術システムを整理する。(第2章(3))
- 4) 各技術システムを技術開発の計画期間等で分類し、ビジョンを実現するためのロードマップを明らかにする。(第3章)
- 5) ロードマップに示す取組を推進する際の留意事項等を明らかにする。(第4章)

ロードマップ等を明らかにすることにより、関係者の連携協力によって、技術の実用化に至る研究開発が効果的、効率的に実施される可能性が高まり、また、市場に供給される技術やその時期が明らかにされることで、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が可能になることを期待するものである。

(参考) 原子力技術によるCO₂排出の削減について

(1) 原子力技術によるCO₂排出削減状況

① 我が国におけるCO₂排出削減への貢献

現在、我が国において稼働中の原子力発電所は、ベースロード電源（電源供給の基礎部分を担う電源）として年間 3,062 億 kWh の電気を供給している（2005 年度）。これを LNG 火力発電所で供給するとすれば、我が国の年間 CO₂ 排出量は、1 億 27 百万トン、約 1 割増加することになる。

② 世界におけるCO₂排出削減への貢献

現在、世界で稼働中の原子力発電所は、設備容量の合計が 3 億 7000 万 kW、年間発電量は 2 兆 6580 億 kWh となっている（2005 年）。この電力量を LNG 火力発電で供給するとすれば、世界の年間 CO₂ 排出量は 11 億トン、約 4 % 増加することになる。

(2) 短・中期のCO₂排出削減ポテンシャル

① 我が国における設備利用率の向上による貢献

我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、欧米主要国（仏を除く）では 90% 程度で運転されている。したがって、仮に、我が国の原子力発電所の設備利用率を 20% 引き上げて運転でき、その分 LNG 火力や石炭火力発電による供給を減らすことが出来れば、年間 CO₂ 排出量を 5,000 万トン程度削減できる。

② 我が国における建設中の原子力発電所の運転開始による貢献

135 万 kW の原子力発電所を増設して設備利用率 90% で運転することとし、その分、火力発電による供給を減らすことができれば、年間 CO₂ 排出量を 600 万トン程度削減できる。そこで、現在建設中及び安全審査中のプラント 5 基すべてが運転を開始し、同規模の火力発電の運転を停止することができれば、年間 CO₂ 排出量を 3,000 万トン程度削減できる。

③ 世界における設備利用率の向上による貢献

世界の原子力発電所の設備利用率の平均は、84%（2006 年）であるが、欧米主要国（仏を除く）では 90% 程度で運転されている。仮に、すべての原子力発電所の設備利用率を 90% 程度に引き上げ、その分 LNG 火力や石炭火力による発電を減らすことが出来れば、年間 CO₂ 排出量を 8,000 万トン程度削減できる。

④ 世界における建設中の原子力発電所の運転開始による貢献

135 万 kW の原子力発電所を増設して、その分 LNG 火力や石炭火力による発電を減らすことができれば、年間 600 万トン程度の CO₂ の排出削減が実現する。そこで、世界で現在建設中の 34 基、2,780 万 kW の原子力発電所が運転を開始し、その分、火力発電所の運転を停止することができれば、世界の年間 CO₂ 排出量を約 1 億 2 千万トン、0.5% 削減することができる。

(3) 中・長期の CO₂ 排出削減ポテンシャル

① 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* は、標準シナリオの場合、2030 年における世界の年間 CO₂ 排出量は約 420 億トンに達するとしている。これに対して、人類が IPCC の評価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場合には、2030 年の世界全体の一次エネルギー需要を現状の約 1.2 倍に抑え、年間 CO₂ 排出量を 230 億トンに留める必要があるとし、そのためには、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）。この場合、原子力発電による電力供給量は 2030 年で 6 兆 5600 億 kWh と標準ケースに比べて 2 倍となる。これが実現した場合、相当する電力量を火力発電（LNG）で供給した場合と比較して、年間 CO₂ 排出量を 27 億トン削減できることになる。これは、450 安定化ケースの 2030 年の年間 CO₂ 排出総量の約 12% に相当する。

なお、本年 6 月に、IEA は *Energy Technical Perspective 2008* を発表し、450 安定化ケースを 2050 年まで延長した分析結果（ETP2008 BLUE Map）を提示している。これによれば、CO₂ 排出量を 140 億トン（標準ケースと比較して 480 億トンの削減）とすることが必要であり、同時に、原子力発電による電力供給量は 2050 年で 9 兆 8570 億 kWh（現在の約 3.6 倍）になるとしている。これが実現した場合、相当する電力量を火力発電（LNG）で供給した場合と比較して、年間 CO₂ 排出量を 41 億トン削減できることになる。これは、ETP2008 BLUE Map の 2050 年の年間 CO₂ 排出量の約 29% に相当する。

② 輸送部門を通じての原子力の CO₂ 排出削減ポテンシャル

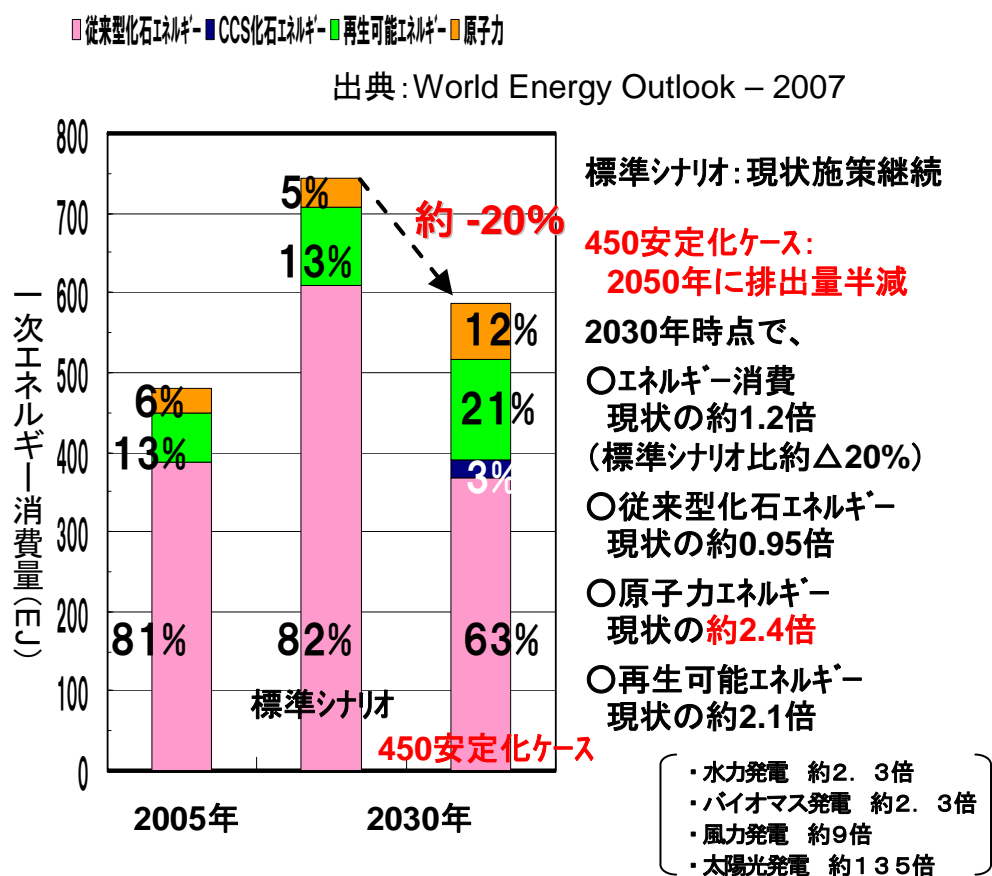
発電部門に次いで CO₂ 排出量の伸びが著しい運輸部門では、エネルギー源を石油からバイオ燃料や水素や電力という二次エネルギーに転換する努力が行われている。電力に転換が行われると電力需要がそれだけ増大することになるが、その増分を原子力発電や再生可能エネルギーによる発電が担えば、化石燃料由来の C

O₂排出量が削減されることとなる。

また、水素が主力になるとすれば、現在の天然ガスを用いた水蒸気改質プロセスでは、水素1 Nm³（ノルマル立方メートル；摂氏0度、1気圧の状態に換算した気体の単位）を生成する際に0.9kgのCO₂が排出される（生成過程由来のみ。投入エネルギー由来を含まず。）が、原子力発電を用いた水の電気分解や、核熱を使って水の高温熱分解を行って水素を生産する場合には、製造過程でのCO₂排出量をゼロにすることができる。

このため、輸送部門において水素、電気等による燃料代替が進めば、現在、50億トンに達しようとしているこの部門のCO₂排出量の削減に原子力が大きく貢献することができる。

図2－1 450 安定化ケースにおける
一次エネルギー消費の試算



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) 地球温暖化対策に貢献する原子力のビジョン

「原子力政策大綱」は、「原子力発電がエネルギー安定供給及び地球温暖化対策に引き続き有意に貢献していくことを期待するためには、2030 年以後も総発電電力量の 30～40%程度という現在の水準程度か、それ以上の供給割合を原子力発電が担うことを目指すことが適切」としており、また、以下の取組を合理的に組み合わせて並行して推進すべきとしている。

- 1) 現在使用中のシステムを安全の確保を大前提に最大限有効活用するための工夫を細部にまで配慮しつつ直実に実施していく短期的な取組
- 2) このシステムをより効率的な確保システムに置き換えたり、新しい市場を開拓できるシステムを導入する準備に取り組んでいく中期的取組
- 3) 新しい利用分野を開拓し、現在のシステムを抜本から換える技術の研究開発に創造力と挑戦心をもって取り組んでいく長期的取組

なお、原子力政策大綱で我が国の原子力利用を分野横断的に支える重要な取組として位置づけられている原子力科学技術に係る基礎的・基盤的な研究開発については、他のエネルギー技術の技術進歩を支えることにより地球温暖化対策にも貢献するものである。

以上に加えて、最近の地球温暖化対策を巡る内外の議論も踏まえ、原子力の技術開発が目指すべき地球温暖化対策に対する貢献のビジョンを以下のように整理する。

ビジョン1：既存の原子力発電技術が、温室効果ガスを発生しない発電技術として、国内外において、社会に受容されつつ、現在より一層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

ビジョン2：既存技術を発展・改良させた原子力発電技術が、既存施設の寿命到来後にも、長期的な地球温暖化対策として国内外において広範に採用されていること

ビジョン3：将来社会において、持続可能性の高い革新的原子力エネルギー供給システムが発電部門に導入され、原子力技術が脱炭素社会の実現に対する貢献を一層拡大していること

ビジョン4：原子力エネルギー供給技術が、温室効果ガスを排出しない熱源として海水脱塩、水素製造等における熱需要に役立っていること

ビジョン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、持続性の高いエネルギー技術の供給や革新に貢献

していること

(2) ビジョンの実現に必要なシステムの性能要求

(1) に示すビジョンの実現に役立つ原子力技術システムは、社会に受け入れられる性能を実現するものでなければならない。本項では、ビジョンの実現に役立つシステムに対する性能要求として、①安全性・信頼性、②持続可能性、③経済性、④立地制約の緩和の4点について、その具体的なあり方を検討する。

なお、求められるシステム性能は、それを受け入れる社会の価値観とともに変化していくこと、市場において競合する他の技術との比較で決まる面もあることから、競合技術の動向も調査しつつ、絶えず見直しを行ない、再設定していくことが必要である。

① 安全性・信頼性

1) 安全性：

安全性に係る性能要求としては、定量的安全目標、従業員の安全に対する配慮が挙げられる。

定量的安全目標：

原子炉施設の安全性に関して、チェルノブイリ事故以降、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、その目安として炉心損傷確率や大規模な放射性物質の放出する事態の発生頻度で与えられる定量的安全目標案が用意されるようになっている。こうした安全目標が社会的に受け入れられ、尊重されるように取り組んでいくことが重要である。

なお、リスク評価結果には不確かさが伴うが、不確かさを支配する一つの要因は地震リスクである。我が国においては、地震発生時の原子力施設の安全性に対する社会の関心が高いこと、平成7年の兵庫県南部地震以来、地震学及び地震工学に関する知見が飛躍的に増大していることから、こうした新知見を踏まえて、既存施設の耐震安全性の確認やリスク評価の見直しを行い、リスク評価の不確かさを減じるとともに、安全目標達成状況を再確認する作業を着実に実施することが重要である。

また、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機能や取組は、炉心損傷確率の不確かさを減じて、防災対策発動の必要性を減じることができる。安全機能等の実現において動的機器に対する依存性を減らす、自己制御性やフェイルセーフ性を高くする、炉内の放射エネルギーを減らすこと等の取組は、固有の安全特性を強化する取組とも呼ばれ、安全目標を余裕をもって達成する具体的な手法となるものである。

従業員の安全に対する配慮：

従業員の安全に対する配慮も重要である。このため、労働災害リスク評価に基づき、このリスクを十分低く設計・管理するとともに、被ばくリスクを実行可能な限り小さくすることが求められる。

ロ) 信頼性：

信頼性に係る性能要求としては、運転信頼性やトラブル発生頻度が挙げられる。

運転信頼性：

原子炉施設の信頼性に対する要求は、運転している時間の割合を示す設備利用率、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表され、このような性能について具体的に要求事項に設定することが重要である。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性能要求として掲げるのが一般的である。

なお、近年、既存の軽水炉について、設備の寿命を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いるが、次世代炉に対する性能要求として、この数字（設備寿命80年）を掲げることもある。

トラブル発生頻度：

原子炉施設は、「人は誤り、機械は故障する」ことを前提として、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が、動的機器の数を減らすなどして、こうした誤りや故障の発生頻度自体を小さくすることを目指して、これを性能要求として掲げることもある。

② 持続可能性

持続可能性に係る性能要求としては、廃棄物処分場の確保可能性、燃料の確保可能性、核拡散抵抗性が挙げられる。

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発生する放射性廃棄物は、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三百メートル以深に処分される。高レベル放射性廃棄物は発熱体であるため、この処分場の所要面積は廃棄体の発熱量に依存する。そこで、将来、原子力発電が大規模に行われる場合には、処分場の開設頻度を大きくしないで済むようにするため、この廃棄物の発熱密度を低下させることが重要になる。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となるべく廃棄物に入れないで燃料の一部に加え、原子炉で別の核種に変換することによって達成可能であるので、長期的観点からの研究

開発においては重要な性能要求として掲げられる。

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、燃料の確保可能性を高めることができる。そこで、長期的観点から実現を目指すべき技術システムに対して、この燃料確保可能性を性能要求として設定すべきである。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、ここからウランを採取することにより、利用可能なウランを増加させることができる。さらに、インドでは、トリウム資源を利用することで、燃料を確保するための研究開発も行われている。

ハ) 核拡散抵抗性：

原子力技術を持続的に利用していくためには核不拡散の確保が不可欠であり、核拡散抵抗性に係る性能要求としては、核兵器への転用の防止及び不法接近に対する防御、妨害破壊行為に対する防御が挙げられる。

核兵器への転用の防止及び不法接近に対する防御：

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。このため、十分な保障措置を実施できる体制の整備や技術開発を進めるとともに、個々の施設の核拡散抵抗性を高めていくことが必要になる。また、個々の施設においては機微な物質や枢要区域に対する不法な接近を深層防護の考え方に従って排除することが求められる。

なお、施設に存在する機微な物質を核拡散の観点から魅力の薄いものにするとは固有の抵抗性を高める観点から有効であるとして、これを性能要求として掲げることもある。

妨害破壊行為に対する防御：

9. 1.1 テロ以来、妨害破壊行為に対する防御も重視されるようになり、重要な原子力施設については設計基礎脅威を定めて、これに対する防御を用意することが求められている。

③ 経済性

良いサービスを行うため、また、市場において優位性を保つために、経済性を性能要求として掲げるべきである。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り、これは資本費（設備の建設費とこれを調達する費用（金利））と燃料費等から構成される。建設費を下げるには、kW あたりの材料重量や工数を小さくすることや、設計や工法の標準化や工場組み立て作業の増加による建設期間の短縮が重要である。特に後者は投

資リスクに影響する。

燃料サイクル費は、ウランの調達費用から燃料加工費、再処理費、廃棄物管理費などから構成される。我が国は、経済性に限定せず総合的評価に基づいて再処理を行うことを選択したが、この選択は核燃料サイクル費の低減に努めることの重要性を変えるものではないことに留意すべきである。

④ 立地制約の緩和

技術開発を通じて原子力施設を立地していく上での制約が緩和できることもあるため、これをシステム性能の要求事項として掲げることもある。

立地制約としては、例えば、現行の安全審査指針では、原子炉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、耐震安全の観点から、原子炉施設を十分な支持性能を持つ地盤に設置することが要求されている。さらに、発電機を回転するのに蒸気タービンを使うために、使用した蒸気を冷やして水に戻すための低温源が必要であり、わが国では海水を低温源に使用するために原子力発電所を海岸に立地している。

今後、原子力発電や原子炉熱供給が内外の多くの地域で普及していくためには、立地条件に応じてモジュラー化（小型標準化）して非居住区域を小さくすること、耐震安全の観点からは免震構造を採用すること、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することが経済性を確保するために肝要であることから、このような点に配慮して立地制約が少ない標準設計を確立することが重要となる。

(3) 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、燃料サイクル技術、安全確保・核拡散抵抗性確保技術から構成される。

エネルギー発生技術には核分裂原子炉、加速器駆動原子炉、核融合炉があり、エネルギー変換技術には主として水蒸気タービンが選択されるが、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、高温ガス炉ではガスタービン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サイクル技術は、核燃料物質を採掘して、濃縮し、燃料に成型加工する技術、エネルギー発生部門から取り出された使用済燃料からウランやプルトニウム、さらにはマイナーアクチニドを回収する技術、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を管理する技

術から成る。核融合炉の燃料サイクル技術には、初装荷用トリチウムの生産技術及びトリチウムを採取して“燃料”を作り出す増殖ブランケット技術がある。

安全確保・核不拡散抵抗性確保技術は、上記の技術と密接に関連してシステムを構成するが、同一のエネルギー供給技術に関するものでも、性能要求の変化に対応して高度化されていかなければならないものである。

(1) に示したビジョンを実現するためには、以上の様々な技術候補の中から、所要の性能が実現できる可能性を見定めて技術を選び、それらを組み合わせてシステムの性能の実現を目指すことが必要になる。なお、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所要の性能に係る要求水準が変化することがあるため、このような変化に適応できる技術を選ぶことも重要である。

以上を踏まえ、ビジョンを実現するために研究開発が必要とされる技術システムの候補及び重点をおくべき性能要求について検討した結果を以下に示す。

- ① ビジョン1の達成：このためには、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・核不拡散技術について、安全性・信頼性、経済性、持続可能性を改良・改善するための研究開発を実施して、効果的かつ効率的な地球温暖化対策である既存の原子力発電所の稼働率の向上や出力の増加を図るべきである。特に、燃料サイクル技術のうち再処理やMOX燃料製造は、施設の運転保守性の向上や廃止措置費用の低減を追求して経済性の向上を図る研究開発や、高レベル放射性廃棄物の処分事業の実現に向けて必要な研究開発を重点的に実施するべきである。
- ② ビジョン2の達成：このためには、安全性・信頼性、経済性、持続可能性の点で既存の軽水炉より市場性の高い次世代軽水炉技術の実用化開発を実施するとともに、高性能燃料に関する核燃料サイクル技術及び安全確保・核不拡散技術の改良・改善のための研究開発を実施するべきである。また、小さい電力系統に適した中小型原子炉を安全性・信頼性や経済性はもとより、立地制約の小さいものとして開発することも、このビジョンの実現に貢献できる。
- ③ ビジョン3の達成：このためには、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その燃料サイクル技術、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（以上の炉技術にはエネルギー変換技術も含む）並びにそれぞれの安全確保・核不拡散技術を、将来社会において持続的な発展を可能とするとの観点から求められる安全性・信頼性、経済性、持続可能性、立地制約の要求を満たすものとすることを目指して研究開発を進めるべきである。我が国としては、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（ヘリカル方式・レーザー方式）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、持続可能性の観点からこのビジョンの実現に有効な寄与をなす可能性があるので、その可能性を高めるための努力を行う価値がある。

- ④ ビジョン4の達成：このためには、海水脱塩や水素製造等の熱源として事業者が原子炉熱を利用できるような安全性・信頼性、経済性の性能要求を設定して、原子炉技術とその燃料サイクル技術及び安全確保・核不拡散技術の研究開発を進めるべきである。なお、海外では、オイルサンド・オイルシェールからの石油抽出、バイオ燃料の製造、地域の熱供給などに原子炉の核熱を利用する取組や研究開発が行われている。
- ⑤ ビジョン5の達成：このためには、電力半導体用シリコンへのドーピング施設の充実、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等が考えられる。

(4) まとめ

以上の検討を踏まえ、原子力技術開発が目指すビジョンと達成する技術について表2-1のとおり整理する。

表2-1 原子力技術開発が目指すビジョンと達成する技術

ビジョンを達成する技術		既存の軽水炉技術	軽水炉の燃料サイクル技術	原子力安全確保・核不拡散技術	次世代軽水炉技術	中小型炉	高速増殖炉とその燃料サイクル技術	核融合エネルギーの研究開発	原子力による革新的水素製造技術	量子ビームテクノロジー研究開発	原子力基礎・基盤研究
原子力技術開発が目指すビジョン	ビジョン1 既存原子力発電技術が温暖化対策に貢献	○	○	○							○
	ビジョン2 改良技術が長期的な温暖化対策に貢献		○	○	○	○					○
	ビジョン3 革新的原子力エネルギー技術による貢献			○			○	○			○
	ビジョン4 原子力エネルギー技術が熱源として貢献			○					○		○
	ビジョン5 原子力科学技術が技術革新に貢献									○	

3. 原子力分野における革新的技術開発のロードマップ

前章において整理したビジョンに係る技術開発活動は、計画期間等によって以下のとおり分類することができる。

- 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的観点からの技術開発活動
- 2) ビジョン2の実現という、既に実用化候補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観点からの技術開発活動
- 3) ビジョン3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長期的技術開発活動や、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す長期的観点からの技術開発活動
- 4) ビジョン4の実現という、多様なエネルギー源を利用できるため、実現すべき技術システムの性能要求や実現時期が競合技術の動向に左右されやすい熱源市場において、原子力の核熱利用の実現を目指す技術開発活動
- 5) こうした原子力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という、原子力の技術を持続させるために必要な技術開発活動
- 6) ビジョン5の実現という革新的エネルギー技術のブレークスルー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

これを踏まえ、以下の各節において、それぞれの技術システムについて、ビジョンを実現するための取組の道筋（ロードマップ）を明らかにする。また、それぞれの技術システムに求められる主な性能要求は、表3-1のとおりである。

（1）軽水炉の高度利用（短期的観点から取り組む技術開発活動）

①原子力安全確保技術

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、この軽水炉の安全を確保しつつ、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貢献

することができる。

取組の内容：

- a. 現行軽水炉に対して、高い安全性、信頼性を維持していくために、中越沖地震等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できるよう、運転中機器の検査診断技術の開発、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・基盤研究の充実を図る。

成果の反映時期：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 核燃料サイクル技術

趣旨：我が国は、原子力エネルギーを安定的かつ長期的に利用していくために、核燃料サイクルの推進を基本方針としている。今後、安全の確保を図りつつ、その着実な推進を図るとともに、経済性の向上を図り、我が国において核燃料サイクルの推進を意義あるものとするよう努めることが重要である。

取組の内容：

- 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について、燃料の高燃焼度化等に伴う処理方法の改良改善を図り、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について、技術開発により、より安全で、経済的な方法を実現し、廃棄物の低減や資源の再利用につなげることで、原子力の持続的な利用の基盤を強化する。

成果の反映時期：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。b.については、2015年頃までの導入を目指す。

(2) 中期的観点から取り組む技術開発活動

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需要に対応する。

取組の内容：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。

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：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。

取組の内容：途上国や島嶼国等における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。

成果の反映時期：2015年頃以降に海外市場への展開を目指す。

(3) 長期的観点から取り組む技術開発活動

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、ウラン資源の飛躍的な有効利用を可能とし、放射性廃棄物の潜在的有害度の低減に貢献でき、原子力エネルギーの持続的利用に貢献する。

取組の内容：高速増殖原型炉「もんじゅ」の運転再開をはじめ、安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性に関する開発目標・設計要求を設定し、これらを満足する概念設計を2015年に得ることを当面の目標として、FBRサイクル技術を実証・実用化するための研究開発を実施する。

成果の反映時期：2015年を目標として進められる概念設計に成果を順次反映し、2050年よりも前の商業炉の開発を目指す。

② 核融合エネルギーの研究開発

趣旨：核融合エネルギーは反応が連鎖的に起こる恐れが無く安全性に優れ、燃料が豊富で地域偏在性がなく、そして、高レベル廃棄物が発生せず、より環境に優しく、持続可能なエネルギー源である。

取組の内容：核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証する国際協力プロジェクト「ITER 計画」及びこれを補完・支援する「幅広いアプローチ」を活用して研究開発を推進する。

成果の反映時期：21 世紀中葉までに実用化の目処を得るべく研究開発を促進する。

(4) 原子力の核熱利用の実現を目指す技術開発活動

原子力による革新的水素製造技術

趣旨：高温ガス炉を用いて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、発電分野以外の温室効果ガスの排出
削減に貢献する。

取組の内容：水素製造等の高温ガス炉を用いた熱供給システムの実用化を目指し
て、以下を行う。

1) 高温ガス炉高性能化技術

2) 水の熱分解による革新的水素製造技術

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 年頃に実用システムの原型を提示することを目指す。

(5) 原子力の技術開発を持続させるために必要な技術開発活動

① 原子力の安全確保・核不拡散技術

趣旨：次世代軽水炉、中小型炉、高速増殖炉、核融合、原子力による水素製造等
の革新的原子力技術に係る安全性、信頼性及び核拡散抵抗性を高めていくための
研究開発を行うとともに、その知見を新たな規制等のあり方に反映していく。

取組の内容：それぞれの研究開発の中で、安全確保・核不拡散技術に係る研究開
発も併せて行う。

成果の反映時期：各技術の開発段階に応じて、成果を順次現場に反映していく

② 原子力基礎・基盤技術

趣旨：軽水炉の高度利用、次世代軽水炉、中小型炉、高速増殖炉、核融合、原子
力による水素製造等の革新的原子力技術の持続的な発展を維持する。

取組の内容：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、革新的核燃料サイクル技術の探索な
どに継続的に取り組む。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. 長寿命核種を分離し、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。

成果の反映時期：成果を順次現場に反映していく

(6) 革新的エネルギー技術のブレークスルーの実現に貢献する原子力科学技術

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、燃料電池や水素貯蔵用の高機能性材料の創出等を行い、水素社会実現に向けたロードマップを着実に推進する。また、太陽電池の高性能化などを通して、様々な高機能の地球環境保全技術の開発に貢献する。

取組の内容:量子ビームテクノロジーを高度化・活用するための研究開発を行う。

成果の反映時期:成果を順次現場に反映していく

表 3－1 原子力技術開発に求められる主な性能要求

性能要求 原子力 技術開発	安全性・信頼 性	持続可能性	経済性	立地制約
軽水炉の高度利用	現状と同等以上の 安全性	(軽水炉: プルサ ーマルの着実な 推進) (ウラン濃縮: 1,500tSWU/年の 達成)	(軽水炉: 将来的 に設備利用率 90%) (ウラン濃縮: 国 際的に比肩しう る経済性)	
次世代軽水炉	(被ばく線量の大幅な低減)	(プラント設計寿命: 80 年) (使用済燃料の発生量の削減)	(建設工期: 約 30 ヶ月以下) (設備利用率: 97%)	(耐震性: 免震 技術の採用)
中小型炉	現状と同等以上の 安全性			途上国の電力 系統への柔軟 な対応
高速増殖炉サイクル 技術	(炉心損傷確率: 10^{-6} /炉年未満)	(ウラン及び TRU の廃棄物への移行率: 0.1%以下) (低除染 TRU 燃料 で増殖比 1.2 以上等)	(炉建設費: 20 万 円/kWe 以下) (再処理・燃料製 造費 0.8 円/kWh 以下)	
原子力による革新的 水素製造技術	(炉心損傷確率: 10^{-6} /炉年未満)		～2010(熱効率: 約 40%) ～2050(熱効率: 50%以上)	
核融合	制御不能となる ような連鎖反応 は起こらない。	原型炉建設判断 までに燃料に使用 されるトリチウムの増殖、回収 機能を実証。	高ベータ (高圧 力) 定常運転法の 確立	

※上記は、今後の技術開発において、現時点で想定されている主なもの。開発段階の進捗により追加・修正されうるものである。

図3-1 課題毎の原子力の革新的技術開発ロードマップの概要



※ 本ロードマップは、現時点での見込みであり、その推測は、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) エネルギー技術の外部性の評価活動

エネルギー技術の研究開発活動やエネルギー政策の推進のためには、技術の外部不経済（技術を用いた経済活動に伴って第三者が受ける不利益）の評価と、その情報共有が不可欠である。

EU では米国 DOE と連携して「ExternE」（External Costs of Energy）という先見性のあるエネルギー技術の外部コスト評価の取組を行ってきたが、今後は途上国を取り込んだエネルギー技術の評価を世界規模で推進することが必要であり、これに我が国がリーダーシップをとるべきである。

(2) 国民との相互理解活動の充実

我が国が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、国民や地域社会の理解と信頼が不可欠であり、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するだけでなく、国民や地域社会との相互理解活動を進めていくことが重要である。また、併せて、児童生徒や社会人に対して原子力分野の学習機会の充実を図っていく必要がある。

(3) 科学的・合理的な規制の追求、基準の整備

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するためには、研究開発段階の進展に合わせて、規格基準類の整備を行うとともに、科学的・合理的な規制を追求していくことが必要である。

(4) 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、使いやすい熱源にしていく工夫が必要であり、原子力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。

(5) 国際展開、国際協力に向けた取組

地球温暖化問題は、今後ともエネルギー需要が着実に増大する途上国のエネルギー政策への対応が重要であるため、原子力発電が地球温暖化対策として有効であることについての国際的なコンセンサスの形成に努めるとともに、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国際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積極的に協力していくべきである。

また、我が国の原子力産業が国際展開を推進できる環境を整備する観点から、輸出に係る公的金融の活用、貿易保険の活用等を進めるべきである。さらに、第iv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べきである。

(6) 国の科学インフラの充実

本ロードマップを実施する上では、様々なブレークスルーにつながる新しいアイデアの懷妊をもたらし、新エネルギー技術の研究開発を進展させる原理的知見を生み出す観点から、大学や研究機関における基礎的・基盤的研究を着実に進めることが重要である。

(7) 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ものであるため、研究開発の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る。ロードマップの実現のためには、市場からのフィードバックを受ける実証試験の成功が重要であり、このような実証試験を起業家精神に溢れた民間事業者と連携して実施することが必須である。

また、技術の実証及び実用化は、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り、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を構築することが必要である。

さらに、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、移転することが不可欠である。

また、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のための基盤整備を進めるなど、多面的かつ国際的な知識のネットワークも構築・整備していくべきである。さらに、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。