

原子力の革新的技術開発ロードマップ 中間取りまとめ

平成20年4月2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) 原子力を地球温暖化対策の一つとしていくために	4
(3) 原子力の革新的技術開発ロードマップについて	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	7
(1) 原子力技術によるCO ₂ 排出削減状況	7
(2) 短・中期のCO ₂ 排出削減ポテンシャル	8
(3) 中・長期のCO ₂ 排出削減ポテンシャル	8
(4) 地球温暖化対策に貢献する原子力技術のビジョン	10
(5) ビジョンの実現に必要なシステムの性能	11
(6) ビジョンを実現できる技術システムの候補	15
(7) まとめ	17
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
3. 1 技術開発活動の対象の選定	18
(1) 軽水炉の高度利用	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) 革新的な原子力の技術開発を持続させるために	20
必要な技術開発活動	
(5) 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	
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	23
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	25
(4) 他の分野、民間との連携による実用化、普及の促進	25
(5) 国際展開、国際協力に向けた取組	25
(6) 国の科学インフラの充実	26
(7) 技術移転、知識管理と人材育成	26

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。そこでは、現行の取組のみで推移すると、世界のエネルギー関連の二酸化炭素（CO₂）の年間排出量は、2005 年から 2030 年にかけて 57%増加すると予想されるが、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（気候変動に関する政府間パネル：IPCC）が、大幅な気候変動を避けるために全地球平均気温の上昇幅を 2.4℃に抑えたとしたら、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（450 安定化ケース）では、CO₂の年間排出量を 2050 年には 2000 年の 15～50%になるように、着実に削減していくことに取り組まなければならないとしている。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、我が国において、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考えており、平成 17 年 10 月にはその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。

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」を策定することとしたことを踏まえて、原子力委員会は、この計画立案に資するため、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とその性能、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検討した。この報告書はその結果を取りまとめたものである。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、本報告書を活用することを期待したい。

1. 基本的な考え方

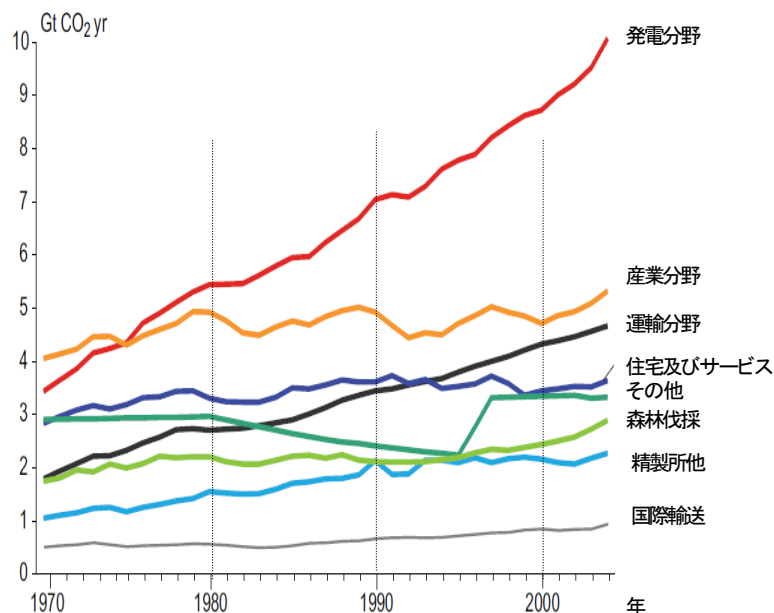
(1) 地球温暖化対策における原子力発電の位置づけ

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。而して、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、その利用が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。

最近に至り、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地球規模の気候変動の主要因と認識されるようになった。そして、こうした排出を抑制することなく継続すれば、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発生すると予見されたことから、今後、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小さ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。

図1-1 分野別CO₂排出量の推移(直接排出)



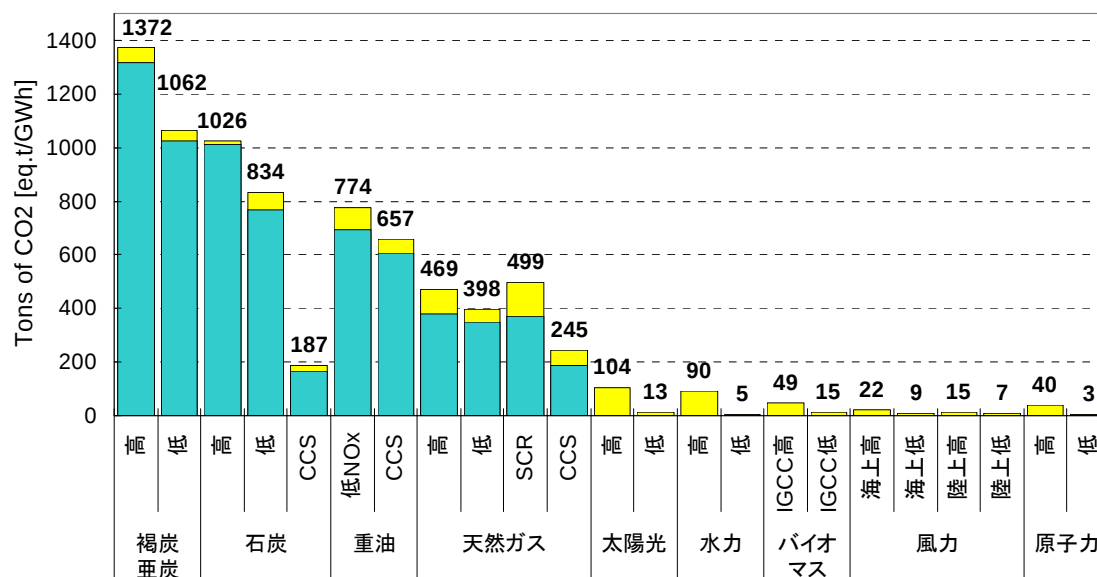
出典: IPCC第4次評価報告第3WG報告書

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（直接排出）の約3割を占めていて、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、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）低炭素発電技術を導入していくこと、が急務であり、後者については、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、を目指すべきである。

それでは、低炭素電源として使えるものは何かということになるが、各電源のCO₂排出特性を比較している図1－2によれば、それは、①CCS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、③水力、④水力以外の再生可能エネルギーに基づく発電技術ということになる。地熱、潮力、波力などもこの分類に入るが、当面大きな供給力を用意する手段として使えないので、ここでは示していない。

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

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程度と、最も小さい部類に属する。而して、原子力発電技術は、世界の発電量の16%を担っている水力発電技術とならんで、15%の供給を担っているから、上に分類した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。

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。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おり、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を、ウラン濃縮作業でウラン235の濃度を高めた濃縮ウランの酸化物にしてから、成型加工して製造される。原子炉に装荷された燃料は炉心に数年間滞在した後に取り出され、使用済燃料となる。この使用済燃料の取り扱いについては、そのまま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及び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がある。

原子炉の運転過程ではCO₂が発生しないのに、3～40g/kWhという値が示されているのは、原子炉の建設資材の製造・輸送、ウラン採掘や濃縮作業、再処理工場、施設の廃止措置、放射性廃棄物の管理の過程において動力源、熱源として化石エネルギーを使用している実態があるからである。また、その結果に幅があるのは、その際の工程や購入する電力の発電様式の組み合わせにどのようなものを選ぶかによってエネルギー消費量やCO₂排出が異なるからである。

（2）原子力を地球温暖化対策の一つとしていくために

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。

既に、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、他の低炭素発電技術と比較して低コストであること、大規模な電力供給能力、その導入、普及に十分な実績があることから、確実な温室効果ガスの削減が可能という観点で大きなアドバンテージをもっているからである。

とはいえ、足元を見ると、原子力発電はすでに全世界の電力の15%を供給しているものの、この割合はこの10年間程度あまり変化せず、むしろ低下傾向にある。その第一の

理由は、多くの国で、急増する電力需要に対しては、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いためである。第二には原子力発電の安全性、特に、重大な被害をもたらす事故の発生可能性に対する人々の不安感を背景に、エネルギー政策における原子力の位置づけが政治の争点になり、ドイツなど原子力を選択肢としない政権がいくつかの国で誕生したことが挙げられる。さらに、原子力発電の普及が核拡散や核テロの発生確率の上昇につながるおそれへの懸念から、その結果として途上国における建設、技術移転に慎重さが求められてきたこともその原因として指摘できる。

今後、地球温暖化対策の有力な手段として、原子力発電が世界で広く利用されていくためには、こうした事情を踏まえれば、次の取り組みを着実にやっていくことが肝要であると言える。

その第一は、すでに原子力施設を運転している人々が、重大な被害をもたらす事故の発生しないことを確かにする、具体的には、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を行い、これ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着実に進めていくことである。

また、第二は、経済性の面では、最近に至り、化石燃料価格が上昇してきたこと、資源の供給安定性に対するリスクヘッジが重要になってきていることから、原子力が再び注目されている。国際エネルギー機関（IEA）等の分析によれば、将来に行われる放射性廃棄物の処理・処分にかかる費用を含めても、原子力発電は火力発電と競合できるようになってきているが、初期投資の大きさ、建設に要する期間や投資の回収期間の長さとその結果としての投資リスクの大きさが、原子力発電への投資へのハードルを高くしているため、この面での制度の整備を公益増進の観点からやっていくことである。

第三は、平和利用を担保すること、具体的には、核不拡散、核セキュリティへの対応である。原子力技術の利用国は、「核兵器の不拡散に関する条約（NPT）」に基づき、その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、それを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、そして、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ても、この面のリスクが増大しないように、こうした国際的な取組みのあり方を点検し、必要に応じて強化していくことである。

なお、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、世界の原子力発電所機器の製造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4グループとアトムエネルゴプロム（露）等に集約されてきている。日本のメーカーは、これまで継続的にプラント建設を進めてきたことから、こうした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いる。今後、地球温暖化対策の国際的な進展に対して日本がこうした高い技術力を活かして貢献していくためには、我が国の持つ実績等について海外に積極的に発信するとともに、諸国の取組に対して多面的な協力活動を展開するなどの積極的取組が必要である。

（3）原子力の革新的技術開発ロードマップについて

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こと、今後、一層の貢献が期待されていること、そして、我が国産業は、それに貢献できる能力を涵養してきているからといって、この分野においては、もはや公的研究開発投資が不要ということにはならない。それは、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ことが最大の課題となっているところ、このための知見を充実するための研究開発がまだまだ必要であるからである。

第二には、現在の供給力を主に担っている軽水炉については、運転時間が30年を超えたものが出てきているが、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、予めそのことの確証を得るためには、高経年化対策に関する研究開発を行うことが必要であるからである。

第三には、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、絶えずその性能を高度化する必要があり、そのためには、研究開発が必要であるからである。これは、軽水炉についても同様で、この観点から既存軽水炉及びその核燃料サイクル技術の安全性、経済性、運転保守性の向上を目指しての研究開発や一段と高い性能目標を定めての次世代軽水炉の研究開発がなされるべきである。さらには、これまでの基礎・基盤的研究を通じて得られた知見に基づいて、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炉や、原子炉市場をより拡大する観点から熱源のような非電力分野の新しいニーズの獲得に貢献できる可能性のある原子炉及び関連技術の実用化を追求する研究開発活動を引き続き推進していくことは、その可能性の大きさに鑑みて、合理性がある。

なお、こうした研究開発活動のためには、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の整備が着実に推進されている必要がある。またこれらは、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きているし、これからも貢献できる可能性が高い。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べきである。

そこで、以下では、こうした活動を通じて実現を目指すべき状況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迫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）に取りまとめる。具体的には、

- 1) ビジョンとこれを実現するために研究開発活動に取り組むべき技術分野とその目標を明らかにし、これを達成するための活動の行程を明らかにする。
- 2) そこに示された取組みを推進する際の留意事項やその推進のために整備が必要な基盤等を明らかにする。

こうして、ビジョンの実現に向けた道筋（ロードマップ）が明らかになることにより、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。

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) 原子力技術によるCO₂排出削減状況

① 我が国のCO₂排出削減努力に対する現在の貢献

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）。これを LNG 火力発電所に置き換えると、わが国の CO₂ 排出量は 1 億 27 百万トン増加する。これは、2005 年度の我が国の CO₂ 総排出量の約 1 割に相当する。

② 世界のCO₂排出削減努力に対する現在の貢献

現在、世界で稼働中の原子力発電所は、設備容量の合計が 370GW、年間発電量は 2658TWh となっている（2005 年）。この電力量を LNG 火力発電で賄うとすれば、CO₂ 排出量は、年間 11 億トン増加する。これは 2005 年の世界の CO₂ 排出量の約 4 % に相当する。

(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、これを20%引き上げることができ、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るとすれば、CO₂排出量を年間5,000万トン削減できる。

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%でその能力に相当する平均的火力発電所による供給を減らすことができれば、年間600万トンのCO₂の排出削減が実現する。そこで、現在、建設中及び設置許可の安全審査中のプラント5基が運転を開始すれば、年間3,000万トンのCO₂排出量の削減がもたらされる可能性がある。

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、すべての原子力発電所がこの水準で運転されるとして、その分、LNG火力や石炭火力による発電を減らすことが出来るとすれば、CO₂排出量を年間8,000万トン削減できる。

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、その能力に相当するLNG火力や石炭火力による供給を減らすことができれば、年間600万トンの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すれば、年間約1億2千万トンのCO₂排出量の削減がもたらされる可能性がある。これは、世界の現在のCO₂排出量の0.5%に相当する。

(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では、標準シナリオの場合、2030年における世界全体のCO₂排出量は、約420億トンに達し、原子力発電の規模は現状の1.2倍で、1次エネルギーに占める割合は約5%になるとしている。これに対して、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、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、CO₂排出量を230億トンに留めるべく、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）。この場合、原子力発電所は標準ケースに比べて2倍の電力

供給を分担することになる。この際、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排出削減が可能である。（450安定化ケースの2030年の年間CO₂排出総量の約12%）

② 原子力発電による長期のCO₂排出削減ポテンシャル

21世紀中のCO₂排出削減について、どのような手段を組み合わせ、また、原子力はどの程度の寄与をなすべきか。原子力委員会では、原子力政策大綱の策定時に、多くの予測モデルの分析を行ったが、設定条件により様々なものがあり、いろいろな低炭素エネルギー源を組み合わせる目標達成に努力することが合理的という以上のメッセージを読み取ることは慎重を要する。そういう留保条件付ではあるが、長期的には、CO₂排出削減の強化とともに、原子力の利用が拡大するものが多い。

③ 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のは、運輸部門である。この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CO₂排出量が削減されることとなる。この場合には、原子力発電のみのケース以上に原子力のシェアが大きくなる。

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製造すると、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から、原子力の利用が拡大する可能性がある。

以上、輸送部門において価格面からの優位性に誘導されて、水素、電気等による燃料代替が進めば、それに応じて、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。