

# 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 <sub>2</sub> 排出削減状況	7
(2) 短・中期のCO <sub>2</sub> 排出削減ポテンシャル	8
(3) 中・長期のCO <sub>2</sub> 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（CO<sub>2</sub>）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、CO<sub>2</sub>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

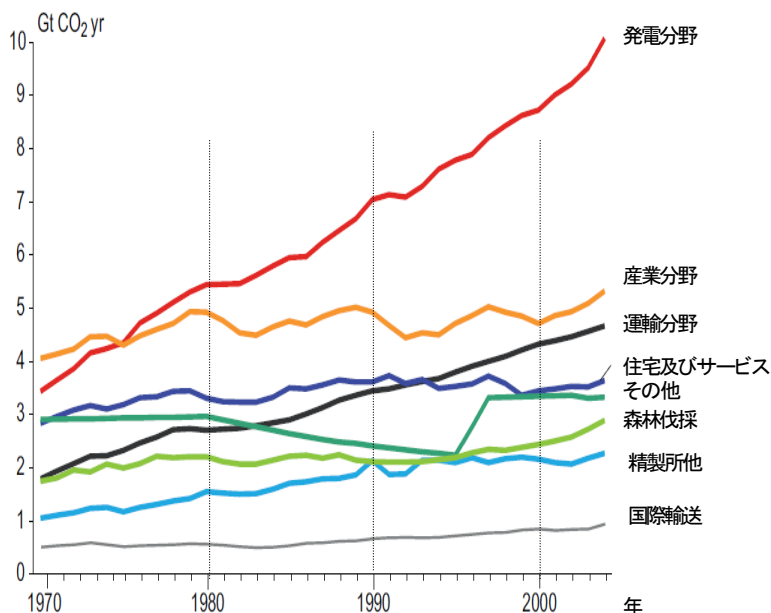
### (1) 地球温暖化対策における原子力発電の位置づけ

#### 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CO<sub>2</sub>排出量の推移(直接排出)



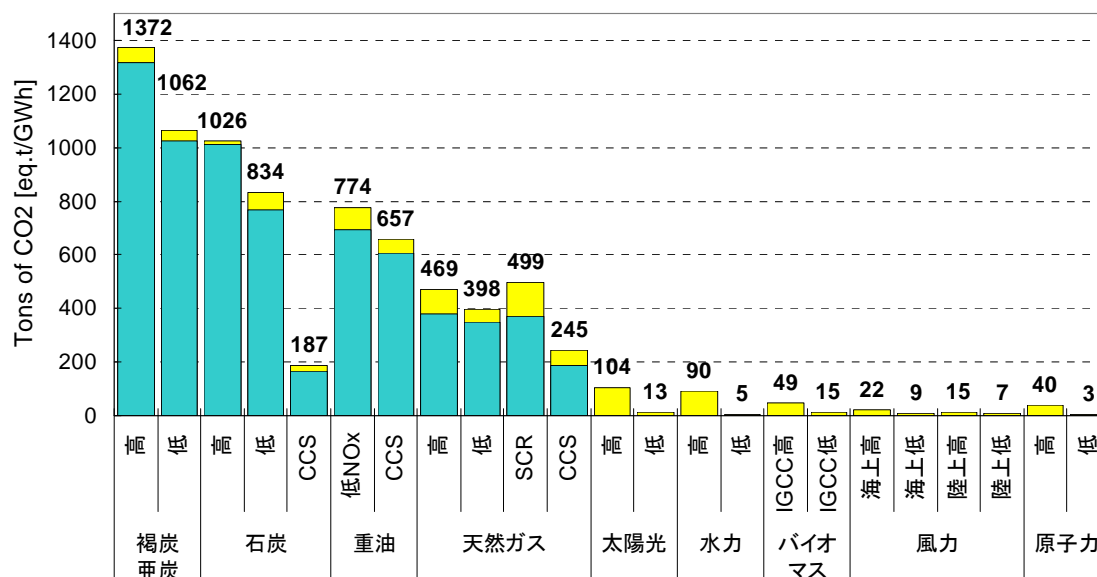
出典: IPCC第4次評価報告第3WG報告書

## 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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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 小林威

この中で原子力発電は、単位電力発生量当たりのCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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・処分に要する費用を含めても、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。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CO<sub>2</sub>排出削減状況

#### ① 我が国のCO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 総排出量の約 1 割に相当する。

#### ② 世界のCO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub> 排出量は、年間 11 億トン増加する。これは 2005 年の世界の CO<sub>2</sub> 排出量の約 4 % に相当する。

### (2) 短・中期のCO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>排出量の0.5%に相当する。

### (3) 中・長期のCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>排出削減が可能である。（450安定化ケースの2030年の年間CO<sub>2</sub>排出総量の約12%）

## ② 原子力発電による長期のCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャル

21世紀中のCO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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。

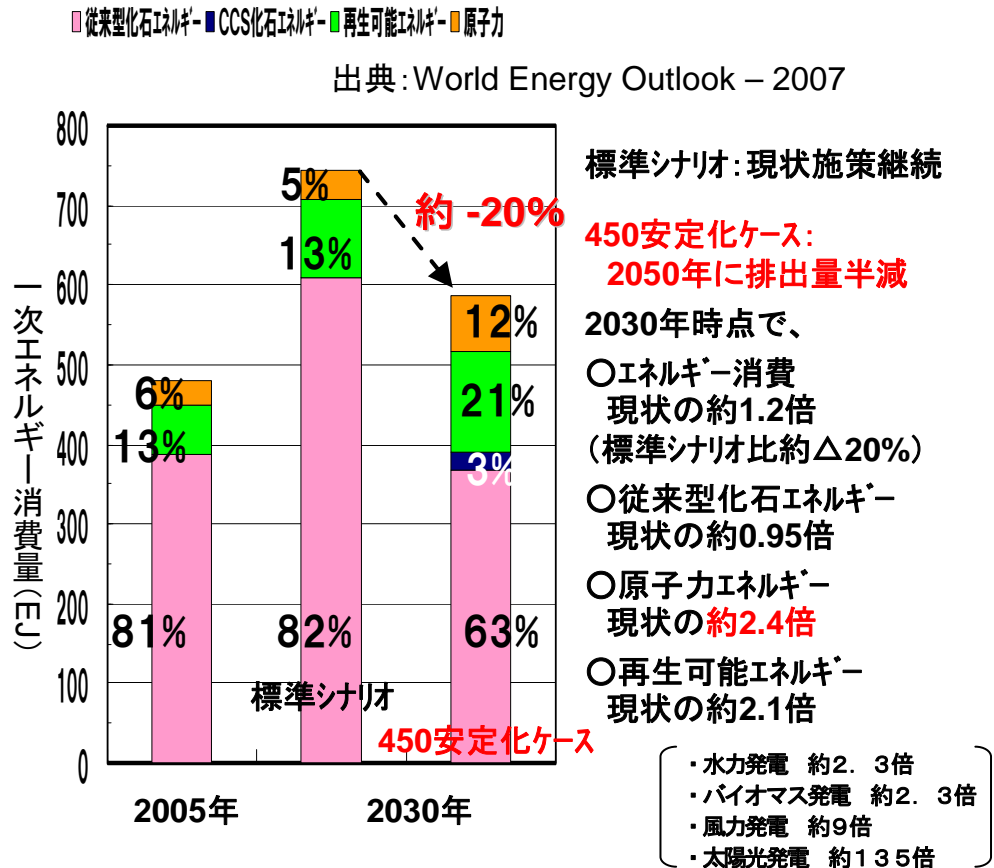
## ③ 輸送部門を通じての原子力のCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャル

発電部門に次いでCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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1Nm<sup>3</sup>を生成する際に、0.9kgのCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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



#### (4) 地球温暖化対策に貢献する原子力のビジョン

原子力委員会が策定した原子力政策大綱は、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、

- 1) 現在、すでに、地球温暖化対策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短期的観点からの取組、
- 2) 既存技術システムに代わるより優れた実用原子力発電技術を準備して取替え需要や、市場拡大需要に備える中期的観点からの取組、
- 3) 持続可能な発展を目指す将来社会において原子力技術が一段と大きな役割を果たす

ことができるように、年々進歩を遂げつつある他の低炭素エネルギー技術に勝るとも劣らない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長期的観点からの取組、  
を適切に組み合わせて推進することとしている。

また、原子力政策大綱は、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。その趣旨は、原子力科学技術は、原子力エネルギー技術の進展のみならず、原子炉によるシリコンへの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ており、これからもこうした貢献が期待できるからである。

以上に加えて、最近の地球温暖化対策を巡る内外の議論、提言も考慮に入れると、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。

ビジョン1：既存の原子力発電技術が、事実上温室効果ガスを発生しない発電技術として、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応えていること

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、エネルギー技術の供給や革新に貢献していること

#### (5) ビジョンの実現に必要なシステムの性能

このようなビジョンの実現に役立つ原子力技術システムを用意するためには、それぞれが貢献を目指す社会において好意的に受け入れられる性能（安全性、信頼性、経済性など）の実現を目指す必要がある。ただし、これらの具体的内容は、社会の価値観、選好とともに変化していくし、他の技術との比較で決まる面もあるから、競争技術の特性の動向も調査しつつ、価値観が現在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ように、システム性能について絶えず見直しを行ない、再設定していく必要がある。

##### ① 安全性・信頼性

イ) 安全性：

定量的安全目標：

原子力施設のリスクについては、日常生活における他のリスクと比較しても、相対的に十分小さく抑えられている。しかし、原子炉施設の安全性に対する要求に関しては、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、我が国においては、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ことから、自然の脅威に関する新知見を含む様々な新知見を設計基準自然現象に反映する等、既存施設のリスク評価を見直し、既存施設の目標達成状況を再確認する作業を定期的に行う定期安全レビューも重要である。

防災対策に対する余裕：

動的機器は静的機器に比べて点検・保守頻度を高くしなければならないので、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などの取組は固有の安全特性を強化する取組と呼ばれる。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を実現できる可能性があるので、安全要求の一つに掲げられることもある。

従業員の安全に対する配慮：

従業員の安全に配慮することも重要なことであり、労働災害リスク評価に基づき、このリスクを十分低くするようにするとともに、被ばくを実行可能な限り、小さくすることが求められる。

ロ) 信頼性：

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。

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ので、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、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が小さくすることという要求を掲げることもある。

## ② 持続可能性

原子力技術システムが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。このためには、廃棄物処分場の確保可能性、燃料の確保可能性が 主要な要件となる。

### 1) 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三百メートル以深に処分されるが、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、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、この廃棄物の発熱密度を低下させることが考えられてよい。これは原理的に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で燃料の一部に加え、原子炉で別の各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においては、要求に掲げられることがある。

### 2) 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、燃料確保の確保可能性を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、

インドでは、トリウム資源を利用することで、燃料を確保する取組も行われている。

#### ハ) 核拡散抵抗性：

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と考える人が多い。そこで、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が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から、これを要求に掲げることもある。

妨害破壊行為に対する防御：

また、9.11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、経済性の一層の向上は重要である。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。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り建設期間を短縮することが重要である。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

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、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。

## (6) 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、放射性廃棄物管理技術、安全確保・核不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、エネルギー転換技術には主として水蒸気タービン技術が選択されるが、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も、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サイクル技術は、核燃料物質を採掘して、濃縮し、あるいは再処理工程で回収したウランやプルトニウムと一緒にして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なる。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、“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、これら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、性能目標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。

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、ビジョンを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て、これらを選び、組み合わせてシステムを実現していくことを目指すことが必要になる。同時に、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があるから、そうした変化に適応できる技術を選ぶことも重要である。

以下には、こうしたことを踏まえて、(4)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と検討において重点をおくべき性能要求について検討する。

- 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していくべきである。それにより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、さらには出力の増加を図る。燃料サイクル技術のうち、再処理やプルサーマルの取組を施設の運転保守性の向上や廃止措置費用の低減追求して経済性の向上を図りつつ、確実に推進していくとともに、高レベル放射性廃棄物の処分事業の実現に向けて処分施設立地点の選定活動を着実に推進していくべきであり、この観点から必要な研究開発を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と併せて、高性能燃料開発に関しての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と考えられる。
- 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）、ならびにそれぞれの安全確保・核不拡散技術を将来社会が持続可能な発展の観点から求める安全性・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を旨として、研究開発を進めるべきである。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、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ため、その可能性を高めるための努力を行う価値がある。  
また、核融合技術については、国際協力を活用しながら、トカマク方式・ヘリカル方式・レーザー方式による研究開発を進めている。
- 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したくなるように性能目標を設定して、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などが考えられる。

## (7) まとめ

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	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

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の技術開発を計画期間で分類して、その道程を明らかにする。その分類は、以下のようにする。

- 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旨とする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しての長期的技術開発活動、
- 4) 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、これらの活動に共通の原子力技術の持続的発展を可能にするための研究開発活動、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

以下の各節には、それぞれの期間における各活動の対象技術と性能目標と、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。なお、この取組を円滑に進めるためには、技術開発活動そのものの他に、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。

#### 3. 1 技術開発活動の対象の選定

##### (1) 軽水炉の高度利用

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：

### ① 原子力安全確保技術

- 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 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、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、2015 年頃までに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。

## (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：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。

取組の内容と成果の反映時期：2050年よりも前の商業炉の開発を目指して、高速増殖原型炉「もんじゅ」の運転再開をはじめ、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。

### ② 原子力による革新的水素製造技術

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、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、2020～2030年頃の実証を目指す。

### ③ 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) 革新的な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、また、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。

取り組みの内容：

それぞれの研究開発の中で、安全確保技術に係る研究開発も併せて行う。

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ため、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。

(5) 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などを行い、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。

表 3－1 原子力技術開発に求められる主な性能要求

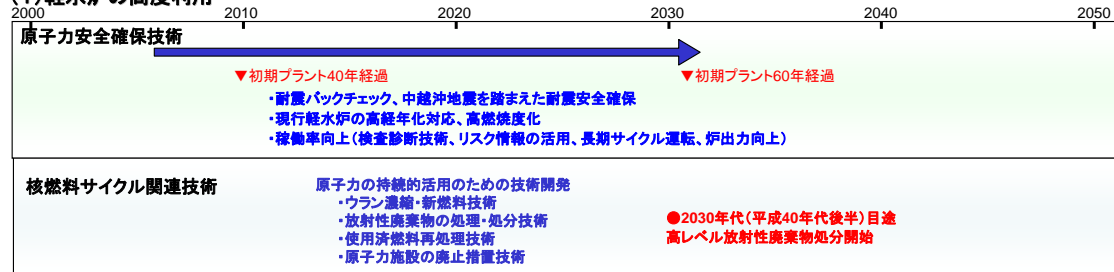
性能要求 原子力 技術開発	安全性・信頼 性	持続可能性	経済性	立地制約
軽水炉の高度利用	現状と同等以上の 安全性	(軽水炉：プルサ ーマルの着実な 推進) (ウラン濃縮： 1,500tSWU/年の 達成)	(軽水炉：将来的 に設備利用率 90%) (ウラン濃縮：国 際的に比肩しう る経済性)	
次世代軽水炉	(被ばく線量の大幅な低減)	(プラント設計寿命：80年) (使用済燃料の発生量の削減)	(建設工期：約30ヶ月以下) (設備利用率：97%)	(耐震性：免震技術の採用)
中小型炉	現状と同等以上の 安全性			途上国の電力系統への柔軟な対応
高速増殖炉サイクル技術	(炉心損傷確率： $10^{-6}$ /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)	
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	
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)	

※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。

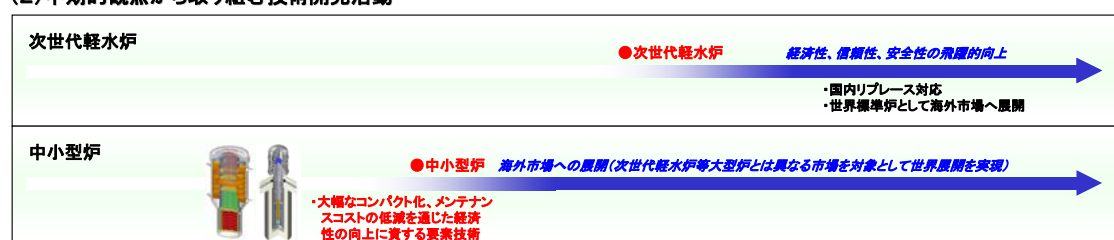


### 3. 2 課題毎の原子力の革新的技術開発ロードマップの概要

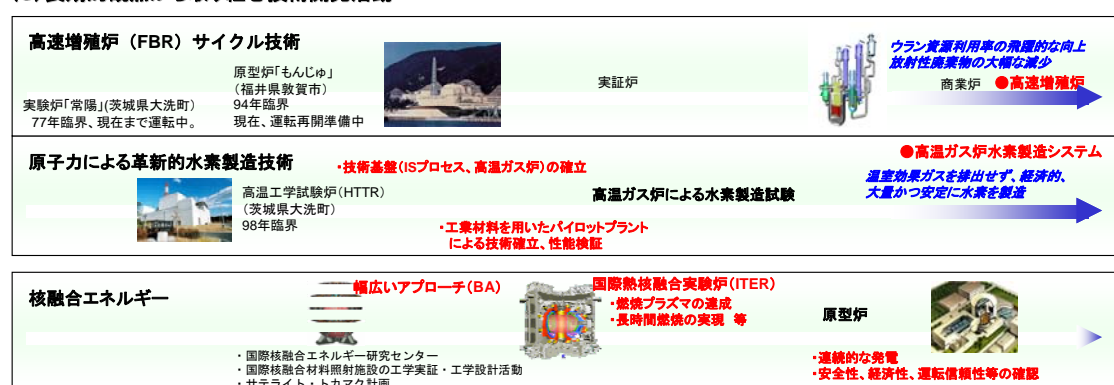
#### (1) 軽水炉の高度利用



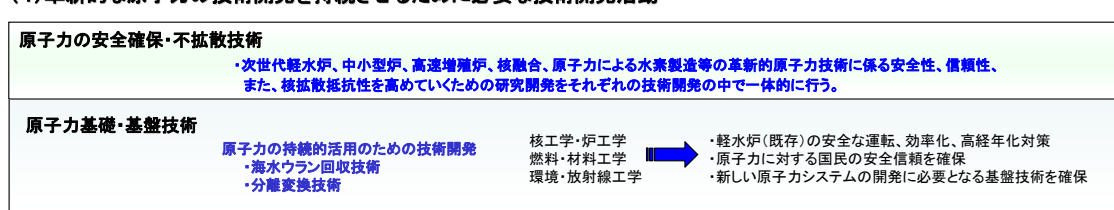
#### (2) 中期的観点から取り組む技術開発活動



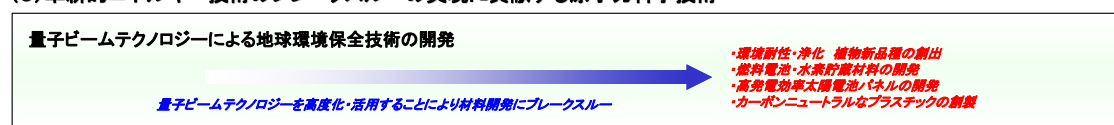
#### (3) 長期的観点から取り組む技術開発活動



#### (4) 革新的な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



#### (5) 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



※ 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) エネルギー技術の外部性の評価活動

原子力技術については、その潜在的リスク故に、当初より公衆リスクの観点が様々に議論され、その過程を通じて、極めてまれな大事故のリスクや廃棄物処分が（半減期が産廃と違って有限であるにも係らず）超長期間にわたって人類の将来に与える可能性としての影響、そして核拡散リスクといった外部性の大きさを評価する技術が発達し、これを小さく保つための国際的取り組みも推進されてきている。しかしながら、他のエネルギー技術については、地球温暖化問題自体がこうした外部性の評価が遅れたためにその顕在化が指摘されるまでに至ったものとも言えるにもかかわらず、その評価作業と情報共有が十分ではない。その対策と喧伝されて最近急速に増大している食用植物によるバイオ燃料生産が食料品価格を押し上げて貧しい人々の生活環境を悪化させるという外部不経済を生み出しているのはその一例である。

多様なエネルギー技術と資源を通じてのエネルギー需給は人類の生命維持装置という複雑系の一部であることを忘れず、特定の技術を重視しようとするときにはその技術の利用がこの複雑系に与える影響を少なくとも外部不経済の評価を加えたライフサイクルアセスメントを通じて明らかにし、その結果をステークホルダーたる人類と共有することは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に必須の要件である。

エネルギー技術の外部性評価については、EU が米国 DOE と連携して ExternE という先見性のある取り組みを行ってきたが、天然資源に恵まれないという地政学的特性を踏まえて、エネルギー効率の高い経済システムを構築する一方、多くの新エネルギー技術を輸出し、途上国に技術協力を行ってきているわが国は、こうした評価の検証に有用なデータに事欠かない国である。途上国を取り込んだこうしたエネルギー技術とシステムの評価を世界規模で推進することにわ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

わ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、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。

こうした原子力を巡る国民と推進者の間の相互理解活動が円滑に進むためには、原子力を含む科学技術に対する国民の興味、理解を高めるための児童生徒、そして社会人に

対してのこの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

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、産学官の関係者が今後の技術的課題についての認識を共有し、明確な役割分担・連携の下で、研究を進めて、その成果を共有して、学協会などを有効に活用して、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、これを実現するための規格基準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供する際の規格基準類の開発を行い、それが時宜を得て規制当局の採用するものとなるよう規制当局との情報交換等を進めていくべきである。

### (4) 他の分野、民間との連携による実用化、普及の促進

原子炉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、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でき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。

さらに、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するためには、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。

### (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も極めて重要である。したがって、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これらの国が、安全性と核不拡散を担保しつつ、それを実現できるように支援することには、国際公共政策としても妥当である。

このため、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コンセンサスの形成に努め、クリーンデベロップメントメカニズム(CDM)、共同実施(JI)等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も対象とすることに力を尽くすとともに、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、我が国としては、わが国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べきである。

#### (6) 国の科学インフラの充実

2050年までに温室効果ガスの排出量を現状の半分にし、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、国が実施しているエネルギー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、基盤的研究が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し、そのための学術研究インフラが基礎データを提供し、あるいは生み出すことを忘れてはならない。基礎研究なくしてエネルギー技術の研究開発はあり得ないのである。

#### (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。そこで、その研究開発においては、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出来るようにすることが重要であり、実際、新技術の実用化においてダーウインの海を抜け出す一つの鍵は、市場からのフィードバックを受ける実証試験の成功である。この試験を企業家精神に溢れる民間事業者と連携して実施する仕組みは計画実現に必須であるとの認識が重要である。

また、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国の整備した研究開発施設や設備の民間による利用も重要であることを踏まえて、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。

さらに、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。

この場合、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。

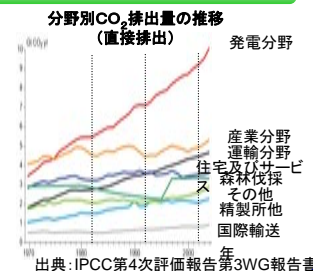
# **課題毎の原子力の革新的技術開発ロードマップ**

**平成20年4月2日**

# 地球温暖化対策に貢献する原子力技術

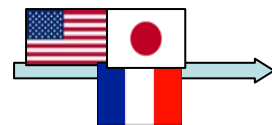
## 温室効果ガスの排出削減に大きく貢献している原子力技術

- 電力分野は、二酸化炭素排出量(直接排出)の約3割を占め、今後も大きな伸びが予想されている。また、低炭素技術の導入機会も多く、当該分野での削減対策は重要課題。
- 原子力は発電過程で二酸化炭素を排出しない供給技術の中で、水力と並んで、最も供給規模の大きなものの一つであり、供給基盤を担える技術。
- エネルギー安定供給を図りつつ、2050年までに世界の温室効果ガスの排出量を半減するためには、省エネの促進、再生可能エネルギーの最大限の利用と並んで、地球規模での原子力の利用の拡大が不可欠。
- 原子力の利用の拡大のためには、安全性の向上等、利用への不安に応える研究開発や更なる持続性のための研究開発が重要。

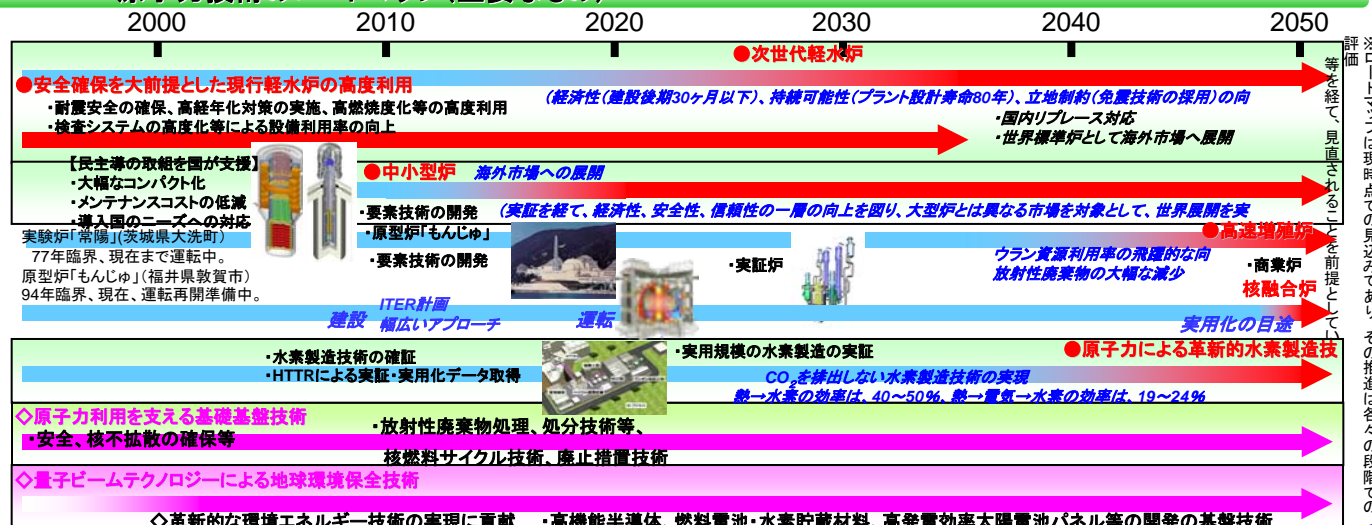


## ベンチマーク／技術の意義

- 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4連合の他、アトムプロム(露)に集約。
- 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。
- 地球規模でのCO<sub>2</sub>排出削減、持続的社会的構築に貢献するためには、短期では既存軽水炉の高度化、次世代軽水炉の開発による経済性等の更なる向上、中長期では、高速増殖炉サイクル技術、核融合技術による持続的な安定供給確保や原子力での水素製造技術によるエネルギー供給の多様化等の取組みが求められており、日本の高い技術力を活かした積極的取組が必要。



## 原子力技術のロードマップ(主要なもの)

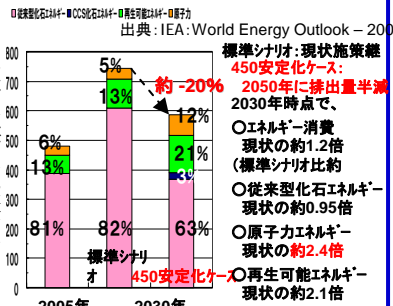


原子力技術開発が目標とするビジョンと達成する技術

ビジョン	原子力技術開発が目標とするビジョン	達成する技術
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	○

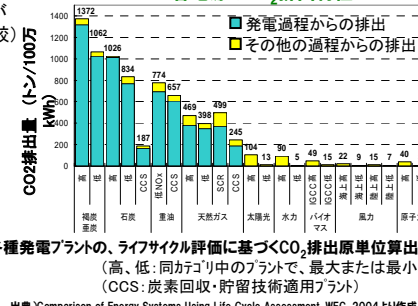
## 普及シナリオ／必要な措置

- IEAのWorld Energy Outlook 2007では、2030年の原子力エネルギー需要は、現状の約2.4倍になると試算されている(450安定化ケース)。この達成のために、以下の措置・取組が必要。
- エネルギー技術に関する経済性等のライフサイクル評価
- 原子力エネルギーの安全性、信頼性等についての国民との相互理解の促進
- 科学的・合理的な規制の整備
- 他のエネルギー技術分野との連携
- 原子力エネルギー利用が温暖化対策として有効であることのコンセンサスの形成促進、並びに安全、核不拡散、核セキュリティを確保する体制強化
- 我が国の科学インフラの充実のための基礎・基盤研究
- 技術移転に関するネットワーク整備、世代を超えた知的財産管理及び人材育成等に関わる適切な取組



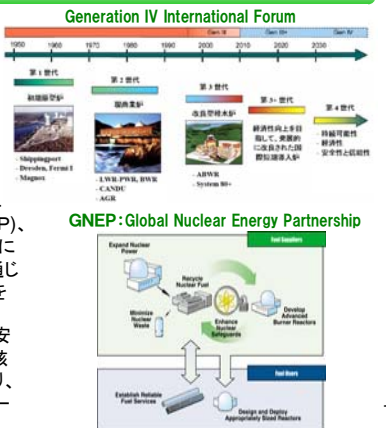
## CO<sub>2</sub>削減の技術ポテンシャル

- 現在世界に約370GWの発電容量をもつ原子力発電を、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間11億トン(世界の排出量の4%)のCO<sub>2</sub>排出を削減。これを、国内も含めて、世界の原子力発電所が欧米並みの設備利用率で運転することができれば更に年間8000万トンのCO<sub>2</sub>排出削減が可能。加えて、世界で建設中の34基(2780万kW)の原子力発電所が運転開始
- 各電源のCO<sub>2</sub>排出特性
- すれば1.2億トンの排出削減が可能。(LNG火力代替との比較)
- またIEAのWorld Energy Outlook 2007では、IPCCの評価における最も低い温室効果ガス安定化レベルある450 ppmの達成のために、原子力発電の電力容量が6560TWhに増加する必要性を示唆。
- これを現実することにより、LNG火力代替との比較で、年間27億トン(2030年の世界の排出量の12%)のCO<sub>2</sub>排出削減が可能。



## 技術の国際展開

- 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増大したり、新たな導入を検討している。
- 我が国としては、原子力産業の国際展開を推進するとともに、第4世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF)、国際原子力エネルギー・パートナーシップ(GNEP)、ITER計画等、原子力の研究開発に係る二国間、多国間の枠組みを通じ研究開発の効果的、効率的推進を図る。
- また、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している。



※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等を経て見直しが必要とされている。

# 各論



# 原子力安全確保技術 —科学的・合理的な安全規制の整備・運用—

## 温室効果ガス排出削減とエネルギー安定供給を同時解決

- 原子力は大規模で安定なエネルギー供給が可能。しかも発電過程で温暖化ガスを排出しないため、温室効果ガス排出削減とエネルギー安定供給に直接的に役立つ。
- 原子力安全の確保なくして、原子力を安定的かつ持続的なエネルギー供給源として利用することはできない。**
- 規制当局が**科学的・合理的な安全規制を整備・運用**するために「**原子力安全確保技術**」の開発は必須。

### 原子力安全確保に関する技術的課題

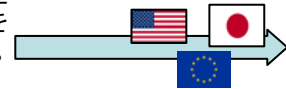
- 現行軽水炉の高度利用・・・中越沖地震を踏まえた耐震安全確保、現行軽水炉の高経年化対応、高燃焼度化

- 次世代軽水炉の研究開発・・・先進安全系、免震技術
- 高速増殖炉(FBR)サイクル技術・・・FBR安全評価技術
- 核燃料サイクル・廃止措置関連技術・・・地層処分安全評価技術

これら□については、次頁以降で記述

## ベンチマーク／技術の意義

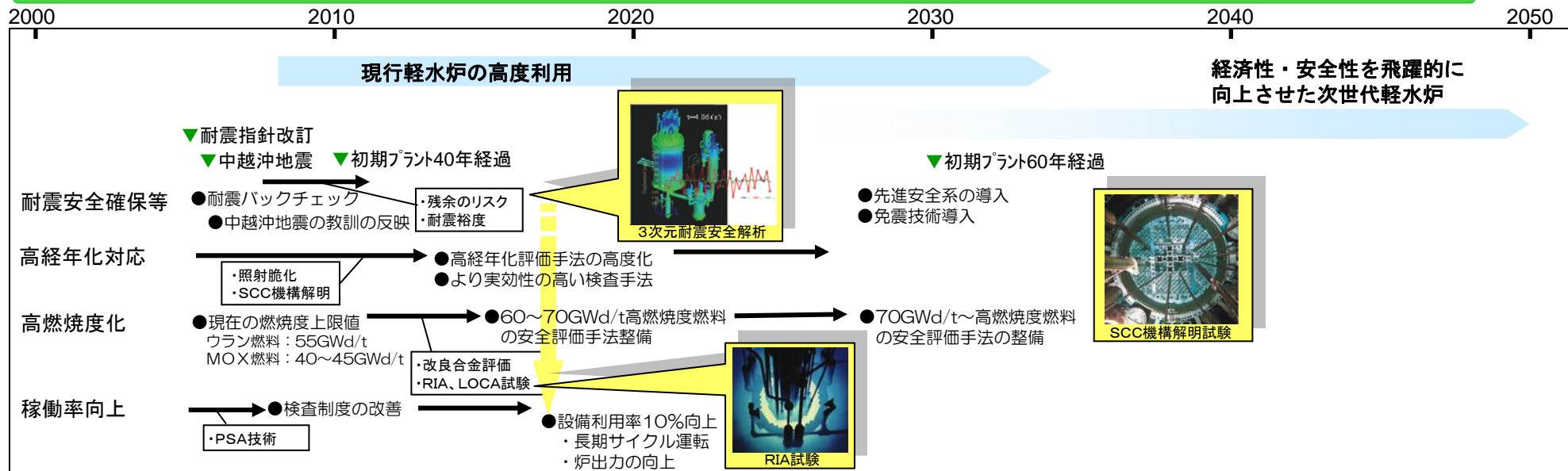
- 原子力安全の高度化は世界共通の課題であり、安全技術や運転経験等に関する知見・教訓を国際的に共有することが重要。



ほぼ同じ

- 我が国の原子力安全研究のレベルは、新設の原子炉建設が停滞していた欧米と同程度か、分野によっては我が国がリード。

## 技術のロードマップ（「現行軽水炉の高度利用」関係）



## 普及シナリオ／必要な措置

- 基本的な考え方：国の原子力安全委員会が策定する安全研究計画（**原子力の重点安全研究計画**）に沿って、重点的かつ効率的に研究を推進。
- 産学官の連携・役割分担：研究分野毎に、産学官の専門家が、共有した目標のもとで取り組むべき技術的課題、その課題への対応方法及び役割分担等を明確にして、連携して研究を推進（※）。

（※）産学官の専門家により策定した今後の安全研究課題等に関するロードマップ  
燃料高度化技術戦略マップ2007、高経年化対応技術戦略マップ2007

## 温室効果ガス排出削減ポテンシャル

- 国内の原子力発電所の**設備利用率の10%向上により年間約2500万トンのCO<sub>2</sub>削減**。（LNG火力代替との比較）
- 世界で建設中の34基（2780万kW）の原子力発電所が運転開始すれば、**年間約1.2億トンのCO<sub>2</sub>排出削減**が可能。（LNG火力代替との比較）

## 技術の国際展開

- 安全研究分野は、**グローバル化**がかなり進行している分野。
- OECD/NEA（経済協力開発機構／原子力機関）などを通じて、多国間による安全研究国際プロジェクトが進行中。国際的に共通な安全上の課題の解決や研究の効率的推進を図っている。

（例）我が国がリードしている研究分野  
軽水炉プラント安全：OECD/ROSAプロジェクト  
高経年化：OECD/SCAPプロジェクト

# 核燃料サイクル関連技術

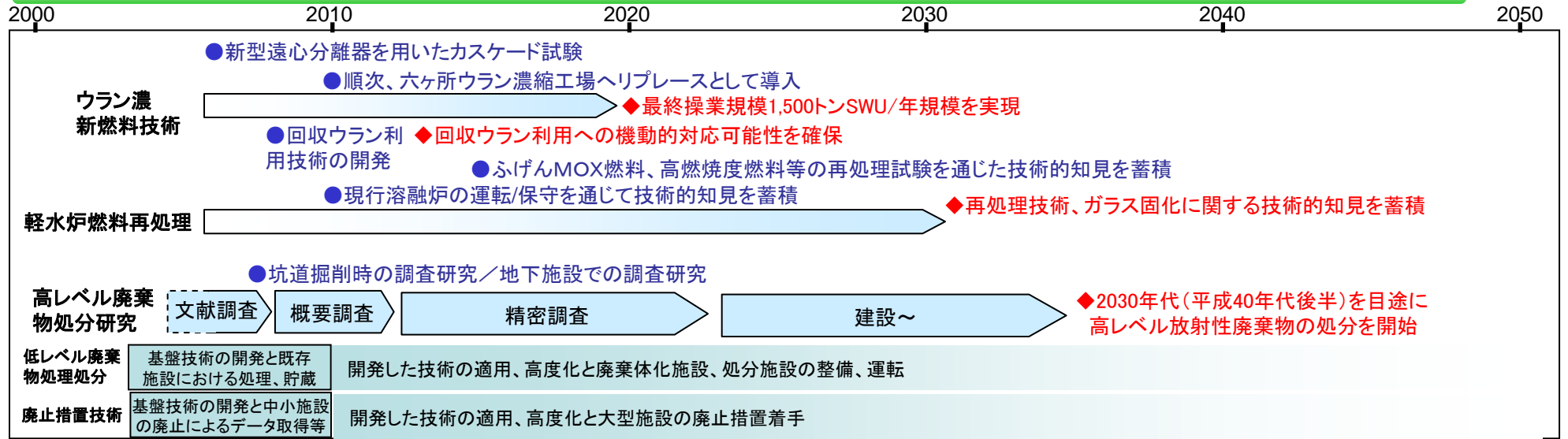
## 技術の概要

- 核燃料供給に不可欠なウラン濃縮について、常に最新技術を導入し、世界最高水準の性能及び経済性を実現し、相当規模(国内需要の1/3程度)の自給率を達成
- 使用済み燃料を再処理し、プルトニウム、ウラン等を回収し有効利用
- 再処理の過程で発生する高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術は、最終処分を実現していく上で不可欠
- 発生する廃棄物の安全で効率的な処理処分を実現し、廃棄物量の低減や資源の再利用につなげるために、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を安全かつ合理的に行うための必要な技術開発を実施

## ベンチマーク／技術の意義

- ウラン濃縮技術については、最先端技術の融合により、国際的に比肩し得る技術レベル及び経済性を有する新型遠心分離器を開発
- 軽水炉使用済み燃料の再処理については、1990年代に仏国及び英国の大型商用再処理施設が稼働し、我が国ではそれらの技術導入と独自の技術開発・技術移転に基づき、現在六ヶ所再処理施設がアクティブ試験運転を実施
- 高レベル放射性廃棄物の処分については、各国は、自国内での地層処分を政策としており、それぞれ自国の地質環境の特性や廃棄物の仕様等を踏まえ研究開発
- 低レベル放射性廃棄物の処理処分、廃止措置については、それぞれ自国の規制等を踏まえ、安全かつ合理的な技術を確立すべく、技術開発

## 技術のロードマップ



## 普及シナリオ／必要な措置

- 機械技術として、国際的な核不拡散体制下における濃縮技術開発は、官民一体となったプロジェクト遂行が不可欠
- 再処理技術については、原子力機構が、六ヶ所再処理工場の設計・建設・試験運転に対して人的協力や技術情報の提供を行うことにより技術移転中
- 高レベル放射性廃棄物の処分については、経済産業省資源エネルギー庁が中心となって設置した「地層処分基盤研究開発調整会議」を通じ、関係研究開発機関が連携・協力して研究開発。また、処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構は、処分事業の安全な実施等を目的として技術開発
- 低レベル放射性廃棄物、廃止措置については、産学官の連携の基に、社会のニーズを踏まえた技術開発を推進していくことが必要

## 温室効果ガス排出削減ポテンシャル

- 現在世界に約370GWの発電容量をもつ原子力発電を、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間11億トン(世界の排出量の4%)のCO<sub>2</sub>排出を削減。
- IEAのWorld Energy Outlook 2007では、IPCCの評価における最も低い温室効果ガス安定化レベルである450ppmの達成のために、原子力発電の電力量が6560TWhに増加する必要性を示唆。これを実現することにより、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間27億トン(2030年の排出量の12%)のCO<sub>2</sub>排出削減が可能。

## 技術の国際展開

- 再処理技術では、日本原燃と連携し米国の進めるGNEP構想に係る協力としての技術情報提供を実施
- 高レベル放射性廃棄物の処分については、国際共同研究プロジェクトへの参加や各国の海外研究開発機関との研究協力。また、国際的な人材育成プログラムへの参加協力や東アジア諸国との情報交換を通じた技術支援
- 低レベル放射性廃棄物の処理処分、廃止措置については、OECD/NEAなどの国際協力の枠組みを活用するとともに、フランス原子力庁(CEA)等との2国間協力を実施

# 次世代軽水炉の開発

## 技術の概要

- 供給安定性に優れた原子力は、我が国で唯一のクリーンな基幹電源であり、経済成長に必要な電力を比較的低コストで安定的に供給できるため、二酸化炭素の排出削減と経済発展の両立に資するエネルギー源である。
- 2030年前後に見込まれる大規模な代替炉建設需要に対応するため、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の技術開発を行う。
- 具体的な技術開発項目としては、使用済燃料の発生量を低減する技術や、免震技術等の開発を行う。

## ベンチマーク／技術の意義

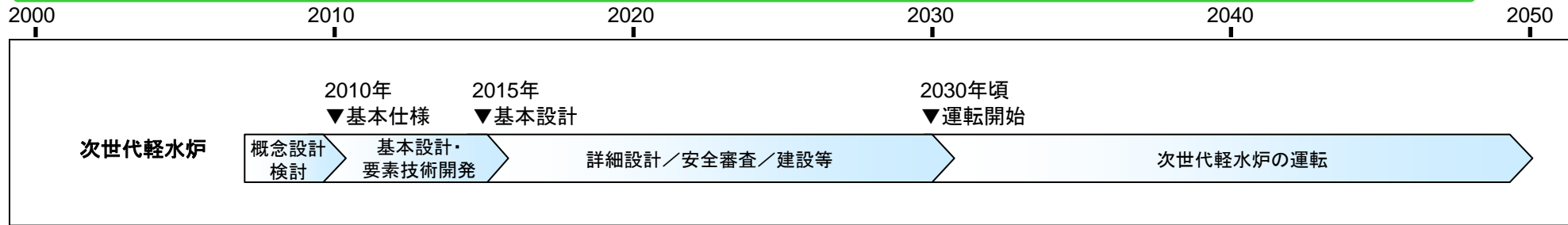
### （技術の意義）

- 長期にわたる新規建設低迷期を乗り越え、2030年前後の大規模な代替炉建設需要の到来に備えるためには、今後我が国原子力産業における技術・人材の厚みを十分に維持・発展させていくことが必要である。
- 原子力産業における技術・人材は、基本的には実際のプラント建設や運転及びこれに向けた研究開発を通じてのみ維持・発展させることが可能である。

### （ベンチマーク）

- 我が国は、継続的に軽水炉建設を行ってきており、設計・製作、建設、運転のいずれの分野においても、世界最高水準の技術レベルを維持している。

## 技術のロードマップ



性能目標：プラント設計寿命：80年、建設工期：約30ヶ月以下、耐震性：免震技術の採用等

## 普及シナリオ／必要な措置

- 次世代軽水炉の開発成果を世界展開するには、我が国原子力産業が保持する枢要技術の知的財産を適切に管理しつつ世界展開を図る必要がある。他方、次世代軽水炉の世界展開を実効的に進めるためには、この知的財産の戦略的な活用についても考慮する必要がある。
- 開発と一体的に、次世代軽水炉に必要な規格基準を整備する。また、次世代軽水炉に適合した規制制度について提案するとともに、安全当局との連携を図り、規制高度化を一体的に推進することが重要である。

## 温室効果ガス排出削減ポテンシャル

- 現在世界に約370GWの発電容量をもつ原子力発電を、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間11億トン（世界の排出量の4%）のCO<sub>2</sub>排出を削減。
- IEAのWorld Energy Outlook 2007では、IPCCの評価における最も低い温室効果ガス安定化レベルである450ppmの達成のために、原子力発電の電力量が6560TWhに増加する必要性を示唆。これを実現することにより、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間27億トン（2030年の排出量の12%）のCO<sub>2</sub>排出削減が可能。

## 技術の国際展開

- 30年前、世界に十数社あった原子力プラントメーカーも現在は5グループのみであり、三菱重工、日立、東芝がこれらのグループの中心的存在である。
- 我が国では、既に最新鋭のABWRが複数機運転実績を有する他、米国等での建設計画もある。また、APWRは国内で建設準備中であり、米国向けに一部仕様を見直したUS-APWRの建設計画などがある。

## 中小型炉の開発

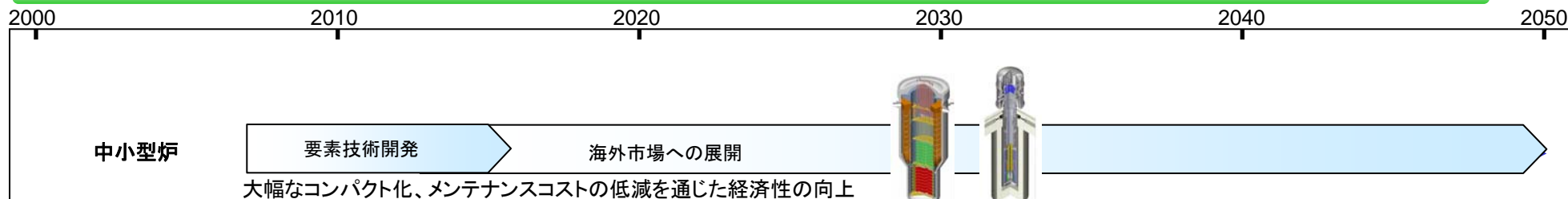
### 技術の概要

- 供給安定性に優れた原子力は、我が国において現段階で唯一のクリーンな基幹電源であり、経済成長に必要な電力を比較的低コストで安定的に供給できるため、二酸化炭素の排出削減と経済発展の両立に資するエネルギー源である。
- 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。
- 現在、民間を中心に最適な炉型等について検討が行われており、国はこれらの取組について支援を行うこととしている。

### ベンチマーク／技術の意義

- 我が国の原子炉メーカーは、90年代以降、世界の原子力市場が停滞した時期も国内において建設を継続してきたため、現在は一定の競争力を有している。
- 多様なニーズに対応可能な原子炉を提供することにより、世界の温暖化対策及びエネルギー安全保障に一層貢献することが可能となる。

### 技術のロードマップ



### 普及シナリオ／必要な措置

- 原子炉メーカーが研究機関等と協力しながら研究開発を実施。開発リスクが高い研究開発や波及効果の大きい研究開発について、提案公募方式により、国が支援。

### 温室効果ガス排出削減ポテンシャル

- 現在世界に約370GWの発電容量をもつ原子力発電を、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間11億トン(世界の排出量の4%)のCO<sub>2</sub>排出を削減。
- IEAのWorld Energy Outlook 2007では、IPCCの評価における最も低い温室効果ガス安定化レベルである450ppmの達成のために、原子力発電の電力量が6560TWhに増加する必要性を示唆。これを実現することにより、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間27億トン(2030年の排出量の12%)のCO<sub>2</sub>排出削減が可能。

### 技術の国際展開

- 中小型炉技術については、日米協力の枠組みの中で、IAEA等が行った途上国のニーズ調査等を基に設計要件をとりまとめ、既に検討されている設計概念を調査する。また、中小型炉に関する互恵的な技術分野で共同研究開発の検討を進めるとともに、研究成果の活用を通じて、途上国等への我が国の原子力発電技術の国際展開を促進し、もって原子力産業の一層の国際競争力強化を目指す。



# 高速増殖炉(FBR)サイクル技術

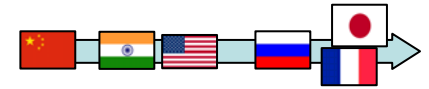
## 技術の概要

○高速増殖炉(FBR)サイクル技術は、発電過程で二酸化炭素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活用を可能とし、長期的なエネルギー安定供給に大きく貢献するものであり、放射性廃棄物の潜在的有害度の低減に貢献できる可能性を有する。

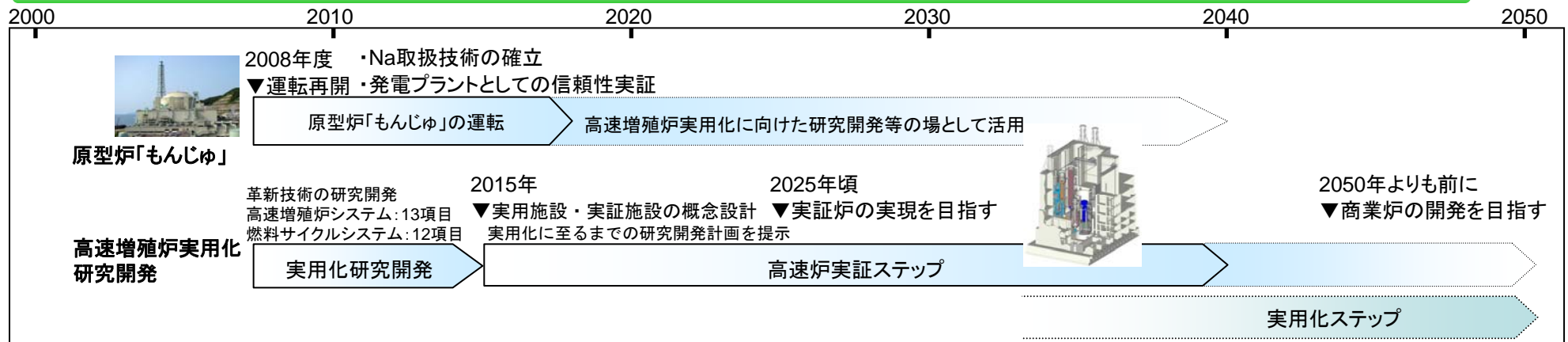


## ベンチマーク／技術の意義

○世界各国が高速増殖炉サイクル技術の研究開発をスローダウンした間においても、我が国では、着実に研究開発を進めてきた。  
○我が国は運転中の実験炉「常陽」と運転再開周辺の原型炉「もんじゅ」並びに高速炉用の燃料製造施設を保有し、豊富なインフラを有している。



## 技術のロードマップ



## 普及シナリオ／必要な措置

○原子力発電を、世界レベルでの温室効果ガスの排出量削減に役立てていくためには、ウラン資源の利用効率を飛躍的に高める高速増殖炉サイクル技術の導入が必要となる。将来的に、我が国の技術を世界的に展開することができれば、環境問題での国際貢献を果たすことが期待される。核不拡散などの課題に留意した、GIF、GNEPなどの多国間協力の中で、検討を進める。  
○この研究開発は、独立行政法人である原子力機構を中核として進められている。今後、必要な資金や要員を確保していくために、研究開発型独立行政法人の制度等の改革を、引き続き検討していく必要がある。

## 温室効果ガス排出削減ポテンシャル

○現在世界に約370GWの発電容量をもつ原子力発電を、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間11億トン(世界の排出量の4%)のCO<sub>2</sub>排出を削減。  
○IEAのWorld Energy Outlook 2007では、IPCCの評価における最も低い温室効果ガス安定化レベルである450ppmの達成のために、原子力発電の電力量が6560TWhに増加する必要性を示唆。これを実現することにより、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間27億トン(2030年の排出量の12%)のCO<sub>2</sub>排出削減が可能。  
○高速増殖炉は、現在把握されている利用可能なウラン資源だけでも二千年以上にわたって、発電過程でCO<sub>2</sub>を発生しない原子力発電を利用できるとの試算がある(OECD)。

## 技術の国際展開

○OGIFやGNEPといった国際的枠組みを活用し、高速増殖炉サイクル技術の研究開発に関わる国際連携を進めるとともに、我が国の技術を国際標準とするべく、アピールを行っている。  
○本年度運転再開予定の原型炉「もんじゅ」を国際的な研究の場の中核として使用する。

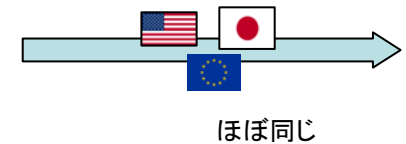
# 原子力エネルギーの着実な利用に資する基礎基盤研究

## 技術の概要

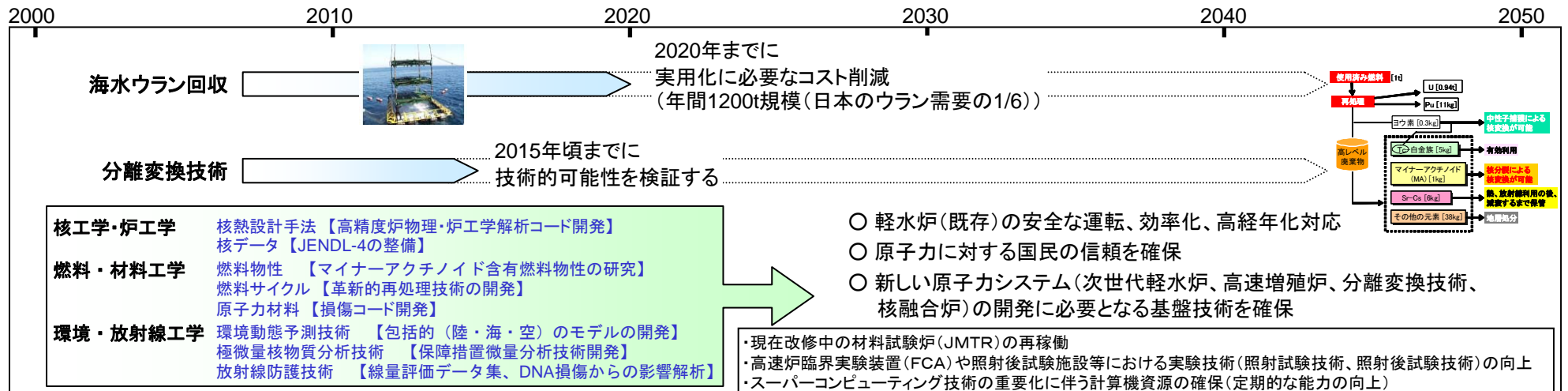
- 原子力の持続的な発展に資する、海水からウラン等の有用金属を回収する捕集材の開発、長寿命核種の短寿命化等による放射性廃棄物処分の負担を大幅に軽減させるための分離変換技術等の研究開発。
- 原子力エネルギーの着実な利用に資するため、原子力施設の設計やその基礎となる核工学・炉工学の研究、燃料・材料工学の研究、環境・放射線工学の研究など、原子力の基礎・基盤技術の研究開発。

## ベンチマーク／技術の意義

- 近年、先進各国は原子力研究をスローダウンさせ、なかでも国立研究所の民営化(営利化)等の動きの中で基礎研究が一段と削減を受けている状況では、我が国の原子力基礎工学研究ポテンシャルは、国際的にも極めて重要な位置づけを得ている。



## 技術のロードマップ



## 普及シナリオ／必要な措置

- 日本原子力研究開発機構は、我が国で唯一の原子力の総合研究機関として、照射済み試料、核燃料物質、及び放射性物質を取り扱える基礎・基盤研究施設の維持ならびに最新の高度分析技術を用いた試験研究装置の適時の導入・整備を行い、これを基盤に、基礎研究から応用研究までを一体的に推進するとともに、大学、民間等と連携する原子力技術開発のプラットフォームを提供する。また、産業界等の要請に応えた研究を効率的に進めるため、原子力エネルギー基盤連携センターの機能を強化し、産業界と一体的に推進できる体制を整備する。
- 研究開発型独立行政法人の制度等の改革を、引き続き検討していく必要がある。

## 温室効果ガス排出削減ポテンシャル

- 原子力エネルギーシステムの発展をととして、長期間にわたって温室効果ガスの排出抑制に貢献。
- 現在世界に約370GWの発電容量をもつ原子力発電を、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間11億トン(世界の排出量の4%)のCO<sub>2</sub>排出を削減。
- IEAのWorld Energy Outlook 2007では、IPCCの評価における最も低い温室効果ガス安定化レベルである450ppmの達成のために、原子力発電の電力量が6560TWhに増加する必要性を示唆。これを実現することにより、火力発電(LNG)で代替した場合と比較して、年間27億トン(2030年の排出量の12%)のCO<sub>2</sub>排出削減が可能。

## 技術の国際展開

- 今後予想されるアジア地域等での原子力エネルギー技術の急速な展開に対応するため、各国で行われる技術者研修の指導者を育成するための研修体制を整備し、最先端の技術を備えた世界の原子力研修センターとして国際貢献し、原子力技術者の育成に努める。
- IAEA、OECD/NEAなどの国際機関の活動に積極的に参加・連携し、学術的及び工学的視点から国際社会を先導することで国際貢献するとともに、技術の普及を図ることで国際標準化を目指す。

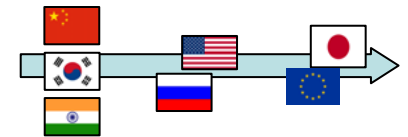
# 核融合エネルギー

## 技術の概要

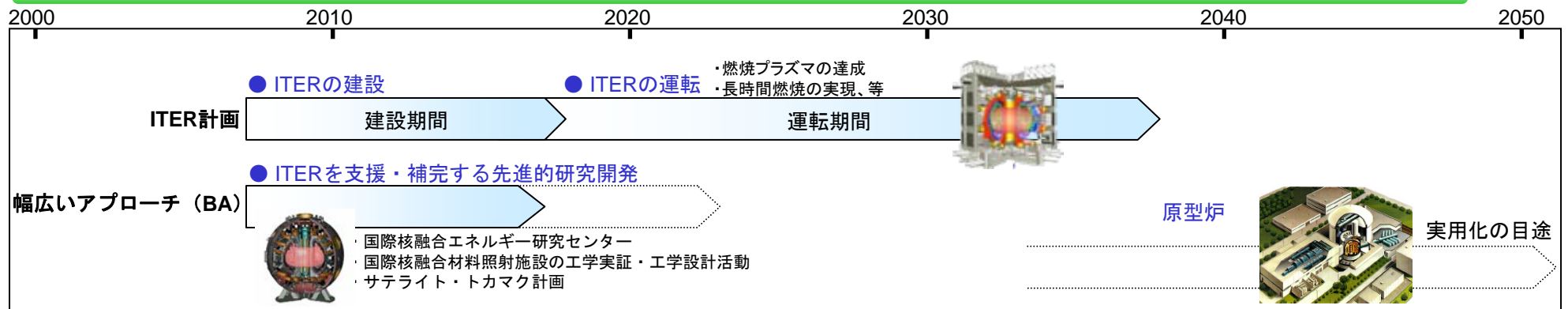
- 核融合エネルギーは、軽い原子核同士を融合させた際に発生する莫大なエネルギーを取り出し利用する。
- 軽水炉、燃料サイクル技術等の既存原子力技術と比して、核融合エネルギーでは、反応が連鎖的に起こる恐れがなく安全性に優れる点、燃料が豊富で地域偏在性がない点、高レベル放射性廃棄物が発生しない点において、将来のエネルギーとして優位性を有する。
- 化石燃料を使用する発電に比して、温暖化ガスを排出しない点、燃料枯渇の恐れがない点で、絶対的な優位性を有する。

## ベンチマーク／技術の意義

- 国内研究では、JT-60Iによる世界最高性能の実証を行うなど、世界をリード。
- ITER計画において、ホスト極である欧州とともに、日本は準ホスト国として、先端機器調達において大きな貢献をするなどして主導。
- 原型炉実現に向けて、日欧協力により幅広いアプローチを我が国で実施し、世界をリード。



## 技術のロードマップ



## 普及シナリオ／必要な措置

- 研究機関や大学、産業界、行政等で構成する核融合エネルギーフォーラムにおいて、国内意見を集約し、国内における産学官相互の連携を図っている。また、国内の連携だけではなく、ITER計画や幅広いアプローチにおける多国間の国際協力を推進しているほか、米国・欧州・韓国・中国と二国間の研究協力協定を結び、アジアそして世界の拠点として、研究者交流や共同研究を推進。
- ITER計画及び幅広いアプローチについては、政府として協定に署名し、国際約束に基づく事業として必要な資源配分を行い、推進。

## 温室効果ガス排出削減ポテンシャル

- 核融合発電が実用化された場合、CO<sub>2</sub>排出源単位において、石炭火力発電、石油火力発電による排出量の90%以上を削減することができる。
- 核融合反応の原燃料は海水中に豊富に存在するため、燃料の枯渇を恐れることなく、エネルギー生産を続けることが可能。

## 技術の国際展開

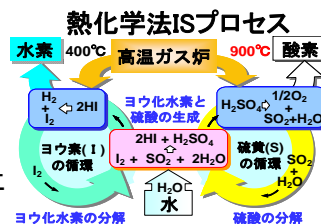
- 国際共同プロジェクトとして実施し、参加国間で経費を分担し、成果を共有する意義が大きいことから、ITER計画を、日本・欧州・米国・ロシア・中国・韓国・インドの7極の国際協力プロジェクトとして実施している。我が国は、ITER機構に機構長等を派遣しているほか、ITERの主要機器の調達を担当し、我が国の技術が多く採用されているなど、ホスト極である欧州とともにITER計画を先導している。
- ITER計画を補完・支援する先進的核融合研究開発である「幅広いアプローチ」を日欧協力により我が国で実施している。原型炉設計等を他国に先駆け日欧で行うことにより、当該技術の国際標準化が見込まれる。



# 原子力による革新的水素製造技術

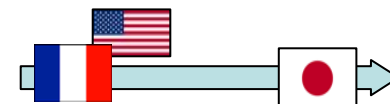
## 原子力エネルギーの多様な利用 — CO2を排出せずに水素を製造 —

- 炭酸ガス排出量の削減のためには、水素は化石燃料代替の有力候補である。2020、2030年以降、大量の水素需要に応える新たな水素供給設備が必要。
- 既存技術による水素製造(水蒸気改質法)は、製造プロセスで大量の炭酸ガスを排出。
- 温室効果ガスを排出せずに、経済的、大量かつ安定に製造することができる、高温ガス炉からの高温熱を用いる革新的水素製造技術

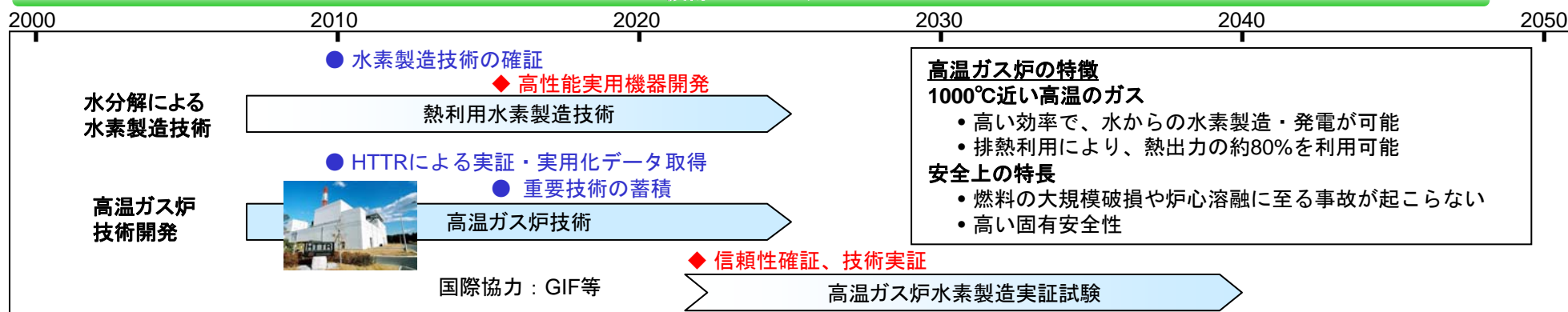


## ベンチマーク／技術の意義

- 水を熱分解して水素を製造する技術であるISプロセスの運転制御法を開発し、2004年に毎時30リッター規模の連続水素製造を達成した。また、2005年に実用材料(セラミックス)製反応器の試作に成功した。
- 米仏はISプロセスの共同研究を進めており、本年、実用材料製装置による毎時200リッター規模試験を行う計画である。



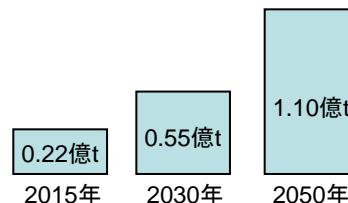
## 技術のロードマップ



## 普及シナリオ／必要な措置

- 研究開発は基盤研究から実証研究へ移行しつつあり、水素製造装置を製作する化学プラントメーカー、及び、燃料電池自動車等に水素を供給する水素供給会社、並びに水素還元製鉄等を行う製鉄会社等の水素ユーザーとしての産業界と強く連携をとりつつ、基盤技術の確立、実証試験に至るまで、政府方針の下、産学官が一体となった研究開発体制が必要。なお、製鉄においては、地球温暖化対策として水素を利用した還元製鉄技術の開発が進められている。
- 実用化に向けては、水素循環社会の実現のための社会基盤・制度の整備が必要。

## 温室効果ガス排出削減ポテンシャル



- それぞれの年の水素需要予測(自動車・定置用燃料電池)  
2015年：246億m<sup>3</sup>、2030年：610億m<sup>3</sup>、2050年：1220億m<sup>3</sup>  
それが全て天然ガス水蒸気改質プロセス(0.9kgCO<sub>2</sub>/水素1m<sup>3</sup>)で製造されていると仮定し、それを全て本技術で製造したと仮定した場合の推定値。

## 技術の国際展開

- ISプロセスについては、2008年から、第4世代原子カシステム国際フォーラム(GIF)において、超高温ガス炉(VHTR)に関する水素製造プロジェクト(日、米、仏、韓、カナダ、ユーラトム)を開始する。また、フランス原子力庁、韓国原子力研究所、中国清華大学と、それぞれ、水素製造に関する情報交換を実施している。



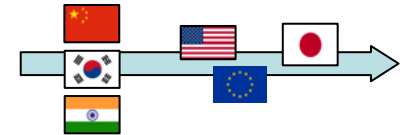
# 量子ビームテクノロジーによる地球環境保全技術の開発

## 技術の概要

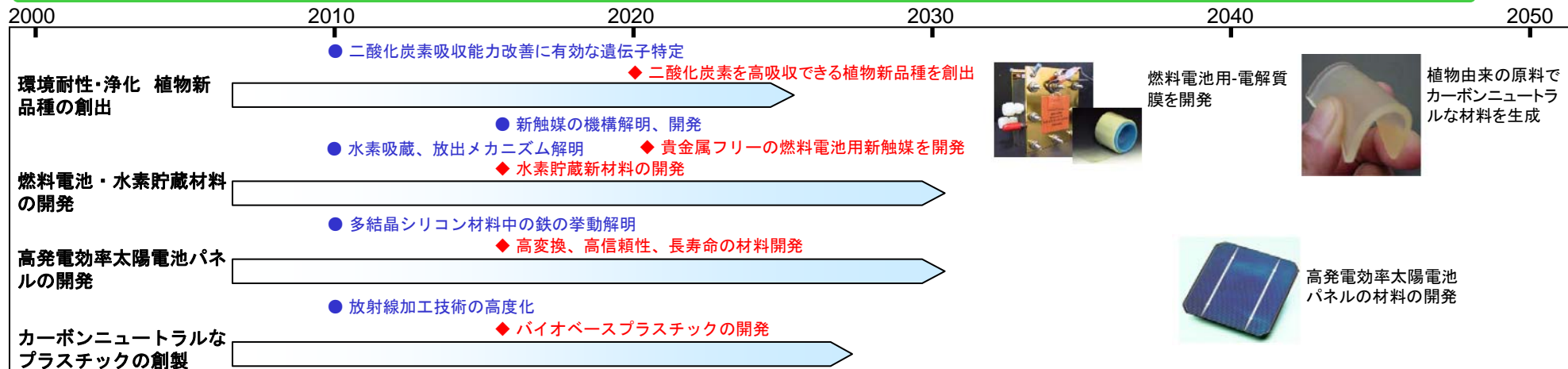
- 量子ビームは、材料改質や微細加工に優れた電子・イオン・RIBビーム、微小試料の構造解析に優れた放射光(X線)、軽元素や磁性体の解析に優れた中性子線といった物質・材料を原子レベルで「みる」「つくる」ことが可能な基盤技術である。
- 量子ビームテクノロジーを高度化・活用することにより材料開発にブレークスルーをもたらし、燃料・太陽電池や水素貯蔵用の高性能性材料、海水からウラン等の有用金属を回収する捕集材の開発、さらには、環境耐性・浄化能力に秀でた植物品種の創出などにより、地球環境保全に貢献する技術開発を行う。

## ベンチマーク／技術の意義

- 我が国では世界最高レベルのビーム強度を有する放射光施設、中性子線施設が稼働中、もしくは、まもなく稼働予定。
- 各種量子ビームの利用技術に関しては、我が国が世界をリードしているが、欧米やアジア各国の追い上げも激しい。



## 技術のロードマップ



## 普及シナリオ／必要な措置

- 量子ビーム施設を有する独立行政法人等の研究機関と産業界や大学との連携研究体制のもと行う。特にSPRING-8、大強度陽子加速器施設(J-PARC)、フォトンファクトリー(PF)、RIBビームファクトリー(RIBF)等の先端的な量子ビーム施設を中核的な拠点として研究開発を推進し、得られた研究成果は産業界によって迅速に実用化できる連携体制を構築する。
- 関係する研究機関や民間企業との連携強化が必要である。そのためには民間企業等による各種量子ビーム施設の横断的かつ積極的な利用を促進・支援することが必要。
- 社会的な認知度を向上させるためには、研究成果の速やかな実用化(商品化)が何よりも重要であるため、強力な産学官の連携体制を構築する。

## 温室効果ガス排出削減ポテンシャル

- 各技術毎に温室効果ガス排出削減ポテンシャルを見積もることは困難。目的とする実用化技術(燃料電池、太陽電池等)の温室効果ガス排出削減ポテンシャルに依存する。

## 技術の国際展開

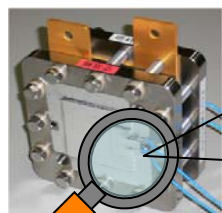
- 各種量子ビーム施設を国際公共財として、外国人研究者にも開放する。
- 既に、アジア原子力協力フォーラムの枠組みで、放射線利用技術の普及・推進を行っているが、更に加速する。

# 量子ビームの活用による水素社会の実現

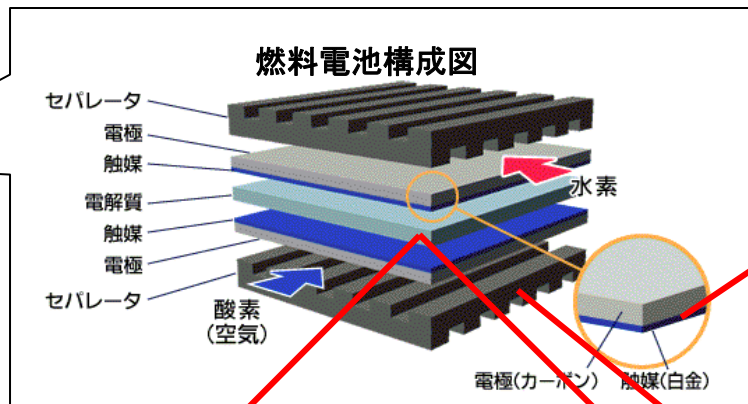
## —燃料電池・水素貯蔵材料の開発—

- ①高耐久性・高性能の燃料電池材料
- ②貴金属フリーの触媒
- ③水素貯蔵用の新材料

を開発する必要



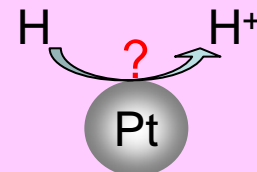
固体高分子型燃料電池



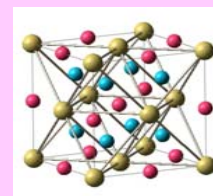
放射光

放射光による触媒機能の解明  
水素吸蔵機構の解明

②触媒中の  
貴金属の低  
減・代替技術  
の開発



触媒機能の観察



水素吸蔵材料の構造解明

③水素貯蔵用の  
新材料開発

「量子ビームでつくる」

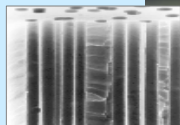
量子ビームで「つくる」

①高耐久性・高性能の燃料電池材料の開発

イオン

電子

高性能電解質膜の開発



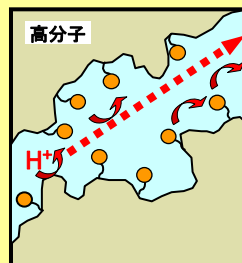
イオンビームや電子線による  
ナノサイズの水素伝導路の  
導入

中性子

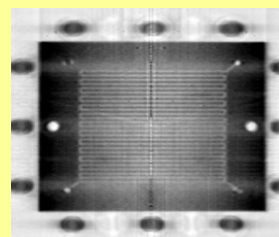
中性子による燃料電池内部の生成水・水素の直接観察

中性子小角散乱法

中性子ラジオグラフィ

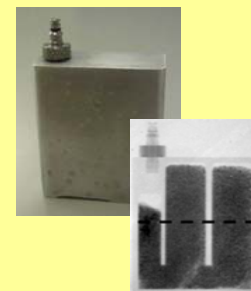


水素の挙動解析



生成水の分布観察

水素吸蔵タンクの可視化



中性子ラジオグラフィ

# RIビームの活用による高発電効率太陽電池パネルの開発

○物質にRI(マンガン-57等)を注入し、RIが崩壊してできる鉄-57の $\gamma$ 線エネルギーを超精密に測定することにより、温度、光、電場によって鉄原子の挙動がどのように変化するかを調べることができる。

○同手法を用いて太陽電池用シリコン結晶に製造過程で混入され、太陽電池の性能に大きな影響を及ぼす鉄不純物の挙動を精密に調べることにより、長寿命、高発電効率の太陽電池の開発を目指す。

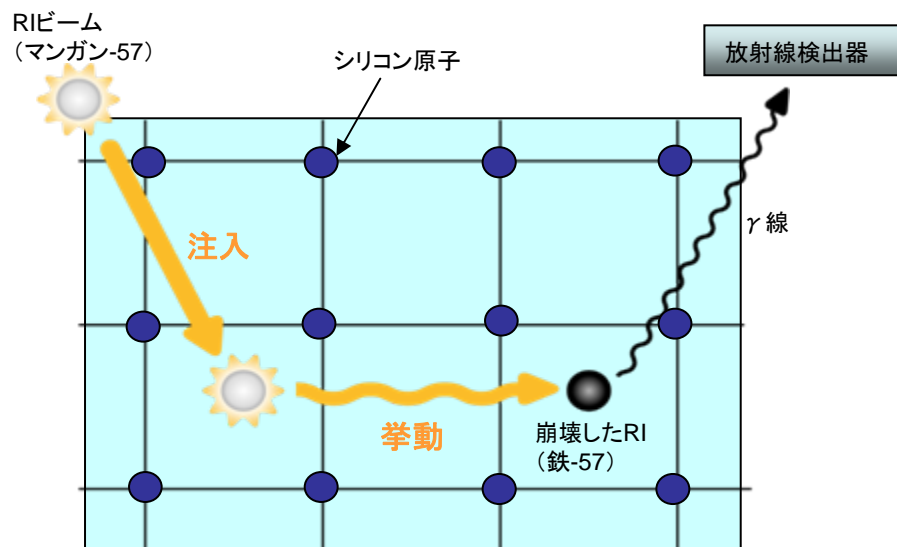
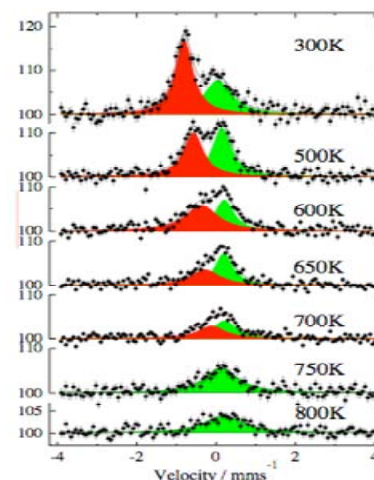


図: RI注入のイメージ



図:  
シリコン型太陽電池パネル



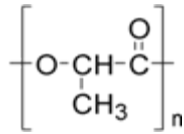
(成果例)

図:  
単結晶のシリコンに埋め込まれた鉄原子核から出る放射線(ガンマ線)のエネルギー分布。  
赤色は格子間、緑色は格子内にある鉄原子を表す。  
下へ行くほど試料が高温であり、鉄原子の動きが激しくなっていることが分かる。

# バイオベースプラスチックの開発

## (例)軟質塩化ビニルに替わるポリ乳酸の開発

ポリ乳酸



- 植物由来で環境に優しい  
カーボンニュートラル材料
- 強度や透明性が高い
- 生体適合性がある
- 放射線分解型
- 室温で硬くて脆い

### 柔らかいポリ乳酸の特長

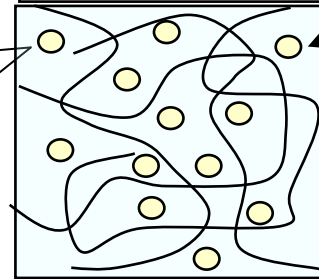
- 高濃度の可塑剤の内部保持により柔軟性と透明性を維持
- 環境に優しく、弾力性に富む
- 生体適合性を保持

### 柔らかいポリ乳酸の応用分野

- 軟質塩化ビニルの代替材料(壁紙等の建材、パッキン、電線被覆材、自動車用部品等)
- コンピュータや携帯電話等の家電内部の防振材
- カテーテル等の医療材料

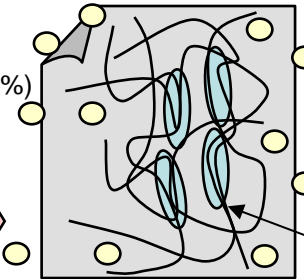


柔軟化ポリ乳酸



可塑剤(20%)

100℃で  
30分加熱

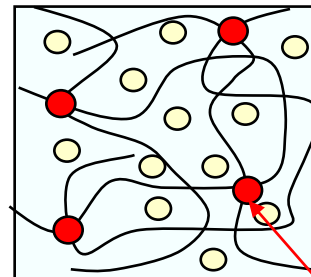


再結晶化



ポリ乳酸が再結晶化してしまい、可塑剤が染み出して、ポリ乳酸が白濁化し、硬くなる

電子線照射

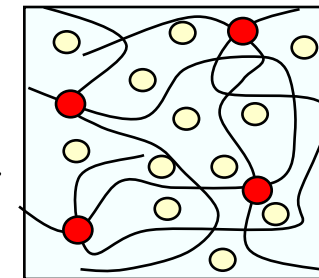


橋かけポリ乳酸

橋かけ点

橋かけにはトリアリルイソシアヌレート (TAIC) が必要

100℃で  
30分加熱



橋かけ構造によりポリ乳酸が再結晶化せず、可塑剤を保持し、柔軟化ポリ乳酸として形状保持



80℃で1週間加熱しても、可塑剤がほとんど染み出さない



可塑剤増加(40%)  
で弾力性向上