

革新的原子力システムの研究開発
の今後の進め方について

平成 14 年 11 月 7 日

原子力委員会
研究開発専門部会
革新炉検討会

目 次

はじめに	1
1. 今何故革新的原子力システムが求められているのか	3
1.1 最近の原子力を巡る内外の情勢	3
(1) 国内の情勢	3
(2) 国外の情勢	4
(3) 革新的原子力システムの視点	5
1.2 革新的な原子力システムによって何をなし得るのか	6
1.3 革新的原子力システム開発へ向けた取組み	7
2. 革新的原子力システムの開発戦略	8
2.1 革新的原子力システムに対する社会的ニーズ	8
2.2 社会的ニーズ達成のための技術とその課題	10
(1) 核燃料資源の有効利用 (エネルギー長期安定供給)	10
(2) 電力需要及び設備投資に対する柔軟性	10
(3) 経済性の大幅な向上	10
(4) 原子力エネルギーの多様な利用	11
(5) 優れた安全性	12
(6) 環境負荷の低減	12
(7) 核拡散抵抗性の向上	13
2.3 革新的原子力システムの研究開発における産学官連携と役割分担	14
(1) 民間、大学及び国 (産学官) の連携の必要性について	14
(2) それぞれの果たすべき役割	14
2.4 開発の進め方のイメージ	16
3. 革新的原子力システム概念 (コンセプトブック)	18
4. 革新的原子力システム開発の新しい国際連携を目指して	37
4.1 世界をリードする研究開発による国際連携の推進	37
4.2 国際プロジェクトへの取組み	37
4.3 実用化に向けた取組み	37
今後の課題	39
参考	40

はじめに

我が国のエネルギー供給構造は先進国の中でも極めて脆弱である。事実、我が国の一次エネルギーの約80%は化石燃料によって賄われており、ほぼ全量を輸入に頼っている。さらに、近年のアジア地域の経済発展とともに東アジア地域での天然ガスなどに対する需要が増加することにより、将来的には我が国が必要な化石燃料を十分入手できず、経済産業活動に打撃を受ける可能性について指摘されている。そのため、我が国のエネルギーセキュリティ確保の観点から、平和利用及び安全確保を前提に、原子力の利用が今後ますます重要な役割を果たすようになると考えられる。経済面では、原子力発電は火力発電に比べ、海外に支払う燃料調達費の割合が小さく、一方、国内に支払う建設費や運転維持費が大きいことから、国内経済の活性化に寄与している。さらには、京都議定書に定められた地球温暖化防止の目標を達成する上で原子力の果たす役割は極めて大きい。

その一方で、近年、電力事業をはじめとする経済規制の緩和、産業活動のグローバル化などが進行するとともに、事故や放射性廃棄物の取り扱いを契機に原子力の社会的受容性の問題が提起されてきた。また、国内での原子力発電所の新規建設の見通しが不透明な中、原子力産業にとっては新しい市場開拓も一つの選択肢であるが、その際には、新規のプラント建設や保全ビジネスでの展開において世界的に厳しい競争が予想されるため、エネルギー資源の確保のみならず、国産の原子力技術の発展と国際競争力の確保が必須である。更に、原子力は地球温暖化問題やエネルギーの安定供給の問題のみならず、これらの新しい状況に対処することが求められており、世界各国で革新的な原子炉及び核燃料サイクル技術（以下「革新的原子力システム」と言う）の研究開発が盛んに行われている。

このような革新的原子力システムには、「革新さ」とともに社会的ニーズを達成するシステムとしての実用化後の姿を常に意識すること、及び、エネルギー分野における急速な技術革新に対応するため、産学官が緊密に連携することなど、従来とは異なる研究開発の進め方が必要となってきた。

また、我が国は軽水炉を中心として世界最高レベルの原子力発電の技術や産業のインフラを有するとともに、原子力研究開発の水準においても世界最高レベルにあることから、革新的原子力システムの研究においては世界を主導する研究開発の推進、我が国の原子力技術の国際化を図ること及び原子力の人材育成に貢献することが期待されている。

平成12年に原子力委員会が策定した原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（以下「原子力長計」と言う）においては、革新的原子力システム（高速増殖炉及び関連する核燃料サイクル技術を含む）に係る研究開発について、国、産業界及び大学が協力して研究開発についての検討を行うことの必要性を指摘しているが、特定の炉型や有望な炉概念についての言及は無く、研究開発の位置付け、在り方及び効果的な研究開発の推進体制等についても、具体的な考え方は示されていない。一方、高速増殖炉及び関連する核燃料サイクル技術については、将来のエネルギー問題の解決を目指す技術的選択肢の中でも潜在的 가능성이最も大きいものの一つとして位置付けている。

原子力委員会は、このような国内外の情勢や革新的原子力システムの必要性及びそれ

に対する社会の期待を踏まえ、研究開発専門部会の下に革新炉検討会を設置し、調査審議を行うこととした。

本報告書は、革新的原子力システムの研究開発に取り組むための第一段階として、我が国における研究開発の現状を把握し、その必要性と開発戦略の考え方をまとめたものである。

1. いま何故革新的原子力システムが求められているのか

1.1 最近の原子力を巡る内外の情勢

(1) 国内の情勢

a. エネルギー供給及び地球環境問題における原子力の位置付け

我が国のエネルギー自給率は、水力、地熱、新エネルギーなどによって4%に過ぎず、また、先進国の中でも一次エネルギー供給における石油依存度が極めて高い。したがって、エネルギー源を可能な限り石油以外のエネルギーに代えていくなどの手段により、このような脆弱なエネルギー基盤を強化することが重要である。そのため我が国では原子力発電の導入を積極的に進めてきた。現在原子力による発電は、52基の軽水炉により総発電電力量の3分の1以上を担う基幹電源となっている。この理由としては、ウラン資源は比較的政情の安定した国に分布していることから、原子力発電は化石燃料資源に比較して供給安定性に優れていること、核燃料サイクルを導入することにより、輸入したウランをより高い効率で利用し、一層長期にわたり安定的にエネルギーを供給することが可能であること等が挙げられる。

また、発電過程で二酸化炭素を排出しないことから、地球温暖化対策の観点からも、原子力発電は重要な役割を担っている。平成14年3月に決定された「地球温暖化対策推進大綱」においても指摘されているとおり、引き続き増加が見込まれるエネルギー需要を満たしつつ二酸化炭素排出量を削減するためには原子力発電所の新增設が不可欠とされている。

このように、原子力はエネルギー供給や地球環境問題において重要な役割を担っている。

b. 原子力発電の現状

今後の軽水炉の増設については、現在3基が建設中であるものの、従来2010年度までに16～20基を運転開始するとされていたものが、平成14年度電力供給計画においては12基に減少しているように、原子力発電所の新規立地及び増設については年々厳しい状況となってきた。

この背景の一つとしては、もんじゅ事故、JCO臨界事故など90年代後半からの一連の事故により原子力の社会的受容性が低下したという社会情勢がある。安全への不安・不信の払拭、及び運転に伴って発生する放射性廃棄物の処理・処分への取組みに対し一層の理解を得ることが求められている。

一方、昨今の景気の低迷に伴う電力需要の伸び悩み、平成7年より始まった電力自由化の一層の本格化を控え電力会社の経営環境が益々厳しさを増していること等の社会情勢により、初期投資負担の軽減、電力需要の伸びの変化に対する電源計画の柔軟性確保等への要求が高まっている。

c. 関連業界の動向

これまで我が国の原子力産業においては、軽水炉システムを中心に高度な水準の技術基盤を確立してきており、これにより近年は年10件台の低いレベルでの計画外停

止や約80%の高い設備利用率を達成してきたところである。

しかしながら 産業界においては、新規立地の減少による受注の低迷を受け、経営環境は一層の厳しさを増していることから 新しい市場開拓を通じた原子力産業の活性化が必要となってきた。 (社)日本原子力産業会議等の調査では、原子力産業の従事者数についても近年減少傾向にあり 人材の確保、育成などに関して適切な方策がとられなければ、将来的には現在の水準の技術基盤が維持できなくなるという懸念もある。

(2) 国外の情勢

a. エネルギー及び電力を巡る動向

国際的なエネルギーを巡る情勢は、今後、アジア地域を中心とする発展途上地域におけるエネルギー需要は2020年には1997年比で57%増加が見込まれるほど急速な伸びが予測されている。中でも化石燃料消費の増分に占めるアジア地域のシェアは大きく、地域全体としてエネルギー供給の不安要因が高まってきている。一方で、アジア地域などで原子力発電の導入・増加が見込まれることから、将来的にはウランの需要も世界的に見て増大するものと考えられる。したがって、我が国のエネルギー安定供給に対する潜在的リスクはますます高くなっていく懸念がある。

電気事業を巡る動向としては、欧州連合 (EU) においては家庭用を含めた小売り分野について、電力の購入先を自由に選択できるようになり市場競争が激化し、これに伴い国境を越えた電力会社の吸収、合併が行われている。また、米国においては、原子力発電所の設備利用率の向上等により経済性が格段に向上し、発電規模が大きく効率性に優れるものとして電力会社間で原子力発電所の売買が活発化している。

また、欧米において原子力発電所の新規建設が停滞している状況を反映し、原子力産業の再編・統合が急激に進んでいる。

b. 各国の取組み

米国においては、1970年代以降原子力発電所の新規建設が途絶えているが、エネルギー源の多様化、地球温暖化ガスの発生抑制、原子力技術の維持・発展等の観点から原子力を重視する方向に政策転換しつつある。米国エネルギー省 (DOE) は、原子力エネルギー研究イニシアチブ (NERI) 計画により革新的原子力システムのシーズ技術開発を進めるとともに、第4世代原子力システム (Generation IV) 開発を国際社会に提唱している。

このような革新的原子力システムの研究開発は、ロシアでは高速炉を中心に研究開発が進められ、カナダではカナダ型重水炉 (CANDU) の改良型を中心に、フランスでは新たにガス炉に集中した研究開発が進められている。その他、韓国、中国、アルゼンチン等においても研究開発が進められている。

一方、南アフリカにおいては、実証炉を兼ねたペブルベッド型モジュール高温ガス

炉 (PBMR) 実用炉の2003年の着工を目指して開発が進められており 実験炉、実証炉、実用炉 (商業炉) というステップにとらわれない導入形態も現れている。

これらの研究開発においても他分野の大型研究開発と同様、一国のみで開発を進めるよりは、人的・資金的に国際分担を行い、成果を共有するという考え方が広まっており 現在、国際機関等を中心に、経済性 / エネルギーの安定供給性 / 安全性、核拡散抵抗性等の高い次世代の原子力システムに関する検討を行うための国際フォーラム (第4世代原子力システム国際フォーラム : GIF や革新的原子力炉開発プロジェクト : INPRO) が形成され、我が国も検討に参画するなどしている。

c. 核拡散防止等に係る取組み

2001年9月11日の米国同時多発テロ以降、原子力施設に対するテロへの懸念が高まり その対策が主要国首脳会議等でも議論されているところである。

一方、核物質や原子力技術、資機材は核兵器の材料や製造への転用が可能であることについては、従来から国際社会が懸念しており 原子力の平和利用を円滑に推進するためには、国際的な核不拡散に対する取組みは極めて重要であると認識されている。このため、核兵器の不拡散に関する条約 (NPT) に基づき、国際原子力機関 (IAEA) が保障措置を厳格に実施しており これに加えて、核拡散防止等に係る取組みを強化することが求められている。

(3) 革新的原子力システムに必要な視点

以上のような内外の情勢を踏まえると エネルギー資源の大半を海外に依存する我が国が、地球温暖化防止を念頭に置きつつ21世紀においても国民生活や経済基盤を維持・発展していくためには、原子力が「エネルギーセキュリティの確保」にこれまで以上に重要な役割を果たすことが求められている。また、最近の景気低迷や新規立地難などの経済社会情勢を受け、原子力の技術基盤の維持や経済社会へのイノベーション (技術革新) の喚起のために、新たに注目されてきた視点として、新しい市場開拓を通じた原子力産業の活性化、新産業の創出」が挙げられる。つまり 市場を見据えて、国際的に評価され得る有望な自主技術を我が国に蓄積することも長期的に極めて重要な視点である。21世紀における革新的原子力システムの研究開発は、これらの視点を常に意識して進められていくべきものである。

一方で、原子力に関する一連の事故がもたらした国民の不安感・不信感は、原子力の社会的受容性の問題を浮き彫りにした。社会的受容性の確保は、原子力利用に当たっての大前提であり「社会的受容性の向上」は前述の視点とともに共通的に考慮すべき視点として挙げられる。

1.2 革新的な原子力システムによって何をなし得るのか

現行の大型軽水炉システムは、我が国の基幹電源として、社会的受容性を保持しつつ、エネルギーセキュリティの確保に大きな役割を果たしてきており 当面はその役割を果たし続けると考える。しかし、長期的には上述の目標を追求するに当たり 現行システムには限界がある。

例えば、プルサーマルも含めた現行の軽水炉システムでは、スケールメリットの追求により大型化しているが、電力需要の大幅な増加が見込めない情勢下において、新規立地あるいは増設が停滞していることの一因となっている。また、ウラン資源の有効利用度が必ずしも高くないこと(燃料の増殖を考慮していないため)、我が国では発電にしか実用化されていないこと(熱利用や中性子利用など様々な利用ポテンシャルを有している)等が挙げられる。米国のように電力自由化の進んだ国においては、軽水炉はプラント生涯にわたっての発電コストが一番安いものの、初期投資額が大きいため、投資リスクの観点から、建設が進まないという状況も現れている。

また、原子力全体の安全性が社会から不安視されていること、長期間の管理が必要な放射性廃棄物の発生に対する懸念があること、国際原子力機関 (IAEA)による十分な保障措置を実施しても更なる核拡散抵抗性の向上が期待されていること等の視点に対応することが必要である。

革新的原子力システムは、このような現行の軽水炉システムの持つ限界を超えることにより、エネルギーセキュリティの確保、原子力産業の活性化による技術基盤の維持、新産業の創出による経済社会への貢献及び社会的受容性の一層の向上といった社会的な目標を達成することを目指すものである。

1.3 革新的原子力システム開発に向けた取組み

民間においては、研究開発や生産設備に対して大規模な資金投入を行うことが困難ではあるが、受注の低迷による閉塞した状況を打破すべく、現行の大型軽水炉システムに替わり得る革新的な原子力システムの開発を目指した様々な概念検討をメーカー各社、研究機関あるいは電力会社において進めている。

大学においては、超臨界圧軽水冷却炉、鉛ビスマス冷却炉の研究をはじめとして、各大学において革新的原子力システムの研究開発が進められている。大学における革新的原子力システムの研究開発は、人材育成のみならず、技術開発シーズの創成の観点で今後益々必要となっている。

国においては、特殊法人である日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構の原子力二法人が革新的原子力システムの研究開発を進めている。具体的には、日本原子力研究所において、低減速スペクトル炉の研究開発、高温工学試験研究炉（HTTR）の研究開発が進められている。また、核燃料サイクル開発機構において、高速増殖原型炉「もんじゅ」の研究開発、及び将来の高速増殖炉サイクルの実用化像の具体化を目指した高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究が進められている。

両法人は、平成13年12月に閣議決定された特殊法人等整理合理化計画において、廃止した上で統合し、新たに原子力研究開発を総合的に実施する独立行政法人を設置する方向で、平成16年度までに法案を提出するものとされており、現在、文部科学省において統合に向けた準備作業が行われている。新法人の具体的なミッションは検討中であるが、革新的原子力システムの研究開発に関して、国の中核的研究開発機関として、研究開発を進める役割を果たすことが期待されている。

この他、文部科学省及び経済産業省が、原子力長計を踏まえ、これまでの革新的原子力システムに関する研究開発に加えて、公募型研究制度を実施している。

文部科学省においては、産学官連携を通じた競争的な環境下での優れた成果の創出及び新たな国際的な動向へ対応した将来性に富んだ革新的原子炉技術の開発及び核燃料サイクルシステムの技術開発の2分野について、平成14年度より公募事業を開始している。

さらに、経済産業省においては、原子力に係る安全性・経済性を追求する革新的・独創的な技術を発掘し、競争環境下での技術開発を推進するため、原子力発電、ウラン濃縮、再処理、放射性廃棄物処分等に関し、安全性・経済性について実用化を見込んだ革新的・独創的なテーマについて、平成12年度より公募事業を実施している。

2. 革新的原子力システムの開発戦略

2.1 革新的原子力システムに対する社会的ニーズ

革新的原子力システムの開発戦略を考えるに当たっての最も重要なポイントは、開発されたシステムが実際に利用されることである。そのためには、革新的原子力システムに対する社会的ニーズを把握し、システムがこれに応えられるものであるかを常に意識し続けるべきである。

第1章では、最近の原子力を巡る内外の情勢を踏まえ、我が国が抱える2つの重要な視点として、

(1) エネルギーセキュリティの確保

(2) 新しい市場開拓を通じた原子力産業の活性化、新産業の創出を挙げた。また、いずれの視点に着目する場合でも共通する視点として、

(3) 社会的受容性の向上

に配慮することが重要である。これらの視点から、例えば、以下の社会的ニーズが抽出されると考えられる。

核燃料資源の有効利用 (エネルギー長期安定供給)

技術立国を目指す我が国にとってエネルギー長期安定供給は必要不可欠であるが、我が国は国内にエネルギー資源をほとんど有しておらず、一次エネルギーの95%を輸入に依存している。このように、エネルギー供給構造の脆弱な我が国においては、長期的に核燃料資源を有効に利用する革新的原子力システムが求められる。また、このことは、世紀を超えて世界の持続的発展可能性を確保することにも寄与することとなる。

電力需要及び設備投資における柔軟性

我が国の経済の低迷等により現在電力需要は伸び悩んでいる。また、電力自由化により経営上短期の資金回収が必要となりこれまでのように10～15年で建設費を回収しようとする、価格競争力の観点から、他電源に対抗することが困難となる。従って、これら変化の激しい社会情勢の中、電力自由化の環境下での投資負担の軽減、需要地近接等立地自由度の増大・送電線負担軽減等に対応可能な革新的原子力システムが求められている。

経済性の大幅な向上

電力自由化など競争的環境の中で、エネルギー市場において原子力が存在価値を持ち続けるためには、経済的な合理性、競争性が求められることとなる。また、国際的な展開を考慮する場合においても、革新的原子力システムが経済的に比較優位性を持つことが重要である。

原子力エネルギーの多様な利用

世界では、地域暖房用、海水脱塩用といった原子力システムが存在するが、我が国では、原子力エネルギーの利用は電気エネルギーを介して行われている。また、近年大都市近郊や島しょ部等において、水不足が深刻な問題となっている。そこで、柔軟な熱供給による冷暖房や海水淡水化を経済的に行える革新的原子力システムが求められている。

また、将来的に燃料電池等の燃料として水素の需要が急増するとの予測から、国内外で水素製造の研究開発が活発化しており、原子力による経済的な水素製造を可能とする革新的原子力システムが求められている。

優れた安全性

現行の原子力発電は、固有の安全性及び多重防護の思想が取り入れられており、火力発電など他の発電方式に比して公衆の健康影響の防止において優れた実績を有している。しかしながら原子力事故の被害は、多くの人々に広い地域に長年にわたって及びうることから、また、放射線が目に見えないという一種の恐怖から、原子力システムに対して優れた安全性が求められてきた。そのため、革新的原子力システムにはより一層の安全性の向上が求められている。

環境負荷の低減

原子力システムは、放射性廃棄物の処理処分を適切かつ確実に実施する限り、他のシステムに比べ環境負荷の極めて小さなシステムであるが、更なる低減を目指し、高レベル放射性廃棄物の発生量の低減及び放射能レベルの低下による管理期間の短縮化、更には周辺環境への廃熱量の低減が革新的原子力システムに求められる。

核拡散抵抗性の向上

地域紛争、テロ等で核兵器が使われることがないように、核燃料輸送、製造、燃焼、貯蔵、再処理時等における機器・設備・システムなどにおいて、核拡散に対する十二分の抵抗性を有することが世界的に求められており、核拡散抵抗性の向上が革新的原子力システムに求められている。

上記の社会的ニーズの他、21世紀の社会的ニーズに合致した原子力の特性として、原子力による発電は発電過程において二酸化炭素を排出せず、二酸化炭素排出量の削減に既に大きな役割を担っていることが挙げられる。

なお、革新的原子力システムとしては、いくつかの社会的ニーズに焦点を当てた複数のコンセプトが提示されることとなる。これらの社会的ニーズのどれが重視されるかは、その時々々の社会的情勢や原子力ユーザーの考え方により異なるものである。

2.2 社会的ニーズ達成のための技術とその課題

以上を踏まえ、革新的原子力システムが21世紀の社会的ニーズを達成するための技術とその課題としては、以下の項目が挙げられる。なお、技術的課題の中には、その解決が複数の社会的ニーズ達成に寄与できるものもあるが、ここでは最も深く関連すると思われる社会的ニーズに対応させて示している。

(1) 核燃料資源の有効利用（エネルギー長期安定供給）

エネルギーの長期安定供給というニーズを達成するために核燃料を有効に活用する方策としては、“高転換 / 増殖”が挙げられる。

高転換 / 増殖の最終的な目標は、高速増殖炉サイクルの実用化であり、そのためには原子炉の開発だけではなく、燃料サイクル、すなわち炉・再処理・燃料製造の整合に関する課題の解決が重要である。特にサイクルの経済性を向上させるための低除染再処理技術、低除染燃料製造技術及びこれを受入れられる炉心技術の技術基盤確立とその実用化が課題である。また、軽水冷却を用いた低減速炉心による高転換 / 増殖の開発等も高速増殖炉サイクルの実用化までの間を担う選択肢として、その可能性が挙げられる。この実現のためには、被覆管開発、熱水力的な評価、炉心安全性評価等による技術的成立性の確認が必要であるとともに、経済的な成立性の確認が必要である。

(2) 電力需要及び設備投資に対する柔軟性

電力自由化の環境下における電力会社の経営上の要求である初期投資額の低減に対する方策としては以下が挙げられる。

- a. 立地の不確実性に対する柔軟性
- b. サイト立地条件の緩和

不確実性のある電力需要や建設計画への初期投資額を低減するには、社会的・制度的な整備の他に、技術的な課題として、初期コストが小さく段階的に増設が出来る小型モジュール炉の導入が考えられる。小型モジュール炉には軽水炉、ガス炉、液体金属炉で多数の概念が提唱されているが、現時点ではいずれの炉型も概念の段階であり、スケールデメリットの克服方策の考案とともに、重要な機器の開発・実証と、炉型によっては実証炉の建設が必要とされるものもある。また、炉の実証試験に当っては、従来の実機ベースの試験による方法に替わる小型もしくは部分試験と解析を用いた合理的な開発方法の確立も技術課題の一つである。また、出力ラインナップ化により、電力需要に合わせた炉の導入も可能となる。

次に、立地地域、需要地域や電力網の環境等の様々な周辺条件に適合するには、建屋 / 機器をサイト立地条件（軟弱地盤立地、海上式、地下式等）に係わらず適用できる建屋制振 / 免震装置の開発が長期的技術課題として挙げられる。

(3) 経済性の大幅な向上

他電源、他プロセスに競合できる経済性を達成するための方策としては、以下が挙げられる。

- a. システムの合理化・簡素化
- b. 高熱効率等の高性能化
- c. 建設期間・準備期間の短縮
- d. 高燃焼度化等の燃料サイクル費の低減
- e. 設備利用率の向上

システムの合理化・簡素化については、従来の実績に基づいて簡素化する方法の他、従来個別に考慮していた設計余裕を統合的に設計・解析する手法を開発することにより最適化することが課題である。さらに、革新的システムの導入による合理化、簡素化が必要であり、例えば、気水分離システムや再循環システムが不要になる超臨界圧軽水冷却炉のように原理的にシステムを簡素化できる技術の開発が課題となる。

高性能化については、熱効率を向上する超臨界圧軽水冷却炉や液体金属冷却高速炉、高温ガス炉などが提唱されており、重要な機器や燃料/材料の開発から実証データの取得が課題である。

建設期間・準備期間の短縮については、鋼板コンクリート構造や船殻構造とそれらを組み合わせた大型モジュール化などの従来工法を高度化する他、小型炉では工場での一体組み立て、輸送とらような新工法の適用が考えられる。

燃料サイクル費の低減については、前述の高速増殖炉サイクルでの再処理技術や、その燃料製造技術の実用化による経済性の向上が課題である。また、軽水炉等現行発電炉における高燃焼度化による燃料サイクル費の低減は、従来から段階的なアプローチが採られているが、さらなる高燃焼度化に当たっては、高中性子照射に耐える材料の開発と燃料サイクル全般に渡る臨界安全上の対応が技術課題となる。

設備利用率向上については、運転中保守や状態監視保全等の大幅な導入やそれを可能とするシステム構成などが設計段階の工夫となるが、数年以上の超長期運転サイクルの採用については燃料/材料の開発や制御棒・制御棒駆動装置、炉内核計装機器等の周辺機器のメンテナンスフリー化(保守を不要にすること)や長寿命化が課題となる。

(4)原子力エネルギーの多様な利用

原子力エネルギーの多様な利用については、新規市場創造、社会的受容性向上、国際貢献等の観点から以下が挙げられる。

- a. 水素製造
- b. 高品質炭化水素製造
- c. 熱供給(産業用、地域冷暖房)、海水淡水化

水素製造については、天然ガスの水蒸気改質、化学的触媒を介した水からの水素製造の方法があり、何れも原子力プラントとのインターフェイスが技術的な課題である。原子炉と直結したシステムの実証が最終的に必要である。

高品質炭化水素製造については、石炭やタールなどの低品位化石燃料から環境汚染物質を除去した高品位炭化水素の製造への原子力エネルギーの利用も課題である。

熱供給については、国外では既に廃熱利用として有効利用の実績があり、原子力によ

る海水淡水化も実績がある。

(5) 優れた安全性

現行の商用発電炉は技術的には十分な安全レベルを達成しているが、社会的受容性を向上し、多様な立地条件への対応を可能とするためには、より優れた安全性を実現していく必要があり、その方策としては以下が挙げられる。

- a. 固有の安全特性の向上
- b. 静的安全システムによる分かりやすい安全性
- c. 人的要因に極力依存しない設計

異常事象が生じても自律的に安全な状態へ移行する固有の安全特性追求のための開発は、いずれも炉心構成、核特性等、プラントの基本構成に関わるものであり、現在までに多くの概念が提唱されているが、実用化を視野に入れた戦略と絞り込みが必要である。

分かりやすい安全性を実現する技術としては、重力、対流、蓄熱、放熱、凝縮等による自然の駆動力を利用した炉心冷却・崩壊熱除去や、触媒による可燃性ガス処理等の静的安全システムがあり、技術的知見が蓄積されつつあるが、発電炉への導入の観点からより一層の性能向上や付加価値の創出が必要と考えられる。

プラント異常事態の拡大を防ぎ終息させるために運転員の介在が極力不要となる設計についても、受動安全システムや情報技術活用など多面的なアプローチが課題と考えられる。

(6) 環境負荷の低減

原子力システムは二酸化炭素の排出が極めて少ないことから、環境負荷の小さい発電システムと評価されるが、ゼロエミッションを目指した環境負荷要因の更なる低減の方策としては、以下が挙げられる。

- a. 放射性廃棄物の発生量の低減
- b. 長寿命核種の核変換（マイナーアクチノイド(MA)、長寿命の核分裂生成物(LLFP)の分離・回収・燃焼等)
- c. 廃熱量の低減

放射性廃棄物の発生量の低減については、現状技術でも十分な低減効果が得られているが、二次廃棄物の発生を低減させる浄化技術、廃棄物の高減容分解処理等が課題である。また、廃止措置廃棄物に関してはクリアランスレベル以下に除染する技術並びに検認する技術、廃材のリサイクル利用技術が課題である。さらに、長期間運転可能な長寿命炉心、高燃焼度燃料、メンテナンスフリーなどの革新概念による低減が課題である。

長寿命核種の変換技術については、高速増殖炉サイクルによるMAやLLFPリサイクル(分離・回収再処理技術や、高速中性子による核変換・燃焼技術)及び加速器駆動未臨界炉(ADS)による核変換が挙げられる。このMAの核変換技術を経済的に実施するためには、MAをプルトニウムと随伴させ回収できる再処理技術の開発が必要であり、その技

術基盤の確立が課題である。一方、LLFPの分離・回収・核変換を効率的に行うためには、群分離、場合によっては同位体分離技術の開発が必要であり、その技術基盤の確立が課題である。また、ADSの技術成立性に係わる実証についても課題である。

廃熱量の低減については、超臨界圧タービンや高温ガスタービンによる熱効率向上技術を適用できる原子炉の開発が課題である。また、水素製造、地域冷暖房、海水淡水化などの発電以外への複合的利用によりエネルギー効率向上を図ることも考えられ、各技術の経済性向上が課題である。

(7) 核拡散抵抗性の向上

核拡散抵抗性については、現在もIAEA保障措置と核物質防護 (PP) によって原子力の平和利用が確保されているところではあるが、さらに技術的に核拡散抵抗性を高める方策としては、核燃料の取扱いを困難にする技術が挙げられる。

例えば、プルトニウムの単独での取扱いの回避や、MA・核分裂生成物 (FP) 等の放射性核種を混入しアクセス性を困難にして盗難防止を図るといった方法などがある。MA・FP等の放射性核種の混入による方法に関する技術課題は(4)項の高速増殖炉サイクルによる低除染リサイクルと同様である。

なお、中性子経済の非常に優れた炉概念においては、高燃焼度燃料や長寿命炉心により再処理や濃縮が不要となることも考えられ、核拡散抵抗性の向上に繋がる。

以上、革新的原子力システムが社会的ニーズを達成するための技術課題を示したが、更に、原子力が広く社会的に受け入れられるためには、これから提案される革新的原子力システムが「社会的受容性」の観点で優れたものである必要がある。

「社会的受容性」を有する革新的原子力システムとは、社会が不安感、抵抗感無しに受け入れられるものであるだけでなく、社会(市場もその一部)から積極的に支持されることが必要であり、これを念頭に革新的原子力システムを構築していくことが必要である。

具体的には、上記で述べられた、ゼロエミッション、緊急避難不要の達成等、社会の不安を解消するための対応技術に加えて、投資リスクの低減や他電源、他プロセスに競合できる経済性の確立等、市場にも受け入れられる対応技術の確立を高水準で達成していく必要がある。社会が求めるところに応じて、段階的にその要件を満たしていくことが肝要である。

2.3 革新的原子力システムの研究開発における産学官連携及び役割分担の考え方

(1) 民間、大学及び国（産学官）の連携の必要性について

原子力システムのような多種多様な技術を組み合わせた巨大システム構築に関する研究開発では、民間、大学及び国（特殊法人や独立行政法人等の研究機関（以下、「国の研究機関」という）を含む。）が別々に開発を進めるのではなく、それぞれのミッションに応じた適切な役割分担のもとに、プロジェクトの開始段階から相互に連携しつつ、同時並行的に研究開発を進めることが重要である。

民間、大学及び国が有する資源を有効に活用し、革新的原子力システムの研究開発を積極的かつ効率的に進めていくためには、全ての関係者が産学官連携の必要性と重要性を認識し、互いの立場を尊重しつつ、主体的に産学官連携に取り組もうという意志を持ち、連携をつくることが重要である。

特に、我が国における産学官連携においては、これを推進する行政の役割が重要である。行政は関係府省で連携をとりつつ、研究協力・人材交流に係る規制の改革、ルール作り等必要な制度整備を行うこと、産学官連携への取組みをより積極的に評価すること、国の研究機関が有する施設、技術、人材等のポテンシャルが有効活用されるよう配慮することなどにより、産学官連携を主導的に推進する必要がある。

大学及び国の研究機関においては、研究開発の成果を社会に還元するという意識をより強く持つことが必要であり、システムの実用化を通じたイノベーションや新産業創出につながるため、民間と積極的に連携することが重要である。とりわけ、原子力二法人は国の中核的研究機関として、産学官連携に重要な役割を果たすことが期待される。

民間においては、特に商業用発電炉の実用化に向けては、電力とメーカーが密接に連携することが不可欠であるが、大学や国の研究機関とも積極的に連携することが重要である。

(2) それぞれの果たすべき役割

原子力システムの研究開発における役割分担の考え方として、例えば「エネルギーセキュリティ確保」などのように、初期投資リスクが大きい等の資金的な理由で民間の積極的な参入が期待できないが、国家戦略として推進する必要があるものや、「新しい市場開拓を通じた原子力産業の活性化、新産業の創出」などのように原子力システムの多様な展開を通じ、ビジネスチャンスを拡大していくものがあるが、いずれにせよ産学官がお互いの役割を認識しつつ連携することが重要である。

a. 民間が特に果たす役割

民間の役割は、各々の経営環境を踏まえ、原子力システム、及び機器の設計・製作を行うこと、試験炉の建設を通して早期に製品化技術を獲得すること等が求められる。

b. 大学が特に果たす役割

大学の役割は、先ず第一に革新的原子力システムを学問として体系化することであ

る。次に、自由な発想に基づく多様な研究を通じて、独創的なアイデアの試行と供給を行うことである。また、次世代を担う多様な人材の育成も重要である。

c. 国が特に果たす役割

行政の役割は、原子力長計などの策定により革新的原子力システムの研究開発のあり方を示すとともに、産学官の連携を促進させる環境の整備や国際連携を政策的に推進することである。

一方、国の研究機関の役割は、原子力長計に基づき、原子力科学技術の発展と我が国のエネルギーセキュリティを確保するため、基礎・基盤研究やプロジェクト型研究開発を推進することである。また、革新的原子力システムの研究開発に必要な施設等を整備し、その共用を促進することにより、民間や大学における研究開発の進展に寄与することが重要である。

2.4 開発の進め方のイメージ

原子力は我が国のエネルギーセキュリティを担うとともに、将来の産業戦略となり得る戦略技術である。従ってその研究開発に当たっては適切な競争原理を導入し、各研究機関の活性化を図ることにより、優れた概念・技術を創出するとともに、産学官の協力・協調による研究開発の効率的推進と国際競争力の確立が重要となる。また、国内外の市場の評価を受けることや、原子力以外の技術との比較検討が、技術的成立性、コスト、市場性、社会的受容性を見極める観点から必要である。

エネルギーセキュリティと新産業創出（新市場開拓）という革新的原子力システム開発を捉える上での重要な2つの視点について、従来は前者が国の研究機関の役割で、後者が主として民間の役割であると考えられてきたが、それぞれを国と民間の別々のプロジェクトとして遂行しようとするのは研究資源と能力の有効利用、市場化の可能性、目標とする実現時期などの点で必ずしも適切ではない。国の研究機関と民間がそれぞれの視点を持ってあるプロジェクトに参加し、各々の役割に応じて担うべき課題を分担し、連携しつつ開発を進めるとの考え方もあろう。すなわち国の研究機関と民間の役割はお互いに相補的であり、それぞれが独立して全体を達成しようとするのではなく、役割、特徴を生かして強いところはますます強く、弱いところは補い合いつつ連携して開発を進めることが必要である。なお大学の果たすべき役割も研究機関や民間とはお互いに相補的である。

一方、革新的原子力システムの今後の開発の進め方として、従来の「概念開発段階」「開発プロジェクト段階」「実証試験段階」といったステップを踏襲した場合には、開発が長期にわたる可能性が高く、その結果として、必ずしも開発したものが社会に受け入れられるとは限らない。そこで、革新的原子力システムの開発に当たっては、これら従来の段階に囚われることなく集中的に資金を投入し、効率よく開発することが必要となる。

また、研究開発者は開発の初期の段階から、産業界のみならず海外との連携をはかりあるいはパートナーシップを増加させ、十分な市場調査を行うことによりニーズとの整合性を確認するなど、実用化を見通した視野で市場競争力のある概念を創出し、これを開発する必要がある。さらに、研究開発者が実用化の段階まで全てに渡って責任の一翼を担うことが必要であり、その研究者が実用化後の組織に移行することも場合によっては必要である。

図1に開発の進め方のイメージを示す。中央の黄色の枠内は、各研究機関・組織（原子力新法人・大学・民間）において、連携しつつ、多様な革新炉概念が創出されている様を示している。但し革新炉概念といっても、開発要素の多いものから少ないものまで存在すると考えられる。これらの革新炉概念は、随時市場調査により市場性の有無を勘案し、あるいは文部科学省や経済産業省の公募型研究制度等を通じて淘汰され、開発を中止するか、場合によってはその組織がリスクを負って開発を継続することになる。最終的に残った概念のうち、技術的に困難であるが、国にとって必要なものについては、国の資金的援助を受けて試験炉を建設することもありうる。しかし、実用化に近い革新炉概念のうち、より容易な技術開発で実現し得るものについては、民間の資金負担で開発することが考えられる。

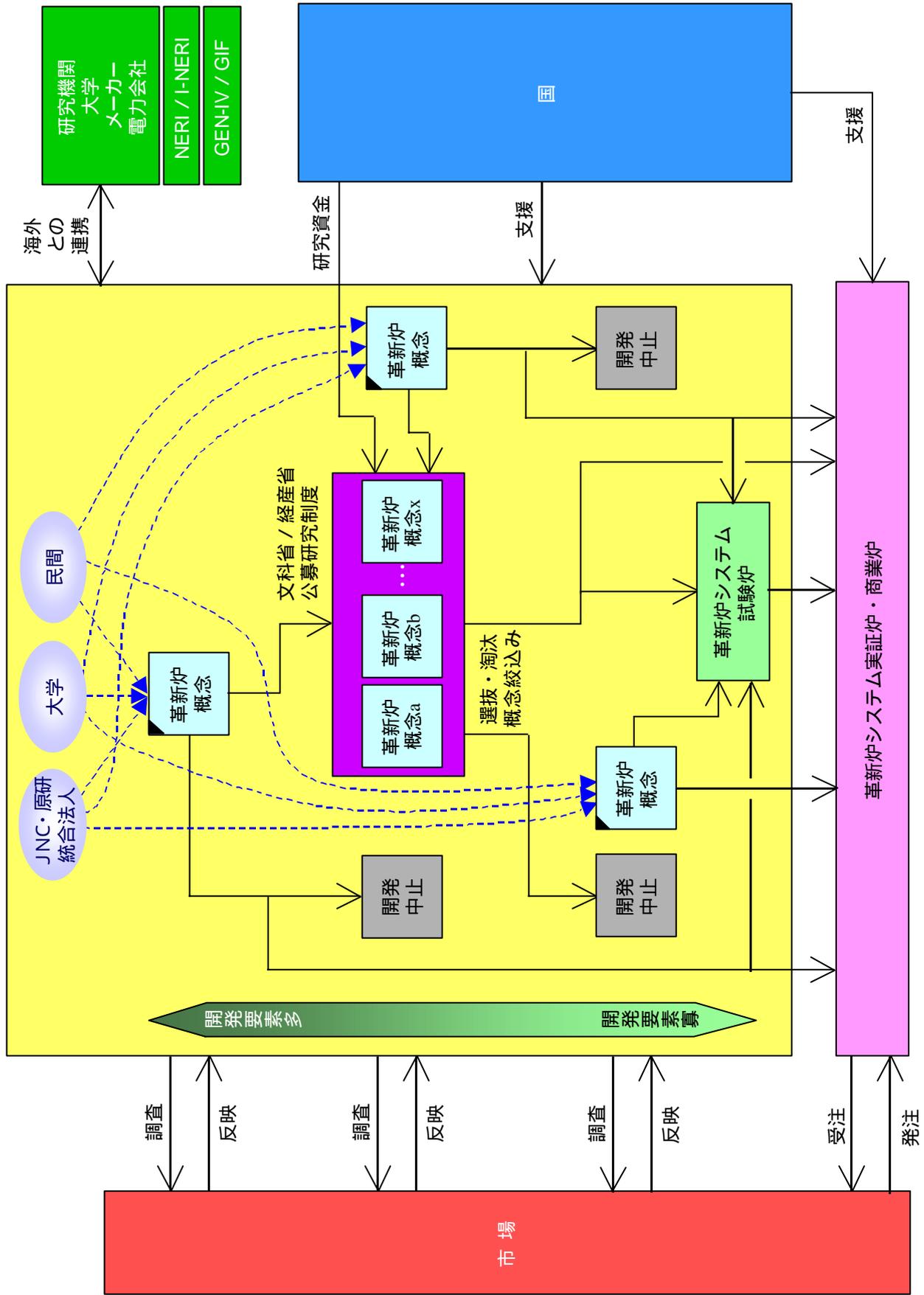


図1 革新的原子炉システムの開発の進め方イメージ

3. 革新的原子力システム概念 (コンセプトブック)

ここでは現在我が国で提案されている各種の革新的原子力システムの概念について記述した。

次世代の原子力システムでは使用済燃料の取扱いに対する考え方(方針、方法)を提示することが必要であり、炉概念に加え付随する燃料サイクル(燃料、再処理方式)についても記載した。

また、各概念の革新性を簡潔に示すため、当該システムが持つ特徴とシステムを構成する主要要素技術について記載した。また、革新的原子力システムは発電、熱供給、水素製造など多様な利用が考えられることから、システムが目指す主な利用目的についても記載した。更には、経済性、初期投資リスク、立地の柔軟性、資源の有効利用性、安全性、放射性廃棄物処分に係る環境への影響、ならびに原子力システムをグローバルスタンダードとするために配慮が必要となる核拡散抵抗性などの社会的ニーズへの対応について記載した。

さらに各概念の実用化を念頭に置くと、利用目的や利用形態に応じて原子力以外のシステムや商業用軽水炉などの現行システムに対する競争力は不可欠であることから、新規市場性、実用化時期、在来炉との役割分担について記載した。なお、システムの実用化時期は、技術開発の困難さや社会のニーズによって見通しが異なるものではあるが、各概念の開発者が実用化を目指して開発を行い、また実用化まで責任の一翼を担うことが重要であるため、1号機設置までのマイルストーンを記載した。

このコンセプトブックは基本的に本検討会委員が開発者の立場から記載したものであるが、その詳細については検討会として評価がなされたものではない。ここで取り上げた革新的原子力システムに加え、今後も新たな革新技術を取り入れたシステムが提案され原子力利用が拡大していくことが期待される。

また、各コンセプトブックのシート上には、2.1の ~ で示した革新的原子力システムに対する社会的ニーズのうち、各概念の開発者が特に重視しているもの3つを選んで記入し、分類の助けとしている。

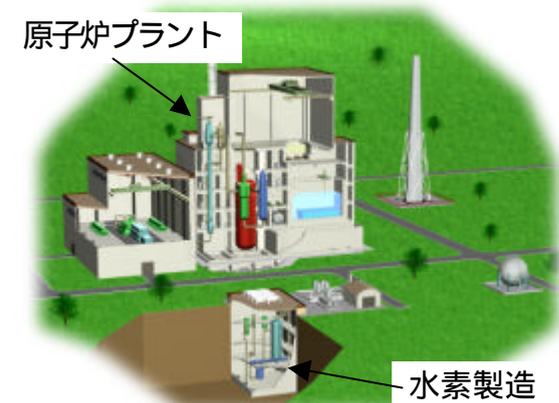
各概念で特に重視している点 (3点選択)

革新的原子力システム に対する社会的ニーズ		核燃料資源の有効利用	電力需要及び設備投資に対する柔軟性	経済性の大幅な向上	発電分野以外への有効利用	優れた安全性	*環境負荷の低減	核拡散抵抗性の向上
1 ナトリウム冷却高速炉・酸化物燃料サイクル								
	a. 大・中型ナトリウム冷却高速炉							
	b. 多目的ナトリウム冷却小型高速炉							
2 ナトリウム冷却高速炉・金属燃料サイクル								
	a. 金属燃料高速炉・乾式リサイクルシステム							
	b. 小型金属燃料高速炉							
3 重金属冷却高速増殖炉								
	a. 中型鉛ビスマス冷却高速炉							
	b. 鉛ビスマス冷却長期燃焼小型固有安全炉							
4 高温ガス炉								
	a. ペブルベッド型							
	b. プリズマティック型							
5 大型ヘリウムガス冷却高速炉								
6 小型軽水炉								
	a. 小型 BWR							
	b. 一体型モジュラー軽水炉							
	c. 分散型小型炉							
7 超臨界圧軽水冷却炉								
	a. 超臨界圧軽水冷却熱中性子炉							
	b. 超臨界圧軽水冷却高速炉							
8 低減速スペクトル炉								
	a. BWR 型低減速スペクトル炉							
	b. リサイクル PWR							
9 加速器駆動核変換システム								

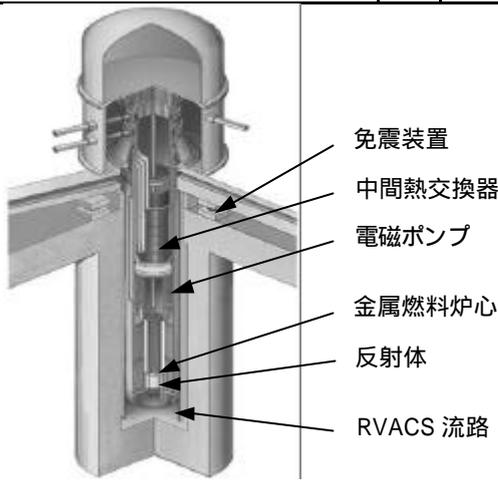
注* :何れの原子力システムも、エネルギー取り出し過程において CO₂ 排出がなく、地球温暖化防止に貢献している。

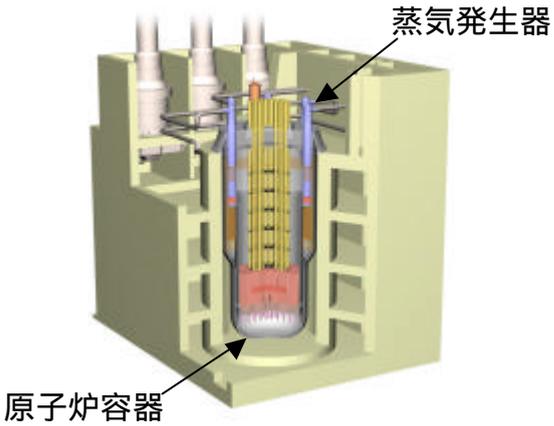
名称(略称)	大・中型ナトリウム冷却高速炉	
開発者	核燃料サイクル開発機構 / 日本原子力発電	
原子炉形式	ナトリウム冷却高速炉	
燃料サイクル形式	1. 酸化物燃料サイクル(先進湿式法/簡素化ペレット法)、代替法として(酸化物電解法/振動充填法) 2. 金属燃料サイクル(金属電解法/射出成型法)	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	日本の高速増殖炉技術とサイクル技術を継承、発展させた低除染TRU燃料ナトリウム冷却高速炉サイクル。革新技術によりシステムを大幅にコンパクト化・簡素化し、経済性向上と廃棄物発生量の低減を図る。Generation- 概念の一つとして登録済み。(1次系循環ポンプと中間熱交換器の機器合体、高強度新材料12Cr系鋼、先進湿式法での晶析技術、高性能遠心抽出器、ソルトフリー技術、金属電解法での高温溶融塩電解技術。)	
主な利用目的	大規模発電	
経済性	原子炉構造コンパクト化、ループ数削減(2ループ)、配管短縮、機器合体等の設計方策及び酸化物燃料サイクルの場合は晶析法導入と溶媒抽出工程の単サイクル化、燃料粉末調整工程の合理化によりシステムを簡素化する。金属燃料サイクルの場合は簡素な設備構成を活かして物量を大幅に削減可能。さらに、燃料の高燃焼度達成を加え、将来軽水炉サイクルと同等の経済性を達成可能。	
初期投資リスク	電気出力当たりの建設コストが低下するため現行軽水炉より低減可能。中型モジュール炉として建設し、初期投資リスクを低減することも可能。	
立地の柔軟性	現行軽水炉程度。	
資源有効利用性	高燃焼度(15万MWD/t)を確保し、高増殖(増殖比1.2 倍增時間35年程度)から低増殖、TRU燃焼まで、ニーズに応じ柔軟に対応可能。	
安全性	多重性・多様性を有する炉停止系、崩壊熱除去系により炉心損傷発生頻度を低減。受動的炉停止機能、自然循環による受動的崩壊熱除去機能を付与。高速炉特有の再臨界問題を回避できる設計を採用。	
環境負荷低減性	廃棄物の発生量の低減、廃棄物の毒性低減が可能。(IPの回収・分離・減容・変換、再処理量の低減、MAの分離・回収・燃焼により実現)	
核拡散抵抗性	低除染TRU燃料リサイクルにより核兵器転用が困難。	
新規市場性	規制緩和されたグローバル市場における新規建設での原子力発電の新型火力に対する競争力奪還の期待あり。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	開発を要する要素技術としては、機器合体、12Cr系鋼、高燃焼度燃料、晶析技術、高性能遠心抽出器、ソルトフリー技術、溶融塩電解技術等。現在は実用化戦略調査研究で概念検討を実施中。2015年までに実用化に向けた技術基盤を確立し、それ以降、早期の実用化を目指す。	
在来炉との役割分担	国内外における軽水炉リプレース等の需要に対応していく。環境保全(廃棄物発生量の低減、廃棄物の毒性低減)、資源高効率利用、ニーズに応じた柔軟な増殖性の確保、需給量に応じたPu利用に貢献。	
資料番号	付2-1A	

No.1b

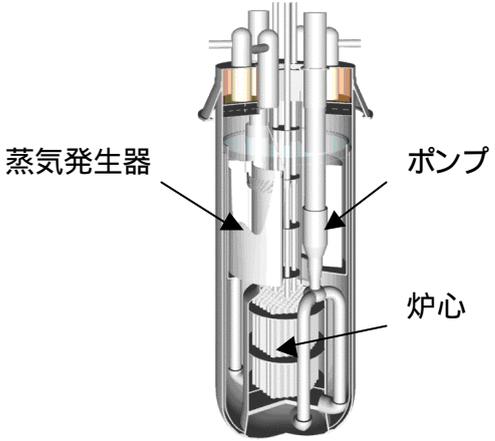
名称（略称）	多目的ナトリウム冷却小型高速炉	
開発者	核燃料サイクル開発機構	
原子炉形式	ナトリウム冷却高速炉	
燃料サイクル形式	1．酸化物燃料サイクル（先進湿式法／簡素化ペレット法等今後開発される方式に柔軟に対応） 2．金属燃料サイクル（金属電解法／射出成型法）	
特徴または独自性（キーとなる要素技術）	これまでに培ってきた技術的知見に基づき、速やかに開発着手可能な酸化物燃料多目的小型高速炉。長寿命炉心により 10 年以上の長期運転サイクルを実現。受動的安全性を確保。将来は金属燃料へ展開可能。水素製造による原子力の多目的利用。Generation- 概念の一つである「ナトリウム冷却高速炉」に該当する。（長寿命炉心の開発、水素製造技術）	
主な利用目的	分散電源（分散電源用ナトリウム小型高速炉も対応可能（付録2 参照））、水素製造、熱利用、海水淡水化等多目的利用	
経済性	原子炉構造コンパクト化等の設計方策によりシステムを簡素化、物量を削減可能。他の原子炉形式と比較して工場生産による標準化・習熟効果により量産効果が大きい。水素製造等多目的利用による経済効果あり。分散電源として、都市近接立地により送電コストが低減可能。	
初期投資リスク	小規模出力の採用に伴い初期投資リスクを低減。これまでに培った高速炉技術（実績豊富な酸化物燃料、既往開発材料を利用した原子炉容器及び冷却系機器）を有効利用することにより、速やかな着工が可能。	
立地の柔軟性	都市近接立地など現行軽水炉より高い立地柔軟性。	
資源有効利用性	高速中性子炉心の有する高い内部転換機能を利用し、炉心の長寿命化が可能。TRU 燃焼などのニーズに応じ柔軟に対応可能な見通し。	
安全性	多重性・多様性を有する炉停止系、崩壊熱除去系により必要十分な安全機能を確保。自然循環による受動的崩壊熱除去系を付与するとともに、低燃焼反応度、受動安全停止機構により ATWS 時にも静定可能。	
環境負荷低減性	低除染・TRU 燃料を燃焼させ、サイクルを通じての環境負荷を低減できる能力あり。余剰中性子を炉心の長寿命化に活用。	
核拡散抵抗性	燃料交換頻度小（10 年以上）。低除染 TRU 燃料の利用可能性あり。	
新規市場性	初期投資リスクの低減や都市近接立地の特徴を加味して、規制緩和されたグローバル市場における新規建設での原子力発電の新型火力に対する競争力奪還の期待あり。水素需要、高温熱源需要に対して新規市場開拓の可能性大。	
実用化時期（1号機設置までのマイルストーン）	大部分が既往技術に基づく。開発を要する要素技術としては、長寿命制御棒、水素製造技術。酸化物燃料サイクルでは 2015 年以前の早期実用化の可能性あり。金属燃料サイクルでは 2015 年までに実用化に向けた技術基盤を確立し、それ以降できるだけ早期の実用化を目指す。	
在来炉との役割分担	国内外軽水炉の役割を補完する分散電源供給に対応。環境保全（廃棄物発生量の低減、廃棄物の毒性低減）、需給量に応じた Pu 利用に貢献。新たな水素需要に対応。	
資料番号	付2 - 1B	

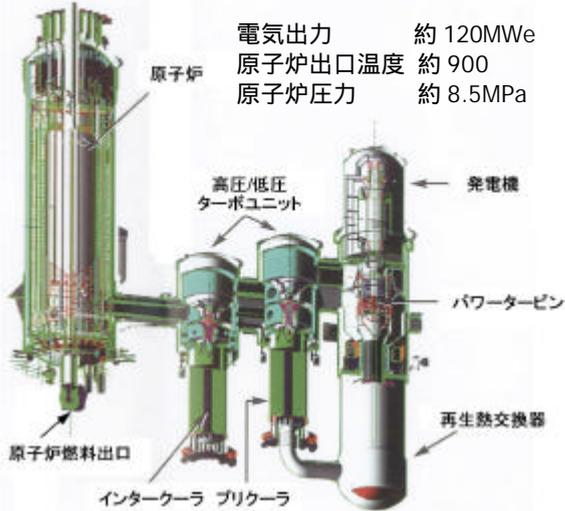
名称(略称)	金属燃料高速炉・乾式リサイクルシステム	<p>金属燃料高速炉サイクル</p>
開発者	電力中央研究所	
原子炉形式	Na冷却金属燃料高速炉	
燃料サイクル形式	乾式再処理 軽水炉酸化物燃料の乾式処理	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	<p>1. 特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> 増殖性、安全性等に優れた商用規模の金属燃料高速炉と乾式リサイクル施設による燃料サイクルシステム 軽水炉使用済み燃料も電解還元処理して高速炉で利用 <p>2. キーとなる要素技術</p> <p>金属燃料高速炉：金属燃料、炉心 乾式リサイクル：電解精製、TRU抽出、射出成型、廃棄物塩処理、酸化物の還元(電解還元、リチウム還元)</p>	
主な利用目的	・エネルギーセキュリティの確保(中・大型炉)、多目的利用中小型炉	
経済性	<ul style="list-style-type: none"> コンパクトで高燃焼度の炉心で長期運転サイクル期間を達成可能 数10t-HM/yの小規模サイクル施設でも高い経済性が達成可能 	
初期投資リスク	<ul style="list-style-type: none"> 金属燃料炉については米において実験炉(EBR-II)で実証 乾式技術については米において工学実証レベルの段階 	
立地の柔軟性	<ul style="list-style-type: none"> 集中立地、都市近接分散立地など、需要、既存のインフラにあわせ、柔軟な立地に対応可能 炉とサイクル施設の同一サイト立地(コロケーション)にも適 	
資源有効利用性	<ul style="list-style-type: none"> 基幹電源として軽水炉、高速炉サイクルから生じるU,Pu,MAを有効に利用 高い増殖性能のため30年以下のシステム増倍時間の達成可能 	
安全性	<ul style="list-style-type: none"> 先行炉と同等以上の安全性確保が可能 燃料が低融点であることを活用した再臨界回避概念の可能性有り 高温バッチ処理に適合するサイクル施設安全論理の確立が課題 	
環境負荷低減性	・長半減期であるマイナーアクチノイド(MA:Np,Am,Cmを総称)をPuと一緒に回収、利用。廃棄物処分に際し環境への負担軽減が可能	
核拡散抵抗性	・Pu単独の分離が原理的に困難、製品の強い放射線強度のため核拡散抵抗性並びに核物質防護性に優れる	
新規市場性	<ul style="list-style-type: none"> 軽水炉サイクルに劣らない経済性の確保が可能 中小型炉は多目的炉として発電分野以外での産業利用可能 乾式技術からは新機能材料の開発等スピンオフ技術へも発展可能 	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	<ul style="list-style-type: none"> 2005年から要素技術の工学実証試験 2010年ごろ「常陽」を用いた燃料照射、乾式リサイクル一体化試験 2020年頃実用化一号炉、サイクル施設の建設 	
在来炉との役割分担	<ul style="list-style-type: none"> 電解還元、乾式再処理の適用で将来の軽水炉サイクルと高速炉サイクルを統合化した炉・サイクルシステムの確立が可能 現行の再処理から生じる高レベル廃液からTRUの分離・燃焼が可能 	
資料番号	付2 - 3B	

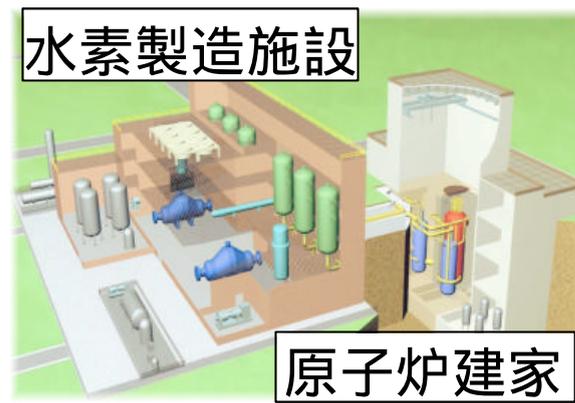
名称(略称)	小型金属燃料高速炉	
開発者	(財)電力中央研究所 株式会社 東芝	
原子炉形式	ナトリウム冷却小型高速炉	
燃料サイクル形式	金属燃料乾式サイクル	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	特徴または独自性 <ul style="list-style-type: none"> ・長期間燃料無交換(10年~30年) ・冷却材ボイド反応度及び全ての温度反応度係数が炉心中負 ・原子炉制御設備の操作が不要な負荷追従性能 ・非常用電源及び動的な崩壊熱除去系に依存しない安全系 ・原子炉の工場生産及び一括移送が可能 キーとなる要素技術 金属燃料炉心、反射体制御、電磁ポンプ、免震、RVACS	
主な利用目的	・電力供給(分散電源)	
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ・量産機で他の分散電源と競合可能、 ・短い建設工期(約2年) ・高稼働率(95%) ・短い廃止措置期間 	
初期投資リスク	<ul style="list-style-type: none"> ・小型であり初期投資額は小さい。 ・建設工期が短いため、投資の回収開始が早い。 	
立地の柔軟性	<ul style="list-style-type: none"> ・立地評価上、必要な敷地面積小 ・免震による耐震標準設計により立地の自由度大 	
資源有効利用性	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼中のプルトニウムの減少は少なく(10%以内)、エネルギーを生産しながらプルトニウムの貯蔵が可能。 ・軽水炉の高次プルトニウムを燃焼しやすいプルトニウム組成に変換できる。 	
安全性	・受動的な安全特性(炉停止と崩壊熱除去)による炉心損傷事故の回避	
環境負荷低減性	<ul style="list-style-type: none"> ・10~30年間1バッチ(この間廃棄物なし) ・MAやFPの消滅可能 	
核拡散抵抗性	<ul style="list-style-type: none"> ・10~30年間燃料無交換(原子炉容器密封) ・低除染MA入り燃料の利用により、核兵器への転用不可、またアクセス不可 	
新規市場性	<ul style="list-style-type: none"> ・大規模なインフラの整備されていない地域での分散電源、・島嶼での電源、 ・需要地近接立地の電源、 ・淡水製造、熱供給、 ・水素製造 ・プルトニウム燃焼炉としての利用も可能 	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	概念設計の段階は終了している。残された課題として、以下が挙げられる。 <ul style="list-style-type: none"> ・金属燃料炉心の安全性の実証 ・反射体(照射挙動、応答特性)の実証 ・環状大口径電磁ポンプの実証 以上の課題について実証試験炉等で確認することにより商用化が可能。さらに、オプションとしてナトリウム-水反応事故がなく、かつコンパクトなSGの開発が課題として挙げられる。 1号機設置までのマイルストーン プロジェクト開始から最短約9年で商用炉1号機着工可能。 (許認可3年、実証試験炉建設2年、試運転・試験2年、型式認定2年)	
在来炉との役割分担	新規市場に対応(地域分散電源、海水淡水化、地域熱供給、等)	
資料番号	付2-3A	

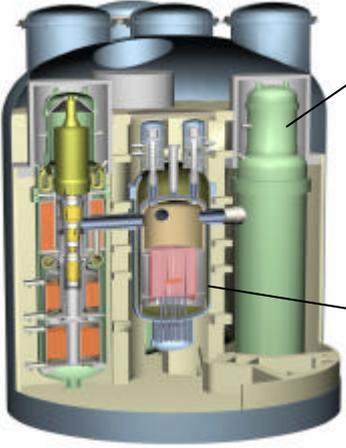
名称（略称）	中型鉛ビスマス冷却高速炉	
開発者	核燃料サイクル開発機構 / 日本原子力発電	
原子炉形式	鉛ビスマス冷却高速炉	
燃料サイクル形式	窒化物燃料サイクル (先進湿式法 / 簡素化ペレット法または金属電解法 / 簡素化ペレット法)	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	中間系削除によるシステムの簡素化を図り、経済性、保守性の向上を追求。自然循環冷却との適合性を活かした受動安全強化、漏洩対策設備の簡素化を図る。窒化物燃料では炭素14生成抑制のために窒素15を使用。Generation- 概念の一つである「鉛ビスマス冷却高速炉」に該当する。(材料の防食技術、冷却材不純物管理技術、晶析技術、高性能遠心抽出器、ソルトフリー技術、溶融塩電解技術、N-15濃縮・回収技術、窒化転換技術、TRU窒化物燃料製造技術)	
主な利用目的	大規模電源(モジュール化による)	
経済性	炉構造、冷却系の簡素化、SG配置合理化による物量削減、BOP設備合理化、所内負荷低減を図るとともに、燃料の高燃焼度達成により、将来軽水炉と同等の経済性ポテンシャルを有する。	
初期投資リスク	電気出力当たりの建設コストが低下するため現行軽水炉より低減可能。中型モジュール炉として建設し、初期投資リスクを低減することも可能。	
立地の柔軟性	現行軽水炉程度	
資源有効利用性	高燃焼度(15万MWD/t)を確保し、高増殖(増殖比1.2、倍增時間約36年)から低増殖、TRU燃焼までニーズに応じ柔軟に対応可能。	
安全性	多重性・多様性を有する炉停止系により十分な安全機能を確保。受動安全として自己作動型炉停止機構を採用。崩壊熱除去系は多重性を有し、受動的な自然循環方式。加えて、ドブプラ反応度、制御棒軸伸び等の固有安全により、ATWS時の高温静定も追及。	
環境負荷低減性	廃棄物の発生量の低減、廃棄物の毒性低減が可能。(HPの回収・分離・減容・変換、再処理量の低減、MAの分離・回収・燃焼により実現)	
核拡散抵抗性	低除染TRU燃料リサイクルにより、核兵器への転用困難。	
新規市場性	規制緩和されたグローバル市場における新規建設での原子力発電の新型火力に対する競争力奪還の期待あり。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	開発を要する要素技術としては、材料の防食技術、3次元免震、窒素15濃縮・高燃焼度窒化物燃料の開発、自然循環冷却実現性の確認が必要。現在は実用化戦略調査研究及び腐食試験を実施中。既存国産材料の炉構造材への適用見通しは2005年に得られる予定。開発期間は、2015年を目処に必要な技術体系を整備し、それ以降できるだけ早期の実用化を目指す。	
在来炉との役割分担	国内外における軽水炉リプレース等の需要に対応していく。環境保全(廃棄物発生量の低減、廃棄物の毒性低減)、資源高効率利用、ニーズに応じた柔軟な増殖性の確保、需給量に応じたPu利用に貢献。	
資料番号	付2-1C	

No.3b

<p>名称(略称)</p>	<p>鉛ビスマス冷却長期燃焼小型固有安全炉(LSPR)</p>	
<p>開発者</p>	<p>東工大、ARTECH、三菱重工</p>	
<p>原子炉形式</p>	<p>鉛ビスマス冷却小型高速炉</p>	
<p>燃料サイクル形式</p>	<p>アクチニドリサイクルまたはワンスルーサイクルFBR (大型CANDLEでは濃縮も再処理も1000年近く不要となる。)</p>	
<p>特徴または独自性 (キーとなる要素技術)</p>	<p>鉛ビスマス高速炉体系での高中性子経済性を活用し、プラント寿命中燃料交換を必要としない長寿命燃焼炉心を達成する。CANDLE燃焼の実証を行うことにより、より優れた大型CANDLE炉(再処理や濃縮を必要としない)にもかかわらず40%の天然ウランまたは劣化ウランを利用できる)の試験炉の役割も果たす。</p>	
<p>主な利用目的</p>	<p>送電網の無い地域での利用、CANDLE燃焼の実証</p>	
<p>経済性</p>	<p>送電網の無いような地域ではいずれの他電源と比べてもより優れた経済性を示せる。</p>	
<p>初期投資リスク</p>	<p>小型であり投資リスクは比較的小さい。大型CANDLE炉のことも考慮すると、リスクに比べて期待値が極めて大きい。</p>	
<p>立地の柔軟性</p>	<p>僻地立地も都市隣接立地も可能で高い柔軟性をもつ。</p>	
<p>資源有効利用性</p>	<p>本炉では増殖を狙わないが、これに続く大型CANDLE炉は現在保有する劣化ウランだけで数100年運転できる。</p>	
<p>安全性</p>	<p>UTOP、ULOF、ULOHSといった事故に対して固有安全性を示す。冷却材は化学的に安定、沸騰もしない。燃料交換等高度な作業が無い。</p>	
<p>環境負荷低減性</p>	<p>運転地ではまったく環境に影響を与えない。大型CANDLE炉が実現したら必要最終処分場を1/10とできる。</p>	
<p>核拡散抵抗性</p>	<p>現地で燃料交換を行わないのですこぶるよい。また大型CANDLE炉が実現したら再処理も濃縮も不必要になる。</p>	
<p>新規市場性</p>	<p>小型炉なので分散電源や地域熱利用などさまざまな用途に利用できる。</p>	
<p>実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)</p>	<p>鉛ビスマスの研究にどれだけかかるかによるが、10年みておけば十分である。大型CANDLE炉は高燃焼度燃料の開発が必要で50年程度みておく必要がある。</p>	
<p>在来炉との役割分担</p>	<p>小型炉なので大型炉にできないことをする。 究極的にはワンスルーFBRによる使用済燃料リサイクル問題の解消。</p>	
<p>資料番号</p>	<p>付2 - 8A、付2 - 8B</p>	

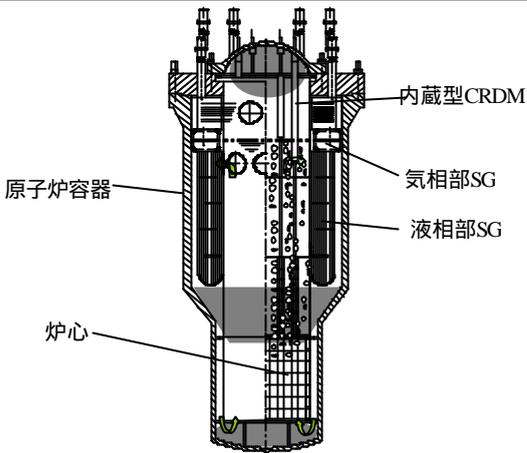
名称 (略称)	高温ガス炉 (ペブルベッド型) (PBMR*を例として記載) *Pebble Bed Modular Reactor	 <p>電気出力 約 120MWe 原子炉出口温度 約 900 原子炉圧力 約 8.5MPa</p>
開発者	南アフリカ PBM R社	
原子炉形式	高温ヘリウムガスタービン発電炉	
燃料サイクル形式	ワンスルー方式 (再処理せず、サイト貯蔵)	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	不活性、放射化しないヘリウムガス冷却材の採用 高温に耐えるセラミクス(SiC)被覆粒子燃料 ペブルベッド炉心による連続燃料交換 高効率を指向したクローズドサイクル・ヘリウムガスタービン	
主な利用目的	分散電源、またはモジュール複数設置による大型電源	
経済性	高い経済性を目標 PBMRの場合、建設費1000～1300\$/kWe (量産機) 主に、原子炉とヘリウムガスタービンから構成される直接クローズドサイクル採用によるシステム簡素化、高温による高効率化	
初期投資リスク	電気出力が約10万kWe級と小型であり、初期投資を小さくできる	
立地の柔軟性	送電網が未整備の地域では分散電源として適用可能。 また、モジュールをユニット化し、大型電源として適用することも可能。	
資源有効利用性	連続燃料交換を行うことにより、燃焼度を高め、有効にウラン資源を活用することを指向。現状、再処理を行う概念としていないが、被覆粒子燃料の脱被覆法が実証されれば、再処理の可能性もある。	
安全性	低炉心出力密度、大きな負の温度反応度係数、黒鉛構造物による高熱容量・安定性、セラミクス被覆粒子採用による1600℃までのFP保持機能等、高い安全性を有する。	
環境負荷低減性	サイト内貯蔵を考慮しており、環境への影響を軽減している。	
核拡散抵抗性	サイト内でのワンスルーサイクルであり再処理過程でのプルトニウム抽出過程がないこと、使用済燃料からの核燃料抽出には脱セラミクス被覆技術が必要であること等、核拡散抵抗性が高い。	
新規市場性	建設費目標を達成できれば、高い経済性及び立地の柔軟性から、原子力発電の新規市場を開拓できる可能性は十分あり	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	PBMRについては、南アフリカ政府の建設許可を取得後、南アに2003年着工、2007年頃運転開始の予定で計画を推進中。	
在来炉との役割分担	分散電源としての適用性あり	
資料番号		

名称 (略称)		高温ガス炉	水素製造用高温ガス炉
開発者	日本原子力研究所 (GTHTTR300 等) 富士電機、他 (GT-MHR)		
原子炉形式	黒鉛減速ヘリウム冷却型熱中性子炉 (プリズマティック炉心)		
燃料サイクル形式	燃料被覆層を除去の後、既存軽水炉と同様の湿式再処理。		
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	高い安全性を有しつつ、高い経済性を達成可能。水素製造等の多様なエネルギー供給が可能。多様な燃料利用に対応可能及び燃料の高燃焼度化が可能。キーとなる要素技術として、HTTR (高温工学試験研究炉) 安全性実証試験等の HTTR を用いて確立される原子炉技術、原子炉出口冷却材温度 850 で 45% の熱効率、950 で 50% の熱効率が可能な直接サイクルヘリウムガスタービン技術、水と核熱だけから水素を製造する熱化学法 IS (ヨウ素/硫黄) プロセス技術。		
主な利用目的	発電、水素製造等の高温熱利用		
経済性	発電コスト約 4 円/kWh が可能。水素製造単価は、従来の化石燃料水蒸気改質法 (二酸化炭素の処理処分費を含めて計算) の約 7 割が可能。		
初期投資リスク	発電用高温ガス炉で約 500 億円 (現行軽水炉の約 1/6)。		
立地の柔軟性	現行軽水炉のリプレイス及び新規立地に対応。需要地近接立地が可能。		
資源有効利用性	高熱効率、高燃焼度により、単位電気出力あたりのウラン使用量を低減可能。		
安全性	簡素な安全設備で現行軽水炉と同等以上の安全性を確保。		
環境負荷低減性	ウラン使用量低減に伴う使用済燃料の低減。高い熱利用率による排熱量の低減。少ない液体廃棄物。二酸化炭素排出量低減。		
核拡散抵抗性	使用済燃料中の核分裂性プルトニウムの割合を低減可能。		
新規市場性	他電源に優る高い経済性による発電市場への参入が可能。燃料電池自動車での大量需要が予測される水素市場の開拓が可能。		
実用化時期 (1号基設置までのマイルストーン)	発電用高温ガス炉の要素技術開発、概念設計・経済性評価に引き続き、2010年代の実用化。 HTTR 水素製造システム実証試験を2008年開始、熱化学法 IS プロセスを2004年度まで工学基礎試験、2010年度までベンチ規模試験、その後、改良型発電用高温ガス炉の実用化、実証高温ガス炉プラント建設に引き続き、2020 - 2030年代の水素製造用高温ガス炉の実用化。		
在来炉との役割分担	需要に対する柔軟性の高い発電炉。水素製造等の高温熱利用。		
資料番号	付2 - 6A、付2 - 4B		

名称 (略称)	大型ヘリウムガス冷却高速炉	
開発者	核燃料サイクル開発機構 / 日本原子力発電	
原子炉形式	ヘリウムガス冷却高速炉	
燃料サイクル形式	窒化物燃料サイクル (脱被覆技術 + 先進湿式法またはフッ化物揮発法 / 湿式ゲル化燃料粒子製造 + 被覆技術)	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	ヘリウムガスタービンを採用し高熱効率の直接サイクル発電。高温熱源、高熱効率による原子力利用拡大。窒化物燃料では炭素14生成抑制のために窒素15を使用。Generation- 概念の一つである「ガス冷却高速炉」に該当する。(高温・高中性子照射場での高燃焼度燃料被覆材・集合体の開発、通常運転時・事故時の除熱特性評価、高温ガスタービンの開発、窒素15濃縮・回収技術、窒化転換技術、ゲル化法による大粒径TRU窒化物燃料製造技術、燃料被覆及び脱被覆技術、廃棄物発生量低減技術。)	
主な利用目的	大規模電源、高温熱源としての利用	
経済性	高温・高効率、燃料の高燃焼度達成による現行軽水炉を上回る経済性ポテンシャルを有する。良好な保守・補修性により運転コスト低減化のポテンシャルを有する。	
初期投資リスク	電気出力当りの建設コストが低下するためリスクの低減化可能。	
立地の柔軟性	現行軽水炉程度。	
資源有効利用性	高熱効率による核分裂エネルギーの有効活用。高燃焼度 (炉心平均10～15万MWD/t)を確保し、高増殖 (増殖比1.1以上)から低増殖、TRU燃焼までニーズに応じ柔軟に対応可能。	
安全性	多重性・多様性を有する炉停止系により炉心損傷発生頻度を低減。また、崩壊熱除去系は多重性を有するとともに、自然循環性能を強化する。さらに減圧事故にスクラム失敗を重畳させた事象にも、自然循環冷却により事故終息が可能となる高い受動安全性を確保できるポテンシャルを有する。	
環境負荷低減性	廃棄物の毒性低減が可能。(FPの回収・分離・減容・変換、MAの分離・回収・燃焼により実現)	
核拡散抵抗性	低除染TRU燃料リサイクルにより、核兵器への転用困難。	
新規市場性	規制緩和されたグローバル市場における新規建設での原子力発電の新型火力に対する競争力奪還の期待あり。また、高温熱源としての利用に新規市場への参入の可能性。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	開発を要する要素技術としては、被覆粒子型窒化物燃料 (窒素15濃縮技術を含む)、脱被覆を含む再処理技術、受動的炉停止機構・高温ガスタービン (1軸型)の開発が必要。現在は実用化戦略調査研究でプラント概念検討を実施中。開発期間は、2015年を目処に必要な技術体系を整備し、それ以降できるだけ早期の実用化を目指す。	
在来炉との役割分担	国内外における軽水炉リプレース等の需要に対応していく。環境保全 (廃棄物発生量の低減、廃棄物の毒性低減)、資源高効率利用、ニーズに応じた柔軟な増殖性の確保、需給量に応じたPu利用に貢献。	
資料番号	付2 - 2B	

<p>名称 (略称)</p>	<p>小型 BWR</p>		
<p>開発者</p>	<p>(株)東芝、 (株)日立製作所</p>	<p>東芝 LSBWR</p>	<p>日立 SSBWR</p>
<p>原子炉形式</p>	<p>BWR</p>		
<p>燃料サイクル形式</p>	<p>酸化物燃料 (UO₂, MOX); 湿式 (Purex) 再処理燃料、 乾式再処理燃料も可能</p>		
<p>特徴または独自性 (キーとなる要素技術)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・超長期運転サイクル (濃縮U, 低減速炉心) ・大幅簡素化設計 (原子炉・タービン建屋合理化構造、静的安全他) ・標準化モジュール工場生産 + 短工期 ・静的安全系の採用、シビアアクシデント対応 		
<p>主な利用目的</p>	<p>発電炉</p>		
<p>経済性</p>	<p>小型 (30万kWe級) で他電源 / 大型炉並みの経済性を達成 ・大幅簡素化・コンパクト設計 ・標準化モジュール工場生産 + 短工期</p>		
<p>初期投資リスク</p>	<p>小型化 (30万kWe以下) により初期投資リスクを軽減</p>		
<p>立地の柔軟性</p>	<p>需要に柔軟に対応し、既存送電設備への負荷を軽減した出力規模</p>		
<p>資源有効利用性</p>	<p>標準炉心を低減速BWR炉心に置き換えPuへの転換する能力あり。これにより資源有効利用が可能である。</p>		
<p>安全性</p>	<p>静的もしくは動的 + 静的のハイブリッド安全系、インベント増加、IVR性向上等、わかりやすく必要十分な安全設備。</p>		
<p>環境負荷低減性</p>	<p>超長期運転サイクルの場合は使用済燃料発生量の低減、簡素化・コンパクト化により廃棄物量削減、船殻構造によりデコミ廃棄物低減</p>		
<p>核拡散抵抗性</p>	<p>超長期サイクル化では燃料交換頻度を低減し、リスクを低減</p>		
<p>新規市場性</p>	<p>温度が280 のため、発電以外では、熱供給 / 海水淡水化への適用が考えられる</p>		
<p>実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・設計 : 概念設計 (~ '03年), 基本設計 (04 ~ '08年) ・建設 : 調査 準備 (~ '10年), 建設 試運転 (~ '14年), 運開 ('15年) ・開発 : 試験 (~ '10年) 		
<p>在来炉との役割分担</p>	<p>分散型立地、需要地近接立地、需要増加への綿密対応、発展途上国輸出</p>		
<p>資料番号</p>	<p>付2 - 9C</p>		

No.6b

名称 (略称)	一体型モジュール軽水炉(IMR)	
開発者	三菱重工業/京大/電中研/原電	
原子炉形式	軽水減速軽水冷却 熱中性子炉	
燃料サイクル形式	軽水炉に適用可能な再処理方法による	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	蒸気発生器を内蔵し、1次冷却材ポンプを削除した一体型自然循環の原子炉である。炉心発生熱は、液相部蒸気発生器と気相部蒸気発生器とによるハイブリット熱移送システムで除熱する。事故時には燃料破損は生ぜず、また炉心冷却は、外部支援不要な自立型静的安全系で行う	
主な利用目的	大規模電源、分散型電源	
経済性	設備簡素化(一体型原子炉、自立型静的安全系等)、標準化等による合理化で大型炉並の経済性を達成。	
初期投資リスク	大型炉並の経済性を達成する小型炉(30万kWe)であり、電力需要の伸びの低迷と大規模投資のリスク回避に対して、電力需要に柔軟に対応できて初期投資リスクを抑えられる。	
立地の柔軟性	小型炉は、電力需要に柔軟に、また大容量送電設備のない立地場所に建設可能である。	
資源有効利用性	現行PWR並。	
安全性	一体型自然循環炉により燃料露出事故の排除、外部支援不要な自立型静的安全系を採用。	
環境負荷低減性	現行PWR並。	
核拡散抵抗性	現行PWR並。	
新規市場性	電力需要の伸びの低迷と大規模投資のリスク回避から大型発電プラントの建設が困難な状況下では、電力需要に柔軟に対応できて投資リスクの小さい経済的な小型炉が新たな市場となる可能性がある。また、自立型静的安全系を採用した小型炉は、経済発展途上国での経済的で取扱い容易な中小型炉とのニーズに合致している。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	実用化済みの軽水炉技術に立脚しており、また基本概念は検討済みである。キー技術である原子炉の一体化と自立型静的安全系の技術開発は、経産省公募研究で2001～2004年度に実施。2010年代での1号炉の設置を目指す。	
在来炉との役割分担	分散型電源(立地場所、建設時期、資金の分散)としてニーズへ対応	
資料番号		

名称 (略称)	分散型小型炉	<p>図 分散型小型炉の概念 (熱供給炉の場合)</p>
開発者	日本原子力研究所	
原子炉形式	軽水冷却軽水減速熱中性子炉 (簡素化一体型炉)	
燃料サイクル形式	現行の湿式再処理、今後開発される方式に柔軟に対応。	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	大型炉では実現が難しい事故発生確率の大幅低減及び受動的安全性の向上により高い安全性を有する一体型炉 / 内装型制御棒駆動装置の採用、浄化系及び体積制御系の排除による原子炉容器貫通配管の大幅削減、受動的な炉停止、炉心冠水及び崩壊熱除去等。一次系に自己加圧・自然循環方式採用の一体型炉により、原子炉系統・機器の大幅簡素化。	
主な利用目的	冷暖房等の民生用熱供給用、離島等の小規模発電、海水淡水化等	
経済性	簡素化一体型炉として、小型化、系統・機器の簡素化、長期運転炉心、運転・保守の簡素化、放射性廃棄物の低減化、量産化等により、小型炉のスケールデメリットの克服を図っている。	
初期投資リスク	小型炉、系統・機器の簡素化、モジュール化等により投資リスク小。さらに、工場生産、量産化、増設の柔軟性等によりリスクの低減化可能。	
立地の柔軟性	陸上立地のほか、ビルの地階、大深度地下、バージ搭載等、柔軟性大	
資源有効利用性	発電と熱利用の組み合わせ、あるいは熱利用のカスケード利用システムにより熱利用効率の向上を図り、資源の有効利用に貢献。	
安全性	事故発生確率の大幅低減及び受動的安全性の向上を図り、高い安全性を有する原子炉 / 需要地近接立地可能性大。大深度地下空洞等の革新的な原子炉立地による事故時住民退避不要への貢献。	
環境負荷低減性	熱利用効率の向上によるウラン資源減少に伴う使用済み燃料の減少	
核拡散抵抗性	長期運転による燃料交換間隔大。専用工場での燃料交換。	
新規市場性	都市の再開発、地震防災、快適な街作りへの地域熱供給の利用。離島、遠隔地での安定したエネルギー源供給。途上国での小規模発電、海水淡水化等のグローバル市場。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	軽水炉技術に立脚しているため、技術開発要素は小。利用ニーズの絞込み後、システムの最適化、法規との整合性確認、基本設計、パイロットプラント建設、総合的な性能確認後に実用プラント建設。実用時期は技術面より利用ニーズの確定、需要地住民の受容性確保に依存 / 10年以内可能。	
在来炉との役割分担	大型原子炉による発電以外の原子力エネルギー未利用分野での多様な利用。	
資料番号	付2 - 6B	

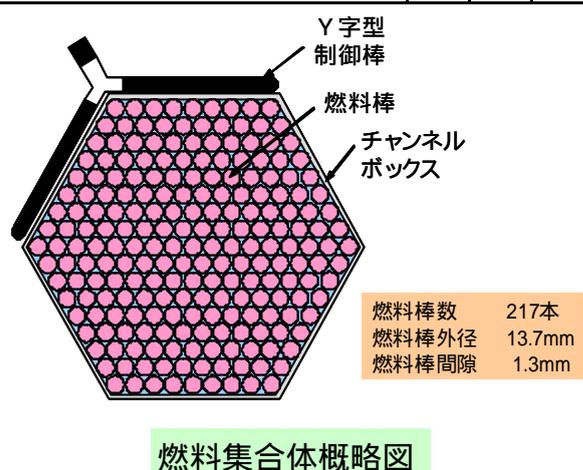
No.7a

名称 (略称)	超臨界圧軽水冷却炉 (SCR)	
開発者	東京大学/ (株)東芝/ (株)日立製作所	
原子炉形式	超臨界圧軽水冷却熱中性子炉 / 高速炉	
燃料サイクル形式	酸化物燃料 (UO ₂ , MOX); 湿式 (Purex)再処理燃料、乾式再処理燃料も可能	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気の超臨界圧化 ・炉内構造の簡素化(対 BWR) ・主蒸気系の簡素化(対 PWR) ・BOP 機器の小型化 	
主な利用目的	発電炉	
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ・既存軽水炉・超臨界圧火力技術の適用により開発コスト低減 ・主要機器の簡素化・小型化により建設コスト低減 ・現行軽水炉の約 28% 増しの高い熱効率により建設・運転コスト低減 	
初期投資リスク	建設コスト低減し、初期投資リスク減	
立地の柔軟性	需要に柔軟に対応し、既存送電設備への負荷を軽減した出力規模	
資源有効利用性	超臨界圧水の高い冷却能力により、稠密炉心の高速炉設計も可能。Pu 転換比の向上により資源有効利用が可能である。	
安全性	高い実績を持つ従来軽水炉の安全系構成を基本に、静的安全系の導入も可能であり、安全性に優れる。	
環境負荷低減性	プラント熱効率の向上により単位発電量あたりの使用済み核廃棄物を削減可能。コンパクトなプラント構成により、廃炉後の廃棄物も減少。	
核拡散抵抗性	使用済み核廃棄物の低減により核拡散抵抗性が向上。	
新規市場性	高い冷却材温度を利用し、水素製造や高品質化石燃料の製造が可能であり、これらの市場への進出が見込める。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	<ul style="list-style-type: none"> ・設計: 概念設計 (~'05 年), 基本設計 ('06 ~ '10 年) ・建設: 調査・準備 (~'15 年), 実証炉建設・試運転('15 年 ~), 運開('20 年) ・開発: 試験 (~'10 年) 	
在来炉との役割分担	在来炉より発電性能やコストで優位である。また小型炉から在来炉並みの出力まで幅広い出力ラインナップをカバーすることや、さらには高速炉設計も可能である。したがって、在来炉の役割をそのまま担う他、小型炉や高速炉の担うべき役割を分担することも可能。	
資料番号	付 2 - 5A	

No.7b

名称 (略称)	高温高性能軽水冷却高速炉 (超臨界圧軽水冷却高速炉)	
開発者	東京大学	
原子炉形式	軽水冷却高速中性子炉	
燃料サイクル形式	混合酸化物 (MOX) 燃料サイクル (湿式或いは乾式の低除染再処理にも対応可能)	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	冷却水エンタルピーが高いため炉心流量が軽水炉の1/8で稠密燃料格子の高速炉心と適合性がよく高速炉の高出力密度の特徴を生かせる。冷却水出口密度は0.1g/cc以下 (沸騰水型軽水炉の1/3) で増殖性がよい。熱中性子炉と同じ原子炉系、プラント系で高速炉が可能。	
主な利用目的	発電炉、プルトニウム多重リサイクル、燃料の増殖	
経済性	高出力密度のため同じ原子炉容器で熱中性子炉より高出力が得られるのでMOX燃料が適切な価格で得られれば熱中性子炉に勝る経済性のある高速炉という永年の夢を実現できる可能性。	
初期投資リスク	300Mwe 1700Mwe級の設計で市場の要求に合った投資規模を実現	
立地の柔軟性	需要動向 / 既存送電設備に合った出力規模	
資源有効利用性	プルトニウムの増殖によるウラン資源の有効利用。プルトニウムマルチリサイクルによる安定した長期エネルギー供給が可能。	
安全性	高い実績を持つ従来軽水炉の安全系構成を基本に受動的安全系の導入も可能であり安全性に優れる。	
環境負荷低減性	プルトニウム多重リサイクルによる使用済燃料蓄積量の低減。熱効率の向上による電気出力当りの廃棄物量と温排水量の低減、プルトニウムと超ウラン元素をまとめた全アクチニドリサイクルも可能。	
核拡散抵抗性	使用済燃料の低減により核不拡散抵抗性向上	
新規市場性	高温超臨界水の化学物質分解性能によりタール等の低品位化石燃料から不純物を除去し、水素や高品質化石燃料製造が可能。触媒を利用して低品位炭化水素より水素製造可能。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	・設計 : 概念設計 (~ '05年) 基本設計 ('06~ '10年) ・建設 : 調査・準備 (~ '15年) 実証炉建設・試運転 ('15年~) 運開 ('20年) ・開発 : 試験 (~ '10年)	
在来炉との役割分担	現在軽水炉の使用済燃料を使用しつつ、新設と既建設替えへ対応する。ウラン輸入への依存のないエネルギーセキュリティの早期実現を目標	
資料番号	付2 - 5B	

No. 8a

名称 (略称)	BWR型低減速スペクトル炉	
開発者	原研 / 原電 / 日立 / 東芝	
原子炉形式	軽水冷却高速中性子炉	
燃料サイクル形式	MOX燃料サイクル (湿式或いは乾式の低除染再処理にも対応可能)	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	MOX燃料サイクルによるプルトニウム多重リサイクルが可能。余剰プルトニウムを持たないプルトニウムの有効利用。プルトニウムの増殖によるウラン資源の有効利用に基づく長期的なエネルギー安定供給の実現。プルトニウムの多重リサイクルによる使用済燃料蓄積量の低減。	
主な利用目的	基幹電源、プルトニウム多重リサイクル、燃料の増殖	
経済性	現行軽水炉と同程度の経済性が期待でき、さらに再処理等のサイクルコストの低減や小型炉の量産効果による建設費の低減により他電源に勝る経済性達成の可能性を有する。	
初期投資リスク	300MWe級～1700MWe級の設計を実現し、市場の要求に合った投資規模を実現可能。	
立地の柔軟性	需要動向 / 既存送電設備に合った大小の出力規模を実現可能。	
資源有効利用性	プルトニウムの増殖によるウラン資源の有効利用に基づく長期的なエネルギー安定供給を実現可能。(MOX燃料サイクルの使用)	
安全性	現行軽水炉と同程度以上の安全性の確保が可能。今後、受動的安全設備の導入も可能。	
環境負荷低減性	高速中性子炉のため、熱中性子炉に比べTRU生成量が少。プルトニウムの多重リサイクルによる使用済燃料蓄積量の低減可能。	
核拡散抵抗性	MOX混合転換や低除染再処理により実現可能。	
新規市場性	本炉概念の中で、転換比は1をやや下回るものの10年程度燃料交換不要の超長寿命炉も可能であり、途上国輸出向け新産業創出も可能。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	炉概念を構築し、その成立性を計算により確認済み。実用化への課題としては、稠密炉心の除熱性能の確認、核設計精度の確認及び燃料の照射特性の確認が必要。今後15年程度の開発において、試験炉等による照射特性確認を経て2020年頃の1号機実現を目指す。それまでの早期実現可能な革新的PUREX再処理による燃料サイクルを使用する。	
在来炉との役割分担	導入後100年程度の期間、次世代軽水炉等のウラン燃料炉と共存しつつ、プルトニウム供給量に応じて順次導入を拡大して行く。	
資料番号	付2 - 6B、付2 - 7A、付2 - 9B	

No.8b

名称 (略称)	リサイクルPWR(RPWR)	
開発者	三菱重工業 / 原研 / 原電	
原子炉形式	重水減速重水冷却 高速中性子炉	
燃料サイクル形式	現状の湿式再処理, 今後開発される方式に柔軟に対応。	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	重水素の優れた中性子反応特性をPu燃料の増殖に振り向け, 現行Na-FBRと同等な燃料リサイクル性能を達成しつつ, 現行軽水炉と同等な安全性・信頼性を維持。	
主な利用目的	大規模電源 / 分散電源とPu燃料増殖炉	
経済性	重水コストを除けば現行軽水炉と同等。製造コストが現行の約1/20 ~ 1/50となる重水製造技術が開発されつつあり, 将来的には重水コストの問題は解消される可能性がある。	
初期投資リスク	現行軽水炉と同等。	
立地の柔軟性	現行軽水炉と同等。	
資源有効利用性	Pu増殖炉であり, 天然ウランを消費することなくPuマルチリサイクルによる安定した長期エネルギー供給が可能。	
安全性	現行軽水炉技術の範囲で現行軽水炉と同等の安全性を確保。	
環境負荷低減性	長寿命放射性廃棄物の消滅。(使用済燃料中のMAを全て燃料として炉心に再装荷できるため燃料サイクル外へのMA排出が無)	
核拡散抵抗性	現行軽水炉と同等であり, 低除染再処理との組合せで更に向上。	
新規市場性	現行軽水炉と同等であるが, 化石燃料及び天然ウランの省資源化に向けては市場性大。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	プラント設計はPWR技術の適用が可能で, 炉心核・熱水力設計及びLOCA時の設計成立性見通しは評価済み。重水及びトリウム取扱はATR・CANDU技術の適用が可能。今後開発すべき技術要素の大部分は次世代軽水炉に対する技術開発の適用が可能。実証試験を中心とした開発期間は今後15年程度を目処に, 2030年代初めに1号炉の設置を目指す。	
在来炉との役割分担	現行軽水炉と共存を図り, FBRサイクル実現までの間の新設、既設建替えへ対応。	
資料番号	-	

名称 (略称)	加速器駆動核変換システム (ADS)	
開発者	日本原子力研究所	
原子炉形式	液体重金属冷却未臨界高速中性子炉	
燃料サイクル形式	マイナーアクチニド窒化物燃料 高温化学再処理 (乾式再処理)	
特徴または独自性 (キーとなる要素技術)	陽子加速器を用いた核破碎中性子源で、未臨界体系の核分裂連鎖反応を維持。核破碎ターゲットと冷却材に、ナトリウムに比べて化学的に安定な鉛ビスマス融合合金を使用。窒化物燃料はマイナーアクチニド (MA) の安定性に優れる。	
主な利用目的	長寿命放射性廃棄物 (MA 及び核分裂生成物の一部) の核変換	
経済性	発電して加速器に給電するため、エネルギー収支は正。ADSを含んだ分離変換サイクル導入は、FBRによる核変換と同等で、電力料金を5~10%増加させるとOECDが試算。	
初期投資リスク	熱出力800MWのADS 1基で電気出力1GWのLWR約10基分のMAを核変換できるため、発電用核燃料サイクルに比べて規模が小さい。	
立地の柔軟性	導入規模が小さいため、再処理工場に隣接して、群分離プラント、燃料製造・処理プラント、ADSを一体として建設できる。MAを分散させずに集中的に管理することが可能であり、燃料輸送の負担を低減する。	
資源有効利用性	廃棄物から、エネルギーを取り出しながら核変換する技術である。	
安全性	陽子ビームの停止により、即座に深い未臨界状態に移行できる。	
環境負荷低減性	再処理後100年以降の長期にわたって放射性毒性を支配するMAを約1/200に低減できる。	
核拡散抵抗性	燃料は放射能及び中性子放出が強いため、核兵器に転用されにくい。	
新規市場性	加速器による新たな産業の創出が期待される。トリウム燃料を使ったシステムや、エネルギー生産の手段として発展の可能性がある。	
実用化時期 (1号機設置までのマイルストーン)	現状は、概念検討と実験室規模の要素技術開発段階である。大強度陽子加速器プロジェクトにおいて、未臨界炉心技術、核破碎ターゲット技術、超伝導加速器技術などの課題に対して成立性の検証と工学データの取得を行い、2020年頃には実験炉規模ADSを建設する。その運転経験を経て、地層処分が具体化する2030年頃の実用化を目指す。	
在来炉との役割分担	在来炉は発電を主目的とし、安全性及び経済性の向上を目指す。ADSは、効率の良い核変換を目指した専用システムである。	
資料番号	付2 - 6D	

4.革新的原子力システム開発の新しい国際連携を目指して

原子力開発利用を進めるに当たっては国際的な視野に立って取り組むことが不可欠であることから、ここでは、革新的原子力システムの研究開発において我が国主導の国際連携を積極的に推進することの必要性、国が国際プロジェクトへの参加を積極的に評価し環境の整備を行うことの重要性及び実用化を目指した国際連携を進めるに当たり考慮すべき視点について記述した。

4.1 世界をリードする研究開発による国際連携の推進

我が国は軽水炉を中心として世界最高レベルの原子力発電の技術や産業のインフラを有しており、革新的原子力システムの研究開発においても、原子力長期計画にも言及のあり、世界を主導する役割を果たす必要がある。

一方、我が国はエネルギー資源のほとんどを輸入に頼っているという国情から、原子力先進国の中でも、比較的大きな開発計画と研究予算により原子力の研究開発利用を着実に推進してきた。そのため、特に高速増殖炉研究などのポテンシャルは大きい。

したがって、我が国主導の国際連携を行うには、国際的にリードすると評価されている日本オリジナルの有力テーマを核として、革新的原子力システム及び共通する要素技術開発の枠組みを提唱、推進することが考えられる。

また、革新的原子力システムの研究開発を国際的な連携により実施する場合、個々のシステムにおいて、技術的進展度、世界への貢献、開発の進捗度、更には国際連携による副次的効果等の観点から、総合的にメリットがデメリットを上回るように国際連携を実施することが必要である。

4.2 国際プロジェクトへの取組み

世界的な革新的原子力システム開発の枠組みとして、米国DOE提唱のGIFやIAEA提唱のINPROにおいて開発候補概念、研究開発計画、要求事項などの検討が進められている。

GIFにおいて選定されたコンセプトの多くは、将来の核燃料サイクルの確立を前提としたものであり、我が国の核燃料サイクル政策とも整合するものである。その技術評価の中で議論されてきた技術のいくつかは我が国が提案したものであり、我が国は関連する試験施設や試験炉など多くのインフラを保有している。

したがって、研究開発に当たっては、国際プロジェクトへの参加を促進するため、個別テーマや要素技術毎に海外の研究機関と相互に協力できるよう海外の研究機関と連携することを行政が支援する、あるいは海外との連携を積極的に評価する等の柔軟な仕組みを構築することが重要である。

4.3 実用化に向けた取組み

グローバル化、電力市場の自由化の動きが不可避な時代にあっては、原子力だけが、国際的な技術としての評価や競争の洗礼を受けずにあり続けることはできない。いずれ我が国の原子力市場にも海外の企業が単独あるいは国内企業と連携し参入してくるであろう。また、逆のケースを考えなければならない傾向も一段と強まる。

研究開発が試験炉、実証炉と進むに従い、国際協力の形態も変化していくと考えられるが、ひとつのビジネスモデルとしては南アフリカ国営電力ESKOM社によるPBMR計画がある。同計画においては、複数の企業からの出資を受け成立性の評価を行い、その成果に基づいて実証炉を兼ねた商業炉初号機を作る予定である。このように、国際的に民間資金を集めつつ、多数基建設による事業の展開を図るビジネスモデルもある。

したがって、実用化（あるいは事業化評価を踏まえた上での実証試験）に向けては、日本から開発・実用化と国際連携のプランを世界に提示し、技術、資金を募集して、またそのような仕組みの成立性を評価して、国際的な分担の枠組みで推進することが考えられる。

今後の課題

将来的には、本報告書においてコンセプトブックとしてまとめられた概念をはじめとする各種の革新的原子力システムが開発される際には、今後の経済社会の情勢の変化や国民の求める社会的ニーズの動向を見極めつつ、個々のシステムの技術的特徴や実現可能性などを判断した上で、原子力委員会が国として重点的に開発すべきシステムの考え方について整理していくことになるが、そのための考え方について検討を行うことが必要である。その一方で、それぞれの開発者は、国の公募型研究制度を利用しつつ、そのシステムに最もふさわしい体制によって研究開発を進めることとなる。

また、原子力委員会においては、革新的原子力システムの研究開発を促進するため、以下の項目について更に検討を進めていくことが必要である。

(1) 産学官の連携を中心とした研究開発のあり方

厳しい経済状況の下、限られた資金、人材を投じて研究開発を効果的・効率的に実施するためには、産学官がそれぞれの役割を明確にした上で、有機的に連携を保ちつつ進めることが重要となる。そのため、産学官の緊密な連携を実施するための研究開発のあり方について検討を行う。特に、民間企業における革新的原子力システムの実用化を促進するとの観点から、国の研究機関、大学などにおける研究開発の進め方に着目することが重要である。

(2) 世界をリードするための国際展開のあり方

革新的原子力システムの研究開発を進めていくに当たっては、諸外国の研究開発と連携していくことが必要であるが、その際に、原子力の研究開発においては、我が国の研究開発活動が世界的水準から見ても活発であることを踏まえると、我が国がリーダーシップを取って進めていくことが期待される。そのための、国際展開のあり方について検討を行う。

参 考

革新炉検討会の設置

審議経過

革新炉検討会の設置

研究開発専門部会革新炉検討会の設置について

平成 13年 10月 9日

原子力委員会

研究開発専門部会

1. 目的

原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」に基づき、革新炉分野における研究開発の着実な推進を行うため、研究開発専門部会の下に、革新炉検討会（以下、「検討会」という）を設置し、調査審議を行う

2. 調査審議事項

- (1)革新炉研究開発の方向性（先進核燃料サイクル研究開発を含む）と開発の進め方に関する事項
- (2)革新炉に関する国際的研究協力に関する事項
- (3)高速増殖炉「実用化戦略調査研究」についての進捗状況のフォローアップに関する事項
- (4)その他

3. 検討会の構成

別紙のとおりとする。

4. 検討の進め方

検討会における議事は、原則として公開とする。ただし、検討会が議事を公開しないことが適当であると判断したときは、この限りでない。

5. その他

- (1)検討会の座長は、必要があると認めるときは、部会長と協議の上、調査審議の結果について、原子力委員会に直接報告することができるものとする。
- (2)その他検討会の運営に必要な事項については、検討会で定める。

(別紙)

研究開発専門部会 革新炉検討会構成員

原子力委員

竹内 哲夫 研究開発専門部会 主任原子力委員 部会長
藤家 洋一 研究開発専門部会 主任補佐原子力委員

参与

秋山 守 財団法人エネルギー総合工学研究所 理事長
清水 彰直 財団法人若狭湾エネルギー研究センター 主幹客員研究員

専門委員

相澤 清人 核燃料サイクル開発機構 理事
饗場 洋一 三菱重工業株式会社 特別顧問
井上 正 財団法人 電力中央研究所 狛江研究所研究参事
兼 金属燃料乾式リサイクルプロジェクトリーダー
大瀬 克博 富士電機株式会社 取締役
(座長) 岡 芳明 東京大学工学系研究科附属原子力工学研究施設 教授
小川 益郎 日本原子力研究所 大洗研究所 核熱利用研究部 次長
佐々木 則夫 株式会社東芝 電力システム社 原子力技師長
鈴木 聖夫 核燃料サイクル開発機構 客員研究員 (第3回まで)
関本 博 東京工業大学原子炉工学研究所教授
早田 邦久 日本原子力研究所 理事
平井 啓詞 日本原子力発電株式会社 取締役研究開発室長
松井 一秋 財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部部長
山下 淳一 株式会社日立製作所 原子力事業部主管技師長

(平成14年11月現在)

審議経過

研究開発専門部会 革新炉検討会の審議経過

第1回 平成14年1月10日(木)

- 議題 (1) 革新炉検討会の当面の進め方について(検討用たたき台)
(2) 革新炉に係る関係省庁の取り組みについて
(3) 内外の革新炉研究開発について
(4) 革新炉概念の整理と検討
(5) その他

第2回 平成14年2月14日(木)

- 議題 (1) 第4世代原子力システムの開発に係る取り組みについて
(2) 革新炉概念の整理と検討
(3) 革新炉概念に係る論点整理
(4) その他

第3回 平成14年3月13日(水)

- 議題 (1) FBR サイクル実用化戦略調査研究について
(2) 革新炉概念の整理と検討
(3) 革新炉概念に係る論点整理
(4) その他

第4回 平成14年4月22日(月)

- 議題 (1) 革新炉概念の整理と検討
(2) 革新炉概念に係る論点整理
(3) その他

第5回 平成14年5月29日(水)

- 議題 (1) 革新炉概念の整理と検討
(2) その他

第6回 平成14年6月18日(火)

- 議題 (1) 革新炉検討会報告書(案)について
(2) その他

第7回 平成14年11月7日(木)

- 議題 (1) 革新炉検討会報告書(案)パブリックコメントの結果について
(2) 今後の検討課題について
(3) その他