



高速増殖炉サイクルに関する 国際的な研究開発の現状

日本原子力研究開発機構

2006年4月26日



「国際的な研究開発」の概観

- 原子力利用が本格化した後、原子力発電の急速な伸び、ウラン資源の制約などから、欧米各国では高速増殖炉実用化に向けた研究開発を開始。
 - ロシアにおいては、原型炉を22年間平均稼働率74%で運転。
 - フランスにおいては、原型炉による研究開発を継続しているが、1998年の政権交代に伴い、経済的理由から実証炉の放棄を政策決定。
 - 米国、英国、ドイツにおいては、70年代後半から90年代にかけて、エネルギー需給緩和、経済性、政治的理由、核拡散への懸念等により、実用化に向けた活動のスローダウンや開発の中断といった動きがあった。
- 活動のスローダウンや開発の中断を行った国の中でも、近年、原子力エネルギーの持続的利用の必要性や放射性廃棄物対策の観点から、高速炉サイクルの研究開発に前向きな動きが見られる。
- ロシアに加え、インド、中国では21世紀におけるエネルギー需要の急速な増加に備えて、高速増殖炉サイクルの実用化に向けた開発を積極的に推進している。
- こうした状況の中、GIF(第4世代原子力システムに関する国際的プログラム)に見られるように、日欧米を中心に高速炉の国際共同研究開発の動きが高まっている。



1. 各国における高速炉開発の経緯（米国）

【過去の経緯】

- 世界で最も早く高速炉開発に着手しパイオニア的役割を果たし、各種の実験炉を建設、運転してきた（1951年にEBR-I: 200kWe、1964年にEBR-II: 2万kWe、1980年にFFTF: 40万kWtなどの実験炉を運転開始）。
- 実験炉に続く原型炉「CRBR: 38万kWe」を建設すべく準備を進めていたが、1977年に核不拡散政策の強化により計画を中止した。
- 1993年にはプルトニウムの民生利用の研究開発を行わないことを決定し、高速増殖炉の設計研究を含めた高速増殖炉サイクルに関わる研究開発は全て中止された。

【近年の状況】

- 米国では依然としてワンスルーの政策をとりつつも、燃料サイクルに関する研究開発を進めている。なお、MITレポートに見られるように、米国では2050年まではプルトニウム利用が不要との意見もある。
- 原子力に関する国際競争力、人材及び知的基盤の維持などを目的として1999年にNERI(原子力エネルギーイニシアチブ)を開始するとともに、2000年から第4世代原子力システム計画(Generation IV)を開始した。
- 共和党ブッシュ政権になり、2001年には原子力を重要な国家戦略とするNEP(国家エネルギー政策)を発表した。2003年からは「処分する高レベル廃棄物(使用済燃料)を減容すること」、「毒性の高い元素の分離」及び「貴重なエネルギー源を再利用をすること」を目的として、燃料サイクルの研究開発を行うAFCI(先進的核燃料サイクルイニシアチブ)を開始した。

米国DOEの原子力エネルギー拡大促進構想

Nuclear Power 2010

- 新規サイトの開拓
- 産業界の取引機会の拡大
- 第3 + 世代原子炉 技術の開発
- 新しい許認可プロセスの実証

Advanced Fuel Cycle Initiative

- 使用済燃料からのエネルギー価値の回収
- 民生用Puインベントリの低減
- 廃棄物の毒性及び発熱量の低減
- 処分場の更なる有効活用



Nuclear Hydrogen Initiative

経済性に優れる商用規模の水素製造
技術の開発

Generation IV

下記を改良したより良い、より安全性の高い
より経済性に優れた原子力発電プラント

- 安全性と信頼性
- 核拡散抵抗性と核物質防護
- 経済的競争力
- 持続性



1. 各国における高速炉開発の経緯（仏国）

【過去の経緯】

- 1967年に実験炉「Rapsodie: 4万kWt」の運転を開始して以来、1974年に原型炉「Phenix: 25万kWe」、1986年に実証炉「Super-Phenix: 124万kWe」の運転を開始し、1988～1998年には欧州協力による欧州統合高速炉「EFR*: 150万kWe」の開発計画を主導した。
- 1969年から1979年にかけてラ・アークの再処理パイロットプラントで、1974年からはマルクールのパイロットプラントにて、「Rapsodie」や「Phenix」の燃料が処理された。

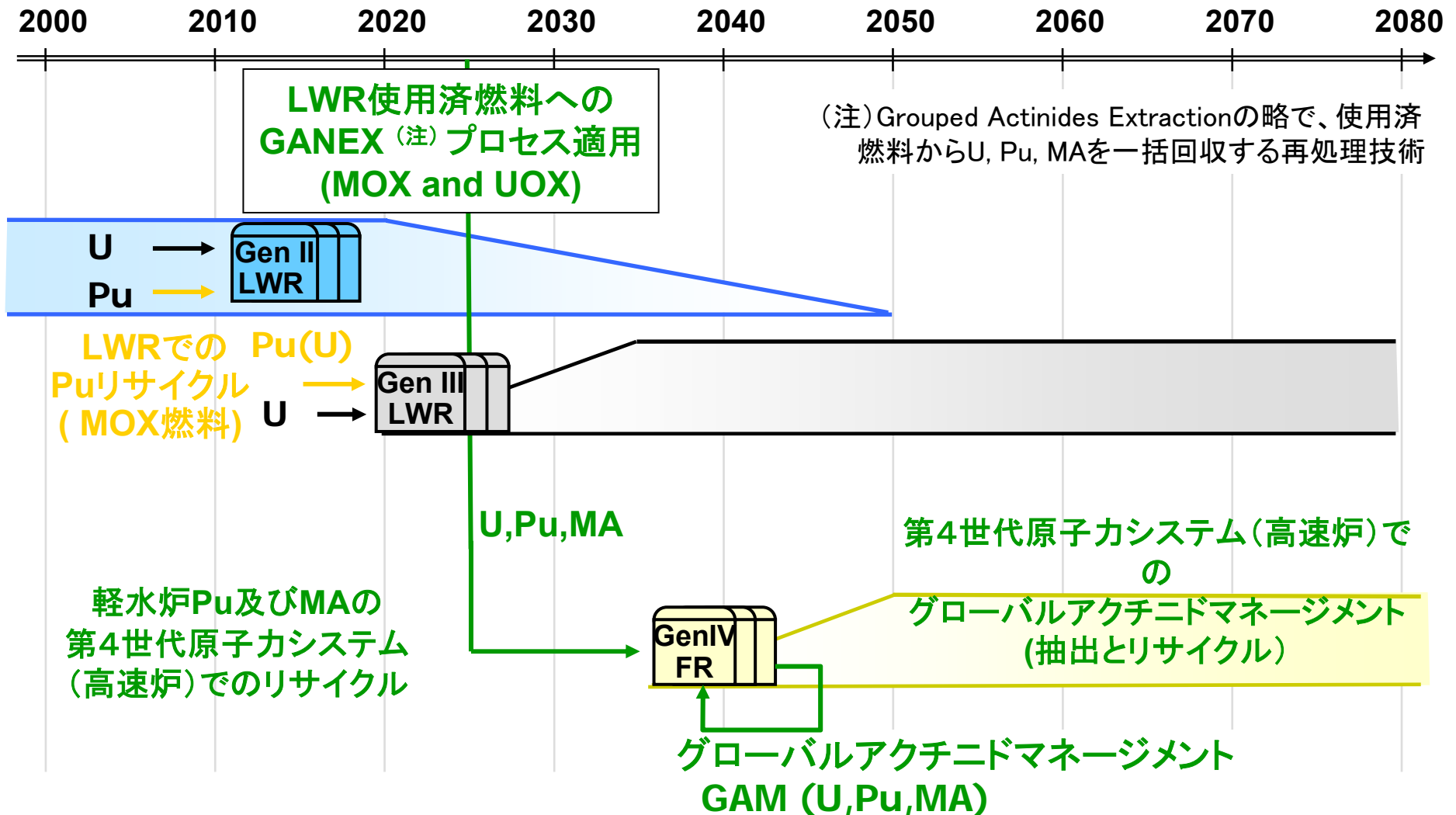
* :EFR(European Fast Reactor)は2010年代に商業用として使用することを目的として欧州各国が共同で開発。ナトリウム冷却タンク型高速増殖炉。設計研究の段階で終了。

【近年の状況】

- 1998年の政権交代に伴い、経済的理由からSuper-Phenixの放棄を政策決定した。しかしながら、Phenixを中心にマイナーアクチニド燃焼等の研究開発並びに、高温熱源の多目的利用(水素製造など)と、核燃料サイクルにおける次世代炉としてガス冷却高速炉の研究開発を推進している。ナトリウム冷却高速炉に関する研究開発は、日仏共同研究や第4世代原子力システム計画の中で実施している。
- また、1991年に放射性廃棄物法(バタイユ法)が制定され、2006年に廃棄物管理の実施に関する最善方策の結論を下すこととしている。放射性廃棄物による環境負荷低減及びエネルギー回収の観点から、全アクチニドを回収し、高速炉の燃料として利用するGAM(グローバルアクチニドマネージメント)計画を進めている。第4世代原子力システムの高速度炉は2035年頃からの導入を検討している。

仏国におけるアクチニドマネージメント構想

— 軽水炉Puリサイクルから高速炉アクチニドリサイクルへ —



出典: P. Bernard, CEA, 4th Tsuruga Int. Energy Forum, Tsuruga, Japan, Apr. 26, 2004



1. 各国における高速炉開発の経緯（英国、独国）

英国

【過去の経緯】

- 実験炉「DFR: 1.5万kWe」(1963～1977年)、原型炉「PFR: 25万kWe」(1977～1994年)など長期にわたる運転実績と燃料再処理の実績を有する。しかし、北海の豊富なエネルギー資源の発見により、1988年に英国政府は高速増殖炉開発予算の削減を決定した。
- ドーンレイ研究所においてDFRの使用済燃料の再処理試験(1962～1979年)を行い、その後、PFR燃料を処理(1980～1996年)した。
- 原子力研究機関の民営化を機に、1992年には高速増殖炉開発は民間で行うこととして、1993年以降の政府出資の停止を決定した。それ以降は、英国単独での高速増殖炉開発を中止し、EFR計画に参加した。

【近年の状況】

- 現在はPuを利用する具体的計画はないが、第4世代原子力システム計画に参加している。現在の予算は、単独の開発を行っていた頃から大幅に低下している。

独国

【過去の経緯】

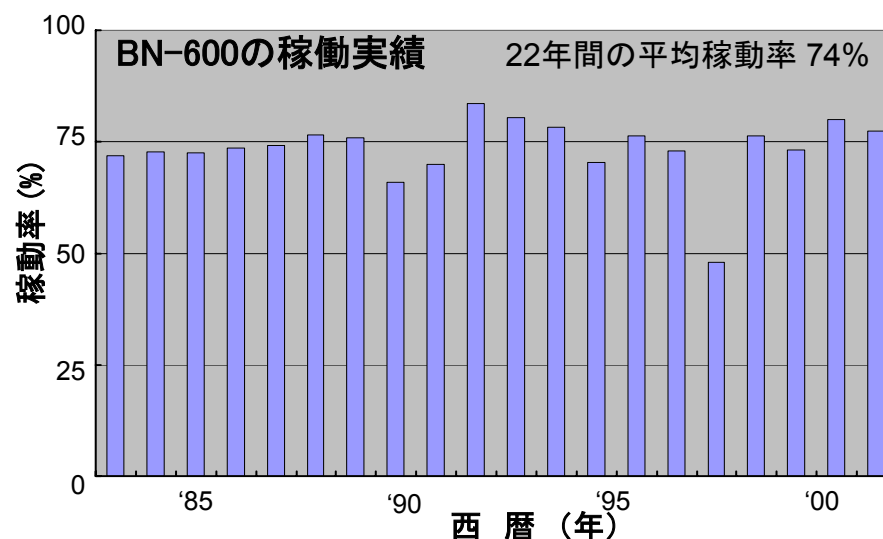
- 実験炉「KNK-II: 2万kWe」(1979～1991年)の運転・改良に続き、原型炉「SNR-300: 32.7万kWe」の建設を行うが、政治的・財政的理由から1991年に計画を中止した。それ以降は、産業界及びカールスルーエ原子力研究所(KfK: 現FZK)はEFR計画の研究開発に参加した。

【近年の状況】

- 原子力発電そのものから撤退する政策を採用しているため、現在は、高速増殖炉サイクルに関する研究開発はほとんど実施されていない。

1. 各国における高速炉開発の経緯（ロシア）

- 1958年の実験炉「BR-5(10):0.5(0.8)万kWt」(1958～2002年)の運転開始を皮切りに、ロシア(旧ソ連)では「BOR-60:1.2万kWe」(実験炉)(1970年～)、「BN-350:13万kWe+脱塩」(原型炉、現カザフスタン共和国)(1973～1999年)、「BN-600:60万kWe」(原型炉)(1980年～)と立て続けに高速炉の建設・運転を進め、仏国とともに熱心に高速増殖炉開発に取り組んでいる。
- 「BN-350」及び「BN-600」は順調な運転実績を残し、また1986年に「BN-800:80万kWe」を着工するなど、現在も積極的な高速炉開発を進めている。BN-600は運転開始以降、多くのナトリウム漏えい、蒸気発生器の水漏えいを経験しているが、これらを含むトラブルによる稼働率の低下はわずか2%であり、以下に示すように良好な運転実績を残している。
- マヤークにあるRT-1にて、高速炉(「BN-600」)使用済燃料の再処理を行っている。
- 2004年にロシア議会在が、高速増殖炉建設と核燃料サイクル開発計画の達成を基本とする持続的な経済発展のためのエネルギー戦略(2005～2010年)を承認した。





1. 各国における高速炉開発の経緯（中国、インド）

中国

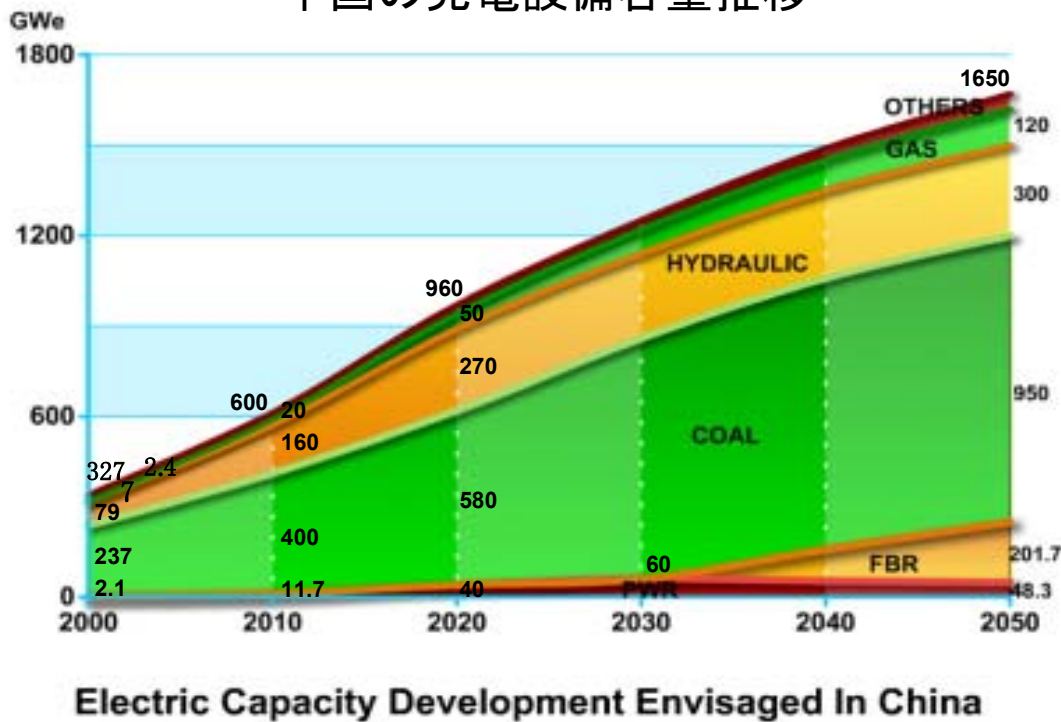
- 原子力エネルギー研究開発の進め方は、人口に対してエネルギー源が不足している現状に鑑み、長期に亘って持続的エネルギーを供給する観点から核燃料サイクルを基本としている。
- 高速増殖炉としてはナトリウム冷却炉の開発を進めており、現在、2008年臨界を目指し実験炉「CEFR: 2.3万kWe」を建設している。
- 原型炉「PFBR: 30 ~ 60万kWe」、実証炉「DFBR: 100~150万kWe」、商用炉「CFBR: 100~150万kWe」の計画がある。商用炉の運転開始目標は2030年としている。2050年頃の高速炉の設備容量は200GWe程度と予測しており、増殖比を高め倍增時間を短くすることを重視し、金属燃料を用いた高速炉サイクルを基本としている。

インド

- エネルギー成長のシナリオとして、「原子力エネルギーの持続的成長には高速増殖炉とクローズド燃料サイクルが不可避」との考えを提示している。当面は金属燃料でU/Puのリサイクル利用を目指し、将来的にはトリウムの利用も視野に入れている。
- 高速増殖炉としてはナトリウム冷却炉の開発を積極的に進めており、現在、実験炉「FBTR: 1.3万kWe、1985年臨界」を運転している。
- 原型炉「PFBR: 50万kWe」の2010年完成を目指して建設中であり、将来的には2020年までに4基の高速増殖炉プラントを建設する計画としている。2050年頃の原子力の設備容量は270GWe程度と予測している（FBRの割合は不明）。
- カルパッカムに、FBTRの使用済燃料の再処理も可能な再処理工場を建設中である。

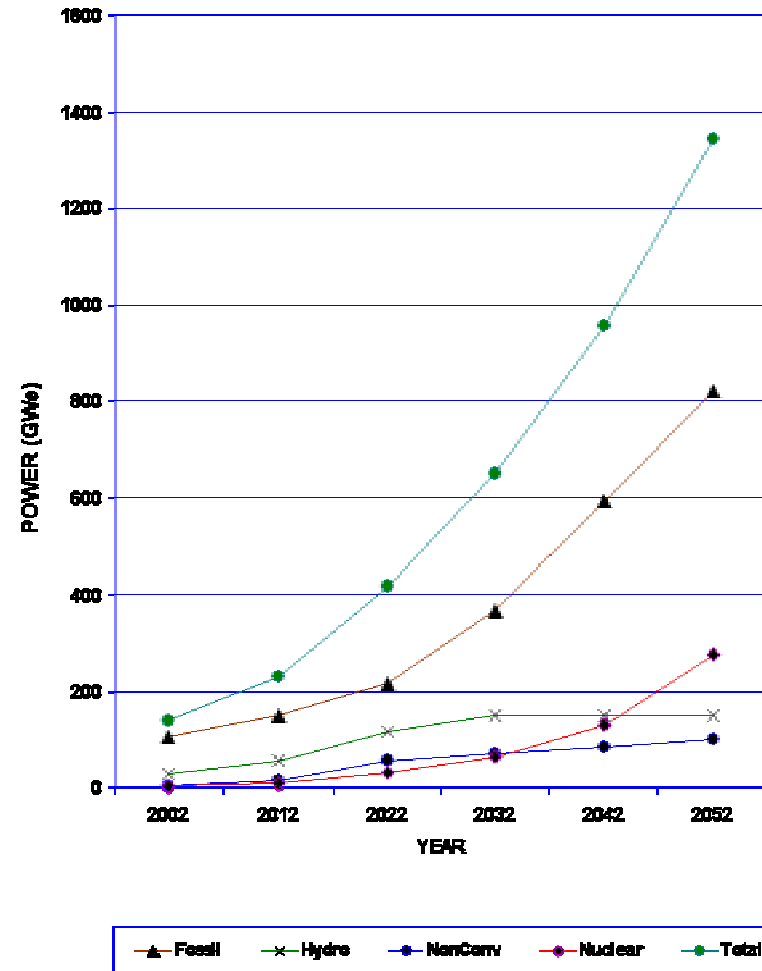
中国、インドにおける将来の発電設備容量推移

中国の発電設備容量推移



出典) Mi Xu, Status and Prospects of Sustainable Nuclear Power Supply in China, GLOBAL2005, No.511, Tsukuba, JAPAN (2005).

インドの発電設備容量推移



出典) Government of India, Department of Atomic Energy (DAE), <http://www.dae.gov.in/>

(参考) 日本の発電設備容量(平成16年度末推定実績)

- ・総発電設備容量: 238GWe
- ・原子力発電設備容量: 47GWe



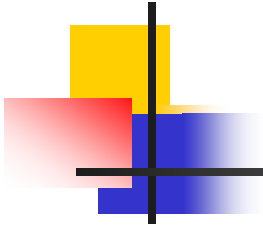
2. 主要国の高速炉導入機運の高まり

フランス(2006年1月5日、シラク大統領)

- ・ 第4世代原子炉のプロトタイプを2020年に運転開始するとの目標**明示**

アメリカ(2006年1月一般教書演説、ブッシュ大統領)

- ・ グローバル原子力パートナーシップ(GNEP)計画を**提唱**
2014年頃にNa冷却高速炉の先進燃焼試験炉、2023年頃に商用1号炉を運転開始
- ・ また、2011年に分離技術の工学規模実証施設、2016年に先進的分離技術と燃料製造技術の試験施設AFCFを運転開始
- ・ GNEP戦略の7つの要素(2月6日DOE発表)
 1. 米国内に新世代の原子力発電所を建設
 2. 新たな核燃料リサイクル技術を開発、整備
 3. 米国内の使用済燃料を効率的に管理、最終的には国内貯蔵に努める
 4. 再生された核燃料からエネルギーを生産する先進燃焼炉(ABR)を設計
 5. 核拡散リスクの最小化、開発途上国が経済的に原子力を獲得・利用できるような燃料供給サービス計画を確立
 6. 開発途上国のニーズに応えるような小規模な原子炉を開発・建設
 7. 拡大された原子力発電所の核拡散抵抗性及び安全性を強化するための保障措置を改良



グローバル原子力パートナーシップ(GNEP)

2006年2月6日 米国エネルギー省(DOE)発表

ブッシュ大統領の先進エネルギー・イニシアティブの一環として、サミュエルW. ボドマンDOE長官は本日、グローバル原子力パートナーシップ(GNEP)を立ち上げるため、2007会計年度に2億5千万ドルの予算要求を行う旨を発表した。この新たなイニシアティブは、核燃料のリサイクルや廃棄物最小化のための新技術を実証・整備し、原子力技術がテロリスト集団の手に渡るのを防ぐ能力を高めることで、ガス放出のない原子力を全世界に拡大しようとする包括的な戦略である。

ボドマン長官は、「GNEPは、核拡散の脅威を低減させつつ、地球上の開発途上経済に対し、環境に優しい方法で事実上無限のエネルギーを供給する明るい見通しをもたらす。もしGNEPが実現できれば、我々は世界を今よりも望ましくクリーンで且つ安全な住処にすることができる」と述べた。

米国及び世界の経済が成長を続ける中、豊富なエネルギー資源に対する需要も同様に増加していくと思われる。原子力は、安全で環境上クリーンで、信頼性があり、且つ安価である。米国は、より多くのエネルギーを生産し、廃棄物を減らし、核拡散上の懸念を最小限にとどめることを目的として、核拡散抵抗性のある新たなリサイクル技術を開発するため、GNEPを通じ、先進原子力技術を持つ他の諸国と協力していく。更にこれらのパートナーとなる諸国もまた、開発途上国が濃縮や再処理を行わず核拡散上の懸念を緩和するとの約束と引換えに、コストがかからずクリーンで安全な原子エネルギー源の恩恵を豊富に享受できるよう、これら途上国に核燃料を供給する計画を策定する。

GNEPは4つの主要目標を持っている。第1の目標は、外国の化石燃料への米国の依存度を減らし、経済成長を促進することである。第2は、より多くのエネルギーを再生し且つ廃棄物を減らす新たな核拡散抵抗性ある技術を用いて、核燃料の再生利用を図ることである。第3は、世界の繁栄とクリーンな開発を助長することである、第4は、世界の核拡散のリスクを減らすため最新の技術を利用することである。

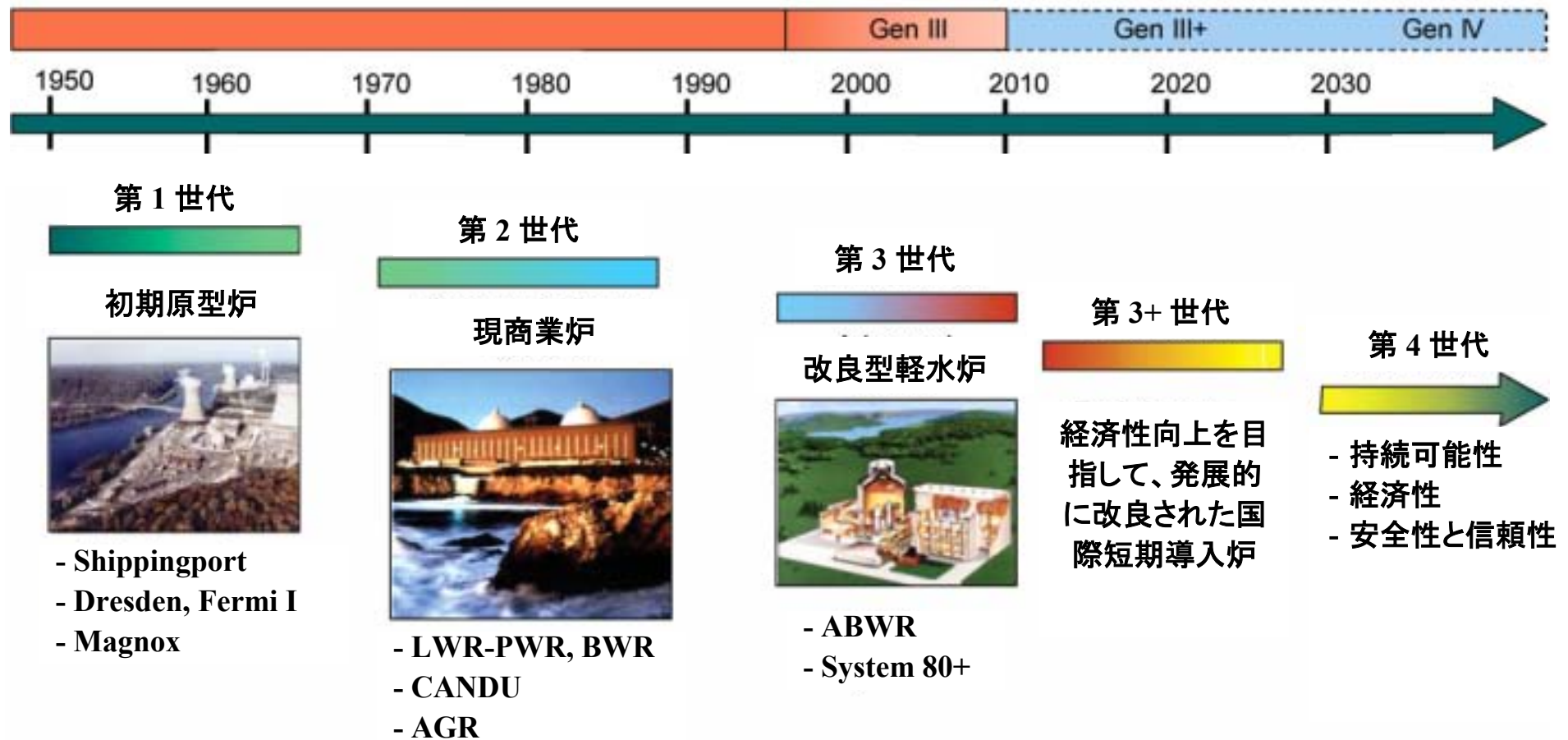
GNEPの推進にあたり、DOEは米商務省と協力しつつ、国際的なパートナーに対し、この新たなイニシアティブに参加するよう働きかけていく。

3. 高速炉システム開発に係る主要な国際協力プロジェクト

国際協力プロジェクト名	活動目的・内容など	参加国
<p>第4世代原子力システムに関する国際的プログラム (GIF)</p>	<p>将来のエネルギーセキュリティを背景とし、安全性・持続可能性・環境適合性・経済性・核拡散抵抗性を兼ね備えた次世代原子力システムの開発とその実証</p>	 <p>アルゼンチン ブラジル カナダ フランス 日本 EU</p> <p>韓国 南アフリカ スイス 英国 米国</p> <p>10カ国 + 1機関</p>
<p>革新的原子炉・核燃料サイクルに関する国際プロジェクト (INPRO)</p>	<p>開発途上国やエンドユーザーのニーズに基づき、21世紀社会のエネルギー需要を持続可能な形で充足するための原子力システムの研究開発</p>	<p>主な参加国</p>  <p>アルゼンチン ブラジル カナダ ロシア スペイン インド</p> <p>韓国 ドイツ スイス オランダ 中国 トルコ</p> <p>23カ国 + 1機関</p>

第4世代原子力システムの開発工程

- 2030年頃に第4世代原子力システム初号機の導入を目標



第4世代原子炉システムに関する国際的プログラム(GIF)

- 日仏米が中心となり、10カ国+1機関が参画した国際共同研究開発
- 2030年頃に初号機の導入を目標
- 2015～2020年頃までで研究開発を終了し、その後は実証試験を行う予定
(現在は研究開発課題とその協力体制について議論中)
- 検討対象6概念の内、3概念が高速炉

開発目標

(1) 持続可能性

- ① 資源有効利用性
- ② 環境負荷低減性
(廃棄物の最小化と管理)
- ③ 核拡散抵抗性

(2) 経済性

- ① コスト (資本費、運転費、燃料費)
- ② 投資リスク

(3) 安全性と信頼性

- ① 通常運転時の安全性と信頼性
- ② 炉心損傷防止
- ③ 敷地外緊急時退避不要

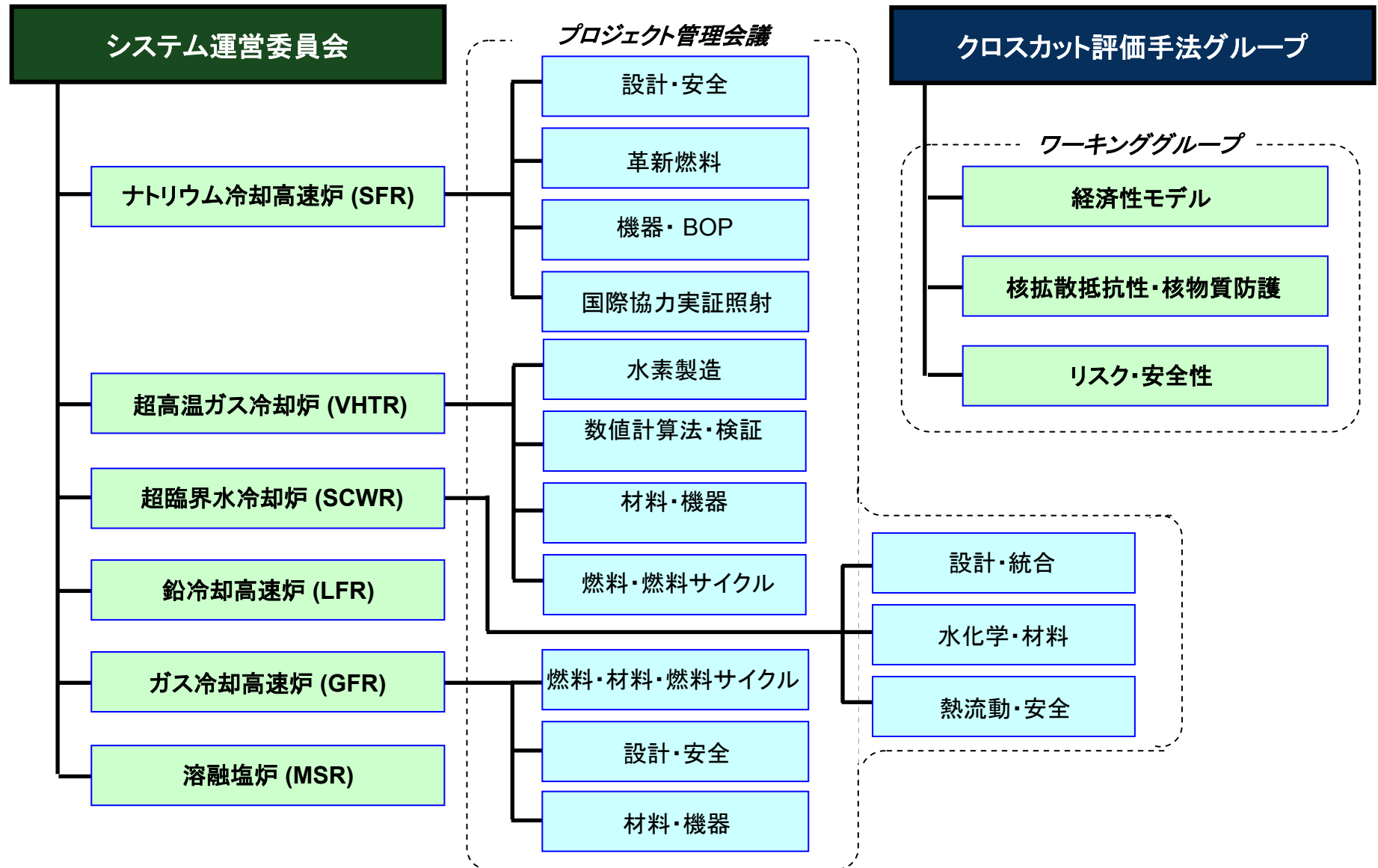
検討対象の6概念

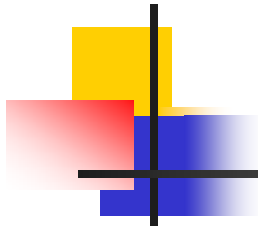
- ・ナトリウム冷却高速炉(SFR)
: 日、仏、米等5カ国
- ・ガス冷却高速炉(GFR)
: 仏、米、日等7カ国+1機関
- ・鉛冷却高速炉(LFR)
: 2カ国+1機関
- ・超高温炉(VHTR)
- ・超臨界水冷却炉(SCWR)
- ・熔融塩炉(MSR)

参加国: 10カ国+1機関





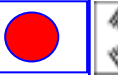






アルゼンチン、ブラジル、カナダ、
フランス、日本、韓国、南アフリカ、
スイス、イギリス、アメリカとEU

GIFの組織体制

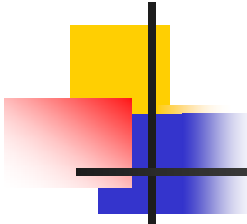




GIFへの参加国

候補概念	 アルゼンチン	 ブラジル	 カナダ	 フランス	 日本	 韓国	 南 アフリカ	 スイス	 英国	 米国	 EU	中性子エネルギー スペクトル	燃料サイクル	
ナトリウム冷却高速炉 (SFR)				○	◎	○			○	◎		高速	クローズド サイクル	
超高温ガス冷却炉 (VHTR)				◎	◎	○	○	○	○	◎	○	熱	ワンスルー	
ガス冷却高速炉 (GFR)				◎	○	○	○	○	○	◎	○	高速	クローズド サイクル	
超臨界水冷却炉 (SCWR)			◎		○	○				◎		熱 / 高速	ワンスルー /クローズド サイクル	
鉛冷却高速炉 (LFR)					○					○	○	高速	クローズド サイクル	
熔融塩炉 (MSR)				検討中									熱	クローズド サイクル

Note ○:参加国
◎:共同議長国



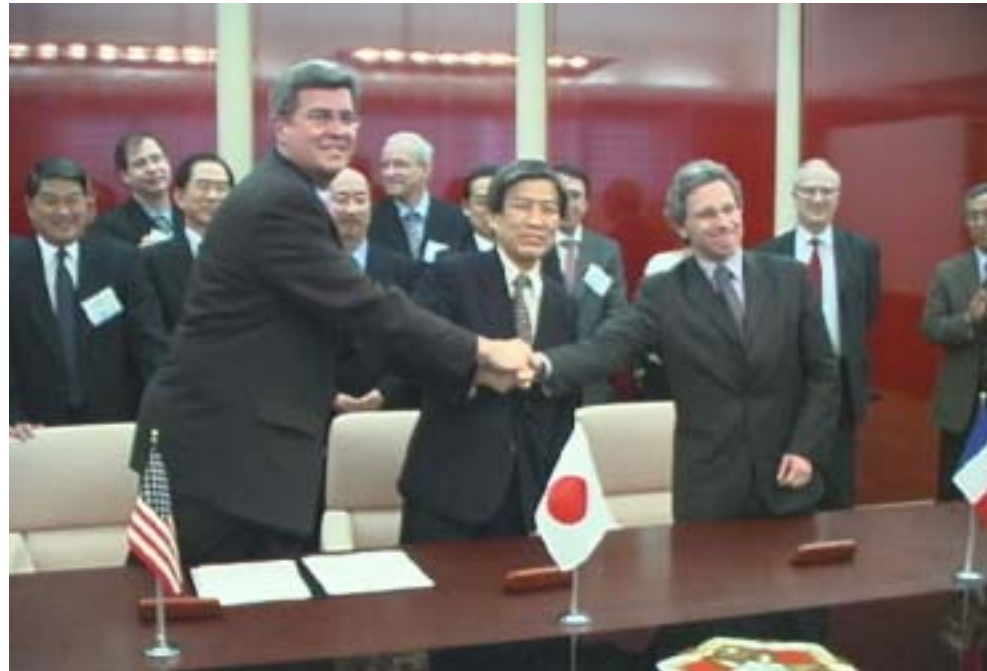
ナトリウム冷却高速炉 (SFR) を対象とした研究開発項目

- 設計・安全 : 日本JSFR、韓国KALIMER炉^(注)を対象に、
炉心設計研究、プラントシステム設計研究、
実証試験施設の概念設計研究、
安全設計要求の具体化、設計オプションの安全評価
参加国: 日本、仏国、米国、韓国
- 先進燃料 : 酸化物、窒化物、金属燃料を対象に、
MA含有燃料の製造技術、同燃料の照射試験、
革新炉心燃料材料(ODS鋼)の開発、
参加国: 日本、仏国、米国、EU、韓国
- 機器・BOP : 保守・補修技術の開発、革新的蒸気発生器の研究、
超臨界CO₂ガスタービンの開発、破断前漏洩に関する研究
参加国: 日本、仏国、米国、英国、韓国
- 国際協力実証照射: 「もんじゅ」を用いた
MAバンドル照射、MA原料準備、集合体製造、照射試験、
照射挙動評価
参加国: 日本、仏国、米国

(注) Korea Advanced Liquid Metal Reactorの略。液体金属冷却高速炉開発計画として1992年から韓国原子力委員会の承認を受けて開発がスタート。同年、電気出力150MWの基本技術開発に着手し、2002年からの概念設計フェーズ3では出力を600MWeに増加し、不核拡散と燃料サイクルの概念、経済性と安全性の向上等を盛り込んだ設計に変更。2003年に概念設計が終了。

ナトリウム冷却高速炉 (SFR) システム取り決めに調印

- 2006年2月15～16日に福井でGIF政策グループ会合が開催
- 会合において、日仏米間でナトリウム冷却高速炉 (SFR) システム取り決めに締結
- 韓国も追加調印、今後、英国、EUも署名予定



革新的原子炉・核燃料サイクルに関する国際プロジェクト (INPRO)

INPROの評価指標

経済性	エネルギーの価格が手頃で、利用可能（エネルギーコスト、投資額、投資リスクなど）
安全性	深層防護とその各層の独立性の強化 固有の安全特性と受動的安全性の充実、など
環境	環境への悪影響が現状の原子力システムの範囲内 資源の効率的利用による21世紀のエネルギー需要に対応可能
廃棄物管理	放射性廃棄物が実行可能なレベルで最小化、など
核拡散抵抗性	核拡散抵抗性の特性と手段が核兵器計画のための核分裂物質を獲得できないようになされていること、など
インフラストラクチャー	インフラにおいて過度の投資を行うことなく導入できるオプションが提供できる(国際的な体制など)

INPROの当面の展開

フェーズ 1A	2001年M～2003年M	評価手法を策定
フェーズ 1B part1	2003年M～2004年	評価手法を用いたケーススタディにより、評価手法を検証、改定
フェーズ 1B part2	2005年～	革新的原子炉システム(INS)に対する評価
フェーズ 2	2006年M～	各国がINSを開発、実証、導入するための支援活動