

# 世界の高速炉開発の動向

平成28年12月9日

日本原子力研究開発機構  
高速炉研究開発部門

各国で実験炉、原型炉、実証炉の建設が進み、2025年～2040年頃には高速炉が実用化される計画

★:ループ型、■:タンク型

**フランス**

- 原型炉(フェニックス ■:25万kWe(1973年～2010年))及び実証炉(スーパーフェニックス ■:124万kWe(1985年～1998年))の運転経験があり、増殖性は確認済み
- 現在は、放射性廃棄物等管理計画法(2006年)に基づき放射性廃棄物対策を主眼に開発(ASTRID:60万KWe)

現在運転中の炉なし

2030年代 実証炉 ■ (ASTRID:60万kWe) 実現予定

2040年代 商用炉 導入予定

**ロシア**

- 原型炉(BN-600 ■:60万kWe)運転中 ⇒豊富な運転経験(1980年運転開始)
- 商用炉から増殖の計画

原型炉運転中

2014年6月 実証炉 ■ (BN-800:88万kWe) 初臨界

2015年12月 初送電

2030年頃 商用炉 ■ (BN-1200:122万KWe) 導入予定



BN-800外観

**中国**

- 原型炉はスキップし、ロシアのBN-800導入と、実証炉(CFR600 ■:60万kWe)を建設予定
- 実証炉から増殖の計画

2010年7月 実験炉 ■ (CEFR:2万kWe) 初臨界

2011年7月 初送電

2025年頃 実証炉 ■ (CFR600:60万kWe) 運転開始予定

2030年頃 商用炉 導入予定

**インド**

- 発電機能を有する実験炉(FBTR ★:1.3万kWe(1985年～))を運転中
- 原型炉から増殖の計画

実験炉運転中

2017年 原型炉 ■ (PFBR:50万kWe) 初臨界予定

2025年頃 実証炉・商用炉 ■ (CFBR:60万kWe) 導入予定



PFBR外観

**アメリカ**

- 実験炉(EBR-II ■:2万kWe(1964年～1994年))やFermi炉 ★:6万kWe(1963年～1975年)などの運転経験があり、1977年政権交代において、核不拡散政策の変更により高速炉計画を改め、商業化を延期
- 高速炉サイクルの基礎・基盤に特化した広範な研究開発を実施
- 2015年に、「原子力の技術革新を加速するゲートウェイ(GAIN)」を設立して原子力産業界を支援中

SFR試験炉の導入を検討中

**韓国**

2028年 原型炉 ■ (PGSFR:15万kWe) 建設完了予定

## ◆ 高速炉技術開発の政策と位置付け

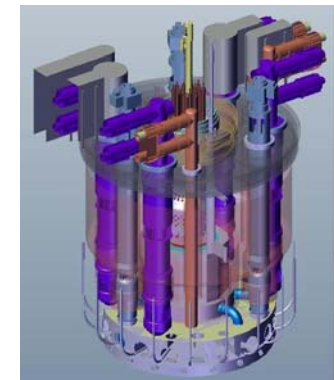
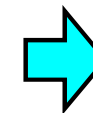
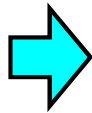
- 原子力の主要なリード国の一つであるフランスは、原子力を基幹エネルギーで、輸出戦略上の重要な産業と位置付け
- 軽水炉プラント/再処理技術に引き続き、高速炉についても世界のリード国としてのステイタスを維持し、将来の輸出産業として発展させていくことを想定していると考えられる。
- 2006年大統領宣言によりGen-IV炉開発推進、2020年代に工業的実証を目的としたプラント (ASTRID) 運開を公表
- 2040年頃から高速炉実用化、現状、電力供給 (約6,600万kWe) の約75% (2025年までに50%へ低減)を占める軽水炉を21世紀後半に高速炉と併存させる計画
- 当面はLWR再処理で回収したPuの有効利用と廃棄物対策中心、将来は増殖を志向。
- 技術的には、タンク型SFR、MOX燃料、湿式法再処理での実現を目指す (ガス冷却高速炉(GFR)は長期的な位置づけ)

## ◆ 実績

- ◆ 原型炉段階からタンク型を指向し、タンク型技術の完成が図られている。
- **実験炉Rapsodie**(4万kWt、ループ型)、**原型炉フェニックス**(25万kWe、タンク型)、**実証炉スーパーフェニックス**(124万kWe、タンク型)と、豊富な開発経験(全てMOX燃料)を有する。
- 2006年1月 シラク大統領が「Gen-IV炉のプロトタイプ炉を2020年に運転開始」と発表。2008年に炉型をSFRに選定
- 2006年「放射性廃棄物等管理計画法」が制定 (高速炉等による長半減期放射性元素の分離・変換の産業化の見通しを2012年までに評価し、2020年にプロトタイプ炉で実証)
- 2009年「大型起債計画」の詳細を発表( **ASTRID**と関連燃料サイクル計画へ約6.5億ユーロを投資⇒2019年まで延長)
- 2012年12月 CEAは、2006年放射性廃棄物等管理計画法に基づき、長寿命放射性核種の分離・変換の産業化の見通しや技術開発の現状を整理した「放射性物質の持続的管理に関する報告書」を政府に提出。その中で、SFRは、今世紀前半に配備するための最良の解決策と評価
- 2012年 実証炉ASTRID(60万kWe、タンク型、MOX燃料)の技術仕様を決定
- 高速炉開発に関して、日米露中印韓との二国間協力、日米との三国間協力、GIF、OECD/NEA、IAEAとの多国間協力を実施中

## ◆ 計画

- AFC (ASTRID用のMOX燃料製造施設10t/y)、ATC (ASTRID用の工学規模の再処理施設)を整備予定
- 2030年代 ASTRID実現予定
- 2040年頃から、実用炉としてGen-IV炉(MOX燃料)を順次導入予定



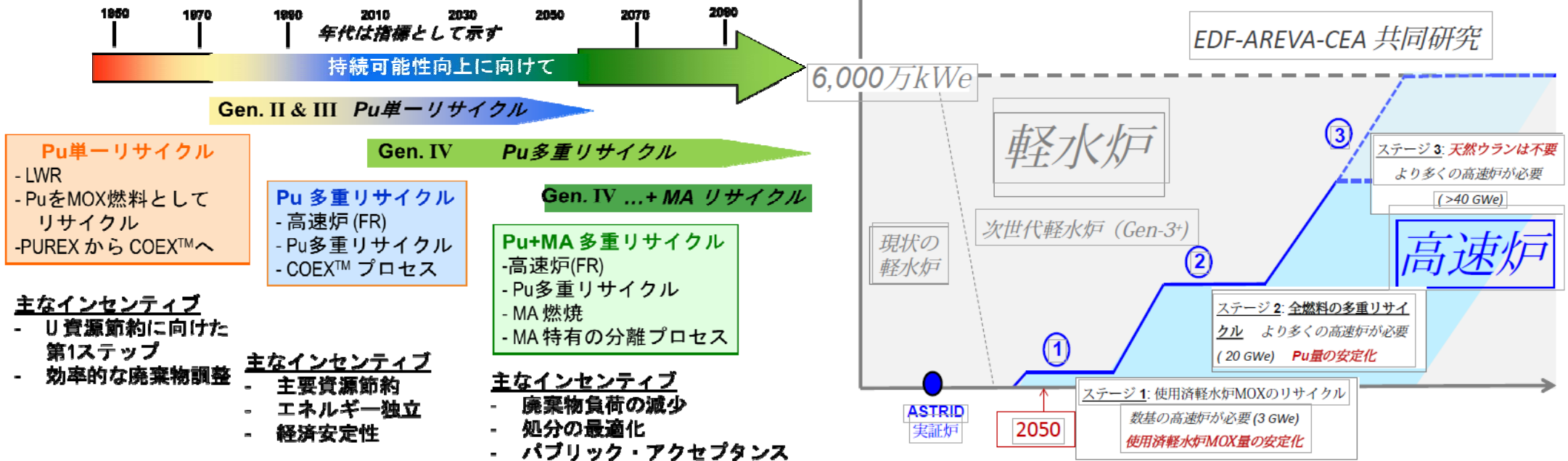
実験炉ラプソディ  
 { 4万kWt、ループ型 }  
 { 1967~1983年 }  
 → 現在、廃止措置中

原型炉フェニックス  
 { 25万kWe、タンク型 }  
 { 1973~2009年 }  
 → 現在、廃止措置中

実証炉スーパーフェニックス  
 { 124万kWe、タンク型 }  
 { 1985~1998年 }  
 → 現在、廃止措置中

ASTRIDの原子炉のイメージ  
 { 60万kWe、タンク型 }  
 { 2030年代に実現予定 }

EDF-AREVA-CEA 共同研究



フランスのプルトニウム利用戦略

フランスの軽水炉から高速炉への移行シナリオ

## ◆ 高速炉技術開発の政策と位置付け

- 原子力を最も経済的なエネルギー供給システムと位置付け、旧ソ連時代から独自技術による高速炉開発推進
- 安全性も優位にあるとして2030年頃の高速炉の実用化を目指し、燃料サイクルの開発を含め積極的に推進中。クローズドサイクルを基本とし、2030年頃に毎年発生する使用済燃料を全量再処理する計画
- 高速炉を原子力の基軸と位置づけ、2050年頃、約1億kWeの原子力発電設備容量の内数千万kWeを高速炉で賄う計画
- ウラン資源の有効利用(増殖)に軸足を置いた開発
- 第4世代炉(Gen-IV炉)として、BN-1200の大型SFRとMOX燃料(又は窒化物燃料)、湿式再処理の実用化を目指す一方、鉛冷却高速炉BREST-300(窒化物燃料)により鉛冷却高速炉(LFR)のポテンシャルを見極める方針。2030年の時点で実用化すべき炉型を選定予定。小型鉛ビスマス冷却炉(SVBR-100)についても追求

## ◆ 実績

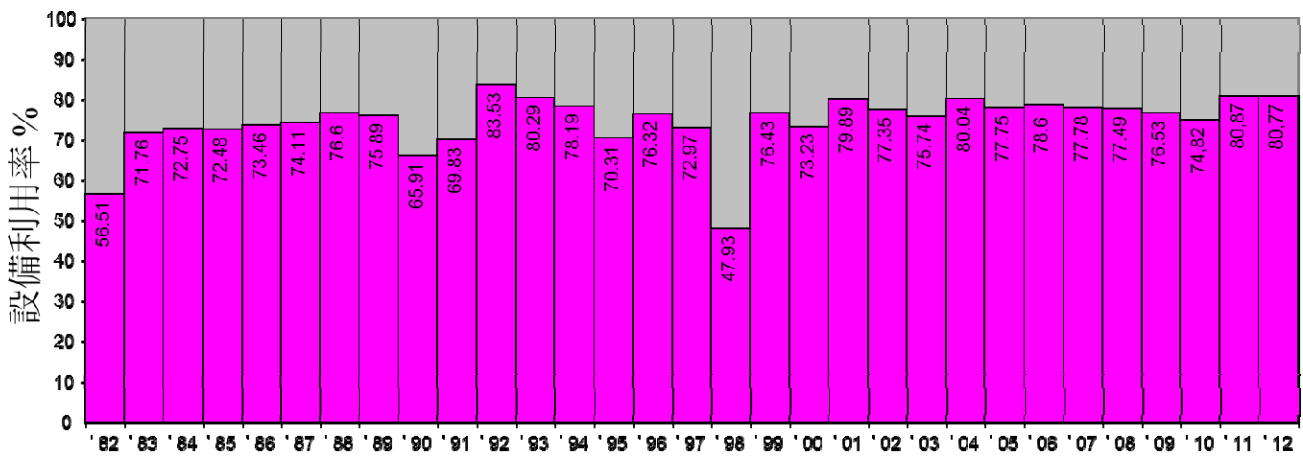
- ◆ ループ型とタンク型を並行して開発。原型炉BN-600でタンク型を選択。
- 実験炉BR-5/10、BOR-60、原型炉BN-350(15万kWe)、BN-600の約150炉・年に亘る豊富な運転経験
- 現在、BOR-60(1.2万kWe;ループ型)とBN-600(60万kWe;タンク型)が運転中、実証炉BN-800(88万kWe;タンク型)が試運転中(2014年6月初臨界、2016年5月30日100%出力達成、2016年11月に商業運転開始)
- 2010年1月 2020年までを展望した「連邦特別プログラム」を策定し、2020年までに1,283億ルーブル(3円/ルーブル換算で約3,850億円)を投資して、高速炉サイクル技術を最優先に開発することを決定
- 2012年 新たな原子力研究開発のプラットフォームを作る計画(ブレークスルー計画)を作成し、SFRとLFRの研究開発を並行して実施し、120万kWe級での実用化を目指す。
- 2014年 鉾山化学コンビナート(MCC)のMOX燃料製造プラント(MFFF:60t/y)が運転開始
- 高速炉開発に関して、米仏中韓との二国間協力、GIF、OECD/NEA、IAEAとの多国間協力を実施中

## ◆ 計画

- 2020年、多目的研究用高速炉MBIR(15万kWt/5.5万kWe;ループ型;MOX振動充填燃料(将来、MOXペレット、金属、窒化物燃料も想定)を運転開始予定
- 燃料サイクルに関しては、2020年 再処理パイロット実証プラントPDC(250t/y)の運転開始予定(2015年から5t/yで運用開始)、2025年頃にPDCを拡張し、RT-2再処理施設(700t/y)(軽水炉および高速炉燃料を対象)として運転開始予定
- 2019年にSVBR-100(10万kWe、濃縮U燃料)、2025年にBREST-300(30万kWe、窒化物燃料)を運転開始予定
- 2030年頃に、BN-1200(122万kWe)を運転開始予定

- ロシアのナトリウム冷却高速炉の運転実績: 約150炉・年
- BN-600の商業運転開始以降の平均設備利用率(1982年~2015年): 75.20%

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{年間発電量 (kWh/y)}}{\text{定格発電出力 (kW)} \times 365 \text{日} \times 24 \text{時間}}$$



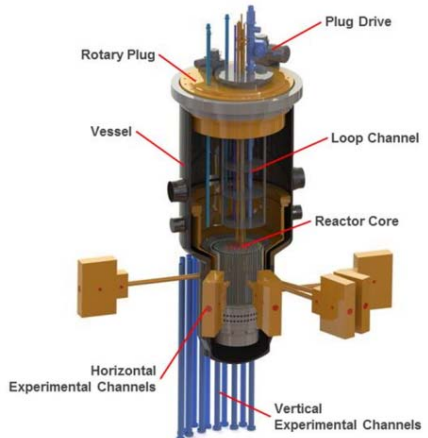
78.40% (2013年)  
86.06% (2014年)  
86.10% (2015年)



高速原型炉BN-600  
(60万kWe; 1981~2020年)



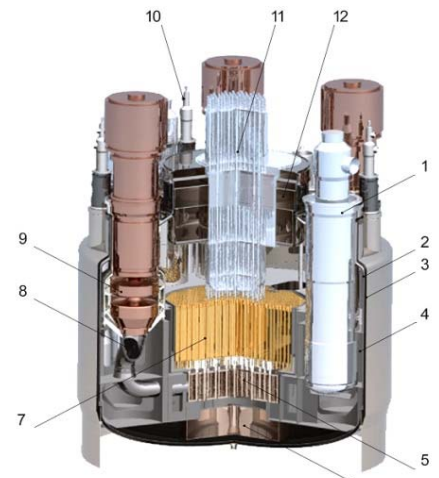
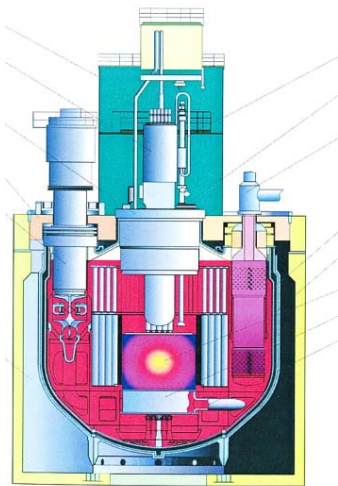
高速実験炉BOR-60  
(1.2万kWe;  
1969~2020年予定)



多目的高速実験炉MBIR  
(約5.5万kWe;  
2020年に運転開始予定)



高速実証炉BN-800  
(88万kWe; 2016年11月~)



高速実用炉BN-1200  
(122万kWe;  
2030年頃運転開始予定)

## ◆ 高速炉技術開発政策と位置付け

- エネルギー需要の大幅な拡大に備えて、増殖炉としての高速炉の早期の実用化を目指している。
- ロシアの技術協力を受けて、実験炉CEFRを建設。
- 当初、実験炉→原型炉→実証炉→実用炉のステップを踏んで開発する方針であったが、2009年10月に、ロシアとの協力により、原型炉をスキップして実証炉(BN-800;MOX燃料)を2基導入するとともに、並行して自主開発を進めることにより、早期実用化を目指す方向に方針変更(ただし、ロシアからのBN-800導入については、コスト、知的所有権等の問題のため進展していない。そのため、2013年以降は、自主技術での高速炉(CFR)の開発を重点化)
- 2020年代中頃までに実証炉を導入し、2030年頃に高速炉の実用化を図る計画
- 技術的にはSFR、MOX燃料、湿式再処理をベースとするが、増殖性の観点から将来的には金属燃料へ移行する方針
- 2030年の中国のクリーンエネルギー目標(GDPあたりのCO<sub>2</sub>排出量を2005年比で60~65%削減し、1次エネルギーに占める非化石燃料の割合を20%程度とする)の達成のためには、2050年頃には原子力を約4億kWe(全電力の16%)に拡大することが必要で、約4割を程度を高速炉で担いたいとの方針。
- SFR開発と併行して、加速器駆動炉(鉛冷却高速炉)や進行波炉の開発も実施中

## ◆ 実績

- ◆ ロシア技術を輸入して、実験炉CEFR(2万kWe、タンク型)を建設し、運転中
  - 2010年7月初臨界、2011年7月初送電(40%出力)
  - 2014年3月出力上昇試験再開、5月40%出力試験終了、12月に100%出力達成
- 自主技術で開発中の**実証炉CFR600**(60万kWe;タンク型;MOX燃料)を建設・運転する新会社「中核霞浦電有限公司」を設立
- MOX燃料製造パイロットプラント(0.5t/y)と再処理パイロットプラント(50t/y)を運転中
- 高速炉開発に関して、仏米露韓との二国間協力、GIF、IAEAとの多国間協力を実施中

## ◆ 計画

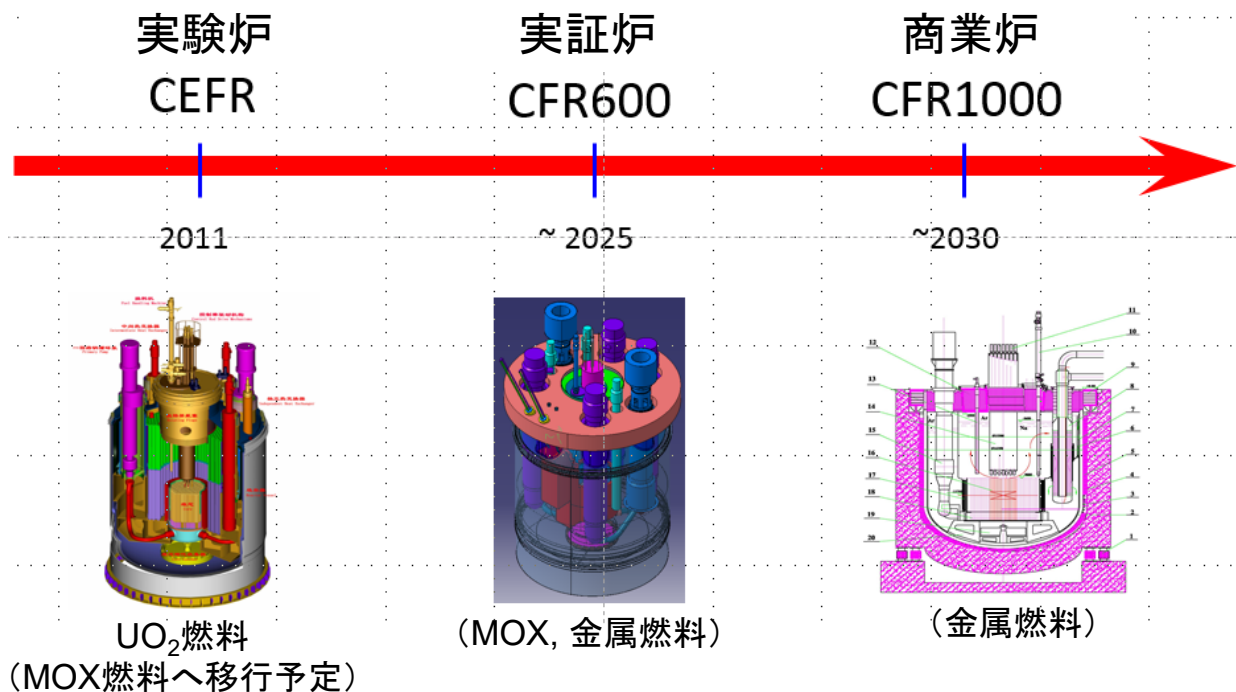
- **実証炉CFR600**は、福建省寧徳市霞浦県に建設予定で、2025年に運転開始予定
- 2030年頃から**実用炉CFR1000**(金属燃料)を導入開始予定
- MOX燃料製造施設や再処理施設の整備についても検討中



高速実験炉 CEFR (2万kWe)

### CFR600の開発計画案(承認待ち)

- 2015年12月 概念設計終了
- 2017年6月 基本設計終了
- 2018年12月 詳細設計終了、着工
- 2025年12月 試験運転開始



### 中国の電力増強計画

	2010	2020	2030	2050
全発電設備容量(億kWe)	9.5	15	20	25
原子力発電設備容量(億kWe)	0.1	0.6	2	4*
原子力の全発電設備容量に占める割合	1.05%	4.0%	10%	16%
原子力の全発電量に占める割合		6%	15%	24%

\* 2050年の原子力設備容量4億kWe(高導入ケースの場合)のうち、約1.6億kWe(約40%)が高速炉



## ◆ 高速炉技術開発の政策と位置付け

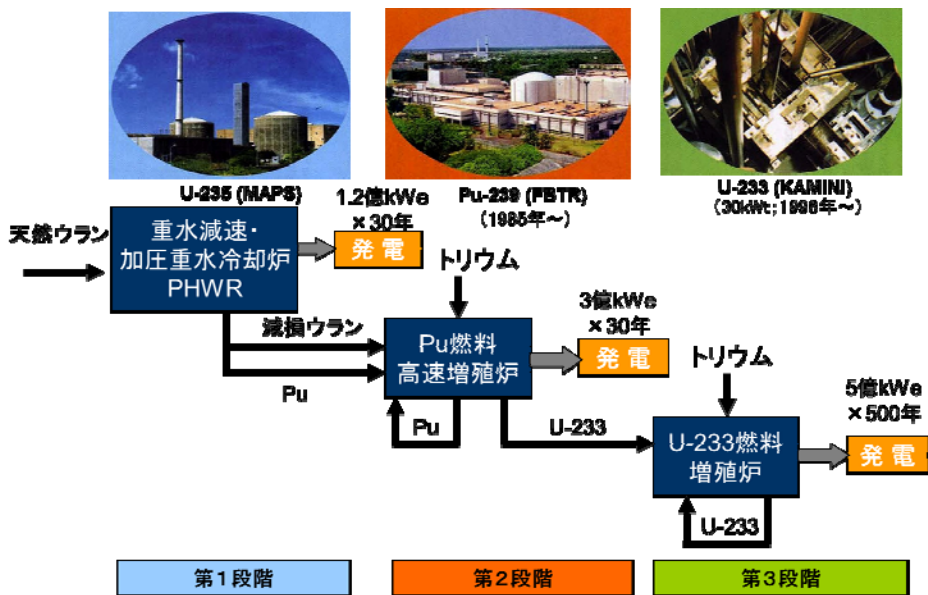
- NPT非加盟国のインドは、フランスの実験炉技術を基に独自路線として開発を進めてきた。
- 当面、増殖性に有利なU・Puを用いた高速炉サイクル技術開発を実施中
- 将来的には、トリウムサイクルを指向
- 急増する電力需要と環境問題に対応するため、2020年代に高速炉実用化、2050年頃には高速炉を原子力発電の主流とする方針
- 技術的には、タンク型SFR、MOX燃料、湿式再処理をベースとするが、増殖性の観点から将来的には金属燃料、乾式再処理へ移行する方針

## ◆ 実績

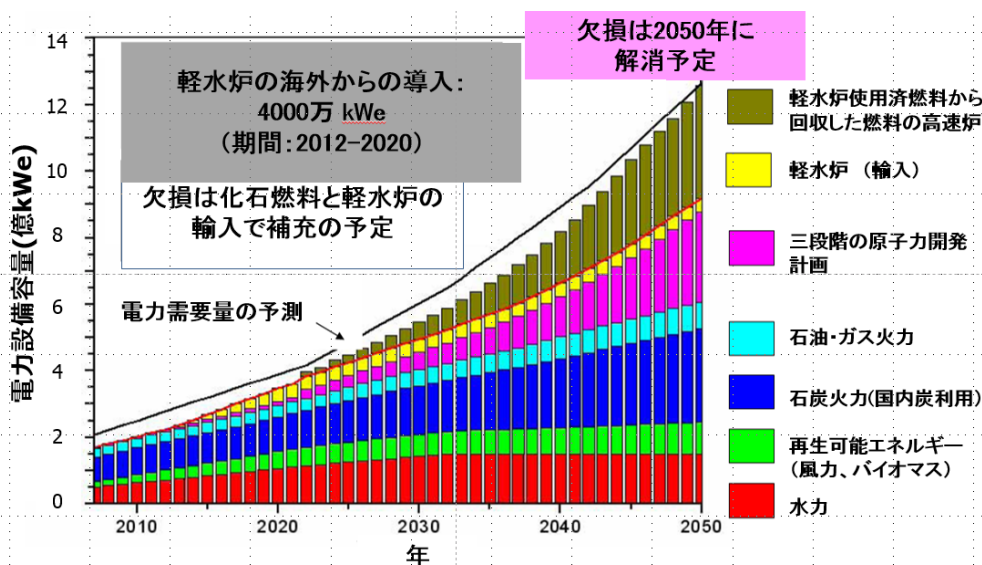
- ◆ フランスよりRapsodieを導入し、SFR技術を修得すると共に、自ら開発を進め、現在は独自技術で原型炉(タンク型)を建設中
- 1985年から**実験炉FBTR**(1.3万kWe、ループ型;U/Pu炭化物燃料;燃料はBARCで製造)を運転中
- 現在、**原型炉PFBR**(50万kWe; タンク型; MOX燃料)の建設を完了し、原子力規制委員会(AERB)のナトリウム充填、燃料装荷、出力上昇の許可待ちの状態(2017年初臨界予定)
- PFBR用の初期のMOX燃料は先進燃料製造施設(AFFF)で製造
- 高速炉開発に関して、仏韓との二国間協力、GIF、IAEAとの多国間協力を実施中

## ◆ 計画

- PFBRに比べて安全性、経済性を向上させた**実用炉FBR1&2**(60万kWe; タンク型; MOX燃料)をツインプラントとしてPFBRサイトに隣接して建設、2024-2025年から運転開始予定
- エネルギー需給の急速な伸びに対応するため、MOX燃料より高増殖の金属燃料高速炉を順次導入する計画
  - 2025年 金属燃料サイクルの研究開発も並行して実施中で、**金属燃料の実験炉MFTR**(11.5万kWt)を運転開始予定
  - 2028年 **金属燃料の実証炉MDFR**(60万kWe)を運転開始予定
- なお、Th利用には多量の $^{233}\text{U}$ が必要となるため、まずは、U-Pu金属燃料高速炉の増設を図り、十分に高速炉が増設された後にそのブランケットにThを装荷して $^{233}\text{U}$ を生産するため、本格的なTh利用は2070年以降と考えている。  
(Th- $^{233}\text{U}$ 燃料サイクルの本格導入時期は、FBR, ADS, 新型重水炉(AHWR), MSR等と関連サイクル技術の今後の展開に依存)
- 原型炉PFBR燃料の再処理実証プラント(DFRP; 1t/y)を建設中(2017年運転開始予定)
- 燃料製造・再処理・廃棄物管理を行う統合型の実用高速炉燃料サイクル施設(FRFCF)をPFBRと併設して建設予定(2019年までの運転開始を予定)(初期はPFBRの炉心燃料7.5t/y、ブランケット燃料6.5t/yを処理するが、将来的には50t/yへ拡張予定)



インドの原子力開発計画 (三段階方式)



インドの原子力導入シナリオ(ケーススタディ)

## 高速増殖炉(FBR)開発計画

プロトタイプによる概念実証、設計、製造、安全性レビュー、経験

経済性と安全性の向上

革新的機能を採用

金属燃料実用炉 MFBR 100万kWe

金属燃料実証炉 (約50万kWe)

金属燃料高速試験炉 (約10万kWe)の導入に向けて、設計研究中

運転経験

原型炉 PFBR(50万kWe) MOX、タンク型、現在、試運転準備中 2017年に初臨界予定

実験炉 FBTR(1.35万kWe) ループ型(Pu-U)炭化燃料 1985年より稼働

## ◆ 高速炉技術開発の政策と位置付け

- 原子力をエネルギーミックスの主要技術と位置付け
- 世界のリーダーとしての地位を確保したい。2012年のブルーリボン委員会報告により、研究開発は限定されるものの、安全基準類や試験施設活用などの点でステータスを示したい意向
- 技術的にはタンク型SFR、金属燃料、乾式再処理の路線に決め、これを追求している。

## ◆ 実績

- ◆ 当初はループ型を追求。その後、タンク型に切換え
- 1940年代前半から1990年代前半にかけて、多くの実験炉の建設・運転経験を保有
  - (金属燃料) Clementine, EBR-I, LAMPRE, EBR-II, Fermi-1 (MOX燃料) SEFOR, FFTF
- 1977年 カーター政権下での核不拡散政策の強化により、原型炉CRBRの計画の無期延期。その後1981年のレーガン政権時に建設計画が復活したものの経済性の観点により計画を中止
- 1993年 クリントン政権下でPuの民生利用の研究開発を行わないことを決定し、FBRサイクルに関わる研究開発は全て中止
- IFR計画(高速炉(金属燃料)・乾式再処理・燃料製造の一体型燃料サイクル)を推進してきたが、原子力に対する政策変更のため1994年にEBR-II(金属燃料)の運転を停止し、IFR計画を中止。EBR-II使用済燃料をアイダホ(INL)で乾式処理中
- 2000年 持続可能性、安全性、経済性、核拡散抵抗性等に優れるGen-IV炉概念の検討のために、「第四世代原子力システム国際フォーラム」(GIF)を設立
- ブッシュ大統領は、温室効果ガス、核拡散抵抗性、使用済燃料発生量低減、放射能毒性低減等の観点から、核燃料サイクル技術や次世代原子力技術のR&Dを促進(2001年 原子力国家エネルギー政策(NEP); 2003年 先進燃料サイクルイニシアティブ(AFCI); 2006年 グローバル原子力エネルギーパートナーシップ(GNEP)構想)
- 2009年 オバマ政権は、上記の開発を凍結し、長期的R&Dに主体を置く政策に戻る。原子力新規導入国への支援、原子力の平和利用推進を目指したサービス構築等に重点を置いた国際原子力エネルギー協力フレームワーク(IFNEC)を2010年に発足
- 2010年 ユッカマウンテン計画の代替案を包括的に検討するため、大統領の諮問機関であるブルーリボン委員会を設置(2012年1月に最終報告書\*を提出) \*廃棄物政策に係る提言と合わせ、先進的サイクル技術に対する研究開発継続の必要性に言及
- 2015年11月 DOEは、先進原子炉設計を商業化させる上で必要な技術・規則・財政面における支援へのアクセスを原子力産業界に提供するため、「原子力の技術革新を加速するゲートウェイ(GAIN)」を設立
- 高速炉開発に関して、日仏中露韓との二国間協力、日米との三国間協力、GIF、OECD/NEA、IAEAとの多国間協力を実施中

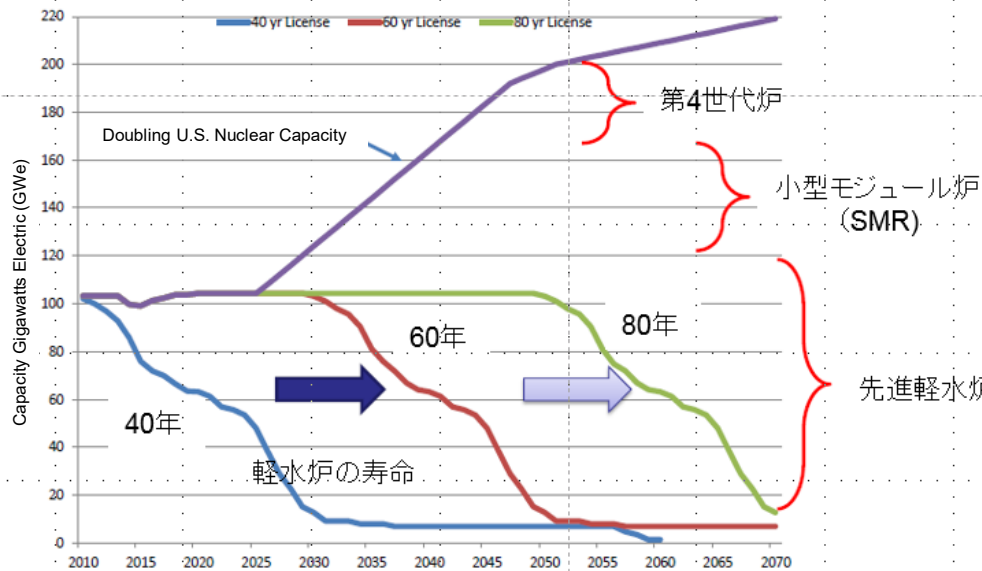
## ◆ 計画

- ブルーリボン委員会報告を受けて、高速炉サイクルに関して基礎・基盤に特化した広範な技術開発を継続。SFR開発のための中性子照射試験炉として、SFR試験炉の設置を検討中

- ANL, INL, ORNLは共同で、2016年7月に、将来の意思決定に資するために種々の先進炉技術オプションについて評価した「先進実証・試験炉オプション研究」報告書をDOEへ提出
- 資源の有効利用と廃棄物管理を目的とした技術実証炉及び照射試験炉として、いずれもナトリウム冷却高速炉が高ランクに評価されている。

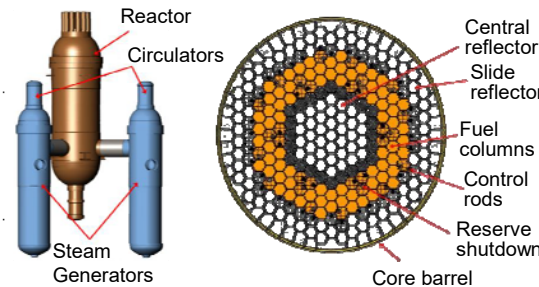


米国のクリーンエネルギー戦略の目標達成に必要な原子力の発電設備容量(DOEの試算)

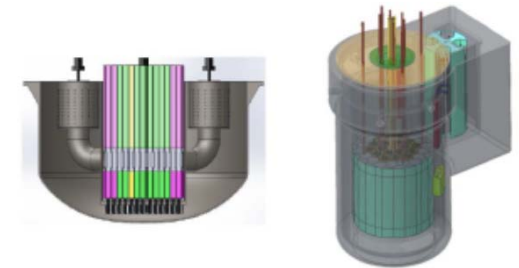


## Resultant Top Options

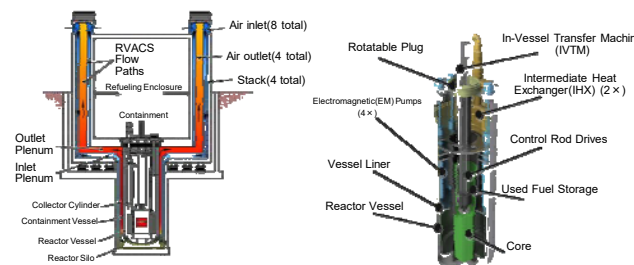
**Strategic Objective 1: Process heat demonstration – modular HTGR commercial demonstration**



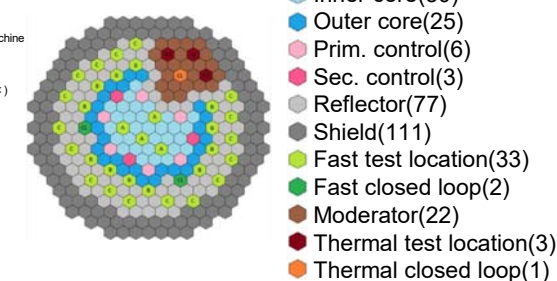
**Strategic Objective 3: Demonstrating a Less Mature Technology – FHR or LFR engineering demonstration**



**Strategic Objective 2: Resource Utilization and Waste Management – SFR commercial demonstration**



**Strategic Objective 4: Test Reactor to Provide Fast Neutrons – Sodium-cooled Fast Test Reactor**



## ◆ 高速炉技術開発の政策と位置付け

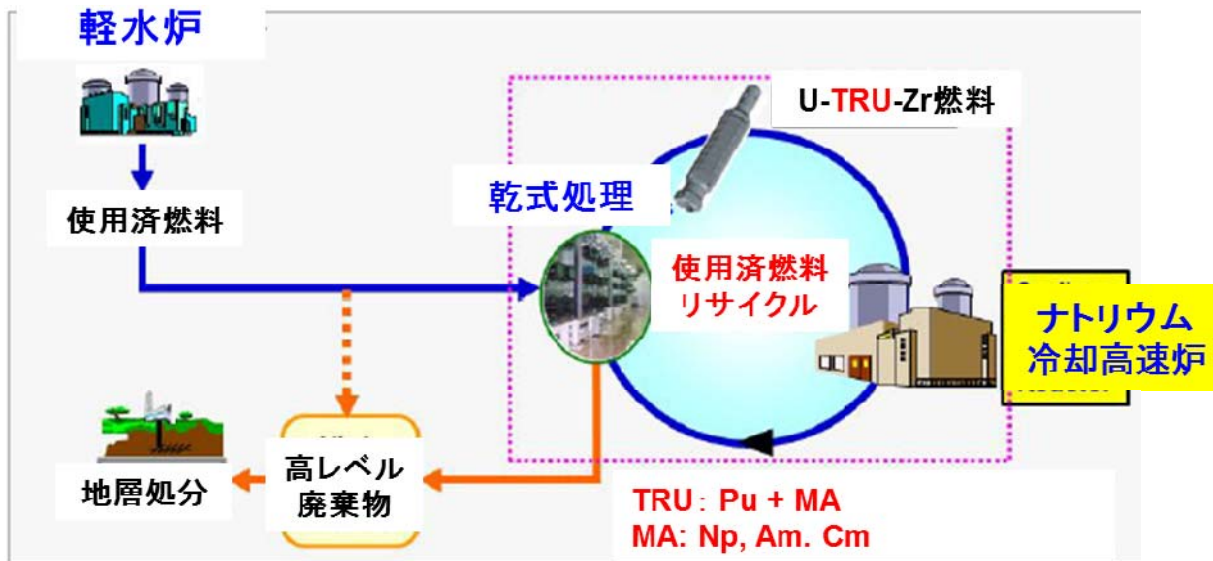
- エネルギー基本計画で新規原子炉建設を推進する方針を堅持することを明示
- 原子力の継続的利用の観点から、高速炉技術開発を目指しており、金属燃料炉心、乾式再処理の開発では米国との協力を継続中(米国との協力がベース)
- Gen-IV炉ではタンク型ナトリウム冷却高速炉の研究開発を実施

## ◆ 実績

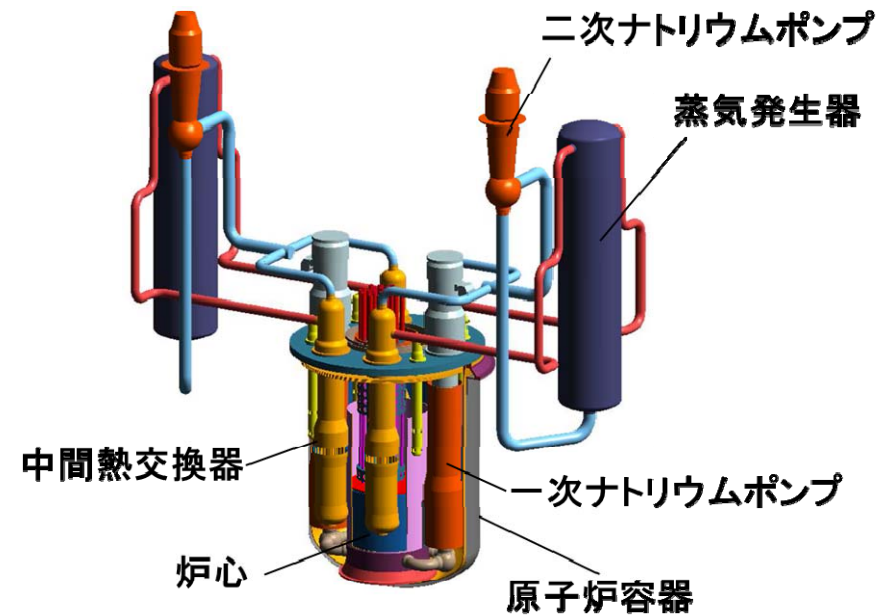
- ◆ 1997年 高速炉KALIMER (15/60/120万kWe; 金属燃料; タンク型) の設計研究を開始
- 米国INLと連携(乾式法による使用済燃料試験を共同研究として米国にて実施中)
- 2008年12月 「将来炉に関する長期計画」を策定。2016年に軽水炉の使用済燃料貯蔵施設が満杯となるため、高速炉(金属燃料)と乾式処理施設を導入して、軽水炉使用済燃料を処理して削減する方針を提示
- 2012年8月～ 工学規模の乾式処理試験施設(PRIDE: 10t-HM/y) の試運転を開始(劣化U及び模擬物質利用)
- 2015年6月 米韓改定原子力協定に両国が署名(同年11月25日に発効)。乾式再処理研究をする際の米国の個別同意が不要となり、協定で規定された韓国内のR&D施設であれば、PWR使用済燃料を用いたDUPIC燃料のR&Dや、乾式再処理の前処理までの試験は実施可能となったが、Puを分離する電解精製等については実施不可のままである。協定の有効期間は20年間
- 高速炉開発に関して、米仏露印との二国間協力、GIF、OECD/NEA、IAEAとの多国間協力を実施中

## ◆ 計画

- 2028年 高速原型炉PGSFR(15万kWe; 金属燃料; タンク型)を建設完了予定



ナトリウム冷却高速炉(SFR)と乾式処理システム



高速原型炉PGSFR  
(15万kWe; 金属燃料; タンク型)  
2028年 運転開始予定