

# 海外高速炉の情勢

平成28年3月4日

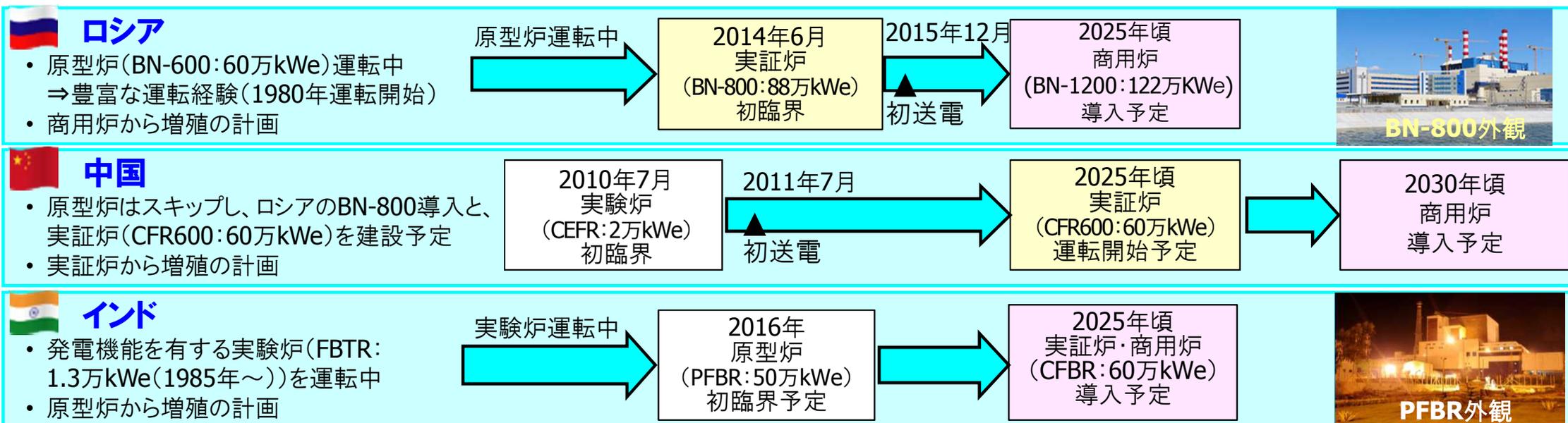
日本原子力研究開発機構

1. 世界の高速炉の開発状況
  1. 1 フランス
  1. 2 ロシア
  1. 3 インド
  1. 4 アメリカ
  1. 5 中国
  1. 6 韓国
2. フランス フェニックスの運営体制
3. ロシア BN-600の運営体制
4. フランス スーパーフェニックスの運営体制

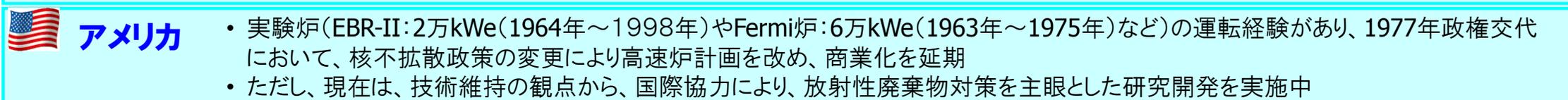
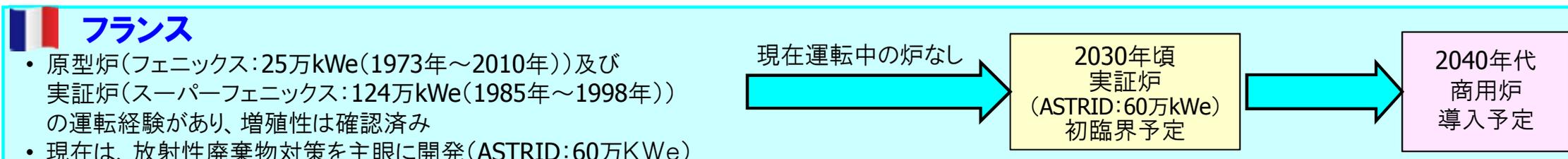
# 1. 世界の高速炉の開発状況

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

## ① エネルギーセキュリティの観点から増殖を志向



## ② 増殖技術を習得した上で廃棄物対策中心



※イギリスは、実験炉・原型炉の運転経験あり。一方で、北海油田の発見もあり、高速炉計画中止。但し、将来的にはNa冷却高速炉サイクルへの移行が必要としている  
ドイツは、実験炉の運転経験あり。一方、原型炉は建設中に政策議論や財政難のため中止  
ロシアは、鉛冷却高速炉等についても開発中

## ◆ 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第四世代炉開発推進、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66GWe) 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
- 現状は、環境負荷低減を強調し、いわゆる燃焼炉としての利用に軸足
- 技術的には、プール型ナトリウム冷却炉、MOX燃料、湿式法再処理での実現を目指す
- Gen-IV炉としてのGFRは長期的な位置づけ

## ◆ 実績

### ■ 原型炉段階からプール型を指向し、プール型技術の完成が図られている

- 実験炉Rapsodie(4万kWt、ループ型、1967-1983年)、原型炉Phenix(25万kWe、プール型、1973-2010年)、実証炉Super-Phenix (124万kWe、プール型、1985-1998年)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(当時)が「第四世代原子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、GFRは長期的オプションとしての開発を決定
- 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

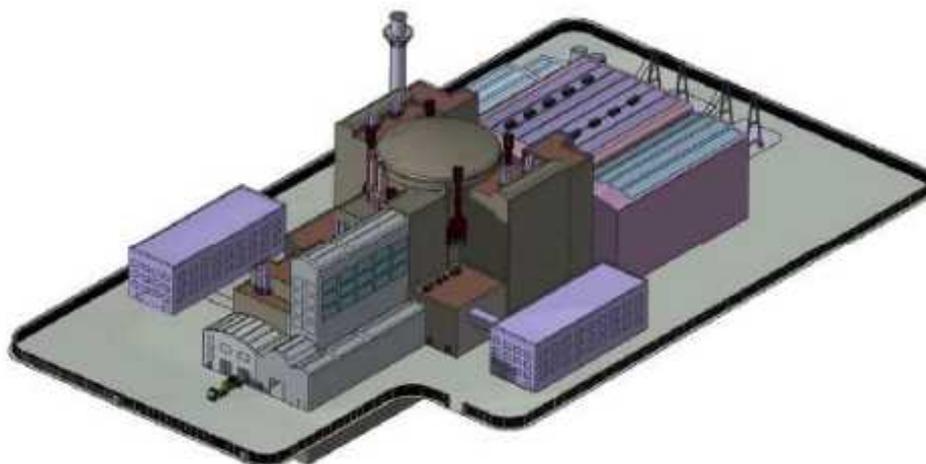
\*ASTRIDと関連する燃料サイクル計画へ2010~17年に約6.5億ユーロを投資 ⇒2019年まで延長

## ◆ 実績 (続き)

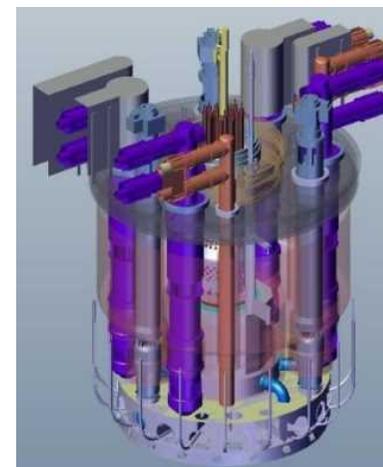
- 2012年12月 CEAは、2006年放射性廃棄物等管理計画法に基づき、長寿命放射性核種の分離・変換の産業化の見通しや技術開発の現状を整理した「放射性物質の持続的管理に関する報告書」を政府に提出。その中で、SFRは、今世紀前半に配備するための最良の解決策と評価
- 2012年 プロトタイプ炉(ASTRID:実証炉、60万kWe、プール型、MOX燃料)の技術仕様を決定

## ◆ 計画

- 2030年頃 ASTRID初臨界予定
- 2040年頃から、実用炉として第四世代原子炉(MOX燃料)を順次導入予定



ASTRIDイメージ(鳥瞰図)



ASTRIDの原子炉のイメージ

## ◆ 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2020年代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年頃には、約100GWeの原子力発電設備容量のうち数10GWe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

## ◆ 実績

- ループ型とプール型を並行して検討。原型炉BN-600でプール型に切替えた。但し、構造基準、安全基準等の保証期間は20年であり、以降は随時審査。設計マージンが少ない
- 実験炉BR-5/10 (0.59/1万kWt;MOX燃料)、BOR-60 (MOX燃料)、原型炉 BN-350 (15万kWe;UO<sub>2</sub>燃料)、BN-600 (UO<sub>2</sub>燃料→MOX燃料へ移行予定)の約140炉・年以上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;プール型)が運転中
- 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

## ◆ 実績(続き)

- 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(ブレイクスルー計画)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6月 実証炉BN-800(88万kWe)が初臨界、2015年12月に電力系統に初併入

## ◆ 計画

- BN-800は2016年に定格出力運転開始予定(初装荷炉心はUO<sub>2</sub>とMOX燃料の混合炉心。2017年にフルMOX燃料へ移行予定)
- 2020年、多目的研究用高速炉MBIR(15万kWt/4万kWe;MOXまたは窒化物燃料)を運転開始予定
- Na冷却炉以外の炉として、
  - 2019年、Pb-Bi冷却小型モジュール型高速炉SVBR-100(10万kWe、濃縮U燃料)のプロトタイプ施設を運転開始予定
  - 2020年、鉛冷却高速原型炉BREST-300(30万kWe、窒化物燃料)を運転開始予定



BN-800の外観

## ◆ 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、プール型ナトリウム冷却炉、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、ナトリウム冷却高速炉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(プール型)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)を運転中
  - 現在、原型炉PFBR(50万kWe; MOX燃料)を建設中(2016年運転開始予定)



FBTR外観



PFBR外観

## ◆ 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; 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kWt)を運転開始予定



## ◆ 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
- 技術的にはプール型ナトリウム冷却炉、金属燃料、乾式再処理の路線に決め、これを追及している
- 但し、民間投資も重視しており、VHTRや溶融塩炉についても捨ててはいないとの立場

## ◆ 実績

- 当初はループ型を追及。その後、プール型・ループ型の比較を行い、プール型に合理性があるとして、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  
Clementine, EBR-I, LAMPRE, EBR-II, Fermi-1……(金属燃料)  
SEFOR, FFTF……(MOX燃料)
- 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
- IFR計画(Integral Fast Reactor: 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、米国の原子力に対する政策変更のため1994年にEBR-IIを停止すると共に、IFR計画を中止。ただし、EBR-II使用済燃料(金属燃料)については、アイダホ(INL)で乾式処理を実施中

## ◆ 実績(続き)

- 2000年 安全性、経済性、核拡散抵抗性等に優れる第四世代原子炉(Gen-IV)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 オバマ政権発足後上記の開発を凍結し、長期的R&Dに主体を置く政策に戻り、GNEP計画は2009年9月で終了。GNEPに代わる協力として、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

## ◆ 計画

- 具体的な建設計画は持たないが、ブルーリボン委員会報告を受けて、基礎・基盤に特化した広範な技術開発を継続

## ◆ 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を建設した
- 2020年代中頃までに実証炉を導入する計画(ロシアBN-800技術の導入計画に並行して自主技術開発も実施中)
- 2030年頃に高速炉を実用化、2050年頃には高速炉を原子力発電の主流とする方針(原子力を400GWe(16%)に拡大(2013);高速炉の導入量は、ウラン需給に依存)
- 技術的にはナトリウム冷却炉、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
- Gen-IV炉として超高温ガス炉、超臨界水冷却炉、熔融塩炉などの研究開発も実施

## ◆ 実績

### ■ ロシア技術を輸入して、実験炉CEFR(2万kWe、プール型)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



CEFRの外観

## ◆ 計画

- 自主技術で実証炉CFR-600(60万kWe;MOX燃料)を開発中で、2025年までに建設完了予定
- ロシアとの協力により、原型炉をスキップして実証炉(MOX燃料)を導入し早期実用化を目指す方向に変更した経緯\*があるが現状不明(無期延期との情報もあり)
- 2028年 高増殖の実証炉(金属燃料;100万~150万kWe)の運転開始予定
- 2030年頃から実用炉(MOX燃料;金属燃料)を導入開始予定

※:2010年3月、ロシアと80万kWe級の実証炉(BN-800の技術)をツインプラントで建設するための覚書に署名

## ◆ 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原子力基調を明示
- 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炉ではプール型ナトリウム冷却高速炉の他、VHTRの研究開発も実施

## ◆ 実績

- 1997年 高速炉KALIMER (15/60/120万kWe; 金属燃料; プール型) の設計研究を開始
- 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
- 2015年6月 米韓改定原子力協定に両国が署名(同年11月発効)  
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

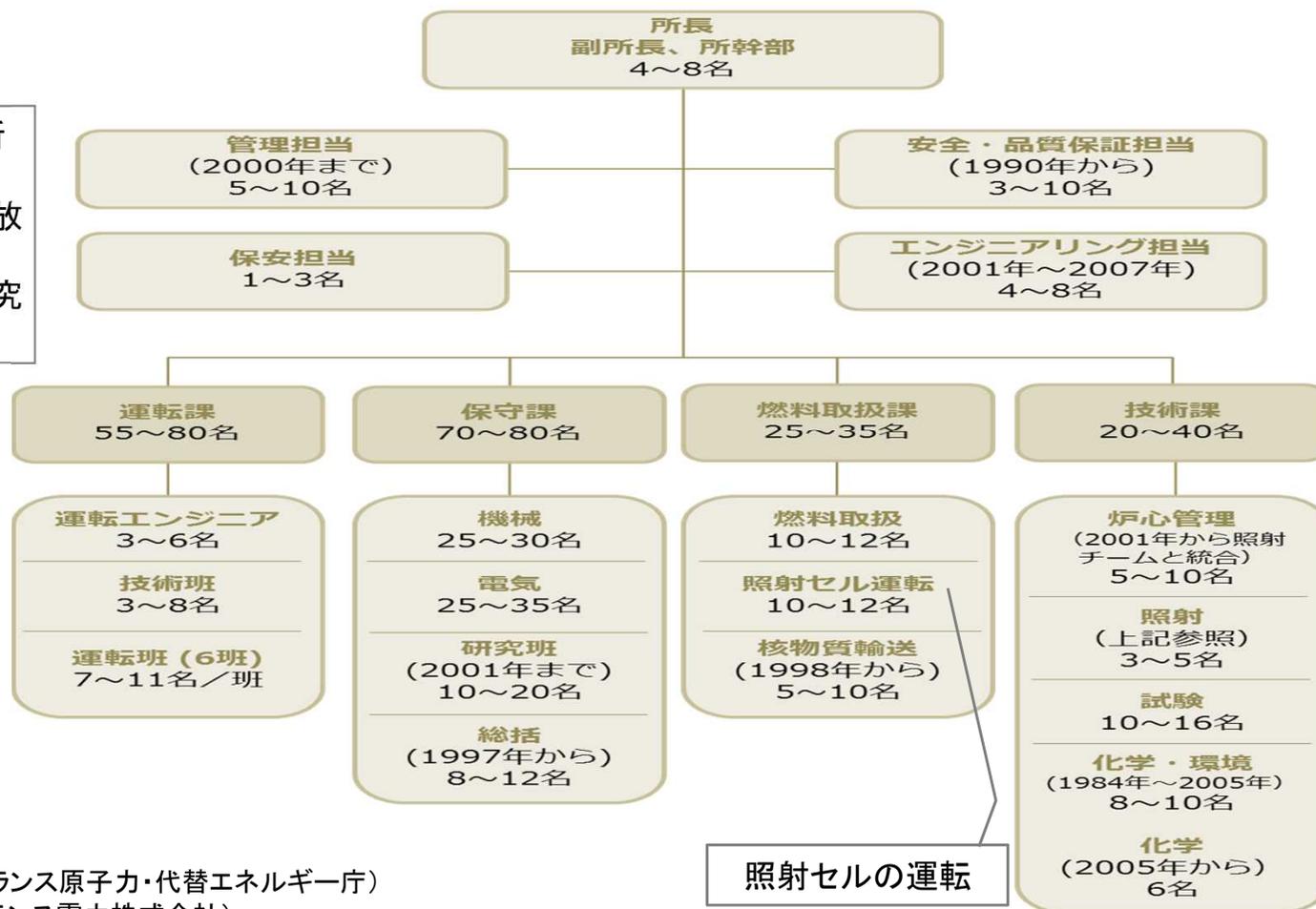
## ◆ 計画

- 2028年 高速原型炉PGSFR(15万kWe; 金属燃料; プール型)を運転開始予定

## 2. フランス フェニックスの運営体制

- 所有者 (Owner) : CEA & EDF  
 運転者 (Operator) : CEA & EDF
- 職員 CEA職員約80%、EDF職員約20%で構成  
 (内、所長はCEAより、副所長はEDFより選出)

フェニックス 組織及び構成人数 ~270名



フェニックスは、CEAマルクール研究所内にあり、

- 放射線管理はマルクール研究所の放射線管理組織で実施
- 人事等の管理業務はマルクール研究所の統括部署が実施

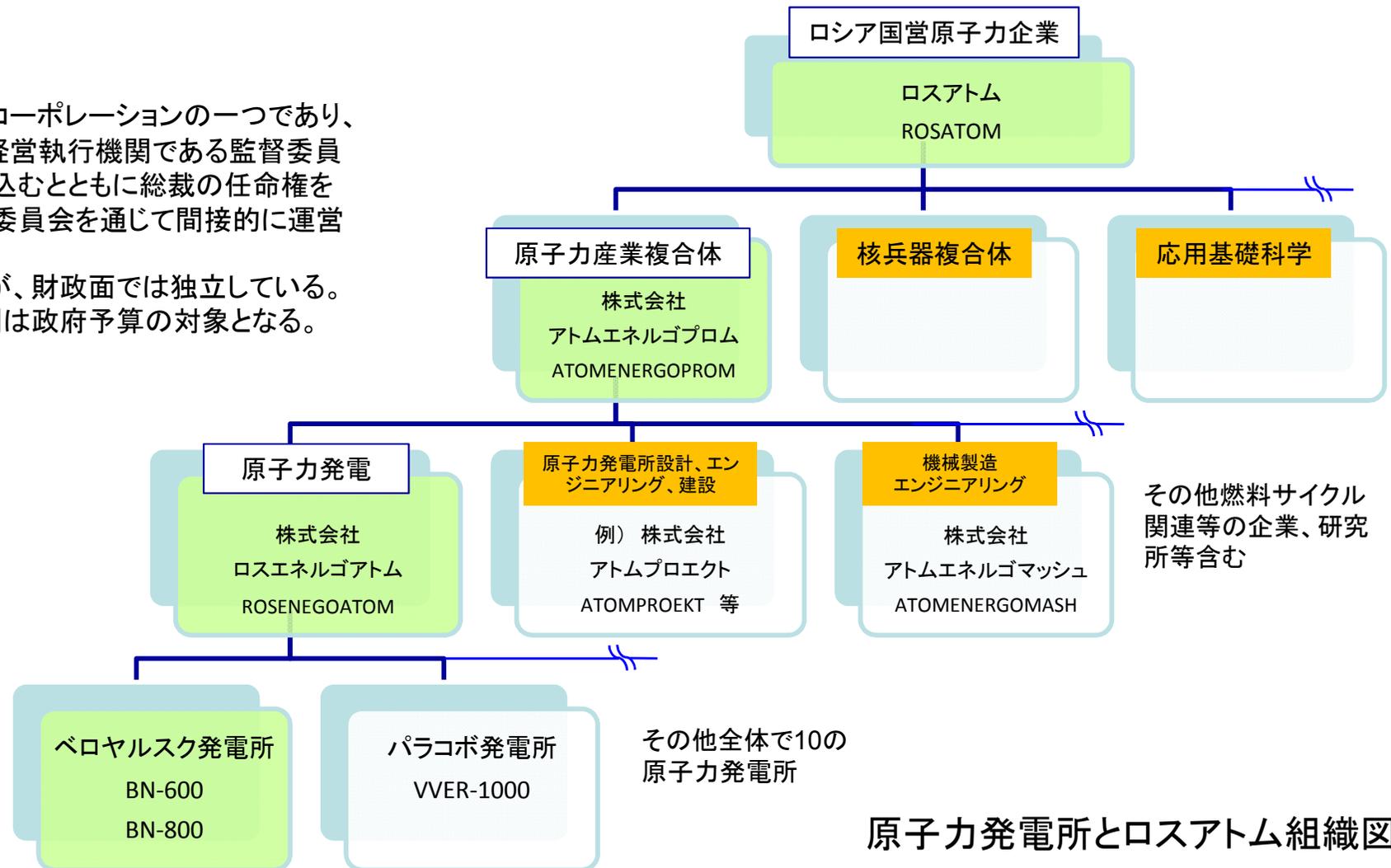
1 CEA: フランス原子力庁 (現、フランス原子力・代替エネルギー庁)  
 2 EDF: フランス電力公社 (現、フランス電力株式会社)

# 3. ロシア BN-600の運営体制

- ✓ 所有者:(株)ロスエネルギーアトム  
 運転者:(株)ロスエネルギーアトム  
 BN-600を含むロシアの原子力発電所は株式会社ロスエネルギーアトムが所有し運転
- ✓ (株)ロスエネルギーアトムは、ロシアの原子力民生利用部分を集約する(株)アトムエネルギープロムの傘下企業  
 (株)アトムエネルギープロムの株式はロシア国営原子力企業ロスアトム<sup>\*1)</sup>が100%所有

\*1) ロスアトム:

- ・100%政府出資の国家コーポレーションの一つであり、大統領はロスアトムの経営執行機関である監督委員会に一定の代表を送り込むとともに総裁の任命権をもっている。国はこれら委員会を通じて間接的に運営に関与する。
- ・ロシア政府に従属するが、財政面では独立している。
- ・但し、軍事面、研究機関は政府予算の対象となる。



原子力発電所とロスアトム組織図

## 4. フランス スーパーフェニックスの運営体制

- 所有者 (Owner) : NERSA  
 運転者 (Operator) : NERSA  
 運転は、NERSAの下でEDFが実施
  - NERSA : EDF (フランス)51%、ENEL (イタリア) 33%、SBK(ドイツ)16%の出資で設立された国際合弁企業。  
 SBKにはベルギー、オランダ、イギリスも参加。  
 運転停止後NERSAは解散し、スーパーフェニックスはEDF所有となった。
- 国の事業への関与  
 当時、EDFはフランスの、ENELはイタリアの国有企業(現在は民営化)
- 約1200名がサイトで雇用(約700名がEDF/NERSAの社員、500名が関連企業の従業員)

NERSA:Centrale Nucléaire Européenne à neutrons Rapides-Société Anonyme

- ・EDF: スーパーフェニックス運転当時は国有企業のフランス電力公社であったが、2004年に民間のフランス電力株式会社(名称はEDFのまま)になった。なお、政府は株式の約8割を所有している。
- ・ENEL: イタリア電力公社、1992年7月に株式会社化され、ENEL Spa(株式会社)となった。さらに1999年5月にENELを持株会社化し、発電、送電、配電、原子炉廃炉(国営)に分社化されることが決められた。
- ・SBK: 西ドイツ(RWE社)68.85%、ベルギー(Electro Nucleaire社)14.75%、オランダ(SEP社)14.75%、イギリス(CEGB社)1.65%の資本によって設立された国際合弁企業