

新型炉部会セッション

「第4世代原子炉の国内外の開発動向」

(2) ナトリウム冷却高速炉の開発状況 と計画

平成30年3月26日

上出 英樹

日本原子力研究開発機構

1. 海外の高速炉サイクル開発状況と今後の展望

- (0) 全体概要、(1) フランス、(2) ロシア、(3) 中国、(4) インド、
- (5) 米国、(6) 韓国

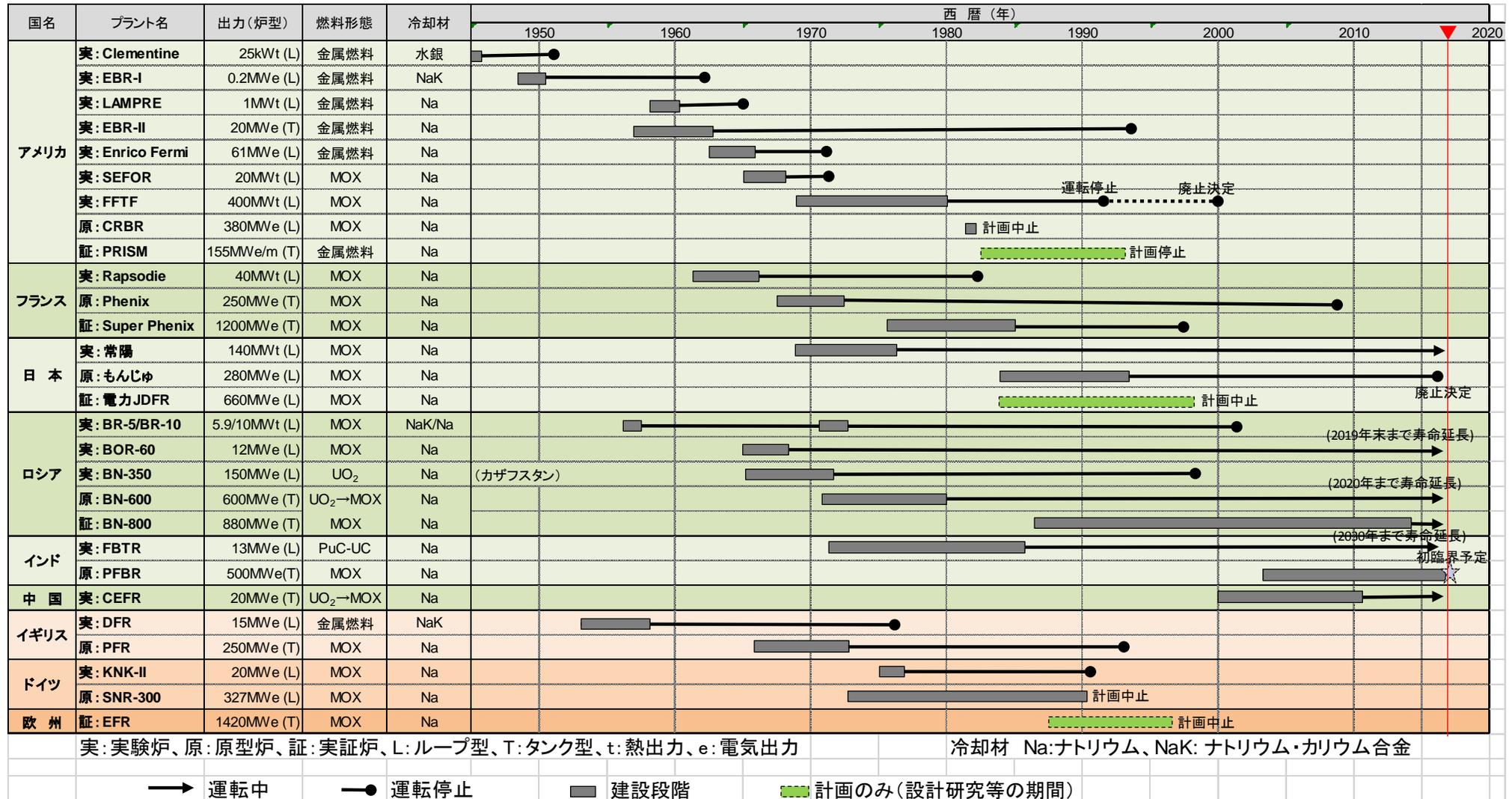
2. 日本の高速炉サイクル開発状況と今後に向けて

- (1) 今後の開発方針
- (2) 国際協力の有効活用

3. まとめ

世界の高速炉開発の歴史

● 世界の高速炉の累積運転年数は、約400炉・年以上



海外のナトリウム冷却高速炉(SFR)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

○: 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

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)を建設中
- 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

2023年 実証炉 ■ (CFR600: 60万kWe) 建設完了予定

2030年代 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

2018年 原型炉 ■ (PFBR: 50万kWe) 初臨界予定

2020年代 実証炉・商用炉 ■ (CFBR: 60万kWe) 導入予定

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

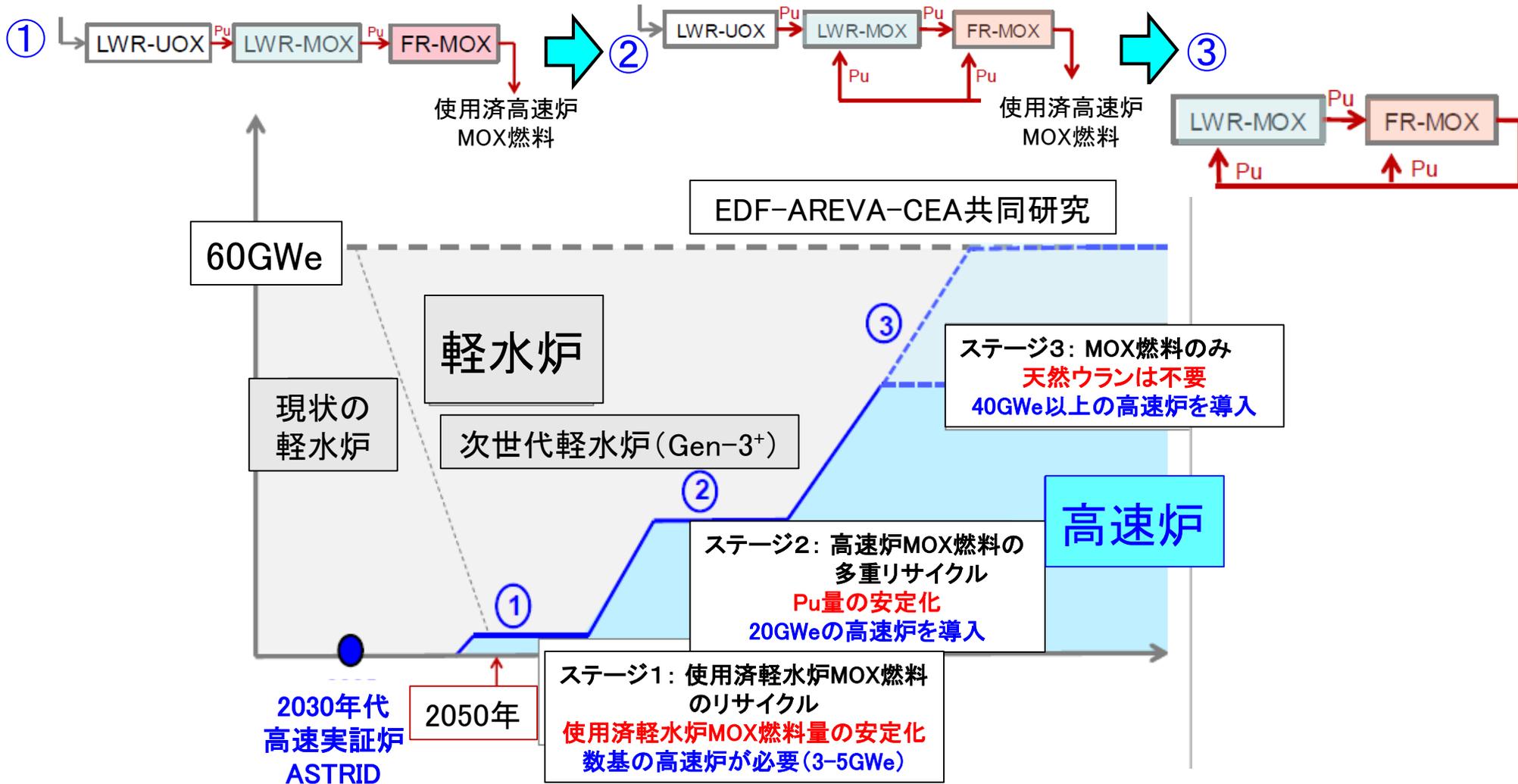
韓国

- 1997年から高速炉の設計研究等を実施
- 乾式処理で電解還元までの試験はできるが、Puを分離する電解精製等を実施するためには、米韓原子力協定の改定が必要
- 2017年の文政権の脱原発政策により今後の動向は不透明

2028年 原型炉 ■ (PGSFR: 15万kWe) 建設完了予定



◆高速炉サイクルの開発戦略

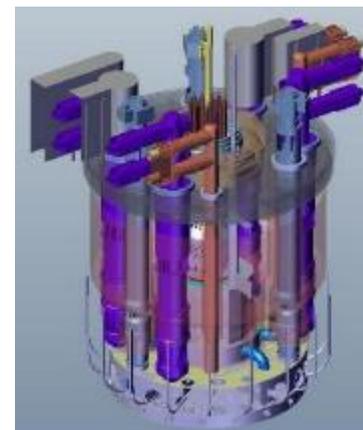


フランスの軽水炉から高速炉への移行シナリオ



◆技術実証炉ASTRIDの開発状況

- 2006年 シラク大統領「第4世代(Gen-IV)炉のプロトタイプ炉を2020年に運転開始」
- 同年 「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)
- 2008年 炉型をSFRに選定
- 2009年 「ASTRIDと関連燃料サイクルに約6.5億ユーロ投資」
- 2012年 実証炉ASTRIDの技術仕様(熱出力150万kW、電気出力60万kW、タンク型、MOX燃料)を決定
- ASTRID向け燃料サイクル施設: AFC(MOX燃料製造10t/y)、ATC(再処理)も予定



ASTRID
建設予定地: マルクール
(原型炉フェニックスに隣接して)

【スケジュール】



基本設計の終了後、数年間の調整期間を設け、詳細設計・建設に向けて設計の調整を行う見込み

- 2040年頃から、実用炉としてGen-IV炉(MOX燃料)を順次導入予定

◆高速炉(SFR)開発の歴史



	BR-5/10	BOR-60	BN-350	BN-600	BN-800	BN-1200
型式	ループ	ループ	ループ	タンク	タンク	タンク
燃料	PuO_2 / UPuO_2	UO_2 / UPuO_2	UO_2	UO_2	UPuO_2	UPuO_2 / UPuN
増殖比	-	-	0.93	0.85	1.0	1.2-1.4
定格熱出力 (万kWt)	0.59/ 0.8	最大6*	75*	147*	210	280
電気出力 (グロス) (万kWe)	-	1.2	最大15	60	88	122
1次冷却材 出入口温度 (°C)	500 430	最大530 310-340	440 280	550 377	547 354	550 410
3次系パラメータ ・ 蒸気温度 (°C) ・ 蒸気圧 (MPa) ・ 給水温度 (°C)	-	480	410 4.9 160	505 14 240	490 14 210	510 17 275
備考	廃止措置準備中	* 発電と地域への熱供給	現在はカザフスタン、廃止措置中 * 発電と海水脱塩	* 発電と地域への熱供給		開発中



原子炉上部の写真

● 建設経緯:

- 1984年 基本設計を開始
- 1986年4月のチェルノブイリ事故後の安全基準強化のため開発を中断
- 2006年 主建屋の建設を再開
- 2014年6月27日 初臨界
- 2015年12月 ベロヤルスク原子力発電所の4号機として、初送電
- 2016年5月30日 定格出力達成
- 2016年10月31日 商業運転開始

● 目的:

- 高速炉を用いた閉燃料サイクルの実証
- 産業が発達しているウラル地方への電力の供給

● その他: 2019年に、フルMOX炉心に移行予定

項目	値
熱出力(万kWt)	210
電気出力(万kWe)	88
冷却ループ数	3
1次冷却系の型式	タンク型
蒸気発生器の型式	ワンスルー型 分割モジュラー形式
最大中性子束密度 ($n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$8.8 \cdot 10^{15}$
燃料	$\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
最高燃焼度(%燃焼率)	9.9
炉心入口/出口 ナトリウム温度($^{\circ}\text{C}$)	354/547
蒸気発生器入口/出口 ナトリウム温度($^{\circ}\text{C}$)	505/309
蒸気発生器入口/出口 水・蒸気温度($^{\circ}\text{C}$)	210/490
蒸気圧力(MPa)	13.7
設計寿命(年)	40

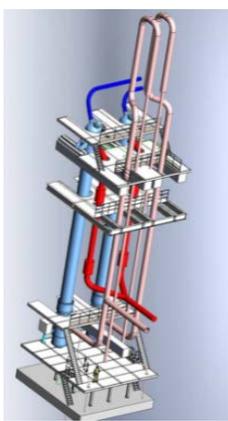
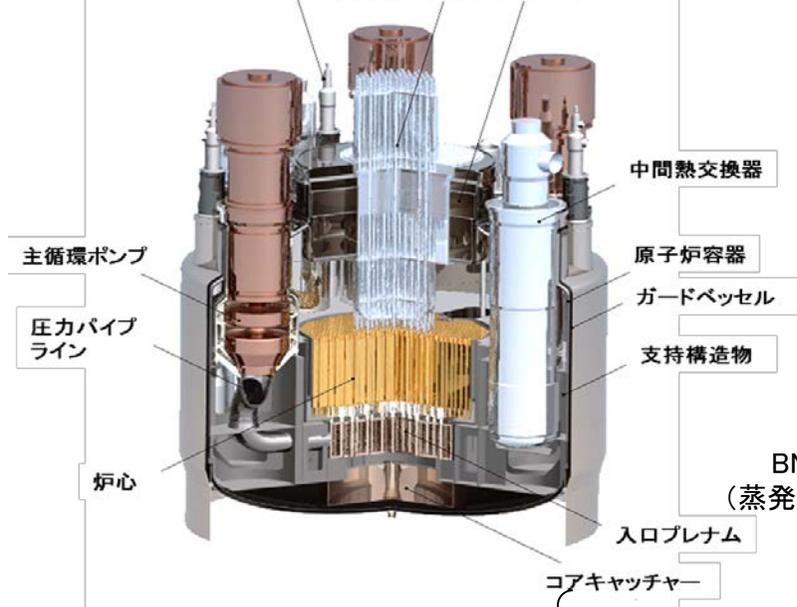
(Puの年間消費量:1.7トン)

高速実用炉BN-1200

- 技術*1、経済性*2、安全性*3の向上を図った第4世代のナトリウム冷却高速炉で、シリーズでの建設を予定
 - *1 一体型長尺蒸気発生器の採用、燃料交換系の簡素化等
 - *2 ロシアのPWRであるVVER-1200と同等の建設単価を目標
 - *3 原子炉容器内に1次系の全てのナトリウム系統を格納、崩壊熱除去系を原子炉容器内に装備、温度感知式の受動反応度制御システムの設置等
- 連邦目標プログラムに基づき設計
- ベロヤルスク原子力発電所に1基(5号機*)と、新設予定の南ウラル原子力発電所に1基建設し、2030年頃運転開始予定

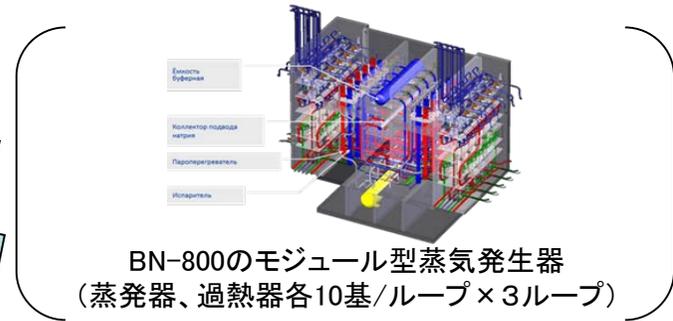
項目	値
定格熱出力(万kWt)	280
電気出力(万kWe)	122
設備利用率(%)	90
熱効率(%)	
グロス(発電端)	43.5
ネット(送電端)	40.7
冷却ループ数	4
設計寿命(年)	60
炉心入口/出口 ナトリウム温度(°C) (中間熱交換機出口/入口)	410/550
蒸気発生器入口/出口 ナトリウム温度(°C)	355/527
蒸気発生器入口/出口 水・蒸気温度(°C)	275/510
蒸気圧力(MPa)	17
燃料	窒化物、MOX

燃料交換機 制御棒駆動機構 回転プラグ *FR17で、2027年に運転開始予定と発表



BN-1200の一体型長尺蒸気発生器
(蒸発器、過熱器各1基/ループ×4ループ)

BN-600のモジュール型蒸気発生器
(蒸発器、過熱器、再熱器各8基/ループ×3ループ)

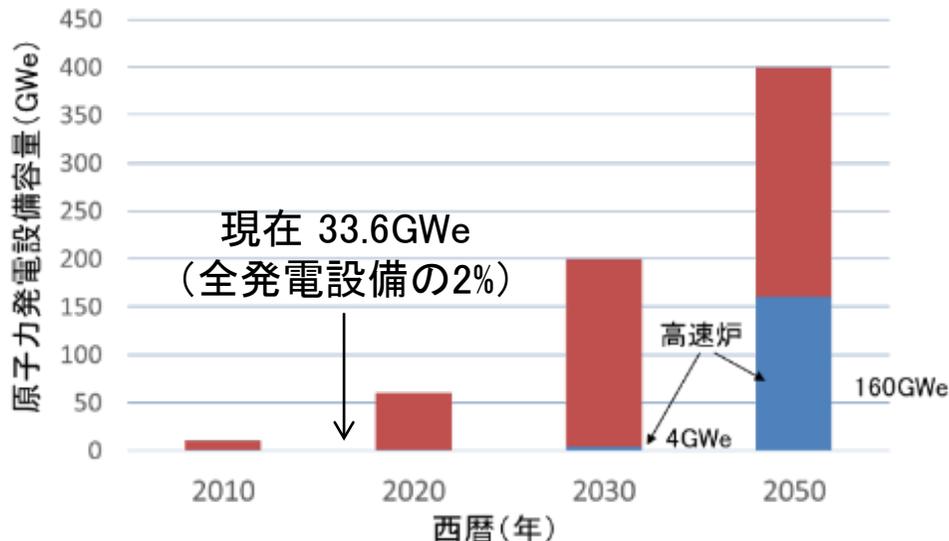


BN-800のモジュール型蒸気発生器
(蒸発器、過熱器各10基/ループ×3ループ)

◆原子力政策と高速炉開発の位置付け

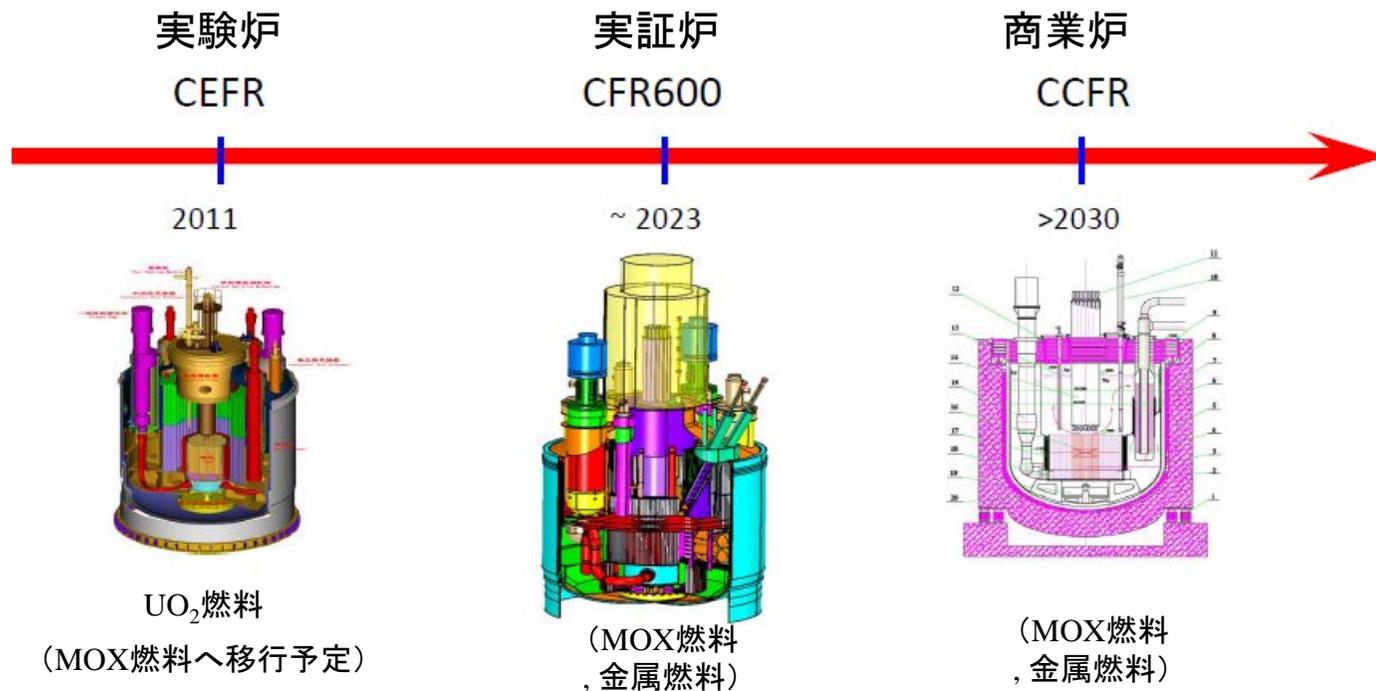
- エネルギー需要の大幅な拡大に備えて、増殖炉としての高速炉の早期の実用化を目指している。
- 2030年の中国のクリーンエネルギー目標（GDPあたりのCO₂排出量を2005年比で60～65%削減し、1次エネルギーに占める非化石燃料の割合を20%程度とする）の達成のためには、2050年頃には原子力を約400GWe（全電力の16%）に拡大することが必要で、約4割を程度を高速炉で担いたいとの方針。

中国の原子力発電の増強計画
[中国原子能科学研究院(CIAE)の試算(高速炉の高導入ケース)]



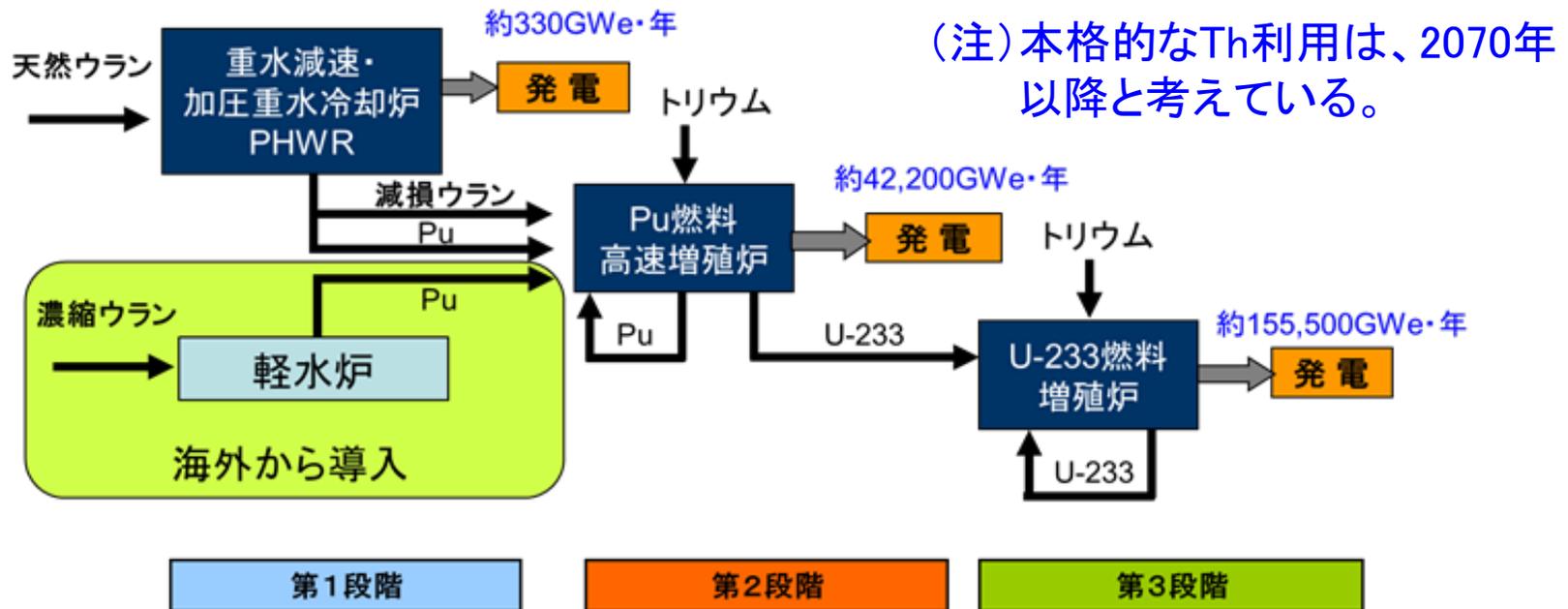
◆今後の高速炉サイクル開発計画

- 2025年頃までに実証炉を導入し、2030年代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
- 高速炉燃料サイクルについては、2021年にMOX燃料製造施設(20t/y)、2030年頃にMOX再処理施設(50t/y)を運転開始予定



◆原子力政策と高速炉開発の位置付け

- 国内に豊富なトリウム(Th)資源(世界第2位)を有しているため、将来、このThを有効活用するインド独自の3段階の原子力開発計画(閉燃料サイクル)を1950年代前半に策定し、この計画に沿って原子力開発を進めてきている。
現在は、その第2段階に当たる高速炉サイクル技術の開発を重点的に推進中

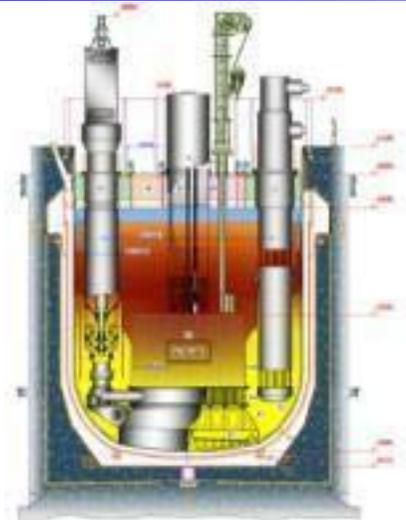


出典： DAE, "Atomic Energy in India: A Perspective", Sep.2006 (軽水炉等を追記)

青字：国内資源を全て電力生産に使用すると想定した発電ポテンシャル

(S.K.シャルマ(NPCIL)「インドの原子力発電開発と今後の計画」第50回原産年次大会(2017)より)

インドの原子力開発計画 (三段階方式)

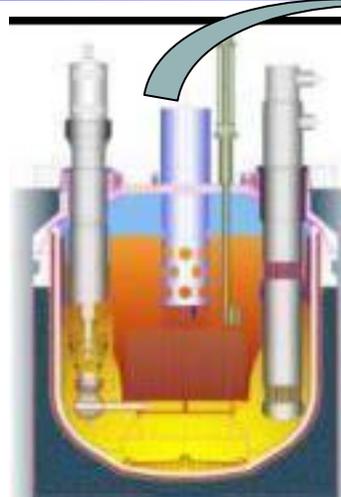


PFBR: 500 MWe



PFBRの設計・製作・建設・
運転を通じて以下のノウハウを習得

- 経済性向上
- 高度な原子炉及び機器の設計・製作・技術開発



FBR- 600 MWe



- より高い安全性
 - ポスト福島、
 - 第4世代炉のアプローチ
- PFBRとほぼ同じ容器寸法でより高出力可能性
- 経済性(ツインユニット、60年寿命等)と製造技術の習熟度を考慮

- 出力: 600MWe
- 炉心の拡大
- 目標: PFBRと比べて
 - より高い増殖比(1.1)
 - ナトリウムボイド係数の低減 (<1\$)
- 容器寸法: PFBRとほぼ同径、高さは少し高い
- 炉心: 均質
- 利点: 金属燃料サイクル技術が成熟するまで、既存のMOX燃料技術を利用



- 2015年11月 DOE(米エネルギー省)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)イニシアチブ**」を設立

◆今後の高速炉開発計画

- 2017年1月、DOEは「**先進炉開発のビジョンと戦略**」を発表

背景:意欲的なCO₂削減目標を達成するために、原子力を含むクリーンエネルギーの大幅拡大が必要。一方、2050年頃から80年寿命の現行軽水炉が寿命に至る。これを**新型軽水炉、小型モジュール炉(SMR)、Gen-IV炉**で置換える必要がある。このため、先進炉(Gen-IV)開発のビジョンと目標を設定。

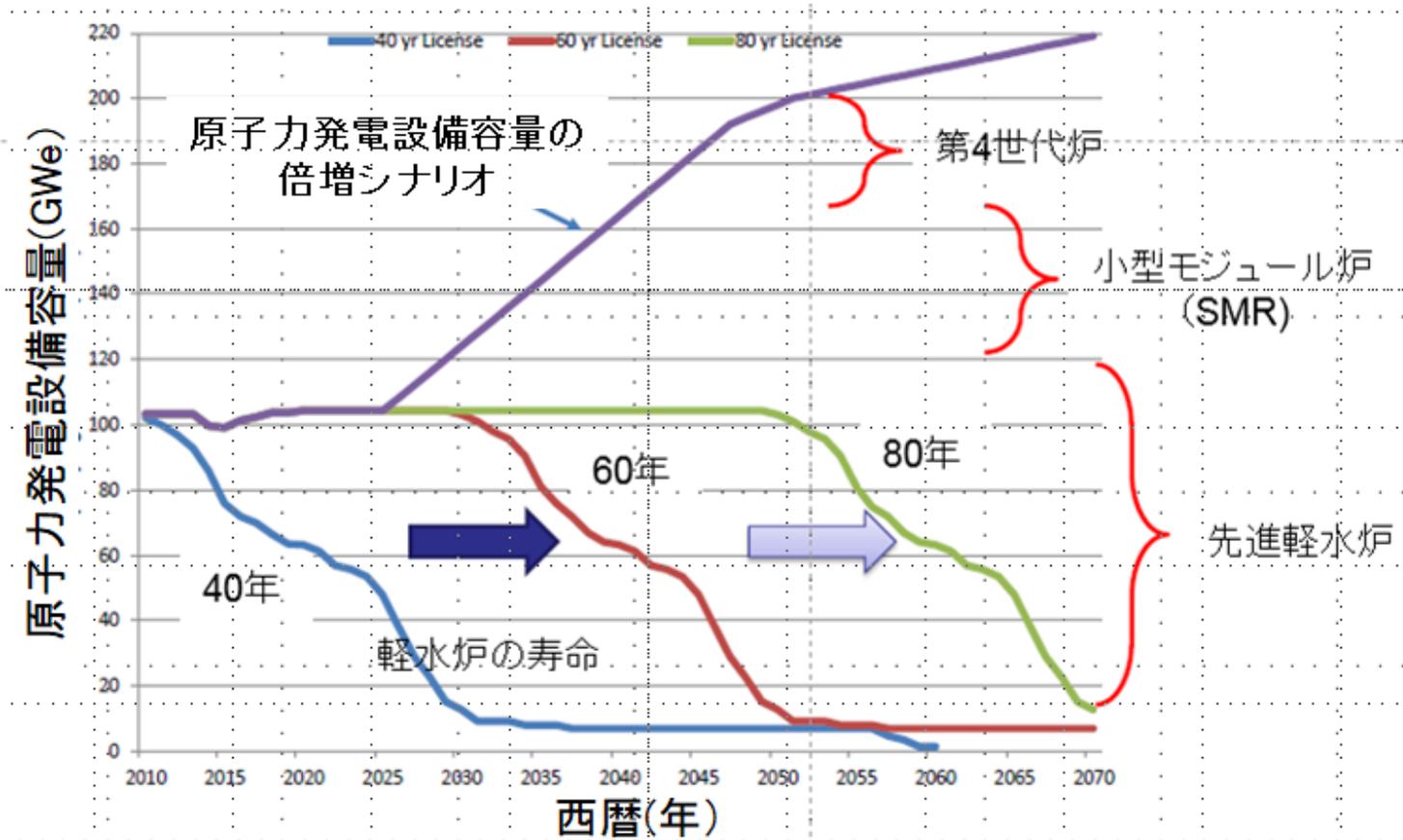
ビジョン:より改善した安全性・コスト・性能・持続性及び拡散リスク低減を以て、2050年までに米国内外で、先進炉がエネルギー・ミックスにおける重要かつ伸長する要素となることを目指す。

目標:2030年代初めまでに、少なくとも二つの非軽水炉型先進炉概念について、技術的に成熟し、安全性・経済的利点の実証され、建設に進むだけの十分な許認可評価を終了していること。

対応策:GAINイニシアチブ推進による官民協力・**出力過渡試験炉(TREAT炉)の運転再開、試験炉の設計・建設**、炉技術の性能実証、燃料サイクルの道筋明確化、原子力規制委員会(NRC)と協力した規制枠組み構築、人材開発等に取り組む。



- 米国のクリーンエネルギー戦略の目標達成には、2050年までに現状の原子力設備容量(約100GWe;全発電量の約20%)を倍増(約200GWe;全発電量の約30%)する必要があり、その内、数10GWeをGen-IV炉で担いたいとの見通し(DOEの試算)



出典: USDOE, "VISION and STRATEGY for the Development and Deployment of Advanced Reactors," Jan. 2017
 「先進炉開発のビジョンと戦略」(2016年5月27日にドラフト公表)

◆原子力政策と高速炉開発の位置付け

- 2016年7月 KAEPが使用済燃料管理に関する2つの政策決定を承認
 - 高レベル廃棄物管理の基本計画(2053年 HLW処分場の運転開始、等)
 - 乾式処理とSFRシステムの技術開発と実証戦略
- 2017年5月に誕生した文新政権は、同年10月に脱原子力発電ロードマップを発表しており、先行きが不透明になっている

◆これまでの高速炉サイクル開発の実績

- 1992年 高速炉KALIMER-150(15万kWe; 金属燃料; タンク型)の基本技術開発に着手し、1997年からKALIMER(15/60/120万kWe)の概念設計を順次開始
- 2012年 高速原型炉PGSFR(15万kWe; 金属燃料; タンク型)の概念設計を開始、現在、SDSARを取りまとめ中
- 金属燃料炉心、乾式処理技術開発では米国との協力を継続中(米国との協力がベース; 炉についてはANLと、INLとの使用済燃料の乾式処理試験の共同研究(2011-2020年))

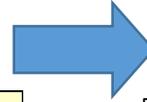
◆今後の高速炉サイクル開発計画

- 2028年 高速原型炉PGSFRの建設完了予定。それ以降の高速炉導入計画は未定
- 2030年代半ばまでに、高速炉と乾式法を用いた閉サイクルにより、高速炉によるTRU消滅能力(使用済燃料削減と放射性毒性の低減)の実証(PWR使用済燃料管理)

1. 新たに掲げる目標

求められる新たなチャレンジ

- ①東電福島原発事故後の要請に応える、更なる安全性向上
- ②開発段階を含めた経済効率性の追求と本格導入の市場環境への適合
- ③国際協力を通じた最先端の知見獲得と国際標準探究



今後の我が国の高速炉開発の目標

- ✓ 世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図る。
- ✓ 高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉を開発し将来的に実用化を図る
- ✓ もって、国際標準化に向けたリーダーシップを最大限に発揮すること、実現のため、開発目標等の具体化を図っていく。

2. 高速炉開発4原則

原則1: 国内資産の活用

- ✓ 技術的知見、技術的・人的基盤、インフラ

原則2: 世界最先端の知見吸収

- ✓ GIFをはじめとした多国間協力及び二国間協力

原則3: コスト効率性の追求

- ✓ 国際協力の積極活用、適時の開発費用、成果状況の評価、開発手段・手法の見極め・見直し

原則4: 責任体制の確立

- ✓ 役割の明確化、ガバナンス体制の確立、的確な安全管理、国の主導的役割

◆ 仏国技術実証炉ASTRIDの概要

- 2008年:ナトリウム冷却高速炉(SFR)をレファレンス炉に選定
- 2012年:プロトタイプ炉(ASTRID:技術実証炉;60万kWe;MOX燃料)の技術仕様を決定
- 2013～2015年:概念設計、2016～2019年:基本設計
- 2030年代:実現予定

◆ 協力の概要

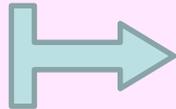
- ASTRID開発プロジェクトへの参加は日仏首脳同士の合意事項
2014年5月に政府間の取決めを締結
- JAEAが日本代表・MFBR/MHIが参加して推進。2014年8月に、
仏CEA・AREVAと実施機関間取決めを締結



政府間取決め締結



仏国のASTRID技術開発



共通技術課題の協力
日仏でワークシェア



日本のSFR技術開発

燃料分野(7課題)

- 燃料照射試験 **常陽を活用**
- 長寿命制御要素開発 **常陽を活用**
- MgO反射体照射試験 **常陽を活用**
- 燃料材料開発、等

設計分野(10課題)

- 強制循環方式崩壊熱除去系
- キュリー一点電磁石方式自己作動型炉停止機構
- 免震技術、等

SA分野(9課題)

- シナリオ検討
- 評価手法開発
- レベル2PSA
- IGRプログラム、等

炉技術分野(10課題)

- 材料のクリープ挙動
- 計装・機器開発
- 熱流動評価手法開発
- 実証試験計画、等

世界の情勢:

- 仏、露、印、中では、2025～2040年頃には高速炉が実用化される計画

原子力関係閣僚会議(2016年9月21日及び12月21)の決定:

- 我が国は、「高速炉開発を含めた核燃料サイクルの推進」の基本方針を堅持
- 高速増殖炉もんじゅは、原子炉として運転再開はせず、今後は廃止措置に移行
- 「高速炉開発の方針」に基づき「戦略ロードマップ(仮称)」の策定による開発工程の具体化を図る。

今後の高速炉サイクル技術の国際協力における考慮すべきポイント

- MOX燃料/窒化物燃料+湿式再処理: 仏国・ロシア
 - 金属燃料+乾式再処理: 米国・韓国、インド、中国
- 世界標準原子炉の追求
 - 地震条件の克服
 - 炉型選択(ループ/タンク)
- 仏米を始め、ロシア、インド、中国、韓国等との協力・連携
- 実用化時期と高速炉サイクルの市場