

世界と日本の高速炉開発について

JAEA 佐賀山 豊

平成28年4月21日

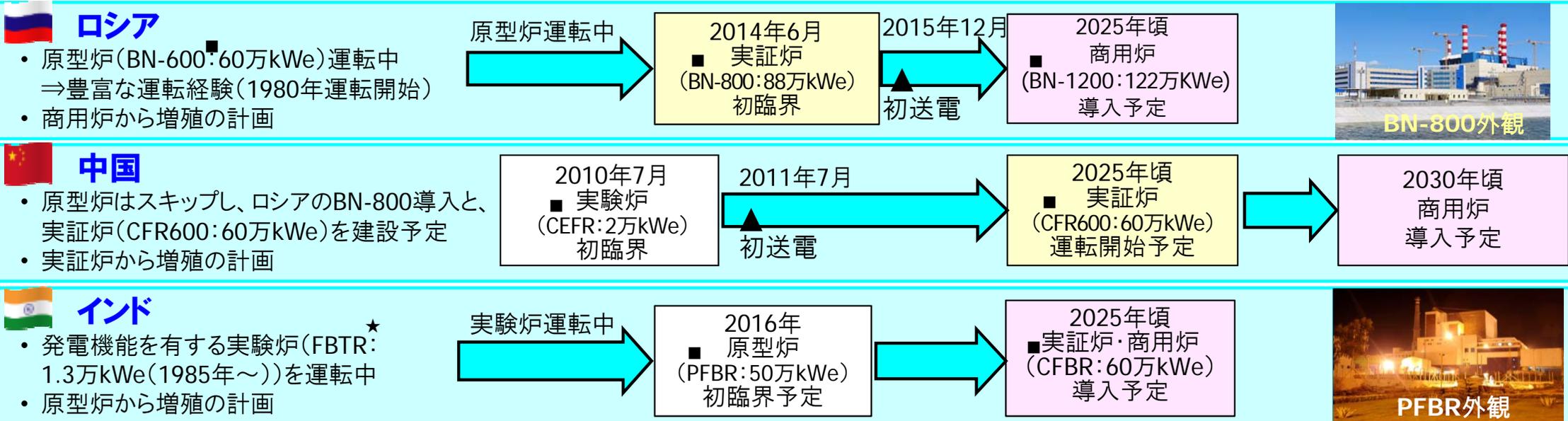
- **世界の高速炉の研究開発動向**
- **各国の研究開発の進捗**
- **国際的な枠組み**
- **もんじゅについて**

世界のナトリウム冷却高速炉の開発状況

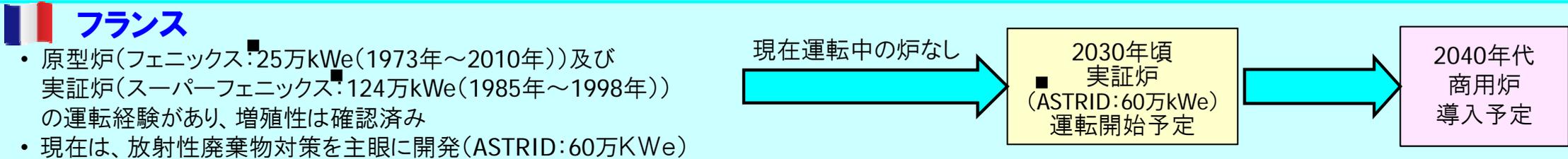
各国で実験炉、原型炉、実証炉の建設が進み、2025年～2040年頃には高速炉が実用化される計画

①エネルギーセキュリティの観点から増殖を志向

★:ループ型、■:プール型



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、将来的にはナトリウム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4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2000年代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高速炉(SFR)、MOX燃料、湿式法再処理での実現**を目指す
- 第4世代炉(Gen-IV炉)としてのガス冷却高速炉(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、1973-2009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

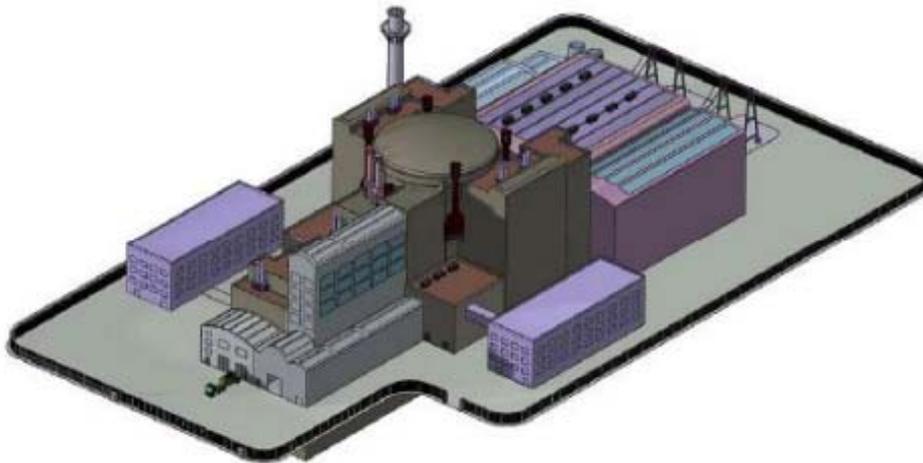
*ASTRIDと関連する燃料サイクル計画へ2010~17年に約6.5億ユーロを投資 ⇒2019年まで延長

◆ 実績 (続き)

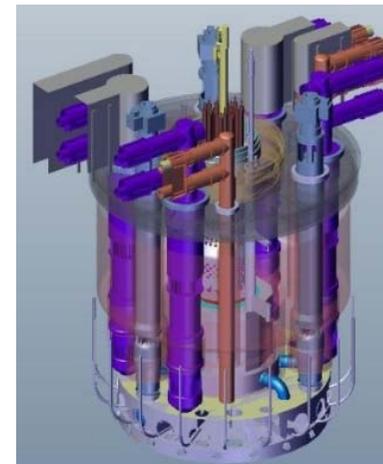
- 2012年12月 CEAは、2006年放射性廃棄物等管理計画法に基づき、長寿命放射性核種の分離・変換の産業化の見通しや技術開発の現状を整理した「放射性物質の持続的管理に関する報告書」を政府に提出。その中で、SFRは、今世紀前半に配備するための最良の解決策と評価
- 2012年 プロトタイプ炉(ASTRID:実証炉、60万kWe、プール型、MOX燃料)の技術仕様を決定

◆ 計画

- 2020年頃 AFS (ASTRID用のMOX燃料製造施設10t/y) の運転開始予定
- 2030年頃 ASTRID初臨界予定、ATC (ASTRID用の工学規模の再処理施設) の運転開始予定
- 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
- Gen-IV炉として、BN-1200の**大型ナトリウム冷却炉と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、原型炉BREST-300(窒化物燃料)により鉛冷却炉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)についても追及
- その他のGen-IV炉として、超臨界水冷却炉、熔融塩炉などの研究開発も実施

◆ 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;UO₂燃料)、BN-600(UO₂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
- 2014年に鉈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

◆ 計画

- BN-800は2016年に運転開始予定(初装荷炉心は UO_2 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
- 燃料サイクルに関しては、2025年頃にRT-2再処理施設(700t/y)(軽水炉および高速炉燃料を対象)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;燃料はBARCで製造)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)
- PFBR用の初期のMOX燃料は先進燃料製造施設(AFFF)で製造



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、2023-2024年(2024-2025年)から運転開始予定
- 原型炉PFBR燃料の再処理実証プラント(DFRP; 1t/y)を建設中(2016年運転開始予定)
- 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}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}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}U 燃料サイクルの本格導入時期は、FBR, ADS, AHWR, MSR等と関連サイクル技術の今後の展開に依存)
- 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)

◆ 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や熔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 [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]した経緯があるが現状不明(無期延期との情報もある)
- 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

◆ 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、超高温ガス炉(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
- 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(発効待ちの状態)。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

高速炉サイクル技術に係る日本の国際協力

- 日仏ASTRID協力や日米CNWGを中心に、日米仏主導の安全基準の国際標準化を目指すと共に、研究開発の効率化を進める。
- GIFやNEAなどの多国間協力においても、安全基準の国際標準化を目指すと共に、日本の施設の国際的な活用を推進する。

GIF (多国間)

【狙い】

- 日米仏主導の安全基準を国際標準化
- 多国間で分担することにより効率的に実施、外部資金利用
- 日本の施設の国際的な活用を推進

【主なプロジェクト】

- 安全基準、運転・保守ガイドラインの構築 (SDC/SDG)
- 廃棄物の減容に資する照射試験 (GACIDプロジェクト)

OECD/NEA (多国間)

【狙い】

- 各国の研究開発動向の把握
- 日本の施設の国際的な活用の推進

【主なプロジェクト】

- 原子力革新2050イニシアチブ (NI2050)

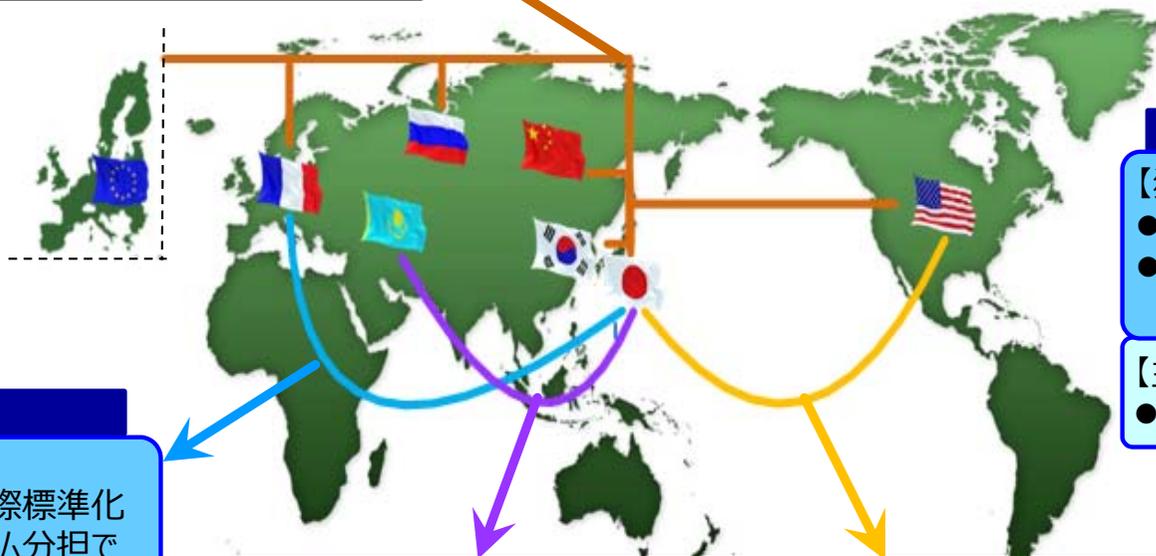
IAEA (多国間)

【狙い】

- 各国の研究開発動向の把握
- 日本の施設の国際的な活用を推進

【主なプロジェクト】

- 革新的原子炉と燃料サイクル国際プロジェクト (INPRO)



日米仏三か国間

【狙い】

- 日米仏主導の安全基準を国際標準化
- 安全性、廃棄物減容研究の協働、データ共有による合理化

【主なプロジェクト】

- ナトリウム冷却高速炉の協力に関する覚書

日仏二か国間

【狙い】

- 日米仏主導の安全基準を国際標準化
- 高速炉の共通技術開発を日仏分担で実施することによる合理化
- 日本の施設の国際的な活用を推進

【主なプロジェクト】

- **ASTRID協力**

日カザフスタン二か国間

【狙い】

- 苛酷事故に関する試験を共同で実施し、苛酷事故対応技術の確立

【主なプロジェクト】

- **EAGLE試験**

日米二か国間

【狙い】

- 日米仏主導の安全基準を国際標準化
- 安全性、廃棄物減容研究の協働、データ共有による合理化

【主なプロジェクト】

- **民生用原子力エネルギー研究WG (CNWG)**

安全設計クライテリア/ガイドラインの国際的な整備

- ◎ 世界の高速炉の安全性向上に向け、**我が国主導で安全設計要件を構築**
- ◎ **高速炉開発国が安全規制や安全設計へ反映の意向**を示し**事実上の世界標準へ**
- ◎ 世界標準を背景に、**日本の高速炉の安全設計のあるべき姿を根拠をもって示す。**

◆ 安全設計クライテリア(SDC)/ガイドライン(SDG)の位置付け・目的

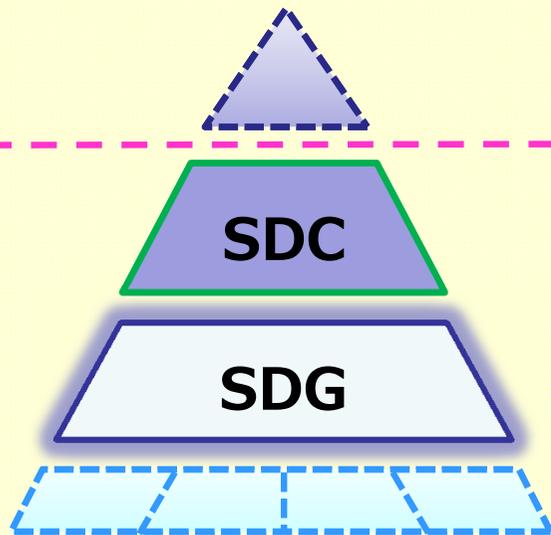
- 実用炉に向け、**安全設計の考え方を国際標準化、世界の高速炉の安全性向上へ**
- 世界標準を背景に、日本の規制に対し**安全設計の考え方、妥当性を示し理解を得る。**

◆ 主たる成果：**SDCレポート (2013年5月GIFにて承認)**

- **ロシア等の規制関連機関から反映の意向、中国・インドでも安全設計に反映の意向**
- OECD/NEA委員会で**世界の規制機関による議論本格化**

<SDC/SDGの位置づけ>

基本的安全原則（例：深層防護、ALARAの原則等）



一般的安全設計クライテリア

SDCを設計に展開するためのガイド
特定系統・機器設計の推奨事項

**国際的な共通化・調和の
推進を目指す**

溶融炉心物質の原子炉容器内保持(IVR)の達成等

各国毎の規格・基準（ASME、JSME、民間規格等）

<もんじゅ成果の高速炉実用化への反映>

◆我が国として保有すべき技術の実証

- 技術力で持続可能なエネルギーを獲得するには、高速炉の **中核技術の自国技術としての確立が重要**
- そのためには、**自らの設計、建設、運転等を通じた技術の実証、ノウハウの蓄積が必要不可欠**
- 実用化までの **開発ステップとして30万KWe級の原型炉の経験は登竜門として重要**

もんじゅ成果

- ① 性能試験
- ② 運転、保守経験
- ③ トラブル対応

反映対象

実証炉・実用炉の**設計**に反映

実証炉の**運転**に反映

実証炉

経済性、信頼性の実証



原型炉 もんじゅ



実用段階

研究開発段階

<高速炉技術の維持・継承>

実験炉 常陽



(1977年初臨界)

①蓄積した経験

- (もんじゅの性能試験/トラブル経験)
- 職員の数多くが**高速炉固有の運転・保守にかかわる現場レベルの経験を蓄積**

②技術の継承

- (性能試験/定格運転/保守・補修)
- **経験者は、今後10年程度で過半が引退**
 - 自国で設計した設備の性能・機能を満足しているか検証
 - その経験を踏まえ次期炉の設計へのフィードバック

③経験の拡充

- 実証炉・実用炉設計のためは**持続的な人材育成・確保を前提とした経験の拡充が必要**
- もんじゅを通じた**高速炉技術の維持・継承及び継続的なプラント建設が必要**

＜もんじゅを活用した国際協力＞

- ◆ もんじゅは、世界に実存する数少ない高速原型炉であり、国際協力・貢献、研究成果の集約・発信の場としての国際研究拠点と位置付けて活用
- ◆ 国際協力の基本方針
 - 開発リード国としての国際貢献
 - 高速炉開発費用の分担によるコスト削減やリスク分散
 - 我が国の設計・技術等の国際標準化

GIF (多国間)

- 高速炉の安全基準、運転・保守ガイドラインの構築
 - 高速炉に関する国際安全設計要件の策定
 - SDCを具体化した国際ガイドラインの策定
- 廃棄物の減容に資する照射試験
 - 日仏米間で「もんじゅ」等を用いたアクチノイドサイクルの国際実証 (GACIDプロジェクト) の推進

IAEA (多国間)

- 高速炉の安全に関する公開データに基づく研究協力
 - 自然循環データ解析など
- プラント運転経験に関する情報交換
 - 公開情報レベルで情報交換

日仏二国間

- 2014年8月より、仏国の次世代高速炉ASTRIDに関する共同研究を開始
- 海外高速炉の燃料の先行照射
 - 仏国はASTRIDの初装荷燃料のための照射試験を希望

日カザフスタン二国間

- カザフスタンの実験施設を利用してシビアアクシデント時の炉心の安全性に係る共同研究 (EAGLE試験) を実施



日米二国間

- 2013年1月に締結された民生用原子力エネルギー研究WG (CNWG) の下で、原子炉に用いる先進材料や、プラントシミュレーション技術等についての研究協力を実施

＜機構外からの見方＞

- ◆ **国内原子力メーカーからの期待(文藝春秋2014年8月)**
 - 高速増殖炉を実現しない限り原子力をやっていく意味がない。将来のためにも技術開発を途絶えさせてはいけない。
 - 将来的には高速増殖炉にならざるを得ない。まだ研究段階なので発電コストも高いが、商用炉になれば、競争力を持てるレベルにまで下がってくる。必ずそういう時代が来る。
- ◆ **立地自治体から国への要請**
 - もんじゅは、思い切った資金と人材を投入し、国際的な研究開発拠点として高速増殖炉の研究開発と放射性廃棄物の低減・低毒化の成果を上げること
 - もんじゅがこの地において良かったと言えるように、早く本来の姿を見せてほしい。
 - 国際的な研究開発の拠点として新たなステップに踏み出せるよう、(中略) 必要な取組をしっかりと果たしてほしい。
- ◆ **米国の懸念 (日米原子力協定改訂交渉への影響)**
 - 核燃料サイクルの推進を基本方針とする我が国にとって包括事前同意方式 (包括的な再処理が可能) の維持が重要
 - 米国にとって我が国の余剰プルトニウム問題 (使用目的の定まらない不必要なPuの増加) は安全保障問題
 - 六ヶ所再処理工場の見通し、高速炉の見通し、中間貯蔵などの我が国の核燃料サイクル政策 (プルトニウムバランスの維持) の明示が必須 (短期、長期)
 - もんじゅの運転再開を目指した活動は、我が国の核燃料サイクル推進の姿勢を強く示すこととなる