



資料2-2

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
原子力科学技術委員会もんじゅ研究計画作業部会（第6回）
H25. 1. 22

国際協力の下での 高速増殖炉/高速炉サイクル研究開発について

平成25年1月22日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

1. 国際協力の意義と基本方針
2. 高速増殖炉/高速炉の開発に関する国際協力の動向
3. 国際協力の枠組みと今後の活用方針
4. 当面の重点協力項目案
 - もんじゅを用いた協力
 - もんじゅ以外での協力

参考資料

- 関連する諸国のFBR/FR開発実績と現在の開発状況
- 世界の主な中性子照射場の現状
- 世界のFBR/FR研究開発における「もんじゅ」の位置付け



1. 国際協力の意義と基本方針(その1)

- 東電福島第一原子力発電所事故後も、高速増殖炉/高速炉開発を進めている国々は、各国毎のエネルギーや環境事情を反映し、その開発・利用計画を維持し、着実に商用化に向けて研究開発を進めている。
- 開発を進める国々との技術協力は、開発や技術基盤整備のコスト削減はもとより、技術・知見の共有化や共通の安全文化の醸成などを促進し、国際的な技術水準底上げや高い信頼性確保という観点からも重要である。

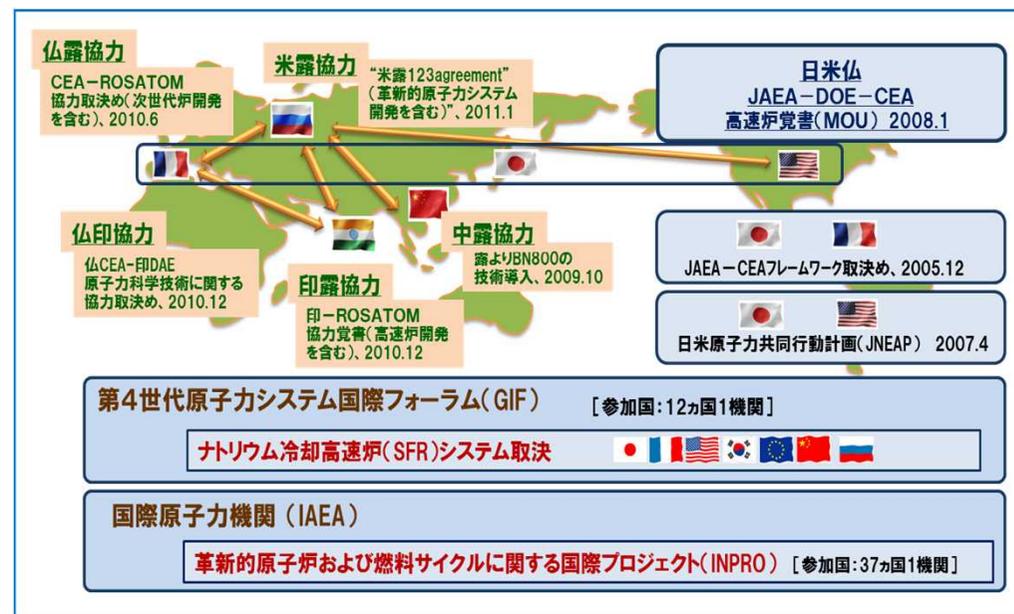


1. 国際協力の意義と基本方針(その2)

- 国際協力として推進すべき項目は、以下の視点で選定する。
 - 我が国の設計・技術、基準等の国際標準化に有効なもの。
 - 国内単独で実施するよりも、国際協力を通じた費用分担によるコスト削減、リスク分散 (相手国と互いに代替技術を補完)が期待され、効率的な研究開発が可能となるもの。
 - 開発リード国として、これまでに我が国が培った技術で国際貢献に資するもの。
- 国際協力項目案の検討では、以下をキーポイントとする。
 - 「もんじゅ」の試運転・運転保守を通じて得られる実機データ・成果の活用
 - 放射性廃棄物の減容・有害度の低減
 - 安全性・信頼性向上(シビアアクシデント対策含む)
- 国際協力の基本は「等価交換」とする。
- 後発国との協力は、国際貢献の観点から、相手国の技術底上げのための情報提供や技術者教育・訓練などを想定する。

2. 高速増殖炉/高速炉の開発に関する国際協力の動向

- 多国間協力として、第4世代原子炉システム国際フォーラム(GIF)およびIAEAの革新的原子炉および燃料サイクルに関する国際プロジェクト(INPRO)があり、前者は技術ホルダー国による技術開発協力、後者は技術ユーザー国と技術ホルダー国が参画した主に評価手法や制度の整備に向けた協力を実施。
- 日本は米仏との間で、日米(民生用原子力研究開発WG(CNWG))、日仏(JAEA-CEAフレームワーク取決め)、日米仏(CEA-DOE-JAEA間の高速炉覚書)の枠組みで具体的な研究開発協力を進めている。
- 仏国とロシアは、2010年6月のCEA-ROSATOM協力取決めに続き、2011年には、仏露ナトリウム冷却高速炉の開発に向けた取決めを締結。
- 中国はロシアの技術を導入しつつ高速炉開発を急テンポで進める計画。
- インドはNPT非加盟国であるが、仏国と原子力研究開発に関する一般的な取決めを締結し、ナトリウム冷却高速炉の安全関連技術について協力を実施中。また、露国ROSATOMと高速炉開発を含む協力覚書を締結。
- 米国は、BRCLレポートで言及されたように、当面は基盤的な研究の域を出ない状況であり、GIFや日仏米の枠組み等に参加しつつ、長期的観点からの基盤的研究を継続。
- 韓国は、GIF及び米国との協力等により開発を進めている。



国際的な協力の枠組み



3. 国際協力の枠組みと今後の活用方針（その1）

● GIFでのナトリウム冷却高速炉(SFR)に関する協力

▶ 米、仏、韓、中、露、EUの関係機関と、

安全、機器、燃料等の多国間で扱うことが効果的な分野での研究開発協力

- 常陽/もんじゅを用いたアクチニドサイクルの国際実証(GACIDプロジェクト)を推進する。
- SFRの国際基準作成に向けて、安全設計クライテリア(SDC)の検討を進めている。
IAEA/INPRO(革新的原子炉及び燃料サイクルに関する国際プロジェクト)との高速炉安全共同ワークショップにより、世界標準化を追求する。
- AtheNa施設等を用いたシビアアクシデント対策試験を、新たなプロジェクトの枠組みを構築して推進していく。



3. 国際協力の枠組みと今後の活用方針（その2）

● 日米仏三国間協力

➤ 基盤的技術からインフラ相互利用までの広範な協力

- 代表的な協力分野は、安全性・設計要求、先進材料、解析コード評価等。
- 2011年11月に11の協力分野の計画に合意し、協力を開始。

● 日仏二国間協力

➤ 日仏協調による原子力R&Dの国際的先導を視野に入れた協力

- 仏国の技術実証炉ASTRIDに対する協力について検討中。

● 日米二国間協力

➤ 高速炉および燃料サイクルの技術基盤の高度化を目指した協力

- 民生用原子力研究開発WG(CNWG)で協力を実施。
- 代表的な項目は、もんじゅ運転再開協力、金属燃料サイクルの総合的開発等。

4. 当面の重点協力項目案－全体概要

もんじゅを用いた協力項目の案

- (1) 高速増殖炉開発の成果とりまとめを目指した研究開発
 - ・性能試験データ等を用いた解析手法検証(出力変更試験解析等)
 - ・運転・保守データ等蓄積による信頼性データベースの構築(故障率データ、保全プログラム等)
 - ・海外からの技術者派遣受け入れ(性能試験参画等)
- (2) 放射性廃棄物の減容・有害度の低減を目指した研究開発
 - ・MA添加MOX燃料の燃焼挙動確認照射(GACIDプロジェクト)
 - ・プルサーマル使用済燃料組成を模擬したMOX燃料照射(高次化Pu燃焼実証)
 - ・ASTRID燃料集合体照射
- (3) 高速増殖炉／高速炉の安全性強化を目指した研究開発
 - ・大規模システムでの自然循環による除熱能力の実証と評価手法の構築・検証
 - ・高速増殖炉/高速炉に対するシビアアクシデントマネジメント策の充実と実証的な確認

もんじゅ以外での協力項目の案

- (1) 放射性廃棄物の減容・有害度の低減を目指した研究開発
 - ・実験炉「常陽」を用いた照射試験等
- (2) 高速増殖炉／高速炉の安全性強化を目指した研究開発
 - ・AtheNA-SA試験、シビアアクシデントシナリオの統一と関連試験・評価手法整備の共同実施
 - ・安全設計クライテリア/安全設計ガイドラインの国際標準化とそのための基盤技術の強化
⇒試験施設共同利用、試験データ共有、ベンチマーク解析・評価手法共同開発
- (3) その他
 - ・技術実証炉ASTRIDに対する協力、金属燃料サイクルの総合的開発 等



4. 当面の重点協力項目案—もんじゅを用いた協力(その1)

これまでの作業部会における検討

【『「もんじゅ」等の研究計画について(中間的な論点のとりまとめ案)』
(もんじゅ研究計画作業部会(第5回)資料1)より抜粋】

●高速増殖炉開発の成果のとりまとめを目指した研究開発について

これまでの検討経過

「もんじゅ」独自の技術と「海外炉」と「もんじゅ」共通の技術、「海外炉」独自の技術に区分した技術マップを作成し、世界の高速増殖炉／高速炉開発における「もんじゅ」で開発可能な技術の位置づけを整理した。

引き続き検討が必要な課題

研究を国際協力の下で行うための具体的な検討を行う。

●廃棄物の減容及び有害度の低減を目指した研究開発について

これまでの検討経過

国内及び海外の高速中性子照射場の性能や照射実績等を整理した上で、環境負荷低減の有効性を確認するために追加的に実施すべき試験項目を選定し、「もんじゅ」及び「常陽」を用いた照射試験の内容の検討を実施した。

引き続き検討が必要な課題

照射試験を国際協力の下で行うため、GACIDの枠組みの有効活用等も視野に入れつつ、具体的な検討を行う。



4. 当面の重点協力項目案—もんじゅを用いた協力(その2)

もんじゅは、世界的にも数少ない原型炉クラスの高速増殖炉プラント。その特徴を活用し、以下のような試験が可能。

- ▶ 原型炉スケールでの各種試験・運転経験データ(実証データ)取得
- ▶ 実規模集合体での各種の燃料照射【世界的にも限られた高速中性子照射場としての活用】

もんじゅを用いた当面の重点協力項目案を、以下の技術分類に沿って検討。

(1) 高速増殖炉開発の成果のとりまとめを目指した研究開発

- ▶ 性能試験データ等を用いた解析手法検証、運転・保守データ等蓄積による信頼性データベースの構築等
- ▶ 海外からの技術者派遣受け入れ、プラント運転/保守管理等の技術者養成

(2) 放射性廃棄物の減容・有害度の低減を目指した研究開発

- ▶ GACIDプロジェクトによるMA添加MOX燃料の照射試験、高次化Pu燃焼試験等

(3) 高速増殖炉/高速炉の安全性強化を目指した研究開発

- ▶ 大規模システムでの自然循環による除熱能力の実証と評価手法の構築・検証等

(1) 高速増殖炉開発の成果のとりまとめを目指した研究開発

性能試験やプラント運転等を通じて、**ナトリウム冷却高速増殖炉プラントの運転・保守・技術実証に関するデータが得られる世界的にも数少ない原型炉プラント**

➤ 性能試験データ等を用いた解析手法検証

- 各種評価手法開発に利用可能な性能試験データの提供(出力変更試験等のループ型ナトリウム冷却発電炉の動特性データ等)、国際ベンチマーク解析による手法検証・高度化、先方のニーズに合わせた試験実施・データ提供も想定。

➤ 運転・保守データ等蓄積による信頼性データベースの構築

- 確率論的安全評価に不可欠な、ナトリウム冷却発電炉の実機保守実績に基づく故障率データ、実機の運転・保守を通して信頼性確保のために構築される保全プログラム、各種機器の設計・信頼性向上に寄与する運転データ等(大型Naポンプや蒸気発生器などの運転データ、燃料取扱実績データ、CP・トリチウムといったNa中放射化物挙動データ、原子炉容器等の検査データ等)を提供。

➤ 海外からの技術者派遣受け入れ

- 性能試験参画など。
- 直接的な施設利用として、プラント運転／保守管理、ナトリウム管理といった技術を習得させる養成コースを提供(有償もしくは等価交換での技術者育成協力)。



4. 当面の重点協力項目案—もんじゅを用いた協力(その4)

(2)放射性廃棄物の減容・有害度の低減を目指した研究開発

長期炉停止中にPu-241の崩壊により蓄積したAm-241を炉心平均で約1.5wt%程度含有する点
は世界的にも前例がなく、もんじゅの運転を通じて放射性廃棄物の減容・有害度の低減に係る
技術開発に対して有益な知見を取得できる。

➤ MA添加MOX燃料の燃焼挙動確認照射をGACIDプロジェクトとして実施

- GIFの下で実施中。
- 米国のMA原料を仏国でMA含有MOX燃料に加工し、「もんじゅ」で照射する計画を合意。
- この枠組みをさらに拡大し、燃料ペレット密度等のパラメータ範囲の拡充等、廃棄物減容・有害度低減のために実施する研究開発を含めることについて、今後検討、関係国と調整を図る。

「もんじゅ」では、「ふげん」使用済MOX燃料起源の高次化Puを適用した燃料の照射試験実施を
検討しており、高次化Pu燃焼を世界に先駆けて実証することができる。

➤ プルサーマル使用済燃料組成を模擬したMOX燃料照射 (高次化Pu燃焼実証)

- 仏国より、「もんじゅ」でのASTRID燃料の照射試験実施等に関する共同検討を行いたいとの意向が表明されている。
- ASTRID協力を通じた技術開発について、我が国の開発体制維持等の効果も含め、検討する。

(3) 高速増殖炉/高速炉の安全性強化を目指した研究開発

「もんじゅ」は、現存するループ型原型炉プラントとして唯一。設計・安全評価手法の実機への適用性の確認を可能とする貴重なデータ取得施設。

➤ 大規模システムでの自然循環による除熱能力の実証と評価手法の構築・検証

- ・ ナトリウム冷却炉の特徴である高い自然循環性能による崩壊熱除去を実機スケールで実証するため、「もんじゅ」性能試験において原子炉トリップ後の自然循環除熱による崩壊熱除去試験を実施。
- ・ 試験で取得されたデータを用いて、プラント動特性解析手法(安全評価解析コード、多次元解析コード)の構築と検証を行う。

「もんじゅ」は、確率論的安全評価(PSA)等を通じて抽出されたシビアアクシデントマネジメント(SAM)策に対して、実機を用いた訓練・運用・改良を通じて、その実証的な確認を可能とする貴重な施設。

➤ 高速増殖炉/高速炉に対するSAM策の充実と実証的な確認

- ・ 「もんじゅ」のSAM策の整備を通じて得られた知見等を、安全技術として体系化し、その成果を安全設計ガイドライン(SDG)の構築に反映。



4. 当面の重点協力項目案—もんじゅ以外での協力(その1)

(1)放射性廃棄物の減容・有害度の低減を目指した研究開発

- 「もんじゅ」での実規模長尺燃料ピン及び燃料集合体試験での照射試験データを補強・補完する観点から、「常陽」での短尺試験ピンでの分析的な試験を実施する。
- 高速実験炉「常陽」は、小型炉心ではあるが、実験炉ゆえに、幅広い許認可、Power to Melt (PTM)試験※¹・Run to Cladding Breach(RTCB)試験※²の能力などを有し、様々な条件で燃料ペレットや材料照射、過渡試験などが可能。

※1:PTM試験:燃料溶融限界線出力試験

※2:RTC B試験:燃料被覆管が破損に至るまで照射を継続する試験

以下のような協力項目の可能性を検討中。

- LLFP(長寿命核分裂生成物)核変換や、MA均質・非均質燃料等(高MA含有、金属、炭化物、窒化物燃料)の放射性廃棄物低減技術開発
- 「常陽」を用いた仏国ASTRID燃料の先行照射試験



4. 当面の重点協力項目案—もんじゅ以外での協力(その2)

(2) 高速増殖炉/高速炉の安全性強化を目指した研究開発

① シビアアクシデント(SA)対策

- 崩壊熱除去手段の多様化に関する試験シリーズ(AtheNa-SA)を、GIFのプロジェクトとして実施することを計画。
- SAシナリオの統一化の推進。関連する溶融燃料挙動を確認する炉内安全性試験(EAGLEプロジェクト)、評価手法(SIMMERコード)整備を日仏で共同実施。

② 安全設計クライテリア・安全設計ガイドラインの国際標準化

- 高水準の安全性・信頼性を国際的に確保するため、GIFの枠組みにおいて構築してきた安全設計クライテリア(SDC)を規制側(IAEA)で国際標準化することを目指すとともに、SDCの下部規定である安全設計ガイドライン(SDG)のGIF内検討を進める(日本の技術の国際標準化に寄与)。

③ SDC/SDG国際標準化のための技術基盤の効率的な強化

- 現象解明や評価モデル開発/検証、新材料開発のための試験データ共有(核/熱流動/材料データ。試験の分担実施を含む)、ベンチマーク解析等による知見獲得と手法共同開発。
- 試験施設共同利用の促進(既に、蒸気発生器伝熱管破損時のナトリウム-水反応現象を解明するSWAT試験を日仏で共同実施中)。

米国

- 1940年代前半から1990年代前半にかけて、多くの実験炉(EBR-I, EBR-II, Fermi-1等の金属燃料炉、FFTF等のMOX燃料炉)の建設・運転経験を保有。
- 1977年の政権交代において、それまでの増殖炉開発計画を中止し、その商用化を延期する骨子の原子力政策を発表。現在は、基礎的な研究を継続している状態で、新たな高速炉建設の計画はない。

仏国

- 実験炉:Rapsodie, 原型炉:Phenix, 実証炉:Super Phenixを建設、運転した実績がある。
- 技術実証炉として位置付けられるASTRID炉の開発を2020年代の運転開始を目標に進めている。現在は、概念設計段階であり、2017年末の基本設計終了時に建設に向けた政策判断が下される予定。

ロシア

- 実験炉BR-5, -10, BOR-60等、旧ソ連時代から積極的に研究開発を進めている。
- 2つの原型炉BN-350, BN-600を建設・運転、BN-600は現在も運転実績を積み重ねている。
- 2014年の運転開始を目指し実証炉BN-800を建設中。2020年代には商用炉BN-1200の建設を計画。



インド

- 炭化物燃料炉心の実験炉FBTRを25年以上運転している。
- 2013年の建設完了を目指してMOX燃料炉心の原型炉PFBRを建設中。
- その後2023年までに同規模の炉を6基建設して商用化する予定。それ以降は高増殖の金属燃料高速炉に移行する予定。

中国

- ロシアの技術協力を受けて実験炉CEFRを建設(2010年7月臨界;2011年7月40%出力で初送電)。
- 2020年代中頃までに実証炉CDFR(ロシアのBN-800の技術を導入したものと自主技術開発のもの)を導入する計画。
- その後2030年頃から実用炉導入を行う予定。将来は高増殖の金属燃料高速炉に移行する予定。

韓国

- 高速炉開発を国家長期研究計画に位置付け、2020年代後半に金属燃料炉心の高速炉を建設する計画。

- 世界的に高速中性子照射場は限られる
- **特に「もんじゅ」は、実規模燃料集合体の照射が可能**

国	原子炉	炉種別	熱出力 (MW)	高速中性子束 ($10^{15} \text{ n/cm}^2\text{s}$)	燃料長 (mm)	現状	照射機能の特徴	照射後試験 (PIE)施設
日	常陽	実験炉	140	4.0	500	停止中	燃料・材料各種照射、限界照射、オンライン計測、制御照射	燃料体、燃料、材料試験施設
	もんじゅ	原型炉	714	3.7	930	停止中	実規模燃料照射	燃料検査設備
露	BOR-60	実験炉	60	2.2	450	運転中	燃料・材料各種照射、限界照射、オンライン計測、制御照射	燃料体、燃料、材料試験施設
	BN-600	原型炉	1470	4.0	1030	運転中	基本的に材料照射のみ可 解体核処分で燃料照射の実績	燃料体解体・ 検査施設
	MBIR (BOR-60 後継炉)	研究炉	150	6.0	600	2019年 運開予定	燃料・材料各種照射、限界照射、 オンライン計測、制御照射	燃料体、燃料、 材料試験施設
仏	Phenix	原型炉	350	2.6	850	運転終了	実規模燃料照射、限界照射	燃料体解体・ 検査施設
	Astrid	実証炉	1500	不明	1100 or 800/900	2023年 臨界予定	未定	未定



参考資料-3 世界のFBR/FR研究開発における「もんじゅ」の位置付け

【もんじゅ研究計画作業部会(第4回)資料1-1より抜粋】

技術	海外炉における研究開発		
	(海外炉独自)	「もんじゅ」における研究開発	
		(海外炉と「もんじゅ」に共通)	(「もんじゅ」独自)
1) 炉心・燃料技術	<ul style="list-style-type: none"> ・金属/窒化物/炭化物燃料技術 ・振動充填燃料技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・高速炉炉心/燃料技術① ・酸化物燃料技術② ・ペレット燃料技術③ ・高燃焼度被覆管材料技術④ 	<ul style="list-style-type: none"> ・高次化Pu炉心技術⑤ ・MA(Am)含有炉心技術⑥
2) 機器・システム設計技術	<ul style="list-style-type: none"> ・炉壁冷却によるコールドベッセル原子炉容器設計技術 ・炉容器内主循環ポンプ/中間熱交換器・系統関連設計技術 ・Aフレーム方式燃料移送系設計技術 ・冷却材サンプリングによるFFD技術 ・タンク型炉のプラント制御系設計技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・ナトリウム機器設計技術⑦ ・高温構造設計・評価技術⑧ ・蒸気発生器設計技術⑨ ・燃料交換機器設計技術⑩ ・計測/異常検出機器・システム設計技術⑪ ・プラント動特性解析評価技術⑫ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ホットベッセル原子炉容器設計技術⑬ ・1次系配管/炉外配置1次系冷却機器・系統関連設計技術⑭ ・台車型直動式燃料移送系設計技術⑮ ・配管設置型FFD技術⑯ ・ループ型炉のプラント制御系設計技術⑰
3) ナトリウム取扱技術		<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器用ISI技術⑱ ・ナトリウム取扱技術⑲(純度管理、漏えい対策、機器洗浄、燃料洗浄、放射化物(CP、トリチウム)、洗浄廃液処分等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・1次系配管用ISI技術、蒸気発生器伝熱管用ISI技術⑳
4) プラント運転・保守技術	<ul style="list-style-type: none"> ・炉容器内主循環ポンプ/中間熱交換器保守管理技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・高速増殖炉発電プラントの運転管理技術㉑ ・高速増殖炉発電プラントの保守管理技術㉒ ・ナトリウム系統・機器運転技術㉓ ・燃料取扱系保守管理技術㉔ ・廃炉関連技術㉕ 	<ul style="list-style-type: none"> ・1次系配管/炉外配置1次系機器保守管理技術㉖
5) 安全機能確認・評価技術		<ul style="list-style-type: none"> ・シビアアクシデント評価技術㉗ ・高速炉安全設計技術㉘ ・安全保護系統設計技術㉙ ・安全解析評価技術㉚ 	<ul style="list-style-type: none"> ・シビアアクシデント対策技術㉛

MA : マイナー・アクチニド、FFD : 破損燃料検出器、CP : 腐食生成物