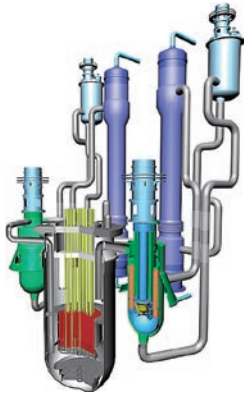


Mitsubishi Activities for Advanced Reactor Development — Sodium-cooled Fast Reactor —



伊藤 隆 哉^{*1}
Takaya Ito

佐藤 裕 之^{*2}
Hiroyuki Sato

碓井 志 典^{*3}
Yukinori Usui

戸田 幹 雄^{*4}
Mikio Toda

当社は、国家プロジェクトである FBR 開発に初期段階から参画し、機電メーカーの一員として取組んできた。2050 年前の商業ベースでの FBR 導入を目指し、(独)日本原子力研究開発機構(以下 JAEA と略す)を中心とした体制で 1999 年度から開始された FBR サイクル実用化戦略調査研究(以下 FS と略す)においては、主体的役割を果たしている。今般、主として開発すべき炉(主概念)としてナトリウム冷却炉が国レベルで選定された。本ナトリウム冷却炉は当社提案に基づくもので、経済性向上のため、ループ数の削減、上部流入配管システムによる配管短縮化、中間熱交換器へのポンプ組込みなどの革新技術を採用した斬新な概念である。今後、2025 年頃までの実証炉の実現(運転開始)に向け、実用化開発が国レベルで加速推進されることになり、当社も提案者として果敢に挑戦していく。

1. は じ め に

FBR サイクルは、ウランを有効利用することにより“半永久的な資源⁽¹⁾”と期待され、国家プロジェクトとして JAEA が中心となり研究開発が行われてきた。2006 年 3 月には総合科学技術会議において、“FBR サイクル技術は、我が国のエネルギー安定供給に大いに貢献し、産業の発展と国民生活の向上に資する技術であり、その開発には国家による大規模かつ長期的な支援が必要”として、国家基幹技術⁽²⁾に位置付けられた。これを受け、2025 年頃までの実証炉の実現(運転開始)⁽³⁾、さらに 2050 年前の商業ベースでの FBR 導入⁽³⁾に向け、研究開発が重点的かつ加速的に推進されている。当社もこの国家プロジェクトに初期段階から積極的に参画してきており、これらを通してナトリウム冷却炉特有の使用条件に対応した設計、材料、製造などの技術を産業レベルとして蓄積・向上させてきた。また、FBR の実用化に向けては安全性確保を前提として経済性向上が必須であり、向上方策などの開発にも果敢に挑戦している。

2. 当社の FBR 開発への取組み

2.1 全 般

我が国の FBR 開発は、JAEA が中心となり高速実験炉「常陽」、高速増殖原型炉「もんじゅ」と段階的に進められてきており、現在、「もんじゅ」では運転

再開に向け、改造工事が行われている(表 1)。当社は、これらのプラントのプラントエンジニアリングや主要機器の設計、製作、現地工事を実施するとともに、「常陽」MK-Ⅲ改造工事や現在進められている「もんじゅ」改造工事にも参画し、ナトリウム冷却炉の設計技術、製作技術、現地工事技術のみならず、ナトリウム機器や配管の改造技術も高めてきた。

また、「もんじゅ」に続く炉として、電気事業者などが取組んだ高速増殖実証炉の設計や技術開発にも参画してきた。さらに、経済性を有する実用化像とそこに至るまでの研究開発を明確にするために、JAEA を中心として電気事業者、メーカー(機電 4 社)などで開始された FS にも積極的に参画している。FS は、ナトリウム以外の冷却材を含め多くの選択肢の評価を行い(フェーズⅠ:1999 年度～2000 年度)、絞り込まれた複数の概念に対し、概念検討、成立性確認及び評価を行い、主概念と副概念を選択した段階(フェーズⅡ:2001 年度～2005 年度)である。

FBR についてはナトリウム冷却炉が主概念として選択され⁽⁴⁾⁽⁵⁾、今後、重点的に、概念設計、要素試験や工学的規模試験が推進される予定である。当社は、フェーズⅠ開始時の概念募集に、ナトリウム冷却炉、ガス冷却炉、重金属冷却炉を提案し、それぞれが検討対象に採択され、フェーズⅡまで概念検討を深めてきた。また、ナトリウム冷却炉に関する成立性確認試験

^{*1} 原子力事業本部原子力技術部新型炉・新製品技術課長

^{*2} 原子力事業本部原子力技術部新型炉・新製品技術課主席

^{*3} 原子力事業本部原子力技術部新型炉・新製品技術課

^{*4} 原子力事業本部原子力技術部新型炉・新製品技術課

FBR 実用化推進チームリーダー

表1 我が国におけるFBR開発

年度	1970	1980	1990	2000
高速実験炉「常陽」	設計／建設／性能試験など △着工	MK-I (増殖炉心) 75 MWt △臨界	MK-II (照射用炉心) 100 MWt △臨界	MK-III 改造工事 △Na漏えい事故 MK-III (高性能照射用炉心) 140 MWt △Na漏えい事故
高速増殖原型炉「もんじゅ」	概念／調整／製作準備設計	安全審査 準備工事	建設／性能試験など △着工	Na漏えい改造工事 △Na漏えい事故
高速増殖実証炉		概念研究	合理化設計研究・炉型評価研究 概念設計研究 最適化研究	
FBRサイクル実用化戦略調査研究				フェーズ I アイデア公募△ フェーズ II △候補概念絞込み フェーズ III △主概念選定

も実施してきた。以下に、主概念に選択されたナトリウム冷却炉に対する当社の取組み状況を示す。

2.2 ナトリウム冷却炉のプラント概要

FBR 実用炉は高い経済性（将来の軽水炉や他電源に比肩する経済性）が求められており、当社はフェーズ I 開始時の概念募集に、安全性、信頼性及び経済性向上のための革新技术を取り入れた斬新なナトリウム冷却炉概念を提案した（図1）。本概念は、出力向上するとともに、ループ数の削減、高温強度に優れ低膨張率の高 Cr 鋼、上部流出入配管システムによる配管の短縮化、中間熱交換器へのポンプの組込み（ポンプ組込型 IHX）などの革新技术を採用し、物量を可能な限り低減することを目指したもので（図2）、フェーズ I、II においてその概念が具体化され、その結果、高い経済性のポテンシャルを有することを示した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、革新技术を含めた実用化に向けた技術開発課題を提出し（表2）、研究開発計画を策定した⁽⁶⁾。

概念の成立性を確認するため、特に重要な革新技术について以下に示す成立性確認試験を行い、その成立の可能性を示した。

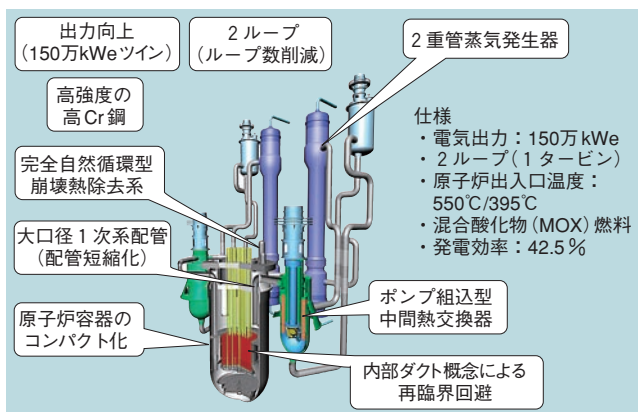


図1 ナトリウム冷却炉

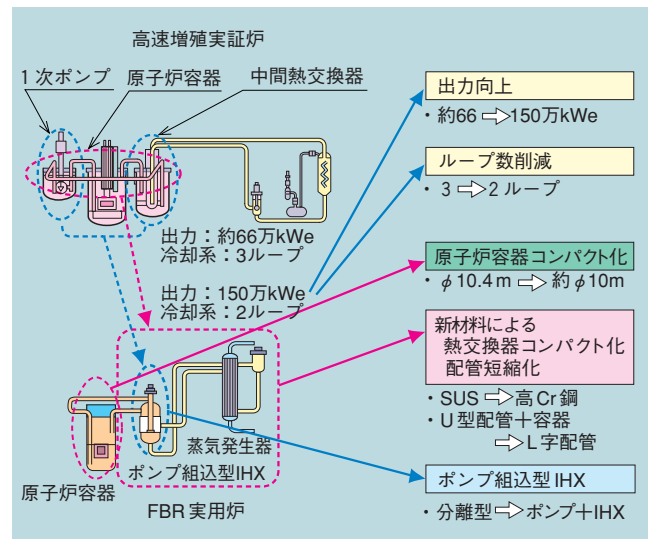


図2 ナトリウム冷却炉における経済性向上策

表2 ナトリウム冷却炉の技術開発課題

区分	技術開発課題
経済性	① 配管短縮のための高Cr鋼の開発
	② システム簡素化のための冷却系2ループ化
	③ 1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器開発
	④ 原子炉容器のコンパクト化
	⑤ システム簡素化のための燃料取扱系の開発
	⑥ 物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化
信頼性向上	⑦ 高燃焼度化による長期運転サイクルの実現
	⑧ 配管2重化によるナトリウム漏えい対策強化
	⑨ 直管2重伝熱管蒸気発生器の開発
	⑩ 保守、補修性を考慮したプラント設計と技術開発
安全性向上	⑪ 受動的炉心停止と自然循環による炉心冷却
	⑫ 炉心損傷時の再臨界回避技術
	耐震性の向上
	⑬ 大型炉の炉心耐震技術

2. 3 実用化に向けた要素開発の概要

(1) 成立性確認試験

当社では JAEA から委託を受け、実用炉の経済性を向上させるために採用される革新技術の成立性を見通すために様々な試験を行っている。

(a) 原子炉容器のコンパクト化

ナトリウム冷却炉では、物量低減の目的から炉内構造物などの数量・配置を工夫して原子炉容器 (RV) 径をできるだけ小さくしており、「もんじゅ」と比較して相対的に炉内のナトリウム流速が速い。FBR では炉心に気泡が入ると正の反応度が炉心に印加されるため、液面からのカバーガスの巻込みを防止する必要がある。

この対策を検討する目的で RV のアクリル製 1/10 縮尺モデル (図 3) を使用した流動試験を実施した。試験の結果、液面下に隙間を有する 2 重の薄板 (2 重ディッププレート) を設置することで、すべての運転状態でガスを巻込まないことを確認した。

今回の試験でガス巻込みの対策構造が見出せたが、今後は対策構造の簡素化のための検討を行う。



図 3 原子炉容器ガス巻込み試験装置

(b) 2 ループ化のための大口径配管

プラントの大型化、ループ数削減のため 1 次系配管は大口径、かつ熱応力低減のために薄肉である。また、配管内のナトリウム流速が約 9 m/s と従来の約 1.5 倍と速く、かつ配置スペースを低減するため曲げ半径の小さいショートエルボを採用しているため、エルボ部分での流れの剥離を含め管内流が引き起こす配管の振動による影響を確認しておく必要がある。

そのため、RV から出るホットレグ配管 (口径 50 B, 板厚 15.9 mm) のアクリル製約 1/3 縮尺モデル (図 4) を製作し、入口整流条件での管内流動状況の観察及び圧力変動データを取得した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、



図 4 大口径 1 次系配管流動試験装置

同縮尺のステンレス製のモデルを使用した振動試験を実施し、管内流動による配管の振動応答を解析で評価する方法の妥当性を確認した。さらに試験で取得した圧力変動データから、実機の配管振動を評価するための流れによる励振力を設定し、配管各部に発生する応力を確認したところ、実機の配管に発生する応力は疲労限以下であることが確認された⁽⁸⁾。

今後は入口流速の分布の影響を確認するとともに、複数の曲がりを持つコールドレグ配管に対する同種の試験を行い、実機配管の評価方法を確立していく。

(c) ポンプ組込型 IHX

ナトリウム冷却炉では、中間熱交換器 (IHX) の内部に 1 次系ポンプを組込んだ“ポンプ組込型 IHX”を採用し、機器物量の低減、IHX とポンプをつなぐ配管物量及び配置スペースの低減を図っている。ポンプ組込型 IHX の設計ではポンプ振動と機器の共振を回避すること、共振領域外の微小振動がプラント寿命の 60 年間継続することによる伝熱管と支持板間の摩耗減肉量を精度良く評価できる手法の開発が必要である。

そのため、実機 (中型炉) の約 1/4 縮尺の振動試験体 (図 5) を使用して、振動解析手法の高度



図 5 ポンプ組込型 IHX 振動試験装置

化のための試験を行った⁽⁸⁾⁽⁹⁾。流体で満たされた多重円筒構造である試験体を三次元でモデル化し、FINAS コード[®]による解析結果と試験結果の比較に基づき最適なメッシュ分割把握、ボルトなどの局部剛性のモデル化、簡素な管束部モデルの構築などにより解析の精度向上を図った。その結果、おおむね固有振動数を数%の精度、悪くても10%以内の精度で評価することが可能となった(図6)⁽⁸⁾。同様の手法で実機の振動応答を解析により予測し、伝熱管の寿命中の摩耗減肉量を評価したところ、伝熱管の板厚余裕に対し十分小さな減肉量となると評価された⁽⁸⁾。

振動試験体に組込んだポンプを回転させることで、ポンプ回転の励振源としての挙動把握も試みており、今後もポンプ回転条件や機器内液位などをパラメータとした試験によりデータを拡充し、ポンプ回転による構造の振動挙動の解析評価精度を向上させていく。

これまでに、実用炉に採用する革新技術に基本的な成立性があることを確認した。今後は、これらの技術の実用炉へ採用を確固たるものにしていくとともに、2重管蒸気発生器の開発など、他の革新技術に対する開発試験も行っていく。

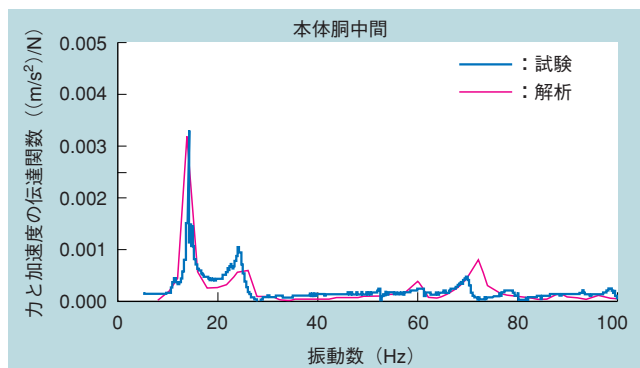


図6 ポンプ組込型 IHX 振動試験と解析結果の比較例

(2) ナトリウムの弱点克服

ナトリウムは、低中性子減速能・吸収、高熱輸送能力、高沸点、低蒸気圧などの特徴を有し、高速炉の冷却材としては最も優れているが、不透明でありかつ化学的活性度が高いことが弱点であり、当社はこれらの克服にも取り組んでいる。

(a) ナトリウム中検査・補修技術

不透明のナトリウム中では、水中のように比較的簡単に検査や補修することが難しく、ナトリウム中での検査技術を開発することが必須であるため、ナトリウム中の検査システムを考案した(図7)⁽¹⁰⁾。本システムは、ナトリウム中で対象位置ま

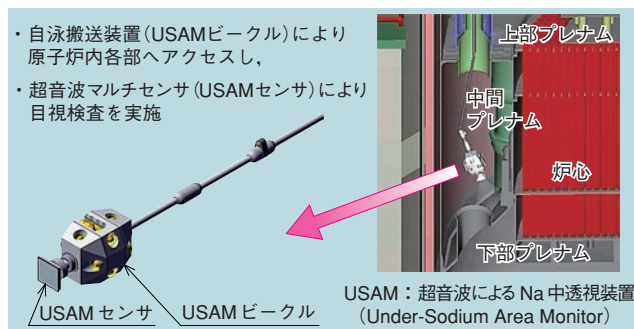


図7 ナトリウム中検査技術の開発

で自泳でアクセスし、超音波により目視または非破壊検査を行うもので、超音波マルチセンサ、搬送装置などから構成される。現在、き裂認識ができることを目標として開発を進めている。また、ナトリウム中補修技術についても開発を行いつつあり、軽水炉並みの保守技術の確立を目指している。

(b) ナトリウムの化学的活性度抑制技術

ナトリウムの化学的活性が低減できれば、ナトリウムの取扱いが容易になり、また万一のナトリウム漏えいに備えた対策設備の合理化にも繋がる。当社はJAEAからの委託研究にて、ナノスケールサイズの物質(ナノ粒子)を用いてナトリウム固有の化学的活性度を抑制する技術について研究開発を進めてきた。この抑制概念は、ナノ粒子の表面で生じる特有の原子間結合によりナトリウムと水分子などとの反応を抑制するとの考えに基づくもので、その可能性を探るため基礎的な水反応試験を実施し、その可能性を示唆するデータを得ている⁽¹¹⁾。現在、文部科学省公募“原子力システム研究開発事業”において、JAEAを研究代表とし、九州大学、北海道大学、新型炉技術開発㈱と連携して研究開発を行っている。

3. 実用炉までの道筋

2050年前の商業ベースでのFBR導入のためには、設計と並行して、要素研究、工学規模試験を行った上で、主要な革新技術を採り入れた実用炉コンセプトを炉システムとして実証するための開発試験炉(30～60万kWe:2025年頃までに運転開始)、さらに本格導入の商業炉(150万kWe級)に向けて、スケールアップの確認並びに目標達成の確認(特に、サイクルを含めた経済性)のための商業導入炉(75～100万kWe:2035年頃運転開始)の2つの原子炉による開発が必要と考える(図8)。また、2050年前のFBR導入に向けて、技術力などの長期にわたる維持・伝承や人材育成は必須であり、実炉を通して世代間で技術伝承を着実にやっていく必要がある。この原子炉による2ステップ

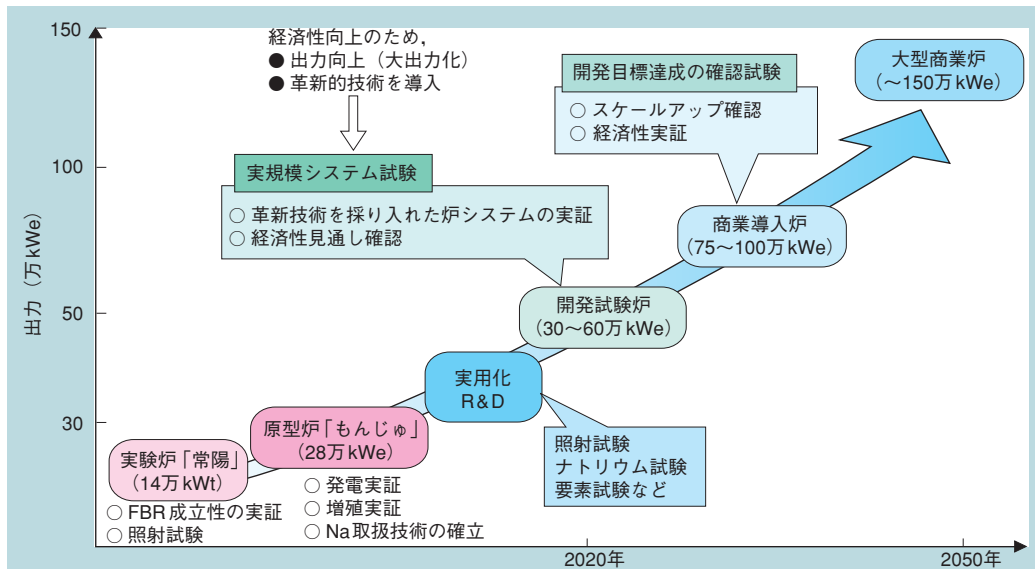


図8 商業炉までの開発の道筋

方式は、世代間の技術伝承にも資するものである。

4. 技術伝承への取組み

当社はFBR開発に初期段階から参画してきており、人材投入も「もんじゅ」建設段階まで積極的に行ってきたが、「もんじゅ」漏えい事故以降FBR開発が停滞し、人材の投入を抑制している。また、人員構成も高年齢化してきており、「もんじゅ」経験者も減少する一方である。このような状況で、FBR実用化に向けた設計・技術開発の効率的な推進を目的として、東京地区に基本設計者、システム設計者、機器設計者を集結し、「もんじゅ」経験者と若手技術者がタイアップして技術伝承や技術分野拡大の努力を行っている。

5. ま と め

当社は国家プロジェクトであるFBRサイクルの重要性を認識し、初期段階から開発に積極的に参画してきた。今般、FBRサイクル技術は国家基幹技術に選定され、さらに当社提案のナトリウム冷却炉が主概念となり、それらの早期実用化に向けた技術開発が重点的に推進するものと考えられる。この推進に当たっては、「もんじゅ」の早期の運転再開並びに「もんじゅ」に続く炉（開発試験炉）の早期建設を含めたFBR開発のロードマップが国から示され、産官で共有化していくことが重要である。主概念の提案者である当社としても、急務な課題である技術の維持・伝承や人材育成を図りつつ、JAEAに積極的に協力し、実用化を図っていくとともに、産業レベルで技術として確立していく、社会の進歩に貢献していく所存である。

なお、FBRサイクル実用化戦略調査研究に関する研究は日本原子力発電(株)並びに(独)日本原子力研究

開発機構からの委託研究に基づき実施されたものである。あらためて日本原子力発電(株)並びに(独)日本原子力研究開発機構に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 原子力委員会, 原子力政策大綱 (2005)
- (2) 総合科学技術会議, 分野別推進戦略 (2006)
- (3) 総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会 原子力部会, 報告書～「原子力立国計画」～ (2006)
- (4) (独) 日本原子力研究開発機構, 日本原子力発電(株), 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告 (2006)
- (5) 文部科学省 原子力分野の研究開発に関する委員会, 高速増殖炉サイクルの研究開発について～「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告」を受けて～ (2006)
- (6) 文部科学省 原子力分野の研究開発研究開発に関する委員会 原子力研究開発作業部会 (第8回), 資料8-4-1 “2015年までの研究開発計画－主概念: ナトリウム冷却炉－” (2006)
- (7) Tadashi Shiraishi, Hisato Watakabe, Hiromi Sago, et.al., Resistance and Fluctuating Pressures of a Large Elbow in High Reynolds Numbers, Journal of Fluids Engineering (2006)
- (8) 文部科学省 原子力分野の研究開発研究開発に関する委員会 原子力研究開発作業部会 (第5回), 資料5-8 “実用化戦略調査研究フェーズⅡの研究成果” (2006)
- (9) 早船浩樹, 辻田芳宏ほか, ナトリウム冷却炉に適用するポンプ組込型 IHX の開発(1)～(3), 日本原子力学会 “2005 年秋の大会” (2005)
- (10) 武石雅之, 加藤潤吾ほか, 実用化ナトリウム冷却高速炉の保全技術(1)～(3), 日本原子力学会 “2006 年秋の大会” (2006)
- (11) 荒邦章, 岡仲樹ほか, ナトリウムの化学的活性度抑制に関する研究(1)～(4), 日本原子力学会 “2005 年春の年会” (2005)



伊藤隆哉



佐藤裕之



碓井志典



戸田幹雄