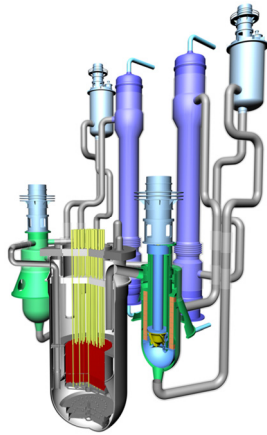


# 世界のエネルギーセキュリティを確保する 高速増殖炉の実用化に向けた取り組み

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



伊藤 隆哉<sup>\*1</sup>  
Takaya Ito

國嶋 茂<sup>\*2</sup>  
Shigeru Kunishima

小林 茂樹<sup>\*3</sup>  
Shigeki Kobayashi

持田 晴夫<sup>\*4</sup>  
Haruo Mochida

化石燃料に頼らず、世界のエネルギーセキュリティ確保と地球環境問題の解決を図るうえで、昨今、原子力発電所の存在が世界でも大きくクローズアップされている。しかしながら、現在の原子力発電所はウラン資源を利用するため、化石燃料と同様にエネルギー資源の枯渇が問題となる。そこで、ウラン資源を有効利用できる高速増殖炉（以下 FBR と称す: Fast Breeder Reactor）の開発に再び世界が注目し始めた。FBR は我が国の“国家基幹技術”にも位置づけられ、開発が加速されている。また、日本政府はフランスや米国と共に国際的なパートナーシップの議論を進め、世界的な動向についても対応し始めている。三菱重工業(株)（以下 MHI と称す）は一昨年、我が国の FBR 開発を一手に担う中核会社に選定され、FBR 開発を専業として行う三菱 FBR システムズ(株)（以下 MFBR と称す）を設立し、FBR の実用化を目指し新たな挑戦を続けている。

## 1. はじめに

化石燃料を始めとする、資源枯渇が身近な問題となりつつあり、更に近年の中国やインドに代表される新興国の急速な経済成長によるエネルギー消費の増加が加わり、地球規模のエネルギーセキュリティを脅かし始めている。最近の調査によると、例えば石油や天然ガスは約 50 年程度で、石炭は約 130 年程度<sup>(1)</sup>、そしてウラン資源を利用する原子力発電においても使用済燃料の再処理によるリサイクルを考慮しない場合、約 80 年程度が利用可能な限度と推定されている。

一方で、昨年のリーマンショックにより世界同時不況に見舞われたものの、多数の新興国の著しい経済成長によるエネルギー消費の大幅な増加が、エネルギーセキュリティレベルを更に低くしている。このような状況の中、地球温暖化の問題も相まって、稼働中に二酸化炭素などのグリーンハウスガス（以下 GHG と称す）を排出しない、太陽や風力、水力や地熱等を利用した再生可能エネルギーが注目され始めている。しかし、これらは火力や原子力発電所のような“大容量且つ高効率”という産業基盤を担うエネルギー源の代替には成り難い。そこで、GHG の排出がなく、さらには資源枯渇問題に対応できるエネルギー源である原子力発電の価値が再認識されつつある。その中で FBR は、現在の原子力発電所の燃料（使用済燃料）から取り出されるプルトニウム資源をリサイクルすることで再び燃料として使用可能であり、ウラン資源利用可能年数を 80 年から数千年規模へと飛躍的に高めることができる。

\*1 三菱 FBR システムズ(株)企画プロジェクト部長

\*2 原子力事業本部 FBR 推進室長

\*3 三菱 FBR システムズ(株)企画プロジェクト部部長代理

\*4 三菱 FBR システムズ(株)企画プロジェクト部

また一方で、使用済燃料にはマイナーアクチニド(以下、MA と称す: Minor Actinide)と呼ばれる寿命の長い放射性物質が生成されるため、その処理・処分に課題がある。FBRはMAを含む燃料を使用することで、高レベル廃棄物の量を減らし、半減期の短い放射性廃棄物に変換することが可能であり、放射性廃棄物の低減に寄与する。即ち、FBRは、数千年の超長期に渡り安定したエネルギー源に成りうるものであるとともに、環境負荷低減を実現できる画期的なエネルギー源なのである。

我が国ではこのような情勢を踏まえ、FBRが国家基幹技術に位置づけられ<sup>(2)</sup>、国家プロジェクトとして(独)日本原子力研究開発機構(以下、JAEAと称す)が中心となり研究開発が行われている。さらには原子力委員会が2006年にFBR開発の基本方針を示し<sup>(3)</sup>、2025年頃までの実証炉(50～75万kWe)の運転開始、2050年前での商業炉(150万kWe)導入を目標として設定した。

そして、MHIはFBR開発に関するこれまでの実績等が評価され、2007年4月FBR実証炉の基本設計開始前までの研究開発体制の中核会社として国から選定されるとともに<sup>(4)</sup>、FBR開発を専業として行うMFBRを設立した。MFBRは、現在、FBR実用炉、実証炉の概念設計や採用が計画されている革新的な技術及び各種要素技術の開発を推進すると同時に、MHIとともに2012年に運転開始予定の、実証炉の技術実証を行うための機器開発試験施設の設計を行い、製作に着手している。

## 2. MHIの取組み

MHIは、実験炉“常陽”や原型炉“もんじゅ”など、国家プロジェクトとしてのFBR開発に対し、その初期段階より積極的に参画し、主要機器設計や、製作、据付、現地工事などを実施し、メーカーとして主導的な役割を担ってきた。そして、図1に示すように“もんじゅ”に続く炉として電気事業者等がFBR実証炉の設計研究や技術開発を実施し、この成果はその後にJAEAが中心として進めた“FBRサイクル実用化戦略調査研究(以下FSと称す)”に受け継がれたが、当社はこれらにおいても主体的役割を果たしてきている。さらに、FSの結果を踏まえ、FBR実用炉の概念として、鉛-ビスマス炉、ガス炉の他炉型や炉のサイズを比較した結果、MHIが提案したMOX\*燃料ループ型ナトリウム冷却炉(150万kWe)が選定された。<sup>(5)</sup>(\*MOX: Mixed Oxide ウランにプルトニウムを混ぜた燃料のことをいう)

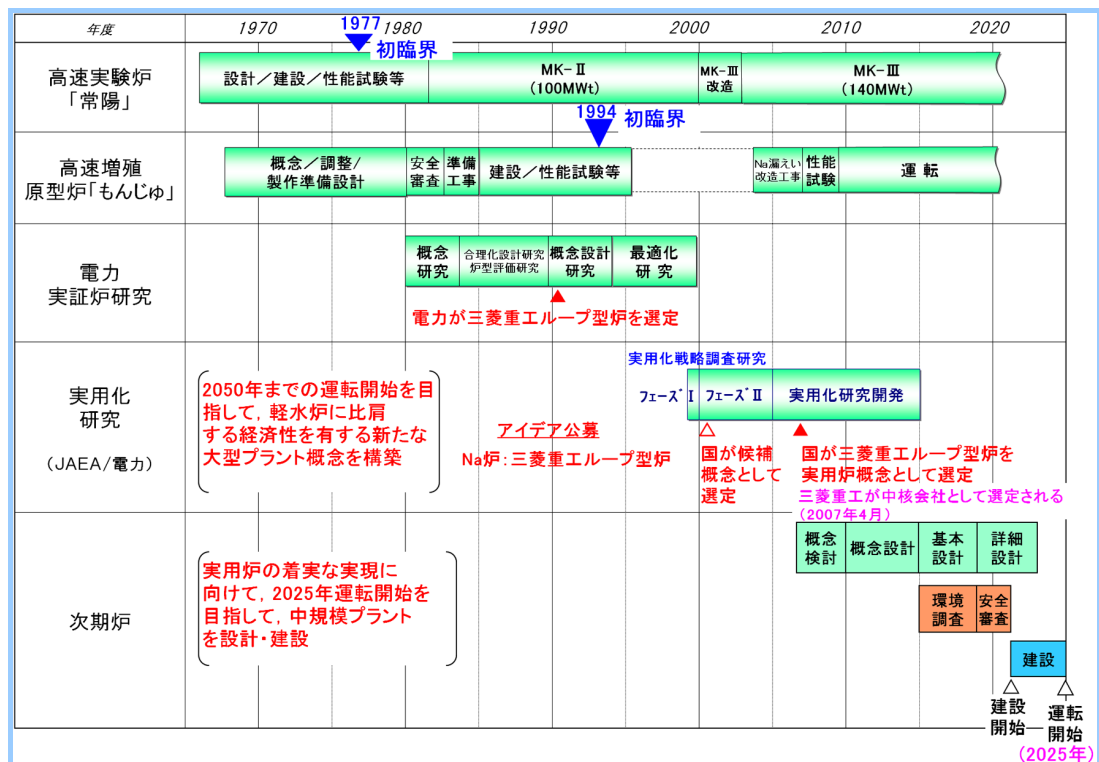


図1 FBR開発の歴史と今後の予定

国はFBRの開発を推進するため、明確な責任体制の下で効率的に推進出来るよう、中核会社1社に責任と権限及びエンジニアリング機能を集中する体制を構築することを決定し、2007年2月にはJAEAが中核会社を公募<sup>(6)</sup>、MHIはこれに応募し、同年4月に中核会社を選定された<sup>(7)</sup>。そして、FBR開発やエンジニアリングを集中して実施するためにMFBRを設立し、同年7月より事業を開始した。

MFBRの事業開始に合わせJAEA、MHI及びMFBRはFBRの開発に関する基本協定を結び、実用炉及び実証炉の概念設計研究、研究開発を推進している。本協定に基づき、JAEAはMHI及びMFBRと連携してプロジェクトの推進や管理、総合的な判断や成果の取り纏めを行う一方、MFBRは設計主体を担っている。この中でMHIは加圧水型軽水炉(PWR: Pressurized Water Reactor)や常陽、もんじゅでの多くの設計や機器製作等の経験に基づき、MFBRと一体で設計を実施すると共に、MFBRの技術的判断に対し、評価・指導を行うこととしている。

これらを踏まえ、MHIは2016年以降の実証炉建設段階を見据え、プロジェクト実施体制の強化等、推進力を高めるため、本年4月に、原子力事業本部直下にFBR推進室(グループ)を新設し、MHI内のFBR開発部署及びMFBRにおける業務が円滑に進むよう、取り纏めを行っている。

### 3. FaCT プロジェクトの状況

FBR実用炉は現在JSFR(Japan Sodium-cooled Fast Reactor)と称され、“FBRサイクル実用化研究開発(Fast Reactor Cycle Technology Development 通称FaCT)”において開発が進められている(図1)。

ここでは、MHIが提案し採用されたJSFR(実用炉)のプラント概要とFaCTプロジェクトにおける設計及び革新技術の開発状況を紹介する。

#### (1) JSFRのプラント概要

JSFRは、安全性や信頼性向上だけでなく、次世代の軽水炉やその他のエネルギー源に比肩する高い経済性を達成するために、様々な革新技術を取り入れた斬新なナトリウム冷却炉である。表1、表2に実用炉の開発目標及び主要仕様を、図2にプラントの概念及び適用する革新技術を示す。

表1 FBR実用炉の開発目標

| 項 目            | 目 標                  |
|----------------|----------------------|
| 安全性及び信頼性       | ・受動的安全性の確保<br>・再臨界回避 |
| 持続可能性 — 資源有効利用 | ・低増殖炉心と高増殖炉心を設定      |
| 持続可能性 — 環境保全性  | ・TRU*のリサイクルと燃焼       |
| 経済性            | ・次世代軽水炉と同等の経済性       |

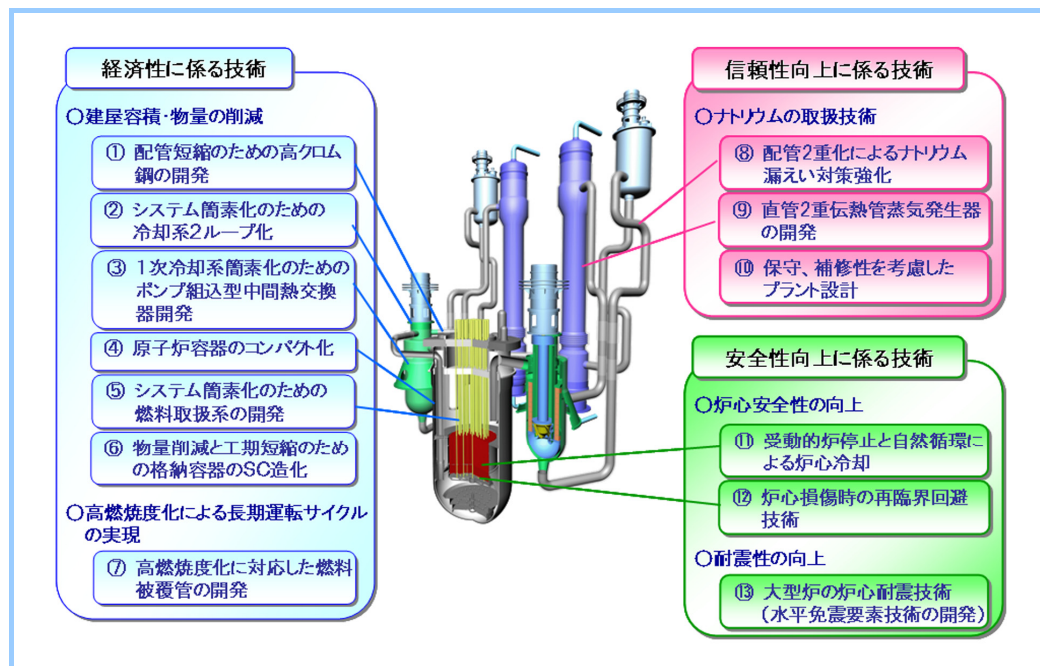
\* TRU: Trans Uranium 超ウラン元素

表2 FBR実用炉主要仕様<sup>(9)</sup>

|                 |   |
|-----------------|---|
| 炉型式             | ナトリウム冷却ループ型炉                              |
| 炉心・燃料型式         | 均質2領域炉心(MOX燃料)                            |
| ヒートバランス         | 1次系:550℃/395℃, 2次系:520℃/335℃              |
| ループ数            | 2ループ                                      |
| 崩壊熱除去系          | DRACS(直接炉心冷却系)×1系統+PRACS(1次系共用型炉心冷却系)×2系統 |
| 1次系配管方式         | 上部流出入方式                                   |
| 主循環ポンプ及び中間熱交換器  | 1次系ポンプ組込型 IHX(中間熱交換器)                     |
| SG型式            | 一体貫流型縦置有液面直管型密着2重伝熱管式                     |
| NSSS材料          | 原子炉容器:316FR鋼, 冷却系機器:改良9Cr鋼                |
| 燃料交換方式          | 単回転プラグ+切込型 UIS*+パンタグラフ式燃料交換機              |
| 燃料貯蔵方式          | EVST(炉外燃料貯蔵槽)貯蔵方式                         |
| 原子炉建屋, 格納容器構造方式 | SC(鋼板コンクリート)造, 矩形 SCCV*(鋼板コンクリート製格納容器)    |
| 建屋免震方式          | 水平免震                                      |
| 再臨界回避方策         | 改良内部ダクト型集合体の採用                            |

・ UIS: Upper Inner Structure 炉内上部機構

・ SCCV: Steel plate reinforced Concrete Containment Vessel

図2 ナトリウム冷却ループ型大型炉の概念及び革新技術<sup>(8)</sup>

## (2) 経済性向上を目的とした革新技術

FBRは、冷却材に化学的に活性な液体金属ナトリウムを使用するため、放射化したナトリウムと蒸気タービンを回すための水とを直接熱交換せず、これらに非放射化ナトリウムを用いたループ(2次冷却系)を介している。従って軽水を冷却材とする加圧水型軽水炉に対し、原子炉から蒸気タービンに至るまでの系統数が多くなるので、このことがFBRの経済性向上のための主要課題のひとつとなっている。JSFRでは、110万kW<sub>e</sub>級以上の軽水炉(大型炉)で採用する4ループ構成に対し、ループ数を減らし、更に系統機器等の合理化を行うことで、この課題を克服している。

具体的には低熱膨張率の高Cr鋼材料の採用による配管長の短縮、原子炉からの熱輸送系の簡素化(ループ数削減:2ループ化)、ポンプと熱交換器を一体化すること(ポンプ組込型IHXの採用)による系統簡素化、炉内燃料交換方法の工夫による原子炉容器のコンパクト化などであり、これらの革新技術により機器物量の大幅削減を可能とした。さらに、鋼板コンクリート(SC)造での矩形化による格納容器のコンパクト化により建屋容積も大幅に縮小した。加えて、高燃焼度化に対応した燃料材料の採用により、18ヶ月以上の長期運転サイクルを実現しプラント稼働率の大幅な向上を狙っている。

ポンプ組込型IHXの設計では、特にポンプ振動と機器の共振を回避すること及び、共振領域外の微小振動がプラント寿命(60年)中継続することによる伝熱管と、その支持構造の摩耗減肉量を精度良く評価し、減肉量を低減することが重要課題のひとつと考えている。そこで、これまでに炉出力75万kW<sub>e</sub>プラントの場合で約1/4縮尺に相当する振動試験体により、振動解析手法の高度化を図るための試験を行うとともに、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、解析結果と試験結果の比較に基づく最適なメッシュ分割、ボルトなどの局部剛性のモデル化、管束部モデルの構築などにより解析評価技術の向上を図ってきた(図3)。

今後、ポンプ部のアンバランスなどをパラメータとした各種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更なる解析評価精度を向上させ、これらの結果を設計へ反映する予定である。



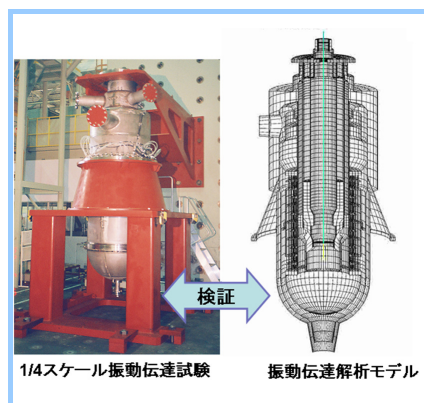


図3 ポンプ組込型 IHX 振動試験体  
及び振動伝達解析モデル<sup>(8)</sup>

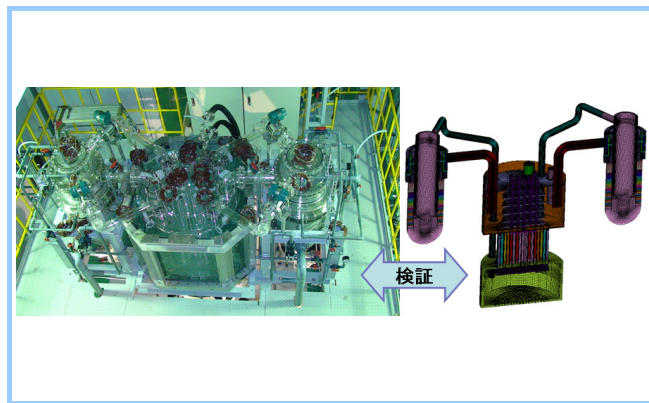


図4 システム水試験体及び3D 流動解析モデル<sup>(10)(11)</sup>

### (3) 安全性向上を目的とした革新技術

次世代の原子力発電所では、従来から適用される深層防護思想に従う安全対策を講じるだけでなく、敷地外の緊急時対応が発動されるような事態の防止 (Evacuation Free) 等を安全確保の基本的な考え方としている。

そこで、受動的炉停止機構 (SASS: Self Actuated Shutdown System) を有する原子炉停止系やパッシブな完全自然循環方式の崩壊熱除去系及び炉心損傷時の再臨界回避を達成する炉心概念、中越沖地震等を踏まえた厳しい地震条件への対応を可能とする厚肉積層ゴムとオイルダンパーで構成される高性能な免震システムを採用し、大幅な安全性向上を狙っている。

自然循環方式崩壊熱除去系は、高い信頼性を確保するため、炉心を炉容器内で冷却する系統 (DRACS: Direct Reactor Auxiliary Cooling System) 1 系統と、1 次系から冷却する系統 (PRACS: Primary Reactor Auxiliary Cooling System) 2 系統の、独立3系統で構成している。ポンプや送風機などの動的機器による強制循環は必要なく、空気冷却器のダンパ (空気の流れを調節する板) の開動作のみで起動することを可能としている。また、空気冷却器 1 基に対してダンパを 2 基設置することで多重化し、ダンパの単一故障では冷却機能を喪失しない設計としている。<sup>(8,9)</sup> 更に、この自然循環方式崩壊熱除去系の機能確認のために、実機状態を再現する、炉容器と DRACS/PRACS で構成される水流動試験体を製作するとともに、3次元解析モデルを構築した。除熱性能の評価に必要な1次系流量等の解析結果は試験結果と概ね一致しており、3次元モデルによる解析評価手法が妥当性を持つことを確認している。(図4)<sup>(10)(11)</sup>

今後、別途計画の中ナトリウム実液試験を実施し、実機の自然循環除熱挙動を確認する計画である。さらに、安全性能の評価の観点から想定する崩壊熱除去機能喪失事象 (以下、PLOHS と称す: Protected Loss of Heat Sink: ここで "Protected" とは、制御棒が既に炉心に挿入された状態を表す。) に対しては、最も厳しい条件においても燃料やナトリウムバウンダリの健全性が損なわれるまでには数時間の十分な余裕があることを確認しており、その時間余裕を活かしたアクシデントマネジメント方策の導入による PLOHS の発生頻度の低減を検討中である。

### (4) 信頼性向上を目的とした革新技術

冷却材がナトリウムであることから、配管や容器からの漏えいは確実に防止する必要がある。そこで、JSFR は配管及び容器の2重化を徹底し、第 1 のナトリウムバウンダリから漏えいが発生した場合の影響範囲を限定すると共に、蒸気発生器では伝熱部分を2重構造とすることで、ナトリウムと水の接触を抑制している。さらに、配管や容器等の機器類の保守・補修のための新たな装置として、ナトリウム中でも目視検査や体積検査が可能な装置を開発し、更なる信頼性の向上を図っている。

なお、信頼性向上の観点で、JSFR の設計、R&D と並行し、JSFR に採用予定の革新技術を用いた機器の技術課題を検証するため、機器開発試験施設の設計を行っている。対象機器

は、SG 及び前述のポンプ組込型 IHX に採用予定の長い軸を持つポンプを想定している。当該施設は、ナトリウム流量 2400m<sup>3</sup>/min、最高温度約 550℃の設備で、MFBR が基本設計を、MHI が主要機器等の詳細設計及び製作から据付までを担当し、2012 年の運転開始に向け推進中である。

## 4. 実用化に向けて

MHI 及び MFBR は、2050 年前に商業ベースでの FBR 導入を実現するためには、設計と並行して、要素研究や必要に応じ実寸試作試験等を行った上で、主要な革新技术を採り入れた実用炉概念を炉システムとして実証するための段階的な開発が必要であると考えている。具体的には、次のとおりである。

- (1) ステップ1:開発試験炉(50 万 kWe 級:2025 年頃までに運転開始する実証炉)を開発
- (2) ステップ2: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及び特に、経済性を確認するための商業導入炉(100 万 kWe 級:2035 年頃運転開始)を開発

2050 年前の FBR 実用炉導入に向けては、技術力などの長期にわたる維持・伝承や人材育成が必須であり、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。また、現在運転中の原子力発電所の寿命が 60 年と仮定すれば、2050 年以降はほぼ毎年 FBR 実用炉を運開することになり、同時期に複数炉の許認可対応等が必要になることから、プラントの標準化が有効な対策のひとつになり、商業導入炉の建設がこれを容易なものとすると考えられる。したがって、FBR の技術伝承や円滑に実用化段階を迎えることを念頭に入ると、上記の 2 ステップ方式が優位であると考えている。

なお、2007 年 4 月に、FBR サイクル実証プロセスへの円滑移行に関する五者\*協議会は“FBR の実証ステップとそれに至るまでの研究開発プロセスのあり方に関する中間論点整理”を方針として示した(\*五者:経済産業省、文部科学省、(独)日本原子力研究開発機構、電気事業連合会、日本電機工業会)。この方針では、今後の開発ステップとして次の 2 ケースを想定しており、実証炉の出力、革新技术の採否とプラント仕様、実用炉に至るまでに必要な炉の基数を、2010 年に暫定し、2015 年に確定するものとしている。

- (1) 実用化段階前までに炉を 1 基建設する案
- (2) 実用化段階前までに炉を 2 基建設(段階的に大型化)する案

現在 MHI 及び MFBR は、JAEA と共に、2010 年におけるこれらの暫定に向け、これまでの研究成果を踏まえた評価を整備中である。

さらに MHI は、革新技术の採否判断に関する JAEA との審議に先立ち、新しい思想、構想に基づくシステム、機器・装置等の変更によりプラントやシステムの機能に影響する技術等に適用する“新設計・新工法管理要領”に準じ、FBR 有識者に加え、PWR 等の有識者より、設計、製作、建設、保守・補修等の経験に基づき、革新技术に対するレビューを実施している。レビュー会では、多数の有益な改善提案等が示され、採否判断に反映することとしている。

一方、原子炉、配管、ポンプ等の個別の革新技术の採用のみでは、プラント全体をバランス良く最適化することは困難である。そこで、実機を視野に入れ、最新の設計ツール(3D-CAD システム)等も活用し、各機器、配管、系統、構造、制御、運転のあらゆる面からバランスが図れた最適化検討を並行して進めている。

## 5. 国際協力への取組み

ウラン資源の有効利用や放射性廃棄物の低減などの観点から日本のみならず世界的にも FBR 開発の必要性が高まる中で、既に 2000 年 1 月には米国のエネルギー省 (DOE) の提唱により、将来の先進的な原子力システム概念の検討のための枠組み (GIF: The Generation IV International Forum) が設立されている。GIF では、対象とする概念の候補の中で FBR を開発対

象の中心に据え、日本、フランス、EU等の12の国と機関が参加している。一方、日仏米の3カ国の政府間において2008年よりFBRの協力に関する覚書を交わし、協力方法の具体化について、協議を開始しており、この中でMHI/MFBRは国際協力の推進主体であるJAEAをバックアップしている。さらに、2006年にDOEから発表された“国際原子力エネルギーパートナーシップ”(GNEP: Global Nuclear Energy Partnership)構想において、FBR(先進リサイクル炉)の必要性が示されたが、MHIはJSFRをベースとした先進リサイクル炉の設計・開発リーダとして、その国際標準化を目指し、炉概念の検討を実施した。

上述のようにFBR開発は主要各国で進められており、今後、国際的な共同研究・開発が活発化すると予想されることも踏まえ、引き続き、国、JAEA、電力の指導の下、国際協力にも注力していく考えである。

## 6. まとめ

日本の国家基幹技術に選定されたFBRサイクル技術に対し、MHIは開発の初期段階よりその重要性を認識し、積極的に参画してきた。そして、MHIが今後のFBR開発における中核会社として選定され、MFBRを設立した。MFBRはJAEAの指導を受け、FBRの早期実用化に向けた技術開発を鋭意実施中である。この推進に当たり、MHIとMFBRは、技術の伝承や人材育成を図りつつ、国内の優れた技術を幅広く活用しながら取りまとめていくと共に、世界の原子力リーディングカンパニーとして、国際協力にも注力し、グローバルなエネルギーの安定供給に貢献していく所存である。

本論文は、特別会計に関する法律(エネルギー対策特別会計)に基づく文部科学省からの受託事業として、三菱FBRシステムズ㈱が実施した平成19年度、20年度及び21年度「過渡時の自然循環による除熱特性解析手法の開発」の成果の一部を含みます<sup>(10)(11)</sup>。

## 参考文献

- (1) BP Statistical Review of World Energy June 2008
- (2) 総合科学技術会議 分野別推進戦略(2006)
- (3) 原子力委員会 高速増殖炉サイクル技術の今後 10年程度の間における研究開発に関する基本方針 (2006)
- (4) 原子力委員会 原子力政策大綱(2005)
- (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、経済産業省、電気事業連合会、日本原子力研究開発機構“高速増殖炉(FBR)実証炉の基本設計開始までの研究開発体制に係る方針決定について”(2006)
- (7) 文部科学省、経済産業省、電気事業連合会、日本原子力研究開発機構“高速増殖炉開発のエンジニアリング等を行う中核企業の選定について”(2007)
- (8) 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズⅡ技術検討書 -(1)原子炉プラントシステム-, JAEA-Research 2006-042, 日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門(2006)
- (9) 高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCTプロジェクト)-フェーズⅠ中間取りまとめ-, JAEA-Evaluation 2009-003, 日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門, 日本原子力発電株式会社 研究開発室(2009)
- (10) 文部科学省 原子力システム研究開発事業 過渡時の自然循環による除熱特性解析手法の開発 成果報告書(2007)
- (11) 文部科学省 原子力システム研究開発事業 過渡時の自然循環による除熱特性解析手法の開発 成果報告書(2008)