

# 高速増殖炉—FBR

Fast Breeder Reactor

植田 正 弘\*

Mashahiro Ueta

## 1. 高速増殖炉の原理と特徴

### ①高速増殖炉とは？

世界の原子力発電の主流となっている軽水炉は、天然には約0.7%しか存在しないウラン235を数%程度まで濃縮した燃料を使用している。軽水炉は、核分裂反応時に放出される高速中性子を軽水で減速させた熱中性子により連鎖反応を安定に維持しており、発生する膨大な熱エネルギーは燃料のまわりを流れる軽水に伝えられ、直接（沸騰水型炉の場合）、もしくは蒸気発生器を介して（加圧水型炉の場合）、蒸気を発生させ、この蒸気でタービン発電機を回して発電するシステムである。

それに対し、高速増殖炉（Fast Breeder Reactorを略してFBR）は、天然ウランの大部分（約99.3%）を占めるものの、そのままでは燃料として使えないウラン238を格段に有効利用できる原子力発電システムである。すなわち、核分裂反応時に放出される中性子をできるだけ減速させずにウラン238の原子核に積極的に吸収させ、生成される新たな人工の核分裂物質プルトニウム239を燃料として利用する原子炉である。

プルトニウム239を効率良く生み出すためには、核分裂反応時に放出される中性子を核分裂反応の維持に加え、ウラン238の中性子吸収のために多く回すことが肝要であり、そのためには、1回の核分裂反応で放出される中性子の数が多い方が有利である。幸いにも、プルトニウム239は、核分裂反応時に比較的多くの中性子を放出する性質を有している。

FBRは、プルトニウム239を燃料として用い、その周囲にウラン238の燃料（ブランケット燃料と呼ぶ）を配置することで、核分裂反応によって消費された以上のプルトニウム239を新たに生み出すこと、すなわ

ち増殖を行うことができる。

### ②FBRの冷却材であるナトリウムの特徴

FBRは高速中性子を用いることから、その冷却材は中性子を減速させないものでなければならない。

軽水は、その構成元素である水素の原子核（陽子1個で構成）の質量が中性子とほぼ同じであるため、放出された高速中性子との衝突によって中性子を減速させる能力が大きく、FBRの冷却材としては適さない。

また、高速中性子の多い体系でプルトニウム239の核分裂反応を維持するためには、プルトニウム239の濃度（富化度）を高くする必要があるので、軽水炉の燃料と比べると単位長さ当たりの発熱量が高くなる。従って、熱伝達性能の優れた冷却材を選定する必要がある。

こうした要求条件を満足するFBRの冷却材として、液体金属ナトリウムが世界の主流となった。

ナトリウムは、原子番号11、質量数23の単体のアルカリ金属元素である。融点が約98℃と低く、加熱によって比較的容易に流動性を持たせることができ、一方で、沸点が約880℃と高いことから、軽水炉のように冷却材の沸騰を抑制するために加圧する必要がなく、原子炉容器等の機器を薄肉に設計することができる。

また、ナトリウムは、①中性子減速能力が小さい、②熱伝達性能に優れている、③構造材との相性が良い、④比重が約0.88（冷却材として使用される300℃において）と小さい、⑤価格が比較的安価である等、冷却材として望ましい多くの性質を有している。

反面、ナトリウムは化学的に活性で空気、水と激しく反応することから、ナトリウム液面をアルゴンガス等の不活性ガスで覆い、空気と接触させないようにする必要がある。また、万一のナトリウム漏洩に備えて、漏洩を早期に検出し、その影響をできるだけ抑制、緩和するための設備対応が必要である。

更に、ナトリウムは、常温では固体であるため、電気ヒータ等のナトリウムの予熱・保温のための設備を

\* 日本原子力発電(株)研究開発本部高速炉開発部長  
〒100-0004 東京都千代田区大手町1-6-1 大手町ビル8F

設けなければならない。

これらは、ナトリウム冷却FBRの経済性、並びに運用上のデメリットとなりうる。

### ③FBRと核燃料サイクル

軽水炉においても、FBRと同様、炉心においてプルトニウム239が生成されるが、前記①で述べたような理由から、これを増殖させることはできない。

しかしながら、軽水炉の燃料中に生成したプルトニウム239を再処理によって抽出すれば、FBR用の燃料として利用できる。これをFBRで燃焼させると、消費した以上のプルトニウム239が生み出され、再びFBRで燃やすことができる。

このような核燃料サイクルを実用化することによって、軽水炉のみの場合に比べて、ウラン資源を50倍以上有効に利用でき、長期間にわたる国産の非化石エネルギー資源を確保することが可能となる。

## 2. 世界のFBR開発の状況

以上述べたようなウラン資源を有効に利用できるFBRの能力に着目し、原子力発電を推進している世界の主要先進国は、FBRの開発を長年に亘り行っている。FBR開発は、開発リスクを低減するため、概ね、実験炉、原型炉、実証炉、実用炉という段階を経て行われている。

アメリカにおいては、第二次世界大戦中から、各種の実験炉を建設して経験を積み、原型炉CRBR（クリンチリバー炉）の建設を計画したが、政治的な理由、及び最終的には経済性を理由として、1983年に計画を中止した。その後は、それまでのスケールメリットを追求する大型化路線とは異なる、同一規格の小型炉を複数組合せて1つの発電プラントを構成する、いわゆるモジュラー型炉の開発が続けられている。

フランスにおいては、実験炉ラブソディ、原型炉フェニックス、実証炉スーパーフェニックスと順調に開発を続けていたが、1998年、主に経済性の理由からスーパーフェニックス炉の閉鎖を決定した。同炉を用いて実施中であった廃棄物処理に関する研究は、フェニックス炉を2004年末までの予定で運転して継続する計画である。

イギリスにおいては、実験炉DFR、原型炉PFRと開発を続けたが、1991年のPFR炉閉鎖をもって一国独自の開発を断念した。

ドイツ（旧西ドイツ）においては、実験炉KNK-IIの建設の後、原型炉SNR-300が建設されたが、1986

年、旧ソ連のチェルノブイル発電所において発生した大事故を契機に政党間で計画の推進について議論が起り、結局、運転されないまま1991年に閉鎖された。

西ヨーロッパでは、FBR開発の効率化を目指し、1987年、スーパーフェニックス炉に続く実用炉としてEFR（欧州統合型高速炉）計画を開始した。しかしながら、上述のスーパーフェニックス炉の閉鎖決定を受け、1998年12月にEFR計画は打ち切られた。

旧ソ連においては、各種の実験炉を建設した後、原型炉BN-350（現在のカザフスタン共和国に位置）、BN-600（ロシア）を建設し、続いて、実証炉BN-800（ロシア）の建設に着手したが、資金不足のため、1980年代後半以降、建設は中断されている。

この他、インド、中国、韓国においても、FBRの開発が進められている。

このように世界各国のFBR開発を巡る現状は、全体的には停滞傾向にあると言わざるを得ない。

これは、石油ショック後の原子力発電への急速な転換と、ウラン資源逼迫に対する強い危機意識があった1970年代と比べ、現時点では、ウラン価格が比較的安価で安定していること、ウラン資源枯渇に対する時間的な余裕があることから、各国ともFBRを急いで建設する必要性がないためである。また、FBRはその潜在能力の反面、現在のところ軽水炉に比べ割高であり、かつ克服可能ではあるものの冷却材にナトリウムを使用することに起因する技術的な困難さが開発を躊躇させている。

しかしながら、長期的な観点では、石炭、石油、天然ガス等の化石エネルギー源枯渇後の代替エネルギー源として、ウラン資源を有効に利用できるFBRの開発は必須のものであり、開発に要する期間を考慮して着実に研究開発を進め、実用化を図るべきである。

## 3. 我が国におけるFBR開発の状況

天然資源に恵まれない我が国においては、長期的な準国産のエネルギー源を確保する目的で、動力炉・核燃料開発事業団（以下、動燃。現核燃料サイクル開発機構）を中心に国産技術をベースとしたFBRの自主開発が進められてきた。

まず、実験炉「常陽」（熱出力100MWt）が茨城県大洗町に建設され、1977年4月の臨界以降、出力を段階的に増加させながら順調な運転を続けている。

続いて、原型炉「もんじゅ」（熱出力714MWt、電気出力280MWe）が福井県敦賀市に建設され、1994年

4月に臨界を達成したが、40%出力での性能試験中であった1995年12月、2次系ナトリウム配管からのナトリウム漏洩事故が発生し、事故後の対応のまずさもあって、現在まで停止中である。

「もんじゅ」に続く実証炉は、官民協力の下、民間主体で建設、運転することになっており、1985年12月以降、電力から実証炉1号の建設・運転主体として委託を受けた日本原子力発電株式会社（以下、原電）を中心に研究開発を実施している。1994年に実証炉の基本仕様（電気出力660MWe、トップエントリーループ型炉）が決定され、それに基づいたプラント概念設計が本年度に完成する予定である。ただし、実証炉の建設は、上述のもんじゅ事故の影響で先行き不透明となっている。

#### 4. もんじゅ事故の我が国のFBR開発への影響

1995年12月に発生した「もんじゅ」の事故は、炉心の安全性や放射線被曝に関連するものではなかったが、その後の動燃の対応のまずさから、FBR開発だけでなく原子力政策全体を揺るがす問題となった。

加えて、1997年3月に発生した動燃東海事業所アスファルト固化処理施設の火災爆発事故は、国民の原子力政策に対する不安感、不信感を更に増幅させることとなった。

こうした状況を踏まえ、原子力委員会は、広範な分野の識者が参加する「原子力政策円卓会議」を開催し、

我が国の原子力政策について幅広い議論を行い、その中で出された提言に基づいて「高速増殖炉懇談会」を設置した。

懇談会は各界の有識者を構成員とし、「もんじゅ」の扱いを含めた将来のFBR開発の在り方について幅広い審議を行い、1997年12月に報告書「高速増殖炉研究開発の在り方」をまとめた。

その骨子は、①FBRは将来の非化石エネルギー源の有効な選択肢の1つである、②「もんじゅ」を使いFBRの研究開発を継続すべきである、③実証炉の具体的計画については「もんじゅ」の運転経験等を十分に評価した上でその決定を行うべきである、④実用化時期を含めたFBRの開発計画は、将来のエネルギー状況を見ながら、柔軟に対応していくことが必要である等であった。

こうした議論を踏まえつつ、動燃は、科学技術庁内

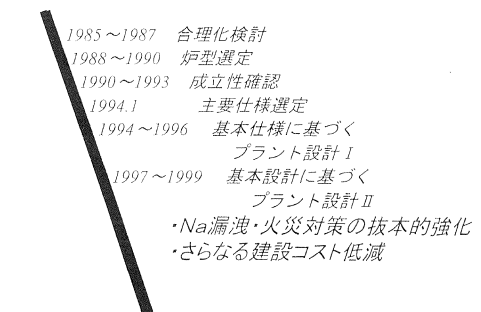


図-1 実証炉開発の到達点

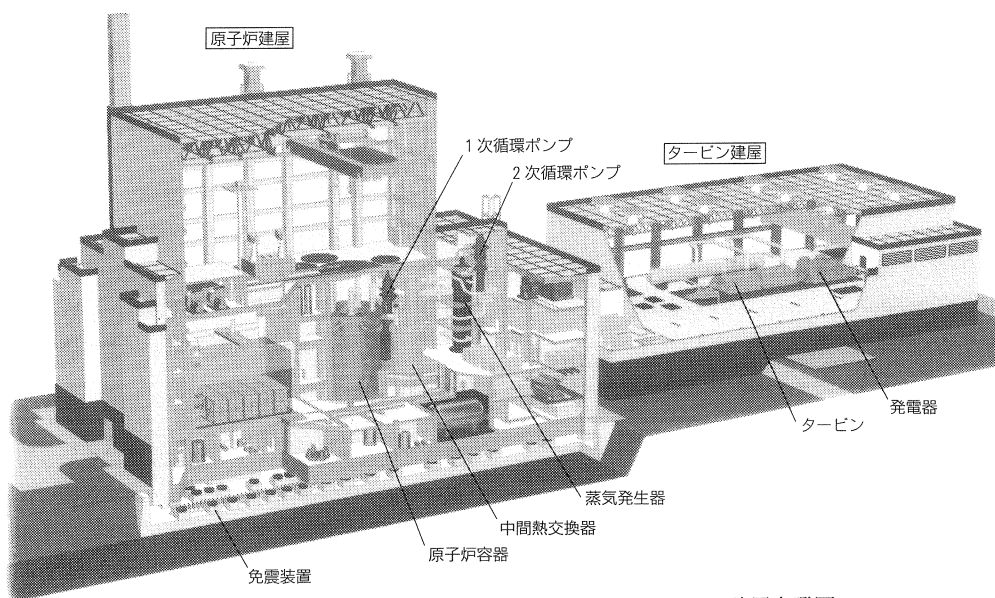


図-2 建屋鳥瞰図

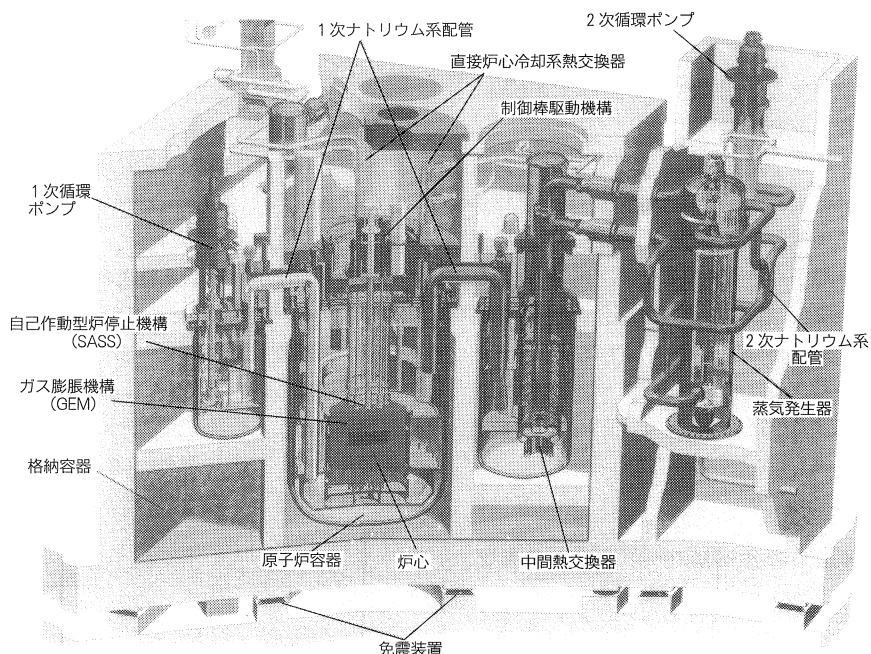


図-3 原子炉・主冷却系概念図

に設置された「動燃改革検討委員会」での審議を経た後、1997年10月に新法人「核燃料サイクル開発機構」として再スタートを切った。

なお、もんじゅ事故の他、1998年2月のフランスの実証炉スーパーフェニックスの閉鎖決定は、我が国のFBR開発にも波紋を投げかけた。ただし、フランスはFBRを放棄した訳ではなく、むしろFBR実用化までの時間的な余裕を利用して、今後は幅広い研究開発を行う方針である。こうした状況を踏まえ、1998年から日仏政府間でのFBR開発に関する協力が新たに開始されている。

## 5. FBR実証炉の開発の状況

### ①実証炉開発の考え方

9電力会社と電源開発株式会社からの委託を受け、原電が昭和60年度から進めている実証炉開発の基本的な考え方は次の通りである。

- ・安心して運転でき、社会に安心感を持たれるプラントを目指す。
- ・確実に設計・建設・運転・保守ができるプラントとする。
- ・実用炉段階で軽水炉と競争できるコストを実現するため、建設コストを電気出力100万kWe換算で軽水炉の1.5倍以下とする。

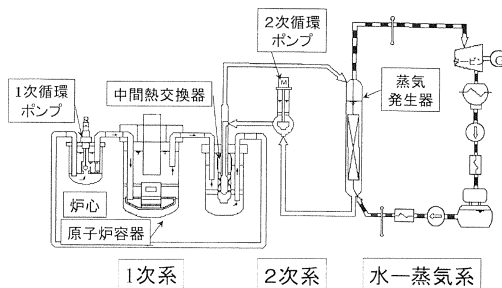


図-4 実証炉の冷却系

- ・見通しの得られた革新技術を積極的に取り入れて実証する。

### ②実証炉開発の到達点(図-1参照)

実証炉は、コストダウンの可能性の見極め、炉型の選定、プラントの成り立ち確認を経て、平成6年1月に電力社長会で主要な仕様が選定され、平成9年3月にこの主要仕様に基づく実証炉プラント全体の概念がまとめられた。

平成9年度からは、「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故と軽水炉建設コストの急速な低減という新しい状況に対応して、ナトリウム漏洩・火災対策の抜本的な強化と更なる建設コストの低減を目指し、3年間の予定で新たな設計研究を実施しており、建設コストを100万kWe換算で軽水炉の1.3倍程度にできる見通しが

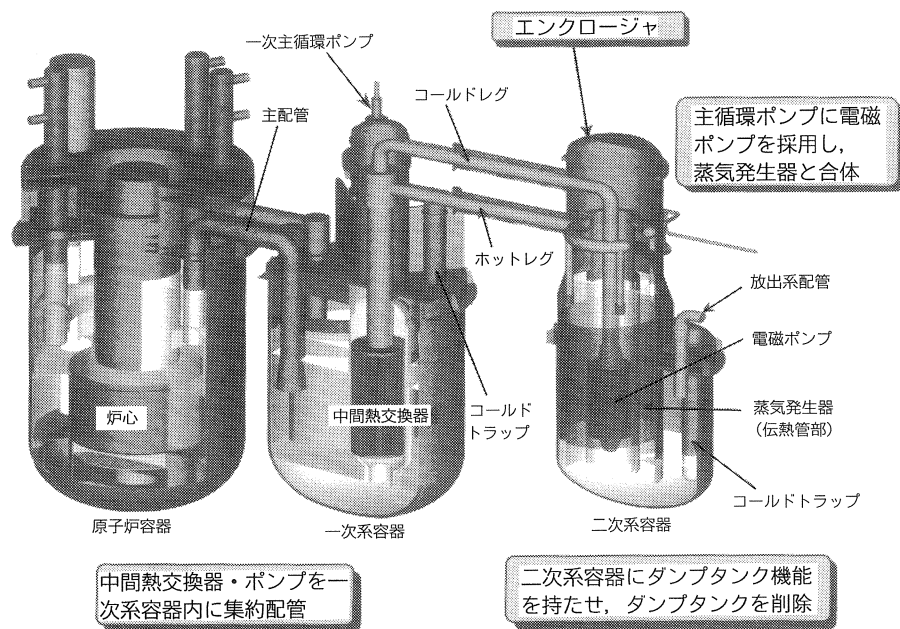


図-5 ナトリウム漏洩・火災対策

得られている。

### ③実証炉のイメージ(図-2, 3, 4参照)

実証炉は、1次冷却系配管が容器の上部から出入りするトップエントリー方式を採用している。欧州では、1次系の熱交換器やポンプを原子炉容器内に収納するタンク型炉が主流であるが、我が国の実証炉は、軽水炉の経験から、万一の場合の補修性に配慮して、これらを原子炉容器の外に配置するループ型炉を採用している。

炉心で発生した熱は、1次系配管から中間熱交換器を経て2次ナトリウム系に伝達され、蒸気発生器で蒸気を発生してタービン発電機を回し発電する。原子炉容器は、胴部にノズルのない単純で頑丈な構造である。1次系配管も、温度計などの計装ウエルのないシンプルな構造である。

建設コストを削減するために、実証炉では、「もんじゅ」に比べ、次のような合理化を行っている。

- トップエントリー方式を採用して、配管長を「もんじゅ」を大型化した場合(以下、同じ)の約1/5に短縮し、配管を含む1次系の占有面積を約1/4に削減した。
- 「もんじゅ」では、応力腐食割れ防止と高温強度に対する要求から、蒸気発生器を蒸発器と過熱器に分割していたが、新しく開発された材料を採用してこれを一体化し、物量を約1/3に削減した。

- 「もんじゅ」では、鋼製円筒格納容器を採用しているが、原子炉建屋と一体の鉄筋コンクリート製矩形格納容器を採用し、原子炉建屋の容積を「もんじゅ」の約1/4に削減した。

これらの合理化と水平免震等の革新技術の導入により、平成9年3月に概念をまとめた実証炉の建設コストは、電気出力100万kW換算で軽水炉の1.5倍以下にできる見通しを得た。さらに、軽水炉の建設コストが急速に低下する傾向にあることから、物量の更なる削減のための努力を続けている。

### ④実証炉設計のポイント

#### 1) 炉心安全性向上

FBRでは、冷却材であるナトリウムの沸点が約900℃と通常運転時の最高温度(550℃)に比べて十分に高いので、通常運転中にナトリウムが沸騰することはあり得ない。ただし、FBRの炉心は、仮にナトリウムの沸騰が起きると核分裂反応を促進させる特性を有していることから、実証炉では独立2系統の炉停止機構に加え、異常時に自然の原理により負の反応度を付加する装置を設けて沸騰を防止している。このように多重の安全対策を施すことにより、原子力発電で最も大切な炉心の安全性確保に万全を期している。

#### 2) ナトリウム漏洩・火災対策(図-5参照)

実証炉は、「もんじゅ」の事故の教訓を踏まえ、ナトリウム漏洩が発生し難く、万一発生してもナトリウム

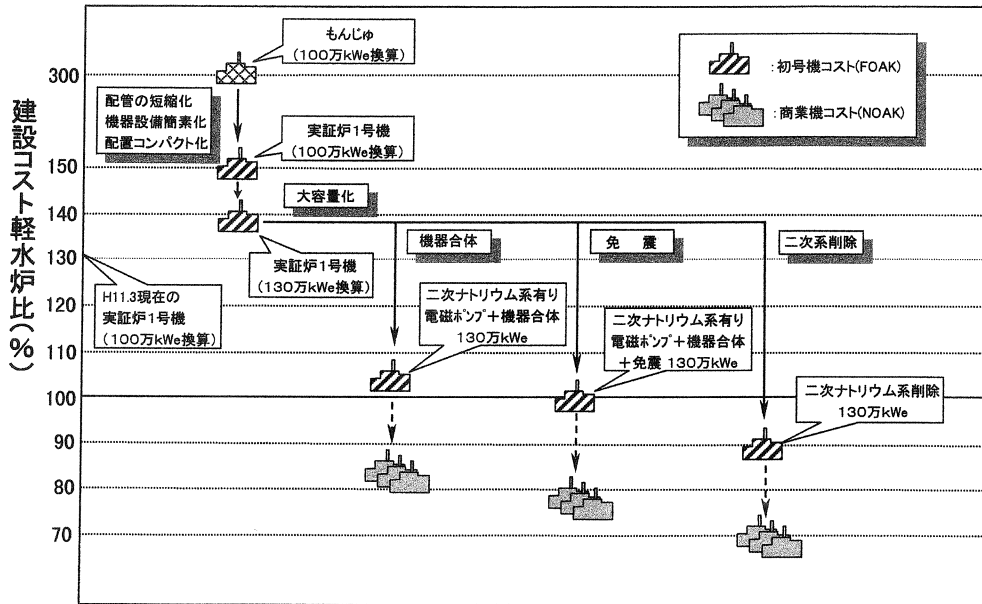


図-6 FBR実用化に向けた経済性向上の見通し

ム火災に至らない、安心感の持てるプラントを目標としている。

「もんじゅ」で問題となった格納容器外のナトリウム機器・配管については、次の考え方でナトリウム漏洩・火災対策を強化している。

第1に、これまでの経験から、配管を貫通する温度計のようなトラブルの起きやすいと思われる部位をできるだけ減らす。

第2に、2次系に電磁ポンプを採用して蒸気発生器の中に組み込む。これにより、蒸気発生器とポンプを結ぶ配管が削除され、2次系配管が格段に簡素になる。

第3に、格納容器外のナトリウム機器についてもエンクロージャで覆った2重構造とした上、内部に窒素ガスを封入する。こうした対策により、従来から2重構造としている格納容器内とあわせ、1次及び2次冷却系のすべてのナトリウムバウンダリを2重構造化する。

この結果、万一ナトリウム漏洩が起きても2重構造の内部に留まるので、ナトリウム火災が起きる心配がなくなる。

## 6. FBR実用化の展望—図-6

平成4年に原電が作成した実用化展望では、実証炉で100万kWe換算の建設コストを軽水炉の1.5倍以下とし、ついでプラントの大容量化と、電磁ポンプ採用に

よる熱交換器とポンプの合体、及び3次元免震採用による炉上部の簡素化等の革新技術の積極的取り入れにより軽水炉並の建設コストを達成するとしていた。

しかしながら、電力自由化の下、軽水炉が従来より大幅に建設コストを下げる目標で合理化を進めていることから、FBRの実用化展望の見直しが必要となってきた。このため、平成11年度から、原電と核燃料サイクル開発機構が緊密に協力して、有望な技術やアイデアを幅広くサーベイし、軽水炉その他の電源と競合できる安価なFBRシステム概念を描出する研究に着手した。

## 7. まとめ

天然資源に恵まれない我が国においては、長期的な準国産の非化石エネルギー源を確保する観点から、核燃料サイクルの実用化を踏まえたFBR開発が必要不可欠である。「もんじゅ」の事故を契機として、FBR開発を巡る現在の状況は厳しいものの、着実に実用化に向けた研究開発を進めていく考えである。