

技術解説

# 日本における高速増殖炉開発の取り組み

— 一千年続くエネルギー源を求めて —

Development of Fast Breeder Reactor Technology in Japan  
— Exploring Sustainable Energy Source for the Next Millennium —

鈴木 惣十  
Suzuki Soju

長期的なエネルギーセキュリティの確保、地球温暖化防止、最近の原油価格の暴騰等の諸情勢に呼応して、世界規模で原子力リネッサンスが始まろうとしている。これら諸問題の有力な解決策として高速増殖炉が、再び注目を集めつつある。本稿では、高速増殖炉技術の実用化に向けた我が国の取り組みについて紹介する。

In view of maintaining the long-term energy security, preventing the global warming, and considering the recent rise of crude oil prices etc., the time of Nuclear Power Renaissance has just come worldwide and the Fast Breeder Reactor is spotlighted again as a promising solution to these problems. The Japan's approach to the commercialization of Fast Breeder Reactor Technology is described briefly in this paper.

キーワード：高速増殖炉, FBR, ウラン資源, プルトニウム, 常陽, もんじゅ, マイナーアクチニド

## 1 はじめに

近年、原油価格が150ドル/バレルに迫る勢いで上昇を続け、地球温暖化防止のためCO<sub>2</sub>の削減が叫ばれるなか、長期的なエネルギーセキュリティの確保に向けて、今まさに原子力リネッサンスが始まろうとしている。しかし、豊富に見えるウラン（以後、U）も現行の軽水炉の燃料としては、石油や天然ガスの可採年数を大幅に超えるものではない。この限られたU資源を高速増殖炉FBR (Fast Breeder Reactor) で使うと、その利用期間は飛躍的に伸び、今後千年を超えるエネルギー源となる。そのため、世界各国がFBR実用化に邁進しており、我が国はそれをリードする国の1つとなっている。

## 2 高速増殖炉の特徴と開発意義

### 2.1 U資源

原子力エネルギーの源であるUは、約54億年前に現在の太陽系の近くで起きた超新星（スーパーノヴァ）の爆発で生成され、その後一定の半減期（U235：7億年、U238：45億年）で消滅してきた。そして、現在の地球に存在するUには、軽水炉で燃やせるU235は約0.7%しか

含まれていない。残りの99%以上は、そのままでは燃料にならないU238であり、軽水炉ではU235を3%～5%に濃縮して燃料にしている。

スーパーノヴァの遺産であるUも軽水炉で燃やすならば、思っているほど豊富に使えるわけではなく、石炭の半分程度の約85年で資源的に枯渇してしまう。しかし、FBRで発電しつつU238を効率的にプルトニウム（以後、Pu）に変えて利用すると、今後千年以上に亘って使い続けることができる。（図1）

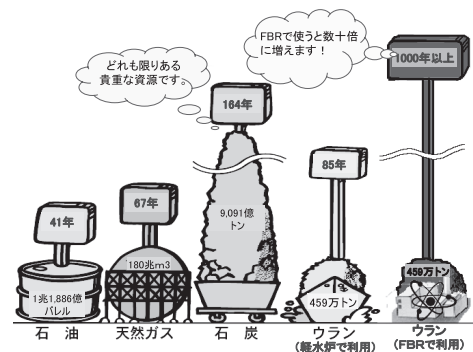


図1 化石燃料とU資源の持続年数  
出典：BP統計2005, OECD/NEA-IAEA「URANIUM2003」

このため、1939年に人類が核分裂現象を発見し、それをエネルギー源とすることを試み始めた時から現在に至るまで、我が国を含む先進諸国は、U資源の究極の利用法であるFBRとその核燃料サイクルの開発を営々と進めてきた。この間

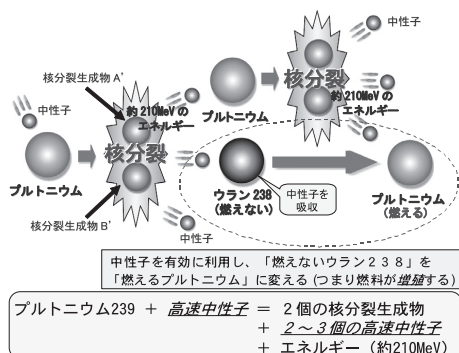
には、天然Uの需給緩和、開発資金の増大、さらには政治的理由等によりFBR開発を減速したり中断したりする国々もあったが、近年これらの国もFBR開発に回帰しつつある。

## 2.2 高速増殖炉の特徴

UやPuが核分裂すると、化学反応の百万倍を超えるエネルギーとともに、数万km/秒の速度を持つ高速中性子が、核分裂当たり平均2.5個生まれる。

現在、我が国では55基の発電用原子炉が運転され、総電力の30%以上を供給している。これらの原子炉では、高速中性子を冷却材でもある水で、分子運動と熱的平衡状態になるまで減速して、核分裂の連鎖反応に用いている。この中性子は熱中性子と呼ばれ、軽水炉を熱中性子炉とも呼ぶ所以となっている。

一方、FBRでは核分裂で発生した高速中性子を有効に利用し、燃えないU238を燃えるPuに変える（つまり燃料を増殖する）ことができるのが特徴である。中性子の速度が大きいほどより効率的にPuに変換できるため、FBRでは核分裂で生まれた中性子を減速させることなく連鎖反応を維持する。（図2）



このため、FBRの冷却材には中性子の減速や吸収が少なく、除熱性能に優れたナトリウム（以後、Na）を用いるのが一般的である。Naは98℃で液体となり蒸気圧が低い、ステンレス鋼との共存性が良い、資源的に豊富、中性子の吸収が少ない（つまり無駄食いしない）など、FBRの冷却材として優れた特性を持つ。しかし、Naは化学的に活性であり、液体Naは空気中で白煙を

あげて燃え、特に水とは爆発的に反応することからその取り扱いに難しさがあり、Na冷却型FBRを実用化する上での課題の1つとなっている。

FBRプラントの冷却系は、炉心を直接冷却する1次Na系、中間熱交換器を介して1次Na系と熱交換を行い蒸気発生器まで熱を運ぶ2次Na系、蒸気を作りタービンを回す水・蒸気系から構成される。（図3）

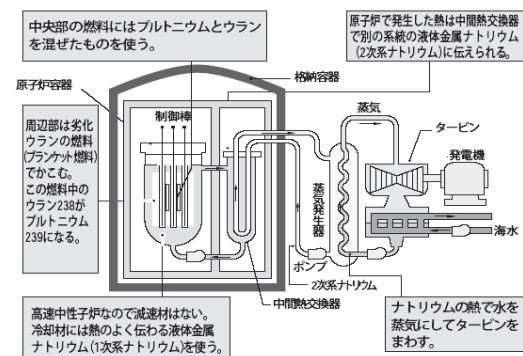


図3 FBRプラントの概念図

## 2.3 高速増殖炉の開発意義

FBRは、現行の軽水炉に比べてU資源の利用効率を格段に高めることができるばかりか、数百万年の長期に亘って管理し続けなければならない高レベル放射性廃棄物量を減らして、環境への負荷を大幅に低減できる可能性を有している。また、CO<sub>2</sub>の発生量が他のエネルギー源に比べて際だって少なく、地球温暖化への影響が小さい。

インド、中国などの国々の著しい経済的発展に伴い世界的なエネルギー需要が増大する一方で、地球温暖化対策への関心がかつてなく高まりつつあるなか、将来における原子力エネルギーの利用拡大の必要性が再認識されている。このような情勢のなか、我が国は、長期的エネルギーの確保、準国産エネルギーの開発といった長期展望に立ち、将来のエネルギーの有効な選択肢として国をあげてFBRの実用化を進めている。

## 3 日本における高速増殖炉開発

我が国におけるFBR開発は、日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構、以後、原子力機構）の“高速増殖炉研究開発委員会（1963年5月発足）”で、第1段階で実験炉を建設・運転し、第2段階の原型炉の建設・運転を経て、第3

段階で実用化に至るとし、開発の柱を実験炉の設計・建設・運転、Na技術、Pu燃料とすることが提案された。

1967年に動力炉・核燃料開発事業団（現原子力機構）が設立され、国家プロジェクトとして本格的にFBR開発が開始された。まず、茨城県大洗町に高速実験炉「常陽」が、次に福井県敦賀市に高速増殖原型炉「もんじゅ」が建設され、これらの設計、建設、運転を通じてFBR技術が蓄積された。（写真1）

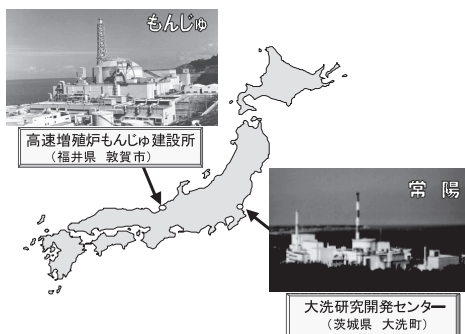


写真1 日本のFBR（「常陽」と「もんじゅ」）

### 3.1 高速実験炉「常陽」

我が国初のNa冷却型FBRは、国産技術により茨城県大洗町の大洗工学センター（現大洗研究開発センター）に建設され、立地する常陸の国の古称にちなんで、「常陽」（14万kWt）と命名された。「常陽」は、FBR開発の第1ステップにあたる実験炉であり、その建設目的は、第1に自主技術によってNa冷却型FBRを設計・建設・運転し、Na冷却型高速炉の運転・保守に関する技術的知見を得て、それを原型炉以降の開発に活かすこと、第2にFBR開発に必要な燃料・材料の照射試験を行うことであった。

「常陽」は1977年4月に初臨界を達成して以来順調に運転を続け、2008年7月1日時点での累積運転時間は、約7万1千時間に達した。現在はFBRの経済性向上のための高性能燃料被覆管、新型FBR燃料、長寿命制御棒の開発、環境負荷低減を目指したマイナーアクチニドMA（ネプツニウム237、アメリカシウム241等）や長寿命核分裂生成物の核変換処理、安全性向上に関する研究開発等が精力的に進められている。

### 3.2 高速増殖原型炉「もんじゅ」

FBR原型炉である「もんじゅ」（71万4千kWt, 28万kWe）は、1985年10月に建設を開始し、1992年12月に総合機能試験を完了して、1994年4月に初臨界を達成した。しかし、40%出力での性能試験中の1995年12月8日、2次系Naの漏えい事故が発生し、それ以来、運転を停止している。その後、2005年2月に運転再開のための改造工事に係る地元の了解が得られ、Na漏えい対策を中心とする改造工事を行った。現在、この改造工事の確認試験を終了し、近々運転を再開すべくプラント確認試験を進めている。

「もんじゅ」は、その運転を通じて発電用FBRプラントの信頼性実証、Na取り扱い技術及びPuによる発電技術の確立という初期の目的を果たした後、FBRの実用化に向けた研究開発の場として国際的に活用されることとなっている。

### 3.3 高速増殖炉実用化への取り組み

原子力機構は、FBRを将来の主要なエネルギー源とするFBRサイクル技術体系を整備するため、1999年から電気事業者を始め、メーカ、大学などの協力を得て、“実用化戦略調査研究”を行った。そして、その5ヵ年計画（2001年度～2005年度）の成果を、今後の研究開発の重点化の考え方、それを踏まえた2015年頃までの研究開発計画、並びにそれ以降の課題としてとりまとめた。

その後、“実用化戦略調査研究”をさらに一歩進め、2025年頃にFBR実証炉の運転を開始すべく、炉型、再処理、燃料製造などのFBRサイクル技術の多様な選択肢の検討を2006年に開始した。現在、FBRサイクルとして適切な実用化像とそこに至るための研究開発計画を、2015年頃に提示することを目標としてFBRサイクル実用化研究開発計画FaCT（Fast Reactor Cycle Technology Development）プロジェクトが、原子力機構を中心にして進められている。

## 4 世界の高速炉開発と国際協力

### 4.1 海外の研究開発の現状

海外においては、原子力開発のごく初期段階



にFBR開発が始められ、早くも1946年には米国の高速実験炉CLEMENTINE (25kWe) が初臨界に至り、1951年には高速実験炉EBR-I (200kWe) が、軽水炉に先駆けて原子力発電に成功した。以来、英国、仏国、ロシアなどでも実用化に向けた開発が行われてきた。

2008年7月時点で、海外では仏国の原型炉Phenix、ロシアの実験炉BOR-60と原型炉BN-600、インドの実験炉FBTRが順調に稼働している。さらに、ロシアでは実証炉を、インドでは原型炉を建設中であり、中国では実験炉ながらも2万kWeの発電能力を持つ、CEFRの臨界を間近に控えている。(表1)

表1 世界のFBRの開発状況

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 原型炉Phenix (25万kWe) を運転中</li> <li>● シラク大統領, 2006. 1. 5               <ul style="list-style-type: none"> <li>● 第4世代原子炉のプロトタイプを2020年に運転開始することを目標</li> <li>● 2035年第4世代原子炉の商用導入</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ブッシュ大統領, 2006. 1. 31 一般教書演説「先進エネルギーイニシアチブ」</li> <li>● エネルギー省, 2008. 2. 6 GNEP構想を発表</li> <li>● 既存技術をベースとした先進的燃焼炉ABRと統合核燃料取扱センターを2020年頃に操業開始</li> <li>● 上記と並行して先進サイクル技術の研究, 高速炉使用済燃料からアクチノイドをリサイクルする施設を設計・建設し, ABRでアクチノイドを燃焼処理</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 実験炉BOR-60 (1.2万kWe), 原型炉BN-600 (60万kWe) を運転中</li> <li>● 実証炉BN-800 (88万kWe) を建設中</li> <li>● 実用炉BN-1800 (180万kWe) を計画</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 実験炉CEFR (2万kWe) を建設中</li> <li>● 2020年に原型炉60万kWe, 2030年に実証炉・商用炉100~150万kWe運転開始</li> <li>● 2050年頃のFBRの設備容量は2億kWe程度と予測</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 実験炉FBTR (1.3万kWe) を運転中</li> <li>● 原型炉PFBR (60万kWe) を建設中, 2020年迄に同規模のFBRをさらに4基建設する計画</li> <li>● 2050年頃の原子力発電の設備容量は2.7億kWe程度と予測</li> </ul>

## 4.2 国際協力

近年、各国においてFBR開発の意義が再認識され、環境負荷低減、資源の持続性、経済性などで優れた特性を有する革新的原子力システムの2030年頃の実用化を目指す第4世代の原子力システム開発計画Gen-IV (Generation-IV), IAEAが提唱する革新的原子炉・核燃料サイクルに関する国際プロジェクトINPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) など、世界規模の国際協力・共同プロジェクトが開始されている。我が国は、Gen-IV計画において世界標準となるFBRサイクルの構築、研究開発のリスク分散と資源の節約、「常陽」と「もんじゅ」の貴重な高速中性子場の提供などで、先導的役割を果たすと期待されている。

この他のFBR関連の国際協力には、米国のGNEP構想 (Global Nuclear Energy Partnership), 日仏米3カ国による包括的アクチノイドサイクル国際実証

プロジェクトGACID計画 (Global Actinide Cycle International Demonstration) などがあり、原子力機構を中心に「常陽」と「もんじゅ」を用いる国際協力が始まっている。

## 5 おわりに

我が国では、「常陽」を30年以上に亘って安定かつ安全に運転して、FBRプラントの基礎データを取得するとともに、数々の研究開発を実施してFBR実用化を進めてきた。さらに近々、世界の期待を担って13年ぶりに「もんじゅ」が運転を再開し、FBR開発の第一線に復帰する予定である。今、まさにFBR実用化を旗頭とする原子力カルネサンスが、現実のものになりつつある。

筆者が働く「常陽」の原子炉格納容器の運転操作床面には、今世紀半ばに到来するであろうFBR社会を象徴した、ローマの哲学者セネカ (紀元前4, 5年頃~65年) のラテン語の詩の一節が書かれている。曰く、“かくも明白な事実を我々が今やっと体験したということに、子孫達が驚く時が来るであろう”。

## <参考文献>

- 1) 「常陽」による高速炉技術開発の成果と将来展望, PNC TN9410 92-081, 1992年4月
- 2) 堀雅夫監修: 基礎高速炉工学, 動力炉・核燃料開発事業団, 1993年10月30日
- 3) 山下芳興ほか: 「常陽」運転20年, エネルギーレビュー, 1999年10月
- 4) 日本原子力学会編: 原子力がひらく世紀 (改訂版), 2004年3月20日
- 5) 能澤正雄: 原研OB回顧録 高速実験炉の開発初期の頃 原子力機構・原研OB会報第51号, 2007年7月31日
- 6) 柳澤務ほか: 高速炉の変遷と現状 (第1回~第10回), 日本原子力学会誌「アトモス」, 49[7] ~ 50[5], 日本原子力学会, 2007年7月~2008年5月

鈴木 惣十 (すずき そうじゅう)  
技術士 (原子力・放射線部門)

(独) 日本原子力研究開発機構  
大洗研究開発センター  
高速実験炉部長  
e-mail: suzuki.souju@jaea.go.jp

