

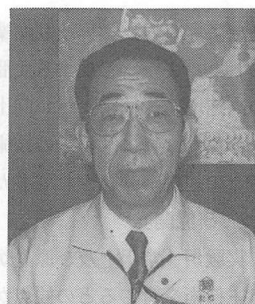
## ■ 論 説 ■

## 高速増殖炉の開発と原型炉「もんじゅ」の臨界

Initial Criticality of Monju toward Further Development  
of Fast Breeder Reactors

高 橋 忠 男\*

Tadao Takahashi



1994年4月5日10時01分、我が国が総力を結集して開発を進めてきた高速増殖原型炉「もんじゅ」は初臨界を達成した。

次世代のエネルギー確保の重要な技術の一つであるプルトニウムを利用する核燃料サイクル及びその要としての高速増殖炉の技術開発が、着実に進展していることを示すことができ、開発に携わってきた一人として誠に喜ばしい限りであるが、この「もんじゅ」の臨界達成を機に、高速増殖炉開発の意義とこれに至るまでの開発経緯を紹介したい。

## 1. 高速増殖炉開発の意義

今日、原子力発電は、世界の総発電電力量の約17%を占め、(これを石油に換算するとサウジアラビアとイランの2か国の産出量に相当する)重要なエネルギー供給源になっているが、21世紀にはさらにその役割が増大するものと期待される。つまり、21世紀半ばには地球人口が約100億人と倍増すること、及び開発途上国での生活水準の向上が必須であることから、世界のエネルギー消費量が2～3倍に増大すると予想される。一方、酸性雨による森林破壊や炭酸ガスの温室効果による地球温暖化問題の深刻化が予想され、化石燃料の消費を制限しなければならない事態を迎えつつある。近年、石油の価格が低いことから石油は無尽蔵にあると思われがちであるが、石油、天然ガス、ウランの可採年数は数十年、石炭で200年程度なのであるから、21世紀に向けて、この資源の制約を克服する努力を続けることが必要不可欠である。

また、我が国のエネルギー確保、とりわけ石油についても、冷戦終結後の世界的秩序が安定しているとはいえない現実を考えると、石油代替エネルギー開発を緩和してよい状況とは言えない。

高速増殖炉は、ウラン資源の99.3%を占めるウラン238をプルトニウムに転換し、これを核燃料として利用することによって、現在主流である軽水炉に比べてウラン資源を約60倍に利用できる魅力ある原子炉である。つまり、高速増殖炉及びこれを支える再処理等の核燃料リサイクル技術の実用化によって、ウランの資源量は1000年のオーダになるのである。

また、核燃料リサイクル技術の魅力については、この資源利用効率の飛躍的向上の他に、技術集約型エネルギーであるので準国産エネルギーと位置付けることができること、及び原子力発電から出て来る使用済燃料を適正に処理処分できることもあげられる。さらに、リサイクルを繰り返した燃料を容易に燃焼できることやプルトニウムの需給バランスが可能、あるいはネプツニウム、アメリシウム等の長半減期のアクチノイド核種の量を低減できる等の魅力にも近年注目が集まっている。

## 2. 「もんじゅ」開発の経緯

## 2.1 開発体制

原子力委員会は、1966年に「動力炉開発の基本方針について」を策定して、高速増殖炉の開発を国のプロジェクトとして推進することを決定した。これを受けて、1967年に開発の中核機関として動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃)が設立され、プルトニウム-ウラン混合酸化物燃料を使用したナトリウム冷却型高速増殖炉を対象とし、実験炉の建設及びそれに続いて電気出力20～30万kWの原型炉の自主開発が開始された。そして、この実験炉は茨城県大洗町に建設が決まり、その地に因んで「常陽」と命名され、一方、原型炉は、巨大なエネルギーを秘めた巨獣(原子力)を知恵の力でコントロールする文殊菩薩に因んで「もんじゅ」と命名された。

「もんじゅ」の開発が国のプロジェクトとして位置づけられたことから、その開発体制は我が国の総力を

\*動力炉・核燃料開発事業団 理事  
〒107 東京都港区赤坂1-9-13三會堂ビル

あげて、官界、学界及び産業界の一致協力の下に進められた。また、参加する民間企業についても、我が国的高速増殖炉技術レベル向上の観点から広く機会が与えられた。特に、将来の技術移転を考慮し、電気事業者との連携が強化されてきた。

## 2.2 研究開発

実験炉「常陽」及び原型炉「もんじゅ」の開発は、自主技術を育てるとの観点から、1970年、茨城県に大洗工学センターを開設し、各種大型試験施設を建設・配備し、国内関係機関と連携を図りつつ開発試験を実施してきた。二つの炉の主要仕様を表1に示す。

「常陽」の建設と並行して「もんじゅ」の設計を進め、1977年の「常陽」臨界以降は、「もんじゅ」の設計ニーズに基づく研究開発を炉心・燃料、機器・構造、安全等を重点に精力的に実施した。

炉心・燃料については、炉出力を「常陽」の約7倍に高めるとともに、燃料の単位重量当たり燃焼量（燃焼度）を6万MWD/tonから8万MWD/tonに高度化した。このため、炉心設計の妥当性を確認するとともに、燃料の被覆管材料として耐スレリング性及びクリープ強度で世界最高レベルの材料を開発してきた。そして、東海事業所で製造した試験体を海外炉と「常陽」で照射して、その健全性を実証している。

機器・構造に関しては、「もんじゅ」の運転温度（529℃）が軽水炉の構造設計基準「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準を定める告示」（通産省告示第501号）の適用温度の上限を上回るため、軽水炉と異なる設計基準が策定された。このため、基礎となる構造材料の高温特性とナトリウム冷却型炉特有の環境効果に関する研究開発、及び構造解析と構造強度に関する研究開発を集中的に実施した。また、発電プラントに必須の蒸気発生器については、「常陽」にない設備であるため、「もんじゅ」蒸気発生器の約1/5の熱交換能力の試験施設を製作し、静特性・水側流動安定性・熱過渡等の試験を行った。さらに、例えば5倍の容量に増強されたナトリウムポンプ等のような大型化された各種機器・設備のスケールアップに伴う工学的課題を解決した他、計測・制御法の開発を行った。

安全性については、炉心、崩壊熱除去系及び格納系に関する各種事象の実験的・解析的把握と、安全性評価手法の構築を大洗工学センターでの試験研究や日仏、日米共同研究等を通じて実施するとともに、ナトリウム-水反応に関する研究も合わせて実施し、これらの成果を「もんじゅ」の安全設計及び安全審査に反映した。

表1 「常陽」と「もんじゅ」の基本仕様の比較

項目	「常陽」	「もんじゅ」
初臨界達成日	1977年4月24日	1994年4月5日
熱出力(MW)	100	714
電気出力(MW)	—	280
燃料	Pu・U混合酸化物	Pu・U混合酸化物
増殖比	—	約1.2
炉心燃料平均取出燃焼度(MWd/t)	約60,000	約80,000
燃料被覆管材質	SUS316相当鋼	改良SUS316鋼(PNC316)
被覆管外径/肉厚(mm)	5.5/0.35	6.5/0.47
炉心燃料被覆管最高温度(℃)	約650	約675
ループ数	2	3
1次冷却材温度(℃)(原子炉入口/出口)	370/500	397/529
1次主冷却系循環ポンプ	1.260m <sup>3</sup> /h	5,100t/h
中間熱交換器型式	縦型自由液面式シェルアンドチューブ方式	縦型無液面平行向流型
2次冷却材流量(1グループ)	1,260m <sup>3</sup> /h	3,700t/h
2次冷却材温度(℃)(低温側/高温側)	340/470	325/505
蒸気発生器型式	—	ヘリカルコイル貫流式分離型
蒸気タービン型式	—	串型3気筒4流排気再熱式複水タービン
蒸気温度/圧力	—	480℃/127kg/cm <sup>2</sup> ・g(主蒸気止め弁前)
燃料交換方式	二重回転プラグ方式	単回転プラグアーム方式
燃料交換間隔	約3ヶ月(70+15日)	約6ヶ月

2.3 製作・建設

設計と並行して立地点の選定を開始し、1970年に福井県敦賀市白木地区を候補地に選定した。県及び国の環境審査は1982年に終了し、行政庁による一次安全審査、原子力委員会及び原子力安全委員会による二次審査を経て、1983年5月に原子炉の設置が許可された。

建設は、1983年に準備工事として進入道路の整備から着手し、1985年10月の主要建物の基礎掘削から本格着工となった。高速増殖炉の主要系統設備の製作においても、原子炉容器では低入熱・低歪である狭開先の溶接施工技術の開発、ポンプではコバルトフリーの表面硬化材の開発、一次系配管ではメンテナンスフリーのメカニカルスナバの開発等、新しい技術を採用した。

その後、原子炉格納容器の部材搬入・現地溶接組立、原子炉容器の製作・据付等を、ステンレス材の溶接管理、ナトリウム冷却炉特有の清浄度管理及び機器据付精度の管理に厳重な基準を設けて実施し、1991年4月主要機器の単体機能試験を含めて機器据付工事を当初の計画通りに終了した。

2.4 総合機能試験から臨界へ

据付工事完了から臨界を経て本格運転開始までの工程を図-1に示すが、1991年5月から開始された総合機能試験では、ナトリウムが系統に入る前に制御棒駆動機構や燃料取扱設備等の機能確認を目視を含めて行う「常温空気中試験」、系統中の空気をアルゴンガスに入れ替えて予熱・昇温を行う「アルゴンガス中試験」、そしてナトリウムを系統に充填した後に冷却系統、制御系統、燃料取扱設備等の機能確認を行う「ナトリウム中試験」と段階的に試験を実施したが、試験項目は全体で約300項目に及ぶものであった。

引き続き実施された性能試験では、冷却系の熱流動特性の予備評価等を行う「プラント特性予備試験」の後、1993年10月に燃料の装荷を開始し、途中に流量分布や炉心特性を評価しながら、1994年4月5日、全炉心198体中168体の炉心燃料装荷により、核分裂反応が持続する初臨界を達成した。初臨界の予測解析は、動燃で整備した最新の解析手法を用いて実施したが、得られたデータからこの予測解析の妥当性を確認する

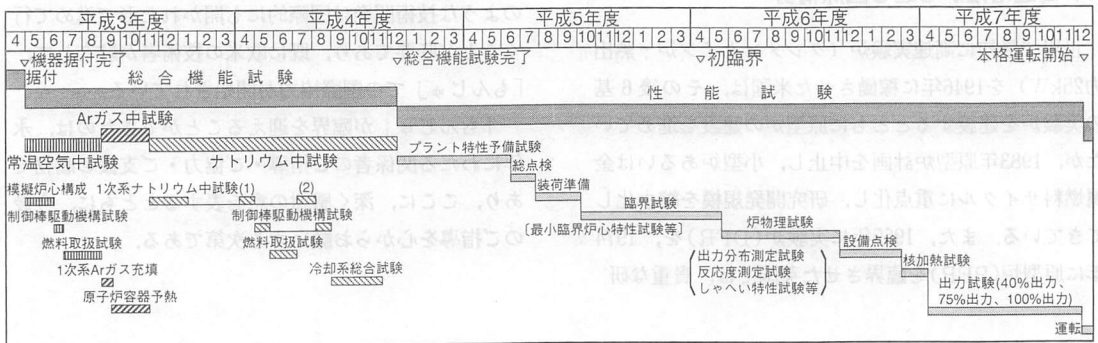


図-1 総合機能試験と性能試験の工程図

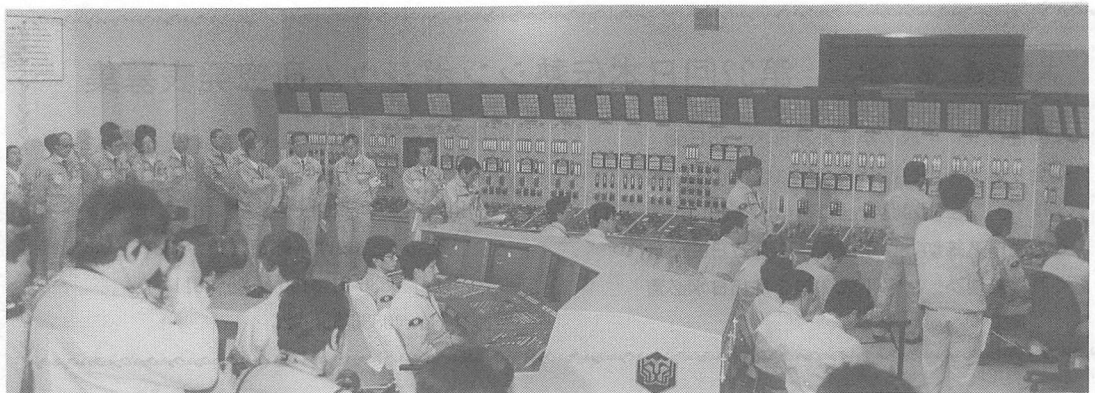


図-2 初臨界時の中央制御室の状況

ことができた。図-2に初臨界時の中央制御室の状況を示す。

今後はさらに、炉心の中性子束分布等を評価する「炉物理試験」、初めて蒸気を発生させてタービンの起動準備等を行う「核加熱試験」、そして発電性能と総合的な運転安全性能を最終的に確認する「出力試験」を進め、1995年12月本格運転を開始する予定である。

### 3. 「もんじゅ」の使命

画期的な特性を有する高速増殖炉を実用化するためには、「もんじゅ」はなくてはならない炉である。実験炉「常陽」に比べて7倍の熱出力であり、大型化による経済性向上を目指す将来炉を工学的に外挿できる規模であるとともに、発電プラントとしての総合的な施設である。従って、設計・製作の経験及び試験・運転を通してプラント性能、増殖等の炉心性能の確認、安全性・信頼性の実証、さらには運転性能の向上を目指したプラント技術の開発を行い、将来炉に反映することが、「もんじゅ」の使命である。

### 4. 高速増殖炉を巡る国際情勢

世界で最初に高速実験炉（クレメンタイン炉；熱出力25kW）を1946年に稼働させた米国は、その後6基の実験炉を建設するとともに原型炉の建設を進めていたが、1983年原型炉計画を中止し、小型炉あるいは金属燃料サイクルに重点化し、研究開発規模を縮小化してきている。また、1959年に実験炉（DFR）を、1974年に原型炉（PFR）を臨界させた英国では、貴重な研

究開発を進めてきたものの、1994年3月、原型炉を閉鎖するため運転を停止した。この結果、海外において、明確な計画のもと高速増殖炉の開発を進めているのはフランス及びロシアという状況になり、そのフランスでは、原型炉（フェニックス）を1973年に臨界に、さらに大型の実証炉（スーパーフェニックス；電気出力120万kW）を1985年に臨界にさせている。また、ロシアでは、1972年と1979年に2つの原型炉を臨界させている。

このように、高速増殖炉開発は、我が国が開発を開始した時代と比べて大きく変化してきているが、原子力政策は各国のエネルギー事情と極めて深い関係があり、原子力以外にエネルギー資源の乏しいフランスが開発を続けていることから分かるように、長期的なエネルギー事情は好転しているわけではない。また、「もんじゅ」の開発経緯で見たように、「常陽」をベースに「もんじゅ」への技術開発は確実に進展している。エネルギー大量消費国である我が国こそ、最新の「もんじゅ」という大きな資産を有効に使って、新たな技術的飛躍に貢献すべきではないだろうか。そして、このような技術開発は国際的にも開かれた形で進めて行くことが肝要であり、既に欧米の技術者が駐在して、「もんじゅ」での国際協力が開始されている。

「もんじゅ」が臨界を迎えることができたのは、永年にもわたる関係者のご指導・ご協力・ご支援の賜物であり、ここに、深く感謝の意を表するとともに、今後のご指導を心からお願いする次第である。

#### 共催行事ごあんない

## 第32回日本伝熱シンポジウム研究発表募集

- ＜開催日＞ 平成7年5月24日(水)～26日(金)  
 ＜会場＞ 山口県教育会館（山口市大手町）  
 山口県社会福祉会館（山口市大手町）  
 ＜発表申込締切＞ 平成7年1月27日(金)必着  
 ＜原稿締切＞ 平成7年3月15日(水)必着

#### ＜研究発表申込先＞

第32回日本伝熱シンポジウム準備委員会  
 山口大学工学部機械工学科 宮本 政英  
 〒755 山口県宇部市常盤台2557  
 Tel 0836-31-5100（内）3011  
 Fax 0836-35-9926