

高速増殖炉技術

Fast Breeder Reactor Technology

高橋 忠 男*

Tadao Takahashi

1. はじめに

高速増殖炉(FBR)は、原子核分裂エネルギーによる発電と同時に原子炉内で新しい燃料を消費した量以上に作り出すことが可能であることから、原子力エネルギー利用の開発当初から注目され、研究が進められてきた。しかしながら、水やガスの流動伝熱技術が他分野で十分確立されていたことや、濃縮ウランあるいは天然ウランを入手し、利用することが可能であったことなどから、軽水炉、ガス炉などの実用化が先行して、高速増殖炉はその後塵を拝することとなった。

しかし、高速増殖炉は軽水炉などと比較してウラン資源を数十倍以上有効に使えることから、次代のエネルギー供給源として最有力であると考えられ、主要先進国において開発努力が続けられており、我が国においても、将来の原子力発電の主流にすべきものとして開発が進められている。

このように、高速増殖炉は資源論的には優位にあるものの、既に実用化された軽水炉との経済性論議において今日的課題として技術的ブレークスルーが必要とされる状況にある。

本稿では、高速増殖炉に関する技術の特徴と、その技術開発の現状、および今後の動向について述べることにしたい。

2. 高速増殖炉技術の特徴

高速増殖炉に関する技術の展望に当たっては、すでに実用化されている軽水炉の技術と対比して見てゆくことが理解しやすいと考えられる。しかしながら、高速増殖炉は同じ核分裂エネルギーを利用する軽水炉とは異なった特徴をもっており、それ故に設計思想など基本的に異なる点があることに十分留意する必要がある。

表1に、高速増殖炉の特徴と主要項目について軽水炉との比較を示した¹⁾。

高速増殖炉においては、中性子を有効に利用してプルトニウム燃料の生成を効率的に行うことなどのため高速中性子を利用し、原子炉内で生成した燃料の使用により核燃料サイクルを完結させることからプルトニウム燃料を使用する。また、原子炉で発生した熱を水・蒸気系に伝える熱媒体、すなわち原子炉冷却材としては、効率的熱除去および中性子経済などの観点からナトリウムを使用するものが主流となっている。

表1 高速増殖炉と軽水炉の主要項目の比較

項 目	高 速 増 殖 炉	軽 水 炉
核分裂を起こす中性子燃料	高速中性子 プルトニウム・ウラン混合酸化物	熱中性子 濃縮ウラン酸化物
高速中性子束 (n/cm ² ・sec)	約 3 × 10 ¹⁵	約 3 × 10 ¹⁴
炉心平均出力密度 (kW/ℓ)	約 270	(PWR) 約 100 (BWR) 約 60
燃料平均燃焼度 (MWD/T)	60,000 ~ 80,000	33,000 27,500
増殖比(転換比) (-)	約 1.2 ~ 1.4	約 0.5
冷 却 材	ナトリウム	軽 水
運転系統圧力 (kg/cm ² G)	約 10	(PWR) 158 (BWR) 74
原子炉出口温度 (°C)	500 ~ 530	約 330 約 290

(100万kW級の大型炉)

* 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉もんじゅ建設所副所長
〒919-12 福井県敦賀市白木2-1

これらの点に注目した高速増殖炉技術の特徴について述べる。

核分裂を起こす中性子として、熱中性子炉にくらべて高速度の中性子、すなわちエネルギーの高い中性子を利用すること、燃料としてプルトニウム・ウラン混合酸化物を使用することから、表1に示したように中性子束(単位体積当りの中性子量×中性子の速度)が軽水炉に比べて約1桁高くなること、炉心平均出力密度(炉心で発生する熱量の体積平均)が約3～4倍となることから、炉心が小型になる。また、燃料平均燃焼度(炉心に装荷した燃料の単位重量当りの平均発熱量)を軽水炉の2倍以上とすることにより、燃料の高出力長期燃焼が可能である。

冷却材として液体ナトリウムを使用する観点からは、ナトリウムの大気圧下の沸点が880℃と高いことから系統は低圧力でよく、高温設計の採用により熱効率の向上が可能となる。炉心平均出力密度が高いことに対しては、ナトリウムの伝熱能力が高いこと、沸点が高いことを生かして除熱能力の確保が図られている。

3. 高速増殖炉技術開発の現状と今後の動向

高速増殖炉に関する技術の開発は、物理、化学などの基礎分野から、機械、電気などの応用分野や、生物学、さらに経済学などに至る広い範囲にわたっているが、開発内容の詳細については他の論文等²⁾にゆずり、本稿では、広い意味での高速増殖炉に係わる技術開発の現状および今後の動向について概括したい。

高速増殖炉の技術開発は、多くの研究開発に支えられ、その成果を反映した設計に集約され、それが許認可、建設へと進んだ場合に飛躍的に進展する。これは実際に建設を行うことにより、具体的技術レベルやその後の方向づけなどが明瞭にしめされ、その経験や情報は極めて重要な価値をもっているからである。

3.1 世界の開発状況³⁾

世界各国の開発状況を表2に示す。

各国の開発ステップはほぼ共通しており、高速増殖炉の基礎技術を確認する実験炉、実証炉のスケールモデル規模(1/3～1/5)で発電プラントの総合技術の確認と実用化への見通しを得るための原型炉、実用炉とはほぼ同規模で技術の実証と経済性を確認する実証炉、さらに実用炉へと順を追って建設し、開発を進めてゆく方式をとっている。

アメリカにおいては、世界最初の原子力発電に成功したEBR-Iを初め多くの実験炉を建設し、また大型の材料試験炉FFTFの利用を含めた基礎技術の蓄積に

表2 世界の高速増殖炉開発状況

国名	各国の開発段階		
	実験炉	原型炉	実証炉
アメリカ	EBR-I (0.12t, 1951) EBR-II (2e, 1963) FERM I (6.6e, 1963) FFTF (40t, 1980)		
フランス	ラプソディ (4t, 1967)	フェニックス (25e, 1973)	スーパーフェニックス (120e, 1985)
西ドイツ	KNK-II (2e, 1977)	SNR-300 (30e)	SNR-II (150e)
イギリス	DFR (1.5e, 1959)	PFR (25e, 1974)	CDFR (132e)
イタリア	PEC (11.8t)		
ソ連	BR-10 (1t, 1958) BOR-60 (6t, 1969)	BN-350 (35e相当, 1972) BN-600 (60e, 1980)	BN-800 (80e) BN-1600 (160e)
インド	FBTR (1.65e, 1985)	PFBR	
日本	常陽 (10t, 1977)	もんじゅ (28e)	実証炉-I

各炉名下の()内は、熱出力tまたは電気出力e(単位万kW)、初臨界年を表す。〔 〕は設計、—は建設中止を示す。

努めつつ、原型炉CRBRの建設を開始したが、政策の変更によりその建設を中止した。その後は、固有の安全性に着目した小型炉PRISMの設計を進めている。

フランスは、実験炉ラプソディ、原型炉フェニックス、そして実証炉スーパーフェニックスへと建設を進めてきたが、経済性の点で次のステップへの踏み出しを考慮している段階にある。しかし、世界で最も進んだレベルにあり、西側の代表とも言える地位を確保している。

西ドイツは、スタートは少し遅れたものの急速に開発を進め、実験炉KNK-IIをへて、原型炉SNR-300を建設したが、燃料装荷の許可が遅れている。また、フランスを追うべく設計を始めたSNR-IIも歩みを止めた形となっている。

イギリスは、西欧諸国の中ではいち早く実験炉DFRを建設し、続いて原型炉PFRを建設した。運転実績は豊富であり、また数多くのトラブルも経験している。実証炉CDFRは設計を行っているものの建設には至っていない。

イタリアは、実験炉PECを建設中であるが、先き行きは厳しい。

ソ連は、独自の路線を維持しつつ開発を進めており、

実験炉BR-10, BOR-60から原型炉BN-350, BN-600を建設してきた。さらに実証炉BN-800の建設へと進んでいる。ソ連においては、高増殖比をねらっていることや発電と共に熱利用も考慮している点に特徴がある。

インドは、実験炉FBTRの建設をへて、原型炉PFBRを計画中である。

我が国における高速増殖炉開発は、エネルギーセキュリティの観点から自主技術開発をめざし、実験炉「常陽」の建設経験をへて、原型炉「もんじゅ」の建設を着実に進めつつある。また、実証炉の仕様選定へと進む段階を迎えている。

世界全体を眺めてみると、アメリカが豊富なエネルギー資源を有していることから高速増殖炉の実用化時期を少し先におき、基礎技術の蓄積に重点をおくと共に、経済性、安全性を重視した炉の研究を進めてゆくこととしている。これに対して、ヨーロッパ各国はそれぞれの国情があるものの連合体制をしき、実証炉EFRの設計を共同で開始した。これに、独自の開発を進めるソ連と、長期計画に沿って着実に開発を推進している日本とが4極となっている感がある。人類が手にすれば500年にわたるエネルギー源を人手したことになると言われる高速増殖炉の開発を、経済的にも現実のものにすべく努力が続けられている。

3.2 技術開発の分野

高速増殖炉の設計、建設にどのような技術開発が必要となるであろうか。図-1は、高速増殖炉の概念設計

に始まり、基本設計、詳細設計、許認可をへて、製作、建設と、これと平行して試験検査が行われ、建設工事が終了して、試運転、運転へと進んでゆくなかで、必要とされる技術項目を、大きくシステム・エンジニアリング、ソフト・エンジニアリング、ハード・エンジニアリングに分類して示した。この分類は必ずしも一般的ではなく、また、システム・エンジニアリング、ソフト・エンジニアリング、ハード・エンジニアリングの用語も従来の用法とは異なる点もあるが、それぞれ、プラントシステム総合化、思想体系の確立と具体化、設備製作等への対応と理解していただきたい。要は、高速増殖炉開発のような新しい技術領域においては、全体を統括、推進するシステム・エンジニアリングと、思想の創造的具體化を行うソフト・エンジニアリングが極めて重要であることを示すことにある。

システム・エンジニアリングの領域では、高速増殖炉に特有の性質や新規技術を取り入れたプラント概念の構築に始まり、システムとしての設計、評価をへて、具体的系統設備が定まってきたところで安全性評価、さらに健全性評価へ進んでゆく。さらに、プラントとしての性能、経済性、信頼性を評価し、運転データなどを反映してプラントとしての総合評価を行ってゆくこととなる。このシステム・エンジニアリングは開発の基本となるもので、大型自主技術開発経験の少ない我が国では一つの技術分野としてなじみにくい面もあるが、総合技術の開発と将来への展開などに不可欠であり、海外先進国にみられるように専門の技術者や組

概念設計	基本設計	詳細設計		製作	建設	試運転	運転
		評価	許認可				
<u>システム・エンジニアリング</u>							
プラント概念設定	システム設計	システム評価	安全性評価	健全性評価	プラント性能・制御性評価	総合評価	経済性評価 信頼性評価
<u>ソフト・エンジニアリング</u>							
設計方針	安全設計方針	運転操作基準					
設計基準	安全設計基準	事故対策基準					
設計コード	安全評価コード	保守補修基準					
材料基準	設計評価基準	安全評価基準	検査基準				
<u>ハード・エンジニアリング</u>							
基礎試験（材料、構造、熱流動等）							
試作試験							
機能・性能試験		確認試験	確性試験	建設技術		評価試験	
				製作技術			
				検査技術			

図-1 プラント建設に伴う技術開発

織の育成が肝要である。

ソフト・エンジニアリングは、未開拓の領域を切りひらき、設計、安全性などの方針、基準作りから、評価基準など、プラントを設計、建設し、そして運転してゆくための考え方の基本となるベース作りであり、また、許認可取得のためのベースを作り上げるものであり、高速増殖炉の思想を背景にプラントを具体化してゆく基盤となる重要な分野である。

一方、ハード・エンジニアリングは、我が国では割合になじみのある分野で、新製品を作り上げる時の手順に似た基礎試験、試作、機能・性能試験、確認試験、健全性などの実証・評価試験を行い、そして製品の製作、輸送、据付などの現場技術へと進めてゆく技術開発を示している。また、検査技術の開発も必要であり、原子力発電所で特に要求される品質保証に係わる技術の開発も含まれる。

3.3 技術開発の現状

上述の流れと位置づけを踏まえた上で、高速増殖炉技術のポイントとなる主要な技術開発の現状について述べる。

(1)プラント概念 高速増殖炉のプラント概念とは、出力規模、炉型、炉心・燃料、冷却系統、燃料取扱系統などを総合した概念であり、開発当初からそれぞれについて色々なアイディアが出され、また各種の実プラントも建設されてきた。特に近年、経済性の飛躍的向上が求められていることもあって、多くの革新的技術が提案されている。

出力規模は、基本的には原子力発電需給に関する国情や地域事情、産業情勢に依存するものと考えられるが、経済性あるいは安全性との関連から出力規模を決めてゆこうとする動きもある。将来のエネルギー需要を見通した判断が重要である。

図-2に一般的な高速増殖炉発電所の系統図を示した。

炉心で発生した熱は1次冷却系のナトリウムに伝えられ、中間熱交換器でナトリウムとナトリウムの熱交換により2次冷却系に伝えられた後、蒸気発生器で水に伝えられて蒸気を発生させ、タービンを駆動して発電する方式をとっており、軽水炉に比べて、系統が一つまたは二つ多い構成となっている。

炉型は、ループ型、タンク型、あるいはその中間のハイブリッド型と呼ばれるものが一般的分類となっているが、基本的には図-2に示したように、炉心を含む系統構成要素をどこまで一つの容器に納めるかの違いであり、それに伴ってそれぞれの特徴や課題を持って

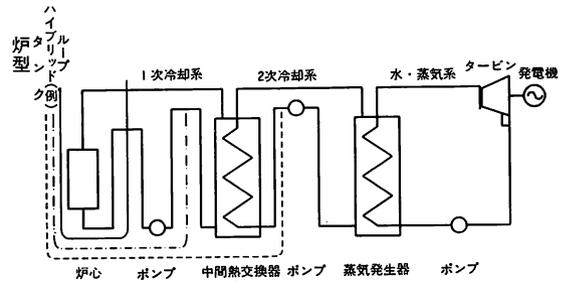


図-2 高速増殖炉系統図

いる。世界的にみれば、ヨーロッパ連合はリーダーのフランスの経験に押された形でタンク型指向、ソ連は両型建設からタンク型へ、アメリカは考慮中、日本はループ型の道を歩んできている。これら炉型の優劣がよく議論になるが、それぞれ建設経験から蓄積された技術への信頼とその有効活用、実用化へ向けての経済性、安全性の向上の見通しなどを踏まえた判断の問題である。

炉心・燃料の問題は、基本的には、高熱出力密度と燃料の長期燃焼の要求を材料、構造、冷却の観点からどこまで許容できるかにあるが、従来は増殖を大きな要素としていたのに対して、近年は経済性の追求を優先させて増殖を犠牲にした小型化や、増殖への転換可能炉心などの工夫もみられる。

冷却系統については、通常発電時の経済的熱除去と、これに比べて極めて低出力の崩壊熱除去時の安定熱除去が要求される。特に後者については、専用設備をどこに設け、どう切替えてゆかが課題であり、それぞれ工夫がこらされている。また、冷却材ナトリウムの自然循環による崩壊熱除去の実プラントによる確認実績を蓄積して高速増殖炉特有の安全性を確保してゆこうとする努力が続けられている。また、冷却系統で重要なことは、ナトリウムの熱を最終的には水に伝えるための機器、すなわち蒸気発生器の健全性であり、多くの研究開発をへて技術的にはほぼ確立され、万一の場合の対策も十分なレベルに達していると考えられる。

これをさらに進めて2次冷却系を削除して建設コストを低減しようとする努力も精力的に行われている。

高速増殖炉の燃料は、冷却材としてナトリウムを使うこと、使用済燃料の崩壊熱が高いことなどから、その取扱は遠隔自動操作により行われ、大気遮断密閉状態での取扱いや付着ナトリウム洗浄などのプロセスもある。このため、軽水炉に比べて燃料取扱系は複雑となり、確実性と迅速性と言う矛盾した要求に対する調和も必要となる。現在までのプラントにおいて

は確実性を第一として建設され、また実績をあげてきたが、今後は合理化の方向に向うものとみられる。しかし、建設、運転経験が大きくものを云う系統であり、十分その反映を計ってゆくことが大切である。

これらのプラント概念を総合化するプラントシステム設計は、長い開発期間を要するもの、アイデアを実用化するために飛躍的技術向上を要するもの、経験の反映が大きいものなどを十分見定めて、調和のとれた進め方を必要とする。

(2)設計方針・基準等 高速増殖炉の特徴を踏まえた設計方針は、設計思想と多くのバックデータを背景とし、許認可および建設をへて固まったものになってきている。具体的内容は各国の事情によって異なり、それぞれの基本的考え方の上に立った理解を必要とするため、安易な適用は避けるべきである。基準の用語は必ずしも一般的ではないが方針への対応を具体化したもの、支援するデータなどで、初めはそれぞれの炉に特有のものとして作られてきたが、次第に先行炉の成果の上に蓄積され、一般的なものになってゆく。したがって、革新的技術導入などを行う場合にはそれに十分適したものとすべき努力が要求される。設計コードは、次項のハード・エンジニアリングの成果をとりまとめた形で作られるが、高速増殖炉技術の具体的エッセンスであり、貴重な財産である。したがって、取扱いには十分留意すべきであり、ヨーロッパ連合では共有財産として管理が行われていると言われる。これらのコードについても、すでに実機建設、運転の成果を反映して確証がなされているが、今後、設計余裕の確

認が行われ、より合理的なものへ向けての努力が行われてゆくことになろう。

(3)安全性評価 原子力発電所の安全評価は、開発と平行して常に設計を確認してゆく形で進められてきた。高速増殖炉においてもその過程は同じであったが、特徴を十分に考慮した評価方法の確立が求められてきた。また、評価事象等の選定は、軽水炉においては経験等を反映した技術的知見により絶対論的に行い得たのに対して、高速増殖炉においては、安全目標の定量化から生まれてきた確率論的安全評価をバックアップとして行われるようになり、この分野の進展はめざましい状況にある。しかし、データベースとなる安全性試験の実施は非常に困難を伴うため、データを補充すべく国際協力で実施されつつある。ここで大事なことは、設計で想定される評価事象と、安全裕度確認や高度の深層防御の観点から行う評価事象との区分を明確にしておくべきであり、後者がいかにも現実であるかのような誤解を招かないよう十分注意すべきである。

(4)ハード・エンジニアリング 図-1ではこの分野の流れを示したが、具体的な開発実施項目と今後の開発課題を表3に示した。^{2)~7)} その代表例について説明する。

燃料関係では、燃料そのものの物性等は別の報告にゆずり、ここでは燃料体としての炉内における振る舞い、特に照射による影響データの取得、蓄積が最大の課題である。高速中性子による照射は先行高速増殖炉を利用して行う必要があり、我が国の燃料開発において

表3 技術開発項目(例)

分類	開発実施項目	開発課題	分類	開発実施項目	開発課題
炉心・燃料	<ul style="list-style-type: none"> 燃料照射 燃料製作技術 臨海試験 被覆材開発 制御材開発 しゃへい試験 	<ul style="list-style-type: none"> 長寿命燃料 長寿命制御棒 酸化物以外の燃料 	構 造	<ul style="list-style-type: none"> 熱衝撃 耐震構造 	<ul style="list-style-type: none"> 免震構造
			計 測 制 御	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム計装 供用期間中検査機器 核計装 破損燃料検出系 	<ul style="list-style-type: none"> 炉内監視機器
材 料	<ul style="list-style-type: none"> 高温材料データ 新規使用材料データ ナトリウム共存性データ 中性子照射データ 高温コンクリートデータ 	<ul style="list-style-type: none"> 新材料データ 	ナトリウム技術	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム物性 取扱い技術 洗浄技術 分析・純度管理 漏えい対策技術 火災試験 	
流 動 伝 熱	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム流動伝熱 層状流動現象 自然循環 自然対流 			安 全 性	<ul style="list-style-type: none"> 過渡時安全性試験 事故模擬試験 ナトリウム・水反応試験 自然循環試験
機 器	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウムポンプ 蒸気発生器 大型ナトリウム弁 中間熱交換器 制御棒駆動機構 燃料交換機 	<ul style="list-style-type: none"> 配管短縮 二重伝熱管蒸気発生器 非耐圧格納構造 高性能ポンプ 新燃料交換系 	運 転 保 守	<ul style="list-style-type: none"> 運転技術 保守技術 燃料取扱技術 	<ul style="list-style-type: none"> 保修ロボット 運転監視システム

は、実験炉が使用されたが、海外炉による国産燃料の照射データも多く蓄積し、燃料の設計領域における健全性が確認されている。この分野の開発には実績実証主義的な要素が強く、今後はさらに長寿命を指向していることから、早期に計画的にデータ取得のための照射試験を実施してゆくことが肝要である。

材料の分野も、燃料に似て実績が必要とされる。我が国においては、実験炉や原型炉の使用材料を対象にした各種材料試験が国内の多くの機関の協力を得て行われ、材料強度基準としてまとめられた。特に、高温領域のデータは慎重に採取され、データベースとして確立している。同時に、ナトリウム環境および中性子照射環境の評価方針もまとめられている。また、万一のナトリウム漏えいに対する高温（65～175℃）のコンクリートデータも試験によって得られ、設計、安全評価に使用されている。今後、新しい材料の使用が計画されてゆくことになるが、長期計画の下に広く試験を実施してデータを蓄積してゆく必要がある。熱流動分野では、ナトリウムが高温であることから当然考慮しなければならないこと他に、例えば高温と低温のナトリウムが層状になったまま滞留あるいは流動する現象が見いだされ、その挙動が解明された。また、自然循環についてもコード化が行われ、試験データによる検証が行われた。一方、ナトリウム機器内のカバーガスの自然対流が機器構造に及ぼす影響を明らかにし、その防止対策も実績をあげている。

ナトリウム技術については、人類が使用しはじめてからまだ40年であるが、安全対策を先行させたこと、高温ではあるが低圧力であること、共存性の良い材料が容易に入手できること、化学工業の触媒などの使用実績も多いことなどから、密封条件での使用は容易であり、かつ万一の漏えいにも十分な対策が講じられ、試験でその効果が確認されている。このため、水・蒸気系に比較してナトリウム系のトラブルが少ないのが実情であり、高速増殖炉技術として確立されていると考えられる。

このように、多くの研究開発の成果や実プラントの建設、運転の経験が蓄積され、高速増殖炉技術は一定のレベルに達した段階にある。今後、高速増殖炉の実用化に向けて、安全性の高い合理的なプラントの建設、経済的な発電および効率的な燃料増殖をはかってゆく必要がある。

4. おわりに

高速増殖炉に対するニーズは強く、開発の底流を成しているが、実用化に向けて軽水炉との経済性論議において高速増殖炉技術を大きく発展させる技術革新が求められており、その努力が精力的に行われている。一方、より一層の安全性、信頼性の向上も人類社会に定着するための基盤であり、高速増殖炉の特性を十分に活用してその要求に応じてゆく努力も続けられている。本稿では、高速増殖炉技術の開発経緯を振り返ってこれまでの進め方と成果について述べ、次代への動向についても触れた。

本稿が、少しでも読者の方々への参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 林昭夫；高速増殖原型炉「もんじゅ」の建設について、第19回報告と講演の会 予稿集（1986）、動力炉・核燃料開発事業団。
- 2) 高速増殖炉技術の現状（1987）、動力炉・核燃料開発事業団。
- 3) Proceedings of the International Conference on Fast Breeder Systems（1987）、ANS。
- 4) 高橋忠男；高速増殖炉開発の現状（1987）、東京工業大学公開講座。
- 5) 岡林邦夫；高速増殖炉、火力原子力発電、38巻10号（1987）、86～98。
- 6) 中川弘；高速増殖炉開発の現状、日本原子力学会誌、30巻11号（1988）、962～970。
- 7) 荒井行雄；FBR新技術フィジビリティ調査について、原子力工業、34巻3号（1988）、15～17。