

■ 展 望 ■

F B Rの現状と展望

Present Status and Future Perspective of FBR Development

近 藤 駿 介*

Shunsuke Kondo

1. はじめに

低濃縮ウランを燃料とする通常の原子炉は、 U^{235} の核分裂によりエネルギーを得ているが、 U^{235} の核分裂の際に発生する中性子のうち若干は併存する（天然ウラン中の99.3%を占める） U^{238} に捕獲される。この捕獲反応により生じた U^{239} はその後 β 崩壊を重ねて Pu^{239} になるが、この Pu^{239} は U^{235} と同様核分裂性であるから、原子炉中では核分裂性である U^{235} が失われ、エネルギーが発生すると同時に核分裂性である Pu^{239} が若干生じていることになる。

ここで原子炉の運転開始時に装荷した核分裂性物質原子数に対する運転終了時に存する核分裂性物質原子数の比を転換比と呼ぶことにすると、この値は通常の軽水炉では0.5前後であるのに対して、この比を大きくするように重水を使うなど工夫した炉心で0.7位、 U^{238} の捕獲反応の大きい中速領域の中性子数を多くするように工夫した高転換率軽水炉で0.9位になる。これに対して Pu^{239} と U^{238} の混合物を燃料とし、高いエネルギーの中性子による Pu^{239} の核分裂では発生中性子数が多いことを利用するべく減速材を用いない高速炉では、この値を1.3位にできる。この場合には核分裂性物質量が原子炉の運転に伴い増えるので、このような原子炉を増殖炉といい、いま述べた例については高速中性子による核分裂を利用しているので、高速増殖炉（Fast Breeder Reactor : FBR）と呼んでいる。

通常の軽水炉ではほぼ天然ウラン中の U^{235} だけを利用しているのに対して、FBRを利用すれば U^{238} も核分裂性物質 Pu^{239} に変えて利用できるため、天然ウランの利用率が図-1に示すように桁ちがいに良くなる。従って、FBRの実用化により、現在の軽水炉による

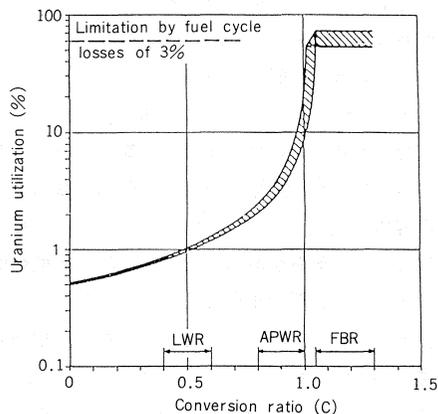


図-1 転換率とウランの利用率の関係（燃料サイクルプロセスにおける損失率を3%とした）

利用では石油資源並といわれるウラン資源が、100倍のエネルギー供給力をもつ資源となるのみならず、もっと低品位の、例えば40億トンといわれる海水中のウランを利用する途も拓けるので、人類は事実上燃料資源制の解放されることになる。そこでFBRを開発実用化することは、エネルギー資源に恵まれない我が国にとってエネルギー自立を達成するという重要な意義を有する事業であるが、同時に人類のエネルギー問題の解決に先進寄するという先進国の義務を果たすことでもあることを忘れてはならない。

本稿では、このFBR開発の現状を要約し、実用化までに当面する課題を展望する。

2. FBRの概要

2.1 炉心

現在世界各国で開発が進められているのは、冷却材にナトリウムを使ういわゆるLMFBR(Liquid Metal cooled FBR)である。この原子炉の炉心は六角形の断面形状を有する燃料集合体数百体から構成されており、各燃料集合体にはスペーサ・ワイヤと呼ばれる

* 東京大学工学部附属原子力工学研究施設原子炉設計工学教授
〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-22

細線を巻いた外径7mm程度の燃料ピンが200本位束ねられて入っている。冷却材のナトリウムはこのピンの間をピンに並行に流れるわけである。各ピンにはウラン・プルトニウム混合酸化物のペレットが詰められている。炉心は中心部にプルトニウム濃度の低い集合体が、外側にプルトニウム濃度の高い集合体が配置され、さらにその外側にはほぼ U^{238} ばかりの集合体が置かれ、炉心から漏れてくる中性子による転換を期待している。この領域をブランケットと呼んでいる。

2.2 プラント構成

LMFBRのプラント構成は、液体冷却であるから加圧水型軽水炉（PWR）に似ているが、炉心を通ったナトリウムが強く放射化されるので、これを中間熱交換器を通して別のナトリウムを加熱し、そのナトリウム（二次ナトリウム）にて水蒸気を発生させることにしている。この場合図-2のように、中間熱交換器までを原子炉容器に入れてしまうプール型とそうでないループ型の2つの配置がある。このいずれの炉型が優れているかという質問に出合うことが多いが、現在のところ、i) それぞれの炉型の設計者が自分の型の優れていることを主張し、それがそれなりに説得力を有する、ii) 大型炉の設計研究では現在の技術をもってすればプール型の方が（不確定性の中に入れてしまうが）僅かに経済的かもしれないと予想されている、

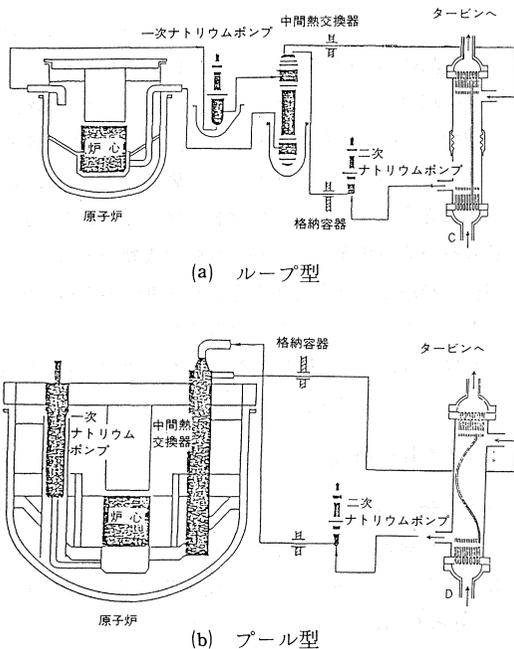


図-2 FBRのプラント構成

iii) フランスで実用規模のプール型FBRが建設中であり、これがうまくいけばプール型の方がより進んだ経験をベースに計画を進めやすい、iv) 中間熱交が削除できるなど革新的なアイデアを展開するにはループ型がよい、などの点を念頭に計画担当者が選択せざるを得ない課題である。

2.3 熱構造設計

冷却材ナトリウムの炉心出口平均温度は、燃料被覆管の最高温度を 750°C （過出力時）に制限すると、出力ピーキング係数、バイパスナトリウム流量比などによるが 550°C 程度になる。原子炉を構成する機器には、ナトリウムとの共存性、高温特性の良さからステンレス鋼が多く用いられる。炉心でナトリウムが約 150°C 昇温するので、出力変動による出口ナトリウム温度の変化が大きく、各機器は大きな過渡熱応力を受け易い。これを受入れ易くするためには薄肉構造とする必要があるが、耐震設計上は一定の強度が必要なので、両者の要求の調和のとり方に工夫が要る。

勿論、いわゆる免震構造の採用によりこの問題を回避する方が余裕のある設計を実現し易いので、そうした方向の努力もなされている。フランスで設計中のSuper Phenix-IIで図-3のように軸方向ならび水平方向免震機構が検討されているのもその一例である。

蒸気発生器も大きな開発対象である。通常水を管側ナトリウムをシェル側とする。伝熱管を直管とする構造の外、ヘリカルに巻くもの、ホッケー・スティック形、J形にするものなどが提案試作されている。

軽水炉の経験では蒸気発生器の信頼性は原子炉の稼働率確保の要であり、米国では1950年代に建設された

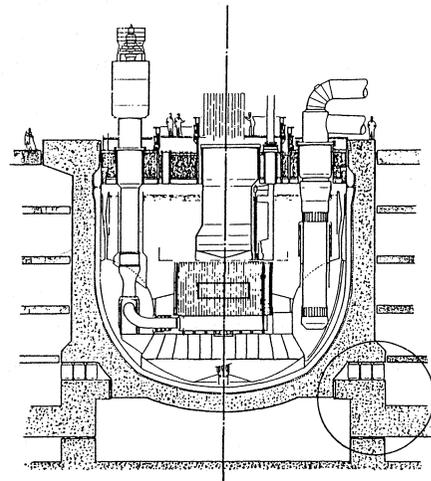


図-3 SPX-2における免震構造の採用(円内)

実験炉EBR-IIの蒸気発生器が二重伝熱管方式で、これまで20年間順調に運転されていることから、二重伝熱管の採用を主張する人もいる。

2.4 燃料

FBRの燃料は核分裂性のプルトニウムを15%程度含むので、製造には遠隔操作や臨界管理上の配慮が必要である。増殖性によりこのプルトニウム含有量が使用中あまり変化しないので、原理的には軽水炉燃料からよりも多くのエネルギーを取出し得るが、被覆材の照射損傷が制約となり、現在のところ燃焼度は軽水炉燃料の3倍程度にとどまっている。

このため中性子照射によるスエリングの発生しにくい材料、高温クリープ特性の良い材料の開発が各国で行われており、現在の主力は20%CW316SSであるが、その改良以外に15Cr15NiMoTi、PE-16なども使われる方向にある。当面15%の燃焼度を達成することが開発目標である。

また炉心の出力密度を大きくとることも経済性の観点から期待され、300kw/l位の値が実現されている。炭化物燃料を用いればさらに大きくすることが可能であるが、ナトリウムの流速制限がきいて、大型炉ではそれほど大きくはできない。

2.5 安全性と信頼性

FBRの安全性については、開発初期にEBR-I、EFFBRという実験炉において燃料溶融を経験したために、炉心溶融の防止策ならびに溶融結果の格納可能性について多大の研究努力が投入された。その結果、現在では炉心溶融の可能性を十分排除できる設計が可能であることが関係者の共通の認識となっている。

冷却材ナトリウムが常用沸点以下で使用されていること、その熱慣性が大きく、自然循環が成立し易いこと、主要な放射性核分裂生成物であるヨウ素とナトリウムの親和性が強いことなどいわゆる固有の安全性も高く、更に放射性廃液が発生しないので従業員被曝が極めて小さくできるなどの通常運転時の優れた安全性も強く認識されている。

これまでの運転経験の範囲では、熱応力対策ならびに蒸気発生器の伝熱管溶接施工に失敗しなければ安定な運転が可能であることが分っている。

2.6 燃料サイクル

高速炉がその特徴を発揮するためには、その使用済燃料が円滑に再処理され、生成しているプルトニウムが回収再利用される必要がある。高速炉の使用済燃料を軽水炉燃料と比較すると図-4のような特性があるの

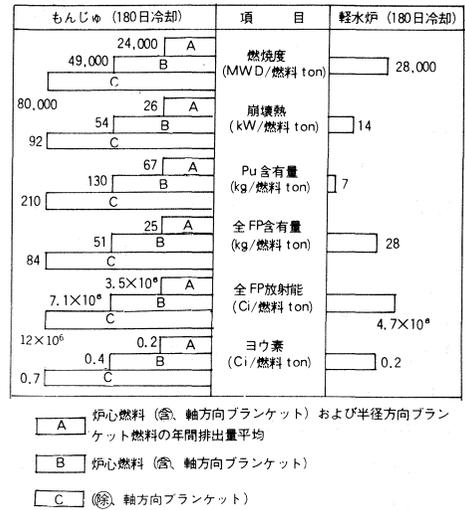


図-4 高速炉および軽水炉使用済燃料の比較

で、軽水炉用の再処理工場でもあらかじめプルトニウム含有量の多い燃料を扱えるようにしておけば扱えないことはないが、実用期には回収プルトニウムあたりの処理量が少ないという特質を生かした専用プロセスを開発利用すべきであり、主要国で、パルスカラム、遠隔自動化プロセスの採用などの技術開発が行われている。

3. 開発動向

FBRの研究開発は、実験炉、原型炉、実証炉の順に5~10倍にスケールアップしたプラントを約10年毎に建設して、これの実現に必要な技術を開発していくという方式で行われている。特に実験炉の建設においてはFBRの工学原理の実証と併せて引続く開発における照射場としての役割を期待する。

また原型炉は、その炉型が引続く建設の原型となることを期待して関連の基盤技術の開発成果を集約する対象であり、技術開発の主要部が達成される段階である。実証炉は、通常は経済性について確かな見通しを得るために建設されるもので、これにより産業技術としての成熟化のプロセスが始まる。

これらの開発を進める方式にはシリーズ型とうま飛び型がある。シリーズ型は前段の建設を完了してから次の建設に移る方式で、建設運転経験をも次段に反映しようとするものである。これに対してうま飛び型は、主要な建設が山を越えたところで次の建設を始める方式である。この方式は勿論開発を急ぐ時に採用されるのであるが、一般に設計の大部分は概念設計段階で決

ってしまうことを考えると、シリーズ型とて概念設計はうま飛び型と同様前段の炉の建設中に終わっていることが多いので実は経験の反映という点での両者の差は小さい。建設中の設計変更で対処できないような事が発生する可能性は少ないとすれば製造・建設という面で時間的につながっている方がむしろ経験の反映が容易であるとして、このうま飛び型開発方式を推す人もいる。

3.1 米国の動向

米国は最も早くFBR開発に着手したが、計画的に研究開発を統合し始めたのは1960年代後半に入ってからで、長期的観点からまず材料試験炉を建設することとし、Fast Flux Test Facility (FFTF) に着工したのは1969年であった。その後うま飛び型で実証炉C RBRを建設する計画であったが、着工寸前にカーター大統領により計画が中断され、その後一時復活したが結局中止となっている。従って現在は原子炉の建設計画を有していないが、年間1,000億円弱の予算で過去十年余にわたり進められてきた技術開発の蓄積は極めて大きい。現在は、「連邦政府の役割は研究開発により各種の技術オプションを用意することであり、特定の炉型について実用化まで行って技術間の公正な競争を障げるようなことはしない」という方針の下で、軽水炉と競合できるFBRの設計研究を行いつつ、技術開発の成果をとりまとめているところである。

3.2 英国

英国は、1958年に実験炉を完成し、1974年に原型炉PFRを完成したことからわかるように、初期には精力的にFBR開発を進めた。しかし、北海で石油が発見され、一方英国経済が成長率を落したことから、次の段階である実証炉については、設計研究は行われているが着手するまでには至らず、今日に至っている。そして当面は他国の建設計画に協力することにより2000年頃に予定している実証炉CDFRの建設着手まで技術的能力を維持拡大していく方針で、1960年に欧州諸国の共同開発路線の仲間に加わっている。

3.3 ソ連

ソ連は、世界のエネルギー問題の解決に高速増殖炉の果たす役割を強く認識している国の1つで、1960年代から精力的に研究開発を進め、現在海水脱塩との二重目的プラントBN-350(電気150MWe)ならびに発電炉BN-600を運転しており、経済性その他のデータが十分知られていないためその評価は困難であるが、FBRを実用化した最初の国といってもよい。次の計画

は従来BN-1600という160万KWeのプラントとされていたが、最近80万KWe程度のものに変更したといわれている。

3.4 フランス

フランスはエネルギー面における自立を強く意識してFBR開発を開始し、1967年に実験炉ラブソデーを完成し、1973年には原型炉フェニックスを運開している。そして1977年に着工した実証炉スーパーフェニックス(SPX)は今年完成の予定である。この間の研究開発・技術移転の進め方は設計集団ごと次の建設主体に移していくフランスならではの方式であるが、その手際のよさはみごとである。

フランスのもう1つの特徴は、国際協力の推進である。これはフランス、イタリア、西独の電力の長老3人の会合に始まったとされ、フランスと西独の実証炉開発計画を相互乗入れで行い、これにイタリアが等しく協力するというものである。現在建設中のSPXについて言えばフランスが51%、イタリアが33%、ドイツを中心とする国際連合体が16%を出資し、建設工事、発生電力をこの比率でわけあうことにしている。この方式はつづいて西独の実証炉SNR-IIにも適用されることになっているが、フランスとしては自国の次の計画SPX-IIもSPXと同様に、しかも英国を加え拡大された国際共同プロジェクトとして推進したいとしている。

3.5 西独

西ドイツは、上述の各国よりも遅れてFBR開発に着手した。そのアプローチは、まず米国と組んで米国にSEFORという小型の実験炉を建設し、FBR安全性の1つの要であるドップラー効果の存在を実証し、つづいて1973年に自国において原型炉SNR-300を民間の手で建設させる方式をとった。この選択の背景には、すでにナトリウム冷却熱中性子炉KNKを有していた自信もあったが、後発の利点を生かそうとする気持も強く存在した。しかしながら不幸にしてSNR-300は反核運動や反原子力運動の標的とされ、相つぐ訴訟への対応などで時間を使い、完成予定は1979年から大幅に遅れて1987年になろうとしている。

その後の予定としては、実証炉SNR-IIを2000年までに完成させることを考えており、現在その準備を行っているところである。

4. わが国におけるFBR研究開発

わが国も先進国にかなり遅れて昭和42年に動力炉核燃料開発事業団を発足させてFBRの研究開

発をスタートさせた。現在は実験炉「常陽」を実験・照射施設として利用しつつ、原型炉「もんじゅ」を着工しようとしているところである。これまでに投入された研究開発費は1982年度までに、

研究開発費	1,480 億円
施設費	226 "
実験炉建設費	341 "
実験炉運転費	387 "

となっており、その他原型炉建設費用、燃料・再処理関係開発費がある。研究開発にあたっては民間の力を有効に活用すべく委託研究を主体に進めることを基本としているが、ナトリウム機器の試験や安全性研究、燃料・再処理技術の開発などは事業団自ら大洗工学センターを中心に実施している。表1には同センターにあるFBR関係主要施設を示す。

今後の計画については、原子力委員会等で検討が進められており、とりえず図-5のような方針で進むこととされている。

わが国の研究開発は、国内においては大型の研究開発ではあるが、例えば炉心特性を実証するのに欠かせない臨界実験装置の規模も原型炉炉心の模擬もできないものしかなく、自主開発とは言いながら、核データや炉物理や安全性の大型試験、それに関連するソフトウェアを海外に依存せざるを得ないハードウェア開発型の性格が強い。近年急速にソフトウェアならびに関連データベース整備の重要性の認識

表1 動燃事業団大洗工学センターのFBR関係主要施設

(昭和58年8月)

No	分類	施設名称	内容
1	実験炉関係施設	1) 高速実験炉「常陽」	最大熱出力10万キロワット 常陽専用シミュレーター
		2) 照射装置組立検査施設	
		3) 常陽運転訓練施設	
2	高速炉機器開発関係施設	1) ナトリウム機器構造施設	総合試験装置他9施設 計測試験ループ他2施設
		2) ナトリウム技術開発施設	
		3) 50Mw蒸気発生器試験施設	性能特性試験装置 (同上)
		4) 1 Mw "	
		5) 構造安全性試験施設	大荷重下での構造物変形式試験用
		6) ナトリウム機器構造強度試験施設	
		7) ナトリウムループ施設	材料等のナトリウム環境効果試験用
		8) 材料強度試験施設	
3	燃料材料試験施設	1) 照射燃料試験施設	照射後試験用ホットセル " " " ホット及びブロード
		2) 照射材料 "	
		3) 照射燃料集合体試験施設	
		4) 金相試験施設	
4	安全工学試験施設	1) 流動伝熱試験施設	ナトリウム流動伝熱試験用 原型炉制御用シミュレータ 装置他4施設 ナトリウム水反応試験用
		2) 原型炉運転制御特性試験施設	
		3) 炉心安全試験施設	
		4) プラント安全試験施設	

が高まりつつあり、民間も力をつけてきているので、今後はそれらの充実に入れつつ、ハードウェア技術と統合して世界的に優れたFBR設計を実現していく創造力と統合力の育成が求められる。

燃料の製造、再処理などいわゆる原子力の燃料サイクルサービス施設は一般に10基以上の原子炉にサービ

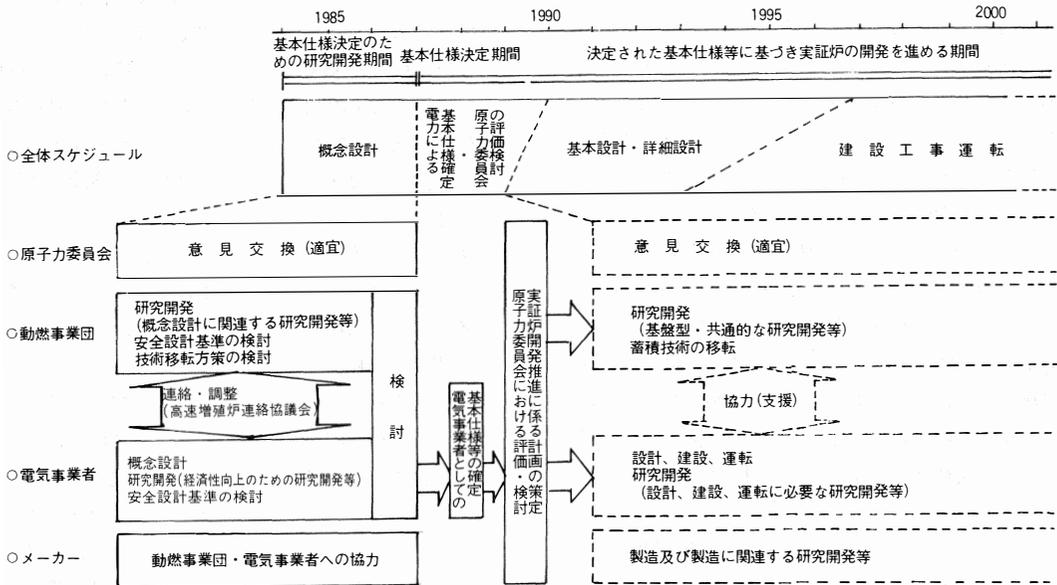


図-4 高速増殖炉実証炉開発手順の概要

スを提供するのが実用規模といわれているので、その実用化は原子炉実用化後になる。現状は、大型炉1基に対して供給可能な施設、いわば実験施設が運転あるいは建設中である。ヨーロッパにおいてはこの分野においても国際協力を行おうとしているが、わが国の場合そうした共同施設にあまり強く依存することはエネルギー自立というFBR開発の本来の目標から見て妥当でないので、慎重な開発計画の求められるところである。

5. 今後の課題

ところで、最近FBR開発をめぐる環境が、開発を始めた時期に比べて大きく変化してきているといわれている。それは、第一には

i) 各国のエネルギー需要の伸び率が低くなり、これにつれて原子力開発利用の想定規模が1970年代に想定されていたものよりもかなり小さくなっている。

ii) ウラン資源の規模が1970年代に想定されていたよりかなり大きいことが分ってきている。

の2つの理由により当分ウラン価格の上昇はなく、従って軽水炉からFBRへの世代交替が発生する時期が遠のいたということである。第二には、

i) FBRの建設費が軽水炉に比較してかなり高い。

ii) FBR燃料製造コスト、再処理コストが従来考えられていたよりもはるかに高く、燃料費が思ったほど安くならない。

という2つの理由から、現状ではFBRの発電コストは石油や火力と石炭火力の間位であり（SPXの場合）、軽水炉と競合するには今後引き続き技術革新が必要であることが明らかになってきたということである。

このうち第一の点についてはさらに、今後転換率のよい軽水炉を導入し、プルトニウムリサイクルを本格的に行えばFBRの実用化は益々先でよい、とする人もいる。しかしながら、FBR開発の本来の目的は、それが諸国民のエネルギー自立の希望を実現することにあるのであり、軽水炉がウラン価格の上昇により競争力を失う時のリリーフとしてこれを登場させるのが目標ではない。むしろ遅くともその時までには登場させて、かつて起きたようなエネルギー価格をめぐる混乱の発生を未然に防止するのが先進国が諸国民から期待されているところではないだろうか。

第二の点については、当初軽水炉の2倍程度の建設費であることを期待していたところ、そうもいかなかったというのがフランス人の所感であるが、同時にこ

の段階を経ずして競合可能な設計への道も存在しないという確信も彼等に存在することに留意する必要がある。これに関連してフランスで2年前に用意された次のデータは興味深い。

	SPX-I 1300MWe	SPX-II # 1 1500MWe	SPX-II # 2 1500MWe	将来ユニット 1500MWe
建設費	2.66	2.00	1.55	1.29
運転費	1.56	1.47	1.25	1.25
燃料 サイクル費	1.89	1.64	1.28	2.85
合計	2.2	1.8	1.5	1.15

(数字は全てFWRの該当費用との比)

すなわち彼らはSPXに続くSPX-IIで建設費を軽水炉の2倍に、そしてSPX-II型の2基目で1.55倍とし、更に改良を進めて大体1.3倍位で実用化期に入ると見ているわけである。そして実際現在設計中のSPX-IIにおいては前に示した免震構造の採用も含めてこの目標が達成できそうな多くの新しいアイデアが登場しているのである。

こうした状況を踏えて、我国の当面する課題を述べるとすれば、次の3点であろう。

第一には、当面の開発目標である原型炉「もんじゅ」を優れたプラントとして建設することである。多くの人々の長い努力がこれから結晶するのであり、完璧の品質保証体制でこれの建設を進め、できるだけ多くの知見を得ることが当事者に強く求められよう。

第二には、「国民経済上許される費用の範囲で原子力研究開発の中心課題として研究開発を進めるべし」という基本的考え方を変える必要性はないが、必要論に安易に依った米国の現状から学び、良いものを提供するという本来の開発理念を取戻し、開発努力のもつ価値、軽水炉と競合可能なプラントへ至る構想などについて国民に具体的に示していく努力を格段に強化する必要がある。

第三点は、各国との開発体制の違いである。

今後は、基礎的データの入手、代替システムの考案と確信などは引続き国の役割であろうが、建設の主体は民間電力に移行する。ところでヨーロッパでは電力は国営かそれに近い強力な国家意志の担い手である。従って、そのFBR研究開発における課題は、国の他の政策課題との調整という文脈の中で発生し、解決されていく。それに対してわが国では電力は民間事業であり、しかも全国に分れているので、それが連合してこのような長期的かつ国民的課題に共同する際に上述の環境の変化はFBRを各社の課題リストの上位から

下位に押しやるように作用することは明らかである。これをいかに克服し、国民の希望ならびに我が国の責務の実現に連合できるかが課題である。

米国のようにそうした電力連合による長期的課題への挑戦がほとんど期待できない国では、メーカと国は、小規模電力も使え、軽水炉と競合できる小型FBRの開発に向わざるを得ないのである。

6. 終りに

以上FBR開発の現状と課題を述べた。開発の正念場は実用化に結びつけるところだといわれるが、FBRはまさにその段階に差し加ろうとしている。創造力を駆使して目標に接近する方途を見出し、これを優れた組織力と運営力により実現していくことが今ほど求められている時はない。関係者の努力を期待するとともに皆様の御声援を期待したい。

新刊洋書紹介

バイオテクノロジー

— 挑戦と可能性 —

- <原 題> Biotechnologies: Challenges and promises
- <著 者> Albert Sasson
- <体 裁> 16.5 cm × 17.7 cm, 315
- <発行所> UNESCO出版局 (Paris, France)
- <発行年> 1984年
- <ISBN> 92-3-102091-9
- <価 格> 85FF

本書は、セクスタント(sexant)シリーズの第2巻として刊行された。

バイオテクノロジーは、われわれの健康や食料ならびにエネルギーの基本的問題に対する生物学的・経済学的なアプローチを代表している。本書は基本的食料の製造、微生物学的な発酵作用など工業的に利用されるバイオテクノロジーに焦点をあてて論じている。しかし、バイオテクノロジーが引き起す危険についても目をつぶっているわけではない。すなわち、生命の機構に及ぼす影響や、財政的・戦略的な関心についても見及されている。

関係者には、有益な文献であろう。

本書の希望者は、下記のユネスコ代理店へ申込まれるとよい。

〒113 東京都文京区本郷3丁目37-3

イースタン ブック サービス社