

## 特集

## 原子力エネルギー

## 高速増殖炉 (FBR) の開発

## Development of Fast Breeder Reactor

野本 昭二\*・奈良 義彦\*\*

Shoji Nomoto Yoshihiko Nara

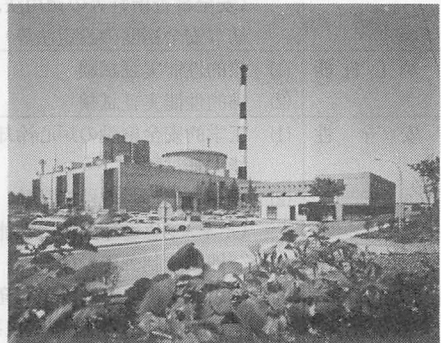
## 1. はじめに

茨城県の大洗町で、いま、高速実験炉「常陽」が運転されている(写1)。この燃料は東海村にある燃料施設で製造されたものである(写2)。最近、この「常陽」からの使用済燃料から数10gのプルトニウムを回収し(写3)、試験的段階ではあるが、「常陽」用の燃料に再び利用されようとしている。こうして、新型転換炉と相俟って、わが国のウランとプルトニウムを再利用する核燃料サイクルの技術の輪が閉じられようとしている。

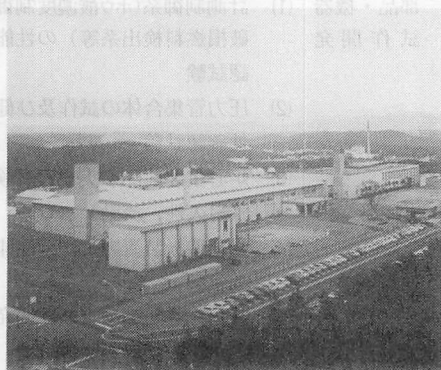
このウラン・プルトニウム燃料サイクルの完結により、軽水炉を基礎に、新型転換炉と将来の高速増殖炉(以下FBRと略す)を軸とした準国産の動力用エネルギーの体系が完成する。ウラン採掘・精錬・転換・濃縮・成型加工・炉での燃焼(核分裂連鎖反応)・再処理・ウランとプルトニウムの再転換・プルトニウム燃料の成型加工・廃棄物処理という輪を閉じることにより、有限の天然ウラン資源の利用率が数十倍に拡大される。そして、将来の天然ウランの世界の需給収支を安定させることができ(図-1)<sup>1)</sup>、またわが国の天然ウランの過大な需要を防止することができる<sup>2)</sup>。この輪を国産技術で閉じ核燃料を効率的に活用するためのナショナル・プロジェクトが進んでおり、FBRはこのプロジェクトの一環として開発されつつある(図-2)。

前述の高速実験炉「常陽」は1977年に初臨界以来、順調に運転され、現在第2期炉心による熱出力10万kWで定格運転を続けている。一方、電気出力28万kWの高速増殖原型炉「もんじゅ」の安全審査も終り、いよいよ本格的な建設が始まろうとしている。これにつぐ高速増殖実証炉についても設計研究が行われている。

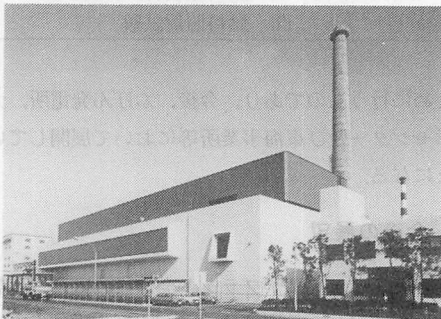
世界的にみると、原子力開発先進諸国において現在



写1 高速実験炉「常陽」



写2 プルトニウム燃料加工施設



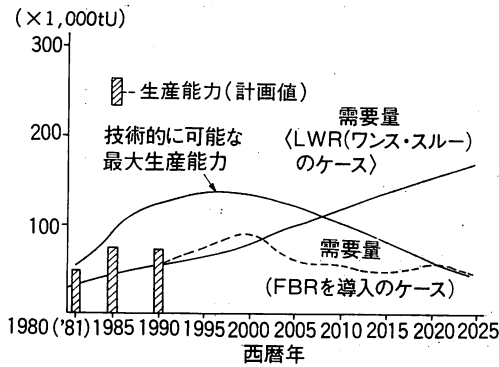
写3 高レベル放射性物質研究施設(CPF)

運転中のFBRは実験炉が6基、発電炉が4基で、すでに停止した炉も含めると、熱出力1万kW以上のものだけで160炉年(原子炉基数×運転年数)の累積運転

\* 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部副本部長

〒107 東京都港区赤坂1-9-13 三会堂ビル

\*\* 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部主任研究員



OECD・NEA / IAEA (1982年2月) より  
 図-1 世界の年間ウラン生産能力と需要量 (低成長ケース) 西暦年

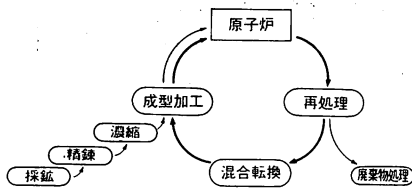
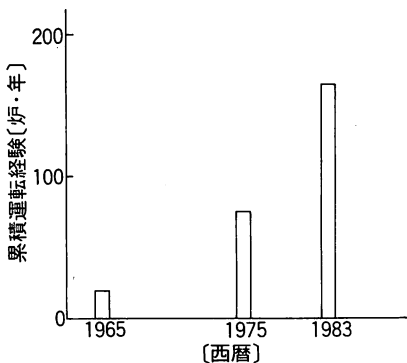


図-2 ウラン・プルトニウム核燃料サイクル



注: 10MWt以上の世界のFBR(臨界以降)  
 図-3 世界のFBRの運転経験

経験をもっている(図-3)。

以下、FBR開発のこれまでの経緯と成果を振り返り、FBRの特徴と当面の課題、今後の展望について述べる。

## 2. 開発の経緯と成果

FBR開発の歴史を振り返ってみると、第2次世界大戦直後の1947年に米国でClementineという25kWtの高速炉が、1956年にはソ連でBR-2という200kWtの高速炉が水銀を冷却材として運転された。

1951年には米国でEBR-1が200kWeの出力で初の原子力発電を実現し、また1959年には英国でDFR

が1万5kWeで運転を始めたが、これらはナトリウムとカリウムの合金であるNaKを冷却材としたものであった。

これらの初期のFBRは、このように冷却材に水銀やNaKを使ったという点でも、現在のFBRとはかなり異なったものであった。その頃には、冷却材としてその他にヘリウムやスチームを使うという試みも研究されていたが実際には利用されなかった。

しかし、米国のEBR-II(1万6kWe)が1963年に、仏国のRapsodie(2万kWt→4万kWt)が1967年に、ソ連のBOR-60(1万2kWe)が1969年に運転を開始して以来、液体金属ナトリウムを冷却材としたFBRが定着した。

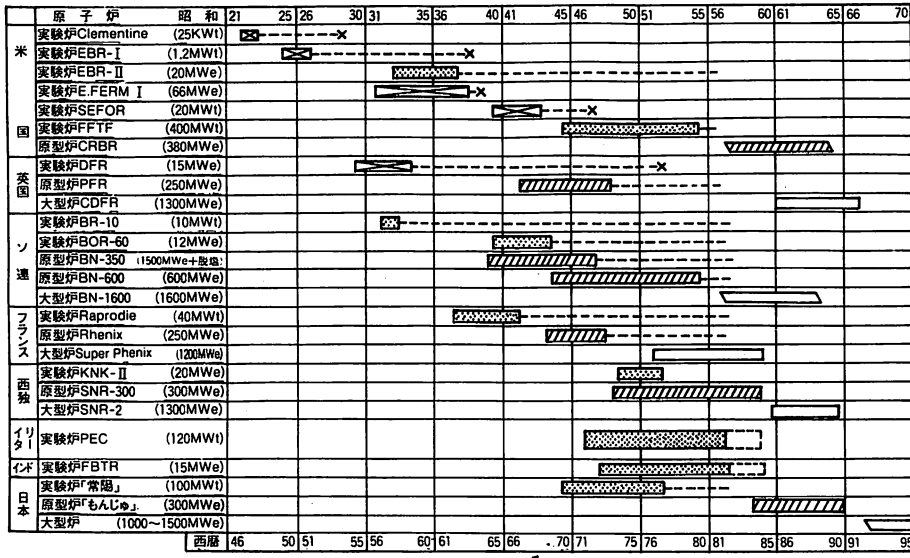
この頃、1960年代後半頃、わが国でも原子力委員会のもとに動力炉開発懇談会が設けられ、新型転換炉と共に、FBRを開発するという方針が打ち立てられた。これにもとづき1967年に当時の原子燃料公社を拡大改組して現在の動力炉・核燃料開発事業団(以下動燃と略す)が設立され、それ以前から日本原子力研究所が開発を進めていた高速実験炉の第2次概念設計を1968年にひき継ぎ<sup>3)</sup>、わが国のFBR開発を担当することになった。

その後1970年代に入って、仏国でPhenix、英国でPFR、ソ連でBN-350などの30kWe級のFBR発電炉が運転を開始した。

この少し前には米国のFermi炉(16万kWt)が運転され、国際的なフェルミ炉委員会が設けられ、運転への国際的な参加が行われ、世界各国から延べ約100名の技術者が実地の経験を、わが国はもちろん世界のFBR開発の促進に貢献した。また同じ米国のSEFOR(2万kWt)という実験炉により、FBRの基本的な安全特性のひとつであるドップラー効果(炉心の温度が上ると反応度が減る核的性質)が実証された。

1977年には、前述のように、わが国の「常陽」が、つづいて1980年には米国のFFTF(40万kWt)とソ連のBN-600(60万kWt)が運転を開始した。1984年には仏国でSuper-Phenix(120万kWt)が臨界になる予定である(図-4)<sup>4)</sup>。

さて、1960年代以降世界のFBRがナトリウム冷却ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料炉となり、「第1世代の原子炉である熱中性子炉の直面する問題に比較すれば、いわば第2世代の原子炉であるFBRに関して同一タイプが世界中で採用されたことは、強調の価値がある」(1983年4月OECDの原子力機関NEA



注：棒線は建設開始から初臨界までを示す。 点線は運転期間を示す ×印は閉鎖を示す  
 図-4 世界の高速増殖炉開発スケジュール概況<sup>4)</sup>

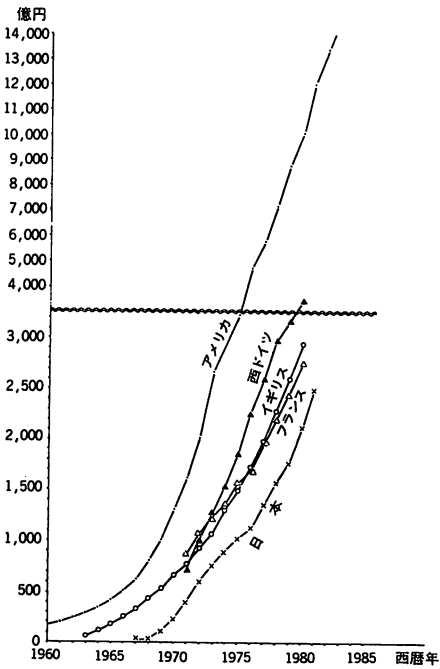
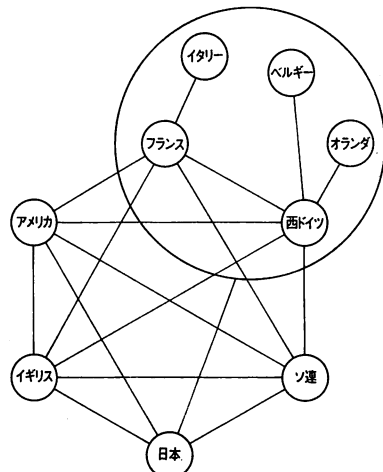


図-5 主要国の高速増殖炉開発費累計<sup>5)</sup>

の25周年記念式典での仏国CEAベカー長官の記念講演から)と云える。

この約20年間に、各国はこの同一タイプのFBR開発に相当の投資を行い(図-5)<sup>5)</sup>、競争と協調による国際協力を活発に行ってきた(図-6)<sup>6)</sup>。そしていま世界経済の状況に応じた投資と協力の仕方が模索されつつある。



国際機関の活動

1. IAEA IWGFR (情報交換, 会議開催等)  
 (参加国 アメリカ, イギリス, フランス, 西ドイツ, ソ連, インド, 日本)
2. OECD NEA (炉物理, 安全性等の情報交換, 会議開催等) (参加国 加盟国)
3. ユーラトム(安全性, 材料等の研究)  
 (参加国 加盟国およびアメリカ, 日本)

図-6 現行高速増殖炉開発協力体制<sup>6)</sup>

わが国のFBR開発も、軽水炉の発展を基礎に、巾広い産・官・学協力により着実に進み、すでに電気出力30万kW級のFBR発電プラント(原型炉「もんじゅ」)を建設着工する水準まで到達している。

### 3. FBRの特徴と当面の課題

このFBR原型炉「もんじゅ」の主系統概要を図-7<sup>7)</sup>

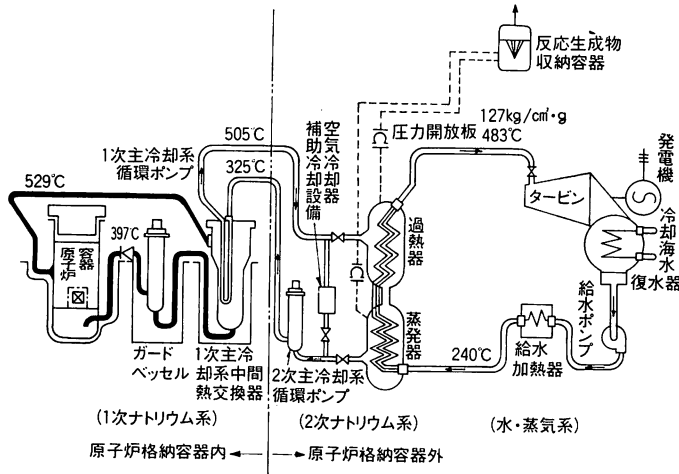


図-7 FBR主系統概要図<sup>7)</sup>

に示す。前述のようにわが国でもFBRのタイプは、高速実験炉「常陽」で実績をもつナトリウム冷却ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料炉である。一般的なFBRの原理的特徴を図-8に、液体金属ナトリウムの物性値を表1<sup>8)</sup>に、主要構造材料を表2<sup>10)</sup>に、また代表的な構造物強度試験例を図-9<sup>9)</sup>に示す。

「もんじゅ」の原子炉容器は、図-10<sup>7)</sup>に示すように、直径約7m、深さ約19mのステンレス鋼製堅型円筒容器であり、その中心に炉心がある。下側から入った約400°Cのナトリウム冷却材は、上側から約530°Cで出て、約71万kWの熱を炉心から外に輸送する。この熱は2次ナトリウム冷却系を経て、蒸気発生器で蒸気に移り、タービン発電機により約28万kWの発電をする。

これを建設するに必要な技術の研究開発(R&D)はすでに大部分完了し、運転のための確認的研究開発の段階に入ろうとしている。

1970年代に建設された「常陽」に比較すると、1980年代の「もんじゅ」は、熱出力で約7倍のスケールアップであり、原子炉出口ナトリウム冷却材温度も若干高く、かつ蒸気を発生し発電するなどが異なるだけでなく、時代の推移による概念の発展も行われている(表3)<sup>3)</sup>。つぎの段階の実証炉はさらに約3.5倍のスケールアップの100万kWe級で計画されており、1990年代のFBRとしてふさわしい概念発展が期待されている。

この発展の基調となるものは、それぞれのプラントの性格とそれらが開発される時代の反映に加えて、信頼性に富み安全で使い易くその上で経済性向上とくに建設費の低減であり、これがFBR開発の当面の主要課題となっている。このことはわが国だけでなく世界

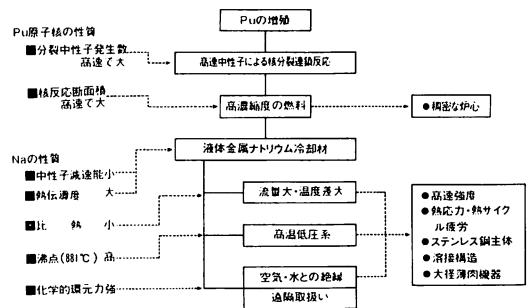


図-8 高速増殖炉の原理的特徴

表1 液体金属ナトリウムの物性値<sup>8)</sup>

物 性 値	ナトリウム
分 子 量	22.997
融 点 (°C)	97.68
沸 点 (°C)	880
比 重 (kg/m³)*	860
熱伝導率 (kcal/mh°C)*	62
比 熱 (kcal/kg°C)*	0.31
粘性係数 (kgfS/m²)*	0.29 × 10 <sup>-4</sup>
電気比抵抗*	26 μΩcm
蒸 気 圧 (cm・Hg)*	0.274
融 解 熱 (cal/g)	27.08
蒸 発 熱 (cal/g)*	1,078
融解時の体積変化(%)	+ 2.7
表面張力 (kg/m)*	4.94 × 10 <sup>-3</sup>

\*350°C付近の値

的にも云えることであり、基準の合理化や新技術の実用化などの努力が払われつつある。これに、開発費そのものの負担軽減の要求も加わり、国際協力の仕方にも共同開発的な要素が増える方向への変化が現われてきている。

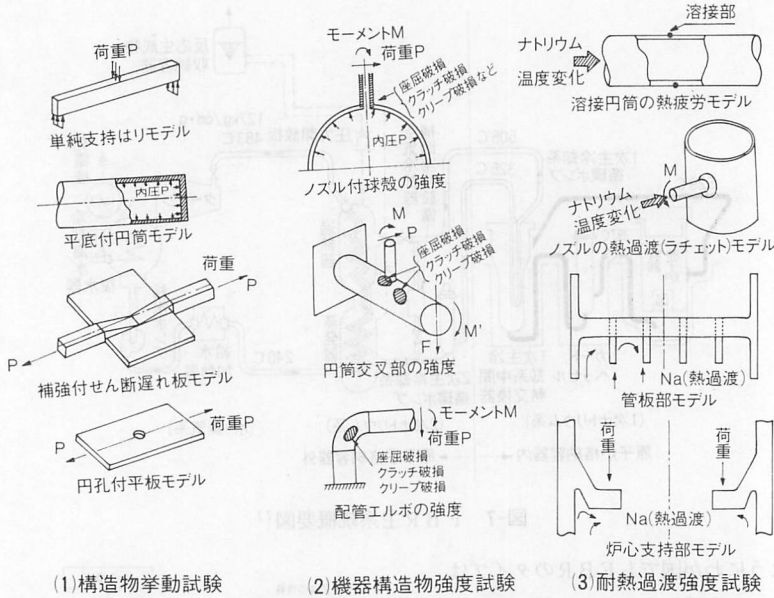


図-9 構造物強度試験の代表的モデル例<sup>9)</sup>

表 2 FBRの主要構造材料<sup>10)</sup>

炉名		MONJU	炉名		MONJU
コンポーネント他		714	コンポーネント他		304 ss
熱出力 (MWt)		~ 280	中間材		304 ss
電気出力 (MWe)		~ 300	熱交換器		21.7 / 1.2
炉心平均出力密度 (KW/ℓ)		~ 300	伝熱管		304 ss
燃料	材質	316 ss (CW20%)	2次系配管材質		304 ss
	外径/肉厚 (mm)	6.5 / 0.47	ホットレグ/コールドレグ		321 ss
	最高温度 (°C)	675	蒸気発生器		31.8 / 3.5
被覆管	最高温度 (°C)	675	過熱器		31.8 / 3.5
	最高温度 (°C)	675	伝熱管		31.8 / 3.5
燃料 (炉心)		UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	蒸気発生器		2 1/2 Cr-1Mo
炉容器		304 ss	蒸気発生器		31.8 / 3.8
温度 (°C) 出口 / 入口		529 / 397	伝熱管		31.8 / 3.8
1次系配管材質		304 ss	2次系温度 (°C) ホットレグ/コールドレグ		505 / 325
ホットレグ/コールドレグ		304 ss			

これらのことは、FBR開発がいよいよ本格的段階に移りつつあることを示しており、技術の開発自体だけでなく、開発の方法そのものの発展が要求されることをも示している。

4. 今後の展望

図-11に、「常陽」、「もんじゅ」等の設計研究から建設、運転までの実績及び計画工程を示す。図-12にFBRプラント開発全体の流れを示す<sup>3)</sup>。現在は「常陽」の実績を積み重ねつつ、「もんじゅ」の建設を実施し、その上でつぎの実証炉の計画を具体化する時期に来ている。

とくに、リードタイムの長いFBRプラント開発に

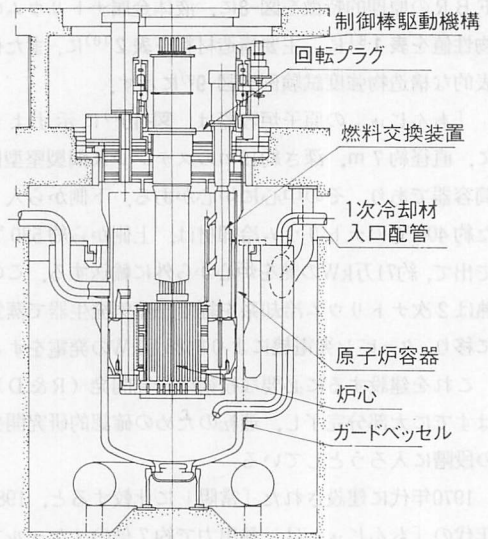


図-10 高速増殖原型炉「もんじゅ」の原子炉構造<sup>7)</sup>

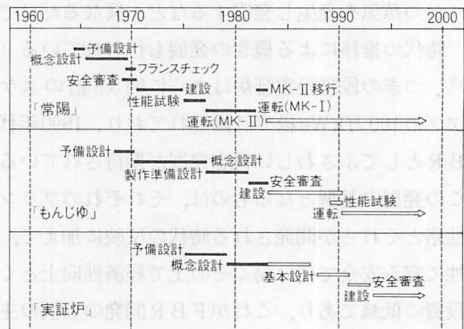


図-11 わが国のFBRプラント開発

表3 プラント主要概念の発展

プラント 項目	「常陽」	「もんじゅ」	DFBRの一例
電気出力	—	約 280 MWe	1,000 MWeクラス
熱出力	100 MWt	714 MWt	約 2,500 MWt
スケールアップ率	—	「もんじゅ」/「常陽」≒7	DFBR / 「もんじゅ」≒3.5
原子炉出口温度	500 °C	529 °C	530 °C
タービン蒸気条件	—	483 °C	483 °C
主ループ数	2	3	3
燃料被覆管 外径	6.3mm/5.5mm	6.5	7.4
ガスプレナム位置	上部	上部	下部
炉容器保護方式	リークジャケット, 安全容器	ガードベッセル	ガードベッセル
回転プラグ	2重回転プラグ	単回転プラグ	2重回転プラグ
燃料交換機型式	直動式	バンタグラフ式	オフセット式
燃料出入方式	走行台車方式	走行台車方式	シュート・移送セル方式
炉容器流入ノズル位置	下部流入方式	下部流入方式	上部流入方式
1次系主配管引廻し方式	垂直引廻し方式	高所水平引廻し方式	高所水平引廻し方式 ベローズ方式
1次主ポンプ位置	コールドレグ	コールドレグ	ホットレグ,コールドレグ
炉容器カバーガス圧	約 100 mm Aq	5,500 mm Aq	4,100 mm Aq
中間熱交換器型式	自由液面並行向流型	無液面並行向流型	無液面クロスフロー型
蒸気発生器型式	—	自由液面ヘリカル コイル分離型	無液面ヘリカルコイル 分離型
崩壊熱除去方式	直接炉心 冷却方式	2次系格外分岐方式	2次系格外分岐方式
燃料崩壊熱冷却方式	炉外	炉外	炉外
炉内中継機構	なし	回転式	なし
破損燃料位置検出方式	( SHIPPING方式 )	タグガス方式	未検討
蒸気発生器配置	—	集合配置	分散配置
原子炉格納容器型式	鋼製円筒まゆ型	鋼製円筒まゆ型	鋼製ハイブリッド円筒型

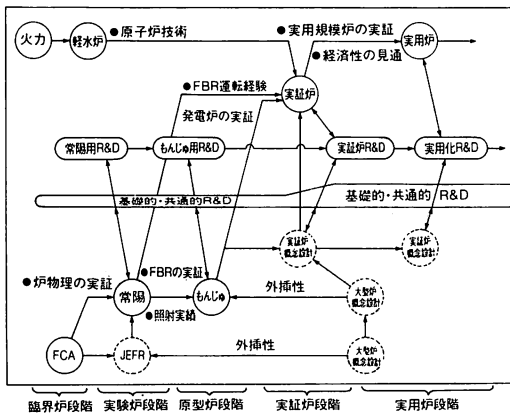


図-12 FBRプラント開発の流れ<sup>3)</sup>

においては、初期の段階に総合的な研究開発計画を策定し、計画的に実施に移していくことが重要であり、これまでの経験によりそれが可能になってきている(図-13)<sup>11)</sup>。この計画全体は10年余の長期にわたるものであり、その間に開発目標自体が移動することもあるの

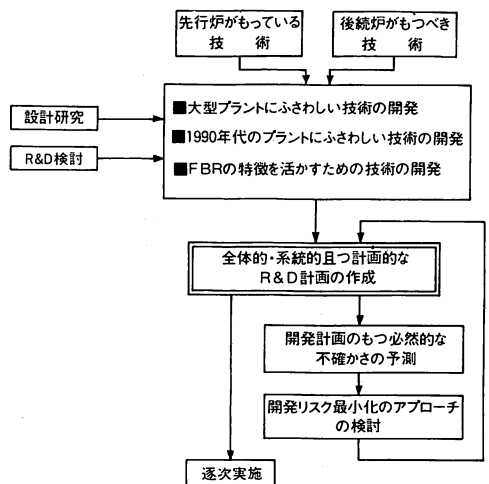


図-13 実証炉 R & D 計画の作成<sup>11)</sup>

で、それに対応しうる計画にしておくことも要求される。

このような計画をつくるものになるのが設計研究と

表4 高速増殖実証炉開発のための課題と当面の研究開発項目<sup>12)</sup>

実証炉開発のための主要課題		基本仕様選定までに必要な項目例		注
		基盤技術項目	設計概念選択に必要な項目	
大容量化—機器の大型化対応	従来技術の活用—スケールアップ技術の確認 (既開発技術の活用)		○1次系配管削除(タンク型)設計研究	1) 基本仕様選定後のR&D項目としては基盤技術項目の他
	新技術・新概念の導入—新技術・新概念の成立性		○炉容器、炉内隔壁、ルーフスラブ強度確認	
経済性向上	建設費の低減	物量削減	○炉心最適化(高出力密度、非均質炉心)	1) 主要機器システムの試作、確性試験 2) 設計詳細化に伴う詳細解析 3) 保守・補修改良に係る研究などがある。
		製作費低減	○機器コンパクト化	
	建設期間の短縮	○計測制御システム改良		
	運転コストの低減	稼働率向上	○高温構造設計基準改良、データバンク	
		所内動力低減	○耐震設計解析法改良	
	燃料サイクルコスト低減	製造コスト低減	○機器・材料改良開発、データバンク	
再処理コスト低減		○大型ステンレス鋼製品溶接及び厚肉ステンレス鋼の溶接施工法開発		
信頼性・安全性確保	信頼性技術の確立	設計、製造技術の向上	○大型燃料集集体開発	
		品質保証の確立	○長寿命燃料開発(高燃焼度化)	
	保守の適切化	検査技術向上	○長寿命制御開発	
		予防保全技術向上	○放熱伝熱低減策開発	
	安全思想の確立	新安全ロジックの導入	○遮断操作技術開発	
		事故解析手法の向上	○各種設計解析コード整備	
		○構造材料仕様ガイド整備		
		○製造中検査技術の向上		
		○I S I 技術開発	○新型炉停止機構開発	
		○異常診断システム開発		
		○確率的評価手法開発、データバンク		
		○解析コード開発改良、データバンク		

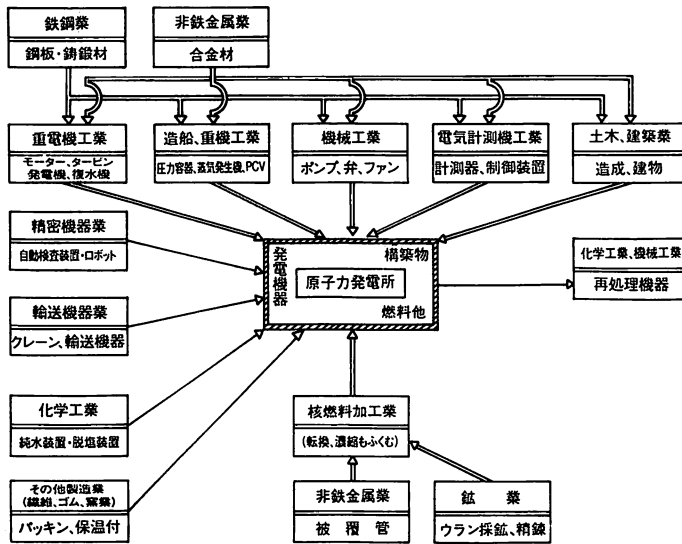


図-14 原子力産業の分野と相互の関連性<sup>13)</sup>

R&D検討である。これにより、将来の本格的実用化段階まで含めた各段階での技術開発展望を明らかにしつつ、当面つぎの実証炉の段階で実現し得て、かつとり入れるべき概念を固めていく。

これまでの検討により抽出されている当面の研究開発項目の具体例を表4<sup>12)</sup>に示す。これらと並行して大型炉用機器システム開発施設の調査研究(略称COSTAR計画)も広く産業界と共に進められており、これも先の計画に折りこまれていくことになる<sup>11)</sup>。

また国際協力については、プラント最適化研究、安全設計基準、共同開発など外国からの働きかけへの対

応が検討されており、わが国の計画にも有効な新たな展開が期待される。

5. あとがき

FBRの開発は、原子力を含む一般科学技術の応用とFBR特有技術の開発を基盤にして、社会的要求に応えられるよう実用化を目指して着実に進みつつある。国内的にも国際的にも、競争と協調による広範な協力がこれまでの成功をもたらしている。

たとえば、動燃のFBR研究開発は100以上の機関(官公立研究所、大学、民間企業など)の直接参加に

よって行われ、その成果はそれぞれの段階のプラント開発を支えると共に、国際協力にも有効に活用されている。また動燃の職員もFBR部門の約40%が約50の機関からの出向者で構成されている。

原子力がもともと総合技術産業である(図-14)<sup>13)</sup>ばかりでなく、FBRがなお研究開発段階にあるためにも、より一層の産官学協力によって今後のFBR実用化への道が開けていくであろう。

#### 参 考 文 献

- 1) 野本昭二；高速増殖炉の最近の開発状況，原子力学会講演予稿集，1983年12月
- 2) 古橋晃；高速増殖炉導入による核燃料サイクル所要量と経済性について，日本原子力情報センター講習会資料「高速増殖炉開発をめぐる諸課題」1983年12月
- 3) 松野義明；「常陽」の現状と展望及び「もんじゅ」とのかかわりについて，同上
- 4) 野本昭二；高速増殖炉開発の現状と動向について，日本機械学会講習会資料，最近の原子力プラント技術における進歩と動向について，1982年12月
- 5) 石上俊；主要国の高速増殖炉開発予算，動力炉・核燃料開発事業団資料，1972年4月
- 6) 動力炉・核燃料開発事業団；高速増殖炉実証炉に関する海外の動向，N 142 82-01，1972年3月
- 7) 野本昭二；高速増殖炉開発の概況，日本原子力情報センター講習会資料，高速増殖炉をめぐる研究開発と今後の技術的課題，1982年9月
- 8) 亀井満；高速炉プラント計装の開発，同上
- 9) 厚母栄夫；高速炉構造材料の研究開発，同上
- 10) 加納茂機；高速増殖炉とオーステナイトステンレス鋼，ステンレス，Vol. 28，No. 2. (1984)
- 11) 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部；高速増殖炉実証炉の設計研究の現況，動力炉技報，No. 45，1983年3月
- 12) 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部；動燃におけるFBR研究開発の方向，P N C T N 253 83-01，1983年12月
- 13) 原子力年鑑' 82，p. 206，日本原子力産業会議(1982)

### (海外行事案内) 化石を主体とした合成燃料に関するシンポジウム (Fossil Based Synfuels Symposium)

<会 期> 1984年6月11日(月) - 15日(金)

<会 場> 米国ジョージア州アトランタ，シュラトン・アトランタホテル

<主 催> ジョージア工科大学

<協 賛> リスク アナリシス学会

米国電力研究所

米国環境保護局

米国エネルギー局

<参加費> US\$250 (約6万円)

標記のシンポジウムでは、当日発表される論文を募集中です。発表のテーマは単なる技術的問題にとどまらず、化石エネルギーを主体とした合成

燃料に関する経済性、安全性、環境に対する影響、規制、要求性能、人体への影響など、あらゆる幅広いテーマを対象としています。論文発表希望者は250語のアブストラクトを下記の主催者宛お送り下さい。なお申込の締切は3月12日です。

Dr. Melvin W. Carter

Chairman, Program Committee

Emerson Building, Room 223

Georgia Institute of Technology

Atlanta, GEORGIA 30332

U. S. A.