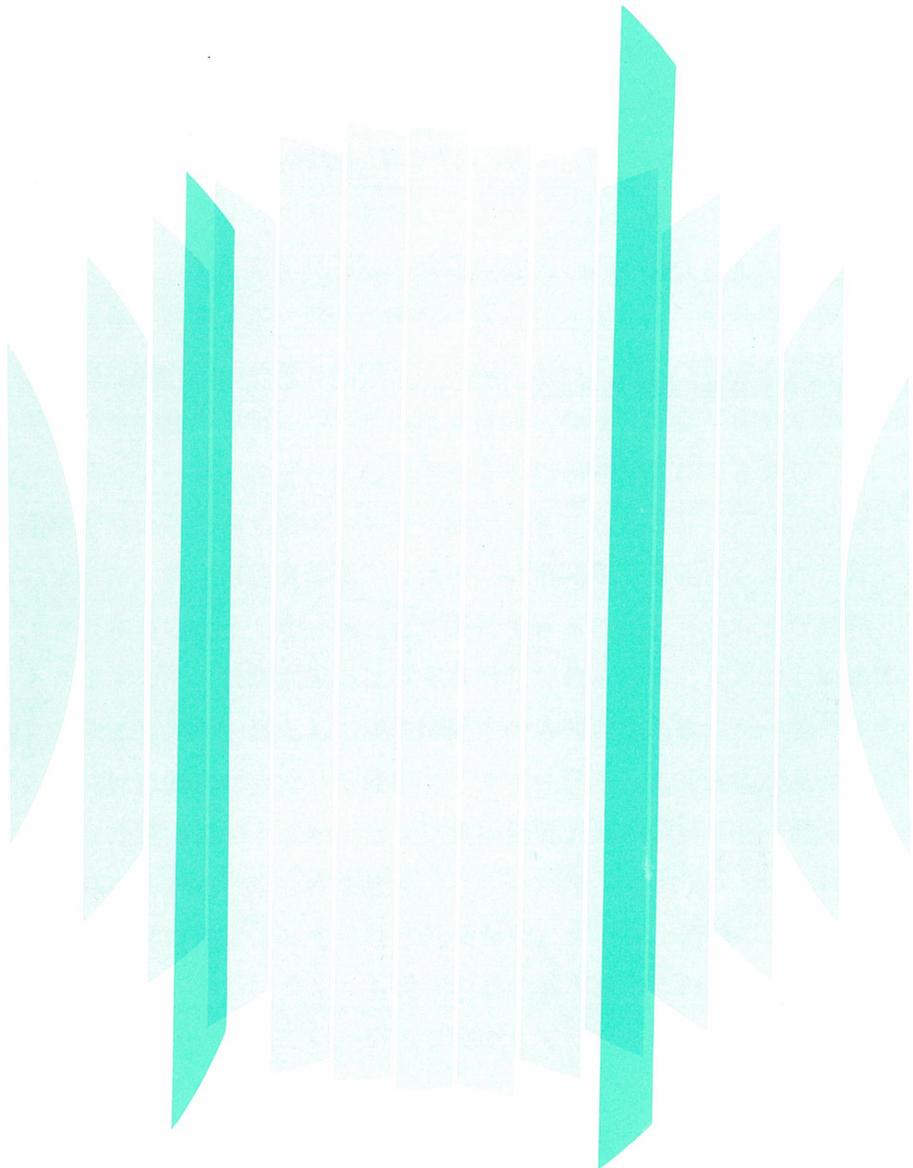


季報 エネルギー総合工学

Vol. 13 No. 2 1990. 7.



財団法人 エネルギー総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

間近になった21世紀	(財)エネルギー総合工学研究所 理事長 山 本 寛.....	1
高速増殖炉新技術フィージビリティ調査に関する調査検討の概要.....	藤 井 外志雄.....	2
自動化の視点からみた人間と機械の役割分担.....	黒 沢 厚 志.....	41
固体電解質型燃料電池の技術開発状況.....	岩 城 秀 雄.....	52
研究所のうごき.....		69

間近になった21世紀

(財)エネルギー総合工学研究所 理事長 山 本 寛

久し振りに巻頭言を書くことになりましたので、いままで私共の季報のために巻頭言をご執筆くださいました方々にこの機会を借りて厚くお礼を申し上げたいと思います。巻頭言は短文なので長文よりはかえってご執筆にご迷惑をおかけしたことがとおもいます。

これからのわが国のエネルギー政策につきましては、現在通産省総合エネルギー調査会で長期エネルギー需給見通しの改定作業をしておられますが、21世紀をひかえてのエネルギー問題は正に混迷の時代に入ってきました。過去の石炭から石油への転換、石油危機の到来当時と比べて、供給において頼るべきエネルギーの種別やエネルギー消費抑制の方策について巾広く検討しなければなりません。この内容が、既存エネルギー源それぞれに各々困難な制約条件が現れてきましたし、またこれから開発を進める各種の新エネルギー源につきましてもそれぞれに期待がよせられてはいますが、利用可能資源量、コスト、技術開発の可能性も含めた導入可能時期など、また本当にエネルギー源として期待できるのかどうかもまだ判然としないものもありますので、計画立案者はさぞ苦勞しておられることとおもいます。

しかし未来エネルギー源として現在開発中の各種の小エネルギー源の中のいくつかはそのうちには実用にいたり分散型エネルギー源として身近になるものもありそうですし、また電力につきましては大型集中発電方式についても一部考え方の修正がなされる時代が来るかもしれません。

エネルギー問題は国によってそれぞれ異なりますから、他国のことは参考にならないものもありますが、フランスも設備産業である原子力の比重がとびぬけて高いが為に、今後原子力産業にいろいろな問題もでてくるのではなかろうかという見方をしている人もあります。

私共の研究所は決して大きくはありませんが、エネルギー供給、利用の両面からこの混迷する時代に少しでもお役に立つべく努力をしておりますので、なお一層のご支援、ご鞭達を戴きたいと思うしだいであります。(やまもと ゆたか)

高速増殖炉新技術フィージビリティ調査 に関する調査検討の概要

藤井 外志雄

1. はじめに

近年の電力需要をみると、国民生活の多様化等を反映してある程度の高い伸びが予想されているが、原子力開発についてはいろいろの原子力を巡る諸情勢から開発の推進が厳しい状況にある。このような状況の中でも、地球環境問題の対応に見られるように、長期的には原子力発電によるエネルギー確保が主軸になっていくものと期待されている。その中でも、高速増殖炉（FBR）はエネルギー資源の有効活用、エネルギーセキュリティ確保の観点から、我が国の長期的な原子力エネルギー利用の基本路線の中に高く位置付けられている。

我が国のFBR開発に関しては、現在原型炉「もんじゅ」が1992年の臨界を目指して建設過程にあり、それに引き続く実証炉はトップエントリー方式ループ型を対象として「予備的概念設計研究」を行い、炉型の成立性研究が進められることとなった。実証炉の建設、運転主体は日本原子力発電（株）が担当することとなっている。

また、昭和63年8月に原子力委員会高速増殖炉開発計画専門部会基礎調査分科会から「高速増殖炉研究開発の進め方」が出され、今後のFBR開発の向こう10年程度の間に実

施すべき研究開発の方向、研究開発をすべき課題等が示された。

FBR原型炉「もんじゅ」、実証炉に続く実用炉の導入時期が2030年頃の時期になるであろうとの見通しがなされ、この実用炉が軽水炉と同等以上の安全性、信頼性を確保し、経済性を確立していくためには、技術開発を着実に進めておく必要がある。

2. 調査検討の概要

本FBR新技術フィージビリティ調査は、通産省資源エネルギー庁原子力発電課が「発電用新型炉等開発調査（高速増殖炉利用システムに関するもの）」の一環として実施しているものであり、FBRの実用化に向けて経済性、安全性及び信頼性確立のために大きなブレークスルーをもたらす可能性があり、開発リスクの高い技術について、その実現の可能性についての調査検討を実施するものである。従って、電気事業者が中心になって行われている実証段階以降のプラントの設計、建設及び運転に必要な研究開発とはその点で内容が違った形で位置付けられる。この調査検討の方向としては、実用化段階のFBRは軽水炉と競合できることが必要であり、安全性、経済性追求の方策としてのプラント合理化、機器の最適設計及び保守性・運転性の改善等

の観点からの基盤的な新技術のフィージビリティ調査を行い、その成立性の有無を見通していくものとしている。(財)エネルギー総合工学研究所は通産省資源エネルギー庁原子力発電課からこの技術開発のための調査検討を受託し、3年間にわたって調査検討を実施して成果をまとめた。

調査検討を行った各革新技术は、システム概念に関する新技術と基盤技術に関する新技術の大きく2つに分類し、それぞれの中に5種類の小さなテーマを選定して合計10種類のものを検討した。これらの革新技术については、FBR実用化を目指して炉心特性、安全特性及び経済性に関するもの等種々の分野にわたって各研究機関にて研究開発が行われている。ここでは、その中から重点的に検討すべき要素を抽出し、それらに関する調査検討を実施することとした。また、検討にあたっては、各基盤技術が新しいシステム概念の中にどのように位置付けられていくのかを考えていく必要があるとしてシステム概念の新技術と関連を付けている。10種類の各革新技术は次の通りであり、それぞれの革新技术の調査検討範囲、プラントとの関連及び実施内容を図1に示す。

(1) システム概念に関する新技術

① 2次系削除プラントの調査検討

(ヘリカルコイル+フルードヘッド型二重管蒸気発生器に係わる検討)

② ラップ管削除型炉心の開発

③ FBR高温高効率システムの開発

④ 小型モジュラ型FBRの日本への適用性に関する調査検討 (PRISMに係わる検討)

⑤ 小型モジュラ型FBRの日本への適用性

に関する調査検討 (SAFRに係わる検討)

(2) 基盤技術に関する新技術

① ポンプ-IHX合体型機器の開発

② ヒートパイプのFBRへの適用に関する検討

③ ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの開発

④ FBR用運転管理、ISI等に関する新技術の開発

(燃料交換機事前故障検知システムの開発)

⑤ 2次系削除プラントの調査検討

(液相拡散接合法に関する検討)

なお、システム概念に関する新技術の調査検討の中で、「小型モジュラ型FBRの日本への適用性に関する調査検討」は当初米国で小型モジュラ炉の概念がPRISM(GE社提案)とSAFR(ロックウエル社提案)の2つのものが平行して開発されていたが、日本の事情、環境等を取り込んで考えた場合、どのような小型モジュラ炉が相応しいのか、解決すべき課題に何があるのかを見通す必要があったことからこれらの両概念を参考にしながら総合させた形でまとめた。

また、「液相拡散接合法に関する検討」については、調査検討を進める過程では基盤技術の範疇に入れて検討したが、検討の内容がシステム概念にある「2次系削除プラントの調査検討」で検討されている二重管SGの溶接法の開発であるため、まとめにあたってはこの調査検討項目との比較評価を行った。

また、各新技術の調査検討は委員会方式によりフィージビリティの見通しの評価及び検討を行い、具体的な調査検討は(株)日立製作所、三菱重工業(株)、(株)東芝、川崎重工業(株)、富士電機(株)及び住友金属工業(株)の各6社が担当し

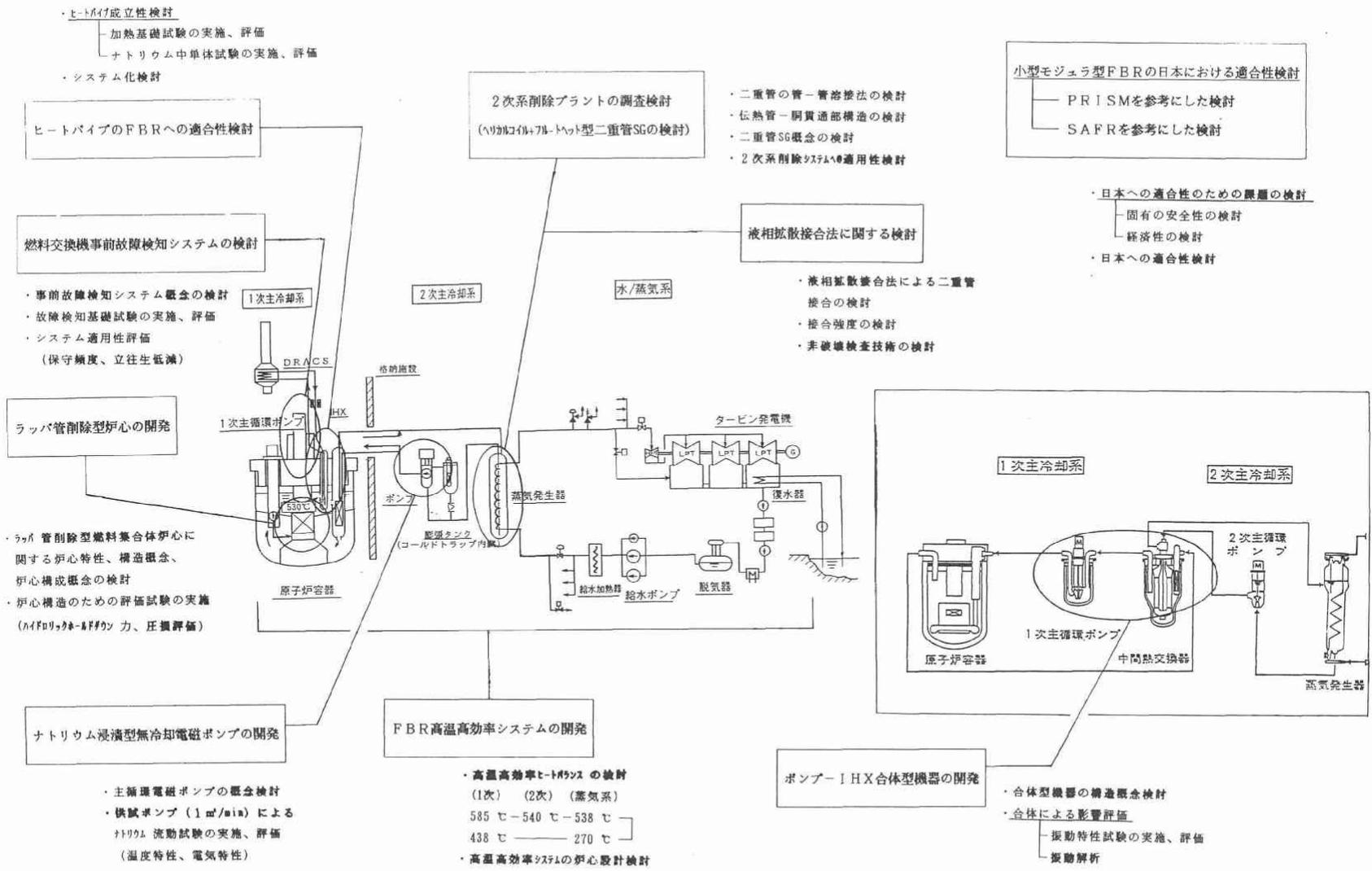


図1 高速増殖炉利用システムと開発調査概要 (新技術フェージビリティ調査に関するもの)

表1 FBR新技術フイージビリティ調査検討スケジュール

新技術調査項目	検討内容	昭和62年度	昭和63年度	平成元年度
2次系削除フラットの調査検討 (ハリカル+フルドヘッド型二重管SGに係る検討)	1. 基本概念の検討 2. 管、フルドヘッド構造の検討 3. 評価	_____	_____	_____
ラッパ管削除型炉心の開発	1. 導入効果の検討 2. 炉心特性の検討 3. 水流動試験 4. HHD力の評価	_____	_____	_____
FBR高温高効率システムの開発	1. ヒートバンスの検討 2. 炉心設計 3. 機器設計 4. 評価	_____	_____	_____
小型モジュール型FBRの日本への適合性に関する検討 (PRISM、SAFR)	1. 設計例の調査 2. 安全特性の検討 3. 経済性の検討 4. 日本への適用性評価	_____	_____	_____
ポンプ-IHX合体型機器の開発	1. 概念のサーベイ 2. 構造概念の検討 3. 合体の影響評価 4. 総合評価	_____	_____	_____
ヒートパイプのFBRへの適用に関する検討	1. 崩壊熱除去系 ①計画、試験 2. 二重管SG ①計画、試験	_____	_____	_____
ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの開発	1. 概念設計 2. システム評価 3. 試みの試験計画 4. 試験、評価	_____	_____	_____
燃料交換機事前故障検知システムの開発	1. システム概念検討 2. 知識ベースの構築 3. 基礎試験 4. システム適用性評価	_____	_____	_____
2次系削除フラットの調査検討 (液相拡散接合法に関する検討)	1. インサート材の評価 2. 二重管の接合 3. 検査法の検討 4. 評価	_____	_____	_____

た。検討委員会及びその下部ワーキンググループである2つのグループ（システム概念評価検討，基盤技術評価検討）がこれらの各6社が調査検討した結果を評価した。

調査検討のスケジュールについては表1に示すとおりである。

3. 調査検討の内容

3.1 システム概念に関する新技術

1) 2次系削除プラントの調査検討

（ヘリカルコイル+フルードヘッド型二重管蒸気発生器に係わる検討）

従来のFBRは炉心からの熱伝達方式としては、軽水炉と違って1次系，2次系及び蒸気系を經由してタービン，発電機の方へ熱エネルギーを送り，電気エネルギーに変換される。この熱伝達システムに対し，2次系を削除していくことによりFBRプラントの合理化を図ることができる。2次系削除プラント実現に向けては，蒸気発生器（SG）におけるナトリウム/水反応防止対策が1つのポイントとなっている。このため，SGの中の伝熱管を二重管タイプにして，ナトリウム中への水・蒸気のリークを防止する必要がある。二重管型のSGは直管タイプのものとしては既に研究が進んでいるが，リークした伝熱管の検出が難しい。このため，伝熱管本数を減少，ヘリカル状にし，伝熱管毎に胴を貫通させる構造（フルードヘッド構造）をもつことにより，二重管のリーク検出及びリーク管の同定が可能になり，また補修も容易になることが期待される。しかし，二重管をヘリカル状にした場合の技術的な問題（管-管の溶接，管-胴の貫通等の諸問題）があり，成立性を難しくしている。

本調査研究では，ヘリカル型の二重管SGを採用した場合の2次系削除プラントの合理化効果の検討，SGの二重伝熱管の管-管構造の健全性，溶接手法及び管-胴貫通構造の健全性検討を行い，ヘリカルコイル+フルードヘッド型二重管SGのフィージビリティを評価した。

①基本概念の検討

2次系削除プラントの概念構築にあたって，従来の2次系有プラントからの相違点をもとに安全設計，システム設計からの留意すべき点を明確にすべく図2に示すように整理し，2次系削除プラントの全体構成，SG，原子炉構造及びリーク検出系の構築を行った。2次系を削除するプラント系統図を図3に示す。また，このプラント概念の構築のための諸要求条件の成立にはSGにて対応が可能であることが評価され，その要求事項をまとめるとともにSG構造概念を図4に示した。

ヘリカルコイル+フルードヘッド型二重管SGを採用した2次系削除プラントのフィージビリティを評価した結果，

- ・二重管SGのリーク検出性能は，本SGがフルードヘッド構造を採用しているため，湿分並びに圧力監視のためのヘリウム室の体積を小さくできることから，内管破損時にて約6分，外管破損時の圧力監視でも約85時間でリークを検出できる可能性がある。また，圧力監視システムを分割ブロック化することにより，リーク検出時間を短縮できる。
- ・2次系を削除することによる経済性効果については，2次系冷却設備の削減とそれに伴う原子炉建屋のコンパクト化，逆にSGの重量増加及び配管，SG安全設

備等を相殺して全体として約4%の削減効果が期待できる。

②管一管溶接構造の検討

ヘリカルコイルを採用したSGの二重管は約70m程度の長尺管になり、現状の管製造技術ではほとんど不可能に近い。このため、二重管同士を溶接して接続する必要があることから、二重管の管一管溶接方法の検討を行った。図5に管一管溶接構造をフルードヘッド構造と合わせて示す。まず、管の溶接継ぎ手構造を対象とした片側溶接に関する基礎的な検討を実施し、内管としてU開先外面TIG溶接、I開先EBW及びI開先内面TIG溶接、外管用としてインサートリングを用いた外面TIG溶接及びリングピース付外面TIG溶接を適用できる見通しをつけた後、ヘリカルコイル部、接続配管部、フルードヘッド

部の3ヶ所の二重管溶接試作試験を実施した。この結果、二重伝熱管に要求される機能の構造の健全性、リーク検出用流路の確保が満足されており、ほぼ管一管溶接構造成立性が見通しが得られた。

③フルードヘッド構造試作検討

SG内部の伝熱管はリーク防止のため二重管構造になっているが、SG外は単管構造として各伝熱管毎にヘリウム室を設けている。このため、SG胴を伝熱管が貫通する場合の構造（フルードヘッド構造）を検討する必要がある。このため、構造の試作を行い、溶接条件（予熱の有無、焼鈍方法）、ヘリウムリーク状況、組織観察及び強度等に関する評価検討を行った。その結果、各試験にて有意な問題は認められずフルードヘッド構造の成立性が見通しが得られた。

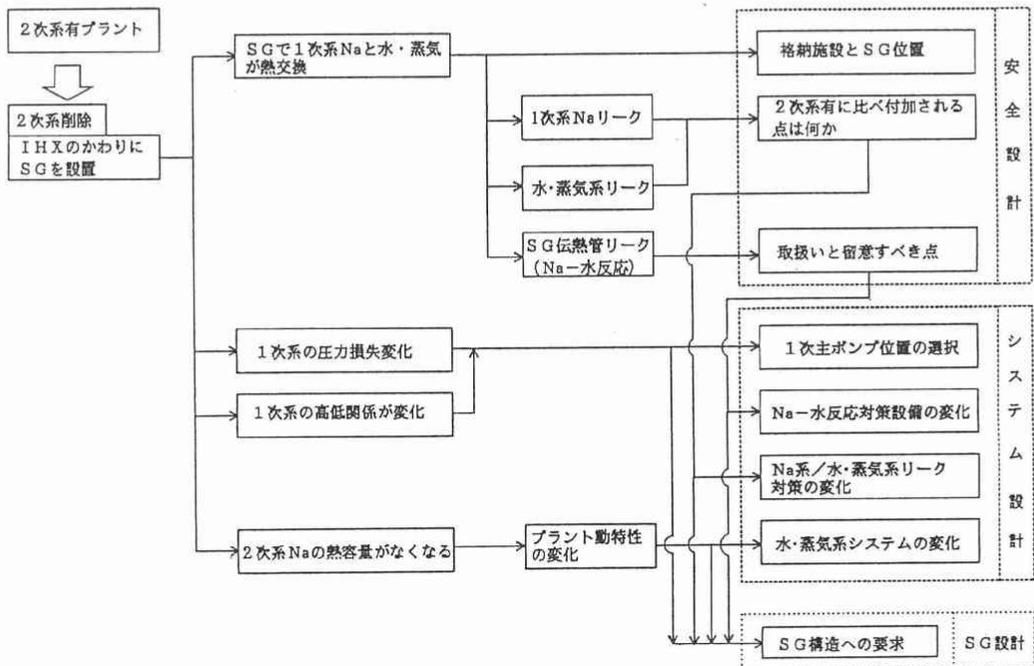


図2 2次系削除プラントに関する基本的な留意点

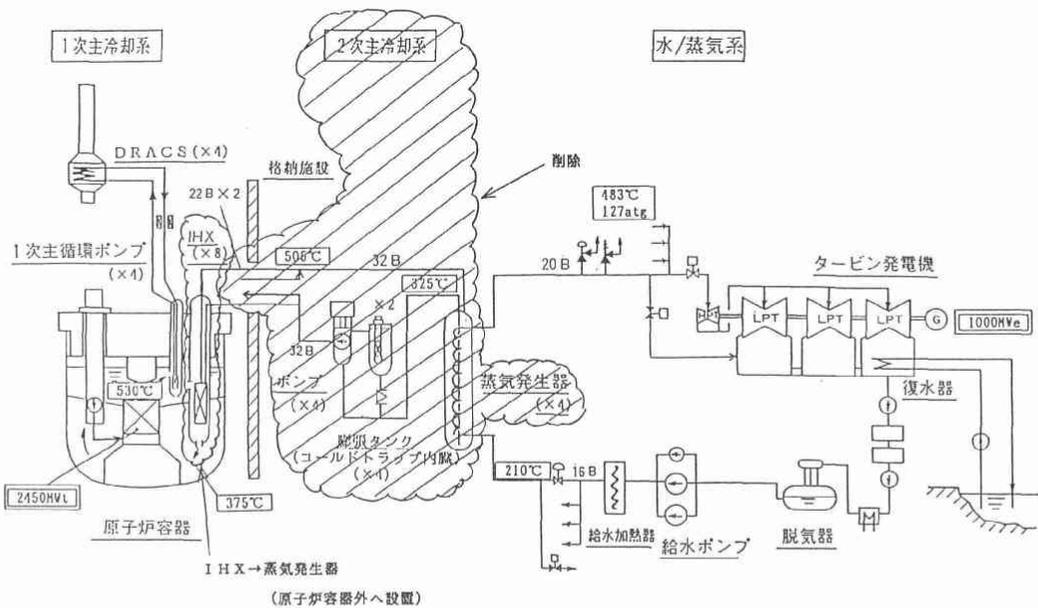


図3 2次系削除の導入効果—冷却系—

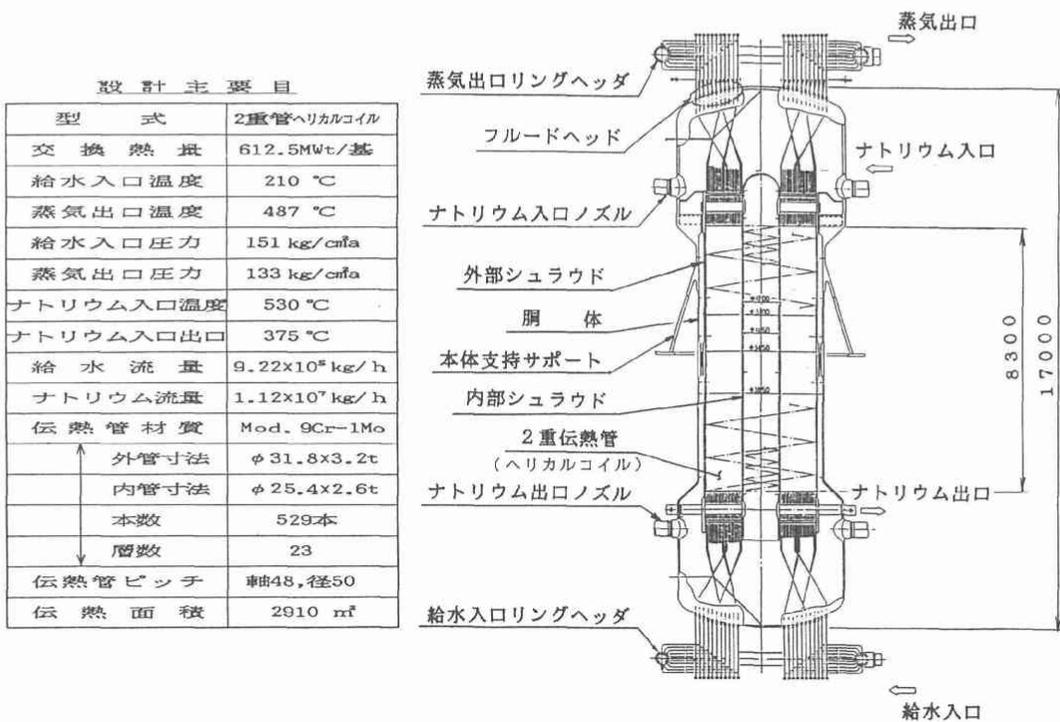


図4 ヘリカルコイル+フルードヘッド型2重管SG構造概念

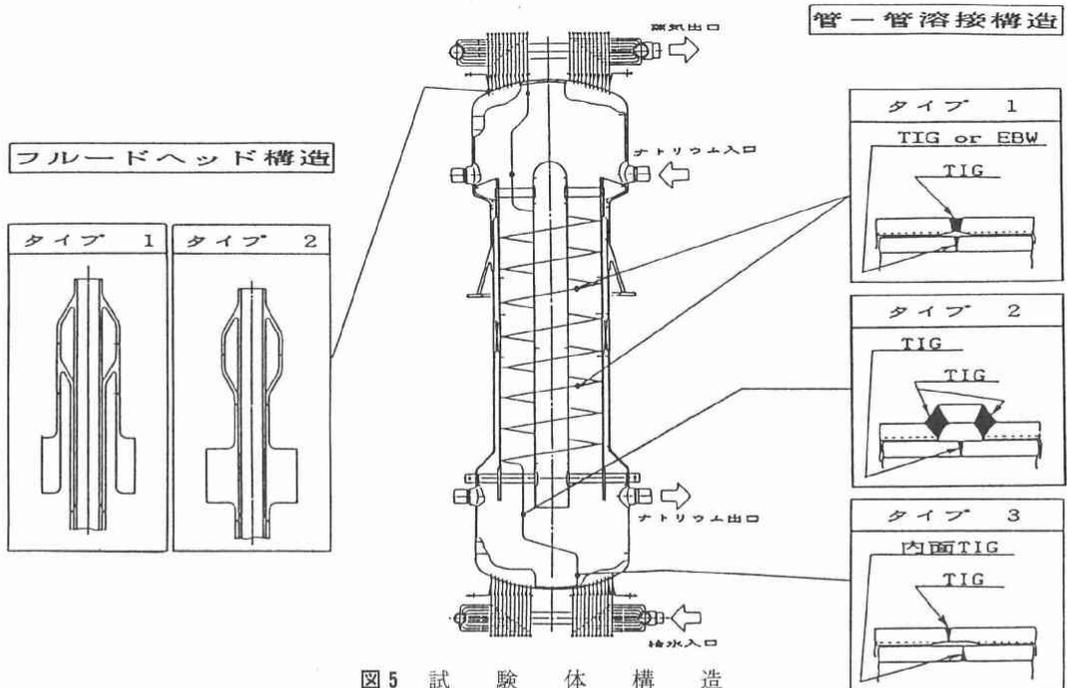


図5 試験体構造

④評価

ヘリカルコイル+フルードヘッド型二重管SGの成立のために必要な技術課題である管一管溶接構造、フルードヘッド構造の製作性、健全性等の見通しは得られたが、今後は伝熱管リークの早期検出及びリーク管の同定等の検討が必要である。

2) ラップ管削除型炉心の開発

ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料を用いたFBRにおいて、軽水炉と競合できる低燃料サイクルコスト型炉心を実現するためには、高燃焼度・長寿命型炉心の開発を行うことが要求される。いままでの研究から、FBRにおいても軽水炉PWR燃料のように燃料集合体のラップ管を削除した炉心概念がこれらの低サイクルコスト化を満たす1つの有望な概念であることが判ってきている。

本検討においては、ラップ管削除型炉心・燃

料集合体の構造概念ならびにその合理化効果を明らかにするとともに、ラップ管削除型炉心成立性のための重要因子である流体力学的保持力(HHD力)を評価するための炉心内水流動による基礎的な調査を実施し、ラップ管削除型炉心のフィージビリティを検討した。

①炉心特性及び構造の検討

燃料集合体からラップ管を削除すると炉心の中性子経済がなくなり、燃料の高燃焼度化、プラント運転サイクルの長期化等経済性向上効果が期待できる。

ラップ管削除型炉心の効果及び燃料概念を表2、ラップ管削除型炉心の仕様を表3に示す。

ラップ管削除型炉心を現在検討中の実証炉(1000MWe)に適用した場合を想定して検討し、以下の結果を得た。

・核特性

経済性に寄与する運転サイクル間隔、増殖比、燃焼反応度等を検討するとともに、

線出力密度，ナトリウムボイド反応度の低減化検討を行い，大幅な経済性向上が期待できること，あるいは安全性向上に関する反応度係数の改善が可能であることを確認した。

・熱流動特性

炉心全体及び集合体内の熱流動解析を実施し，燃料集合体間ギャップの適正化，炉心外側の構成要素のラップ管型化，燃料スペーサ枚数の炉心最外周での増加により，ラップ管削除型炉心の冷却性は従来炉心と同等にできることがわかった。また，自然循環時，流路閉塞時でも冷却材の最高温度が従来炉心並みかそれ以下であることを確認した。

・燃料構造の検討

燃料構造のクリープ損傷和(CDF)，燃

料要素湾曲等の検討を行い，高燃焼度化のためには高強度，低スエリング材の開発及び燃料要素長の増加によるガスプレナム体積の増大が必要であることがわかった。

また，燃料の湾曲，燃料の引き抜き力の概略評価を行い，成立の見通しを得た。

・経済性向上効果の検討

炉心寸法及び集合体配列ピッチをラップ管型と同一として，燃料集合体からラップ管を削除して燃焼度，運転サイクル間隔を検討すると，

燃焼度：

90GWd/t → 140GWd/t (+50%)

運転サイクル間隔：

12ヶ月 → 21ヶ月運転 (+9ヶ月)

の高燃焼度，長期運転サイクルが可能となり，経済性向上効果として，燃料サイクル

表2 ラップ管削除型炉心の効果及び燃料概念

- | |
|--|
| <p>1. 中性子無駄吸収低減による炉心内部転換比向上</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 高燃焼度炉心の達成 ◦ 長期運転サイクル達成 <p>2. 炉心圧損低減</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 主循環ポンプ小型化 ◦ 所内動力低減 <p>3. 燃料集合体流路閉塞事故ポテンシャルの排除</p> <p>4. 燃料サイクルコストの低減
(燃料集合体の製造/再処理コスト低減)</p> |
|--|

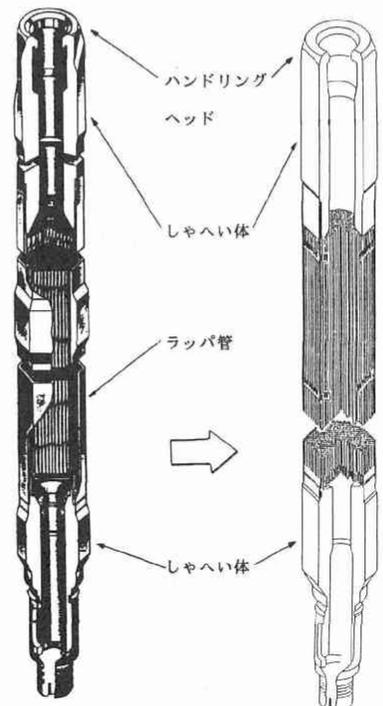


表3 ラッパ管削除型炉心のシステムまとめ

	項 目	仕 様
炉 心	炉心型式	軸方向非均質炉心
炉心燃料	型 式	ラッパ管削除型
	集合体支持	コーナロッド型
	スペーサ型式	グリッド型スペーサ
	HHD力増強用ベント方式	エントランスノズル内ベント管
	燃料物質	混合酸化物 (将来は金属, 窒化物等)
	燃料材料	高温強度保有, 低スエリング材料 (フェライト系材料)
ブランケット燃料	型 式	ラッパ管型
	スペーサ型式	ワイヤスペーサ
可動遮蔽体	型 式	ラッパ管型
	遮 蔽 材	SUS及びB ₄ C
制 御 棒	型 式	ラッパ管型あるいは収納円管型
	制 御 材	B ₄ C
流量配分	炉 心 部	集合体のスペーサ枚数を炉内位置で 変え、調整(最外周 → 多い)
	他の炉心構成要素	入口部のオリフィスで調整
炉心耐震方式	水平方向	燃料上部耐震パッド設置 (水平免震方式)
	軸 方 向	HHDにより燃料浮上がり抑制

コストを約30%低減、プルトニウム消費量、燃料製造数、再処理量を約40%低減できることがわかった。これらのラップ管削除型炉心とラップ管型炉心との炉心特性比較を図6に示す。

また、燃料ピンを太径化することにより、燃焼度は約190Gwd/tを達成し得る高燃焼度化、運転サイクル間隔は約48ヶ月に達する運転サイクル長期化の可能性がある、反対に細径化により、炉心径の約10%コンパクト化の可能性があることがわかった。以上のラップ管削除型応用各種炉心の比較を図7に示す。

・安全性向上効果の検討

ラップ管型炉心と同じ径で、径方向ブランケットを削除することにより、ナトリウムボイド反応度、燃焼反応度及び線出力密度等の安全性関連特性を向上させることができた。しかし、運転サイクル等経済性向上効果を抑制する結果となった。

②水流動による基礎的な調査の実施及びHHD力の評価

ラップ管削除燃料集合体の水による流動状況の検討を実施してHHD力を把握するとともに、HHD評価式、漏洩流量評価式、圧損評価式の妥当性を確認した。

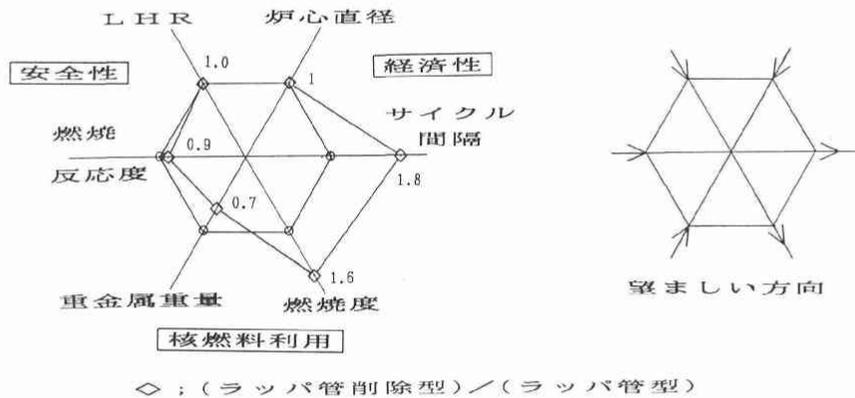


図6 ラップ管削除型炉心とラップ管型炉との炉心特性比較

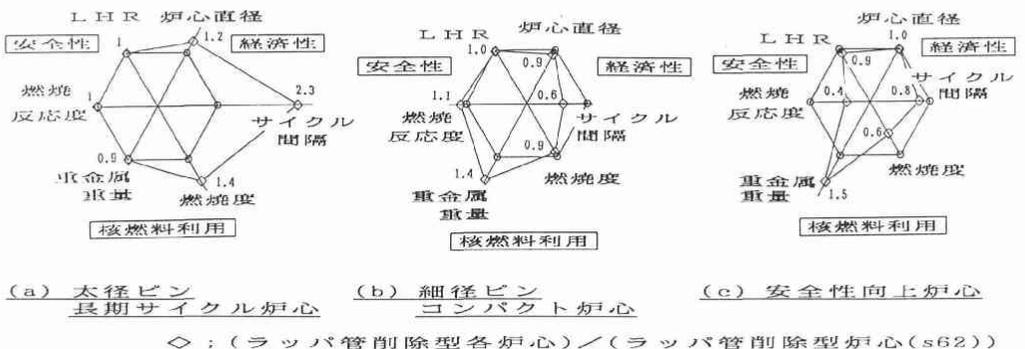


図7 ラップ管削除型応用各種炉心の比較

また、この評価式により、実機体系におけるHHD力の成立範囲の検討を行い、地震時の上向き加速度0.5G程度まで成立するとの見通しを得た。同時に実機におけるベント構造を提案し、その成立性を明らかにした。

3) FBR高温高効率システムの開発

FBRの経済性を軽水炉と同じ程度のものにしていくためには、設備の合理化等による物量低減の検討も行われているが、熱効率の向上等高度な技術を用いた経済性向上の努力も必要である。FBRが冷却材として使用しているナトリウムは、加圧することなく900℃程度まで高温化することが可能であることから、蒸気条件として軽水炉では達成できない火力並みの高温高圧化及び炉心燃料の改良による高燃焼度化の2つの方法にて経済性向上への可能性を有している。しかし、従来のFBRプラントでは、機器・構造成立性の観点から原子炉出口温度を500℃程度、プラント効率も38%程度に留まっている。

本調査検討では、高温・高効率化が経済性向上にどの程度効果を有するのか、またどのような問題があるのかを調査検討し、今後の

方向を探ることが重要であることから、プラントを高温・高効率化していくための設計及び設計手法の改善、合理化、新材料の適用等によりFBR高温高効率化システムの開発の可能性検討を行う。検討にあたっては、経済性向上とともに安全性の向上も重要な課題であるので、炉心の固有の安全性の検討も実施し、経済性と安全性双方の特性を有するプラント概念のフィージビリティを評価した。

①高温高効率ヒートバランスの検討

炉心熱出力を2600MWt、原子炉出口温度585℃、ループ型、冷却系は4ループとして、一体貫流型ヘリカルコイル型SG（再熱器使用）を採用したプラントを想定して、現在の火力並みの高温プラント（蒸気条件：温度539℃、圧力246kg/cm²）に高温・高圧化すると、タービン効率で従来のプラントの約1.13~1.10倍上昇することがわかった。さらに、再熱システムを採用することにより、タービン効率を2~5%アップさせることができた。

また、2次主冷却系の出入口温度を適切に設定していくことにより、IHXとSGの合計伝熱面積を最適化していくことができ、建設コストを最小限にしていくことが可能であ

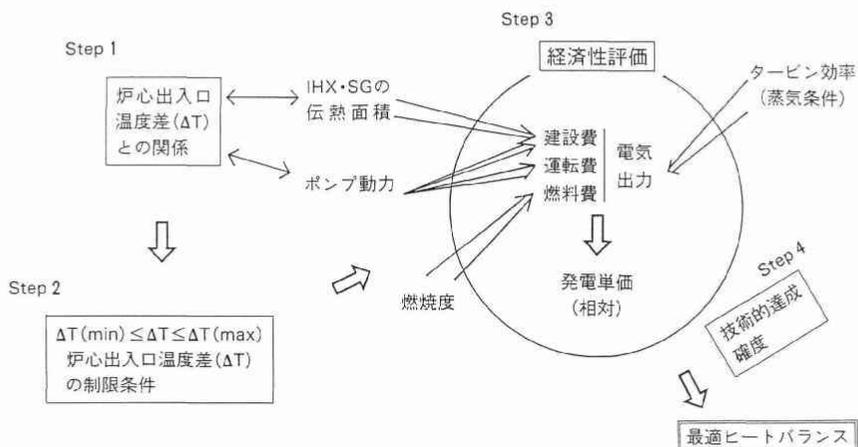


図8 最適ヒートバランスの設定手法

ることがわかった。経済的に最適なヒートバランスを設定していくために、炉心出入口温度差が大きな影響を及ぼすので、温度差に制限を与える因子の検討を行い、温度差を100℃～200℃の間が適切であるとした。最適ヒートバランス達成のための設定手法を図8に示す。

②炉心設計

プラントの高温化を実現する上で、炉心出口温度を向上させる必要があり、炉心温度が上昇することによる炉心許容限界温度との差

の縮小分を吸収する炉心設計の方策として、設計上考慮すべき炉心高温点因子の低減と燃料健全性判断基準となる許容限界温度向上の2点に着目して検討を行った。また、炉心の固有の安全性を確保していくことも重要であるため、合せて検討を実施した。

・全炉心高温点因子は図9の炉心高温点因子の低減目標にあるように、炉心流量分布特性改善、集合体構造革新による集合体内の温度場平坦化及び高温点不確かさ評価方法

炉心高温点因子 (G) の低減

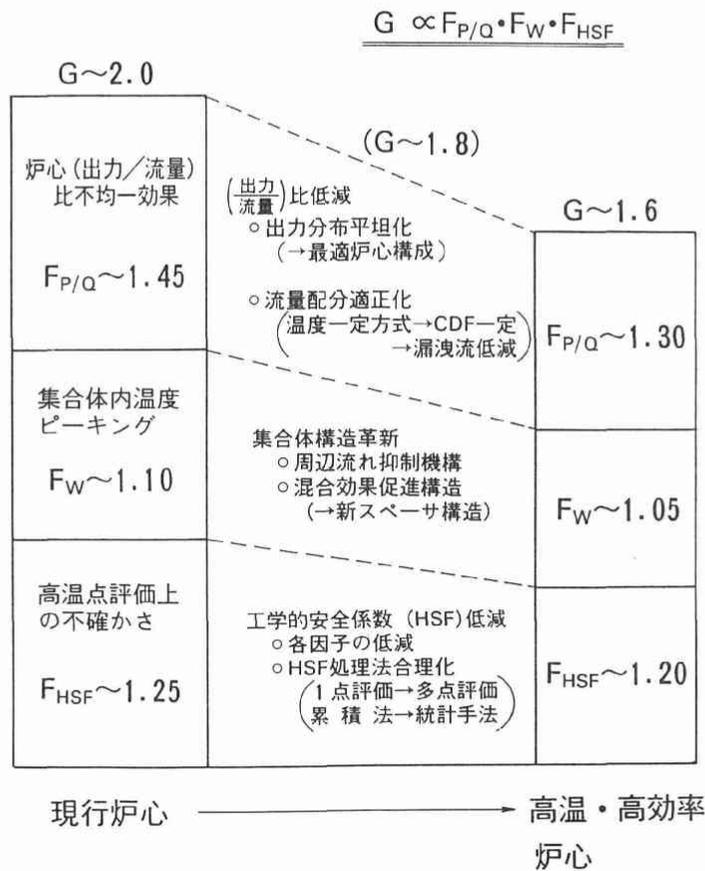


図9 炉心高温点因子の低減目標

の合理化の検討を行い、現行値（～2.0）から585℃炉心達成のための値（～1.6）に低減できる見通しを得た。

- ・燃料許容温度については、耐高温材料の開発、燃料損傷評価手法の合理化が重要な方策であると考え、高温炉心の燃料集合体の材料候補の選定、炉心高温化の観点からの設計評価関数の選定及び損傷限界の評価を実施した。
- ・炉心固有の安全性の検討では、図10に示すように固有の安全性を持つ炉心概念の方向付けからポイントとなるNaボイド反応度の低減策の検討を行い、偏平炉心、減速材増加炉心及び燃料体積比評価から、Naボイド反応度が零となる炉心（偏平化炉心、分割型炉心）の主要仕様を設定した。
固有の安全性を有する高温化炉心を構築す

るために、固有安全炉心と高温炉心の整合を図り、安全性重視型炉心と性能成立性重視型炉心を提案し、図11に従来型炉心との比較をした。

③機器設計

炉心高温化に伴う重要な機器として、原子炉容器、SGを代表的に選び、構造成立性の検討を行った。

・原子炉容器

液面近傍部の構造健全性及び原子炉構造の耐座屈性について評価し、昇降温速度の制限、または構造強度余裕の低下はあるが、成立性の見通しはあることがわかった。

・SG

管板型の管板構造の応力評価が厳しいと考えられているが、製作性、ISI等からフルードヘッド型よりも現状の管板型の方を選定した。

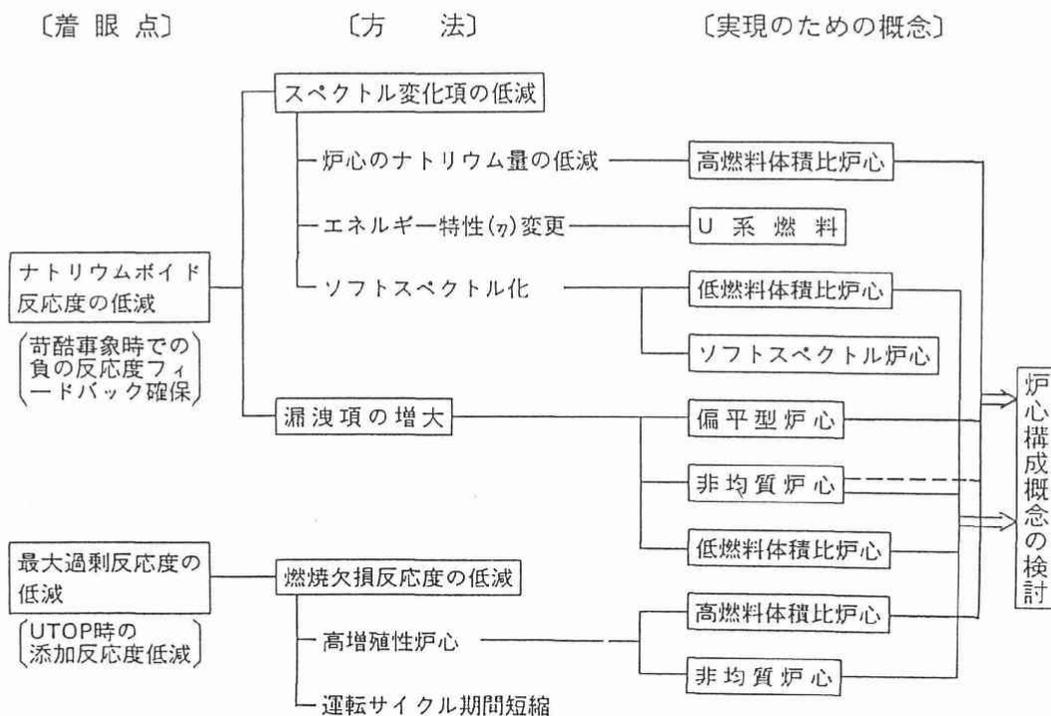


図10 固有の安全性を持つ炉心概念の方向付け

目標とする炉心の定義
 S1: 究極の安全性重視型 ($\rho_{max} \leq 0$) 炉心
 S2: 成立性と安全性重視型 ($\rho_{prior} < 0$) 炉心
 H: 高温高効率炉心 (585°C炉心)

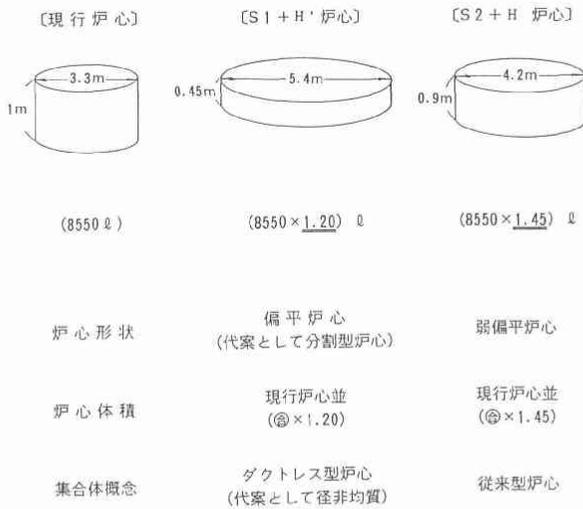


図11 炉心概念の構築 (固有安全性+高温高効率)

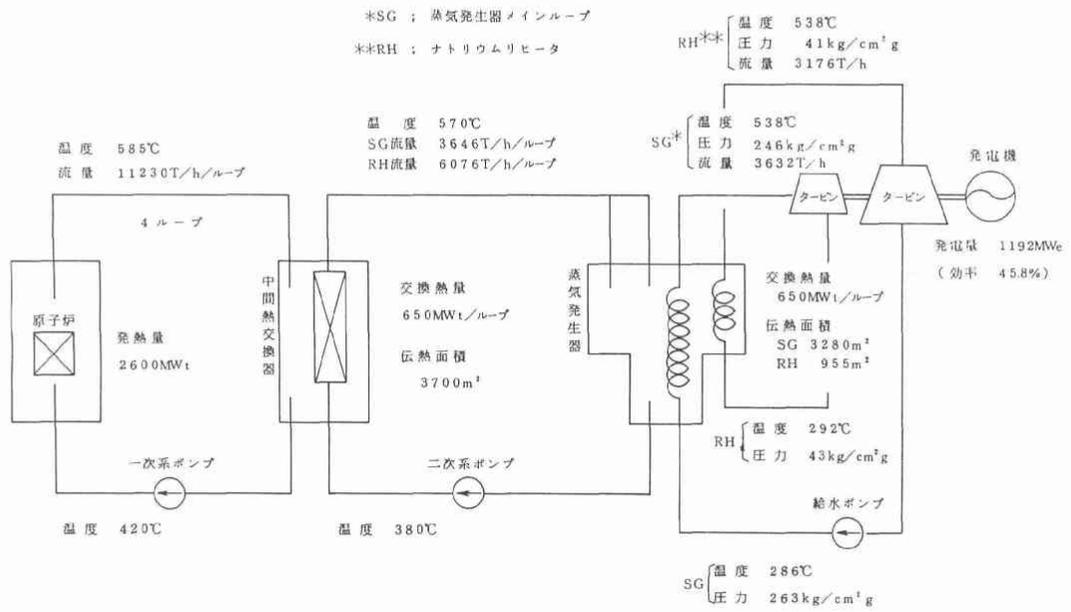


図12 高温高効率プラント最適ヒートバランス (再熱システム有り)

④総合評価

高温高効率ヒートバランス, 固有の安全性を有した高温炉心及び機器設計に関する評価検討を行い, 再熱システムを有した高温高効

率プラント最適ヒートバランスを図12にまとめた。

さらに, 経済性, 運転性及び構造健全性を含めた評価の結果, 従来のプラントと比較し

て発電原価を約10%安くできることが可能である。この評価は経済性が中心であったが、プラント全体のヒートバランスとしてはシステム運転性、補修性、プラント建設コスト等総合的に評価して決めていくことが重要である。

また、タービン効率についてはリヒータを設置することにより、効率を45.7%までアップ、炉心は固有の安全性を有した高温炉心を構築することができた。

4) 小型モジュラ型FBRの日本への適用性に関する調査検討

(PRISM, SAFRに係わる検討)

FBRの開発の方向としては、これまでスケールアップ効果による経済性向上を指向した大型炉の開発が主流になってきている。しかし、近年米国で研究が進められている小型モジュラ型FBR (PRISM, SAFR) は、高い固有の安全特性を有すること、小型で免震構造が容易であること等いろいろな長所を持っており、またモジュラ化することによる設計標準化、量産化あるいはコンパクト化することにより、経済的に大型炉と競合できる可能性をも有している。

一方、我が国における将来の原子力開発の状況を考えてみると、電力需要への柔軟な対応、発電所立地の制約等があり、大型炉のみの推進では難しくなる可能性がある。小型モジュラ型炉については、将来における法規制の改善、安全性の向上または社会的な受容性の変化により、狭い敷地での立地、高い安全性等国土の狭い我が国への適用には有利な面がある。

本調査検討では、米国で研究が進められているPRISM, SAFRの小型モジュラ型FBR

を参考に、日本の事情に適合させたシステム概念の明確化、検討すべき課題の整理及び開発の方向を検討し、そのフィージビリティを調査した。

①適合性評価因子の抽出、評価

日本で運転している原子力プラントは軽水炉が主力となっており、将来炉としてFBRの開発が進められている。また、プラントの出力規模もさまざまである。このような中で、小型モジュラ型FBRがどのように適合していくのか、将来炉のニーズも考慮しつつ調査検討していくため、日本への適合性の考え方をまとめ、図13に示した。この考え方をベースにして、原子力プラントの開発、計画を進めるにあたって、当面検討課題となり得る因子として次のものを抽出し、小型モジュラ型FBRの日本への適合性評価を行った。検討した因子は次のとおりである。

- ・電力需要からみた評価
- ・立地の多様化からみた評価
- ・炉心特性からみた評価
- ・安全性からみた評価
- ・経済性からみた評価
- ・運転・保守性からみた評価
- ・核燃料サイクルからみた評価
- ・他設備への利用からみた評価

②適合性評価

合計8ポイントからみた小型モジュラ型FBRの日本への適合性評価を行った結果をまとめてみると、小型化ゆえに日本のような面積の小さい国において、立地の多様化が望めること、この点に関しては日本では特に経済性追求のために大型化指向となり、遠隔地立地が主流となっているが、小型炉はFBRの安全特性をさらに向上させていくとともに、

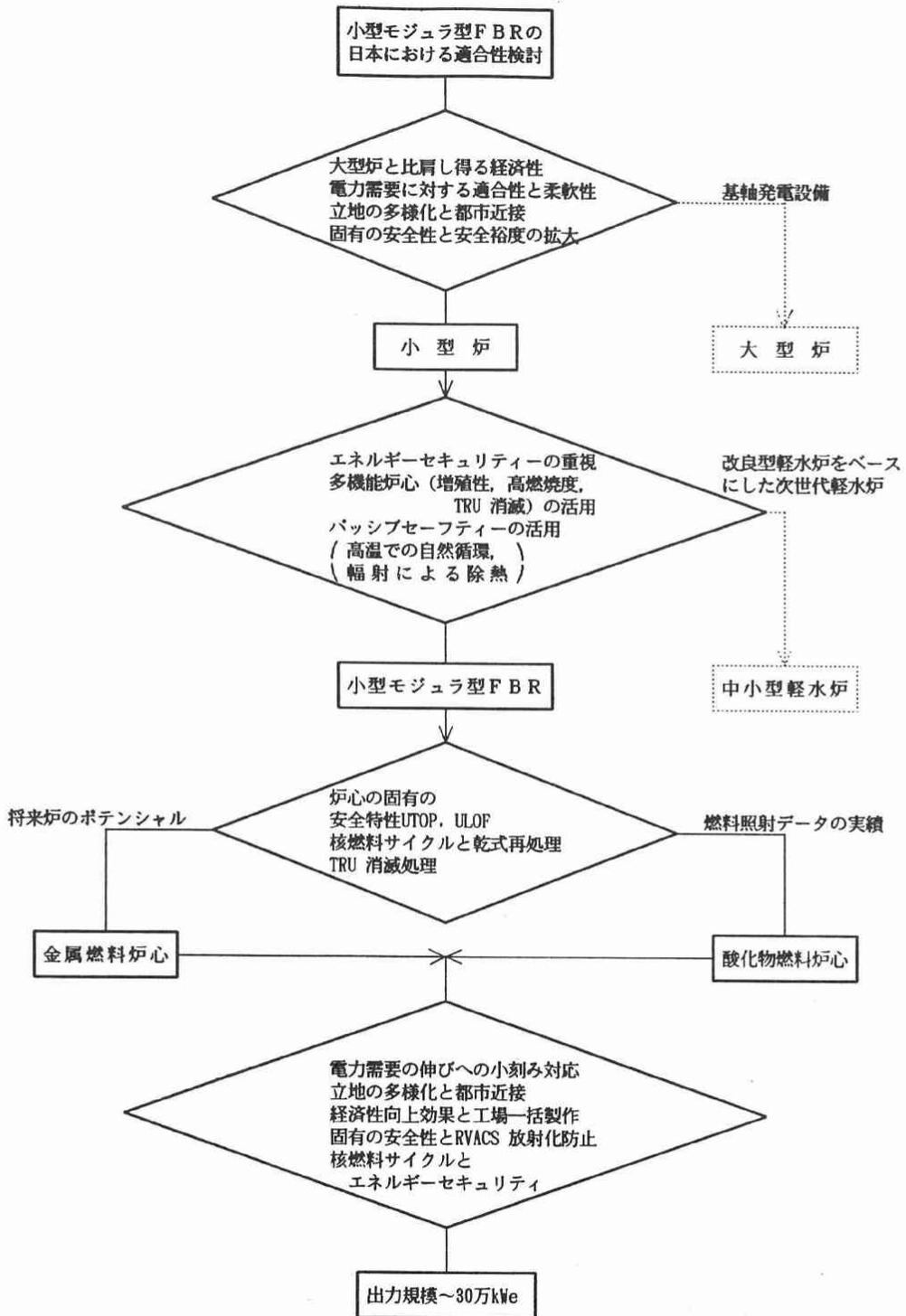


図13 小型モジュラ型FBRの日本における適合性の考え方

法規制の改善，社会的に原子力の必要性が認識されていくことにより需要地近接立地，例えば火力発電所跡地のような狭い場所での立地も可能となる要素があることがわかった。また，経済性の確立は導入のための絶対的な要素であるが，モジュラ化，コンパクト化及び設計を標準化していくことにより，工場製作性及び建設性でコスト低減を図ることができ，大型炉との競合が可能である。

また，小型モジュラ型FBRの出力規模については，需要地近接のように狭い場所でのサイトを考慮した立地の多様化ニーズ，経済性向上のために，2次系1ループ化，原子炉構造，SGの工場一括製作及び輸送限界等を検討し，これに固有の安全性，自然循環方式による除熱等の安全上の革新性とFBRとし

ての増殖性に関する炉心特性を加味して，約30万KWeクラスの出力のものが適切であるとした。各因子及び炉心安全特性から見た日本における小型モジュラ型FBRの出力規模評価のまとめを表4，表5に示す。日本における海岸立地条件や今後の電力需要の増大及びスケールデメリット効果の抑制を勧奨すると，日本に適合する中小型炉の出力規模は米国のPRISMクラスのものよりも大きい方が適していると言える。

ただし，他産業への利用については，FBRがあまり高温でないこと，水が比較的入手し易いこともあり，発電以外の熱源，造水プラントへの利用等ニーズは少なく，この方面の小型モジュラ型炉の適用性は望めないことがわかった。

表4 日本における小型モジュラ型FBRの出力規模の適合性

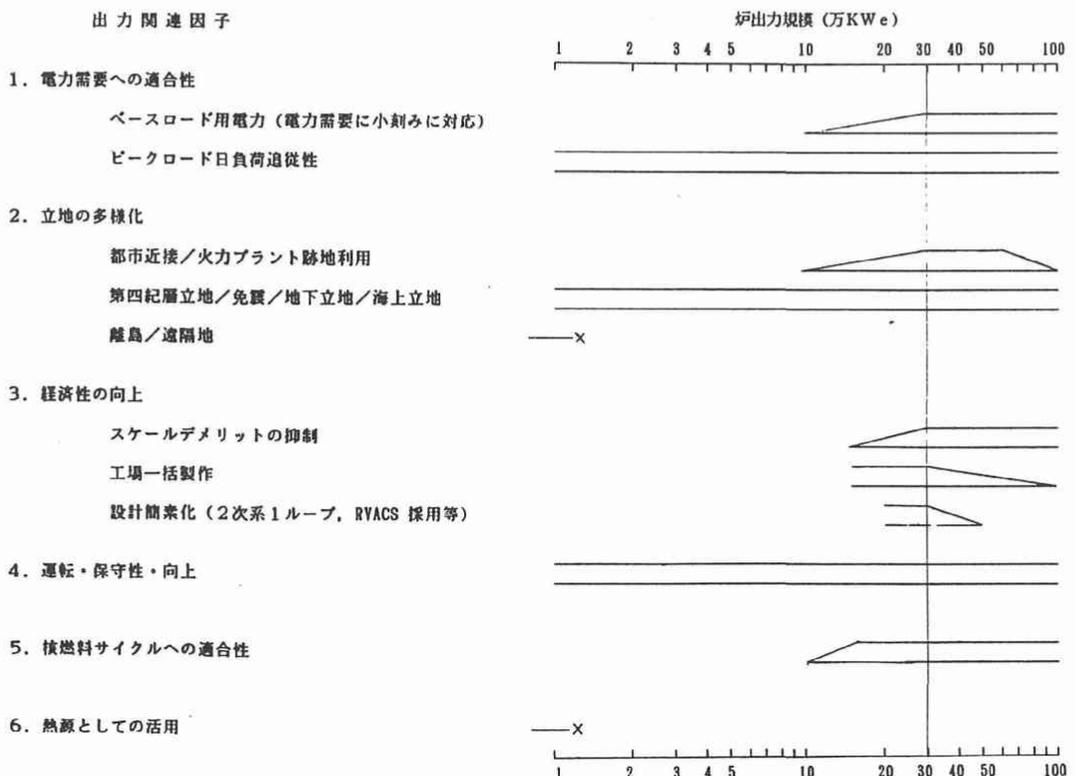


表5 炉心安全特性の出力依存度

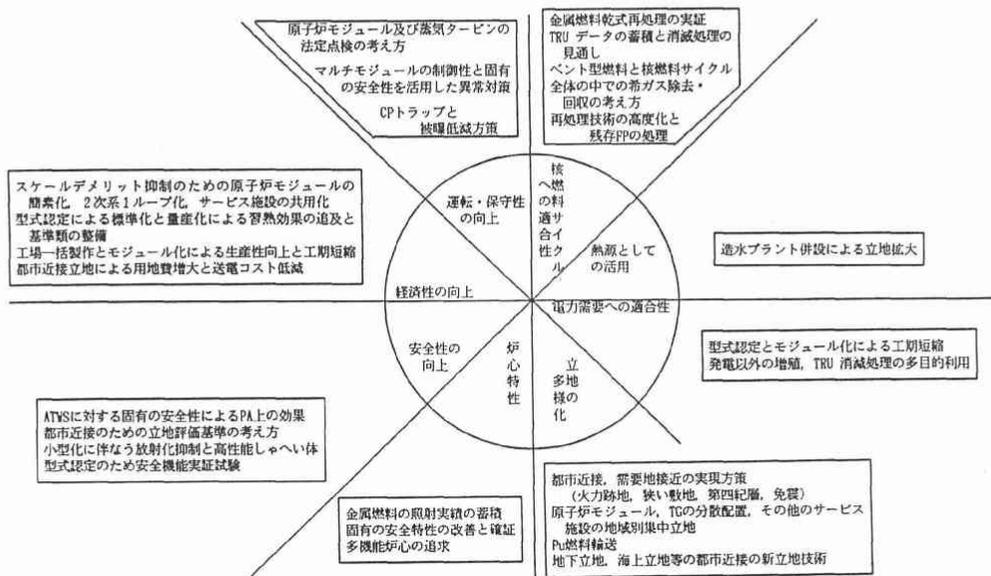
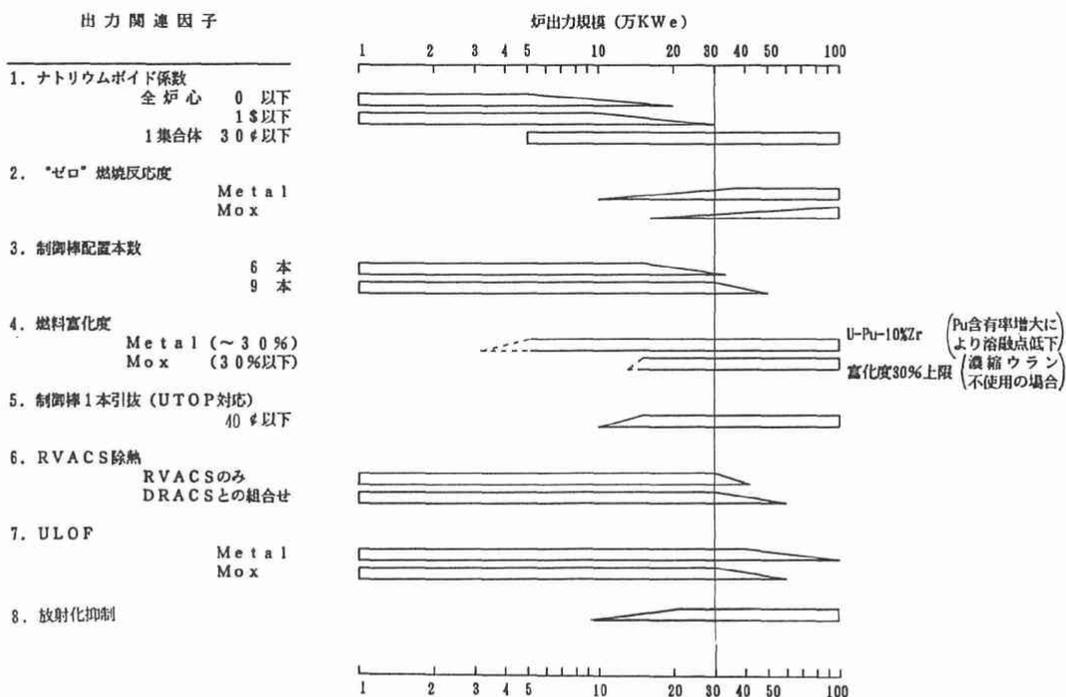


図14 小型モジュラ型FBRの日本における適合性向上のための課題

③適合のための検討課題の整理

日本に適合させるために、将来とも検討していくべき課題を図14に示すとおり整理した。この課題の中で、小型モジュラ型炉が導入されるために、将来にわたって検討すべき主なものは次のとおりである。

- ・標準化、量産化のための型式認定化
- ・工場一括製作と工期短縮の追求
- ・立地評価の考え方の検討（Pu輸送、需要地近接立地）
- ・社会的受容性の検討

3.2 基盤技術に関する新技術

1) ポンプ-IHX合体型機器の開発

FBR実証炉は軽水炉と競合するために建

設コストの低減を目標に検討を進めており、さらに大幅な合理化を図るための有効な手段の1つとして、現状単独で設置されている各機器の合体化が考えられる。ループ型FBRにおける機器の合体化が可能であり、建物、配管等合理化効果の大きいものとして、1次系及び2次系を構成する1次主循環ポンプ、中間熱交換器、SG及び2次主循環ポンプの組合せによる合体型機器の構想があげられる。それぞれの機器の相互関係を図15に示す。

本調査研究では、これらの機器の合体化の組合せの方向として、

- ・1次主循環ポンプ — 中間熱交換器
- ・中間熱交換器 — SG
- ・2次主循環ポンプ — SG

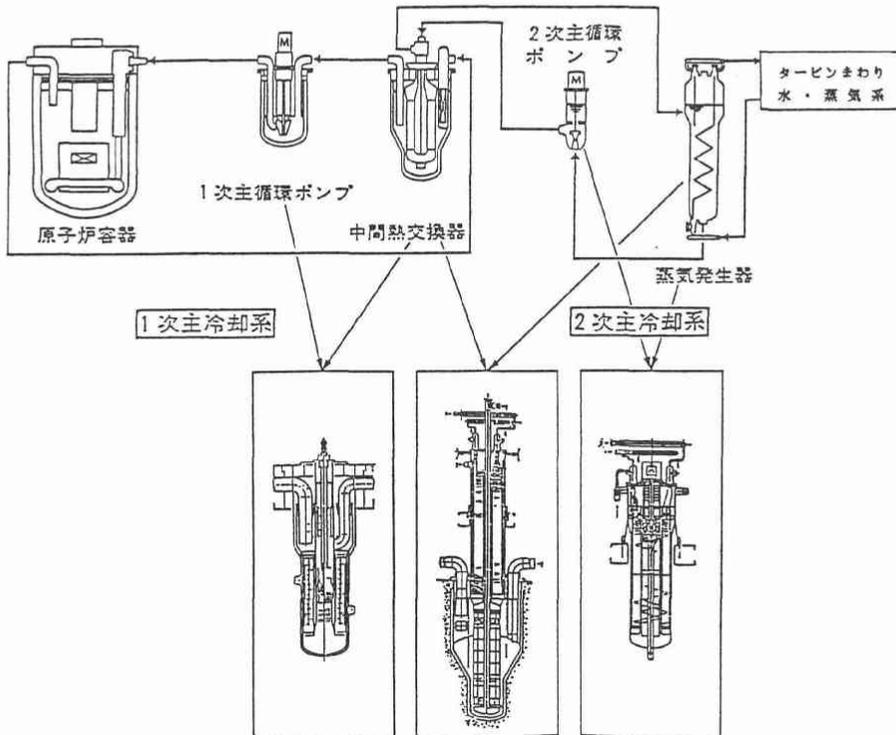


図15 合体型機器の種類

を考え、その中から構造的に比較的簡単で、取り組みやすい1次主循環ポンプ-中間熱交換器(以下ポンプ-IHX合体型機器という)を取上げ、その成立性について検討を行った。

①合体型機器概念の検討

ポンプの型式としては、機械式、電磁式の両方の型式が考えられるが、これらの型式によるポンプとIH Xの合体化機器を比較検討した。その結果、機械式ポンプ-IHX合体機器は振動に関する問題があり、この検討の必要性はあるが、ポンプとしての製作実績が十分あること、安全設計上特に問題がないこと及び合体型機器としてコンパクトにできることがわかった。電磁式ポンプは振動問題はないが、製作(安全設計を含む)、運転実績がなく、開発に時間を要すること、合理化効果が少ないことから、機械式ポンプ-IHX合体機器が適当と考えた。ポンプ-IHX合体型機器概念の比較評価結果を表6に示す。

②構造概念の検討

ポンプ-IHX合体型機器の構造を検討するとともに、機械式ポンプの基本的な問題となるポンプ軸系の振動解析を実施した。

軸系の振動解析においては、固有値の調整のため軸系剛性アップを図り、軸系の増加、軸受スパン(ポンプ長)の短縮化及び軸受剛性の検討を実施するとともに、ポンプ長の短縮化に伴い、ポンプ水力部の見直しを行った。ポンプ軸系固有値は軸回転数730rpmに対し固有値810rpmであり、軸系固有値が軸回転数の1.1倍の条件を満足することを確認した。

また、ポンプ構造はメンテナンス上の必要性から内部構造物を引き抜き可能な構造とするため、ポンプ胴側をラビリンス形状、IH X内部をフラット形状としたラビリンス型シ

ールリングとした。IH X側の構造としては、合体型機器のコンパクト化のため、管長を3.5m以内とし、問題となる管内の半径方向流配の誤差増加、胴側偏流増加の対策のためにジグザク流となる胴を考えた。

③合体による影響評価

合体化による影響として、最も重要と考えられる振動及び流動特性について解析検討を実施した。また、特に振動については合体機器のスケールモデルによる検討を実施し、解析シミュレーションの妥当性を検証するとともに、ポンプ振動によりIH Xの振動がどのように変化するかを検討した。実機合体型機器からの振動及び流動特性評価のためのモデル化範囲を図16に示す。

④評価

解析結果とモデル化による評価検討の結果を比較検討した結果、次のことがわかった。

・振動特性評価

固有振動数、振動モード及び振動応答とも実験値と解析値は比較的よく一致しており、解析モデル化(流体連成要素等の取扱い方)は妥当であった。

・流動特性評価

上部プレナム部の入口ノズル部にリングヘッドを取りつけることにより、液面でのガス巻き込み及びIH X管板での整流化は十分対応可能となる見通しを得た。

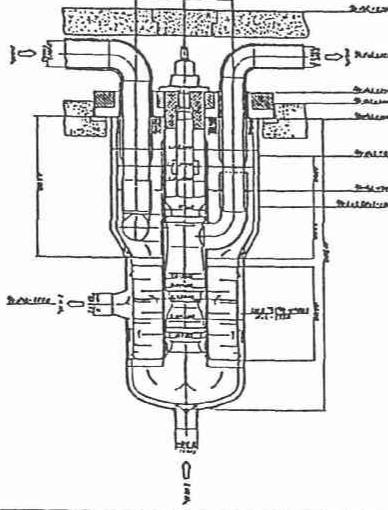
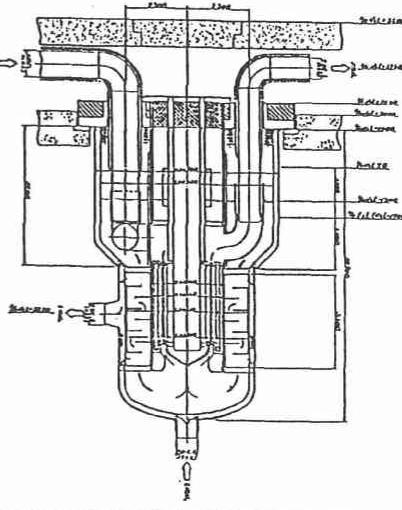
・保守

補修性評価従来型IH Xと作業量を比較した場合、18%工程が多くなるが、ポンプに係わる作業は合体しない場合と同等である。

・合体化効果

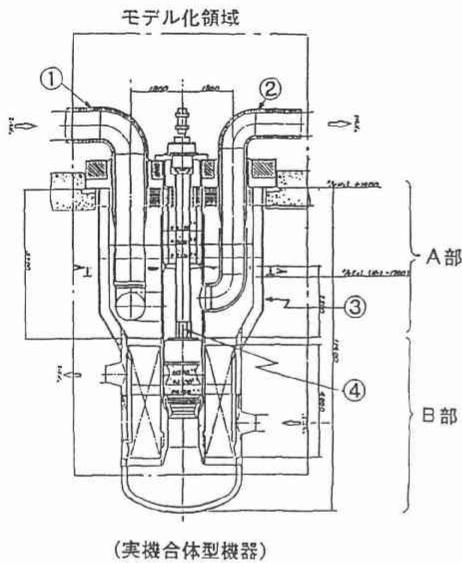
合体型機器の導入により、1次系/2次系建物の投影面積は約30%低減、1次/2

表6 ポンプ-IHX合体型機器概念の比較評価表

概 念	機械式ポンプ-IHX合体型	電磁式ポンプ-IHX合体型
構 造		
外形寸法	円形 $\phi 4.3\text{m} \times \text{H}10.9\text{m}$ (プレナム部： $\phi 5.0$)	円形 $\phi 5.0\text{m} \times \text{H}10.9\text{m}$ (プレナム部： $\phi 6.4$)
重 量	280TON	370TON
1次系ポンプ の実績	有	無
振動伝播	ポンプ振動の伝播について 検討要	ポンプが振動源とならない。
安全設計	特に問題なし	コストダウンが期待 できないので検討要
総合評価	◎ 振動伝播に関する 検討要だが、他 については電磁式ポ ンプより有利	○ 大容量化に当っ ての開発項目が多く、 かつ合理化効果が 小さい。また、安 全設計上の検討が 必要



機械式ポンプ-IHX合体型を選定



モデル化



- 縮尺 約1/6
- 材質 スチール
- 流体 水

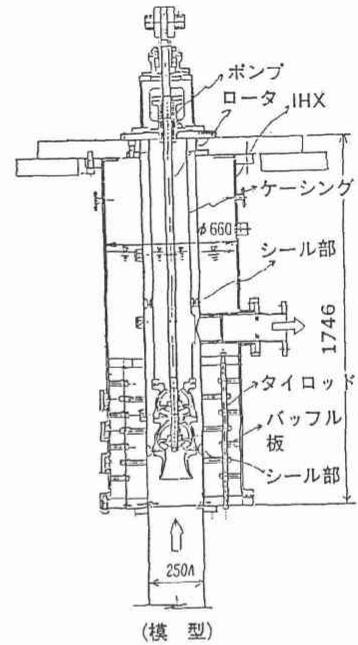


図16 モデル化の範囲

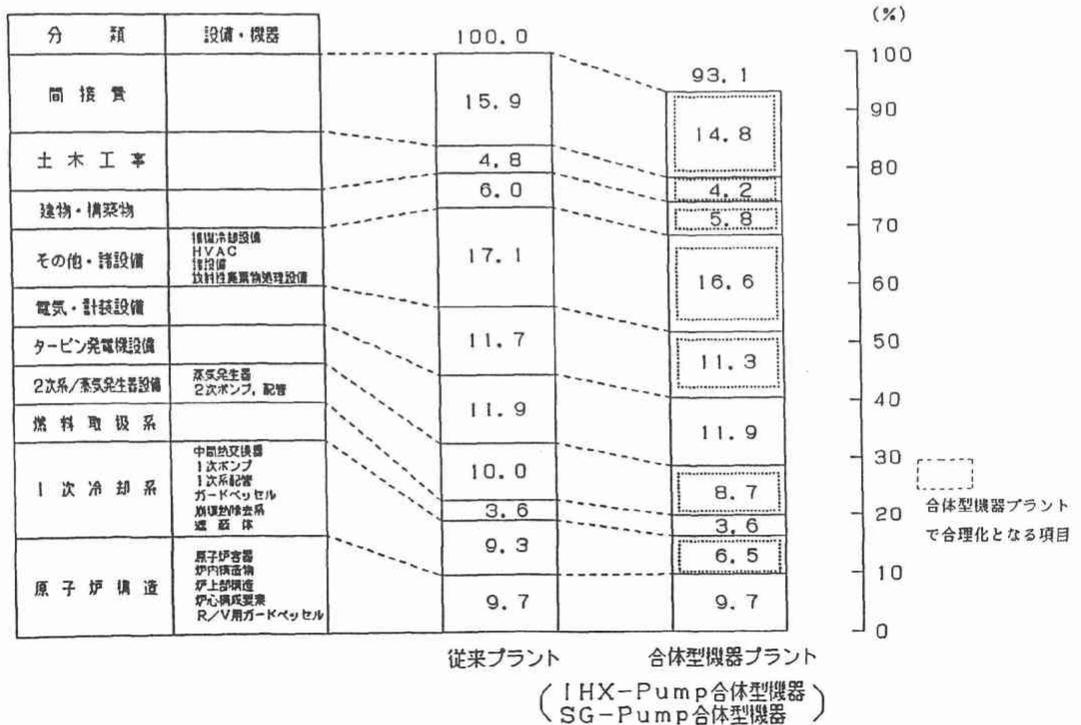


図17 建設コスト低減率評価図

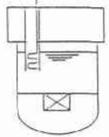
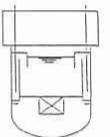
次冷却機器の物量は約25%，総合的な建設コスト低減は約7%となる見通しを得た。従来プラントと合体型機器プラントとの建設コスト低減率評価結果を図17に示した。

2) ヒートパイプのFBRへの適用に関する検討

ヒートパイプに関する技術は既に実用化されている技術であるが、それは比較的低温領域であり、高温領域では確立していない。このヒートパイプのもつ特徴をFBRの崩壊熱除去系及び二重管SGに採用できれば伝熱性能の向上と信頼性の向上を図ることができる。

崩壊熱除去系は炉停止後の炉心崩壊熱を除去するシステムであって、炉停止後に水・蒸気系のような常用系で熱除去が行えないような異常時、または燃料交換時、定期検査時にプラントを冷温停止状態に長時間保持する際に使用される。このため、崩壊熱除去系の機能喪失は仮想炉心崩壊事故の起因事象となる

表7 ヒートパイプDRACSの型式・設置位置の選定

型式	DHXタイプ	IHX内組込タイプ	壁冷部設置タイプ
概念			
運転性	通常運転時 510℃ ↓ 通常は作動させない(ヒートロス防止) ↓ かなり正確な自己制御が必要なVCHP*では難しい		通常運転時は 375℃ ↓ ヒートロスが小 ↓ 作動制御容易(VCHP)
HPへの適合性	△	△	○
適用炉型	ループタンク	タンク	ループタンク
RV物量への影響	直径増大	高さ増大	なし
伝熱管形状	ヘリカル	ヘリカル	直管 サーペンタイン
評価	ヒートパイプを応用し易く、RV物量への影響がない。 「壁冷部設置タイプ」を今後の検討のベースとする。		

*VCHP……Variable Conductance Heat Pipe

可能性が大きいので、この系には非常に高い信頼性が要求されてくる。崩壊熱除去系には、崩壊熱除去系の冷却材の流動の観点から、炉容器の1次冷却材との混合がある場合と混合がなく、完全に閉じた系内にある場合の2例が考えられ、後者のケースにヒートパイプを採用した場合、熱媒体が密閉型であるため基本的には信頼性が向上すると予想されている。ヒートパイプを適用した崩壊熱除去系の比較を表7に示す。また、二重管SGの適用は水/ナトリウム反応防止のために水とナトリウムの間の中間媒体として利用し、SGの信頼性向上を図ることができる。

本調査検討では、ヒートパイプの崩壊熱除去系と二重管型SGへの適用を目指し、基礎的な検討の実施により、ヒートパイプでの熱輸送能力の評価及びシステム概念の成立性へのフィージビリティを調査する。

(1) 崩壊熱除去系への適用検討

①概念の検討

ヒートパイプを炉壁に設置した場合、通常運転では低温ナトリウム領域(375℃)にあり、作動しないが、崩壊熱除去モード時の高温ナトリウム(540℃)で熱輸送が可能になればよい。このことから、ヒートパイプの作動領域を375℃←→540℃の広い領域で作動開始するように要求条件を設定した。

②ヒートパイプ成立性検討の実施と評価

ヒートパイプの作動媒体としての作動温度及び熱輸送能力の点から、水銀、カリウムを選定し、ヒートパイプ熱特性の評価のための加熱することによる基礎的な検討、ヒートパイプ適用性を見通しを得るためのナトリウム中での熱輸送性を確認するための検討を実施した。

加熱することによる基礎的な検討では、カリウムを使用したヒートパイプは崩壊熱除去系作動領域温度で音速限界が熱輸送能力を支配し、450℃以上の温度が作動開始となることがわかった。600℃における熱輸送能力は10⁷ kcal/m²h以上であった。水銀を使用した場合については、カリウムよりも大きい熱輸送能力を持っていることがわかったが、水銀は構造材との濡れ性に問題（熱抵抗が大）があり、製作性に課題が残されている。水銀を使用した場合のヒートパイプ温度分布及び熱輸送特性をそれぞれ図18、図19に示す。

ナトリウム中での熱輸送性を確認するための検討では、加熱部ナトリウムの温度分布はヒートパイプの特性に影響を与えず、非常に良好な応答特性を確認した。カリウムでは450℃以上、水銀では～300℃で作動を開始し、水銀では不凝縮性ガス封入により、除熱開始温度を制御できることを確認した。熱輸送量

はカリウム、水銀それぞれ最大14kW（設計値30kW）、19kW（設計値60kW）であった。また、水銀は濡れ性が悪いことからその能力を十分出していないため、濡れ性改善検討を行い、ヒートパイプの構造、添加剤、製作方法により改善できる可能性のあることがわかった。

水銀のぬれ性改善の検討では水銀にマグネシウムを添加するとぬれ性がよくなることがわかった。また、ヒートパイプ内部のウィックの改善等を行い、製作時前ぬらし作業等を工夫したが、条件の検討が必要である。

③システム評価

システム成立性の評価に必要な熱特性、信頼性及び媒体の放射化について、解析評価を実施し、ヒートパイプを適用した崩壊熱除去系の各評価事象に対する解析評価結果は燃料及び冷却材バンドリの健全性確保に必要な除熱が可能であることがわかった。また、媒体の放射化による遮蔽対策が必要であることが

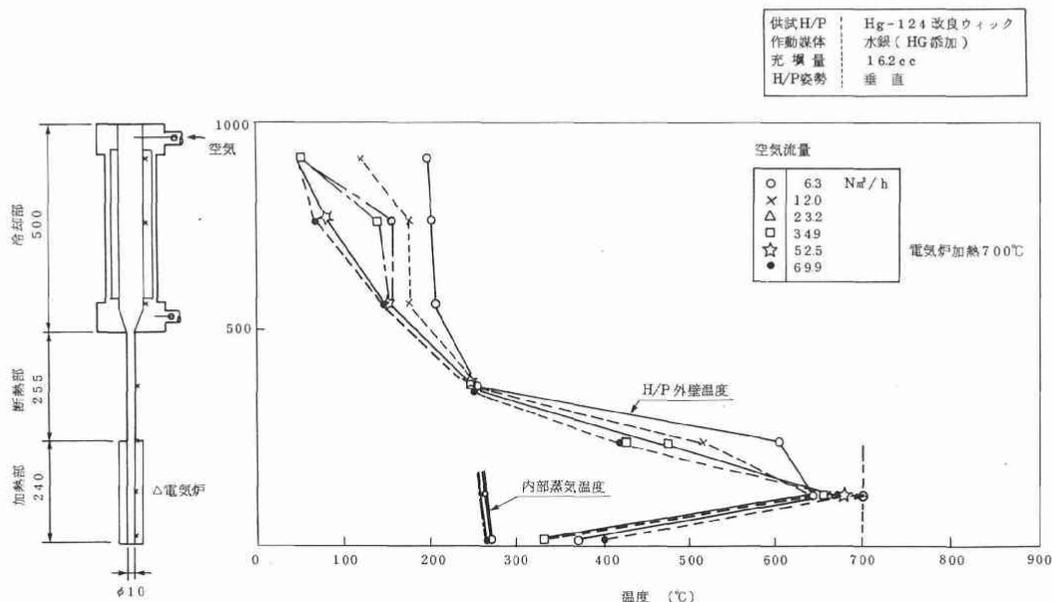


図18 ヒートパイプ温度分布

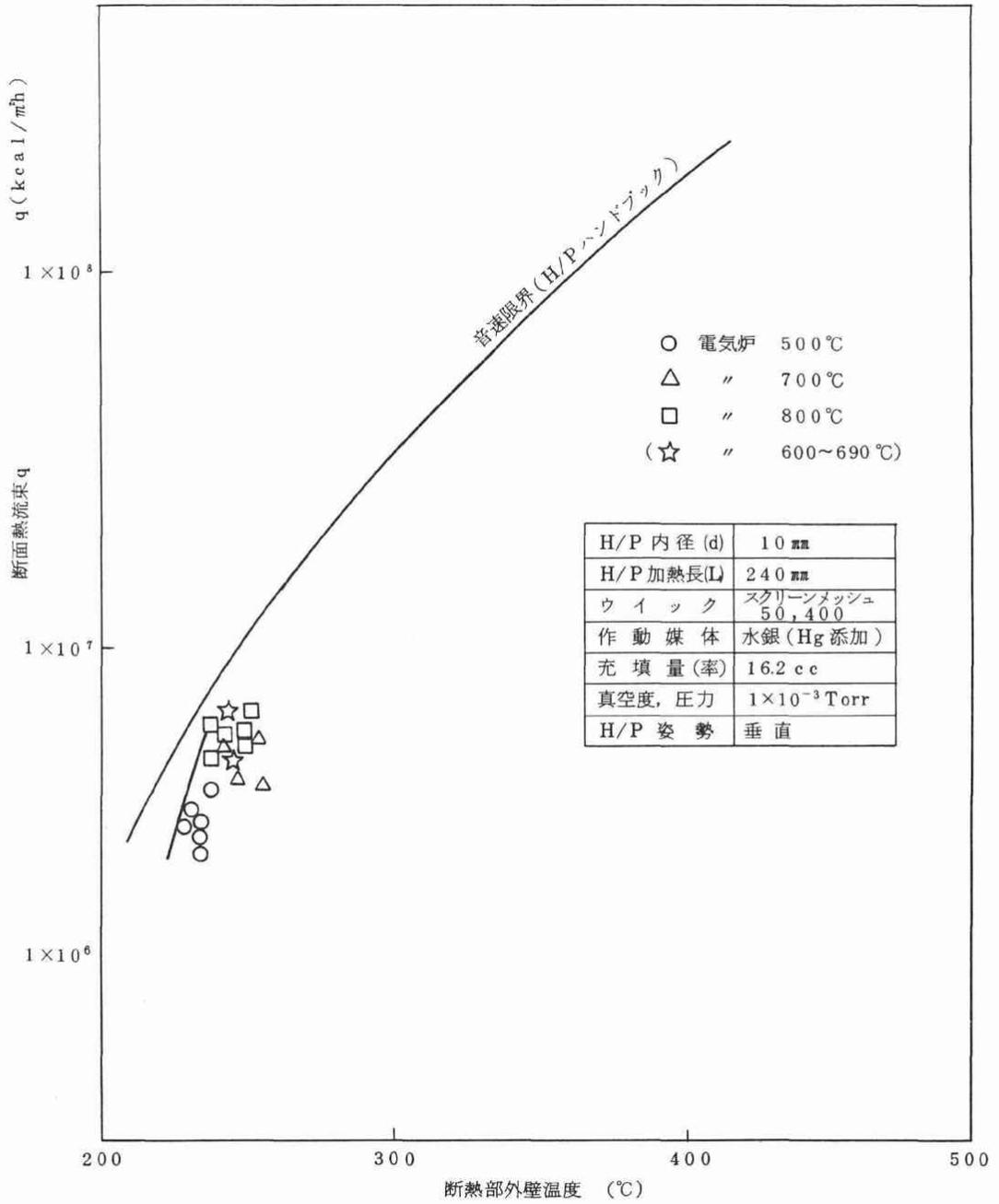


図19 ヒートパイプの熱輸送特性 (断熱部壁温 vs 熱輸送量)

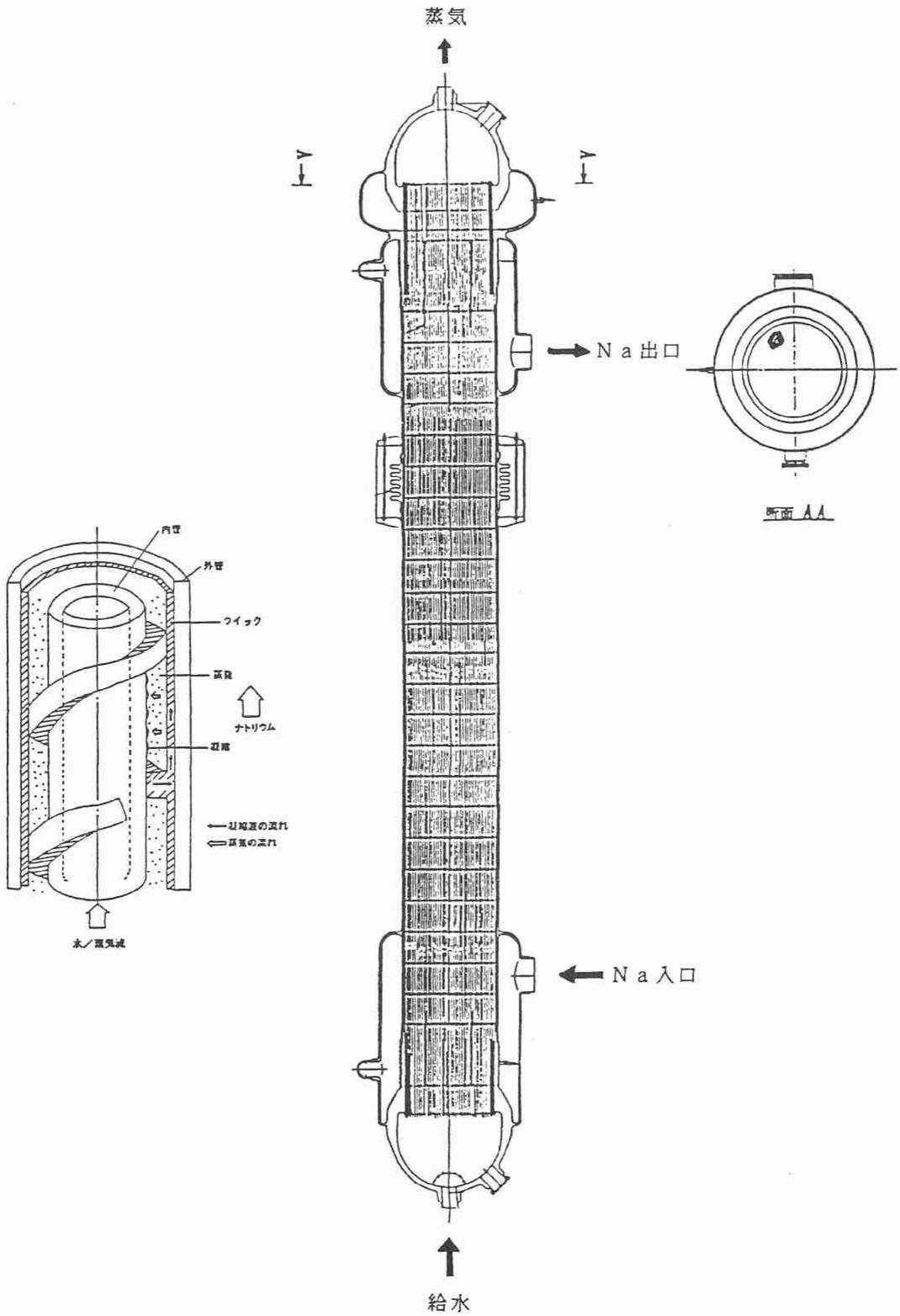


図20 ヒートパイプ式2重管型SG概念

わかった。なお、媒体の放射化反応によるガスの影響はほとんど無視できる程度である。

(2) 二重管型SGへの適用検討

ヒートパイプを熱輸送の中間媒体として利用することにより、ナトリウム/水反応の防止、リークの早期検出を可能にした概念の検討及び基礎的な検討を実施したが、高温から低温への蒸気輸送、毛細管力による液輸送等に検討の余地が残っており、今後さらに開発の必要があることがわかった。二重管SGに適用するための原理を図20に示す。

3) ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの開発

従来からFBRに使用されるポンプは、主冷却系の大容量のものには機械式ポンプ、補助系の小容量用には強制冷却型電磁ポンプが採用されてきた。

電磁ポンプは機械式ポンプに比べて効率は低い、構造的には可動部がなく完全密封状態で電磁力によりナトリウムを移送できるという特徴を有している。このため、機械式ポンプに比べて効率が低いにもかかわらず、補助系には多く採用されてきている。しかし、主冷却系等の大容量ポンプとしては、運転実績データ、プラントコストに及ぼす影響評価及び炉心安全性に対する評価の不足からあまり注目はされなかった。しかし、電磁ポンプをシステムに適用、または機器との合体化を行うことにより、プラントの合理化、簡素化を図っていくことが可能となる。

本調査検討では、FBRの実用化に対応したプラントの簡素化を念頭に置き、主循環電磁ポンプの概念構築を始め、他機器との合体の可能性を含めたプラントへの適用性の検討を行った。また、最近開発進展の著しい耐熱

新素材を利用して、ナトリウムに浸漬させる無冷却の電磁ポンプを製作し、これを評価検討することによりポンプ成立性のフィージビリティ調査を行った。

①ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの概念設計検討

電磁ポンプとしては、流路構成によりいろいろの種類があるが、構造が単純化でき、強度上の信頼性が高いこと、耐熱コイルの製作上有利なコイル形状を有すること及び大容量化、他機器との合体に適合し易いことから、アニュラ型誘導電磁ポンプを選定した。構造的には、固定子鉄心、コイル等の電気部品は密閉構造とし、内部で発生した熱はダクト等から周囲のナトリウムに自然放熱する方式とした。

②供試電磁ポンプの試作・評価検討

高い信頼性を有するナトリウム浸漬型無冷

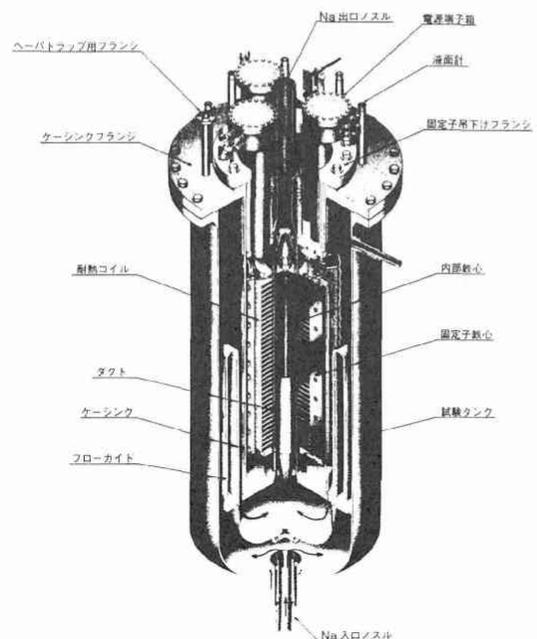


図21 供試電磁ポンプ構造鳥瞰図

却電磁ポンプを実現させるために、電磁ポンプを試作し、ナトリウムを流動させた状態での評価検討により機能、性能を確認した。ポンプはアニュラ型誘導電磁ポンプで、コイル等の主要構造物の熱的評価ができる程度の大きさとして、1 m³/minの容量とした。供試電磁ポンプの構造を図21に示す。

評価検討はポンプの予熱による評価、ポンプ特性評価、連続運転による確認等総計4000時間の試運転を行い、安定した機能・性能を確認した。これらの評価検討による結果は次のとおりであった。

- ・ポンプの予熱は誘導加熱により、十分に達成できることを確認した。
- ・ポンプPQ特性、効率特性は設計定格値

を十分満足し、等価回路モデルによる特性計算法で予測できることを確認した。供試電磁ポンプのPQ特性及び効率特性を図22に示す。

- ・ポンプの内部温度上昇は $\Delta T=100\sim 130$ ℃で、予測の範囲内にあることを確認した。
- ・4000時間の試験運転において、電気絶縁、異常振動、騒音等のポンプ機能の不具合はなく健全であった。また、連続運転前後における性能の経時変化は認められなかった。このポンプの連続運転履歴を図23に示す。試運転による評価検討で電磁ポンプとしてのフィージビリティの見通しが得られたが、今後は効率の改善、高温材料の開発等を進めていく必要がある。

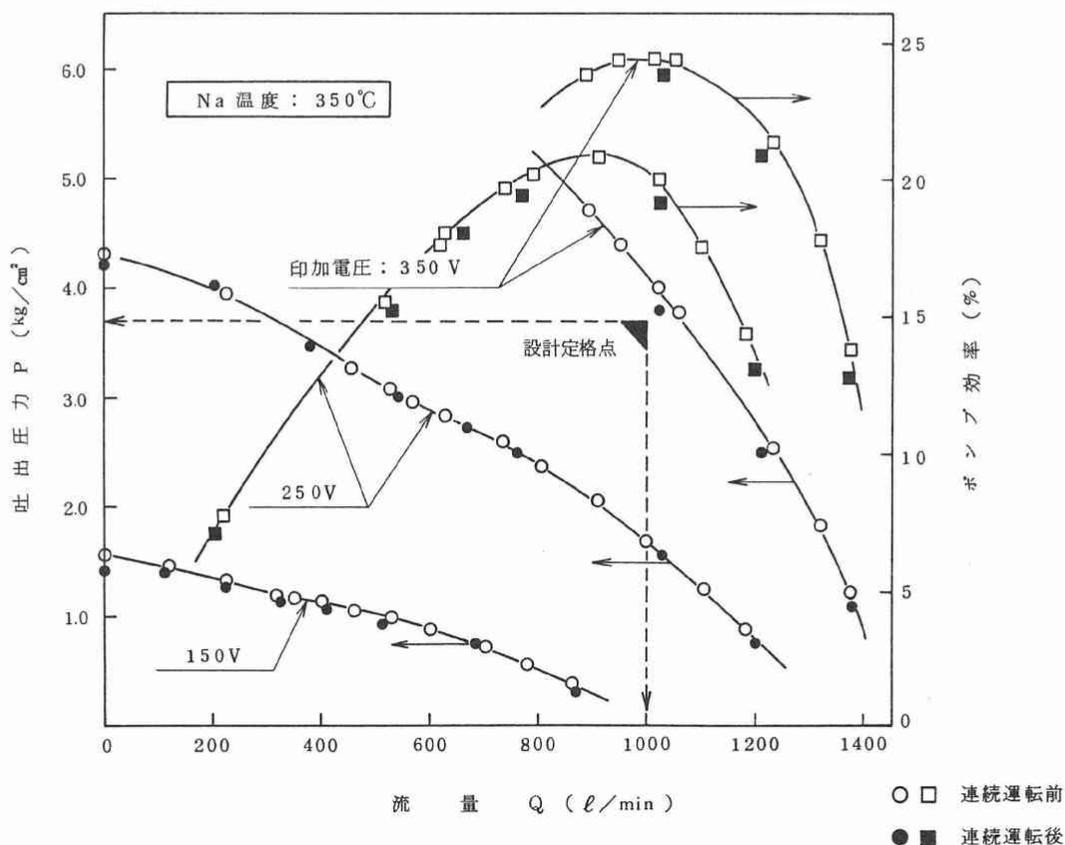


図22 供試電磁ポンプP-Q・効率特性

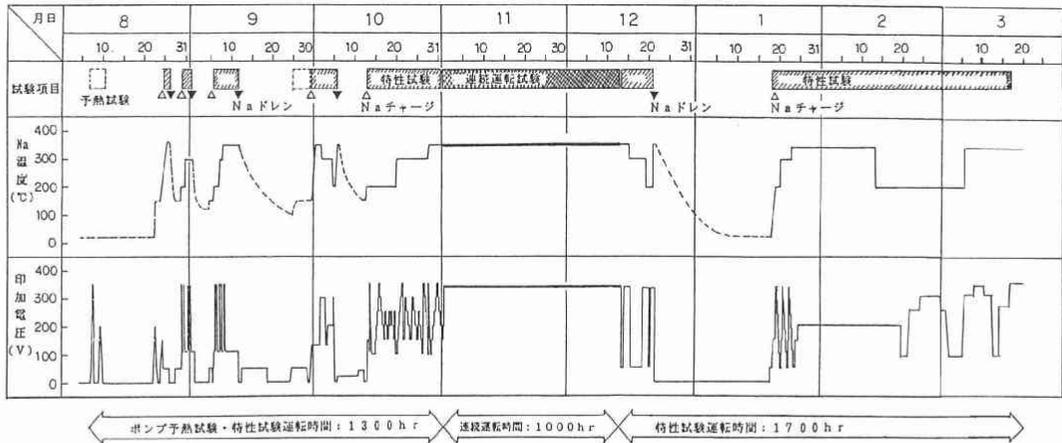


図23 供試電磁ポンプの試運転履歴

表8 電磁ポンプの適用によるプラント簡素化のねらい

適用箇所	1次主循環ポンプへの適用	2次主循環ポンプへの適用	補助系への適用
簡素化のねらい	原子炉構造、ルーフスラップ上面配置の簡素化	SG上部に2次主循環電磁ポンプを内蔵し、1HX-SG間の配管短縮による、2次系システムの簡素化	一体化コールドトラップ採用による純化システムの簡素化
構成例			
ポンプ仕様	流量: 230 m ³ /min 揚程: 80 mNa ナトリウム温度: ~400℃ 電圧: ~数千V	流量: 200 m ³ /min 揚程: 40 mNa ナトリウム温度: ~400℃ 電圧: ~数千V	流量: 200 l/min 揚程: 30 mNa ナトリウム温度: ~500℃ 電圧: ~数百V
備考	●米国のモジュール型炉(PRISM)で1次主循環電磁ポンプを採用	●他の用途として、1HXと電磁ポンプの合体、2重管配管と電磁ポンプ合体等	●SPX炉で一体化コールドトラップを採用 ●他の用途として、DRACS強制循環ポンプ、FFDシステム用サンプリングポンプ等

③電磁ポンプのプラントシステムへの適用性検討

本電磁ポンプの特徴を生かし、プラントシステムの簡素化のための概念として、タンク型炉1次主循環ポンプへの適用、SGと2次主循環電磁ポンプの合体及び、電磁ポンプ一

体型コールドトラップへの適用等が考えられ、検討を実施した。その結果、設備のコンパクト化、機器との合体化が可能となる。ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの適用例を表8に示す。

また、電磁ポンプの効率は機械式ポンプに

比べ悪いが、内部発生熱のナトリウムによる回収熱等によりプラント所内負荷率の増加分として0.9%の微増となる程度であった。

4) FBR用運転管理、I S I等に関する新技術の開発（燃料交換機事前故障検知システムの開発）

燃料交換機は発電所定期検査時に炉内の使用済燃料を新しい燃料と交換するために、燃料の掴み・離し、炉心からの引き抜き・挿入、または炉内中継位置への移送等の機能を有する設備である。現在の検討では、原子炉容器径のコンパクト化、燃料交換機自体の簡素化

等から伸縮アーム式燃料交換機が指向されている。しかし、ナトリウム中での燃料交換機の立ち往生に対する保守が困難であることから何らかの対応が必要になっている。このため、従来運転員が経験に基づいて行っていた異常発生を検知、または炉内燃料取扱い時における事故の未然防止を図るために、人工知能（以下A Iと称する）を応用して燃料交換機の各可動部が故障発生する前の段階で事前に検知し、対処していくことができるようにすることが大事である。

本調査検討では、A Iを利用した事前故障検知システムを構築し、燃料交換機の故障メ

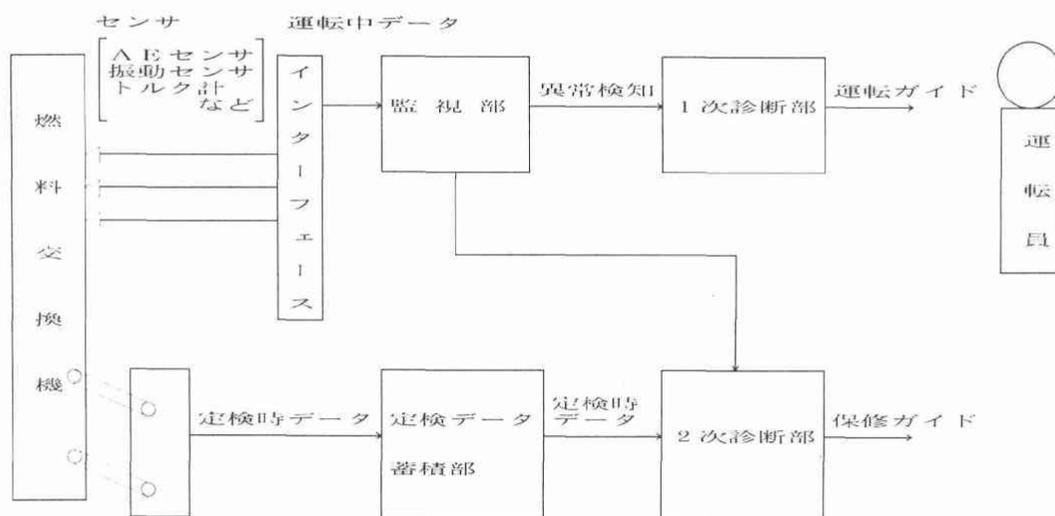


図24 システム構成概念

カニズムの検討を行っていくとともに、診断アルゴリズムの成立性及び実機への適用に対するフィージビリティを調査した。

①システム概念の構築

燃料交換途中での炉内立ち往生の防止と部品の保修頻度の適正化のための保修ガイドとしていくためのシステムへの要求条件をまとめるとともにシステムの基本構成の構築を行

った。システム構成概念を図24に示す。システムの基本構成は監視部、1次診断部、2次診断部及び定検データ蓄積部から構成されており、このシステムに要求される条件としては、運転中のデータの収集、異常発生を検知、同定及び異常の波及度、対策等の診断を行っていくことができるような機能を有することとしている。

②異常診断のための基礎調査の実施

燃料交換機異常時の各要素の応答の把握、異常検知・内容同定アルゴリズムの構築に対しては、同等の体系下での経験及びデータがないため、水中における要素の基礎的な調査検討及びモデルによる調査検討を実施した。

調査検討は炉内立ち往生に至る可能性のある要素部品（軸受等）及び機構（グリッパ等）に対して、実機条件下で発生する可能性のある故障モード（摩耗等）を設定し、AEセンサー、トルクセンサー及び加速度センサーから異常時模擬信号を検知した。この調査検討の結果、従来からあるトルクセンサーには現

われない異常についても、AEセンサーのレベル情報を取り込んでおくことで、異常の把握が可能であることがわかった。トルクセンサー及びAEセンサーによる各可動部（軸受、ジョイント及びボールネジ）の信号レベルをそれぞれ図25に示す。また、異常検知及び異常内容同定アルゴリズムについても構築でき、見通しが得られた。ただし、複数異常の同定はさらに検討が必要である。構築したアルゴリズムを図26に示す。

今後の検討については、炉心内における燃料交換機の各要素の特性がデータが少ないので、炉心内データの蓄積が必要である。

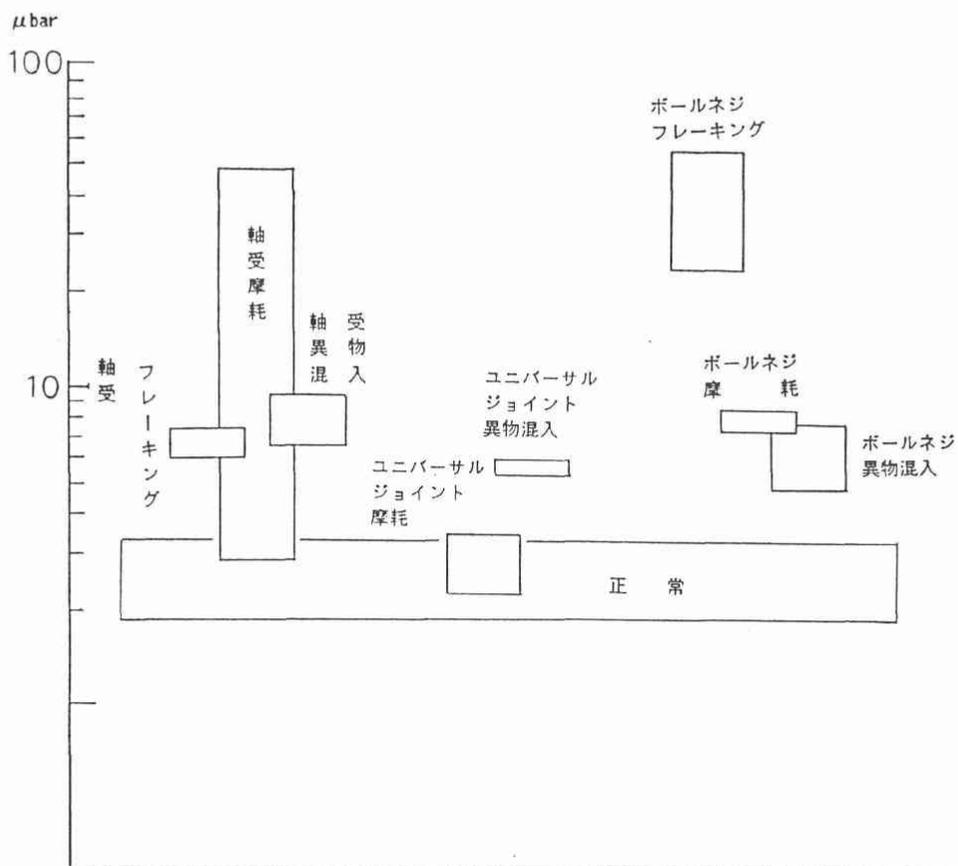


図25 A E 信号レベル

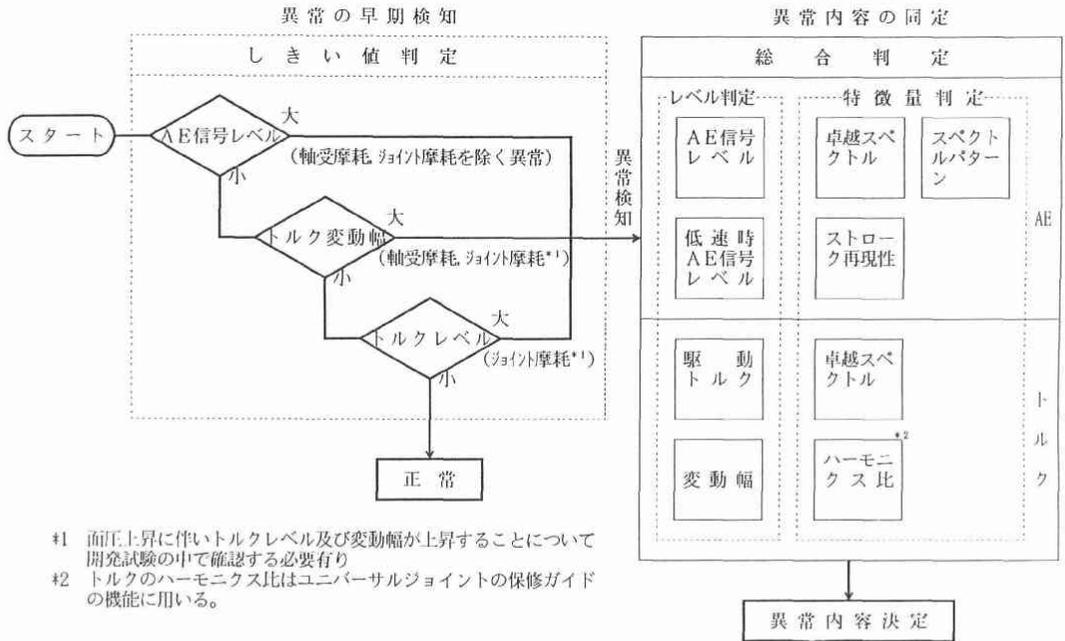


図26 構築アルゴリズム

③実機への適用性評価

構築した異常診断アルゴリズムの実機における検知性能を評価するとともに、本システムを導入した場合の効果について検討した。

・システムの実機適用性評価

実機条件下においても、無負荷時に診断を行う運用とすれば、システムの評価量であるトルク、AEへの外乱による影響及び信号減衰の影響は少なく、基本的には実機に適用できる見通しが得られた。ただし、実機における運転データの蓄積を図っていくことが重要である。

・システムの導入効果

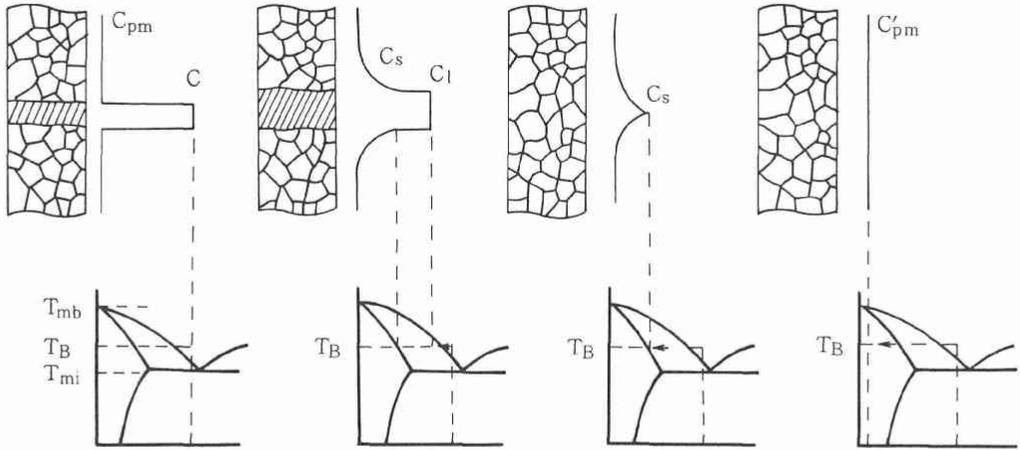
本システムの導入により、交換機が無故障でも従来方式と同等、またはそれ以上の信頼性を確保できる可能性があり、保修頻度の低減に資することがわかった。

5) 2次系削除プラントの調査検討

(液相拡散接合法に関する検討)

2次系を削除することでFBRプラントの合理化を図ることができ、二重管型SGの成立性がポイントになることは3.1の1)「ヘリカルコイル+フルードヘッド型二重管蒸気発生器に係わる検討」の項目において報告した。しかし、このSGはヘリカルコイル構造としており、二重管は長尺構造(約70m)となる。二重管は現在約25m程度までは可能であり、現在の製造技術の延長でさらに長尺のものを製造することは可能であるが、溶接または接合によって信頼性のある継手が得られれば容易に可能となる。溶接に対する検討は既に述べたが、液相拡散接合法は母材より低融点のインサート材を接合界面に挿入し、加熱して接続する接合方法である。この方法による接合原理を図27に示す。液相拡散接合法による方法は従来のアーク溶接と比較して溶接熱からの影響による材質劣化、熱変形が小さい等

1. 接合温度まで加熱
インサート金属の
溶融
2. 母材一部溶融，溶液
の組成は
 C_i から C_l に変化
 C_l で等温凝固開始
3. T_B で完全に凝固
二次相の生成はなし
4. 熱処理によって均質化



T_{mb} : 母材の溶融温度, T_B : 接合温度, C_{pm} : 母材の組成, T_{mi} : インサート材の初期溶融温度,
 C_s : 固相線の溶質濃度, C_l : インサート材の初期溶質濃度, C_l : 液相線の溶質濃度

図27 液相拡散接合法の等温保持過程での接合原理

の特徴がある。

本調査検討では、この液相拡散接合法を二重管の接合に利用し、管一管の接合構造の成立の見通しを評価した。

① FBR用インサート材の開発と性能把握

FBR用伝熱管の有力材料であるMod.9Cr-1Mo鋼を母材として使用し、インサート材にはSi, Bを添加したNi基アモルファス箔(MBF50, MBF80)及び合金系(9CR, 9CR2)の試作箔を用いて接合評価を行った。接合面に垂直に一定圧力(1 kgf/cm²)を加え、高周波誘導加熱により所定の温度に保持して接合条件を変えて行った。接合方法及び条件を図28に示す。その結果、インサート材としては、時効衝撃性能、製造性の点からNi基のSiを含まない系統(MBF80)が選択され、液相拡散接合法による継手の性能としては強度上母材と同等であった。接合部の衝撃性能については、550℃で時効した時に低下したが、

改善できる可能性のあることがわかった。また、接合継手の健全性検討では、腐食及び応力腐食割れも認められず、母材と同等の良好な耐蝕性を示した。

②二重管の接合方法と性能把握

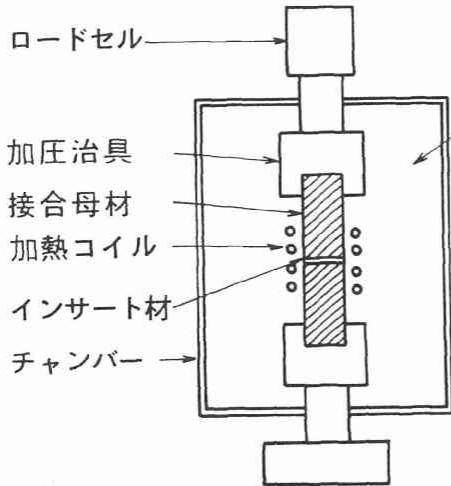
液相拡散接合法による二重管の接合の評価を行い、管のリーク検出用溝の健全性及び引っ張り強さ等の強度を確認した。この結果、管のリーク検出用溝の健全性については、二重管の接合時の開先加工として深さ1.5mm、幅0.4mmの溝を切ることにより、溝部でのガス導通性を確保できることがわかった。二重管接合部の開先形状と導通性チェックの結果を図29に示す。また、二重管接合材の室温引っ張り強さは母材と同等であった。

③非破壊検査技術の検討

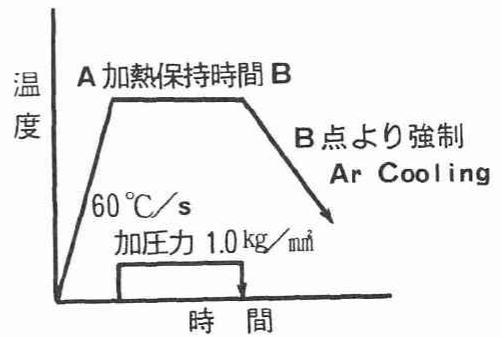
液相拡散接合法は従来の各種接合法とはプロセスが異なるため、従来の溶接部検査とは別の観点からのアプローチが必要であること

供試インサート材

	Fe	Ni	Cr	Si	Mo	B	
MBF50	-	72	19	7.2	-	1.5	Ni基
MBF80	-	81	15	-	-	4	
9CR	84	-	9	2	1	4	共金系
9CR2	85	-	9	0.5	1	6	



液相拡散接合装置



接合時の熱サイクル

拡散接合試験片

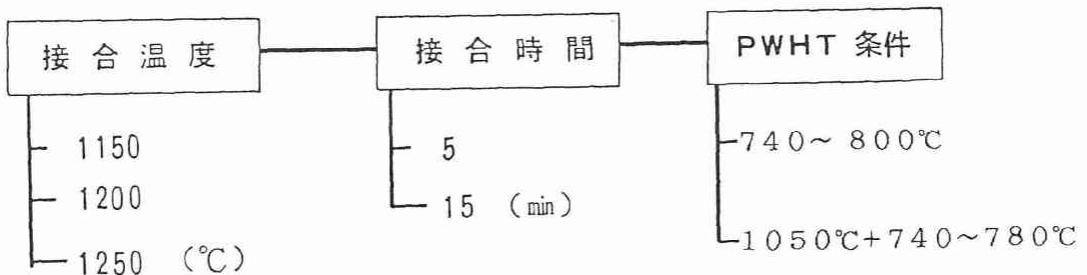
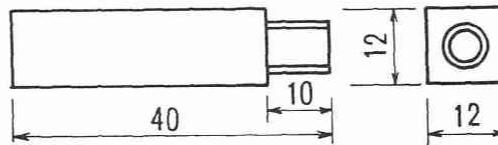


図28 接合方法及び条件

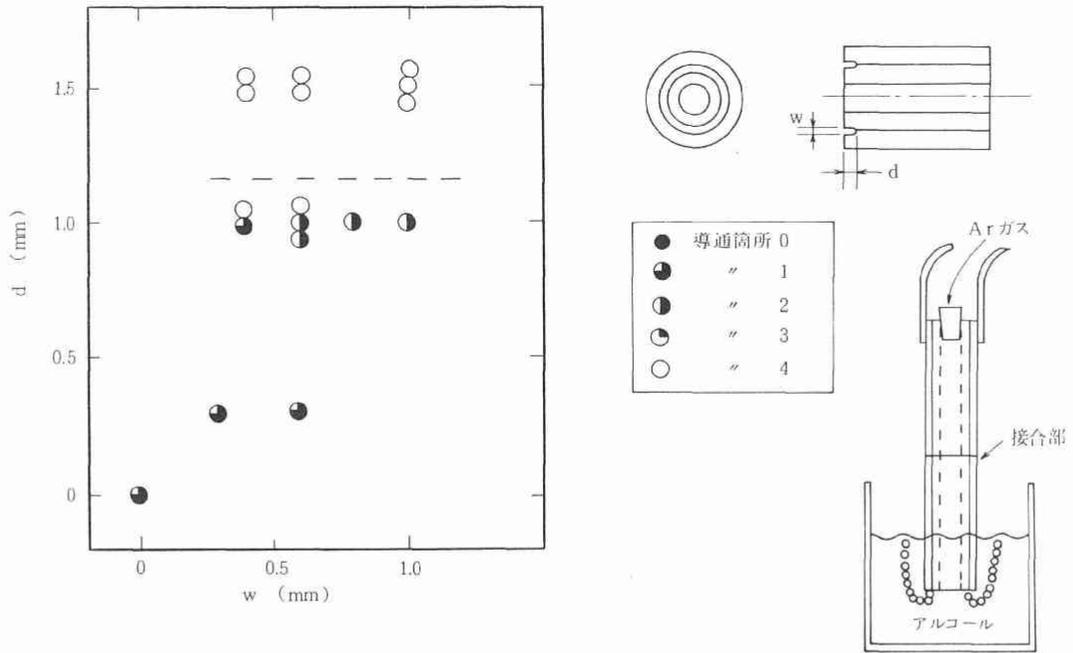


図29 二重管接合部の開先形状と導通性 (溝状開先)

表9 液相拡散接合継手の性能 (総括)

検討項目	結果のまとめ			
	Ni基		9Cr系	
インサート材				
組成 (%) Si	7	0	2	0.5
B	1.5	4	4	6
製造性	○	○	△	△
継手製作条件	1250°C×5min+1050°C+780°C			
PWHT				
継手性能				
曲げ性	○	○	○	▲
引張 (室温)	○	○	○	○
引張 (室温)	○	○	○	-
クリープ破断強度	○	-	○	○
時効衝撃靱性	△	○~△	△	▲
耐食性 (高温水, 蒸気)	○	-	○	-
非破壊検査検出特性				
PT	○	○	○	○
MT	▲	▲	○	○
UT	○	○	○	○
RT	△	-	-	-

注) ○:良好 △:劣る ▲:悪い -:実施せず

から検討を実施した。その結果、

- ・ 共金系インサート材は磁粉探傷及び超音波探傷が有力であり、Ni基系インサート材では超音波探傷は利用できるが、渦流探傷、磁粉探傷は適用できないことがわかった。
- ・ 将来的には、二重管内面の検査のためのロボットの開発が必要になってくものと考えられる。

④評価

二重管の長尺化については継目無で出来れば問題ないが、現状の技術では非常に難しく、経済的にも設備の新設等コスト的にも割りが合わないものと考えられる。従って、接合による長尺化を検討したが、技術的には液相拡散接合法は適用性の可能性が大きいと見られ、本調査検討の結果を表9に示す。しかし、強度上の問題、検査性及び使用実績等さらに積んでいくことが必要である。

4. まとめ

昭和62年度より3年間にわたって、FBRの実用化に資すると考えられる新技術の成立性を見通すためのフィージビリティ調査検討を行った。FBR実証炉は炉型の成立性研究を進めることで開発が推進され、1997年頃に着工、2003年頃の運開の予定で今後さらに詳細な検討に入っていくものと思われる。実用炉はその時点からさらにR&D、コスト低減努力を重ねて20~30年後頃になるものと思われる。この実用化されたFBRに利用されるとされる新技術を模索し、そのフィージビリティを見通していくことは非常に意義があるものと考えられる。

本FBR新技術フィージビリティ調査は、

システムのなもの、基盤技術的のものと大きく2つに分けて実施した。本調査検討結果のまとめを表10に示した。FBRは本来持っている特性としての増殖機能の他に、軽水炉では持ち得ない特徴を有している。システム概念における検討では、ナトリウムを使用するがゆえに高温、高効率化、高燃焼度化または長期運転サイクル化を達成し得る可能性を見通した調査検討であった。プラントの高効率化については、従来の発電プラントの効率に比べ、効率アップのための調査検討であった。発電所等からの熱エネルギーをできるだけ効率よく利用していく観点から、FBRの高効率化検討はこのニーズに合っていくものである。小型モジュラ型FBRの日本への適合性評価については、日本のような狭い国土の中で、大出力を生み出す大型プラントの立地場所を確保することはだんだん難しくなっていることから、発電プラントも需要地近接設置の可能性がある。小型モジュラ型FBRはモジュール設計、工場一括製作が可能であり、経済性低減を図ることができる。しかし、社会受容性の検討等多くの検討すべき課題がある。

この他2次系を削除できる可能性のある二重管型SG、高燃焼度化、長期運転サイクルをもたらし可能性のあるラップ管を削除した燃料集合体採用の炉心、または合体型機器の成立性検討等プラントのコンパクト化、コスト低減に資する新技術が検討され、成立性を見通せた。

基盤技術に関する検討では、これらの新技術の成立性検討を行うとともに、可動部のない機器の開発についても調査検討を行い、効率はまだ低いですが、将来の静止機器の採用、メ

表10 FBR新技術フィージビリティ調査検討結果のまとめ

調査検討項目	検討方法	調査検討結果
2次系削除プラントの調査検討 (トリプルヘッド二重管SGに係る検討)	2次系削除プラントの概念を検討するとともに、キー的技術となる二重管SGの成立性を調査検討する。	1. 二重管SGを適用した2次系削除プラントの合理化効果を検討した。 2. 二重管SGのキーとなる二重管の構造成立性を見通した。
ラップ管削除型炉心の開発	ラップ管を削除した炉心の合理化効果の検討を実施するとともに、燃料集合体のHHD力を試験により評価する。	1. ラップ管削除による燃焼度、運転サイクルの効果を見通し、応用炉心の評価を行った。 2. HHD力の妥当性を評価した。
FBR高温高効率システムの開発	FBRの高温高効率化の可能性について成立性を調査検討する。	1. 高温化ヒートボタムの検討及び炉心設計を行った。 2. 高温化への経済性検討で、発電原価低減の可能性を見通した。
小型モジュール型FBRの日本への適合性に関する検討 (PRISM、SAFR)	日本に適合する小型モジュール型FBRへの調査検討及び将来検討すべき課題の整理を行う。	1. 適合性に関する因子の抽出を行い、適合性の調査を実施した。 2. 小型炉の出力規模を検討した。 3. 適合性への課題を整理した。
ポンプ-IHX合体型機器の開発	合体化による問題点(振動、流動)の検討を実施するとともに、経済性効果を評価する。	1. 合体化構造概念の検討を実施し、モデル試験により振動等を評価した。 2. 合体による経済性を評価した。
ヒートパイプのFBRへの適用に関する検討	ヒートパイプの特徴を崩壊熱除去系及び二重管SGに適用し、その成立性を試験等により調査検討する。	1. カリウム、水銀を媒体に利用し、熱輸送性等成立性を見通した。 2. 崩壊熱除去系への適用は可能であるが、二重管SGには難しい。
ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの開発	カリウムに浸った無冷却電磁ポンプの成立性を供試ポンプで調査検討するとともに、システム適用性を評価する。	1. 1m ³ /minの供試ポンプを製作、試験し、成立性を見通した。 2. システムへの適用性を検討し、適用可能性を評価した。
燃料交換機事前故障検知システムの開発	AIを利用した燃料交換機の前故障検知システム構築の見通しを調査検討する。	1. AIを利用したアルゴリズムを構築した。 2. 可動部の基礎試験を行い、システムの検知性等を調査検討した。
2次系削除プラントの調査検討 (液相拡散接合法に関する検討)	二重管型SGに利用される二重管の液相拡散接合法による接続法を調査検討する。	1. 適用インサート材の調査を行い、試験等で評価した。 2. 接合法で二重管の接続した。 3. 非破壊試験法等を検討した。

メンテナンスフリー化につながっていくものとして期待されるものである。

発電プラントは何と言っても経済性が妥当なものでなければならず、どのような画期的な技術でも経済的に成立していくことが最低条件であり、そのための技術開発が今後とも必要である。

調査検討した各新技術が、このフィージビリティ調査で成立性の見通しがつき、次の展開につながっていくことができれば幸いである。最後に、この調査検討を行うにあたって、東京工業大学の藤家教授をはじめ、検討委員会、各ワーキンググループの委員及び具体的な調査検討を行った各メーカーの関係者に謝意を表すものである。(ふじい としお 主管研究員)

参考資料

- (1) 「2次系削除プラントの調査検討」報告書
(ヘリカルコイル+フルードヘッド型二重管蒸気発生器に係わる検討)
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (2) 「ラッパ管削除型炉心の開発」報告書
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (3) 「FBR高温高効率システムの開発」報告書
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (4) 「小型モジュラ型FBRの日本への適用性に関する調査検討」報告書
(PRISMに係わる検討)
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (5) 「小型モジュラ型FBRの日本への適用性に関する調査検討」報告書
(SAFRに係わる検討)
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (6) 「ポンプ-IHX合体型機器の開発」報告書
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (7) 「ヒートパイプのFBRへの適用に関する検討」報告書
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (8) 「ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの開発」報告書
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (9) 「FBR用運転管理, ISI等に関する新技術の開発」報告書(燃料交換機事前故障検知システムの開発)
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (10) 「2次系削除プラントの調査検討」報告書
(液相拡散接合法に関する検討)
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版
- (11) 「高速増殖炉利用システム開発調査」報告書
(FBR新技術フィージビリティ調査に関するもの)
昭和62年度, 昭和63年度, 平成元年度版

自動化の視点からみた人間と機械の役割分担

黒 沢 厚 志

1. はじめに

近年、制御およびコンピュータ技術の進展にともない、各種エネルギー産業においてもプラント運転等の部分のおよび完全な自動化が進展している。このような自動化は、人間と機械の役割を変容させるものであり、人間の直接操作していた機械をコンピュータ制御するようになると、人間の役割は操作から監視へと変化する。また最近では、エキスパートシステムの導入にみられるように、自動化の対象領域は単純労働から熟練労働へと拡大しており、機械の役割も制御だけではなく判断にまでおよぶことがある。

このような自動化の進展は、人間と操作対象である機械とのインターフェイスの設計および利用の方法論を従来にもまして重要なものとしている。また、インターフェイス設計の背景には、目的遂行へ向けての人間と機械の役割分担の設定という、幅広い視点からの配慮を必要とする課題がある。

原子力分野をみると、スリーマイルアイランド事故やチェルノブイリ事故を発端として、人間の過誤を原因とする事故防止の観点からヒューマンファクタに関する議論がなされてきた。ここでは原子力分野を中心として、自動化の現状、人間と機械の役割分担に関す

る研究動向、役割分担のガイドラインについてその概要をまとめることとする。

2. 産業における自動化

2.1 自動化を支える基礎技術

原子力、火力、化学プラント、船舶、鉄道、航空などの産業においては、従来から経済性、信頼性、安全性などの要因から自動化を推進しており、制御、計算機等の基礎技術の進歩がそれを支えている。

1960年代には、プロセスの状態をコンピュータで監視しながら最適条件を演算、指示する計算機制御の導入や、半導体技術の進歩となう制御機器信頼性の向上により、自動化を前提とした設備計画は当然のこととなった。

その後、マイクロコンピュータの出現により自動制御の機能はさらに高まり、従来のアナログ制御の多くはデジタル化した。また、高速データ通信の活用により、サブシステムを統合、階層化して、大量の情報およびエネルギーを取り扱う大規模システムを構築するようになると、システムのかなりの部分において自動化技術を導入している。

これら自動化を支える基礎技術をまとめると、以下の5つの視点で整理できる。

- ①シーケンス制御およびフィードバック制御などの「制御理論」

- ②集中型，分散型などの「システム構成」
- ③自己診断機能，二重化による冗長システムなどの「信頼性確保」
- ④手足，五感，判断といった人間機能の代替である「センサー，操作機器，人工知能技術」
- ⑤遠隔スイッチから制御盤へ，さらにはCRT制御へとといった「ヒューマンインターフェイス」

2.2 コンピュータシステムの信頼性

原子力発電所および銀行オンライン等の，自動化された巨大システムに利用される社会基盤としてのコンピュータシステムの障害時の影響は，最小限にとどめることが必要であり，図-1に示した信頼性，安全性，コスト，セキュリティ等の要求特性を満足させなければいけない。このように，コンピュータの信頼性は，自動化システムの信頼性確保のうえ

で重要な要素のひとつである。

障害の原因には，製造上の欠陥，素子劣化，予期しない負荷といった「物理的要因」，システム仕様，設計，運用段階における単純なエラーである「自然発生的な人的要因」，システム破壊・妨害，データ改ざん・盗用といった「意図的な人的要因」，および「災害」に分類できる。現在は，このような各種の障害原因が生起しても，全体システム保護のため，コンピュータ構成要素の障害を全体システムの致命的障害に拡大させない方針（これをフォールトトレランスと呼ぶ）に基づいた，大規模システム構築を行うのが普通である。コンピュータを二重化し，一方のコンピュータに障害が起こっても他のコンピュータがその機能を受け継いでサービスを行うことは，フォールトトレランスのよい例である。

また，OECD（経済協力開発機構）は，13加盟国に対し，原子力発電所制御室におけ

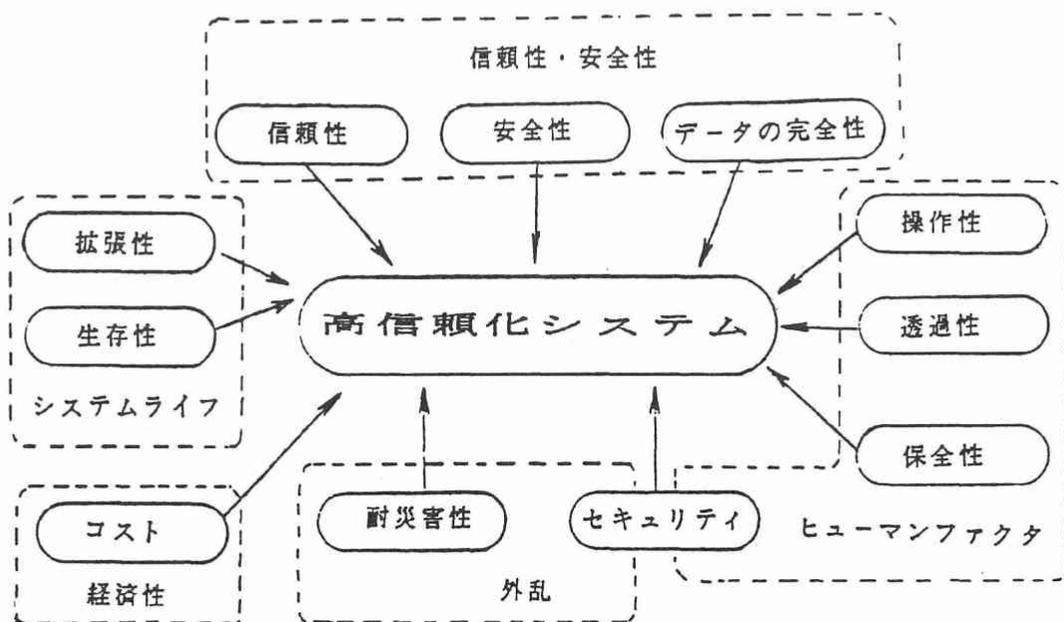


図-1 高信頼化システムに要求される特性分類⁽¹⁾

る計算機利用に関する調査を行っている。その結果をみると、計算機利用の方針として、データ収集、情報表示、運転員支援、データログなど制御系への応用には、ほとんどの国が同意しているのに対し、運転員の直接支援など、安全機能に関連する部分への適用に関する思想は国によって異なっている。

プラント運転等に導入が図られつつある、コンピュータを利用した支援システムの信頼性を確保していくためには、ハードウェアおよびソフトウェアといった、いわば機械側のシステム信頼性ととも、特に異常時における人間のエラーの低減に配慮し、マンマシンシステム全体としての信頼性を確保していくことが必要である。

2.3 原子力発電所運転の自動化

原子力発電所運転の自動化は、前述の自動化関連技術を適用することでなされてきた。

デジタル制御、分散ネットワーク、コンピュータの二重化によるフォールトトレランスといった技術は既に採用されており、近年建設されたプラントにおいては、通常運転時の大部分の機能を自動制御するようになっている。

ヒューマンインターフェイスに関しては、人間工学的要素を配慮した制御盤のスイッチ配置や、カラーCRT、大型ディスプレイ、ミミック（注1）の採用、さらには運転支援システムに関する研究開発が行われているところである。

また、日本の原子力発電所要員の役割をみると、制御から監視へとといった産業界一般にみられるプロセス制御の変遷と同様の軌跡をたどっており、3交代運転直体制による24時間運転が行われている。

共同利用の運転訓練センター、発電所サイトにある小型シミュレータなどを活用した運転訓練も行なわれている。

また、自動化の進展をふまえ、現在および今後ともに、世代交代にともなう、建設、停止、異常時の経験を持つ運転員と持たない運転員とのノウハウの伝承、技能レベルの維持向上を図るべきであろう。

3. 自動化と人間と機械との役割分担

感覚特性、知覚特性、注意の範囲、短期記憶容量やその減衰時間、判断時間、運動のコントロールなどの特性によって明らかにされる人間の情報処理のメカニズムを「認知プロセス」と呼んでいる。このような認知プロセス全般を扱う心理学を「認知心理学」と呼んでおり、近年は活発な研究を行っている分野である。

前章2. で触れたように、自動化が進行すると、システムに関わる人間の役割は変化していく。以下に、人間工学や認知心理学などの知見をとり入れた人間と機械の果たす役割の分担、情報の交換を行うインターフェイスについての研究動向、および関連するガイドラインの動向を紹介する。

3.1 役割分担の方法

従来の人間と機械の役割分担手法は、システムの機能を定義した後、人間と機械それぞれの長所、短所を考慮しながら、あらかじめ考えられたタスク（ある目的遂行のために、必要な作業の一部）を人間と機械に割り振る、静的、定性的なものであった。しかし近年は、技術進歩にともなう設計の柔軟化、評価要因の多様化（社会的、経済的、政治的、心理的、

哲学的)などの理由から、動的、定量的な役割分担手法が求められている。

同時に、多数のタスクを実行しなければいけない状態である「多重タスク状態」におかれた人間が、一度にどれだけの認知タスクを処理することができるかは、システム、特にインターフェイス設計において重要な要素であり、人間でも機械でもできるタスクの動的な配分 (Dynamic Task Allocation) の研究も進められている。

その研究動向をみると、Dynamic Task Allocation におけるコミュニケーション形態として、人間がコンピュータの行動を指示する、従来の「ダイアログ・ベース」から、コンピュータが人間の意志決定、および行動モデルに基づく予測を行い、コミュニケーション関連の認知的負荷を軽減させる「モデル・ベース」へと関心が移っている。モデル・ベースのコミュニケーションのためには、人間がいかに事象を認知し、判断し、行動するかといった人間のモデル化を行わなければいけない。一度に扱える認知タスクの最適数は3程度であるという最近の報告もあるので、今後は理論と実験の両面からのアプローチをさらにすすめるべきであろう。

原子力分野においては、元リソ国立研究所 (デンマーク) のラスムッセンにより、スキル (反射操作)、ルール (規則)、ナレッジ (知識) の3種類の行動モデルが提案され、原子力発電所の設計者、運転員、計算機へ認知タスクを配分する試みも行われてきた。近年は、チェルノブイリ事故等の影響もあり、組織におけるコミュニケーション、つまり人間と人間のコミュニケーションなど、さらに広い視点から役割分担をとらえる必要があるとされている。

さらに、コンピュータが家庭にまで導入されるようになると、人間とコンピュータとの関わり (Human Computer Interaction)、特にインターフェイス設計を重要視すべきであるという要求も当然高まってくる。そこで、マサチューセッツ工科大学 (MIT) のSchneidermanらは、言語的表現よりも、視覚化されたシンボルに対して操作を行うことで、理解しやすく、制御感覚の満足度の高いインターフェイスを設計することが可能で、その結果人間のパフォーマンスも向上するとしており、そのようなインターフェイスの形式を Direct Manipulation と名付けた (その代表的な例がアップル社のコンピュータ「マッキントッシュ」にみられる)。このように、メニュー、表入力、コマンドランゲージといった従来のインターフェイス方式から、自然言語、さらには Direct Manipulation へと関心が移っている。研究ベースではあるが、原子力分野においても、軽水炉、FBR (高速増殖炉) の制御インターフェイスへの適用を試みた研究もある (図-2 参照)。

3.2 インターフェイス設計

ガイドラインの例

(1) 米国の中央制御室設計ガイドライン

米国NRCは、中央制御室に関する人間工学的設計ガイドライン NUREG-0700の発行以降、中央制御室のマンマシンインターフェイス評価に関する研究を進めている。1985年には、安価で柔軟性の高いインターフェイス機器であるCRT利用の拡大の動向を反映し、アイダホ国立工学研究所 (INEL) のGilmoreらの作業の成果である、ガイドライン 'Human Engineering Guidelines for

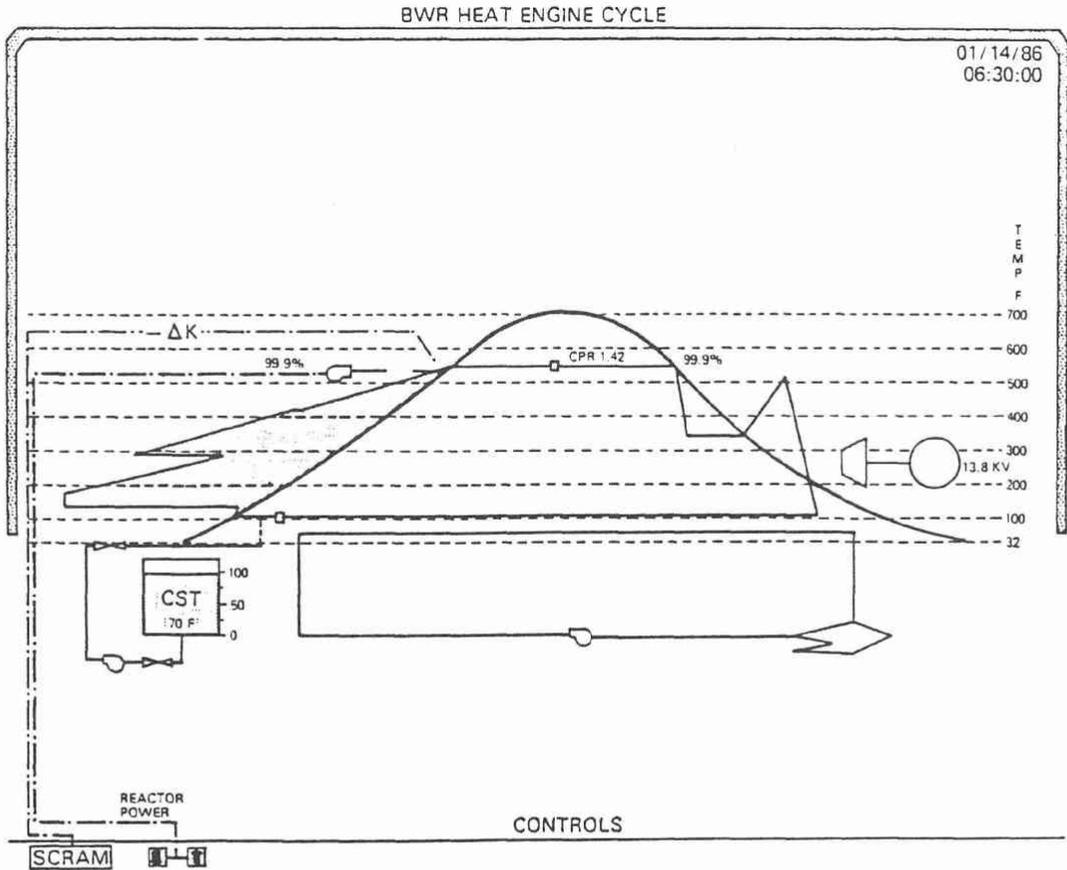


図-2 BWRモデルにおける Direct Manipulation Interface 画面⁽²⁾

the Evaluation and Assessment of Video Display Unit (NUREG/CR-4227)'を発行している。さらに、NRCは新型制御技術の原子力発電所への導入に関するガイドラインを作成しようとしており、電力会社、メーカー、原子力発電所に対するヒアリングを実施し、今後取り組むべきテーマのひとつに、人間と新型制御機器の間での Dynamic Task Allocation をとりあげている。

(2) IEC 964 'Design for Control Rooms of Nuclear Power Plants'

IEC (International Electrotechnical Commission, 国際電気標準会議)は、1908年に発足し、現在までに40以上の加盟国を有す

る電気関連(電気、電子、通信等)国際規格の決定機関である。IECには約80の技術委員会(Technical Committee, TC)があり、その下部には約130の分科会(Sub Committee, SC)が設けられて活動を行っている。

そのうち、技術委員会TC45の作業部会WG A8(チェアマン:日本原子力研究所 若山氏)を中心に、原子力計測関連規格の検討を進めており、1989年3月には、IEC 964 'Design for Control Rooms of Nuclear Power Plants'をまとめている。

ガイドラインでは、図-3に示すように、制御システムの定義を明確に与えており、人間が行う役割を、

①自動制御のバックアップ制御を含む「手動操作」

②手動および自動制御両方を含む「監視」

③異常時、想定外事象における原因診断および対応といった「高度な精神作業」

とし、機械が行う役割を自動運転としている。

また、図-4に示すように、システム設計プロセスの進め方として、以下の3つをとりあげている。

①タスク分析

②人間工学および認知心理学的な計測因子との整合性を図ったうえでの分担基準の決定

(i)人間/機械の役割分担

(ii)遠隔制御/ローカル制御の分担

(iii)運転支援システム使用の是非

③計測因子と分担基準を比較しながらの分担決定

加えて、原子力、人間工学、制御、情報、運転経験者等からなる評価チームの設置を推奨している。

既に規格採用を決定した、フランス、イギリスに加えて、原子力発電所所有各国においてガイドラインの適用を検討中である。また、一部の国では、建設中、建設予定のプラントを含めたガイドラインの適用も検討している。

(3) I S O T C 159委員会の活動

I S O (International Standardization Organization, 国際標準化機構)は、農林水産物、鉱工業製品に関する国際標準化を推進し、物資およびサービスの国際交流を円滑にすることを目的として、1947年に発足した国際機関である。

そのうち、技術委員会T C 159(人間工学担当)委員会の分科委員会S C 6においては、「作

業システムの人間工学的設計」を担当しており、そのうち作業部会WG3は技術系システムの制御のコンソール、情報表示盤、パネル等の基礎的人間工学的原理を扱っており、日本からも委員が参加している。

WG3においては、従来から「目標」、「基礎規格」、「I S Oの整備すべき規格」といったフレームワークのもとで作業を進めてきており、考慮すべき「目標」と「基礎規格」に、以下の項目をあげている。

・目標：安全性、信頼性、効率、ワークロード削減、社会的認知

・基礎規格：生体測定、人間工学、計測指標、認識、認知、評価手法、環境、用語の統一

WG3における制御室のイメージは、元々は化学プロセス等の装置産業を対象としたものであったが、最近の関心は原子力発電所をはじめとする、より広範囲の「制御および監視システム」に移ってきており、人間、物質、エネルギー、情報など多様な産業における制御と監視を、「システム目的」と「操作度」という基本要因を中心に、他の要因も考慮しながら検討を進めているところである。

4. 役割分担ガイドラインの必要性

4.1 評価要素

システムを自動化するにはなんらかの理由(負荷削減、人件費削減、システム効率向上など)があるはずであり、その理由を最低限満足すべき目標とみなせば、それらは評価要素とみなせる。自動化のもたらす、監視や確認作業の増加、覚醒度の低下による労働の質的变化といった要素、あるシステムに対して別の人間が本当に同じ能力をもつか(個体間

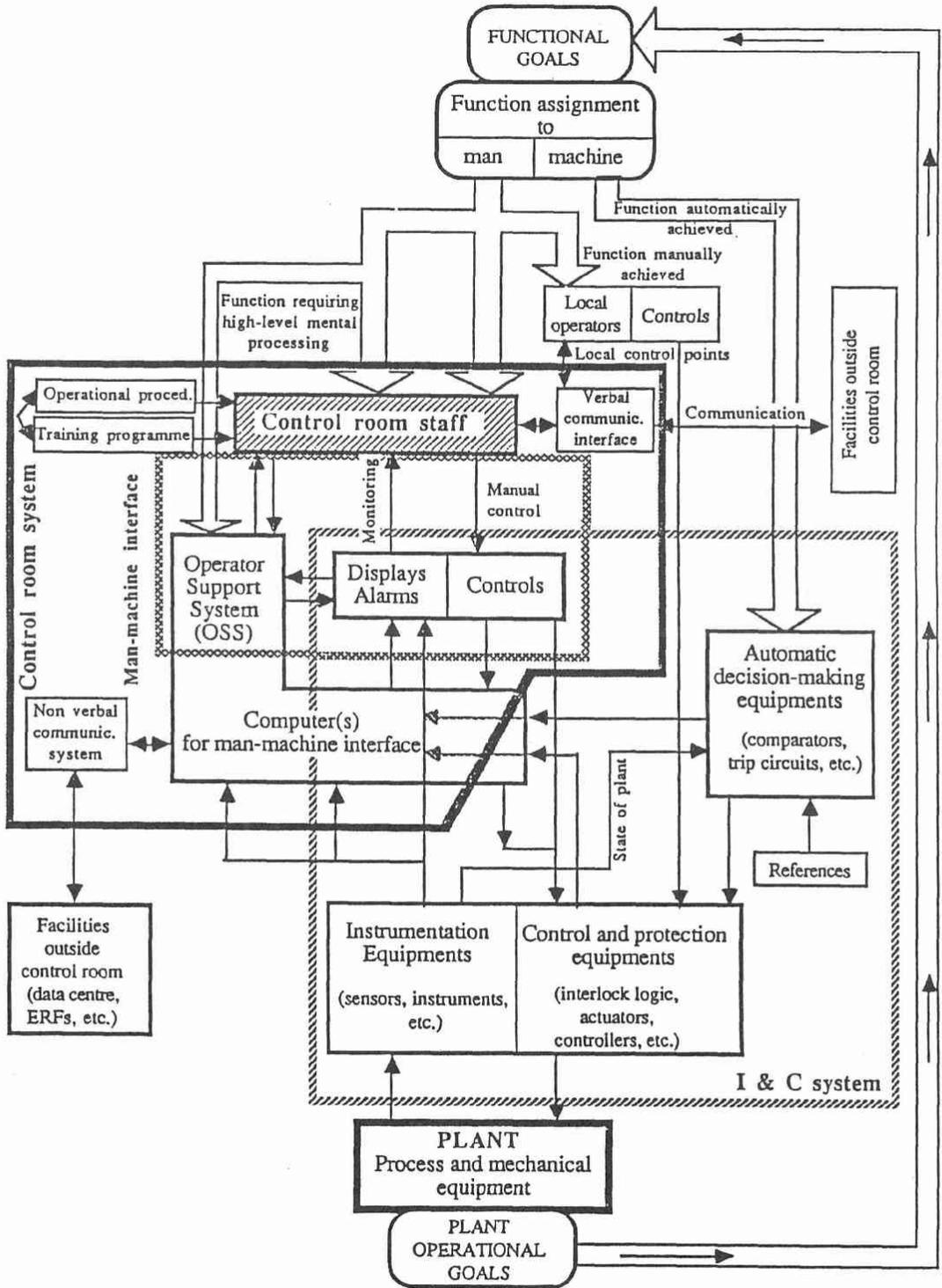


図-3 IEC964における制御システムの構成⁽³⁾

(矢印は設計および情報の流れを示す)

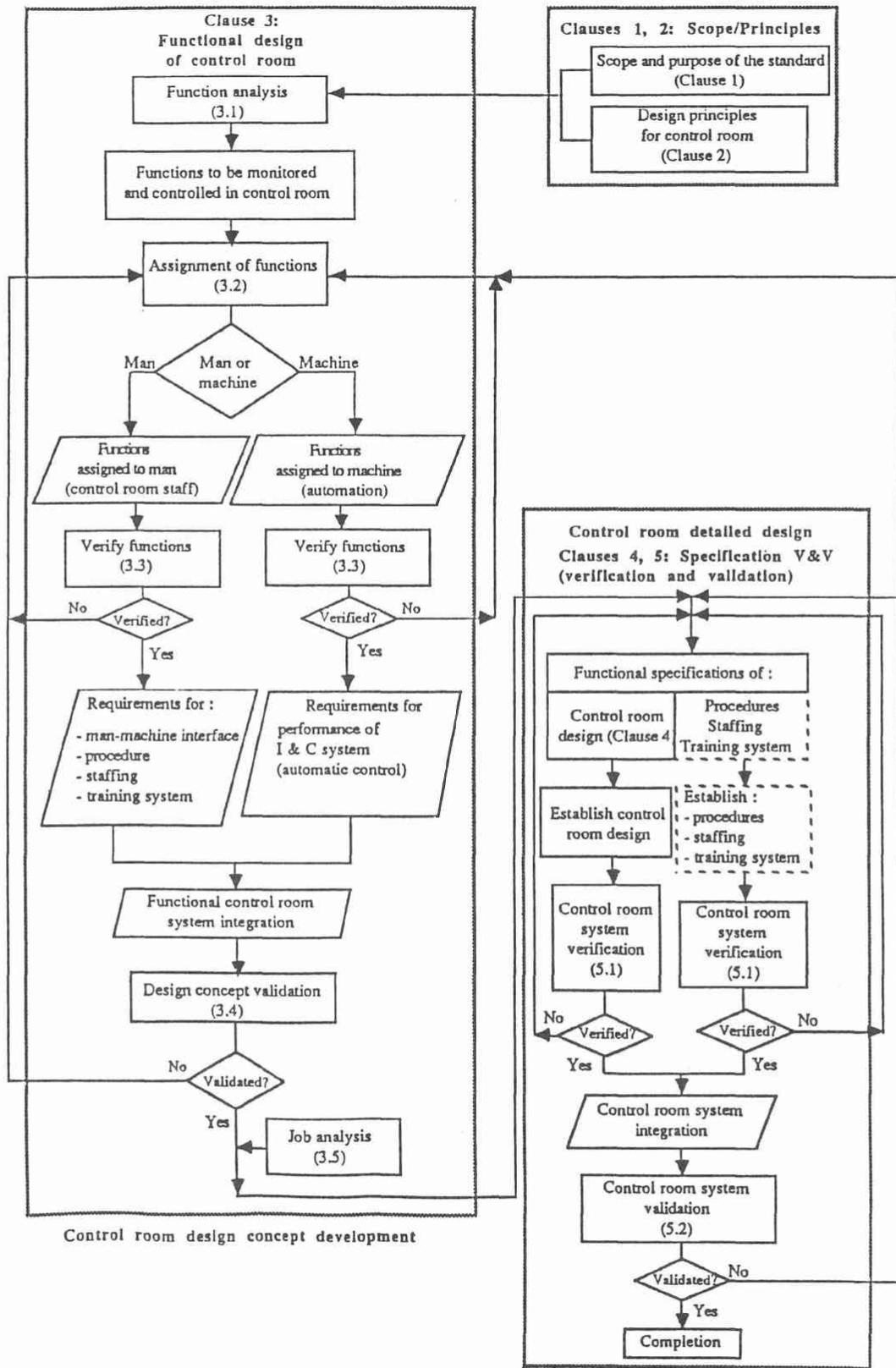


図-4 IEC964における設計プロセス⁽³⁾

差) およびある人間はどのような個人的背景にあっても同じ能力をもつか(個体内差)といった要素, さらにはシステムの理解のしやすさなど, 多数の要因を考慮し役割分担を行うべきであろう。

スリーマイルアイランド事故以降の一連の米国のヒューマンファクタ研究の成果をまとめた, 'Handbook of Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications (NUREG/CR-1278)' というハンドブックがあり, その一部には, 原子力発電所の運転を対象とした評価要素を包括的にまとめた行動形成因子 (P S F, Performance Shaping Factors) の説明がある。

4.2 自動化レベルに適合した役割分担

原子力発電所等の大規模システムにおいては, その設置時期によって運転制御用のインターフェイスは異なり, その一方で, 大部分のシステムにおいて安全性が確保されてきた実績を考慮すると, 自動化のレベルとあるべき役割分担の姿を整理しておく必要がある。米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) の White は, 図-5 に示すように, 自動化レベルとシステム機能のレベルについて整理しており, このように, 何らかの基準を設定して自動化レベルを定義し, そのクラスに応じた役割分担評価を行うべきである。

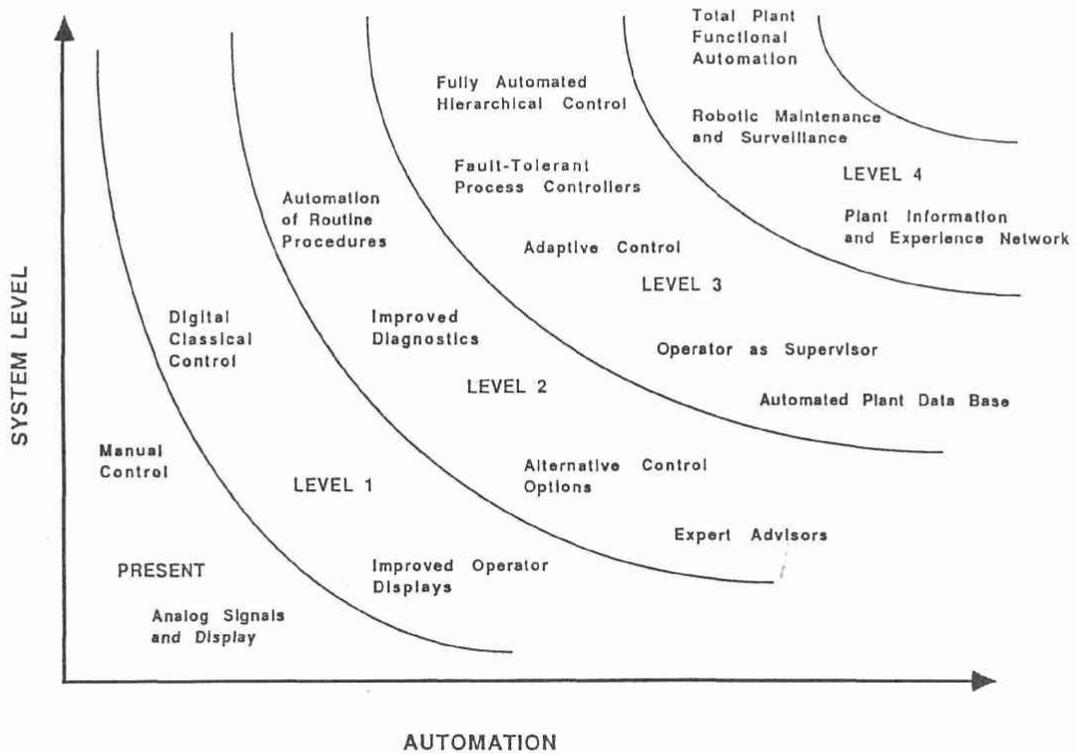


図-5 システムレベルと自動化レベル⁽⁴⁾

4.3 インターフェイスの独立性

パーソナルコンピュータやワークステーションが大型計算機と比較して近年大幅に使用されている理由として、コストの問題に加えて、インターフェイスの使いやすさがある。そのような背景もあり、最近のインターフェイス研究では、アプリケーションソフトウェアと人間の間に存在して情報交換を行うインターフェイス部分を独立に扱い、「ユーザーインターフェイスマネジメントシステム (UIMS)」によって管理するというコンセプトを取り上げている。従来はアプリケーションに従属し、付加的部分とみなされていたインターフェイスは、ハードウェア技術の進展ともあいまって、近年そのソフトウェア設計における比重を高めており、ついには独立するようになった。

4.1 で述べたような、Direct Manipulation Interface の研究動向などを考慮すると、操作方法を自由に変更できる柔軟性の高いインターフェイスも技術的には設計可能となってきている。このような、「インターフェイスの独立性と柔軟性の進展」は、原子力発電所の中央制御室等のインターフェイス設計にも影響を与えると予想されるため、インターフェイスに重点をおいた、またはさらにインターフェイスを独立して評価する必要性が高まってくるものと思われる。

4.4 新型インターフェイスへの適応

CRTやその他のスクリーンを使用したゲームなどを通じて、CRT画面およびその上での操作に慣れ親しんだ世代は、近い将来のプラント等の制御インターフェイスに取り組むことになる。その場合は、制御盤およびハ

ードウェアスイッチといった従来型のインターフェイスよりもCRT中心のインターフェイスへの適応性が高いことも考えられる。

1990年内に運転開始を予定しているフランスのN4型原子力発電所における、大幅なCRT制御、トラックボール(注2)の使用、大画面ミミックの採用などにみられるように、今後も次々に新しいインターフェイスの採用が図られていく。タッチスクリーン、ライトペン、マウス、トラックボールなどのいわゆるポインティングデバイスとCRTを使用した制御はソフトウェア制御の利点である柔軟性を生かしつつ採用されていくであろう。

5. まとめ

自動化のもたらす労働の質、量の変容により、人間は想定していない事象に対するバックアップの役割を担うことも今後増加していくと思われる。システム自動化後の信頼性および安全性確保のためには、人間とコンピュータの調和を保ちつつ情報を適切に抽象化・集約化して表示するインターフェイス、自動化関連知識、異常時疑似体験、熟練技術者のノウハウ・トラブル体験の伝承などの視点からの教育訓練、組織的要因を考慮した自動化システムの安全性・信頼性分析など、自動化の進展を認識した役割分担の方法論を必要とする。

役割分担評価を実施するにあたっては、IECのガイドライン等にもみられるように、評価目的および評価対象範囲を明確にしておくことが必要であり、システムの通常時および異常時に対する評価の両方に配慮すべきである。個体間および個体内の差異、システムの

透明性に注意を払いながら評価を進めるべきである。

また、CRTを使用したインターフェイスは、その設計の柔軟性等から今後のインターフェイスの主流となっていくものと思われ、インターフェイス部分のシステム設計における比重も高まっており、今後は、ポインティングデバイスおよびCRTを用いたインターフェイス設計に重点をおいた、評価ガイドラインおよび役割分担手法を確立する必要がある。

これまでに述べてきたように、NUREG, IEC, ISOといった各種ガイドラインの制定動向や、Dynamic Task Allocationに代表される役割分担手法研究の進展を踏まえ、自動化レベルに適合し、チーム行動や組織論、設計者と使用者といった視点を組み入れた統合的役割分担手法が今後必要となっていくと思われる。

6. あとがき

1990年7月9日～13日には、ミュンヘン（西ドイツ）においてIAEAの主催する、「原子力発電所における自動化と人間行動のバランスに関する国際シンポジウム（International Symposium on Balancing Automation and Human Action in Nuclear Power Plants）」が開催予定であり、各国は、自動化と人間の役割に関する考え方や研究開発の成果を発表することになると思われる。

大規模システムの安全性、信頼性を向上させるために、自動化のメリットとデメリットを勘案しつつ、人間と機械の役割分担に関する基礎的研究や応用開発を今後とも注目して行きたい。（くろさわ あつし 研究員）

（注1）ミミック

中央制御室等において機器の構成要素をエネルギーや他のシステム動作の流れ、あるいは人間行動の適切な順序を示す模式図で表現し、その要素を矢印等で結んで図示したパネルの配列

（注2）トラックボール

ボールを回転させることにより、ディスプレイ上のカーソルを任意の方向に移動可能とする小型の入力機器

参考文献

- (1) システムの高信頼性技術に関する調査研究（電子応用システム）報告書、財団法人日本規格協会、1988年3月
- (2) Beltracchi, L., A Direct Manipulation Interface for Water-Based Rankine Cycle Heat Engines, IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics, vol. SMC-17, no. 3, 1987
- (3) International Standard 'Design for control rooms of nuclear power plants', IEC 964, International Electrotechnical Commission, Mar. 1989
- (4) White, J.D., Approach to Plant Automation with Evolving Technology, Proc. 7th Power Plant Dynamics, Control & Testing Symp., Knoxville, TN, USA, May 1989

固体電解質型燃料電池の技術開発状況

岩 城 秀 雄

はじめに

燃料電池 (Fuel Cell) は天然ガスなどの燃料の持つ化学エネルギーを直接電気に変換できる新しいエネルギー変換装置であり、電解質の種類により、主にアルカリ型 (AFC)、リン酸型 (PAFC)、熔融炭酸塩型 (MCFC)、固体電解質型 (SOFC) に分類される。現在、リン酸型が商用化一歩手前の段階にあり、熔融炭酸塩型と固体電解質型は開発途上にある。

燃料電池は従来の火力発電方式に比べて、大気汚染物質の排出が少なく、発電効率が高いことに加え、その排熱を利用すればエネルギーの有効利用ができる等の特徴を有し、地球環境保全の面からも将来の電源として注目されている。特に、固体電解質型燃料電池は、現在、基礎的な研究段階ではあるものの、高温作動型の燃料電池であることから、高出力密度・高効率、コジェネレーションシステムへの応用やスチームタービンとの併用が可能であり、コジェネレーション用および電気事業用などの電源として期待されている。

数年前までは、固体電解質型燃料電池の実用化には長期にわたる基礎研究が必要と考えられていたが、最近のセラミックス技術開発などの進歩に加えて、地球環境問題等の社

会的関心等から、研究開発の機運が高まっている。

本稿では、今後、世界的にますます加速されて行くと考えられる固体電解質型燃料電池の国内外の技術開発状況の概要について述べる。

1. 燃料電池の種類と特徴

一般に電池といえば電気化学反応を利用した「電気のため池」であり、電気を取り出してしまえば電池寿命が終わる1次電池 (例えば、乾電池) と充電によって反復使用できる2次電池 (例えば、蓄電池) があるが、いずれも反応物質を電池内に蓄えており、持ち運びの容易な独立電源になっている。これに対して、燃料電池は電池本体に反応物質を蓄えておらず、反応する物質 (燃料と空気・酸素等) が外部から供給されたとき、その反応エネルギーにより電力が得られ、かつ反応後の生成物も除去するようになっており、反応物質の補給が続く限り電気を発生することができるものである。

一般に燃料電池には次のような特徴があり、電気事業用やコジェネレーション用として期待されている。

- ① 従来の火力発電が燃料の化学エネルギーを熱エネルギー、機械エネルギーへの

変換過程を必要とするのと異なり、化学エネルギーを直接電気に変えるので、高い発電効率が得られる。

- ② 発電設備は、単セルを積層した構造となるため、目的に応じていろいろな容量を選定できる。また、効率が容量にあまり左右されず、部分負荷でも他の発電方式に比べ、大幅に低下しない。
- ③ 電池反応は燃焼反応ではないので、窒素酸化物 (NO_x) の発生が少ない。ま

た、可動部分がほとんどないので、騒音、振動の発生が少ない。

燃料電池は図1²⁾に示すように、燃料極(水素などの燃料が電気化学的に酸化される電極)、空気極(空気中の酸素等の酸化剤が電気化学的に還元される電極、酸素極ともいう)およびその間にある電解質(イオン電導を行う物質)から構成される。現在開発が進められている燃料電池は、電解質の違いにより、表1²⁾のように分類される。

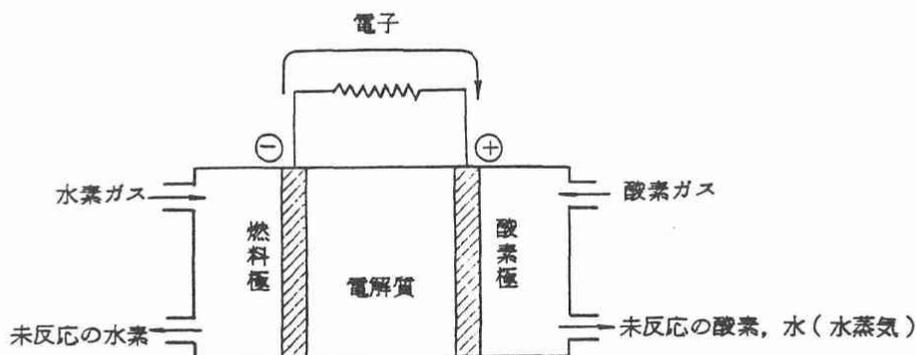


図1 燃料電池の基本構成

リン酸型 (PAFC) は、電解質にリン酸、電極に白金触媒を用い、作動温度は200℃前後であり、MW級の試験段階に入っているなど実用化の検討が最も進んでいる。

熔融炭酸塩型 (MCFC) は、電解質に熔融炭酸塩を用い、作動温度が700℃程度とリン酸型に比べ高く、そのため電池の反応が活発となり、内部抵抗が小さく、電極に白金を用いなくても高効率を得られる等の特徴を有し、現在100kW級のスタックに向けて研究開発を推進している。

固体電解質型 (SOFC) は、後述のように、電解質にジルコニア系セラミックスを用

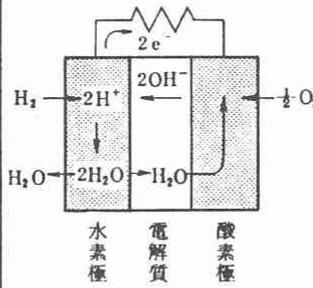
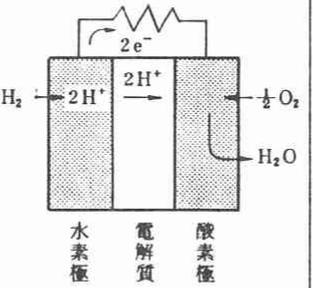
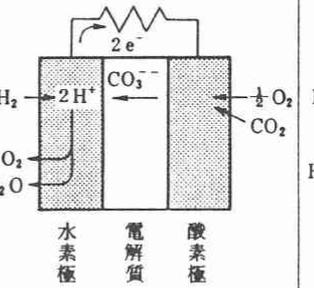
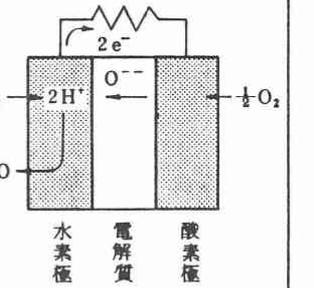
い、1000℃程度の高温で作動するもので、構成要素がすべて固体であるため構造が簡単で、かつ効率も高いことなどから期待されており、現在数kWから数十kW級の実験機の段階(円筒型)で研究が進んでいる。

2. SOFC開発の経緯¹⁻³⁾

燃料電池は、19世紀前半(1839年)イギリスのグローブ卿(Sir William R. Grove)によって発明されたとされている。これが燃料電池試作第1号である。

現在の燃料電池の基礎となる研究は、1950年代のベーコンによるアルカリ型燃料電池の

表1 燃料電池（水素—酸素系）の種類と特徴

種類	アルカリ型 (AFC)	リン酸型 (PAFC)	熔融炭酸塩型 (MCFC)	固体電解質型 (SOFC)
電解質	カ性カリ水溶液	リン酸	熔融炭酸塩	安定化ジルコニア
反応を仲介するイオン	OH^-	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
作動温度	常温～100℃	150～220℃	600～700℃	900～1000℃
反応物質	純水素	粗製水素	粗製水素	粗製水素
使用可能な燃料	精製された水素, 電解工業における副生水素など	天然ガス メタノール ナフサまでの軽質油	天然ガス メタノール 石油炭 石炭	天然ガス メタノール 石油炭 石炭
動作原理	 <p>水素極 電解質 酸素極</p> <p>(水素極反応) $\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ (酸素極反応) $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$</p>	 <p>水素極 電解質 酸素極</p> <p>$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$</p>	 <p>水素極 電解質 酸素極</p> <p>$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$</p>	 <p>水素極 電解質 酸素極</p> <p>$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$</p>
主な電池材料	合成樹脂可	カーボン系	ニッケル, ステンレス	セラミックス
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 触媒として必ずしも貴金属を必要としない 腐食性が低いので, 材料選択の幅が広い 	<ul style="list-style-type: none"> COの含有率が高いと白金触媒をいためる 排熱利用が可能 	<ul style="list-style-type: none"> COを含んでいてもよい CO₂は反応上必要であり循環使用される ニッケル系触媒が使用できる 排熱利用が可能 	<ul style="list-style-type: none"> COを含んでいてもよい 高温のため特に触媒を用いる必要がない 排熱利用が可能
内部改質*	不可	不可	可	可
システム発電効率	～60% (純水素使用)	35～45%	45～55%	50%以上

* 燃料の改質を電池容器内で行わせること

開発であり、それまでの燃料電池の研究が、電気化学の実験室的研究であったのに対し、ペーコンは水素酸素燃料電池の実用化をめざして、系統的で技術的な研究を行ったとされている。

やがて、1960年代の宇宙開発時代を迎えて、燃料電池は他の電源に比べて、長時間使用の場合の重量が小さく、回転部分がないためジャイロ作用がなく、発電の結果生成する純水が搭乗員の飲料水になるなどの理由から、人工衛星に必要な小型電源として、特に有人宇宙船の電源として使用されるようになった。

1965年に米国の有人宇宙船ジェミニに、ゼネラルエレクトリック（GE）社が開発した固体高分子電解質を用いた燃料電池が搭載された。

一方、アルカリ型は、先のペーコンから特許を取得した米国のユナイテッド航空機会社のプラットアンドホイットニー航空機事業部が開発を進め、アポロ計画の宇宙船の電源に採用された。

こうして、燃料電池は米国で宇宙用電源として実用化され、燃料電池の存在と可能性を広く印象づけたといえよう。

そして、1967年米国のガス会社を中心となり、TARGET (Team to Advanced Research for Gas Energy Transformation Inc.)計画を作り、天然ガスを燃料としたオンサイト用リン酸型燃料電池の開発に着手した。

TARGET計画はGRI (Gas Research Institute) に発展的に引き継がれた。

一方、電気事業用を目指した開発計画としてFCG (Fuel Cell Generator) - I計画を発足させ、電気事業用燃料電池発電所の開発

が進められた。

わが国においては、昭和49年、サンシャイン計画の水素利用技術の一環としてアルカリ型燃料電池の開発が取り上げられ、第一次石油危機がさらに拍車をかけ、昭和56年にムーンライト計画で燃料電池発電技術の研究開発プロジェクトが開始され積極的な開発が進められるようになった。

これらの計画が今日の実用間近かにあるリン酸型燃料電池システムの大きな基礎を築いたともいえよう。

さて、液体の電解質を利用した燃料電池に対して、SOFCは固体科学の発展というもうひとつの要素を必要とした。

固体の中に約 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ S/cm}$ 程度と比較的高いイオン導電率をもつ物質があり、これらを特に固体電解質と呼んでいる。ジルコニア (ZrO_2) に2価あるいは3価の金属酸化物を固溶して得られるいわゆる安定化ジルコニアは、 1000°C 以上の高温になると酸化物イオン (O^{2-}) 導電性を顕著に示すようになる。このような固体電解質の O^{2-} イオン導電性は、約1世紀前の1899年にネルンストによって、イットリア (Y_2O_3) を固溶して結晶を安定化したジルコニアに見出され、その後カルシア (CaO)、イッテルピア (Yb_2O_3) 等による固溶体にも認められている。現在、燃料電池を組むことができる固体電解質は様々あるが8~10mol%程度のイットリア (Y_2O_3) をジルコニア (ZrO_2) に固溶させたイットリア安定化ジルコニア (YSZ) が用いられることが多い。

ネルンストの発見以来、幾つかの先駆的研究を経て、西独のブラウンボベリウントシイエ社 (BBC社)、フランクフルトバテル研究

所、米国ウエスティングハウス社（WH社）などで、他の燃料電池と同様に平板状の電池を作り積層しようという試みがなされ、平板または円板状をした燃料電池が開発された。しかし、これらは現在の平板型セルの抱える課題と同じく、電解質板の脆弱さ、端部におけるガスシールの困難さ、直列接続の困難さ等から、実用化には至らなかった。

その後が開発されたのは、BBC社のテーパ円筒型、半円筒型、そして円筒型の源流ともいわれるWH社のベルスピゴット型である。しかし、これらの形態ではジルコニアの脆弱性の克服困難や単セル接続のための各セルのセラミック加工精度の高度さによるコスト等から実用化にはならなかった。その問題は、支持管方式をもたらし、WH社は多数のセルを直列に接続するいわゆる円筒横縞型セルへと展開させたが、インターコネクタの長時間の耐久性などが問題となることがわかった。1980年代に入り、WH社において、現在最も完成度が高いといわれている円筒縦縞型が登場する。このセルは、1987年から88年にかけて東京ガス、大阪ガスによる3kWモジュールの試験が行われ、さらに今年、関西電力、東京ガスおよび大阪ガスにより25kW級（2モジュール方式）が実証運転されるまで発展している。

西独では、ドルニエ社が高温水蒸気の電気分解を固体電解質を利用して行う計画（HOT ELLY）を1975年に開始した。

また、アライドシグナルエアロスペース社では、出力密度の向上を目的として、アルゴン国立研究所（ANL）の技術を継承して一体型（モノリシック型）セルの開発を、さらにセラマテック社、ジーテック社では、平

板型セルの開発を行っている。

わが国においては、電子技術総合研究所（電総研）が、1972年（昭和47年）の石油ショックを機に発足したサンシャイン計画において、水素エネルギーの有効利用に関連して研究を開始し、1981年（昭和56年）にムーンライト計画に移って今日に至っている。この間、円筒型セルの製作方法、発電システムの開発などの研究を進めており、国内各社への技術移転等を含め、わが国の開発の指導的な役割を果たしている。昭和62年に入り、化学技術研究所（化技研）がムーンライト計画に参加し、平板型セルの開発を行っている。大学においては、1960年代から始められ、当初はジルコニアに代わる新しい固体電解質を見出すことを主要な研究課題としていたが、1980年代には、セル開発を指向した研究が開始され、1986年には文部省科学研究補助金重点領域研究「エネルギー変換と高効率利用」の研究課題としてSOFCが取り上げられ現在に至っている。

民間においては、昭和60年頃から関心が高まり研究開発が行われるようになった。東京電力／三菱重工グループの円筒横縞型セルの試作や東燃、三洋電機の平板型セルなどが独自に開発が進められた。

現在、東京電力／電源開発／三菱重工のグループが円筒型セルで1kW発電に成功し、東燃では平板型で、200Wの出力を達成している。

平成元年度には、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）がムーンライト計画の一環として、数百W級のスタック開発を目指した要素技術の開発と発電システムの研究を5社・1研究所に委託し、開始した。

3. SOFCの技術開発状況

国内外の技術開発のレベルは、米国のWH社の円筒型セルによる25kWが最も進んでおり、わが国のkW級セルがそれに続いている。

3.1 わが国における開発状況

1) ムーンライト計画における技術開発

表2 ムーンライト計画による研究開発スケジュール

型式	年度	56	57	58	59	60	61	62	63	元	2	3	4	5	6	7	
リン酸型燃料電池	要素技術	56-57		58-59		60-61		62-63		元-2		3-4		5-6		7	
1000kW級発電プラント	基本設計	56-57		58-59		60-61		62-63		元-2		3-4		5-6		7	
オンサイト型	設計・製作・運転	56-57		58-59		60-61		62-63		元-2		3-4		5-6		7	
溶融炭酸塩型燃料電池	要素技術	56-57		58-59		60-61		62-63		元-2		3-4		5-6		7	
固体電解質型燃料電池	要素技術	56-57		58-59		60-61		62-63		元-2		3-4		5-6		7	
アルカリ型燃料電池	要素技術	56-57		58-59		60-61		62-63		元-2		3-4		5-6		7	
トータル・システム	要素技術	56-57		58-59		60-61		62-63		元-2		3-4		5-6		7	

注: 斜線部分はNEDOが開発を担当

昭和56年度より電子技術総合研究所で円筒型セルの開発が行われ、昭和62年度より化学技術研究所で平板型セルの開発が行われている。

NEDOは、このムーンライト計画の一環として、SOFCの大型化の可能性などの見極めを行い、今後の本格的な研究開発の推進に資することを目標として、平成元年度から平成3年度で数百W級のスタックの開発を目指している⁷⁾。研究テーマは、①セラミックセパレータ技術（高電子伝導性を持つセパレータの開発）、②合金セパレータ技術（セラミックスとの熱整合性のある金属セパレータの開発）、③共焼結技術（燃料ガスのシール及び各電池構成材料の電気的接触を同時に満足する共焼成技術の開発）、④コンポジット電極技術

燃料電池発電技術の研究開発プロジェクトは、昭和56年に始められたムーンライト計画に取り上げられ、積極的な開発が進められるようになった。このプロジェクトでは、リン酸型、溶融炭酸塩型および固体電解質型燃料電池を中心に進められている。ムーンライト計画のスケジュールを表2⁵⁾に示す。

（ガス反応に最適な構成を持つ高性能・高信頼性のある電極の開発）、⑤溶射法等による加工技術（溶射法等によるセルの各構成要素の溶射被膜製造技術の開発）、⑥発電システムの研究（種々の電池形式について研究開発課題の抽出・整理、システム構成の検討、概念設計等）である⁷⁾。

研究開発の実施体制を図2に示す。

2) 国内各研究機関による開発状況

イ. 電子技術総合研究所（電総研）

既に述べたように、電総研のSOFCの研究開発は、昭和47年のオイルショックを機に発足した昭和49年度のサンシャイン計画において水素エネルギーの有効利用に関連して開始され、昭和56年度からのムーンライト計画に移り今日に至っている。電総研では、円筒

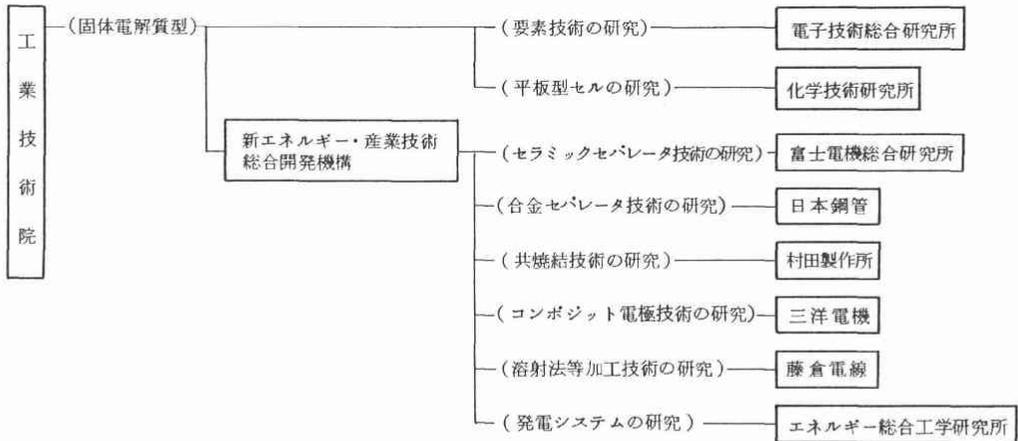


図2 ムーンライト計画におけるSOFC研究開発実施体制

型を基本に開発を進めており、昭和61年度には500W発電実験において、空気流量1100 l/min、水素流量192 l/minの条件で、セル電圧0.76V、電流密度63mA/cm²となり、1207Wが得られた^{18),19)}。発電装置は、スタックを48本並列接続したもので、単管電池は発電区間24mm、接続区間12mm、15素子直列型電池で、主な構成材料は、次のとおりである¹⁸⁾。

- 燃料極 : NiO/NiO+YSZ
- 電解質 : 8 mol%YSZ
- 空気極 : LaCoO₃

電池断面図は、5.1の1) 参照のこと。

ロ. 化学技術研究所 (化技研)

化技研は、昭和62年度より、ムーンライト計画に参加し、平板型セルの開発を行っており、燃料極、空気極と電解質を一緒にした三層一体化の研究を行っている⁵⁾。

ハ. 大学

大学では既述したように、ジルコニア、ペロブスカイト等の固体化学の基礎研究が積極的に進められており、世界のトップクラスにあると言える。現在は、室蘭工業大学、東京

大学、東京工業大学、横浜国立大学、名古屋大学、鳥取大学、三重大学、京都大学、九州大学などで研究が進められている⁸⁾。

ニ. ユーザーおよびメーカー^{6,12,13,14)}

ムーンライト計画におけるNEDOを中心としたグループの他、現在研究開発を積極的に行っているのは、次のとおりである。

東京電力/三菱重工業は、昭和61年より共同研究を開始し、63年度までに円筒横縞型セルを開発し、その性能は、35W/本(発電区間32cm)、200mA/cm²時セル電圧0.78V、燃料利用率58%であった。平成元年度には電源開発を加えた3社でモジュール化技術に取組み、最大出力約1.3kWを達成している。

また、東京電力、中部電力、関西電力、JFCC(ファインセラミックスセンター)のグループでも、電池構成、材料、薄膜の形成法などの基礎分野の研究を行っている。

東京ガスと大阪ガスでは、昭和62年11月より米国WH社から3kW実験機を購入し、両社ともに延べ4000時間を越える(大阪ガスはジェネレータを#1~#2に交換)運転を行っている。

さらに、関西電力、東京ガス、大阪ガスでは共同で、WH社から25kW級発電システムを導入し、運転実証試験を計画している。その現地試験は本年秋から1年間、関西電力六甲アイランド実験場において実施予定である。

石油精製大手の東燃でも、平板型で200Wスタックを実証している。

その他、九州電力、東邦ガス、電中研、石川島播磨重工業、東芝、三井造船、小野田セメントなどで研究開発を行っている。

3.2 海外における技術開発状況

1) 米国

米国では、WH社の30年以上の開発努力に代表されるように、長期的視点からSOFCの技術開発が進められており、技術的には世界で最も先行していることは、これまで述べたとおりである。開発体制は、米国エネルギー省(DOE)、米国国防省(DOD)、電力研究所(EPRI)、ガス研究所(GRI)等からの資金援助のもとに、アルゴンヌ国立研究所(ANL)、WH社、セラマテック社、ジーテック社、およびアライドシグナルエアロスペース社等で試験研究が実施されており、基礎的な研究は一部大学でも行われている。開発体制の概要を図3に示す。

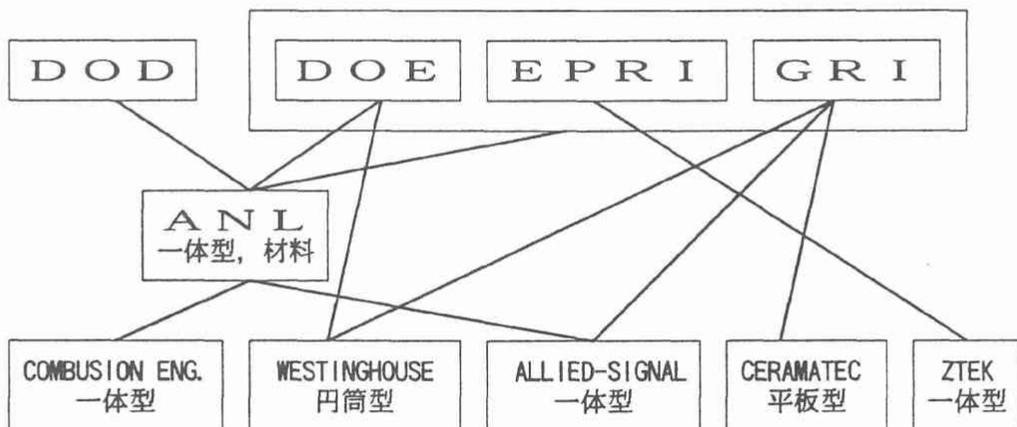


図3 米国におけるSOFC研究体制

WH社は、1962年末から1970年にかけて、米国内務省石炭局との契約により石炭利用の高温固体電解質型燃料電池の開発のためProject Fuel Cellと称する研究開発を行い、ベルスピゴット型と呼ばれる燃料電池を開発した。その後、先に述べたような経緯を経て、現在最も進んでいると言われている円筒縦縞型セルへ開発が進められていった。最近のWH社での開発概要を表3に示す²⁰⁾。

アルゴンヌ国立研究所(ANL)は、DO

Dの支援により、1983年より一体型(モノリシック型)と呼ばれる新しいタイプのSOFCを提案している。

アライドシグナルエアロスペース社では、ANLが提案したモノリシック型の開発を行っている。

また、セラマテック社では、GRIの支援により平板型の開発を行っている。

ジーテック社では、EPRIの支援により、平板型の開発を行っている。

表3 WH社SOFC開発の概要

Event	Achieved	Committed
15 Watt Cell	1981	
3 Cell Life Test (9000 hr)	1983	
24 Cell Bundle Test (2000 hr)	1985	
5 kW Generator	1986	
Direct Utilization of Natural Gas	1988	
Natural Gas Fueled Module (GRI)	1989	
Multi-kW Module (DOE)		1990
System Experimental Units:		
TVA	1986	
Osaka Gas	1987	
Tokyo Gas	1987	
Kansai Electric Power Co., Tokyo Gas, and Osaka Gas		1990

2) 欧州

欧州においては、1899年にネルンストによる安定化ジルコニアの酸化物イオン導電性の報告後、フランクフルトバテル研究所、BBC社で行われてきた研究成果が、西独ドルニエ社に継承されて研究開発が進められているが、近年CEC (Commission of European Communities)の下に、ドルニエ社、GEC、ジーメンス社等の9機関で研究が進められるようになり、活発化している^{15,16)}。

CECでは、1987年から2年間の計画で、2つの新型50Wマルチチャンネルハニカム型SOFCと3つの平板型(100W想定)SOFC等の開発が開始されている^{15,16)}。

以下の目標が設定されている¹⁶⁾。

- ・ 2 × 1kW SOFCユニット (1992)
- ・ 1 or 2 × 20kW SOFC (1995)
- ・ 200kWe コージェネレーションユニット (1997)

さらに、現在進行しているCECのプログ

ラム (1989~1992) では、次のことを含んでいる¹⁶⁾。

- ・ 金属バイポーラプレートの平板型セル1kWスタック (ジーメンス)
- ・ 改良型円筒の1kW SOFC (ABB)
- ・ セラミックバイポーラ板の100W平板型SOFC (インペリアルカレッジ)

西独では、1975年よりHOT ELLY計画と呼ばれるプロジェクトがドルニエ社等により開始され、高温水蒸気の電気分解システムを目指して研究が進められている。これは、SOFCの逆プロセスであるが、SOFC開発もこのプロジェクトの一環として取り上げられている¹⁷⁾。

その他、ノルウェー、スウェーデン、スイスなどでも研究が進められている。

4. SOFCの原理と特徴^{3,22)}

SOFCは、「まえがき」でも述べたように

- ①発電効率が約60%と高い。
- ②排熱温度が高

く、効率的な利用が可能。③石炭ガス、LNG等の各種の燃料が利用できる。④電池材料がすべて固体（主としてセラミックス）であり、長期耐久性、安定性に優れている。⑤さらに内部改質型（燃料電池本体内で、燃料改質を行う方法）が期待できる。一などの特徴を有している。

SOF Cの構成は、他の燃料電池と同様に、燃料、電極 | 電解質 | 電極、酸化剤で示され、燃料あるいは、酸化剤のいずれかがイオン化して電解質を流れる必要がある。

燃料として、水素ガス、酸化剤として酸素ガスの場合、電解質内を動きうるイオンにより二つに分けることができる。図4(a)のように水素がイオン化して電解質を通過するものと、(b)のように酸素がイオン化するものがあり、前者の電解質をプロトン伝導体といい、後者は酸素イオン伝導体であり、代表的なものとして安定化ジルコニアがある。両者とも、電池反応は、



である。

現在開発が進んでいるSOFCには、ほと

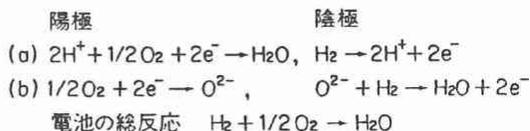
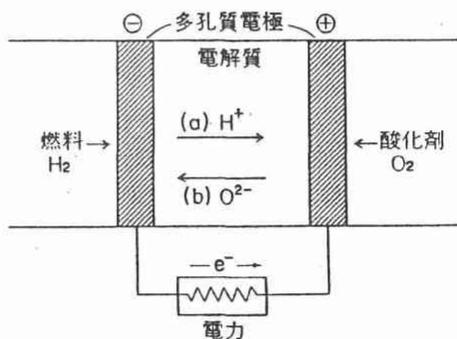


図4 水素-酸素燃料電池の作動原理図

んど安定化ジルコニア (ZrO_2 に8 mol%程度 Y_2O_3 を固溶させたもの、YSZと呼ぶ)が電解質として用いられている。水素酸素燃料電池を組むことができる固体電解質には他にも種々あるが、物性、化学的性質、機械的性質、工学的な技術の積み重ねなど種々の理由から使用されている。

SOF Cの特徴は、PAFCやMCFCなど他の燃料電池と異なり電解質が固体であるため、電池本体が液体を含まず全て固体（主としてセラミックス）で形成されるということである。

そのため、電池構成において、他の燃料電池では不可能な様々な形状が可能であり、現在、円筒、平板、一体型などの全てが固体であることの特徴を活かした様々な電池の構成方法が提案されている。

5. SOFCの種類と特徴

5.1 形状における種類

先に述べたように、SOFCの特徴として、他の燃料電池と異なり液体を含まず全て固体であるため、様々な形状が可能となることがあげられる。しかし、電解質をはじめとした電池主要部が液体を含む材料や金属に比べ脆く自己修復性の乏しいセラミックスになること、作動温度が高温であるため使用できる金属材料に制限があること、高温で酸素と燃料を分離しておく有効なシーリング材がないことなど種々の制約も存在している。これらの制約条件の基に、電解質や電極を如何に薄くし、しかも安定に支持するか等ということを中心に、3、4章で述べたように種々の形式が提案開発されてきた。現在研究されているSOFCの分類を図5に示す⁹⁾。

TYPES OF FUEL CELL CONCEPTS RIPE FOR COMMERCIALIZATION

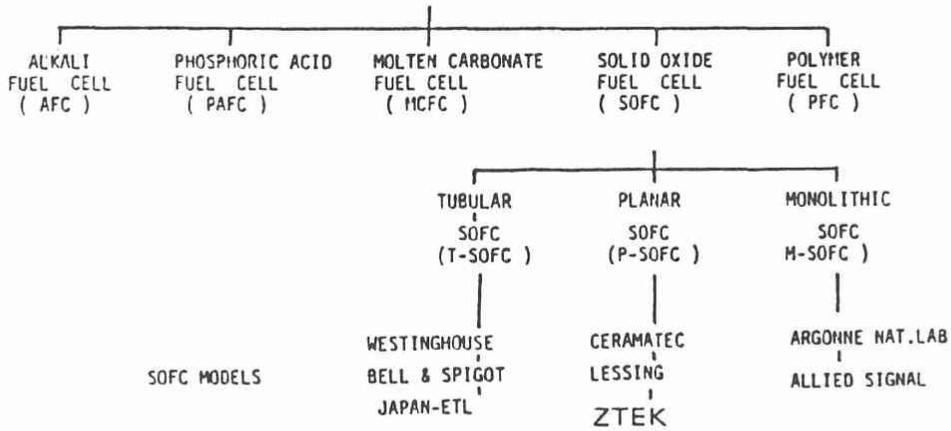


図5 SOFCの形状による分類

1) 円筒型 (tubular) セル

素子構造がほぼ確立し、製作技術やスタックの技術が最も進んでいる。これらのセルの特徴は強度のある円筒型にし、支持管を用いることで、セラミックスの脆弱性を緩和したこと等であり、さらにWH社の縦縞型ではシールレス構造を可能としたことにある。

代表的な円筒横縞型セルと円筒縦縞型セルの例をそれぞれ図6²³⁾、図7²¹⁾に示す。

2) 平板型 (planar) セル

平板型セルの開発は、2章でみてきたように円筒型より古く、SOFC開発の初期の段階では他の形式と同様平板状であった。しかし、セラミックス技術の未熟さと平板周辺部でのガスシール、熱膨張の吸収問題が解決できず開発は中断されていた¹⁾。近年、セラミックス技術の急速な進展のため、再び研究され始めている。この形状の特徴は、高出力密度、大型化および低コスト化と言われている。平板型セルの例を図8⁹⁾に示す。

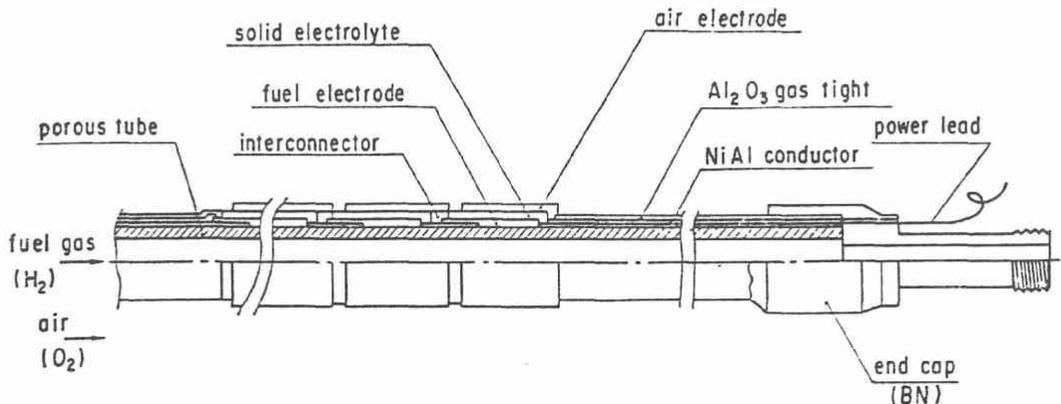
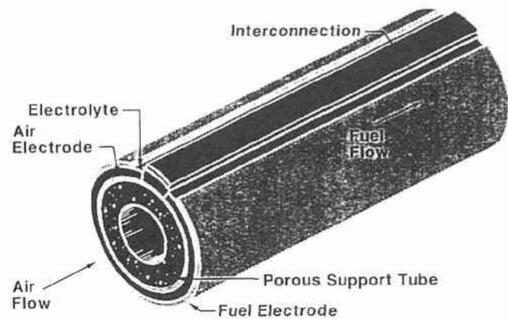
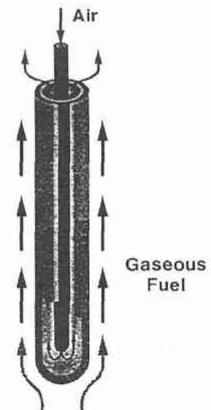


図6 円筒横縞型SOFC (電総研)

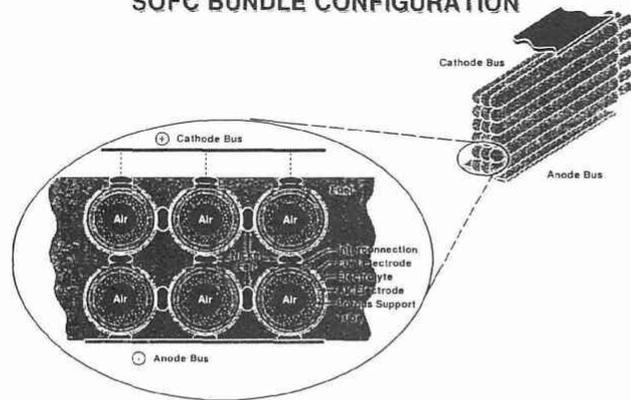
WESTINGHOUSE SOLID OXIDE FUEL CELL



SOLID OXIDE FUEL CELL: FUEL & AIR FLOW PATHS



SOFC BUNDLE CONFIGURATION



SOFC MODULE

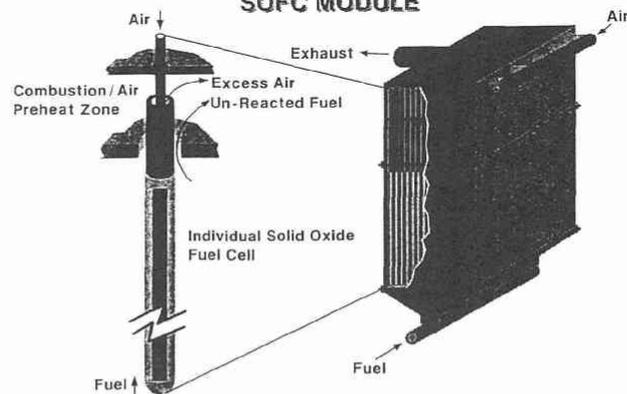


图7 円筒縦縞型SOFC (WH社)

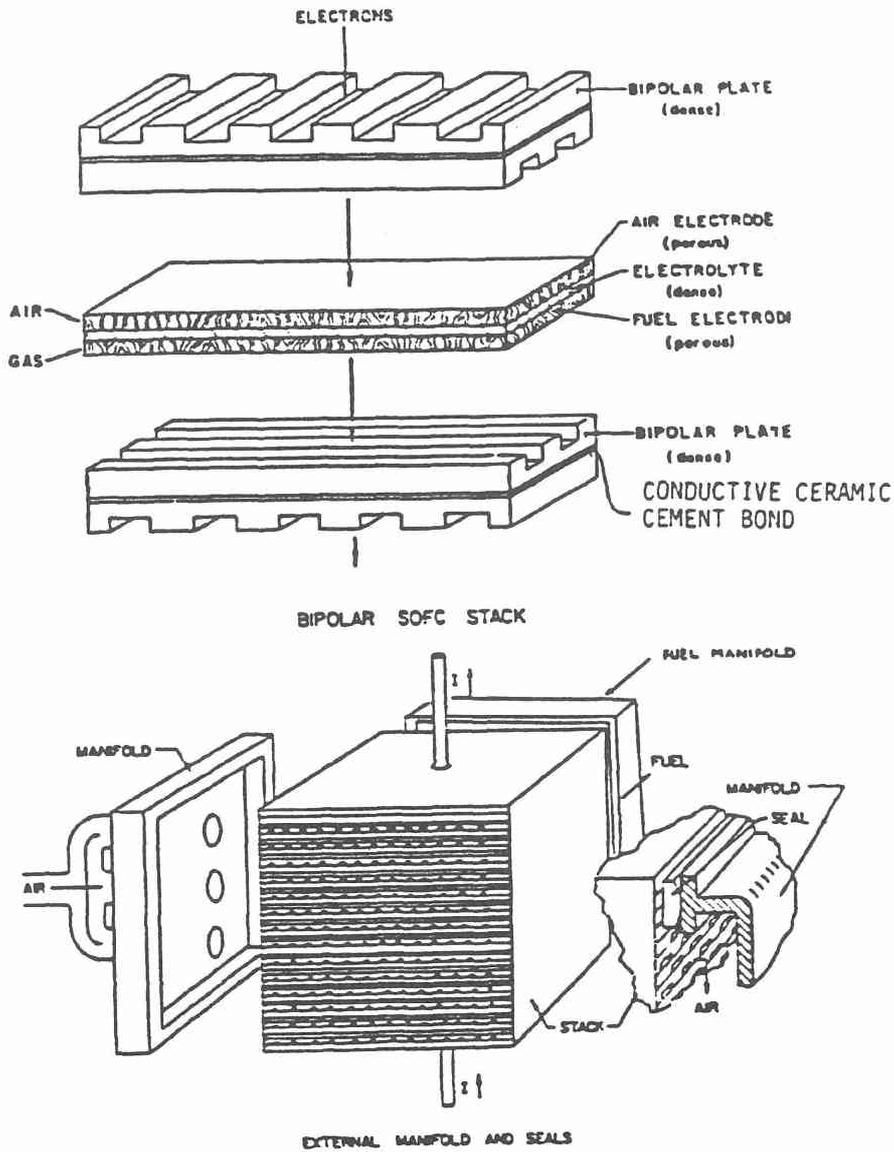


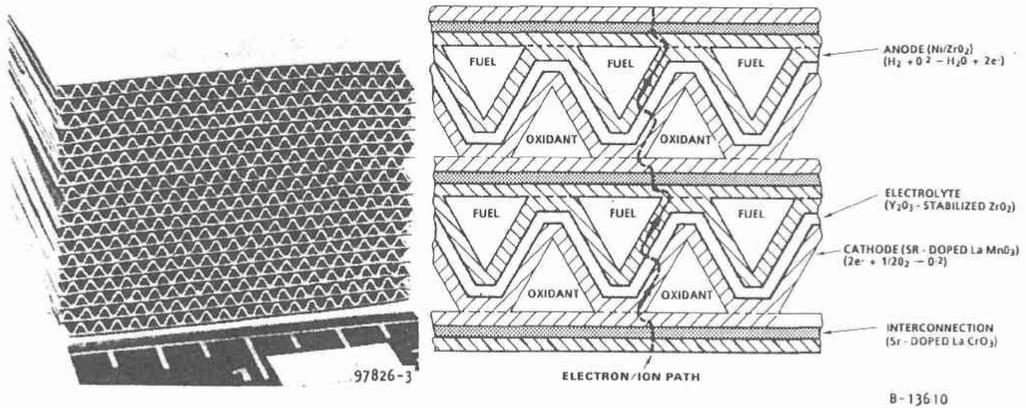
図8 平板型SOFC

3) 一体型 (monolithic) セル
 一体型セルの代表的なものは、米国のアルゴン国立研究所 (ANL) で開発が始まったセルで、現在アライドシグナルエアロスペース社でも開発を行っている。このセルは、各構成材料を積層してから最後に焼結するものである。この形状には2種類あり、燃料と

空気を直交に流すものと燃料と空気を並行に流すものがある(図9)²⁴⁾。

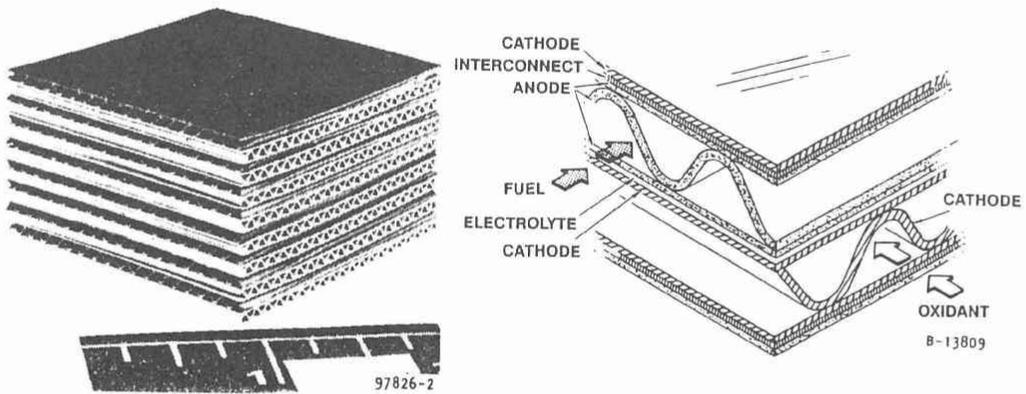
特徴は、小型セルではあるが超高出力が得られることがあげられる。

その他にハニカム型といわれるものもあるが割愛させていただく。



B-13610

(a) 並行流



B-13809

(b) 直交流

図9 一体型SOFC

5.2 製造技術

1) 材料

現在各構成材料には、固体電解質としてはイットリア安定化ジルコニア(YSZ)、燃料極としてはニッケルジルコニアサーメット、空気極では、アルカリ土類をドーブしたランタンマンガナイトが用いられることが多い。

電池の最も基本的な構成要素である電解質を何にするかが燃料電池の材料選択のスタートとも言える。他の材料は電解質に合わせて選択され、安定化ジルコニアの使用を前提に

すると、電極、インターコネクタ、支持材料は全て①ジルコニアと反応しないこと、②ジルコニアと熱膨張率が合っていることなどが必要条件になってくる。

イ. 固体電解質

固体電解質は、酸素イオンに対し導電性を示し、電子、ガスの移動を妨げる高温で安定な材料であることで、次のような特性が要求される。

①イオン導電率が大きいこと。

②イオン輸率が1に近く、ほとんど電子導

電性を示さないこと。

- ③高温で、物理的にも化学的にも安定で耐久性のあること。
- ④ガスを透過しないこと。
- ⑤資源的に豊富で安価なこと。

その諸条件をかなりよく満足して、現在開発が進められているSOFCの電解質には、ほとんどイットリア安定化ジルコニア（YSZ）が用いられることは既に述べたが、他の酸化物イオン導電性固体電解質、例えばYSZより高い導電率を示す酸化ビスマス固溶体や酸化セリウム固溶体、またYSZより機械的強度に優る部分安定化ジルコニア（2~3 mol %程度の Y_2O_3 などを ZrO_2 に固溶させたもの、PSZという）なども研究されており、さらにプロトン導電性固体電解質を用いた基礎研究も進められている。

ロ. 電 極

電極材料としては、次のような特性が要求される¹⁾。

- ①大きな電子導電率のあること。
- ②使用雰囲気中で安定な物質であること。
- ③電解質と反応しない物質であること。
- ④電解質と熱膨張率がほぼ等しいこと。
- ⑤資源的に豊富で、価格の安いこと。

燃料極は、電解質を拡散してきた酸素イオンを電解質との界面で燃料と反応させ、電子を放出させるとともに、反応生成物を排除する役割を果たす。このため、導電率が高く、燃料および反応生成物を容易に通過させるような高い気孔率を有する必要がある。

現在、ニッケルジルコニアサーメットが高温での焼結防止とYSZの熱膨張との整合をとるために使用検討されている¹⁾。

空気極は、空気中の酸素を電解質境界など

でイオン化し、酸素イオンを効率よく電解質へ供給するとともに電子を受け止める役割を果たす。

現在、ランタン系ペロブスカイト型複合酸化物が研究されている。LaCoO₃系は導電性が高いが熱膨張率が大きいため、La_{1-x}Sr_xMnO₃（X=0.2~0.4）が使用されている¹⁾。

その他の構成部材、インターコネクタなどについては、割愛させていただく。

2) 製 造

SOFCはセラミック構造体であるため、基本的にはセラミック薄膜技術を応用した種々の方法が適用できると考えられている。

膜は、電解質などの緻密膜と電極などの多孔質膜に分けることができ、それぞれの種々の要求条件を満たしたものを製造しなければならない。

また、成膜法は乾式法と湿式法に分けられる。乾式法には、溶射法、EVDなどのCVD法、スパッタリング法などのPVD法があり、現在はEVD法や溶射法が代表的なものになっている。湿式法には、テープキャスト法、スリップキャスト法、押し成型法などがある。

SOFCの原理的な構造は前述したように、燃料極、固体電解質、空気極のサンドイッチ型の構造である。しかし、この単電池の起電力は1V以下であり、取り出せる電流も単位面積当たり数百mA程度である。従って、実用化するためには、この単電池を直列、並列につないだ集合電池（スタック）を構成することが必要となる。

単電池をつなぐ部分はインターコネクタとよばれており、燃料と酸素を分離するなどの

役割をも果たす。

燃料電池開発に当たっては、単電池の性能を上げるだけでなく、いかにして集合電池を構成するかが重要な課題となっている。

おわりに

ここ数年の間に最近のセラミックス技術開発の進歩に加えて、地球環境問題の社会的関心の高まり等から、固体電解質型燃料電池が急激に注目されるようになったが、固体電解質型燃料電池は、基礎研究から開発研究へ移行して日が浅いために、まだ要素技術、シス

テム化技術全般にわたり非常に多くの技術開発課題を抱えているのが現状である。現在の技術レベルは、繰り返した述べてように、米国WH社の25kW発電システムが最も進んでおり、わが国のkW級がそれに続いている段階である。しかし、技術開発は加速度を増して急速確実に進んでおり、今後の研究開発が大いに期待される場所である。

なお、本稿をとりまとめるにあたり、関係の方々にご協力をいただいた。ここに、紙面を借りて深く感謝の意を表する次第である。

(いわき ひでお 主任研究員)

参考文献

- 1) 大野, 固体電解質型燃料電池の開発の将来動向, 平成元年電気学会全国大会, S.13-3
- 2) 高倉他, 新エネルギーの展望「燃料電池編(改訂版)」, (勸エネルギー総合工学研究所)
- 3) 高橋, 燃料電池, 共立出版
- 4) 佐藤, 固体電解質型燃料電池, 燃料電池の技術と経済性, シーエムシー
- 5) 栗原, 燃料電池発電技術, 省エネルギー, Vol. 41, No. 1, 1989
- 6) 竹内, 25kW級 SOFC 発電システム実証運転研究, FC NEWS LETTER, Vol. 2, No. 2, 燃料電池開発情報センター
- 7) 渋谷, <研究開発・プロジェクト> NEDO, SOFC の開発に着手, FC NEWS LETTER, Vol. 2, No. 2, 燃料電池開発情報センター
- 8) 「エネルギーの変換技術」, 文部省科学研究費補助金重点領域研究, 平成元年度研究成果報告書
- 9) BRIAN RILEY, SOLID OXIDE FUEL CELLS-THE NEXT STAGE, Journal of Power Sources, 29 (1990), P223~237
- 10) B. C. H. Steele, Proceedings of SOFC-NAGOYA, P77~85, 1989
- 11) N. Q. Minh, Proceedings of SOFC-NAGOYA, P37~41, 1989
- 12) 梅村他, SOFC への取組み, 第9回 SOFC 研究会資料, SOFC 研究会 (1990)
- 13) 玄後他, SOFC 1kWモジュールの開発, 第9回 SOFC 研究会資料, SOFC 研究会 (1990)
- 14) F. Umemura, et al., Proceedings of SOFC-NAGOYA, P15~20, 1989
- 15) P. Zegers, Fuel Cell Seminar, P5~8, 1988
- 16) P. Zegers, Power Sources, 29 (1990), 133-142
- 17) 伊藤他, 海外における燃料電池の開発動向, 平成元年電気学会全国大会, S.13-5
- 18) 春日他, 固体電解質型燃料電池500W 発電実験, 昭和63年電気学会全国大会
- 19) T. Yagawa, Proceedings of the first international symposium on SOFC, P387~393, 1989
- 20) W. J. Dollard, Proceedings of SOFC-NAGOYA, P1~8, 1989

- 21) W. J. Dollard, et al., FUEL CELL TECHNOLOGY AND APPLICATIONS, EXTENDED ABSTRACTS, PEO, P262~273 (1987)
- 22) 荒井, 高温固体電解質型燃料電池, 化学, VOL. 43, NO. 10, P698~699
- 23) 加賀他, 固体電解質型燃料電池の長時間運転試験装置の試作と試験
- 24) N. Q. Minh, Proceedings of SOFC-NAGOYA, P37~41, 1989

研究所のうごき

(平成2年4月1日～6月30日)

◇ 理事会開催

第31回理事会

日時：6月18日(月) 12:00～13:00

場所：経団連会館(9階) 906号室

議題：

1. 第一号議案 平成元年度事業報告書および収支決算書(案)について

◇ 月例研究会

第69回月例研究会

日時：4月27日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館(6階) 中ホール

議題：

1. チェルノブイリ事故と欧州労働組合の対応(プロジェクト試験研究部部長 副主席研究員 松井一秋)
2. 原子力安全問題の現状と今後の課題(資源エネルギー庁 原子力発電安全管理課長 倉重有幸氏)

第70回月例研究会

日時：5月25日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館(7階) 第1会議室

議題：

1. 最近の電力技術の動向について(資源エネルギー庁 公益事業部技術課長 並木徹氏)
2. CVCFの現状と今後の課題(㈱富士電機総合研究所電子機器開発本部強電電子開発部電力変換技術第一課課長 黒木一男氏)

第71回月例研究会

日時：6月29日(金) 14:00～16:00

場所：霞会館(9階) まつ・たけ

議題：

1. 総合エネルギー調査会中間報告総論—地球規模のエネルギー新潮流への挑戦—(資源エネルギー庁 企画調査課課長補

佐 真田 晃氏)

2. 地球環境時代の石炭利用法—開発途上国のエネルギー自給への一提案—(プロジェクト試験研究部部長 副主席研究員 片山優久雄)

◇ 主なできごと

- 4月5日(木) 第2回高プルトニウム利用軽水炉検討委員会開催
- 9日(月) 第2回軽油の低硫黄化に関する影響調査委員会開催
- 5月10日(木) 第3回高プルトニウム利用軽水炉検討委員会開催
- 11日(金) 第1回エネルギー需要予測検討委員会開催
- 16日(水) 第1回シミュレーション技術部会開催
第69回原子力プラント運転の信頼性に関する研究会開催
- 23日(水) 第3回電気自動車の導入とその社会、経済、環境・エネルギー的インパクトに関する研究委員会開催
- 6月1日(金) 第1回高度負荷集中制御システム検討委員会開催
- 7日(木) 第1回高プルトニウム利用軽水炉検討委員会準備会開催
- 14日(木) 第4回高プルトニウム利用軽水炉検討委員会開催
- 15日(金) 第2回軽油の低硫黄化に関する影響調査分科会開催
- 25日(月) 第3回軽油の低硫黄化に関する影響調査委員会開催
- 27日(水) 第1回火力発電所の大気影響評価技術実証調査委員会開催
第1回エネルギー技術データ・ベース体系化法の開発研究 石炭技術分科会開催
- 第1回M I B E導入に関する調査委員会試験分科会開催
- 28日(木) 第1回M I B E導入に関する調査委員会調査分科会開催

◇ 人事異動

- 4月1日付
(採用)
池田郁子 研究員に任命
総務部に配属
- (昇任)
蓮池 宏 主任研究員に任命
- 5月31日付
(退任)
プロジェクト試験研究部 主任研究員
福田勇三 (出向解除)
- 6月1日付
(採用)
佐藤富男 主任研究員に任命
プロジェクト試験研究部に配属
- 蛭沢重信 主任研究員に任命
プロジェクト試験研究部に配属
- 6月28日付
(退任)
プロジェクト試験研究部 主任研究員
岸 孝雄 (出向解除)
- 6月29日付
(採用)
磯 修 主任研究員に任命
プロジェクト試験研究部に配属

松葉 明 主任研究員に任命
プロジェクト試験研究部に配属

- 6月30日付
(退任)
プロジェクト試験研究部 主管研究員
中野重夫 (出向解除)

◇ その他

海外出張

- (1) 黒沢厚志研究員は、高度計算システムに関する海外調査のため、5月5日から5月12日の間、アメリカへ出張した。
- (2) 松井一秋副主席研究員は、中小型炉専門家会議出席のため、6月23日から7月1日の間、フランスへ出張した。

[訂正]

先の第13巻1号誌「研究所のうごき」の外国出張欄第2項を下記の通り訂正致します。

- (2) 東京大学名誉教授三島良績氏は、A A A S Annual Meeting に出席・招待講演のため、2月13日から2月20日の間アメリカへ出張した。

季報エネルギー総合工学 第13巻第2号

平成2年7月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 508-8891

無断転載を禁じます。(印刷) 和光堂印刷株式会社