



各種冷却材を有する高速増殖炉に関する プラント設計評価(1) －ナトリウム冷却炉、重金属冷却炉、ガス冷却炉の検討－

此村 守 島川 佳郎 堀 徹 川崎 信史*
江沼 康弘 木田 正則 笠井 重夫 一宮 正和
大洗工学センター システム技術開発部
*大洗工学センター 要素技術開発部

Comparative Design Study of FR Plants with Various Coolants(1) － Studies on Na Coolant FR, Pb-Bi Coolant FR, Gas Coolant FR －

Mamoru KONOMURA Yoshio SHIMAKAWA Toru HORI Nobuchika KAWASAKI*
Yasuhiro ENUMA Masanori KIDA Shigeo KASAI Masakazu ICHIMIYA

System Engineering and Technology Division, O-arai Engineering Center
* Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

実用化戦略調査研究フェーズⅠにおいて、多様な冷却材を有する高速増殖炉のプラント設計を行った。本稿ではナトリウム冷却炉、重金属冷却炉及びガス冷却炉の研究結果を詳述する。設計目標は建設単価が20万円/kWeとなることと設定した。この結果、ナトリウム冷却炉ではこの目標を満たすことが可能であること、また鉛ビスマス冷却炉やガス冷却炉でも、まだ目標値よりはやや高いものの、一層の工夫でこの目標を満たす見通しのあることが分かった。

In Phase I of the Feasibility Studies on the Commercialized Fast Reactor (FR) Cycle System, plant designs on FR were performed with various coolants. This report describes the plant designs on FR with sodium, lead-bismuth, CO₂ gas and He gas coolants. A construction cost of 0.2 million yen/kWe was set up as a design goal. The result is as follows: The sodium reactor has a capability to obtain the goal, and lead-bismuth and gas reactors may satisfy the goal with further improvements.

キーワード

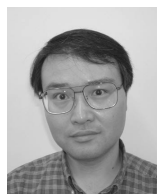
高速増殖炉，プラント設計，冷却材，ナトリウム，鉛ビスマス，炭酸ガス，ヘリウムガス

Fast Reactor, Plant Design, Coolant, Sodium, Lead-Bismuth, CO₂ Gas, He Gas



此村 守

FBRシステムグループリーダー
原子炉プラント設計研究及びグループ総括に従事
工学博士



島川 佳郎

FBRシステムグループ所属
ナトリウム冷却炉の設計研究に従事



堀 徹

FBRシステムグループ所属
Na炉(2次系簡素化)、小型炉設計に従事
核燃料取扱主任者、第1種放射線取扱主任者



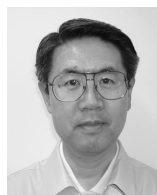
川崎 信史

構造信頼性研究グループ所属
副主任研究員
高温構造材料設計基準に従事



江沼 康弘

FBRシステムグループ所属
副主任研究員
重金属冷却炉のシステム設計に従事



木田 正則

FBRシステムグループ所属
研究主幹
ガス炉、重金属炉の設計に従事



笠井 重夫

FBRシステムグループ所属
研究主幹
ナトリウム炉設計総括、小型炉設計総括に従事



一宮 正和

システム技術開発部長
FBRシステム設計に従事
工学博士

1. はじめに

1999年度から2カ年の予定で実施した実用化戦略調査研究フェーズⅠが2001年3月に完了し、2001年4月からフェーズⅡとして、新たな研究段階に入った。フェーズⅠでは高速増殖炉の冷却材として使用できるものほぼすべてを対象とし、既存の知見に基づいて、有望なシステムを構築することを目的とした。フェーズⅡでは冷却材ごとに構築した有望なシステムの予備的な概念設計を行うと共に、その成立性を見通すための要素技術開発を行い、候補概念について成立性の見極めを行うことを目的としている。本稿は、フェーズⅠにおけるプラント設計研究の成果を報告するものである。

実用化戦略調査研究では、実用化段階の原子炉プラント像を描くことを目的としている。その際に、図1に示すように、安全性を前提として、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性の五つの目標を満足することを設計要求条件として設定した。この中で、特に経済性と安全性とが原子炉プラントの設計に大きく影響する。これらの要求を実用化段階で実現するプラントは、必ずしもナトリウム（以下、Na）を冷却材とするものでなくともよい。したがって、高速中性子を利用する高速炉あるいは高速増殖炉を成立させる冷却材は、すべて本研究の対象とした。

このため、過去に実施された設計、実際に建設

された原子炉について、広く文献を検討すると共に、国内外に広くアイデアを募り、上述の五つの目標を満たし得るプラント像を追求した。これにより、本研究を直接実施していない研究開発者の見解も取り入れたものとなっている。

研究の目的は、対象としたすべての冷却材について、上記目標を満たし得る独創性のあるプラント概念を構築し、その評価を共通の指標で行い、課題を摘出することである。経済性の共通の指標としては、「物量」及び「建設コスト」を採用した。

以下では、順に、(i) Na冷却炉、(ii) 重金属冷却炉、(iii) ガス冷却炉の研究結果を詳述する。また、(i) 水冷却炉、(ii) 溶融塩炉、(iii) 小型炉及び六つの炉型の総合評価については、「各種冷却材を有する高速増殖炉に関するプラント設計評価(2)」に詳述する。

本研究は、「高速増殖炉システムの実用化調査研究に関する協力協定」に基づき実施したサイクル機構と日本原子力発電(株)(9電力会社、電源開発株式会社及び日本原子力発電(株)の代表)との共有成果である。また、本研究には、「核燃料サイクル開発機構と財団法人電力中央研究所との原子力の研究開発に関する研究協力協定」に基づく共同研究の成果及び(財)電力中央研究所からの開示を受けた技術情報、並びに、「日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構との間の高速増殖

安全性	炉	○炉心損傷に至る恐れのある事象の発生を防止するとともに、その発生を仮定しても原子炉内で自然に終息
燃料サイクル		○臨界安全、閉じ込め機能に十分な対策を施す ○取扱物質の特性(化学的活性度、毒性等)やプロセス条件(運転温度等)を踏まえた安全対策
経済性		○将来の軽水炉に比肩する経済性の達成 ○コスト目標 ・炉の建設費：20万円/kWe ・再処理費：27万円/kgHM ・燃料製造費：16万円/kgHM
資源有効利用性		○高増殖から低増殖、TRU燃焼まで柔軟に対応 ○高増殖としては、増殖比1.2程度を目標
環境負荷低減性		○TRU燃焼及び長半減期FPの核変換により、放射性廃棄物量を低減 ○施設の運転・保守及び廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物量の低減
核拡散抵抗性		○FBRサイクルの中で純粋なプルトニウムが単独で存在しないこと ○核物質防護性及び保障措置性の対応が良好な設計

図1 FBRサイクルの開発目標

炉サイクルの実用化戦略調査研究に関する研究協力取り決め」に基づく共有成果を含む。

2. Na冷却炉

Na冷却炉については、もんじゅ以降、様々な経済性向上方策が検討されてきた。実証炉設計研究では、トップエントリー配管の採用、水平免震システムの導入等により、建設費37.6万円/kWe（100万kWe換算値）までのコストダウンが達成されているが、本研究における経済性目標は20万円/kWeであり、大幅なコストダウンが更に必要である。

建設費20万円/kWeに向けてのコストダウンの考え方を図2に示す。同図に示すように、本研究では、「スケールメリットの追求」、「標準化・習熟効果等の追求」及び「システムの改善」という三つのアプローチにより経済性目標の達成を目指している。

「スケールメリットの追求」は、1原子炉当たりの出力を極力大きくして建設費低減を図るものであり、「標準化・習熟効果等の追求」は、同一仕様の原子炉を複数基建設してその量産効果等により建設費低減を図るものである。また、「システムの

改善」は、種々の設計上の工夫によりシステムを簡素化し、主要な機器・系統の物量を削減すると共にバランスオブプラント（原子炉及び主冷却設備以外の設備、以下、BOP）、建屋容積の削減を図るものである。

本研究では、主要なNa冷却炉のシステム改善方策として、①原子炉構造のコンパクト化、②配管短縮化、③ループ数削減、④機器合体等を検討している。これらは、これまでの設計条件を超えた領域にまで踏み込んだ革新的な概念であるが、現在研究開発が進められつつある将来技術（高強度の新材料（12Cr系鋼）、新高温構造設計基準、3次元免震技術、再臨界回避方策等）を採用することや、Na冷却材の持つ固有の長所（高沸点、高熱伝導率）を最大限に活かすこと等により、現実のものになり得ると考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では経済性目標の達成に向けて、次の二つのNa冷却炉概念を検討している。

① Na冷却大型炉

出力を150万kWeとしてスケールメリットを追求するとともに、ツインプラント（合計出力300万kWe）として設備の共有化を進め、かつ、システ

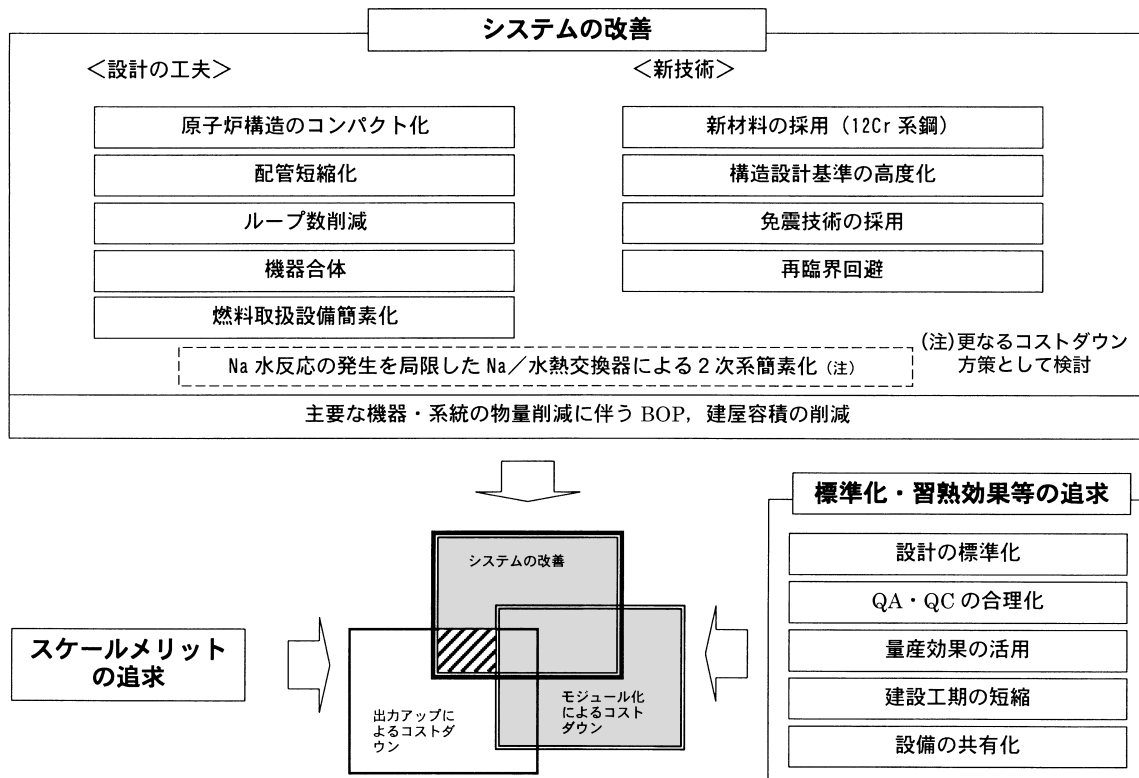


図2 建設単価20万/kWeに向けてのコストダウンの考え方

ムの改善による物量削減を図った概念。

② Na冷却中型モジュール炉

出力を50万kWeに抑えた6モジュールプラント（合計出力300万kWe）として設計の標準化や量産効果を追求し、かつ、システムの改善による物量削減を図った概念。

これらの二つの炉概念は、いずれも2次冷却系を有する概念として検討しているが、本研究では経済性向上を更に図るという観点から、不活性中間媒体によりNa水反応を局限し、2次冷却系の大幅な簡素化を可能とする新型の蒸気発生器（以下、SG）を採用した2次系簡素化概念についても検討を進めている。

以下、Na冷却大型炉、Na冷却中型モジュール炉及び2次系簡素化概念の検討状況について述べる。

2.1 Na冷却大型炉

(1) 候補概念の抽出

フェーズⅠでは、スケールメリットを追求した大型炉として、次の四つのNa冷却大型炉候補概念を設定した（図3参照）。

1) ループ型炉

① 1次系機器合体・ループ数削減

2) タンク型炉

① 2次系機器合体・ループ数削減

② 機器合体・集中配置

③ 機器・系統コンパクト化

これらの候補概念について、前述の5項目の設計要求への適合性を検討したが、いずれの概念も設計要求に適合でき、経済性目標をクリアできる見通しがあることが分かった。また、図3に示すように、1次系機器を合体し、ループ数を2ループに削減したループ型炉は、これらの4概念の中で、原子炉及び主冷却設備（以下、NSSS）物量及び原子炉建屋容積が最小となることが分かった。そこで、ループ型炉については、経済性目標をクリアする見通しのある有望な候補概念と位置付けて、設計検討を進めることとした。

一方、タンク型炉については、いずれの概念も物量がループ型炉より大きくなった。しかしながら、これらの三つの概念で採用されているコストダウン方策はそれぞれ異なっており、さらなる物量削減の余地があると考えられた。そこで、これらの概念を統合し、互いの長所を相互に取り入れることにより、より優れた経済性を有する新たなタンク型炉概念の構築を図ることとした。

(2) 候補概念の特徴

上述の方針に沿って検討したNa冷却大型炉の候補概念の特徴を以下にまとめる。

1) ループ型炉（図4及び図5参照）

① 原子炉構造のコンパクト化

炉心のコンパクト化、炉内燃料取扱方式のコンパクト化により炉容器径を既存の工作機械による

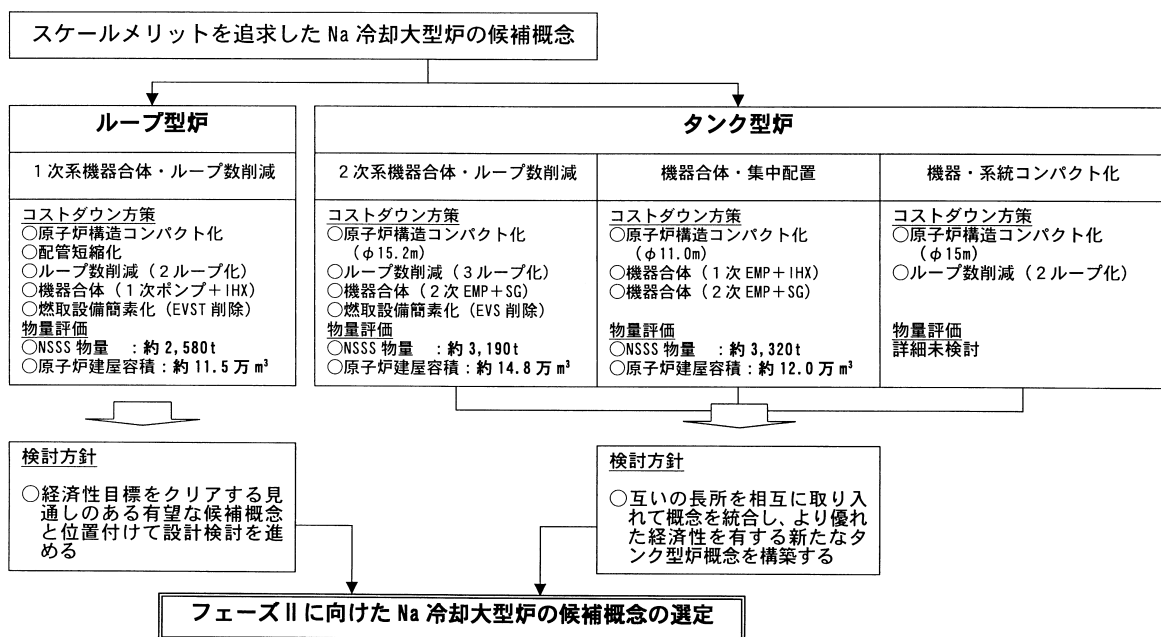


図3 Na冷却大型炉の候補概念抽出

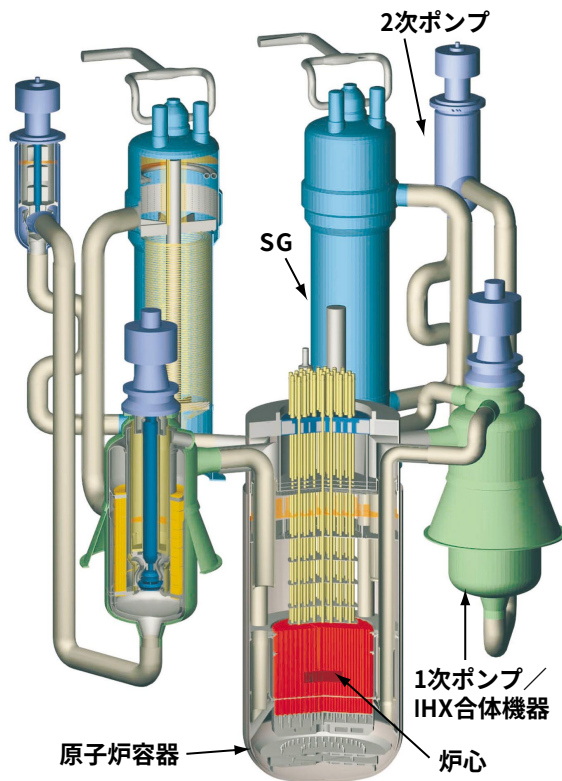


図4 Na冷却大型ループ型炉のプラント概念

リング鍛造が可能な範囲($\phi 9\text{m}$ 台)に抑えている。また、3次元免震技術の採用による地震入力軽減、再臨界回避による炉心崩壊事故(以下、CDA)荷重の軽減等により炉容器を薄肉化(30mm)するとともに、炉壁保護構造や炉心支持構造の簡素

化を進めている。

② 配管短縮化

低熱膨張率、高強度の12Cr系鋼の採用及び現行基準の持つ裕度を合理化した構造設計基準の高度化等により配管を大幅に短縮し、コンパクトな機器配置を実現している。

③ ループ数削減

Na冷却材に固有の特長(低圧力での運転が可能、高い伝熱能力等)の活用及び12Cr系鋼の採用等により、熱交換器の大型化や伝熱構造のコンパクト化、すなわち、熱交換器1基当たりの出力増加や冷却系1ループ当たりの出力増加が可能となる。構造健全性や製作性を見通せる範囲で冷却系機器の大型化と配管の大口径化を図り、2ループ構成として冷却系統を簡素化している。

④ 1次系機器合体

1次ポンプ(機械式)と中間熱交換器(以下、IHx)を合体して、冷却系統の簡素化を図るとともに、クロスオーバーレグ配管を削除している。

⑤ 燃料取扱設備の簡素化

高発熱の使用済燃料を水プールで直接貯蔵する簡素化燃料取扱設備を採用し、炉外燃料貯蔵槽(EVST)及びその冷却系を削除している。

⑥ ツインプラント化

ツインプラントとして計画し、設備の共用化、設備容量の削減を図っている。

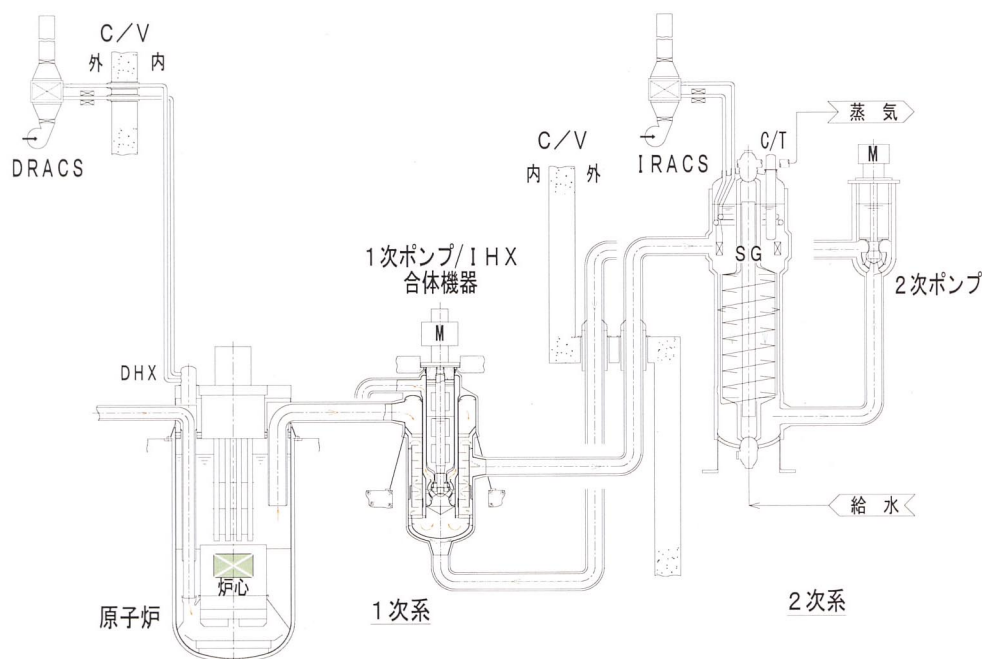


図5 Na冷却大型タンク型炉のプラント概念

2) タンク型炉 (図6 参照)

① 炉容器径の縮小

炉容器内の機器の配置効率向上を意図して平面形状を湾曲長円形としたIHX (湾曲長円形IHX: 図7 参照) を採用している。これにより、炉心のコンパクト化や炉内燃料取扱方式のコンパクト化と併せて、炉容器径を13.3mまで縮小している。また、ループ型炉と同様、3次元免震採用による地震入力軽減、再臨界回避によるCDA荷重軽減等により炉容器を薄肉化 (25mm) している。

② ループ数削減

炉容器内の機器の配置効率等を考慮して、1次系ポンプは3基としているが、冷却システムの簡素化を

意図して2次系を2ループ構成とし、IHX、SG及び2次ポンプをそれぞれ2基としている。

③ 2次系機器合体

2次ポンプに電磁ポンプを採用し、2次ポンプとSGと合体して、冷却システムの簡素化を図っている。

④ 燃料取扱設備の簡素化

ループ型炉と同様。

⑤ ツインプラント化

ループ型炉と同様。

(3) 比較検討

プラント設計の評価に際しては、経済性、安全性のほかに、構造健全性、製作建設性及び運転・保守補修性の観点からの評価が重要になる。上述の二つのNa冷却大型炉 (ループ型炉及びタンク型炉) について、これら五つの項目を比較検討した結果を以下にまとめる。

1) 経済性 (表1 参照)

より優れた経済性を目指した概念統合の結果、タンク型炉のNSSS合計物量、原子炉建屋容積等は相当削減されたが、ループ型炉の方が物量は幾分小さく、建設費もやや低い。ループ型炉とタンク型炉の建設費は、それぞれ目標値の約0.89倍、約0.91倍と評価されているが、概念検討段階の評価でもあり、経済性に関しては、両者はほぼ同等と見ることができる。また、両者とも経済性目標 (20万円/kWe) を達成できる見通しである。

なお、タンク型炉の運転サイクル長は、冷却系と原子炉まわりを同時に定期検査ができないためループ型炉より4カ月長いが、稼働率は両者同程度の値となっている。

2) 安全性 (表1 参照)

両者とも、独立2系統の急速炉停止系 (主炉停止系及び後備炉停止系) を有しており、炉停止に関する高い信頼性を確保している。また、ループ型炉では自己作動型炉停止機構 (以下、SASS)、タンク型炉ではSASS及びガス膨張機構 (以下、GEM) を採用し、受動的炉停止能力を確保している。なお、タンク型炉のGEMは、再臨界回避方策としての溶融燃料排出チャンネルを兼用するものである。

崩壊熱除去に関しては、ループ型炉は2系統の2次系共用炉心補助冷却システム (以下、IRACS) + 1系統の直接炉心補助冷却システム (以下、DRACS) を設置しており、またタンク型炉は4系

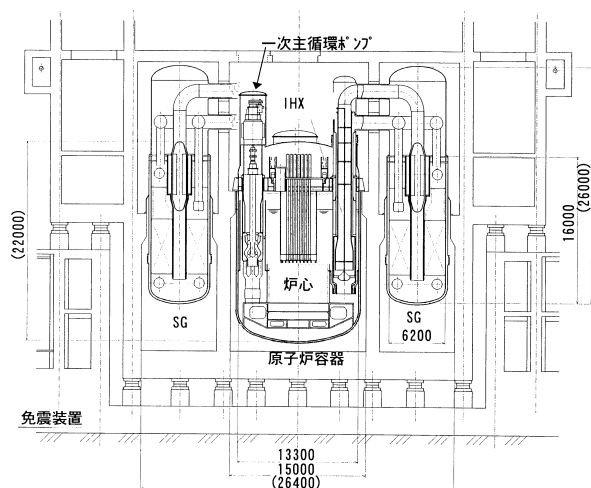


図6 Na冷却大型タンク型炉のプラント概念

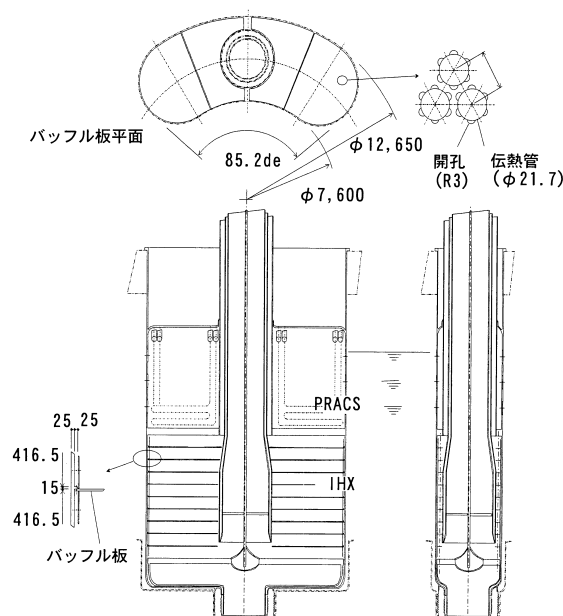


図7 湾曲長円形IHX

表1 ループ型炉とタンク型炉の経済性、安全性及び構造健全性の比較

項 目		ループ型炉	タンク型炉	備 考
経 済 性	建設費	20万円/kWe以下を達成できる見通し		
	建設工期	約46カ月	約49.5カ月	
	定検期間（標準）	約40日	約44日	
	稼働率	約92%	約93%	
	所内負荷率	約4.1%	約4%	
	NSSS物質	約2,628t	約2,770t	原子炉1基当たり
	原子炉建屋容積	約12万m ³	約13万m ³	原子炉1基当たり
安 全 性	炉停止系	独立2系統（主炉停止系＋後備炉停止系）		
		SASSを設置	SASS, GEMを設置	受動的炉停止能力を確保
	崩壊熱除去系	IRACS×2＋DRACS×1	PRACS×4	自然循環除熱能力を確保
	格納系	ライナ内張り矩形鉄筋コンクリート製格納容器	ガードベッセル＋上部ドーム式格納境界	
	最臨界回避方策	起因過程：ボイド反応度制限		
		遷移過程：ABLE概念	遷移過程：ABLE概念＋燃料排出チャンネル＋厚肉ラップ管のリング状配置	有効性の実施が課題
構造健全性	使用材料	炉構造：316FR，冷却系：12Cr系鋼		
	構造設計基準	新構造設計基準の考え方（非弾性解析の採用，許容値の合理化等）を一部先取り		
	耐震性確保	3次元免震技術を採用		
	評価部位	クリティカルとなる箇所の構造健全性を評価	湾曲長円形IHXの構造健全評価に注力	

統の1次系炉心補助冷却システム（以下、PRACS）を設置し、各系統に必要な除熱量の100%の除熱容量を持たせ、高い信頼性を確保している。また、両者とも「全交流動力電源喪失」を想定しても自然循環のみによる崩壊熱除去が可能となるよう、これらの系統に高い自然循環除熱能力を持たせている。

格納系に関しては、格納容器内のNaバウンダリをすべて二重構造とし、Na漏えいによる影響をその中に局限する設計としていること等から、ループ型炉は建屋一体型ライナ内張り矩形鉄筋コンクリート製格納容器、タンク型炉はガードベッセル＋上部ドーム式格納境界、という簡素な格納方式を採用している。

上述の炉停止系及び崩壊熱除去系の設計により、ループ型炉、タンク型炉とも炉心損傷の発生頻度を十分低いレベルに抑えることができるが、あえて炉心損傷の発生を仮想した場合でも、再臨界による急激なエネルギー発生を回避できるよう、次のような方策を採用している。

まず、ループ型炉、タンク型炉ともボイド反応度を6\$未満に制限し、起因過程での再臨界回避を図っている。特にタンク型炉では、上部Naブ

レナム付き炉心を採用し、その効果も含めてボイド反応度を低減する方策をとっている。

また、遷移過程での再臨界回避方策として、ループ型炉では軸方向ブランケットペレット一部削除（以下、ABLE）概念を採用し、溶融燃料の炉心領域外への早期排出を図っている。一方、タンク型炉ではABLE概念の採用に加え、溶融燃料排出チャンネルの設置や、厚肉ラップ管燃料集合体のリング状配置による溶融燃料プール連結の防止といった方策を採用している。

事故後物質再配置及び事故後熱除去（以下、PAMR/PAHR）対策としては、ループ型炉、タンク型炉とも原子炉下部構造を工夫し、炉心下部ブレンナムにおいて溶融燃料を冷却するのに十分なNa容積とデブリ保持面積を確保することとしている。

再臨界回避については、両炉型とも、溶融燃料の炉心領域外への早期排出方策の有効性、PAMR/PAHR対策の有効性を試験等により検証していく必要がある。

このように、ループ型炉、タンク型炉とも、受動的炉停止能力の付与、全交流動力電源喪失への対応、再臨界回避、炉心損傷発生頻度の低減

(10-6 /ry未満)という実用化戦略調査研究での設計要求事項を満足できる見通しである。

3) 構造健全性 (表1 参照)

使用材料が、原子炉構造316FR、冷却系12Cr系鋼 (HCM12A) であること、基本的には実証炉用高温構造設計方針案 (以下、DDS) に則って構造設計を行うが、DDSの有する裕度を合理化した新たな基準の考え方 (非弾性解析の採用、1次応力の許容値の拡大等) を一部先取りしていることは、ループ型炉、タンク型炉とも共通である。また、3次元免震技術を採用し、機器の健全性 (耐座屈性) 及び炉心の耐震性 (集合体浮き上がり、反応度投入の抑制) を確保していることも両者共通である。

① ループ型炉の構造健全性評価

熱応力に対する構造健全性については、炉容器の炉壁保護構造を簡素化して高温容器化したこと、配管を短縮したこと、ループ数削減及び機器合体により IHX 及び SG が大型化したこと等、本プラントの構造上の特徴と熱過渡特性上の特徴を考慮してクリティカルとなる箇所 (炉容器のホットレグ配管吸込部と液面近傍、1次系配管、IHX 上部管板及び SG 出口蒸気管板) を摘出し、構造健全性評価を行った。その結果、上述の構造設計基準の高度化等により、成立の見通しがあるとの結論を得ている。

また、耐震性については、炉容器の耐座屈性と炉心の耐震性について評価しているが、炉容器が比較的厚肉かつ小径であることから、タンク型炉と異なり、炉容器の耐座屈性ではなく炉心の耐震性がクリティカルとなること、炉心の耐震性を確保するためには上下方向固有振動数が 5Hz 以下の 3次元免震が必要となることが分かっている。

本プラントでは、機械式ポンプと IHX 伝熱管を近接配置する 1次ポンプ・IHX 合体機器を採用しており、伝熱管のフレットング摩耗が懸念されるが、予備的な評価の結果、寿命期間中の伝熱管摩耗深さを許容値以下に抑えることが可能との見通しを得ている。

また、漏えい先行型破損 (以下、LBB) の成立性については、実証炉等に比べて厳しい条件ではあるが、1次主配管、2次主配管とも成立可能な見通しである。

なお、本プラントでは、炉上部プレナム内や主配管内の Na 流速の高速化と関連して、炉容器液面からのカバーガス巻き込み、炉内構造物 (ディッ

ププレート、炉心上部機構等) への熱荷重及び流体力荷重、1次主配管の不安定振動やキャビテーション等が課題となる。これらの課題に対しては、3次元熱流動解析による炉上部プレナム内流況の把握、既往知見ベースでの検討等を実施し、課題解決に向けて一定の見通しを得つつあるが、今後、炉内流動試験や配管の不安定振動特性試験を通じて実験的・解析的知見を蓄積し、設計の最適化を図って行く必要がある。

② タンク型炉の構造健全性評価

経済性向上に向けて炉容器径を極力小さくするため IHX を湾曲長円形とし、それを炉容器内に非対称配置している点に構造上の特徴がある。このため、構造健全性評価は、IHX の成立性に重点を置いている。

IHX は、圧損上の制約、PRACS との取り合い、シール構造の取りやすさといった点を考慮して管内 1次としているが、胴に加わる圧力荷重 (Na 水反応による荷重等) に耐えられるよう、バッフル板を胴に固定して強度メンバーとしている。胴部に発生する曲げ応力、バッフル板に加わる面内応力を評価し、バッフル板の枚数、ピッチ及び板厚を、それぞれ 9 枚、430mm 及び 15mm としている。

湾曲長円形 IHX は、管束部流れの不均一により伝熱管間温度差が大きくなり伝熱管座屈の発生や、湾曲長円形管板の熱応力に対する構造健全性が懸念される。特に、後者については PRACS コイルが管板直上に設置されていることから、起動時のコールドショックや冷却材の温度ムラの影響が考えられる。これらについては、バッフル板を多孔板構造とすること及び PRACS コイルの配置等を工夫すること等の対応方策がある。

湾曲長円形 IHX の成立性のほかに、熱応力に対する構造健全性、耐震性、LBB の成立性、Na 流速の高速化に伴う熱流動等について検討する必要がある。IHX を炉容器内に非対称に配置していることから、炉容器内熱流動、温度分布の確認が特に重要である。これらはループ型炉での検討結果から見て、基本的には解決可能と考えられる。

以上のように、それぞれ課題はあるものの、ループ型炉、タンク型炉とも、構造健全性の確保は可能と考えられる。

4) 製作建設性

ループ型炉、タンク型炉とも、ループ数削減等に伴って機器が大容量化するが、IHX、SG 等の主

要機器の寸法を抑え、工場製作が可能な範囲としている。なお、タンク型炉の場合は、湾曲長円形 IHX の製作性について検討が必要である。

ループ型炉の炉容器は、現有設備でのリング鍛造・削り出しが可能な直径（9 m 台）及び肉厚（30mm）に抑えている。また、タンク型炉の炉容器は板溶接で製作することになるが、特に大きな課題はない範囲である。

なお、ループ型炉、タンク型炉とも、大口径主配管の製作性、12Cr 系鋼薄肉管（IHx 伝熱管）の製作性について確認が必要である。

以上のように、ループ型炉、タンク型炉とも製作上大きな課題のある構造物はない見通しである。また、検査性、組立・輸送・据付性及び現地試験性で課題となる構造物もない見通しである。

5) 運転・保守補修性

ループ型炉、タンク型炉とも運転上の大きな課題はないと考えられるが、炉容器内の Na 流速が高くなるので、液面からのカバーガス巻き込み防止が特に重要な課題となる。

なお、固体電解質水素計、音響計などの検出性能と信頼性を高めることにより、SG 水リーク時の Na 水反応の規模と影響を局限することができるが、タンク型炉の場合、上述の湾曲長円形 IHX の成立性との関連で、IHx 胴に加わる圧力荷重を抑

制する観点から、このような対応により設計基準漏えい（以下、DBL）を 1 本相当に低減することが必須の要件となっている。

表 2 にループ型炉とタンク型炉の検査性について比較した結果をまとめた。ループ型炉、タンク型炉とも 1 次冷却材バウンダリの目視・体積検査、炉内構造物の検査、炉心支持構造物の検査等が可能であるが、炉内構造物の検査の際、タンク型炉は 1 次ポンプ及び IHx を撤去してアクセスする必要がある。また、検査対象となる炉内構造物がループ型炉に比べて多く、隔壁構造も複雑である。

ループ型炉、タンク型炉とも冷却材漏えいの検出及び漏えい箇所の同定、SG 水リークの検出及び漏えい箇所の同定、主循環ポンプ（電磁ポンプを含む）の異常検出、遅発中性子の検出が可能である。なお、破損燃料検出系での遅発中性子の検出については、両炉型とも 1 次系が炉心に近接配置されているため、従来の概念以上の工夫が必要である。

表 2 にループ型炉とタンク型炉の補修性について比較した結果をまとめた。ループ型炉、タンク型炉とも炉内構造物の補修、1 次ポンプの補修、IHx の補修等が可能であるが、補修のためのアクセス性及び補修の容易性について見ると、以下のとおりタンク型炉はループ型炉に比べ不利である。

表 2 ループ型炉とタンク型炉の保守補修性の比較

項 目			ループ型炉		タンク型炉	
検査性	検査のための アクセス性	1 次冷却材 バウンダリ	○	容器とガードベッセル、配管と外観の間の間隙を確保して検査機器をアクセス。	○	容器とガードベッセルの間の間隙を確保して検査機器をアクセス。
		炉内構造物	◎	アクセスホールを通しての検査が可能。	△	1 次ポンプ及び IHx を撤去してアクセスする必要がある。
		炉心支持構造物	○	炉心退避後、1 次 Na をドレンして検査。	○	炉心退避後、1 次 Na をドレンして検査。
	検査の容易性		◎	検査対象となる炉内構造物が少ない。なお、溶接線長さはタンク型炉より長くなるが、機器が分散している利点を活かして効率的な検査を計画し得る。	△	検査対象となる炉内構造物が多く、かつ、隔壁構造が複雑。
補修性	補修のための アクセス性	炉内構造物	○	炉心退避後、1 次 Na をドレンして補修。	○	炉心退避後、1 次 Na をドレンして補修。
		1 次ポンプ	◎	IHx からの引抜き補修が可能。	△	炉容器からの引抜き補修が可能であるが、遮蔽対策が重要となる。（ポンプ破損時に、ルースパーツ対策という観点からの注意も必要）
		IHx	◎	インブレース補修が可能（ポンプ引抜き孔からの IHx の伝熱管及び管板へのアクセスが可能）。	△	2 次主配管を切断した上で、炉容器からの引抜き補修を行う必要がある。遮蔽対策が重要となる。
	補修の容易性		◎	機器が分散しており、並行作業を行いやすい。また、補修対象となる炉内構造物が少ない。	△	機器が集中しており、並行作業を行い難い。また、補修対象となる炉内構造物が多い。

- ① 1次ポンプ及びIHXが炉容器内に設置されているタンク型炉では、これらを補修する際の遮蔽対策がより重要となる。
- ② ループ型炉の場合、1次ポンプの引抜き孔からIHXの伝熱管及び管板にアクセスできるので、IHX伝熱管のインプレース補修が可能である（ただし、インプレース技術開発は必要）。一方、タンク型炉の場合、コンパクト化に有利な管内1次方式のIHXであることから、2次主配管を切断してIHXを炉容器から引抜き、その上で補修を行う必要がある。

- ③ ループ型炉の場合、機器が分散して配置されており、機器が集中配置されているタンク型炉に比べ並行作業を行いやすい利点がある。

以上のように、ループ型炉、タンク型炉とも、運転・保守補修性に関する大きな課題は基本的にはないといえる。ただし、タンク型炉に関しては、湾曲長円形IHXの成立性との関連でNa水反応の検出性能及び信頼性の向上が求められること、1次ポンプやIHX伝熱管の補修がループ型炉に比べて困難であること等、ループ型炉に比べて不利な点がいくつか存在している。

(4) フェーズⅡ候補概念の選定

以上のように、経済性、安全性、構造健全性、製作建設性及び運転・保守補修性に関する評価結果の比較に基づき、フェーズⅡに向けて最も有望なNa冷却大型炉概念としてNa冷却大型ループ型炉を選定した。

選定根拠は以下のとおりである。

- ① 経済性、安全性、構造健全性及び製作建設については、ループ型炉とタンク型炉は同等といえる。
- ② タンク型炉には、1次ポンプやIHX伝熱管の補修に遮蔽対策が必要であり容易でないこと等、炉心と1次系機器を集中配置することに伴う課題が存在しており、運転・保守補修性に関してはループ型炉が優れていると判断する。
- ③ 以上の点に加え、ループ型炉の場合、更なる経済性向上のポテンシャルである2次系簡素化にも移行しやすいという特長がある。タンク型炉で2次系を削除する場合、1次ポンプとSGを共にタンク内に設置するオプションと、1次ポンプのみタンク内に設置するオプションがあるが、特に前者の場合、スペース的な制約で、ループ数削減による物量低減方策の採用が困難となる。

2.2 Na冷却中型モジュール炉

(1) 候補概念の抽出

Na冷却中型モジュール炉は、中型出力規模固有のコストダウン方策と、中型出力炉を複数組み合わせさせて大出力発電所を構成するときのモジュール効果とにより経済性向上を図る概念である。まず、代表的な既往中型炉モジュール炉設計のS-PRISM¹⁾ (41.2万kWe)の調査と、代表的な既往小型炉設計4S炉²⁾ (5万kWe)から出力アップを図った概念(4S-200 (20万kWe))の検討を行い、コストダウン方策の分析を行った。その結果、以下に示す中出力規模のコストダウンの着眼点が抽出された。

- ① 原子炉容器のコンパクト化（製作・据付コスト）
- ② 2次系機器数の削減（冷却系の大容量化）
- ③ 崩壊熱除去系等安全系の簡素化
- ④ 低コスト/短期間建屋建設工法の導入

これらの着眼点から50万kWe出力の中型炉プラント概念を検討した。

(2) 候補概念の検討

1) コストダウン方策の適用

- ① 原子炉容器のコンパクト化（φ6 m台）

ループ型炉は、φ6 m台の原子炉容器とすることにより通常の機内鍛造法（プレス機械外径内での荷重鍛造方法）と機械加工により製作が可能になるため、φ6.57 m / 50万kWeの原子炉構造とした。

タンク型炉では6 m台の原子炉容器は期待できないため、現地搬入及び吊込み限界(1,000トン)以内となるように湾曲長円型の炉内IHXを採用しφ9.3 m / 50万kWeという原子炉構造とした。

- ② 2次系機器数の削減（50万kWe/基）

単基出力増加による系統数削減及び単基当たりの機器コストダウンを目的に2次系1ループの50万kWe(119万kWt)/基出力とした。

ループ型炉の設計ではポンプとSGは分離し、ヘリカルコイル型SGより約20%の物量削減が期待できる直管型SGを採用しコストダウンを図った。

タンク型炉の設計では、ヘリカルコイル型SGを採用して電磁ポンプと合体させることで単基のコストダウンを図った。

- ③ 崩壊熱除去系等安全系の簡素化

崩壊熱除去系は、2次系1系統の体系で信頼性を確保し、受動的システムによる系統の簡素化を図った。

ループ型炉では、炉心と熱交換器の伝熱中心差を確保しやすいという特徴を活かして、PRACS2系統、IRACS1系統の3系統構成で冗長性を確保しながら、2次系完全自然循環により動的機器を削減した。

タンク型炉は、炉心出力に比べ炉容器径が大きい特徴を活かした原子炉容器補助冷却システム（以下、RVACS）とSG補助冷却系の容器直接空気冷却2系統で流路（スタック）の多重化による冗長性を図った。

④ 低コスト/短期間建屋建設工法の導入

建屋のコストダウンと現地組立作業を低減化する方策として、一括輸送単位を拡大（大型ユニット化）することや建屋の構造を船殻構造（鉄板溶接ブロック構造）等の低コスト建屋にするといった2種類のアプローチが考えられ、両者ともコスト、期間の両面からの効果が期待できる。

ループ型炉の設計では前者を採用した。輸送に関して約4,000トンまでのユニットを一括輸送できると見込んでおり、フロアレベル+35mまでの原子炉建屋を一括して輸送でき、中型炉の特徴を活かせる。そのため本プラントは、33ヵ月という短期間の現地建設工期となっている。

タンク型炉の設計では、後者を採用し40ヵ月の建設工期とした。

2) プラント概念

上述のコストダウン方策を適用したNSSS概念を図8に示す。本概念は、50万kWe相当の3モジュールに対し、150万kWe出力のタービンを接続し1発電ブロックとした。ここで、中央制御室、燃取系、BOPなどはモジュール間で共用化しコストダウンを図っている。また、6モジュール製作の習熟効果によるコストダウンも期待できる。なお、大型炉ツインプラントとの比較は300万kWeの電気出力で実施した。

(3) フェーズⅡ 候補概念の選定

以上のループ型炉とタンク型炉の比較結果を以下に示す。

- ① 経済性、安全性、構造健全性及び製作建設性については、大型炉と同様に両者とも同等といえる。ただし、経済性においては、ループ型炉の方が物量、建設工期、コストダウン方策の数において優位なものとなった。発電ブロックのプラント建設コストは、両概念とも20万円/kWeを下回る評価を得ている。
- ② 運転・保守補修性に関する差異は大型炉と同様にループ型炉が優れている。
- ③ 更なる経済性向上のポテンシャルとしては、熱出力の増加によるコストダウン及び2次系簡素化といったものが挙げられる。タンク型炉は、

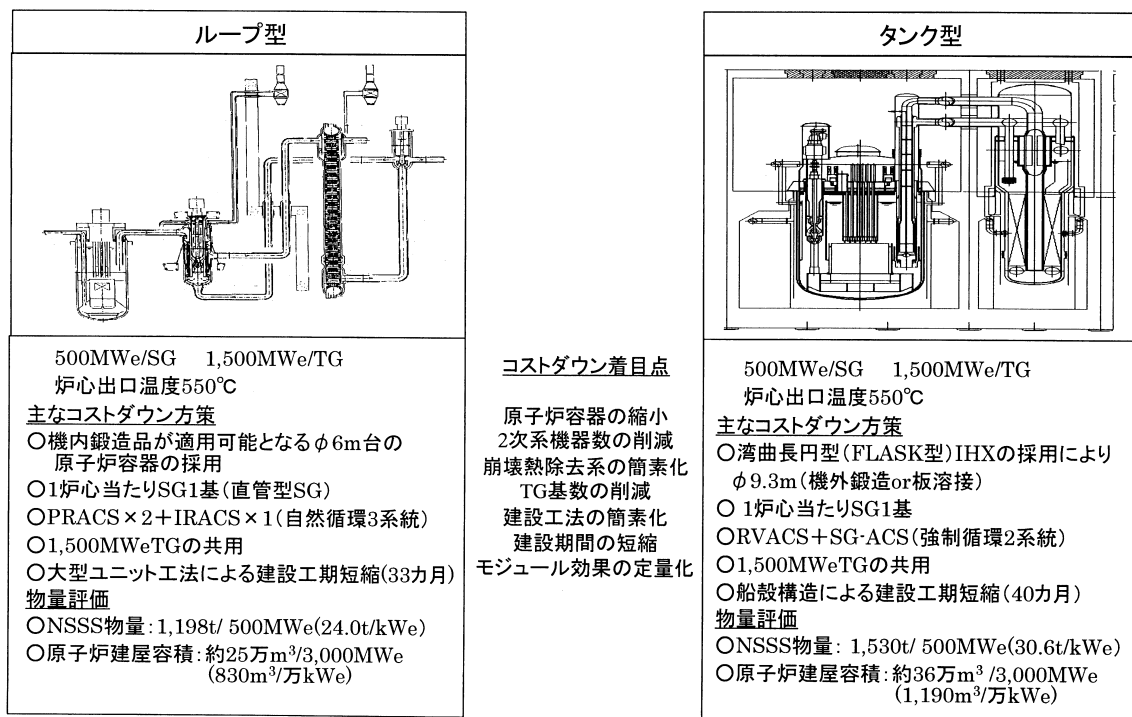


図8 Na冷却中型モジュール炉候補概念の特徴

原子炉一体吊込み重量制限及びRVACSによる崩壊熱除去限界により本概念を維持したまま出力を増加することは難しい。一方、ループ型炉は原子炉容器径が増加することを除けば本概念を維持したまま出力増加は容易であり、大型炉と同様に2次系簡素化との相性が良い。

以上の理由により中型モジュール炉においてもループ型炉をフェーズⅡ候補概念として選定した。

2.3 2次系簡素化概念

(1) 候補概念の抽出

2次系簡素化概念は、従来型Na冷却炉の2次Naに代えて、不活性な中間熱媒体を採用することによりIHXとSGを合体した概念で、伝熱管破損時のNa水反応の局限化による安全性向上、系統簡素化・機器合体による経済性向上を図っている。

フェーズⅠでは、メーカ提案やアイデア公募を基に、以下の主要な2次系簡素化概念を抽出し、構造概念を具体化した後、経済性、安全性などの比較評価をもとに、フェーズⅡ以降の検討対象とすべき有望な候補概念の絞り込みを行った。

- ① 鉛ビスマス熱媒体プール型SG
- ② 鉛ビスマス熱媒体チューブ型SG
- ③ 固体熱媒体型SG

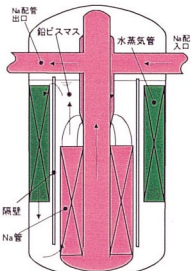
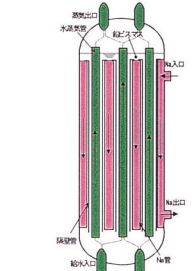
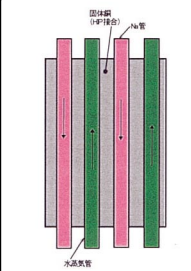
各概念の特徴を表3に示す。①は鉛ビスマス充てん容器内に独立したNa伝熱管と水蒸気伝熱管を設置した概念で、大阪大学の発案文献に基づいている。②は鉛ビスマス入り同心円状二重管を採用した概念、③は銅などの固体熱媒体を介してNa伝熱管と水蒸気伝熱管を接合した概念である。

(2) 構造概念の具体化

ループ型のNa冷却大型炉への採用を考慮して、交換熱量178.5万kWt、Na温度550℃/395℃、蒸気条件498℃/17.2MPa、給水温度240℃の条件で、各構造概念の具体化検討を行った。

鉛ビスマス熱媒体チューブ型SGの中で、三重管型SGの検討例を図9及び図10に示す。本概念は直管三重管の間隙部に鉛ビスマスを充填した概念で、内管内側を水蒸気、外管外側を1次Naが流れる。Na及び水蒸気バウンダリを空間分離して同時リーク時のNa水反応規模を緩和するために、内外管の間隙部に隔壁管を設置した。0.01kg/s以下の水リーク率(管束部下端での内管破損を想定)では、リークした水蒸気は内管と隔壁管間を上昇して、カバーガス空間に移行する。高い水リーク率や下部プレナムで内管破損した条件では、リーク水が外管と隔壁管間に流れ込むが、間隙幅が狭いため、そこに流れ込むことができるリーク水量

表3 2次系簡素化概念のp比較検討評価

項目	鉛ビスマス熱媒体プール型	鉛ビスマス熱媒体チューブ型	固体熱媒体型
概念図			
伝熱管型式	Na伝熱管、水蒸気伝熱管の分離設置(隔壁有り)	同心円状の二重、又は、三重構造(隔壁管追加)の伝熱管	Na伝熱管、水蒸気伝熱管の分離設置(固体熱媒体有り)
中間熱媒体	鉛ビスマス	同左	固体熱媒体(銅など)
伝熱面積 ¹⁾ (m ²)	Na側 水蒸気側		
	5,600 10,180	9,740	7,930 6,860
経済性 (冷却系) ²⁾	90	68	118
安全性	同時リーク時にもNa-水反応規模小(チューブ型よりポテンシャル高) 鉛ビスマスリーク対応	同時リーク時にもNa-水反応規模小 同左も、鉛ビスマスリーク量小	三重の固体障壁を有し、同時リーク時にもNa-水反応規模小 想定不要
構造健全性	耐震性、耐腐食性などの確認必要	耐震性、耐腐食性などの確認必要(耐震性はプール型より容易)	熱膨張差による発生応力低減策の確認必要
総合評価	○	○	×

注1) チューブ型SGは外管の伝熱面積。二次系有リプラントの伝熱面積は、IHXで4,370m²、SGで7,680m²

注2) 二次系有リプラント100に対する相対値(主冷却系、2次補助系)

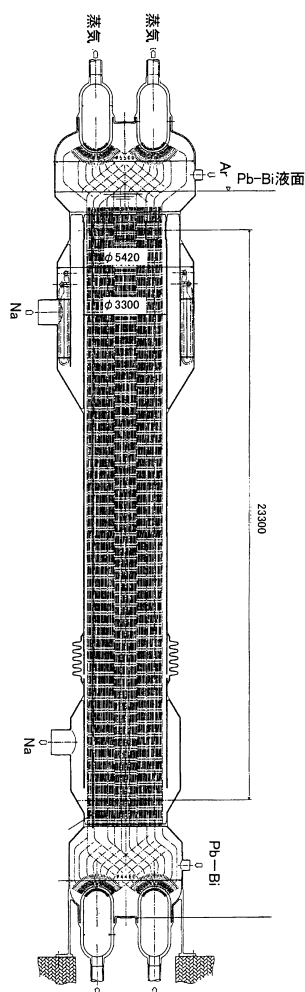


図9 鉛ビスマス熱媒体チューブ・三重管型SGの構造概念図

は0.02kg/sに制限される。内管破損と外管破損を重ね合わせることは極めて保守的な想定であるが、この場合でもNa水反応規模は十分に小さく、炉心安全防护上、成立する見通しである。

(3) 比較評価

各2次系簡素化概念の比較評価を表3中に示した。

- ① 安全性について、Na伝熱管破損時の鉛ビスマスリーク対応や固体熱媒体部でのき裂進展挙動などの開発課題を有するが、いずれの概念も同時リーク時にNa水反応が発生せず、Na水反応事故排除のポテンシャルが高い。ただし、鉛ビスマス熱媒体チューブ型SGでは、伝熱管の構造上、貫通破断の想定を排除するための安全の考え方及び設計対応を明らかにする必要がある。
- ② 経済性について、鉛ビスマス熱媒体チューブ型SGのコストが最小で、2次系を有する概念の約0.68倍（原子炉構造を除くNSSSを対象。プラント全体で5%のコスト低減に相当）と推測される。鉛ビスマス熱媒体プール型SGは、伝熱面積や鉛ビスマス量が増加するが、リフトポンプなどの鉛ビスマス自然循環性能の向上方策を取込むことにより2次系を有する概念に対して約10%のコスト低減が期待できる。今後、アルゴンガス循環系（リフトポンプ）や鉛ビスマ

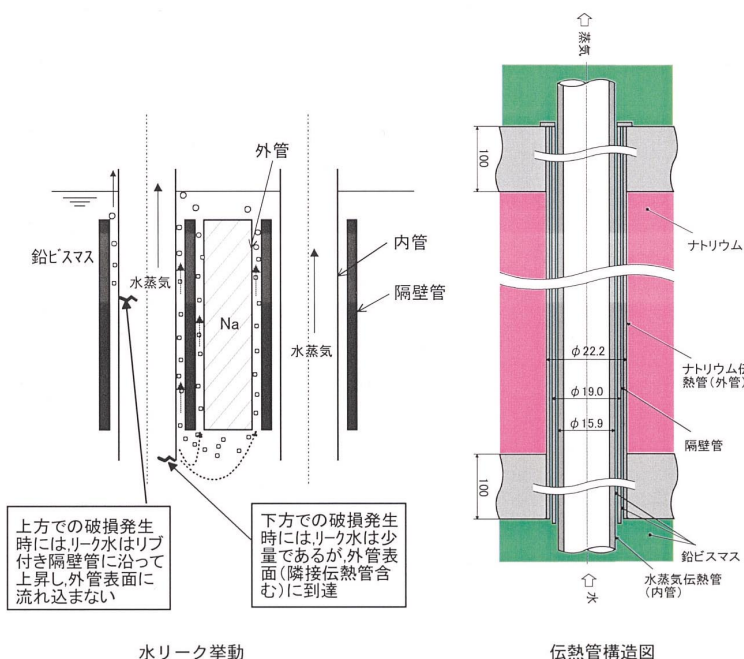


図10 チューブ型の伝熱管構造と水リーク挙動

ス補助系のコスト影響を明らかにする必要がある。一方、固体熱媒体型SGは、固体熱媒体の加工・伝熱管との接合コストが高いため、コスト低減が困難な見通しである。

以上より、フェーズⅡ以降の検討対象概念として、経済性及び安全性の要求条件を満足できる、鉛ビスマス熱媒体プール型SGと鉛ビスマス熱媒体チューブ型SGを選定した。フェーズⅡでは、設計検討に加えて、伝熱管の試作や鉛ビスマスリークに関連する安全試験などを行い、最終的な候補概念を決定する計画である。

3. 重金属冷却炉

重金属冷却炉の冷却材としては、ロシアでの研究実績等の先行研究例を基に、鉛及び鉛ビスマス（鉛ビスマス共晶合金、Pb45%-Bi55%）を対象とした。これらの重金属冷却材の主要な特徴は以下のとおりである。

(1) 重金属冷却材の長所

- ① 中間冷却系が不要であり、冷却材漏えい燃焼に起因した火災防止設備も不要（重金属は水と空気の反応性が低い）
- ② 冷却材の高沸点を活用した高い安全性の可能性（鉛と鉛ビスマスの融点は各々 1,737℃、1,670℃であり、Na より高い）
- ③ Na より中性子吸収断面積が小さく、散乱断面積が大きいので、優れた増殖性、マイナーアクチニド（以下、MA）燃焼につながる可能性
- ④ 再臨界回避ロジック構築による炉心設計への影響がNa冷却炉より小さくなる可能性がある〔冷却材密度が混合酸化物燃料（以下、MOX燃料）とほぼ等しいので、仮に燃料が溶融しても炉容器底部に堆積し難い〕

(2) 重金属冷却材の短所

- ① 重金属は腐食性が強いいため構造材料選択の範囲が狭い（構造材との共存性が悪い）
- ② Na よりも高比重であることから同じ流速で比較すれば、構造材のエロージョンは一段と生じやすいと懸念される。したがって、線流速の制限が厳しくなり、設計自由度が低くなる（高比重、構造材との共存性が低い）
- ③ 冷却材の中性子照射により揮発性のPo-210が生じるため、冷却材を覆うカバーガス系及び燃料取扱系を密閉管理する必要がある（核特性）
- ④ 冷却材の密度が大きいためポンプ軸動力が大

きくなる。また、トリチェリの真空が問題となり、主冷却系及び崩壊熱除去系においてトップエントリ方式が成立し難い等、設計自由度が小さくなる（冷却材が高比重）

- ⑤ 高比重の冷却材及び厚肉化により重量が増加した容器・配管の支持構造の成立性（冷却材が高比重）

3.1 有望な炉型の選定

有望候補概念の抽出のために、大型ループ型炉、大型タンク型炉、中型ループ型炉及び中型タンク型炉の4概念を具体化し、有望な炉型に関する検討を実施した結果、以下の知見を得た。図11に有望な炉型選択の経緯を示す。

(1) 大型ループ型炉

大型ループ型炉は、冷却材が高比重のためトップエントリ方式は成立し難い。一方、サイドエントリ方式では、冷却材が高比重のため浮動側の容器支持構造の成立性が見込めず、また、直管で炉容器とSG容器をつなぐ二重配管方式は、摺動部の磨耗により防食のための酸化皮膜が剥離し、局所的な腐食進展が懸念されると共に、内管部の供用期間中検査（以下、ISI）も困難であるため、技術的課題が大きい。

(2) 大型タンク型炉

大型タンク型炉は、構造健全性を確保するために容器径の増大に比例して容器肉厚を増大させる必要があり、近似的にタンク容器重量 $\propto$ （容器径²×冷却材密度）となることから、重金属炉の大型タンクは重量過大となる。工場からの運搬性にも困難が生ずる。また、現有設備では、一体焼鈍10m以下、開先加工13m以下が容器径の制限となり、容器径の増大は高品質の原子炉容器製作性及びコストの面で不利となる。さらに、大型タンクでは固

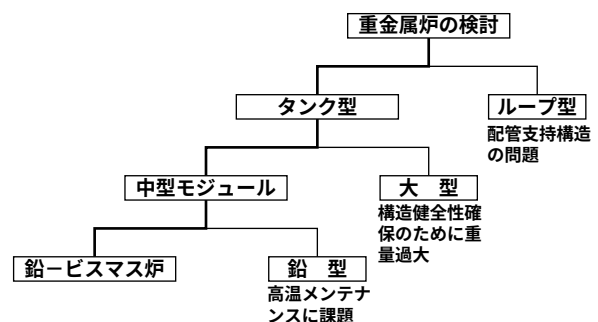


図11 重金属の概念抽出工程

有振動数が数Hz程度となり、適合する3次元免震装置開発のハードルが高くなることも課題として挙げられる。

(3) 中型ループ型炉

中型ループ型炉では、配管ルートについては大型ループ型炉と同様に、配管支持構造の技術的実現性の課題が大きい。

(4) 中型タンク型炉

中型タンク型炉では、上述の大型タンク型炉の課題を避けることができ、モジュール化による経済性向上の可能性があることから、有望な候補として挙げられる。

冷却材については、鉛と鉛ビスマスが候補として挙げられる。鉛（融点約327℃）、鉛ビスマス（融点約125℃）は高融点のため、運転時及び停止時における冷却材の凍結対策の予熱設備負荷が大きい。また、400℃程度の高温センサーや計測線などの高温メンテナンス技術の開発が必要である。さらに、低温側温度が400℃以上となることから、水・蒸気系の給水温度を高く設定する必要がある、熱交換器の伝熱面積の増大により物量が増大する。

また、鉛と鉛ビスマスの自然循環方式による崩壊熱除去系への適合性を比較すると、鉛は冷却材温度制御幅が狭いため、冷却材流路の凍結防止の点で鉛ビスマスに比べて劣る。

鉛ビスマスは、課題としてPo-210問題やビスマス資源量が挙げられていたが、予備的な検討結果から、これらの問題は大きな制約とはならない見通しである³⁾。

以上より、有望な炉型として中型タンク型鉛ビスマス冷却炉を選定した。

3.2 冷却材駆動方式の選定

鉛ビスマスとNaの自然循環能力を比較すると、

- ① 鉛ビスマスは同一流路条件での自然循環除熱能力（ $\rho C_p \beta^{0.5}$ ）はNaとほぼ等しい（Naの約0.8倍）
 - ② 鉛ビスマスは中性子の減速能が小さく（Naの約1/3倍）、同一炉心流路（P/D）条件ではNaに比べ核特性が良い
 - ③ 鉛ビスマスはNa冷却炉と同程度の核特性を得るのに広い炉心流路（大きなP/D）が許容される
- となり、鉛ビスマスの必要自然循環ヘッドは

Naの数分の1となることから、鉛ビスマスはNaよりも自然循環炉に適している。したがって、鉛ビスマス炉概念の駆動方式の候補としては、Na冷却炉と同様の強制循環のほかに自然循環も有望な候補と考えられる。

概念構築に先立ち、有望な冷却材駆動方式（強制循環、自然循環）に関する検討を実施した。

(1) 駆動方式候補概念

強制循環方式では、原子炉容器内に複数基のSGとポンプを配置するため、炉容器径が増大し、隔壁・配管等を用いた複雑な流路構成となることが懸念される。このため、強制循環方式の概念ではSG及びポンプの型式が重要な要素となり、SGはコンパクトな矩形型のサーペンタイン方式SG及び形状の自由度が高いパイヨネット方式SG、またポンプは機械式ポンプと電磁ポンプを候補として摘出した。

一方、自然循環方式では、主要な機器はSGだけとなるため、性能に優れた一体ヘリカルコイル方式を採用した完全自然循環炉概念を候補とした。また、このほかにリフトポンプ追加方式の自然循環炉も候補として摘出した。各候補概念を図12～15に、比較表を表4に示す。

(2) 経済性

経済性に関しては、完全自然循環方式がNSSS物量775トンと最も小さく、次にリフトポンプ方式が優れている。強制循環方式の物量が大きいのは、SG物量の差による三つの要因がある。一つ目は、強制循環方式では複数の小出力SGを採用することにより、SG物量が自然循環方式に比べ大きくなる。二つ目は、伝熱性能の劣るSG型式を採用しているため、SG物量が増大する。三つ目は、高温・高圧の蒸気条件を採用しているため、伝熱管の肉厚が厚くなることから伝熱特性が低下し、必要伝熱面積が大きくなり、SG物量が増大する。

また、強制循環方式に一体型ヘリカルコイル方式SGを採用することにより物量削減を指向した概念についても検討したが、NSSS物量は905トンとなり、他の強制循環方式に比べ優れているが、自然循環方式の物量には及ばない。

したがって、経済性をNSSS物量とSG物量で比較した結果、自然循環方式が有望と考えられる。

3.3 完全自然循環方式鉛ビスマス冷却炉

(1) 基本概念

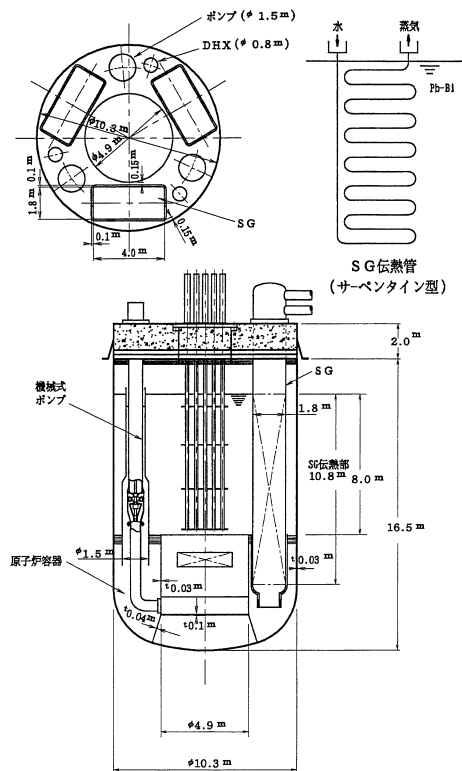


図12 機械式ポンプ+サーペンタイン SG 方式概念図

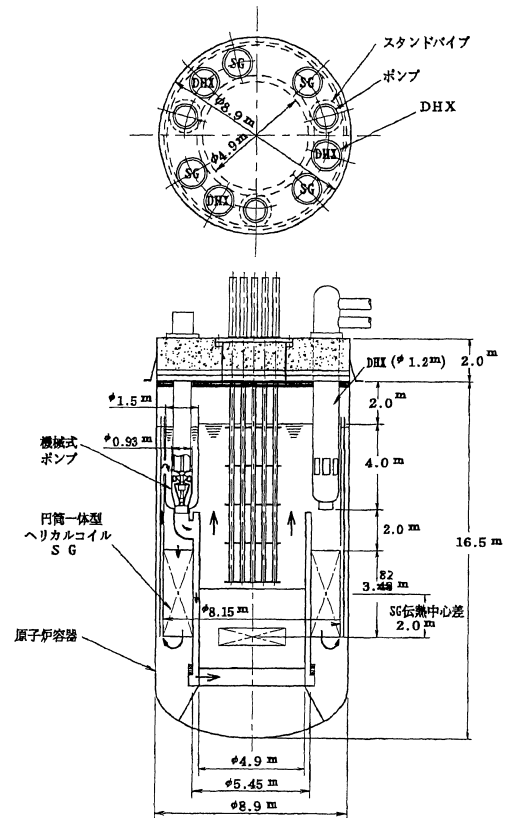


図14 機械式ポンプ+一体型ヘリカルコイル SG 方式概念図

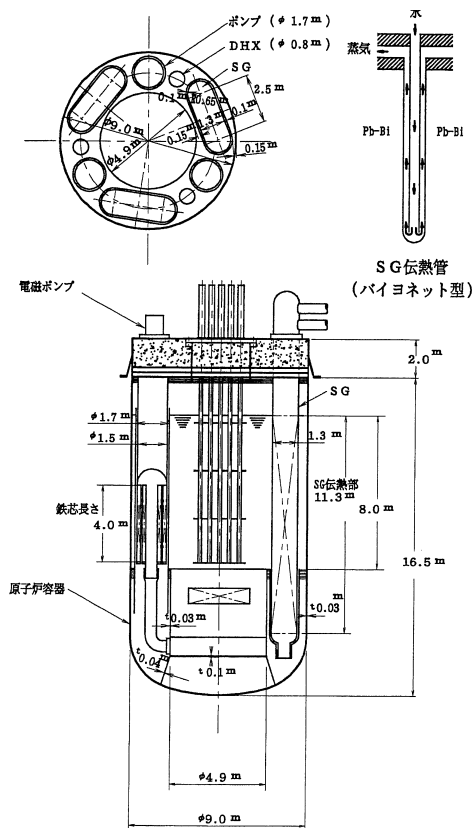


図13 電磁ポンプ+バイヨネット SG 方式概念図

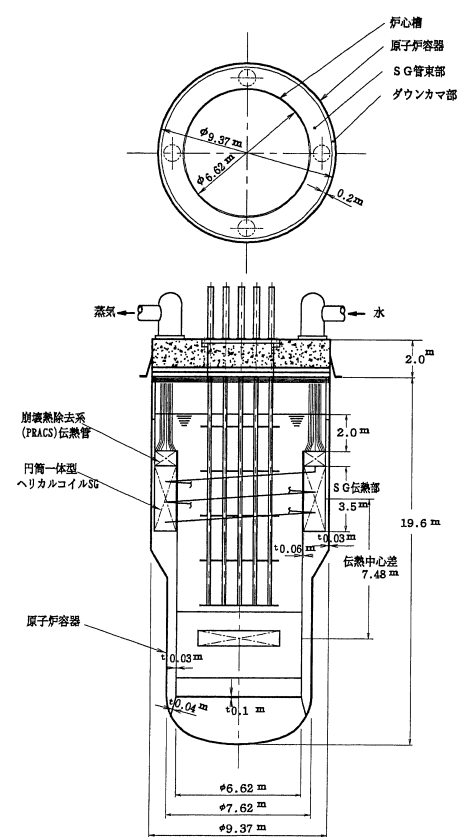


図15 完全自然循環方式概念図

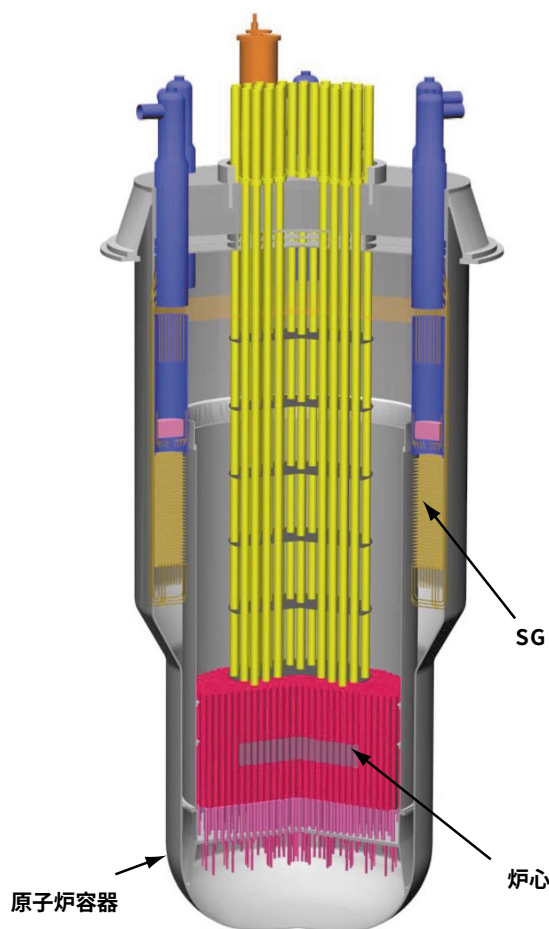


図17 鉛ビスマス冷却中型モジュール炉

4モジュール/160万kWeタービン1基) 2次系
削除自然循環冷却タンク型であり、炉容器はNa冷
却炉と同等の検査性を考慮して、鋼製炉容器とし
ている。また、自然循環運転によりポンプを削除

し、炉容器内は円筒状2領域の単純な流路構成を
採用している（内側領域：上昇流，外側領域：下
降流）。SGは、炉容器一体型のヘリカルコイル方
式を採用し、NSSS物量削減を図っている。崩壊
熱除去系は、鉛ビスマスを冷却材とした自然循環
方式のPRACS（3系統）を採用し、SG上部に配
置している。

自然循環方式を採用するために炉心圧損を
0.01MPaに制限することにした。同制限を受け、
炉心圧損を低減するため燃料ピンについてP/D
（ピンピッチ／ピン径比）=1.48とし、また、同配
列の基で炉心性能の確保のために炉心燃料として
窒化物燃料を採用した。増殖比は径方向ブラン
ケット、軸方向ブランケットを設置して1.19を達
成している。運転サイクル長は19ヵ月（10バッチ）、
取出平均燃焼度は15万MWd/tである。建屋は3次
元免震建屋、ガードベッセルはコンクリートライ
ナ構造を採用し、格納容器はモジュールごとに独
立である。基本仕様を表5に示す。

(2) 経済性

完全自然循環炉の経済性を評価した結果、目標
値の1.30倍であり、現時点では、20万円/kWeの
経済性目標は達成されていない。しかしながら、
予備的な評価によりモジュール単基出力の増大
（55万kWe）等の方策により一層の経済性向上の
可能性があることを確認した⁴⁾。経済性向上を目
指した設計研究として、以下の課題に取り組む必
要がある。

① 炉心核熱設計の詳細化等に基づく単基出力増

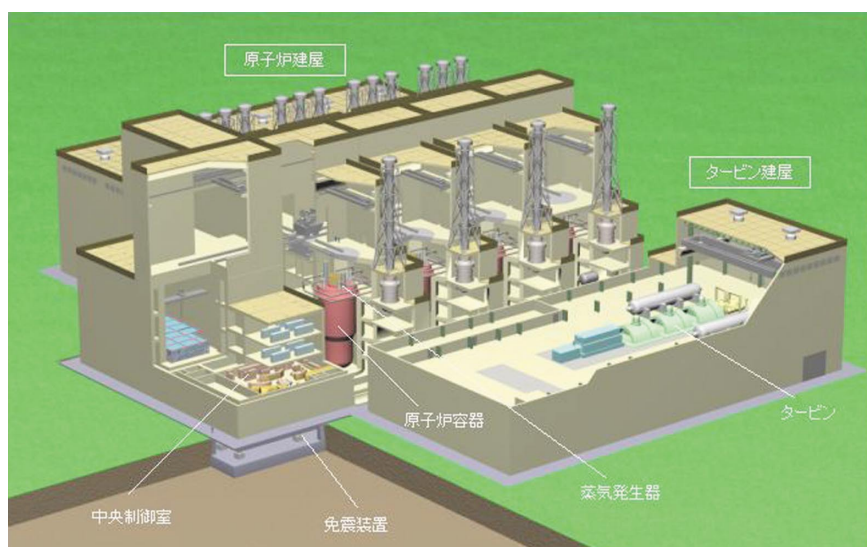


図18 鉛ビスマス冷却中型モジュール炉建屋内配置鳥瞰図

表5 基本仕様（完全自然循環方式ビスマス冷却炉）

No	項 目	基本仕様
1	原 子 炉 型 式	(2次系削除)自然循環冷却タンク型
2	電気出力(発電端)	400MWe
3	熱 出 力	1,053MWt
4	ル ー プ 数	・
5	1次系PbBi温度	492°C / 312°C
6	1次系流量	約14,350・/h
7	主蒸気温度/圧力	403.5°C / 6.5 MPa
8	給水温度/流量	220°C / 約1,696ton/h
9	タービン発電機	蒸気タービン
10	プラント熱効率	38%
11	プラント稼働率	92%
12	炉 心 ・ 燃 料	窒化物(増殖比は低下するものの酸化燃料にも対応可)
13	遮蔽体外径	6,600mm
14	燃 焼 度	15万 MWd/t (取出平均)
15	増 殖 比	1.19 (窒化物燃料)
16	原 子 炉 停 止 系	主炉停止系及び後備炉停止系
17	炉 心 安 全 性	①受動的炉停止方策：SASS設置 ②CDA防止強化型：高熱伝導の窒化物燃料+高沸点のPb-Bi+受動安全強化
18	炉 心 支 持 方 式	炉心下部支持方式
19	炉 壁 保 護 構 造	ライナー構造方式 (*SGシュラウド壁兼用)
20	炉 心 上 部 機 構	単回転プラグ+切込み付コラム型UIS
21	1次系配管方式	・(タンク型炉)
22	1次主循環ポンプ	・(完全自然循環方式)
23	S G	一体貫流ヘリカルコイル型(1基)
24	崩壊熱除去系	PRACS(3系統：完全自然循環方式)
25	漏 え い 対 策	ライナ型ガードベッセル(断熱ブロック+ライナ)
26	原子炉格納施設	ライナ内張一体型コンクリート製格納容器(炉上部矩形室ライナ+生体遮へいコンクリートライナ)
27	プラント運転サイクル	約19ヵ月(EFPM)
28	①燃料減衰待貯蔵	水プール貯蔵(IVS及びEVSTでの減衰なし)
29	②炉内燃料交換	単回転プラグ+切込み付コラム型UIS+パンタグラフ式FHM
30	③炉内/外燃料移送	炉内貯蔵なし/直接取出水プール保管
31	免 震	3次元免震
32	プラント寿命	40年以上
33	原 子 炉 建 屋	6.5万m ³ /モジュール
34	モジュール構成	複数モジュール方式

大の追及

- ② NSSS物量の低減化
- ③ モジュール間での共用化を考慮したBOP概念の詳細化・合理化
- ④ モジュール方式による製作費低減(量産効果,

習熟効果)

(3) 安全性

受動安全により事故時に炉心が溶融することなしに事象を静定させ、再臨界を回避することを目指とした。

予備的な安全解析によれば、反応度抑制機能喪失時においても運転温度許容幅が従来のNa冷却炉よりも大きいことから、SASSを考慮しなくても、固有の安全性による異常静定を追求できる可能性があることが分かった。反応度抑制機能喪失時の一例として除熱源喪失事象(以下、ULOHS)の解析結果を図19に示す。

5秒でSGの給水が停止したことにより蒸気発生器出口温度が上昇し、それに伴い炉心出入口温度も上昇し、3時間後には炉心出口温度が約640°Cに達している。炉心出口温度の上昇速度は、ドップラ反応度による炉出力低下により、約10°C/時間と緩やかであり時間余裕がある。また、今回の解析では考慮していないが、炉心入口温度上昇に伴う炉心支持板膨張による負のフィードバック反応度及び除熱源としてPRACSがあることを考慮すれば、炉心損傷に至ることなく事象を収束できる可能性があるものと考えられる。

今後は、固有の安全性の不確かさ(支持板反応

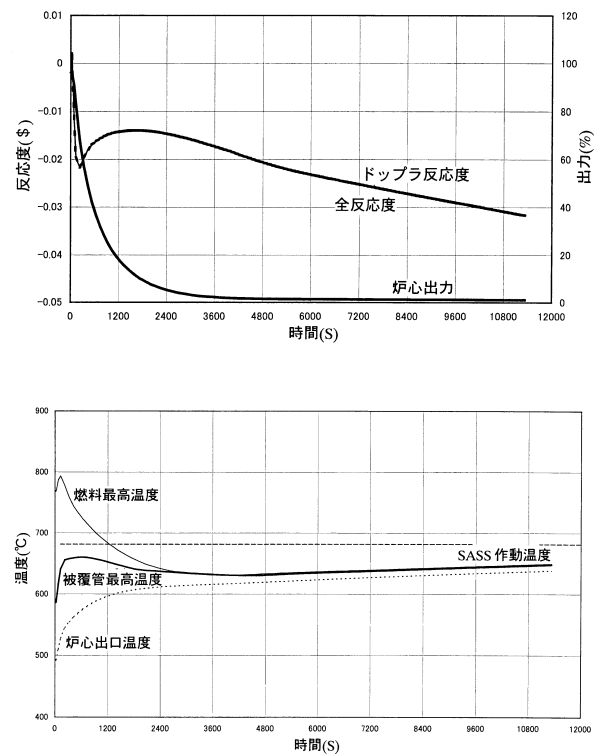


図19 安全解析例：定格運転状態からのULOHS

度係数、ドブドラ係数、冷却材温度係数等)、運転性を考慮した制御棒引き抜き速度、浮上り防止機構を備えた制御棒の成立性の確認、SASSの構造具体化とその信頼度及び取り扱いの考え方の確認が課題となる。なお、PRACSについては構造具体化、共通要因故障対策の検討が必要となるが、Na冷却炉の崩壊熱除去系の設計・評価を参考にできると考えられる。

安全設計・評価方針の観点からは、耐腐食性を含めた異常時の燃料健全性判断基準の確立が課題である。また、設計基準事象の選定と個々の事象に対する評価、特に安全保護系等の異常検出系の具体化、性能要求条件の明確化等が今後必要となる作業である。

蒸気発生器伝熱管破断(SGTR)対策として急速ブロー設備により水リーク率抑制、ラブチャードディスクを設け長期の圧力上昇の影響緩和を想定しているが、今後、解析評価により具体的な確認が必要となる。また、SGTR時のバブリングにより1次冷却系内の圧力バランスに変動が発生し、自然循環による炉心流量が大幅に変化することにより炉心冷却性能が損なわれることがないことや、水蒸気の炉心への移行が生じないことの確認が必要となる。

Na炉のアルゴンガス系異常に対応した設計基準事象を想定した場合、ポロニウム環境中への放出挙動を評価する必要がある、ソースタームとしてのポロニウムの評価手法を確立することが重要である。

格納系については、特に大きな問題はないと思われるが、設計基準事象を設定し、それらの事象に対応するための設計要求条件を整理することが必要である。特に、主蒸気配管が格納バウンダリ内部に存在することから、主蒸気漏えい時のバウンダリ内圧力増大抑制方策について検討する必要がある。また、立地評価に対応して、受動安全機能による炉心溶融回避との設計目標との整合性の観点から放射能線源をどのように設定すべきか、従来のようにアプリオリに線源を仮定するか、機構論的な設定条件を想定するか等の検討が必要である。

(4) 構造健全性

酸化防護皮膜による腐食防止技術の成立性の確認は、本概念における最も重要な課題である。炉容器、炉内構造物、炉心材料等の各種構造物材に対

して、防食技術の適用性を材料腐食試験を通じて確認していく必要がある。

特に、酸素濃度管理装置(酸素ガス、水素ガス注入、酸素計、水素計)の成立性、鉛ビスマス純化系に関するコールドトラップ方式の成立性等の要素技術開発が必要である。酸素濃度管理については、タンク方式の冷却系統全体にわたり、自然循環条件下で、酸素濃度分布が許容運転範囲に制御できるかが課題である。以上の防食技術の開発結果を踏まえて、腐食に対する構造設計基準を設定する必要がある。

また、冷却材が高比重であることから、燃料集合体の浮き上がり防止機構を具体化する必要がある。特に、耐震設計に関しては、3次元免震装置の開発が必要である。

(5) 製作建設性

製作性、建設性で特に課題となる点は少ない。冷却材初期チャージの際に、大規模な仮設施設が必要となり、その具体化検討が必要である。

(6) 運転保守補修性

運転性については、プラント起動時の冷却材予備加熱方法の具体化、過渡変化時のプラント挙動安定性、負荷追従性の確認が課題となる。

ISIに関しては、炉心支持構造物、制御棒駆動機構の検査性等が課題である。異常検出性に関する課題として、破損燃料検出方法の成立性の確認があり、遅発中性子検出(DN)法を採用する場合の中性子のバックグラウンドを低下させるため、1次系内での遮へい設計の検討が必要となる。

保守・補修性については、耐圧・耐熱性を備えた鉛ビスマス中の透視検査技術の開発が課題である。万一、冷却材のドレンを必要とするような補修が必要となった場合に備えて、冷却材を抜き取る技術の検討も必要である。ポロニウムを含む放射性廃棄物の処理方策の確立も検討する必要がある。

(7) まとめ

これまでの検討の結果、出力55万kWeの中型モジュールタンク型鉛ビスマス冷却炉とすることにより、経済性目標を達成できる可能性があることが分かった。また、本概念に関し、経済性の更なる追求や安全評価の詳細化、その他種々の課題については、技術的成立性の見通しの確認や達成度の限界を見極めることを目的として今後も検討を行う必要がある。

フェーズⅠでは、物量削減を通しての経済性追

求を第一の目的として自然循環方式を選定し、開発目標を達成できる見通しを得るまでに至ったが、炉心性能については従来のNa冷却炉と比べて必ずしも満足できるものとはなっていない。すなわち、腐食を考慮した被覆管温度制限（650℃以下）や自然循環方式であることから、低出力密度とならざるを得ず、その結果、重金属インベントリが増大した（炉心：約35トン、ブランケット：約86トン）。また、燃焼度目標15万MWd/tonを達成するためにPu富化度を高く設定せざるを得ず、その結果、固有の負のフィードバック（ドブプラ係数）がNa冷却炉よりも小さくなり、重金属の高沸点であることによる温度余裕を活かしきれていないため、安全確保とのバランスを考慮した炉心設計の再検討も必要と考えられる。このため、炉心性能（増殖性、燃焼度等）の追求の観点から、自然循環方式に限定せず、強制循環方式も視野に入れた炉心性能の見極めが必要と考えられる。

4. ガス冷却炉

ガス冷却炉の冷却材は、高温における化学的安定性、取扱性と熱中性子炉における実績から炭酸ガス、ヘリウムガスを選定した。ガス冷却材の主な長所と短所は以下のとおりである。

(1) 長所

- ① 炭酸ガス、ヘリウムガスは化学的に安定であるため、水、大気との反応がない。
- ② ヘリウムガスは高温まで化学的に安定であるため、高温域で使用したガスタービン直接発電により、システムが簡素化でき、高い熱効率が可能である。

(2) 短所

- ① ガスは密度が小さいため熱輸送性能（冷却材密度×比熱）が小さくなることから、システムを高圧にして、冷却材としての密度を高める必要がある。
- ② 除熱性能が低いことから、Na炉と同等の安全性を確保するためには耐熱性燃料や冷却システムの機能強化が必要となる。

フェーズⅠでは、ガス冷却材の特徴を活かし、冷却材（炭酸ガス、ヘリウムガス）と燃料形態（ピン型燃料、被覆粒子燃料）の組み合わせから、ピン型燃料炭酸ガス炉、被覆粒子燃料ヘリウムガス炉及び耐熱ピン型燃料ヘリウムガス炉についてプラントシステム概念を検討した。

4.1 ピン型燃料炭酸ガス炉

(1) 基本概念

既存の炭酸ガス熱中性子炉の技術を利用することにより新たな開発要素を少なくし、現有技術の延長線上でプラント性能向上と経済性向上を追求した概念である。

プラント基本仕様は、経済性向上のため電気出力を大きくすると共に、熱輸送性能を向上させるため高圧システムとしており、表6に示すように、電気出力137万kWe、原子炉圧力4.2MPa、炉心入口/出口温度266℃/530℃に設定した。

プラント概念は、図20及び図21に示すように、プレストレストコンクリート型原子炉容器（以下、PCRVR）内にボイラ（12基）、ガス循環機（8基）を設置し、ボイラを介して蒸気タービンで発電するシステム構成である。PCRVR上部には事故時の崩壊熱を除去する崩壊熱ボイラ（12基）を設置し、制御棒駆動装置を下部に配置している。この結果、原子炉構造はPCRVR内に機器を集中して設置することにより、配管や炉心上部構造を削減したシンプルな構造となった。

(2) 炉心・燃料

炉心はMOX燃料を使用し、増殖比1.2、燃焼度15.5万MWd/tとなり、開発目標を満足する見通しが得られた。また、窒化物燃料を採用することにより、増殖比1.38と高い増殖性能が期待できる。

表6 ガス冷却炉のプラント基本仕様

No	項 目	ピン型燃料 炭酸ガス炉	被覆粒子燃料 ヘリウムガス炉	耐熱ピン型燃料 ヘリウムガス炉
1	電気出力 (発電端)	1,370MWe	1,120MWe	1,120MWe
2	熱出力	3,600MWt	2,400MWt	2,400MWt
3	プラント熱効率	約38%	約47%	約47%
4	原子炉圧力	4.2MPa	6.0MPa	6.0MPa
5	炉心入口/ 出口温度	266/530℃	460/850℃	460/850℃
6	燃 料	ピン型 酸化物燃料	被覆粒子型 窒化物燃料	耐熱ピン型 窒化物燃料
7	燃焼度	15.5万MWd/t	10万MWd/t	15万MWd/t
8	増殖比	1.2	1.1	1.2
9	原子炉容器	PCRVR	鋼製原子炉容器	鋼製原子炉容器
10	タービン 発電機	蒸気タービン 1基	ヘリウムガス タービン4基	ヘリウムガス タービン4基
11	格納容器	SCCV	鋼製格納容器	鋼製格納容器



ガス冷却材の特徴として、炭酸ガス密度が 26kg/m^3 と小さいため、熱輸送性能が低くなる（例えば、炭酸ガス：Na = 3 : 100）ことから炉心の冷却性能が問題となる。したがって、ガス冷却炉において考慮すべき代表的な事象として減圧事故を選定し、冷却性能を評価した。その結果、炉

心出口温度高により原子炉がトリップし、ガス循環機により冷却材を循環させ、崩壊熱ボイラによる除熱により、燃料被覆管制限温度 900°C (暫定値)に対し、被覆管最高温度は 800°C 程度となり、炉心の安全性が確認された。

また、設計基準事象より過酷な事象として、減圧事故+スクラム失敗+動的機器不動作を想定した場合、CDAに至る概念であるため燃料ピンピッチを大きくするとともに、下部軸ブランケット燃料の一部を削除することにより、熔融燃料が流れ落ちやすい設計とした。さらに、熔融燃料を受け止め、長期安定冷却するためのコアキャッチャー概念を策定し、再臨界の回避及び熔融燃料の冷却が可能となる見通しが得られた。なお、コアキャッチャー概念については、熔融燃料に対する冷却性能等を試験により検証してゆく必要がある。

(4) 経済性

経済性向上の観点から、PCRVR、格納容器を合理化設計することにより原子炉建屋をコンパクトにした設計とした。具体的には、PCRVRは燃料交換用スタンドパイプを削減すること及びボイラ配置を合理化すること、また格納容器はテンドンを削減したスチールコンクリート型格納容器(SCCV)を採用するとともに、ガス循環機の保守スペースを格納容器外に変更することにより原子炉建屋をコンパクト化した。

この結果、原子炉建屋容積は約 14万 m^3 /ユニットであり、原子炉構造の鋼材物量はPCRVRが約2,540トン、ボイラ(12基)が約1,480トン、ガス循環機(8基)が約300トンで合計鋼材物量は約4,320トンとなり、電気出力当たりの鋼材物量は約3.2トン/MWeとなった。なお、PCRVRのコンクリート重量は約30,000トンであり、原子炉建屋以外に蒸気タービンを収納するタービン建屋が約 18万 m^3 必要である。

(5) 開発課題

安全性の観点からCDAに対するコアキャッチャーの性能評価が必要である。また、運転時の所内電気負荷をみるとガス循環機負荷が大きいいため、所内電気負荷の小さな大容量ガス循環機の開発が必要である。さらに、高速中性子フルエンス条件下におけるPCRVRの健全性や実績がないSCCVの健全性を確認する必要がある。

4.2 被覆粒子燃料ヘリウムガス炉

(1) 基本概念

高温まで化学的に安定なヘリウムガスの特性及び被覆粒子燃料の耐熱性を活かして原子炉出口温度を高温にし、原子炉出口から直接ガスタービン発電を行うことにより、高いプラント熱効率とシステムの簡素化による経済性を追求した概念である。また、過酷事象(例：減圧事故+スクラム失敗+動的機器不動作)に対してもCDAに至らない安全性を目指した概念である。

プラント基本仕様は、表6に示すように、経済性向上のため電気出力を大きくするとともに、熱輸送性能を向上させるため高压システムとしており、電気出力110万kWe、原子炉圧力6 MPa、原子炉入口/出口温度 $460^{\circ}\text{C}/850^{\circ}\text{C}$ に設定した。

プラント概念は、図22～図24に示すように、鋼製原子炉容器を採用し、ガスタービン(4基)を収納するガスタービン発電ユニット容器(4基)と二重管配管で接続され、上部には補助炉心冷却器(4基)を設置し、下部には制御棒駆動装置が配置されている。

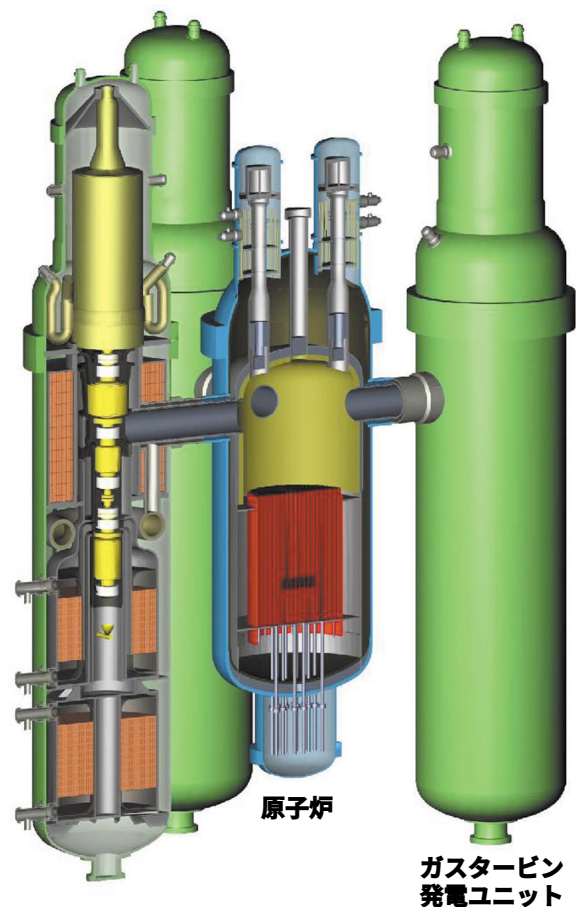


図22 ヘリウムガス冷却炉

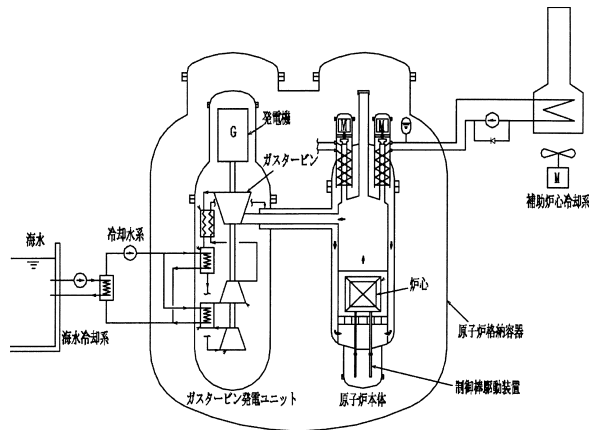


図23 被覆粒子燃料ヘリウムガス炉概念

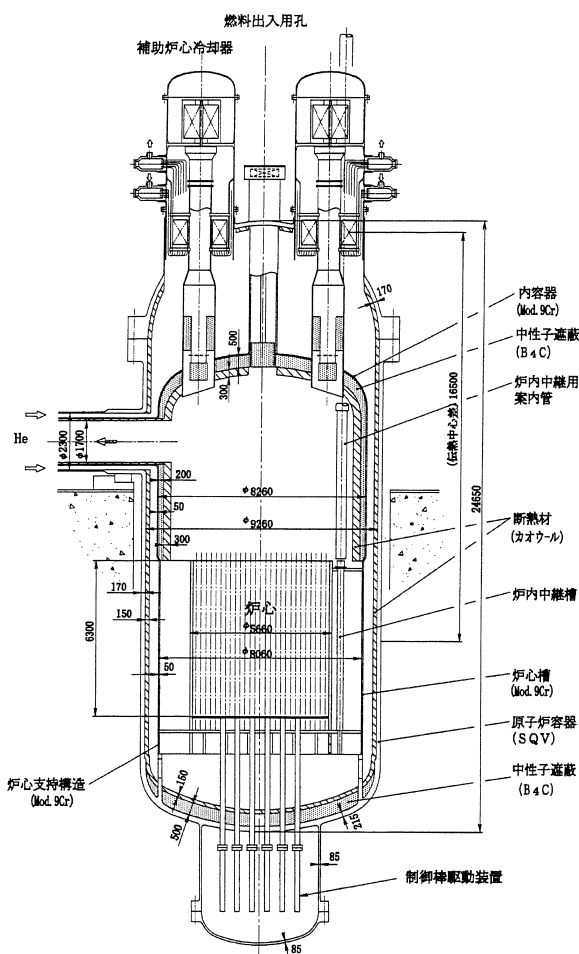


図24 鋼製原子炉容器構造図

(2) 炉心・燃料

炉心は窒化物燃料を使用して増殖比1.09、燃焼度約10万MWd/tとなり、開発目標の炉心性能を満足できていない。炉心出力密度はCDAを防止するため、約30W/cm³と低出力密度に設定されている。

炉心仕様は、炉心直径5.6m、炉心高さ3.2mであり、燃料集合体438体、ブランケット燃料集合体144体である。また、燃料集合体は燃料コンパートメント、軸ブランケット、遮蔽体から構成され、燃料コンパートメント内に被覆粒子燃料が充てんされている。燃料粒子の外径1.94mm、燃料核径1.5mmである。なお、事故時の温度上昇に対し安全性を確保するため、燃料コンパートメント及び燃料被覆は耐熱性材料を採用している。

(3) 安全性

ガス冷却材の特徴として、ヘリウムガス密度が2.6kg/m³と小さいため、熱輸送性能が低くなる(例えば、ヘリウムガス:Na=1:100)ことから炉心の冷却性能が問題となる。したがって、過酷事象(減圧事故+スクラム失敗+動的機器不動作)を想定し、冷却性能について事故解析した結果、流量制限機構により破断面積を50cm²に制限し、受動的炉停止装置が事象発生後350秒で作動する条件の場合、自然循環で補助炉心冷却器により冷却されることから、燃料コンパートメント制限温度2,200℃に対し、最高温度は2,033℃程度となり、炉心の安全性が確認された。

(4) 経済性

原子炉出口から直接ガスタービンにより発電するため、中間の熱交換器を削除した設計とした。この結果、原子炉建屋容積は約23万m³/ユニットであり、原子炉構造の鋼材物量は原子炉容器が約1,510トン、ガスタービン発電ユニット容器(4基)が約3,640トン、接続配管が約150トンで合計鋼材物量は約5,300トンとなり、電気出力当たりの鋼材物量は約4.8トン/MWeとなった。

(5) 開発課題

被覆粒子燃料を使用した炉心は増殖比、燃焼度の開発目標を満足していないため、炉心性能の向上を検討する必要がある。また、ヘリウムガスタービンについては実績がないため、各要素からの開発が必要である。さらに、原子炉容器は事故時高温となるため、耐熱性の断熱材やライナの開発が必要である。

4.3 耐熱ピン型燃料ヘリウムガス炉

(1) 基本概念

耐熱合金の燃料被覆管を使用し、ヘリウムガスの特性を活かして原子炉出口温度を高温にし、原子炉出口から直接ガスタービン発電を行うため、

高いプラント熱効率とシステムの簡素化による経済性を追求した概念である。また、過酷事象(減圧事故+スクラム失敗+動的機器不動作)に対しては、CDAに至ることから再臨界回避のための影響緩和対策が必要である。

被覆粒子燃料ヘリウムガス炉と同様なプラント概念であるが、プラント基本仕様は、表6に示すように、鋼製原子炉容器の下部に熔融燃料を受け止め、冷却するためのコアキャッチャーが設置されている点が被覆粒子燃料ヘリウムガス炉と異なっている。

(2) 炉心・燃料

炉心は窒化物燃料を使用し、増殖比1.2、燃焼度15万MWd/tとなり、開発目標を満足する見通しが得られた。

炉心仕様は、炉心直径4.9m、炉心高さ1.2mであり、燃料集合体318体、ブランケット燃料集合体150体である。また、燃料集合体は214本の燃料ピンから構成され、燃料ピン径11.0mm、燃料ピン全長3,200mm、燃料ピンピッチ13.31mmである。なお、事故時の温度上昇に対し安全性を確保するため、燃料被覆管は耐熱性材料を想定している。

(3) 安全性

代表的な事象として減圧事故を選定し、冷却性能について事故解析した結果、原子炉圧力低により原子炉がトリップし、補助炉心冷却器により冷却されることにより、燃料被覆管制限温度1,500℃に対し、被覆管最高温度は1,492℃程度となり、炉心の安全性が確認された。

また、過酷事象(減圧事故+スクラム失敗+動的機器不動作)に対して炉心が熔融するため、再臨界を回避でき、熔融燃料の除熱が可能となるコアキャッチャー概念を設定した。なお、コアキャッチャー概念については、熔融燃料に対する冷却性能等を試験により確認してゆく必要がある。

(4) 経済性

被覆粒子燃料ヘリウムガス炉と同様と考えられる。

(5) 開発課題

安全性の観点からCDAに対するコアキャッチャーの性能評価が必要である。また、耐熱被覆管材料の検討やヘリウムガスタービンについては実績が

ないため、各要素からの開発が必要である。さらに、原子炉容器は事故時高温となるため、耐熱性の断熱材やライナの開発が必要である。

4.4 まとめ

以上のように冷却材と燃料形態の組合せから、ピン型燃料炭酸ガス炉、被覆粒子燃料ヘリウムガス炉及び耐熱ピン型燃料ヘリウムガス炉という三つの候補概念の設計検討を行った。フェーズⅠでは建設コストの算定に主眼を置いたために炉心特性は必ずしも最適なものとはなっていない。そのため、フェーズ終了時点で、候補概念を選定せずフェーズⅠの研究期間を1年間延長し、炉心特性を追求した上で、最も有望なガス冷却炉概念の選定を行う予定である。

5. おわりに

実用化戦略調査研究フェーズⅠにおいて、実用化候補概念を実現し得る冷却材として、Na、鉛ビスマス、ガスを選択した。このうち、ガスについてはフェーズⅠの研究期間を1年間延長し、この間に炭酸ガスとするかヘリウムとするか決める予定である。

また、Na冷却炉は、安全性を担保した上で、当初目標の建設コスト20万円/kWeを満たすことが可能となり、鉛ビスマス冷却炉及びガス冷却炉では、まだ目標値よりはやや高いものの、一層の工夫で目標を満たす見通しのあることが分かった。なお、本研究における(i)水冷炉、(ii)熔融塩炉、(iii)小型炉及び六つの炉型の総合評価については、「各種冷却材を有する高速増殖炉に関するプラント設計評価⁽²⁾」に詳述する。

参考文献

- 1) C.E.Boardman, M.Hui, et al.: "A Description of the Super-PRISM Reactor", ICONS 8 (2000).
- 2) S.Hattori, I.Ikemoto, et al.: "Realization of Safety Culture into a Reactor Plant-4S(Super Safe, Small and Simple) LMR", Int. Topical Meeting on Safety Culture in Nuclear Installations, p.479~488 (1995).
- 3) 三原隆嗣, 江沼康弘, 他: "重金属冷却炉の検討", JNC TN9400 2000-064 (2000).
- 4) 三原隆嗣, 山本昌宏, 他: "FBRシステム技術検討書", JNC TY9400 2001-012 (2001).