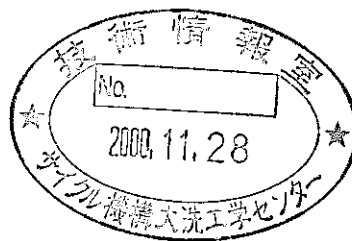


ガス冷却炉の検討

2000年6月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

ガス冷却炉の検討

小林順*1、木曾芳広*1、小江秀保*1

梅津陽一郎*1、一宮正和*1

要旨

中長期事業計画に基づく FBR サイクルの実用化戦略調査研究では、平成 12 年度までの検討フェーズ (フェーズ I) において、軽水炉システムと比肩する経済的競争力を有する可能性があると考えられる複数の FBR サイクルの候補概念を具体化し、実用化に向けた開発シナリオを策定する計画である。フェーズ I は平成 11 年 7 月から本格着手した。

原子炉システムについては、各種冷却材を使用する概念の具体化を図り、経済性向上のポテンシャルを評価するとともに、開発課題の抽出・整理を行う。

ガスを冷却材として使用する原子炉システムの概念は、A)ピン型燃料炭酸ガス炉、B)ピン型燃料ヘリウムガス炉、C)被覆粒子燃料ヘリウムガス炉の 3 タイプが候補として考えられている。本年度は A)および C)に対して以下の項目の検討を実施した。

- ①基本仕様の設定
- ②炉心・燃料の概念検討 (MOX 燃料)
- ③主要なプラントシステムの概念検討
- ④事故時の安全性評価
- ⑤再臨界回避方策概念の検討
- ⑥被覆粒子燃料の再処理技術

検討の結果、A)ピン型燃料炭酸ガス炉については、再臨界回避方策概念と炉心性能とのバランスの検討、熔融燃料の長期安定冷却を可能とする設備の成立性確認、大容量ガス循環機の開発等が、また C)被覆粒子燃料ヘリウムガス炉については、被覆粒子燃料開発、燃料集合体開発、ガスタービンの開発等が概念の成立を左右する重要な課題であることが明らかとなった。

*1: 大洗工学センター システム技術開発部 FBR システムグループ

WBS 番号: I-1-A-③

本研究は、実用化戦略調査研究の一環として実施したものである。

Studies on Gas Cooled Fast Breeder Reactor Results

Jun Kobayashi^{*1}, Yoshihiro Kiso^{*1}, Hideyasu Ogo^{*1}

Youichiro Umetsu^{*1}, Masakazu Ichimiya^{*1}

Abstract

In the feasibility studies on commercialized fast reactor cycle system started in July 1999, according to a medium and long-term R&D project and management plan of JNC, various candidate concepts for a fast reactor cycle system are investigated to have good cost performance competitive with LWR system and the related R&D programs. In this report candidate fast reactor concepts using various coolants are studied and the related R&D items are picked up.

Three concepts of the gas cooled reactor have been selected as follows.

- A) Carbon dioxide cooled reactor using fuel pin
- B) Helium cooled reactor using fuel pin
- C) Helium cooled reactor using coated fuel particles

Concept A) and C) have been studied concerning the following items in FY1999.

- ① Basic specifications
- ② Conceptual design of core and fuel
- ③ Conceptual design of major components
- ④ Safety design and analysis
- ⑤ Countermeasures against core disruptive accidents
- ⑥ Reprocessing procedures of coated fuel particles

The result of the investigation revealed that the following issues have to be solved in order to realize each concept.

For concept A); how to take countermeasures against recriticality from the viewpoint of core performance, feasibility of debris tray (core catcher) to retain molten fuel in coolable and subcritical geometry and development of a large scale gas circulator, etc.

For concept C); development of coated fuel particles, fuel subassemblies, and a helium gas turbine, etc.

*1 : FBR System Design Group, OEC, JNC

目 次

| | |
|------------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 1.1 検討目的 | 1 |
| 1.2 検討方法 | 1 |
| 2. ピン型燃料炭酸ガス炉 | 3 |
| 2.1 プラント設計 | 3 |
| 2.1.1 プラント概要 | 4 |
| 2.1.2 炉心・燃料 | 4 |
| 2.1.3 系統機器 | 4 |
| 2.1.4 安全性 | 6 |
| 2.1.5 全体配置 | 7 |
| 2.2 プラント設計評価 | 7 |
| 2.2.1 炉心・燃料の概念検討（MOX 燃料の増殖性検討が中心） | 8 |
| 2.2.2 炉心・燃料の概念検討（窒化物燃料、MA 添加への適合性） | 8 |
| 2.2.3 主要なプラントシステムの概念検討 | 8 |
| 2.3 開発項目 | 12 |
| 2.3.1 新技術、新概念についての課題 | 12 |
| 2.3.2 概念の成立性を左右する重要な課題 | 13 |
| 3. 被覆粒子燃料ヘリウムガス炉 | 24 |
| 3.1 プラント設計 | 24 |
| 3.1.1 プラント概要 | 24 |
| 3.1.2 炉心・燃料 | 24 |
| 3.1.3 系統機器 | 26 |
| 3.1.4 安全性 | 29 |
| 3.1.5 全体配置 | 30 |
| 3.1.6 被覆粒子燃料の再処理における脱被覆法の検討 | 31 |
| 3.2 プラント設計評価 | 34 |
| 3.3 開発項目 | 40 |
| 4. 冷却材の比較 | 68 |
| 5. おわりに | 70 |
| 参考文献 | 71 |

表リスト

| | | |
|----------|----------------------------------|----|
| 表 2. 1-1 | 基本仕様（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 14 |
| 表 3. 1-1 | 基本仕様（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 42 |
| 表 3. 1-2 | 燃料集合体、被覆燃料粒子の寸法諸元（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 43 |
| 表 3. 1-3 | ガスタービン設備仕様（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 44 |
| 表 3. 1-4 | 補助炉心冷却系仕様（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 45 |
| 表 3. 1-5 | 脱被覆検討用被覆粒子燃料仕様（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 46 |

図リスト

| | | |
|-----------|---|----|
| 図 2. 1-1 | 原子炉構造概念図（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 15 |
| 図 2. 1-2 | リファレンス炉心配置（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 16 |
| 図 2. 1-3 | 炉停止系概念図（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 17 |
| 図 2. 1-4 | 冷却系全体系統図（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 18 |
| 図 2. 1-5 | ガス循環機概念図（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 19 |
| 図 2. 1-6 | ボイラ構造概念図（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 20 |
| 図 2. 1-7 | 燃料取扱全体概念（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 21 |
| 図 2. 1-8 | 原子炉建屋立面図（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 22 |
| 図 2. 1-9 | 減圧事故時の被覆管温度解析結果（ピン型燃料炭酸ガス炉：EGCR） | 23 |
| 図 3. 1-1 | プラント概念、配置図（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 47 |
| 図 3. 1-2 | 系統概念図（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 48 |
| 図 3. 1-3 | 炉心構成及び主要諸元（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 49 |
| 図 3. 1-4 | 被覆粒子燃料の構造寸法（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 50 |
| 図 3. 1-5 | 燃料集合体の構造概念（1/2）（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 51 |
| 図 3. 1-5 | 燃料集合体の構造概念（2/2）（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 52 |
| 図 3. 1-6 | 原子炉構造概念図（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 53 |
| 図 3. 1-7 | 高速中性子累積照射量（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 54 |
| 図 3. 1-8 | 炉停止系概念図（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 55 |
| 図 3. 1-9 | 中性子スペクトルの比較（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 56 |
| 図 3. 1-10 | ガスタービンヒートバランス（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 57 |
| 図 3. 1-11 | ガスタービン設備構造概念図（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 57 |
| 図 3. 1-12 | 補助炉心冷却系系統構成（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 58 |
| 図 3. 1-13 | 原子炉格納容器構造概念（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 58 |
| 図 3. 1-14 | 燃料取り扱いフロー（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 59 |
| 図 3. 1-15 | 減圧事故解析結果（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 60 |
| 図 3. 1-16 | 減圧事故＋スクラム失敗＋補助炉心冷却系単一故障（50%×2系統） 解析結果（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 61 |
| 図 3. 1-17 | プロットプラン（被覆粒子燃料ヘリウムガス炉） | 62 |
| 図 3. 1-18 | 被覆燃料粒子脱被覆検討仕様 | 63 |
| 図 3. 1-19 | Burn-Grind-Reburn 法概要図 | 64 |
| 図 3. 1-20 | Grind-Burn 法概要図 | 65 |
| 図 3. 1-21 | All-Burn 法概要図 | 66 |
| 図 3. 1-22 | All-Grind 法概要図 | 67 |

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下「サイクル機構」という）では、中長期事業計画（平成 11 年 3 月策定）に基づき、F B R サイクルの完成に向け、1) エネルギー生産システムとして必要な経済性の向上、2) 資源の有効利用、3) 環境負荷の低減、4) 核不拡散性の確保を開発目標とし、システム全体としての最適化と実用性に留意しながら F B R サイクルの研究開発を実施することとしている。また、中期的には、安全確保を前提として、F B R サイクル全体で、軽水炉の燃料サイクルと比肩する経済性を達成すべく、その向上を図ることを最重要課題として取り組む方針である。

この方針を受けて、平成 11 年 7 月から F B R サイクルの実用化戦略調査研究（以下「実用化戦略調査研究」という）に本格着手した。

実用化戦略調査研究の検討フェーズは、軽水炉システムと比肩する競争力を確保する上で有望と考えられる複数の F B R サイクルの候補概念を具体化し、実用化に向けた開発シナリオを策定する第 I 期と、工学的試験も含めて技術的成立性を確認して整合性を図ったシステムに絞り込む第 II 期とで構成されている。

本報告書は、実用化戦略調査研究の第 I 期において検討している各種炉システム概念のうちガス炉システムについて、平成 11 年 3 月までの検討状況をまとめたものである。

1.1 検討目的

冷却材に炭酸ガス、又はヘリウムガスを用いる F B R システムについて、概念の具体化を図り、経済性向上のポテンシャルを評価するとともに、開発課題を摘出・整理することにより、実用化戦略調査研究の第 II 期に向けて、原子炉システムの候補概念を選定するための判断材料を整備することを目的とする。

1.2 検討方法

実用化戦略調査研究の候補概念としてのガス炉システムは、参考文献 [1] に示されているように、①ピン型燃料炭酸ガス炉、②ピン型燃料ヘリウムガス炉、③被覆粒子燃料ヘリウムガス炉の 3 タイプが考えられる。したがって、本検討では、これら 3 タイプのガス炉システムについて、メーカーから募集した概念をベースに検討を進める。

基本的な検討の進め方は、各ガス炉システムの概念設計により、他の F B R システムとも比較できる形で基本仕様を整理し、開発目標への適合

性を評価するとともに、経済性評価に必要な物量を概算し、経済性を評価する計画である。ガス炉システムについての主要な実施事項は以下のとおりであり、平成 11 年度においては、*印を中心に検討した。平成 12 年度には、残りの事項の検討を加えるとともに、総合的な検討評価を実施する予定である。

- ① 基本仕様の設定 *
- ② 炉心・燃料の概念検討 (MOX 燃料の増殖性検討が中心) *
- ③ " (窒化物燃料、MA 添加への適合性)
- ④ 主要なプラントシステムの概念検討 *
- ⑤ 事故時の安全性評価 *
- ⑥ 再臨界回避方策概念の検討 *
- ⑦ 運転・保守・検査性の検討
- ⑧ 経済性評価 (物量概算を含む)
- ⑨ 技術開発課題の摘出・整理

なお、検討の効率化の観点で作業の重複を避けるため、ピン型燃料を用いる 2 つの概念のうち、ピン型燃料ヘリウムガス炉の検討については平成 11 年度に着手せず、ピン型燃料炭酸ガス炉の検討結果を踏まえて平成 12 年度に実施することとした。したがって、本報告書では、ピン型燃料炭酸ガス炉、及び被覆粒子燃料ヘリウムガス炉の検討状況を示す。

2. ピン型燃料炭酸ガス炉

2.1 プラント設計

ピン型燃料炭酸ガス炉（EGCR：Enhanced Gas-Cooled fast Reactor）は、ガス炉の特長を生かしつつ、炭酸ガス冷却熱中性子炉AGRのプラント技術とナトリウム炉の燃料技術を利用することにより、開発要素を少なくし、現有技術の延長線上での性能向上と経済性の追求を着眼点としたガス冷却高速炉である。冷却材に炭酸ガスを利用することの利点としては、低価格、無限に製造が可能、貯蔵が容易などが挙げられる。また、炭酸ガスはヘリウムガスと比べて比重が大きく、熱輸送性に優れることから、ヘリウムよりも低圧設計が可能となり、これを生かしたプラント設計が可能となる。一方、短所としては炭酸ガスと燃料、材料との両立性、中性子減速効果の大きいことによる増殖性の低下などが挙げられ、ステンレスの場合は700℃以上で材料腐食が生じ、冷却材使用温度に上限が存在する。

炭酸ガス冷却高速炉の既往設計例として、実用ガス炉（AGR）のプラント技術とナトリウム冷却炉の燃料技術を組み合わせ、低リスクでの開発を目指した代表的な設計例としてETGBR（Existing Technology Gas-cooled Breeder Reactor）がある。ETGBRの設計研究は、炭酸ガスによる高速炉の可能性が指摘されて以来、1970年代から1980年代初頭にかけて英国CEGB/NNCによって進められた。設計研究の結果、ETGBRの実現可能性が確認されたが、当時、欧州における高速炉開発はナトリウムが主流であり、各国との協調の観点から、ETGBRの開発は棚上げされた。1990年代に入り、AGRの良好な運転実績によりガス冷却炉の信頼性が実証されたこと、既存技術が利用できることにより開発費用を含めて経済性に優れる可能性が高いこと、P uインベントリに対する要求条件の緩和等から、ガス冷却高速炉（GCFR）の検討が再開された。特に、最新のAGRプラント技術と、欧州のナトリウム冷却炉開発で蓄積された炉心・燃料技術を活用した概念が、EGCRとして検討されている。

EGCRは、AGRと同様4.2MPaの炭酸ガスを冷却材とし、ナトリウム炉と同様の密封型金属被覆のMOX燃料を使用する高速炉であり、AGRの実績・経験に基づくプラント設計のため、開発要素が少なく、良好な運転実績が期待される概念であると考えられている。

ピン型燃料炭酸ガス炉の新たな着眼点は、炉心性能の向上（高増殖率化、高燃焼度化）を目指し、有効なCDA対策を考慮する点にある。出力規模については、AGRのプラント技術をそのまま活かすことを前提として、AGRのPCR Vを利用した高速炉の出力規模とし、小型化はスケールメリットの点で経済的に魅力がないと判断した。

なお、ピン型燃料炭酸ガス炉に関する検討内容には、ロンドンガイドラインに基づく管理義務が課せられた情報および英国NNC株式会社固有の技術情報が含まれているため、本報告書は公開が可能な情報に基づいて記述した。

2.1.1 プラント概要

ピン型燃料炭酸ガス炉の基本概念は、炭酸ガスを冷却材として使用したピン型燃料の高速炉である。ナトリウム炉技術を応用した原子炉、AGR技術を応用した蒸気発生器（ボイラ）、ガス循環機を採用し、AGRと同寸法、同構造のPCR Vを原子炉容器としてそれらを収納したシステムとすることにより、新たな開発要素が少ないプラント概念である。ピン型燃料炭酸ガス炉の基本仕様を表 2.1-1 にまとめた。また、原子炉構造概念図を図 2.1-1 に示す。

2.1.2 炉心・燃料

(1) 炉心配置

これまで検討してきた ETGBR や EFR をもとに、熱出力 3600MWth で、120GWd/t 程度の燃焼度と増殖性が確保されるようにした炉心を検討の出発点としてリファレンス炉心とした。リファレンス炉心配置を図 2.1-2 に示す。炉心燃料は MOX 燃料を採用し、炉心径／高さは 4.8m/1.5m である。また軸ブランケットを有し、径ブランケットは 2 列となっている。

(2) 燃料および燃料集合体

燃料集合体形式はラッパ管付き 3 角格子配列密封式ピン型で、燃焼度は欧州先行炉設計に準じて 12 万 MWd/t と設定し、増殖比は 1.06 である。炉心出力密度は平均 190W/cc（平均線出力は 260W/cm）で熱中性子を利用するガス炉が数 W/cc 程度であることに比べればかなり高い。被覆管最高温度は 660℃（暫定）、炉心圧損は 0.275MPa（暫定）である。

2.1.3 系統機器

(1) 原子炉構造（原子炉構造機器・配置、遮蔽解析結果、構造）

熱出力は 360 万 kW で電気出力は約 140 万 kW（発電端）であり、冷却系は 4 ループ構成となっている。また、経済性追求の観点から、低温部分となる炉心支持構造物等には AGR のように炭素鋼を採用することで検討を実施している。

原子炉容器には PCR V が採用されている。キャビティ内壁には炭素鋼ライナがアンカで固定されており、コンクリートの挙動に追従させている。また、キャビティ内面に断熱材を設置すると共に、ライナ裏面に設置したパイプによって水冷を行い、高温条件下でのコンクリートの強度低下を防止している。

(2) 原子炉停止系

原子炉停止系は独立 2 系統であり、主炉停止系（CSD：Control and ShutDown system）および後備炉停止系（DSD：Diverse ShutDown system）からなる。後備炉停止系には自己作動型炉停止機構（SASS）が付加されている。炉停止系概念図を図 2.1-3 に示す。主炉停止系のスクラム方法は現在検討中である。一方、後備炉停止系のスクラム方法は重力による落下方式で、温度感知合金による自動落下を利用したものである。DSD では、温度感知合金に冷却材を導くためのスリットをラッパ管に設け、さらにスクラム遅れ時間の短縮化を図るために、温度感知合金にフィンを付加する対策が考えられている。

なお、炉心上部機構はなく制御棒は下部駆動とし、炉上部側から燃料交換機で制御棒の交換を行うこととしている。

(3) 主冷却系

冷却系全体系統図を図 2.1-4 に示す。主冷却系はシングルキャビティ方式の P C R V 内にすべて設置されており、主冷却系の配管はない。なお、炉心出口温度は 525℃である。また主冷却系圧力は 4.2MPa である。

8 基のガス循環機は、インペラ、ガイドベーンおよびその流量コントロール装置、モータ、モータクーラ等から構成されている。ガス循環機概念図を図 2.1-5 に示す。冷却材の流量は、インペラの入口にある可変のガイドベーンにより制御される。モータは炉内の定格圧力炭酸ガス雰囲気中で動作し、ラビリンスシールにより炉内ガスとモータ室の冷却用ガスが混合するのを防いでいる。保守のために、インペラ、ガイドベーン、モータのアセンブリは隔離ドームを閉じることによって冷却系から隔離することが可能で、炉内を減圧させた後、P C R V の貫通部から取り外すことができるようになっている。

蒸気発生器として 12 基の 300MWt の貫流ボイラが設置されており、スペース効率の点から、管束は蛇行型で矩形のケーシング内に設置されている。ボイラ構造概念図を図 2.1-6 に示す。ボイラの伝熱管は炭酸ガス雰囲気での応力腐食割れと酸化を防ぐために改良 9%Cr-1%Mo 鋼を採用している。

伝熱管や炭酸ガス供給配管の P C R V 貫通部に対しては流量制限機構を設け、漏洩流路面積が制限される構造とすることにより、破損時にも急速な内圧低下が起らないようになっている。また、貫通部の端部に設置したバックアップ構造により、配管破損時の脱落を防止し、大きな開口が発生しない構造となっている。なお、ガス循環機等の機器の貫通部では、機器を P C R V に固定するためのアンカに冗長性を持たせることによって十分な固定を行っており、配管部におけるバックアップ構造は持たせていない。

(4) 補助炉心冷却系

補助炉心冷却系（崩壊熱ボイラ系）は、原子炉トリップ後に使用されるシステムであり、ガス循環機を低速で運転して崩壊熱を崩壊熱ボイラにより除去する。崩壊熱ボイラは各主ボイラの下部に 1 基ずつ、合計 12 基設置されている。崩壊熱ボイラへの給水は、主給水系とは独立した崩壊熱ボイラ給水系と呼ばれる給水系により行われる。崩壊熱ボイラ給水系の給水ポンプは 4 基あり、そのうちの 2 基の作動のみで必要な除熱量を確保することができるようになっている。また減圧事象等の場合には、主ボイラに給水し、ガス循環機を運転することにより炉心から熱を除去する。さらに全交流電源喪失等でガス循環機が作動しない場合には、炉内での炭酸ガスの自然循環により除熱することができ、主冷却系及び主蒸気系の熱容量がヒートシンクとして働く。なお、タンクから水が重力落下で給水する設計も可能である。

(5) 原子炉格納容器

現状ではAGRと同様にPCRVRで1次格納施設を構成する概念としているが、2次格納についても他のプラント並の格納性を考慮した設計とすることが必要と考えられるため、格納系に関していくつかのオプション概念が考えられている。

(6) 燃料取扱設備

燃料取扱全体概念図を図 2.1-7 に示す。新燃料は新燃料貯蔵設備に貯蔵され、燃料交換時には燃料出入機により新燃料貯蔵設備から炉内の中継位置に装荷される。炉内では中継位置からマニプレータ式燃料交換機により炉心へ装荷される。

使用済燃料は冷却系により強制冷却されつつ、炉心から燃料交換機により炉内の中継位置に移送される。さらに燃料出入機により炉外へ取り出され、強制冷却されつつ水プールドアバルブまで移送される。減衰待ち貯蔵後の燃料はキャスクに入れられた後、搬出される。

2.1.4 安全性

(1) 安全設計の特徴

冷却材としての必要な除熱性能確保のためガスは高圧化されており、冷却材圧力バウンダリの破損により減圧すると炉心冷却能力が低下する。しかし、このような冷却材圧力バウンダリが破損した場合においても、原子炉の停止後、崩壊熱を除去するための冷却材流量を確保するためには、減圧速度を抑制する必要がある。このような減圧事故に対する安全対策設備として流量制限機構（流路絞り機構等）が導入された。すなわち、PCRVR貫通用のスリーブ内に設置された配管部において貫通部に破損が発生しても流量制限機構により漏洩流路面積が制限される構造となっている。また、貫通部の端部に設置したバックアップ構造により、配管破損時の脱落を防止し、大きな開口が発生しない構造となっている。なお、この機構の妥当性評価は継続中である。

一方、ボイラ伝熱管破損事故等により生じる恐れのある蒸気流入事象における反応度変化の傾向について、ETGBR炉心を対象に、蒸気流入量については簡易的な推定のもとに解析を行った結果、負の反応度が投入されることが示された。したがって、この蒸気流入事象に対しては大きな問題とならない可能性が高いが、簡易的な仮定の下での結果であるため、詳細な仕様が決定的後、再確認する必要がある。

さらに炉心下側から挿入している制御棒システムについて、制御棒駆動軸が抜けるような制御棒飛び出し事故に対しても、制御棒が炉心以下には落下しないような構造とすることによって対応している。

(2) 原子炉停止系

独立2系統の停止系により信頼性を高め、さらにキュリー一点電磁石式SASSによる受動的炉停止機能を付加している。本機能の動作原理は、図 2.1-3 に示したSASS付きDSD構造図において、感知合金が炉心出口温度の上昇に応じてある温度（キュリー一点）に達すると、磁気抵抗が増して、電磁石から切り

離され、中性子吸収体とともに炉心内部へ落下挿入されるというものである。

ただし、SASS機能が要求される事象の進展に対し、時間応答性能を確保できる装置の開発については今後の検討課題であり、検討を継続する。

(3) 補助炉心冷却系

補助炉心冷却系は主冷却系とは独立に4系統を設置する。通常の崩壊熱除去時には、原子炉トリップ後、ガス循環機を低速で運転すると共に崩壊熱ボイラによって除熱を行う。また、減圧事故時には主ボイラに給水し、ガス循環機を運転することによって除熱を行う。さらに全交流電源喪失等でガス循環機が作動しない場合は、炭酸ガスの自然循環により除熱を行う。ただし現状のシステムでは、炉内のガス系のみが自然循環で、2次側の水系は強制循環であるため、長期冷却については今後の検討が必要である。

(4) 格納系

現状ではAGRと同様に円筒形PCRVRで1次格納施設を構成する概念としているが、2次格納についても他のプラント並の格納性を考慮した設計とすることが必要と考えられるため、格納系に関していくつかのオプション概念が考えられている。今後さらに国内向安全設計方針の検討（減圧事故に対する方策および格納施設設計要求の整理）を継続して行い、概念を選定していく必要がある。

2.1.5 全体配置

最終型AGRでは地震を考慮した設計となっているものの、PCRVR全体が低重心のコンクリート塊であり耐震性が高く、また英国は地震が少ないため、実質的に地震を考慮する必要がほとんどない。このことから各系統の系統分離に、より重きをおいた配置となっており、高耐震クラスの機器を格納する建屋は独立した基礎上に設置されている。ピン型燃料炭酸ガス炉ではAGRプラントをベースにわが国の地震条件等を考慮して、高耐震クラスの機器を共通の耐震基礎上に設置することとしている。

原子炉建屋の立面図を図2.1-8に示す。基本配置は、ユーティリティの共有によるコスト削減が可能なよう、AGRと同様にツイン型配置としている。また、高耐震クラスとなるPCRVR、原子炉格納施設、使用済燃料貯蔵設備、補助炉心冷却系、非常用ボイラ給水系、制御室等は原子炉建屋内に設置している。AGRで別建屋配置となっているディーゼル発電機は、各PCRVRの外側にそれぞれ4機ずつ配置している。格納施設についてはAGRの考え方を基準（PCRVRにより1次格納バウンダリを構成）としつつ、PCRVR外周の建屋に2次格納機能を持たせた方式を前提としている。

2.2 プラント設計評価

本概念検討にあたっては、熱中性子炉であるAGRシステムとの差異、高速炉システムとしての特性等を考慮し、以下の点に留意する必要がある。

・高速炉では炉内の黒鉛減速材（＝大容量のヒートシンク）を削除する必要があるため、黒鉛減速材のために事故時の挙動が緩慢になるAGRの特性は失われることになる。加えて、炉心燃料ピン配列が稠密構造に変更されることから、安全性を見極める必要がある。特に、高圧システムであることから冷却材バウンダリ破損時（減圧事故）の炉心冷却性の確認が重要である。

- ・CDA対応の検討（再臨界回避、コアキャッチャ等）が必要である。
- ・出力規模が大型化するため、AGRと同一サイズのPCRVRを採用するものの、ガス循環機、蒸気発生器等の冷却系機器の大容量化技術が必要となる。
- ・高速炉炉心に対する炉心設計の最適化、炉心周りの遮蔽設計が必要である。
- ・熱中性子炉の燃料に比べて発熱密度の高い燃料のガス中での取扱技術の確立が必要である。

2.2.1 炉心・燃料の概念検討（MOX燃料の増殖性検討が中心）

リファレンス炉心は前述の通り、燃焼度が12万MWd/t、増殖比は1.06であるが、増殖比1.26の高増殖炉心および燃焼度15万MWd/tの炉心も成立の見通しであり、継続して検討している。

2.2.2 炉心・燃料の概念検討（窒化物燃料、MA添加への適合性）

資源の有効利用の観点から、MA核種を混入したTRU燃料については、ピン型燃料炭酸ガス炉は硬スペクトルであり余剰中性子も多いことから、適切な設計対応により経済的な燃焼が可能である見通しが高い。また、Pu専焼炉としてのPu燃焼効率については、ピン型燃料炭酸ガス炉は高いポテンシャルを有する可能性が高い。

2.2.3 主要なプラントシステムの概念検討

ピン型燃料炭酸ガス炉の経済性、構造健全性（含耐震性）、安全性、製作建設性（主要機器、系統）、運転・保守補修性についての評価について以下に示す。

(1) 構造健全性（含耐震性）

(i) 炉心の構造健全性

燃料支持方法や流量配分の検討、及び下部軸方向遮蔽の設置による燃料集合体の長尺化への対応を検討する必要がある。

(ii) 構造設計の特徴

PCRVRはAGRのそれとほぼ同等であり、構造上の課題は少ない。また、その他の機器に関しても、設計可能と見通せる。

(iii) 主要機器の構造健全性

PCRVR内の主要機器は4.2MPaに対応した耐圧設計が必要なものはなく、剛設計も不要であるため、耐震上の成立性を有していると考えられるが、国内立地を考慮した耐震性については確認の必要がある。

(iv) 炭素鋼の使用

経済性追求の観点から炉心支持構造物に炭素鋼を使用しており、高速中性子照射による影響や異材継手構造物（炉心槽）等の成立性について検討が必要であ

る。

(2) 製作建設性（主要機器、系統）

(i) 製作建設性

主要機器が炉心、ボイラ、ガス循環機及び制御機器のみであり、これらは全て PCRV 内に設置されるシンプルな構造であること、ナトリウム冷却炉に存在する中間熱輸送系やナトリウム洗浄系等が削除できることから、ナトリウム冷却炉に比べて系統・機器数が減少し、製作建設性に優れる可能性がある。

また、AGR と比べても黒鉛減速材がないことや系統構成をさらに簡素化できる可能性があるため、AGR よりも建設性は向上する可能性がある。

(ii) 検査性、据付性、現地試験性

これらについては AGR の製作経験が活用できる可能性がある。

(3) 事故時の安全評価

(i) 減圧事故

ガス冷却炉特有の事象として減圧事象が挙げられる。減圧時には冷却材密度の低下により炉心の冷却が厳しくなることから、減圧事故は厳しい事象の 1 つと考えられる。そこで、減圧事故時の温度履歴解析を行い、安全性について概略評価を行った。

① 解析条件

(a) 開口面積

AGR での設計開口と同様に、PCRV のホットプレナムに流量制限機構により制限される開口面積 0.03m^2 （直径約 200mm 相当、減圧時定数 400 秒）の開口が発生した場合を想定した。この想定は、各貫通部の開口面積を包絡する。

(b) ガス循環機の減速時定数：4.4 秒

(c) 再起動するガス循環機基数：4 基（半数）

② 判断基準

事故事象に対する被覆管温度制限値は、被覆管設計上限温度である 900°C （暫定）とした。

③ 解析結果

(a) 事象推移

- ・ 100 秒の時点でホットプレナムに 0.03m^2 の開口が発生する。
- ・ ガス循環機入口圧力が定格の約 65% に達した時点（299 秒）で原子炉はトリップし、原子炉出力は崩壊熱レベルまで急速に低下する。
- ・ ガス循環機は、原子炉トリップ後 10 秒間定格回転数を維持した後、309 秒時点でトリップし、時定数 4.4 秒で定格回転数の 15% まで減衰する。
- ・ 定格回転数の 15% 時点で再起動するガス循環機基数は評価上、半数（4 基）になると仮定する。
- ・ 非常用給水系の起動によりメインボイラーに給水し、崩壊熱を除去する。

- ・減圧による冷却材密度の低下を補うために 920 秒時点でガス循環機の回転数が 100%になる。
- ・圧力は大気圧まで低下し、圧力の低下に伴って冷却材流量は減少する。

(b)被覆管温度解析結果

被覆管温度解析の結果を図 2.1-9 に示す。この結果以下のことが明らかとなった。

- ・被覆管温度は、原子炉トリップ時、ガス循環機再起動時及び圧力が大気圧近傍まで低下した時点でピーク値を取る。
- ・原子炉トリップ時及び圧力が大気圧近傍まで低下した時点での温度が高く、安全評価上クリティカルになる。
- ・本解析結果では、被覆管温度は 800℃程度になるという結果となった。

(ii) 再臨界回避方策概念の検討

ナトリウム炉に比して断面積が約 3 倍となる広い冷却材流路を熔融燃料排出経路とする概念により再臨界を回避する可能性について検討を継続している。この概念が期待すべき効果を発揮せず、熔融燃料排出ダクト等の再臨界回避方策を採用した場合における炉心性能とのバランスについては、今後、更に検討を継続する必要がある。なお、排出された熔融燃料の長期冷却、再臨界防止を目的としたコアキャッチャ設備が炉心支持構造下部に設置される。コアキャッチャは、熔融燃料を受けるトレイ部と燃料を冷却する冷却系から構成される。トレイ部は、熔融燃料が臨界になるのを形状面で防止するため、円錐形状となっている。また、PCR/V ライナの下面から支持されており、炉心下部駆動の制御棒はトレイ部を貫通する構造となっている。一方冷却系には炭酸ガス等の気体あるいは水等の液体を強制循環させることによりトレイの熔融燃料の除熱を行う。なお、コアキャッチャに関する課題として、冷却系仕様の設定および制御棒貫通による機械荷重や熱荷重に対する強度等の影響の確認が挙げられる。

以下に定性的な予測評価と必要な対策案を述べる。

①C D A 過渡状態

急激な膨張やボイド反応度のような冷却特性や核特性に影響する冷却材の相変化がないため、過渡は緩やかとなり、急激なエネルギー放出を伴う C D A は考えられない。

②燃料再配置

代表的な寸法

ピンピッチ/ピン径 = 1.55 (ナトリウム炉: 1.14)

ピン間ギャップ = 4.51mm (ナトリウム炉: 1.15mm)

大きな隙間により軸方向の燃料の移動が容易であると推定されるが、炉心高さが 1.5m と長いので、詳細な検討により確かめる必要がある。

③燃料溶融に伴う冷却材バウンダリへの影響

液体金属冷却炉のように MFCI (Molten Fuel-Coolant Interaction) の問

題はなく、液体が沸騰することによる体積変化もない。熔融燃料や再臨界による急激な機械的エネルギー放出事象は考えにくい。

④事故後崩壊熱除去・・・ PAHR

ガス中において、炉心下部へ落下した熔融燃料を長期にわたり安定に保持・冷却するためには、コアキャッチャおよび強制冷却系を必要とする。図 2.1-1 中にコアキャッチャの配置を示す。コアキャッチャは熔融燃料を受けるトレイ部と燃料を冷却する冷却系から構成されているが、詳細な構造、材質及び冷却方法などについては今後の課題である。

(4) 運転・保守・検査性の検討

(i) 運転の容易性

プラントシステムとしては AGR での運転実績が活用可能であり、AGR で信頼性の高い運転が行われていることから、運転性は高いと考えられる。なお、運転圧力は 4.2MPa で、AGR と同等である。また、ナトリウム炉に比べて、中間熱輸送系やナトリウム予熱系等が削除でき、系統数が削減できること、及び、ナトリウム漏洩の監視が不要となるため、運転が容易になる可能性がある。

(ii) ISI

冷却材がガスであるため、アクセスができる範囲については検査性に優れる(目視検査が可能)。しかし、PCRVR 壁面のライナについては、現状のコールドライナ方式では断熱材が設置され、点検補修の面で課題が残る。このため、ISI 方針の検討が必要であり、一方でホットライナ方式の開発が期待される。

(iii) 補修性

シングルキャビティ PCRVR 内に機器が設置されており、マルチキャビティ方式に比べてアクセス性に優れる。ただし、機器は高エネルギーフルエンスの場にあり炉心からの遮蔽対応が必要である。燃料リークについては破損燃料検出系により対応する。ボイラは PCRVR 貫通部を通して伝熱管束を引き廻し、PCRVR 外部に管板を設ける設計となっており、破損した伝熱管は PCRVR の外部から施栓することが可能である。また、ボイラ伝熱管では、AGR で使用されていた異材継手を排除することにより、検査性やメンテナンス性を向上させている。なお、運転保守性に対しては、今後詳細な検討を継続して行い、評価する予定である。

(5) 経済性評価 (物量概算を含む)

(i) 原子炉及び冷却系の物量

中間熱輸送を必要とせず、NSSS がコンパクトに設計されること等から、経済性についてのポテンシャルは高いと期待され、AGR 技術に立脚した概念構築により低コストで開発を達成できる魅力がある。

(ii) 所内負荷率

ガス循環機の動力だけで所内負荷率の 12%程度であり、ナトリウム炉と比較して 2 倍以上となる可能性がある。所内率の低減方策の検討については、今後詳

細な検討を継続して行っていく予定である。

(iii) プラント稼働率

24 ヶ月連続運転と軽水炉以上の定検短縮化を図ることにより、90%程度の稼働率とできる可能性がある。

(iv) プラント建設単価

NNCの試算によれば、AGRの設備構成とピン型燃料炭酸ガス炉の設備構成で、増減が考えられる個々の系統単位で増減を求めることによって概略の建設費を算出すると、AGR建設費の70%～80%程度になるという結果となった。一方、過去に行われたAGRと軽水炉の建設費に関する調査では、AGR建設費は軽水炉の1.25倍になるとされていることから、ピン型燃料炭酸ガス炉は軽水炉の0.9倍程度になると予測される。しかし、現段階では格納施設が考慮されておらず、格納施設を設ける場合の建設費はこの評価結果以上になる可能性がある。ただし、ツインプラント効果等については考慮されていないため、建設費の削減の可能性は残されている。なお、建設工期については今後の検討課題である。

(v) 発電コスト

EGCRにおいて、蒸気条件の最適化、ガス循環機の高性能化による動力の低減、定検期間の短縮により、AGRより発電コストを下げる事が可能という見通しである。

なお、粗面被覆管燃料のコストについては今後詳細な検討を継続して行い、評価を行っていく予定である。

(6) 技術開発課題の抽出・整理

炭酸ガス冷却高速炉は、AGRのプラント技術とナトリウム冷却炉の燃料技術を活用することにより新たな開発要素は少ない可能性がある。したがって、高速炉プラントとしての成立性のポイントは、a) 大型機器の開発、b) 炉心性能とのバランスのとれた再臨界回避方策の確立である。特に、熔融燃料の長期安定冷却を可能とする設備（コアキャッチャ等）の成立性は、ガス冷却方式であることに起因してクリティカルな問題であり、更なる検討・評価が必要である。

以下の2.3 開発項目に、新技術、新概念についての課題と概念の成立性を左右する重要な課題についてまとめる。

2.3 開発項目

2.3.1 新技術、新概念についての課題

- ・ 熔融燃料排出概念（FAIDUS）、コアキャッチャ及びその冷却系統概念の成立性検討
- ・ 下部アクセス型制御棒駆動装置の開発と試験による検証
- ・ 炭素鋼を使用した炉心支持構造物の成立性（高速中性子照射による影響、異材継手構造物（炉心槽））

- ・ SASS の開発
- ・ ボイラの保守方法の開発（アクセス性、交換性等）
- ・ 炉心構成要素の変形対策（スウェリング、熱変形）
- ・ 高増殖性の確認と炉心成立性の確認
- ・ 高燃焼度化（ナトリウム冷却炉の知見により、被覆管の材料を PE-16 とすることで 12 万 MWD/t は達成が可能との見通しがある。さらに設計要求である 15 万 MWD/t が開発目標となる。）
- ・ PCRV 技術基準の整備
- ・ 高温、高圧環境下での炉容器内機器・圧力バウンダリの健全性
- ・ 燃料交換取扱技術（高発熱燃料のガス中取扱方法および燃料取扱時除熱能力低下事象における対応検討）
- ・ 国内向安全設計方針の検討（減圧事故に対する方策および格納施設設計要求の整理）

2.3.2 概念の成立性を左右する重要な課題

- ・ 大容量ガス循環機の開発
- ・ 再臨界回避概念の具体化及び成立性の見通しの確認
- ・ 再臨界回避方策候補概念が炉心性能に与えるインパクトを評価し、要求される炉心性能との両立が可能となるような再臨界回避方策の成立性を見極める。
- ・ 溶融燃料の長期安定冷却を可能とする設備（コアキャッチャ等）の成立性の確認

表 2.1-1 基本仕様 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

| No | 項目 | 基本仕様 |
|----|------------|--|
| 1 | 原子炉形式 | ピン型燃料炭酸ガス冷却高速増殖炉 |
| 2 | 電気出力 (発電端) | 約 1400MW _e |
| 3 | 熱出力 | 3600MW _t |
| 4 | ループ数 | 4 ループ |
| 5 | 1 次系冷却材温度 | 525℃ |
| 6 | 1 次系冷却材圧力 | 4.2 MPa |
| 7 | タービン発電機 | 熱効率 38.9 % |
| 8 | プラント稼働率 | 90%以上 |
| 9 | 炉心・燃料 | (U, Pu)O ₂ |
| 10 | 炉心の径/高さ | 4.8m/1.5m |
| 11 | 径ブランケット | 2 列 |
| 12 | 燃料形態 | 密封式ピン型MOX燃料 |
| 13 | 燃焼度 (増殖比) | 12 万 MWd/t (1.06) (15 万 MWd/t についても検討中) |
| 14 | 高増殖炉心 | 増殖比 1.26 を目標とする高増殖炉心の検討を継続中 |
| 15 | 平均炉心線出力 | 260W/cm |
| 16 | 炉心圧損 | 0.275MPa (暫定) |
| 17 | 被覆管最高温度 | 660℃ (暫定) |
| 18 | 燃料集合体形式 | ラッパー管付六角集合体 |
| 19 | 原子炉容器形式 | PCRVR |
| 20 | 炉壁保護構造 | 断熱材+ライナ設置+水冷 |
| 21 | ガス循環機 | 単段吸込型 (2 基/ループ) |
| 22 | 蒸気発生器 | 蛇行コイル貫流型 (矩形ケーシング) |
| 23 | 原子炉停止系 | 独立 2 系統-主炉停止系+後備炉停止系 (CSD, DSD+SASS) |
| 24 | 炉心安全 | ①受動的炉停止方策: SASS 設置 ②再臨界回避方策: ボイド反応度の影響は非常に小さい。溶融燃料排出方策は未検討。コアキャッチャ設置。 |
| 25 | 炉心上部機構 | なし (制御棒下部駆動、上部燃料交換) |
| 26 | 補助炉心冷却系 | 独立 4 系統 |
| 27 | 原子炉格納施設 | 円筒形PCRVR |
| 28 | プラント運転サイクル | 344 日 5 バッチ方式 (24 ヶ月についても検討継続中) |
| 29 | 燃料減衰待貯蔵 | 水プール貯蔵 (IVS 及び EVST での減衰なし) |
| 30 | 炉内燃料交換 | マニプレータ式燃料交換機 |
| 31 | 炉外燃料移送 | 燃料出入機 (台車式) |
| 32 | 免震 | - |
| 33 | プラント寿命 | 60 年以上 |
| 34 | 原子炉建屋 | 原子炉建屋容積約 22 万 m ³ /ユニット (ツインプラント) |

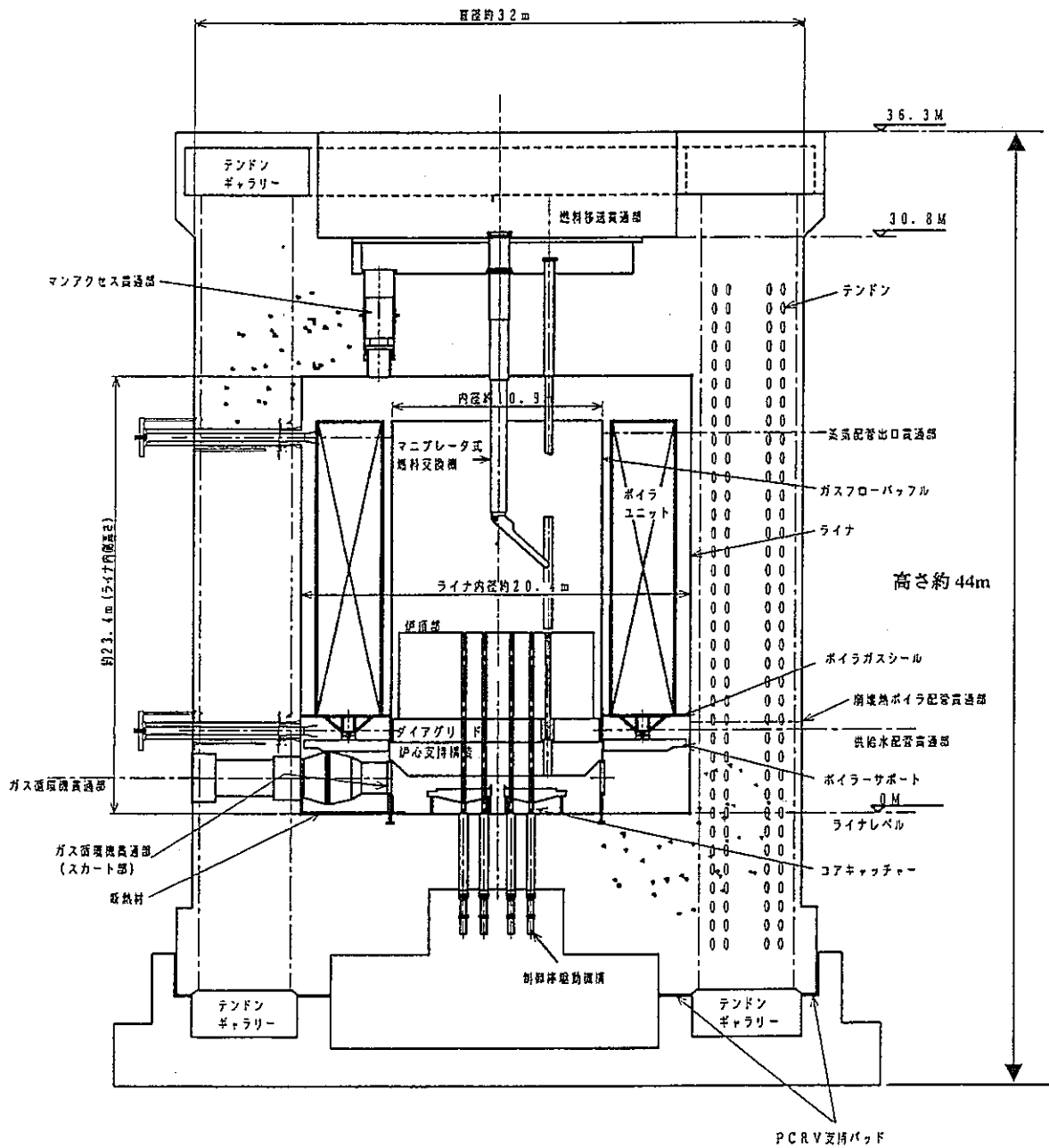


図 2.1-1 原子炉構造概念図 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

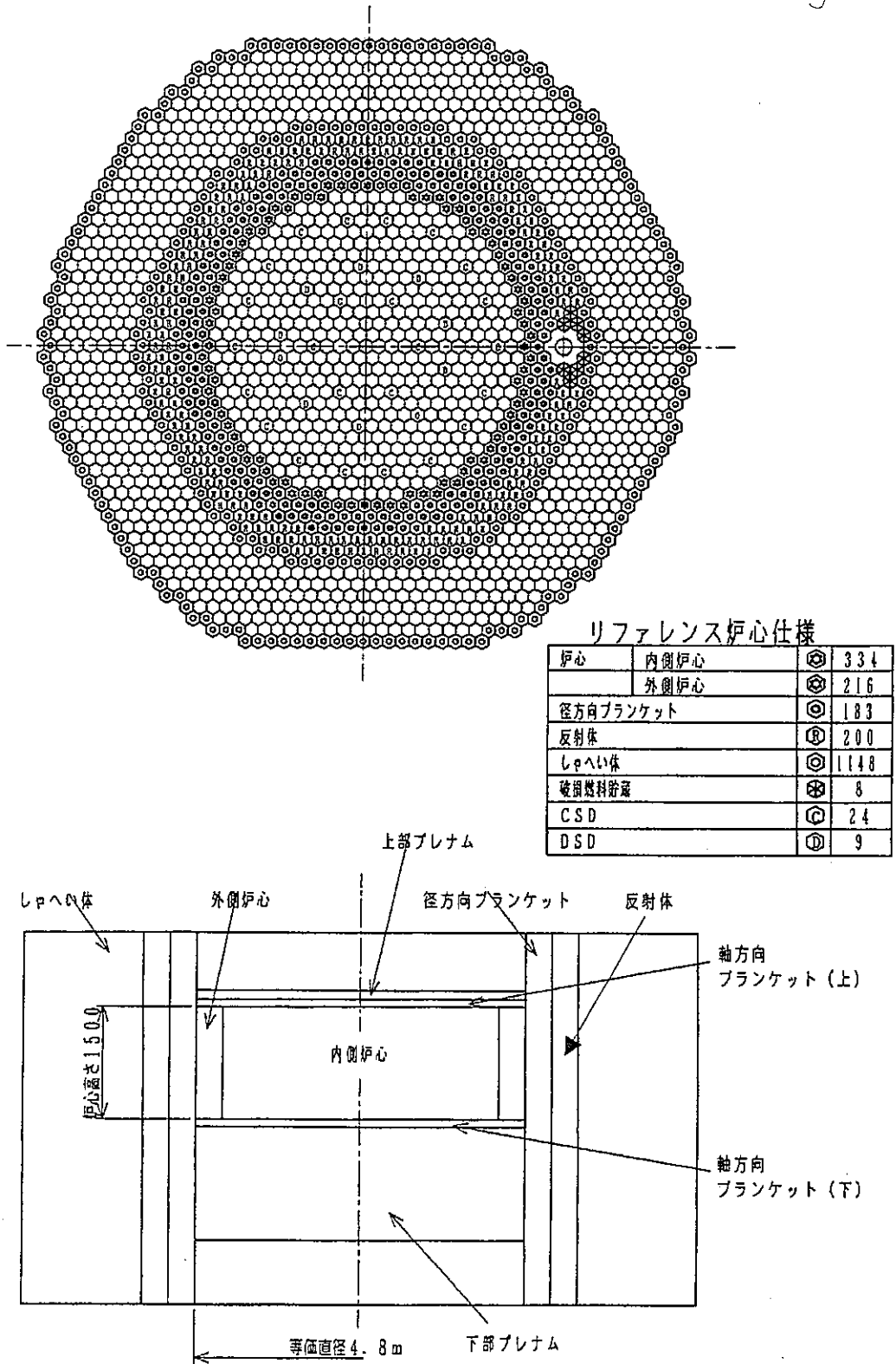


図 2.1-2 リファレンス炉心配置 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

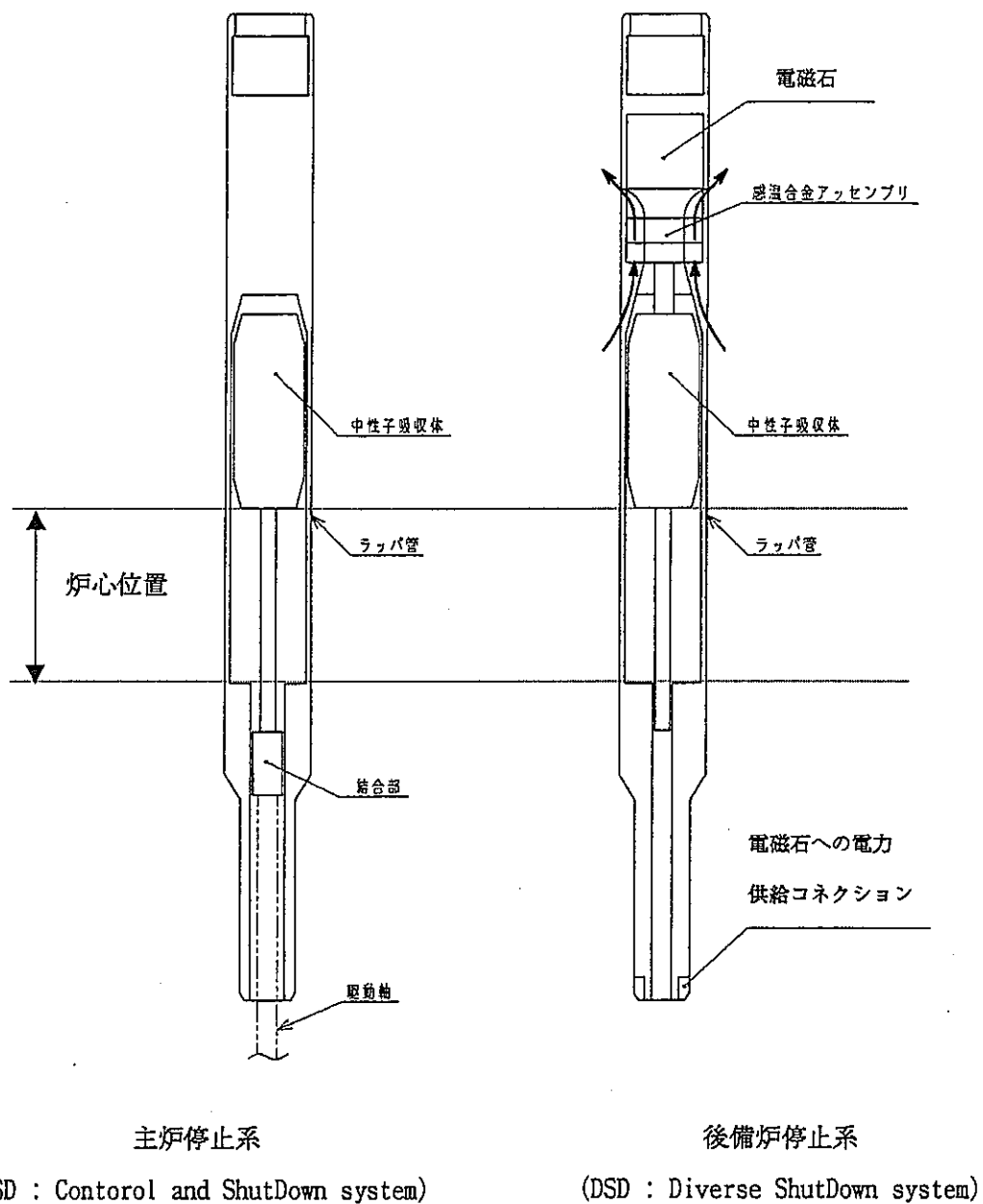


図 2.1-3 炉停止系概念図 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

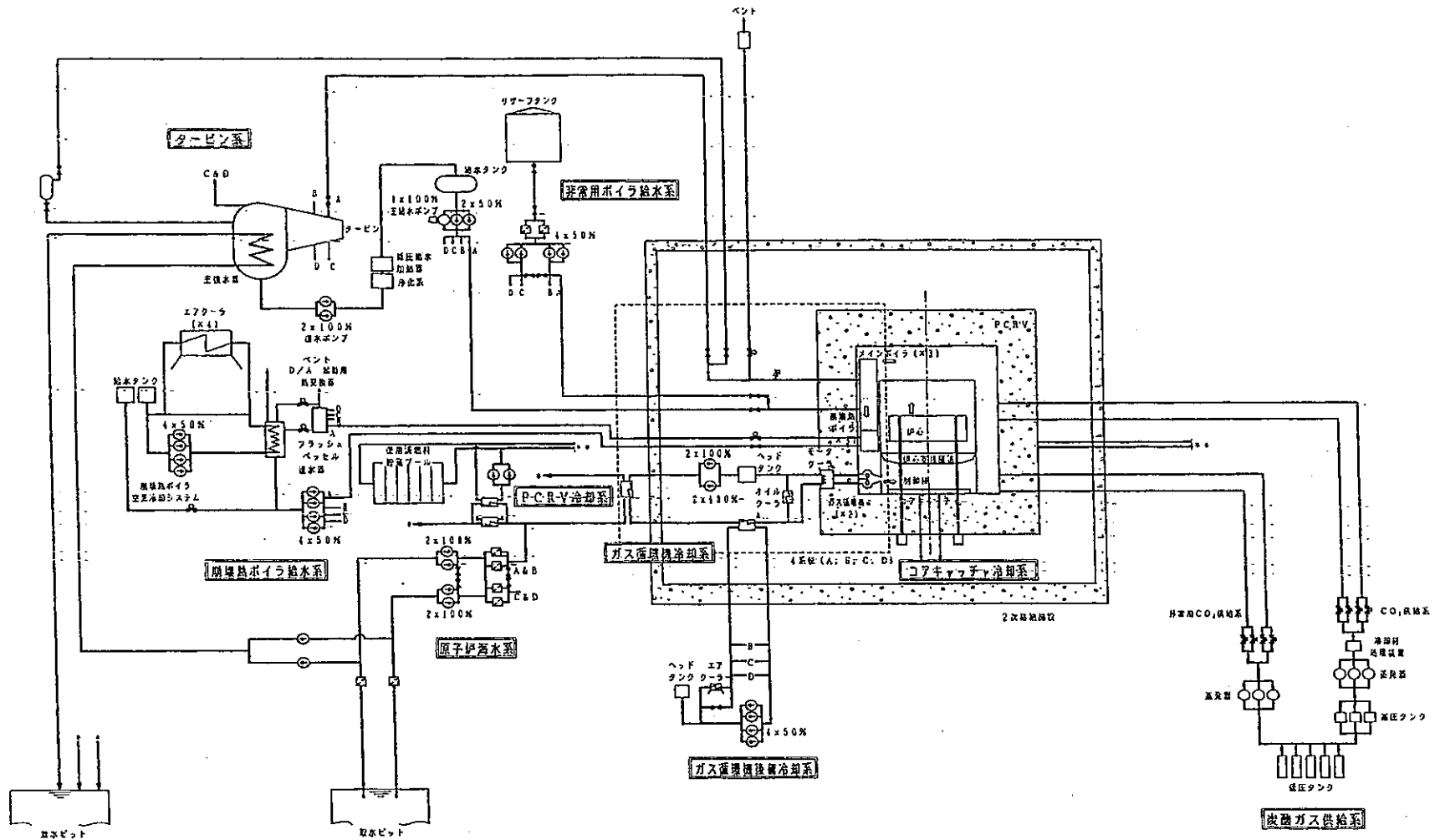


図 2.1-4 冷却系全体系統図 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

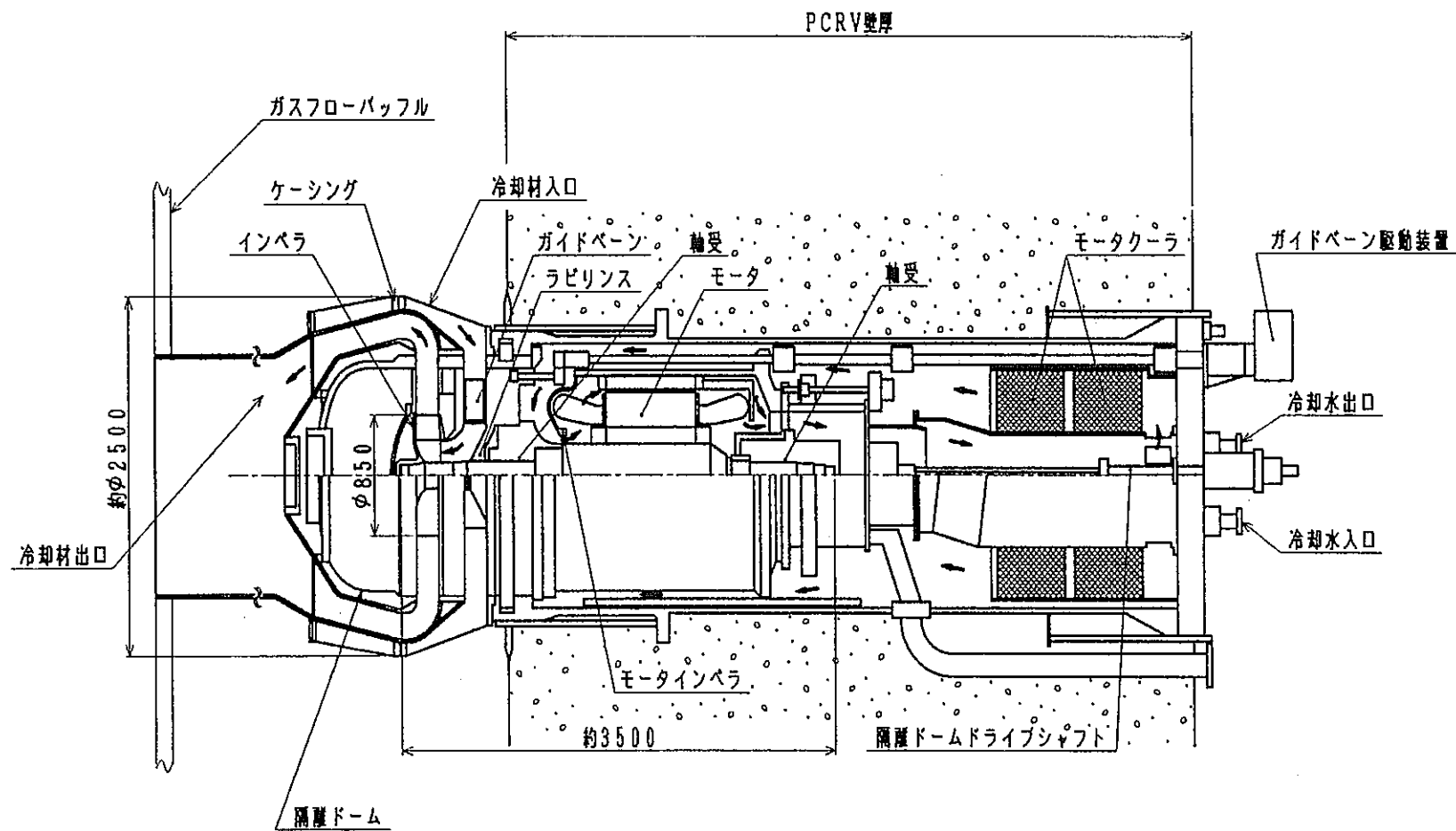


図 2.1-5 ガス循環機概念図 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

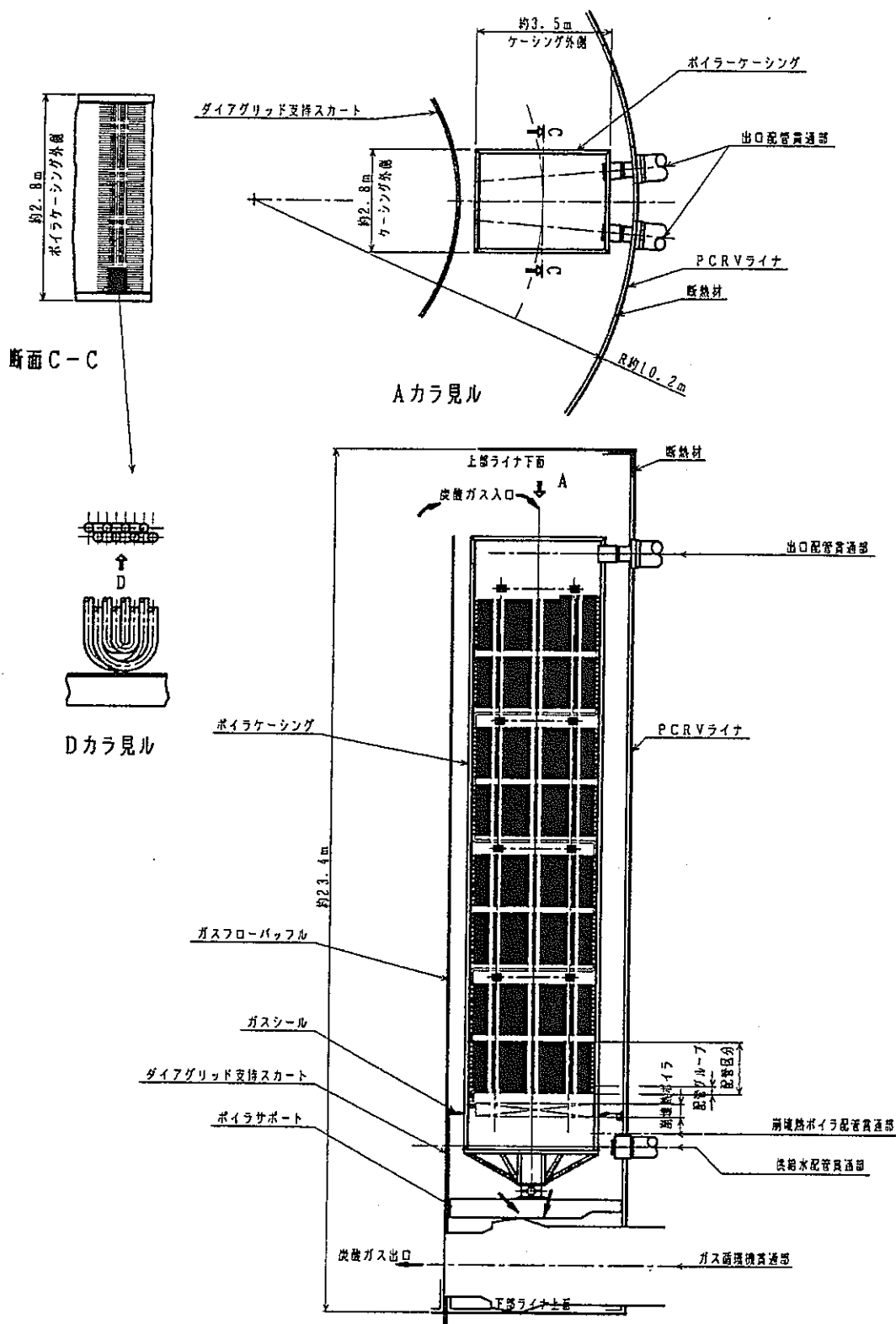


図 2.1-6 ボイラ構造概念図 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

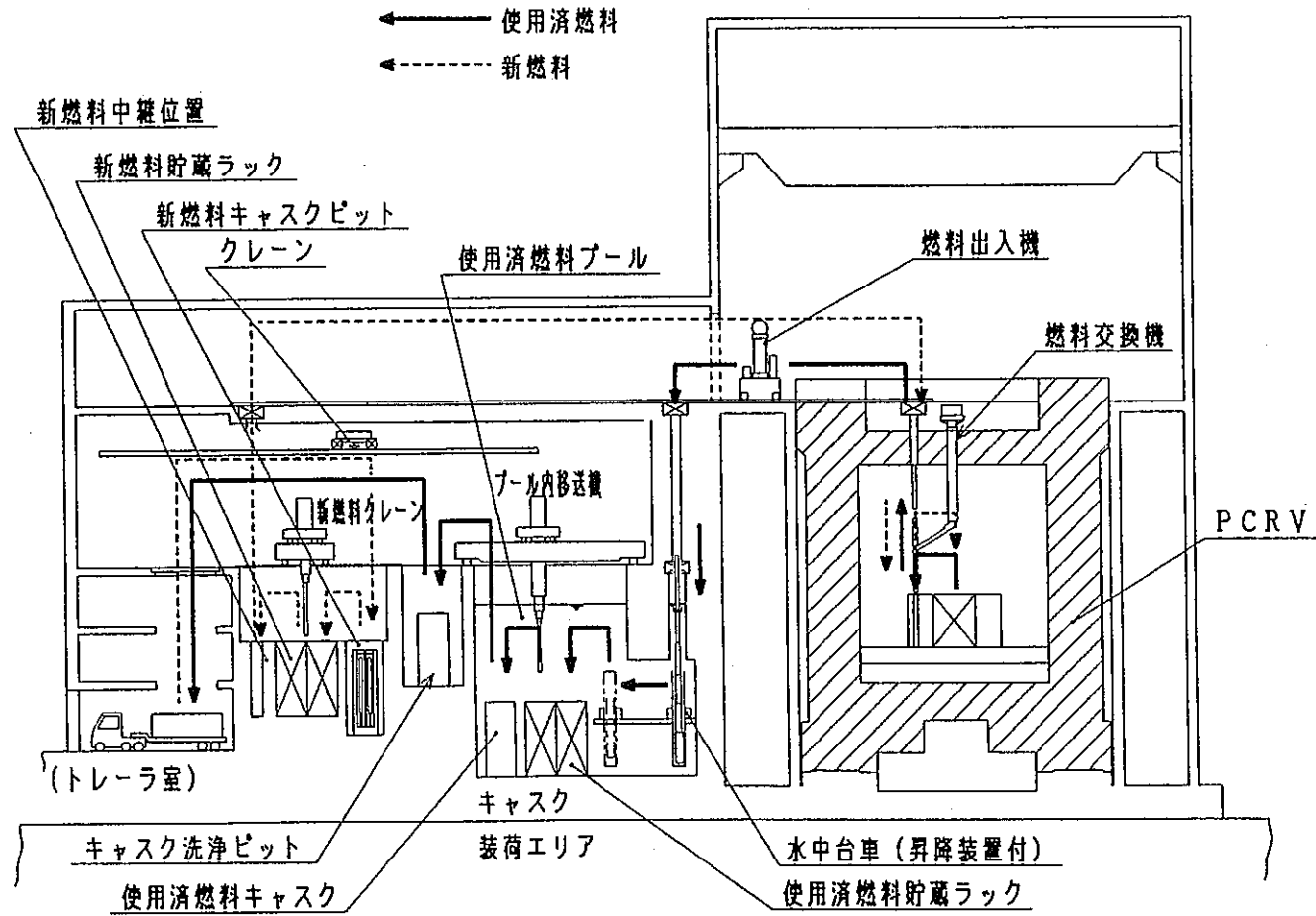


図 2.1-7 燃料取扱全体概念 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

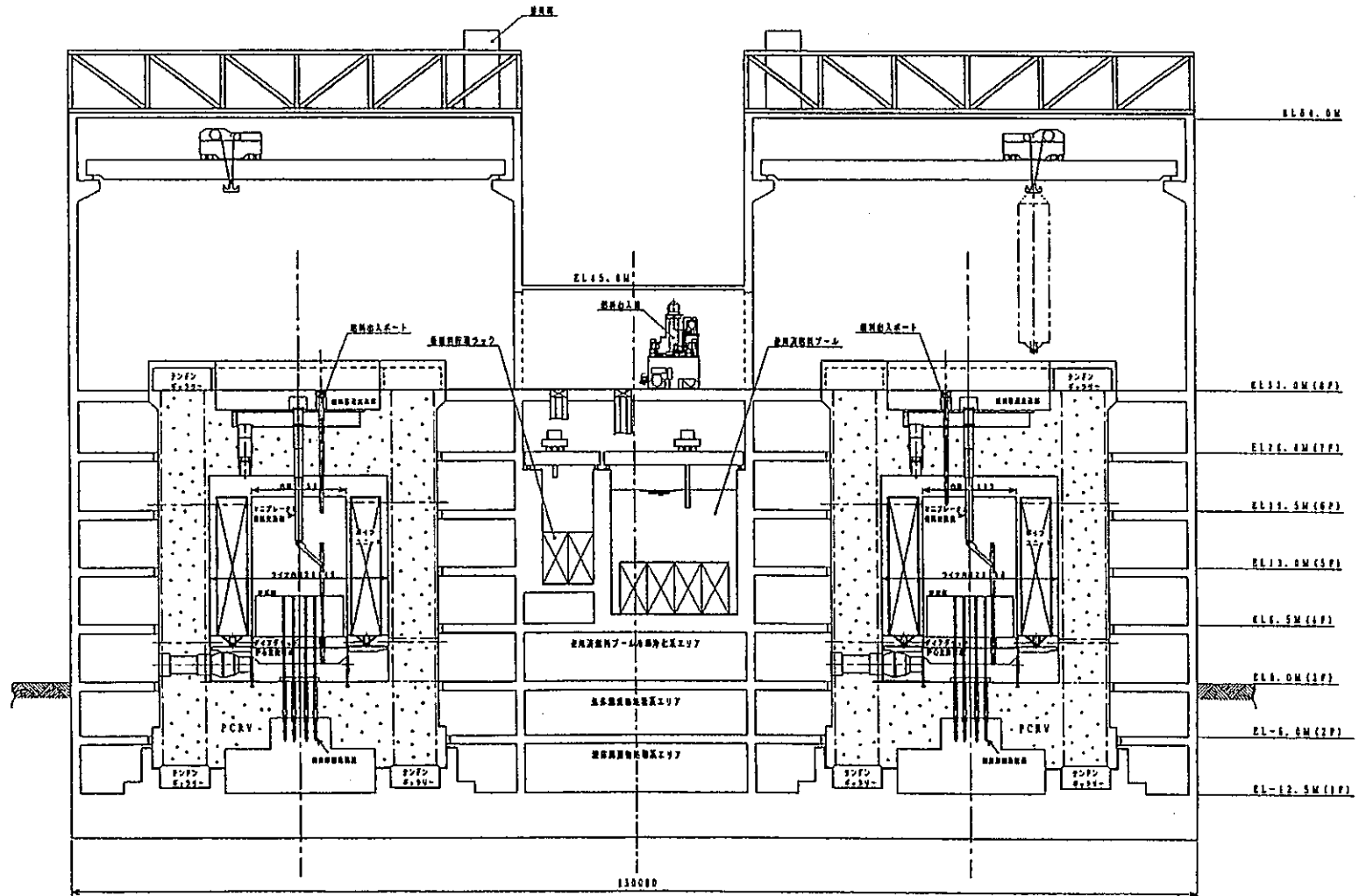


図 2.1-8 原子炉建屋立面図 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

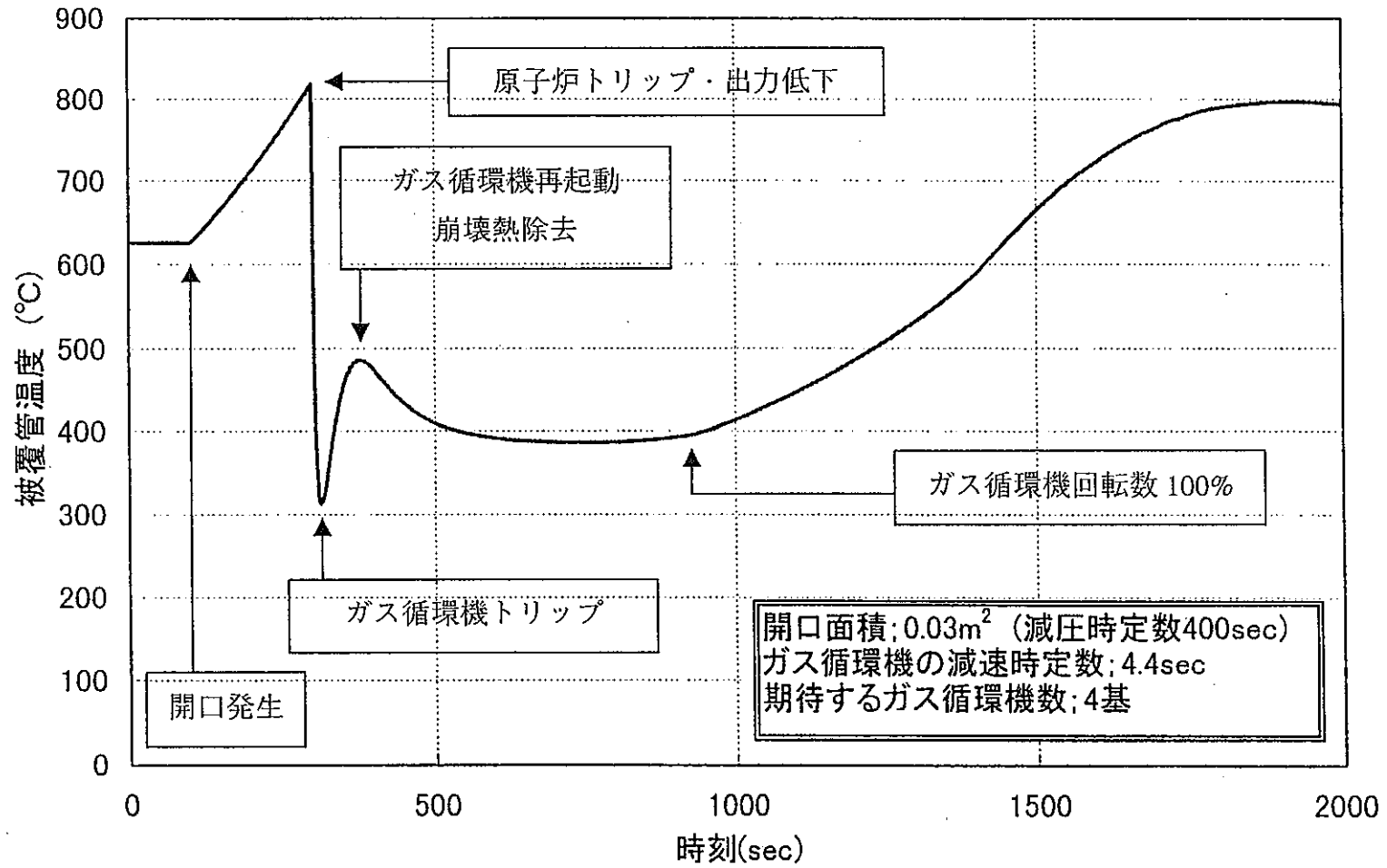


図 2.1-9 減圧事故時の被覆管温度解析結果 (ピン型燃料炭酸ガス炉:EGCR)

3. 被覆粒子燃料ヘリウムガス炉

3.1 プラント設計

3.1.1 プラント概要

プラント概念、配置図、系統概念図及び基本仕様を図 3.1-1、図 3.1-2、表 3.1-1 に示す。

本被覆粒子燃料ヘリウムガス炉は、熱出力 1800MW、電気出力約 85 万 kW（発電端）のプラントである。

プラントは、鋼製耐圧格納容器中に、原子炉圧力容器、動力変換容器等を収納したものである。

炉心燃料は被覆粒子燃料で、これをヘリウムで冷却して、直接ガスタービン発電を行う直接サイクル発電プラントである。

本プラントでは、被覆粒子燃料を、高温ガス熱中性子炉のように、コンパクトなどの燃料マトリックス中に分散させることなしに、直接冷却することにより、増殖率の向上等を図っている。また、炉心出入口温度の高温化（850℃/460℃）により、ヘリウムガスタービン直接発電との組み合わせで、プラント熱効率を向上している。

ナトリウム炉と比較すると、本プラントでは一次系のみを系統とすることにより、中間熱輸送系やナトリウム取扱系を排除し、また、パンタグラフ式燃料交換器を使用して、回転プラグ等の複雑な上部構造物を排除、設備物量を低減している。また、ガスタービン設備を動力変換容器に内蔵してモジュール・ユニット化することにより、工場製作、現地据付性を向上している。これらによって、経済性向上のポテンシャルがある。

ヘリウムガスは化学的に不活性であり、他の冷却材では達成できない高温領域まで、燃料・構造材との共存性が良く、放射化されない。また、ナトリウムと水との反応を排除できるとともに、冷却材は光学的に透明であるため監視・操作上有利である。

被覆粒子燃料は SiC 複合材料製のかご（燃料コンパートメントと称する）に保持されており、ピン型の金属被覆と比較して許容温度が非常に高い。そのため、過酷事故時のような高温状態でドップラー効果、自然循環除熱が期待でき、またナトリウムのようにボイドを形成して反応度を添加することがないボイドフリーと相まって、燃料溶融には至らない設計となっている。

3.1.2 炉心・燃料

(1) 炉心構成

炉心構成および炉心主要諸元を図 3.1-3 に示す。

炉心は高さ 3.2m、等価直径 3.8m で、内側炉心燃料集合体 84 体、

外側炉心燃料集合体 114 体の 2 領域と制御棒（主系＋後備系）19 体で構成されている。ブランケットは炉心燃料集合体周囲に、径ブランケット集合体として 174 体設置されており、上下方向には各燃料集合体の上下 60cm ずつに設置されている。径ブランケット集合体周囲には遮蔽の一部をかねる黒鉛の可動反射体が配置されている。

本炉心は燃焼度 10 万 MWd/t で増殖比が 1.11 であり、目標仕様である燃焼度 15 万 MWd/t、増殖比が 1.2 には達していない。図 3.1-3 に燃焼度が 15 万 MWd/t の場合についても示したが、この場合には、増殖比は 1.06 である。炉心圧力損失の検討により設定される粒子径と、健全性検討の結果として要求される被覆層厚さによって、燃料核径が制限されるため、燃焼度と増殖比は両立していない。

また、ピーク高速中性子フルエンスは $2.2 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ となっており、通常の高速炉よりは小さな値であるが、後述する被覆粒子燃料の被覆層健全性に影響がある。

(2) 燃料及び燃料集合体

(i) 被覆粒子燃料

被覆粒子燃料の構造寸法を図 3.1-4 に示す。

被覆粒子燃料は、これまで高温ガス冷却熱中性子炉では実績があるが、高速炉利用の実績はない。熱中性子炉で使用されている被覆粒子燃料は TRISO 型であり、燃料核／低密度 PyC 層／高密度 PyC 層／SiC 層／高密度 PyC 層の構成である (PyC: 熱分解炭素)。最近では SiC 層の代わりに、高温強度の大きな ZrC 層も検討されている。これ以外の材料を被覆粒子燃料の被覆材料として使用する場合には研究開発が必要となる。

被覆粒子燃料は、既知材料を組み合わせで構成され、圧力損失をできるだけ低減して燃料インベントリを大きくするため大粒径寸法が採用されている。被覆粒子燃料の健全性と増殖性を確保するため、燃料核と中性子減速効果を持つ炭素を含有する被覆層との体積比率が調整されている。

ここで、TRISO 型に使用された最外層 PyC は、本炉心の高速中性子フルエンスでは照射収縮により破損にいたる。そのため最外層 PyC は取り除かれ、強度保持の目的で SiC 層の厚さを増して最外層としている。

また、熱中性子炉では被覆燃料粒子は黒鉛マトリックス中に内蔵されて使用されたが、本原子炉では、被覆粒子燃料は直接冷却される。

(ii) 燃料集合体およびブランケット集合体

(a) 燃料集合体

燃料集合体の構造概念図を図 3.1-5 に、これらの寸法諸元を表

3. 1-2 に示す。

燃料集合体は、六角形状の SiC 製ラッパ管に燃料コンパートメントと呼ばれる燃料棒状要素 19 本を収納したものである。燃料コンパートメントは、SiC 繊維を編み上げて、SiC マトリックスと組み合わせて作ったセラミック複合材料製の内管、外管で構成されるかごの中に、炉心燃料粒子およびブランケット燃料粒子、遮蔽用顆粒材料を充填したものである。燃料コンパートメントは空隙のある構造で、その隙間を通して冷却材ヘリウムが流れる。冷却材は燃料集合体下部の内管内側より流れ込み、内管、燃料領域、外管を通過して燃料を冷却し、外管外側から上部に流出する。

この構造は、高温強度の大きなセラミック材料を使用して、事故時の高温での健全性を確保し、冷却材流路長を短くすることにより圧力損失の低減化（約 0.4MPa）を図ったものである。

(b) ブランケット集合体

径ブランケット集合体は炉心燃料集合体と同様、六角形状 SiC 製ラッパ管にコンパートメントと呼ばれる棒状要素 11 本を収納したものである。炉心の周囲に 174 体設置されている。上下方向ブランケットは、前述のように各燃料集合体の上下 60cm ずつに、顆粒材料として充填されている。

3. 1. 3 系統機器

(1) 原子炉構造

原子炉構造

原子炉構造概念図を図 3. 1-6 に示す。

原子炉は原子炉圧力容器と、炉心出入口の冷却材流路を形成する内側容器との二重容器構造となっている。

原子炉圧力容器は、ガスタービン等を内蔵する動力変換容器と二重管状の接続容器で接続され、上鏡部には、補助炉心冷却系、燃料出入用孔等が、下鏡部には制御棒駆動装置が設置されている。原子炉圧力容器は、接続容器部レベルで、120 度対象の 3 箇所から張り出した、ノズル部により支持されている。

また、原子炉圧力容器材料は、経済性を考慮して、PWR 材料と同じ S Q V 材を使用している。そのため使用温度を約 400℃以下とすることが必要で、原子炉圧力容器内面には断熱材を設置し、外面を空調施設により冷却している。さらに、原子炉圧力容器は、開発要素を排除し、現有技術で製作、輸送が可能な、軽水炉と同程度の寸法（内径約 7 m）と重量に制限された設計となっている。

炉心は原子炉圧力容器下部の支持部上に設置され、周囲を遮蔽体を兼ねた黒鉛の固定反射体で囲まれている。

冷却材は接続容器二重管外管から流入し、原子炉圧力容器と内側容器との間の流路を通して下降し、炉心下部より流入して炉心を冷却し、二重管内管からガスタービンへ流出する。出入口の冷却材を熱的に隔離するため、内側容器の内面には断熱材が設置されている。断熱材には、HTTRで経験が豊富な繊維状の断熱材であるカオウルが考えられている。

遮蔽構造

炉心周囲の高速中性子遮蔽体は、炉心の径ブランケット集合体外周に反射体を兼ねて設置された黒鉛構造物である。図 3.1-7 に高速中性子累積照射量の解析結果を示す。黒鉛部の高速中性子累積照射量は、原子炉寿命 40 年、稼働率 90% を考慮すると、黒鉛の構造健全性から設定される高速中性子累積照射量制限値、約 $4 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ を上回るため、交換が可能な可動部と固定部に分離している。可動部は径ブランケット集合体外周に、燃料集合体と同一寸法で 3 層、固定部はその周囲に約 60cm 厚で設置されている。遮蔽体により、高速中性子累積照射量は、炉心中心からは約 7 桁減衰して径方向外周部で約 $1 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$ となっている。

また、内側容器の内面には、炉心からのストリーミング等の遮蔽目的で中性子遮蔽体が設置されている。

(2) 炉停止系

炉停止系の概念図を図 3.1-8 に示す。

炉停止系は、主炉停止系と後備炉停止系の 2 系統で構成されている。

原子炉圧力容器上部は内側容器の上鏡板と外側原子炉圧力容器の二重構造になっており、さらに圧力容器上鏡上に補助炉心冷却器が設置されていること等により構造が複雑になっている。構造の複雑化および高温雰囲気を避ける目的で、制御棒は下部から挿入される。

制御棒は、通常運転時にはモータ駆動のボールねじにより挿入度調整が行われる。シャットダウンの急速挿入時には、主炉停止系はストロークベローズの加圧ガスにより急速挿入される。一方、後備炉停止系は、加圧ガスとともに、加速スプリングにより急速挿入される。炉停止系は多様性を有している。

制御棒は、グリッパを取り外すことにより駆動機構から分離され、燃料交換装置により上部から交換される。

炉心の中性子スペクトルは、ナトリウム炉などの高速炉スペクトルと比較すると、多少低エネルギー側に偏っており(図 3.1-9 参照)、比較的、ドップラー効果が効きやすくなっている。また、制限温度が高温であり、炉停止は炉心の自己制御性であるドップラー効果に期待できるため、後備停止系では S A S S 等の受動的炉停止システムは採用

していない。

(3) 主冷却系（ガスタービン）

ガスタービン設備のヒートバランス図を図3.1-10に、系統の仕様を表3.1-3に示す。

ガスタービン設備はタービン、発電機、低圧コンプレッサー、高圧コンプレッサー、再生熱交換器、前置冷却器、中間冷却器で構成されている。炉心を流出した高温冷却材により、直接、タービンを回転して発電を行う。タービンを出て、減圧、減温された冷却材ヘリウムは、再生熱交換器で熱交換され、更に前置冷却器で冷却されて低圧コンプレッサーに入り、そこで昇圧される。昇圧により温度が上昇したヘリウムは、中間冷却器で冷却され、高圧コンプレッサーにより所定の圧力まで昇圧されて、さらに再生熱交換器で所定の温度まで昇温され、原子炉入り口へ送られる。

ガスタービン設備の容量および仕様は、日本原子力研究所の設計例に基づき設定された。プラント熱効率は約46%を達成している。

ガスタービン設備の構造概念図を図3.1-11に示す。

ガスタービン設備は、発電機、ガスタービン、コンプレッサーが一軸で連結された縦置き型であり、再生熱交換機、冷却器とともに動力変換容器中に収納されている。3つの動力変換容器は、接続容器により原子炉圧力容器に接続されている。各容器は接続容器レベルで支持され、熱膨張に対して水平方向にスライドして変位を吸収する構造となっている。

(4) 補助炉心冷却系

補助炉心冷却系の系統構成を図3.1-12に、系統の仕様を表3.1-4に示す。

補助炉心冷却系は原子炉トリップ後の崩壊熱除去、低温停止時、燃料交換時等の通常運転時及び事故時の除熱を行う。また、系統の多重故障による強制循環喪失時には、自然循環により除熱を行う。

原子炉圧力容器上鏡部に設置された炉内熱交換器の2次側流体は加圧水であるが、2次側伝熱管は、原子炉格納施設を貫通して、格納施設外に設置された空気冷却器で冷却される。

補助炉心冷却系は50%（強制循環冷却容量）×4系統の構成である。但し、非常用電源は2系統であるため、単一故障時は、健全な電源系の50%（強制循環冷却容量）×2系統が作動することになる。

(5) 原子炉格納容器

本原子炉では、前述のように再臨界回避方策は不要であることから、減圧事故のみに着目して、減圧事故時格納容器雰囲気は300℃、0.5MPa(g)と暫定的に設定し、図3.1-13に示す3種類の構造を比較検討

した。

検討内容を以下に記す。以下では格納容器をC Vと呼称する。

① 円筒鋼製C V

皿型鏡板の鋼製C V形式の耐圧力性の改善、内径縮小の観点から、上部鏡板は半楕円型を採用した。C V板厚を概算し、以下のような必要板厚となった。

材料は、圧力容器鋼板 JIS G3115 SPV490

胴部（内径 35m）： 59mm

上部半だ円鏡板： 46mm

下部平板：6mm ライナー構造

② 円筒小型P C C V

P C C Vは、緊張材（テンドン）の量を増加させる等により耐圧力を上げることが可能であるが、小型円筒C Vでは、上部平板に多数の開口を持つため強度上の欠損部分が多く、またテンドンを有効に配置することができないため、強度上厳しくなる。

③ 円筒ドーム型P C C V

上記の欠点を解決するためには、天井クレーンを含めた上部空間全体もC Vバウンダリーとする構造であるが、C V径等の増加、建屋物量の増加となりコストアップ要因となる。

以上のことから、鋼製C Vを採用している。なお、鋼製の場合、厚板(38mm 以上)に伴う現地溶接部の焼鈍の免除に関する特別認可申請が必要である。

(6) 燃料取扱設備

燃料取り扱いのフロー図を図3.1-14に示す。

使用済み燃料は、パンタグラフ式燃料交換機により炉内中継装置に移動されて炉外に取り出される。燃料出入機により使用済み燃料貯蔵施設に移送されて貯蔵される。その後、燃料出入機により移送され、使用済み燃料キャスク等に収納されて、天井クレーンによりトレーラに積み込まれ、再処理施設に搬出される。新燃料はこの逆のプロセスで炉心に装荷される。

なお、パンタグラフ式燃料交換機は、通常運転時は炉心外に保管され、燃料交換時に圧力容器上鏡スタンドパイプの燃料出入用孔を通過して炉心内に設置される。また、燃料は、圧力容器上鏡に設置された専用の燃料出入機用孔を通して交換される。

3.1.4 安全性

(1) 設計基準事象解析

設計基準事象の代表事象として、ガス炉で最も厳しいと考えられる接続容器二重管内外管破断に非常用電源系の1系統の故障を仮定

し、補助炉心冷却系 50% (強制循環冷却容量) × 2 系統で強制循環冷却される場合の事故解析が実施された。温度、反応度変化解析結果を図 3.1-15 に示す。

二重管内外管破断後、ヘリウムガス圧力はほぼ瞬時 (約 0.6 秒) に減圧し、格納容器と均圧状態となる。ヘリウムガスの減圧によって炉心の冷却能力は低下すると同時に、減圧による正の反応度 (約 50¢) が添加される。原子炉出力は最大で定格出力の約 170% まで増大するが、燃料最高温度のピーク値は 1396℃ であり、被覆粒子燃料の設計基準事故での制限温度 1600℃ には十分に余裕のある結果となっている。この制限温度 1600℃ は、この温度を超えると、SiC 層の健全性が失われ、燃料粒子内部の FP が放出され始める温度である。

(2) 設計基準外事象解析

本炉心は、設計基準外事象においても余裕をもって燃料熔融温度以下の条件を満足し、再臨界回避方策が必要ないことを示すために、まず、ナトリウム炉の設計基準外事象となっている ULOF、UTOP 事象の解析を実施した。次に、被覆粒子燃料ヘリウムガス炉に特有の事象である、減圧事故を初期事象とする設計基準外事象を評価した。また、本炉において特に厳しいと想定される減圧事故と補助炉心冷却系の強制循環失敗 (DG の 2 台起動失敗) についても解析を実施した。

その結果、ULOF、UTOP においては、燃料最高温度が約 1500℃ 以下となり、設計用に暫定した燃料制限温度 2650℃ を十分に下回る結果となった。また、減圧事故 (小口径配管破断) を初期事象とする制御棒挿入失敗に補助炉心冷却系の単一故障 (50% × 2 系統の強制循環) を仮定した場合には、燃料温度は約 1900℃ となり、この場合にも 2650℃ を十分に下回る結果となった。解析結果を図 3.1-16 に示す。減圧事故 (小口径配管破断) に補助炉心冷却系の強制循環失敗、自然循環除熱 (DG の 2 台起動失敗) を考慮した場合にも、燃料最高温度は 2636℃ となり、設計用に暫定した燃料制限温度 2650℃ を下回る結果となった。

設計用に暫定した燃料制限温度 2650℃ は、MOX 燃料核の設計用燃料熔融温度であり、燃料集合体のその他の構造物は制限温度以内におさまることを前提として、冷却形状が確保できる温度として暫定したものである。

3.1.5 全体配置

プラント概念、配置図を図 3.1-1 に、プロットプランを図 3.1-17 に示す。ツインプラントでの原子炉建屋寸法は、補助建屋を含み

102.8m×52.5m×H83.5m であり、建屋容積としては、約 40.7 万 m³ で、1 プラント容積に換算すると約 20.5 万 m³ である。

本被覆粒子燃料ヘリウム炉プラントの特徴は、以下の項目である。

① ツインプラント化

他プラントと同様、ツインプラントとして設備の共用化等により物量の削減を図っている。

- ・ 燃料出入機は 1 号機と 2 号機の共用とし建屋の天井クレーンで吊り上げられ炉上部蓋上に設置されて燃料交換を行なう。使用済み燃料は、補助建屋側の使用済み燃料貯蔵室に収容される。貯蔵室は 1/2 号機分の共用としている。なお、貯蔵容量は、8 炉心分（4 炉心分/1 プラント×2）である。
- ・ 建屋上部の天井クレーンは共用化して 1 台である。（1/2 号機的一方が運転していて、他が燃料交換するという状態があり、安全上問題が生じる場合には、1/2 号機で雰囲気隔離ができるように天井クレーンの個別化も考える必要がある。）

② タービン建屋の排除

ガス冷却炉プラントは、ガスタービン発電ユニットを直接原子炉に接続し発電するシステムであり、ナトリウム冷却炉のようなタービン建屋は不要である。

③ 建屋免震

他炉型のプラントと同様に、建設時の土木掘削量の削減、建屋物量の削減、機械設備（特にガスタービン）に対する耐震荷重条件の緩和等の観点から、免震建屋構造となっている。原子炉建屋（本プラントでは格納容器とその外周部のコンファインメントエリア部を合わせた部分を原子炉建屋と呼ぶ）と補助建屋は基礎一体として、建屋全体を免震構造とするものとした。

なお、原子炉補助建屋には、補助炉心冷却塔、燃料貯蔵取扱設備、廃棄物処理設備、メンテナンス設備、中央制御室を含む電気計測制御設備、換気空調設備、その他共用化の可能な補機設備関係及び放射線管理関係設備等が配置されている。

3.1.6 被覆粒子燃料の再処理における脱被覆法の検討

被覆粒子燃料ヘリウム炉の工業レベルでの燃料再処理検討は、重要な検討事項である。本検討では、再処理前工程としての脱被覆を行うためのプロセスおよび設備について調査し、これらを再処理施設へ適用した場合の影響等について検討した。

(1) 対象燃料の設定

被覆粒子燃料ヘリウム炉の設計は、炉心および燃料の設計途中段階にあり、被覆粒子燃料仕様は今後さらに検討される予定である。本検討で

は、暫定的に以下のように設定した。

- ・ 燃料粒子 図 3.1-18
- ・ 燃料コンパートメントおよび燃料集合体 図 3.1-5、表 3.1-5

また取り出し燃料では、燃料コンパートメント内で被覆燃料粒子の溶着等がないものと考えた。

(2) 検討結果

(i) プロセスおよび装置の検討

文献調査等から、被覆粒子燃料の脱被覆プロセスおよび装置について検討した。以下に概要を述べる。

以下に説明する (a) の方法がもっとも工程数が多く、(b)～(d) は (a) で省略可能な工程を合理化したものである。現実にはどの方法を採用するかは設備としての技術実証も考慮して決定しなければならないと考えられる。

(a) Burn-Grind-Reburn 法 (図 3.1-19)

① 燃料集合体搬入工程

燃料集合体のハンドリングヘッド部を専用のグリッパにて把持し、反転せん断工程へ移送する。本工程の装置は、従来技術の組み合わせで成立するものである。

② 反転・せん断工程

垂直姿勢で搬入された燃料集合体を反転して、水平姿勢にするとともに、集合体単位で燃料コンパートメントの端部を直接切断し、傾斜させることにより内部の被覆燃料粒子を取り出す。取り出された被覆燃料粒子は傾斜路シュート等により次工程へ移送される。燃料が取り出された後の集合体は廃棄物処理設備へ移送される。

本工程の装置は、従来技術の組み合わせで成立するものであるが、切断装置の仕様は燃料集合体形状に起因する項目が大きく、技術実証が必要な機器である。

③ 被覆燃料粒子燃焼処理工程

取り出された被覆燃料粒子を容器等に受けて燃焼炉に装荷する。燃焼炉内では酸素を供給して燃焼させることにより、最外層の可燃性被覆を除去する。燃焼ガスはオフガス処理工程へ吸引される。燃焼処理後はシュート等にて次工程へ移送される。

本工程の加熱炉装置は、一般産業界での実績が豊富であり、均一な加熱が可能な電気加熱炉を利用した装置がもっとも技術的成立性が高いと考えられる。

④ 被覆燃料粒子破碎工程

前工程から移送された被覆燃料粒子を破碎機にかけてセラ

ミック(または金属)被覆層を破碎除去する。破碎処理後はシュート等にて次工程へ移送される。

本工程の装置は、セラミック粒子に関する一般産業界での実績が豊富であり、機械式可動部がほとんどなくメンテナンス上有利と考えられる JET-MILL 方式を利用した装置がもっとも技術的成立性が高いと考えられる。

⑤ 被覆燃料粒子再燃焼工程

再燃焼工程では下記 2 種類の処理方法が考えられる。

- ・ ③の燃焼処理工程と同様に燃焼炉にて被覆層の燃焼処理を実施する。この燃焼炉および周辺設備は③に同じである。
- ・ ④の破碎工程で燃料粒子上に燃料核に届くき裂をつけておき、加熱炉内に酸素を吹き込み 500℃前後の低温にてウラン酸化処理を行う。ウラン燃料は酸化処理により U_3O_8 に酸化されて、この反応の体積膨張により、被覆部分を押し広げ破壊する。この処理を行う装置も③に同じである。

処理後の燃料粒子はシュート等にて溶解設備へ供給される。燃料部分と被覆部分の分離に関しては溶解設備にて燃料部分の溶解を行い、被覆部分は溶け残りとして処理する考えである。

(b) Grind-Burn 法 (図 3.1-20)

① 燃料集合体搬入工程

(a) ①に同じ。

② 反転・せん断工程

(a) ②に同じ。

③ 被覆燃料粒子破碎工程

(a) の③および④で除去する層を本工程で一度に除去するものである。装置については(a) ④に同じである。

④ 被覆燃料粒子燃焼工程

(a) ⑤に同じ。

(c) All-Burn 法 (図 3.1-21)

① 燃料集合体搬入工程

(a) ①に同じ。

② 反転・せん断工程

(a) ②に同じ。

③ 被覆燃料粒子燃焼処理工程

破碎工程がないため、燃料核まで届くき裂をつけることができない。そのため、本工程ではすべての被覆層を燃焼にて除去するケースのみ考える。装置については、(a) ⑤に同じである。

(d) All-Grind 法 (図 3.1-22)

① 燃料集合体搬入工程

(a) ①に同じ。

② 反転・せん断工程

(a) ②に同じ。

③ 被覆燃料粒子破碎工程

本工程では、被覆燃料粒子を破碎機にかけて、すべての被覆層の破碎除去を行う。破碎機型式等は(a)④に同じであるが、すべての粒子の被覆層を確実に破碎する必要があるため、機械構成上、要求される機能が非常に多くなる。

(ii) 影響評価

前項で挙げたプロセスおよび装置を適用した際の再処理施設全体に対する影響を、以下の条件で評価した。

- ・ 現在検討が進められている、再処理施設と燃料製造施設との統合プラントへの影響評価とする。
- ・ 変更の影響がある項目は、建設コストに関しては下記のとおりとした。
 - 1) 建屋床面積増大に伴う建屋、電気・換気関連設備費用
 - 2) 解体・せん断・オフガスの各内装設備費用
- ・ 電気・換気関連設備費用に関しては、概略評価の位置付けから、延べ床面積増加に比例するものとして計算した。
- ・ 運用コストに関しては、人員の増減の観点から評価した。

評価の結果、建設コストに対して約2%増、運用に関して人員数の比較では約3%増との見通しが得られた。

(iii) まとめ

本検討では、被覆粒子燃料を再処理するための脱被覆法について、文献調査から始めて、採用可能なプロセス、装置および施設概念の検討を実施するとともに、その影響評価を実施した。

その結果、工業レベルでの脱被覆プロセスや装置・施設の概念を構築するとともに、再処理施設全体への影響は建設コストで約2%増、運用に関して人員数の比較では約3%増との見通しが得られた。

また、被覆粒子燃料の脱被覆に関する今後の開発課題が明確となった。

3.2 プラント設計評価

1.2 項で記述したように、第I期では、下記項目、特に*印の項目を中心に検討した。

① 基本仕様の設定 *

② 炉心・燃料の概念検討 (MOX燃料の増殖性検討が中心) *

- ③ " (窒化物燃料、M A添加への適合性)
- ④ 主要なプラントシステムの概念検討 *
- ⑤ 事故時の安全性評価 *
- ⑥ 再臨界回避方策概念の検討 *
- ⑦ 運転・保守・検査性の検討
- ⑧ 経済性評価 (物量概算を含む)
- ⑨ 技術開発課題の抽出・整理

本節では、上記検討項目を次の5つの観点から評価した。なお、技術開発課題の抽出・整理の結果は次節に記述した。

- ① 構造健全性
 - ② 安全性
 - ③ 製作建設性 (主要機器、系統)
 - ④ 運転保守性
 - ⑤ 経済性
- (1) 構造健全性等
- (a) 被覆粒子燃料、燃料コンパートメント
 - ・ 高高速中性子フルエンス下 ($2 \sim 4 \times 10^{23} \text{n/cm}^2, > 0.1 \text{MeV}$) での被覆粒子燃料被覆層、燃料コンパートメントの健全性については不確定要因があり、現時点では健全性を判断できない。開発課題と考えられる。
 - (b) 燃料集合体ラッパ管
 - ・ 概念設計段階であり、今後の構造設計、健全性検討が必要である。特に、設計基準外事象時には、雰囲気温度が SiC の焼結温度である 2000°C を越える可能性があるため、設計基準外事象時の冷却形状を維持できるように設計対応が必要である。
 - (c) 反射体、遮蔽体、その他炉内構造物
 - ・ 概念設計段階であり、高高速中性子フルエンス下に曝されることも考慮し、今後の構造設計、健全性検討が必要である。
 - (d) 原子炉圧力容器
 - ・ PWR と同じ S Q V 材を使用する場合には、断熱材の設置等、耐高温設計として定格運転時、事故時ともに配慮が必要である。また、圧力容器はノズル部で支持されているため、現有製作設備容量を考慮して、ノズルの長さを適切に設計する必要がある。重量についても同様に配慮の必要がある。詳細については今後の検討が必要である。
 - (e) ガスタービン発電ユニット

- ・ 本設計では、日本原子力研究所の設計経験に期待しており、設計検討は実施されていないため、実現性および健全性評価は今後の課題である。

(f) 燃料交換設備

- ・ 燃料交換はパンタグラフ式燃料交換装置と炉内中継装置、燃料出入機で行われる。燃料出入れ用孔（燃料交換機出し入れ用）、燃料出入機用孔いずれも圧力容器上鏡上に設置される。圧力容器上鏡部には補助炉心冷却系等も設置されており、炉心内でのアクセス可能性を考慮して、十分な設置スペースが確保できるかどうか検討する必要がある。

(g) 炉停止系

- ・ 概念検討の段階であり、具体的には、駆動装置部の遮蔽等の問題も含めて今後の検討が必要である。また、制御棒材料もセラミクス材料であるため、急速挿入時の衝撃荷重等を考慮した設計が必要である。

(h) 補助炉心冷却系

- ・ 本炉心では、高温ガス熱中性子炉のように熱容量の大きな黒鉛を炉心に導入すると、炭素の中性子減速効果により高速増殖炉として成立しなくなる。また、高速炉の出力密度は、一般的に、高温ガス熱中性子炉出力密度の数倍～数十倍（受動的炉心冷却系を有するモジュラー炉では数十倍）であるため、除熱の際に炉心の熱容量に期待するためには、熱中性子炉よりもさらに大きな熱容量が必要となる。高温ガス熱中性子炉の黒鉛の代替として、中性子減速効果が小さく、熱容量の大きなセラミック材料を導入することが可能となれば、高温ガス熱中性子炉のように、炉心の熱容量に期待して、圧力容器外部より輻射で除熱するという受動的な熱除去が可能となる可能性がある。しかし、現状では、候補材料として十分な照射試験データを有する材料が見つからず、研究開発が必要である。そのため、本炉のように、中性子減速効果のある炭素を、できるだけ排除した炉心構成とするためには、DRACSによる強制循環冷却に頼らざるを得ず、強制循環失敗の場合には、受動的な自然循環で冷却を可能とする原子炉とせざるを得ない。
- ・ 設計基準事象時及び設計基準外事象時には、補助炉心冷却系による除熱が期待されている。安全解析結果によると、炉心出口温度は高温（約 1200℃～2500℃）となるので、高温化に十分に対処した設計が必要と考えられる。特に通常

運転時閉状態で事故時に開となる弁の健全性にも十分な配慮が必要である。本設計は概念検討段階であり、今後、詳細な検討が必要である。

(i) 格納容器

- ・ 格納容器厚が 38mm を超えているため、溶接部の熱処理に対して、軽水炉のように特別認可が可能かどうか見極める必要がある。

(2) 安全性

(a) 炉停止系

- ・ 独立で多様な炉停止系 2 系統とドップラー効果による自己制御性を持たせた受動的炉停止能力に期待できる設計となっている。安全解析結果によれば、たとえば、ガス炉で厳しい減圧事故を初期事象とする苛酷な事象、小口径配管破断 + 炉停止失敗 + 補助炉心冷却系の単一故障時にも、補助炉心冷却系 2 系統での強制循環冷却が可能な限り、燃料最高温度は約 1900℃ と、設計用に暫定した燃料制限温度 (約 2650℃) 以下であり、ドップラー効果による自己制御性が確認できる。

(b) 補助炉心冷却系

- ・ D B E 事象の中で、ガス炉で最も厳しい減圧事故時には、ヘリウムガスの減圧によって炉心の冷却能力低下と共に、減圧による正の反応度 (約 50¢) が添加され、原子炉出力は最大で定格出力の約 170% まで増大するが、補助炉心冷却系 2 系統の強制循環によって、燃料最高温度のピーク値は約 1400℃ 以下となり、設計用に暫定した燃料制限温度 1600℃ に達せず、十分に余裕がある。このように、基本的な設計上の要求は満足されている。

(c) 再臨界回避方策

- ・ 再臨界回避に関しては、U L O F や U T O P 等の設計基準外事象時においても、補助炉心冷却系の 2 系統が作動している限り、燃料最高温度は約 1500℃ 以下となり、設計用に暫定した燃料制限温度約 2650℃ 以下となり、さらに F P 放出の燃料制限温度 1600℃ 以下も満足する。従って、このような事象に対しては、本プラントでは、再臨界排除方策は必要ない。
- ・ しかし、本被覆粒子燃料プラントに特有な事象で、設計基準事象を越える苛酷な事故事象、小口径配管破断 + 補助炉心冷却系の多重故障 (D G 2 系統起動失敗、補助炉心冷却

系4系統の自然循環冷却)の場合には、補助炉心冷却系の強制循環喪失が大きく影響して、燃料最高温度は2636℃に達し、約2650℃以下であるが十分な余裕はない。また、燃料集合体全体の冷却形状維持を考慮すると、さらに燃料温度を下げる必要がある。今後は、事故後対応手順、自然対流除熱性能の向上、安全解析の詳細化を含めて、さらに検討が必要である。

- ・ また、ガス炉である本プラントでは、設計基準外事象としてどのような事象を対象とすべきかさらに検討する必要がある。

(d) その他

- ・ 補助炉心冷却系が炉心上部に設置されているため、補助炉心冷却系の伝熱管破損時には水分が原子炉内に流入する可能性が大きい。炉心内はSiCと黒鉛で構成されているため、特に、黒鉛と水との反応では可燃性ガスが生成されるため、十分な検討が必要である。

(3) 製作建設性 (主要機器、系統)

(a) 製作性

- ・ 被覆粒子燃料を内蔵するための燃料コンパートメント内外管は、SiCコンポジット(セラミック複合材料)で製作し、ポーラス構造で軸方向に流量配分を調整するが、開発段階の技術であり、製作性については研究開発が必要である。また、燃料コンパートメントを収納するラッパ管もこれまでの炉心構成要素で経験のないSiCの焼結体で製作されるため、研究開発が必要である。
- ・ 各圧力容器は現有設備で製造・輸送可能な大きさの範囲に収まり、製作上の問題なく経済性が追及できる可能性が大きい。
- ・ 縦置きガスタービンの製作性、特に軸受け、再生熱交換器等については、今後の研究開発が必要である。

(b) 検査性

- ・ 製作性の項で記述のように、燃料コンパートメント内外管およびラッパ管の製作には研究開発が必要である。そのため、これらを組み合わせて構成される燃料集合体の検査方法についても、今後の検討が必要である。その他の部分はガス冷却であることで、大きな問題はないものと考えられる。

(c) 据付性

- ・ モジュール、ユニット化という設計方針であるため、据付性は他炉型に比較して問題はなく、むしろ簡素化されるものと考えられる。
- (d) 現地試験性
 - ・ 据付性と同様の理由で、他炉型に比較して問題はないものと考えられる。
- (4) 運転保守性
 - (a) 運転の容易性
 - ・ 直接ガスタービン発電プラントであり中間熱輸送系が削減されているため、運転は簡素化されるものと考えられるが、ガスタービン自体の運転制御方法については今後の検討が必要である。
 - (b) I S I
 - ・ ガスタービン全体が縦置き容器内に収納されているので、検査時に取り出して検査するのか、容器を取り外し構造にするのか等の検討が必要である。また、運転時の燃料温度が高く、一部のF Pが拡散放出される場合には、循環放射能がタービンに沈着する可能性があるため、F Pの拡散放出、循環挙動に注意する必要がある。
 - ・ 冷却材がガスであるため、アクセス可能な範囲については目視検査が可能である。
 - (c) 漏洩検出性等
 - ・ 1次系は圧力容器を組み合わせた構造であり、微小漏洩箇所はフランジ部等の接合部あるいは計測用微小配管に限られるものと考えられる。ナトリウムと比較して放射化しないため、アクセスが容易であると考えられる。
 - (d) 漏洩位置の同定と補修性
 - ・ 漏洩検出性と同様の内容である。
- (5) 経済性
 - タービン直接発電による中間熱輸送系の削除と高温高効率化、国内メーカーの現有設備で製作・輸送が可能な原子炉容器により建設費約20万円/kWeは可能性が大きいと考えられる。しかし、現時点の原子炉概念と概略物量のデータだけでは概念を構築した程度であって設計まで至っていないため、建設費約20万円/kWe以下が可能かどうかの判断はできず、さらに検討が必要である。

3.3 開発項目

以下に炉型特有の開発課題を示す。

(a) 被覆粒子燃料の開発

熱中性子炉で実績のあるTRISO型被覆粒子燃料では、最外層にパイロカーボンを使用しているが、最外層パイロカーボンは約 $1 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ の高速中性子フルエンスで破損したというデータがあり、高速中性子フルエンスが約 $2 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ に達する高速炉では使用できない。これを燃焼度に換算すると約1万 MWd/t に相当する。そのため、最外層からパイロカーボンを取り除き、その内層のSiC層の肉厚を増し、最外層とする案が提案されているが、SiC層の強度特性が製造過程等により不確定なこと、あるいは直接燃料コンパートメントに充填して使用することが問題視されている。最外層がSiCの被覆粒子燃料の健全性実証とこれまでに使用経験のない新たな材料を使用した被覆粒子燃料開発を前提として、高高速中性子フルエンス ($2 \sim 4 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 、 $>0.1 \text{MeV}$) までの照射実験で挙動データを取得し、健全性を確認する必要がある。

(b) 燃料集合体の開発

燃料集合体はセラミック複合材料を採用しているため、その製作性について今後の開発、検討が必要である。特に、燃料コンパートメントには、出力分布に応じた軸方向流量調節用のポラス構造が必要であり、ポラス度の製造時制御方法の検討が必要である。また、制御棒もセラミック複合材料が使用されることになるが、制御棒は高速挿入が要求されるため、セラミック材料の挿入性（挿入時の衝撃荷重に対する機械的健全性の確保等）について検討する必要がある。

(c) ヘリウムガスタービンの開発

ヘリウムガスタービンは、発電機等と一緒に一軸で結合されて動力変換容器中に設置される縦置き一軸型である。本ヘリウムガスタービンの成立性についてはまだ実績がないため、南アフリカのPBMRや日本原子力研究所の検討内容を参考に今後の研究開発が必要である。

(d) 断熱構造の検討

原子炉出入口温度が $850/460^\circ\text{C}$ と高温であるため、事故時のみならず定格運転時にも、断熱材あるいは断熱構造の詳細検討が必要である。これには日本原子力研究所のHTTRの経験が参考になるものと考えられる。

(e) 苛酷な減圧事故の検討

苛酷な減圧事故時には、格納容器により放射性物質の外部環境への放出を抑制し、補助炉心冷却系により除熱することとなっているが、前述のように、設計基準事象を超える苛酷な事象として仮に想定した、減圧事故+補助炉心冷却系多重故障時（自然循環冷却）の燃料最高温度は、燃料熔融温度に対して余裕が少ない。今後、設計の進捗に伴って、自然対流除熱性能の向上、安全解析の詳細化、実験を含めて、さらに検討が必要である。

なお、設計基準外事象として、上記の事象を含め、どのような事象を想定すべきかについては、炉型の特徴を考慮の上、別途検討が必要である。

(f) 被覆粒子燃料の脱被覆技術

① 解体装置関連課題

構造材が SiC 等のセラミックであり、現状の条件のみではその形状による破壊強度等が推定できないため、この破壊せん断強度等のデータを取得して装置設計に反映する必要がある。また、せん断時にこぼれ落ちる被覆燃料粒子の回収方法について詳細検討が必要である。

② 被覆燃料粒子の破碎装置関連課題

被覆層の厚い粒子の破碎実験データは存在しないため、今後のデータ蓄積が必要となる。

③ 被覆燃料粒子の燃焼装置関連課題

燃焼装置をウランの酸化処理装置 (U_3O_8 生成) として使用する場合には、酸化ウランの粉体化が同時に生じるため、被覆層との分離を含めた粉体燃料の処理方法について検討する必要がある。また、燃焼処理により同時に発生する二酸化炭素に関して、同伴する C-14 (半減期 5730 年) を定量的に把握し、回収するシステムを検討する必要がある。

表 3.1-1 基本仕様
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

| No | 項 目 | 基本仕様 |
|----|------------|--|
| 1 | 原子炉型式 | 被覆粒子燃料ヘリウムガス冷却高速増殖炉 |
| 2 | 電気出力 (発電端) | 846 MWe |
| 3 | 熱出力 | 1800 MWt |
| 4 | ループ数 | 3ループ |
| 5 | 1次系冷却材温度 | 460/850℃ |
| 6 | 1次系流量 | 3,197 ton/h |
| 7 | 1次系圧力 | 6 MPa |
| 8 | 2次系温度、流量 | — |
| 9 | 水/蒸気温度 | — |
| 10 | タービン発電機 | ヘリウムガスタービン: 3基/プラント |
| 11 | プラント熱効率 | 約46% |
| 12 | プラント稼働率 | 90%以上 |
| 13 | 炉心・燃料 | 被覆粒子型 MOX 燃料 |
| 14 | 炉心の径/高さ | 3.8 m (等価直径) / 3.2 m |
| 15 | 軸/径ブランケット | 上下各厚さ 0.6 m / 0.6 m |
| 16 | 被覆粒子燃料 | 直径 2.08mm、被覆層: PyC・ZrC・SiC、燃料核直径 1.5mm |
| 17 | 燃焼度 (増殖比) | 10万 MWd/t (約 1.1) |
| 18 | 炉心出力密度 | 150 W/cc (粒子体積当たり)、50 W/cc (炉心体積当たり) |
| 19 | 燃料集合体型式 | 被覆粒子燃料内蔵集合体 |
| 20 | 原子炉容器型式 | ガスタービン発電ユニット一体型鋼製原子炉容器 |
| 21 | 原子炉停止系 | 下部からの制御棒駆動方式 |
| 22 | 炉心安全 | ①受動的炉停止方策: ATWS 時には、ボイド反応度が小さいこと、及び燃料融点が高いことからドブプラ反応度による負の反応度投入により出力が低下。更に DRACS の自然循環除熱により、炉心冷却可能形状を維持。 ②再臨界回避方策: 炉心熔融回避により特別な方策は不要。 |
| 23 | 炉心上部機構 | 無し (制御棒下部駆動、上部燃料交換) |
| 24 | 1次系接続容器 | 2重管方式 |
| 25 | 補助炉心冷却系 | 原子炉本体上部設置型直接炉心冷却: 50%×4系統 |
| 26 | 原子炉格納施設 | 高圧鋼製原子炉格納容器 |
| 27 | 燃料取扱い方式 | プラント運転サイクル約16ヶ月、6又は9バッチ方式 |
| 28 | 燃料減衰待貯蔵 | 炉外燃料貯蔵方式 (空気冷却) |
| 29 | 炉内燃料交換 | パンタグラフ式 FHM |
| 31 | 炉内/外燃料移送 | 炉内中継装置+燃料出入機 (台車方式) |
| 32 | 免震 | 2次元免震 (上下動は要検討) |
| 33 | プラント寿命 | 40年 (60年目標) |

表 3.1-2 燃料集合体、被覆燃料粒子の寸法諸元
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

| | |
|--------------------|------------------|
| 燃料集合体 | |
| 燃料集合体配列ピッチ | 247mm |
| 燃料集合体全長 | 6800mm |
| エントランスノズル長さ | 500mm |
| ハンドリングヘッド長さ | 400mm |
| 燃料コンパートメント | |
| 燃料コンパートメント数/集合体 | 19 |
| 外径 | 53mm |
| 内径 | 11mm |
| 全長 | 5800mm |
| 上/下部遮蔽長さ | 700/700mm |
| 炉心高さ | 3200mm |
| 上/下ブランケット高さ | 600/600mm |
| 燃料粒子 | |
| 外径 | 2.08mm |
| 燃料核径 | 1.5mm |
| 第1層低密度 PyC | 110 μ m |
| 第2層高密度 PyC/ZrC/SiC | 10/10/40 μ m |
| 第3層 SiC | 120 μ m |

表 3.1-3 ガスタービン設備仕様
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

| ガスタービン設備系統仕様 | | タービン機器仕様 | | 圧縮機機器仕様 | |
|--------------|-------------|----------|-----------|---------|-----------|
| 系統数 | 3 系統/1 原子炉 | 数量 | 1 基/系統 | 数量 | 2 基/系統 |
| 熱交換量 | 600 MWt/系統 | 作動ガス | ヘリウム | 入口ガス温度 | 35℃ |
| 発電機端電気出力 | 282 MWe | 入口ガス温度 | 850℃ | 入口ガス圧力 | 1.82 MPa |
| サイクル効率 | 47% | 入口ガス圧力 | 6.0 MPa | 出口ガス圧力 | 6.25 MPa |
| 冷却材 | ヘリウム | 出口ガス圧力 | 1.91 MPa | ガス流量 | 296 kg/s |
| 冷却材流量 | 296 kg/s/系統 | ガス流量 | 296 kg/s | 回転数 | 3,600 rpm |
| 原子炉出口冷却材圧力 | 6.0 MPa | 回転数 | 3,600 rpm | | |
| 原子炉出口冷却材温度 | 850℃ | | | | |
| 原子炉入口冷却材温度 | 460℃ | | | | |

| 発電機機器仕様 | | 再生熱交換器機器仕様 | | 前置冷却器機器仕様 | | 中間冷却器機器仕様 | |
|---------|-----------|------------|----------|-----------|------------|-----------|------------|
| 数量 | 1 基/系統 | 数量 | 1 基/系統 | 数量 | 1 基/系統 | 数量 | 1 基/系統 |
| 型式 | 3 相交流縦置き型 | 型式 | プレートフィン型 | 型式 | ヘリカルコイル水冷式 | 型式 | ヘリカルコイル水冷式 |
| 発電機出力 | 282 MWe | 交換熱量 | 510 MWt | 交換熱量 | 176 MWt | 交換熱量 | 156 MWt |
| 回転数 | 3,600 rpm | | | | | | |
| 雰囲気 | ヘリウムガス | | | | | | |

表 3.1-4 補助炉心冷却系仕様
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

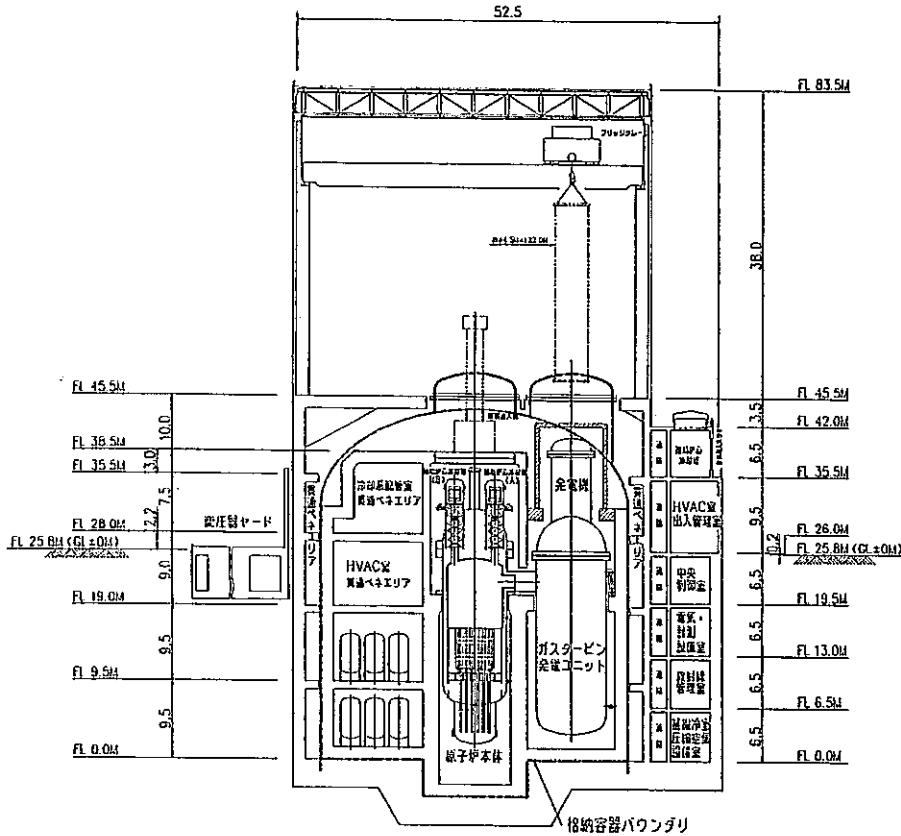
| 補助炉心冷却系熱交換器 | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| (a) 系統数 | 4 系統 | |
| (b) 使用流体 | 1 次側：ヘリウム | |
| | 2 次側：加圧水 | |
| | 3 次側：空気 | |
| (c) 熱移送量 | 22.5 MWt ^{注(1)} /系統 (強制循環時) | |
| | 9 MWt ^{注(2)} /系統 (自然循環時) | |
| 注(1)：2.5%の崩壊熱を 50%×2 系統で強制循環除熱するための容量 | | |
| 注(2)：2%の崩壊熱を 50%×4 系統で自然循環除熱するための条件 | | |
| (d) 運転条件 | | |
| 運転流量 | 減圧時強制循環時 | 減圧時自然循環時 |
| 1 次側 | 30,600 kg/h | 4,700 kg/h |
| 2 次側 | 192,640 kg/h | 7,740 kg/h |
| 3 次側 | 666,300 kg/h | 176,960 kg/h |
| 運転温度 | | |
| 1 次側 | 1,000°C/490°C | 1,650°C/320°C |
| 2 次側 | 250°C/150°C | 250°C/150°C |
| 3 次側 | 160°C/40°C | 220°C/40°C |

| 補助炉心冷却系熱交換器 | |
|-------------|----------------------|
| 交換熱量 | 22.5 MWt/系統 (強制循環時) |
| | 9 MWt/系統 (自然循環時) |
| 基数 | 4 基 |
| ヘリウム循環機 | |
| 流量 | 8.5 kg/s |
| 基数 | 4 基 |
| 循環ポンプ | |
| 流量 | 210m ³ /h |
| 基数 | 4 基 |
| 空気冷却器 | |
| 交換熱量 | 22.5 MWt/基 (強制循環時) |
| | 9 MWt/基 (自然循環時) |
| 基数 | 4 基 |
| 送風機 | |
| 基数 | 4 基 |

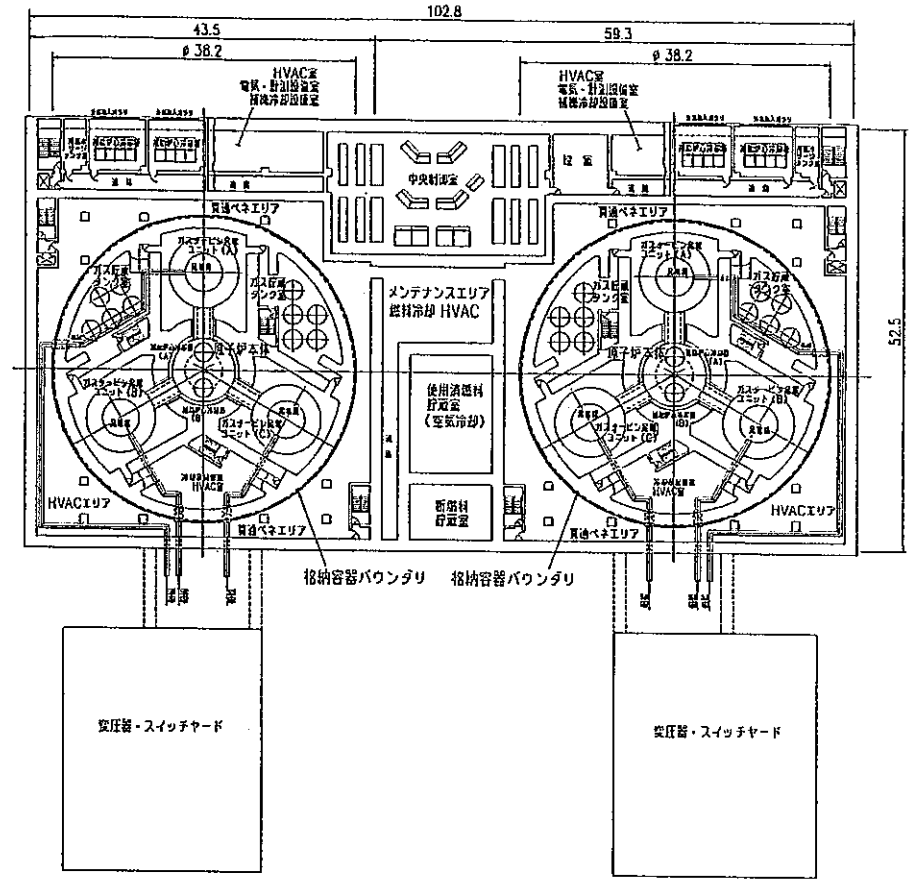
表 3.1-5 脱被覆検討用燃料集合体仕様
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

| | |
|--|--|
| 燃料集合体 燃料集合体配列ピッチ 燃料集合体全長 エントランスノズル長さ ハンドリングヘッド長さ | 247mm 6800mm 500mm 400mm |
| 燃料コンパートメント 燃料コンパートメント数/集合体 外径 内径 全長 上/下部遮蔽長さ 炉心高さ 上/下ブランケット高さ | 19 53mm 11mm 5800mm 700/700mm 3200mm 600/600mm |

| 項目 | 燃料集合体 (1体あたり) | 径方向ブランケット 集合体 (1体あたり) | 備考 |
|----------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 燃料集合体重量 | 約 900 kg | 約 1000 kg | |
| 取出時重金属重量 | 約 350 kg | 約 580 kg | |
| 取出時 Pu 重量 (内数) | I/C : 約 50 kg O/C : 約 60 kg | 約 10 kg | |
| コンパートメント空重量 | 約 430 kg | 約 300 kg | 炉心 : 19 体 RB : 7 体 |
| 上下遮蔽体重量 (内数) | 約 140 kg | 約 140 kg | |
| その他構造材重量 | 約 120 kg | 約 120 kg | |



(立面)

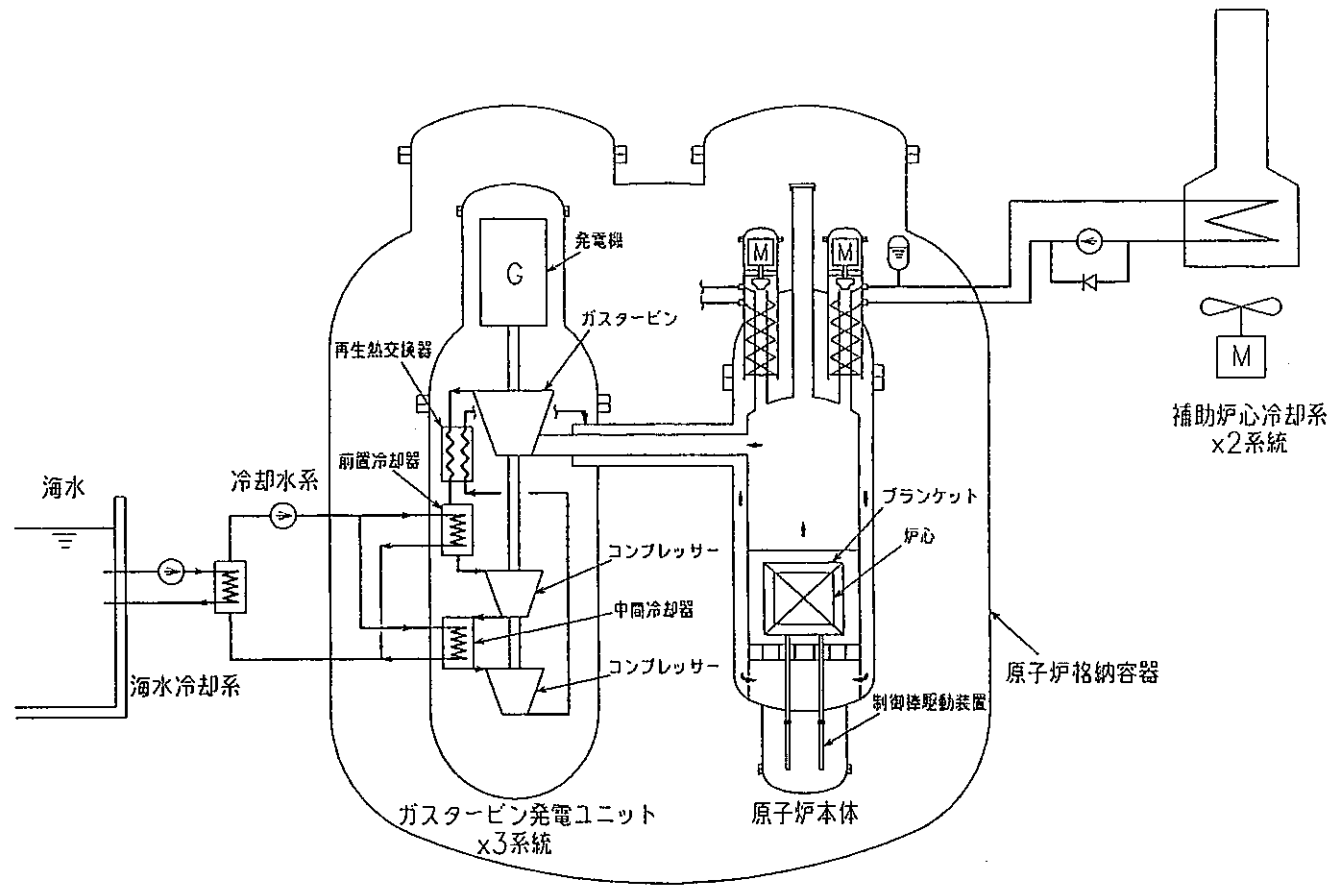


原子炉建屋容積=40.7万 m^3
 格納容器内容積=5.04万 m^3 × 2基 (容積は原子炉建屋内に含む)
 1ユニットの場合の建屋容積=20.5万 m^3

(平面)

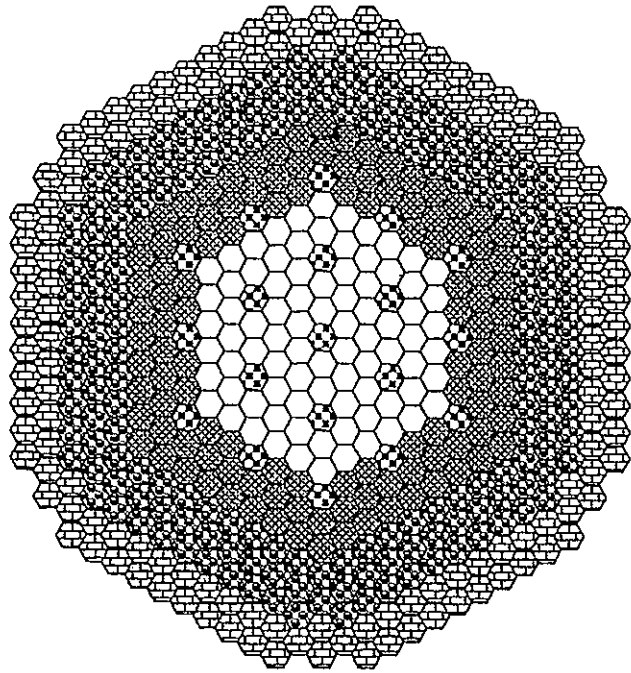
注) 本図は、代表的な設備類の配置を表示したもので、同一フロアを示すものではない。

図 3.1-1 プラント概念、配置図
 (被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)



↑ 図中の矢印は通常運転時の冷却材の流れを示す。

図 3.1-2 系統概念図
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)



He冷却炉心 炉心構成図

- 内側炉心燃料集合体 84体
- ⊗ 外側炉心燃料集合体 114体
- ⊗ 径ブランケット集合体 174体
- ⊗ 制御棒 19体
- ⊗ 可動反射体 138体

He冷却炉心の主要目

| 項目 | MOX燃料炉心 |
|---|-----------------------|
| 原子炉熱出力 (MWt) | 1800 |
| 運転サイクル長さ (EFPM) | 16 |
| 燃料交換バッチ (Core/RB) | 6/6 (9/9) |
| 炉心高さ (cm) | 320 |
| 炉心等価直径 (cm) | 380 |
| 軸ブランケット厚 (上/下) (cm) | 60/60 |
| 炉心燃料 | 被覆粒子型燃料 |
| 燃料粒子径 (mm) | 2.08 |
| 燃料核径 (mm) | 1.5 |
| コンパートメント内燃料粒子充填率 (%) | 66 |
| 集合体当たりコンパートメント本数 (本) | (炉心) 19、(径ブラ) 7 |
| 集合体配列ピッチ (mm) | 247 |
| Pu富化度 (内側/外側) (wt%) | 21.8/27.7 (23.3/29.6) |
| 燃焼反応度損失 (%Δk/kk) | 2.5 (2.5) |
| 平均出力密度 (W/cm ³) (粒子体積当たり) | 140 |
| ピーク高速中性子束 (×10 ¹⁴ n/cm ² s) | 0.89 (0.84) |
| ピーク高速フルエンス (×10 ²⁰ n/cm ²) | 2.2 (3.2) |
| 炉心取出平均燃焼度 (GWd/t) | 100 (150) |
| 増殖比 | 1.11 (1.06) |

図 3.1-3 炉心構成及び主要諸元
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

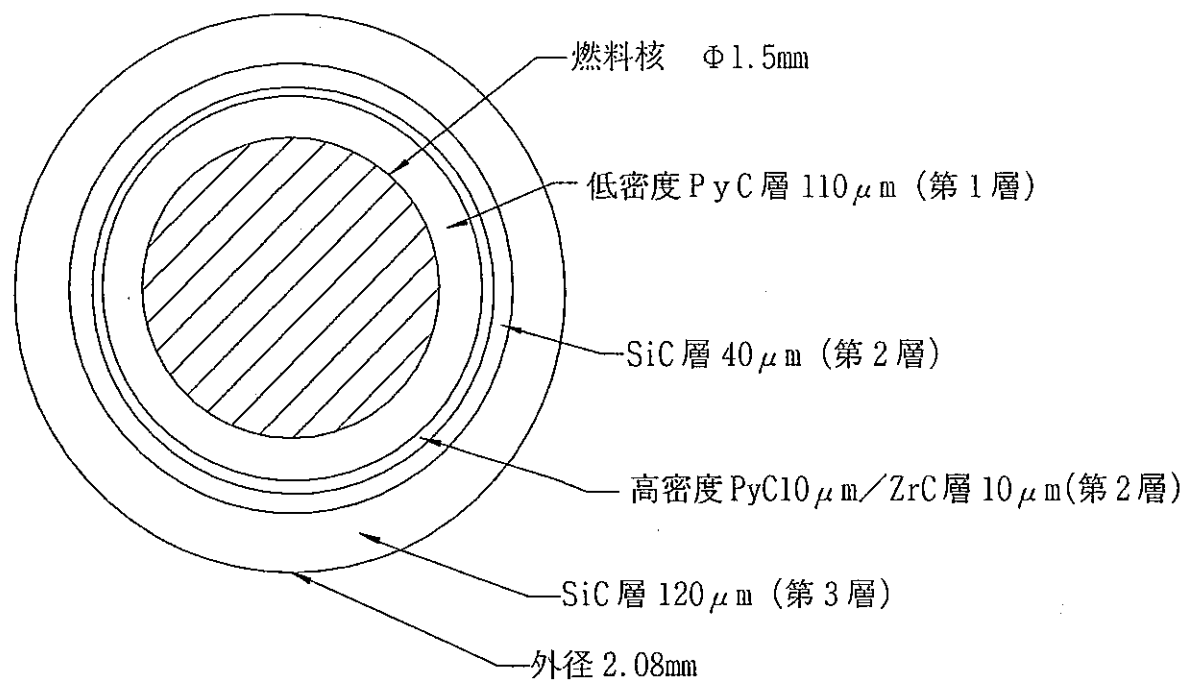


図 3.1-4 被覆燃料粒子の構造寸法
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

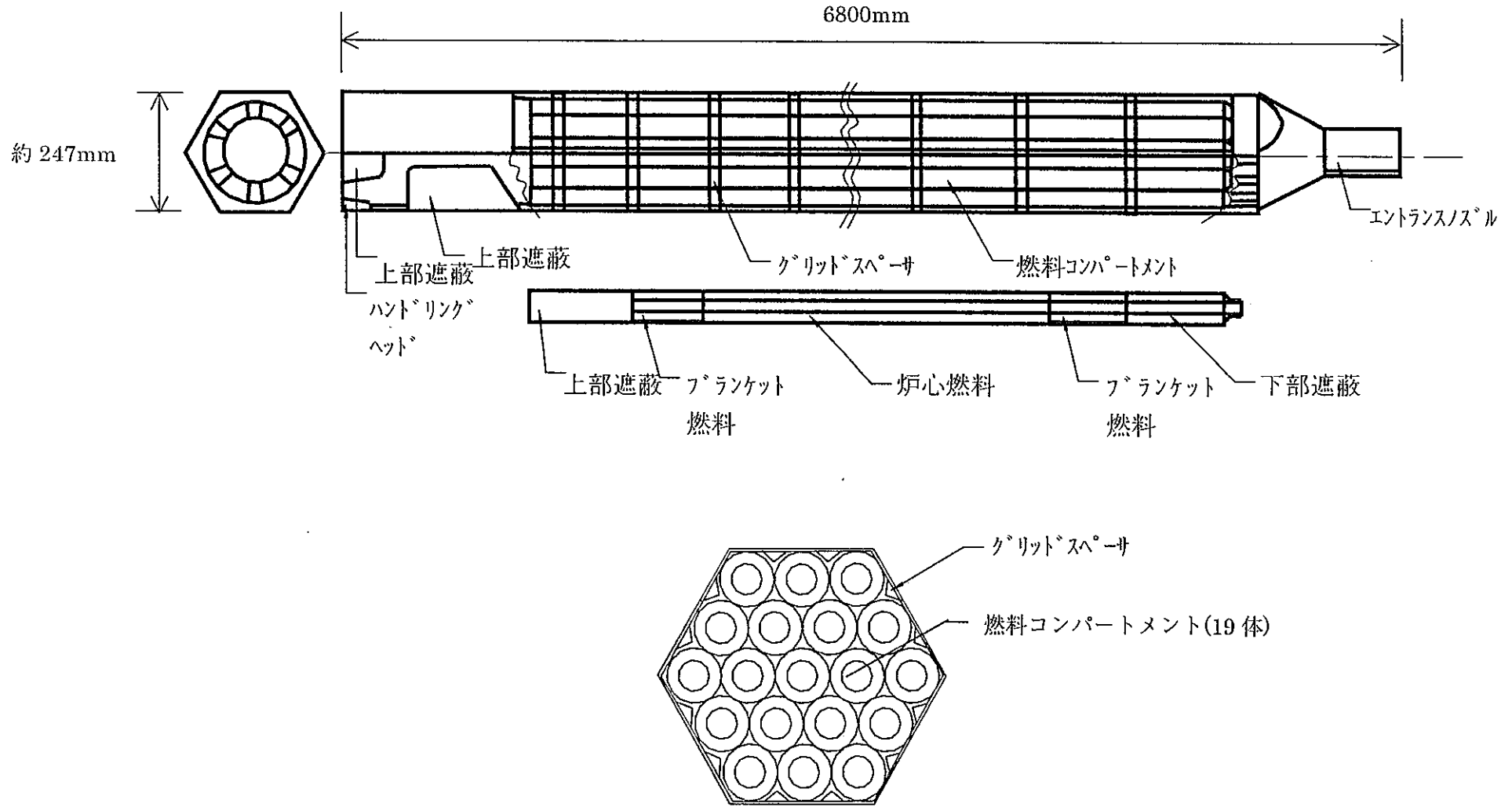


図 3.1-5 燃料集合体の構造概念 (1 / 2)
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

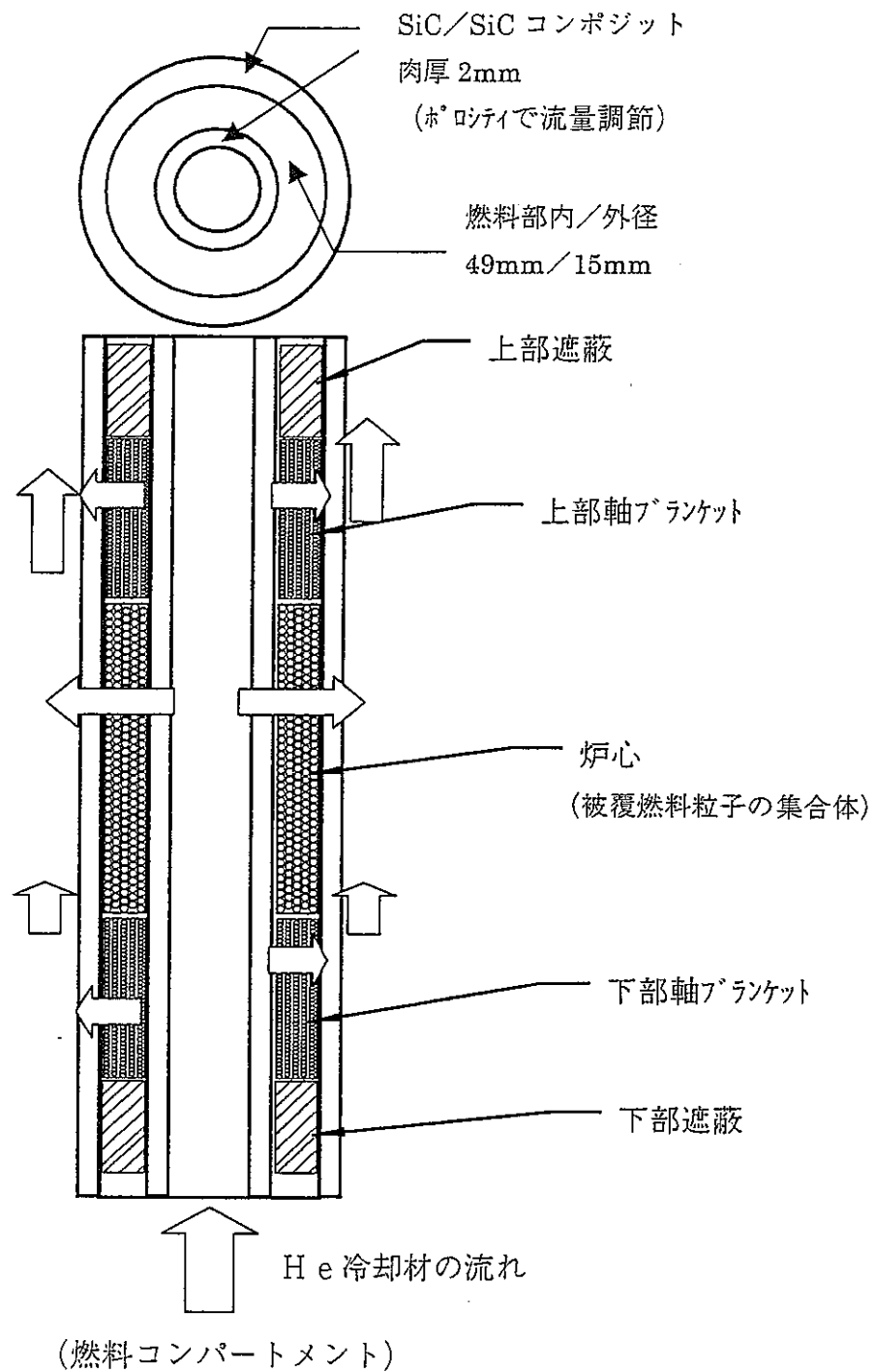


図 3.1-5 燃料集合体の構造概念 (2 / 2)
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

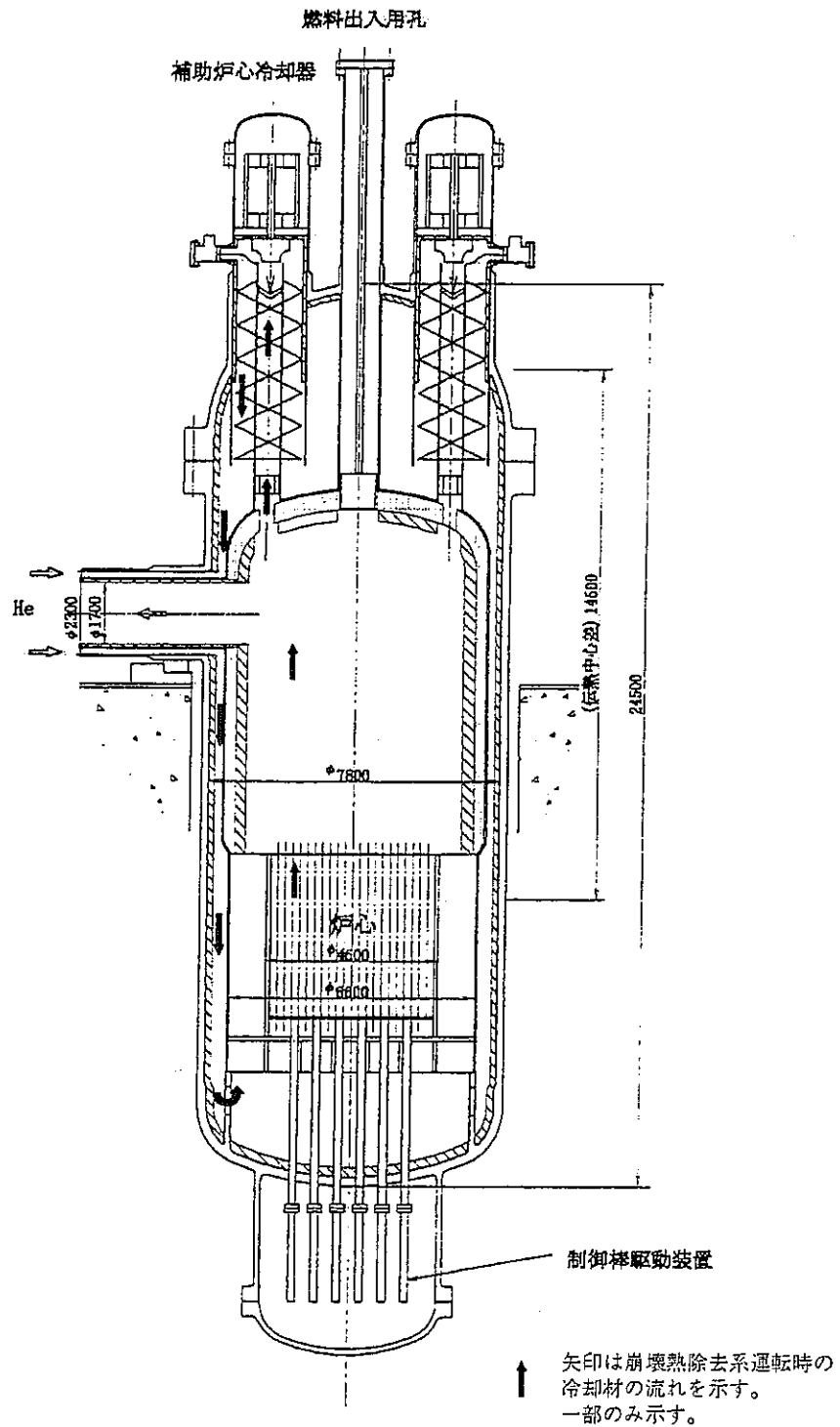


図 3.1-6 原子炉構造概念図
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

He炉 高速中性子 (>0.1MeV) 累積照射量 (40年× 90%)

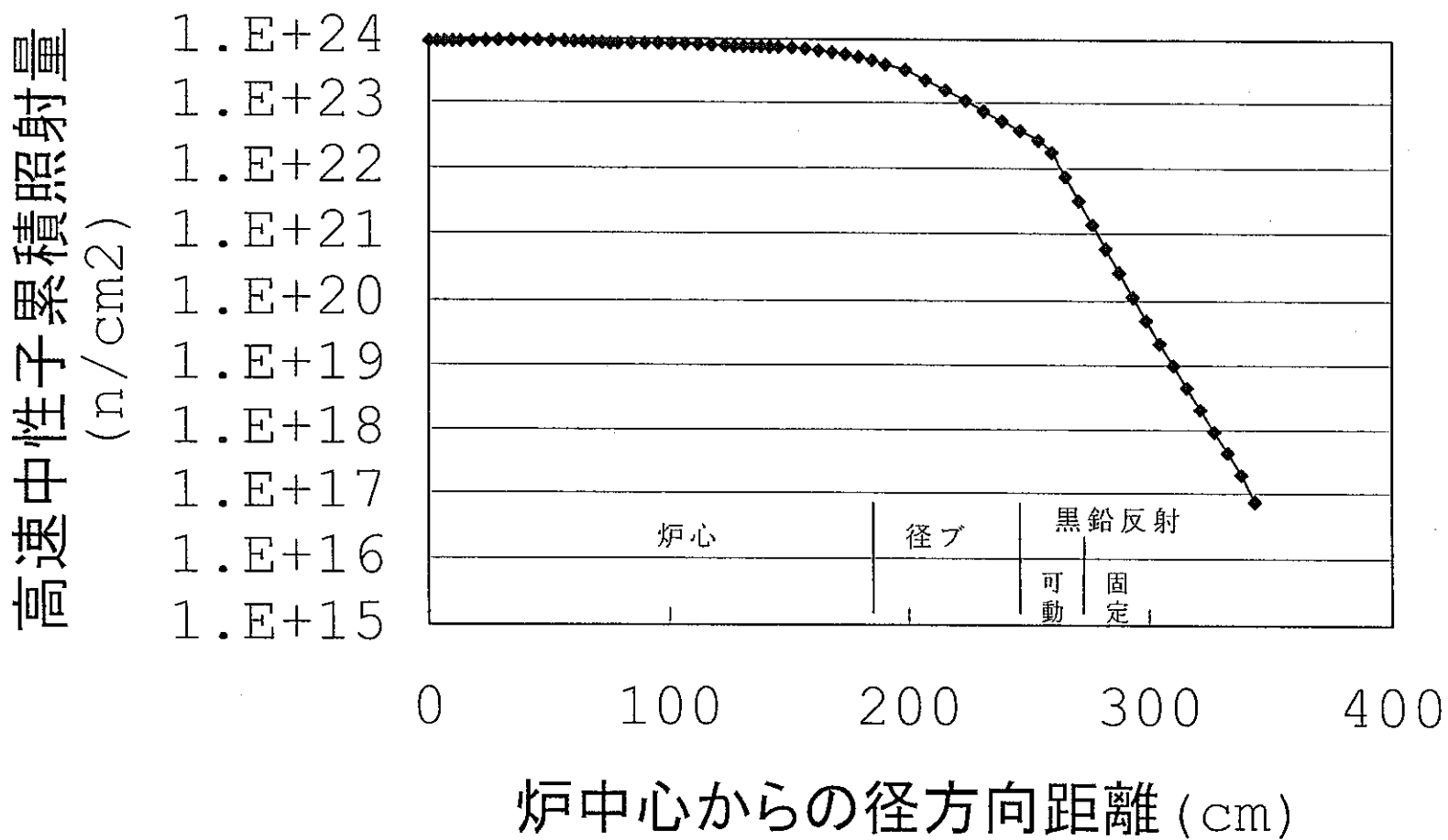


図 3.1-7 高速中性子累積照射量
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

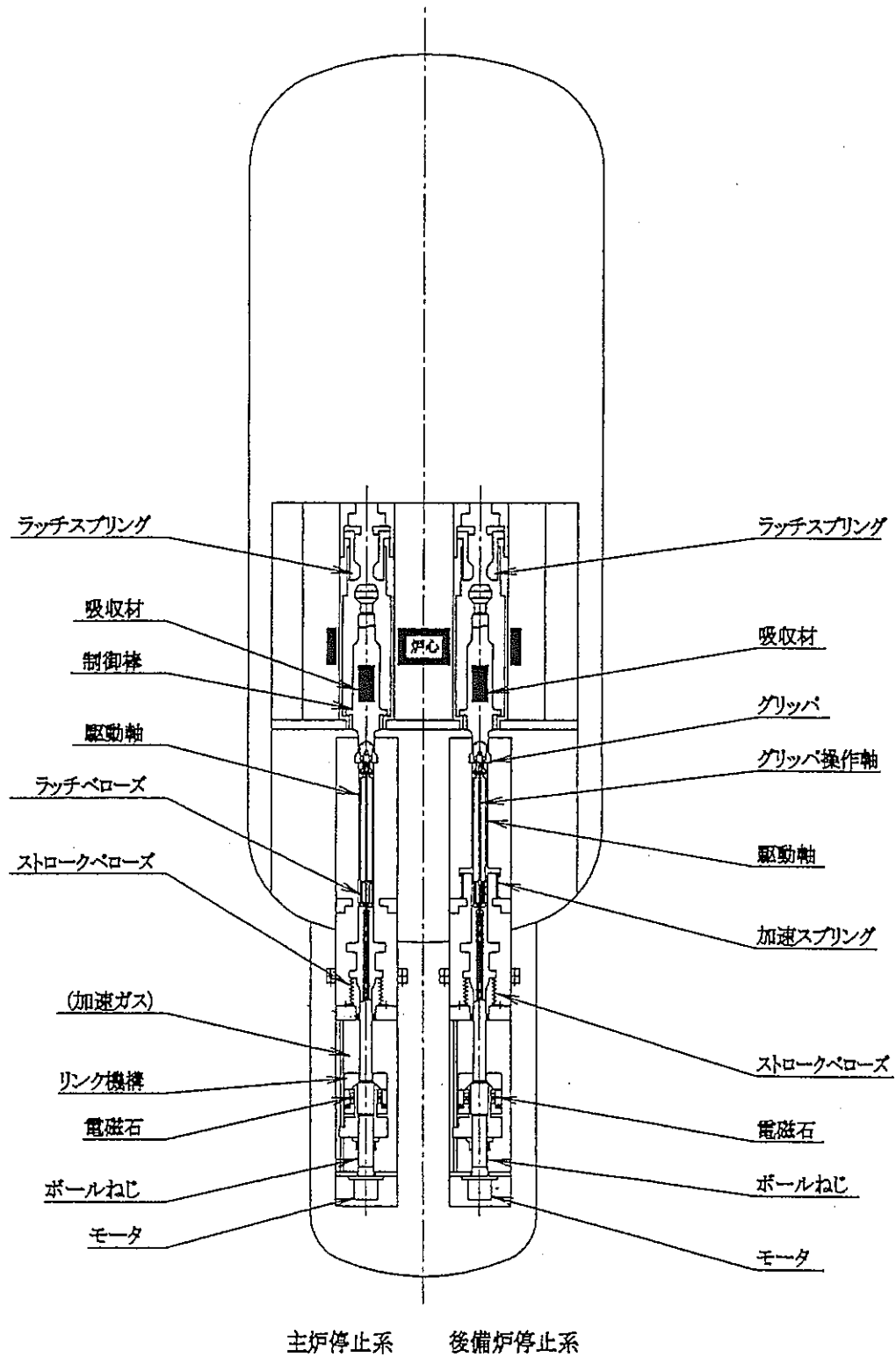
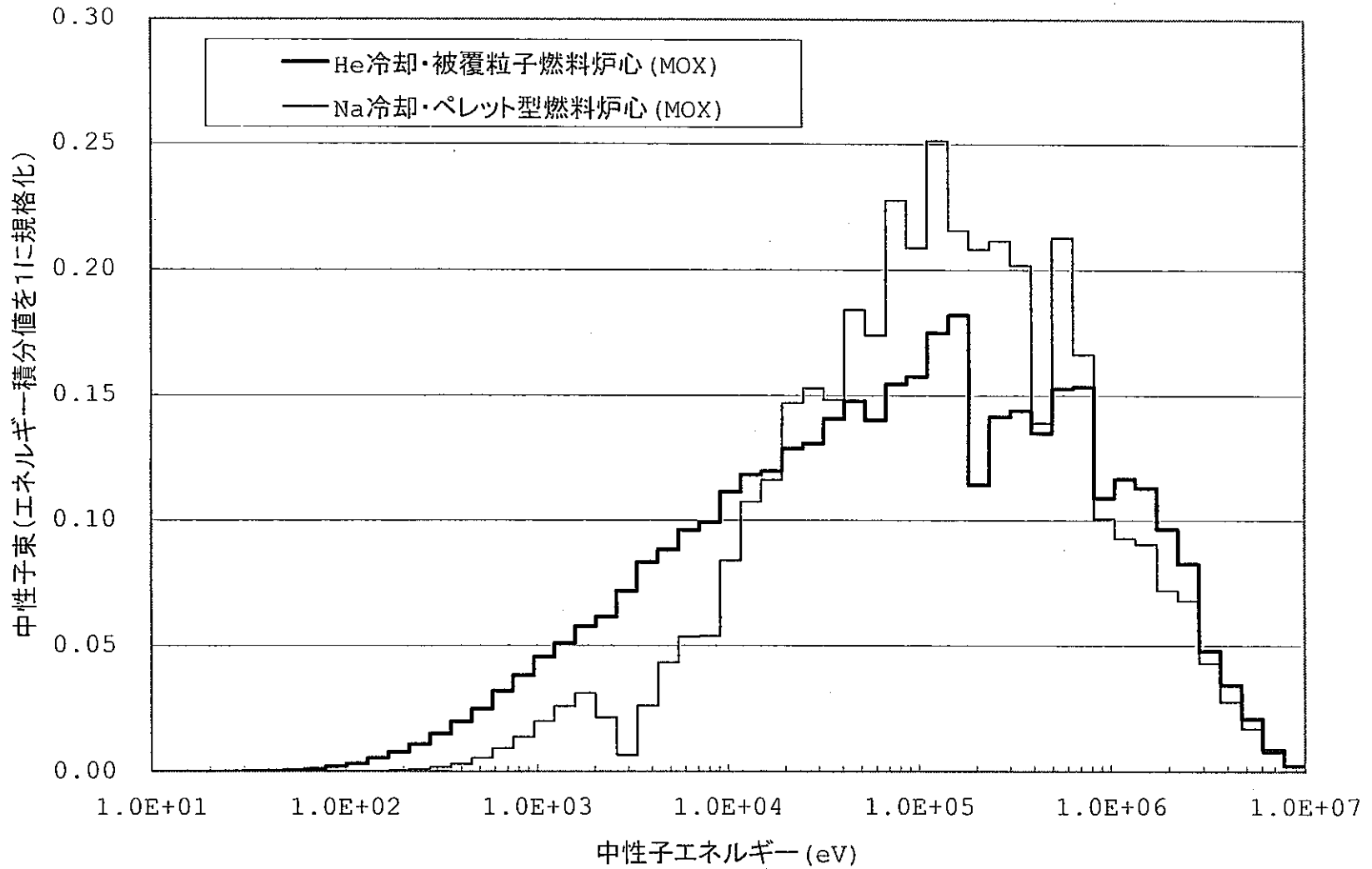


図 3.1-8 炉停止系概念図
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)



He冷却炉(被覆粒子燃料)とNa冷却炉(従来燃料)との中性子スペクトルの比較

図 3.1-9 中性子スペクトルの比較
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

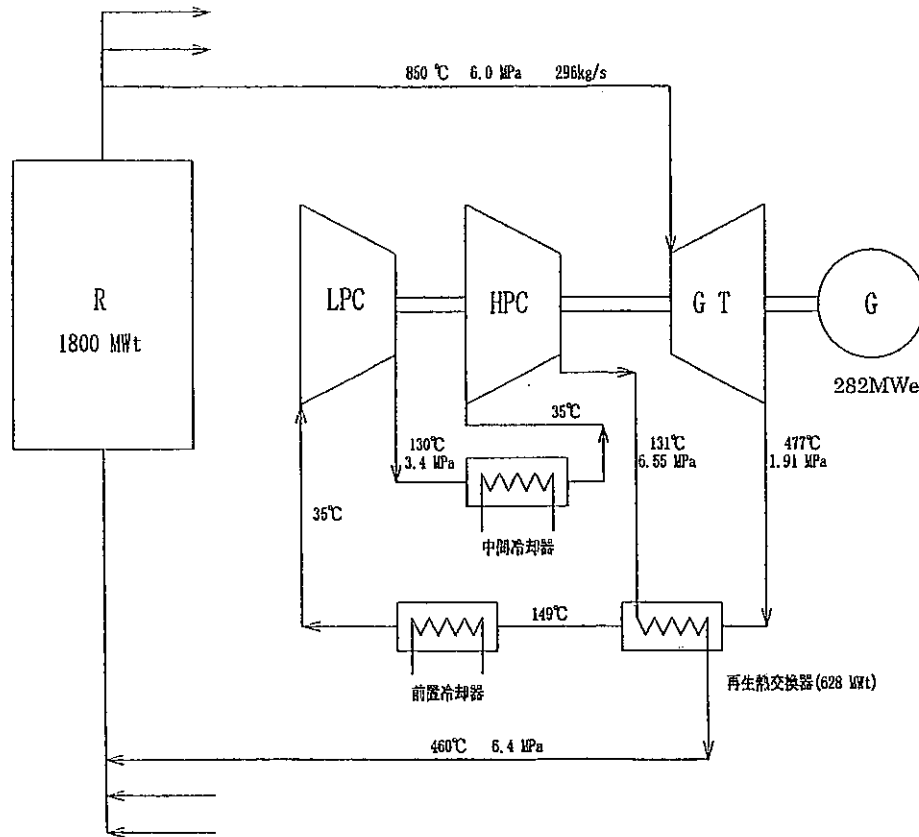


図 3.1-10 ガスタービンヒートバランス
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

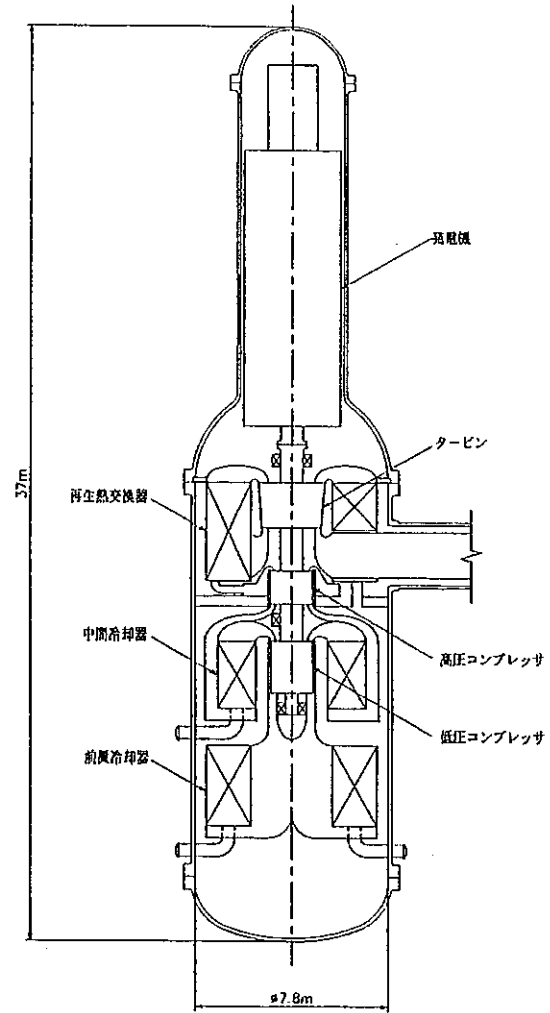


図 3.1-11 ガスタービン設備構造概念図
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

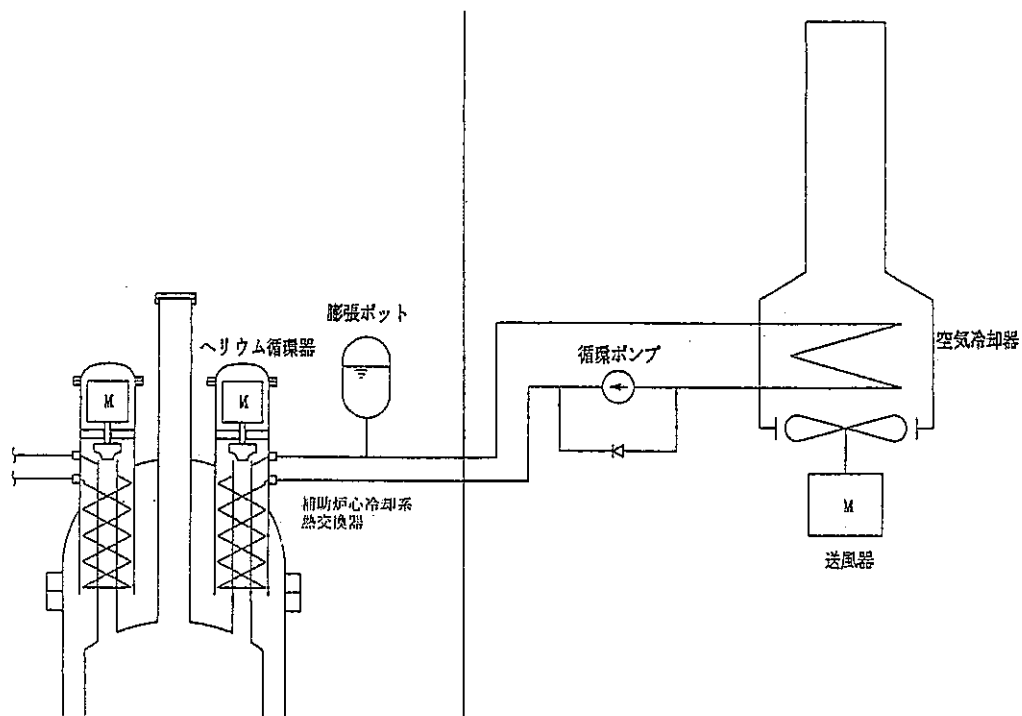


図 3.1-12 補助炉心冷却系系統構成
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

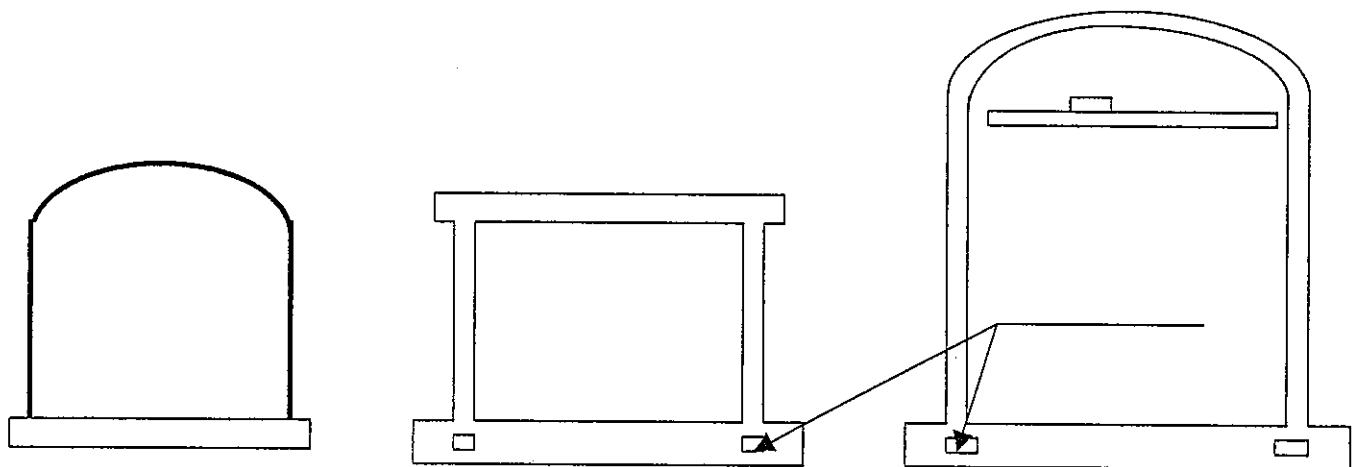


図 3.1-13 原子炉格納容器構造概念
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

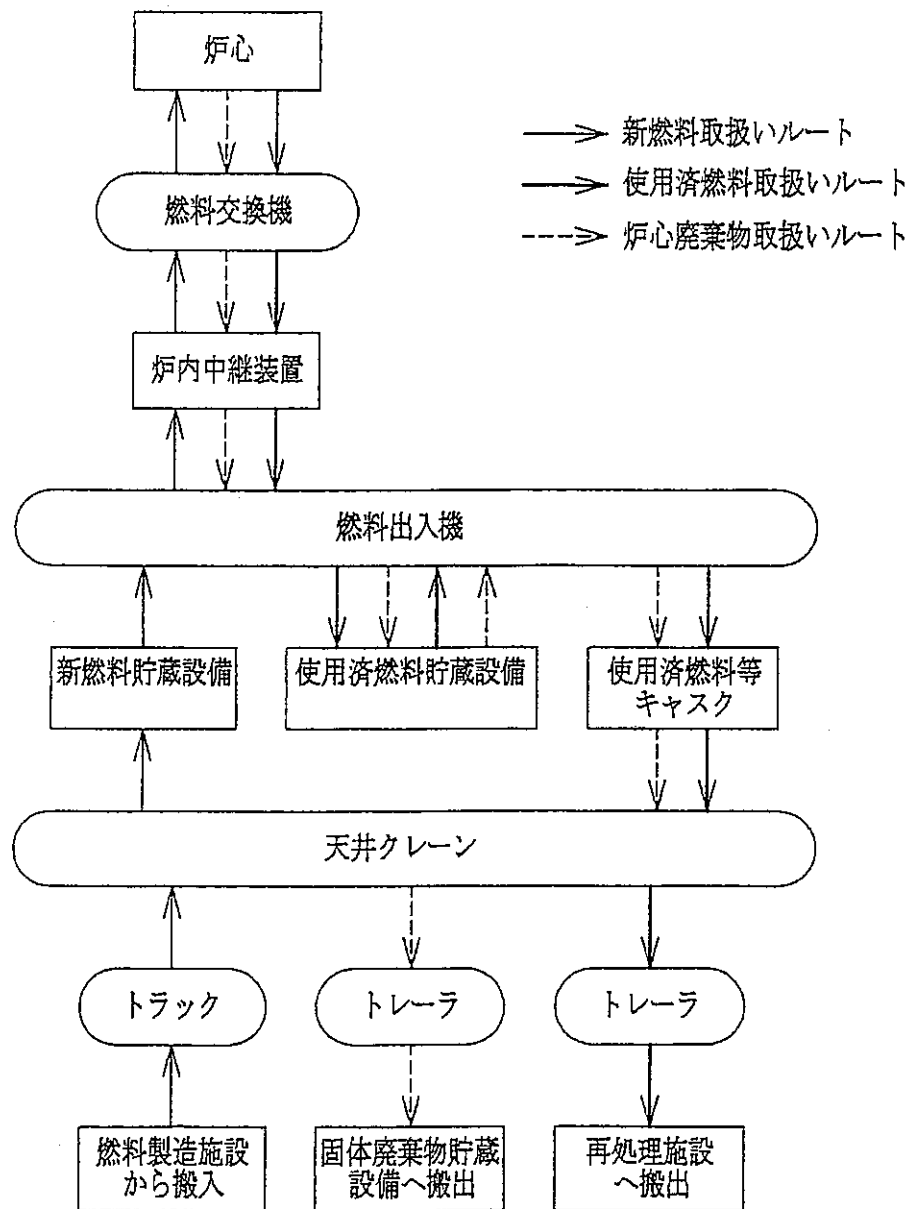
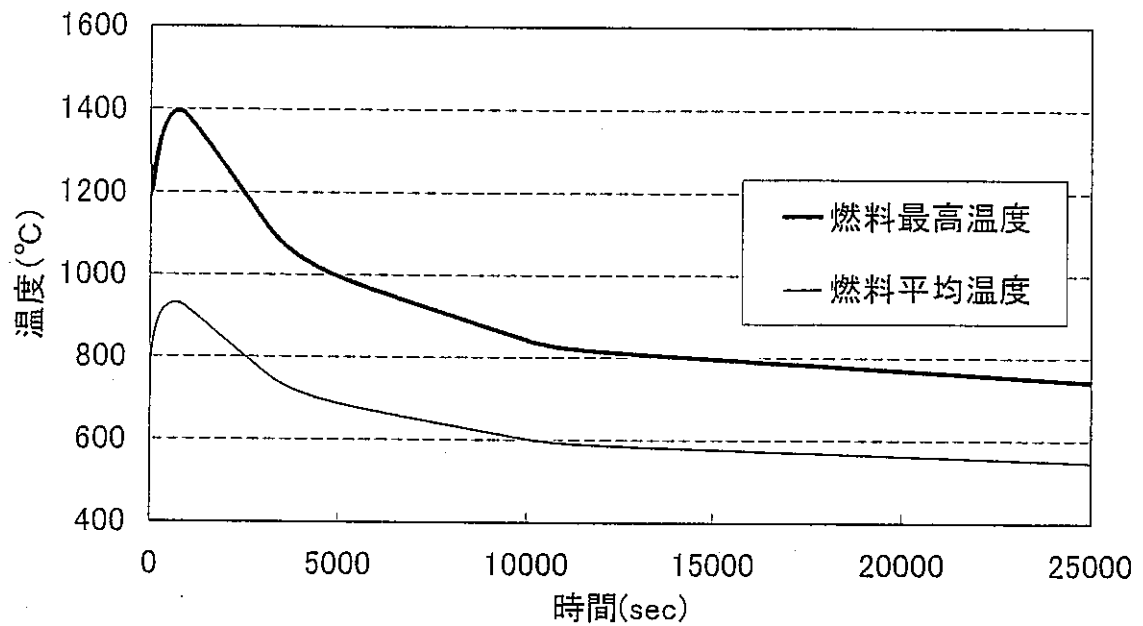
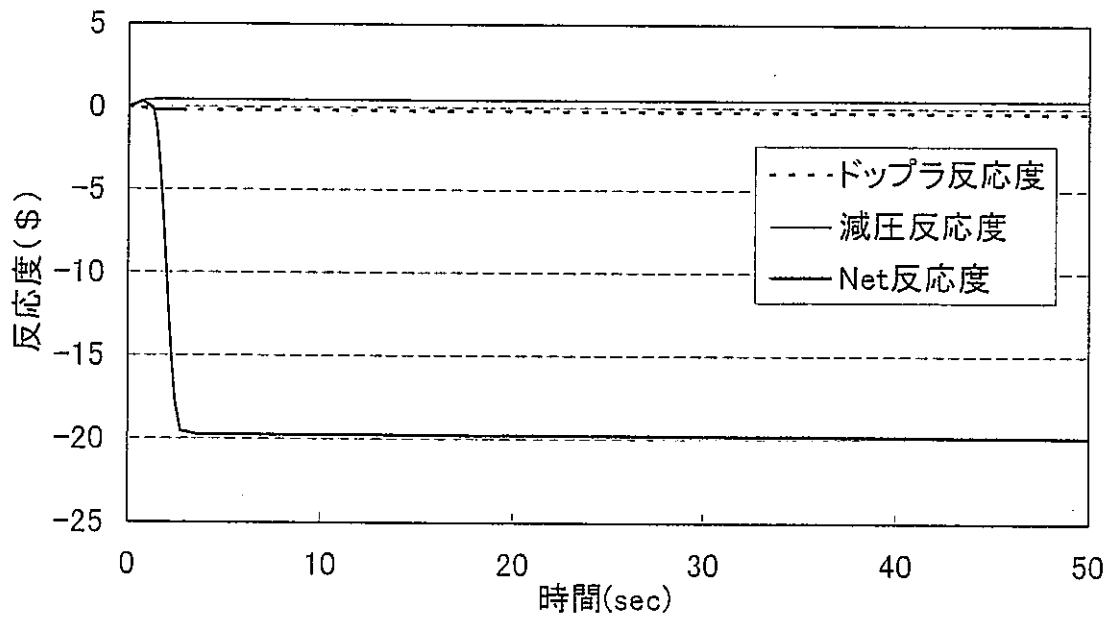


図 3.1-14 燃料取扱いフロー
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

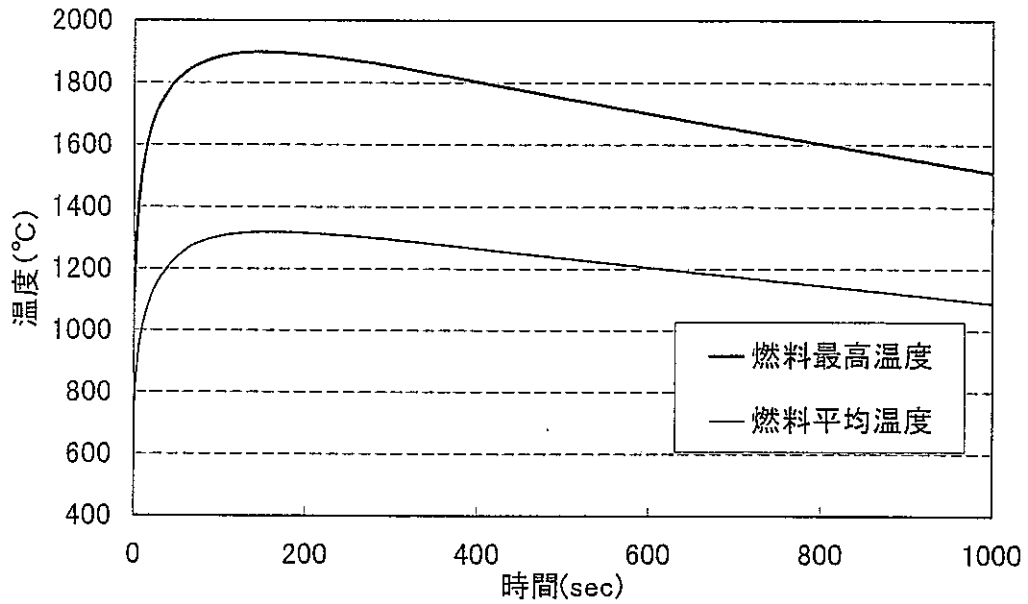


温度変化(φ3.8m炉心、減圧事故(主配管DE破断)、スクラム成功、強制循環、ホットスポットファクタ=1.7)

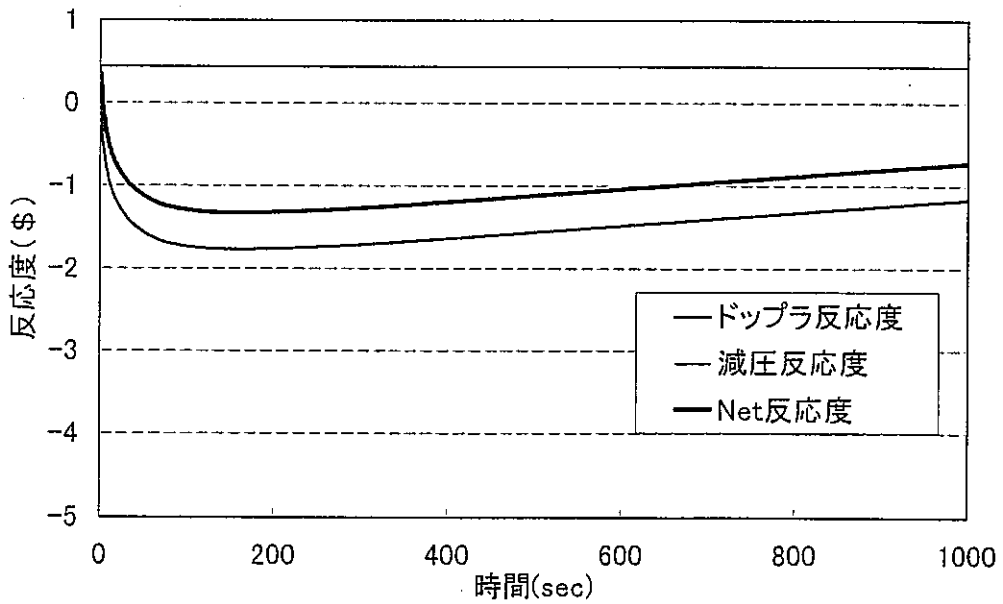


反応度変化(φ3.8m炉心、減圧事故(主配管DE破断)、スクラム成功、強制循環、hot spot factor=1.7)

図3.1-15 減圧事故解析結果
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)



温度変化(φ3.8m炉心、減圧事故(主配管DE破断)、スクラム失敗、強制循環)



反応度変化(φ3.8m炉心、減圧事故(主配管DE破断)、スクラム失敗、強制循環)

図3.1-16 減圧事故+スクラム失敗+補助炉心冷却系単一故障
(50%×2系統)解析結果
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)

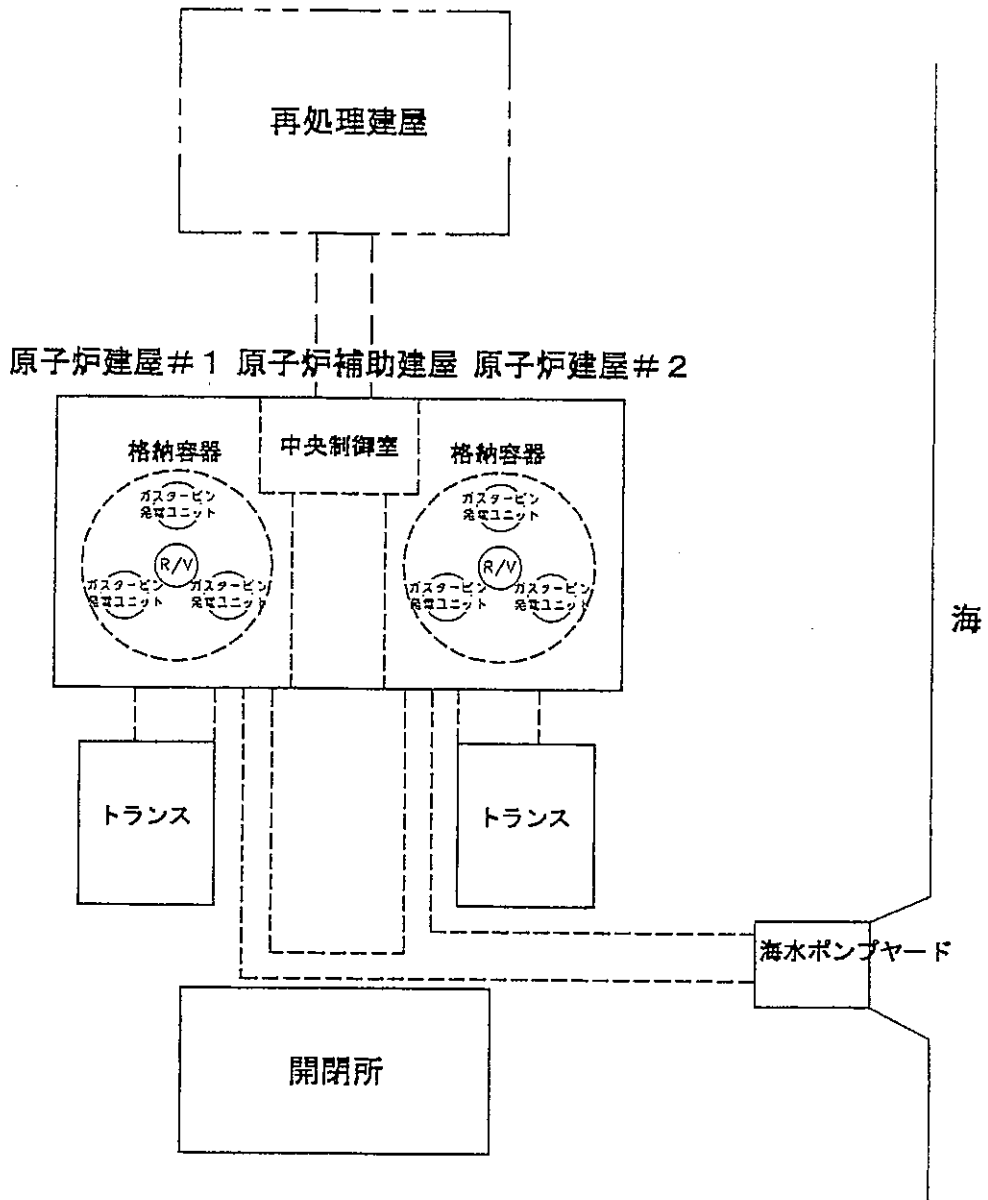
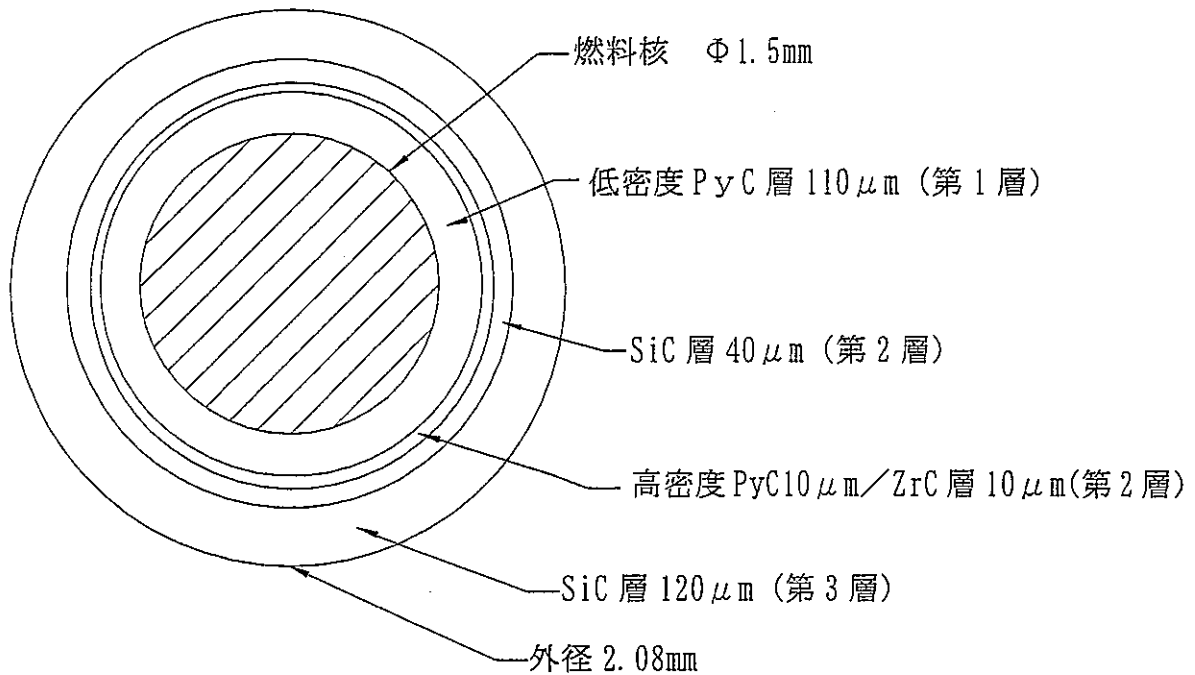


図 3.1-17 プロットプラン
(被覆粒子燃料ヘリウムガス炉)



C案の例

| | 主要機能 | A 案 | B 案 | C 案 (設定値) | |
|-----|----------|---|-----------------------------|--|--------|
| 燃料核 | | MOX | ← | ← | 1.5mmφ |
| 第1層 | ガスプレナム | 低密度 PyC | ← | ← | 110μm |
| 第2層 | FP ガスシール | 高密度 PyC + SiC (Pd 腐食代) | 高密度 PyC + 金属(Mo 等) (酸素ゲッター) | 高密度 PyC + ZrC (酸素ゲッター) | 10μm |
| | | | + SiC (Pd 腐食代) | + SiC (Pd 腐食代) | 10μm |
| | | | | | 40μm |
| 第3層 | 強度部材 | SiC 又は ZrC | ← | ← | 120μm |
| 第4層 | 最外被覆層 | 高密度 PyC 又は なし | 金属(Mo 等) 又は なし | ZrC 又は なし | なし |
| 特徴 | | 熱炉構成と同等。最新の等方性 PyC 使用で耐久性向上。PyC 耐照射性確認要 | 金属層シール採用。金属層蒸着法検討要。 | ZrC と SiC でシール。現在検討されている材料で構成される、今回の検討のベースとする。 | |

図 3.1-18 被覆燃料粒子脱被覆検討仕様

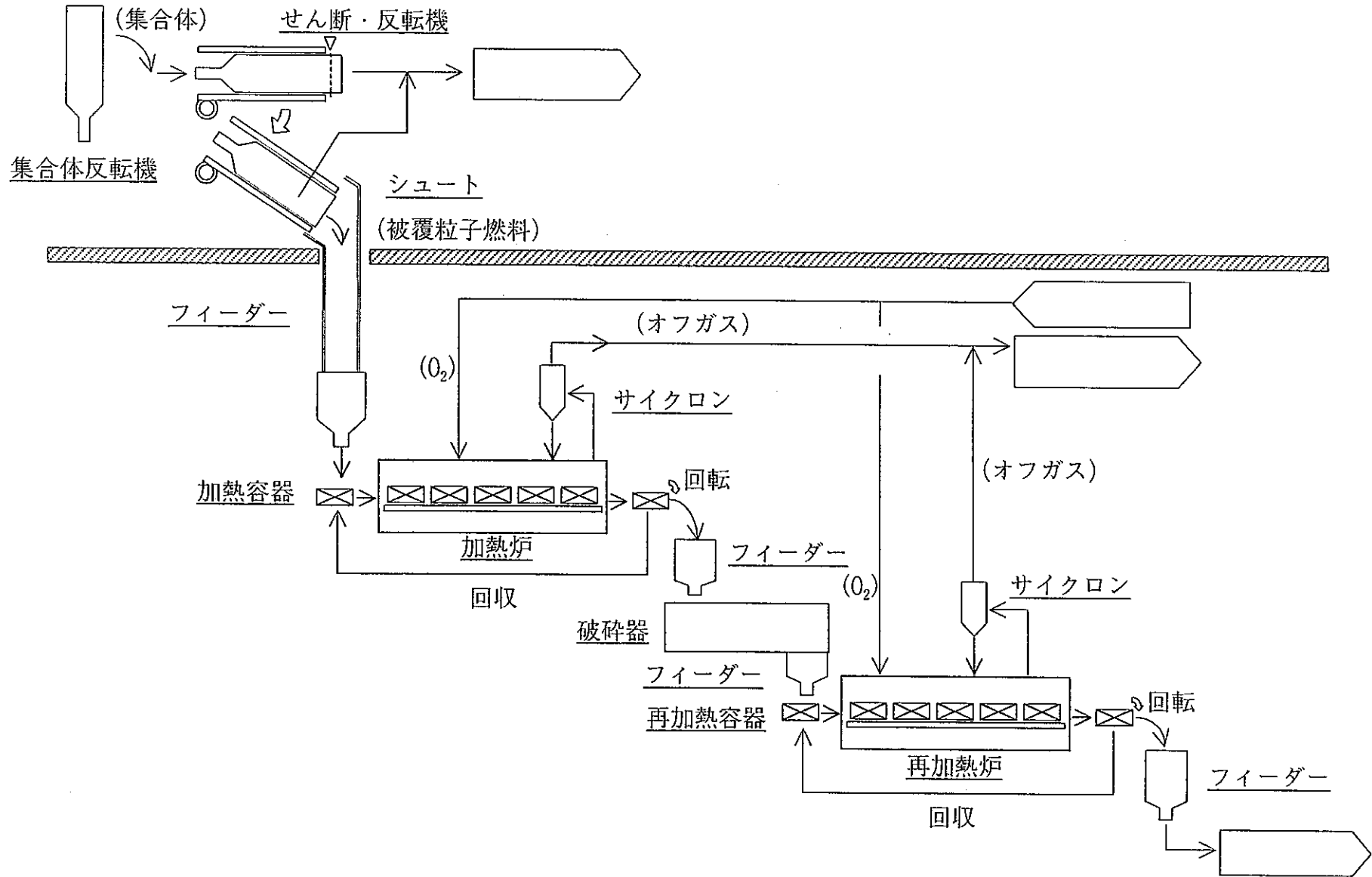


図 3.1-19 Burn-Grind-Reburn 法概要図

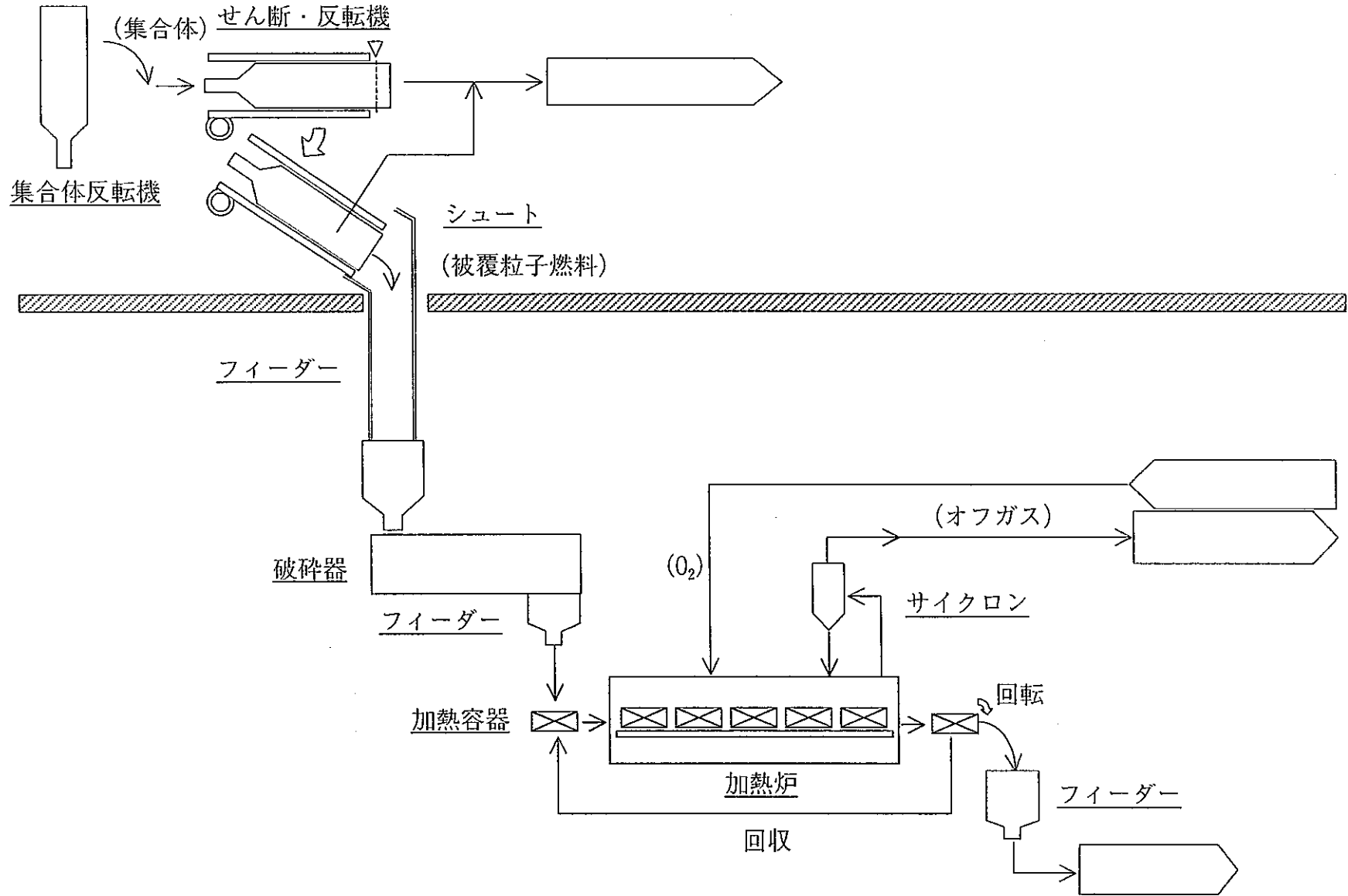


図 3.1-20 Grind-Burn 法概要図

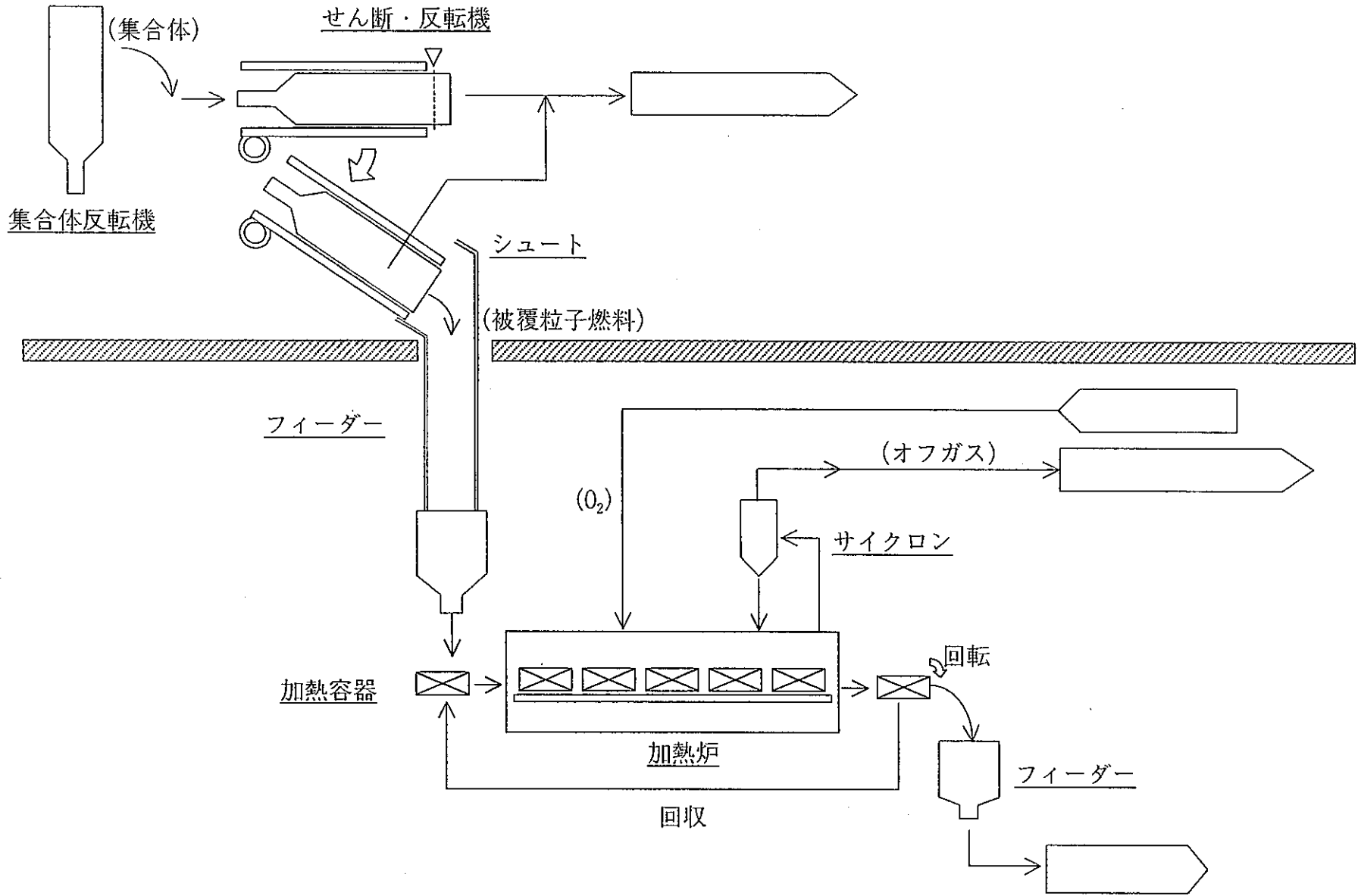


図 3.1-21 All-Burn 法概要図

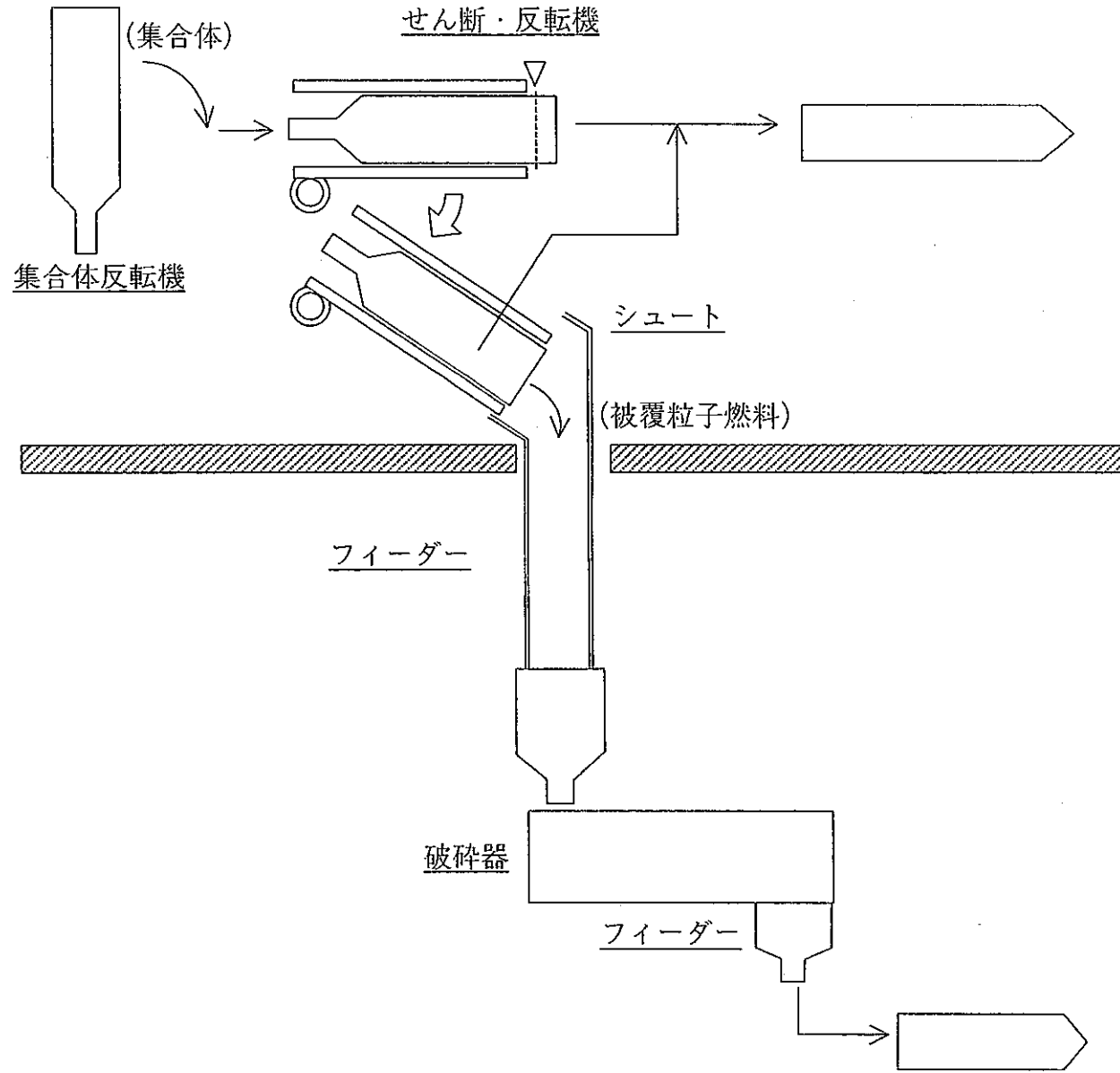


図 3.1-22 All-Grind 法概要図

4. 冷却材の比較

冷却材の比較については、すでに参考文献〔1〕に記述がある。各種の冷却材が比較された結果、炭酸ガスとヘリウムが選定されている。また、炭酸ガスとヘリウムの特性についても十分に比較されている。

参考文献〔1〕の比較表によれば、比較の各項目は互いに関連しあい、また、それぞれの冷却材で長所、短所があるため、単純な比較はできない。従って、炭酸ガスかヘリウムかという比較は、それぞれの長所を生かして、各プラントの諸仕様を最適化するとき、どちらが設計要求に適合して、経済性を達成できるかの議論になるものと考えられる。

しかし、あえて各プラントを特徴づける主要なガス特性の比較項目を考えると、高温化、安全性、入手性の3点になるものと考えられる。以下に夫々の項目について比較して記述する。

(1) 高温化

ヘリウムは不活性ガスであり、高温においても特に材料との共存性が問題になることはない。したがって、前述のようにガスタービンとの組み合わせが可能になり、熱効率の向上が期待できる。

しかし、この高温での利用が可能であるという特性を十分に生かすには、高温まで利用可能な、燃料や構造材の開発が不可欠である。

高温ガス熱中性子炉では、耐高温材料として被覆粒子燃料と黒鉛が利用されているが、今年度の検討で明らかになったように、減速材である黒鉛は、高速炉には利用できず、また、高高速中性子フルエンス下では被覆粒子燃料の被覆材の一つであるパイロカーボンの健全性が維持できない見通しである。

燃料の被覆に金属被覆を使用するピン型では、金属被覆管が許容する温度までの高温化が可能である。特に、同じ冷却条件であれば、炭酸ガスよりも熱伝達率が上げられるヘリウムでは、その分、被覆管の温度を下げることもできるため、炭酸ガスよりも原子炉冷却材出口温度を上げられる可能性がある。

炭酸ガスは、出口ガス温度640℃まではAGRの実績があるが、それ以上の温度では材料との共存性に問題のある可能性があり、高温化を考えるならばさらに今後の検討が必要である。

(2) 安全性

① 再臨界回避対策

今年度の検討で明らかになったように、高温化の特長を生かした被覆粒子燃料ヘリウム炉では、高温まで燃料等の熔融がないため、再臨界回避対策を必要としない可能性が大きく、炭酸ガスに比較して優っている。しかし、冷却材がヘリウムであっても、ピン型でコンベンショナルな金属被覆燃料を使

用する限りは再臨界回避対策が必要であり、炭酸ガスと同等である。

② 事故時特性

事故時特性として比較の上で重要な特性は減圧事故時の減圧特性と自然循環特性である。これらについては、文献 [1] 等で、いずれも炭酸ガスの方がヘリウムよりも良好な特性があると評価されている。

(3) 入手性

ヘリウムは大気中に 1 p p m 程度含まれているが、現在の技術では、大気からの回収は生産コストの点で経済的に成立しない。ヘリウムが採掘可能な資源として考えられるのは、油田などの天然ガスからの分離・精製である。現在、天然ガス中に 0.3% 以上のヘリウムを含有し、経済的に見合う天然ガス生産ができるのは米国のみであり、我が国はヘリウムを米国からの輸入に頼っている。プラントからの漏洩量は、生産量に比較すると微小であり、問題にはならないが、将来は資源の減少とともに、価格上昇の可能性もある。

一方、炭酸ガスは特にヘリウムのような問題はないのでこの点で有利である。

5. おわりに

実用化戦略調査研究の第1期でFBRシステムの候補概念を絞り込むに当たり、各種FBRシステム概念のうちガス炉システムについて、平成12年3月までの検討状況をまとめた。

検討対象としたガス炉システムは、①ピン型燃料炭酸ガス炉、②ピン型燃料ヘリウムガス炉、③被覆粒子燃料ヘリウムガス炉の3タイプであるが、検討の効率化の観点から作業の重複を避けるため、ピン型燃料を用いる2つの概念のうち、ピン型燃料ヘリウムガス炉の検討着手は平成12年度に先送りしたため、本報告書ではピン型燃料炭酸ガス炉、及び被覆粒子燃料ヘリウムガス炉について検討状況を示した。

ピン型燃料炭酸ガス炉についての検討結果は以下のとおり。

ガス炉の特長を生かし、炭酸ガス冷却熱中性炉AGRのプラント技術とナトリウム炉の燃料技術を利用することにより、開発要素を少なくし、現有技術の延長線上での性能向上と経済性の追求を着眼点としたプラント概念の検討を行った。本年度は、ピン型燃料仕様の検討と炉心概念を構築し、この炉心概念を中心としてプラント概念を検討した。また、検討概念の開発課題の抽出を行った。

プラント概念評価の結果、プラント概念成立のための最重要課題として、再臨界回避方策概念の検討、熔融燃料の長期安定冷却を可能とする設備の成立性確認、大容量ガス循環機の開発等が必要であることが明らかとなった。

被覆粒子燃料ヘリウムガス炉についての検討結果は以下のとおり。

被覆粒子燃料と直接サイクルガスタービン発電の組み合わせにより、高効率で、中間系を排して建設費の低減を図り、炉心熔融を回避するプラント概念の検討を行った。被覆粒子燃料仕様を検討し、セラミクスで構成される炉心概念を構築し、この炉心概念を中心としてプラント概念を検討した。安全解析評価の結果、苛酷な事故時にも炉心熔融を回避できる可能性のあることが分かった。その後、検討概念の開発課題を抽出した。

本プラント概念を評価した結果、炉心熔融を回避するためには、プラント基本仕様の適正化が必要であることが分かった。また、本概念は、非常に魅力的な特性をもった概念であるが、プラント概念を成立させるためには、被覆粒子燃料開発、燃料集合体開発、ガスタービンの開発等が必要であることも明らかとなった。

参考文献

- [1] 早船浩樹、江沼康弘、久保田健一、吉田匡志、宇野修、石川浩康、小林順、梅津陽一郎、一宮正和「実用化戦略調査研究（FBR プラント）平成10年度予備調査－幅広い技術選択肢の検討－」JNC TN9400 99-080（1999.10）