

# 多目的高温ガス炉用原子炉压力容器及び冷却系機器の研究・開発

## Research and Development of Reactor Pressure Vessel and Cooling System Components for Multi-Purpose High Temperature Gas Cooled Reactors

工藤昭雄\* Akio Kudô  
 浅海隆夫\*\* Takao Asami

原子力エネルギーを、石炭ガス化や直接還元製鉄などの工業用熱源として利用することを目的とした多目的高温ガス実験炉の開発が、日本原子力研究所を中心に進められている。日立製作所は昭和48年以来本計画に参画し、主として原子炉压力容器、高温冷却系機器の研究・開発を進めてきた。実験炉は温度1,000°C、ゲージ圧40kg/cm<sup>2</sup>で運転される予定であり、性能、材料、構造面にわたり多くの開発要素をもっている。

本論文では、多目的高温ガス実験炉プラントの概要と日立製作所での原子炉压力容器、高温冷却系機器に関連するソフトウェア及びハードウェアの研究・開発の現状、開発上の問題点などについてまとめて報告する。

### 1 緒言

多目的高温ガス実験炉は、その核熱エネルギーを発電だけでなく、石炭ガス化、直接還元製鉄、水の熱化学分解による水素製造など、工業用熱源として利用することを目的とした原子炉である。現在、世界的には西ドイツを中心に、アメリカ、イギリスなどで開発が進められている。一方、我が国では日本原子力研究所が中心となり、熱出力50MW多目的高温ガス実験炉の建設計画が進められており、現在、詳細設計の段階に入っている。また、多目的高温ガス実験炉用大形構造機器実証試験ループ“HENDEL”の建設も進行しており、55年度は試験部の設計・製作が一部着手される。日立製作所(バブコック日立株式会社を含む)は、昭和48年以来多目的高温ガス実験炉の開発に参画しており、主として原子炉压力容器、

中間熱交換器、高温配管など、一次冷却系機器の開発を進めてきた。以下に、多目的高温ガス実験炉の概要、日立グループの研究・開発の現状及び技術開発上の問題点をまとめて述べる。

### 2 多目的高温ガス実験炉の概要

多目的高温ガス実験炉は、燃料として低濃縮二酸化ウランを核とした被覆粒子を、減速材、反射体及び炉心構造材として黒鉛を、冷却材としてヘリウムを使用した熱出力50MWの熱中性子炉である。熱利用系としては、直接製鉄用還元ガス製造やガスタービン発電などが想定されており、このため、原子炉出口冷却材温度は1,000°Cに設定されている。

この実験炉の役割は次に述べるとおりである。

- (1) 多目的利用システムの開発実証試験
- (2) 耐高温燃料、材料の照射・開発試験
- (3) 高温ガス炉システム安全性実証試験

実験炉建設工程は、昭和58年度着工、62年度末臨界達成と予定されている。図1、2に各々実験炉プラントの系統概略、実験炉構造を示す。

### 3 原子炉压力容器及び一次系高温機器開発の現状

多目的高温ガス実験炉は、核熱、システムをはじめ、燃料、材料、構造にわたる多くの開発要素をもっている。これらの中で最も重要なものの一つは、中間熱交換器をはじめとする一次系及び二次系高温コンポーネントの開発である。

高温コンポーネント開発上の最大の問題は、運転温度1,000°C近傍での使用可材料の特性低化(例えば、高温部候補材 Hastelloy X の1,000°C、10万時間のクリープ破断強度0.15kg/mm<sup>2</sup>、断熱候補材カオウールなどの高温での変質と弾性喪失の問題など)である。したがって、高温構造物の開発には上記材料特性を十分考慮した設計と、実機条件下での性能実証が必要になる。

以下、原子炉压力容器、中間熱交換器及び高温配管を例に

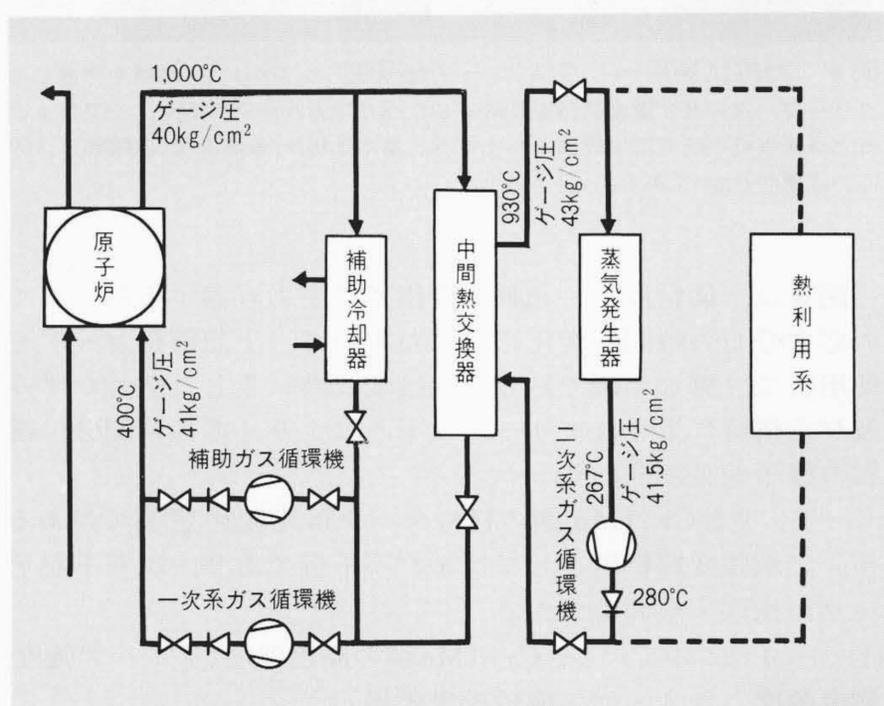


図1 多目的高温ガス実験炉系統図 プラント基本構成は原子炉系、一次冷却系、二次冷却系、水・蒸気系及び熱利用系から成っている。冷却系は2ループ構成となっている。

\* バブコック日立株式会社呉工場 工学博士 \*\* バブコック日立株式会社呉工場

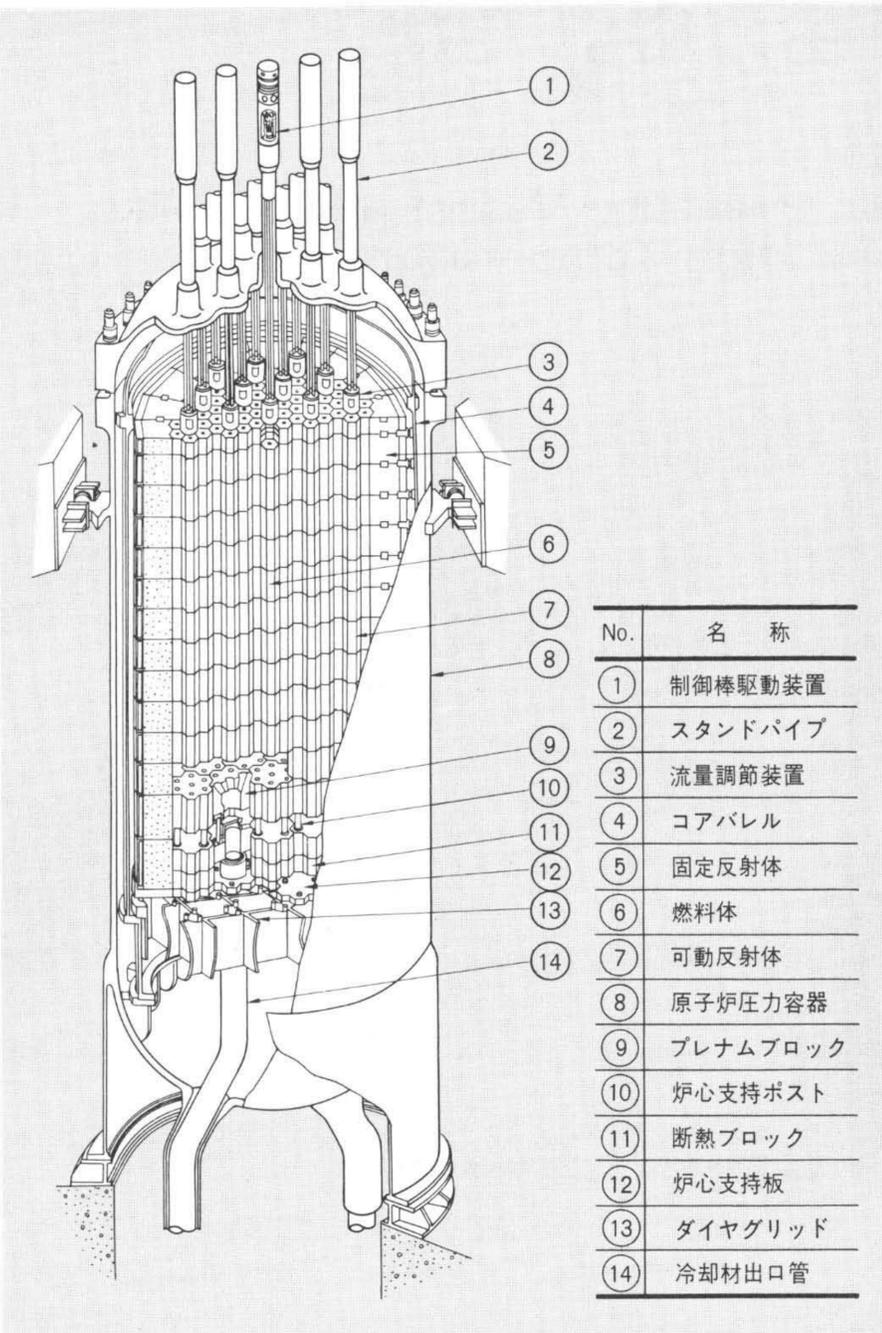


図2 多目的高温ガス実験炉の炉体構造 压力容器主要寸法は、内径5,950mm, 内高16,110mmであり、スタンドパイプを含めた全高は22,495mmである。

とり、研究・開発の現状について報告する。

### 3.1 原子炉压力容器

本実験炉原子炉压力容器の運転温度は400°Cであり、軽水炉に比べ100°C以上高い。このため、容器材料として、この温度範囲で水添脱硫リアクタ容器などに豊富な使用実績のある2¼Cr-1Mo鋼(SA-387Gr22相当)を採用している。

実験炉压力容器構造を図2に示すが、自立円筒形で、内径5,950mm, 肉厚136mm, 内高16,110mm, 重量は約520tであり、現在まで一貫して日立製作所が設計を担当してきた。構造的な特徴としては、高温ガス炉特有のものとして、上鏡に燃料交換用スタンドパイプをもっている点、冷却材がヘリウムであることを考慮し、主フランジシールバックアップとしてオメガシールリングを採用している点などが挙げられる。

本压力容器はクリープ温度域で使用されるため、構造強度設計はASME(American Society of Mechanical Engineers) Boiler & Pressure Vessel CodeのSec. III, Case Interpretation 1592(現在N-47)に準拠して行なわれる。このため、下記の温度及び応力解析コードの開発を行ない、設計に適用した。

- (1) 2次元, 3次元非定常温度分布解析コード
- (2) 2次元熱弾塑性クリープ解析コード
- (3) 2次元熱ラチェット解析コード

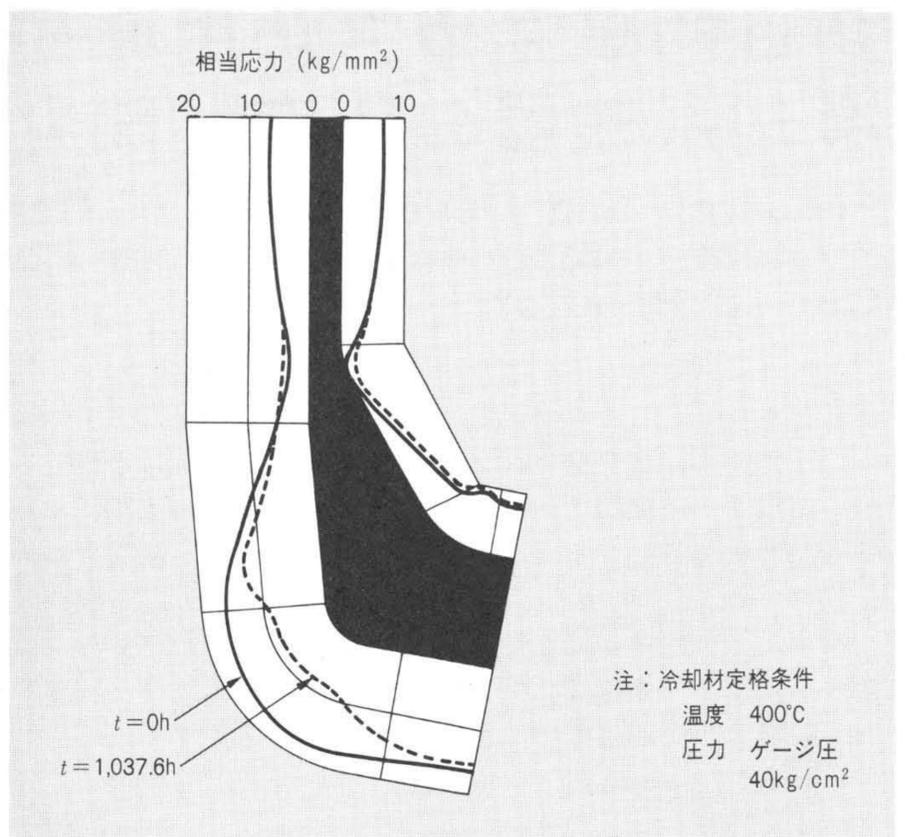


図3 主冷却ノズル応力分布 通常炉停止—炉起動一定格の運転サイクルでの非弾性応力解析結果を示す。ノズル内面コーナは、炉停止時に降伏し塑性ひずみが生ずる。

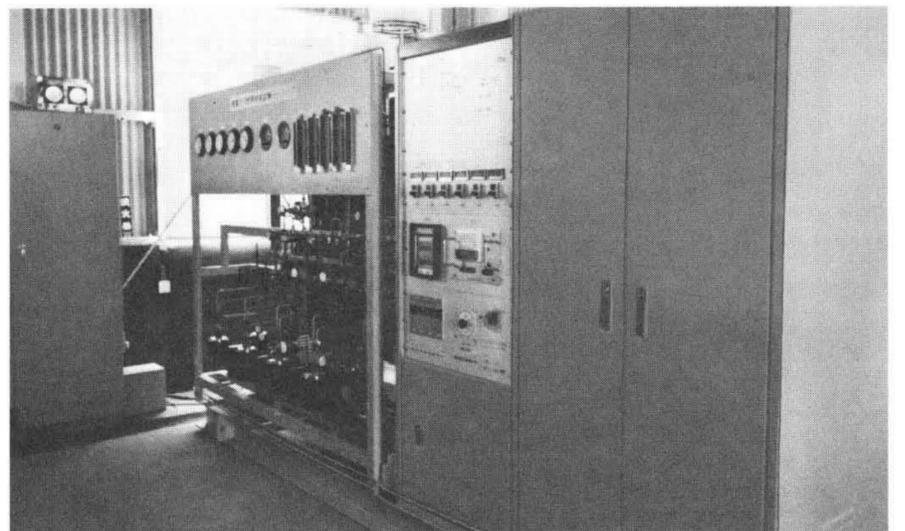


図4 材料試験用ヘリウムループ全景図 ヘリウム環境を考慮したクリープ、疲労及び腐食試験を目的としたヘリウムループであり、バブコック日立株式会社の研究所に設置されている。基本仕様は、最高温度(試験部)1,100°C, 流量40l/minである。

図3は、通常停止—起動一定格での压力容器主冷却ノズルの応力分布の時間的変化を示したもので、上記解析コードを使用して計算した例である。過渡変化時に生じた塑性ひずみ及び定格時に生じたクリープひずみにより、応力再配分、緩和の様子が読み取れる。

一方、2¼Cr-1Mo鋼の材料データは比較的豊富ではあるが、詳細強度解析用としてはまだ不十分であり、現在下記データの採取・整備中である。

- (1) ヘリウム中での2¼Cr-1Mo鋼の高温強度(クリープ強度、疲労強度、クリープ・疲労重畳効果)
- (2) 2¼Cr-1Mo鋼の靱性特性(照射及び熱時効を含む)
- (3) CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>などの不純物を含むヘリウム中での2¼Cr-1Mo鋼の脱・浸炭特性

(1)及び(3)のデータ採取用として、不純ガス添加制御の可能な材料試験用ヘリウムループが昭和55年3月、バブコック日立株式会社の研究所で完成した。ループ全景を図4に示す。

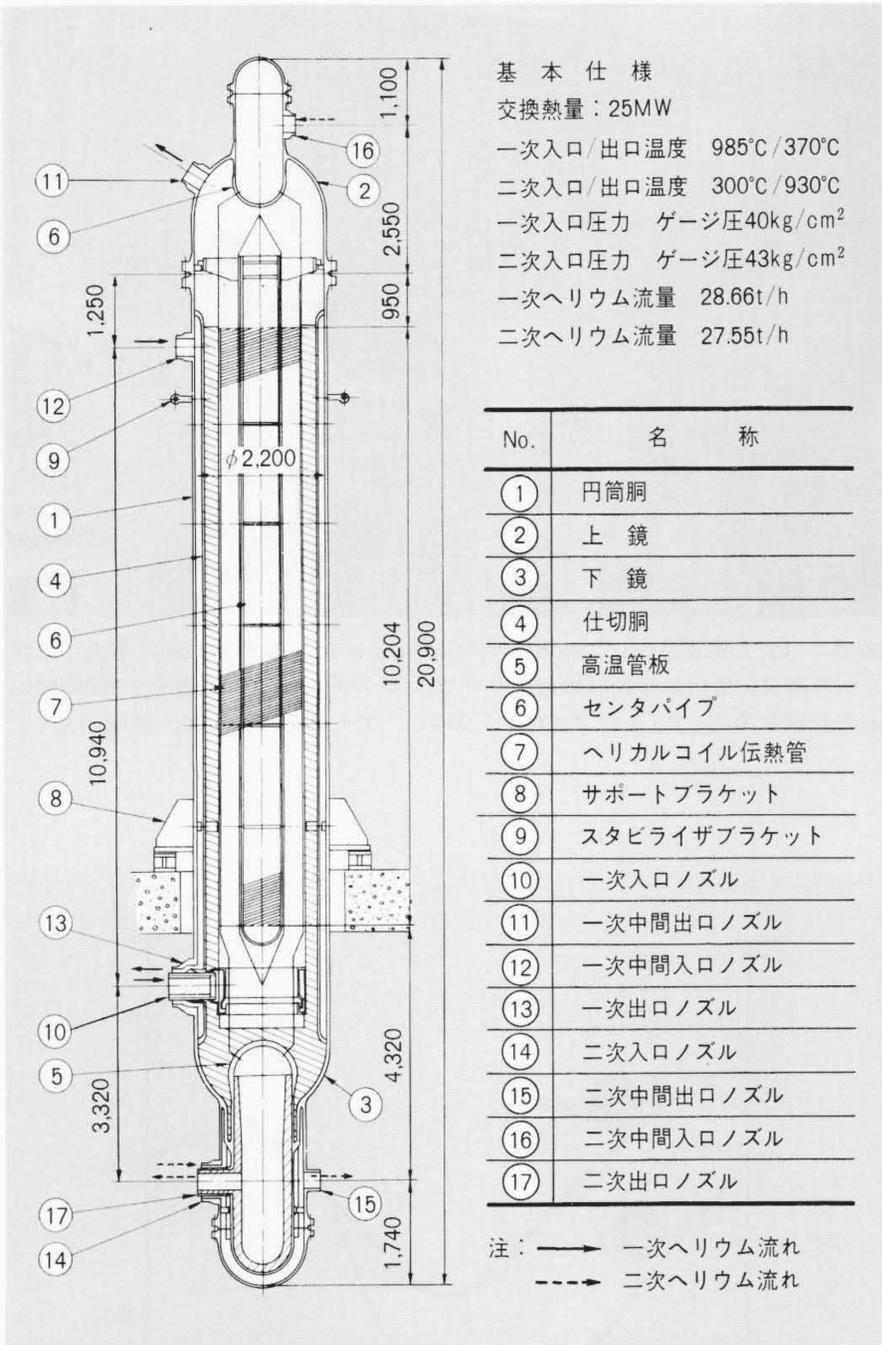


図5 中間熱交換器全体構造図 ヘリカルコイル形の熱交換器で、一次ヘリウムは胴側、二次ヘリウムは管側を流れる。

試験機も鋭意整備中であり、今後、材料のヘリウム環境強度データが着々と整備される予定である。

### 3.2 中間熱交換器

中間熱交換器は、多目的高温ガス実験炉プラントの成否を左右する最重要コンポーネントの一つである。図5に、中間熱交換器構造(日立製作所設計)例及び基本仕様を示す。主な設計上の特長は次に述べるとおりである。

- (1) 高温管板、伝熱管など高温部の機械的応力を低減するため、一次、二次運転差圧を小さく(3 kg/cm<sup>2</sup>)していること。
- (2) 空間利用効率が高く、胴との熱膨張差吸収が容易なヘリカルコイル伝熱管群を採用していること。
- (3) 薄肉化が可能で、熱応力の低減が図れる球形管板を採用していること。
- (4) 強度的に最も厳しい高温管板温度を、一次入口ヘリウム温度(985°C)から断熱材により熱的にしゃ断し、二次ヘリウム出口温度(930°C)に支配される構造としていること。

高温部材料としては、既存耐熱合金の中から、高温強度、耐食性の比較的優れた Hastelloy X を採用している。現在、中間熱交換器の実用的設計寿命として、5×10<sup>4</sup>時間が設定されているが、材料特性からかなり厳しいものと判断される。

中間熱交換器は、材料のクリープ現象が顕著な温度領域で使用されるため、強度設計は2.1で述べた Code Case N-47 に準拠して実施される。したがって、上記設計寿命を満足す

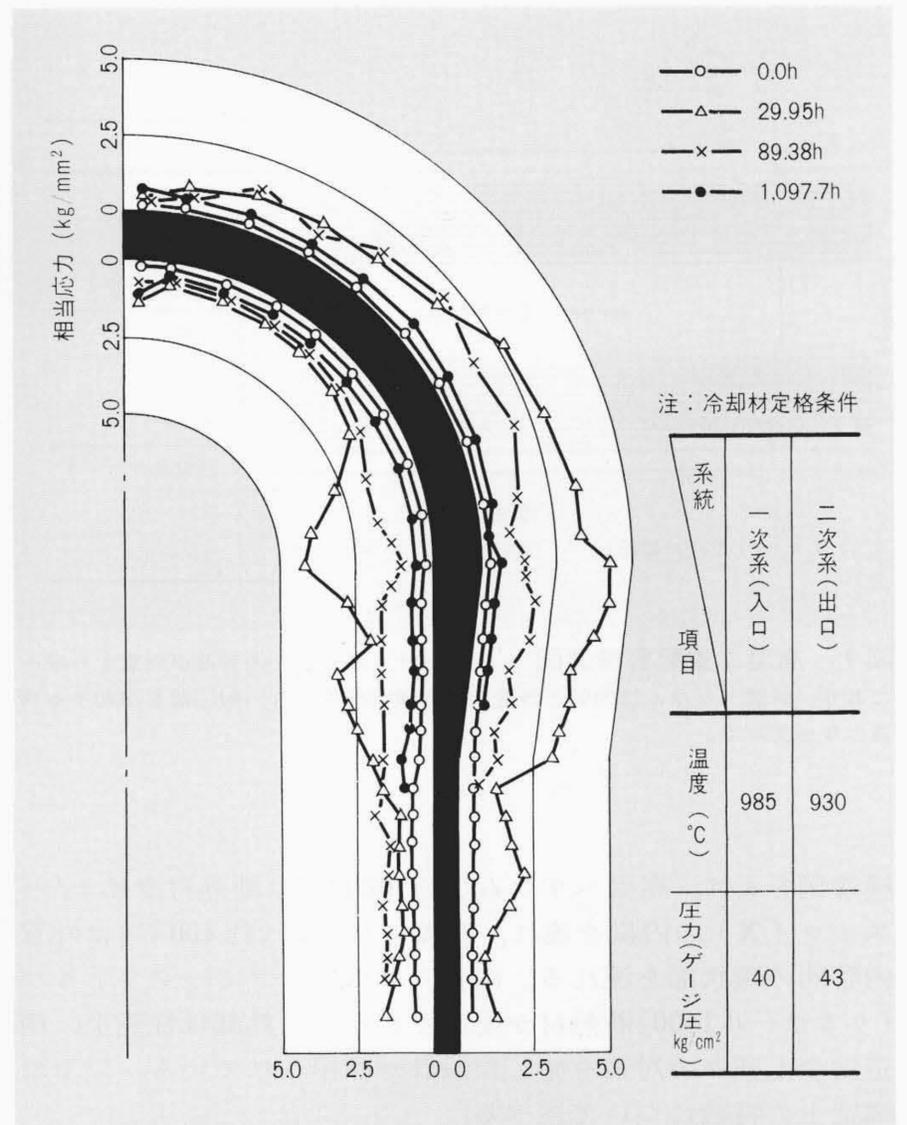


図6 高温管板応力分布 通常炉停止一炉起動一定格の運転サイクルでの応力分布の変化履歴を示している。定格運転中(89.38~1,097.7時間)にクリープひずみによる応力緩和が生じていることが分かる。

る信頼性の高い中間熱交換器の設計に必要なことは、次の二点である。

- (1) 非弾性クリープ解析による高温部の非弾性ひずみ量の評価
- (2) 材料の高温特性データの整備と、信頼できる材料構成方程式の確立

Hastelloy X 及び改良材 Hastelloy XR (Al, Ti の制限により耐食性を改善したもの)とも、微量不純物を含む高温ヘリウム中のデータ、特に低応力長時間のクリープデータは十分ではなく、疲労データとともに、今後整備していく必要がある。一方、高温強度特性の改善された有望な新超耐熱合金(例えば日立金属株式会社製の Ni ベース固溶強化形合金 SSS 113M など)の開発も進められている。従来からこれら超耐熱合金の高温強度データ採取は、主としてバブコック日立株式会社の研究所で実施してきたが、今後は図4に示した新設備が有効に活用される予定である。

非弾性応力解析実施には膨大な時間がかかるが、自社開発、導入プログラムを含めて整備済みである。解析実施例として、図6に球形高温管板の通常停止一起動一定格時での応力分布の変化を示す。発生応力は熱応力が主体であり、クリープひずみにより応力が緩和されていく様子が認められる。今後は、断熱構造を含む高温管板、伝熱管サポート構造など要素の開発試験に着手したいと考えている。

### 3.3 高温配管

高温配管には、内部断熱式の二重配管構造が採用される。この構造は、1,000°C 近傍での金属材料強度の極端な低下を補うため、耐熱部と耐圧部を分離するという設計思想に基づいている。図7に高温二重配管(日立製作所が開発中のもの)の

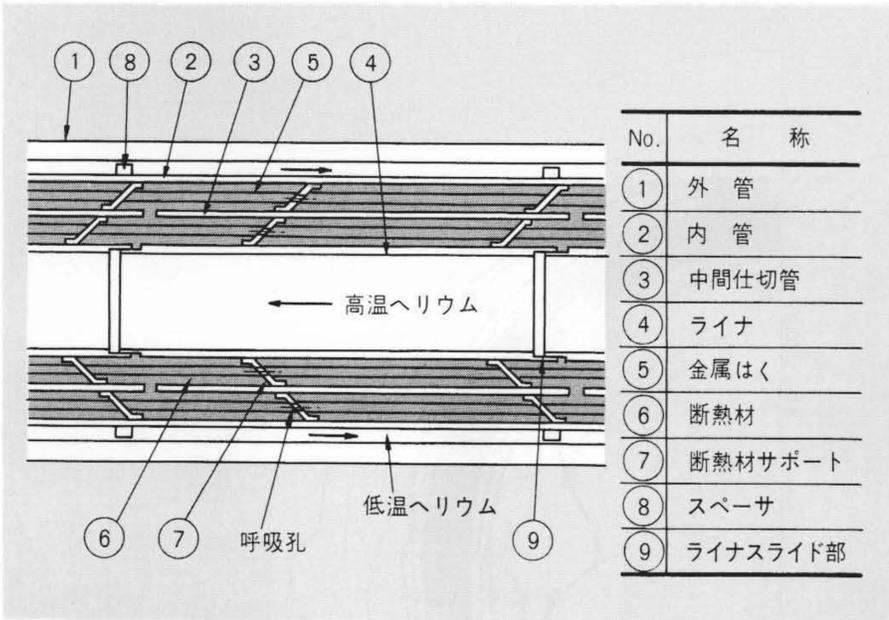


図7 高温二重配管構造図 ライナ、断熱層、内管及び外管から成っており、低温ヘリウムは内管と外管の間の環状部を流れ、耐圧部を冷却する構造となっている。

構造例を示す。高温ヘリウム(約1,000°C)は断熱材ライナ(ハステロイX)の内側を流れ、低温ヘリウム(約400°C)は外管内管間の環状部を流れる。内管内側にはセラミックファイバ(カオウル1400)断熱材が配置される。断熱部は性能上、構造健全上種々の対策を施した設計が採用されている。以下に構造上の特徴について述べる。

- (1) 断熱部は金属はくにより多層構造としてある。これは内部に生ずる自然対流により、断熱性能が劣化するのを防止するためである。
- (2) 中間仕切管により、断熱部を高温部(700°C以上)、低温部(700°C以下)に分離してある。これは、セラミックファイバの高温(800°C以上)長時間使用に伴う弾性喪失により、内管内側に間隙が生ずるのを防止するためである。
- (3) 断熱材サポートの均圧用呼吸孔は、一つおきに取り付けてある。これは、断熱材内部に高温ガスのバイパス流が生ずるのを防止するためである。
- (4) 断熱材ライナは、サポートを介して一端は内管に固定するが、他端はスライド可能とし、高低温部の熱膨張差吸収を可能とした。また、スライド表面は焼付防止対策としてセラミックコーティングを施してある。

このような構造の高温配管試作試験体を、日立製作所の研究所にある日立高温ヘリウムループに組み込み、1,000°Cで500時間以上の性能確認試験を実施した。日立高温ヘリウムループの全景を図8に示す。その結果、断熱部有効熱伝導率は、ほぼ実機温度条件で約0.5kcal/m・h・°Cと満足すべき値が得られた。図9に、内管表面の温度分布測定例を示す。内管温度は自然対流を反映した分布を示しているが、これはヘリウムループが小形でガス流量が小さいため、断熱材内部ではなく、内、外管流路[Re(レイノルズ数)約600]に自然対流が生じたためである。このようなことは実機定格運転条件ではないが、循環機トリップ時などには類似の温度分布が発生することも予想される。

これらの試験体製作、及び運転試験の経験を生かし、昭和53年10月、実機の約1/2スケール(12B)の高温二重配管試験装置を日本原子力研究所に納入することができた。同装置は現在運転中である。

高温配管の設計・製作技術は、現時点で一応確立された。しかし、ライナ及び断熱材は実験炉プラント寿命を20年間と

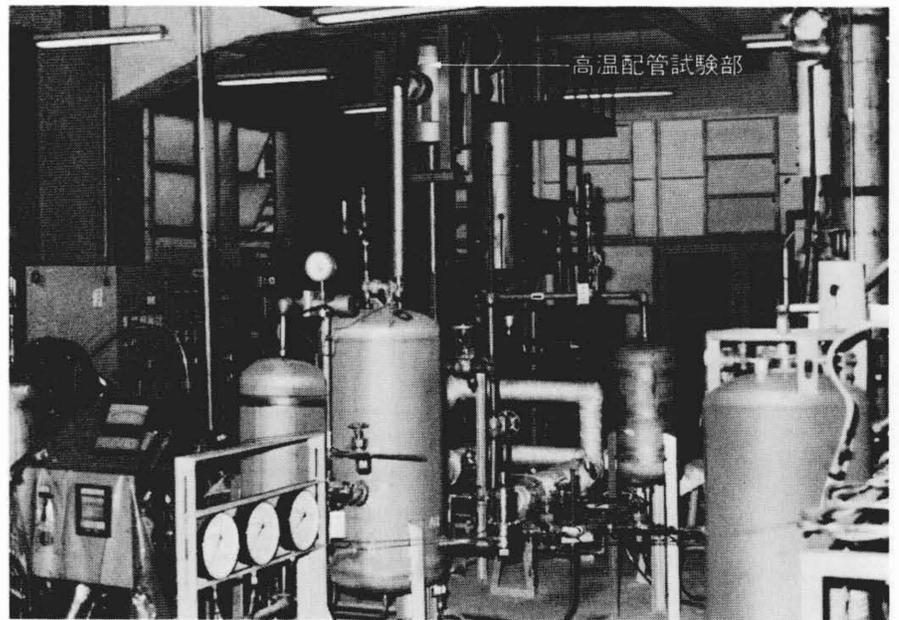


図8 日立高温ヘリウムループ全景図 日立製作所の研究所内に設置された高温配管性能確認試験用のヘリウムループで、1,000°C運転で500時間以上の実績を達成した(ループ仕様: 1,000°C, ゲージ圧20kg/cm², 36kg/h)。

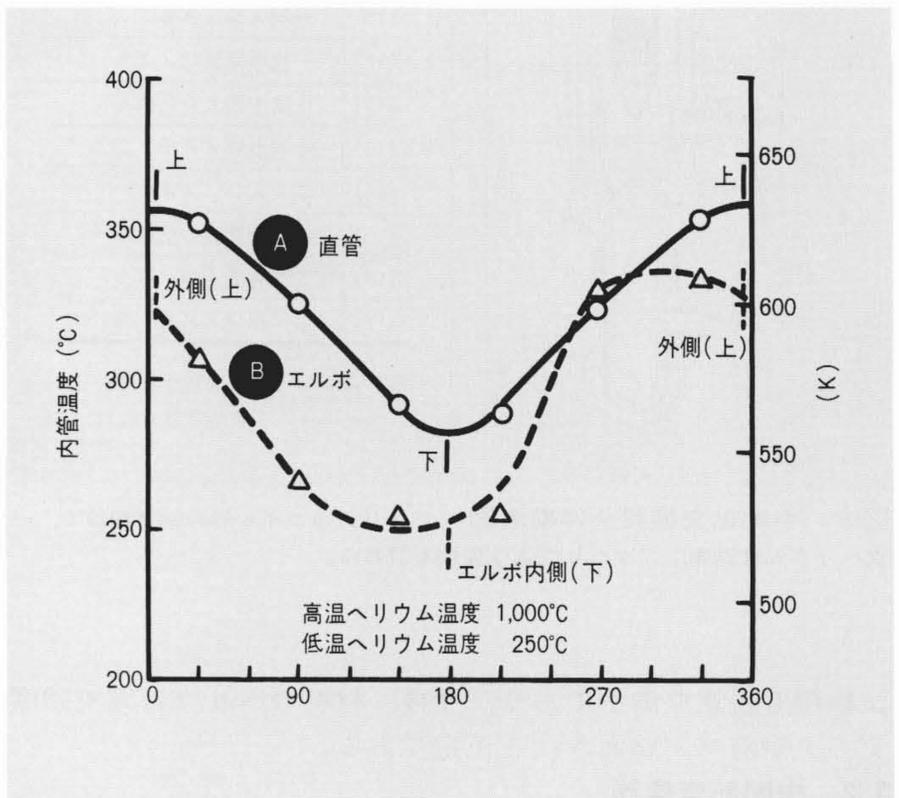


図9 内管表面温度分布測定例 高温配管内管の直管部及びエルボ部での円周方向温度分布測定結果を示すが、円周方向温度分布は、低温ヘリウムの自然対流により生じたものである。

想定した場合、耐久性に問題があり、今後長時間運転実証試験に加えて、補修交換技術を確立することが必要である。

#### 4 結 言

日立製作所での多目的高温ガス炉用機器の研究・開発の現状として、原子炉圧力容器、中間熱交換器及び高温配管を取り上げて報告した。要約すると次のように結論される。

- (1) 原子炉圧力容器は、材料バックアップデータの追加整備を除き、設計・製作技術はほぼ確立した。
- (2) 中間熱交換器、高温配管については、設計の信頼性を向上させるため、長時間の高温材料データの整備と大形モデルの長時間運転実証が必要である。

今後、高温ガス炉の開発には長期間の努力を要するが、関連研究所との協力関係をいっそう密にするとともに、顧客との技術面の協力を図り、積極的な推進を図っていく考えである。