

JAERI-Tech

96-037



HTTR熱利用系炉外技術開発試験用 ヘリウムガス供給系の設計

1996年9月

日野竜太郎・藤崎勝夫・小林敏明・会田秀樹・太田幸丸
大内義弘・関田健司・羽賀勝洋・加藤道雄・茂木春義
深谷好夫・根小屋真一・稻垣嘉之・鈴木邦彦・溝上頼賢*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力公済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株高野高速印刷

H T T R 热利用系炉外技術開発試験用

ヘリウムガス供給系の設計

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

日野竜太郎・藤崎 勝夫・小林 敏明・会田 秀樹・太田 幸丸
大内 義弘・関田 健司・羽賀 勝洋・加藤 道雄・茂木 春義⁺¹
深谷 好夫・根小屋真一⁺²・稻垣 嘉之・鈴木 邦彦⁺³・溝上 頼賢*

(1996年8月1日受理)

H T T R の目的の一つは高温核熱利用の有効性を実証することにある。H T T R という実炉に世界で初めて高温核熱利用系を接続して実証試験を実施するのに先立ち、機器の高性能化、運転・制御及び安全技術の実証、設計・安全評価解析コードの検証のため炉外技術開発試験が不可欠である。そこで、H T T R の最初の熱利用系として設計検討が進められている水蒸気改質水素製造システムについて、炉外技術開発試験計画を策定し、炉外技術開発試験のための試験装置の設計検討を行った。本報告は、試験装置のなかで原子炉システムを模擬して約900°Cの高温ヘリウムガスを水蒸気改質システムに供給するヘリウムガス供給系の設計についてまとめたものである。本ヘリウムガス供給系は、コスト低減の観点から H E N D E L の M₁ ループ構成機器を移設・再利用することを基本方針とし、H E N D E L 全設備を調査して移設・再利用可能な機器を評価・整理した。また、新規に制作する必要のあるヘリウムガス高温加熱器等の熱流動性能及び構造強度の評価を行い、その仕様と構造を定めた。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀3607

⁺¹ 高温工学試験研究炉開発部

⁺² 保安管理室

⁺³ 中性子科学特別チーム

* 三菱重工業(株) 長崎造船所

Design of Helium-gas Supplying Facility of Out-of-pile Demonstration Test
for HTTR Heat Utilization System

Ryutaro HINO, Katsuo FUJISAKI, Toshiaki KOBAYASHI, Hideki AITA,
Yukimaru OHTA, Yoshihiro OHUCHI, Kenji SEKITA, Katsuhiro HAGA,
Michio KATO, Haruyoshi MOGI⁺¹, Yoshio HUKUYA, Shinichi NEKOYA⁺²,
Yoshiyuki INAGAKI, Kunihiko SUZUKI⁺³, and Yorikata MIZOKAMI*

Department of Advanced Nuclear Technology
Oarai Research Establishment Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 1, 1996)

One of the objectives of the High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) is to demonstrate effectiveness of high-temperature heat utilization. Prior to connect a heat utilization system to the HTTR, a series of out-of-pile demonstration test is indispensable to improve components' performance, to demonstrate operation, control and safety technologies and to verify analysis codes for design and safety evaluation. After critical review and discussion on the out-of-pile demonstration test, a test facility have been designed. In this report, a helium-gas supplying facility simulated the HTTR system was described in detail, which supplies High-temperature helium-gas of 900°C to a steam reforming facility mocking-up the HTTR heat utilization system. Components of the Helium Engineering Demonstration Loop (HENDEL) were selected to reuse in the helium-gas supplying facility in order to decrease construction cost. Structures and specifications of new components such as a high-temperature heater and a preheater were decided after evaluation of thermal and hydraulic performance and strength.

Keywords : HTTR, High-temperature Heat Utilization, Out-of-pile Demonstration Test,
Steam Reforming, Test Facility, Design, Helium-gas Supplying Facility, HENDEL,
Components.

⁺¹ Department of HTTR Project

⁺² Office of Operational Safety Administration

⁺³ Special Task Force for Neutron Science Initiative and OMEGA Programme

* Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Nagasaki Shipyard

目 次

| | | |
|-----|------------------------------|----|
| 1. | はじめに | 1 |
| 2. | 炉外技術開発試験及び試験装置の概要 | 1 |
| 2.1 | 炉外技術開発試験の主要内容 | 2 |
| 2.2 | 炉外技術開発試験の熱流動条件 | 3 |
| 2.3 | 炉外技術開発試験装置の構成 | 4 |
| 2.4 | ヘリウムガス供給系の設計基本方針 | 6 |
| 3. | H E N D E L 再利用機器の検討 | 12 |
| 3.1 | H E N D E L 機器の選定 | 12 |
| 3.2 | 再利用機器の選定 | 13 |
| 3.3 | その他機器 | 14 |
| 4. | ヘリウムガス高温加熱器の設計 | 26 |
| 4.1 | 熱流動に関する性能検討 | 26 |
| 4.2 | 構造設計及び機器仕様 | 29 |
| 5. | ヘリウムガス予熱器の設計 | 38 |
| 5.1 | 熱流動に関する性能検討 | 38 |
| 5.2 | 機器仕様 | 41 |
| 6. | あとがき | 43 |
| | 謝 辞 | 43 |
| | 参考文献 [付録] ヘリウムガス冷却器の仕様 | 43 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of Out-of-pile Demonstration Test and Test Facility | 1 |
| 2.1 Main Items of Out-of-pile Demonstration Test | 2 |
| 2.2 Thermal and Hydraulic Conditions of Out-of-pile Demonstration Test | 3 |
| 2.3 Components of Out-of-pile Demonstration Test Facility | 4 |
| 2.4 Design Concepts of Helium Gas Supplying Facility | 6 |
| 3. Investigation on HENDEL Components Available for Out-of-pile Demonstration Test Facility ... | 12 |
| 3.1 Assessment of HENDEL Components | 12 |
| 3.2 Components Selected for Helium Gas Supplying Facility | 13 |
| 4. Design of High-temperature Helium-gas Heater | 14 |
| 4.1 Thermal and Hydraulic Performance | 26 |
| 4.2 Structural Design and Specification | 26 |
| 5. Design of Helium-gas Pre-heater | 29 |
| 5.1 Thermal and Hydraulic Performance | 38 |
| 5.2 Specification | 38 |
| 6. Conclusions | 41 |
| Acknowledgments | 43 |
| References | 43 |
| Appendix : Specification of Helium-gas Cooler | 43 |

1. はじめに

大洗研究所に建設が進められている高温工学試験研究炉（HTTR）は、その臨界を平成9年末に予定しており、それから5年後に最初の熱利用系をHTTRに接続して、実証試験を開始することを目指している。このHTTR熱利用系は、原子力の利用分野を電力以外の分野に拡大して熱効率の向上をはかる核熱利用の多様化の有効性を実証することを目的としており、炭酸ガス放出量削減など地球環境保全の観点から極めて意義がある。

そこで、HTTRに熱利用系を接続するのに先立って東海研究所のHENDELで炉外実証試験を行うため、R&Dの現状、技術的問題点、システムの概要、試験計画などについて検討を行った⁽¹⁾。検討の対象は、これまで熱利用系の候補として挙げてきた、水素／メタノール製造システム（水蒸気改質システム）、熱化学法及び高温水蒸気電解法による水素製造法、ガスタービン発電等である。このうち、水蒸気改質システムは他のシステムより容易に設計・製作が可能であるため、HENDELに早期に設置し、炉外実証試験を通してシステム特性の把握、運転制御方法の確立等を行うとともに、将来の核熱利用系に対して汎用性のある高温隔離弁、受動的冷却型蒸気発生器などの各種安全機器・技術を検証・高度化できることを示した。

この後、高温隔離弁、受動的冷却型蒸気発生器を含む水蒸気改質システム炉外実証試験装置の設計検討を開始したが、途中で、高温ガス炉に関するR&Dは大洗研究所に集約してHTTR計画を効率的に推進することとなった。これを受け、炉外実証試験は「炉外技術開発試験」と改称し、HTTRサイトに試験装置を建設する予定となった。そこで、試験装置のうち、原子炉システムを模擬するヘリウムガス供給系については、コストダウンのためにHENDEL機器を移設・再利用することとした。本報告は、炉外技術開発試験装置の設計検討において実施したヘリウムガス供給系の設計検討をまとめたもので、炉外技術開発試験装置及びヘリウムガス供給系の構成、HENDEL移設・再利用機器、新規に製作する機器の熱流動性能の評価、仕様等について述べている。

2. 炉外技術開発試験及び試験装置の概要

HTTR熱利用系は前述したように核熱利用分野の拡大と熱効率の向上を目指し、核熱利用の有効性を実証しようとするものである。HTTRはその臨界を平成9年末に想定しており、それから5年後に最初の熱利用システムをHTTRに接続することを目指している。このため、今後8年程度の間に詳細設計、熱利用系炉外実証試験、安全審査等の作業を確実に進める必要がある。そこで、

- 安全技術、運転・制御技術等の汎用性
- 21世紀半ばをターゲットとして考えたときの核熱利用システム
- HTTRへの早期接続

1. はじめに

大洗研究所に建設が進められている高温工学試験研究炉（HTTR）は、その臨界を平成9年末に予定しており、それから5年後に最初の熱利用系をHTTRに接続して、実証試験を開始することを目指している。このHTTR熱利用系は、原子力の利用分野を電力以外の分野に拡大して熱効率の向上をはかる核熱利用の多様化の有効性を実証することを目的としており、炭酸ガス放出量削減など地球環境保全の観点から極めて意義がある。

そこで、HTTRに熱利用系を接続するのに先立って東海研究所のHENDELで炉外実証試験を行うため、R&Dの現状、技術的問題点、システムの概要、試験計画などについて検討を行った⁽¹⁾。検討の対象は、これまで熱利用系の候補として挙げてきた、水素／メタノール製造システム（水蒸気改質システム）、熱化学法及び高温水蒸気電解法による水素製造法、ガスタービン発電等である。このうち、水蒸気改質システムは他のシステムより容易に設計・製作が可能であるため、HENDELに早期に設置し、炉外実証試験を通してシステム特性の把握、運転制御方法の確立等を行うとともに、将来の核熱利用系に対して汎用性のある高温隔離弁、受動的冷却型蒸気発生器などの各種安全機器・技術を検証・高度化できることを示した。

この後、高温隔離弁、受動的冷却型蒸気発生器を含む水蒸気改質システム炉外実証試験装置の設計検討を開始したが、途中で、高温ガス炉に関するR&Dは大洗研究所に集約してHTTR計画を効率的に推進することとなった。これを受け、炉外実証試験は「炉外技術開発試験」と改称し、HTTRサイトに試験装置を建設する予定となった。そこで、試験装置のうち、原子炉システムを模擬するヘリウムガス供給系については、コストダウンのためにHENDEL機器を移設・再利用することとした。本報告は、炉外技術開発試験装置の設計検討において実施したヘリウムガス供給系の設計検討をまとめたもので、炉外技術開発試験装置及びヘリウムガス供給系の構成、HENDEL移設・再利用機器、新規に製作する機器の熱流動性能の評価、仕様等について述べている。

2. 炉外技術開発試験及び試験装置の概要

HTTR熱利用系は前述したように核熱利用分野の拡大と熱効率の向上を目指し、核熱利用の有効性を実証しようとするものである。HTTRはその臨界を平成9年末に想定しており、それから5年後に最初の熱利用システムをHTTRに接続することを目指している。このため、今後8年程度の間に詳細設計、熱利用系炉外実証試験、安全審査等の作業を確実に進める必要がある。そこで、

- 安全技術、運転・制御技術等の汎用性
- 21世紀半ばをターゲットとして考えたときの核熱利用システム
- HTTRへの早期接続

という観点から H T T R に最初に接続する熱利用システムの選定作業を行い、高温工学試験研究炉（H T T R）開発部では水蒸気改質システムを選定し、

- － 热的動特性の違いを考慮した運転・制御技術
- － 事故対策、インターフェース等の安全技術

の確立に重点を置いた検討作業を進めてきた^(2, 3, 4)。これを踏まえて、炉外技術開発試験内容の策定、試験装置の構成等の検討を行い⁽¹⁾、試験装置の設計検討を行った。以下に、試験内容、熱流動条件、試験装置の構成等について記す。

2. 1 炉外技術開発試験の主要内容

炉外技術開発試験は、H T T R 接続水蒸気改質システムの起動・停止方法の確立、定常運転時の機器及びシステム性能の把握に加えて、原子炉接続システムとして過渡／事故時に原子炉システムに影響を及ぼさないことを実証することを目的とする。

H T T R 接続水蒸気改質システムについては、化学反応システムの原子炉への接続可能性をまず実証するという見地から、初期システムは高温隔離弁を組み込んだ水蒸気改質部のみの簡素化したシステムとしている。これにより、炉外技術開発試験装置も同じシステム構成とした。以下に炉外技術開発試験の主要内容を記す。

(1) 定常運転試験

- ・ 水蒸気改質反応器の伝熱流動特性
 - － 対流熱伝達率、熱放射の効果
 - － 圧力損失特性、反応管の流体誘起振動特性他の把握
- ・ 化学反応特性
 - － 脱硫反応、水蒸気改質反応特性の把握
- ・ 反応管の水素透過特性
 - － 反応管からの透過水素量の経時変化（腐食状況と対比）
- ・ システムの運転・制御方法
 - － 通常運転時の起動、停止におけるシステム制御方法の確立

(2) 過渡／トリップ時模擬試験

- ・ 負荷変動時のシステム挙動とシステム制御方法
 - － 全体システムの安全で確実な制御方法の確立
- ・ ヘリウムガス側及び機器トリップ時のシステム挙動と停止方法
 - － 全体システムの安全で確実な停止方法の確立
 - （蒸気発生器の受動的冷却性能試験を含む）

(3) 耐久性並びに信頼性

- ・ 改質反応管の供用後検査
 - － 反応管の変形、腐食状況

- ・触媒の供用後検査
 - 触媒の劣化状況

2. 2 炉外技術開発試験の熱流動条件

H T T R 接続水蒸気改質システムの熱流動条件と、それを基にした炉外技術開発試験装置の熱流動条件を以下に記す。

(1) H T T R 接続水蒸気改質システム

ヘリウムガス熱流動条件（定格条件）

入口圧力 : 4.0 kg/cm²G
 入口温度 : 880°C
 出口温度 : 600°C
 流量 : 9070 kg/h (= 2.5 kg/s、反応管本数 36 本)
 反応管 1 本当たりのヘリウムガス流量 : 0.0694 kg/s

プロセスガス熱流動条件（反応管本数 36 本）（定格条件）

入口プロセスガス圧力 : 4.5 kg/cm²G
 入口プロセスガス温度 : 450°C (反応器入口)
 出口プロセスガス温度 : 600°C (反応器出口)
 水蒸気改質器入口質量流量 : 7098 kg/h
 プロセスガス分圧 (モル分率)
 CH₄ 8 kg/cm²G (0.1770)
 H₂O 35.3 kg/cm²G (0.7845)
 H₂ 0.7 kg/cm²G (0.0151)
 エタン 0.5 kg/cm²G (0.0114)
 水蒸気改質器入口総モル数 : 396, 900 モル/h
 水蒸気改質器入口体積流量 : 8890 Nm³/h
 (添字N: 1atm, 0°Cにおける体積流量)
 供給メタン (CH₄) 流量 : 1573 Nm³/h (43.7 Nm³/h/本)
 供給水蒸気量 (H₂O) 流量 : 6974 Nm³/h (= 5604 kg/h, 156 kg/h/本)
 スチーム／カーボン比 : 4.4

(2) 炉外技術開発試験装置の熱流動条件

ここでは、後述する H E N D E L M₁ ループ機器を移設・再利用することを前提とし、ヘリウムガス流動条件を考慮して反応管本数は 3 本までとする。炉外技術開発試験は以下

の熱流動条件で行う。

ヘリウムガス及び原料側の熱流動条件

(a) ヘリウムガス流動条件

入口圧力 : 4.0 kg/cm²G

入口温度 : 880°C

出口温度 : 600°C

ループ戻り温度 : 380°C (固定)

流量範囲 : 反応管3本の場合 0~0.3 kg/s、定格運転時 0.21 kg/s

反応管1本の場合 0~0.1 kg/s、定格運転時 0.069 kg/s

(b) メタンガス流動条件

供給圧力 : 4.5 kg/cm²G

供給温度 : 最高450°C (水蒸気改質器入口)

流量範囲 : 反応管3本の場合 0~250 Nm³/h (4.12 Nm³/min)

定格運転時 131 Nm³/h (2.18 Nm³/min)

反応管1本の場合 0~83 Nm³/h (1.38 Nm³/min)

定格運転時 43.7 Nm³/h (0.73 Nm³/min)

(c) 水蒸気流動条件

供給圧力 : 4.5 kg/cm²G

供給温度 : 最高450°C (水蒸気改質器入口)

流量範囲 : 反応管3本の場合 0~700 kg/h (11.7 kg/min)

定格運転時 468 kg/h (7.8 kg/min)

反応管1本の場合 0~233 kg/h (3.9 kg/min)

定格運転時 156 kg/h (2.6 kg/min)

生成ガスの流動条件—改質器での生成ガス量

(CH₄+H₂O→3H₂+CO、メタン転換率 100%の場合)

反応管3本の場合 定格運転時 H₂ 393 Nm³/h (=6.55 Nm³/min)

CO 131 Nm³/h (=2.18 Nm³/min)

反応管1本の場合 定格運転時 H₂ 131 Nm³/h (=2.18 Nm³/min)

CO 43.7 Nm³/h (=0.73 Nm³/min)

2. 3 炉外技術開発試験装置の構成

H T T R 開発部での設計検討と上記の熱流動条件を基にして作成した炉外技術開発試験装置のシステム構成をFig. 2.1に示す。このシステムは以下の機器・系統から構成される。

(1) 水蒸気改質反応器（試験部）

水蒸気改質反応管を圧力容器内に組み込んだ構造で、ヘリウムガス側の放熱を防ぐために、補償ヒータブロックを内部に設置する。反応管の材料、寸法はH T T R開発部での設計条件と同一とする。

(2) ヘリウムガス供給系

水蒸気改質器へ定格で880°Cのヘリウムガスを供給して、水蒸気とメタンの改質反応を進行させるとともに、原料水蒸気を製造するために設置する。

(3) 水蒸気供給系

- ・水蒸気供給系は、

- 水蒸気改質器に原料水蒸気を安定に供給
- ヘリウムガス戻り温度を制御
- プロセス側トリップ時（機器トリップ、電源喪失）にヘリウムガスの循環を停止することなく、ヘリウムガスを適正に除熱

することを主目的としており、本試験装置ではとくに重要な系統である。

- ・水蒸気供給系を構成する主要機器は以下の通りである。

- 1) フィルター+水精製器
- 2) 水タンク
- 3) 定流量ポンプ
- 4) 水予熱器
- 5) 脱ガス器
- 6) 蒸気発生器（蒸気ドラム、放熱器付き）
- 7) 蒸気過熱器
- 7) 非常時給水タンク他

(4) 原料ガス供給系

- ・原料ガス供給系は、

- 水蒸気改質器に原料メタンを安定して供給
- 機器トリップ、電源喪失時にメタンを供給停止

することを主目的としている。

- ・原料ガス供給系を構成する主要機器は以下の通りである。

- 1) LNG（液化天然ガス）タンク
- 2) 蒸発器
- 3) 主コンプレッサー
- 4) 脱硫器用加熱器
- 5) 脱硫器他

(5) 不活性ガス供給系

- ・不活性ガス供給系は、

- －水蒸気改質反応器の起動・停止時及び非常時に系統に不活性ガスを供給
 - －水蒸気供給系の非常時給水タンクの加圧
- に用いるためのものである。
- ・主要構成機器は以下の通りである。
- 1) 液化窒素タンク
 - 2) 蒸発器
 - 3) コンプレッサー
 - 4) 窒素ガスカーボル他

(6) 热交換器（原料加熱器）

本熱交換器は、原料のメタンと水蒸気の混合ガスを450°Cまで加熱して水蒸気改質器に供給するためのものである。

(7) フレアースタック

ガス分離器からの、H₂、CO、CO₂を燃焼排気するためのもので、爆発等を防止するため、水プール付きのフレースタックとする。

(8) 計測・制御設備

計測・制御設備は、熱電対、圧力計、差圧計、ガス分析器、流量計等の計測機器、ヘリウムガス供給系、原料ガス供給系、不活性ガス供給系等の運転制御設備で構成する。

(9) 高温隔離弁

触媒管破断及び二次系配管破断より原料及び生成ガスが原子炉格納容器に漏洩して引爆発するのと、その継続を防止するのを防ぐためのもので、熱利用系の重要な安全器である。隔離弁の接続口径(16B)、構造は実機と同一とする。

(10) 各種配管（耐圧配管）

ヘリウムガス高温配管（外径250A）、ヘリウムガス主配管(50A、100A等)、その他配管

(11) その他必要機器

計装用高圧弁（手動弁、電動弁、空操弁）、機器架台他

上記システムのHTTRサイトへの配置案をFig. 2.2に示す。ヘリウムガス供給設備は、HTTRに隣接して建設される開発棟内に設置し、水蒸気改質システムは安全確保の観点から屋外に設置することとした。開発棟は平成9年度から建設開始の予定である。

2. 4 ヘリウムガス供給系の設計基本方針

ヘリウムガス供給系は、前述したように水蒸気改質器へ定格で880°Cのヘリウムガスを供給して、水蒸気とメタンの改質反応を進行させるとともに、原料水蒸気を製造するために設置する。Fig. 2.3にヘリウムガス供給系の構成を示す。この系統は単一のヘリウムガスループであり、ループを構成する主要な設備は、ヘリウムガス循環機、ヘリウムガス予

熱器、ヘリウムガス加熱器、ヘリウムガス冷却器、フィルター、真空排気装置等である。この他に付帯設備としてヘリウムガス精製装置、計装用圧縮空気設備、ヘリウムガス供給・回収設備、冷却水供給設備（クーリングタワー、水ポンプ等）、電源設備、計測制御設備等が接続する。図中の~~機器~~で囲んだ部分が後述する H E N D E L からの移設・再利用機器・設備である。

炉外技術開発試験は、低予算で、しかも効率的に実施することが前提である。この観点から、ヘリウムガス供給系の設計に当たっては、H E N D E L の M₁ ループの機器を大洗研究所に移設して再利用することを大方針とした。そこで、H E N D E L 設備機器を調査して移設・再利用の可否を評価した。この評価を基にして Fig. 2.4 に示す H E N D E L の M₁ ループ + T₁ 試験部の~~機器~~で囲んだ機器を再利用することとした。評価結果の詳細は次章の「移設機器検討」で述べる。

なお、再利用するヘリウムガス循環機、フィルター、ヘリウムガス精製装置及び真空排気装置については、移設に際して高圧ガス取締法に従った手続きを行い、移設先で耐圧気密試験等の検査を受ける必要がある（真空排気装置は除く）。

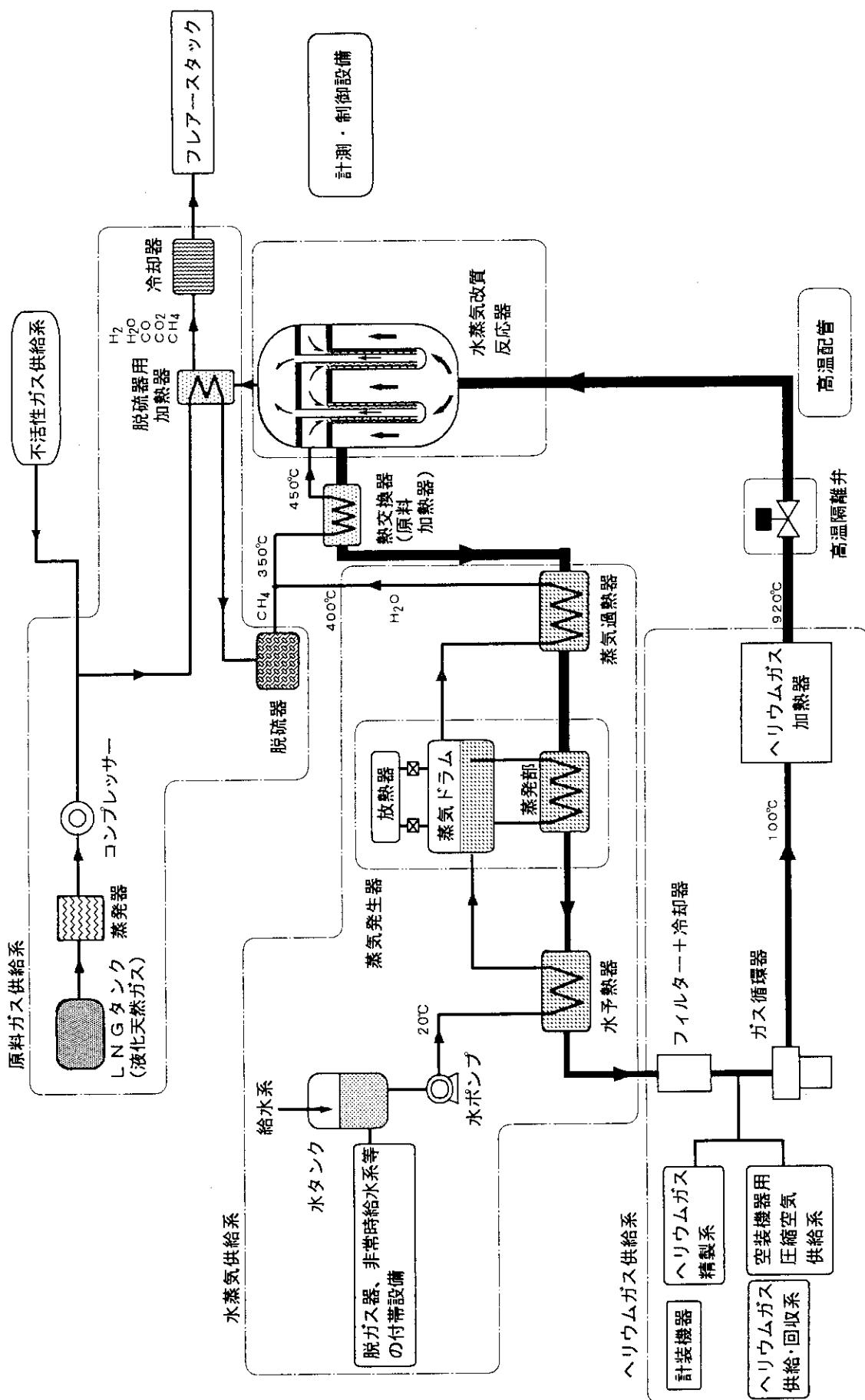
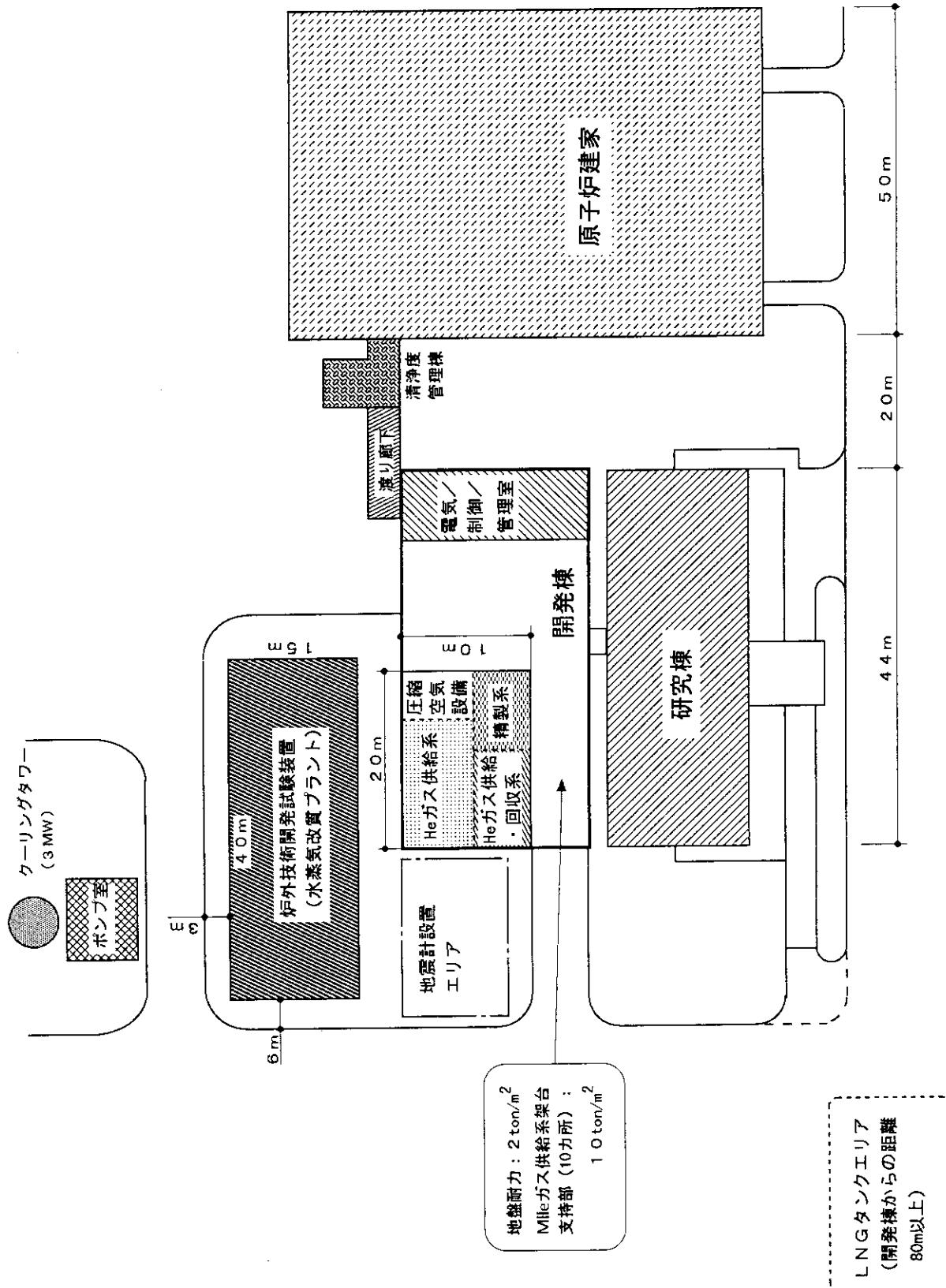


Fig. 2.1 炉外技術開発試験装置の構成



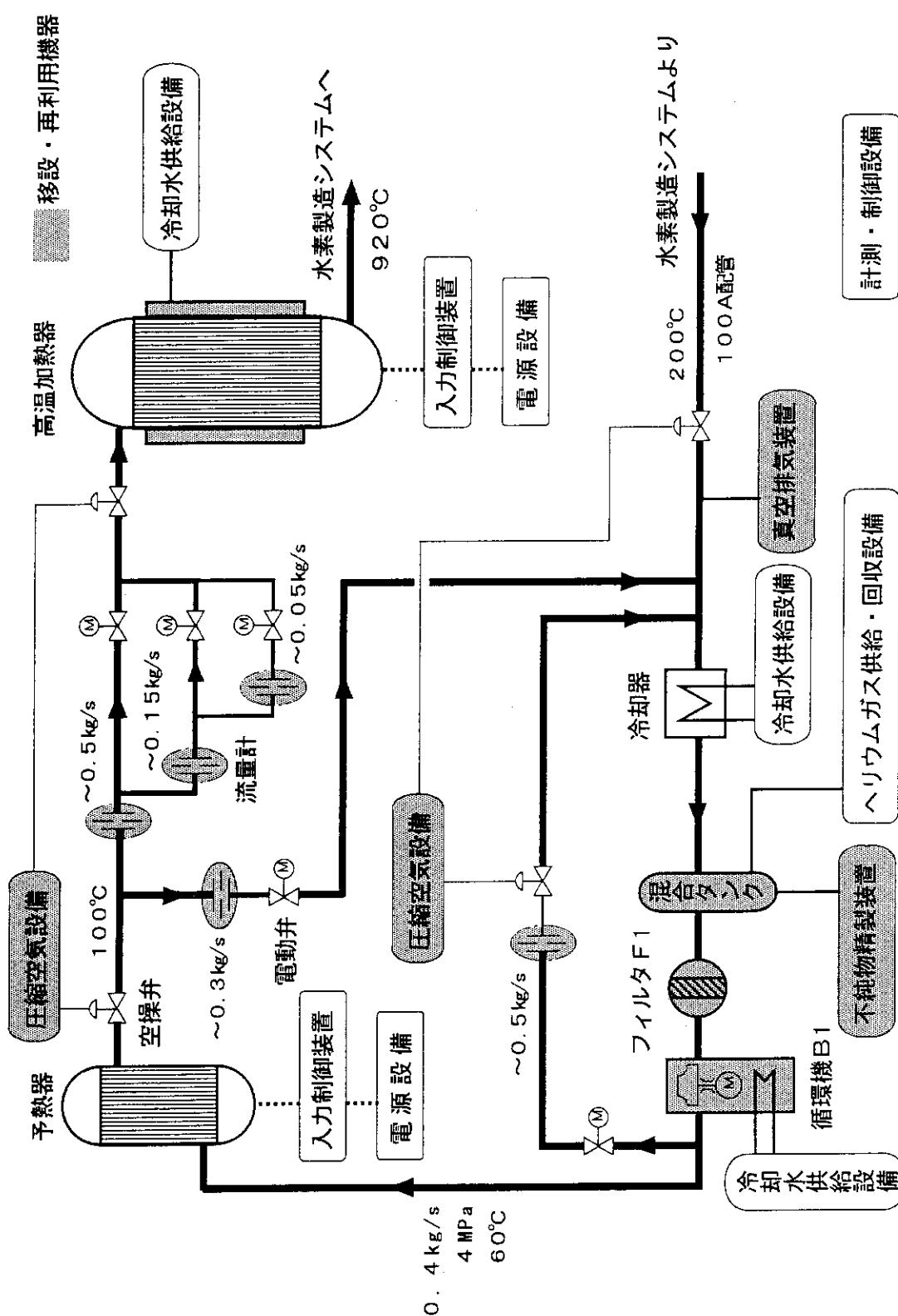
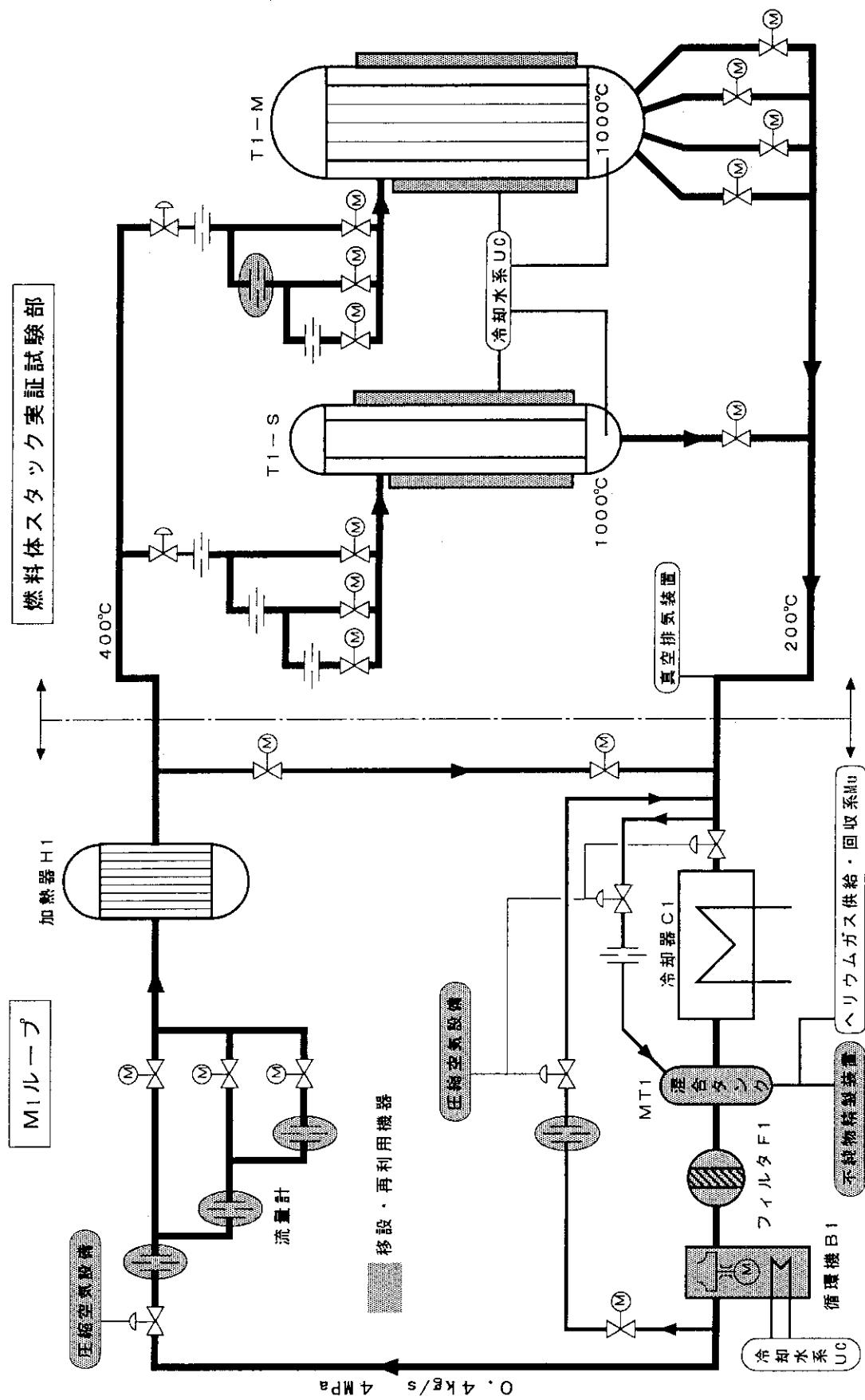


Fig. 2.3 ヘリウムガス供給系の構成

Fig. 2.4 H E N D E L の M₁, N₁, T₁ 試験部の再利用機器

3. H E N D E L 再利用機器の検討

本章では、炉外技術開発試験装置のヘリウムガス供給設備に再利用するH E N D E L 機器の検討結果について述べる。

3. 1 H E N D E L 機器の評価

H T T R 熱利用系炉外実証試験装置のヘリウムガス供給設備については、前述したようにH E N D E L M₁ループ等の構成機器をできるだけ再利用し、建設費の合理化を図ることとした。そこで、H E N D E L 全設備機器について、これまでの保守経緯、故障回数等を考慮し、かつ、腐蝕、老朽化等の現状の機器状況を詳しく調べ、それを基にして再利用の可否を評価した。

平成7年11月段階の評価結果をTable 3.1～Table 3.11に示す。表中には、H E N D E L 設備の主要機器について、仕様・サイズ等を記し、また、使用開始年月、現状の程度と必要な点検内容や機器の現状等を記してある。再利用可能な機器は下記の通りであった。これらの機器は Table 3.1～Table 3.11中に（◎、○）を記しておいた。

- 1) M₁ループ
 - ・ヘリウムガス循環機（予備機本体）、加熱器H₁、混合タンク、フィルター、流量計、圧力計、差圧計等の計測機器
- 2) M₂ループ
 - ・圧力計、差圧計等の計測機器
- 3) 加圧冷却水系
 - ・カートリッジ式混床型イオン交換塔
- 4) メイクアップ系（ヘリウムガス供給・回収設備M_u）
 - ・主圧縮機、レシーバタンク、供給ヘッダー、回収ヘッダー、不純物トラップ、膨張タンク
- 5) 精製系（M_p）
 - ・ガス分析装置（ガスクロマトグラフ、高精度水分計）
 - ・サンプリングライン用弁類
- 6) 不純物精製装置（新設M_p系）
 - ・ガス循環機、真空ポンプ、熱交換器、加熱器、酸化銅ベッド、モレキュラーシープベッド他、配管・弁類を除く設備一式
- 7) 冷却水設備（U_c）
 - ・防錆剤ポンプ、防錆剤タンク
- 8) 圧縮空気設備（空気計装機器操作用）
 - ・空気圧縮機、空気槽他、冷却器を除く設備 一式

9) T₁試験部

- ・真空ポンプ、加圧器、冷却器、循環ポンプ、補給水ポンプ、薬注ポンプ他

10) T₂試験部

- ・真空ポンプ、高圧起電盤、変圧器、圧力計、差圧計

3. 2 再利用機器の選定

上記のように現状で程度の良いものは数多くあるが、これらを全て移設・再利用することは移設先の設備可能面積、移設コスト等の点から極めて困難である。そこで、

- ・炉外技術開発試験装置のヘリウムガス供給設備容量（熱流動条件）との整合性、
- ・移設費用を考慮しても建設コストの合理化効果が期待できること

などの観点から、移設・再利用機器を選択することにした。選択した再利用可能な主要機器を以下に記す。これらの機器は Table 3.1 ~ Table 3.11中に (◎) を記しておいた。

1) M₁ループ

- ・ヘリウムガス循環機（予備機本体）
- ・加熱器H₁
- ・フィルター
- ・混合タンク
- ・流量計

2) 精製系 (M p)

- ・ガス分析装置、サンプリングライン用弁類

3) 不純物精製装置（新設M p系）

- ・ガス循環機、真空ポンプ、熱交換器、加熱器、酸化銅ベッド、モレキュラーシーブベッド他、配管・弁類を除く設備一式

4) 圧縮空気設備

- ・空気圧縮機、空気槽他、冷却器を除く設備 一式

5) T₁及びT₂試験部

- ・真空ポンプ（可搬型） 一式

上記の機器のうち、加熱器H₁は流量計での流体温度を一定に制御するなど非常に有用な機器であるが、ヒータエレメントの交換、制御装置の更新が必要でありコストがかさむことと、寸法が大きいために設置面積を要することから、再利用を見合せた。

炉外技術開発試験装置のヘリウムガス供給系では、H₁に代わる加熱器として、流量計での流体温度制御用の予熱器（容量が約50kW）と水蒸気改質器入口での流体温度制御をそれぞれ目的とした高温加熱器を設置する。これらについては後述する。現在の見積りでは、予熱器の新規製作の方が加熱器H₁の修理（制御装置の更新を含む）よりも安くなる。また、加熱容量が低減して機器が小型化することによりメンテナンス性が向上することを考

慮すると、H₂の再利用よりも新規に予熱器を製作する方が有利である。

3. 3 その他機器

以下に H E N D E L 再利用機器以外の機器・設備について記す。

(1) ヘリウムガス高温加熱器（制御装置を含む）

規格品がないため新規に設計製作する。第4章に設計の概要と仕様を記す。

(2) ヘリウムガス予熱器（制御装置を含む）

規格品がないため新規に設計製作する。第5章に設計の概要と仕様を記す。

(3) ヘリウムガス冷却器

設置面積の縮小と高効率化の観点からプレートフィン熱交換器（規格品）を使用することとする。ヘリウムガス冷却器の仕様を付録に記す。なお、仕様ではヘリウムガス入口／出口温度を300°C／50°Cとして、熱交換量に余裕を持たせた。

(4) ヘリウムガス循環機制御装置

新規に設計製作する。仕様、構成等は H E N D E L 既設のものと同一である。

(5) 差圧計、圧力計

H E N D E L 設置されているものは本体に限っては程度の良いものが多いが、信号変換器は老朽化しているので全数交換する必要がある。現在市販されている工業プラント用の差圧計、圧力計は本体と信号変換器を組み合わせて計算機制御を行うシステムになっており、H E N D E L での旧品と新規の差圧計、圧力計を混在して使用することは校正、保守等の作業が複雑になり不利である。そこで、差圧計、圧力計は規格品を購入設置することとした。

(6) ヘリウムガス供給・回収設備

H E N D E L に設置されているものは規模が大きいため、設置面積の縮小と圧力制御等の高効率化のために新規に設計・製作する。ただし、設備の系統は H E N D E L 既設のものと同一であり、ヘリウムガス供給系と水蒸気改質システムのヘリウムガスラインの容量に余裕をみて最高200N^m³規模に対する設備とする。

(7) 冷却水供給設備

本設備は、3 MW 規模の冷却能力を有するクーリングタワー、防錆剤注入装置、冷却水循環ポンプ等で構成され、貯水槽については H T T R の予備貯水槽を分岐利用することを計画している。設備構成は H E N D E L 冷却水系とほぼ同一である。本設備は開発棟建設時に並行して建設する。

(8) 電源設備

3 MW 規模の電源設備を開発棟建設時に並行して設置する。

(9) 配管及び弁

配管は流量計配管を除いて100Aの溶接配管とし、弁は同口径の空操及び電動弁とする。

Table 3.1 H E N D E L 設備・機器の評価
—マザー第1ループ (M:ループ)

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|--------------|---|-------------|-------------|--------------------------|
| ◎ | 循環機 B1 | 130kW、△ p = 2kg/cm ² 0.4 kg/s | S. 57. 4 | 否 | 機能劣化 |
| | 循環機 (予備機) | 130kW、△ p = 2kg/cm ² 0.4 kg/s | S. 61. 3 | 良 | |
| | 循環機 制御装置 | 210kVA、SCR方式 | S. 57. 4 | 否 | 老朽化(錆, 腐食) 旧型交換部品入手困難 |
| ◎ | 加熱器H1 | 160kW、 1.28m φ × 5.6m H | 〃 | 良 | ヒータエレメント交換要 周囲断熱材の交換要 |
| | 加熱器 制御装置 | 3φ、6.6kV、250kVA | 〃 | 否 | 老朽化(錆, 腐食) 旧型交換部品入手困難 |
| ◎ | 冷却器C1 | シェルアンドチューブ形、170kW 0.27m φ × 2.7m L | 〃 | 否 | 伝熱管の腐食 |
| | 混合タンク | 円筒型、1 m ³ 0.32m φ × 3.0m L | 〃 | 良 | |
| | フィルター | 焼結金属型、5μ 0.32m φ × 1.1m H | 〃 | 良 | |
| ◎ | 配管一式 | STPA22、STPT38、100A | 〃 | 否 | 新設安価 |
| | 弁(19台) | 電動弁、調整弁、100A | 〃 | 否 | 弁座老朽化 |
| | 計測機器 | 熱電対 圧力計、差圧計 流量計 | 〃 〃 〃 | 否 良 良 | 老朽化 信号変換器交換要 |

Table 3.2 H E N D E L 設備・機器の評価
—マザー第2ループ+アダプターセクション (M₂+Aループ)

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|---------------------|--|--------------------|-------------|-------------------------|
| ○ | 加熱器 H2 | 豎型直接通電パイプヒータ 2MW 1.6mφ × 7.7m ^H | S. 57. 4 | 否 | 老朽化 |
| | 入力制御装置 H31 | 3,000KVA(変圧器含) 4.7MW 2.4mφ × 11m ^H | H. 4. 1 | 良 | 制御盤は使用可 |
| | 入力制御装置 H32 | 7,500KVA(変圧器含) 4.3MW 1.7mφ × 9m ^H | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 入力制御装置 | 7,000KVA(変圧器含) | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 冷却器 | シェルアンドチューブ型 2.3MW 1.0mφ × 4.0m ^H 6.7MW 2.0mφ × 9.0m ^H 2.3MW 1.0mφ × 6.3m ^H | S. 57. 4 〃 〃 | 否 否 否 | 伝熱管の腐食 老朽化 伝熱管の腐食 |
| | 循環機 4台 B21 | 豎型密閉動圧ガス軸受型 Head 0.1Mpa 12000rpm 250kW 1.0mφ × 1.5m ^H | S. 57. 4 | 良 | |
| | B22 | 同上 | 〃 | 良 | |
| | B23 | 同上 | 〃 | 良 | |
| | B24 | 同上 | S. 58. 12 | 良 | |
| | B2MGセット | 可変電圧可変周波数式 容量 770KVA MG 4.0 ^w × 1.5m ^D × 3.0 ^H | S. 57. 4 | MG不良 | 制御盤老朽化 |
| ○ | B3MGセット | 同上 | S. 58. 12 | MG不良 | 〃 |
| | フィルター F21 F22 | 豎置円筒焼結金属型 濾過精度5μ 1mφ × 4m ^H 同上 | S. 57. 4 | 否 否 | マンホールフランジ部劣化 |
| | 混合タンク MT21 | 横置円筒 0.5m ³ 0.5mφ × 4m ^L | 〃 | 良 | |
| | MT22 | 0.1m ³ 0.3mφ × 3m ^L | 〃 | 良 | |
| | 中温低温配管 | STPA22、267.4φ × 4m ^L 114.3φ × 6 ^L | 〃 | 良 | |
| | 内部断熱配管 | SB42, 558.8φ × 18 ^L | 〃 | 良 | |
| | 弁類 | 電動弁、調節弁 | 〃 | 否 | 弁座老朽化 |
| | 計測機器 | 熱電対 圧力計、差圧計 | 〃 | 否 良 | 老朽化 |

Table 3.3 H E N D E L 設備・機器の評価—加圧冷却水系

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|------------------|---|-------------|-----|------------------------|
| ○ | 加圧器 W T 32 | 堅置円筒 1.0m ³ 0.7mφ × 3.0m ^H | S. 57. 4 | 良 | |
| ○ | 気水分離器 | 堅置円筒 0.8m ³ 0.7mφ × 2.5m ^H | " | 良 | |
| ○ | 冷却器 C 33 | 横置シェルアンドチューブ型 4.7MW 0.7mφ × 6.0m ^L | " | 良 | |
| ○ | C 34 | 同上 | | 良 | |
| ○ | 循環ポンプ W P 31 | 横置遠心ポンプ Head 15m Flow 110t/hr | " | 良 | 分解点検要 |
| ○ | W P 32 | 同上 1.0 ^w × 2.0m ^D | | 良 | |
| ○ | 補給水ポンプ W P 33 | 往復動式ブランジャポンプ Flow 33L/min | " | 良 | 分解点検要 |
| ○ | W P 34 | 同上 1.0 ^w × 1.0m ^D | | 良 | |
| ○ | 薬注ポンプ C P 3 | 往復動式ブランジャポンプ Flow 0.3L/min | " | 良 | 分解点検要 |
| ◎ | 純水装置 D M 3 | 混床型 採水量 2m ³ /hr 原水タンク 1基 原水ポンプ 2台 活性炭濾過機 1基 混床型イオン交換塔 6基 (カートリッジ式) 純水タンク 1基 | " S. 61. 10 | 否 良 | 老朽化 定置式からカートリッジ式に交換 |
| | 弁類 | 締切弁、調節弁等 | S. 57. 4 | 否 | 弁座老朽化 |

Table 3.4 H E N D E L 設備・機器の評価—メイクアップ系 (Mu)

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|-------------|--|----------|----|--------|
| ○ | 主圧縮機 | 吐出量6m ³ /min 150kg/cm ² 数量：2基 | S. 57. 4 | 良 | |
| | 冷却器 | 400°C、45kg/cm ² | 〃 | 否 | 冷却水側腐食 |
| | レシーバータンク | 3m ³ 、50°C、45kg/cm ² | 〃 | 良 | |
| | 供給ヘッダー | 0.18m ³ 、55kg/cm ² | 〃 | 良 | |
| | 回収ヘッダー | 0.15m ³ 、55kg/cm ² | 〃 | 良 | 分解点検要 |
| | 不純物 トラップ | 3.6m ³ /hr、5μ 150kg/cm ² | 〃 | 良 | |
| | 真空ポンプ | 排気速度330、1600L/min 数量：7基 | 〃 | 良 | |
| | 膨張タンク | 7.115m ³ 、8kg/cm ² | 〃 | 良 | |
| | 配管 | STPT38、125A、100A | 〃 | 否 | 新設安価 |
| | 弁類 | 締切弁、調節弁等 | 〃 | 否 | 弁座老朽化 |
| | 計測機器 | 圧力計、差圧計 | 〃 | 否 | 老朽化 |

Table 3.5 H E N D E L 設備・機器の評価—精製系 (Mp)

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|------------------|------------------------------------|----------|----|-----------|
| ○ | 酸化胴ベッド | 0.249m ϕ × 2.62m ^H | S. 57. 4 | 良 | 4基 |
| ○ | モレキュラー シーフベッド | 0.40m ϕ × 2.25m ^H | 〃 | 良 | 6基 |
| ○ | コールド チャコルベッド | 1.30m ϕ × 5.04m ^H | 〃 | 良 | 2基 |
| ○ | ガス循環機 | | 〃 | 良 | 2基 |
| | 真空ポンプ | (再生用) | 〃 | 否 | 2基 老朽化 |
| ○ | サージボリューム | | 〃 | 良 | 2基 |
| ○ | 加熱器 | 0.22m ϕ × 1.78m ^H | 〃 | 良 | 1基 |
| | ガス加熱器 | 0.16m ϕ × 0.90m ^H | 〃 | 否 | 1基 老朽化 |
| | 冷却器及び 冷凍機 | | 〃 | 否 | 1式 老朽化 |
| ○ | 中温熱交換器 | 0.80m ϕ × 3.52m ^H | 〃 | 良 | 1基 ハンプソン式 |
| ○ | 高温熱交換器 | 0.70m ϕ × 3.30m ^H | 〃 | 良 | 1基 |
| ◎ | ガス分析装置 | | 〃 | 良 | 1式 |
| ◎ | サンプリングライン 用弁類 | 電磁弁, 減圧弁等 | 〃 | 良 | 1式 |
| | 弁類 | 電磁弁, 減圧弁 流調弁, 安全弁等 | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 計器類 | 側温体, 感温式温度計 差圧発信器等 | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | He加熱器電源 | SCR制御方式, 50KVA, 440V | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 各種ヒータ電源 | 440V, 4kW/2台、6kW/7台 | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 流量調節弁 | | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 玉形弁 | | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 計装用止弁 | | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 配管 | | 〃 | 否 | 老朽化 |

Table 3.6 H E N D E L 設備・機器の評価—不純物精製装置（新設Mp系）

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|------------------|--|---------|----|------------------|
| ◎ | ガス循環機 | 13g/s at 42kg/cm ² 7.5kW | H. I. 4 | 良 | B551及び盤 |
| ◎ | 真空ポンプ | 設計排気速度:1540L/min 到達真空度: 5×10^{-3} Torr | 〃 | 良 | VP551, VP552, 2台 |
| ◎ | 熱交換器 | 伝熱面積:4.1×4m ² | 〃 | 良 | HX551, HX552, 2基 |
| ◎ | 加熱器 | 23.8kW | 〃 | 良 | H551 |
| ◎ | 酸化胴ベッド | 165.2 φ × 9.3 ^t × 7681mm | 〃 | 良 | SB551, SB552, 2基 |
| ◎ | モレキュラーシーフ ベッド | 216.3 φ × 15 ^t × 8341mm | 〃 | 良 | MB551, MB552, 2基 |
| ◎ | コールドチャコール ベッド | 216 φ × 8.1 ^t × 727.2 ^h mm | 〃 | 良 | MB551, MB552, 2基 |
| ◎ | モレキュラーシーフ 冷却器 | | 〃 | 良 | HX553 |
| ◎ | サージボリューム | 8B × SCH40 × 1946.8 ^h mm | 〃 | 良 | ST551, ST552 2基 |
| ◎ | 不純物注入 装置 | 450 × 570 × 1250 ^h mm | 〃 | 良 | |
| ◎ | ガスクロマトグラフ | 測定範囲:0.5ppm | 〃 | 良 | |
| ◎ | 伝送器類 | 横河電機製 UNI-11S | 〃 | 良 | 13台 |
| ◎ | 精製装置 制御盤 | | 〃 | 良 | |
| ◎ | 再生ガス 加熱器 | 250 φ × 5 ^t × 1610 | 〃 | 良 | H552, H553 2基 |
| | 配管・弁類 | 締切弁、調節弁等 | 〃 | 否 | 新設安価 |

Table 3.7 H E N D E L 設備・機器の評価—冷却水設備 (U c 系)

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|--------|---|----------|----|-------------------|
| ○ | 冷却塔 | 475m ³ /Hr × 2セル 42°C/32°C | S. 57. 4 | 否 | 大型木製、輸送困難 老朽化 |
| | 防錆剤ポンプ | 0~0.2L/min, 5kg/cm ² | 〃 | 良 | |
| | 防錆剤タンク | 1.5m ³ , 1000 φ × 1340 ^H mm | S. 63. 4 | 良 | |
| | 冷却水ポンプ | 1000t/Hr, 揚程38m 数量:2基 | S. 57. 4 | 良 | |
| | 排水ポンプ | 18t/Hr, 揚程5m | 〃 | 否 | 接液部腐食 |
| | 供給水ポンプ | 72t/Hr, 揚程10m 数量:2基 | 〃 | 良 | |
| | 高架水槽 | 水槽6000 φ × 3800 ^H mm 高さ33.5m | 〃 | 否 | 大型のため輸送困難 一部腐食 |
| | スクリーン | 16メッシュ 2台、SUS304 | 〃 | 良 | |
| | 配管 | SGP, 350A | 〃 | 否 | 腐食 |
| | 弁類 | 電動弁、空気作動弁等 | 〃 | 否 | 弁座老朽化 |
| | 計装設備 | 流量計、水位計等 | 〃 | 否 | 老朽化 |

Table 3.8 H E N D E L 設備・機器の評価－電気設備（E I 系）

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|--------------------|-----------------------------|----------|----|-------------|
| ○ | 高圧配電盤 | 8面 7.2KVA VCB(600A) | S. 57. 4 | 良 | (建屋共有設備を除く) |
| ○ | 低压配電盤 | 5面 500KVA ACB(1000A) | 〃 | 良 | (建屋共有設備を除く) |
| | C V C F 装置 | 100KVA, 440, 110V, 50Hz | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | M+A用 コントロールセンター | 18面 440V, 110V CN型 8段×両面 | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | T1用 コントロールセンター | 9面 440V, 8段×片面 | S. 58. 4 | 否 | 老朽化 |
| ○ | T2用 コントロールセンター | 4面 440V, 8段×片面 | S. 61. 6 | 良 | |
| | | | | | |

Table 3.9 H E N D E L 設備・機器の評価—計測制御設備（In系）

| 空 気 壓 縮 機 設 備 | | | | | |
|---------------|---------|--|----------|-----|-------------|
| 利 用 可 | 機 器 名 | 仕 様・サ イ ズ 等 | 使 用 開 始 | 程 度 | 備 考 |
| ◎ | 空気圧縮機 | 実風量4.2m ³ /min 7kg/cm ² 数量:2基 | S. 57. 4 | 良 | 移動式空気圧縮機を利用 |
| ◎ | 空気槽 | 2.2m ³ 、8kg/cm ² 1270 φ × 3650 ^H mm | 〃 | 良 | |
| | 冷却器 | 5.5m ³ /min、10kg/cm ² 、2基 4 ^B × 997 ^L 、ミストセパレータ付き | 〃 | 否 | 冷却水側腐食 |
| ◎ | 脱湿筒設備 | 1660 × 550 × 1750 ^H mm/セット 数量2基/セット | 〃 | 良 | |
| ◎ | フィルタ-設備 | 1070 × 410 × 1160 ^H mm/セット 2基/セット | 〃 | 良 | |

| 計 算 機 設 備 | | | | | |
|-----------|------------------------------------|-------------|----------|-----|---------------------|
| 利 用 可 | 機 器 名 | 仕 様・サ イ ズ 等 | 使 用 開 始 | 程 度 | 備 考 |
| | M+A 制御システム タイプライター バックアップ 計器 | | S. 57. 4 | 否 | 老朽化、旧性能 交換部品入手不可 |
| | T1制御システム タイプライター バックアップ 計器 | | S. 58. 4 | 否 | 老朽化、旧性能 交換部品入手不可 |
| | T2制御システム タイプライター バックアップ 計器 | | S. 61. 6 | 否 | 老朽化、旧性能 交換部品入手不可 |
| | 新設Mp系用 制御システム | | H. 1. 4 | 否 | 旧性能 |

Table 3.10 H E N D E L 設備・機器の評価 - T : 試験部

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|------------------|---|--|-------------|----------------------------|-------|
| | T1-S試験装置 T1-M試験装置 | 1.26m ϕ × 13.3m H 1.80m ϕ × 14.8m H | S. 58. 4 | 否 否 | |
| ◎ | 真空ポンプ 1 V P 0 0 1 | カニカルフ [®] -スター付油回転型 排気速度 600m ³ /hr 到達圧力 10—4 torr | 〃 | 良 | 分解点検要 |
| ○ ○ | 加圧器 1 W T 1 0 1 1 W T 2 0 1 | 豎置円筒 0.3m ³ 0.3m ϕ × 4.5m H 1.1m ³ 0.6m ϕ × 5.0m H | 〃 | 良 良 | |
| ○ ○ | 冷却器 1 C 1 0 2 1 C 2 0 1 | 横置シェルアンドチューブ型 0.1MW 0.2m ϕ × 3.0m L 1.4MW 0.5m ϕ × 5.0m L | 〃 | 良 良 | |
| ○ ○ ○ ○ | 循環ポンプ 1 W P 1 0 1 1 W P 1 0 2 1 W P 2 0 1 1 W P 2 0 2 | 横置遠心ポンプ(キャンド型) Head 15m Flow 40L/min 同上 0.5m ^w × 0.5m ^D Head 15m Flow 250L/min 同上 0.5m ^w × 0.5m ^D | 〃 | 良 | 分解点検要 |
| ○ ○ | 補給水ポンプ 1 W P 1 0 3 1 W P 2 0 3 | 往復動式フランジポンプ Flow 4L/min 0.5 ^w × 0.5 ^D m Flow 20L/min 1 ^w × 1 ^D m | 〃 | 良 良 | 分解点検要 |
| ○ ○ | 薬注ポンプ 1 C P 1 0 1 1 C P 2 0 1 | 往復動式フランジポンプ Flow 0.013 L/min Flow 0.03 L/min | 〃 | 良 良 | 分解点検要 |
| ○ ○ ○ ○ | T1-S I V R 高周波フィルタ 変圧器 遮断器盤 サイリスタ制御盤 | 120KVA 1 ϕ 40KVA 13.2KV/500V 120KVA 1 ϕ 0.8 ^w × 1.8 ^D × 2.4 ^H m 120KVA 1 ϕ (4面) | 〃 | 良 良 良 良 否 | 老朽化 |
| ○ ○ ○ ○ | T1-M I V R 高周波フィルタ 変圧器 遮断器盤 サイリスタ制御盤 補償ヒータ制御 分岐盤 | 1500KVA 3 ϕ 500KVA 13.2KV/500V 1500KVA 3 ϕ 1.0 ^w × 2.0 ^D × 2.4 ^H m 120KVA 1 ϕ × 12(4面) 3.0 ^w × 1.2 ^D × 2.4 ^H m 1 ϕ 7.8KW 200V (9面) 1.0 ^w × 1.8 ^D × 2.4 ^H m | 〃 | 良 良 良 良 否 否 | 老朽化 |
| ○ | ケーブル、トレイ | 6KVA、600V、CV | 〃 | 良 | |
| | ヘリウム配管 | | 〃 | 否 | 老朽化 |
| | 計測設備 | 計測中継盤等 | 〃 | 否 | 老朽化 |
| ◎ ○ | 計測機器 | 熱電対 流量計 圧力計、差圧計 | 〃 〃 〃 | 否 良 良 | 老朽化 |

Table 3.11 H E N D E L 設備・機器の評価 - T₂試験部

| 利用可 | 機 器 名 | 仕様・サイズ等 | 使用開始 | 程度 | 備 考 |
|-----|----------------------|---|----------|--------|------------|
| | T2試験装置 | 4.8m ^w × 16.0m ^h | S. 61. 6 | 否 | |
| ◎ | 真空ポンプ 2 V P 1 0 1 | メニカルブースター付回転型 排気速度 600m ³ /hr 到達圧力 10-4 torr | 〃 | 良 | 分解点検要 |
| ○ | 高圧起電盤 | 2.0 ^w × 2.0 ^d × 2.4 ^h m | 〃 | 良 | |
| | I V R I V R | 900KVA 3φ 1台 600KVA 3φ 6台 | 〃 | 否 否 | 老朽化 老朽化 |
| ○ | 変圧器 | 900KVA 1台 | 〃 | 良 | |
| ○ | 変圧器 | 600KVA 6台 | 〃 | 良 | |
| ○ | ヘリウム配管 | | 〃 | 良 | |
| ○ | 計測機器 | 熱電対 圧力計、差圧計 | 〃 〃 | 否 良 | 老朽化 |
| | | | | | |

4. ヘリウムガス高温加熱器の設計

高温加熱器は、水蒸気改質器へ高温のヘリウムガスを供給するために設置する。この加熱器は、電気ヒータエレメント（以後、ヒータ管と呼ぶ。）を発熱させて920°Cの高温ヘリウムガスを発生させるためのものである。このため、加熱器内部構造物は耐熱性を考慮した構造及び仕様にする必要がある。

以下に、高温加熱器のヒータ容量(発熱量)、管内流速、レイノルズ数、熱伝達率、圧力損失及びヒータ管の最高温度等の熱流動計算結果、圧力容器等の構造強度計算結果等について述べ、確定した仕様を記す。なお、ヒータ管については、制御性、メンテナンス性等を考慮して、HENDELで実績のある黒鉛製ヒータ管を直接通電して発熱させる方式とする。黒鉛製ヒータ管の寸法はHENDELのM₂ループに設置されている高温加熱器H₂に使用されているものと同一とした。

4. 1 热流動に関する性能検討

(1) 計算条件

以下に、水蒸気改質器の反応管が1本の場合(ヘリウムガス流量:0.069kg/s)と3本の場合(ヘリウムガス流量:0.069kg/s)の計算条件を示す。ヒータ管本数は三相電源が不平衡にならないように3の倍数とした。とくに、反応管1本の場合はヒータ管は3本でもよいが、ヒータ管の配置の関係から6本とした。

(a) ヒータ管条件

| | |
|--------|-----------------|
| 材 質 | : 黒 鉛 |
| 管 径 | : 外径70mm、内径40mm |
| 本 数 | : 6本 |
| 有効伝熱長さ | : 3.85m/本 |
| 使用限界温度 | : 2000°C |

(b) ヘリウムガス条件

| | |
|--------|--|
| 入口圧力 | : 40.3kg/cm ² G |
| 入口温度 | : 100°C |
| 出口温度 | : 920°C |
| 流 量 | : 0.069kg/s (反応管1本の場合) 0.207kg/s (反応管3本の場合) |
| 許容圧力損失 | : 0.1kg/cm ² (ヘリウムガス循環機の昇圧能力から) |

(2) 性能計算^(5, 6, 7)

性能計算は、ヒータ容量、管内流速、レイノルズ数、熱伝達率、圧力損失及びヒータ最

高温度について行う。ここでは計算手法のみについて述べ、実際の数値計算過程は省略する。計算結果については後述する。

(a) ヒータ容量Q [kcal/h]

$$Q = 3600G C_p (t_o - t_i)$$

ここで、 C_p : ヘリウムガス低圧比熱 [kcal/kg°C]

G : ヘリウムガス流量 [kg/s]

t_o : ヘリウムガス出口温度 [°C]

t_i : ヘリウムガス入口温度 [°C]

ヒータ1本当たりの容量はQをヒータの本数で除す。なお容量を仕事率(kW)で表す場合は860.11で除す。

(b) ヒータ管内の平均流速 U_1 [m/s]

$$U_1 = \frac{G}{\gamma_1} \times \frac{4}{\pi D_1^2} \times \frac{1}{n}$$

ここで、 D_1 : ヒータ管の内径 [m]

G : ヘリウムガス流量 [kg/s]

n : ヒータ管の本数

γ_1 : ヘリウムガスの比重 [kg/m³]

γ_1 はヘリウムガスの入口温度と出口温度の算術平均値(510°C)を基に算出する。

(c) ヒータ管内を流れるヘリウムガスのレイノルズ数Re

$$Re = \frac{U_1 D_1}{\nu}$$

ここで、 U_1 : (b)で求めた平均流速 [m/s]

ν : 動粘性係数 [m²/s]

ν はヘリウムガスの入口温度と出口温度の算術平均値(510°C)を基に算出する。

(d) ヘリウムガスとヒータ管の内壁との間の熱伝達率 α [kcal/m²h°C]

$$\alpha = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda}{D_1}$$

ここで、 Re : (c)で求めたレイノルズ数

Pr : ヘリウムガスのプラントル数

λ : ヘリウムガスの熱伝導率 [kcal/mh°C]

λ はヘリウムガスの入口温度と出口温度の算術平均値(510°C)を基に算出する。

(e) 圧力損失 ΔP [kg/cm²]

ヒータ管直管部での圧力損失 ΔP_1 は次式で算出する。

$$\Delta P_1 = f \frac{\ell}{D_1} \times \frac{\gamma_1 U_1^2}{2g} \times 10^{-4}$$

$$f = \frac{0.3163}{Re^{0.25}}$$

ここで、 f : 摩擦損失係数

g : 重力の加速度 [m/s^2]

ℓ : ヒータ管の長さ (=3.85) [m]

Re : (c)で求めたレイノルズ数

U_1 : (b)で求めた管内平均流速 [m/s]

γ_1 : (b)で求めた比重 [kg/m³]

ヒータ管入口の縮小流部 ΔP_2 、ヒータ管出口の拡大流部の圧力損失 ΔP_3 は次式で算出する。

$$\Delta P_{2,3} = \zeta \frac{\gamma_1 U_1^2}{2g} \times 10^{-4}$$

ここで、 ζ : 縮小流部又は拡大流部の損失係数 (=1)

γ_1 : (b)で求めた比重 [kg/m³]

U_1 : (b)で求めた管内平均流速 [m/s]

ヒータ管での圧力損失 ΔP は、

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

(f) ヒータ管の最高温度

ヒータ管はヘリウムガスの出口部で最高温度になる。最高温度はメーカーが提示している使用限界温度(2000°C)以下にする。ヒータ管出口部の管内面温度 t_{max} [°C]は次式で算出する。

$$t_{max} = \frac{Q}{\pi D_1 \ell \alpha n} + t_0$$

ここで、 Q : (a)で求めたヒータの発熱量 [kcal/h]

α : (d)で求めた管内熱伝達率 [kcal/m²h°C]

t_0 : ヘリウムガス出口温度 [°C]

(3) 計算結果

| 反応管1本の場合 | |
|----------|--|
| ヒータ容量 | 294kW (49kW/本) |
| 管内流速 | 3.7m/s |
| レイノルズ数 | 9724 |
| 熱伝達率 | 196kcal/m ² h°C |
| 圧力損失 | 0.001kg/cm ² (< 0.1kg/cm ²) |
| ヒータ最高温度 | 1365°C (< 2000°C) |
| 反応管3本の場合 | |
| ヒータ容量 | 882kW(147kW/本) |
| 管内流速 | 11.1m/s |
| レイノルズ数 | 29173 |
| 熱伝達率 | 471kcal/m ² h°C |
| 圧力損失 | 0.007kg/cm ² (< 0.1kg/cm ²) |
| ヒータ最高温度 | 1474°C (< 2000°C) |

4. 2 構造設計及び機器仕様

(1) 構 造

Fig. 4. 1及びFig. 4. 2にヘリウムガス加熱器の構造を示す。Fig. 4. 1は蒸気改質器の反応管が1本の場合、Fig. 4. 2は反応管が3本の場合である。いずれの構造もヘリウムガスは下部から入り、管状黒鉛ヒータの内側を流れ、上部から出る方式である。基本的にこれらの構造は、寸法がほぼ同じであり、いづれもヒータ管の本数は6本であるが、Fig. 4. 2に示した加熱器の方は、水冷電極の数が12本であり、高さも500mm程度高くなる。ここではFig. 4. 1を基に構造の概略を述べる。

(a) ヒータエレメント

4. 1節で述べたように、ヒータ管は黒鉛製の円管で、H E N D E L のM₂ループに設置されている高温加熱器H₃₂に使用されているものと同一の寸法を有する。ヘリウムガスは下部から入り、このヒータ管の内側を通過しながら加熱されて上部に出る。6本のヒータ管は上部で電気的に接続している。加熱器の下部に水冷電極を6本設け、ここからヒータ管に直接通電して発熱させる。

(b) リフレクター

ヒータ管は定格の入力で約1400°Cに加熱される。加熱時のヒータ管を高温に維持し、かつ、加熱器からの熱損失を防止するため、ヒータ管群の周囲に輻射熱反射用のリフレクターを配置する。形状は薄板の円筒とし、材質はモリブデンを候補とする。

(c) 断熱材及びライナー

断熱材は、リフレクターと圧力容器内壁との間に設置して放熱を防止する。ライナーは断熱材を内側から覆い、断熱材の脱落、飛散を防ぐために設ける。断熱材はセラミックファイバー(ファインフレックス又はカオウール相当)、ライナーをインコロイ800H等の耐熱合金とする。

(d) 圧力容器

加熱器の圧力バウンダリーであり、高温高圧のヘリウムガスを保持するものである。主要部は胴、上部鏡板及び下部鏡板であり、上部鏡板はフランジで胴に取り付け、下部鏡板と胴は溶接で取り付ける。また、胴にはヘリウムガスの出入口用管台、電極用管台を設置し、下部鏡板には点検用のマンホールを設ける。材質はH₃₂と同じSCMV2を候補とする。ヘリウムガス入口部の配管接続口径は100A、出口は高温配管接続のために250A(反応管1本)、350A(反応管3本)とする。出口についてはさらに検討する。

(e) 水冷ジャケット

加熱器の温度分布(詳細は次項(2)の圧力容器の設計温度を参照のこと)を求めるとき、圧力容器の胴の内壁の温度は約240°Cになる。この温度は、ヘリウムガス雰囲気中での断熱材の有効熱伝導率を基にして算出したが、断熱材中の対流は考慮していない。有効熱伝導率や対流発生は断熱材(セラミックファイバー)を施工する際の充填密度に依存するが、施工の程度により胴内壁の温度は240°Cを越えて設計温度以上になる可能性がある。このため、安全のために水冷ジャケットを設ける。水冷ジャケットは胴部の冷却を主とするが、電極が発熱して破損するのを防ぐために下部の電極用管台も併せて冷却する。

(2) 圧力容器の設計温度

次項(3)で述べる圧力容器の強度計算を行うためには容器の設計温度を定めておく必要がある。ここでは、水冷ジャケットを設けない場合の圧力容器温度を計算する。以下に伝熱計算について述べるが、水蒸気改質器の反応管が1本の場合も、3本の場合も胴部の径方向に関しては同一寸法であり(断熱材等の径方向寸法も同じ)、ヘリウムガスの出入口温度も同じなので、温度分布は同じになる(厳密には、下部水冷電極管台の近傍では異なる)。なお、計算条件として、断熱材の熱伝導率はヘリウムガス雰囲気中での有効熱伝導率を用いた。また、胴の外表面の熱伝達率は10kcal/hm²°Cとし、40°Cの大気へ放熱するものとした。

(a) 外胴の温度 T_2

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L \lambda_{12}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L \lambda_{23}} + \frac{1}{2\pi r_3 L \alpha}} \quad : \text{外胴への熱流束}$$

$$T_2 = T_1 - q \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L \lambda_{12}}$$

計算結果（反応管1本及び3本の場合の胴の温度）

| | | |
|----------------|------------------------|------|
| T_1 | 断熱材内表面温度 (°C) | 920 |
| T_4 | 室温 (°C) | 40 |
| r_1 | 断熱材内半径 (m) | 0.33 |
| r_2 | 外胴内半径 (m) | 0.5 |
| r_3 | 外胴外半径 (m) | 0.54 |
| λ_{12} | 断熱材熱伝導率 (kcal/hm°C) | 0.64 |
| λ_{23} | 外胴熱伝導率 (kcal/hm°C) | 17.3 |
| α | 外胴外表面熱伝達率 (kcal/hm²°C) | 10 |
| T_2 | 外胴内表面温度 (°C) | 239 |

(b) 壓力容器の設計温度

上記(a)での計算の結果、胴の内表面の温度は239°Cである。鏡板は胴に比べ外表面での熱流束が小さくなるため胴よりも温度が低くなる。そこで、設計温度は、安全のために余裕を持たせて胴及び鏡板とも500°Cとする。これにより水冷ジャケットへの通水が不能になった場合でも圧力容器の健全性を維持することができる。

(3) 圧力容器の強度計算

(a) 計算条件

計算条件は下表の通りとする。なお、設計圧力は高圧ガス取締法特定設備検査規則⁽⁸⁾に従って設定した。

| 項目 | 単位 | 要目 | |
|------|----|-----------------|-----|
| 適用法規 | — | 高圧ガス取締法特定設備検査規則 | |
| 流体 | — | ヘリウムガス | |
| 設計圧力 | 外胴 | kg/cm² | 50 |
| | 鏡 | kg/cm² | 50 |
| 設計温度 | 外胴 | °C | 500 |
| | 鏡 | °C | 500 |

(b) 脳の厚さ

脳の厚さは、「特定設備検査規則」第12条1項による厚さ t_1 (=2.5mm)と同規則第12条1項1号イ(1)(i)から求めた厚さ t_2 と比較して、大きい方の値が実際の脳の厚さ t_1 の値以下であることを確認する。 t_2 は次式で求める。

$$t_2 = \frac{PD_1}{200\sigma_*\eta - 1.2P}$$

ここで、 P : 設計圧力 [kg/cm²]

D_1 : 脳の内径 [mm]

σ_* : 許容引張応力 [kg/mm²]

η : 溶接継手の効率

計算結果（反応管1本及び3本の場合の脳の厚さ）

| 使用材料 | | SCMV2 |
|--------------------------------------|----------------------------------|-------|
| 設計圧力 | P (kg/cm ²) | 50 |
| 設計温度 | (°C) | 500 |
| 脳の内径 | D ₁ (mm) | 1000 |
| 許容引張応力 | σ_* (kg/mm ²) | 8.4 |
| 脳板の厚さ | t ₁ (mm) | 40 |
| 溶接継手の効率 | η | 1.0 |
| 最小厚さ | t ₂ (mm) | 2.5 |
| 最小厚さ | t ₂ (mm) | 30.9 |
| t ₁ 、t ₂ の大きい値 | t (mm) | 30.9 |
| $t_1 \geq t_2$ よって十分である。 | | |

(c) 鏡板の厚さ

鏡板の厚さは、「特定設備検査規則」第12条1項による厚さ t_1 (=2.5mm)と同規則第12条1項3号ロ(1)により求めた厚さ t_2 を比較し、大きい方の値が実際の鏡板の厚さ t_1 の値以下であることを確認する。 t_2 は次式で求める。

$$t_2 = \frac{PDK}{200\sigma_*\eta - 0.2P}$$

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right]$$

ここで、 P : 設計圧力 [kg/cm²]

D : 鏡板の内側の長径 [mm]

- K : 形状によって定まる数
 σ_s : 許容引張応力 [kg/mm^2]
 η : 溶接継手の効率
 h : 鏡板の内側の短径の2分の1

計算結果（反応管1本及び3本の場合の鏡板の厚さ）

| 使用材料 | SCMV2 | |
|---|-----------------------------|------|
| 設計圧力 P | (kg/cm^2) | 50 |
| 設計温度 | (°C) | 500 |
| 鏡板の内径の長径 D | (mm) | 1000 |
| 鏡板の内側の短径の2分の1 h | (mm) | 250 |
| 形状によって定まる係数 K | | 1 |
| 許容引張応力 σ_s | (kg/mm^2) | 8.4 |
| 鏡板の厚さ t _s | (mm) | 40 |
| 溶接継手の効率 η | | 1.0 |
| 最小厚さ t ₁ | (mm) | 2.5 |
| 最小厚さ t ₂ | (mm) | 30.0 |
| t ₁ , t ₂ の大きい値 t | (mm) | 30.0 |
| $t_s \geq t$ 、よって十分である。 | | |

(4) 機器仕様

水蒸気改質器の反応管が1本と3本の場合の仕様をTable 4.1とTable 4.2にそれぞれ示す。

Table 4.1 水蒸気改質器の反応管が1本の場合の仕様

| 項 目 | | 単 位 | 仕 様 |
|------------|---------|----------------------|--|
| 機 器 名 称 | | — | ヘリウムガス加熱器 |
| 形 式 | | — | 直接通電ヒータ管型 |
| 基 数 | | — | 1 |
| 設計交換熱量 | | kW/基 | 294 (Max 470) |
| 最高使用圧力 | | kg/cm ² G | 50 |
| 最高使用温度 | | °C | 500 |
| 伝熱面積 | | m ² /基 | 2.904 |
| 使用条件 | 流体名 | | ヘリウムガス |
| | 流量 | | kg/s 0.069 (Max 0.1) |
| | He温度 | 入 口 | °C 100 |
| | | 出 口 | °C 920 |
| | ヒータ管内流速 | | m/s 3.7 |
| | 圧力損失 | | kg/cm ² 0.001 |
| 主要寸法 | ライナー | 内 径 | mm 650 |
| | | 板 厚 | mm 5 |
| | 胴 | 内 径 | mm 1000 |
| | | 板 厚 | mm 40 |
| | ヒータ管 | 外 径 | mm 70 |
| | | 肉 厚 | mm 15 |
| | | 本 数 | — 6 |
| | | 長 さ | mm 3850 (有効伝熱部長さ) |
| | 全長又は全高 | | — 7500 ^H |
| 材 料 | 胴 | | SCMV2 |
| | ヒータ管 | | 黒鉛 |
| | ライナ | | インコロイ800H |
| | 内部断熱材 | | セラミックファイバー |
| 入力制御 装置 | 形 式 | | 3相サイリスタ制御方式 |
| | 数 量 | | 制御盤1式 電源盤1式 |
| | 定格入力 | | 3φ 6.6kV 50Hz |
| | 定格容量 | | kVA 550 |
| | 定格出力電流 | | A 2490 |
| | 寸 法 | | mm 制御盤 800 ^W ×900 ^D ×2050 ^H 電源盤 1500 ^W ×1000 ^D ×1500 ^H |

Table 4.2 水蒸気改質器の反応管が3本の場合の仕様

| 項目 | 単位 | 仕様 |
|--------|----------------------|--|
| 機器名称 | — | ヘリウムガス加熱器 |
| 形式 | — | 直接通電ヒータ管型 |
| 基 数 | — | 1 |
| 設計交換熱量 | kW/基 | 882 (Max 1400) |
| 最高使用圧力 | kg/cm ² G | 50 |
| 最高使用温度 | °C | 500 |
| 伝熱面積 | m ² /基 | 2.904 |
| 使用条件 | 流体名 | ヘリウムガス |
| | 流量 | kg/s 0.207 (Max 0.3) |
| | He温度 入口 | °C 100 |
| | 出口 | °C 920 |
| | ヒータ管内流速 | m/s 11.1 |
| | 圧力損失 | kg/cm ² 0.007 |
| 主要寸法 | ライナ 内径 | mm 650 |
| | 板厚 | mm 5 |
| | 胴 内径 | mm 1000 |
| | 板厚 | mm 40 |
| | ヒータ管 外径 | mm 70 |
| | 肉厚 | mm 15 |
| | 本数 | — 6 |
| | 長さ | mm 3850 (有効伝熱部長さ) |
| | 全長又は全高 | — 8000 ^H |
| | 材 料 | |
| ヒータ管 | 胴 | — SCMV2 |
| | ヒータ管 | — 黒鉛 |
| | ライナ | — インコロイ800H |
| | 内部断熱材 | — セラミックファイバー |
| 入力制御装置 | 形 式 | — 3相サイリスタ制御方式 |
| | 数 量 | — 制御盤1式 電源盤1式 |
| | 定格入力 | — 3φ 6.6kV 50Hz |
| | 定格容量 | kVA 1500 |
| | 定格出力電流 | A 4310 |
| | 寸 法 | mm 制御盤 2400 ^W ×900 ^D ×2050 ^H 電源盤 4500 ^W ×1000 ^D ×1500 ^H |

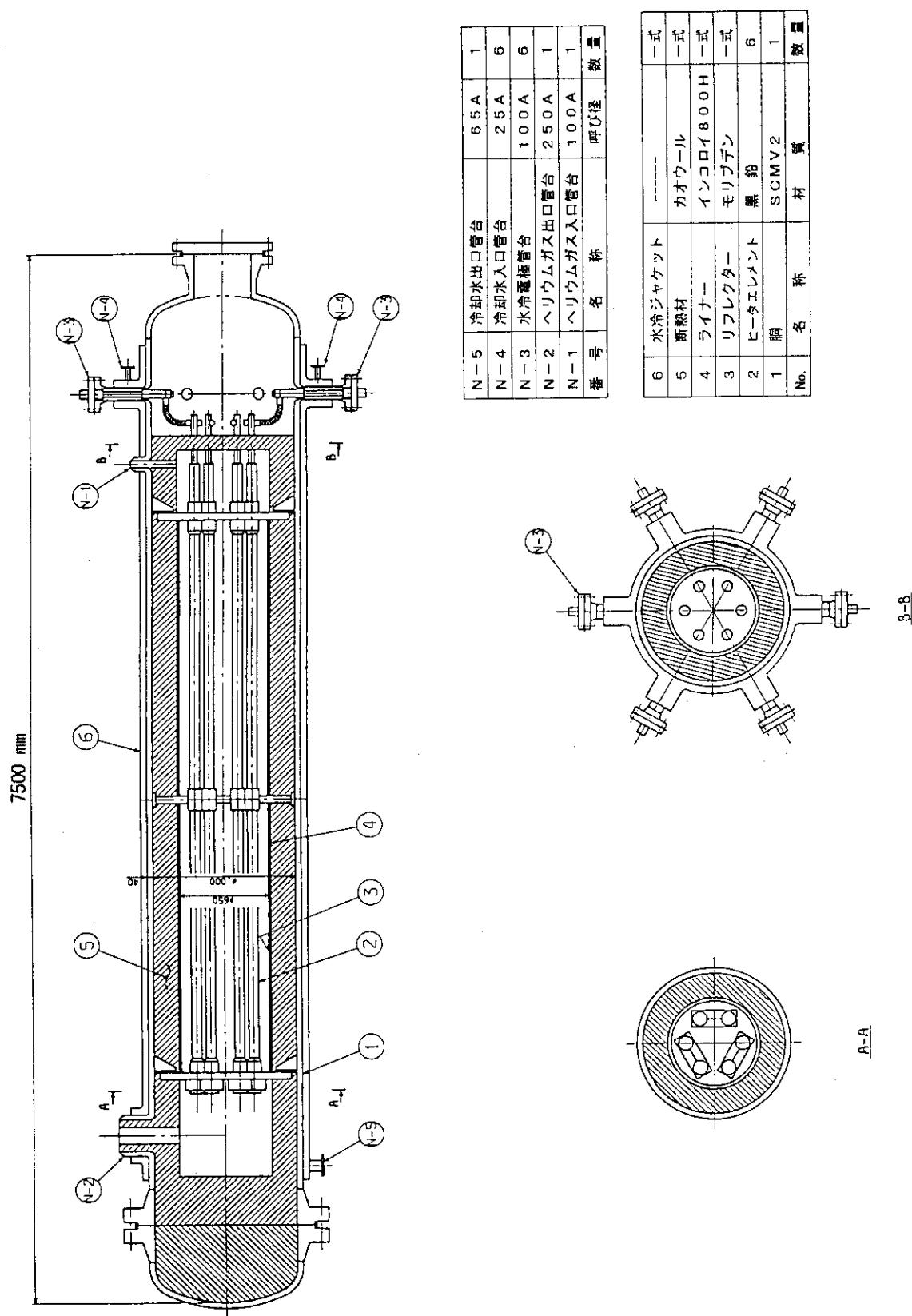


Fig. 4.1 ヘリウムガス加熱器の構造一反応管が1本の場合

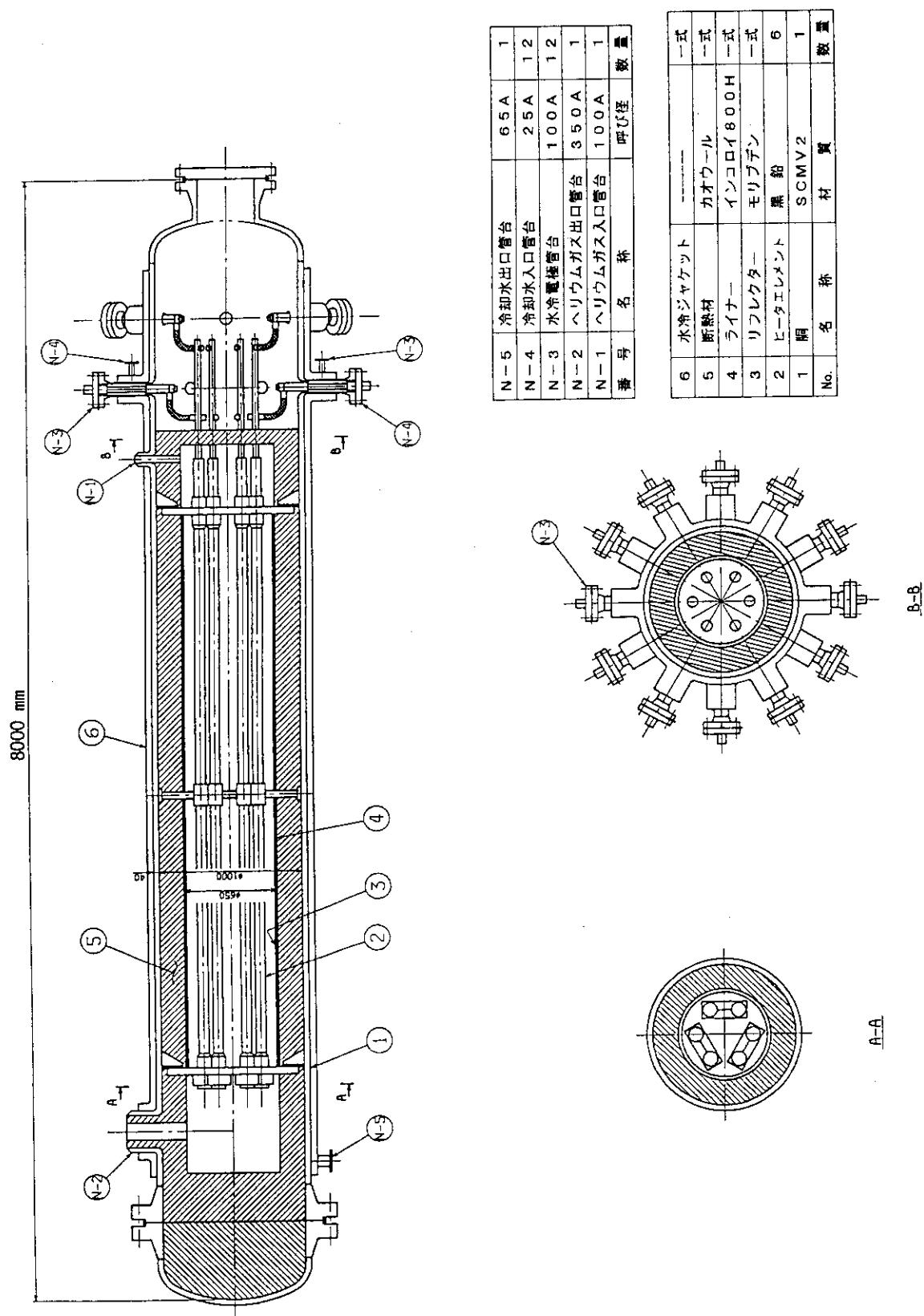


Fig. 4.2 ヘリウムガス加熱器の構造—反応管が3本の場合

5. ヘリウムガス予熱器の設計

予熱器は流量計手前に設置してヘリウムガス温度を一定に調節し、循環流量の計測精度を維持するのに用いる。このため、H E N D E Lでの経験からヘリウムガスを昇温して一定温度に調節するのが容易な40°C～100°Cの昇温範囲を目安とした。また、その構造はH E N D E Lで実績のあるM₁ループの加熱器H₁とほぼ同じ構造とし、耐熱金属インコロイ800H製ヒータ管を直接通電で発熱させる。以下に、予熱器のヒータ容量(発熱量)、管内流速、レイノルズ数、熱伝達率、圧力損失及びヒータ管の最高温度等の熱流動計算結果、圧力容器等の構造強度計算結果等について述べ、確定した仕様を記す。

5. 1 热流動に関する性能検討

(1) 計算条件

予熱器の構造はH E N D E LのM₁ループのH₁加熱器と基本的に同じものとする。ただし、三相電源の不平衡を防ぎ、ヒータ管の通電電流を低減させるためにヒータ管の本数を6本(H₁は15本)にし、ヒータ管直径を小さくした。また、昇温範囲を40°Cとし、できるだけ熱的余裕を持たせて性能を長期にわたって維持することを前提とした。

(a) ヒータ管の条件

| | |
|--------|---------------------|
| 材 質 | : インコロイ800H |
| 管 径 | : 外径27.2mm、内径20.2mm |
| 本 数 | : 6本 |
| 有効伝熱長さ | : 1.024m/本 |
| 使用限界温度 | : 700°C |

(b) ヘリウムガスの熱流動条件

| | |
|--------|--|
| 入口圧力 | : 40.3kg/cm ² G |
| 入口温度 | : 60°C |
| 出口温度 | : 100°C |
| 流 量 | : 0.207kg/s |
| 許容圧力損失 | : 0.1kg/cm ² (ヘリウムガス循環機の昇圧能力から) |

(2) 計算方法^(5, 6, 7)

性能計算は、ヒータ容量、管内流速、レイノルズ数、熱伝達率、圧力損失及びヒータ最高温度について行う。ここでは計算手法のみについて述べ、実際の数値計算過程は省略する。

(a) ヒータ容量Q [kcal/h]

$$Q = 3600 G C_p (t_o - t_i)$$

ここで、 G : ヘリウムガス流量 [kg/s]

C_p : ヘリウムガス低圧比熱 [kcal/kg°C]

t_o : ヘリウムガス出口温度 [°C]

t_i : ヘリウムガス入口温度 [°C]

ヒータ1本当たりの容量はQをヒータの本数で除す。なお容量を仕事率(kW)で表す場合は860.11で除す。

(b) ヒータ管内の平均流速 U_1 [m/s]

$$U_1 = \frac{G}{\gamma_1} \times \frac{4}{\pi D_1^2} \times \frac{1}{n}$$

ここで、 D_1 : ヒータ管の内径 [m]

G : ヘリウムガス流量 [kg/s]

n : ヒータ管の本数

γ_1 : ヘリウムガスの比重 [kg/m³]

γ_1 はヘリウムガスの入口温度と出口温度の算術平均値(80°C)を基に算出する。

(c) ヒータ管内を流れるヘリウムガスのレイノルズ数Re

$$Re = \frac{U_1 D_1}{\nu}$$

ここで、 U_1 : (b)で求めた平均流速 [m/s]

ν : 動粘性係数 [m²/s]

ν はヘリウムガスの入口温度と出口温度の算術平均値(80°C)を基に算出する。

(d) ヘリウムガスとヒータ管の内壁との間の熱伝達率 α [kcal/m²h°C]

$$\alpha = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda}{D_1}$$

ここで、 Re : (c)で求めたレイノルズ数

Pr : ヘリウムガスのプラントル数

λ : ヘリウムガスの熱伝導率 [kcal/mh°C]

λ はヘリウムガスの入口温度と出口温度の算術平均値(80°C)を基に算出する。

(e) 圧力損失 ΔP [kg/cm²]

ヘリウムガスのヒータ管直管部での圧力損失 ΔP_1 は次式で算出する。

$$\Delta P_1 = f \frac{l}{D_1} \times \frac{\gamma_1 U_1^2}{2g} \times 10^{-4}$$

$$f = \frac{0.3163}{Re^{0.25}}$$

ここで、 f : 摩擦損失係数

g : 重力の加速度 [m/s^2]

ℓ : ヒータ管の長さ ($=3.85$) [m]

Re : (c)で求めたレイノルズ数

U_1 : (b)で求めた管内平均流速 [m/s]

γ_1 : (b)で求めた比重 [kg/m³]

ヒータ管入口の縮小流部 ΔP_2 、ヒータ管出口の拡大流部の圧力損失 ΔP_3 は次式で算出する。

$$\Delta P_{2,3} = \zeta \frac{\gamma_1 U_1^2}{2g} \times 10^{-4}$$

ここで、 ζ : 縮小流部又は拡大流部の損失係数 ($=1$)

γ_1 : (b)で求めた比重 [kg/m³]

U_1 : (b)で求めた管内平均流速 [m/s]

ヒータ管での圧力損失 ΔP は、

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

(f) ヒータの最高温度

ヒータ管はヘリウムガスの出口部で最高温度になる。最高温度はメーカーが提示している使用限界温度($700^\circ C$)以下にする。ヒータ管出口部の管内面温度 t_{max} [$^\circ C$] は次式で算出する。

$$t_{max} = \frac{Q}{\pi D_1 \ell \alpha n} + t_0$$

ここで、 t_0 : ヘリウムガス出口温度 [$^\circ C$]

n : ヒータ管の本数

(3) 計算結果

| | |
|---------|--|
| ヒータ容量 | 43.2kW (7.2kW/本) |
| 管内流速 | 20.2m/s |
| レイノルズ数 | 99165 |
| 熱伝達率 | 1445kcal/m ² h°C |
| 圧力損失 | 0.04kg/cm ² (<0.1kg/cm ²) |
| ヒータ最高温度 | 166°C (<700°C) |

この結果が示すように、定格運転条件では本予熱器は温度的に相当な余裕がある。これは、将来の利用を見越して発熱量に余裕を持たせたためで、熱出力は100kWまで高めることができる。

5. 2 機器仕様

予熱器の基本仕様を下表に記す。なお、強度計算は4.2節の「構造設計」で述べたヘリウムガス加熱器の圧力容器と同じなので省略する。Fig. 5.1に予熱器の概要を示す。現在、さらに小型化するための検討を進めている。

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------|---------------------------|
| 予 熱 器 | 本 体 | 形 式 | 直接通電パイプヒータ、外部保温方式 |
| | | 数 量 | 1 基 |
| | | 流 体 | ヘリウムガス |
| | | 流 量 | 0.207 Kg/s |
| | | 圧 力 | 40.3 kg/cm ² G |
| | | 温 度 | 60°C / 100°C (入口/出口) |
| | | 伝 熱 量 | 43.2 KW (Max. 100kW) |
| | | 設 計 圧 力 | 50 kg/cm ² G |
| | | 設 計 温 度 | 500°C (圧力容器) |
| | | 材 質 | 圧力容器 SCMV2 |
| ヒ タ エ レ メン ト | ヒ タ エ レ メン ト | 外 形 寸 法 | 約1080° × 40° × 4700° |
| | | 配管接続口径 | 100A |
| | | 制御方式 | 出口温度検出入力制御形 |
| | | 材 質 | インコロイ 800H |
| | | 外 径 | 27.2 mm |
| 制 御 装 置 | 制 御 装 置 | 内 径 | 20.2 mm |
| | | 長 さ | 1815 mm |
| | | 有効発熱部長さ | 1024 mm |
| | | エレメント本数 | 6 本 |

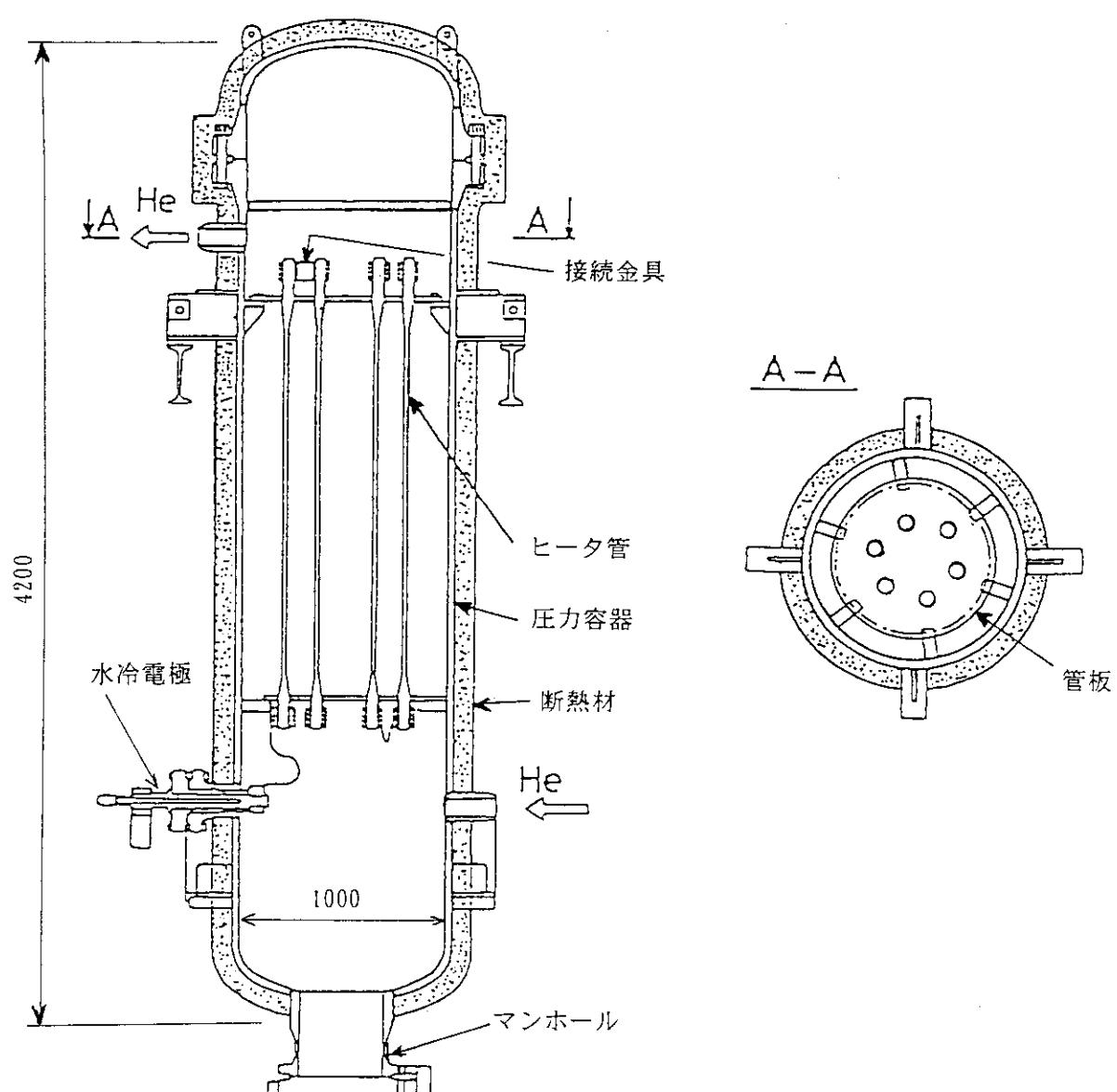


Fig. 5.1 予熱器の概要

6. あとがき

HTTRの最初の熱利用系として設計検討が進められている水蒸気改質水素製造システムの炉外実証試験を実施するために、試験装置の設計検討を行った。本報告では、試験装置のなかで原子炉システムを模擬し、約900°Cの高温ヘリウムガスを水蒸気改質システムに供給するヘリウムガス供給系の構成、機器仕様等についてまとめた。とくに、ヘリウムガス供給系は、コスト低減の観点からHENDELのM₁ループ構成機器を移設・再利用することを基本方針とし、HENDEL全設備を調査して移設・再利用可能な機器を評価・整理した。また、新規に製作する必要のあるヘリウムガス高温加熱器等の熱流動及び構造強度の評価を行い、ヘリウムガスを最高920°Cまで加熱する高温加熱器については黒鉛製ヒータ管による直接通電発熱で最高882kW、予熱器については耐熱金属製ヒータ管による直接通電発熱で約43kWの発熱量の仕様と構造を定めた。今後、本設計を基にして、機器の配置計画、基礎工事要領等の策定を実施する。

謝　　辞

本設計に当たっては、三菱重工業（株）長崎造船所 山田誠也氏から多大な助力をいただいた。核熱利用研究部 富本喜晟部長からは設計の進展について、熱利用技術研究室 秋野詔夫室長からは本報告の内容について貴重な助言をいただいた。数土幸夫次長からは設計の進め方、評価方法等について適切な助言と励ましをいただき、今後の製作に向けて著者一同の士気が高まった。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 日野竜太郎、鈴木邦彦、羽賀勝洋 他7名：「HENDELによるHTTR熱利用系炉外実証試験の検討」、JAERI-Review 95-016(1995).
- (2) HTTR原子炉開発室：私信（第5回熱利用系実証試験検討委員会資料、平成6年12月26日）
- (3) K. HADA et al. : "Plant Arrangement and Operational Procedure of HTTR with Heat Utilization System", 1st Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme of Design and Evaluation of Heat Utilization Systems for the HTTR, Tokai Research Establishment of the JAERI, 9-11 Nov.(1994).
- (4) S. Saito et al. : "Design of High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI 1332(1994).
- (5) 日本機械学会編：「技術資料－流体の熱物性値集」、p. 35-59(1991).

6. あとがき

HTTRの最初の熱利用系として設計検討が進められている水蒸気改質水素製造システムの炉外実証試験を実施するために、試験装置の設計検討を行った。本報告では、試験装置のなかで原子炉システムを模擬し、約900°Cの高温ヘリウムガスを水蒸気改質システムに供給するヘリウムガス供給系の構成、機器仕様等についてまとめた。とくに、ヘリウムガス供給系は、コスト低減の観点からHENDELのM₁ループ構成機器を移設・再利用することを基本方針とし、HENDEL全設備を調査して移設・再利用可能な機器を評価・整理した。また、新規に製作する必要のあるヘリウムガス高温加熱器等の熱流動及び構造強度の評価を行い、ヘリウムガスを最高920°Cまで加熱する高温加熱器については黒鉛製ヒータ管による直接通電発熱で最高882kW、予熱器については耐熱金属製ヒータ管による直接通電発熱で約43kWの発熱量の仕様と構造を定めた。今後、本設計を基にして、機器の配置計画、基礎工事要領等の策定を実施する。

謝　　辞

本設計に当たっては、三菱重工業（株）長崎造船所 山田誠也氏から多大な助力をいただいた。核熱利用研究部 宮本喜晟部長からは設計の進展について、熱利用技術研究室 秋野詔夫室長からは本報告の内容について貴重な助言をいただいた。数土幸夫次長からは設計の進め方、評価方法等について適切な助言と励ましをいただき、今後の製作に向けて著者一同の士気が高まった。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 日野竜太郎、鈴木邦彦、羽賀勝洋 他 7 名 : 「HENDELによるHTTR熱利用系炉外実証試験の検討」、JAERI-Review 95-016(1995).
- (2) HTTR原子炉開発室 : 私信（第5回熱利用系実証試験検討委員会資料、平成6年12月26日）
- (3) K. HADA et al. : "Plant Arrangement and Operational Procedure of HTTR with Heat Utilization System", 1st Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme of Design and Evaluation of Heat Utilization Systems for the HTTR, Tokai Research Establishment of the JAERI, 9-11 Nov.(1994).
- (4) S. Saito et al. : "Design of High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI 1332(1994).
- (5) 日本機械学会編 : 「技術資料－流体の熱物性値集」、p. 35-59(1991).

6. あとがき

HTTRの最初の熱利用系として設計検討が進められている水蒸気改質水素製造システムの炉外実証試験を実施するために、試験装置の設計検討を行った。本報告では、試験装置のなかで原子炉システムを模擬し、約900°Cの高温ヘリウムガスを水蒸気改質システムに供給するヘリウムガス供給系の構成、機器仕様等についてまとめた。とくに、ヘリウムガス供給系は、コスト低減の観点からHENDELのM₁ループ構成機器を移設・再利用することを基本方針とし、HENDEL全設備を調査して移設・再利用可能な機器を評価・整理した。また、新規に製作する必要のあるヘリウムガス高温加熱器等の熱流動及び構造強度の評価を行い、ヘリウムガスを最高920°Cまで加熱する高温加熱器については黒鉛製ヒータ管による直接通電発熱で最高882kW、予熱器については耐熱金属製ヒータ管による直接通電発熱で約43kWの発熱量の仕様と構造を定めた。今後、本設計を基にして、機器の配置計画、基礎工事要領等の策定を実施する。

謝　　辞

本設計に当たっては、三菱重工業（株）長崎造船所 山田誠也氏から多大な助力をいただいた。核熱利用研究部 宮本喜晟部長からは設計の進展について、熱利用技術研究室 秋野詔夫室長からは本報告の内容について貴重な助言をいただいた。数土幸夫次長からは設計の進め方、評価方法等について適切な助言と励ましをいただき、今後の製作に向けて著者一同の士気が高まった。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 日野竜太郎、鈴木邦彦、羽賀勝洋 他 7 名 : 「HENDELによるHTTR熱利用系炉外実証試験の検討」、JAERI-Review 95-016(1995).
- (2) HTTR原子炉開発室 : 私信（第5回熱利用系実証試験検討委員会資料、平成6年12月26日）
- (3) K. HADA et al. : "Plant Arrangement and Operational Procedure of HTTR with Heat Utilization System", 1st Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme of Design and Evaluation of Heat Utilization Systems for the HTTR, Tokai Research Establishment of the JAERI, 9-11 Nov.(1994).
- (4) S. Saito et al. : "Design of High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI 1332(1994).
- (5) 日本機械学会編 : 「技術資料－流体の熱物性値集」、p. 35-59(1991).

- (6) 日本機械学会編：「伝熱工学資料－第4版」、 p. 56(1986).
- (7) R. L. Daugherty and J. B. Franzini : "Fluid Mechanics with Engineering Applications", McGRAW-HILL, 6th Edition, p.212-222(1965).
- (8) 高圧ガス保安協会編：「高圧ガス取締法規集（第21次改訂版）」、 p. 413-420(1993).

[付録] ヘリウムガス冷却器の仕様

| 項目 | 単位 | 仕様 | |
|------------------|---|--|---|
| 機器名称 | — | ヘリウムガス冷却器 | |
| 形式 | — | プレートフィン型 | |
| 最高使用圧力(低温側/高温側) | kg/cm ² G | 7 / 50 | |
| 最高使用温度(低温側/高温側) | °C | 300 / 400 | |
| 基 数 | — | 1 | |
| 材 料 | 胴 チューブプレート | SUS310S SUS310S | |
| 水蒸気改質器の反応管が1本の場合 | | | |
| 設計交換熱量 | KW/基 | 90 | |
| 伝熱面積 | m ² /基 | 1.5 / 1.2 | |
| 使用条件 | 流体名(低温側/高温側) 流量(低温側/高温側) 出入口温度 (低温側/高温側) 伝熱部流速 圧力損失(低温側/高温側) | — kg/s °C °C m/s kg/cm ² | 水/ヘリウム 1.71 / 0.069 32 / 300 42 / 50 1.00 / 10.1 0.14 / 0.06 |
| 水蒸気改質器の反応管が3本の場合 | | | |
| 設計交換熱量 | KW/基 | 270 | |
| 伝熱面積 | m ² /基 | 3.9 / 3.6 | |
| 使用条件 | 流体名(低温側/高温側) 流量(低温側/高温側) 出入口温度 (低温側/高温側) 伝熱部流速 圧力損失(低温側/高温側) | — kg/s °C °C m/s kg/cm ² | 水 / ヘリウム 5.14 / 0.207 32 / 300 42 / 50 1.15 / 10.1 0.22 / 0.08 |