

JAERI-Review

95-016



HENDELによるHTTR熱利用系 炉外実証試験の検討

1995年10月

日野竜太郎・鈴木邦彦・羽賀勝洋・根小屋真一・深谷 清・清水三郎
小貫 薫・高田昌二・茂木春義・数土幸夫

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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

H E N D E L による H T T R 热利用系炉外実証試験の検討

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

日野竜太郎・鈴木 邦彦・羽賀 勝洋・根小屋真一
深谷 清・清水 三郎・小貫 薫・高田 昌二
茂木 春義・数土 幸夫

(1995年8月30日受理)

HTTR 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。HTTR に熱利用系を接続するのに先立ち、熱利用系及び構成機器の性能、熱利用系と原子炉システムとの整合性、安全性能などを検証する必要がある。そこで、HENDEL を用いた炉外実証試験を提案し、これまで熱利用系の候補として挙げられてきた水素／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システム、ガスタービン発電等について、R & D の現状、技術的問題点、システムの概要などについて検討を行った。本報告はその検討結果を示すものであり、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。

Critical Review and Discussion on HENDEL Demonstration Tests
for HTTR Heat Utilization Systems

Ryutaro HINO, Kunihiro SUZUKI, Katsuhiro HAGA, Shinichi NEKOYA
Kiyoshi FUKAYA, Saburo SHIMIZU, Kaoru ONUKI, Shoji TAKADA
Haruyoshi MOGI and Yukio SUDO

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 30, 1995)

One of the key objectives of the HTTR is to demonstrate effectiveness of high-temperatute nuclear heat utilization. Prior to connect a heat utilization system to the HTTR, it is needed to demonstrate system and components performances of the heat utilization system, integrity between the HTTR and the heat utilization systems, safety performance etc.. The HENDEL demonstration test to perform the tests effectively has been proposed, and present status of the R&D, technical problems, system outlines etc. on following systems proposed for the HTTR heat utilization systems have been inspected and discussed:

- Steam-reforming hydrogen and methanol co-production system
(Steam reforming system),
- Thermo-chemical water splitting by Iodine-Sulfur(IS) process,
- High-temperature electrolysis of steam,
- Power generation by gas turbine,

In this report, a critical review and discussions on above systems were described in detail, and also it was showed that general purpose safety equipments and technologies such as a high-temperature isolation valve and a steam generator with a passive cooling function, which would be useful for future heat utilization systems, could be verified and improved through demonstration tests of the steam reforming system with the HENDEL because the steam reforming system could be designed and fabricated relativery

easier and be installed in the HENDEL earlier than other heat utilization systems.

Keywords : Nuclear Heat Utilization, HTTR, HENDEL, Demonstration Tests, Steam Reforming System, Iodine-sulfur Process, High-temperature Electrolysis, Gas Turbine, Critical Review, Discussions on HTTR Heat Utilization Systems

目 次

1.はじめに	1
2.熱利用系炉外実証試験の必要性	1
3.水蒸気改質による水素製造	2
3.1 水蒸気改質システムの選定理由	2
3.2 開発の現状	3
3.3 炉外実証試験の内容	7
3.4 試験条件	9
3.5 炉外実証試験装置の構成	10
3.6 設計基本方針	12
3.7 まとめ	15
4.熱化学法による水素製造	26
4.1 はじめに	26
4.2 実験室規模の装置による試験例	26
4.3 技術的問題点	28
4.4 大型装置による試験計画の検討	28
4.5 まとめ	35
5.高温水蒸気電解法による水素製造	55
5.1 はじめに	55
5.2 円筒型電解要素による試験	55
5.3 平板型電解要素による試験	58
5.4 H T T R 接続プラントの試案	60
5.5 まとめ	61
6.ガスタービン発電	73
6.1 開発の現状	73
6.2 技術的課題	75
6.3 試験計画(案)	77
6.4 まとめ	81
7.高温隔離弁	84
7.1 開発の現状	84
7.2 技術的問題点	86
7.3 H T T R 用高温隔離弁の要求事項	87
7.4 試験計画	88
7.5 まとめ	91
8.結言	96

謝 辞	97
参考文献	97
付 錄 1 水蒸気改質システム炉外実証試験装置の機器仕様	99

Contents

1. Introduction.....	1
2. Necessity of Outpile Demonstration Test	1
3. Steam Reforming System.....	2
3.1 Selection Reason of Steam Reforming System.....	2
3.2 Present Status of R&D	3
3.3 Contents of Outpile Demonstration Test.....	7
3.4 Demonstration Test Conditions	9
3.5 Organization of Outpile Demonstration Test Installation	10
3.6 Principle of Basic Design	12
3.7 Conclusion.....	15
4. Thermo-chemical Water Splitting by Iodine-Sulfur(IS) Process.....	26
4.1 Introduction.....	26
4.2 Representative Test Results Obtained by Laboratory-scale Test Apparatus.....	26
4.3 Technological Problems.....	28
4.4 Test Plan with Pilot-plant.....	28
4.5 Conclusion.....	35
5. High-temperature Electrolysis of Steam.....	55
5.1 Introduction.....	55
5.2 Test with a Electrolysis Tube	55
5.3 Test with a Planar Cell	58
5.4 Tentative Plan of Pilot Plant Connected to HTTR	60
5.5 Conclusion.....	61
6. Power Generation by Gas Turbine	73
6.1 Present Status of the R&D	73
6.2 Technical Problems.....	75
6.3 Test Plan	77
6.4 Conclusion.....	81
7. High-temperature Isolation Valve.....	84
7.1 Present Status of the R&D	84
7.2 Technical Problems.....	86
7.3 Requests for High-temperature Isolation Valve of HTTR	87
7.4 Test Plan	88
7.5 Conclusion.....	91

8. Concluding Remarks.....	96
Acknowledgements.....	97
References.....	97
Appendix 1 Specification of Outpile Demonstration Test Installation for Steam Reforming System.....	99

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、システムの概要などについて検討を行った。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。本報告は、炉外実証試験について検討を進めてきた成果をまとめたもので、各項目毎に技術的課題、HENDELでの炉外実証試験の早期実施の可否等を述べている。

2. 热利用系炉外実証試験の必要性

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。水蒸気改質システム、熱化学法などの化学プラントやガスタービンの原子炉システムへの接続は世界で初めての試みであり、この試みの成否は、将来のエネルギー構想に大きな影響を与えるものである。このため、原子炉接続システムの設計と並行して、設計妥当性の確認、安全技術の高度化等のための炉外実証試験が不可欠である。

炉外実証試験を、低予算で、しかも効率的に行うにはHENDELの利用が極めて有利である。HENDELは1983年にループの完成以来、HTTR建設のための実証試験を行ってきた。構成機器の一部は10年以上の運転で老朽化が著しいが、内部機器の交換・補修等で熱利用系炉外実証試験に対応することができる。HENDELはHTTRの運転条件を模擬することを前提として構成されており、炉外実証試験で重要なHTTRの通常運転、過渡時／トリップ時の原子炉側の条件を十分に模擬することができる。

HENDELを利用したHTTR熱利用系炉外実証試験の主要目的は以下の通りである。

- ・原子炉に熱利用系を接続したシステムの特性を調べ、技術的整合性を確認するとともに、設計解析・安全性評価コードの検証と高度化を行い、システムの最適化と合理化をはかる。
- ・システム過渡時／トリップ時の運転・制御技術、安全技術を検証・蓄積し、それらの高度化と合理化をはかる。
- ・試験を通してHTTR熱利用系建設のための安全審査対応データを取得・蓄積する。
- ・HTTR熱利用系運転のための経験・ノウハウを蓄積する。

炉外実証試験は、いわば工学的実現性を確証するための試験であり、炉外実証試験、HTTR実証試験を通して核熱の安全で有効な利用という新しい技術が開拓され、同時に原子力の有用性を実証できるものと考えられる。

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、システムの概要などについて検討を行った。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。本報告は、炉外実証試験について検討を進めてきた成果をまとめたもので、各項目毎に技術的課題、HENDELでの炉外実証試験の早期実施の可否等を述べている。

2. 热利用系炉外実証試験の必要性

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。水蒸気改質システム、熱化学法などの化学プラントやガスタービンの原子炉システムへの接続は世界で初めての試みであり、この試みの成否は、将来のエネルギー構想に大きな影響を与えるものである。このため、原子炉接続システムの設計と並行して、設計妥当性の確証、安全技術の高度化等のための炉外実証試験が不可欠である。

炉外実証試験を、低予算で、しかも効率的に行うにはHENDELの利用が極めて有利である。HENDELは1983年にループの完成以来、HTTR建設のための実証試験を行ってきた。構成機器の一部は10年以上の運転で老朽化が著しいが、内部機器の交換・補修等で熱利用系炉外実証試験に対応することができる。HENDELはHTTRの運転条件を模擬することを前提として構成されており、炉外実証試験で重要なHTTRの通常運転、過渡時／トリップ時の原子炉側の条件を十分に模擬することができる。

HENDELを利用したHTTR熱利用系炉外実証試験の主要目的は以下の通りである。

- ・原子炉に熱利用系を接続したシステムの特性を調べ、技術的整合性を確認するとともに、設計解析・安全性評価コードの検証と高度化を行い、システムの最適化と合理化をはかる。
- ・システム過渡時／トリップ時の運転・制御技術、安全技術を検証・蓄積し、それらの高度化と合理化をはかる。
- ・試験を通してHTTR熱利用系建設のための安全審査対応データを取得・蓄積する。
- ・HTTR熱利用系運転のための経験・ノウハウを蓄積する。

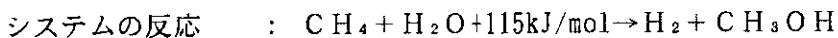
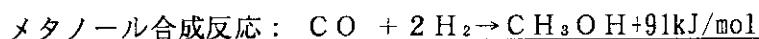
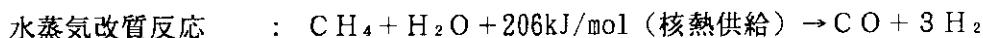
炉外実証試験は、いわば工学的実現性を確証するための試験であり、炉外実証試験、HTTR実証試験を通して核熱の安全で有効な利用という新しい技術が開拓され、同時に原子力の有用性を実証できるものと考えられる。

3. 水蒸気改質による水素製造

核熱エネルギーの利用効率を格段に高め、かつ、核熱エネルギーの利用分野を拡大する観点から、高温ガス炉を熱源として天然ガス（メタン）と水から水素とメタノールを製造する核熱利用システム（水蒸気改質システム）は、核熱エネルギーを利用して輸送・貯蔵が可能なエネルギー媒体を製造する極めて有効な方法である。

本システムは次の二つの反応から構成される。

－反応系（水蒸気改質反応とメタノール合成反応の組合せ）



水蒸気改質反応で合成ガスを製造し、その合成ガスからメタノールを製造する。このとき、水蒸気改質反応ではメタノール合成に必要な量以上の水素が発生するため、本システムではメタノールとともに水素も同時に製造することができる。

以下に、本システムの選定理由を含む開発の現状と炉外実証試験計画について述べる。

3. 1 水蒸気改質システムの選定理由

水蒸気改質システムの選定理由は、

- －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

に大別される。以下にこれらの詳細を記す⁽¹⁾。

(1) 安全技術、運転・制御技術等の汎用性

- (a) 多くの化学反応プラントは吸熱反応を伴っており、HTTR熱利用系としての水蒸気改質反応も同様に大きな吸熱を伴うので、ここで培った技術は高温ガス炉に他の化学反応システムを接続するときに応用できる。
- (b) 基本系統構成は、熱化学法、高温水蒸気電解法などの水素製造システムと共通であるため、得られた運転制御技術、安全技術は熱利用系としての他の水素製造法などの化学反応システムに応用可能である。

(2) 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

- (a) 製品としての水素とメタノールに潜在的需要が期待できる。
 - ・製品としての水素
 - －究極のクリーンエネルギーとして期待される。

(注) 現時点の出荷は堅調であり、そのクリーンさが改めて見直されている。

・製品としてのメタノール

- 21世紀前半を中心に、SO_x、NO_x等の放出が少ない低公害液体燃料として石油に代わる燃料として注目されている。
- エチレン等を製造するC1化学原料としての利用も期待される。(Fig. 3.1 参照)
(全石油需要の5%程度が期待できる)

(注1) MTBE(含酸素ガソリンブレンド基剤)の生産増大等により1994年からメタノール価格が急上昇⁽²⁾

(注2) 1995年以降も順調な需要拡大が期待され、プラントの新設、休止プラントの再稼働、アンモニアプラントのメタノールへの転換、現有プラントの能力増強などが行われている⁽²⁾。

(b) CO₂削減効果

水蒸気改質器からの副生成物としてのCO、CO₂は通常は大気に放出するが、本システムではメタノールに転換して有効利用するので、製造過程からのCO₂放出がない。

(3) HTTRへの早期接続

HTTR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年程度の間に設計検討、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。

水蒸気改質システムは、システム及び構成機器については技術基盤がある程度確立しているので(他の水素製造法は要素技術の研究段階)、HTTRに接続するうえで、機器仕様・構造、全体システムの構築が比較的容易であり、安全性に関する問題点を明確にしやすい。また、水蒸気改質システムのR&Dは全面的な開発研究ではなく、高温ガス炉システムに接続するときの整合性をはかる技術の確立、改質反応器等の改良と性能向上などが主体であり、機器等の製作には現状技術で対応できる。

3. 2 開発の現状

3. 2. 1 原子炉接続システムの設計検討⁽³⁾

HTTRに接続する水蒸気改質システムは、原子炉システムと水蒸気改質システムという二つの異なるシステムを結合しており、従来の化石燃料燃焼加熱方式とは次の点で大きく異なる。

- 1)熱源は核熱であり、核熱は高温高圧のヘリウムガスを媒体として水蒸気改質システムに伝えられる。
→化石燃料方式では、改質反応管周囲でのガス燃焼による直接輻射及び対流伝熱で熱を伝える。
- 2)原子炉システムからの二次ヘリウムガスは閉ループ構成

- 化石燃料方式では、燃焼ガスは大気放出
- 3)核熱利用システムの運転制御は原子炉システムに影響を及ぼさないことを要件とする。
- 化石燃料方式は、水蒸気改質システムのみの単独運転制御
- 4)原子炉接続システムとしての事故時安全技術の確保
- 化石燃料方式とは異なるシステム構成、機器構造が必要

このような相違から、必ずしも従来方式をそのまま適用することができないため、

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

が必要である。このため、高温工学試験研究炉開発部における設計検討⁽⁴⁾では、

- 水蒸気改質器の性能向上
- システムの起動方法
- HTTRと水蒸気改質システムとの接続
- インターフェース

等を中心として検討作業を進めてきた。本節では、文献〔3、4、5〕を参考にして主要な構成をここに再録する。参考図のFig. A1 にHTTRに接続する場合の水蒸気改質システムの主系統の構成を示す。中間熱交換器（IHX）をインターフェースとして、二次ヘリウムガスを水蒸気改質システムに利用する構成である。このシステムでは、二次ヘリウムガスの冷却過程で生じる水蒸気を圧縮機と直結した蒸気タービンに導き、水蒸気改質器からの生成ガスを圧縮してメタノール合成反応器に送る。このフローシートを基にしたHTTR熱利用系の配置（案）をFig. A2 に、二次ヘリウムガス配管の敷設経路（案）をFig. A3 に、HTTRと熱利用系との接続経路（案）をFig. A4 にそれぞれ示す。

また、水蒸気改質反応器については、伝熱性能を向上させて小型化等をはかるために、バッフル板、ワイヤーネットなどの伝熱促進を施したバイオネット型反応管を組み込んだ構造としている。

水蒸気改質システム側の配管破断事故時等において、二次ヘリウムガス系の安全性を確保する手段として、HTTR開発部利用系グループではヘリウムガスの受動的冷却が可能な蒸気発生器をヘリウムガス系に設置する検討を進めている。現在の検討では、蒸気発生器と蒸気ドラムを一体化して、電源喪失時の給水停止、システム側配管破断時などにおける圧力低下などの事象においても蒸気発生器内の圧力低下（沸点の低下）を引き起こすことなく、高温ヘリウムガスの除熱で発生した水蒸気をドラム上部の放熱器で自然空冷凝縮させる機能を有することとし、システム側事故時においても原子炉側の緊急停止を回避することを目指している。

3. 2. 2 水蒸気改質用触媒の反応試験

水素／メタノール製造プロセス開発の一環として、水蒸気改質反応触媒の反応試験等の試験（反応温度低減化実験）を進めている。試験は、第一期としてメタンの水蒸気改質による合成ガス（H₂、CO）製造用触媒の試作とその反応試験（触媒試験）を行っており、反応温度低減化に伴い増加する未反応メタン（CH₄）を合成ガスから分離して反応系に戻す試験（ガス分離

試験)を準備中である。Fig. 3.2に試験装置の系統を示す。試験装置は、触媒反応試験部(小型反応試験部)と反応促進プロセス試験部(中型反応試験部)から構成される。それぞれの試験部では、

- ・小型反応試験部(水素製造能力 最高 0.5 l/min)
 - 試作触媒の反応試験(触媒反応の定量化)
 - 炭素析出条件の把握
- ・中型反応試験部(水素製造能力 最高 10 l/min)
 - 水蒸気改質システムの運転・制御性試験
 - 合成ガスと未反応原料メタンの分離と未反応原料メタンの反応系へのリサイクルシステム試験

を中心とした試験を行う。

小型試験部を用いた触媒試験では、アルミナ多孔質粒子にNi、Rhを担持させた触媒を実験室で試作し、その反応試験を進めている。試験では、

- ・試作触媒の反応試験
 - 反応温度とメタン転換率
 - 反応温度二酸化炭素生成率他
- ・触媒の劣化検知と再生方法

などについて調べ、触媒試作技術、反応試験技術等を蓄積・改良している。これまでの結果では、800°C以下でCOがCO₂に転換する割合が多くなることが分かった。メタノール合成では、多量のCO₂は反応を阻害するので水蒸気改質触媒とCO₂改質触媒を混合してCO₂の生成を抑制することが有効である。

また、中型反応試験部でのガス分離試験に先立ち、

- ・合成ガスと未反応原料メタンの分離方法
 - 多孔質ガラス製ガス分離器の性能試験
 - 高分子糸膜型ガス分離器の性能試験

を実施し、高分子糸膜型ガス分離器のガス分離性能の優秀性を確認した。この成果を基にして、高分子糸膜型ガス分離器を組み込んだ未反応原料メタンの分離・リサイクルシステムを中型反応試験部に接続し、圧力制御性などの調整を行った。

今後は、炉外実証試験に用いられる触媒の反応特性や未反応原料メタンの分離・リサイクル試験を行い、その成果を炉外実証試験装置の運転・制御、反応解析に反映する予定である。

3. 2. 3 従来の水蒸気改質装置^(6, 7)

水素製造を目的とした工業用水蒸気改質システムは、Fig. 3.3に示すように①前処理工程、②水蒸気改質工程、③後処理工程の3工程に大別される。

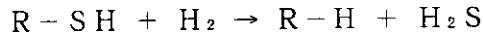
①前処理工程

天然ガスを原料とする場合の前処理工程は、天然ガス中の有機硫黄化合物を除去する工程で、

脱硫工程ともよばれる。有機硫黄分の除去方法には次の2種類がある。

1)水添脱硫法

第1工程



(R- : 炭化水素基)

仕様触媒 : Co-Mo系、Ni-Mo系、Ni系の硫化物触媒

反応温度 : 300~400°C

水素量 : 反応に必要な量 + α (余分)

第2工程



仕様触媒 : ZnO (消耗品)

反応温度 : 300~400°C

利点 : ・最も一般的な脱硫法で、小型から大型設備に至る技術が確立している。

問題点 : ・第2工程のZnOは消耗品なので、天然ガス中の硫黄化合物濃度に合わせて十分な量を充填しておく必要がある。

・水添用水素は、定常運転時には改質した水素をリサイクルして使用するが、起動時には水添用水素を外部から供給する必要があり、外部供給水素設備の設置と外部供給水素とリサイクル水素との切替え制御設備が必要。

2)吸着脱硫法

Cu系、Mn系触媒を充填した反応器1段で吸着除去

反応温度 : 常温~250°C程度

利点 : ・リサイクル水素が不要であり、触媒反応の温度域が広いので、システムの簡素化が可能

問題点 : ・大型化については不明

②水蒸気改質工程

水蒸気改質反応管については、燃料電池への燃料水素供給設備としてコンパクトで高性能な反応器の開発が進んでいる。反応器の高性能化と小型化に対しては反応生成ガスの顯熱を有効利用する2重円筒式反応管（バイオネット方式）が一般的である。この方式では、伝熱促進を目的としたワイヤーネット、伝熱粒子充填などの方法が採用されている。

また、充填する触媒については、工業規模ではNi担持触媒が一般的であるが、燃料電池システムに代表されるような運転条件の変動の大きいシステムでは低温域においても高い活性を維持でき、かつ、炭素析出を防止できるRh、Ru担持触媒の開発が進んでいる。なお、Ni担持触媒を用いる場合は、通常、スチーム・カーボン比(S/C)は3以上である。

ところで、ICI社（英国の重化学企業）のNi系触媒にはアルカリ土類金属を担持させてS/Cの低減と炭素析出などの防止をはかっていることで有名である。これは、アルカリ土類金属が多量の水分を吸着するために小さいS/Cで炭素析出防止効果があることと、析出した炭素を吸着水蒸気でガス化する反応を促進できるという利点を有しているためである⁽⁸⁾。

水蒸気改質反応は、高温ではCH₄ + H₂O → CO + 3H₂（吸熱反応）が一般的であるが、圧力の上昇とともにメタン転化率は減少して未反応メタンの量が多くなる。また、850°C以下では生成したCOと水蒸気が反応するCO + H₂O → CO₂ + H₂（発熱反応）

が併行して生じるようになる。

③後処理工程

水素製造を目的とした後処理工程は、1)CO変成工程、2)メタネーション工程、3)ガス分離工程から成る。

1)CO変成工程

CO変成工程は $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (発熱反応) の反応を高温及び低温条件で行わせてCO量を低減させるものである。

高温変成工程 : 使用触媒 Fe-Cr系触媒

反応温度 320~480°C

低温変成工程 : 使用触媒 Cu-Zn系触媒

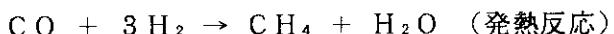
反応温度 180~280°C

CO変成反応は発熱反応であるため、高温変成工程から低温変成工程の間に冷却器を設置して反応ガスを冷却する必要がある。

なお、燃料電池システムでは、CO変成工程の簡素化をはかるために熱交換器(冷却器)を内蔵したCu-Zn系触媒反応器(低温変成器)のみとし、出口でのCO濃度が1%以下を実現している。

2)メタネーション工程

メタネーション工程はCO変成工程で残ったCOをメタンに転換する工程で、反応式は



である。CO変成工程の高度化によりメタネーション工程は省略される傾向にある。

3)ガス分離工程

H_2 、 CH_4 などを分離するガス分離工程は、現在では圧力スイング吸着法(PSA法)が一般的である。この方法は、 CO_2 などのガスを専用の吸着剤を充填した吸着塔で吸着分離するもので、高純度分離が可能である。ただし、複数の吸着塔を設置して吸着、再生を行うバッチ方式でるために、ガスページに伴う圧力変動を緩和するためのページガスドラム(タンク)を設置する必要がある。

吸着塔を多数設置すると運転制御が複雑になるため、水素の分離については高分子膜を利用する膜分離法も有効である。

3. 3 炉外実証試験の内容

炉外実証試験では、HTTR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。

HTTR水蒸気改質システムについては、原子炉接続を目的とした化学反応システムへの応用可能性をまず検討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、HENDELでの炉外実証試験も同じ

システム構成とする。以下に炉外実証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

これらの試験項目を、スケジュールと合わせて分類したものをTable 3.1 に、各試験項目の試験内容についてはTable 3.2 にまとめた。Table 3.2 中には、安全評価、特性評価に係わる試験内容を、◎は重要な項目、○は関連する項目として区分けしてある。これらの試験の実施順序を示したのがTable 3.3 である。Table 3.4 に炉外実証試験の順序に対応した炉外実証試験スケジュール（案）を示す。平成7年度に、反応管が3本と1本の場合のシステム構成、機器仕様等を検討し、コストなどの評価を行う。現在、この作業の準備を進めている。また、炉外実証試験に予算が順調に計上されるものと仮定して、平成8年度から製作設計、機器製作に入り、平成10年度から水蒸気改質反応器（試験部）の流動試験等を中心とした機器特性試験を実施する予定にしている。反応特性試験、システム過渡特性試験等は平成11年度以降からを計画している。

3. 4 試験条件

H T T R 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実証試験装置の熱流動条件を以下に記す。

(1) H T T R 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 : 8 8 0 °C
 出口温度 : 6 0 0 °C
 流量 : 9 0 7 0 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. 0 6 9 4 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 : 4 5 0 °C (反応器入口)
 出口プロセスガス温度 : 6 0 0 °C (反応器出口)
 水蒸気改質器入口質量流量 : 7 0 9 8 kg/h
 プロセスガス分圧 (モル分率)
 CH₄ 8 kg/cm²G (0. 1 7 7 0)
 H₂O 3 5. 3 kg/cm²G (0. 7 8 4 5)
 H₂ 0. 7 kg/cm²G (0. 0 1 5 1)
 エタン 0. 5 kg/cm²G (0. 0 1 1 4)
 水蒸気改質器入口総モル数 : 3 9 6, 9 0 0 モル/h
 水蒸気改質器入口体積流量 : 8 8 9 0 Nm³/h (添字N : 1atm, 0°Cにおける体積流量)
 供給メタン (CH₄) 流量 : 1 5 7 3 Nm³/h (4 3. 7 Nm³/h/本)
 供給水蒸気量 (H₂O) 流量 : 6 9 7 4 Nm³/h (= 5 6 0 4 kg/h, 1 5 6 kg/h/本)
 スチーム／カーボン比 : 4. 4

(2) 炉外実証試験装置の熱流動条件

ここでは、H E N D E L M₁ ループを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。炉外実証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 : 8 8 0 °C
 出口温度 : 6 0 0 °C
 ループ戻り温度 : 3 8 0 °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

供給壓力 : 4.5 kg/cm²G

供給溫度 : 最高 450°C (水蒸氣改質器入口)

流量範囲 : 反応管3本の場合 $0 \sim 250 \text{Nm}^3/\text{h}$ ($4.12 \text{Nm}^3/\text{min}$)

定格運転時 131 Nm³/h (2.18 Nm³/min)

反応管1本の場合 0~8.3Nm³/h (1.38Nm³/min)

定格運転時 43.7 Nm³/h (0.73 Nm³/min)

(c) 水蒸氣流動條件

供給壓力 : 4.5 kg/cm²G

供給溫度 : 最高 450 °C (水蒸氣改質器入口)

流量範囲 : 反応管3本の場合 0~700 kg/h (1 l. 7 kg/min)

定格運転時 468 kg/h (7.8 kg/min)

反応管1本の場合 0~120 kg/h (2 kg/min)

定格運転時 156 kg/h (2.6 kg/min)

生成ガスの流動条件

(a) 改質器での生成ガス量

($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{H}_2 + \text{CO}$ 、メタン転換率 100%の場合)

反応管3本の場合 定格運転時 H_2 393Nm³/h (= 6.55Nm³/min)

CO 131 Nm³/h (= 2.18 Nm³/min)

H₂ 1.31 Nm³/h (= 2.18 Nm³/min)

(b) ガス分離器に CO 变成器を設置する場合の CO 变成器出口における生成ガス量

($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2$ 100%變成)

反応管3本の場合 宝格運動時 $H_2 = 5.24 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ($= 8.73 \text{ Nm}^3/\text{min}$)

$$C_{O_2} = 13.1 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (= 2, 18 \text{ Nm}^3/\text{min})$$

$$H_2 = 1.75 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (= 2.91 \text{ Nm}^3/\text{min})$$

3. 5 恒外電圧試験装置の構成

H T T R 開発部での設計検討を基にして作成した炉外実証試験装置のシステム構成をFig. 3. に示す。炉外実証試験装置は、以下のシステム・機器から構成される。

(1) 未薦氯改質反應器（試驗部）

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、補償ヒータプロックを内部に設置する。反応管及び反応器の概要をFig. 3-5に示す。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) ヘリウムガス加熱器

ヘリウムガスを最高 950 °Cまで電気ヒータで加熱して水蒸気改質器に供給するためのものである。(H E N D E L で実績有り)

(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) 高圧・定流量ポンプ
- 4) 水流量計
- 5) 水予熱器
- 6) 脱ガス器
- 7) 蒸気発生器(蒸気ドラム付き)
- 8) 蒸気過熱器
- 9) 非常時給水タンク
- 10) バルブ類(定流量弁、逆止弁、空操弁等)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) L N G (液化天然ガス) タンク
- 2) 蒸発器
- 3) ガスタンク(サージタンク)
- 4) 主コンプレッサー
- 5) 冷却器(バイパスライン)
- 6) 脱硫器用加熱器
- 7) 脱硫器
- 8) 流量計
- 9) バルブ類(定流量弁、逆止弁、空操弁等)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) ガスタンク（サージタンク）
- 4) コンプレッサー
- 5) 窒素ガスカードル
- 6) 冷却器（バイパスライン）
- 7) 流量計
- 8) バルブ類（定流量弁、逆止弁、空操弁等）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) ガス分離器（+冷却器）

ガス分離器は、生成した合成ガスを冷却して水分を水蒸気供給系にリサイクルする冷却器、合成ガス中のCOをCO₂に変成する変成ユニット、未反応CH₄を分離してメインラインに戻すガス分離ユニットから構成される。

(8) 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に、水プール付きのフレースタックとする。

(9) 計測・制御設備

計測・制御設備としては、熱電対、圧力計、差圧計、ガス分析器、流量計等の計測機器、ヘリウムガス加熱器入出力制御装置、コンプレッサー制御装置及びP.S.A.ユニット制御装置、試験装置制御設備が主要なものである。

(10) 各種配管

ヘリウムガス高温配管、ヘリウムガス配管、原料ガス配管等

(11) その他必要機器

計装用バルブ、機器架台他

3. 6 設計基本方針

上記のシステムを製作するに当たっては、以下の方針で設計を行うこととする。なお、構成機器のHENDELでの配置案をFig. 3.6に示す。図では、M₁ループに水蒸気改質システムの炉外実証試験装置を接続し、水蒸気改質反応器は安全確保の観点から屋外に設置する。

(1) 機器配置等

a)全体機器の配置に当たっては、

- 各種機器及び計測センサー・機器の増設、メンテナンスが容易な配置とする。
 - 作業・増設スペースを確保する。
 - 設置スペースを最小にできるように架台を多層にするなどの工夫をする。
- 高圧ガス法規等に対応がとれる配置とする。
- 高温隔離弁の性能試験を独立して行える機器構成、配置計画とする。

b)可燃性ガスライン（水蒸気改質反応器等を含む）については、

- 可能な限り屋外設置とする。
- 以下の部分に防爆壁を設ける。
 - 道路等に隣接する部分
 - 屋内に設置する場合の経路域
- 設置するバルブ、センサー類及び電源機器は防爆構造とする。
- 原料ガス、水蒸気、不活性ガスの逆流がないように逆止弁を適宜設置する。
- 可燃性ガスラインには、火炎伝播防止用にメッシュフィルターを適宜設置する。
- 静電気除去のための防爆型除電気など、安全確保に必要な機器を設置する。
- ガスの漏洩を防ぐためのシール構造とする。

(2) 運転制御性

- 運転制御は原則としてコンピュータ支援の遠隔操作とする。
- 安全確保に必要なインターロックを備える。

(3) 水蒸気改質反応器

- 反応管の寸法、材料はH T T R開発部での設計と同一とする。
 - バイオネット型構造とし、伝熱促進手段を積極的に取り入れる。
- 反応管の組立、触媒充填と取出しが容易な構造とする。
- 圧力容器には、温度、圧力、ガスサンプリング等の計測を行えるようにセンサー等の取出しノズルを設ける。
- ヘリウムガス側の放熱防止用に補償ヒータブロックを多数設置し、個々にヒータ出力制御が可能なようにする。このための電源ノズルを圧力容器に設ける。

(4) ヘリウムガス加熱器、水予熱器、蒸気発生器、熱交換器等の除熱量（伝熱量）

- これら機器の伝熱量を後述する熱物質収支の計算を基にして決定する。

(5) 水蒸気供給系

- 蒸気発生器は、事故時模擬条件において、ヘリウムガスの流動を停止することなくヘリウムガスの冷却が可能なようになる。
 - 事故時受動的冷却機能を有する構造を検討する。
- 運転時にヘリウムガス供給設備戻り温度が380°Cになるように、水予熱器でヘリウムガス温度を制御する。脱ガス器への水バイパスラインを設ける。
- 給水はH E N D E Lの貯水タンクから行い、合成ガス中のドレン水を貯水タンクに戻すラインを設ける。

- 非常時水供給系のラインを設ける。
 - 定流量弁の流量は、定格運転時の供給水量と同じになるようにする。
 - (ヘリウムガスの戻り温度の調整のため)

(6) 原料ガス供給系

- 原料ガス流量の制御が円滑に行えるように、
 - コンプレッサーの出口にバイパスライン（ガスタンク戻り）を設置する。
 - バイパスラインは、液化天然ガスの供給ラインと流量干渉しないようにする。
- LNGタンクの交換が可能な配置とする。
- 脱硫器用加熱器は、天然ガス温度が350°C以上に上昇しないように構造を検討する。
- 電源喪失事故等の事故時模擬試験では、原料ガスの供給停止と窒素ガスページが重要であり、コンプレッサーの電源OFF後（停止まではフリーラン）
 - 不活性ガス供給系からの窒素ガス供給開始
 - バイパスラインのバルブ開放、メインラインのバルブ閉止
 - LNGからの供給停止（供給バルブ閉止）
 の一連のシーケンスを不活性ガス供給系の動作と合わせる。

(7) 不活性ガス供給系

- 気化した液化窒素ガスの供給制御が円滑に行えるように、
 - 原料ガス供給系と同じようにコンプレッサーの出口にバイパスラインを設置する。
 - バイパスラインは、液化窒素ガス供給ラインと流量干渉しないようにする。
- 窒素ガスカーボルからの窒素ガス供給は、事故時模擬において水蒸気改質器内のメタンガスのページを目的とする。
 - 定流量弁で供給する流量は、定格運転時のLNG供給量の1/2以下とする。

(8) ガス分離器

- 冷却器の除熱量及び凝縮した水分の自動排出機構を設ける。
- CO変成ユニットは、実績のある変成工程のものを使用する。
- ガス分離はPSA法を採用する。
 - PSAユニットのCH₄分離ラインにはメインラインへのリサイクル用にコンプレッサー、サージタンク等を設置する。
 - H₂、CO、CO₂分離ライン出口にはサージタンクを設け、フレアースタックと接続する。

(9) 热交換器（原料加熱器）

- 耐腐食性、メンテナンス性を考慮した構造とする。

(10) 計測・制御設備

- 計測センサーは試験及び安全保護に必要な数量とする。
- データ収録は、各種センサーの専用信号変換器からの出力信号をデータロガーに集約し、コンピュータで記録保存する。
- ガス分析器については、専用の処理系（コンピュータ付き）で解析・記録を行うこととするが、ガス分析結果については、データロガーにも入力する。

- ヘリウムガス加熱器入出力制御装置については、H E N D E L M₂ ループの高温加熱器（H₃₂等）用のものの流用を検討する。
- P S A ユニット制御装置は、試験装置の運転制御系と連動させる。
- 各機器と電源（非常用電源設備を含む）との配線系統、非常用電源設備の仕様を決める。

(11)フレアースタック

- 水プール型フレアースタックとし、耐震性を考慮するとともに、コンパクトな構造とする。

(12)各種配管

- ヘリウムガス高温配管の構造については、低コスト化をはかる。
- 水蒸気改質器出口のヘリウムガス配管と合成ガス配管についても低コスト化をはかる。

(13)その他

- 系統構成、機器の形式、材料等については、定常／過渡／トリップ時に対応する試験内容を考慮して検討し、選定する。
- 各種タンクの容量は、試験内容を満たすものとする。
- ガス分析器へのサンプリング配管にはバイパスラインを設けることとする。

3. 7 まとめ

本章では、水蒸気改質システムの開発現状、試験内容・条件、炉外実証試験装置の構成、設計基本方針等を述べた。とくに、試験部としての水蒸気改質反応器と受動的冷却機能を有する蒸気発生器は、炉外実証試験の中核となる機器であり、その設計が試験を左右するといってよい。ただし、これらは規格品ではないという点を除けば、現行の技術レベルで対応可能と考えられる。この意味で、本システムは現状において最も早期に炉外実証試験が可能なシステムである。設計方針に従って作成した機器の主要仕様（案）を付録1に示す。

Table 3.1 Test items of demonstration test for steam reforming system

試験小区分	試験項目
機器特性試験	<ul style="list-style-type: none"> ・水蒸気改質反応器の流動特性 ・反応管の水素透過特性 ・蒸気／原料ガス供給系等の動作試験
反応特性試験	<ul style="list-style-type: none"> ・伝熱流動特性 ・化学反応特性 ・構造強度特性 ・反応管の水素透過特性 ・通常運転時のシステム制御方法
システム過渡特性試験	<ul style="list-style-type: none"> ・システムの過渡特性と制御方法 ・一次側及びシステム機器のトリップ時の挙動と停止方法
耐久性試験	<ul style="list-style-type: none"> ・触媒及び改質反応管の耐久性

Table 3.2 Contents of demonstration test for steam reforming system

試験項目	試験内容	安全評価	特性評価	備考
水蒸気改質反応器の流動特性	・圧力損失特性 ・反応管群への流量配分特性 ・反応管の流体誘起振動特性	○	◎ ◎ ◎	
蒸気／原料ガス供給系等の動作試験	・蒸気供給系動作試験 ・原料ガス供給系動作試験		◎ ◎	
伝熱流動特性	・反応管の対流／輻射熱伝達率 ・反応管群への流量配分特性 ・蒸気発生器等の熱交換特性		◎ ◎ ◎	
化学反応特性	反応メカニズムと反応速度評価		◎	
構造強度特性	反応管、管板等の応力分布		◎	
反応管の水素透過	反応管からの水素透過量評価	○	◎	
通常運転時のシステム制御方法	・一次側（原子炉側）と連動した起動、停止方法の確立 ・運転時のシステム制御法の確立	○ ○	◎ ◎	一次側の起動・停止は 原子炉条件を模擬
システムの過渡特性と制御方法	・一次側負荷変動時のシステム挙動とシステム制御 －負荷変動の吸収とシステムのトリップ防止 ・システム側負荷変動による一次側への影響とシステム制御 －炭素析出時、システム側流量変動時等における一次側への影響防止対策	◎ ◎	○ ○	一次側の負荷変動は設計条件を模擬 解析コードの開発
一次側及びシステム機器のトリップ時の挙動と停止方法	・機器のトリップに伴うシステム挙動とシステムの安全・確実な停止方法の確立 ・システム構成・制御の最適化検討	○ ○	○	解析コードの検証と改良
触媒及び改質反応管の耐久性	触媒の耐久性 改質反応管の変形、腐食	○	◎ ○	供用後試験

Table 3.3 Test sequence of demonstration test for steam reforming system

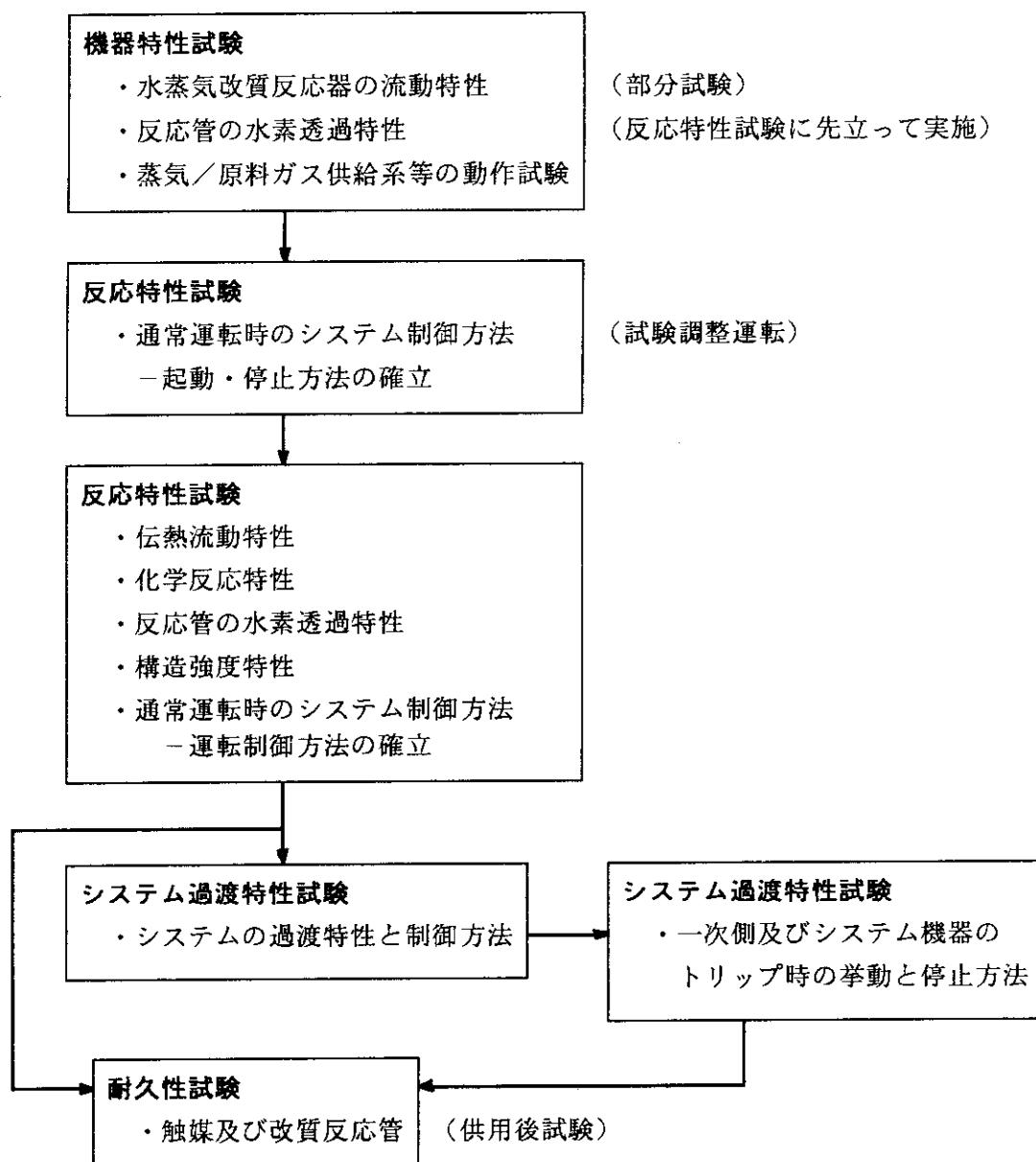


Table 3.3 Demonstration test schedule for steam reforming system

項目＼年度	平成7年度	H 8	H 9	H 10	H 11	H 12
設計検討	試験計画の策定 機器構造・配置 熱物質収支・効率		▲HTTR臨界			熱利用系安全審査 (予定)
炉外実証試験装置の製作		反応器、周辺機器等の 機器製作、組立・据付け	制御系 接続 調整			
炉外実証試験			機器特性試験	反応特性試験	システム 過渡特性試験	

(注) 炉外実証試験の設計検討(試験計画を含む)、装置の設計・製作・据付け、及び試験はHTTR開発部と連携して進める。

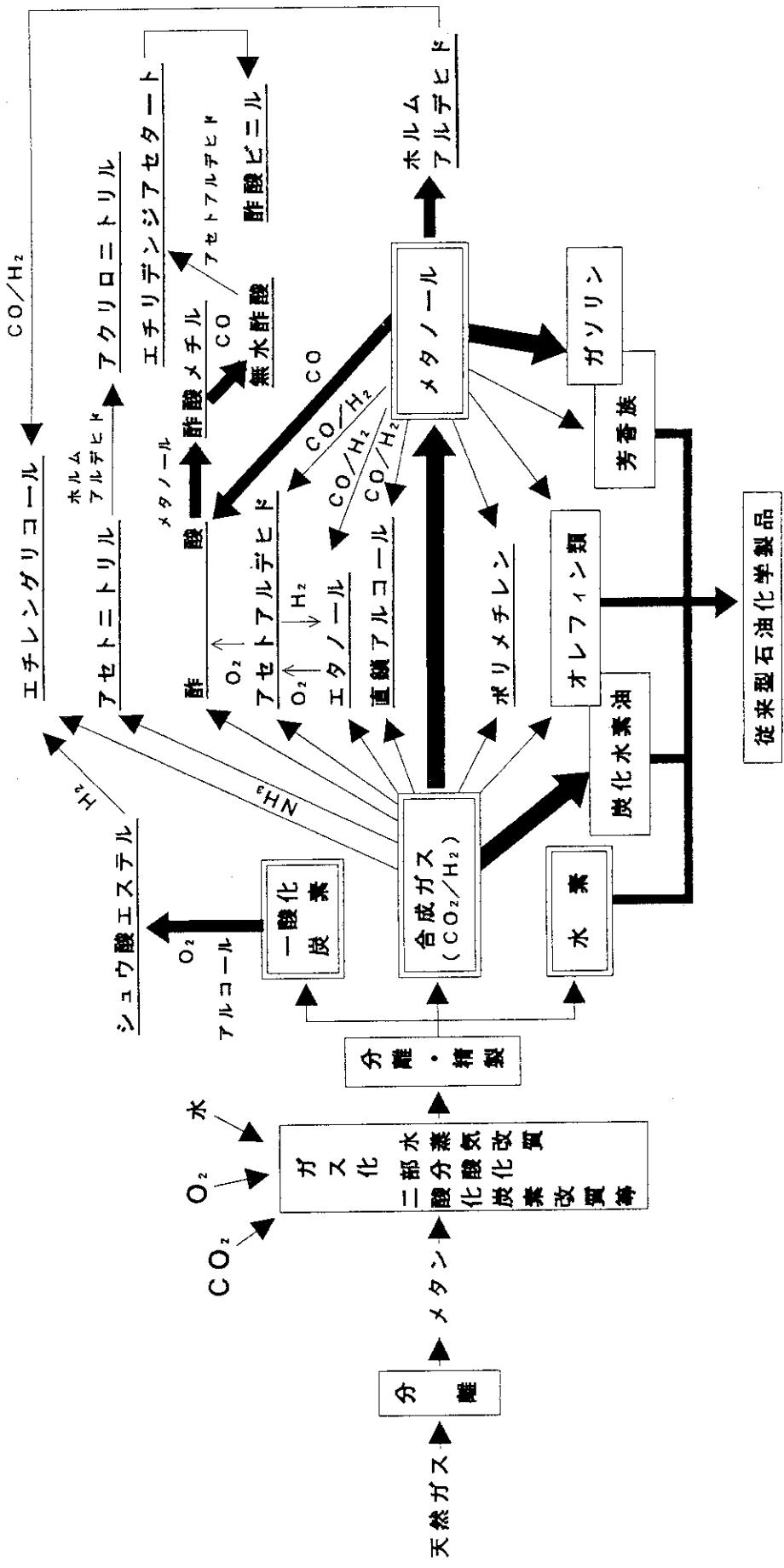


Fig. 3.1 Systematic flow of Cl chemistry

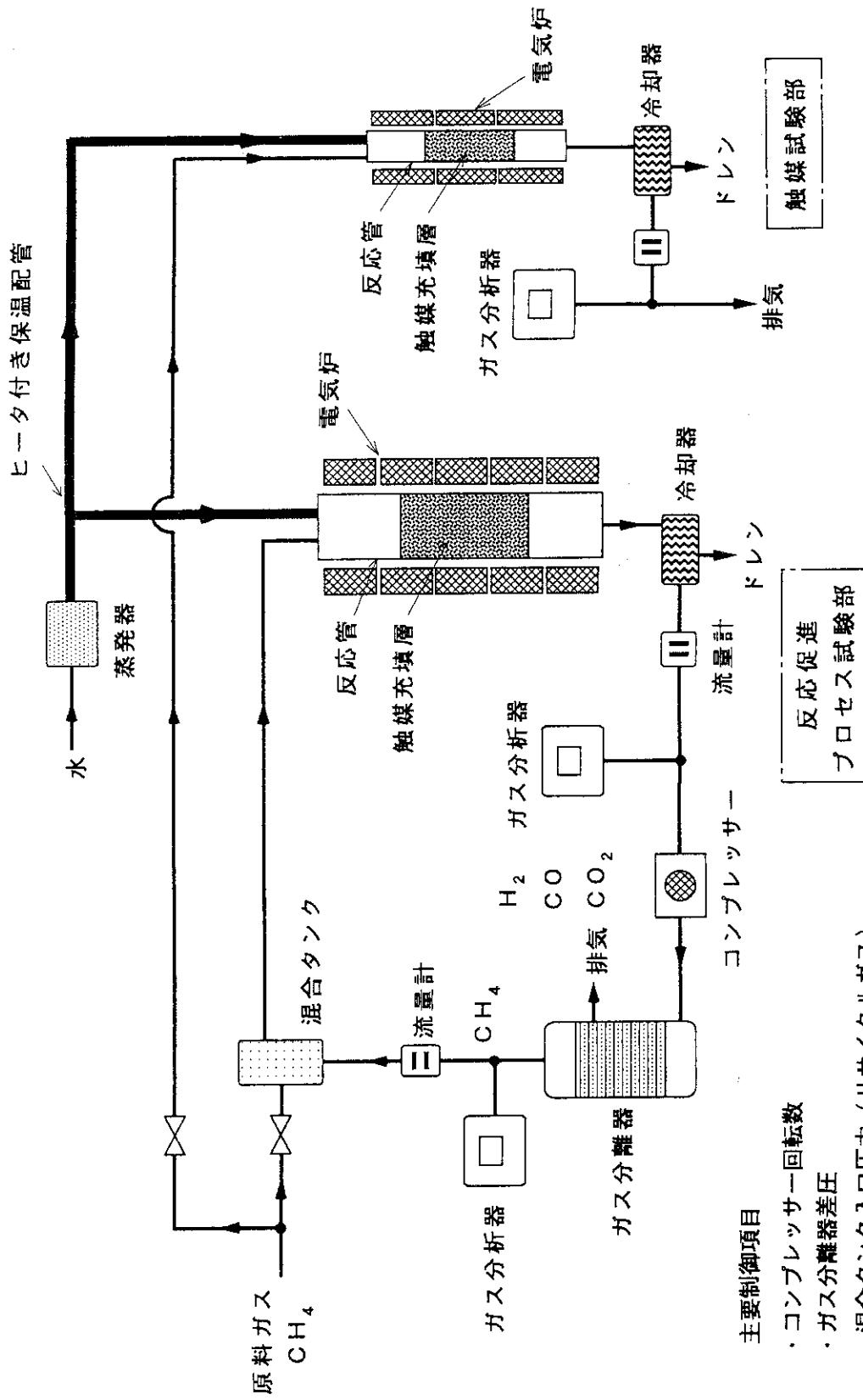


Fig. 3.2 Schematic diagram of test apparatuses of catalyst and reaction processes for steam reforming

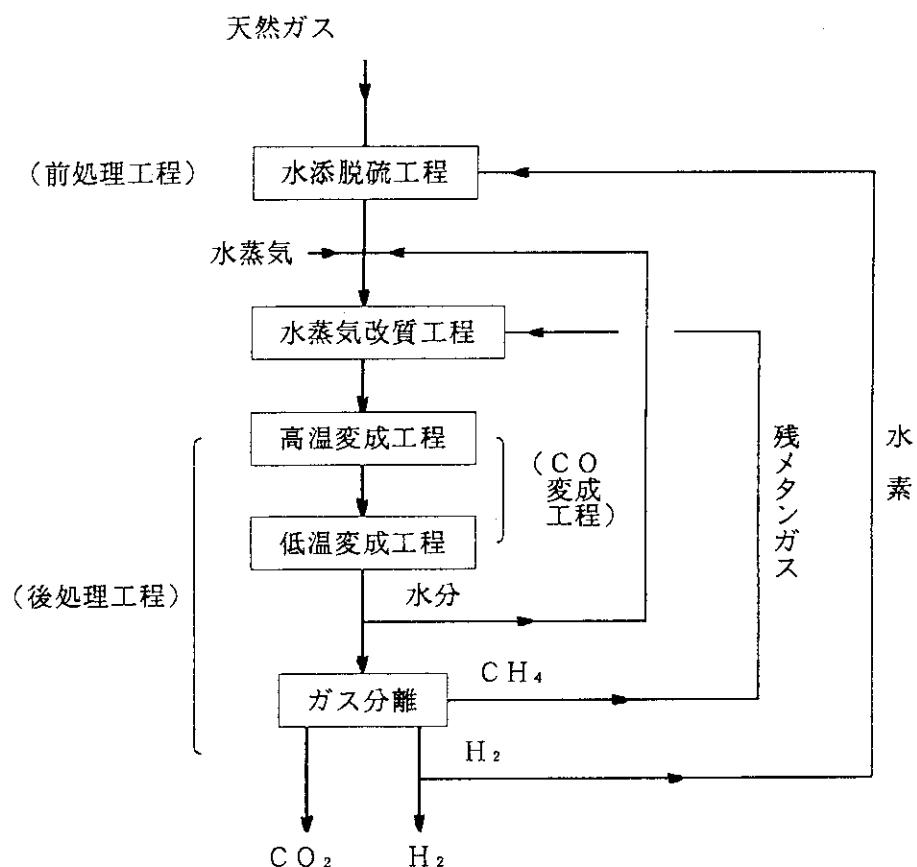


Fig. 3.3 Industrial process of steam reforming

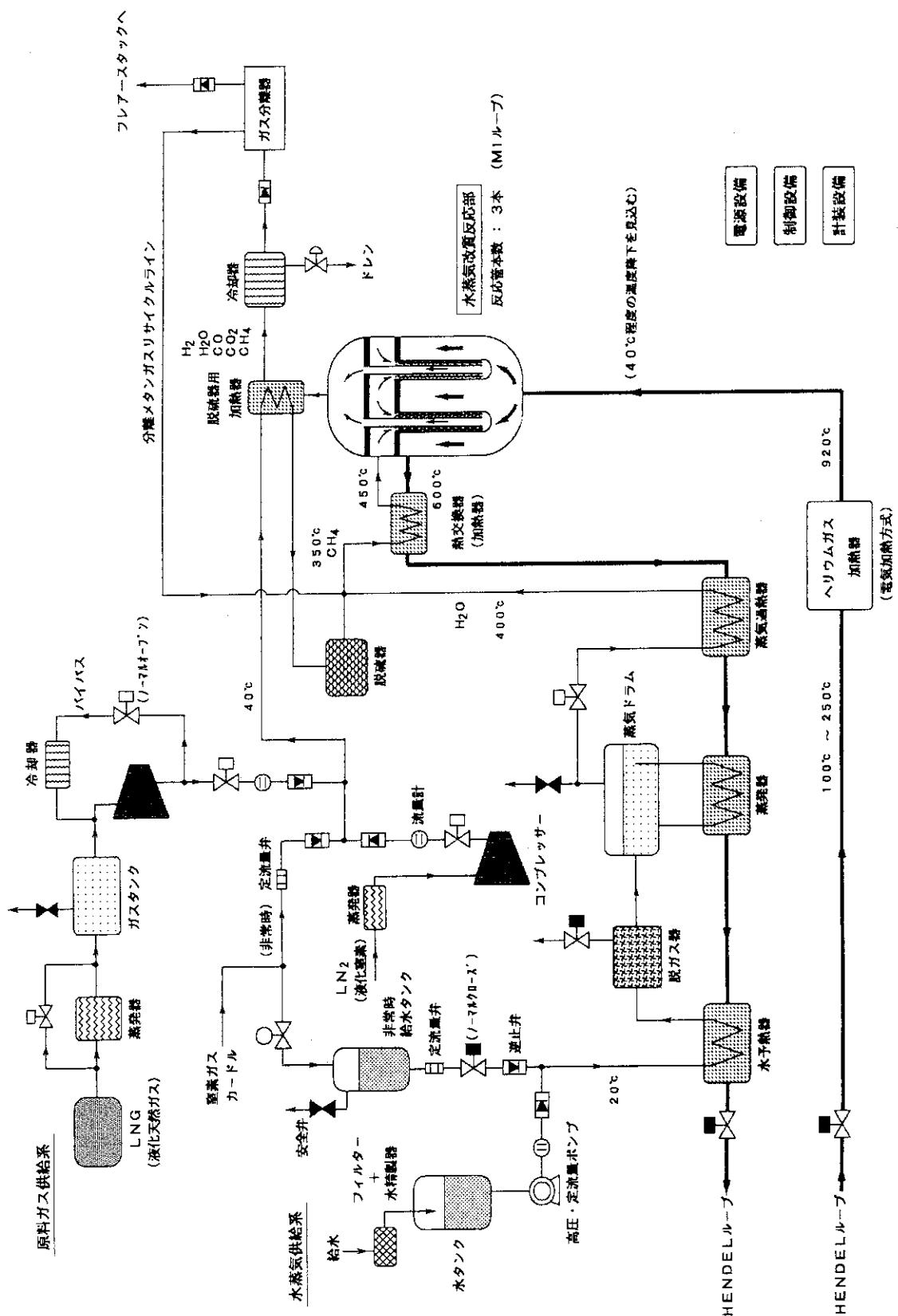


Fig. 3.4 Schematic diagram of outpile demonstration test installation for steam reforming system

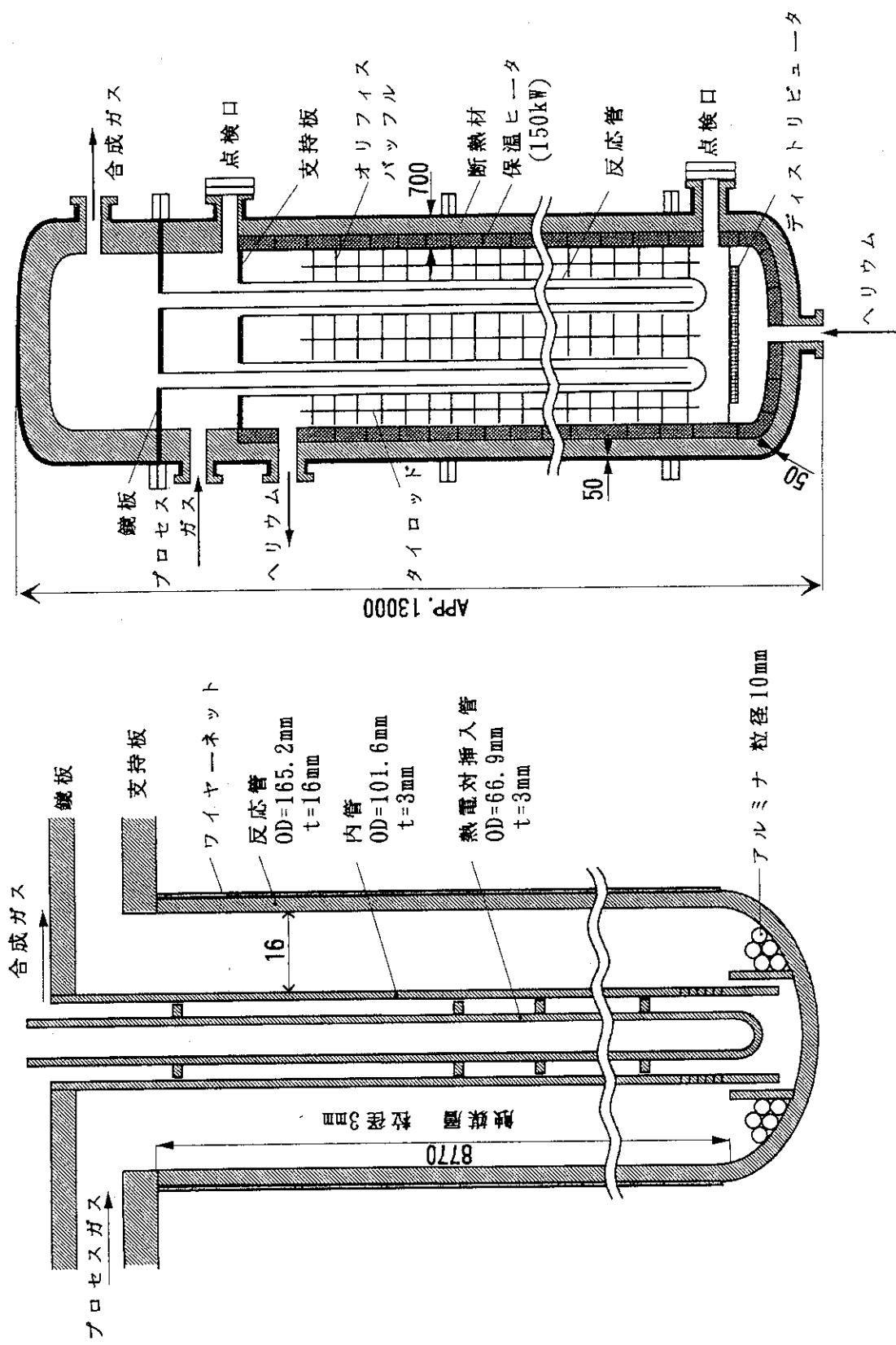
改質反応器

Fig. 3.5 Schematic drawing of steam reforming tube and reactor

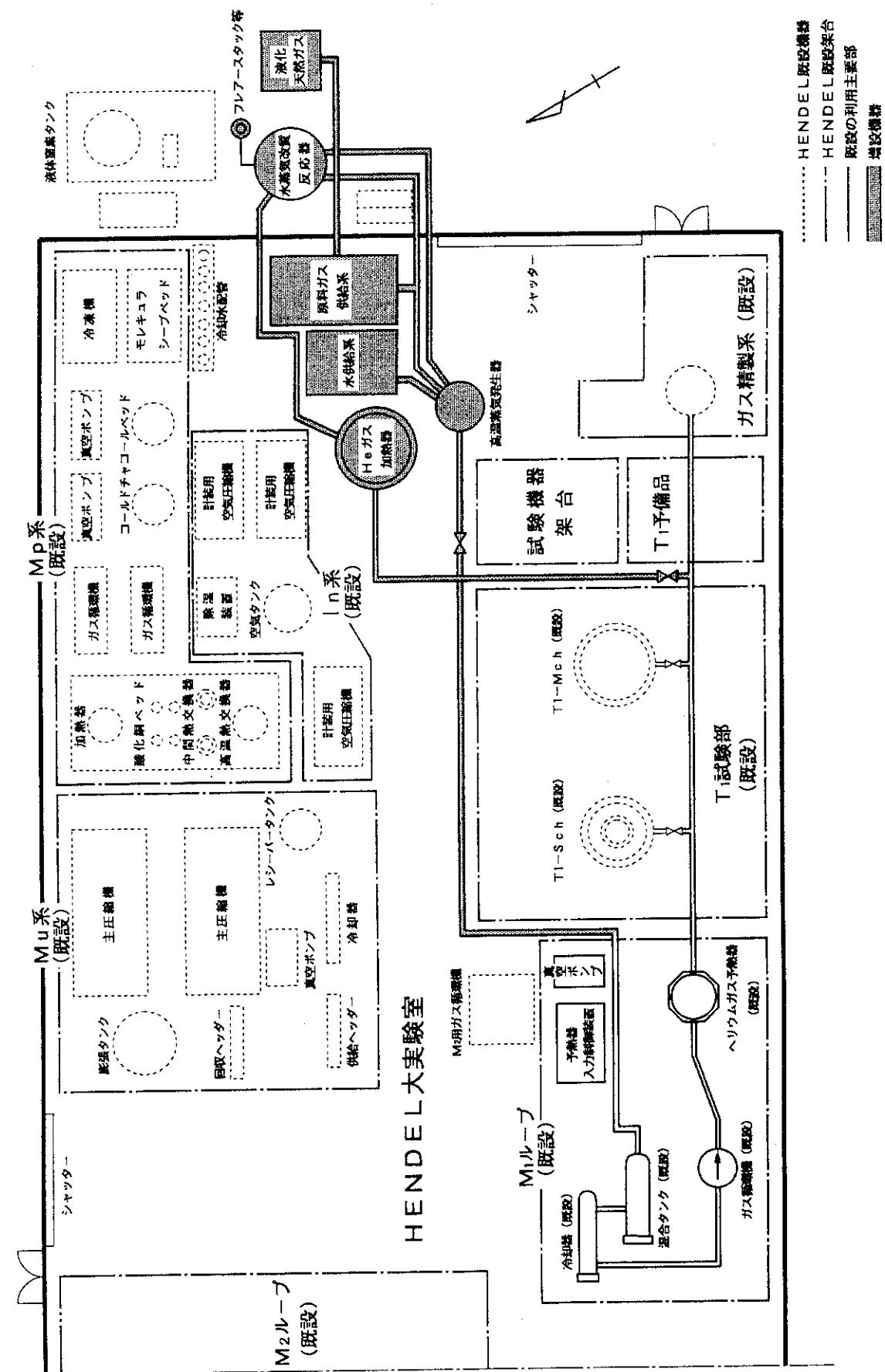


Fig. 3.6 Arrangement plan of outpile demonstration test installation in HENDEL

4. 热化学法による水素製造

4. 1 はじめに

热化学水素製造法は、様々な化学反応を組み合わせて水を水素と酸素に分解する化学プロセスである。原研では、高温ガス炉の热利用系研究の一環として热化学水素製造法の中の一つである I S (Iodine-Sulfur) プロセスの開発研究を行ってきた。I S プロセスは G A 社が提案したものであるが、原研ではこのプロセスの改良と高度化を進めてきた。I S プロセスは次に示す 3 つの反応系から構成される。



(1) 式は、 SO_2 ガスを I_2 溶液に接触させて HI_x と H_2SO_4 を生成させる反応である（ブンゼン反応）。(2) 式の反応は HI を H_2 と I_2 に分解するもの（ HI 分解反応）であり、(3) 式の反応では H_2SO_4 を SO_2 と O_2 に分解する（ H_2SO_4 分解反応）。各反応で得られる生成物は、 H_2 と O_2 を除いて他の反応の原料物質となり、これらの反応で H_2O を O_2 と H_2 に分解しながら一つの閉サイクルを形成することができる。

I S プロセスを実際に水の分解サイクルとして機能させる、すなわち閉サイクル運転を可能にするために、各反応段階における反応特性や生成物の分離特性を明らかにすることを目的として、これまで実験室規模の装置（以後、実験装置と呼ぶ。）を用いて様々な試験を行ってきた。以下に、実験室規模の装置による試験例、技術的問題点、大型装置による試験の検討結果等について述べる。

4. 2 実験室規模の装置による試験例⁽⁹⁾

(1) 実験装置及び物質収支

Fig. 4.1 に実験装置の概要を示す。この装置はブンゼン反応系、 HI 分解系、 H_2SO_4 分解系の 3 つの部分から成り立っている。各機器はパイレックスガラスまたは石英ガラスで作られており、それらをテフロンチューブで接続してある。I S プロセスは 3 つの反応部と 4 つの分離部と精製部から構成されている。Fig. 4.1 には各構成部分ごとに A から G まで番号がついている。各部分の概要を以下に記す。

A : ブンゼン反応 (357 K)

テフロンチューブ内での I_2 の析出を防止し二相分離器での相分離を促進するために HI_x の x は 4 ~ 2 の値になるように調節される。

B : $\text{HI}_x - \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液二相分離 (283 K)

HI は I_2 と結びついて HI_x 溶液となり直ちに H_2SO_4 溶液と分離する。

C : H I x 溶液の脱硫 (393 K以上)

ブンゼン反応の逆反応により H_2SO_4 成分は SO_2 として取り除かれる。

生成した SO_2 を効率よく運ぶために N_2 がキャリアガスとして使われている。

D : 精製された H I x 溶液を蒸留して I_2 を取り除いた H I 溶液を作る。

E : 触媒を使用した H I 分解 (973 K)

分解反応器を 4 つ直列につなぐことにより全体の H I 分解率を 50 % にできた。

F : 硫酸濃縮

46 % の硫酸を 80 % に濃縮する。同時に、ここでもブンゼン反応の逆反応が生じ、H I、 I_2 成分が取り除かれる。

G : 触媒を使用した H_2SO_4 分解 (1073 K)

分解率は 80 %

本研究の初期段階においては反応、精製及び分離の最適条件を明らかにするために、各工程ごとに個別に実験を行い、その特性を調べてきた。次にこれらの工程をつなぎ合わせて閉サイクル運転を試みたが、当初は各工程間の物質収支の整合がとれなかった。物質収支の整合性は、ISプロセスの閉サイクル運転の可否を示すものであるため、物質収支の改善を重点的に進めてきた。Fig. 4.2に物質収支の一例を示す。

(2) 閉サイクル運転の実験結果

閉サイクル運転をするためには次の 2 つの要件を満たすことが必要である。

- ・閉サイクルに投入され分解された水は、体積比 $O_2/H_2 = 1/2$ の状態で取り出されなければならない。
- ・閉サイクル運転中の各物質量は常に一定でなければならない。

これらの要件を満たすために、実験装置内の各部の流路や流量を様々に変えて最適なシステムを開発する努力を行ってきた。

Fig. 4.3に閉サイクル運転実験の結果の一例を示す。実験は大気圧下で行い、生成した水素は 11.6 dm³、酸素は 6.0 dm³ であった。8 時間の閉サイクル運転中、転換率は安定していた。二相分離器中の H I x 溶液量は 250 mL であり、脱硫器へ送られる H I x は 125 mL/h であるから、実験系内の物質は 2 時間で一循環することになる。従って、8 時間の運転中に 4 回の循環を繰り返したと考えられる。ただし、実験は各部を所定の温度に昇温した後、HI Decomposer に液体ヨウ化水素 (H I、沸点 130°C) を滴下する。このとき液体 H I が蒸発器内部 (25 0°C) で蒸発すると体積膨張による圧力変動が起こり、これが安定するまでに時間がかかる。初期の水素製造率が変動しているのは、この圧力変動が原因である。

4. 3 技術的問題点

これまでの研究により、ISプロセスの閉サイクル運転は可能であることを示した。しかし、これは実験室規模の装置による閉サイクル運転であり、実用規模のプラントに拡大するためには様々な工学的課題がある。以下に課題を項目別に述べる。

構造材料

ISプロセスに使用するHI及びH₂SO₄は高い腐食性があり、さらにこれらの物質を高温下で扱い、濃縮、蒸発、蒸留等を行わなければならないという厳しい条件がある。現在のところ、この条件に耐えられる既存の構造材料がほとんどない。そこで、新規材料・機器の開発として、最も過酷な硫酸蒸発工程に的を絞り、セラミックス材、Fe-Si合金の装置材料への適用を検討している。

エネルギー効率

実用規模のプラントでは、エネルギー効率がそのプラントの有用性を評価する重要な要素になる。現在の実験装置は閉サイクル運転の実現が主目的であるため、エネルギー効率は考慮されていないが、実際のプラントでは、既存の水素製造技術と比べても遜色のないエネルギー効率が求められる。エネルギー効率については、次段階の試験として計画している50 l(H₂)/h規模の小型実験装置（工学実験装置）を用いて研究を進める予定である。

長時間連続運転

長時間連続運転をするためには、プロセス内の各工程において物質収支の整合性が確実でなければならない。これまでの試験（8時間の閉サイクル運転）では、溶液組成の経時変化が微小ながら認められた。このため、1つの反応段階で生じた生成物と未反応物質が他の反応段階に不純物として入り込むので、各段階での反応を効率よく進めるのが難しく、とくに、二液分離器内の物質組成と平衡液位が時間とともに変化する安定性の問題が表面化した。今後、この原因の解明及び対策を進め、連続運転の長期安定性の実現を目指す予定である。

高圧運転

実用プラントでは、ヘリウムガス加熱を考慮して高圧運転にしなければならない。このため、各反応プロセスの平衡条件と圧力との関係を調べ、最適な圧力を決定する必要がある。現行の実験室規模の装置で各プロセスの稼働圧力を変えるのは、全体系統の接続からみて困難である。これについては、工学実験装置を用いて研究を進める予定である。

4. 4 大型装置による試験計画の検討

ISプロセスの炉外実証試験装置（大型試験装置）の規模は100 m³(H₂)/h規模の水素製造能力を考えている。大型試験装置による試験では、高温ガス炉の核熱を模擬したシステム（HENDEL）から高温・高圧ヘリウムガスを大型装置に供給して、原子炉系と化学プロセス系を結合した統合プロセスとしての運転・制御性等のデータの蓄積・評価と解析を行い、HTT

R熱利用系の安全審査に対応することを目的とする。

(1) 開発試験項目及びスケジュール⁽¹⁰⁾

Fig. 4.4に平成19年までのISプロセス開発計画を示す。現行の実験室規模の装置をスケールアップして50l(H₂)/h規模の工学実験装置でエネルギー効率等の試験を行い、これをさらに1m³(H₂)/h規模にスケールアップして反応器のスケールファクター等を明らかにする実験を行う。これらの成果を反映して、まず、大型試験装置のうちの硫酸分解系を製作し、炉外実証試験を行う。これと並行して前述の工学試験装置による閉サイクルシステム開発試験を精力的に進め、その成果を基にして他の反応系を先の硫酸分解系に増設してISプロセスシステム(大型試験装置)を完成させる。

(2) 装置の仕様

現時点までのデータを基にして作成した装置の仕様(案)を以下に記す。

A. プロセスフロー

Fig. 4.5にISプロセス大型試験装置のフローシートを示す。このフローシートに基づいたプロセス内の主要物質収支をTable 4.1-1からTable 4.1-4に示す。各コンポーネントの操作条件等の概要は以下の通りである。

(a) ブンゼン反応器

- ・本装置では操作性を重視して常温運転とする。
- ・将来的には95°C運転が目標であり、必要なH₂O量を少なくできる。
- ・I₂析出を防止する保温が必要になる。
- ・ブンゼン反応器での成分組成を満足するために大量のH₂Oが必要となるため、硫酸分解系の配管から分岐させて添加水抽出塔を設置してある。

(b) 重液、軽液の分離

重液成分(I₂、HI)は全て重液リザーバタンクへ戻すことにより、二相分離器はブンゼン反応の生成物を分離する機能のみを持たせる。これにより分離効率が向上する。

(c) HI蒸留器

高圧力(20 atm)でHIを蒸留すると、蒸留過程でもHIの分解反応が生じH₂を30%の分解率で発生させることができるとある。また、HI溶液の組成が常圧と比べてH₂O/HI=5/1から1/2と改善される。しかし、本試験装置では製作材料、運転性の問題から、常圧運転とする。

(d) HI分解反応器

HIのH₂への転化率及び操作条件からいえばPSA法が有利であるが、HENDEL接続のようなテストプラント規模では、システムの小型化、簡略化ができる点で多段連続反応方式のほうが実験操作面で有利である。

(e) 添加水抽出塔

ブンゼン反応器でSO₂を効率よく反応させるためにはI₂/(I₂+H₂O)の値を小さくする必要があり、そのため大量の水が必要となる。本システムの運転条件においてメイク

アップ水と硫酸濃縮器からの水だけではブンゼン反応器の成分組成を満足するだけの水量が得られないので、硫酸溶液を硫酸濃縮装置に移送するラインからバイパスを設け、新たに硫酸溶液から水を蒸発分離してブンゼン反応器に補充するシステムにしている。

B. 主要機器のプロセス仕様

実験プラントの主要機器プロセス仕様は以下の通りである。なお、以下の機器で材質を指定していないものは、ステンレス鋼にタンタルを内張りしたものとする。

(a) ヘリウムループ系

1) ヘリウム加熱器

入口温度 : 30 °C
 出口温度 : 880 °C
 ヘリウム流量 : 9600 Nm³/h
 加熱熱量 : 2100 KW
 ヒータ材質 : 黒鉛

2) ヘリウムサーキュレータ

入口温度 : 39.5 °C
 出口温度 : 40.0 °C
 ヘリウム流量 : 9600 Nm³/h
 本体材質 : ステンレス

3) 硫酸分解反応器（核熱熱交換型）

濃縮硫酸入口温度 : 450 °C
 濃縮硫酸入口圧力 : 5 Kg/cm²G
 分解ガス出口温度 : 830°C
 分解ガス出口圧力 : 2 Kg/cm²G
 交換熱量 : 381 Mcal/h
 ヘリウム流量 : 9600 Nm³/h
 ヘリウム入口温度 : 880°C
 ヘリウム出口温度 : 700°C

4) 硫酸予熱器（プロセス熱交換型）

濃縮硫酸入口温度 : 180°C
 濃縮硫酸入口圧力 : 8 Kg/cm²G
 濃縮硫酸出口温度 : 450°C
 濃縮硫酸出口圧力 : 5 Kg/cm²G
 交換熱量 : 68 Mcal/h
 分解ガス入口温度 : 830°C
 分解ガス入口圧力 : 2 Kg/cm²G
 分解ガス出口温度 : 640°C
 分解ガス出口圧力 : 1.5 Kg/cm²G

硫酸予熱、蒸発、分解工程は硫酸の腐食性や、核熱利用機器であることなどから、実用プラントにおいては特に重要な部分である。硫酸分解系の機器について、形状、寸法等を検討した結果をFig. 4.6からFig. 4.13 に示す。ただし、運転中のトラブルに備えて24時間のバッチ運転にも耐えられる寸法になっており、連続運転のみを対象

とすればより小型になる。Fig. 4.14 に H E N D E L 大実験室内に設置した場合の配置図を示す。図に見られるように、H E N D E L 大実験室内にこれらの機器を配置すると大実験室のかなりの部分を占めることになる。

5) 蒸気発生器（核熱熱交換型）

ヘリウム入口温度	: 700°C
ヘリウム出口温度	: 150°C
交換熱量	: 1.2 Gcal/h
発生蒸気圧力	: 50 Kg/cm ² G
発生蒸気温度	: 263°C
発生蒸気量	: 1850 Kg/h

ただし、加熱温度は25°Cから所定蒸気温度までとする。

6) ヘリウム冷却器

ヘリウム入口温度	: 150°C
ヘリウム出口温度	: 30°C
交換熱量	: 0.26 Gcal/h
冷却水入口温度	: 25°C
冷却水出口温度	: 40°C
冷却水量	: 17 ton/h

(b) 沃化水素分解系

1) H I 分解反応器

分解反応温度	: 700°C
分解反応圧力	: 常圧及び加圧
H I 分解率	: 50%
反応器型式	: 固定床 4段連続反応器型

2) 分解H I ガス加熱器

分解H I ガス入口温度	: 650°C
分解H I ガス出口温度	: 70°C
加熱熱量	: 270 KW

ただし、E-402、E-404、E-406、E-408の合計加熱量とする。

(c) 蒸留系

1) 硫酸濃縮塔

入口硫酸濃度	: 46 wt%
塔頂温度	: 100°C
塔頂硫酸濃度	: 0 wt%
塔底温度	: 180°C
塔底硫酸濃度	: 75 wt%

2) 添加水抽出塔

入口硫酸濃度	: 46 wt%
塔頂温度	: 100°C
塔頂硫酸濃度	: 0 wt%
塔底温度	: 140°C
塔底硫酸濃度	: 60 wt%

3) 脱硫塔

入口硫酸濃度 : 0.57mol%
 塔頂温度 : 140°C
 塔頂硫酸濃度 : 1.13 mol%
 塔底温度 : 140°C
 塔底硫酸濃度 : 0 mol%

4) 沃化水素蒸留塔

塔頂温度 : 127°C
 塔頂成分 : 57wt%HI
 塔底温度 : 184°C
 塔底成分 : I₂

5) リボイラ（蒸気加熱型）

・硫酸蒸発器	必要熱量 : 352 Mcal/h 必要蒸気量 : 895 kg/h
・硫酸濃縮装置	必要熱量 : 272 Mcal/h 必要蒸気量 : 690 kg/h
・添加水抽出塔	必要熱量 : 1292 Mcal/h 必要蒸気量 : 3280 kg/h
・脱硫塔	必要熱量 : 1752 Mcal/h 必要蒸気量 : 4450 kg/h
・沃化水素抽出塔	必要熱量 : 1235 Mcal/h 必要蒸気量 : 3140 kg/h

(d) ブンゼン反応系

1) ブンゼン反応器

容器形式 : 気体吹込攪拌槽型反応器
 反応温度 : 25°C
 反応圧力 : 常圧
 反応物質 : SO₂、H₂O、I₂
 生成物質 : H₂SO₄、HI

2) ブンゼン反応生成物重液・軽液分離セトラ

容器形式 : 密度差式2相分離器
 温 度 : 25 °C
 圧 力 : 常圧
 重 液 : ポリHI溶液
 軽 液 : 硫酸溶液

3) 重液リザーバ

容器形式 : 攪拌槽型中間貯蔵タンク
 温 度 : 25 °C
 圧 力 : 常圧
 貯蔵物質 : ポリHI溶液

(e) 蒸気発生系

1) リボイラ用蒸気発生器（電気加熱型）

蒸気圧力 : 50 Kg/cm²G

蒸気温度 : 263 °C

必要蒸気量 : 10725 kg/h

加熱熱量 : 7930 kW

ただし、加熱温度は25°Cから所定蒸気温度までとする。

また、リボイラ用蒸気の対象はT-501、T-502、T-301、T-302及びE-201とし、必要蒸気量はヘリウムループ系から発生する蒸気量を差し引いた値である。

C. ヘリウムループ系の仕様について・ M₁ループを使う場合 :- 大型試験装置で必要なヘリウム流量は 9 6 0 0 Nm³/h- M₁ループの最大流量は約 8 0 0 0 Nm³/h (0.4 kg/s) であるから、1 6 0 0 Nm³/h 分だけ増強する必要がある。

→ヘリウムの利用温度や、反応器構造の改善によって補える可能性あり

- 循環ヘリウムを 4 0 0 °C から 8 8 0 °C に昇温するための加熱器と、7 0 0 °C から 4 0 0 °C まで冷却する冷却器が必要になる。

- あるいは、ヘリウム循環器、加熱器、冷却器とも本システムの仕様に合わせて新設することも考えられる。

・ M₂ループを使う場合 :最大流量は約 8 0 0 0 0 Nm³/h (4 kg/s) であり加熱器、冷却器の性能も問題ないが、これを 9 6 0 0 Nm³/h の流量で定常的に使用可能かどうかが問題である。D. プロセス熱収支

Table 4.2 に熱交換システム相互関連表を示す。実験プラント内での熱の流れについては、この表を参照のこと。

(a) 核熱投入量

核熱量(Mcal/h)	温度範囲 (°C)	対象機器
3 8 1	8 8 0 ~ 8 0 5	硫酸分解反応器
4 7	8 8 0 ~ 8 0 5	R-401 No. 2熱交換器
6 2	8 8 0 ~ 8 0 5	R-401 No. 4熱交換器
6 2	8 8 0 ~ 8 0 5	R-401 No. 6熱交換器
6 2	8 8 0 ~ 8 0 5	R-401 No. 8熱交換器
4 7 2 1	8 1 0 ~ 2 2 0	蒸気発生器
5 3 3 5	8 8 0 ~ 2 2 0	-----

上記の表からわかるように、核熱利用の 8 8 % は蒸気発生器を介した水蒸気の発生に使用される。これらの水蒸気は硫酸蒸発器、硫酸濃縮装置、添加水抽出器、H I 蒸留器等の熱源とし

て使われる。

(b) 热効率

プロセス热効率 (η) を、

$$\text{プロセス热効率} (\eta) = \text{生成水素燃焼熱量} / \text{核热投入量}$$

と定義すると、

$$\begin{aligned}\eta &= 4.46 [\text{kmol}/\text{h}] \times 68.3 [\text{Mcal}/\text{kmol}] / 5335 [\text{Mcal}/\text{h}] \times 100 \\ &= 5.7\%\end{aligned}$$

これにプロセス系から回収できる動力を考慮に入れるとき熱効率は約10%となる。ただし、このエネルギー効率は、実験室規模で行われている現時点でのデータを大型装置規模に拡大しており、これが将来の実験装置のエネルギー効率ではない。

(c) 热効率改善のための方策

現在の研究は、閉サイクル運転を実現することを第一目標として行っており、エネルギー効率の改善はこれからの課題である。この課題に対処する方策として以下のことを検討中である。

1) ブンゼン反応を95°Cで行うこと。

ブンゼン反応は本来95°C程度が最適温度条件であるが、実験機器の操作性を考慮して大型試験装置では25°Cの常温操作としている。この操作温度条件下では、その条件に対応する組成比率を維持するために大量の添加水が必要となり、添加水抽出器の設置が必要である。添加水抽出器で消費される熱量は1292Mcal/hであり、全核熱投入量の24%を占める。また重液(HIx-H₂O系)と軽液(H₂SO₄-H₂O系)の分離性も低下する。ブンゼン反応が95°Cで行われれば、必要な水の量は大幅に減少し、この添加水抽出器は不要となり、重液、軽液の分離性も良くなる。

2) 消費熱量の少ない脱硫方法を開発すること。

3) HI蒸留器を高圧にすること。

4) HI分解に、より分解率の高い分離法を採用すること。以下に例を記す。

方法	P S A法	多段連続反応法
圧力	-----	常圧
温度	230°C	700°C
段数	1段	4段(直列)
HI分解率	70%	50%
供給HI濃度	57~100%	57%
触媒	Pt	Pt

以上の改善策により熱効率を30%以上にすることが可能である。これらの改善策については、現行の実験室規模の装置では実験が困難なので、50lH₂/h規模の実験装置にスケールアップして改善策を中心とした実験を行い、大型装置の設計データ、ノウハウを蓄積していく予定である。

E. ユーティリティ使用量

大型試験装置において必要なユーティリティ使用量の概要を以下に示す。

純 水（原料水）： 80 ℥/h

ボイラ給水（プローダウン用）： 600 kg/h

電力量 : 10300 KW

冷却水 (20°C→30°C) : 500 ton/h

その他 : 窒素

計装用空気

計装用電源等

なお、上記の電力量は主として加熱用に用いられるもので回転機械類及び熱損失に関する効率等の考慮は含んでいない。

4. 5 まとめ

実験室規模の試験装置により、ISプロセスの閉サイクル運転は可能であることを示したが、実用規模のプラントに拡大するためには、

- ・ H I 及び H₂ S O₄ を高温下で扱い、濃縮、蒸発、蒸留等を行うための構造材料の開発、
- ・ エネルギー効率を既存の水素製造技術と比べて遜色のない値まで高める、
- ・ 長時間連続運転するためのシステム構成とシステム運転制御技術の開発

が必要である。現在、これらをクリアーするための開発研究を進めつつ、要素技術の高度化をはかっている。H E N D E L に接続する大型試験装置 (100 m³/h 規模の水素製造能力) の設計・製作は長期的な展望の下で行う。

Table 4.1-1 Mass balance in demonstration test plant of IS process (Units-1 and-2)

単位 : kg·mol/h

工程番号 A/I/A番号	UNIT - 1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
供給水 A/I-A名	供給水	抽出水	R-101供給水	V-201 気相	V-201 液相	重液循環水	St.5+St.6	S-101 供給液	生成O ₂	S-102 重液
温度 (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
圧力 (kg/cm ² G)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H e	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂	-	-	-	2.23	-	-	-	-	2.23	-
S O ₂	-	-	-	4.46	-	-	-	-	-	-
S O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ S O ₄	-	-	-	-	1.20	1.63	2.83	7.29	-	3.31
H I	-	-	-	-	-	25.82	25.82	34.74	-	34.74
I ₂	-	-	-	-	-	40.94	40.94	36.48	-	42.95
H ₂ O	4.46	145.37	149.83	-	15.93	227.71	243.64	383.35	-	366.47
合 計	4.46	145.37	149.83	6.69	17.13	296.10	313.23	461.86	2.23	447.47

Table 4.1-2 Mass balance in demonstration test plant of IS process (Unit-3)

単位 : kg·mol/h

工程番号 アトム番号	UNIT-2			UNIT-3			UNIT-3
	21	22	23	31	32	33	
R-201 入口	R-201 出口	R-202 出口	T-301 塔底	T-301 塔頂	T-302 塔底	T-302 塔頂	
温度 (°C)	450	830	25	140	140	140	
圧力 (kg/cm ² G)	—	—	—	—	—	—	
He	—	—	—	—	—	—	—
H ₂	—	—	—	—	—	—	—
O ₂	—	2.23	—	—	—	—	—
SO ₂	—	4.46	4.46	—	—	—	—
SO ₃	—	1.20	—	—	—	—	—
H ₂ SO ₄	5.66	—	1.20	1.71	1.71	—	—
HJ	—	—	—	26.59	8.75	17.84	—
I ₂	—	—	—	42.16	6.47	35.69	35.69
H ₂ O	10.27	15.93	14.73	230.13	134.42	95.71	—
合計	15.93	23.82	22.62	300.59	151.35	149.24	113.55
							35.69

Table 4.1-3 Mass balance in demonstration test plant of IS process (Unit-4)

工程番号 スリ-ク番号	UNIT - 4						単位 : kg/mol/h
	41	42	43	44	45	46	
NH ₃ -ク番号 R-401	R-401 人口	R-401 1段目	R-401 2段目	R-401 3段目	R-401 4段目	生成 H ₂	未反応循環液
温度 (°C)	700	700	700	700	700	25	25
圧力 (kg/cm ² G)	—	—	—	—	—	—	—
He	—	—	—	—	—	—	—
H ₂	—	2.68	0.89	0.44	0.36	4.46	—
O ₂	—	—	—	—	—	—	—
SO ₂	—	—	—	—	—	—	—
SO ₃	—	—	—	—	—	—	—
H ₂ SO ₄	—	—	—	—	—	—	—
H I	17.84	12.48	10.70	9.81	8.92	—	8.92
I ₂	—	2.68	3.57	4.01	4.46	—	4.46
H ₂ O	95.71	95.71	95.71	95.71	95.71	—	95.71
合計	113.55	113.55	110.87	109.97	109.45	4.46	109.09

Table 4.1-4 Mass balance in demonstration test plant of IS process (Units-5 and-6)

単位 : kg·mol/h

工程番号 A11-L番号	UNIT - 5						UNIT - 6			
	51	52	53	54	55	56	57	61	62	63
濃縮用絶液 A11-L名	濃縮用絶液	T-501 供給液	T-501 塔頂水	T-501 塔底水	T-502 供給液	T-502 塔頂水	T-502 塔底液	HTGR 出口	E-601 入口	E-601 出口
温度 (°C)	25	25	100	180	25	100	140	880	805	220
圧力 (kg/cm ² G)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H e	-	-	-	-	-	-	-	1630	1630	1630
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S O ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ S O ₄	48.95	5.66	-	5.66	43.29	-	43.29	-	-	-
H I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ O	312.75	36.18	25.91	10.27	276.58	119.46	157.12	-	-	-
合計	361.70	41.84	25.91	15.93	319.87	119.46	200.41	1630	1630	1630

Table 4.2 Heat balance in demonstration test plant of IS process

機器番号	機器名称	与熱側温度(℃)		機器番号	機器名称	受熱側温度(℃)		交換熱量 (Kcal/h)	熱交換・回収方法
		入口部	出口部			入口部	出口部		
—	Heガス熱交換器	880	805	R-201	硫酸分解反応器	450	830	381	核熱段入
E-202	生成ガス冷却器	830	640	—	硫酸予熱器	180	450	68	工程内のプロセス熱交換
E-601	蒸気発生器	—	—	E-201	硫酸蒸発器	180	180	284	蒸気凝縮
E-417	R-401 No.4 冷却器	150	35	E-501a	} T-501 リボイラ	} 25	100~180	63	工程内のプロセス熱交換
E-601	蒸気発生器	—	—	E-501	} T-502 リボイラ	} 25	100~140	272	蒸気凝縮
E-417	R-401 No.4 冷却器	150	35	E-502a	} T-301 リボイラ	} 25	100~140	478	工程内のプロセス熱交換
E-601	蒸気発生器	—	—	E-502	} T-302 リボイラ	} 25	140	1,292	蒸気凝縮
E-412	T-502 塔底液冷却器	140	35	E-301a	} T-301 リボイラ	} 25	140	446	工程内のプロセス熱交換
E-601	蒸気発生器	—	—	E-301	} T-302 リボイラ	} 25	140	1,752	蒸気凝縮
E-601	蒸気発生器	—	—	E-302	} T-302 リボイラ	} 25	140	1,235	蒸気凝縮
E-401	R-401 No.1 热交換器	700	150	E-401	R-401 No.1 热交換器	127	665	603	工程内のプロセス熱交換
—	Heガス熱交換器	830	700	E-402	R-401 No.2 热交換器	665	700	47	核熱段入
E-403	R-401 No.3 热交換器	700	170	E-403	R-401 No.3 热交換器	100	650	598	工程内のプロセス熱交換
—	Heガス熱交換器	880	805	E-404	R-401 No.4 热交換器	650	700	62	核熱段入
E-405	R-401 No.5 热交	700	170	E-405	R-401 No.5 热交換器	100	650	594	工程内のプロセス熱交換
—	Heガス熱交換器	880	805	E-406	R-401 No.6 热交換器	650	700	62	核熱段入
E-407	R-401 No.7 热交	700	170	E-407	R-401 No.7 热交換器	100	650	592	工程内のプロセス熱交換
—	Heガス熱交換器	880	805	E-408	R-401 No.8 热交換器	650	700	62	核熱段入
E-413	T-301 塔頂ガス冷却器	140	140	E-403a	—	—	25	1,281	工程内のプロセス熱交換
E-405	R-401 No.5 热交換器	170	60	E-405a	—	—	25	1,305	工程内のプロセス熱交換
E-407	R-401 No.7 热交換器	170	60	E-407a	—	—	25	1,293	工程内のプロセス熱交換
E-601	蒸気発生器	805	220	E-601	蒸気発生器	—	—	4,721	核熱による蒸気発生
E-202a	生成ガス冷却器	640	235	—	蒸気発生器	—	—	114	工程内における蒸気発生
E-202b	生成ガス冷却器	235	25	—	蒸気発生器	—	—	210	冷却水による熱除去
E-413a	T-301 塔頂ガス冷却器	140	25	—	—	20	30	559	冷却水による熱除去
E-411	硫酸濃縮塔頂冷却器	100	25	—	—	20	30	1,561	冷却水による熱除去
E-412	T-502 塔底液冷却器	35	25	—	—	20	30	42	冷却水による熱除去
E-414	R-401 No.1 冷却器	170	25	—	—	20	30	1,398	冷却水による熱除去
E-415	R-401 No.2 冷却器	60	25	—	—	20	30	96	冷却水による熱除去
E-416	R-401 No.3 冷却器	60	25	—	—	20	30	96	冷却水による熱除去
E-417	R-401 No.4 冷却器	—	25	—	—	20	30	787	冷却水による熱除去
S-102	重液リザーバ	—	25	—	—	20	30	167	冷却水による熱除去

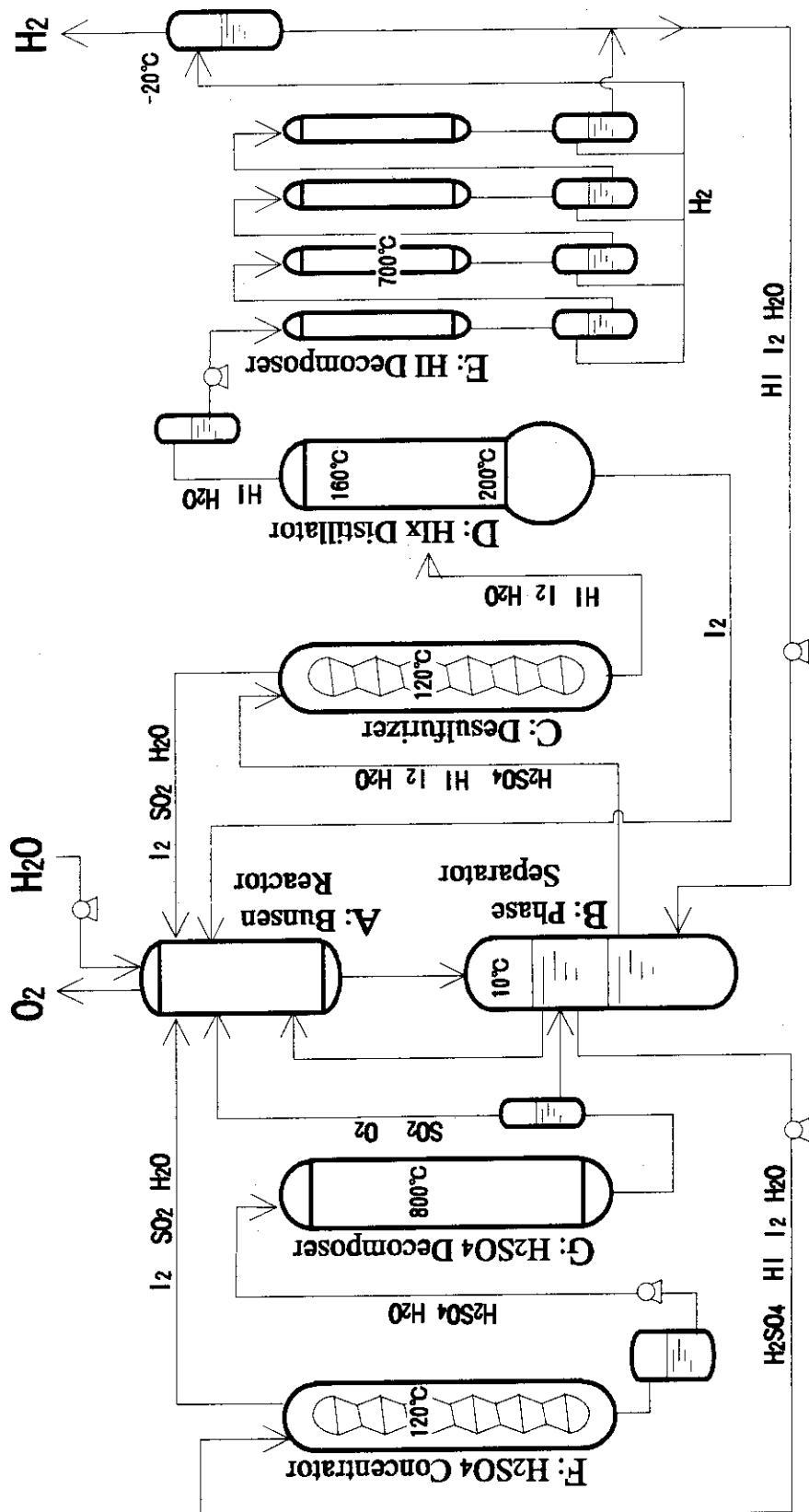


Fig. 4.1 Flowsheet of laboratory-scale test apparatus of IS process

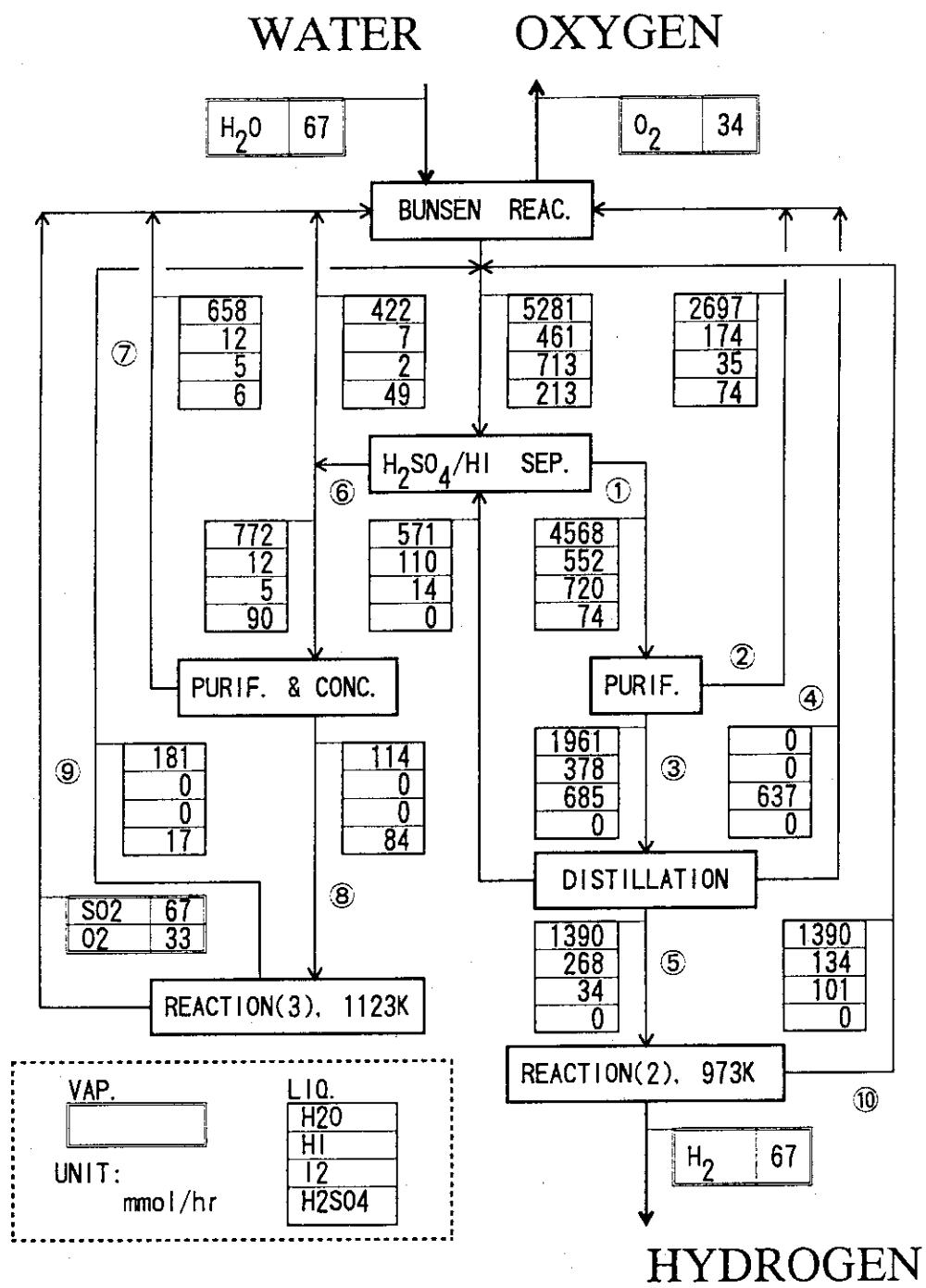


Fig. 4.2 Mass-flow balance obtained by laboratory-scale test apparatus

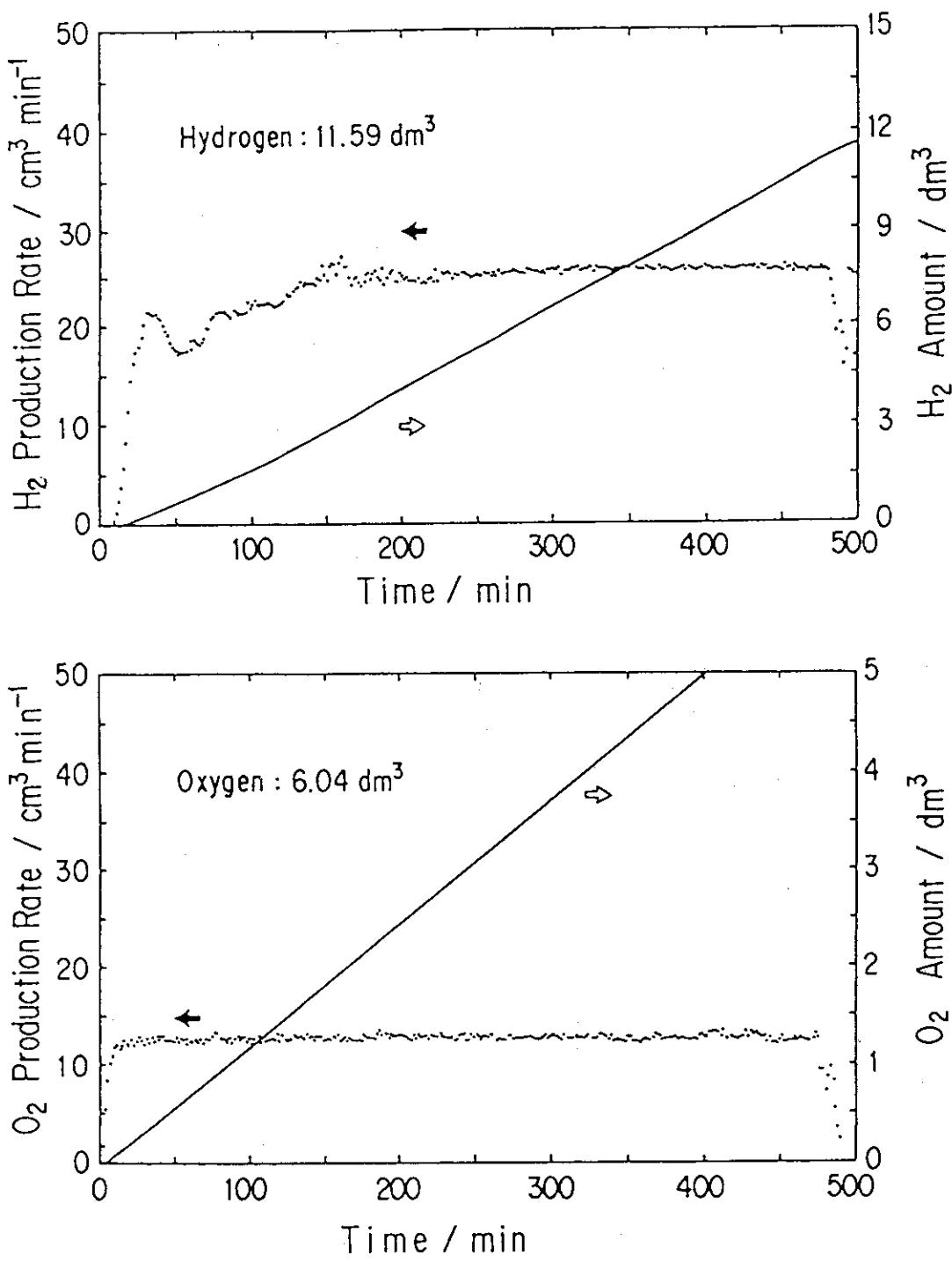


Fig. 4.3 Test results obtained in closed-cycle test

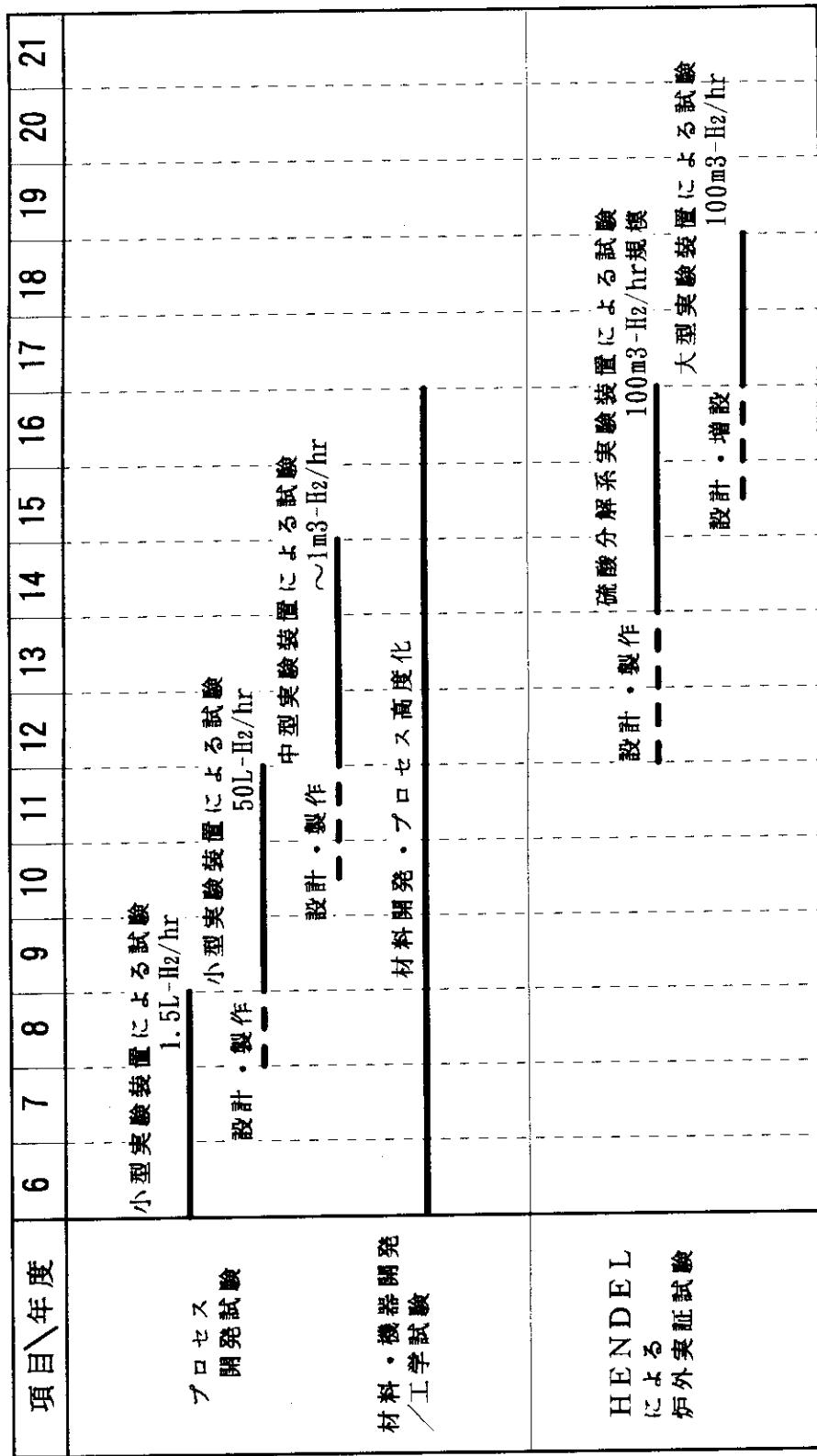


Fig. 4.4 Development plan of IS process

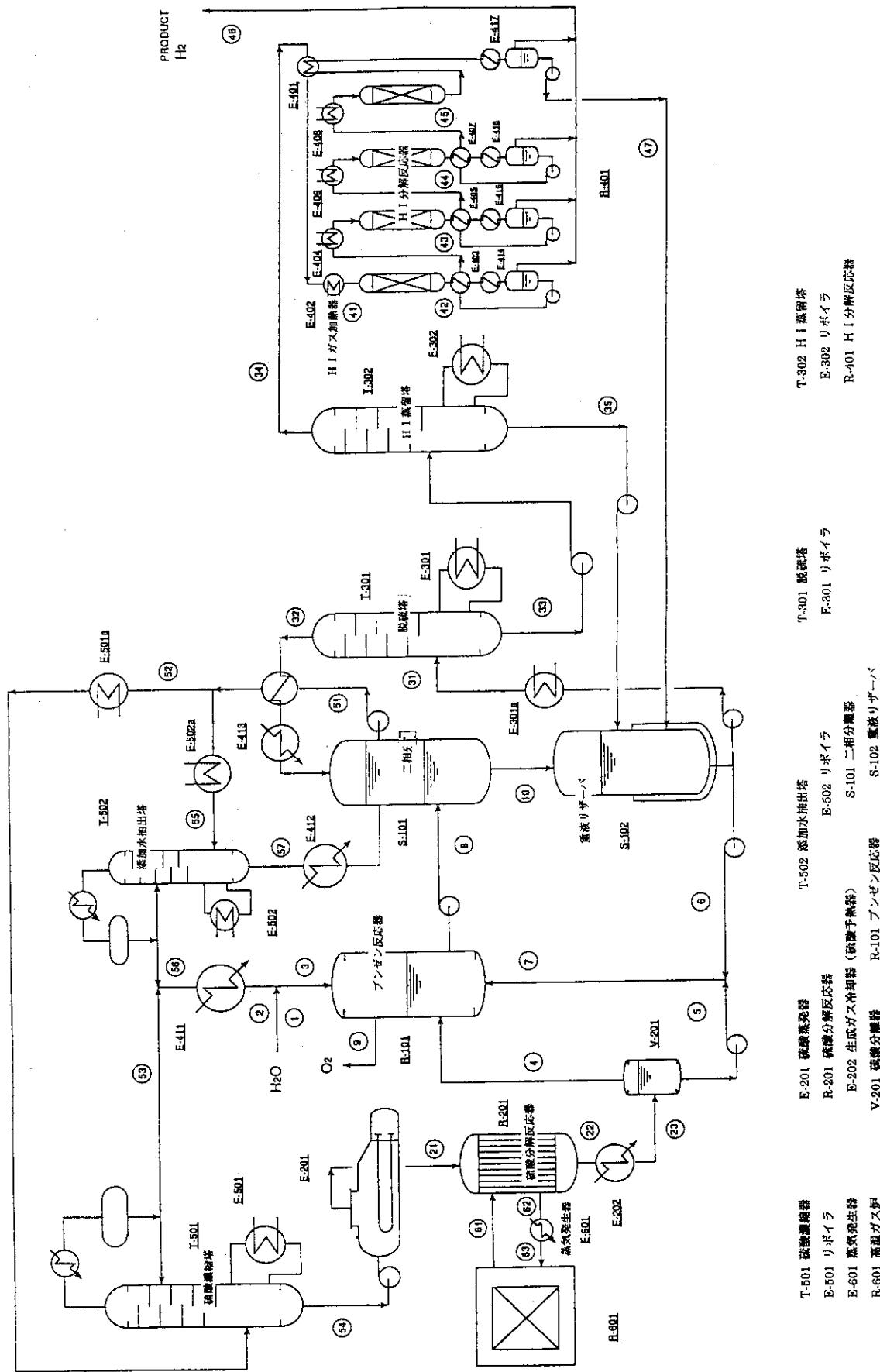


Fig. 4.5 Flowsheet of demonstration test plant of IS process

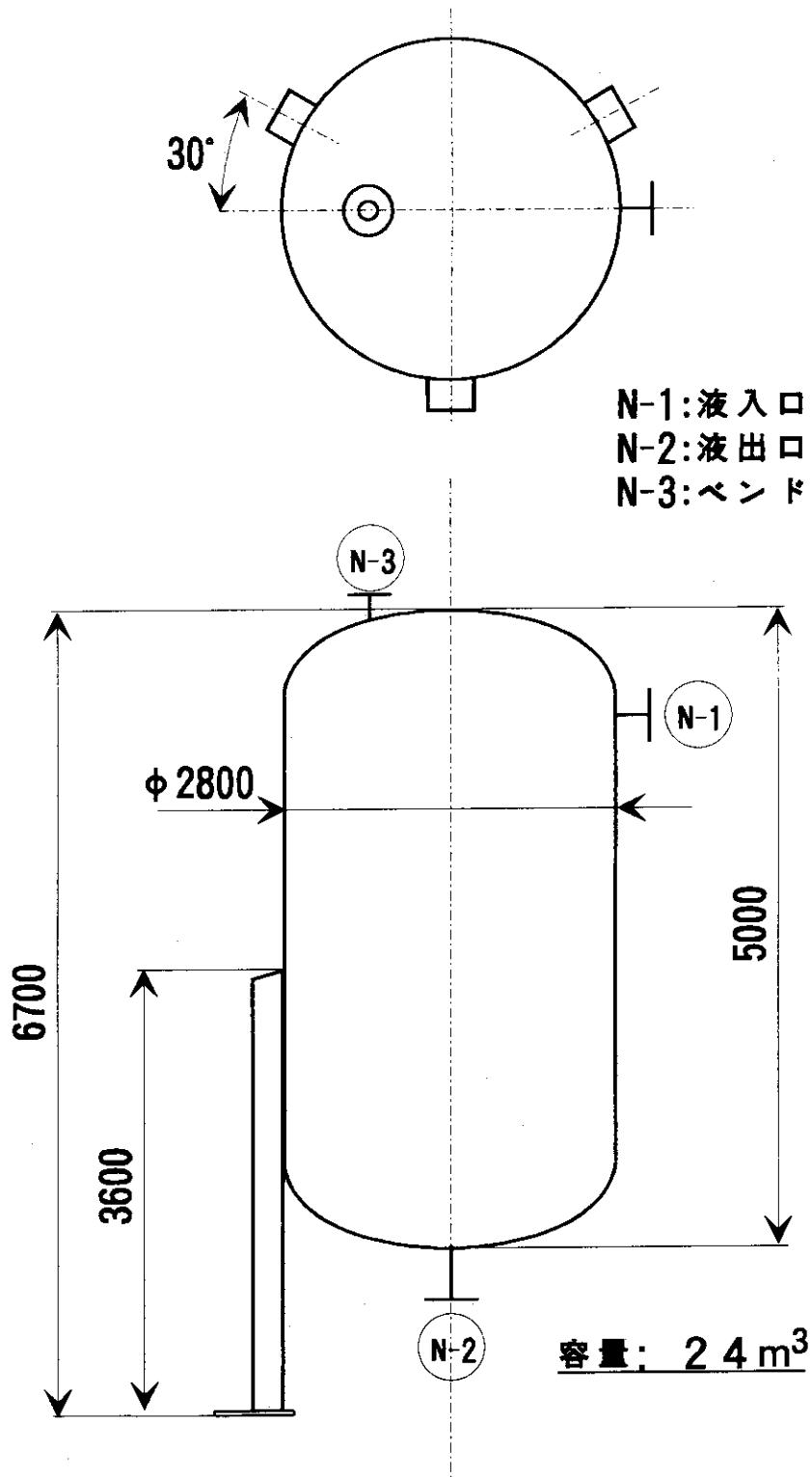
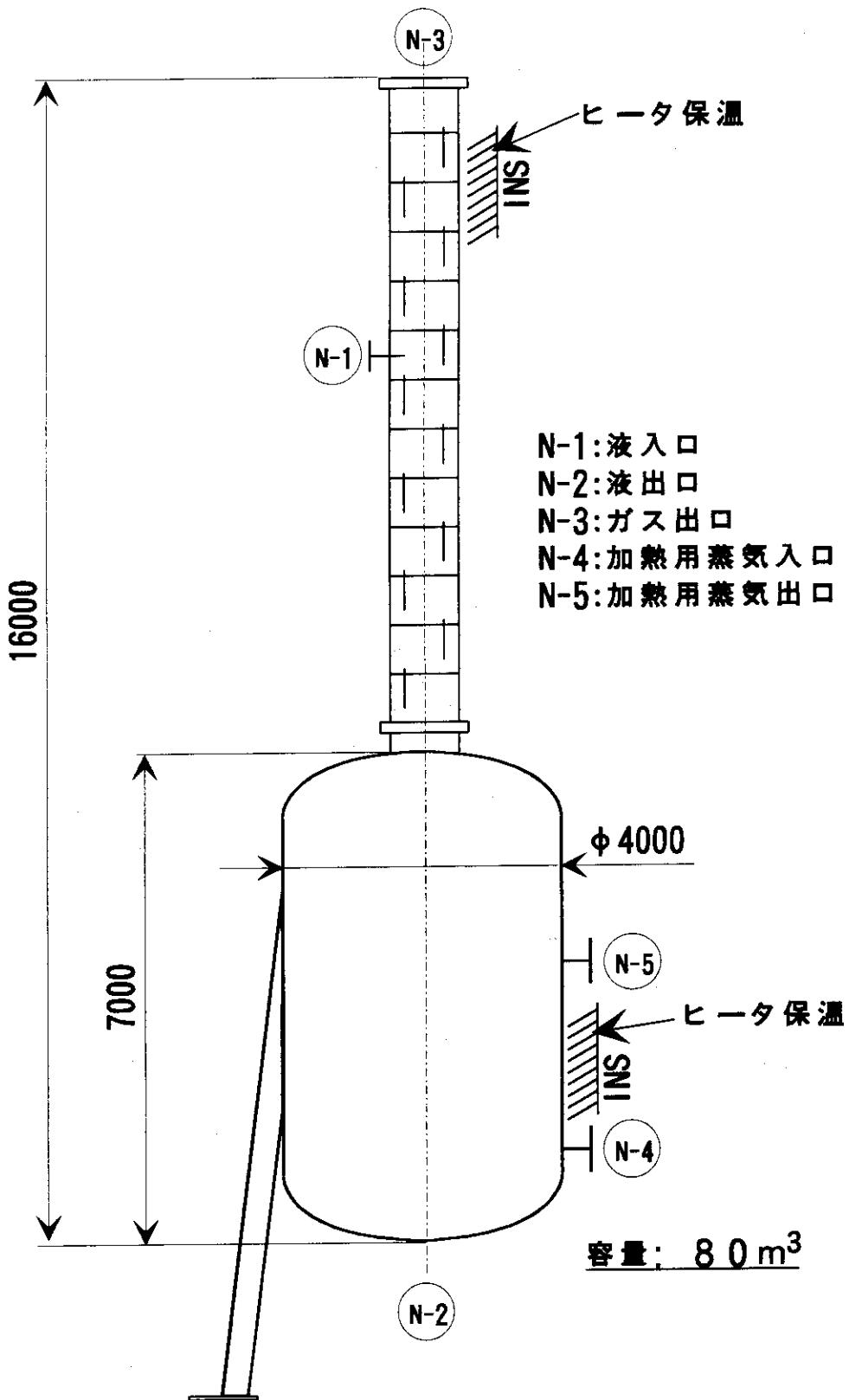


Fig. 4.6 H_2SO_4 reservoir

Fig. 4.7 H_2SO_4 concentrator

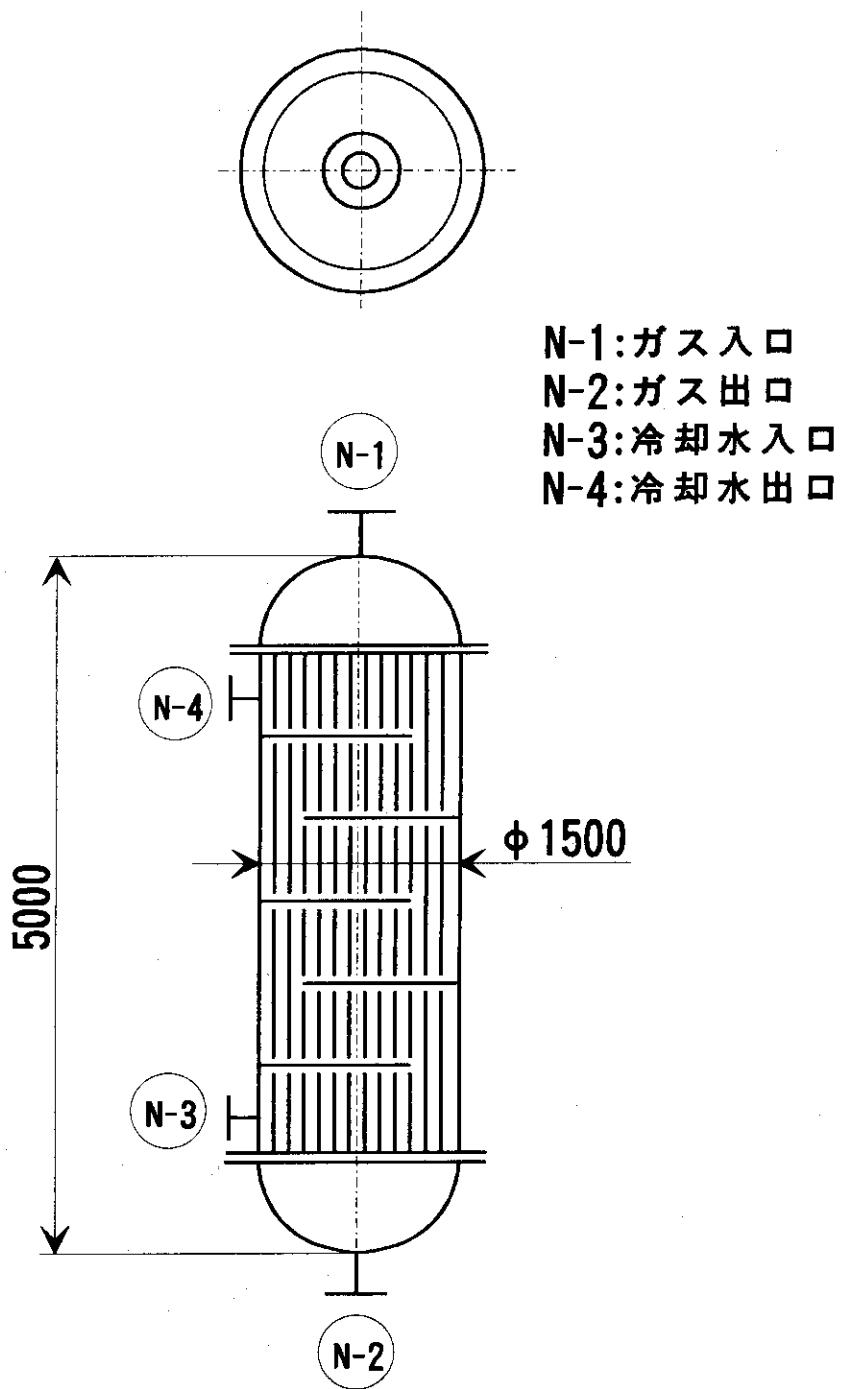
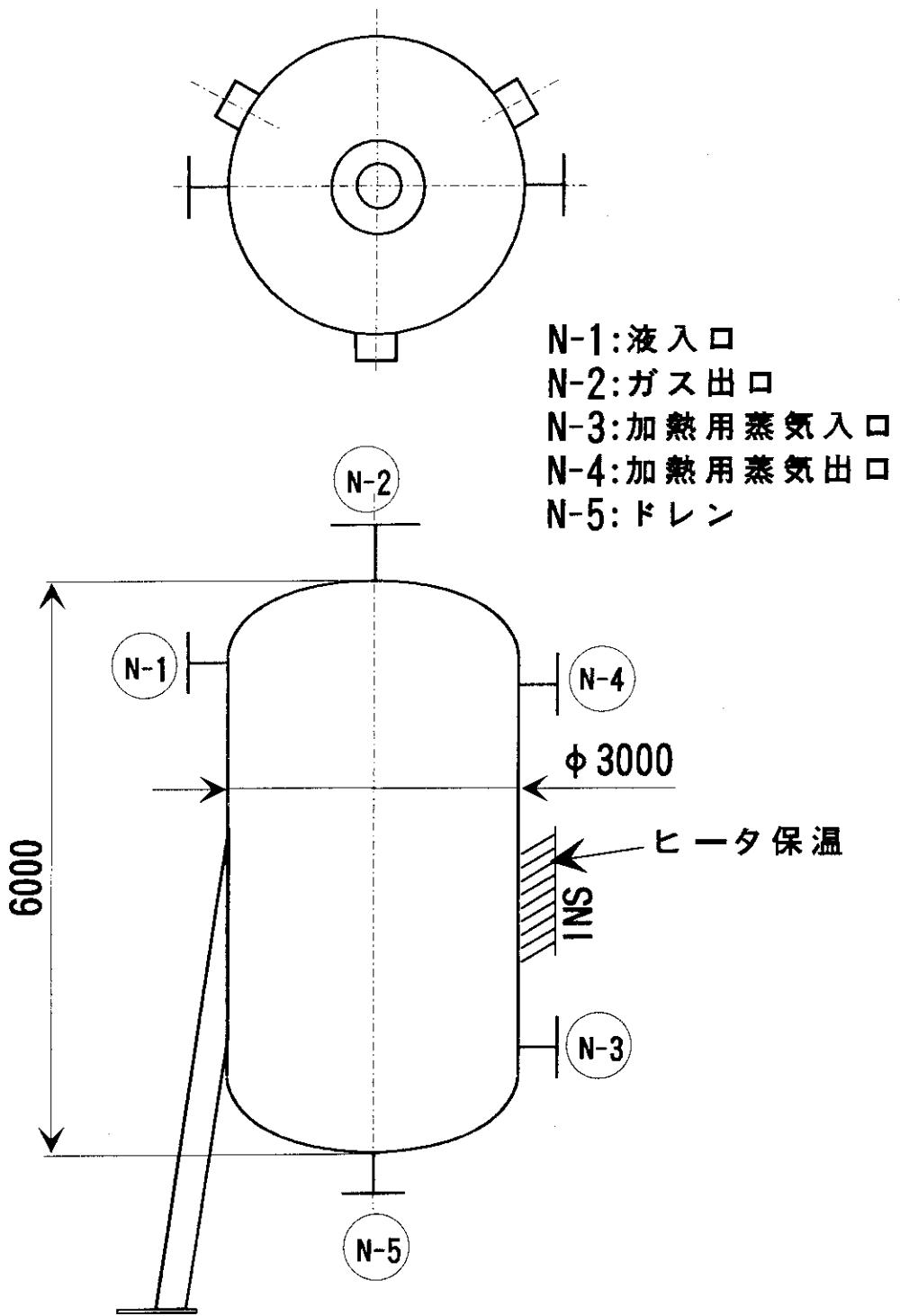


Fig. 4.8 H_2SO_4 condenser

Fig. 4.9 H_2SO_4 vaporizer

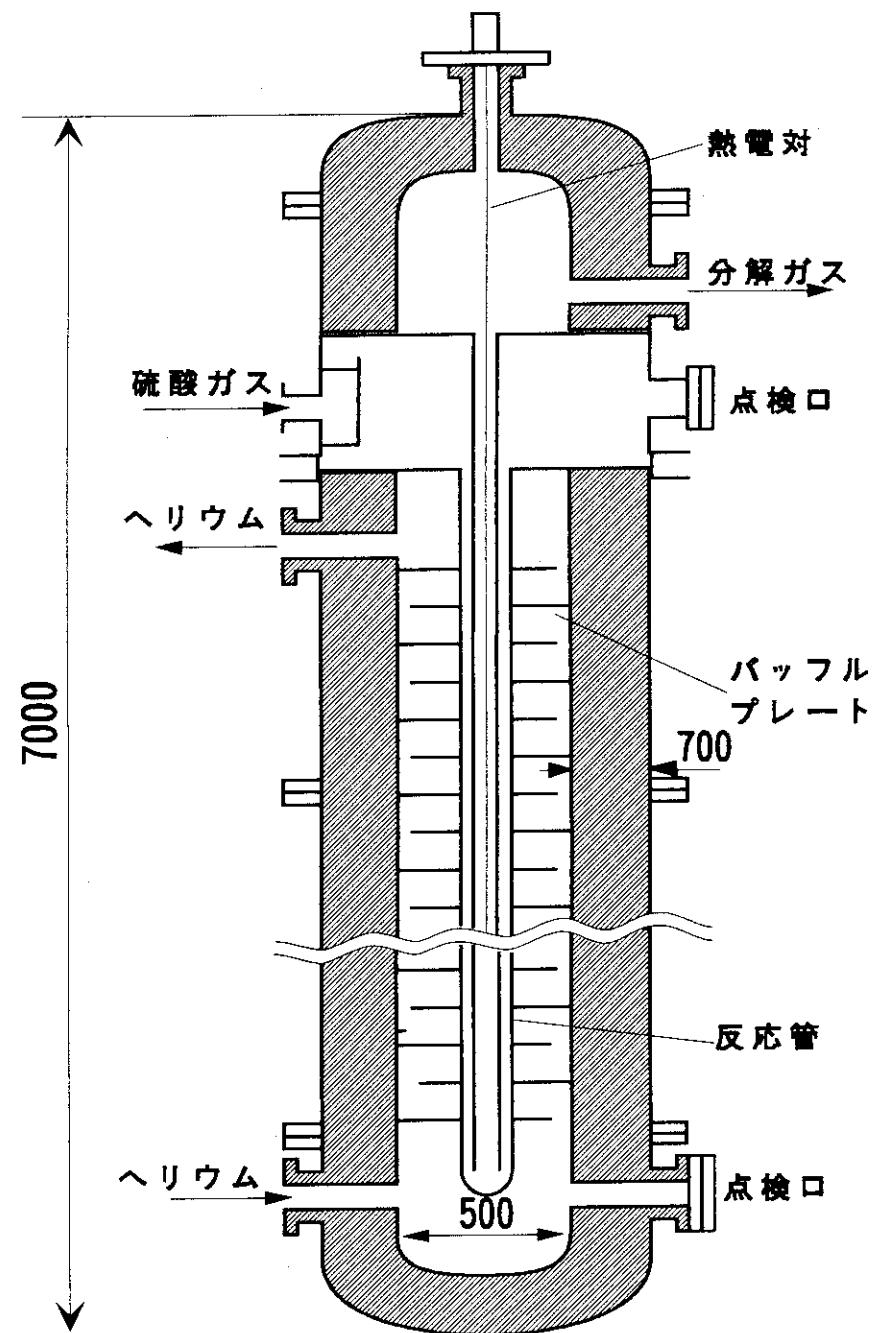
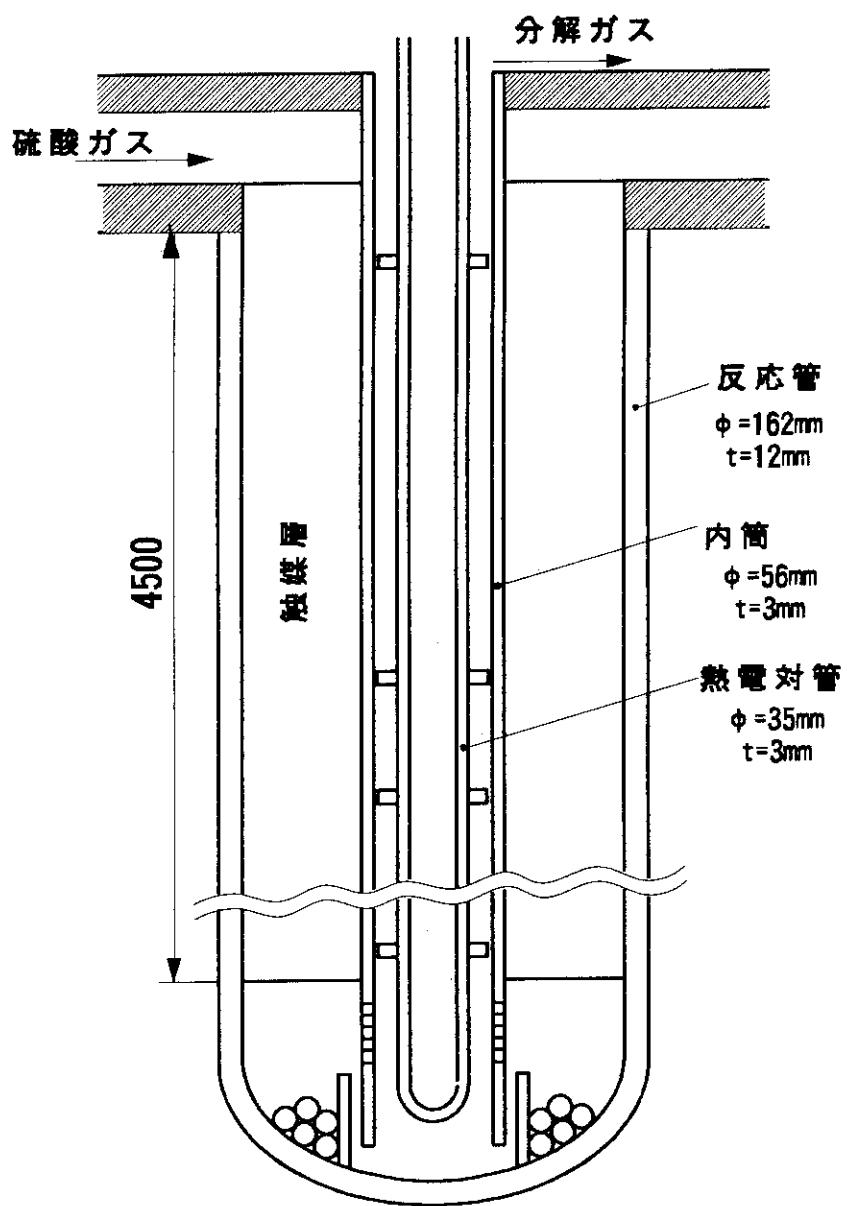


Fig. 4.10 H_2SO_4 decomposition reactor

Fig. 4.11 H_2SO_4 decomposition reactor tube

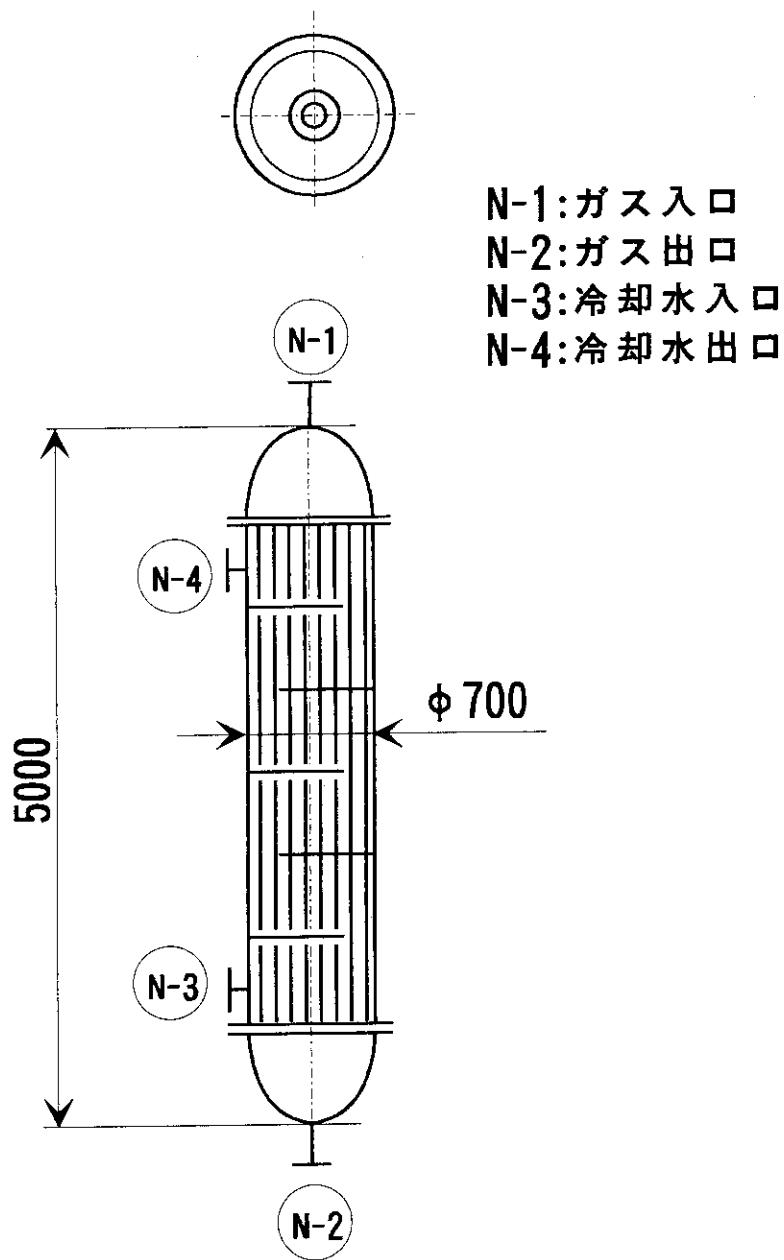


Fig. 4.12 Product gas cooler

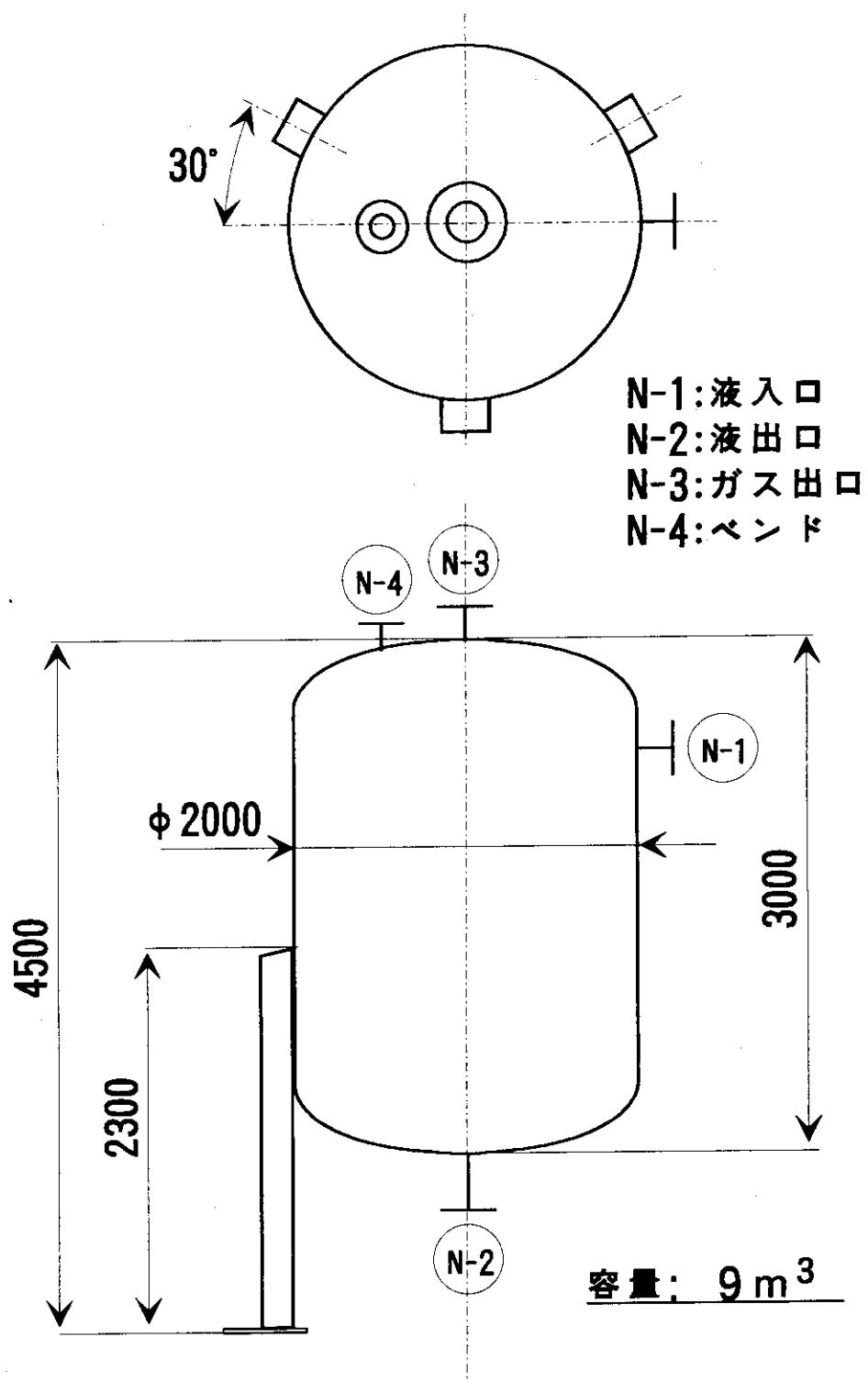


Fig. 4.13 H_2SO_4 separator

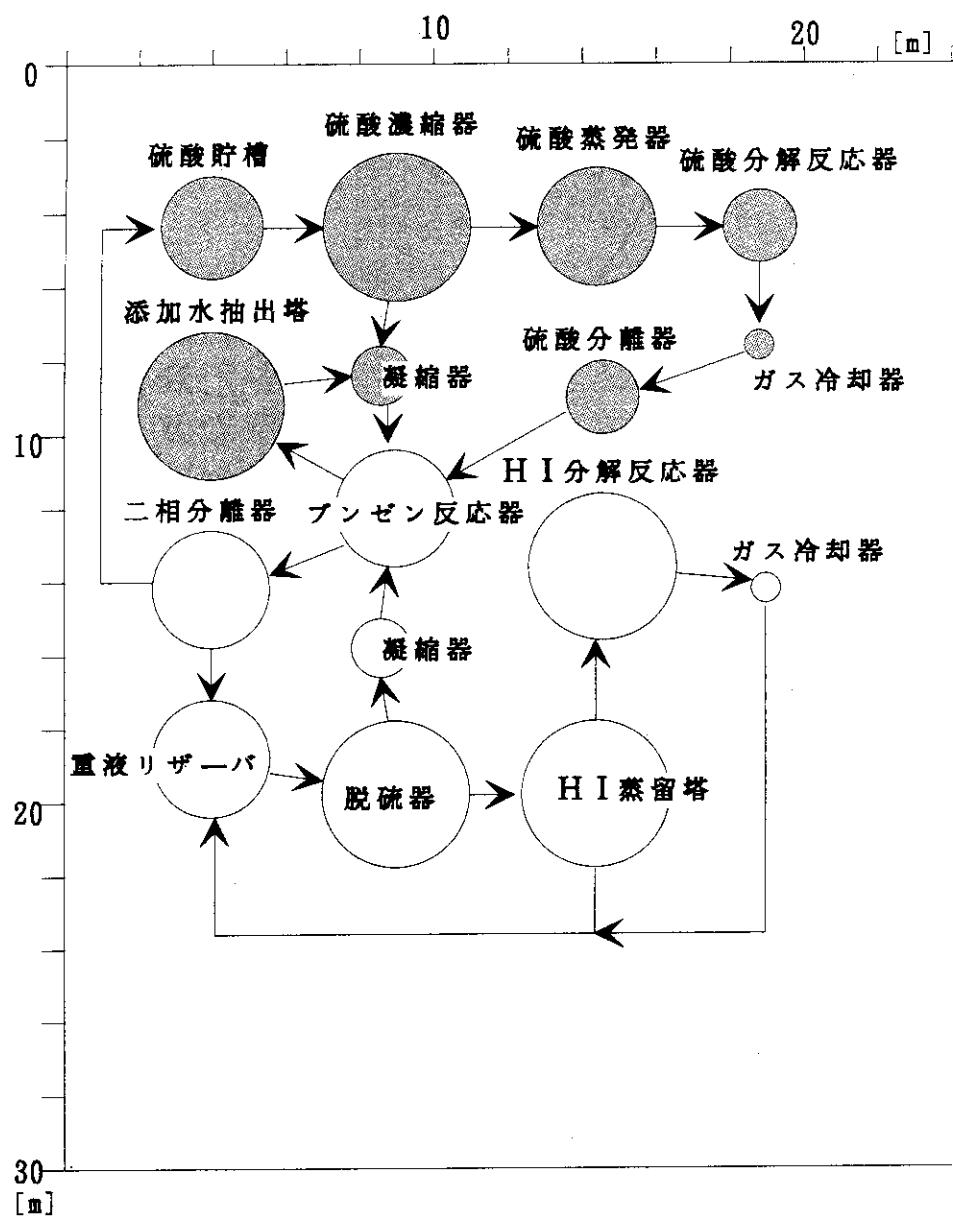


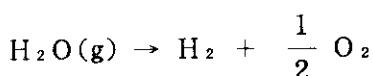
Fig. 4.14 Arrangement of demonstration test apparatus

5. 高温水蒸気電解法による水素製造

5. 1 はじめに

高温水蒸気電解法は、固体電解要素（以後、電解要素と呼ぶ。）を用いて最高1000°Cの高温水蒸気を電気分解（電解）するクリーンな水素製造法である。高温水蒸気電解法は先進的な電解プロセスであり、要素技術の研究開発を主とする段階にある。

Fig. 5.1に酸素イオン導電体を電解質とする高温水蒸気電解法の原理を示す。陰極側に供給された水蒸気(H₂O)は外部からの電力で還元されて水素(H₂)になり、酸素イオン(O²⁻)は電解質中を移動して陽極で電荷をうけて酸素(O₂)となる。この過程は可逆であり、逆反応が固体電解質型燃料電池である。この電解反応では電解質が水素と酸素の分離膜として機能しているが、全反応は次の水蒸気分解として表せる。



水蒸気の電解は、高温では自由エネルギーが低下するために低電圧で可能となるほか、電極における電荷授受が速やかに進行するため、分極抵抗等に打ち勝つための電圧（過電圧）も低くてすむ。このため、常温での水電解に比較して少ない電気エネルギーで反応が進行することになる。さらに、電解要素の主要部品はセラミックスで構成されているために腐食の問題が少ないという利点も有している。

高温ガス炉を熱源とする高温水蒸気電解装置を設計するためには、高温水蒸気の電解特性、システムの運転特性などのデータの取得・蓄積、実用的な電解要素の開発などが課題である。そこで、これらの課題に対処するために円筒型及び平板型電解要素を試作して電解基礎試験を行ってきた。本章では、これまでに得られた基礎試験結果、HTTR接続プラントの試案等について述べる。

5. 2 円筒型電解要素による試験⁽¹⁾

(1) 円筒型電解要素の概要

試作した円筒型電解要素の概要をFig. 5.2に示す。電解要素は、カルシア安定化ジルコニア製の円筒管（基体管）表面上に12個のセルを配置しており、12個のセルを配置した区間が高温水蒸気の電解部となる。水蒸気は基体管壁内を透過して陰極に到達し、水素と酸素に解離する。解離した水素は基体管壁を透過して主流中に入り、系外へと導かれる。酸素イオンは電解質中を陽極側へ移動し、陽極で電荷の授受を行って酸素ガスとなる。基体管の外径は22mm、肉厚は3mm、全長は710mmである。

セルは、基体管外表面に陰極膜（ニッケル（Ni）サーメット）、電解質膜（イットリア（8モル%Y₂O₃）安定化ジルコニア、YSZ）、陽極膜（ランタンコバルタイト、LaCo₃O₃）の順で成膜している。各セルはニッケルアルミニウム（NiAl）とニッケルクロム（NiCr）を主成分としたインターフェクターで電気的に直列に接続されており、電解部の両端から電極リード膜（インターフェクターと同じ材料）を電解要素の両端まで引き出している。

る。インターフェクター及び電極リード膜の外面には酸化による材料変質と生成した水素の透過を防ぐために、保護膜（YSZ）と気密膜（Al₂O₃）を成膜してある。いずれの膜もプラズマ浴射で成膜しており、その厚さは電解質膜が約0.13mm、その他の膜厚さは0.1~0.25mmの範囲にある。また、セルの有効長さは19mm、インターフェクタ部の長さは9mmである。電解要素の両端には電極端子及びシール端として銅コーティングを施し、電極リード膜をこれに接続している。銅コーティングには電解電力供給用のPt線もロード付けしてある。

(2) 試験装置

Fig. 5.3に試験装置の系統を示す。試験では、アルゴンガスを露点発生器に通し、所定の量の水蒸気を含有させて試験部に供給した。このとき、基体管などがスケールで目詰まりするのを防ぐために蒸留水を用いた。試験部は、電解要素を収納した金属管を3分割加熱方式の豊型電気加熱炉内に設置したもので、水蒸気含有ガスは電解要素の内側に供給する。電解要素の外側には乾燥空気（露点-15°C以下）をコンプレッサーから供給して、酸素量の低下によるLaCoO₃の分解と水蒸気の介在によるYSZとの反応を防ぐようにした。水蒸気が流れる配管は結露を防ぐためにヒータを巻き付けて保温した。

電解要素の入口／出口部において、ガス及び空気の流量、圧力、温度、及びガス露点をそれぞれ計測した。また、高速のオンラインガスクロマトグラフ（スキャン速度90秒）を試験部出口に設置して水素ガス濃度を測定し、その測定値を基にして水素発生量を求めた。電解電圧は直流電源装置から所定の電圧値で印加し、電解要素を流れる電流は標準抵抗器（1Ω）を用いて電圧値に変換して計測した。計測データはすべてデータロガーを経てパソコンに集約し、ハードディスクに保存した。

Fig. 5.4に試験部の概要を示す。電解要素は内径49.5mmのインコネル600製円管内に挿入しており、電解要素両端の銅コーティング部でグランドパッキンによる気密シールを行った。電気炉での加熱と併せて、電解要素入口部においてシーズヒータによる予熱を行い、要素内のガス温度を調整した。電解要素内部には10本のK型熱電対（シーズ径1mm）を挿入して流れ方向のガス温度分布を測定し、電解部での平均温度を電解温度とした。また、高温のガスが流出する電解要素出口部にはグランドパッキンを保護するために、パイプ型水冷却器と水冷却壁を設けた。電解要素にロード付けしたPt線は電極端子を介して直流電源に接続した。

なお、本試験部では電解要素入口部にガス予熱ヒータを設置したが、高温ガス炉用のヘリウムガス加熱型電解モジュールでは電解要素を長くして入口から電解部までの距離をとれば水蒸気及び空気を十分に昇温することができる。また、電解要素の設置・交換の容易性からはグランドパッキンによる気密シールが適していると考えられ、電解モジュールではパッキンを保護するための冷却器を水及び空気予熱用熱交換器として用いることにより熱利用率を高めることが可能である。

(3) 試験条件及び試験操作

試験は次の条件で行った。

電解温度 : 850°C, 900°C, 950°C

アルゴンガス流量 : 2.2Nl/min

供給水蒸気量 : 最高0.32g/min (=0.018mol/min)
 試験部入口圧力 : 0.11MPa
 供給空気量 : 4~5Nl/min

ここで示した流量は0.1MPa(1atm)、0 °Cにおける標準状態(N)で換算した流量である。後述する水素発生密度も同じ標準状態で表している。

また、試験前に陰極膜の還元を行った。この操作は高価なPt材を電極に用いる場合には必要ないが、本試験のように実用化を目的としてNiサーメットを陰極に用いた場合には不可欠である。すなわち、成膜されたNiサーメットはYSZと酸化ニッケル(NiO)の混合物であり、両者ともに電気絶縁体であるため、NiOを還元して電子導電体であるNiに変換する必要がある。この還元操作では電解要素は燃料電池として動作する。ちなみに、水素濃度が約6%、ガス温度が850 °Cにおいて約10V（1セル当たり約0.85V）の直流電圧（無負荷）を発生することを確認した。還元操作は電解温度等を変更する毎に最低数時間実施した。

電解温度までの昇温速度はセル構成膜の熱膨張による剥離・破損を防ぐために約10°C/hとした。また、標準ガスによるガスクロマトグラフの校正は還元操作時等を利用して随時行った。電解要素に電圧を印加するときは、急激な電圧印加による局所的なジュール熱の発生を抑制するために水素の発生がほぼ検知できる電圧まで徐々に（0.4V程度ずつ）高めてゆき、試験電圧に設定後は30分以上保持してから次の試験電圧へと変化させた。印加電圧を下げるときも同様に徐々に降下させた。後述の試験結果は、1分間隔で記録した試験データのうち、試験電圧に設定してから10分以上経過して安定した状態にあるデータ（約20分間のデータ）を平均したものである。

(4) 代表的な試験結果

Fig. 5.5に水素発生密度と電流密度の関係を示す。電流密度はセルの単位面積当たりの電流値である。本試験における水素発生密度の最高値は、850 °Cでは108mA/cm²のときに23.9NmL/cm²h、900 °Cでは105mA/cm²で27.3NmL/cm²h、950 °Cでは131mA/cm²で44NmL/cm²hであった。また、電流密度が45mA/cm²以上において、水素発生密度との間に線形な関係が見られる。次式は、試験データを基にして水素発生密度Q_{H2} [NmL/cm²h] と電流密度i_a [mA/cm²] の関係を整理したものである。図中の各実線は次式を表している。

$$Q_{H2} = 984.7 - 1.722T_a + 7.427 \times 10^{-4} T_a^2 - (6.744 - 1.136 \times 10^{-2} T_a + 4.502 \times 10^{-6} T_a^2) i_a$$

ここで、T_aは電解温度の絶対温度[K]である。

なお、水素発生密度は、本来、電流密度と線形な関係があり、それらは原点を通る直線で表されるはずである。上式を水素発生密度がゼロに延長すると20~30mA/cm²の電流密度となり、電解に寄与しないリーク電流が存在していることがわかる。リーク電流を低減させるには、成膜技術の一層の向上が必要である。

また、水素発生密度をさらに高めるためには、基体管壁内を拡散透過して陰極面に到達する水蒸気量を増加させる必要がある。しかし、気孔率の増大は電極膜や電解質膜の付着性の悪化及び付着強度の低下を引き起こすため、気孔率を現在の値（約38%）以上に高めることができないのが現状である。この解決策の一つとして、基体管を使用せずに電解質自身がセルを支持する方式、すなわち、焼結等で成形した固体電解質の内外面に電極を成膜する電解質自立方式

にすることにより陰極への水蒸気の到達が容易になる。同時に、発生した水素の滞留を防止できるため、過電圧を低下させる効果もある。

Fig. 5.6に発生した水素を燃焼させたときの低位発熱量と電解要素印加電力との関係を示す。水素の燃焼熱の算出に当たっては、電解要素に水蒸気を供給していることから低位発熱量($=67.2\text{W/mol}$)を用いた。図中に示す実線は発生水素の燃焼熱と印加電力が等しい、すなわち電解のエネルギー効率(=水素の燃焼熱／印加電力)が100%であることを表している。正味の水素発生は4W程度の印加電力から開始しているが、印加電力を増大させてもエネルギー効率は100%に達していない。高温水蒸気電解では外部から熱エネルギーが加えられるので、エネルギー効率は原理的に100%を越えるはずである。しかし、いずれの電解温度でも100%以上には達しておらず、過電圧による電力損失やリーケ電流が低いエネルギー効率の要因と考えられる。過電圧を低下させるには、上述した電解質自立方式の電解要素構造の採用や、YSZよりも高い酸素イオン輸率を有する電解質材料の使用(例えば、イッテルビウム安定化ジルコニア)、電子導電率の高い材料の電極膜、インターフェクターなどへの使用に加えて、過電圧並びにリーケ電流を低減するために電解要素を構成する膜の薄膜化と膜同士の接触電気抵抗の低減をはかる成膜技術の一層の開発が必要である。

試験終了後、温度サイクルの影響を調べるために電解部の温度を室温まで $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の速度で降下させ、再度 850°C まで同じ速度で昇温して電解試験を試みた。電圧を14Vまで印加しても電流密度は 20mA/cm^2 程度までしか上昇しなかった。 900°C に昇温して同じ操作を行ってもほぼ同じ状況であった。そこで、 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 程度の速度で降温させた後に電解要素を取り出したところ2個のセルの陽極膜が剥離していた。このような陽極膜の剥離は燃料電池の発電試験においても観察されている。陽極膜の LaCoO_3 は他の材料に比べて電子導電率は優れているものの熱膨張率が2倍以上大きいため、今回剥離した部分の付着力は熱膨張に起因する応力に耐えられるほど高くなかったものと考えられる。円筒型電解要素の熱サイクルに対する耐久性は実用化の一つの鍵となるものであり、陽極膜材料の探索・開発や成膜技術の開発が重要である。

5. 3 平板型電解要素による試験^(1,2)

5. 2節で述べた基体管方式の円筒型電解要素では、水素発生密度は基体管壁内での水蒸気拡散に影響されるため、富士電機(株)と共同で水蒸気が陰極膜に直接到達する電解質支持方式の実用サイズの平板型電解要素を試作して、電解試験を開始した。本節では、予備試験で得られた結果について述べる。

(1) 平板型固体電解要素の概要及び試験条件

Fig. 5.7に試作した平板型電解要素の概要を示す。電解質は縦・横各100mm、厚さ0.3mmのイットリア(8モル% Y_2O_3)安定化ジルコニア(YSZ)の緻密焼結板である。この両面に陰極膜(ニッケル(Ni)サーメット)と陽極膜(ランタンマンガナイト、 LaMnO_3)を塗布・焼成した。陰極膜と陽極膜の厚さはそれぞれ約 $30\mu\text{m}$ 、それらの電極面積は 64cm^2 である。この電極部が高温水蒸気の電解部となる。

電解要素の組込みに当たっては、電解モジュール構造開発の一環として電解要素の組替え等

が容易な圧縮シール方式を採用した。これは、電解要素をSUS310S 製の電解要素収納容器に挟み込み、上部から荷重（最高30N）を負荷して電解要素端面でシール性を確保する方式である。このとき、陽極側のシール面にはアルミナシート（厚さ0.3mm）を挿入して電気絶縁性を確保した。また、陽極室と陰極室内には白金メッシュを波状に成形した通電用金属板を設置して電極面での電流密度の一様化をはかった。通電用金属板が接する収納容器内面には白金シートを溶接して酸化／還元雰囲気中の電気経路を確実にした。

Fig. 5.8に試験装置の系統を示す。1枚の電解要素を組込んだ試験体を電気加熱炉内に設置し、電解要素の陽極側にはコンプレッサーから乾燥空気（露点-15 °C以下）を、陰極側には水蒸気を供給した。水蒸気量は定流量ポンプの吐出し量で調節し、蒸気発生器で発生した水蒸気をアルゴンガスをキャリアーとして陰極側に供給した。試験では、陰極材料のNiの水蒸気酸化を防止するために、少量の水素をアルゴンガスに混入して供給した。外部からの直流電力の印加は、電解要素収納容器に溶接した電極棒を介して直流定電源装置により行った。発生水素量は、電解要素出口に設置した自動ガスクロマトグラフの測定値を基にして求めた。また、電解要素を流れる電流は、標準抵抗器(0.1Ω)を介して電圧値に変換して計測した。

試験は次の条件で行った。

電解温度	: 850 °C
試験圧力	: 0.11MPa
供給水蒸気量	: 0.2g/min
アルゴンガス流量	: 200Nm ³ /min
外部供給水素ガス流量	: 100Nm ³ /min

ここで示した流量は、0.1MPa(1atm)、0 °Cの標準状態(N)に換算した流量である。後述する水素発生量、水素発生密度も同じ標準状態で表している。

(2) 試験結果

電流密度に対する水素発生量の関係をFig. 5.9に示す。ここでは、水素発生量を水素発生密度（=水素発生量／電極面積）で表した。本試験では、58mA/cm²のときに38Nm³/cm²hの水素発生密度を得た。基体管方式の円筒型電解要素の試験では、850 °Cにおいて108mA/cm²の電流密度で24Nm³/cm²hの水素発生密度を得ている⁽²⁾。電解質自立方式の平板型要素ではこの約半分の電流密度で1.5 倍の水素発生密度を得ることができた。本試験で用いた水蒸気を陰極に直接供給できる電解要素構造は、水素製造能力の向上に適していることを示すものといえる。また、水素発生密度と電流密度との間にはおおよそ線形な関係が見られ、限界電流には至っていない。電流密度を高めれば、さらに水素発生密度は増大するものと考えられる。

印加電力に対する水素発生量の関係をFig. 5.10に示す。図では、水素発生量を低位発熱量を用いて燃焼熱で表してある。図中の実線は水素製造のエネルギー効率（=発生水素の燃焼熱／印加電力）が100 %であることを示す。印加電力を増加させて3W近くまではエネルギー効率は100 %を越えており、電解損失が極めて少ない状態を示しているが、電解電力がさらに増加するとエネルギー効率は減少する傾向にある。これは、印加電力の上昇とともに電流密度も大きくなつて水素発生量が増大するが、前述したように過電圧が増加するためにエネルギー効率が低下するものと考えられる。しかし、約10Wと大きい電力を印加したときのエネルギー効率

は76%であり、円筒型電解要素の850 °Cにおける結果よりも約60%向上した。今後は、高いエネルギー効率を維持しつつ、水素発生密度のさらなる増大を目指して、電解質厚さの低減、電子導電率の高い電極材料の探索と使用、電流密度を一様化する通電体開発などを行い、過電圧の低減をはかった高性能な電解要素の試作試験を進める予定である。

(3) 実用化への課題

平板型電解要素は、電解反応器の小型化と要素のコスト低減が可能であるが、実用的な高温電解反応器を設計するためには以下に記す技術的課題を解決することが重要である。

1) 電解要素の高性能化

- ・過電圧を低減化し、エネルギー効率向上をさせた要素構造の開発
 - 量産可能な要素構造と製作技術の確立
 - 電子導電率の高い電極材料の探索と使用
 - YSZよりも高い酸素イオン輸率を有する電解質材料の使用
(例えば、イッテルビウム安定化ジルコニア)
 - 電子導電率の高い材料の電極膜インターフェースなどへの使用
 - 電解要素を構成する膜の薄膜化
 - 膜同士の接触電気抵抗の低減をはかる成膜技術の開発
- ・熱サイクルに対する耐久性確保
 - 付着強度の高い成膜技術のさらなる開発。
- ・電解要素の大型化(電解反応器の高出力化)
 - 量産可能な製作技術の開発

2) モジュール構造におけるスタック化技術

- ・高温シール構造の開発
 - 水素／水蒸気シール構造(耐還元性、耐酸化性シール材料の開発)
- ・高温通電経路の合理化(低コスト化)
 - 電流密度を一様化する低コスト通電体の開発

また、電解反応器に高温水蒸気等を供給するための高温過熱器の開発も重要である。

5. 4 HTTR接続プラントの試案

高温水蒸気電解のHTTR接続プラントとして、次の条件で検討した。

構成

- (1) 電解に要する電力は蒸気タービン発電で賄う。
- (2) 水予熱器、蒸気発生器、蒸気過熱器などは水蒸気改質システムと同型式のものを使用し、配置等も同じにする。
- (3) 電解反応器は二重容器構造とし、外側には保温用に高温ヘリウムガスを流し、内側に電解モジュールを設置する。内側には不活性ガスを充填し、水素、酸素の漏洩に対して爆

発等の危険性を回避する。

- (4) 生成した水素はタンクに貯蔵するものとする。
- (5) 電解モジュールの陽極側には空気を少量供給し、生成した酸素を高分子膜等のガス分離器で分離・回収する。

IHXからの熱量内訳

蒸気タービン発電用	9. 8 MW
電解用蒸気生成+電解反応器保温	0. 2 MW

蒸気タービン発電

タービン入口／出口温度	30 °C / 550 °C
発電効率	42 %
発電量	4110 kW

水素製造量

エネルギー効率	90 % (供給蒸気温度 880 °C)
水素製造量	1230 Nm ³ /h
燃焼熱換算	3700 kW (低位発熱量基準)

Fig. 5.11 にプラントの概要を示す。HENDELでの炉外実証試験の場合には、水素製造量を 100 Nm³/h 規模（燃焼熱換算で 300 kW 規模）にして全体システムを小型化すれば、反応器の動特性試験を効率よく実施することが可能である。また、HENDELでの試験では、生成した水素を貯蔵し、これを燃料として電解反応器に供給することにより、燃料電池（SOFC）として機能させることができる。すなわち、一つのユニットを切り替えて電解による水素製造と燃料電池発電を行うことが可能である。この試験を HENDEL で行うことにより、夜間電力等の余剰電力で高温水蒸気電解による水素製造を行い、電力不足時に製造した水素で燃料電池発電を行うことで、ベースロードとしての原子力発電に効率的な電力貯蔵システムを付加することが可能である。

5. 5 まとめ

高温水蒸気電解法については、本章で述べたように要素技術の研究開発段階にある。今後、電解要素の高性能化に加えてモジュール化技術の開発を進める必要がある。この意味で、HTTR 热利用系としての早期実現は困難であり、将来の熱利用系としての位置付けが妥当である。ただし、これは高温水蒸気電解法の道を閉ざすものではなく、この方法は燃料電池の逆反応であることから、ベースロードとしての原子力発電にこのシステムを付加して、夜間電力等の余剰電力で高温水蒸気電解による水素製造を行い、また、電力不足時には製造した水素で燃料電池発電（高温水蒸気電解の逆反応）を行うことにより、効率的な電力貯蔵システムの構築が可能である。

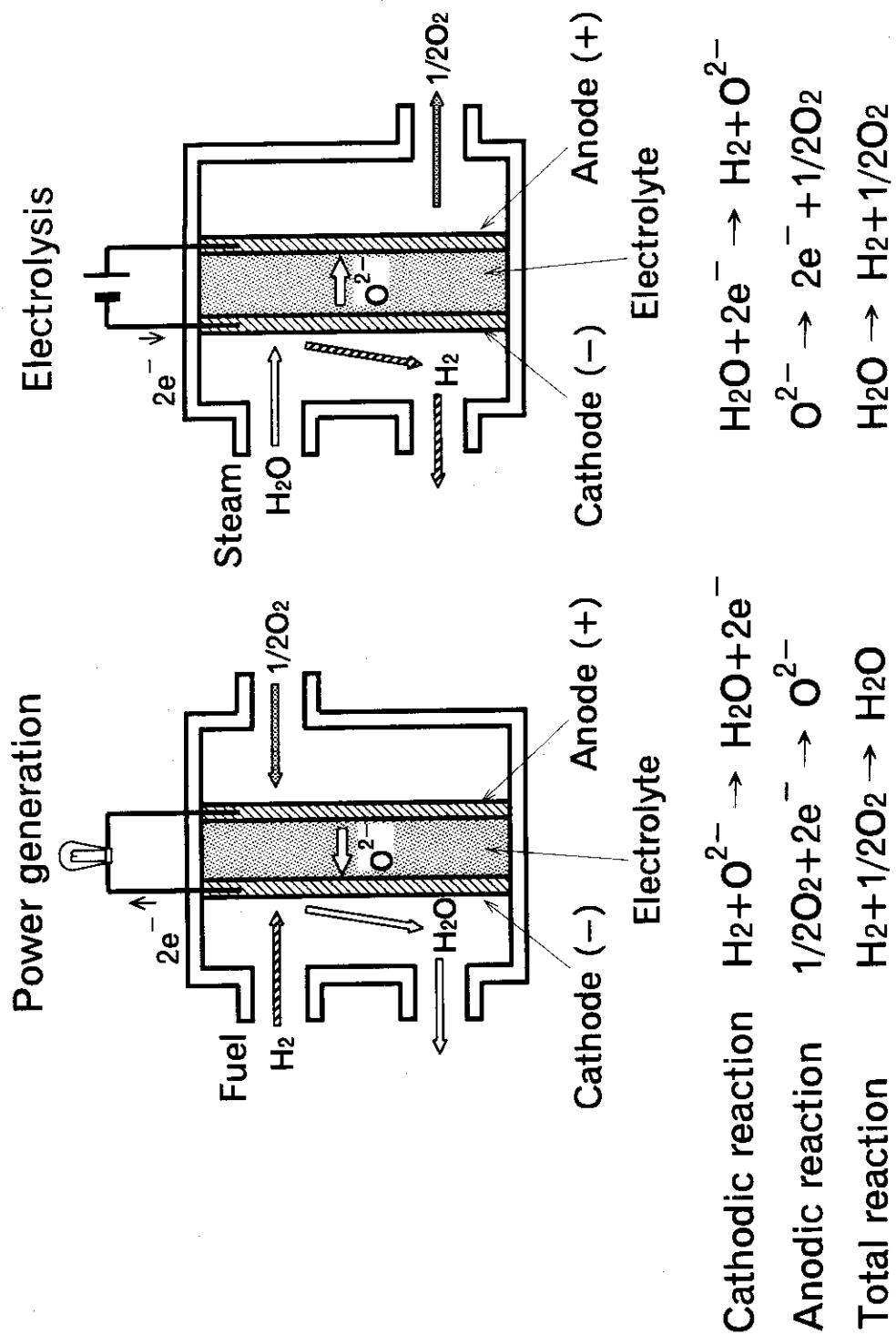


Fig. 5.1 Concepts of high-temperature electrolysis of water steam and solid-oxide fuel cell

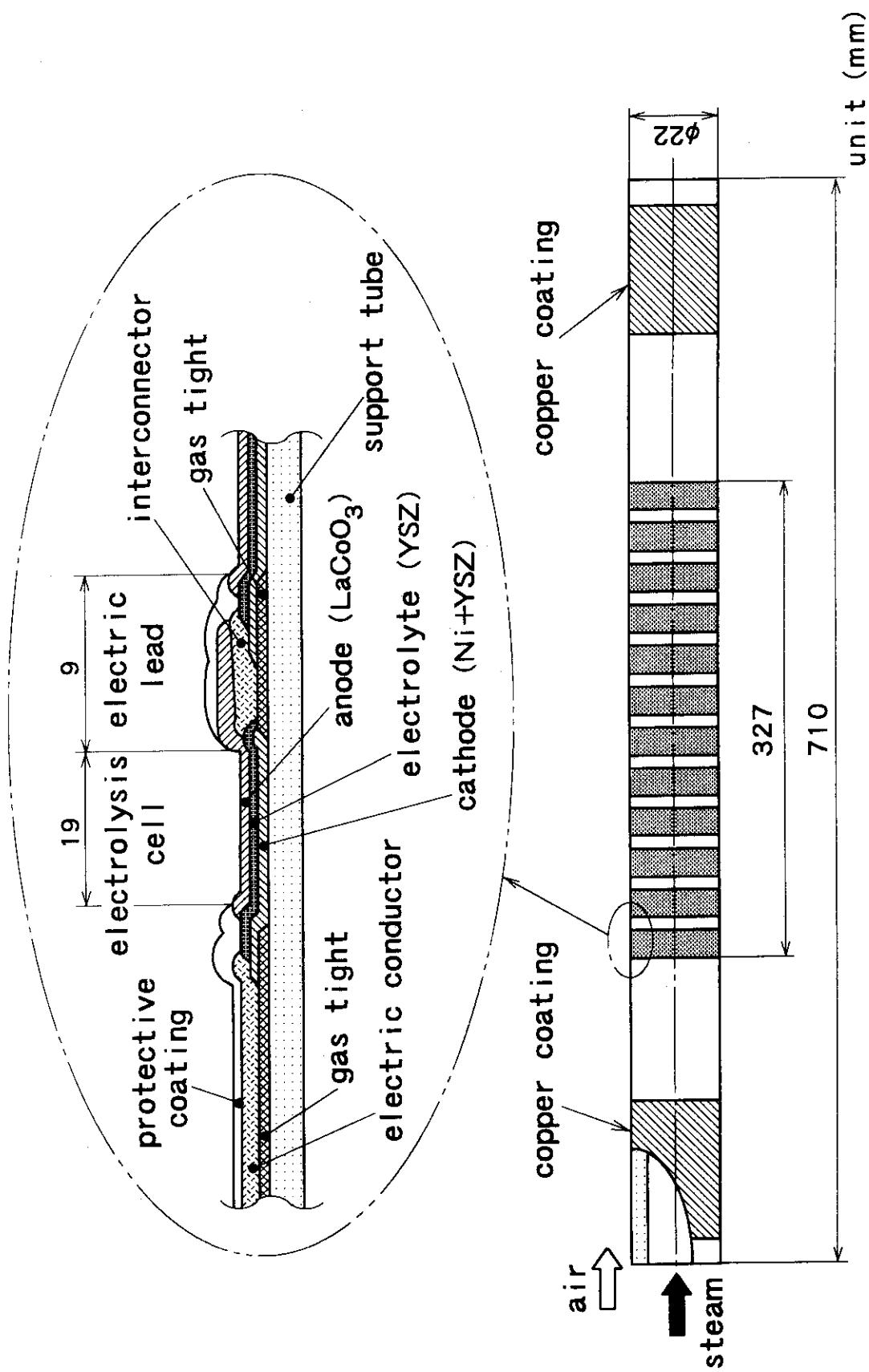


Fig. 5.2 Schematic drawing of electrolysis tube with 12 cells

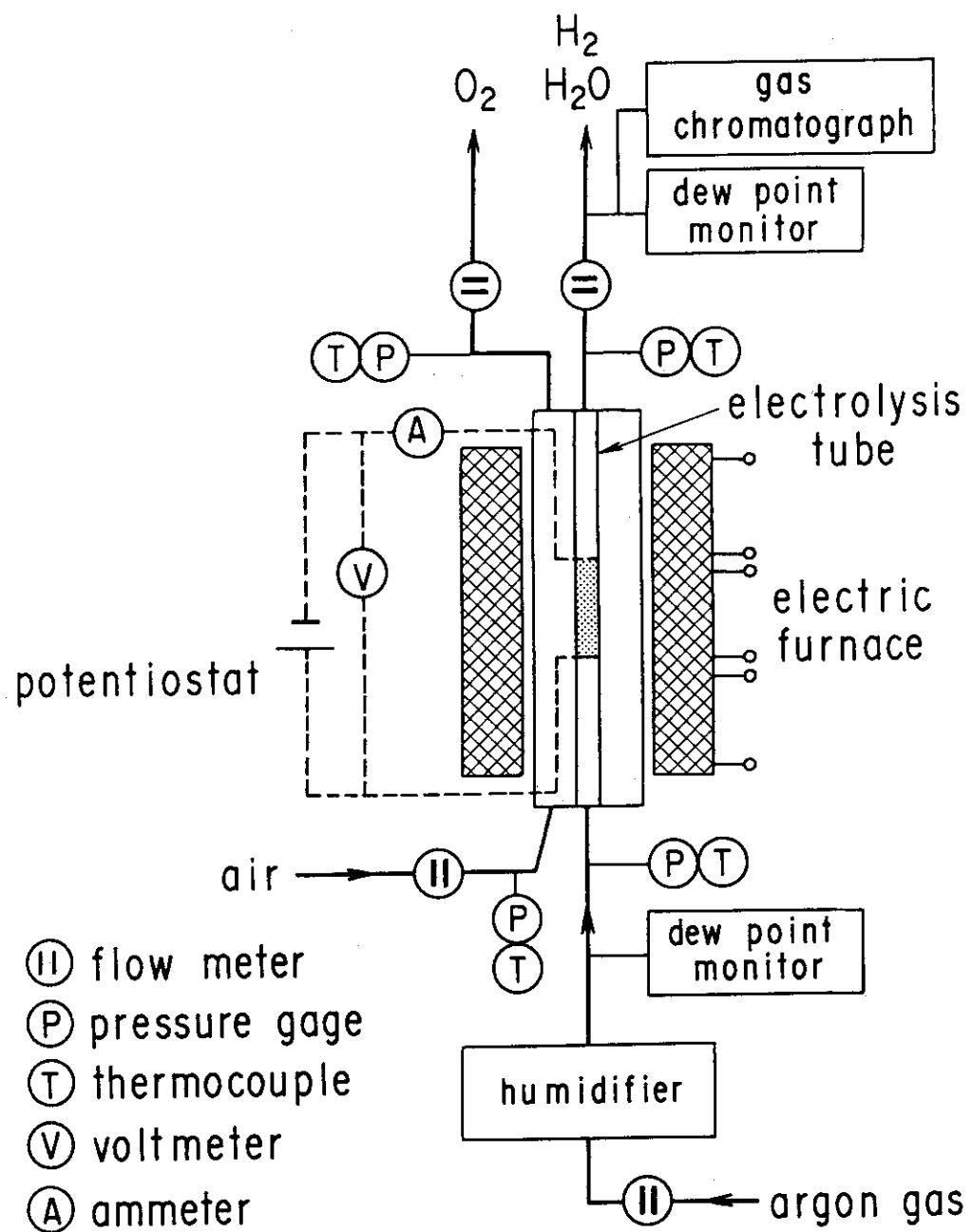


Fig. 5.3 Flowsheet of test apparatus for electrolysis tube test

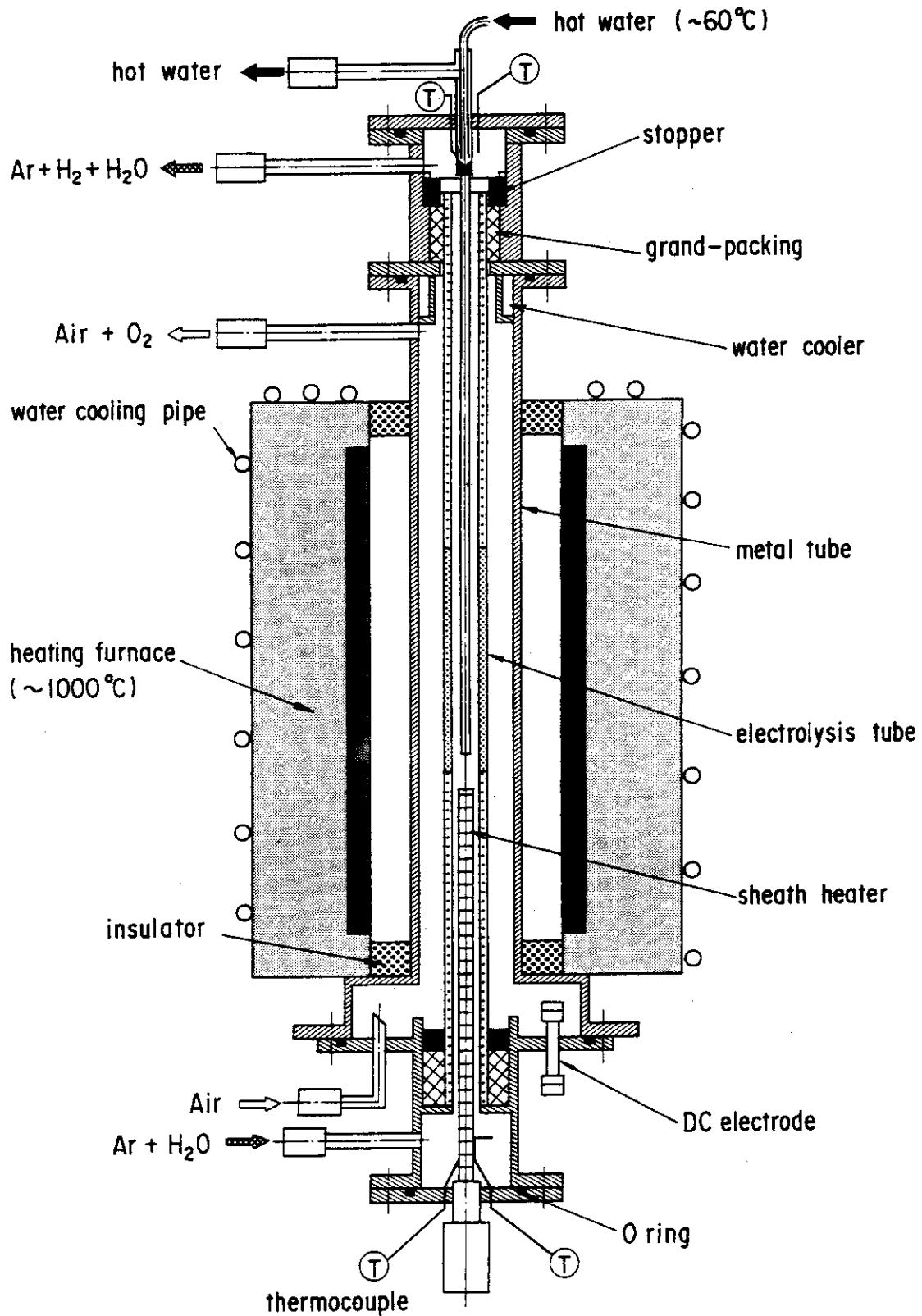


Fig. 5.4 Schematic drawing of test section installed in an electrolysis tube

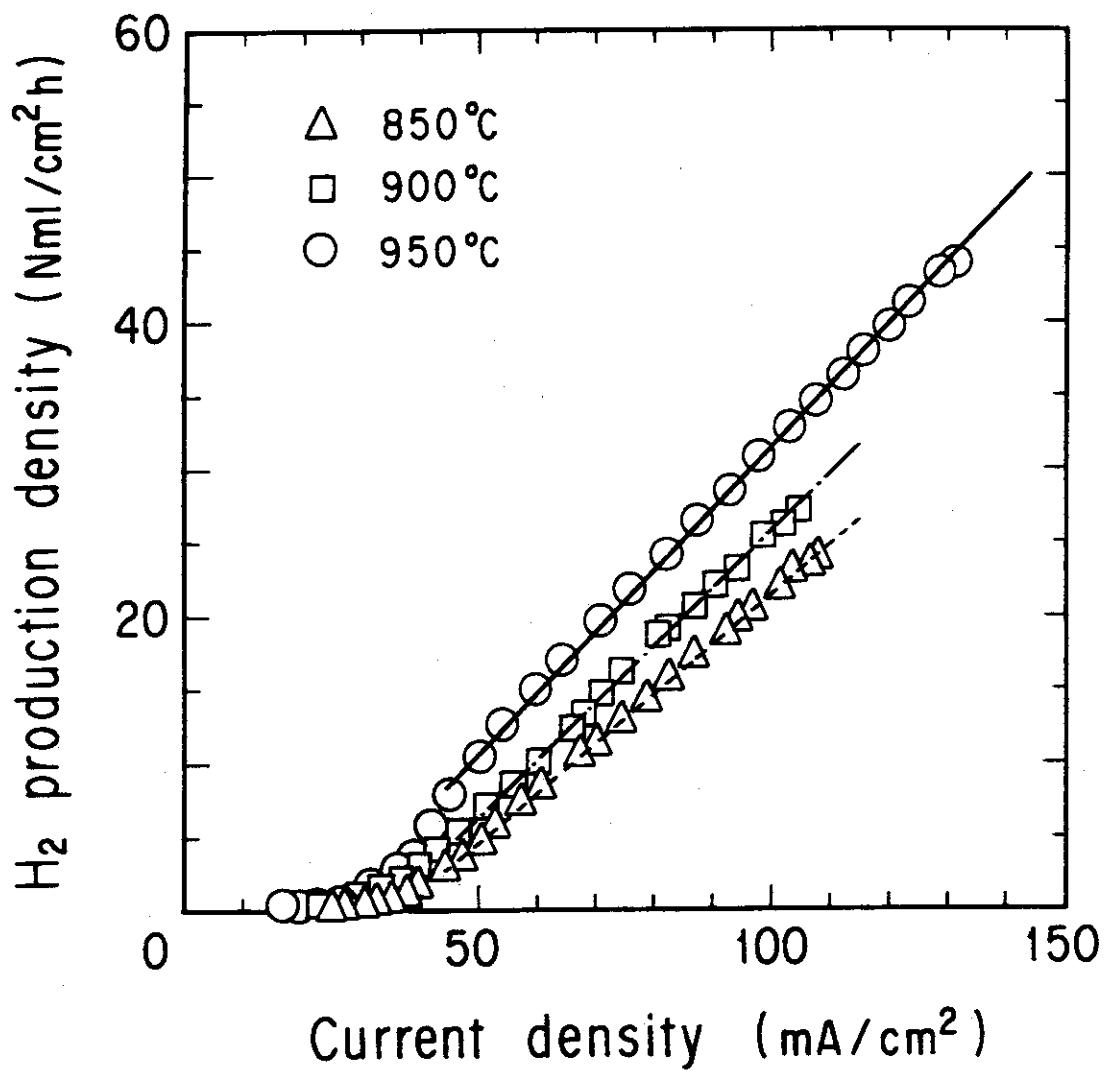


Fig. 5.5 Relationship between hydrogen production density and current density obtained by an electrolysis tube

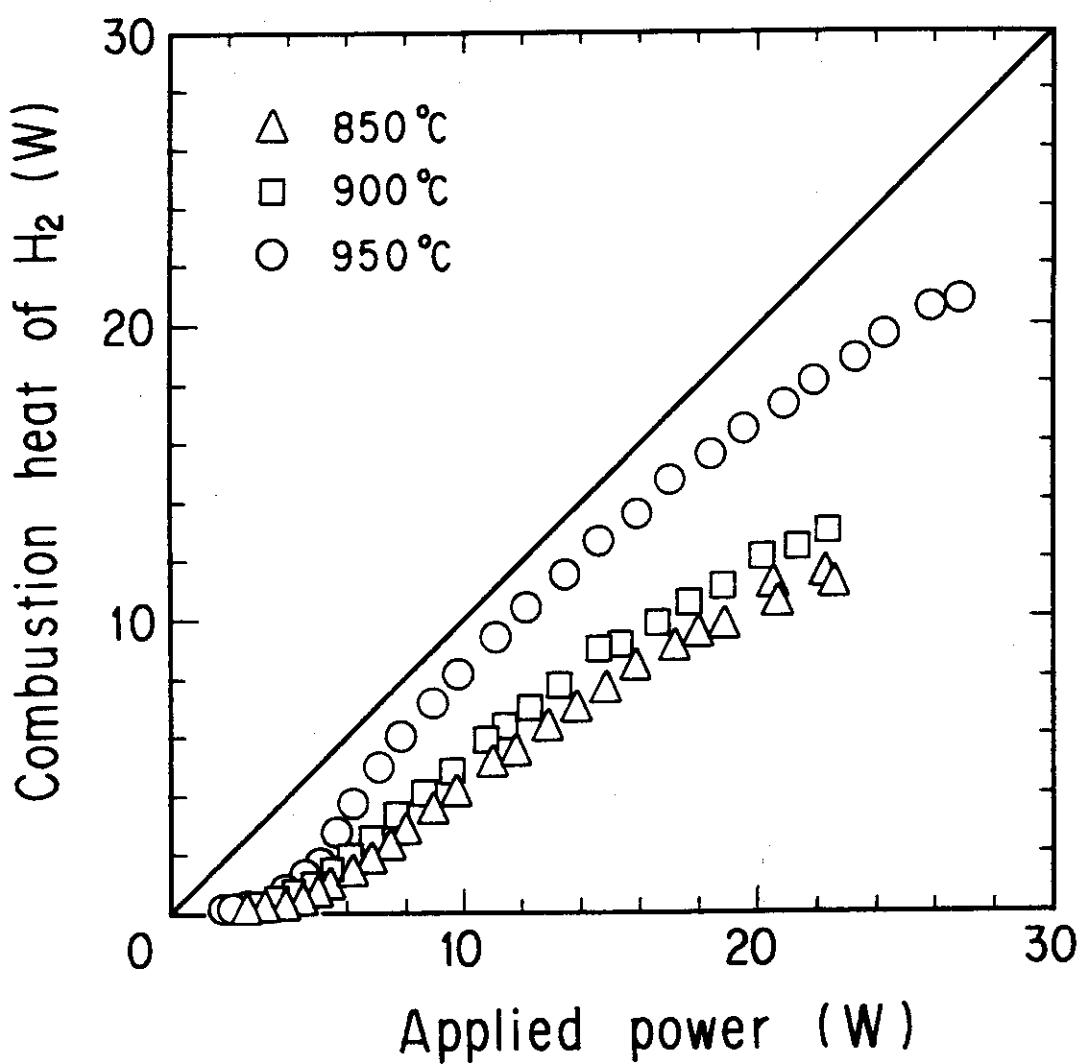


Fig. 5.6 Relationship between applied power for electrolysis and combustion heat based on hydrogen production rate obtained by an electrolysis tube

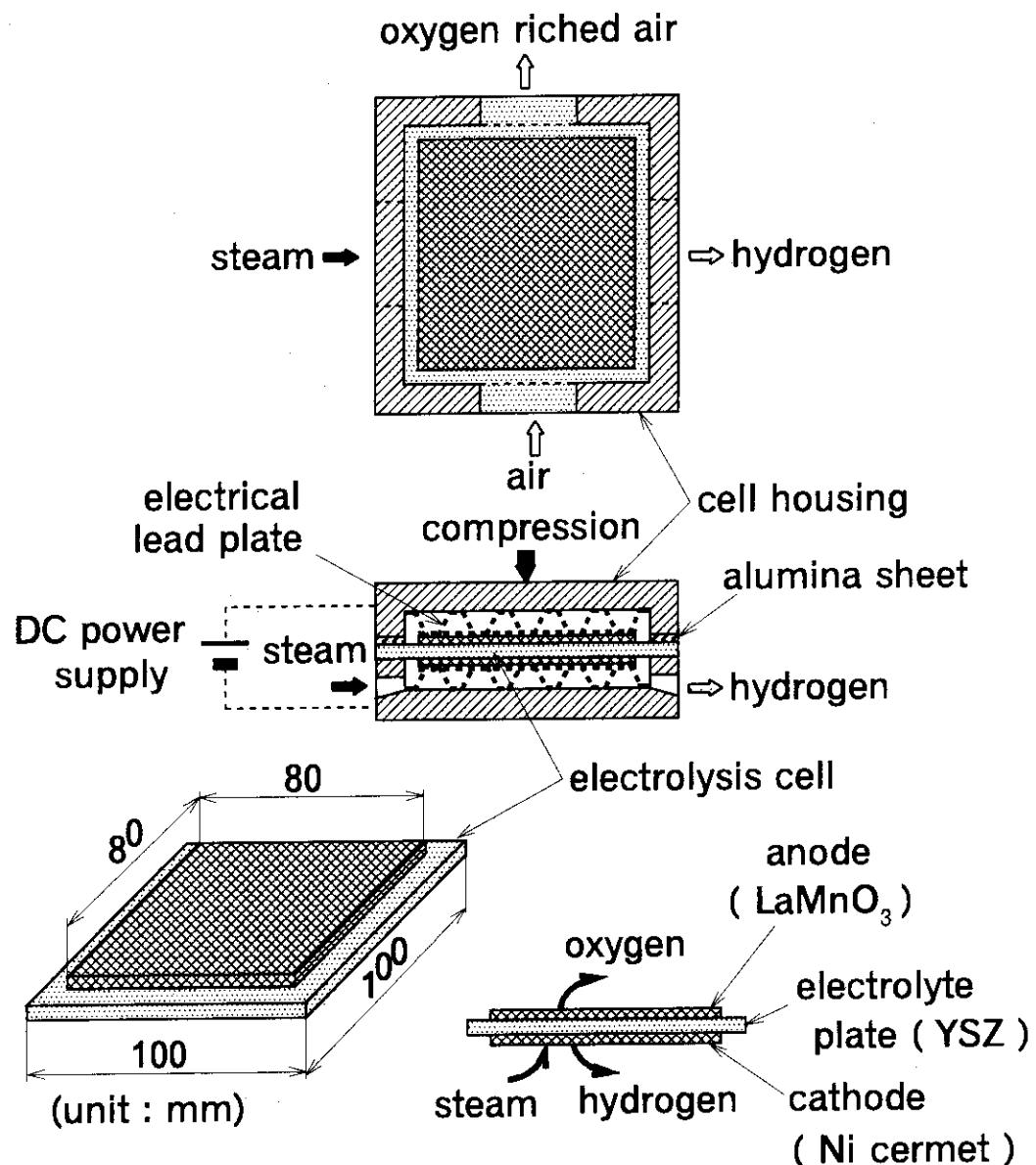


Fig. 5.7 Schematic drawing of planar type electrolysis cell

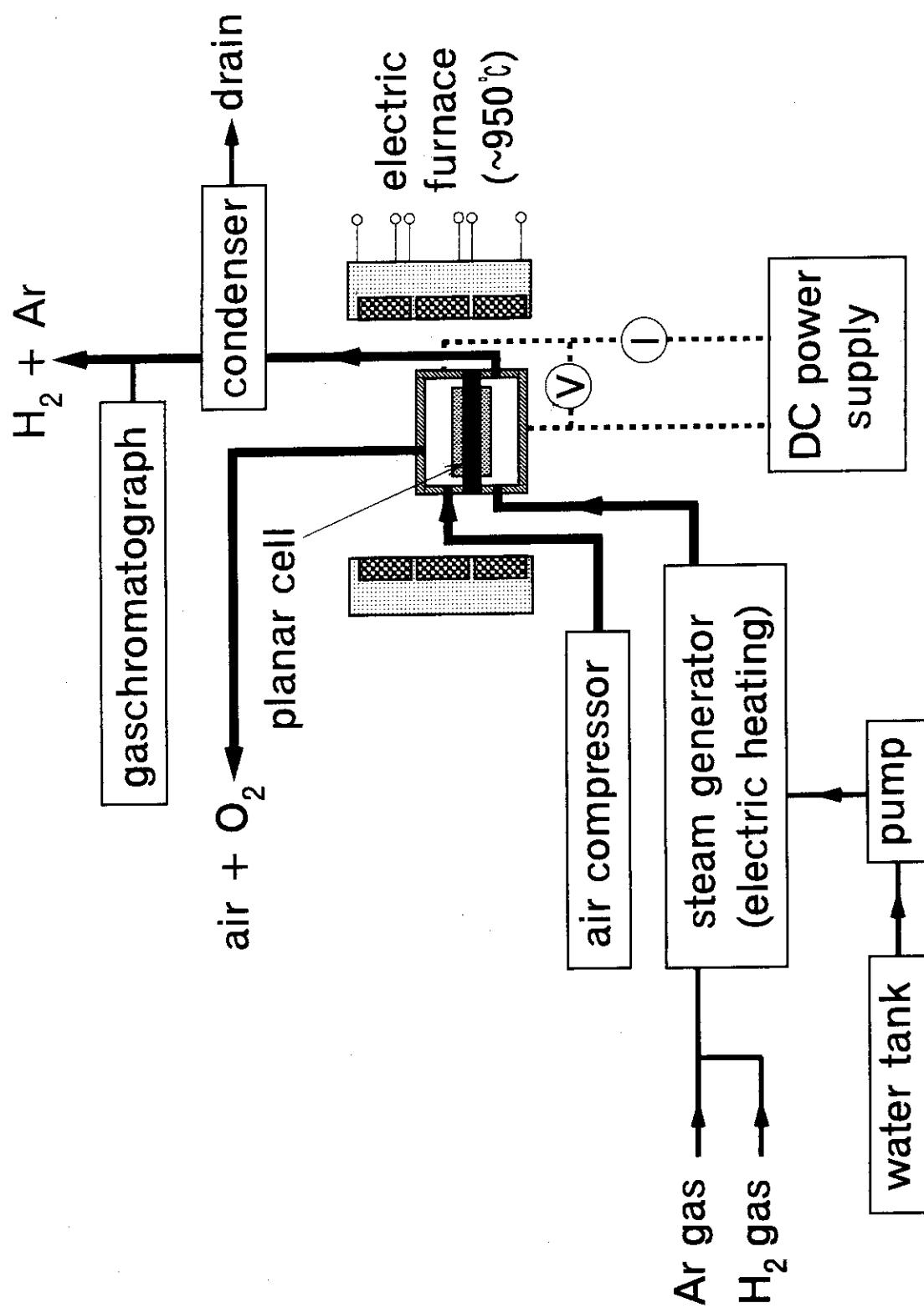


Fig. 5.8 Flowsheet of test apparatus for planar cell test

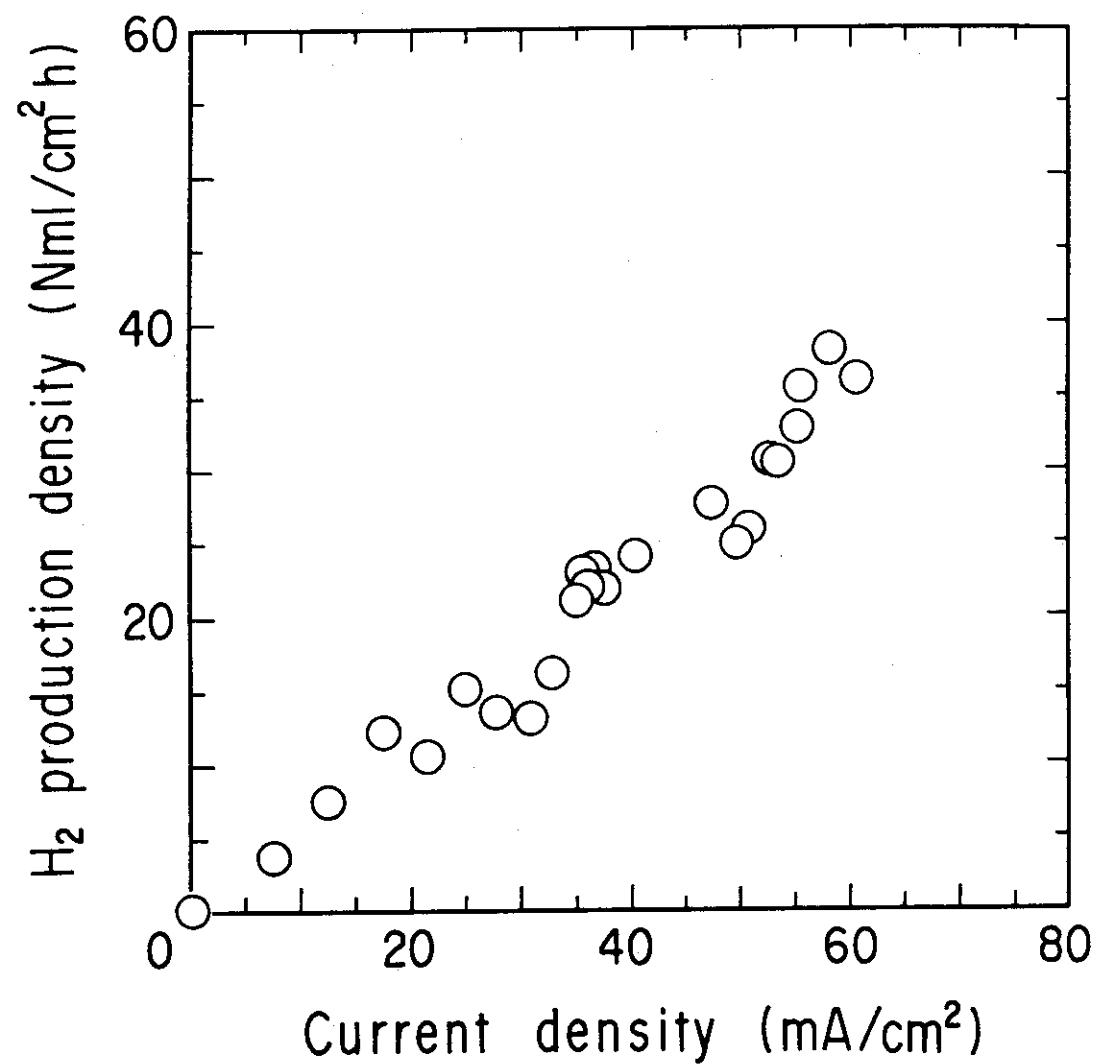


Fig. 5.9 Relationship between hydrogen production density and current density obtained by a planar cell

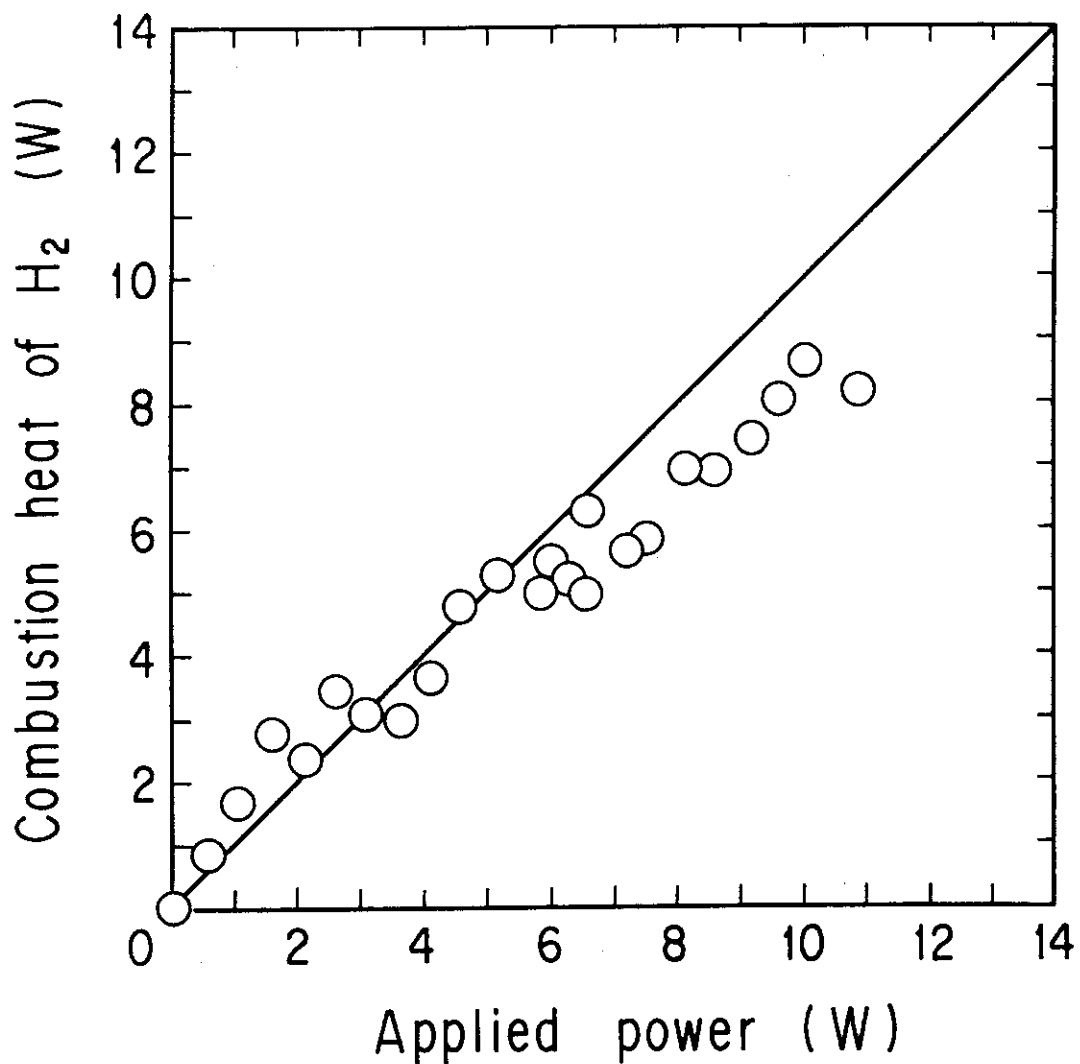


Fig. 5.10 Relationship between applied power for electrolysis and combustion heat based on hydrogen production rate obtained by a planar cell

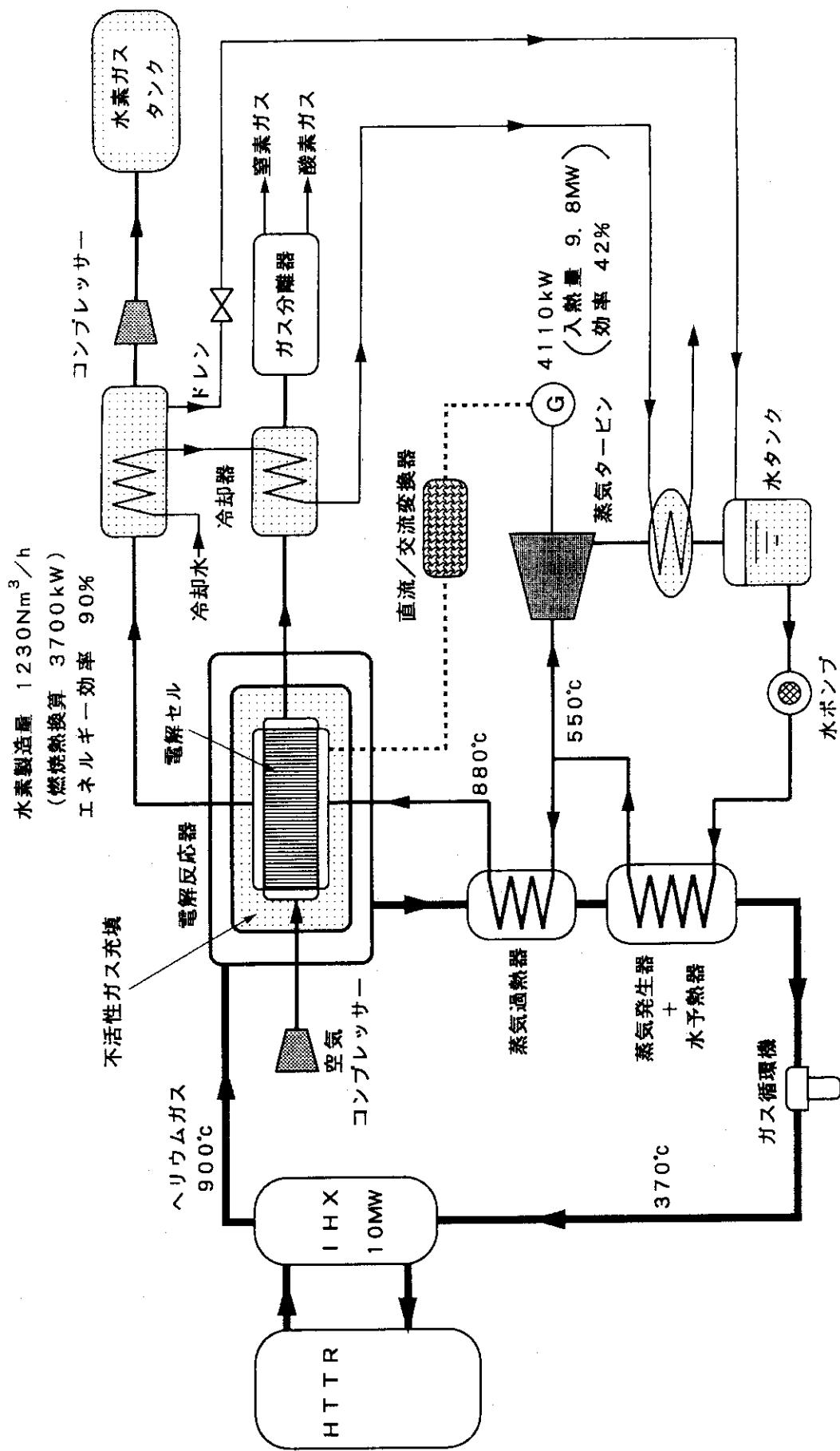


Fig. 5.11 Tentative plan of pilot plant connected to HTTR

6. ガスタービン発電

6. 1 開発の現状

現在の発電は蒸気タービンプラントが主流であるが、オープンサイクルのガスタービンプラントも蒸気タービンプラントと比肩し得る実績を有している。熱効率を向上させるには、タービン入口での作動流体温度をできるだけ高温にすればよい。しかし、蒸気タービンの場合はタービン入口での作動流体温度を高温にすると、タービンローターの製作が困難になることに加えて、ボイラ、配管、弁、タービンなどの材料費及び製作費が高騰して経済性のメリットも少なくなるため、現状では550°C～650°Cが温度の上限とされている。このため、熱効率は蒸気条件の良い火力プラントにおいて約41%である。これに対してガスタービンは高温の作動流体を利用するため、タービン入口温度の上昇とともに熱効率も向上する。高熱効率という魅力から、各国でガスタービン発電の研究開発が行われてきた。以下に、主要各国におけるガスタービン技術の開発・研究について述べる。

(1) ドイツにおける開発⁽¹³⁾

ガスタービン技術は第2次世界大戦末期にドイツで実用化され、その後、開放サイクルガスタービンはもとより、蒸気サイクルと組み合わせた複合サイクル及び閉サイクルガスタービンの研究開発が進められてきた。閉サイクルガスタービンの分野では、1960年代初期から現在まで石炭燃焼等による実用プラントを建設、運転しており、それらは単純ガスタービンサイクルより原理的に優れた再生及び中間冷却方式を採用している。

一方、1970年の初期から高温ガス炉の開発と各種利用系に関する研究開発の一環として、高温ガス炉への応用を前提としたヘリウムを作動流体とする閉サイクルガスタービンの開発が計画され、西ドイツ連邦政府の財政援助のもとにハノーファ大学気体力学・ターボ機械研究所、ユーリッヒ研究所、オーバーハウゼン市エネルギー供給公社(EVO)、GHH社、BBC(ABB)/HRB社、SIEMENS/INTERATOM社、SULZER社等がそれぞれの分野で共同研究を行った。これらの共同研究に基づいて高温ガス炉ヘリウムガスタービン計画(HHT計画)が開始され、天然ガス燃焼加熱のオーバーハウゼン・ヘリウム閉サイクル・ガスタービンモデルプラントが建設、運転されるとともに、上記の機関を含めて幅広い分野から多くの専門家によるグループによって、高温ガス炉をヘリウムタービンに結合するための研究が実施された。

オーバーハウゼン・ヘリウム閉サイクル・ガスタービンプラント(以下EVOヘリウムタービンプラントと略称)は、化石燃料加熱、計画電気出力50MW、同暖房出力50.5MWである。このプラントは高温ガス炉とヘリウムガスタービンの結合を目指したHHT計画の成否を判断するための重要なモデルとして運転された。このプラントの運転においては、軸出力の不足、ジャーナル軸の振れ回りによるローター振動、軸封部からのヘリウムガス漏洩、加熱器、熱交換器類及び調節弁等の系統圧損による外部損失増大と実効効率低下、圧縮機及びタービン内部でのヘリウムガス漏洩による内部損失増加等の問題が発生し、プラント熱効率は目標値を下回るものであった。

一方、HHT計画は1968年から1981年まで約1000億円を投じて研究開発が行われた。小型のタービン試験施設による研究に続いて、600MWの実規模タービン試験施設HHVが製作され、

試験が行われた。しかし、上述したようにオーバーハウゼンに建設されて商業発電運転が行われたEVOヘリウムガスタービンプラントの熱効率が高くなかったことに加え、HHVで油漏れ事故等によるトラブルが多発した。さらに、電気出力 600MWのプラント設計においても、長期間の研究を要する技術的課題が提示され、かつ高温ガス炉・蒸気タービン発電プラントの方が10~20%発電コストが低いという評価も示された。これらの結果、HT計画は中止され、高温ガス炉の開発は蒸気タービン発電プラント及びプロセス熱利用に向けられることになった。

(2) 米国における開発⁽¹⁴⁾

1970年代の後半、ヨーロッパのHTGR計画とほぼ同時期に米国でも大型のガスタービン計画(HTGR-GT計画)が展開された。当初は 3000Mwt級の大型プラントの参考設計から開始されたHTGR-GT計画は、1970年代後半には 2000Mwt級に規模が縮小された。しかし、当時のガスタービン技術レベルは低かったため、1979年に実施された各種の応用例の比較評価(蒸気サイクルコジェネレーション発電、ガスタービン、改質及び核熱利用)の結果、1980年には蒸気サイクルコジェネレーション発電HTGRが引き続き注目され、HTGR-SC(蒸気サイクル複合発電)より出力コストが数パーセントだけ低いHTGR-GTガスタービンは長期的な計画として位置づけられた。

その後、大型高温ガス炉開発からモジュラー型高温ガス炉(MHR)へ開発路線が変更されたのを期に、GA社及びMITによりMHRへのガスタービン接続が検討された。GA社は、MHR固有の受動的な安全性を基にして、磁気軸受け、高性能熱交換器などの最新の技術を取り入れた閉サイクルガスタービン発電プラントをMHRに接続するGT-MHRの設計が可能になることを1986年のIECEC会議で初めて報告した。また、MITでは、ドイツのモジュラー型高温ガス炉の概念に基づいたペブルベッドタイプのGT-MHRの研究を行い、熱交換とタービン技術の改良が重要であることを提示している。

GT-MHR構造では、原子炉とガスタービンを直結する直接サイクル(原子炉冷却材をガスタービン作動流体とする)と原子炉とガスタービンを中間熱交換器等で分離する間接サイクル(ガスタービン作動流体は中間熱交換器からの二次冷却材)について、SC-MHR(蒸気サイクル)をも含めた幅広い評価・検討を行い、

- ・商業用の高温ガス炉には直接サイクルGT-MHRが選択されるべきであること
- ・間接サイクルGT-MHRの開発はコンパクトで低コストの中間熱交換器技術の開発を中心にして限定的に行うこと
- ・MHRの基本技術(例えば、燃料)の開発に加えて、直接サイクルGT-MHRの設計を支援するために、最適初期出力、直接サイクル出力変換ループ、ターボ機械、一次系内の核分裂生成物の評価に関する開発研究を推進すること

としている。

(3) フランスにおける開発⁽¹⁵⁾

フランスは早くからMagnox炉を多数建設、運転し、ガス冷却炉の開発に関しては充分な経験を持っていた。さらに、高温ガス炉を国際的に協力して開発するというUmbrella Agreementに参加し、高温ガス炉による蒸気タービン発電プラントの開発に加わっていた。一方、閉サイク

ルガスタービンプラントについては、このタイプのガスタービン開発の黎明期に電気出力12MWの実験プラントをパリに建設し、1952年から運転した。また、1984～1990年頃、宇宙用の発電システムとして閉サイクルガスタービンプラント（20～30MW）の検討が行われた。

90年代に入り米国でG T - M T R の検討が始まると、C E A がこの検討に加わり、ガスタービンと蒸気タービンの複合サイクル発電高温ガス炉プラントの熱効率計算を行っている。複合サイクルの構成としては、次の4種類を検討している。

- ・直接サイクル、再生・再熱なしガスタービン／排熱利用蒸気タービン
- ・直接サイクル、再生・再熱なしガスタービン／水熱交付排熱利用蒸気タービン・間接サイクル、再生・再熱なしガスタービン／再熱式蒸気タービン
- ・間接サイクル、再熱式ガスタービン／再熱式蒸気タービン

(4) 日本における開発

高温ガス炉は950～1000°Cの高温ガスを供給できることから、プロセス熱利用と並んで閉サイクルガスタービンによる発電が当初より有望と考えられていた。このため、原研における多目的高温ガス炉プロジェクトにおいても実験炉にガスタービンループを設置することが検討された。我が国における閉サイクルガスタービンについての実績は非常に少ないが、出力2000kWの天然ガス燃焼発電プラント、出力12000kWの高炉ガス発電プラント及び出力10000kWの船用プラントがこれまでに製作・運転されている。

6. 2 技術的課題

原子炉を用いるガスタービン発電の技術的課題を大別すると、ガスタービン発電そのものの技術的な課題と、熱供給源である原子炉とガスタービン発電システムとの接続から発生する技術的課題とがある。

(1) ガスタービン発電の技術的課題

ガスタービンの熱効率を上げるために作動流体をできるだけ高温で膨張させ、低温で圧縮することが望ましい。ガスタービンに発電機を接続したガスタービン発電システムを成立させるための技術課題と対策を以下に記す。

1) ガスタービンサイクルの基本概念の選択

空気を吸気、圧縮して燃料と混合、燃焼させた後のガスをタービン駆動用流体（作動流体）として使用する開放サイクルガスタービンの形式は、原子炉に接続するガスタービンサイクルとしては採用できない。原子炉接続ガスタービンシステムとしては、原子炉を利用して作動流体を加熱・循環させる閉サイクルのガスタービンシステムが基本となる。閉サイクルには、原子炉直結型の直接サイクルと中間熱交換器等で原子炉と分離する間接サイクルがある。さらに、直接及び間接サイクルに蒸気タービンを組み合わせる複合システムにすることにより、熱効率をさらに向上させることが可能である。現時点では、次の4通りの組み合わせが考えられる。

- ・ヘリウムガスタービン単独直接サイクル
- ・ヘリウムガスタービン単独間接サイクル
- ・ヘリウムガスタービン・蒸気タービン複合直接サイクル
- ・ヘリウムガスタービン・蒸気タービン複合間接サイクル

2)作動流体の選択

現状では、直接サイクル、間接サイクルともに原子炉冷却材として用いられるヘリウムガスをタービン用作動流体としている。ただし、作動流体については、その加熱量に

$$Q = C_p G (T_1 - T_2)$$

Q : ガス加熱部でガスに与えられた熱量

C_p : ガスの比熱

G : ガスの質量流量

T_1 : ガス加熱部入口ガス温度

T_2 : ガス加熱部出口ガス温度

の関係があり、 Q 、 T_1 、 T_2 が一定であるとすると C_p が大きければ G は小さくなる。タービンで取り出せるタービン1段当たりの仕事 W は G に比例するので、 G が小さいと W も小さくなる。ヘリウムガスは C_p が大きいので段数が増加し、作動流体としては不利である。

3)ターボ機械の開発

圧縮機及びタービン段数を増加させず、かつ、商用周波数の同期発電機を直結して発電を行う（回転数を3000rpm又は3600rpmにする）ために、一般にローター平均径を大きくしてローター周速を高めることで圧力比を維持するようにしている。このとき、回転時のロータの振れを考慮して動翼先端とケーシングとの隙間（チップクリアランス）を大きくすると、隙間を漏洩するガス量が増加して断熱効率が低下する。このため、ロータの振れを最小限に抑えつつ、低回転数型のコンパクトなターボ機械を開発する。

4)圧力損失の少ない系統機器の開発

閉サイクルガスタービンでは、系統で生じる圧力損失によって熱効率が低下するので、圧力損失の小さい系統機器の使用と構成にする。

5)軸封部からの漏洩

回転機器の軸封部からガスの漏洩を完全に防止することは現状では難しい。特に、ヘリウムガスは漏れ易いので、FPを含んだ一次冷却材を作動流体とする直接サイクルではガスの漏洩が問題となる。この点、間接サイクルはFP漏洩の問題が小さいので有利である。

7)タービンブレード及びディスクの材料の開発

熱効率を上げるためにタービン入り口温度はできるだけ高温であることが望ましいが、タービンブレード及びディスクの材料は現状レベルではそれぞれ800~850°C及び500~600°Cが限界である。これらの要素を冷却する方式が考案・実用化されているが、熱効率の低下を引き起こすので、より高温に耐える材料を使用する。

(2) 原子炉とガスタービン発電との接続から発生する技術的問題点

原子炉とガスタービン発電との接続を考える時、以下の問題点がある。

1) ターボ機械の保守・点検性

直接サイクルにおいては、燃料から放出された微量の FP がガス中に混在しているためタービンの保守が困難

- 通常のタービンは 3 年でオーバーホールが必要。
- G A の設計では 8 年間連続使用可能なものも考えられている。

このため、間接サイクルにしてガスタービンを二次系に設置することが考えられるが、中間熱交換器などの機器が必要となり、これら機器の保守・点検という課題が生じる。また、熱効率のさらなる向上のために蒸気タービンとの複合サイクルにする場合には蒸気発生系などの保守・点検が加わり、メンテナンス業務が複雑化する。

2) 安全性

ガスタービン発電モジュラー炉はこれまでに無かったシステムであり、水侵入事故が起らぬ反面、圧力損失事故時の熱除去、負荷喪失時の健全性、高圧系と低圧系の短絡事故、ターボ機械破損部品のミサイル事故等新しい安全性に係わる問題が派生する。

6. 3 試験計画（案）

HENDEL を用いたガスタービン発電システムの炉外実証試験は、閉サイクルガスタービンとする。閉サイクルガスタービンは次のような特徴を有している。

- ・ タービンの仕事から圧縮機の仕事を差し引いた仕事が発電に利用できる。
- ・ 膨張過程の温度が高温ほど、圧縮過程が低温ほど熱効率が向上する。
- ・ 热効率をさらに向上させるには再生熱交換器が必要であるが、これを設けると原子炉への戻りガス温度が高くなる。
- ・ 圧力比は 3 度であり、他のタービンシステムに比べて小型化が可能。
- ・ 高圧部と低圧部が存在するためガスリークの問題がある。

以下に HENDEL を用いたガスタービン発電システムの炉外実証試験計画（案）、装置の仕様等について述べる⁽¹⁸⁾。

（1） 計画概要

ガスタービン発電システムの研究開発においては、体積流量が同じであればタービンの空気力学特性も同じである。このため、HENDEL で実機運転条件と同程度の体積流量を流せば実機システムの模擬が可能である。ただし、体積流量が同じであってもレイノルズ数が異なり、完全な模擬にはならない。従って、HENDEL に設置する試験機（ターボマシンモデル）と実機との間でタービン本体を含めて相似性がどの程度成立するかについては検討が必要である。

そこで、先ず HENDEL を利用してガスタービンシステムを構成する要素の試験を実施し

(HENDEL実証試験〔I〕)、相似性の成立性を検証するとともに、各要素の性能把握、運転・制御性などを調べ、その成果を基にしてHTTRに接続するガスタービンシステムを設計・製作することとする。これと並行して、熱出力450MW程度の高温ガス炉ガスタービン発電プラントを対象にして、その主要な機器・要素の1/2スケール程度の大型試験をHENDELで実施し(HENDEL実証試験〔II〕)、この成果を基にして高温ガス炉に接続するガスタービン発電システムを構築すれば、HTTRでのガスタービン実証試験の成果は実用炉ガスタービン発電システムのための実証データとして利用できる。HENDEL実証試験〔I、II〕で対象とするサイクルは次の通りである。

HENDEL実証試験〔I〕：

M+Aループを直接利用した小型ターボマシン(ガスタービン+コンプレッサー)による再生サイクル。(規模は、450MW出力炉の1/7スケール程度)

HENDEL実証試験〔II〕：

M+Aループを間接利用した450MW出力炉の1/2スケール程度のターボマシンモデルによる再生サイクル。

これらの試験の主要目的は次の通りである。

- 主要機器の製作性を確認する。
- 高温から低温(～200°C)条件の広い温度範囲で試験し、性能を把握する。
- 原子炉の出力変動に対するガスタービンシステムの負荷追従性など、システムの対応能力を検証する。
- 保守・点検性を検証する。

なお、HENDEL実証試験〔I〕で用いる1/7スケールのターボマシン及びHENDEL実証試験〔II〕で用いる1/2スケールのターボマシンのサイズは、450MW規模の高温ガス炉に接続するガスタービンの回転体の有効径が1.6～1.7mであるため、この1/7及び1/2の有効径を持つガスタービンという意味である。有効径が1/7、1/2ならば、タービンの容量は1/49、1/4になり、450MW × 1/49、1/4 = 9.2MW、112MWで、1/7スケールの場合は、HENDELのM₂+A ループの熱出力と同じ(HTTR中間熱交換器の出力とほぼ同じ)程度になる。このため、1/7スケールの試験結果はそのままHTTR用ガスタービンに適用できる。一方、1/2スケールの場合はHENDELの増力、あるいは別途の対策が必要である。また、1/2スケール規模を実機にスケールアップしても、その特性変化は一般的に予測可能な範囲であると考えられる。「もんじゅ」の場合は、50MWの試験装置による試験結果を基にして、実機300MWの熱交換器の安全審査、設工認に合格している。

(2) 開発試験項目及びスケジュール

開発試験項目及び試験内容は、次のとおりである。

- 1)タービン、コンプレッサ等の小型ターボマシンの回転試験
 - ①タービンブレード、ディスクなどの高温部材の健全性の実証
 - ②高温、高圧下におけるシール部からの系統内ヘリウム漏洩防止対策の実証

- ③軸受け部シールシステムの機能の実証
- ④新型軸受けシステムの機能、健全性の実証
(軸受け潤滑材の系統内への混入を防止するため、無潤滑で保持力の高い磁気軸受けの試験)

2)プレートフィン型熱交換器の熱流力性能試験

対象とする熱交換器は、再生サイクルでは再生熱交換器及び前置冷却器、中間冷却を加えたサイクルではさらに中間冷却器が加わるが、基本的にはヘリウム／ガス熱交換器とガス／水熱交換器がプラントの主要構成要素となる。ガスタービンサイクルではこれら熱交換器での圧力損失が性能に大きく影響するので、圧力損失を低減し、かつ、小型化をはかるためにプレートフィン型熱交換器とする。使用材料については伝熱、強度の両面から検討して材料選定を行うこととなるが、既存材料で対応できると考えられる。試験項目は次のとおりである。

- ①構造健全性の実証
- ②圧力損失、熱伝達率の確認
- ③ I S I 等の検査・保守技術の確立
- ④運転制御性の実証

3)制御弁の信頼性確認

閉サイクルガスタービンでは、急激な負荷変動に対しても高圧側から低圧側へ作動流体をバイパスさせることにより、系の温度平衡を大きく乱すことなく速やかに追従可能である。このバイパス量調節弁の高温・高圧下での高速動作信頼性を確認する。

- ①熱膨張、熱衝撃に耐える機密構造の実証
- ②高速応答性の実証
- ③組立メンテナンス容易性の確認

4)運転・制御性の把握

閉サイクルガスタービンの出力制御法として、基本的に以下の3種の制御法がある。

- ①圧力制御法
- ②入り口温度制御法
- ③バイパス制御法

しかし、各制御法は単独では様々な欠点を持っているので、各々の制御法の明確な特性を調べ、起動・停止、過渡状態などに適した運転・制御法を確立する。

5)保守・点検性の検証

放射線被曝対策を考慮して、保守・点検の対象となる機器については、設計段階から可能な限り部品点数の削減、部品のモジュール化、カプセル化を進めて作業時間の短縮化を図るとともに、遠隔操作可能な構造とする。それに合わせて、各種センサの開発及びそれらを用いた検査方法を確立するとともに、異常の発見を目指した異常予知診断システムを確立する。

(3) 装置の仕様

1) H E N D E L 実証試験 [I]

H E N D E L 実証試験 [I] の系統構成をFig. 6.1 に示す。本試験装置は、H E N D E L M₂+A ループを直接利用した小型ターボマシンによる再生サイクルである。既設の冷却器 C₃₁、C₃₂を前置冷却器として代用し、循環機 B₂₃、B₂₄は仕切弁で隔離する。M₂+A ループの熱流動条件（案）を以下に記す。ただし、熱入力が小さいためにターボ機器の寸法も小さくなるが、タービンブレードのケーシングの隙間はローターの振れ回りの関係で極端に狭くできないためにヘリウムガスの漏洩が多くなり、高効率の実証は困難である。

作動流体	:	ヘリウムガス
タービン入り口温度	:	950 °C
タービン入り口圧力	:	4 MPa
流量	:	4 kg/s
熱入力	:	~10 MWt

2) H E N D E L 実証試験 [II]

H E N D E L 実証試験 [II] の系統構成をFig. 6.2 に示す。本試験装置は、H E N D E L M₂+A ループを間接利用した450MW炉の1/2 スケール程度のターボマシンモデルによる再生サイクルである。H E N D E L M₂+A ループとタービン側のループは中間熱交換器を介して接続する。ここで、間接利用の形態をとるのは、熱の一部はH E N D E L から供給し、他は、タービン側ループに補償加熱器を設置して大容量の熱入力が可能にするためである。以下に試験部の熱流動条件（案）を記す。ただし、本試験装置は、中間熱交換器を組み込んでいるものの大容量の熱は補償加熱器で供給されるため、事故時等の緊急停止措置などに係わる安全性試験を行うときには補償加熱器の制御が重要となる。

作動流体	:	ヘリウムガスまたは窒素ガス
タービン入り口温度	:	~950 °C
タービン入り口圧力	:	~4 MPa
流量	:	~320 kg/s (He)
熱入力	:	~100 MWt

なお、閉サイクルガスタービンの圧縮-冷却段数と効率については佐野川⁽¹⁷⁾が試算方法を提示しており、本試験で構成する再生サイクルの熱効率についてはそれを基にして別途計算する予定である。

6. 4 まとめ

高温ガス炉に接続するガスタービン発電システムは実用化されておらず、また、最適なガスタービンシステムも明らかではない。例えば、モジュラー型高温ガス炉の熱出力は450MW程度と想定されているが、これに接続するガスタービン発電システムとしては、直接サイクル又は間接サイクルで発電効率、経済性等が異なってくる。このため、ガスタービン、コンプレッサ等のターボマシンの主要な機器の特性を明らかにするとともに、将来の高温ガス炉によるガスタービン発電システムについて、発電効率、経済性などの観点に立ってパラメータサーベイを行う必要がある。本章で記した試験はこのような主旨で計画されたものであり、原子炉接続システムとしての成立性検討と検討から生じた要求項目を反映しながら、最適なガスタービン発電システムの構築に向けてターボマシン等の基本特性を明らかにしていくこととしている。

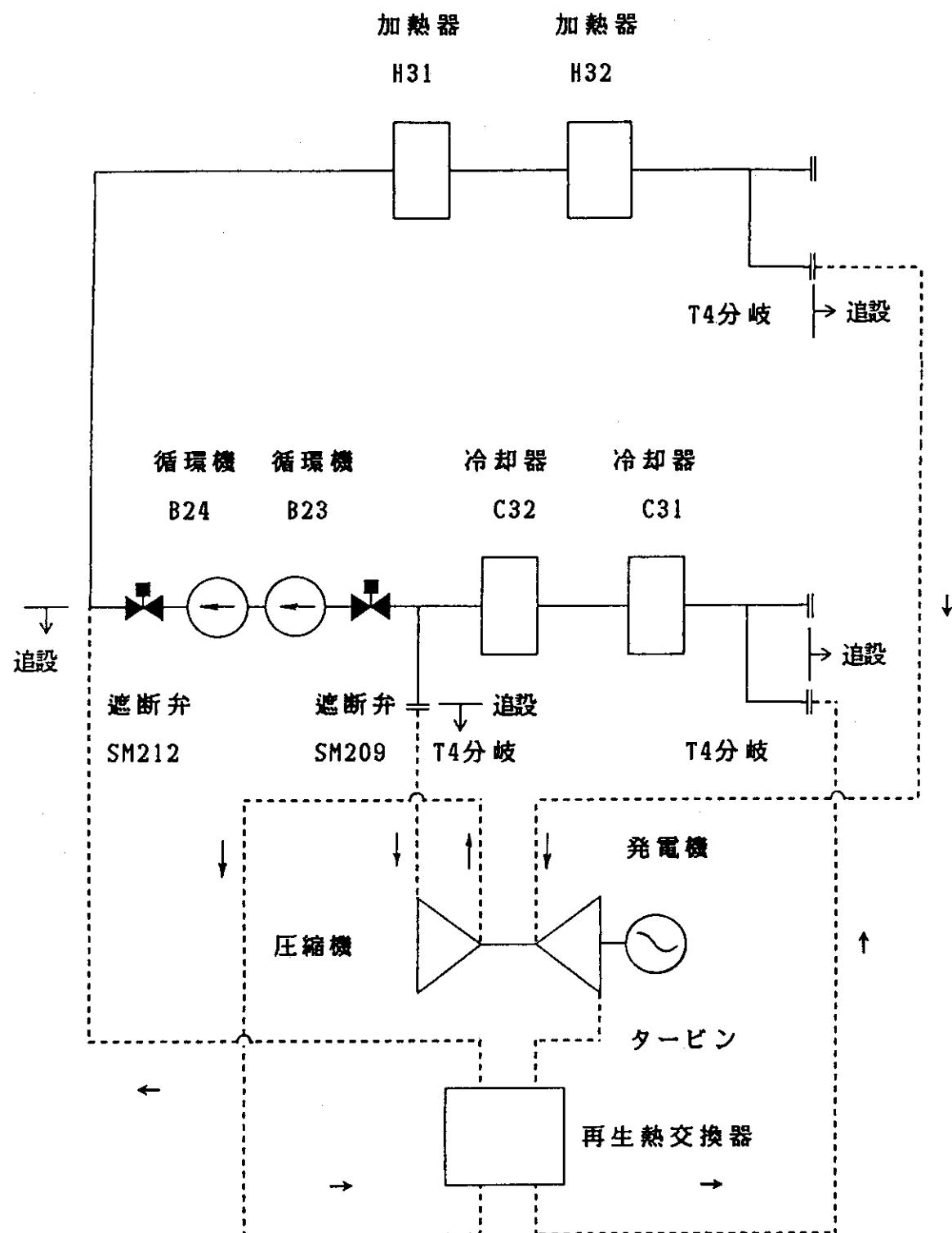


Fig. 6.1 Flow diagram of direct gas turbine loop without IHX using HENDEL M+A

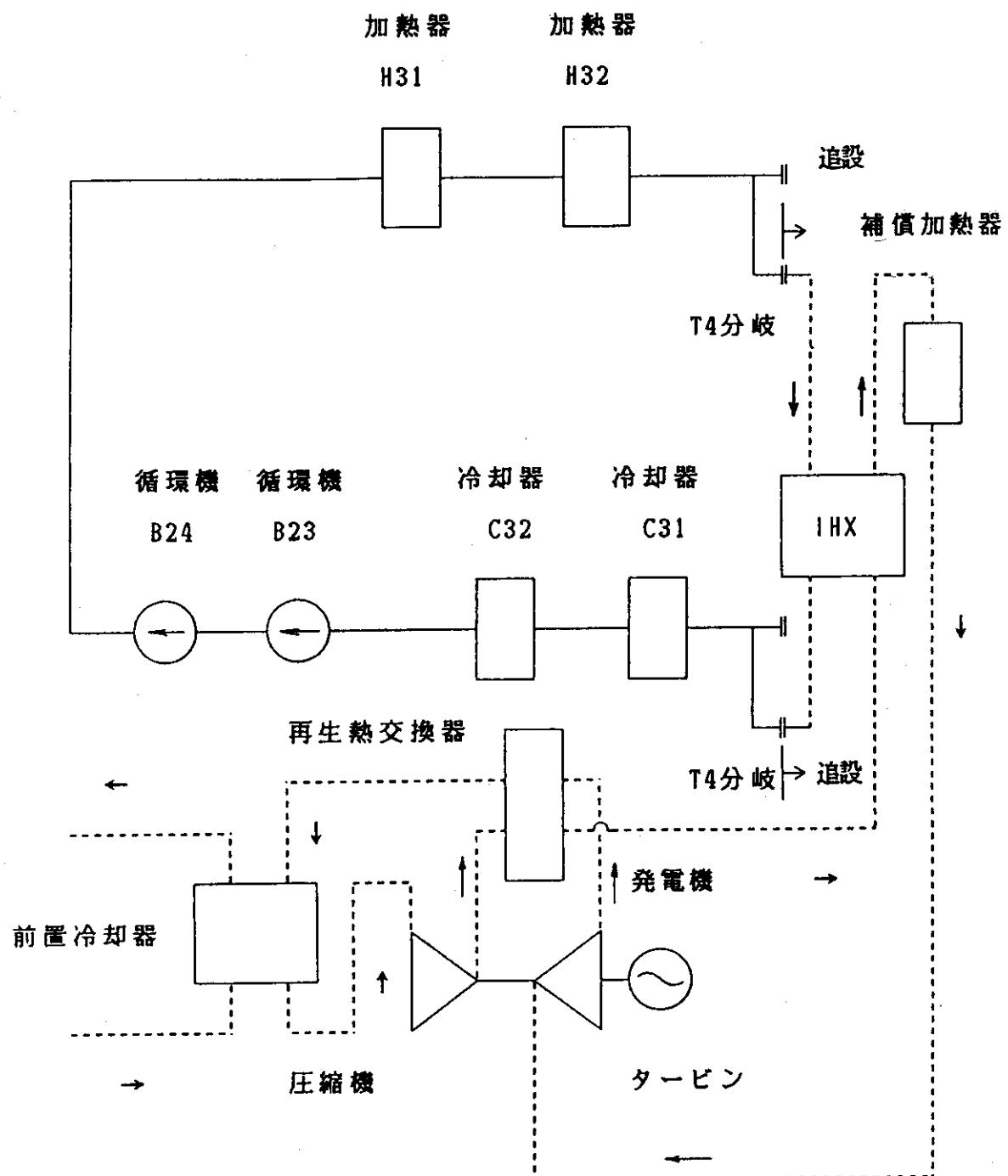


Fig. 6.2 Flow diagram of indirect gas turbine loop with IHX using HENDEL M+A

7. 高温隔離弁

7. 1 開発の現状

高温隔離弁の開発は、ドイツのPNP-Project、日本の通産省大型プロジェクト、原研の大型構造機器試験ループ（H E N D E L）の開発試験において実施されている。以下に、それらの成果の概要を述べる。

(1) ドイツにおける開発

高温核熱利用の開発を目指したPNP-Projectにおいて、高温のヘリウムガス（918°C, 42bar）を格納容器で隔離する目的から、1976年Klinger社によって圧力損失の低減を主目的にしたダブルコアキシャルバルブが提案され、Interatom/GHT、HRB等との協力のもとに小型モデルの試作試験などが進められた⁽¹⁸⁾。その後、PNP-Projectの中止により、実機モデルの製作と試験は行われなかった。ダブルコアキシャルバルブの仕様をTable 7.1に、また、参考図をFig. 7.1に示す。このような型式のバルブを考案・選定した理由は、配管破断時にも弁を自動的に閉止できること（自動閉止機能）、大流量でも極力、圧力損失を低く抑えること（ガスタービン向き）を特に重視したものと思われるが、小型モデルによる試験実績は800°Cまでである。本弁構造の主要な特徴、技術的問題点等を以下にまとめる。

- ・コーン（弁座）の形状が流線型のため、圧力損失が小さい。
- ・配管破断時等で大きな差圧を生じると受動的に弁が閉まる。
- ・弁閉鎖時にコーンの間の空間をバッファーガスで加圧することにより、一次側と二次側を完全に遮断できる。
- ・弁を開ける時に熱応力によりコーン表面のコーティング層にクラックが生じるのが問題であったが、ジルコニアコーティングなどにより改良された。
- ・コーンと本体接触面（台座）との高温融着はインコロイを使用することにより800°Cまでは問題なしとされていたが、最近のガスタービンブレード材料を使用すれば900°C～950°Cは可能である。

(2) 日本における開発（通産省大型プロジェクト）

開発目的とした弁は、多目的高温ガス実験炉に接続される直接製鉄パイロットプラントにおいて、二次ヘリウム冷却系機器の破損を伴う事故が発生した場合に一次系放射能の格納容器外放出を防止するために、格納容器前後の二次ヘリウム冷却系配管上に設けられる高温隔離弁である。この高温隔離弁の設計・製作は、高温還元ガス利用による直接製鉄のためのHe-He中間熱交換器の研究・開発において行われた。中間熱交換器試験用の高温ヘリウムテストループに緊急遮断弁及びバイパス弁を設置し、これらの運転実績に基づいて型式選定や構造検討が行われた。緊急遮断弁及びバイパス弁は、前者は常時開、後者は常時閉の違いはあるが、高温ヘリウムガスを隔離することを基本的機能とした内部断熱式アングル弁である。これらの弁の形状及び寸法はほぼ同じである。試験に用いられた弁（モデル弁）は炭素鋼(SCS14)製で、弁体及び弁座の口径が100mm、締切面には特殊耐熱シート材が加工されている。

モデル弁を用いて、内圧及び外力に対する応答試験及び常温のヘリウムガス及び窒素ガスを用いた弁座の漏れ特性試験が、面圧、ガスの種類、ガス圧力、外力を変えて実施された。弁座の面圧 0.8 kg/mm^2 の場合、漏洩量は $5\text{cc}/\text{min}/\text{in}$ 超えず MSS-SP-61 Hydrostatic Testing of Steel Valves に規定される空気洩れ量に対する制限値、弁口径 1 inchあたり $0.1 \text{ ft}^3/\text{hr}$ (約 50 cc/min) at 80 psig ($5.6 \text{ kg/cm}^2\text{G}$) と比較してかなり小さい。また、ガス温度を 1000°C まで上げたときの弁座漏れ特性を常温の場合と比較した結果、大きな差は無かった。なお、グランド部からの漏れ(グランドパッキン材: 黒鉛系)は、静止時には検知されない程度であるが、45分間に 200回開閉した後の差圧 40kg/cm^2 の場合には $0.42\text{cc}/\text{min} \cdot 1$ 回の漏れ量であった。

弁の作動試験は、グランドパッキン締付力 ($300, 350, 400 \text{ kg/cm}^2\text{G}$) を変えて、空気式シリンダによって行われた。その結果、空気式操作で弁を作動するのに必要な最小空気圧力は、 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下、動作時間は 2~10秒であった。

これらの試験において、圧力バウンダリとしての弁本体の内圧、外力に対する応答特性、漏洩特性及び作動特性について、大きな問題点は見られなかった。

(3) 日本における開発(原研の大型構造機器試験ループ(H E N D E L)の開発試験)

H E N D E L に設置されている炉内構造物実証試験部 (T₂ 試験部) の圧力容器等の鋼構造物の健全性を保持するために、外部電源喪失事故による強制循環停止時に高温配管を自然循環冷却ラインに接続するための緊急用圧力調節弁の開発を行った。この弁は通常は閉じていて、外部電源喪失時に開くノーマルクローズタイプである。弁開放時には、最高温度が約 800°C のヘリウムガスを圧力約 40kg/cm^2 の条件下で、最大 1 kg/s の流量で循環可能であることが要求された。このときの差圧は 2kg/cm^2 で、圧力損失係数は約 300 程度である。この弁の仕様及び構造図を Table 7.2 及び Fig. 7.2 に示す。弁形式はアングル弁形式で、シールにはベローズシールを用いている。耐圧部は S B 4 2 (設計温度 350°C)、耐熱部は S U S 3 0 4 (設計温度 800°C)、弁座及びディスクは S C M V F を用い、弁座の呼び径は 150 mm 、弁のストロークは 80 mm である。弁座等の強度維持のために弁内部を水で冷却しており、弁座及びディスクのシート面はステライト肉盛り溶接により表面硬化処理している。

開発に当たっては、弁構造で重要な弁座、ディスク部及び駆動部を対象とした試験装置を製作し、実機を模擬した雰囲気中で試験を実施した。試験終了後に、開放検査を行っている。主な結果は以下のとおりである。

- ① 内部冷却方式により、 800°C 、 8 kg/cm^2 の H e ガス雰囲気中においても金属温度は 150°C 以下にできる。
- ② 漏洩率に対する弁締切速度、弁締切力、弁前後差圧及びガス温度の影響を調べ、基本的な特性を明らかにした。漏洩率に対する弁締切速度の影響は無視できるが、他のパラメータについては明確な傾向をつかむに至らなかった。
- ③ 測定誤差 $\pm 20\%$ を考慮すると、シート面の接触状態に対する弁開閉動作の優位な影響はない。

④ディスク肉厚方向の温度勾配が大きいので、漏洩特性を悪化させる不均一な熱変形や塑性変形を生じる可能性がある。解析コード（AYER-SAPV）を用いて2次元軸対称モデルによる弾性応力解析を実施した結果、800°Cでは弁ディスク材料であるSFVAF12の降伏応力 19 kg/mm^2 を超えてはおらず、塑性変形は生じていないと考えられた。しかし、降伏応力に対する余裕が少ないので、さらに高温のヘリウムガスで使用するためには、ディスク部表面に熱遮蔽板や断熱材を施工するなどの対策を行えば対応可能と考えられる。

⑤解放検査によれば、当たり面2箇所にキズがみつかった。しかし、寸法検査の結果、熱応力（弁座表面で90°C、ディスク表面で150°Cまで加熱される）による塑性変形が起こった形跡は見られない。また、開放前と同様の漏洩試験を行った結果、解放前と同等以上の締切性能が得られた。

7. 2 技術的問題点

本節では、高温隔離弁の主要な技術問題点とその対応策（案）を述べる。

(1) 弁の基本概念の選択

ダブルコアキシャルバルブは優れた概念のバルブであるが、閉止時の衝撃、開放時の熱応力、摺動部の高温融着に加え、機構が複雑なこととそれに伴うメンテナンス性に問題がある。内部断熱式アングル弁は実績が有り、高温での締め付け荷重による塑性変形を生じないようにすれば比較的良好な漏洩防止特性が得られる。また、アングル弁における締切り時の弁座とディスクの高温融着、開放時の圧力損失については、弁座形状の改良、セラミックスコーティング、口径の拡大などを行えば対応は可能と考えられる。

(2) 高温に曝される弁座及びディスク部の材料の選択

弁の型式によって要求される強度レベルが異なってくるが、いずれの弁型式にしても弁座及びディスク部は高温のガス流動下に曝されるので、不均一な温度分布による熱応力・歪みの発生、締切り時の高温融着などの問題がある。この対策としてセラミックスを用いることが有効と考えられる。

(3) 弁本体の健全性

断熱材を設置して高温部からの熱流入を防止するか、或いは、ガス、水等により冷却を行って使用温度に保持することになるが、水冷却の場合には熱応力が大きくなり、また、ガス温度が低下（熱損失の増大）するなどの問題を生じる。弁内部に断熱材を充填し、弁本体を空気自然冷却する方式は動的冷却機器を用いないので安全保護上有利である。高温ガス炉の固有安全性を考えすれば、空気自然冷却を採用すべきと考える。この場合、断熱材の設置場所、厚さ、自然対流による弁本体の除熱促進方法などを工夫すれば弁本体の強度維持は可能と考えられる。

(4) 荷重伝達部の健全性の問題

ディスクを弁座に大きな力で締め付けることが漏洩防止上有効であるが、荷重を伝達する部分の温度が高温ガスからの熱伝導で上昇する。この部分をセラミックスで製作することにより、断熱性が確保でき、かつ、強度的にも問題はなくなる。

(5) 開封部からの漏洩

一般に、弁駆動機構と弁箱は別置きであり、弁ディスクを締め付ける駆動軸が弁箱を貫通する開封部からガスが漏洩し易い。この漏洩防止については、黒鉛ガスケット、ベローズシール等で解決は可能と考えられる。

7. 3 H T T R 用高温隔離弁の要求事項

高温隔離弁は参考図のFig. A3 に示すように、H T T R の中間熱交換器を介して水蒸気改質システムに高温高圧ヘリウムガスを供給する二次ヘリウム配管に設置される。以下に高温隔離弁の仕様と要求機能について記す。

基本設計条件

- ①機器区分 : 第3種機器
- ②耐震クラス : As クラス
- ③流動条件
 - (a)流 体 : ヘリウムガス
 - (b)圧 力 : 最高 4 0 kg/cm²G
 - (c)流 量 : 最高 9 0 7 0 kg/h
 - (d)温 度 : 最高 9 0 5 °C
- ④接続配管 : 1 6 B
- ⑤主要材料 : S F V A F 2 2 B (21/4Cr - 1Mo) 、ハステロイ-X
- ⑥弁開閉時間 : 6 0 秒以内
- ⑦耐用年数 : 2 0 年 (弁本体)
ディスク部等の摺動部は定期的に交換する。

高温隔離弁に要求される機能等

- ①二次ヘリウム減圧事故に対する I H X 伝熱管保護の観点から隔離弁に要求される事項
 - ・二次系配管のギロチン破断が生じた場合は隔離弁で対応するのは無理である。このような急速減圧事象に対しては、I H X 伝熱管が座屈しないように設計してある。
(注) 一次系側での配管破断事故については、格納容器 (C/V) が外部に対するバリアーとなる。この時、I H X 伝熱管が損傷して外部へのF P 放出が生じるので、I H X 伝熱管保護のことを特に考えている。
また、一次系のヘリウムガスがC/V 内に全量が漏洩しても、C/V内の圧力はその耐圧0.4MPaまで上昇しないので問題はない。
 - ・二次系の配管が破断した場合は二次ヘリウムの喪失を隔離弁で防ぐことはできないので、一次系との差圧が大きくなつて I H X 伝熱管が座屈損傷するまでの間に隔離弁を閉止させればよい。
 - ・二次系配管からの小リークに対しては隔離弁を閉めて I H X 伝熱管を保護する。
例えば、二次系配管に直径5mm程度の穴があいた場合、一次系との差圧が0.2MPaになる

までに約5分かかるので、隔離弁を閉める時間は十分ある。

(IHX伝熱管の使用最高差圧は0.3MPa)

ただし、HTTRでは差圧0.18MPaで差圧低の警報が発信されるので、差圧低の警報信号で隔離弁を閉めたのでは遅いと考えられる。この警報設定値についてはプラント設備を考慮して再検討する。

② C/V隔離機能として被曝防護の観点から隔離弁に要求される事項

- HTTRで気体廃棄物処理設備が破損してサービスエリア外へFPが地上放出された場合でも、その放出実効線量当量は 3.9×10^{-3} である。これは事故時の実効線量当量の上限値5mSvよりはるかに小さい。

また、たとえ一次系ヘリウムの全量がC/V外へ漏れたとしても、それに含まれる実効線量当量は0.4mSvなので、被曝防護上は大きな問題ではない。

これらから、隔離弁に要求される事項は無い。

(注) HTTRの全一次ヘリウム中に含まれる放射性物質による実効線量当量0.4mSvは、気体廃棄物処理設備の破損事故時の放出実効線量当量 3.9×10^{-3} mSvから比例計算した値であり、建屋外への全量放出を意味する。

- 熱出力600MWの実用炉を考えた場合、一次ヘリウム中に含まれる放射性物質による実効線量当量は0.8mSv程度であるから、たとえ全量がC/V外へ漏れたとしても被曝防護上は大きな問題ではない。このため、隔離弁にはFP放出量制限に対する要求も無い。

③配管系統内に設置する上で隔離弁に要求される事項

- HTTRのC/V内配管については耐震C(S2)クラスとして、S2地震時にも配管破壊を引き起こさないようにする(機器種別第4種)。また、設置変更許可申請書の要求に従い、高温及び低温用二次ヘリウム配管のC/Vの外側に隔離弁を各々1基ずつ設けることとする。
- 漏洩量については、柴田、羽田の解析結果⁽¹⁹⁾を参考にして140Ncc/sを上限とする。ただし、この数値については今後さらに検討して、実体に即した数値を提出するものとする。

7.4 試験計画

本試験の目的は、高温隔離弁の技術上の問題を克服してHTTR用高温隔離弁を開発・実証することにある。このために、まず、弁の基本概念を検討し、要求機能を満足する構造諸元を定める。次に、HTTRに設置する高温隔離弁モデルを製作し高温・高圧条件下で実証試験を行う。なお、高温隔離弁の試験では、製作性、弁締切性能、アクチュエータ機能等の経時変化を調べることを主眼とし、原子炉システム及び熱利用系システムの緊急停止時における弁閉止動作とシステム挙動の関係などについては、水蒸気改質システム炉外実証試験装置に模擬隔離弁を設けて試験を行うこととする。以下に高温隔離モデル弁の確保すべき機能、試験項目、試験装置の仕様等を記す。

(1) モデル弁が確保すべき機能

①耐圧性

内部流体を外部に漏洩させないために、内圧及び外力（配管、操作力、地震など弁に作用する諸荷重を含む。）に対して弁本体に充分な強度・剛性並びにシール性を確保する。

②機能及び構造性

弁に作用する諸影響に対して、弁の機能を損なわず確実に操作可能な構造とし、内部流体に対して劣化しない材料とする。とくに弁の摺動部、弁座周辺部については、かじりや外部漏洩がなく開閉時の操作力（面圧）に対しても座屈や変形を起こさない構造とする。また、角部等の集中応力や熱歪みの発生を低減する構造とする。

さらに、接続配管（高温二重配管）との溶接接合に対して構造・形状の適合性をはかる。

高温二重配管 内 管：ハステロイX、内管の外形：230mm、内管の厚さ：5mm
外 管：S T P A 2 4、外管の外形：406.4mm、外管の厚さ：16.7mm

③隔離性（弁座の機密性）

想定事故に対する原子炉格納容器バウンダリとして必要な隔離機能、とくに弁閉止時の弁座からの漏洩（機密性）量を極力小さくする。このため、弁座の構造、弁座面の仕上げ、アクチュエータ出力（面圧）等を考慮する。

[参考] 弁閉鎖時の弁座からの漏洩量は弁耐用年数にわたり140Ncc/s以下。

④緊急遮断性能とその状態での保持

隔離弁を緊急遮断する際には、遮断開始の入力信号を確実に受信し、即座にアクチュエータが動作して円滑に、かつ、定められた時間内に隔離弁が閉鎖するとともに、閉止状態を確実に保持することが重要である。

⑤メンテナンス性

摺動部、弁座部等の点検・交換が容易で、かつ、漏洩量の計測が可能な構造とする。

⑥その他

多重安全性を考慮して弁内部及び外部の水冷は行わず、弁内部での断熱性能と弁外部での自然空冷で機能を確保する。

注) 上記③と④に対しては、駆動動力源の喪失の場合にも、弁閉鎖時の状態を保持する機能を有するアクチュエータとする。

(2) 試験項目

①弁座、ディスク部締切特性試験

高温に曝される弁座及びディスク部について、材料を変え、かつ、表面処理（ボロン、ジルコニア等のコーティング処理、ステライト肉盛り溶接硬化処理等）を行った複数の弁座、ディスク部を作成し、それぞれの締切特性を調べる。同時に弁座、ディスク部の変形挙動も調べる。

②漏洩特性試験

ベローズシール、黒鉛ガスケットなどを使用した高温高圧用ロッド軸封部からの漏洩量

を計測する。

③駆動部動作試験

セラミックスを用いた駆動部構造を製作し、荷重伝達部の強度特性を調べる。また、駆動による弁座、ディスク部締切特性への影響を調べる。

④断熱特性試験

内部断熱材の設置方法及び変形防止構造を開発し、それぞれの断熱特性を調べる。

⑤ I S I 試験

超音波等を利用して弁内部構造の I S I を行い、検査の標準化をはかる。

⑥耐久性並びに信頼性

- ・弁座、ディスク、弁本体等の供用後検査を行い、変形状況、腐食状況、割れの有無等を調べる。
- ・アクチュエータの供用後検査を行い、機構の劣化状況を調べる。

(3) 試験順序及び試験装置

まず高温隔離弁モデルを製作して、上記試験項目の内、

- ①弁座、ディスク部締切特性試験
- ②漏洩特性試験
- ③駆動部動作試験
- ④断熱特性試験

について各要素ごと、あるいは要素を組み合わせた試験を行い、最適な要素構造を決定する（要素試験）。この成果を踏まえて最適要素構造を組み合わせたモデルによる連続動作試験（実規模隔離弁試験）を行い、動作信頼性を実証する。

要素試験体を組み込んだ試験装置のフローシートをFig. 7.3に示す。試験装置には、当初は、要素試験用のものを接続するが、この試験の後に実規模高温隔離弁を接続して実証試験を行う。試験装置の運転条件は以下の通りである。

試験圧力	: 最高 4.5 MPa
試験温度	: 最高 950 °C
ヘリウムガス流量	: 最高 0.1 kg/s
試験体加熱ヒーター	: 黒鉛
荷重負荷	: 最大 10 トン

なお、本試験装置は開放閉止の繰り返しを頻繁に行うため、H E N D E L ループに接続する他の熱利用系試験が実施できなくなる。そこで、ガス循環系は別途製作し、ヘリウムガスの供給・回収、不純物精製などは H E N D E L を利用する。

7. 5 まとめ

本章では、高温隔離弁の開発現状、技術的問題点、試験計画などについて述べた。技術的には解決すべき問題は多いが、現状の技術レベルで解決不可能な問題はない。弁座、ディスクなどの漏洩防止構造・材料などの開発においては、セラミックスなどの利用により好結果が得られる可能性が高い。また、高温ガス炉のみならず、化学プラントでは高温高圧反応が多く、この分野での高温高圧締切弁の重要性が高まっている。このため、高温隔離弁は高温ガス炉での使用に限定されるものではなく、一般の高温高圧機器にも速やかに応用されるものと考えられる。

Table 7.1 Specification of double coaxial valve

Working/design pressure	41.9/51 bar
Working temperature	900 + 18 °C
Helium mass flow	35.6 kg/s
Diameter of gas duct	700 mm
Temperature gradient	±2 °C/min
Max. closing time	15 sec
Leakage rate	0.1 mbar l/sec
Closing cycles per life time overall	1,000
Closing cycles at full temperature	100
Life time Components not working under high temperature	2.8×10^5 h
High temperature components	1.4×10^5 h

Table 7.2 Specification of pressure control valve

Type	water-cooled angle valve
Diameter (inner Dia.)	150 mm
Material	SFVAF12
Fluid	Helium
Working/design pressure	9/45 kg/cm ² G
Working/design temperature	約 800/450 °C

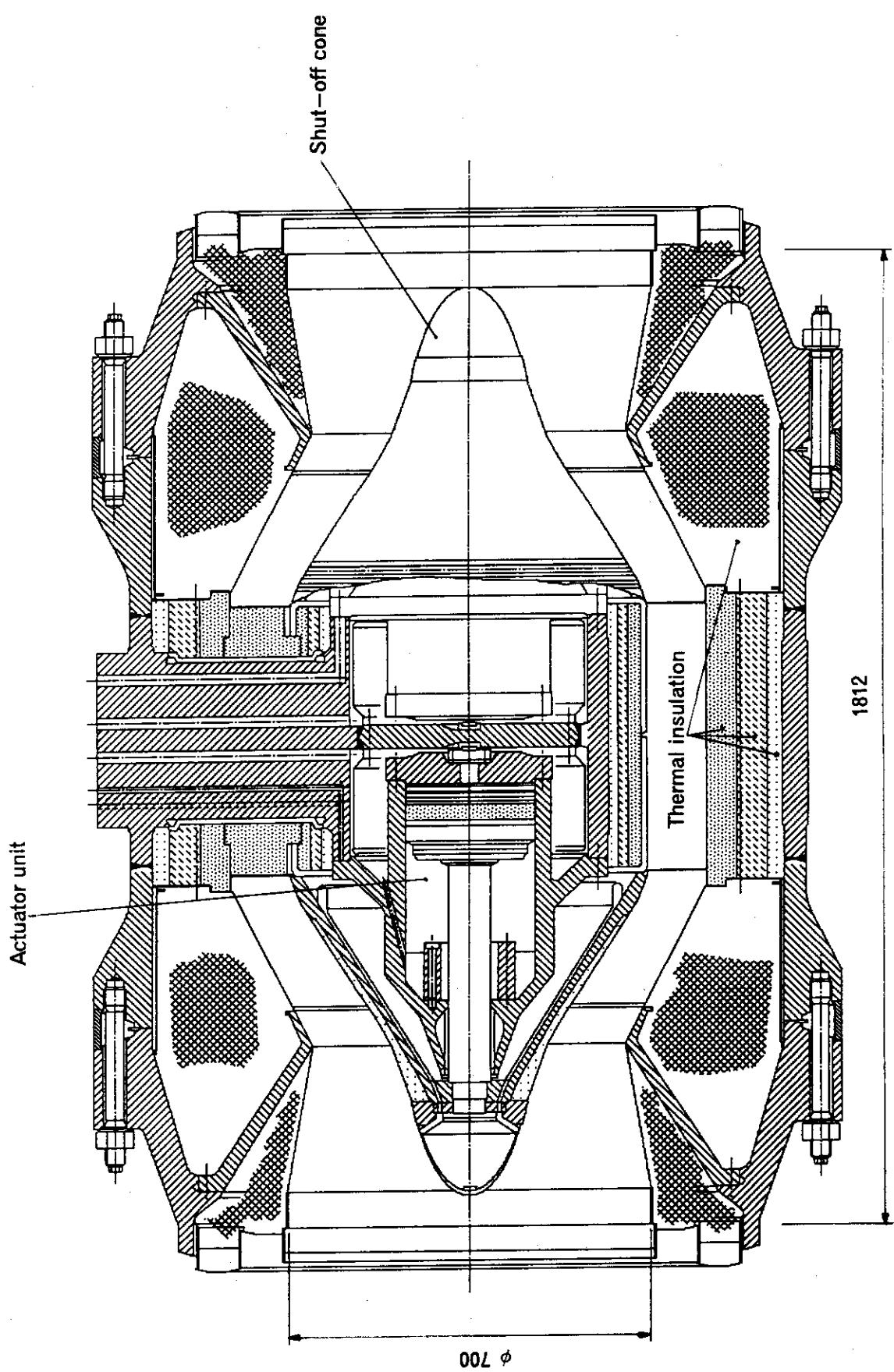


Fig. 7.1 General arrangement drawing of double coaxial hot gas valve

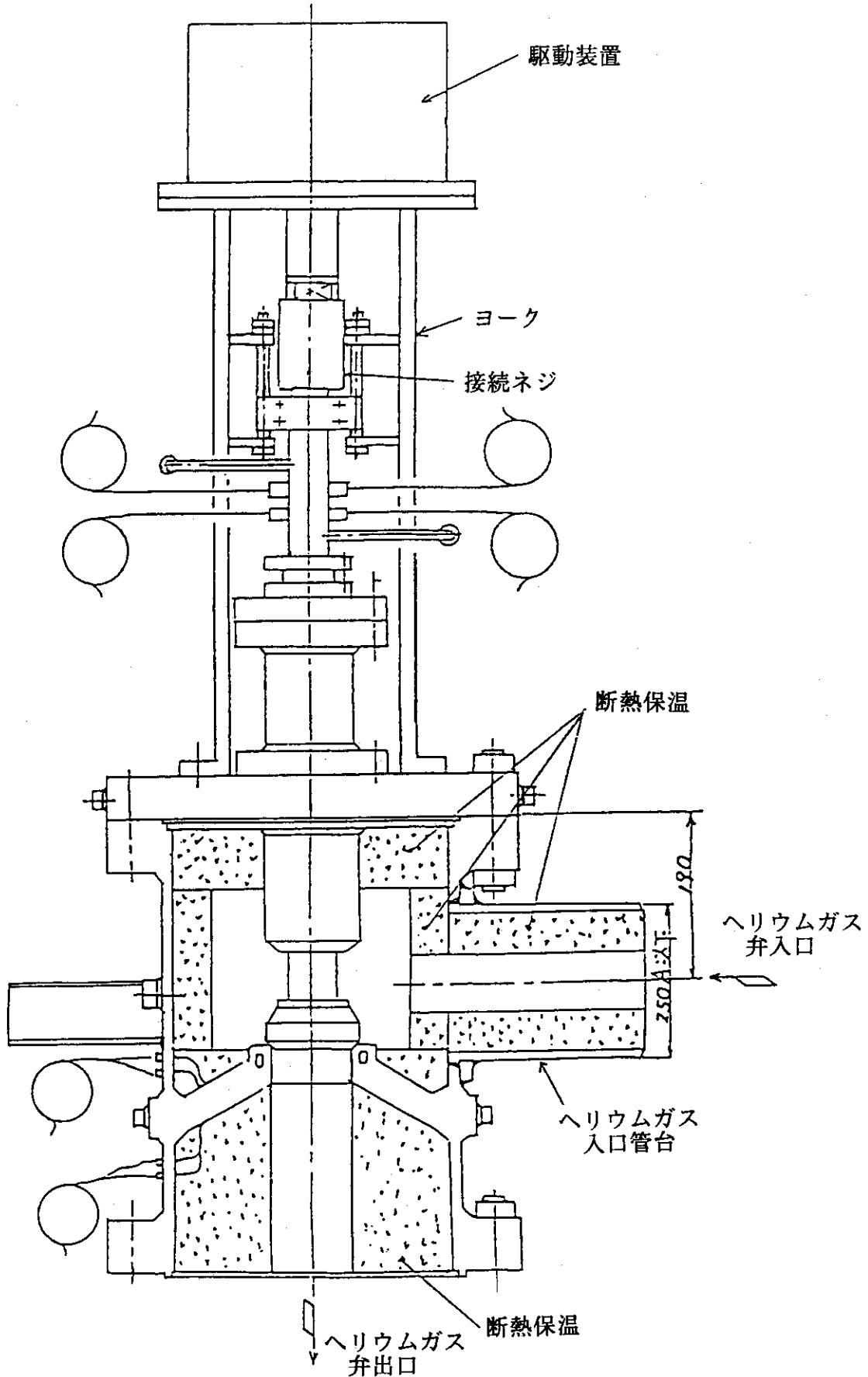


Fig. 7.2 Cross sectional drawing of pressure control valve

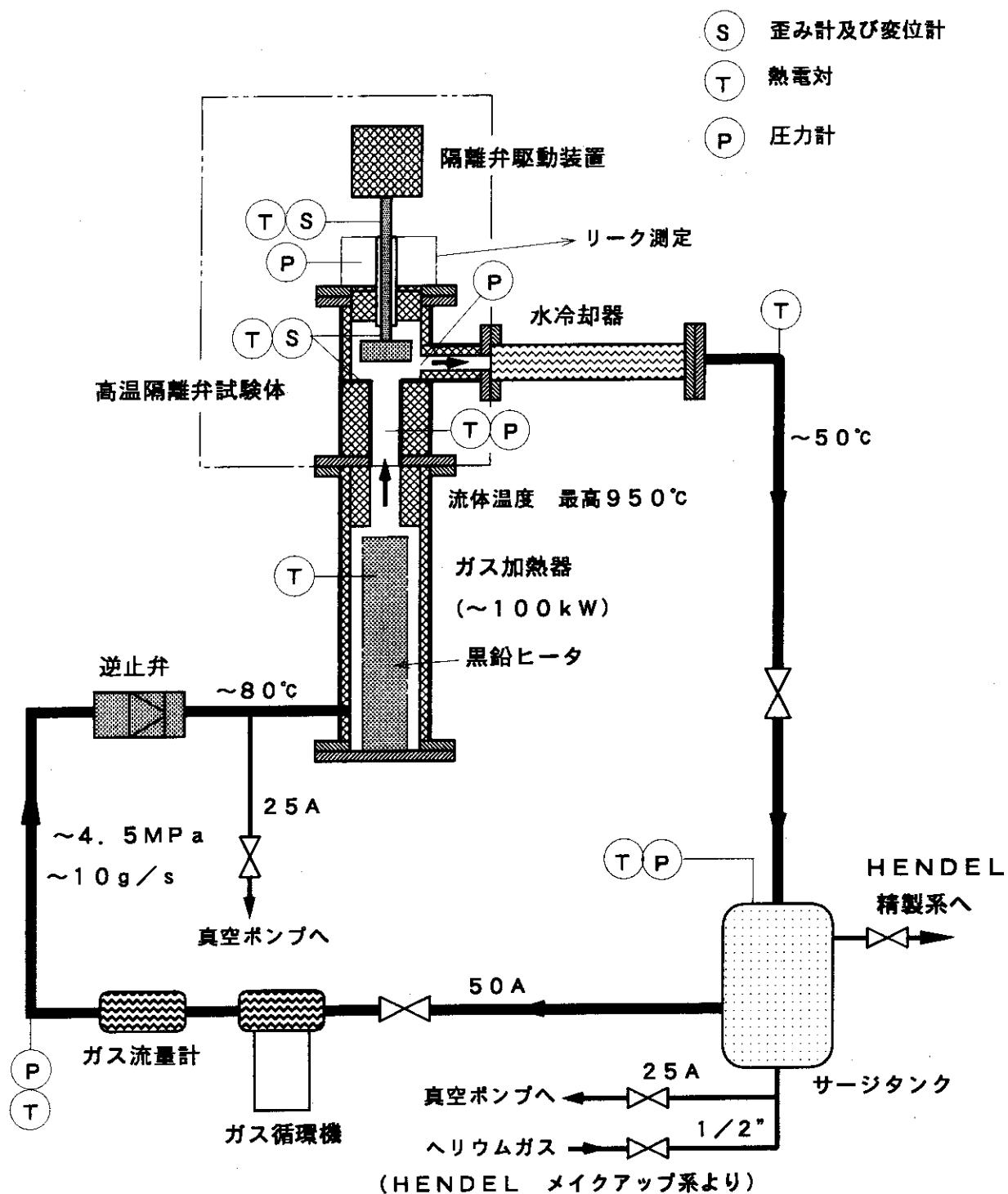


Fig. 7.3 Test apparatus for high-temperature isolation valve

8. 結 言

H T T R 热利用系として候補に挙がっている以下のシステムを中心にして、H E N D E L で早期に炉外実証試験が可能なシステム・機器の検討を行った。

- ・水蒸気改質システム（水素／メタノール製造プロセス）
- ・熱化学法による水素製造
- ・高温水蒸気電解法による水素製造
- ・ガスタービン発電

本検討において、熱化学法は、材料開発とプロセスの大型化が課題であり、高温水蒸気電解法は要素の研究開発をさらに進める必要があることを示した。また、ガスタービン発電は、H E N D E L 規模では極めて小型のシステムになるため、タービンブレードなどの機器製造や発電効率向上等に関する実証は困難である。

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、H E N D E L に早期に設置することができる。同様に、高温隔離弁も現行技術で設計・製作を行えるため、H E N D E L への早期設置が可能である。水蒸気改質システムと高温隔離弁の炉外実証試験を通して、システム特性の把握、運転制御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・高度化することができる。この意味で、現状の核熱利用系候補のうちH E N D E L を用いて行う炉外実証試験は水蒸気改質システムと高温隔離弁が望ましい。

本研究成果は、宮本高温工学部長をリーダーとして部内に設置した以下のメンバーから成るH E N D E L 热利用系検討会において、平成6年11月から平成7年3月までの検討結果を高温技術開発室が主体となって検討整理したものである。

- 宮本 喜晟（高温工学部長）（検討会リーダー）
 数土 幸夫（高温技術開発室長）（検討会リーダー代理）
 茂木 春義（H E N D E L 管理室長）
 秋野 詔夫（熱利用技術研究室長）
 清水 三郎（熱利用技術研究室）
 小貫 薫（熱利用技術研究室）
 鈴木 邦彦（高温技術開発室）
 根小屋真一（高温技術開発室）
 深谷 清（高温技術開発室）
 日野竜太郎（高温技術開発室）（幹事）
 高田 昌二（高温技術開発室）
 羽賀 勝洋（高温技術開発室）

謝 辞

検討に当たっては、検討作業を効率的に進めるために関連分野のレビュー、HTTR熱利用系の設計活動等について、以下の方々から貴重な説明を受けた。

高温隔離弁の開発現状 : 下村 寛昭 課長

ガスタービン発電システムについて－原理・特徴、技術的可能性、研究開発計画等
: 武藤 康 高温構造工学研究室長

HTTR熱利用系の設計現状 : 羽田 一彦 HTTR原子炉開発室利用開発グループ-

HTTR用高温隔離弁の要求機能 : 柴田 大受 HTTR原子炉開発室利用開発グループ°

ガスタービン発電の開発計画提言 : 山田 誠也 係長（三菱重工業（株））

また、討論には必要に応じてHTTR開発部から

馬場 治 HTTR開発部次長

塩沢 周策 HTTR原子炉開発室長

藤本 望 HTTR原子炉開発室利用開発グループ

にも出席をいただき、貴重な意見、助言等をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 羽田一彦 : 私信（平成5年9月7日付け）
- (2) 化学経済、3月臨時増刊号、pp. 167-173(1995).
- (3) 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）
- (4) K. Hada et al. : "Plant Arrangement and Operational Procedure of HTTR with Heat Utilization System", 1st Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme on Design and Evaluation of Heat Utilization Systems for the HTTR, Tokai Research Establishment of the JAERI, 9-11 Nov. (1994).
- (5) S. Saito et al. : "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI 1332(1994).
- (6) 山口克誠 : 「水蒸気改質装置」、富士時報、Vol.55、No.9、pp. 574-578(1982).
- (7) 大澤 勇、梅本真鶴 : 「要素技術開発－各種改質装置の開発」、富士時報、Vol.63、No.11、pp. 774-776(1990).
- (8) M. P. Roberts and M. Fowels : "Review of the Steam Reforming Process and Catalysts"、触媒、Vol. 36、pp. 270-277(1994).
- (9) K. Onuki et al. : "IS Process for Thermochemical Hydrogen Production", JAERI-Review 94-006(1994).

謝 辞

検討に当たっては、検討作業を効率的に進めるために関連分野のレビュー、HTTR熱利用系の設計活動等について、以下の方々から貴重な説明を受けた。

高温隔離弁の開発現状 : 下村 寛昭 課長

ガスタービン発電システムについて - 原理・特徴、技術的可能性、研究開発計画等 : 武藤 康 高温構造工学研究室長

HTTR熱利用系の設計現状 : 羽田 一彦 HTTR原子炉開発室利用開発グループ -

HTTR用高温隔離弁の要求機能 : 柴田 大受 HTTR原子炉開発室利用開発グループ

ガスタービン発電の開発計画提言 : 山田 誠也 係長（三菱重工業（株））

また、討論には必要に応じてHTTR開発部から

馬場 治 HTTR開発部次長

塩沢 周策 HTTR原子炉開発室長

藤本 望 HTTR原子炉開発室利用開発グループ

にも出席をいただき、貴重な意見、助言等をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 羽田一彦 : 私信(平成5年9月7日付け)
- (2) 化学経済、3月臨時増刊号、pp. 167-173(1995).
- (3) 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)
- (4) K. Hada et al. : "Plant Arrangement and Operational Procedure of HTTR with Heat Utilization System", 1st Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme on Design and Evaluation of Heat Utilization Systems for the HTTR, Tokai Research Establishment of the JAERI, 9-11 Nov. (1994).
- (5) S. Saito et al. : "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI 1332(1994).
- (6) 山口克誠 : 「水蒸気改質装置」、富士時報、Vol. 55、No. 9、pp. 574-578(1982).
- (7) 大澤 勇、梅本真鶴 : 「要素技術開発-各種改質装置の開発」、富士時報、Vol. 63、No. 11、pp. 774-776(1990).
- (8) M. P. Roberts and M. Fowels : "Review of the Steam Reforming Process and Catalysts"、触媒、Vol. 36、pp. 270-277(1994).
- (9) K. Onuki et al. : "IS Process for Thermochemical Hydrogen Production", JAERI-Review 94-006(1994).

- (10) 清水三郎：私信（第10回熱利用系実証試験検討委員会資料、平成7年3月10日）
- (11) 日野竜太郎、宮本 喜晨：「高温水蒸気電解法による水素製造－円筒型電解要素による試験結果」、原子力誌投稿中
- (12) R. Hino et al. : "Present Status of R&D on Hydrogen Production by High Temperature Electrolysis of Steam", 1st Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme on Design and Evaluation of Heat Utilization Systems for the HTTR, Tokai Research Establishment of the JAERI, 9-11 Nov.(1994).
- (13) K. Kuegeler : Proceedings of the Int. Workshop on the Closed-Cycle Gas-Turbine Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor, June 17-19, 1991, Cambridge, pp. 2-1 - 2-17.
- (14) C. F. McDonald : "Exploitation of the Very High Temperature Capability of the MHTGR to meet National Energy Needs after the Year 2000", Proceedings of the 21st IECEC, 1986, Paper No. 869069.
- (15) Z. P. Tilliette : "Towards a 50 Per Cent Efficient Nuclear Power Plant", Proceedings of the 27th IECEC, 1986, Paper No. 929281.
- (16) 山田誠也他3名：私信（第9回熱利用系実証試験検討委員会資料、平成7年3月3日）
- (17) 佐野川好母：「高温ガス炉による高効率発電、(1) 高温ヘリウムガスタービンによる発電」、原子力誌、Vol. 35、pp. 70-74(1993).
- (18) J. Kruschik : "Development of a new hot gas double axial valve and design concept for a coaxial valve", ASME paper 86-GT-31, Int. Gas Turbine Conf. and Exhibit, June 1986, Dusseldorf.
- (19) 柴田大受、羽田一彦：私信（第6回熱利用系実証試験検討委員会資料、平成7年1月10日）

[付録 1] 水蒸気改質システム炉外実証試験装置の機器仕様

炉外実証試験装置を構成する機器の主要仕様（案）について以下に記す。以下の仕様は反応管3本の場合を対象にした案を記してある。構成機器の配置（案）についてはFig. 3.4のフローシートを参照のこと。また、圧力は特に指定しない限りゲージ圧とする。

(1) 水蒸気改質器 (Fig. 3.5参照)

(a) 反応管寸法

外管（触媒管） : 外径 165.2mm (6B管)、肉厚 16mm

内管（ライザー管） : 外径 101.6mm (3.5B管)、肉厚 3mm

スリーブ管* : 外径 66.9mm (2.5B管)、肉厚 3mm

(*)スリーブ管はライザー管内に挿入して、生成ガスの流速を速めて伝熱促進を行うためのもの。

触媒充填層幅 : 15.8mm (= (外管内径 - 内管外径) / 2)

充填触媒寸法 : 3mm径の球形触媒

(触媒充填層には、径方向に5~6個の触媒が充填される)

触媒層高さ : 8770mm

充填触媒数 : 約127万個

バッフルプレート : ピッチ 450mm、総数 21枚

(b) 反応管及び反応器材質

外管（触媒管） : ハステロイXR 又は相当品

内管（ライザー管） : インコロイ800H

スリーブ管 : SUS304

外管固定用鏡板 : SUS304

内管固定用鏡板 : SUS304

バッフルプレート : SUS310S

ワイヤーネット : SUS310S

ヘリウムガス分散器 : SUS310S

シェル（圧力容器） : SB42

圧力容器内部断熱材 : カオウール 又は相当品

(c) 改質反応器内部構造物

ヘリウムガス流量が少ないためにヘリウムガス保有熱のかなりの量が圧力容器から放散することが予想されるので、圧力容器内部に補償ヒータブロックを組み込み、放熱を防止することとする。補償ヒータブロックを軸方向に多数積層して、個々のブロックのヒータ出力を制御して放熱を防止する。

(2) ヘリウムガス加熱器

本加熱器は、HENDEL M₂ ループで実績のある黒鉛製発熱体による直接通電加熱方式のものとする。

本体形式 : 直接通電パイプヒータ、内部保温方式

流 体 : ヘリウムガス
 流 量 : 最高 0.3 kg/s
 升 温 : 最高 900 °C (ヘリウムガス)
 設計圧力 : 4.5 kg/cm²G
 設計温度 : 450 °C (圧力容器)
 材 質 : 圧力容器 SCMV 2 又は相当品
 発熱体 黒鉛
 保温材 カオウール又は相当品
 概略伝熱量 : 最高 1400 kW
 数 量 : 1 基

(3) 水蒸気供給系

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) 高圧・定流量ポンプ
- 4) 水流量計
- 5) 水予熱器
- 6) 脱ガス器
- 7) 蒸気発生器 (蒸気ドラム付き)
- 8) 蒸気過熱器
- 9) 非常時給水タンク
- 10) バルブ類 (定流量弁、逆止弁、空操弁等) 他

以下に、上記機器の仕様 (案) を記す。

1) フィルター + 水精製器

形 式 : 純水製造装置
 除去粒子 : 1 ミクロン以上
 生産水量 : 最高 250 l/h
 純 度 : 15 MΩ/cm 以上
 主要材質 : SUS 304 又は相当品
 数 量 : 1 基

2) 水タンク

型 式 : 円筒型タンク
 概略容量 : 5 m³
 耐 壓 : 5 kg/cm²G
 主要材質 : SUS 304 又は相当品
 数 量 : 1 基

3) 高圧・定流量ポンプ

形 式 : 複数プランジャー型定流量ポンプ
 吐出流量 : 最高 1.5 kg/min (流量は光学式エンコーダーで検出)
 吐出圧力 : 最高 100 kg/cm²G
 主要材質 : SUS 316 又は相当品
 電 源 : 単相 200 V
 数 量 : 1 台

- 付属品
- ・モーター回転数制御器（現場／遠隔操作切替え機能付き）
 - ・エンコーダー出力変換器

4)水流量計

- 型式
- ・質量流量計
- 測定範囲
- ・最高 15 kg/min
- 耐圧
- ・50 kg/cm²G
- 使用温度
- ・100 °C以下
- 主要材質
- ・SUS316 又は相当品
- 数量
- ・1台
- 付属品
- ・トランスマッター
 - ・流量／密度演算器

5)水予熱器

- 本体型式
- ・プレートフィン型熱交換器、外部保温方式
- 流体
- ・ヘリウムガス／水
- 流量
- ・ヘリウムガス 最高 0.3 kg/s
 - ・水 最高 11.7 kg/min
- 設計圧力
- ・50 kg/cm²G
- 設計温度
- ・450 °C
- 主要材質
- ・SUS310S 又は相当品
 - ・保温材 カオウール又は相当品
- 概略伝熱量
- ・熱物質収支計算から決定する。
- 数量
- ・1基

6)脱ガス器

- 型式
- ・高分子膜型水／ガス分離器
- 流量
- ・最高 11.7 kg/min
- 設計圧力
- ・50 kg/cm²G
- 設計温度
- ・150 °C
- ケーシング材質
- ・SUS304 又は相当品
- 脱気能力
- ・溶存ガス量 2 ppm以下
- 数量
- ・1基

7)蒸気発生器（蒸気ドラム付き）

- 本体型式
- ・蒸気ドラム付き U字管タイプ蒸気発生器
 - ・蒸気ドラム、圧力容器、ヘリウムガス出口ヘッダー 外部保温方式
 - ・ヘリウムガス入口部 内部保温方式
- 流体
- ・U字管内 ヘリウムガス
 - ・U字管外 水、水蒸気
- 流量
- ・ヘリウムガス 最高 0.3 kg/s
 - ・水 最高 11.7 kg/min
- 設計圧力
- ・50 kg/cm²G
- 設計温度
- ・450 °C（圧力容器）
- 主要材質
- ・圧力容器 SUS310S 又は相当品
 - ・U字管 インコロイ800H 又は相当品
 - ・保温材 カオウール又は相当品
- 概略伝熱量
- ・熱物質収支計算から決定する。

数 量 : 1 基
 付 属 品
 ・放熱器
 ・逆止弁（給水側）他

8) 蒸気過熱器

本体型式 : U字管タイプ蒸気過熱器、外部保温方式
 流 体 : U字管外 ヘリウムガス
 U字管内 水蒸気
 流 量 : ヘリウムガス 最高 0.3 kg/s
 水蒸気 最高 11.7 kg/min
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 設計温度 : 450 °C (圧力容器)
 主要材質 : 圧力容器 SUS310S 又は相当品
 U字管 インコロイ800H 又は相当品
 保溫材 カオウール又は相当品
 概略伝熱量 : 熱物質収支計算から決定する。
 数 量 : 1 基

9) 非常時給水タンク

型 式 : 円筒型タンク
 概略容量 : 3 m³
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 設計温度 : 100 °C
 主要材質 : SUS304 又は相当品
 数 量 : 1 基
 付 属 品
 ・安全弁
 ・加圧用窒素ガス導入圧力調節弁

10) バルブ類（定流量弁、逆止弁、空操弁等）他

定流量弁 : 固定オリフィスタイプ
 流量 7.8 kg/min
 逆止弁 : バネ式逆止弁
 動作差圧 0.1 kg/cm²
 空操弁 : ストップ弁（遠隔操作）
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 主要材質 : SUS304 又は相当品

(4) 原料ガス供給系

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) ガスタンク（サージタンク）
- 4) 主コンプレッサー
- 5) 冷却器（バイパスライン）
- 6) 脱硫器用加熱器
- 7) 脱硫器
- 8) 流量計

9)バルブ類（定流量弁、逆止弁、空操弁等）他

以下に、上記機器の仕様（案）を記す。

1)LNG（液化天然ガス）タンク

型式：円筒型断熱タンク
 概略容量：30 m³
 設計圧力・温度・材質：液化天然ガスタンクの基準に従う。
 数量：2基
 付属品
 • 安全弁
 • 流量調節弁（遠隔操作）

2)蒸発器

型式：フィン付き蒸発器
 蒸発量：最高4.12 Nm³/min
 耐圧：10 kg/cm²G
 主要材質：アルミニウム 又は相当品
 数量：1基
 付属品
 • 圧力調節弁（遠隔操作）

3)ガスタンク（サージタンク）

型式：円筒型タンク
 概略容量：5 m³
 設計圧力：20 kg/cm²G
 設計温度：100 °C
 主要材質：低温用鋼 又は相当品
 数量：1基
 付属品
 • 安全弁

4)主コンプレッサー

型式：ターボ型コンプレッサー
 吐出容量：最高5 Nm³/min
 昇圧：最高4.5 kg/cm²G
 主要材質：SUS304 又は相当品
 設計圧力：50 kg/cm²G
 設計温度：150 °C
 電源：三相 400 V
 数量：1基

5)冷却器（バイパスライン）

本体型式：プレートフィン型熱交換器、外部保温方式
 流体：天然ガス／水
 流量：天然ガス 最高4 Nm³/min
 水 最高6000 lph
 設計圧力：20 kg/cm²G
 設計温度：200 °C
 主要材質：SUS304 又は相当品
 保温材 カオウール又は相当品
 概略伝熱量：熱物質収支計算から決定する。

数 量 : 1 基

6) 脱硫器用加熱器

本体型式 : 逆 U 字管タイプ加熱器、内部保温方式
 流 体 : U字管外 ヘリウムガス
 U字管内 メタン+水蒸気
 流 量 : ヘリウムガス 最高 0. 3 kg/s
 メタン 最高 4. 12 Nm³/min
 水蒸気 最高 11. 7 kg/min
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 設計温度 : 450 °C (圧力容器)
 主要材質 : 圧力容器 S U S 3 1 0 S 又は相当品
 U字管 インコロイ 8 0 0 H 又は相当品
 保溫材 カオウール又は相当品
 概略伝熱量 : 热物質収支計算から決定する。
 数 量 : 1 基

7) 脱硫器

本体型式 : 水添脱硫器、外部保温方式
 流 体 : 天然ガス
 流 量 : 最高 4. 12 Nm³/min
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 設計温度 : 450 °C (圧力容器)
 主要材質 : S U S 3 1 0 S 又は相当品
 保溫材 カオウール又は相当品
 充填触媒 : 第1工程 Co-Mo系 又は相当品
 第2工程 ZnO
 数 量 : 1 式

8) 流量計

型 式 : 乾式体積流量計
 流 体 : 天然ガス
 流 量 : メインライン 最高 4. 5 Nm³/min
 バイパスライン 最高 3 Nm³/min
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 設計温度 : 100 °C
 主要材質 : S U S 3 1 0 S 又は相当品
 電 源 : 単相 100 V
 数 量 : 1 式
 付 属 品 : • 流量演算器

9) バルブ類(定流量弁、逆止弁、空操弁等)他

定流量弁 : 固定オリフィスタイプ
 流 量 1 kg/min
 逆 止 弁 : バネ式逆止弁
 動作差圧 0. 1 kg/cm²
 空 操 弁 : ストップ弁及びニードル弁(遠隔操作)
 供給空気圧力 5 kg/cm²G

減圧弁 : 減圧弁(バイパスライン) (遠隔操作)
 (調整範囲 2 ~ 10 kg/cm²G)
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 主要材質 : S U S 3 0 4 又は相当品

(5) 不活性ガス供給系

不活性ガス供給系の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) ガスタンク(サージタンク)
- 4) コンプレッサー
- 5) 窒素ガスカードル
- 6) 冷却器(バイパスライン)
- 7) 流量計
- 8) バルブ類(定流量弁、逆止弁、空操弁等)他

以下に、上記機器の仕様(案)を記す。

1) 液化窒素タンク

型式 : 円筒型断熱タンク
 概略容量 : 30 m³
 設計圧力・温度・材質 : 液化窒素ガスタンクの基準に従う。
 数量 : 1基
 付属品 : ・安全弁
 ・流量調節弁(遠隔操作)

2) 蒸発器

型式 : フィン付き蒸発器
 蒸発量 : 最高 4 Nm³/min
 耐圧 : 10 kg/cm²G
 主要材質 : アルミニウム 又は相当品
 数量 : 1基
 付属品 : ・圧力調節弁(遠隔操作)

3) ガスタンク(サージタンク)

型式 : 円筒型タンク
 概略容量 : 5 m³
 耐圧 : 20 kg/cm²G
 主要材質 : 低温用鋼 又は相当品
 数量 : 1基
 付属品 : ・安全弁

4) コンプレッサー

型式 : ターボ型コンプレッサー
 吐出容量 : 最高 4.2 Nm³/min
 昇圧 : 最高 45 kg/cm²G
 主要材質 : S U S 3 0 4 又は相当品
 設計圧力 : 50 kg/cm²G

設計温度 : 150°C
 電 源 : 三相 400V
 数 量 : 1基

5)窒素ガスカーボル

容 量 : 1000Nm³
 数 量 : 2基
 付 属 品 : 安全弁付き減圧弁

6)冷却器(バイパスライン)

本体型式 : プレートフィン型熱交換器、外部保温方式
 流 体 : 窒素ガス／水
 流 量 : 窒素ガス 最高 3Nm³/min
 水 最高 6000L/h
 設計圧力 : 20 kg/cm²G
 設計温度 : 200°C
 主要材質 : SUS304 又は相当品
 保温材 カオウール又は相当品
 概略伝熱量 : 熱物質収支計算から決定する。
 数 量 : 1基

7)流量計

型 式 : 乾式体積流量計
 流 体 : 天然ガス
 流 量 : メインライン 最高 4.5Nm³/min
 バイパスライン 最高 3Nm³/min
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 設計温度 : 100°C
 主要材質 : SUS310S 又は相当品
 電 源 : 単相 100V
 数 量 : 1式
 付 属 品 : 流量演算器

8)バルブ類(定流量弁、逆止弁、空操弁等)他

定流量弁 : 固定オリフィスタイプ
 流 量 1.5Nm³/min
 逆止弁 : バネ式逆止弁
 動作差圧 0.1 kg/cm²G
 空操弁 : ストップ弁及びニードル弁(遠隔操作)
 供給空気圧力 5 kg/cm²G
 減圧弁 : 減圧弁(バイパスライン)(遠隔操作)
 (調整範囲 2~10 kg/cm²G)
 設計圧力 : 50 kg/cm²G
 主要材質 : SUS304 又は相当品

(6)熱交換器(原料加熱器)

本体型式 : プレートフィン型熱交換器
 流 体 : 水蒸気含有合成ガス／水

流 量 : 水蒸気含有合成ガス 最高 $1300 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (概略)
 水 最高 1200 l/h
 設計圧力 : $50 \text{ kg/cm}^2\text{G}$
 設計温度 : 450°C (圧力容器)
 主要材質 : S U S 3 1 0 S 又は相当品
 概略伝熱量: 熱物質収支計算から決定する。
 数 量 : 1 基

(7) ガス分離器 (+冷却器)

1) 冷却器

本体型式 : プレートフィン型熱交換器
 流 体 : 水蒸気含有合成ガス／水
 流 量 : 水蒸気含有合成ガス 最高 $1300 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (概略)
 水 最高 1200 l/h
 設計圧力 : $50 \text{ kg/cm}^2\text{G}$
 設計温度 : 450°C (圧力容器)
 主要材質 : S U S 3 1 6 又は相当品
 概略伝熱量: 熱物質収支計算から決定する。
 数 量 : 1 基
 付 属 品 : ドレン排出機構
 - ドレンタンク (レベルセンサー付き)
 + バルブ 1 (空操弁、冷却器とドレンタンクの間に設置)
 + バルブ 2 (定流量弁、ドレンタンク出口)
 + バルブ 3 (空操弁、バルブ 2 の下流側)
 - レベルセンサー高の指示でバルブ 1 を閉止、バルブ 3 を開放
 - レベルセンサー低の指示でバルブ 3 を閉止、バルブ 1 を開放

2) CO 变成ユニット

本体型式 : 低温型 CO 变成ユニット
 流 体 : 合成ガス
 CO₂変換率 : 90 %
 設計圧力 : $50 \text{ kg/cm}^2\text{G}$
 設計温度 : 200°C
 主要材質 : S U S 3 1 6 又は相当品
 数 量 : 1 基

3) ガス分離ユニット

本体型式 : P S A ガス分離ユニット
 分離流体 : H₂、CO、CO₂、CH₄
 分離効率 : H₂ 99 %
 CO、CO₂ 99 %
 CH₄ 99 %
 設計圧力 : $50 \text{ kg/cm}^2\text{G}$
 設計温度 : 200°C
 主要材質 : S U S 3 1 6 又は相当品
 電 源 : 三相 400 V
 数 量 : 1 基

(8) フレアースタック

本体型式 : 水プール付きフレアースタック
 燃焼流体 : H₂、CO
 流量 : 最高 800 Nm³/h (概略)
 保有水量 : 10 m³
 主要材質 : SUS304 又は相当品
 数量 : 1基
 付属品 : ・着火装置（遠隔）

(9) 計測・制御設備

1) 热電対

形式 : 非接地型K型シーズ熱電対
 シーズ材質 : インコネル600
 数量 : 1式
 備考 : ・機器入口、内部、出口には必ず2点以上設置する。
 ・配管経路には5mおきに2点設置する。
 ・改質器内部には、
 ヘリウムガス温度測定用.....45点以上
 原料温度測定用.....12点以上
 反応管温度測定用.....45点以上
 合成ガス温度測定用.....45点以上
 設置する。

2) 壓力計

形式 : 現場指示型絶対圧力計
 計測範囲 : ~50 kg/cm²G
 耐圧 : 70 kg/cm²G
 主要材質 : SUS304 又は相当品
 数量 : 1式
 付属品 : ・ディストリビュータ
 ・5方弁（ガス系）
 ・3方弁（水系）
 備考 : ・各機器入口又は出口に1台設置する。
 ・改質器には、
 ヘリウムガス側入口、出口.....各2台（1台バックアップ）
 原料入口.....2台（1台バックアップ）
 合成ガス出口.....2台（1台バックアップ）
 設置する。

3) 差圧計

形式 : 現場指示型差圧計
 計測範囲 : 最高 10 kg/cm²
 耐圧 : 60 kg/cm²G
 主要材質 : SUS304 又は相当品
 数量 : 1式
 付属品 : ・ディストリビュータ
 ・5方弁（ガス系）

- 備考
- ・3方弁(水系)
 - ・各機器に1台設置する。
 - ・改質器には、
ヘリウムガス側………3台
(0～5 kg/cm²の範囲で3種類のレンジ)
 - 反応管……………3台×3本
(0～10 kg/cm²の範囲で3種類のレンジ)

4)ガス分析計

- 形式：現場用質量分析器
- ガス分析範囲：ヘリウムガス中の不純物ガス 最低0.1 ppm
合成ガス他の成分ガス 最低1 ppm
- 電源：単相 200V
- 数量：8台
- 付属品
- ・データ処理器
 - ・サンプリングライン切替え器(減圧弁、ページ弁付き)
- 備考
- ・質量分析器へのサンプリングラインは以下の通り。
 - 改質器入口／出口(ヘリウムガス側)……………各1本
 - 改質器入口(原料ガス側)…………… 1本
 - 改質器出口(合成ガス側)…………… 1本
 - 熱交換器、蒸気過熱器、蒸気発生器、水予熱器の各出口…各1本
 - 脱硫器入口／出口、熱交換器出口……………各1本
 - P S Aユニット出口…………… 2本

5)冷却水用流量計(体積流量計(ガス用)、質量流量計(供給水用)は既述)

- 形式：電磁流量計(冷却水)
- 計測範囲：最高15 m³/h
- 耐圧：60 kg/cm²G
- 主要材質：SUS304 又は相当品
- 数量：1式
- 付属品
- ・ディストリビュータ
 - ・流量演算器
- 備考
- ・水冷却器入口に1台設置する。

6)ヘリウムガス加熱器入出力制御装置

- 形式：3相サイリスタ制御方式
- 定格容量：1.6 MW
- 自動制御範囲：0～98% (連続)
- 設定方式：現場手動及び遠隔設定
- 電源：HENDEL設備に準拠
- 数量：1式
- 主要構成
- ・油入り変圧器………1基
 - ・電圧調整器………1基
 - ・制御装置………1基

7)コンプレッサー制御装置

- 形式：3相インバータ制御方式
- 自動制御範囲：0～98% (連続)

設定方式 : 現場手動及び遠隔設定
 電 源 : 三相 400V
 数 量 : 1式

8) P S A ユニット制御装置

形 式 : プログラム制御方式
 設定方式 : コンピュータによる遠隔設定
 電 源 : 三相 400V
 数 量 : 1式

9) 試験装置制御設備

形 式 : プログラム制御方式
 設定方式 : コンピュータによる遠隔設定
 電 源 : 単相 200V
 数 量 : 1式

10) 非常用電源設備

形 式 : 無停電電源設備+非常用発電機
 出 力 : 三相 400V (単相 200V/100Vはトランス等で変換)
 容 量 : 非常用発電機起動までに試験装置に要求される容量
 数 量 : 1式

(10) 各種配管

1) 高温配管(ヘリウムガス用)

形 式 : 内部断熱式单管
 主要材質 : ライナー管 インコロイ800H 又は相当品
 外 管 炭素鋼
 断熱材 カオウール 又は相当品
 設計温度 : ライナー管 950°C
 外 管 450°C
 設計圧力 : 4.5 kg/cm²G
 数 量 : 1式
 備 考 : ・設置はヘリウムガス加熱器から水蒸気改質器まで(ヘリウムガスライン)

2) ヘリウムガス配管

形 式 : 外部保温式单管
 主要材質 : SUS316 又は相当品
 断熱材 カオウール 又は相当品
 設計温度 : 450°C
 設計圧力 : 4.5 kg/cm²G
 数 量 : 1式

3) 原料ガス及び合成ガス配管

形 式 : 外部保温式单管
 主要材質 : SUS316 又は相当品
 断熱材 カオウール 又は相当品
 設計温度 : 450°C
 設計圧力 : 5.0 kg/cm²G

数 量 : 1式

4)給水配管

主要材質 : S U S 3 0 4 又は相当品
設計温度 : 1 0 0 °C
設計圧力 : 5 0 kg/cm²G
数 量 : 1式

5)水蒸気配管

主要材質 : S U S 3 1 0 S 又は相当品
設計温度 : 4 5 0 °C
設計圧力 : 5 0 kg/cm²G
数 量 : 1式

6)計装用配管

主要材質 : S U S 3 0 4 又は相当品
設計温度 : 1 0 0 °C
設計圧力 : 5 0 kg/cm²G
数 量 : 1式

(11)その他必要機器

1)計装用バルブ

主要材質 : S U S 3 0 4 又は相当品
設計温度 : 1 0 0 °C
設計圧力 : 5 0 kg/cm²G
数 量 : 1式

2)機器架台

主要材質 : 構造鋼
耐 加 重 : 機器重量に耐えられること。
数 量 : 1式

[参考図] (4, 6)

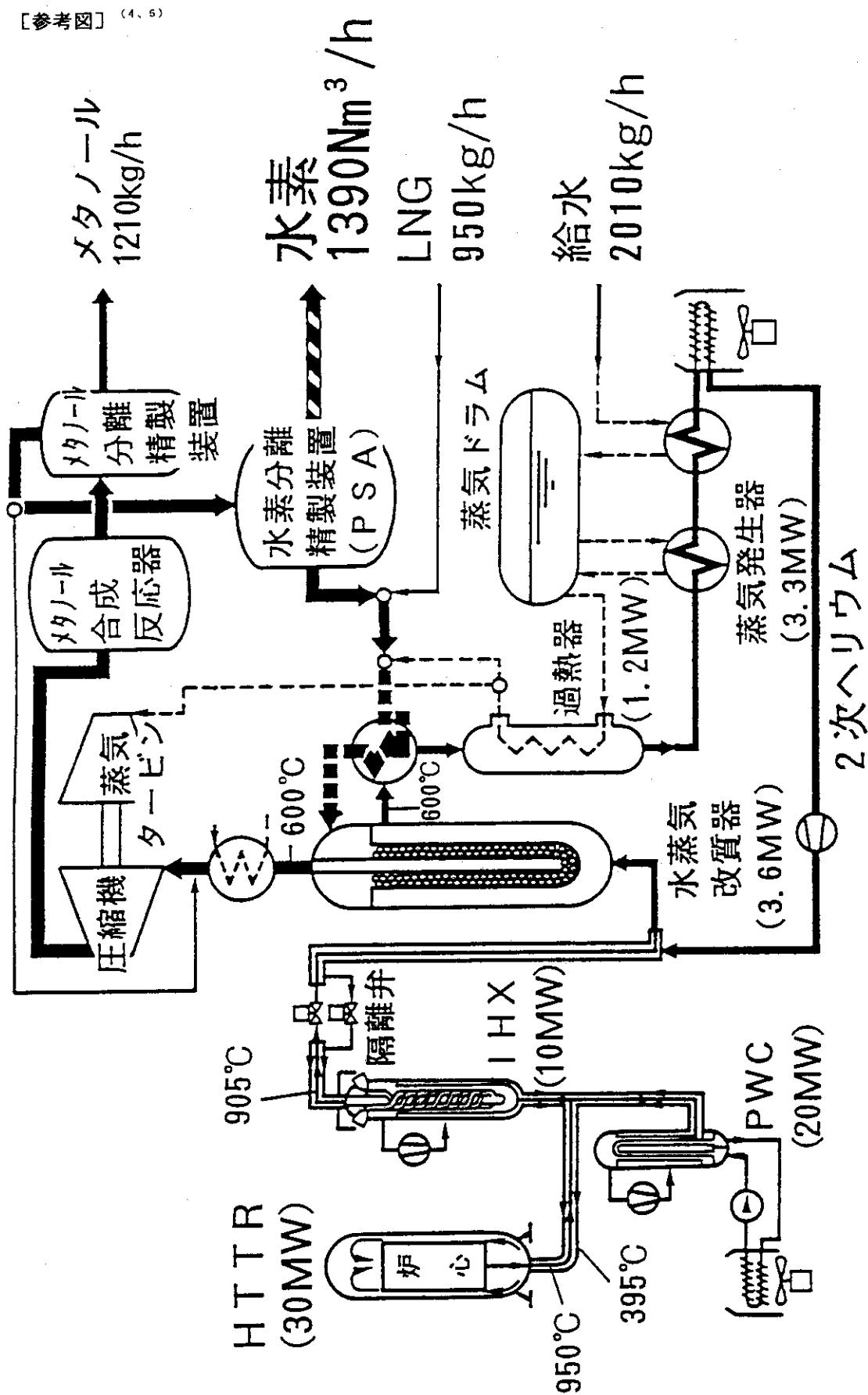


Fig. A1 Flowsheet of steam reforming system with methanol synthesis process
connected with HTTR

N
↑

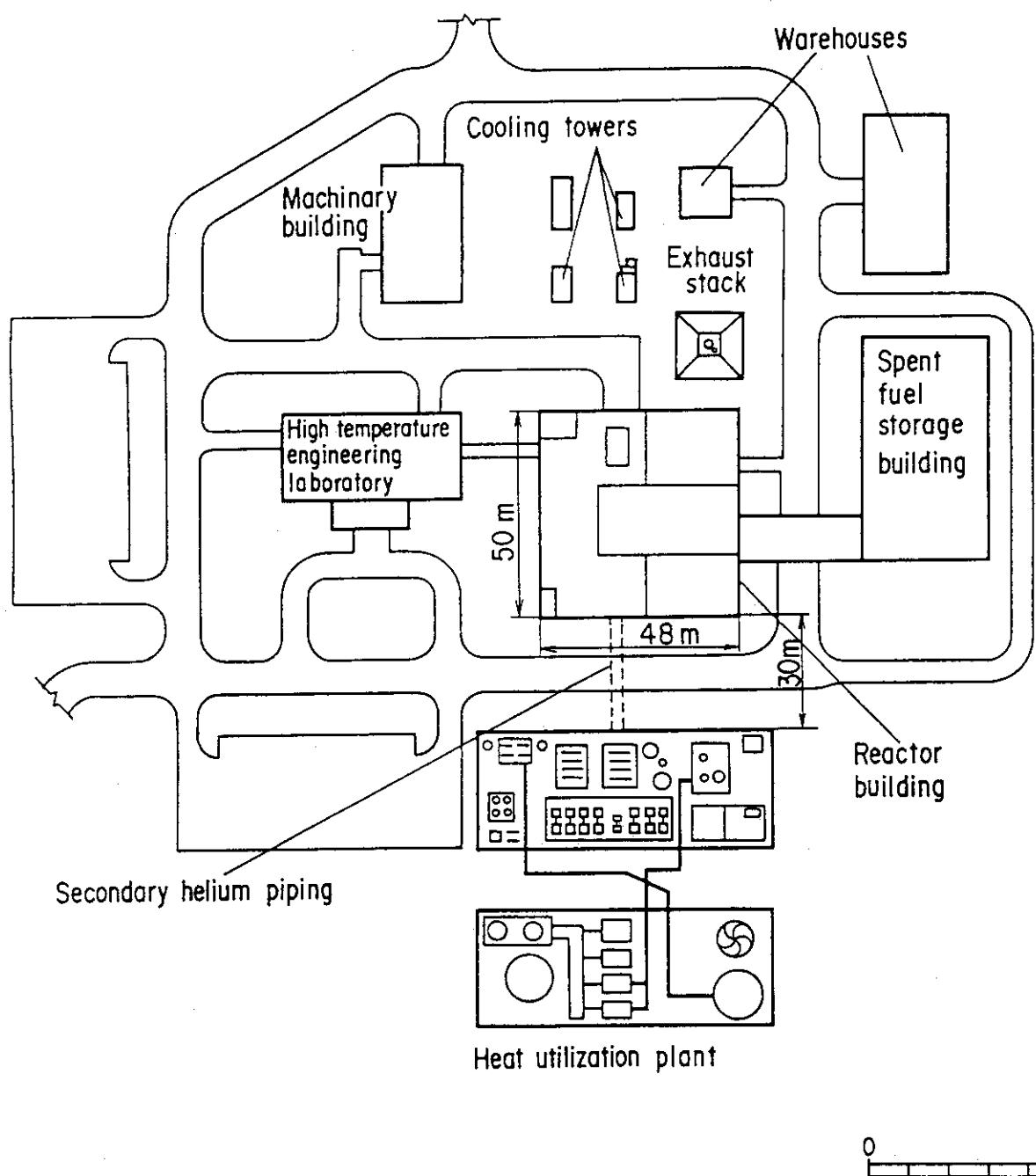


Fig. A2 Arrangement of HTTR heat utilization system

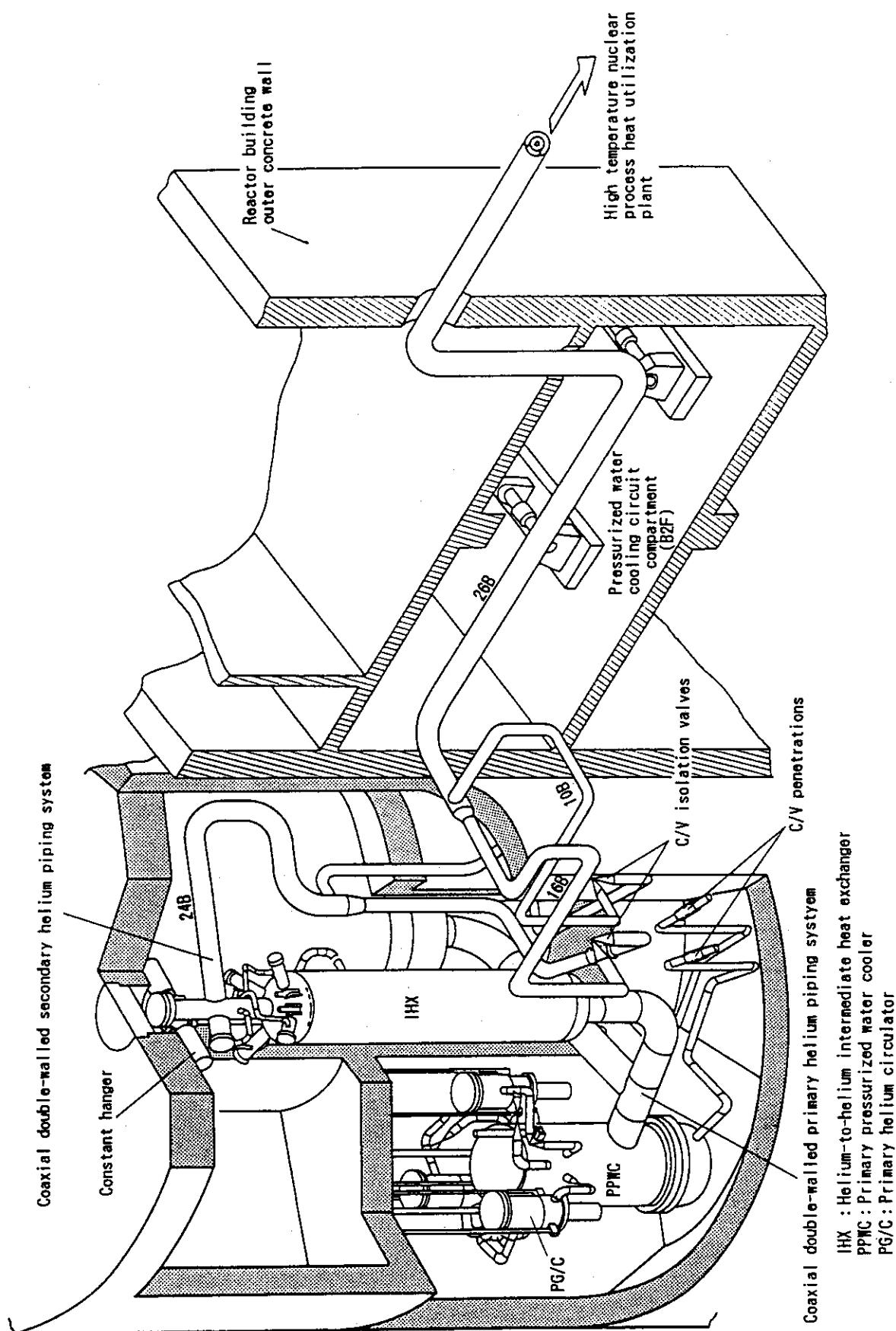


Fig. A3 Arrangement of secondary helium gas piping connected to heat utilization system

Reactor building

Heat utilization plant

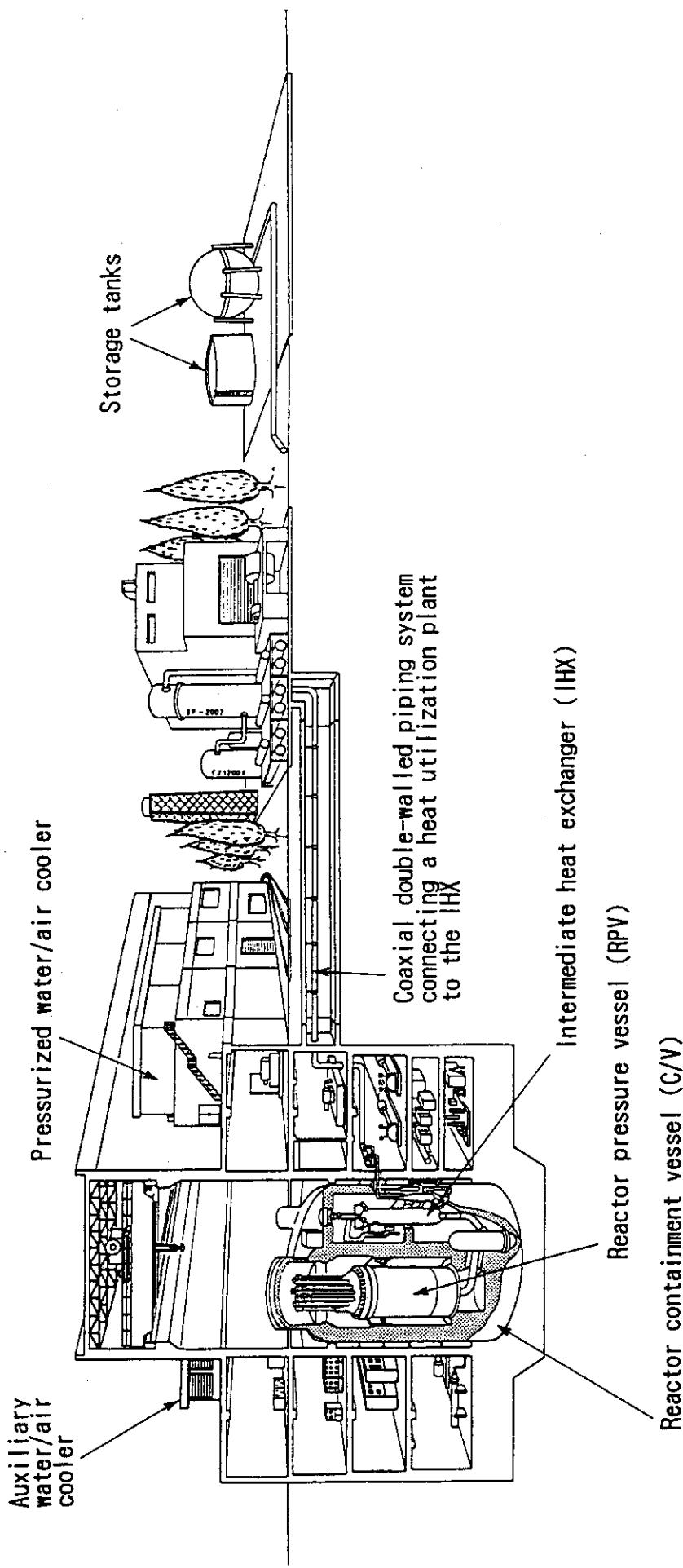


Fig. A4 Cutaway drawing of HTTR plant with heat utilization system