

JAERI-Tech

96-053



HTTR熱利用系炉外技術開発試験用 水蒸気改質器の基本設計の検討

1996年11月

羽賀勝洋・日野竜太郎・稲垣嘉之・羽田一彦・会田秀樹・関田健司
西原哲夫・山田誠也*・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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力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）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

HTTR熱利用系炉外技術開発試験用
水蒸気改質器の基本設計の検討

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部
羽賀 勝洋・日野竜太郎・稻垣 嘉之・羽田 一彦
会田 秀樹・関田 健司・西原 哲夫・山田 誠也*
数土 幸夫

(1996年10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という実炉に世界で初めて高温核熱利用系を接続して実証試験を実施するのに先立ち、機器の高性能化、運転・制御及び安全技術の実証、設計・安全評価解析コードの検証のための炉外技術開発試験が不可欠である。そこで、HTTRの最初の熱利用系として設計検討が進められている水蒸気改質水素製造システムについて、炉外技術開発試験計画を策定し、炉外技術開発試験のための試験装置の設計検討を行った。本報告は、試験装置の中核となる水蒸気改質器の設計検討の成果をまとめたものである。設計に当たっては、反応管が3本の場合と、コストダウンのために反応管を1本にした場合について、それぞれ反応特性、構造強度を解析評価し、その仕様と構造を定めた。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀3607番地

* 三菱重工業(株)長崎造船所

Preliminary Design of Steam Reformer in Out-Pile Demonstration
Test Facility for HTTR Heat Utilization System

Katsuhiro HAGA, Ryutaro HINO, Yosiyuki INAGAKI,
Kazuhiko HATA, Hideki AITA, Kenji SEKITA,
Tetsuo NISHIHARA, Seiya YAMADA * and Yukio SUDO

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

(Received October 30, 1996)

One of the key objectives of HTTR is to demonstrate effectiveness of high-temperature nuclear heat utilization system. Prior to connecting a heat utilization system to HTTR, an out-pile demonstration test is indispensable for the development of experimental apparatuses, operational control and safety technology, and verification of the analysis code of safety assessment. For the first heat utilization system of HTTR, design of the hydrogen production system by steam reforming is going on. We have proposed the out-pile demonstration test plan of the heat utilization system and conducted preliminary design of the test facility.

In this report, design of the steam reformer, which is the principal component of the test facility, is described. In the course of the design, two types of reformers are considered. The one reformer contains three reactor tubes and the other contains one reactor tube to reduce the construction cost of the test facility. We have selected the steam reformer operational conditions and structural specifications by analyzing the steam reforming characteristics and component structural strength for each type of reformer.

Keywords: Nuclear Heat Utilization, HTTR, Demonstration Test, Steam Reformer, Hydrogen Production, Reactor Tube, Design

* Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 1.はじめに | 1 |
| 2.炉外技術開発試験の試験装置の概要 | 1 |
| 2.1 炉外技術開発試験の主要内容 | 2 |
| 2.2 炉外技術開発試験の熱流動条件 | 3 |
| 2.3 炉外技術開発試験装置の構成 | 5 |
| 3.水蒸気改質器の構造 | 9 |
| 3.1 設計基本方針 | 9 |
| 3.2 構造検討 | 9 |
| 4.水蒸気改質器の性能検討 | 15 |
| 4.1 反応管外側の伝熱促進手法の検討 | 15 |
| 4.2 改質反応器解析モデル | 20 |
| 4.3 解析条件 | 26 |
| 4.4 アプローチ温度の影響 | 27 |
| 4.5 原料ガスの相違による熱物質収支への影響 | 28 |
| 5.構造設計計算 | 47 |
| 5.1 設計条件の検討 | 47 |
| 5.2 設計条件 | 48 |
| 5.3 反応管が1本の場合の計算結果 | 48 |
| 6.計測点の検討 | 60 |
| 7.機器仕様 | 65 |
| 8.補償ヒータブロックの検討 | 67 |
| 8.1 設置目的 | 67 |
| 8.2 ヒータ容量の検討 | 67 |
| 8.3 検討結果 | 68 |
| 9.あとがき | 70 |
| 謝 辞 | 70 |
| 参考文献 | 71 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of Out-of-pile Demonstration Test and Test Facility | 1 |
| 2.1 Main Items of Out-of-pile Demonstration Test | 2 |
| 2.2 Thermal and Hydraulic Conditions of Out-of-pile Demonstration Test .. | 3 |
| 2.3 Components of Out-of-pile Demonstration Test Facility | 5 |
| 3. Structure of Steam Reformer | 9 |
| 3.1 Principle of Basic Design | 9 |
| 3.2 Structure Design | 9 |
| 4. Performance of Steam Reformer | 15 |
| 4.1 Optimization of the Method to Promote Heat Transfer of Reactor Tube .. | 15 |
| 4.2 Analysis Model | 20 |
| 4.3 Analysis Condition | 26 |
| 4.4 Influence of the Approach Temperature | 27 |
| 4.5 Influence of Feed Gas Constitution to Heat and Mass Transfer | 28 |
| 5. Structure Design Calculation | 47 |
| 5.1 Consideration for Design Condition | 47 |
| 5.2 Design Condition | 48 |
| 5.3 Calculation Results | 48 |
| 6. Arrangement of Measuring Instrument | 60 |
| 7. Specification | 65 |
| 8. Compensation Heater Block | 67 |
| 8.1 Installation Purpose | 67 |
| 8.2 Optimization of Heater Capacity | 67 |
| 8.3 Optimization Result | 68 |
| 9. Conclusions | 70 |
| Acknowledgments | 70 |
| References | 71 |

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

この後、高温隔離弁、受動的冷却型蒸気発生器を含む水蒸気改質システム炉外実証試験装置の設計検討に着手し、水蒸気改質器を含む基本システム構成を定めて、コストダウンのための合理化設計を行った。この間、高温ガス炉に関するR & Dは大洗研究所に集約してH T T R計画を効率的に推進することとなり、炉外実証試験は「炉外技術開発試験」と改称し、H T T Rサイトに試験装置を建設する予定となった。炉外技術試験装置の基本設計は2. 3節に示すような水蒸気改質システムの各系統について行われた。これらの検討結果は、4分冊程度のレポートにまとめられる予定である。このうち原子炉システムを模擬するヘリウムガス供給系については、合理化設計の中でH E N D E L機器を移設・再利用する方針で検討を行った。並行して、水蒸気改質器の反応管本数の削減等の合理化設計を行った。これらの成果を踏まえて、今後詳細設計を行っていく予定である。本報告は、水蒸気改質システムの炉外技術試験装置について行われた基本設計の内、水蒸気改質器の合理化設計の結果をまとめたもので、炉外技術開発試験装置の構成、水蒸気改質器の設計条件及び構造、反応特性、機器仕様等について述べる。

2. 炉外技術開発試験の試験装置の概要

H T T R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。原研ではH T T Rを用いた水素製造システムの実証試験のための予備設計を2年度から開始した。また、8年度からは科学技術庁の委託を受け、H T T Rを用いた水素製造システムの技術開発を行い、14年度中頃に試験を開始する計画で設計などを進めることになった。H T T Rはその臨界を平成9年末に想定しており、それから5年後に最初の熱利用システムをH T T Rに接続することを目指している。このため、今後8年程度の間に詳細設計、熱利用系炉外実証試験、安全審査等の作業を確実に進める必要がある。

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

この後、高温隔離弁、受動的冷却型蒸気発生器を含む水蒸気改質システム炉外実証試験装置の設計検討に着手し、水蒸気改質器を含む基本システム構成を定めて、コストダウンのための合理化設計を行った。この間、高温ガス炉に関するR & Dは大洗研究所に集約してH T T R計画を効率的に推進することとなり、炉外実証試験は「炉外技術開発試験」と改称し、H T T Rサイトに試験装置を建設する予定となった。炉外技術試験装置の基本設計は2. 3節に示すような水蒸気改質システムの各系統について行われた。これらの検討結果は、4分冊程度のレポートにまとめられる予定である。このうち原子炉システムを模擬するヘリウムガス供給系については、合理化設計の中でH E N D E L機器を移設・再利用する方針で検討を行った。並行して、水蒸気改質器の反応管本数の削減等の合理化設計を行った。これらの成果を踏まえて、今後詳細設計を行っていく予定である。本報告は、水蒸気改質システムの炉外技術試験装置について行われた基本設計の内、水蒸気改質器の合理化設計の結果をまとめたもので、炉外技術開発試験装置の構成、水蒸気改質器の設計条件及び構造、反応特性、機器仕様等について述べる。

2. 炉外技術開発試験の試験装置の概要

H T T R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。原研ではH T T Rを用いた水素製造システムの実証試験のための予備設計を2年度から開始した。また、8年度からは科学技術庁の委託を受け、H T T Rを用いた水素製造システムの技術開発を行い、14年度中頃に試験を開始する計画で設計などを進めることになった。H T T Rはその臨界を平成9年末に想定しており、それから5年後に最初の熱利用システムをH T T Rに接続することを目指している。このため、今後8年程度の間に詳細設計、熱利用系炉外実証試験、安全審査等の作業を確実に進める必要がある。

これを受け、高温工学試験研究炉（HTTR）開発部でHTTRに最初に接続する熱利用システムの選定作業を行い、主に以下に示す理由から天然ガス（メタンが主成分）の水蒸気改質による水素製造システムを選定した。

- 一般産業界での十分な使用実績があり、高温ガス炉の核熱利用の早期実証と核熱利用技術の早期蓄積が可能である。
- 本システムで開発された運転・制御技術及び安全技術が他の水素製造システムにも応用可能である。

水蒸気改質システムについては、

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

の確立に重点を置いた検討作業が進められており^(2, 3, 4, 5)、8年度から2年間で概念設計を行い水素製造システムの設計概念を定め、これを基に詳細設計並びに安全解析・評価を行って国の安全審査に備える。そこで、設計概念の実験的検証と改良や運転に必要なデータの取得を行うための炉外技術開発試験内容の策定、試験装置の構成等の検討を行い⁽¹⁾、試験装置の設計検討を行った。以下に、試験内容、熱流動条件、試験装置の構成等について記す。

2. 1 炉外技術開発試験の主要内容

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

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

(1) 定常運転試験

- ・水蒸気改質器の伝熱流動特性
 - －ヘリウムガス対流熱伝達率、熱放射による伝熱特性（化学反応特性に影響）
 - －ヘリウムガス及び生成ガスの圧力損失特性（化学反応特性に影響）
 - －反応管の流体誘起振動特性他の把握
- ・化学反応特性
 - －脱硫反応の把握
 - －水蒸気改質反応による水素製造特性の把握
- ・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（トリチウム移送の評価用）
- ・システムの運転・制御方法

－通常運転時の起動、停止におけるシステム制御方法の確立

(2) 過渡／トリップ時模擬試験

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

(3) 耐久性並びに信頼性

- ・改質反応管の供用後検査
 - －反応管の変形、腐食状況
- ・触媒の供用後検査
 - －触媒の劣化状況

2. 2 炉外技術開発試験の熱流動条件

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

(1) H T T R 接続水蒸気改質システム

ヘリウムガス熱流動条件（定格条件）

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

プロセスガス熱流動条件（反応管本数 36 本）（定格条件）

入口プロセスガス圧力 : 4.5 kg/cm²G
 入口プロセスガス温度 : 450°C (反応器入口)
 出口プロセスガス温度 : 600°C (反応器出口)
 水蒸気改質器入口質量流量 : 7098 kg/h

プロセスガス分圧 (モル分率)

| | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| C H ₄ | 8 kg/cm ² G (0.1770) |
| H ₂ O | 35.3 kg/cm ² G (0.7845) |
| H ₂ | 0.7 kg/cm ² G (0.0151) |
| C ₂ H ₆ | 0.5 kg/cm ² G (0.0114) |

水蒸気改質器入口総モル数 : 396, 900 mol/h

水蒸気改質器入口体積流量 : 8890 Nm³/h
 (添字N : 1atm, 0°Cにおける体積流量)
 供給メタン (CH₄) 流量 : 1573 Nm³/h (43.7 Nm³/h/本)
 供給水蒸気量 (H₂O) 流量 : 6974 Nm³/h (= 5604 kg/h, 15.6 kg/h/本)
 H₂O/CH₄流量比 : 4.4

(2) 炉外技術開発試験装置の熱流動条件

ここでは後述する H E N D E L M₁ ループ機器を移設・再利用することを前提とし、M₁ ループのヘリウム供給能力と、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。これは、H T T R 接続水蒸気改質器の反応管配置が三角ピッチ格子状なので、複数の反応管が存在する場合の相互の影響を実験的に調べるための最小単位である。

炉外技術開発試験は以下の熱流動条件で行う。

ヘリウムガス及び原料側の熱流動条件

(a) ヘリウムガス流動条件

入口圧力 : 4.0 kg/cm²G
 入口温度 : 880°C
 出口温度 : 600°C
 ループ戻り温度 : 380°C (固定)
 流量範囲 : 反応管3本の場合 0~0.3 kg/s、定格運転時 0.21 kg/s
 反応管1本の場合 0~0.1 kg/s、定格運転時 0.069 kg/s

(b) メタンガス流動条件

供給圧力 : 4.5 kg/cm²G
 供給温度 : 最高450°C (水蒸気改質器入口)
 流量範囲 : 反応管3本の場合 0~250 Nm³/h (4.12 Nm³/min)
 定格運転時 131 Nm³/h (2.18 Nm³/min)
 反応管1本の場合 0~83 Nm³/h (1.38 Nm³/min)
 定格運転時 43.7 Nm³/h (0.73 Nm³/min)

(c) 水蒸気流動条件

供給圧力 : 4.5 kg/cm²G
 供給温度 : 最高450°C (水蒸気改質器入口)
 流量範囲 : 反応管3本の場合 0~700 kg/h (11.7 kg/min)
 定格運転時 468 kg/h (7.8 kg/min)
 反応管1本の場合 0~233 kg/h (3.9 kg/min)
 定格運転時 156 kg/h (2.6 kg/min)
 H₂O/CH₄流量比 : 4.4

生成ガスの流動条件－改質器での生成ガス量(C H₄ + H₂O → 3 H₂ + C O、メタン転換率 100%の場合)反応管3本の場合 定格運転時 H₂ 393 Nm³/h (= 6,55 Nm³/min)C O 131 Nm³/h (= 2,18 Nm³/min)反応管1本の場合 定格運転時 H₂ 131 Nm³/h (= 2,18 Nm³/min)C O 43.7 Nm³/h (= 0.73 Nm³/min)

2. 3 廉外技術開発試験装置の構成

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

(1) 水蒸気改質器（試験部）

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

(2) ヘリウムガス供給系

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

(3) 水蒸気供給系

- ・水蒸気供給系は、

- 水蒸気改質器に原料水蒸気を安定に供給

- ヘリウムガス戻り温度を制御

- プロセス側トリップ時（機器トリップ、電源喪失）にヘリウムガスの循環を停止することなく、ヘリウムガスを適正に除熱

することを主目的としており、本試験装置ではとくに重要な系統である。

- ・水蒸気供給系を構成する主要機器は以下の通りである。

- 1)純水装置

- 2)水タンク

- 3)定流量ポンプ

- 4)水予熱器

- 5)脱ガス器

- 5)蒸気発生器（蒸気ドラム、放熱器付き）

- 6)蒸気過熱器

- 7)非常時給水タンク他

(4) 原料ガス供給系

- ・原料ガス供給系は、
 - －水蒸気改質器に原料メタンを安定して供給
 - －機器トリップ、電源喪失時にメタンを供給停止することを主目的としている。
- ・原料ガス供給系を構成する主要機器は以下の通りである。
 - 1)LNG（液化天然ガス）タンク
 - 2)蒸発器
 - 3)主コンプレッサー
 - 4)脱硫器用加熱器
 - 5)脱硫器他

(5) 不活性ガス供給系

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

(6) 热交換器（原料加熱器）

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

(7) フレアースタック

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

(8) 計測・制御設備

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

(9) 高温隔離弁

触媒管破断及び二次系配管破断より原料及び生成ガスが原子炉格納容器に漏洩して引火爆発するのと、その継続を防止するのを防ぐためのもので、熱利用系の重要な安全装置である。

(10)各種配管（耐圧配管）

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

(11)その他必要機器

計装用高圧弁（手動弁、電動弁、空操弁）、機器架台他

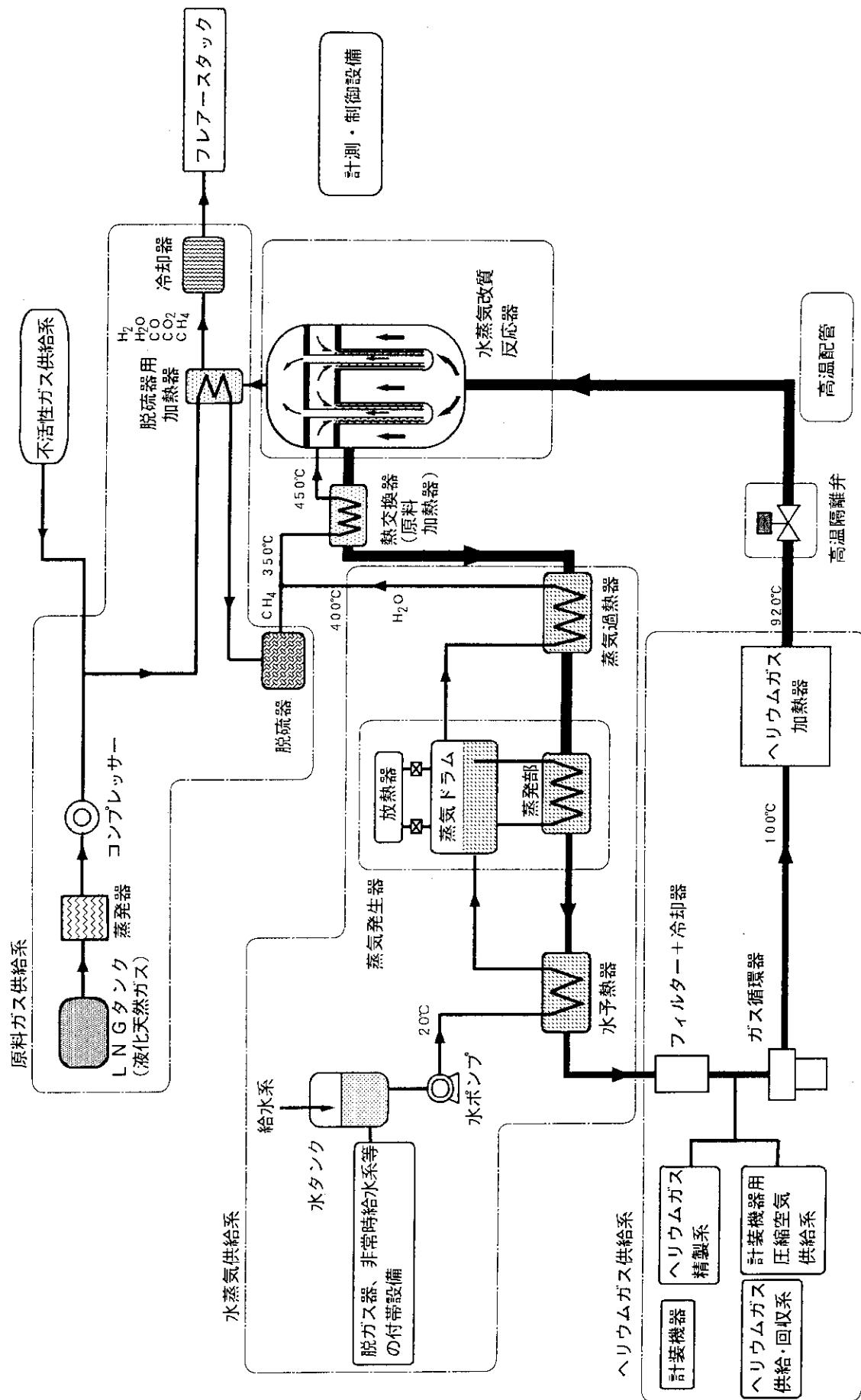


Fig. 2.1 炉外技術開発試験装置のシステム構成

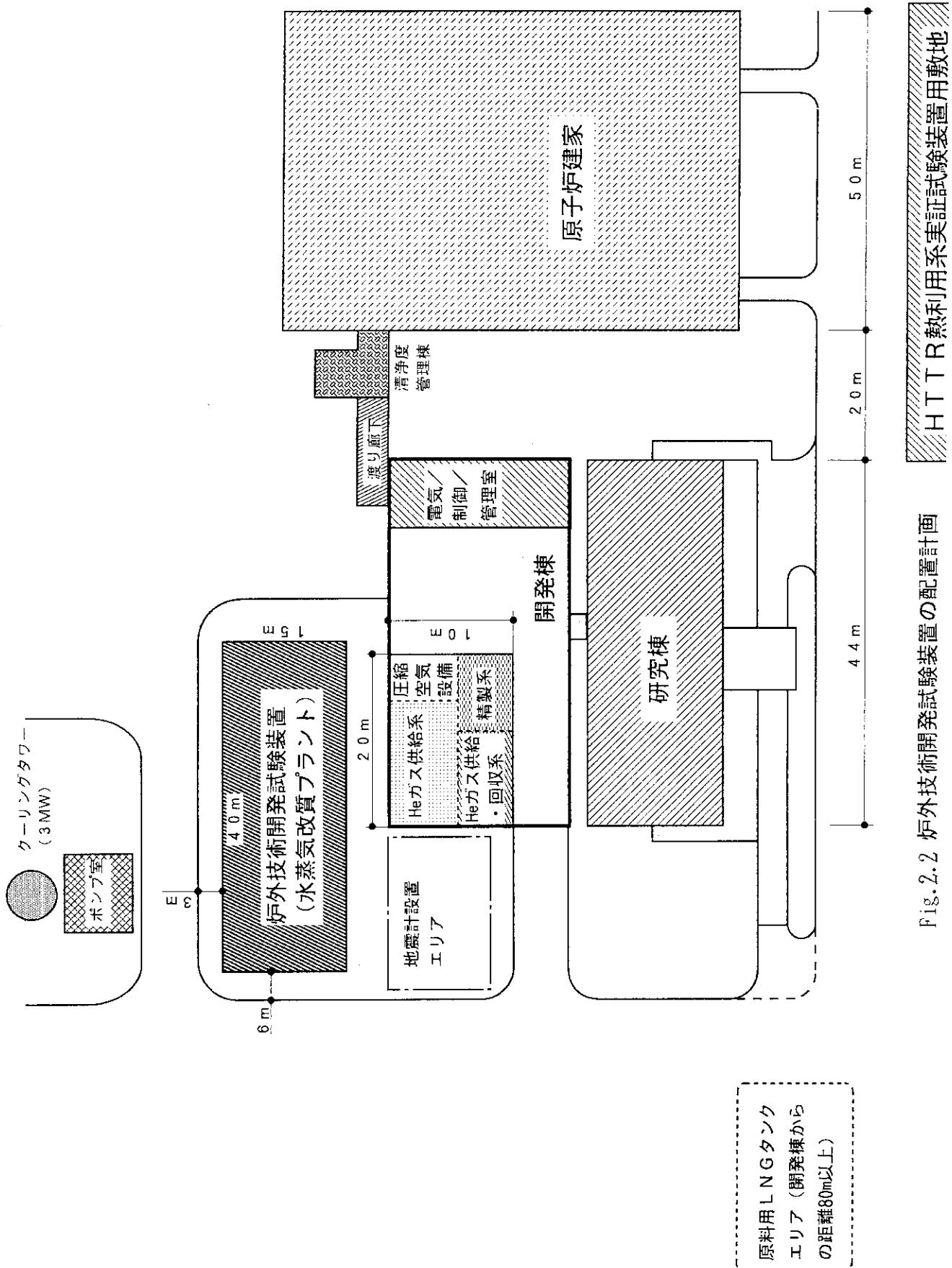


Fig. 2.2 炉外技術開発試験装置の配置計画

上記システムのHTTRサイトへの配置案をFig. 2.2に示す。ヘリウムガス供給設備は、HTTRに隣接して建設される開発棟内に設置し、水蒸気改質システムは安全確保の観点から屋外に設置することとした。開発棟については現在設計を進めている。

3. 水蒸気改質器の構造

水蒸気改質器は、炉外技術開発試験装置の中核となる機器である。以下に、設計基本方針及び構造の検討結果について述べる。

3. 1 設計基本方針

水蒸気改質器の設計に当たっては、以下の基本方針を定めた。

- (1) 反応管は、HTTR接続水素製造システムと同じくバイオネット型とする。このとき、以下の点に留意する。
 - 伝熱促進手法を積極的に採用して、局所的に低温部分が発生しないようにする。
 - 組立が容易な構造にする。
 - 触媒の充填／取出しが容易な構造にする。
- (2) 改質器の設計に当たっては、温度、圧力、差圧、ガスサンプリング等の計測位置を検討し、これらの引出しノズルを圧力容器に設ける。
- (3) ヘリウムガス側の放熱防止のために、反応管の周囲に補償ヒータブロックを設置する。ヒータブロックは個々に制御（差温制御）可能なようにする。

3. 2 構造検討

上記の設計基本方針を基にして水蒸気改質器の構造を検討した。反応管が1本の場合の構造をFig. 3.1に、3本の場合の構造をFig. 3.2に示す。各流体の圧力容器内での流れは以下の通りである。

- (a)原料ガス入口管台から水蒸気改質器内に流入した原料ガスは、分配され各反応管に入る。
- (b)反応管に入った原料ガスは、反応管外管と反応管内管で構成された水蒸気改質反応用触媒が充填された触媒層を通過し、生成ガスとなる。
- (c)生成ガスは、反応管最下部で折り返し、反応管内管とスリーブ管とで構成された環状流路を上昇した後、反応管を出る。
- (d)各反応管から出た生成ガスは合流し生成ガス出口管台から流出する。
- (e)ヘリウムガスは、ヘリウムガス入口管台から水蒸気改質器内に流入し、反応管外管と流路管とで構成された流路内にはいる。なお、反応管外管表面には伝熱促進のための矩形突起が加工されている。
- (f)各反応管の流路から出たヘリウムガスは合流しヘリウムガス出口管台から流出する。
反応管周りには補償ヒーターブロックを設けて、熱損失を抑制するようにした。

上記システムのHTTRサイトへの配置案をFig. 2.2に示す。ヘリウムガス供給設備は、HTTRに隣接して建設される開発棟内に設置し、水蒸気改質システムは安全確保の観点から屋外に設置することとした。開発棟については現在設計を進めている。

3. 水蒸気改質器の構造

水蒸気改質器は、炉外技術開発試験装置の中核となる機器である。以下に、設計基本方針及び構造の検討結果について述べる。

3.1 設計基本方針

水蒸気改質器の設計に当たっては、以下の基本方針を定めた。

- (1) 反応管は、HTTR接続水素製造システムと同じくバイオネット型とする。このとき、以下の点に留意する。
 - 伝熱促進手法を積極的に採用して、局所的に低温部分が発生しないようにする。
 - 組立が容易な構造にする。
 - 触媒の充填／取出しが容易な構造にする。
- (2) 改質器の設計に当たっては、温度、圧力、差圧、ガスサンプリング等の計測位置を検討し、これらの引出しノズルを圧力容器に設ける。
- (3) ヘリウムガス側の放熱防止のために、反応管の周囲に補償ヒータブロックを設置する。ヒータブロックは個々に制御（差温制御）可能なようにする。

3.2 構造検討

上記の設計基本方針を基にして水蒸気改質器の構造を検討した。反応管が1本の場合の構造をFig. 3.1に、3本の場合の構造をFig. 3.2に示す。各流体の圧力容器内での流れは以下の通りである。

- (a)原料ガス入口管台から水蒸気改質器内に流入した原料ガスは、分配され各反応管に入る。
- (b)反応管に入った原料ガスは、反応管外管と反応管内管で構成された水蒸気改質反応用触媒が充填された触媒層を通過し、生成ガスとなる。
- (c)生成ガスは、反応管最下部で折り返し、反応管内管とスリーブ管とで構成された環状流路を上昇した後、反応管を出る。
- (d)各反応管から出た生成ガスは合流し生成ガス出口管台から流出する。
- (e)ヘリウムガスは、ヘリウムガス入口管台から水蒸気改質器内に流入し、反応管外管と流路管とで構成された流路内にはいる。なお、反応管外管表面には伝熱促進のための矩形突起が加工されている。
- (f)各反応管の流路から出たヘリウムガスは合流しヘリウムガス出口管台から流出する。
反応管周りには補償ヒーターブロックを設けて、熱損失を抑制するようにした。

以下に、改質器各部の概要を記す。

(1) 反応管構造

(a) 伝熱促進手段

各種の伝熱促進手段を比較検討し、反応管の外側に同心の流路管を設け管外の流速を上げながら、さらに反応管の外面に乱流促進のために突起を設けた矩形突起付二重管構造を採用した。

詳細な検討結果は4章に示す。

(b) 反応管組立

反応管組立はモジュール型構造を採用した。原料ガスと生成ガスは反応管上部の管台から個々に出入し、連絡管を通して、圧力容器の外部に取り出される。

また、反応管及び流路管の取り外しは、圧力容器の上部フランジ及び中間フランジを開放して行う。

(c) 触媒充填、取り出し構造

触媒充填、取り出しは圧力容器の上部フランジを開放し、上鏡板を取り外した後反応管上部の管台から、充填・取り出しホースを挿入し実施する。

(2) 温度、圧力、ガスサンプリング等の計測位置

本試験装置は、水蒸気改質器内の対流伝熱、輻射伝熱、圧力損失、水蒸気改質反応、反応管の水素透過などの特性を把握するために使用される。そのための計測項目及び計測位置は第6章にまとめると。

(3) 補償ヒーターブロック

補償ヒーターブロックは、圧力容器内面に設けられた断熱層と流路管の間に設置するものとする。補償ヒーターブロックには、軽量で耐熱性、断熱性、施工性に優れたセラミックファイバーの成型品にコイルヒーターを埋め込み一体化したパネルヒーターを採用した。容量などの詳細検討結果を8章にまとめると。

ここで検討した水蒸気改質器の構造について、設計条件と構造設計の検討結果を第5章に記す。

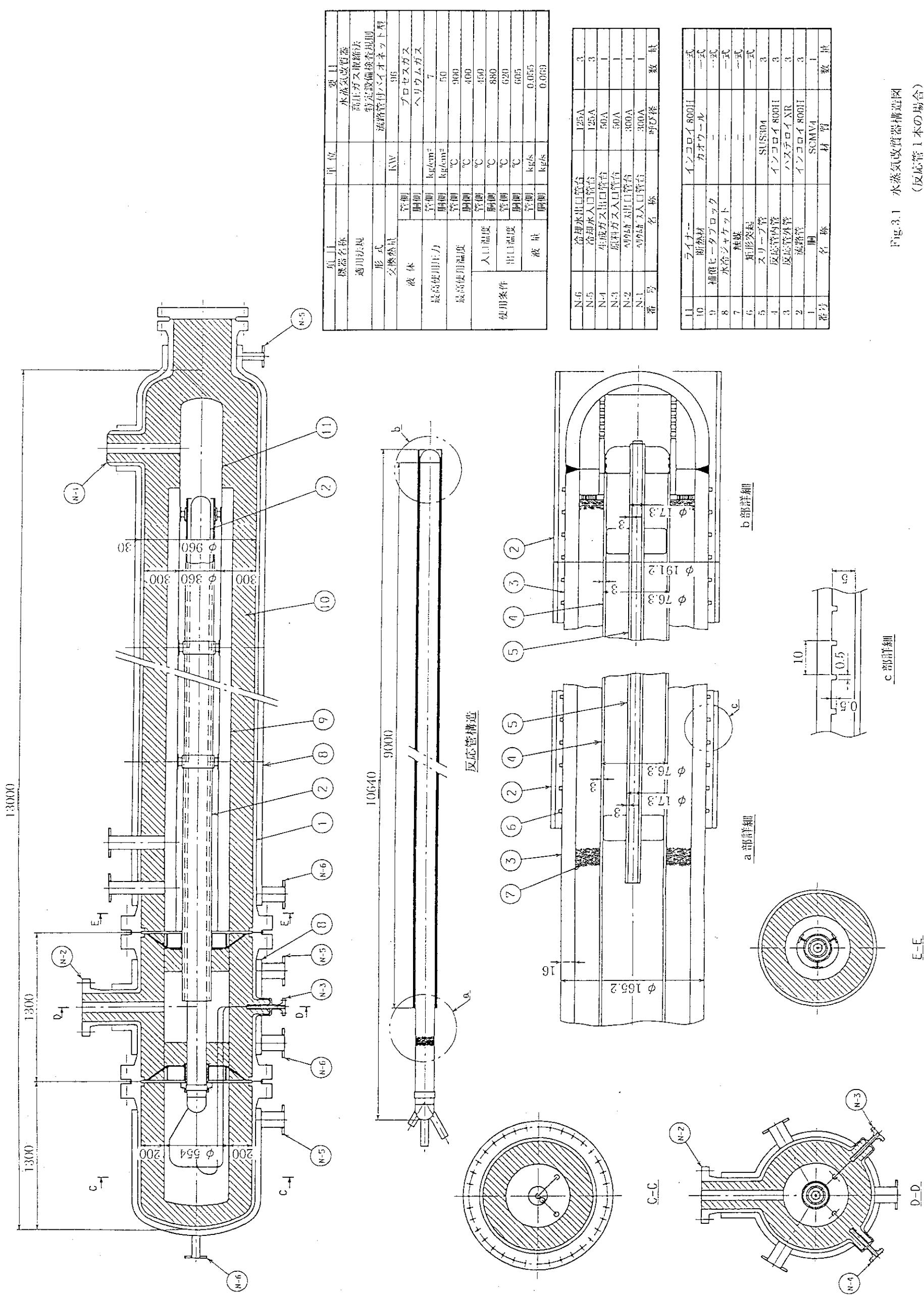


Fig.3.1 水蒸気改質器構造図
(反応管 1 本の場合)

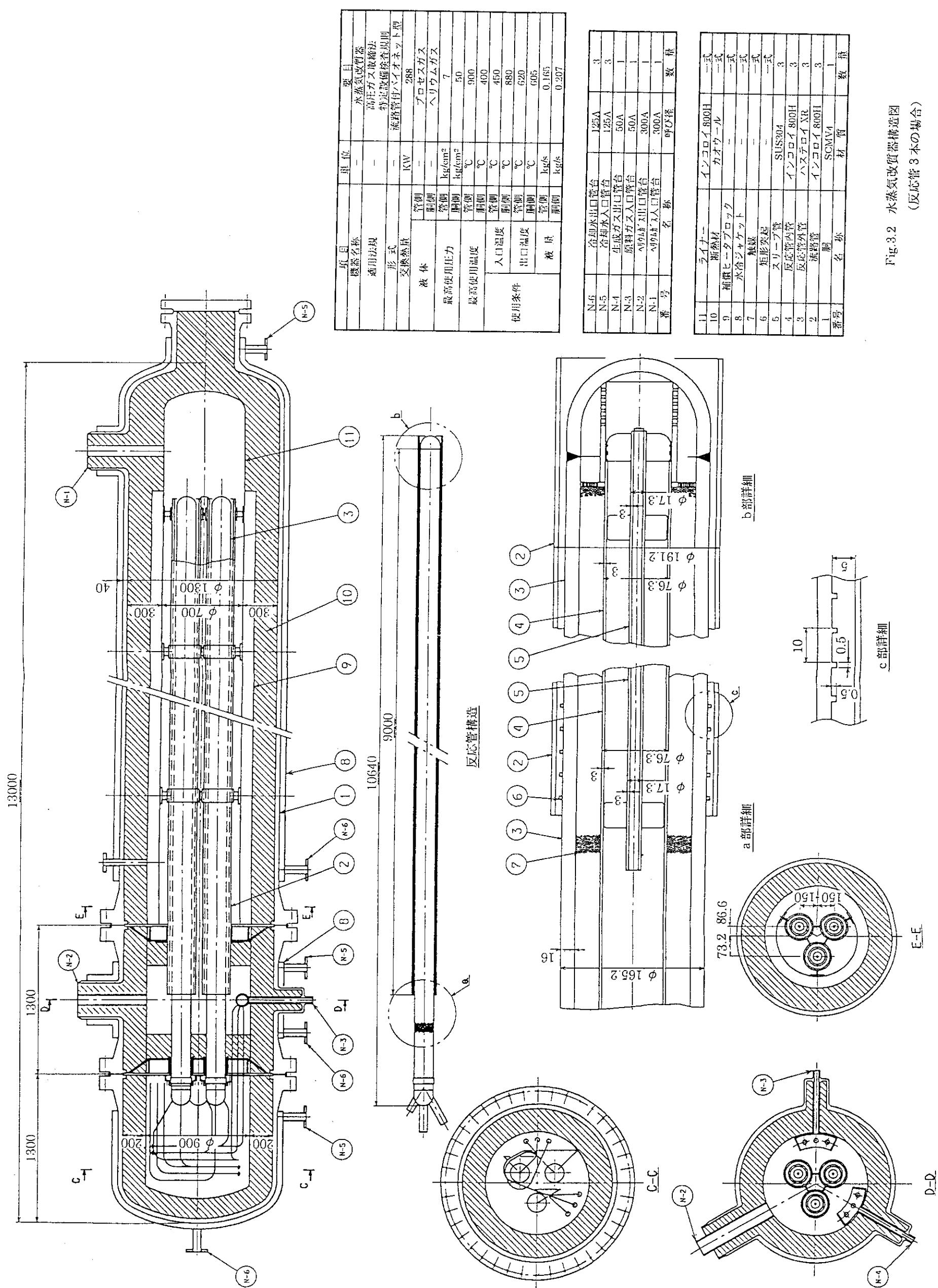


Fig.3.2 水蒸気改質器構造図
(反応管3本の場合)

4. 水蒸気改質器の性能検討

3章で検討した水蒸気改質器構造の反応管軸方向の温度分布及び改質反応特性について、反応管外側の伝熱促進手法の検討、アプローチ温度の反応への影響検討、解析モデル／条件、解析評価した結果を以下に述べる。流体の物性値は参考文献（6）等を参照した。

4. 1 反応管外側の伝熱促進手法の検討

ヘリウムガスから反応管への熱伝達を促進し、水蒸気改質反応のメタン転換率の向上を図るために、反応管外側の伝熱促進手法について流路形状の効果を比較検討した結果を以下に記す。

(1) 検討条件

(a) ヘリウムガス条件

圧力 : $40\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$

温度 : $740\text{ }^\circ\text{C}$ (入口 $880\text{ }^\circ\text{C}$ 、出口 $600\text{ }^\circ\text{C}$ としたときの平均温度)

流量 : $0.069\text{kg}/\text{s}$ (触媒管 1 本当たり)

密度 : $1.91\text{kg}/\text{m}^3$

比熱 : $1.24\text{kcal}/\text{kg}\text{ }^\circ\text{C}$

熱伝導率 : $0.312\text{kcal}/\text{mh}\text{ }^\circ\text{C}$

粘性係数 : $4.5 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$

プラントル数 : 0.644

(b) 反応管条件

触媒管本数 1 本 (オリフィスバッフル板付き二重管のみ 3 本)

触媒管外径 165.2mm

触媒管長さ 9m

(c) 伝熱促進手段

Fig. 4.1 に示す以下の 6 方式について検討を行う。なお、6 方式とも触媒管外面のワイヤーネットは無しとして検討を行う。

a) 二重管

b) バッフル付き二重管

c) 螺旋板付き二重管

d) 直交フィン付き二重管

e) オリフィスバッフル板付き二重管

f) 矩形突起付き二重管

(2) 热伝達率、圧力損失の計算式

(a) 記号説明

D_c : 螺旋板付き二重管の螺旋巻き直径(m)

D_i : 流路管内径(m)

d_s : 流路断面の相当直径(m)

$$d_e = 4 S / L$$

d_h : オリフィス径の直径(m)

d_o : 触媒管外径(m)

F_f : バッフル板による斜流を考慮した補正係数

f : 管摩擦係数

G : 質量速度(kg/m²s)

G_a : バッフル間で触媒管に平行な質量速度(kg/m²s)

G_b : オリフィス孔と触媒管との間の環状部の質量速度(kg/m²s)

g : 重力加速度(9.8m/s²)

H : 矩形突起高さ(m)

H_f : フィン高さ(m)

h : 热伝達率(kcal/m²h°C)

$h = N_o \lambda / d_o$

L : 触媒管長さ(m)

L' : 螺旋板付き二重管の流路総長さ(m)

L_w : めれぶち長さ(m)

l_b : バッフル板間の距離(m)

N_b : バッフル板枚数

N_c : ヌッセルト数

P : 矩形突起ピッチ

P_r : プラントル数

R_e : レイノルズ数

$R_e = G d_o / \mu$

$(R_e)_c$: 層流から乱流への限界レイノルズ数

S : 流路断面積(m²)

S_f : フィン間隔(フィンピッチからフィン厚みを差し引いたもの)(m)

S_o : オリフィス孔面積(m²)

S_p : 触媒管のピッチ(m)

u : 流路平均流速(m/s)

v_b : バッフル板切り欠き部流速(m/s)

W : 流量(kg/s)

ΔP : 圧力損失(kg/cm²)

ζ_1 : バッフル板流路縮小圧損係数

ζ_2 : バッフル板流路拡大圧損係数

λ : 热伝導率(Kcal/mh°C)

μ : 粘性係数(kg/ms)

μ_w : 壁温での粘性係数(kg/ms)

ρ : 密度(kg/m³)

(b) 二重管の計算式⁽⁷⁾

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{D_i}{d_o} \right)^{0.45} \quad (4.1)$$

Re > 10000

$$\Delta P = 4f \frac{L}{d_e} \frac{G^2}{2gp} \left(\frac{\mu_w}{\mu} \right)^{0.14} \times 10^{-4} \quad (4.2)$$

$$f = 0.076 Re^{-0.25} \quad (4.3)$$

Re > 2000

(c) バッフル付き二重管の計算式⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

$$Nu = (0.3 + \sqrt{Nu_L^2 + Nu_T^2}) F_\theta \quad (4.4)$$

$$Nu_L = 0.664 Re^{0.5} Pr^{1/3}$$

$$Nu_T = \frac{0.037 Re^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)}$$

$$\Delta P = \left[4f \frac{L}{d_e} \frac{G^2}{2gp} + N_b (\zeta_1 + \zeta_2) \frac{v_b^2}{2g} p \right] \times 10^{-4} \quad (4.5)$$

$$f = 0.0791 Re^{-0.25}$$

2300 < Re < 1000000

$$f = (3.641 \log_{10} Re - 3.28)^{-2}$$

Re ≥ 1000000

(d) 螺旋板付き二重管の計算式⁽¹¹⁾

Nu 及び ΔP の計算式には、ハンプソン式熱交換器のものを用いた。

$$(Re)_c = 2300 \left[1 + 8.6 \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.45} \right] \quad (4.6)$$

$$100 < Re < (Re)_c$$

$$Nu = 3.65 + 0.08 \left[1 + 0.8 \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.9} \right] Re^i Pr^{1/3} \quad (4.7)$$

$$i = 0.5 + 0.2903 \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.194}$$

$$(Re)_c < Re < 22000$$

$$Nu = 0.023 \left[1 + 14.8 \left(1 + \frac{d_e}{D_c} \right) \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{1/3} \right] Re^i Pr^{1/3} \quad (4.8)$$

$$i = 0.8 - 0.22 \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.1}$$

$22000 < Re < 150000$

$$Nu = 0.023 \left[1 + 3.6 \left(1 - \frac{d_e}{D_c} \right) \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.8} \right] Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (4.9)$$

$$\Delta P = \frac{f_i G^2}{2gp} \frac{L}{d_e} \times 10^{-4} \quad (4.10)$$

摩擦係数 f_i は、以下による。

$100 < Re < (Re)_c$

$$f_i = \left[1 + 0.14 \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.97} \right] \frac{64}{Re} \quad (4.11)$$

$$i = 1 - 0.644 \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.312}$$

$(Re)_c < Re < 22000$

$$f_i = \left[1 + \frac{28800}{Re} \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.62} \right] \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (4.12)$$

$22000 < Re < 150000$

$$f_i = \left[1 + 0.0823 \left(1 + \frac{d_e}{D_c} \right) \left(\frac{d_e}{D_c} \right)^{0.53} Re^{0.25} \right] \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (4.13)$$

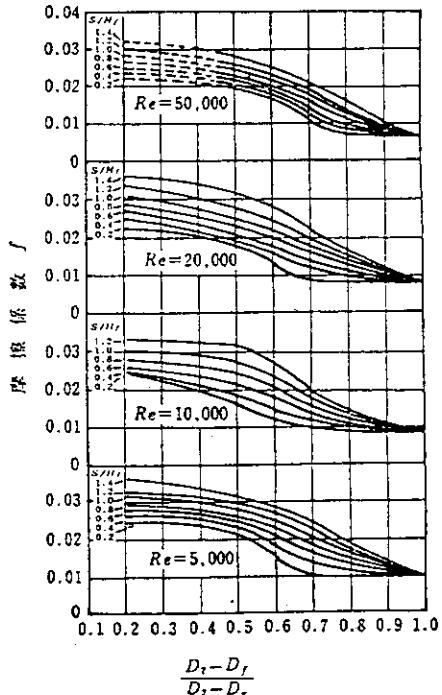
(e) 直交フィン付き二重管の計算式^(1,2)

$1 < H_f / S_f < 2$ において

$$Nu = 0.039 Re^{0.87} Pr^{0.4} \left(\frac{S_f}{d_e} \right)^{0.4} \left(\frac{H_f}{d_e} \right)^{-0.19} \quad (4.14)$$

$$\Delta P = 4f \frac{L}{d_e} \frac{G^2}{2gp} \left(\frac{\mu_w}{\mu} \right)^{0.14} \times 10^{-4} \quad (4.15)$$

摩擦係数 f は、右図による。



(f) オリフィスバッフル板付き二重管の計算式⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

$$Nu = 0.82 \left(\frac{S_p - d_e}{S_p} d_e \right) Pr^{1/3} \left(\frac{d_e G'}{\mu} \right)^{0.6} \quad (4.16)$$

$$G' = \frac{4d_e}{l_b} \left(\frac{G_o - G_a}{2} \right) + \left(\frac{l_b - 4d_h}{l_b} \right) G_a$$

$$\Delta P = \left[4f \frac{L}{d_e} \frac{G^2}{2gp} + \frac{f_b W^2}{2gp S_o^2} N_b \right] \times 10^{-4} \quad (4.17)$$

$$f = \frac{0.0785}{0.7 - 1.65 \log Re + (\log Re)^2} \quad Re < 3.2 \times 10^6 \quad (4.18)$$

 f_b : オリフィス部摩擦係数 (= 1.5)(g) 矩形突起付き二重管の計算式⁽¹⁵⁾

$$Nu = 0.238 (P/H)^{-0.45} Re^n Pr^{0.4} \quad (4.19)$$

$$n = 0.68 (P/H)^{0.0354} \quad 1.0 \leq P/H \leq 4.0, 3000 < Re < 17000$$

$$\Delta P = 4f \frac{L}{d_e} \frac{\rho u^2}{2g} \times 10^{-4} \quad (4.20)$$

$$f = \{0.253 - 0.0568 \ln(P/H)\} Re^m$$

$$m = -0.25 + 0.0456 (P/H)^{0.353} \quad 1.0 \leq P/H \leq 4.0, 2500 < Re < 30000$$

(3) 検討結果

各伝熱促進手段での熱伝達率の変化をFig. 4.2～Fig. 4.9に示す。各伝熱促進手段とも二重管の隙間を狭くするにつれて熱伝達率は向上する。一方、圧力損失も同様に上昇するため、機器又はシステムの許容圧力損失から、熱伝達率の限界が決定される。触媒管部での許容圧力損失は0.2kg/cm²と想定して評価した。比較項目として、伝熱促進効果、隙間管理の容易さ、製作性を考え、各伝熱促進手段を評価した結果をTable 4.1に示す。

比較項目ごとの優劣を判断し、Table 4.1より触媒管の管外伝熱促進手段としては、「矩形突起付き二重管」を選定した。

4. 2 改質反応器解析モデル

(1) 温度分布の基礎式

水蒸気改質器はスリーブ管、反応管内管、反応管外管、流路管、伝熱促進コイルから構成され、原料ガス、生成ガス、ヘリウムガスの3つのガスが存在する。水蒸気改質器のモデルをFig. 4. 10に示す。水蒸気改質器は、数本の反応管より構成されているが、モデルとしてはFig. 4. 10に示すように1本の反応管について考える。管の温度、ガスの温度及び圧力の定常状態の計算は、次のような仮定をもとにした。

- (a) 管材内においては、管軸方向の熱伝導は考えずに管軸に垂直な方向の熱伝導のみを考える。
- (b) 反応管内で起こる化学反応は、アプローチ温度を考慮した温度及び圧力の状態のもとでたちに平衡に達する。化学反応に伴う反応熱は、ガス組成のモル流量の変化による総エンタルピーの変化として計算する。
- (c) ガスと管表面との間の熱伝達率は、ガスの温度と圧力から求める。
- (d) スリーブ管は、内部がよどみ霧潤氣であることから断熱とみなす。
- (e) 流路管は、周囲に補償ヒーターブロックを設けることから断熱とみなす。
- (f) ガスの圧力変化は、入口圧力と各流路での圧損から求められる。
- (g) 反応管内管での化学反応はないものとする。

上記の仮定に基づき、原料ガス温度(T_R)、生成ガス温度(T_P)、ヘリウムガス温度(T_F)、反応管内管内表面温度(T_{II})、反応管内管外表面温度(T_{IO})、反応管外管内表面温度(T_{OI})、反応管外管外表面温度(T_{OO})の変化は、(4.21)～(4.25)式で表現される。

$$C_{PP}W_P \frac{dT_P}{dz} = a_P A_{II} (T_{II} - T_P) \quad (4.21)$$

$$C_{PR}W_R \frac{dT_R}{dz} = a_{RI} A_{IO} (T_{IO} - T_R) + a_{RO} A_{OI} (T_{OI} - T_R) - Q_c \quad (4.22)$$

$$C_{PR}W_P \frac{dT_F}{dz} = a_P A_{OO} (T_{OO} - T_F) \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} a_P A_{II} (T_P - T_{II}) &= \frac{2\pi\lambda_I}{l_n(A_{IO}/A_{II})} (T_{II} - T_{IO}) \\ &= a_{RI} A_{IO} (T_{IO} - T_R) \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} a_{RO} A_{OI} (T_R - T_{OI}) &= \frac{2\pi\lambda_O}{l_n(A_{OO}/A_{OI})} (T_{OI} - T_{OO}) \\ &= a_P A_{OO} (T_{OO} - T_F) \end{aligned} \quad (4.25)$$

C_{Px} : 各ガスのガス比熱 (kcal/kg°C)

W_x : 各ガスのガス流量 (kg/h)

A_{xs} : 単位長さ当たりの各伝熱面積(m^2/m)
 Q_c : 単位長さ当たりの化学反応による反応熱 (kcal/hm)
 α_{xs} : ガスから管への熱伝達率 (kcal/ $m^2 h^\circ C$)
 λ_x : 管の熱伝導率 (kcal/ $m^2 h^\circ C$)
 Z : 反応管の軸方向を示す。

ただし、
 X = P (生成ガス)
 R (原料ガス)
 F (ヘリウムガス)
 I (反応管内管)
 O (反応管外管)
 $\Delta = I$ (管の内表面)
 O (管の外表面)

(2) 化学反応の計算式

反応管内で起こる化学反応としては(4.26)式で表現される炭化水素の水蒸気改質反応と、(4.27)式で表現されるシフト反応を考慮する。各反応は、与えられた温度、圧力のもとで、ただちに化学的平衡に達するものと仮定する。

炭化水素 ($C H_4$) の水蒸気改質反応



シフト反応



化学反応に伴うガス組成の変化及び反応熱の計算は、下記の手順で行う。

(a) 炭化水素の水蒸気改質反応

$C H_4$ の変化量を ΔG_{CH_4} とすると(4.26)式の平衡定数 E_{CH_4} は次式で表される。

$$E_{CH_4} = \frac{(X_{CO} + \Delta G_{CH_4})(X_{H_2} + 3\Delta G_{CH_4})^3}{(X_{CH_4} - \Delta G_{CH_4})(X_{H_2O} - \Delta G_{CH_4})} \quad (4.28)$$

ここで、 ΔG_{CH_4} : メタンの変化量 (モル分率) (%)

X_{R_i} : 各組成ガスのモル分率 (%)

(4.28)式で求められた $C H_4$ の変化量から H_2 、 $H_2 O$ 、 $C O$ の変化量を求める。

(4.26)式より

$$\Delta G_{CH_4} = -\Delta G_{CH_4} \quad (4.29)$$

$$\Delta G_{H_2} = 3 \Delta G_{CH_4} \quad (4.30)$$

$$\Delta G_{H_2O} = -\Delta G_{CH_4} \quad (4.31)$$

$$\Delta G_{CO} = \Delta G_{CH_4} \quad (4.32)$$

(4.29)～(4.32)式を用いて、各組成 i の新しい成分は次式で求められる。

$$G_i = G_i + \Delta G_i \quad (4.33)$$

(b) シフト反応

(a) 得られた各組成に(4.27)式で表現されるシフト反応を考慮し、成分の補正を行う。各成分のモル分率 $Y R_i$ と変化量 X によって平衡定数 K は、次式で定義される。

$$K = \frac{(YR_{CO_2}+X)(YR_{H_2}+X)}{(YR_{H_2O}-X)(YR_{CO}-X)} \quad (4.34)$$

(4.34)式より、変化量 X が求められる。

シフト反応に伴う H_2O 、 CO 、 CO_2 、 H_2 の変化量を次式で示す。

$$\Delta G_{H_2O} = -X \quad (4.35)$$

$$\Delta G_{CO} = -X \quad (4.36)$$

$$\Delta G_{CO_2} = X \quad (4.37)$$

$$\Delta G_{H_2} = X \quad (4.38)$$

(4.35)～(4.38)式を(4.33)式に加算することによって、炭化水素の化学反応とシフト反応を考慮した新しい組成が求められる。

(c) 化学反応にともなう反応熱

(4.26)式で表現される炭化水素の化学反応は吸熱反応であり、(4.27)式で表現されるシフト反応は発熱反応である。化学反応にともなう反応熱は、微小区間 $\Delta \ell$ での各ガス組成 i のモル流量の変化による総エンタルピの変化として計算する。

$$H_i = f(T) \quad (4.39)$$

$$Q_c = \sum H_i \cdot \Delta G_i / \Delta \ell \quad (\Sigma \text{は各ガス組成についての総和}) \quad (4.40)$$

H_i : 与えられたガス温度もとの各ガス組成の 1 モル当たりのエンタルピー
(kcal/kg-mol)

ΔG_i : 各ガス組成のモル流量の変化量(kg-mol/h)

Q_c : 単位長さ当たりの化学反応による反応熱(kcal/m)

T : ガスの温度 (°C)

f : ガス温度により各ガス組成の 1 モル当たりのエンタルピを求める関数

$\Delta \ell$: 管軸方向の微小長さ (m)

(3) 圧力分布の計算式

各ガスの管軸方向の圧力分布は、ガスの入口圧力から各管での圧力損失を引いたものとして代数的に求める。各管の圧力損失は、下記の式で計算する。

(a) 触媒層内のプロセスガスの圧力損失 (ΔP_R) ⁽¹⁶⁾

$$\Delta P_R = f_v \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{R_{eR} \cdot \varepsilon^3} \cdot \frac{\Delta l}{d_R} \cdot \frac{G^2}{Y_R} \cdot 1.02 \cdot 10^{-5} \quad (4.41)$$

$$f_v = 150.0 + 1.75 \cdot \frac{R_{eR}}{1-\varepsilon}$$

$$R_{eR} = \frac{G \cdot d_R}{\mu_R}$$

$$G = Y_R \cdot u_R$$

ε : 空間率

Δl : 管軸方向の微小長さ (m)

d_R : 触媒粒子の代表径(m)

γ_R : ガスの比重(kg/m³)

μ_R : ガスの粘度(kg/ms)

u_R : ガスの流速(m/s)

(b) 内管内のプロセスガスの圧力損失 (ΔP_p) ⁽¹⁷⁾

$$\Delta P_p = 4f \frac{\Delta l}{d_e} \frac{G^2}{2gp} \left(\frac{\mu_w}{\mu} \right)^{0.14} \times 10^{-4} \quad (4.42)$$

$$f = 0.076 R_e^{0.25} \quad (R_e > 2000)$$

$$R_e = \frac{G \cdot d_e}{\mu}$$

$$G = p \cdot u$$

Δl : 管軸方向微小長さ(m)

d_e : 流路断面の相当直径(m)

g : 重力加速度(m/s²)

ρ : ガスの密度(kg/m³)

μ : ガスの粘性係数(kg/ms)

μ_w : 壁温でのガスの粘性係数(kg/ms)

u : ガスの流速(m/s)

(c) ヘリウムガスの圧力損失 (ΔP_F) ⁽¹⁸⁾

$$\Delta P_F = f \frac{\Delta l}{d_e} \frac{G^2}{2gp} \times 10^{-4} \quad (4.43)$$

矩形突起付き二重管の摩擦係数 f は以下による。

$$f = \{0.253 - 0.0568 \ln(P/H)\} Re^m$$

$$m = -0.25 + 0.0456(P/H)^{0.353} \quad (10 \leq P/H \leq 40, 2500 < Re < 30000)$$

$$Re = G \cdot d_e / \mu$$

d_e : 流路断面の相当直径(㎟)

G : ガスの質量速度(kg/m²s)

H : 矩形突起の高さ(㎟)

P : 矩形突起のピッチ(㎟)

g : 重力加速度(㎟/s²)

ρ : ガスの密度(kg/m³)

μ : ガスの粘性係数(kg/ms)

Δl : 管軸方向微小長さ(㎟)

(4) 热伝達率の計算式

(a) ガスの热伝達率の計算式

1) 生成ガスの热伝達率 (α_p) ⁽¹⁹⁾

$$\alpha_p = N_u \cdot \lambda_p / d_e \quad (4.44)$$

$$N_u = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (D_i / d_e)^{0.45} \quad (Re > 10000)$$

λ_p : 生成ガスの热伝達率(kcal/mh°C)

d_e : 流路断面の相当直径(㎟)

Re : レイノルズ数

Pr : プラントル数

d_e : スリーブ管外径(㎟)

D_i : 反応管内管内径(㎟)

2) 原料ガスの熱伝達率 (α_R) ⁽²⁰⁾

$$\alpha_R = (D_s/D_t)\beta(\alpha_i^2 + \Phi/y)/(D_s/\lambda_R) \quad (4.45)$$

$$\beta = \epsilon \left(1 + \frac{\alpha_{rv} D_s}{\lambda_R} \right) + \frac{1-\epsilon}{\frac{1}{1 + \frac{\alpha_{rs} D_s}{\Phi}} + \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_s} \right)} + \Psi P_r R_e$$

$$\alpha_{rs} = 0.1952 \frac{P}{(2-P)} \left(\frac{T_R}{100} \right)^3$$

$$\alpha_{rv} = \left[\frac{0.1952}{\left\{ 1 + \frac{\epsilon}{2(1-\epsilon)} \frac{(1-P)}{P} \right\}} \right] \left(\frac{T_R}{100} \right)^3$$

$$y = 4 \left(\frac{D_s}{D_t} \right) \left(\frac{L}{D_t} \right) \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_R} \right) / (P_r R_e)$$

D_s : 触媒粒子の粒径(ミクロン)

D_t : 触媒充填層の内径 (= $d_2 - d_1$) (ミクロン)

d_1 : 反応管内管の外径(ミクロン)

d_2 : 反応管外管の内径(ミクロン)

λ_R : 原料ガスの熱伝導率(kcal/mh°C)

P_r : プラントル数

R_e : レイノルズ数

λ_s : 触媒の熱伝導率(kcal/mh°C)

ϵ : 空間率

P : 触媒粒子表面の輻射率

T_R : 原料ガス絶対温度 (K)

λ_e : 流れと直角方向の触媒層の有効熱伝導率(kcal/mh°C)

$a_i, \Phi : b (= D_t \cdot \alpha_w / 2 / \lambda_e)$ によって決まる定数

α_w : 管内壁表面における見かけの熱伝達率(kcal/mh°C)

Ψ : D_s / D_t 及び粒子の形状によって決まる定数

ϕ : λ_s / λ_R と ϵ によって決まる定数

L : 触媒層の長さ(ミクロン)

3) ヘリウムガスの熱伝達率 (α_F) ⁽²⁾

$$\alpha_F = N_u \cdot \lambda / d_e \quad (4.46)$$

矩形突起付き二重管の N_u は以下による。

$$N_u = 0.283(P/H)^{-0.45} R_e^n P_r^{0.4}$$

$$n = 0.68(P/H)^{0.0354} \quad (10 \leq P/H \leq 40, 3000 < R_e < 17000)$$

λ : ヘリウムガスの熱伝導率(kcal/mh°C)

H : 矩形突起の高さ(m)

P : 矩形突起のピッチ(m)

P_r : プラントル数

R_e : レイノルズ数

d_e : 流路断面の相当直径(m)

(b) 管の熱伝導率の計算式

各管の熱伝導率は、管の材質によって下記の式で与えられる。

1) 管の熱伝導率 (λ)

$$\lambda = a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + \dots + a_n \cdot T^{n-1} \quad (4.47)$$

a_n : 管の材質によって決まる定数

T : 管の温度 (°C)

4. 3 解析条件

解析条件を以下に記す。

(1) 反応管

反応管外管 : 外径165.2mm 肉厚16mm ハステロイX R

反応管内管 : 外径76.3mm 肉厚3mm インコロイ800H

スリーブ管 : 外径17.3mm 肉厚3mm SUS304

流路管 : 外径185.2mm 肉厚5mm インコロイ800H

反応管外管と流路管との流路隙間 : 5mm

矩形突起(反応管外管表面) : 高さ0.5mm 幅0.5mm ピッチ10mm

触媒粒子径 : 3mm

触媒層サイズ : 高さ8770mm 触媒充填幅28.45mm

空間速度 : 3150/h

反応管本数 : 1本

(2) ヘリウムガス条件

ヘリウムガス入口圧力 : 40kg/cm²G

ヘリウムガス入口温度 : 880°C

ヘリウムガス流量 : 0.069kg/s (反応管1本当たり)

(3) 原料ガス条件

原料ガス入口圧力 : 45kg/cm²G

原料ガス入口温度 : 450°C

原料ガス入口流量 : 0.055kg/s (反応管1本当たり)

原料ガス組成

CH₄ : 18.7 mol%H₂O : 78.3 mol%H₂ : 2.97 mol%

CO : 0.03 mol%

CO₂ : 0.0 mol%

4. 4 アプローチ温度の影響

アプローチ温度は、反応管内の実際のプロセスガスの温度とその組成を与える平衡温度との差を言い、水蒸気改質器の性能予測に良く用いられる。

水蒸気改質器の反応特性の検討に当たっては、アプローチ温度を考慮して改質反応の平衡計算を行う。従来の水蒸気改質器では、運転条件が比較的の低圧（常圧～十数kg/cm²）であることから、メタンの転換率が高い平衡条件の下でアプローチ温度の影響を検討している。炉外技術開発試験装置は45kg/cm²という高圧運転条件であり、メタンの転換率が低くなる高圧条件下でのアプローチ温度の影響について検討した例はほとんどない。ここでは、一般的に行われている水蒸気改質圧力(29bar)でのデータを基にして、アプローチ温度を変化させたときの反応特性への影響を検討した。検討に当たっては、上述した解析モデル及び解析条件を使用した。以下に解析条件及び解析結果について記す。

(1) 解析条件

解析に当たっては、文献[22]を参考にして、以下のアプローチ温度を用いる。

| 反応管内温度 | 400 °C | 500°C | 600°C | 700°C | 800°C | 備 考 |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| ケースA | -130°C | -60°C | -9°C | -2°C | 0°C | ケースB + 10°C |
| ケースB | -140°C | -70°C | -19°C | -12°C | -10°C | 文献[21]による |
| ケースC | -150°C | -80°C | -29°C | -22°C | -20°C | ケースB - 10°C |
| ケースD | -10°C | -10°C | -10°C | -10°C | -10°C | 温度一定 |

(2) 解析結果

反応管内のガス組成分布及び温度分布をFig. 4.11に示す。

反応管出口における水素及びメタンの組成について整理すると以下のようになる。

| | 水素 (wet mol%) | メタン (wet mol%) |
|------|------------------|-------------------|
| ケースA | 37.86 | 5.12 |
| ケースB | 37.10 | 5.44 |
| ケースC | 36.33 | 5.76 |
| ケースD | 37.41 | 5.30 |

ケースBを基準にしてアプローチ温度を10°C高く(ケースA)とると、生成水素の組成は2%増大し、残留メタンは6%減少する。逆にアプローチ温度を10°C低く(ケースC)とると、生成水素の組成は2%減少し、残留メタンは6%増大する。又、原料ガス入口低温部のアプローチ温度が低くても、出口のアプローチ温度が等しい(ケースD)と生成ガス中の水素、メタンの組成はほぼ等しくなる。

4. 5 原料ガスの相違による熱物質収支への影響

原料ガスとなる天然ガスをメタン100%（アラスカ産相当）とブルネイ産とした場合の炉外実証試験装置の熱物質収支への影響について確認を行った。

(1) 前提条件

熱物質収支の計算に当たっては、前提条件を設定した。

- (a) 水蒸気改質器の形状、寸法は同一とする。
- (b) 水蒸気改質器の入口ガス流量（質量流量）を一定とする。
- (c) 水蒸気改質器入口ガスのS/C値は一定とする。
- (d) 水蒸気改質器入口ガスの水蒸気流量は一定とする。
- (e) ブルネイ産の天然ガスの組成は以下とする。

C H₄ 90.06vol%

C₂H₆ 4.93vol%

C₃H₈ 3.30vol%

n C₄H₁₀ 0.96vol%

i C₄H₁₀ 0.75vol%

(業者データを参考とした。)

(2) 計算結果

定格運転状態における炉外実証試験装置の熱物質収支の計算結果を以下のように示す。

- ・メタン100%の場合

定格運転時ヒートマスバランス Table 4.2

- ・ブルネイ産の場合

定格運転時ヒートマスバランス Table 4.3

(3) 評価

計算結果を整理すると以下のようになる。但し水蒸気改質器の反応管1本の場合を示す。

| | メタン 100% (アラスカ産相当) | ブルネイ産 |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------|
| (a) 原料ガスの供給量 (Nm ³ /s) | 0.00861 | 0.00773 |
| (b) メタン回収量 (Nm ³ /s) | 0.00478 | 0.00466 |
| (c) 水蒸気改質器出口組成 (水素／残メタン) | 37.10% / 5.44% | 36.74% / 5.36% |
| (d) 水蒸気改質器出口水素流量 (Nm ³ /s) | 0.0328 | 0.03215 |
| (e) 热交換器交換熱量 | | |
| ・原料加熱器 (kW) | 14.49 | 14.57 |
| ・脱硫器用加熱器 (kW) | 9.41 | 9.92 |
| ・生成ガス冷却器 (kW) | 41.32 | 40.80 |
| ・生成ガス凝縮器 (kW) | 26.66 | 26.40 |
| (f) 対数平均温度差 (Table 4.4参照) | | |
| ・原料加熱器 (°C) | 173 | 176 |
| ・脱硫器用加熱器 (°C) | 282 | 283 |
| ・生成ガス冷却器 (°C) | 281 | 281 |
| ・生成ガス凝縮器 (°C) | 135 | 135 |

(1)の前提条件の下で、熱物質収支を計算した結果、ブルネイ産の天然ガスを用いた場合、原料ガスの供給量は約10%程度少なくなる。又、水蒸気改質器の生成ガス組成は水素の組成が0.36%程度低下し、生成水素流量も2%程低下する。

原料加熱器と脱硫器用加熱器についてみると、ブルネイ産が交換熱量大となるが、交換熱量の増大分は、原料加熱器で0.6%程度、脱硫器用加熱器で5%程度であることから、あらかじめ設定している伝熱面積余裕の中で対応できると考えられる。

生成ガス冷却器、生成ガス凝縮器については、ブルネイ産が交換熱量小となるが、上述の原料加熱器と脱硫器用加熱器と同様に、交換熱量の変化分は小さく、生成ガス冷却器で1.3%程度、生成ガス凝縮器で1%程度であることから、伝熱面積余裕の中で対応できると考えられる。

以上のことから、現在計画しているシステムにおいては、原料ガスとなる天然ガスとして、ブルネイ産の天然ガスを用いた場合、アラスカ産に較べて若干の水素生成量の低下が見られるものの、熱物質収支上、両者の間に大きな差はない見ることができる。又、熱交換器類の設備についても熱交換量に大きな差はないことから、予め伝熱面積の余裕を確保しておくことで対応できると考えられる。

Table 4.1 伝熱促進手段の評価

| 伝熱促進手段 | 二重管 バッフル付き 二重管 | 螺旋板付き 二重管 | 直交フィン付き 二重管 | オリフィスバッ フル付き二重管 | 矩形突起付き 二重管 | (参考)矩形突起 及びオリフィス バッフル付き 二重管 |
|---|--|------------------------------|---|--|---|--|
| 伝熱促進効果 比較図 | Fig. 4.2 | Fig. 4.3 Fig. 4.4 | Fig. 4.5 | Fig. 4.6 Fig. 4.7 | Fig. 4.8 | Fig. 4.9 |
| 圧力損失 0.2kg/cm ² 時の 熱伝達率 (kcal/m ² h°C) | 920 | 100~400 | 880~1160 | 1280~1880 | 640~900 | 1100~1240 |
| 伝熱促進効果 標準(○) | × | ○ | ○ | △ | ○ | ○ |
| 圧力損失 0.2kg/cm ² 時の 触媒管最外周と流 路管との隙間 (mm) | 3.3 | 6~17.5 | 6.5~10 | 4.5 | 3.3~5.6 (触媒管とオリ フィスの隙間) | 4.5~4.7 (3.3~5.6) |
| 隙間管理の 容易さ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 製作性 | ○ | △ | △ | × | △ | △ |
| 特記事項 | 配管自体の製作 精度を考慮すれば、 3mm程度の隙間を 管理するのは困難。 | 他の手段に比べ 伝熱促進効果が著 しく低い。 | 螺旋板と流路管 との間に微少隙 間が生じ、バイバ ス流れがある。 恐れがある。 | フィン高さを3~ 5mmとする触媒管 のフィンは、他の 手段に比べて製作 コストが高くなる。 | 高熱伝達率(900 程度)を得るために には、必要バッフ ル枚数が90枚と 多い。 | 二重管に対する二 重管突起率をオ リフィスバッフ ル付に乘じて熱伝 達率を推定した。 |
| 総合評価 | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ |

Table 4.2 定格運転時ヒートマスマバランス

| 位置 | 位置No. | 温度(°C) | 圧力(kg/s) | 反応管本数:1本 | 反応管本数:3本 | 反応管本数:6本 | 反応管本数:12本 | 反応管本数:24本 | 反応管本数:48本 | 反応管本数:96本 | 反応管本数:192本 | 反応管本数:384本 | 反応管本数:768本 | 反応管本数:1536本 | 反応管本数:3072本 | 反応管本数:6144本 | 反応管本数:12288本 | 反応管本数:24576本 | 反応管本数:49152本 | 反応管本数:98304本 | 反応管本数:196608本 | 反応管本数:393216本 | 反応管本数:786432本 | 反応管本数:1572864本 | 反応管本数:3145728本 | 反応管本数:6291456本 | 反応管本数:12582912本 | 反応管本数:25165824本 | 反応管本数:50331648本 | 反応管本数:100663296本 | 反応管本数:201326592本 | 反応管本数:402653184本 | 反応管本数:805306368本 | 反応管本数:1610612736本 | 反応管本数:3221225472本 | 反応管本数:6442450944本 | 反応管本数:1288490188本 | 反応管本数:2576980376本 | 反応管本数:5153960752本 | 反応管本数:1030792150本 | 反応管本数:2061584300本 | 反応管本数:4123168600本 | 反応管本数:8246337200本 | 反応管本数:16492674400本 | 反応管本数:32985348800本 | 反応管本数:65970697600本 | 反応管本数:131941395200本 | 反応管本数:263882790400本 | 反応管本数:527765580800本 | 反応管本数:1055531161600本 | 反応管本数:2111062323200本 | 反応管本数:4222124646400本 | 反応管本数:8444249292800本 | 反応管本数:1688849558400本 | 反応管本数:3377699116800本 | 反応管本数:6755398233600本 | 反応管本数:1351079646400本 | 反応管本数:2702159292800本 | 反応管本数:5404318585600本 | 反応管本数:10808637171200本 | 反応管本数:21617274342400本 | 反応管本数:43234548684800本 | 反応管本数:86469097369600本 | 反応管本数:17293819473600本 | 反応管本数:34587638947200本 | 反応管本数:69175277894400本 | 反応管本数:138350555788800本 | 反応管本数:276701111577600本 | 反応管本数:553402223155200本 | 反応管本数:110680446310400本 | 反応管本数:221360892620800本 | 反応管本数:442721785241600本 | 反応管本数:885443570483200本 | 反応管本数:1770887140966400本 | 反応管本数:3541774281932800本 | 反応管本数:7083548563865600本 | 反応管本数:14167097127731200本 | 反応管本数:28334194255462400本 | 反応管本数:56668388510924800本 | 反応管本数:11333677702149600本 | 反応管本数:22667355404299200本 | 反応管本数:45334710808598400本 | 反応管本数:90669421617196800本 | 反応管本数:181338843234393600本 | 反応管本数:362677686468787200本 | 反応管本数:725355372937574400本 | 反応管本数:145071074587548800本 | 反応管本数:290142149175097600本 | 反応管本数:580284298350195200本 | 反応管本数:116056859670390400本 | 反応管本数:232113719340780800本 | 反応管本数:464227438681561600本 | 反応管本数:928454877363123200本 | 反応管本数:1856909754726246400本 | 反応管本数:3713819509452492800本 | 反応管本数:7427639018904985600本 | 反応管本数:14855278037809971200本 | 反応管本数:29710556075619942400本 | 反応管本数:59421112151239884800本 | 反応管本数:118842224302479769600本 | 反応管本数:237684448604959539200本 | 反応管本数:475368897209898678400本 | 反応管本数:950737794419797356800本 | 反応管本数:190147558883954711200本 | 反応管本数:380295117767859422400本 | 反応管本数:760590235535718844800本 | 反応管本数:1521180471071437689600本 | 反応管本数:3042360942142875379200本 | 反応管本数:6084721884285750758400本 | 反応管本数:1216944376857501516800本 | 反応管本数:2433888753715003033600本 | 反応管本数:4867777507430006067200本 | 反応管本数:973555501486001214400本 | 反応管本数:1947111002972002428800本 | 反応管本数:389422200594400485600本 | 反応管本数:778844400188800971200本 | 反応管本数:1557688003776001942400本 | 反応管本数:3115376007552003884800本 | 反応管本数:6230752001510407769600本 | 反応管本数:12461504003020815539200本 | 反応管本数:24923008006041631078400本 | 反応管本数:49846016001208332156800本 | 反応管本数:99692032002416664313600本 | 反応管本数:19938406404833288627200本 | 反応管本数:39876812809666577254400本 | 反応管本数:79753625619333154508800本 | 反応管本数:15950725123866630901600本 | 反応管本数:31901450247733261803200本 | 反応管本数:63802900495466523606400本 | 反応管本数:127605800990933047212800本 | 反応管本数:255211600198186094425600本 | 反応管本数:510423200396372188851200本 | 反応管本数:102084600792744237762400本 | 反応管本数:204169200158548475524800本 | 反応管本数:408338400317096951049600本 | 反応管本数:816676800634193902099200本 | 反応管本数:1633353600126838784198400本 | 反応管本数:3266707200253677568396800本 | 反応管本数:653341440050735513678400本 | 反応管本数:13066828001014711273600本 | 反応管本数:26133656002029424447200本 | 反応管本数:52267312004058848894400本 | 反応管本数:10453462400811777788800本 | 反応管本数:20906924801623555577600本 | 反応管本数:4181384960324711115200本 | 反応管本数:8362769920649422230400本 | 反応管本数:16725538401298444460800本 | 反応管本数:33451076802596888921600本 | 反応管本数:66902153605193777843200本 | 反応管本数:133804312010387555686400本 | 反応管本数:267608624020775111372800本 | 反応管本数:535217248041550222745600本 | 反応管本数:1070434480831100445412800本 | 反応管本数:214086896016622089082400本 | 反応管本数:428173792033244178164800本 | 反応管本数:856347584066488356329600本 | 反応管本数:1712695160133176712659200本 | 反応管本数:3425390320266353425318400本 | 反応管本数:6850780640532706850636800本 | 反応管本数:13701561201065413701273600本 | 反応管本数:27403122402130827402547200本 | 反応管本数:54806244804261654805094400本 | 反応管本数:10961248960852330961018800本 | 反応管本数:21922497921704661922037600本 | 反応管本数:43844995843409323844075200本 | 反応管本数:87689991686818647688150400本 | 反応管本数:175379983373637295376302400本 | 反応管本数:350759966747274590752604800本 | 反応管本数:701519933494549181505209600本 | 反応管本数:1403039866989098363005419200本 | 反応管本数:2806079733978196726010838400本 | 反応管本数:5612159467956393452021676800本 | 反応管本数:11224399339512786904043353600本 | 反応管本数:2244879867902557380808671200本 | 反応管本数:4489759735805114761617342400本 | 反応管本数:8979519467607559523234684800本 | 反応管本数:17959038952015119046469369600本 | 反応管本数:35918077804030238092938739200本 | 反応管本数:71836155608060476185877478400本 | 反応管本数:143672311216120952371754956800本 | 反応管本数:287344622432241904743509913600本 | 反応管本数:574729244864483809487019827200本 | 反応管本数:1149458489328877618974038554400本 | 反応管本数:2298916978657755237948077108800本 | 反応管本数:4597833957315510475896154417600本 | 反応管本数:9195667914631020951792308835200本 | 反応管本数:1839133582926204190358601766400本 | 反応管本数:3678267165852408380717203532800本 | 反応管本数:7356534331704816761434407065600本 | 反応管本数:14713068663409633522868801411200本 | 反応管本数:29426137326819267045737602822400本 | 反応管本数:58852274653638534081475205644800本 | 反応管本数:117704549307277068162950411289600本 | 反応管本数:23540909861455413632590082257600本 | 反応管本数:47081819722910827265180164515200本 | 反応管本数:94163639445821654530360329030400本 | 反応管本数:188327278891633109060720658060800本 | 反応管本数:376654557783266218121441316121600本 | 反応管本数:753309115566532436242882632243200本 | 反応管本数:1506618231133064674855765264486400本 | 反応管本数:3013236462266129349711530532912800本 | 反応管本数:6026472924532258699423061065825600本 | 反応管本数:1205294584906457739884612213651200本 | 反応管本数:241058916981291547976924442726400本 | 反応管本数:482117833962583095953848885452800本 | 反応管本数:964235667925166191907697770905600本 | 反応管本数:1928471338453332383815355541811200本 | 反応管本数:3856942676906664767630711083622400本 | 反応管本数:7713885353813329535261422167244800本 | 反応管本数:15427770707626659075522844334489600本 | 反応管本数:3085554141525331815104568866897600本 | 反応管本数:6171108283050663630209137733795200本 | 反応管本数:1234221656610132726041827546758400本 | 反応管本数:2468443313220265452083655093516800本 | 反応管本数:4936886626440530904167310187033600本 | 反応管本数:9873773252881061808334620374067200本 | 反応管本数:1974754650572132361667240748033600本 | 反応管本数:3949509301144264723334481496067200本 | 反応管本数:7899018602288529446668962992134400本 | 反応管本数:1579803204577058993337794598426800本 | 反応管本数:3159606409154117986675589119653600本 | 反応管本数:6319212818308235973351178239307200本 | 反応管本数:12638424566616679546702356478614400本 | 反応管本数:2527684913323335909340471297228800本 | 反応管本数:5055369826646671818680942594457600本 | 反応管本数:10110739653293423634161885188915200本 | 反応管本数:2022147930658684726832377037783200本 | 反応管本数:4044295861317369453664754075566400本 | 反応管本数:8088591722634738907329508151132800本 | 反応管本数:1 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

Table 4.3 定格運転時ヒートマスバランス

| 位置 | 位置 NO. | 反応管本数：1本 温度(℃)圧力(atq) 流量(kg/s) | 反応管本数：3本 温度(℃)圧力(atq) 流量(kg/s) | $\frac{1}{3}M^{\frac{1}{2}}$ (kcal/kg) | H 8 | C H 4 | C 2 H 6 | C 3 H 8 | nC 11 H 0 | iC 4 H 10 | H 2 O | H 2 | C O | C O ₂ | N 2 | 組成(%) |
|------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|---------|-------|---------|---------|-----------|-----------|-------|------|------|------------------|-------|-------|
| ヘリウムライン | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ヘリウム入排熱器出口 | H1 | 100.0 | 40.3 | 0.0590 | 100.0 | 40.3 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ヘリウム入加熱器入口 | H2 | 100.0 | 40.3 | 0.0590 | 100.0 | 40.3 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ヘリウム入加熱器出口 | H3 | 920.0 | 40.2 | 0.0590 | 920.0 | 40.2 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水蒸気改質器入口 | H4 | 880.0 | 40.0 | 0.0590 | 880.0 | 40.0 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水蒸気改質器出口 | H5 | 609.5 | 39.8 | 0.0590 | 609.5 | 39.8 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 蒸気過熱器入口 | H6 | 609.5 | 39.8 | 0.0590 | 609.5 | 39.8 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 蒸気過熱器出口 | H7 | 558.5 | 39.8 | 0.0590 | 558.5 | 39.8 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 蒸気過熱器入口 | H8 | 558.5 | 39.8 | 0.0590 | 558.5 | 39.8 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 蒸気過熱器出口 | H9 | 280.0 | 39.8 | 0.0590 | 285.0 | 39.8 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水予熱器入口 | H10 | 280.0 | 39.7 | 0.0590 | 285.0 | 39.7 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水予熱器出口 | H11 | 280.0 | 39.7 | 0.0590 | 285.0 | 39.7 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水予熱器入口 | H12 | 129.8 | 39.7 | 0.0590 | 137.5 | 39.7 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水予熱器出口 | H13 | 129.8 | 39.7 | 0.0590 | 129.8 | 39.7 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水予熱器入口 | H14 | 100.0 | 39.6 | 0.0590 | 100.0 | 39.6 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水予熱器出口 | H15 | 100.0 | 39.5 | 0.0590 | 100.0 | 39.5 | 0.2070 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水・蒸気ランプ | S1 | 20.0 | 47.0 | 0.0567 | 20.0 | 47.0 | 0.1670 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 水予熱器出口 | S2 | 240.8 | 47.0 | 0.0567 | 240.8 | 47.0 | 0.1670 | 247.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 蒸発器入口 | S3 | 240.8 | 46.0 | 0.0567 | 240.8 | 46.0 | 0.1670 | 247.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 蒸発器出口 | S4 | 258.8 | 46.0 | 0.0567 | 258.8 | 46.0 | 0.1670 | 668.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 蒸気過熱器入口 | S5 | 258.8 | 46.0 | 0.0567 | 258.8 | 46.0 | 0.1356 | 668.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 蒸気過熱器出口 | S6 | 400.0 | 46.0 | 0.0452 | 400.0 | 46.0 | 0.1356 | 765.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 原料ガスライン | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 原料ガス供給系出口 | R1 | 40.0 | 47.0 | 0.0664 | 40.0 | 47.0 | 0.0191 | 0 | 90.06 | 4.93 | 3.30 | 0.96 | 0.75 | 0 | 0 | 0 |
| 原料ガス回収系出口 | R2 | 40.0 | 47.0 | 0.0035 | 40.0 | 47.0 | 0.0105 | 0 | 73.43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.30 | 0.27 | 0 |
| 脱硫器用加熱器入口 | R3 | 40.0 | 47.0 | 0.0035 | 40.0 | 47.0 | 0 | 0 | 82.56 | 2.71 | 1.87 | 0.53 | 0.41 | 0 | 11.86 | 0.12 |
| 脱硫器用加熱器出口 | R4 | 40.0 | 47.0 | 0.0039 | 40.0 | 47.0 | 0.0297 | 0 | 82.56 | 2.71 | 1.87 | 0.53 | 0.41 | 0 | 11.86 | 0.12 |
| 脱硫器用加熱器入口 | R5 | 350.0 | 47.0 | 0.0039 | 350.0 | 47.0 | 0.0297 | 0 | 82.56 | 2.71 | 1.87 | 0.53 | 0.41 | 0 | 11.86 | 0.12 |
| 脱硫器入口 | R6 | 350.0 | 46.3 | 0.0039 | 350.0 | 46.3 | 0.0297 | 0 | 82.56 | 2.71 | 1.87 | 0.53 | 0.41 | 0 | 11.86 | 0.12 |
| 脱硫器出口 | R7 | 350.0 | 46.2 | 0.0039 | 350.0 | 46.2 | 0.0297 | 0 | 82.56 | 2.71 | 1.87 | 0.53 | 0.41 | 0 | 11.86 | 0.12 |
| 脱硫器出口 | R8 | 350.0 | 46.1 | 0.0039 | 350.0 | 46.1 | 0.0297 | 0 | 82.56 | 2.71 | 1.87 | 0.53 | 0.41 | 0 | 11.86 | 0.12 |
| 原料加熱器原料A入口 | R9 | 350.0 | 46.0 | 0.0039 | 350.0 | 46.0 | 0.0297 | 0 | 82.56 | 2.71 | 1.87 | 0.53 | 0.41 | 0 | 11.86 | 0.12 |
| 原料加熱器水蒸気入口 | R10 | 350.0 | 46.0 | 0.0452 | 350.0 | 46.0 | 0.1356 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 原料ガス・水蒸気合流 | R11 | 350.0 | 45.3 | 0.0551 | 350.0 | 45.3 | 0.1652 | 0 | 16.44 | 0.54 | 0.36 | 0.11 | 0.08 | 80.06 | 2.38 | 0.03 |
| 原料加熱器原料A | R12 | 350.0 | 45.3 | 0.0551 | 350.0 | 45.3 | 0.1652 | 0 | 16.44 | 0.54 | 0.36 | 0.11 | 0.08 | 80.06 | 2.38 | 0.03 |
| 原料加熱器入口 | R13 | 350.0 | 45.3 | 0.0551 | 350.0 | 45.3 | 0.1652 | 0 | 16.44 | 0.54 | 0.36 | 0.11 | 0.08 | 80.06 | 2.38 | 0.03 |
| 原料加熱器出口 | R14 | 450.0 | 45.3 | 0.0551 | 450.0 | 45.3 | 0.1652 | 0 | 16.44 | 0.54 | 0.36 | 0.11 | 0.08 | 80.06 | 2.38 | 0.03 |
| 原料加熱器原料A入口 | R15 | 450.0 | 45.0 | 0.0551 | 450.0 | 45.0 | 0.1652 | 0 | 16.44 | 0.54 | 0.36 | 0.11 | 0.08 | 80.06 | 2.38 | 0.03 |
| 水蒸気改質器入口 | R16 | 450.0 | 45.0 | 0.0551 | 450.0 | 45.0 | 0.1652 | 0 | 16.44 | 0.54 | 0.36 | 0.11 | 0.08 | 80.06 | 2.38 | 0.03 |
| 生成ガスライン | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 水蒸気改質器出口 | P1 | 633.8 | 39.6 | 0.0551 | 633.8 | 39.6 | 0.1652 | 0 | 5.36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.79 | 36.74 | 4.09 |
| 原判加熱器入口 | P2 | 633.8 | 39.5 | 0.0551 | 633.8 | 39.5 | 0.1652 | 0 | 5.36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.79 | 36.74 | 4.09 |
| 原判加熱器出口 | P3 | 528.3 | 39.5 | 0.0551 | 528.3 | 39.5 | 0.1652 | 0 | 5.36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.79 | 36.74 | 4.09 |
| 脱硫器用加熱器入口 | P4 | 528.3 | 39.4 | 0.0551 | 528.3 | 39.4 | 0.1652 | 0 | 5.36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.79 | 36.74 | 4.09 |
| 脱硫器用加熱器出口 | P5 | 463.1 | 39.4 | 0.0551 | 463.1 | 39.4 | 0.1652 | 0 | 5.36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.79 | 36.74 | 4.09 |
| 生成ガス冷却器入口 | P6 | 463.1 | 39.3 | 0.0551 | 463.1 | 39.3 | 0.1652 | 0 | 5.36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.79 | 36.74 | 4.09 |
| 生成ガス冷却器出口 | P7 | 200.0 | 39.2 | 0.0551 | 200.0 | 39.2 | 0.1652 | 0 | 6.21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.51 | 42.57 | 4.74 |
| CO変成エタノール | P8 | 200.0 | 39.1 | 0.0551 | 200.0 | 39.1 | 0.1652 | 0 | 6.21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35.24 | 46.63 | 0.47 |
| 生成ガス冷却器入口 | P9 | 260.0 | 39.0 | 0.0551 | 260.0 | 39.0 | 0.1652 | 0 | 6.21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35.24 | 46.63 | 0.47 |
| 生成ガス冷却器出口 | P10 | 260.0 | 38.9 | 0.0551 | 260.0</ | | | | | | | | | | | |

Table 4.4 各熱交換器の交換熱量及び対数平均温度差（反応管1本の場合）

| | | A:メタン100% (アラスカ産相当) | B:アルネイ産 | 変化率 (B-A)/A |
|----------|-----------|------------------------|---------|----------------|
| 原料加熱器 | | | | |
| 管外流体入口温度 | °C | 620 | 624 | |
| 管外流体出口温度 | °C | 526 | 528 | |
| 管内流体入口温度 | °C | 350 | 350 | |
| 管内流体出口温度 | °C | 450 | 450 | |
| 対数平均温度差 | °C | 173 | 176 | 1.85% |
| 管外流体定圧比熱 | kcal/kg°C | 0.668 | 0.661 | |
| 管内流体定圧比熱 | kcal/kg°C | 0.629 | 0.631 | |
| 管外流体流量 | kg/s | 0.055 | 0.055 | |
| 管内流体流量 | kg/s | 0.055 | 0.055 | |
| 交換熱量 | KW | 14.49 | 14.56 | 0.48% |
| 脱硫器用加熱器 | | | | |
| 管外流体入口温度 | °C | 526 | 528 | |
| 管外流体出口温度 | °C | 464 | 463 | |
| 管内流体入口温度 | °C | 40 | 40 | |
| 管内流体出口温度 | °C | 350 | 350 | |
| 対数平均温度差 | °C | 282 | 283 | 0.46% |
| 管外流体定圧比熱 | kcal/kg°C | 0.665 | 0.659 | |
| 管内流体定圧比熱 | kcal/kg°C | 0.739 | 0.772 | |
| 管外流体流量 | kg/s | 0.055 | 0.055 | |
| 管内流体流量 | kg/s | 0.010 | 0.010 | |
| 交換熱量 | KW | 9.41 | 9.91 | 5.38% |
| 生成ガス冷却器 | | | | |
| 管外流体入口温度 | °C | 464 | 463 | |
| 管外流体出口温度 | °C | 200 | 200 | |
| 管内流体入口温度 | °C | 20 | 20 | |
| 管内流体出口温度 | °C | 50 | 50 | |
| 対数平均温度差 | °C | 281 | 281 | -0.17% |
| 管外流体定圧比熱 | kcal/kg°C | 0.679 | 0.672 | |
| 管内流体定圧比熱 | kcal/kg°C | 1 | 1 | |
| 管外流体流量 | kg/s | 0.055 | 0.055 | |
| 管内流体流量 | kg/s | 0.329 | 0.325 | |
| 交換熱量 | KW | 41.32 | 40.80 | -1.25% |
| 生成ガス凝縮器 | | | | |
| 管外流体入口温度 | °C | 260 | 260 | |
| 管外流体出口温度 | °C | 100 | 100 | |
| 管内流体入口温度 | °C | 20 | 20 | |
| 管内流体出口温度 | °C | 50 | 50 | |
| 対数平均温度差 | °C | 135 | 135 | 0.00% |
| 管外流体定圧比熱 | kcal/kg°C | 0.723 | 0.715 | |
| 管内流体定圧比熱 | kcal/kg°C | 1 | 1 | |
| 管外流体流量 | kg/s | 0.055 | 0.055 | |
| 管内流体流量 | kg/s | 0.212 | 0.210 | |
| 交換熱量 | KW | 26.66 | 26.40 | -0.99% |

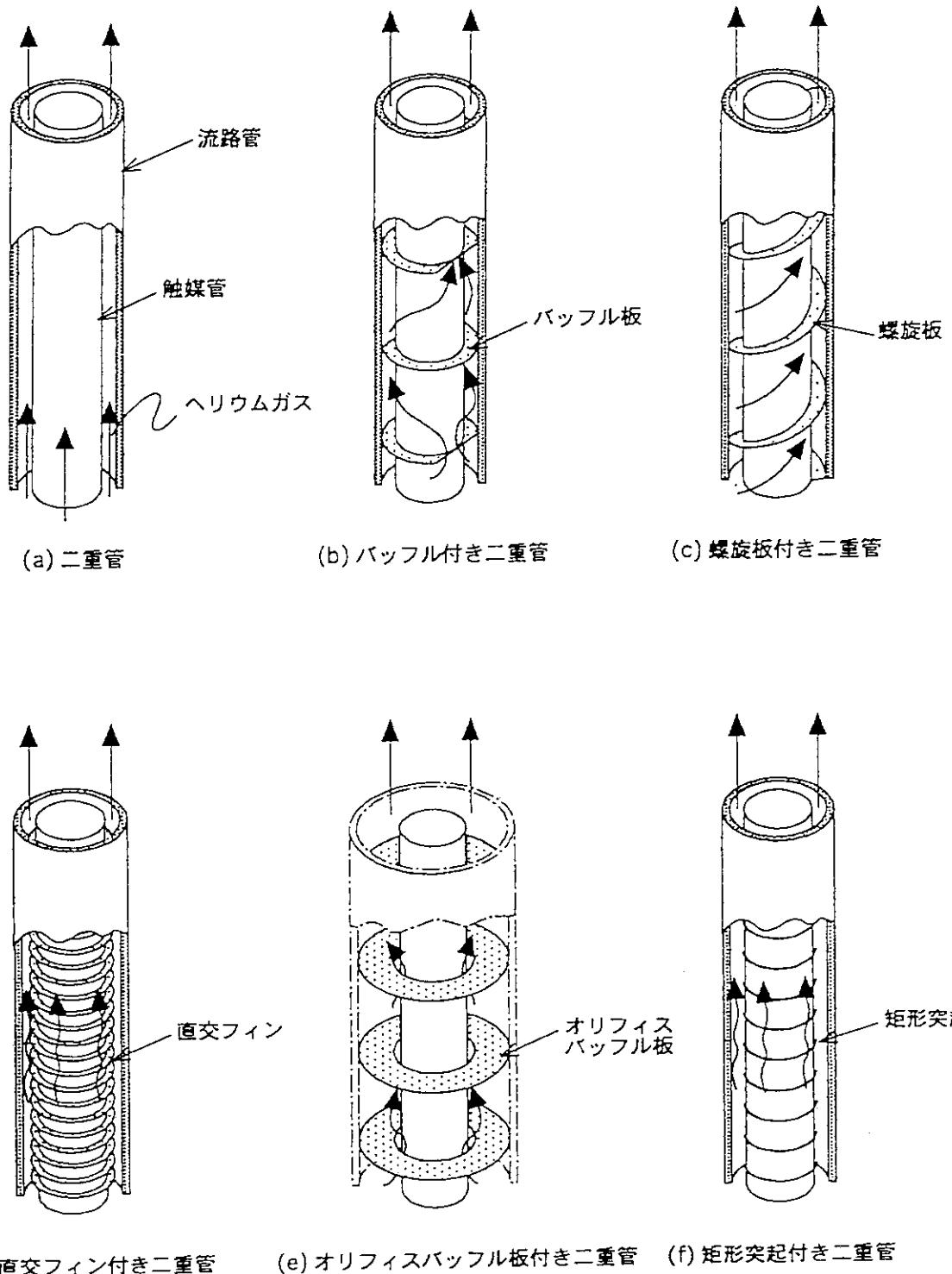


Fig.4.1 伝熱促進手段

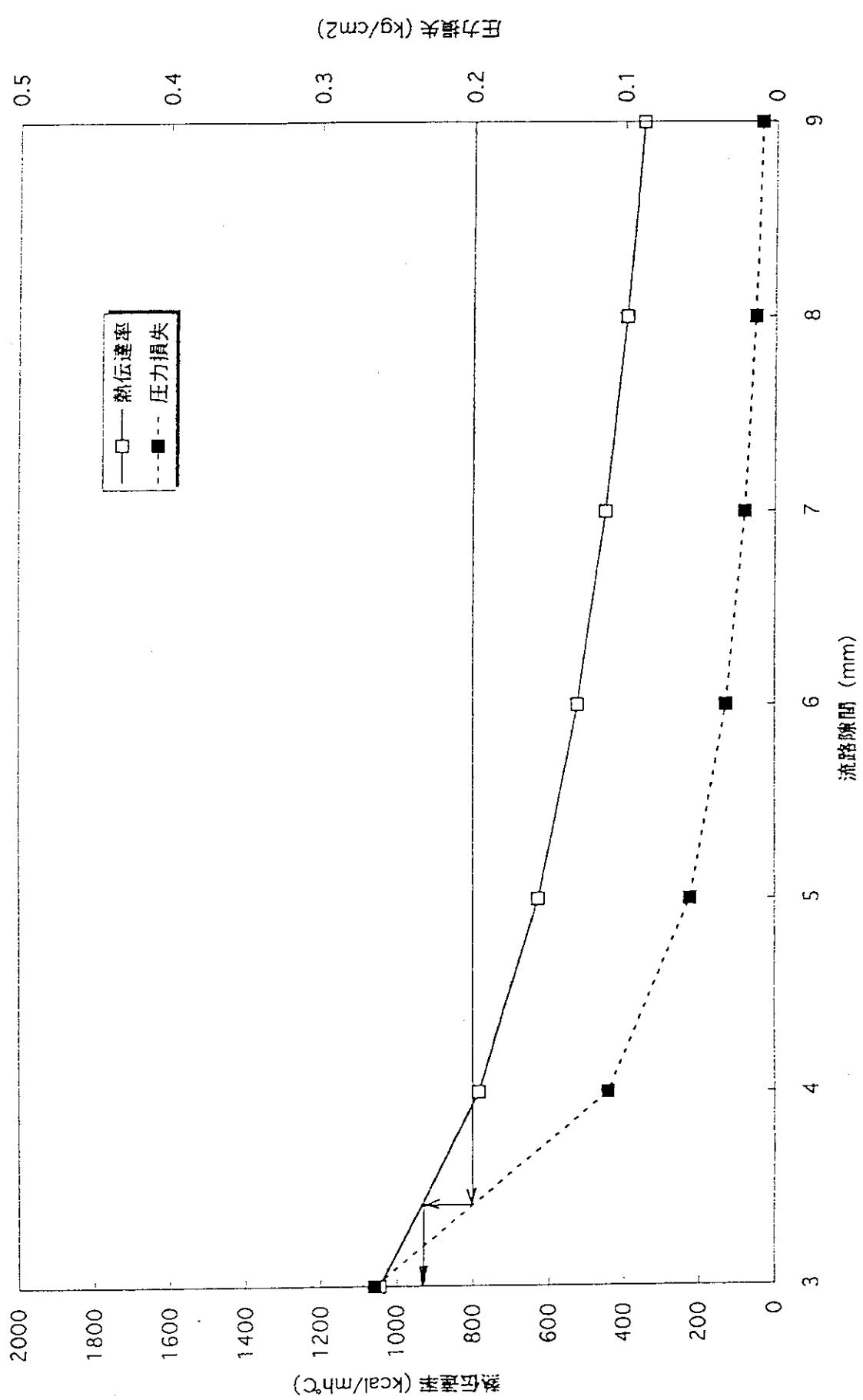


Fig.4.2 二重管伝熱促進効果比較図

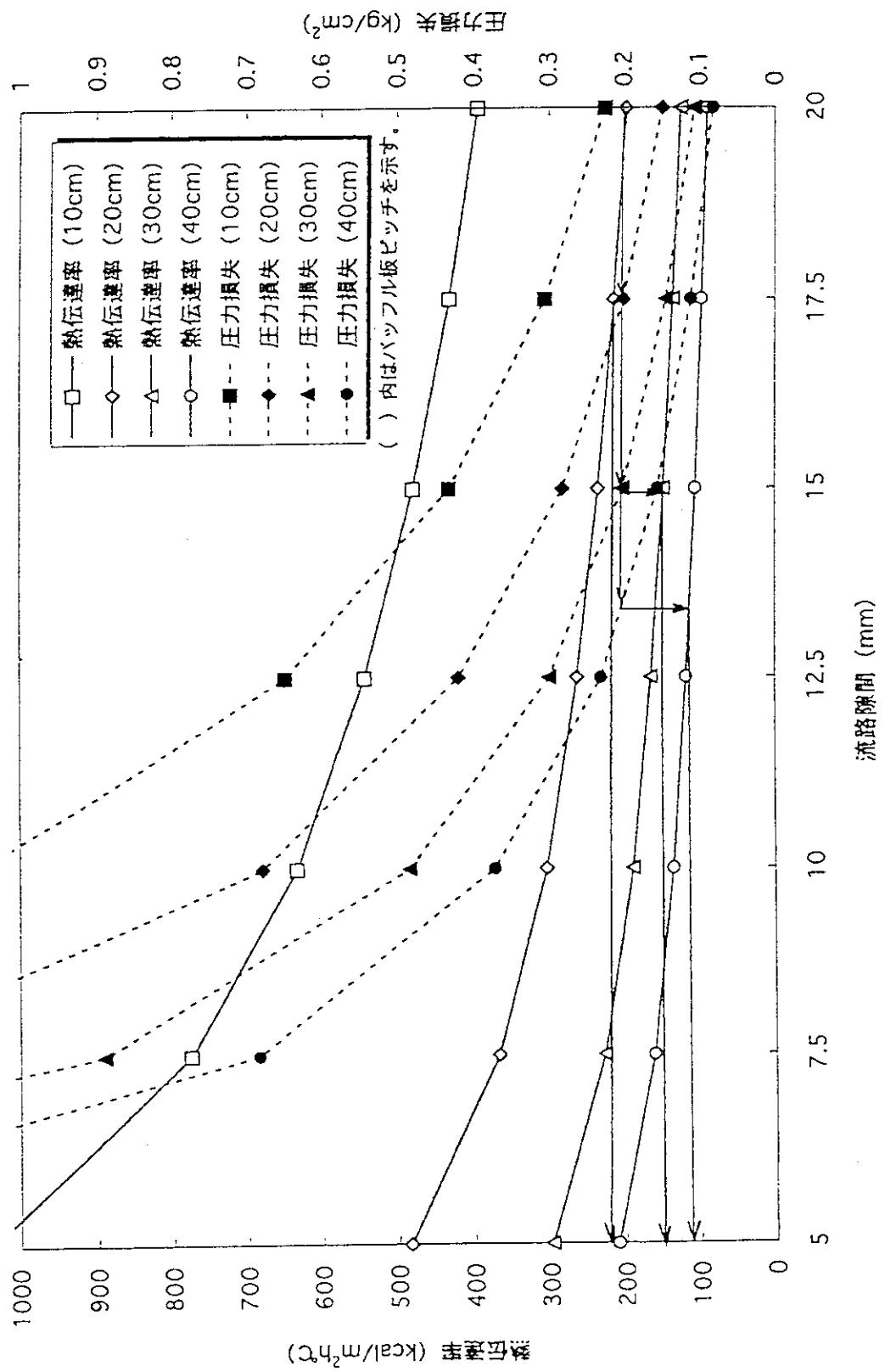


Fig.4.3 バッフル付き二重管伝熱促進効果比較図（バッフル板切り欠き率15%）

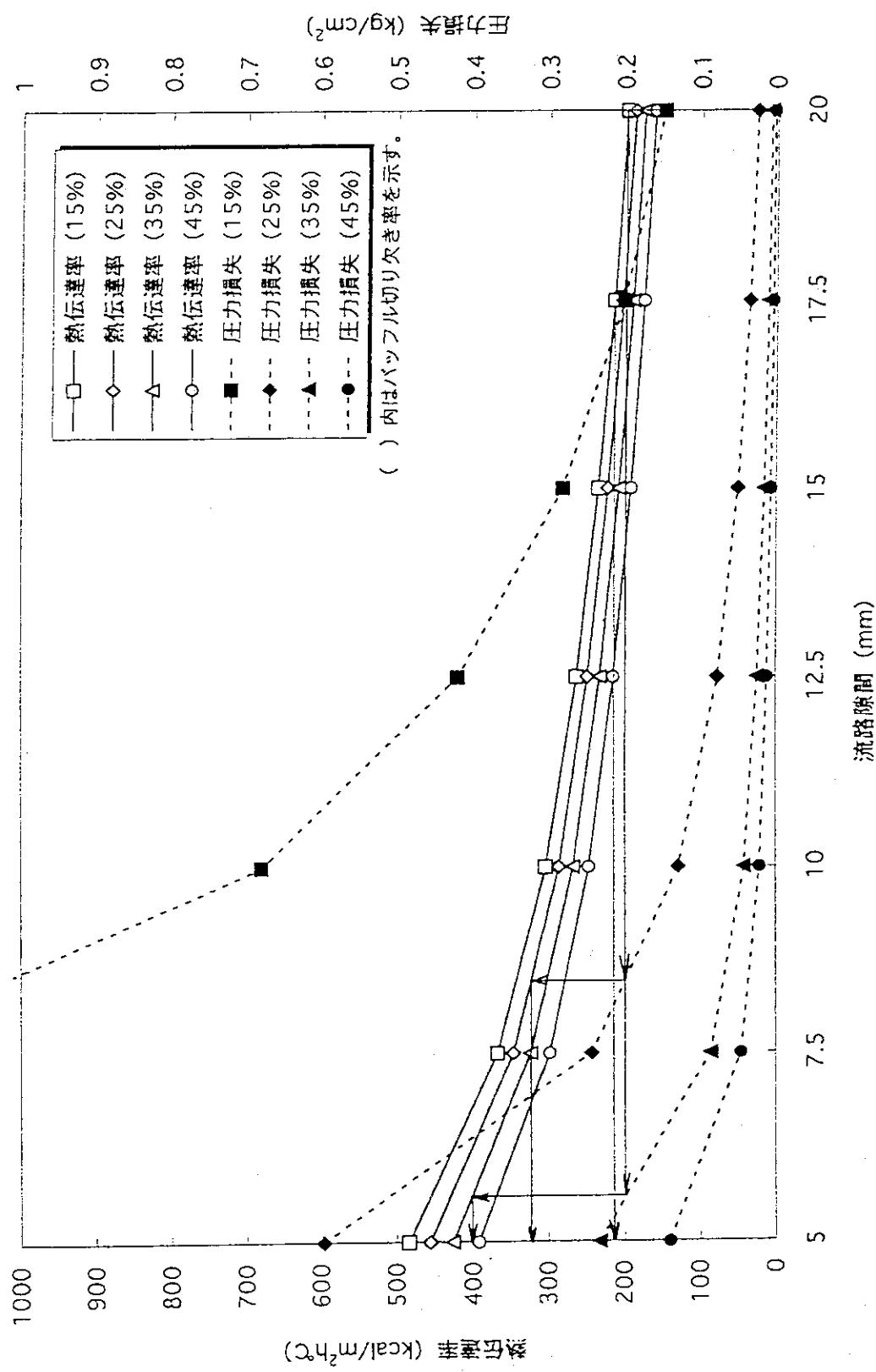


Fig.4.4 バッフル付き二重管伝熱促進効果比較図 (バッフル板間隔 20cm)

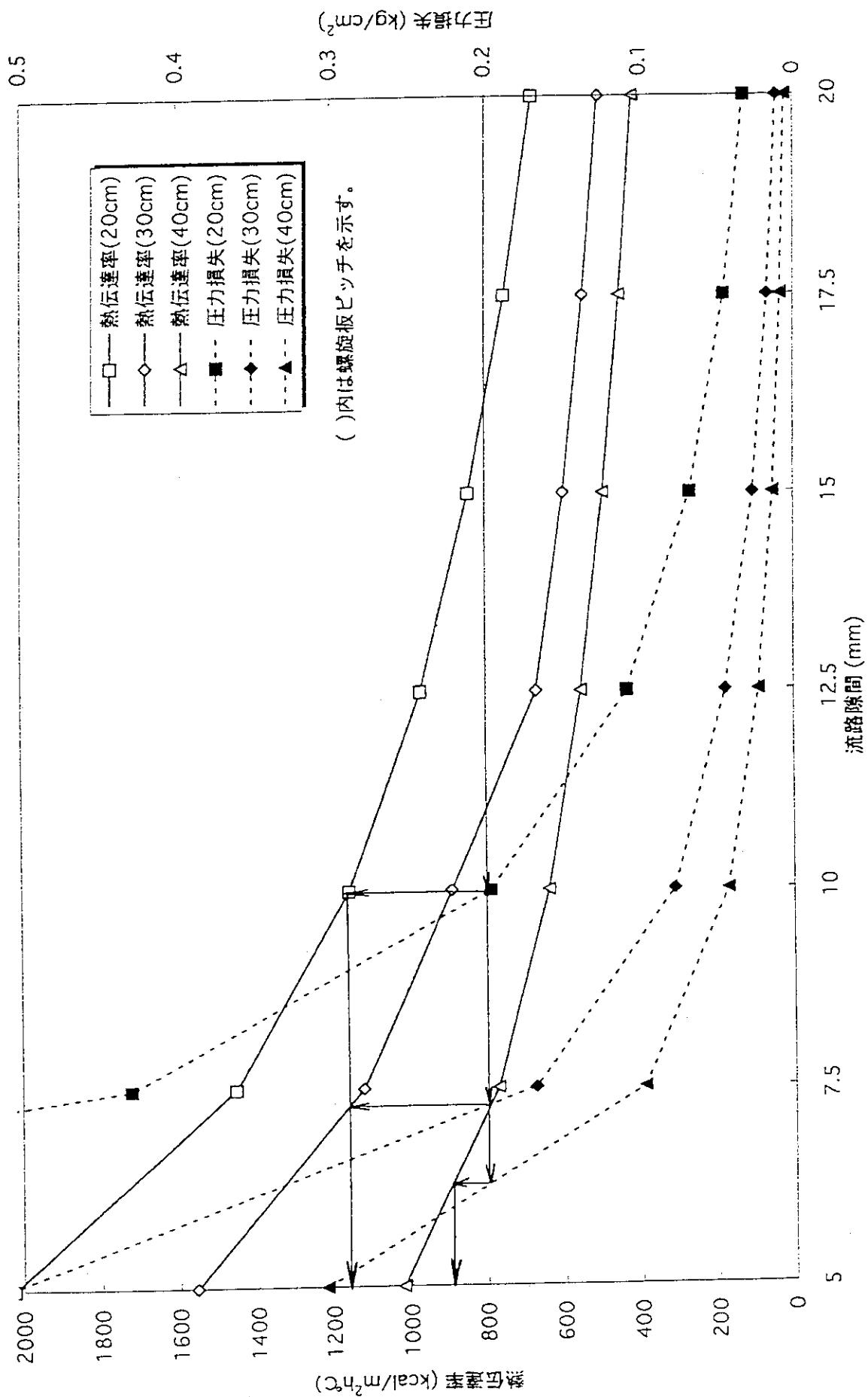


Fig.4.5 螺旋板付二重管の伝熱促進効果比較図

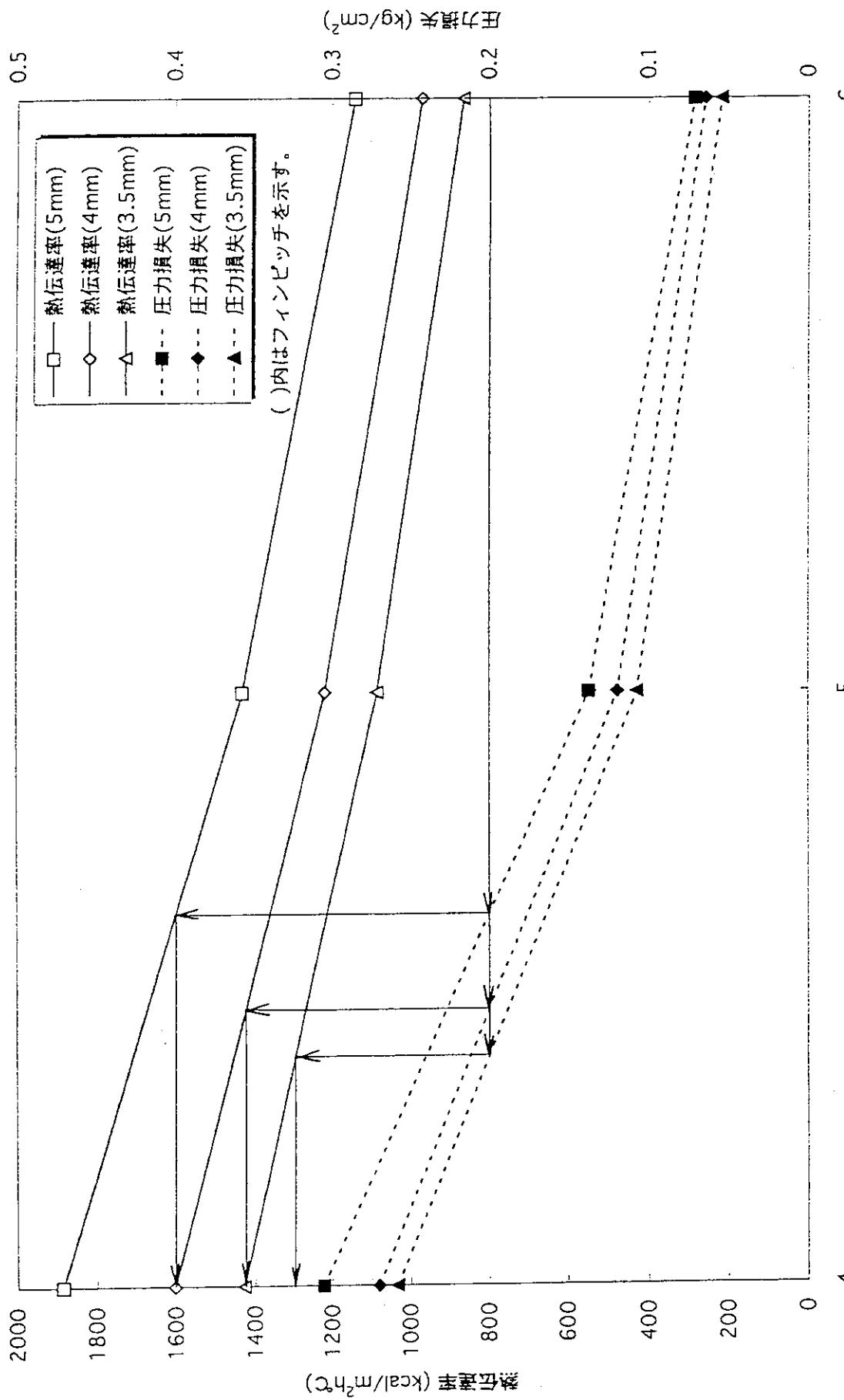


Fig.4.6 直交フィン付二重管の伝熱促進効果比較図 (フィン高さ3mm、フィン厚さ2mm)

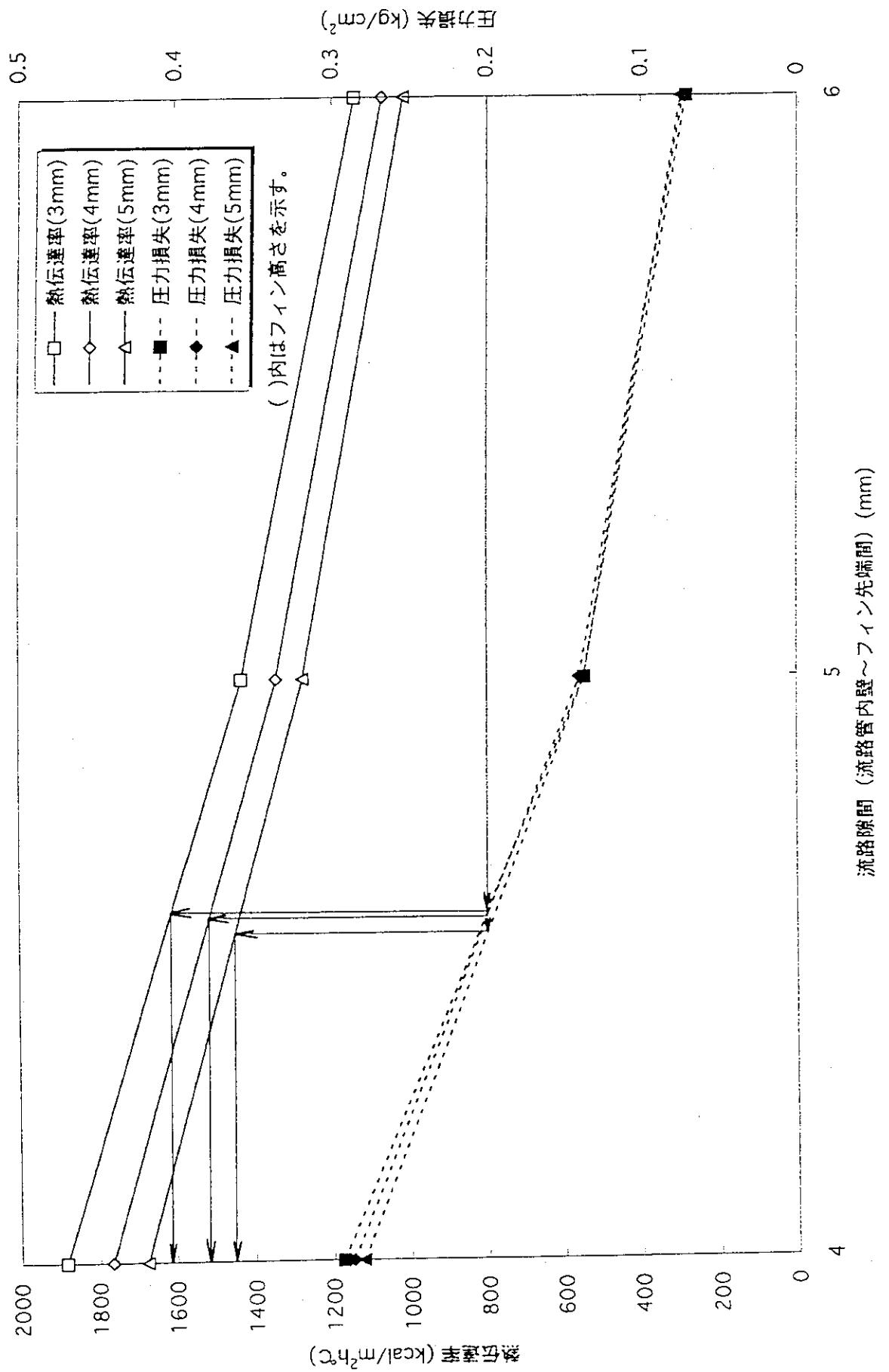


Fig. 4.7 直交フィン付二重管の伝熱促進効果比較図 (フィンピッチ 5mm、フィン厚さ 2mm)

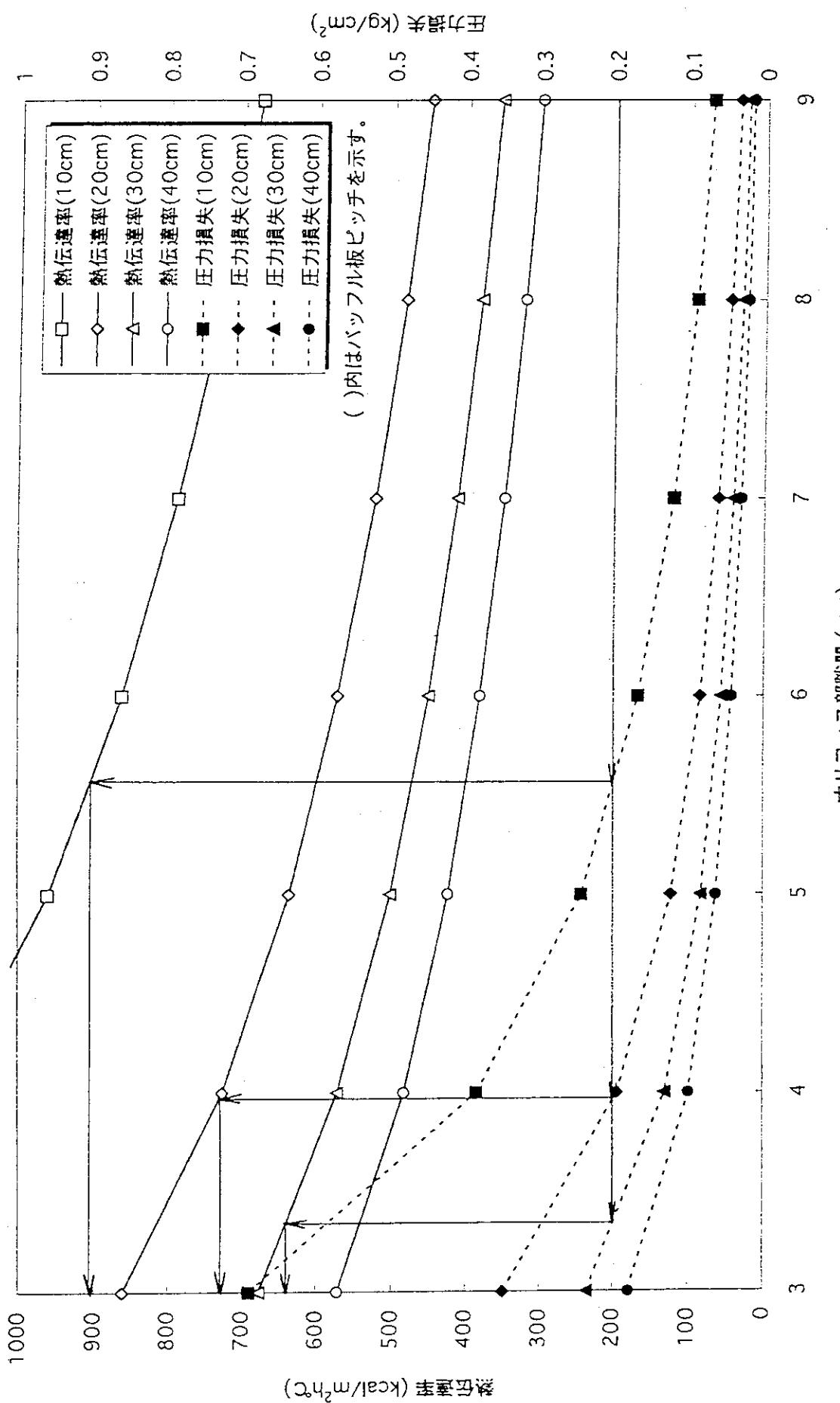


Fig.4.8 オリフィスノバッフル付二重管の伝熱促進効果比較図

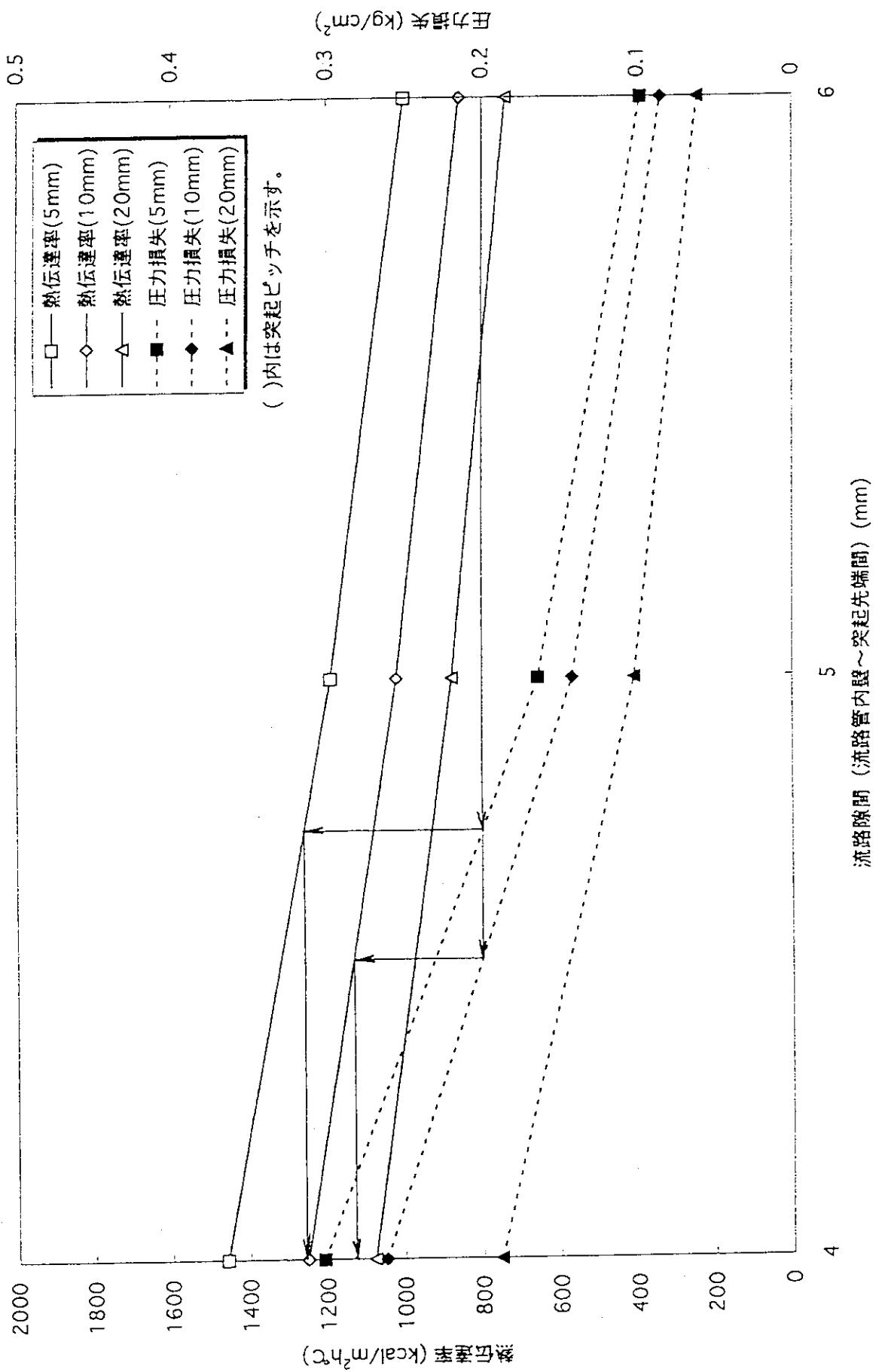


Fig. 4.9 矩形突起付二重管の伝熱促進効果比較図 (突起形状: 幅 0.5mm、高さ 0.5mm)

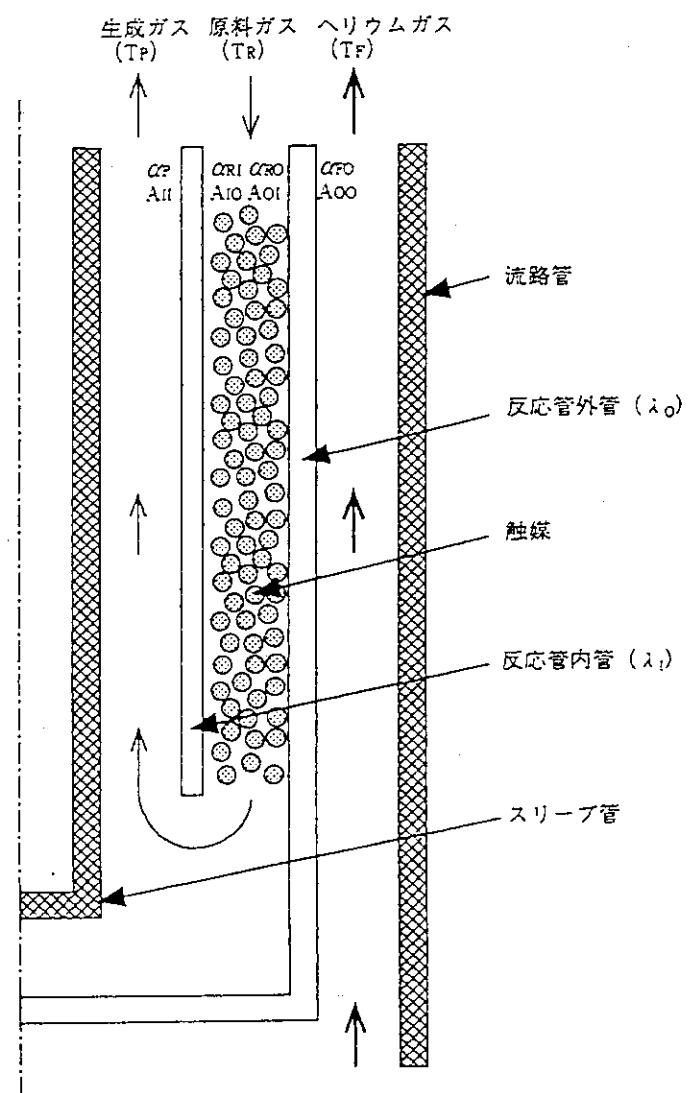


Fig. 4.10 水蒸気改質器のモデル

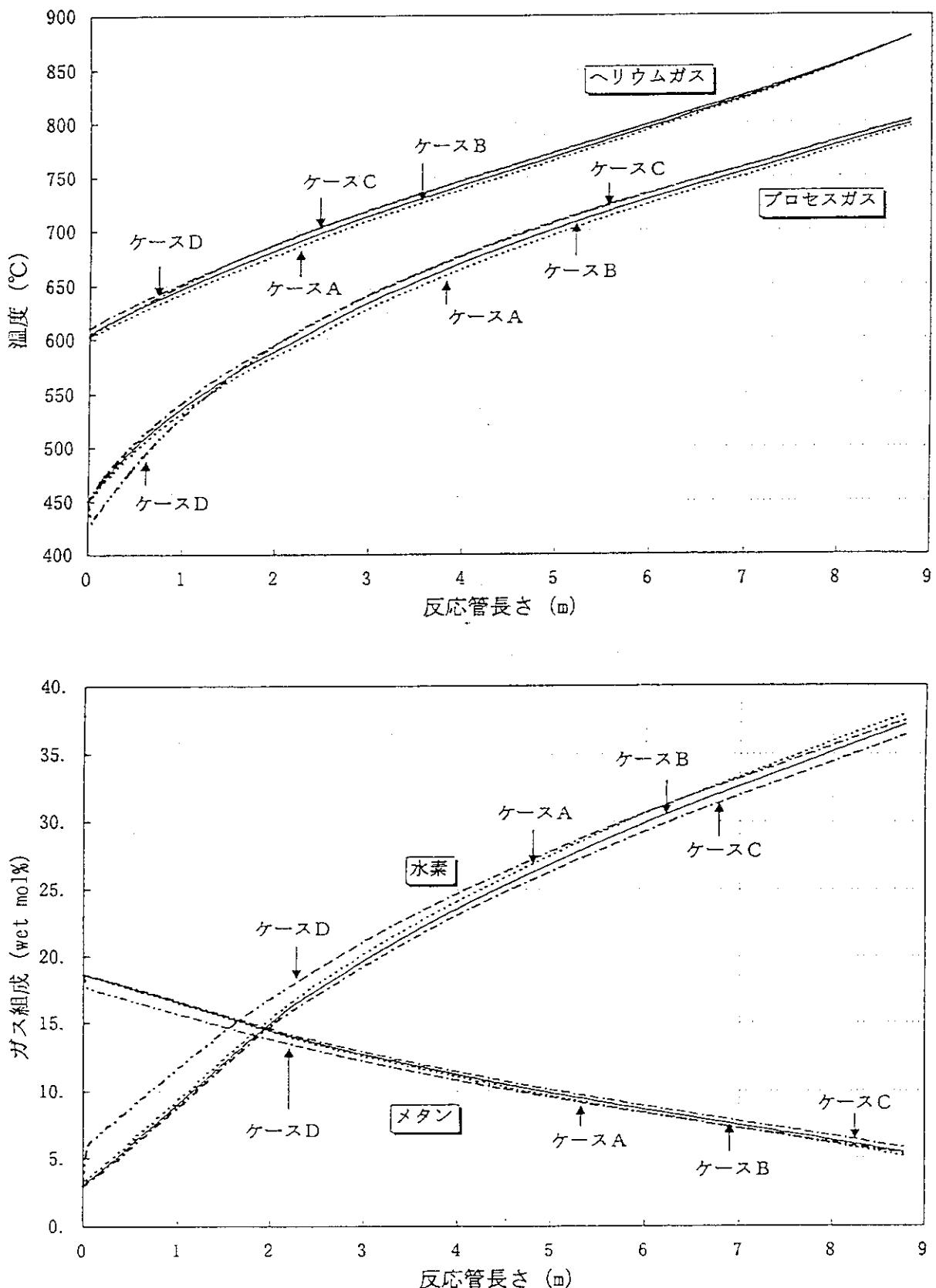


Fig.4.11 反応管内のガス組成分布及び温度分布

5. 構造設計計算

3章で検討した水蒸気改質器の構造について、設計条件と構造設計の検討結果を以下に記す。

5. 1 設計条件の検討

水蒸気改質器の設計圧力は、とくに圧力容器の設計圧力は高圧ガス取締法の法規から運転圧力に余裕をみて50kg/cm²にする。設計温度については、以下に検討した結果を記す。

(1)外胴の設計温度

外胴の設計温度は、伝熱計算から求まる外胴内表面温度に余裕を取り、以下の値とする。

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L\lambda_{12}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L\lambda_{23}} + \frac{1}{2\pi r_3 L\alpha}} \quad (5.1)$$

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

| | 反応管 1 本 | 反応管 3 本 |
|--|---------|---------|
| T1 断熱材内表面温度 (°C) | : 880 | 880 |
| T4 室温 (°C) | : 40 | 40 |
| r1 断熱材内半径 (m) | : 0.235 | 0.405 |
| r2 外胴内半径 (m) | : 0.45 | 0.65 |
| r3 外胴外半径 (m) | : 0.48 | 0.69 |
| λ_{12} 断熱材熱伝導率 (kcal/hm°C) | : 0.64 | 0.64 |
| λ_{23} 外胴熱伝導率 (kcal/hm°C) | : 17.3 | 17.3 |
| α 外胴外表面熱伝達率 (kcal/hm ² °C) | : 10 | 10 |
| T2 外胴内表面温度 (°C) | : 185 | 180 |
| 外胴の設計温度 (°C) | : 400 | 400 |

※断熱材表面温度は、安全側にヘリウムガス温度と等温としている。

(2)鏡の設計温度

鏡は外胴に比べ外表面での熱流束が小さくなるため温度は外胴よりも低くなる。よって、鏡の設計温度は、外胴の設計温度と同じとする。

外胴の設計温度 : 400 °C

鏡の設計温度 : 400 °C

(3)反応管外管の設計温度

異常時は反応管内にプロセスガスが滞留するため、反応管外管はヘリウムガス温度と等温になる。

よって、反応管外管の設計温度はヘリウムガス温度に余裕を取り、以下の値とする。

ヘリウムガス温度 : 880 °C

反応管外管の設計温度 : 900 °C

5. 2 設計条件

上記の検討結果を基にして、設計条件を以下のように設定した。なお、設計条件は反応管が1本と3本の場合とも共通である。

| 項目 | | 単位 | 要目 |
|------|-------|--------------------|------------------|
| 適用法規 | | — | 高圧ガス取締法 特定設備検査規則 |
| 流体 | 胴側 | — | ヘリウムガス |
| | 管側 | — | プロセスガス |
| 設計圧力 | 外胴 | kg/cm ² | 50 |
| | 鏡 | kg/cm ² | 50 |
| | 反応管外管 | kg/cm ² | 7 |
| 設計温度 | 外胴 | °C | 400 |
| | 鏡 | °C | 400 |
| | 反応管外管 | °C | 900 |

上記の設計条件に対する構造設計計算は、高圧ガス取締法特定設備検査規則に基づいて行う。
Fig. 5.1に計算箇所を示す。

5. 3 反応管が1本の場合の計算結果

(1) 圧力容器の胴の厚さ

(a) 「特定設備検査規則」第12条による厚さ : t_1

(b) 「特定設備検査規則」第12条1号イ(1)(i) : 内面に圧力を受ける円筒胴の胴板

(胴板の最小厚さ \leq 内径の4分の1)

$$t_2 = P D_i / (200 \sigma_s \eta - 1.2 P)$$

| | | |
|---------------------|---|-------------------------|
| 使用材料 | : | SCMV4 |
| 設計圧力 P | : | 50 kg/cm ² |
| 設計温度 | : | 400 °C |
| 胴の内径 D_i | : | 900 mm |
| 許容引っ張り応力 σ_s | : | 11.9 kg/mm ² |
| 胴板の厚さ t_2 | : | 30 mm |
| 溶接継手の効率 η | : | 1.0 |
| 最小厚さ t_1 | : | 2.5 mm |

最小厚さ t_2 : 19.40 mm
 t_1, t_2 の大きい値 t : 19.40 mm
 $t_s \geq t$ 、よって十分である。

(2) 圧力容器の鏡板の厚さ

- (a) 「特定設備検査規則」第12条による厚さ : t :
(b) 「特定設備検査規則」第12条3号口(1) : 中低面に圧力を受ける半梢円形鏡板

$$t_2 = PDK / (200\sigma_a \eta - 0.2P)$$

$$K = 1/6[2 + (D/2h)^2]$$

使用材料 : SCMV4
 設計圧力 P : 50 kg/cm²
 設計温度 : 400 °C
 鏡板の内側の長径 D : 400 mm
 鏡板の内側の短径の2分の1 h : 225 mm
 形状によって定まる係数 K : 1
 許容引っ張り応力 σ_a : 11.9 kg/mm²
 鏡板の厚さ t_s : 30 mm
 溶接継手の効率 η : 1.0
 最小厚さ t_1 : 2.5 mm
 最小厚さ t_2 : 18.99 mm
 t_1, t_2 の大きい値 t : 18.99 mm
 $t_s \geq t$ 、よって十分である。

(3) 圧力容器管台の厚さ

- (a) 「特定設備検査規則」第12条1号イ(1)(i) : 「内面に圧力を受ける円筒胴の胴板」に準ずる。(胴板の最小厚さ \leq 内径の4分の1)

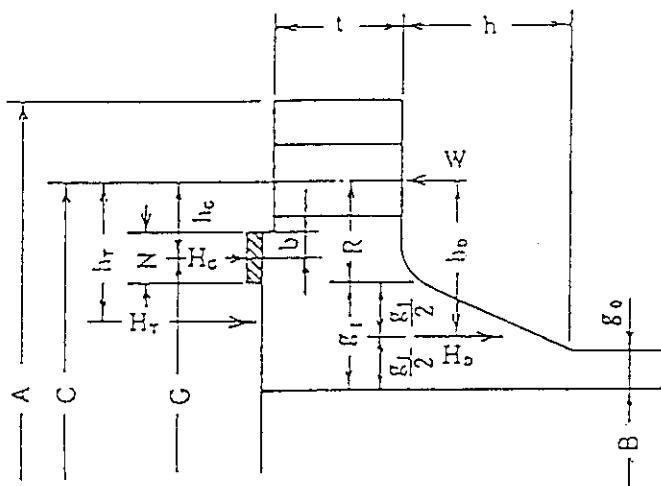
$$t_2 = PD_i / (200\sigma_a \eta - 1.2P)$$

| | ヘリウムガス出入口管台 | マンホール管台 |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|
| 使用材料 | : SFVAF22B | SFVAF22B |
| 設計圧力 P | : 50 kg/cm ² | 50 kg/cm ² |
| 設計温度 | : 400 °C | 400 °C |
| 管台の内径 D_i | : 237.2 mm | 500 mm |
| 許容引っ張り応力 σ_a | : 12.1 kg/mm ² | 12.1 kg/mm ² |
| 管台の厚さ t_s | : 30 mm | 30 mm |
| 溶接継手の効率 η | : 1.0 | 1.0 |
| 最小厚さ t | : 5.03 mm | 10.60 mm |

$t_s \geq t$ 、よって十分である。

(4) フランジの厚さ

「特定設備検査規則」第12条第2項
 J I S B 8 2 4 3 附録書2 フランジの応力計算方法
 (内圧を受けるフランジ) 一体形フランジ



| | |
|-----------|-----------------|
| フランジ使用材料 | S F V A F 2 2 B |
| 胴使用材料 | S C M V 4 |
| ボルト使用材料 | S N B 1 6 |
| ガスケット使用形式 | うず巻形ガスケット |
| 座面の形状 1 a | |

| | | |
|-------------|---|---------|
| 最高使用圧力 | P (kg/cm ²) | 5 0 |
| 最高使用温度 | (°C) | 4 0 0 |
| フランジの許容引張応力 | 常温 $\sigma_{n.s}$ (kg/mm ²) | 1 3 . 3 |
| | 最高使用温度 $\sigma_{n.t}$ (kg/mm ²) | 1 2 . 1 |
| ボルトの許容引張応力 | 常温 σ_s (kg/mm ²) | 1 5 . 4 |
| | 最高使用温度 σ_b (kg/mm ²) | 1 5 . 4 |
| 胴の材料の許容引張応力 | 常温 $\sigma_{n.s}$ (kg/mm ²) | 1 3 . 1 |
| | 最高使用温度 $\sigma_{n.t}$ (kg/mm ²) | 1 1 . 9 |

| | | |
|-----------|--------|---------------|
| フランジの外径 | A (mm) | 1 3 8 0 |
| フランジの内径 | B (mm) | 9 6 0 |
| ボルト中心円の直径 | C (mm) | 1 2 6 0 |
| ガスケット有効径 | G (mm) | 1 0 4 4 . 0 6 |

| | | | | |
|--|-----------------|-----------------------|--------------------|-------|
| ハブ先端の厚さ | g _o | (mm) | 30 | |
| フランジ背面のハブの厚さ | g _i | (mm) | 80 | |
| ハブの長さ | h | (mm) | 150 | |
| ボルト呼び | | | M56×3 | |
| ボルト本数 | n | | 32 | |
| ボルト谷径 | d _b | (mm) | 52.75 | |
| ガスケット接触面の外径 | G _s | (mm) | 1060.00 | |
| ガスケット接触面の幅 | N | (mm) | 20.00 | |
| ガスケット係数 | m | | 3.00 | |
| 最小設計締付圧力 | y | (kg/mm ²) | 7.03 | |
| ガスケット座の基本幅 | b _o | (mm) | 10.00 | |
| ガスケット座の有効幅 | b | (mm) | 7.97 | |
| 内圧による全荷重 | H | (kg) | 428066 | |
| ガスケットにかける圧縮力 | H _p | (kg) | 78425 | |
| 使用状態での最小ボルト荷重 | W _{m1} | (kg) | 506491 | |
| ガスケット締付最小荷重 | W _{m2} | (kg) | 183776 | |
| ボルトの 所要総断面積 | 使用状態 | A _{m1} | (mm ²) | 32889 |
| | ガスケット締付時 | A _{m2} | (mm ²) | 11934 |
| | いずれか大きい値 | A _m | (mm ²) | 32889 |
| 実際のボルト総断面積 | A _b | (mm ²) | 69933 | |
| A _b > A _m 、よって十分である。 | | | | |

| | | | | |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------|----------|
| ボルト荷重 | 使用状態 | W _o | (kg) | 506491 |
| | ガスケット締付時 | W _p | (kg) | 791729 |
| 距離 | | R | (mm) | 70.00 |
| 荷重 (kg) | モーメントアーム (mm) | モーメント (kg·mm) | | |
| H _D = 361912 | h _D = 110.00 | M _D = 39810320 | | |
| H _C = 78425 | h _C = 107.97 | M _C = 8467548 | | |
| H _T = 66154 | h _T = 128.99 | M _T = 8533205 | | |
| フランジに 作用する モーメント | 使用状態 | M _o | (kg·mm) | 56811073 |
| | ガスケット締付時 | M _p | (kg·mm) | 85482980 |
| フランジの内外径の比 | K | | | 1.4375 |
| 形状係数 | h _o | | | 169.71 |

| | | |
|----------|-----------|----------------------|
| 係 数 | h/h_0 | 0.8839 |
| 係 数 | g_i/g_0 | 2.6667 |
| ハブ応力修正係数 | f | 1.0000 |
| 係 数 | F | 0.7224 |
| 係 数 | T | 1.7379 |
| 係 数 | U | 6.0644 |
| 係 数 | V | 0.1069 |
| 係 数 | Y | 5.5186 |
| 係 数 | Z | 2.8755 |
| 係 数 | d | 8.6648×10^6 |
| 係 数 | e | 0.0043 |
| フランジの厚さ | t (mm) | 120.00 |
| 係 数 | L | 1.0717 |

| 使用状態におけるフランジの強さ | | |
|---|---------------------------------|------------------------------|
| 応力の計算値 | (kg/mm ²) | 許容引張応力 (kg/mm ²) |
| ハブの軸方向応力 $\sigma_H = 8.7$ | $1.5\sigma_f = 18.1$ | |
| | $1.5\sigma_n = 17.8$ | |
| フランジの半径方向応力 $\sigma_R = 6.5$ | | $\sigma_f = 12.1$ |
| フランジの周方向応力 $\sigma_T = 4.0$ | | $\sigma_f = 12.1$ |
| 組合せ応力 $(\sigma_H + \sigma_R)/2 = 7.6$ | | $\sigma_f = 12.1$ |
| | $(\sigma_H + \sigma_T)/2 = 6.3$ | $\sigma_f = 12.1$ |
| ガスケット締付時のフランジの強さ | | |
| 応力の計算値 | (kg/mm ²) | 許容引張応力 (kg/mm ²) |
| ハブの軸方向応力 $\sigma_H = 13.0$ | $1.5\sigma_{fa} = 19.9$ | |
| | $1.5\sigma_{na} = 19.6$ | |
| フランジの半径方向応力 $\sigma_R = 9.8$ | | $\sigma_{fa} = 13.3$ |
| フランジの周方向応力 $\sigma_T = 6.0$ | | $\sigma_{fa} = 13.3$ |
| 組合せ応力 $(\sigma_H + \sigma_R)/2 = 11.4$ | | $\sigma_{fa} = 13.3$ |
| | $(\sigma_H + \sigma_T)/2 = 9.5$ | $\sigma_{fa} = 13.3$ |
| よって十分である。 | | |

(5) 反応管の厚さ

「特定設備検査規則」には、反応管外管の材料であるハステロイ X R の許容引っ張り応力が規定されていない。よって、以下の計算は参考扱いとする。

(a) 「特定設備検査規則」第14条1号：内面に圧力を受ける管

$$t_1 = PD_o / (200 \sigma_a \eta - 0.8P)$$

| | | |
|-------------------------|---|-------------------------|
| 使用材料 | : | ハステロイ X R |
| 設計圧力 P | : | 7 kg/cm ² |
| 設計温度 | : | 900 °C |
| 管の外径 D _o | : | 165.2 mm |
| 許容引っ張り応力 σ _a | : | 0.37 kg/mm ² |
| 管の厚さ t _s | : | 1.6 mm |
| 溶接継手の効率 η | : | 1.0 |
| 最小厚さ t ₁ | : | 14.53 mm |

t_s ≥ t₁、よって十分である。

※ σ_a の値はハステロイ X R の最大許容引っ張り強さ S_o による。

5. 4 反応管が3本の場合の計算結果

(1) 圧力容器の胴の厚さ

(a) 「特定設備検査規則」第12条による厚さ： t₁

(b) 「特定設備検査規則」第12条1号イ(1)(i)：内面に圧力を受ける円筒胴の胴板

(胴板の最小厚さ ≤ 内径の4分の1)

$$t_2 = PD_i / (200 \sigma_a \eta - 1.2P)$$

| | | |
|---|---|-------------------------|
| 使用材料 | : | SCMV4 |
| 設計圧力 P | : | 50 kg/cm ² |
| 設計温度 | : | 400 °C |
| 胴の内径 D _i | : | 1300 mm |
| 許容引っ張り応力 σ _a | : | 11.9 kg/mm ² |
| 胴板の厚さ t _s | : | 4.0 mm |
| 溶接継手の効率 η | : | 1.0 |
| 最小厚さ t ₁ | : | 2.5 mm |
| 最小厚さ t ₂ | : | 28.2 mm |
| t ₁ , t ₂ の大きい値 t | : | 28.2 mm |
| t _s ≥ t、よって十分である。 | | |

(2) 圧力容器の鏡板の厚さ

(a) 「特定設備検査規則」第12条による厚さ: t_1

(b) 「特定設備検査規則」第12条3号ロ(1): 中低面に圧力を受ける半梢円形鏡板

$$t_2 = PDK / (200 \sigma_s \eta - 0.2P)$$

$$K = 1/6 [2 + (D/2/h)^2]$$

| | | |
|----------------------|---|-------------------------|
| 使用材料 | : | SCMV4 |
| 設計圧力 P | : | 50 kg/cm ² |
| 設計温度 | : | 400 °C |
| 鏡板の内側の長径 D | : | 1300 mm |
| 鏡板の内側の短径の2分の1 h | : | 325 mm |
| 形状によって定まる係数 K | : | 1 |
| 許容引っ張り応力 σ_s | : | 11.9 kg/mm ² |
| 鏡板の厚さ t_s | : | 40 mm |
| 溶接継手の効率 η | : | 1.0 |
| 最小厚さ t_1 | : | 2.5 mm |
| 最小厚さ t_2 | : | 27.43 mm |
| t_1, t_2 の大きい値 t | : | 27.43 mm |

 $t_s \geq t$ 、よって十分である。

(3) 圧力容器管台の厚さ

(a) 「特定設備検査規則」第12条1号イ(1)(i): 「内面に圧力を受ける円筒胴の胴板」に準ずる。(胴板の最小厚さ \leq 内径の4分の1)

$$t_2 = PDi / (200 \sigma_s \eta - 1.2P)$$

| | ヘリウムガス出入口管台 | マンホール管台 |
|---------------------|-------------|-------------------------|
| 使用材料 | : | SFVAF22B |
| 設計圧力 P | : | 50 kg/cm ² |
| 設計温度 | : | 400 °C |
| 管台の内径 D_i | : | 283.7 mm |
| 許容引っ張り応力 σ_s | : | 12.1 kg/mm ² |
| 管台の厚さ t_s | : | 40 mm |
| 溶接継手の効率 η | : | 1.0 |
| 最小厚さ t | : | 6.02 mm |

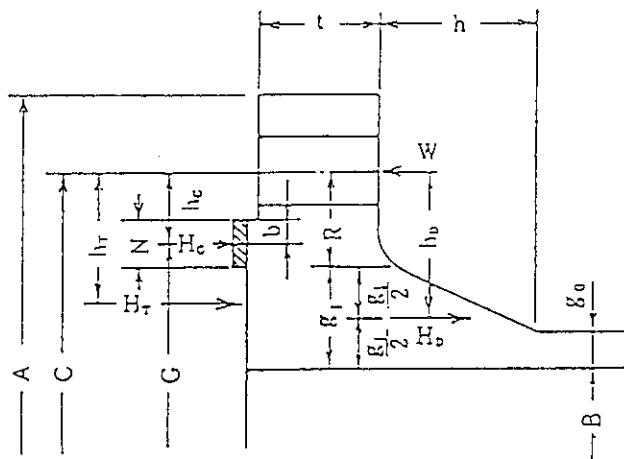
 $t_s \geq t$ 、よって十分である。

(4) フランジの厚さ

「特定設備検査規則」第12条第2項

J I S B 8 2 4 3 附属書2 フランジの応力計算方法

(内圧を受けるフランジ) 一体形フランジ



| | |
|-----------|-----------------|
| フランジ使用材料 | S F V A F 2 2 B |
| 胴使用材料 | S C M V 4 |
| ボルト使用材料 | S N B 1 6 |
| ガスケット使用形式 | うず巻形ガスケット |
| 座面の形状 1 a | |

| | | |
|-----------------|--|---------|
| 最高使用圧力 | P (kg/cm ²) | 5 0 |
| 最高使用温度 | (°C) | 4 0 0 |
| フランジの 許容引張応力 | 常温 σ_{ts} (kg/mm ²) | 1 3 . 3 |
| | 最高使用温度 σ_t (kg/mm ²) | 1 2 . 1 |
| ボルトの許容引張応力 | 常温 σ_b (kg/mm ²) | 1 5 . 4 |
| | 最高使用温度 σ_{bs} (kg/mm ²) | 1 5 . 4 |
| 胴の材料の 許容引張応力 | 常温 σ_n (kg/mm ²) | 1 3 . 1 |
| | 最高使用温度 σ_{ns} (kg/mm ²) | 1 1 . 9 |

| | | |
|-----------|--------|---------------|
| フランジの外径 | A (mm) | 1 8 2 0 |
| フランジの内径 | B (mm) | 1 3 0 0 |
| ボルト中心円の直径 | C (mm) | 1 6 8 0 |
| ガスケット有効径 | G (mm) | 1 3 8 4 . 0 6 |

| | | | |
|--|-----------------------------------|------------------------------------|---------|
| ハブ先端の厚さ | g。 | (mm) | 40 |
| フランジ背面のハブの厚さ | g ₁ | (mm) | 100 |
| ハブの長さ | h | (mm) | 180 |
| ボルト呼び | | | M6 4×4 |
| ボルト本数 | n | | 40 |
| ボルト谷径 | d _b | (mm) | 59.67 |
| ガスケット接触面の外径 | G _s | (mm) | 1400.00 |
| ガスケット接触面の幅 | N | (mm) | 20.00 |
| ガスケット係数 | m | | 3.00 |
| 最小設計締付圧力 | y | (kg/mm ²) | 7.03 |
| ガスケット座の基本幅 | b ₀ | (mm) | 10.00 |
| ガスケット座の有効幅 | b | (mm) | 7.97 |
| 内圧による全荷重 | H | (kg) | 752263 |
| ガスケットにかける圧縮力 | H _p | (kg) | 103964 |
| 使用状態での最小ボルト荷重 | W _{m1} | (kg) | 856227 |
| ガスケット締付最小荷重 | W _{m2} | (kg) | 243623 |
| ボルトの 所要総断面積 | 使用状態 | A _{m1} (mm ²) | 55599 |
| | ガスケット締付時 | A _{m2} (mm ²) | 15820 |
| | いずれか大きい値 | A _m (mm ²) | 55599 |
| 実際のボルト総断面積 | A _b (mm ²) | | 111857 |
| A _b > A _m 、よって十分である。 | | | |

| | | | |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| ボルト荷重 | 使用状態 | W ₀ (kg) | 856227 |
| | ガスケット締付時 | W _e (kg) | 1289411 |
| 距離 | | R (mm) | 90.00 |
| 荷重 (kg) | モーメントアーム (mm) | モーメント (kg·mm) | |
| H _D = 663661 | h _D = 140.00 | M _D = 92912540 | |
| H _C = 103964 | h _C = 147.97 | M _C = 15383553 | |
| H _T = 88602 | h _T = 168.99 | M _T = 14972852 | |
| フランジに 作用する モーメント | 使用状態 | M ₀ (kg·mm) | 123268945 |
| | ガスケット締付時 | M _e (kg·mm) | 190793998 |
| フランジの内外径の比 | | K | 1.4000 |
| 形状係数 | h ₀ | | 228.04 |

| | | |
|----------|-----------|-----------------------|
| 係 数 | h/h_0 | 0.7893 |
| 係 数 | g_1/g_0 | 2.5000 |
| ハブ応力修正係数 | f | 1.0000 |
| 係 数 | F | 0.7471 |
| 係 数 | T | 1.7542 |
| 係 数 | U | 6.5221 |
| 係 数 | V | 0.1276 |
| 係 数 | Y | 5.9351 |
| 係 数 | Z | 3.0833 |
| 係 数 | d | 18.6495×10^5 |
| 係 数 | e | 0.0033 |
| フランジの厚さ | t (mm) | 160.00 |
| 係 数 | L | 1.0907 |

| 使用状態におけるフランジの強さ | | |
|---|---------------------------------|------------------------------|
| 応力の計算値 | (kg/mm ²) | 許容引張応力 (kg/mm ²) |
| ハブの軸方向応力 $\sigma_H = 8.7$ | $1.5\sigma_t = 18.1$ | |
| | $1.5\sigma_{nt} = 17.8$ | |
| フランジの半径方向応力 $\sigma_R = 5.8$ | | $\sigma_t = 12.1$ |
| フランジの周方向応力 $\sigma_T = 4.2$ | | $\sigma_t = 12.1$ |
| 組合せ応力 $(\sigma_H + \sigma_R)/2 = 7.3$ | | $\sigma_t = 12.1$ |
| | $(\sigma_H + \sigma_T)/2 = 6.5$ | $\sigma_t = 12.1$ |
| ガスケット締付時のフランジの強さ | | |
| 応力の計算値 | (kg/mm ²) | 許容引張応力 (kg/mm ²) |
| ハブの軸方向応力 $\sigma_H = 13.5$ | $1.5\sigma_{ts} = 19.9$ | |
| | $1.5\sigma_{nts} = 19.6$ | |
| フランジの半径方向応力 $\sigma_R = 9.0$ | | $\sigma_{ts} = 13.3$ |
| フランジの周方向応力 $\sigma_T = 6.3$ | | $\sigma_{ts} = 13.3$ |
| 組合せ応力 $(\sigma_H + \sigma_R)/2 = 11.3$ | | $\sigma_{ts} = 13.3$ |
| | $(\sigma_H + \sigma_T)/2 = 9.9$ | $\sigma_{ts} = 13.3$ |
| よって十分である。 | | |

(5) 反応管の厚さ

「特定設備検査規則」には、反応管外管の材料であるハステロイ X R の許容引っ張り応力が規定されていない。よって、以下の計算は参考扱いとする。

(a) 「特定設備検査規則」第14条1号：内面に圧力を受ける管

$$t_1 = PD_o / (200 \sigma_a \eta - 0.8P)$$

使用材料 : ハステロイ X R

設計圧力 P : 7 kg/cm²

設計温度 : 900 °C

管の外径 D_o : 165.2 mm

許容引っ張り応力 σ_a : 0.37 kg/mm²

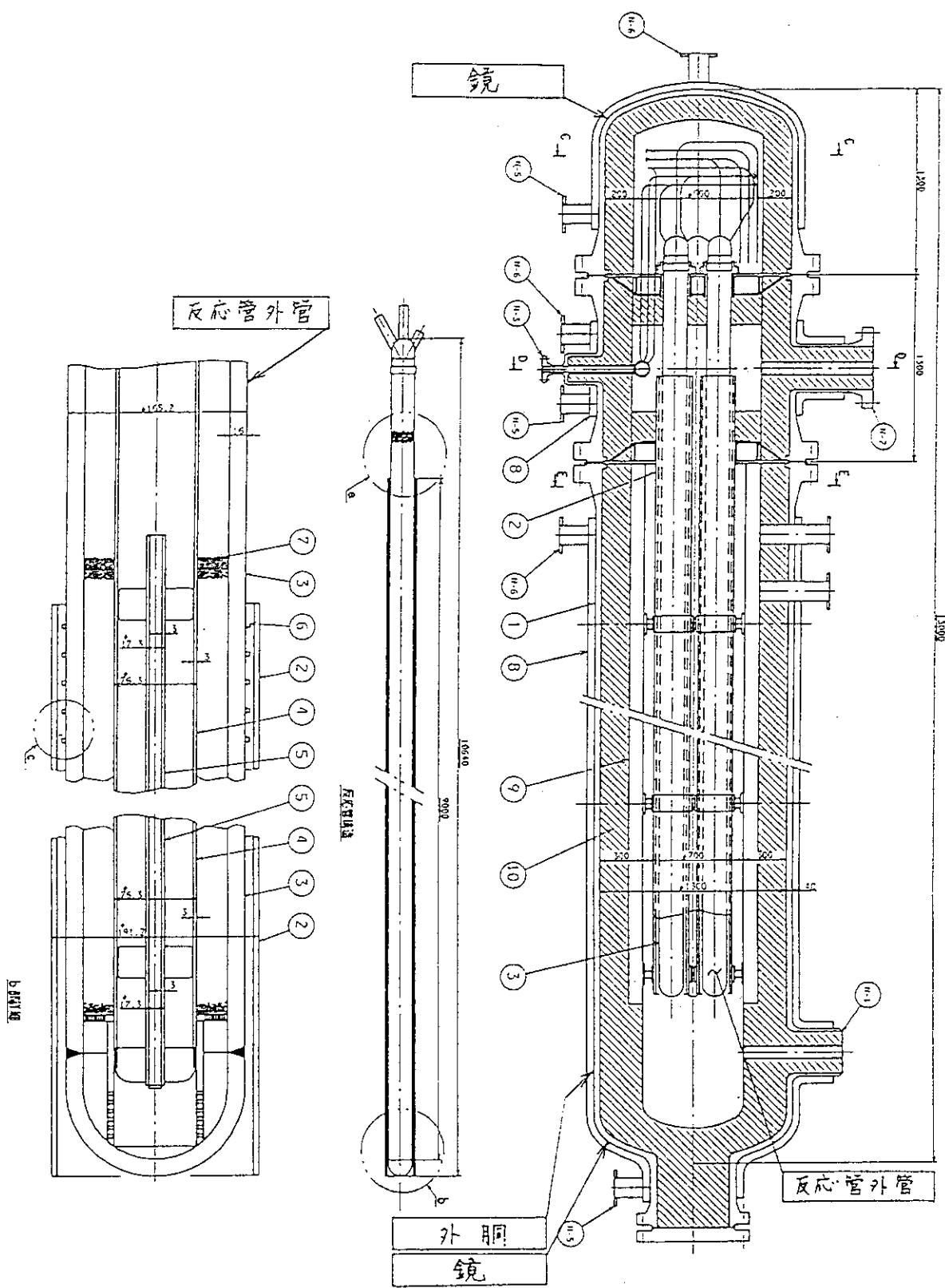
管の厚さ t_s : 16 mm

溶接継手の効率 η : 1.0

最小厚さ t₁ : 14.53 mm

t_s ≥ t₁、よって十分である。

※ σ_a の値はハステロイ X R の最大許容引っ張り強さ S₀ による。



6. 計測点の検討

本章では、2章で述べた試験項目を基にして、水蒸気改質器に設置する計測機器について検討した結果を述べる。炉外技術開発試験の主要内容は以下の通りである。ここで、水蒸気改質器に係わる試験内容を一覧で示してある。

(1) 定常運転試験

- ・水蒸気改質器の伝熱流動特性
 - －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
 - －脱硫反応の把握
 - －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

Table 6.1～6.3に試験項目とそれに対応した計測点の設置目的、計測対象、検出器の種類、設置場所、点数等を示す。また、熱電対の設置位置をFig. 6.1に示す。

Table 6.1 計測点の検討結果（1／3）

| No | 試験項目 | 試験内容 | 計測点の設置目的 | 計測対象 | 検出器の種類 | 設置場所 | 計測点数 | 備考 |
|----|--------|--------|----------------|----------------|--------|--------------------|---|------------------------------|
| 1 | 伝熱流動特性 | 対流伝熱特性 | ヘリウム側熱伝達特性 | ヘリウムガス温度 | 熱電対 | 流路管と反応管の間のヘリウムガス流路 | 反応管 1 本あたり 軸方向 : 10 点 周方向 : 3 点 計 : 30 点 | ヘリウムガスの圧力、流量は、プロセス計装にて計測される。 |
| | | | 流路管外表面温度 | 熱電対 | | 流路管外表面 | 反応管 1 本あたり 軸方向 : 10 点 周方向 : 1 点 計 : 10 点 | |
| | | | 流路管内表面温度 | 熱電対 | | 流路管内表面 | 反応管 1 本あたり 軸方向 : 10 点 周方向 : 3 点 計 : 10 点 | |
| | | | 反応管外管ヘリウム側表面温度 | 熱電対 | | 反応管外管ヘリウム側表面 | 反応管 1 本あたり 軸方向 : 10 点 周方向 : 3 点 計 : 30 点 | |
| | | | 触媒層内熱伝達特性 | 反応管外管ヘリウム側表面温度 | 熱電対 | 同上 | 同上 | |
| | | | 反応管外管触媒層側表面温度 | 熱電対 | | 反応管外管触媒層側表面 | 反応管 1 本あたり 軸方向 : 10 点 周方向 : 1 点 計 : 10 点 | |
| | | | 触媒層内合成ガス温度 | 熱電対 | | 触媒層内 | 反応管 1 本あたり 軸方向 : 10 点 周方向 : 3 点 計 : 30 点 | |
| | | | 反応管内管触媒層側表面温度 | 熱電対 | | 反応管内管触媒層側表面 | 反応管 1 本あたり 軸方向 : 10 点 周方向 : 1 点 計 : 10 点 | |

Table 6.2 計測点の検討結果（2／3）

| No | 試験項目 伝熱流動特性 (前項の続き) | 試験内容 対流伝熱特性 | 計測点の設置目的 反応管内管内熱伝達 ガス温度 | 計測対象 熱電対 | 検出器の種類 反応管内管内の 合成ガス流路 | 設置場所 反応管内管内表 面 | 計測点数 反応管1本あたり 軸方向：5点 周方向：3点 計：15点 | 備考 合成ガスの 圧力、流量 は、プロセス 計装にて計 測される。 |
|----|---------------------------|--|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|---|---|--|
| 1 | 輻射伝熱特性 | 流路管より反応管外 管への輻射伝熱特性 シリーブ管より反応 管内管への輻射伝熱 特性 | 反応管内管内表面 温度 | 熱電対 | 反応管内管内表 面 | 反応管1本あたり 軸方向：10点 周方向：3点 計：30点 | | |
| | | | 流路管内表面温度 反応管外管へリウ ム側表面温度 | 熱電対 | 前出 | 前出 | | |
| | | | シリーブ管外表面 温度 | 熱電対 | シリーブ管外表 面 | 反応管1本あたり 軸方向：10点 周方向：1点 計：10点 | | |
| | | | 反応管内管内表面 温度 | 熱電対 | シリーブ管外表 面 | 反応管1本あたり 軸方向：10点 周方向：1点 計：10点 | | |
| | 圧力損失特性 | ヘリウムガスの圧力 損失特性 | ヘリウムガスの出 入口差圧 | 差圧計 | 水蒸気改質器の 入口 | ヘリウムガス出 入口差圧：1点 | | |
| | | | 合成ガスの流路差 圧 | 差圧計 | 水蒸気改質器の 下端 | 合成ガス出入 口差圧：1点 合成ガス入口とス リーブ管下端差 圧：1点 | | |
| | | | 流体誘起振動 特性 | 反応管の振動 | 変位計 加速度計 | 反応管下端 | 変位計：2点 加速度計：2点 | |
| 2 | 化学反応特性 | 水蒸気改質反 応特性 | 触媒層内での改質反 応特性 | 合成ガス側出入 口 ガス組成 | ガスサンプリ ング | 水蒸気改質器の 出入口 | 水蒸気改質器の出 入口各1点 | 合成ガスの出 圧力、流量 は、プロセス 計装にて計 測される。 |
| | | | 触媒層内合成ガス 温度 | 熱電対 | 前出 | 前出 | | |

Table 6.3 計測点の検討結果（3／3）

| No | 試験項目 | 試験内容 | 計測点の設置目的 | 検出器の種類 | 設置場所 | 計測点数 | 備考 | |
|----|---------------|---------------|--|--|---|--|----|--|
| 3 | 水素透過特性 | 反応管の水素透過特性 | 水蒸気改質器出入口 ヘリウムガス出入 口ガス組成 | ガスサンプリング | 水蒸気改質器の 出入口 各1点 | | | |
| 4 | 耐久性並びに 信頼性 | 反応管の供用 後検査 | 反応管の供用後検査とし て、供用中に反応管 に加わった荷重条件 の経時変化を記録す る。 | 合成功外管側出入口 ガス組成 反応管外管触媒層 側表面温度 反応管外管ヘリウ ム側表面温度 反応管外管の内外 圧力計 差圧 反応管外管触媒層 側表面温度 反応管外管ヘリウ ム側表面温度 ヘリウムガス出入 口ガス組成 合成功外管側出入口 ガス組成 | ガスサンプリ ング 熱電対 熱電対 熱電対 圧力計 水蒸気改質器の 出入口 各1点 熱電対 熱電対 ガスサンプリ ング ガスサンプリ ング | 前出 前出 前出 前出 前出 前出 前出 前出 前出 前出 | | |

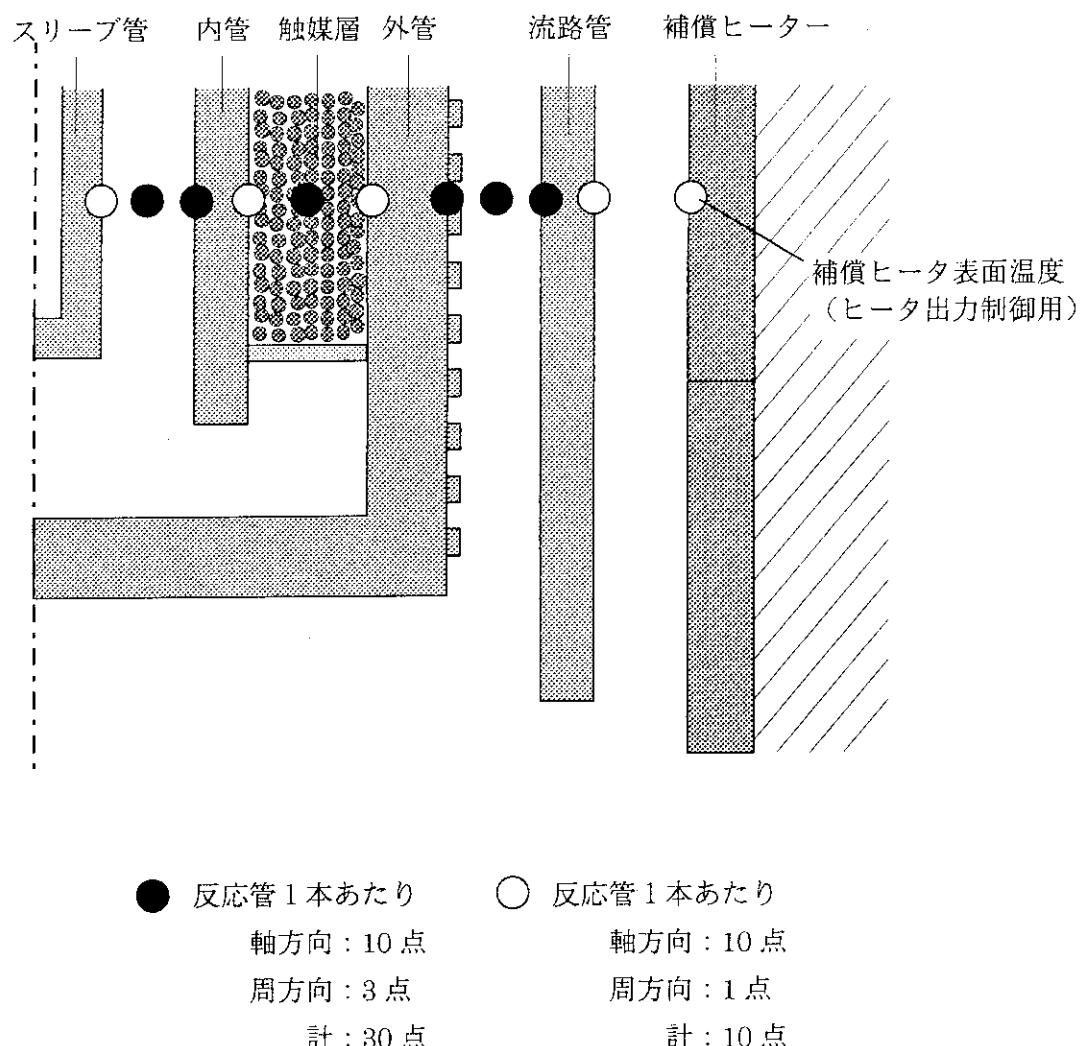


Fig.6.1 热伝対取り付け位置

7. 機器仕様

本章では、これまでの検討結果をまとめた機器仕様を記す。

(1) 反応管が1本の場合

| 項目 | | 単位 | 仕様 |
|---------------|-------------------------|----------------------|---|
| 機器名称 | | — | 水蒸気改質器 |
| 形式 | | — | 流路管付きバイオネット型 |
| 基数 | | — | 1 |
| 設計交換熱量 | | kW/基 | 96 |
| 最高使用圧力(管側／胴側) | | kg/cm ² G | 7/50 |
| 最高使用温度(管側／胴側) | | °C | 900/400 |
| 使用条件 | 流体名(管側／胴側) | | プロセスガス／ヘリウム |
| | 流量(管側／胴側) | | kg/s 0.055/0.069 |
| | 出入口温度 (管側／胴側) | 入口 | 450/880 |
| | | 出口 | 620/605 |
| | CH ₄ (入口／出口) | wet mol% | 18.7/5.44 |
| | H ₂ O(入口／出口) | wet mol% | 78.3/47.8 |
| | H ₂ (入口／出口) | wet mol% | 2.97/37.1 |
| | CO(入口／出口) | wet mol% | 0.03/3.92 |
| | CO ₂ (入口／出口) | wet mol% | 0.0/5.75 |
| | 圧力損失(管側／胴側) | kg/cm ² | 5.40/0.18 |
| 主要寸法 | ライナ(内径×板厚) | | mm 360×5 |
| | 胴(内径×板厚) | | mm 960×30 |
| | 反応管外管(外径×板厚) | | mm 165.2×16 |
| | 反応管内管(外径×板厚) | | mm 76.3×3 |
| | スリーブ管(外径×板厚) | | mm 17.3×3 |
| | 流路管(外径×板厚) | | mm 185.2×5 |
| | 反応管外管外表面矩形突起 | | mm 0.5H×0.5W×10pitch |
| | 触媒粒子径 | | mm 3 |
| | 触媒層サイズ | | mm 8770H×28.45gap |
| | SV | | Nm ³ /m ³ h 3150 |
| | 反応管本数 | | 本 1 |
| | 補償ヒータブロック(内径×板厚) | | mm 370×50 |
| 材 料 | 全長又は全高 | | mm 13000H |
| | ライナ | | インコロイ 800 H |
| | 胴 | | SCMV4 |
| | 反応管外管 | | ハステロイ XR |
| | 反応管内管 | | インコロイ 800 H |
| | スリーブ管 | | SUS304TP |
| | 流路管 | | インコロイ 800 H |
| | 内部断熱材 | | カオウール |

(2) 反応管が3本の場合

| 項目 | 単位 | 仕様 |
|---------------|--------------------------|--|
| 機器名称 | — | 水蒸気改質器 |
| 形式 | — | 流路管付きバイオネット型 |
| 基数 | — | 1 |
| 設計交換熱量 | kW/基 | 288 |
| 最高使用圧力(管側／胴側) | kg/cm ² G | 7/50 |
| 最高使用温度(管側／胴側) | °C | 900/400 |
| 使用条件 | 流体名(管側／胴側) | — プロセスガス／ヘリウム |
| | 流量(管側／胴側) | kg/s 0.165/0.207 |
| | 出入口温度 (管側／胴側) | 入口 °C 450/880 出口 °C 620/605 |
| 組成 | CH ₄ (入口／出口) | wet mol% 18.7/5.44 |
| | H ₂ O (入口／出口) | wet mol% 78.3/47.8 |
| | H ₂ (入口／出口) | wet mol% 2.97/37.1 |
| | CO (入口／出口) | wet mol% 0.03/3.92 |
| | CO ₂ (入口／出口) | wet mol% 0.0/5.75 |
| | 圧力損失(管側／胴側) | kg/cm ² 5.40/0.18 |
| 主要寸法 | ライナ(内径×板厚) | mm 700×5 |
| | 胴(内径×板厚) | mm 1300×40 |
| 反応管 | 反応管外管(外径×板厚) | mm 165.2×16 |
| | 反応管内管(外径×板厚) | mm 76.3×3 |
| | スリーブ管(外径×板厚) | mm 17.3×3 |
| | 流路管(外径×板厚) | mm 185.2×5 |
| | 反応管外管外表面矩形突起 | mm 0.5H×0.5W×10pitch |
| | 触媒粒子径 | mm 3 |
| | 触媒層サイズ | mm 8770H×28.45gap |
| | S V | Nm ³ /m ³ h 3150 |
| | 反応管本数 | 本 3 |
| | 補償ヒータロック(内径×板厚) | mm 710×50 |
| | 全長又は全高 | mm 1300H |
| 材 料 | ライナ | — インコロイ 800 H |
| | 胴 | — SCMv4 |
| | 反応管外管 | — ハステロイ X R |
| | 反応管内管 | — インコロイ 800 H |
| | スリーブ管 | — SUS304TP |
| | 流路管 | — インコロイ 800 H |
| | 内部断熱材 | — カオウール |

8. 補償ヒータブロックの検討

8. 1 設置目的

水蒸気改質器に流入したヘリウムガスの熱は、反応管に伝わり水蒸気改質反応に用いられる。

一方、ヘリウムガスと水蒸気改質器の外部との間には温度差があり、ヘリウムガスの熱の一部は水蒸気改質器の外胴を伝わって外部に放熱される。

ヘリウムガスの外部放熱量が多ければ所定の水蒸気改質反応が阻害される恐れがあるため、ヘリウムガスの外部放熱量を抑える必要がある。

ヘリウムガスとその外周との温度差がなければ外向きの熱移動が生じないことから、ヘリウムガスの外周をヘリウムガスとほぼ等温に維持することによってヘリウムガスの外部放熱量を抑えることができる。

よって、ヘリウムガスの外周に補償ヒータブロックを設け、これを発熱させることによってヘリウムガスの外周をヘリウムガスとほぼ等温に維持させ、ヘリウムガスの外部放熱量を抑える。

なお、補償ヒータブロックには、断熱材に金属発熱体（コイルヒータ）を埋め込んだものを用いる。（Fig. 8. 1参照）

8. 2 ヒータ容量の検討

補償ヒータブロックの温度をヘリウムガス温度に維持した場合、補償ヒータブロックと水蒸気改質器の外部との間に温度差が生じる。

温度差と熱抵抗及び伝熱面積から機器放熱量が求められるが、これに見合った電力を補償ヒータブロックに与え続けなければ、補償ヒータブロックの温度をヘリウムガス温度に維持することはできない。

よって、機器放熱量が補償ヒータブロックの正味の容量となる。実際の補償ヒータブロックの容量は、機器放熱量に50%余裕を取った値とする。

機器放熱量の算出に用いた計算式を以下に示す。計算モデルをFig. 8. 2に示す。

なお、本計算では安全側に断熱材表面温度をヘリウムガス温度と等温とし、また、外部は水冷ジャケットにて冷却されているものとした。

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L \lambda_{12}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L \lambda_{23}} + \frac{1}{2\pi r_3 L \alpha}}$$

q 機器放熱量 (kcal/h)

T₁ 断熱材内表面温度 (°C)

T₄ 冷却水平気温度 (°C)

r₁ 断熱材内半径 (m)

r_2 外胴内半径 (m)
 r_3 外胴外半径 (m)
 λ_{12} 断熱材熱伝導率 (kcal/hm°C)
 λ_{23} 外胴熱伝導率 (kcal/hm°C)
 α 外胴外表面熱伝達率 (kcal/hm²°C)
 L 伝熱部長さ (m)

8. 3 検討結果

(1) 反応管 1 本の場合

| | | |
|----------------|-----------|----------------------------|
| T_1 | 断熱材内表面温度 | : 880 °C |
| T_4 | 冷却水平均温度 | : 37 °C (32 → 42) |
| r_1 | 断熱材内半径 | : 0.235 m |
| r_2 | 外胴内半径 | : 0.45 m |
| r_3 | 外胴外半径 | : 0.48 m |
| λ_{12} | 断熱材熱伝導率 | : 0.64 kcal/hm°C |
| λ_{23} | 外胴熱伝導率 | : 17.3 kcal/hm°C |
| α | 外胴外表面熱伝達率 | : 1000 kcal/hm²°C |
| L | 伝熱部長さ | : 9 m |
| q | 機器放熱量 | : 46700 kcal/h (54 kW) |
| | | <u>補償ヒータブロック容量 : 90 kW</u> |

(2) 反応管 3 本の場合

| | | |
|----------------|-----------|-----------------------------|
| T_1 | 断熱材内表面温度 | : 880 °C |
| T_4 | 冷却水平均温度 | : 37 °C (32 → 42) |
| r_1 | 断熱材内半径 | : 0.405 m |
| r_2 | 外胴内半径 | : 0.65 m |
| r_3 | 外胴外半径 | : 0.69 m |
| λ_{12} | 断熱材熱伝導率 | : 0.64 kcal/hm°C |
| λ_{23} | 外胴熱伝導率 | : 17.3 kcal/hm°C |
| α | 外胴外表面熱伝達率 | : 1000 kcal/hm²°C |
| L | 伝熱部長さ | : 9 m |
| q | 機器放熱量 | : 64100 kcal/h (75 kW) |
| | | <u>補償ヒータブロック容量 : 120 kW</u> |

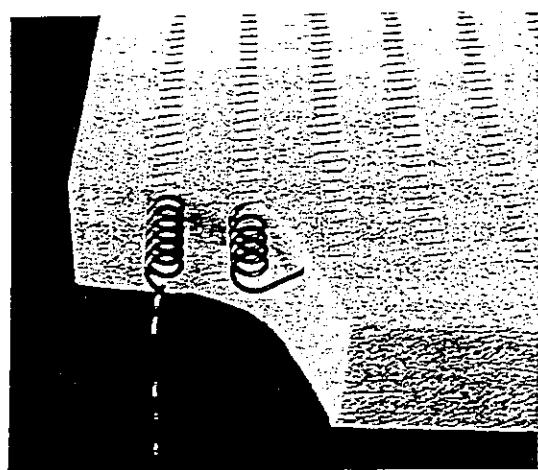


Fig.8.1 補償ヒータブロックの構造

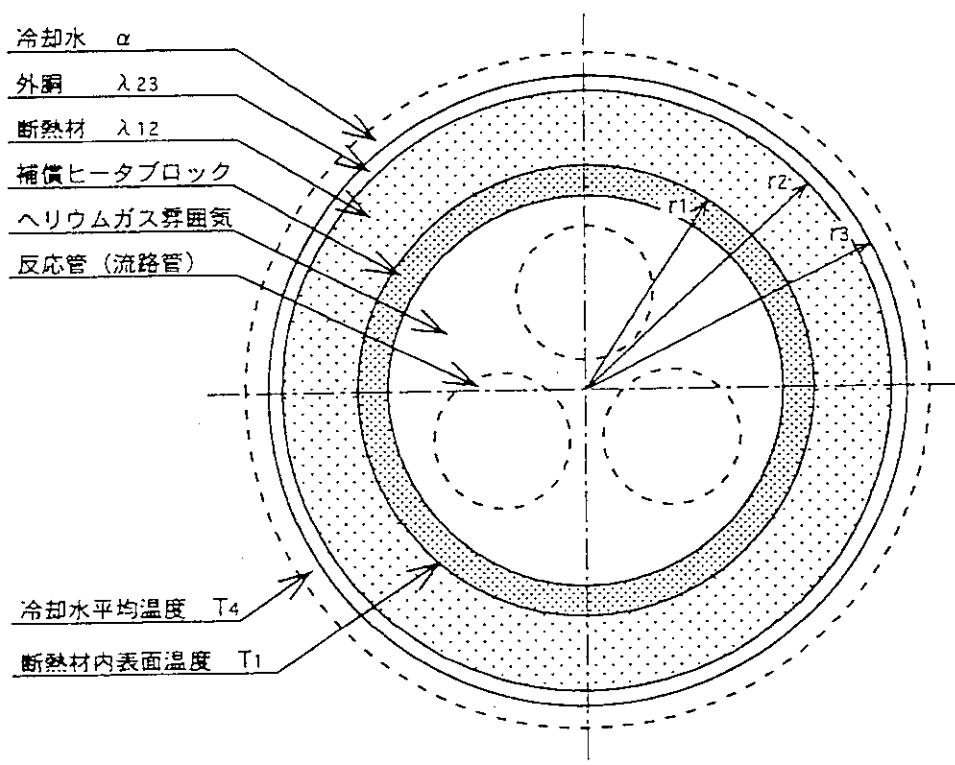


Fig.8.2 補償ヒータブロックの容量計算モデル

9. あとがき

本報告は、HTTRに接続する熱利用系として考えられている水蒸気改質システムの炉外技術開発試験装置のうち、水蒸気改質器についての合理化設計の成果をまとめたものである。合理化の大きな柱は、水蒸気改質器の反応管を3本から1本に減らすことであるが、そのほかのシステムの部分でHENDELから使用可能な機器を移設したり、計測制御系機器の選定を見直したりすることによっても大幅な合理化がなされている。また、水蒸気改質システムの他の機器の設計も同時に進められており、その結果も逐次レポートとしてまとめられる予定である。

謝 辞

本設計に当たっては、高温機器開発試験室の小磯浩司氏より水蒸気改質反応について、また、HENDEL管理室の皆様からはシステム設計について貴重な意見、助言等をいただいた。ここに記して謝意を示す。

9. あとがき

本報告は、HTTRに接続する熱利用系として考えられている水蒸気改質システムの炉外技術開発試験装置のうち、水蒸気改質器についての合理化設計の成果をまとめたものである。合理化の大きな柱は、水蒸気改質器の反応管を3本から1本に減らすことであるが、そのほかのシステムの部分でHENDから使用可能な機器を移設したり、計測制御系機器の選定を見直したりすることによっても大幅な合理化がなされている。また、水蒸気改質システムの他の機器の設計も同時に進められており、その結果も逐次レポートとしてまとめられる予定である。

謝 辞

本設計に当たっては、高温機器開発試験室の小磯浩司氏より水蒸気改質反応について、また、HEND管理室の皆様からはシステム設計について貴重な意見、助言等をいただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- (1) 日野竜太郎、鈴木邦彦、羽賀勝洋 他7名：「H E N D E LによるHTTR熱利用系炉外実証試験の検討」、JAERI-Review 95-016(1995).
- (2) HTTR原子炉開発室： 私信（第5回熱利用系実証試験検討委員会資料、平成6年12月26日）
- (3) K. HADA et al. : "Plant Arrangement and Operational Procedure of HTTR with Heat Utilization System", 1st Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme of Design and Evaluation of Heat Utilization Systems for the HTTR. Tokai Research Establishment of the JAERI, 9-11 Nov.(1994).
- (4) S. Saito et al. : "Design of High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI 1332(1994).
- (5) 羽田一彦他：日本原子力学会誌、38、834、(1996)
- (6) 「技術資料－流体の熱物性値集」、日本機械学会、p. 35-59(1991).
- (7) 尾花英朗：「熱交換器設計ハンドブック」第2版、P672～673, 675～676(1994).
- (8) Gnielinski, v : Forsch. -Ing-Wes. 41(1975)Nr. 5. S. 145/153
- (9) 「管路・ダクトの流体抵抗」、日本機械学会、p53～55(1980).
- (10) Vornehm, L. : Z. VDI 80(1936)22 S. 702.
- (11) 尾花英朗：「熱交換器設計ハンドブック」第2版、P968～972(1994).
- (12) 尾花英朗：「熱交換器設計ハンドブック」第2版、P674～678(1994).
- (13) 「化学工学便覧」改訂五版、化学工学協会、P261, P337(1992).
- (14) 宮杉武他：「熱交換器型水蒸気改質器の装置特性」石油学会誌、Vol25, No. 4, P261(1982).
- (15) 「大型構造機器実証試験ループ（HENDEL）の試験部による高温ガス炉用燃料体・炉内構造物の実証試験」日本原子力研究所、JAERI 1333, P18, 41～44(1995).
- (16) 「化学工学便覧」改訂5版、化学工学協会、P242(1992).
- (17) 尾花英朗：「熱交換器設計ハンドブック」第2版、P675～676(1994).
- (18) 「大型構造機器実証試験ループ（HENDEL）の試験部による高温ガス炉用燃料体・炉内構造物の実証試験」日本原子力研究所、JAERI 1333, P18, 41～44(1995).
- (19) 尾花英朗：「熱交換器設計ハンドブック」第2版、P672～673(1994).
- (20) 「化学工学便覧」改訂5版、化学工学協会、P355～356(1992).
- (21) 「大型構造機器実証試験ループ（HENDEL）の試験部による高温ガス炉用燃料体・炉内構造物の実証試験」日本原子力研究所、JAERI 1333, P41～44(1995).
- (22) AIChE Journal, Vol. 35, No. 1, p100～p101(1989), Fig. 3, Fig. 5