

JAERI-M
92-070

ITERブランケット用冷却水流量配分試験装置の製作

1992年5月

吉田 浩・榎枝 幹男・平田 慎吾^{*}・怡土 英毅^{*}

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

JAERI-M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。

JAERI-M 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, 1992

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

ITER ブランケット用冷却水流量配分試験装置の製作

那珂研究所核融合工学部トリチウム工学研究室

吉田 浩・榎枝 幹男・平田 慎吾*
怡土 英毅*

(1992年4月17日受理)

国際熱核融合実験炉 (ITER) 用ブランケットとしてわが国が開発を担当している多層ペブル充填型ブランケットでは、増殖材領域 (Li_2O 層) 3層、中性子増倍材領域 (Be層) 9層、冷却材領域 (軽水冷却パネル) 5層が交互に配列された構造となっている。ブランケット内各部の温度分布は、プラズマの出力密度に応じて設計した各領域の厚みによってほぼ一義的に定まっているため、各冷却パネルに供給される冷却水の流量配分制御は極めて信頼性が高くかつ多少のプラズマ出力変動に対応できる融通性を備えた方式を採用する必要がある。

標記試験装置は、模擬冷却パネル3層（並列）、ヒーター、アフタークーラー、冷却水加圧器、冷却水ヘッダー等から構成されたものであり、ITERブランケット設計条件（温度：100°C以下、圧力：1.5MPa）におけるヘッダー部の流量配分・制御特性を幅広く測定することが可能となっていいる。

Test Apparatus for ITER Blanket
Cooling Water Distributor Design

Hiroshi YOSHIDA, Mikio ENOEDA, Shingo HIRATA^{*}
and Hideki ITO^{*}

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 17, 1992)

Current Japanese breeding blanket concept being developed for the ITER driver blanket is comprised of three breeding layers, nine multiplier layers and five water cooling panels. In order to meet design requirements of tritium release efficiency and material temperature restrictions, configuration of these layers should be designed to achieve optimum temperature profiles in the radial direction of the blanket. Such temperature conditions are attained by appropriate water flow rate distributions in each cooling panel. Furthermore, the cooling panel must be designed to accomodate variation of D-T burning plasma density during ITER operation.

We have developed an engineering test apparatus composed of three parallel cooling panel models. It was designed to examine performance of orifice type passive distributors for cooling header design. The apparatus can be operated under ITER blanket design conditions: temperature range; 60 - 100°C, water pressure; 1.5MPa, flow rate; 0.5-5m/s, pressure drop; up to 50kPa, heat flux of heater; 20-200kW/m².

* Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

Keywords: ITER Breeding Blanket, Breeder, Multiplier,
Cooling Panel, Cooling Header, Temperature
Control, Water Distributor, Orifice, Passive Control

目 次

1. はじめに	1
2. 試験装置の概要	2
2.1 全体構成	2
2.2 主要機器	2
2.3 主要計器	3
2.4 安全機構	4
3. 設計検討	4
3.1 ITERブランケット冷却パネル条件	4
3.2 試験体寸法と冷却水流量範囲の設定	4
3.3 試験体ヒータ容量の設定	5
3.4 オリィフィスの検討	6
3.5 アフタークーラ所要伝熱面積	6
4. 試験装置の流動特性	7
4.1 配管系統流動特性	7
4.2 オリィフィス部流動特性	7
4.3 試験体部流動特性	8
4.4 ヘッダー部流動特性	8
5. 試運転	9
5.1 機能及び性能試験	9
5.2 性能試験条件	10
5.3 試験結果	10
6. まとめ	11
参考文献	11

Content

1.	Introduction	1
2.	Description of Test Apparatus	2
2.1	General Layout	2
2.2	Major Components Layout	2
2.3	Major Instruments Layout	3
2.4	Interlock System Layout	4
3.	Design	4
3.1	ITER Blanket Cooling Panel Design Conditions	4
3.2	Cooling Panel Model and Its Water Flow Rate Design	4
3.3	Heater Design for Cooling Panel Model	5
3.4	Orifice Design	6
3.5	After-Cooler Design	6
4.	Flow Characteristics	7
4.1	Hydraulics in the Piping System	7
4.2	Hydraulics at the Orifice	7
4.3	Hydraulics in the Cooling Panel Model	8
4.4	Hydraulics in the Cooling Water Header	8
5.	Results of Test Operation	9
5.1	Functional Tests of Components and Instruments	9
5.2	System Performance Tests	11
6.	Conclusions	10
	References	11

図、表リスト

- 図1 ITER ブランケット（日本案）の断面構造、核発熱率及び温度分布
(1991年設計段階の外側ブランケットモデル)
- 図2 冷却水流量配分試験装置のP & I フローシート
- 図3 冷却水循環ポンプの予想性能曲線
- 図4 系統差圧測定系の導圧配管構成
- 図5 冷却水（軽水）密度の温度変化
- 図6 冷却水（軽水）粘度の温度変化
- 図7 試験体における冷却水流量と流速
- 図8 試験体における冷却水流量と圧力損失
- 図9 オリィフィス圧損係数と絞り面積比
- 図10 オリィフィス圧損係数と絞り直径比
- 図11 試験装置配管系の立体配置概念図
- 図12 オリィフィス部の冷却水流速（予想値）
(配管口径を22.2mmとした場合)
- 図13 オリィフィス部の冷却水レイノルズ数（予想値）
(配管口径を22.2mmとした場合)
- 図14 オリィフィス部の冷却水圧力損失（予想値）
(配管口径を22.2mmとした場合)
- 図15 試験装置各部の冷却水レイノルズ数（予想値）
- 図16 管摩擦係数データ[4, 5]
- 図17 管摩擦係数データ（ムーディ線図）[4, 5]
- 図18 試験体の冷却水圧力損失（予想値）
- 図19 試験体の熱伝達率（予想値）
- 図20 急拡大／縮小管の圧力損失係数データ[7]
- 図21 循環ポンプ性能実測値（試運転結果）
- 図22 試験体の圧力損失実測値（試運転結果）
- 図23 オリィフィス部の圧力損失実測値（試運転結果）
- 図24 アフタークーラ性能実測値（試運転結果）

- 表1 a 機器リスト
- 表1 b 機器リスト
- 表2 a 計器リスト
- 表2 b 計器リスト

- 表2 c 計器リスト
表3 a バルブリスト
表3 b バルブリスト
表3 c バルブリスト
表3 d バルブリスト
表4 警報、インターロックリスト
表5 オリイフィス抵抗体の仕様
表6 アフタークーラ設計条件
表7 配管系統の圧力損失評価条件
表8 管挿入物の相当長さ ℓ_e [4]
表9 配管系統の圧力損失（計算結果）
表10 管内壁のあらさ係数kの値の参考値 [5]
表11 試験体における冷却水流動特性（計算結果）
表12 試運転試験条件
表13 a 性能試験結果
表13 b 性能試験結果
表13 c 性能試験結果

1. はじめに

ITER計画では、D-T核燃焼実験に必要となるトリチウム（約60kg／年）の大部分を自給することを目的としたトリチウム生産用ブランケットをその工学試験段階に装着する事を検討している〔1〕。この計画では、エネルギーの回収を目的としているため、比較的リスクが少なく信頼性が高いと想定される低温水冷却（温度100°C以下、圧力1.5MPa）方式の固体増殖ブランケットが開発の第一目標となっている。ITERブランケットに対して日本（増殖材及び増倍材のペブルを充填層として構成）、米国（増殖材及び増倍材をブロック状で構成）、EC及びソ連（増殖材及び増倍材を燃料ピン型に構成）が、それぞれ独自のブランケット構造を提案している〔2,3〕。

わが国が提案しているペブル充填型多層ブランケットの断面構造、核発熱率及び温度分布を図1に示す。増殖材及び増倍材はそれぞれ直径1mm前後のペブルとして独立の充填層を構成しており、冷却パネルはベリリウム層で挟まるように配置されている。

ここでベリリウム層の厚みは、ブランケット内各部の温度分布をそれぞれの許容温度範囲に維持できるように設計されている。本ブランケット概念では、ITERの長期にわたる運転に伴う増殖材及び増倍材の照射損傷（スエリング、割れ等）、核発熱に伴う熱変形（熱膨張、収縮、クリープ、及び割れ等）に対する柔軟性、製作・組み立ての容易性が長所として期待できる半面、ブランケット内温度分布制御、並びに長期にわたる構造信頼性の観点から次の2点がとくに問題になるとを考えられる。

- (1) ブランケット内の発熱率は半径方向に大きく異なるため、半径方向に配置された5つの冷却水パネルに供給される冷却水流量は大幅に異なっている。ブランケット各部の温度を所定の値に維持するためには、冷却水ヘッダー部における正確な流量配分・制御が必要となる。また、ITERでは定常運転中のプラズマ出力密度変動も考えられるので柔軟性のある流量配分制御方式の確立が必要となる。
- (2) ブランケット内の各層の厚み及び温度分布は、増殖材及び増倍材ペブル充填層において充填密度及び充填層有効熱伝導率が一定であるとして設計される。一方、ITERブランケットでは、プラズマのパルス運転による種々の機械的振動や熱膨張収縮が起こることが予想される。特に、第一壁に近い領域の各層の厚みは10mm前後と薄いため、ITERの運転特性を考慮した安定性の高い充填層を実現するためには、使用する増殖材及び増倍材ペブルの材料特性とともに工学規模ブランケットモデルによる充填特性（静的特性及び動的特性）を予め十分に把握し、ブランケットの設計及び製作に反映する必要がある。

ITERの長期工学R&D計画の初年度（1991年）における国際分担テーマの一つとして、わが国はペブル充填型多層構造ブランケットの開発を目的とした工学規模ブランケットモデル開発試験を着手することとなっている。この計画に従い、今年度は緊急性の高い上記課題に着目した試験研究を行うことを目的として、次の2種類のブラン

ンケットモデル予備試験装置を製作した； (i) I T E R ブランケット用冷却水流量配分試験装置、(ii) ペブル充填層動特性試験装置。

本報告書は、(i) の試験装置の設計、製作仕様の概要をまとめたものであり、(ii)については、別報に譲る。

2. 試験装置の概要

2.1 全体構成

本試験装置は、配管・計装フローシートを図2に示すように、系統内の冷却水圧力を所定圧力に保持する加圧系、冷却パネル試験体に所定流量の冷却水を供給するための循環ポンプ、ブランケット冷却パネルの流路管を模擬した試験体、流量配分・調節のためのオリフィス試験体、上部・下部冷却水集合ヘッダー、及び冷却水の圧力、流量、温度、系統圧力損失等のを計測するための計装・計器類から構成されている。

2.2 主要機器

(1) 基本仕様

I T E R ブランケットの設計基準（冷却水； 軽水、温度； 100°C以下、圧力； 1.5 MPa）及びできるだけ融通性のある試験条件を考慮して以下のように定めた。

流体	市水
流体圧力	2～14.3 kgf/cm ² (可変)
流体温度	室温～100°C (可変)
流体循環流量	0～9 m ³ /h (可変)
配管、バルブ類の材質	SUS304
塔槽類の材質	SUS304
その他部品	原則としてステンレス鋼

(2) 試験体部

現時点のわが国のブランケット設計条件（冷却パネル数； 5層）を対象とし、任意のパネル3層を組み合せたときの流量配分・制御試験が行えるように流路管模擬試験体、オリフィス試験体等で構成される流路を3系統並列に設置している。これらの主要諸元は、以下の通りである。

試験体(1)	: 7.1 mm ¹⁰ × 1 m ¹
試験体(2)	: 9.4 mm ¹⁰ × 1 m ¹
試験体(3)	: 12.7 mm ¹⁰ × 1 m ¹
オリフィス抵抗体	: 開孔比0.1～1.0の間の5種類の条件で流量調節が可能である。

なお、試験体(1)については、ブランケット内の発熱率を模擬した加熱試験が可能なように外部ヒータを設置した。

ンケットモデル予備試験装置を製作した： (i) I T E R ブランケット用冷却水流量配分試験装置、 (ii) ペブル充填層動特性試験装置。

本報告書は、(i) の試験装置の設計、製作仕様の概要をまとめたものであり、(ii)については、別報に譲る。

2. 試験装置の概要

2.1 全体構成

本試験装置は、配管・計装フローシートを図2に示すように、系統内の冷却水圧力を所定圧力に保持する加圧系、冷却パネル試験体に所定流量の冷却水を供給するための循環ポンプ、ブランケット冷却パネルの流路管を模擬した試験体、流量配分・調節のためのオリフィス試験体、上部・下部冷却水集合ヘッダー、及び冷却水の圧力、流量、温度、系統圧力損失等のを計測するための計装・計器類から構成されている。

2.2 主要機器

(1) 基本仕様

I T E R ブランケットの設計基準（冷却水； 軽水、温度； 100°C以下、圧力； 1.5 MPa）及びできるだけ融通性のある試験条件を考慮して以下のように定めた。

流体	市水
流体圧力	2~14.3 kgf/cm ² (可変)
流体温度	室温~100°C (可変)
流体循環流量	0~9 m ³ /h (可変)
配管、バルブ類の材質	SUS304
塔槽類の材質	SUS304
その他部品	原則としてステンレス鋼

(2) 試験体部

現時点のわが国のブランケット設計条件（冷却パネル数； 5層）を対象とし、任意のパネル3層を組み合せたときの流量配分・制御試験が行えるように流路管模擬試験体、オリフィス試験体等で構成される流路を3系統並列に設置している。これらの主要諸元は、以下の通りである。

試験体(1)	: 7.1 mm ^{1D} × 1 m ^L
試験体(2)	: 9.4 mm ^{1D} × 1 m ^L
試験体(3)	: 12.7 mm ^{1D} × 1 m ^L
オリフィス抵抗体	: 開孔比0.1~1.0の間の5種類の条件で流量調節が可能である。

なお、試験体(1)については、ブランケット内の発熱率を模擬した加熱試験が可能なように外部ヒータを設置した。

(3) 冷却水ヘッダー（上・下部）

プランケット構造設計における冷却水ヘッダー部詳細設計が完了していないので、ここでは、試験目的に支障の生じない精度で運転が行えるようポンプ脈動の防止の観点から、十分な容積を持つ単純な横型円筒槽を採用した。

(4) 循環ポンプ及び加圧タンク

I T E R プランケットの冷却パネル入口圧力条件 (1.5 MPa, 60°C) 及び配管系圧力損失を考慮して、全揚程 50 m、最大流量 $9 \text{ m}^3/\text{h}$ の一般的な冷却水循環ポンプを採用した。さらに、冷却水圧力を適宜調節できるように N₂ ガス加圧方式の加圧タンクを設けている。本ポンプの予想性能曲線を図3に示す。ポンプ吸入側の冷却水圧力が 0.35 kgf/cm^2 以下ではキャビテーションを起こすので注意を要する。

(4) アフタークーラー

循環ポンプ（モータ直結型キャンドポンプ）及び試験体（1）からの入熱を除去し、試験体入口温度を所定温度（常温～100°C）に維持するものであり、簡単なシェル&チューブ構造を採用した。

2.3 主要計器

(1) 流量計

図1に示したように並列に設置された3試験体において任意流量の組み合わせ試験が行えるように各試験体入口部及び循環ポンプ出口部に独立の流量計を設置した。加圧・熱水を取り扱う本装置では測定精度とともに安全性に優れた電磁流量計を採用している。

(2) 差圧計

プランケット冷却水は、循環流路に沿った各部で圧力損失が生じる。本試験装置では流量配分用オリィフィス部、冷却パネル部及び系統全体の圧力損失を広い流量範囲で測定するために、高差圧用及び低差圧用の差圧伝送器を並列に設置した。図4に差圧測定用導圧配管構成を示す。すなわち、本装置ではバルブの切替えのみで任意の試験体及び任意の箇所の差圧を測定できるように工夫がなされている。

(3) ヒータ温度制御計

試験体（1）に設置した加熱器（200V - 10KW）の温度調節及びインターロック機能を持つものである。

本試験装置に使用した機器、計装類の使用を表1（機器リスト）に、計器類の設計条件及び測定範囲を表2（計器リスト）に、バルブ類の仕様を表3（バルブリスト）に示す。

2. 4 安全機構

本試験装置では加圧された熱水（1.5 MPa, 100°C以下）を取り扱うので、作業者の安全確保及び機器・計器・配管系の損傷防止の観点から、温度及び圧力に異常が発生した場合にヒータ及び循環ポンプにインターロックが作動するように設計した（表4）。

3. 設計検討

3. 1 I T E R ブランケット冷却パネル条件

わが国が提案している多層構造 I T E R ブランケットでは、5層の冷却パネルが半径方向に配置される。冷却水ヘッダー部及び各冷却パネルにおける流量及び流速、冷却パネル熱流速等に関する詳細設計は今後の課題となっているが、本試験装置の設計に当たっては幅広い試験条件が選択できるように以下のパラメータを目標とした。

①冷却パネル冷却水流路寸法： 等価直径 7.06 mm、長さ 8 m

1モジュール当たりの所要冷却管数は未定であるが、流路断面積 30 mm × 4 mm を基本寸法と仮定したときの等価直径は 7.06 mm となる。

②冷却パネル熱流速 : 20 ~ 200 kW/m²

③冷却水温度（入口／出口）: 50°C / 90°C

④冷却水温度上昇率 : 5°C ~ 40°C/m

⑤冷却水流速 : 0.5 ~ 5 m/s

⑥冷却水圧力 : 1.5 MPa

⑦単位長さ当たり圧力損失 : 0.5 ~ 50 kPa/m

なお、以後の設計検討に必要な水の物性値（密度及び粘性係数）を図5及び図6に示す。また、約70°C (340K), 1.5 MPaにおけるその他の物性値として以下の値を使用した。

比熱 4.2 × 10³ J/Kg/K

熱伝導率 6.5 × 10⁻¹ W/m/K

プラントル数 3.2 (-)

動粘性係数 4.3 × 10⁻⁷ m²/s

3. 2 試験体寸法と冷却水流量範囲の設定

(1) 試験体寸法

試験体は、以下のJIS規格円管を使用して製作した。

試験体(1) 6 A s c h 4 0 S (7.1 mm ID) × 1 m

試験体(2) 8 A s c h 4 0 S (9.4 mm ID) × 1 m

2. 4 安全機構

本試験装置では加圧された熱水（1.5 MPa, 100°C以下）を取り扱うので、作業者の安全確保及び機器・計器・配管系の損傷防止の観点から、温度及び圧力に異常が発生した場合にヒータ及び循環ポンプにインターロックが作動するように設計した（表4）。

3. 設計検討

3. 1 I T E R ブランケット冷却パネル条件

わが国が提案している多層構造 I T E R ブランケットでは、5層の冷却パネルが半径方向に配置される。冷却水ヘッダー部及び各冷却パネルにおける流量及び流速、冷却パネル熱流速等に関する詳細設計は今後の課題となっているが、本試験装置の設計に当たっては幅広い試験条件が選択できるように以下のパラメータを目標とした。

①冷却パネル冷却水流路寸法： 等価直径 7.06 mm、長さ 8 m

1モジュール当たりの所要冷却管数は未定であるが、流路断面積 30 mm × 4 mm を基本寸法と仮定したときの等価直径は 7.06 mm となる。

②冷却パネル熱流速 : 20 ~ 200 kW/m²

③冷却水温度（入口／出口）: 50°C / 90°C

④冷却水温度上昇率 : 5°C ~ 40°C/m

⑤冷却水流速 : 0.5 ~ 5 m/s

⑥冷却水圧力 : 1.5 MPa

⑦単位長さ当たり圧力損失 : 0.5 ~ 50 kPa/m

なお、以後の設計検討に必要な水の物性値（密度及び粘性係数）を図5及び図6に示す。また、約70°C(340K), 1.5 MPaにおけるその他の物性値として以下の値を使用した。

比熱 4.2 × 10³ J/Kg/K

熱伝導率 6.5 × 10⁻¹ W/m/K

プラントル数 3.2 (-)

動粘性係数 4.3 × 10⁻⁷ m²/s

3. 2 試験体寸法と冷却水流量範囲の設定

(1) 試験体寸法

試験体は、以下のJIS規格円管を使用して製作した。

試験体(1) 6 A s c h 4 0 S (7.1 mm ID) × 1 m

試験体(2) 8 A s c h 4 0 S (9.4 mm ID) × 1 m

試験体(3) 10Asch40S (12.7mm ID) × 1m

なお、試験体(1)、(2)及び(3)の流路断面積は、等価直径7.06mmの基準冷却管のそれぞれ1.0本、1.8本及び3.3本に相当する。

(2) 冷却水流量範囲

本試験装置では、以下に示すように各試験体における流速及び圧力損失を上記パラメータ範囲とするように設計している。

(i) 流速を保存した場合(図7)

試験体(1) : 1.2~12l/min

試験体(2) : 2.1~21l/min

試験体(3) : 3.8~38l/min

(ii) 圧力損失を保存した場合(図8)

試験体(1) : 1.2~12l/min

試験体(2) : 2.4~24l/min

試験体(3) : 5.2~52l/min

(iii) 定格流量

以上から、各試験体の冷却水流量定格値を次のように設定した。

試験体(1) : 1.0~20l/min

試験体(2) : 2.0~40l/min

試験体(3) : 3.0~52l/min

3.3 試験体ヒータ容量の設定

(1) 热流束20~200kW/m²に対応するヒータ出力

試験体(1) : 1.0~20l/min 0.5~4.5kW

試験体(2) : 2.0~40l/min 0.6~5.9kW

試験体(3) : 3.0~52l/min 0.8~6.9kW

(2) 温度上昇率5°C/mの場合

試験体(1) : 1.0~20l/min 0.3~6.8kW

試験体(2) : 2.0~40l/min 0.7~14kW

試験体(3) : 3.0~52l/min 1.0~17kW

(3) 温度上昇率4.0°C/m(最小流量時)の場合

試験体(1) : 2.7kW

試験体(2) : 5.5kW

試験体(3) : 7.1kW

以上の検討結果及び試験条件の余裕を考慮して、本試験装置のヒータ定格容量を 1.0 kWとした。

3.4 オリィフィスの検討 [5, 6]

3 試験体の冷却水流量を種々の割合で配分するために、表5に示す5通りの開孔比のオリフィスを製作した。オリフィス開孔比 (S/S_0 , d/D) と損失係数の相関を図9及び図10に示す。

3.5 アフタークーラ所要伝熱面積 [5, 6]

(1) 設計条件

交換熱量は、試験体(1)ヒータの通常試験条件 (8 kW) に相当する 7000 k c a l/hとする。被冷却側、冷却側の流体入口温度及び入口/出口温度差をそれぞれ 60°C, 24°C 及び 1°C, 4°C とし、流量を 120 l/m i n (ポンプ揚程 50 m) 及び 30 l/m i n (実験室の利用可能上限値) とする。設計に必要な流体の物性値は、表6に示す値を使用する。

(2) 所要伝熱面積

(i) 管外熱伝達係数 (α_o)

非冷却側の入口/出口温度差は 1°C と小さく冷却側の流速は極めて小さくなるので、管外熱伝達係数 (α_o) は、次の自然対流熱伝達評価式で算定する。

$$Nu = C (Pr) (Gr \cdot Pr)^{0.25}$$

$$Pr = C_p \cdot \eta / \lambda$$

$$Gr = g \cdot \beta \cdot d^3 \cdot \Delta T / \eta^2$$

$$\alpha_o = Nu (\lambda / d)$$

ここで、 C_p (流体比熱)、 η (流体動粘性係数)、 λ (流体熱伝導率)、 β (流体膨脹係数 = $2 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$) にそれぞれの物性値を代入する。 g は、重力の加速度 (9.81 m/s^2) である。

管口径を 25 A (管外径 $d = 0.034 \text{ m}$)、流体の温度差は $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ ($60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}$) とすると、 $C(Pr) = 0.7$, $Gr = 4.17 \times 10^6$, $Pr = 5.9$, $Nu = 28.2$ を得る。よって、管外熱伝達係数 $\alpha_o = 505 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ となる。

(ii) 管内熱伝達係数 (α_i)

口径 25 A の管内流速は 2.2 m/s でありレイノルズ数は ($Re = 1.47 \times 10^5$) 十分な乱流域となるので、次の強制対流熱伝達評価式により管内熱伝達係数 α_i を算定する。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 49.8$$

$$\alpha_i = Nu (\lambda / d) = 9.52 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

以上から伝熱管表面の熱通過率 (K) は、

$$\begin{aligned} K &= 1 / \{ 1 / \alpha_0 + 1 / \alpha_1 \} = 480 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\ &= 412 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

一方、対数平均温度 (T_m) は、

$$\begin{aligned} T_m &= (\Delta_1 - \Delta_2) / \ln (\Delta_1 / \Delta_2) \\ &= (41 - 36) / \ln (41 / 36) = 38.5^\circ\text{C} \end{aligned}$$

と求められる。

(iii) 所要伝熱面積 (A) 及び管長 (L)

$A = Q / (K \cdot T_m)$ 、 $L = 4A / d^2 \pi$ より、伝熱面積及び管長はそれぞれ 0.44 m^2 、 4.1 m と求められる。

以上の検討結果に基づき、汎用性のあるデータが得られるシェル&チューブ型熱交換器 ($65.2 \text{ mm}^{0.0} \times 5 \text{ mm}^1$ 、全長 1.3 m) を製作した。内部の伝熱管は、口径 25 A (Sch 20)、長さ 0.82 m の鋼管 5 本で構成した。

4. 試験装置の流動特性

4.1 配管系統流動特性

本試験装置の配管系統は、図 1.1 に示すような立体配置となっている。系統各部における圧力損失を次式により算定した [5]。

$$\Delta P = \lambda (\rho u^2 / 2) (l_e / d)$$

圧損評価区間の仕様を表 7 及び表 8 に、計算結果を表 9 に示す。

4.2 オリィフィス部流動特性

3 試験体の定格流量範囲 ($1 \sim 5.2 \text{ l/min}$) に対応するオリィフィス部の流速、レイノルズ数及び圧力損失を図 1.2 ~ 図 1.4 に示す。ここで、冷却水の温度、圧力はそれぞれ 340 K 、 1.5 MPa とした。圧力損失は、次式で求めた。

$$\Delta P = \zeta \rho u^2 / 2$$

(ρ は流体の密度、 u は管内平均流速である。)

オリィフィス入口側の導入配管及び 3 試験体のレイノルズ数を図 1.5 に示す。

以上から伝熱管表面の熱通過率 (K) は、

$$\begin{aligned} K &= 1 / \{ 1 / \alpha_0 + 1 / \alpha_1 \} = 480 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\ &= 412 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

一方、対数平均温度 (T_m) は、

$$\begin{aligned} T_m &= (\Delta_1 - \Delta_2) / \ln (\Delta_1 / \Delta_2) \\ &= (41 - 36) / \ln (41 / 36) = 38.5^\circ\text{C} \end{aligned}$$

と求められる。

(iii) 所要伝熱面積 (A) 及び管長 (L)

$A = Q / (K \cdot T_m)$ 、 $L = 4A / d^2 \pi$ より、伝熱面積及び管長はそれぞれ 0.44 m^2 、 4.1 m と求められる。

以上の検討結果に基づき、汎用性のあるデータが得られるシェル&チューブ型熱交換器 ($65.2 \text{ mm}^{OD} \times 5 \text{ mm}^{ID}$ 、全長 1.3 m) を製作した。内部の伝熱管は、口径 25 A (Sch 20)、長さ 0.82 m の鋼管 5 本で構成した。

4. 試験装置の流動特性

4.1 配管系統流動特性

本試験装置の配管系統は、図 1.1 に示すような立体配置となっている。系統各部における圧力損失を次式により算定した [5]。

$$\Delta P = \lambda \left(\rho u^2 / 2 \right) (l_e / d)$$

圧損評価区間の仕様を表 7 及び表 8 に、計算結果を表 9 に示す。

4.2 オリィフィス部流動特性

3 試験体の定格流量範囲 ($1 \sim 5.2 \text{ l/min}$) に対応するオリィフィス部の流速、レイノルズ数及び圧力損失を図 1.2 ~ 図 1.4 に示す。ここで、冷却水の温度、圧力はそれぞれ 340 K 、 1.5 MPa とした。圧力損失は、次式で求めた。

$$\Delta P = \zeta \rho u^2 / 2$$

(ρ は流体の密度、 u は管内平均流速である。)

オリィフィス入口側の導入配管及び 3 試験体内のレイノルズ数を図 1.5 に示す。

4. 3 試験体部流動特性

(1) 試験体部圧力損失

試験体はブランケット冷却パネルの冷却水流路管群を模擬した円管であるので、圧力損失は次式により算定できる。

$$\Delta P = (\lambda l / D) (\rho u^2 / 2)$$

ここで、 l は直径 D の円管の長さ、 u 及び ρ は冷却水の流速及び密度である。

なお、管摩擦係数 λ は、管内壁粗さ係数 k (表10)、管内平均レイノルズ数 Re とを関係づけた次のコールブルックの式で求められる [4, 5]。

$$1/\sqrt{\lambda} = -2.10 \cdot g_{10} [k/D / 3.71 + 2.51 / Re \sqrt{\lambda}]$$

この評価式は、新しい継ぎ目のない比較的滑らかな鋼管 (k の値 0.05 以下) で、レイノルズ数 $10^4 \sim 10^5$ の範囲において適用される (図16、図17)。これらの相関図より、管摩擦係数 λ の値は 0.03 と求められる。

冷却水の温度、圧力をそれぞれ 340 K, 1.5 MPa とした場合の各試験体における流速、レイノルズ数及び圧力損失を表11と図18に示す。

(2) 試験体部熱伝達係数

表11に見られるように、計画した試験範囲 (定格流量範囲) における試験体内部レイノルズ数はほぼ $10^4 \sim 10^5$ の範囲 (十分発達した乱流) である。冷却水のプロントル数が 3.2、試験体等価直径 d と長さ l の比が $l/d > 60$ を満足していることから、乱流域における管内強制対流熱伝達係数の評価式 [5, 6] が適用できる。

$$h l / \lambda = 0.023 (l u \rho / \eta)^{0.8} (C_p \eta / \lambda)^{0.4}$$

これにより、各試験体における平均熱伝達係数 h と流量との相関が求められる。ここで、 u , C_p , η , ρ は冷却水の流速、比熱、動粘性係数及び密度である。計算結果を図19に示す。

4. 4 ヘッダー部流動特性

I T E R ブランケット冷却水ヘッダーは矩形に近い構造になると考えられるが、現時点でこの部分の詳細構造が確定していないこと、及び耐圧性を考慮した矩形ヘッダの製作コストがかなり大きくなることから、本試験装置では耐圧信頼性に優れた円筒形ヘッダ構造を採用している。すなわち、本試験装置では冷却パネル模擬試験体 (円管) の入口及び出口側のヘッダー部で流れの急縮小、急拡大が起こる。これによる冷却水圧力の乱れを以下に検討した。

(1) 評価条件

図11に示すように、ヘッダー(305.5¹⁰ × 1104.8 mm²)まわりの配管の取り付け条件は以下の通りである。

鏡板取付ノズル(42.6 mm¹⁰ × 1本)：流れに対して平行方向

胴部取付ノズル(28.0 mm¹⁰ × 3本)：流れに対して直角方向
ノズル間隔350 mm

系統最大流量 : 150 l/min

試験体ノズル最大流量 : 52 l/min

(2) ノズル部圧力損失

前記各ノズル部における圧力損失は、次式により求められる。

$$\Delta P = \zeta (\rho u^2 / 2)$$

(ρ は流体の密度、 u は管内平均流速である)

図20[7]より、急縮小($d_1/d_2 = 42.6/305.5$)及び急拡大($d_1/d_2 = 28.0/305.5$)の断面積比に対応するヘッダ流入部と流出部の圧力損失係数とは、それぞれ0.95、0.46と求められる。すなわち、ヘッダ流入部及び流出部の圧力損失は、それぞれ 1.4×10^3 Pa、 6.9×10^2 Paとなる。

これらの値は、試験体で予想される圧力損失範囲($1.8 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^5$ Pa)に入る大きさであるが、冷却水の全圧 1.5 MPa の0.1%以下に過ぎないので測定精度への影響は無視少と考えられる。

(3) ヘッダー内圧力損失

ヘッダ内の流速は、最大流量(150 l/min)のとき 0.034 m/s となる。したがって、管摩擦係数 $\lambda = 0.03$ 、流路長さ 1.1 m として見積もられる圧力損失は高々 0.06 Pa であり、ヘッダー内の圧力分布は無視少である。したがって、入口ヘッダの胴部に取り付けられた3つの試験体導入配管の入口圧力は、それぞれ等しくなる。

5. 試運転

5.1 機能及び性能試験

本試験装置の設計の妥当性及び製作の健全性を確認するために以下のような機能及び性能試験を実施した。

①耐圧試験 : 主要機器類、バルブ・配管系の耐圧健全性を加圧 N_2 ガス(運転圧力の1.5倍の 2.25 MPa)で確認。

②作動試験 : 循環ポンプ、ヒータ、計器類及び計装制御系等の電気機器類の動

(1) 評価条件

図11に示すように、ヘッダー(305.5^{1D} × 1104.8 mm^L)まわりの配管の取り付け条件は以下の通りである。

鏡板取付ノズル(42.6 mm^{1D} × 1本)：流れに対して平行方向

胴部取付ノズル(28.0 mm^{1D} × 3本)：流れに対して直角方向
ノズル間隔350 mm

系統最大流量 : 150 l/min

試験体ノズル最大流量 : 52 l/min

(2) ノズル部圧力損失

前記各ノズル部における圧力損失は、次式により求められる。

$$\Delta P = \zeta (\rho u^2 / 2)$$

(ρ は流体の密度、 u は管内平均流速である)

図20[7]より、急縮小($d_1/d_2 = 42.6/305.5$)及び急拡大($d_1/d_2 = 28.0/305.5$)の断面積比に対応するヘッダ流入部と流出部の圧力損失係数 ζ は、それぞれ0/95、0.46と求められる。すなわち、ヘッダ流入部及び流出部の圧力損失は、それぞれ 1.4×10^3 Pa、 6.9×10^2 Paとなる。

これらの値は、試験体で予想される圧力損失範囲($1.8 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^5$ Pa)に入る大きさであるが、冷却水の全圧 1.5 MPaの0.1%以下に過ぎないので測定精度への影響は無視少と考えられる。

(3) ヘッダー内圧力損失

ヘッダ内の流速は、最大流量(150 l/min)のとき 0.034 m/sとなる。したがって、管摩擦係数 $\lambda = 0.03$ 、流路長さ 1.1 mとして見積もられる圧力損失は高々 0.06 Paであり、ヘッダー内の圧力分布は無視少である。したがって、入口ヘッダの胴部に取り付けられた3つの試験体導入配管の入口圧力は、それぞれ等しくなる。

5. 試運転

5.1 機能及び性能試験

本試験装置の設計の妥当性及び製作の健全性を確認するために以下のようないくつかの機能及び性能試験を実施した。

①耐圧試験 : 主要機器類、バルブ・配管系の耐圧健全性を加圧 N_2 ガス(運転圧力の1.5倍の 2.25 MPa)で確認。

②作動試験 : 循環ポンプ、ヒータ、計器類及び計装制御系等の電気機器類の動

作確認。

- ③安全機構試験：冷却水循環流路の温度、圧力、循環ポンプ過負荷、及びヒータ制御系のインターロック及び警報の動作確認。
- ④性能試験：定格圧力における冷却水循環性能（流量、温度、圧力損失等）及び流量配分特性の確認。

ここでは、性能試験の結果について説明する。

5. 2 性能試験条件

本試験は、試験装置製作のために実施した設計の妥当性を確認し、計画通りの運転範囲でデータ取得可能であることを確認する事を目的としている。試験条件を表12に示す。

5. 3 試験結果

性能確認試験で取得したデータの主なものを表13（a～c）にまとめて示す。

（1）循環ポンプ性能

図21に示すように、循環ポンプはほぼ予想どおりの揚程が得られることから、冷却水圧力1.5 MPaの条件で流量を幅広く変化させた試験が可能である事が分かる。

（2）冷却水流量と圧力損失の相関

図22に示すように、各試験体の設計流量範囲において圧力損失が正確に測定できる事が分かる。なお、図中のデータは冷却水の温度及び圧力を規格化せずにプロットしているが、試験体（1）～（3）の最大流量に対応する測定結果はそれぞれ 3×10^5 Pa（設計値 1.5×10^5 Pa）、 1.2×10^5 Pa（同 1.2×10^5 Pa）、 8×10^4 Pa（同 5.5×10^4 Pa）であり、設計検討値（図18）と良く合っている。

（3）流量配分特性

図23は、試験体（1）、（2）及び（3）の導入管部に開孔比の異なるオリフィスを組込んだ場合の流量と圧力損失の相関を示す。図中のデータは冷却水の温度及び圧力を規格化せずにプロットしているが、設計検討結果（図12）と良く一致していることが分かる。

（4）アフタークーラー性能

図24は、アフタークーラーに一次冷却水（市水： $16 \text{ l}/\text{min}$ ）を流通した時の冷却水温度の時間変化を示す。入口／・出口温度差約1°Cである事から、ほぼ設計通りの機能していることが分かる。

6. まとめ

オリィフィス抵抗体による流量の配分・制御方式は、稼働部分がなくかつ駆動機構を必要としないことから安定性および長期信頼性が極めて優れている。しかし、本方式では流路ごとに配分された冷却水流量を能動的に制御することができないので、オリィフィスの流量配分精度がブランケット各部の冷却パネルの設計裕度を左右すると考えられる。また、ITERではさまざまなプラズマ出力密度での運転が予定されており、ブランケット各部へ配分される冷却水流量は設計段階から十分な余裕を見込む必要がある。

本試験装置は設計目標とした性能を備えており、計画したすべての操作範囲で流量配分特性試験が行える事が試運転により確認された。今後、温度、圧力、流量（流速）、圧力損失、オリィフィス開孔比等のパラメータに関する系統的な試験を実施する予定である。取得されたデータは、オリィフィス配分方式の実用可能性の評価に利用できるとともに、ブランケット各部（増殖領域、冷却領域、側壁、補強リブ、第一壁を含む）の冷却水流路の設計にも有効である。

参考文献

1. ITER Conceptual Design Report, ITER Documentation Series,
No.18, IAEA, Vienna1991
2. ITER Blanket and Shield Conceptual Design, and ITER Material
Evaluation and Data Base, ITER Documentation Series,
No.29, IAEA, Vienna1991
3. Japanese Contributions to Blanket Design for ITER,
JAERI-M91-133(1991)
4. 化学工学便覧 第5編、化学工学協会編、丸善(1988)
5. JIS Z8762-1969: 絞り機構による流量測定方法
6. 伝熱工学資料、改定第3版、日本機械学会(1981)
7. 配管サイジングハンドブック、斎藤義巳、工業調査会(1988)

6. まとめ

オリィフィス抵抗体による流量の配分・制御方式は、稼働部分がなくかつ駆動機構を必要としないことから安定性および長期信頼性が極めて優れている。しかし、本方式では流路ごとに配分された冷却水流量を能動的に制御することができないので、オリィフィスの流量配分精度がブランケット各部の冷却パネルの設計裕度を左右すると考えられる。また、ITERではさまざまなプラズマ出力密度での運転が予定されており、ブランケット各部へ配分される冷却水流量は設計段階から十分な余裕を見込む必要がある。

本試験装置は設計目標とした性能を備えており、計画したすべての操作範囲で流量配分特性試験が行える事が試運転により確認された。今後、温度、圧力、流量（流速）、圧力損失、オリィフィス開孔比等のパラメータに関する系統的な試験を実施する予定である。取得されたデータは、オリィフィス配分方式の実用可能性の評価に利用できるとともに、ブランケット各部（増殖領域、冷却領域、側壁、補強リブ、第一壁を含む）の冷却水流路の設計にも有効である。

参考文献

1. ITER Conceptual Design Report, ITER Documentation Series,
No.18, IAEA, Vienna1991
2. ITER Blanket and Shield Conceptual Design, and ITER Material
Evaluation and Data Base, ITER Documentation Series,
No.29, IAEA, Vienna1991
3. Japanese Contributions to Blanket Design for ITER,
JAERI-M91-133(1991)
4. 化学工学便覧 第5編、化学工学協会編、丸善(1988)
5. JIS Z8762-1969: 絞り機構による流量測定方法
6. 伝熱工学資料、改定第3版、日本機械学会(1981)
7. 配管サイジングハンドブック、斎藤義巳、工業調査会(1988)

表1a 機器リスト

番号	機器名	数量	主要仕様
1	流路管模擬管(1)	1	10Axsch 40x1000mm
2	流路管模擬管(2)	1	8Axsch 40x1000mm
3	流路管模擬管(3)	1	6Axsch 40x1000mm
4	加熱器	1	単相200V×10kW(ヒータ材質 カンタルAPM)
5	オリフィス抵抗体	3組	開口比 0.1、0.3、0.5、0.6、0.7、1.0 各3枚組
6	入口ヘッダ	1	円筒横形 300Axsch 20x1104mm
7	出口ヘッダ	1	円筒横形 300Axsch 20x1104mm
8	循環ポンプ	1	ポンプ・モーター一体形キャンドポンプ ポンプ:全揚程50m、流量 150 ^{l/min} モータ: 200V, 50Hz, 5.5kW
9	加圧タンク	1	円筒立形 300Axsch 20x500mm
10	アフタークーラ	1	円筒立形 水／水 熱交換器 伝熱面積:約0.4m ²
11	弁類	1式	
12	計装類 1) 流量計(試験体部) 2) 流量計(メインライン) 3) 差圧計(試験体部)	3 1 2	一体形電磁流量計 一体形電磁流量計 高差圧伝送器 1台 差圧伝送器 1台 指示計 2台

表1b 機器リスト

番号	機器名	数量	主要仕様
	4) ヒータ温度制御計	1	ヒータ温度調節計 1台 DB1130 ヒータ温度警報計 1台 GF1170-010 単相サイリスタレギュレータ 1台 JS-2075VA 勾配設定器 1台 VL-JAL シーズ熱電対 1本 K形 3.2ΦX 75mm
	5) 温度計	5	シーズ熱電対: T形 3.2ΦX 500 mm 1本(双心) T形 3.2ΦX 200 mm 1本 指示計 2台
	6) 圧力計(加圧タンク現場指示形)	1	現場指示形隔測温度計 3台 丸形圧力計(0~25kg/cm ²)
	7) 圧力計(メインライン)	1	圧力センサ 1台 指示計 1台
	8) 液位計(加圧タンク現場指示形)	1	ガラス形反射式液面計 1組 電極式レベルスイッチ 1組
	9) 記録計	1	6打点記録計 μR180 4176-100-11
	10) ディストリビュータ	1	ループ絶縁形入力4点用
13	計装盤	1	自立閉鎖形 900wX500X2150h
14	架台	1	鋼構造

表2a 計器リスト

TAG No.	名 称	測定象	最 高 使 用 壓 力 kg/cm ²	温 度 °C	測定範囲	信 号 別 種	用 調 節 イン ポーツ			接続計器 TAG No.	備 考
							電 動	音 報	テ ラ ポ ッ ト 口 #		
FX-1	テスト部(1) 流量発信器	水	16	100	0~60 ℓ/min	4~20 mA				R-1 (1)	
FX-2	テスト部(2) 流量発信器	水	16	100	0~60 ℓ/min	4~20 mA				R-1 (2)	
FX-3	テスト部(3) 流量発信器	水	16	100	0~60 ℓ/min	4~20 mA				R-1 (3)	
FX-4	メインライン 流量発信器	水	16	100	0~150 ℓ/min	4~20 mA				R-1 (4)	
TX-1	テスト部(1) 出口温度	水	16	150	0~200 °C	mV				TIC-1	
TX-2	入口ヘッダ 温度	水	16	100	0~200 °C	mV				TI-2	
TX-3	加熱ヒータ 温度	ヒータ本体	—	1,000	0~999 °C	mV				TA-1	
PX-1	メインライン 圧力発信器	水	16	100	0~2,500 kPa	4~20 mA				D-1 (1)	
PdX-1	大差圧発信器	水	16	常温	0~500 kPa	4~20 mA				D-1 (2)	
PdX-2	小差圧発信器	水	16	常温	0~20 kPa	4~20 mA				D-1 (3)	
LX-1	加圧タンク 水位スイッチ	水	16	100	—		○	○			

表2b 計器リスト

TAG No.	名 称	測定 対象	最 高 使 用 圧 力 kg/cm ²	測定範囲 温 度 °C	信種	号 別	用			接続計器 TAG No.	備 考
							調 節	イ タ ッ ク ッ	警 報 フ ッ		
D-1	ディスリピュータ										
(1)	メインライン圧力	PX-1	-	-	1~5V DC					PX-1 (R-1(6)), (PI-1)	
(2)	小 差 圧	PdX-2	-	-	1~5V DC					PdX-2 (R-1(5)), (PdI-2)	
(3)	大 差 圧	PdX-1	-	-	1~5V DC					PdX-1 (R-1(5)), (PdI-1)	
P I - 1	メインライン圧力指示計	-	-	0~2,500 kPa	-		○	○		D-1 (1)	
Pd I - 1	大差圧指示計	-	-	0~500 kPa	-					D-1 (2)	
Pd I - 2	小差圧指示計	-	-	0~20 kPa	-					D-1 (3)	
T I - 1	テスト部(1) 出口温度指示計	-	-	0~200 °C	-		○	○		TX-1	
T I - 2	入口ヘッダ 温度指示計	-	-	0~200 °C	-					TX-2	

表2c 計器リスト

TAG No.	名 称	測定象	最 高 壓 力 kg/cm ²	使 用 温 度 °C	測定範囲	信 号 別 種	用			接続計器 TAG No.	備 考
							調	節	シターポジ		
R-1	多点記録計										
(1)	テスト部(1) 流量	-	-	-	0~60 ℓ/min					FX-1	
(2)	テスト部(2) 流量	-	-	-	0~60 ℓ/min					FX-2	
(3)	テスト部(3) 流量	-	-	-	0~60 ℓ/min					FX-3	
(4)	メインライン 流量	-	-	-	0~150 ℓ/min					FX-4	
(5)	大 差 壓	-	-	-	0~500 kPa					D-1 (2)	接続切替どちらかを記録する。
(6)	小 差 壓	-	-	-	0~20 kPa					D-1 (3)	
	メインライン 圧 力	-	-	-	0~2,500 kPa					D-1 (1)	
TIC-1	加熱ヒータ制御器	-	-	-	0~200 °C	○				TX-1	
TA-1	加熱ヒータ警報器	-	-	-	-	○	○			TX-3	

表3a バルブリスト

弁番号	用 途	流 体	圧 力 kg/cm^2	温 度 °C	形 式	口 径	接続方式	備 考
V-1	メインライシン止弁	水	16	100	ボーラー	40A	20K/RF	
V-2	メインバイパス弁	水	16	100	二ードル	25A	管用ねじ	CV max= 7.0
V-3 1	テスト部 (1) 手動調節弁	水	16	100	同上	25A	同上	CV max= 7.0
V-3 2	テスト部 (2) 手動調節弁	水	16	100	同上	25A	同上	CV max= 7.0
V-3 3	テスト部 (3) 手動調節弁	水	16	100	同上	25A	同上	CV max= 7.0
V-4	アフタークーラ 出口止弁	水	16	100	クローブ	40A	20K/RF	
V-5	アフタークーラ バイパス弁	水	16	100	同上	40A	同上	
V-6 1	入口ヘッダ 空気抜弁	水	16	100	同上	10A	管用ねじ	
V-6 2	出口ヘッダ 空気抜弁	水	16	150	同上	10A	同上	
V-6 3	加圧タンク 空気抜弁	水	16	100	同上	10A	同上	
V-6 4	テスト部 (1) 出口管空気抜弁	水	16	150	同上	10A	同上	
V-6 5	テスト部 (2) 出口管空気抜弁	水	16	150	同上	10A	同上	
V-6 6	テスト部 (3) 出口管空気抜弁	水	16	150	同上	10A	同上	
V-6 7	循環ボンプ空気抜弁	水	16	150	同上	4A	同上	ポンプ付属弁

表3b バルブリスト

弁番号	用 途	流 体	圧 力 kg/cm^2	温 度 $^{\circ}\text{C}$	形 式	口 径	接続方 式	備 考
V-7 1	入口ヘッダ ドレン弁	水	16	100	グローブ	10A	管用ねじ	
V-7 2	出口ヘッダ ドレン弁	水	16	100	同上	10A	同上	
V-7 3	循環ポンプ ドレン弁	水	16	100	同上	10A	同上	
V-7 4	配管ドレン弁	水	16	100	同上	10A	同上	
V-8 1	アフタークーラ 入口 冷却水止弁	水	5	常温	ボルト	20A	同上	
V-8 2	アフタークーラ 出口 冷却水止弁	水	5	常温	同上	20A	同上	
V-8 3	アフタークーラ ドレン弁	水	5	常温	同上	20A	同上	
V-9 1	テスト部(1) 高圧 検出止弁	水	16	100	同上	6A	喰込継手	
V-9 2	テスト部(1) 中圧 検出止弁	水	16	100	同上	6A	同上	
V-9 3	テスト部(1) 低圧 検出止弁	水	16	100	同上	6A	同上	
V-9 4	テスト部(2) 高圧 検出止弁	水	16	100	同上	6A	同上	
V-9 5	テスト部(2) 中圧 検出止弁	水	16	100	同上	6A	同上	
V-9 6	テスト部(2) 低圧 検出止弁	水	16	100	同上	6A	同上	
V-9 7	テスト部(3) 高圧 検出止弁	水	16	100	同上	6A	同上	

表3c バルブリスト

弁番号	用 途	流 体	圧 力 kg/cm ²	温 度 °C	形 式	口 径	接続方式	備 考
V-98	テスト部(3) 中圧検出止弁	水	16	100	ボーラー	6A	噴込継手	
V-99	テスト部(3) 低圧検出元弁	水	16	100	同上	6A	同上	
V-10	加圧タンク供給水弁	水	16	100	同上	15A	管用ねじ	
V-11	加圧タンク供給ガス弁	N ₂	16	常温	同上	6A	噴込継手	
V-12	加圧タンクリーフ弁	N ₂	17.5	常温	スナップ式	—	管用ねじ	
V-13	ガス減圧弁	N ₂	165/ 5~25	常温	—	—	—	
V-14	メインライン手動調節弁	水	16	100	グローブ	40A	20K/RF	
V-15	メインライン圧力検出元弁	水	16	100	同上	15A	管用ねじ	
V-161	小差圧発信器替弁 高圧側切替弁	水	16	100	3方ボール	6A	噴込継手	
V-162	小差圧発信器替弁 低圧側切替弁	水	16	100	3方ボール	6A	同上	
V-163	大差圧発信器替弁 高圧側切替弁	水	16	100	3方ボール	6A	同上	
V-164	大差圧発信器替弁 低圧側切替弁	水	16	100	3方ボール	6A	同上	
V-17	ポンプ入口ストレーナー	水	16	100	—	50A	20K/RF	
V-181	テスト部(1) オリフィス下流止弁	水	16	100	ボーラー	20A	管用ねじ	

表3d バルブリスト

表4 警報、インターロックリスト

設 定 値	信 号 発 信 機 器 名	イ ン タ ロ ッ ク		警 報	
		ヒ ー タ	ポン プ	ラン プ	ブ ザ -
試験体(1) 出口 流 体 温 度 高	温度指示計 (TI-1)	OFF	-	ON	ON
外部ヒータ過熱 温 度 高	温度警報器 (TA-1)	OFF	-	ON	ON
入 口 ヘ ッ ダ 流 体 壓 力 高	圧力指示計 (PI-1)	OFF	OFF	ON	ON
循 環 ボ ン プ コ イ ル 過 熱 温 度 高	循環ポンプ	OFF	OFF	ON	ON
加 壓 タ ン ク 水 位 低	レベルスイッチ (LX-1)	OFF	OFF	ON	ON

表5 オリィフィス抵抗体の仕様

オリフィス番号	絞り面積比 絞り直径比 圧力損失係数		
	S / S ₀	d / D	ζ
# 1	0. 09	0. 3	27
# 2	0. 25	0. 5	20
# 3	0. 36	0. 6	11
# 4	0. 49	0. 7	4
# 5	1. 0	1. 0	0

表6 アフタークーラ設計条件

		被冷却側	冷却側
流体		市水	市水
圧力		16 kg/cm ² G	5 kg/cm ² G
入口温度		61 °C	20 °C
出口温度		60 °C	24 °C
流量		120 ℥/min	30 ℥/min
交換熱量		7000 kcal/h (8.14 kW)	
物性値	密度	990 kg/m ³	1000 kg/m ³
	比熱	4.2 kJ/kg·K	4.2 kJ/kg·K
	熱伝導率	650 mW/m·K	610 mW/m·K
	動粘性係数	0.51 mm ² /s	0.86 mm ² /s
	プラントル数	3.2	5.9

表7 配管系統の圧力損失評価条件

圧損評価区間	管内径 d (mm)	管長 ¹ l. (m)	バルブ類 ² (-)	継手類 (-)
試験体出口～ 出口ヘッダ	22.2	0.7		90 エルボ 1 個
出口ヘッダ～ アフタークーラ	42.6	1.2		90 エルボ 2 個
アフタークーラ～ 循環ポンプ	42.6	1.4	玉形 2 個	90 エルボ 3 個
	53.5	0.9	ストレーナ 1 個	Tピース 1 個、 90 エルボ 1 個
循環ポンプ～ 入口ヘッダ	42.6	1.4		90 エルボ 4 個
入口ヘッダ～ 試験体出口	22.2	1.4	ニードル 1 個	90 エルボ 1 個

* 1 : 管挿入物の相当長さ (表8) [4]

* 2 : ボール弁、電磁流量計は圧損の無視できるユニオン継手相当とし、
ストレーナ及びニードル弁は玉形弁相当とした。

表 8 管挿入物の相当長さ l_e [4]

管挿入物	l_e/d	管挿入物	l_e/d	管挿入物	l_e/d	管挿入物	l_e/d
45° エルボ	15	曲率/直角=3 " " =4	24	1/4 閉	10	10~40	水量計
90° エルボ	32	180° ベン F	75	1/2 閉	100~200	ピストン型	600
標準曲率	26	十字継手	50	3/4 閉	800	ディスク型	135~400
中間曲率	20	T型継手	40~80	球形弁	200~300	翼車型	200~300
長径	75	仕切弁	0.7	全開	300	ニオノ	≤0
角型(2円筋直交)		全閉		肘弁(アンダル弁)	170	カーブリング	≤0
90° ベンド							

表 9 配管系統の圧力損失(計算結果)

ルート	実長さ	管	弁類	継手類	合計	圧力損失	
						m	Pa
試験体出口 - 出口ハッダ	0.7				0.5	1.2	9.8×10^4
出口ハッダ - アタ-ケ-ラ	1.2				2.7	3.9	1.5×10^6
アタ-ケ-ラ - 循環ポンプ	1.4				4.1	31.1	3.3×10^4
	0.9				16.1	6.0	1.2×10^6
循環ポンプ - 入口ハッダ	1.4				5.5	6.9	1.5×10^5
入口ハッダ - 試験体出口	1.4				7.4	0.5	8.4×10^3
合計							1.6×10^6

表10 管内壁のあらさ係数kの値の参考値

材質	管内壁の状態	k (mm)
黄銅、銅、アルミニウム、プラスチック、ガラス	付着物がなく、なめらか	< 0.03
鋼	新しい継ぎ目なしの冷間引抜き	< 0.03
	新しい継ぎ目なしの熱間引抜き	0.05 ~ 0.10
	新しい継ぎ目なしの圧延	
	新しい継ぎ方向の溶接	0.10
	新しいスパイラル溶接	0.10 ~ 0.20
	わずかのさび	0.20 ~ 0.30
	さび	0.50 ~ 2
	あか	> 2
	はなはだしいあか	0.03 ~ 0.05
	れき性質塗料(新しいもの)	0.10 ~ 0.20
鋳鉄	亞鉛めっき	0.13
	新しいもの	0.25
	さび	1.0 ~ 1.5
	あか	> 1.5
	れき性質塗料(新しいもの)	0.10 ~ 0.15

表11 試験体における冷却水流動特性（計算結果）

冷却水流量 (Q/min)	試験体(1) 6A (7. 1mm ID)			試験体(2) 8A (9. 5mm ID)			試験体(3) 10A (12. 7mm ID)		
	流速 (m/s)	Re数 (-)	圧損 (kPa)	流速 (m/s)	Re数 (-)	圧損 (kPa)	流速 (m/s)	Re数 (-)	圧損 (kPa)
1	0. 42	$5. 9 \times 10^3$	0. 37						
2	0. 84	$1. 2 \times 10^4$	1. 5	0. 48	$8. 9 \times 10^3$	0. 36			
3	1. 3	$1. 8 \times 10^4$	3. 3	0. 72	$1. 3 \times 10^4$	0. 82	0. 39	$9. 8 \times 10^3$	0. 18
10	4. 2	$5. 9 \times 10^4$	37	2. 4	$4. 4 \times 10^4$	9. 1	1. 3	$3. 3 \times 10^4$	2. 0
20	8. 4	$1. 2 \times 10^5$	150	4. 8	$8. 9 \times 10^4$	36	2. 6	$6. 6 \times 10^4$	8. 1
40				9. 6	$1. 8 \times 10^5$	150	5. 3	$1. 3 \times 10^5$	32
52							6. 8	$1. 7 \times 10^5$	550

表12 試運転試験条件

試験項目	入口ヘッダ			試験体(1)			試験体(2)			試験体(3)		
	圧力 MPa	温度 °C	流量 ℓ/min	開口比	出力 kW	出口温度 °C	流量 ℓ/min	開口比	出力 kW	流量 ℓ/min	開口比	
循環ポンプ定格性能	1.5	成行	~75	0.5	0	成行	~50	0.5	~25	0.5	0.5	
外部ヒーター性能	1.5	60	52	0.5	10	成行	40	0.5	20	0.5		
最小流量	1.5	60	3	1.0	成行	100	2	1.0	1	1.0		
最大流量	1.5	60	52	0.3	成行	40	0.3	0.3	20	0.3		
最大圧損												

表13a 性能試験結果

試験モード	試験日時	試験体寸法	入り口開口出	入り口開口出	流入量	入口圧力	加圧ポンプ圧力	入口ヘッダ温度	ヘッド流量	試験体流量	試験体差圧	ヘッド差圧	全体差圧
最大流量試験	3月11日 16:10	10A	0.3	23.5	1574.0	832.6	50.2	99.8	38.9	41.50	415.40	457.30	
		8A	0.3					39.7	104.20	435.00	OVER		
		6A	0.3					19.0	236.20	95.30	133.40		
最大流量試験	3月11日 16:31	10A	0.3	23.5	1622.0	931.6	56.0	99.5	38.5	41.00	415.00	456.60	
		8A	0.3					39.5	104.00	435.30	OVER		
		6A	0.3					18.7	231.20	93.20	125.00		
最大流量試験	3月11日 16:54	10A	0.3	23.5	1634.0	980.7	59.0	105.8	45.0	55.90	OVER	OVER	
		8A	0.3					39.2	102.80	430.50	OVER		
		6A	0.3					18.6	229.60	93.00	323.50		

表13b 性能試験結果

試験モード		試験日時	試験体寸法	ノリゲン開口比	ノリゲン電流	入口ノリゲン圧力	入口ノリゲン圧力	入口ノリゲン温度	ノリゲン流量	試験体流量	試験体流量	ノリゲン差圧	全体差圧
			A	kPa	kPa	kPa	°C	l/min	l/min	l/min	kPa	kPa	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	23.0	1622.0	931.6	76.1	88.2	44.2	54.00	OVER	OVER
最小流量試験	18:16	8A	0.3						38.8	102.20	430.10	OVER	
		6A	0.3						0.6	0.00	0.00	0.00	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	23.0	1763.0	1088.5	81.5	95.2	43.7	52.90	OVER	OVER
最小流量試験	19:09	8A	0.3						38.4	101.20	427.50	OVER	
		6A	0.3						8.1	44.60	17.40	62.10	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	23.0	1788.0	1127.8	84.7	95.0	43.9	53.00	OVER	OVER
最小流量試験	19:19	8A	0.3						38.4	101.40	426.00	OVER	
		6A	0.3						7.4	36.60	14.20	52.00	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	22.0	1570.0	892.4	86.9	74.4	44.0	53.20	OVER	OVER
最小流量試験	19:43	8A	0.3						8.7	4.00	20.40	25.80	
		6A	0.3						18.5	230.00	93.50	325.00	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	22.0	1601.0	921.8	88.3	74.7	44.1	53.60	OVER	OVER
最小流量試験	20:03	8A	0.3						8.5	3.40	18.60	21.50	
		6A	0.3						18.4	231.00	93.20	326.20	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	22.0	1644.0	970.9	90.2	70.8	10.6	1.50*	30.30	33.30
最小流量試験	20:36	8A	0.3						38.2	99.80	418.00	OVER	
		6A	0.3						18.3	225.70	90.90	318.20	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	22.0	1653.0	980.7	90.7	69.9	9.7	2.78	25.80	28.80
最小流量試験	20:49	8A	0.3						38.2	99.00	416.80	OVER	
		6A	0.3						18.3	226.30	90.90	319.60	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	26.5	1728.0	1098.3	95.7	27.3	22.8	12.90	148.30	163.50
最小流量試験	21:21	8A	0.3						1.4	0.00	0.30	0.13	
		6A	0.3						1.0	4.20	0.09	0.60	
最小流量試験		3月11日	10A	0.3	26.5	1761.0	1127.8	96.9	29.8	3.1	0.00	2.68	2.74
最小流量試験	21:32	8A	0.3						15.0	13.80	63.00	79.00	
		6A	0.3						9.3	58.00	22.50	82.60	
													*
													参考値(大差正誤の測定値)

表13c 性能試験結果

試験七一下	試験日時	試験体寸法	リバーフローポジツト電流	入口ヘッド圧力	加圧ゾンク圧力	入口ヘッド温度	水の流量	試験体流量	試験体差圧	リバーフローポジツト	全体差圧
		A	kPa	kPa	°C	l/min	l/min	kPa	kPa	kPa	kPa
最大流量試験	3月12日 11:50	10A 8A 6A	0.5 0.5 0.5	25.0 1621.0	931.6	39.2 116.0	52.3 40.3 19.1	78.90 111.00 248.50	88.50 49.00 10.10	169.00 161.70 259.80	
最小流量試験	3月12日 12:19	10A 8A 6A	0.5 0.5 0.5	26.5 1664.0	990.5	50.6 29.6	3.1 0.30	0.25	0.58		
最小流量試験	3月12日 12:31	10A 8A 6A	0.5 0.5 0.5	26.5 1690.0	1029.7	54.8 30.7	17.0 20.8	19.70 12.20	7.30 12.30	28.70 26.20	
最小流量試験	3月12日 12:45	10A 8A 6A	0.5 0.5 0.5	26.5 1721.0	1059.1	59.4 31.5	16.7 12.1	7.40 9.30	7.50 2.80	16.50 13.90	
流配特性試験	3月12日 14:56	10A 8A 6A	0.3 0.5 1.0	25.0 1416.0	725.7	45.1 129.3	36.8 61.2	40.30 261.50	393.20 114.00	434.50 378.00	
流配特性試験	3月12日 15:13	10A 8A 6A	0.3 0.5 1.0	25.5 1411.0	725.7	44.5 152.2	43.5 64.8	25.2 449.10	6.06 455.20		
流配特性試験	3月12日 15:56	10A 8A 6A	0.3 0.3 1.0	24.5 1423.0	735.5	41.9 121.8	44.1 41.9	55.10 368.70	OVER OVER OVER	OVER OVER OVER	
流配特性試験	3月13日 10:23	10A 8A 6A	0.3 0.3 1.0	24.0 1468.0	764.9	24.0 87.3	31.8 30.3	31.60 66.40	289.50 260.40	322.80 328.60	
								21.8	334.00	4.62	338.20

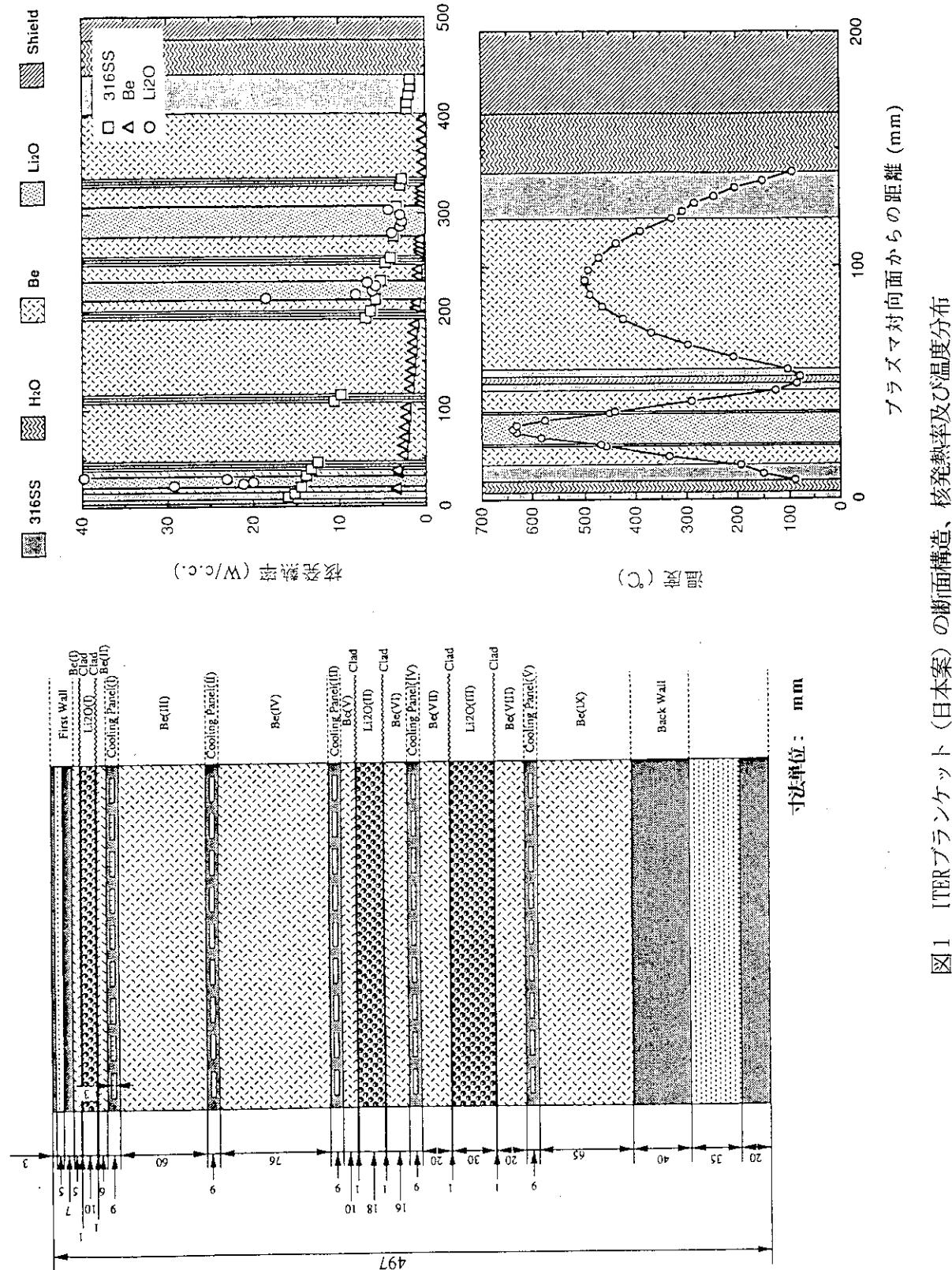


図1 ITERブランケット(日本案)の断面構造、核発熱率及び温度分布
(1991年設計段階の外側ブランケットモデル)

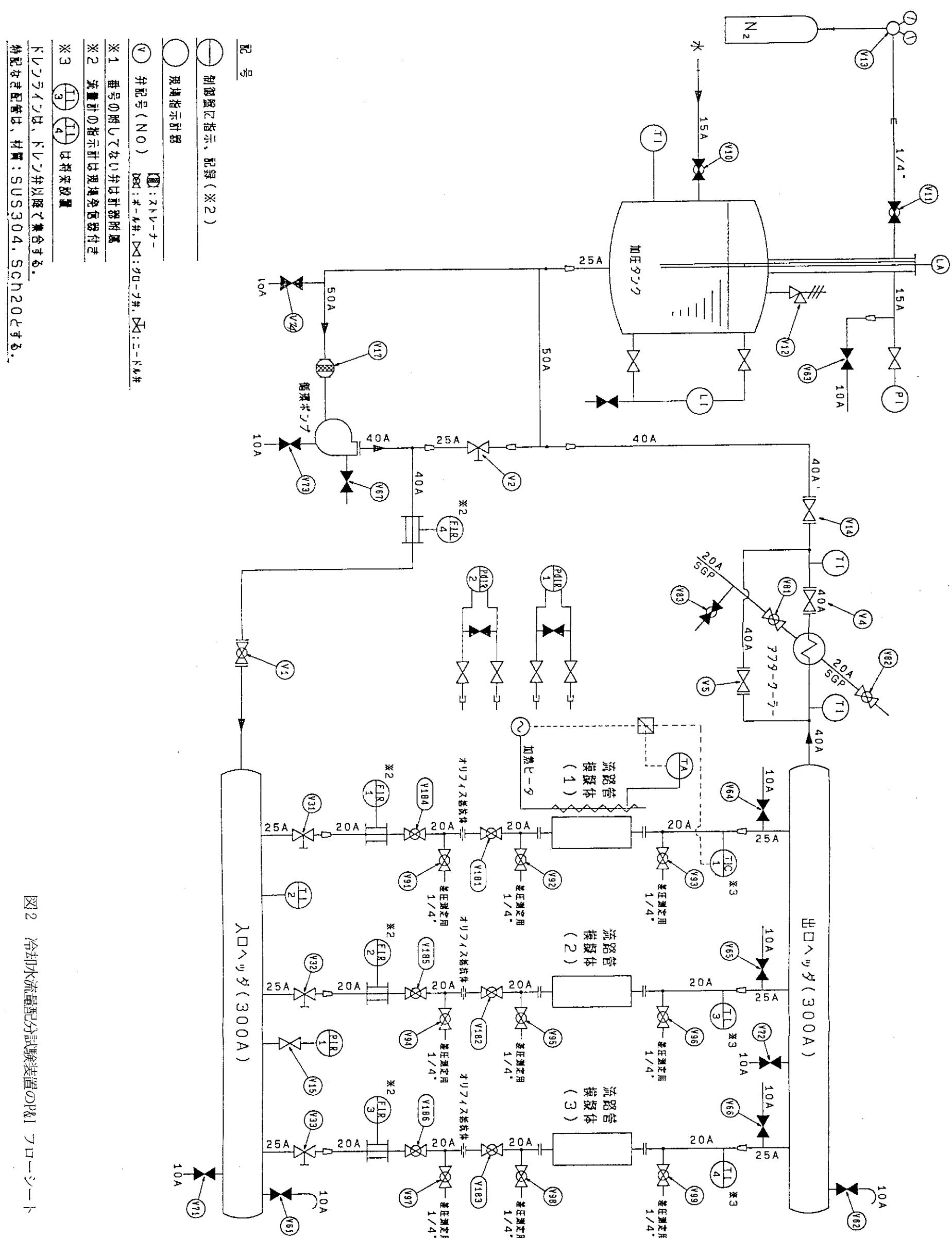


図2 冷却水流量配分試験装置の構成 フローシート

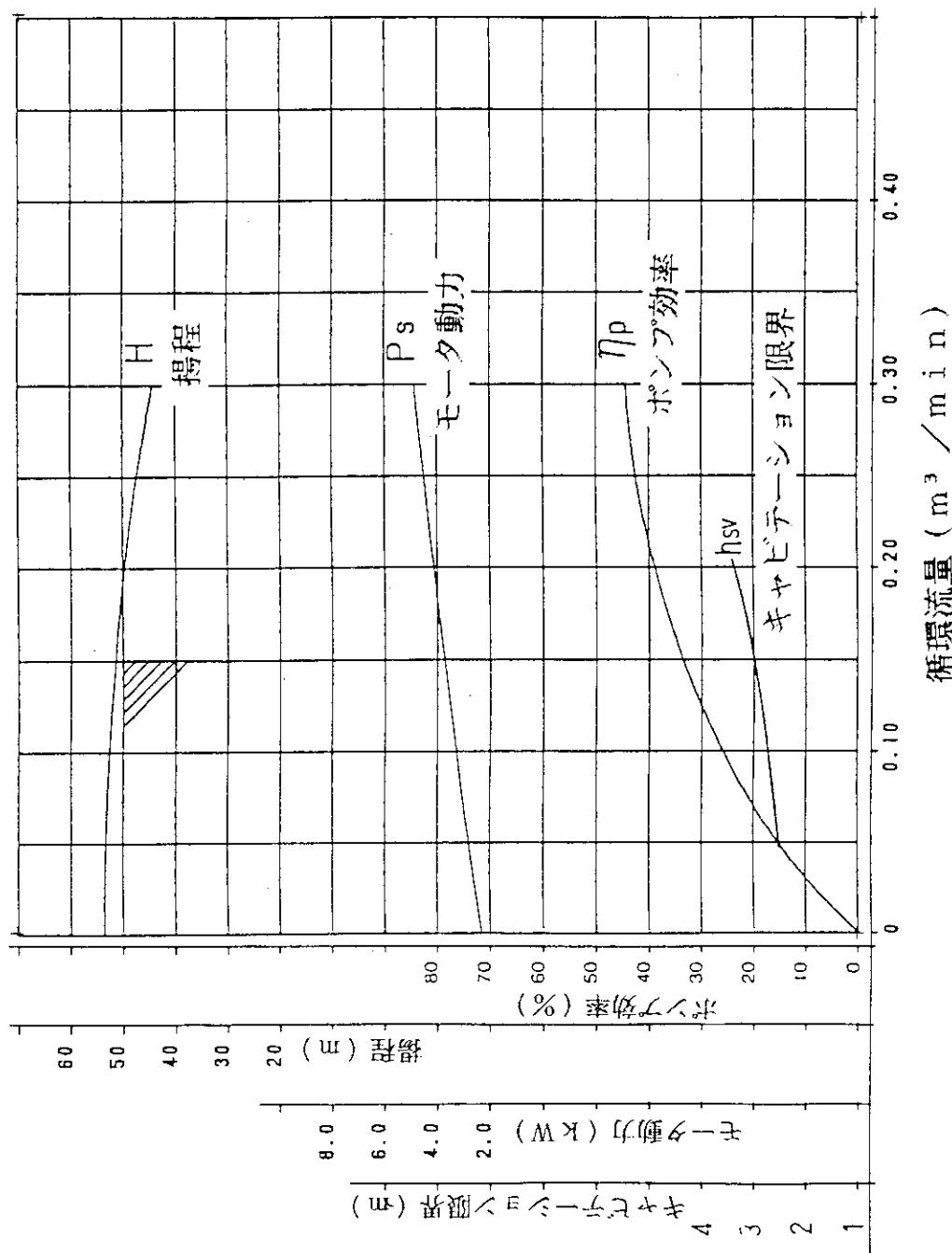


図3 冷却水循環ポンプの予想性能曲線

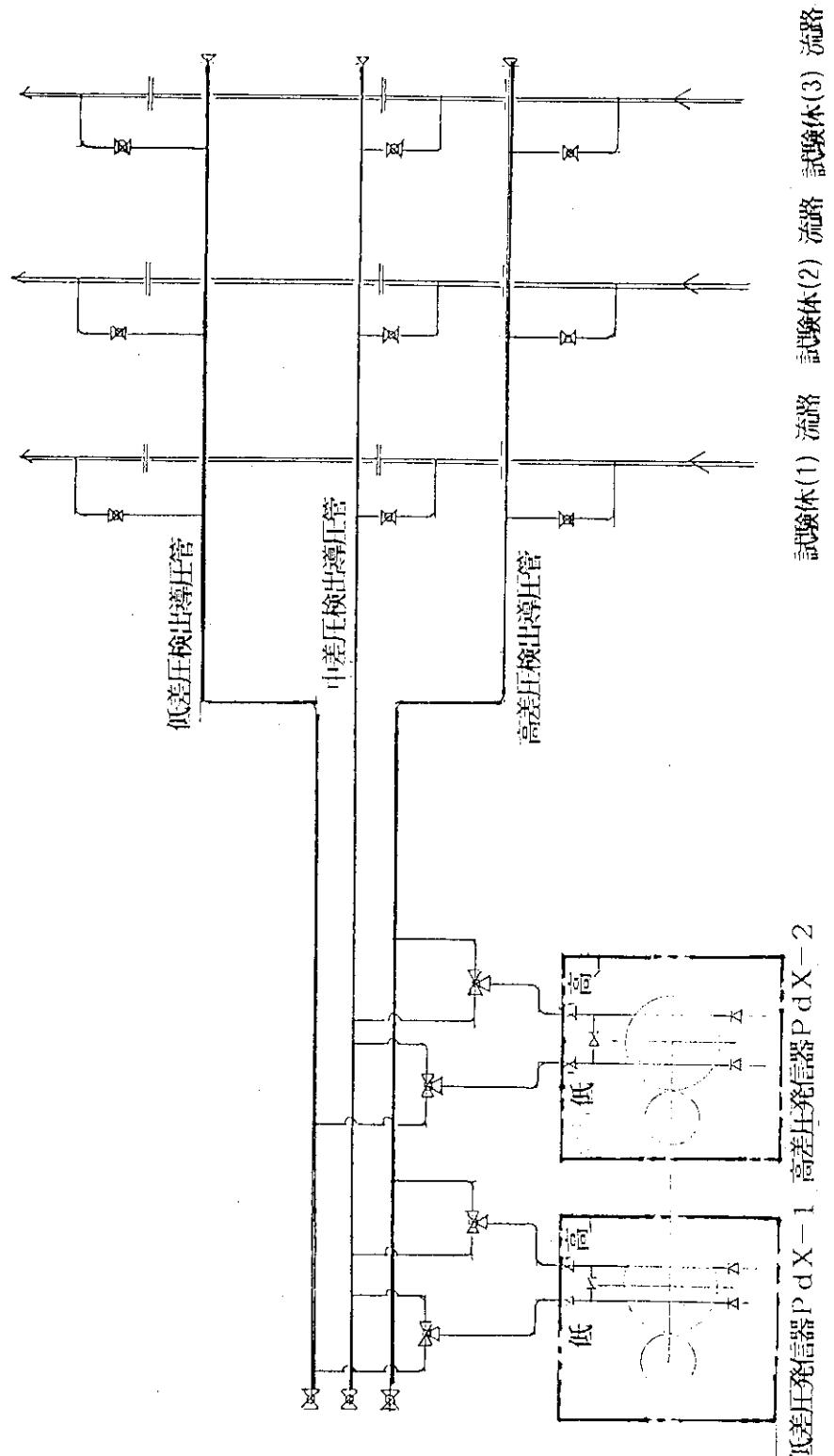


図4 系統差圧測定系の導圧配管構成

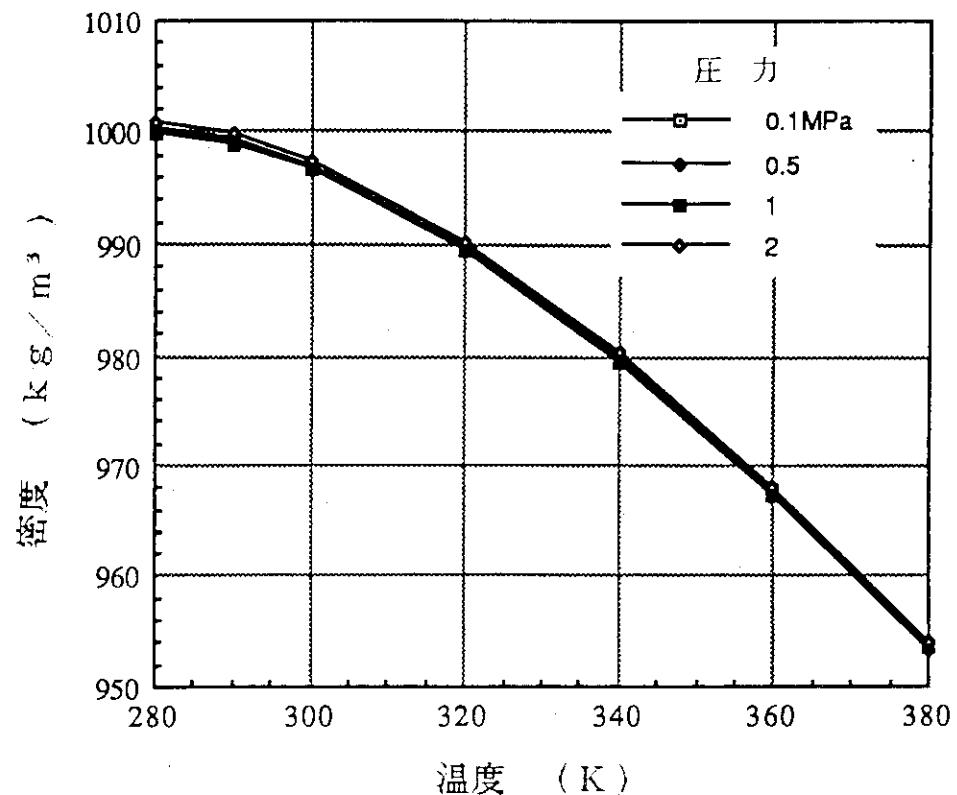


図5 冷却水（軽水）密度の温度変化

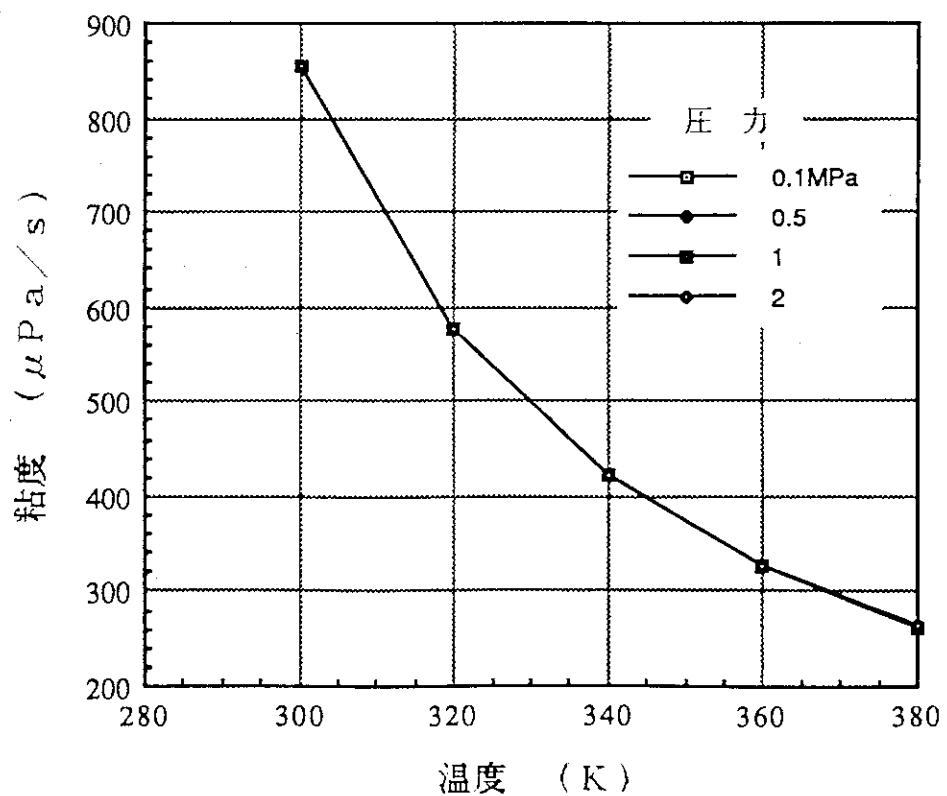


図6 冷却水（軽水）粘度の温度変化

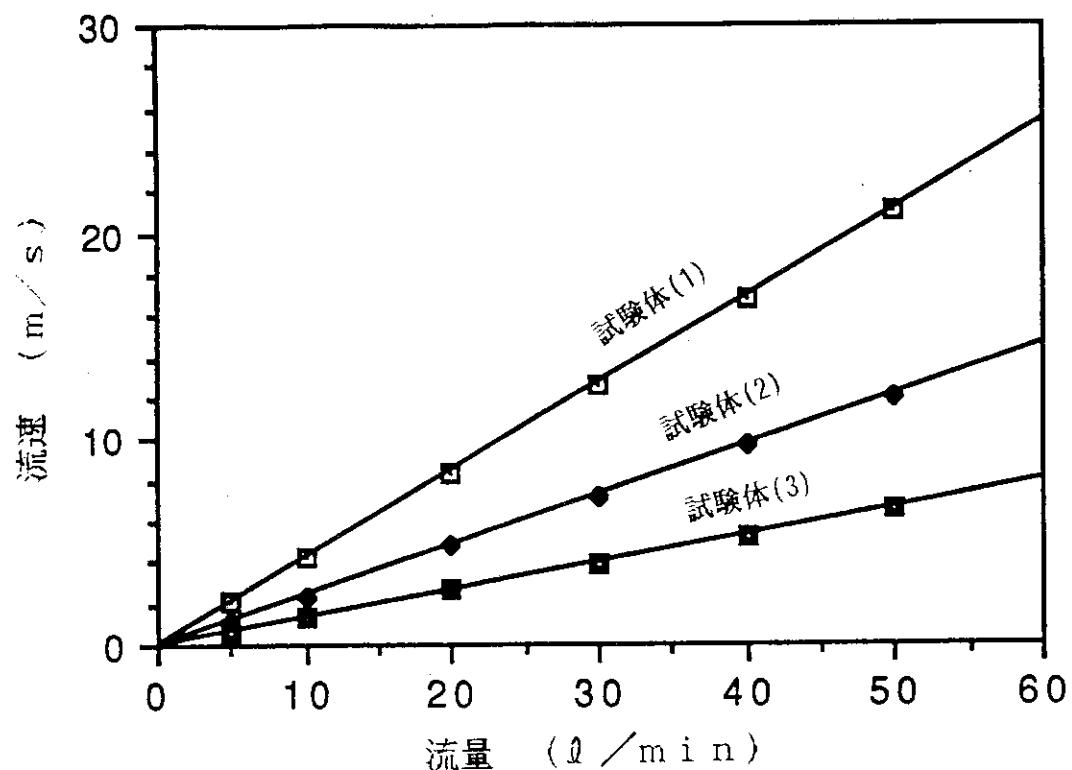


図7 試験体における冷却水流量と流速

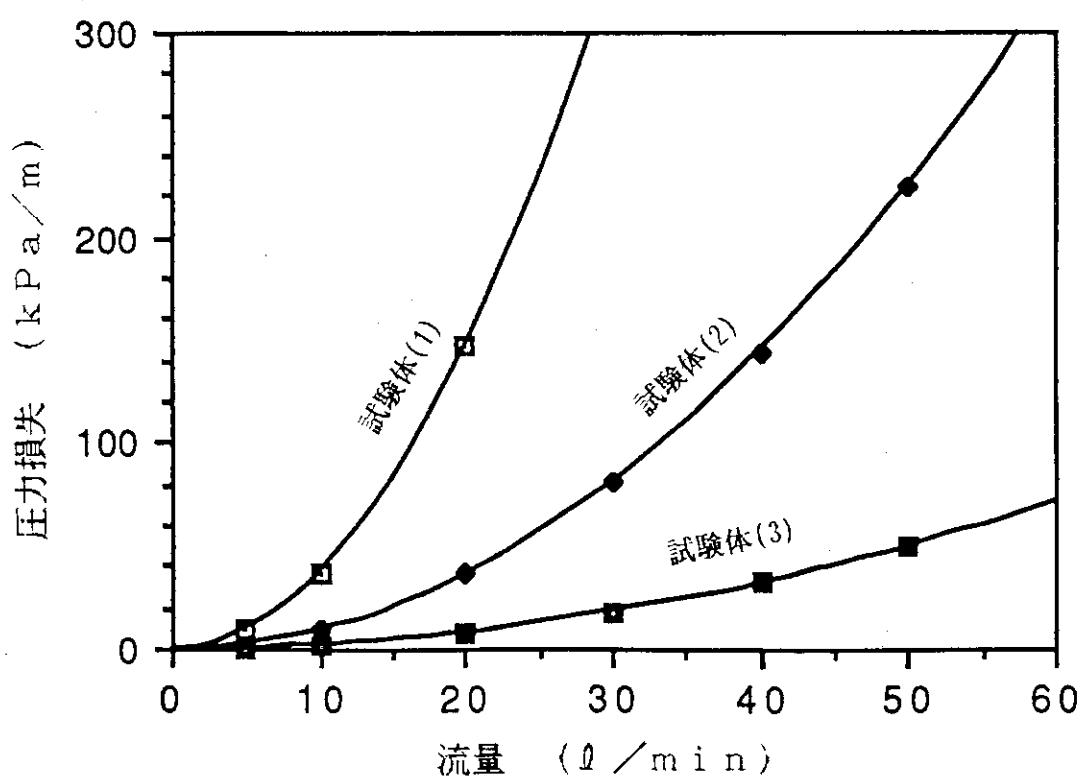


図8 試験体における冷却水流量と圧力損失

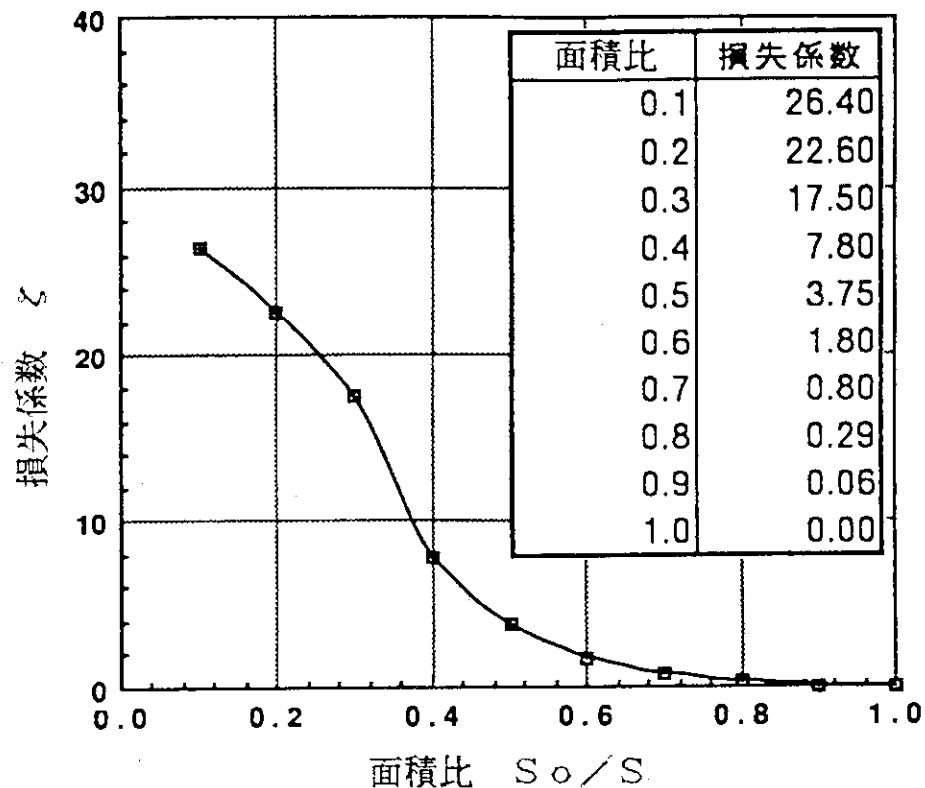


図9 オリィフィス圧損係数と絞り面積比

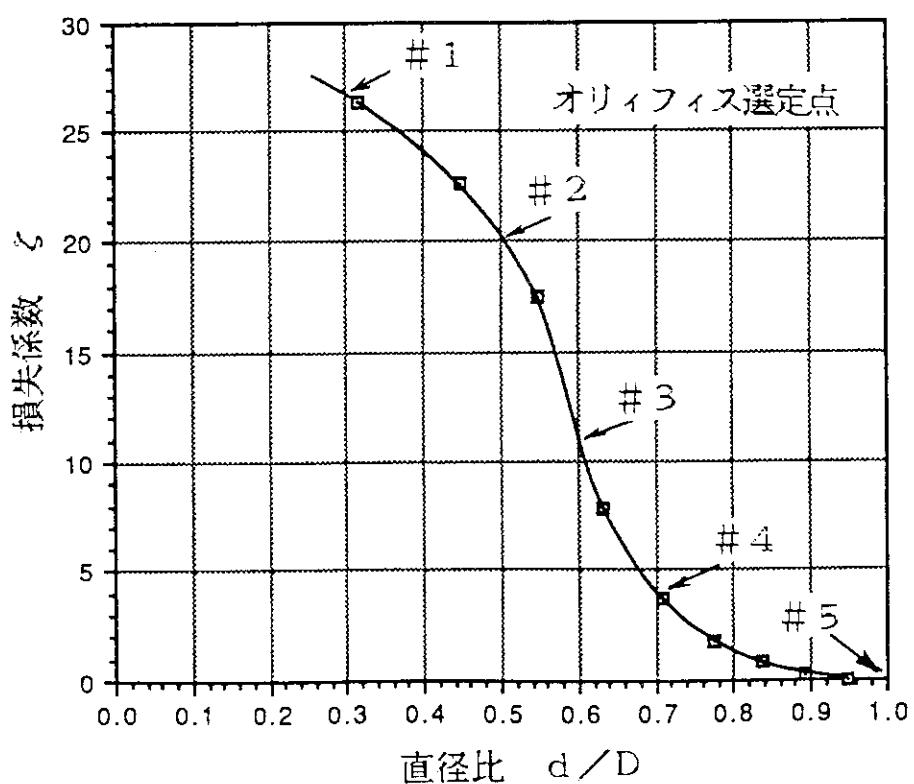


図10 オリィフィス圧損係数と絞り直径比

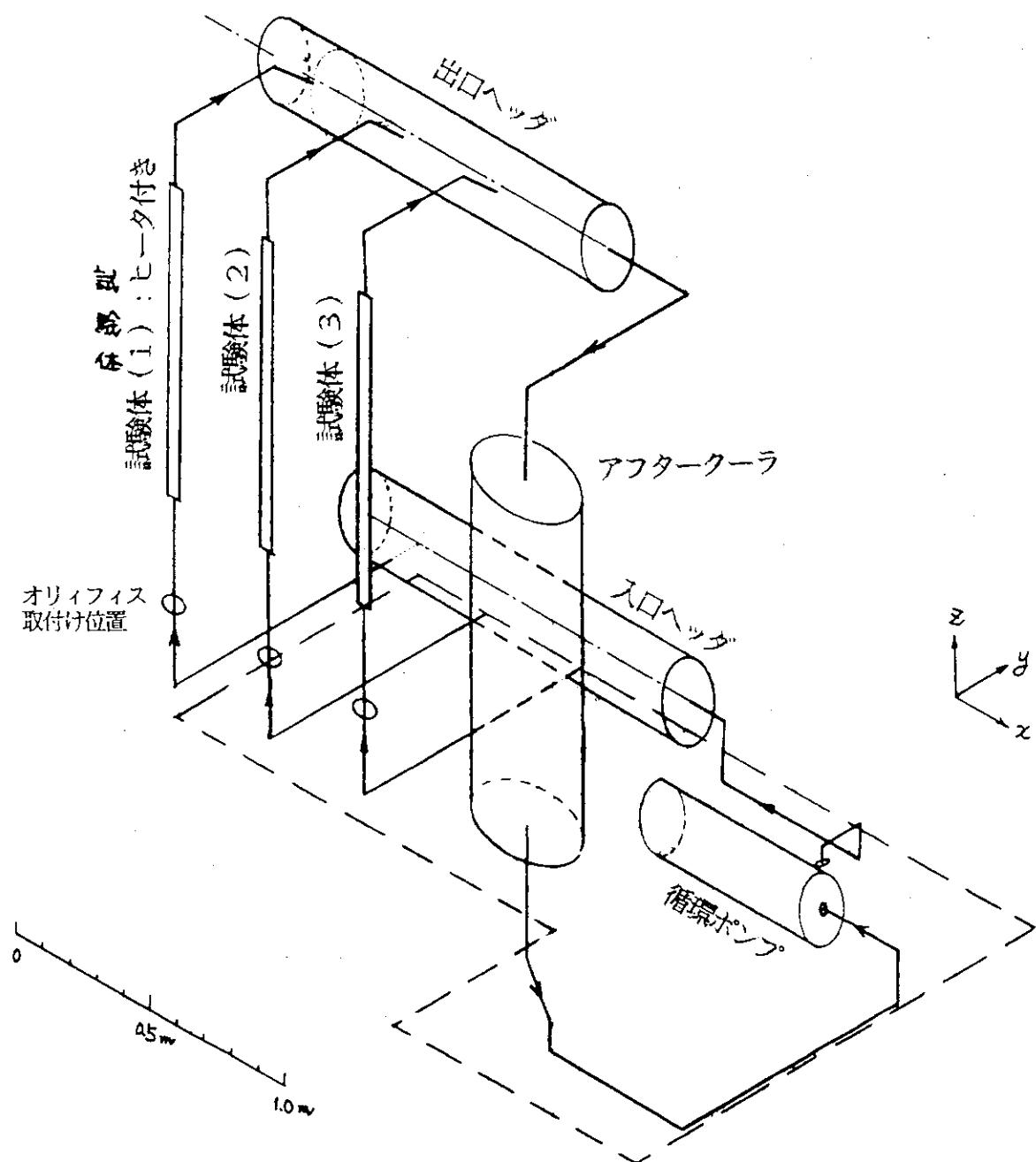


図11 試験装置配管系の立体配置概念図

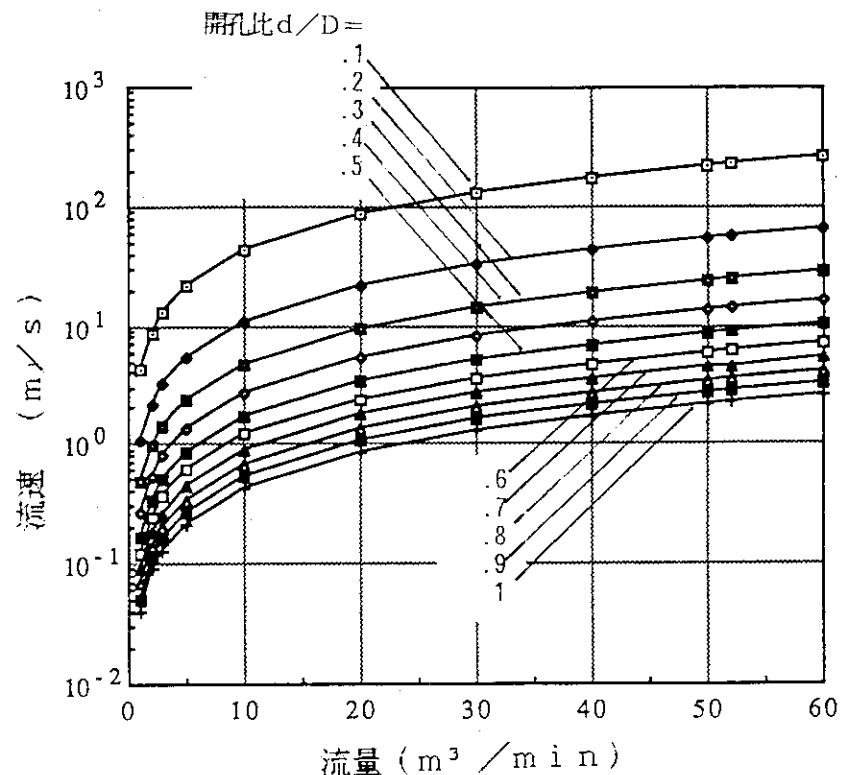


図12 オリィフィス部の冷却水流速 (予想値)
(配管口径を22.2mmとした場合)

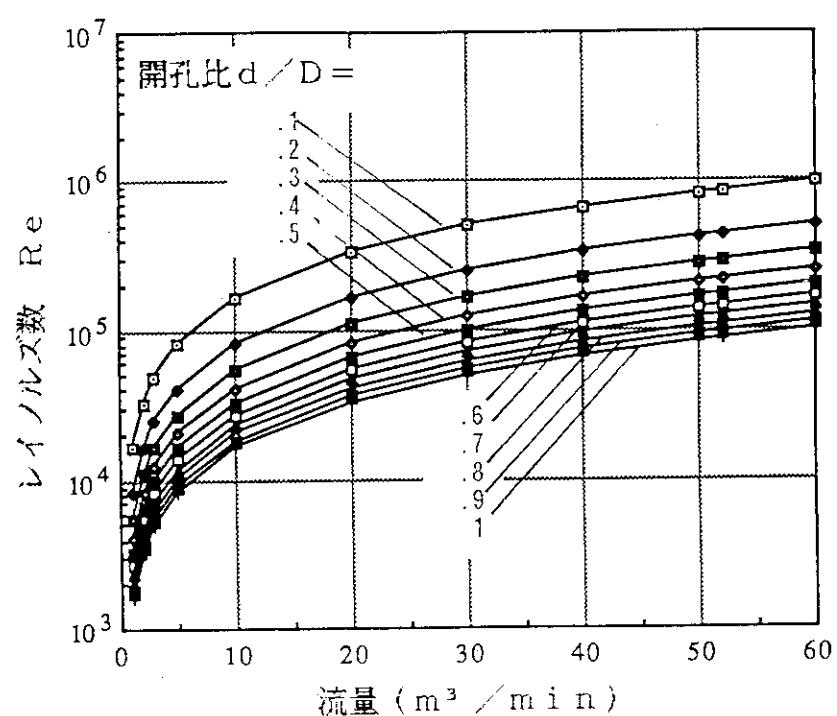


図13 オリィフィス部の冷却水レイノルズ数 (予想値)
(配管口径を22.2mmとした場合)

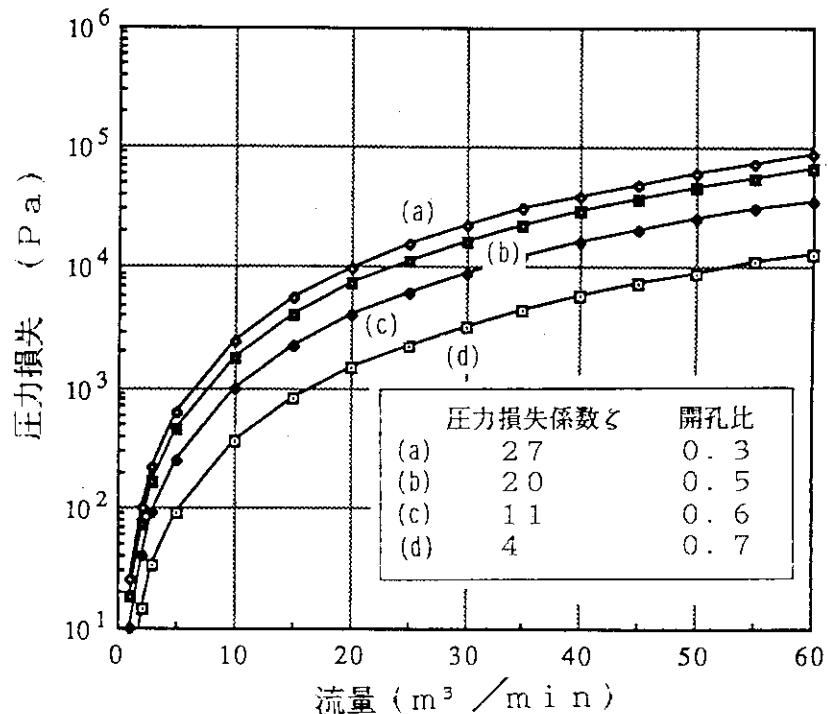


図14 オリィフイス部の冷却水圧力損失（予想値）
(配管口径を22.2mmとした場合)

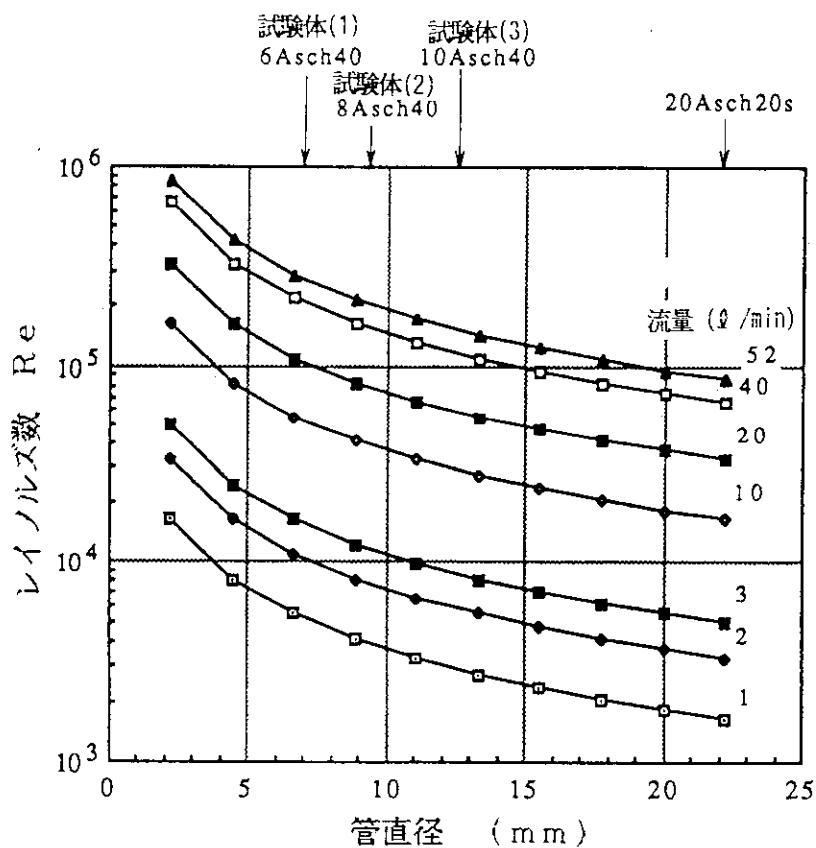


図15 試験装置各部の冷却水レイノルズ数（予想値）

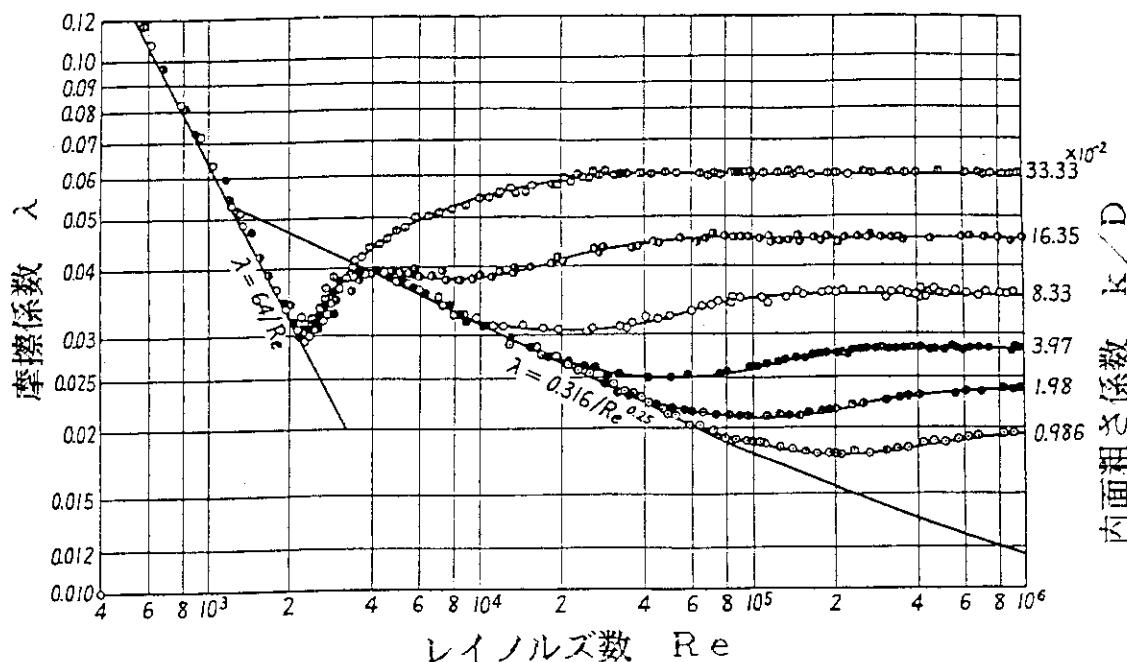


図16 管摩擦係数データ [4、5]

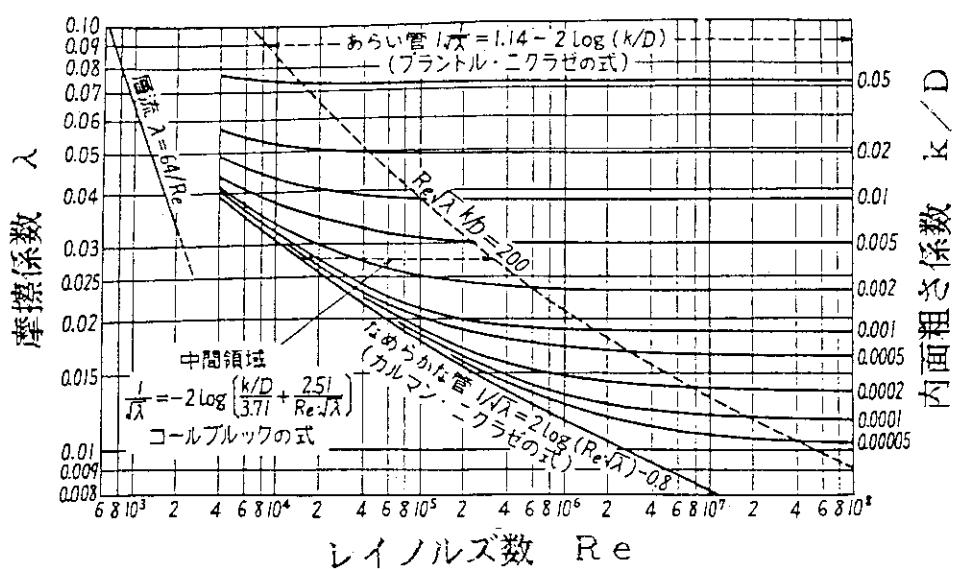


図17 管理摩擦係数データ (ムーディ線図) [4、5]

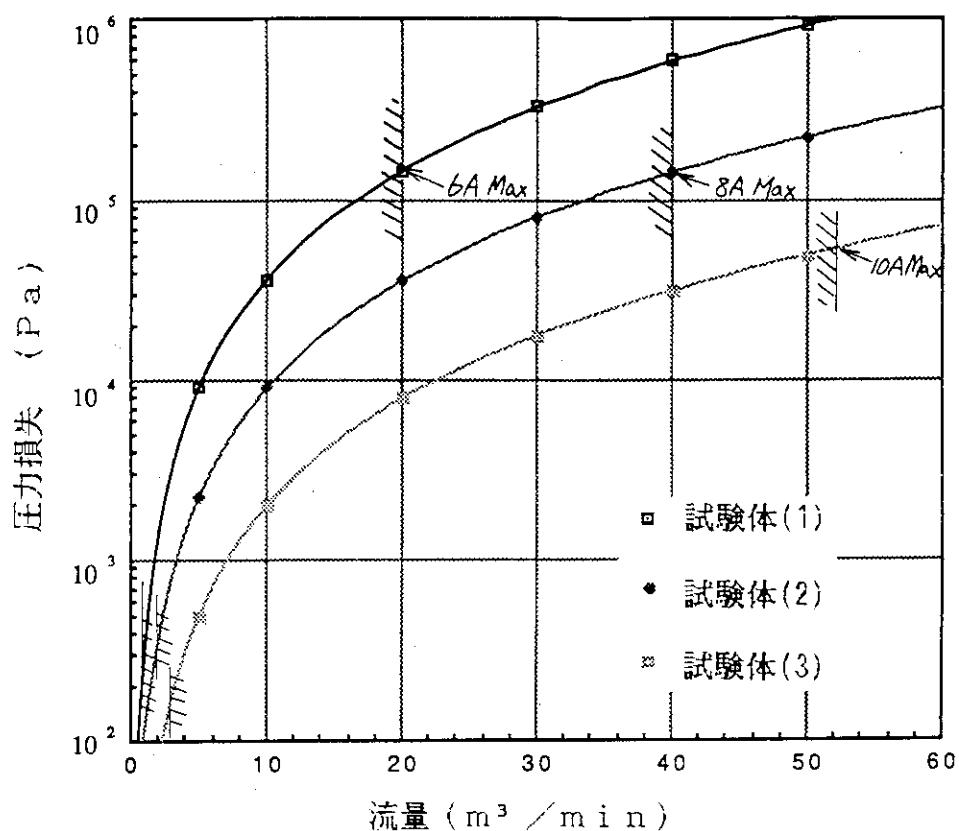


図18 試験体の再客水圧力損失（予想値）

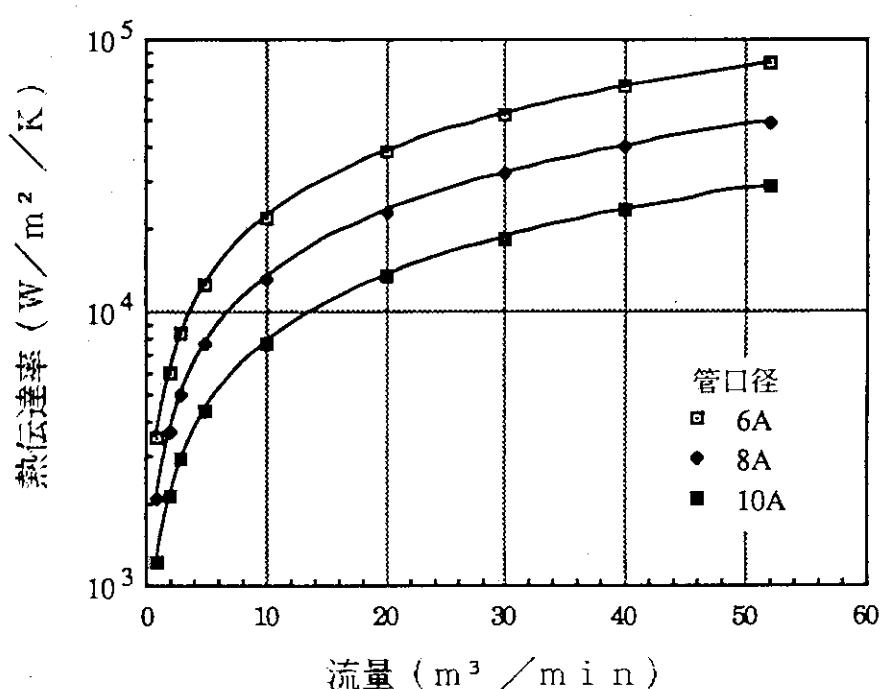


図19 試験体の熱伝達率（予想値）

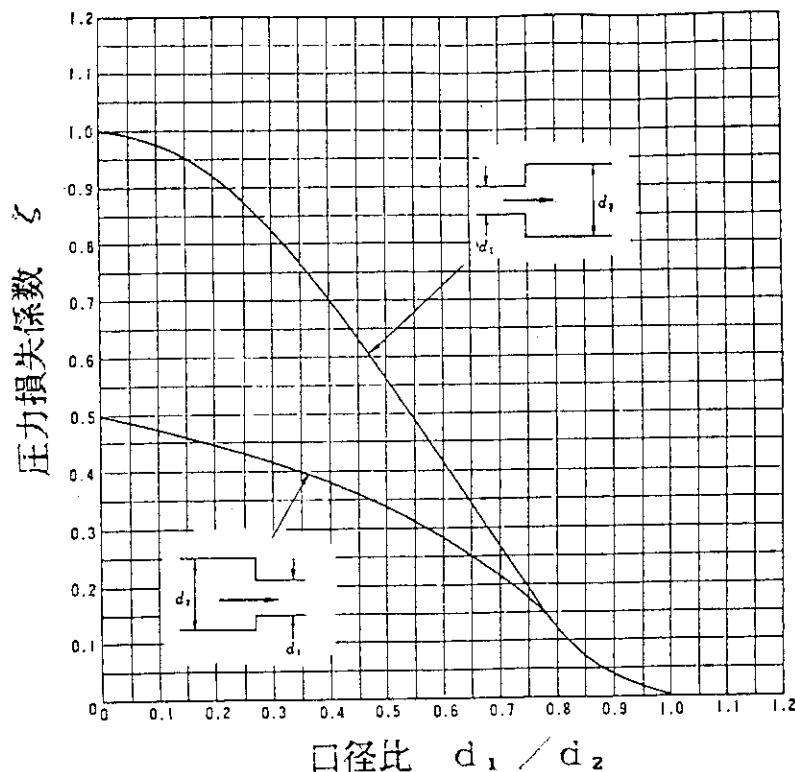


図20 急拡大／縮小管の圧力損失係数データ [7]

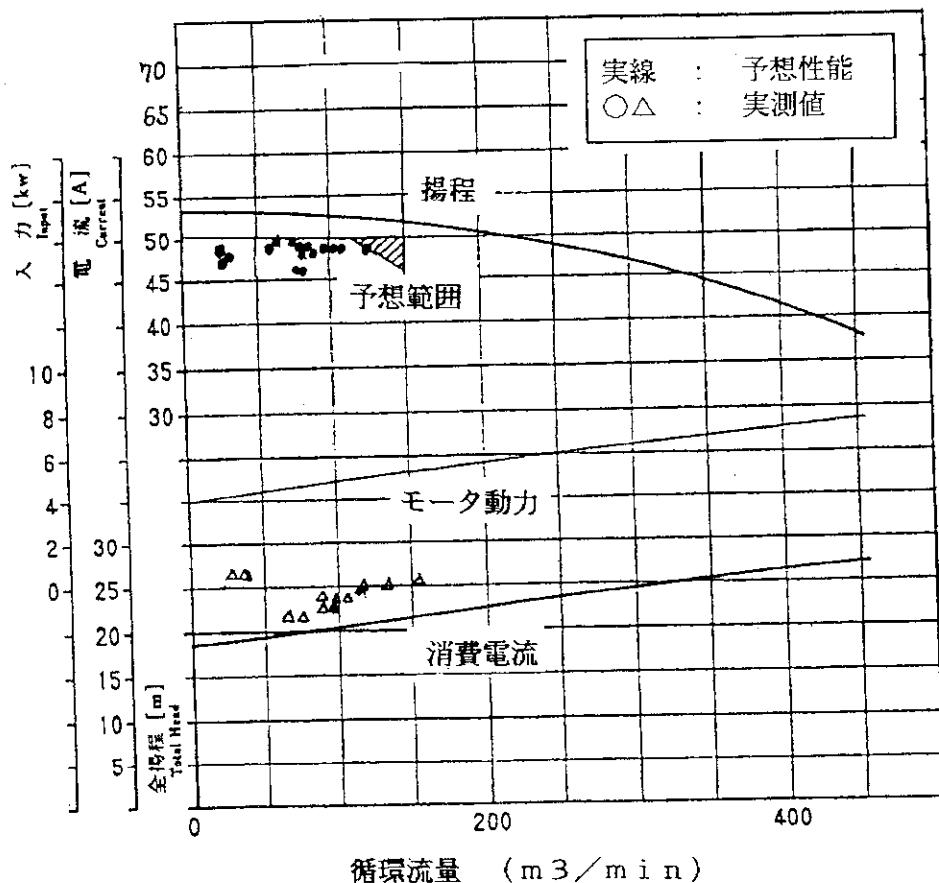


図21 循環ポンプ性能実測値（試運転結果）

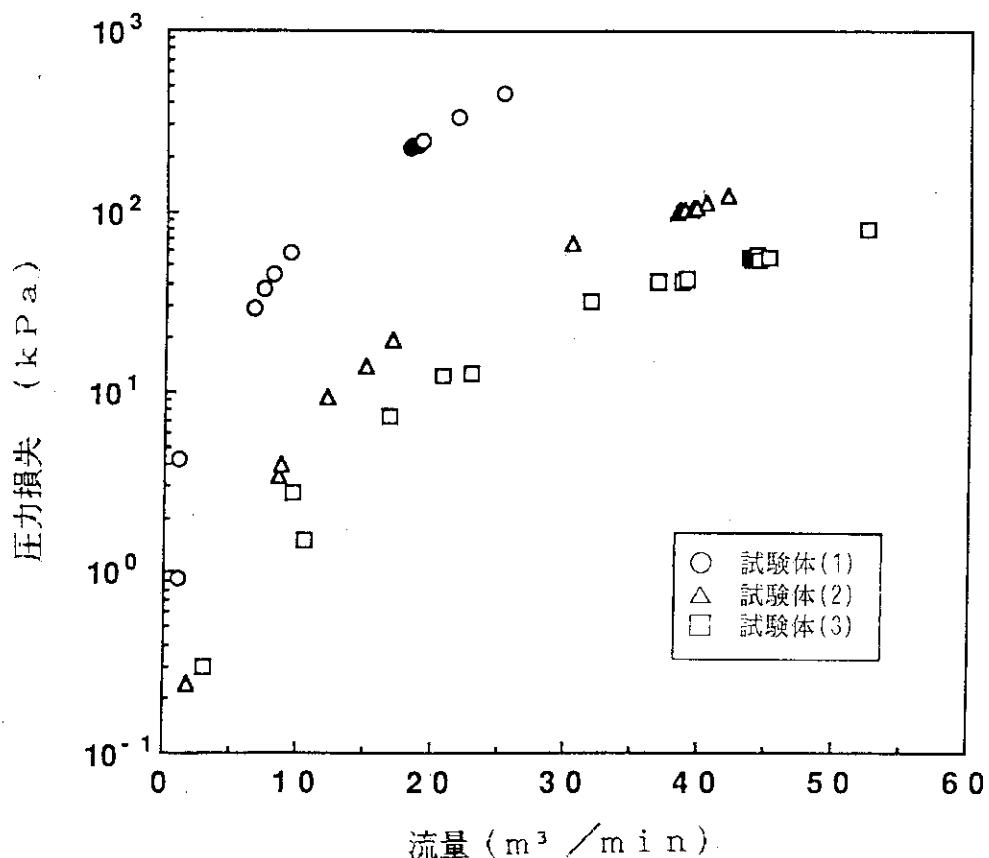


図22 試験体の圧力損失実測値（試運転結果）

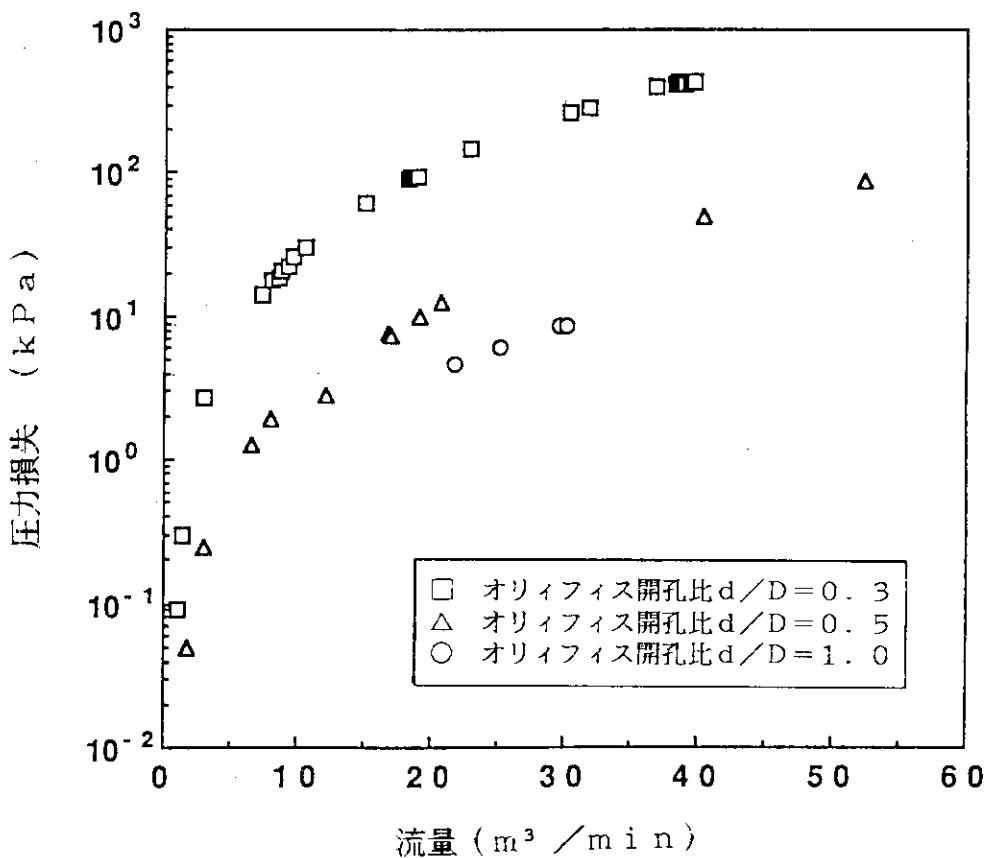


図23 オリィフィス部の圧力損失実測値（試運転結果）

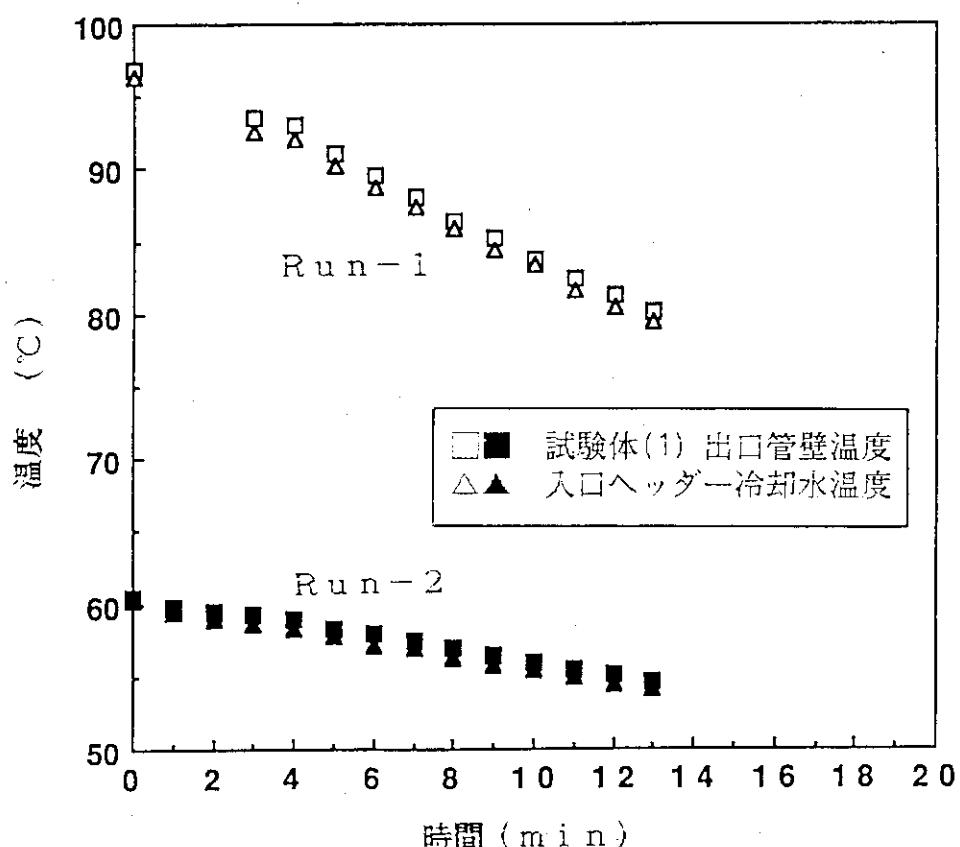


図24 アフタークーラ性能実測値（試運転結果）