

JAERI-Tech
95-046



TRU消滅処理プロセス用燃料要素の熱流動試験計画

1995年10月

日野竜太郎・羽賀勝洋・滝塚貴和・会田秀樹・関田健司

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。
入手の問合わせは、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、お申し越してください。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 Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)高野高速印刷

TRU消滅処理プロセス用燃料要素の熱流動試験計画

日本原子力研究所東海研究所高温工学部
日野竜太郎・羽賀 勝洋・滝塚 貴和⁺
会田 秀樹・関田 健司

(1995年9月4日受理)

原研はOMEGA計画の下で、高レベル廃棄物から抽出される超ウラン元素 (TRU) を分離するプロセスと、TRUを短半減期あるいは安定核種に変換する消滅処理プロセスの開発を進めている。消滅処理プロセスの開発を促進するため、アクチノイド燃料を充填したヘリウムガス冷却型専焼高速炉 (ABR) 用燃料要素の最適化をはかる熱流動試験計画を立案した。試験計画では、試験項目を抽出し、必要な試験装置の仕様を明らかにした。また、本計画に従い、模擬燃料要素 (幅11.7mm, 全長600mmの多孔二重空間内に模擬燃料粒子を充填) を試作するとともに、熱流動特性を把握するための試験装置 (1MPa, 400m³/h のヘリウムガス又は窒素ガスを流動させるガスループ) を設計・製作した。また、試験装置による予備試験により、試験装置の流力性能を確認した。本報告は、ABR炉心設計のための熱流動試験計画のほか、模擬燃料要素と試験装置の概要、予備運転結果について述べたものである。

Thermal and Hydraulic Test Plan of TRU Fuel Element
for Transmutation Process

Ryutaro HINO, Katsuhiko HAGA, Takakazu TAKIZUKA⁺
Hideki AITA and Kenji SEKITA

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

(Received September 4, 1995)

JAERI is developing processes to partition long-lived transuranic elements (TRU) from high-level radioactive waste and transmutation processes to transform TRU into shorter-lived or stable nuclides under the OMEGA program. To promote developments of transmutation processes, thermal and hydraulic tests were planned to optimize a fuel element of an actinide burner fast reactor (ABR) cooled by helium gas. Along the test plan, a simulated fuel element in which simulated fuel particles were filled up in the porous annular space of 11.7mm in gap width and of 600mm in length was manufactured experimentally, and also a test apparatus which could circulate helium gas or nitrogen gas at a maximum flow rate of 400m³/h under 1MPa was designed and fabricated. Hydraulic performance of the test apparatus was confirmed through preliminary operations. This paper presents mainly a thermal and hydraulic test plan of the fuel element for developing ABR core design, outlines of the simulated fuel element and the test apparatus, and preliminary operation results.

Keywords : Transuranic Elements, OMEGA Program, Transmutation Process, Actinide Burner Reactor, Fuel Element, Thermal and Hydraulic Test, Test Plan, Test Apparatus, Preliminary Operation

⁺ Department of Reactor Engineering

目 次

1. はじめに	1
2. He冷却型専焼炉の概要	2
3. 燃料要素の研究開発計画	5
3.1 試験計画	5
3.2 試験内容	5
4. 試験装置	10
4.1 基本設計方針及び試験装置の概要	10
4.2 TRU燃料要素模擬試験体	11
4.3 試験ループの機器仕様	13
5. 調整試験結果	46
6. 結 言	54
謝 辞	54
参考文献	54

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Actinide Burner Fast Reactor Cooled by Helium Gas	2
3. Test Plan to Develop Fuel Element	5
3.1 Test Plan	5
3.2 Test Items	5
4. Test Apparatus	10
4.1 Basic Design Line and Test Apparatus	10
4.2 TRU Simulated Fuel Element	11
4.3 Specifications of Test Apparatus	13
5. Preliminary Operation Results	46
6. Concluding Remarks	54
Acknowledgments	54
References	54

1. はじめに

核燃料の再処理で抽出される高レベル廃棄物（HLW）には核分裂生成物や超ウラン元素（TRU）などの超長半減期成分が含まれている。これらを人間の生活圏から隔離するために人工及び天然バリアー（地層）による処分方法の開発が進められているが、超長期にわたる確実な隔離を実証することは容易ではない。そこで、HLWを幾つかの元素群に分離（群分離）し、中性子による核分裂反応、核破砕反応、光核反応などで短半減期あるいは非放射性核種に変換（消滅処理）して処理・管理を容易にする方法・システムの研究開発が進められている。HLWの半減期を大幅に短縮することができれば、将来にわたる潜在的有害性を未来の世代への「つけ」として残すことがなくなり、また、原子力利用、放射性廃棄物管理に対するコンセンサス形成に大きく寄与することができる。

原研は、原子力委員会が定めた群分離・消滅処理技術研究開発長期計画（OMEGA計画）に従い、群分離・消滅処理システムの評価及び技術開発、核データ、燃料物性データ整備などの基礎研究を進めている⁽¹⁾。消滅処理システムに関して、原研は、TRUのうち超長半減期成分であるNp、Am、Cm等のマイナーアクチノイド（MA）を燃料化し、これを消滅処理するためにヘリウム（He）ガス又は液体金属を冷却材とする専焼高速炉、及び大強度陽子加速器駆動システムを提案している⁽²⁾。このうち、TRU消滅処理専焼高速炉は、核分裂反応で発生する大量の中性子を消滅処理に効果的に利用できること、核分裂反応で生じた熱を発電等に利用できること、必要な技術が既存の技術の延長線上にあり、中性子エネルギースペクトルや中性子束密度を消滅処理に最適な条件に設定できることなどから、他の方式に比べて有利な処理方法であると言える。

とくにHeガスを冷却材とする専焼高速炉（He冷却型専焼炉）は、不活性なHeガスを使用するために冷却材の放射化問題、材料制限が少ないなどの利点を有している。また、システムの構築においては、大洗研究所（原研）で建設中の高温ガス炉（高温工学試験研究炉）の技術⁽³⁾、とくにHeガス技術を応用できるという利点も有している。

しかし、He冷却型専焼炉の炉心を設計するには、MA燃料、核反応、燃料要素等について未確定な部分が多い。そこで、燃料の安全性を確保するうえでとくに重要な燃料要素の伝熱流動性能の把握とデータベースの拡充、さらに、強制循環喪失事故等においても燃料の安全性が確保できる燃料要素構造の開発を目的とした試験を立案した。これに基づいて試験装置の検討を行い、Heガス、窒素ガスなどの各種ガスを流動させて広範囲な流量条件下で試験が可能なガスループと概念検討⁽⁴⁾で提案された構造の模擬燃料要素試験体を製作した。

本報では、He冷却型専焼炉の燃料要素構造最適化のための試験計画、製作した試験装置の概要、試験装置の調整運転結果について述べる。

2. He冷却型専焼炉の概要

TRU専焼炉の概念設計⁽⁴⁾においては、以下のような条件が設定された。

- (1) TRUを燃料の主成分とする。
- (2) TRU燃料で臨界になるようにし、中性子捕獲による高位のTRU派生を少なくするために非常に硬い中性子スペクトルを達成する。
- (3) TRU装荷量を少なくする。
- (4) 消滅処理速度を大きくするために中性子束密度を大きくする。
- (5) 熱出力3000MWの軽水炉10数基から発生するTRU（年間約300kg）を専焼炉1基で消滅する。

上記の条件に基づいてHe及び液体金属(Na)を冷却材とする専焼高速炉の概念設計が行われた。概念設計で策定されたHeガスを冷却材とする専焼高速炉の燃料要素概念と原子炉設計諸元をFig. 2.1とTable 2.1に示す。燃料粒子は、高温ガス炉燃料と類似の構造を持つ直径が1.47mmの球形被覆粒子である。燃料核はMAを主成分としたTRU窒化物であり、燃料核の表面を窒化チタン(TiN)で二重に被覆する。燃料要素は、同心二重円筒の環状空間内に燃料粒子を充填した構造で、円筒はステンレス鋼製の多孔管(フリット)である。内側フリットの内径は14mm、外側フリットの外径は42mm、これらの肉厚は1mm、燃料粒子充填高さは600mmである。Heガスは燃料要素下部から内側フリットに流入し、環状の燃料粒子層を半径方向外向きに流れながら燃料粒子を冷却し、外側フリットから流出する。このような流動から、燃料要素はラジアルフロー型燃料要素とも呼ばれる。この燃料要素は炉心内に一様な三角ピッチ44.1mmで配列される。

ところで、ガスは熱伝導率及び熱容量が小さいため、高出力密度のガス冷却炉心は大量のガスを流動させることから圧力損失が大きくなる。炉心の圧力損失が大きいと、ガス循環のために大きな動力が必要となるのに加えて、強制循環喪失時(冷却材流動停止時)に自然循環冷却能力が低下するなど安全性の面からも問題を生じる。このため、高い出力密度が達成できるとともに圧力損失を十分低くできるような炉心構造、とくに燃料要素構造とすることが重要である。粒子層の圧力損失は層厚さのほぼ3乗に比例することから、概念設計の燃料要素構造は粒子層厚さが12mmと薄くしてある。さらに、Heガスは粒子層内で加熱されて膨張するが、Heガスの流れ方向を内側フリットから外側フリットへと半径方向外向きとしてガスの熱膨張による流れ方向の流速増加を抑制するようにし、流速の増加による圧力損失の上昇を防ぐようにしている。

また、TiN被覆層の厚さが薄いTRU燃料粒子では、FP放出を防止するために燃料最高温度は高温ガス炉と比較して低い温度に制限されている。燃料の許容最高温度をTRU窒化物燃料の融点(絶対温度)の約1/3(1000K)と設定した。また、炉心入口でのHeガス温度及び圧力はそれぞれ127°C及び10MPaであり、炉心での圧力損失は13kPaと想定している。

このようにHe冷却型専焼炉には微小な窒化物粒子燃料を用いるため、体積当たりの伝熱面積を非常に大きくできることから、従来の粒子充填層の熱伝達式から想定すると優れた除熱性能を有している。このため、出力密度を大きくすることができ、消滅処理速度はナトリウム冷却型専焼炉の7.3%/yearに対してHe冷却型専焼炉では17.2%/yearと約2.4倍大きくなるものと

Table 2.1 Specification of MA burner reactor cooled by helium gas

燃料粒子	形 式 粒子直径 燃料組成 被覆組成 被覆厚さ	被覆粒子 1.47mm (66% Np Am Cm-34% Pu) _{1.0} Ni _{1.0} TiN 0.135mm
燃料要素	形 式 内側フリット内径/肉厚 外側フリット外径/肉厚 燃料要素ピッチ 炉心寸法、高さ/半径 燃料要素数 TRU初期装荷重量 Np-237 Am and Cm Pu Total	多孔二重円筒内粒子燃料充填 14mm / 1mm 42mm / 1mm 44.1mm 6000mm / 7400mm 930 765kg 598kg 702kg 2065kg
熱出力	1200Mwth	
運転条件	冷却材 全流量 入口圧力 圧力損失(予想) 燃料最高温度 フリット最高温度 冷却材温度 入口/出口 全中性子束(炉心平均) 平均反応エネルギー 中性子割合(>1MeV) サイクル長、全出力日 1サイクル当たりMA転換率 1サイクル当たり燃焼率	ヘリウム 1088kg/s 10Mpa 13kPa 722°C 560°C 127°C / 340°C 8.4×10^{15} n/cm ² ·s 743keV 22% 300 25.3% 17.3%

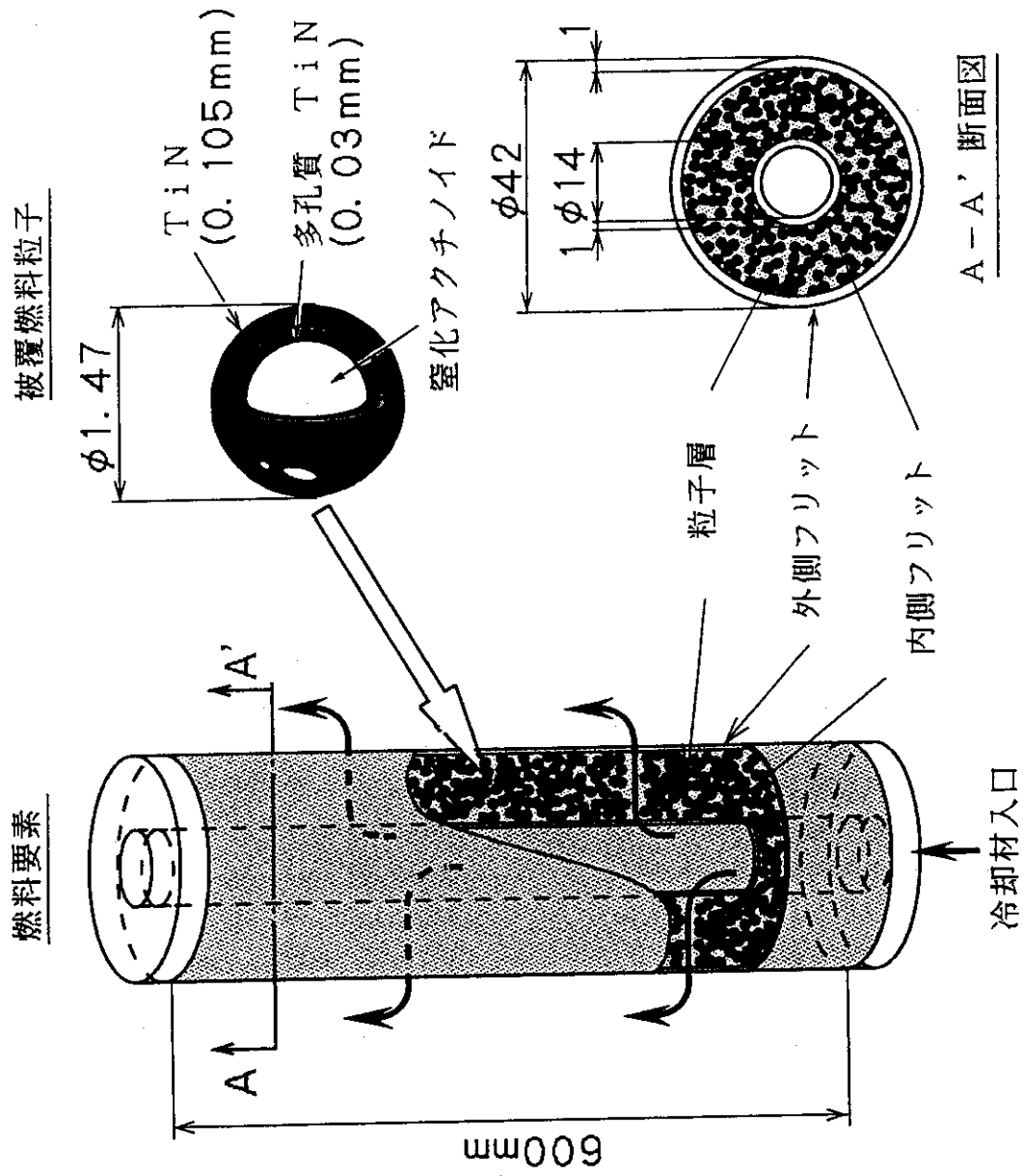


Fig. 2. 1 Schematic drawing of fuel element and fuel particle under conceptual design

3. 燃料要素の研究開発計画

3. 1 試験計画

He冷却型専焼炉の開発は、OMEGA計画に沿ったスケジュールで実施する。OMEGA計画における専焼炉開発（燃料開発を除く）は、次のスケジュールで展開されている⁽⁵⁾。

- 第Ⅰ期（1988～1996）： 原子炉炉心・システム設計研究
 第Ⅱ期（1997～2000）： 実験炉予備設計
 2001～ : 実験炉設計・建設

上記のスケジュールにおいて、適時C&Rを行い、計画の見直しと修正を行う。

Table 3.1 に燃料要素の熱流動試験のスケジュール（案）を示す。熱流動試験は、OMEGA計画の第Ⅰ期で行う燃料要素の伝熱流動試験と、第Ⅱ期で行う燃料要素集合体の伝熱流動試験（工学試験）に分けた。これらの試験は、効率的な消滅処理に必要とされる高出力密度達成のための燃料要素及びその集合体の技術的成立性を、燃料要素及び要素集合体の試作と伝熱流動試験によって確認するとともに、炉心設計のための熱流動データを取得・整備し、試験と並行して解析コードの開発と高度化を行うことを目的とする。

燃料要素の伝熱流動試験では、燃料要素内の流動状況、圧力損失、燃料粒子の熱伝達率等を調べつつ燃料要素の改良をはかり、低い圧力損失と要素内で偏流のない均一な流量分布を実現し、かつ、過渡状態、強制循環喪失事故時等においてもhot spotを生じることなく、強度的にも優れた燃料要素構造を確定する。この成果を基にして複数本の燃料要素を集合した模擬燃料集合体を製作し、燃料集合体の熱流動試験（工学試験）へ移行する。工学試験では、定常及び過渡状態における各燃料要素への流量配分特性、熱伝達特性などを調べるとともに、強制循環喪失事故、圧力喪失事故等を模擬した安全性試験を行い、燃料集合体構造の改良と最適化をはかる。工学試験で得られた結果及びノウハウは専焼実験炉の予備設計に反映するとともに、安全審査用実証データを取得する炉外実証試験装置の設計製作などにも反映する。

3. 2 試験内容

試験内容については、燃料要素の伝熱流動試験と工学試験に分けて述べる。工学試験については、燃料要素構造が最適化されるまでの段階で詳細な試験内容を決定するものとし、本報では概略を述べる。

(1) 燃料要素の伝熱流動試験

前述したように、He冷却型専焼炉はナトリウム冷却型専焼炉よりも約2.4倍大きい消滅処理速度が達成できるものと予測されている。このように大きい消滅処理速度の実現は粒子充填層の熱伝達性能に依存するため、粒子充填層における熱伝達性能の実証は極めて重要である。このため、燃料要素及びその集合体の開発を目的とした熱流動試験の実施に当たっては、試験体、計測系の変更、改造を頻繁に行い、試験を効率的に行えることを第一とする。そこで、試験は1MPa以下の圧力（高圧ガス法規から除外）で行うこととし、試験装置もそれに対応したものと

する。

燃料要素の伝熱流動試験は、燃料要素の流動試験と伝熱試験に分ける。これは、粒子充填層における熱伝達性能は、粒子充填層内での流量配分に大きな影響を受けるので、まず、流量配分とそれに関係する圧力損失、流動状況、さらには流体誘起振動について調べる。流動試験の内容は以下の通りである。

- ・ 粒子層内の圧力損失と流動状況
 - － 粒子層厚さと圧力損失及び流動状況の関係
(加熱による径方向、軸方向の膨張流れは伝熱試験で調べる。)
- ・ 内側／外側フリットの圧力損失と流動状況
 - － 孔形状、孔分布、開口率と圧力損失の関係
 - － 内側フリットからの吸込み状況と外側フリットからの吐出し状況
(圧力損失低減と、流量配分の均一化のため)
- ・ 要素軸方向、周方向の圧力損失分布と流量分布
 - － フリット形状、粒子層厚さ、隣接燃料要素の影響
- ・ 要素の流体誘起振動と支持部の健全性

ここで、隣接燃料要素の影響とは、概念検討では炉心内に燃料要素を密に配置することとしているが、燃料要素間隔が最短で2.1mm と燃料要素同士が非常に接近していることから、隣接する燃料要素からのガスの吹出しにより、当該燃料要素からのガスの排出が影響を受け、燃料要素内部に偏流(流量分布)を生じる可能性があることを意味している。

また、概念検討では、燃料要素は下端で固定されており、一種の片持ちはりであるため、吹出しの影響で振動しやすくなり、下端支持部が損傷する可能性もある。そこで、流体誘起振動の発生状況を調べ、支持部の健全性を確認する。

伝熱試験は、Heガスを100℃程度まで昇温する低温試験と350℃まで加熱する高温試験に分け、さらに、過渡状態、強制循環喪失事故、圧力喪失事故を模擬した安全性試験を行う。低温試験は流動試験と合わせて、粒子充填燃料要素の基本的な伝熱流動特性を明らかにするためのもので、燃料要素の技術的成立性を確認する。高温試験は、高出力密度の可否を確認するための試験である。安全性試験は、燃料要素の健全性を確認するためのものである。これらの試験内容は以下の通りである。

- ・ 低温試験
 - － 強制対流による粒子層内の熱伝達率
 - 粒子層厚さの影響
 - 内側／外側フリットの孔形状、孔分布、開口率の影響
(低温なので熱放射の影響は無視)
 - － 加熱時の圧力損失と流量配分
(加熱による径方向、軸方向の膨張流れ(流速増加)の状況との関係)
- ・ 高温試験
 - － 粒子層内の熱伝達率
 - 温度によるガス物性値(密度、粘度、熱伝導率等)の変化の影響

放射熱伝達

ガスの熱膨張による流速変化の影響

－フリットの熱伝導効果

径方向、軸方向の温度分布

－hot spotの発生状況

粒子層内

フリット

－燃料要素構造の健全性

フリット構造の熱応力、熱変形に対する健全性

熱サイクルに対するフリット構造と充填粒子の安定性

・安全性試験

－流量変化時、粒子層出力変化時の伝熱流動特性

粒子層内の流量分布、温度分布の時間的变化

フリット等の温度分布の時間的变化

－低流量時における強制対流と自然対流の複合対流による熱伝達率

粒子層内の温度分布に対する放射熱伝達の効果

フリットの熱伝導率等の効果

粒子層内の温度分布状況

粒子層内、フリットにおけるhot spotの発生状況

－流量停止状態での自然対流発生状況と模擬崩壊熱除去状況

粒子層内の温度分布に対する放射熱伝達の効果

フリットの熱伝導率等の効果

粒子層内の温度分布状況

粒子層内、フリットにおけるhot spotの発生状況

－燃料要素構造の健全性

フリット構造の熱応力、熱変形に対する健全性

熱サイクルに対するフリット構造と充填粒子の安定性

燃料要素構造の健全性において、熱サイクルに対するフリット構造と充填粒子の安定性は、加熱時にフリットが熱膨張して粒子の充填が径方向に密となり、冷却時のフリットの収縮過程で充填粒子を破損させることの可否を調べるものである。

これらの流動試験及び伝熱試験を通して、伝熱流動解析コード等の開発を行う。各試験とコード開発は次のように行う（案）。

・流動試験＋低温試験の結果

－流動解析モデル、粒子層内の対流熱伝達モデル、フリットの熱伝導モデルの検証と高度化

－構造解析コードとリンクして燃料要素の伝熱流動と構造解析が可能なコード体系を構築

・高温試験

- 粒子層内の熱伝達モデルに熱放射伝熱モデルを加え、それらのモデルと、流動解析モデル、フリットの熱伝導モデルの検証と高度化
- ガス物性値の温度依存性の影響検証
- 構造解析コードとリンクしてコード体系の高度化

このコードを使用して、燃料要素に要求される均一な流量分布を実現するために、

- ・フリット形状、材質
- ・孔形状、開口率
- ・充填層厚さ

をパラメータとした解析を行い、燃料要素構造の最適化をはかる。このとき、過渡状態、強制循環喪失事故時等における燃料粒子充填層内の伝熱流動挙動、燃料粒子温度、要素強度等の変化についても解析を行い、健全性等を確認する。この一連の解析を基にして、燃料要素構造の改良設計を行う。改良設計に従って改良型燃料要素を試作して製作性、組立性を確認し、上記の伝熱流動試験を行う。これにより、解析コードの検証とさらなる高度化をはかる。これらの試験、解析を通して最終的な燃料要素構造を決定するとともに、燃料要素設計等のための伝熱流動、要素構造に関するデータベースを拡充する。

(2) 工学試験

燃料要素の伝熱流動試験で最適化した燃料要素を複数本組み込んだ燃料要素集合体を試作し、その製作性、組立性を調べる。この後、定常及び過渡状態における伝熱流動試験を行い、

- ・各燃料要素への流量配分特性
- ・燃料要素の伝熱流動熱特性

を調べ、炉心システム構築のためのデータを取得・整備する。

さらに、安全性試験として、

- ・強制循環喪失事故
- ・圧力喪失事故等

を模擬した試験を行い、事故時の炉心集合体各部の温度変化を調べ、自然循環による冷却挙動、系内の圧力変化等のデータを取得・整備するとともに、燃料及び要素の健全性を確認する。

この工学試験と並行して、燃料要素集合体の伝熱流動解析コードを開発し、これに構造解析コードをリンクして、炉心構造体の伝熱流動と構造強度の解析ができるようにする。なお、燃料要素集合体の伝熱流動解析コードは燃料要素の伝熱流動解析コードを基にする。

Table 3.1 Schedule of thermal and hydraulic tests

項目 / 年度	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
OMEGA計画 (1988年策定)	第Ⅰ期 炉心原子炉システムの設計研究				第Ⅱ期 実験炉予備設計		
燃料要素の 伝熱流動試験	実験装置・模擬燃料要素の製作 燃料要素の改良 試験（流動、伝熱、安全性） 概念検討の燃料要素 改良型燃料要素 解析コード開発						
工学試験		燃料集合体の設計及び製作				試験 (定常、過渡状態、安全性)	

燃料要素の伝熱流動試験（定常状態）

- 粒子層の圧力損失（Ergun の式の検証）
- 要素軸方向、周方向の圧力損失分布と流量分布
- 粒子層内の熱伝達率（Wakao の式の検証）
- 燃料要素構造の健全性

安全性試験

- 強制循環喪失事故、減圧事故模擬試験
- 過渡時の伝熱流動特性

4. 試験装置

4. 1 基本設計方針及び試験装置の概要

試験装置の製作に当たり、以下の基本方針を設定した。

- ・ Heガス、窒素ガスなどの不活性ガスを用いて熱流動試験が可能なこと。
 - －密度、粘性を変えて充填層内の流動条件を広範囲に設定する。
- ・ 試験装置の起動、停止、熱流動条件の変更が容易であり、誤操作時にも機器が損傷しないこと。
 - －無人運転が可能ないように、各種自動調節計、インターロックを設置する。
 - －ガス流量を安定させるために、高回転型遠心ガス循環器を用いる。
 - －試験体に流入するガス温度を一定に維持できるように予熱器等を設ける。
 - －ループ内のガス圧力が一定になるように、圧力調節用のガス供給ラインを設ける。
 - －各種計測器は信頼性の高いものを使用する。
- ・ 模擬燃料要素に300℃までのガスを供給できるようにする。
- ・ 試験装置は、電源、冷却水、ガス供給の便からHENDEL大実験室内に設置する。
- ・ 試験装置の設計・製作に当たっては、HENDELでの高温ガス炉燃料体の伝熱流動試験で得られたノウハウを活用する。
- ・ 模擬燃料要素は、概念検討に従って製作する。
 - －フリットの開孔部形状、孔の配置、開孔率等については未定なので、それらの設計検討と試作を行い、製作性を確認する。
 - －原子炉への装荷を考慮して、放射線による溶接割れ等を防ぐために、フリット構成部品の製作及び組立に際してはできるだけ溶接を避ける。
 - －隣接燃料要素からの吹き出しの影響を模擬できる構造とする。

上記の方針に従って試験装置の設計を行った。試験装置は、He、窒素ガスなどの不活性ガスを最高1MPa、400m³/h(He)で流動させることを目標とした。本試験装置の系統構成をFig. 4.1に、また、機器配置図をFig. 4.2に示す。試験装置は、TRU燃料要素模擬試験体を中心として、ガス循環機、Heガス配管、予熱器、フィルター、サージタンク、冷却器、各種計装機器から構成される。主配管は、Heガスの流動による系統の圧力損失を低減させるために100Aとした。また、ガス循環機の故障を想定して、試験の中断がないように既設のPW Cループの窒素ガス系からガス供給が受けられるようにした。装置の運転・制御は現場制御盤で一括して行う。試験データは、データロガーに集約してパソコンで解析し、ハードディスクに保存する。データのサンプリング間隔は最短30秒、記録時間は最短1時間を想定している。試験装置各部の写真をPhoto 4.1～Photo 4.4に示す。

以下に、TRU燃料要素模擬試験体、その他の試験装置構成機器について記す。

4. 2 T R U 燃料要素模擬試験体

T R U 燃料要素模擬試験体は本試験装置の中核となる部分である。計測系を組み込んだ T R U 燃料要素模擬試験体の概要を Fig. 4.3 に、試験体の詳細組立図を Fig. 4.4 に示す。試験体は、多孔壁を有する内側及び外側フリットの間に 1.5mm 径のアルミナ模擬燃料粒子を充填し、その外側を流路管で覆った構造である。He ガスは内側フリットから流入して充填層内を流れ、外側フリットより流路管に流入する。参考のため、本試験装置と概念検討の燃料要素の流動条件を比較したものを Table 4.1 に示す。

フリットの概要を Fig. 4.5 に示す。フリットの製作性は、本燃料要素の成立性を左右するものである。多孔性を維持するには焼結金属管が最適だが、概念検討にあるような小口径で長尺のものは製作できないため、短い焼結管を溶接で接合して所定の長さ加工しなければならない。原子炉への設置を考慮して、燃料粒子に接する部品には溶接構造を用いない方がよいので、ステンレス薄肉管にスリットを設けて多孔性を確保することとした。スリットの製作に当たっては、予めステンレス管内に低融点合金（融点 80℃ 以下）を熔融充填しておき、それを自動切削機で超硬合金製の cutter で切削する特殊な方法を用いた。この方法で設けられたスリットの幅は 1mm、配置は千鳥状、フリットの開孔率は内管が 29%、外管が 27% である。また、内側及び外側フリット間の模擬燃料粒子充填部のギャップは 11.7mm である。

流路管の概要を Fig. 4.6 に示す。外側フリットから吹き出したガスが隣接燃料要素からの吹き出しガスと干渉するのを模擬するために、外側フリットと流路管とのギャップは 2.65mm と狭くした。流路管には軸方向に 7カ所、管の円周方向に 3カ所に導圧管が取り付けられている。このうち、軸方向の 7カ所にはピトー管を挿入してフリットから吹き出すガス流速を測定し、流量分布を求められるようにした。ピトー管の概要を Fig. 4.7 に示す。残りの導圧管には静圧管を挿入して圧力分布を測定する。ピトー管及び導圧管の各部の計測寸法を Table 4.2 に示す。試験体上下にはプレナム部を設け、炉心での燃料要素入口・出口の条件を模擬するようにした。模擬試験体は、鋼製のアングル架台に設置・固定している。以下に、模擬燃料要素各部の仕様を記す。

(1) 本 体

型 式 : 粒子充填二重多孔性容器 (フランジ付き)

概略寸法 : (a) 内側フリット

全長 605mm、内径 14mm、肉厚 1mm

(b) 外側フリット

全長 605mm、内径 39.4mm、肉厚 1.65mm

(c) 流路管

全長 680mm、内径 48mm、肉厚 3.5mm

(d) 導圧管 全長 225.5mm (端末プラグ含む)

外径 8mm、肉厚 1.2mm

(e) 充填粒子 外径 1.5mm のアルミナ球形粒子

材 質 : SUS304

設計圧力 : 1MPa

設計温度 : (a)、(b) 450℃

その他 350℃

数量 : 1基

付属品 ●内側フリット内温度計測用シース熱電対…………… 6本

●外側フリット内温度計測用シース熱電対…………… 6本

●導圧管…………… 21本

●流量計測用ピトー管…………… 14本

●流量計測用静圧管…………… 7本

備考 ●内側及び外側フリット内温度計測用シース熱電対は下記の型式である。

型式 : 非接地K型シース熱電対

精度 : JIS 0.4級

シース材質 : SUS316

シース寸法 : 直径0.5mm、長さ800mm

補償導線 : 精密級(電磁シールド付き)、長さ 最高7000mm

●端部プレートは内側/外側フリットを閉止するためのもので、中心には動圧測定用のピトー管を挿入する。

(2) 入口プレナム

概略寸法 : 全長 410mm、最大内径 216mm

材質 : SUS304

設計圧力 : 1MPa

設計温度 : 円管部 250℃

数量 : 1基

付属品 ●入口ガス温度計測用シース熱電対…………… 3本

●入口配管接続ノズル(100Aフランジ接続)…………… 1個

●導圧管(全長 220mm、外径 8mm、肉厚 1.2mm)
…………… 2本

●内側フリット熱電対挿入口(コナックスシール使用)…………… 2個

●整流板…………… 1式

備考 ●入口ガス温度計測用熱電対は下記の型式である。

型式 : 非接地T型シース熱電対

精度 : JIS 0.4級

シース材質 : インコネル600

シース寸法 : 直径1mm、長さ800mm

補償導線 : 精密級(電磁シールド付き)、長さ 最高7000mm

●整流板はメッシュを積層して成形したもの。

(3) 出口プレナム

概略寸法 : 全長 410mm、最大内径 216mm

材質 : SUS304

設計圧力 : 1MPa

設計温度	: 円管部 450℃
数量	: 1基
付属品	●入口ガス温度計測用シース熱電対…………… 3本
	●出口配管接続ノズル(100Aフランジ接続)…………… 1個
	●導圧管(全長220mm、外径8mm、肉厚1.2mm) …………… 2本
	●外側フリット熱電対挿入口(コナックスシール使用)…………… 2個
	●整流板…………… 1式
備考	●出口ガス温度計測用熱電対は下記の型式とする。 型式 : 非接地T型シース熱電対 精度 : JIS 0.4級 シース材質 : インコネル600 シース寸法 : 直径1mm、長さ800mm 補償導線 : 精密級(電磁シールド付き)、長さ 最高7000mm
	●整流板はメッシュを積層して成形したもの。

4. 3 試験ループの機器仕様

4. 3. 1 試験ループ主要機器の仕様

ガス循環機、ガス冷却器、サージタンク等の試験ループ主要機器の仕様を以下に記す。なお、試験ループで重要なガス循環機の構造図をFig. 4.8に示しておいた。

(1) ガス循環機

型式	: 高速遠心型オイルフリーガス循環機 HCBX-22-A型(丸和電機製)
ガス吸入圧力	: ~0.8MPa
昇圧値	: ~0.2MPa
ガス流量	: 最高400m ³ /h(He)
回転数	: 最高4200rpm
入力電圧	: 三相400V
消費動力	: 最高22kW
制御方式	: インバータによる電動機の回転数制御
電動機	: 全閉外扇型三相誘導電動機
主要材質	: アルミニウム精密鍛造品(インペラー) SUS製ケーシング
配管取合い	: JIS10K-4Bフランジ(SUS製)
数量	: 1基
付属品	●潤滑油ユニット…………… 1基
	●制御盤(インバータ等を設置)…………… 1面

(2) ガス冷却器

- 形式 : プレートフィン型ガス冷却器
 主要材質 : SUS304
 コア寸法 : 幅 150mm、奥行き 144mm、高さ 450mm
 使用流体 : 低温側 冷却水
 高温側 Heガス他のガス
 流量 : 冷却水 100~200ℓ/min
 Heガス ~400m³/h
 流体圧力 : 冷却水 最高0.4MPa
 Heガス 最高1MPa
 流体温度 : 冷却水 入口15℃/出口35℃
 Heガス 入口最高420℃/出口最高50℃
 交換熱量 : 120kW
 設計圧力 : 1MPa
 設計温度 : 450℃
 数量 : 1基
 付属品 ●ガス温度計測用シース熱電対 (K型、0.4級、φ1.6mm) 4本
 ●冷却水温度計測用シース熱電対 (T型、0.4級、φ1.6mm) 2本
 ●圧力スイッチ (動作範囲~5kg/cm²G、AC100V) 1個
 ●冷却水ドレン用ノズル+バルブ (25A) 1個

(3) サージタンク

- 形式 : 円筒型密閉容器
 概略寸法 : 内径 1400mm、高さ 2230mm
 主要材質 : SUS304
 容量 : 3m³
 設計圧力 : 1MPa
 設計温度 : 50℃以下
 数量 : 1基
 付属品 ●安全弁 型式 : S-K100FBC-SSF-D
 呼び径 : 25A
 設定圧力 : 0.99MPa
 吹止圧力 : 0.85MPa
 所要吹出量 : 533kg/h
 本体耐圧 : 2MPa
 ●現場指示圧力計 (ブルドン管) 1個
 ●ガス入口ノズル (口径100A) 1個
 ●ガス出口ノズル (口径100A) 1個
 ●窒素ガス出口ノズル (口径80A) 1個
 ●ドレンパイプ (1/4") +バルブ 1本

- 圧力計用ノズル（1/4" パイプ）……………1本
 - 予備ノズル（1/2" パイプ+バルブ）……………6組
 - 予備ノズル（25A、盲フランジ付き）……………1組
 - ガス温度計測用シース熱電対（T型、0.4級、φ1mm）……………2本
- 備考 ●予備ノズルを用いてHeガス等の供給、排出を行う。

(4) ガス予熱器

型式 : シースヒータ加熱式円筒型ガス予熱器

ヒータ容量 : 10.8kW (1.2kW×9本)

概略寸法 : 外径 165.2mm、全長 1570mm

主要材質 : 容器 SUS304

シース SUS316

設計圧力 : 1MPa

設計温度 : 容器 300℃

ヒータ温度 700℃

電源 : 三相400V

数量 : 1基

付属品 ●ガス入口ノズル（口径100A）……………1個

●ガス出口ノズル（口径100A）……………1個

●ヒータ表面温度計測用シース熱電対（K型、0.4級、φ1.6mm）

……………2本

●出口ガス温度計測用シース熱電対（T型、0.4級、φ1.6mm）…2本

(5) ガスフィルター

型式 : 高分子フィルターカートリッジ収納容器

概略寸法 : 内径 350mm、全長 1200mm

材質 : 容器 SUS304

フィルター ポリプロピレン

捕集粒子 : 3μm以上

設計圧力 : 1MPa

設計温度 : 60℃以下

数量 : 1基

付属品 ●ガス入口ノズル（口径100A）……………1個

●ガス出口ノズル（口径100A）……………1個

●ドレンパイプ（1/4"）+バルブ……………1本

●入口・出口差圧計測パイプ（1/4"）……………各1本

4.3.2 配管及び弁類

ガス系配管のシールは原則としてOリングシールとし、250℃以上の部分には金属Oリン

グ、又は金属ガスケット、それ以外はバイトンOリングシールとした。

(1) ガス主配管

配管型式 : (a)スケジュール20S円管
 (b)耐圧フレキシブルチューブ(試験体出入口配管)
 口 径 : 100A
 主要材質 : SUS304
 設計圧力 : 1MPa
 設計温度 : 1)450℃……………(ガス加熱器出口～試験体～ガス冷却器入口)
 2)200℃……………(その他)
 数 量 : 1式

(2) 冷却水配管

供給配管 口 径 : 1)ガス冷却器 50A
 2)ガス循環機 25A
 耐 圧 : 0.6MPa
 使用温度 : 80℃以下
 主要材質 : SUS304
 数 量 : 1式

(3) 導圧配管、真空排気配管及びガス導入配管

配管接続 : 1)1/8" (導圧配管)
 2)25A、50A (真空排気配管)
 3)1/2" (ガス導入配管)
 設計圧力 : 1MPa
 設計温度 : 50℃
 主要材質 : SUS304
 数 量 : 1式
 備 考 ●真空排気は主配管系(25A)が小型油回転ポンプに、サージタンク(50A)からはブースターポンプにそれぞれ接続してある。

(4) 継手類(フランジ、エルボ、ニップル等)

主要材質 : SUS304
 設計圧力 : 1MPa
 設計温度 : 配管設計温度と同じ
 数 量 : 1式

(5) ガス配管用仕切り弁

型 式 : 手動式ベローズバルブ(大野ベローズ製)
 配管接続口径 : 1)100A(主配管用)
 2)80A(PWCループの窒素ガス系接続用及びガス流量計用)
 3)50A(ガス流量計及び真空排気用)

4) 25 A (真空排気用)

弁体材質 : SUS304
 耐 圧 : 1.5 MPa 以上
 使用温度 : 200 °C 以下
 数 量 : 1) 4 個
 2) 4 個
 3) 2 個
 4) 1 個

(6) 水用仕切り弁

型 式 : 手動式ストップバルブ (北沢バルブ製)
 弁体材質 : SUS304
 耐 圧 : 1 MPa
 使用温度 : 80 °C 以下
 配管接続 : ネジ込み式
 設置位置 : ガス冷却器用給水配管 (50 A) 1 個
 及び数量 : ガス循環機用冷却水配管 (25 A) 4 個

(7) 計装用バルブ

型 式 : パックレスベローズバルブ SS-BNS4 型 (NUPRO 製)
 配管接続 : 1/4" スエジロック継手
 耐 圧 : 2.5 MPa 以上
 弁体材質 : SUS316
 数 量 : 1 式
 備 考 ●計装用バルブは導圧配管及び配管に設置した 1/4" ノズルに設置。

(8) 圧力調節器

型 式 : 二次側圧力調節弁
 調節圧力 : ~1 MPa
 配管接続 : 1/4" スエジロック継手付き
 数 量 : 1 個

4. 3. 3 計装用検出器

計装用検出機器の配置は Fig. 4.1 の実験装置フローシートに示してある。差圧計は校正等を考慮して差圧計用ラックにまとめて設置した。差圧計用ラックの配管系統図を Fig. 4.9 に示す。また、フリットの振動計測のためにフリット頭頂部に加速度計を設置した。加速度計の配置を Fig. 4.10 に示す。全てのデータはデータロガーを経由して、パソコン(PC-9801) に集約し、計測データファイルとして記録保存する。データロガーへの入力信号を Table 4.3 ~ Table 4.5 に示す。

(1) シース熱電対 (主配管設置)

型 式 : 非接地K型及びT型シース熱電対
 精 度 : J I S 0.4級
 シース材質 : インコネル600
 シース寸法 : 直径1.6mm、長さ 最高800mm
 補償導線 : 精密級 (電磁シールド付き)、長さ 最高7000mm
 数 量 : 6本

(2) 圧力検出器

形 式 : NS100-20K-1-2-1型 (ミネベア製)
 受圧部材質 : サファイヤ
 計測範囲 : 最高2MPa (絶対圧)
 精 度 : ±0.2%以内
 出 力 : DC4~20mA
 使用温度 : 最高100℃
 数 量 : 6台

(3) 微差圧計測用差圧検出器

形 式 : UNE12-SET1/ZD型微差圧計 (横河製)
 主要材質 : SUS304
 計測スパン : 最高70mmH₂O (10mmH₂Oまでレンジ変更可能)
 精 度 : ±0.25%以内
 出 力 : DC4~20mA
 数 量 : 6台

(4) 中差圧計測用差圧検出器

形 式 : UNE11-SLS2/ZD型差圧計 (横河製)
 主要材質 : SUS304
 計測スパン : 最高700mmH₂O (100mmH₂Oまでレンジ変更可能)
 精 度 : ±0.2%以内
 出 力 : DC4~20mA
 数 量 : 6台

(5) 高差圧計測用差圧検出器

形 式 : UNE11-SHS2/ZD型差圧計 (横河製)
 主要材質 : SUS304
 計測スパン : 最高21000mmH₂O (3000mmH₂Oまでレンジ変更可能)
 精 度 : ±0.2%以内
 出 力 : DC4~20mA
 数 量 : 6台

(6) ガス流量計 1

型 式 : 渦流量計 VXW1050型 (オーバル機器製)
 公称口径 : 50 A (挟み込みフランジ接続)
 計測流量 : 40~490 m³/h
 出 力 : DC4~20 mA
 数 量 : 1台
 付 属 品 ●入口側フローストレーナ.....1本
 ●出口側下流管.....1本

(7) ガス流量計 2

型 式 : 体積流量計 D-NMDa-120B (シナガワ製)
 計測流量 : 2~120 m³/h
 センサー部
 電 源 : DC5~24 V
 発信パルス : 100 P/rev.
 フォトセンサー : EE-SX670
 数 量 : 1台

(8) 浮き子式流量計 (冷却水用)

接続配管口径 : 1) 15 A (ねじ込み接続、ガス循環機用)
 2) 50 A (フランジ接続、ガス冷却器用)
 計測流量 : 1)~30 ㍓/min
 2)~400 ㍓/min
 数 量 : 各1個

(9) 加速度計

形 式 : 303A (東陽テクニカ製)
 計測レンジ : ±500 g
 分解能 : 0.01 g
 感 度 : 10 mV/g
 温度範囲 : -40~93℃
 耐 振 : ±1000 g
 耐ショック : 2000 g
 数 量 : 4個

4. 3. 4 現場制御盤

本試験装置の電源として、三相400V (ガス循環機、予熱器用) をHENDELパワーセンターから、また、三相200V (一部はトランスで単相100Vに変換し、計器用等に利用) はHENDEL T₂架台下の電源盤から電源ケーブルをHENDEL大実験室のピット内を引き回して現場制御盤まで配線した。差圧計及び熱電対信号は、中継端子ボックスを介してデー

タロガー及び現場制御盤まで配線した。

型 式 : 自立開扉式
 概略寸法 : 幅 2700mm、高さ 2000mm、奥行き 1500mm
 主要材質 : 鉄
 主電源 : 三相400V、400A
 数 量 : 1基

付属主要機器:

(a) ガス循環機用制御盤

型 式 : ラック組込み型制御盤
 入力電圧 : 三相400V
 ガス循環機制御方式: インバータによる電動機の回転数制御
 インバータ出力 : 三相400V、22kW
 数 量 : 1台

備 考 (a)盤の運転操作は次のとおり。

- 1)ガス循環機の起動・停止及び回転数制御
- 2)潤滑油ポンプの起動・停止

(b)次のインターロックでガス循環機と潤滑油ポンプの運転を停止し、警報ランプ点灯及び警報ブザーを鳴らす。

- 1)インバータ異常
- 2)潤滑油圧低下
- 3)潤滑油温高

(b) 三相サイリスタ

型 式 : PRXD0045-1CC-Z (富士電機製)
 入力信号 : DC4~20mA
 制御方式 : 電圧フィードバック型位相制御方式
 定格電流 : 45A (ガス予熱器用、SCR01)
 出力調整範囲 : 0~98%
 勾配調整範囲 : 0~100%
 電 源 : 三相400V
 数 量 : 1台

付属品 (a)外部勾配設定器.....1個
 (b)外付け速断ヒューズ.....1個
 (c)電圧計(小型).....1個

備 考 ●外部勾配設定器、ヒューズは盤内に取り付け、電圧計は盤前面に設置

(c) 温度調節計(TCI、ガス予熱器用)

型 式 : REX-F400型(理化工業製)
 入力信号 : T型熱電対の熱起電力
 出力信号 : サイリスタ駆動用DC4~20mA

警 報 : 測定値上下限警報 (絶対値)
 電 源 : 単相100V
 数 量 : 1台

(d) 2線式伝送器用ディストリビュータ (2出力タイプ)

形 式 : WA1V-A4-2*B/DO型 (横河製)
 入力信号 : DC4~20mA
 出力信号 : DC0~10V (第1、2出力)
 センサー電源 : DC24V
 電源電圧 : AC100V
 数 量 : 33台

(e) 差圧計、圧力計及び流量計用指示計 (スケーリング機能付き)

形 式 : 413G-04型 (鶴賀電機製)
 入力信号 : DC0~10V
 電源電圧 : AC100V
 数 量 : 33台

(f) 温度指示計

形 式 : (a) SC100型 (山武ハネウエル製)
 (b) REX-C100型 (理化工業製)
 入力信号 : K型熱電対
 警報出力 : リレー接点出力 (AC250V、1A、1a接点)
 電源電圧 : AC100V
 数 量 : (a) 20台
 (b) 5台

(g) ハイブリッドレコーダー

形 式 : 3081型 (横河電機製)
 入力信号点数 : 30点 (熱電対の熱起電力、直流電圧)
 警報点数 : 4点 (上下限警報、リレー出力)
 電 源 : 単相100V

(h) その他主要電気器具

- ・三相電磁遮断器 (漏電+過電流+短絡保護機能付き)
 400V、3P、30AT.....1個
- ・三相電磁遮断器 (過電流保護機能付き)
 400V、3P、400AT.....1個
 400V、3P、50AT.....4個
 200V、3P、200AT.....1個
 200V、3P、30AT.....3個
- ・三相電磁接触器

- 400V、3P、30A用..... 1個
- ・ 単相電磁遮断器（過電流保護機能付き）
 - 100V、2P、50AT..... 1個
 - 100V、2P、30AT..... 2個
 - 100V、2P、20AT..... 1個
- ・ 電源端子板（三相400V、200V、単相100V用）..... 1式
- ・ 単相100V用OAタップ（6個口）..... 4個
- ・ アース端子板..... 1個
- ・ 警報信号端子板..... 1式
- ・ 電源・警報ランプ（集合表示灯）..... 1面（50個）
- ・ 非常停止スイッチ..... 1個
- ・ 計測器電源用スナップスイッチ..... 1式
- ・ インターロック復帰用等のスイッチ及びリレー..... 1式
- ・ 三相／単相複巻き電源トランス（3φ400V／1φ100V、10kVA）
 - 1個
- ・ 配線資材（電源ケーブル等）..... 1式
- ・ プログラマブルシーケンサー..... 1式
- ・ ファン及び蛍光灯..... 1式

備 考

(a)警報信号はプログラマブルシーケンサーに集約する。

4. 3. 5 安全保護系

本試験体の安全保護系は、圧力高の場合を除いて、すべての警報信号をプログラマブルシーケンサーに集約しており、シーケンサーからの信号で各機器の電源を遮断するようにしている。以下に、安全保護系の主要内容と動作を示す。

(1) 圧力及び差圧

- 1)サージタンク付属安全弁動作（圧力高）
- 2)サージタンク予備ノズル付属弁の手動開放（圧力高）

3)フィルター差圧高

●ハイブリッドレコーダの上限警報

→ガス循環機停止、ガス予熱器及び加熱器（設置予定）ヒータ出力OFF、
試験体加熱用自動電源（AVR、設置予定）出力OFF、警報ランプ点灯、
警報ブザー

(2) 温 度

1)ガス予熱器ヒータ温度高

●ハイブリッドレコーダの上限警報

●デジタルメータリレーの上限警報

→ヒータ出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー

- 2) ガス予熱器出口ガス温度高
- 温度調節計TC1の上限警報
 - ハイブリッドレコーダの上限警報
- ガス予熱器ヒータ出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー
- 3) 試験体入口ガス温度高
- ハイブリッドレコーダの上限警報
 - デジタルメータリレーの上限警報
- ガス加熱器ヒータ（設置予定）出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー
- 4) 試験体出口ガス温度高
- ハイブリッドレコーダの上限警報
 - デジタルメータリレーの上限警報
- AVR（設置予定）出力OFF、ガス加熱器ヒータ（設置予定）出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー
- 5) サージタンク内温度高
- ハイブリッドレコーダの上限警報
 - デジタルメータリレーの上限警報
- AVR（設置予定）出力OFF、ガス加熱器ヒータ（設置予定）出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー
- 6) ガス循環機表面温度高
- ハイブリッドレコーダの上限警報
 - デジタルメータリレーの上限警報
- ガス循環機停止、ガス予熱器及び加熱器ヒータ出力OFF、AVR出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー
- (3) ガス冷却器冷却水圧力低
- 圧カスイッチ警報信号
- AVR（設置予定）出力OFF、ガス加熱器ヒータ（設置予定）出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー
- (4) ガス循環機停止（ガス循環機用制御盤のインターロックによる停止を含む）
- AVR（設置予定）出力OFF、ガス加熱器ヒータ（設置予定）出力OFF、ガス予熱器ヒータ出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー
- (5) 非常停止
- ガス循環機停止、ガス予熱器及び加熱器ヒータ出力OFF、AVR出力OFF、警報ランプ点灯、警報ブザー
- (6) その他
- 1) 動力用主電源異常 → 警報ランプ点灯、警報ブザー

2)制御・計装用主電源異常

→ガス循環機停止、ガス予熱器及び加熱器ヒータ出力OFF、A V R 出力OFF、
警報ランプ点灯、警報ブザー

3)制御用電源異常

→ガス循環機停止、ガス予熱器及び加熱器ヒータ出力OFF、A V R 出力OFF、
警報ランプ点灯、警報ブザー

5)ガス予熱器電源異常→警報ランプ点灯、警報ブザー

Table 4.1 Dimensions and flow conditions of TRU fuel element and test section

項 目	実 機	模擬燃料要素
燃料要素の寸法		
長さ (燃料粒子層部)	600 mm	600 mm
内側フリット内径/肉厚	14 mm/1 mm	14 mm / 1 mm
外側フリット外径/肉厚	42 mm/1 mm	42.7 mm / 1.65 mm
粒子層厚さ	12 mm	11.7 mm
粒 子 径	1.47 mm	1.5 mm
使用 (試験) 条件		
流 体	Heガス	N ₂ ガス等 (非加熱試験) Heガス (加熱試験)
入口温度	127 °C	~40 °C
平均出口温度	340 °C	~40 °C (N ₂) ~(240)°C (He)
圧 力	10 MPa	~1.0 MPa
流 量	~284 m ³ /h	~120 m ³ /h (N ₂) ~400 m ³ /h (He)
発熱量(燃料要素当り)	~1.0 MW	(100 kW)
流速(燃料要素入口)* ¹	~511 m/s (127°C)	~216 m/s (N ₂) ~720 m/s (He) (20°C)
流速(燃料粒子周り)* ²	~3 m/s (127°C)	~1.3 m/s (N ₂) ~4.2 m/s (He) (20°C)
粒子層内外面間差圧	~21.8 kPa (127°C)	~5.1 kPa (N ₂) ~11.3 kPa (He) (20°C)
粒子レイノルズ数	~1460 (127°C)	~1188 (N ₂) ~517 (He) (20°C)
音 速	1212 m/s (127°C)	355 m/s (N ₂) 1021 m/s (He) (27°C)

(*1)内側フリット入口流速、(*2)内側フリット近傍の粒子周り流速

Table 4.2 Dimensions of pitot tube and static pressure measuring tube installed at test section

番号	フリットまでの長さ (a)	外筒内側までの長さ (b)	ピトー管挿入部の長さ (c)	スペーサの厚さ (e)
A-7	228.75	226.28	233.34	4.61
A-6	228.8	226.12	233.92	5.14
A-5	227.95	225.32	233.88	5.95
A-4	228.1	225.56	233.86	5.78
A-3	228	225.75	234.14	6.16
A-2	227.55	225.04	233.9	6.37
A-1	227.1	224.46	234.1	7.02

番号	フリットまでの長さ (a)	外筒内側までの長さ (b)	ピトー管挿入部の長さ (c)	スペーサの厚さ (e)
B-7	227.75	225	234.3	6.55
B-6	228.2	225.76	234.18	6
B-5	227.85	225.22	233.85	6.02
B-4	227.8	224.9	234.24	6.46
B-3	227.9	225.33	234	6.12
B-2	228.55	225.65	234.04	5.51
B-1	228	224.92	233.8	5.82

番号	フリットまでの長さ (a)	外筒内側までの長さ (b)	静圧管挿入部の長さ (d)	スペーサの厚さ (e)
C-7	227.4	225.24	231.05	5.81
C-6	228.05	225.74	231.2	5.46
C-5	227.4	225.19	231.2	6.01
C-4	227.95	225.65	231.3	5.65
C-3	227.7	225.35	231.45	6.1
C-2	227.6	225.01	232.54	7.53
C-1	227.45	224.92	231.2	6.28
予備			231.26	

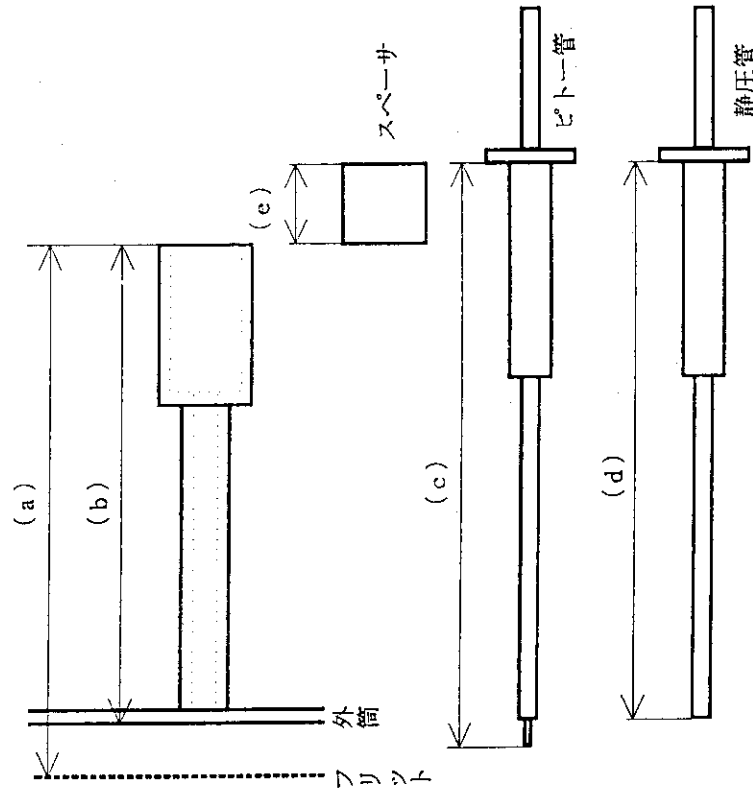


Table 4.3-1 List of measuring items-flow rate and pressure difference (1/3)

CH No.	Tag No.	名称	設定レンジ	最大レンジ	型番	製造元
1	P11A					
2	P12A					
3	P13A					
4	P14A					
5	P15A					
6	P16A					
7	F01A	ガス流量 1	0~490m ³ /h	0~490m ³ /h	VXW1050-C31G-1002	オーバル
8						
9	F02A	ガス流量 2				
10						
11	D01A	試験体流路ガス差圧 1	0~70mmH ₂ O	0~70mmH ₂ O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
12						
13	D02A	試験体流路ガス差圧 2				
14						
15	D03A	試験体流路ガス差圧 3	0~70mmH ₂ O	0~70mmH ₂ O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
16						
17	D04A	試験体流路ガス差圧 4	0~200mmH ₂ O	0~700mmH ₂ O	UNE11-SLS1*B/OSW/CAL-M	横河電機
18						
19	D05A	試験体流路ガス差圧 5	0~70mmH ₂ O	0~70mmH ₂ O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
20						
21	D06A	試験体流路ガス差圧 6	0~200 mmH ₂ O	0~700mmH ₂ O	UNE11-SLS1*B/OSW/CAL-M	横河電機

Table 4.3-2 List of measuring items-flow rate and pressure difference (2/3)

CH No.	Tag No.	名称	設定レンジ	最大レンジ	型番	製造元
22						
23	D07A	試験体流路ガス差圧 7	0~70 mmH ₂ O	0~70mmH ₂ O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
24						
25	D08A	試験体流路ガス差圧 8	0~400 mmH ₂ O	0~700mmH ₂ O	UNE11-SLS1*B/OSW/CAL-M	横河電機
26						
27	D09A	試験体流路ガス差圧 9	0~70 mmH ₂ O	0~70mmH ₂ O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
28						
29	D10A	試験体流路ガス差圧 1 0	0~400 mmH ₂ O	0~700mmH ₂ O	UNE11-SLS1*B/TBL/OSW/Z	横河電機
30						
31	D11A	試験体流路ガス差圧 1 1 (ピトー管 8 として使用)	0~200 mmH ₂ O	0~700mmH ₂ O	UNE11-SLS1*B/TBL/OSW/Z	横河電機
32						
33	D12A	試験体流路ガス差圧 1 2	0~700 mmH ₂ O	0~700mmH ₂ O	UNE11-SLS1*B/OSW/CAL-M	横河電機
34						
35	D13A	試験体流路ガス差圧 1 3	0~2.1kgf/cm ²	0~2.1kgf/cm ²	UNE11-SHS1*B/OSW/CAL-M	横河電機
36						
37	D14A	試験体流路ガス差圧 1 4	0~2.1kgf/cm ²	0~2.1kgf/cm ²	UNE11-SHS1*B/OSW/CAL-M	横河電機
38						
39	D15A	試験体流路ガス差圧 1 5	0~3000 mmH ₂ O	0~21000mmH ₂ O	UNE11-SHS1*B/TBL/SSB/OSW/Z	横河電機
40						
41	D16A	試験体流路ガス差圧 1 6	0~2.1kgf/cm ²	0~2.1kgf/cm ²	UNE11-SHS1*B/OSW/CAL-M	横河電機

Table 4.3-3 List of measuring items-flow rate and pressure difference (3/3)

CH No.	Tag No.	名称	設定レンジ	最大レンジ	型番	製造元
42						
43	D17A	ガスフィルタ-差圧	0~3000 mmH2O	0~21000mmH2O	UNE11-SHS1*B/TBL/SSB/OSW/Z	横河電機
44						
45	D18A	ピト-管1	0~70 mmH2O	0~70mmH2O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
46						
47	D19A	ピト-管2	0~70 mmH2O	0~70mmH2O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
48						
49	D20A	ピト-管3	0~70 mmH2O	0~70mmH2O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
50						
51	D21A	ピト-管4	0~100 mmH2O	0~700mmH2O	UNE11-SLS2*B	横河電機
52						
53	D22A	ピト-管5	0~200 mmH2O	0~700mmH2O	UNE11-SLS2*B/HALF	横河電機
54						
55	D23A	ピト-管6	0~70 mmH2O	0~70mmH2O	UNE12-SET1*B/OSW/CAL-M	横河電機
56						
57	D24A	ピト-管7	0~200 mmH2O	0~700mmH2O	UNE11-SLS2*B	横河電機
58						
59						
60						

Table 4.4-1 List of measuring items-temperature (1/3)

T/C : 非接地型シース熱電対

CH No.	Tag No.	名称	T/C種類	階級	シース材質	シース直径 (mm)	シース長さ (mm)	型番	製造元
61	T101	内フリット内側温度1	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
62	T102	内フリット内側温度2	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
63	T103	内フリット内側温度3	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
64	T104	内フリット内側温度4	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
65	T105	内フリット内側温度5	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
66	T106	内フリット内側温度6	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
67	T111	外フリット外側温度1	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
68	T112	外フリット外側温度2	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
69	T113	外フリット外側温度3	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
70	T114	外フリット外側温度4							
71	T115	外フリット外側温度5	K	0.4	NCF600	0.25	800	T-35	助川電気
72	T116	外フリット外側温度6							
73	TC13	入口プレナムガス温度	T	0.4	SUS316	1	800	T-35	助川電気
74	TC13B	入口プレナムガス温度	T	0.4	SUS316	1	800	T-35	助川電気
75	TC13C	入口プレナムガス温度	T	0.4	SUS316	1	800	T-35	助川電気
76	T01	出口プレナムガス温度	T	0.4	SUS316	1	800	T-35	助川電気
77	T01B	出口プレナムガス温度	T	0.4	SUS316	1	800	T-35	助川電気
78	T01C	出口プレナムガス温度	T	0.4	SUS316	1	800	T-35	助川電気
79	T02	ガス冷却器入口ガス温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気

Table 4.4-2 List of measuring items-temperature (2/3)

CH No.	Tag No.	名称	T/C 種類	階級	シース材質	シース直径 (mm)	シース長さ (mm)	型番	製造元
80	T02B	ガス冷却器入口ガス温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気
81	T03	ガス冷却器出口ガス温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気
82	T03B	ガス冷却器出口ガス温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気
83	T120	ガス冷却器入口冷却水温度	T	0.4	SUS316	1.6	400	T-35	助川電気
84	T04	ガス冷却器出口冷却水温度	T	0.4	SUS316	1.6	400	T-35	助川電気
85	T05	サージタンク内温度	K	0.4	NCF600	1.6	500	T-35	助川電気
86	T05B	サージタンク内温度	K	0.4	NCF600	1.6	500	T-35	助川電気
87	T06	予熱器ヒータ表面温度 1	K	0.4	NCF600	1.6	1500	T-35	助川電気
88	T07	予熱器ヒータ表面温度 2	K	0.4	NCF600	1.6	1500	T-35	助川電気
89	T08	ガス予熱器出口ガス温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気
90	T08B	ガス予熱器出口ガス温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気
91	T09	ガス加熱器ヒータ表面温度 1							
92	T10	ガス加熱器ヒータ表面温度 2							
93	T11	ガス加熱器ヒータ表面温度 3							
94	T12	ガス加熱器出口ガス温度							
95	T12B	ガス加熱器出口ガス温度							
96	T13	ガス循環器出口ガス温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気
97	T13B	ガス循環器出口ガス温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気
98	T14	ガス循環器モータ表面温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気
99	T14B	ガス循環器モータ表面温度	K	0.4	NCF600	1.6	400	T-35	助川電気

Table 4.4-3 List of measuring items-temperature (3/3)

CH No.	Tag No.	名称	T/C種類	階級	シース材質	シース直径 (mm)	シース長さ (mm)	型番	製造元
100	TC01	流量計1 出口温度	T	0.4	SUS316	1.6	400	T-35	助川電気
101	TC01B	流量計1 出口温度	T	0.4	SUS316	1.6	400	T-35	助川電気
102	TC01C	流量計1 出口温度	T	0.4	SUS316	1.6	400	T-35	助川電気
103	T15	流量計2 出口温度							
104	T15B	流量計2 出口温度							
105	T15C	流量計2 出口温度							
106	T17								
107	T18								
108	T130								
109	T131								
110	T132								


※  網掛け部分はセンサー未接続。

Table 4.5 List of measuring items-pressure

CH No.	Tag No.	名称	設定レンジ	最大レンジ	型番	製造元
111	P01A	(ピト-管 8 静圧力)	0~20kgf/cm ²	0~20kgf/cm ²	NS100-20KA-1221	ミネベア
112	P02A	流量計 1 ガス圧力	0~20kgf/cm ²	0~20kgf/cm ²	NS100-20KA-1221	ミネベア
113	P03A	流量計 2 ガス圧力				
114	P04A	試験体入口ガス圧力 1 (入口プレナムガス圧力)	0~20kgf/cm ²	0~20kgf/cm ²	NS100-20KA-1221	ミネベア
115	P05A	試験体入口ガス圧力 2 (ピト-管 1 静圧力)	0~20kgf/cm ²	0~20kgf/cm ²	NS100-20KA-1221	ミネベア
116	P06A	試験体出口ガス圧力 (出口プレナムガス圧力)	0~20kgf/cm ²	0~20kgf/cm ²	NS100-20KA-1221	ミネベア
117	P07A	ガス循環器入口ガス圧力	0~10kgf/cm ²	0~10kgf/cm ²	NS100-10KA-1132	ミネベア
118	P08A	ガス循環器出口ガス圧力	0~20kgf/cm ²	0~20kgf/cm ²	NS100-20KA-1221	ミネベア
119	P09A					
120	P10A					

※ 網掛け部分はセンサー未接続。

流量計、差圧計、圧力計の出力信号は全て 4~20mA DC 電流出力。これをディストリビュータで 0~10V DC 電圧信号に変換。

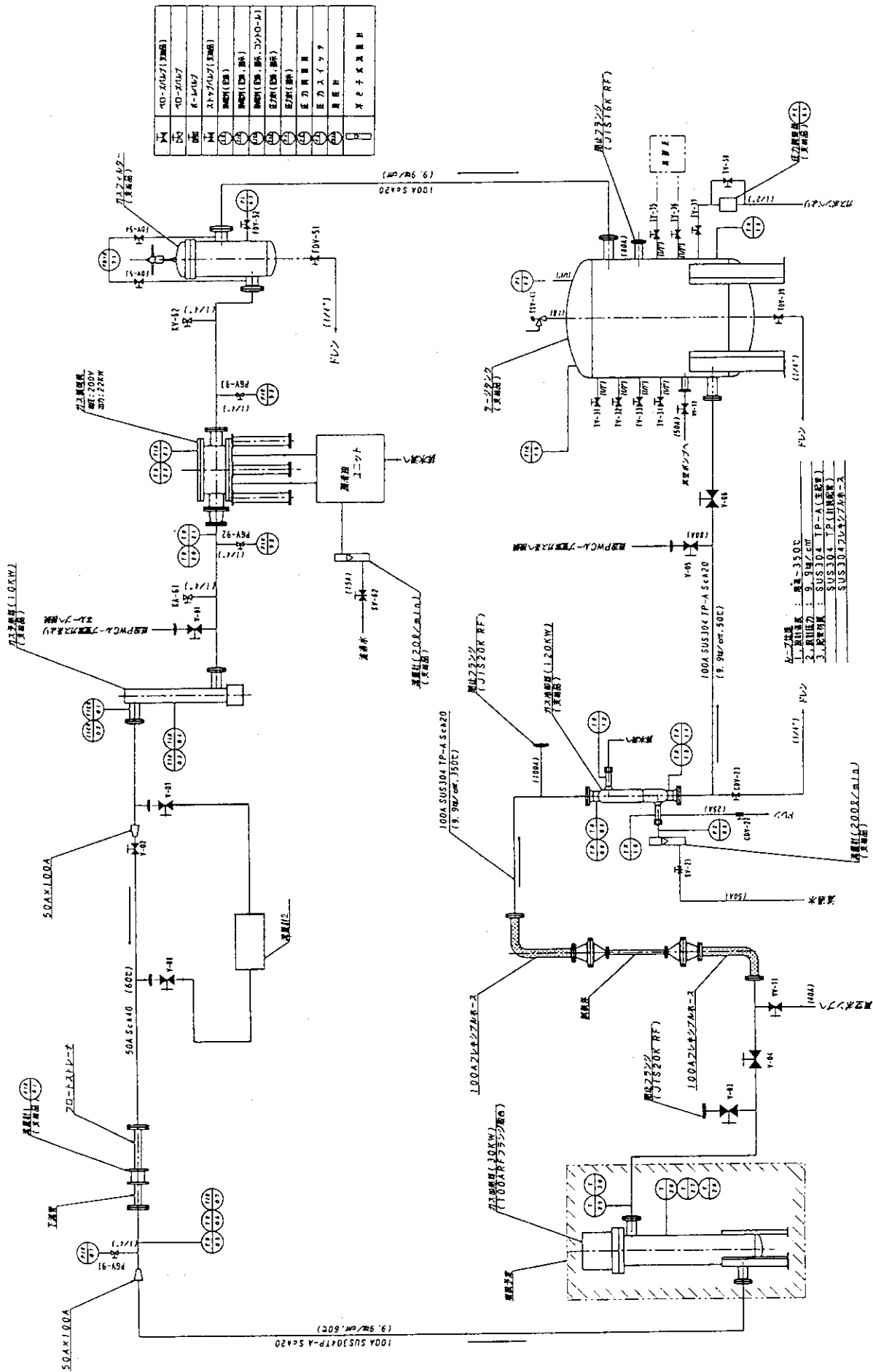


Fig. 4. 1 Flowsheet of test apparatus

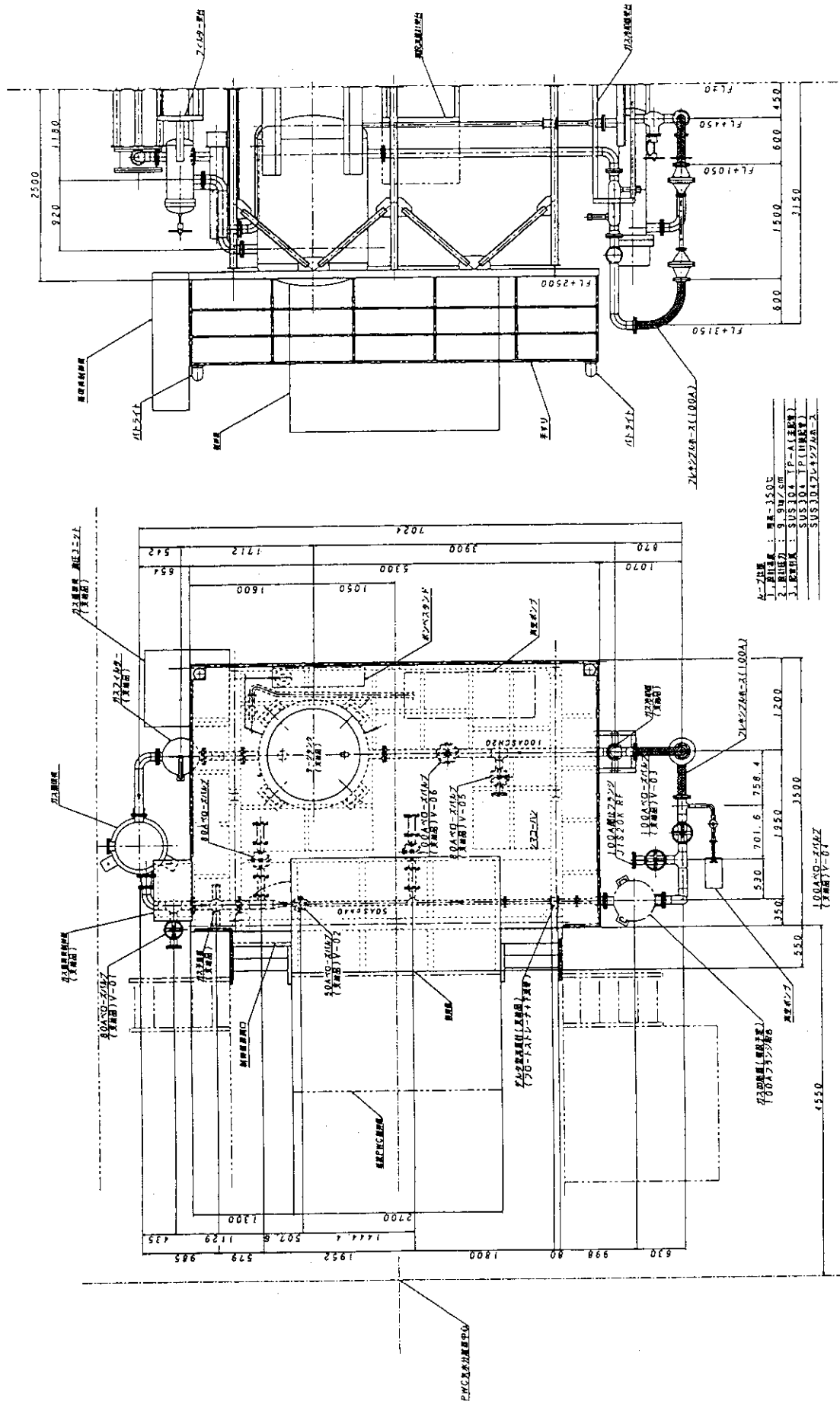


Fig. 4. 2 Arrangement of test apparatus

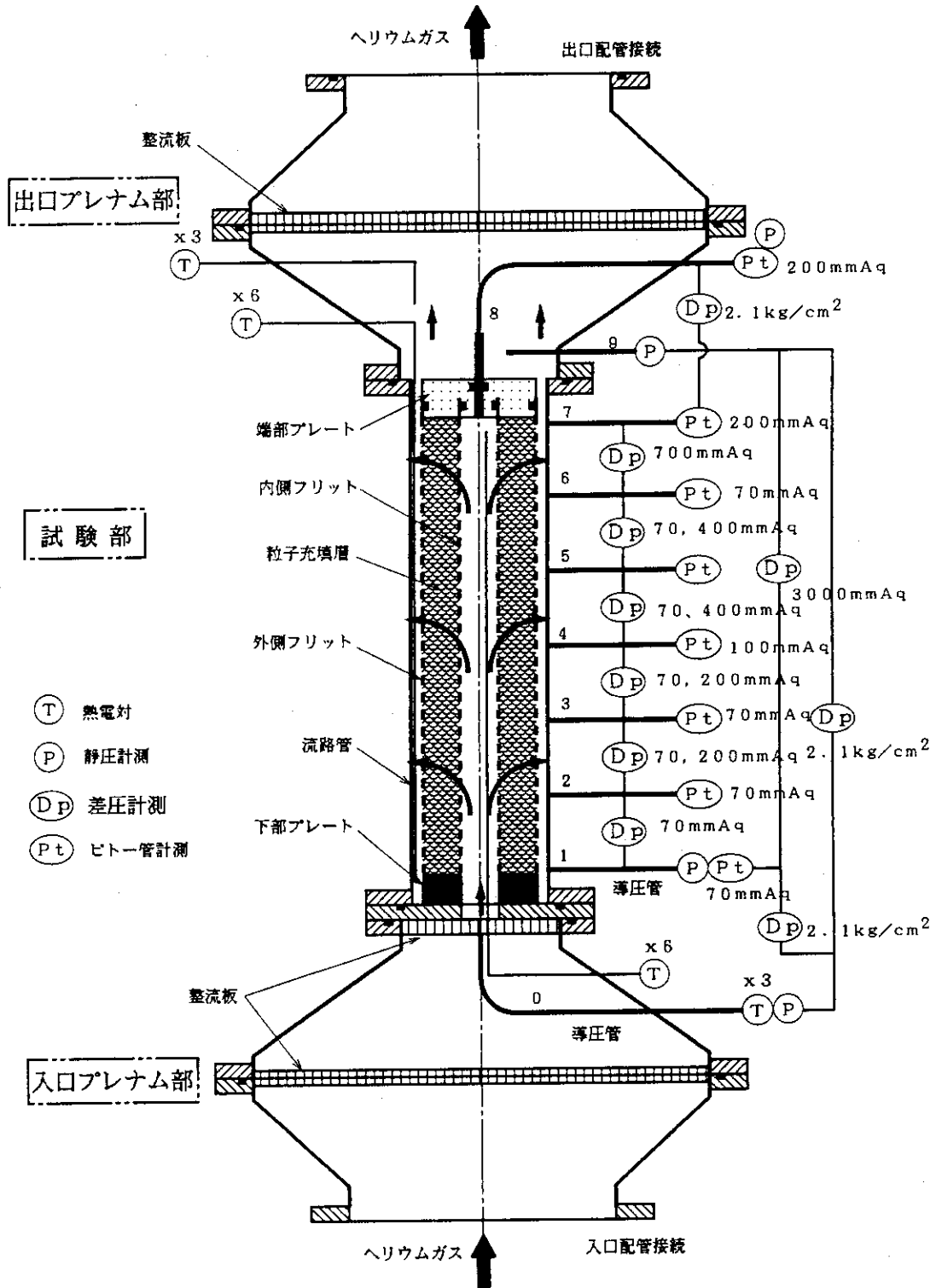


Fig. 4.3 Schematic drawing of simulated fuel element with measuring points

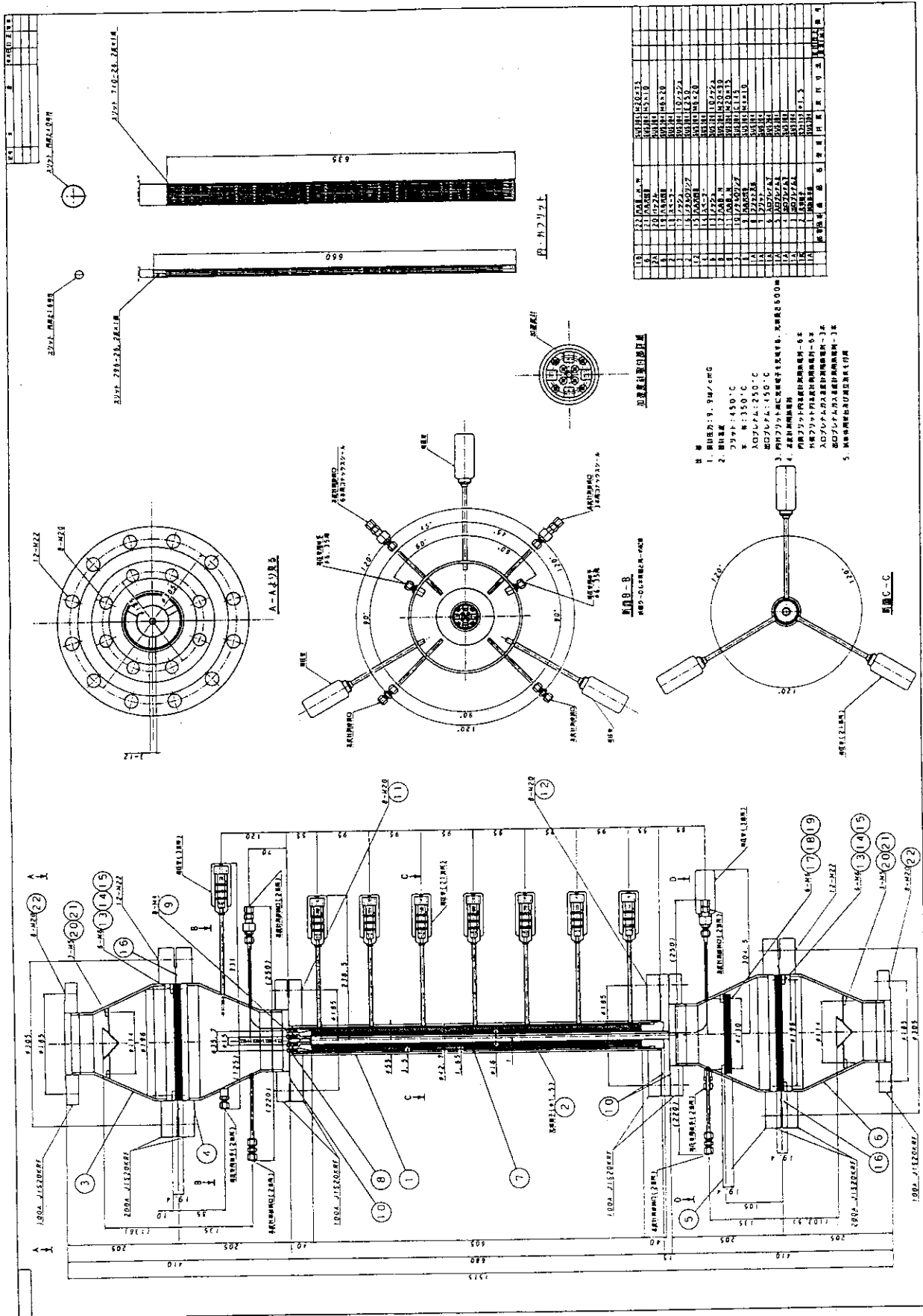


Fig. 4. 4 Detail drawing of simulated fuel element

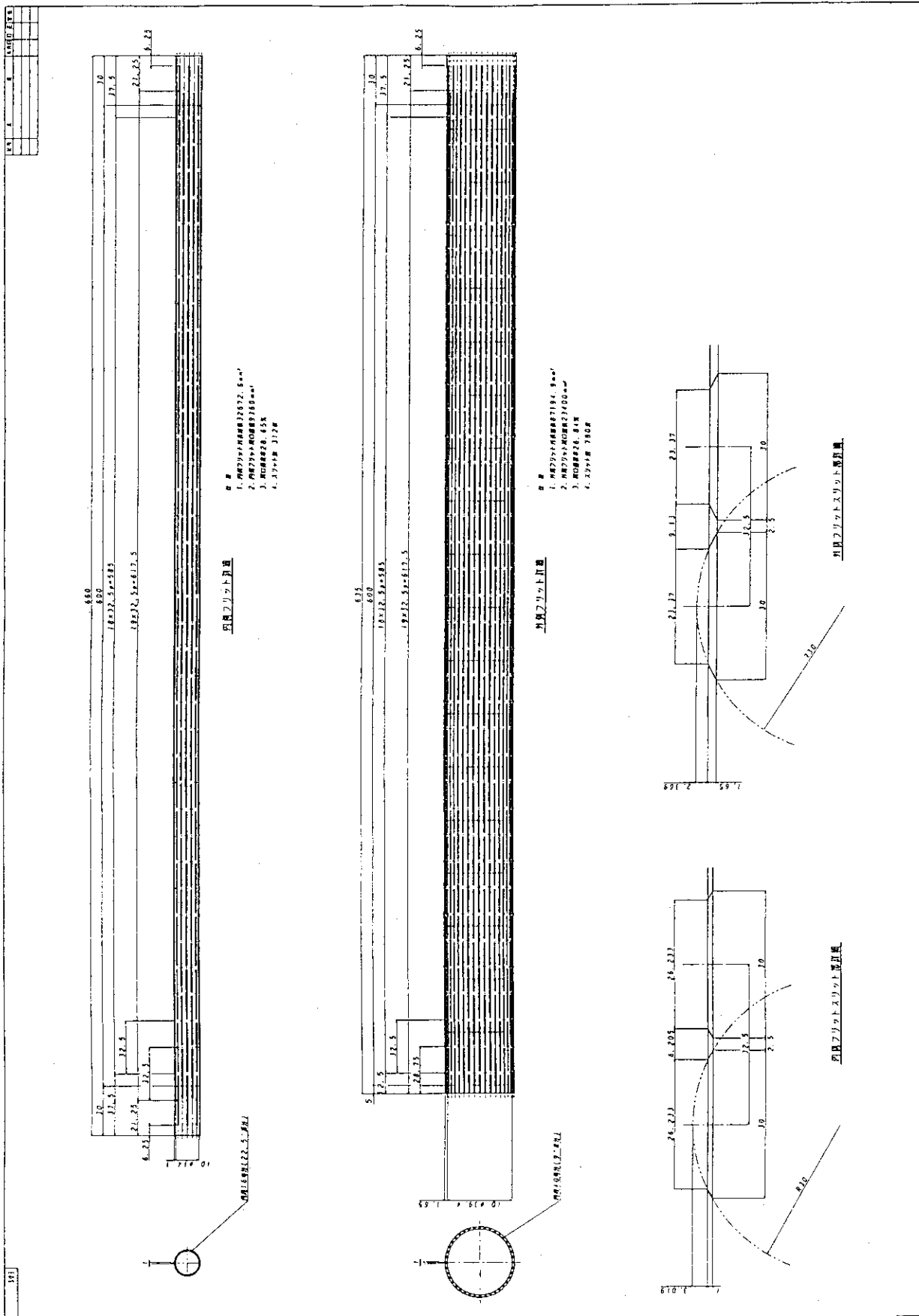


Fig. 4.5 Detail drawing of inner and outer frits

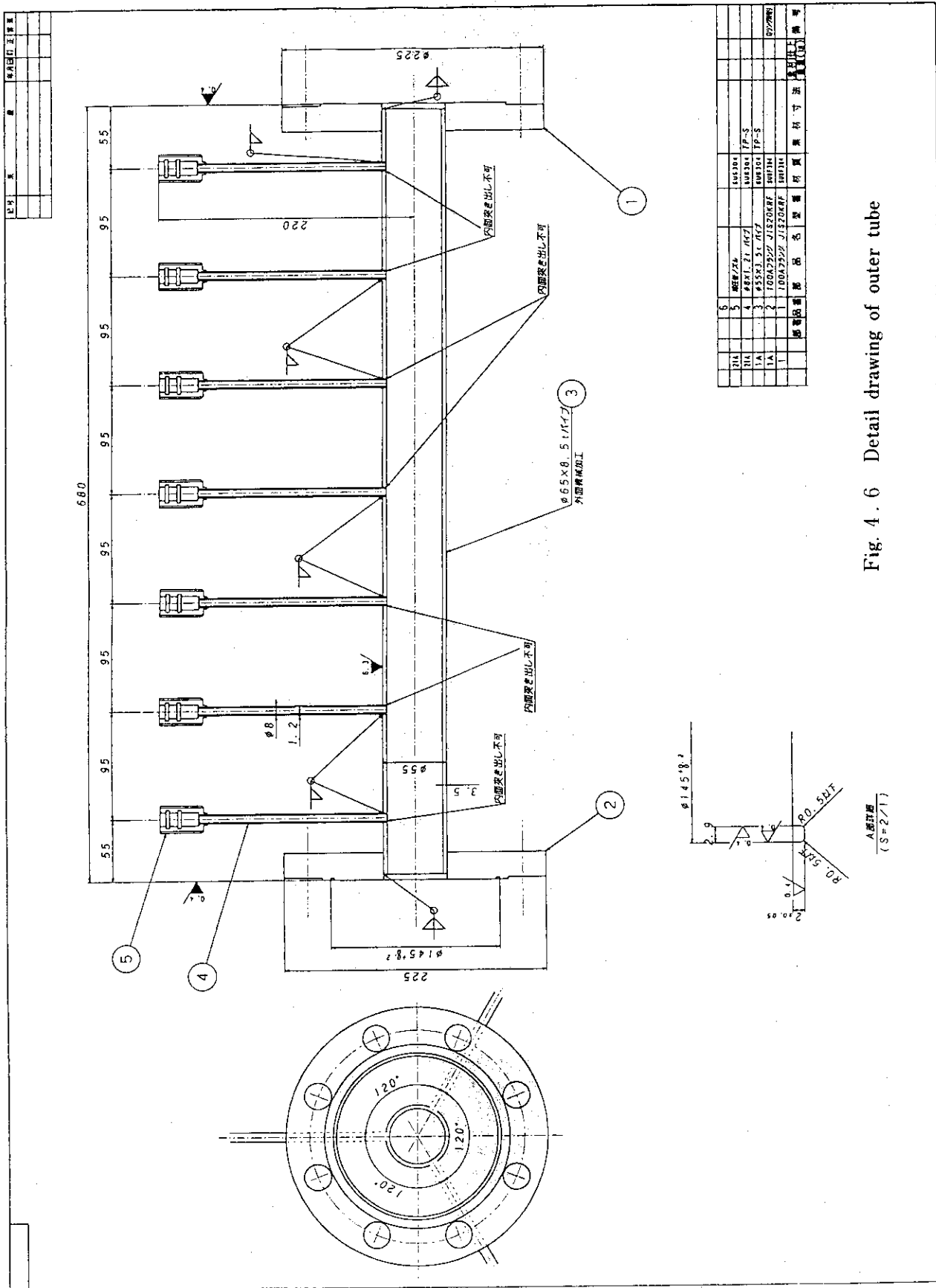


Fig. 4. 6 Detail drawing of outer tube

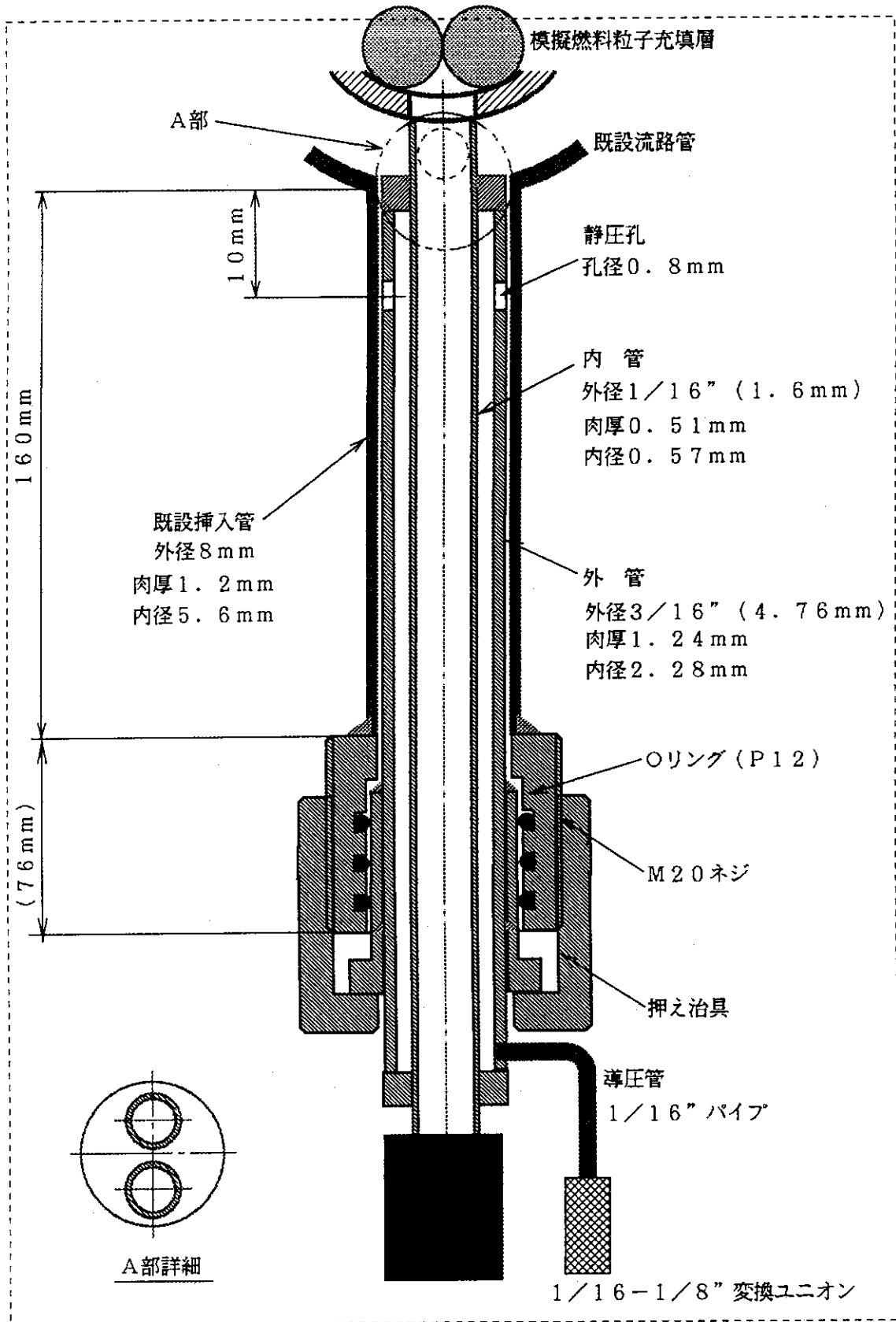


Fig. 4.7 Schematic drawing of pitot tube

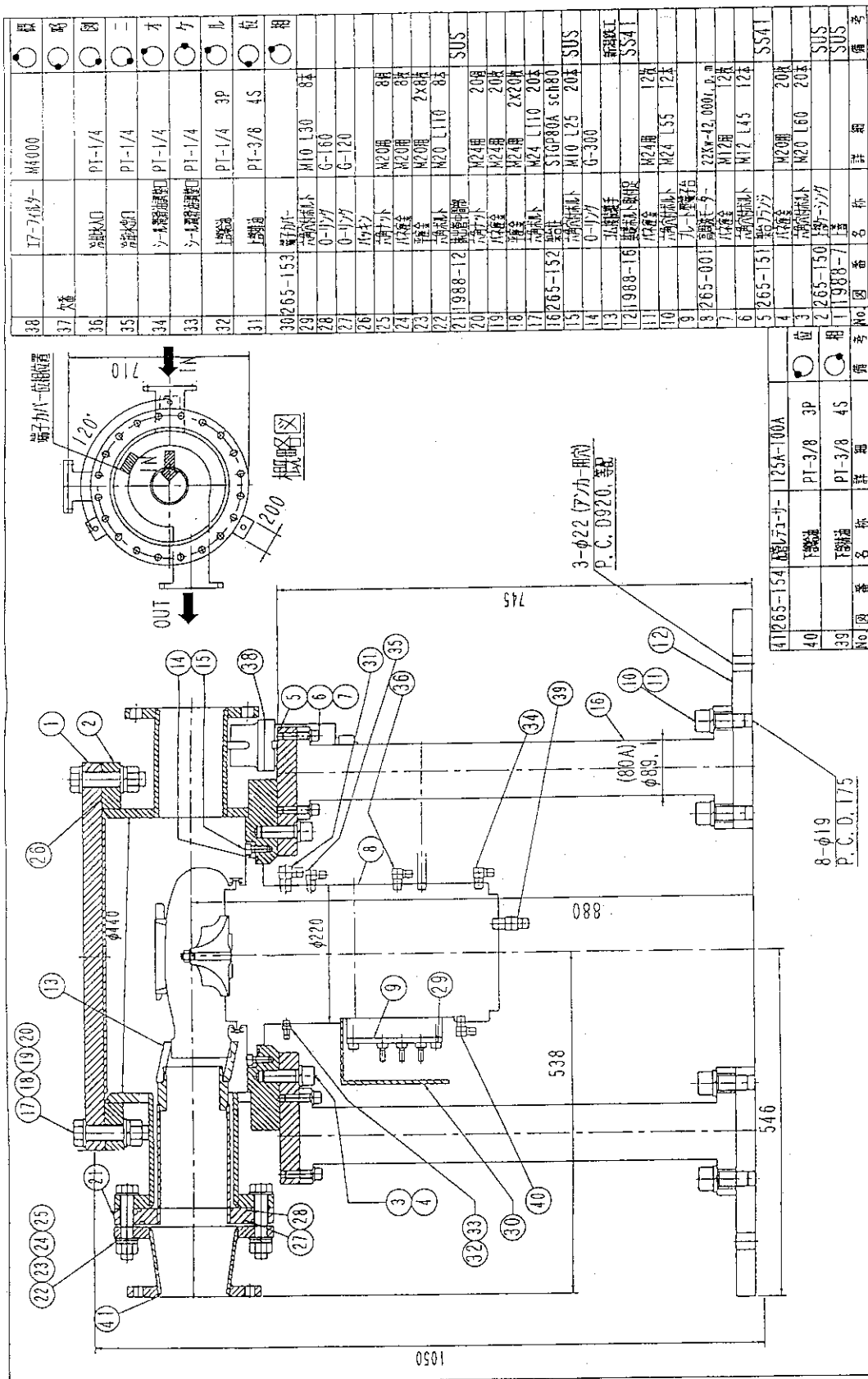


Fig. 4. 8 Schematic drawing of gas circulator

2) 蓋子 5Y7/11寸
 注記 1) 高純度銅-小黒色酸化物

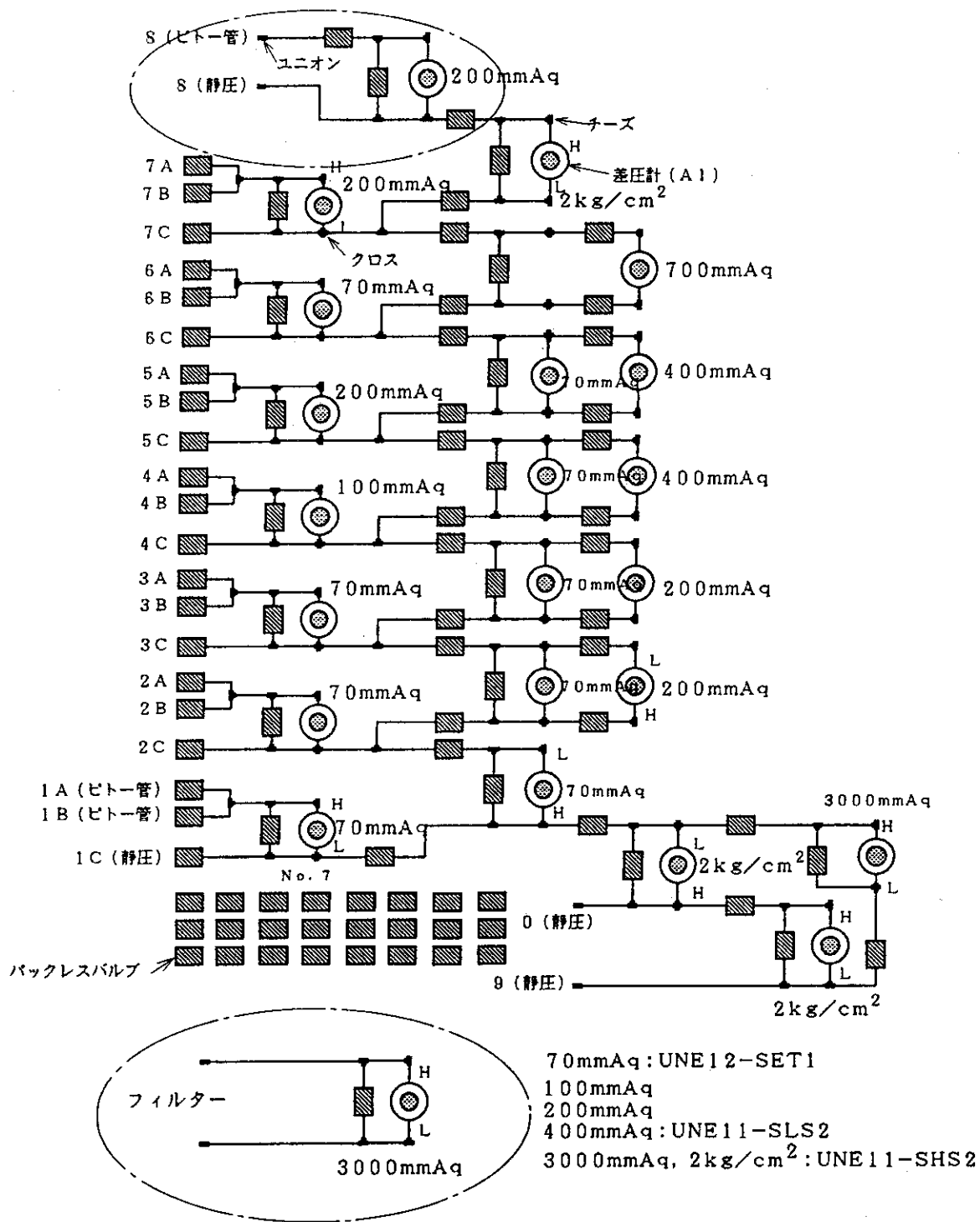


Fig. 4. 9 Arrangement of differential pressure gauges

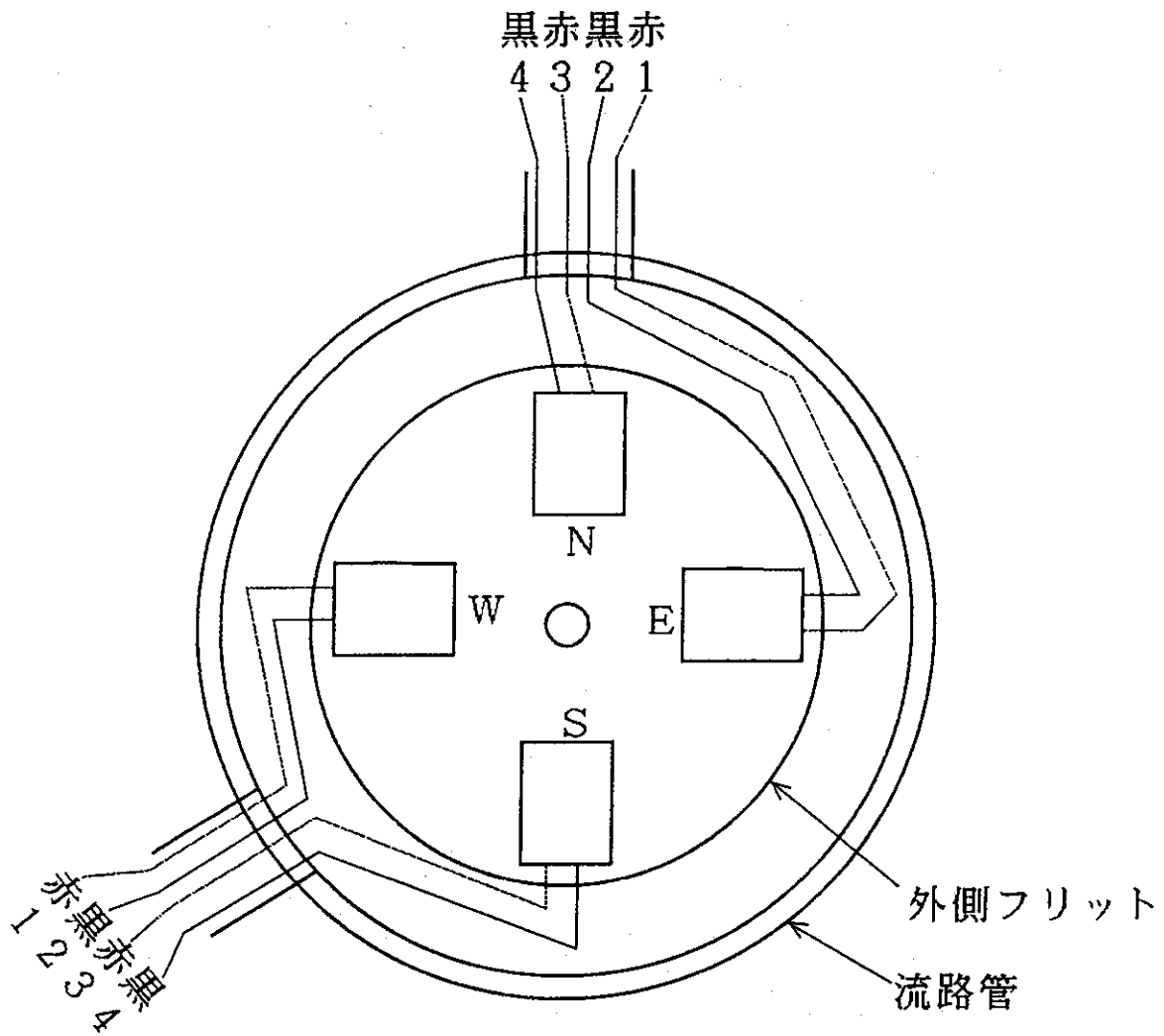


Fig. 4.10 Arrangement of accelerometers

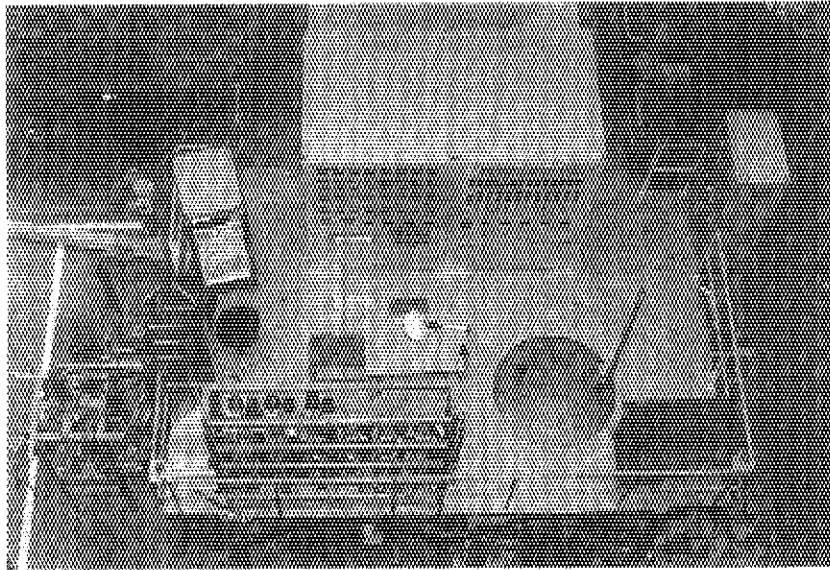


Photo 4.1 Outer view of test apparatus

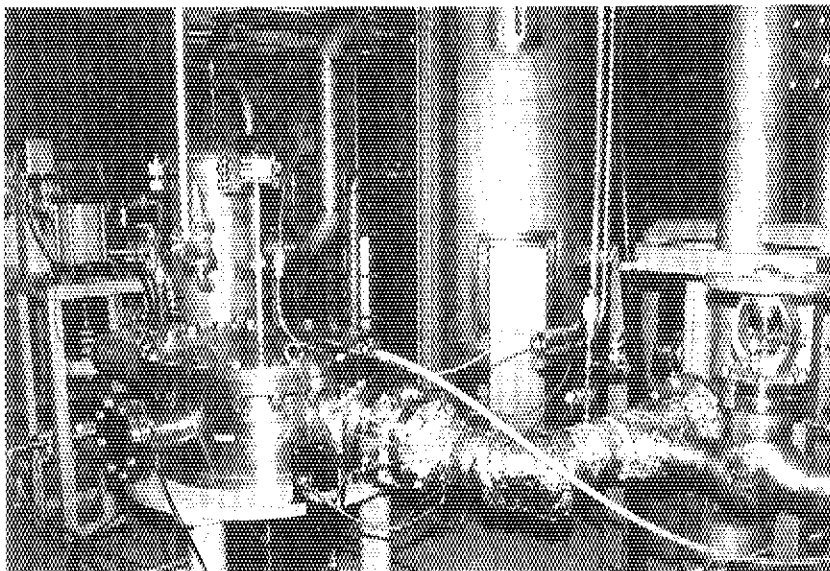


Photo 4.2 Gas circulator

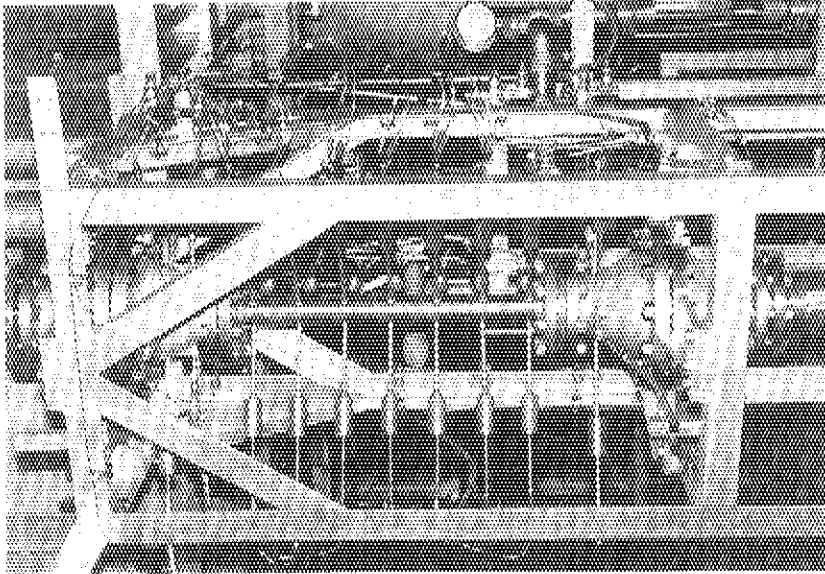


Photo 4.4 Outer view of test section

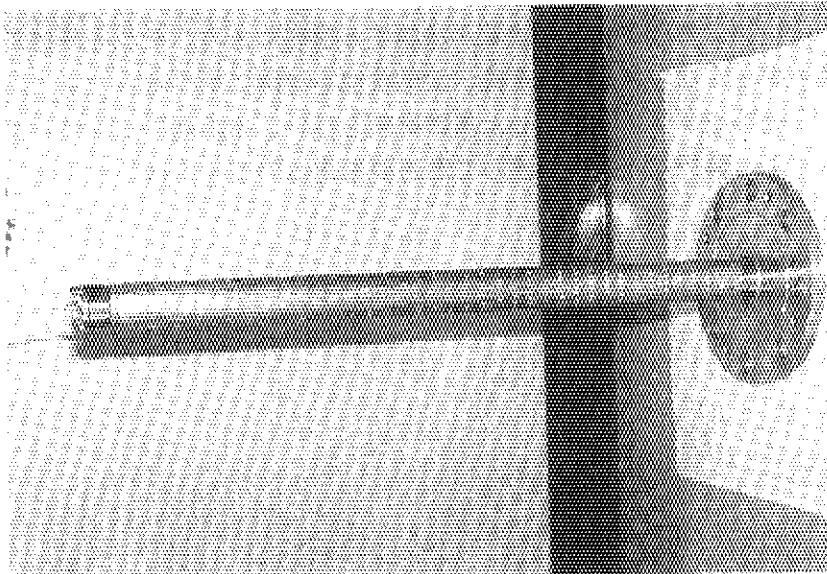


Photo 4.3 Outer view of simulated fuel element

5. 調整試験結果

試験装置の運転方法の習熟を兼ねて調整運転を行った。試験装置の運転は極めて簡単で、

- ・冷却水供給元弁を開けて冷却器等へ冷却水を流す。
- ・サージタンク内圧力を圧力調節弁で調節する。
- ・試験体圧力損失計測用の差圧計のゼロ点を記録
- ・ガス循環機を起動
- ・予熱器出口ガス温度を設定（温度調節計による自動設定）
- ・所定の流量までガス循環機回転数を上げる。

この一連の操作が、起動・運転操作である。停止は、予熱器出力をゼロにしてから、ガス循環機回転数をゼロにしてガス流動を停止、冷却水供給元弁を締めて冷却水供給を停止するのみでよい。

調整運転は、試験装置に窒素ガスを0.5MPa（絶対圧）充填して行った。このとき、ガス予熱器は起動せずに、ガス循環による温度上昇を調べた。Fig. 5.1～5.5 にガス流量を変えたときの試験装置各部の圧力と温度を示す。ガス流量の増加とともにガス循環機出口温度は上昇し、さらに流量を増大させるとガス流量計の耐熱温度を超える可能性がある。今後の試験で、大流量域を対象とする場合にはガス循環機出口に冷却器を設置する必要がある。一方、試験体を含む配管系統の圧力損失は流量の増大とともに大きくなるが、予想通り試験体での圧力損失の増加が著しい。ちなみに、流量が50m³/hのときの圧力損失は0.33kg/cm²(32kPa)となり、ガス循環機の昇圧値（＝系統の全圧力損失）の約60%を占めるに至っている。

Fig. 5.6と5.7 に流量が10m³/h、50m³/hのときの流路管側で計測した圧力損失の累積値□と多孔管から流出するガス流量の相対分布値○を示す。ガス流量はピトー管による吹出し流速計測を基にしたものである。出口側ほど吹出し流量が増加する傾向にあり、それを受けて圧力損失の増大傾向も出口側で大きくなっている。今後、流動状況を詳細に調べるとともに、孔形状と粒子充填層厚さ、粒子径等をパラメータにした基礎実験を行い、充填層内における基本的な流動特性を調べるとともに、解析コードを整備して燃料要素構造の改良をはかる予定である。

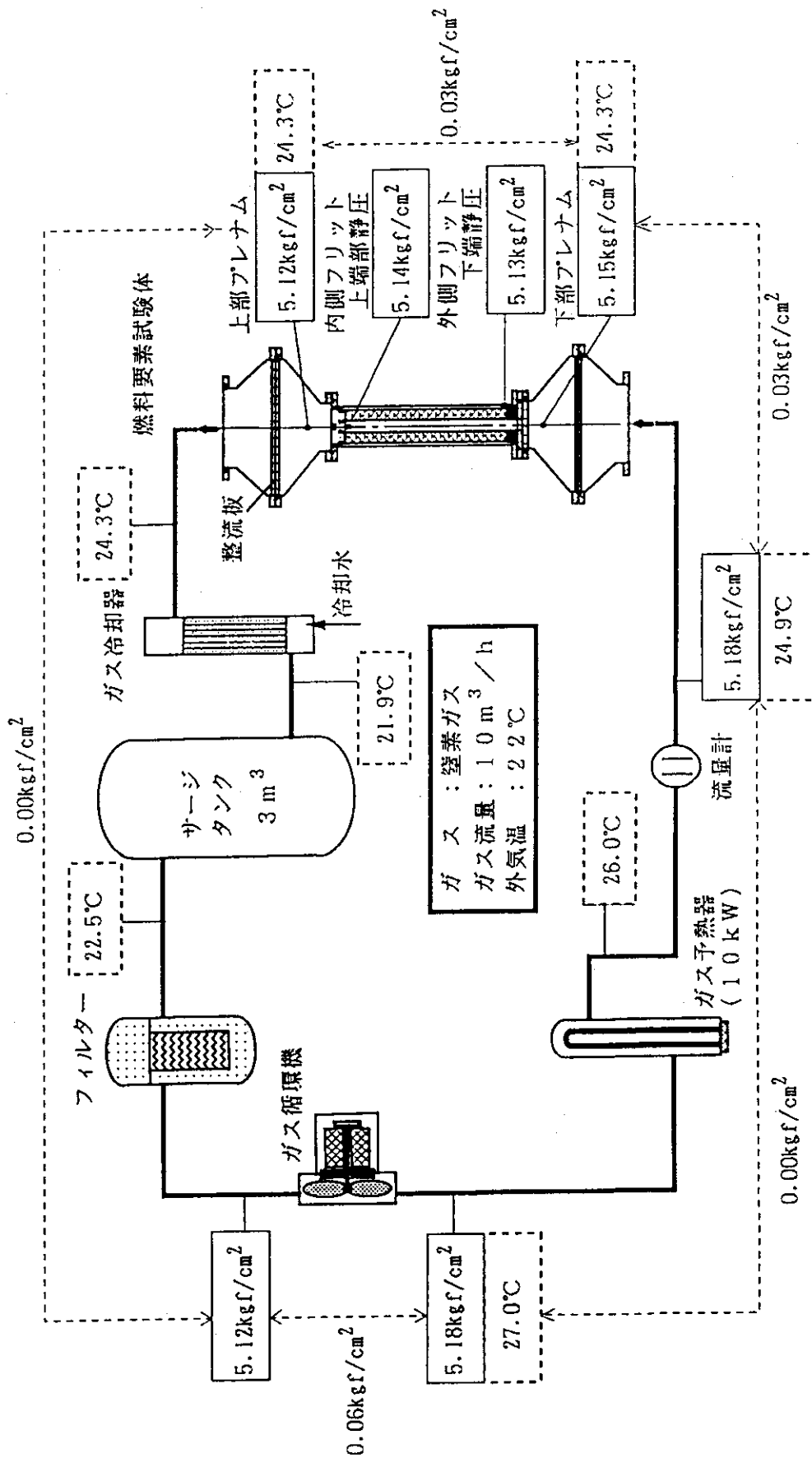


Fig. 5. 1 Temperature and pressure distributions in test apparatus under 10 m³/h of flow-rate

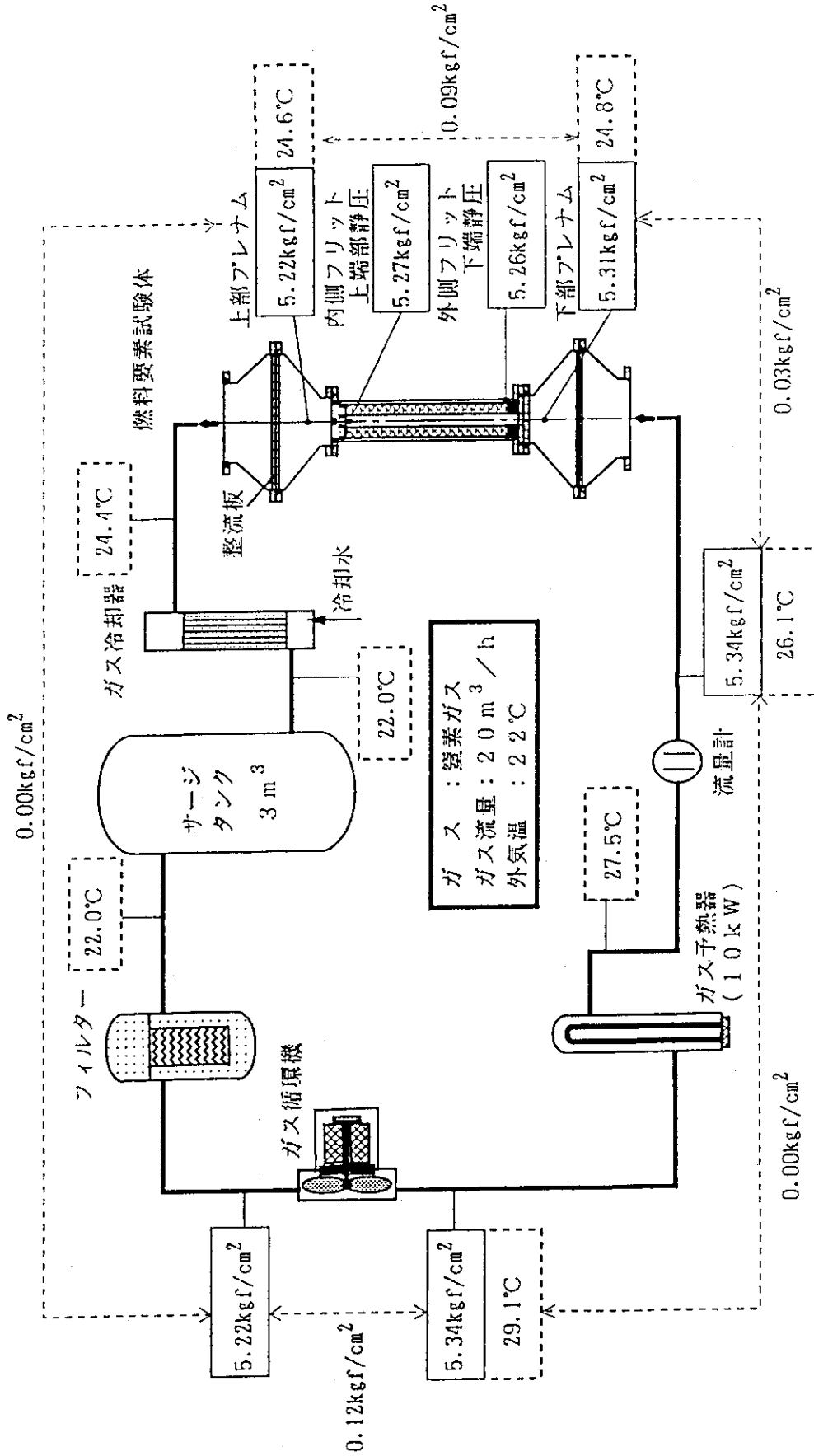


Fig. 5. 2 Temperature and pressure distributions in test apparatus under 20 m³/h of flow-rate

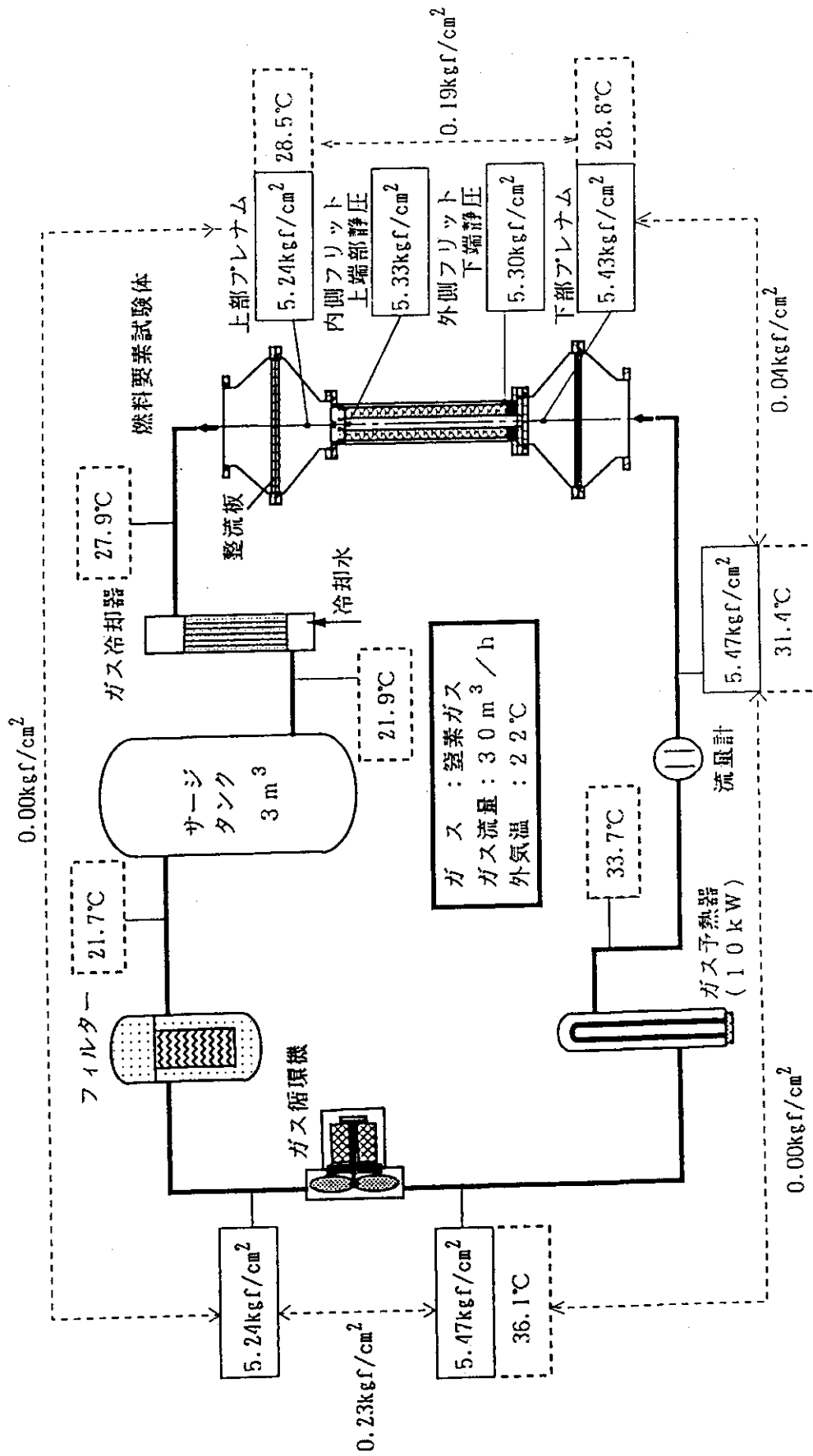


Fig. 5. 3 Temperature and pressure distributions in test apparatus under 30 m³/h of flow-rate

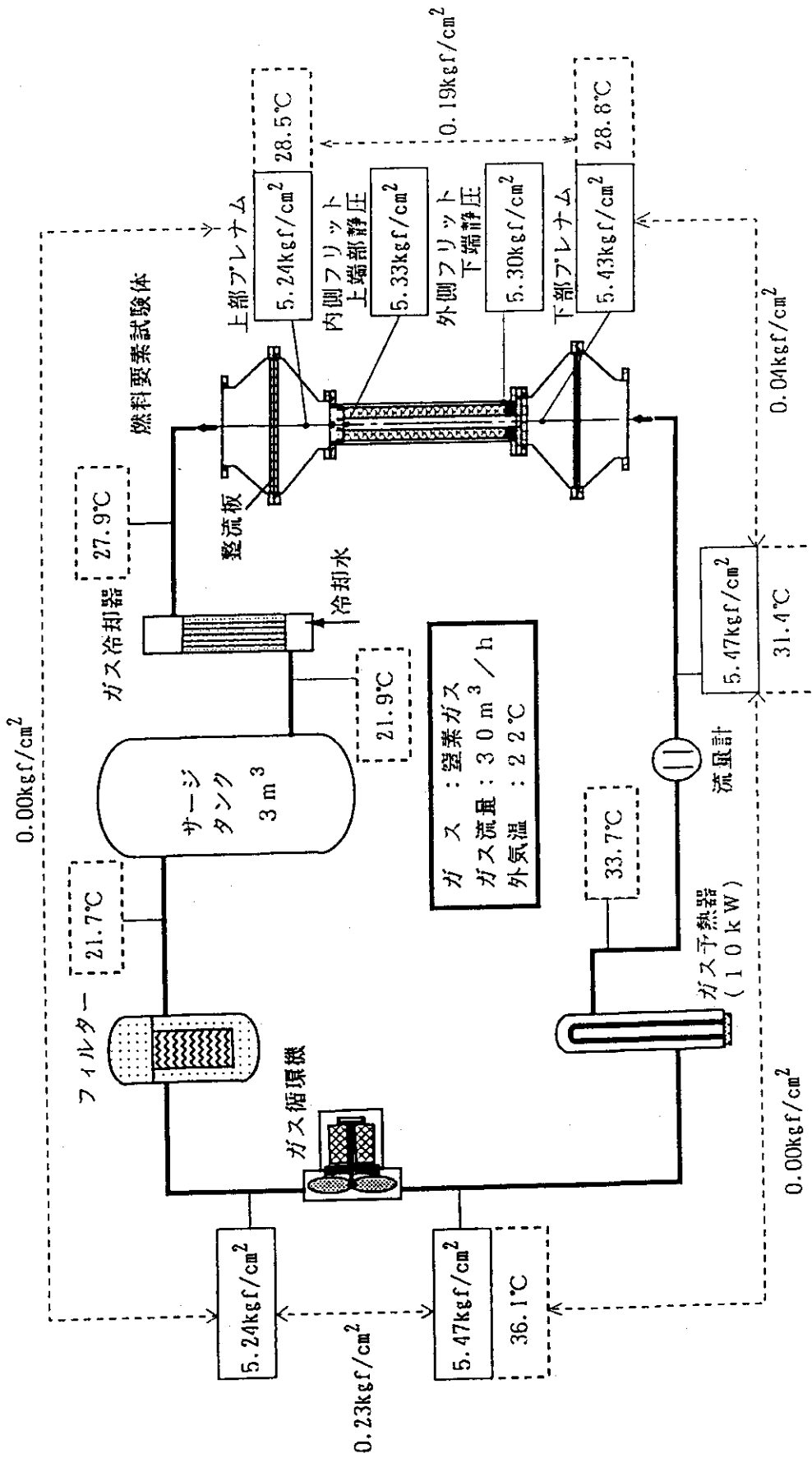


Fig. 5. 3 Temperature and pressure distributions in test apparatus under 30 m³/h of flow-rate

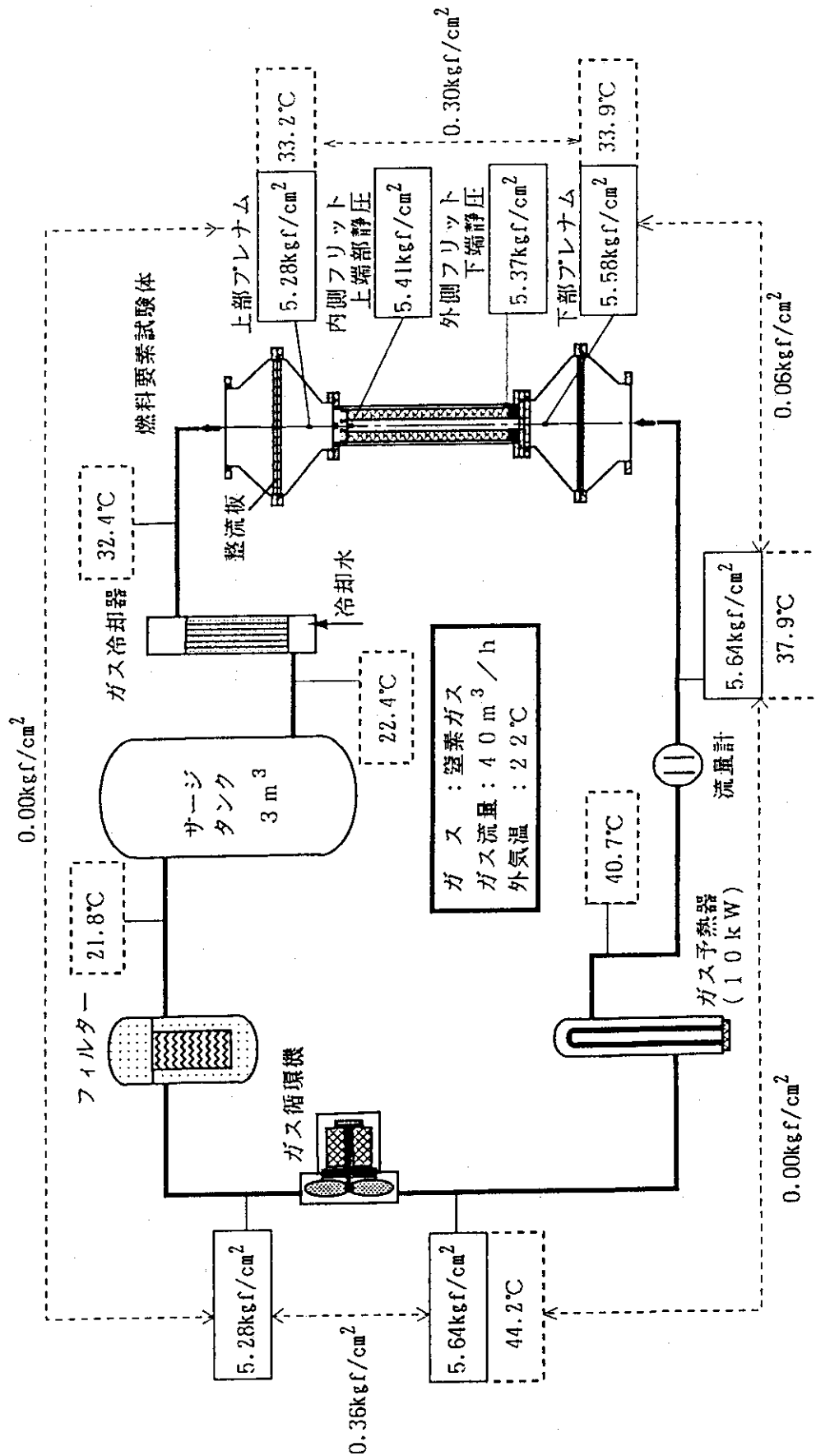


Fig. 5. 4 Temperature and pressure distributions in test apparatus under 40 m³/h of flow-rate

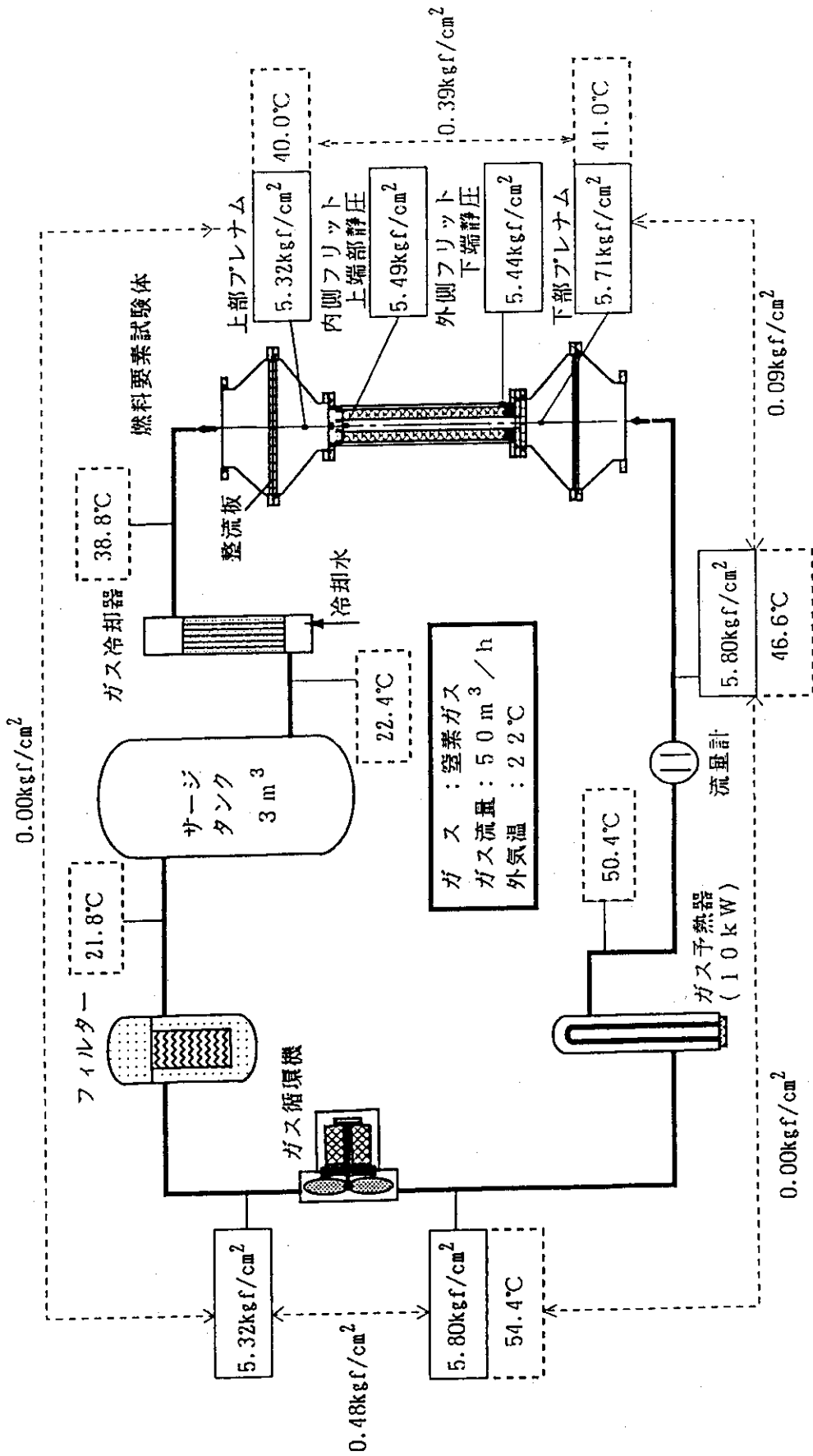


Fig. 5.5 Temperature and pressure distributions in test apparatus under 50 m³/h of flow-rate

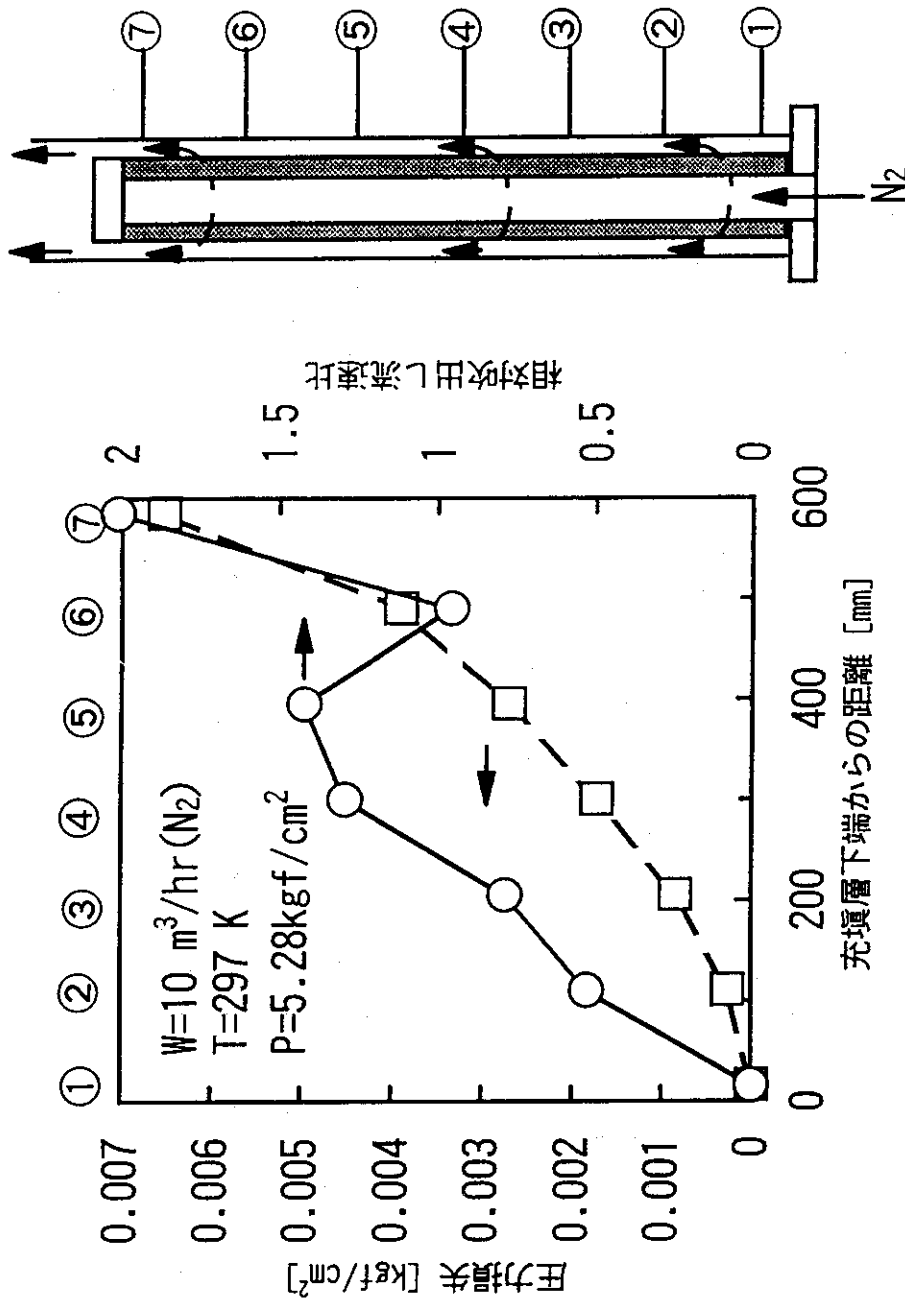


Fig. 5. 6 Pressure loss and flow rate distributions in test section under 10 m³/h of flow-rate

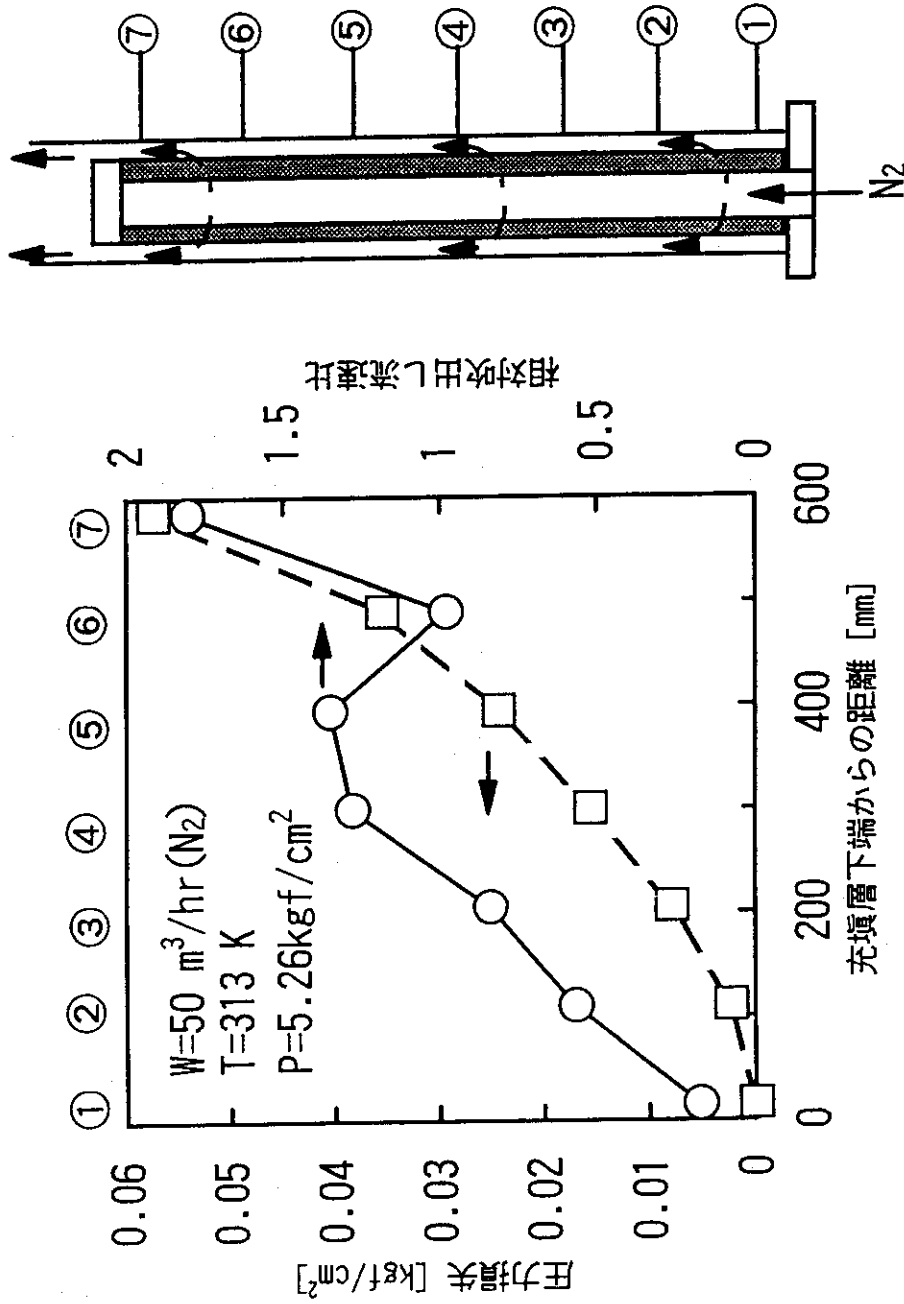


Fig. 5. 7 Pressure loss and flow-rate distributions in test section under 50 m³/h of flow-rate

6. 結 言

原研では、我が国のみならず世界の原子力エネルギー政策において重要な群分離・消滅処理の研究開発を積極的に進めており、この一環としてHe冷却型専焼炉による消滅処理システムの実現を目指した燃料要素の熱流動試験を開始した。本報では試験計画、試験装置等を紹介したが、本計画を効率的に遂行するためには、大学、メーカーを含む国内外の研究機関との協力が不可欠である。今後、多くの機関と協力して開発研究システムの構築をはかっていきたいと考えている。

謝 辞

本試験装置の製作及び試験の実施に当たっては、宮本喜晟高温工学部長から多大な助言と支援を頂いた。また、本報告書の作成に当たっては、数土幸夫高温工学部次長から貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 「原子力基礎・基盤研究の現状」、原研、(1994)。
- (2) 向山武彦、「高レベル放射性廃棄物の消滅処理研究開発」、原研所内報、No. 356、pp. 2-7 (1995)。
- (3) 「高温工学試験研究の現状」、原研、(1994)。
- (4) 滝塚貴和、他、「TRU消滅処理炉の熱流動の検討—TRU消滅処理炉の設計研究(3)」、JAERI-M 89-091(1989)。
- (5) 井上 正、「オメガ計画及びSPIN計画」、消滅処理研究の現状、原子力学会、pp. 11-19(1994)。

6. 結 言

原研では、我が国のみならず世界の原子力エネルギー政策において重要な群分離・消滅処理の研究開発を積極的に進めており、この一環としてHe冷却型専焼炉による消滅処理システムの実現を目指した燃料要素の熱流動試験を開始した。本報では試験計画、試験装置等を紹介したが、本計画を効率的に遂行するためには、大学、メーカーを含む国内外の研究機関との協力が不可欠である。今後、多くの機関と協力して開発研究システムの構築をはかっていきたいと考えている。

謝 辞

本試験装置の製作及び試験の実施に当たっては、宮本喜晟高温工学部長から多大な助言と支援を頂いた。また、本報告書の作成に当たっては、数土幸夫高温工学部次長から貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 「原子力基礎・基盤研究の現状」、原研、(1994)。
- (2) 向山武彦、「高レベル放射性廃棄物の消滅処理研究開発」、原研所内報、No. 356、pp. 2-7 (1995)。
- (3) 「高温工学試験研究の現状」、原研、(1994)。
- (4) 滝塚貴和、他、「TRU消滅処理炉の熱流動の検討 - TRU消滅処理炉の設計研究(3)」、JAERI-M 89-091(1989)。
- (5) 井上 正、「オメガ計画及びSPIN計画」、消滅処理研究の現状、原子力学会、pp. 11-19(1994)。

6. 結 言

原研では、我が国のみならず世界の原子力エネルギー政策において重要な群分離・消滅処理の研究開発を積極的に進めており、この一環としてHe冷却型専焼炉による消滅処理システムの実現を目指した燃料要素の熱流動試験を開始した。本報では試験計画、試験装置等を紹介したが、本計画を効率的に遂行するためには、大学、メーカーを含む国内外の研究機関との協力が不可欠である。今後、多くの機関と協力して開発研究システムの構築をはかっていきたいと考えている。

謝 辞

本試験装置の製作及び試験の実施に当たっては、宮本喜晟高温工学部長から多大な助言と支援を頂いた。また、本報告書の作成に当たっては、数土幸夫高温工学部次長から貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 「原子力基礎・基盤研究の現状」、原研、(1994)。
- (2) 向山武彦、「高レベル放射性廃棄物の消滅処理研究開発」、原研所内報、No. 356、pp. 2-7 (1995)。
- (3) 「高温工学試験研究の現状」、原研、(1994)。
- (4) 滝塚貴和、他、「TRU消滅処理炉の熱流動の検討—TRU消滅処理炉の設計研究(3)」、JAERI-M 89-091(1989)。
- (5) 井上 正、「オメガ計画及びSPIN計画」、消滅処理研究の現状、原子力学会、pp. 11-19(1994)。