

JAERI-M

9 1 9 5

高温燃料試験 (II)
(高温配管)

1980年11月

秋野 詔夫・椎名 保顕・根小屋真一・滝塚 貴和
江森 恒一・佐野川好母・岡本 芳三

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高温燃料試験(Ⅱ)
(高温配管)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部
秋野詔夫・椎名保顕・根小屋真一・滝塚貴和
江森恒一・佐野川好母・岡本芳三

(1980年10月24日受理)

本報告は、大型高温ヘリウムガスループ(HTGL)と高温燃料試験体とを接続する高温配管の設計、施工、運転とその特性についてまとめたものである。

この配管の主要仕様は次のとおりである。

流体；ヘリウムガス，温度；900°C，圧力；40bar，型式；内部断熱方式，
外径；216mmφ および内径；38mmφ

本配管はHTGLのヒーターから高温燃料試験体までの入口配管と，試験体出口からHTGLの再生熱交換器1次側までの出口配管から成り立っている。戻り管の最後には混合冷却器が付設されていて，ガスの温度が配管の設計温度を越えることがないようにしてある。

断熱材は， Al_2O_3 のセラミックウールでインコネル600の箔で作られたパッケージの中に詰められており，断熱材のパッケージ表面と外管(耐圧壁)内面との間のバイパス流れが起きないように区画板が取り付けられている。

Test of High Temperature Fuel Element (II)
(High Temperature Piping)

Norio AKINO, Yasuaki SHIINA, Shinichi NEKOYA
Takakazu TAKIZUKA, Koichi EMORI, Konomo SANOKAWA
and Yoshizo OKAMOTO

Division of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 24, 1980)

This report deals with the design, construction, operation and performance of a high temperature gas duct which connects the high temperature fuel test section and the High Temperature helium Gas Loop (HTGL).

The main specification of this pipe is as follows;

Fluid	Helium gas
Temperature	900°C
Pressure	40 bar
Type	Internal thermal insulation
Diameter of outer pipe	216 mm ϕ
Diameter of inner pipe	38 mm ϕ

This pipe was composed of two parts, the one was inlet section between the heater of HTGL and upper nozzle of the test section, the other was return section between the lower nozzle of the test section to the regenerative heat exchanger of HTGL. At the end of return pipe, a mixing cooler was attached to decrease the temperature of return gas below the design limit of this pipe.

The insulation material, ceramic wool made of Al_2O_3 , is packed with thin Inconel 600 foil to prohibit the bypass flow between the outer surface of the insulation package and the inner surface of outer pipe (pressure wall).

Keywords: Helium Gas, High Temperature, High Pressure, Pipe,
Insulator, Gas Loop, Heat Transfer, VHTR, Specification

目 次

1. 概 要	1
2. HTGLの改造・高温配管の仕様	1
3. 技術検討項目	9
3.1 断熱方式と伝熱流動	9
3.2 漏洩流れの測定	10
4. 高温配管の構造	13
5. 掘付前検査	21
6. 掘付工事	21
7. 性能試験	22
7.1 真空試験	22
7.2 総合性能試験	22
8. 性能試験の結果	25
9. 高温配管試験	32
10. 結言	37
謝 辞	37
参考文献	38
付録 脈動流の計測と対策	39

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Reformation of HTGL and specification of piping	1
3. Technical problems	9
3.1. Thermal insulation and difficulties	9
3.2. Measurement of by-pass flow	10
4. Structure of piping	13
5. Inspection before installation	21
6. Installation	21
7. Performance test	22
7.1. Vacuum test	22
7.2. Overall performance test	22
8. Results of performance test	25
9. High temperature operations	32
10. Concluding remarks	37
Acknowledgement	37
References	38
Appendix: Measurement of flow pulsation and reformation of HTGL	39

1. 概 要

本報告書は、多目的高温ガス炉燃料棒の伝熱流動特性に関する炉外実証試験技術を確立するために実施した高温燃料試験の成果のうち、高温配管に関する部分を取りまとめたものである。

高温配管は大型高温ヘリウムガスループ（HTGL）と高温燃料試験体を接続している¹⁾。内部を流れるヘリウムガスの条件は900℃、40気圧である。構造は、内部断熱方式であり、外管（圧力管）は外径216mmφのステンレス管であり、ヘリウムガスが流れる内管は外径38mmφのInconel600である。断熱材はアルミナ繊維より成る綿状のものであり、金属箔で形成されるパッケージに収納されている、いわゆる、インシュレーションブランケットである。本配管の特徴は、このインシュレーションブランケットと内管とを一体化してユニットとした点にあり、これを圧力管に挿入しバイパス流れを防止するための区画板を溶接した。

本配管は、高温燃料試験体をHTGLに接続するためのものであり、主たる目的は次のとおりである。

- 1) 高温燃料試験を実施し、多目的高温ガス炉炉心の伝熱流動特性を明らかにする。
- 2) 今後高温で行う伝熱流動の装置に使用されると考えられる混合冷却器の経験を得る。
- 3) 高温断熱配管に関する経験を得る。

2. HTGLの改造・高温配管の仕様

Fig. 21は、本配管のフローシートを示す。本配管の構成部分は、以下のとおりである。

- 1) 高温配管
- 2) 混合冷却器
- 3) 低温配管
- 4) 真空配管
- 5) 冷却水配管
- 6) 計測制御系
- 7) 電源装置

各部の関係を、フローシートに従って説明する。HTGLのフィルターを出たヘリウムガスは、低温配管を経て混合冷却器へ行く流れと、再生熱交換器低温側へ行く流れに分かれる。再生熱交換器で加熱されたヘリウムガスは、加熱器で試験条件温度まで昇温され、高温配管を通過して高温燃料試験体の上部ノズルより流入する。ヘリウムガスは、高温燃料試験体内を下向に流れタンタル発熱体と黒鉛製流路から成る環状流路において加熱され、伝熱流動特性の測定が行われる。発熱体を経たヘリウムガスは、高温で直接HTGLへ戻すことができないため、混合冷却器で低温ヘリウムガスを混合して冷却した後、高温配管を経てHTGL再生熱交換器へ戻される。

計測制御系は、混合冷却器と高温燃料試験体の流量測定及び各部温度制御を行うためのものである。電源装置は、高温燃料試験体のタンタル発熱体及び補償ヒーターの電源に相当する。

Table 2.1 に、本配管の主要設計仕様を、Table 2.2 に、各部の仕様を示す。

Fig. 2.2 は、概略の配管系統図を示したものである。図中には、温度レベルも併せて記入されている。800℃以上の配管は、圧力管付内部断熱配管を使用する。600℃以下の配管は、外部断熱の単独配管を使用する。

Fig. 2.3 は、混合冷却器の概略を示したものである。高温ガスに接する部分は、黒鉛で製作され、カオウル（綿状）断熱層を隔ててSUS304の耐圧容器に収められている。低温ヘリウムガスは、多数の細孔より高温ヘリウムガス流へ注入され、混合流の温度変動をできるだけ小さく抑える構造となっている。

Fig. 2.4 は、高温燃料試験体及び高温配管を取り付けたHTGL高温部の写真である。直ぐ手前に再生熱交換器がある。その奥に加熱器があり、右の奥に高温燃料試験体が置かれている。それらの間を接続する高温配管が水平に配置されている。

Table 2.1 Main specification of high temperature piping

冷却材	ヘリウムガス
最高使用圧力	4.3 kg/cm ² G
最高ガス温度 ^{注)}	900℃（高温燃料試験体入口） 1000℃（高温燃料試験体出口）
最高使用流量	30 g/s
最大発熱体入力	3.5 kw（高温燃料試験体）
運転時間	1000時間（高温配管）
温度・圧力サイクル	70回以上
昇温速度	50℃/h以上
ヘリウムガス純度	O ₂ , N ₂ , CH ₄ , CO 各2 ppm以下 露点 -68℃以下
運転可能範囲	
圧力	1.0～4.0 kg/cm ² G
流量	0.8～30 g/s（試験体）
温度	50～850℃（試験体入口）
入力	3～3.5 kw

注) 高温燃料試験体の加熱部出口の最高ガス温度が1200℃（目標値）であるため、試験体内の混合冷却器によって1000℃（高温燃料試験体出口）まで冷却される。

Table 2.2 Specification of each parts

1. 高温配管

形 式	内部断熱材付配管
数 量	一式
呼 び 径	6 ~ 8 B , 1 B
材 質	SUS304TP (圧力管) ハステロイ-X, インコロイ800 (HTGL接続部) インコネル600 (内部流路管, 断熱材外皮) セラミックウール (断熱材)
設計圧力	43 kg/cm ² G
同 温 度	
内部	900 °C
外壁	200 °C
流 量	
試験体入口	1 ~ 30 g/s (HTGL加熱器 ~ 試験体)
混合冷却器出口	1 ~ 50 g/s (混合冷却器 ~ HTGL再生熱交換器)
範 囲	HTGL加熱器 ~ 高温燃料試験体 ~ HTGL 再生熱交換器, HTGL 熱器入口 ~ 再生熱交換器
付 属 品	熱電対, 架台

2. ヘリウム系中温配管

形 式	外部断熱材付配管
呼 び 径	1 B
材 質	SUS304TP Sch 40
設計圧力	43 kg/cm ² G
設計温度	600 °C
流 量	30 g/s
範 囲	HTGL再生熱交換器 ~ HTGL加熱器

3. ヘリウム系低温配管

呼 び 径	3 B, 2 B, 1 B, 3/4 B, 1/2 B
材 質	SUS304TP Sch 40
設計圧力	43 kg/cm ² G
設計温度	100 °C
範 囲	HTGLフィルター ~ 試験体 (1/2 B) HTGLフィルター ~ 混合冷却器 (3/4 B) 真空系配管 (3 B, 2 B)

4. 混合冷却器

形 式	ガス混合形		
外 径	耐圧部 呼び径 10 B Sch 40		
長 さ	1,000 mm		
材 質	高温ガス接触部 グラファイト		
耐 圧 壁	SUS304TP		
断 熱 部	インシュレーションブランケット, カオウール		
ガス温度			
高温ガス	入口	0 ~ 1,000 °C	
	出口	0 ~ 900 °C	
冷却用ガス	0 ~ 100 °C		
ガス流量			
高温ガス	入口	0 ~ 30 g/s	
	出口	0 ~ 50 g/s	
冷却用ガス	0 ~ 20 g/s		
数 量	一式		

5. ヘリウム系弁類

形 式	ベローシール形止弁, ニードル弁 (手動)
材 質	SUS304
設計圧力	43 kg/cm ² G
設計温度	100 °C

種 別	口 径	個 数	備 考
止 弁	2 B	2	真空系止弁
止 弁	3 / 4 B	1	混合冷却器止弁
止 弁	1 / 2 B	2	試験体パージ系止弁
ニードル弁	3 / 4 B	1	混合冷却器流量調節用
ニードル弁	1 / 2 B	3	低域用流量計調節用

6. 冷却水配管

呼 び 径	1 B他
材 質	SGP
設計圧力	10 kg/cm ² G
付 属 器	弁類, ヘッダー, フロースイッチ (1個)

7. 計測系

内 容	ヘリウムガス温度測定
種 別	CA (インコネルシース)
数 量	4
取付場所	混合冷却器入口, 出口 試験体入口 HTGL再生熱交換器入口

8. 電気計装設備

(1) 電源盤

形 式	自立閉鎖形
数 量	一面

(2) 高温燃料試験体用電源

1) I V R

形 式	单相電動式
容 量	50 KVA
電 圧	200V / 0 ~ 400V
数 量	一式
付 属 品	制御盤

2) 降圧トランス

形 式	油入自冷形
容 量	单相 50 KVA
電 圧	400V / 10V
数 量	1台
付 属 品	バスダクト (单相 3000A)

(3) 計装設備

1) 調節計

形 式	P I D
入 出 力	1 ~ 5 V / 4 ~ 20 mA
数 量	1
用 途	加熱電力調節用

2) プログラム設定器

形 式	ギヤー式
出 力	1 ~ 5 V
用 途	加熱電力自動設定用

3) その他 切換スイッチ, 盤改造, 配線工事 一式

9. その他 架台, 基礎 一式

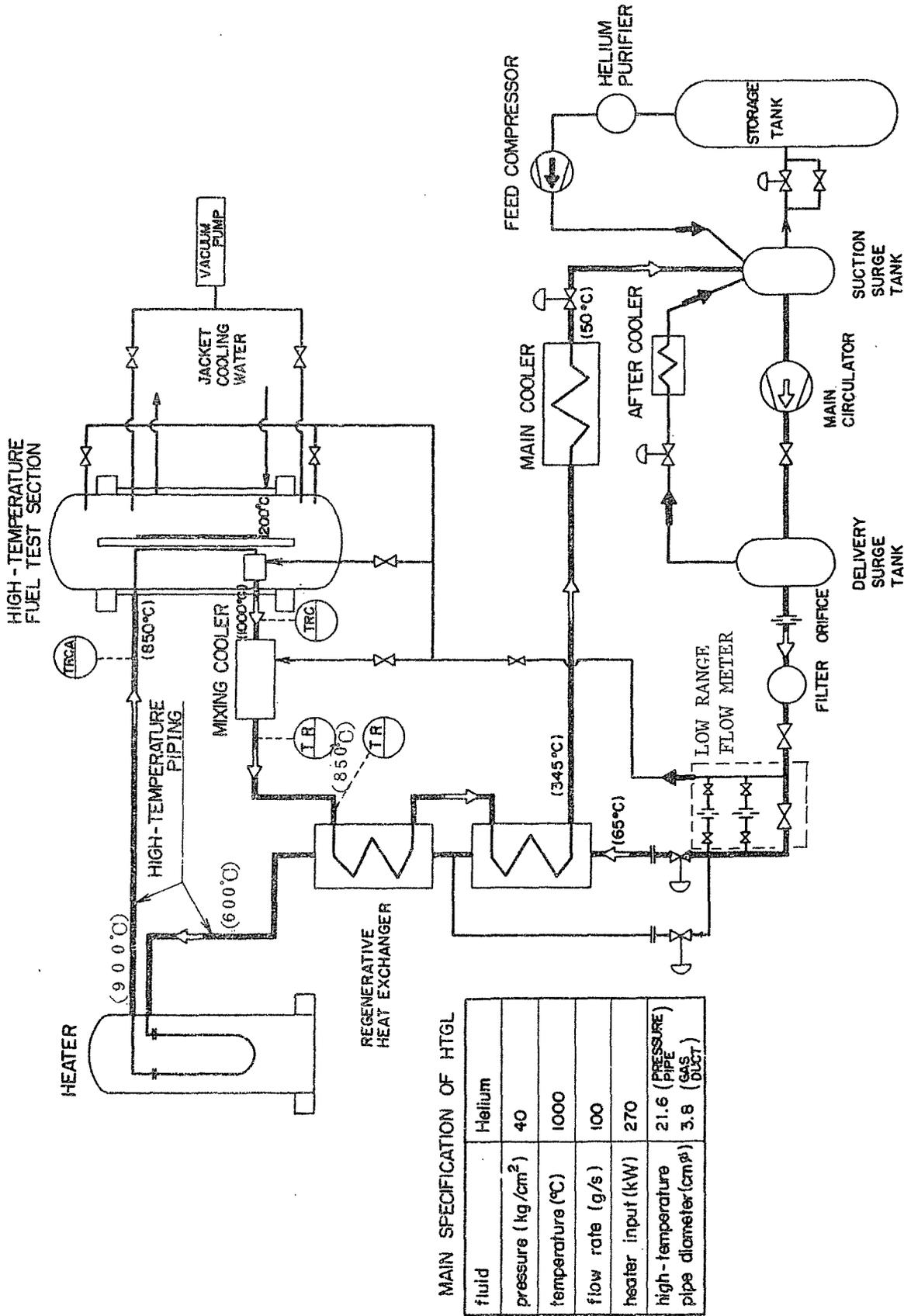
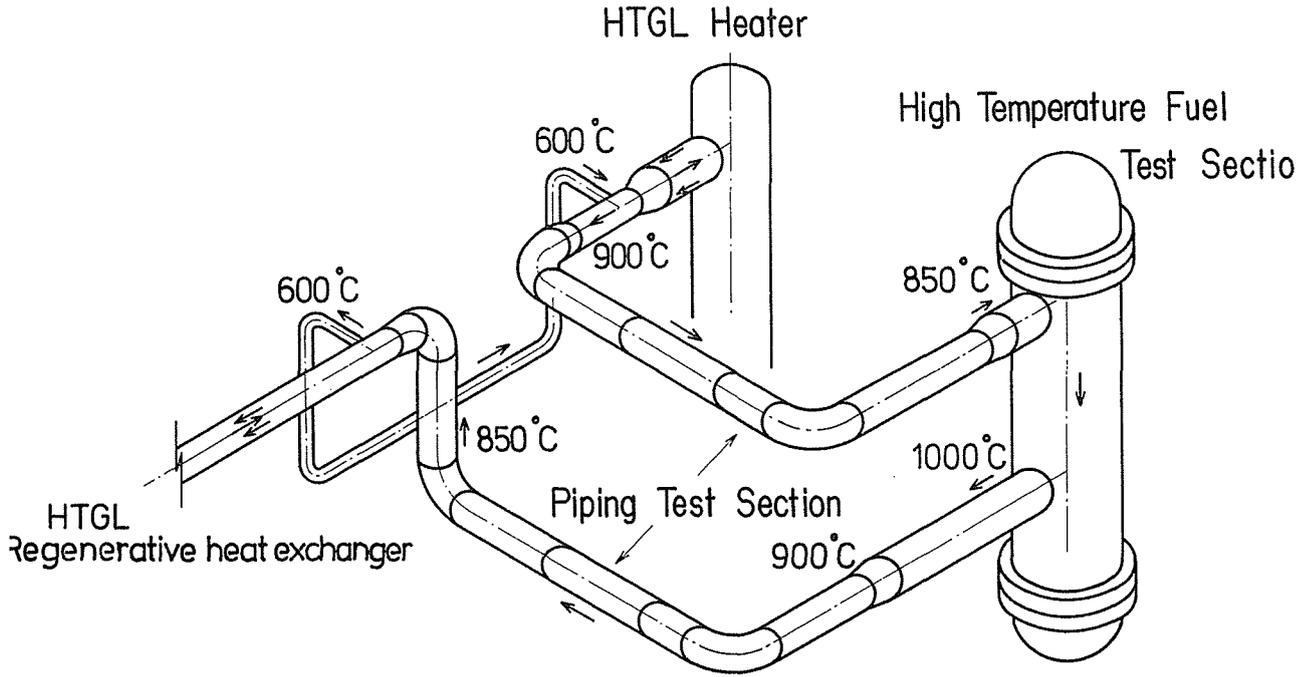
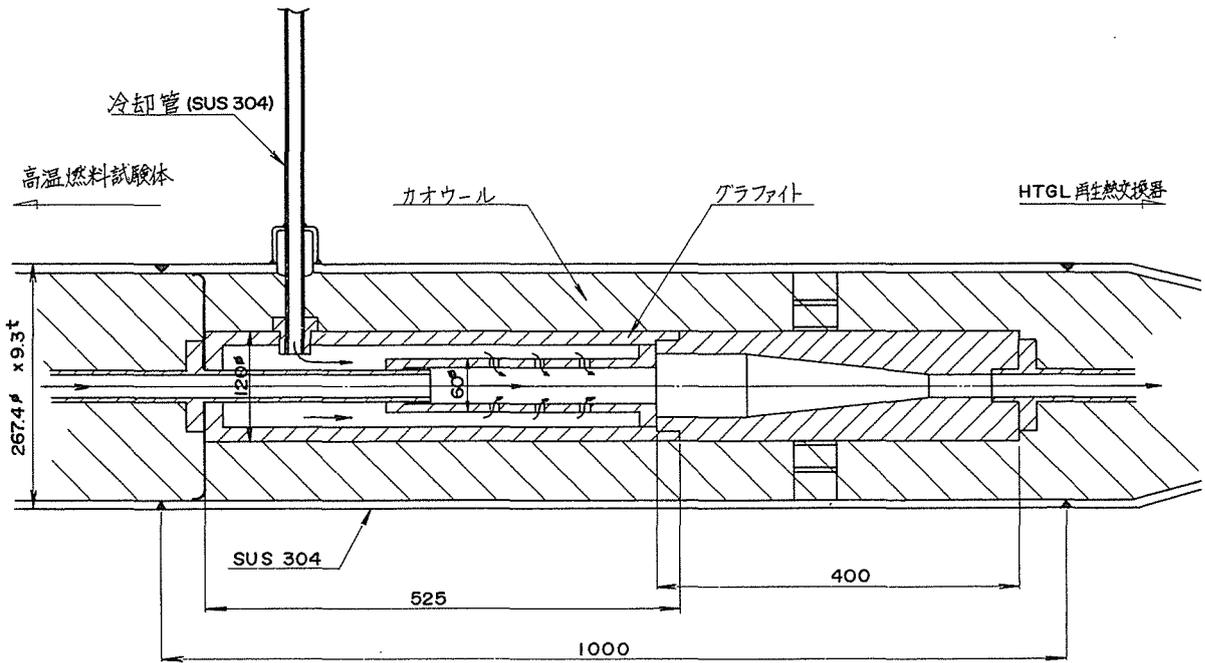


Fig.2.1.1 Flow sheet of high-temperature piping test section



配管系統図

Fig.2.2 Layout of high-temperature piping test-section



混合冷却器

Fig 2.3 Mixing cooler

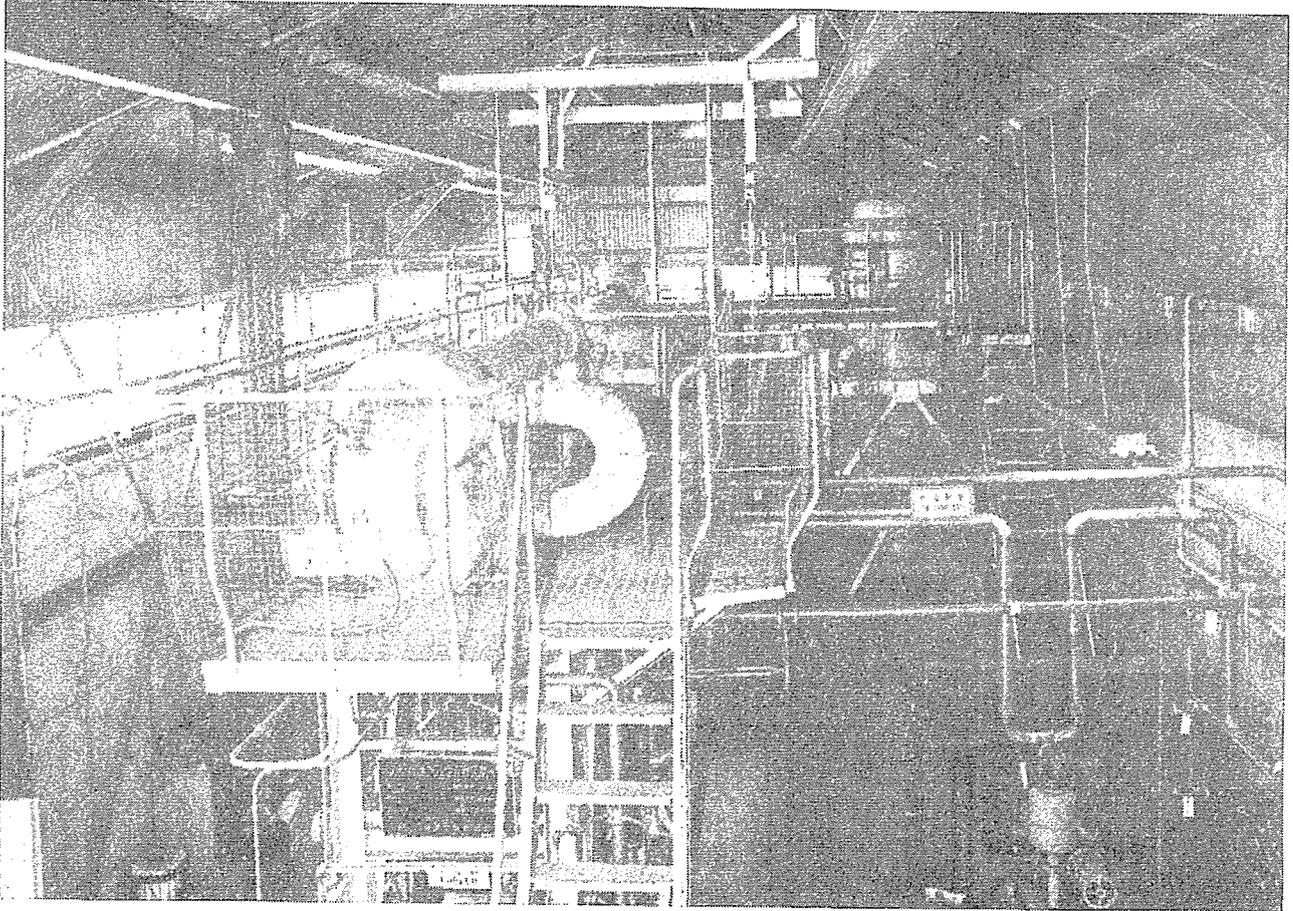


Fig. 2.4 HTGL 高温部

3. 技術検討項目

3.1 断熱方式と伝熱流動

一般に、高温高圧条件で使用される配管は、耐圧管の温度を低くするために、内部に断熱層を設けることが多い。そのため、構造は少なくとも内側からガス流路管、断熱層、耐圧管を配する多重構造となり、種々の問題を生じる。

第1の問題点は、内外管の温度差によって生じる熱膨張差の吸収構造である。例として、長さ10m、内外管温度差500°Cの配管では、8~9cmの熱膨張差が生じる。通常、内管側にベローズまたは、スライド・ジョイントを設ける。しかし、ベローズは、使用温度、収縮量、伸縮回数等の弾塑性上の条件を考慮すると、技術、費用の点で極めて困難なものがある。一方、スライド・ジョイントは、ベローズのような問題はないが、金属と金属が接触摺動する部分の高温融着現象と漏洩流れの発生が問題となる。

漏洩流れは、ガス管路内の流動抵抗によって生じる圧力差と配管内温度分布によって生じる密度差が駆動力となって、断熱層中及び断熱層と耐圧管内壁に存在する間隙を流路として、スライド・ジョイント間を流体が流れるために発生する。その流量は、条件によっては数10%にもなることがある。

漏洩流れによって生ずる問題点をFig.3.1に示す。漏洩流れは、耐圧管と断熱材の間隙を流れるバイパス流れと断熱材中を流れる浸透流れに分けられる。高温のバイパス流れが、スライド・ジョイント部から流出し、耐圧管内壁に衝突する部分はホットスポット（異常高温点）が発生する。さらに、間隙中を流れる間に放熱し、その結果耐圧管の平均温度を上昇させる。バイパス流れが、下流のスライド・ジョイント部で主流と混合することにより、主流温度を低下させ、実質的に配管の断熱性を悪化させる。また、浸透流れは、断熱材中の熱移動を促進し、断熱性能を悪化させる。

高温配管では、漏洩流れを防止するため、各スライド・ジョイントごとに内外配管の間に区画板を設けている。この区画板及び断熱材包装箱の密閉性については、予備実験を行って、その結果から細部の施工条件を決定した。

配管の断熱層の設計に当たっては、熱伝導率が重要であるが、一般に知られているデータは比較的低い温度の静止空気零囲気の値である。さらに、高圧ガス零囲気で温度差が大きいと、グラスホフ数が大となるため自然対流に対する検討が必要となる。自然対流の発生モードをFig.3.2に示す。発生個所としては間隙部、断熱層の中及び結合部が考えられ、配管の姿勢も重要な条件である。自然対流が発生すると、対流の影響により、耐圧管に大きな温度分布を生じ、断熱層及び間隙の熱伝導も静止零囲気よりも大きくなるため断熱性能は低下する。

高温配管試験部²⁾³⁾については、全ての自然対流モードについて、従来の研究に基づいた検討を行った結果、一応安全であることが分かった。しかし、断熱層中に浸透流れが存在する場合は、さらに検討する必要がある。

断熱材は一般に多孔性の材料であり、主成分はアルミナシリカ等のセラミック類が使用されるため、各種吸着成分の脱ガスとその排出の問題がある。脱ガス対策は、漏洩流れの防止対策と相矛盾するものである。すなわち、漏洩流れを防止するために断熱材側の密閉性を高めると、脱ガスの排出が困難となる。

高温配管では、漏洩流れ防止用の区画板を各スライド・ジョイント区間の一方向のみに設けて滞留領域を生じないようにし、さらに包装箱の中でスライド・ジョイントに近い位置に息抜き穴を設け、脱ガスの拡散抵抗が最小となるような設計を行った。

3.2 漏洩流れの測定

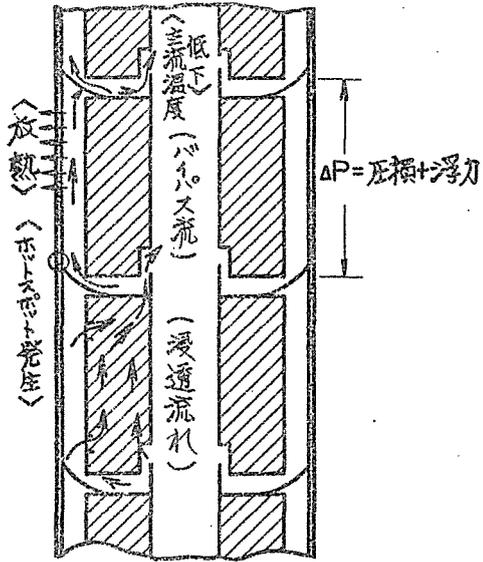
漏洩流量を明らかにするために必要な性能試験について述べる。漏洩流れは、インシュレーションブランケット包装箱の接合部の流動抵抗、箔と区画板の接合部の流動抵抗によって決定される。詳細施工条件を決定する前に、これらの実測を行う予定である。ここでは、高温配管試験に使用するものとは寸法形状が異なるインシュレーションブランケット（HTGLの高温二重配管で使用したもの、 1000°C で100時間程度使用）について行った予備試験について述べる。

測定法及び試料インシュレーションブランケットをFig.3.3に示す。流体はヘリウムガスを使用し、減圧弁を二段取り付けて流量を十分安定化させ、インシュレーションブランケット内を通過させて、圧力損失と流量の関係を求めた。ガスは、インシュレーションブランケットの息抜き孔から流入された。流量は、面積流量計（ローターメーター）と細管流量計を使用した。

測定結果をFig.3.4に示す。全体の圧損とは、測定管路及びインシュレーションブランケットを含めた測定値である。ガス抜き孔金網の圧損とは、測定管路及び息抜き孔入口に取り付けられた金網までの圧損である。従って、両者の差が断熱層及び薄板接合部の圧損と考えられる。図中の各プロットは、息抜き穴Aからガスを注入し、息抜き孔B、C、Dを開放した条件及び閉じた条件での結果である。各条件下での結果は、全て同一の線上に集っており、Aから流入する場合他の息抜き孔の開閉は圧力損失に影響しないことが分かる。このことから、Aから流入したガスは、断熱層中を流れ近辺の箔接合部から流出したものと判断される。従って、この測定で得られた結果は、主として箔接合部の流動抵抗に相当する。

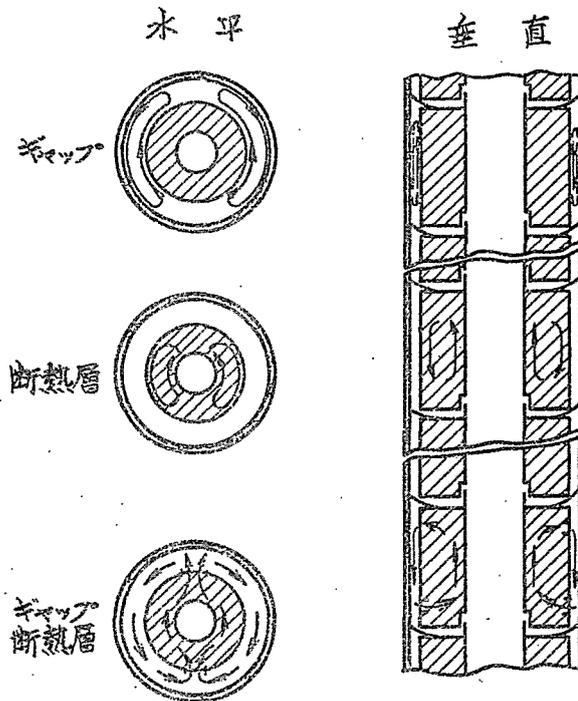
以上の予備試験の結果を、高温配管の場合に当てはめてみると、試験部のスライドジョイント間の圧損は最大 20 mmAq なので最大漏洩流量は 1.5 l/min 程度である。この漏洩流量は、配管内主流量の 0.5% に相当する。試験部全体で約 20 個所のスライドジョイントがあるので、合計 10% の漏洩流量が発生することになる。

以上の結果は、使用した断熱材要素の寸法、形状、箔接合部の構造が実際の試験部に使用するものとはかなり異なるため、正確な推定値とはいえないが、ある程度の傾向は分かると思われる。



洩漏流れの影響

Fig.3.1 Effects of leakage flow



自然対流の影響

Fig.3.2 Effects of natural convection on the thermal insulation of pipe

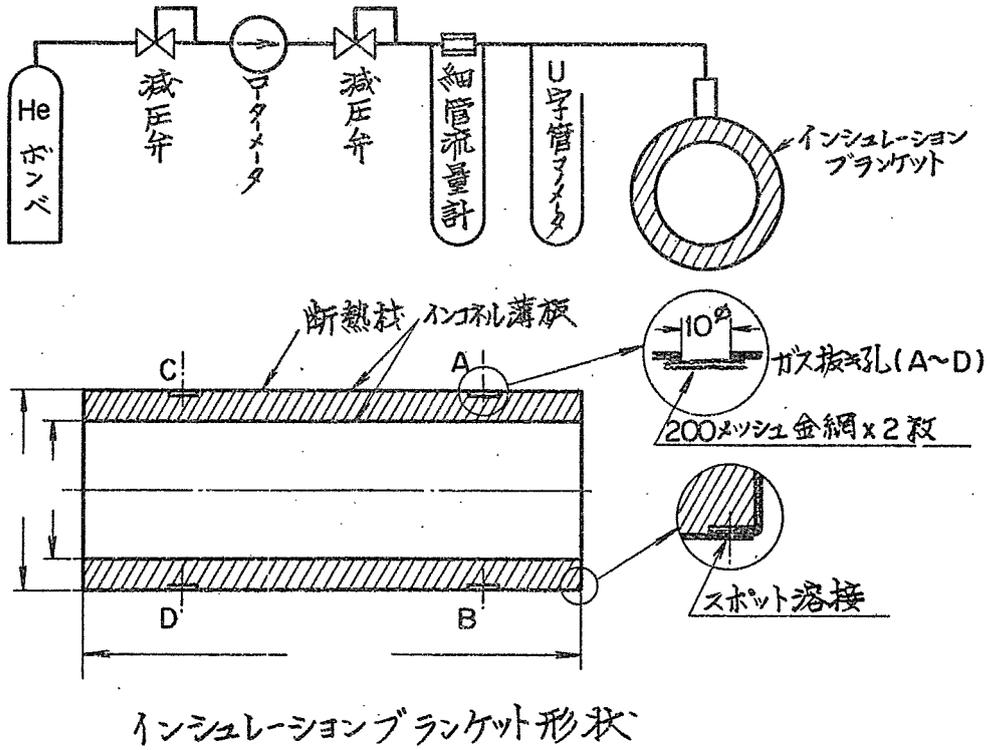


Fig.3.3 Apparatus for measurement of leakage flow through insulator

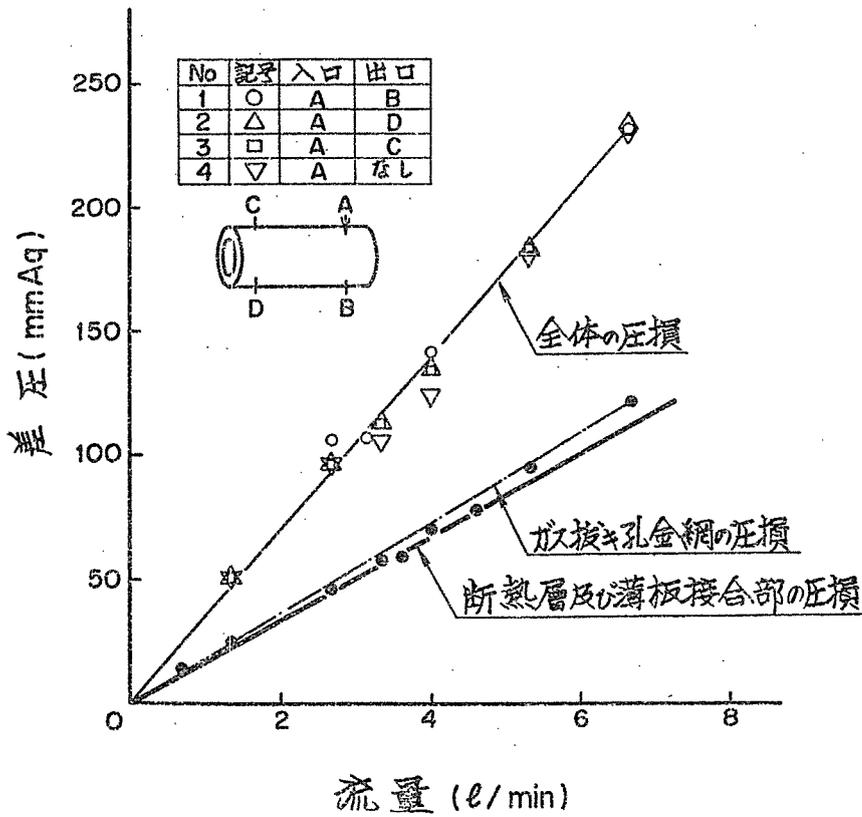


Fig.3.4 Results of measurement of leakage flow (Preliminary test)

4. 高温配管の構造

Fig.4.1は、高温配管試験部の配管系を具体的に示したものである。HTGLの再生熱交換器と加熱器の間に現在設けられている高温二重配管を取り外し、図に示すような配管系を接続する。配管の主要な部分は、内部に断熱材を有する一重配管方式である。入口配管及び出口配管は、高温ヘリウムガス（最高900℃）が通過するため、内部に断熱層を取り付け耐圧管の温度を低くする設計となっている。Fig.4.2とFig.4.3に、入口及び出口配管の詳細図を示す。使用される断熱材要素の構造を、Fig.4.4に示す。この断熱材の要素は、配管構造の簡略化、断熱物質から発生する微粒子の閉じ込め、低温耐圧管と高温ガス流路管の熱膨張の吸収、及び耐圧管と断熱材要素の間隙に生ずるバイパス流れの防止等の問題点を解決するため、以下のような特徴を持つ。

- (1) 断熱物質（綿状アルミナシリカ断熱材）を、耐熱合金箔で包装する（インシュレーションブランケット）。
- (2) ガス流路管と断熱材を一体化する。
- (3) バイパス流れを防止するための区画板を有する。

すなわち、使用される断熱材は、金属箔で無機綿状断熱材を包装した形式のものであるため、包装箔の接合部からのガス漏洩は、耐圧管のホットスポット発生及び断熱特性の低下等の問題を引き起こす。そのため、接合法と漏洩流量の関係を実測し、シール性を要する接合部には連続抵抗溶接方法が採用された。

Fig.4.5に箔包装形断熱材要素（インシュレーションブランケット）及び組み立て中の配管の端面を示す。8インチのSUS304圧力管の内部にインシュレーションブランケットが挿入されている。断熱材中心のパイプは、ヘリウムガス流路管であり、断熱材の内壁を兼ねている。また、この端面は、断熱材インローのメスに相当する。断熱材端面の4つの穴は通気孔である。

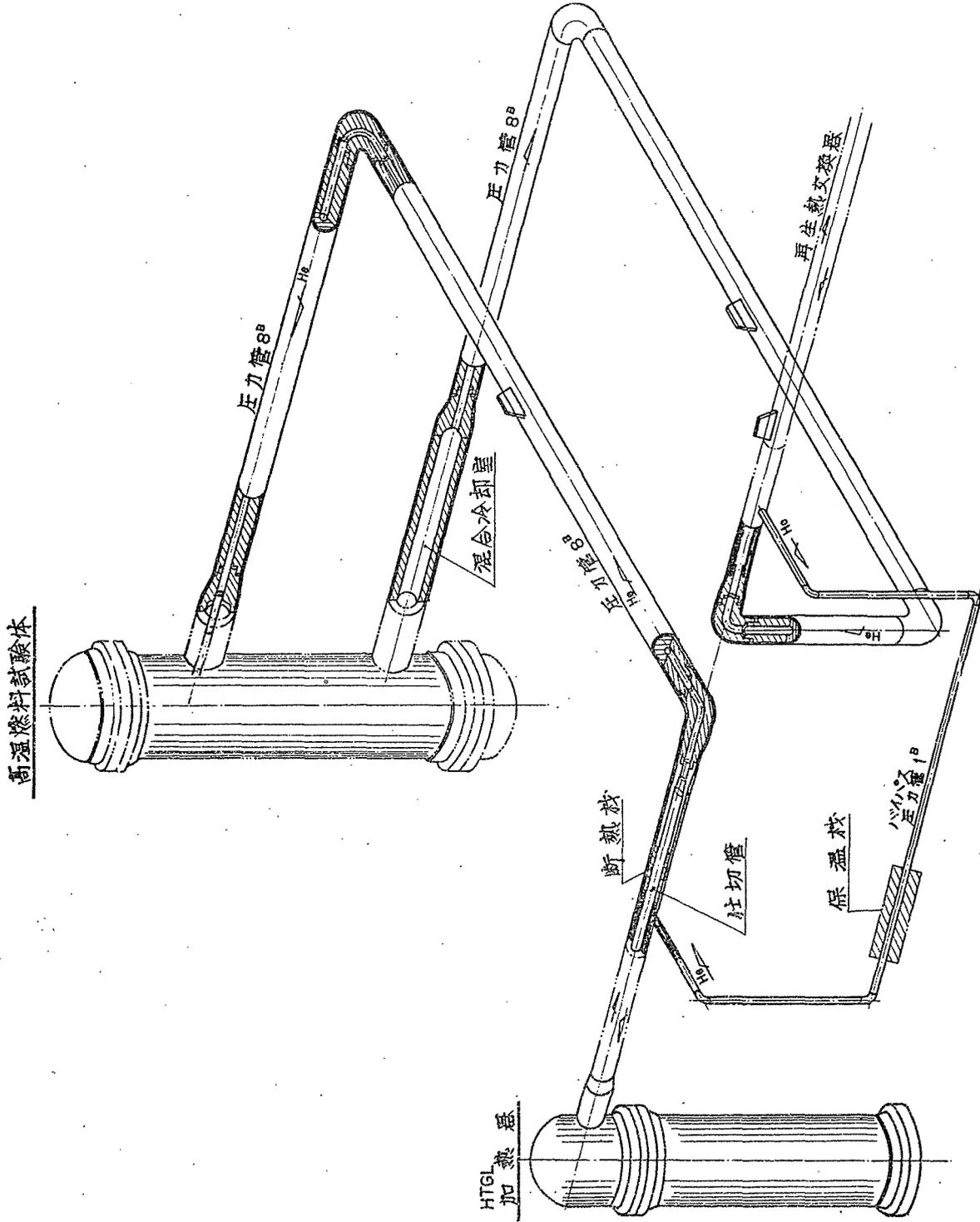


Fig.4.1 Layout of high temperature piping

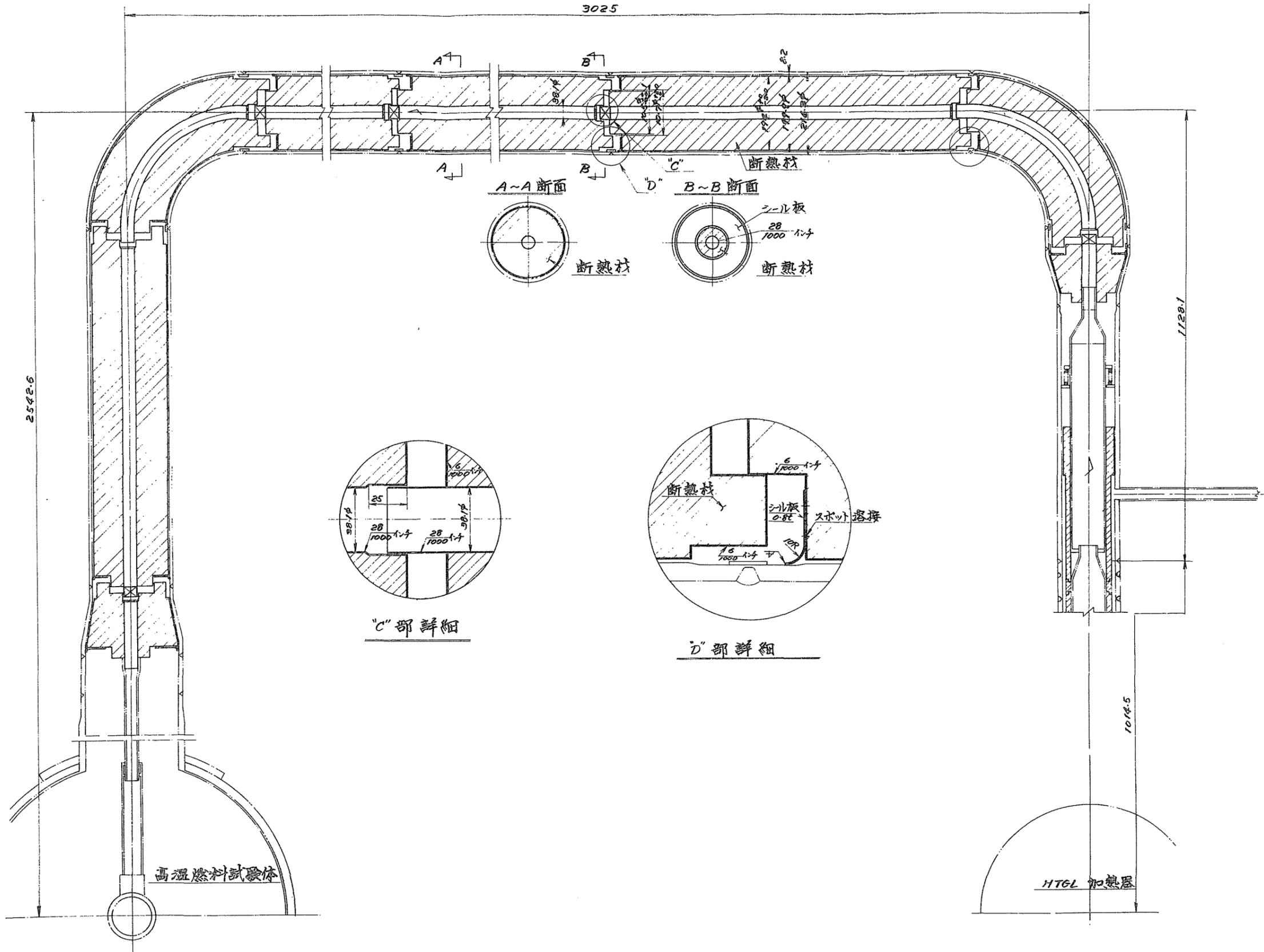
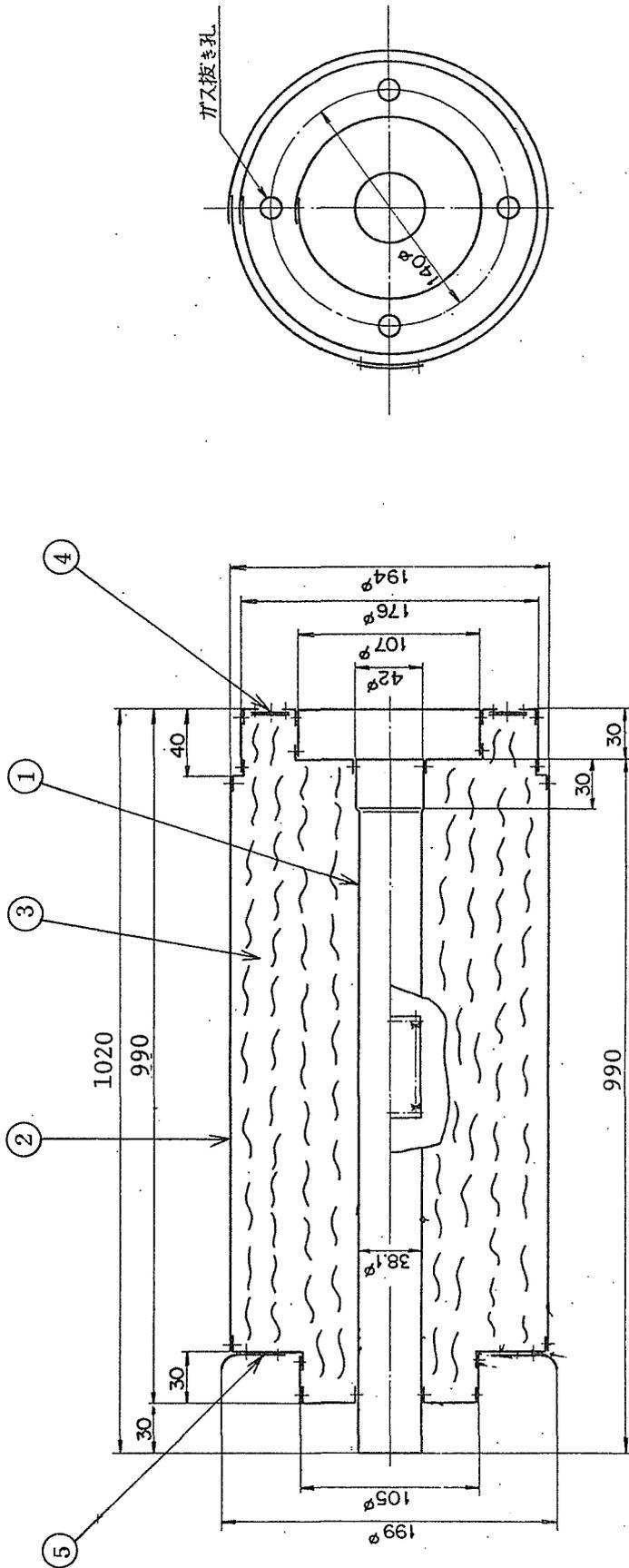
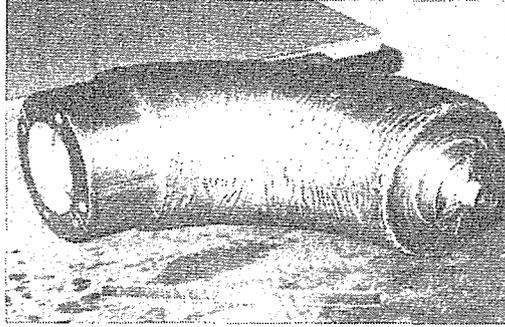


Fig. 4.2 入口配管

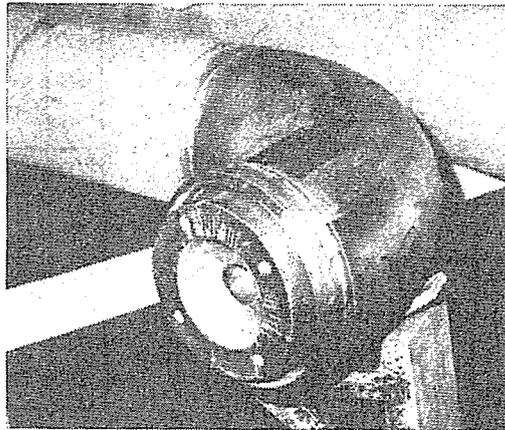


No	名称	材質	備考
①	内部流路管	インコネル600	0.8 mm 厚
②	外被フォイル	インコネル600	0.15 mm 厚, 模様刻印
③	断熱材	セラミックウール	9.5 mm 厚, フエルト状 (密度 0.138/cc)
④	金網	モネル	200メッシュ×2枚
⑤	区画板	インコネル600	0.8 mm 厚

Fig.4.4 Drawing of the insulator element for high temperature piping test section



(a) Insulation blanket (inner tube with thermal insulator)



(b) Insulation blanket settled in the pressure pipe

Fig.4.5 End view of a foil packed thermalinsulator settled in the pressure tube

5. 据付前検査

入口，出口配管は，耐圧管の中に，流路管を含めて一体化した箔包装形断熱材要素（インシュレーションブランケット）を挿入し，これをインロー部により接続する配管方式である。このインロー部は，耐圧管と流路管の熱膨張の吸収，耐圧管とインシュレーションブランケットの間隙に生じるバイパス流れの防止のために取り付けた区画板，及び，構造物のはめ合い等重要な要素を含んでおり，組立前に以下の検査を行った。

- (1) 流路管と耐圧管の心ずれ
- (2) 耐圧管とインシュレーションブランケットの間隙
- (3) 成形断熱材インローのはめ合い
- (4) ブロックごとの漏洩試験

(1)(2)(3)については仕上り寸法を測定し，承認図との照合を行い，許容寸法内であることを確認した。(4)については，各ブロックの圧力損失に相当する圧力を加え，区画板（シールプレート）部の漏洩ガスを補集し，測定した。その結果，全数許容漏洩量内に収まることを確認したが，1箇所だけインシュレーションブランケットと漏洩防止板の接合部より比較的多い漏洩量を確認したので，補修板を当て，全周スポット溶接を施し，漏洩量の減少を図った。

6. 据付工事

本据付工事は，HTGLの加熱器と再生熱交換器間に本高温配管によって高温燃料試験体を取り付けるものである。配管溶接に先立って，長時間高温下で使用された既設材料と今回取り付ける新しい材料との溶接性能試験を実施する必要があった。この試験についてはOGL-1炉内管高温流動試験終了後，配管を切断し，接続箇所の供試材料を入手し，溶接性試験，非破壊検査及び破壊試験を行った。その結果，適性溶接条件で溶接を行う限り，継手性能を満足するという結論を得た。その後に，現地据付工事が開始され既設HTGLの加熱器と高温燃料試験体を結ぶ入口配管，高温燃料試験体とHTGLの再生熱交換器を結ぶ出口配管及び低流量のための流量測定部の順に溶接作業が行われた。溶接作業については，溶接部の開先寸法チェック，溶接後の非破壊検査として， γ 線透過試験検査を行い，溶接部の欠陥の有無を検査基準であるJIS 2級判定のもとに行った。なお，放射線取り扱いについては，所内担当課，製造業者，当研究室と密接な連絡を保ち厳重な管理のもとに作業を終了した。現地据付工事完了後，官庁立ち合いのもとに行われる完成検査を受け，耐圧試験（ N_2 ガス， $65\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ ）気密試験（ N_2 ガス， $43\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ ）に合格した。

7. 性能試験

高温高圧配管部の性能試験（検収試験）は、ループ運転前の真空試験、高温ヘリウムガス流動条件における総合機能試験及び単体機器の性能を確認する機器性能試験より構成され、約1週間にわたって行われた。

7.1 真空試験

高温燃料試験体、及び、本高温配管の両者は多量の無機綿状断熱材を使用している関係上、昇温過程で断熱材から離脱する不純ガスを除去しなければならない。従って昇温前に可能な限りの水分及び不純ガスの除去に専念した。真空試験はホールドアップタンク周りのヘリウムガス供給系統を除く全系統について実施した。真空引きは3台の真空ポンプによりヘリウムガス置換と交互に6回行い、ピラニー真空ゲージにより各部を計測し、目標到達真空度 10^{-2} torrを確認した。

7.2 総合機能試験

本試験はループ構成機器の作動を常温で確認する予備試験、試験条件設定時の構成機器の特性を求める昇温試験及び降温試験を計画した。ここでは主要検収条件を含む昇温試験について述べる。Fig.7.1に運転条件の経過を、Fig.7.2に運転中の不純物濃度変化を示す。運転条件は、高温燃料試験体において圧力 $40\text{kg/cm}^2\text{G}$ 、流量 30g/s を設定し、高温燃料試験体入口ガス温度を 50°C/hr 以下の昇温速度で 350°C まで昇温し、定常状態で所定のデータを記録した。この際、昇温につれて不純ガスの発生が活発になるため、現場指示型の酸素計、露点計のほか、ガスクロマトグラフを併用してヘリウムガス純度管理を厳重に行った。もし昇温過程で不純ガス濃度が増加する場合には、昇温を一時停止して精製運転を行い、純度回復を確認した後、再び昇温に移行した。しかしながら昇温時には顕著な不純ガスの発生もなく試験を順調に進めることができた。これは真空試験で述べたように、真空置換を数多く繰り返したためと思われる。

次に、圧力、流量一定の状態試験体入口ガス温度 650°C を目標に昇温を開始した。まもなく、高温高圧配管の表面温度が制限値に近づいてきたため、熱電対を数多く取り付け、温度監視に対処する一方、部分的にファン（扇風機）を取り付けて耐圧管の温度を下げた。さらに高温燃料試験体ののぞき窓の温度が制限値である 200°C 近くになったため冷却を行った。このような冷却措置を行った後、圧力 $42\text{kg/cm}^2\text{G}$ 、流量 30g/s 、試験体入口ガス温度 650°C 、 850°C で約2時間の定常状態を保持して各機器の性能が満足することを確認してから、試験体入口ガス温度 400°C までは 50°C/hr 、それ以下の温度では 100°C/hr の降温速度で常温まで下げて総合機能試験を終了した。

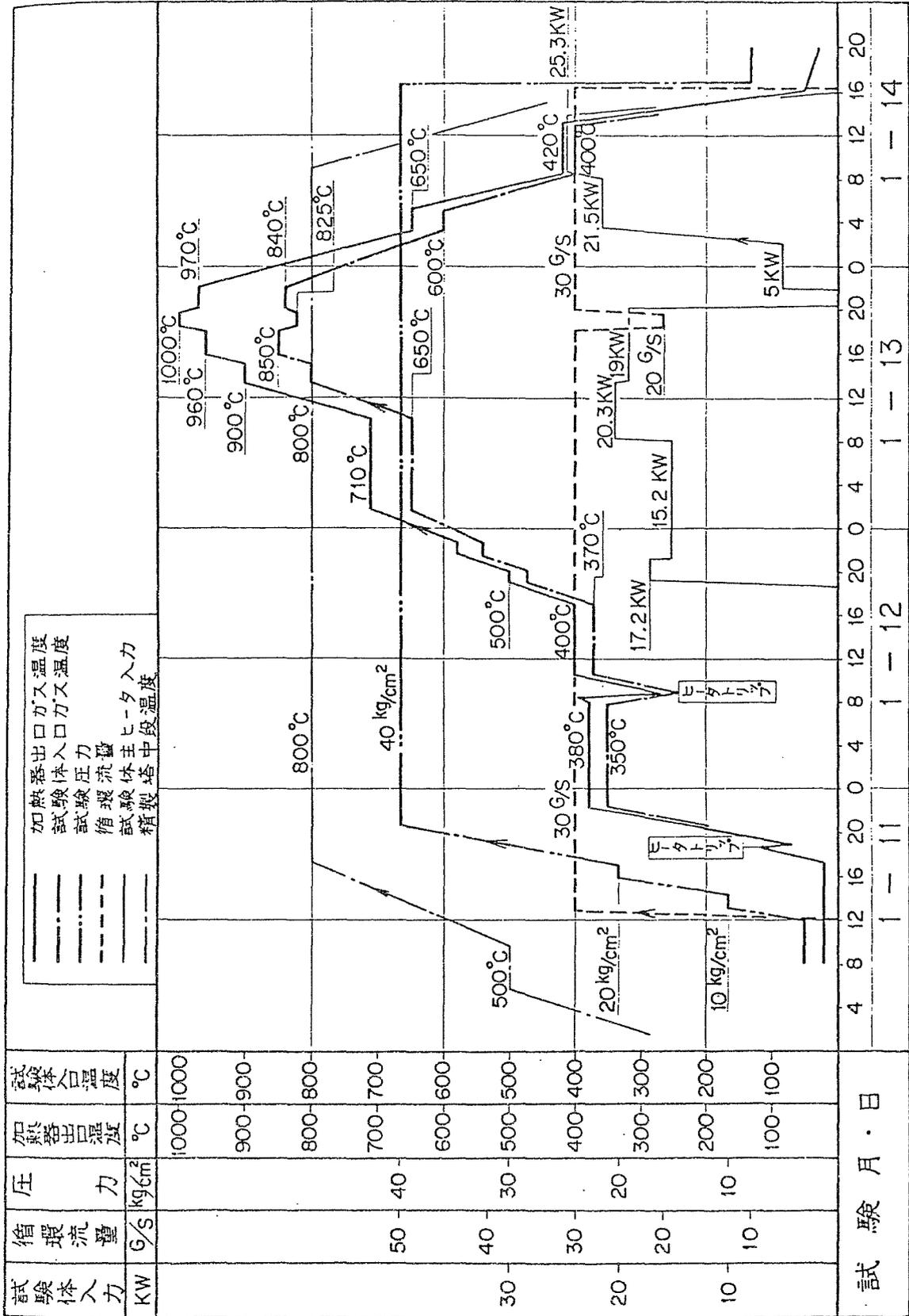


Fig.7.1 Record of operational conditions

8. 性能試験の結果

総合特性試験における本配管に関する測定，評価項目は以下のとおりである。

- i) 耐圧管温度分布の測定
- ii) 配管熱損失の測定
- iii) 配管の熱膨張変位の測定
- iv) 配管に生じる応力の評価

総合機能試験の経過については前章に記したように，圧力 $40 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ ，流量 30 g/s の条件の下で，順次ヘリウムガスの温度を上昇せしめ，定格温度条件（高温燃料試験体入口ガス温度 850°C ）で2時間の定常運転を保持した後，順次ヘリウムガス温度を降下せしめた。この間に， 400°C ， 600°C ， 800°C の各温度で測定を行った。また，ヘリウムガス温度 400°C 以上では，耐圧管の一部（ベンド部）が設計温度以上になる傾向が現われたので，冷却ファン（扇風機）を使用して局部的に冷却を行った。

(1) 耐圧管温度分布の測定

本管の特徴は，内部に断熱層を設け，その外に圧力管を配置し圧力管の温度を下げる構造（いわゆる内側断熱外側耐圧方式）になっていることである。内側の断熱材は内管（高温ヘリウムガス流路管）の周囲を取り巻く無機質綿状断熱材を耐熱金属箔（INCONEL 600）で包装したインシュレーションブランケット方式である。内管と外管（耐圧管）との熱膨張差を吸収するため，約 1 m ごとに分割されており，両側にはインロー部を設けている。このインロー部の存在のため耐圧管の温度は長手方向に分布を生じる。また，断熱材内及び耐圧管外面の自然対流熱伝達の不均一分布のため，周方向にも温度分布を生じる可能性がある。耐圧管の温度を正確には握ることは，耐圧管の材質，口径の決定，配管応力の評価，経費の軽減にとって重要である。

1) 測定方法

測定は，耐圧管外面に取り付けた合計45点の熱電対によって行った。Fig.8.1に取り付け位置を示す。

熱電対の取り付け固定は，耐熱性セラミック接着剤による方法，及びスポット溶接されたSUS薄板で押さえ付けて行った。前者の方法によって取り付けられた箇所は，Fig.8.1中のT-28～37の10点である。

熱電対起電力の測定は，自動平衡型記録計及びデジタル電圧計によって行った。

2) 測定結果

まず，耐圧管温度分布の全体的傾向について触れる。配管は，直接部分とベンド部分に大別して，後者の温度が高くなる。水平部分では，円周上に分布を生じ，下面より上面の温度が高くなる。各部の温度は，ヘリウムガス温度に比例している。従って，最も温度が高くなる位置は，ベンド部の上面であり，最高ヘリウムガス温度（ 900°C ）条件で冷却ファンを使用しなければ $400\sim 450^\circ\text{C}$ に到達すると推定され，強度上危険な状態となる。直管部分では，イン

シュレーシヨンプランケットのインロー部の温度が高くなる。しかし、直管部の最高温度は、最高ヘリウムガス温度及び冷却ファンのない条件でも、 200°C を僅かに超える程度であり、全く問題がない。

Fig.8.2は、出口配管の直管部の温度分布を示したものである。T-34~37の部分がインシュレーシヨンプランケットインロー部であり、T-28~31の部分がインシュレーシヨンプランケットの長手方向の中央に相当する。これらの温度を、ヘリウムガス温度との関係として示したものが、Fig.8.3、Fig.8.4である。耐圧管温度は、ヘリウムガス温度に比例している。ベンド部に取り付けられた冷却ファンを停止すると、僅かに温度が上昇($5\sim 10^{\circ}\text{C}$)する。これらの図より、直管部分では、冷却ファンを使用する必要はなく、最高ヘリウムガス温度(900°C)においても、耐圧管温度は、高々 220°C であることが結論される。Fig.8.5は、円周上の実測温度分布と水平円柱周りの熱伝達率分布³⁾を考慮して求めた計算値を示したものである。 0° (下面)及び 90° (側面)の位置では、実測値は計算値より大であるのに対して、 180° (上面)の位置では、逆転している。

Fig.8.6は、入口配管の高温燃料試験体側のベンド部の実測温度とヘリウムガス温度の関係を示したものである。矢印を付した実測値以外は、冷却ファンを作動させている条件であり、耐圧管温度とヘリウムガス温度は比例関係を示している。最高ヘリウムガス温度(1000°C)でも、耐圧管温度は、 190°C 以下である。しかしながら、冷却ファンを停止すると、 400°C を越える可能性がある。

本図で、特徴的なことは、ベンド部の内側測面に相当するT-3点の温度が十分低い値に留まっていることであり、内部に自然対流が生じているのではないかと思われる。

以上から、配管各部の温度を、各ヘリウムガス温度に対して、は握ることができた。ベンド部の温度が特に高くなった原因については、現状では推定域を出ないが、インシュレーシヨンプランケット内の断熱材の充填施工方法によるものと考えられる。(特に、ベンド部は、形状が複雑であるため断熱材が均一に充填され難く、半月形の断熱材マットを切断面を垂直にしてインシュレーシヨンプランケット包装内に充填している。そのため、上下方向にベンド中立面に沿って断熱材の割れまたは粗な部分が生じ自然対流などが生じたものと推定される。)

全体として、ベンド部に問題点があるが、化学プラント等では高温配管の外表面を落下液膜等で冷却している事例が多いことなどと比較して、本方式の配管は自然対流冷却だけで十分使用できると結論される。

(2) 配管熱損失の測定

高温配管の目的は、高温高圧のガスを移送することであるため、熱損失は重要である。

Fig.8.7は、入口配管の熱損失特性を示したものである。横軸はHTGL加熱器出口ガス温度であり、縦軸は高温燃料試験体入口までのガス温度降下量である。ガス温度が高くなるにつれて、熱損失量は比例関係よりやや大なる関係で増大している。図中には、計画値(26 g/s に換算したもの)を示してある。実測値は、計画値より約1.6倍の熱損失となっている。この原因は、耐圧管温度が局部的に高くなったこと、冷却ファンを使用したこと等によると考えられるが、定量的検討は困難である。

Fig.8.8は、熱損失が流量に反比例すると仮定して求めた熱損失と流量の関係である。図中1000°Cと記した実測値は、流量20g/sの条件のものであり、1000°Cの推定線とほぼ一致している。従って、本配管の熱損失特性は、Fig.8.8により大体は握することができる。

(3) 配管の熱膨張変位の測定

配管の表面温度の実測データをもとに計算コードFAPSを用いて熱膨張量を算定し、実測の配管変位と対比した。本配管部のデータ（加熱器出口ガス温度960°C，試験体入口ガス温度850°C，同入口圧力，流量，40kg/cm²G，30g/s）における高温配管の熱膨張による変位を測定した。測定値をFig.8.1に示す。配管変位の実測値と計算コードFAPSによる計算結果を、Table 8.1に記した。

当初行った計算結果(I)では、測定点④，⑦，⑧での計算値と実測値とはかなりの差があった。その原因として、配管支持点(C)においてX方向の移動が拘束されていたためと考えると、測定点⑦，⑧がX軸の負の方向に移動したことが定性的に非常に良く説明ができる。支持点(C)は、再生熱交換器のX方向熱膨張を逃げるために取り付けられたスライドジョイントであり、構造上Y・Z方向の自由度は少ない。従って、圧力管の上下面温度差によって、圧力管に湾曲を生じ、支持点(C)にY方向（下向き）の力を生じ、摩擦又はかじりによって支持点(C)が拘束されていた可能性が考えられる。

そこで、拘束条件を再吟味するために、出口配管とHTGLの結合箇所(X)の節点に、初期変位としてX軸方向に-15mmを与えて、再び計算したものがFAPS計算結果(II)である。この計算結果と測定値を比較してみると、測定点③，④，⑧，⑨で、ほとんど一致しており、残りの箇所も②のZ方向を除いて大体一致している。

以上のことから、節点(X)に-15mmのX方向の変位を与えたことは妥当であり、再生熱交換器のスライド・ジョイント（支持点(C)）のX方向移動が拘束されていたと結論することができた。また、拘束条件を正しく与えるならば、計算値と実測値は一致することが明らかとなった。

(4) 配管に生ずる応力の評価

FAPSよりアウトプットされたデータを、計算コードSPEC4 (ASME Section IIIに基づく配管応力評価) にインプットして、配管の応力評価を行った。運転条件（加熱器出口ガス温度960°C，試験体入口ガス温度850°C，同入口圧力，流量，40kg/cm²G，30g/s）における実測温度分布を与えて応力評価の計算を行った結果、ファンで配管表面を冷却しないと許容値を越えるとされるところは、試験体入口部の配管バンド1箇所，再生熱交換器側高温配管接合部のバンド2箇所の計3箇所であるが、ファンで表面の冷却を行えば安全であることを確認した。

なお配管温度を、210°Cとしたときの応力評価を行った結果、安全であることを確認した。

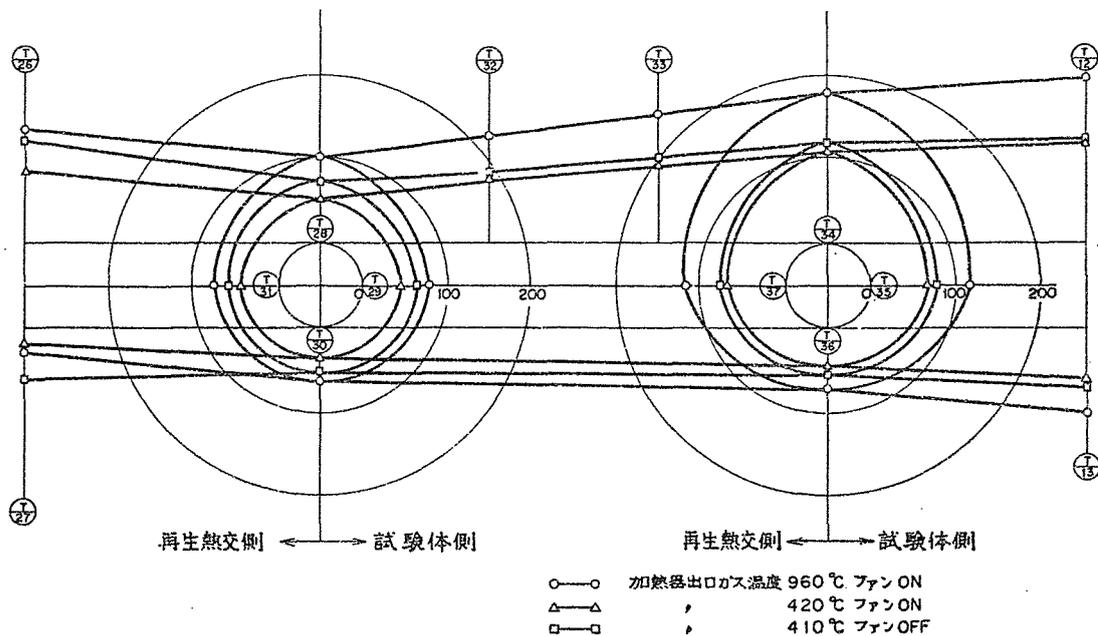


Fig. 8.2 Temperature distribution around the surface of pressure tube

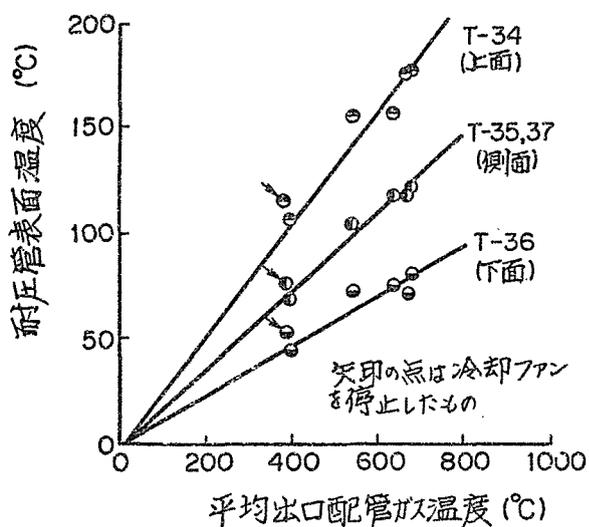


Fig.8.3 Temperature of pressure tube wall at the position of insulation blanket connection

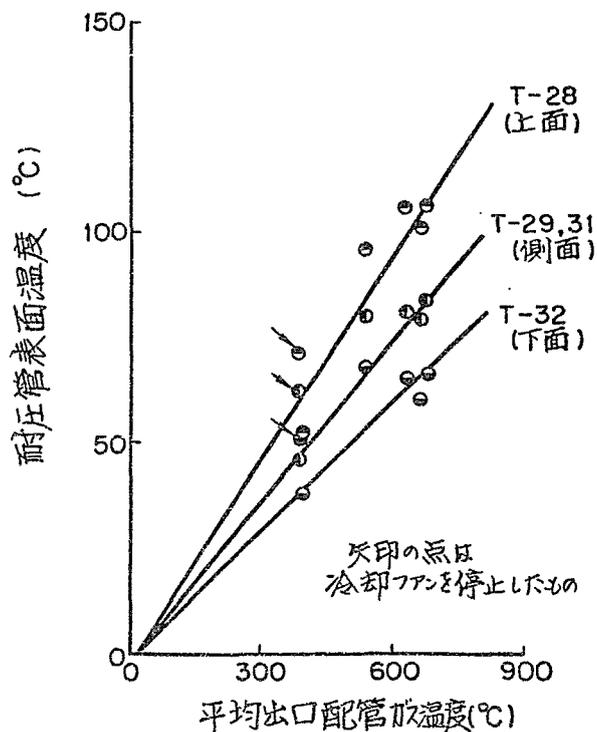


Fig.8.4 Temperature of pressure tube wall at the middle position between insulation blanket connections

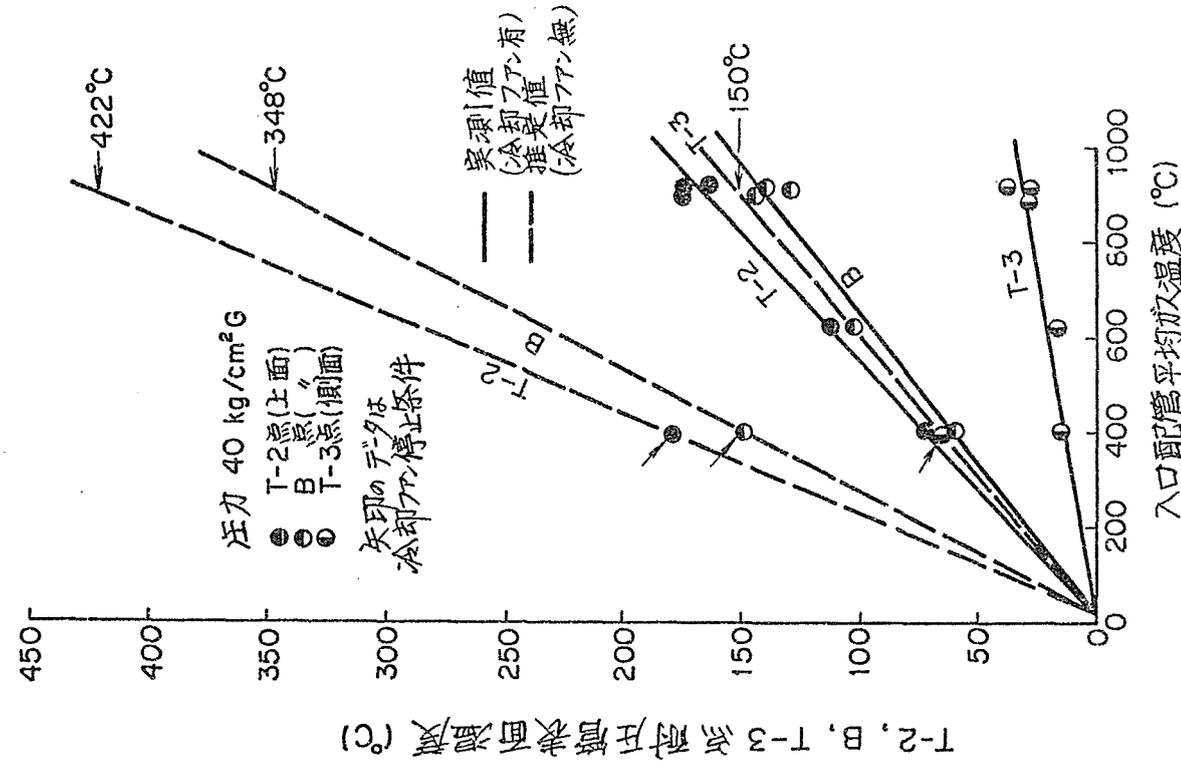


Fig.8.6 Temperature of pressure tube wall at the bend position of inlet pipe

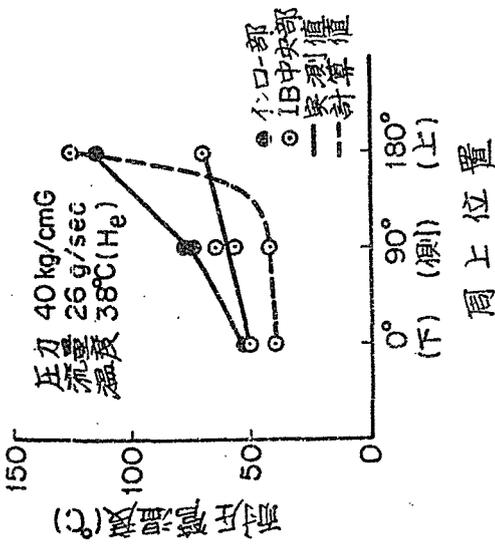


Fig.8.5 Peripheral temperature distribution of pressure tube wall

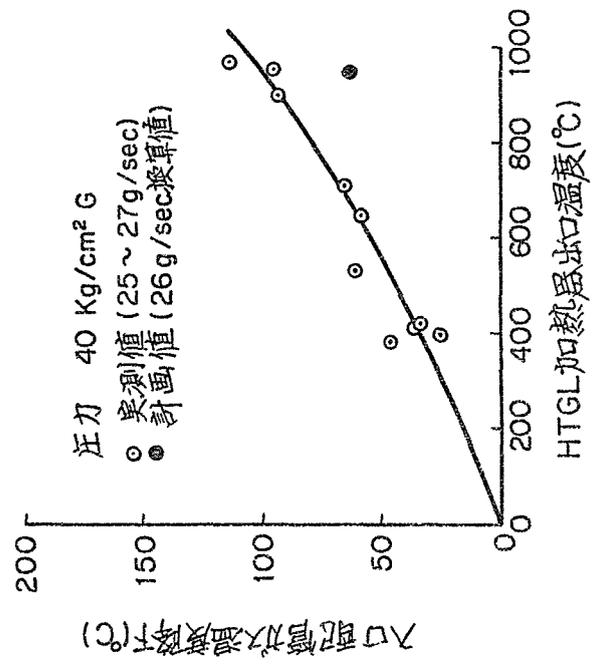


Fig.8.7 Heat loss characteristic of inlet pipe

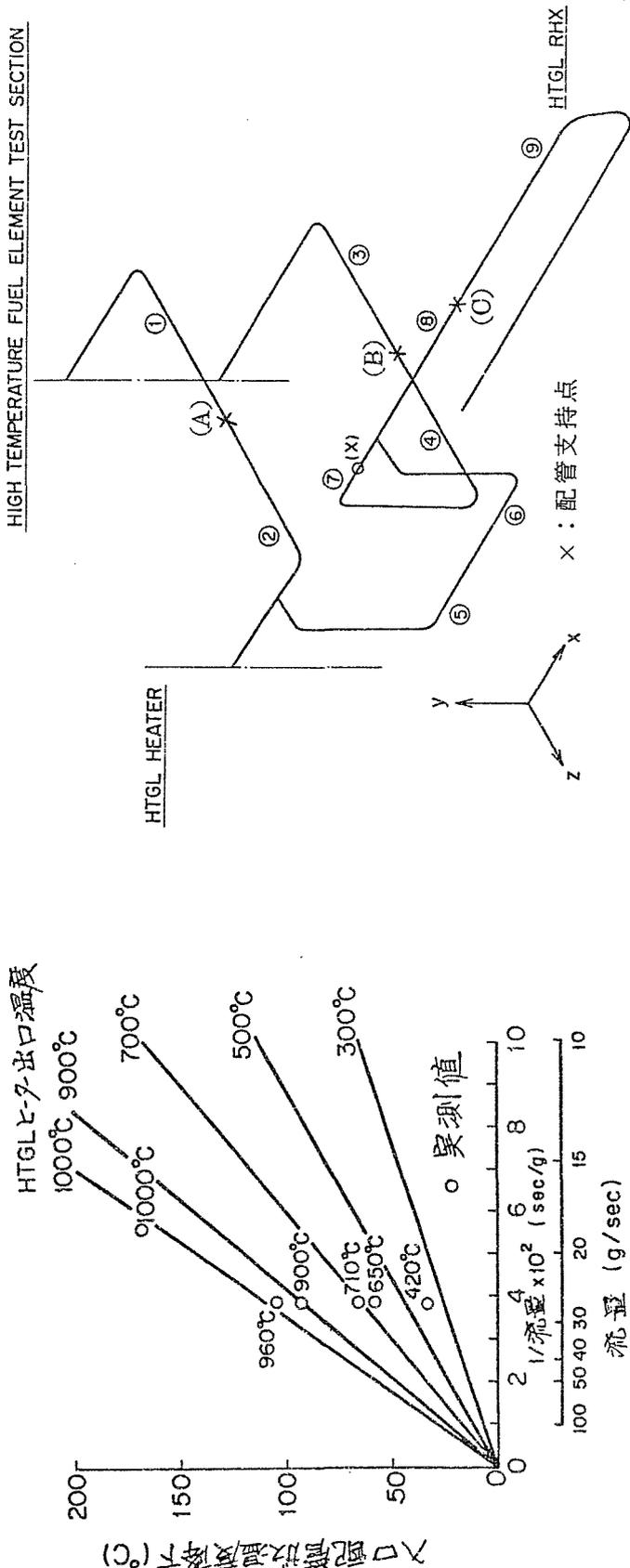


Fig.8.8 Relation between heat loss of inlet piping and flow rate

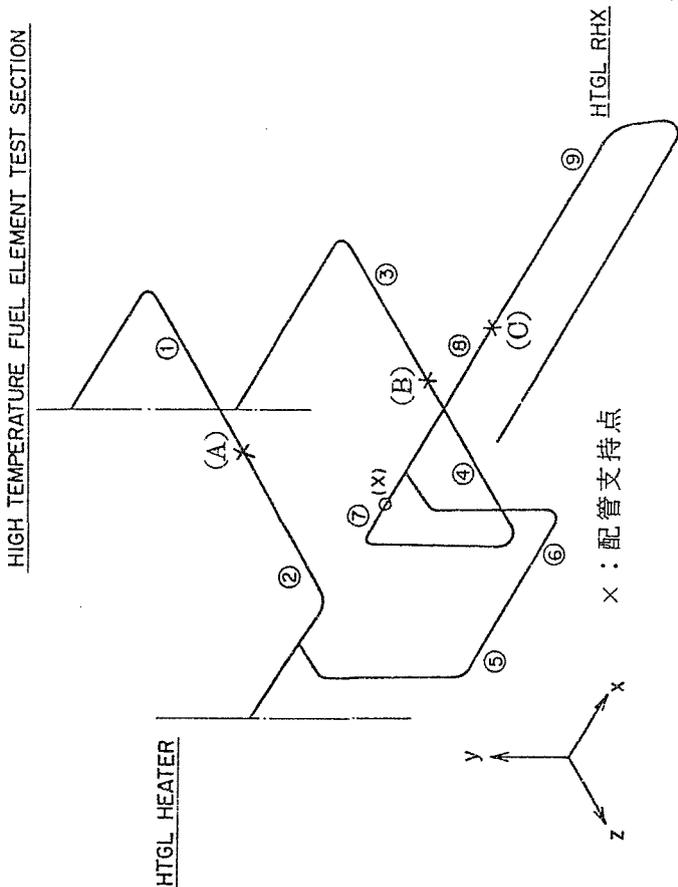


Fig.8.9 Measuring points of displacement of the pipe

Table 8.1 Comparison of displacement values between experiment and calculation (FAPS code)

測定員	実測値 (mm)			FAPS 計算値 (mm)					
	X	Y	Z	(I)		(II)			
(1)				X	Y	Z	X	Y	Z
(2)	2	⊖	-4	6.952	0.0	-3.527	6.952	-0.002	-3.527
(3)	10	⊖	-3	7.781	0.0	-1.239	7.781		1.239
(4)	6	⊖	-3	6.866	-1.458	-1.742	5.328	-1.374	-2.769
(5)	-5	⊖	2	9.895	-3.077	5.292	-8.995	-5.027	4.242
(6)	-6	⊖	13	-2.324	-14.070	7.355	-17.068		6.181
(7)	0	⊖	13	17.751	-12.774	9.107	3.004	-15.376	6.336
(8)	-15			12.915	0.859		-19		
(9)	-3			21.999	0.017		-5.196		
(9)	7			36.132	1.993		6.22		

⊖の記号は負方向に動いていることを示す。

9. 高温配管試験

高温燃料試験体の実験のために、3回の高温運転を行い、それぞれ1週間にわたって、高温配管の温度分布、変位の測定を行った。

Fig. 9.1 に配管の切断面を示す。図に示すように、配管外側は圧力管である。内側には、断熱材をインコネル600の薄い箔で包んだインシュレーションブランケットが挿入され、ヘリウム流路を圧力管と隔てている。ヘリウムの流れはインシュレーションブランケットの内側を流れるが、高温による熱膨張を逃げるため、インシュレーションブランケットの継ぎ目に間隙を設けてある。この間隙に生じる恐れのあるヘリウムガスの漏洩流れを防ぐために、インコネル箔は区画板にスポット溶接されており、区画板は圧力管内面に全周溶接で取り付けられている。もし、間隙を漏れたヘリウム流れが生じると、配管温度が上昇する可能性が考えられる。さらに、高圧で用いるために、断熱材中のヘリウムガスの自然対流、強制対流により、熱損失が大きくなること等が考えられる。

Fig. 9.2 に配管の変位の測定点の位置を示す。変位は測定点の下方に、おもりを垂直に吊して測定した。

1回目の実験では、配管部の安全を考慮して配管部温度を耐用温度（210℃）以下に下げするために、かなり早い時期から、冷却ファンを回して配管温度を下げた。このため、圧力管の壁温の正確なデータが得られなかったので、2回目の実験では耐用温度限界付近まで冷却ファンを用いずに測定を行った。さらに、この運転では、配管部温度分布、変位のみを調べるため、圧力、流量をパラメータとした実験も行った。

試験結果を Fig. 9.3 ~ Fig. 9.8 に示す。

試験の結果、以下のことが分かった。

水平配管について

- ① Fig. 9.3 の白丸は、インシュレーションブランケットの接続部（間隙のある部分）の配管の外面温度、黒丸は中央の配管の外面温度である。ここに示すように圧力、及びヘリウムガス温度が低いとき（20kg/cm²G, 400℃）は、インシュレーションブランケットの継ぎ目でない中央部分では、配管上面下面の温度差はほとんどつかない（2~3℃）。
- ② 圧力及び温度が高いとき（~40kg/cm²G, 600℃）は、継ぎ目でない部分でも配管上、下面で10℃程度の温度差がつく。
- ③ 継ぎ目の部分では上下面でかなりの温度差がつき（50~60℃）、その差は圧力が大きくなると著しい（Fig. 9.3）。
- ④ エルボ部においては Fig. 9.4 に示すように上下面で大きな温度差がつく（50~60℃）ばかりでなく、左右面でも温度差がつく（10~20℃）、このとき、内側が高温となる。
- ⑤ 軸方向の温度分布を Fig. 9.5 に示す。配管部下面では流れ方向に緩やかに下る傾向を示し、継ぎ目でも温度は変化しないが、上面では継ぎ目部で温度が大きく上昇する。

垂直配管について

- ① 周方向の温度分布を Fig.9.6 に示す。温度は周方向に一様とはならず 15℃程度のずれを生じる。ずれは圧力が高くなると大きくなる。
- ② 流れ方向の温度分布を Fig.9.7 に示す。流れ方向には温度降下が著しく 1 m 程度の間に 100℃近く温度が下がる。

変位について

変位は試験部ガス温度の上昇に伴ってほぼ直線的に増加するが、冷却ファンを用いると変位は減少する。その一例を Fig.9.8 に示す。

以上の結果を考察すると、

インシュレーションブランケットを入れた水平配管の上下面の温度差は主として断熱材内の自然対流によるものと考えられる。水平配管の場合、流れ方向の温度降下は小さいことから、間隙を流れるバイパスフローは少ないものと思われる。

エルボ一部の温度分布は、インシュレーションブランケットの中の断熱材の充填が不均一であるために生じたものであろう。内側の温度が高いのは表面積が内側で少ないためと思われる。

垂直部の温度分布は、間隙でのバイパス流れがなければ周方向に均一になるはずであり、流れ方向の温度降下も緩いはずである。ところが実際はかなり異なっていた。これは間隙でのバイパス流れが多いと考えないと説明がつかない。垂直部では水平部と異なり、区画板にインシュレーションブランケットの重量がかかるので間隙が生じた可能性がある。

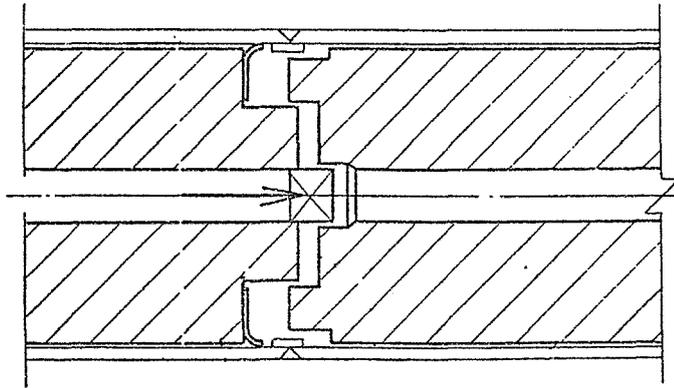


Fig.9.1 Cross-section of the high temperature piping

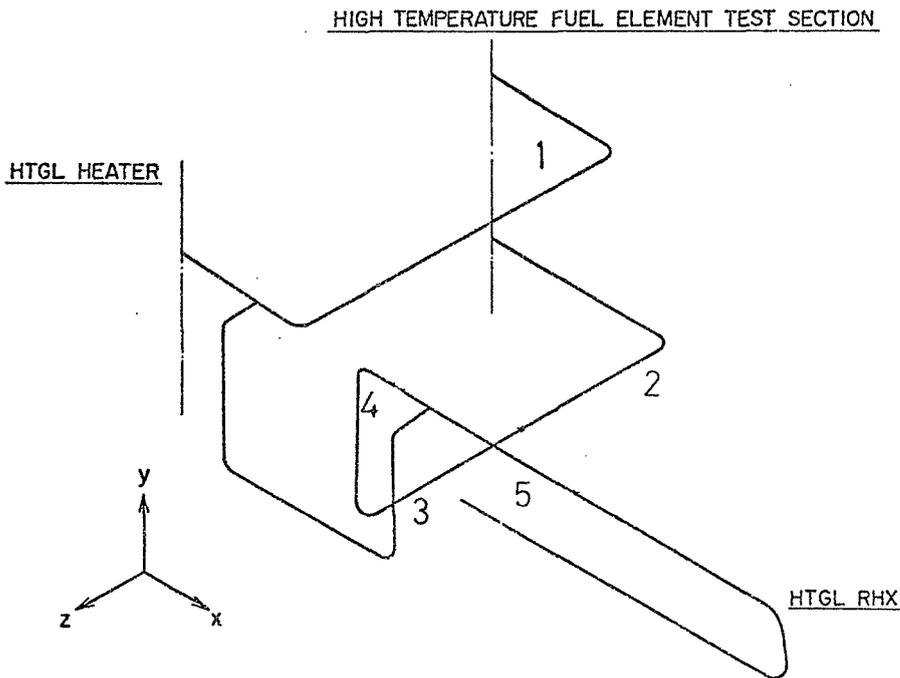


Fig.9.2 Measuring points of displacement of the piping system

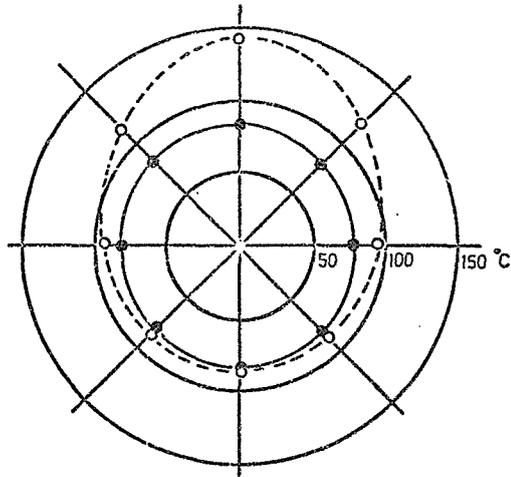


Fig.9.3 Circumferential temperature distribution of horizontal piping surface

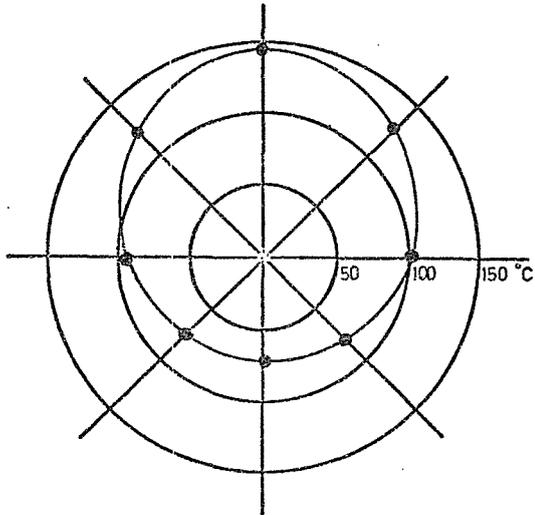


Fig.9.4 Circumferential temperature distribution of horizontal elbow pipe

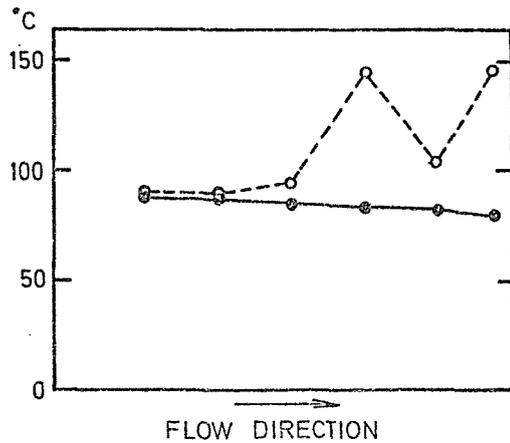


Fig.9.5 Axial temperature distribution of horizontal pipe

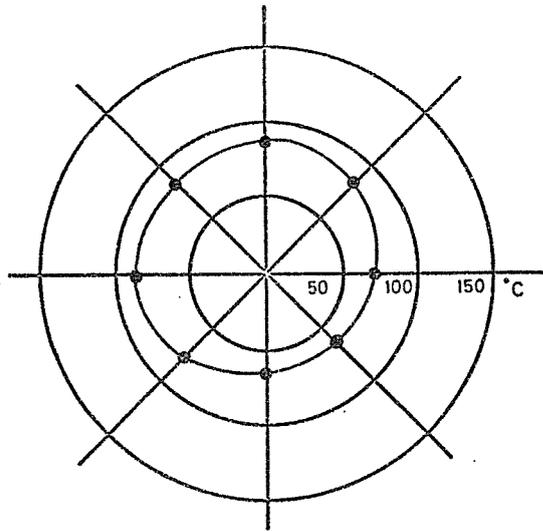


Fig.9.6 Circumferential temperature distribution of vertical pipe

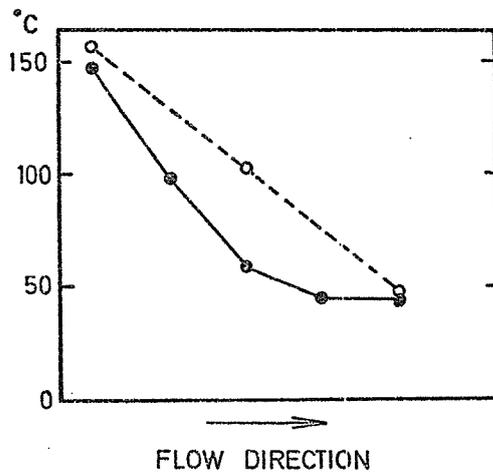


Fig.9.7 Axial temperature distribution of vertical pipe

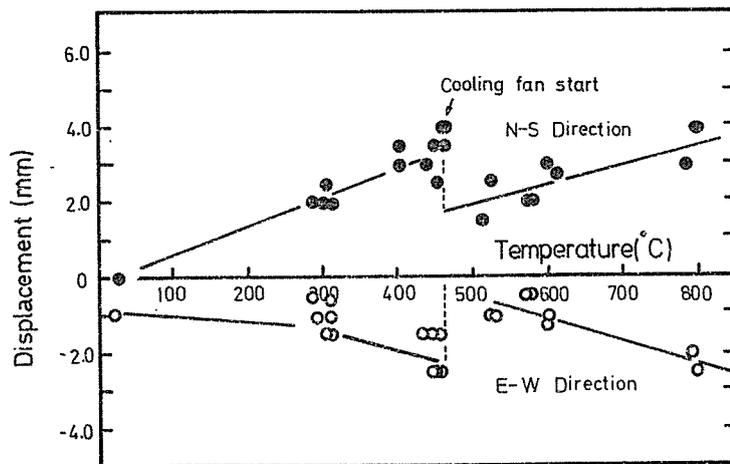


Fig.9.8 A result of measurement of displacement in N-S and F-W direction

10. 結 言

本配管の特徴は、高温ガスに接する流路管と断熱層を一体化して金属箔で包装したインシュレーションブランケットを採用した点にある。また、漏洩流れを防止するための区画板も一体化されている。この方式の長所は、インシュレーションブランケットを圧力管に挿入し、区画板を溶接固定すれば、断熱施工が完了する点にある。

最高温度900℃、最大圧力40 kg/cm² Gを含む条件で、約一週間の高温運転を3回実施した。その結果より、以下の結論を得た。

- (1) 水平直管部は、インシュレーションブランケットの継ぎ目の位置で圧力管の上面に温度の高い箇所が生じた。しかし、設計許容温度に対して十分余裕が残されている。継ぎ目以外の位置では、圧力管の外面温度は十分低く、ほぼ均一であった。
- (2) 垂直直管部では、圧力管外面温度は流れ方向に減少する大きな分布を示し、漏洩流れが発生した可能性がある。
- (3) ベンド部では、上面にホットスポットが生じた。空冷ファンを取り付けて、強制冷却を行う必要があった。ホットスポットの原因は、断熱材の充填が不均一で内部に自然対流を生じたためと考えられる。
- (4) 配管の熱損失は、計画値の熱1.6倍であった。
- (5) 配管の変位は、計算コードによって得られた値とほぼ一致した。その結果を用いて、応力評価を行い安全を確認した。

結論として、本配管の水平直管部は良好な性能を示したが、ベンド部、垂直直管部は改良を必要とすることが分かった。

謝 辞

本配管の設計、製作を行った川崎重工業株式会社、原子力第2課中野忠典氏、鈴木宣弘氏他に心からの感謝の意を表す。

また、運転は、旧原子炉工学部伝熱流動研究全員の協力の下に行われた。ここに記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) JAERI-M 9194 (1980)
- 2) 甲藤, 増岡, 日本機械学会論文集, 32卷243号(昭41-11), p.1708~1717 (1966)
- 3) Gröber, Erk ; Fundamentals of Heat Transfer, 3rded., McGraw-Hill (1961), p. 313~320
- 4) 伝熱工学資料(改訂第2版)

付録 脈動流の計測と対策

HTGLでは、循環機として往復動圧縮機を使用している。この型式の圧縮機は脈動を伴う。流量脈動には、次のような問題がある。

(1) オリフィス流量計の誤差

一般に、オリフィス流量計を初めとして絞り機構に発生する差圧は流量の自乗に比例した出力を発生するため、脈動によって見掛け流量が増大する。

(2) 伝熱流動現象への影響

流れの変動は、流速分布及び温度分布に変化を与え、圧損や熱伝達に影響し、その結果、諸特性は脈動がない場合に比べて異なる可能性がある。特に、多目的高温ガス炉で問題となる層流から乱流への遷移現象に影響を与える。

(3) 振動、変動応力などの問題

流速や圧力の変動は、流体力の変動も引き越すので、機器各部の振動や応力変動の原因となる可能性がある。特に、高温伝熱管の流体変動、オリフィス板、インシュレーション・ブランケットのケースなど、薄板部品への影響に注意する必要がある。

脈動は、往復動圧縮機の気管容積、気筒数、回転数、及び管路各部の容積、流動抵抗によって決定される。現在、脈動流については、流量測定に関連して多くの研究が行われているが、一般的に適用しうる成果は得られていない。それらの研究によると、脈動流の測定は、圧力取り出し口、導管（長さ、抵抗、容積）、差圧検出器特性（応答性、内容量）等が影響し、種々の問題があるとされている。

測定の概略をFig.A.1に示す。ループに付属した差圧検出器は、プロセス計装用のものであり、脈動流成分には応答しないため、再生熱交換器2次系入口のオリフィスに歪ゲージ式差圧計を取り付け、差圧の変動を測定した。

測定波形の例をFig.A.2に示す。下の図は、差圧の経時変化を示しており、途中で圧縮機のモーター入力が切られ、流量が低下して完全に停止する。上の図は、差圧変化の詳細波形を示す。大きな脈動は、約8 Hzに相当し、圧縮機の回転数から計算した周波数と一致している。波形の下限に規則的な高低があるのは圧縮機が複式であり、上下容積に差があるためと考えられる。さらに、約40 Hzの微小波形が重畳しているのが認められるが、この波形は、条件によっては8 Hzの脈動と同等程度の大きさとなる。この原因は、管路中の気柱振動によるものと考えられる。ヘリウムの音速が2000 m、管路長50 m弱であることから求めた管路共振周波数40 Hzと一致する。

また、種々の流量について求めた脈流率 (Q'/Q) と次式から計算したオリフィス流量計の測定誤差をFig.A.3に示す。

$$\frac{Ga-1}{G} = \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Q'}{Q} \right)^2} - 1$$

ここで、 G_a : 見掛けの流量

G : 実際の流量

以上の結果から、定格条件 (100 g/s) における脈流率は 1% 以下であり、オリフィス流量計の誤差は十分小であることが分かる。なお、同図には、簡略化したモデルの計算結果も示したが、両者の不一致はモデルの仮定及び脈動測定法の検討を要することを示している。

測定結果からも分かるように、高温燃料試験体の流動状態が層流から乱流に変化するいわゆる臨界レイノルズ数 ($Re = 2300$, 流量 = $4 \sim 7 \text{ g/s}$) 条件での脈動率は数百% (瞬間的に流れが逆転する) に及び、多目的高温ガス炉心で問題とされている低流量条件での測定は難しい。そのため低流量で運転するとき生じる脈動を防止するための改造を行った。この改造は、遷移領域の実験を行う上で不可欠なものである。

改造の内容は、Fig.21 のフローシートに示す低域流量計配管 (Low range flow meter) の部分である。フィルターと流量制御弁の間の配管に止め弁を取り付け、低流量時には増設したオリフィスをガスが通過するようにした。このオリフィスの上流、下流に絞り弁を取り付けて脈動を低減させた。また、脈動の大きさは歪ゲージ式、差圧計の出力をオシロスコープで監視した。改造の結果、全ての流量条件で脈動を 3% 以下に減少させることができ、同時に流量計測の精度が改善された。

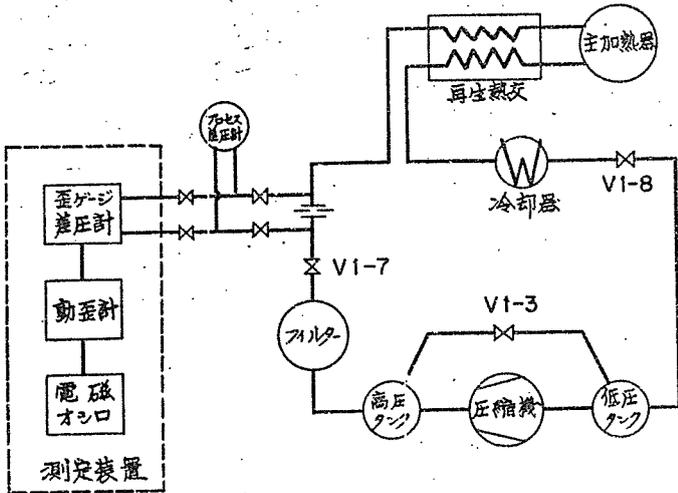


Fig.A.1 HTGL ループ脈動流の測定

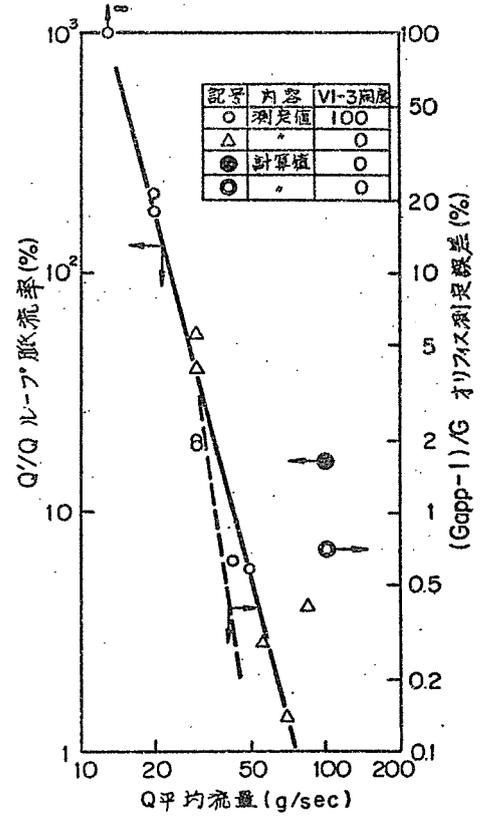


Fig.A.3 HTGL ループ脈動流測定結果

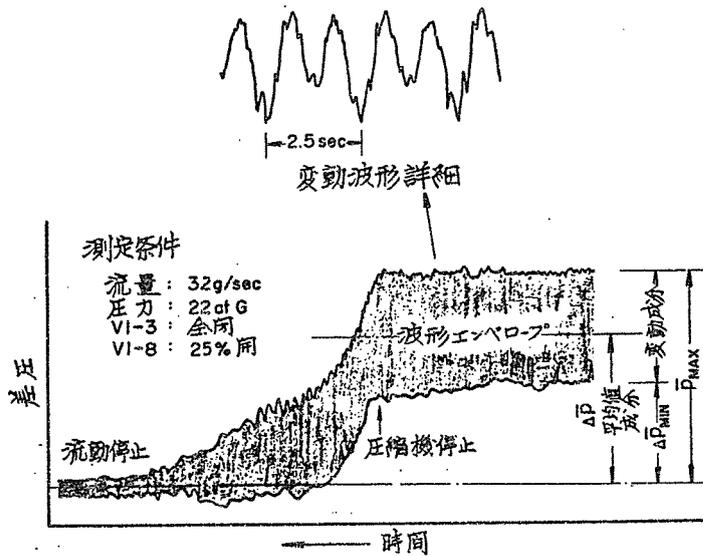


Fig.A.2 HTGL ループ脈動流の測定波形例