

UDC 621.454.2.034.018:

629.76.036.54.018:

533.59

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-387

液体水素ロケット燃焼器高空性能試験設備

大塚貞吉・鈴木昭夫・宮島博
山田晃・黒田行郎・日下和夫
熊谷達夫・毛呂明夫・木皿且人
佐藤政裕・阿部登・鎌田真
植野孝・鈴木和雄

1979年7月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	1
2. 基本計画	1
2.1 設備要目	2
2.2 設備の設計方針	2
3. 高空燃燃試験設備	3
3.1 推力計測台	3
3.2 推進薬供給設備	8
3.4 制御設備	19
3.5 計測設備	24
3.6 供試燃焼器およびデフューザ	29
3.7 コールドフロー試験	33
4. 排気系試験装置	35
4.1 推進薬および冷却水供給系統	38
4.2 監視操作盤	38
4.3 供試体	38
5. あとがき	43

液体水素ロケット燃焼器高空性能試験設備^{*}

大 塚 貞 吉^{**} 鈴 木 昭 夫^{**} 宮 島 博^{**}
山 田 晃^{***} 黒 田 行 郎^{**} 日 下 和 夫^{**}
熊 谷 達 夫^{**} 毛 呂 明 夫^{**} 木 皿 且 人^{**}
佐 藤 政 裕^{**} 阿 部 登^{**} 鎌 田 真^{**}
植 野 孝^{**} 鈴 木 和 雄^{**}

概 要

上段用高膨脹液体酸素・液体水素ロケットエンジンおよび同エンジンの試験設備に関する技術資料を得ることを目的として航空宇宙技術研究所に建設された液体水素ロケット燃焼器高空性能試験設備の主要部分の計画、構造、および試験について述べた。設備は真空推力最大0.7トンの小型燃焼器の高空性能シミュレーションをおこない得る高空燃焼試験設備と、真空推力10トン用の高空性能試験設備の排気系統の最大1/10縮小モデルの試験をおこない得る排気系試験装置とからなる。本設備は昭和52～53年度にわたって建設がおこなわれ53年10月に完成したものである。

1. ま え が き

液体酸素・液体水素ロケットエンジンは大型人工衛星打上げ用のロケットの上段用エンジンとしてすでに研究と開発がおこなわれつつある。当所でも昭和51年度に完成した液体水素ロケットエンジン要素試験設備を用いた燃焼および熱伝達の研究が活発におこなわれている。実機型エンジンの開発、試験に先立ち、小型燃焼器により高空性能の実験をおこない、高膨脹エンジンの性能および試験に関する技術資料ならびに高空性能試験装置の整備のための技術資料を得ることが必要である。このため、航空宇宙技術研究所(NAL)では、既設のロケットエンジン高空性能試験設備¹⁾に液体水素、液体酸素の供給系などを追加して、高膨脹ノズル付小型燃焼器を用いた高空性能のシミュレーションをおこない得る燃焼試験設備、ならびに高空性能試験設備の排気系統の縮小モデル試験をおこない得る排気系試験装置を設置することになった。

本設備は昭和52～53年度にわたって建設がおこなわれ、53年10月に完成した。ここでは本設備の計画、構

造および機能、ならびに予備的な試験結果について述べる。

略 語

A-50 : エアロジン50, 50%ヒドラジン+50%
非対称ジメチルヒドラジン
CAL : 校正, Calibration
G H₂ : 水素ガス
G He : ヘリウムガス
G O₂ : 酸素ガス
G N₂ : 窒素ガス
L H₂ : 液体水素
LOX : 液体酸素
L N₂ : 液体窒素
NASDA : 宇宙開発事業団
NAL : 航空宇宙技術研究所
NTO : 四酸化二窒素

2. 基本計画

本設備は高膨脹液体酸素・液体水素ロケットエンジンの性能解析手法ならびに設計手法の確立の助けとなる実験データを供給すると共に、実機の高空性能試験設備の排気系統、すなわちデフューザ、燃焼ガス冷却器ならびにエゼクタ系の縮小モデル試験をおこない、設備整備の

* 昭和54年5月28日 受付

** 角田支所

*** 元角田支所、現宇宙開発事業団

助けとなる実験データを得る事の2点を当面の目的として計画された。前者の目的のためには既設の排気系等を最大限に利用し、液体水素、液体酸素等の供給系を新たに追加して高空燃焼試験をおこなうことのできる燃焼試験設備を計画し、後者の目的にはきわめて小規模な排気系試験装置を計画した。

2.1 設備要目

2.1.1 高空燃焼試験設備

高空燃焼試験をおこなう推力室は原則として大気圧下で燃焼性能および信頼性の確認されたものであることが必要である。従って、試験できるエンジンの推力レベルは当所の液体水素ロケットエンジン要素試験設備のそれと同程度(0.7トン)とすることにした。動作タンク容量等の決定に直接的に関係する燃焼時間は、定常性能の測定が可能なことを判定基準とした。既設の推力5トン級のNTO/A-50推進薬エンジンでは、着火後定常状態に達するまでに7～8秒必要であった。推力0.7トン級の液体酸素(LOX)・液体水素(LH₂)推進薬でどの程度の燃焼秒時が必要となるかは、推進薬が極低温であること、配管系の相違等から予測し難いが、30秒あれば少なくとも近似的に定常状態に達するであろうと考えられた。また推進薬の供給圧力に関しては、将来型の高燃焼圧、高膨脹エンジンに関するデータを集めるためには高い程良いわけであるが、我国で運用がめざされているエンジンの燃焼室圧は35 kg/cm²、Aであることを考慮して、推進剤の供給圧力は70 kg/cm²、Gとした。以上のことをまとめて次に示す。

推力(真空)	0.7 ton(最大)
推進薬	LOX/LH ₂ (GH ₂ との混合を含む)
燃焼時間	30 sec
推進薬供給系圧力	70 kg/cm ² , G(最大)

2.1.2 排気系試験装置

排気系試験装置の要目は供試体の大きさ、装置の設置場所のスペース等を考慮して10トン級エンジンに対して最大1/10リニアスケールの供試体の試験が可能な容量をもつものとした。なお、蒸気エゼクタ系は既設の小型2段式蒸気エゼクタ²⁾を用いることにした。その要目は次の通りである。

推進薬	G O ₂ / G H ₂
推進薬流量	0.2 kg/s
推進薬供給圧力	100 kg/cm ² , G(最大)
排気方式	デフューザおよび蒸気エゼクタ
蒸気流量	2 kg/s

2.2 設備の設計方針

本設備の設計に当っては次の方針にそうことにした。

- (1) 設備、装置類の安全性、信頼性が高いこと
 - (2) 経費の節減をはかること
 - (3) 既設の装置類を最大限に利用すること
 - (4) 準備作業および試験作業が少人数で安全・確実に速やかにおこなうことができること
 - (5) 既設のNTO/A-50系および10トン計測台等は必要に応じてすみやかに切換使用ができるものとする。
- 上記の(2)項の経費節減と(3)項を除く他の項目は本質的に相矛盾することであったが、現在までの経験をもとにしてトレードオフをおこなった。

設備の安全確保のためには次の対策を講じた。

- (a) テストスタンド室付近における水素ガス漏洩を検知するため建屋に検知器を装備し、計測制御室とテストスタンド室に警報装置を設ける。
- (b) 制御系電磁弁類、計測・制御用検出器類はその使用電圧、電流および装備位置に応じ、防爆機器の使用、GN₂バージボックスへの収納、安全ヒューズの使用、本質安全リレーの使用又はそれらの併用によって万一の水素ガスの漏洩に対する安全をはかる。
- (c) タンク、配管類は接地をおこなう。
- (d) 燃焼シーケンスには安全上のインタロック機構をもたせる。
- (e) 燃焼実験操作の電源は既設の蓄電池式の無停電電源を用いる。

経費の節減のため、既設の装置類を最大限に利用することが望まれたが、NTO/A-50推進薬系の推力5トンレベルの燃焼試験を今後も続ける必要があり、NTO/A-50とLOX/LH₂の試験の切換時の作業を過度に複雑にしないため、次のような方針を取った。

- (f) 推力計測台の台枠は既設の10トン用のものを用い、ロードセル、フレキシヤおよびエンジン取付部を既設部分と交換して用いる。
- (g) 蒸気エゼクタ系は既設のものを用い、デフューザは供試体にあわせて新設し、既設デフューザ内部に脱着可能な構造とする。
- (h) 計測データ収録システムは既設部分を用いるものとする。従って、追加を要する計測機器は既設システムと一貫性があるものとする。
- (i) 運転制御装置は新設するが、イベントレコーダおよびペンレコーダは既設のシステムにつなぎ変えて用いることにする。

既設の蒸気エゼクタ系は小型LOX/LH₂燃焼器に対してはその容量はきわめて大きい、建設費用の節約の観

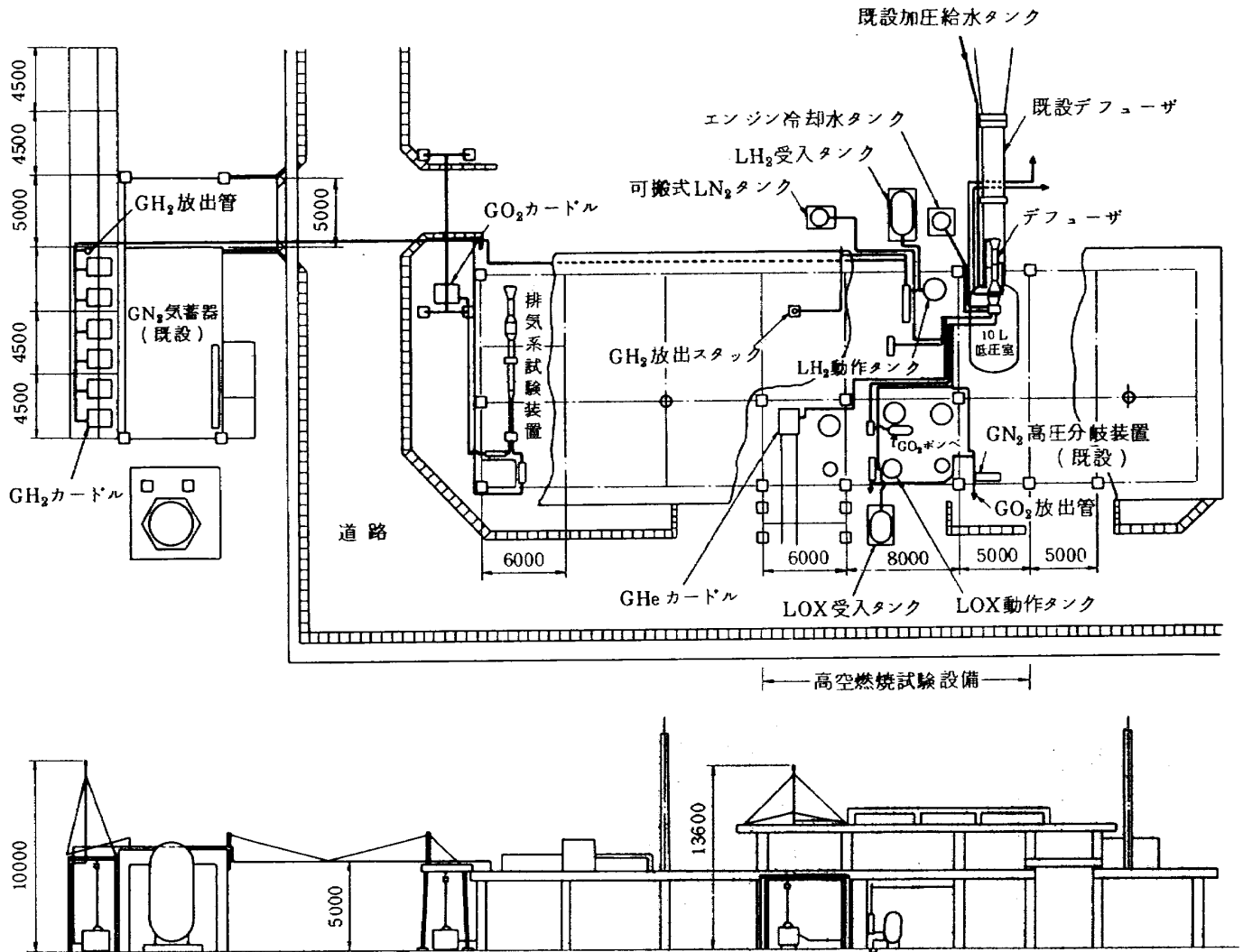


図1 全体配置

点からエセクタ系の新設はおこなわないことにした。

NTO/A-50系とLOX/LH₂系の実験の切換作業は9人×12日程度は止むを得ないと考えた。

図1に上記の基本方針のもとに計画された主要装置類の配置を示す。

3. 高空燃焼試験設備

高空燃焼試験設備の主要な構成は次の通りである。

推力計測台

推進薬供給設備

制御設備

計測設備

供試燃焼器およびデフューザ

以下に各装置、設備の計画、構成、構造、機能および試験成績等について述べる。

3.1 推力計測台

3.1.1 構造

ロケット燃焼器を装着してその推力を計測するための

推力計測台(スラスト・スタンド)は、当初の計画では推力1トンの専用のものを設けることも考えられたが、既設の10Lスラスト・スタンド(容量10トンの液体ロケット用スタンド)のロード・セルおよびフレクシャ等を1トン用のものに換装すればこれまでのスタンドとほぼ同等の精度が得られる見通しがあったので、これを利用するための改造が行われた。したがってスタンドの形状、計測機構等は既報¹⁾のものそのままであり、機能は部品類の相互交換により容量10トンおよび1トンの兼用のものとなっている。

新規に設けた交換部品および改造のおもな点は下記のとおりであり、1トン用として用いる際のスタンドの全景は図2、図3に示すとおりである。

- (i) 容量1トンの較正用および計測用ロード・セルならびにその両側に用いるフレクシャを設けた。これらの仕様をそれぞれ表1、表2に示すが、ロード・セルの総合精度は、 $E_T = (E_L^2 + E_H^2 + E_R^2)^{1/2}$ より±0.057%である。但し、記号の意味は以下のとおり

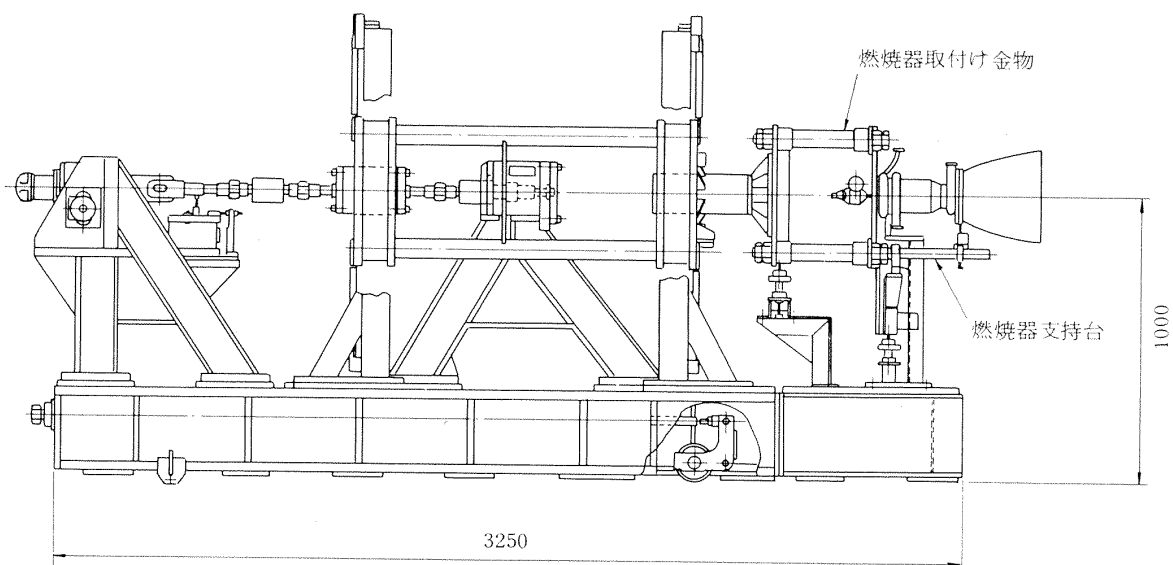


図2 推力計測台

表2 フレクシャの仕様

メーカー	ORMOND INC.	
型番	UNF-4°-4K	
公称負荷	lbs	4,000
ϵ = 負荷/剛性		364
剛性	in-lbs/degree	11
重量	lbs	15

である。

E_L : 非直線性 即ち無負荷時の出力と定格負荷時の出力を結ぶ直線に対する較正曲線との偏差のうちの荷重増加時の最大値で、定格出力に対する%で示す。

E_H : ヒステリシス 即ち無負荷から定格負荷まで荷重を増加および減少させるときの同一負荷点における出力差の最大値で、定格出力に対する%で示す。

E_R : 再現性 即ち同一負荷条件での繰り返し荷重に対するロード・セル出力差の最大値で、定格出力に対する%で示す。

(ii) 上記ロード・セルおよびフレクシャをスタンドに組込む際のアタッチメントを設けた。

ロード・セルおよびフレクシャの組込み状況を、図4に示す。

(iii) インプレース較正における荷重印加用の手動式ジャッキ装置を設けた。スタンド10トン用として用いる場合は、これを従来の油圧式ジャッキと交換する。

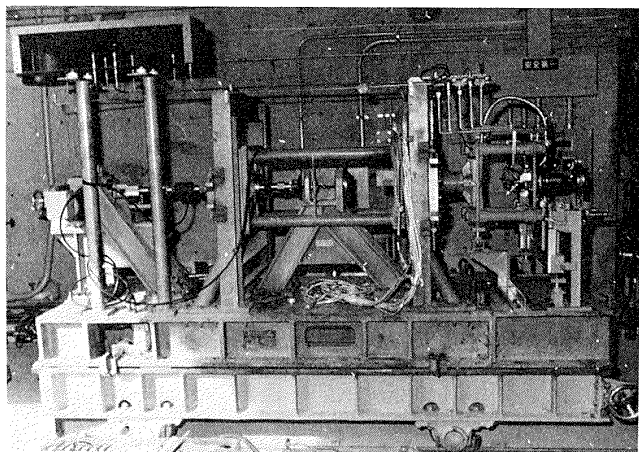


図3 推力計測台外観

表1 ロード・セルの仕様(較正用, 計測用)

型番	新興・BLH-T3P1	
定格容量	t	1
定格出力	mV/V	3
較正確度	%FS	0.1 以内
非直線性	%FS	0.05 "
ヒステリシス	%FS	0.02 "
再現性	%FS	0.02 "
温度による出力の影響	%/°C	±0.003 "
温度による零点の影響	%FS/°C	±0.003 "

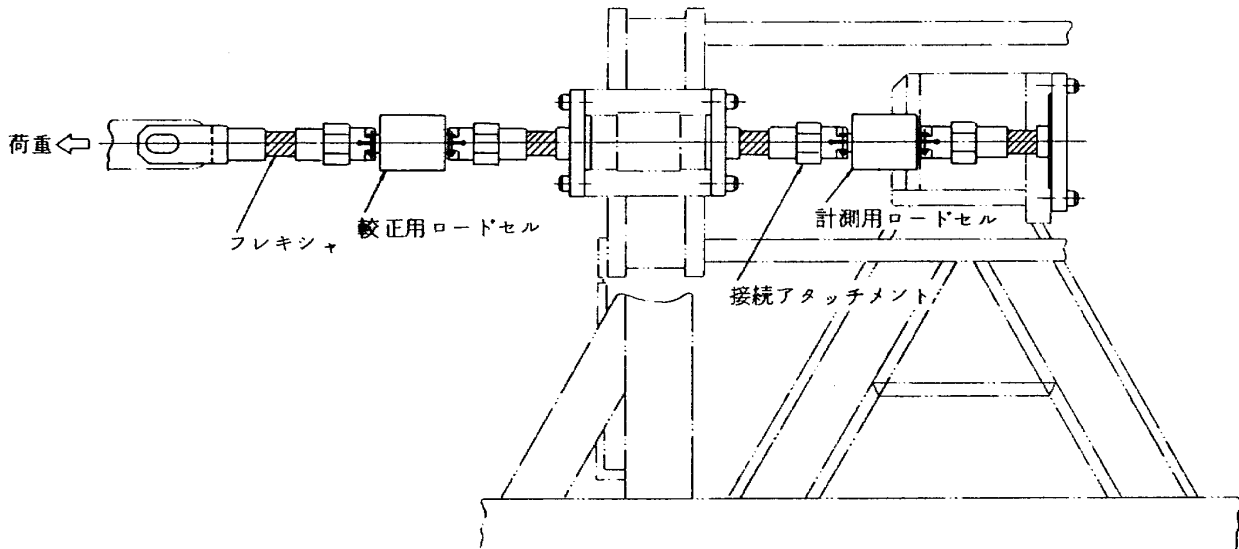


図4 ロードセルおよびフレキシャの組込状況

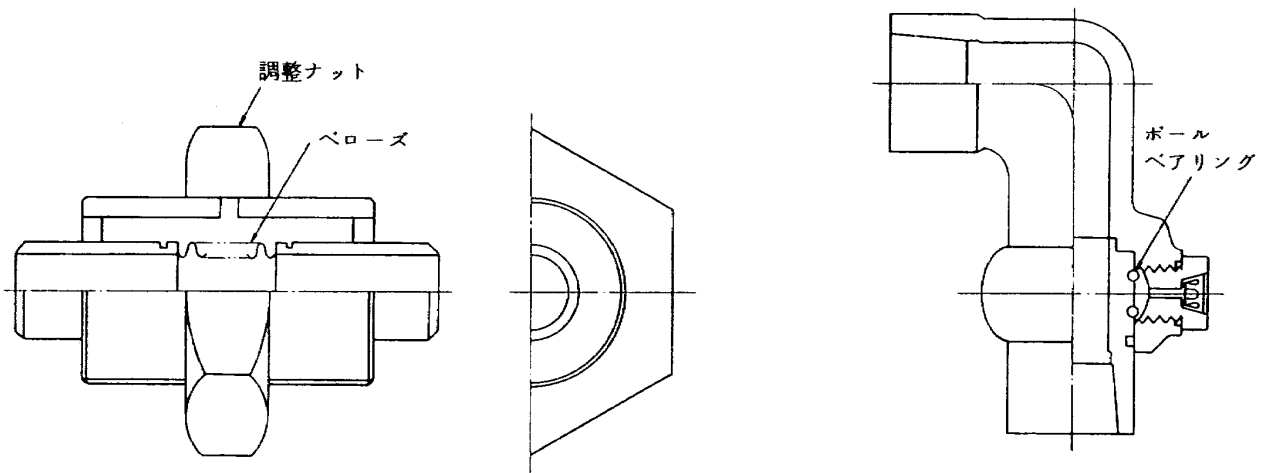


図5 伸縮継手およびスイベルジョイント

(Ⅳ) 燃焼器をスタンドに装着する際の取付金物を設けた。従来は燃焼器をスタンドに直に装着したのを、今回の改造では取付金物を介して行なうことにした（図2参照）。

(Ⅴ) 燃焼器支持台を設けた。燃焼器をスタンドに装着する際のスタンドに対する片持ち荷重となるのを避けるため、従来も板バネ構造の支持台により燃焼器の自重を支持しており、これは燃焼器の形状や大きさ等に合わせてその都度用意されるべきものであるが、今回の改造では図2に示すように燃焼器取付金物を介して支持するようになっている。

スタンドを低圧室内の所定の位置にセットする際の位置ずれの誤差は、燃焼器と諸配管を接合する際の位置ずれに関係してくるが、燃焼器との接合を円滑にするため推力軸方向に±3mm、上下方向および左右方向にそれぞれ±1mmの自由度を与えるよう、推進薬供給配管に

は図14（3.2節参照）に示すジナル継手を用い、エンジン冷却水配管（往、復）には図5に示すスイベル継手およびベローズ型伸縮継手を用いた。

3.1.2 精 度

(1) スラスト・スタンドの精度の見積

スタンドの精度は、これを構成する各要素の組立精度や荷重撓みによる誤差、推力伝達部等可動部の偏位による支持バネおよび配管の反力による誤差、校正荷重と実荷重との荷重位置が異なることによる誤差、およびロード・セル自体の誤差などを要因として決ってくるが、このスタンドではインブレース校正を行なうので、これらの誤差要因の内のあるものはその大部分を補正することが可能であり、以下に述べる諸要因を総合してこのスタンドの精度は±0.17%FSと見積られている。

(Ⅱ) 10Lスタンド系の誤差 …………… 0.033%FS

この系の誤差はインブレース校正でその大部分を

補正することができるが、補正しきれないで非直線性やヒステリシスとして残る誤差がある。すなわち、計測用ロード・セルの組付誤差およびスタンドの荷重撓みによりロード・セルに曲げモーメントがかゝって生ずるロード・セルの出力誤差を0.001%FS、スタンドの組立誤差および荷重撓みにより推力軸が傾くことによる誤差を0.005%FS、推力伝達部を支持する前部および後部の板バネの反力による誤差を0.012%FS、スタンドのガタその他の不確定要素による誤差を0.03%FSとしてこれらを集計した。

(ii) 燃焼器取付金物系の誤差 …………… 0.0045%FS

この系では取付金物の製作誤差およびその構成部品の組立誤差のため燃焼器取付面が傾き、したがって推力軸が傾くことによる誤差0.00033%FSのほか、取付金物が推力伝達部に伴われて偏位する際に生ずる支持バネの反力による誤差と、この際の板バネが偏心吊りとなって生ずる自重分力による誤差が考えられ、これらの誤差の大部分はインブレース較正で補正されるが、補正しきれないで残る誤差をそれぞれ0.0032%FSおよび0.00314%FSとし、これらを集計した。

(iii) 配管類の反力による誤差 …………… 0.0284%FS

スタンドの可動部が荷重により偏位するときの燃焼器に結ばれている推進薬供給配管(LOX/LH₂)およびエンジン冷却水配管(往、復)の反力による

誤差は、インブレース較正によりその大部分を補正されるが、補正しきれないで残る誤差として上記の値を見積った。

(iv) 較正用ロード・セルの組付精度および

荷重撓みによる誤差 …………… 0.0094%FS

較正用ロード・セルの組付誤差およびスタンドの荷重撓みによりロード・セルに曲げモーメントがかゝって生ずるロード・セルの出力誤差として上記の値を見積った。

(v) 較正荷重と実荷重との荷重位置が

異なることによる誤差 …………… 0.137%FS

較正荷重と実荷重との相異は、実荷重では10Lスタンドの推力伝達部および新規の燃焼器取付金物が圧縮撓みを受けることであり、これによって関係する支持バネの反力が増加して誤差となる。

推力伝達部の圧縮撓みによる後部支持台のバネ反力の誤差を0.0203%FS、推力伝達部および燃焼器取付金物の圧縮撓みによる燃焼器取付金物支持板バネ反力の誤差およびこのときの板バネが偏心吊りとなって生ずる自重分力の誤差をそれぞれ0.00436%FSおよび0.0043%FS、またこのときの推進薬供給配管およびエンジン冷却水配管の反力の誤差を0.135%FSとしてこれらを集計した。

(vi) 較正用ロード・セル自体の誤差 …………… 0.057%FS

メーカーのカタログによる。

表3 スラスト・スタンドの単体較正

荷 重 kg	計測用ロード・セルの出力 μV							誤 差 %		
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	平 均	非直線性	ヒステリシス	再 現 性
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	- 3912	- 3911	- 3911	- 3906	- 3908	- 3904	- 3909	0.007	0.010	0.020
400	- 7824	- 7823	- 7817	- 7820	- 7809	- 7812	- 7818	0.014	0.020	0.038
600	-11734	-11731	-11731	-11719	-11711	-11713	-11723	0.042	0.026	0.059
800	-15647	-15640	-15640	-15623	-15620	-15622	-15632	0.049	0	0.069
1000	-19568	-19565	-19557	-19544	-19539	-19539	-19552	0		0.074
800	-15645	-15639	-15640	-15626	-15619	-15623	-15632	0.049		0.066
600	-11740	-11735	-11735	-11720	-11717	-11718	-11728	0.016		0.059
400	- 7829	- 7827	- 7825	- 7817	- 7817	- 7817	- 7822	-0.006		0.031
200	- 3909	- 3907	- 3904	- 3909	- 3913	- 3900	- 3907	0.017		0.033
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0

$$\text{較正精度} = (0.049^2 + 0.026^2 + 0.074^2)^{1/2} = 0.09 \% \text{FS}$$

表4 配管を接続したスラスト・スタンドの較正

荷 重 kg	計測用ロード・セルの出力 μV							誤 差 %		
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	平 均	非直線性	ヒステリシス	再 現 性
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	- 3903	- 3900	- 3905	- 3906	- 3909	- 3904	- 3904	0.012	0	0.020
400	- 7805	- 7804	- 7810	- 7820	- 7809	- 7812	- 7810	0.014	0.026	0.041
600	-11707	-11700	-11710	-11719	-11711	-11713	-11710	0.047	0.026	0.049
800	-15609	-15603	-15612	-15623	-15620	-15622	-15615	0.054	0	0.051
1000	-19525	-19518	-19526	-19544	-19539	-19539	-19532	0		0.067
800	-15611	-15603	-15610	-15626	-15619	-15623	-15615	0.054		0.059
600	-11713	-11707	-11715	-11720	-11717	-11718	-11715	0.022		0.033
400	- 7815	- 7809	- 7814	- 7817	- 7817	- 7817	- 7815	0.011		0.020
200	- 3903	- 3897	- 3903	- 3909	- 3913	- 3900	- 3904	0		0.031
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0

$$\text{較正精度} = (0.054^2 + 0.026^2 + 0.067^2)^{1/2} = 0.09 \% \text{ FS}$$

表5 配管を接続しこれに圧力をかけたスラスト・スタンドの較正

荷 重 kg	計測用ロード・セルの出力 μV							誤 差 %		
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	平 均	非直線性	ヒステリシス	再 現 性
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	- 3903	- 3905	- 3903	- 3903	- 3904	- 3901	- 3903	0.030	0.010	0.010
400	- 7811	- 7811	- 7812	- 7809	- 7809	- 7808	- 7810	0.039	0.051	0.010
600	-11712	-11717	-11716	-11718	-11719	-11716	-11716	0.053	0.026	0.018
800	-15620	-15626	-15624	-15626	-15625	-15620	-15624	0.057	0.010	0.015
1000	-19537	-19546	-19546	-19546	-19544	-19543	-19544	0	0	0.023
800	-15621	-15626	-15625	-15628	-15627	-15626	-15626	0.047		0.018
600	-11718		-11722	-11722	-11721	-11721	-11721	0.028		0.010
400	- 7817	- 7822	- 7820	- 7823	- 7920	- 7819	- 7820	0.012		0.015
200	- 3900	- 3904	- 3902	- 3903	- 3902	- 3894	- 3901	0.040		0.026
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0

$$\text{較正精度} = (0.057^2 + 0.051^2 + 0.026^2)^{1/2} = 0.08 \% \text{ FS}$$

(vii) 計測用ロード・セル自体の誤差 …… 0.057% FS

同 上

(2) スラスト・スタンドの較正精度

スタンドの較正は較正荷重受台に設けたジャッキ装置により較正用ロード・セルを介してスタンドに荷重をか

け、較正用および計測用のロード・セル出力を対比することにより行なわれる。

スタンドに燃焼器をとり付けるだけの状態で行なうスタンドの単体較正のほか、その燃焼器に諸配管をとり付けた較正、更にその配管に実際の燃焼試験と同程度の

圧力をかけた状態での較正を行なった。その結果は表3～5に示すとおりであり、較正精度は配管の有無および配管内圧力の有無にほとんど関係がなく、またこれらの表の較正荷重1トンにおけるロード・セル出力を、ロード・セルの単体較正における1トン時の出力19974 μV と比較して、スタンド単体の支持パネ等の反力21.23 kg、これに配管が加わったときの反力22.23 kg、更に配管に圧力が加わったときの反力21.63 kgを知るが、これから分るように配管類の反力およびこれに圧力が加わる影響は無視し得るほど小さいものであった。

なお同表のロード・セル出力は、ロード・セルを引張りで用いてあるのでマイナス表示がなされており、較正精度の評価は前掲のロード・セルの例によった。

3.2 推進薬供給設備

3.2.1 構成および一般機能

この設備は推進薬および冷却水を加圧ガスによって圧送し、燃焼器に供給するシステムである。実際のロケット燃焼器においては、液体水素は燃焼室を冷却することによってより高温の超臨界状態で燃焼室に供給される。本設備では高膨張のノズルをもつ供試燃焼器の高空性能を求めることに重点を置き、燃焼室の冷却は液体水素の代りに高圧冷却水を用い、液体水素と水素ガスを混合しロケット燃焼室入口の推進薬状態をシミュレートする方法を取った。推進薬供給システムの主な設計条件を表6に示す。図6に系統を単純化して示すように、主要構成は動作タンク、液体推進薬系、燃焼用水素ガス系、動作タンク加圧・逃気系、遠隔操作気圧弁の作動ガス系、バージガス系ならびに真空ポンプ、サービスタンク等の付帯装

置からなっている。主要機器の配置は図1に示した通りである。

機器の一般的機能および構造として検討した主な項目は下記の通りである。

- (a) 液体酸素、液体水素などの推進薬およびその雰囲気中で用いられる導管、弁類および付属装置類は適当な材質および構造をもつものであり、長期間の使用に耐えること。また、NTOおよびA-50の雰囲気さらされる可能性も考慮すること。
- (b) 各配管口径は最大流量を流した時圧力損失が過大とならないこと。
- (c) 遠隔操作弁は制御系からの信号に従い適当な速度で動作するものとする。始動弁の応答速度は0.5秒を目標とし、他の弁の応答速度は1秒以内を目標とした。
- (d) 推進薬流量および混合比の設定は燃焼器と配管系のインターフェース部に挿入されるオリフィスと動作タンク圧の調整によっておこなう方式を取るものとする。従って加圧ガスの調圧系統は調圧精度、応答性、再現性および操作性が良好なものであること。
- (e) 小人数の人員による能率的な機側操作がおこなえるように、操作機器は不都合のない限り集中させる。

3.2.2 動作タンク

動作タンクは供試燃焼器に推進薬および高圧冷却水を所要の秒時一定流量でガス加圧によって圧送するためのものであり、LOX、 LH_2 およびエンジン冷却水系統に各1個設置した。動作タンクはステンレス鋼製定置式、直円筒たて置式であり、要目を表7に示す。動作タンク

表6 推進薬供給系の設計条件

		常用圧力 (kg/cm^2)	最大流量 (kg/s)	配管径	断熱方式
1	LH_2 系	70	0.4	1 B	真空断熱
2	GH_2 系	70	0.2	1 B	
3	LOX系	70	1.4	$\frac{3}{4}$ B	LN_2 ジャケット
4	エンジン冷却水	70	10	$1\frac{1}{2}$ B	

表7 動作タンク諸元

	充填容量	常用圧力	許容蒸発量	断熱方式
LH_2	200 ℓ	70 $\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$	30 %/day	LN_2 ジャケット付 バーライト真空断熱
LOX	70 ℓ	70 $\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$	15 %/day	バーライト真空断熱
冷却水	400 ℓ	70 $\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$	—————	—————

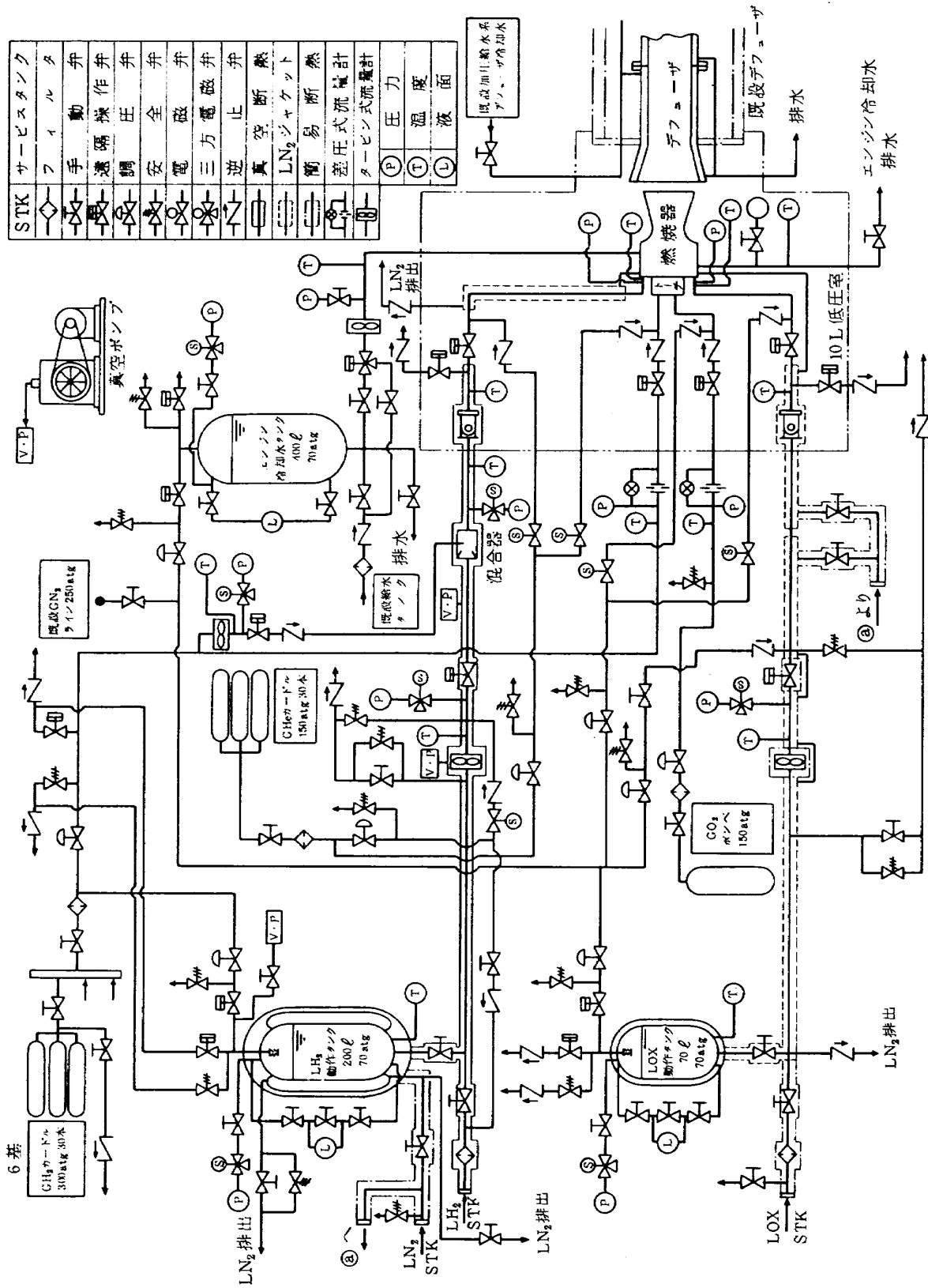


図 6 推進薬供給系系統図

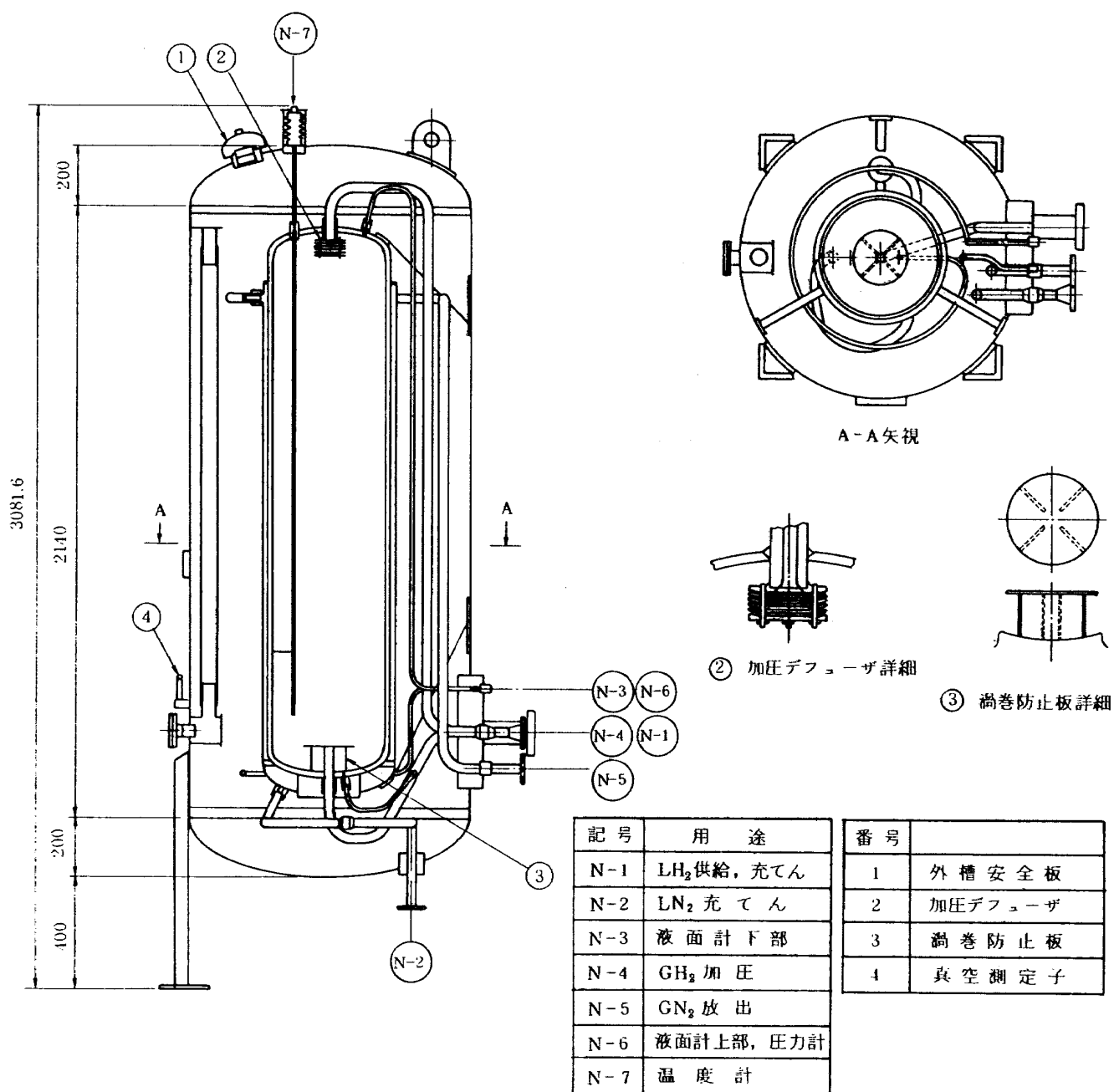


図7 液体水素動作タンク

は加圧ガスのデフューザおよび液取出口の渦流防止板等の通常の装置類をそなえている(図7参照)。極低温液体用のLOXタンクおよびLH₂タンクについては液体推進薬の自然蒸発量および差圧式の液面計について検討した。ここでは最も条件のきびしいLH₂ランタンク(図7)について主として述べる。

(1) 蒸発損失

図8に示すように、ステンレス鋼は約100°K以下になると急速に比熱が小さくなるのでLN₂(沸点77.4°K)によって予冷することによってLH₂充填時の予冷損失を大巾に減少させることができる。この理由からLH₂タンクにはLN₂ジャケットをつける構造とした。

蒸発損失を少なくするためには多層真空断熱等のより高度な断熱方法も考えられたが、通常、動作タンクにLH₂を充填後2～3時間以内に燃焼試験をおこなうものとしてより安価なパーライト真空断熱方式を選定し、蒸発損失は定常状態において全充填容量の30%/day以下と規定した。蒸発損失の計算には以下の簡単な方法を用いた。

蒸発損失 K (%/day)は外部からの熱侵入量によって決定され、次式であらわされる。

$$K = \frac{Q \cdot 24}{V \cdot \rho \cdot q} \times 100 \quad (1)$$

ここで V はタンクの充填容量(ℓ)、 ρ は液の密度(kg/ℓ)、 q は液の蒸発潜熱(kcal/kg)であり、 Q は総熱

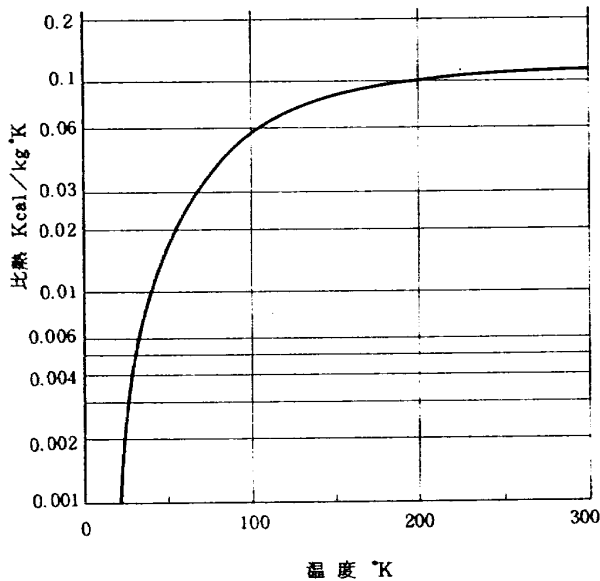


図8 SUS 304の比熱

侵入量 (kcal/hr) であり、次式であらわされるものとする。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2)$$

Q_1 は断熱層からの熱侵入量であり

$$Q_1 = \frac{A k \Delta T}{L} \quad (3)$$

となる。ここで A は伝熱面積 (m^2) であり A_i , A_o をそれぞれ内表面積および外表面積とすれば, $A = \sqrt{A_o A_i}$ となる。 D_o をタンク外槽外径, L_o 外槽胴平行部長とすれば,

$$A_o = \pi D_o L_o + 2 \times 1.084 D_o^2$$

とあらわされる。同様に A_i も求めることができる。 k はパーライト真空断熱層のみかけの熱伝導率であり, $k = 1.8 \times 10^{-3} \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ とした。 L は断熱層の厚さ (m), ΔT は室温と液温との差である。

Q_2 は内部サポートからの熱侵入量であり,

$$Q_2 = \left(\sum \frac{A_{si}}{L_{si}} \right) k_s \Delta T \quad (4)$$

とあらわされる。 A_{si} は各サポート材の断面積, k_s はサポート材 SUS 304 の熱伝導率であり室温と LH_2 温度の平均温度 160°K の値 $k_s = 9.6 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{K})$ を用いた。 L_{si} は各サポートの長さである。

同様に内部管からの熱侵入量 Q_3 は

$$Q_3 = \left(\sum \frac{A_{pi}}{L_{pi}} \right) k_s \Delta T \quad (5)$$

とあらわされる。 LH_2 動作タンクについて(3)~(5)式を適用すれば

$$Q_1 = 9.66 \text{ kcal/hr}$$

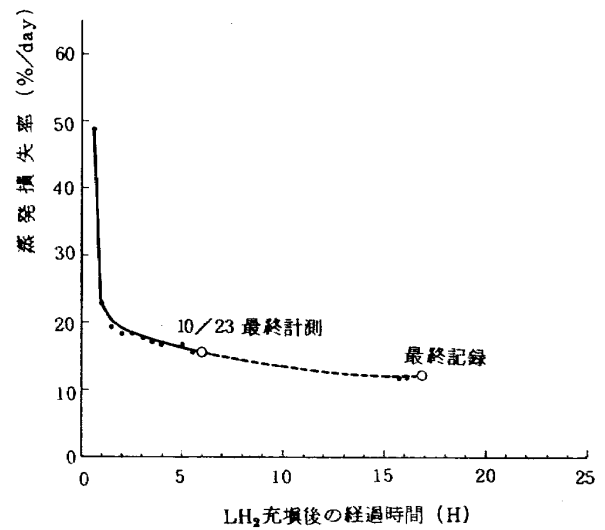
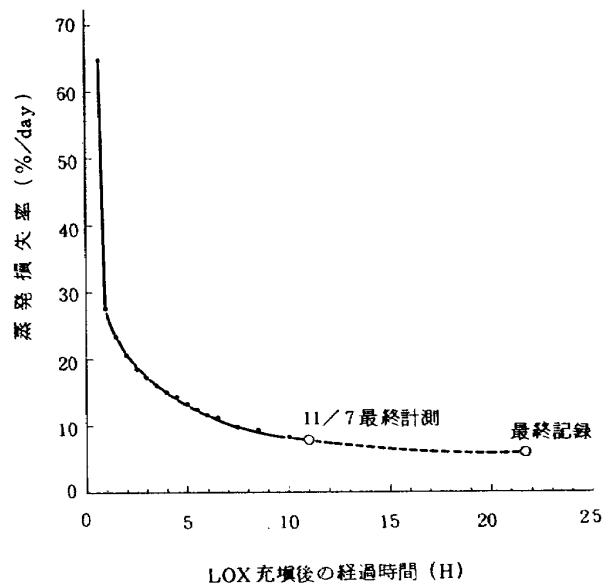
図9 LH_2 タンク蒸発損失

図10 LOX タンク蒸発損失

$$Q_2 = 3.98 \text{ kcal/hr}$$

$$Q_3 = 1.56 \text{ kcal/hr}$$

となり, (1)式において $V = 200 \ell$, $\rho = 0.07 \text{ kg}/\ell$, $q = 114 \text{ kcal}/\text{kg}$ を用いれば, $K = 22.9\% \text{ day}$ となる。同様に液体酸素動作タンクについては, $K = 7.2\% \text{ day}$ となる。

LH_2 および LOX の動作タンクの蒸発損失は図9および図10に示すように, 定常状態とみなせるようになるには一昼夜以上必要であることがわかる。各々最後の計測時刻の値を定常値とみなすと, 上記の単純計算は LOX 動作タンクについては $6\% \text{ day}$ の実験値に対して安全側の値をあたえる事がわかる。 LH_2 動作タンクについては, 計算値 $22.9\% \text{ day}$ に対して $12\% \text{ day}$ の実験値が

得られているが、これは動作タンク予冷用の LN_2 ジャケット部が真空断熱層として作用しているためと考えられる (3.2.6 節, LH_2 動作タンク予冷手順を参照)。

(2) 液面計

極低温液体の液面は静電容量型の液面計によって正確に測定できるといわれているが、計画当時国内に液体水素の計測の実績をもつ小型の液面計がみあたらなかった事、ならびに費用の節減のため、差圧計によって液面を測定する方式を採用した。極低温液体のタンク下部の導圧配管部では熱侵入による気化はまぬがれないので、気液の平均的な境界面がタンクの零レベルにあるように高圧側の導圧配管を零レベルで長くし、また気化ガスのタンクへのもどり時に大きな差圧を生じないように、タンク下部の導圧配管はできるだけ零レベルに近く配置した (図 7)。その結果、液体酸素タンクでは容易に安定な液面の表示を得ることができた。しかし、液体水素タンクでは差圧計元弁のしぼりによる調整の必要があったがモニタ計器としての使用にはほど満足し得るものとなった。ただし、タンク加圧時には熱平衡がくずれるため、液面の読みはきわめて信頼性がとぼしくなる傾向はまぬがれなかった。

3.2.3 液体推進薬系

この系統は LH_2 および LOX のサービスタンクから動

作タンクまでおよび動作タンクから燃焼器にいたるまでの LH_2 系および LOX 系の 2 系統である (図 6 参照)。サービスタンクは当所角田支所内に設置されている LH_2 製造設備の貯蔵タンクあるいは LOX 貯蔵タンクより抜き取り、使用場所へ運搬し、フレキシブルホースによって動作タンクに接続後移注をするためのものである。 LH_2 系の配管はサービスタンクから動作タンクまでのフレキシブルチューブ、弁類を含み、始動弁の直前までを真空断熱とした。 LOX 系は動作タンクから LOX 始動弁の直前までの配管を LN_2 ジャケットによって予冷をする方式を取ったが、弁類、流量計部および継手部はグラスウールによる簡易断熱とした。極低温液体が閉じ込められる可能性のある個所には放出用の弁の他に安全弁をもうけ、クラッキング圧 0.07 kg/cm^2 以下の逆止弁を介して放出配管は室外へ導いた。特に、水素の系統は屋上に設置した放出スタックへ導いた。配管の直線部および分岐部、温度センサ等の挿入口はベロー等を要所に入れ、温度差による膨脹、収縮による局部的応力を逃げる構造とした。図 11 に温度計部、分岐部を示す。

液体水素の配管系は漏洩を最小にし、かつ断熱を有効にするため継手は主としてバイオネット方式とした。 LH_2 流量計部の真空断熱は流量計の保守、較正等のために取外しが容易なように、図 12 に示すような構造とした。

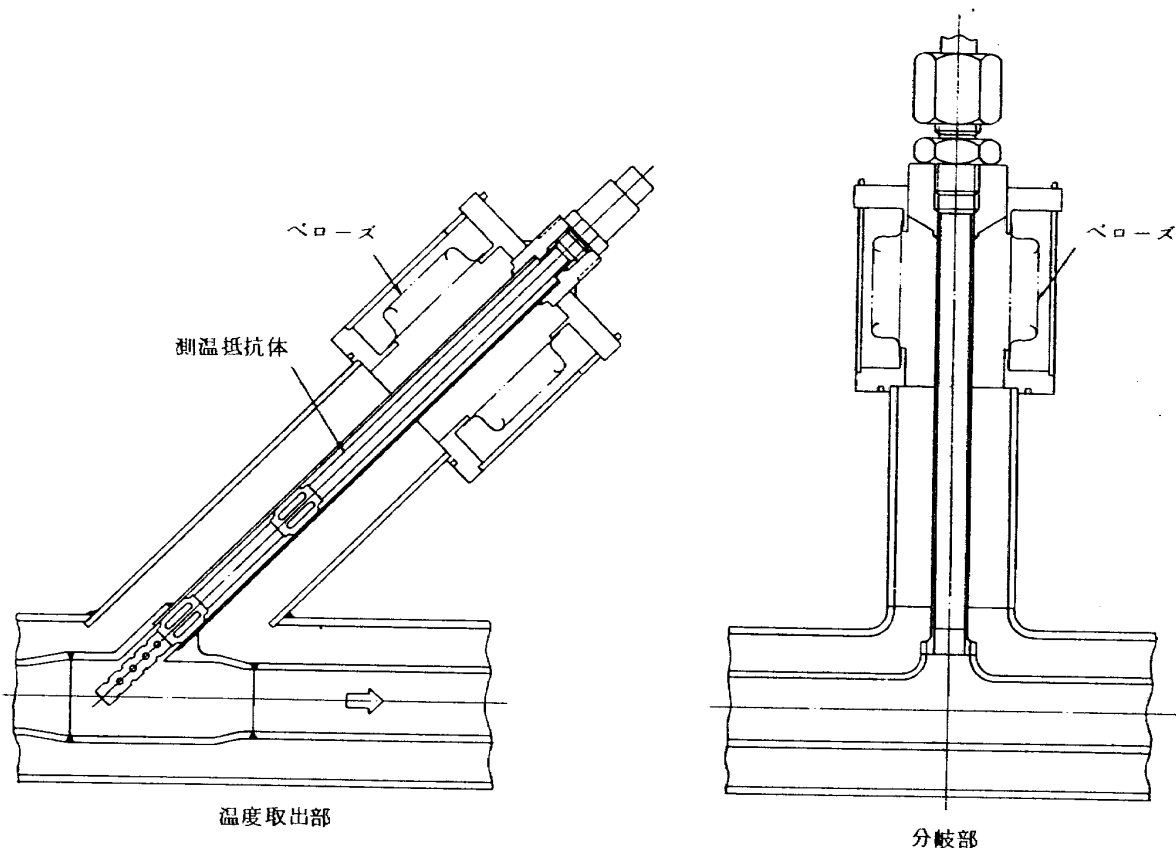


図 11 温度取出部および分岐部

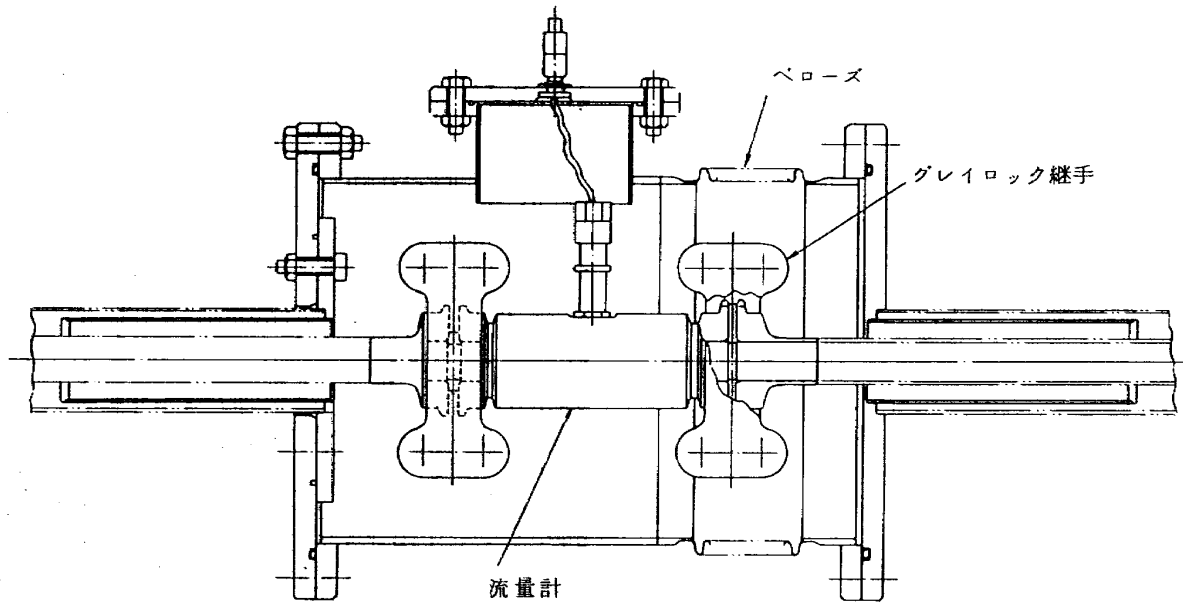


図12 流量計部

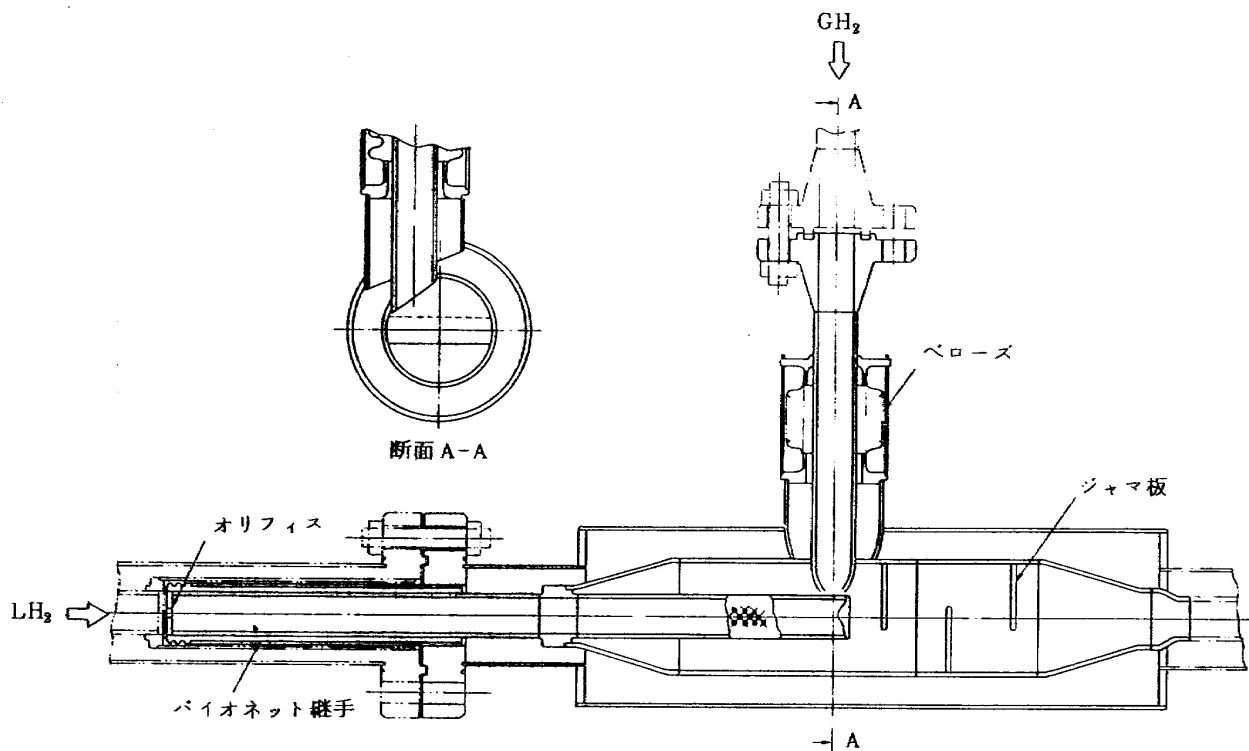


図13 混合器

図13には液体水素とガス水素との混合器を示す。混合器は流路に数枚のジャマ板を入れた簡単な構造としたが、安定な作動、すなわち、 LH_2 流量の変動および出口部温度の変動がない作動のためには、 LH_2 入口部オリフィス径の選定が最も重要であることがわかった。

低圧室内配管は既設設備と同様な考え方で、始動弁、予冷放出弁、トーチ着火器始動弁等のバルブをつけた配管アセンブリを真空断熱あるいは LN_2 予冷が可能なジャ

ケット付ジナル継手(図14)およびフレキシブルチューブによって低圧室両側へたおして供試エンジンを取付けた推力計測台を低圧室に出し入れをおこなう方法をとった(図15参照)。

弁類がやゝ大きいこと、ならびにジャケット付配管が太い事、予冷配管等の必要性などからきわめて大容積のものとなった。やむを得ず、NTO/A-50系の試験をおこなうときには、立上り部の配管アセンブリを取外すこ

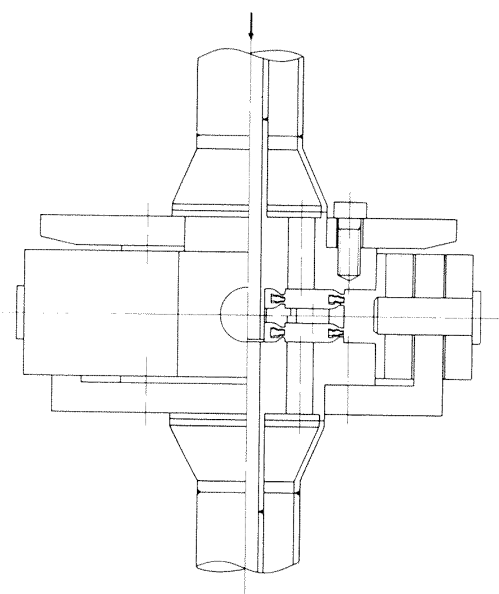


図 14 ジャケット付きジンバル継手

とにした。推力計測台まわりの配管類は推力計測精度に及ぼす影響が大きいので、上述のフレキシブル継手類を用いるほか、低圧室内配管をやゝ細目にし、剛性をすくなくするようにした。

弁類は国産の高圧ガス認定品を出来る限り利用する方針をとったが、始動弁、極低温用逆止弁および圧力計測・較正時に使用する三方電磁弁等は国内に適當なものがみあたらなかったため実績のある米国製品を用いた。遠隔作動弁は計画当時本設備に利用できる国産品はなかったが、極低温用も含めて応答性の高いシリンダ駆動の気圧弁を国内で新たに設計、製作し、それを利用することにした。図16に真空ジャケット付の LH_2 弁の写真を示す。これらの低温弁はメーカーで LN_2 温度において作動試験、耐久試験等がおこなわれたもので、その試験結果の1例を表8に示す。 LN_2 浸漬試験によって機能が確認された弁類が LH_2 温度においてもその性能を保つかどうかある程度の不安があったが、現在まで何ら問題はないようである。

燃焼試験の自動シーケンスのチェック等のために、遠隔作動弁には、その開閉等の表示を制御系へアンサバックする機能が要求される。 LH_2 、 LOX の始動弁にはポテンショメータによってそのリフトを遠隔表示できるようにし、 LH_2 、 LOX および GH_2 遮断弁と予冷放出弁には全開、全閉をリミットスイッチによって遠隔表示できるようにした。

3.2.4 燃焼用 GH_2 系および加圧・逃気系

本節では比較的大流量の高圧ガス系、すなわち、 LH_2

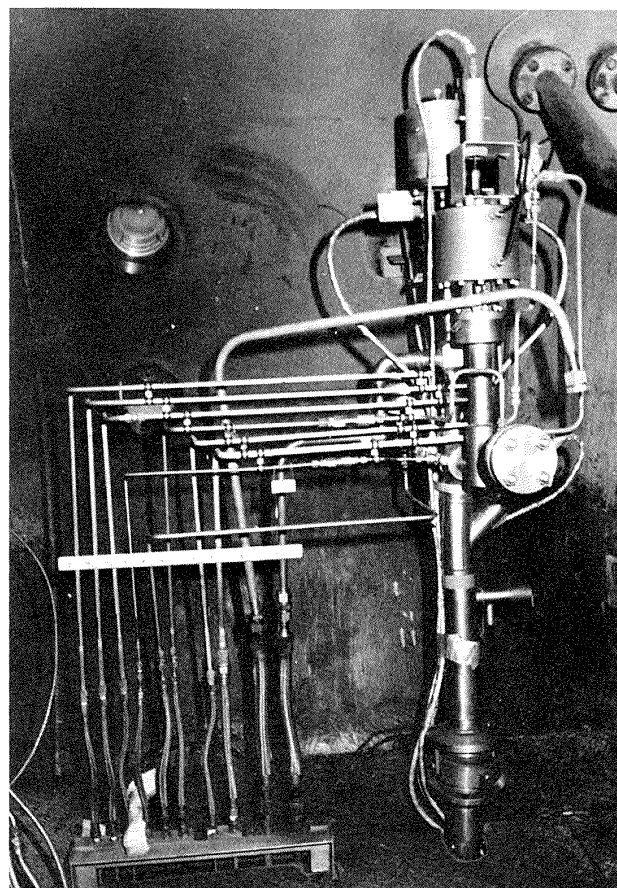


図 15 低圧室内配管立上がり部

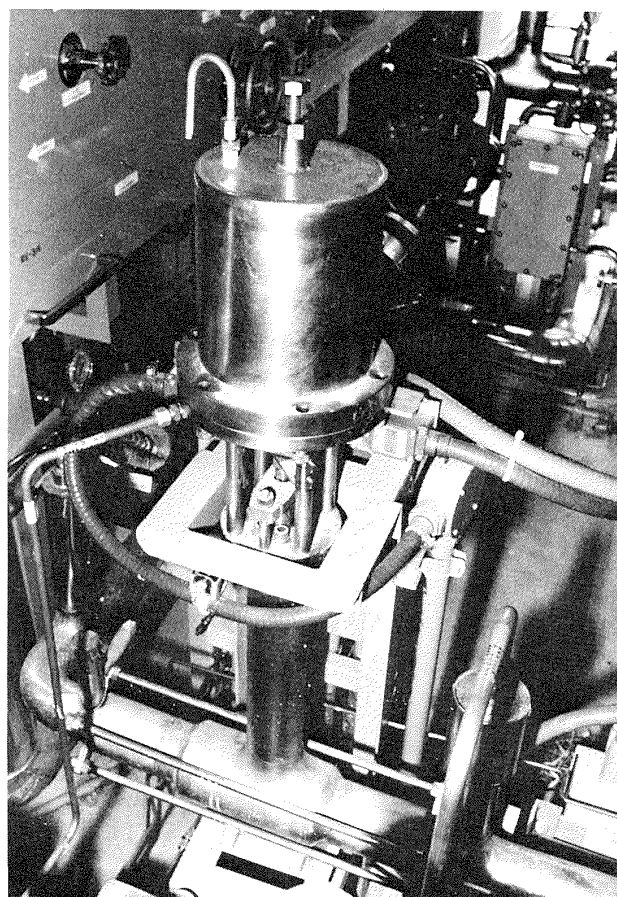


図 16 ジャケット付低温弁

表 8 国産遠隔作動弁試験成績の 1 例

項 目	単 位	規 定 値	測 定 値	備 考
常 温 気 密 GHe 内 部 洩 GHe 外 部 洩	scc/min "	0. 0.	0. 0.	試験圧力 70 kg/cm ² G 保持時間 10 分
LN ₂ 浸漬気密 GHe 内 部 洩 GHe 外 部 洩	scc/min "	10. 0.	2.5 0.	同 上
応 答 時 間 閉より 開信号 — 全 開 閉より 閉信号 — 全 閉	sec "	0.5 0.5	0.29 0.45	作動用GN ₂ 7 kg/cm ² G 電磁弁よりシリンダまでの配 管長さ約 1.5 m (単 体 試 験)

表 9 主要調圧弁諸元

用 途	口 径	1 次 圧 (kg/cm ² G)	2 次 圧 (kg/cm ² G)	流 量 (Nm ³ /hr)	備 考
LH ₂ タンク加圧GH ₂	1 B	200 ~ 100	70 ~ 30	3800	遠 隔 設 定
燃 焼 用 GH ₂	1 B	200 ~ 100	70 ~ 30	9000	"
LOXタンク加圧GN ₂	3/4 B	250 ~ 100	70 ~ 30	1000	"
冷却水タンク加圧GN ₂	1 B	250 ~ 100	70 ~ 30	2500	機 側 設 定

と混合して燃焼器に供給するGH₂系, LH₂動作タンク加圧用GH₂系, ならびにLOX動作タンクおよびエンジン冷却水動作タンク加圧用の窒素ガス系統について記述する。

水素ガス系統はLH₂動作タンク加圧ガス系, 燃焼用GH₂系およびトーチ着火用GH₂系によって構成される(図6参照)。供給源は充填圧力200 kg/cm²G, 30本組のボンベカードル6基からなっており, メインバルブスタンド(図22参照)において動作タンク加圧系, 燃焼用等に分岐される。トーチ着火用GH₂供給系は燃焼用の系統からさらに分岐される。

窒素ガス系はLOX動作タンクおよび冷却水タンクの加圧ガスの他にバース用, 弁操作用およびエアホイスト駆動用等からなっており, 既設の高圧窒素ガス製造設備の充填圧力250 kg/cm²G, 内容積14 m³の気蓄器より分岐して用いた。

本設備においては推進剤圧力と流量の設定は燃焼器インターフェース部オリフィスの設定と動作タンクおよび燃焼用水素ガスの圧力によって決定されるので, これらのガス系の調圧精度, 安定性等が特に重要になる。また, LOX/LH₂燃焼器の試験では予冷終了後迅速にタンク圧設定をおこない燃焼試験を実施しなければならないので,

調圧設定の操作性も良好でなくてはならない。極低温液体LH₂およびLOXの加圧用の所要ガス量は加圧ガスの液中への溶け込み, ガス温度の低下による体積の減少あるいは熱伝達による液体の蒸発等により予測は容易ではない。所要ガスの体積流量 Q_p はタンク圧力における排液量 Q_p^0 よりも一般に多く, Q_p/Q_p^0 はcollapse factor (“縮減率”)とよばれている。縮減率は同様な容量, 圧力レベルにおける三菱重工業㈱の試験データより2とした。表9に主要な調圧弁の容量を示す。調圧弁は既設設備で実績のある米国Grove社製のダイヤフラム式ドームレギュレータを用いた。調圧の遠隔設定には図17に示すようにキャピラリチューブおよび容量約300 c.c.のタンクを通して加圧用および減圧用の電磁弁をON, OFFして調圧弁ドームの圧力を調整する方法をとった。このシステムではキャピラリの径および長さの選定が重要であったが, 数種のキャピラリによる試行の結果内径約1mm, 長さ1m程度が適当であることがわかった。動作タンク圧の制御盤への指示はデジタル式とし, 設定精度の確保をおこなった。

推進剤の流量試験(3.7節参照)の結果タンク加圧用調圧弁の容量は十分であったので, タンク加圧後推進薬を流し始めた時の2次圧の変動は通常0.5秒以内にもと

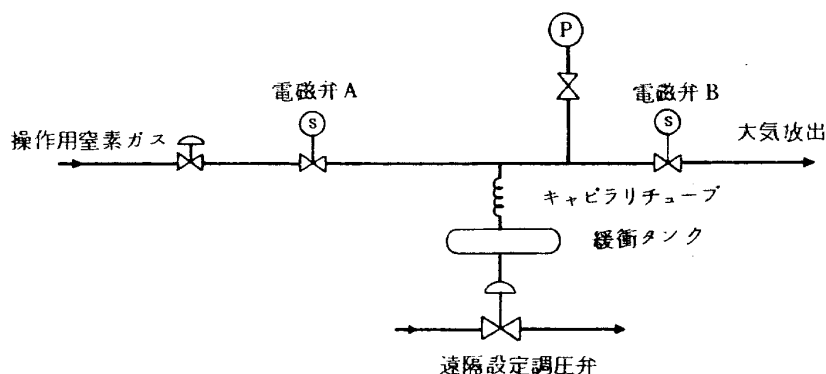


図 17 遠隔設定調圧システム

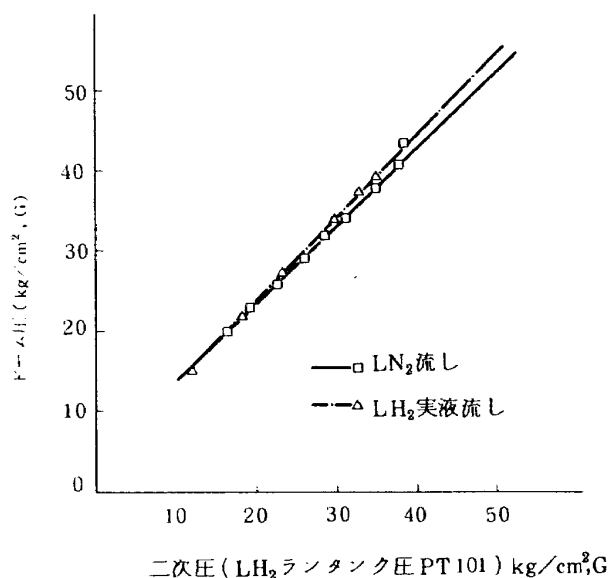


図 18 調圧弁ドーム圧とタンク圧

の値、すなわちしめ切り時の値に復帰することがわかった。しかしながら、調圧弁の特性としてドーム圧と動作タンク圧とのあいだには図 18 に一例を示すようにバイアスがみられた。また、図 19 に示すように一次圧の低下に伴ってわずかであるが 2 次圧の変動を起す場合もあった。燃焼用 GH_2 の調圧系は動作タンク加圧用の系統とは異なり 2 次側に容量がないため、しめ切り時の 2 次圧と作動中の 2 次圧とのあいだに約 1 kg/cm^2 程度の差がみられた。これらの調圧系統の特性に起因するバイアス等は実験回数を重ねることによって所要の調圧精度に影響をおよぼさなくなるものと考えられる。

次に逃気系統について若干述べる。LOX 動作タンク加圧ガスおよび LOX の予冷放出は単純に建屋のひさしに取付けた導管から水平方向に放出したが、水素系統の放出にはやゝ考慮をはらった。水素ガスは液体水素の加圧に使用されるため、空気等が混入した場合、爆発の危険があるばかりでなく、固体空気がタービン流量計部等に付着した場合には流量計の不作動などを起す可能性がある

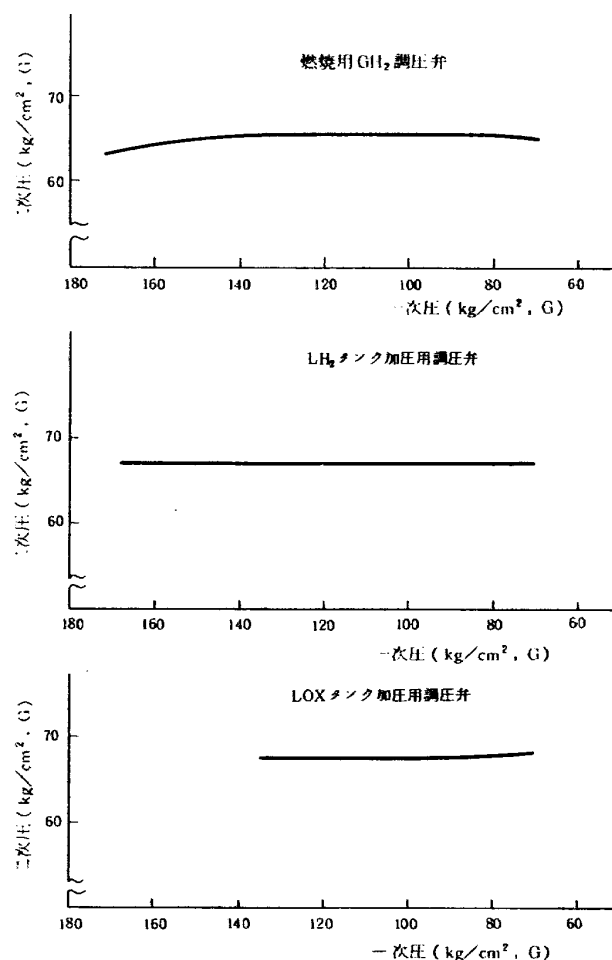


図 19 一次圧の低下に伴う二次圧の変化

ので、水素ボンベカードルのマニホールド部へのつなぎ込みは、数回の加圧・放出をくり返す方法(“加圧バージ”)をとった。気蓄器室は実験室からはなれているので、こゝからの GH_2 の放出は地上約 10m の位置でおこなった。実験室側における水素の放出、すなわち LH_2 動作タンク逃気、 GH_2 ライン逃気、予冷放出、バージ、および安全弁吹出側はすべて逆止弁を介して実験室屋上に立てられた放出スタックに導かれる(図 20)。 H_2 の大気放出部の

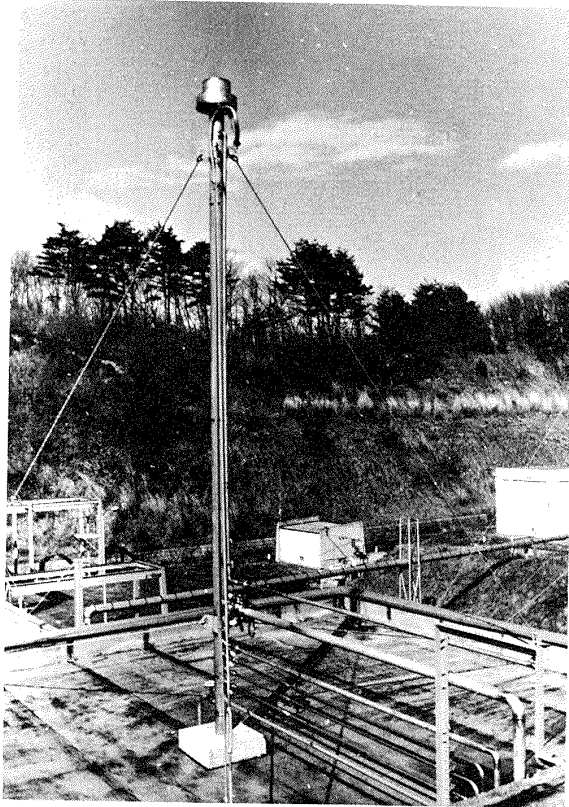


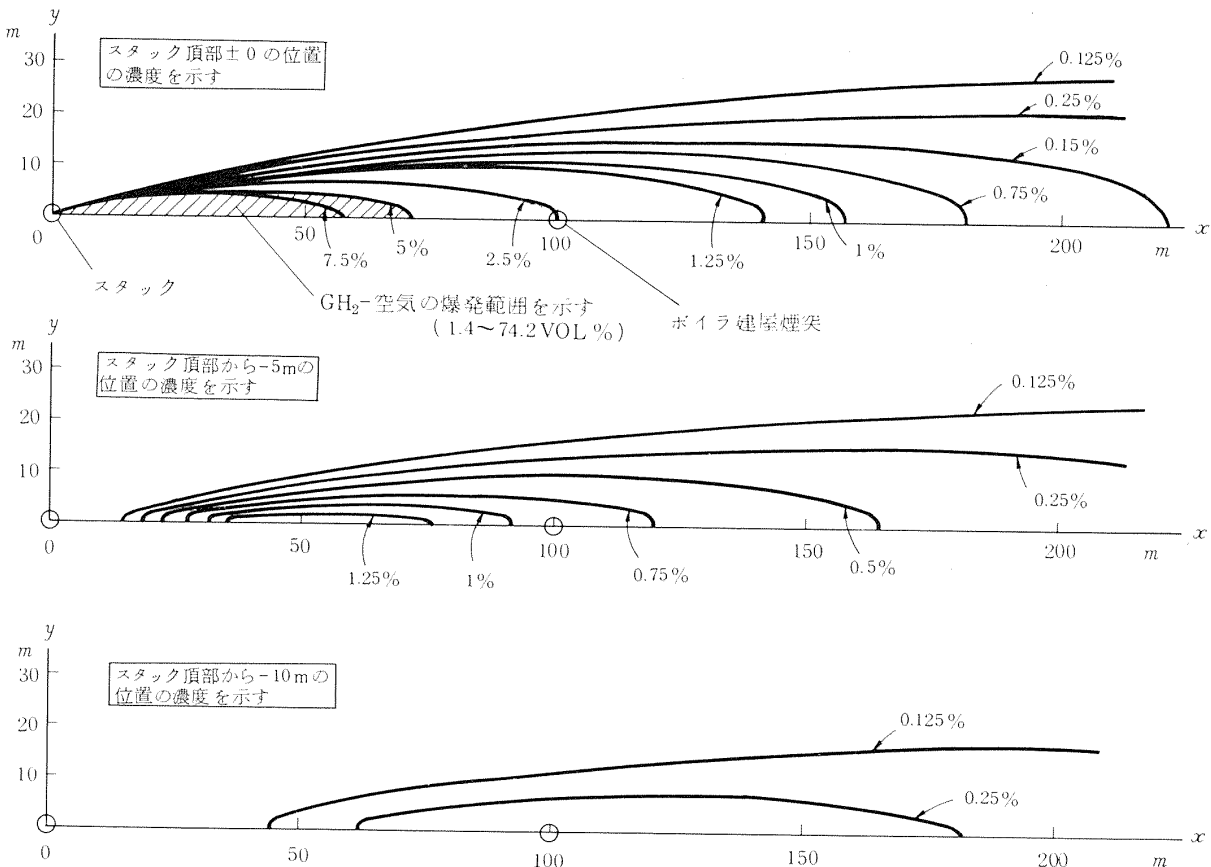
図 20 放出スタック

高さは地表面上約13.6mの位置にある。最大放出量として LH_2 動作タンク逃気量 $5\text{Nm}^3/\text{sec}$ ，風速を $2\text{m}/\text{sec}$ とすれば図21に示すように，着火源となる可能性のあるボイラ建屋煙突部においては十分安全と考えられる。放出スタック出口部において静電気等によって着火しないように，放出スタック，導管類は接地されているが，万一着火した場合のために出口部に着火検出用の熱電対をもうけ，消火のための大量 GN_2 ページが可能ないようにした。

3.2.5 その他のガス系統

燃焼試験設備には3.2.4節で述べた大容量高圧ガス系統の他に，より小流量の多数の高圧ガス系統がある。その主なものは図6に単純化して示したが，トーチ着火用の GH_2 および GO_2 系，気圧作動弁の駆動用の GN_2 又は GHe ，配管および燃焼器のインジェクター用 GN_2 又は GHe 系などである。これらの系統は小人数で能率的な機側操作がおこなえるように，ブルドン管圧力計，手動弁，および機側設定調圧弁等を集中させた。図22に大部分のガスを取扱うためのメインバルブスタンドを示す。

バルブ操作ガス切換用の電磁弁，ページガス用の電磁弁類は防爆のため窒素ページをおこなった箱に収納した。酸素系，水素系および低圧室内弁操作系について各1コ

図 21 LH_2 タンク 逃気時の水素濃度分布

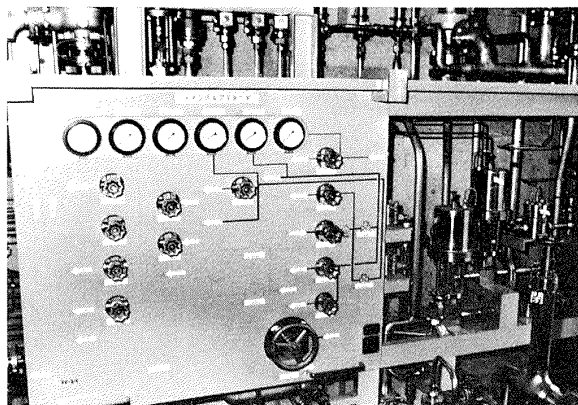


図 22 メインバルブスタンド

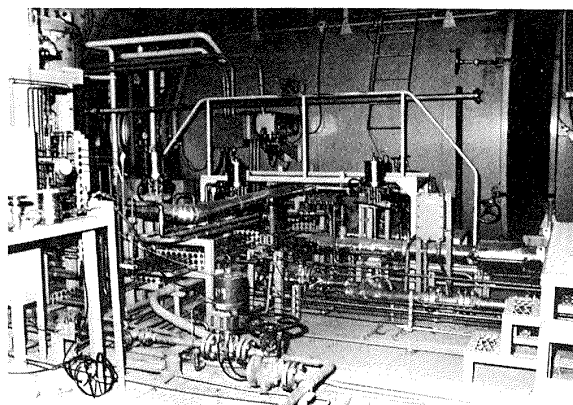


図 23 低圧室へ向かう配管類

の電磁弁箱をもうけ、これらの箱には制御用および計測用の圧力変換器もまとめて収納した。点火トランスおよび流量計前置増幅器はセンサ又はスパークプラグまでのケーブル長が制限されるので、機側に各々別個の窒素ページボックスをもうけた。

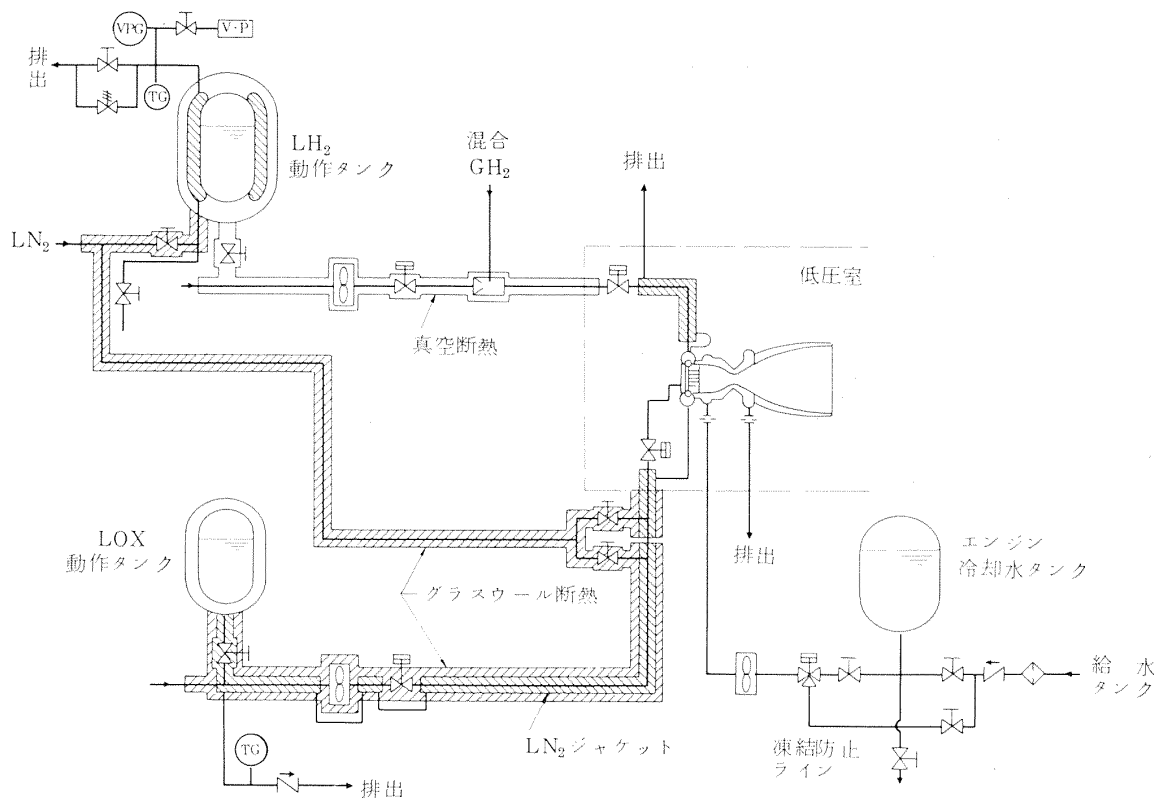
GHe 系統は液体水素系統のページと、始動弁等の早い応答を要求される弁の操作用に用いられる。ページ用 GHe は LH_2 ラインページ、混合器とその下流のページおよびインジェクタのページに用いられる。混合器とその下流のページは LH_2 ラインの実液予冷後、燃焼直前にこの部分にたまっている LH_2 を放出するために必要となった。インジェクタページは燃焼終了後インジェクタ部へ

逆火等がおこらないために必要であり、これは自動シーケンスに組み込まれている。

図 23 に低圧室へ向う配管類の写真を示すが、上述のように操作性と安全性のためにバルブスタンド、電磁弁箱等に機器を集中させたことにより、既設部分との干渉を少くしたことにより、きわめて複雑な配管組立となった。

3.2.6 予冷用 LN_2 およびエンジン冷却水ライン

液体窒素 LN_2 は、 LH_2 動作タンクの予冷、 LOX 配管ジャケット予冷および燃焼器のインジェクタ予冷等に用いられる。 LOX 配管予冷系統は低圧室外の LOX 配管予冷と低圧室内 LOX 配管予冷の 2 系統に分かれている (図 24 参照)。

図 24 予冷用 LN_2 ライン及びエンジン冷却水凍結防止ライン

LH₂動作タンクの予冷は、タンク内が負圧となり空気等の混入の可能性がないようにあらかじめ動作タンクを約4 kg/cm² G以上にGH₂又はGHeによって加圧封入した後ジャケット部にLN₂を充填する手順をとる。LN₂充填後パーライト真空断熱部を予冷するため通常24時間以上放置する。動作タンクにLH₂を充填する前にジャケット部のLN₂を排出し、ジャケット部の真空びきをおこなう。

大気圧下の燃焼試験においては通常、燃焼器を通してLOXおよびLH₂による実液予冷をおこなうが、半密閉状態の低圧室内へ燃焼直前に多量の水素および酸素を放出するのは爆発等の危険があると考えられたので、燃焼器を通ず予冷はおこなわないこととし、実液予冷は始動弁の直前から放出弁を通して低圧室外へ導くものとした。しかし、この方式ではインジェクタ部の予冷がおこなわれず、燃焼が定常になるまでに長秒時を要することが予想された。そこで、図24に示すように燃焼器のインジェクタ部をLN₂ジャケット予冷をおこなうことにした。インジェクタ部の予冷によって当然燃焼室部も予冷されるが、このとき水冷燃焼室の冷却水チャンネルに残った水が凍結しチャンネルの閉塞を起さないように、エンジン冷却水系には図24に示す凍結防止ラインをもうけた。予冷開始と同時に既設加圧給水タンクより凍結防止ラインにより水が燃焼室に供給され、燃焼試験時には三方弁の切換により動作タンクから高圧冷却水が供給される。

3.2.7 付帯設備および装置

燃焼試験設備に関連して必要となった付帯設備および建屋の改修には、GH₂カードル置場とその荷おろし設備、GHeカードル置場とその荷おろし設備、およびGH₂の漏洩に対する対策として建屋の要所に通気用のガラーをもうけたことなどが含まれる。

付帯装置には真空ポンプとサービスタンクがある。真空断熱配管の真空びき、および実験の長期休止後の再開時、あるいは空気等の混入の可能性がある場合のLH₂系

の真空びき等のため可搬式油回転真空ポンプを用い、配管系の要所には真空びき用のポートをもうけた。LH₂、LOXおよびLN₂は角田支所内に設置されている貯蔵タンクよりめき取り車輪付のサービスタンクによって使用場所まで運搬し、動作タンク又は予冷ラインにフレキシブルホースによって接続して使用方法をとった。表10にサービスタンクの諸元を示す。なお、LH₂サービスタンクは当所角田支所流体機器研究室において軸受・シールの実験に動作タンクとして用いているものであり、実験スケジュールの調整が困難な場合は液体水素メーカーから別の可搬式タンクを借受けることにした。

3.4 制御設備

3.4.1 計画

この制御設備は既設のロケットエンジン高空性能試験設備内計測制御室に於いて、LOX/LH₂エンジンの高空性能試験に必要な制御および監視を行うものである。遠隔操作弁の手動操作および燃焼試験のためのシーケンスの制御が主体となっているが、極低温流体を推進薬として用いるため推進薬供給ラインやエンジン周辺の温度監視も重要である。既設排気設備との関連では、その運転の状態や低圧室圧等の監視が必要である。また排気系設備が運転されていないときに絶対にエンジンが燃焼に進むことのないよう、そのインタロックも必要であり、既設排気系制御設備の若干の改造を行った。水素ガスが漏洩した場合付近は爆発等の危険にさらされるので水素ガス検知器を備え、設備やエンジンからの漏れを発見して、事故を未然に防ぐことも重要である。

以上の諸点に留意して計測制御室にLOX/LH₂操作監視盤を設置した。高空性能試験設備の排気系スタートに始まり、約30秒後高空性能試験設備の排気系よりOK信号がでるのを確認する。次いでエンジン燃焼、エンジン停止、最後にエンジンが確実に停止した事を確認して排気系停止、以上が高空性能試験の工程となる。極低温推進薬を用いるエンジンでは燃焼直前まで供給ラインの予

表10 サービスタンク諸元

	LH ₂ サービスタンク	LOXサービスタンク	LN ₂ サービスタンク
充填容量 ℓ	500	500	416
最高使用圧kg/cm ² G	20	2	12
断熱方式	LN ₂ ジャケット付 パーライト真空断熱	パーライト真空断熱	多層真空断熱
蒸発損失 %/day	7 (実績)	5 (設計値)	5 (設計値)
昇圧器	加圧式	加圧式	内蔵式

冷温度やエンジン冷却水の凍結防止に細心の注意を払わなくてはならない。この短時間内の操作や判断は、操作員によって行なおうとするのは無理があり、またエンジン燃焼試験やその安全にとって重要であるのでシーケンサと論理回路および制御機器を用いて自動シーケンス制御とした。自動シーケンスはその実験の目的により組み換えが必要とされるが、操作が容易であるように30チャンネルのピンボードシーケンサ2台を用い、バルブの開閉や検出信号の判断等のタイミングを、そのピンのセッティングだけで換えられるようにした。

安全対策としては、前述の水素ガス検知装置を設け、酸化剤室とスタンド室内の電磁弁は全て電磁弁箱を設けて収納し、内部を窒素ガスで置換して外気と遮断した。さらにスタンド室と計測制御室を結ぶ監視用および制御用配線の間には、本質安全リレーおよび安全ヒューズの盤を設けて、電気設備が爆発等の事故の原因とならない措置を講じた。また自動シーケンス上の安全対策は最も重要である。この設備では操作員の誤操作や端末機器の誤動作、あるいはエンジンその他の設備ならびに制御機器類に異常をきたした場合の事故防止の為、操作員が行なうスイッチ操作の自動チェック回路や燃焼中の異常を検知する機構を要所にとり入れ、燃焼準備段階で操作員が誤操作を行った場合には自動に切り換わらなくなっており、またエンジン燃焼中は異常を検知した場合直ちに自動停止するようにした。さらに操作員の判断により直ちに運転を停止することが可能なように非常停止釦も設けた。一方実験中に起る不慮の停電に対しては、既設設備の蓄電池を内蔵した無停電電源を制御電源として共用し、万一停電の場合でも安全にエンジンを停止できる。また停電中のエンジンの監視は、既設テレビ監視装置にガソリン発動機を使用した発電機が備えられており、カラーテレビ画面によって監視することができる。

3.4.2 構成および構造

制御設備を構成する主なものは次のとおりである。

- i) LOX/LH₂操作監視盤
 - (a) 操作部
 - (b) 監視部
- ii) 監視計器および検出器
- iii) シーケンサ
- iv) 水素ガス検知装置
 - (1) LOX/LH₂操作監視盤
 - (a) 操作部

LOX/LH₂操作監視盤のスイッチボードから液体酸素供給系、液体水素供給系、ガス水素供給系、トーチ系、バージ系、エンジン冷却水系、および計測用圧力検出器



図 25 LOX/LH₂操作監視盤

大気開放用の各弁を押釦スイッチにより遠隔手動操作できる。これらの弁はLOX/LH₂エンジンの燃焼試験準備および燃焼試験に必要なものと、計測用圧力検出器が大気圧を基準レベルとして較正されており、計測前較正を行う場合に一旦大気に開放する必要がある、そのための弁である。またスイッチボードには、エンジンスタート釦、非常停止釦、イグナイタ釦、その他弁以外の釦スイッチ、および予備のスイッチが付いている。操作盤は操作性が良く誤操作しにくい構造であることが必要で、盤上の機器の配置は重要である。そこでスイッチの配置は実物大の紙型をつくり操作性の検討をおこない決定した。スイッチはボード上で各系ごとにまとめ、それを彫刻による線で囲み、操作員が判別し易いようにした。また非常停止釦は操作員に最も近い位置におき、イグナイタ釦は誤操作すると危険であるので操作員より比較的遠い位置に配置した。イグナイタスイッチには盤内部に直列にもう1個のスイッチを設け、万一誤ってボード上の釦を押した場合でも火花がでないように、イグナイタテストおよび燃焼試験を行う時以外はそのスイッチを開にして安全を確保するようにした。LOX/LH₂操作監視盤の外観を図25に示す。弁の開閉の状態は押釦内のランプの点滅で確認することができる。しかし大半はそのランプを盤からの出力によって点滅させているので実際に弁が正常に動作しているかどうか確認できない欠点がある。そこでその欠点を補うため、遮断弁等の重要な弁はリミットスイッチ付の弁を使用し、実際の弁の動作状態を確認できるようにした。またその出力は既設のイベントレコーダで開閉時間を記録できるよう配線を行なった。表11はこのLOX/LH₂操作監視盤より操作される弁を掲げたものである。リミットスイッチの有無を示してあるが、LOXおよびLH₂始動弁については弁リフトが特に重要であるのでポテンショメータを使用した。

燃焼準備操作および燃焼終了後の操作は操作員による

表 11 LOX/LH₂ 操作監視盤遠隔操作弁

弁 名 称	操 作 の 内 容	備 考
LOX 供給系 逃気弁	開 閉	
“ 加圧弁	“	
“ 遮断弁	“	リミットスイッチ付
“ 放出弁	“	“
“ 始動弁	“	ポテンショメータ付
LH ₂ 供給系 逃気弁	“	
“ 加圧弁	“	
“ 遮断弁	“	リミットスイッチ付
“ 放出弁	“	“
“ 始動弁	“	ポテンショメータ付
GH ₂ 供給系 放出弁	“	
“ 遮断弁	“	リミットスイッチ付
トーチ GO ₂ 始動弁	“	
トーチ GH ₂ “	“	
エンジン冷却水 逃気弁	“	
“ 加圧弁	“	
“ 遮断弁	“	
LOX ドーム圧設定調圧弁	増 減	
LH ₂ “	“	
GH ₂ “	“	
LOX エンジン バージ弁	開 閉	
トーチ GO ₂ “	“	
LH ₂ エンジン “	“	
LH ₂ 供給系 “	“	
トーチ GH ₂ “	“	
放出 スタック “	“	
LOX タンク ゼロバルブ	“	
LOX ライン “	“	
LH ₂ タンク “	“	
LH ₂ ライン “	“	
ミ キ サ “	“	
GH ₂ ライン “	“	
トーチ GO ₂ “	“	
トーチ GH ₂ “	“	
冷却水タンク “	“	

表 12 LOX/LH₂ 操作監視盤・監視項目および計器

監視項目	監視計器		備考
	検出器	指示範囲	
GN ₂ 操作圧	ストレンゲージ	50 kg/cm ² , G	
GH ₂ 元圧	"	200 "	
He 元圧	"	200 "	
GN ₂ パージ圧	"	50 "	
He パージ圧	"	50 "	
LOX 調圧弁ドーム圧	"	100 "	
LH ₂ 調圧弁ドーム圧	"	100 "	
GH ₂ 調圧弁ドーム圧	"	100 "	
LOX タンク圧	"	100 "	
LH ₂ タンク圧	"	100 "	
LOX 液面	差圧式	69 cm	
LH ₂ 液面	差圧式	180 "	
燃 焼 圧	ストレンゲージ	100 kg/cm ² , G	
エンジン温度	CA 熱電対	800 °C	
エンジン冷却水圧	ストレンゲージ	100 kg/cm ² , G	
エンジン冷却水出口温度	CA 熱電対	300 °C	
LOX 予冷温度	測温抵抗体	-200 "	
LH ₂ 予冷温度	"	-260 "	
インジェクタ予冷温度	CC 熱電対	-200 "	
エンジン冷却水タンク圧	ストレンゲージ	100 kg/cm ² , G	
低圧室圧	"	1 "	
LOX 流量	タービン	0.8 l/s	計測より分岐
LH ₂ 流量	"	3.8 "	計測より分岐
GH ₂ 流量	"	40 "	計測より分岐
エンジン冷却水流量	"	10 l/s	計測より分岐
GH ₂ 放出スタック温度	CA 熱電対	800 °C	

手動操作で行なわれるが、エンジン燃焼はシーケンスの制御によって行なわれる。シーケンス制御は後述のシーケンサと無接点リレーによる論理回路および信号設定器を組合わせて動作する。シーケンス制御はシーケンサが主体となって進行するが、シーケンサはピンボード式を使用しており、実験の目的によりシーケンサ前面のピンの差し換えのみでシーケンスを容易に換えることができる。シーケンサは燃焼用および停止用の 2 台使用してお

り、燃焼用シーケンサが終了すると続いて停止用シーケンサがスタートする。また燃焼途中で異常信号が現れると直ちに停止用シーケンサに移り燃焼を停止させる。

シーケンス制御は設定が正確であることと、その正確な動作が非常に重要である。この設備では自動シーケンスに必要な圧力や温度の擬似信号を与える回路、および盤の出力回路を現場の機器と切り離し、そのシーケンスプログラムを推進薬準備等で弁の開閉が不可能な場合で

もシーケンスの単体チェックができるようにした。

(b) 監視部

監視部ではLOX/LH₂エンジン燃焼試験操作を行なうに必要な圧力、温度、液面、流量、等を監視する。監視項目を表12に示すが、監視パネルにはこのほか確認ランプ6個および自動シーケンスの異常表示ランプが9個取り付けられている。指示計のなかで、LOXとLH₂の動作タンク圧力は高い設定精度が要求されるのでデジタル指示計を用いた。また推進薬が極低温のため、LOXおよびLH₂の供給ライン温度の監視は、その系統が十分に予冷されていないと推進薬がガス化して計画する流量と大幅に異なりを生じる等の問題があるので特に注意が必要で、これもデジタル表示にした。確認ランプは既設設備の運転状態と計測の準備状態および自動シーケンスの進行状態を表示する。また異常ランプはエンジン燃焼途中に異常が起き非常停止がかかった場合に、その原因を表示する。

10Lスタンド室付近で水素ガスが漏れた場合には水素

ガス雰囲気となり爆発等の危険にさらされる。この設備では現場とLOX/LH₂操作監視盤の間に本質安全回路を収納した盤を設置しこれに対処した。回路は本質安全リレーおよび安全ヒューズからなり、これらに接続した機器を表13に示す。LOX/LH₂操作監視盤にはこれまで述べたほか、燃焼時間表示器、計器用電源、インバータ電源装置、コンディショナーユニット、およびフィルターユニットが内蔵されている。

(2) 監視計器および検出器

本設備に用いた監視計器および検出器を表12に示すが極低温の温度監視用検出器には精度の良い白金測温抵抗体を用いた。液体水素、液体酸素、ガス水素の流量計は計測設備と共用し、指示計への信号は計測設備信号前処理部から分岐させた。

(3) シーケンス

シーケンスは燃焼用および停止用に2台使用している。燃焼用と停止用に使用した機種は同型で、和泉電気(株)製の3030TE型である。その主な仕様を表14に示す。

表13 安全回路に接続する機器

本質安全 リレー	LH ₂ 系放出弁開閉表示用リミットスイッチ
	LOX 放出弁 "
	LH ₂ 遮断弁 "
	LOX 遮断弁 "
	混合用GH ₂ 遮断弁 "
安全 ヒューズ	LOX タンク圧
	GN ₂ 操作圧
	LOX 調圧弁ドーム圧
	GN ₂ 元 弁
	LH ₂ タンク圧
	GN ₂ 調圧弁ドーム圧
	LH ₂ 調圧弁ドーム圧
	GN ₂ パージ圧
	He 元 圧
	He パージ圧
	エンジン冷却水圧
	燃 焼 圧
	点火器燃焼圧
	エンジン冷却水タンク圧

表14 シーケンスの主な仕様

一般仕様	電源電圧	AC100V/200V±10%
	周囲温度	0～40℃
	プログラム設定	ピンボード方式
動作仕様	工 程 数	30
	単歩進入力	接点入力 8μsec～1 sec
	確認歩進入力	接点入力 30m sec 以上
	復帰時間	30μsec 以内
	確認歩進応答時間	1/50 sec (50Hz)
	連続確認歩進時間	25ステップ/sec (50Hz)
出力仕様	出 力 数	30
	出力方式	無接点オープンコレクタ出力
	出力容量	DC24V, 300mA (max)
タイマ仕様	回路構成	無接点デジタルクロックタイマ
	基本単位時間	1 sec
	倍率 (ピン設定)	0.1 sec, 1M, 1H
	タイマと, E.P.S	各工程毎 AND-OR ピン設定
	JUMP 回路	有

(4) 水素ガス検知装置

水素ガスが漏洩した場合に付近は非常に危険な状態におかれる。万一漏洩した場合には直ちにそれを発見し適当な措置をとる必要がある。また液体水素およびガス水素は実験期間外にも動作タンクや配管内に残留する事が考えられるので常時監視する必要がある。この設備では計測制御室内に制御盤とは独立させて水素ガス検知盤を設け、常時監視を行なうようにした。また漏洩水素ガスを検知した場合には計測制御室とスタンド室に取り付けられた警報ブザーにより知る事ができる。水素ガス検知器はスタンド室内 4 箇所、 LH_2 サービスタンク付近および低压室内各 1 箇所の合計 6 箇所に設置し漏洩の可能性のある場所をカバーした。警報濃度は 400 ppm に設定してある、また検知盤には 6 個の濃度指示計が付いており最大 1000 ppm まで読みとることができる。使用した機種は、新コスモス電気(株)製の BM-204-6 型で計測制御室に設置された検知盤を図 26 に示す。

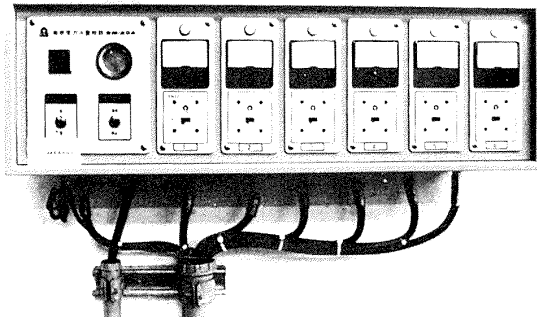


図 26 水素ガス検知盤

3.2.5 自動シーケンス

LOX/LH_2 エンジン燃焼自動シーケンスのフローチャートを図 27 に示す。また自動シーケンス燃焼試験の代表的な操作シーケンスの一例を図 28 に示す。

現場の手動操作および LOX/LH_2 監視操作盤からの遠隔操作により燃焼準備が整った後自動切り換えを行なう。既設設備排気系 OK の条件が整うのを待ち、OK になった時点でエンジンに点火する。点火鈕を操作員が押すと自動的に計測装置がスタートする。計測装置がスタートすると信号が発せられ燃焼シーケンサがスタートする。またそれと同時にスパーク点火装置が ON およびトーチ GH_2 始動弁が開になる。燃焼シーケンサがスタートした後はその設定に従いシーケンスが進み燃焼が行なわれる。設定された燃焼時間を経過すると停止シーケンサに移り

エンジン停止の工程にはいる。点火から停止までの間には、トーチ着火およびエンジン着火は自動判断が行なわれる。またエンジン温度、エンジン冷却水出口温度、燃焼圧力については燃焼中継続して自動判断が行なわれ、異常を検知した場合には同様にエンジンは停止される。自動停止された場合には前述の異常ランプが点灯し異常を発したところが知らされる。一方操作員が監視計器等で異常を判断した場合には非常停止鈕を押すことにより緊急停止操作が可能である。燃焼が終了すると既設設備監視盤に新たに設けた燃焼終了ランプが点灯し、既設排気系の操作員はそれを確認して排気系を停止させる。

3.5 計測設備

3.5.1 構成

計測設備の増設としては、既設のデータ収録システムを利用し、液水化に伴って必要となった検出器、シグナル・コンディショナ配線および配管工事をおこない、一部防爆対策をおこなうに止めた。

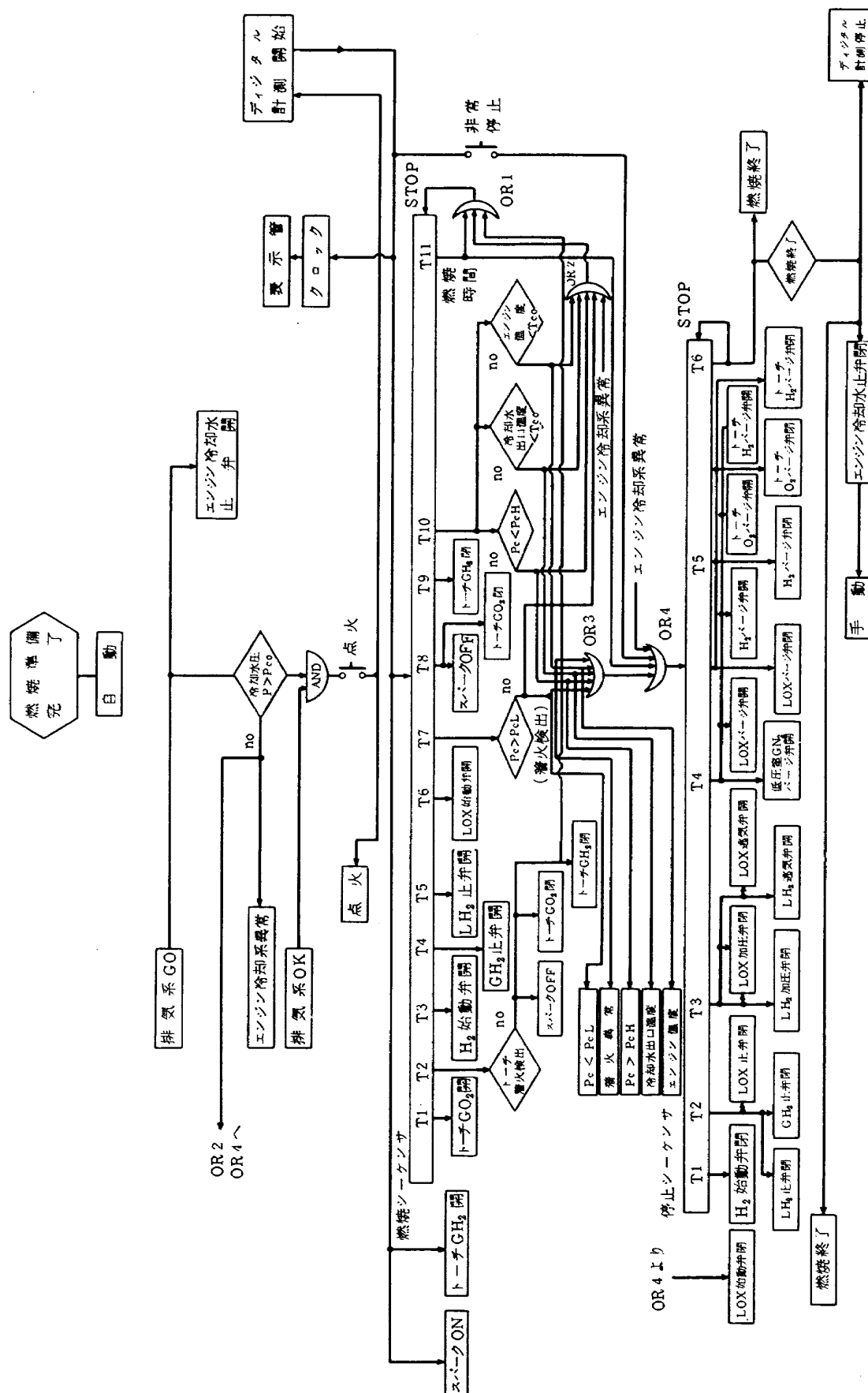
検出器は、ストレンゲージ型圧力変換器、極低温用白金測温抵抗体、熱電対、流量計からなる。追加を要した検出器および測定項目を表 15 に示す。温度測定のため、既設信号前処理装置ラックにシグナル・コンディショナを 10 チャンネル増設した。検出器より既設中継盤まで圧力 11 チャンネル、温度 8 チャンネル、流量 6 チャンネルのケーブルの増設をおこなった。

安全対策として、圧力変換器は窒素パージをおこなった電磁弁箱へ収納するほか、シグナル・コンディショナ内の印加電圧の+側に高速遮断ヒューズを設けた。流量計パルスのピックアップと前置増幅器のケーブル長が限られるため、増幅器は各チャンネル毎に別個の窒素パージボックスに入れた。

3.5.2 温度測定系

(1) 白金測温抵抗体信号系

本信号系は、既設の計測設備を変えずに利用することを重視して、ブリッジ式のもの、つまり白金測温抵抗体の電源および較正電圧をシグナル・コンディショナより供給する方式をとった。極低温の液体水素および液体窒素温度近辺の温度測定には、CC 熱電対を使用した計測点もあるが、性能計算上重要な計測点には白金測温抵抗体 (ROSEMOUNT 社製, MODEL 134 PM, 千野製作所製, RSK3-0 型) を使用した。白金測温抵抗体による温度測定には、定電流方式を使用するケースが多いが、ブリッジ方式でも温度測定が可能であり、その温度近辺で較正すれば精度上問題はない。この場合に、精度上で一番影響を与える要素は較正用抵抗の温度変動と、測定場所と計測場所の距離が長い場合の伝送線相互の干渉である。これらを考



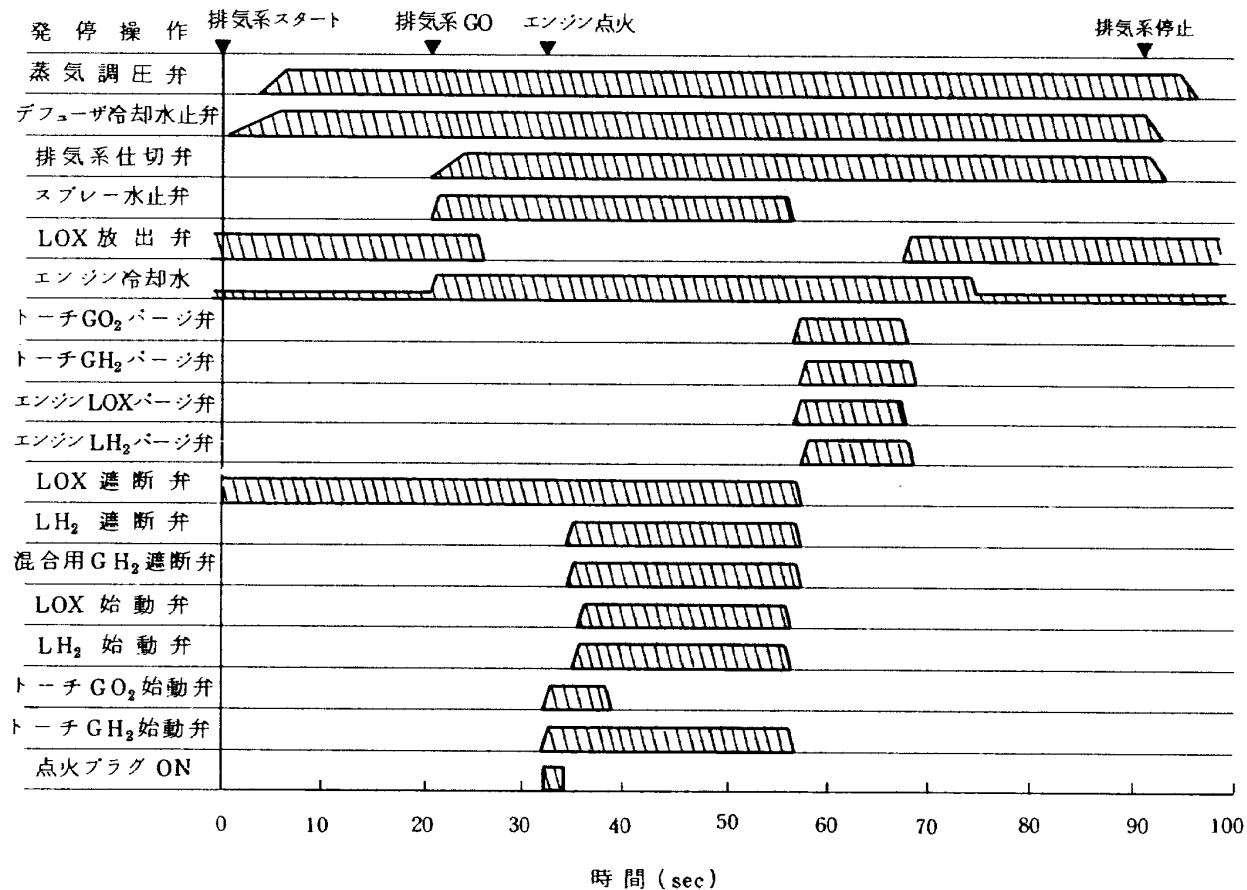


図 28 燃焼試験における操作シーケンスの一例

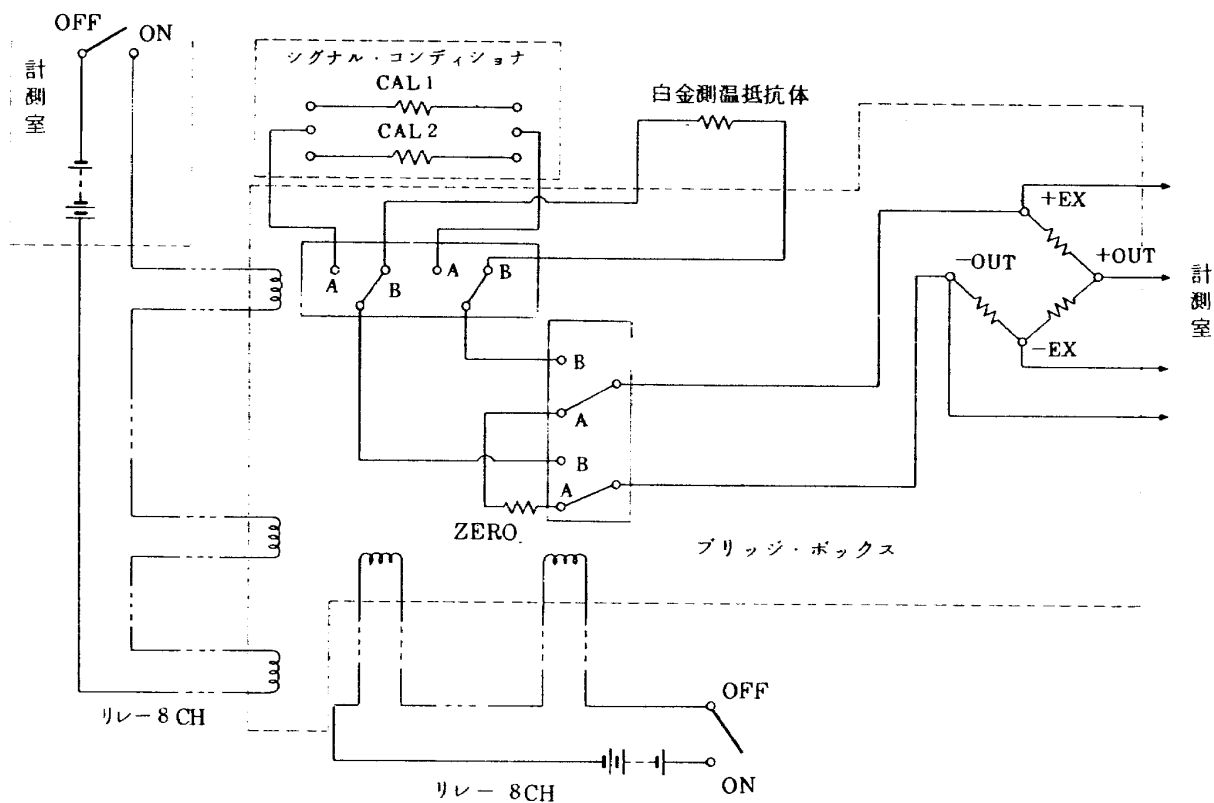


図 29 白金測温抵抗体較正系

表15 測定項目および検出器

測定項目	検出器		測定項目	検出器	
	型	名		型	名
推力	SHINKOH & BLH T3P1-1T		GH ₂ ライン温度	CHINO	RDN2-0-RN1-320
LH ₂ タンク圧	同上		H ₂ インターフェース温度	CHINO	CK05
GH ₂ ライン圧	同上		トーチGH ₂ ライン温度	CHINO	CK05
LH ₂ 供給ライン圧	同上		混合器出口温度	ROSEMOUNT	134PM
混合器圧	同上		LOX タンク温度	ROSEMOUNT	134PM
トーチGH ₂ ライン圧	同上		LOX 供給ライン温度	CHINO	RDN2-0-RN1-450
LOX 動作タンク圧	同上		LOX インターフェース温度	CHINO	CK05
LOX 供給ライン圧	同上		トーチGO ₂ ライン温度	CHINO	CK05
LOX エンジン供給ライン圧	同上		エンジン冷却水入口温度	CHINO	CK05
トーチGO ₂ ライン圧	同上		エンジン冷却水出口温度	CHINO	CK05
エンジン冷却水圧	同上		LH ₂ 流量	COX FCRL- $\frac{3}{4}$ (12)1- $\frac{1}{2}$ GR11	3.8 ℓ/s
エンジン燃焼室圧	同上		LOX 流量	COX FCRM $\frac{3}{4}$ (10)-600	0.8 ℓ/s
エンジン冷却水出口圧	同上		混合用GH ₂ 流量	COX FGL- $\frac{1}{4}$ "-600	40 ℓ/s
エンジン冷却水タンク圧	同上		エンジン冷却水流量	TOKIKO 5000シリ-ズNo.11	10 ℓ/s
LH ₂ タンク温度	ROSEMOUNT	134PM	トーチGH ₂ ライン流量	YEW FOR-25A-EHC-32	0.5 ℓ/s
LH ₂ ライン温度	ROSEMOUNT	134PM	トーチGO ₂ ライン流量	YEW FOR-25A-EHC-32	0.5 ℓ/s

慮に入れると、この影響をお互いに打消することができるブリッジ方式にすることが好ましい。この方式は従来のストレンゲージ圧力計等と同様に抵抗値が測定温度範囲の最低と最高の2点に相当する校正用抵抗によって構成したふたつのブリッジ出力のあいだを直線的に補間して計測時の温度を求めるものである。従って、この方式で測定精度を上げるためには、校正用の抵抗値はできる限り測定温度近辺の测温抵抗体のそれに取りなければならない。測定温度が校正用の抵抗値に相当する範囲を大きく外れると測定精度は悪くなる。

白金测温抵抗体による温度測定系の結線図を図29と図30に示す。操作性の観点からブリッジボックスを中継盤に置き、3辺のブリッジ抵抗はCAL(校正)の第一ステップに近い値に合わせて、CALの第一ステップと第二ステップの間隔をできるだけ大きく増幅できるようにして、その間の温度測定の精度を上げた。この場合に、测温抵抗体の許容電流が数mAなので0°Cの時100Ωの白金测温抵抗体の場合には、白金测温抵抗体およびCAL用抵抗と直列に1KΩの抵抗(TDK-ACI, 抵抗値許容差±

0.01%, 抵抗温度係数 $0 \pm 5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)を挿入して許容電流値以下にした。また、液体水素温度の測定に使用する0°Cの時5KΩの白金测温抵抗体の場合には、CALの第一ステップが100Ω近辺に成るので、増幅度を上げるためにブリッジ抵抗を100Ωにすればよいが、この場合電流値の制限によりブリッジへ加わるEXCITE電圧を1V以下にする必要がある。このようにするとシグナル・コンディショナ内のEXCITE電圧による誤差が大きくなるのでEXCITE電圧を2V以上にして、CAL抵抗に直列に1KΩを挿入した。零バランス用抵抗には、1KΩを使用して増幅度を大きくし、計測前に零バランスの調整を行ないCAL1とCAL2の抵抗に切り換えて、計測前の準備終了後、测温抵抗体側に切り換える。ENDEVCO社製のシグナル・コンディショナは、CAL抵抗がブリッジの一边へ並列に加わるように成っているために、リレーの操作によりCAL用抵抗と测温抵抗体との切り換えができるようにした。

(2) 熱電対信号系

低温用にはCC, 常温～高温用にはCA熱電対を使用した。検出器から基準温度装置¹⁾まで同一材質の補償導

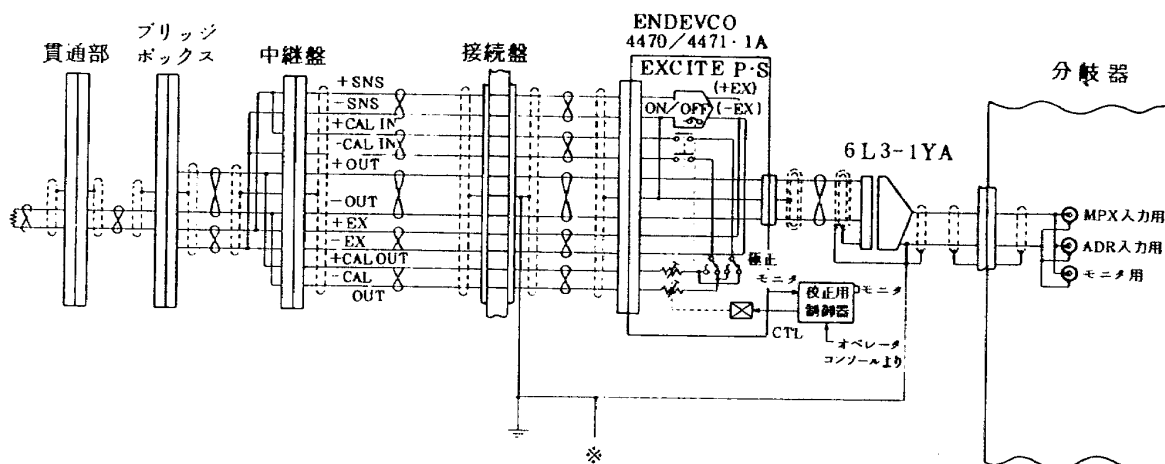


図30 白金测温抵抗体信号系

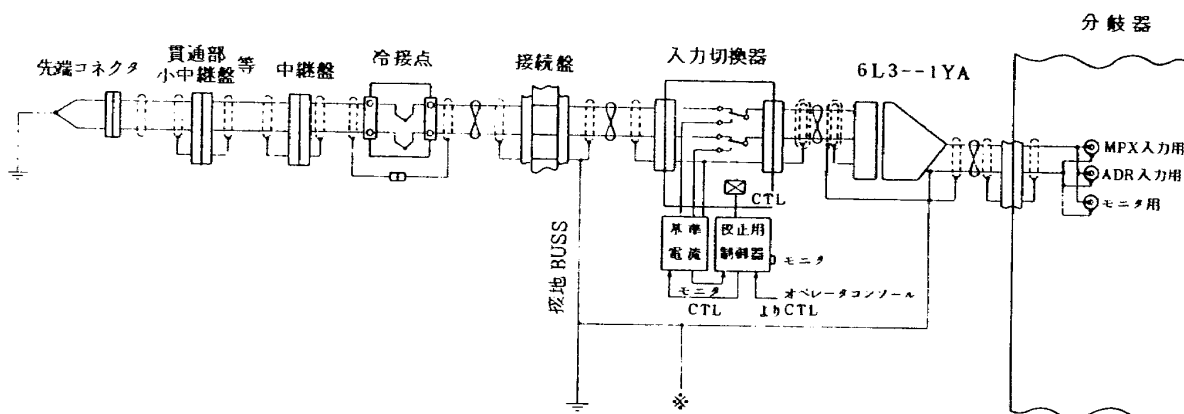


図31 熱電対信号系

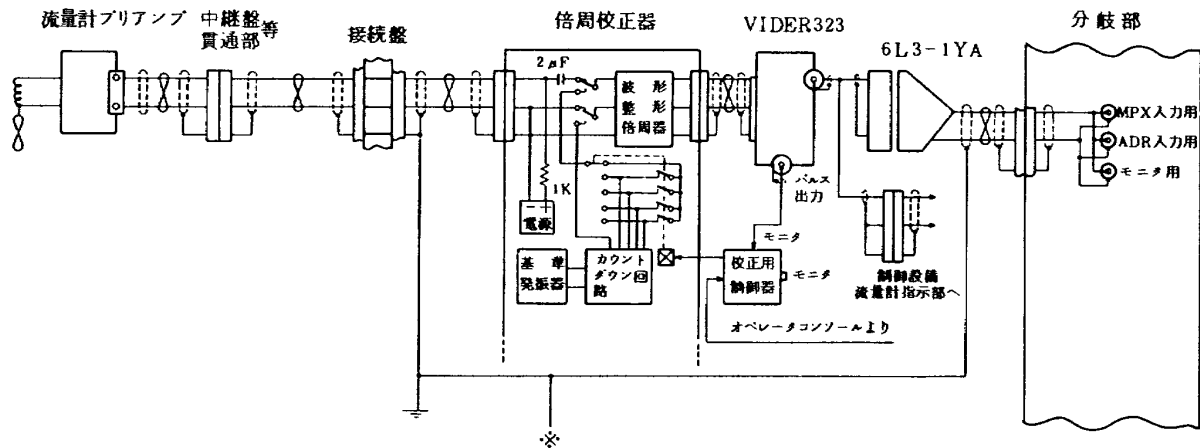


図32 流量計信号系

線を使用し、検出器と補償導線の接続にもクイック・コネクタを使用した。またノイズによる影響を防ぐため、中点アース方式をとった(図31)。

(3) 流量測定系

液体水素、液体酸素、ガス水素及びエンジン冷却水用には、各々1個のタービン流量計を使用し、トーチ用ガス水素及びガス酸素用には各々1個のオリフィス流量計を使用した。その主な仕様を表15に、タービン流量計の結線図を図32に示す。タービン流量計の出力パルス信号はプリアンプを用いて既設のF-V変換器に入力される。オリフィス流量計による流量測定では、ストレンゲージ式差圧変換器と絶対圧力変換器及び熱電対による温度の出力をデジタル計測し、後にソフト上で処理計算することにより流量を算出した。

3.5.3 制御系-計測系信号の授受

既設計測設備へ新設制御盤から、オンライン自動計測の制御信号の授受ができるようにした。これは、新設制御盤で燃焼準備完了後、点火ボタンを押すことによりリレー接点信号を出力し、計測側へ送り計測開始と同時に、計測設備側から計測OK信号を新設制御設備に送るものである。

3.6 供試燃焼器およびデフューザ

供試燃焼器は設備の機能の確認を目的とする燃焼試験に用い、ひき続いて高空性能の研究に用いるものである。既設デフューザ¹⁾(直円筒型デフューザ、内径116mm)は計画した供試燃焼器ではスタートしない。供試燃焼器と既設デフューザを亜音速作動領域の零2次流エゼクタとして作動させた場合、ノズルにおいて流れがはくりする可能性が大きかったので、供試エンジンに対して別途デフューザを新設することにした。

3.6.1 供試燃焼器

供試燃焼器は昭和52年度に宇宙開発事業団(NASDA)

が試作し広範囲の試験をおこなったものを基本にしている。表16にその設計諸元を示す。図33に燃焼器の組立図を示す。ノズルスロート部からその下流の内径寸法は、NASDAによって開発が計画されている10トン級エンジンのノズルの寸法の $\frac{1}{5}$ のスケールに相当する。インジェクタは18コの同軸エレメントをもつものでNASDAの基礎試験用燃焼器のそれとほぼ同一設計である。着火は GH_2 、 GO_2 によるトーチ着火器によるもので、着火器はNASDAの基礎試験用燃焼器のそれと同一型式であるが、フランジ部は熔接構造となっている。

燃焼室はNASDAの基礎試験時の熱伝達データをもとにした設計でミゾ付の銅製内筒にステンレス鋼の外筒をロウ付けした構造であり、ノズル膨張面積比16の位置で熱吸収式軟鋼製のノズルイクステンションと結合される。冷却チャンネルの設計には実測熱流束と、三菱重工業(株)が開発した簡便な方法を用いた。この方法はあたえられた熱流束に対して冷却チャンネル内でバーンアウトを起さないことを条件としたものである。ノズルイクステンション部の軟鋼の肉厚は単純化されたBartzの式³⁾の係数を前記の実験データで補正してガス側の熱伝達係数を求め、ノズルの各軸方向位置において外面が断熱された円筒からなるものとし(すなわち、軸方向への熱伝導を無視する)、30秒の燃焼時間内にガス側の壁面温度が 800°C をこえないことを条件として決定した。ノズルイクステンション部には静圧測定孔の外に図34に示す簡単な構造の熱流束ブローブが装着できるようにした。熱流束ブローブはガスに接する表面(ノズル内面)に高純度の銅片をおき、その温度を非定常的に測定することによって表面に垂直方向の熱流束を測定しようとするものである。この試作ブローブはブローブ当りの温度計測が1点ですみ、構造が簡単で頑丈であるが、金属片の断熱が不十分なので、精度の良い測定にはブローブの適当

表 16 供試燃焼器設計諸元

項 目	単 位	諸 元	備 考
推 力	kg	415	目 標 値
燃 焼 室 圧	kg/cm ² , a	35.4	インジェクタ端
混 合 比	—	5.0	酸化剤／燃料
推 進 薬 流 量	kg/sec	0.925	
比 推 力	sec	448.5	目 標 値
燃焼室円筒部径	cm	6.6	
ノズルスロート径	cm	2.8	
水冷部出口径	cm	11.2	
ノズル出口径	cm	33.1	
ノズル膨脹面積比	—	140	75%ベルノズル
燃焼室収縮面積比	—	5.56	
特 性 長	cm	73	
インジェクタエレメント数	—	18	同軸エレメント
LOX 温 度	°K	94	インジェクタ入口(標準値)
H ₂ 温 度	°K	120	インジェクタ入口(標準値)
冷 却 水 流 量	kg/s	4	
点 火 器 型 式	—	—	ト ー チ 式

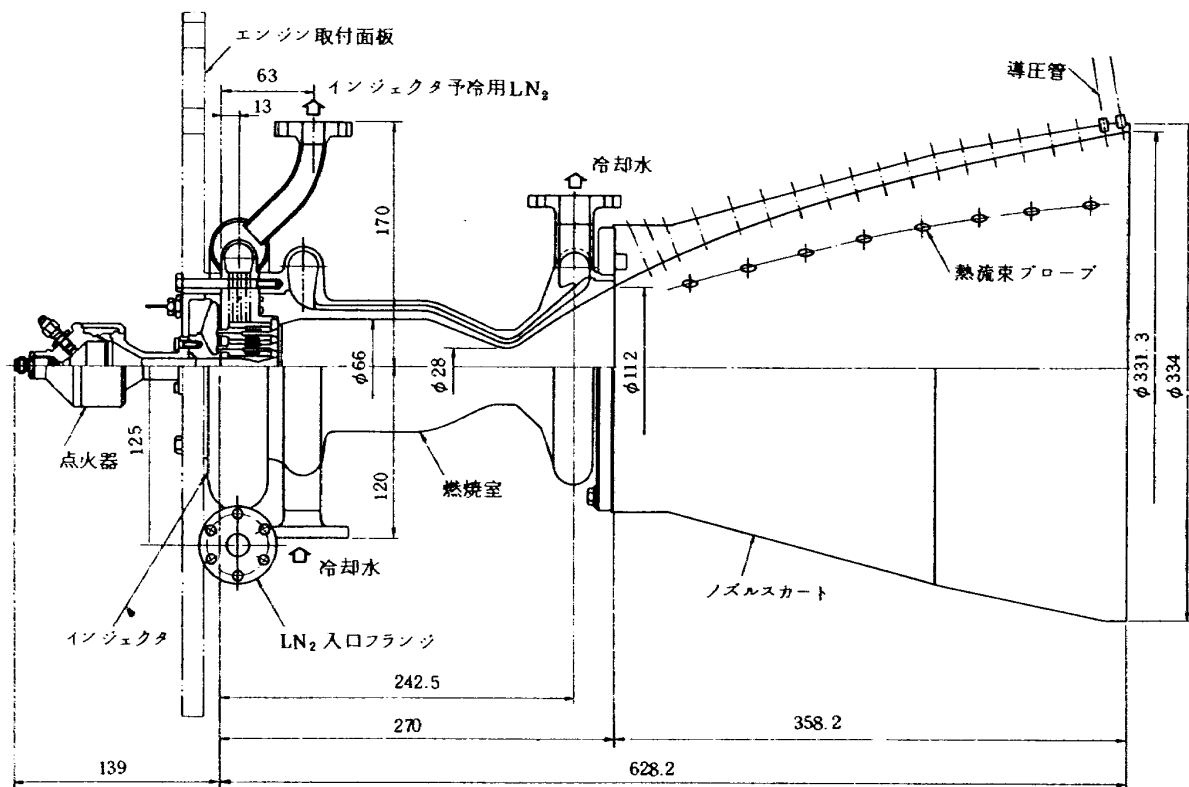


図 33 燃焼器組立図

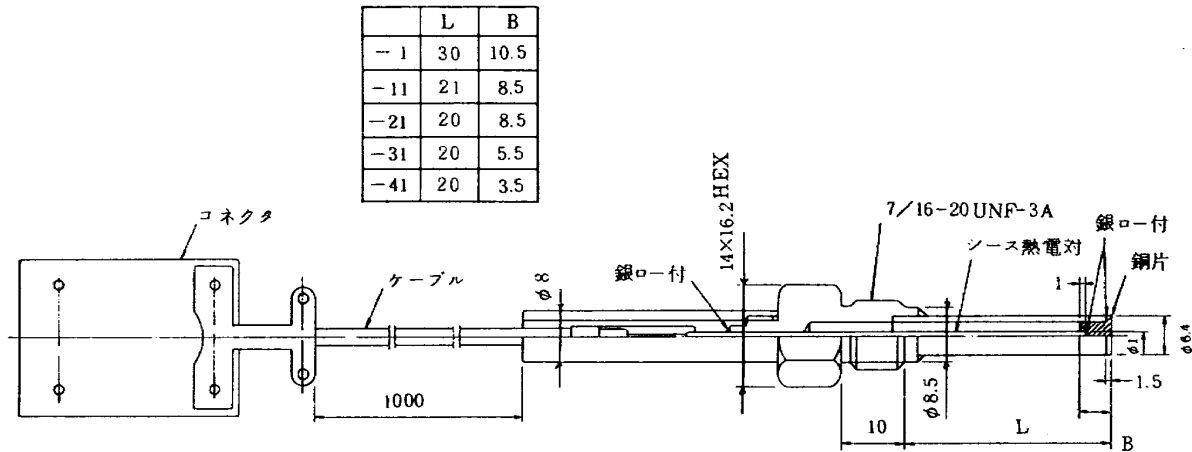


図34 熱流束プローブ

な較正方法を考えなければならないものと思われる。

3.6.2 デフューザ

前節の供試燃焼器とNロケット第2段用LE-3型エンジンの試験のために作られた既設デフューザを組み合わせるとき、スタート圧力比(スタート時の燃焼室圧 P_c /デフューザ背圧 P_b)は966となり、 $P_c = 35 \text{ kg/cm}^2$ 、Aとした場合スタートに必要な背圧 P_b は27 torr以下となり、既設エゼクタ系を用いて燃焼時に予想される背圧約50 torrではスタート条件を得ることはできない。燃焼器の試験のためにはノズルのフルフローさえ確保されれば良いという立場に立つとして、超音速作動領域のエゼクタ¹⁾として作動させるとすれば、低圧室圧は約24 torrとなり、ノズルのフルフローとはくりの限界的な値となり、種々の不確定要素、たとえばはくり圧力比の推定、物性値の効果、燃焼ガス冷却用スプレ水量の調節精度、燃焼室圧力の設定精度等を考慮すれば、既設デフューザと供

試燃焼室を組み合わせた場合のノズルフルフローの確保は困難であると判断した。

表17に供試燃焼器について新しく製作したデフューザの設計諸元を示す。図35にデフューザの系統図を示す。新設デフューザは既設デフューザ内に取りつけたレールによってそこへ挿入され、既設デフューザ入口部でシールする。冷却通路は内筒の外径に直径10mmのロッドを上流部では150mm、下流部では160mmのスペンでらせん状にまき、その上から外筒をかぶせることによって形成される。最も予測が困難なガス側擬似衝撃波部の熱伝達のオーダーを求めるため、冷却水通路は4つのセクションに分れている。ガス側の熱伝達率の推定に当っては、セカンドスロートデフューザの流れモデル⁴⁾によって軸方向の静圧分布を仮定し、Cuffelら⁵⁾によって提案された熱伝達係数が静圧の0.8乗に比例するとする関係を用いた。この方法では超音速部の熱伝達係数が直円筒の熱

表17 デフューザ設計諸元

項 目	単 位	諸 元	備 考
入 口 径	mm	381.8	
入口平行部長	mm	195	
セカンドスロート入口半頂角	度	~ 12	
セカンドスロート径	mm	296	
セカンドスロート長	mm	2368	
セカンドスロート長さ/径	—	8.0	
超音速デフューザ半頂角	度	~ 6	
超音速デフューザ出口径	mm	420	
冷却水チャンネル幅	mm	150, 160	スパイラル状チャンネル
冷却水チャンネル高さ	mm	10	
冷却水流量	ℓ/s	12	
ブレイクダウン圧力比	—	78.5	供試燃焼器に対し

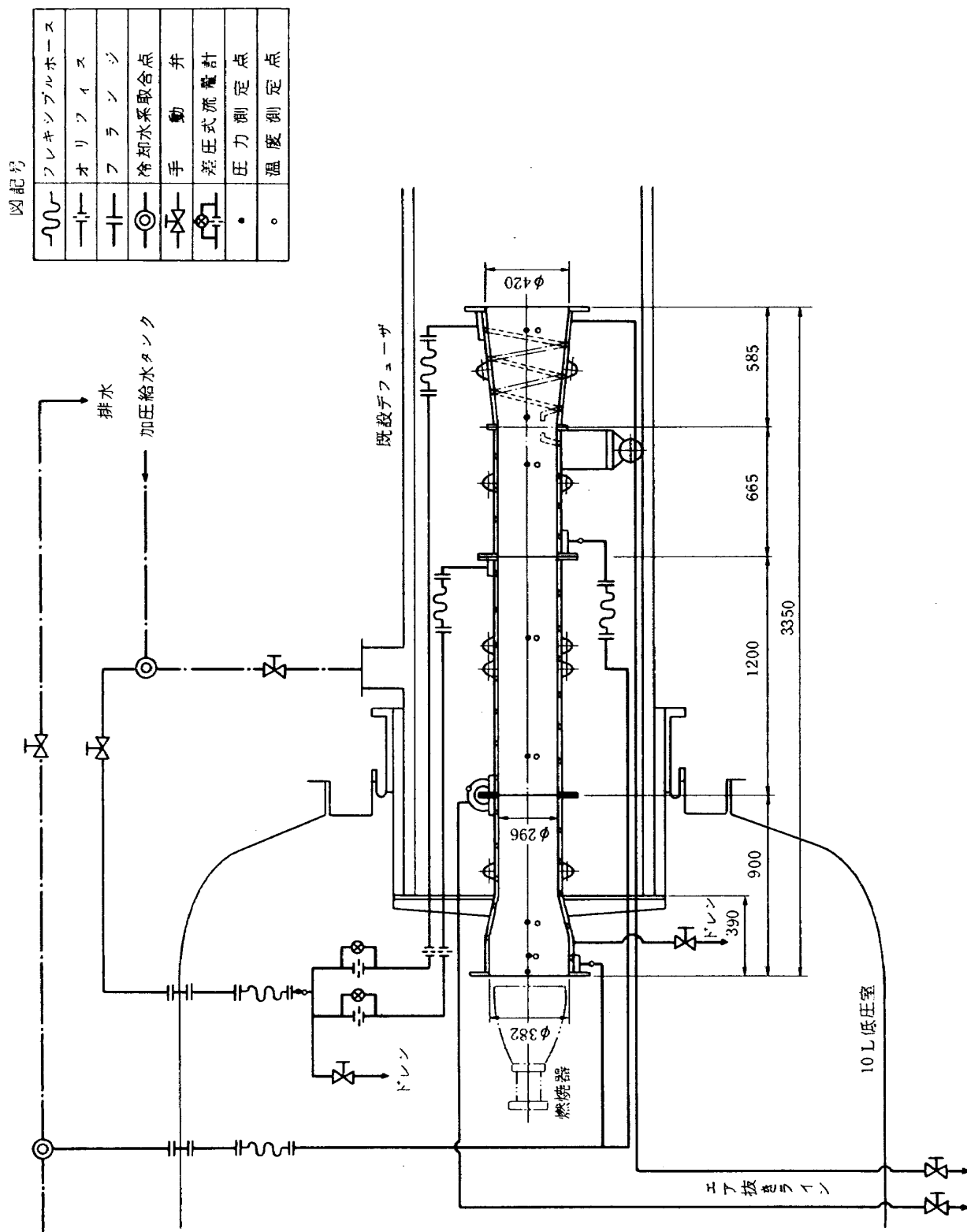


図 35 デフューザ系統図

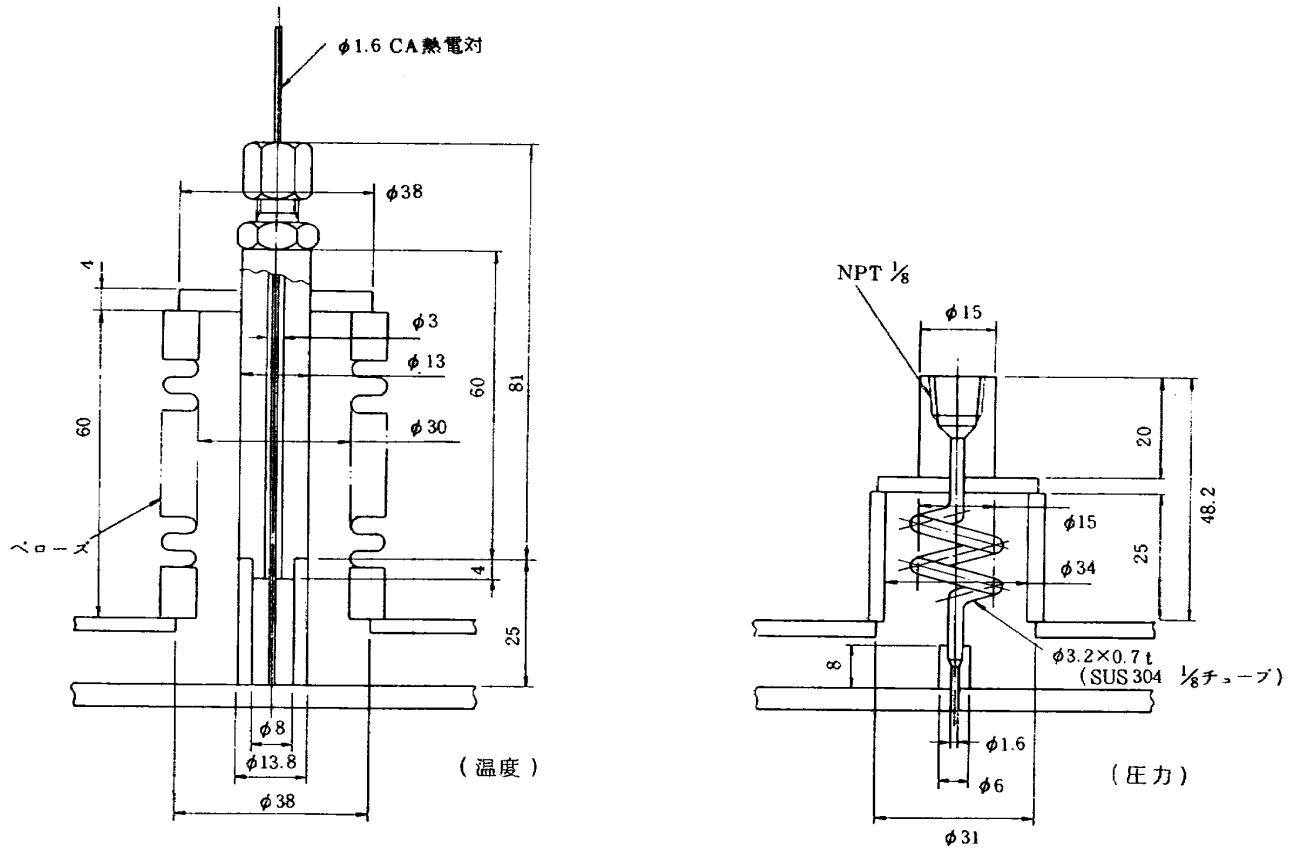


図36 測定ポート

伝達式から求めたものゝ数倍となったが、安全側の値として用いた。冷却チャンネルの熱伝達には相当直径の考え方と $Nu = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.4}$ によって熱伝達係数を算出し、メタル温度が 130°C をこえないことを条件とした。図35に図式的に示すように、内筒と外筒との熱膨脹の差による変形を防ぐため、内筒と外筒はフランジ部以外では溶接されておらず、外筒フランジ間に伸縮部がもうけられている。

デフューザには軸方向に6点の静圧孔と同じく6点の冷却水側の壁面温度の測定を試みるためのポートがもうけられている。内外筒の位置ずれを許容するために圧力と温度の測定ポートは図36に示す構造とした。温度測定部は熱電対の金属表面への溶接が困難であったため、シリコングリースを熱電対先端につけ、しめつけ金具によって表面へ押つけることによって表面における接触抵抗を減少させようとした。

既設エセクタ系の能力からすれば、デフューザ入口径は表17に示した値よりも大きくすることが可能であり、ノズル出口面とデフューザ入口面との距離を大きく取り得、低圧室内の作業性は良くなったのであるが、ここでもNASDAによって開発が計画されている10トン級エンジンの $1/5$ スケールの供試燃焼器との一貫性をもたせるために可能なフルスケールデフューザの $1/5$ スケールモデル

と考えた設計をおこなった。この形状で、既設エセクタ系を通常の操作条件で用いた場合には背圧は十分低く、スタート時の燃焼室圧は約 6.4 kg/cm^2 、A以下という計算になる。デフューザ背圧によって圧力回復がおこなわれる擬似衝撃波部の位置と長さが異なり⁶⁾、熱伝達特性は異なったものとなる。従って実際にデフューザのスタート特性および熱伝達特性を求めるためには、蒸気調圧を下げ第2段単独で蒸気エセクタを運転する等によりエセクタの能力を落して試験をおこなう必要がある。

3.7 コールドフロー試験

コールドフロー試験、すなわち、燃焼を伴わない流量特性試験は、燃焼試験設備の領収試験としておこなわれたものであり、冷却水系の流量試験、LOX系、 LH_2 系の LN_2 流しによる機能確認試験等が実液コールドフロー試験に先立っておこなわれたが、本節では実液コールドフロー試験の結果について述べる。

3.7.1 LOX系

すでに述べたように、LOX系配管は LN_2 ジャケットによって予冷がほどこされているが、フランジ部、流量計および弁類はグラスウールによる簡易断熱のみに止められている。ジャケット部に LN_2 を流すことによって配管予冷を十分におこない、予冷を継続しながらLOXにより始動弁の上流まで実液による予冷をおこなった後に、

燃焼器を通して LOX を流す手順をとった。流量試験時と燃焼試験時の圧力レベルをほぼ同一にするため、燃焼器スロート部に図 37 に示すような特殊な金具を作り、燃焼室から推進薬を低圧室外へ通じる配管へ接続し、接続部にオリフィスを入れた。

図 38 に LOX 配管系の流量特性を示す。・印のデータは 1 回の試験中に段階的に動作タンク圧を上げて取得したデータであり、○および◇印のデータは燃焼試験時と同じように試験中にタンク圧の設定を変えないで取得したデータである。圧力レベルおよび流量レベルによって

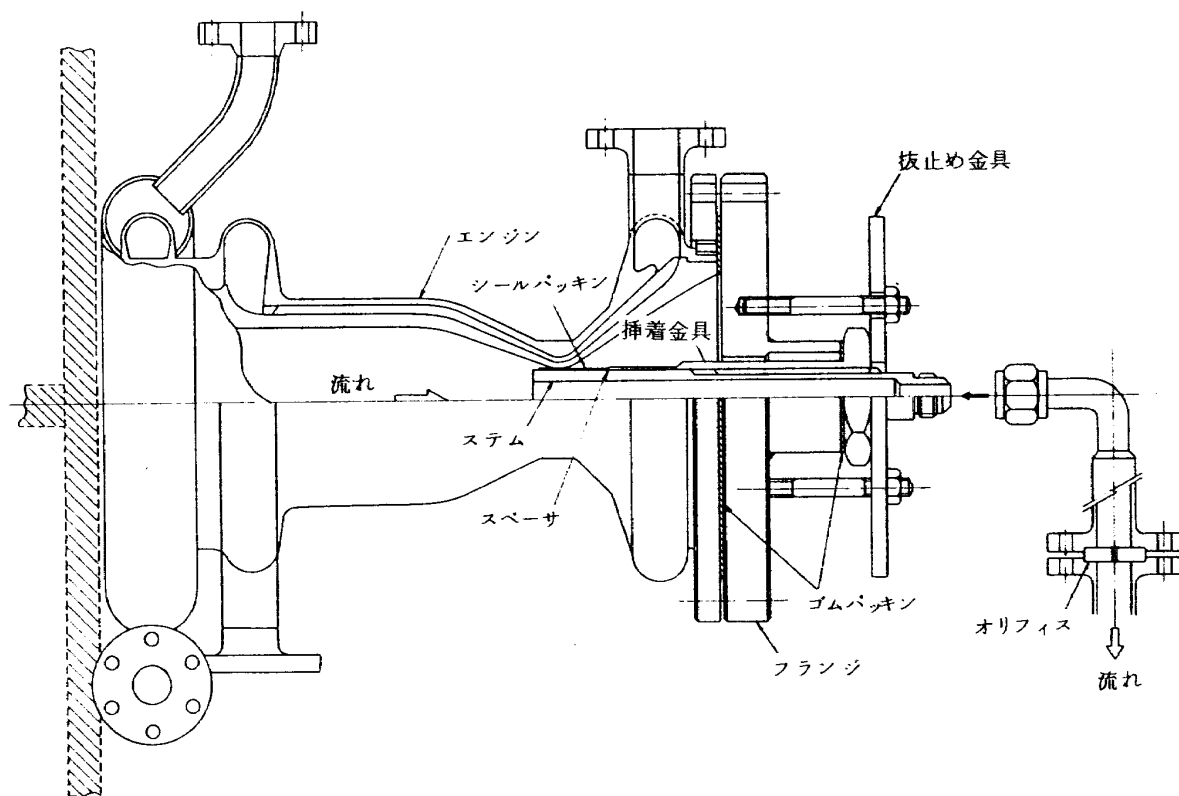


図 37 コールドフロー試験用金具

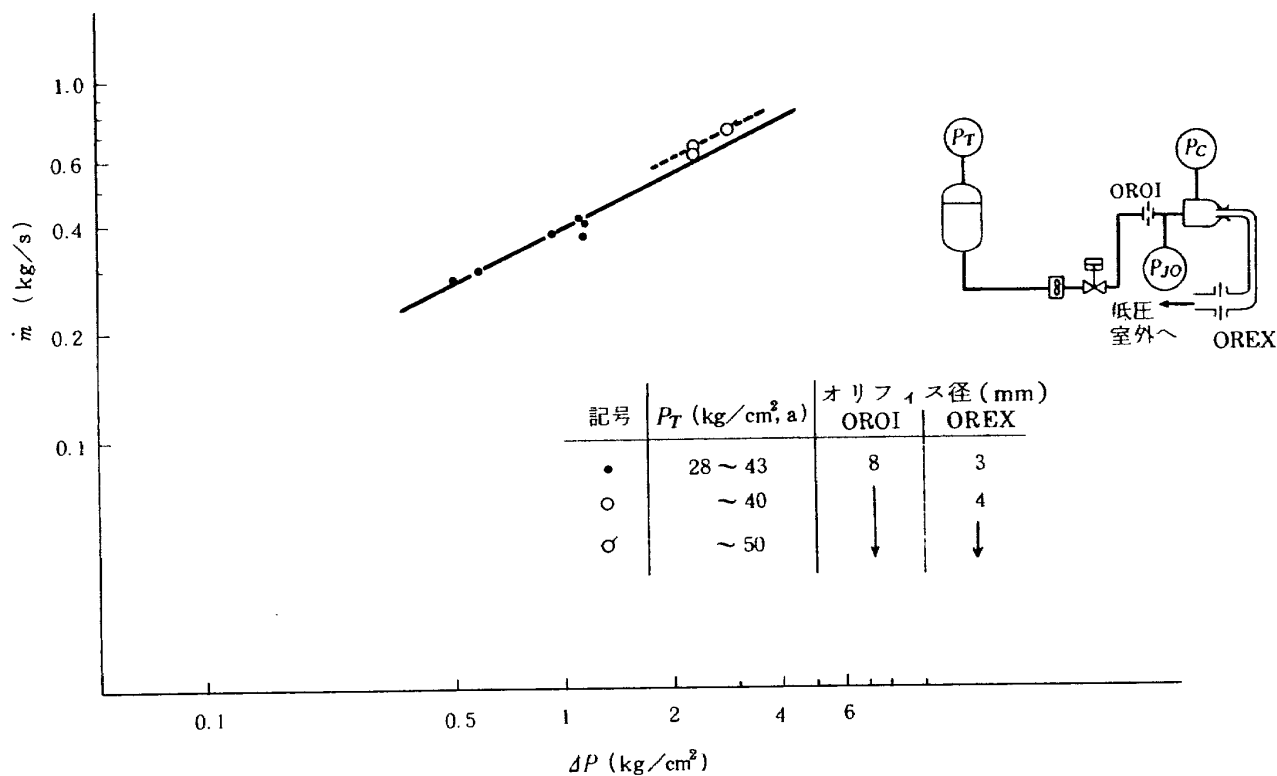
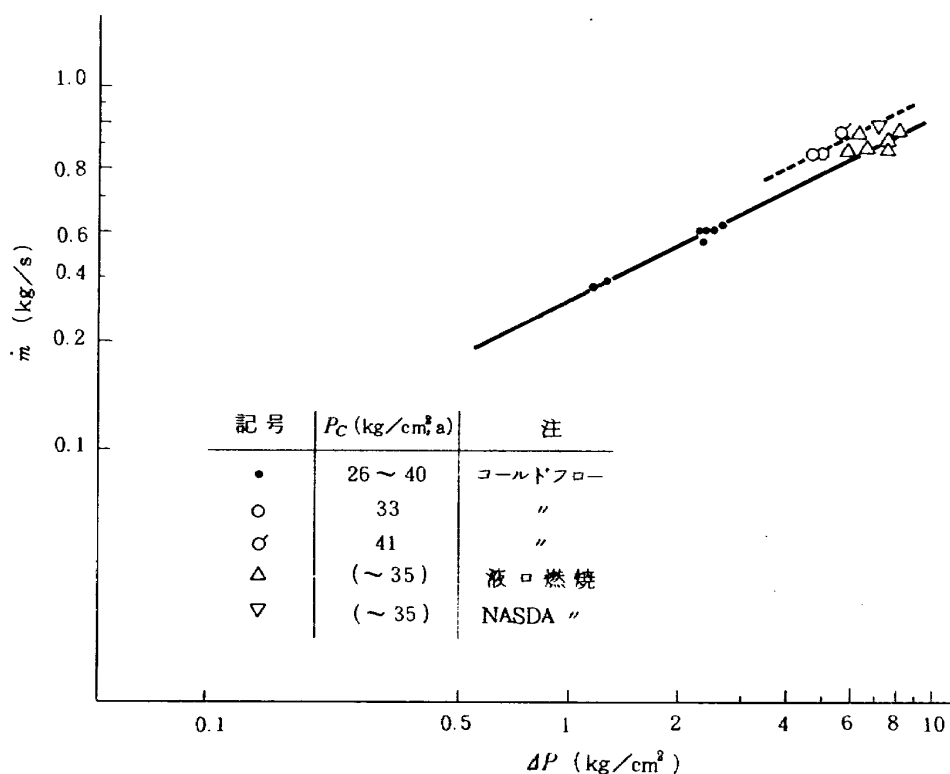


図 38 LOX 配管系流量特性 ($\Delta P = P_T - P_{JO}$)

図 39 LOX インジェクタ 流量特性 ($\Delta P = P_{JO} - P_C$)

わずかに流量特性が異なるように見える。図 39 に LOX インジェクタの流量特性を示す。当所液体ロケット研究室および NASDA における同型式のインジェクタを用いた燃焼試験時の流量特性と、ここで求めたコールドフロー試験時のそれはほぼ一致する。燃焼室が低圧室内にあるために、実際の燃焼試験時にインジェクタを通して実液予冷をおこなうことが困難であり、実液予冷用 LOX は始動弁の直前にある放出弁から低圧室外へ放出する方法を取っているが、この予冷方法、配管系の簡易断熱部、あるいは流量試験法に起因すると思われるが、LOX 流量はタンク圧 50 kg/cm²、G レベルにおいても定常値に達するまで数秒かかった。

3.7.2 L₂ / G₂ 系

3.2 節で述べたように燃料系統は実際のエンジンの再冷却後の水素が燃焼室へ供給されることをシミュレートするため、液体水素と常温の水素ガスとを混合して燃焼器入口温度の設定をおこなう方式をとり、始動弁の手前まで弁類、流量計を含めて真空断熱をほどこした配管系となっている。L₂ による始動弁直前までの予冷を十分おこなった後、混合器部下流を GHe によってパージをおこない流量試験にはいる。

図 40 に混合器出口までの流量特性を示す。• 印および ▲ 印はエンジンをつけずに、L₂ タンク圧を一定値 39 kg/cm²、a として 1 実験中に G₂ 調圧を段階的に変えて

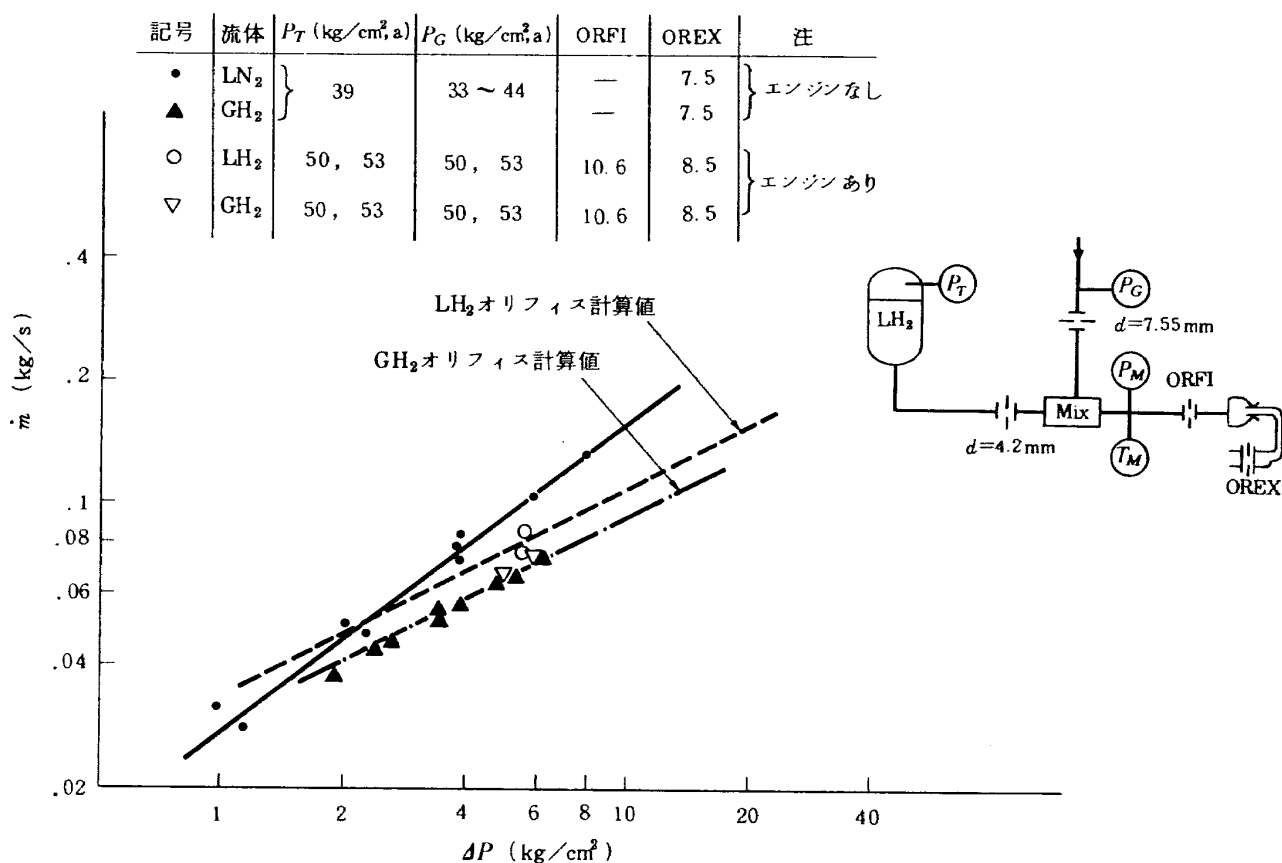
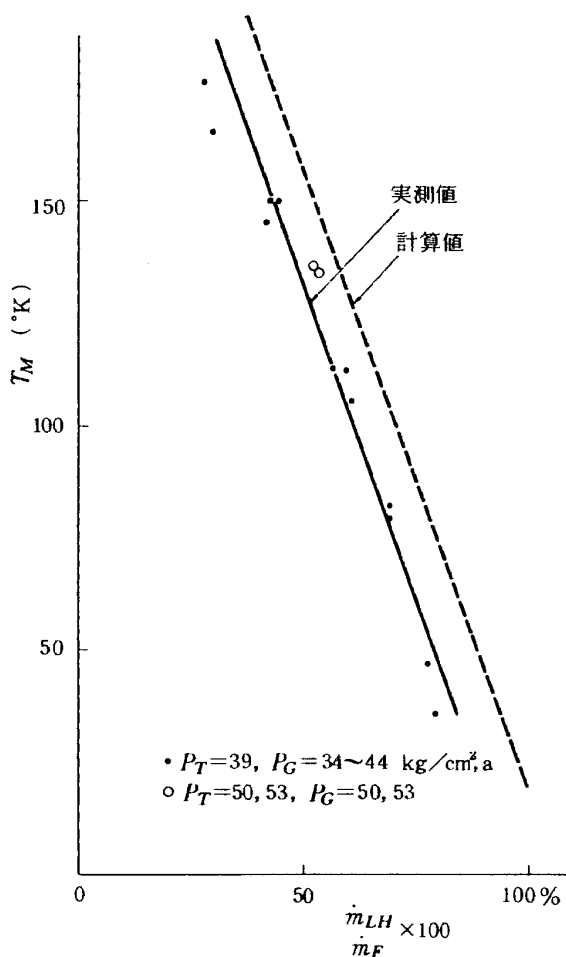
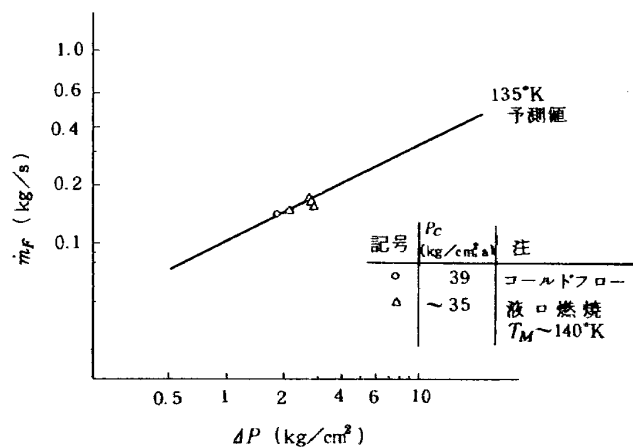
おこなった実験データを示す。○ 印および ▽ 印は L₂ タンク圧と G₂ 調圧をほぼ同じに設定し試験中に設定を変えないで取得した 2 点である。L₂ の流量特性は圧力レベルによってかなり変り得ることがわかる。

図 41 は混合器出口において計測した温度と燃料中の L₂ の割合を実験によって求めたものである。混合温度 120°K を得るためには約 55% の L₂ が適当であることがわかる。計算値は混合器が断熱されているものとして混合前後のエンタルピーが保存されるとして求めたものである。なお、L₂ タンク圧および G₂ 調圧が 50 kg/cm²、a のとき、L₂ 流量は ± 6 ~ 7 % の範囲で周期的に変動することが観測された。L₂ 混合器入口部のオリフィス径をさらに小さくすることによってこの不具合は解消可能と思われる。

図 42 にインジェクタの流量特性を示す。コールドフロー試験データは 1 点だけであるが、当所液体ロケット研究室のデータおよび NASDA の試験結果をもとにして算出した予測値と良い一致をしているように見える。

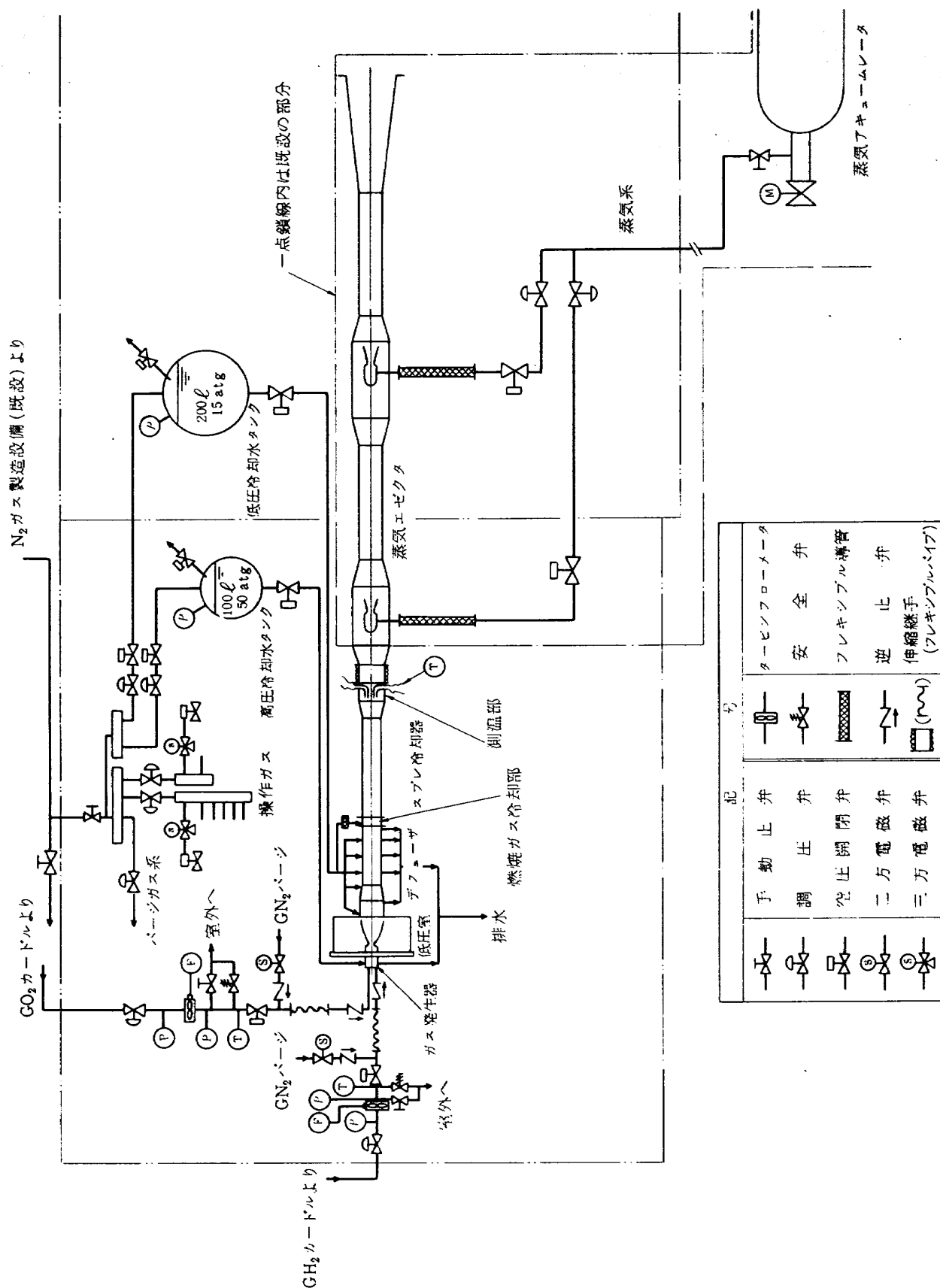
4. 排気系試験装置

本装置は、エンジンの燃焼ガスのよどみ温度と物性値を液酸・液水エンジンのそれに近くし、高膨脹エンジンの高空性能試験用の排気設備の縮小モデル試験をおこなうための装置であり、推進薬供給系、冷却水系、操作盤、

図40 混合器部流量特性 ($P_T - P_M$, $P_G - P_M$)図41 LH₂/GH₂混合割合と混合器出口温度図42 H₂インジェクタ部流量特性

ならびに、ガス発生器、デフューザ、およびスプレ冷却器等の供試体と既設²⁾の小型蒸気エセクタ系からなる。装置の系統を図43に示す。また装置の主要部分の外観を図44に示す。装置の容量は2.1.2節で述べたように、10トン級エンジンの約 $\frac{1}{100}$ の流量の推進剤を供給することが可能である。従ってモデルは $\frac{1}{10}$ スケールまでの試験が可能である。

装置の計画に当っては、経費節約のため、可能な限り部品および装置類の自作および既存機器類の利用等をはかることとした。



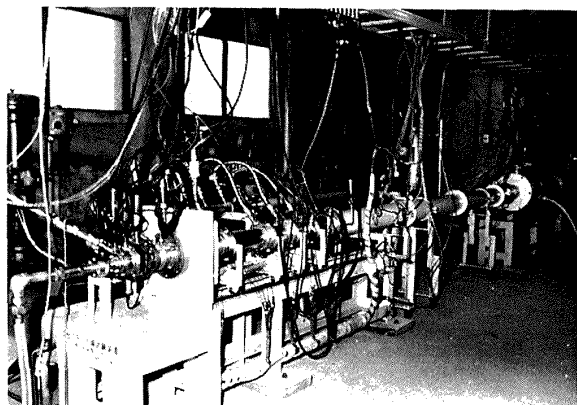


図 44 排気系試験装置主要部外観

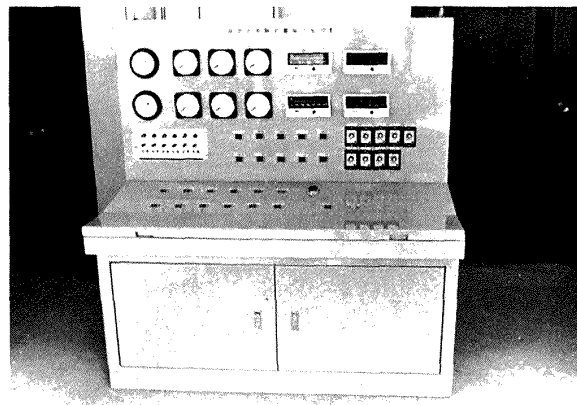


図 45 操作監視盤

4.1 推進薬および冷却水供給系統

推進薬供給系統は GH_2 および GO_2 の高圧ポンパードルから GH_2 および GO_2 を所定の圧力に減圧してガス発生器へ導くためのものであり、調圧弁、流量計および始動弁などからなる。ガス発生器の燃焼室圧および混合比の設定は3.2節で述べたと同様に供給ガスの調圧とガス発生器入口部オリフィス径の選定による単純な方式を取る。従って主要要素のひとつは調圧弁であり、燃焼試験設備の場合と同様に応答性が良く、広範囲の1次圧に対して大流量のガスの調圧が可能なダイヤフラム式ドームレギュレータを用いた。推進薬供給系におけるもうひとつの重要な要素は始動弁である。経費の節減のため遮断弁等の冗長性はもたせていないので、遠隔操作によって推進剤の流れを止めることができるのは始動弁のみであり、始動弁には確実な作動の他に、(1)開閉速度は開又は閉信号から全開又は全閉になるまでの時間が1秒以内であること、(2)リフター流量の特性が直線的であること(3)しめ切り時の洩れは零であることなどが要求された。選定された弁は米国 Autoclave Engineering 社の 20SV 型の空圧シリンダ弁であり、流量特性がリニアに近い弁形状をしており、水素側は特殊なソフトシーリング機構をもったものである。ガス流量計は COX 社の小型軽量のタービン流量計を用いた。米国における較正結果から、流量測定精度は $\pm 0.5\%$ と推定されている。

冷却水は、デフューザ冷却用の低圧冷却水タンク（容量 200ℓ、常用圧 15 kg/cm²G）とガス発生器冷却用の高圧冷却水タンク（容量 100ℓ、常用圧 50 kg/cm²G）からそれぞれ別の配管系によってデフューザ、スプレ冷却器およびガス発生器に導かれる。高圧大容量の冷却水タンクを1コ製作した方が経費面では節約になるように見えるが、すでに述べたように手持ちの部品を最大限に

利用することによって経費の節減をはかる方針を取ったので、バルブ等機器の常用圧力等の制限から、冷却水タンクは2コとなった。これによって全経費が少なくなったばかりでなく、冷却水流量設定および操作上のフレキシビリティも確保された。燃焼ガスを冷却するスプレ冷却水の流量は、スプレ冷却器の性能ならびに燃焼ガスの冷却がエゼクタ負荷におよぼす効果を調べるために重要なので、タービン式流量計によって測定する。デフューザ冷却水流量の測定も、デフューザの熱負荷測定には同様な重要性をもつものであるが、デフューザ部の熱負荷はある程度の長さで渡る平均値（4.3節参照）を取るもので高精度を要しないこと、経費の節減の観点から、いくつかに分割した各セクションの流量-差圧の関係をあらかじめ較正用のタービン流量計によって較正しておき、燃焼実験時の差圧を測定してそのときの流量を算出する方法を取った。

4.2 監視操作盤

監視操作盤は排気系実験の監視と各弁の操作、イグナイタの ON-OFF をおこなうための装置であり、機械装置の隣室に設置した。その外観を図45に示す。

監視計器系統のうち、圧力信号の増幅器は自作したものである。そのブロック図を図46に、その外観を図47に示す。

各操作は、単独手動操作の他に、図48に示すように、簡単な時間おくれ機構による自動操作も可能となっている。なお、エゼクタ系の監視操作盤は既設であり、この盤のとなりに設置されている。

4.3 供試体

供試体はガス発生器、デフューザおよびスプレ冷却器からなっている。それらのスケールは10トン級液酸液水エンジンに対して $1/13.8$ リニアスケールとした。これらの

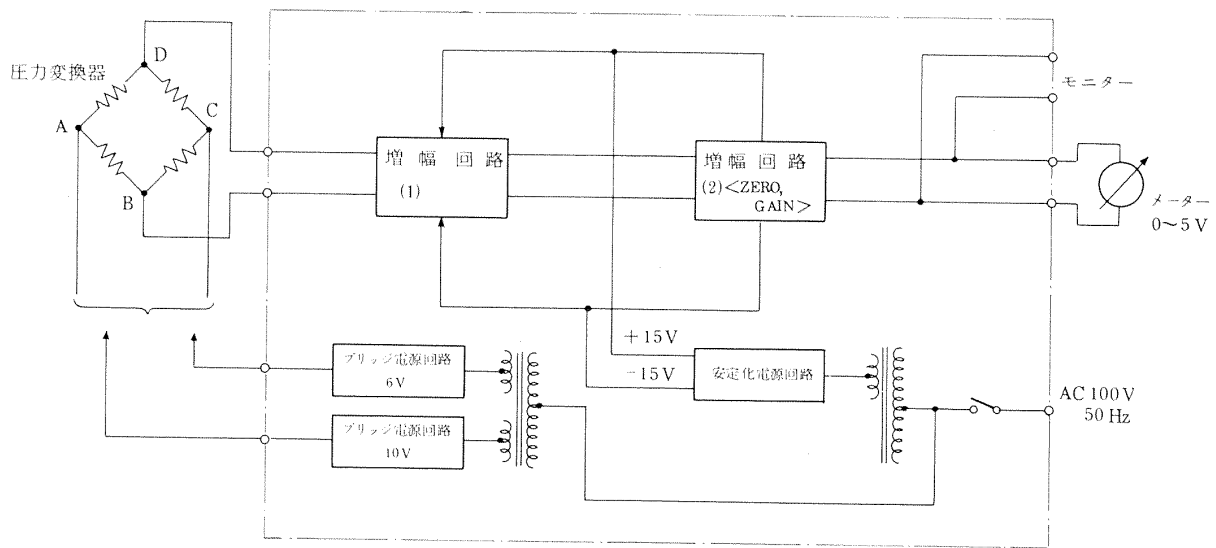


図 46 制御用圧力増幅器ブロック図

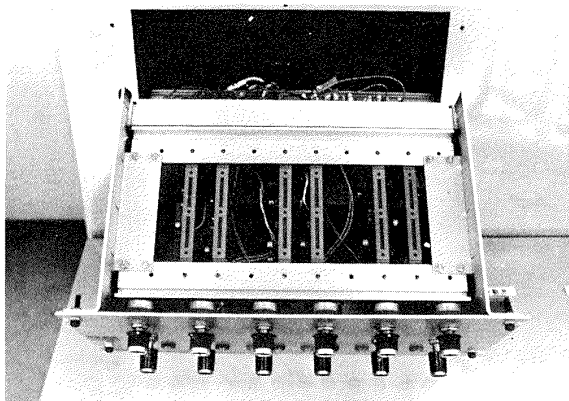


図 47 圧力計増幅器

供試体はフルスケールのモデルとしての意味の外に排気系の設計概念が適当であるかどうかを確認する目的の実験もおこない得ることを考慮して設計された。

4.3.1 ガス発生器

ガス発生器は常温の GH_2 および GO_2 を標準設定点混合比5.0、燃焼室圧 35 kg/cm^2 、aで燃焼させる燃焼器であり、燃焼室内径30mm、燃焼室長さ約120mm、ノズルスロート径10mm、ノズル出口径116.2mm（ノズル膨脹面積比135）である。ガス発生器の略図を図49に示す。インジェクタ同軸型4エレメントであり、諸元の決定にはAerojet社で開発された設計手法⁷⁾を用い、燃焼効率(C^* 効率)は95%以上を目標とした。燃焼室は熱吸収式の着火用スパークプラグ取付部および水冷式の円筒部からなり、ノズルは水冷式のスロート部と銅製の熱吸収式ノズルイクステンション部からなる。これらの熱設計は

3.6節で述べた供試燃焼器の場合とほぼ同様な方法でおこなった。燃焼室の水冷円筒部は図49に断面を图示するような簡単な方法をとった。ノズルスロート部の冷却はこの方法では製作上の困難があった他にバーンアウトを防ぐに十分な冷却水流速を確保できない計算となったので、内筒外側に流れ方向に流路の断面積が変化する溝をつけ、二つ割りにした外筒をかぶせる方法を取った。熱膨脹による内筒の変形をさけるために、ノズルイクステンションの取付部においてスロート部内筒とのあいだに約1mmのギャップをつけた。ノズルは、ベースライン形状として 15° コニカルノズルとした。

4.3.2 デフューザ

デフューザは3.6.2節のそれと同様にセカンドスロート型とした。図50にデフューザ基本寸法と冷却チャンネルの構造を示す。ガス発生器と組み合わせた場合のブレイクダウン圧力比は69.6と計算された⁸⁾。供試デフューザについての当面の試験項目は、スタートおよびブレイクダウン圧力比、軸方向の静圧分布、内面のメタル温度の分布、および、いくつかのセクションに分けた場合の平均的な熱流束を求めることである。いくつかのセクションに分けてフランジ止めとしたことは、将来ガス側のピトー圧等の半径方向分布測定用のリングをフランジ間にはめ込むことができる余地を残したものである。

図50に示すように冷却水は内筒と外筒とのあいだの2mmのすきまを軸方向に流れる。冷却水チャンネルは軸方向に入れた8本のスペーサによって構成される。内外筒スペーサ、マニホールドおよびフランジは真空ブレーシングによって2段階に分けてろう付される。静圧孔は外筒からスペーサを通してデフューザ内面に通されている。

同様に、先端が平面に仕上げられた熱電対は内表面に面一となるように銀ろう付される。熱計算は 3.6.2 節で述べた方法を用いた。

4.3.3 スプレ冷却器

スプレ冷却器は H_2/O_2 燃焼ガスによって無冷却の蒸気エゼクタ部を焼損しないように、燃焼ガスに直接水を噴射し、主として蒸発潜熱によって燃焼ガス温度を下げるための装置である。供試体ではスプレ冷却器の設計概念の妥当性を実験によって確かめること、冷却後の燃焼ガスと水蒸気の混合物の温度がエゼクタ負荷としてどう作

用するかを調べることを目標とした。

水の噴射部の直前の流れの状態は、ノズル、デフューザにおけるよどみ温度の低下を無視して、デフューザ背圧を蒸気エゼクタ性能から求めることによって 1 次元関係式より求める。この流れに対して管壁からガス流に垂直な方向への水の噴流の透過距離は Schetz らの実験式⁹⁾を用いて計算した。なお、標準設定点の冷却水流量は、 GH_2 、 GO_2 の他に H_2O を加えて化学平衡計算をおこない、よどみ温度が $400^\circ C$ となることを条件として求め、NTO/A-50 燃焼試験の経験から燃焼効率、化学反応動

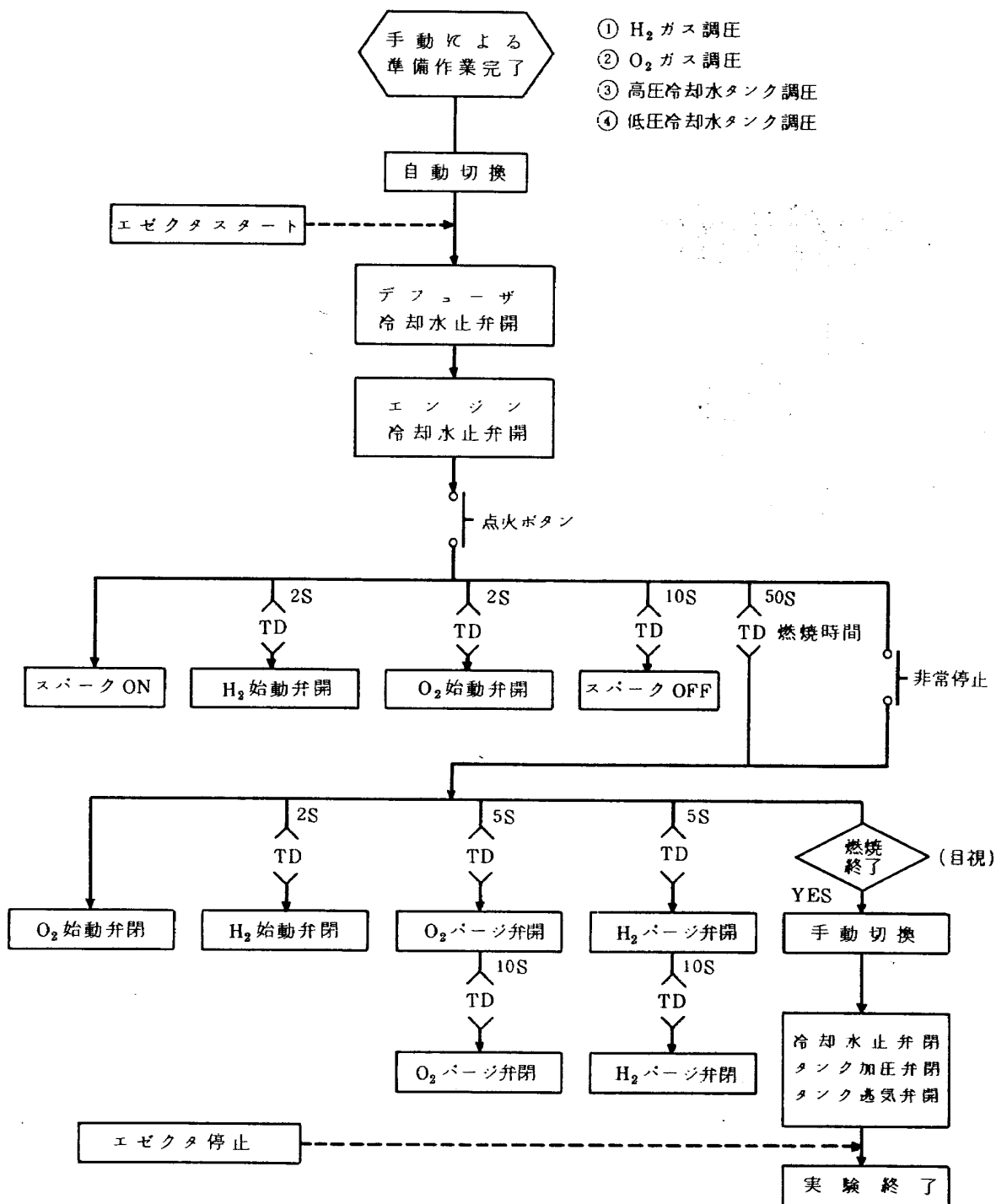


図 48 燃焼試験操作手順の 1 例

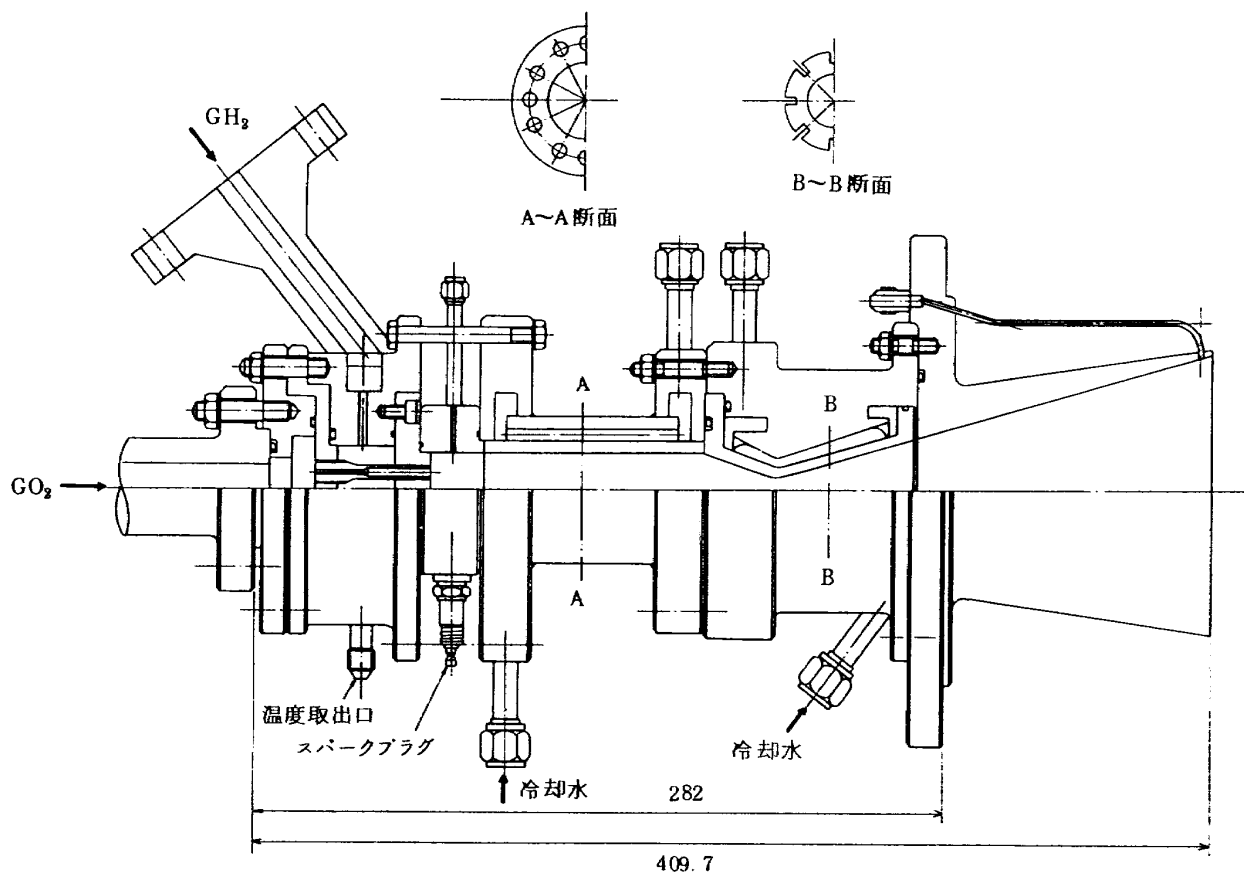


図49 ガス発生器組立

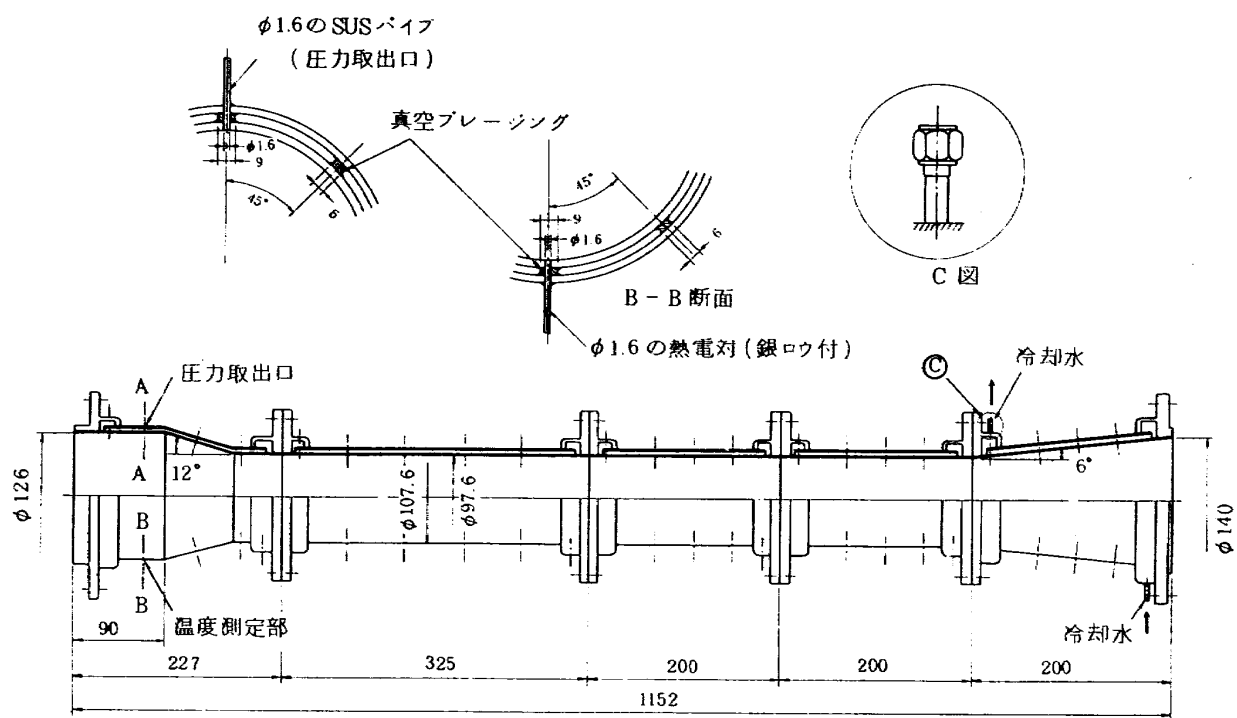


図50 供試デフューザ

力学損失、熱損失等の効果を定数として上記の理論値に乗ずる補正をおこなって求めた。

蒸発部長さは、噴流が気流によって微粒化するときの最大径の液滴¹⁰が蒸発するのに要する時間から求めた。計算された所要長さは3.5 mであった。

図51に示すように、水の噴射孔は、着火前に過度に水滴がデフューザ部へもどらないように、やや下流方向に

向けられている。また蒸発部出口には温度分布を測定するためのレークが取り付けられる。

4.3.4 供試体組立

図52に示すように、供試体は一直線上に順次取付られる。固定支持部はノズルとデフューザが前後に取付られている低圧室と図には示されていないが、第2段エゼクタのノズル取付部であるため、熱膨張によって局部的な

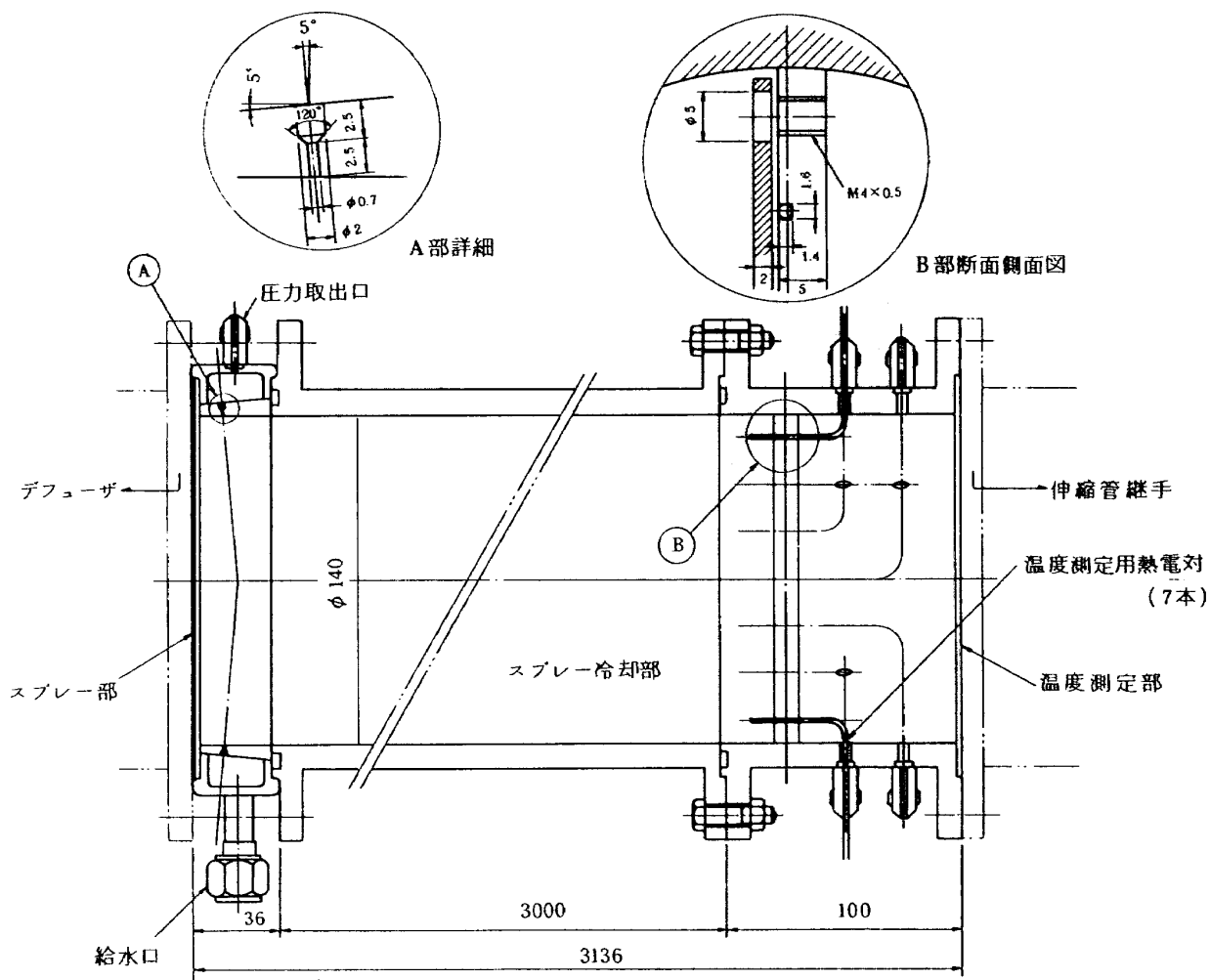


図51 スプレー冷却器

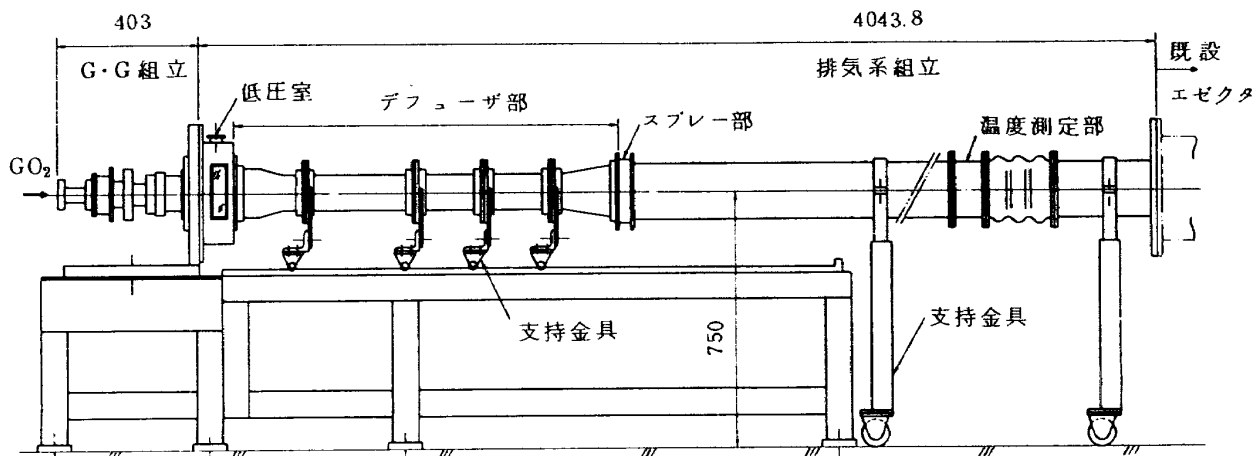


図52 供試体組立図

力が加わらないように、デフューザ、スプレ蒸発部は車輪による支持とし、エゼクタ系との接続部にはベロー継手をもうけた。低圧室部には、ノズル出口面およびデフューザ入口面が目視可能な窓をもうけた。

5. あとがき

液体酸素・液体水素ロケットエンジンの研究および開発の必要性が叫ばれ始めてから久しくなるが、いま、液体水素ロケット燃焼器高空性能試験設備の完成によって、サブスケールとはいえ、高膨脹推力室の試験が可能となった。本設備は昭和53年10月に完成以来、コールドフロー試験、着火試験等を通して運転技術の確立をおこない、小人数でより安全確実に試験を実施できるように部分的改造工事をおこない現在にいたっている。

本設備は既設のロケットエンジン高空性能試験設備への増設工事であり、既設部分との干渉を少なくするために特殊な設計を進めなければならない場合があったり、細部において改良を加えて組立、据付をおこなわなければならない場合があった。主契約者の三菱重工業(株)をはじめ大阪酸素工業(株)、日本酸素(株)の関係者は終始熱心に検討しつゝ建設を遂行された。ここに厚くお礼を申し上げる次第である。供試燃焼器の設計・製作に当っては宇宙開発事業団の技術資料を活用させていただいた事に対し、同事業団の関係者に心からお礼を申し上げたい。さらに、本設備が比較的短期間に完成したのは当所角田支所の液体ロケット研究室(現ロケット燃焼器研究室)をはじめ、流体機器研究室および固体ロケット研究室における各種の経験の蓄積があったことが大きな貢献をしている。計画、建設および試験期間中に上記諸研究室より暖い支援を受けたことを付記する。

引用文献

- 1) 航空宇宙技術研究所；航空宇宙技術研究所のロケットエンジン高空性能試験設備，NAL TR-454 (1976)。
- 2) 宮島博，他；ロケットエンジン高空性能試験用蒸気エゼクタの実験，NAL TR-566 (1979)。
- 3) D. R. Bartz; A Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convective Heat Transfer Coefficients, Jet Propulsion, Vol. 27 (1957) pp. 49 ~ 51.
- 4) R. C. German, et al.; Method of Determining the Performance of Ejector-Diffuser Systems, J. Spacecraft, Vol. 3 (1966) pp. 193 ~ 200.
- 5) R. F. Cuffel and L. H. Back; Flow and Heat Transfer Measurements in a Pseudo-Shock Region with Surface Cooling, AIAA Journal (1976) pp. 716 ~ 722.
- 6) 宮島博，他；零2次流エゼクタにおける亜音速デフューザおよびノズル形状の効果，NAL TR-493 (1977)。
- 7) D. F. Calhoon, et. al.; Investigation of Gaseous Propellant Combustion and Associated Injector/Chamber Design Guidelines, NASA CR-121234 (N73-29799), July 1973.
- 8) 宮島博，阿部登，木皿且人；ロケットエンジン高空性能試験用デフューザの設計計算，NAL TM-313 (1976)。
- 9) J. A. Schetz and A. Padhye; Penetration and Break-up of Liquid Fuel Jets in High Subsonic Speed Air Streams, AIAA paper 77-201 (1977).
- 10) R. D. Ingebo and H. H. Foster; Drop-Size Distribution for Crosscurrent Breakup of Liquid Jets in Airstreams, NACA TN 4087 (1957).

航空宇宙技術研究所資料 387 号

昭和 54 年 7 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町 1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山 4-1-7 (羽田ビル)
