

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-517

セクタ型高圧燃焼器試験装置

鈴木邦男・西尾健二・堀内正司
越沼 威・岡部裕二郎・石原久蔵

1977 年 11 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

セクタ型高圧燃焼器試験装置*

鈴木 邦男** 西尾 健二**
堀内 正司*** 越沼 威**
岡部裕二郎**** 石原 久蔵****

A High-pressure, Sector-shaped Model Combustor Test Facility for Development of Turbofan Engines

By Kunio SUZUKI, Kenji NISHIO, Shoji HORIUCHI, Mamoru KOSHINUMA, Yujiro OKABE and Kyuzo ISHIHARA

A high-pressure, blow-down type turbine combustor test facility has been completed at the National Aerospace Laboratory in Tokyo.

The facility has a capacity of up to 30 atm of air from ambient temperature to 720 K. The test section can supply an airflow rate of either 10 kg/s in weight or 0.6 m³/s in volume at the maximum. The combustor inlet temperature and pressure are independently regulated. Test duration is limited to between 60 and 100 seconds depending on the experimental condition. Control of the facility and experimental measurements are conducted by a mini-computer.

1. はしがき

ジェットエンジンの高圧、高温化にともない、燃焼器側にも排ガス組成や耐久性など問題点が生じ、これらの研究を行なうため、高圧燃焼試験装置を建設した。この装置は、アニュラ形燃焼器の分割模型（通称、セクタ形燃焼器）を対象に、高圧作動条件で燃焼試験を行なうもので、高圧貯気槽からの空気を減圧、調整して使用するブローダウン方式である。この、実験時間の制限から、装置の運転に、電算機による制御を取り入れ、短時間に条件設定を行ない得るようにした。

設計にあたって、高圧空気、高圧高温の燃焼ガスを扱うため、安全性向上に充分配慮し、また、騒音対策や排ガス処理にも注意して、まわりに影響を与えないようにした。

装置試運転の結果、予期通りの性能が得られ、現在この装置を用いた研究を進めている。

なお、これは通商産業省工業技術院の大型工業技術研究開発の一テーマ：航空機用ジェットエンジンの研究開発の一環として建設したものである。

2. 試験装置の設計

2.1 航空エンジンの動向と（既設）燃焼試験装置

亜音速機用航空エンジンは、燃料消費率の低下、騒音

の減少をはかるため、バイパス比の大きなファンエンジンに移りかわりつつある。このファンエンジンとしてもサイクル効率向上のため、全圧力比の増加、タービン入口温度の上昇の傾向がいちぢるしい。航空エンジンの全圧力比およびタービン入口温度の動向を図1および図2に示す。この結果、燃焼器は高圧、高温形になり、燃焼そのものには好都合になっているが、供給燃料の挙動、煙その他の大気汚染成分の排出、耐久性などに不明な点が多く、これらの資料の充実をはかる必要がある。

実用の燃焼器は、構造的には比較的簡単であるが、内部で起きている諸現象は複雑で、電算機によるシュミレーションなども試みられているが^{1), 2)}、まだ実用的な資料を得るところまで達していない。このため、燃焼器の設計・開発には燃焼実験が不可欠である。

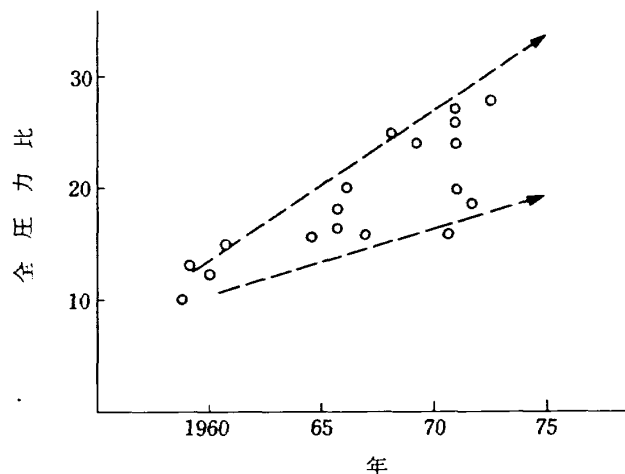


図1 航空エンジンの動向 — 全圧力比

* 昭和52年9月6日受付

** 原動機部

*** 航空公害研究グループ

**** 宇宙研究グループ

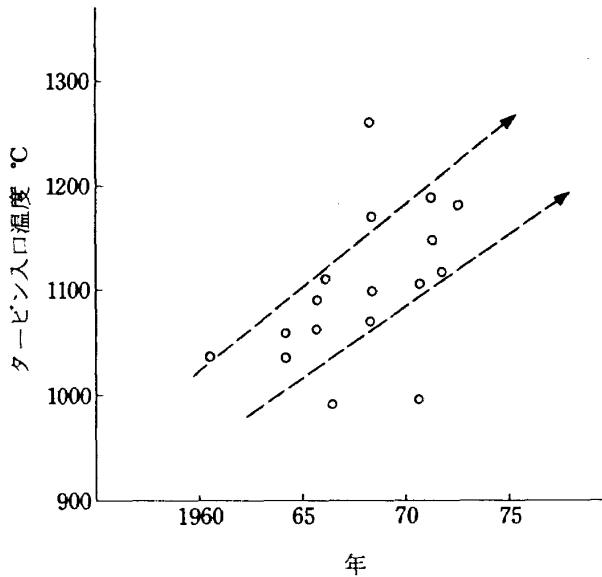


図2 航空エンジンの動向 — タービン入口温度

当所における既設の燃焼試験装置を表1に示す。表1中の罐形燃焼器試験設備および円環形燃焼器試験設備についてはすでに報告がある³⁾。表1から明らかのように既設装置を用いて高圧・高温燃焼器の研究を行なうことは、きわめてむずかしく、供試燃焼器入口空気として高圧、かつ圧縮機出口温度に見合う高温なものを得る試験装置が必要である。

表1 航技研の既設燃焼試験装置

装置名	供試燃焼器入口空気条件
缶形燃焼器 (低圧・低温系)試験設備	$P_1 =$ ほぼ大気圧 $\sim 0.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs.}$ $t_1 = 30^\circ\text{C} \sim -55^\circ\text{C}$ $Q_a = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ (最大)
常圧セクタ燃焼器試験系	$P_1 =$ ほぼ大気圧 $t_1 = 30^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ (予熱燃焼器使用) $G_a = 2 \text{ kg/s}$ (最大)
円環形燃焼器試験設備	$P_1 =$ ほぼ大気圧 $\sim 2.7 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs.}$ $t_1 = 100^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ (予熱燃焼器使用) $G_a = 35 \text{ kg/s}$ (最大)
高圧燃焼基礎試験装置	$P_1 = 50 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs.}$ (最高) $t_1 =$ 常温 $G_a = 0.08 \text{ kg/s}$ (最大)

2.2 高圧燃焼試験装置の要目の決定

2.2.1 供試燃焼器入口空気圧力および燃焼器出口温度

図1および図2, それに我国の航空産業界の現状から判断すると, さしあたり燃焼器入口圧力最高 30 Kg/cm^2 出口温度 (=タービン入口温度) 最高 1300°C までの実験ができれば充分であろう。これまでの資料が充実していれば, さらに高圧比のエンジンの燃焼器の設計も可能である。

さしあたり, この装置を用いる実験は, 航空機用ジェットエンジンの研究開発によって試作しているFJRエンジンの燃焼器であるが, この設計点の要目を表2に示す。表2からみると, 上記の圧力 30 Kg/cm^2 出口温度 1300°C は十分に余裕のある値と判明する。

表2 FJRシリーズ エンジンの燃焼器作動条件

	FJR710/10	FJR710/20
燃焼器入口空気圧力 $\text{kg/cm}^2 \text{ abs}$	17.1	19.6
入口空気温度 $^\circ\text{C}$	429.6	451.5
出口ガス温度 $^\circ\text{C}$	1080	1180
空気流量 kg/s	25.1	26.6

2.2.2 供試燃焼器入口空気温度

圧縮機の断熱効率を $\eta_{ad} = 0.85$ としたときの圧縮機出口温度 (=燃焼器入口温度) と圧力比の関係を図3に示す。全圧力比30を目標にする場合, 燃焼器入口空気温度は 600°C 近くまで上昇するが, 高圧かつ高温容器の製作がむずかしいため, さしあたりの実験条件として表2の温度をとり, 最高 450°C とした。この温度であれば, 構造材としてボイラ鋼板の使用が可能である。

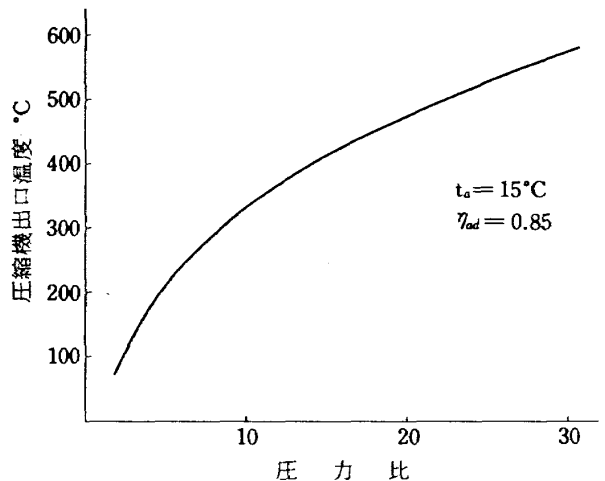


図3 全圧力比と圧縮機出口温度

2.2.3 空気流量

燃焼実験では、燃焼器を流れる空気の体積流量が重要な因子になるので、これを合わせる、すなわち、最大断面平均風速を合せて実験する必要がある。本装置のさしあたりの使用目的からFJR710エンジンを対象に考えると、設計点における燃焼器入口空気の体積流量は約 $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、燃料噴射弁数は16個である。分割模型の燃料噴射弁数は、もちろん多いほど良いわけであるが、今までの経験上、最低3個あればよいと思われるので、これから、

$$2.8 \text{ m}^3/\text{s} \times \frac{3}{16} = 0.53 \text{ m}^3/\text{s}$$

少し余裕をみて、最大 $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ にすれば充分であろう。

現用エンジンについて、全圧力比、燃焼器入口空気の体積流量および推力との関係を求めたものを図4に示す。

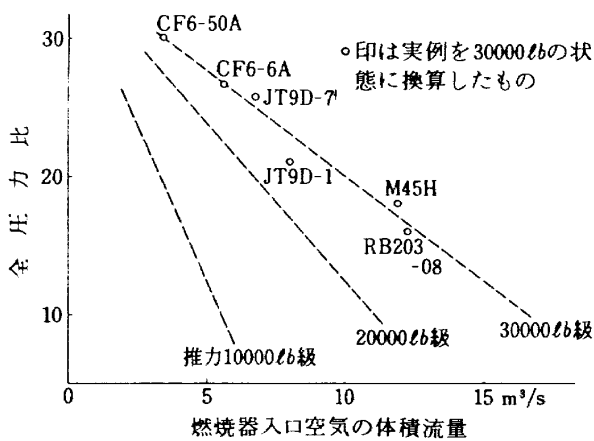


図4 現用エンジンから推定した全圧力比と燃焼器入口空気の体積流量

これから一般的に、推力10000lb級エンジンで $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 、推力30000lb級で $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と見積られ、燃料噴射弁数が10000lb級エンジンのとき20個、30000lb級のとき40個あれば、前記の $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ の体積流量で分割模型の実験が可能となる。

燃焼器を流れる空気の重量流量は、体積流量を合せても入口空気温度によって大幅に変化する。実験目的の一つとして大気汚染成分の排出の様子を調べる場合を考えると、入口空気温度をかえた（低下させた）効果を調べることが予想され、空気の重量流量を多めに選定する。すなわち、入口圧力 $30 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ 、温度 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 、体積流量 $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ に対応する重量流量は、 $8.5 \text{ Kg}/\text{s}$ であるが、最大 $10 \text{ Kg}/\text{s}$ とした。この場合、 $30 \text{ Kg}/\text{cm}^2 - 344 \text{ }^\circ\text{C} - 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ または $20 \text{ Kg}/\text{cm}^2 - 137 \text{ }^\circ\text{C} - 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ まで実験可能となる。

2.2.4 実験時間

1条件の実験について、入口空気条件および燃料流量

の設定に20秒、供試燃焼器の安定化に30秒、計測時間10秒を考え、合せて60秒を最短時間とする。

空気流量の少ない場合は、数分の実験も可能になるが、一応120秒間を限度とする。

2.3 試験装置の具体化

2.3.1 詳細設計の方針

製作費、設置場所、取扱いやすさ、安全性、騒音や排気の影響などを考慮して試験装置の細部の設計を行なう。

2.3.2 高圧空気源の選定

所内に既設の高圧空気源として次の3種がある。

- 遷音速風洞用空気源；圧力 $20 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ 、流量約 $3 \text{ Kg}/\text{s}$ （連続）⁴⁾
- 極超音速風洞用空気源；圧力 $200 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ 、 18 m^3 （貯気槽）⁵⁾
- 高圧燃焼基礎試験装置用空気源；圧力 $50 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ 、流量 $0.08 \text{ Kg}/\text{s}$ （連続）

このうち、(a)の空気源は、連続実験のできる長所をもつが、圧力がやや低いこと、空気源の使用頻度が高く、燃焼実験に利用できる余裕のないことから断念した。(b)は、長さ約200mの高圧配管を行なう必要があり、高圧減圧弁の設置、別に高圧貯気槽を設置して欲しいという要望などがあり、この経費がかさむので中止した。結局、(c)を用い、 30 m^3 程度の貯気槽をおく形に決定した。この方法は、必要以上の高圧空気を取扱わないこと、場所的に都合などなどの利点をもつが、圧縮機の容量が小さく、空気の充填に時間がかかり、実験回数制限される欠点はある。

2.3.3 空気加熱法の選定

簡単な空気加熱法としては、予熱燃焼器を用い、燃焼実験用空気の一部をとって燃料を燃焼させ、高温燃焼ガスとバイパス空気と混合する方法があるが、これでは、実験用空気に燃焼ガスが混入し、空気のみの場合とことななった状態になる。燃焼ガスの混入しない加熱法として、次の方法が考えられる、

- 電気ヒーターによる直接加熱方式
- 空気ボイラによる加熱（加熱源はバーナ）
- 液体または気体の伝熱媒体による蓄熱式加熱（加熱源は電気ヒータ）
- ベブルによる蓄熱式加熱（加熱源はバーナ）

このうち、(a)は大容量の電熱器を短時間使用する形で設備費がかさみ、また制御もむずかしい。(b)も制御に難点がある。(c)および(d)は、あらかじめ蓄熱体を所定の温度に熱しておく、制御なしで済む利点がある、ただし、(c)は伝熱媒体の毒性や危険性から取扱いがむずかしく、加熱温度も $300 \text{ }^\circ\text{C}$ が限度になろう。表3に各種伝熱媒体

の例を示す。これに対しペブルヒータ方式では 500 ~ 600℃までの加熱は容易であり、問題は、まわりの耐圧構造材のみであるが、これは他の方式のヒータを用いても同様である。本装置としてはペブル蓄熱体を用いる方法を採用した。

表 3 各種伝熱媒体の使用温度

伝熱媒体	使用温度 ℃	使用圧力 kg/cm ²	凝固点 ℃	成分
水 蒸 気	100 200 300	大気圧 15 87	0	H ₂ O
ダウサム A	300 350	1.5 4.5	12	ジフェニールオキサイド・ジフェニール混合物
ダウサム E	178 250(仮)	大気圧	-21.5	ジクロロベンゼン
カネクロール#300	305	大気圧	-19~ -15	塩化ジフェニール
カネクロール#400	320	大気圧	-5~ -8	塩化ジフェニール
SK #260	320	2	<-10	アルキルナフタリン
SK #350	350 400 (MAX)	大気圧	65~75	ポリフェニール
ナイター(HTS)	450 (MAX)	大気圧	142	NaNO ₂ , NaNO ₃ , KNO ₃

2.3.4 排気処理系統

供試燃焼器出口には、アフターバーナをおいて排気臭の除去を行ない、この出口側に多孔ノズルの絞りをおき大気圧まで減圧する。この多孔ノズルまでは耐久性などに問題があると考えられるため供試燃焼器側に含め、装置から除外する。

燃焼ガスは大気圧まで減圧したのち、排ガス冷却器に通して 250℃以下まで冷却する。冷却水量をなるべく少

く押えるよう、また構造材の保護を考慮して燃焼ガス中に冷却水を噴射する方式とする。この方式は既設燃焼試験装置で採用しているが、いずれも良好な結果を得ている。噴霧水の冷却効果を高めるためには燃焼ガスとの混合を促進し、滞留時間を充分とる必要がある。大直径ダクトに入れて流速低下をはかる必要がある。この異径部分は、これも実績のある多孔板ダクトを用い、発生する騒音の低周波成分を少なくするよう考える。

出口消音器は、地下に入れて壁面からの音のほう射を防ぐ。吸音構造は、吸音材を内張りした迷路形とする。最高 40 m/s の高流速ガスが流れるため、吸音材が飛去らぬよう、張り方は、これも実績ある方法をとる。

排気は、原動機部 3 号館の既設消音排気塔まで導き、装置まわりには発散させない。

2.3.5 安全性に対する配慮

安全性向上に対し、次のような各点を考慮した。

- (a) 実験部分を地下ピット内におく。
- (b) ピット側壁にコンクリートブロックを積み、供試体破損の場合でも、破片がコンクリート壁面ではね返り、外部に飛び出ることのないようにする。
- (c) スレート屋根にし、吹抜け容易なようにする。
- (d) 実験者のいる計測室の側壁は、厚み 15 cm のコンクリートブロック、20 cm の砂、15 cm の鉄筋コンクリートの合せて 50 cm の厚みをもつ防護壁とする。
- (e) 各高圧容器に安全弁をつけ、燃焼器入口部に逆止弁およびラプチャーディスクを入れる。
- (f) ペブルヒータ用プロパンバーナまわりを、ブロックその他で囲み、プロパン漏洩時にプロパンがピット内に流れ込まぬようにする。
- (g) 各弁には、開閉のリミットスイッチをつけ、ロック回路をつける。所要の警報器一式をつける。
- (h) 始動ボタンをキー付とする。
- (i) 装置まわりを金網柵で囲こみ、警戒標式をつける。

2.3.6 供試燃焼器の特性および実験条件について

さしあたり使用するセクタ形燃焼器模型は、次のようなものである。

燃料噴射弁数 3 個 (実機の 3/16)

設計点における入口空気体積流量 $Q_{ad} = 0.525 \text{ m}^3/\text{s}$

通常の実験範囲 (1.1 ~ 0.5) Q_{ad}

着火時の体積流量 0.3 Q_{ad} 以下

(着火は、大気圧付近で行なうことになる。)

燃焼器の平均温度上昇 $\Delta t = 300 \sim 750 \text{ deg C}$

燃焼器の圧力損失 設計点風速のとき、入口全圧の 4% 以下。または全圧損失係数 ϕ にして $\phi = 30 \sim 35$

火災安定限界または出口温度過上昇限界から判断した空燃比の許容範囲

- 火災吹消え限界から $n \leq 400$
- 出口温度過上昇から $n \geq 40$
- 着火時の空燃比 $n \cong 80$

着火時の操作・制御は次のように行なう。

- (a) 着火スパークをとばす。
- (b) 空気シャ断弁(減圧弁)を開く。上記着火時の体積流量 $0.3 Q_{ad}$ は、空気流量計の最小計測値以下になると予想され、これは弁開度などにより流量を検出する必要がある。このときの流量計測(設定)精度は $\pm 20\%$ 程度でよい。
- (c) 着火時の空気条件が設定されたとき、燃料シャ断弁を開く。このとき燃料噴射圧力にして 3 Kg/cm^2 程度の値をあらかじめ設定しておく。
- (d) 着火確認後、燃料-空気とも増して実験条件に合わせる。このとき、燃料一定のままにしておくと $n \geq 400$ になって吹消える危険性がでる。また急速に燃料を増すと $n \leq 40$ になり、危険である。
- (e) 着火スパークの電源を切る。着火スパークを高空気圧状態をとばすと、プラグの寿命がいちぢるしく短縮されるためである。

燃焼実験の“標準条件”は表4および次に示す通りとする。

表 4 燃焼実験の標準条件の例

燃焼器入口圧力	燃焼器入口空気温度		
	150 °C	300 °C	450 °C
3 kg/cm ²			
7		300	450
15		300	450
20			450

使用燃料 ; ジェット燃料 Jet A-1
 空燃比 ; 50, 60, 80, 100 の 4 種
 減圧ダクト絞り面積 ; 一定 (試作例の有効開口面積は 27.2 cm^2)
 空気流量 ; 上記条件からきまる値

貯気槽圧力は次のように見積る、

初期圧力 { 40 Kg/cm^2 ($P_1 = 3 \sim 7 \text{ Kg/cm}^2$ のとき)
 50 Kg/cm^2 ($P_1 = 15 \sim 20$ ")

停止時圧力 10 Kg/cm^2 ($P_1 = 3 \text{ Kg/cm}^2$ のとき)
 15 Kg/cm^2 ($P_1 = 7$ ")
 25 Kg/cm^2 ($P_1 = 15$ ")
 30 Kg/cm^2 ($P_1 = 20$ ")

3. 試験装置の系統および配置

試験装置全体の系統の決定したものを図5に、主要部の配置を図6に示す。表5に装置の仕様を示す。

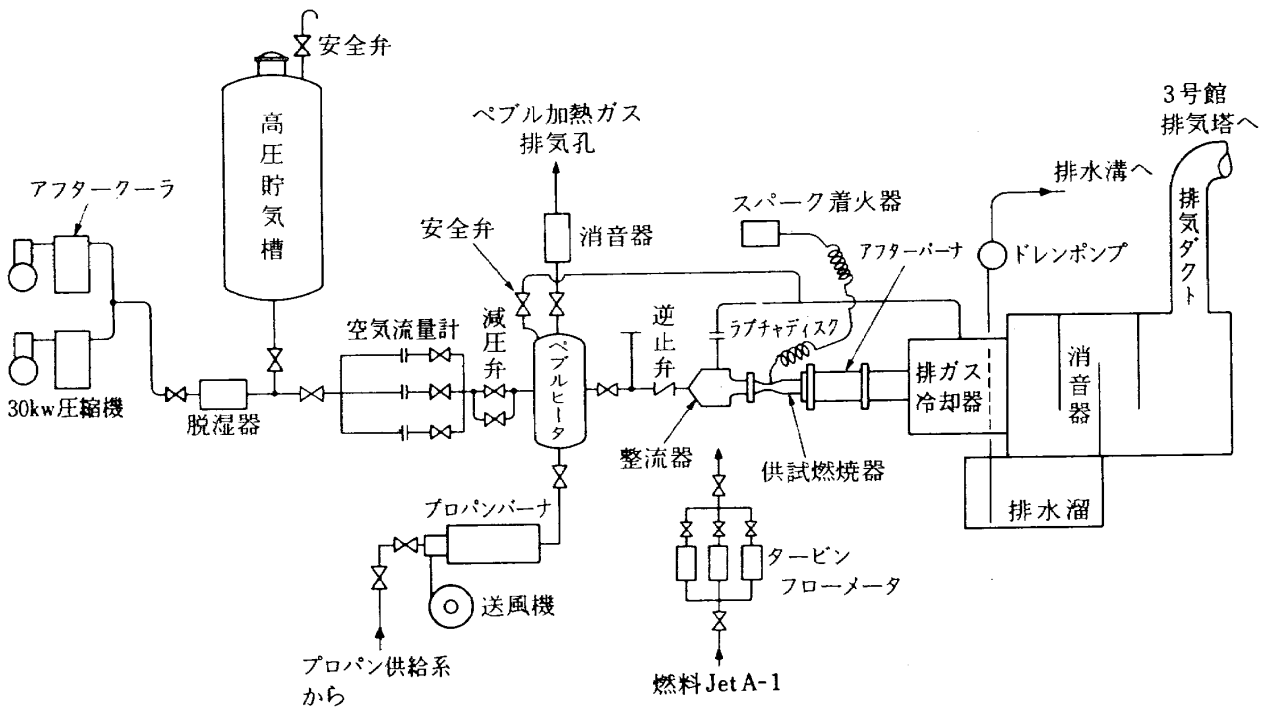


図5 セクタ型高圧燃焼器試験装置系統図

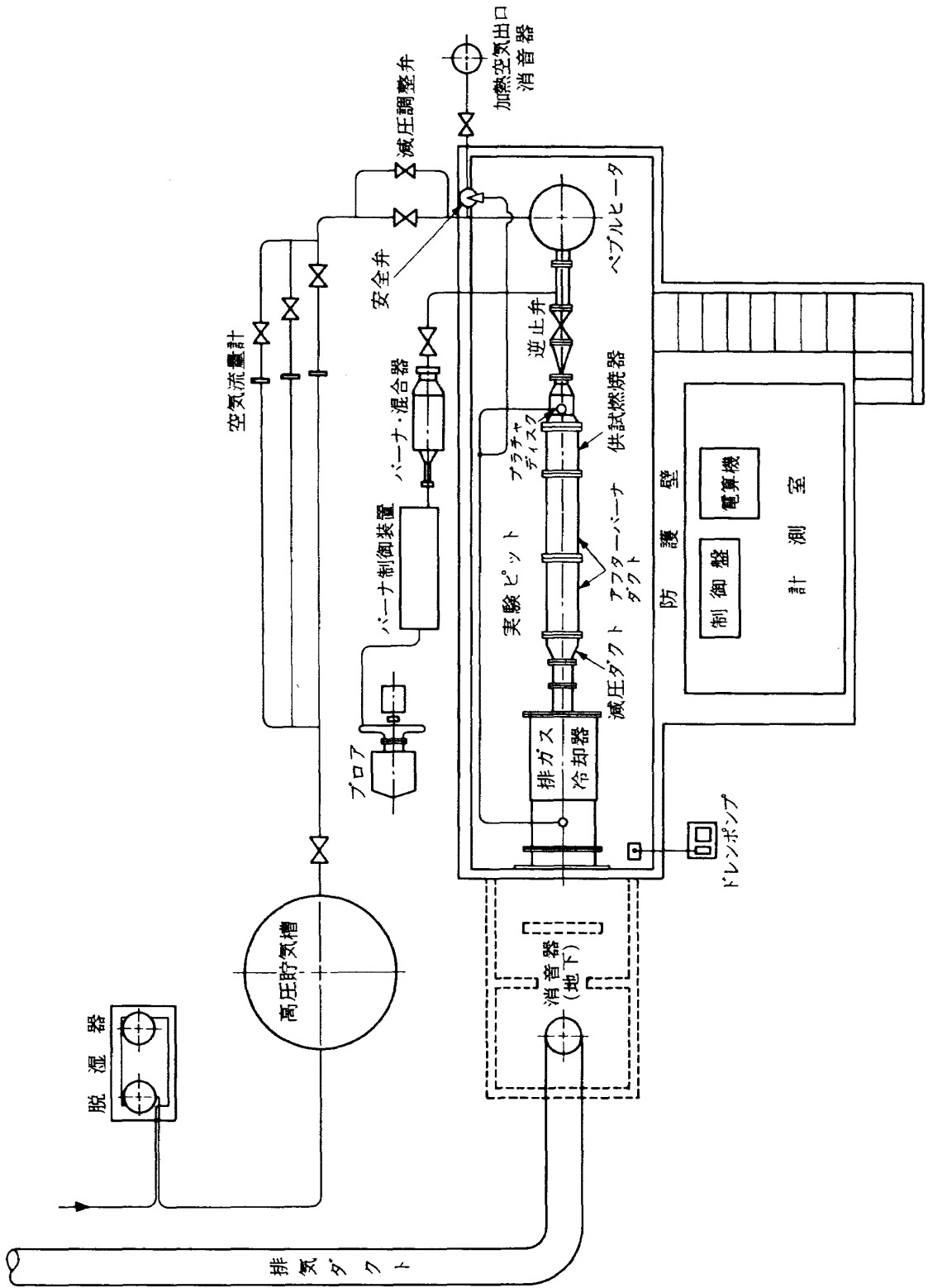


図 6 主要部配置図

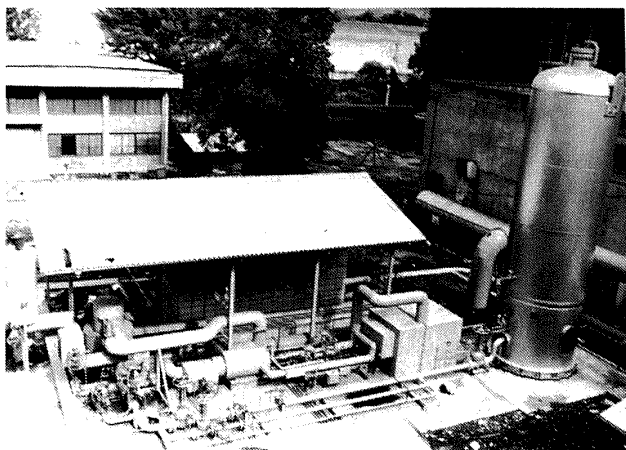


図7 セクタ型高圧燃焼器試験装置の外観

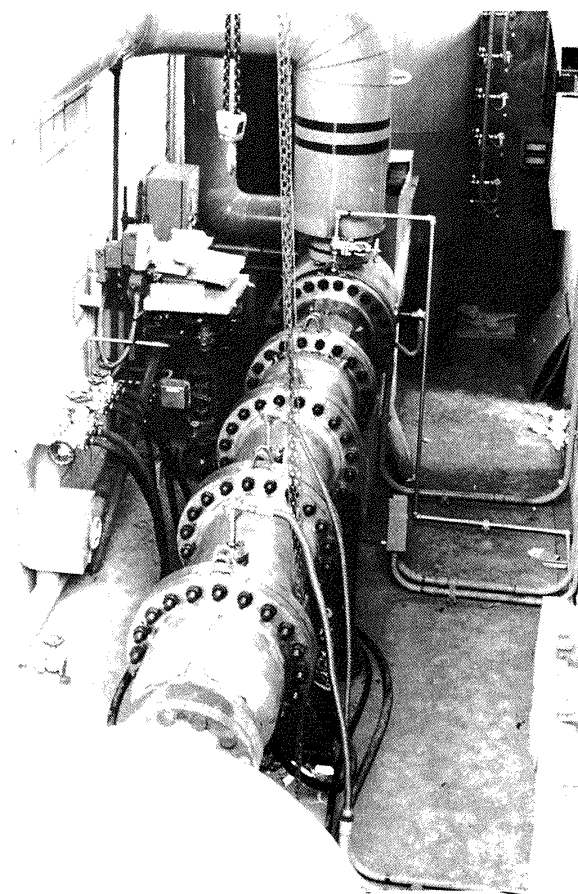


図8 実験部，供試燃焼器およびアフターバーナダクト（下流側から見たところ）

表5 セクタ型高圧燃焼器試験装置の仕様

試験装置仕様	
供試燃焼器入口圧力	$P_1 = 1 \sim 30 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$
供試燃焼器入口温度	$t_1 = 100 \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$
空気重量流量*	$G_a = 0.3 \sim 10 \text{ kg/s}$
空气体積流量*	$Q_a = 0.24 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$
燃料圧力	$P_f = 100 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ 最高
燃料流量	$G_f = 0.003 \sim 0.25 \text{ kg/s}$
使用燃料	ジェット燃料 Jet A-1
実験時間	60 ~ 120 秒

(*いずれかで制限される範囲まで実験可能とする)

図7は製作完了時の主要部の外観である。広角レンズを用いて撮影しているため、図の左右がいくぶん歪んでいる。図の右側が高圧貯気槽，その左側の箱形消音器内部にペブル加熱用バーナのフロアがある。ほぼ中央部の円筒状のものがバーナを混合器である。図の左端が加熱空気出口の消音器，その右側のピット内にペブルヒータ（上部のみ見える）がある。ピット向う側のブロック積みの箇所が計測室である。図8にピット内の実験部を示す。取付けてあるダクトは，セクタ燃焼器の耐圧外筒およびアフターバーナダクトである。

供試燃焼器取付部は，入口整流器フランジから出口ダクト入口フランジまで3700 mmあり，入口フランジは外径711 mm ϕ ，ボルト孔24個 - 39 mm ϕ 上下振り分け，ピッチ円628.5 mm ϕ ，内径390 mm ϕ ，厚さ60 mmである。また，出口側のフランジは，外径450 mm ϕ ，ボルト孔12個 - 33 mm ϕ 上下振り分け，ピッチ円390 mm ϕ ，内径265 mm ϕ ，厚さ34 mmとなっている。

4. 主要機器およびその性能

4.1 高圧圧縮機

高圧圧縮機は，三国重工業製VH-226型2台でその仕様を表6に，断面図を図9に示す。据付状態を図10に示す。

表6 高圧圧縮機仕様

高圧圧縮機仕様 (VH-226)	
1段シリンダ径×数	180 mm ϕ × 1
2段シリンダ径×数	65 mm ϕ × 1
ストローク	150 mm
回転数	580 rpm
ピストン押のけ量	2.2 m ³ /min
実風量	1.43 m ³ /min
吐出圧力	50 kg/cm ² G
電動機	30 kW, 50 Hz, 4 P

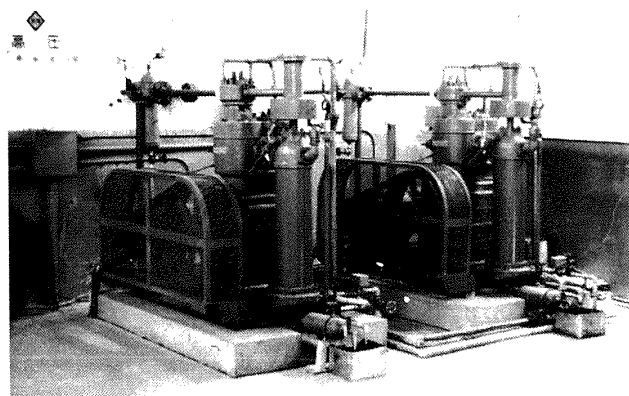


図10 高圧圧縮機 (30 kW, 2台) 据付状態

符号	部分品名
1	クランク室蓋
2	クランク室蓋軸
3	クランク室蓋軸
4	主軸
5	軸油
6	パラストウェイ
7	ベアリング
8	一段ピストン
9	一段ピストン
10	一段ピストン
11	一段ピストン
12	一段ピストン
13	一段吸入弁
14	一段吸入弁
15	一段吸入弁
16	一段吸入弁
17	一段吸入弁
18	一段吸入弁
19	一段吸入弁
20	二段ガイドピストン
21	二段ガイドピストン
22	二段ピストン
23	二段ピストン
24	二段ピストン
25	二段ピストン
26	二段吸入弁
27	二段吸入弁
28	二段吸入弁
29	二段吸入弁
30	二段吸入弁
31	二段吸入弁
32	二段吸入弁
33	二段吸入弁
34	二段吐出弁
35	二段吐出弁
36	二段吐出弁
37	二段吐出弁
38	排水曲管
39	中間冷却器油水分離器
40	中間冷却器安全弁
41	中間冷却器
42	単独
43	油
44	クランクピストン
45	クランクピストン
46	パイロットバルブ
47	パイロットバルブ
48	吸入ストレーナ
49	一段吐出弁
50	一段吐出弁
51	中間冷却器ドレンタンク

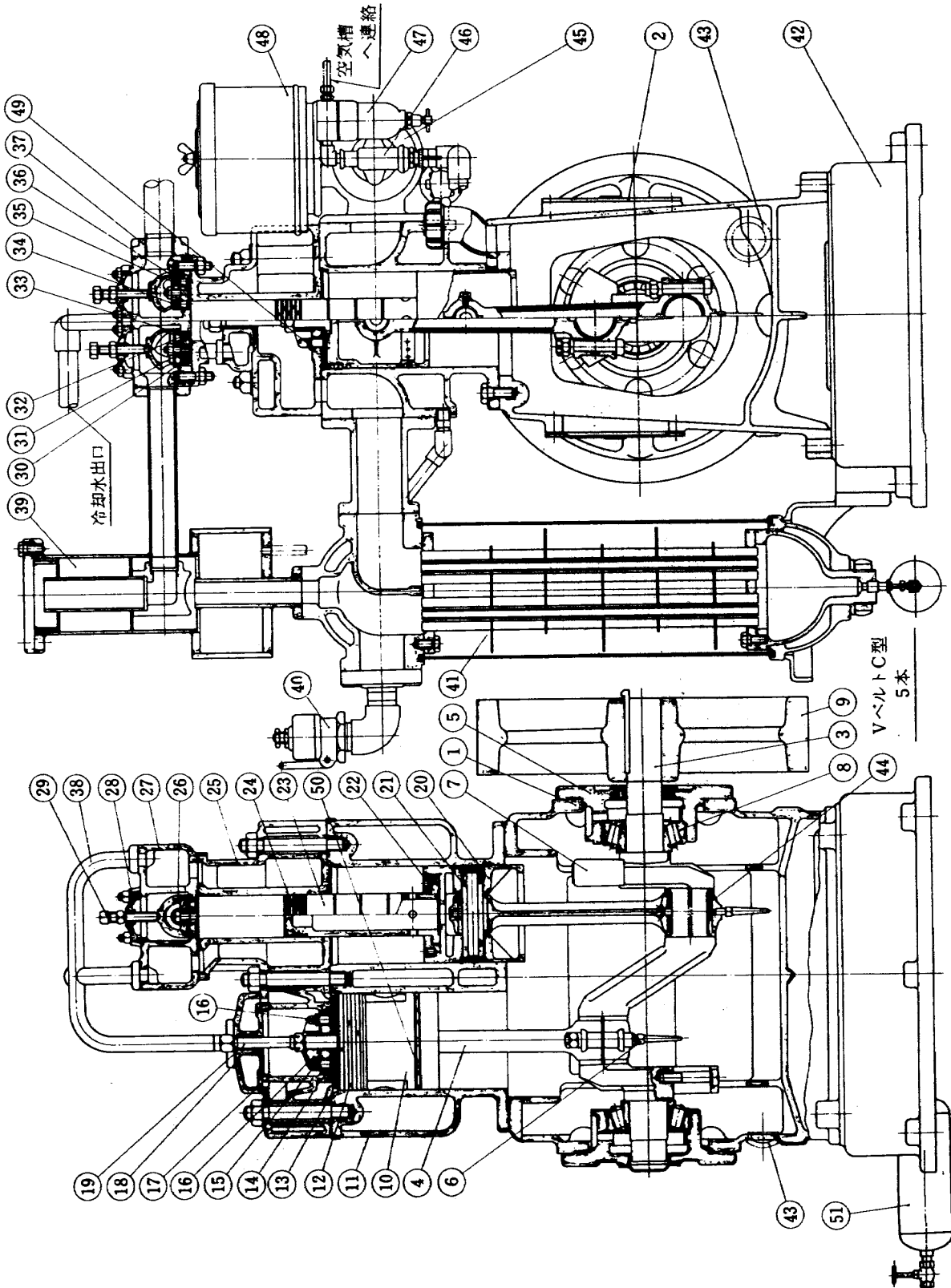


図9 30 kW高圧圧縮機

4.2 空気脱湿器

電気加熱式半自動脱湿器で、仕様を表7に、外観を図11および図12に示す。主要材はSTPG 38, SCH 80である。(株)白川製作所製。

表7 空気脱湿器仕様

空気脱湿器仕様	
形式	2筒式
処理流量	300 kg/h (1筒連続5h)
空気圧力	55 kg/cm ² G
入口温度	常温
出口湿度	(露点) -50℃
再生加熱電力	1.2 kW
最高使用温度	200℃
安全弁	口径 13 mm 吹出し圧 55 kg/cm ² G

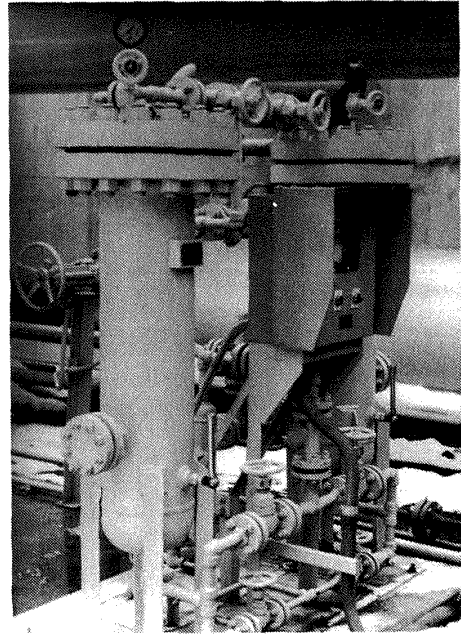


図12 空気脱湿器

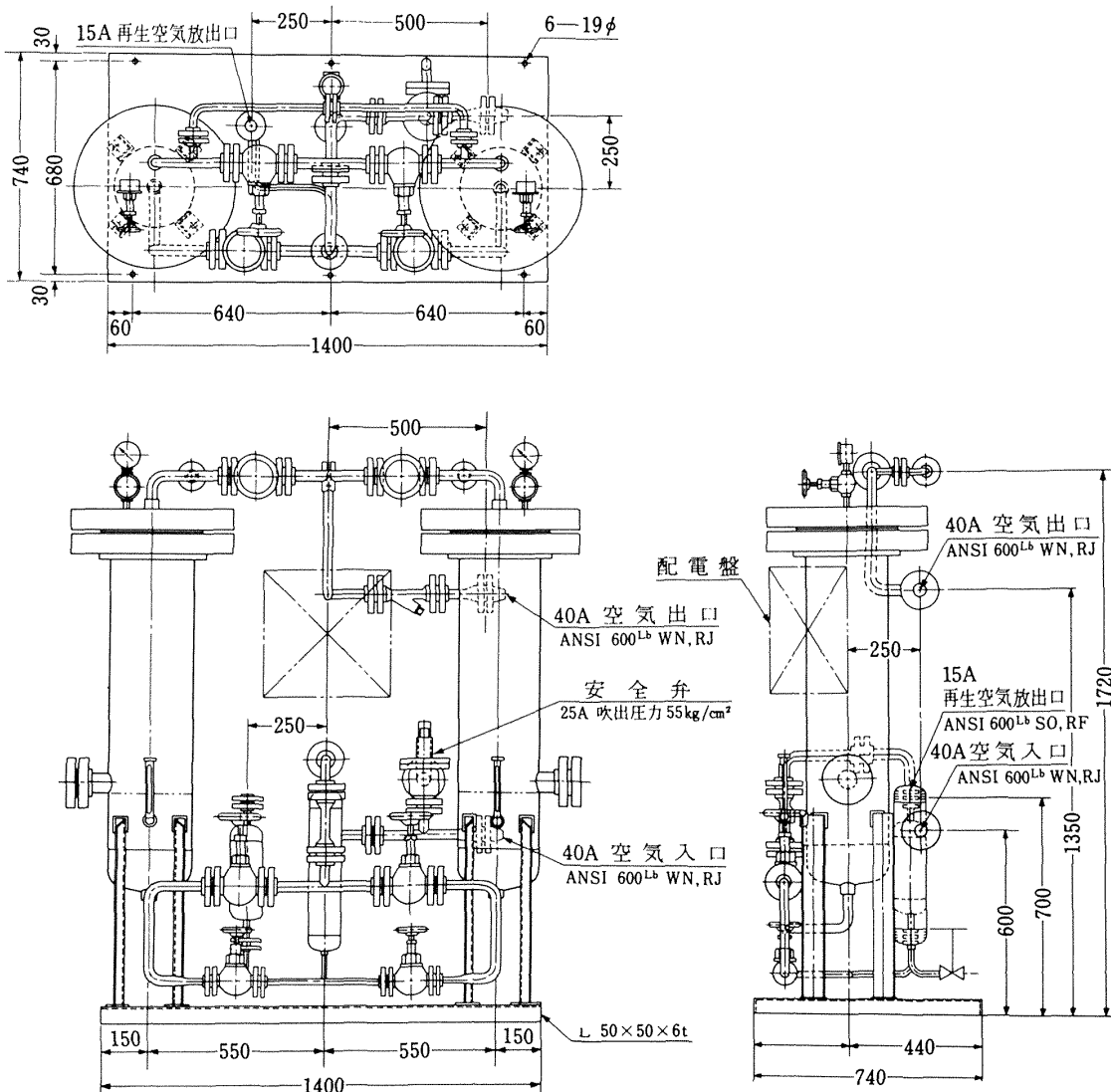


図11 空気脱湿器

4.3 高圧貯気槽

内径 2,400 mm, 平行部長さ 5,880 mm, 内容積 30 m³ の立型で, S B 46 材を使用した。この仕様を表 8 に, 図 13 および図 14 に外観を示す。空気使用時の温度低下を防ぐ蓄熱体を内蔵しており, その効果を図 15 に示す (計算値)。

表 8 高圧貯気槽仕様

高圧貯気槽仕様	
内径	2,400 mm φ
円筒部長さ	5,880 mm
鏡形状	2:1 半だ円
材質	S B 46
常用圧力	50 kg
設計圧力	55 kg
設計温度	常温
内容積	30.2 m ³
安全弁	呼称口径 15 mm 吹出し圧 55 kg/cm ²
蓄熱体	0.6 t 板 800 kg
全重量	約 35,000 kg

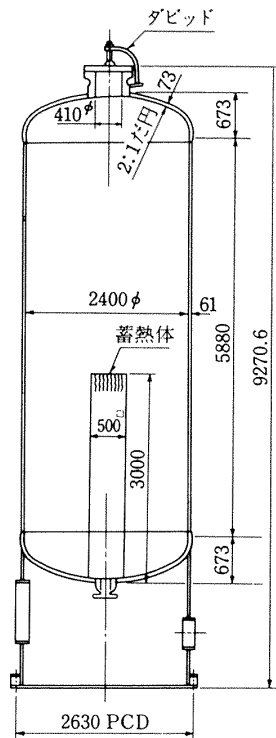


図 13 高圧貯気槽

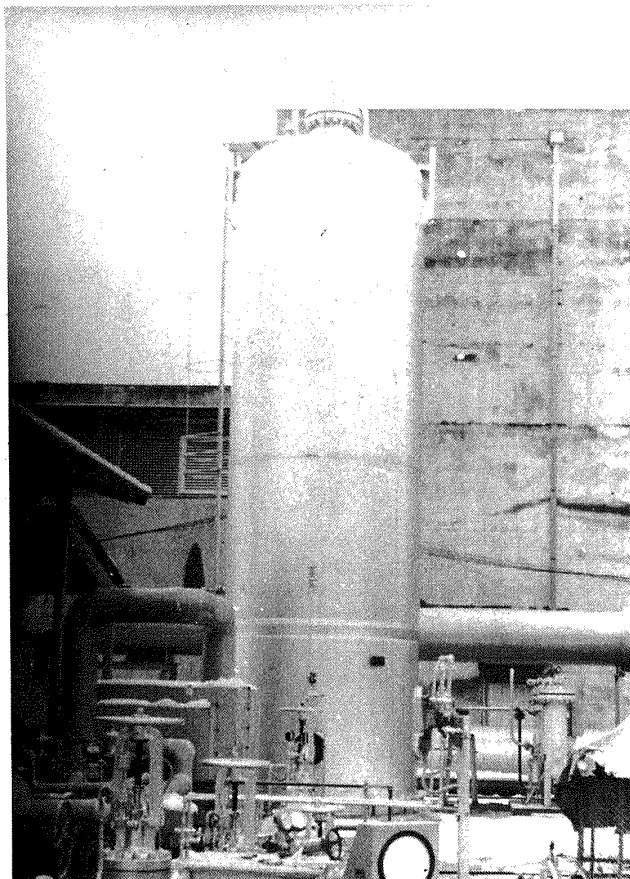


図 14 30 m³ 貯気槽

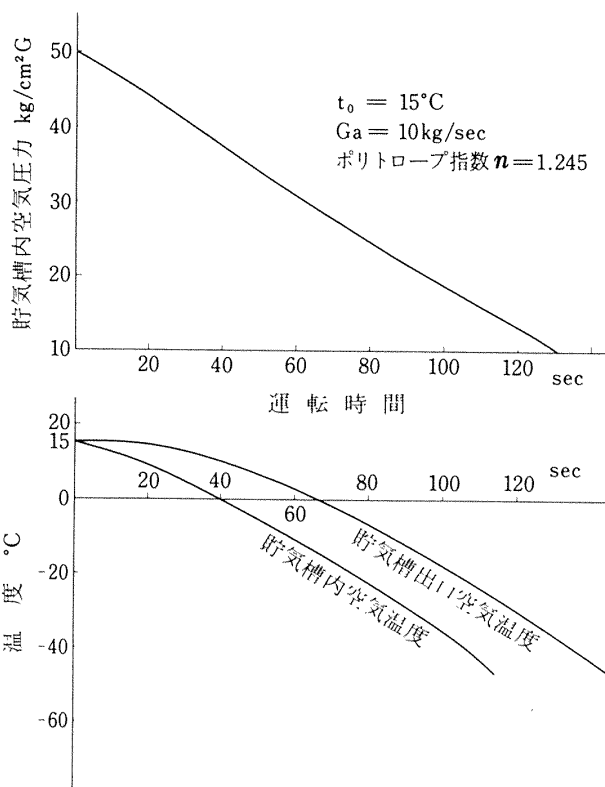


図 15 貯気槽の特性 (計算値)

4.4 空気加熱器

空気加熱器は, ペブル蓄熱式で, あらかじめプロパンバーナにより, 大気圧状態にて所要の温度にペブルを加熱しておく。空気は, ペブル出口側の温度まで加熱されて供試燃焼器に流れる。表 9 に, この系統の各機器の仕

表9 空気加熱器系仕様

空気加熱器系仕様		
本体	内径 円筒部長さ 鏡形状 材質 常用圧力 設計圧力 最高温度 伝熱媒体 温度設定範囲 安全弁	1,000 mmφ 2,200 mm 2:1 半だ円 S B 46 M 30 kg/cm ² G 33 kg/cm ² G 450°C ムライトボール (アミルナ系) 3/8", 2,000 kg 100 ~ 450°C 口径 100 × 150 A 吹出し圧 33 kg/cm ²
バーナ	使用燃料 燃料圧力 燃焼容量 着火方式 温度制御	プロパンガス 0.5 kg/cm ² G (0.5 ~ 1) × 10 ⁵ Kcal/h パイロット着火 遠隔自動
混合器	混合流体 出口温度	{ バーナ燃焼ガス 稀釈用空気 100 ~ 450°C
バーナ用 ブロー	流量 吐出圧力 モータ	16.7 Nm ³ /min 1,500mm Aq 全閉外扇形 22 kw

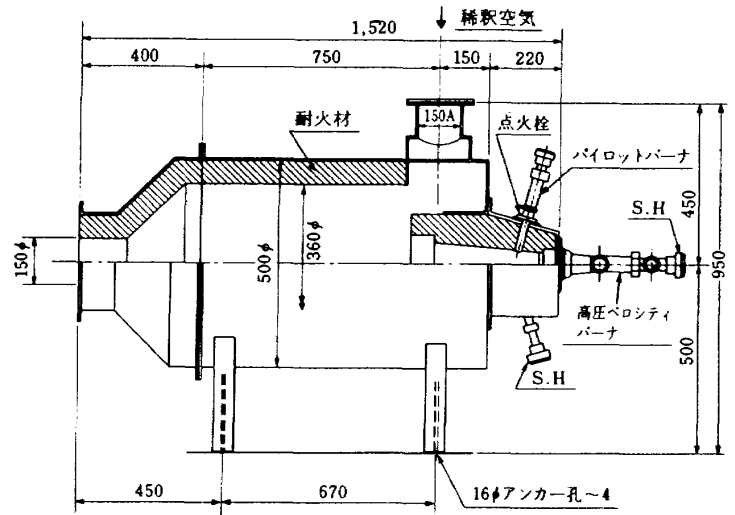


図17 プロパンバーナおよび混合器

様を示す。図16は、バーナ用ブローの外形図、図17はプロパンバーナおよび混合器、図18はベブルタンクを示したものである。ベブルは、図18の格子に1.7 mの高さまで充填する。

図19は、ベブル加熱特性の計算値で、ベブル初期温度0°C、ベブル比熱0.24 Kcal/Kg degC、充填比重量1,500 Kg/m³、バーナ熱量1 × 10⁶ Kcal/hとしたときのものである。図20は、実測例で、図19の計算値より加熱時間が長くなっているが、これは、加熱空気流量が少なかつたためである。図21は、5時間加熱したときのベブル層温度分布の計算および実測例である。図22は、初期状態として図21の計算値を考えたときの空気出口温度の変

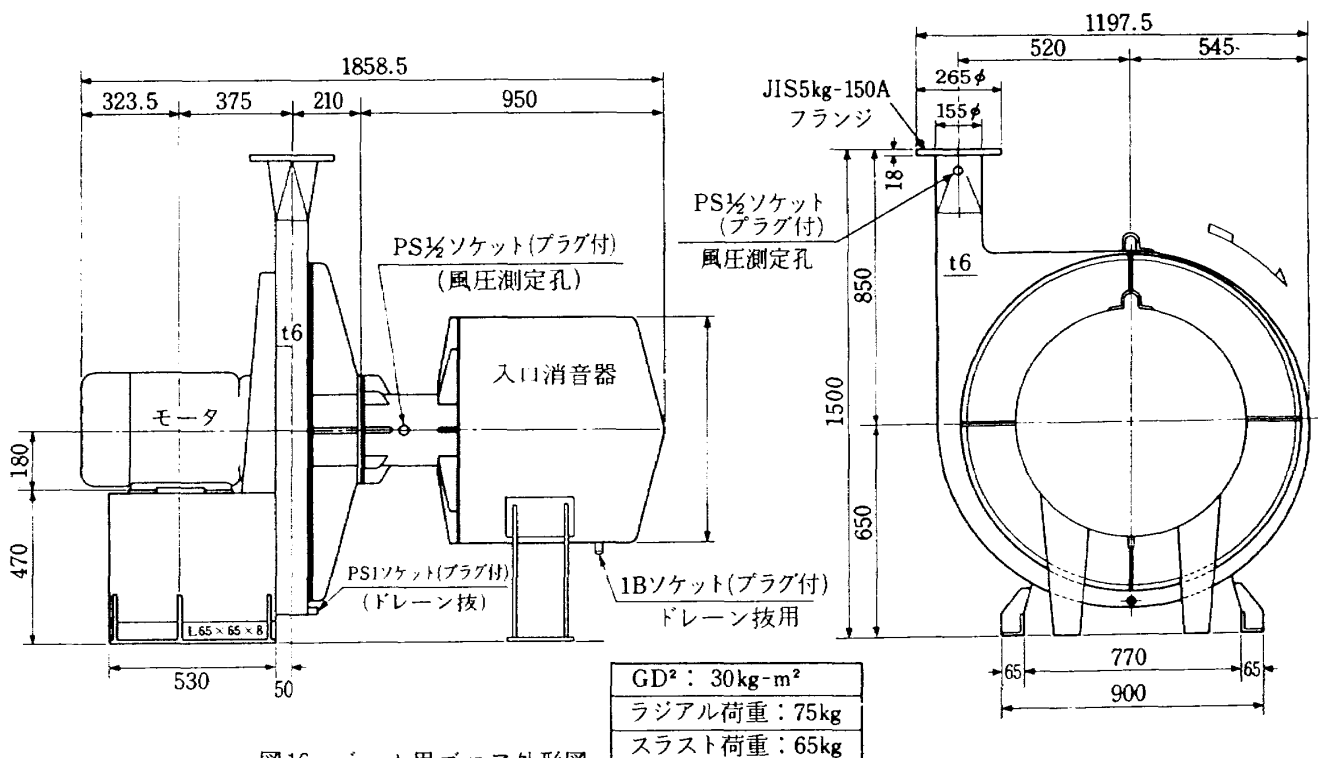


図16 バーナ用ブロー外形図

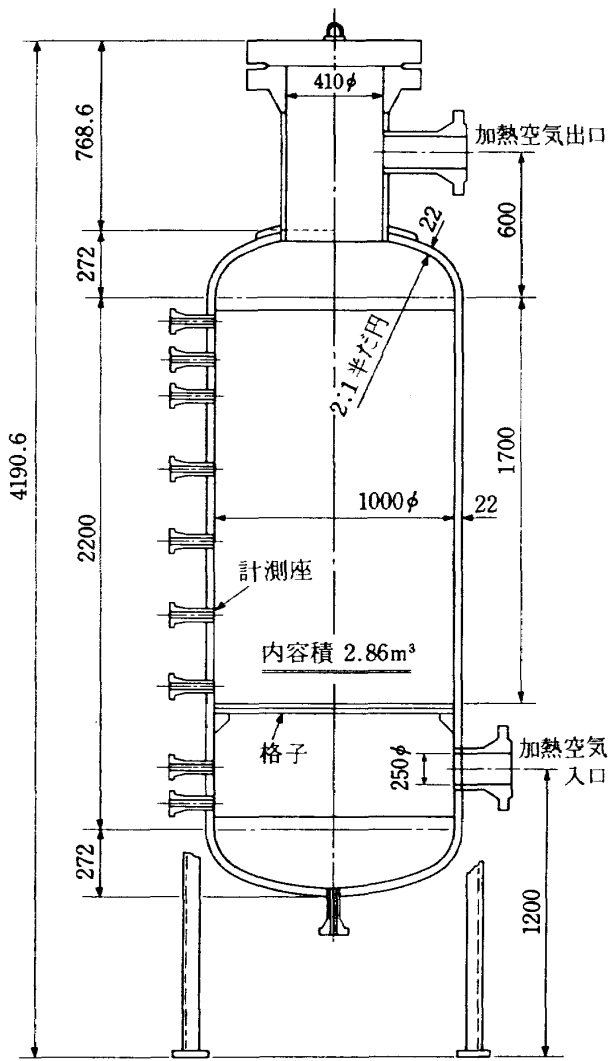


図18 ベブルタンク

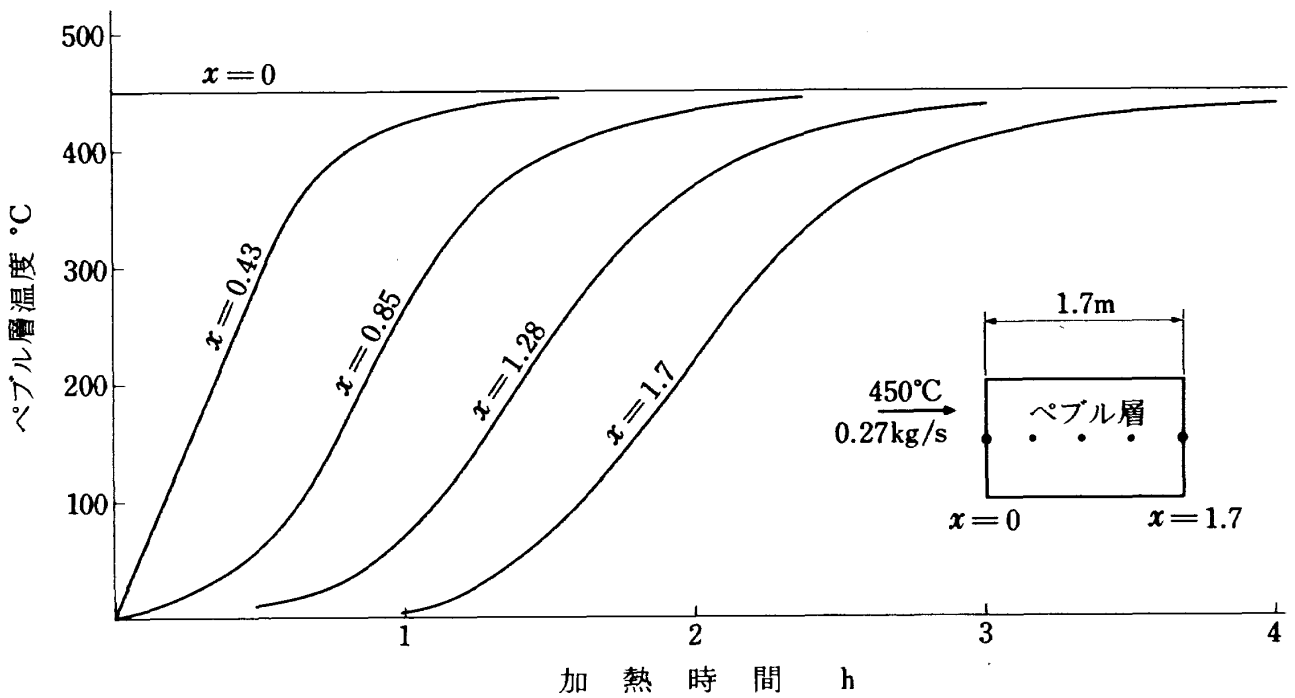


図19 ベブル加熱特性 (計算値)

空気供給圧力 : 1500mmAq
 設定温度 : 450°C
 メインバーナ空気量 : 全開
 燃料圧力 : 0.4kg/cm²G

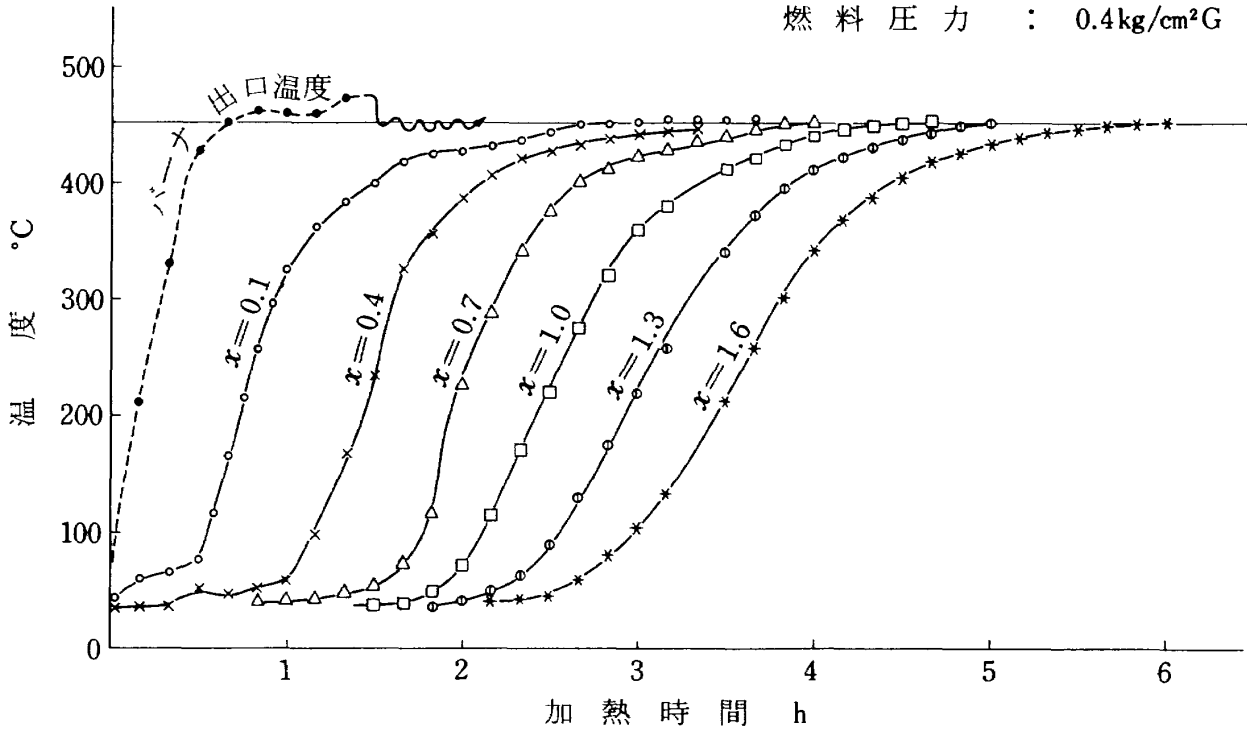


図20 ベブル加熱特性 (実測例)

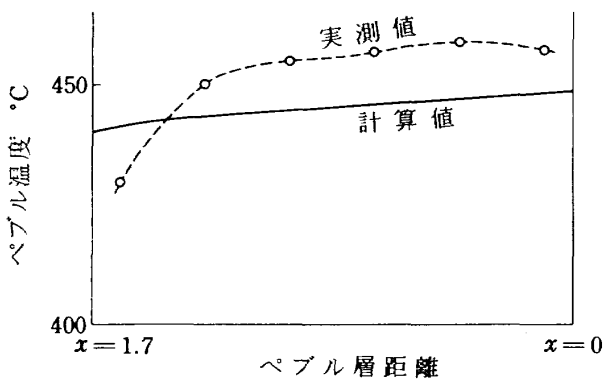


図21 ベブル層温度分布例

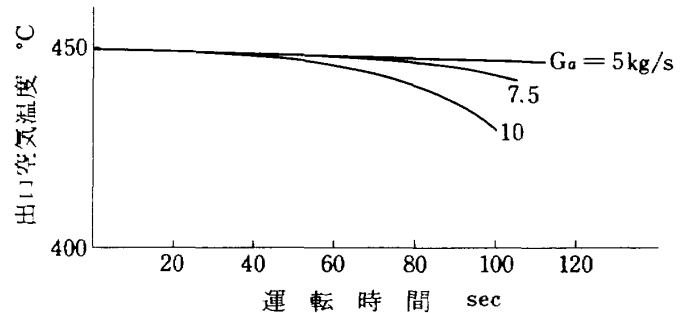


図22 空気出口温度 (放熱特性 — 計算値)

化を示したものである。本装置の最大空気流量 $G_a = 10 \text{ Kg/s}$ 、実験時間 60 秒において、空気温度の変化は、約 4 degC であり、仕様要求値の 10 degC 以内を充分満足している。

空気加熱器外板の材質は、SB 46 M で、その許容引張応力-温度特性を図 23 に示す。図 23 の実線の範囲 ; 450 °C 以下、で使用可能である。

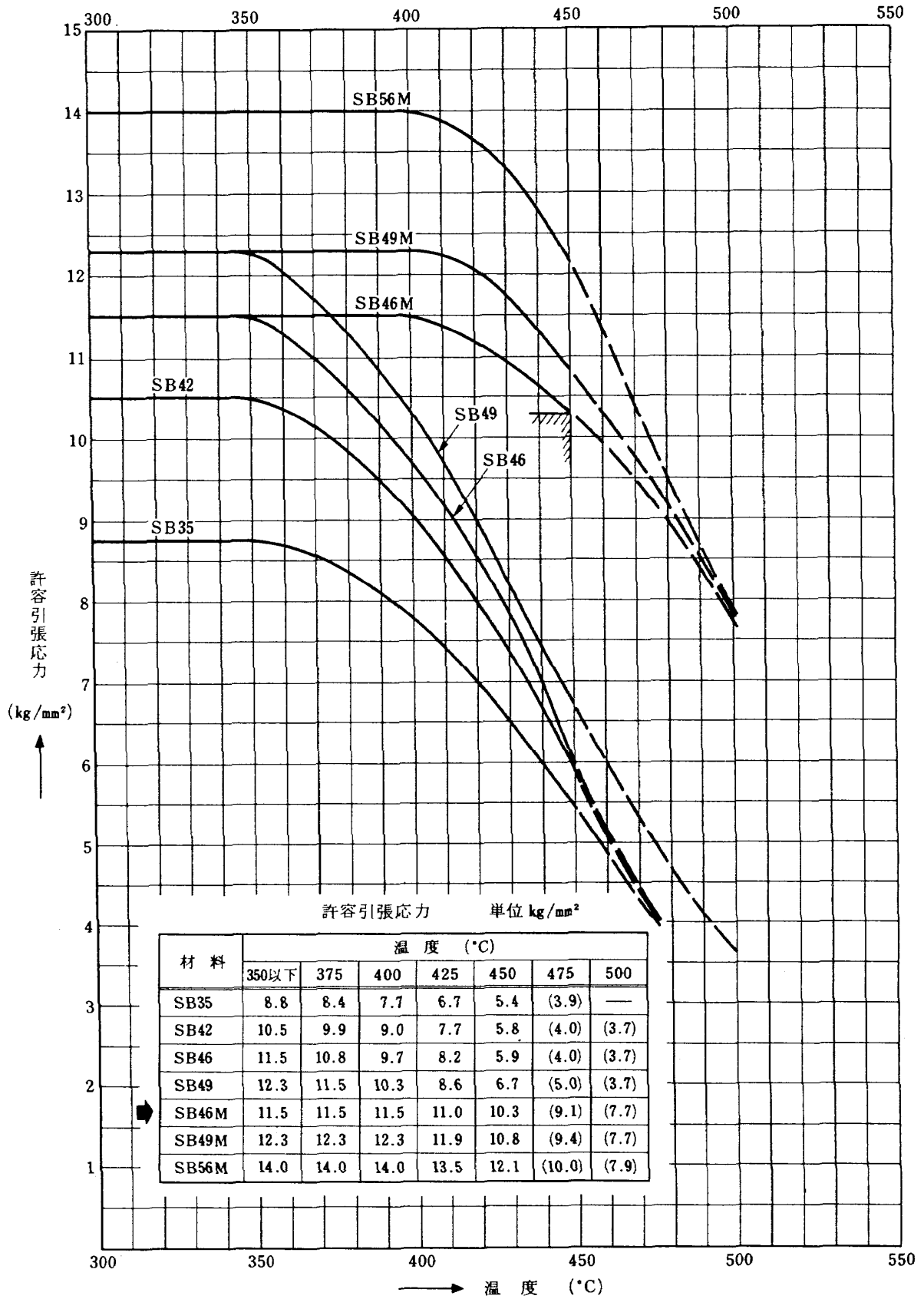


図23 ボイラ用炭素鋼鋼板の許容引張応力 (JIS B8243-1969)

4.5 排ガス冷却器

排ガス冷却器は、入口ダクトと本体からなる。この仕様を表10に、断面図を図24に示す。入口ダクトは直径270mmの管で、外壁を水冷とし、冷却水はダクト内に噴射して燃焼ガスの冷却に用いる。ダクト出口側には多孔板を巻き、燃焼ガスおよび冷却水を小孔から噴出す形式とした。これは、噴流エネルギーの分散をはかること、低周波騒音の軽減をはかることを目的としている。本体は、直径1mのダクトで、上流部分を水冷壁とし、冷却水は内部に噴射する。また、この箇所にはラプチャディスクと安全弁出口の配管を接続し、安全装置作動時の騒音を防止している。

表10 排ガス冷却器仕様

燃焼ガス流量	10 kg/S (最大)
燃焼ガス温度	1,300°C (最高)
冷却器出口温度	250°C (以下)
冷却水量	500 kg/mn(以下)
設計圧力 内圧	1.5 kg/cm ²
設計圧力 外圧	6 kg/cm ²
使用材料	S S 41
重量	1,730 kg

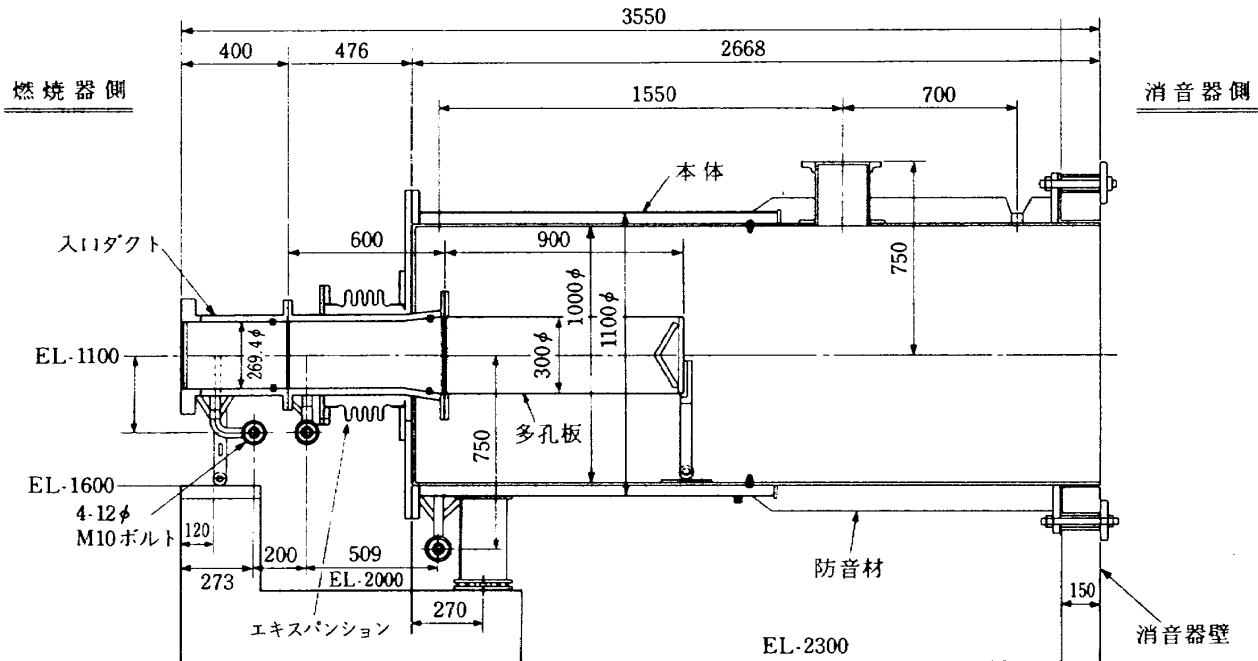


図24 排ガス冷却器

4.6 出口消音器

出口消音器は、充分な容積をもつ迷路形とし、側壁および天井に吸音材を内張りした。吸音材は、厚さ100mmのロックウールで、気流によってはがれないように注意した。消音器側壁のうち、排ガス冷却器出口に面した箇所は、高速の水滴などの衝突を考慮して、板厚3.2mmの鋼板を張り、コンクリートを保護している。消音器全体は地下におさめ、外壁からの騒音発散を防止した。図25に、この概要を示す。

5. 運転操作

本装置の運転操作を12のステップに分けて図26に示

す。図26の①の操作は通常10～12時間必要であり、実験前2日間にわたって行なう。③の操作は3～4時間必要で、実験日の前の半日をあてる。⑧の実験条件の設定は、すべて制御用計算機に入力する。この他の操作は、手動弁の閉と電気回路の断・接である。

6. 制御および計測システム

制御および計測システムの役割としては

- 1) 実験条件を整えること。
- 2) 安全に実験が行なえること。
- 3) 実験の状態を記録すること。

の三つをあげることができる。特に、本装置では高圧高温の空気を使用して燃焼実験を行なうことから、安全対策に十分な考慮を払わなければならない。また、貯気槽

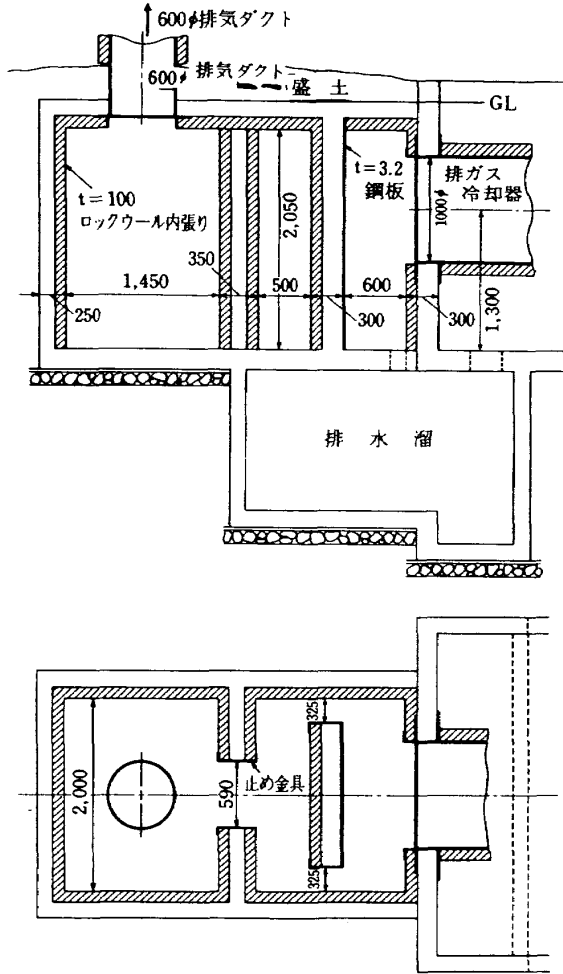


図25 出口消音器

- ① 高圧貯気槽に空気を貯える。
- ② 制御用空気を供給する。
- ③ ペブルヒータを加熱する。
- ④ ドレンポンプを運転する。
- ⑤ 冷却水を噴霧する。
- ⑥ 基準圧発生装置を起動する。
- ⑦ 始動条件を確認する。
- ⑧ 実験条件の設定をする。
- ⑨ 実験を始める。
- ⑩ 実験計測する。
- ⑪ 実験停止させる。
- ⑫ 停止後の処理をする。

図26 運転操作のステップ

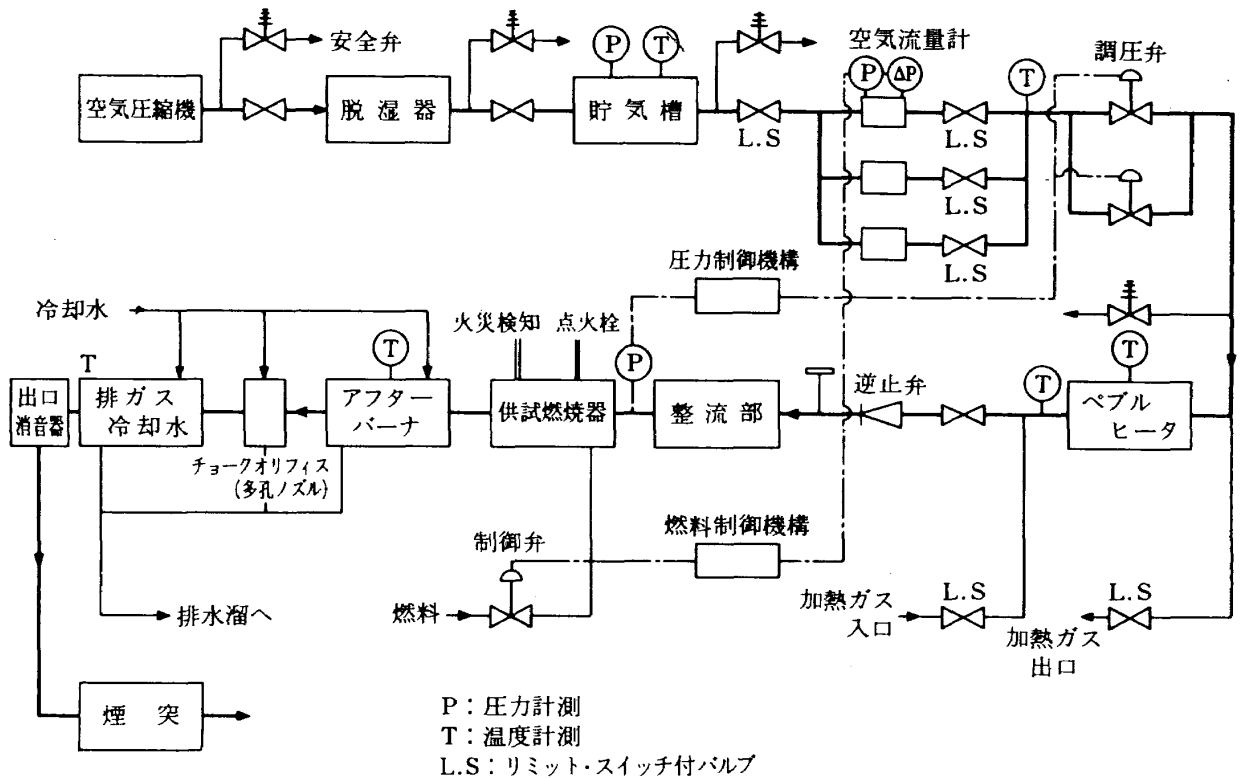


図27 空気系統計装フローシート

の容量から実験時間が制約されているので、実験条件を整えるための制御には、応答のはやいことおよび安全性の良いことが要求される。このための制御方式として、調節計の入力を計算機で制御するSPC（Set Point Control）方式を用いている。

空気系統の計装フローシートを図27に示す。

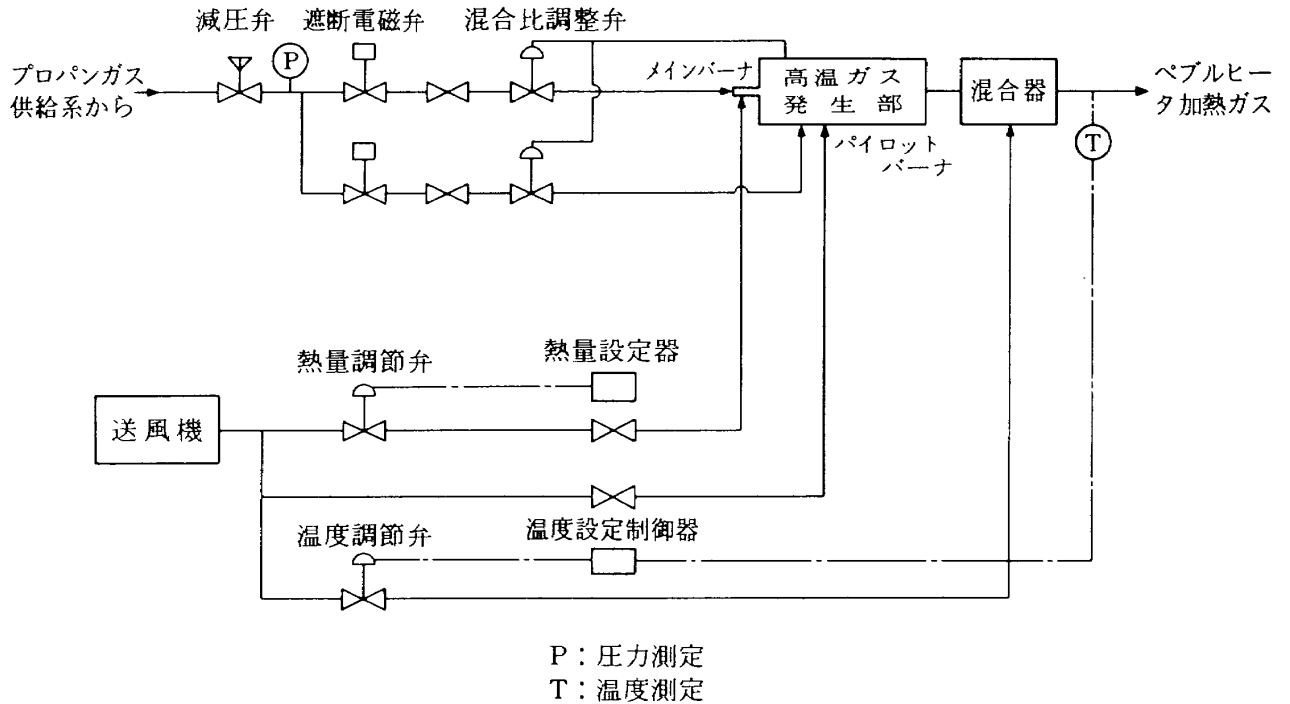


図28 ペブルヒータ加熱ガス発生系統計装フローシート

加熱ガス発生系統計装フローシートを示す。高温ガス発生炉は、燃焼空気量に合せて常に理論混合比に保たれるようにベンチュリ形バーナと差圧型混合比調整弁によって自動的にプロパンガス流量が制御されるので、熱発生量の制御は、メインバーナの空気量を調節することによって行なう。加熱ガス温度の制御は、混合気出口温度と指定温度（手動設定）との差により混合器へ流入する温度希釈空気量を調節して温度を制御（フィードバック制御）する。

供試燃焼器入口空気圧力は、アフターバーナ出口につけた多孔ノズル前後の圧力差によってきまる。これを電気回路に置き替えて図29に示す。実際の圧力検出部は燃焼器入口部にあり、圧力調整弁は制御範囲が広いので口径25 mmのものと100 mmのものを切替えて用いている。また、空気圧力の設定精度を高めるため、圧力検出範囲を0~5atgと0~30atgの二つに分けている。それぞれの検出には、大気圧との差を検出するものと基準圧との差を検出するものとの二系統があり、入口空気圧力が設定値の90%

6.1 実験条件の設定および制御

実験条件の設定は、供試燃焼器の入口空気温度、入口空気圧力および空気-燃料流量比（空燃比）の三つである。

入口空気温度は、図26の運転操作ステップ③に示したペブルヒータの加熱温度によって決定される。図28に

になると圧力比例制御から差圧積分制御へ移るようにして精度を高めている。

実験時の供試燃焼器入口空気圧力は、図30に示すように5段階からなり、それぞれの段階の設定圧力値は、計算機から圧力制御系へ指示している。第1段階は、着火を行なうための期間で、圧力を1~3 atgに設定して着火確認まで持続する。着火後の第2段階は、燃焼器内の火炎を吹消すことなく、また燃焼器出口温度の過上昇なく実験の設定圧力まで上昇させる期間であり、空気圧力のほか燃料の流量制御も同時に行なう。第3段階は、空気圧力、燃料流量の安定するのを待つ期間である。第4段階で計測を行ない、安定した測定ができれば、第5段階で停止する。空気圧力制御において、安定期間の途中で差圧積分制御になったのちは、計算機から分離され、機器のみの制御になる。

空燃比の設定では、供試燃焼器の着火可能範囲、圧力上昇時において吹消えない空燃比になるように燃料制御値を計算機が発する。実験条件の空燃比は、計算機に与

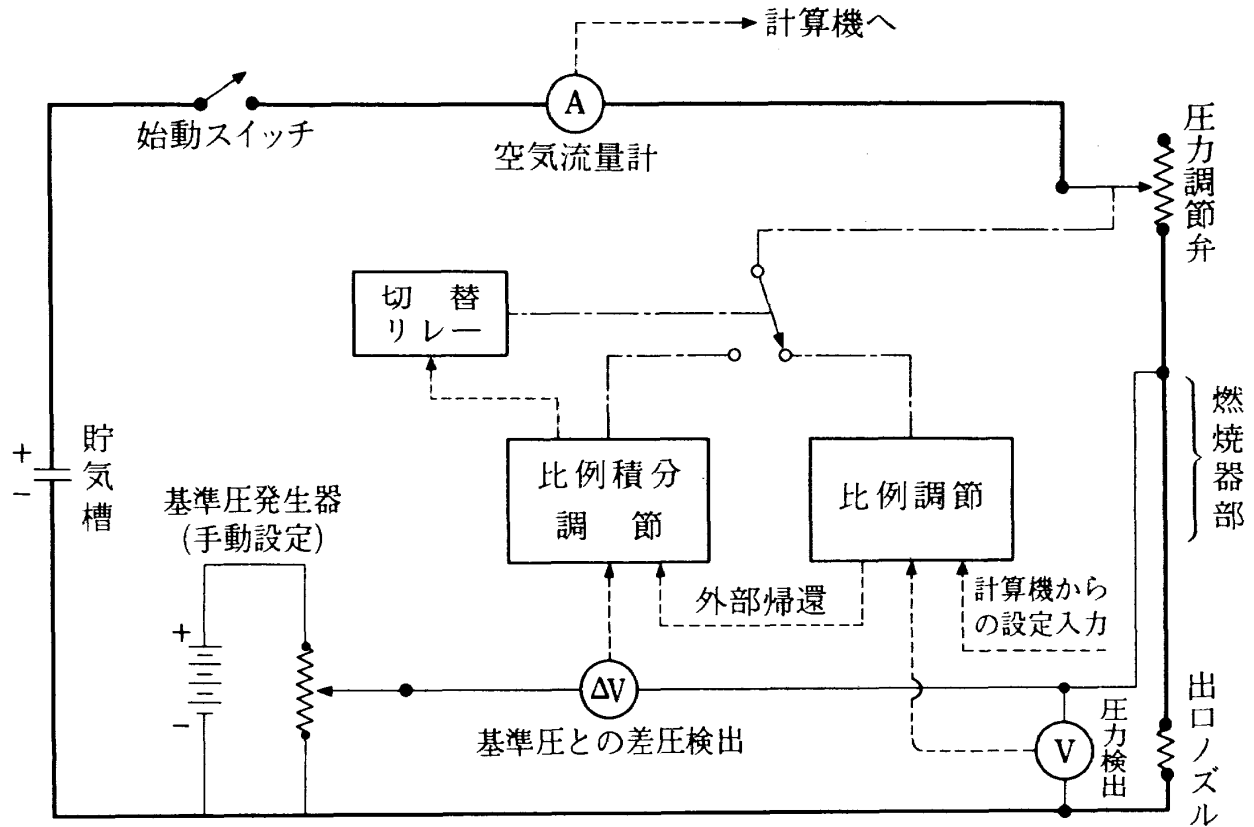


図29 燃焼器入口空気圧制御回路（電気回路に置換）

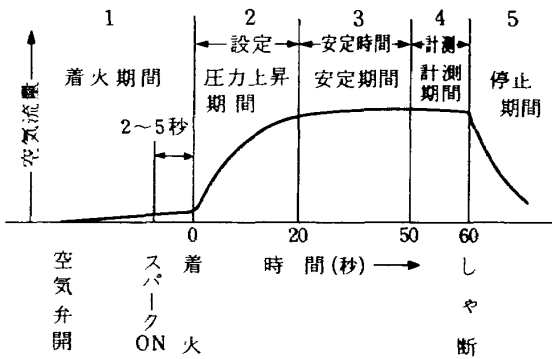


図30 制御スケジュール

えた設定値によってきめられる。図31に燃料流量制御システムを示す。燃料流量計は、流量測定範囲が広いので3種類のレンジの流量計を備えているが、1回の実験には1種類の流量計に限られるので、着火-圧力上昇時に燃料流量が少なくて、流量計から正確な流量が検出できない場合が生ずる。このため、安定期間ははじめまでは、燃料圧力による制御を行なっている。空気流量計についても着火状態の少流量のとき、流量の正確な値は測定困難な場合が多く、燃料と同様な制御方式を採用している。

6.2 保安装置

計装関係の安全対策としては、実験前の誤操作のチェック、実験中の異状の検出および実験停止（シャ断）の方法に分けられる。

6.2.1 ベブル加熱バーナ系統

始動前操作確認および条件停止回路を図32(a), (b)に示す。

6.2.2 実験用空気、燃料、冷却水、排水、制御空気系統

始動前操作確認回路を図33に示す。

火災そう失による条件停止回路を図34(a)に示す。ここでは火災検出の方法として光によるものと温度によるものを用いているが、温度計の応答速度を早くすることが応答全体のバランスの上で必要であった。装置停止時には、まず燃料をシャ断し、空気流により残留燃料を吹飛ばしてから空気を停止する。

空気系統条件停止回路を図34(b)に示す。

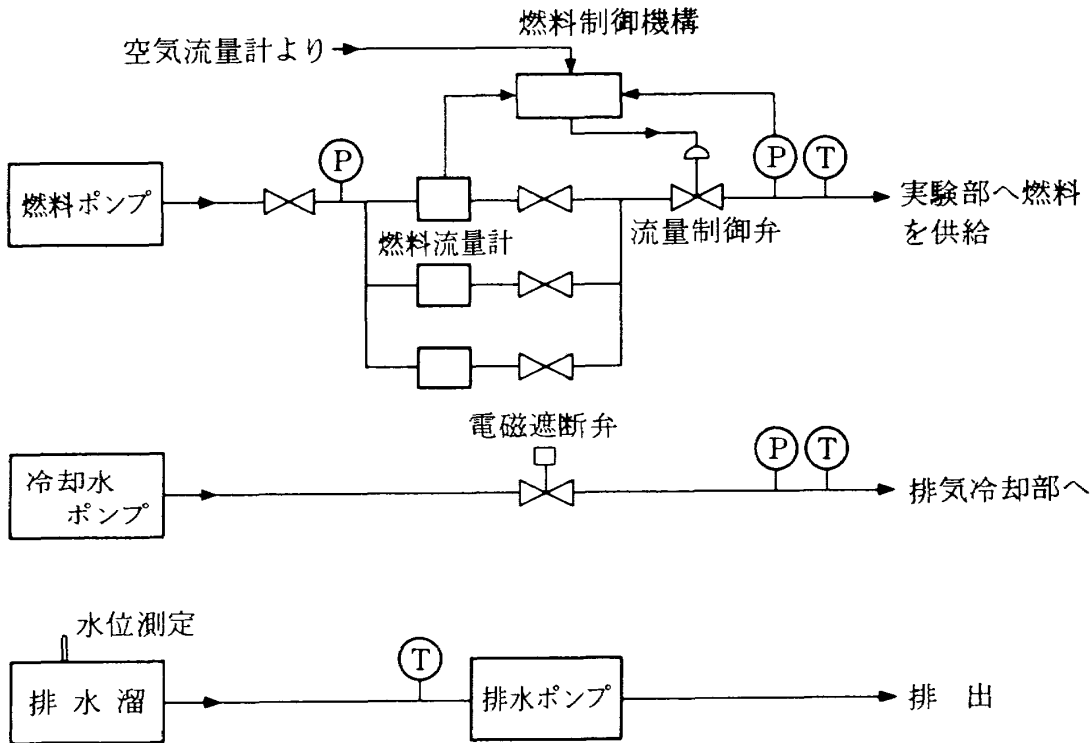
燃料系統条件停止回路を図35に示す。危険性増加の要素は、主に燃料にあるので、ほとんどの条件で燃料シャ断を行なっている。

6.2.3 危急停止系統

危急停止系統を図36に示す。これでは空気、燃料、プロパンバーナ系をシャ断する。

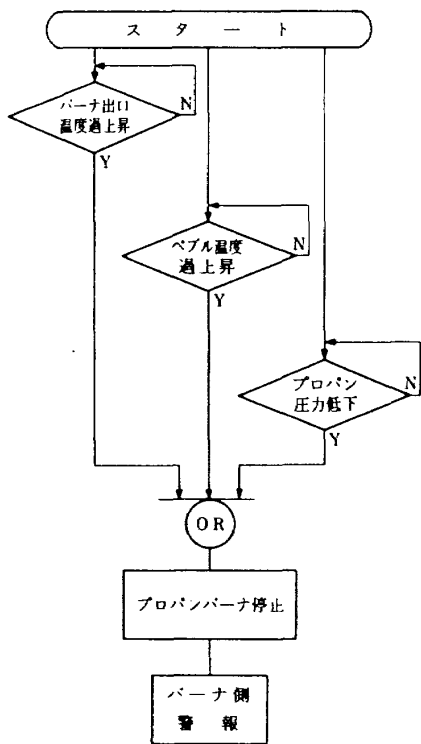
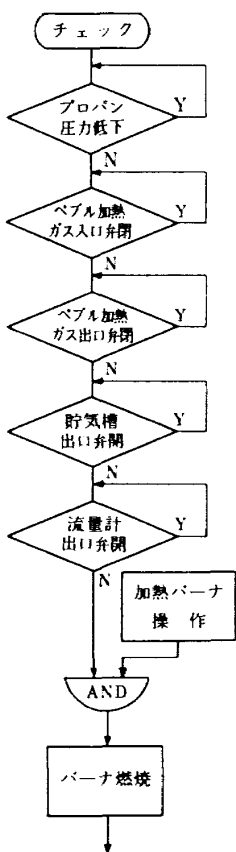
6.2.4 その他

ランプテスト、ブザーテストにより保安装置のチェックを行なう。実験前の操作の確認は、主として弁につけたリミットスイッチで行なう。



P: 圧力測定
T: 温度測定

図31 燃料、冷却水、排水系統計装フローシート



(a) ベブル加熱バーナ始動ロック回路

(b) ベブル加熱バーナ条件停止回路

図32 ベブル加熱バーナ保安装置

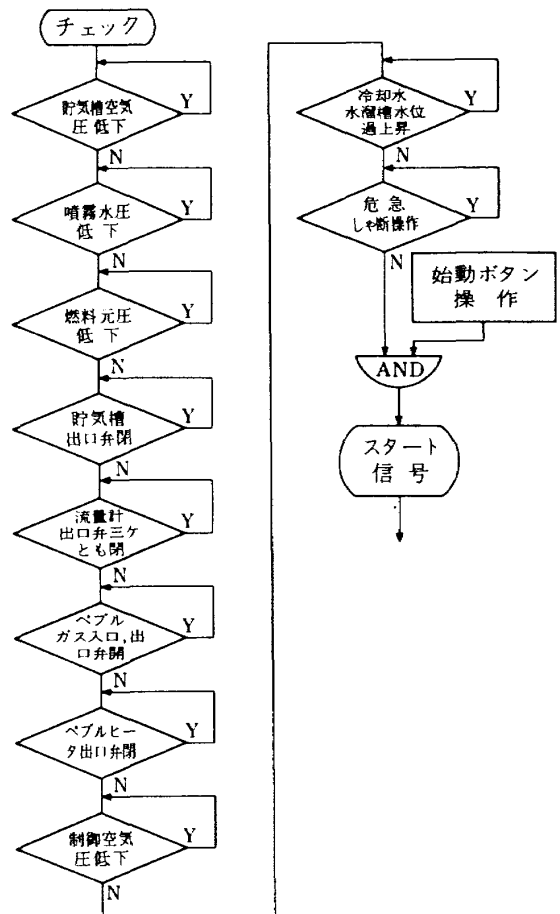


図33 実験始動ロック回路

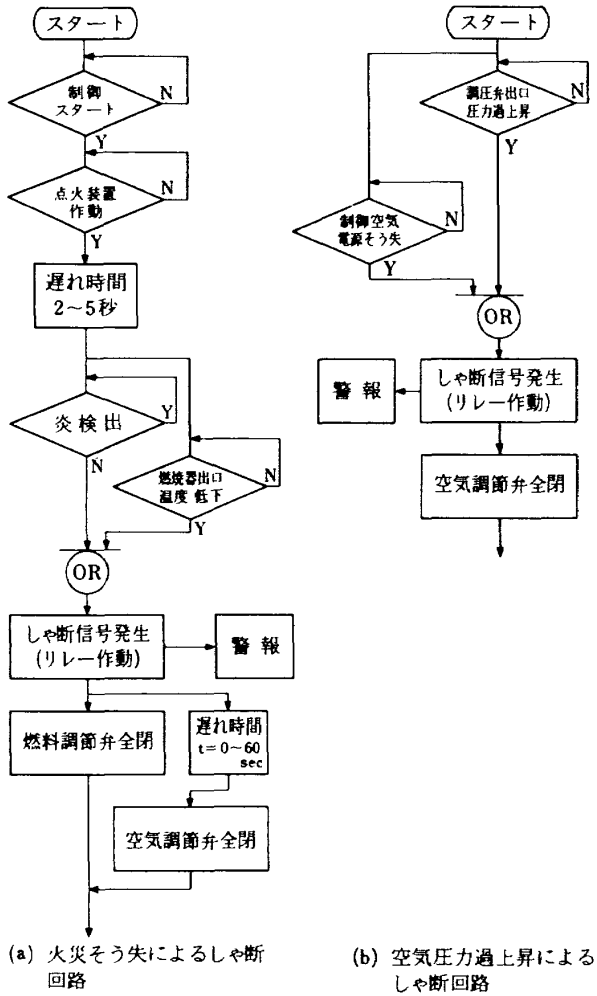


図34 火災そう失および
空気圧力過上昇によるしゃ断回路

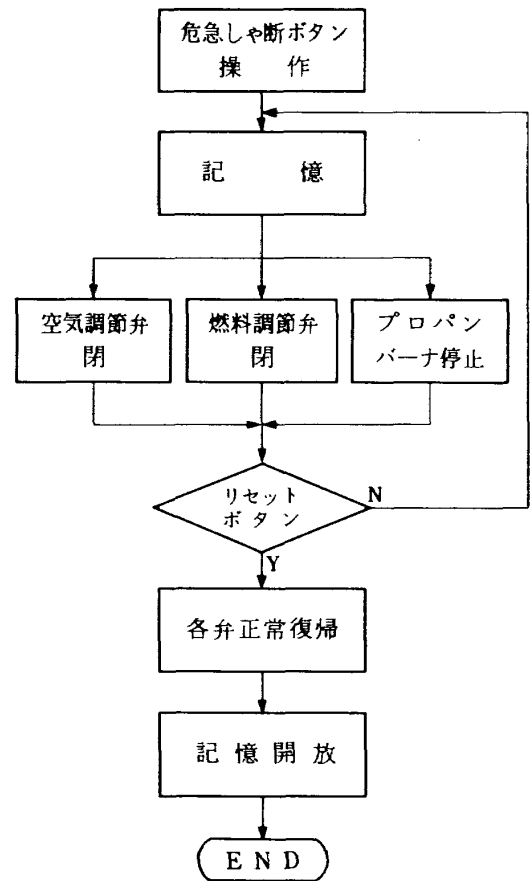


図36 危急停止回路

7. 制御装置

この試験装置は、貯気槽の空気を吹出し試験する型式をとっているため、試験時間は極めて短い、すなわち約60秒で試験を完了する必要がある。その間に図30に示すように、空気弁の開度設定、燃料噴射、試験条件の設定、定常状態の保持、計測、停止とそれぞれ異なるシーケンス制御を行わなければならない、また試験条件の設定にあたっては高温の空気流量を瞬間的に計測演算し、空燃比を一定に制御する等、通常の制御装置では、きわめて困難な制御が要求される。

また、これらの試験は高压、高温のもとで行なわれ、ほとんど未知の条件で行なわれる関係上、その制御の方法は、次々に変るものとみなければならない、そのため、制御装置ならびに制御方式は、柔軟性に富んだものでなければならない。

これらの装置は、試験設備の関係上、比較的環境条件の悪い場所に設置せざるを得ない、このため産業用プロセス制御用の機器を中心として構成する必要がある。

以上の点を考慮し、制御装置として、プロセス制御用のデジタル計算機を中心とした計算機制御システムを採用することにした。

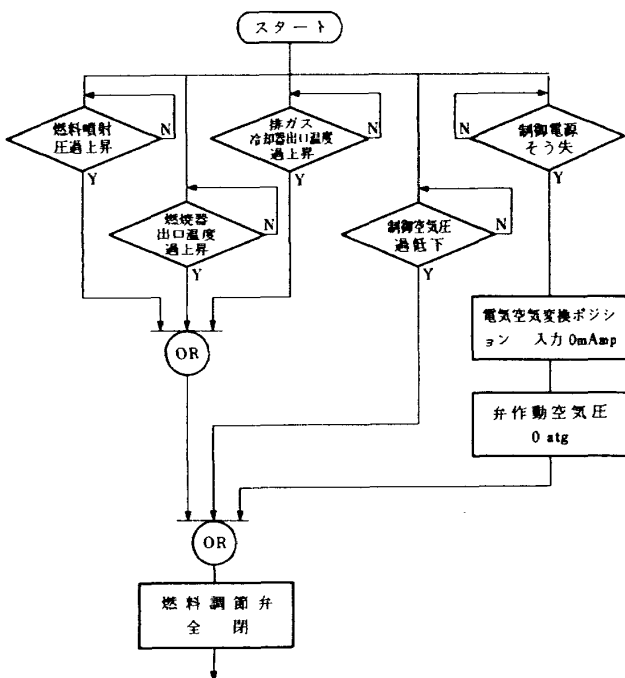


図35 燃料系統条件しゃ断回路

7.1 制御システム

制御システムの系統図を図 37 に示す、このシステムの中心となる 空気流量ならびに燃料流量の制御には、プロセス用の調節計、サーボ弁を用い、これを計算機で制御する方式をとっている。空気流量を計算するための温

度、圧力、差圧の計測には、本装置の野外設置の条件から、プロセス用の検出器を用いている。

この制御システムの細部の系統図を図 38～図 40 に示す。

試験条件は実験に先立ち、計算機に接続されたタイプ

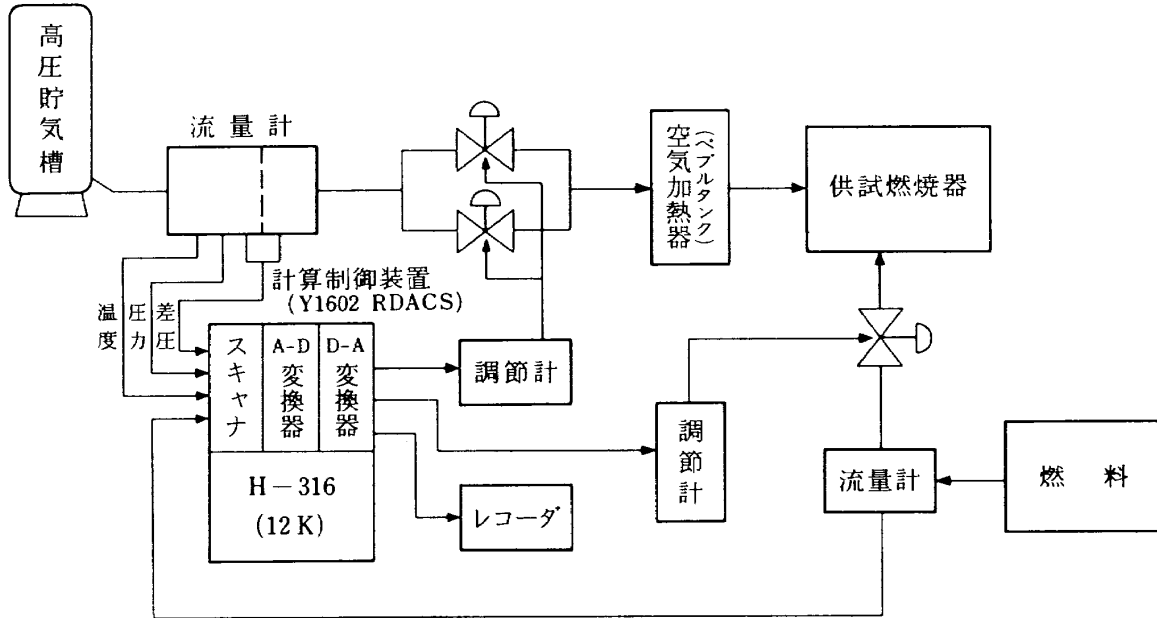


図37 系統図

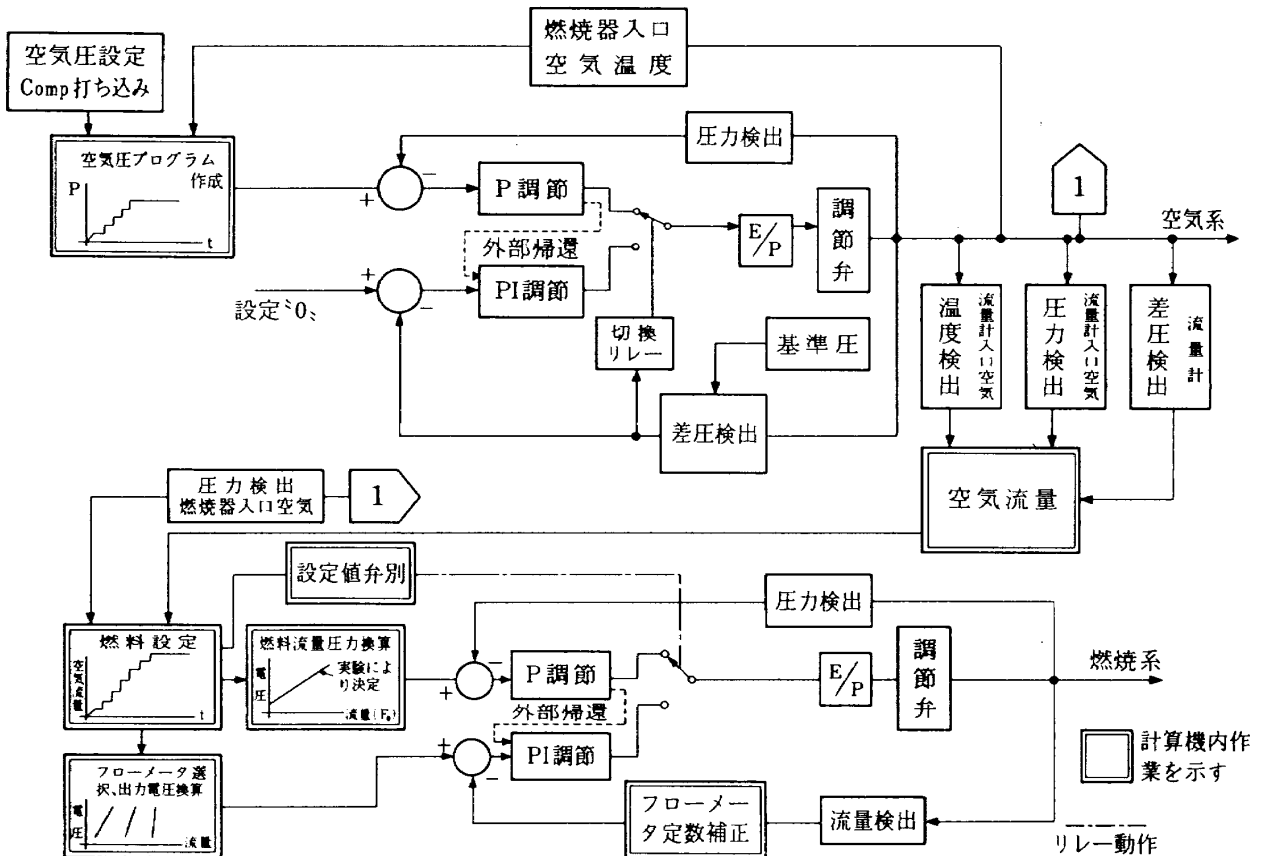


図38 制御システム系統図

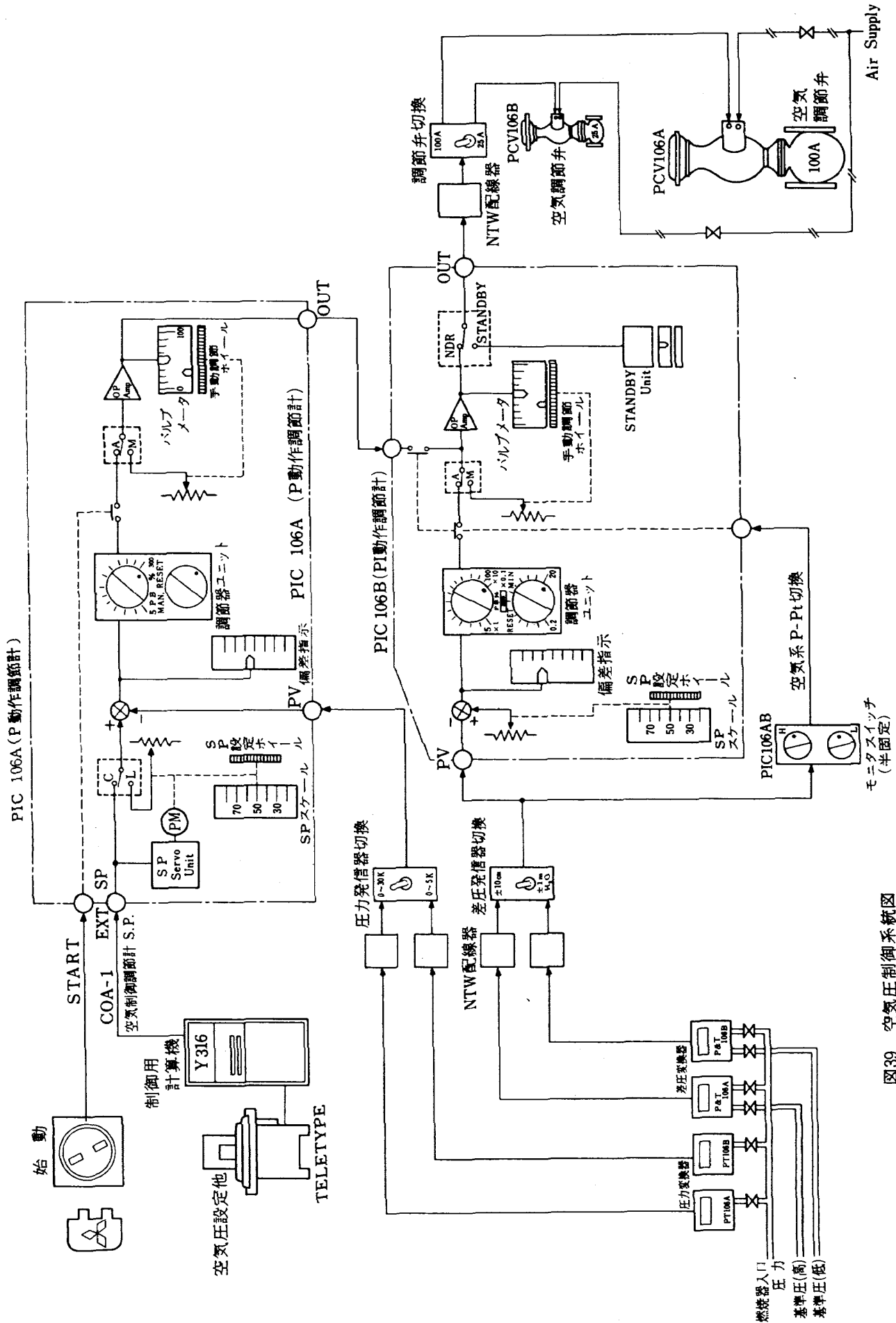


図 39 空気圧制御系統図

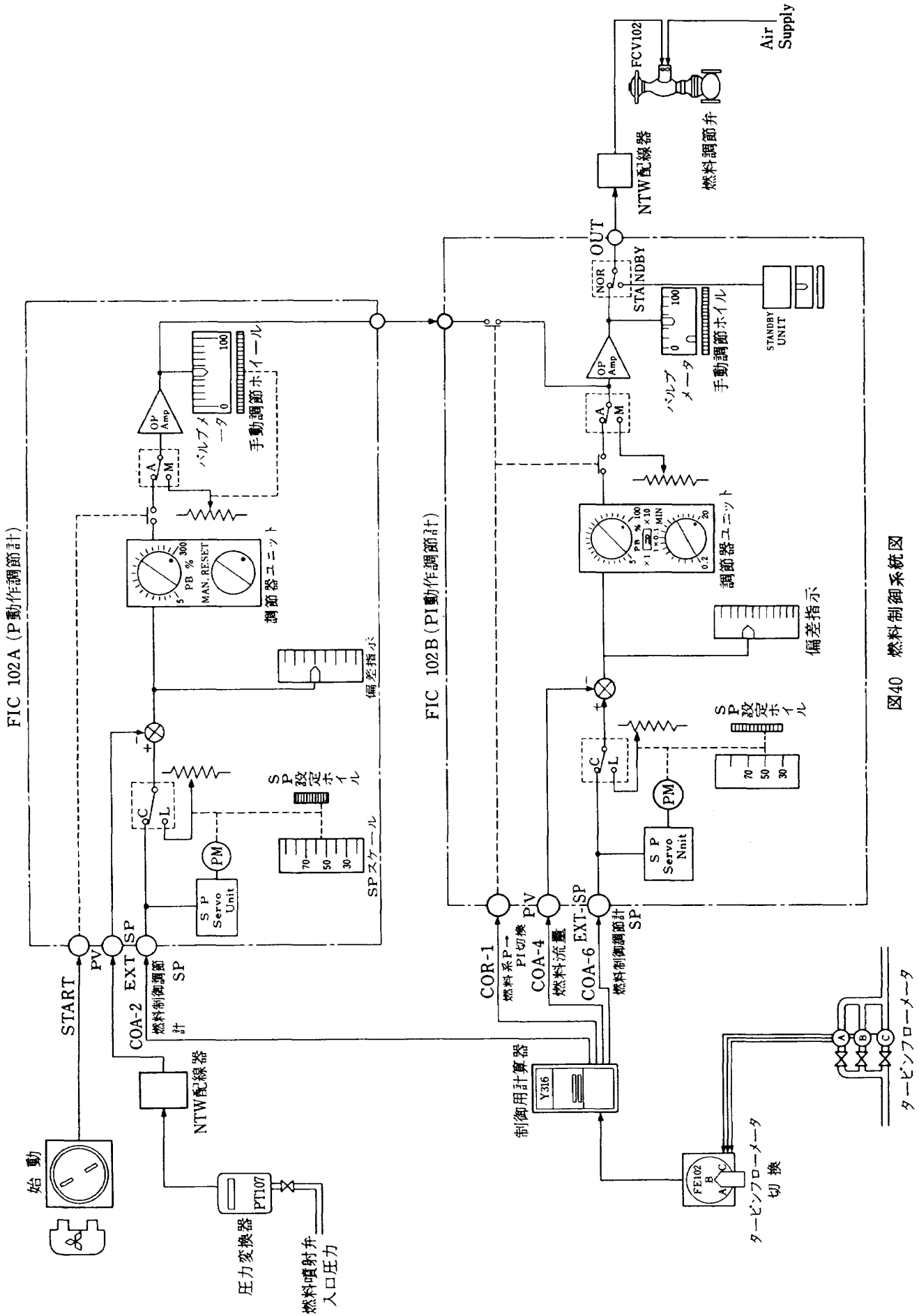


図40 燃料制御系統図

ライターにより計算機に入力される。入力データを表 11 に示す。

表 11. 入力データ

設定	例
燃焼器入口空気圧力	10 kg/cm ² G
最大燃料流量	50 g/S
着火設定ステップ数	10 STEP
設定空燃比	50
着火空気圧力	2kg/cm ² G
着火燃量流量	20 g/S
空気流量計総合係数	7,154
燃料流量計係数	0.174

試験用ソフトウェアのフローチャートを図 41～図 46 に示す。

7.2 制御用計算機

制御用計算機として、比較的外部ノイズの影響を受けない、DTLのNAND素子より構成されるハネウェルH 316を用いた。その規格を表 12に外観を図 47 に示す。

7.3 インターフェース

計算機と試験設備制御用機器を結びつけるインターフ

ェースとして、プロセス制御用に設計され、標準化されているハネウェルシステム 1602 を採用した。

このインターフェースは計算機H-316と同一の論理演算素子DTLを中心として構成されており、ノイズマージンがTTLを中心としたものに比べ優れている。その系統図を図 48 に、外観を図 49、個々の素子の配置を図 50 に示す。

7.4 制御方式

この装置による試験方法の代表的なものは、空燃比が一定になるよう燃料を制御することであるが、燃料制御の方式とし、プロセス制御用の燃料調節弁を用いる方式をとった。図 40において、燃料流量は計算機のインターフェースに内蔵されているカウンタで計測し、これが目標とする燃料流量になるよう燃料調節弁を計算機出力により制御する。燃料噴射弁の絞りの前後の差圧と燃料流量との関係はあらかじめ計測しておき、その差圧になるよう調節弁を制御する間接的な方法を用いている、なお調節弁の作動はP動作で、入力すなはち計算機の出力と噴射弁の絞り前後の差圧は比例する。燃料流量と差圧の実測値を図 51 に示す。

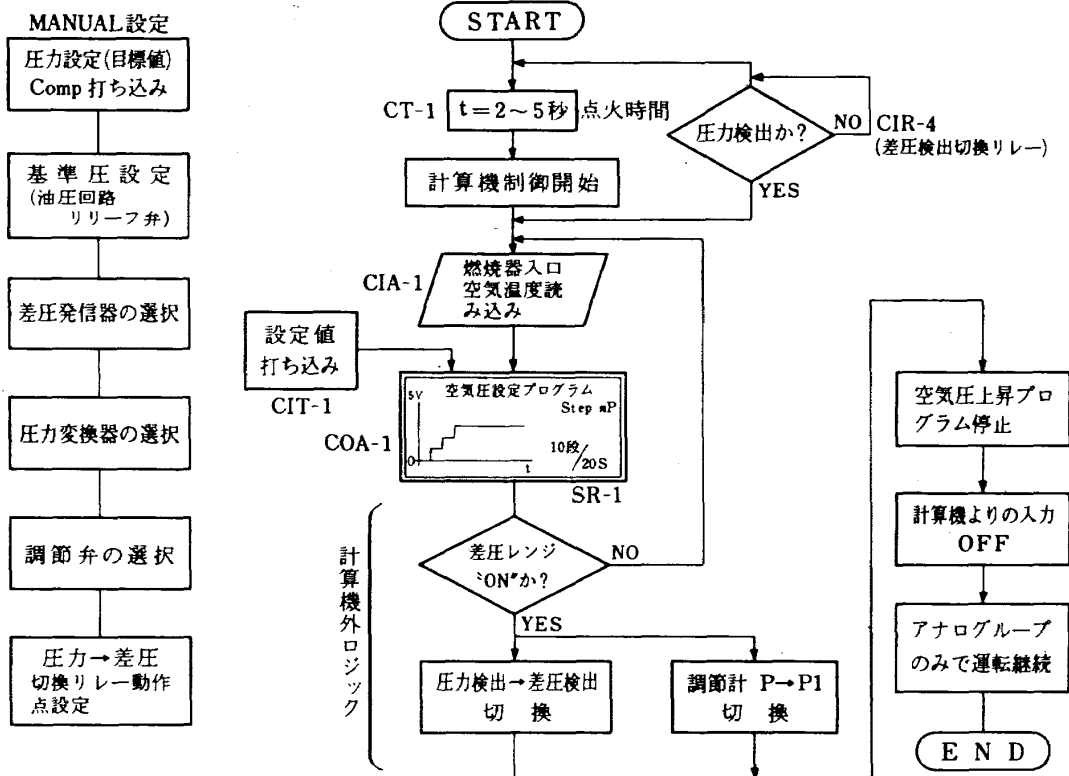


図41 空気圧制御

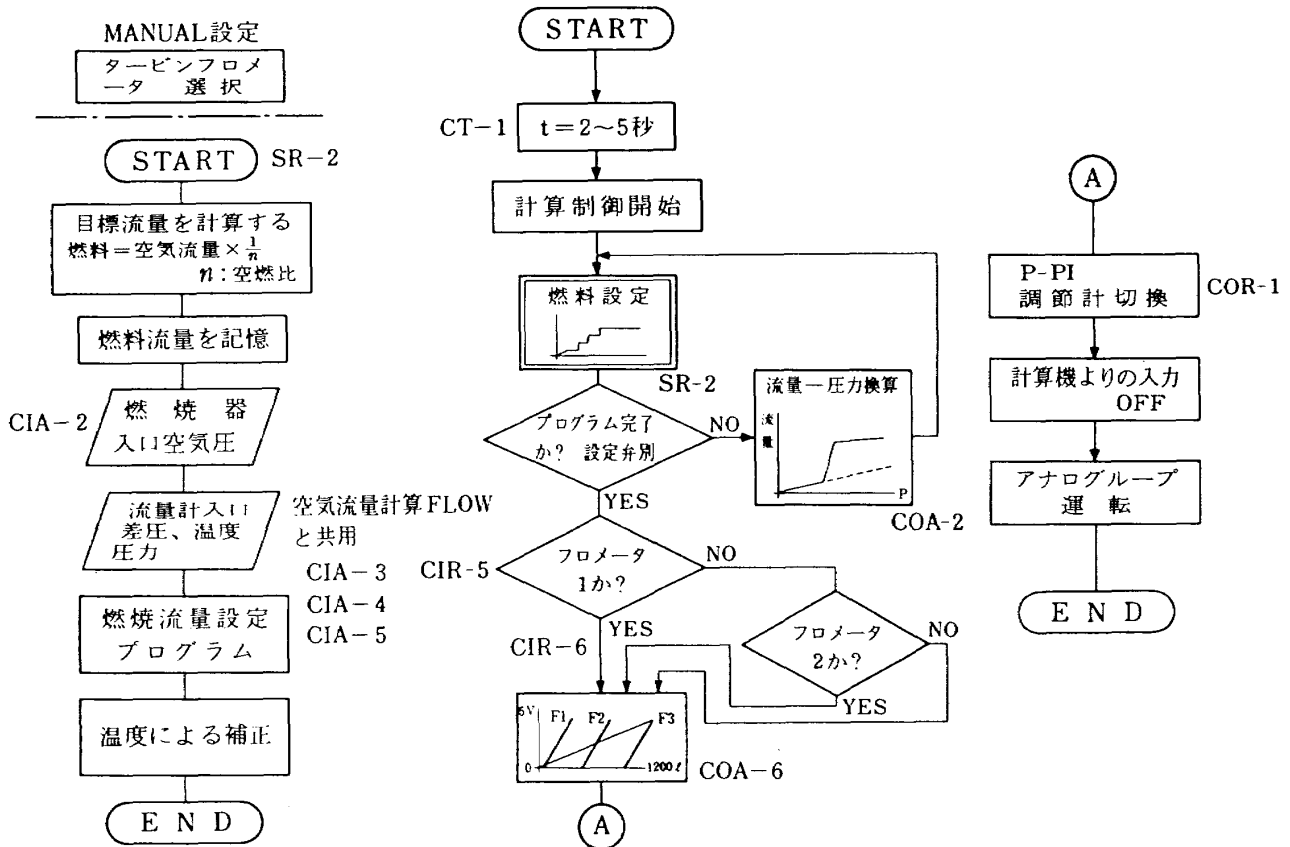


図42 燃料制御

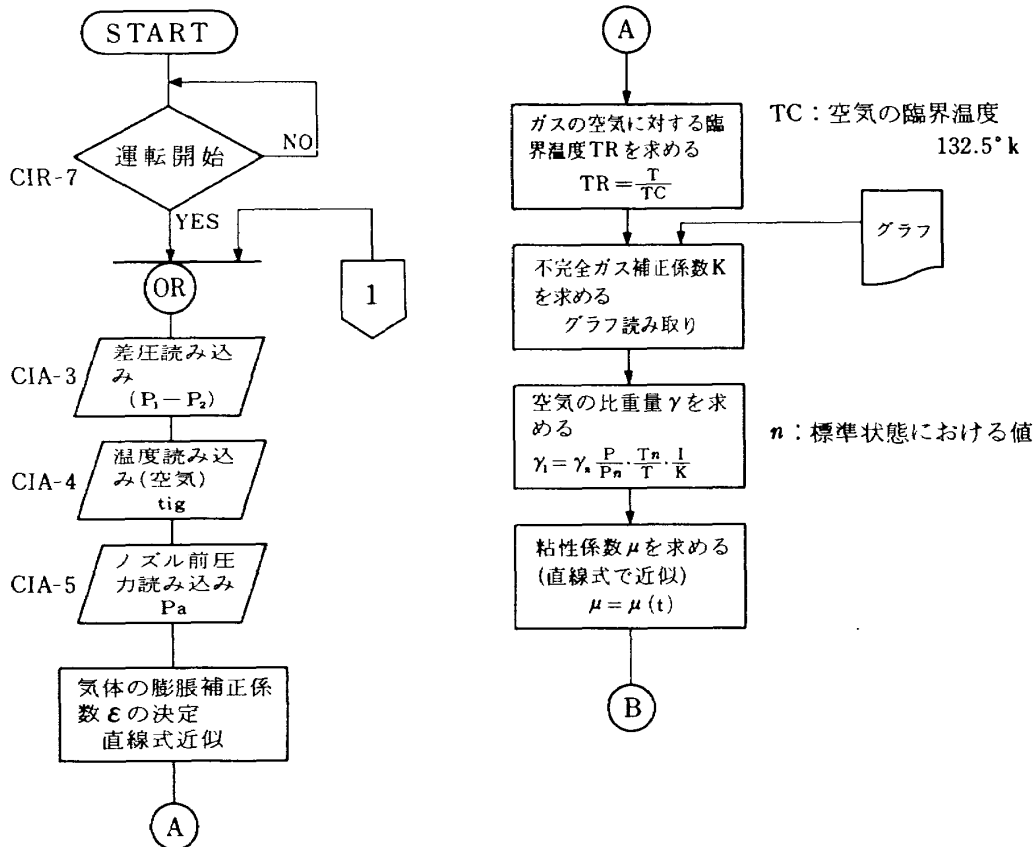


図43 空気流量補正 (I)

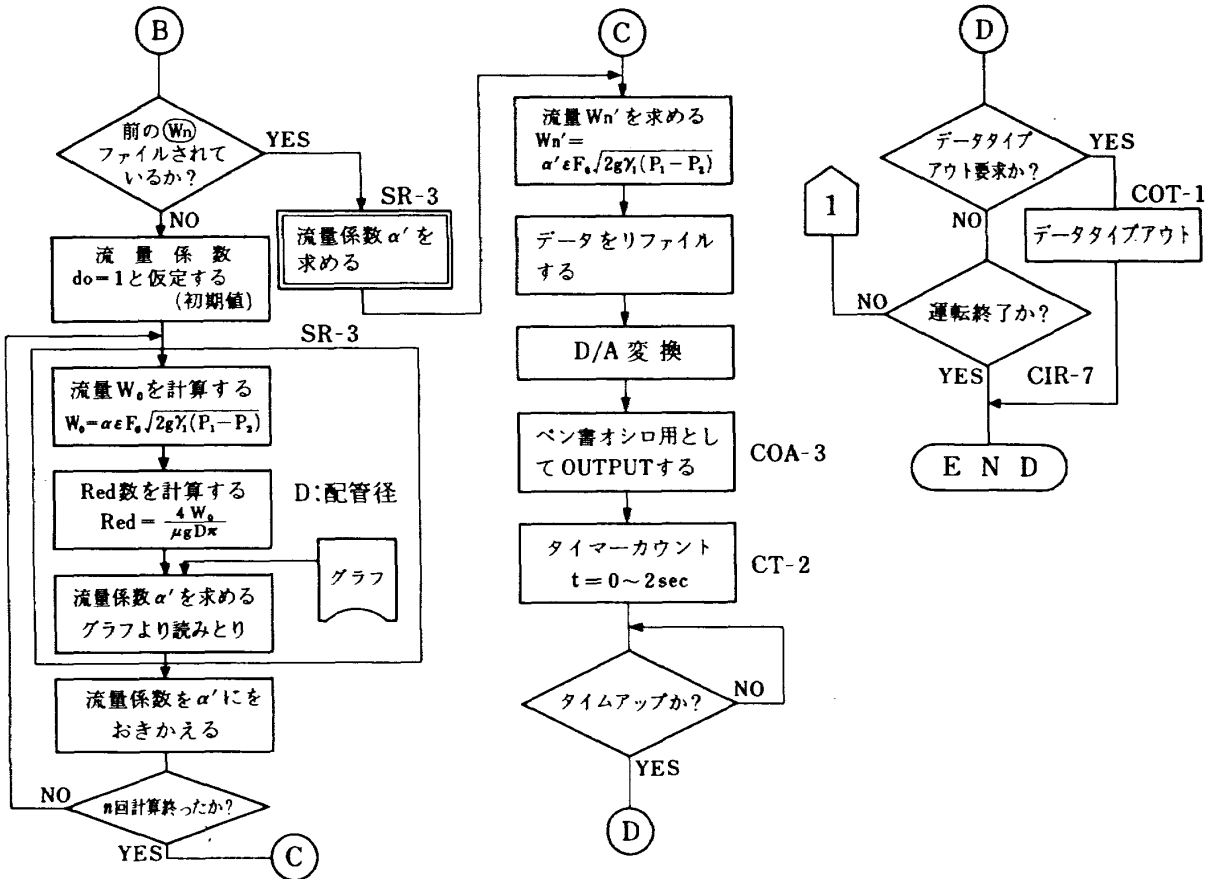


図44 空気流量補正 (II)

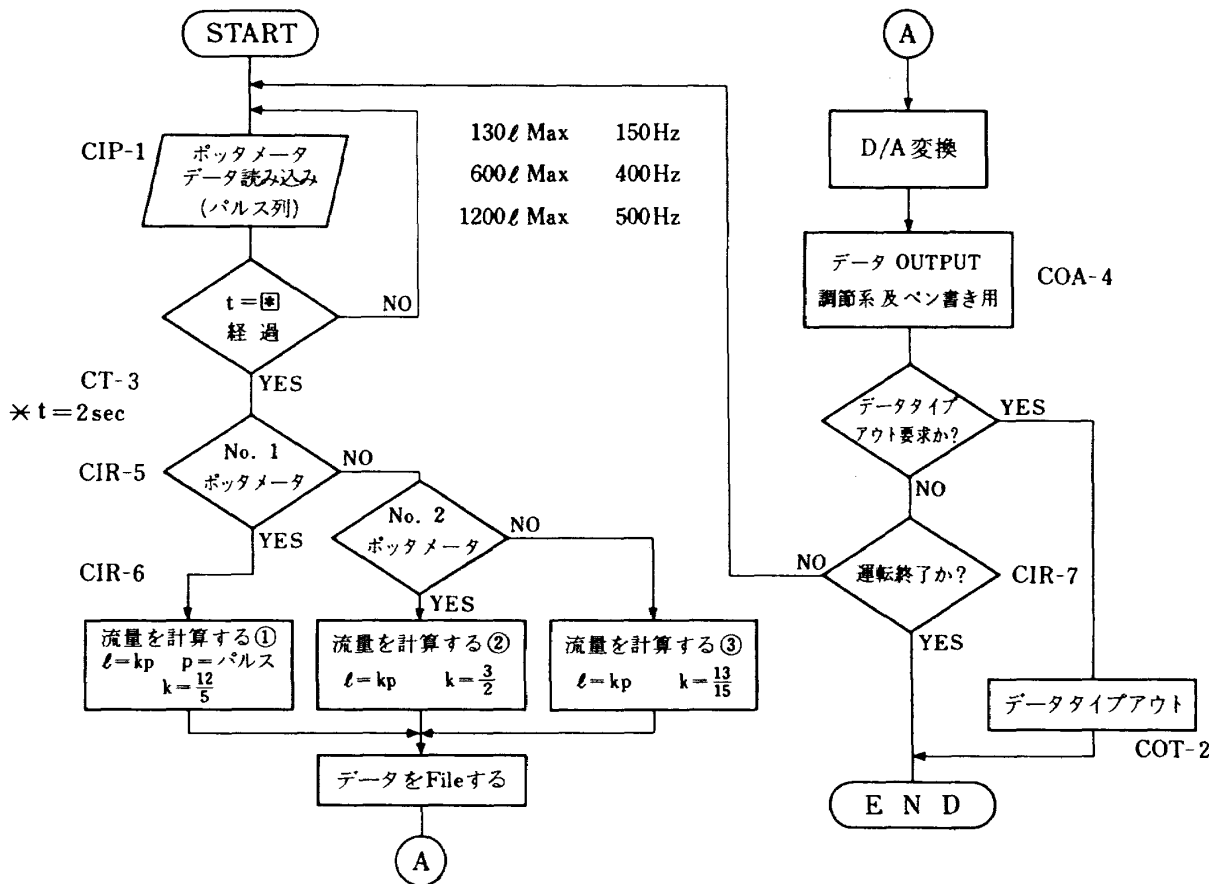


図45 タービフローメータからの燃料流量計測

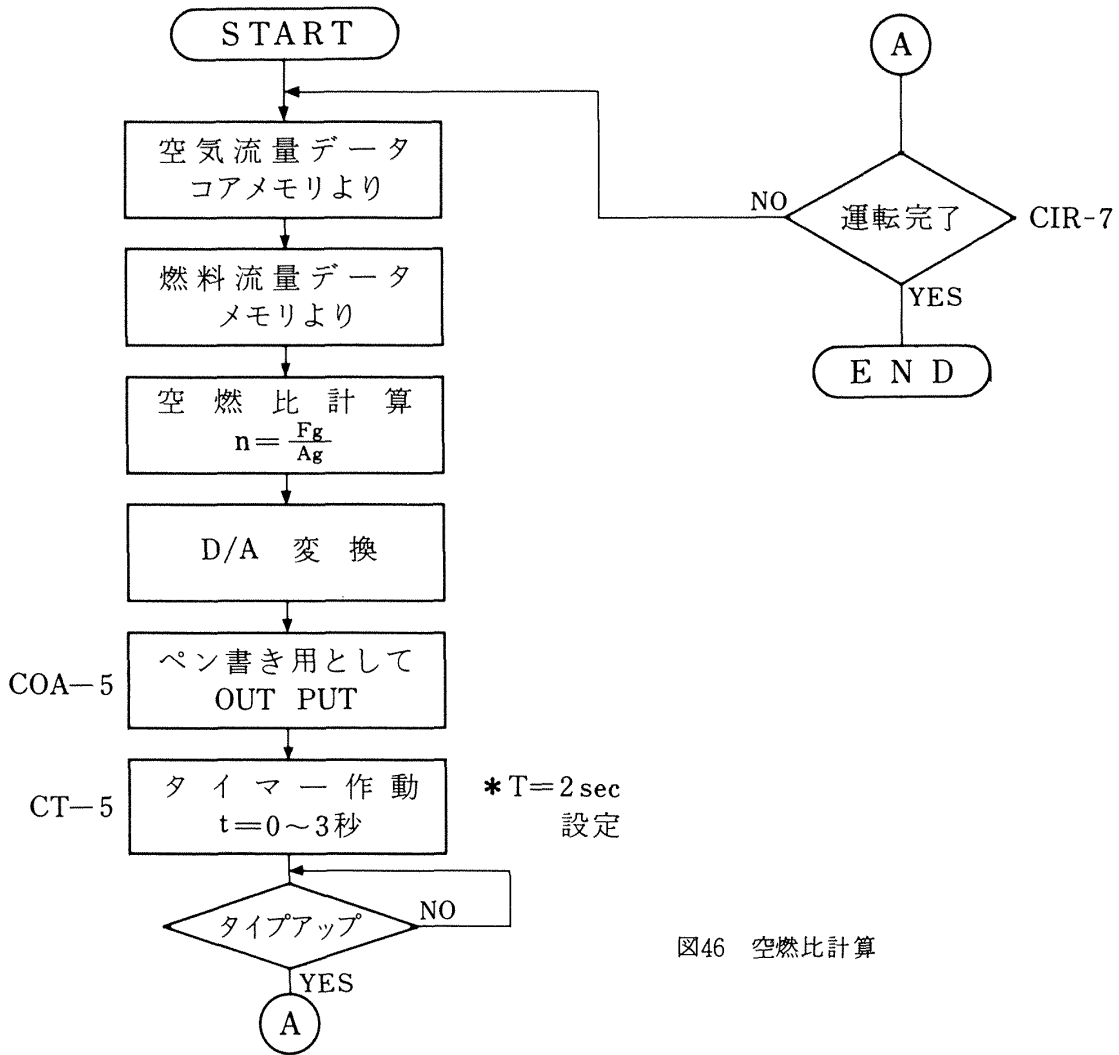


図46 空燃比計算

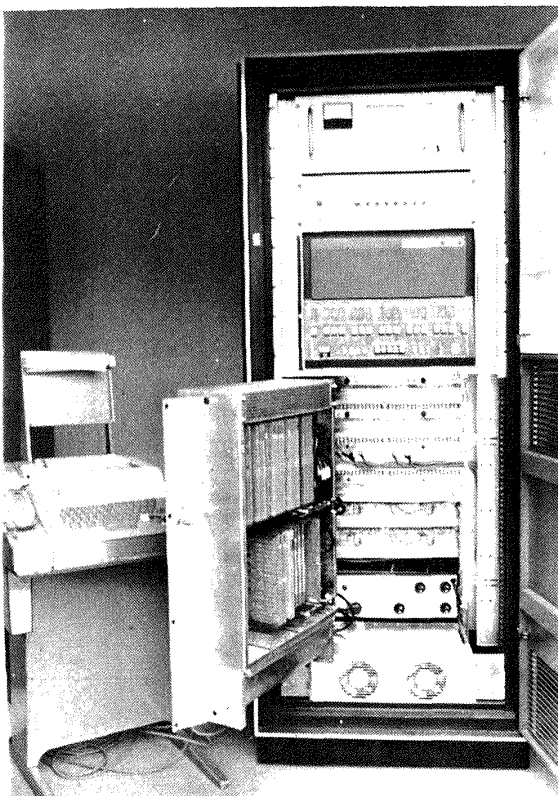


図47 制御装置

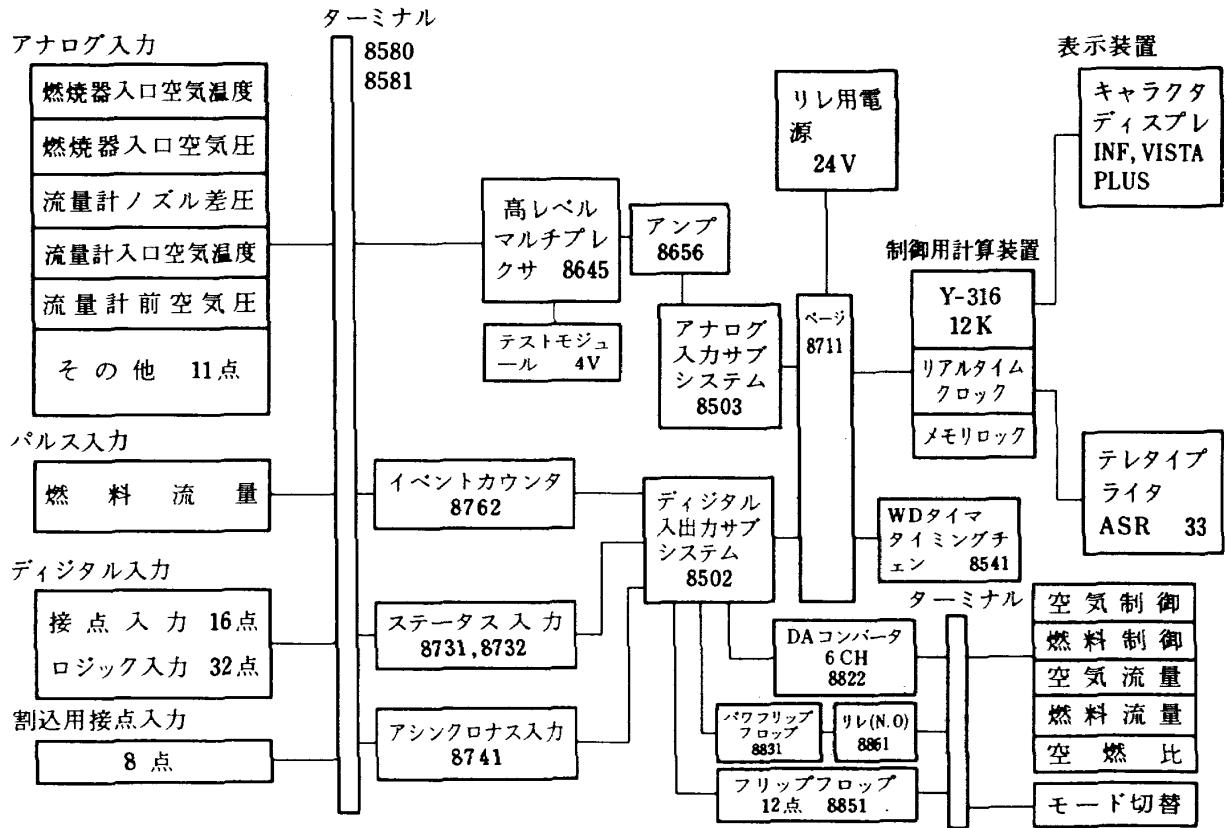
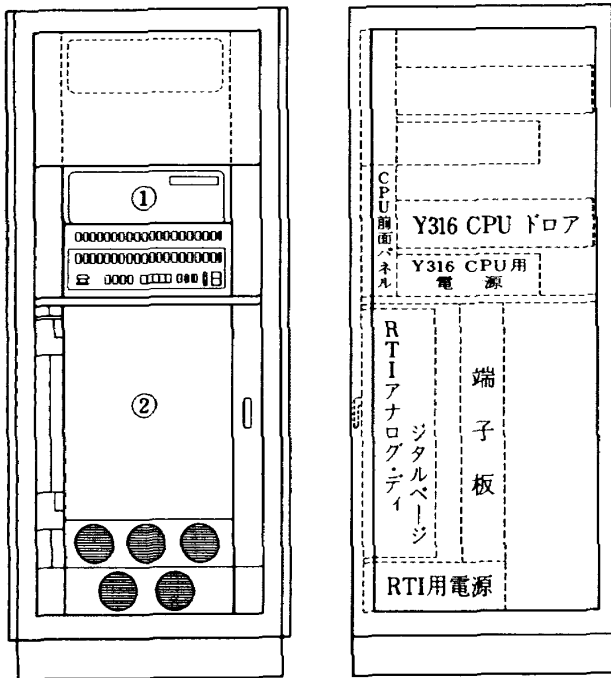


図48 制御装置系統図



正面図

側面図

① 制御用計算装置

② 制御用入出力機構

CS 418	制御回路	
CS 753	〃	
CC 690 A	〃	
CC 690 A	〃	LE 800 A
LA 800	制御回路	AL 720 B
LB 800	〃	AD 720
LC 800	〃	PD 720
LD 800	〃	AD変換器
PF 800	接点出力	AH 801
US 800	レベル出力	CS 482
AS 800 C	パルス入力	CS 501
DA 801	DA変換器	
DA 801	〃	MH 801 マルチプレクサ
DA 801	〃	MH 801 マルチプレクサ
DA 801	〃	
DA 801	〃	
EC 801 C	カウンタ入力	
SI 800	レベル入力	
SI 801	レベル入力	
SI 801	レベル入力	
SI 801	レベル入力	
AS 801 C	パルス入力	

図 50 インターフェースカード配置

図49 制御装置外観図

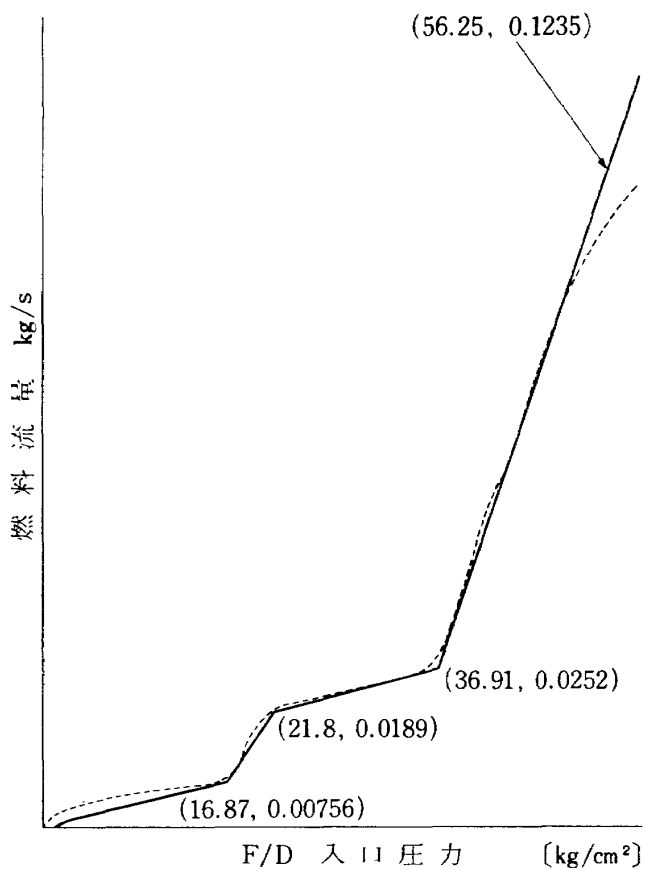


図51 FD入口圧力と燃料流量の関係

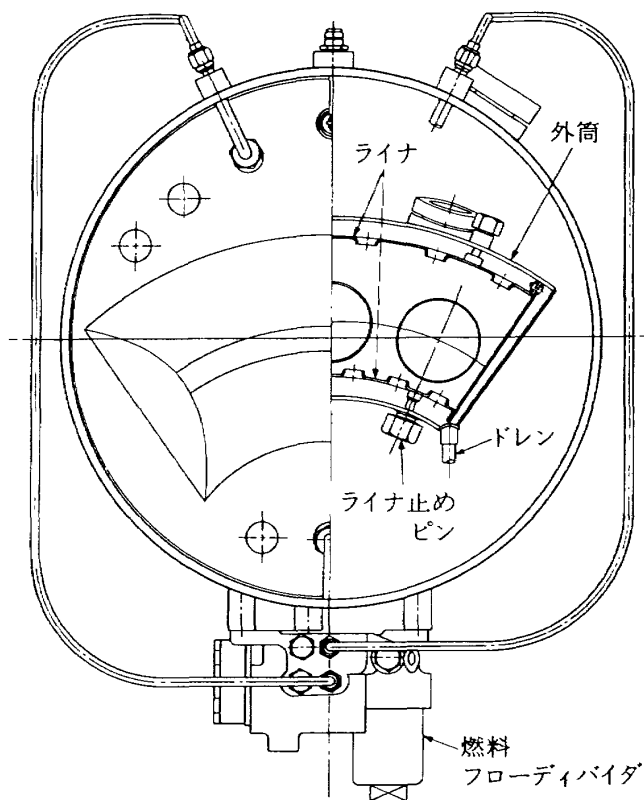


図52 高圧セクタ燃焼器模型概要図(b)

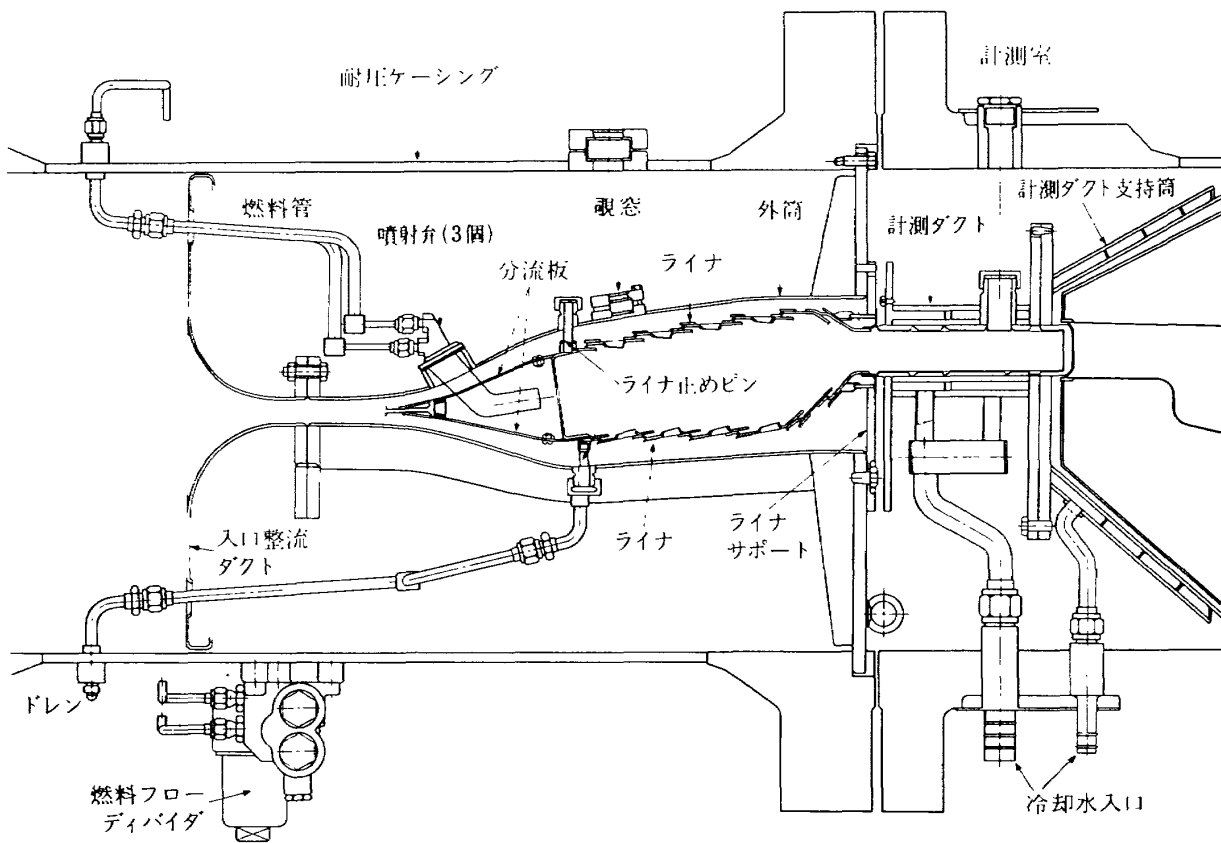


図52 高圧セクタ燃焼器模型概要図(a)

表 12 計算機規格

一 次 電 源	475 W, 100/115VAC ± 10%, 5.5 A
形 式	並列 2 進, ソリッド・ステート
アドレッシング	シングルアドレス, インデクシングおよび間接アドレッシング可能
語 長	16 ビット (単精度), 31 ビット (倍精度)
数 値	2 の補数形式
回 路 素 子	集積回路
信 号 レ ベ ル	アクティブ: 0V, パッシブ: 6V
記 憶 形 式	電流一致方式, フェライト・コア (外径 30 mil)
記 憶 容 量	4, 8, 12 および 16 K
メモリ・サイクル・タイム	1.6 μs
命 令 数	72 命令
ス ピ ー ド	加算および減算 3.2 μs
標準メモリ保護	一次電源の事故に対しメモリを保護する
標準割込み	シングル標準割込みライン
入出力モード	一語転送 割込みによる一語転送 データ・マルチプレックス・チャンネル (オプション)
標準入出力ライン	10 ビット アドレス・バス 16 ビット 入力バス 16 ビット 出力バス 外部制御およびセンス・ライン
標準入出力タイプライター	紙テープ入力 10 CPS 紙テープパンチ 10 CPS 印 字 10 CPS キーボード入力 オフ・ライン紙テープ作成, 複製, リスト作成
大 き さ	前面高さ: 35 cm, 幅: 44 cm, 奥行: 41 cm
重 量	55 kg
周 囲 温 度	0 ~ 45 C°
冷 却	強制空冷 (エアフィルタ付)

8. あとがき

図 52 は, 本装置で実験するために製作した高圧セクタ燃焼器模型である。これまでに, この種の模型を用いて 15 気圧までの燃焼実験を行ない, 燃焼器の耐久性試験, 排気中に含まれる煙濃度の測定, その他, 排ガス成分の分析を行ってきた。これらの燃焼実験時には所要の実験条件に適合するように制御系をいくぶん修正しているが, 使いやすい安全な装置になっている。

おわりにあたり, 本装置の設計・製作を担当された三菱重工工業㈱の 北野景一氏ほかの方々々に感謝の意を表わす。

文 献

- 1) A.D.Gosman, W.M.Pun, A.K.Runchal, D.B.Spalding, M.Wolfshtein; Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows, Academic Press (1969)
- 2) 香月正司, 水谷幸夫; 連続流燃焼器の解析モデル (第 1 報), 燃焼シンポジウム, 第 15 回 (前刷集) 昭和 52 年 pp.168 ~ 170.
- 3) 航空技術研究所原動機部; 航空技術研究所のターボ・ジェットエンジン要素試験設備, 航技研報告 TR-24 (昭和 37 年)。

- 4) 航空技術研究所；航空技術研究所 2 m×2 m 遷音速風洞の計画と構造，航技研報告 TR - 25（昭和37年）。
- 5) 極超音速風洞建設グループ；50cm極超音速風洞の計画と構造，航技研報告 TR - 116（昭和41年）。

航空宇宙技術研究所報告 517 号

昭和 52 年 11 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 東京プレス
東京都板橋区桜川 2-27-12
