

液水／液酸ステージの開発

棚次 亘弘・成尾 芳博・丸田 秀雄
秋葉鐮二郎・倉谷 健治

(1983年1月31日受理)

Stage Firing Tests of LH₂/LOX Propulsion System

By

Nobuhiro TANATSUGU, Yoshiro NARUO, Hideo MARUTA,
Ryojiro AKIBA and Kenji KURATANI

Abstract: The Institute of Space and Astronautical Science has conducted the stage firing tests of the LH₂/LOX propulsion system at the final step of verification test on the LH₂/LOX propulsion system which has been developed in ISAS since 1976. Stage firing tests were performed with the battle-ship type of tank system and the 7-ton thrust level engine for the first time and then with the 10-ton thrust level one. The performance of these engines had been already verified in 1980 and 1981 respectively. From October in 1981 through April in 1982, eight stage firing tests have been carried out and the stage performance characteristics have been verified in the self-sustained operation. The 7-ton thrust level engine worked well within the range between 84.5 and 118% of its rated power and the 10-ton thrust level one within the range between 86 and 113%. And also both the start-up and shut-down sequence including the chill-down operation of engine system have been examine and established. The PU (Propellant Utilization) control have been tried in the five test runs with good results.

概 要

宇宙科学研究所は昭和51年から行ってきた液水／液酸ロケット開発における最終段階の試験としてステージ燃焼試験を行った。ステージ燃焼試験は最初に7トン級エンジンと小形厚肉タンクシステムを用いて、次に10トン級エンジンを用いて行った。これらのエンジンは昭和55年と56年にそれぞれ確認試験を行っている。ステー

ジ燃焼試験は昭和56年10月から昭和57年4月に3期に分けて8回実施し、ステージシステムが計画した性能で自立運転状態になることを確認した。また、ステージシステムの起動と停止シーケンス、およびシステムの予冷運転の方法が確立され、タンクの推進剤を過不足なく消費するためのPU制御も試みられ良好な結果が得られた。

1. 序 論

ステージとは推力を発生するエンジン、推進剤を貯蔵するタンクおよび制御機器を含めたものを称し、これだけでロケットとして飛ばしうける機能を持ったシステムである。宇宙科学研究所では、推力7トン級エンジンと10トン級エンジンを用いたステージの開発を行った。特に、10トン級ステージは宇宙開発事業団において進めているH-1ロケットの開発に協力することを目的に開発を進めてきた。従って、10トン級ステージの開発においては開発費を軽減する上から、次に示す主要コンポーネントは宇宙開発事業団との共同研究によって宇宙研に供与された。

- (1) 液水／液酸小形厚肉タンク
- (2) エンジン燃焼器
- (3) メイン弁
- (4) 予冷弁

昭和55年からステージの開発を開始し、この年度に宇宙開発事業団から供与された液水／液酸タンクに補機、配管および電気計装を施し、断熱施工を行ってタンクシステムを完成した。昭和56年8月に両タンクの断熱性能試験を実施し、その後先に完成していた7トン級エンジンとタンクシステムを組合せて7トン級ステージを構成した。ステージ燃焼試験は昭和56年9月から12月に2期に分けて実施し、7トン級ステージとしての性能を確認した。続いて、昭和57年4月には同じタンクシステムと10トン級エンジンを組合せた10トン級ステージの燃焼試験を実施し、7トン級ステージと同様に良好な結果が得られた。これによって、宇宙研における液水／液酸ロケット開発計画の所期の目的は達成された。ここでは、宇宙研において開発した液水／液酸ステージのシステムと燃焼試験の方法および結果について報告する。

2. 液水／液酸ステージシステム

2-1) ステージシステムの概要

7トン級と10トン級ステージ(HST-701, HST-1001と称する)は、各部の設定条件と燃焼室を再生冷却する水素の流れ方向が異なる以外、基本的には同じシステムから構成されている。最初に、図1に示すHST-701ステージシステムの概念図に基づいて、ステージの作動を述べる。液水と液酸は試験設備の貯槽から加圧供給方式によって、それぞれステージタンクに供給される。エンジン各部を予冷した後、タービンスピナに点火し、ターボ

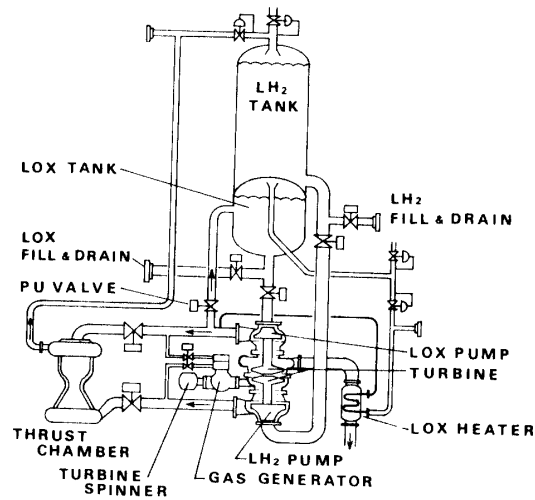


図1 液水/液酸ステージシステム概念図

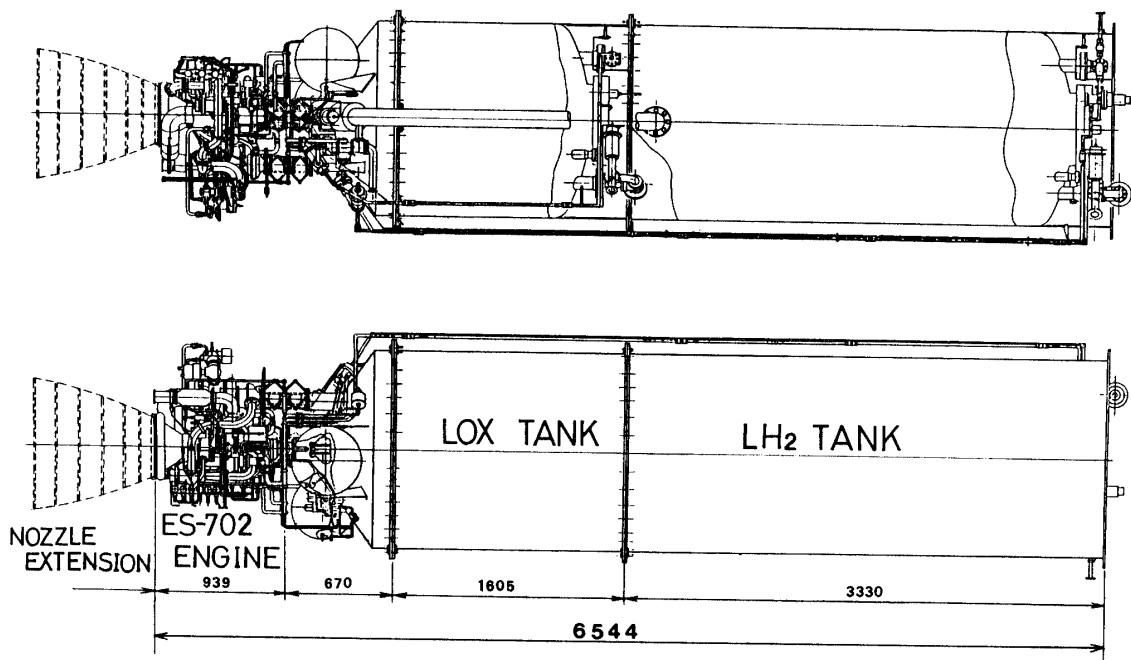


図2 液水/液酸ステージの外観図

ポンプに回転エネルギーを与えて液水および液酸の供給を開始する。ターボポンプの回転数が定格値の2分の1に上昇した時、液水および液酸をガスジェネレーターに供給すると、エンジンは自動的に出力を増し、定格運転状態になる。この過程で、ターボポンプの回転開始とほぼ同時に、主燃焼器にも液水と液酸が供給され、ターボポンプの回転上昇に比例して燃焼圧力が増し、推力が増す。また、エンジンの起動に伴って、両タンクに加圧ガスの供給が始まる。液水タンクは主燃焼室の再生冷却によって加熱された水素ガスによって、

液酸タンクはタービン排気ガスの熱を利用した熱交換器によって加熱された酸素ガスによって加圧される。定格運転状態に達した後、両タンク内の残留推進剤を過不足なく消費するためのPU制御 (Propellant Utilization Control) を行う。エンジンの停止は、ガスジェネレーターへの供給弁と主燃焼器への供給メイン弁をタイミングを調節して閉じることによって行う。図2にはHST-701ステージの外観図を示した。ステージの燃焼試験は大気圧条件で行うため、エンジン燃焼器のノズル開口比は7であり、図に示すノズルスカートは取付けていない。エンジンは、そのスラストマウントを液酸タンク下部に設けた円錐形の推力受けの頂点に固定してタンクシステムと結合される。タンクシステムの補機類は、液水タンク上部、両タンクの結合部および推力受け部分に分散してマウントされている。エンジンシステムについては、この特集号の他の論文で報告されているので割愛し、ここでは主にタンクシステムについて機能別に述べる[1]。タンクシステムは、図3に示すステージシステムフロー図の中央の1点破線より上側の部分であり、エンジンシステムとは表1に示す9系統の配管によって接続される。これらの接続配管は、エンジンのジンバリンク運動ができる範囲で柔軟性を持たせている。フライト型ステージでは、主燃焼器の点火器には固体推進薬を用いる計画であるので、E-6、E-7の配管は省略することができる。

表2~3にHST-701およびHST-1001ステージの性能諸元の計画値を示す。ステージの性能は、主に主燃焼器およびガスジェネレーターの供給ラインに設けた流量制御オリフィスによって調整される。

表4にステージを構成する主なコンポーネントの重量を示した。エンジンは約20%軽量化するとフライト型となるが、タンク本体は地上燃焼試験を目的として製作されているためフライト型に比べるとかなり重い。

2-2) 液水/液酸タンク

液水および液酸タンクは肉厚10mmの円筒形アルミ合金(A 5083)製で、厚み50mmの発泡性ポリウレタンによって断熱されている。断熱施工の詳細は、この特集号の別の論文

表1 タンクとエンジンシステムを接続する配管

接続配管記号	配管の機能
E-1	液水ポンプ供給配管
E-2	液酸ポンプ供給配管
E-3	液水タンク加圧ガス供給配管
E-4	水素系予冷液帰還配管
E-5	酸素系予冷液、PU制御液帰還配管
E-6	点火器水素ガス供給配管
E-7	点火器酸素ガス供給配管
E-22	液酸タンク加圧ガス供給配管
E-20	ヘリウムガス供給配管

表 3 HST-1001 スタージェの計画性能諸元

(主燃焼器) 推力	kg	6800	液水ポンプ	液酸ポンプ
	kg/cm ² A	35.8		
燃焼圧力	kg/cm ² A	23.3		
推進剤流量	kg/s	6.0		
混合比				
(ターボポンプ)				
ポンプ				
回転数	rpm	46310	21080	
吸込流量	kg/s	3.75	22.6	
吐出圧力	kg/cm ² A	62.9	60.7	
タービン				
タービン入口圧力	kg/cm ² A	26.5		
タービン入口温度	K	900		
(ガジェネレータ)				
燃焼圧力	kg/cm ² A	26.5		
ガス発生量	kg/s	0.752		
混合比	K	0.875		
(タービンを)				
燃焼圧力	kg/cm ² A	100.0		
推進剤量	kg	0.45		
燃焼時間	SEC	1.7		
PU制御流量	kg/s	4.0/2.0/0.0		

主燃焼器圧力はインジェクター面における値である。

表 2 HST-701 スタージェの計画性能諸元

(主燃焼器) 推力	kg	4951	液水ポンプ	液酸ポンプ
	kg/cm ² A	25.9		
燃焼圧力	kg/cm ² A	17.3		
推進剤流量	kg/s	5.2		
混合比				
(ターボポンプ)				
ポンプ				
回転数	rpm	41000	16680	
吸込流量	kg/s	2.95	15.5	
吐出圧力	kg/cm ² A	41.9	35.3	
タービン				
タービン入口圧力	kg/cm ² A	28.2		
タービン入口温度	K	900		
(ガジェネレータ)				
燃焼圧力	kg/cm ² A	28.2		
ガス発生量	kg/s	0.290		
混合比	K	0.875		
(タービンを)				
燃焼圧力	kg/cm ² A	50.0		
推進剤量	kg	0.45		
燃焼時間	SEC	2.5		
PU制御流量	kg/s	1.8/0.7/0.0		

主燃焼器圧力はインジェクター面における値である。

表4 ステージシステムの重量

コンポーネント	HST-701	HST-1001
(エンジン)		
主要コンポーネント		
主燃焼器	52.3	67.3
ターボポンプ	42.3	40.3
ガスジェネレーター	6.9	7.7
タービンスピナ	3.1	3.1
熱交換器	1.7	1.7
弁類	45.8	46.0
配管類	61.1	56.1
サポート類	8.5	9.6
スラストマウント	24.5	18.3
その他	9.6	9.3
エンジン総重量	255.8	259.4
(タンクシステム)		
タンク本体	1058	
断熱材	180	
気蓄器	57.6	
緩衝器	26.4	
スラストコーン	62.0	
弁類	121.9	
配管類	104.4	
その他	169.7	
タンクシステム総重量	1780	
ステージ総重量	2005.8	2039.4

単位：kg

表5 タンクの形状諸元

		液水タンク	液酸タンク
長さ	m	3330	1605
外径	m	1370	1370
円筒部肉厚	mm	10	10
鏡部肉厚	mm	12	12
内容積	liter	2730	1232
重量	kg	627	431
全長	m	4935	
全重量	kg	1058	

に報告されているので参照されたい[2]。両タンクは共通隔壁を持たず、各々独立したタンクをフランジによって結合したものである。エンジンの供給配管は、両タンク共、タンク下部の鏡板中央に取付けられており、その吸込口には渦流防止板とフィルターが設けられている。両タンクには、静電容量型の連続液位センサーとホットワイヤー型のセンサーが取付けられている。表5にタンクの形状諸元を示した。

2-3) タンク加圧制御システム

タンク加圧制御システムの目的はポンプ入口NPSHを計画値に維持するため、タンク圧力を常に一定に保つことである。これにはタンクからエンジンに供給された推進剤の体積と等価な体積のガスをタンクに供給しなければならない。宇宙研で開発したステージシステムでは、タンク加圧ガスの他にタンクの加圧に寄与するガスとして次の3つが考えられる。

- (1) ベアリング冷却液、およびPU制御液
- (2) 推進剤の蒸発ガス
- (3) 推進剤に溶解したガス

以上の3つのうち、推進剤蒸発ガスの加圧ガスへの寄与は1~2%程度であり、また推進剤に溶解するガス量は加圧ガスに比べて無視できる。従って、タンクへ戻るベアリング冷却液とPU制御液を考慮すればよい。しかし、これらの液はステージシステムが自立運転状態となった後にタンクに戻るため、それ以前には加圧ガスとして期待できない。従って、タンク加圧ガス流量は、ステージが自立運転状態になる以前を想定してその最大値を決定しておく必要がある。通常、極低温流体のタンクを加圧する場合、タンクに注気された加圧ガスは冷却されるため、次に定義する加圧ガス余剰率を用いてタンク加圧ガス量を決定する。

加圧ガス余剰率

＝タンクに流入するガスの容積流量／ポンプに供給される容積流量

表6に設計に用いたタンク加圧ガス余剰率と流体の条件を示した。エンジンが作動している間は、タンクはエンジンから供給された各々のガスによって加圧されるが、エンジンを起動する以前は試験設備から供給されたヘリウムガスによって予圧される。タンクの加圧ガスの制御は、加圧ガスの供給ラインと排気ラインに設けた機械式の調圧弁によって行

表6 タンク加圧制御計画諸元

	HST-701	HST-1001
加圧ガス余剰率	1.45/1.30	1.42/1.35
タンク圧力 kg/cm ² A	2.8/3.0	3.0/3.6
アレッジガス温度 K	67/250	67/250
ポンプ吸込流量 kg/s	0.042/0.014	0.058/0.021
加圧ガス体積流量 m ³ /s	0.083/0.019	0.110/0.028
加圧ガス重量流量 kg/s	0.061/0.085	0.088/0.153
加圧ガス温度 K	90/250	90/250

われる。どちらの調圧弁もタンク圧力を検出して、予め設定した圧力との差に比例して弁を開閉する構造である。加圧ガス圧力の制御は主に、供給ラインに設けた加圧調圧弁 (FR-2/OR-2) によって行い、排気ラインの排気調圧弁 (FR-1/OR-1) は定格値より高く設定することによって異常時に備えている。図4~5に両タンクの各々の調圧弁の特性を示した。更に、タンク圧力が $5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ を越えて異常に上昇した場合には、試験設備の制御盤によってタンク排気弁 (FVV-1/OVV-1) が自動的に開かれる。

2-4) ヘリウムガス供給システム

ヘリウムガスは空気作動弁の駆動およびエンジン各部のシールとパージに用いられる。試験設備から供給されたヘリウムガスは、タンクシステムの高圧気蓄器 ($150 \text{ kg/cm}^2\text{G}$, 50 liter) に貯えられ、減圧弁 (HR-4) によって $35 \text{ kg/cm}^2\text{A}$ に減圧されてエンジンに供給される。この減圧弁の出口には、40 リットルの緩衝器が設けてあり、一時的なガス消費による圧力の減少を抑えている。エンジンでは更に2個の調圧弁 (HR-2/HR-3) を含む8系統に別けて各部のシールおよびパージを行っている。ヘリウム供給システムはエンジンの制御に拘る重要な機能を果しているため、エンジンの起動後も、気蓄器のヘリウムガス圧力が異

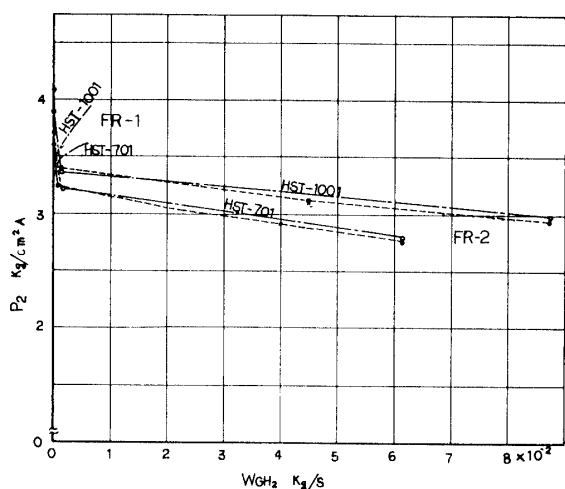


図4 液水タンク圧力制御用調圧弁の特性

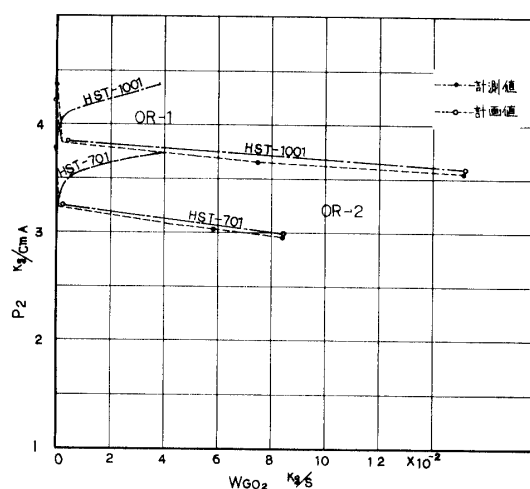


図5 液酸タンク圧力制御用調圧弁の特性

常に低下した場合には、試験設備から自動的に供給される。

2-5) エンジン冷却液の処理システム

エンジンの予冷を行っている間は、エンジン各部から排出された冷却液は予冷切換え弁 (FV-10/OV-10, FV-11/OV-11) によって試験設備のベントスタックに排液され、エンジンが自立運転状態にある時は各々のタンクに戻される。

2-6) PU制御システム

PU制御の目的は、両推進剤を過不足なく消費しタンクに残留する量をできるだけ少なくすることである。宇宙研の開発したステージシステムでは、液酸の供給流量を調節することによってPU制御を行っている。液酸の供給流量を調節する場合、主燃焼器の供給メ

イン弁を制御する方法があるが、これでは大きな流量を制御しなければならない。宇宙研では液酸ポンプの吐出ラインから液酸の一部分をタンクに戻し、この流量を制御する方法を採用した。液酸ポンプはインペラー出口角度が28度であり、流量が増加すると圧力係数が下がること、また宇宙研方式のターボポンプでは液酸ポンプの流量が増加すると、液酸ポンプを駆動するタービンだけ負荷が増しその回転数が低下することを利用して、少量の液酸をタンクに戻すことによってPU制御を行っているのが特徴である。PU制御弁は3段階(全閉, 中立, 全開)で作動し、ステップ状に流量を変える。PU弁が中立の位置にある時、ステージシステムで消費される推進剤の混合比は定格値になり、全閉の時には高い混合比に、全開の時には低い混合比になる。従って、タンク残液の混合比が高く検出された場合には、PU弁は全閉の位置に、逆の場合には全開の位置に制御される。タンク残液混合比が計画値になっている場合には、PU弁は中立の位置のままである。タンク残液混合比の検出は、タンク内に10%おきに取付けたホットワイヤ型液位計の信号を比較することによって行った。PU制御の目標となるステージ混合比の計画値はHST-701とHST-1001とで異なるため、各々の試験においてホットワイヤセンサーの取付位置を変える必要がある。しかし、ホットワイヤセンサはタンク内に固定され、その位置を変えることが困難なため、HST-1001試験の位置に設定した。これによって、PU制御の目標となるタンク残液混合比は各ホットワイヤセンサーの位置において表7に示す値となる。HST-1001ではステージ混合比は終始ほぼ5.7に設定されるが、HST-701では逐次変化することになる。液位の検出およびPU制御回路についてはこの特集号の別の論文に報告されている[3][4]。

表7 ステージ混合比の設定値

HST-1001			HST-701		
液酸タンク ホットワイヤ	液水タンク ホットワイヤ	ステージ 混合比	液酸タンク ホットワイヤ	液水タンク ホットワイヤ	ステージ 混合比
1	2	5.78	2	1	5.78
2	3	5.79	3	2	5.82
3	4	5.80	4	4	4.36
4	5	5.80	5	5	4.66
5	6	5.81	6	6	4.85
6	7	5.80	7	7	4.99
7	8	5.80	8	8	5.08
8	9	5.80	9	9	4.85
9	10	5.81	10	10	4.97
10	11	5.80			

(注) HST-701では液酸ホットワイヤ①の位置を液位0とした。

3. ステージ試験

3-1) 試験の概要

表8にステージ試験の経過と概要を示した。これらの試験は能代ロケット実験場に設置されているタンク試験設備およびたて型燃焼試験設備を用いて行われた。ステージ燃焼試験の最も重要な目的は、飛しょう時と同様にシステム全体が計画した性能を維持して、自立運転状態になることを確認することである。この目的に従って、次に示す個々の項目を確認した。

- (1) ステージの性能
- (2) 起動、停止およびPU制御時のエンジンの運転特性
- (3) タンクの加圧特性
- (4) PU制御特性
- (5) 予冷特性

また、実際の飛しょう時を考慮して、このシステムを再現性よく運転する方法を確立することもステージ試験の目的である。

表8 液水/液酸ステージ燃焼試験の概要

試験記号	試験内容	試験実施日	インヅ出力	PU制御	燃焼時間
(7トンステージ)	断熱性能試験	1981/8/7~8			
HST-701-1-1	冷却試験	1981/10/13			
HST-701-1-2	燃焼試験	1981/10/16	114 %	無	50秒間
HST-701-1-3	燃焼試験	1981/10/19	104	有	54
HST-701-2-1	燃焼試験	1981/12/8	91	有	60
HST-701-2-2	燃焼試験	1981/12/11	107	有	60
(10トンステージ)					
HST-1001-1-1	燃焼試験	1982/4/20	88	無	20
HST-1001-1-2	燃焼試験	1982/4/23	88	有	40
HST-1001-1-3	燃焼試験	1982/4/26	105	有	40

ステージ燃焼試験を行う前に、液体窒素を用いたタンクの断熱性能試験と実液を用いたステージの冷却試験を行った。断熱性能試験の結果はこの特集号の別の論文に報告されているので、ここでは断熱性能を示す蒸発率の結果だけを表9に示し、詳細については割愛した[2]。

ステージの冷却試験は、たて型燃焼試験設備において、実液を用いてタンクシステムお

表9 液水/液酸タンクの断熱性能

	液水タンク	液酸タンク
液体窒素による試験結果	1.07 %/Hr	3.56 %/Hr
実液に換算した値	7.20	2.40

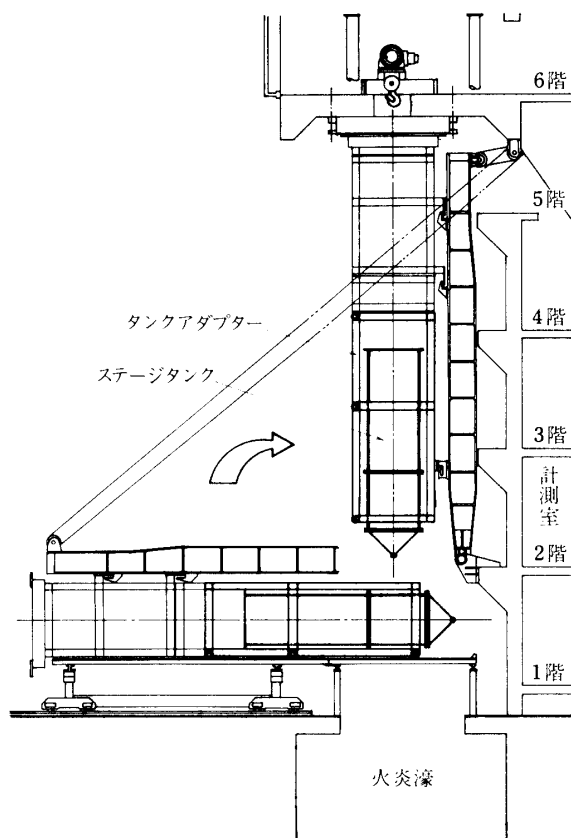


図 6 たて型燃焼試験設備

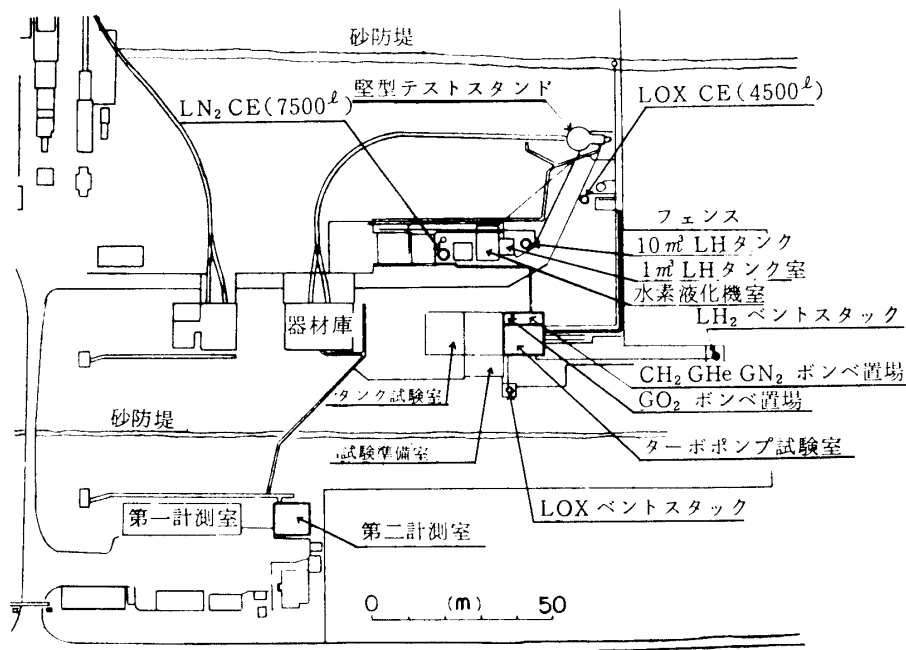


図 7 能代ロケット実験場試験設備配置図

よびエンジンを予冷し、エンジンの起動条件を調査した。また、エンジンが起動する以前に不具合を生じた場合のスケジュールの逆行手順についても彫査した。この結果は、実際の発射場における打上げ操作にとって貴重な資料となる。

ここでは、ステージ冷却試験と7回のステージ燃焼試験によって得られた結果をまとめた。

3-2) ステージ試験の方法

ステージはタンクシステムとエンジンシステムに分割し、メーカーにおいて組立て調製を行った後、それぞれ専用のコンテナに格納して能代ロケット実験場に搬入される。実験場では、最初にタンクシステムを図6に示すようにタンクアダプターに取付け、これをたて型燃焼試験設備に固定し、次にエンジンをタンクシステムに固定して配管類を接続する。ステージの制御および計測は、図7に示す第1および第2計測室から遠隔操作される。以下に試験設備、計測、保安対策、およびステージの運転方法の概要を述べる。

3-2-1) 試験設備

このたて型燃焼試験設備は燃焼器およびエンジンの試験に用いたもので、これらの試験で用いた高圧の加圧供給タンク架台および推力計測架台を取外してステージ試験に供した。ステージは図8に示すようにタンクアダプターに取付けた後、図6、9に示すように試

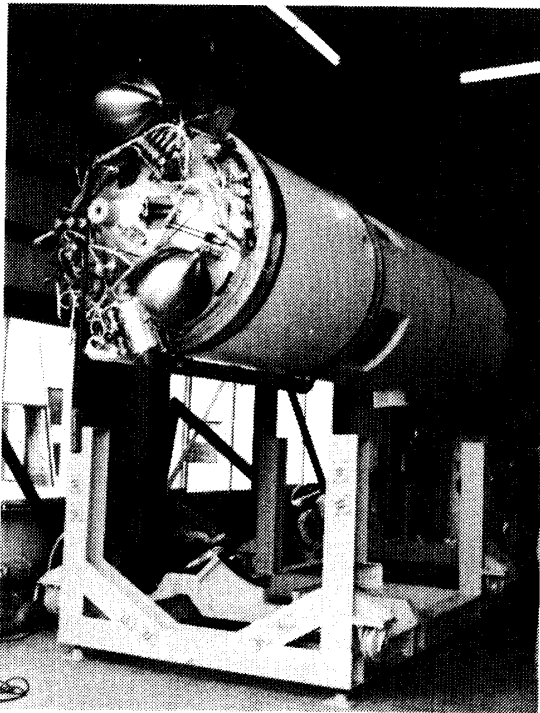


図8 ステージタンクをアダプターに取付ける作業

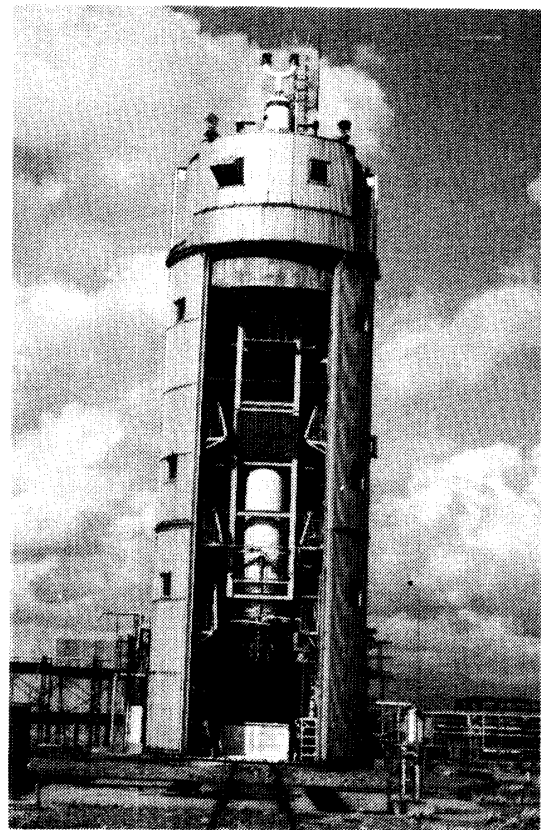


図9 たて型燃焼試験設備に固定されたタンクシステム

験設備に固定される。液酸タンクの下部フランジは、図 10 に示す 12 本のロッドによってタンクアダプターに固定されており、これによってエンジンの推力を試験設備に伝えている。一方、タンク上部は約 20 mm の伸縮が可能なようにタンクアダプターにスライドベアリング (図 11) を用いて支持されている。図 12~13 にタンクが試験設備に固定された状態を写真で示した。

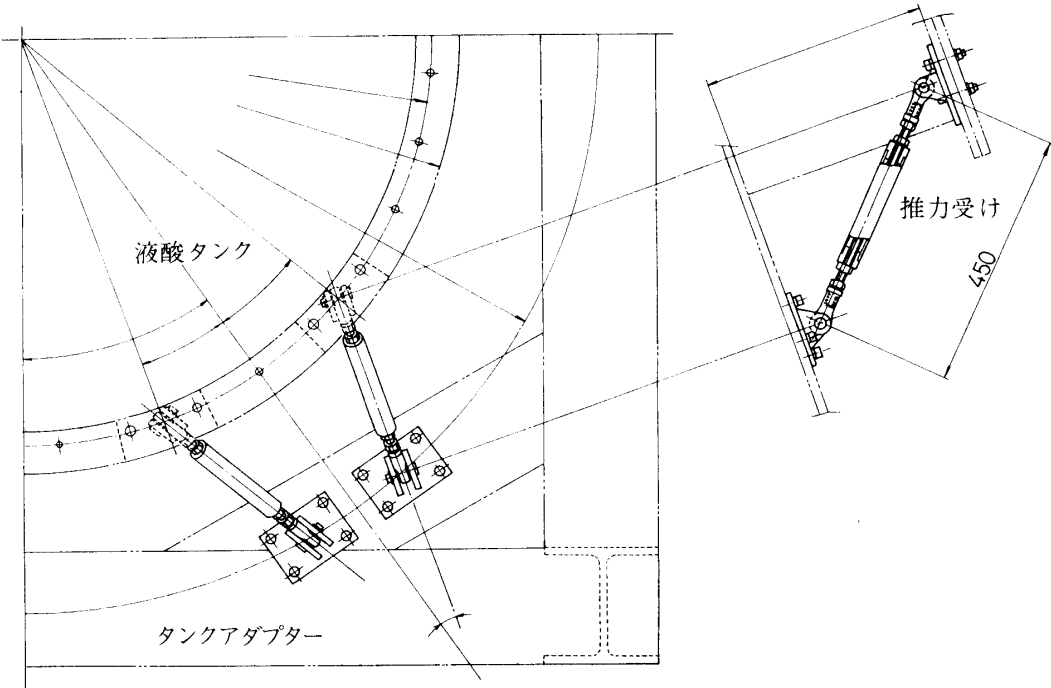


図 10 タンク下部固定方法

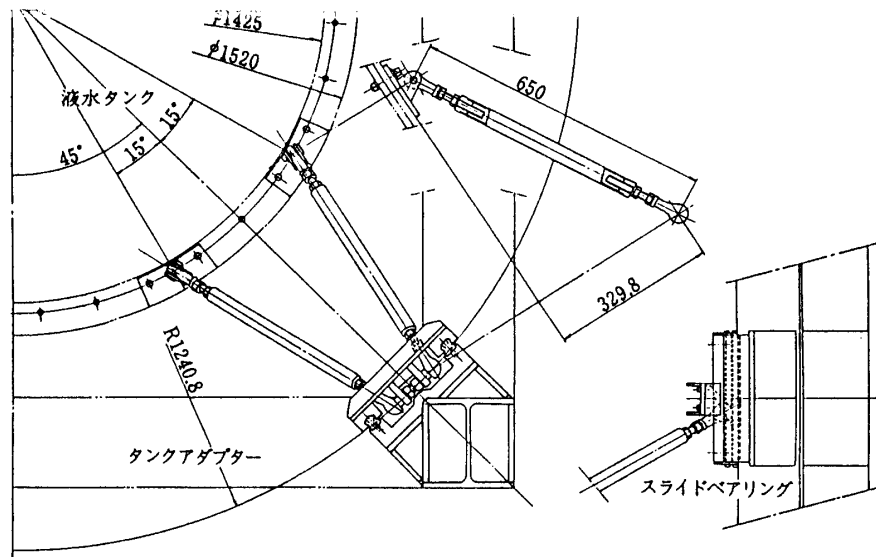


図 11 タンク上部固定方法

ステージ試験設備の供給フロー図を図14に示した。ステージシステムは11本の配管によって、試験設備と接続されており、主に推進剤と各種ガスの供給および排気、排液の機能を持っている。ステージの運転操作を行う制御系統図を図15に示した。ステージシステム制御盤は、エンジンシステム、タンクシステムおよび試験設備で作動する合計39個の遠隔操作弁と3台の点火器を制御する。燃焼試験時の運転操作は、これらの弁から必要なものを選択してシーケンサーによって自動的に制御される。シーケンスは、起動から定常状態、定常状態から停止、および非常停止の3種類のものを用意し、計画した時間あるいは各種の運転状態をモニターすることによって、自動および手動操作によっていずれかのシ

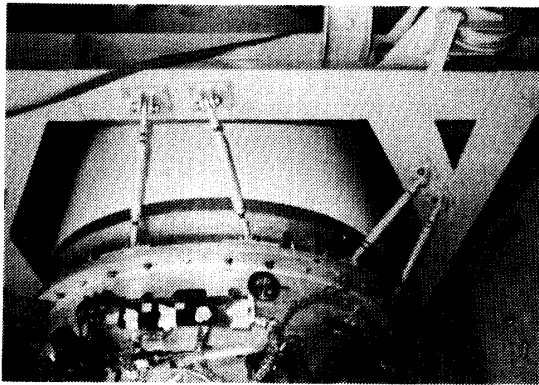


図12 アダプターに取付けられたタンク下部の写真

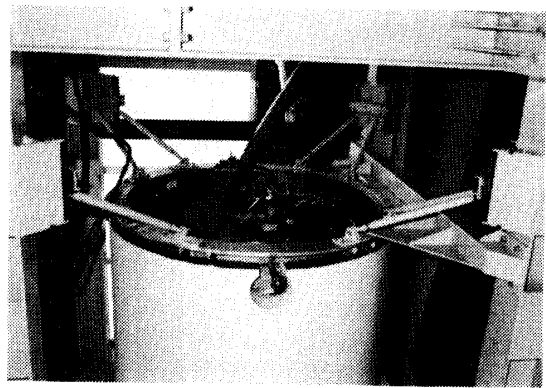


図13 アダプターに取付けられたタンク上部の写真

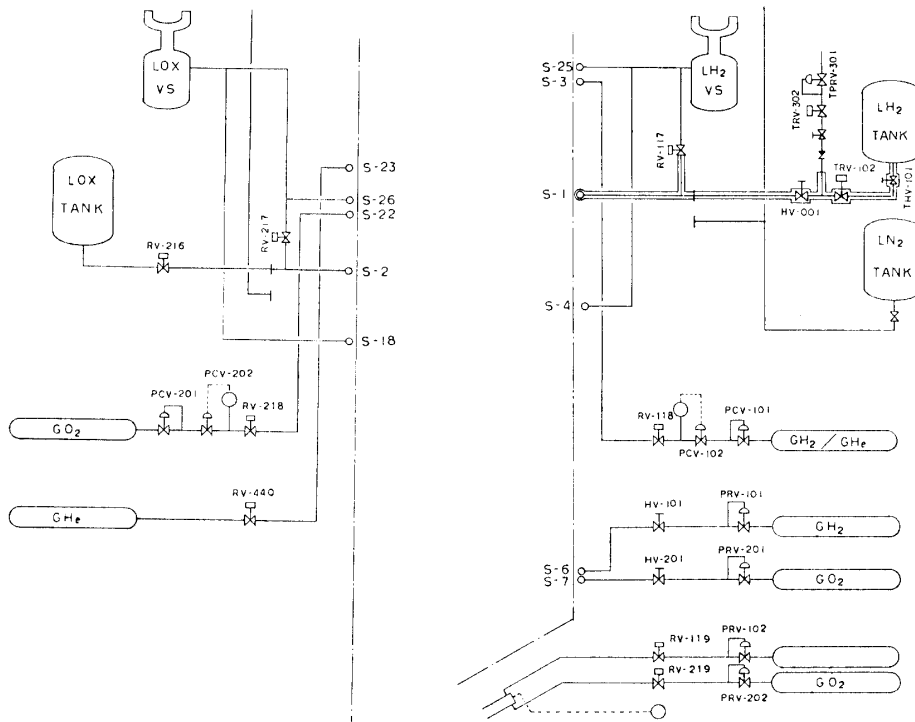
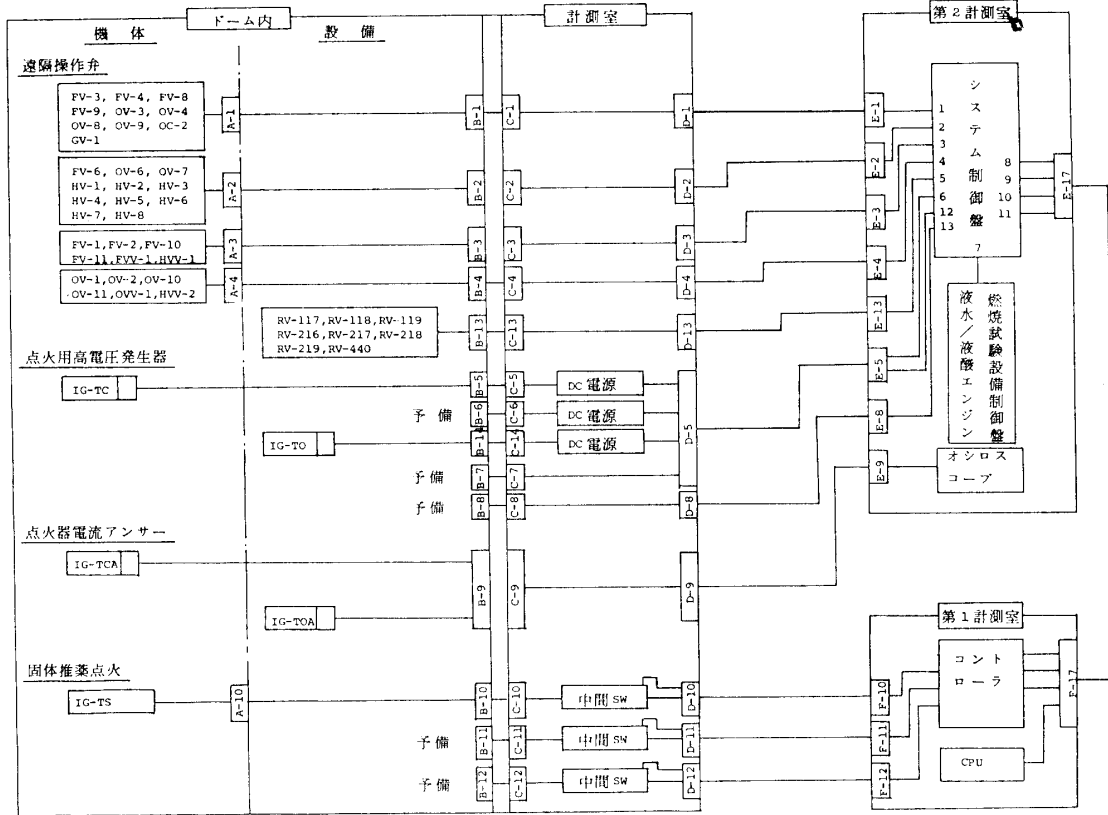


図14 ステージ試験設備フロー図

図 15 ステージシステム制御系統図

(ステージシステム試験)



ーケンスに進める。

3-2-2) 計 測

ほとんどの計測項目は、たて型試験設備の近くに設置された前置増幅器によって信号処理し、第1計測室においてミニコンピューターによって収録される。一部の特殊な計測項目(液位、タービンの回転数等)は、第2計測室において信号処理しミニコンピューターに転送される。また、振動計測のように広い周波数帯域を必要とする場合は、別にデータレコーダーに収録される。ステージシステムの計測項目を表10に示した。各々の計測に関する詳細は、この特集号の別の論文に報告されているので割愛する。

3-3-3) 保安対策

ステージ燃焼試験を実施する上での保安対策として、次の2つを対象としたものが上げられる。

- (1) 実験に参加している者および部外者を含む対人のための保安対策
- (2) 供試体および試験設備等の破損を防止するための保安対策

これらの保安対策には、それぞれ試験の運営と保安設備の両面から考慮しなければならない項目がある。能代実験場において、試験時にとられている保安対策の項目を表11にまとめて示した。未燃焼水素ガスの爆発を防止するトーチの燃焼の様子を図16に示した。現在までに実施した8回のステージ試験では、対人および対物のいずれに関する事故も生じ

表 10 ステージシステム試験の計測項目 (エンジンシステム計測項目) (その1)

計測項目および計測箇所		Tag. No.	計測センサー	計測範囲	記録計器	備考
HST-1001-1						
(I) 圧力						
(ボンプ)						
液水ポンプ入口	PPH-1	CEC1000-05,250psia	0~10 kg/cm ² g	CPU(S)	GD*	
出口	PPH-2	CEC1000-05,1000psia		CPU(S)	GD*	
液酸ポンプ入口	PPO-1	CEC1000-05,250psia		CPU(S)		
出口	PPO-2	CEC1000-05,1000psia		CPU(S)		
PU制御計測オリフイス	PPO-3	CEC1000-05,1000psia		CPU(S)		
シールガス供給ライン	PPO-4	LP 10	0~10 kg/cm ² g	CPU(S)	GD*	
PU弁下流	PPO-5	MP-70	0~70	CPU(S)		
(タービン)						
ノズルマニホールド	PT-1	CEC1000-05,500psia	0~35	CPU(S)		
排気マニホールド	PT-2	CEC1000-05,100psia	0~5	CPU(S)		
(ガスジェネレーター)						
水素インジェクター	PGH-1	CEC1000-05,1000psia	0~45	CPU(S)	GD*	
酸素インジェクター	PGO-1	CEC1000-05,1000psia	0~45	CPU(S)	GD*	
(燃焼器)						
燃焼室	PC-1	CEC1000-05,1000psia	0~50	CPU(S)		非常停止
水素インジェクター	PCH-1	CEC1000-05,1000psia	0~60	CPU(S)		
酸素インジェクター	PCO-1	CEC1000-05,1000psia	0~60	CPU(S)		
点火器燃焼室	PCI-1	CEC1000-05,1000psia	0~50	CPU(S)		インターロック, GD
点火器水素絞り上流	PCI-2	MP-70	0~70	CPU(S)		GD
点火器酸素絞り上流	PCI-3	MP-70	0~70	CPU(S)		GD
(II) 流量						
ガスジェネレーター水素	QGH-1	オリフイス	0~1.8 kg/cm ² D	CPU(S)		
酸素	QGO-1	オリフイス	0~1.3	CPU(S)		
液酸ポンプシール	QPO-2	オリフイス	0~1.0	CPU(S)		
PU制御	QPO-1	オリフイス	0~3.5	CPU(S)		GD
水素ポンプアブリアング冷却	QPH-1	オリフイス	0~1.5 kg/cm ² D	CPU(S)		
酸素ポンプアブリアング冷却	QPO-3	オリフイス	0~2.0	CPU(S)		

GD: グラフアイクディスプレイ表示 CPU: ミニコンピューターによる記録

表 10 ステージシステム試験計測項目 (エンジンシステム計測項目) (その2)

計測項目および計測箇所		Tag. No.	計測センサー	計測範囲	記録計器	備考
HST-1001-1						
温度						
(ポンプ)						
液水ポンプ	TPH-1	Au, Fe-Ch 1.0 ^o 熱電対	20~300 K	CPU(DC)	GD	
入口	TPH-2	Pt-Co 1.6抵抗測温体	20~300	CPU(DC)		
出口						
液水ポンプ	TPH-3	Pt 1.0 抵抗測温体	20~300	CPU(DC)	GD	
アベアリング	TPH-4	Pt 1.0 抵抗測温体	20~300	CPU(DC)	GD	
側						
ポンプ側	TPO-1	Au, Fe-Ch 1.0 熱電対	90~300	CPU(DC)	GD	
タービン側	TPO-2	Pt-Co 1.6 抵抗測温体	90~300	CPU(DC)		
液酸ポンプ	TPO-3	Pt 1.0 抵抗測温体	90~300	CPU(DC)	GD	
入口	TPO-4	Pt 1.0 抵抗測温体	90~300	CPU(DC)	GD	
出口						
液酸ポンプ						
アベアリング						
側						
タービン側						
(タービン)						
ノズルマニホールド	TT-1	CA 1.6 熱電対	300~1300	CPU(DC)		非常停止
排気マニホールド	TT-2	CA 1.6 熱電対	300~1300	CPU(DC)		
(ガスジェネレーター)						
水素インジェクター	TGH-1	Au, Fe-Ch 1.0 熱電対	20~300	CPU(DC)		
酸素インジェクター	TGO-1	Au, Fe-Ch 1.0 熱電対	90~300	CPU(DC)		
液酸供給ライン外壁	TGO-2	CA 1.6 ^o 熱電対	90~300 K	CPU(DC)	GD	
液水供給ライン外壁	TGH-2	CA 1.6 熱電対	20~300	CPU(DC)	GD	
(燃焼器)						
水素インジェクター	TCH-1	Au, Fe-Ch 1.0 熱電対	20~300	CPU(DC)		
酸素インジェクター	TGO-1	Au, Fe-Ch 1.0 熱電対	90~300	CPU(DC)		
液酸供給ライン外壁	TGO-2	CA 1.6 熱電対	90~300	CPU(DC)	GD	
液水供給ライン外壁	TCH-2	CA 1.6 熱電対	20~300	CPU(DC)	GD	
点火器燃焼室	TGI-1	CA 3.2 熱電対	0~1200°C	CPU(DC)	GD	
回転						
水素ポンプ	R-1		0~60000 rpm	CPU		非常停止
酸素ポンプ	R-2		0~30000	CPU		非常停止
(V) 振動						
水素ポンプ (径方向)	VP-2			DR		非常停止
酸素ポンプ (径方向)	VP-1			DR		非常停止
燃焼器 (軸方向)	VC-1			DR		
燃焼器 (径方向)	VC-2			DR		

DR: データレコーダー

表 10 ステージシステム試験計測項目(タンクシステム計測項目) (その3)

計測項目および計測箇所		Tag. No.	計測センサー	計測範囲	記録計器	備考
HST-1001-1						
(I) 圧力	液水タンク	PTH-1	CEC1000-05, 100psia	0 ~ 5 kg/cm ² G	CPU(S)	非常停止, GD*
	加圧水素ガス流量計測部	PLH-1	CEC1000-05, 1000psia	0 ~ 70	CPU(S)	GD*
	加圧水素減圧弁下流	PLH-2	CEC1000-05, 100psia	0 ~ 5	CPU(S)	GD*
	液酸タンク	PTO-1	CEC1000-05, 100psia	0 ~ 5	CPU(S)	非常停止, GD*
	加圧酸素ガス流量計測部	PLO-1	CEC1000-05, 1000psia	0 ~ 70	CPU(S)	GD*
	加圧酸素減圧弁下流	PLO-2	CEC1000-05, 100psia	0 ~ 5	CPU(S)	GD*
	ヘリウム気密器	PHE-1	CEC1000-02, 2500psia	0-150	CPU(S)	GD*
	ヘリウムガス流量計測部	PHE-2	CEC1000-05, 1000psia	0 ~ 45	CPU(S)	GD*
	ヘリウム粉衝器	PHE-3	CEC1000-05, 1000psia	0 ~ 45	CPU(S)	GD*
	タンク掃選水素流量計測部	PLH-3	MP-50	0 ~ 10	CPU(S)	GD*
(II) 温度	液水タンク下部	TTH-1	Pt 1.6 ϕ 抵抗測温体	20 ~ 300 K	CPU(DC), マイコン	デジタル表示
	液水タンク上部	TTH-2	Pt 1.6	20 ~ 300	CPU(DC), マイコン	デジタル表示
	加圧水素ガス流量計測部	TLH-1	Pt 1.6	20 ~ 300	CPU(DC)	GD*
	液酸タンク下部	TTO-1	Pt 1.6	90 ~ 300	CPU(DC), マイコン	デジタル表示
	液酸タンク上部	TTO-2	Pt 1.6	90 ~ 300	CPU(DC), マイコン	デジタル表示
	加圧酸素ガス流量計測部	TLO-1	Pt 1.6	90 ~ 500	CPU(DC)	GD*
	ヘリウムガス流量計測部	THE-1	Pt 1.6	200 ~ 300	CPU(DC)	GD*
	タンク掃選水素流量計測部	TLH-2	Au, Fe-Ch 1.0 熱電対	20 ~ 300	CPU(DC)	GD*
(III) 流量	液水タンク加圧ガス	QLH-1	タービンフローメーター	2.36 ~ 25 liter/s	CPU	0 ~ 1300 Hz, GD*
	液酸タンク加圧ガス	QLO-1	タービンフローメーター	0.566 ~ 10	CPU	0 ~ 1300 , GD*
	ヘリウムガス	QHE-1	タービンフローメーター	2.36 ~ 20	CPU	0 ~ 1300 , GD*
	タンク掃選水素流量	QLH-2	タービンフローメーター	0 ~ 1.0 kg/cm ² D	CPU(S)	
(IV) 液位	液水タンク (静電容量型)	LCH-1	同軸円筒電極	280 ~ 2200 mm	PEN, CPU	
	(ホツトワイヤ型)	LHH-1	ホツトワイヤ	381 ~ 2314	PEN (1 pen), CPU, マイコン	
	液酸タンク (静電容量型)	LCO-1	同軸円筒電極	280 ~ 960	PEN, CPU	非常停止
	(ホツトワイヤ型)	LHO-1	ホツトワイヤ	321 ~ 942.5	PEN (1 pen), CPU, マイコン	非常停止
	PU制御信号	pu-2			CPU	

PEN: ペンレコーダー

表 11 ステージ試験における保安対策

	試験の運営方法に関する事項	保安設備に関する事項
対人に関する保安対策	(1) ステージタンクに液水および液酸が充填されている間、たて型燃焼試験設備に立入らない。 (2) 試験時には、第2砂防堤(図)より試験設備側へ立入らない。 (3) 実験場の周囲に警戒区域を設け、4ヶ所に警備員(能代消防署員に依頼)を配置し、部外者の侵入を防止する。 (4) 燃焼試験の前後5分間、実験場前の道路の通行を禁止する。(警察官に依頼) (5) 試験の運転に直接関わらない者は、定められた室で待機する。 (6) 見学者に対して、安全な見学者席を設ける。	(1) たて型燃焼試験設備の各階に水素漏洩検知器を設置し、爆発下限の10分の1(0.04%)以上の漏洩が検知された時、警報器で実験班に知らせる。 (2) 試験開始の1時間前に赤旗を上げ、サイレンを吹鳴して、部外者に知らせる。 (3) 試験日には、たて型燃焼試験設備の近くに警戒灯を設置し、部外者の注意を促す。 (4) カラーモニターテレビによるたて型燃焼試験設備付近の監視
供試体に対するおよび保安試験設備	(1) 運転シーケンスの各工程において、運転状態をモニターし、予め設定した範囲を越えて異常が検出された場合、自動あるいは手動操作によってステージの運転を非常停止する。 (2) 試験を行う前に全ての計測および制御回路の漏電および干渉チェックを実施する。	(1) 燃焼器から排気される未燃焼水素ガスを燃焼させるトーチを設置した。 (2) 燃焼器の火炎は、水で冷却して排気する。 (3) 計測および制御ケーブルは防炎処理する。 (4) 防爆カラーVTRによって、燃焼試験中のエンジンをモニターし、異常を検出する。

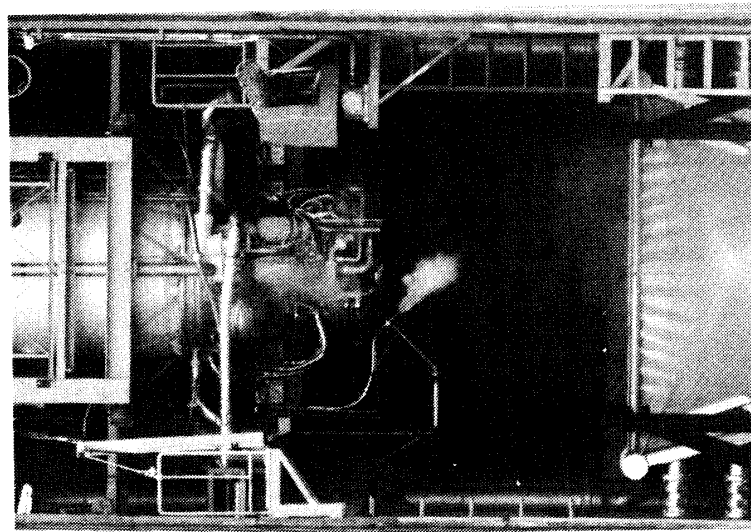


図 16 主燃焼器ノズル出口付近に取付けたトーチ

図 17 ステージ試験スケジュール

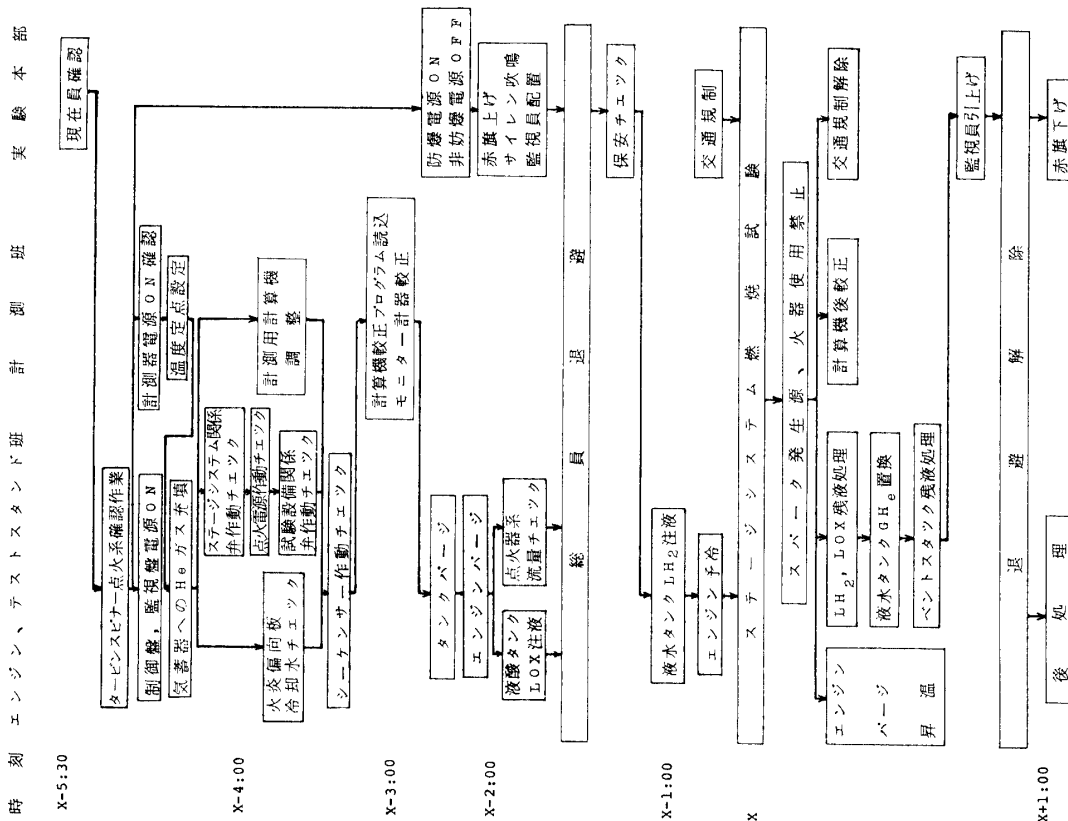
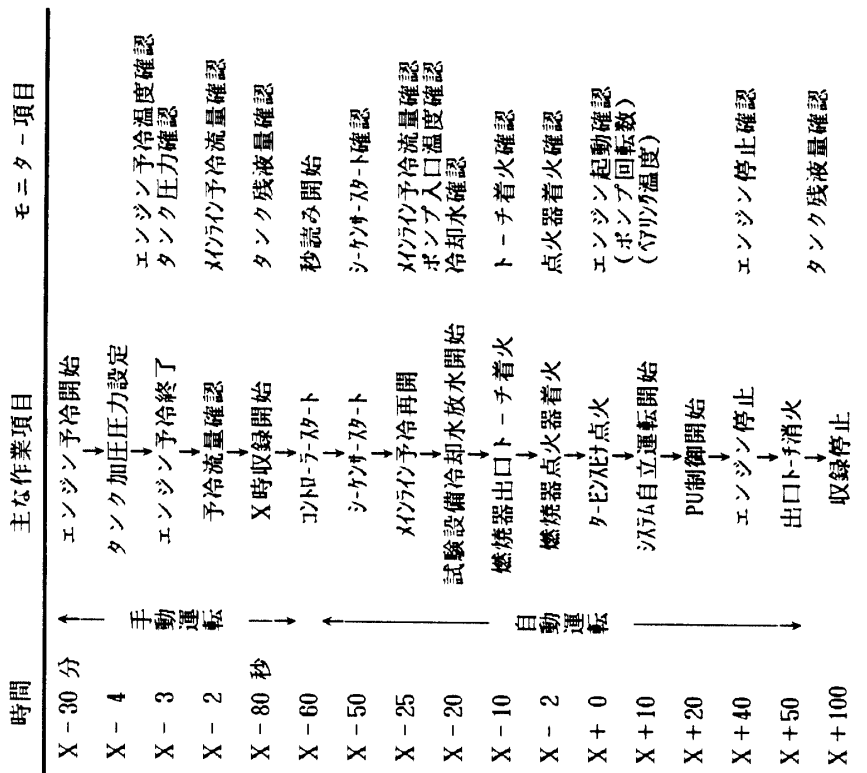


図 18 ステージ運転手順



(注) HST-701試験ではエンジンの停止時間はX+60秒である。

ていない。

3-4) ステージの運転方法

現在までに実施した8回のステージ試験によって確立した試験方法をまとめた。ここでは、試験当日のスケジュールとエンジンの予冷から試験終了までの試験方法に分けて述べる。

3-4-1) 試験当日のスケジュール

試験を行うための一連の準備作業はできる限り試験当日に実施した。また、保安上から屋外作業が日没までに終了するスケジュールとした。タービンスピナの固体推進薬の交換作業、およびステージ各部の点検作業のため、試験は1日に1回に限られる。図17に試験前後の主な作業項目を示した。

3-4-2) ステージの運転方法

エンジンの予冷開始から試験終了までの詳細な作業スケジュールを図18に示した。ステージの運転は、大きく分けて次に示す4つの操作から成る。

- (1) タンクの予冷および注液
- (2) エンジンの予冷
- (3) ステージ燃焼運転
- (4) ステージシステムの昇温

以上の4つの操作のうちステージ燃焼運転だけシーケンサーによって自動的に運転し、その他の運転は手動操作によって行う。

最初に、ヘリウムガスで置換した室温常態のタンクに試験設備の貯槽から液酸と液水を徐々に供給し、タンクを冷却する。タンク温度が液温に達した後、注液が始まると供給速度を速め、ホットワイヤが100%を検知するまで注液する。タンクへの注液が終了した後、タンク入口弁を開きエンジンシステムの予冷を開始する。エンジンシステムは、液水および液酸系を次に示す各々3つの冷却系統によって予冷する。

- (1) ポンプベアリング冷却系統
- (2) ガスジェネレーター供給ライン予冷系統
- (3) 主燃焼器供給ライン予冷系統

表 12 エンジン予冷温度の基準

	水素系	酸素系
(ポンプ)	K	K
ポンプ入口温度	30(23)	96(94)
ポンプ側ベアリング温度	60	100
タービン側ベアリング温度	70	110
(主燃焼器)		
供給配管外壁温度	70	110
(ガスジェネレーター)		
供給配管外壁温度	70	110

() 内の数値は X - 15秒における予冷基準

表 13 ステージ試験における非常停止およびインターロック項目とその基準

非常停止、インターロック項目	処置	HST-701試験の基準	HST-1001試験の基準
〔自動操作による項目〕			
液水ポンプ回転数	非常停止	46000 rpm 以上	50000 rpm 以上
液酸ポンプ回転数	非常停止	22000 rpm 以上	29000 rpm 以上
液水ポンプ振動	非常停止	40 G 以上 (2000Hz以下)	40 G 以上 (2000 Hz以下)
液酸ポンプ振動	非常停止	40 G 以上 (")	40 G 以上 (")
主燃焼室圧力	非常停止	2 kg/cm ² G 以下	2 kg/cm ² G 以下
液水タンク圧力	非常停止	0.5以下、5 kg/cm ² G 以上	0.5以下、5 kg/cm ² G 以上
液酸タンク圧力	非常停止	0.5以下、5 kg/cm ² G 以上	0.5以下、5 kg/cm ² G 以上
タービン入口温度	非常停止	150 °C 以下、800 °C 以上	150 °C 以下、800 °C 以上
点火器燃焼温度	インターロック	-----	200 °C 以下
点火器燃焼圧力	インターロック	6 kg/cm ² G 以下	-----
〔手動操作による項目〕			
炉バリアリング温度(4点)	非常停止	急激な上昇	急激な上昇
液水タンク液位	非常停止	No.1ホトリ付の液位以下	No.1ホトリ付の液位以下
液酸タンク液位	非常停止	No.1ホトリ付の液位以下	No.1ホトリ付の液位以下
モニターによる監視	非常停止	目視により出火等の異常を判断	目視により出火等の異常を判断

予冷の初期には、ベアリング冷却系統だけを用いて主にポンプを徐々に予冷する。次にガスジェネレーター供給ラインの予冷を行い、最後に主燃焼器の供給ラインを予冷する。以上の3系統の予冷温度をモニターしながら、エンジンシステムが一様に冷却されるよう各ラインの予冷排液弁を調節する。エンジン各部の温度が表12に示す温度以下に予冷された時を予冷終了の基準としている。予冷終了後、図18に示すような燃焼運転開始のための準備作業を行い、X-60秒からコントローラーおよびシーケンサーによって燃焼運転が自動的に行われる。エンジンが起動する約25秒前から再びメインラインの予冷を行い、ポンプ供給流量とポンプ入口温度がエンジン起動の基準を満足していることを確認する。X-20秒にエンジンの火炎を冷却するための冷却水を火炎偏向板に放水する。X-10秒にエンジンの未燃焼水素ガスを燃焼させるトーチに点火する。このトーチは燃焼終了後約10秒して消火する。X-2秒に主燃焼器の点火器に着火し、X時にタービンスピナに点火して、エンジンを起動する。エンジンは約3秒程度で定常運転状態になる。X+10秒で試験設備に捨てていたエンジンの予冷排液をタンクに戻し、ステージシステムは試験設備から独立して自立運転状態となる。X+20秒からPU制御を開始する。HST-701ではX+60秒で、HST-1001ではX+40秒でエンジンを停止し、エンジン各部のパージと昇温が開始する。タン

表 14 HST-701 ステージ燃焼試験結果

試験記号	HST-701-1-2		HST-701-1-3		HST-701-2-1		HST-701-2-2	
	中立	全開	中立	全開	中立	全開	中立	全開
PU弁の位置	X+4.0	X+4.0	X+4.0	X+4.5	X+4.4	X+5.4	X+2.6	X+3.6
時刻								
燃焼器								
推力	6188.	6306.	4711.	5529.	4211.	5731	5041.	
燃焼室圧力	30.1	30.6	23.9	27.5	21.9	28.2	25.4	
供給流量	3.46/16.6	3.44/16.9	2.65/13.5	3.24/14.6	2.54/12.0	3.01/15.9	2.84/13.9	
混合比	4.78	4.91	5.09	4.51	4.74	5.26	4.87	
比推力	308.	310.	292.	309.	289.	304.	302.	
推力係数	1.42	1.42	1.36	1.39	1.33	1.41	1.38	
特性排気速度効率	0.933	0.939	0.931	0.949	0.933	0.942	0.947	
ポンプ								
回転数	45630/18810	45150/19160	37700/15600	42560/18170	36280/14890	42420/17910	38970/17010	
吸込流量	3.69/17.5	3.65/17.8	2.80/14.4	3.44/16.9	2.70/13.8	3.23/16.8	3.04/16.0	
吸込圧力	2.81/2.56	2.79/2.63	3.06/2.97	2.79/2.60	3.08/2.77	2.90/3.00	2.95/2.83	
吐出圧力	47.3/40.6	48.4/42.3	95.0/31.1	43.8/36.2	32.4/27.9	44.2/38.9	39.3/33.9	
NPSH	204./12.3	221/12.4	234./16.0	220./11.6	236./14.3	213/15.4	219./13.7	
圧力係数	0.613/0.412	0.609/0.417	0.627/0.441	0.602/0.393	0.626/0.426	0.625/0.427	0.627/0.410	
タービン								
入口圧力	- - -	35.2	23.3	31.1	23.3	30.9	27.7	
入口ガス温度		849.	869.	847.	826.	918.	828.	
駆動ガス流量	0.394	0.383	0.285	0.345	0.257	0.348	0.325	
駆動ガス混合比	0.850	0.892	0.863	0.865	0.787	0.86	0.80	
タンク								
加圧ガス圧力	3.16/2.93	3.17/3.12	3.28/3.12	3.15/3.00	3.27/2.92	3.20/3.23	3.21/3.10	
液温度	22.0/93.1	21.6/94.8	20.7/92.1	21.1/95.5	21.6/92.1	21.6/93.0	20.7/93.0	
ステージ								
比推力	300.	303.	287.	302.	283.	296.	284.	
供給流量	3.70/16.9	3.64/17.2	2.80/13.6	3.43/14.9	2.71/12.2	3.22/16.1	3.03/14.1	
混合比	4.56	4.71	4.87	4.33	4.50	5.00	4.65	
PU制御流量	0.56	0.53	0.69	1.91	1.60	0.63	1.80	

上段/下段：水素系/酸素系

表 15 HST-1001 ステージ燃焼試験結果

試験記号		HST-1001-1-1	HST-1001-1-2		HST-1001-1-3	
PU弁の位置		全開	中立	全閉	中立	全閉
時刻	sec	X+15	X+25	X+37	X+26	X+35
燃焼器						
推力	kg	5865.	5942.	6431.	7363.	7962.
燃焼室圧力	kg/cm ² A	31.6	31.8	33.8	37.8	40.3
供給流量	kg/s	3.32/16.8	3.25/17.3	3.35/19.3	3.52/22.0	3.53/23.4
混合比		5.06	5.33	5.75	6.25	6.61
比推力	sec	292.	289.	284.	288.	296.
推力係数		1.31	1.32	1.34	1.37	1.39
特性排気速度効率		0.925	0.919	0.901	0.906	0.928
ポンプ						
回転数	rpm	41150/18710	40650/18660	42000/19610	46940/20960	48890/21840
吸込流量	kg/s	3.72/19.3	3.63/20.2	3.75/19.9	3.98/25.1	4.00/24.1
吸込圧力	kg/cm ² A	3.07/3.12	3.13/2.86	3.14/3.03	2.99/2.91	3.00/2.97
吐出圧力	kg/cm ² A	49.7/53.8	49.3/53.8	52.4/60.2	59.5/64.4	62.3/71.1
NPSH	m	177./14.6	212./14.6	212./15.3	213./15.6	214./15.7
圧力係数		0.653/0.502	0.664/0.504	0.658/0.511	0.611/0.482	0.600/0.492
タービン						
入口圧力	kg/cm ² A	20.3	20.2	21.4	27.1	28.9
駆動ガス温度	K	822.	827.	855.	954.	1023.
駆動ガス流量	kg/s	0.589	0.601	0.632	0.759	0.818
駆動ガス混合比		0.758	0.819	0.843	0.922	0.989
タンク						
加圧ガス圧力	kg/cm ² A	3.38/3.68	3.43/3.49	3.41/3.54	3.37/3.67	3.40/3.70
液温度	K	21.7/94.2	21.7/92.2	21.9/94.6	21.2/92.8	21.7/93.4
ステージ						
比推力	sec	280.	279.	275.	278.	286.
供給流量	kg/s	3.72/17.2	3.59/17.7	3.75/19.6	3.98/22.5	4.00/23.9
混合比		4.63	4.94	5.24	5.65	5.97
PU制御流量	kg/s	1.84	2.30	0.	2.42	0.

上段/下段：水素系/酸素系

クの残液は試験設備のベントスタックに排液され、タンクシステムのパージと昇温を始める。

ステージの運転状態が表 13 に示す基準から外れて異常を示した場合には、運転を停止するかあるいはシーケンスの歩進を停止する。

3-3) ステージ試験の解析結果

HST-701 および HST-1001 ステージ試験によって得たデータに基づいて、ステージの性能、エンジンの起動と停止特性、タンクの加圧特性、PU 制御特性、およびステージの冷却特性に注目して解析した結果を述べる。

3-3-1) ステージの性能

表 14～15 に現在までに実施した HST-701 および HST-1001 ステージ試験のデータ解析の結果を示した。これらの解析はステージの運転が十分に定常状態になっている時刻のデータを用いて、解析したものである。また、PU 制御を行った試験については、PU 弁が中立の位置にある時が定格運転であるが、PU 弁が異った位置にある時の解析結果も示した。

ステージ試験においては、ガスジェネレーターへの供給流量、ベアリング冷却流量、および PU 制御流量は各ラインに組込んだオリフィス流量計によって計測しているが、ポンプ吸込流量と主燃焼器への供給流量はこれらのラインの過剰な圧力損失を避けるため、オリフィスあるいはタービン流量計によって計測しなかった。従って、これらの流量は次のようにして算出した。主燃焼器供給流量 \dot{W} とラインの圧力損失 ΔP の間に次のような関係がある。

$$\dot{W} = k(\gamma \cdot \Delta P)^{1/2}$$

γ : 流体の比重量 k : 比例定数

ここでは、比例定数 k はステージシステムの各部を流れる流量を積分し、タンクから供給された液量と比較することによって決定した。

また、ステージ試験では推力を計測していないので、主燃焼器単体燃焼試験によって得られた表 16 に示すスラスト係数効率から推力を算出した。この場合の理論計算については、この特集号の別の論文に報告されている [5]。ここに示す推力および比推力は、表 16 に示すノズル開口比で大気圧条件で得られた値である。

表 16 主燃焼器のスラスト係数効率とその他の諸元

ステージ名称	HST-701	HST-1001
燃焼器名称	TC-701	LE-5
スラスト係数効率	0.956	0.973
ノズル修正係数	0.966	0.927
ノズル開口比	6.974	8.2
燃焼室ノズル絞り比	2.491	3.11

HST-701 および HST-1001 燃焼試験の範囲を図 19～20 に示した。HST-701 は設計値の 84.5～118 % の範囲で、HST-1001 は 86～113 % の範囲で運転した。

図 21～22 にステージ燃焼試験の写真を示した。

3-3-2) 起動および停止特性

ステージシステムの運転においても最も難しい点は起動操作であり、次に停止操作である。どちらも 2～3 秒以内に完了するため、各操作のわずかなタイミングのずれが特性を変

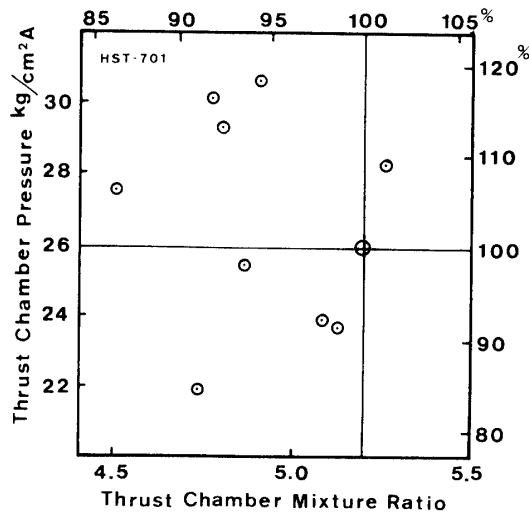


図 19 HST-701 ステージ試験の範囲

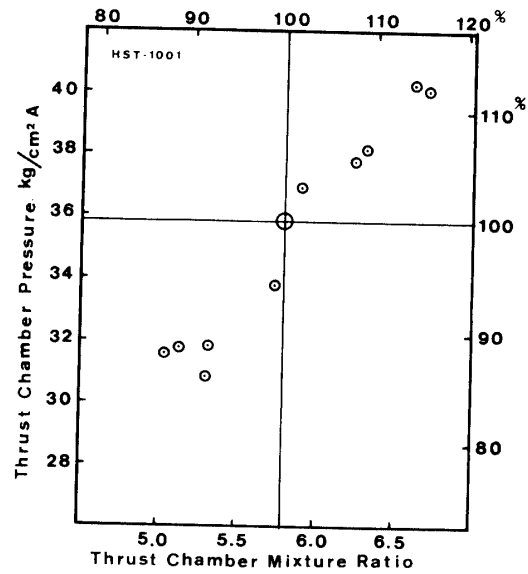


図 20 HST-1001 ステージ試験の範囲



図 21 HST-1001 ステージ燃焼試験の遠景写真

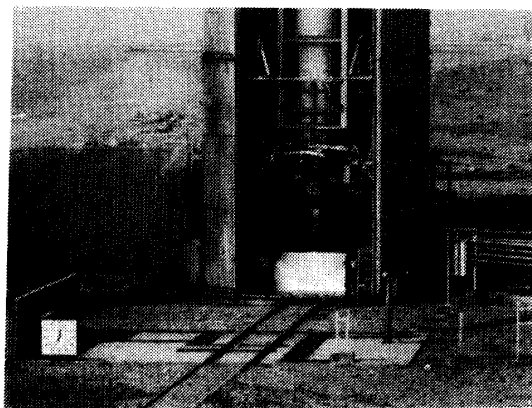


図 22 HST-1001 ステージ燃焼試験の近景写真

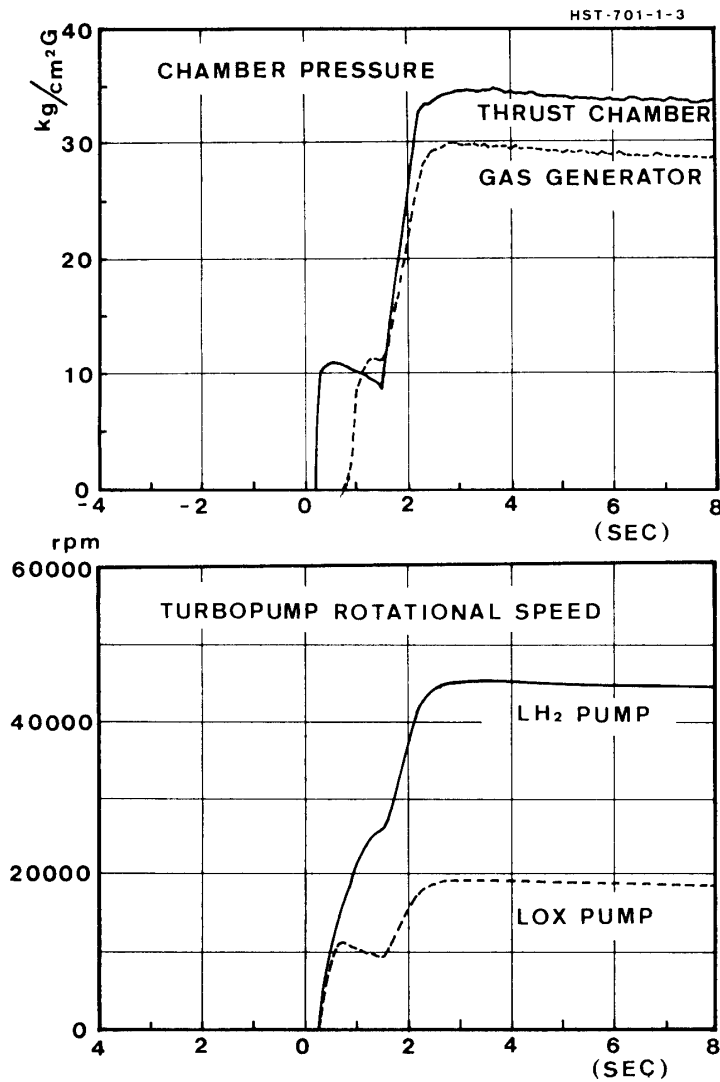


図 23 HST-701 ステージの起動状態

えることになる。図 23～24 に HST-701 と HST-1001 の起動の様子を示した。各々の図には、起動の状態を顕著に表わす主燃焼室とガスジェネレーター燃焼室の圧力と両ポンプの回転数を示した。図 25～26 に両ステージの制御シーケンスを示した。起動エネルギーは固体推進薬タービンスピナーによって与えられるが、HST-701 と HST-1001 とでエネルギーを変えた。推進薬はどちらも同じ (450 g) であるが、HST-1001 では燃焼圧力を約 2 倍に上げて燃焼速度を増し、発生するガス流量を約 50 % 増加している。タービンスピナーについてはこの特集号の別の論文に報告されている [6]。各図で起動途中で段が見られるが、この時ガスジェネレーターの燃焼が始まり、システムは自励運転状態となる。ガスジェネレーターの燃焼が開始された後も、タービンスピナーは燃焼を続けており、この燃焼が終了するとシステムは定常運転に入る。この起動時間は、HST-701 で約 2.5 秒、HST-1001

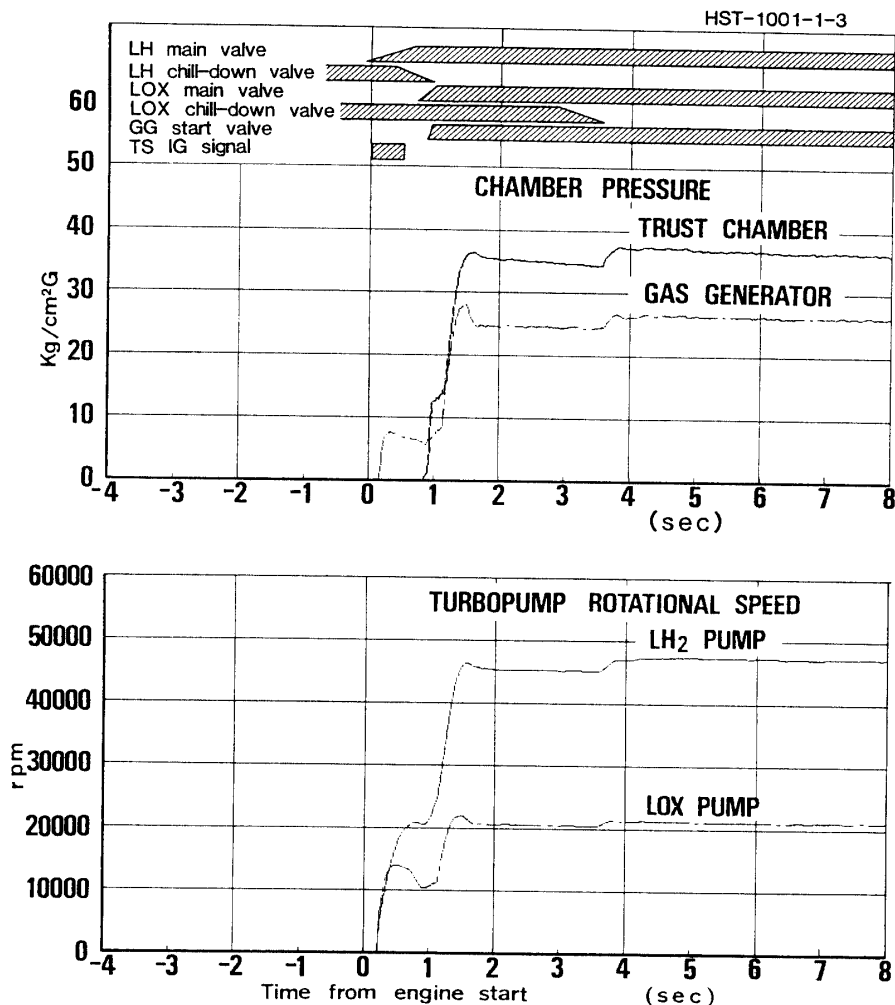


図 24 HST-1001 ステージの起動状態

で約 1.7 秒である。HST-1001 の起動では、X+3.8 秒に更に小さな段が見られるが、これは起動時に主燃焼器の混合比を下げるため開いておいた酸素系の予冷弁を閉じたことによるものである。3 回の実験結果から判断すると、この予冷弁を閉じる時期はかなり早めても、起動特性に悪い影響を与えないものと思われる。HST-701 の試験では、予冷弁は起動と同時に閉じているため、このような現象は見られない。また、HST-1001 では起動時に主燃焼室圧力が約 7% オーバーシュートしたが、HST-701 ではこの現象はほとんど見られなかった。図 27~29 に HST-1001 のタービンガス温度および各インジェクターの温度を示した。主燃焼器およびガスジェネレーターの水素および酸素インジェクター温度は起動と同時に降下し、すみやかに定常状態に達していることから供給ラインの予冷が良好であったことが判る。タービンノズル入口ガス温度は、タービンスピナーの燃焼によって 1 度上昇し、ガスジェネレーター始動弁が開いて液水と液酸が供給された時、1 時的に下がる現象が見られる。その後、タービンスピナーの燃焼終了とともに定常値に達し、X+3.8

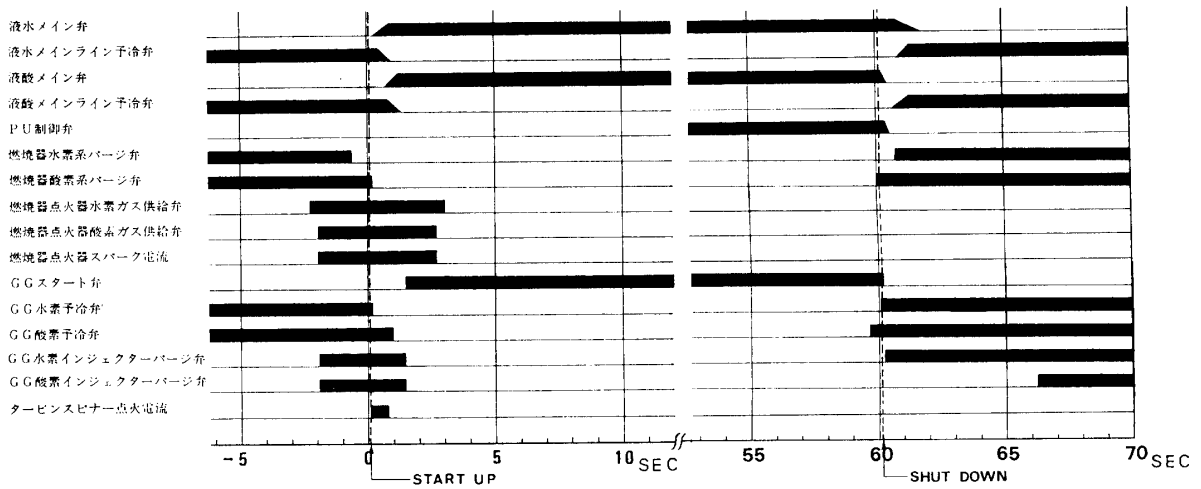


図 25 HST-701 運転シーケンス

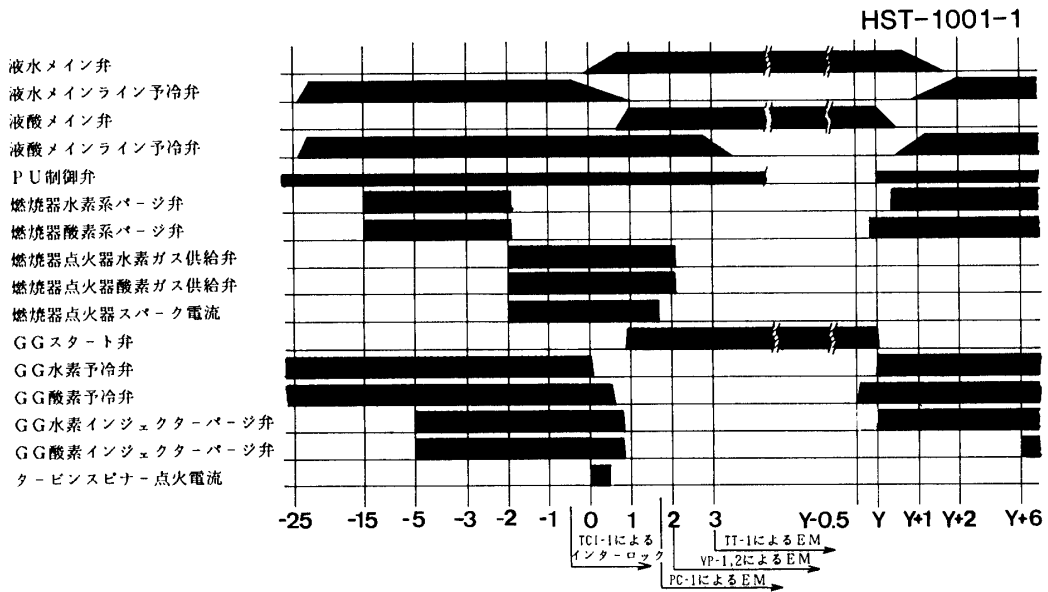


図 26 HST-1001 運転シーケンス

秒に予冷弁が閉まると液酸ポンプの吐出圧力が上昇し、混合比が上って高い温度の定常値になる。主燃焼器の水素インジェクターには、再生冷却によって加熱された水素が供給されるため、その温度は他のインジェクター温度に比べて定常状態に達する時間が長く、約 10 秒程度である。

次に、HST-1001 の停止特性を図 30 に示した。停止時にも途中で 1 つ段が見られるが、これはガスジェネレーターの液酸供給ラインの予冷弁を開いてガスジェネレーターへの液酸供給流量を減じ、混合比を下げてサーマルスパイクの発生を抑えたことによるものであ

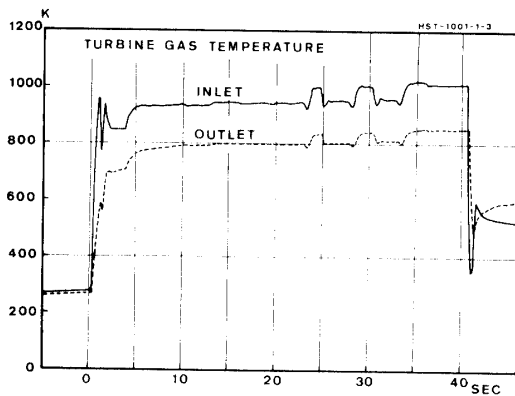


図 27 タービンガス温度

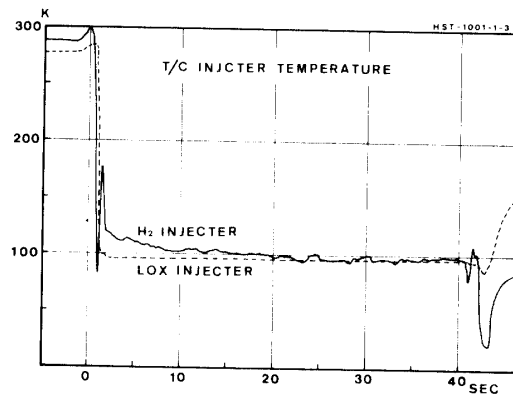


図 28 主燃焼器インジェクター温度

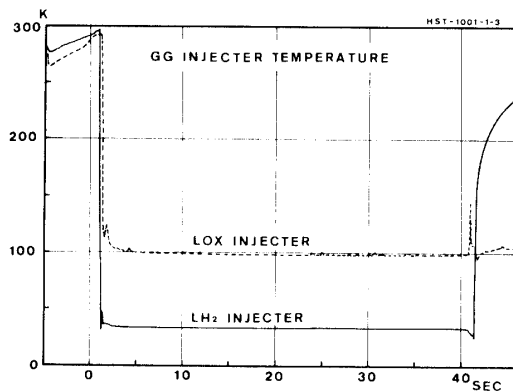


図 29 ガスジェネレーターインジェクター温度

る。この後、ガスジェネレーター始動弁を閉じて、タービン駆動ガスの供給を止めエンジンを停止する。HST-701 および HST-1001 とともに停止時間は約 1.5 秒である。

HST-702-2-2 試験において、図 31 に示すように運転停止の約 6 秒前から液水ポンプ回転数が徐々に上昇する現象が見られた。これはタンク内の液水の残液量が少なくなり、図に示すように液水の温度が上昇し密度が低下したためである。液水ポンプ駆動タービンの回転が上昇したことによって、液酸ポンプ駆動タービンの回転が下降している。これによって主燃焼室圧力も徐々に下降する傾向を示した。このことは飛しょう時にタンクの推進剤をどこまで使えるかという問題に重要な示唆を与えている。

3-3-3) タンク加圧特性

タンク圧力はポンプ入口の NPSH を決定するものであり、ポンプ吸込特性を左右し、更にエンジン全体の性能に影響を与える。従って、タンクの加圧制御特性はステージ試験における重要な調査項目である。加圧制御特性はこれに大きな影響を与えると思われる自立運転と PU 制御運転を考慮して解析した。表 17~18 に HST-701 および HST-1001 ステージ試験の結果を示す。HST-701 ステージ試験では加圧ガス流量計が不良のため解析できない部分があった。また、ポンプベアリング冷却液の戻り流量と温度を計測していない

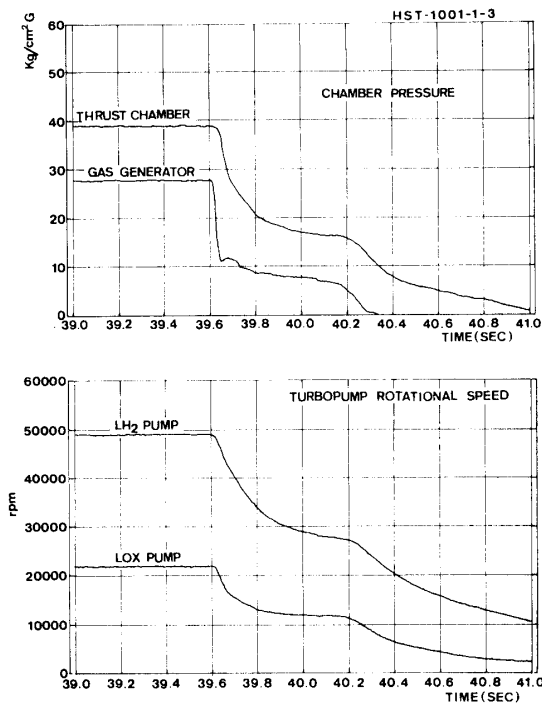
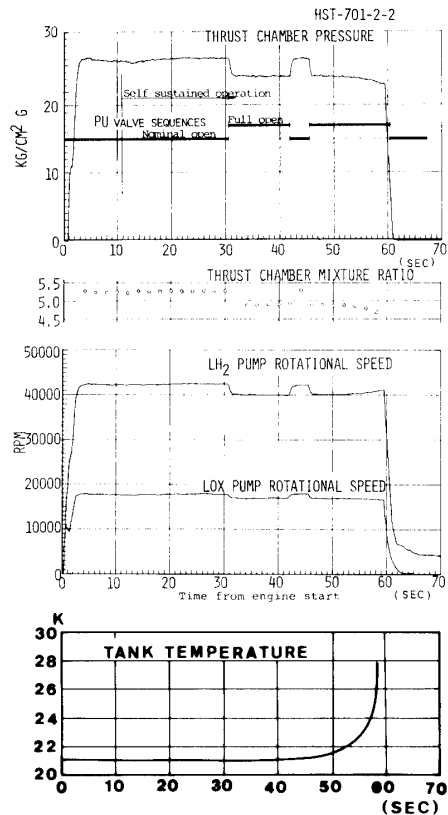


図 30 HST-1001 の停止特性

図 31 HST-701-2-2 試験における
タンク温度の上昇

ため、加圧ガス余剰率の算出には次の値を用いた。

液水タンク戻り流量：ベアリング冷却液の全流量

温度：25 K

液酸タンク戻り流量：ベアリング冷却液の 2 分の 1

温度：ポンプ吐出液温度

HST-701 ステージ試験の結果 エンジンの起動から自立運転になるまでは水素タンクは加圧制御系水素ガスだけがタンクに流入する。この間の加圧ガス余剰率は 1.1~1.2 となり、表 6 に示した計画値より 40% 程度小さい。自立運転状態では、ベアリング冷却液がタンクに戻るためタンク圧力制御系のガス流量は少なくなり、この時のガス余剰率は 0.2~0.3 となった。従って、ベアリング冷却液の戻りによるタンクの加圧への寄与は約 70% になる。

一方、液酸タンクについては、自立運転前の加圧ガス余剰率は 1.6~1.8 であり、自立運転後は 1.8~2.0 であった。タンクに戻る冷却液および PU 制御液の全流量は PU 弁が中立位置にある時、ポンプ吸込容積流量の 4% で、全開位置にある時、11% である。従って、自立運転後の加圧ガス余剰率は自立運転前より小さくなること予想されたが、実際には加圧ガス温度が約 20% 上昇したことによって大きくなった。

表 17 HST-701 試験のタンク加圧特性

試験記号	HST-701-1-2		HST-701-1-3		HST-701-2-2	
	中立	中立	中立	全開	中立	全開
PU弁の位置	X+10	X+40	X+10	X+40	X+10	X+26
時刻	sec					
加圧ガス余剰率	1.05 / --	0.14 / --	1.17 / 1.85	0.24 / 1.99	1.12 / 1.59	0.31 / 1.83
掃還ガス余剰率		0.15 / 0.037		0.16 / 0.038		0.18 / 0.038
(タンク)						
タンク圧力	kg/cm ² A	3.14 / 2.90	2.96 / 3.13	3.20 / 3.03	3.00 / 3.23	3.20 / 3.23
アレッジガス温度	K	195 / 105	196 / 99.6	90.8 / 193	194 / 99.4	114 / 134
ポンプ吸込体積流量	liter	52.2 / 15.2	53.1 / 15.5	52.2 / 15.8	45.9 / 14.7	46.5 / 15.0
(加圧ガス系統)						
調圧弁上流圧力	kg/cm ² A	31.1 / 12.5	32.6 / 12.9	33.0 / 14.1	30.7 / 19.0	31.2 / 20.6
調圧弁上流温度	K	156 / 285	143 / 374	146 / 373	151 / 269	132 / 348
加圧ガス重量流量	kg/s	0.026 / --	0.004 / --	0.006 / 0.102	0.024 / 0.106	0.008 / 0.096
(タンク掃還系統)						
掃還液温度	K			25. / --		25. / --
γリチル冷却液掃還流量	kg/s		0.025 / 0.071	0.025 / 0.082		0.025 / 0.076
PU制御掃還液流量	kg/s		-- / 0.56	-- / 0.53		-- / 0.63

上段/下段：水素系/酸素系

表 18 HST-1001 試験のタンク加圧特性

試験記号	HST-1001-1-1			HST-1001-1-2			HST-1001-1-3		
	中立	全開	中立	中立	全開	中立	中立	全開	中立
PU弁の位置	X+10	X+15	X+10	X+25	X+37	X+10	X+26	X+35	X+10
時刻	sec								
加圧ガス余剰率	0.89/1.33	0.58/1.54	0.93/1.39	0.30/0.84	0.38/0.82	0.94/1.41	0.40/0.88	0.37/0.98	0.37/0.88
帰還ガス余剰率		0.19/0.11		0.19/0.13	0.19/0.012		0.18/0.11	0.18/0.011	0.18/0.011
(タンク)									
タンク圧力	kg/cm ² A	3.24/3.79	3.24/3.68	3.44/3.49	3.42/3.55	3.19/3.81	3.37/3.68	3.41/3.71	3.41/3.71
アレシジガス温度	K	204/169	176/167	116/141	87/154	191/133	114/168	111/180	111/180
ポンプ吸込体積流量	liter	52.7/17.4	53.6/17.2	52.6/18.1	54.2/17.8	57.4/22.0	56.9/22.3	57.5/21.5	57.5/21.5
(加圧ガス系統)									
調圧弁上流圧力	kg/cm ² A	34.9/30.6	34.8/27.2	34.5/23.4	34.8/20.5	41.4/37.6	41.3/29.0	43.9/33.0	43.9/33.0
調圧弁上流温度	K	120/207	117/220	119/193	117/209	118/249	114/270	114/277	114/277
加圧ガス重量流量	kg/s	0.030/0.17	0.021/0.17	0.032/0.19	0.011/0.098	0.035/0.185	0.016/0.104	0.015/0.110	0.015/0.110
(タンク帰還系統)									
帰還液温度	K		26.3/ --	25.7/ --	25.7/ --		25.7/ --	25.7/ --	25.7/ --
AT/P冷却液帰還流量	kg/s		0.038/ --	0.040/0.225	0.039/0.237		0.039/0.243	0.039/0.257	0.039/0.257
PU制御帰還液流量	kg/s		--/1.84	--/2.30	--/2.30		--/2.42	--/2.42	--/2.42

上段/下段：水素系/酸素系

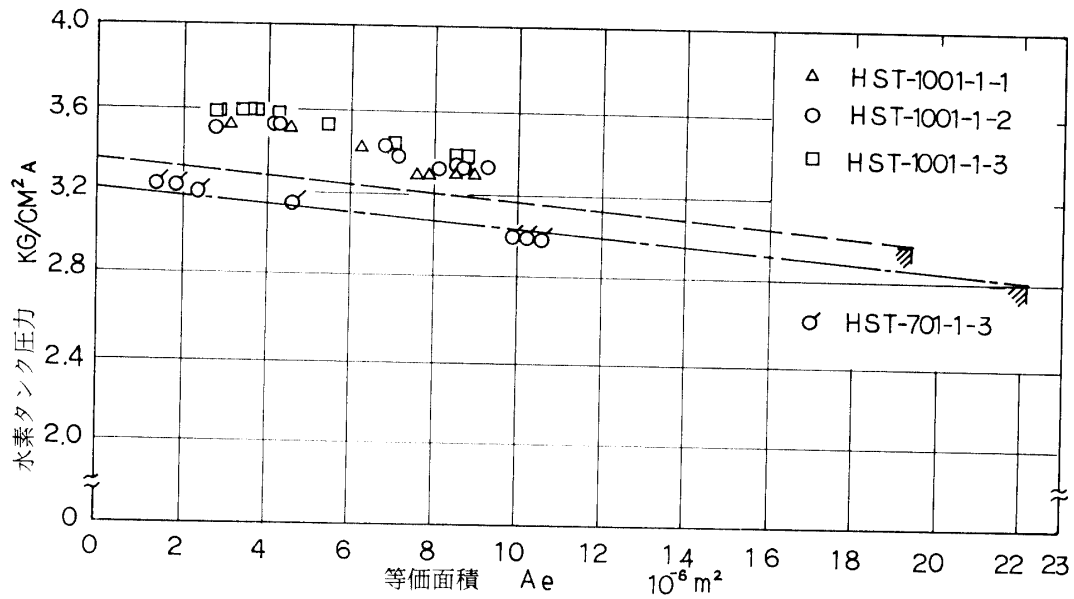


図 32 液水タンク圧力調整器の弁開度特性

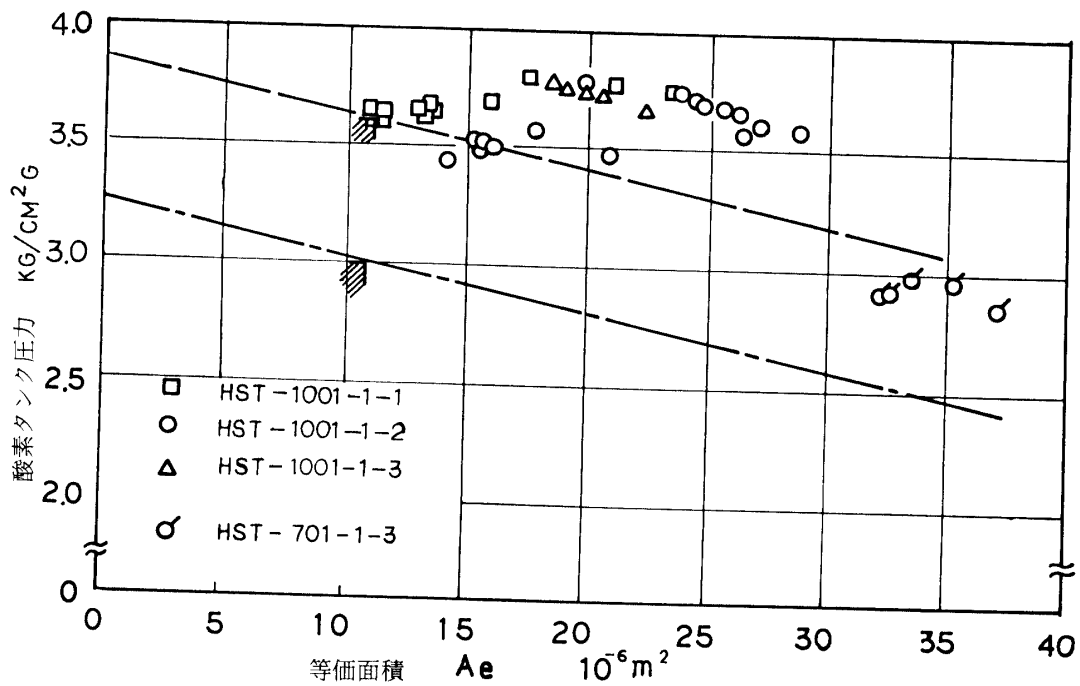


図 33 液酸タンク圧力調整器の弁開度特性

HST-1001 ステージ試験の結果 HST-701 試験の結果から判断すると10トンエンジンのタービン駆動ガス流量が増加することから判断するとタンク加圧ガスを発生する熱交換器の出口ガス温度がかなり上昇することが明らかになったため、熱交換器の低温側にバイパスラインを設け出口ガス温度を下げる処置を行った。また、液水ポンプベアリング

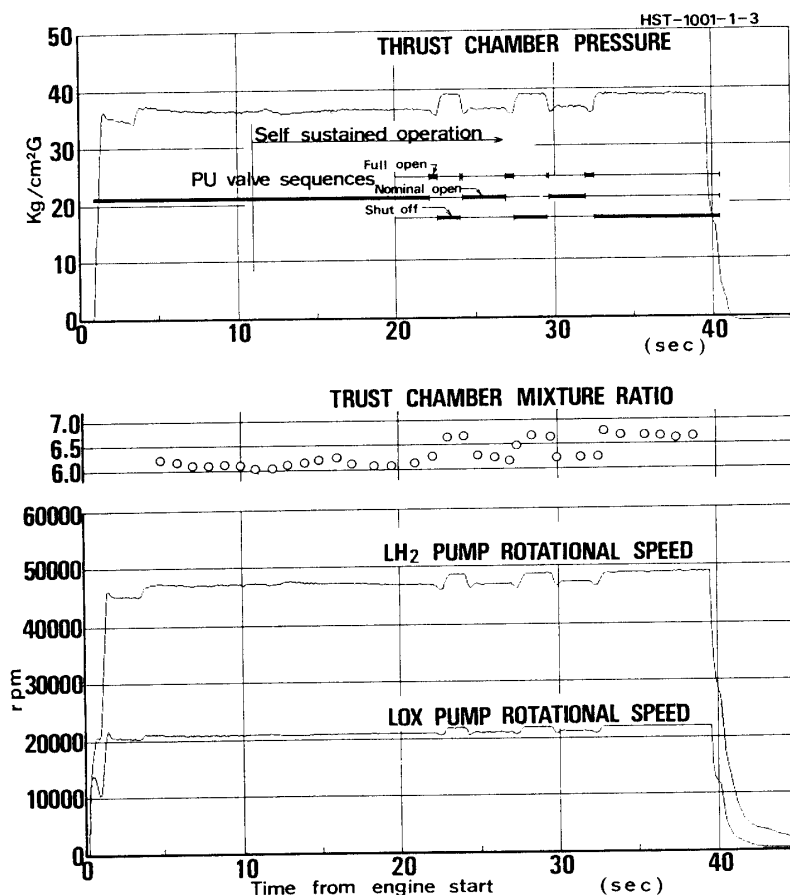


図 34 HST-1001 の PU 制御特性

冷却液の戻り流量を計測する流量計を取付けた。自立運転前の液水タンク加圧ガス余剰率は 0.9~0.94 であり、HST-701 試験の場合の約 80% である。これは主燃焼器の再生冷却出口温度が下がったためである。また、自立運転後の加圧ガス余剰率は 0.3~0.4 に低下したが、これも HST-701 試験の場合と同様である。一方、液酸タンクの自立運転前の加圧ガス余剰率は 1.3~1.4 であり、自立運転後は 0.9~1.0 になった。

圧力調整器の特性 圧力調整器の特性は流体の温度および圧力が同じ場合には設計に用いた図 4~5 の特性曲線が判り易いが、圧力調整器の上流側の流体条件が大きく変化する場合には、下流側圧力（タンク圧力）と調整器の弁開度（あるいは弁の等価面積）を用いて特性を表現した方が望ましい。弁の等価面積は一次元等エントロピー流のチョークの式を用いて算出した。図 32 に液水タンクの圧力調整器 (FR-2) の特性を示す。図中の鎖線は計画値である。HST-701 ではほぼ計画値と一致したが、HST-1001 では設定値が 0.1 kg/cm^2 程度高くなったためタンク圧力も $0.1 \sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$ 高くなった。図 33 に液酸タンク圧力調整器の特性を示す。両ステージ試験とも、作動点が計画値の 3 倍程度大きい。これは、熱交換器の圧力損失が大きくなったため、圧力調整器の上流圧力が計画値より低くなったことに原因があるが、圧力調整器の弁等価面積に余裕があったためタンク圧力は計画

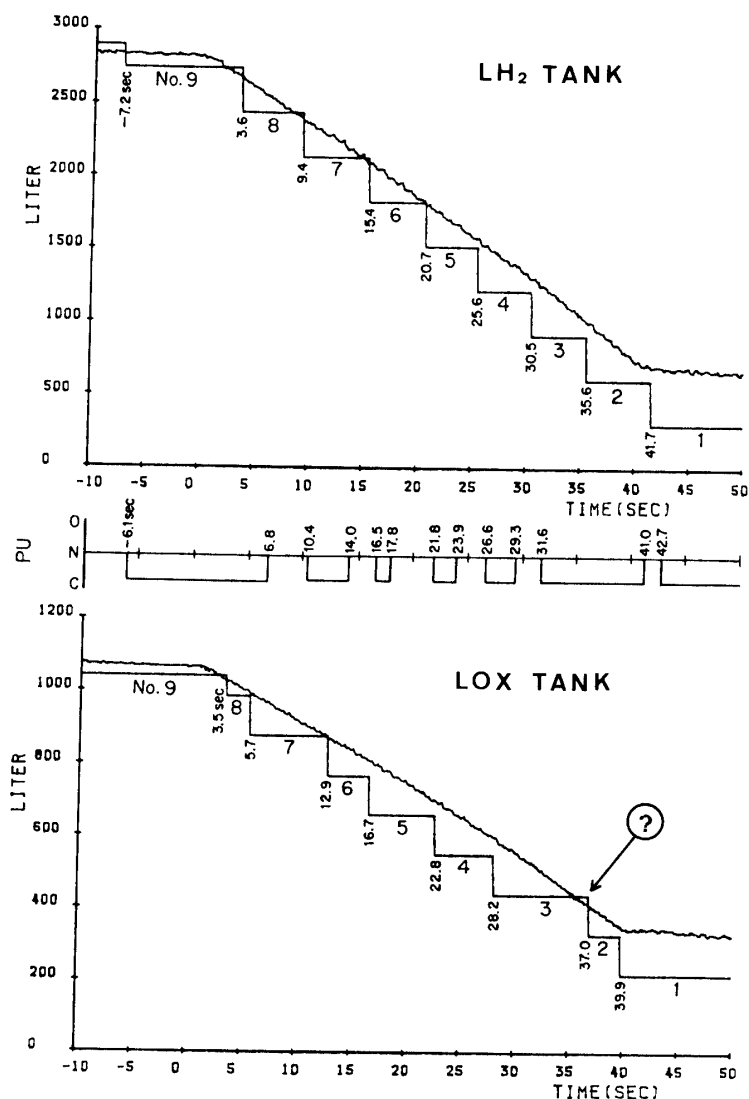


図 35 ホットワイヤセンサーと PU 制御信号

値に設定された。

3-3-4) PU 制御特性

図 34 に HST-1001 試験における PU 制御の様子を示した。PU 制御は X+20 秒から開始し、これ以前では PU 弁は中立の位置にある。図 35 には両タンクのホットワイヤ液位計の信号と PU 制御弁に与えられる制御信号が示されている。この試験では、タンク残液混合比が高くなっているため、PU 制御弁は中立と全閉位置を往復しており、また液酸タンクの No. 3 ホットワイヤセンサーが異常な信号を出したため、X+35 秒付近の PU 制御に誤りが認められる。各ホットワイヤセンサーが液位を検出した後、約 1 秒遅れて PU 制御弁が作動しているのが認められるが、これはホットワイヤセンサーが液面の揺らぎを検出することによって PU 弁がチャタリングを起こすことを防ぐため制御系に遅延回路を入れた

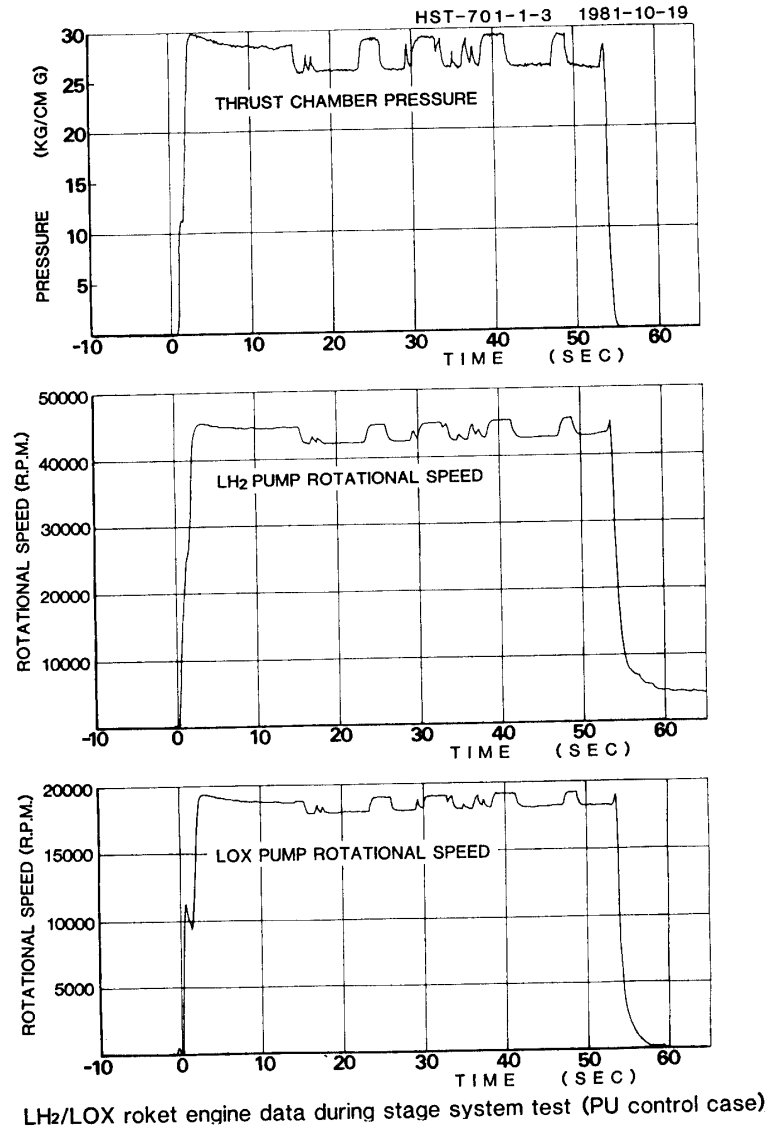


図 36 HST-701-2-1 試験の PU 制御特性

ためである。この処置を施す以前に行った HST-701 試験では、図 36 に示すようなチャタリング現象が見られた。PU 制御によってエンジン混合比は定格値から約 ± 0.35 変化し、またその他の運転状態も表 14~15 に示す値に変化する。

3-3-5) ステージの予冷特性

図 37~38 に注液が始まるまでのタンクの予冷温度と注液状態を示した。図には水素と酸素タンクの状態を対比するため、予冷および注液開始時間を一致させて表示しているが、実際には酸素タンクの注液後、水素タンクの注液を行っている。酸素タンクの予冷は約 9 分程度であり、酸素の沸点 (90.2 K) に達する時期が比較的明確である。一方、水素タンクの予冷は 100 K までは速く、その後水素の沸点 (20.4 K) に達するまで時間を要し、予冷時間は約 30 分である。予冷後の注液速度は水素および酸素タンクともほぼ同程度で 100

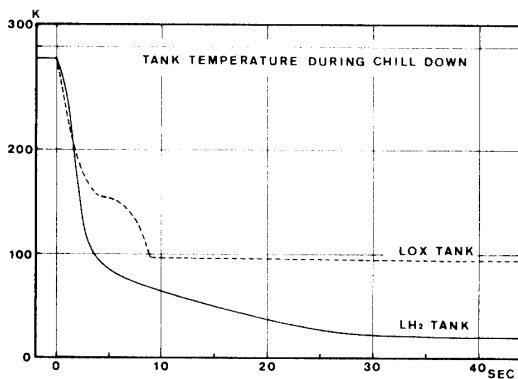


図 37 タンクの予冷温度

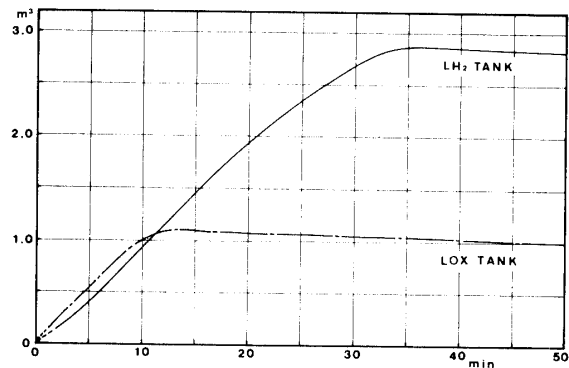


図 38 液水/液酸の注液状態

liter/分であった。表 19 に各試験におけるタンクの予冷および注液時間を示した。

図 39 にエンジンシステムの予冷状態を示した。ポンプ入口温度は予冷開始後すぐに沸点近くまで下降するが、その後十分なポンプ NPSH が確保できる温度にまで予冷するのに時間を要する。ポンプベアリングと各供給配管の温度は約 15 分程度でエンジンを起動できる値になる。エンジンの予冷終了後、図 18 に示した作業を行うため、この間約 3~4 分間に各部の温度が多少上昇するためエンジン起動の 25 秒前から主燃焼器供給配管に推進剤を流して再度予冷を行い、ポンプ入口温度の確認を行った。予冷を行っている間に供給配管の温度が大きく変動しているのが見られるが、これは各部の予冷温度が一様に降下するよう予冷排液弁を操作したためである。表 20 には、エンジンの予冷時間および予冷終了時における各部の温度を示した。

3-3-6) タンクの昇温

燃焼試験が終了した時、両タンクには液水と液酸が残っており、これらの残液は順次試験設備のベントスタックから大気中に排気される。この後タンクはヘリウムでパージし、密閉して昇温する。図 40 に排液 2 時間後からのタンクの昇温の様子を示した。両タンクとも約 50 時間でほぼ室温に戻る。

表 19 タンクの予冷および注液時間

試験記号	予冷時間 分	注液時間 分	注液量 liter
HST-701-1-1	23/5	14/4	1118/584
HST-701-1-2	16/5	38/9.5	3100/1117
HST-701-1-3	17/4	30/9	3100/1096
HST-701-2-1	18.5/3	31/9.5	3050/1096
HST-701-2-2	14/4	25/9	3050/1096
HST-1001-1-1	17/5	16.5/7	1830/899
HST-1001-1-2	13/4	36/10	3000/1094
HST-1001-1-3	12/3.5	30/11.5	3050/1082

(注) 注液時間には再注液の時間を含んでいない。

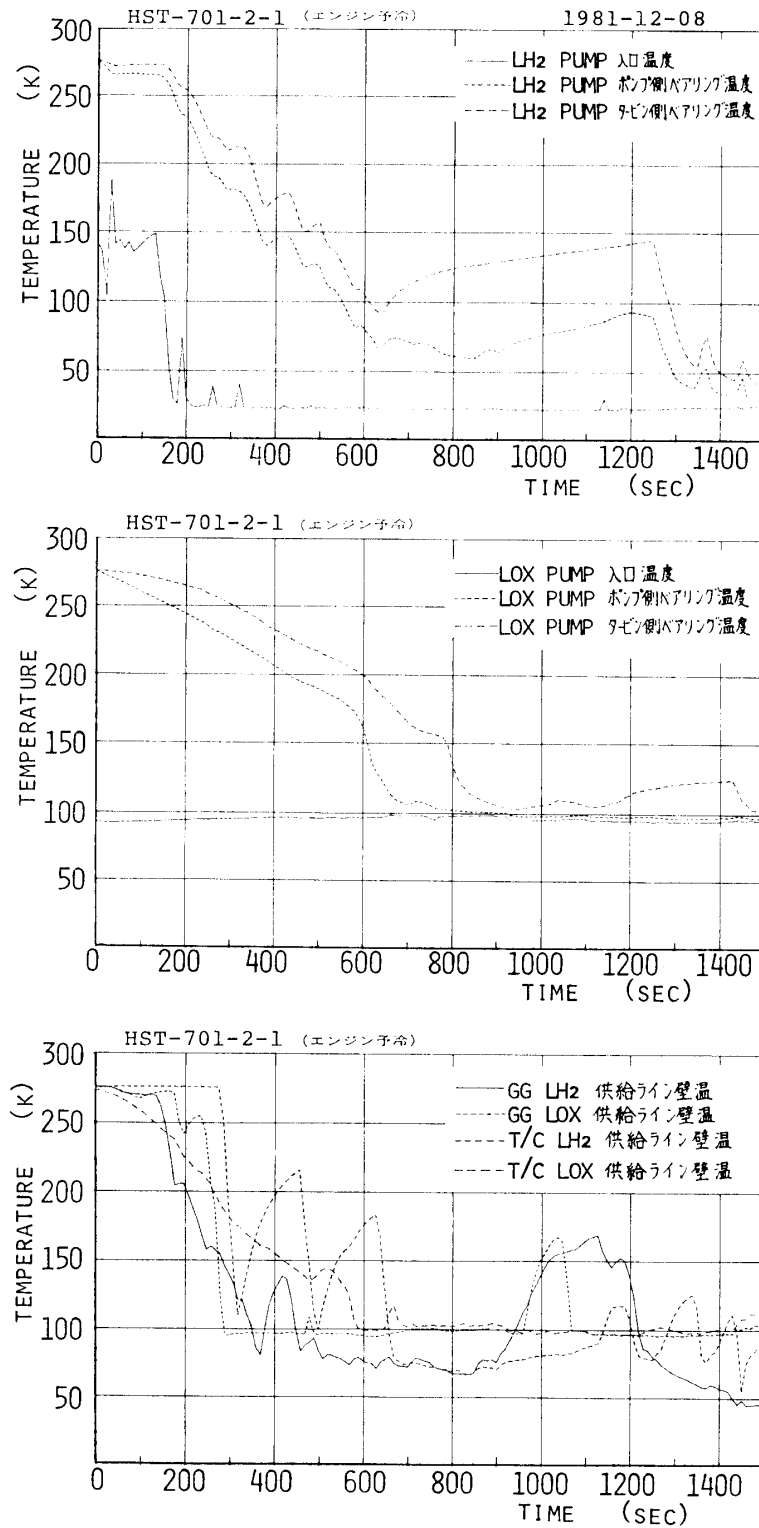


図 39 エンジンシステムの予冷温度

表 20 エンジン予冷運転の結果

予冷時間 予冷温度 K	HST-701-1-2~2-2		HST-1001-1-1~3	
	18~25分	起動時	予冷終了時	14~31分 起動時
ノリ入口	22.7~26.2/92.9~95.	21.6~23.2/93.1~93.4	24.7~25.2/93.2~94.3	22.7~23.8/93.1~94.2
ノリ側バルブ	25.2~46. /95.7~99.9	35.3~43.9/97.5~99.7	27.6~31.4/94.2~94.2	33.1~38.4/93.9~94.8
タービン側バルブ	38.4~51.2/99.8~102.6	42.9~62.2/97.4~102.	57.0~61.0/102.	69.8~72.7/102.~103
燃焼器供給配管	87.0~179. /100. ~110.	41.3~45.2/93.5~108.	79.3~93. /110. ~142.	49.4~54.9/103.~133.
ノリバルブ-ター供給配管	41.5~95.0/101.6~124.	39.2~48.4/98.3~103.	38.8~39.6/105.~107.	37.7~38.8/100.
予冷流量 l/s		5.91~7.19/0.73~0.93		6.7~7.1/0.73~0.85

上段/下段：水素系/酸素系

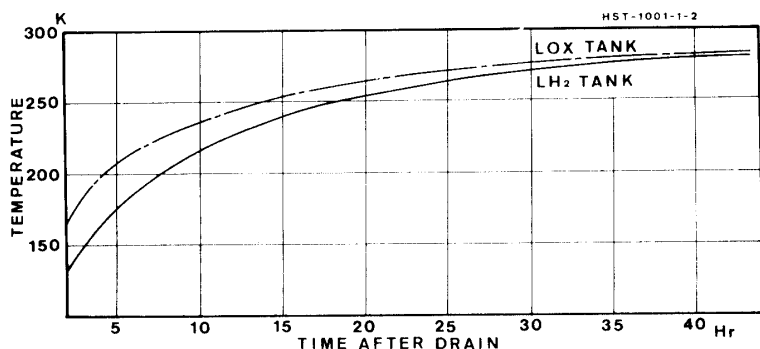


図 40 タンクの昇温状態

4. ま と め

昭和56年10月から昭和57年4月までに3期に分けて、推力7トンおよび10トン級液水/液酸ステージの燃焼試験を8回実施し、いずれも計画した時間の燃焼ができた。このステージ燃焼試験によって、昭和51年から行ってきた液水/液酸ロケット基礎開発研究の所期の目的はほぼ達成できた。以下にステージ燃焼試験の結果をまとめた。

- (1) HST-701 ステージは定格出力の84.5~118%の範囲で、HST-1001 ステージは86~113%の範囲で運転し、良好に作動した。
- (2) タンクシステムおよびエンジンシステムの予冷特性を把握し、予冷方法を確立した。
- (3) エンジンの起動および停止特性を把握し、自動運転シーケンスを確立した。
- (4) ステージシステムが定格設計性能を維持しながら自立運転状態となることを確認した。
- (5) タンクの加圧制御機能が正常に作動し、タンク圧力が定格値に設定されることを確認した。
- (6) PU制御が計画どおり作動することを確認した。

謝 辞

液水/液酸ステージ開発研究に御協力下さいました宇宙科学研究所液水実験班の各位に心から感謝の意を表します。また、液水/液酸ステージの製作および試験に御協力下さいました石川島播磨重工業 K. K., 川崎重工業 K. K., および三菱重工業 K. K. の関係各位に感謝します。

参 考 文 献

- [1] 棚次他, 「液水/液酸エンジンの開発」, 宇宙研報告「液水/液酸基礎開発研究特集号」
- [2] 小野田他, 「液水/液酸システム試験用タンク断熱構造の開発」, 同上
- [3] 小田他, 「液水実験支援用各種機器の試作」, 同上
- [4] 倉谷他, 「燃焼器の理論性能」, 同上
- [5] 棚次他, 「タービンスピナーの開発」, 同上