

液水/液酸 7 トン管構造燃焼器の試作と燃焼実験

倉谷 健治・秋葉鏖二郎・長友 信人
岩間 彬・橋本 保成・棚次 亘弘
加勇田清勇・成尾 芳博・小林 清和
林 哲史*・外川 守人*・加藤 文雄**

(1983 年 2 月 7 日受理)

Development of Tubular Wall Thrust Chamber for LH₂/LOX Rocket engines

By

K. Kuratani, R. Akiba, N. Nagatomo,
A. Iwama, Y. Hashimoto, N. Tanatugu,
S. Kayuta, Y. Naruo, K. Kobayaski,
T. Hayashi, M. Togawa and F. Kato

Abstract : A regeneratively cooled thrust chamber for 7-ton thrust rocket engine using LH₂-LOX as propellant has been fabricated and its performance has been demonstrated. This thrust chamber, with a reduced area ratio of 7 for sea-level running in comparison with 40 under vacuum condition, has 90-element coaxial injector distributed on a face plate made by pressed meshes for hydrogen transpiration cooling and it is equipped with a GH₂/GO₂ augmented spark igniter. The cooling jacket has been made by furnace brazing process, consisting of 199-tapered tubes, each with 0.3 mm thick SUS 347, which is reinforced by a contoured SUS 347 outer shell. The sea-level test facility has pressurized LOX and LH₂ tanks which provide a maximum burning duration of approximately 20 sec. Following the initial testing period during which the starting sequence and operating conditions have been established, the static-firing tests were conducted at a chamber pressure of about 25 kgf/cm²a and an oxidant-fuel ratio of about 5.0. The test results are discussed as compare with the design conditions.

* 三菱重工業 KK

** 川崎重工業 KK

1. 序

宇宙研では昭和51年7月に無酸素銅平行管とSUS316平行管を使った2組の1トン級液水再生冷却式燃焼器の試作と燃焼試験を行っている。7トン管構造燃焼器TC-701(図1)はこれらの基礎試験結果を踏まえて設計試作したもので、実用規模での液水/液酸エンジン用燃焼器としては我国最初のものである。TC-701燃焼器は昭和52年度に試作完成したが、ステンレス鋼製管構造燃焼器のロー付等の製造技術はすでに実績があったので、むしろ水素による再生冷却熱設計に重点が置かれた。また噴射要素、発汗冷却多孔質板等の流量特性についても未知の要素が多分にあったが、その後国内で多孔質板の試作や噴射要素の模擬試験を重ね10トン溝構造燃焼器でその成果を上げている[1]。一方たて型燃焼試験設備も昭和52年度に完成したが、設計段階においては大量の LH_2 の安全な取扱方法、計測技術、極低温流体系の設計、燃焼試験時の保安対策、実験手法等について十分には把握できでいなかった。この様な問題についてはTC-701-3燃焼試験(昭和54年12月)でほぼ全容がつかめその後のエンジンシステム試験に必要な一連の技術を確立できた。ここでは7トン管構造燃焼器TC-701の概要を主要な設計方針を含めて紹介し、次に一連の試験方法とその経過についてメイン燃焼器の着火と保安対策を主体に概略説明した後、これ



図1 7トン管構造燃焼器 TC-701

らの試験結果について性能，再生冷却機能，噴射器特性，着火性等について若干の考察を加える。

2. 7 トン管構造燃焼器 TC-701

2-1. TC-701 燃焼器

表 1 燃焼器設計の基本諸元

| | 諸 元 | 記 号 | 単 位 | 諸 元 値 |
|----|--------------------|-------------|-------------------------|-------|
| 1 | 推 力 | F (vac) | kg | 7000 |
| 2 | チャンパーよどみ圧力 | Pc | kgf/cm ² ab. | 25 |
| 3 | 混 合 比 | O / F | | 5.2 |
| 4 | 開 口 比 | ϵ | | 40 |
| 5 | 外気圧力 | Pa | kgf/cm ² ab. | 0 |
| 6 | 推進剤流量 | Wt | kg/sec | 16.18 |
| 7 | LH ₂ 流量 | Wf | kg/sec | 2.61 |
| 8 | LOX 流量 | Wo | kg/sec | 13.57 |
| 9 | 比 推 力 | Isp (vac) | sec | 433 |
| 10 | スラスト係数 | Cf | | 1.80 |
| 11 | 特性排気速度 | C * | m/sec | 2357 |

TC-701 燃焼器は推進剤に液体水素と液体酸素を使用し，開口比 40 のノズルスカートを付けた場合に真空推力が約 7 トンとなる様に計画した。基本設計の段階では表 1 に示す諸元を計画し詳細設計に入った。実際には大気燃焼試験を行うためノズル開口比を約 7 でカットしたものを製作した。この TC-701 燃焼器は図 2-1 にその組立図を示した様に，上から GH 2/GO 2 点火器，噴射器及び管構造燃焼室で構成されている。噴射器と燃焼室間のシールは大気側がテフロンコーティングされたインコネル 718 製ナフレックスシールで，燃焼室側が銀メッキされたインコネル製 O リングを使用しており，噴射器と燃焼室は容易に取り外すことができる。この燃焼器の作動原理は，ノズル出口部マニホールドに入った約 28 K の液体水素が SUS 347 製再生冷却管を通して約 100 K 程度に昇温ガス化し水素マニホールドを経て噴射器に入る。燃焼室へは 90 個のコアキシャル型噴射要素と発汗冷却用多孔質板から噴射される。設計点での発汗冷却水素流量は全水素流量の約 10～20% 程度になる様計画した。上部の水素ガスマニホールドは飛翔型ステージシステムの LH₂ タンクを加圧するための水素ガス抽出口を持っている。液体酸素は直接噴射器に入り 90 個のコアキシャル型噴射要素出口で水素流と混合し燃焼室内に噴射される。この燃焼器は高さ約 70 cm，幅約 55 cm 程度の大きさであるが，その重量は点火器約 1.4 kg，噴射器約 17.5 kg，燃焼室約 31 kg その他，図 2-1 に示した組立状態で約 52.3 kg である。また SUS 347 外筒に穴が開けられているのは燃焼室の炉中ロー付の際にロー剤を外側からつめたものである。

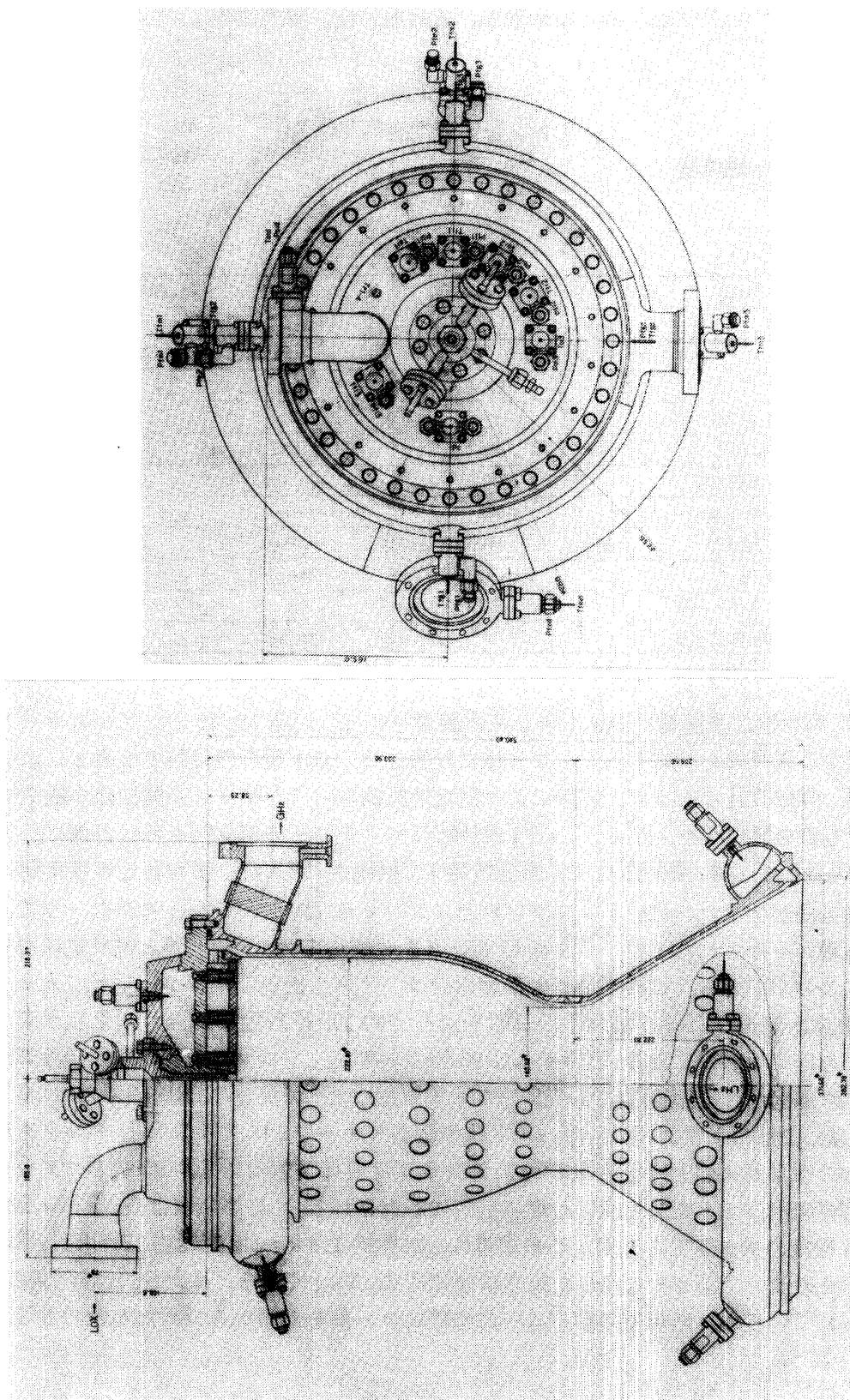


図 2-1 7 トン管構造燃焼器 TC-701 の形状

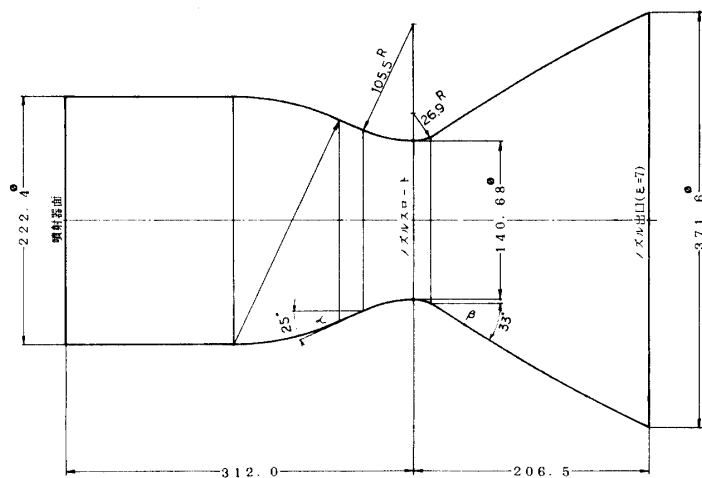


図 2-2 TC-701 燃焼室内形状

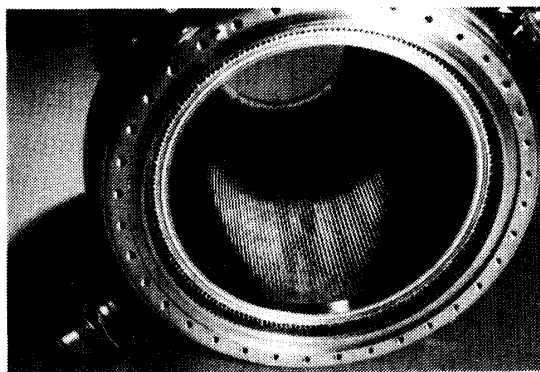


図 2-3 燃焼室内（噴射器側より）

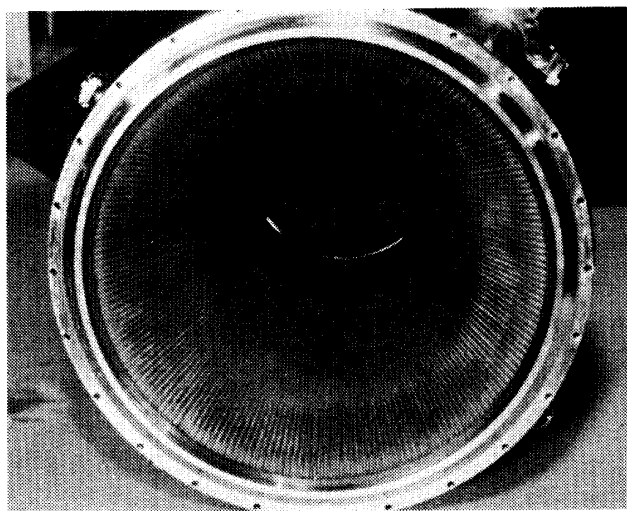


図 2-4 燃焼器ノズルスカート内面

2-2. 管構造燃焼室

本設計段階では TC-701 燃焼器が真空中で作動するものとして開口比 40 の 75 % ペルノズルスカーツを持つものを計画した。このノズルはスロット出口角度 33 度スカート出口角度を約 8 度として放物線近似法によりスカート形状を決めているが、そのノズル効率は RAO の最適化法に比較して約 0.2 % 程度低くなる〔2〕とされている。図 2-2 に示す TC-701 燃焼室内形状はこのノズルスカーツを大気燃焼試験用に開口比 7 の部分まで製作したものであるが、この場合のノズル出口角度から得られるノズル効率は約 0.966 程度である。またこの燃焼室は特性長が約 0.66 m、ノズル収縮比が約 2.5 となっている。TC-701 燃焼室の基本的構造は、199 本の SUS 347 製成型管を SUS 347 外筒に特殊な治具で密着し水素炉中でロー付により結合一体化したものである（図 2-3、図 2-4）。この再生冷却管は肉厚 0.3 mm で、管径が平行部で 4.5 mm、スロット部で 2.9 mm、ノズル出口部で 6.9 mm の SUS 347 製テーパ管を米国より輸入したもので、スプリングバック等の効果を予め見込んで調整された特殊な治具により成型したものである。水素炉中ロー付は第一段階として融

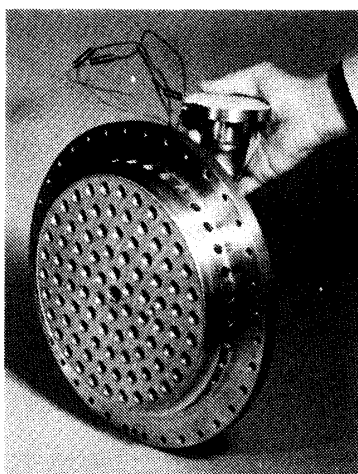


図 2-5 TC-701 噴射器面

点約 1100°C の銀ロー付を行い，第二段階は融点約 960°C の金ロー付を行っている．燃烧室の設計では再生冷却熱設計が主要なものとなるが，再生冷却管の形状，本数等を決めるために一次元熱計算を行っている．この TC-701 燃烧器の再生冷却熱計算については別途報告されているので参照されたい[3]．設計点においては $P_c = 25 \text{ kgf/cm}^2\text{a}$ ， $O/F = 5.2$ であるが，このとき燃烧ガス側最高管壁温度は約 680 K，再生冷却圧損は約 6.9 kgf/cm^2 ，再生冷却剤温度上昇は約 135°C 程度となっている．これらの再生冷却特性については燃烧試験結果に基づいて第 4-2 章で若干の考察を行う．

2-3. 噴射器

TC-701 噴射器は上部が LOX マニホールドで下部（燃烧室側）が水素マニホールドになっており，図 2-5 に示す様に 90 個のコアキシャル型噴射要素を持っている．噴射器面の中央には点火器噴射口があり，噴射要素はこの面上に等分配されている．TC-701 では米国等の実用例を参考にして，推力/要素の値を 50～100 kg 程度を予定し噴射器面の要素分布が均一になる様に考慮して噴射要素個数を 90 個にしたもので，このときの推力/要素は約 78 kg となっている．また噴射器面は燃烧ガスからの熱流束による噴射器面の座屈を防止するため多孔質板を使用して全水素流量の 10～20 % 程度の発汗冷却を行うことを計画していた．この多孔質板は実際には圧力 30 kgf/cm^2 程度温度 100 K 程度の水素ガスが流れるが，多孔質板メーカーでは下流が大気開放状態での常温空気流し試験を行うだけなので発注に際しては低温高压水素流量を常温低压空気流量に対応づけて要求値を出さなければならない．TC-701 の場合には下流大気開放状態で多孔質板差圧が $0.238 \pm 0.02 \text{ kgf/cm}^2$ のとき多孔質板単位面積あたりの常温 1 気圧の空気流量が $152 \text{ Nm}^3/\text{min}/\text{m}^2$ （全表面でのバラツキ 10 % 以下）とした．この多孔質板は SUS 347 製 12×64 メッシュ金網 12 枚を圧縮，焼結して製作したもので肉厚は約 7.15mm である．TC-701 では米国製 (DYNAPORE) を使用したが，その後この種の多孔質板を国内でも試作して流量特性と発汗冷却熱計算を行っているが，これについては別途に報告されているので参照されたい[7]，[8]．またこの多孔質板には温度計測用 CA 熱電対 (1 mm シース型) 4 本を図 2-6 に示す様に噴射器製作段階で

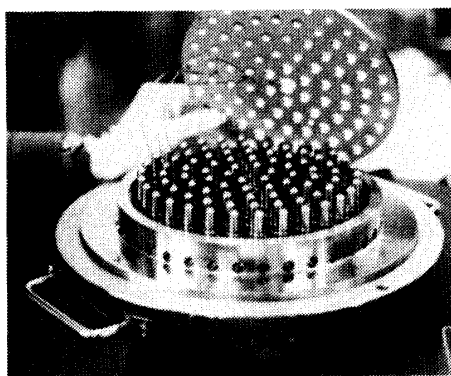


図 2-6 噴射器面多孔質板の温度センサー取付部

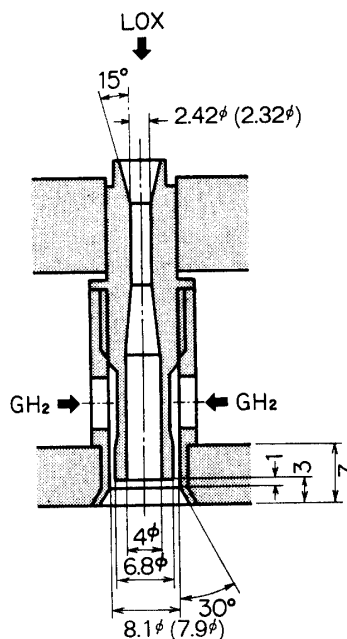


図 2-7 TC-701 噴射要素形状

埋め込んでいる。コアキシャル要素形状は図 2-7 に示したが、設計の段階でその絞り断面積を決めるため模擬要素により水素系には常温窒素ガスを、酸素系には液体酸素を使って流量特性を調査し寸法を決めている（図 2-7、カッコ内寸法は模擬フロー試験のもの）。この噴射要素流量特性については第 4-3 章で議論する。

2-4. GH_2/GO_2 点火器

(1) 開発の経過

TC-701 の一部として同時に設計製作した IG-702 点火器は常温水素ガスと常温酸素ガスを点火プラグにより着火させるものである。その設計思想は混合比 1~2 の低い範囲で作動させ燃焼時間を約 10 秒程度に限定して燃焼時の熱負荷は点火器本体の熱容量でもたせる無冷却型である。この型の点火器単体燃焼試験では混合比が約 2、点火器内圧が約 3 $\text{kgf/cm}^2\text{G}$ 以上では特にスロート部が局部的に焼損している。IG-702 本体はインコネル製でスロート径は 6 mm であるが、最初の 1 トン溝構造燃焼器試験で混合比約 1.1、点火器流量約 2.3 g/sec の条件で使用した結果着火遅れのためハードスタートになった。この結果点火器能力と始動シーケンスを検討し水素リード時間を短くすると同時に点火器混合比を約 1.6 に上げた結果 1 トン級では正常に着火した。この IG-702 を 7 トン級で使うに際して点火器噴射口まわりの噴射要素配置の違いを考慮してこの点火器の上限に近い混合比約 1.55、点火器流量約 3.3 g/sec で TC-701 の第一回燃焼試験を行った結果不着火となった。その後同様な型でスロート径が約 8 mm の IG-703 点火器により点火器流量を約 2 倍に増大させて着火試験を行った。この結果着火は良好であったが、始動シーケンス上 LH_2 メイン弁の開遅れにより約 0.25 秒の酸素リードとなっていた。TC-701 燃焼器の様にステンレス鋼製の管構造燃焼器では再生冷却管壁の熱伝導性の観点から熱流束条件が不確定な始動状態では水素リードの方が安全側であり、しかもこれまでの点火器能力では十分であると

表2-1. 点火器作動状況

| | 実験項目 | 点火器 | ノズル出口トーチ | 状況 |
|-------------|-----------------|--------|----------|-------------------------------------|
| 1 ト ン | TC-103-1-3 | IG-702 | 使用せず | メイン着火遅れ, ハードスタート, 爆発 |
| | TC-103-2-2 A, C | IG-702 | IGT-1 | メイン不着火(H_2 リッチ) ノズル出口 トーチ作動良好 |
| | TC-103-2-4 | IG-702 | IGT-1 | 燃焼 (13 sec) |
| 7 ト ン | TC-701-2-3 | IG-702 | IGT-1 | メイン不着火, トーチ不良, 爆発 |
| | TC-701-2-4 C | IG-703 | 使用せず | 着火 (1 sec) |
| | TC-701-3-2 A, B | IG-704 | IGT-2 | 着火 (1 sec) |
| | TC-701-3-3 | IG-704 | IGT-2 | 燃焼 (20 sec) |
| | TC-701-3-4 | IG-704 | IGT-2 | 燃焼 (20 sec) |

表2-2. 点火器規模の比較

| 実験番号 | 混合比 O / F | 点火器流量 Wt (g / sec) | 燃焼ガス温度 Tg (K) | エンタルピー H (Kcal / g) | 熱量 Q (Kcal / sec) |
|-----------------|--------------|-----------------------|------------------|------------------------|----------------------|
| TC-103-1-3 | 1.1 | 2.3 | 約 1080 | 1.4 | 3.22 |
| TC-103-2-2 A, C | | | | | |
| TC-103-2-4 | 1.59 | 2.28 | 約 1510 | 1.83 | 4.17 |
| TC-701-2-3 | 1.55 | 3.26 | 1490 | 1.80 | 5.86 |
| TC-701-2-4 C | 1.6 | 6.5 | 1530 | 1.84 | 11.96 |
| TC-701-3-2 A, B | 6.5 | 35.7 | 3200 | 2.27 | 81.03 |
| TC-701-3-3 | 6.62 | 35.8 | 3210 | 2.26 | 80.90 |
| TC-701-3-4 | 6.67 | 34.7 | 3210 | 2.26 | 78.42 |

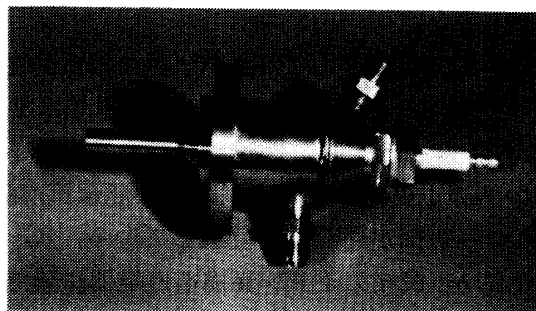


図2-8 IG-704 点火器

言えないことから、点火器の設計思想を全面的に改めた IG-704 点火器を開発した。表 2-1, 表 2-2 はこれまでに述べた経過をまとめて示したものである。

(2) IG-704 点火器

IG-704 点火器は常温の GH_2 と GO_2 を点火プラグにより着火させ比較的高い圧力差でメイン燃焼室に噴射するタイプのものである。図 2-8 には外観を図 2-9 には形状を示したが、大きさは IG-702 と同程度である。原理を説明すると、 GO_2 はスパーク部上流より噴射され、全流量の約 13 % の GH_2 は火花ギャップ 1 mm のスパーク部へ直接噴射され燃焼する。このとき点火器内は内圧約 10 kgf/cm²a で混合比約 50 となる。残りの 87 % の GH_2 は

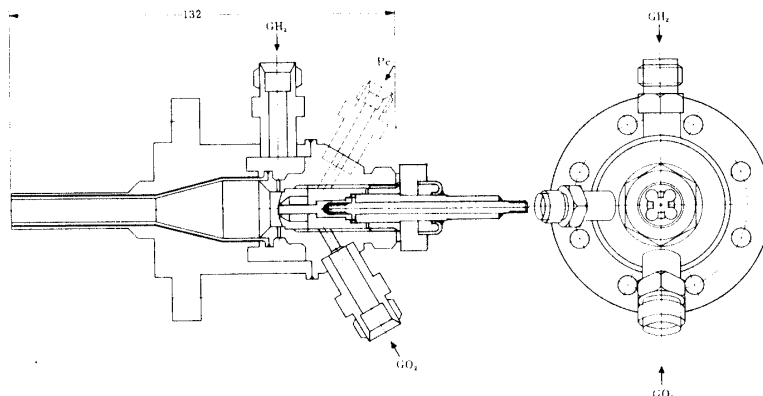


図 2-9 IG-704 点火器形状

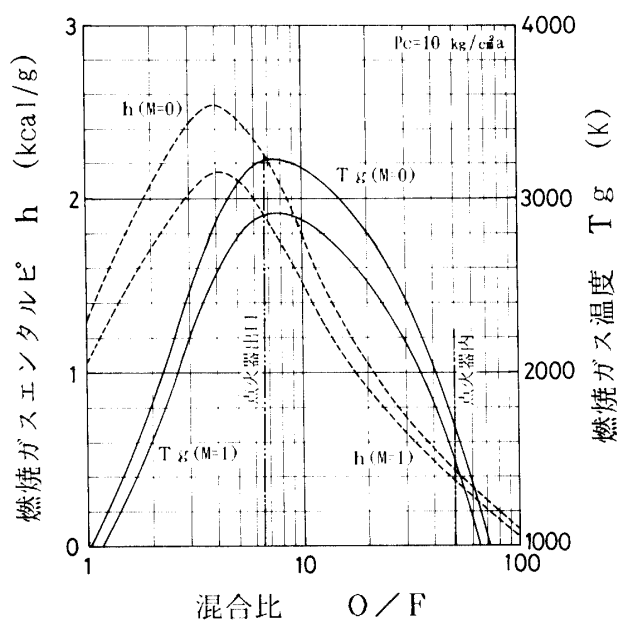
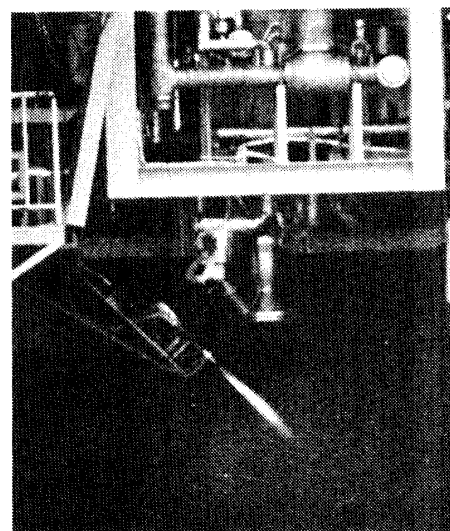
図 2-10 GH_2/GO_2 燃焼ガス特性図 3-2 GH_2/GO_2 ノズル出口トーチ

表 2-3 IG-704 設計諸元

| 諸 元 | 記 号 | 単 位 | 点 火 器 内 | アフターバーナ付 |
|--------------------|-------|------------------------|---------|----------|
| スロート | Dt | mm | | 8 |
| 特性長 | L* | cm | | 26 |
| 点火器内圧 | Pcig | Kgf/cm ² ab | | 10 |
| 全流量 | Wt | g / sec | 31.62 | 35.77 |
| GO ₂ 流量 | Wo | g / sec | 31 | 31 |
| GH ₂ 流量 | Wf | g / sec | 0.62 | 4.77 |
| 混合比 | O / F | | 50 | 6.5 |
| 燃焼ガス温度 | Tg | K | 1710 | 3200 |
| 燃焼ガスエンタルピー | h | K cal / g | 0.44 | 2.28 |

二重の燃焼室壁をダンプ冷却し点火器出口で酸素リッチ噴射流と混合し燃焼するものである。全体での混合比は約 6.5 となり図 2-10 に示す様にこのときの燃焼ガス温度は約 3200 K となる。IG-704 点火器はスロート径が 8 mm であるが、点火器内を極端な酸素リッチにすることで大きな流量がとれ、しかも燃焼ガス温度が約 1700 K と低いので熱設計が容易であり、かつ点火器出口では高温が得られる。この点火器はその後 7 トンエンジンシステムと 7 トンステージシステム燃焼試験に使用されており、始動シーケンスのかなり広い範囲に対応できることが分かっている。また IG-704 を図 3-2 に示した様にノズル出口トーチとしても使用しており、ステージ試験では約 80 秒程度の連続燃焼をさせている。この IG-704 点火器の設計諸元は表 2-3 に示す通りである。

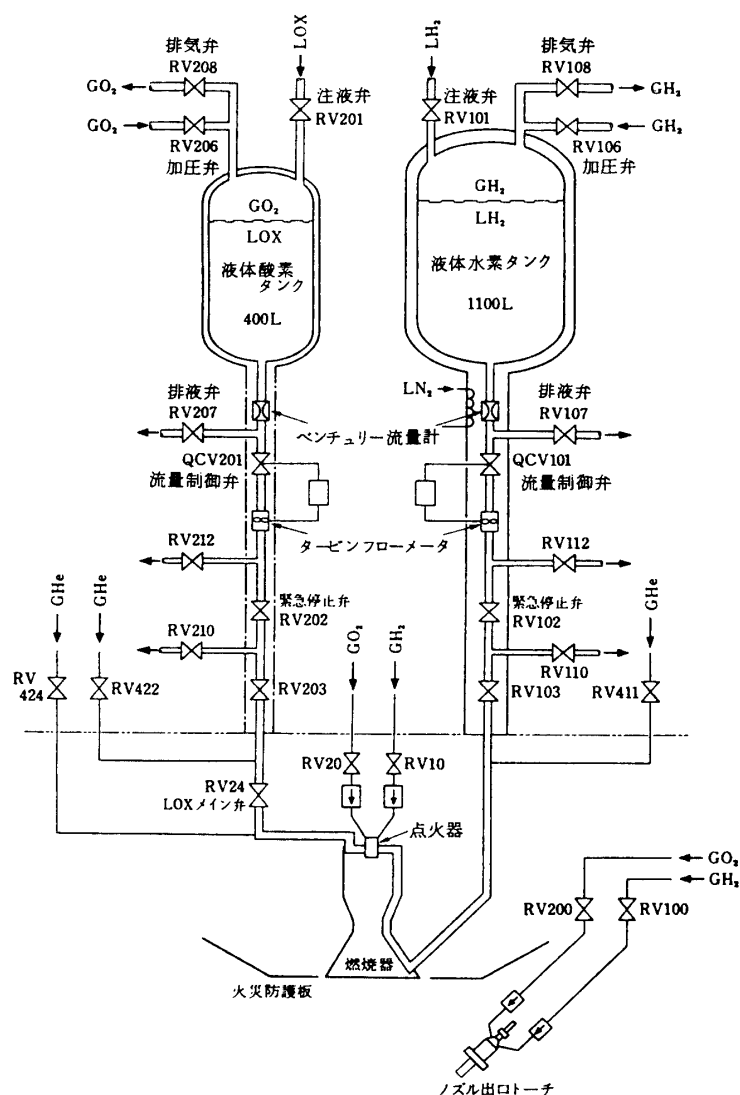


図 3-1 TC-701-3 燃焼試験で使用したテストスタンド供給系略図

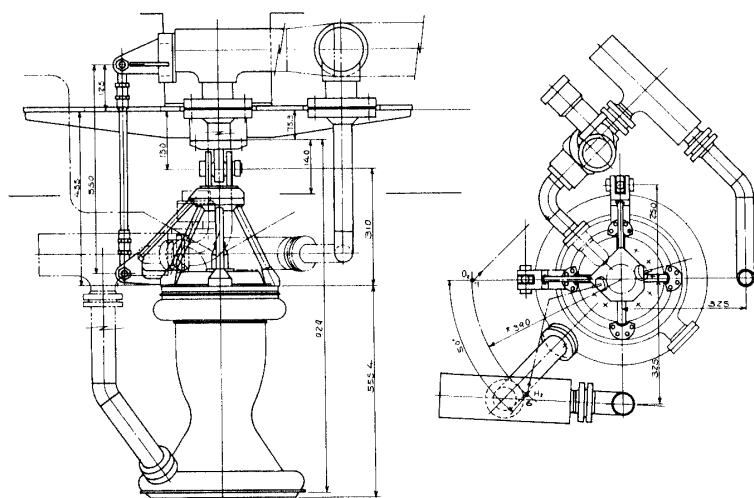


図 3-3 燃焼器・テストスタンド取合配管

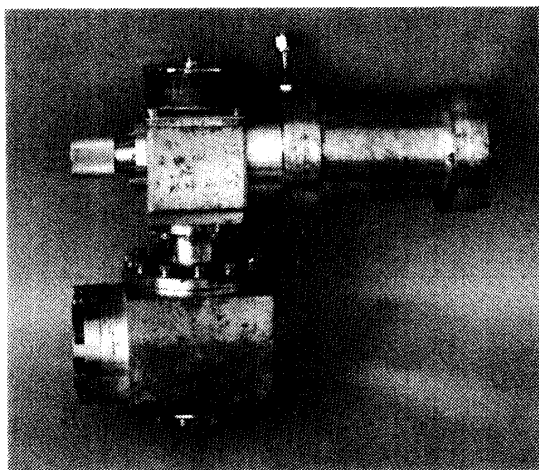


図 3-4 LOX メイン弁

3. 燃 燒 試 験

3-1. テストスタンド供給系

7トン管構造燃焼器単体燃焼試験で使用しているたて型タンク加圧供給式テストスタンドは本格的な液水/液酸燃焼器用大気燃焼試験設備としては我国では最初のものであり、1トン管構造燃焼器用横型スタンドの経験はあったが設計段階では未知の要素が多分にあった。その推進剤供給系統図は図 3-1 に示す様なもので、推力約 10 トン級の燃焼器まで単体燃焼試験を行える様に計画した。これは本来エンジンシステムで持つ供給機能をテストスタンド側に持たせたものである。ターボポンプシステムのかわりに推進剤タンクを加圧するもので、タンク加圧ガスとしては LH_2 系が常温水素ガス、 LOX 側が常温酸素ガスを使用している。供給系の最高使用圧力は約 $60\text{kgf/cm}^2\text{G}$ 程度であるが実際には安全弁の設定値を約 $58\text{kgf/cm}^2\text{G}$ 程度としている。推進剤タンク容量は LH_2 タンクが約 1100lit 、 LOX タンクが約 400lit 、で 7 トン級の流量範囲では約 20 秒間の連続燃焼が可能である。この供給

表 3-1 TC-701 燃焼器に関連した実験項目

| | 実験日 | 実験記号 | 実験名称 | 燃焼時間 | 流 体 | |
|----|------------------------|----------------------|--|------|-----------------|-----------------|
| | 年・月・日 | | | 秒 | 水素系 | 酸素系 |
| 1 | テストスタンド供給系特性試験 | | | | | |
| | 53・6・7 | EG-TS-1-1・A, -3・B, C | LH ₂ 系LN ₂ コールドフロー試験 | | LH ₂ | |
| | 6・13 | -4・A | LH ₂ 系実液コールドフロー試験 | | LH ₂ | |
| | 6・14 | -5・B | LOX系LN ₂ コールドフロー試験 | | | LN ₂ |
| | 6・14 | -2・A | LOX系実液コールドフロー試験 | | | LOX |
| | 6・17 | -7・B, C | LH ₂ 系実液コールドフロー試験 | | LH ₂ | |
| | 6・17 | -5・B, C | LOX系LN ₂ コールドフロー試験 | | | LN ₂ |
| 2 | テストスタンド総合チェック | | | | | |
| | 53・11・18 | EG-TS-2-1・A | LOX系LN ₂ コールドフロー試験 | | | LN ₂ |
| | 11・21 | -1・B, C | LH ₂ 系LN ₂ コールドフロー試験 | | LN ₂ | |
| | 11・22 | -2・B | LH ₂ 系実液コールドフロー試験 | | LH ₂ | GH ₂ |
| | 11・23 | -2・A, C | LOX系LN ₂ コールドフロー試験 | | GN ₂ | LOX |
| 3 | 7トン管構造燃焼器コールドフロー試験 | | | | | |
| | 53・11・26 | TC-701-1-1・A, B, C | LN ₂ /LN ₂ コールドフロー試験 | | LN ₂ | LN ₂ |
| | 11・27 | -2・A, B | LH ₂ コールドフロー試験 | | LH ₂ | GH ₂ |
| | 11・29 | -3・A, B, C | LOXコールドフロー試験 | | GN ₂ | LOX |
| 4 | 53・12・5-7 | 点火器単体燃焼試験 | | | | |
| 5 | 1トンチャンネル構造燃焼器燃焼実験（第一次） | | | | | |
| | 54・3・18 | TC-103-1-1・A, B, C | LOXコールドフロー試験 | | GN ₂ | LOX |
| | 3・19 | -2・A, B, C | LH ₂ コールドフロー試験 | | LH ₂ | GH ₂ |
| | 3・21, 22 | IG-702-1, 2 | 点火器燃焼試験 | | GH ₂ | GO ₂ |
| | 3・24 | TC-103-1-3 | 1トン燃焼器燃焼実験 | 不着火 | LH ₂ | LOX |
| 6 | 1トンチャンネル構造燃焼器燃焼実験（第二次） | | | | | |
| | 54・5・14-21 | IG-702-3 | 点火器燃焼試験 | | GH ₂ | GO ₂ |
| | 5・19 | TC-103-2-1・A, B, C | LH ₂ /LN ₂ コールドフロー試験 | | LH ₂ | LN ₂ |
| | 5・22 | -2・A, C | 1トン燃焼器燃焼実験 | 不着火 | LH ₂ | LOX |
| | 5・23 | -3・A, B | LOXコールドフロー試験 | | | LOX |
| | 5・24 | -4 | 1トン燃焼器燃焼実験 | 13 | LH ₂ | LOX |
| 7 | 54・8・8, 9 | 点火器単体燃焼試験 | | | | |
| 8 | 54・8・19, 20 | ノズル出口トーチ単体燃焼試験 | | | | |
| 9 | 7トン管構造燃焼器燃焼実験（第一次） | | | | | |
| | 54・8・24 | TC-701-2-1・A, B, C | LOXコールドフロー試験 | | | LOX |
| | 8・27 | -2・A, B, C | LH ₂ /LN ₂ コールドフロー試験 | | LH ₂ | LN ₂ |
| | 8・28, 29 | IG-702-4 | 点火器燃焼試験 | | GH ₂ | GO ₂ |
| | 8・30 | TC-701-2-3 | 7トン燃焼器燃焼実験 | 不着火 | LH ₂ | LOX |
| | 9・1 | TC-701-2-4・A, B | LOXコールドフロー試験 | | | LOX |
| | 9・1 | -4・C, D | 7トン燃焼器着火試験 | 1 | LH ₂ | LOX |
| 10 | 54・11/28-12/1 | 点火器・ノズル出口トーチ単体燃焼試験 | | | | |
| 11 | 7トン管構造燃焼器燃焼実験（第二次） | | | | | |
| | 54・12・8 | TC-701-3-1・A, B, C | LOXコールドフロー試験 | | | LOX |
| | 12・10 | -5・A, B | LH ₂ コールドフロー試験 | | LH ₂ | |
| | 12・12 | IG-704-2 | 点火器燃焼試験 | | GH ₂ | GO ₂ |
| | 12・14 | TC-701-3-2・A, B | 7トン燃焼器着火試験 | 1 | LH ₂ | LOX |
| | 12・16 | TC-701-3-3 | 7トン燃焼器燃焼実験 | 20 | LH ₂ | LOX |
| | 12・18 | TC-701-3-4 | 7トン燃焼器燃焼実験 | 20 | LH ₂ | LOX |

試験では約60kgf/cm²Gに加圧し作動させて漏れ量を測定したところ、4～10Ncc/min程度のもれがあり、その後調整をくり返したがLN₂温度、60 kgf/cm²Gでのもれ量は減少させることができなかった。しかしこの程度のもれは実用上は許容できるものであり、その後の試験においても正常に作動している。また表3-1に見られる様にテストスタンド供給系の特性を調査するため各種のコールドフロー試験を行っているが、その供給系特性は次の様な C_v というパラメータを採用してLH₂ 及び LOX 系の流量特性を定義している。

$$\dot{W} = \frac{1}{4.212} \cdot C_v \cdot \sqrt{G \cdot \Delta P}$$

\dot{W} : 推進剤重量流量 (kg/sec)

C_v : 推進剤供給配管系の C_v 値

G : 推進剤比重

ΔP : 供給配管系の圧損 (kgf/cm²)

この値は流調弁開度により変化するが、TC-701-3 燃焼試験では流調弁の特性がよい60～70 %の開度で自動流量制御を計画しており、これに対応する C_v 値は水素系で7.8～9.4 程度酸素系で9.0～12.0 程度となっている。また燃焼試験時のタンク圧力設定値等もこの式より求めている。

3-2. 運転・操作

TC-701 燃焼器試験の初期の段階では遠隔操作弁の応答性、タンク加圧特性、供給配管系内での LH₂, LOX の流体力学的特性等の運転・操作に必要なデータを得るため一連のコールドフロー試験を行って実験のオペレーション方法を検討した。また燃焼試験時の保安対策については各種燃焼試験の教訓を踏まえてTC-701-3燃焼試験でほぼ確立された。燃焼試験中の一連の運転操作はたて型テストスタンドから約120 m離れた第二計測室内の遠隔操作盤のプログラムシーケンサーで自動的に行っている。燃焼試験を安全に行うための基本的な思想はオペレータが緊急に判断し操作する項目を極力少なくし、その自動化に際しても判断基準の信頼性を高め、考えられる危険なモードに対してはすべてトラップを設け、未知の要素に対しては予め模擬できる様な予備試験を十分行っておくことである。この様な観点から、TC-701-3 では特にメイン燃焼器の不着火に対して次の様な対策をしている。

(1) 点火器不作動時のインターロック機構……X-3 秒に点火器が作動した後に X-0.2 秒までに点火器内圧が 6 kgf/cm²G まで上昇しない場合にはシーケンサーを自動的に停止させ推進剤メイン弁を開けない。

(2) メイン燃焼器不着火時の緊急停止機構……X+2 秒までにメイン燃焼器内圧が 2 kgf/cm²G 以上に上昇しない場合には自動的に運転を停止シーケンス側に移行させる。

(3) ノズル出口トーチの採用……X-10 秒から X+25 秒までノズル出口トーチを作動させメイン燃焼器不着火によりノズルから放出された水素ガスを空気と着火させ滑らかに燃焼させる。

また表3-2には燃焼試験時の操作系の各種設定諸元値を示したが、流量制御弁は始動をソフトなものにするためメイン弁開から約3秒間はランプ入力信号により直線的に開け

表 3 - 2. 燃焼試験の操作系設定諸元値

| 設 定 諸 元 | 記 号 | 単 位 | TC-701-3-3 | | TC-701-3-4 | |
|---------------------------------------|--------|-----------------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | | | 燃 焼 試 験 | 燃 焼 試 験 | 燃 焼 試 験 | 燃 焼 試 験 |
| | | | LH ₂ 系 | LOX 系 | LH ₂ 系 | LOX 系 |
| 試 験 流 体 | | | LH ₂ | LOX | LH ₂ | LOX |
| 定 流 量 | Q | ℓ / s | 37 | 11.9 | 36.4 | 12.2 |
| タ ン ク 加 圧 目 標 値 | Pt | kgf / cm ² G | 55 | 50 | 55 | 50 |
| タ ン ク 加 圧 系 上 ・ 下 限 設 定 値 | PCV | kgf / cm ² G | 54 / 56 | 49 / 51 | 54 / 56 | 49 / 51 |
| タ ン ク 加 圧 ス イ ッ チ 設 定 値 | Ps | kgf / cm ² G | 57 | 53 | 57 | 53 |
| 流 量 制 御 弁 目 標 弁 開 度 | Dk | % | 15 → 70 | 15 → 70 | 15 → 70 | 15 → 70 |
| 操 作 電 流 | i | mA | 7 → 17 | 6 → 17 | 7 → 17 | 6 → 17 |
| ラ ン プ 装 置 | T | sec | 3.6 | 3.3 | 3.6 | 3.3 |
| 入 力 対 する 流 調 弁 作 動 遅 れ 見 込 時 間 | td | sec | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 手 動 操 作 ノ ブ 設 定 値 (相 当 電 流) | | % (mA) | 71 (15.4) | 64 (14.3) | 71 (15.4) | 64 (14.3) |
| 流 量 操 作 比 例 帶 設 定 値 | P | % | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 積 分 時 間 設 定 値 | I | min | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| タ ン ク 注 液 予 定 量 | | ℓ | 1100 | 400 | 1100 | 400 |
| 液 体 水 素 系 パ ー ジ (GHe 高 圧) | PRV411 | kgf / cm ² G | 30.0 | — | 30.0 | — |
| 液 体 水 素 系 パ ー ジ (GHe 低 圧) | PRV414 | kgf / cm ² G | 流れた状態で 0.5 | — | 流れた状態で 0.5 | — |
| 液 体 酸 素 系 パ ー ジ (GHe 高 圧) | PRV424 | kgf / cm ² G | — | 25.0 | — | 25.0 |
| 液 体 酸 素 系 パ ー ジ (GHe 低 圧) | PRV422 | kgf / cm ² G | — | 流れた状態で 0.5 | — | 流れた状態で 0.5 |
| 液 体 酸 素 系 パ ー ジ (GH ₂ 低 圧) | PRV321 | kgf / cm ² G | — | 5.0 | — | 5.0 |
| 点 火 器 - 燃 焼 室 | | kgf / cm ² | — | 14.7 | — | 14.7 |
| 間 ・ 差 圧 | PEM-1 | % (kgf / cm ²) | 40.8 (6.0) | 40.8 (6.0) | 40.8 (6.0) | 40.8 (6.0) |
| 燃 焼 室 内 圧 | | kgf / cm ² | — | 39.6 | — | 39.6 |
| 点 火 器 内 温 度 | PEM-3 | % (kgf / cm ² G) | 5.1 (2.0) | 5.1 (2.0) | 5.1 (2.0) | 5.1 (2.0) |
| | TEM-1 | °K | — | — | — | — |
| | | % (°K) | — | — | — | — |

て、その後タービン流量計出力と連動させて自動制御を行っている。

3-3. 実験の経過

7トン管構造燃焼器 TC-701 に関連した試験は表 3-1 に示した様に一連の予備試験を行った後昭和 54 年 12 月に終了した。たて型タンク加圧供給式テストスタンド完成後昭和 53 年 6 月にはその供給系の諸特性を把握するため液体窒素を使った最初のコールドフロー試験を行った。ここでは流量特性を調査するというより弁類、制御・計測系が極低温状態で本来の機能を発揮することを確認するのに重点を置いた。その後 11 月に供給系流量特性に主眼を置いて燃焼器の代用負荷としてオリフィスを用い、 LN_2 コールドフロー試験を行った。供給系の機能確認と基本的な流量特性が把握できたので TC-701 燃焼器を図 3-3 に示す様な取合で設置し、実液 (LH_2 と LOX) を使って各系ごとにコールドフロー試験を行った。これは始動・停止シーケンスの設定に必要なデータ及びタンク加圧特性、流量制御特性を調べるため、できるだけ燃焼試験に近い状態で行ったものである。この試験では多量に放出される LH_2 を処理するのにステンレス鋼製内径約 0.6 m 長さ約 12 m の排気ダクトを用いて未燃焼のまま大気中に拡散させる方法をとった。これで運転・操作に関する基礎データを得たが、点火器の着火特性と燃焼試験時の保安について調査するため「拡散溶融接合法」という新しい製造法で 1 トン級溝構造燃焼器を試作完成していたので、その試験も兼ねて昭和 54 年 3 月にたて型試験設備完成後最初の燃焼試験を行った。これら一連の 1 トン級燃焼試験では着火遅れ、不着火等の結果から第 3-4 章で述べた様な点火器の能力増大をはかると同時にノズル出口トーチを設置する等の保安対策の基準を設けた。その後昭和 54 年 8 月に 7 トン管構造燃焼器の試験に入り、まずハードスタート防止と始動の過渡特性を確認するため実液コールドフロー試験を行った後最初の燃焼試験に入ったが、結果は不着火となり自動緊急停止システム (EM) が作動した。この際ノズル出口トーチが機能せずこの間に放出した水素ガスは火炎壕内で小規模の爆発を起した。不着火の原因としては点火器能力不足と始動初期の燃焼室内混合比が極めて低かったことが上げられる。その後点火器流量を約 1.5 倍にして約 1 秒間の着火試験を行った結果良好な着火が確認されたが、始動時に酸素リードであることが分った。このため新しい設計思想に基づく IG-704 点火器を開発した。昭和 54 年 12 月には点火器とノズル出口トーチの能力を増大して TC-701-3 燃焼試験を行った。まず約 1 秒間の着火試験で点火器と始動時の混合比の妥当性を確認した後 TC-701-3-3 燃焼試験を行った(図 3-6)。この結果流量制御により設計点付近で約 20 秒間正常に燃焼し、再生冷却機能も良好で異常は認められなかった。引き続いて TC-701-3-4 燃焼試験を行って約 20 秒間計画点付近で定常に燃焼した。この燃焼試験後目視検査の結果再生冷却管壁に局所的な変色が見られたが、その後のチェックで再生冷却管の一本に焼損があることが分った。これについては昭和 55 年 3 月中に補修を行って、その後 7 トンエンジンシステム用燃焼器として使用している。

3-4. 燃焼試験の計測結果

TC-701-3 燃焼試験では操作盤指示計器を除く計測項目は表 3-3 に示す様に最大 86 点の計測を行ってほぼ良好な結果を得ることができた。この計測データのうち直接燃焼器の特性解析に用いたデータを図 3-7～図 3-15 に示した。

表 3-3 TC-701-3 燃焼試験の計測項目

| | 計測項目名称 | | 計測項目記号 | | 記録器 | 備考 |
|---------------|---------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|----------------|------------|
| | | | 水素系 | 酸素系 | | |
| 1 | 7トン燃焼器関係 (計測点数 24 点) | | | | | |
| | 燃焼室側インジェクタ面圧力 | Pc-1 | | CPU | チャンバー内圧計算 | |
| | 点火器内圧 | Pcig | | | | |
| | 水素入口マニホールド圧力 | Pfm-1 | | | | |
| | インジェクタ圧力 | Pfi-1 | Poi-1 | | | |
| | 水素入口マニホールド温度 | Tfm-1 | | DR | 露出型センサー | |
| | | Tfm-2 | | | | |
| | インジェクタ温度 | Tfi-1 | Toi-1 | CPU | | |
| | | Tfi-2 | Toi-2 | DR | | |
| | リジメツシュ温度 | Tr-1 | | CPU | | |
| | チャンバー外板温度 | Tc-1, Tc-2, Tc-3 | | | | |
| | チャンバー外板ひずみ | Sc-1-x.y, Sc-2-xy, Sc-3-x.y | | | | |
| チャンバー内圧振動 | Pv-1 | | DR | | | |
| チャンバー軸, 周方向振動 | Vc-1, Vc-2 | | | | | |
| 2 | テストスタンド供給系関係 (計測点数 19 点) | | | | | |
| | 推力 (主推力, 横推力) | Fk-61, Fk-62, Fk-63 | | CPU | | |
| | 推進剤流量 | タービン式 | Qk-13' | | | Qk-23' |
| | | ベンチュリー | Qk-12 | | | Qk-22 |
| | 流量制御弁開度 | Dk-12 | Dk-22 | CPU, VG | | |
| | 推進剤タンク圧力 | Pk-12 | Pk-22 | CPU | | 推進剤密度計算 |
| | 推進剤供給ライン圧力 | Pk-14 | Pk-24 | | | |
| | 推進剤タンク温度 | Tk-12 | Tk-22 | | | |
| | 推進剤供給ライン温度 | Tk-14 | Tk-24 | | | |
| | 推進剤混合比 | O/F | | 計算機 | | |
| | スラストマウント振動 | Vr-1 | | DR | | |
| 3 | 燃焼実験オペレーション関係 (計測点数 43 点) | | | | | |
| | 点火器・メインチャンバー差圧 | Pem-1 | | PEN, DR | 工業計器, インターロック | |
| | チャンバー内圧 | Pem-3 | | | 工業計器, 自動 E/M 用 | |
| | 推進剤タンク液位 | 静電容量 | Lk-12 | Lk-22 | PEN | 推進剤注, 排液監視 |
| | | ホットワイヤー | Lk-13-1-3 | Lk-23-1-3 | | 手動 E/M 用 |
| | LOX メイン弁上流配管壁温度 | | | Tk-20 | | 予冷監視 |
| | 点火器流量計測オリフィス上流圧力 | Pf-1 | Po-2 | PEN, DR | 減圧弁設定用 | |
| | 点火器しほり上流圧力 | Pfig | Poig | PEN | | |
| | 点火器流量計測オリフィス差圧 | Qfig | Goig | PEN, DR | 点火器流量設定用 | |
| | ノズル出口トーチオリフィス上流圧力 | Ptfig | Ptoig | | 減圧弁設定用 | |
| | ノズル出口トーチオリフィス差圧 | Qtfig | Qtoig | | ノズル出口トーチ流量設定 | |
| | 水素, 酸素ガス一次圧力 | | Pf | Po | PEN | |
| | 操作信号 | 点火プラグ | | | DR | シーケンス弁応答特性 |
| | | 流量制御弁 | | | VG | |
| | | 推進剤メイン弁 | RV102 | RV 24 | DR | |
| | | 緊急停止弁 | | RV 202 | | |
| | | タンク排気弁 | RV108 | RV208 | | |
| | アンサー信号 | 推進剤メイン弁 | RV102 | RV 24 | | |
| | | 緊急停止弁 | | RV 202 | | |
| | | タンク加圧弁 | RV106 | RV206 | | |
| | | タンク排気弁 | RV108 | RV208 | | |
| | | 供給ライン抽出弁 | RV110 | RV210 | | |
| | | 噴射器バージ弁 | RV411 | RV424 | | |
| | | 点火器メイン弁 | RV114 | RV214 | | |

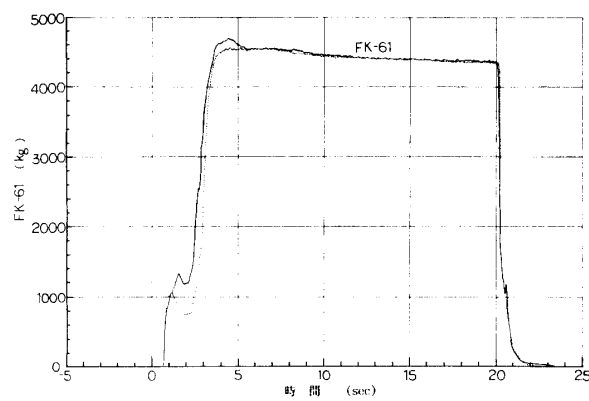


図 3-7

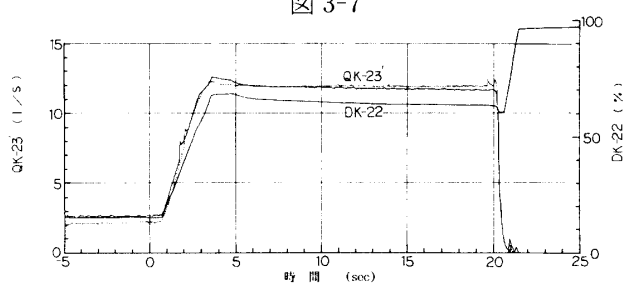


図 3-8

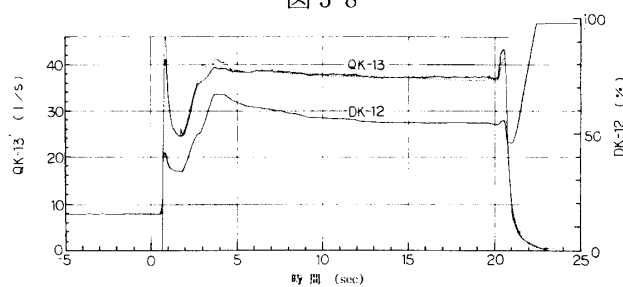


図 3-9

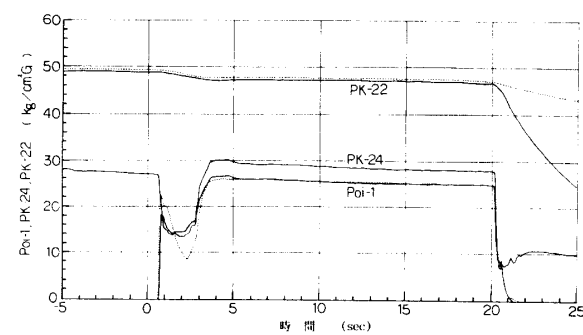


図 3-10

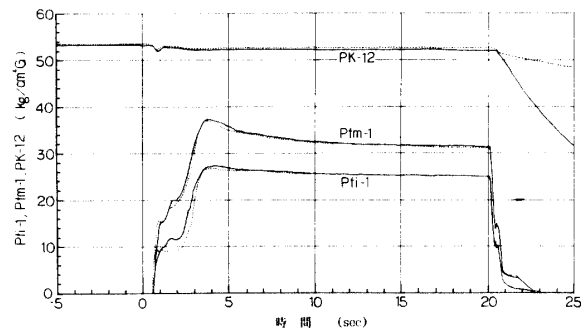


図 3-11

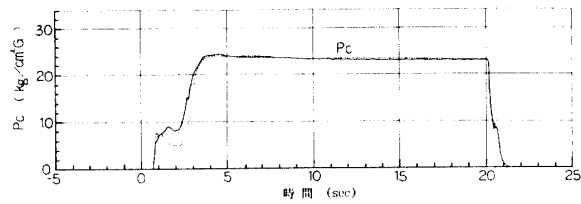


図 3-12

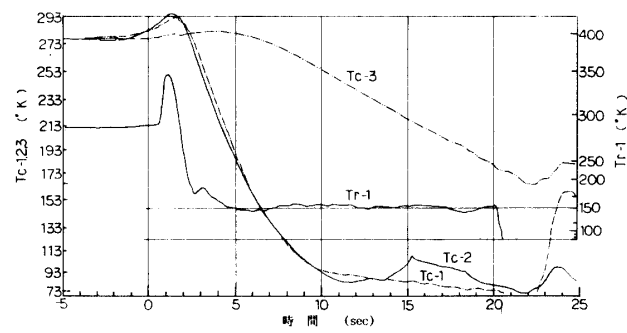


図 3-13

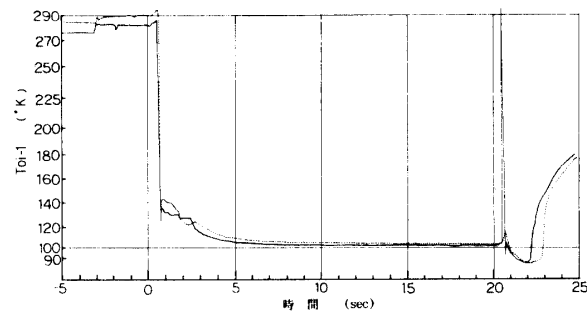


図 3-14

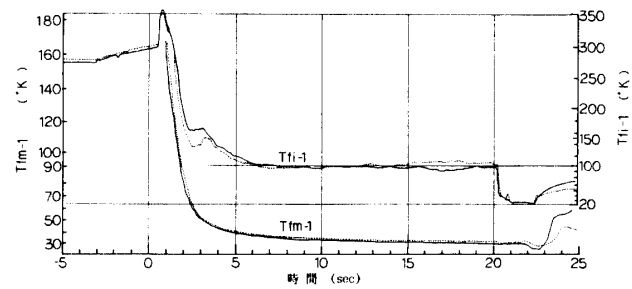


図 3-15

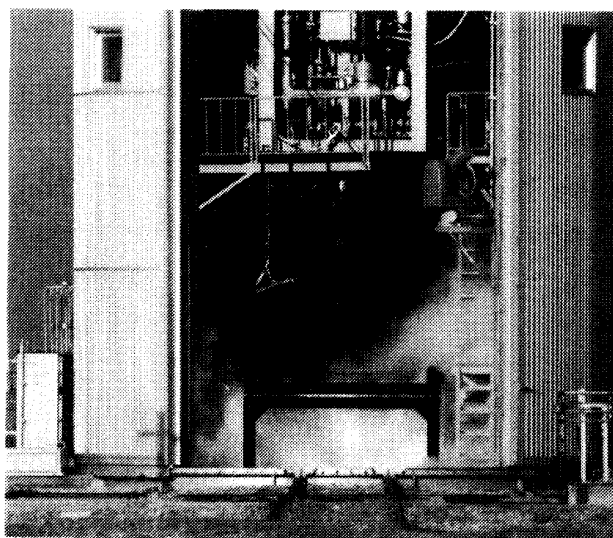


図 3-6 TC-701-3-3 燃焼試験

4. TC-701 燃焼器の特性

4-1. 燃焼性能

燃焼性能とは特性排気速度 C^* 、比推力 I_{sp} 、スラスト係数 C_f の3性能である。ただし、TC-701 燃焼器は開口比 40 のノズルスカートをつけて真空中で作動させる様に設計されているので、 C^* 以外は参考値として評価している。図 4-1 に TC-701 燃焼器の大気燃焼における特性排気速度を示した。プロットした実験データは表 4-1 に示した値であるが、その計算式は次の様である。

$$\text{特性排気速度} \quad C^* = P_c \times A_t \times 9.806 / W_t$$

$$\text{スラスト係数} \quad C_f = F / (A_t \times P_c)$$

$$\text{比推力} \quad I_{sp} = F / W_t$$

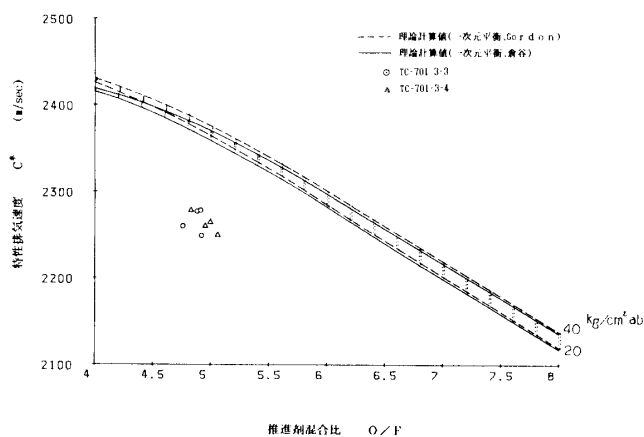


図 4-1 TC-701 特性排気速度

表 4-1 TC-703-3, 4 燃焼試験結果

| 諸 元 | 記 号 | 単 位 | 設計点 | TC-701-3-3 | | | | TC-701-3-4 | | | |
|-------------------------------------|------------------|----------------------|-------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|
| | | | | X+5 | X+10 | X+15 | X+20 | X+5 | X+10 | X+15 | X+20 |
| 燃焼時間 | t | sec | | 20 | | | | 20 | | | |
| 推 力 | F | kg | | 4617 | 4464 | 4401 | 4368 | 4548 | 4422 | 4389 | 4356 |
| | FK-61 | kg | | 4617 | 4463 | 4400 | 4367 | 4548 | 4422 | 4388 | 4355 |
| | FK-62 | kg | | 20 | 50 | 55 | 59 | 30 | 45 | 41 | 45 |
| | FK-63 | kg | | 50 | 63 | 65 | 65 | 59 | 37 | 67 | 67 |
| ノズルよどみ圧力 | Pc | kg/cm ² a | 25.0 | 24.01 | 23.34 | 23.24 | 23.24 | 23.24 | 23.63 | 23.63 | 23.34 |
| | Pc-1 | kg/cm ² a | 26.0 | 25.0 | 24.3 | 24.2 | 24.2 | 25.1 | 24.6 | 24.6 | 24.3 |
| 酸素重量流量 | W _o | kg/sec | 13.57 | 13.59 | 13.15 | 13.02 | 13.02 | 13.42 | 13.31 | 13.31 | 13.31 |
| | QK-23' | lit./sec | | 12.2 | 11.8 | 11.7 | 11.7 | 12.2 | 12.2 | 12.2 | 12.2 |
| | PK-14 | kg/cm ² G | | 29.5 | 28.7 | 28.1 | 27.9 | 29.7 | 29.1 | 28.8 | 28.6 |
| | TK-22 | K | | 97.0 | 97.0 | 97.0 | 97.0 | 101.5 | 101.5 | 101.5 | 101.5 |
| | ρ_o | kg/m ³ | | 1114 | 1114 | 1113 | 1113 | 1091 | 1091 | 1091 | 1091 |
| 水素重量流量 | W _f | kg/sec | 2.61 | 2.76 | 2.71 | 2.66 | 2.65 | 2.78 | 2.69 | 2.66 | 2.63 |
| | QK-13' | lit./sec | | 38.5 | 37.8 | 37.2 | 37.1 | 38.7 | 37.6 | 37.2 | 36.8 |
| | PK-14 | kg/cm ² G | | 33.5 | 32.5 | 31.6 | 31.1 | 34.7 | 31.9 | 31.0 | 30.6 |
| | TK-12 | K | | 23.2 | 23.2 | 23.2 | 23.2 | 23.2 | 23.2 | 23.2 | 23.2 |
| | ρ_f | kg/m ³ | | 71.8 | 71.7 | 71.6 | 71.5 | 71.9 | 71.6 | 71.5 | 71.4 |
| 全推進剤重量流量 | W _t | kg/sec | 16.18 | 16.35 | 15.86 | 15.68 | 15.67 | 16.20 | 16.00 | 15.97 | 15.94 |
| 推進剤混合比 | O/F | | 5.20 | 4.92 | 4.76 | 4.89 | 4.91 | 4.83 | 4.95 | 5.00 | 5.06 |
| 酸素噴射器圧損 | ΔP_o | kg/cm ² | 6.0 | 2.3 | 2.2 | 2.5 | 2.1 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| | Poi-1 | kg/cm ² G | | 26.3 | 25.5 | 25.4 | 25.0 | 26.1 | 25.6 | 25.5 | 25.3 |
| 水素噴射器圧損 | ΔP_f | kg/cm ² | 6.0 | 2.5 | 2.1 | 2.2 | 2.0 | 2.4 | 2.1 | 1.6 | 1.8 |
| | Pfi-1 | kg/cm ² G | | 26.5 | 25.4 | 25.1 | 24.9 | 26.4 | 25.6 | 25.1 | 25.1 |
| 再生冷却圧損 | Tfi-1 | K | | 120.0 | 96.5 | 96.1 | 96.8 | 110.9 | 100.4 | 103.0 | 102.5 |
| | ΔP_{jac} | kg/cm ² | 6.9 | 9.4 | 7.0 | 6.6 | 6.5 | 8.7 | 6.6 | 6.4 | 6.0 |
| 再生冷却温度上昇 | Pfi-1 | kg/cm ² G | | 35.9 | 32.4 | 31.7 | 31.4 | 35.1 | 32.2 | 31.5 | 31.1 |
| | ΔT_{jac} | K | | 80.0 | 63.5 | 64.3 | 66.8 | 70.6 | 66.0 | 70.7 | 71.7 |
| 燃焼室外表面温度 | Tf | K | | 40.0 | 33.0 | 31.8 | 30.0 | 40.3 | 34.4 | 32.3 | 30.8 |
| | T1 | K | | 193.0 | 95.1 | 83.0 | 74.3 | 188.1 | 95.2 | 84.5 | 84.0 |
| 特性排気速度 | T2 | K | | 186.7 | 93.0 | 93.3 | 78.0 | 186.7 | 93.0 | 73.0 | 73.0 |
| | T3 | K | | 279.3 | 253.0 | 217.1 | 178.0 | 284.7 | 261.3 | 222.1 | 186.0 |
| 特性排気速度 | C* | m/sec | | 2249 | 2260 | 2277 | 2278 | 2279 | 2260 | 2264 | 2249 |
| 比推力 | I _{sp} | sec | | 282 | 281 | 281 | 279 | 281 | 276 | 275 | 273 |
| スラスト係数 | C _f | | | 1.23 | 1.22 | 1.21 | 1.20 | 1.21 | 1.20 | 1.19 | 1.19 |
| 〔再生冷却熱計算結果〕 ロ - 材充填率 70%, 表面積率 1.74 | | | | 1.74 | | | | 1.74 | | | |
| 再生冷却圧損 | ΔP_{jac} | kg/cm ² | | 10.05 | 8.92 | 8.51 | 8.32 | 10.35 | 8.96 | 8.75 | 8.35 |
| | ΔT_{jac} | K | | 124.5 | 121.4 | 123.6 | 124.2 | 123.1 | 124.2 | 125.0 | 126.3 |
| 〔再生冷却熱計算結果〕 ロ - 材充填率 100%, 表面積率 1.0 | | | | 1.0 | | | | 1.0 | | | |
| 再生冷却圧損 | ΔP_{jac} | kg/cm ² | | 8.96 | 7.72 | 7.34 | 7.13 | 9.22 | 7.80 | 7.56 | 7.18 |
| | ΔT_{jac} | K | | 107.5 | 104.2 | 106.2 | 106.6 | 106.3 | 106.7 | 107.4 | 108.5 |

ノズルよどみ圧力 P_c は燃焼室側噴射器面圧力を用いて $(P_c)_{inj}/1.041$ として算出した。スロート面積 A_t は燃焼器製作後スロート部の管起伏をレプリカにとって求めたもので公称値としては 155.6 cm^2 を用いている。推力 F は前回 (TC-701-2) に行った実校正時の電気校正値のみでデータ処理をしている。全推進剤重量流量 W_t はタービン流量計のデータを使用しているが、密度算出にはタービン流量計から多少離れた位置での圧力、温度センサーによる測定結果を使用している。

また図4-1の破線はGordonの計算結果を示したものである。実線で示した理論性能計算方法は HST-1001-1 (昭和 57 年 4 月) から採用している方法 [4] で、大型計算機により一次元平衡計算を行い、チャンバー内圧は 20 から $40 \text{ kgf/cm}^2 \text{a}$ まで 5 kgf/cm^2 おきに、混合比は 4.0 から 8.0 まで 0.2 おきに予め計算しておき、それをデータとして実験の任意 P_c , O/F について補間できるようにしたものである。燃焼器形状による定数としてはノズル修正係数 $\lambda=0.966$, ノズル開口比 7.02, ノズル収縮比 2.5 として計算している。

参考までに実線の理論値に対して特性排気速度効率 η_{c^*} を示せば、X+5 秒から X+20 秒までの値は約 95%~96% と比較的低い値となっている。

次に前述のタービン流量計での密度推定誤差による η_{c^*} への影響を評価する。圧力と温度の測定位置による効果としては、圧力計測位置がタービン流量計下流約 3 m (LH₂ 系), 約 2 m (LOX 系) で、温度計測位置は上流約 1.3 m (LH₂ 系), 約 1.5 m (LOX 系) であり、この間の供給配管からの熱流入を考慮すればその結果として水素流量は約 1.1%, 酸

素流量は約 0.43 % 減少することになり ηc^* 効率は約 0.55 % 程度高くなる。また温度データに 1 度の誤差が生じた場合には水素流量は約 1.77 %，酸素流量は約 0.46 % 変化し，その結果効率は約 0.7 % 程度変化する。

4-2. 再生冷却特性

TC-701 燃焼器の設計段階での再生冷却熱計算方法とその計算結果については別途報告されていることは前述したが，再生冷却特性は水素噴射器特性に影響するのでここは燃焼試験結果から直接評価できる再生冷却圧損 ΔP_{jac} と再生冷却剤温度上昇 ΔT_{jac} について検討する。再生冷却特性は P_c , O/F 及び燃焼性能によって変化する。したがってエンジンシステムとしては系の抵抗を知るため，その作動範囲内での再生冷却特性を把握しておく必要がある。今回の燃焼試験では P_c , O/F の変化が少ないのでそれらに関してパラメトリックな評価は行えないが，表 4-1 には再生冷却圧損と再生冷却温度上昇について同条件で前述計算プログラムにより計算した結果を共に示した。計算値はチューブ間のロー材充填率によって変化するが実際の平均値は約 70 % 程度である。この条件では再生冷却圧損は 20～30 % 程度計算値が高く，再生冷却温度上昇は約 55 % 計算値が高くなっている。この次元熱計算方法は燃焼ガス側には Bartz の式[5]を，冷却剤側には Schacht と Quentmeier の式[6]を使っているが，それぞれ特定の範囲を限定して適用できるものである。例えば冷却剤側の式は SUS 管構造燃焼器を使って実験的に各係数を決めたもので，その計算ではスロート付近での冷却壁表面粗さを約 1.6～1.9 μrms 程度を使っている。TC-701 ではこの表面粗さは実測していないので当然この摩擦係数のとり方も圧損の計算結果に影響してくる。このような冷却剤側の境界層内での物性値のとり方等の観点からも別途検討を進めている。

4-3. 噴射器特性

諸外国の例を見ても液水/液酸燃焼器にはコアキシャル型噴射要素を用いている。これは噴射器の性能はそのまま特性排気速度に影響するので，水素流と酸素流の混合効率を上げる目的でコアキシャル型噴射要素が選ばれているものである。TC-701 噴射器でも図 2-7 に示した様なコアキシャル型要素を採用している。水素の流速を速くすると混合効率が上がることにつながる。TC-701-3 燃焼試験で ηc^* 効率が約 95～96 % と比較的低くなっているが，噴射器圧損が計画値の 30 % 程度であったことからその傾向は納得できる。以下に設計圧損を確保できなかった原因に重点を置いて噴射器流量特性を検討する。

(1) 酸素噴射器流量特性

酸素噴射要素流量特性を次の様な諸量を用いて相関づける。

| | |
|-------------|--|
| 酸素噴射器内圧 | P_{0i} kg/cm ² a |
| 噴射器内酸素温度 | T_{0i} K |
| 燃焼ガス側噴射器面圧力 | $(P_c)_{inj}$ kg/cm ² a |
| 噴射要素数 | $NE = 90$ 個 |
| 酸素噴射絞り面積 | $A_0 = 4.14$ cm ² |
| 酸素噴射器差圧 | $\Delta P_{0i} = P_{0i} - (P_c)_{inj}$ |

酸素噴射要素流量特性は噴射要素形状で定まる流量係数 Cd_0 を仮定し次の様に定義し

た。

$$W_0 = C d_0 \cdot A_0 \cdot (2 \cdot g \cdot \rho_0 \cdot P_{0i})$$

ここで、

W_0 : 酸素重量流量 kg/sec

ρ_0 : 噴射器内酸素密度 kg/m³

ρ_0 は噴射器内圧 P_{0i} と温度 T_{0i} が決まれば求まる。流量係数 $C d_0$ は昭和 52 年 6 月に下流を大気開放状態で模擬要素を使って LOX フロー試験により求めた。その平均値として図 4-2 の鎖線で示した $C d \cdot A_0 = 3.73 \text{ cm}^2$ を得た。図 2-7 の絞り寸法はこの値から決めている。その後この様な下流を大気開放状態にした噴射ではキャビテーションが発生することが分った。キャビテーションがない場合にはある場合に比べて 20～30 % 程度流量が増大する。

(2) 水素噴射器流量特性

水素噴射器流量特性についても次の諸量により試験データを相関している。

| | |
|----------------|------------------------------------|
| 水素噴射器内圧 | P_{fi} kg/cm ² a |
| 噴射器内水素温度 | T_{fi} K |
| 燃焼ガス側噴射器面圧力 | $(P_c)_{inj}$ kg/cm ² a |
| 噴射要素数 | $NE = 90$ 個 |
| 水素噴射絞り総面積 | $A_f = 13.69 \text{ cm}^2$ |
| 燃焼ガス側発汗冷却有効表面積 | $A_r = 264 \text{ cm}^2$ |

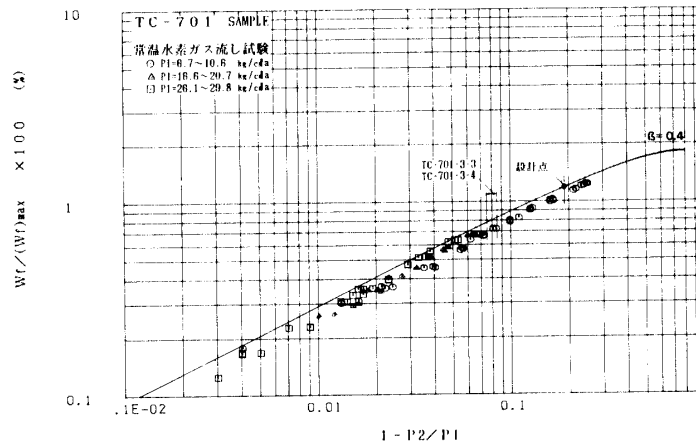


図 4-2 多孔質板水素ガス流量特性

水素噴射器流量 W_f は 90 個のコアキシャル型噴射要素を通る流量 W_{f1} と多孔質噴射器面を通る発汗冷却水素流量 W_{f2} との和である。図 4-2 は TC-701 に使用している多孔質板と同一製品 (板厚 7.15 mm, 間隙率約 29 %) からカットした直径 37 mm のサンプルにより常温水素ガスフロー試験を行った結果を示している。これは多孔質板上・下流の圧

力比の関数 $(1-P_2/P_1)$ に対して多孔質板の単位表面積あたりの測定流量とその単位面積を一つの音速スロートと仮定した場合の最大流量との比 $(W_f/(W_f)_{\max})$ をとったもので、 $(W_f)_{\max}$ は粘性を考慮していない。図中の線は理論特性曲線に対応させたもので β の値とその計算方法は別途報告されているので参照されたい[7]。これより TC-701-3 燃焼試験での発汗冷却率 $\alpha \propto (W_f/2/W_f)$ が $(W_f/(W_f)_{\max}) \times A_r/A_f$ に比例すると仮定した場合に図 4-2 から求めた数値を用いると、 $\alpha = 13 \sim 15\%$ 程度と推定できる。

次に水素噴射要素流量特性を検討した。表 4-2 に示す様に水素噴射器圧損が設計圧損(約 6 kg/cm^2) に対して異常に低い値を示しているが、その原因の一つとしては噴射器内水素温度を約 165 K 程度と推定していたのが燃焼試験で $90 \sim 100 \text{ K}$ 程度となっていることがあげられ、この温度低下による圧損の減少率は約 $40 \sim 50\%$ 程度と推定される。また実際の噴射要素は前述の GN 2 フロー試験の後図 2-7 に示す様に出口径を大きくしており、そのため流量特性が変化していることが考えられる。この様な諸条件を考慮して大まかに計算した結果ほぼ Funno 曲線に近い値が得られたが、今後計測誤差の評価を含め、水素流と酸素流の干渉の効果等、流量特性に影響を与える要因について基礎試験を重ねて厳密な議論をしたい。

4-4. GH_2/GO_2 点火器の着火特性

メイン燃焼器の着火特性は点火器能力だけではなく、着火時付近のメイン燃焼器内環境が大いに影響する。これまでの経験からはむしろ着火時の混合比が重要である様に見える。TC-701 の様なステンレス製鋼管構造燃焼器では熱伝導性があまりよくないので急激な熱負荷の増大には比較的弱い特性を持っている。このため始動の過渡状態の様に熱負荷の変化が激しいところでは再生冷却機能を十分もたせる様にするため一般に水素リードになるシーケンスを設定する。しかし水素リード時間を取りすぎるとハードスタートの原因になるため、TC-701-3 燃焼試験では約 $0.3 \sim 0.5$ 秒程度の範囲に入る様にしている。一方最初に用いた IG-702 点火器の様に極端に fuel rich の燃焼ガスを供給するものでは本来酸素リード環境の方がより有効な着火特性を示す。この様に始動シーケンスに合った点火器を用いるか、点火器の特徴にシーケンスを合わせるかの選択は設計段階で決めておく話であるが、TC-701 用点火器の場合には第 3-4 章で述べている様な経過になっている。TC-701 では燃焼器を保護する観点から水素リードの思想を維持することにし、新しく IG-704 を開発した。点火器能力の表現として単位時間あたりに発生する熱量を考え、これまでに行った着火、不着火の燃焼試験結果をまとめたものを図 4-3 に示した。これより着火と不着火の範囲がおおよそ見当がつき、IG-701 は点火器出口で十分なパワーを持っている様に見える。

また図 4-4 と図 4-5 は燃焼試験の始動・停止の過渡状態を見たものであるが、着火遅れはなく、着火時の混合比も妥当な値となっている。過渡期にはガスの比率が大きい二相流が存在すること、メイン弁下流の配管容積が比較的大きいことから実際に燃焼器に入る流量は供給系に設けた流量計データからは正確に把握できない。このため図に示した混合比は燃焼器計測データを用いて次の方法で算出している。

- ① 噴射器内の水素は完全にガス状であるので、定常燃焼時の水素噴射器流量特性を等

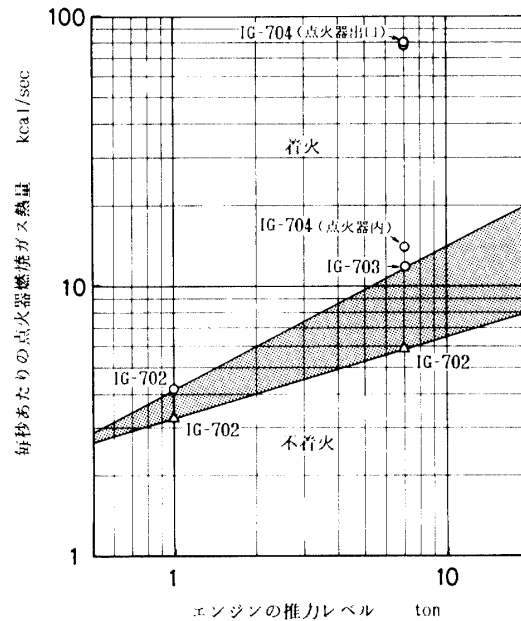


図 4-3 エンジンの規模と着火に必要な点火器パワー

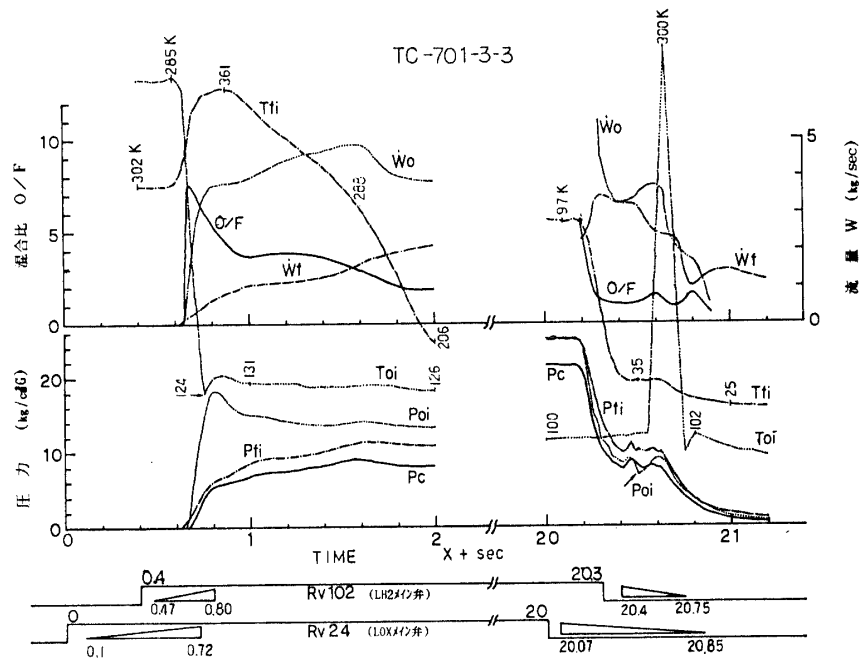


図 4-4 TC-701-3-3 始動・停止過渡特性

温流を仮定した Fanno の式で整理し、噴射要素流量係数を仮定する。

② この値を使用して過渡状態の任意時間での水素噴射器内圧力、温度条件から水素重量流量 \dot{W}_f を求める。

③ 酸素噴射器内は過渡期にはガス比率が大きい二相流であり正確な密度の推定が困難である。そのため試謬法によりまず O/F を仮定して実測 P_c 下での特性排気速度 C^* を求

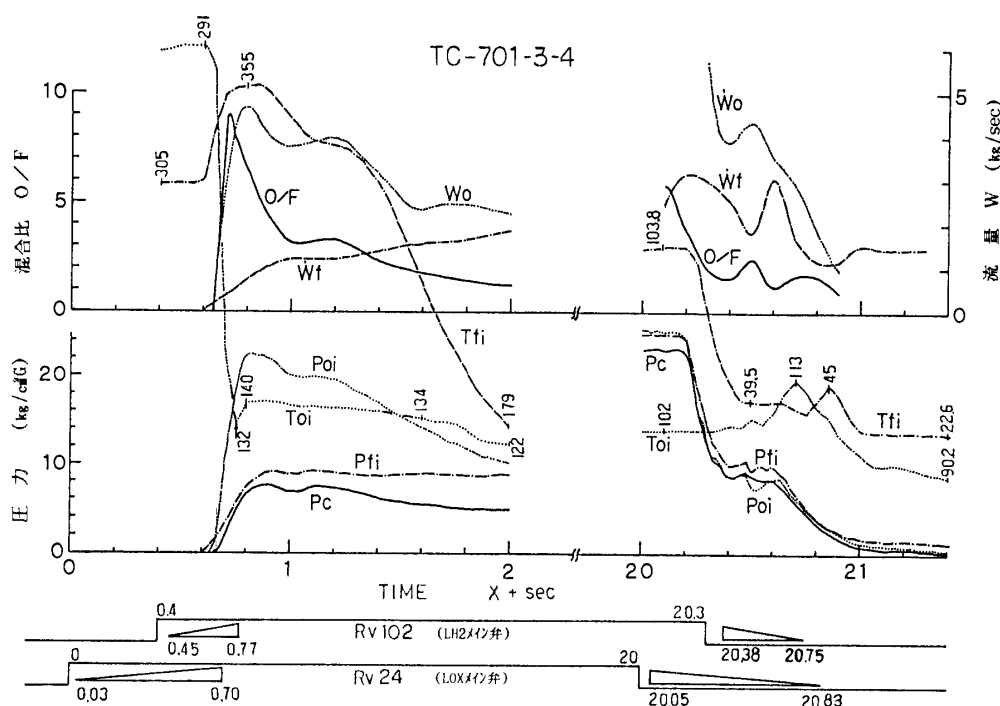


図 4-5 TC-701-3-4 始動・停止過渡特性

める。次にこの C^* の値から全流量を算出し、 \dot{W}_f との差より酸素流量 \dot{W}_o を求める。この様にして求めた \dot{W}_o/\dot{W}_f が先に仮定した O/F と一致するまで計算を反復する。

また IG-704 点火器はその後 7 トンエンジンシステム試験とステージ試験に使用されているがいずれの場合にも良好な着火特性が得られている。(文責：橋本)

謝 辞

最後にこの一連の実験を直接担当され協力された宇宙研の液水実験班各位と関係会社の諸氏に感謝する次第である。

参 考 文 献

- [1] 秋葉鐔二郎他,「液水/液酸 10 トン溝構造燃焼器の試作と燃焼実験」, 本宇宙研報告
- [2] F.M. Kirby, "SSME and Other Propulsion System Options for Future Boosters", AIAA PAPER NO. 76-710, 1976
- [3] 棚次亘弘,「再生冷却熱計算」, 本宇宙研報告
- [4] 倉谷健治他,「燃焼室の理論性能」, 本宇宙研報告
- [5] D.R. Bartz, "A Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convection Heat Transfer Coefficients, JET PROPULSION, January 1957
- [6] R. L. Schacht and Quentimyer, NASA TN D-7207, March 1973
- [7] 橋本保成他,「10 トン溝構造燃焼器用噴射器面多孔質板の試作研究」, 本宇宙研報告
- [8] 小竹 進他,「10 トン溝構造燃焼器噴射器面の発汗冷却熱計算」, 本宇宙研報告