

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

ラムジェットエンジン試験設備の液化水素供給装置について

小野 文衛, 早坂 理, 齋藤 俊仁, 植田 修一

2005年9月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. はじめに	1
2. RJTF 液化水素供給装置の配管系統および仕様	2
2.1 初期配管系統からの変更点	2
2.2 配管系統の改修	6
2.2.1 LH ₂ コンテナ用 GH ₂ 逃気ライン、GHe 供給ラインの増設	6
2.2.2 新しい LH ₂ 気化ガス処理装置の増設	6
2.2.2.1 各種処理方法の比較と採用システムの選択	6
2.2.2.2 バッファータンクの必要容積	7
2.2.2.3 LH ₂ 気化ガス処理システムの構成	8
2.2.2.4 機能確認試験	8
2.2.2.5 LH ₂ 冷却スクラムジェットエンジン試験	10
3. 液化水素供給装置の取り扱い	13
3.1 LH ₂ 受入れ準備手順	13
3.1.1 ガス類の準備	13
3.1.2 配管およびバルブ類の確認	14
3.1.3 LH ₂ 気化ガス処理用バッファータンクの窒素ガス置換	15
3.1.4 LH ₂ コンテナ接続用フレキホース類の準備	15
3.1.5 LH ₂ ランタンク内槽の水素ガス置換	16
3.1.6 LH ₂ 供給配管の GHe 置換	17
3.1.7 LH ₂ ランタンクジャケットの LN ₂ 予冷	17
3.2 LH ₂ コンテナの受入れ	18
3.2.1 コンテナの荷下ろし	18
3.2.2 アース線接続および圧力・液量の確認	18
3.2.3 フレキホース類の接続および GHe 置換	19
3.2.4 コンテナ内気化ガスの逃気	19
3.3 ランタンクへの LH ₂ 充填	20
3.3.1 ランタンクジャケット内 LN ₂ の排出	20
3.3.2 LH ₂ ランタンク内に封入された GH ₂ の逃気	20
3.3.3 LH ₂ 充填	20
3.4 試験手順	21
3.4.1 計装用ガス類の準備状況の確認	21
3.4.2 RJTF 低圧室内の GN ₂ 置換	21
3.4.3 LH ₂ 供給配管およびエンジンの予冷	21
3.4.4 試験	22
3.4.5 バッファータンク内の LH ₂ 気化ガスの逃気	23

3.5 後処置手順.....	23
3.5.1 LH ₂ コンテナ内の残液処理.....	23
3.5.2 フレキホース類の取外しおよび養生保管.....	23
3.5.3 LH ₂ コンテナの返却.....	24
3.5.4 LH ₂ 供給配管、ランタンク内槽の GHe 置換.....	24
3.5.5 LH ₂ ランタンクジャケットの圧力調整.....	25
3.5.6 LH ₂ 気化ガス処理用バッファータンクの GN ₂ 置換.....	25
4. あとがき.....	25
参考文献.....	25
付録 A LN ₂ CE (N6CE、N7CE) の取り扱い.....	27
付録 B 多層巻真空断熱 LH ₂ 配管の真空度.....	30
付録 C 高温ガス流評価試験装置の水素系統.....	30
付録 D 高圧 GN ₂ 製造装置 (N7CE 付置ポンプ) の取り扱い.....	30
付録 E RJTF の全系統図.....	35
付録 F LH ₂ 配管およびタンク内の GHe 置換の指針.....	35
付録 G 2000 リットル LH ₂ コンテナ.....	41
付録 H LH ₂ の製品安全データシート (MSDS).....	44
付録 I 1000 リットル LH ₂ ランタンク.....	48

ラムジェットエンジン試験設備の液化水素供給装置について*

小野 文衛*¹ 早坂 理 *² 齋藤 俊仁*¹ 植田 修一*¹

Liquid Hydrogen Supply System of the Ramjet Engine Test Facility *

Fumiei Ono*¹, Osamu Hayasaka*², Toshihito Saito*¹ and Shuichi Ueda*¹

ABSTRACT

At least 300 scramjet engine firing tests have been conducted at the ramjet engine test facility (RJTF) of the Kakuda Space Center of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA-KSC). However, because problems arose with on safety and the testing procedures, remedial measures were needed prior to the testing of the liquid hydrogen (LH₂) cooled scramjet engine. Therefore, only 13 tests of the LH₂-cooled scramjet engine have so far been conducted. Of particular concern is the safe handling of the large amount of gaseous hydrogen produced by the evaporation of LH₂ in these tests. Reviewing the testing procedure, improving the poorly performing part of the LH₂ supply apparatus, and redesigning the evaporated gas processor cleared up these problems, and safe testing of the LH₂-cooled scramjet engine became possible. In this report, improvements of the LH₂ supply system, handling of the LH₂ supply system and the incidental equipments, and testing procedure of the LH₂-cooled scramjet engine were described.

Keywords: liquid hydrogen, hydrogen system, test facility, safety, ramjet engine

要 約

宇宙航空研究開発機構の角田宇宙センター (JAXA-KSC) に設置されているラムジェットエンジン試験設備 (RJTF) では、これまでに 300 回以上のスクラムジェットエンジン試験が実施されてきた。このうち、LH₂ 冷却エンジン試験については、安全上および試験手順上、解決すべき問題がいくつか発生し、その対策を講じたため、これまでに実施された試験回数は 13 回と比較的に少ない。特に、LH₂ 冷却式エンジン試験を実施する際に、大量に発生する LH₂ 気化ガスを安全に処理することが重要な課題となった。このため、新しい概念による気化ガス処理装置を製作して設置し、併せて、LH₂ 供給装置の不具合部分の改修および試験手順の見直し等を行った。これらの対策によって、LH₂ 冷却エンジン試験を安全に実施することが可能になった。本報では、これらの問題を解決するために行った対策について述べると共に、LH₂ 冷却エンジン試験の安全な遂行とトラブルの未然防止に寄与することを期待して、これまでの経験を反映させた RJTF-LH₂ 供給装置の取扱いおよび試験手順についても触れた。

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の角田宇宙センター (KSC) にはラム/スクラムジェットエンジンの地上試験が可能なラムジェットエンジン試験設備 (RJTF : RamJet engine Test Facility) が設置されている。図 1-1 に RJTF の全景写真を示す。RJTF の主要機器の配置を図 1-2 に示し、これらの機器の名称を表 1-1 に示す。RJTF は高度 20km、25km、30km におけるマッハ数が

各々、4、6、8 の飛行条件を模擬できるユニークなエンジン試験風洞である。RJTF の全体については文献¹⁾を参照されたい。

RJTF において、供試スクラムジェットエンジンを用いた試験がこれまでに合計 300 回以上行われている。供試エンジンには無冷却式、水冷式、液化水素 (LH₂) 冷却式の三つの形式があるが、これまでの試験^{2~3)}では、主として無冷却式と水冷式が使用されてきた。LH₂

* 平成 17 年 7 月 29 日受付 (Received 29 July, 2005)

*1 総合技術研究本部 (Institute of Space Technology and Aeronautics)

角田宇宙センター (Kakuda Space Center)

複合推進研究グループ (Combined Propulsion Research Group)

*2 財団法人 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology)

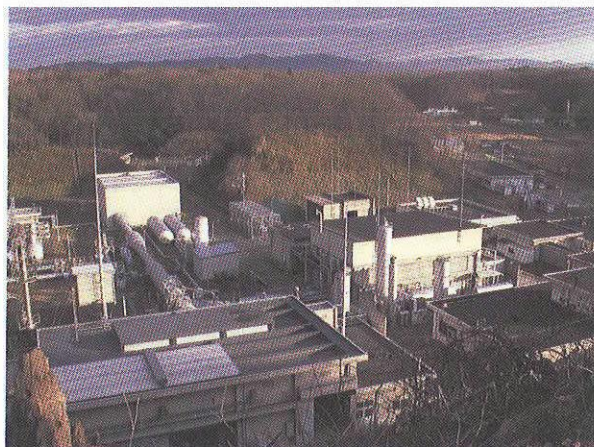


図 1-1 ラムジェットエンジン試験設備 (RJTF) の全景

冷却エンジン試験を安全に実施するためには、エンジンが設置される低圧室内において水素が漏洩した場合の処置、更には大量に発生する LH_2 気化ガスの安全な処理等の課題を解決する必要がある。これらの課題に対処するために装置の改修および試験手順の見直し等を行いながら、これまでに 13 回の LH_2 冷却エンジン試験が実施されている^{4~6)}。

LH_2 冷却エンジンを用いた試験では大量の LH_2 気化ガスが発生するため、この気化ガスの処理が安全に試験を実施する上で重要な課題となる。また、 LH_2 は極低温の可燃性液化ガスであるため、漏洩、汚染ガスの凍結固化、着霜・結氷、液封等によるトラブル発生のリスクが高い。更に、供試エンジンは低圧室と呼ばれる閉空間内に設置されるため、可燃性ガスが漏洩した場合には安全性確保の面で開放空間における試験とは異なった困難さがある。

試験の際に大量に発生する LH_2 気化ガスの処理の問題は、新しい概念に基づいた処理装置を製作して設置することにより解決した。本報では、この新しい気化ガス処理装置の検討、設計・製作、試験結果について述べるとともに、RJTF の竣工後これまでに LH_2 供給系統に施された改修等の変更についても触れる。また、 LH_2 冷却エンジン試験を安全に実施し、あるいはトラブルを未然に防止するための一助となることを期待して、これまでの経験を反映させた RJTF- LH_2 供給装置の取扱いについても具体的に述べる。

2. RJTF 液化水素供給装置の配管系統および仕様

2.1 初期配管系統からの変更点

図 2-1 および図 2-2 に各々、RJTF 竣工時（平成 6 年 3 月）と現在（平成 17 年 7 月現在）の LH_2 供給装置の系統を示す。また、 LH_2 供給装置の公称能力を表 2-1 に示す。竣工時から現在に至るまでに、 LH_2 供給装置には二つの変更が施された。一つは、市販の LH_2

を RJTF に搬入する際の容器を大型のトレーラー容器 1 基から小型容器 2 基に変更したことに伴う受入れ配管系の増設である。他の一つは、 LH_2 冷却供試エンジンが必要とする冷却用 LH_2 の流量が設備計画時点に比べて大幅に増加したことに伴う気化水素ガスの処理方法の変更である。以下にこれらについて詳しく述べる。

初めに、 LH_2 の搬入容器の変更について述べる。RJTF 竣工当初は容量が 16000 ~ 20000L のタンクローリーを用いて搬入する予定であったが、この場合には容器の蒸発特性上、最低搬入量を満量の半分以上、すなわち 8000~10000L 以上にすることが求められる。また、搬入したタンクローリーは LH_2 が残っていない状態で返却しなければならない。このため、試験時に供試エンジンあるいは設備の不具合によって試験の継続が不可能になった場合、残った LH_2 を処分する必要がある。RJTF には容量 1000L のランタンク以外に貯蔵容器が無いため、大量の残液がある場合には対処が困難になる。そこでこのようなリスクを避けるため、 LH_2 の搬入容器をタンクローリーから 2000L コンテナに変更した。通常はコンテナを 2 基同時に搬入するため、コンテナで発生する気化水素ガスの逃気系統、およびパージあるいは置換用ヘリウムガスの供給系統が従来の 1 系統では対応できなくなる。このため、これらの配管系を新たに 1 系統増設した。

次に、供試エンジンの冷却に使用した LH_2 が気化して発生する大量の GH_2 の処理方法の変更について述べる。当初、供試エンジン冷却用の LH_2 流量は、エンジンの再生冷却を前提として燃焼用水素ガス流量と同一の 6 L/s（約 0.42 kg/s）として計画され、これに基づいて RJTF の LH_2 供給装置が製作された。 LH_2 気化ガスの処理は非燃焼式のベントスタックを通して行うもので、高さ 12m に位置する直径 208mm の放出口から大気中に水素ガスを放散させる方式である。0.42 kg/s の処理量は非燃焼方式ベントスタックで取り扱う水素流量としては大きく、水素および水素システムに関する NASA の安全基準およびグレンリサーチセンターの安全マニュアルに規定されている上限流量 0.5 lb/s（約 0.23 kg/s）の約 2 倍である^{7,8)}。なお、前書⁷⁾は水素の性質、安全、水素システムの設計、材料選定、運用、貯蔵および輸送、他に関して詳細に記述してあるので興味のある向きは参照されたい。その後、供試エンジンの設計検討が進むにつれて、冷却には 1.5 kg/s 程度（約 21 L/s）の LH_2 が必要になることが判明した。この場合、設備の処理能力としては若干の余裕を見込んで 2kg/s 程度が必要になると考えられる。これを既存の非燃焼式ベントスタックで処理した場合には、放出

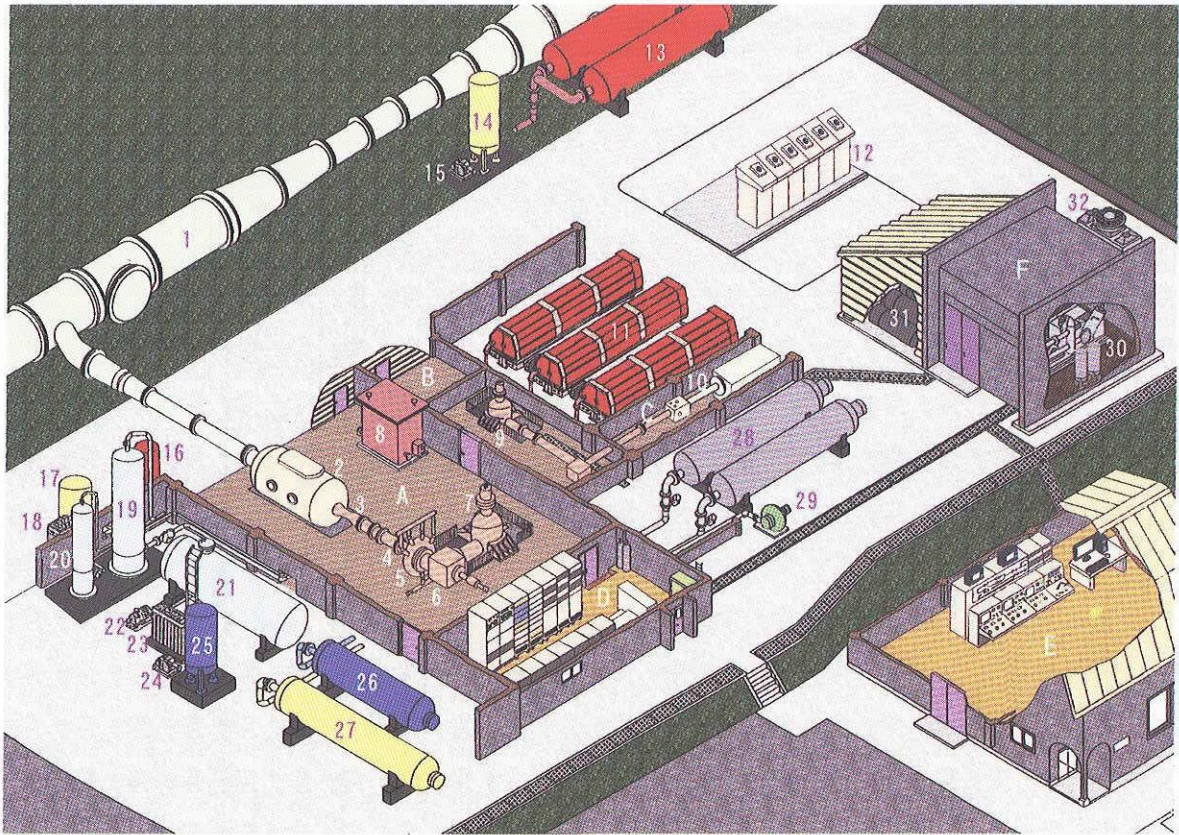


図 1-2 RJTF 主要機器配置図

表 1-1 RJTF 主要機器の説明 (機器番号は図 1-2 中の番号に対応)

A RJTF実験室 (main test bay)	8 ガス水素加熱器 (GH2 heater)	21 受水槽 (water catch tank)
B 高温ガス流評価試験装置 (hot gas flow device)	9 小型蓄熱体加熱器 (subscale storage air heater)	22 揚水ポンプ (water pump)
C ディフューザー室 (diffuser bay)	10 小型エジェクター (subscale ejector)	23 液化酸素蒸発器 (LOX vaporizer)
D 中継室 (data relay room)	11 ガス水素トレーラー容器 (GH2 loader)	24 液化酸素ポンプ (LOX pump)
E 計測・制御室 (measurement/control room)	12 変電設備 (transformer facility)	25 液化酸素CE, O-6 (LOX cold evaporator, O-6)
F 圧縮器室 (compressor room)	13 気化水素バッファータンク (H2 buffer tank)	26 ガス酸素気蓄器 (GO2 bottle)
1 エジェクター (ejector)	14 液化窒素CE, N-7 (LN2 cold evaporator, N-7)	27 ガス窒素気蓄器 (GN2 bottle)
2 測定部 (test chamber)	15 液化窒素ポンプ (LN2 pump)	28 空気気蓄器 (air bottles)
3 ノズル (nozzle)	16 液化水素動作タンク (LH2 run tank)	29 空気ブロワー (air blower)
4 燃焼加熱器 (vitiated air heater)	17 液化窒素CE, N-6 (LN2 cold evaporator, N-6)	30 空気圧縮器 (air compressor)
5 空気混合器 (air mixer)	18 液化窒素蒸発器 (LN2 vaporizer)	31 LPGボンベ (LPG bottles)
6 高温弁 (high temperature valve)	19 高温空気供給系冷却水タンク (coolant water tank for high temperature air supply system)	32 水冷却塔 (water cooling tower)
7 大型蓄熱体加熱器 (main storage air heater)	20 エンジン冷却水タンク (coolant water tank for engine)	



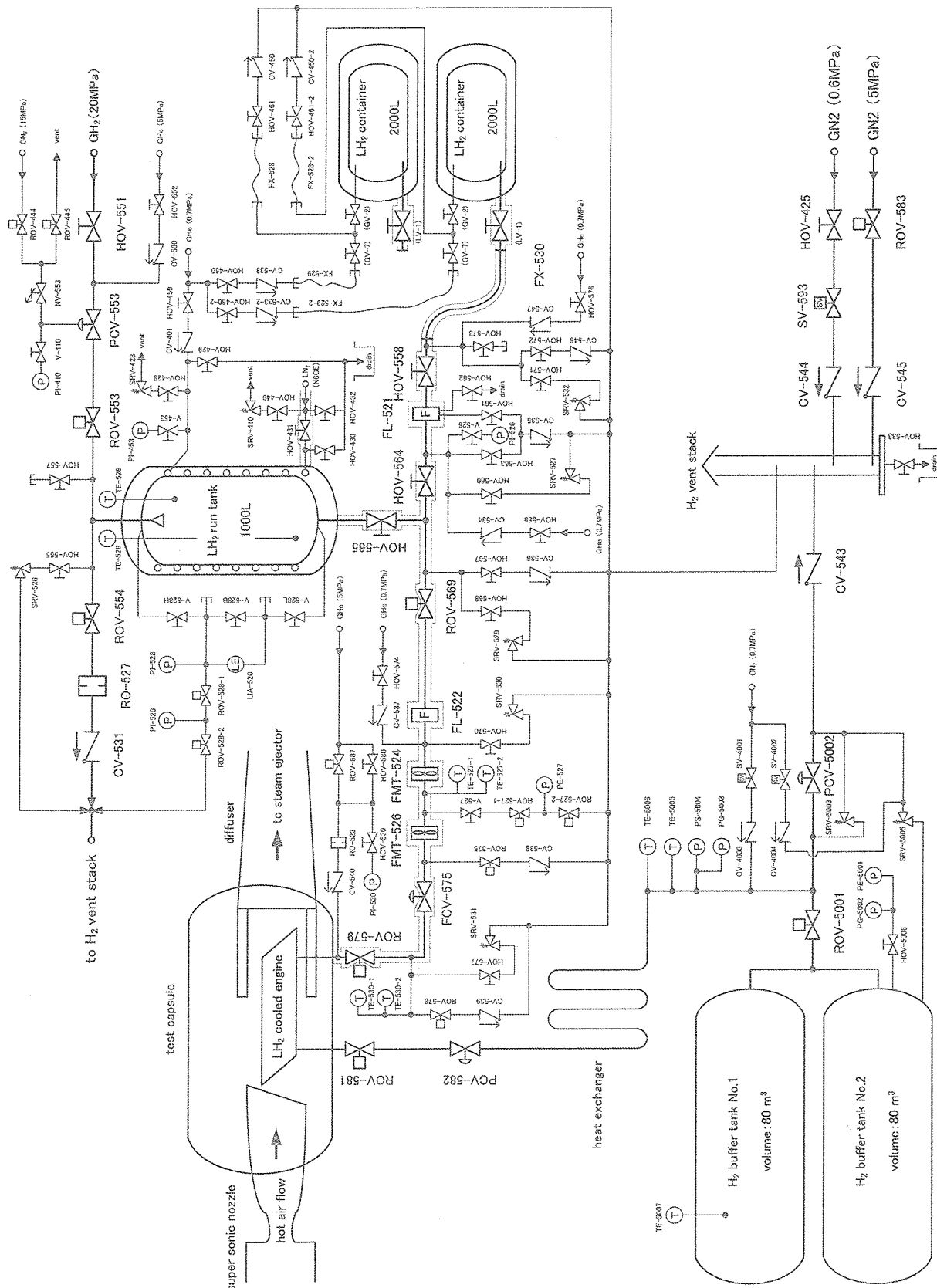


図 2-2 LH₂ 供給系統図 (平成 17 年 7 月 現在)

表 2-1 RJTF-LH₂ 供給装置の公称能力

時 期	公称最大流量	最大供給圧力	1 run あたり最大供給量
RJTF 竣工時 (平成 6 年 3 月)	6 L/s (0.42kg/s)	9.8 MPaG	1000L (70.8 kg)
LH ₂ 供給装置改修後 (平成 10 年 7 月)	28 L/s (2kg/s)	9.8 MPaG	1000L (70.8 kg)

口における気化水素の流出速度が最大で 900m/s 程度に達すると見積もられた。万一、空气中に放出された大量の水素ガスが静電気放電等によって着火、爆発した場合には、設備およびその周辺に被害をおよぼすことが懸念される。特に、塵埃、水滴、氷等の微粒子が含まれる場合には、ガスの噴出速度が大きいと容易に帯電し、着火・爆発の危険性が高まる⁹⁾。水素ガスは最小着火エネルギーが特に小さいこともあり¹⁰⁾、ベントスタック出口で容易に着火する恐れがある。事実、水素噴出速度が 122m/s 程度で静電気火花が着火源と推定される事故が NASA から報告されている¹¹⁾。また、帯電量を抑えるためにベントスタック出口における水素ガスの噴出速度を 200m/s 以下に制限している例も見られる¹²⁾。これらのことから、RJTF において LH₂ 冷却エンジンの試験を安全に行うには、既設ベントスタックの処理能力では対処できないと判断した。このため、安全な LH₂ 気化ガス処理方法の検討を行い、新たに気化ガス処理装置を製作して設置することにした。

- 2.2 配管系統の改修
- 2.2.1 LH₂ コンテナ用 GH₂ 逃気ライン、GHe 供給ラインの増設
- LH₂ の搬入をタンクローリーから容量 2000L コンテナ 2 基に変更したことに伴い、コンテナ逃気ラインおよび GHe 供給ラインの増設を行った。増設した部分を図 2-3 に示す。図中の赤色で示した部分が新たに増設した系統である。
- 2.2.2 新しい LH₂ 気化ガス処理装置の増設
- 2.2.2.1 各種処理方法の比較と採用システムを選択
- 現在広く用いられている廃水素ガスの処理方法には大きく分けて二つある。一つは高所大気中に未燃ガスを直接放出して拡散させ地上付近での濃度を可燃限界以下にするベントスタック方式であり、残りの一つは未燃ガスを燃焼処理する燃焼方式である。燃焼方式には高所において燃焼させるエレベータードフレア、地上で燃焼させるグランドフレア、装置のコンパクト化を狙った加圧燃焼方式等の幾つかの種類がある。これらの既存の方式を用いて RJTF で発生する LH₂ 気化ガ

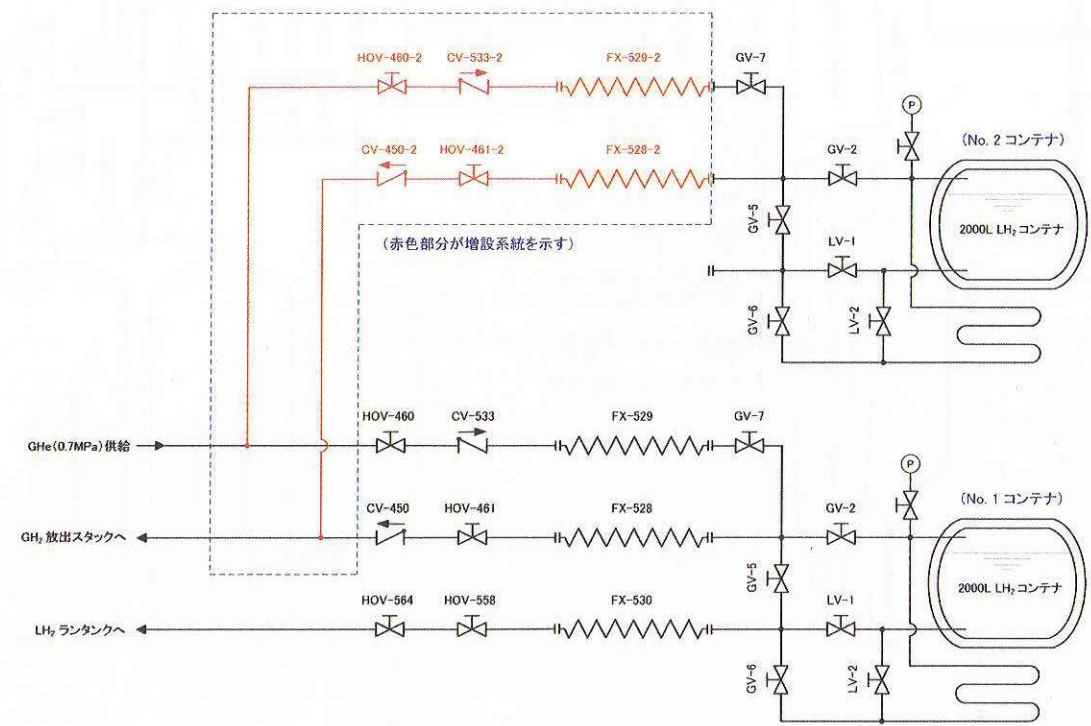
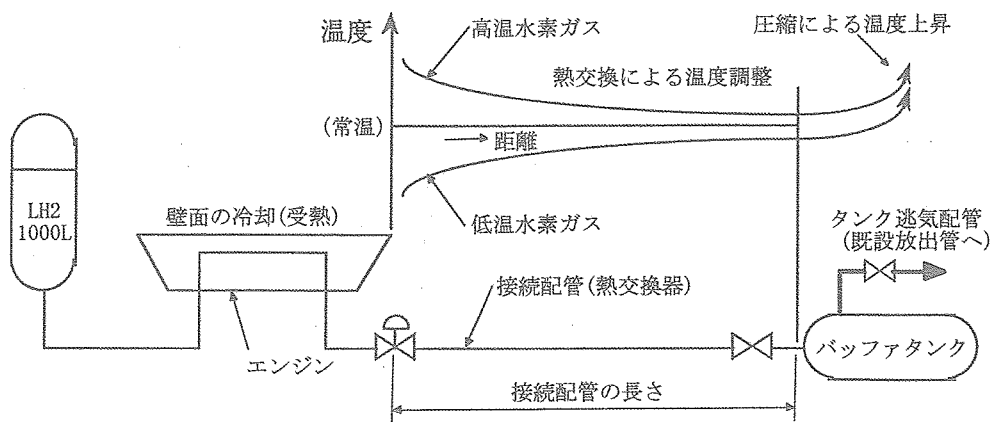


図 2-3 LH₂ コンテナ 2 基搬入に備えた配管の改修

図 2-4 バッファータンク方式による LH₂ 気化ガス処理装置の概念

スを処理する場合を検討してみた。その結果、非燃焼のベントスタック方式を採用した場合には、放出口の口径が 600mm、放出口高さは 30m 以上が必要と見込まれ、かなり大掛かりな建造物となる。燃焼方式を採用した場合には、火炎長さが約 30m にも達すると推定され¹³⁾、処理装置本体以外に山林等の火災対策、隣接建物・作業者等への輻射熱対策等が必要となる。また、両方式共に風向・風速等の気象条件によっては、安全面から試験の実施が制限されることも予想される。これらの結果から、既存の処理方式を採用することは、安全面あるいはコスト面で現実的ではないと判断した。

そこで RJTF における試験形態すなわち、「60 秒程度の短時間内に 2kg/s の大流量の LH₂ を流すが、その総量は最大でも 1000L である」ことに着目して、安全性が高く高コストにならない処理方式を模索した。その結果、試験中に多量に発生する気化ガスを一旦低压でタンク内に貯め込み、試験後に小流量で既設のベントスタックを通して放出する方法が最適であるとの結論に達した。図 2-4 に新しいシステムの概念を示す。この新しい水素ガス処理方式を「バッファータンク方式水素逃気システム」と称し、以下に本システムの検討、製作、試験結果について述べる。

2.2.2.2 バッファータンクの必要容積

バッファータンクの容積を求めるための条件は次の通りとする。

- 1) タンクの設計圧力は 1.072MPa_{abs.} (9.9kg/cm²G) とする。
- 2) タンクの初期圧力は 0.161MPa_{abs.} (0.6kg/cm²G)、最終圧力は 0.964MPa_{abs.} (8.8kg/cm²G) とする。
- 3) タンクの材質は SLA235A(低温圧力容器用炭素鋼鋼板、使用可能温度範囲:-30～350℃)とする。
- 4) タンクの使用温度範囲は-30～200℃とする。

- 5) タンクに導入される気化ガスの量は LH₂ 換算で 1000L(70.8kg)とする。
- 6) LH₂ 流量は 2kg/s とする。
- 7) 供試エンジン出口側における気化ガスの温度は 250℃とする。
- 8) 気化ガスを熱交換器に通すことにより、タンクに流入するガスの温度を常温に近づける。

最初に、熱交換器を通してタンクに流入する気化ガスの温度を求める。熱交換器は供試エンジンの出口側からバッファータンクの入口側までを接続する全長 110m の配管とする。全長 110m の接続配管の内、上流側 100m は SUS316TP(配管用ステンレス鋼管、使用可能温度範囲:-196～800℃)製の 8B-sch20S 配管、下流側の 10m は STPL380(低温配管用鋼管、使用可能温度範囲:-45～200℃)製の 8B-sch40 配管を用いる。図 2-5 に次元非定常伝熱計算によって求めたタンク入口における流入ガス温度の時間変化を示す。エンジンの出口で 250℃の気化ガスは、接続配管を流れる間に配管側と熱交換されて温度が低下する。時間の経過につれて温度の低下量は少なくなるが、バッファータンク入口での温度は試験終了時に相当する 35 秒経過時(累積 LH₂ 流量が 1000L、すなわちランタンクが空になる時点)で 74℃ (347K) であり、十分に接続配管材料の使用可能温度範囲内にある。

気化ガスを貯めるバッファータンクは断熱してあり、タンク内のガスは流入してくるガスによって圧縮されると仮定した場合、タンク内のガスの温度は次式から求められる¹⁴⁾。

$$T_1 = T_0 \frac{\kappa T_a}{T_0 + (\kappa T_a - T_0) \frac{P_0}{P_1}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

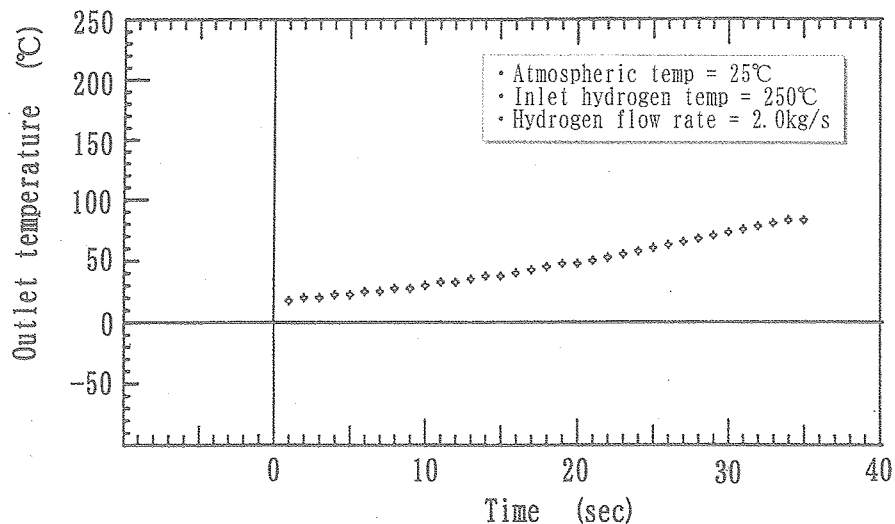


図 2-5 バッファータンクに流入する気化ガス温度の見積もり

T_0 : 気化ガス流入前のタンク内温度

T_1 : 気化ガス流入後のタンク内温度

P_0 : 気化ガス流入前のタンク内圧力

P_1 : 気化ガス流入後のタンク内圧力

T_a : 流入する気化ガスの温度

κ : ガスの比熱比

である。

気化ガス流入前後におけるタンク内の温度、圧力、および流入ガスの質量が既知であれば、必要なタンクの容積は次式より求められる。

$$V_B = \frac{G}{\rho_1 - \rho_0} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

V_B : バッファータンクの容積

G : 流入する気化ガスの質量

ρ_1 : 流入後の容器内ガスの密度

ρ_0 : 流入前の容器内ガスの密度

である。

必要なバッファータンク容積を計算するために、初期状態が $T_0=298\text{K}$ (25°C)、 $P_0=0.161\text{MPa}_{\text{abs}}$ ($0.6\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) のバッファータンクに $T_a=347\text{K}$ (74°C) の GH_2 ($\kappa=1.4$) を流入させて $P_1=0.964\text{MPa}_{\text{abs}}$ ($8.8\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) まで圧力を上昇させる場合を考える。(1)式からバッファータンク内のガス温度は $T_1=440\text{K}$ (167°C) となり、タンク材料の使用可能温度範囲内であることが分かる。流入前後のタンク内の GH_2 の密度は各々、 $\rho_0=0.1346\text{kg}/\text{m}^3$ および $\rho_1=0.5815\text{kg}/\text{m}^3$ となり、タンクに流入する GH_2 の全質量は $G=70.8\text{kg}$ (LH_2 で 1000L 相当) であるから、必要なタンクの容積は(2)式から $V_B=158.4\text{m}^3$ となる。

なお、実際には、タンク壁が非断熱であること、流入する気化ガスの平均的な温度は計算に用いた最高温度よりも低いこと、エンジン試験ではランタンクが空になるまで LH_2 を流さないこと等から、実際のタンクの圧力は仮定した圧力には達しない。

2.2.2.3 LH_2 気化ガス処理システムの構成

図 2-6 に LH_2 供給系を含んだバッファータンク方式水素逃気システムの構成を示す。タンクは製作工場からの運搬性を考慮して横置円筒型タンク（直径 $2.7\text{m} \times$ 長さ 14.5m 、内容積 80m^3 ）を 2 基並列に使用することにした。熱交換器を兼ねた口径 8 インチ、長さ 110m の接続配管は一部折り返して二階建てとして設置スペースを減らすように努めた。最大で 60s 程度の試験時間内にタンクに貯まった大量の LH_2 気化ガスは、試験後に周囲の安全を確認した後、高さ 12m の既設ベントスタックを通して少量ずつ大気中に放出する。図 2-7 および図 2-8 に各々、新たに設置したバッファータンクおよび既設ベントスタックの外観を示す。

2.2.2.4 機能確認試験

設置を完了したバッファータンク方式水素逃気システムの機能と健全性を確認するため、供試エンジンの代わりにダミー配管を接続して次の試験を行った。すなわち、

- 1) 常温試験：常温の水素ガスを用いた機能確認
- 2) 低温試験： LN_2 を流して接続配管（熱交換器を兼ねる）の健全性を確認する試験
- 3) 実液試験： LH_2 を流して総合的な機能を確認する試験

を順次実施した。

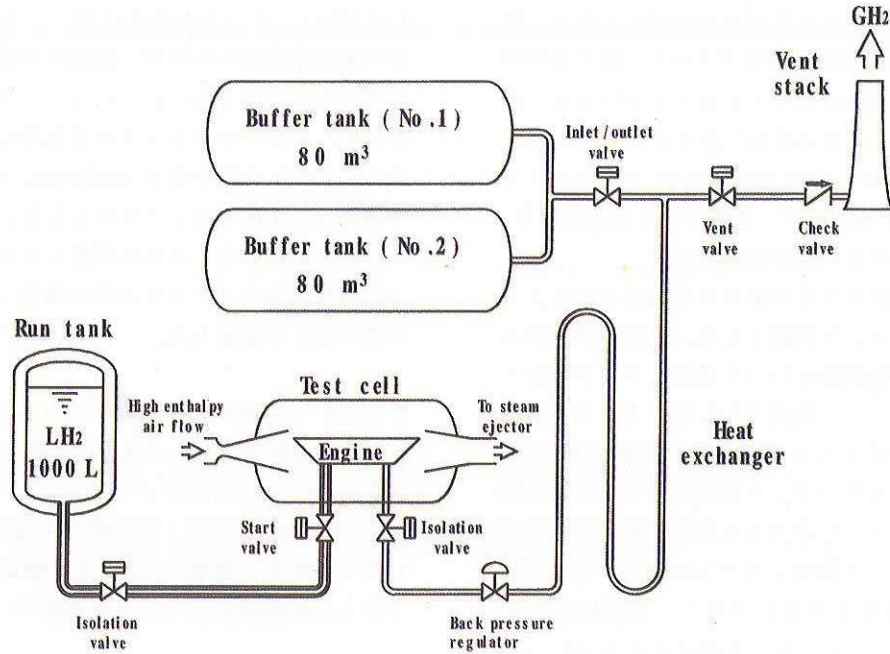
図 2-6 新しい LH₂ 気化ガス処理装置の構成

図 2-7 設置されたバッファータンクの外観



図 2-8 水素ベントスタックの外観

常温試験では 45 分かけてタンク圧が $0.101 \rightarrow 0.960 \text{ MPa}_{\text{abs}}$ に達するまで GH₂ を流し込んだ後、タンク圧が $0.101 \text{ MPa}_{\text{abs}}$ に低下するまで約 60 分かけて GH₂ を逃気した。配管およびタンクからの漏れは認められずバルブ類の作動も正常であった。GH₂ 逃気時には RJTF 実験棟内に常設された検知器で H₂ ガスは検知されなかった。隣接建物内の常設検知器では風向きによって最高 400ppm 程度の H₂ ガスが検知された場所もあったが、爆発下限界の百分の一の濃度であり、危険性は無いと判断した。

低温試験では LN₂ を接続配管に流し、バッファータンクには導入せずにベントスタックを通して放出した。バッファータンク入口弁の上流側でガス温度が -60°C 、配管温度が -5°C に低下するまでに約 1700L の LN₂ を流したが配管に異常は認められなかった。低温状態での配管の変位量は全て計画値内であり、 $0.8 \text{ MPa}_{\text{abs}}$ で行った漏洩検査でも異常は認められなかった。

実液試験は合計 3 回行った。1 回目の試験は計測系のチェックと流量（目標値：1.5 kg/s）を設定するための予備試験とし、約 20 秒間 LH₂ を流した。結果は最大流量が 1.3kg/s、バッファータンク内圧力は $0.101 \rightarrow 0.34 \text{ MPa}_{\text{abs}}$ 、タンク内温度は $28 \rightarrow 75^\circ\text{C}$ まで上昇した。設備に異常は認められず、データの計測は良好に行われた。

2 回目の試験はランタンク内の LH₂ が空になるまでの約 50 秒間流した。結果は最大流量が 1.55kg/s、バッファータンク内圧力は $0.101 \rightarrow 0.60 \text{ MPa}_{\text{abs}}$ 、タンク内温度は $23 \rightarrow 60^\circ\text{C}$ まで上昇した。バッファータンクに流入した GH₂ の量は LH₂ 換算で約 730L 相当であった。

バッファータンクの圧力上昇は 0.499MPa であり、最大許容値 0.86MPa の 58%であることから、同じ条件で LH₂ 換算 1000L 相当の水素ガスを流入させた場合の圧力上昇は約 0.8MPa と見込まれ、最大許容値に対してまだ余裕がある。タンク内の水素は約 20 分かけて 0.101 MPa_{abs.}まで逃気したが、異常は見られなかった。図 2-9 (a)～(c)に 2 回目の試験結果を示す。

3 回目の試験は流入する水素ガスの温度を大きく上昇させるトランジェント試験とした。これは供試エンジンを装着して燃焼試験を行った場合、エンジンから熱を受けることによって冷却用 LH₂ 気化ガスの温度が高くなる場合を想定したものである。試験は約 250L の LH₂ が入っているランタンクを加圧して液を流し始め、LH₂ が無くなってもそのまま加圧用水素ガスを流し続けることによって逃気システムに流入する流体の温度を低温から常温まで変化させた。試験時間は約 170 秒であり、バッファータンク内圧力は 0.101 →

0.49 MPa_{abs.}、タンク内温度は 22 → 62℃まで上昇した。ガス漏れ等は認められず、装置が正常に機能することを確認した。図 2-10 (a)～(c)に 3 回目の試験結果を示す。バッファータンクの逃気時には、全てのケースでタンク圧の降下率が 25kPa/min となるように自動で逃気弁の開度をコントロールした。

以上の試験から、新たに設置したバッファータンク方式水素逃気システムが正常に機能し、健全性に問題が無いことを確認した。

2.2.2.5 LH₂冷却スクラムジェットエンジン試験

新たに設置した LH₂ 気化ガス処理システムを用いて、現在までに LH₂ 冷却スクラムジェットエンジン試験を計 10 回実施しており、短時間に大量に発生する LH₂ 気化ガスを安全に処理できることを確認している。なお、これらの試験結果については文献^{5,6)}を参照されたい。

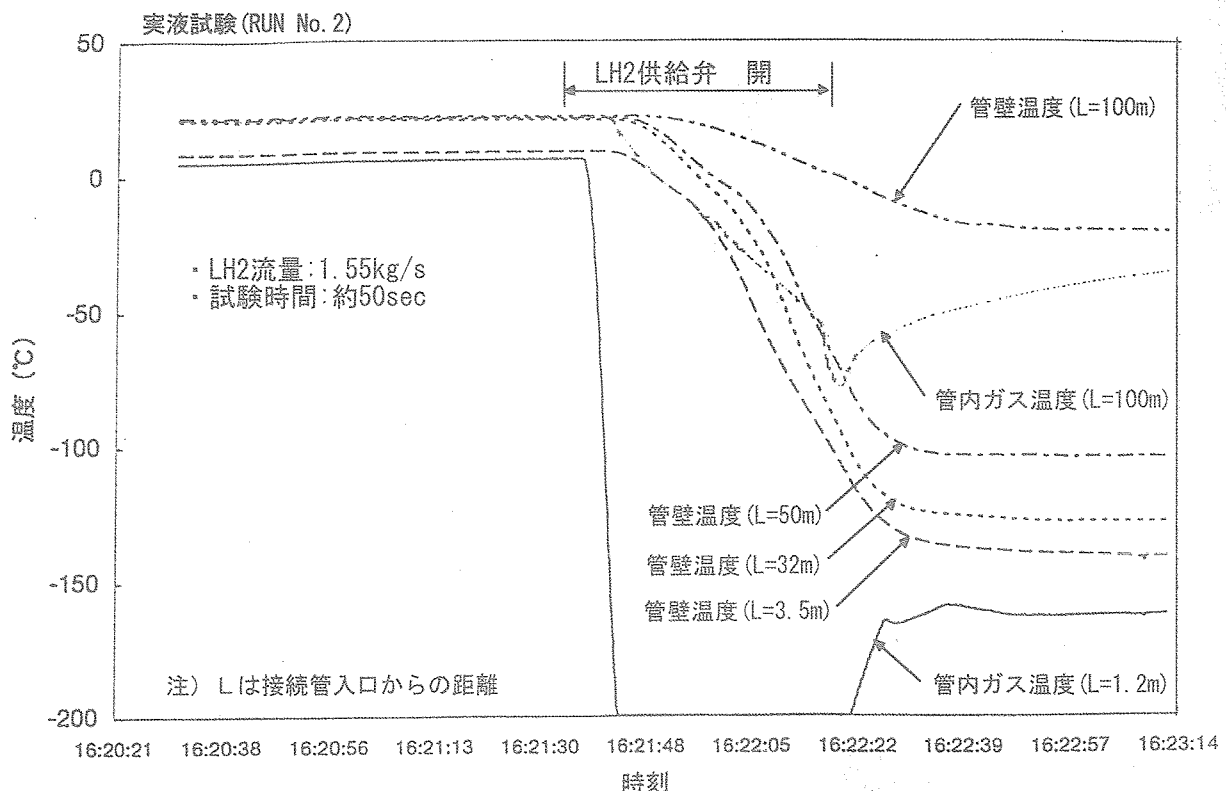


図 2-9 LH₂ 流し試験の結果

(a) 気化ガス流入時における各部のガス温度および管壁温度

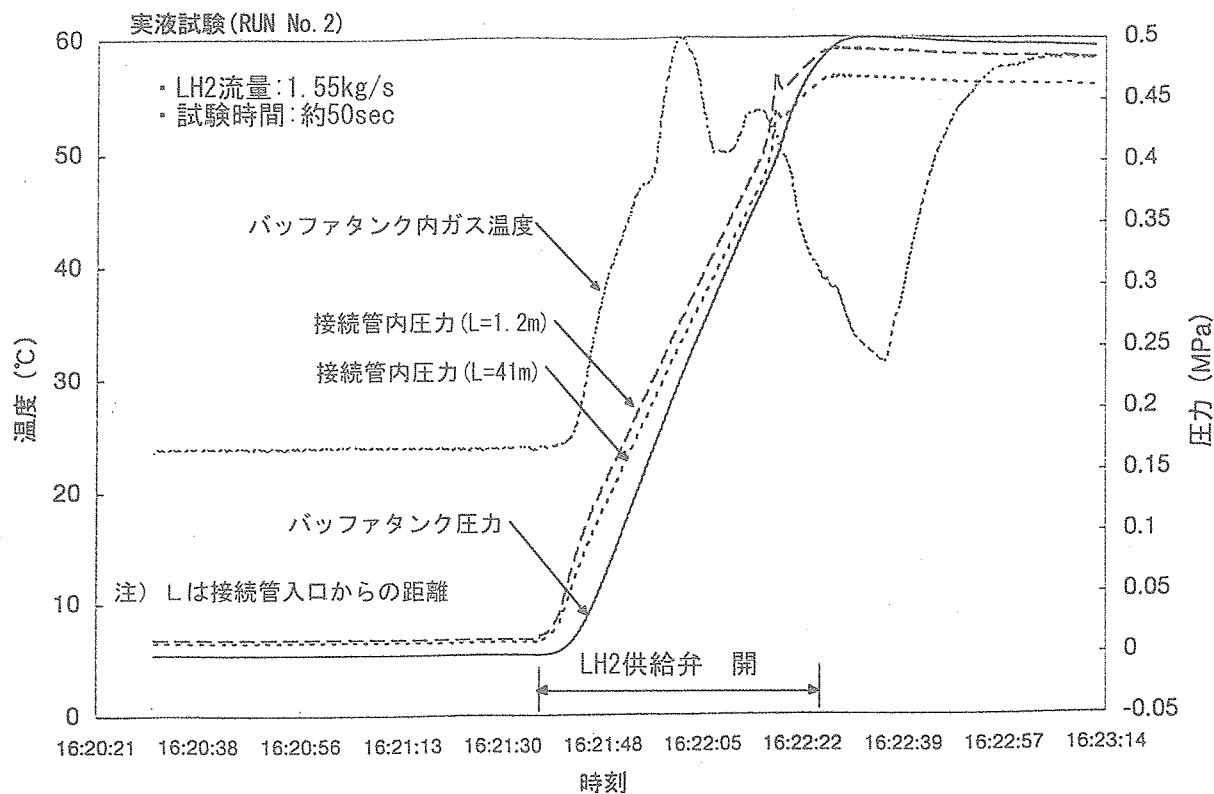


図 2-9 LH₂ 流し試験の結果
(b) 気化ガス流入時における各部の圧力とバッファータンク内ガス温度

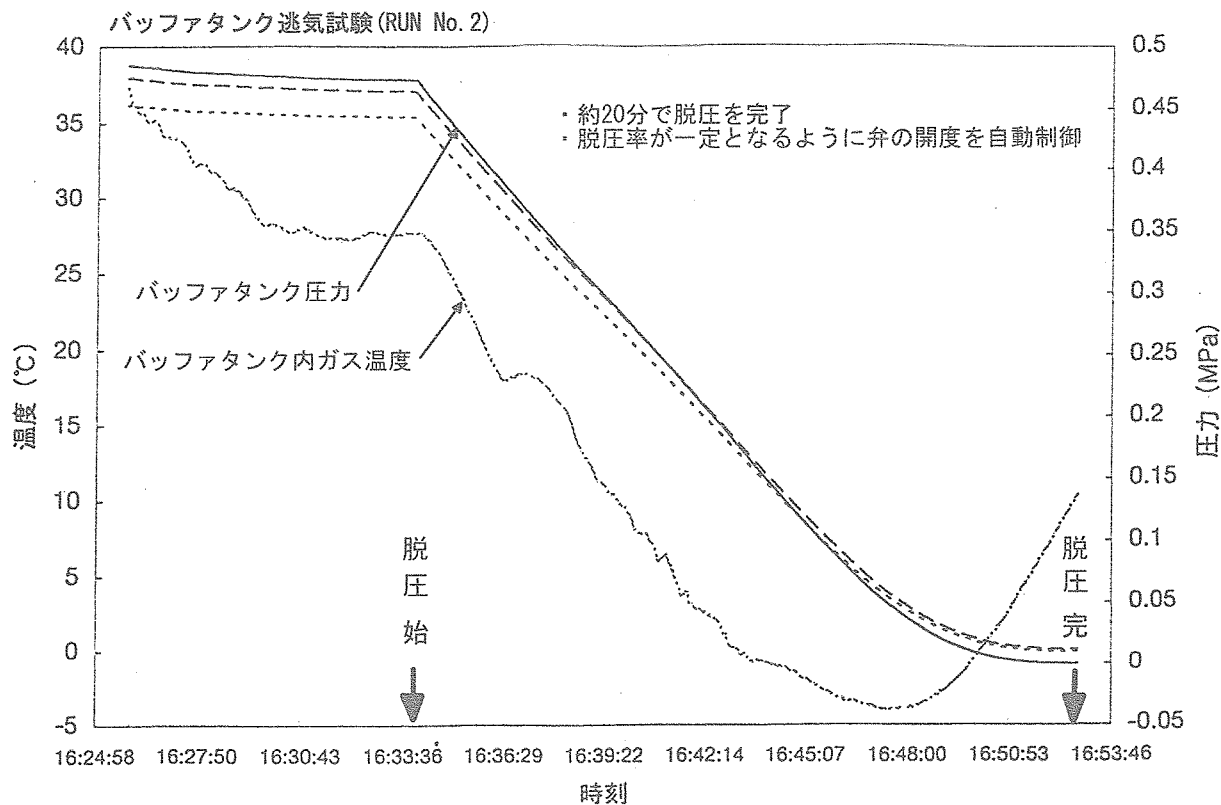


図 2-9 LH₂ 流し試験の結果
(c) バッファータンク逃気時における各部の圧力とバッファータンク内ガス温度

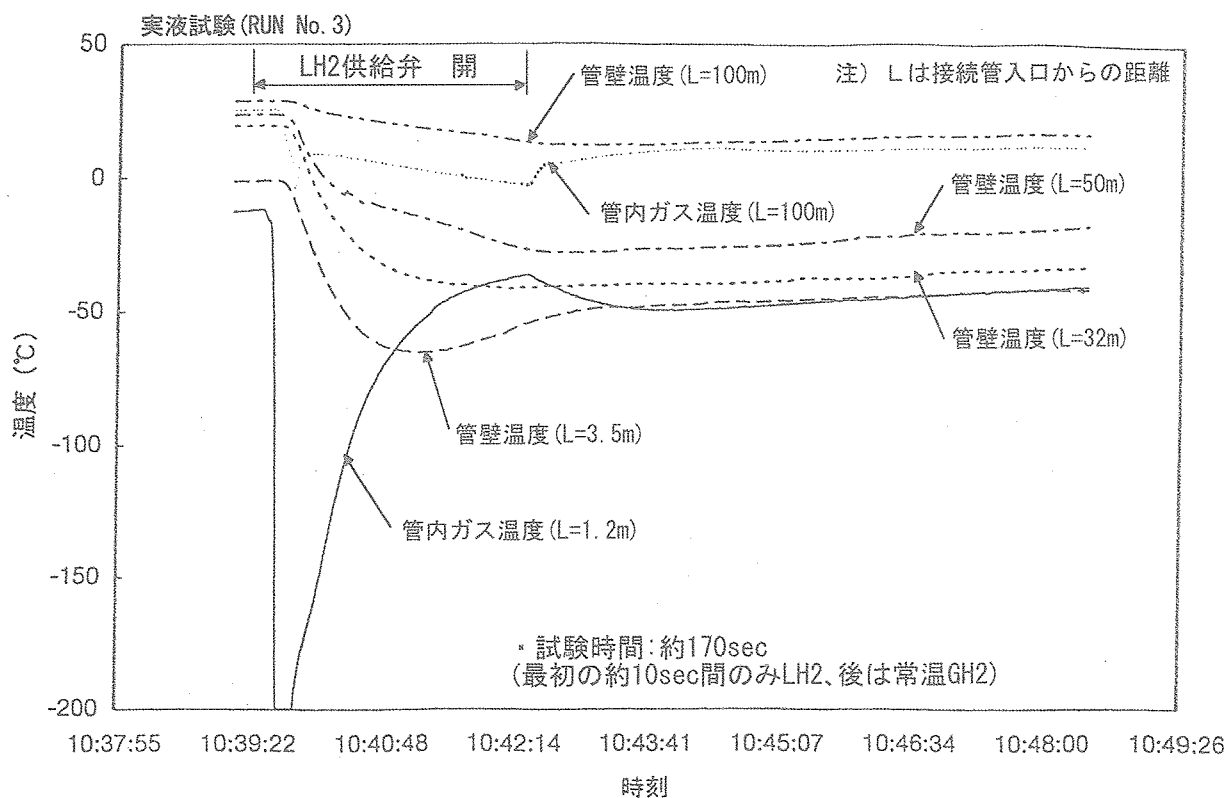


図 2-10 トランジェント試験の結果

(a) 気化ガス流入時における各部のガス温度および管壁温度

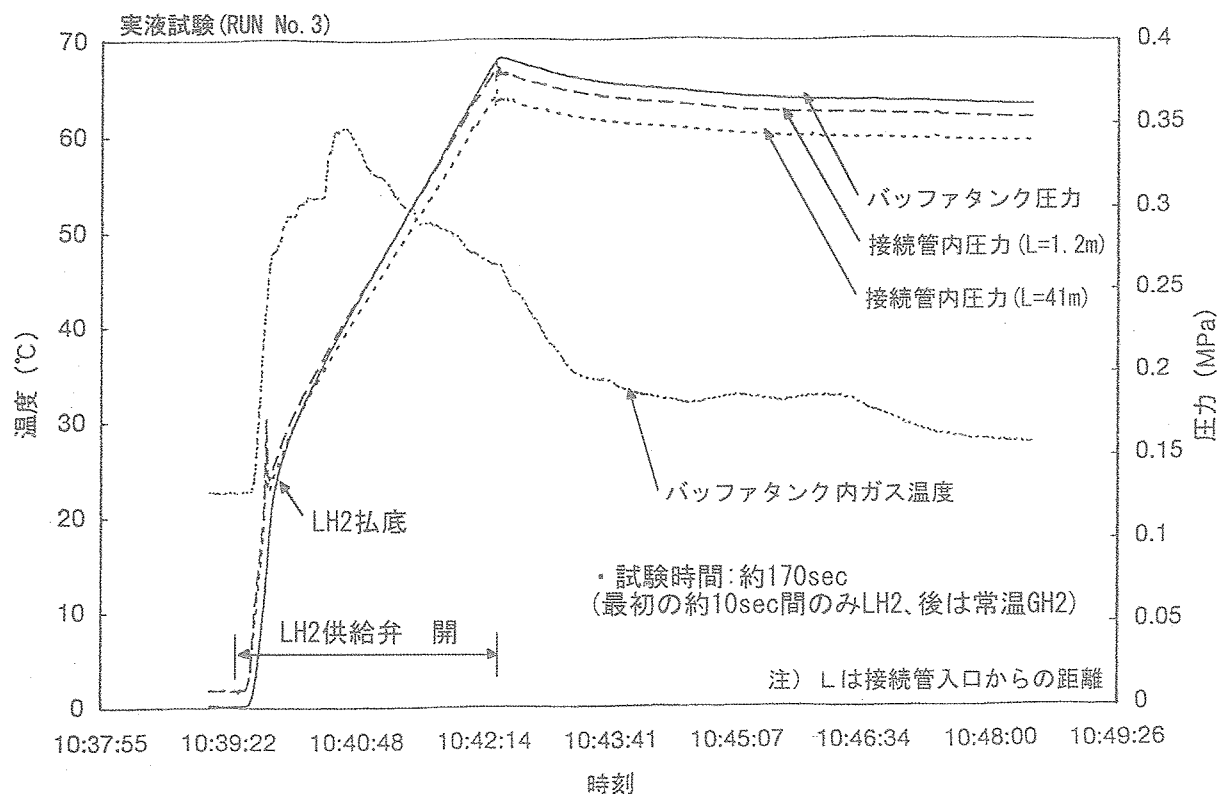


図 2-10 トランジェント試験の結果

(b) 気化ガス流入時における各部の圧力とバッファータンク内ガス温度

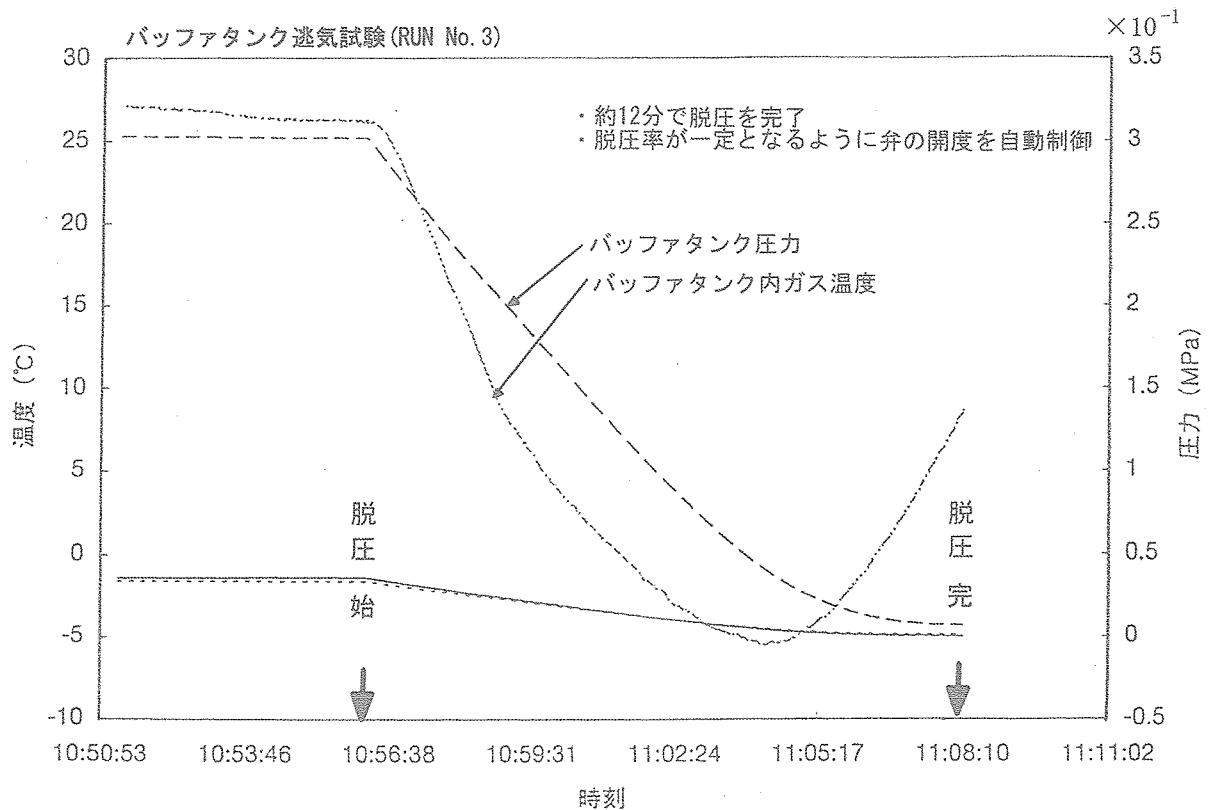


図 2-10 トランジェント試験の結果

(c) バッファータンク逃気時における各部の圧力とバッファータンク内ガス温度

3. 液化水素供給装置の取り扱い

LH₂ は大気圧における沸点が約-253℃の極低温液化ガスであるため、貯蔵時あるいは充填時の蒸発によるロスが大きいのが特徴である。また、LH₂ を扱うタンクおよび配管内に H₂ あるいは He 以外のガスが存在すると、凍結固化による流路閉塞等のトラブルを引き起こす恐れがあるため、使用前に H₂ あるいは He ガスによる十分な置換を行う必要がある。LH₂ を用いた試験では短期間に多数の作業が集中するため、事前に必要な作業を確認しその手順を十分に考えておかねばならない。

RJTF における LH₂ 試験では、作業は主として事前準備作業と試験当日作業との二つに分けられる。事前準備作業は各種ガス類の準備、タンク・配管の置換、LN₂ による予冷、断熱層の真空引き等の LH₂ 受け入れ準備であり、時間的にはそれほど窮屈にならないが、トラブルの発生に対処できるように余裕を持つて行う。この作業に必要な人員は、現場での操作に 2~3 人、必要に応じて設備制御盤の操作に 1 人、の計 3~4 人である。試験当日の作業は LH₂ の充填、配管の予冷等が主となるが、時間的な余裕が無いため、トラブルの発生は直ちに試験開始の遅れにつながる。試験当日作業 (LH₂ 関連のみ) に必要な人員は、現場での操作に 2~3 人、確認・記録に 1 人、設備制御盤の操作に 1~2

人、の計 4~6 人である。

水素を扱う装置の現場作業で使用する工具はベリリウム銅製の防爆用安全工具が望ましい。防爆用安全工具に用いられるベリリウム銅は、ベリリウムの含有量が 2% 前後のものであり、激しい打撃や摩擦を加えても火花を発生しない性質を有する。なお、防爆用安全工具の使用に関する法的規制としては、労働安全衛生法第 20 条、消防法第 24 条第 13 項、労働安全衛生規則第 279 条、船舶安全法危険物船舶運送及び貯蔵規則第 101 条第 3 項、が挙げられる。

3.1 LH₂ 受入れ準備手順

3.1.1 ガス類の準備

RJTF で液化水素 (LH₂) を使用する場合には、ベントスタックパージ用ガスおよび LH₂ 気化ガスバッファータンクの置換用ガスとして GN₂、LH₂ ランタンク内槽の置換用ガスとして GH₂、LH₂ 移送ラインの置換用ガスとして GHe、LH₂ ランタンクジャケットの予冷用寒剤として LN₂ が各々必要になる。これらのガス類は準備段階で余裕を持つて手配しておくようにするが、試験シリーズの途中で不足が見込まれる場合は随時、手配しなければならない。

LN₂ は N6CE および N7CE の 2 基の CE (Cold Evaporator) に貯蔵される。最大貯蔵量は N6CE が約

9000L、N7CE が約 11000L である。N7CE は主として高圧の GN_2 （常用最大圧=23.0MPa、貯気槽実容積=約 25m^3 、HATS 設備の貯気槽を含む）を製造するための LN_2 を供給し、N6CE は LN_2 および低圧 GN_2 （常用設定圧=約 0.62MPa）を供給する。N6CE、N7CE の配管系等および取扱い等については、末尾の付録 A を参照されたい。

GH_2 はトレーラー式容器（常用最大圧=19.6MPa、1 基あたりの実容積=13.1 m^3 又は 11.79 m^3 ）から供給する。容器置場には最大で 3 基のトレーラー容器を収容できる。通常、トレーラー容器は 2 基並列で使用するが、 LH_2 を用いる試験では GH_2 の消費量が多いため、予備の 1 基を加えて計 3 基のトレーラー容器を手配する。図 3-1 に、所定の位置に搬入された 3 基の水素トレーラーの写真を示す。

これまでに行った LH_2 冷却スクラムジェットエンジンの燃焼試験では、1 Run あたりの GH_2 容器の圧力降下は 0.8～1.2 MPa である。

GHe は隣接する HATS（High Altitude Test Stand）設備のカードル容器（常用最大圧=14.7MPa、実容積=1.41 m^3 ）から供給を受ける。

参考までに、M6S モードで LH_2 冷却スクラムジェットエンジンの燃焼試験を行う場合について、Run 前における諸ガス類の必要圧力および量の目安を表 3-1 に示す。



図 3-1 水素ガストレーラー容器の外観
（実容積 13.1 m^3 ×3 基）

3.1.2 配管およびバルブ類の確認

LH_2 供給装置の使用に先立って配管およびバルブ等の機器類の目視検査を行い、破損あるいは腐食等の異常が無いことを確認する。供試エンジンに至る LH_2 供給配管は多層巻真空断熱が施された二重管であるが、断熱層の真空度が低下すると断熱性が悪化するため、試験予定時期の直前の定期検査において真空引きを実施しておくことが望ましい。詳しくは末尾の付録 B を参照されたい。

次に、配管内に圧力が掛かっていないことを確認した後、遠隔操作弁の開閉操作を行って動作の確認を行う。遠隔操作弁の開閉には、アクチュエーターを駆動する GN_2 が必要であるため、後述 3.1.3 節 1) の手順で立ち上げる。もし、 GH_2 あるいは LH_2 が通る配管内に残圧がある場合には、ベントスタックを通して外部に放出する。遠隔操作弁に作動不良が見られる場合は、これまでの経験によれば以下の点が原因であることが多いので確認を行う。

- 1) 制御プログラムが LH_2 冷却モードになっていない。
- 2) 遠隔操作弁のアクチュエーター駆動ガスの大気放出口がハチの巢等で閉塞している。
- 3) 遠隔操作弁のアクチュエーター駆動ガスを切替える三方弁が固着している。
- 4) 遠隔操作弁に付属している駆動ガス用調圧器の出口圧が適正值でない。
- 5) 遠隔操作弁のグランドナットの締付けが過大である。
- 6) アクチュエーター部のゴム製ダイヤフラムが破損している。

RJTF の LH_2 供給装置からは、供試エンジンが設置される低圧室のほかに、同建屋内にある高温ガス流評価試験装置（通称、ラムジェット構造スタンド）にも LH_2 の供給が可能になっている。本資料ではラムジェット構造スタンドの詳細については触れないが、 LH_2 冷却エンジン試験時にはラムジェット構造スタンドに関係する 3 個の弁、LH-HV1（手動弁）、LH-RV11（遠隔操作弁、常時開）、GH-RV11（遠隔操作弁、常時閉）が閉になっている必要がある。LH-HV1 については、

表 3-1 Run 前に必要な諸ガス類の圧力および量（M6S モード LH_2 冷却エンジン試験時）

項 目	必要残量、必要圧力
液体窒素貯槽（N6CE、最大充填容量 9000L）	1500 Sm^3 （約 2000L）以上
液体窒素貯槽（N7CE、最大充填容量 11000L）	1500 Sm^3 （約 2000L）以上
水素ガス元圧（13.1 m^3 トレーラ容器×3 基）	15 MPaG 以上（トレーラ容器、二基並列使用）
ヘリウムガス元圧（1.41 m^3 カードル容器）	6 MPaG 以上（HATS 建屋設置）
窒素ガス元圧（貯気槽、HATS+RJTF 計 約 25 m^3 ）	17 MPaG 以上

RJTFにおけるLH₂冷却試験シリーズに入る前に閉(又は閉確認)にしておけば良い。LH-RV11 および GH-RV11 については、これらの弁が開であると、RJTFの制御装置にインターロックがかかって試験シーケンスが進まなくなるため、試験時には閉としておく。両弁の内、GH-RV11 は常時閉弁であるので、LH-RV11 だけを閉にすれば良い。この際、ラムジェット構造スタンド室内にある送気台を操作して LH-RV11 を操作するための計装用 GN₂ (設定 0.7MPaG、RJTF 側とは別系統) を立ち上げておかなければならない。ラムジェット構造スタンドの水素系統については、末尾の付録 C の図 C-1 を参照されたい。

3.1.3 LH₂ 気化ガス処理用バッファータンクの窒素ガス置換

LH₂ 冷却試験シリーズに入る前に、空気が含まれている可能性がある内部の残留ガスを窒素ガスで置換し、流入してきた水素ガスが燃焼あるいは爆発する可能性を除去しておく。置換は窒素ガスによってタンク内のガスを 1%以下(容積割合)まで希釈することによって行う。この際、大量の窒素ガス(約 2400 Sm³)を使用するため、事前に GN₂ 気蓄器に十分な量の GN₂ (気蓄器圧で 20 MPaG 以上)を貯めておく必要がある。高圧 GN₂ 製造設備およびその取り扱いについては、末尾の付録 D を参照されたい。また、置換作業には 1.5 日程度を要するため、余裕を持って早めに行う。

手順は次の通りである(以後に記述する弁等のタグ番号は、図 2-2 および付録 E を参照のこと)。

1) 計装用GN₂系の立上げ

- ・HOV-414[開] → PRV-404[操作してPI-403指示値を約1.6MPaGに調整]
- ・HOV-415[開] → PRV-405[操作してPI-404指示値を約0.8MPaGに調整]
- ・HOV-424[開]

2) 置換作業(計測制御室からの遠隔操作)

- ・ROV-581、PCV-582[全開] → ROV-5001[開]
- ・PCV-5002[全開] → SV-4001[開] (タンクに窒素ガス導入)
- ・PE-5001指示値の監視(0.6MPa_{abs.}に達するまで待つ。約4 hrを要する。)
- ・SV-4001[閉] → PCV-5002[全開](約0.1MPa_{abs.}までタンク内ガスを逃気する。)
- ・上記の置換操作を合計3回実施する。(1回あたり約4hrを見込む)
- ・ROV-5001[閉]

3.1.4 LH₂ コンテナ接続用フレキホース類の準備

通常、LH₂の搬入は2000L コンテナ2基で行われる。コンテナ内のLH₂は外部からの熱の侵入によって気化するため、この気化ガスを設備側のベントスタックに放出するために逃気管を接続する必要がある。また、LH₂を設備側のランタンクに充填して使用するためには移送管を接続する必要がある。更に、置換用ガスとして GHe を供給するための管を接続しなければならない。

これらの接続管として合計5本のフレキシブルホースを使用する。すなわち、コンテナ内気化ガス逃気用が2本(FX-528, FX-528-2)、GHe 供給用が2本(FX-529, FX529-2)、LH₂ 移送用が1本(FX-530)である。この内、LH₂ 移送用は真空断熱された二重フレキシブルホースである。これらのホースは、通常、HATS 設備のボイラー室に隣接するラムジェット整備棟に格納してあるので、LH₂ コンテナが入荷する前に LH₂ ランタンク付近に移動しておく。フレキシブルホースの移動に際しては、過度の曲げ、ねじりを加えたり、潰したりしないように慎重に取扱う。なお、これらのフレキシブルホースは、LH₂ コンテナが入荷する前に、その一端を設備側の接続口に接続しておく。図 3-2 に、設備側と接続された5本のフレキシブルホースの写真を示す。接続作業にあたっては、配管内部に侵入する外気を少なくするために接続部の周囲をビニールで覆い、可能な個所は設備側配管から GHe をパージしながら行う。

手順は次の通りである。

1) パージ用GHe系の準備

- ・後述の3.1.6節1) の手順で低圧GHe供給系を立ち上げる

2) LH₂移送用フレキホースの接続

- ・HOV-558上流側接続口のブラインドキャップを撤去 → HOV-576 [開] (Heパージ)
- ・パイオネット継手部のノーズシールおよびOリングに損傷が無いことを確認する
- ・FX-530フレキホースの一端(ストレートエンド側)を設備側に挿入する
(挿入時はHOV-576を[微開]にしてHeを漏らしながら行う)
- ・接続部をクランプで固定 → HOV-576 [閉]

3) GHe供給用フレキホースの接続(2本)

- ・CV-533、CV-533-2下流側接続口のブラインドキャップを撤去
- ・HOV-460、HOV-460-2 [開] (Heパージ)
- ・FX-529、FX529-2フレキホースの一端(どちら側でも可)を設備側に接続する

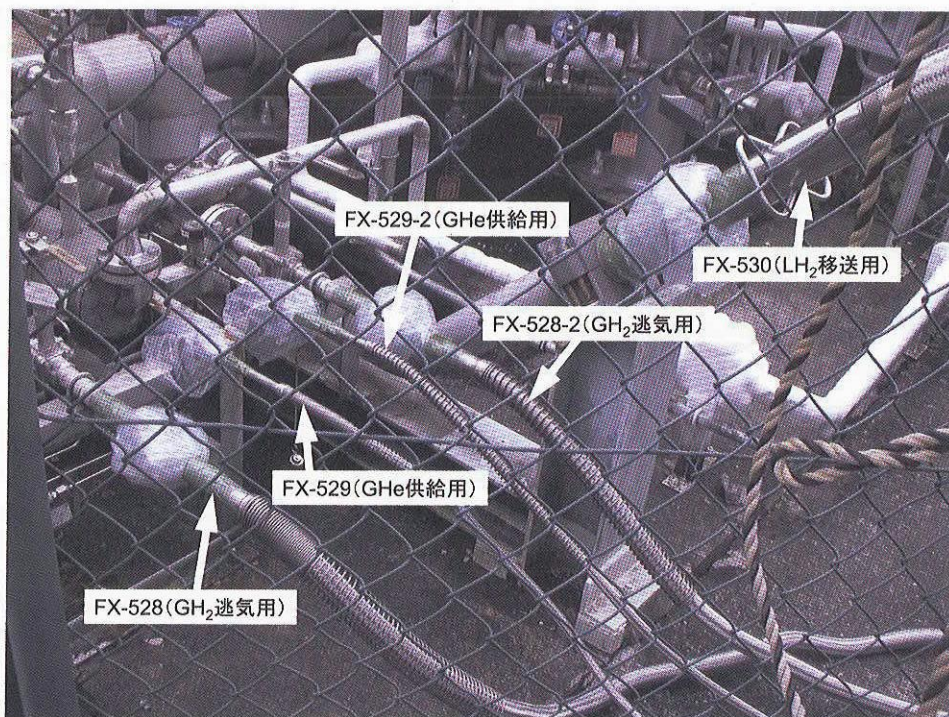


図 3-2 コンテナ接続用フレキホースと RJTF 側との接続状況

(接続時はHOV-460、HOV-460-2を [微開] にする)

- ・ 接続部の袋ナットを締める → HOV-460、HOV-460-2 [閉]

4) コンテナ気化ガス(GH₂)逃気用フレキホースの接続 (2本)

- ・ HOV-461、HOV-461-2上流側接続口のブラインドキャップを撤去
(HOV-461、HOV-461-2は [閉] のままとする)
- ・ FX-528、FX528-2フレキホースの一端 (どちら側でも可) を設備側に接続する
- ・ 接続部の袋ナットを締める
(本フレキホース内のGHe置換は他端をLH₂コンテナに接続した後にやる)

3.1.5 LH₂ランタンク内槽の水素ガス置換

LH₂ランタンクには約 20K の可燃性極低温液化ガスが充填されるため、内部に H₂ あるいは He 以外のガスが存在すると凍結固化して流路閉塞等のトラブルを生じる恐れがある。このため、タンク内の温度を下げる予冷作業に先立ち、ランタンク内槽を GH₂ あるいは GHe で十分に置換しておく必要がある。置換作業は初めにタンクの内部に入っていたガスが 50 Vol.ppm 以下まで稀釈されるように行う。なお、末尾の付録 F に置換の指針を示したので参照されたい。ランタンクの場合は容積が大きいので、置換用ガスとして GH₂ を用いる。置換操作は、タンクを 1MPaG に加圧後、脱圧

を行う操作を 5 回繰り返して行う。その後、ランタンクジャケットを予冷する際にタンク内槽が負圧になることを防ぐために、ランタンク内槽に約 1 MPaG の GH₂ を封入しておく。この作業に必要な GH₂ の量は約 60 Sm³であり、水素トレーラーを 1 基使用した場合には、作業終了後にトレーラー容器の圧力が約 0.5MPa 低下する。なお、ランタンク内槽の置換、GH₂ 封入作業は、ランタンクジャケットの LN₂ 予冷を開始する前までに完了しておく必要がある。

手順は次の通りである。

- 1) 計装用GN₂系の立上げ
 - ・ 3.1.3節の 1) の操作に加え、以下を行う (PCV-553 駆動用ガスの立上げ)
 - ・ HOV-413 [開] → PRV-403 [操作してPI-402指示値を10.5MPaGに調整]
 - ・ HOV-422 [開確認]
- 2) 水素ベントスタックページ用GN₂系の立上げ
 - ・ N6CEの状況確認 (加圧されていないければ、後述の3.1.7節1) の手順で加圧する)
 - ・ N6CE送液弁 LV-4 [開] (2～3回転)
 - ・ SV-593 [開、又は開の確認] (遠隔ベントスタックページ弁、必要に応じて開閉する)
 - ・ HOV-425 [開] (開度0～90°の範囲で窒素ガスの流量を調整する。通常、20～30°程度)
- 3) 置換用GH₂供給準備 (GH₂トレーラー ～ PCV-553 上流までの圧張り)

- ・ GH₂トレーラー搬入、設備側配管と接続、配管内のGH₂置換（早めに準備をしておく）
- ・ HOV-523、-524、-525 [開]（3系統の内、使用する系統を開ける）
- ・ GH₂トレーラー元弁 [開]（使用する系統を開ける）
- ・ HOV-551 [開]
- ・ HOV-500 [開] 均圧後 → ROV-500 [開]（遠隔操作）
- 4) 置換作業（計測制御室からの遠隔操作）
 - ・ HOV-565 [開確認]
 - ・ ROV-554 [閉] → ROV-553 [開] → PCV-553 [操作してタンク内を約1MPaGに加圧]
 - ・ ROV-553 [閉] → ROV-554 [開]（タンク内をほぼ大気圧になるまで脱圧）
 - ・ 上記の置換操作を合計5回実施後、タンク内を約1MPaGに保圧する。
（ROV-553[閉]、ROV-554 [閉]、PCV-553 [ドーム圧を開放] 状態で保持）
 - ・ HOV-551 [閉]、GH₂トレーラー元弁[閉]
 - ・ HOV-413 [閉]、PRV-403[開放]、HOV-419 [開]（残圧放出）
 - ・ SV-593 [閉] 又はHOV-425 [閉]（水素ベントスタックへのGN₂供給を停止）
 - ・ ランタンク内にGH₂を封入している間は計装用GN₂は立上げたままにする。

3.1.6 LH₂ 供給配管のGHe 置換

LH₂ 供給配管は前節の LH₂ ランタンクと同様に約20Kの極低温となるため、内部を十分に置換してから使用しなければならない。置換の目安はLH₂ ランタンクの場合と同様、50 Vol.ppm 以下とする。置換用ガスとしてGHeを用いる。置換操作は配管内をGHeによって0.5MPaGまで加圧後、脱圧を行う操作を6回繰り返すことによって行う。なお、配管内の置換作業はLH₂ ランタンクにLH₂の充填を開始する前に完了しておく必要がある。

手順は次の通りである。

- 1) 置換用GHeの準備（低圧GHe系）
 - ・ GHeカードル元弁 [開] → HOV-459 [開]（HATS建屋内）
 - ・ HOV-452 [開] → PRV-451 [操作してPI-452指示値を0.7MPaGに調整]
 - ・ HOV-458 [開]
（高圧GHe系、本作業では使用しないが試験時に必要となる）
 - ・ HOV-451 [開] → PRV-450 [操作してPI-451指示値

を0.5MPaGに調整]

- ・ HOV-457 [開]

2) 置換作業

- ・ HOV-558、-561、-563、-565、-567、ROV-575、-578、-579 [閉、又は開確認]
- ・ HOV-564、ROV-569、FCV-575 [開]
- ・ HOV-559 [開]（PI-526の指示が0.5MPaGに達するまで待つ）→ HOV-559 [閉]
- ・ HOV-561、-563、-567 [開→閉]（上記と並行して枝管部にガスを流して稀釈する）
- ・ ROV-575およびROV-578 [開]（PI-526の指示がほぼ0MPaGに低下するまで待つ）
- ・ ROV-575およびROV-578 [閉] → HOV-559 [開]（配管内を0.5MPaGまで再加圧）
- ・ 上記の置換操作を6回繰返した後、配管内を約0.1MPaGに加圧する。
- ・ HOV-558、HOV-564、ROV-569、FCV-575 [閉]
- ・ ROV-575、ROV-578 [開]（ライン放出弁）

3.1.7 LH₂ ランタンクジャケットのLN₂ 予冷

LH₂ ランタンク内槽のジャケットにLN₂を流して予冷を行う。予冷作業はランタンクにLH₂の充填を行う前日に行い（それ以前に行っても特に支障は無い）、ジャケットにLN₂を満たしたまま一晩放置してタンク内槽をLN₂温度近くまで冷却する。LN₂はN6CEから供給するが、予冷初期の段階では、ジャケットに流入するLN₂の量が多過ぎると液の突沸（flashing）によって配管内の圧力が供給圧以上になるため、ジャケット内の圧力を監視しながら圧力が過大とならないようにLN₂の流入量を調節する。また、急激な予冷は熱歪みによるタンクへの悪影響が懸念されるため、4～5 hrの時間をかけて緩やかに行うようにする。ジャケット内にLN₂を満たして一晩放置し、翌朝、タンク内槽温度を確認して予冷不足であれば追加予冷を行う。なお、予冷に必要なLN₂の量は約1000 Sm³である。

手順は次の通りである。

- 1) LN₂供給準備（N6CEの加圧操作、0.5～1 hrを見込む）
 - ・ GV-2 [閉]（N6CEの放出弁）
 - ・ LV-3 [開]（N6CEの加圧弁、開度＝2～3回転、到達圧は約0.63 MPaG）
- 2) LN₂によるジャケット予冷
 - ・ HOV-430、HOV-431、HOV-432 [閉]
 - ・ HOV-429 [全開]
 - ・ LV-5 [全開]（N6CEの送液弁、徐々に開ける）
 - ・ HOV-431 [微開]（1/8～1/4回転で1hr程度流す。

PI-453指示値を監視)

- ・PI-453の指示が変動してCE圧を超過する場合はHOV-431を絞る
- ・PI-453指示が安定していること確認した後、HOV-431の開度を増す(<1回転)
- ・PI-528指示を監視(タンク内槽圧、0.1MPaG以下ならGH₂により加圧する)
- ・ジャケット出口側配管(HOV-429付近)の冷え具合を監視
- ・TE-529指示値でタンク内槽下部温度の変化を監視(制御室)
- ・ジャケット放出口からの安定したLN₂流出音を確認(放出口はHATS西側の側溝内)
- ・TE-529指示が90K以下であれば予冷完了とする
- ・LV-5, HOV-431 [閉] → HOV-432 [開] (HOV-432は液封防止のため速やかに開く)
- ・ジャケット内にLN₂を貯めたままで一晩放置する
- ・翌朝、TE-529指示確認(85K以上ならばLN₂による追加予冷を実施)

3.2 LH₂ コンテナの受入れ

3.2.1 コンテナの荷下ろし

2000L-LH₂ コンテナが到着したら、所定の位置に下ろすように指示を与える。なお、RJTFには荷下ろし用の設備が無いので、LH₂ 発注時にトラッククレーン又はクレーン付トラックが必要であることを伝えておくこと。図3-3にトラックからコンテナを荷降ろし中の様子を示す。通常、コンテナは二基同時に搬入されるが、コンテナを下ろす位置によっては、接続用フレキホース類が届かない恐れがある。このため、LH₂ コンテナがフレキホース類と接続可能であることを必ず確認した後に、トラックおよびクレーン車を帰すようにする。図3-4(a)および図3-4(b)に各々、LH₂ コンテナの

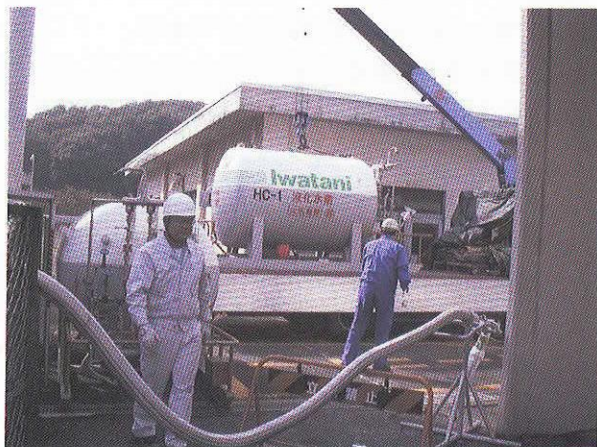


図3-3 2000L-LH₂ コンテナの受け入れ風景

異なった設置例を示す。

LH₂ コンテナの重量は製造メーカーによって若干異なり、1基あたりの総重量は1592～1842 kgである。このうち、LH₂の正味重量は約142kgであるから、コンテナの空重量は1450～1700 kgとなる。

3.2.2 アース線接続および圧力・液量の確認

コンテナの荷下ろしが完了したら、直ちにコンテナに付属しているアース線をN6-CE近傍の防護壁にあるアース棒(GN₂用フィルターFL-400の後側に位置する)に接続する。次に、コンテナ内の圧力および差圧計による液量の確認を行う。なお、差圧計は電気式であるため、確認する際はコンテナ右側下にある電池箱付近にある電源スイッチを入れてから行う。通常、搬入時の圧力は0.06～0.19 MPaG、差圧計は69～72 mm H₂O(液量で1900～2000L)の範囲である。LH₂ コンテナは大阪府または兵庫県から運ばれてくるため、到着までの所要日数によってコンテナの内圧が異なってくる。



図3-4 2000L-LH₂ コンテナ設置状況
(a) 設置例1



図3-4 2000L-LH₂ コンテナ設置状況
(b) 設置例2

3.2.3 フレキホース類の接続および GHe 置換

既に設備側配管に一端が接続されている、フレキホース類の残りの一端をコンテナ側に接続し、ホース内部を GHe で置換する。なお、LH₂ コンテナの最高使用圧力は 0.392 MPaG (4 atg) であるため、GHe パージ系の供給圧は 0.392 MPaG 以下に設定する。

手順は次の通りである。本手順では、(株)日本化学機械製造製の LH₂ コンテナを例にとりて記述する。他に、(株)ティサン（現在は(株)ジャパン エア ガシズ）製造の LH₂ コンテナも使用される。両コンテナは配管系統、機器類のタグ番号等に若干異なる部分があるが、基本的な構成はほぼ同じである。図 3-5 に LH₂ コンテナにフレキホース類を接続した様子を示す。末尾の付録 G に、2000L-LH₂ コンテナの配管系統および差圧と LH₂ 液量の換算図表を示したので、必要に応じて参照されたい。また、末尾の付録 H に、LH₂ の製品安全データシート (MSDS) の一例を示したので、取り扱いをする際の参考とされたい。

手順は次の通りである。

1) GHe 供給用 FX-529、FX-529-2 の接続

- ・ 3.1.6 節 1) の手順で GHe 供給系を立ち上げる（但し、設定圧は 0.39 MPaG とする）
- ・ FX-529 接続端およびコンテナ側 GV-7 弁上流配管のブラインドキャップを撤去
- ・ HOV-460 [開] とし、フレキホース内を GHe でパージ
- ・ 少量の GHe を流しながらフレキホース FX-529 をコンテナに接続
- ・ HOV-460 [閉]
- （FX-529-2 についても同じ手順で接続する。HOV-460 は HOV-460-2 に読み代える。）

2) コンテナ内気化ガス逃気用 FX-528、FX-528-2 の接続

- ・ FX-528 接続端およびコンテナ側 GV-2 弁下流配管の

ブラインドキャップを撤去

- ・ HOV-460, GV-7 [開] とし、配管内を GHe でパージ
- ・ HOV-461 [閉]
- ・ 少量の GHe を流しながらフレキホース FX-528 をコンテナに接続
- ・ GV-7 [閉] → HOV-461 [開]（ガスの放出）
- ・ HOV-461 [閉] → GV-7 [開] → GV-7 [閉] → HOV-461 [開]（本操作を 6 回繰り返す）
- （FX-528-2 についても同じ手順で接続する。HOV-461 は HOV-461-2 に読替る。）

3) LH₂ 移送用 FX-530 の接続

- ・ LV-1, GV-2, HOV-461 [閉、又は閉確認]
- ・ FX-530 接続端およびコンテナ側 LV-1 弁の下流側配管のブラインドキャップを撤去
- ・ HOV-460, GV-7, GV-5 [開] とし、コンテナ側の配管内を GHe でパージ
- ・ HOV-576 [開] とし、フレキホース内を GHe でパージ
- ・ GV-5, HOV-576 [微開] とし、フレキホースをコンテナ側に接続
- ・ HOV-460, HOV-576, GV-7 [閉]
- ・ HOV-461 [開]
- ・ GV-5 [閉] → HOV-576 [開] → HOV-576 [閉] → GV-5 [開]（本操作を 6 回繰り返す）
- ・ GV-5, GV-7, HOV-460, HOV-576 [閉、又は閉確認]
- すぐに LH₂ をランタンクに充填しない場合には、
- ・ GV-2 [開] (H₂ ベントスタックの GN₂ パージ確認後、開とする。)
- ・ 置換用 GHe 系の圧を落とす
- （残りの一基のコンテナに接続する場合には、HOV-460 と HOV-461 は各々、HOV-460-2 と HOV-461-2 に読替える。）

3.2.4 コンテナ内気化ガスの逃気

LH₂ コンテナの輸送中は外部に可燃性ガスが放出されないように閉め切っておくため、熱侵入により LH₂ の温度が上昇する結果、着荷時にはコンテナの内圧が高まっている。これまでの経験では、貯液量が約 2000L の場合でコンテナ内圧の上昇率は約 0.1 MPa/day である。コンテナの最高使用圧力は 0.392 MPaG (4 atg) であるが、通常の使用においては 0.343 MPaG (3.5 atg) を超えないように注意する。もし、コンテナを搬入した当日に LH₂ を使用する予定が無ければ、コンテナ内の気化ガスを逃気して脱圧する。使用時以外は常時、気化ガスをベントスタックに放出しておく。なお、気化水素は設備側の水素ベントスタックを通して放出するが、水素ガス放出中は常時、GN₂ によるベントスタ

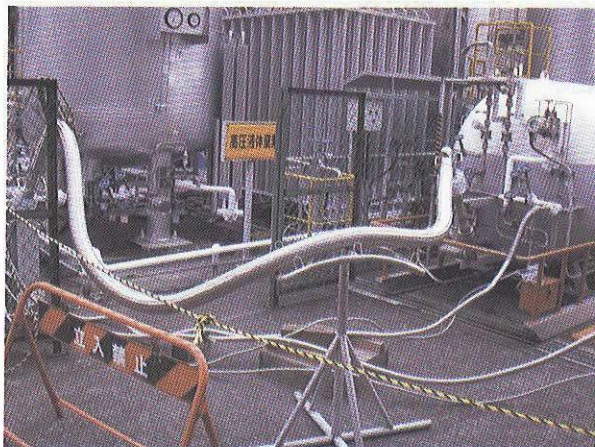


図 3-5 2000L-LH₂ コンテナとフレキホースの接続状況

ックのパージを行う。GN₂ パージ流量は GH₂ の放出量により適宜、調節するが、コンテナの内圧が大気圧付近まで低下した後は小流量として良い。

コンテナの脱圧手順は次の通りである。

- ・ベントスタックパージ用GN₂の供給（前述の3.1.5 節2）の手順で行う）
- ・HOV-461, HOV-461-2 [開]
- ・GV-2 [開]（コンテナ2基とも開とする）

3.3 ランタンクへの LH₂ 充填

3.3.1 ジャケット内残留 LN₂ の排出

LH₂ 充填作業前に、タンクジャケットの上部側を GHe で加圧して、ジャケット内の LN₂ をドレン弁から全量排出する。通常、LN₂ の排出作業には約 1 hr を要する。

具体的な手順は次の通りである。

- ・3.1.6 節1) の手順でGHe供給系を立ち上げる
- ・HOV-429 [閉] → HOV-459 [開]（PI-453を監視、0.7MPaG以下に保つ）
- ・HOV-430 [開]（ジャケット内のLN₂の放出）
- ・LN₂の排出が完了（HATS西側にある側溝内の放出音で確認）したら、HOV-430 [閉]
- ・ジャケット内圧が0.6 MPaGに達するまでGHeの導入を継続する
- ・HOV-459 [閉]（ジャケットへGHe封入完了）

3.3.2 LH₂ ランタンク内に封入された GH₂ の逃気

この作業はランタンクに LH₂ を充填する直前に行う。水素ベントスタック内に投入されている GN₂ パージの流量を増加させてから、LH₂ ランタンク内に封入されている GH₂ をベントスタックから逃気する。ランタンクが常温のときに封入した GH₂ の圧力が約 1 MPaG であったとすれば、LN₂ によるジャケット予冷後は 0.2 MPaG 程度にまで低下しているはずである。

具体的な手順は次の通りである。

- ・SV-593[開確認]
- ・HOV-425[開度調整]（水素ベントスタックパージ用GN₂流量を増す）
- ・ROV-554[開]（ランタンク逃気弁の開、計測制御室からの遠隔操作）
- ・ランタンク内槽圧がほぼ大気圧まで低下することを確認する

3.3.3 LH₂ 充填

前節の作業と同時進行で LH₂ コンテナを 0.15～0.25MPaG に加圧する。コンテナ内の残液量が少ない

（液位計の指示が 40 mm Aq 程度以下）場合には、自己加圧能力の低下により充填中のコンテナの昇圧が困難になるため、できるだけ高めの圧力とする。配管系統上は、外部から GHe を導入してコンテナの昇圧を行うことが可能であるが、LH₂ の供給会社が外部ガスの導入に起因するコンテナ内の汚染を嫌うため、原則として、外部から供給するガスを用いてコンテナの加圧を行ってはならない。

LH₂ 充填ラインの予冷を行う際には、LH₂ が突沸（flashing）を起こしてラインの圧力が過上昇する場合があるので、配管が十分に冷えるまでは小流量で行う。また、予冷を行う際に使用する予冷放出ラインは断熱されていないため、LH₂ 温度付近まで冷えると表面に大量の液化空気が生成する。この場合、O₂ は N₂ よりも液化温度が高いため、生成した液化空気中には高濃度の O₂ が含まれる可能性が大きい。安全保持の面から、換気の良くない場所では不必要に多量の液化空気を生成させないように注意する。

ランタンクに充填する LH₂ の最大量は内容積の 90%（制御室モニター上で 88.4%、現場の液位計差圧で 1.622kPa）とし、溢れるまで充填してはならない。ランタンクに充填された LH₂ 液量と差圧の換算図表を末尾の付録 I に示したので必要に応じて参照されたい。ランタンク内に LH₂ が溜まるにつれて、タンクジャケット内に封入した GHe が冷やされてジャケット内圧が低下するため、適宜、GHe を補充する。ジャケット内圧が大気圧よりも低下した場合には、大気吸引の可能性が高くなり、大気の凍結固化による配管閉塞等のトラブルを引き起こす恐れがある。コンテナの液位計が約 6 mmAq 以下になったら充填を終了し、必要ならば、別のコンテナに切換えてからランタンクへの充填を再開する。コンテナ内の液がほとんど無くなった状態で充填を続けると、ランタンクには低温の GH₂ が入り込むため、既に溜まっている LH₂ を蒸発させてしまう。なお、LH₂ 移送用フレキホース（FX-530）を他のコンテナに切換える場合は、ホース内部に GHe ガスを通して常温まで昇温してから行う。

具体的な手順は次の通りである。

- ・液位計（LI-1）の電源をONにする（スイッチはコンテナの右側面下部にある）
- ・GV-2 [閉]（LH₂ コンテナ逃気弁）
- ・LV-2 [開]（LH₂ コンテナ自己加圧弁）
- ・圧力計（PI-1）が目標圧（0.15～0.25MPaG）に達したら、LV-2 [閉] とする
- ・HOV-565、ROV-569 [開確認]
- ・HOV-558、HOV-564 [開]
- ・HOV-561、HOV-563、HOV-567、HOV-572 [開]

(予冷放出ライン)

- ・ LV - 1 [微開] (1/8～1/4回転程度)
- ・ PI-526の指示を監視 (コンテナ圧よりも極端に高くない様にLV-1を調整する)
- ・ コンテナ圧を確認し、目標圧を下回りそうな場合にはLV-2 [開] として加圧する
- ・ 予冷放出ラインの冷え具合を監視 (配管表面に液化空気が生成するまで予冷する)
- ・ HOV-567を除き、予冷が完了したラインの放出弁を [閉] とする
- ・ HOV-565 [開] 後、HOV-567 [閉] とする (ランタンクにLH₂の充填開始)
- ・ コンテナ圧が0.2MPaG以下であれば、LV-2を [全開] とする
- ・ LV-1の開度を大きくする (最大でも1回転程度で充分、PI-526の指示を監視)
- ・ LIA-520 (ランタンク液面計) 指示を監視 (液が溜まり始めるまで5～10分を要す)
- ・ PI-453指示値 (ランタンクジャケット圧) に注意し、負圧にならないようにする (HOV-459を通してGHeを補充し、LH₂充填終了時で0.1～0.2MPaG程度に保つ)
- ・ LIA-520指示値が1.622kPa (= ランタンク容積の90%相当) に達したら充填終了 (LIA-520指示値は変動するため、平均的な値で判断する)
- ・ LV-1、HOV-565 [閉]
- ・ 速やかに、HOV-561、HOV-563、HOV-567、HOV-572を [開] とする
- ・ LV - 2 [閉] (引続き、後述の3.4.3の予冷作業を行う場合は、コンテナ圧を0.2MPaG程度に保つ)
- ・ GV - 2 [開] (引続き、後述の3.4.3の予冷作業を行う場合は [閉] のままとする)

3.4 試験手順

3.4.1 計装用ガス類の準備状況の確認

以下に記す3.4.2から3.4.5の手順は一連の作業として行う必要がある。このため、事前に計装用GN₂系、GHe系およびLH₂ランタンク加圧用GH₂等の供給準備が完了していることを確認する。まだ済んでいない事項がある場合には供給可能な状態にする。

具体的には次の通りである。

- ・ 計装用GN₂が供給可能状態にあること (手順は3.1.5節1) を参照)
- PI-402指示 : 10.5MPaG、PI-403指示 : 1.6MPaG、PI-404指示 : 0.8MPaG
- ・ N6CEがGN₂供給可能状態にあること (手順は3.1.7

節1) を参照)

- ・ 水素ベントスタックにGN₂パージがされていること (手順は3.1.5節2) を参照)
- ・ GHe系が供給可能状態にあること (手順は3.1.6節1) を参照)
- PI-452指示 : 0.7MPaG (低圧系)、PI-451指示 : 5.0MPaG (高圧系)
- ・ ランタンク加圧用GH₂が供給可能状態にあること (手順は3.1.5節3) を参照)
- GH₂トレーラー容器は二基並列使用のこと (GH-PB1指示 : 15MPaG以上)

3.4.2 RJTF 低圧室内のGN₂置換

供試エンジンおよび接続配管をLH₂で予冷する際に、低圧室内にリークするH₂の着火防止および供試エンジン表面への着霜防止のため、予め、低圧室内をGN₂で置換しておく。低圧室のベント弁を閉じ、ロケット高気性能試験設備 (HATS) の真空ポンプで内部の空気を吸引した後にGN₂を導入する。

具体的な手順は次の通りである。

- ・ ROV-931 [閉] (RJTF低圧室ベント弁)
- ・ 真空ポンプ作動、吸引開始 (操作はHATS排気系側で行う)
- ・ RJTF低圧室圧が約10kPaまで低下したら吸引終了 (操作はHATS設備側で行う)
- ・ ROV-930 [開] (GN₂導入弁)
- ・ RJTF低圧室圧が大気圧 (約100kPa) まで回復したら、ROV-930 [閉] とする

3.4.3 LH₂ 供給配管およびエンジンの予冷

試験に先立ち、多層真空断熱されたLH₂供給配管、低圧室内に設置してある供試エンジンの入口側および出口側接続配管をLH₂で予冷する必要がある。最初にLH₂供給配管の予冷を行い、放出ラインの温度が50Kに達したら下流の供試エンジン側の予冷を開始する。供試エンジンとの接続配管の入口側マニホールド内の温度が50Kに達したら予冷を終了する。予冷用のLH₂はコンテナから供給し、やむを得ない場合を除いて、ランタンクのLH₂は使用しないようにする。また、供試エンジンと接続配管を予冷する際には、供試エンジンの冷却通路と並列に設けたバイパス弁を開いて流路抵抗を小さくし、低圧のLH₂コンテナからでも十分にLH₂を供給できるようにする。接続配管には金属Oリングでシールするフランジ継手を使用されている部分があり、予冷過渡時にこの継手部からのH₂リークが避けられない。これは予冷の過程で金属Oリングがフランジに対して早期に冷却されて収縮するため、一時的

にシール機能が低下することによる。徐冷を行うことによってリーク量を抑えることが出来るが、リークを完全に防ぐことは困難である。

具体的な手順は次の通りである。

1) 多層真空断熱LH₂供給配管の予冷

- ・ 3.3.3節で述べた手順でLH₂コンテナを0.15～0.25MPaG（目標）に加圧
- ・ HOV-565、ROV-579〔閉確認〕（ランタンク元弁、LH₂始動弁）
- ・ HOV-558、HOV-564〔開確認〕
- ・ HOV-561、HOV-563、HOV-567、HOV-572、ROV-575、ROV-578〔開確認〕（予冷放出ライン）
- ・ ROV-569〔開〕（LH₂供給遮断弁）
- ・ FCV-575〔開〕（LH₂流量調整弁、全開）
- ・ LV-1〔微開〕（1/8～1/4回転程度）
- ・ PI-526の指示を監視（コンテナ圧よりも極端に高くない様にLV-1を調整する）
- ・ HOV-561、HOV-563、HOV-567、HOV-572出口側に液化空気の生成を認めたら〔閉〕
- ・ LV-1の開度を大きくする（最大でも1回転程度で充分）
- ・ ROV-575出口側に液化空気の生成を認めたら〔閉〕とする
- ・ TE-530指示値を監視し、50K以下になったら予冷終了とする
- ・ ROV-578〔閉〕とし、速やかに以下の操作に移る

2) 供試エンジンの入口側と出口側接続配管の予冷

- ・ ROV-581〔開〕（LH₂系エンジン出口側遮断弁）
- ・ PCV-582〔背圧開放〕（LH₂系背圧調整弁）
- ・ ROV-LH01〔開〕（エンジンバイパス弁）
- ・ PCV-5002〔開〕（逃気水素量調整弁、開度30%に設定）
- ・ ROV-579〔開〕（LH₂始動弁）
- ・ エンジン入口側マニホールド温度（TE-952）が50Kに達したら予冷終了とする
- ・ LV-1〔閉〕
- ・ ROV-569〔閉〕
- ・ HOV-561、HOV-563、HOV-572〔開〕（HOV-567は〔閉〕のままとする）
- ・ HOV-564〔閉〕（HOV-558は〔開〕のままとする）
- ・ LV-2〔閉〕、GV-2〔開〕
- ・ LH₂コンテナの液位計（LI-1）の電源をOFFにする
- ・ 上記操作終了後、速やかに試験操作に移る

3.4.4 試験

試験時には冷却用水素系のエンジン出口側圧（背圧）を予め定めた値に保持する必要がある、この働きは背圧調整弁（PCV-582）によってなされる。この弁はPID制御方式を持つが、電空変換部の時定数が大きいために応答性が悪く、通液時に弁を全閉状態から開け始めると背圧のオーバーシュートおよび過大な圧力変動が発生する。これらの現象を軽減するために、予め、背圧調整弁の開度を、これまでの経験から得た適切な開度（65%）にプリセットしておき、更にエンジン冷却流路内に予定背圧相当の圧力を封じ込めておく対策をとった。試験時における冷却流路へのLH₂の通液・遮断は制御装置による自動シーケンスで行われるが、それ以前の段階までは手動で制御操作を行う。

具体的な手順は次の通りである。

- ・ PCV-582〔背圧調整モードの設定を6MPaにセットする〕
- ・ ROV-LH01〔閉〕（バイパス弁）
- ・ HOV-565〔開〕（ランタンク元弁）
- ・ ROV-575 & ROV-578〔閉確認〕
- ・ ROV-569〔開〕
- ・ ROV-554〔閉〕（ランタンク逃気弁）
- ・ FCV-575、ROV-579〔開確認〕
- ・ ROV-581〔閉〕
- ・ PCV-582〔開度設定モードの開度を65%にセットする〕
- ・ ROV-553〔開〕（ランタンク加圧ガス遮断弁）
- ・ PCV-553〔遠隔操作にてランタンク圧を6MPaまで加圧する〕
- ・ ROV-579〔閉〕（LH₂供給遮断弁）
- ・ PCV-553を操作してランタンク圧を約10MPaまで昇圧する（ドーム圧10MPa設定）
- ・ ROV-5001〔開〕（気化水素処理用バッファータンク入出口弁）
- ・ PCV-5002〔全閉〕（逃気水素量調整弁）
- ・ 自動シーケンスによる試験開始
（ROV-579 & ROV-581〔開〕、PCV-582〔背圧調整モード〕となりLH₂通液開始）
（試験中は異常の有無と低圧室内のH₂濃度を監視し、必要であれば手動で停止する）
- ・ 自動シーケンスによる試験終了
（ROV-579〔閉〕となり、LH₂の通液停止、PCV-582〔全開〕、ROV-581〔開のまま〕）
（ROV-569〔閉〕、ROV-575 & ROV-578〔開〕となり、LH₂供給配管内脱圧）
（ROV-587が〔開〕となり、エンジン冷却流路内をGHeでページする）

(ROV-930が「開」となり、低压室にGN₂が導入される)

(低压室が大気圧まで回復すると、ROV-931「開」となり大気開放となる)

- ・ ROV-5001「開」、PCV-5002「全開」(バッファータンクの遮断、配管内残ガスの放出)
- ・ LH₂ランタンク脱圧 (ROV-553「開」、PCV-553「ドーム圧開放」、ROV-554「開」)
- ・ 低压室内でH₂が検知されなければGN₂の導入を終了 (ROV-930「開」)
- ・ 空気ブローを起動して低压室内を空気で置換する
- ・ HOV-551, HOV-565「開」、HOV-567「開」

3.4.5 バッファータンク内のLH₂気化ガスの逃気

バッファータンクに溜まったLH₂気化ガス(GH₂)は、試験終了後、速やかにベントスタックを通して大気に放出する。但し、雷雲の接近、風雪による空中帯電の恐れがあるような荒天時、あるいは付近で火災等が発生した場合には、安全な状態になるのを待ってGH₂の放出を行う。

具体的な手順は次の通りである。

- ・ ROV-581, PCV-582「開」
- ・ ROV-5001「開」
- ・ PCV-5002「開度50～100%」(バッファータンク内GH₂の放出)
(ガス検知器モニターでH₂濃度を監視し、500 ppmを超す場合は弁開度を絞る)
- ・ PE-5001の指示値(バッファータンク内圧)がほぼ大気圧になったら終了
- ・ ROV-5001「開」
- ・ PCV-5002「開度100%」
- ・ ROV-581, PCV-582「開」

3.5 後処置手順

試験シリーズが終了した後は、LH₂コンテナを返却し、LH₂ランタンク、LH₂供給配管および気化水素バッファータンクの不活性ガスによる置換等の後処置を行う。特に、安全保持の観点からは、配管とタンク内に残留しているH₂ガスの濃度が可燃限界外となるように、不活性ガスによる置換を確実に実施しておく。

3.5.1 LH₂コンテナ内の残液処理

内部にLH₂が残っている状態ではコンテナの返却ができないため、残液が無いように処理する必要がある。もし、コンテナの液位計で10 mmAq以上残っているような場合には、ランタンクに充填する。これより少ない場合には、コンテナの自己加圧系配管を利用して

液を気化させてベントスタックに逃気する。

具体的な手順は次の通りである。

- ・ ランタンクに充填する場合の手順は3.3.3節を参照のこと
- ・ 気化処理する場合は
LV-2「開」、GV-2「開」として液位計が約2 mmAqになるまで放置する
(ベントスタックにはパージ用として少量のGN₂を流し続ける)

3.5.2 フレキホース類の取外しおよび養生保管

引取り輸送中のLH₂コンテナの内圧をできるだけ低く保つために、引取りの直前までコンテナの逃気をしておく。従って、最初にLH₂移送用のフレキホース(FX-530)を取り外し、気化ガス逃気用のフレキホース(FX-528およびFX-528-2)とGHe供給用のフレキホース(FX-529およびFX-529-2)はコンテナの引取り直前に取り外す。取り外したこれらのホースは、両端にブラインドキャップを装着して養生した後、ラムジェット整備棟に格納する。移動の際はホースに過度の曲げ、ねじりを加えないように慎重に行う。

具体的な手順は次の通りである。

- ・ 前記3.1.6節1)(低压GHe系)の手順で低压GHe供給系を立ち上げる
(FX-530フレキホースの取外し)
- ・ LV-1, HOV-564, GV-5「閉確認」
- ・ HOV-558「開」
- ・ HOV-559「開」(GHe導入、PI-526の指示が0.39MPaGを超えないように注意する)
- ・ HOV-559「閉」
- ・ GV-5「開」(脱圧、状況はPI-526の指示値で確認する)
- ・ GHeの導入・脱圧を4回繰返し、フレキホース内部をGHeに置換する
- ・ HOV-558「閉」
- ・ HOV-559の開閉によりPI-526指示値が約0.3MPaGとなるようにGHeを封入する
- ・ フレキホースのコンテナ側接続部を取り外して塞止栓を取付ける
- ・ 同様に、フレキホースの設備側接続部を取り外して塞止栓を取付ける
(取外しの際はHOV-576を微開、接続部からGHeを漏らしながら行う)

(FX-528 (FX-528-2) フレキホースの取外し)

- ・ GV-2「閉」
- ・ HOV-460 (HOV-460-2)「開」

- ・GV-7 [開] (フレキホース内をGHeで2～3分間バージする)
- ・GV-7 [閉]
- ・HOV-461 (HOV-461-2) [閉]
- ・フレキホースの設備側接続部を取り外して塞止栓を取付ける
- ・同様に、フレキホースのコンテナ側接続部を取り外して塞止栓を取付ける
(取外しの際はGV-7を微開、接続部からGHeを漏らしながら行う)
- ・HOV-460 (HOV-460-2) [閉]
- ・GV-7 [閉確認]

(FX-529 (FX-529-2) フレキホースの取外し)

- ・フレキホースのコンテナ側接続部を取り外して塞止栓を取付ける
- ・同様に、フレキホースの設備側接続部を取り外して塞止栓を取付ける
(取外しの際はHOV-460 (HOV-460-2) 微開、接続部からGHeを漏らしながら行う)
- ・HOV-460 (HOV-460-2) [閉確認]

(フレキホースの養生保管)

- ・取り外した合計5本のフレキホースはラムジェット整備棟に移動して保管する
(両端の接続継手部はビニール袋等で覆い、防塵処理を施しておく)

3.5.3 LH₂ コンテナの返却

空のLH₂ コンテナはクレーンで吊り上げてトラックに搭載し、引取ってもらう。通常、コンテナの引取り予定日は搬入時点で既に決められているが、不測の事態により予定通り返却できないことが明らかになった場合には、早急に納入元に連絡しなければならない。

なお、返却時の手順は次の通りである。

- ・接地線を取り外して巻き取る
- ・コンテナ内圧および液位計を確認後、液位計の電源スイッチをOFFにする
- ・LV-1、LV-2、GV-2 [閉確認]
- ・トラッククレーンで吊り上げて車上に搭載し、引取ってもらう

3.5.4 LH₂ 供給配管、ランタンク内槽のGHe置換

試験シリーズ終了後、ランタンク内のLH₂がすべて気化したことを確認してから、内槽をGHeで置換する。置換は配管およびタンク内のH₂濃度が1%以下になるように行う。置換作業は、ランタンク、HOV-565～

ROV-579間、ROV-579下流(エンジンを含む)部分の三区間に分けて行うが、ランタンクの置換は大量のGHeが必要となるため最後に実施する。ランタンク内槽の置換に必要なGHeの量は、タンク内槽の温度によって異なるが、100 Sm³程度を目安として見込んでおく。なお、ランタンクのGHe置換を始める前に、ランタンク加圧用GH₂ライン内(HOV-551下流側)のGH₂を脱圧しておくことが望ましい。

具体的な手順は次の通りである。

- ・3.1.5節の1)の手順で計装用GN₂系を立ち上げる
- ・前記3.1.6節1)の手順で低圧および高圧GHe供給系を立ち上げる
(HOV-565～ROV-579間の置換)
- ・HOV-565、HOV-564 [閉確認]
- ・HOV-567 [閉]
- ・ROV-569 [開]
- ・FCV-575 [全開]
- ・ROV-575、ROV-578 [閉] (予冷放出弁)
- ・HOV-574 [開] (ラインにGHe導入、約0.7MPaGまで加圧)
- ・HOV-574 [閉] 後、ROV-578 [開] (ライン内のガスを開放)
- ・GHeの導入・脱圧を3回繰り返す
- ・ROV-569 [閉]、FCV-575 [全閉]
- ・ROV-575、ROV-578 [開] 又は開確認]

(ROV-579下流部分の置換)

- ・PCV-5002 [全開、又は全開確認]
- ・PCV-582 [背圧開放に設定] (背圧調整弁)
- ・ROV-581 [閉]
- ・ROV-587 [開] (ラインにGHe導入、約5MPaGまで加圧)
- ・ROV-587 [閉] 後、ROV-581 [開] (ライン内のガスを開放)
- ・GHeの導入・開放を3回繰り返す
- ・ROV-581 [閉]

(ランタンクの置換)

- ・HOV-551、HOV-565 [閉確認]
- ・ROV-554 [開確認] 後、ROV-553 [開]
- ・PCV-553 [ドーム加圧操作] (約1MPaGに設定、GH₂ラインの残圧を開放)
- ・ROV-553、ROV-554 [閉] (GH₂ラインの残圧が抜けた後に操作)
- ・HOV-552 [開] (GH₂ラインに約5MPaGのGHeを導入)
- ・ROV-553 [開] (ランタンクをGHeで約1MPaGまで

加圧する)

- ・ ROV-553 [閉] 後、ROV-554 [開] (ランタンクの脱圧)
- ・ ランタンクの加圧・脱圧を3回繰り返す
- ・ HOV-552 [閉] 後、ROV-553 [開] (GH₂ラインのGHe残圧を開放)
- ・ ROV-553 [閉] 後、PCV-553 [ドーム圧開放]
- ・ ROV-554 [開確認]

計装用 GN₂ 系および GHe 系は、他で使用しなければ供給を停止する。

3.5.5 LH₂ ランタンクジャケットの圧力調整

ランタンク内槽から LH₂ が無くなると、外部から侵入する熱によってタンク内部の温度が上昇するため、前記 3.3.1 節の手順でジャケットに封入した GHe の圧力も徐々に上昇する。ジャケットの安全弁 (SRV-428) の設定圧は約 0.95MPaG であるが、放置すると安全弁が作動する圧力に達するため、適宜、ジャケット内の圧力 (PI-453) を監視して GHe を放出することにより、圧力を 0.1~0.4MPaG 程度に保つようにする (完全に抜かないこと)。なお、ランタンク内の LH₂ が完全に蒸発した時点から約 10 日間はジャケット圧の上昇が大きいので特に留意する。

具体的な手順は次の通りである。

- ・ PI-453の指示値を確認 (> 0.4MPaGの場合は下記
の操作を行う)
- ・ HOV-429 (又はHOV-430) [開] (ジャケット内の
GHe放出)
- ・ PI-453指示値が約0.1MPaGまで低下したら放出を
終了する
- ・ HOV-429 (又はHOV-430) [閉]
(極低温ガスが放出されるので、放出配管等に触
れないように注意すること)

3.5.6 LH₂ 気化ガス処理用バッファータンクの GN₂ 置換

試験シリーズが終了した時点で、LH₂ 気化ガスを処理するためのバッファータンクはほぼ大気圧の GH₂ で満たされている。定期点検時の安全確保、および災害等による不測事態発生の際に可燃性ガスによる二次災害を防止するため、バッファータンク内を不活性な GN₂ に置換しておく。置換作業はバッファータンクを GN₂ で 0.5 MPaG まで加圧した後、内部のガスを放出する操作を 3 回繰り返す。

具体的な手順は次の通りである。

- ・ 前記3.1.3節の手順で置換作業を行う

4. あとがき

RJTF が竣工してから 10 年以上が経過し、これまでに 300 回以上のスクラムジェットエンジン試験が実施されており、飛行マッハ数 4、6、8 において数多くの知見が得られている。その中で、LH₂ 冷却エンジン試験に関しては、安全に試験を実施するために設備の改修および試験手順の見直し等が必要になったため、これまでに実施された試験回数はそれほど多くない。本報では、RJTF における安全な LH₂ 冷却エンジン試験の実施を目的として製作した、新しい概念による LH₂ 気化ガス処理装置について述べた。本気化ガス処理装置の設置によって、LH₂ 冷却式エンジン試験を行う上で、安全上最も大きな課題を解決することができた。

また、LH₂ 冷却エンジン試験の安全な遂行とトラブルを未然に防止するための一助となることを期待して、RJTF-LH₂ 供給装置の試験時の取扱いについて、これまでの経験を反映させて具体的に述べた。更に、LH₂ 供給装置に付帯する装置の取り扱い、他についても可能な限り、付録に収録して実用の便を図った。

本資料を纏めるにあたり、角田宇宙センター複合推進研究グループの谷香一郎サブグループリーダーより図表の一部を提供して頂いた。

参考文献

- 1) RJTF 建設グループ ; 「ラムジェットエンジン試験設備」 航空宇宙技術研究所報告 TR-1347, 1998 年 2 月.
- 2) 三谷 徹ほか ; 「航技研・角田におけるスクラムジェットエンジン試験及びその性能計測」, 日本航空宇宙学会誌, Vol.49, No.574 (2001), pp.265-272.
- 3) Mitani, T., et al; "Progress in Scramjet Engine Testing at NAL-KPL, Japan," ISTS 02-a-11, 23rd ISTS, (May 2002).
- 4) Wakamatsu, Y., et al; "Design and Preliminary Experiments of Liquid Hydrogen Cooled Scramjet Engine," ISTS 98-a-1-27, 21st ISTS, (May 1998).
- 5) Wakamatsu, Y., et al; "Firing Tests of Liquid Hydrogen Cooled Scramjet Engine in the Ram Jet Engine Test Facility," ISTS 02-a-17, 23rd ISTS, (May 2002).
- 6) Saito, T., et al; "Firing Tests of Liquid-Hydrogen-Cooling Scramjet Engine in the Ramjet Engine Test Facility II," AIAA-2005-3821, 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, (July 2005).
- 7) Office of Safety and Mission Assurance of NASA, "Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen

- Systems,” NASA STD 8719.16, (February 2002).
- 8) NASA Glenn Research Center; “NASA Glenn Safety Manual, Chapter 6 – Hydrogen,” (September 2001).
 - 9) 増田閃一 ; 「最近の静電気工学 KHK E006」 高压ガス保安協会, 昭和 49 年 7 月, pp.51-71.
 - 10) 新岡 嵩, 河野通方, 佐藤順一 ; 「燃焼現象の基礎」, オーム社, 平成 13 年 8 月, pp.124-125.
 - 11) Advisory Panel on Experimental Fluids and Gases, Lewis Research Center; “Hydrogen Safety Manual,” NASA TM-X-52454 (Jan.1968).
 - 12) NAL/NASDA 共同研究成果報告書「小型溝構造液水冷却燃焼器系の研究」, 昭和 57 年 6 月.
 - 13) API Recommended Practice 521 Third Edition; “Guide for Pressure Relieving and Depressuring Systems,” November 1990.
 - 14) 例えば、谷下市松 ; 「工業熱力学 基礎編」 ; 裳華房, 昭和 43 年 5 月, pp.56-62.

付録 A LN_2 CE (N6CE、N7CE) の取り扱い

RJTF には LN_2 を貯蔵するための貯槽（通常、CE : Cold Evaporator、と称する）が 2 基設置してある。1 基は N6CE（㈱セイカエンジニアリング製 CE10000-M 型）と呼ばれ、 LH_2 供給配管の予冷用 LN_2 の供給、および水素ベントスタックパージ用、低压室置換用の低压 GN_2 の供給に用いられる。残る 1 基は N7CE（㈱日酸工業製 CE-13 型）と呼ばれ、高压 GN_2 を製造するための往復型ポンプに LN_2 を供給するために用いられる。高压 GN_2 は水素ベントスタック用高压 GN_2 パージ、 LH_2 気化ガス用バッファータンクの置換ガスをはじめ、計装用ガスおよび冷却水タンクの加圧ガス等、多方面で使用される。図 A-1 に N7CE の外観を示す。

図 A-2 および図 A-3 に各々、N6CE および N7CE の系統図を示す。充填可能な最大量は N6CE が 8955L、N7CE が 11043L であり、各々、容器内容積の 90% に相当する。これらの CE には液量計と圧力計が備わっているが、液面高さで生じる差圧を利用する方式の液量計は、貯蔵されている液の温度と圧力によっては指示値の誤差が大きくなるので注意が必要である。



図 A-1 コールドエバポレーターの外観 (N7CE の例)

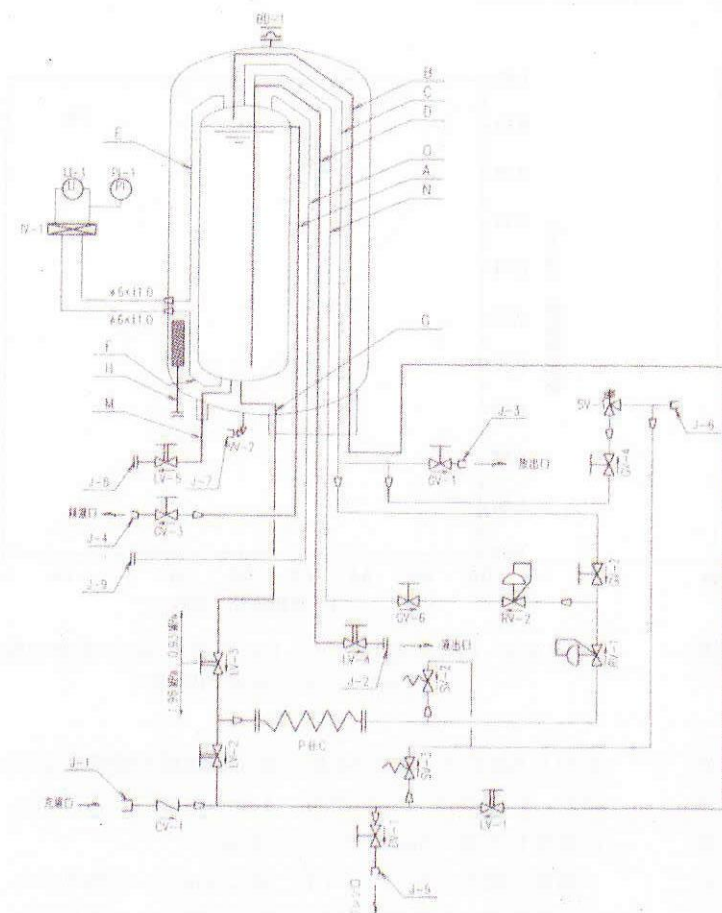
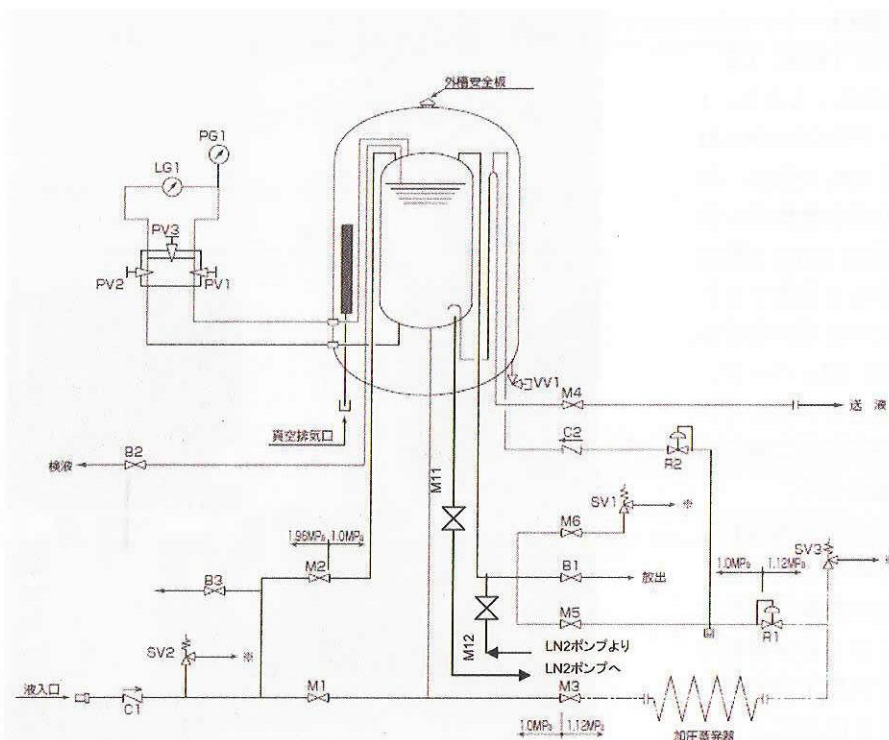


図 A-2 N6CE の配管系統図

記号	名称	記号	名称
A	検液管	LV-1	頂部充填弁
B	頂部充填管	LV-2	底部充填弁
C	放出管	LV-3	底部締切弁
D	液体取出管	LV-4	液体取出弁
E	液面計頂部管	LV-5	予備弁
F	液面計底部管	GV-1	放出弁
G	底部充填管	GV-2	気相締切弁
M	予備管	GV-3	検液弁
N	エコマイザー管	GV-4	内槽安全弁元弁
O	予備管	GV-6	エコマイザー元弁
H	真空排気管	DV-1	ドレン弁
J-1	充填口	CV-1	充填口逆止弁
J-2	液出口	RV-1	加圧調整弁
J-3	放出口	RV-2	エコマイザー弁
J-4	検液口	SV-1	内槽安全弁
J-5	ドレン口	SV-2	加圧コイル安全弁
J-6	安全弁出口	SV-3	充填管安全弁
J-7	真空測定口	IV-1	液面計元弁
J-8	"M"予備管口	PI-1	内槽圧力計
J-9	"O"予備管口	LI-1	液面計
BD-1	外槽安全栓	VV-1	真空測定弁
P.B.C.	加圧コイル		



機器番号	名 称
M1	下部充填弁
M2	上部充填弁
M3	加圧弁
M4	送液弁(使用せず)
M5	調整弁元弁
M6	内槽安全弁元弁
M11	LN2ポンプ送液弁
M12	LN2ポンプ戻り弁
B1	ガス放出弁
B2	検液弁
B3	ブロー弁
C1	充填口逆止弁
C2	エコノマイザー逆止弁
R1	加圧調整弁
R2	エコノマイザー弁
SV1	内槽安全弁
SV2	液充填ライン安全弁
SV3	加圧ライン安全弁
PV1	圧力計元弁
PV2	液面計元弁
PV3	液面計均圧弁
LG1	液面計
PG1	内槽圧力計
VV1	真空計元弁

図 A-3 N7CE の配管系統図

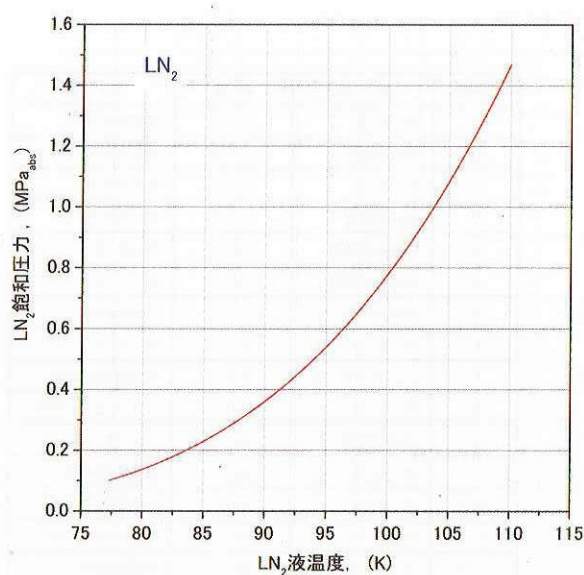
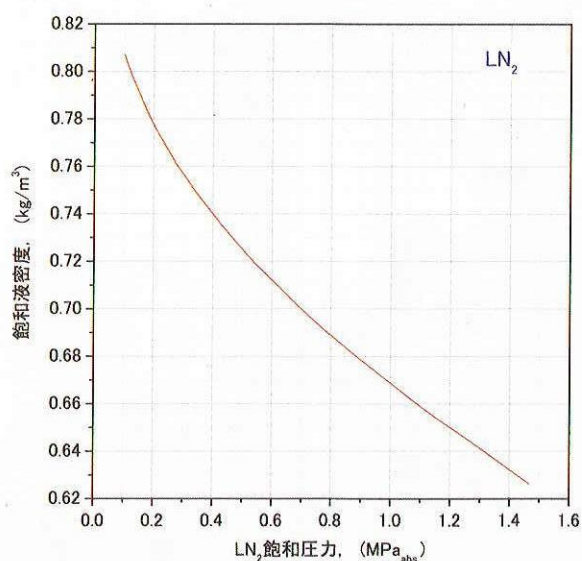
図 A-4 飽和状態における LN₂ の温度-圧力-密度の関係
(a) 温度と圧力の関係図 A-4 飽和状態における LN₂ の温度-圧力-密度の関係
(b) 圧力と密度の関係

図 A-4 (a) および図 A-4 (b) に各々、飽和状態にある LN₂ の温度 vs. 圧力および圧力 vs. 密度の関係を示す。これらの図から、たとえ CE 内に貯蔵してある液の容積が同じ場合でも、液の温度と圧力が異なっていれば、差圧を利用した液量計の指示値が異なってくる事が理解できる。図 A-5 に、貯蔵される LN₂ の飽和

圧力と N6CE および N7-CE の最大貯蔵量の関係を示す。なお、貯蔵量は LN₂ を 35℃、1 atm 状態における GN₂ に換算した量 (Sm³) で示してある。

通常の使用において、CE、特に N6CE、は数日から 1 ヶ月程度の長時間、加圧状態下に置かれて使用されることが多い。大気圧状態から加圧して使用を開始し

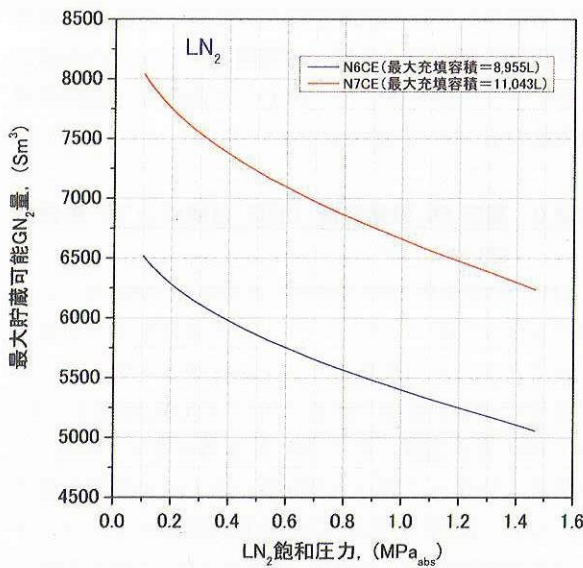


図 A-5 LN₂の飽和圧力と最大貯蔵量の関係 (N6CE、N7CE)

た場合、CE 内の LN₂ の温度は外部から侵入する熱のために徐々に上昇していく。使用状態での CE 圧力は自己加圧系統に備わっている調圧弁 (N6CE : RV-1、N7CE : R1) の働きによって所定の圧力に保たれるが、長期の使用においては LN₂ の温度が使用圧力に対応する飽和温度を超えて上昇する場合がある。この状態では LN₂ 温度の上昇に伴って CE 圧も上昇する。このような場合には、一旦、加圧元弁 (N6CE : LV-3、N7CE : M3) を閉じ、大気開放弁 (N6CE : GV-1、N7CE : B1) を開いて CE の圧力を使用圧力以下まで低下させて内部の LN₂ の温度を下げなければならない。

LN₂ タンクローリーから CE に LN₂ を充填する際の手順を以下に示す。手順は N6CE の例であるが、N7CE の場合も基本的には同じである。図 A-6 に N7CE における充填風景を示す。

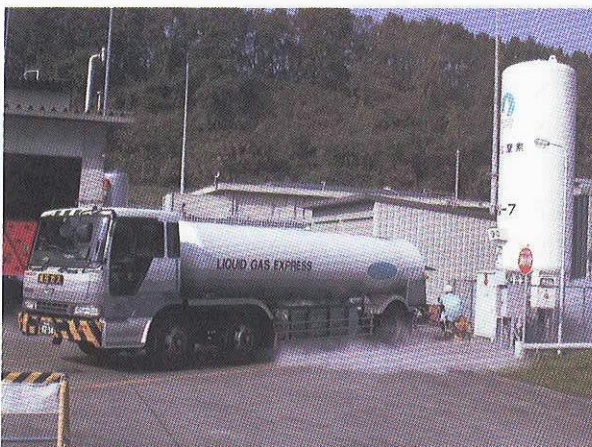


図 A-6 CE の充填風景 (N7CE の例)

- 1) 管理課会計係に発注依頼を出す (CE 番号、希望日時、数量を伝える)。
- 2) 納入当日、LN₂ ロローリー到着の連絡を受けたら現場で立会う。
- 3) 充填前に時刻、CE の圧力および残液量をメモする。
- 4) 放出弁 (GV-1) を全閉とする。CE が使用中であれば、液体取出し弁 (LV-4) は開のままが良い。(CE が使用中で無ければ、放出弁 (GV-1) は開でも構わないが、開度が大き過ぎると充填時に液状のガスが大量に放出されて無駄になる。)
- 5) 気相締切り弁 (GV-2) を全閉にする。
- 6) 底部締切り弁 (LV-3) を全開にする。
- 7) ロローリーからの送液作業は、ローリーの運転手がドレン弁 (GV-3)、上部充填弁 (LV-1)、底部充填弁 (LV-2) を操作して行う。但し、作業前に各バルブの位置を運転手に教えること。
- 8) 送液中の監視

N6CE の最大充填量 (内容積の 90%) は大気圧における飽和状態の液で約 6,520Sm³ (35℃、1 atm におけるガス換算量) であるが、ローリーから CE に移送される液は大気圧における沸点よりも温度が高いために、通常、液面計の指示値が 6,200~6,300Sm³ 前後で満液 (8,955L) となることが多い。過充填とならないように、液面計が 6,000Sm³ を越えたら必ず、検液弁 (GV-3) を 1/4~1/2 回転開いて放出されるガスの状態を監視する。連続して液の放出が見られるようになったら満液であるので、運転手に満液である旨を伝えて送液を停止してもらう。CE が使用中であり、CE 圧力を大きく変化させたくない場合は、上部充填弁 (LV-1) と底部充填弁 (LV-2) の開度を変えて CE の圧力を調整してもらう。定性的には、上部からの充填量が多い場合には CE 圧力が低下し、底部からの充填量が多い場合には圧力が上昇する傾向がある。

- 9) 送液ホース等の後片付けが終わるのを待つ間、上部充填弁 (LV-1) および底部充填弁 (LV-2) が閉であることを確認する。また、時刻、CE の圧力および液量をメモする。
- 10) 納入量を確認した後、納入案内書にサインして控えを受け取り、管理課会計係の担当者に提出する (コピーを一部取って保存すること)。
- 11) 気相締切り弁 (GV-2) を全開にする。貯槽を使用しない場合は底部締切り弁 (LV-3) を全閉とし、使用する場合は LV-3 を必要なだけ開け

る。GV-2およびLV-3の両方が閉まっていると、液封によって安全弁（SV-2）が吹くので注意すること。

- 12) ドレン弁（GV-3）を微開にしておき、充填口逆止弁（CV-1）付近の配管に付着した霜が溶けた後（約1時間後）、GV-3を全開とする。（液封による安全弁吹出し防止のため）
- 13) 高圧ガス保安法によって義務付けられている充填記録簿に記帳する。
- 14) 納入案内書のコピー、ガス分析表等はファイルに綴って保存する。なお、これらの帳簿類はRJTF計測・制御室の東壁側の書類棚に常備してある。

付録B 多層巻真空断熱LH₂配管の真空度

RJTFの主要なLH₂配管は多層真空断熱が施されており、弁、タービン流量計等の機器類部分は真空ジャケット付の簡易的な断熱が施されている。これらの断熱層の真空度が低下するとLH₂の蒸発損失が大きくなるので、使用予定時期の直前の定期検査で真空引きを実施するようにする。真空引きが必要か否かはジャケット内の真空度を測定して判断するが、簡易的には配管にLH₂を流した際にジャケット表面に霜が生成する場合には真空引きが必要と判断する。真空度は高いほど望ましいが、 1×10^{-2} Torr以下を目安とする。真空引き作業は、真空ジャケットに設けてある真空引きポートに真空排気オペレーターを介して真空ポンプを接続して行う。真空ポンプはロータリーポンプ+油拡散ポンプ、又はロータリーポンプ+分子ターボポンプを用いる。真空引き作業は配管が常温状態あるいは加温状態（baking）の下で行い、液化ガスが流れているような低温下で行ってはならない。

RJTFのLH₂供給装置に使用されている真空排気関連の接続継手、シールオフ弁、オペレーター等は、（株）大同酸素（現在は（株）エア・ウオーター）製のCOSMO SEALシリーズ製品であり、呼び径が1/2と3/4のものである。なお、真空引き作業時には消耗品としてパイトン製Oリングが必要となるので、P-10、P-15、P-18、P-22、P-26のサイズのものを各5個程度常備しておくことが望ましい。

付録C 高温ガス流評価試験装置の水素系統

RJTFが設置されている建屋内には、冷却構造体および材料の加熱試験を行うための、高温ガス流評価試験装置（通称、ラムジェット構造スタンド）が併設されている。この装置に必要なGN₂、GH₂、GO₂、GHeの各ガスはRJTFの各気蓄器から供給され、冷却水とLH₂

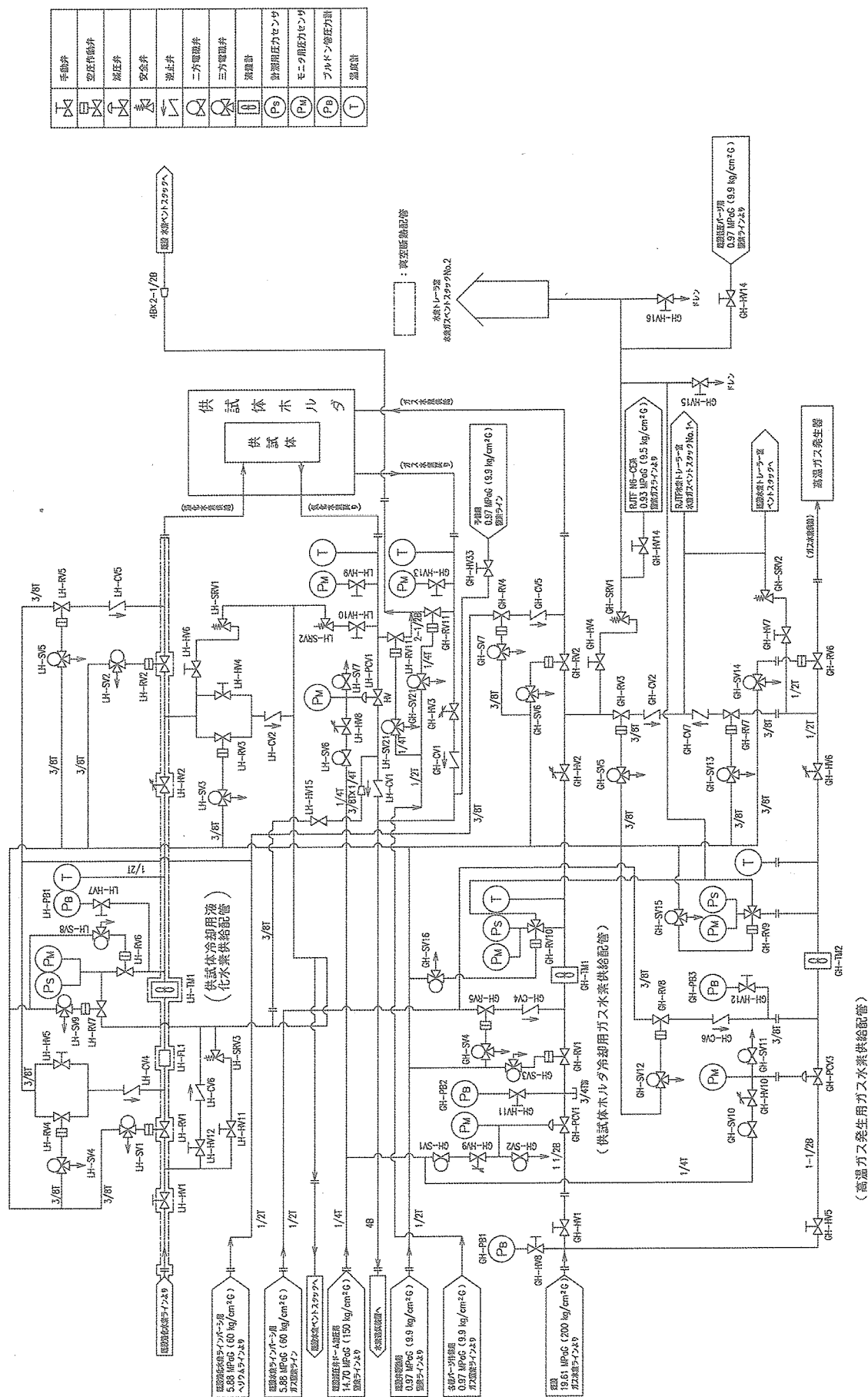
は各々のランタンクから供給を受ける。RJTFにおいてLH₂冷却エンジンの試験を行う際には、高温ガス流評価試験装置側の弁（3個）の開閉ポジションの確認が必要になる。参考までに、図C-1に高温ガス流評価試験装置のH₂系の系統図を示す。

付録D 高圧GN₂製造装置（N7CE付置ポンプ）の取り扱い

RJTFでは水素ベントスタック用高圧GN₂ページ、LH₂気化ガス用バッファータンクの置換用ガスを始め、計装用ガスおよび冷却水タンク加圧用ガス等、多方面で多量のGN₂が使用される。これらのGN₂を賄うため、高圧GN₂製造装置と高圧GN₂気蓄器を備えている。この装置は付録Aで述べたN7CEからLN₂の供給を受ける。なお、RJTFの高圧GN₂系統は隣接するロケット高空性能試験設備（HATS）の高圧GN₂系統と配管で接続されており、互いの設備間で高圧GN₂を融通し合うことが出来る。気蓄器等の合計実容積が約25m³（RJTF気蓄器10m³ + HATS気蓄器14m³ + 接続配管等1m³）、最高充填圧が23.0MPaGであるので、貯気能力としては約5700Sm³となる。高圧GN₂製造装置はLN₂を往復型の高圧ポンプで昇圧し、熱交換器を通して空気と熱交換させることによって高圧のGN₂を発生させるものである。図D-1に高圧GN₂製造装置の系統を示す。図D-2（a）およびD-2（b）に各々、往復型高圧LN₂ポンプおよび制御盤箱の写真を示す。

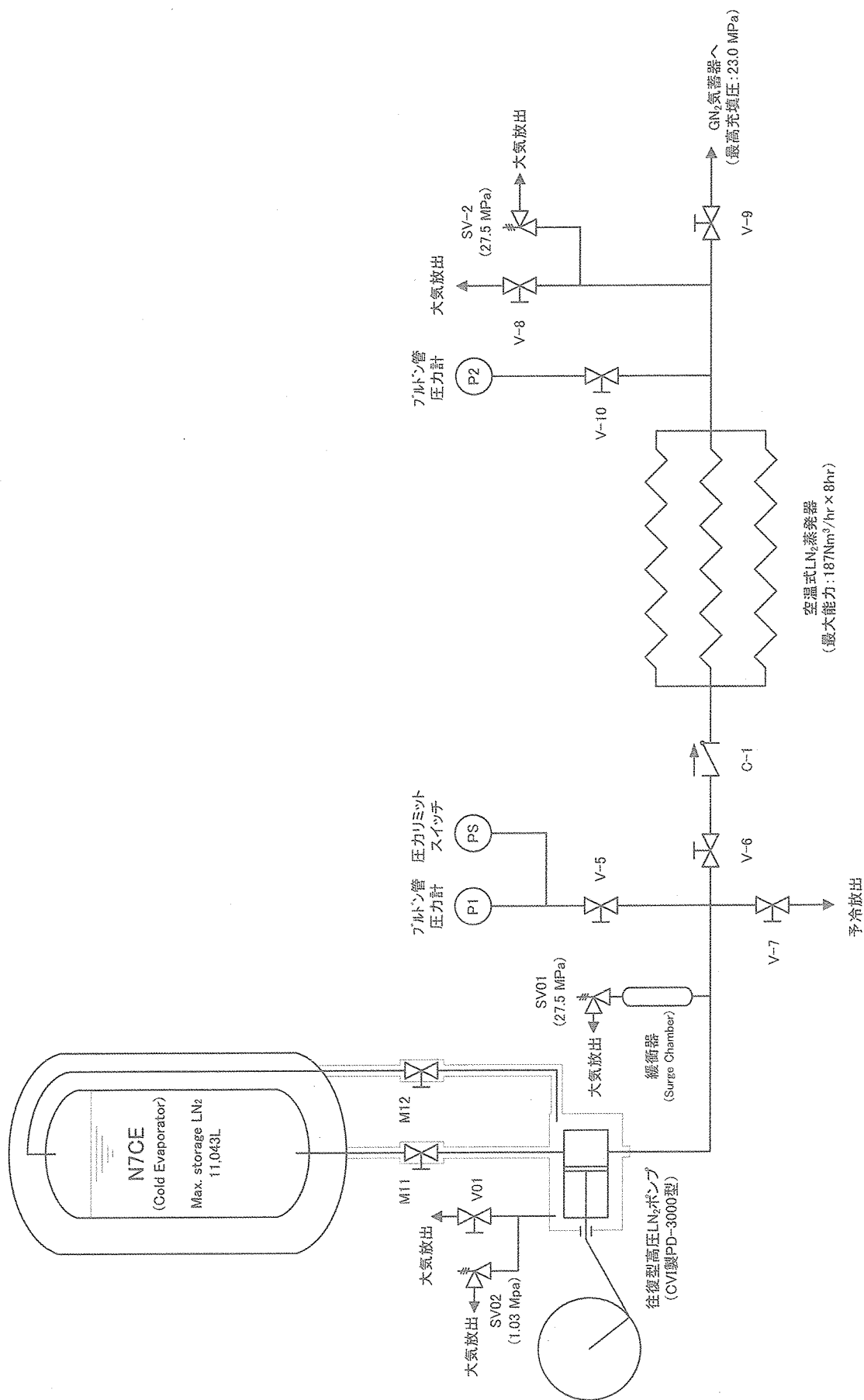
高圧LN₂ポンプの公称能力は280L/hrであるが、インバーター制御装置によって約200～330L/hrまで流量を連続的に変えることが可能である。空温式LN₂蒸発器の公称能力は187Nm³/hr（Nm³: 0℃、1気圧の状態に換算したガス容積）であり、これはLN₂で280L/hrに相当する。ポンプが公称能力点で運転された場合には、気蓄器（容積25m³）の昇圧量は約0.8MPa/hrとなる。図D-3に本LN₂ポンプの理論吐出し性能と設置後間もない頃に行った実際の運転結果の比較を示す。ポンプの効率は約92%であり、公称能力の280L/hrを達成するにはインバーターの周波数を約46Hzに設定すれば良いことが分かる。ポンプの効率は累積運転時間の増加とともに徐々に低下し、1500hr運転後で約10%の低下が見られた。

空温式LN₂蒸発器は着霜あるいは着氷によって熱交換能力が低下するので、運転中は蒸発器出口側下流の配管表面に着霜あるいは着氷が生じていないかを観察する。もしも、着霜あるいは着氷が認められた場合には、ポンプの送液量を少なくするか、又はポンプを停止して、高圧GN₂気蓄器に低温のガス（-10℃以下）が流入しないようにしなければならない。湿度が高く、



REV.0

冷却構造試験用
水素系 系統図

図 D-1 高圧 GN₂ 製造装置の配管系等図

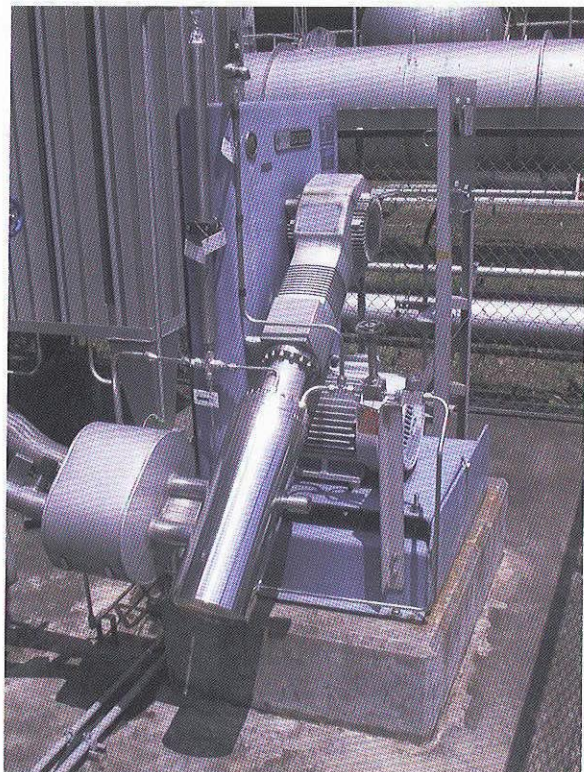


図 D-2 往復型高圧 LN_2 ポンプの外観
(a) ポンプ本体

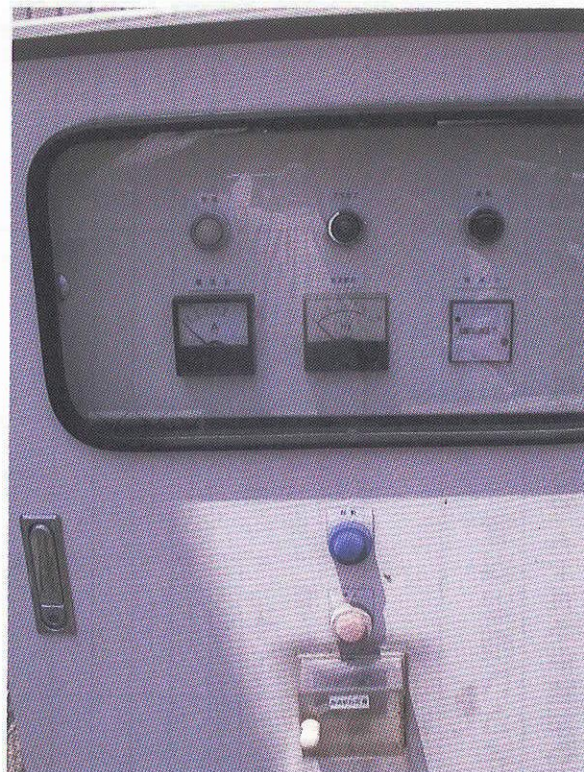


図 D-2 往復型高圧 LN_2 ポンプの外観
(b) 制御盤箱

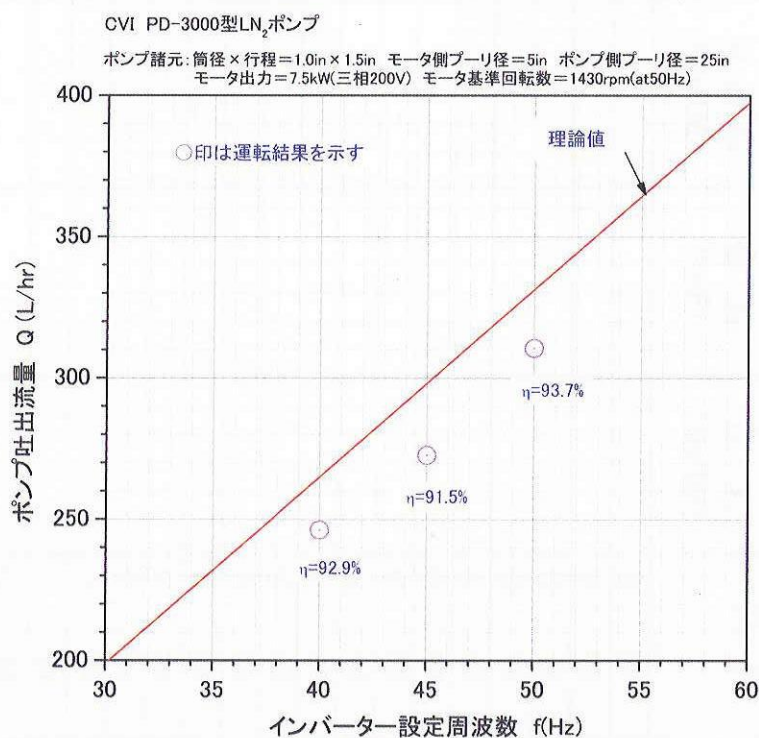


図 D-3 高圧 LN_2 ポンプの理論吐出性能と実測値

気温が低い条件では着霜あるいは着氷が顕著となるので、特に注意が必要となる。なお、蒸発器の表面に成長した霜を帚等で掃うことにより、熱交換能力の低下を小さくすることができる。

高圧 GN_2 製造装置の運転手順を以下に示す。

- 1) 運転記録紙（書式を図 D-4 に示す）に日付、天候、運転者名等を記入する。
- 2) N7CE の液量を確認する（約 1500Sm^3 以上ある

厳守事項：100時間毎にクランク周り4ヶ所にグリスアップ（ダウコーニング社製モリコート BR2 プラスグリス）を行うこと。

N7-CE 付置 高圧液化窒素 (LN ₂) ポンプ運転記録										
2004/10 改定			ラムジェットエンジン試験設備 (RUFF)							
CVI 製 PD-3000 型 (S/N 3750)			高圧ガス保安係員							
運転月日：平成 年 月 日 (曜日)			天 候：		運転者氏名：		印			
項 目	時 刻	N7-CE 圧 力 (MPaG)	N7-CE 液 量 (Sm ³)	LN ₂ ポンプ 吐 出 圧 (MPaG)	気蓄器 圧 力 (MPaG)	電流計	周波数計 指示値 (Hz)	気 温 (°C) (水素容器置場内)	備 考	
						指示値 (A)				
※気蓄器圧 23.0MPaG で 16A 前後										
加圧開始時	時 分					—	—			
予冷開始時	時 分					—	—			
ポンプ起動直後	時 分									
LN ₂ ポンプ 運 転 中 (点検は1時間毎 に行い、蒸発器の 着霜状態にも注意 すること)	時 分									
	時 分									
	時 分									
	時 分									
	時 分									
	時 分									
	時 分									
	時 分									
	時 分									
	時 分									
(気 蓄 器 圧 は 23.0MPaG を 超 え てはならない)	時 分									
	時 分									
運転終了直前	時 分									
作業終了時	時 分									
GN ₂ 製造状況	LN ₂ 消費量：	Sm ³	GN ₂ 気蓄器昇圧値：	MPa	本日の運転時間：					hr
特記事項	□：CE & ポンプの後処置 (CE 加圧弁&放出弁、ポンプ液入口弁、電源、他)				累積運転時間：					hr

図 D-4 高圧 GN₂ 製造装置の運転記録紙

こと、2000 Sm³ 以下になったら手配する)。

- 3) CE を加圧する (ガス放出弁 B1 閉、加圧元弁 M3 開、記録紙に記入)。
- 4) ポンプの予冷を開始する (送液弁 M11 開、戻り弁 M12 開確認、予冷放出弁 V-7 開、記録紙に記入)。
- 5) 起動条件の確認を行う (CE 圧 0.2MPaG 以上、V-7 出口側から連続して LN₂ が流出)。
- 6) 送液準備操作を行う (V-6 開、V-8 閉確認、V-9 開確認、V-10 開確認)。
- 7) 制御盤箱内の主電源 ON、操作用電源 ON とする。
- 8) ポンプを起動する (制御盤箱外面のスイッチを ON、周波数計指示値が 50Hz 以下のこと)。
- 9) V-7 を徐々に閉めていく (P1 指示値の上昇と脈動で送液を確認する。脈動が確認できない場合には、V-7 を全開にして暫く待った後、再度、徐々に閉めていく)。
- 10) 記録紙の起動直後の欄に記入する。
- 11) CE 圧が 0.25～0.3MPaG に達したら加圧を停止する (加圧元弁 M3 閉)。
- 12) 定常運転 (1 時間毎に運転状況を記録する。CE 圧は加圧元弁 M3 の開閉操作によって 0.2MPaG 以上を保持すること。蒸発器出口側下流の配管表面に着霜が認められたら、ポンプの回転を周波数計で 40Hz 程度まで低下させて様子を見るか、又はポンプを停止する。ポンプ駆動用モーターの電流値 (脈動の平均値) は通常、10～19A の範囲にあり、20A 以上になった場合は何処かに不具合が発生していると考えること。インバーターの設定周波数は原則として 50Hz 以下とすること)。
- 13) 運転終了 (記録紙の運転終了直前の欄に記入後、ポンプのスイッチを OFF にする)。
- 14) 送液弁 M11 を閉める (戻り弁 M12 は開のままにする)。
- 15) 予冷放出弁 V-7 を開けて配管内の残液を放出する。
- 16) 遮断弁 V-6 を閉じる。
- 17) 制御盤箱内の主電源 OFF、操作用電源 OFF とする。
- 18) CE の脱圧を行う (ガス放出弁 B1 を開ける。運転時以外は常時、脱圧しておく)。
- 19) 記録紙に運転時間、気蓄器昇圧量、LN₂ 消費量等を記入する。
- 20) 予冷放出弁 V-7 を閉じる (開のままだと配管内部に湿気が侵入してトラブルの原因となる)。

保守管理を行う上で、注油および主要部品の交換時期

の目安は以下の通りとする。但し、運転中に異常が認められた場合には、直ちに運転を中止して原因を究明し、必要な処置をとらなければならない。なお、本ポンプは米国製であり交換部品の入手には数ヶ月を要するため、主要部品の予備を常に在庫しておくことが望ましい。

- 1) 100 時間運転毎に、クランク軸部 3 ケ所、クロスヘッド部 1 ケ所のニップルにグリースを圧入する (モリコートグリース BR2 プラス、又は二硫化モリブデン入りグリースに限る)。
- 2) 1000 時間毎に、プッシュロッドガスシール (2 個) を交換する。
- 3) 4000 時間毎にピストンリング (シールリング、ウエアーリング) セット、吸入弁、吐出弁、O リング類、V ベルトを交換する。
- 4) 10000 時間毎に、クランク軸部ベアリング、クロスヘッド部ウエアバンドを交換する。

付録 E RJTF の全系統図

本資料は RJTF の LH₂ 供給装置に限定して記述したものであるが、計装用ガス、置換・パージ用ガス、タンク加圧用ガス等に関しては、RJTF の他の部分とも関連している。必要となった際に容易に参照できるように、RJTF の全系統を図 E-1 から図 E-5 に示した。図 E-1 は空気系、LPG 系について、図 E-2 は GN₂、GO₂、GHe 系について、図 E-3 は水素系について、図 E-4 は冷却水系について、図 E-5 は気化水素処理系について記述してある。なお、これらの図には竣工後に施された多数の小改修がすべて反映されていない箇所もあると思われるので、参照するにあたっては留意されたい。

付録 F LH₂ 配管およびタンク内の GHe 置換の指針

液化水素 (LH₂) は大気圧における沸点が約 20.3K と極めて低温であり、この温度ではヘリウム (He) 以外のガスは凍結固化する。このため、LH₂ を取り扱うタンク、配管等の内部に H₂ および He 以外のガスが存在した場合、凍結により配管の閉塞、弁類の固着等のトラブルを発生することになる。また、空気や酸素ガスが含まれると、その濃度によっては燃焼、爆発の危険性もある。

このようなトラブルを防止するために、LH₂ を使用する前に GH₂ あるいは GHe を用いてタンク、配管内を十分に置換することが必要となる。ここでは LH₂ を取扱うタンク内あるいは配管内を置換するにあたって、LH₂ および LH₂ ランタンク加圧用 GH₂ の純度を基にして指針を決める。表 F-1 および表 F-2 に各々、RJTF で使用している GH₂ および LH₂ の組成を示す。LH₂ および LH₂ ランタンク加圧用 GH₂ の両方とも、純度として 99.995 vol.% 以上を保証している。従って、総不純物量

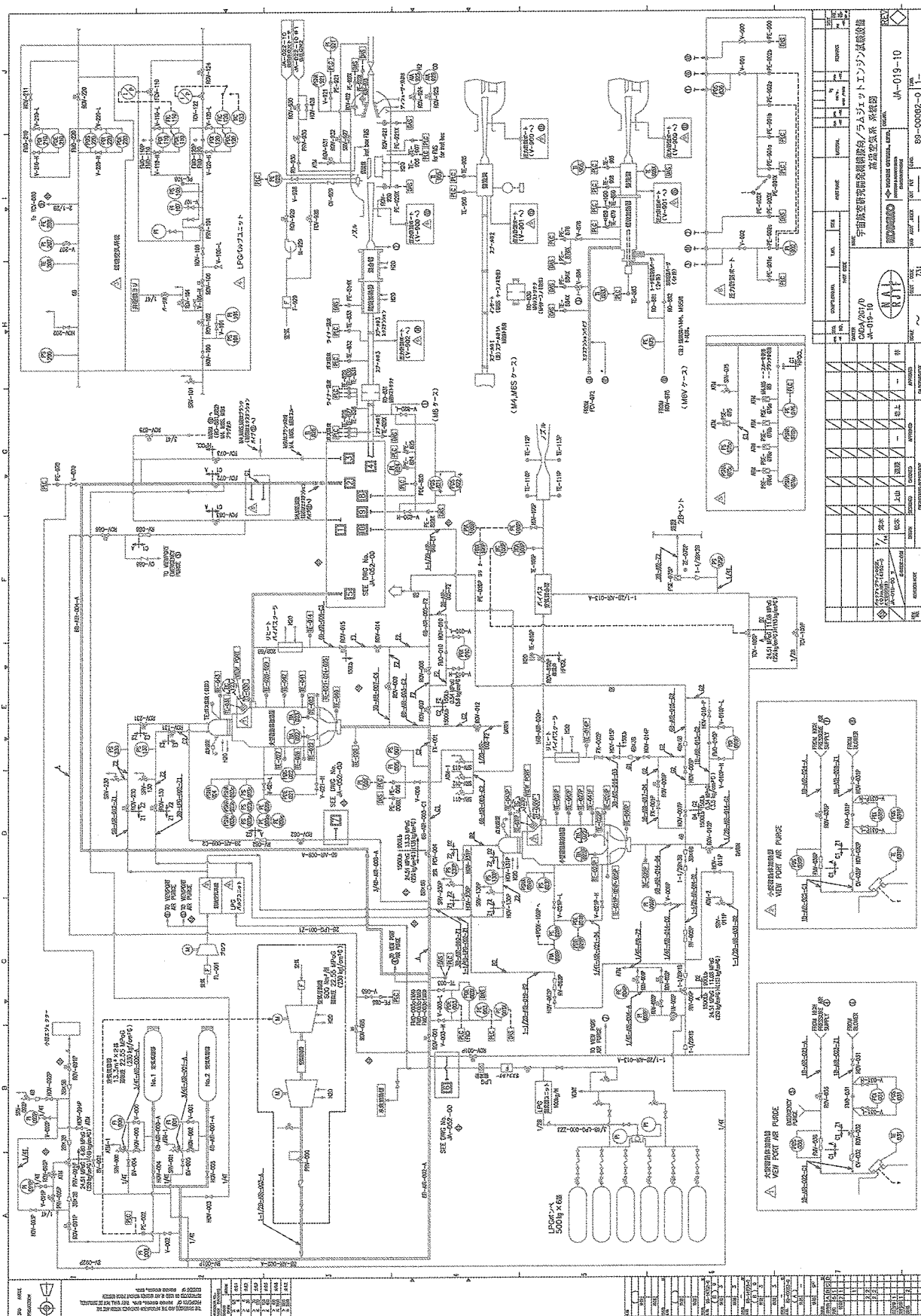
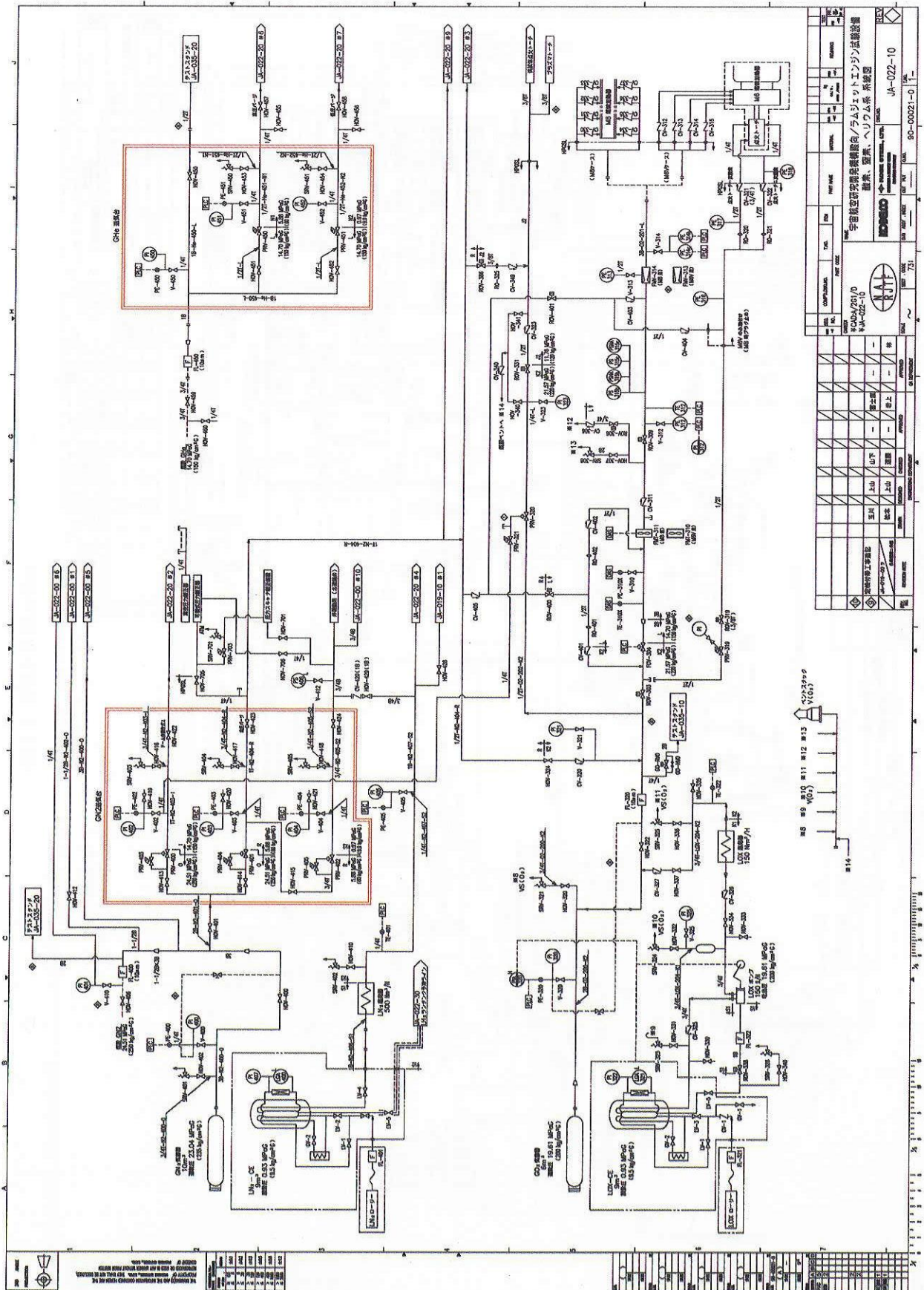
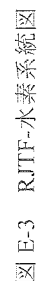


図 E-1 RITF-空、LPG 系統図

図 E-2 RJTF-GN₂、GO₂、GHe 系統図



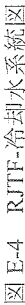


表 F-1 RJTF で使用されるガス水素 (GH₂) の純度

純度 (vol.%)	O ₂ (vol.ppm)	N ₂ (vol.ppm)	CO (vol.ppm)	CH ₄ (vol.ppm)	CO ₂ (vol.ppm)	露点 (°C)	HC (vol.ppm)
> 99.995	< 1.0	< 20.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< -70	無規定

表 F-2 RJTF で使用される液化水素 (LH₂) の純度

純度 (vol.%)	パラ水素 (vol.%)	全不純物量 (vol.ppm)	He (vol.ppm)	O ₂ /Ar (vol.ppm)	CO/CO ₂ (vol.ppm)	N ₂ (vol.ppm)	露点 (°C)	HC (vol.ppm)
> 99.995	> 95.0	< 50	< 39.0	< 1.0	< 1.0	< 9.0	< -78 (実測)	無検知 (実測)

表 F-3 置換回数と使用ガス量の関係 (内部のガスを 50 Vol.ppm 以下まで希釈する場合)

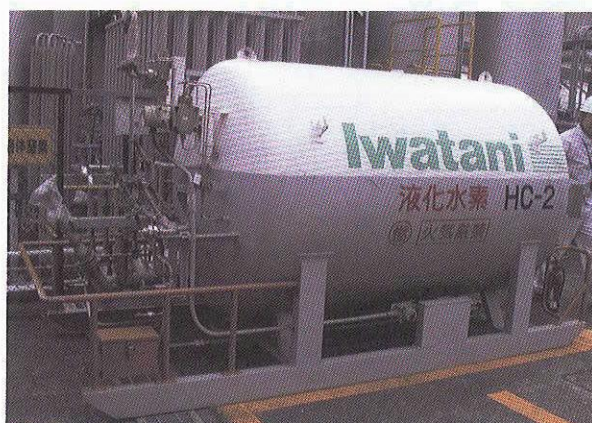
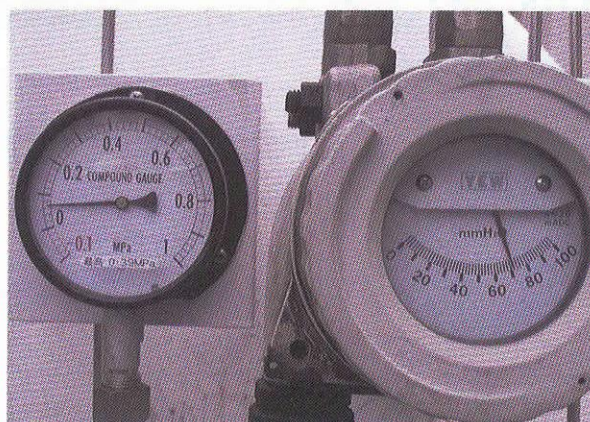
置換圧力 (MPa G)	置換回数	必要な置換ガス量の比較 (0.1MPaG を基準とする)
0.1	(14.4) 15	1.0
0.2	(9.1) 10	1.33
0.3	(7.2) 8	1.6
0.4	(6.2) 7	1.87
0.5	(5.6) 6	2.0
0.6	(5.2) 6	2.4
0.7	(4.8) 5	2.33
0.8	(4.5) 5	2.67
0.9	(4.3) 5	3.0
1.0	(4.2) 5	3.33

は最大で 50 vol.ppm であるから、置換の目安はタンク内あるいは配管内に入っているガスの濃度が 50 vol.ppm 以下となるようにすればよい。但し、この場合には置換しようとするタンクおよび配管内に液相あるいは固相の水、油、アルコール等の異物があってはならない。これらの異物が存在する場合には、タンクあるいは配管の加温または真空引きを行って異物を除去しなければならない。

一例として、タンク内あるいは配管内が大気圧 (0.101325 MPa_{abs}) にあると仮定した場合、内部のガスを 50 vol.ppm 以下まで置換する場合の圧力と回数の関係、および必要ガス量の比較を行った結果を表 F-3 に示す。置換圧力が低い場合には置換回数が増えるが、置換に必要な総ガス量は少なくて済む。

付録 G 2000 リットル LH₂ コンテナ

RJTF に LH₂ を搬入するのに用いられる 2000L コンテナは、(株)日本化学機械製造製および(株)テイサン (現在は(株)ジャパン エア ガシズ) 製の二種類がある。図

図 G-1 2000L-LH₂ コンテナの外観
((株)テイサン製コンテナ)図 G-2 2000L-LH₂ コンテナの圧力計と液位計
((株)テイサン製コンテナ)

G-1 および図 G-2 に各々、(株)テイサン製コンテナの外観および計器類の写真を示す。これら二つのコンテナは弁類のレイアウトとタグ番号が異なるが、形状、配管の系統はほぼ同じである。図 G-3 および図 G-4 に各々、(株)日本化学機械製造製コンテナおよび(株)テイサン製コンテナの配管系統を示す。計器としては、圧力計 (ブルドン管式)、差圧式液面計 (電気式)、検液計 ((株)テイサン製コンテナには無い) を備えている。検液

表 G-1 2000L-LH₂ コンテナの差圧と LH₂ 液量の関係2000L LH₂コンテナ 液面-容積換算表 (株)日本化学機械製造製容器)

差 圧 (mmAq)	液 量 (L)	重 量 (kg)	ガス量 (m ³)	差 圧 (mmAq)	液 量 (L)	重 量 (kg)	ガス量 (m ³)
0	0	0	0	48	1224.5	86.9	973.7
1	3.7	0.3	2.9	49	1257.8	89.3	1000.2
2	10.6	0.8	8.4	50	1291.1	91.7	1026.7
3	19.7	1.4	15.6	51	1324.4	94	1053.1
4	30.5	2.2	24.3	52	1357.6	96.4	1079.5
5	42.9	3	34.1	53	1390.7	98.7	1105.9
6	56.7	4	45.1	54	1423.8	101.1	1132.2
7	71.5	5.1	56.9	55	1456.8	103.4	1158.5
8	87.7	6.2	69.7	56	1489.7	105.8	1184.6
9	104.5	7.4	83.1	57	1522.5	108.1	1210.7
10	122.7	8.7	97.5	58	1561.9	110.9	1242.1
11	141.8	10.1	112.7	59	1594.4	113.2	1267.8
12	165	11.7	131.2	60	1626.4	115.5	1293.3
13	185.9	13.2	147.8	61	1658.4	117.7	1318.8
14	207.7	14.7	165.2	62	1690.1	120	1343.9
15	230.3	16.4	183.1	63	1721.4	122.2	1368.9
16	253.2	18	201.3	64	1752.3	124.4	1393.4
17	277.1	19.7	220.4	65	1783.1	126.6	1417.9
18	301.3	21.4	239.6	66	1813.3	128.7	1442
19	326.4	23.2	259.6	67	1843.5	130.9	1465.9
20	352.2	25	280	68	1873.3	133	1489.7
21	378.2	26.9	300.8	69	1902.7	135.1	1513
22	405.1	28.8	322.1	70	1931.8	137.2	1536.1
23	432.1	30.7	343.6	71	1960.4	139.2	1558.9
24	459.9	32.7	365.7	72	1988.6	141.2	1581.3
25	488.2	34.7	388.2	73	2016.3	143.2	1603.4
26	516.8	36.7	411	**** 74	2043.3	145.1	1624.8
27	545.9	38.8	434.1	**** 75	2070.1	147	1646.1
28	575.3	40.8	457.5	**** 76	2096.1	148.8	1666.8
29	605.2	43	481.2	**** 77	2121.8	150.6	1687.2
30	635.4	45.1	505.3	**** 78	2146.9	152.4	1707.2
31	665.7	47.3	529.4	**** 79	2170.9	154.1	1726.3
32	696.5	49.5	553.9	**** 80	2194.8	155.8	1745.3
33	727.4	51.6	578.4	**** 81	2221.6	157.7	1766.6
34	758.8	53.9	603.4	**** 82	2243.9	159.3	1784.3
35	797.3	56.6	634	**** 83	2265.3	160.8	1801.3
36	829.3	58.9	659.4	**** 84	2286	162.3	1817.8
37	861.6	61.2	685.1	**** 85	2305.8	163.7	1833.6
38	893.9	63.5	710.9	**** 86	2324.8	165.1	1848.7
39	926.5	65.8	736.7	**** 87	2342.9	166.3	1863
40	959.3	68.1	762.8	**** 88	2359.6	167.5	1876.3
41	992.1	70.4	788.9	**** 89	2375.6	168.7	1889.1
42	1025.2	72.8	815.2	**** 90	2390.3	169.7	1900.7
43	1058.3	75.1	841.5	**** 91	2403.9	170.7	1911.6
44	1091.4	77.5	867.9	**** 92	2416.1	171.5	1921.3
45	1124.6	79.8	894.3	**** 93	2426.8	172.3	1929.8
46	1157.9	82.2	920.8	**** 94	2435.6	172.9	1936.8
47	1191.2	84.6	947.2	**** 95	2442.2	173.4	1942

1) **** は過充填領域

2) 最高充填量(内容積の90%)は差圧 73mmAq (容積=2016.3L、重量=143.2kg、ガス容積換算=1798.5Sm³)3) LH₂液密度=0.071kg/L、LH₂液温度=20.4K、分子量=2.02、圧力= 0.0kg/cm²G (1atm)

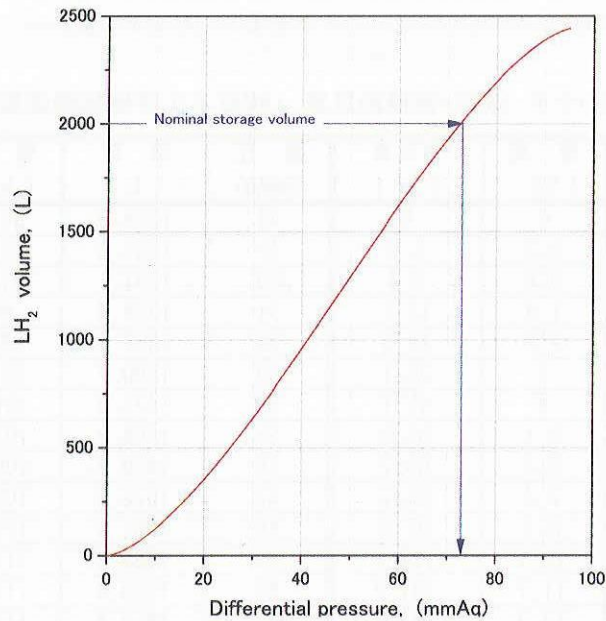


図 G-5 2000L-LH₂ コンテナの差圧と LH₂ 液量の関係

付録 H LH₂ の製品安全データシート (MSDS)

製品安全データシート

会 社 太平洋液化水素株式会社
電話番号：03-3438-2764
FAX 番号：03-3435-7706
緊急連絡先 昭和電工株式会社 大分工場
電話番号：0975-21-5118

作成 1993 年 3 月 31 日

整理番号 No. G-007 (全 3 ページ)

製品名	液化水素
-----	------

物質の特定

単一製品・混合物の区分 単一製品
化学名 水素
含有量 ≒100 Vol.%
構造式 H₂
官報公示整理番号 対象外
(化審法、安衛法)
CAS No. 1333-74-0
国連分類 クラス 2.1

国連番号 1966

危険有害性の分類

分類の名称： 高圧ガス （液化ガス）
危険性： 可燃性ガス。空気と混合すると爆発性の混合ガスを形成する。
有害性： 水素自体は無害で毒性はない。極低温のため凍傷を起こす。
空気中の酸素濃度を低下させ酸素欠乏を起こす。

応急措置

液化水素及び蒸発した直後のガスは極めて低温である。

目に入った場合： 15 分以上浄水で洗い、医師の診断を受ける。
皮膚に付いた場合： 凍傷を起こす。凍傷を起こした部分はこすってはならない。
凍傷患部は体温程度の温水で温め、医師の診断を受ける。
体温が低下するほどひどい場合には温水浴槽に入れる。
ショックに対する保護も考慮する。
吸入した場合： 大量吸入の場合には酸素欠乏に対する措置を行う。患者を新鮮な空気
の場所に移し安静にする。呼吸が停止している場合には人工呼吸を行
い、医師の診断を受ける。

火災時の措置

水素の炎は殆ど目に見えない。（A B C 粉末消火剤をかけることにより、
炎色反応で炎の大きさ・形・噴出状況がわかる。）しかもその火炎は輻
射熱が少なく、炎の外ではあまり熱を感じない。火炎に触れるとひど
い火傷を起こす。消火作業には耐熱用の保護衣、保護手袋を使用する。
消火方法： 液の流出を止める。液漏れを止められない場合には、設備の損傷等火
災の拡大や類焼を防止するため噴霧散水しながら、水素が無くなるま
で燃焼させる。液化水素に直接水をかけてはならない。消火すると漏
洩ガスにより爆発を起こし被害を拡大させる恐れがある。
消火剤： A B C 粉末消火器、散水

G-007 液化水素 2/3

漏出時の措置

- ・ 蒸発したばかりの水素ガスは空気と同様な比重をもつ。液化水素がガスになると約 8
5 0 倍のガスとなる。大気中に流出した液化水素は、ガス化して空気中の湿気を凝縮
し白雲を生じる。可燃性混合ガスの範囲は蒸気雲以上に拡大している可能性があるの
で、緊急処置を行う者以外は危険区域外に退避させる。
- ・ 全ての火源を取り除き換気に努める。漏洩区域に入る場合には着火による災害や、凍
傷、酸素欠乏等による災害を防止するため、保護具等を着用する。密閉場所に入る場
合にはガス濃度等を確認の後に処置を行う。ガスの供給を遮断弁、元弁の操作により
断つ。また容器等では内圧を下げる処置を行う。できれば容器等の安全な場所への搬
出を行う。

取扱いおよび保管上の注意

火気の管理を十分に行う。通風良好な場所で取り扱う。
取扱い： 液化水素を空気に触れさせない、漏らさない。液化水素や液化水素温度に

なっている機器に直接触れない。容器は転倒、転落、衝撃を防止する。
保 管： 火気厳禁で、引火性、発火性のものを周囲に置かない。酸化剤と一緒に貯蔵しない。通風良好な場所で貯蔵する。

=====
暴露防止措置

管理濃度： 設定されていない。
設備対策： 健康障害に対する措置の規定はない。
保護具： 凍傷を防止するため保護衣を着用する。保護衣にはポケットやズボンの裾の折り返しのないものとし、裾は長靴の外になるようにする。液体が飛散したり、霧状になる危険性が予想される場合には保護衣を使用して凍傷、突沸及び火災発生による火傷をさける。また必要に応じて陽圧式の空気呼吸器等の保護具を使用する。
保護眼鏡： 液化水素が飛散して目に入る場合には、顔面プロテクターか保護眼鏡を使用する。
保護手袋： 液化水素の取扱は革手袋を使用する。手袋はその中に液化水素が飛散して侵入したときすぐに脱げるよう、大きめのものを使用する。

☆静電気防止用の保護衣、靴を着用する。

=====
物理／化学的性質

外観等： 無色、無臭
沸点： -252.9 ℃
融点： -259.14 ℃
ガス比重： 0.0695 （空気＝1）
液密度： 0.0708 (-252.9 ℃、 760 mm Hg)
その他： あらゆる液化ガスの中で最も軽い。気化速度は早い。ヘリウム以外のガスは固化する。

=====
G-007 液化水素 3/3
=====

危険性情報 （安定性－反応性）

発火点： 572 ℃
爆発限界： 上限：75.0 Vol.% 下限：4.0 Vol.% （空気中）
可燃性： 燃焼時の炎は無色であり、明るい場所では特に目で見分けにくい。
自己反応性・爆発性： 酸化剤と活発に、時には爆発的に反応する。塩素との混合ガスに光を当てると常温でも激しく反応する。
安定性・反応性： 常温では比較的安定であるが、フッ素とは常温でも反応する。
その他： 常温では金属腐食はないが、高温高压下では鋼中の炭素と反応し鋼を脆化させる（水素脆化）。
低温域では一般の炭素鋼は低温脆化を起こすので、アルミニウムかオーステナイト系ステンレス鋼を使用する。

=====
有害性情報 （人についての症例、疫学的情報を含む）

- ・現在のところ確定された有害性の情報はない。

環境影響情報

- | | |
|------|------------------------|
| 蓄積性： | 空気より軽く、上昇し拡散するので蓄積しない。 |
| 魚毒性： | 現在のところ確定された情報はない。 |
-

廃棄上の注意

- ・廃棄は容器と共に行わず、製造者または販売店に引取りを依頼する。
 - ・水素ガス廃棄の場合には通風良好で、火気のない場所で少量ずつ放出する。
 - ・大量廃棄の場合には、ベントスタック等により放出する。
-

輸送上の注意

☆高圧ガス取締法、移動の基準を遵守

- ・容器は転落・転倒・衝撃を防止し、粗暴な扱いをしない。
 - ・運搬車は警戒標を掲げ、防災工具・消火器等を常備する。
 - ・火気の使用を禁止する。
-

適用法令

- ・高圧ガス取締法
 - ・労働安全衛生法
-

その他・引用文献等

- 1) 化学便覧
 - 2) 安全工学便覧
-

本「製品安全データシート」の原案は水素工業会にて作成したものである。
記載内容のうち、含有量、物理化学的性質等の数値は保証値ではありません。
危険・有害性の評価は、現時点で入手できる資料・情報・データ等に基づいて作成しておりますが、すべての資料を網羅したわけではありませんので取扱いには十分注意して下さい。

付録Ⅰ 1000 リットル LH₂ ランタンク

図 I-1 に RJTF に設置されている LH₂ ランタンクの外観を示す。本ランタンクは充填液量あるいは残液量を測るための差圧式液面計 (LIA-520) と熱電対式ポイントセンサー (上部センサー: TE-528、下部センサー: TE-529) を備えている。差圧式液面計の信号は現場と計測制御室モニターの 2 か所に表示されるが、現場の表示単位は kPa、計測制御室モニターの表示単位は % である。図 I-2 (a) および図 I-2 (b) に各々、液面計の現場表示例および制御室モニター上の表示例を示す。ポイントセンサーの装着位置は上部センサーが液面高さ 2217.5 mm (残液量 952.0L 相当)、下部センサーが液面高さ 303.5 mm (残液量 106.5L 相当) である。ポイントセンサーはランタンク内の温度の監視、および試験時に LH₂ 残量が下限を切った場合に停止をかけるために用いられる。表 I-1 および図 I-3 に差圧と LH₂ 充填 (残液) 量の関係を示す。本ランタンクに充填できる LH₂ の最大容積は、タンクの幾何容積の 90 % である 1001.2L である。最大充填時の差圧計 (LIA-520) の指示は現場表示で 1.622kPa、計測制御室モニター表示で

88.4% である。実際には、導圧管内における LH₂ の気化によると思われる差圧計の指示の変動があるため、平均的な値を用いると良い。また、試験時におけるランタンク加圧状態下では、加圧ガスの影響によって差圧計の指示値は 10~20% 程度 (LH₂ 液量および加圧圧力によって異なる) 低い値を示す。

本ランタンクは二重殻構造を持ち、内槽と外槽の間に多層真空断熱 (Super Insulation) を施して外部からの熱侵入による LH₂ の蒸発を抑えている。蒸発率を実測した結果、最大充填量 (1000L) の LH₂ をランタンクに満たし、静置した場合の蒸発率は 10.4%/day (仕様は 15%/day 以下) であった。すなわち、ランタンクに 1000L の LH₂ を充填して 1 日放置した場合には、104L が蒸発することになる。ちなみに、LH₂ の搬入に用いられる 2000L コンテナの蒸発率は 1.5%/day (仕様) であり、本ランタンクよりも一桁小さい。多層真空断熱層の真空度が低下すると蒸発率が大きくなるので、使用予定時期の直前の定期検査で真空引きを実施する。真空度は高いほど望ましいが、 1×10^{-2} Torr 以下を目安とする。



図 I-1 RJTF-LH₂ ランタンクの外観

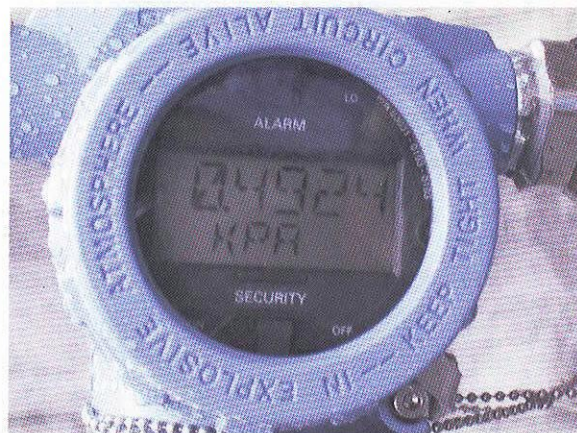


図 I-2 LH₂ ランタンク液面計の表示
(a) 現場表示の一例

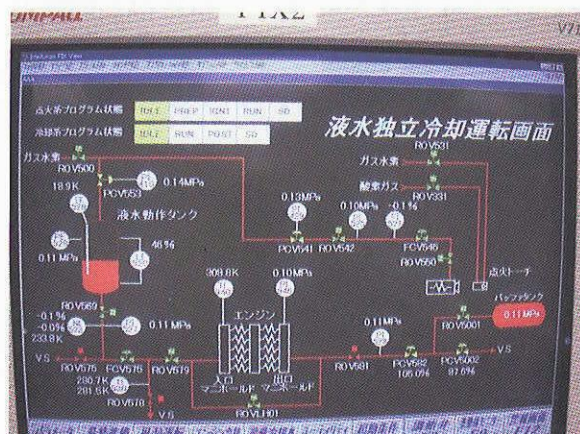


図 I-2 LH₂ ランタンク液面計の表示
(b) 制御室内モニター上の表示の一例

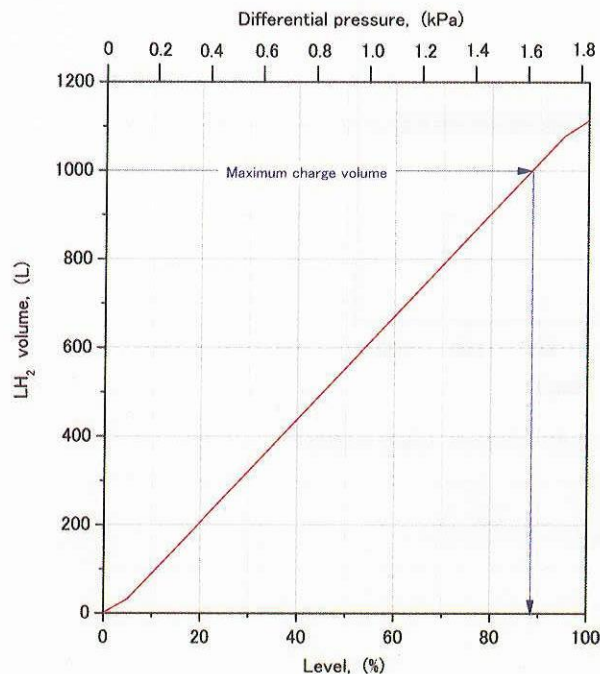
表 I-1 LH₂ ランタンクの差圧と LH₂ 充填量の関係RJTF 1000L LH₂ランタンク 差圧-容積換算表

差 圧			液面高さ	液容積	液重量	ガス換算容積	備 考
(%)	(mmAq)	(kPa)	(mm)	(L)	(kg)	(Sm ³)	
0	0	0.0000	0	0	0	0.00	
5	9.4	0.0922	131.7	31.3	2.22	27.88	
10	18.7	0.1834	263.4	88.7	6.3	79.13	
15	28.1	0.2756	395.1	146.9	10.43	131.00	
20	37.4	0.3668	526.8	205.1	14.56	182.87	
25	46.8	0.4589	658.5	263.3	18.69	234.75	
30	56.1	0.5502	790.1	321.5	22.82	286.62	
35	65.5	0.6423	921.8	379.6	26.96	338.62	
40	74.8	0.7335	1053.5	437.8	31.09	390.49	
45	84.2	0.8257	1185.2	496	35.22	442.36	
50	93.5	0.9169	1316.9	554.2	39.35	494.24	
55	102.9	1.0091	1448.6	612.4	43.48	546.11	
60	112.2	1.1003	1580.3	670.5	47.61	597.98	
65	121.6	1.1925	1712	728.7	51.74	649.85	
70	130.9	1.2837	1843.7	786.9	55.87	701.73	
75	140.3	1.3759	1975.4	845.1	60	753.60	
80	149.6	1.4671	2107	903.3	64.13	805.47	
85	159	1.5593	2238.7	961.4	68.26	857.35	
88.4	165.4	1.6220	2328.8	1001.2	71.09	892.89	満 量
**** 90	168.3	1.6505	2370.4	1019.6	72.39	909.22	過充填
**** 95	177.7	1.7426	2502.1	1077.4	76.49	960.71	過充填
**** 100	187	1.8338	2633.8	1112.2	78.97	991.86	過充填

1) **** は過充填領域

2) 最高充填量(内容積の90%)は差圧 1.622kPa (容積=1001.2L、重量=71.1kg、ガス容積換算=892.9Sm³)

3) LH₂液密度=0.071kg/L、LH₂液温度=20.4K、分子量=2.02、圧力= 0.0kg/cm²G (1atm)

図 I-3 LH₂ ランタンクの差圧と LH₂ 充填量の関係

ランタンク内の LH_2 が蒸発した後、内槽の温度上昇特性を調べた結果を図 I-4 に示す。図に示した温度は内槽下部温度（TE-529、流体温度を測定）であり、残量 10% のポイント液面センサーとして使用されているものである。 LH_2 が完全に蒸発した後、内槽の温度は急激に上昇し、約 8 日で 100K に達している。100K 以上では上昇率が徐々に低下しており、内槽温度が常温に復帰するまでには約半年を要すると思われる。 LH_2 が完全に蒸発してから 3 日後に内槽の GHe 置換（0.7MPaG×4 回）を行っているが、置換による温度上昇は僅か 3K であった。これらのことから、ランタンク内の LH_2 が一旦無くなった場合、 LN_2 によるジャケットの再予冷無しで LH_2 を再充填できる期間は最大で 8 日程度と見積もられる（内槽温度 100K 以下）。ランタンクの内槽温度が 100K 以上になった場合でも、直接 LH_2 を再充填することは可能であるが、内槽の冷却に使われる LH_2 の量が増えるため、 LH_2 コンテナから送液された LH_2 量に対してランタンクに溜まる LH_2 の割合が低くなる。

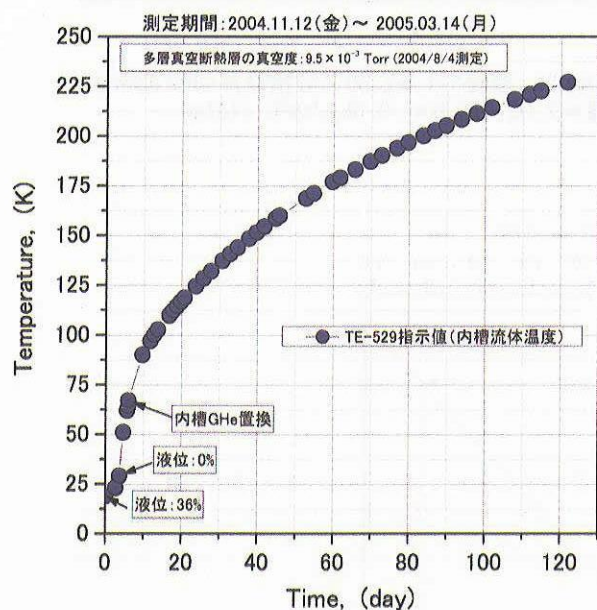


図 I-4 LH_2 ランタンク内槽の温度上昇特性（熱侵入特性）

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-05-001

発 行 平成 17 年 9 月 1 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 弘久写真工業（株）

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

© 2005 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工作することを禁じます。



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency