公開用

終了報告書

SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「液化水素用ローディングシステム開発とルール整備」

研究題目「液化水素を用いた試験の実施」

研究開発期間:平成27年12月8日~平成31年3月31日 研究担当者: 小林 弘明 所属研究機関:国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

目次

1. 本研究の目的
2. 研究開発目標とマイルストーン
 3.研究実施内容・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3-4. まとめ
3-5. 今後の課題 ····································
4. 外部発表実績
5.参考文献
図表一覧 図1.供試体配置図

- 図2. 極低温推進剤試験エリア
- 図3. ERS 供試体の様子
- 図4. ERS 性能確認試験 システムブロック図
- 図5. ERS 性能確認試験ガス供給系統図
- 図6. ERS 性能確認試験 計測・操作系統図
- 図7. ERS 性能確認試験における切離しの様子
- 図8. ERS 性能確認試験における分離面の着火(弁体ネジ穴部の閃光)と損傷状況
- 図9. 液体空気の滴下による気泡崩壊
- 図10. 気泡崩壊を起こす2つの要因

図11. 気泡崩壊による着火:3つのシナリオ 図12.シナリオ①の検証実験装置 図13. サブクール用液化水素の供給系 図14.実験の様子(左:実験装置全景、右:デュワ) 図15. 高速度カメラによる観測(1) 図16. 高速度カメラによる観測(2) 図17. 多成分気泡の崩壊 図18. 気泡崩壊による気泡温度上昇(初期温度 300K) 図19. 多成分気泡発生·可視化装置 図20. 観測した現象①~5 図21. サブクール液体窒素中の気泡の代表的な挙動(現象①②③) 図22. サブクール液体窒素中の GOX 気泡(現象④) 図23. 温度計測データ 図24.実験装置の模式図(本実験用) 図25.予備実験の様子 図26. SJ 荷重試験供試体概略図 図27. SJ 荷重試験 システムブロック図 図28.SJ荷重試験 高圧ガス供給系統図 図29.SJ 荷重試験 計測・操作系統図 図30. 絶縁ガスケット及び SJ 荷重試験時の様子 図31.SJ荷重試験 計測結果の例 図32. SJ 耐久試験供試体概略図 図33. 異常検知システム 図34. SJ 耐久試験供試体 システムブロック図 図35.SJ耐久試験 高圧ガス供給系統図 図36.SJ耐久試験装置の設置状況 図37. SJ 耐久試験 リーク量の測定結果例 表1. ERS 性能確認試験 計測項目 表2. SJ 荷重試験 計測項目

1. 本研究の目的

液化水素ローディングシステムは、大量の水素需要に対応する水素サプライチェーンの うち、海外の液化水素基地から液化水素運搬船への荷積み、また国内において運搬船から 国内基地への荷揚げ作業において、陸側・海側双方の設備を結ぶ重要なインターフェース であるが、同システムは未だ世の中に存在せず、関連する安全対策や安全基準も検討され ていない。東京貿易エンジニアリング株式会社及び川崎重工業株式会社において、液化水 素用の緊急離脱機構及び揺動対応継手(スイベルジョイント)の開発を行っているが、最 終的には製作した実機について、液化水素を用いた各種試験を実施し、安全面等の検証を 行うことが、液化水素ローディングシステムの実用化レベルの開発を行うためには必要不 可欠である。

2. 研究開発目標とマイルストーン

東京貿易エンジニアリング株式会社および川崎重工業株式会社が共同で開発している液 化水素ローディングシステムの緊急離脱機構および可動式継手部(スイベルジョイント) について、実液(液化水素)を用いた単体での性能確認試験を、東京貿易エンジニアリン グ株式会社および川崎重工業株式会社と協力して能代ロケット実験場にて実施する。

- 平成27年度:液化水素を用いたシール構造・材質確認試験の準備
- 平成28年度:LH2シール構造・材質確認試験の完了
- 平成29年度:液化水素を用いた性能確認試験の完了
- 平成 30 年度:液化水素を用いた性能確認試験のフォローアップ(発火メカニズムの解明)
- 3. 研究実施内容
- 3-1. 液化水素を用いた緊急離脱機構性能確認試験の実施

液化水素ローディングシステムの主要な構成要素である緊急離脱機構(以下 ERS と略 す。)の総合的なシステム評価に必要なデータを取得するため、平成 27 年度に液化水素を 用いた試験実施要領を策定し、平成 28 年度にシール構造・材質確認試験を実施した。翌 29 年度には、前年度の試験結果を踏まえて設計、製作した ERS プロトタイプ機の性能確認試 験を実施した。当初計画していた試験はいずれも 1 回(1 シリーズ)であったが、初回の 試験において、試験供試体や試験装置に改修を施す必要が判明したことから、シール構造 や材質及び試験装置に改良を加えた上で、複数回にわたって実施した。特に ERS プロトタ イプ機の性能確認試験においては、ERS 動作時に弁体切離し面から発火する現象が見られ たことから、発火防止対策を施した上で再試験及び再々試験に臨み、計 3 回(3 シリーズ) 試験を実施した。一連の試験によって発火の可能性が少ない構成(材質、形状)を導出で きたことから、平成 29 年度に計画通り ERS 性能確認試験を完了した。

3-1-1. ERS 性能確認試験概要

本研究開発では、2020年頃に竣工する小規模な液化水素運搬船における荷役を想定し、 配管口径が150mm程度の小規模なローディングシステムのERSについて、液化水素の荷 役中の配管表面に液化空気が生じない断熱構造の研究開発を行い、実機を製作して各種試 験を実施し、安全面等の検証を行うことを目指していた。平成28年度には簡易断熱方式の 実機部分モデルを試作してシール構造及び材質の評価に必要なデータを取得し、平成29年 度には、真空断熱方式の実機モデル(以下、供試体と呼ぶ)を試作して、ERS 総合システ ムの検証(ERS 性能確認試験)を行った。試験では、供試体に液化水素を充填し、充填状 態にて弁体の切離しを実施、その後上部弁体を加圧し、数種類の圧力条件でシールからの 漏洩量を計測した。供試体の設計は川崎重工と東京貿易エンジニアリングが担当し、製作 は東京貿易エンジニアリングが担当した。供試体内部上下に弁体があり、油圧により外部 の締結クランプを取り外すことで、上下の弁体が閉弁するようになっている。

以下に供試体の仕様を示す。

- 内容積:約42L(供試体切離し前)
- 設計圧力:1.0PaG
- 強度安全率:4.0
- 重量:約 550kg (フレーム込みで約 4,000kg)
- 各種ポート
 - ① LH₂下部充填
 - ② LH₂ 上部充填
 - ③ He ガス加圧/ボイルオフガス排気
 - ④ ボイルオフガス排気
 - ⑤ 圧力センサ用
 - ⑥ 熱電対用(2ヶ所)
 - ⑦ リーク量検出ライン(1ヶ所)
- 断熱構造
 - 真空断熱構造
- 防爆構造
 警戒区域内に設置する電気品(計測機器、窒素ガス噴射用電磁弁)は、窒素パージボックスの中に収納し、内圧防爆相当の安全化措置をとる。
- 計測項目
 - ① 供試体の内部温度(熱電対:TK-1)
 - ② 供試体の内部圧力(圧力センサ: PK-1)
 - ③ ERC (緊急離脱継手)シリンダ油圧
 - ④ 緊急離脱機構稼働の様子(映像記録,高速度映像記録)
 - ⑤ 緊急離脱機構動作時の風下水素濃度(第2シリーズ試験)
- 操作項目
 - ① 高圧ガススタンドバルブ類
 - ② エアシリンダ
 - ③ モーメント用シリンダ
 - ④ 軸力用シリンダ
 - ⑤ ERC(緊急離脱継手)シリンダ
 - ⑥ 上部弁体カバー用エアシリンダ(第3シリーズ試験)
 - ⑦ 窒素ガス噴射バルブ(第3シリーズ試験)

試験は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(以下 JAXA と略す。)能代ロケット 実験場で実施した。同実験場は、秋田県能代市南部の日本海に面した南北に細長い敷地 にある JAXA の付属研究施設の一つであり、内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられる 観測ロケット、科学衛星及び探査機打上用 M ロケットの研究開発に必要な各種固体ロケ ットモータの地上燃焼試験を行うために 1962 年に開設された。最大で 1km の保安距離 を確保できることから、我が国の宇宙推進エンジンの研究開発にとって重要な役割を果 たしている。また同実験場は、JAXA 宇宙科学研究所が推進している大学共同利用研究 の場としても活用され、液化水素を用いる多数の共同研究が実施されている。ERS 性能 確認試験は、実験場内の極低温推進剤試験設備で実施した。極低温推進剤試験設備は、 30m³液化水素貯槽、20m³液化酸素貯槽、10m³液化窒素貯槽、圧縮水素/圧縮酸素/圧 縮窒素/圧縮へリウム供給設備などから構成され、液水/液酸ロケットエンジンの開発 や液化水素を用いる各種基礎研究に用いられている。設備と供試体の配置レイアウトを 図1に示す。極低温推進剤試験エリア(30m³液化水素貯槽その他)の写真を図2に、ERS 供試体の様子を図3に示す。



図1. 供試体配置図



図2. 極低温推進剤試験エリア



図3. ERS 供試体の様子

3-1-2. ERS 性能確認試験時の安全対策

ERS 性能確認試験の供試体は開発品であることから、試験時に予期せぬ事態が発生する ことを想定して、安全を確保する必要がある。このため、高圧ガス保安法が定める離隔距 離ではなく、JAXA 内部の安全基準が定める、より大きな保安距離を設定し、安全に試験 を実施することとした。試験時の安全に対する基本的な考え方を以下に示す。

本試験では、供試体に液化水素を充填(最大約 42L)し、離脱システムを動作させ、供 試体を上下に分割状態にする。供試体の分離後には、2 つの弁体間の液化水素が放出され、 さらに低温の弁体表面に液体空気が発生し、周辺に可燃性混合気が形成されることになる。 したがって、供試体の分割は総員退避を確実に確認してから実施する。また、可燃性混合 気に着火した際には延焼が落ち着くまで退避状態とし、その後へリウムガスパージにより 消火を試みる。これら一連の作業は、屋外において行う。 本試験における最悪の事故として、緊急離脱システム動作時に弁体による封止が適正に 行われず、結合状態の供試体に充填した液化水素が全量放出され、蒸気雲となり、さらに 空気と混合して爆発する状況を想定する。この想定における爆風圧、ファイアボールから 規定される保安距離は42mである(システムが想定通りに動作し、弁体が閉となれば、放 散される液化水素は充填した液化水素のうち極一部に抑えられる)。

供試体への加圧減圧時に加え、離脱システム動作時にも、周囲に人員が存在しないこと を確実に確認する。また放散した液化水素および蒸発した水素ガスが周囲の建物に滞留す ることを防ぐため、警戒区域内の建物の開口部には目張りを行い、戸は全閉であることを システム稼働前に確認する。

以上より、本試験では、供試体から半径 42m の範囲を警戒区域と定め、液化水素の充填 開始から、供試体内部圧力を放圧し、不活性ガスで置換するまでの間、関係者以外の立ち 入りを禁止する。また液化水素充填後、供試体への加圧や分割は、関係者を含め総員が警 戒区域外に退避したことを確認してから遠隔で行う。また供試体の加圧中に外観検査や周 囲での作業が必要となった場合は、供試体の圧力が安定し、かつ供試体周辺に異常がない ことを確認してから、限定した作業者がこれを行う。供試体周辺に立ち入る人員は必要最 小限(2名)とし、予め保安主任の許可を得るものとする。

センサなど一部の非防爆電気機器を供試体近傍(8m以内)に置く必要がある場合、これ らについては気密ボックスの内部に設置し、内部に窒素ガスを供給することで、内圧防爆 相当の安全化措置をとる。

発火防止対策の効果を確認する試験(第3回試験)においては、風速の影響を極力排除 するために、供試体回りに防風シートを取り付けた囲いを設置する。天井面は、試験時に は開放状態とする。防風シート(難燃性素材)が万一燃焼した場合は、予め定めた自衛消 防隊員のみが供試体に近づき、消火を試みるものとし、事前に消火訓練を実施する。

3-1-3. ERS 性能確認試験装置

本試験のシステム構成を図4に、またガスの供給系統を図5に示す。図5(a)は高圧ガ ス供給系統図である。能代ロケット実験場の30m³液化水素貯槽から真空断熱フレキシブ ルホースと試験スタンドを経由して供試体に液化水素が供給され、ボイルオフガス及び残 液は、設備のベントスタックから排出・処理された。第1シリーズ試験で使用した供試体 からの漏洩計測ラインパージシステム系統を図5(b)に、第3シリーズ試験で使用した発 火対策用高圧ガス系統図(液体酸素受けカバー駆動用のエアシリンダ系統と窒素ガス噴射 用の系統)を図5(c)に示す。図6に計測・操作系統図を、表1に計測項目を示す。



(a) 高圧ガス供給系統図図5. ERS 性能確認試験ガス供給系統図







(c) 発火対策用高圧ガス供給系統図(第3シリーズ試験)
 図5. ERS 性能確認試験ガス供給系統図(つづき)



図6. ERS 性能確認試験 計測・操作系統図

計測項目	点数	センサ等		
容器内圧力	各1	圧力計,圧力トランスミッター		
容器内部温度及び液位	1	熱電対		
ERCシリンダ油圧	2	圧力計		
ERS 稼働の様子	4	ビデオカメラ		
ERS 歪み	8	歪みセンサ(第1シリーズのみ)		
水素漏洩量	1	流量計(第1、第2シリーズのみ)		
リークライン圧力	1	圧力センサ(第1、第2シリーズのみ)		
緊急離脱時の水素濃度	11	水素濃度センサ(第1、第2シリーズのみ)		
ERS 稼働の様子	1	高速度カメラ(第3シリーズのみ)		

表1. ERS 性能確認試験 計測項目

3-1-4. ERS 性能確認試験実施要領

本試験における準備作業から各評価試験、及び後処理までの作業実施要領を以下に示す。

8

◆ 試験準備

- (1) 加圧ラインやパージラインに所定のボンベがセットされていること、全バルブが閉 じていることを確認し、減圧弁 PRV-1,2,3 を所定の圧力にセットする。
- (2)供試体内をヘリウムガスにより置換する。
- (3) THV-153, RV-1を開けて液化水素が通過するラインを予冷した後、HV-1を開、RV-1を閉にして液化水素を充填ラインより供試体内部に充填する。温度計 TK-1 が液 化水素温度で安定することを確認し、計測位置までの液化水素の充填を判断する。
- (4) 液化水素がオーバーフローするまで、充填を継続する。
- ◆ 強度試験(第1シリーズ試験のみで実施)
 - (1) 全バルブを閉止し、内圧 1.0MPa まで加圧する。
 - (2) モーメント用シリンダを駆動させ、10分間の強度試験を実施する。
- ◆ 切離し予備試験(第1シリーズ試験のみで実施)
 (1) ERC シリンダを駆動させ、切離し動作に問題ないことを確認する(2回)。
- ◆ 低温漏洩試験(第1シリーズ試験のみで実施)
 - (1) HV-1 を閉し、ERC シリンダを駆動させ、緊急離脱システムを作動させる。システ ム作動時は液化水素が周囲に散布されるため、警戒区域より退避した状態で実施す る。軸力用シリンダ及びモーメント用シリンダを駆動させる。その後、排液ドレン 弁 RV-5 を開にする。
 - (2) ビデオカメラにて緊急離脱システム稼働の様子を確認し、周囲の状況が安定したら、 供試体付近の退避を解除し、下部供試体を上部供試体の下から移動させる。
 - (3) 上部供試体の下にリークガス回収容器をセットする。
 - (4) リークガス回収容器内を水素ガスにより置換する。水素ガスボンベからリークガス 回収容器につながる手動弁 LHV-1,7, LRV-3A,3B を開く。一定時間流したのち、 LHV-1,LRV-3A,3B を閉じる。
 - (5) 軸力用シリンダを駆動させ、上部供試体とリークガス回収容器を接続する。
 - (6) HV-3 を開き、供試体上部から液化水素を再充填する。
 - (7) スタンド点から退避後、RV-2 を遠隔により開け、ヘリウムガスにより供試体内部 を所定の圧力(0.3, 1.0 MPaG で 2 回ずつ、計 4 回)に加圧する。
 - (8) その後、漏洩量計測ラインの流量計下流の自動弁 LRV-3A,3B を遠隔で開け、漏洩 流量を計測する。
 - (9) 各温度計から供試体内部の残液量を確認し、必要に応じて供試体を RV-3 開で放圧 したうえで、一旦退避を解除し、供試体上部から液化水素を補充填する。
- ◆ 発火対策評価試験(第2シリーズ及び第3シリーズ試験)
 - (1) HV-1を閉し、軸力用シリンダ、モーメント用シリンダの油圧を印加したのち、ERC シリンダを駆動させ、緊急離脱システムを作動させる。その後、排液ドレン弁 RV-5を開にする。
 - (2) エアシリンダを駆動させ、液体空気受けカバーを駆動させる(第3シリーズ試験の み)。

- (3) RVN-1,2,3 を開にし、供試体切離し面への窒素ガス噴射を開始する(第3シリーズ 試験のみ)。
- (4) ビデオカメラにて緊急離脱システム稼働の様子を確認し、周囲の状況が安定したら、 供試体付近の実験班員のみ退避を解除する。
- ◆ 後処理
 - (1) 排気弁 RV-3 を遠隔操作して、供試体内部を減圧する。
 - (2)供試体内部をヘリウムガスにより置換する。

3-1-5. ERS 性能確認試験結果

平成29年5月8日~5月20日に、第1シリーズの試験を実施した。試験は、中二日(1日目:供試体昇温、2日目:供試体弁体交換)を置いて実施した。試験期間中に計3回の切離し試験を実施し、切離し動作の確認、放出される液化水素の蒸発/拡散の様子の観測、切離し後の弁体からの漏洩量計測を実施した(図7)。全ての試験において、正常な切離し動作が確認でき、その後のリーク量計測も行うことができた。しかしながら、3回実施した分離試験のうち2回において、分離動作直後のERS弁体付近で小規模な着火が確認された(図8)。これを受けて、故障の木解析による原因分析を行い、起こりうる現象を網羅的に検討した結果、可能性のある原因として、以下を抽出した。

- ① GFRP 製弁体のエポキシ樹脂が液体酸素と反応
- ② GFRP 製弁体表面に残存した油脂が液体酸素と反応
- ③ ボルト(金属)又はGFRP(樹脂)が帯電、両材料の間に生じた電位差により放電 して着火



図7. ERS 性能確認試験における切離しの様子



図8. ERS 性能確認試験における分離面の着火(弁体ネジ穴部の閃光)と損傷状況

上記の対策として、弁体表面を液体酸素適合性の高い銅合金 C3771 で被覆し帯電を最小限にするとともに、内部の材料も PTFE 系の材料を適用し、平成 29 年 8 月 17 日~8 月 30 日に、第 2 シリーズの分離試験を実施した。しかしながら、3 回実施した分離試験のうち 1 回において、分離動作直後の ERS 弁体付近で小規模な着火が再び確認され、施した着火対策が十分でなかったことが判明した。

第2シリーズ試験での着火現象を受けて、弁体の材質や形状以外の原因候補を探す必要 が生じたことから、文献調査含めて再度原因究明を行った結果、液体空気中の気泡崩壊現 象により局所的な高温が生じて着火するという Cavitation induced ignition が生じた可能 性を抽出した。Cavitation induced ignitionのメカニズムを図9に示す。可燃性混合気中 で液体空気が滴下することで、可燃性混合気の気泡を液体空気中に巻き込み、これが滴下 衝撃もしくは液化水素による過冷却によって気泡崩壊を起こし、それが着火源となる可能 性があるとする仮説である。

Cavitation induced ignition を防止するためには、液体空気の滴下を防止するのが最も 効果的であることから、上部弁体に可動カバー機構を取り付け、分離後に液体空気の滴下 を防止できるようにした。同改良を施した供試体を用いて平成 29 年 12 月に第3シリーズ の分離試験を実施した結果、可動カバー機構を作動させた場合は着火が起きないことを確 認できた。



図9.液体空気の滴下による気泡崩壊

上部弁体から液体空気が滴下し、周囲の可燃性混合気を巻き込んだ混合気泡を 下部弁体表面上に生成、これが気泡崩壊することで局所的な着火源となる。 3-2. 着火メカニズム解明のための実験

ERS 切り離し時に見られた着火現象のメカニズムを解明することを目的として、平成 30 年度にフォローアップの基礎実験を実施した。

3-2-1. Cavitation induced ignition

キャビテーション気泡が崩壊する際に、衝撃波を伴うことはよく知られており、これに よって流体振動や、固体表面の壊食が引き起こされる[1]。さらに、気泡崩壊によって着火 に至る可能性について着目した研究事例として、米国の Osipov らは、液化水素タンクと液 体酸素タンクを衝突させた場合に起こりうる Cavitation induced ignition について理論解 析し、水素の着火が生じうることを示唆しているが、現時点では仮説にとどまっており実 証されたものではない[2]。また、Simon らは、超音波洗浄機のキャビテーションが着火源 になる可能性について実験的に検証しているが、着火までは確認できてない[3]。

気泡崩壊は、液中の気泡が、①飽和温度以下に冷却される「温度要因」、もしくは、②飽 和蒸気圧以上の圧力を受ける「圧力要因」のどちらかで発生する(図10)。ERS性能確認 試験において、分離直後の下部弁体温度は液化水素の大気圧飽和温度21Kであり昇温には 時間がかかる。ここに滴下する液体空気は、飽和温度以下に冷却されることになり、温度 要因の気泡崩壊が発生しうる。また、液体空気の滴下は液中衝撃波を生じ、圧力要因の気 泡崩壊が発生しうる。



図10.気泡崩壊を起こす2つの要因

次に、気泡崩壊による3つの着火シナリオを示す(図11)。シナリオ①は、液面近くの 衝撃波を伴う気泡崩壊が、液面上部の可燃性混合気に対する着火源となる、という仮説で ある。シナリオ②は、多成分気泡(例えば水素/空気)が非凝縮性成分を残して崩壊する際 の断熱圧縮で高温の収縮気泡を生成し、これが着火源となる、という仮説である。シナリ オ③は、液面に対する衝撃が液中衝撃波を発生させ、これが可燃性混合気の液中気泡に対 する着火源となる、という仮説である。



3-2-2. 着火シナリオ①の検証 シナリオ①の検証に使用した実験装置の構成を図12に示す。



図12.シナリオ①の検証実験装置

可燃性混合気を形成する実験空間は、長さ1mのアルミフレームを組み合わせた容積1m³ の立方体である。この実験空間に液体窒素を入れた真空断熱オープンデュワを設置し、デ ュワ内の銅コイル管に液化水素を通液することで、液体窒素をサブクール状態にする。そ こに窒素ガスを吹き込むことで、サブクール液中の気泡崩壊を発生させる。実験空間には 水素ガスを一定量混入しておき、気泡崩壊による着火の有無を確認する。サブクールにす るための液化水素は、30m³液化水素貯槽のサンプリングポートから最大 0.1MPaG で供給 し、設備のベントスタックから大気に気化放出させる(図13)。計測項目は、実験空間温 度(K熱電対)1点、デュワ内温度(T熱電対)2点、通常カメラ1点、及び高速度カメラ 1点である。操作項目は、電磁弁4台、及び可燃性混合気を燃焼処理するための点火器1 台である。実験装置の全景と、デュワを図14に示す。



図13. サブクール用液化水素の供給系



図14.実験の様子(左:実験装置全景、右:デュワ)

液化水素によって凝固点(63K)付近まで冷却されたサブクール液体窒素中に、窒素ガスを吹き込むと、図15に示すようにほぼ瞬時に崩壊する様子が確認された。対照のため ヘリウムガスを吹き込んだ場合の観察結果を図16に示す。気泡はほとんどサイズを変え ずに上昇していく様子が分かる。一方で、窒素気泡が崩壊する過程において衝撃波が発生 する様子を観測することはできなかった。また、水素・空気系の可燃性混合気(水素濃度 ~30%Vol.)中で気泡崩壊を多数発生させても、着火が起きることはなかった。このこと から、シナリオ①の可能性は低いと判断し、シナリオ②の検証に移行した。



図15. 高速度カメラによる観測(1) (90,000fps, 気泡成分:窒素ガス、液体窒素温度:64.6K、圧力:大気圧)



図16. 高速度カメラによる観測(2) (90,000fps, 気泡成分: ヘリウムガス、液体窒素温度: 64.6 K、圧力:大気圧)

3-2-3. 着火シナリオ②の検証

シナリオ②で検討する多成分気泡崩壊の模式図を図17に示す。例えば、水素と空気の 混合気がサブクール液体窒素中に混入した場合、空気、すなわち窒素と酸素の成分は、シ ナリオ①で示した通り、凝縮して液体窒素中に拡散することになる。一方、水素成分は凝 縮せずに残存し、サイズの収縮した単独成分の気泡を形成する。この過程において水素は、 当初混合気中の分圧から大気圧まで圧縮される。例えば、混合気中の水素の体積分率が3%、 初期温度が300Kである場合、気泡崩壊後の水素気泡温度は817Kで発火点を超えること になる(図18)。ただし、この計算は断熱圧縮を前提しており、実際には気泡が収縮する 過程で、周囲のサブクール液体窒素との熱交換によって冷却される効果や、濃度拡散によ る周囲から気泡内部への物質移動も考慮しなければならない。また、収縮の過程で酸素成 分が気泡中に残存していなければ、液中での着火は起こらない。







図18. 気泡崩壊による気泡温度上昇(初期温度300K)

シナリオ②を検証することを目的として、図19に示す多成分気泡発生・可視化装置を 新規に製作し、実験を行った。極低温対応のビューポートを2枚使用する可視化槽は、液 体窒素中の気泡を観測可能となっており、ここに微小流量コントロールされた窒素・ヘリ ウム・酸素・水素等の混合気を導入し、気泡崩壊の可視化と温度計測を行う。可視化槽は、 断熱のために内部観測が可能な真空容器に収納されるほか、外部からの入熱を除去するた めの外周コイル管を備える。本装置を用いて観測した現象は、

- :LN₂中における GN₂気泡の挙動
- :LN₂中における GHe 気泡の挙動
- ③ : LN₂ 中における二成分(GN₂+GHe)気泡の挙動
- ④ : LN₂中における GOX 気泡の挙動
- ⑤ : LN₂中における二成分(GOX+GH₂)気泡の挙動

である(図20)。



図19. 多成分気泡発生·可視化装置

図21に、現象①②③を高速度カメラによって観測した結果を示す。液体窒素温度は82 K、圧力は0.24 MPaGで、サブクール度7Kの条件で気泡を供給した。気泡サイズは直径 で約5mm、気泡の上昇速度:約0.5m/sである。二成分気泡の場合、気泡がいったん収 縮した後、サイズを変えずに上昇していく様子が確認された。



図21. サブクール液体窒素中の気泡の代表的な挙動(現象①②③)

一方、現象④で GOX 気泡をサブクール LN₂に供給したケースでは、GN₂気泡と全く同様に GOX 気泡が消失する様子を確認した。違いとしては、図22に示すように気泡界面に LOX と LN₂の密度差によるゆらぎが観測される点である。しかし、GOX 気泡を大気圧飽和の LN₂に供給したケースでは、気泡の大きさは全く変化しないことが判明した。78Kの LN₂は、飽和温度 91K の GOX に対して 13K のサブクール度があるにも関わらず、気泡崩壊が起きないという事実は、GOX 気泡が放出された直後に、速やかに濃度拡散によっ

て GN_2 成分に置換されていることを意味する。このことから、極低温における N_2/O_2 系の物質拡散の速度は、熱の移動より早い(Le 数(ルイス数)が1より小さい)ということが分かった。

現象⑤で GOX/GHe 気泡をサブクール LN₂に供給したケースでは、GN₂/GHe 気泡と同様の挙動で気泡崩壊することを確認したが、着火まで確認できなかった。図23の温度計 測データに示すとおり、気泡崩壊や着火による温度への影響も確認されなかった。

当初検討した二成分気泡の収縮過程は、物質拡散の影響が入っていなかったが、実験で GOX/LN₂系の気泡崩壊現象を観測した結果、物質拡散が熱移動の速度を上回るということ が判明し、検討の前提が正しくないことが明らかとなった。物質拡散の影響を考慮した場 合、空気が凝縮で消失し、水素気泡が一気に断熱圧縮されるのではなく、空気と水素の混 合気が少しずつ収縮していくメカニズムとなる。この場合、気泡が水素の着火温度を上回 ることは考えにくく、温度計測の結果もこれを支持している。このことから、液中衝撃波 の影響を考慮するシナリオ③の検証に移行した。



図22. サブクール液体窒素中のGOX気泡(現象④)



図23. 温度計測データ

3-2-4. 着火シナリオ③の検証

シナリオ③で検討する実験装置の模式図を図24に示す。液体窒素の粘度に近い特性の シリコンオイルをアクリル管に入れ、エア駆動のインパクタによって液面に衝撃を与え る。この衝撃が、GH₂/GOX 混合気泡に与える影響を、高速度カメラにより観測すること にした。2018 年 12 月に実施した予備実験(図 2 5)では、液面衝撃によって液中の気泡 がダイナミックに変形・崩壊する様子が捉えられており、現在、画像の分析と本実験の準 備を進めている。



図24.実験装置の模式図(本実験用)



図25.予備実験の様子(2018年12月)

以上の様に、気泡崩壊による着火の裏付けはまだ取れていないが、分離時に液体空気の 滴下を防止するカバーを作動させるようになってからは着火が見られてないことから、液 体空気が発火メメカニズムに関与している可能性が極めて大きいと言えよう。 3-3. 液化水素を用いたスイベルジョイント性能確認試験の実施

液化水素ローディングシステムの主要な構成要素であるスイベルジョイント(以下 SJ と 略す。)の耐荷重及び耐久性評価に必要なデータを取得するため、平成 27 年度に液化水素 を用いた試験実施要領を策定し、平成 28 年度にシール構造・材質確認試験(パッキン単体 試験)を実施した。翌平成 29 年度には、前年度の試験結果を踏まえて設計、試作した真空 断熱方式の SJ プロトタイプ機を用いて、荷重試験と耐久試験(長期動的性能試験)を実施 した。試験では、供試体に液化水素を封入し、作動状態で圧力及び荷重をかけ、パッキン 毎の漏洩量を測定した。供試体の設計は ERS と同様に、川崎重工と東京貿易エンジニアリ ングが担当し、製作は東京貿易エンジニアリングが担当した。当初計画していた試験はそ れぞれ1回ずつであったが、シール構造・材質確認試験は、1回の試験で評価に必要なデ ータを取得できなかったことから、供試体及び試験装置改修した上で2回実施した。荷重 試験は計画通り1回で完了した。一方、耐久試験は、長期に連続運転したこともあり、夜 間に数度の想定外の圧力上昇を経験して安全装置が働くことがあったが、運転方法を工夫 して規定回数の動的性能データを取得することができた。一連の試験により目標とした規 定条件を満足するデータを取得できたことから、平成 29 年度に計画通り SJ 性能確認試験 を完了した。

3-3-1. SJ 荷重試験

(1) SJ 荷重試験概要

図26にSJ荷重試験の供試体を示す。供試体に荷重受けを取り付け、油圧シリンダによりSJ 摺動部への荷重印加を実施した。以下に仕様を示す。

- 液化水素容量 :約 35L
- 設計圧力 : 1.0MPaG
- 強度安全率 : 4.3
- スイベルジョイントに荷重をかけ1次シールからのリーク量の測定を行う.
- 重量 :約 710kg (試験スタンドを含む)
- サンプルパッキン:2種
 ジャケット材質:シール単体試験で成績のよかった樹脂
 スプリング材質:コバルト合金(厚さ2種:スプリング力が異なる)
- ポート
 - ① LH₂充填
 - ② ボイルオフガス排気
 - ③ ボイルオフガス排気
 - ④ 圧力センサ用
 - ⑤ 熱電対用
 - ⑥ リーク量検出ライン
- 防爆構造

警戒区域内に設置する電気品は、簡易防爆窒素パージボックスの中にいれ、窒素ガスを ブローしながら使用した。流量計測について、漏洩ラインへの水分混入を防ぐため、漏 洩ライン水素パージシステムを設置した。 試験は、ERS性能確認試験と同様にJAXA能代ロケット実験場極低温推進剤試験設備で実施した。



図26. SJ 荷重試験供試体概略図

(2) SJ 荷重試験時の安全対策

本試験は、屋外に設置された供試体に液化水素を充填(最大約 35L)し、排気弁を閉じ て封じきった上で、最大 1.0MPaG に加圧した。この間に、供試体からのガス漏洩量を計 測した。これら一連の試験作業は、屋外において行った。

本試験で想定する最悪の事故ケースとして、供試体に充填した液化水素が全量放出され、 蒸気雲となり、さらに空気と混合して爆発することを想定した。この想定における爆風圧、 ファイアボールから規定される保安距離は 39m である。

本試験では、供試体から半径 39m の範囲を警戒区域と定め、液化水素の充填開始から、 供試体内部圧力を放圧し、不活性ガスで置換するまでの間、関係者以外の立ち入りを禁止 した。また、液化水素充填後、供試体への加圧は、関係者を含め総員が警戒区域外に退避 したことを確認してから遠隔で行った。また、供試体の加圧中に外観検査や周囲での作業 が必要となった場合は、供試体の圧力が安定し、かつ供試体周辺に異常がないことを確認 してから、限定した作業者がこれを行った。供試体周辺に立ち入る人員は必要最小限(2名) とし、予め保安主任の許可を得るものとした。

センサなど一部の非防爆電気機器を供試体近傍(8m以内)に置く必要がある場合は、気 密ボックスの内部に設置し、窒素ガスを供給することで、内圧防爆相当の安全化措置をと った。

22

(3) SJ 荷重試験装置

本試験のシステム構成を図27に、高圧ガス供給系統を図28に示す。能代ロケット実 験場の 30m³ 液化水素貯槽から真空断熱フレキシブルホースと試験スタンドを経由して供 試体に液化水素が供給され、ボイルオフガス及び残液は、設備のベントスタックから排出・ 処理された。図29に計測・操作系統図を、表2に計測項目を示す。



図27. SJ 荷重試験 システムブロック図



図29.SJ 荷重試験 計測・操作系統図

計測項目	点数	センサ等
供試体内圧力	1	圧力計, 圧力トランスミッ ター
供試体内部温度及び液 位	2	T熱電対
水素漏洩量	2	流量計
リークライン圧力	2	圧力計
回収容器温度	4	K熱電対
供試体の様子	2	ビデオカメラ

表2. SJ 荷重試驗 計測項目

(4) SJ 荷重試験実施要領

本試験における準備作業から各評価試験、及び後処理までの作業実施要領を以下に示す。

- ◆ 試験準備
 - 加圧ラインやパージラインに所定のボンベがセットされていること、全バルブが 閉じていることを確認し、減圧弁 PRV-1,2,3 を所定の圧力にセットする。HV-5 を 開にする。
 - (2) 供試体内をヘリウムガスによりパージする。
 - (3) 漏洩ラインを水素ガスによりパージする。水素ガスボンベから漏洩ラインにつな がる手動弁を開にする。一定時間、水素ガスを流したのち全バルブを閉じる。
 - (4) RV-1 を開けて液化水素が通過するラインを予冷した後、HV-5 を開けて液化水素 を充填する。熱電対 TK-2 が液化水素温度に到達し、安定することで液化水素の 充填完了を判断する。
- ◆ スイベルジョイント荷重試験
 - (1) スタンド点から退避後、全バルブを閉止、RV-2 を遠隔で開け、内圧 1.0MPa まで 加圧する。
 - (2) 手動ポンプで所定の圧力まで油圧を上げ、10分間保持し漏洩データを取得する。
- ◆ 後処理
 - (1) 残液を気化させて排気ラインから排出する。
 - (2) 供試体内部をヘリウムガスによりパージする。
- (5) SJ 荷重試験結果

SJ 荷重試験は、平成 29 年 9 月 22 日~10 月 2 日に実施した。図30に SJ 荷重試験中 の写真、図31に計測結果の例を示す。荷重負荷時および加圧時に漏洩量が増えているも のの、この量は規定値(1,500sccm)以下である(sccm: standard cubic centi meter per minute)。2回試験を実施したが、いずれも漏洩量は小さく、規定値以下であることが確認 され、合格であった。本試験により、SJ は LNG 用のシステムを参照した規定の荷重負荷 条件で良好に機能することが実証できた。



図30. 絶縁ガスケット及びSJ荷重試験時の様子



図31. SJ 荷重試験 計測結果の例

3-3-2. SJ 耐久試験

(1) SJ 耐久試験概要

図32にSJ耐久試験における供試体概略図を示す。2段で構成されるSJ供試体に荷重 を負荷するためウェイトを取り付け、油圧シリンダによりSJの摺動を実施する。30m³液 化水素貯槽に直結する上部充填ポートから液化水素を充填し、隣接する放圧ポートから液 化水素貯槽付帯設備のベントスタックへと蒸発ガスを放出する。供試体内部の圧力は30m³ 液化水素貯槽と同圧であり、SJ疲労試験供試体内部の液量を監視し、液面計指示で60%を 基準として放圧側の流量調整弁を自動で開閉することで液面制御を実施した。また、SJ耐 久試験供試体は高圧ガス保安協会(KHK)の委託検査も受検し、合格していることから、 本試験は高圧ガス保安法に則って高圧ガス製造設備の運転として実施した。



図32. SJ 耐久試験供試体概略図

(2) SJ 耐久試験時の安全対策

本試験は、供試体準備や分解点検において条件設定など実験班による判断が必要な期間と試験装置の自動運転が可能で、高圧ガス設備の運転監視のみとなる期間が存在する。 それぞれ「A:実験調整モード」と「B:定常監視モード」と分類し、実験時の体制を定めることとした。

以下、A:実験調整モードとB:定常監視モードについて、各モードでの安全に対する 考え方を記載する。

A:実験調整モード

- A:実験調整モードについては一般的な実験と同様に実験主任及び保安主任を主とし た実験班を編成し、作業を実施する。
- ○各危険作業については、保安主任の安全監視の下で実施する。高圧ガスに関連する作業については、保安主任及び保安係員が高圧ガス保安法及び能代ロケット実験場危害予防規定等に基づいて作業を監視する。その他の危険作業については、保安主任が作業を監視する。

B:定常監視モード

- 定常監視モードは、実験班の判断や操作を必要としないデータ取得だけの期間と定義 する。その期間の運転は、供試体を含め、全て高圧ガス保安法に基づいて申請、合格 した高圧ガス機器を用いて行うことから、高圧ガス保安法上の位置づけは、燃焼実験 や容器など高圧ガス機器の開発試験ではなく、一般的な高圧ガスの貯蔵及び製造と考 えてよいことが秋田県により確認されている。
- ○したがって、定常監視モードは、一般的な高圧ガス製造設備の運転要件にあたる保安 係員の常駐状態を作り出して実施する。本試験は約3か月間に渡ることから、協力会 社の高圧ガス保安製造責任者免状保持者に保安係員代理者を委託できるよう、能代ロ ケット実験場の高圧ガス危害予防規程の見直しを行う。
- ○試験装置の周辺2箇所に水素ガス漏洩検知警報器を設定し、夜間運転中に水素の外部 漏れが検知された場合には、自動運転停止装置が働き、液化水素の供給を遮断すると 共に、SJを稼働させている油圧ポンプを停止、試験装置を放圧する。同時に、パトラ イトが点灯し、実験場の警備室にて異常を検知できるようになっている。保安係員あ るいは保安係員代理者は警備室から連絡を受け、装置が正常に自動停止していること を 24 時間体制で確認する体制を構築することによって安全を担保するとして、秋田 県の了解を得た。
- ○図33に、昼間保安係員滞在時及び夜間保安係員不在時における異常検知システムを 示す。



- 図33.異常検知システム
- 以下は、SJ 耐久試験における試験設備の運用方法である。
- ○本試験設備は、高圧ガス保安法一般高圧ガス保安規則第6条1項に基づいて、常用の 圧力の1.25倍以上の圧力でのガス耐圧試験,常用の圧力以上の圧力での気密試験を実施する。また、当該項に基づき、可燃性ガス製造設備と火気との距離等、各種設備距離を確保するものとする。電気設備についても、耐圧防爆構造の機器を使用する。
- ○本試験設備は、高圧ガス保安法一般高圧ガス保安規則第6条2項に基づいて、安全弁 を設置し、本弁を全開とする。日常点検は、毎日3回実施するものとする。

- その他、本試験は、能代ロケット実験場危害予防規定、危害予防規定に基づく規定類 管理基準に基づいた運用を実施するものとする。
- ○本試験に関わる当該高圧ガス設備の操作は、手順書を作成し、それに基づいて実施するものとする。

(3) SJ 耐久試験装置

本試験のシステム構成を図34に、SJ耐久試験装置高圧ガス供給系統図を図35に示す。 試験装置は、無人自動運転が可能な高圧ガス製造設備として秋田県の許可を得た。



図34. SJ 耐久試験供試体 システムブロック図



図35.SJ耐久試験 高圧ガス供給系統図

(4) SJ 耐久試験実施要領

本試験は LNG 用ローディングアームの規格である ISO16904 に基づいて実施した。試験手順と判定基準を以下に示す。なお、以下の項目番号は ISO16904 規格の項目番号に相当している。

- ♦ ISO16904
 - 9.2.2.1 Life time qualification dynamic test (長期使用を想定した試験)
 9.2.2.1.2 Test protocol 作動回数:400,000 往復(≒ 1111 時間≒47 日間) 作動角度:6~25°(平均 8~10°) 往復作動時間:平均10秒 試験媒体:液化水素 試験温度:低温(液化水素温度~20K) 試験圧力:0.25~0.35MPa
 試験荷重:長期設計荷重 ボールレースパージシステム:試験中は稼働(He ガスで 4kPa保圧) 4 万往復毎に常温に戻す。 12 万往復、24 万往復、40 万往復毎に分解点検する。
 - 9.2.2.1.3 Test acceptance criteria
 許容漏洩量:1次シールからの漏洩を測定する
 回転抵抗が著しく増加しないこと
 圧痕の幅がボール径の8%以下であること
 内部に氷(水)が形成されていないこと
 SJのシール面とボールレースに著しい摩耗のないこと
- ◆ 定常監視モード移行前手順
 - (1) 供試体据付/配管結合
 - (2) 気密試験
 - (3) 供試体ヘリウムガスパージ
 - (4) 30m³液化水素貯槽圧力調整
 - (5) 下流放圧弁 THV-181 開の後,上流充填弁 TCV-180, THV-180 を開にし,予冷 開始
 - (6) 予冷終了後,各弁を開状態保持して,供試体内部に液化水素を充填開始
 - (7) 液面計 LI-180 に反応が表れ始めたら, THV-180,181 を閉にし, TPCV-180 の 制御を開始し, 任意の液位に調整
- ◆ 定常監視モード移行基準
 - ▶ 30m³液化水素貯槽の圧力が規定値以内で調整されていること
 - ▶ 30m³液化水素貯槽液量が十分であること
 - ▶ 試験装置が規定の作動角及び時間で往復運動をしていること
 - ▶ 試験装置内に規定量以上の液化水素量が保持されていること

- ▶ 計測機器に不具合がないこと
- ▶ 漏洩検知パトライト、ベントスタック、試験装置が遠隔監視できていること
- ◆ 定常監視モード終了手順
 - (1) 30m³液化水素貯槽放圧
 - (2) TPCV-180の制御を終了し、TCV-180を閉、THV-181を開にし、供試体を放圧
 - (3) 供試体内部の液化水素が蒸発するまで待機
 - (4) 供試体ヘリウムガスパージ
 - (5) 供試体内温が常温となるまで待機
 - (6) 配管取外し,供試体取外し
- ◆ B:定常監視モード

以下に、B:定常監視モードにおける自動運転及び計測項目を示す.

- (1) スイベルジョイントの繰り返し動作(自動)
- (2) データ収録【温度, 圧力, 漏洩流量】(自動)
- (3) 異常検知【圧力,外部漏洩水素濃度】(自動)
- (5) SJ 耐久試験結果

図36に試験時の様子を、図37に計測結果の例を示す。

SJ 耐久試験は平成 29 年 8 月 31 から開始し、11 月 12 日に所期の目標であった 400,000 往復を達成した。耐久試験では、前年度実施したパッキン単体試験で特性を評価したシー ル機構を2種組み込んでいたが、スプリング力を強化した(厚手のスプリングを用いた) 組合せが良好な結果を示し、耐久性試験で満たすべき全ての判定基準を満足する結果が得 られた。

液化水素供給ラインの簡易断熱材を適宜補修、補強しながら耐久試験を実施したことに より、耐久試験における液化水素の消費量を大幅に節約することができた。

本試験のために能代ロケット実験場に設置した「スイベルジョイント耐久試験装置」は 計画通り機能し、大きなトラブルもなく、液化水素を用いた SJ 性能確認試験を完了した。



図36. SJ 耐久試験装置の設置状況



図37. SJ 耐久試験 リーク量の測定結果例

3-4. まとめ

緊急離脱機構については、切り離し動作を含む総合的な試験システムを構築し、切り離 し動作、および動作後のシール性能を評価し、規定を満たすことを確認した。また、緊急 離脱機構切り離し時に見られた発火現象を解明するための要素試験を実施し、着火シナリ オの絞り込みを実施した。発火メカニズムの全容解明には至らなかったものの、分離時に 発生する液体空気の滴下を防ぐことによって発火は見られなくなった。スイベルジョイン トについては、長期耐久試験、荷重試験、絶縁ガスケット試験を実施した。試験装置内部 に液化水素を充填した状態で40万回往復の摺動運転を実施した.この際、4万回往復ごと に液化水素の充填を停止して常温に戻す操作、また12万回、24万回往復の際には分解点 検を実施した。目標とした規定条件を満足し、良好な結果を得ることができた。

以上により、研究開発目標である、「液化水素を用いた性能確認試験の完了」を達成した。

3-5. 今後の課題

事業のフォローアップとして設定した発火メカニズムの解明が、今後の課題として残った。液中衝撃波による気泡着火再現実験の早期実施と、理論解析や数値シミュレーション による現象解明に向けた継続的な取り組みが望まれる。

- 4. 外部発表実績
- (1) 学会、展示会等発表
- <口頭発表> 国内1件
- 丸祐介、竹崎悠一郎、小林弘明、成尾芳博、河合務、「液化水素ローディングシステム 緊急離脱機構の離脱動作模擬実験」2018 年度日本機械学会年次大会, 吹田市(2018 年 9月10日)
- 5. 参考文献
- Dear, J.P. and Field, J.E., A Study of the Collapse of Arrays of Cavities, J. Fluid Mech., 190(1988), 409-425.
- [2] Osipov, V., et al., Explosion Hazard from a Propellant-Tank Breach in Liquid Hydrogen-Oxygen Rockets, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, Vol. 50, No. 4, 2013
- [3] Lars Hendrik Simon, Volker Wilkens, Michael Beyer, Safety-related conclusions for the application of ultrasound in explosive atmospheres, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 36, July 2015, Pages 522-531