液化水素用緊急離脱機構の熱応力特性*

猪股 昭彦^{*1,*2†} 梅村 友章^{*1} 河合 務^{*3}
成尾 芳博^{*4} 丸 祐介^{*4} 武田 実^{*2}
千田 哲也^{*5}

Thermal Stress Performance of Emergency Release System (ERS) for Liquefied Hydrogen

Akihiko INOMATA^{*1,*2,†}, Tomoaki UMEMURA^{*1}, Tsutomu KAWAI^{*3}, Yoshihiro NARUO^{*4}, Yusuke Maru^{*4}, Minoru TAKEDA^{*2}, and Tetsuya SENDA^{*5}

To develop a loading arm for ship-to-shore transfer of liquefied hydrogen, an emergency release system (ERS) for liquefied hydrogen has been designed and manufactured. In order to estimate its mechanical and thermal behaviors, we have developed a calculation model for temperature and stress distribution of the ERS at low temperatures during the transfer of liquefied hydrogen. The calculation has revealed that the surface temperature would exceed the boiling point of oxygen. A prototype model of the designed ERS has been manufactured and tested by filling liquid hydrogen in the model. The temperature and strain on the surface have been measured during the test and compared with the calculation results. The results have shown that the calculation can predict the temperature on the surface of ERS and that the designed ERS can avoid generating liquefied oxygen. It has also been shown that the measured strains are well consistent with the predicted strain on the surface of ERS. It has been demonstrated that the developed ERS exhibits performance good enough to be utilized for the loading arm for transfer of liquefied hydrogen.

1. はじめに

2014 年 4 月に「エネルギー基本計画」が閣議決定され¹⁾, その中で, 2 次エネルギーとして水素に言及され, 水素社会の実現に向けた取り組みが明記された. また, 経済産業省では, 2014 年 6 月に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を策定し²⁾, 2015 年に燃料電池自動車の市場投入, 2020 年代後半には水素発電の本格導入について記載している. 実際にはこれに前倒しされる形で, 2014 年 11 月にトヨタ自動車より,

水素をエネルギー源とした燃料電池車「MIRAI」が市場に投入された. 水素ステーションについては 2017 年 8 月末時点で, 全国で 91 箇所の水素ステーションが開業されている. 日本政府はこの数を, 2020 年度までに 160 か所, 2025 年度までに 320 か所まで増やす目標を掲げている.

水素は燃料電池や燃焼に利用した場合, 排出するのは水のみであり, 温暖化ガスである CO₂ を排出しない. また水素は, 水の電気分解により製造できることから, 近年では風力や太陽光などの自然エネルギーにより得た電力から, 水素を製造し, エネルギーとして貯蔵, 輸送する検討も行われている³⁾. NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) は, 海外の未利用エネルギーを活用して水素を製造・貯蔵・輸送し, 日本国内で利用する大規模な水素エネルギー利用システムの技術開発プロジェクトを 2015 年度より開始した⁴⁾.

水素社会の実現においては, 大量の水素需要に対応するために, 上記の通り海外で製造した

*原稿受付 平成 30 年 6 月 12 日

^{*1} 正会員 川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術研究所

(兵庫県明石市川崎町 1-1)

^{*2} 正会員 神戸大学大学院 海事科学研究科
(神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

^{*3} 東京貿易エンジニアリング株式会社
(新潟県長岡市城岡 2-5-1)

^{*4} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
(神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1)

^{*5} 名誉会員 日本船舶技術研究協会
(東京都港区赤坂 2-10-9)

水素を、効率的に日本に輸送する必要がある。その一つとして、LNG（沸点 111K）と同様に、水素を製造地で液化水素（沸点 20K）に液化する方法が考えられる。2017 年 12 月に閣議決定された水素基本戦略では、世界初となる液化水素運搬船の開発実証を通し、将来的に商用船の国際基準を策定し、安定した輸送を確立することが記載されている⁵⁾。

運搬船で輸送された液化水素を陸上に移送する場合、LNG と同様に、運搬船と陸上基地を、可動性の配管で接続して、荷役を行うこととなる。この可動性の配管システムは、一般にローディングアームと呼ばれている。船陸間の荷役を行う場合、接続時に稼働できるのみならず、液体水素の荷役中、船体が揺動している状態においても、配管が損傷しないよう、常に船体の動きに追従し続ける機能を有する必要がある。本システムは、運搬船と陸上間における液体水素の移送において必須の機器であるが、液化水素用のものはまだ存在しない。そのため、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム」

（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, 以下 SIP）において、液化水素用ローディングシステムの研究開発が行われている⁶⁾。この中で、荷役中に非常事態が起こり、速やかに移送配管を離脱して船が離棧できるようにするためには、緊急離脱機構（Emergency Release System, 以下 ERS）が必要となる。LNG 用で使用している本機構の例を Fig.1 に示す。主に 2 つの弁体とその間を接続するカプラーで構成されており、通常の荷役中は 2 つの弁はともに開いているが、作動信号を受けると、2 つの弁体が閉まり、それに伴いカプラーが作動して、船陸間の接続が解かれることで、移送配管内の流体の大気放散を最小限に抑えつつ、速やかに船が離棧できる環境を形成する。液体水素に使用できる本品は存在しない。

液化水素用の機器を開発するためには、極低温での適用を考慮した伝熱設計および構造設計を行うための解析手法を構築する必要がある。設計情報として必要となる熱応力解析を行うためには、有限要素法による解析が用いられているが、これまでに液化水素温度で使用する機器に関して有限要素法の解析結果の妥当性を報告した例はほぼない。例えば Babac ら⁷⁾は、円筒形のタンクにおける冷却配管の配置を検討するために 1 次元および 2 次元円筒の有限要素法を

用いているが、伝熱解析のみの実施であり、応力やひずみといった強度面の解析結果は報告されておらず、実液による試験結果との比較は行われていない。

そこで本研究では、液化水素に使用できる緊急離脱機構を開発するために、以下の検討を行った。まず、液化水素用の緊急離脱機構の構造を検討し、液化水素温度環境での使用時における伝熱および構造特性を評価するために、有限要素法による極低温解析モデルを構築した。次に、本解析モデルを用いて、内部に液体水素が存在する場合の熱応力解析を実施した。さらに、解析対象とした緊急離脱機構の試作機を製作し、実際に液体水素を充填した状態で、試作機表面の温度およびひずみ値を測定し、解析結果との比較により、解析手法の妥当性を検討した。

Fig.1 Operation sequence of ERS for LNG

2. 緊急離脱機構の熱応力解析

2.1 緊急離脱機構の構造

液化水素は、LNG との沸点や蒸発潜熱の違いから、大気温度での使用時には LNG より 10 倍程度蒸発しやすい。このため、外部から弁棒を通じた入熱が、内部の液化水素の蒸発を促進するだけでなく、弁棒表面が冷却され、液化空気が生成するおそれがある。液化空気自体は安全性に大きな問題はないが、窒素分が蒸発した後で液化酸素（沸点 90K）が主成分となると、油分などの特定の可燃物と接触することで激しく反応する可能性がある⁸⁾。これを防止するために、液化水素の荷役時には機器の外表面で液化空気が発生しないようにする、あるいは生成した場合の安全対策を行うようにする必要がある。また、液化空気が生成しなくても、本箇所からの入熱による移送効率の低下を避けるため、可能な限り入熱量を小さくすることが望ましい。このため、液化水素用の緊急離脱機構として、Fig.2 に示すような、チェッキ式の緊急離脱構造を採用することとした。本構造では、開弁時は

弁体とケーシングの間のスペースを流体が通過する．閉弁時はバネを押す力を開放することで弁体が閉まりケーシングとの間で密閉される．本構造を緊急離脱機構に適用する場合，2つの弁が押し合った状態でクランパーにより固定することで，互いの弁を開状態に保つことができ，クランパーを開放すると，双方の弁が閉止する．本構造の長所として，弁棒がないため，ボール弁やバタフライ弁などの形式よりも外部からの入熱が低減できるとともに，弁棒の温度低下による液化空気の生成も防止できる．さらに，ケーシングにおける表面温度の低下を避けるため，真空二重断熱構造を採用した．ERSは構造上，突合せによる接続面（突合せ面）が存在し，この箇所では真空二重構造が実現できない（Fig.2）．そのため，接続面の径を大きくするとともに，強度的に許容できる範囲で肉厚をできる限り小さくすることによる，熱伝導による伝熱を抑制する構造とした．以上の通り考案したERS構造に対して熱応力解析を行い，表面温度の評価を行った．

Fig.2 A sample of structure of ERS (Check type, open state)

2.2 熱応力解析

解析モデルを Fig.3 に示す．3次元ソリッド要素でモデル化し，2つの弁体は同一形状とし，1つの弁体の半円部を解析対象とした（1/2×1/2対称）．使用要素はABAQUSの六面体ソリッドで8節点1次，メッシュ数は約14万，メッシュサイズは突合せ面近傍で約4.0mmである．

使用材料については，Fig.3に示す通り，弁の一部をGFRP，クランパーを青銅とし，それ以外についてはSUS316Lとした．

極低温の熱応力解析を行うために，材料物性値については，縦弾性係数，平均線膨張係数，熱伝導率については温度依存性を考慮するために，低温における物性値を用い⁹⁾，それを線形補完して解析を行った．

伝熱解析の境界条件に関して，外表面については自然対流を考慮して熱伝達率を $10.0 \times 10^{-6} \text{ W/(mm}^2\text{K)}$ ，大気温度を300 Kとし，ニュートンの冷却法則により外表面 - 囲大気との熱流束を規定した．内管内表面については液化水素温度と等しい20 Kで温度一定条件とした．また部材間の熱伝達を考慮するため，それぞれに接触固着条件を設定した．真空断熱部には輻射率0.2の空洞輻射表面を定義し¹⁰⁾，空洞の反射対称条件を定義した（XZ平面に対して）．

応力解析の境界条件について，拘束条件はXY平面，XZ平面で対称条件を定義した．双方のケーシングの接触表面を剛体壁で模擬し，完全拘束とするとともに，端部に剛体壁を設置し，剛体梁を介して1点でY軸方向とZ軸回転方向以外を拘束した．外表面に大気圧（0.1 MPa）を，配管内に流体圧力（1.0 MPa）を付加した．試験時のフランジ合わせ面には，LNG用ローディングアームの国際規格¹¹⁾に準拠したモーメント（1250 kN・mm）を設定し，伝熱解析で得られた温度分布を，熱荷重として付加した．使用プログラムは，ABAQUS 6.14-1 定常伝熱解析，非線形応力解析（接触考慮）である．応力解析に適用した基礎式を以下に示す．

$$[k_e]\{u_e\} = \{f_e\} \quad (1)$$

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (2)$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (4)$$

ここで， $[k_e]$ は要素剛性マトリックス， $\{u_e\}$ は各要素の節点変位ベクトル， $\{f_e\}$ は各要素の節点外力ベクトル， $[K]$ は全体剛性マトリックス， $\{U\}$ は全体系の節点変位ベクトル， $\{F\}$ は節点外力ベクトル， $\{e\}$ はひずみベクトル， $[B]$ はBマトリックス， $\{\sigma\}$ は応力ベクトル， $[D]$ は応力-ひずみマトリックスを示す．

2.3 解析結果

温度分布図を Fig.4 に示す．ケーシングのフランジの接続面については，荷役中はケーシング同士が突合せの格好で接触していることからこの面では大気との接触がない．大気と接触する外表面で最も温度が低い部分は，フランジ接触面の熱伝導の影響を受ける，フランジ面の外周部であり，この部分は -35°C （238 K）となった．これは液化空気が生成する約 -180°C に比

べて十分に高い温度であり、液化空気の生成を避けることができる．このように表面の温度低下を避けることができたのは、フランジ面の肉厚を薄くし、長さを大きくとったためと考えられる．また、温度分布の解析結果から、フランジ面の熱伝導が支配的であり、真空断熱が施工された箇所においては、液化空気が生じない、十分な断熱性能が発揮されると考えられる．

Fig.3 Calculation model

Fig.4 Calculation result on temperature distribution

次に、強度解析の妥当性を評価するために、先の計算条件で示した、荷役流体の圧力荷重、荷役中のモーメント荷重、温度荷重を考慮した際の円周方向の垂直ひずみの解析結果を Fig.5 に示す．

Fig.5 Calculation result on strain distribution

最もひずみの大きい部分は、フランジ面より内側の円周部であった．この箇所はモーメント荷重が比較的小さい場所であり、液化水素に近い位置であることから、熱収縮によるひずみが支配的であると考えられる．

また、後述する測定結果との比較のため、ひずみゲージを設置可能でかつ絶対値の大きいフランジ面の外側について、①' から③' の値を記載した．モーメントの付加位置に近い側の方が、圧縮ひずみが大きくなっている．

3. 液化水素通液時の温度・ひずみ測定

3.1 試験方法

以上の計算結果をもとに ERS の試作機を製作し、内部に液化水素を充填した状態で、ケーシング外表面の温度およびひずみを測定し、解析結果の妥当性を評価した．試験は、JAXA（宇宙航空研究開発機構）能代ロケット実験場（秋田県能代市）にて実施した．試験設備の配置図を Fig.6 および Fig.7 に示す．

Fig.6 Layout of the test facility

Fig.7 Layout of the test equipment

試験場に常設する液化水素タンク（有効容量 30 m³）の近傍に試験スタンドを設置し、その中に ERS 試験体を垂直に取り付けた。Fig.8 に試験体の設置状況を示す。離脱試験時には試験体上部の ERS（陸側 ERS）が真上に引き上げられる。

液化水素の供給口は、ERS の下部と上部の 2 箇所設けた。これは、ERS 分離後、両方の ERS に液化水素を補充して、弁体とケーシング間のシール性を確認できるようにするためである。試験は、試験体内部をヘリウムガスで置換した後、試験体下部から液化水素を供給し、蒸発したガスは併設のベントスタックから大気に放出した。液化水素の満充を確認した後、ヘリウムガスで試験体内部を 1.0MPa に加圧し、モーメント付加用油圧シリンダで負荷をかけ、強度を確認すると共に、ケーシング外表面の温度・ひずみを測定した。その後、試験体内を大気圧状態に戻し、ERS 内に液化水素が十分残っていることを確認した後、離脱試験を実施した。

Fig.8 Assembly of ERS prototype

Fig.9 に、温度センサおよびひずみゲージの位置図を示す。温度センサは解析において、外表面で最も温度が低いと思われるフランジ面端部を中心に、シート状 K 種熱電対を 6 点（熱電対番号 11～16）設置した。ひずみゲージ（株）東京測器研究所 CEFLA-3-17）も同様に、フランジ面端部 3 か所に設置した（ひずみゲージ番号 ①～③）。温度センサおよびひずみゲージの出力は、供試体近傍に置いたデータロガーによってデジタル値に変換し、LAN ケーブルで 42 m 離れた操作計測室に設置したパソコンまで導き、収録した。

Fig.9 Location of a) temperature sensor, b) strain sensor

3.2 試験結果

計測した各位置の温度経時変化を Fig.10 に示す。約 2000 s 後から液化水素の充填を開始した。本図中 8350 s 後に記載した赤色の直線は、離脱試験の時間を示している。充填開始後、温度安定以降で外気との接触部で最も低い箇所である 11 番の最低温度は -27.1℃であり液化空気生成温度以上であることを確認した。また計算結果との比較も Fig.10 に示した。クランパーの温度である 15 番、16 番については計算で低く見積もる傾向にあったが、より低温となる弁のケーシング部においては、計算結果は測定結果と近い値となり、本解析方法による液化空気生成に関する温度予測の妥当性が示された。

次に、円周方向の垂直ひずみ値の測定結果と解析結果の比較を行った。双方のモーメント負荷の方向を合わせると、解析結果 Fig.5 の①'～③'が、計測箇所①～③に相当することから、両者の値の比較を Table 1 に示す。定量的および各位置の相対的な大小関係ともに、両者は良好に一致することが確認でき、本解析の妥当性が示された。

Fig.10 Change in measured temperature of ERS

Table.1 Comparison between measured and calculated strain value for ERS

位置	計測値[-]	計算値[-]
①, ①'	-951×10^{-6}	-884×10^{-6}
②, ②'	-917×10^{-6}	-804×10^{-6}
③, ③'	-844×10^{-6}	-716×10^{-6}

4. 結論

本研究により得られた知見を下記にまとめる。

液化水素温度環境での熱応力解析を行うために、極低温の材料物性値の温度依存性を考慮した解析モデルを構築した。

本解析手法を用いた伝熱解析により、フランジ部の径を大きくし、かつ強度面を考慮して肉厚を小さくすることにより、熱伝導による伝熱を抑制することができ、外表面の温度を液化空気生成温度以上となる結果を得た。

本解析手法の妥当性を検討するために、解析対象の試作機を製作し、解析条件と同様に液化水素充填した状態で、機器外表面の温度およびひずみ分布を計測し、計測結果と解析結果を比較した。その結果、本解析手法により、外表面の温度およびひずみのいずれにおいても、定量的および定性的（位置ごとの大小関係）に良好な一致が見られ、本解析手法の妥当性が示された。

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア」の研究テーマ「液化水素用ローディングシステムの開発と

ルール整備」（管理人：国立研究開発法人 科学技術振興機構）によって実施されました。ご指導いただいた皆様にお礼申し上げます。

References

- 1) Agency for Natural Resources and Energy, Basic energy plan, (2014) pp59-62
- 2) Ministry of Economy, Trade and Industry, Hydrogen and fuel cell strategic road map, (2014) pp7-8
- 3) S. Kamiya et. al, Technologies of hydrogen liquefaction, transport and storage, Kawasaki Technical Review No.176, (2015) pp34-39
- 4) M. Nishimura, et. al, Challenge for realization of CO₂-free hydrogen supply chain, vol. 25, No. 12, (2016) pp18-23
- 5) Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related, Basic Hydrogen Strategy, (2017) p18
- 6) T. Takanohashi, Activities of SIP “Energy Carriers”, Piping Technology, vol. 59, No.7, (2017) pp1-5
- 7) G. Babac et. al, Two-dimensional thermal analysis of liquid hydrogen tank insulation, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, (2009) pp6357-6363
- 8) Material safety data sheet for liquefied oxygen, Suzuki Shokan, (1999) p4
- 9) Cryogenics Association, Cryogenic metal material data collection, (1981) pp23-28, 44-49
- 10) S. Kamiya et. al, A large experimental apparatus for measuring the thermal conductance of LH₂ storage tank insulations, TEION KOGAKU, vol 35, No.9 (2000) p453
- 11) Petroleum and natural gas industries – Design and testing of LNG marine transfer arms for conventional onshore terminals, ISO 16904, (2016) p34