

GM冷凍機を用いた液化水素の蒸発ガス抑制技術の開発

Development of Boil-Off Gas Suppression Technology for Liquid Hydrogen Using GM Cryocooler

●小 池 祐太郎*
Yutaro KOIKE

森 江 孝 明**
Takaaki MORIE



液化水素の蒸発ガス抑制装置の外観
Photograph of boil-off gas suppression unit for liquid hydrogen

水素社会推進法の施行などを背景に、水素のエネルギーキャリアとしての社会実装に向けた取組みが進められている。液化水素 (LH₂) はガス状態の水素と比べて高密度であり効率的な水素の貯蔵・輸送が可能である。一方で、沸点が -253°C (20 K) と極低温であることから蒸発が生じ、ボイルオフガス (BOG) が継続的に発生する。よって液化水素は、貯蔵時の安全性および経済性の観点から、BOG発生による損失を抑制するゼロボイルオフ (ZBO) 技術が求められている。

本開発では、当社製の20K単段式GM (ギフォード・マクマホン) 冷凍機を用いた試験装置を製作し、水素の液化およびBOGの再凝縮試験を実施した結果、加熱条件下においても10時間以上にわたり容器内の圧力上昇を完全に抑制することに成功した。さらに、再凝縮時の効率を評価し、本システム導入時の投資回収期間を試算したところ、短期 (数年以内) での回収が可能であり、経済性の面でも十分な利点が得られることが明らかとなった。

Against the background of the enactment of the Hydrogen Society Promotion Act and related developments, efforts are underway toward the social implementation of hydrogen as an energy carrier. Liquid hydrogen (LH₂) has a much higher density than gaseous hydrogen, enabling efficient storage and transportation. However, because its boiling point is extremely low at -253°C (20 K), evaporation occurs and boiloff gas (BOG) is continuously generated. Therefore, from the perspective of both safety and economics during storage, zero boil-off (ZBO) technology is required to suppress losses caused by BOG generation. In this development, a test apparatus equipped with an SHI 20 K single-stage Gifford-McMahon (GM) cryocooler was constructed, and experiments on hydrogen liquefaction and BOG recondensation were conducted. As a result, even under heated conditions, we successfully suppressed the pressure rise inside the vessel completely for more than ten hours. Furthermore, by evaluating the recondensation efficiency and estimating the payback period when introducing this system, it was found that the investment could be recovered within a short period of a few years, demonstrating sufficient economic advantages.

1 まえがき

カーボンニュートラルな社会の実現に向け、使用時にCO₂を排出しないエネルギーキャリアとして水素の利活用が期待

されている。水素のキャリア形態には圧縮水素ガス、液化水素 (LH₂)、アンモニアなど複数の種類があり、使用条件やインフラの制約に応じて適切に選択する必要がある。なかでもLH₂は高い密度を有するうえに、利用時に化学的な精製工程

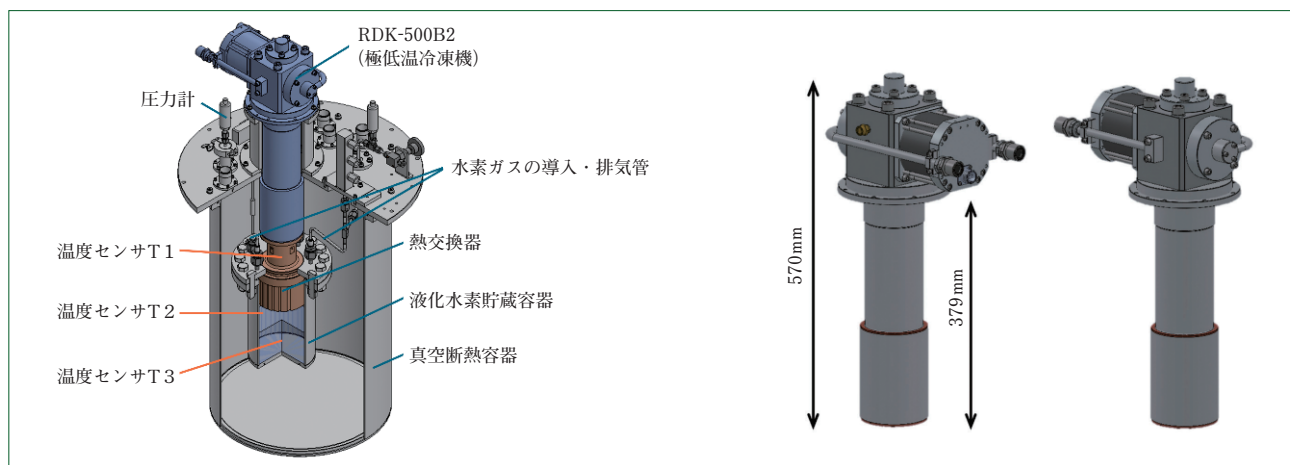


図1 左：再凝縮試験装置の概略構成図，右：本試験で使用したSHI製単段GM冷凍機
Left: Schematic configuration of recondensation test apparatus; Right: SHI single stage GM cryocooler used in this study

を必要としないことから、高純度水素が要求される燃料電池用途での利用が注目されている。

一方で、 LH_2 は沸点が約20 K (−253℃) と極低温であることから、外部からのわずかな入熱によりBOGが継続的に発生する。BOGの発生は貯蔵容器内の圧力上昇を引き起こすので定期的な放散が必要となり、大気へ放散すればそのまま経済的損失につながる。エネルギーキャリアとしての安全性および経済性の観点からBOG発生に対策する技術が必須となる。

容器内の圧力上昇を抑制する方法として、発生したBOGを極低温冷凍機を用いて再凝縮するZBO技術が検討されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。このZBO技術はBOGの放散を抑制できる一方で、その運転には電力消費を伴うことから再凝縮工程における効率は省エネルギー性の観点で重要となる。

そこで、当社製の20 K単段GM冷凍機を利用した LH_2 再凝縮試験装置を製作し、ZBOの実証に取り組んだ。また、再凝縮時の効率を評価し、得られた結果に基づいて本方式による経済性の検討を行い、社会実装に耐え得る技術であるかを検証することとした。

2 試験装置の構成

図1に、今回準備した試験装置の構成を示す。左側は装置全体の外観および断面図、右側は使用した当社製単段GM冷凍機RDK-500B2 (50 W@20 K)⁽³⁾の外観である。本試験では効率評価を行う都合上、冷凍機と組み合わせる圧縮機には出力可変型を選定した。

冷凍機の冷却ステージ先端にはBOGを再凝縮する熱交換器と、 LH_2 を貯蔵する小型貯蔵容器(内容積約3 L)を取り付けた。これらを真空断熱層内に配置し、外部からの侵入熱を十分に低減した条件下で、容器内で発生するBOGおよび再凝縮挙動を適切に評価できる構成とした。冷凍機で発生した冷熱は熱交換器を介してBOGへ伝達され、容器内で発生したBOGは再凝縮される。熱交換効率を高めるべく、熱交換器はフィン形状に近い独自構造とし、伝熱面積を増大させている。

貯蔵容器の外部に2本の配管を設け、それぞれ水素ガスの導入および排気に使用した。一方の配管には圧力計を取り付け、容器内圧力を常時監視できる構成としている。さらに、

両配管には手動バルブを設けており、閉操作により容器を完全に密閉できる。この密閉状態で外部から容器を加熱すると LH_2 の蒸発が促進され、容器内圧力が上昇する。同時に、冷凍機を運転しZBO状態が実現している場合には、BOG発生量と再凝縮量が釣り合い、容器内圧力は上昇せずに平衡状態が維持される。つまり、本試験では容器内圧力の経時変化を観測することで、BOG発生量と再凝縮量のバランスを評価できる。また、容器内部の状態を把握できるよう装置内の3カ所に温度センサを配置した(図1左)。熱交換器と冷凍機ステージ間(T1)、容器上部の気相部(T2)、容器下部の液相部(T3)に設置された温度センサにより、それぞれの温度と容器内圧力情報から内部状態の推定が可能である。

さらに、外部から意図的に加熱できる機構も備えており、所定量の液化水素生成後、容器を密閉・加熱することでBOGの発生を促進し、冷凍機運転時に圧力上昇が抑制されるかを検証した。これらの消費電力と再凝縮に伴う吸熱量の比が、再凝縮効率を示す指標となることから、冷凍機運転時の電力消費量を別途設置した電力計により計測した。

本試験における水素の液化および貯蔵は高压ガスの製造行為に該当するので、試験の実施に当たっては本装置を高压ガス保安法に基づく製造装置として、事前に神奈川県へ届け出を行った。また、水素は可燃性ガスであり、試験で使用する電気機器には防爆仕様が求められることから、防爆に関しても県の確認を得て安全性を確保し、設計を完了させた。試験開始に当たっては想定される事故や災害への対策を十分に検討し、運転手順と監視体制を明確にしたうえで安全に配慮して実施した。

3 水素の液化と再凝縮の試験および試験結果

本試験では、冷凍機を用いた液化水素を生成する液化工程、BOGの再凝縮工程および冷凍機停止時の挙動確認までを一連のシーケンスとして実行した。具体的には、まず冷凍機を運転した状態で室温の水素ガスを容器内に導入し、冷却・液化して LH_2 を生成・貯蔵する液化工程に入る。その後、約2 Lの LH_2 を貯蔵した状態で容器を密閉し、外部から加熱してBOGの発生を促進させた条件下で、冷凍機によりBOGを再凝縮して圧力上昇を抑制する再凝縮工程に進む。最後にZBO

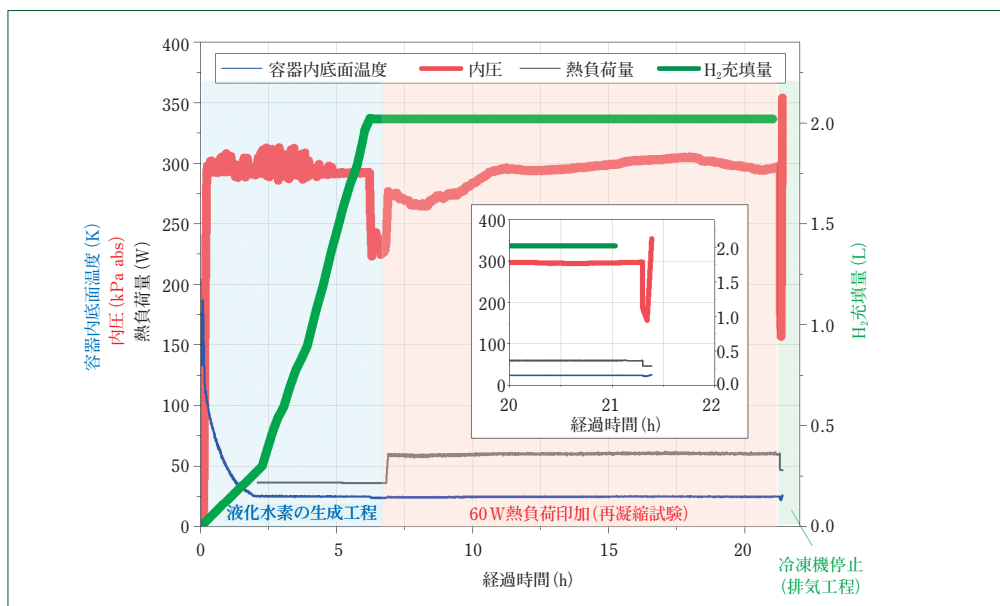


図2 液化、再凝縮および冷凍機停止を含む一連の試験における温度・圧力の時系列結果
Time-series results of temperature and pressure during sequence of tests, including liquefaction, recondensation and cryocooler shutdown

状態が安定している段階で冷凍機を停止し、密閉状態における容器内圧力の応答を確認した。これら一連の工程における各所の温度、容器内圧力および貯蔵されているLH₂量の時系列データを図2に示す。次に、図2に基づき、各工程の挙動を考察する。

液化工程では、排出ライン側のバルブを閉じた状態で冷凍機の初期冷却を進め、十分に温度が低下した段階で水素ガス導入ラインのバルブを開放した。室温(約300K)の水素ガスをゲージ圧0.2MPaに調整しつつ導入すると、ガスは冷凍機で連続的に冷却され、導入開始から約1.5時間後に容器下部の液相部温度(T₃)が水素の沸点(0.2MPaG条件で約25K)に到達した。以降は水素ガスボンベの減圧量が生成されたLH₂量に対応し、最終的に容器的内容積の約65%に相当する約2LのLH₂が生成・貯蔵されたことを確認した。なお、生成量はボンベ残圧の変化に基づく推定値であり、直接液量を測定しているわけではない。

再凝縮工程では、ガス供給ラインのバルブを閉じて容器を密閉状態とし、ヒータにより所定の熱負荷を与えてBOGを意図的に発生させた。発生したBOGは熱交換器近傍で冷凍機により再凝縮され、容器内の圧力上昇は抑制される。図2に示すように、約60Wの加熱条件下においても10時間以上にわたり容器内圧力が上昇しないZBO状態に維持されていた。これは、加熱により生成されるBOGの量と、冷凍機による再凝縮量がほぼ釣り合っていることを示す。また、試験中に容器からの水素ガスの漏洩は観測されず、気液界面付近の温度は水素の沸点(約25K)に安定して維持されていることも確認できた。本試験に基づく装置の再凝縮能力は約7.9 L/hと算出された。

工程の最後に、冷凍機によるBOG抑制効果を明確にすべく、圧力が一定に保たれているZBO状態で冷凍機を停止し、容器内圧力の変化を観測した。冷凍機停止前には、安全確保のため外部熱負荷を一時的に低下させた。そのため、容器内圧力に一時的な低下が見られた。その後、冷凍機を停止すると、

停止直後から、外部からの入熱に伴う蒸発(BOG生成)は継続するが再凝縮は起きないので、容器内圧力は直ちに上昇へと転じる挙動が確認された(図2挿入図)。この結果は、ZBO状態が冷凍機の運転によって成立していることを裏付けるものである。

4 試験結果および経済性に関する考察

最後に、本試験で得られた再凝縮(ZBO)システムの効率評価および経済性について考察する。一般に冷凍機単体の効率はCOP (Coefficient of Performance : 成績係数) で表され、式(1)で定義される。ここで、COPは得られる冷凍能力Qを消費電力Pで割った比である。

$$\text{COP}(\%) = \frac{Q}{P} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、BOGを再凝縮する際には、BOGとの熱交換過程で必ず伝熱損失が発生する。そこで、この損失も含めた再凝縮工程の効率COP_Zを式(2)のように定義した。

$$\text{COP}_Z(\%) = \frac{Q \times \text{熱交換効率}}{P} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

熱交換効率は、理想的には100%が上限であり、再凝縮効率は必ず冷凍機単体のCOPより低い値となる。再凝縮効率を基に、液化水素設備で発生するBOGを本ZBOシステムにより抑制した際の経済性を検証する。BOGを大気放散した場合の損失と、ZBOシステム運用時の電力コストを比較し、水素のBOGのコスト回収効率を式(3)のように定義した。

$$\text{コスト回収効率}(\%) = \text{再凝縮効率} \times \frac{\text{水素単価}}{\text{電気代}} \times \frac{1}{h_L} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 h_L は液化水素の蒸発潜熱を表し、圧力条件に依存して変化するパラメータである。BOG回収効率が100%を超える場合、電力を消費してZBOシステムを運転しても回収される水素の金銭的価値が電力コストを上回るの、経済的メリットが得られる。しかし、100%未満では経済的には不利となる。実際には装置導入時には初期投資が発生するので、本指

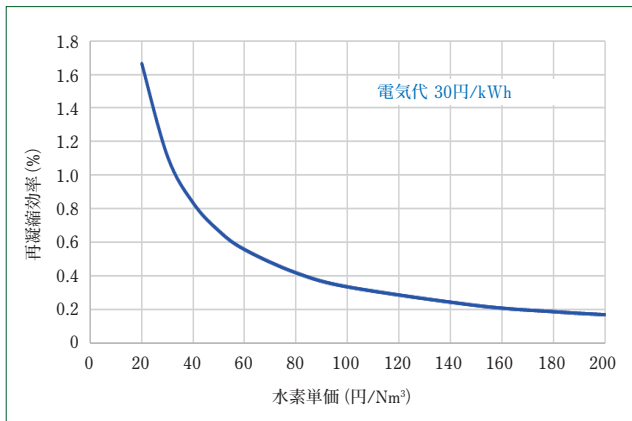


図3 再凝縮運転における電力コストと水素単価に基づく損益分岐ライン
Break-even lines based on electricity cost and hydrogen unit price during recondensation operation

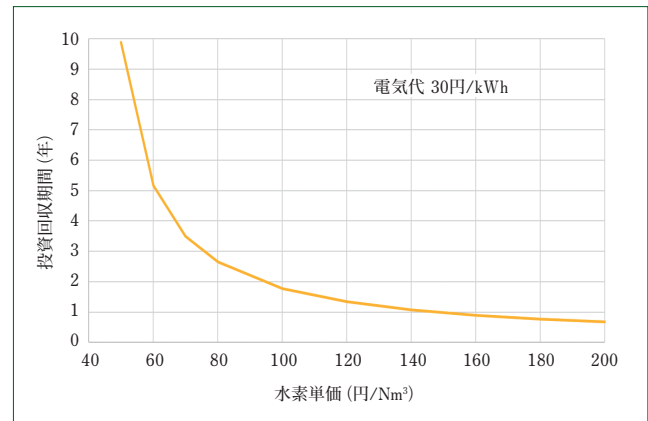


図5 水素単価に対する投資回収期間の試算結果
Estimated payback period as function of hydrogen unit price

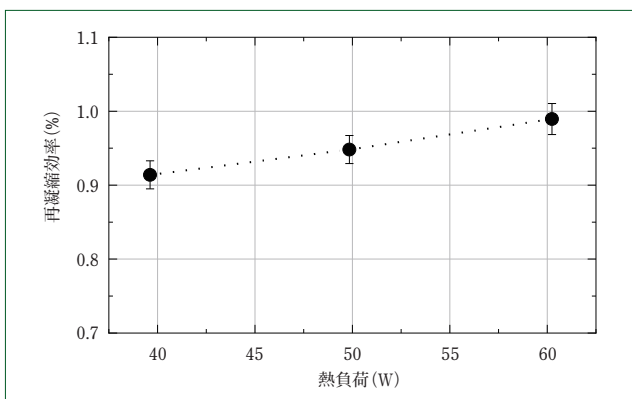


図4 外部入熱40~60 Wにおける再凝縮効率の測定結果
Measured recondensation efficiency under external heat loads of 40~60 W

標が高いほど投資回収期間は短くなる。図3に、横軸を水素単価とし、BOG回収効率が100%となる再凝縮効率を示す。この曲線は損益分岐を表し、曲線より上の領域では運用による経済的利点が見込める。水素単価が安価になるほど、コストメリットを得るために必要な再凝縮効率が高くなることが分かる。

現状(2026年3月時点)では、水素単価が約180円/Nm³と高いので、再凝縮効率が0.2%程度でも経済的メリットが得られる。将来水素単価が50円/Nm³程度まで低下した場合、損益分岐に必要な再凝縮効率は約0.65%となる。

今回構築した装置の再凝縮効率を評価するに当たり、外部から印加する熱負荷を40~60 Wの範囲で変化させ、条件に応じて冷凍機出力を調整し、LH₂貯蔵容器の内圧を0.2 MPaG付近に維持した。この状態で外部入熱と再凝縮による吸熱が釣り合っており、ZBO状態が成立している。このときの吸熱量と消費電力の計測値から再凝縮効率を算出した。図4に、測定結果を示す。熱負荷40~60 Wの全条件において再凝縮効率は0.9%を上回り、特に60 W印加時には本試験で最高値となる0.99%を得た。この結果は、外部入熱が変動する実際の液化水素設備においても、本装置が幅広い条件で高い効率を維持し最小限の電力で圧力上昇を抑制できることを裏付けている。また、事前に実測した結果から冷凍機単体のCOPが約1.0%であることを加味すると、本装置の熱交換器にお

ける損失は十分に小さく、冷凍機性能がほぼそのまま有効活用できていることを表す。

最後に、設備導入時の投資回収期間について評価した。投資回収期間は、装置導入に必要な初期費用を運転によって得られるBOG回収量に相当する利得で除することにより算出される。図5に、実測した再凝縮効率および電気代30円/kWhを用いて算出した結果を示す。現行の水素単価180円/Nm³では、1年未満で投資回収が可能であり本装置導入の経済的メリットは大きい。また、本試験では保持圧力を0.2 MPaGと比較的低い条件としたが、設備によってはより高压での運用も可能である。保持圧が上がれば水素の沸点は蒸気圧曲線に従って上昇し、それに伴い冷凍機のCOPも向上する。仮に冷却温度が5 K程度上昇した場合、水素単価が50円/Nm³に低下した場合でも数年以内の投資回収が可能である。

液化水素を扱う設備においてBOG発生が課題となる場合、再凝縮装置の導入によって、運用効率と経済性の双方を大きく改善できることが明らかとなった。

5 むすび

- (1) 当社製の単段GM冷凍機を用い、安全性を確保したうえで高効率な液化水素ZBOシステムを構築した。
- (2) 外部から約60 Wの熱負荷を印加した条件において、容器内の圧力上昇を10時間以上にわたり完全に抑制できることを確認し、GM冷凍機による液化水素のZBO状態が成立することを実証した。
- (3) 本装置の再凝縮効率は、最適条件において約1%を示した。
- (4) 再凝縮効率を基に投資回収期間を試算した結果、現行の水素価格においては経済性の観点から本装置の導入効果が十分に期待できることを明らかにした。

(参考文献)

- (1) Notardonato, W. U., et al., Zero boil-off methods for large-scale liquid hydrogen tanks using integrated refrigeration and storage, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 278 (2017), 012012.
- (2) Plachta, David W. Hybrid thermal control testing of a cryogenic propellant tank, NASA/TM-1999-209389 (1999).
- (3) 精密機器事業部, 大型20K単段GM冷凍機 RDK-500B2, 住友重機械技報, 216 (2025), 15.