テーマ解説

液体水素冷却超電導応用エネルギー機器の開発

白井 康之^{*1,†}, 塩津 正博^{*1}

Research and Development of Liquid Hydrogen-Cooled Superconducting Energy Apparatus

Yasuyuki SHIRAI^{*1,†} and Masahiro SHIOTSU^{*1}

Synopsis: A hydrogen based energy infrastructure, where liquid hydrogen (LH₂) is one of the important energy carriers, has recently been being developed in support of a future carbon-free society. Effective utilization of LH₂ cold energy is one of the key issues. We have been developing a hydrogen-cooled energy apparatus under a grant from the Japan Science and Technology Agency (JST). LH₂ has good physical properties for cooling, including a low boiling point, a high latent heat, a high specific heat and low viscosity properties. Moreover, its low boiling point (20.3 K) is advantageous in view of the excellent electromagnetic properties of high-critical-temperature superconductors, such as YBCO, BSCCO and MgB₂, which have been under development for many years. It is important to understand the heat transfer characteristics of LH₂ in order to design LH₂ cooled superconducting devices. For this purpose, we have designed and constructed basic experimental facilities, such as a thermal-hydraulics experimental system for LH₂, in order to carry out systematic investigation of the forced-flow heat transfer, set up experiments for investigating the electro-magnetic properties of superconductors or superconducting magnets, and introduced an LH₂ supply and exhaust test system for superconducting rotating machines. Using these facilities, we have conducted systematic experiments relevant to LH₂ cooling properties, and LH₂-cooled superconductor and superconducting magnet properties, and hence, have accumulated operational experience for handling LH₂ safely throughout over 25 test events.

Keywords: liquid hydrogen, heat transfer, superconductor, cooling property

(Some figures in this article may appear in color only in the electronic version)

1. はじめに

近年の地球規模の異常気象を経験すると、二酸化炭素の排出を抑制した「低炭素化社会」の構築はエネルギー問題の中の重要なイシューであると実感する。現在のエネルギーインフラの基幹を成すものは、天然ガス・原油サプライチェーンと原子力発電を含む電力系統である。ここから軽水炉を捨て、カーボンフリーを想像すれば、究極は自然エネルギーによる発電とそれによる水素製造・貯蔵を基本としたシステムに至る。核融合炉が実現したとしても、その熱エネルギーによる水素製造がエネルギーシステム構築には必須である。

我が国の原油・石油製品供給に対する自動車部門の割合

はおよそ 1/3 であり、このエネルギー源を水素に転換することで非常に大きい低炭素効果が得られるため、水素で走行する燃料電池車が販売され、水素ステーションなどの設置が急ピッチで進んでいる¹⁾。発電部門のその割合はおよそ 1/5 であり、現在の電力エネルギーの大半を占めている天然ガスや石炭による火力発電を水素主体の発電に転換するための研究開発が進められている²⁾。

このような水素エネルギーインフラが主軸となる社会の実現には、液化天然ガス (LNG) の海上輸送に代わる大量の水素のサプライチェーンが必要になる。この時、大気圧での水素ガスの約 800 倍の密度を持つ液体水素 (LH₂: 20.3 K) は主要なエネルギーキャリアである^{3),4)}。しかし、比較的大きな液化エネルギーが必要とされるので、その冷熱エネルギーの有効利用は大きな課題である。

このような背景のもと、我々の研究グループは、液体水素冷却超電導応用機器をキーとした水素・電力協調エネルギーインフラの構築を提案し、これを目指した基盤技術の研究開発を、2010 年より科学技術振興機構の先端的低炭

Received October 30, 2019

^{*1} 京都大学大学院エネルギー科学研究科

〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

Graduate School of Energy Science, Kyoto University,
Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

[†] E-mail: shirai.yasuyuki.7v@kyoto-u.ac.jp

DOI: 10.2221/jcsj.55.44

素化技術開発（Advanced Low Carbon Technology Research and Development Program ; ALCA）プロジェクトとして進めてきている。本稿では、その内容を中心に液体水素を冷媒とした超電導機器の考え方、研究開発動向、将来展望について紹介する。

2. 液体水素と超電導

超電導応用電力機器は、これまで発電機、変圧器、電力ケーブル、SMES(超電導エネルギー貯蔵装置)、限流器などの研究開発が進められ、従来の技術体系を大きく変える次世代エネルギーシステム技術として極めて有望であることが明らかになっている。特に、超電導応用電力機器は、系統安定度、電圧安定性の向上、柔軟な系統運用に有用であり、低炭素化を目指した再生可能エネルギー源の電力系統へのスムーズな導入に寄与する。

電力機器で扱えるエネルギー密度を大きくするには、扱う（電流密度 J ）×（磁束密度 B ）が大きいことが必要となる。実用化の段階にある超電導材料（Bi2223 や ReBCO）の臨界電流や構造材料の比熱を考えると、これらの超電導特性を効率よく利用できる温度域は 15~40 K であるといえる。この温度域に対して、民生用の小型機器であれば冷凍機伝導冷却も候補となるが、比較的容量の大きい電力機器では液体水素（20.3 K@1 atm）が冷媒として最も適していると考えられる。また、液体水素の蒸発潜熱は液体ヘリウムの約 20 倍、液体窒素の 2 倍以上あり、粘性も液体窒素の 1/10 で、冷媒としての優れた特性を有している。

さらに、ヘリウムや窒素では冷媒とするために液化する必要があるのに対して、液体水素が水素エネルギーキャリアとして社会インフラに組み込まれることは、超電導機器にとって優良な冷媒がインフラの中に存在することになる。したがって、蒸発ガスを水素エネルギーとして利用するシステムに組み込めば、再凝縮の必要は無い。逆に言え

ば、液体水素の冷熱の有効な利用法の一つは、超電導機器の冷却である。例えば、JST-ALCA の我々のグループは Fig. 1 のようなシステムを提案している。最近、液体水素がタンカーによって受入基地（現在の LNG 受入基地のような形）に入り、貯蔵タンクに蓄え、これを気化してエネルギーとして利用する水素燃焼（混焼・専焼）ガスタービン発電²⁾の開発が進んでいる。この発電機の界磁巻線を超電導化し、液体水素で冷却して高効率でコンパクトな超電導発電機とする。蒸発したガスは燃料として使用し、さらに現用の発電機でも行われているように電機子巻線の冷却にも用いるシステムである。液体水素の冷熱エネルギーを有効に利用することで、液化機（再凝縮機）は不要となりワンスルーの高効率なシステムとすることができる。

このように、液体水素で冷却した超電導応用エネルギー機器をキーとした現在の電力エネルギーの大きな変革と、水素エネルギーと協調した新しい低炭素化エネルギー供給基盤の構築は、将来の環境に優しいエネルギーシステムの究極の形であると考えられる。

3. 課題と実験設備

3.1 解決すべき課題

水素はその爆発範囲が 4.0~75%（空気との混合濃度）と大変広く、材料の水素脆性の問題もあり、超電導機器の液体水素冷却に関しては、液体水素冷却超電導ケーブルのデモ試験³⁾や液体水素移送ポンプ用全超電導モータの試験開発⁴⁾などが報告されているだけで、研究例が少ないのが現状である。

液体水素冷却超電導機器とこれをキーとした水素・電力協調エネルギーインフラ構築による低炭素化を実現するためには、超電導機器冷媒としての液体水素の基礎特性の把握、液体水素冷却超電導線材の特性評価、液体水素冷却超電導機器・冷却システムの要素技術・設計法開発、水素・電力協調エネルギーシステム導入効果検討を実施するとともに、防爆設計・安全性技術基準の確立、社会実装のための法整備が必要である。

第一段階としては、液体水素冷却超電導導体のそれぞれの運用条件（温度域、磁場、圧力、浸漬／強制対流など）に応じた冷却試験、通電特性試験を実施するためのプラットフォーム（テストベンチ）を整備すること。そして、液体水素を用いたこれらの試験を系統的に行い、安全性と実績を示していくことも重要となる。

3.2 液体水素冷却超電導機器開発のための実験設備

従来、液体水素の利用は、宇宙ロケット燃料として主に進められてきたため、これとは大きく利用条件の異なる超電導機器の冷却を想定した液体水素の冷却特性、熱流動特性については十分な実験研究が無かった。我々のグループでは、まずこれを目的とした実験装置（Fig. 2~4）を世界に先駆けて、宇宙航空研究開発機構(JAXA)能代ロケッ

Fig. 1 Proposed image of hydrogen and electric power coordinated energy infrastructure including liquid hydrogen-cooled superconducting energy devices.

ト実験場に製作・設備した⁷⁾。実験条件として、圧力（大気圧 ~ 2 MPa(G)）、温度（20 ~ 32 K）、強制対流（ ~ 43 g/s）が設定可能である^{8,9)}。以下、(G)はゲージ圧、(A)は絶対圧を示す。

1. 実験用液体水素クライオスタット(貯液容量 50 L:内径 300 mm: ~ 2 MPa(G):500 A 通電端子 4 本)
2. 液体水素キャッチタンク(貯液容量 50 L:内径 300 mm: ~ 2 MPa(G))
3. 超電導材料特性試験用液体水素クライオスタット(貯液容量 50 L:内径 300 mm: ~ 2 MPa(G):500 A 端子 3 本)+外部磁場印加用液体ヘリウム冷却超電導マグネット

Fig. 2 Experimental set-up for LH₂ hydraulic tests and LH₂ cooled superconductor and superconducting device tests. (Main LH₂ test cryostat, catch tank, LH₂ cryostat with external magnetic field and LH₂ pump for forced flow circulation test.)

Fig. 3 Power supply and measurement system room (left) and remote control room (right).

Fig. 4 System flow for LH₂ forced-flow circulation test.

(112 H: 175 A: ~ 7 T)

4. 液体水素強制対流循環ループ (~ 43.7 g/s: ~ 2 MPa(G):管路内径 1/2 inch : LH₂ ポンプユニット:熱交換器:気液分離槽)
5. 励磁電源 ([± 5 V; 400 A], [± 10 V; 200 A], [+10 V; 100 A] $\times 8$ 台)
6. 光 LAN と PLC, Labview によるリモート計測・監視・制御システム

これらの装置を用いて、以降で述べる液体水素冷却超電導機器の要素技術開発を行い、液体水素応用低温機器の設計指針、防爆対応を検討、実証し、運用実績を積み重ねてきている。

4. 液体水素冷却特性

4.1 プール沸騰臨界熱流束⁷⁾

実験用液体水素クライオスタットを用い、マンガニンなどの細線あるいは平板を加熱体として液体水素に浸漬し、通電加熱することで沸騰熱伝達の試験を行った。圧力は 0.1 ~ 1.1 MPa(A)、温度は 21 ~ 32 K とした。

通常液体の核沸騰熱伝達については多くの表示式が提示されている。これに対する圧力の効果は、高压になるほど平衡気泡半径が小さくなり、同一の加熱度で発泡する気泡核が増加することで、熱伝達係数が大きくなると説明される。しかし、液体水素の場合には、0.6 MPa(A)を越えると圧力の効果が見られなくなる。これは表面張力が非常に小さいため、高压域では平衡気泡径が伝熱表面上に存在するキャビティ径の下限より小さくなるためと考えられる。

このため、飽和沸騰臨界熱流束の圧力依存性について我々の行った液体水素の実験結果を Kutateladze の式で検討すると、およそ 0.6 MPa(A)を境にしてこれより低压域では過小評価し、高压域では過大評価となる。臨界熱流束となった時の発熱体表面温度を見ると、0.6 MPa(A)までは圧力と共に上昇し、それより高压域では液体水素の臨界温度で一定値となる。通常液体の臨界熱流束を決定する水力的不安定状態になる前に臨界温度に到達し、瞬時に蒸気膜におおわれたものと考えられる。この議論は、表面張力が比較的小さく、溶存ガスが少ない他の極低温液体（液体ヘリウム、液体窒素）でも成り立つ。

4.2 強制対流沸騰熱伝達^{10,11)}

加熱円管内を液体水素が流れる際の DNB 熱流束 (Departure from Nucleate Boiling heat flux) を圧力、流量（流速）サブクール度（入口）などのパラメータに対して把握し、その表示式を得ることは、液体水素による超電導材料の強制対流冷却（例えば Cable In Conduit Conductor）や超電導応用機器の冷却の設計を行う際の基礎資料となる。

Table 1 に示す内径 d 、加熱部分長 L 、外径 OD の様々な円管発熱体 (SUS310S, 316L) を垂直支持し、その内側に液体水素を上方に流した状態で円管を電流加熱し、圧力、

温度（サブクーリング）をパラメータとして熱伝達特性を評価した。発熱試験体の断面図を **Fig. 5** に示す。**Fig. 6** は、試験結果の例である。縦軸が熱流束、横軸は入り口液温からの発熱体表面温度上昇である。発熱体表面温度は、発熱体抵抗から求めた平均温度を基に、熱流束に対する円管半径肉厚方向温度分布を考慮して求めた。発熱率を緩やかに上昇させると、熱流束は Dittus Boelter 式に沿って沸騰開始

Table 1 Test sample of tube heater.

Type	d	L	L/d	Outer Diameter
A	3.0 mm	100 mm	33.3	4.0 mm
B	4.0 mm	100 mm	25	4.5 mm
C	4.0 mm	167 mm	41.7	4.5 mm
D	6.0 mm	50 mm	8.33	6.4 mm
E	6.0 mm	100 mm	16.7	6.4 mm
F	6.0 mm	150 mm	25	6.4 mm
G	6.0 mm	200 mm	33.3	6.4 mm
H	6.0 mm	250 mm	41.7	6.4 mm
I	6.0 mm	300 mm	50	6.4 mm

Fig. 5 Typical test tube heater for LH₂ forced-flow heat transfer test (Type E).

Fig. 6 Heat transfer curves for various flow velocities at $P=1.1$ MPa and subcooling of 5.0 K. Heater inner diameter is 6.0 mm. Type E test heater.

点まで上昇し、さらに発熱率を上げると勾配の急な核沸騰域を上昇し、核沸騰が発達して DNB 熱流束に達すると小さな正の勾配をもって僅かな熱流束の増加で大きく温度上昇し、膜沸騰に移行する。入口から出口に向かって温度分布が生じ、臨界点が入口側に移っていくためである。

4.3 飽和沸騰 DNB 熱流束表示式

比較的短い流路の発達した核沸騰では、熱は主に蒸発潜熱として伝達される。クオリティーの小さい表面沸騰では、DNB 熱流束は、強制対流する液体が運べる蒸気泡の量で決まると考えると、蒸気の最大質量流量、液の質量流量およびウェーバー数の関数とすることができる。この考えに基づき、実験結果を用いて飽和沸騰 DNB 熱流束表示式を提示した。

$$q_{sat} = Gh_{fg}(\rho_v/\rho_l)^{0.43}(L/d)^{-0.35}F_b \quad (1)$$

$$F_b = 0.025 \cdot (L/d)^{-0.3} \quad \text{for } We < We_b$$

$$F_b = 0.32 \cdot We^{-0.45} + 0.0017 \quad \text{for } We \geq We_b$$

$$We_b^{-0.45} = 0.078 \cdot (L/d)^{-0.3} - 0.0053$$

$We = G^2 d / (\rho_l \sigma)$: ウェーバー数

q_{sat} [W m⁻²] : 飽和沸騰 DNB 熱流束

G [kg m⁻² s⁻¹] : 質量流量

h_{fg} [J kg⁻¹] : 蒸発潜熱

ρ_v, ρ_l [kg m⁻³] : ガス密度, 液密度

L [m] : 発熱円管長

d [m] : 発熱円管内直径

σ [Nm⁻¹] : 表面張力

各発熱体の飽和沸騰 DNB 熱流束実験結果と表示式の比較

を $\log\{q_{sat}(Gh_{fg})^{-1}(\rho_v/\rho_l)^{-0.43}(L/d)^{0.35}\}$ vs. $\log\{We\}$ グラフ上 (**Fig. 7**) に示す。実験結果は表示式でよく記述されている。

Fig. 7 Generalized expression of saturated DNB heat fluxes in liquid hydrogen at various pressures.

4.4 サブクール沸騰 DNB 熱流束表示式

サブクールされた液体水素で強制対流冷却している超電導導体の場合、平常時は熱負荷がほとんどなく出口もサブクール状態である。何らかの原因で超電導導体の一部が常電導転移した場合に局所的熱負荷が印加されることになる。加熱円管面に沿って飽和液と蒸気からなる二相境界層が形成され、その内側をサブクール液が流れることになる。サブクール条件下の DNB 熱流束 q_{sub} は、潜熱と顕熱の寄与からなっていると考え、潜熱の寄与は前項の飽和沸騰 DNB 熱流束 q_{sat} と等しく、DNB は流路出口で起こるとし、実験結果を基に次式で表示した。

$$q_{sub} = q_{sat}(1 + A Sc_{out}) \quad (2)$$

$A = 1.4 \cdot (\rho_v/\rho_l)^{-0.43} (L/d)^{0.25} E^{-0.1}$: 無次元パラメータ
 $E = d/\sqrt{\sigma/g(\rho_l - \rho_v)}$: 無次元加熱管直径
 $Sc_{out} = c_{px}\Delta T_{sub,out}/h_{fg}$: 無次元出口サブクーリング
 $\Delta T_{sub,out}$: 出口サブクール度
 $c_{px} = (h_{sat} - h_{in})/(T_{sat} - T_{in})$: 入口液温から飽和液温まで平均した定圧比熱

例として、試験体 Type C, E, G での q_{sub} の実験結果を、 $\log\{(q_{sub}/q_{sat} - 1)/A\}$ vs. $\log\{Sc_{out}\}$ のグラフ上 (Fig. 8) に示す。 q_{sat} は(1)式で求めた。表示式(2)は、実験結果をよく記述している。

しかし、出口サブクール度 $\Delta T_{sub,out}$ 、すなわち出口サブクーリング Sc_{out} は、予め与えられないので、(2)式を、入口サブクーリング Sc_{in} で表すと、

$$q_{sub} = q_{sat}(1 + A Sc_{in})/(1 + A B) \quad (3)$$

$B = 4.0 \cdot q_{sat}(L/d)/(Gh_{fg})$: 無次元パラメータ
 ただし、
 $\Delta T_{sub,in}$: 入口サブクール度
 $Sc_{in} = c_{px}\Delta T_{sub,in}/h_{fg}$: 無次元入口サブクーリング
 $Sc_{out} = Sc_{in} - 4.0 \times q_{sub}(L/d)/(Gh_{fg})$

とできる。

Fig. 8 Comparison of the subcooled DNB heat flux data for Type C, Type E and Type G heaters at various pressures with determined using Eq.(2).

Fig. 9 Comparison of the equation Eq.(3) developed by the authors with the experimental data for 0.7 MPa(A) (Type E).

例として Fig. 9 に、Type E の試験体について、圧力 0.7 MPa(A) ($T_{sat}=29$ K) での DNB 熱流束 q_{DNB} の液体水素流速に対する実験結果を入口サブクール度 $\Delta T_{sub,in}$ をパラメータとして示す。 q_{sub} は流速やサブクール度が大きいほど大きく、高流速、高サブクール度のデータは、同じ流速の飽和沸騰 DNB 熱流束 q_{sat} の値の 2 倍以上である。すべての実験データは予測値の 20%程度に収まることを確認した。

4.5 DNB 熱流束を越えた後の熱伝達特性 (膜沸騰熱伝達)

液体水素強制対流冷却超電導機器の安全設計には、クエンチ以降の熱伝達特性の把握が重要である。しかし、クエンチ時には、質量流量やクオリティーの変化が大きく、定常熱伝達特性の知識では評価できず、表示式の提示は難しい。そこで、加熱 (クエンチ) 以前の初期質量流量 $v_{mass,ini}[\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}]$ をパラメータとして、以降の非沸騰域、核沸騰域、DNB 熱流束を経て膜沸騰域にいたる飽和沸騰熱伝達特性を記述する計算コードを開発した¹²⁾。Fig. 10 に実験結果と計算コードによる特性曲線の比較を示す。

Fig. 10 Comparison of curves calculated and experimental data.

Fig. 13 Two-pole MgB₂ racetrack coil.

Table 2 Specifications of MgB₂ racetrack coil.

Dimensions	250 mm height, 100 mm Arc diameter, 34 mm thickness
Superconducting wire	MgB ₂ 10-core wire (1.2 mm dia.), grass braised
No. of turns	23 rows × 23 layers = 529 turns / pole
No. of poles	2

レーストラックコイルには In-situ PIT 法で作製された日立製作所製の MgB₂ 多芯線 (Φ=1.2 mm) を使用している。この線材について約 300 m の長さの線 2 本を用いて、Wind & React で 2 極のレーストラックコイルを作成した。諸元を Table 2 に示す。

液体水素浸漬冷却下で、圧力を変え飽和液温を 21 K から 30 K まで変えて通電試験を行った。掃引速度は 0.1, 0.4, 1.6 A/s の 3 条件で行った。臨界電流値の決定に際して、電界定義として 0.07 μV/cm を採用した。(測定する 46 ターン分の

Fig. 14 Excitation and quench testing of MgB₂ racetrack coil.

線材間の電位に対し、3 ターン分の線材が 1 μV/cm の電界基準を超えた場合を想定。) 液温 30 K, 掃引速度 0.4 A/s の条件で励磁実験を行った際のコイル両端電圧と電流の関係を Fig. 14 に示す。掃引速度 0.1, 0.4 A/s における実験では、予想される臨界電流の 5, 6 割程度の電流値までは速い掃引速度 (1.0 A/s) で励磁し、その後所望の掃引速度で臨界電流まで励磁した。図より約 190 s でクエンチが検出され、消磁されていることが分かる。また励磁時の誘導起電力より 2 極レーストラックコイルのインダクタンスは 194.8 mH と求められた。

Fig. 15 に得られた各温度におけるレーストラックコイルの臨界電流 I_c とロードライン、同じ MgB₂ 線材の短尺試験体の $I_c - B - T$ 特性を示す。線材の MgB₂ 部にかかる最も大きな磁場を最大経験磁場とし横軸にとった。線材は鉄を含むので、経験磁場については MgB₂ 部に実際にかかる磁場を計算により補正を行った。

液温 21 K の条件下でレーストラックコイルの臨界点において 279 kAtum を実現した。クエンチはコイル両端電圧が 50 ms の間 1.0 V を越えることで検出し、電源は -8 V で消磁動作に入る。21 K の励磁でのクエンチ時、コイルの貯蔵エネルギーは約 7.15 kJ であり、コイルにダメージを与えることなく処理された。Fig. 16 は、クエンチ時の 1 極のコイルのタップ電圧の変化を示している。23 巻 2 層をータップとし、コイル内側から 20 層まで $V_{1,2}, V_{3,4}, \dots, V_{19,20}$ と取り出した。線材の長手方向よりも速く層間で常伝導が伝搬していることが確認できる。

レーストラックコイルの弧部分にかかる z 軸方向の磁場が最も大きく、臨界電流付近で 2.10 T であった。また、こ

Fig. 15 Load line of MgB₂ racetrack coil.

Fig. 16 Tap voltage of each magnet layer and current (21 K).

の時界磁コイルとして重要なレーストラックコイル表面での磁場は、1.09 Tであった。

本試験において、レーストラックコイルを何度もクエンチさせたが、コイルの臨界電流の劣化や焼損は見られなかった。これは液体水素の冷却能力の高さに加え、速い常伝導領域の伝搬により、タップ電圧によるクエンチ検出が行えたためであると考えられる。

6. 回転体への液体水素給排

液体水素冷却にする重要な技術として、回転子（回転する低温容器）への液体水素の給排が挙げられる。液体水素給排システムの基本的な設計の考え方は、液体ヘリウム冷却の回転機開発で進められたものを踏襲すればよいが、物性の違い、再凝縮を伴わないワンスルーシステム、さらに冷却系の防爆対応・安全性の確保は重要な技術的課題である。そこで、回転界磁超電導機を想定し、要素技術開発を目的として、軸径 504 mm、幅 160 mm の円柱形回転低温容器への液体水素給排試験装置を設計・製作し、試験を実施した。

その概略図を Fig. 17 に、全景写真を Fig. 18 に示す。磁性流体シールで軸封した真空容器内に、回転低温容器を設

Fig. 17 Cross-sectional view of hydrogen supply and exhaust system.

Fig. 18 Experimental set-up of hydrogen supply and exhaust system for a liquid hydrogen-cooled superconducting rotating machine.

置し 80 K シールドを設けた。液体水素はパイオネットを介して、ロータリージョイント内の回転軸中心を通り、回転体の断熱二重管を経て回転水素槽に供給される。回転する水素槽で液体水素は遠心力により円周外壁から貯液され、回転中心に向かって液面を形成する。回転軸周りは水素ガス層となり、戻りガスとして反駆動側の中央部から軸径 400 mm、幅 150 mm の円筒に設けたコイル状の流路をヒータで加熱昇温されながら流れる。常温近くに昇温された水素ガスは回転軸近くに戻り、先の注液用断熱二重管の外側を通して、ロータリージョイント部の水素ガスシール（磁性流体シール）でシールされて回転部から固定部（ベントライン）に導かれる。回転子は、インバータ駆動誘導機（15 kW）で駆動され、軸受間距離は 920 mm、設計回転数は 1800 rpm である。回転部の液面計、温度計、圧力計などの計測ラインおよび加熱用ヒータのリード線は駆動機側に設けたスリッピングを通して静止部にとりだした。

液体水素の給排試験における回転体内部に図示のように設置した温度計（T1～T4）と回転数の変化を Fig. 19 に示す。一日目に 1200 rpm で回転させながら液体水素を供給し 291 K から 123 K まで冷却して、回転停止し夜間放置した。二日目再び 1200 rpm で回転させて液体水素を供給

Fig. 19 Time trend of hydrogen-cooling test using a rotating LH₂ cryostat.

し、224 K から 7 時間 24 分で T4 が 20.4 K となり貯液を開始し、貯液状態で設計回転数 1800 rpm での運転を確認した。三日目は 167 K から貯液状態とし、1800 rpm で液面を安定に維持できることを確認し、回転数を下げたときの液の挙動を調べた。実験を通じて水素の漏洩は検出されず、設計製作した構造で安定な液体水素の給排が可能なことを確認した。

7. おわりに

液体水素冷却超電導応用エネルギー機器をキーとした電力システムの大きな変革と、水素エネルギーと協調した新しい低炭素化エネルギー供給基盤は、その高効率による低炭素化や、システムの安定性、柔軟性を高める導入効果、それによる再生可能エネルギー導入の促進効果などが期待され、将来の環境に優しいエネルギーシステムの究極の形である。

このプロジェクトでは、開発成果として液体水素冷却超電導機器のためのマグネット技術、水素のハンドリング技術、冷却システム技術、安全性技術の基本的指針を明らかにしてきた。研究開発で得られた知見をもとに、液体水素を冷媒とした種々の超電導機器のプロトタイプ機の開発が可能となると考えている。

実験設備の設計・製作においては、実用機器への展開を想定しながら種々の方策を提案し、所轄県庁の認可を受けた。整備した実験設備を用いて、液体水素を使った冷却特性試験、超電導特性評価実験をこれまで 25 回 (2019.10 現在) 実施し、運用実績を積み上げてきた。今後、安全な液体水素冷却超電導機器システムの設計・法的整備、社会への実装につなげて行きたいと考えている。

本研究は、JST 先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA) の助成を受け、JAXA、熊本高専、IHI、太陽日酸、上智大学の共同研究として実施したものである (Grant Number : JPMJAL 1002, JPMJAL1001)。参画諸氏に感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 宮崎 淳, 梶原昌高, 岩下博信: 「液化水素市場の現状とエネルギーとしての可能性」, 水素エネルギーシステム **36**(4) (2011)
- 2) NEDO News Release: 「水素専焼タービンの先導的研究開発等に着手」 https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100596.html, 2016.07 (2019.07.10 アクセス)
- 3) 「川重が世界初、液化水素運搬の実証船建造へ」, 日刊工業新聞 2017 年 7 月 7 日
- 4) 山下誠二ら: 「水素液化貯蔵システムの開発」, エネルギー・資源学会論文誌 **37**(4) (2016) 1-8
- 5) V. S. Vysotsky, et al.: “Energy transfer with hydrogen and superconductivity – The review of the first experimental results,” Physics Procedia **65** (2015) 299-302
- 6) K. Kajikawa, et al.: “Research and development of fully superconducting motors for liquid-hydrogen transfer pumps,” TEION KOGAKU **51** (2016) 155-163 (in Japanese)
 柁川一弘, 中村武恒, 小林弘明: 「液体水素移送ポンプ用全超電導モータの研究開発」, 低温工学 **51** (2016) 155-163
- 7) Y. Shirai, et al.: “Boiling heat transfer from a horizontal flat plate in a pool of liquid hydrogen,” Cryogenics **50** (2010) 410-416
- 8) Y. Shirai, et al.: “Liquid hydrogen recirculation system for forced flow cooling test of superconducting conductors,” IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. **278** (2017) 012036
- 9) H. Tatsumoto, Y. Shirai, et al.: “Development of an experimental system for characterization of high-temperature superconductors cooled by liquid hydrogen under the external magnetic field,” J. Phys.: Conf. Ser. **507** (2014) 022042
- 10) Y. Shirai, et al.: “Forced flow boiling heat transfer of liquid hydrogen for superconductor cooling,” Cryogenics **51** (2011) 295-299
- 11) Y. Shirai, et al.: “DNB heat flux on inner side of a vertical pipe in forced flow of liquid hydrogen and liquid nitrogen,” Cryogenics **92** (2018) 105-117
- 12) M. Shiotsu, Y. Shirai, et al.: “Post DNB heat transfer from inner surface of a vertical heated pipe with upward flow of liquid hydrogen (II): calculation of heat transfer characteristics,” Abstracts of CSSJ Conference **98** (2019) 38
 塩津正博, 白井康之ら: 「円筒発熱体を流れる液体水素の DNB 以降における熱伝達特性 (II) – 熱伝達特性の計算」, 第 98 回 2019 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2019) 38
- 13) T. Matsumoto, Y. Shirai, et al.: “Excitation test of solenoid MgB₂ coil under external magnetic field immersed in liquid hydrogen,” IEEE Trans. Appl. Supercond., **29**(5) (2019) 4600205
- 14) T. Matsumoto, Y. Shirai, et al.: “Experiment and simulation for normal zone propagation of multifilament MgB₂ superconducting wire cooled by liquid hydrogen,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**(5) (2019) 4700806
- 15) Y. Iwami, Y. Shirai, et al.: “Excitation characteristics of MgB₂ Race-track coil immersed in liquid hydrogen,” presented at EUCAS2019, Glasgow (2019)

白 井 康 之 1980 年京都大学工学部電気工学科卒業。1982 年同大学院工学研究科博士前期課程 (電気工学専攻) 修了。1985 年同博士後期課程 (電気工学専攻) 修了。同年京都大学工学部助手, 1996 年同大学大学院エネルギー科学研究科助教授, 2008 年同教授。主に超電導応用電気機器, 極低温冷媒, 電力システムに関する教育・研究に従事。低温工学・超電導学会, 日本エネルギー学会, 電気学会会員。工学博士。

塩 津 正 博 1966 年京都大学工学部電気工学科卒業。1967 年同大学原子エネルギー研究所助手。1996 年同大学院エネルギー科学研究科教授。2006 年同大学名誉教授。軽水炉・高速炉の冷却, 極低温冷媒の熱伝達特性, 超電導応用に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。