

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289047

研究課題名(和文)液体水素強制冷却高温超電導体設計のための過渡冷却特性と過渡伝搬特性の解明

研究課題名(英文) Study of transient heat transfer phenomena of Liquid hydrogen for a high temperature superconducting device

研究代表者

達本 衡輝 (HIDEKI, TATSUMOTO)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究副主幹

研究者番号：70391331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：高温超電導体の液体水素冷却は、従来の液体窒素冷却の場合に比べて、電気・磁気的性能の向上と超伝導状態が破れた際の冷却安定性の向が期待される。本研究では、高温超伝導線材の液体水素による強制流動方式を提案し、その実用化に向けて液体水素強制流動下の過渡熱伝達特性データを既存の装置を用いて取得した。さらに、開発した遠心式ポンプと既存の実験装置を組み合わせ、長時間安定に液体水素を流動できる循環ループを開発した。これにより、これまで得られなかった高流速域でのデータの取得に成功し、広範囲の流速域で定量的に評価できる熱伝達の相関式を導出した。また、超伝導線材の過渡電流分流特性を提案し、その妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Liquid hydrogen is expected as a coolant for high-Tc superconductors. We propose forced flow cooling of liquid hydrogen for high-Tc a superconducting device. In this study, we measured transient heat transfer of liquid hydrogen in forced flow using Pt-Co wire heaters inserted into a vertically mounted pipe like Cable-in-Conduit Conductor. In order to obtain data for high flow rates, we have developed a hydrogen loop that was stably operated for a long time using a developed hydrogen pump and the existing experimental apparatuses. We successfully acquired the experimental data for higher flow rate. We derived a transient heat transfer correlation based on our experimental data obtained in a wide range of flow rates, pressures and temperatures. Furthermore, we established a model to estimate properties of the current-sharing ratio among MgB2 and sheath materials. Transient over-critical-current tests were performed on a MgB2 wire cooled by LH2 under magnetic field.

研究分野：熱工学

キーワード：液体水素 熱伝達 高温超伝導

### 1. 研究開始当初の背景

高温超伝導体を液体水素(20 K)で冷却すると、従来の液体窒素冷却の場合に比べて、飛躍的に電気・磁気的な性能が向上するだけでなく、超伝導状態が破れた際に発生するジュール発熱による冷却安定性も向上するので、高温超伝導体の実用化へのブレイクスルーになると期待されている。

高温超伝導体は、NbTi などの金属超伝導体(4.2K 冷却)に比べて、使用温度領域が高いので比熱が大きい。そのため、臨界電流以上の過電流が流れた場合でも発熱による温度上昇は小さく、臨界温度以下であれば、瞬時に超伝導状態が破れる(クエンチ)ことにならない。しかし、冷却が不十分で膜沸騰状態に遷移すると、線材の温度は臨界温度以上となり、クエンチすることになる。このように、高温超伝導線材の特性は、導体の構造だけでなく、液体水素の冷却特性にも大きく依存するので、高温超伝導応用機器の設計において、液体水素の冷却特性の把握とその効率的な冷却方式の検討が必要不可欠である。

研究代表者らは、2009年に液体水素の熱流動実験装置を開発[1]し、JAXA 能代ロケット実験場の防爆実験室に設置した。大気圧～臨界圧に至る広範囲の圧力、温度条件下での浸漬冷却特性[2]および間接冷却方式を想定した一様加熱円管内の強制冷却特性に関する研究[3,4]を行ってきた。

水素に対する安全性の観点から、間接冷却方式が一般的な考え方であるが、CICC(ケーブルインコンジット)導体のような液体水素による直接冷却方式の方が、高温超伝導線材の性能を十分発揮できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、高温超伝導線材の特性を十分に発揮できる液体水素の強制流動による直接冷却方式を提案し、その導体設計基準の確立をすることを目的としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 液体水素強制流動熱伝達実験装置

実験装置は、実験槽(設計圧力 2.0MPaG、直径 406mm、高さ 1495mm、液体水素の充填容積は 50L)とサブタンクが流調弁を有する断熱真空配管によって連結されている。液体水素の温度は、シースヒータで調整し、Cernox 温度センサーにより計測した。実験槽圧力は、水素カードルからの水素ガスをドーム型減圧弁により調整した。これらの容器の圧力差と流調弁開度を調整することで液体水素の

強制流動を発生させ、その流速は、実験槽を載せた重量計(0.002 kg の精度)の重量変化とタービフローメータによる供給ガス流量測定により評価した。

#### (2) 液体水素循環ループ

上述の液体水素強制流動熱伝達実験装置は、2つのタンクの差圧により強制流動を発生する装置である。さらに実験槽は最大で 50L の液体水素インベントリを有するが、実験槽内に設置した供試体より液面が低くなると供試体を設定温度に維持できず、かつ、差圧駆動のため、大流量の液体水素を長時間安定に流すことができなかった。そこで、これまでに開発した液体水素ポンプ(気体軸受方式の遠心ポンプ(回転数: 30,000 ~ 63,000 rpm))と既存の2つの実験装置を組み合わせることにより、図1に示すような液体水素および超臨界水素(臨界圧: 1.29 MPa)を長時間安定に強制循環するための循環ループを開発した。ポンプの防爆対策は、これまでと同様に、ポンプ自体をブランケットで覆い、陽圧の窒素ガス雰囲気保持した。既存の「液体水素冷却超電導材料の通電基礎特性試験装置」をバッファタンクとして使用し、「強制対流熱伝達実験装置」には、コイル状の熱交換器を設置して、循環ループ内の液体水素を再凝縮器とした。実験槽は常に大気解放状態とし、液体水素の液位が低下すると、30,000 L の液体水素貯槽からサブタンクを介して実験槽に供給できるようにして、長時間の連続運転が可能とした。安全対策として、実験中の操作はすべて遠隔できるように運転制御システムを構築した。供試体への供給温度は、実験槽内の液位(熱交換器で熱交換量)を制御した。オリフィス流量計によりポンプ吐出流量と供試体への供給流量を測定した。

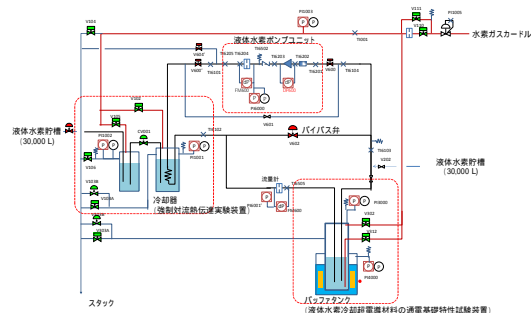


図1. 液体水素循環ループの概要

#### (3) 供試体

図2 強制流動過渡熱伝達測定用供試体の形状を示す。内径 8 mm の FRP 製流路の中心軸に沿って、直径( $d$ ) 1.2mm、加熱長さ( $L$ ) 60mm, 120mm, 200mm の PtCo 製ワイヤヒーターを設置した。この供試体は、(1)で示した実験装置では、実験槽内のトランスファーチューブの一端に接続し、(2)で示した実験装置ではバッファタンク内のトランスファーラインの一端に設置し、垂直に支持した。

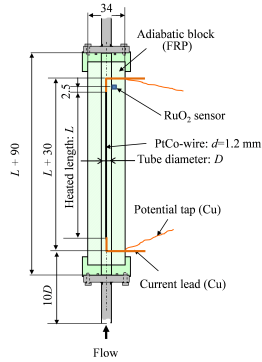


図 2. 過渡熱伝達用供試体の形状

一方、 $MgB_2$  超電導線材の過電流特性用供試体として、試験体は直径 0.83mm、電流端子間距離 105.5mm、電圧端子間距離 47.65mm の  $MgB_2$  線材を水平に支持した。試験体には Cu シース Nb バリア  $MgB_2$  線材を用いた。

(4) 強制流動過渡熱伝達特性の実験方法  
本実験では上述の(1)と(2)の実験装置を用いて、過渡熱伝達特性実験を実施した。(3)で記述した PtCo ワイヤを指数関数状の発熱率  $Q = Q_0 \exp(t/\tau)$  で直流電流加熱し、上昇周期  $\tau$  を変化させて過渡熱伝達特性を測定した。発熱体平均温度は、PtCo ヒーターの電気抵抗変化から測定し、発熱体表面温度は、平均温度の垂直軸方向分布を無視して、その平均温度と発熱率から半径方向の熱伝導方程式を解いて求めた。

(5)  $MgB_2$  超電導線材の過渡分流特性の実験方法

1.1MPa の圧力で、液温を 21K ~ 29K、磁場を 0T ~ 0.8T と変化させた。試験体に連続的に指数関数状の発熱率  $Q_0 \exp(t/\tau)$  を与え、上昇周期  $\tau$  を変化させた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 液体水素循環ループ特性試験結果

ポンプ起動から停止まで 7 時間の長時間連続運転を実施した時の試運転結果の一例を図 3 示す。圧力は 0.3MPa、1.1MPa、0.75MPa、1.5MPa(超臨界圧)の順で変化させ、各圧力時においてバイパス弁開度を調整し、供試体流量調整試験を実施した。供試体への供給流量は最大で 43.7g/s であることを確認した。計通りの性能を確認することができた。この時の供試体への供給温度は熱交換出口より約 2K 高い 22.5K であった。安定に長時間運転できることを本性能試運転で確認できた。

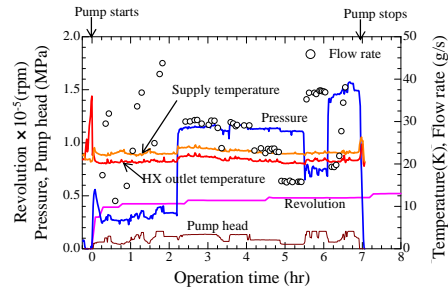


図 3. 液体水素循環ループの試運転結果

##### (2) 強制流動過渡熱伝達特性結果

直径 1.2mm、加熱長さ 120 mm の PtCo 製ワイヤの場合の流速が 0.8 m/s と 5.5 m/s の場合の液体水素の強制対流過渡熱伝達特性結果を図 4 示す。横軸は発熱体表面温度 ( $T_w$ ) の入口温度からの上昇分 ( $\Delta T_L = T_w - T_{in}$ ) である。

が大きい(加熱速度がゆっくり)場合、非沸騰域の熱伝達は、Dittus-Boelter 式[2]の予測値と良く一致しているが、が小さくなると過渡熱伝達の寄与が大きくなり、Dittus-Boelter 式より大きくなる。同じ上昇周期の場合、流速が速い方が、熱伝達の影響は小さく、その影響が現れる上昇周期は小さい。一方、核沸騰熱伝達はほとんど上昇周期の影響はみられないが、DNB(Departure from Nucleate Boiling)熱流束 ( $q_{DNB}$ ) は、が小さくなるとつれて大きくなっている。

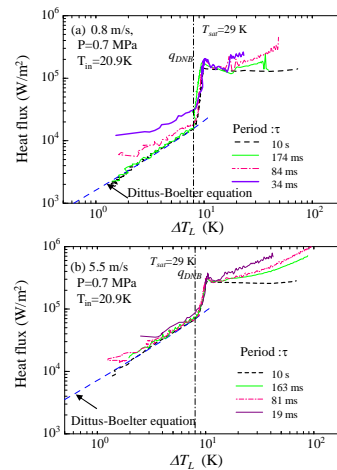


図 4. 強制流動過渡熱伝達特性結果の一例

図 5 に加熱長さが 120 mm の PtCo 製ワイヤヒーターの場合の 0.4 MPa における過渡 CHF ( $q_{cr}$ ) の依存性を示す。  $> 1s$  では、過渡 CHF は加熱速度の影響はなく、ほぼ一定であり、定常状態とみなせる。  $< 1s$  では、の減少(加熱速度を速くする)とともに、過渡 CHF は増加し、が同じ場合、流速が速い方が過渡 CHF は大きい。0.7 MPa の場合(図 6)、0.4 MPa の場合と同様に、  $< 1s$  でが短くなると  $q_{cr}$  は単調増加しており、サブクール液体水素による強制冷却の場合、液体窒素の浸漬冷却で

報告[5]されているような核沸騰域がなく、膜沸騰へ直接遷移することによる過渡 CHF の急激な減少はないことが明らかになった。また、圧力が低い方が、の減少に伴う過渡 CHF の増加傾向は大きくなっている。

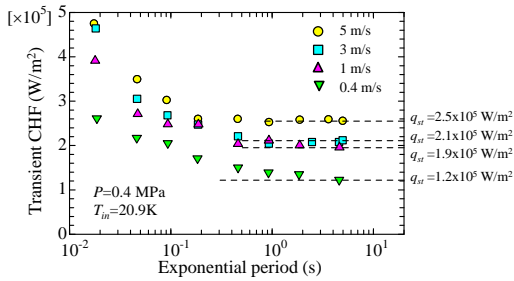


図5. 0.4 MPaにおける過渡 CHF ( $q_{cr}$ ) の 依存性 ( $L=120$  mm)

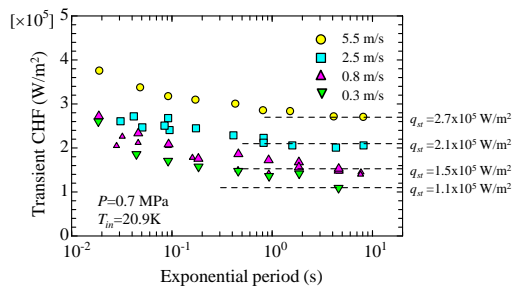


図6. 0.7 MPaにおける過渡 CHF ( $q_{cr}$ ) の 依存性 ( $L=120$  mm)

過渡 CHF ( $q_{cr}$ ) を定常 CHF ( $q_{st}$ ) からの上昇分 ( $q_{cr} - q_{st}$ ) として整理した結果を図7に示す。 $(q_{cr} - q_{st})$  は、同一の供試体においては、流速の影響は殆どなく、 $\alpha^{-0.5}$  の関数で表されることがわかった。また、同一の特性長さ ( $L/D_h$ : 加熱長さ と加熱等価直径との比) を有する供試体では、実験結果は同一の直線状に存在するが、特性長さが大きくなると、係数  $\alpha$  は、大きくなることが明らかにした。

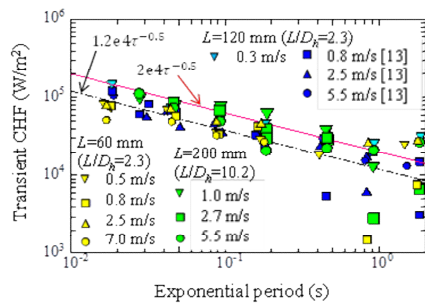


図7. 過渡 CHF の定常 CHF からの上昇分 ( $q_{cr} - q_{st}$ ) の 依存性

(3) 超電導線材の過渡分流特性の実験結果  
供試体の抵抗率が  $10^{-13}$  m に達したときの電流値を臨界電流とし、臨界電流と温度の関係から MgB<sub>2</sub> 線材の臨界電流値を以下のように温度の関数として表した。

$$I_c = X \{1.0 - (T/T_c(B))^Y\}^Z \quad (1)$$

ここで、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  は各磁場で求めた定数である。MgB<sub>2</sub> 線材の電気抵抗  $R(T, I)$  を次式で近似した。 $R(T, I) = R_N(T) [1.0 - 1.0 / \{(1.0 - a) + a(I/I_c(T))^m\}^{0.1}]$

$R_N$  はバリア材の Nb とシース材の Cu の合成抵抗である。式(2)の  $a$  と  $m$ 、非沸騰熱伝達理論式を用いて決定した。

図8は、磁場をパラメータとして、21 Kにおける分流比と電流の関係を示す。分流比は(2)式より、以下のように表せる。

$$I_N/I(T) = 1.0 - 1.0 / \{(1.0 - a) + a(I/I_c(T))^m\}^{0.1} \quad (3)$$

分流比は、電流が大きいほど、磁場が大きいほど大きくなっている。このように、提案した過渡加熱法により、高温超伝導線材の分流特性を評価できることがわかった。

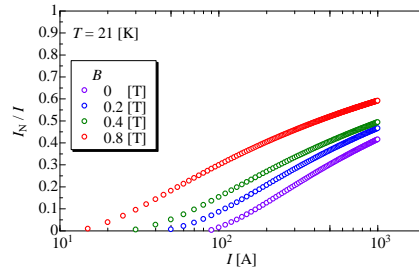


図8. 分流比と電流の関係

(参考文献)

- [1] H. Tatsumoto et al., Journal of Physics; Conference Series, 234 032056 (2010)
- [2] Y. Shirai, H. Tatsumoto et al., Cryogenics, 50, p410-p416 (2010)
- [3] H. Tatsumoto et al., Physics Procedia, 36 (2012) 1360-1365
- [4] H. Tatsumoto et al., Advances in Cryogenic Engineering, 57B (2012) 747-754
- [5] A. Sakurai et al; Cryogenics, Vol.32 (1992) p.421

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- (1) " Forced convection heat transfer from a wire inserted into a vertically-mounted pipe to liquid hydrogen flowing upward ", H. Tatsumoto, Y. Shirai, M. Shiotsu, Y. Naruo, H. Kobayashi and Y. Inatani Journal of Physics: Conference Series, 568, 032017, 2014, 査読有, DOI : 10.1088/1742-6596/568/3/032017

(2) "Cooling Stability Test of MgB<sub>2</sub> Wire Immersed in Liquid Hydrogen under External Magnetic Field", Y. Shirai, K. Hikawa, M. Shiotsu, H. Tatsumoto, Y. Naruo, H. Kobayashi and Y. Inagaki, Journal of Physics: Conference Series, 507, 022031, 2014, 査読有,

DOI: 10.1088/1742-6596/507/2/022031

(3) "Transient Heat Transfer from a Wire Inserted into a Vertically Mounted Pipe to Forced Flow Liquid Hydrogen", H. Tatsumoto, Y. Shirai, M. Shiotsu, Y. Naruo, H. Kobayashi, Y. Inatani, Physics Procedia, Volume 67, 649-654, 2015, 査読有,

DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.110

(4) "Transient heat transfer from a wire to a forced flow of subcooled liquid hydrogen passing through a vertically-mounted pipe", H. Tatsumoto, Y. Shirai, M. Shiotsu, Y. Naruo, H. Kobayashi, S. Nonaka and Y. Inatani, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 101, 012177, 2015, 査読有,

DOI: 10.1088/1757-899X/1101/1/012177

〔学会発表〕(計 12 件)

(1) 白井 康之, 茂田 宏樹, 飼沼 徹, 塩津 正博, 達本 衡輝, 成尾 芳博, 小林 弘明, 野中 聡, 稲谷 芳文, 吉永 誠一, 液体水素強制対流冷却試験のための循環ループ装置, 2015 年秋季低温工学・超電導学会, 2015 年 12 月 2 日~4 日, 姫路商工会議所(兵庫県姫路市)

(2) 達本 衡輝, 白井 康之, 塩津 正博, 成尾 芳博, 小林 弘明, 野中 聡, 稲谷 芳文, 堀江 裕輝, 茂田 宏樹, 比嘉 大輔, サブクール液体水素の強制流動下における流路中心垂直発熱線における DNB 熱流束, 2015 年春季低温工学・超電導学会, 2015 年 5 月 27 日~29 日, 産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂(茨城県つくば市)

(3) 茂田 宏樹, 堀江 裕輝, 松澤 崇之, 米田 和也, 白井 康之, 塩津 正博, 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文, 達本 衡輝, 熊倉 浩明, 葉 術軍, 拡散法で作製した MgB<sub>2</sub> 線材の液体水素冷却下における臨界電流特性, 2014 年秋季低温工学・超電導学会, 2014 年 11 月 5 日~7 日, コラッセふくしま(福島県福島市)

(4) 塩津 正博, 白井 康之, 堀江 裕輝, 米田 和也, 松澤 崇之, 達本 衡輝, 畑 幸一, 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文, 液体水素流路中心の垂直発熱線における DNB 熱流束, 2014 年秋季低温工学・超電導学会, 2014 年 11 月 5 日~7 日, コラッセふくしま(福島県福島市)

(5) 達本 衡輝, 白井 康之, 塩津 正博, 堀江 裕輝, 米田 和也, 松澤 崇之, 茂田 宏樹, 成尾 芳博, 小林 弘明, 野中 聡, 稲谷 芳文, 強制流動下におけるサブクール液体水素の過渡熱伝達特, 2014 年秋季低温工学・超電導

学会, 2014 年 11 月 5 日~7 日, コラッセふくしま(福島県福島市)

(6) 茂田 宏樹, 堀江 裕輝, 松澤 崇之, 米田 和也, 大浦 洋祐, 白井 康之, 塩津 正博, 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文, 達本 衡輝, 液体水素冷却 MgB<sub>2</sub> 超電導線材の過電流特性の解析, 2014 年春季低温工学・超電導学会, 2014 年 5 月 26 日~5 月 28 日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

(7) 松澤 崇之, 堀江 裕輝, 米田 和也, 大浦 洋祐, 白井 康之, 塩津 正博, 畑 幸一, 達本 衡輝, 成尾 芳博, 小林 弘明, 稲谷 芳文, 液体水素冷却 MgB<sub>2</sub> 線材の磁場下における過電流特性, 2014 年春季低温工学・超電導学会, 2014 年 5 月 26 日~5 月 28 日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

(8) 塩津 正博, 白井 康之, 大浦 洋祐, 堀江 裕輝, 米田 和也, 達本 衡輝, 畑 幸一, 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文, 液体水素流路中心の円柱発熱体における膜沸騰熱伝達, 2014 年春季低温工学・超電導学会, 2014 年 5 月 26 日~5 月 28 日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

(9) 達本 衡輝, 白井 康之, 塩津 正博, 成尾 芳博, 小林 弘明, 稲谷 芳文, 堀江 裕輝, 米田 和也, 松澤 崇之, 液体水素の強制流動下における過渡熱伝達, 2014 年春季低温工学・超電導学会, 2014 年 5 月 26 日~5 月 28 日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

他海外発表 3 件

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

達本 衡輝 (TATSUMOTO HIDEKI)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARC センター・研究副主幹

研究者番号: 70391331

### (2) 研究分担者

白井 康之 (SHIRAI YASUYUKI)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号: 60179033

成尾 芳博 (NARUO YOSHIHIRO)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号: 70150050

塩津 正博 (SHIOTSU MASAHIRO)

京都大学・エネルギー科学研究科・名誉教授

研究者番号: 20027139