

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360127

研究課題名(和文) 超伝導機器冷媒としての液体水素冷却特性に関する研究

研究課題名(英文) Heat Transfer Characteristics of Liquid Hydrogen as Coolant for Superconducting Apparatus

研究代表者

白井 康之 (SHIRAI YASUYUKI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：60179033

研究成果の概要(和文)：

液体水素の熱伝達特性に関する物理現象の解明と超伝導応用機器への冷却設計指針を与えることを目的とし、液体水素熱流動特性試験装置の設計製作を行った。浸漬冷却および未臨界圧・超臨界圧での強制対流冷却について、温度・圧力・強制対流流速の種々の条件下において、特に限界熱流束に注目して圧力・サブクール度の影響を系統的に測定した。さらに、浸漬冷却試験では、BSCCO および MgB₂ 超伝導線を発熱体として熱伝達特性を取得した。

研究成果の概要(英文)：

The knowledge of forced flow heat transfer in liquid hydrogen is important for cooling design of large scale HTS superconducting magnets. An experimental system for thermal hydraulics of liquid hydrogen has been developed, designed and made in order to investigate the heat transfer characteristics for wide ranges of subcoolings, flow velocities, and pressures up to supercritical. The remote control systems and the interlock systems were also established for hydrogen safety. By use of the experimental set-up, steady state and transient heat transfer characteristics in pool cooling and forced flow cooling of liquid hydrogen were investigated experimentally. Additionally, cooling characteristics of High T_c wires, such as BSCCO and MgB₂, immersed in liquid hydrogen were investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
21年度	3,100,000	930,000	4,030,000
22年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	11,900,000	3,570,000	15,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：液体水素, 熱伝達, 高温超電導, 冷却特性, サブクール

1. 研究開始当初の背景

液体水素の研究は、水素ガスが二酸化炭素を発生しない地球環境に優しいエネルギー源であるという視点から、水素ガスの大量輸

送や貯蔵というエネルギーインフラとして主に進められてきている。

一方、水素ガスや液体水素は、高い熱伝導率・比熱、低い粘性などという非常に優れた

冷媒としての冷却特性を持っている。しかし、極低温冷媒として比較的扱いやすい液体窒素(77.3K)や逆に極限領域では液体ヘリウム(4.2K)という不活性ガス液体が利用され、液体水素は活躍出来るフィールドが少なかったため、その冷却特性については、飽和状態の浸漬冷却特性に関するものがほとんどで、十分な解明がなされていない。

近年酸化物超伝導材料を用いた線材の開発が進み、これらを用いた超伝導機器の研究・開発が活発になってきている。高温超伝導材を利用した超伝導機器の利用温度は、種々の目的に応じた利用条件を勘案すれば、77K(液体窒素)が最適であるとは限らない。また、最近精力的に開発されている MgB₂ 線材は、酸化物超伝導材料と比較して安価な金属材料で構成されており、その経済性や扱いやすさで優位性があると考えられている。この臨界温度は、過去の金属系超伝導材の臨界温度より遙かに高く 39K であるので、安定な冷却冷媒として液体水素(20K)の利用が冷凍機による伝導冷却とともに選択肢として上がってきている。また、大きな蒸発潜熱や低い粘性(液体窒素の 1/10)は強制対流を利用した冷却に有利である。

したがって、機器設計の視点から見れば、超伝導材料が何度で超伝導特性を示すかではなく、何度での運用設計を行うかが重要な視点となる。超伝導導体の超伝導特性・比熱・温度マージンや構造材料の比熱、さらに冷却の安定性などを考慮すれば、液体水素による冷却を前提とした超伝導応用機器の可能性は非常に大きい。また、エネルギーシステムという観点から見れば、冷媒の能力とともに、蒸発潜熱が液体ヘリウムの約 20 倍、液体窒素の約 2 倍あり、安定な貯蔵が期待出来るなどエネルギー源としての価値も高く、超伝導機器との相乗効果が期待出来る。

2. 研究の目的

このような視点に立って、種々の液体水素冷却超伝導導体を想定し、これを使った超伝導応用機器(例えば、ケーブル・発電機・電動機・変圧器など)の設計を行うための、液体水素の基本的な熱伝達特性を把握することを第 1 の目的とする。したがって、広範囲の圧力条件下でのサブクール液体水素の浸漬冷却および強制対流冷却特性に関して基礎データを収集する。

さらに、想定した液体水素冷却超伝導導体およびコイルのサンプルを作成し、その電気的特性・安定性に与える液体水素冷却特性の影響について、実験的に解明することを第 2 の目的とする。併せて、このような実験を行うための実験設備・手法の開発も目的の一つである。

また、以上で得られた実験結果をベースに

して、液体水素熱流動解析コードの開発、液体水素冷却超伝導導体安定性解析コードの開発を第 3 の目的とする。

3. 研究の方法

液体水素強制対流熱伝達実験装置の設計・製作を行い、製作した液体水素用強制対流熱伝達実験装置を用いて、発熱体を含んだ種々の大きさ・長さの円管流路や方形状流路を作成・設置し、広範囲な温度・圧力・流速の強制対流下での測定を実施する。発熱体へは外部電源から任意のパターンに制御した電流によって直流加熱し熱入力を与え、定常および過渡熱伝達特性を求める。浸漬冷却、未臨界圧での強制対流冷却について、特に限界熱流束に注目して、圧力・サブクール度、発熱率上昇率などの影響を系統的に測定する。

超臨界圧での強制対流冷却についても流速、液温、流路形状や長さ等の影響を明らかにする。これらの実験結果を系統的にまとめ液体水素の熱伝達データベースを作成し、これから各種条件をパラメータとした液体水素の熱伝達表示式の導出を行う。

高温超伝導線材を用いた種々の液体水素冷却超伝導導体構造を想定して、線材の液体水素冷却下での電気的特性、安定性を検討する。

4. 研究成果

(1) はじめに

カーボンフリーエネルギーシステムが重要課題となる中、液体水素の民生応用に対する熱伝達基礎特性は、種々の機器・システム設計に不可欠である。特に今後開発が期待される超伝導応用機器設計では、広範囲の圧力条件下でのサブクール液体水素の浸漬冷却および強制対流冷却特性に関する基礎データが必要であるが、その熱伝達特性はまだ十分に解明されていない。

これまで十分に行われていない液体水素の熱伝達特性に関する物理現象の解明と超伝導応用機器への冷却設計指針を与えるために、浸漬冷却・強制対流冷却特性実験を可能とする試験装置を設計、製作した。本装置は JAXA 能代多目的実験場に設置し調整試験の後、浸漬冷却および強制対流下での液体水素熱流動特性試験を実施した。

(2) 液体水素熱流動特性試験装置

① 実験装置構成

図 1 に液体水素熱流動特性試験装置の概略図を示す。試験装置は試験体を設置する実験槽(クライオスタット)、サブタンク(レシーバータンク)、これらをつなぐ流量調整弁付断熱輸送配管(トランスファーライン)、水素圧力供給用のガスライン、ガス放出用ベ

ントラインからなる。図2に写真を示す。各クライオスタットの仕様は表Iに示す。実験装置に液体水素を供給するLH2コンテナ、H2ガスカードル、ベントスタックは実験装置室外に設置した。

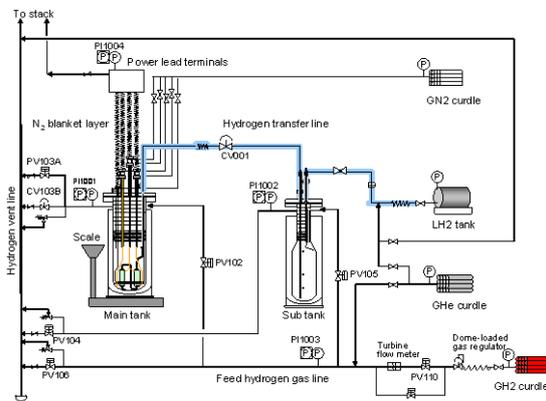


図1 実験装置の概要

表 I Specification of cryostats.

実験槽	設計圧力(常用圧力)	2.0MPa(1.8MPa)
	寸法	406φ×1495h
	LH2 充填量(内容積)	50L(100L)
サブタンク	設計圧力(常用圧力)	2.0MPa(1.8MPa)
	寸法	406φ×1578h
	LH2 充填量(内容積)	59L(80L)



図2 実験装置の概要

②実験槽

実験槽(設計圧力2.0MPaG)は、直径406mm、高さ1495mm、液体水素の充填容積は50Lである。実験槽の液量は、重量計の変化で計測する。実験槽には、放出弁として、圧力調整用の流調弁と水素を放出用のON/OFF弁を設置

した。液体水素の温度は、Cernox温度センサーにより、計測し、液体水素の温度は、シーヒータ(最大出力:500W)により調整した。実験槽には、最大で3つの試験発熱体を設置できるように、電流導入端子(最大で400A)を4本挿入した。

③サブタンク

サブタンク内の液体水素容量は、実験槽より大きい60Lとし、その液位は、高さ方向に設置した3つの温度計(T型熱電対)により、計測した。

④制御システム

制御システムは、安全距離が十分な制御室に全て遠隔で操作可能なシステムを構築した。圧力異常、および、漏洩等の異常時には、(1)供給電源遮断、(2)系内水素の放出、(3)液体水素の移送が中断するインターロックも構築した。

(3) 機能検証試験

①実験条件の設定

実験槽の液体水素は、ドーム型減圧弁により減圧した水素ガスにより加圧した。液体水素輸送配管の流調弁の開度を調整し、試験管路内に強制対流を発生させた。

液体水素の流量は、実験槽を載せた重量計およびタービン流量計を用い、重量時間変化と加圧用に供給されたガス量により算出する。圧力はドーム型減圧弁により一定に制御され、実験槽の重量変化を一定に保持でき、供給水素ガス流量も一定で、安定な強制対流を発生させることができた。

液体水素液温は実験槽の底部に設置したシーヒータによって、さまざまな圧力条件下で所定のサブクール度に設定できることを確認した。

(4) 熱伝達特性試験

①試験方法

浸漬冷却試験用平板発熱体とトランスファチューブ入口に直列連結し円管内をLH2強制流が流れるようにした二つの強制対流試験用円管発熱体を用いた。

液温、圧力、流速を設定した状態で、それぞれの試験発熱体の発熱率が指数関数($Q=Q_0 e^{-t/\tau}$, $\tau=10.0s$)となるように直流電流源の電流を、遠隔制御で準定常的に最大400Aまで上昇させた。このときの浸漬冷却および強制対流熱伝達を測定した。

②浸漬冷却熱伝達実験

ア. 試験発熱体

図3に試験で用いた幅10mm、厚さ0.1mm、長さ100mmのマンガニン製平板発熱体を示す。実験では、発熱面は上向き水平に設置され、反対側はFRPブロックにより断熱してあ

る。この試験体を直流電流加熱して、電気抵抗変化から発熱体平均温度を測定した。発熱体表面温度は、測定した平均温度と熱流束から厚さ方向の熱伝導式を解いて求めた。

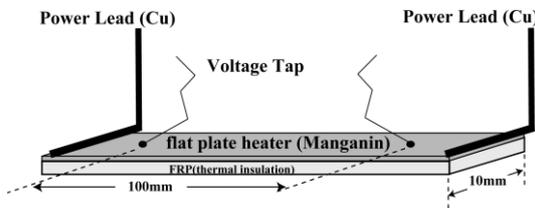


図 3 浸漬冷却用試験体

イ. 実験結果と考察

実験は系の大気圧から 1.1MPa までの压力下、飽和条件で行った。発熱体への通電をゆっくりと連続的に上昇させることにより、液体水素の臨界熱流束までの定常熱伝達特性を調べた。

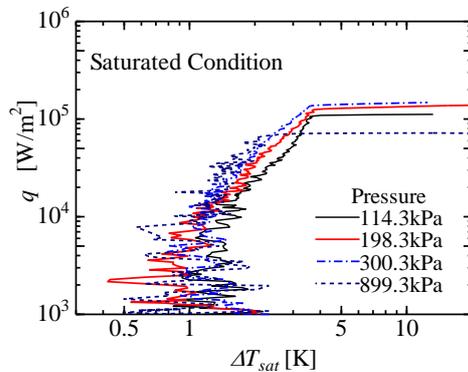


図 4 圧力をパラメータとした液体水素の飽和熱伝達特性

図 4 に種々の压力下における熱伝達曲線を示す。縦軸は熱流束、横軸は発熱体表面の飽和温度からの温度上昇分である。熱流束が上昇すると発熱体温度も上昇し、臨界熱流束 (CHF) に達すると表面温度は急上昇する。低熱流束域では勾配が大きいが、 104W/m^2 程度以上になると各圧力とも勾配がほぼ 3 のいわゆる発達した核沸騰状態となり、以後ほぼ直線状に臨界熱流束まで上昇する。この発達した核沸騰熱伝達は、圧力上昇とともに向上することがわかる。しかし 899.3kPa の CHF は小さくなっている。

そこで CHF と圧力の関係を図 5 に示す。CHF は、300kPa まで圧力とともに大きくなるが、以後減少して 1100kPa 付近ではピーク値の 25% にまで減少している。この結果をよく知られた Kutateladze の式で係数を 0.16 としたものと比較すると、圧力依存性の傾向は類似であるが、500kPa 以下の圧力では、最大 15% 程度同式より大きく、それ以上の圧力では最大 40% 程度低くなった。

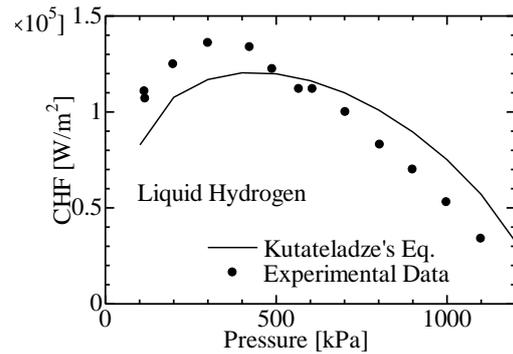


図 5 圧力に対する CHF の変化 (飽和条件)

この原因を考察するため、臨界熱流束に到達した時の発熱体表面温度と圧力の関係を調べた。臨界熱流束点での発熱体表面温度は、600 kPa 程度までは圧力上昇とともに上昇するが、より高い圧力では水素の臨界温度 T_{cr} で一定になる。この T_{cr} で抑えられる圧力領域では、水力的不安定性による臨界状態となる前に、発熱体表面温度が水素の臨界温度に到達し、発熱体全面が蒸気で覆われることによって膜沸騰へ遷移すると推測される。一方、臨界熱流束到達時の発熱体表面温度が T_{cr} に到達するかは、核沸騰熱伝達特性に依るため、発熱体表面状態やキャビティー分布の影響を受けると考えられる。

ウ. サブクールの影響

実験は系の大気圧から 1.1MPa までの压力下、飽和ならびにサブクール条件で行った。

CHF は、各圧力でサブクール度の増加とともに上昇し、この実験範囲では圧力ともに小さくなる。よく知られた Kutateladze のサブクール沸騰臨界熱流束式は、実験結果をほぼ記述しており、サブクールの効果は沸騰によってエンハンスされた顕熱輸送効果と考えられる。

エ. 過渡熱伝達特性

液体水素浸漬冷却過渡熱伝達、特に液体窒素冷却のような膜沸騰直接遷移の有無を明らかにすることを目的として、水平上向き平板発熱体に指数関数状上昇発熱 $Q = Q_0 \exp(t/\tau)$ を与え、上昇周期 τ を 0.008 s から 8 s まで種々変化させて過渡熱伝達特性を、大気圧から 700 kPa までの压力下、飽和及びサブクール状態で測定した。

各圧力における CHF は、 τ の減少とともに単調に上昇し、液体窒素冷却で見られる膜沸騰直接遷移による急激な減少は見られなかった。

③強制対流熱伝達実験

ア. 試験発熱体流路

図 6 に試験発熱体の一例の概要図を示す。

- No. 2, pp.1483-1486, June 2008
- ② ▪ Y. Shirai, H. Tatsumoto, M. Shiotsu, K. Hata, H. Kobayashi, Y. Naruo and Y. Inatani, “Boiling Heat transfer from a Horizontal Flat Plate in a Pool of Liquid Hydrogen”, *Cryogenics*, Vol.50, pp.410-416 2010.
 - ③ ▪ Y. Shirai, H. Tatsumoto, M. Shiotsu, K. Hata, H. Kobayashi, Y. Naruo, Y. Inatani and K. Kinoshita, “Forced Flow Boiling Heat Transfer of Liquid Hydrogen for Superconductor Cooling”, *Cryogenics*, Vol.51, pp.295-299 2011.
 - ④ ▪ H. Tatsumoto, Y. Shirai, K. Hata, T. Kato and M. Shiotsu, “Forced Convection Heat Transfer of Subcooled Liquid Nitrogen in Horizontal Tube”, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.53, pp.665-672, 2008.
 - ⑤ ▪ Y. Shirai, H. Tatsumoto, K. Hata, M. Shiotsu, H. Kobayashi, Y. Naruo and Y. Inatani, “Preliminary Study on Heat Transfer Characteristics of Liquid Hydrogen for Coolant of HTC Superconductors”, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.55, pp.337-344, 2010.
 - ⑥ ▪ H. Tatsumoto, Y. Shirai, M. Shiotsu, K. Hata, H. Kobayashi, Y. Naruo, Y. Inatani, T. Kato, M. Futakawa and K. Kinoshita, “Development of a Thermal-hydraulics Experimental System for High Tc Superconductors Cooled by Liquid Hydrogen”, 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 09), J. Physics Conference Series, 234, IOP Pub. (2010) 032056.
 - ⑦ ▪ H. Tatsumoto, Y. Shirai, K. Hata, T. Kato, M. Futakawa and M. Shiotsu, “Forced Convection Heat Transfer of Subcooled Liquid Nitrogen in a Vertical Tube”, 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 09), J. Physics Conference Series, 234, IOP Pub. (2010) 032057.

[学会発表] (計 11 件)

- ① ▪ Y. Shirai, H. Tatsumoto, H. Kobayashi, K. Yoshikawa, M. Shiotsu, K. Hata, H. Kobayashi, Y. Naruo, Y. Inatani and K. Kinoshita, “Axial Temperature Distribution in a Heated Pipe Cooled by Forced flow of Liquid Hydrogen”, *Proc. of ICEC23-ICMC2010*, pub. by Wroclaw Univ. of Technology, in press.

- ② ▪ H. Tatsumoto, Y. Shirai, T. Kato, M. Shiotsu, K. Hata, H. Kobayashi, Y. Naruo, Y. Inatani, and K. Kinoshita, “Forced Convection Heat Transfer of Subcooled Liquid Hydrogen in a Small Tube”, *Proc. of ICEC23-ICMC2010*, pub. By Wroclaw Univ. of Technology, in press.
- ③ ▪ 白井康之他：高温超電導材冷却を目的とした液体水素熱流動特性試験装置—概要、第 8 1 回 2009 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p.64. 2009.
- ④ ▪ 達本衡輝, 白井康之他：高温超電導材冷却を目的とした液体水素熱流動特性試験装置—設計・試験方法、第 8 1 回 2009 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 65, 2009.
- ⑤ ▪ 吉川浩太郎, 白井康之他：液体水素のプール冷却における熱伝達、第 8 1 回 2009 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 66, 2009
- ⑥ ▪ 塩津正博, 白井康之他：液体水素の強制対流沸騰熱伝達、第 8 1 回 2009 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 67, 2009
- ⑦ ▪ 塩津正博, 白井康之他：液体水素のプール冷却における熱伝達—サブクールの影響、第 8 2 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p.141, 2010
- ⑧ ▪ 達本衡輝, 塩津正博, 白井康之他：液体水素強制対流定常熱伝達特性実験 —第 2 報—, 第 8 2 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p.142, 2010
- ⑨ ▪ 塩津正博, 塩津正博, 白井康之他：液体水素のプール冷却における過渡熱伝達特性、第 8 3 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p.63, 2010
- ⑩ ▪ 達本衡輝, 塩津正博, 白井康之他：垂直円管内超臨界水素の強制対流熱伝達、第 8 3 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p.64, 2010
- ⑪ ▪ 竹上泰樹, 塩津正博, 白井康之他：強制対流液体水素の飽和沸騰 DNB 熱流束表示式、第 8 3 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p.65, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白井 康之 (YASUYUKI SHIRAI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：60179033

(2) 研究分担者

塩津 正博 (MASAHIRO SHIOTSU)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・名誉教授

研究者番号：20027139