

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760141

研究課題名（和文）

液体水素の浸漬冷却・強制冷却特性に関する基礎研究

研究課題名（英文）

Basic study of heat transfer characteristics in liquid hydrogen

研究代表者

達本 衡輝（TATUMOTO HIDEKI）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究員

研究者番号：70391331

研究成果の概要（和文）：

液体水素の強制対流熱伝達に関する基礎特性データを取得するために新規に実験装置を開発し、採用した原理により、安定な液体水素の強制対流の発生と流量計測に成功した。供試体にはステンレス製の円管流路を用い、0.4MPa から臨界圧まで広範囲の圧力条件下における液体水素の強制対流熱伝達データを取得した。核沸騰領域における熱輸送限界値に関する圧力、液温、流速、および、流路形状の依存性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

A thermal-hydraulics experimental system of liquid hydrogen was developed in order to investigate the forced flow heat transfer characteristics in the various cooling channels for wide ranges of subcoolings, flow velocities, and pressures up to supercritical. It was confirmed that forced flow through a test tube heater, which has a maximum flow rate of 30 m/s, is successfully produced by adjusting the pressure difference between two tanks and the valve opening. Heat transfer characteristics in forced flow liquid hydrogen were successfully measured for the pressure of 0.4MPa to its critical pressure of 1.3 MPa. The effects of pressure, flow velocity, subcooling and channel geometry on the departure from nucleate boiling (DNB) heat fluxes were clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	2,200,000	660,000	2,860,000
21年度	600,000	180,000	780,000
22年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：液体水素、熱伝達

1. 研究開始当初の背景

将来の大容量地中送電方式用高温超伝導ケーブルの冷媒として、過冷却液体窒素（77 K）による冷却が検討されているが、冷却流路内の大きな圧力損失と交流損失による定常的な発熱が問題となっている。液体水素(20

K)を冷媒として使用すると、液体窒素に比べて粘性係数が約 1/10 であるため冷却流路内の圧力損失を軽減できるだけでなく、高い熱伝導率と比熱を有するため冷却特性の向上も期待できる。さらに、超伝導体を 20K レベルの低温に維持できるため、臨界電流密度が

一桁近く向上し、高温超伝導ケーブルの大容量化と小型化が可能となる。また、この冷却回路を利用して、燃料としての液体水素自体も同時に輸送できる可能性があり、将来の水素エネルギー社会における液体水素の主な高効率輸送システムとしても期待できる。このような液体水素により冷却される超伝導機器やシステムを設計する際には、液体水素冷却時における基礎的な熱伝達特性を把握することが必要不可欠である。しかしながら、これまで飽和液体水素の浸漬冷却実験データが僅かに報告されているだけで、広範囲の圧力条件下での過冷却液体水素に関する浸漬冷却、及び、強制冷却特性に関する研究は殆ど行われておらず、それらの熱伝達特性は全くと言ってよいほど解明されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、これまでにない新たな液体水素の熱伝達特性に関するデータを収集とその冷却特性を解明し、液体水素による超伝導応用機器への冷却設計指針を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

図1に新たに開発した液体水素熱流動特性試験装置の概略図とその写真を示す。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（レシーバタンク）、これらをつなぐ流量調整弁付断熱輸送配管、水素ガス供給ライン、水素ガス放出ラインからなる。実験装置は、防爆実験室に設置し、液体水素コンテナ(2000 L)、加圧用水素ガスカードル、窒素ガスカードル、ヘリウムガスカードル、および、水素排気スタックは、通気性に優れた屋外に設置した。また、計測制御機器等の電気機器は、厚さ 300mm の壁で隔てられた制御室(非防爆エリア)に設置した。実験中は、防爆実験室と隣の制御室の立ち入りを禁止し、安全距離を十分確保した計測室(約 100m離れた)から遠隔制御と遠隔計測を行った。

実験槽(設計圧力 2.0MPaG)は、直径 400mm、高さ 1495mm、液体水素充填容積は 50L であり、その液位は、重量計の変化で計測する。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: 500 W)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。電気機器の防爆対策として、電力リード線とシーヒータ用ケーブルは、不活性ガスである窒素ガスで覆われたブランケット構造内に封入し、その圧力は常時 5 kPaG に保持した。実験槽の液体水素のインベントリは最大で 50L である。

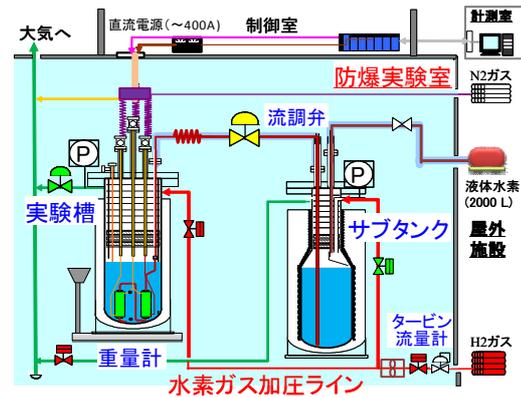


図1 液体水素熱流動実験装置

サブタンクでは、液体水素のインベントリは、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 つの熱電対(T 型)により計測した。

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。制御システムは、PLC により構築し、データ収集、および、バルブ操作は制御画面上で行う。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。

浸漬冷却特性用には、巾 10mm、厚さ 0.1mm、長さ 100mm のマンガニン製の平板を発熱体として使用した。その片側はガラス繊維強化プラスチック (GFRP) により断熱をした。図 2 に強制冷却特性用の試験発熱体の概要図を示す。強制冷却特性用では、内径が 6.0mm と 3.0 mm、長さ 100mm、厚み 0.2mm のステンレス製円管を試験発熱体として用い、その外側には FRP ブロックで断熱した片側円管発熱体を製作した。円管発熱体の両端では、ステンレス製円管の内径と同径で 20mm の FRP ブロック流路によ

り、液体水素輸送配管との電氣的な絶縁処理を施した。試験発熱体は、実験槽内に垂直に支持した。

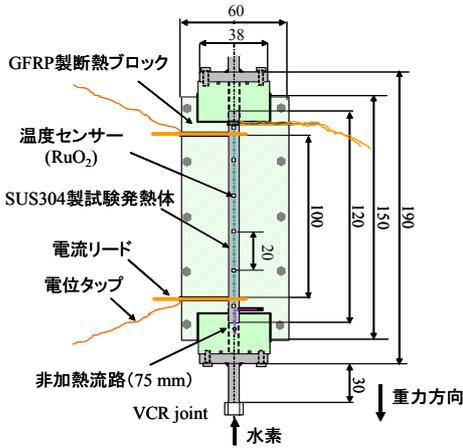


図2 強制対流用供試体概要図

液体水素の温度は、実験槽底部に設置したシーヒータにより調整した。実験槽圧力は、水素ガスカードルからの高压水素ガス（純度 99.999%）をドーム型減圧弁で減圧した水素ガスにより加圧し、サブタンクは放出ラインを開放することで常に大気圧に保持した。この圧力差と流調弁の開度調整により、断熱輸送配管の一端（実験槽内）に設置した試験発熱体流路に強制流動を発生させる。液体水素の流量は、実験槽を載せた重量計（分解能 0.002kg）、および、タービン流量計を用い、実験槽の重量時間変化と加圧ガス流量により求めた。

上述の方法で、図2に示す試験発熱体流路内に液体水素の強制対流を発生させ、試験発熱体に発熱率が指数関数（ $Q = Q_0 e^{-\lambda t}$, $t=10s$ ）となるように直流電流源の電流を遠隔制御により準定常的に最大 400A まで上昇させ、発熱体の電気抵抗変化から発熱体平均温度を測定した。発熱体の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方程式を解いて、熱伝達を求めた。

4. 研究成果

(1) 初期冷却特性

実験システムに液体水素を供給する前には、真空排気とヘリウムガスパージを繰り返し行った後、サブタンクに液体水素を 60L 充填した。また、その時の蒸発ガスは実験槽の予冷に使用した。その後、サブタンクから実験槽へ液体水素 50L (3.45kg@大気圧) を移送した。図3に示すように、初期冷却は約 30 分で完了し、この時の液体水素消費量は約 200L であった。定常状態の熱侵入量は 11.5W であり、設計値

ほぼ一致した。

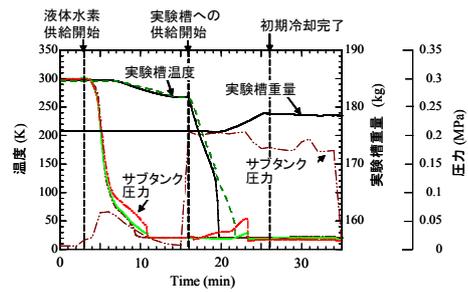


図3 初期冷却特性

(2) 流動特性

図4に液体水素（0.7MPa、20 K）の流動試験結果の一例を示す。実験槽の圧力は、ドーム型減圧弁により保持され、実験槽の重量変化、および、加圧ガス流量を一定に保つことができた。流動試験結果から、レイノルズ数 (Re) が 3×10^5 以下であれば、安定な液体水素の強制流動が得られ、採用した原理により、質量流量を計測できることを確認した。

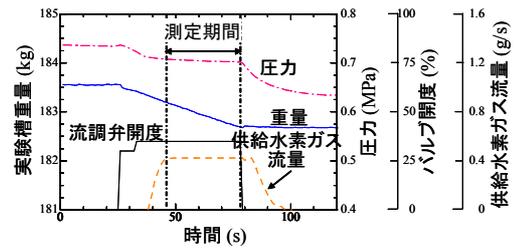


図4 液体水素の流動試験結果

(3) 浸漬冷却特性結果

実験は、大気圧から 1.1MPa までの圧力範囲における飽和温度での液体水素の定常熱伝達、および、臨界熱流束を測定した。

図5に種々の圧力下における飽和液体水素の熱伝達曲線を示す。縦軸は熱流束、横軸は飽和温度から発熱体表面温度の温度上昇分 (ΔT_{sat}) を表している。熱流束が上昇すると発熱体温度はわずかに上昇し、熱流束が

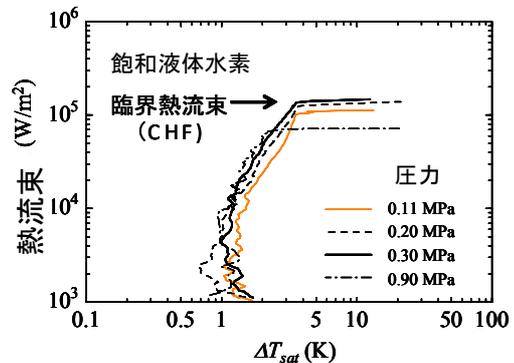


図5 飽和液体水素の熱伝達特性

10⁴W/m²程度以上になると勾配がほぼ3のいわゆる発達した核沸騰状態となっている。以後ほぼ直線状に臨界熱流束 (CHF) まで上昇し、発熱体表面が蒸気膜で覆われる膜沸騰熱伝達に支配される領域となるため、表面温度は急激に上昇している。この臨界熱流束は、圧力上昇とともに向上するが、0.9MPaの場合、他に比べて小さくなっている。

図6に臨界熱流束と圧力の関係を示す。臨界熱流束は、0.3MPaまで圧力ともに大きくなるが、以後減少して1.1MPa付近ではピーク値の25%まで減少している。この結果をよく知られたKutateladzeの式¹⁾で係数を0.16としたものと比較した。

$$q_{cr,sat} = 0.16L\rho_v[g\sigma(\rho_l - \rho_c)/\rho_v^2]^{1/4} \quad (1)$$

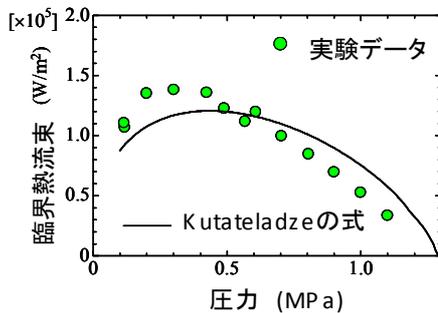


図6 臨界熱流束と圧力の関係

圧力依存性の傾向は類似であるが、0.5MPa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。臨界熱流束時における発熱体表面温度と圧力の関係を図7に示す。圧力上昇に伴い、その発熱体表面温度は上昇するが、0.6MPaより高い圧力では水素の臨界温度に等しく、ほぼ一定になっている。したがって、液体水素の場合、0.6MPa以下の圧力領域では、水力的不安定性により核沸騰熱伝達の限界が決定されるが、0.6MPa以上では、水力的不安定性が現れるより前に、発熱体表面温度が水素の臨界温度に到達するために、発熱体全面が蒸気で覆われ、膜沸騰へ遷移すると推測される。

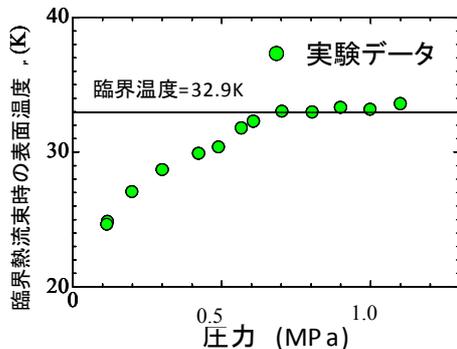


図7 臨界熱流束時の表面温度係

図8に代表的なサブクール液体水素(圧力0.72MPa、サブクール度8.56K)の熱伝達曲線を示す。横軸は発熱体表面の液温からの温度上昇分 (ΔT_L) である。熱流束が上昇すると発熱体温度も上昇し、飽和温度を僅かに超えたところで沸騰が開始する。以後勾配が大きく熱伝達の良い核沸騰領域を上昇し、臨界熱流束(CHF)に達すると表面温度が急上昇する。非沸騰域の熱伝達は次の藤井らの式²⁾と良く一致している。

$$Nu = 0.16(GrPr)^{1/3} \quad (2)$$

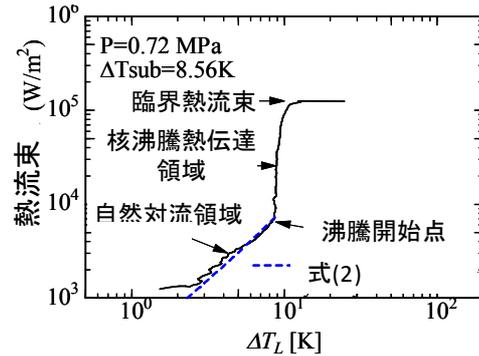


図8 サブクール液体水素の熱伝達特性

図9は、0.4 MPa, 0.7MPa, 1.0MPaの圧力における臨界熱流束のサブクール度依存性を示す。臨界熱流束は、各圧力でサブクール度の増加とともに上昇し、この範囲では圧力ともに小さくなっている。この結果をよく知られたKutateladzeの式¹⁾

$$q_{cr,sub} = q_{cr,sat}[1 + 0.065(\rho_v/\rho_l)^{0.8} S_c] \quad (3)$$

ここで、 $S_c = c_{pl}\Delta T_{sub}/L$ と比較すると、サブクール度依存性の傾向は類似であるが、0.42MPaでは、同式より大きく、0.7MPa以上の圧力では低くなっている。この傾向は、図7に示す飽和液体水素の実験結果の圧力依存性と同一である。そこで、 $q_{cr,sat}$ として実験結果を使い、 $q_{cr,sub}$ の実験結果との比をとって

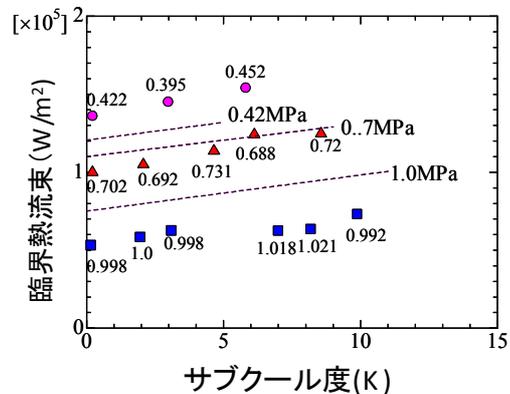


図9 サブクール液体水素の熱伝達特性

無次元サブクール度 Sc に対して図 10 に示す。Kutateladze のサブクール沸騰臨界熱流束式(2)は、実験結果をよく記述する。つまり、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。これまでにない広範囲の圧力条件下における飽和、サブクール液体水素の浸漬特性データを取得し、その熱伝達特性を明らかにした。

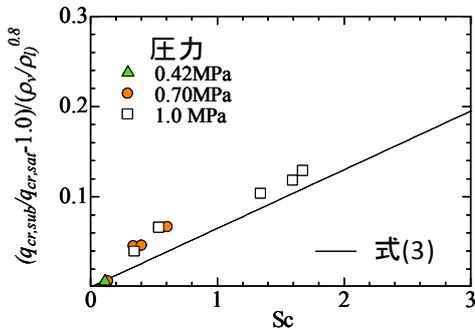


図 10 臨界熱流束に対するサブクール

(4)強制冷却特性結果

図 11 にサブクール度 (ΔT_{sub}) が 8K の場合のサブクール液体水素の熱伝達曲線を示す。核沸騰熱伝達並びに限界熱流束は、流速が大きいほど大きくなる。発熱体表面温度が飽和温度を僅かに超えると沸騰が開始する。それまでの過程は非沸騰熱伝達で、流速が大きいほど熱伝達係数も大きく、既存の Dittus-Boelter 式³⁾の値とほぼ一致している。沸騰が開始すると、熱伝達が良くなるため各流速の曲線とも勾配が大きくなる。熱流束がある限界値(限界熱流束)に到達すると熱伝達が急に悪化し、僅かな熱流束の増加で温度が大きく上昇する。強制対流沸騰の場合、後流側から先に核沸騰限界状態となり発熱率の増加と共に上流側に移行するので、プール沸騰のように膜沸騰にジャンプするのではなく弱い正勾配で連続的に上昇する。

図 1 2 は、限界熱流束と流速の関係性を圧力と

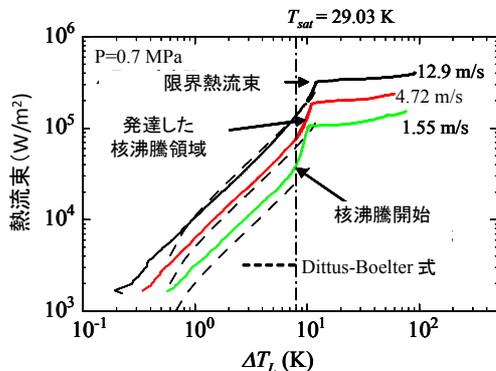


図 1 1 サブクール液体水素の強制対流熱伝達特性

入口サブクール度をパラメータとして示す。限界熱流束は、流速が大きく、サブクール度が大きいほど大きい。注目すべきは、サブクール度が零の場合の限界熱流束に系圧力の影響が殆ど見られないことである。これは、プール沸騰臨界熱流束が水力的不安定性や過熱限界によって決まるのに対し、強制対流の場合、発生気泡の流れによる輸送限界が限界熱流束を決めているためと考えられる。圧力を 0.4MPa 以上の範囲で大きくすると、各サブクール度における臨界熱流束が圧力と共に小さくなるのに対し、強制対流の場合、流速とサブクール度が同一であれば、圧力の影響は大きくない。圧力 0.4 MPa の低流速域では同一圧力、サブクール度のプール沸騰臨界熱流束よりはるかに低い限界熱流束となる一方、圧力 1.1 MPa、サブクール度 11 K、流

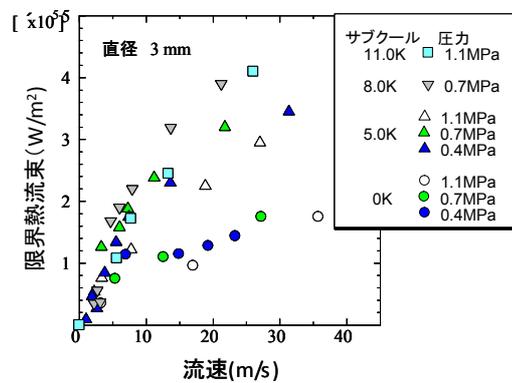


図 1 2 限界熱流束の流速の影響

速 40 m/s では、 $4 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ という高い限界熱流束が得られている。

図 13 は、限界熱流束に対する発熱体直径の影響を示す。長さ L は同一(100 mm)で直径 3 mm の結果 ($L/d=33$) と 6 mm の結果 ($L/d=17$) と比較すると、流速とサブクール度が同一であれば、 L/d が小さい方が限界熱流束は大きくなることがわかった。

今後、これまでの実験結果を基礎に、限界熱

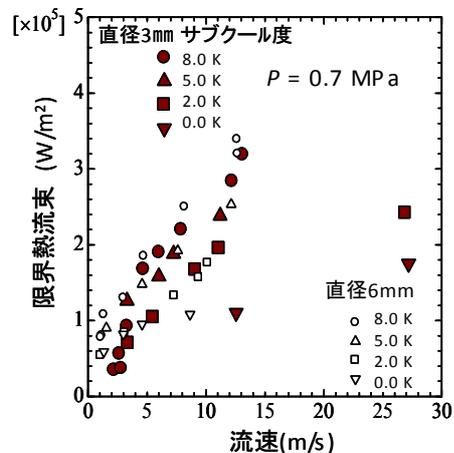


図 1 3 限界熱流束の直径の影響

流束のモデルを考察し、実験結果を記述する表示式の導出を試みる。さらに、液体水素冷却高温超伝導のための冷却設計基準の確立を目指す。

(参考文献)

- 1) Kutateladze SS. AEC-tr3770; 1952. p. 129.
- 2) Fujii T. and Imura H., JSME Journal, 37-301, (1971), 1697-1707.
- 3) Van Sciver S. W., In: Helium Cryogenics, Plenum Press, New York, USA (1986) 231-238

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5件)

- (1) “Forced convection heat transfer of subcooled liquid hydrogen in a small tube”, H.Tatsumoto, Y.Shirai, M.Shiotsu, K.Hata, H.Kobayashi, Y.Naruo, Y.Inatani, T.Kato, M.Futakawa, K.Kinoshita, Proceedings of ICEC23-ICMC2010 (採用決定)
- (2) “Axial Temperature Distribution in A Heated Pipe Cooled by Forced Flow of Liquid Hydrogen”Y.Shirai, H.Tatsumoto, H.Kobayashi,K.Yoshikawa.M.Shiotsu,K.Hata,H.Kobayashi,Y.Naruo,Y.Inatani,K.Kinoshita,Proceedings of ICEC23-ICMC2010 (採用決定)
- (3) “Development of a thermal-hydraulics experimental system for high Tc superconductors cooled by liquid hydrogen”,H.Tatsumoto,Y.Shirai,M.Shiotsu, K.Hata, H.Kobayashi, Y.Naruo, Y.Inatani, T.Kato, M.Futakawa, K.Kinoshita, Journal of Physics; Conference Series, 234 032056 (2010)
- (4) “Boiling heat transfer from a horizontal flat plate in a pool of liquid hydrogen”, Y.Shirai, H.Tatsumoto, M.Shiotsu, K.Hata, H.Kobayashi,Y.Naruo,Y.Inatani,Cryogenics, 50, p410-p416 (2010)
- (5) “Forced flow boiling heat transfer of liquid hydrogen for superconductor cooling”, Y.Shirai, H.Tatsumoto, M.Shiotsu, K.Hata, H.Kobayashi Y.Naruo, Y.Inatani, K. Kinoshita, Cryogenics, (2010) (in Press)

[学会発表] (計9件)

- (1) 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 -,白井康之, 達本 衡輝, 畑 幸一, 塩津 正博,小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文, 2009 年秋季低温工学・超電導学会
- (2) 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 -,達本 衡輝,白井 康之, 畑 幸一, 塩津 正博,小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文,2009 年秋季低温工学・超電導学会

- (3) 液体水素のプール冷却における熱伝達, 吉川 浩太郎, 小林 啓人, 白井 康之, 塩津 正博, 達本 衡輝,畑 幸一, 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文,2009 年秋季低温工学・超電導学会
- (4) 液体水素の強制対流沸騰熱伝達, 塩津 正博, 吉川 浩太郎, 小林 啓人, 白井 康之, 畑 幸一, 達本 衡輝, 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文,木下 勝弘
- (5) 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-, 塩津 正博, 小林 啓人, 吉川 浩太郎, 白井 康之, 畑 幸一, 達本 衡輝,小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文,2010 年春季低温工学・超電導学会
- (6) 液体水素強制対流定常熱伝達特性実験 -第2報-, 達本 衡輝,小林 啓人, 吉川 浩太郎, 白井 康之, 塩津 正博, 畑 幸一, 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文,木下 勝弘, 2010 年春季低温工学・超電導学会
- (7) 垂直円管内超臨界水素の強制対流熱伝達, 達本 衡輝, 塩津 正博, 小林 啓人, 吉川 浩太郎, 白井 康之, 畑 幸一, 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文,2010 年秋季低温工学・超電導学会
- (8) 液体水素のプール冷却における過渡熱伝達特性, 塩津 正博, 小林 啓人, 竹上 泰樹, 白井 康之, 畑 幸一, 達本 衡輝,小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文,2010 年秋季低温工学・超電導学会
- (9) 強制対流液体水素の飽和沸騰 DNB 熱流束表示式, 竹上 泰樹, 小林 啓人, 吉川 浩太郎, 白井 康之, 塩津 正博, 畑 幸一, 達本 衡輝,小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文,2010 年秋季低温工学・超電導学会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

達本 衡輝 (日本原子力研究開発機構、J-PARC センター、研究員)

研究者番号 : 70391331