

テープ線材表面状態による超電導限流器復帰特性改善効果の 可視化実験による検討

Visualization of Improvement of Recovery Characteristics of Superconducting tapes with Coolig Fins and PTFE Coating

玉嶋 愛美, 白井 康之, 塩津 正博(京大); 磯嶋 茂樹(住友電工)

TAMASHIMA Manami, SHIRAI YASUYUKI, SHIOTSU Masahiro (Kyoto University); ISOJIMA Shigeki(SEI, LTD.)

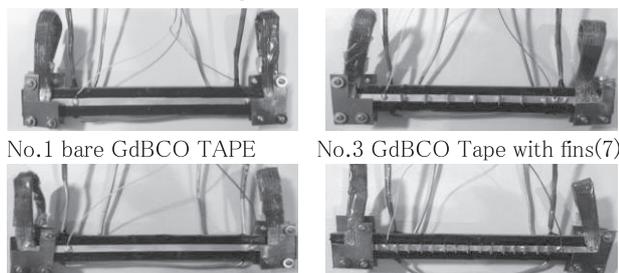
E-mail: tamashima@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

超電導限流器は故障電流を限流した後、素早く超電導状態に復帰する必要がある。以前、線材にフィンや PTFE (polytetrafluoroethylene) コーティングを施すと復帰特性が向上することが確認されている。[1] 今回、フィンや PTFE コーティングの冷却特性向上のメカニズムを明らかにするためにフィンや PTFE コーティングを施した GdBCO 線材に通電加熱を行い、入熱・冷却時の線材の表面の状態をハイスピードカメラで撮影した。撮影した映像を基に冷却フィンと PTFE コーティングの復帰特性向上への影響を検討した。

2. 試験体

長さ 130mm、幅 4mm、厚さ 0.18mm の GdBCO 線 (No.1) と、その線に PTFE コーティングしたもの (No.2)、12mm 間隔で冷却フィンを取り付けたもの (No.3)、6mm 間隔としたもの (No.4) の 4 種類の試験体を用いた。電流リードは取れないように銅版で固定し、GdBCO 線をスタイクキャストで FRP ブロックに貼り付け、断熱している。Fig.1 は 4 種類の試験体の写真である。



No.1 bare GdBCO TAPE

No.3 GdBCO Tape with fins(7)

No.2 GdBCO Tape coated with PTFE

No.4 GdBCO Tape with fins(14)

with PTFE

Fig.1 Test Heater

3. 実験結果と考察

電源電圧を時定数 τ の指数関数状に増加させ臨界電流を越えて通電し、指定値で遮断して後の復帰特性を観察し、抵抗を計測 (100mA 通電) した。Fig.2 は、 $\tau=100$ ms、大気圧飽和条件での各試験体の実験結果である。縦軸は抵抗、横軸は時間を表している。また、Fig.3 は、各試験体の表面の一部をハイスピードカメラで撮った画像である。

PTFE コーティングを施した試験体 2 は、核沸騰を経ずに膜沸騰へ直接遷移し、電源遮断した後、沸騰膜は安定せず、膜沸騰と核沸騰が混在した状態となっている ($t=811$ ms)。 $t=1024$ ms では、伝熱面全体が核沸騰へと遷移し、 $t=1089$ ms と $t=1144$ ms でも同様に核沸騰状態にあり、大きな変化はない。PTFE は低熱伝導性の物質であり、核沸騰での熱伝達が悪いためと考えられる。冷却フィンを取り付けた試験体 3 は、フィン間は膜沸騰に直接遷移し、フィンの先端からは気泡が発生する ($t=978$ ms)。そして、冷却フィンから核沸騰へと遷移 ($t=1140$ ms) し、その後徐々にフィン間の伝熱面に核沸騰が広がっていく ($t=1238$ ms)。 $t=1474$ ms では、伝熱面全体が核沸騰へと遷移している。冷却フィンを施した試験体 4 でも、復帰特性の改善は見られたが、Fig.2 からわかるように $t=1100$ ms と 1300 ms の間低い抵抗が残っており、線材の一部の特性が劣化したものと考えられる。

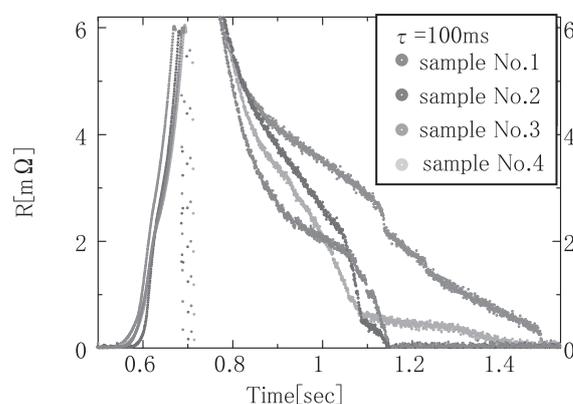


Fig.2 Resistance appearance of all test samples at the similar heating condition ($\tau=100$ ms)

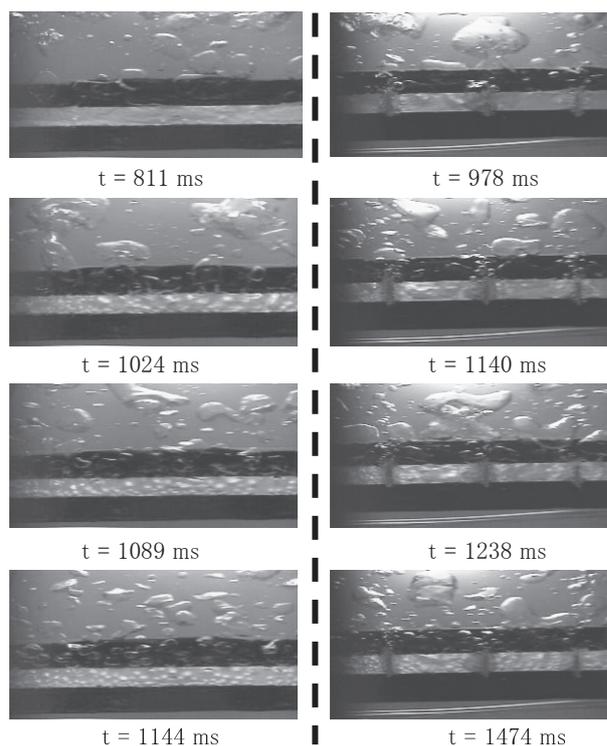


Fig.3 Boiling behavior during quench and recovery for sample No.2(left) and No.3(right)

4. まとめ

1. PTFEコーティングは、沸騰膜を不安定にさせ、すぐに遷移沸騰へと移行するが、核沸騰では、熱伝達が悪い。
2. 冷却フィンでは、フィンの部分から先行して核沸騰に遷移し、フィン間の伝熱面へと伝わって、冷却を促進している。

参考文献

- [1] Y. Shirai, IEEE TRANS. ON APPL. SUPER. VOL. 26, NO. 3, APRIL 2016, DOI: 10.1109/TASC.2016.2524456

ITER 向け超臨界圧ヘリウム循環ポンプの開発

Development of Supercritical Helium Cold Circulator for ITER

小田 兼太郎, 藤咲 克弥, 吉永 誠一郎 (IHI); 河野 勝己 (量研機構); SARKAR Biswanath, BHATTACHARYA Ritendra, VAGHELA Hiten (ITER-india)

ODA Kentaro, FUJISAKU Katsuya, YOSHINAGA Seiichiro (IHI); KAWANO Katsumi (QST); SARKAR Biswanath, BHATTACHARYA Ritendra, VAGHELA Hiten (ITER-india)

E-mail: kentarou_oda@ihi.co.jp

1. はじめに

ITER では、巨大な超伝導コイルを極低温状態で維持し続けるために、世界最大流量の超臨界圧ヘリウム循環ポンプが必要とされている。これまで世界中どのメーカーにも経験がない要求仕様のため、インドの研究機関 ITER-India は、世界各国の極低温回転機械メーカーに対して競争入札を行った。技術選考および入札金額によって上位 2 社に絞られた後、開発リスク低減を目的として、実際に各社 1 台ずつ製作し、模擬試験装置にて評価試験を実施した。本稿ではポンプの設計方法と試験結果を報告する。

2. 設計と製造

超臨界圧ヘリウム循環ポンプに対する要求仕様は、これまでの世界最大ポンプの 2 倍以上の大流量 2.21[kg/s]と、広い運転範囲における 70%以上の高断熱効率である。また流体性能以外でも、過渡的運転状態における信頼性や、核融合炉から発する磁場雰囲気中および放射線環境下での安定性・耐久性といった様々な項目が要求される。

2.1 ポンプ性能

ポンプ性能の要であるインペラは、弊社にて長年積み重ねた膨大なテストデータと、高精度解析評価技術をバランスよく融合し、その形状と流路形状を最適設計した。もの作りでは、品質の安定性に優れたロストワックス金型方式の精密鋳造を適用し、高品質・高性能インペラを実現した。(Fig.1)

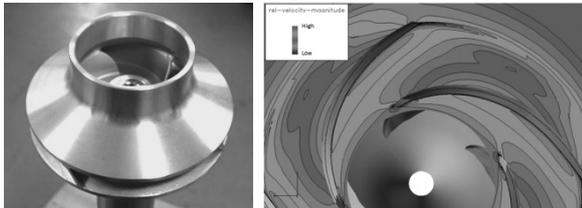


Fig.1 Pump impeller and numerical simulation

2.2 断熱構造

ポンプ性能を左右する設計要素として、断熱構造も極めて重要である。常温部から低温部への不要な熱侵入を遮断するため、金属製ケーシングの肉厚を極限まで薄くしながら、十分な強度・剛性を持たせる最適構造を実現した。またケーシング内部には高性能断熱材を設置した。(Fig.2)

回転軸は一部中空構造とし、さらに回転軸の中間点にはサーマルアンカ(吸熱部品)を配置することにより、回転軸を伝って超臨界圧ヘリウムに侵入する熱を捉えて排除する構造とした。

ケーシングの低温部分には、常温構造物から真空断熱空間を伝わり輻射熱がわずかに侵入する。この微小な熱も、ケーシングの低温部をサーマルシールドで覆い徹底的に排除した。

2.3 さらに高信頼性をめざして

系内への異物混入を防ぐため、軸受は磁気軸受を採用した。万一停電等により設備が電源喪失した場合においても、ポンプが安全に停止できるように回転軸の回生エネルギーで回転軸を浮上コントロールし続ける対策をとった。その他モータや

磁気軸受、センサ類が、実験炉から発せられる磁場と放射線を受けて誤作動しないように、外部磁場を遮断する磁気シールドを新たに開発し、かつ耐放射線性を有する材料を各所に適用し製造した。

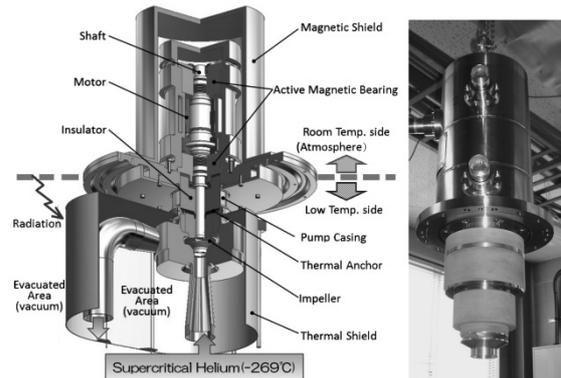


Fig.2 Supercritical Helium Cold Circulator

3. 性能試験結果

一か月間におよぶ実負荷性能試験の結果、ポンプは流量・効率とも要求をクリアすることを実証した。また最大流量は、世界最大級である 3.0[kg/s]以上に達した。(Fig.3)

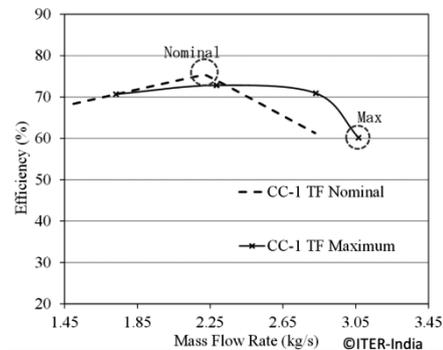


Fig.3 Performance test result

実運用では、流体性能だけでなく、長時間連続運転における安定性や、急な圧力・温度変化に伴う運転条件下での信頼性なども非常に重要である。これら全ての条件を模擬した実負荷試験も連続的に行い、安定・安全に持続運転可能であることを実証した。

4. まとめ

世界最大級の容量、かつ高性能・高信頼性を有するポンプを開発した。実負荷試験を行い、要求仕様を全て満足することを実証した。

謝辞

実負荷試験は、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 (QST, 旧称日本原子力研究開発機構) 那珂核融合研究所にて行われた。試験要求および良否判定は ITER-India にて行われた。

海に近い超伝導重力計の諸問題 Superconducting Gravimeter of near the sea

池田 博(筑波大); 杉原光彦, 名和一成, 西祐司(産総研)

IKEDA Hiroshi (Tsukuba Univ.); SUGIHAR Mitsuhiro, NAWA Kazunari, NISHI Yuji (AIST)

E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

日本で初めて2015年3月に北海道苫小牧にCO₂地中貯留モニタリングへの適用を目指して iGrav タイプ野外観測対応超伝導重力計(iGrav017)が設置されてから1年が経過した。2016年4月からはCO₂地中貯留が開始された。この間、野外観測対応超伝導重力計(iGrav017)は諸問題を解決して観測を継続している。この1年間で生じた問題としては、予想はされていたが、海が近い為のノイズレベルの大きさや塩害によるエアコンの不調が原因で過冷却状態になり、ヘリウム容器内に固体空気の成長などがある。本報告ではそれらの状況と対応策に関して報告する。

2. 海に近い超伝導重力計の影響

超伝導重力計を海岸近くに設置した場合、海面変動を起源とする振動が観測することがある。2015年3月からの観測データを解析し、海面変動を起源とする信号の抽出を試みた。その結果、低気圧が通過時には周期74分の海面変動に対応した信号を抽出することができた[1]。このことはCO₂地中貯留モニタリングへの地下モニタリングにおけるノイズ低減とともに、観測点周辺の地下構造や物性を知る基礎データとして重要である。今後も観測を継続することによりデータの蓄積が必要である。

3. 超伝導重力計の塩害の影響と対策

野外観測対応超伝導重力計として海岸から約50mの位置に設置したiGrav017は、当初から塩害による影響が心配されていたが、現実として超伝導重力計に影響が出たのは設置後、半年が経過した2015年10月だった。原因は塩害によって超伝導重力計が収納されている小型エンクロージャーの温度コントロールをしている小型エアコンが動作不良となった。小型エアコンの配管に緑錆が発生している様子をFig.1に示す。外気ファンから吸い込んだ塩分によって発生したと考えられる。これによりファンが動作不良となり、同じ電源系統の超伝導重力計のコントロール用パソコンがハングアップする事態が生じた。

一方、超伝導重力計の冷却を行って冷凍機と圧縮機は別系統の電源であり通常どおり冷凍機は運転されていたのでコントロール用パソコンがハングアップしたことにより容器内の圧力コントロールが出来ない状態となり容器内は冷凍機が運転されており液体ヘリウム温度以下の過冷却状態になった。さらに安全弁付近にリークがあったようで容器内が過冷却状態で空気を吸い込む状態になったと思われる。そのため冷凍機と容器の隙間に固体空気が成長するようになったと考えられる。Fig.2に確認のために冷凍機を容器から取り外し、内部を上から写真に撮った様子である。これを見ると底部に固体空気があるのが確認出来る。

そこで固体空気除去のために室温のヘリウムガスをステンレスパイプの先端から固体空気に吹き付け、固体空気の除去を行った。除去作業によって容器の液体ヘリウムは10%減少したが、固体空気は除去され超伝導球も正常に動作するようになった。

今回のような事態に対応するために遠隔で制御用パソコンのリポートを出来るように改造を行い、その後は同

じような状態は起きていない。

塩害対策としては、小型エンクロージャーの温度コントロールをしている小型エアコンは塩害対策として全体を塩害に耐えるようなコーティングをしたタイプに変更して以降は正常に動作している。

大きいエンクロージャーには冷凍機用の圧縮機と蓄電池とヘリウムガスボンベが収納されており、それぞれ温度コントロールされているが、こちらは現在のところ塩害の影響は無いようである。



Fig.1 Effect of salt damage

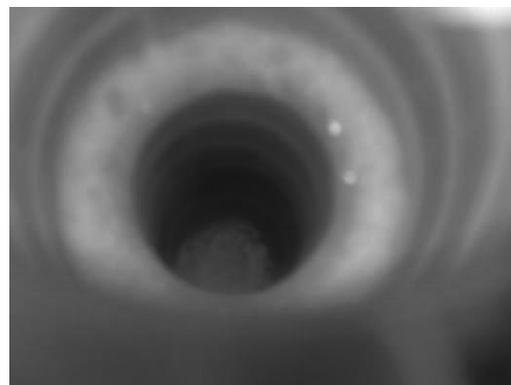


Fig.2 Solid air of the bottom of the container

4. まとめ

野外観測対応超伝導重力計(iGrav017)を北海道苫小牧にCO₂地中貯留モニタリングへの適用を目指して設置し、2015年3月より連続観測を開始して1年が経過した。海が近い為のノイズレベルの大きさや塩害による影響などあったが現在も連続観測を継続中である。

超伝導重力計の設置関連作業の一部は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業(弾性波探査を補完するCO₂挙動評価技術の開発)」の一部として実施した。

参考文献

1. 名和一成, 杉原光彦, 池田 博 世界でいちばん海に近い超伝導重力計で海面変動をみる GSJ 地質ニュース, 5, 69-70(2016).

多層断熱材 MLI の燃焼特性に関する研究 Flammability Study of Multi-Layer Insulation (MLI)

高田 卓(核融合研); 三戸 利行(核融合研); 久万 剛(栃木カネカ)

TAKADA Suguru (NIFS); MITO Toshiyuki (NIFS); KUMAN Tsuyoshi (TOCHIGI KANEKA)

E-mail: takada.suguru@LHD.nifs.ac.jp

1. 研究背景

クライオスタットの断熱の為に多く使われる多層断熱材 (Multi-Layer Insulation: MLI) は、種々のポリマーフィルムにアルミ蒸着を行って、反射率を上げたものを多層にすることで輻射熱伝達を低減させるものである。基材であるポリマーの性質を反映して引火する可能性があり、MLI が巻かれた配管部の再溶接等の場面で引火、火災への発展が懸念される。MLI 使用時に必要な安全策を検討する為に燃焼特性について実験的研究を行った。

2. MLIの基材 (ポリエステルとポリイミド)

本研究ではポリエステルとポリイミドのフィルムを基材として使用する MLI 数種類を対象に実験を行った。

ポリエステルは遅燃性であり、プラスチック素材の燃焼特性を表す UL94 規格*において HB に分類されるものである。(*UL94 規格とは、装置及び器具部品のプラスチック材料燃焼性試験で、材料の燃えにくさの度合いを表す工業規格で、HB は遅燃性を示す。)

ポリイミドについては様々な種類が存在するものの総じて難燃性であり、黒煙を出さないことが知られている。

3. 試験方法

実験には下記の 4 種の MLI を用いた。ネットスペーサを使わないしわ加工によって層間の接触を低減するポリエステルを使用する MLI、ネットスペーサを用いて使うポリエステルフィルムを利用した MLI2 種、エンボス加工を施したポリイミドフィルムを使用した 1 種を選定し試験した。

- ・ NRC-2 片面 Al 蒸着しわ加工 10 層 /ポリエステルフィルム
- ・ KF-9B(9 μ m 両面蒸着)+KN-20(ネットスペーサ)10 層 /ポリエステルフィルム
- ・ KFHN-9B05 不織布 10 層 /ポリエステルフィルム
- ・ KC-12BE エンボス加工 10 層 /ポリイミドフィルム

これらの試料を 13 x 125 mm の大きさに裁断し、10 層を 1 組として、上方火炎試験、水平燃焼試験を行った。上方火炎試験においては、1 組にした試料を吊り下げその下端に火炎を当て、火炎の広がりを観察した (Fig.1(a))。また、水平燃焼試験においては、ステンレス板とガラス板で囲った 15 x 15 x 150 mm の直方体の治具に試料を収め、下方に設けた露出部から火炎を当てる方法で試験を行った(Fig.1(b))。露出部は 13 mm 角であり、露出部とは反対側の片側側面については付外し可能とした。付外しによって蒸し焼き状態、水平方向に空気の流れがある 2 つの場合について試験を行った。燃焼実験は全てドラフトチャンバー内で行われ、常に室外排気されている環境で行われた。また、その燃焼の様子はビデオカメラにて録画し観察を行った。

上方火炎については、開放空間における火災、水平火炎についてはトンネル内作業や配管内の MLI 燃焼を模擬する意図をもって測定系を組んだ。

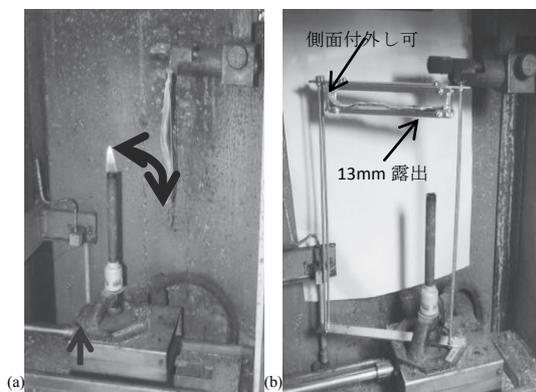


Fig.1 Setup of Flammability test; (a) vertical direction (b) horizontal direction

4. 実験結果

上方火炎伝播試験を行った結果、ポリエステルの基材とした MLI は概ね同様の燃焼過程をたどり、着火～炭化までの過程は 15 秒程度の時間のうちに終わった。着火(バーナ火炎が MLI に当たる)から引火(MLI から立ち上る火炎が観察される)して自発的に燃焼が広がるまでには 1 秒程度の時間である。その後サンプル全体から炎があがった後、炭化と共に消失していく。ネットスペーサをもつ物が燃焼時間としては比較的長く、ポリエステルの質量に相関していると考えられる。消失されるまでの間黒煙を上げ続ける。炎を下端に付けず、MLI の中間に押し付けた場合には炎は上方にのみ伝播し、下方には伝播しなかった。一方でポリイミド基材の MLI については着火後、炎の当たったポリイミド膜が縮み上がり変形するものの、引火することは無くやや赤熱するのみである。1 分以上炎を当て続けても表面 1, 2 枚が焼き切れてしまう程度であり、黒煙も発生しない。

一方で、水平火炎伝播試験については、チャンバー側面の片端を開放した場合と閉鎖した場合の 2 ケースの実験を行ったが、閉鎖空間中の火炎試験については炎を近づけても引火することは無く炎が当たった部分のみ僅かに焦げるのみで顕著な変化は見られなかった。ポリエステルの火炎を維持するために必要な酸素濃度は空気中の酸素濃度が 17~19%程度であるため、すぐさま消失してしまった物と考えられる。片端を開放した場合には、横方向の対流が形成され、やや燃焼範囲は広がるものの、30 mm 程度伝播するのみであった。もちろんポリイミド基材の MLI については殆ど影響が見られなかった。

5. まとめ

MLI の燃焼実験を行った結果、垂直方向にポリエステルを使用した MLI が設置されている場合には下方から上方へ向かって燃焼は伝播し火災が広がる可能性が高い。また、燃焼の際には黒煙を出しながら燃焼する。延焼は下方、水平方向への火炎伝播は比較的小さい。

一方でポリイミドを使用した MLI では垂直・水平に設置した場合ともに燃焼は起きず、縮み上がるのみで、黒煙も出さない。

非加熱水平円管を流動する気液二相液体窒素の圧力損失

Pressure drop of vapor-liquid two-phase nitrogen flow in an unheated horizontal circular pipe

大平 勝秀(東北大, JAXA); 志牟田 晃大, 高橋 幸一(東北大); 小林 弘明, 田口 秀之(JAXA); 青木 五男(ジェック東理社)
 OHIRA Katsuhide (Tohoku University, JAXA); SHIMUTA Akihiro, TAKAHASHI Koichi (Tohoku University);
 KOBAYASHI Hiroaki, TAGUCHI Hideyuki (JAXA); AOKI Itsuo (JECC TORISHA)
 E-mail: ohira@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

JAXA では、液体水素を燃料とする極超音速予冷ターボジェットエンジンの開発を進めている。エンジン始動時、高速飛行時に液体水素は気液二相流動状態となるので配管系の圧力損失を把握することが重要となる。本研究では、上流に設置した水平加熱管で気液二相流の熱平衡クオリティ(x)を制御し、下流の非加熱管を流動する液体窒素気液二相流の流動パターンを高速度カメラで観察すると共に、サブクール沸騰時、および飽和沸騰時の圧力損失を Blasius 式、および均質流モデル(McAdams, Cicchitti, Dukler, Beattie-Whalley の 4 式)、分離流モデル(Chisholm 式)で評価した。

2. 実験装置および実験方法

流動試験装置は既報[1, 2, 3]を参照されたい。図 1 に示す銅製加熱管、非加熱管は内径 $d = 15$ mm, 加熱部長さ 1200 mm, 加熱部圧力損失測定区間 500 mm(上流), 非加熱部圧力損失測定区間 207.5 mm(中流), 550 mm(下流)である。実験時のランタンク圧力 0.11~0.14 MPa, 流速 0.2~2.2 m/s, Re 数 $1.8 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^5$, 質量流束 180~1780 kg/(m²·s), 加熱部熱流束 10, 20 kW/m², 熱平衡クオリティ 0.01~0.09 である。

3. 実験結果および考察

非加熱管下流において、気泡流, プラグ流, スラグ流, スラグ-環状流, 波状-環状流, 波状流の 6 種類が観察された。

図 2 に加熱部出口で $x < 0$ の場合の中流の圧力損失を Blasius 式と比較した結果を示す。加熱部のサブクール沸騰の影響により実験値が 0~20%程度大きく、20 kW/m²ではさらに大きな値を示している。加熱部が $x < 0$ の場合の上流の圧力損失については、10, 20 kW/m²の両者において、サブクール沸騰の影響により実験値は Blasius 式よりも 20%以上大きな値が多くなる。一方、非加熱部下流では 0~20%程度になっており、サブクール沸騰の影響は下流にいくほど小さくなる。

加熱部出口でクオリティが正 ($x > 0$) の場合に非加熱部中流の圧力損失を McAdams 式と比較した結果を図 3 に示す。中流では McAdams 式と Dukler 式が精度良く評価でき、Cicchitti 式, Beattie-Whalley 式はばらつきがあるが、概ね ±30%で評価できる。分離流モデルの Chisholm 式は圧力損失を大きく見積もる傾向があり、圧力損失予測には適さない。

次に、クオリティが正 ($x > 0$) の場合に非加熱部下流の圧力損失を一番精度良く評価できた Dukler 式との比較結果を図 4 に示す。McAdams 式と Beattie-Whalley 式も概ね ±30%で評価できるが、Cicchitti 式はばらつきが大きい。Chisholm 式は中流と同様の傾向を示し、圧力損失を大きく見積もる。

図 5 に下流と中流の単位長さ当たりの圧力損失比と x の関係を示す。 $x = 0.01$ 付近で下流の圧力損失は増加から減少に転じて、 x の増加と共に中流よりも小さくなっている。 $x = 0.01$ 以下の低クオリティでは過熱状態にあった流体が加熱条件の変化により沸騰が促進され圧力損失が増加したと考えられる。 $x = 0.01$ 以上では過熱状態の影響が少なく、飽和状態であった気液二相流体が非加熱部で冷却され、流体密度の増加と流速の低下により下流の圧力損失が低下したと考えられる。

参考文献

1. K.Ohira, et al.: Abstracts of CSSJ Conf., 89 (2014) p. 187.
2. K.Ohira, et al.: Abstracts of CSSJ Conf., 91 (2015) p. 184.
3. K.Ohira, et al.: Physics Procedia, 67 (2015) pp. 675-680.

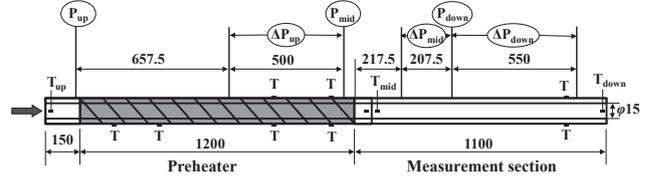


Fig. 1 Schematic illustration of the test section.

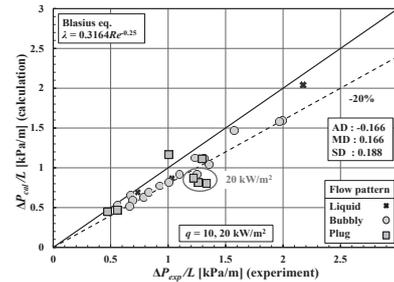


Fig. 2 Pressure drop increase due to subcooled boiling compared to the Blasius eq. in the midstream section.

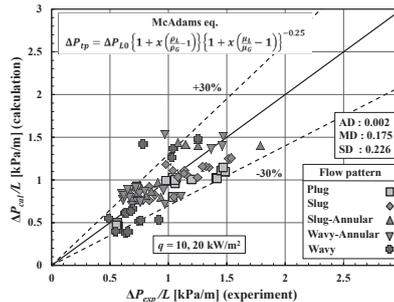


Fig. 3 Comparison of experimental pressure drop with the McAdams eq. in the midstream section.

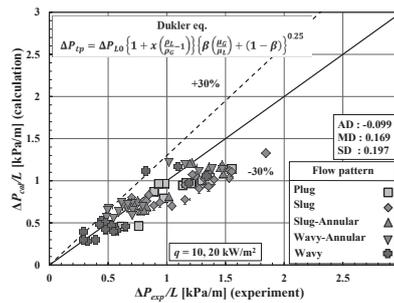


Fig. 4 Comparison of experimental pressure drop with the Dukler eq. in the downstream section.

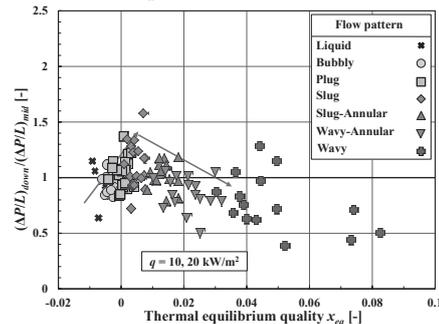


Fig. 5 Pressure drop in the downstream section compared to that in the midstream section.

液体窒素プール沸騰における多孔体ニクロムの沸騰曲線

Boiling Curve of Porous Nichrome Plate in Liquid Nitrogen Pool Boiling

野澤 正和(秋田高専); 高田 卓(核融合研)

NOZAWA Masakazu (NIT Akita College); TAKADA Suguru (NIFS)

E-mail: nozawa@akita-nct.jp

1. 研究背景

液体窒素の沸騰熱伝達による冷却についての研究は、高温超伝導体を利用した応用を考えるうえで必要な知見となる。液体窒素は、その潜熱の大きさに由来する高い熱輸送能力を持ち、高温超伝導体の冷却安定性を向上させる期待が出来る。本研究では、熱交換器として期待できるサブミリオードの非常に小さい空孔の連続した多孔質材料に焦点を当て、その沸騰熱伝達の関係性を明らかにする。実際に、高温超伝導体の液体窒素による冷却法については、多孔質材を用いた流動沸騰における沸騰熱伝達が明らかにされており、通常の加熱体に比べて、過熱度の上昇を抑えられることが報告されている[1]。多孔質材の微細な空孔が対流を誘起していることが考えられるが、多孔質材に沸騰が発生した際の、気泡の離脱も含めた周囲の液体窒素の流動状態は明らかにされていない。今回は、放電加工によりワイヤ状に裁断した多孔質ニクロムを使用して、大気圧下の液体窒素中のプール沸騰における沸騰曲線を実験的に求める。さらに、沸騰時における可視化観測も行い、多孔質材を用いた沸騰熱伝達の有用性について検討した。

2. 実験装置

本研究で用いる多孔質材のヒータは、発泡ニクロムを放電加工により矩形断面を持ったワイヤ状に切断して用いる。図1に本研究で用いたヒータの写真を示す。本実験で使用した多孔体は平均孔径 0.6 mm の開気孔を持っており、1 inch あたり 37~43 のセルを持っている。比表面積は 3700 m²/m³ 程度である。液体窒素中の気泡のキャピラリー長さ L は、

$$L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (1)$$

で定義され、77K、飽和状態の液体窒素中のキャピラリー長さを計算すると、 $L =$ 約 1.07 mm となり、本研究で用いられる多孔質材の空孔は、キャピラリー長さの約 0.6 倍程度となっている。

このワイヤ状に加工した多孔体を、窓付きクライオスタットに水平に設置し、電流を印加することで発熱させ、その際の電圧・電流について4端子法で計測を行った。

沸騰曲線を算出する際には、ヒータの温度を計測する必要があるが、ヒータの温度変化に伴う抵抗の変化を計測する。本実験で用いるヒータは、断面積にもよるが、抵抗が約 3~5 Ω 程度と比較的低い。

3. 実験結果と考察

多孔体ニクロムによる液体窒素中の沸騰曲線の結果を図2に示す。液体窒素は飽和状態(77 K, 101 kPa)であり、加熱量を徐々に上昇させた場合の結果である。用いたヒータは、断面が 1.6 × 3.2 mm、長さは 100 mm である。縦軸が熱流束 q 、横軸がヒータ抵抗 R を表す。ヒータの表面積は、比表面積の 3700 m²/m³ を元に計算した。ニクロムは、電気抵抗と温度の関係に正の相関があることが確認されている。したがって、定常状態における電気抵抗と熱流束の関係は、温度と熱流束の関係に等しい。そのため、図2は沸騰曲線と同様になる。一般的な沸騰曲線は、右上がりの傾向となるが、今回用いたサイズのヒータでは、その傾向と大きく異なる結果が得られた。

$q =$ 約 400 W/m² 以下では、加熱量の増加にしたがってヒータ抵抗(温度)が増加しているものの、400 W/m² 以上ではヒータ抵抗が減少する傾向となった。そして、約 1900 W/m² で、目視で核沸騰が確認されると、一度大きくヒータ温度が上がるが、その後は加熱量の増加にしたがってヒータの温度が下がる傾向が現れた。生成された気泡がヒータから離脱する際に、強く強制対流を誘起したものと考えられる。

4. まとめ

放電加工によりワイヤ状に切断した発泡ニクロムを用いて、液体窒素中の多孔質材の沸騰曲線を実験的に求めた。通常の沸騰曲線とは異なり、加熱量の増加にしたがって過熱度が減少する領域が確認できた。さらに、核沸騰領域においても、過熱度が減少する傾向が得られた。本研究で用いたヒータは薄肉であるため、核沸騰時の気泡の離脱により、加熱体周囲の強制対流が促進され、沸騰熱伝達が向上したと考えられる。

参考文献

1. Y. Tanno, et al.: AIP Conf. Proc., 1573 (2014) p.597-604

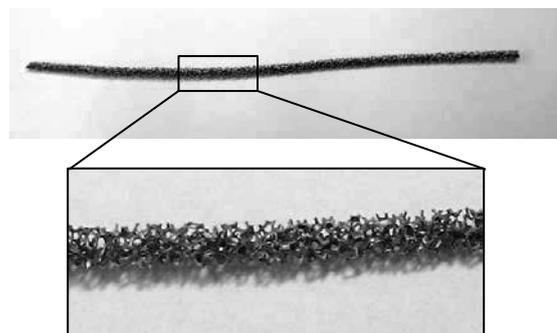


Fig.1 Picture of Porous Nichrome Plate (1.6 x 3.2 x 100 mm)

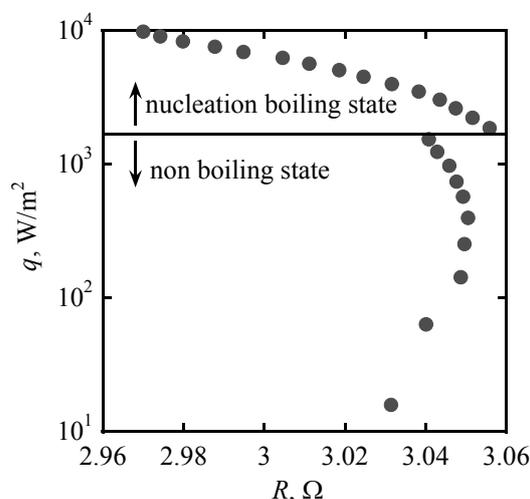


Fig.2 Boiling Curve of Porous Nichrome Plate in saturated liquid nitrogen at atmospheric pressure condition