

LHD 低温システムの性能再確認試験と 2017 年の運転成果

Re-examination of refrigeration power of the LHD cryogenic system and the 19th operation in 2017

三戸利行, 岩本晃史, 濱口真司, 森内貞智, 大場恒揮, 鷹見重幸, 野口博基, 高畑一也, 柳長門, 今川信作 (NIFS);
熊木卓也, 小原浩二, 信時実 (大陽日酸)

MITO Toshiyuki, IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji, MORIUCHI Sadatomo, Ooba Kouki, TAKAMI Shigeyuki,
NOGUCHI Hiroki, TAKAHATA Kazuya, YANAGI Nagato, IMAGAWA Shinsaku (NIFS); KUMAKI Takuya, OBARA Kouji,
NOBUTOKI Minoru (Taiyo Nippon Sanso Corporation)
E-mail: mito@nifs.ac.jp

1. LHD の超伝導・低温システム

LHD は総ての磁場閉込めコイルを超伝導化した世界初のヘリカル型核融合プラズマ実験装置であり、ヘリオトロン磁場配位による無電流・定常プラズマの閉じ込め研究を可能としている。LHD の超伝導システム及び低温システムの全体配置を図 1 に示す。LHD の超伝導システム（ヘリカルコイル、ポロイダルコイル、電磁力支持構造物、超伝導バスライン、80 K 輻射シールド）は、冷凍能力として 5.76 kW at 4.4 K、20.6 kW at 80 K、液化能力として 650 L/h を同時に発生する 1 台のヘリウム液化冷凍機で冷却されている。

2. LHD 低温システム性能再確認試験

1998 年の LHD の運転開始から 99% を超える高い稼働率で、安定な核融合プラズマの実験環境を全国の共同利用研究者に提供してきた。しかし、2015 年のメンテナンス期間中に、図 2 に示したヘリウム液化冷凍機のコールドボックス部の火災事故が発生し、コールドボックス内の多層断熱材や温度センサー等の部材及び計測機器が焼失した。2015 年 11 月より復旧工事を行い、2016 年 7 月末に完了した。復旧後の冷凍液化能力及びセンサー類、自動弁等の動作特性を確認するため、2016 年 8 月にヘリウム液化冷凍機の単独冷凍運転を行い、20 年前に行った性能試験の結果と比較した結果を表 1 に示す。4.4K の等価冷凍能力は、9.19 kW であり、20 年前に測定した性能 9.38 kW に対して約 2% の冷凍能力の低下が測定された。この冷凍能力の低下は火災事故の影響ではなく、18 年間の経年劣化による僅かな性能低下と考えられる。

Table 1. Comparison of measured refrigeration power

Refrigeration power	Measurement on August 5, 2016	Measurement on June 17, 1995
4.4 K refrigeration power (Measured by heater input in LHe Dewar)	5.67 kW	5.67 kW
4.4 K liquefaction ability (Measured by He level sensor in LHe Dewar)	606 L/h	704 L/h
80 K refrigeration power (Measured by heater input of LTIC2023)	23.35 kW	20.7 kW
4.4 k equivalent refrigeration power	9.19 kW	9.38 kW

3. 2017 年 LHD 第 19 サイクル運転成果

2017 年 1 月から LHD の運転を再開し、3 月 7 日からは新たに重水素プラズマ実験を開始した。LHD の運転履歴を図 3 に示す。第 19 サイクルではこれまでの最長となる 5,761 時間の安定な連続運転を達成している。LHD 超伝導・低温システムの運転経過、復旧、再稼働後の状況について報告する。

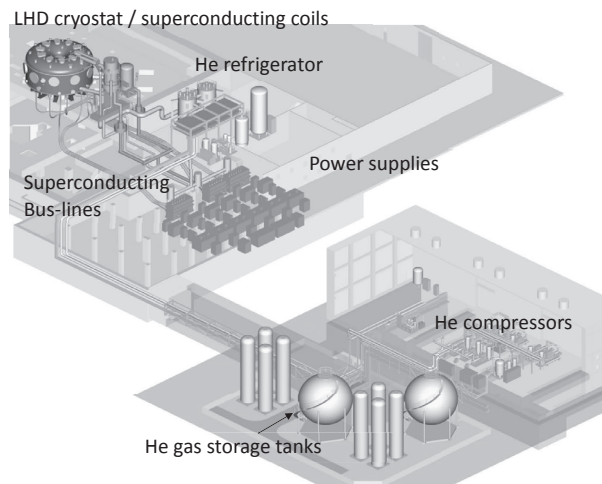


Fig. 1. Layout of LHD superconducting and cryogenic system

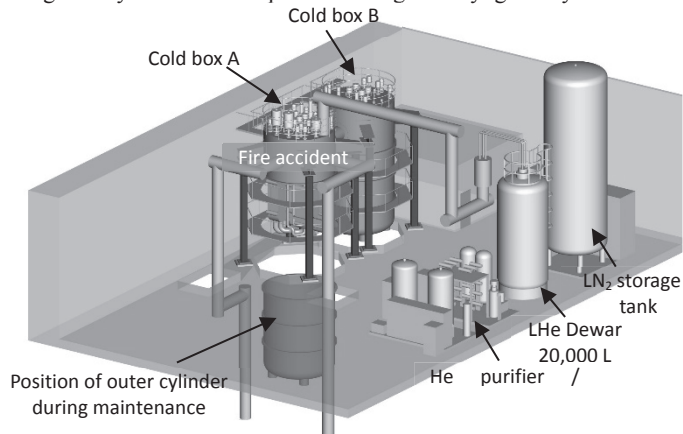


Fig. 2. Equipment layout in the LHD He refrigeration room

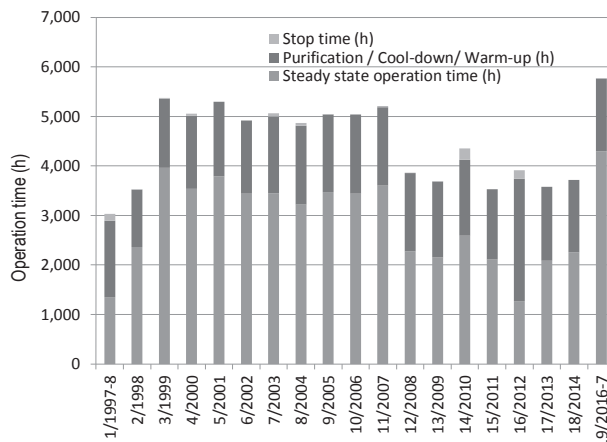


Fig. 3. Operation history of the LHD cryogenic system

参考文献

1. T. Mito, "Long-term operational performance of the LHD cryogenic system," (2015) TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.) Vol. 50, No. 12, pp. 565-5

LHD ヘリカルコイル用サブクールシステムの 10 年間の運転実績 Ten-year operations of helium subcooling system for the LHD helical coils

濱口 真司, 今川 信作, 尾花 哲浩, 柳 長門, 三戸 利行(核融合研)

HAMAGUCHI Shinji, IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, YANAGI Nagato, 三戸 利行 (NIFS)

E-mail: hamaguchi@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所に設置されている核融合プラズマ実験のための大型ヘリカル装置(LHD)の超伝導コイルのうち、ヘリカルコイルの運転温度を下げるため、2006年に低温排気圧縮機を用いたサブクールシステムが導入された[1-3]。本システムでは、低温排気圧縮機により減圧され温度が下がった飽和ヘリウムと熱交換することでサブクールヘリウムを生成している。導入後、10年にわたり設計温度・設計流量のサブクールヘリウムを安定にヘリカルコイルに供給し、これまでに低温排気圧縮機の運転時間は30,000時間を超えた。本講演では、本システムの構成、運転制御方法を詳述するとともに、10年間の運転実績について報告する。

2. サブクールシステムの概要

LHDヘリカルコイルの運転温度を下げてプラズマ実験で利用できる磁場領域を拡大すると同時に冷却安定性の向上を目的として、ヘリカルコイルの冷却系にサブクールシステムが2006年に導入された。減圧槽に貯めた飽和ヘリウムを2段直列の低温排気圧縮機で減圧することで3.0Kまで冷却し、これと熱交換を行うことでヘリカルコイルに供給する120kPaの液体ヘリウムをサブクールしている。定常冷却時の供給流量は50g/sである。ヘリカルコイルを冷却したサブクールヘリウムは出口ヘッダーに設置されているヒーターにより気化され、ガスとして回収される(Fig.1)。

3. 運転手法

定常冷却時は低温排気圧縮機の回転数を1,500rpm程度に固定し、低温排気圧縮機の流量を減圧槽内のヒーターで16.0g/sに自動制御している。これにより、減圧槽の熱負荷が平準化され、減圧槽、および供給ヘリウムの温度が安定化される(Fig.2)。同時に、本制御は非常時の急激な圧力や流量の変化を緩和し、トリップや機器の故障を防ぐ役割も果たしている。

減圧槽の飽和ヘリウム液面は、減圧槽入口弁により70%に自動制御され、ヘリカルコイルへの供給ヘリウム流量は、ヘリカルコイル供給弁で50g/sに調整される。また、バイパス弁は非常時に備えて低温を維持するため、およびシステムの安定化のため、常時微開されている。

4. 運転実績

制御手法の構築、および適切なメンテナンス等により、プラズマ実験のための10回の長期運転(1回あたり4~7ヶ月の連続運転)に対し、設計温度・流量のサブクールヘリウムを安定に供給してきている。これまでの低温排気圧縮機の積算の運転時間は30,000時間を超え、サブクール運転の積算時間は20,000時間を超えた。幸い、サブクールシステムが原因でプラズマ実験を中断する事象は発生していない。直近の長期運転(第20サイクルプラズマ実験)から、重水素を用いた実験が開始されたが、事前の放射線対策により問題は起こらなかったと考えられる。

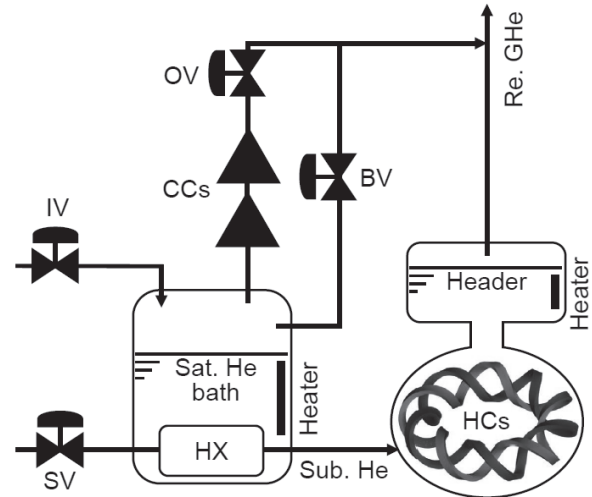


Fig.1 Schematics of the helium subcooling system with a series of the cold compressors.

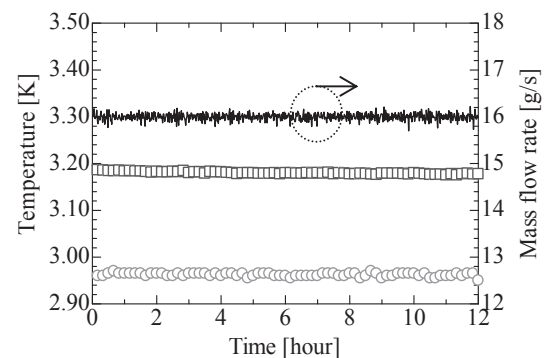


Fig.2 Helium mass flow rate of the cold compressors (solid line) and temperature stabilized with the automatic flow control of the cold compressors by the heater in the bath. Open circles show the temperature of the saturated helium in the bath and open squares that of the supplied helium at the inlet of the helical coils, respectively.

参考文献

1. S. HAMAGUCHI, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.145
2. S. HAMAGUCHI, et al.: Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 53B (2008) p.1724
3. S. HAMAGUCHI, et al.: Fusion Science and Technology, Vol. 58 (2010) p.581

J-PARC 大強度中性子源の液体水素循環システム用ヘリウム冷凍機の性能劣化 - 性能劣化に関わる概要 -

Performance degradation of helium refrigerator for liquid hydrogen circulation system of J-PARC high intensity neutron source

- Over view of performance degradation -

麻生 智一, 勅使河原 誠, 長谷川 勝一, 武藤 秀生, 青柳 克弘, 高田 弘, 池田 裕二郎(原子力機構)
 ASO Tomokazu, TESHIGAWARA Makoto, HASEGAWA Shoichi, MUTO Hideki,
 AOYAGI Katsuhiko, TAKADA Hiroshi, IKEDA Yujiro (JAEA)
 E-mail: aso.tomokazu@jaea.go.jp

1. はじめに

J-PARC の大強度中性子源では、ターゲットで発生した速中性子を液体水素減速材で冷中中性子に冷却するために、液体水素循環系 (1.5MPa, 18K) とヘリウム冷凍機 (6kW at 17K, 1.6MPa, 270g/s) から成る 2 元冷凍システムを導入した (Fig.1) [1]。2008 年の運転開始以来、約 2-3 ヶ月の連続運転を行ってきたが、2015 年からヘリウム冷凍機内の熱交換器と内部吸着器 (ADS) で運転中に圧力損失が増加し、冷凍機の冷却性能が低下して運転に支障を来す状態となった。本件は、この性能劣化に関わる経緯と、性能回復に向けた検討及び対応について報告する。

2. ヘリウム冷凍機の性能劣化と要因検討

2015 年 1 月からヘリウム冷凍機において、運転毎に熱交換器及び ADS の間で圧力損失が増加し始めた (Fig.2)。熱交換器の圧力損失がおおよそ 10kPa を超えると、冷却性能が劣化して熱交換器出口温度が上昇した。一旦昇温すると圧力損失は初期状態に戻るが、長期間の運転は不可能な状態となった。

これまでも 2010 年 10 月と 11 月に熱交換器及び ADS において急激な圧力損失の増加を経験しており、2 つの原因が特定された。それは、圧縮機の活性炭吸着器 (OS-5) の活性炭を再生せずに運転を行ったことによる水分の熱交換器及び ADS への付着と、ADS 内の活性炭の過加熱による粉化であった。今回、系内に粉化した活性炭等の異物が確認されず、圧力損失の発生傾向が水分付着による不具合と類似していたため、活性炭の再生不足が原因であると考えた。

2015 年夏季保守で OS-5 の活性炭を交換したが、改善は見られなかった。さらなる原因特定のため、水分、窒素、その他炭化水素化合物等、冷凍機の運転中に測定できる循環ヘリウムガス中の不純物分析に注力した。しかしながら、設計範囲以上の不純物は確認できなかった。停止期間中にしか開放できない圧縮機周りのフィルタの状況、圧縮機-コールドボックス間の配管の内部状況や熱交換器及び ADS の内部調査等は、2016 年の夏季保守に計画した。

同規模類似施設での理研や CERN の大型ヘリウム冷凍機では、圧縮機の潤滑油が系内に流れ出し、熱交換器の圧力損失を引き起こす事例があった [2]。不純物分析では有意な油が検出されなかったが、発生事象が似ていることから、圧縮機からの油の流出を疑った。

3. 運転対応と性能回復に向けた計画

油に対する保守の準備や作業には 5 か月以上要すること、既に利用者のための施設稼働が計画されていたことから、2016 年夏季保守 (約 3 ヶ月) に作業を計画し、それまでに施設稼働しながらその準備を進めた。冷凍機の運転は、圧力損失の許容上限に達する 3 週間の連続運転と約 1 週間の保守を行う運転サイクルに変更し、利用に供した。夏季保守では、

熱交換器のフロン洗浄とその油分評価、ADS の交換と解体調査等を実施した。詳細については続く発表で報告する。

参考文献

1. T. Aso, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.77 (2007) p.145
2. 奥野 広樹: 低温工学, Vol.50, No.12 (2015) p.589

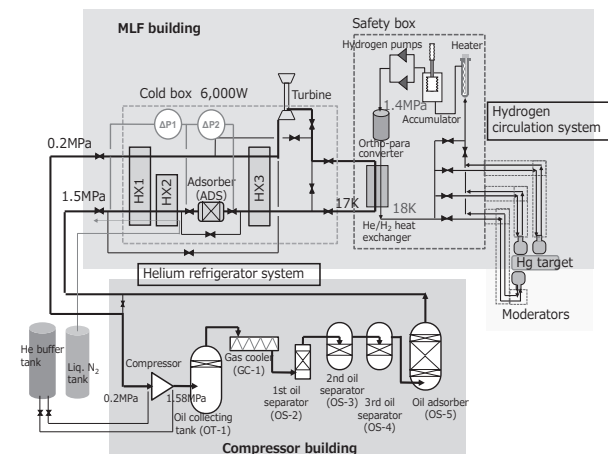


Fig.1 Over view of liquid hydrogen circulation system

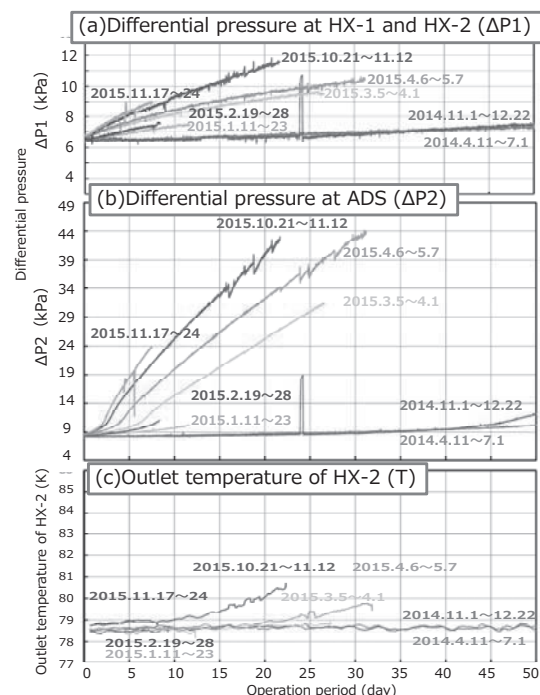


Fig.2 Trend of differential pressure at HX1-HX2 ($\Delta P1$) and ADS ($\Delta P2$), and outlet temperature of HX2 (T)

J-PARC 大強度中性子源の液体水素循環システム用ヘリウム冷凍機の性能劣化 - 性能劣化に関わる原因究明 -

Performance degradation of helium refrigerator for liquid hydrogen circulation system of J-PARC high intensity neutron source

- Investigation of performance degradation -

勅使河原 誠, 麻生 智一, 長谷川 勝一, 武藤 秀生, 青柳 克弘, 高田 弘, 池田 裕二郎(原子力機構)

TESHIGAWARA Makoto, ASO Tomokazu, HASEGAWA Shoichi, MUTO Hideki,

AOYAGI Katsuhiko, TAKADA Hiroshi, IKEDA Yujiro (JAEA)

E-mail: teshigawara.makoto@jaea.go.jp

1. はじめに

J-PARC の大強度中性子源において、液体水素循環システム用ヘリウム冷凍機は、2015 年より冷却性能が低下し、運転に支障を来した。原因を解明するため、循環系内の不純物や油の蓄積量を実測したが、設計の許容値であった。しかしながら、唯一、内部吸着器内の活性炭が飛散しないよう配置したフェルト材のヘリウム入口側表層に膜状の油の蓄積が見られた。本報告では、得られた結果について議論し、原因究明に迫りたい。

2. ヘリウム冷凍機内の原因究明

ヘリウム冷凍機の構成を Fig. 1 に示す。原因の調査では、過去に理研等で発生した事例を踏まえ、循環ヘリウム(He)ガス中の不純物(油を含む)の分析を行った。停止期間中にしか解放できない圧縮機周りのフィルタの状況、圧縮機・コールドボックス間の配管の内部状況や熱交換器(HX: HX1+HX2)及び内部吸着器(ADS)の内部調査等は、長期定期保守の期間に行った。

定期的に行っているリンデ製測定器(WE3M-2)による水分(H_2O)、窒素(N_2)の分析、ガスクロマトグラフィによる水素(H_2)、酸素(O_2)、一酸化炭素(CO)、メタン(CH_4)の分析では、いずれも数 ppm 程度で設計の許容値であった。In-situ で特定種以外のガス種も広範囲 (200 a.m.u.まで)に分析できる四重極分析器(Q-mass)も導入した。2015 年 11 月の運転終了後の測定では、性能低下に関わる圧力損失が発生した ADS 及び HX で不純物が計測された。ADS では、 N_2 が約 100 ppm, HX では、 N_2 , H_2O , CO_2 が、それぞれ約 200, 500, 700 ppm 検出された。その除去作業を実施し、効果を確認する試運転を行った。除去作業では、加温 N_2 パージ及び He 充てん及び真空置換を Q-mass でモニタしながら検出限界以下になるまで行った。活性炭吸着器(OS-5)も除去の対象とした。試運転中のガス分析では、特に不純物は検出されなかった。しかしながら、これまでに観測されたものと同様な圧力損失の増加が確認された。不純物除去作業は、差圧の発生を抑えるには至らなかった。

コールドトラップ法による循環ヘリウム中の油分析では、OS-5を通過した後で約 10ppb 程度であり、ほぼ設計で想定される値であった。

2016 年 7 月の夏の定期保守の期間に、配管内部、HX 出入口を光ファイバー及び紫外光(ブラックライト)を用いて目

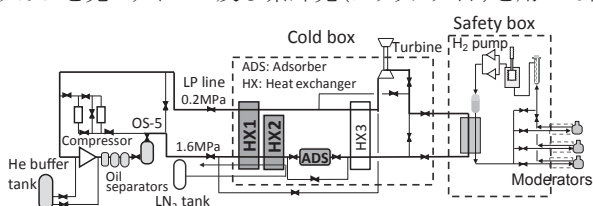


Fig. 1 Layout of liquid hydrogen circulation system in J-PARC

視確認を行ったが、特に、異物等は確認出来なかった。

HX 内部に付着した油を、フロン洗浄剤(AK-225G)を用いて溶媒抽出法にて定量した結果、約 95g の油が検出された。これは、He ガス内の油の不純物である 10ppb と、積算運転時間(約 15,000 時間)のヘリウムの総通過量(14,013 t)から得られる値とほぼ矛盾しない値であった。

ADS の内部は、活性炭及び活性炭を挟むフェルトより構成する。ADS を解体し内部を観察した結果、Fig. 2 に示すように He ガスの入口側の上部フェルトの 3 mm 程度の表面層に膜状の黄色の着色が確認された。それ以外の場所では、着色は確認出来なかった。フェルトは、活性炭が飛散しないように押さえるもので、耐熱グラスフェルト B を 40 mm の厚さに圧縮し、活性炭の上下に挟んで挿入される。フェルト及び活性炭内に付着した油を、四塩化炭素で溶媒抽出、赤外分光法により定量した。ADS 内に付着した総油量は 48g で、上部フェルト、活性炭、下部フェルト、それぞれ 45.6g, 2.1g, 0.3g の油が検出された。内部に付着した総油量は、He 中の油濃度と積算運転時間から推量される値と矛盾しないが、全量の油のうち 95 %もの油が上部フェルトに付着していた。油分量は、下層へ行くに従い指数関数的に下がっていた。活性炭で検出された油分量は、新品の活性炭と変わりはなかった。フェルトが本来と異なる油のフィルタとして機能したことを意味する。

3. まとめ

He 中に含まれる油の濃度が設計範囲内の少ない量であるとしても、かなり限定された領域で確認された油の付着は、問題を引き起こす要因の一つと考えた。フェルトの表層にトラップされた油が低温で徐々に固まり、ヘリウムの流路を閉塞させ、それが差圧を発生させたのかもしれない。

この事象は、他施設における不具合の事象、例えば、圧縮機からの大量油の流出や窒素、酸素、水等の不純物による流路閉塞とは大きく事象が異なる新しい知見であろう。

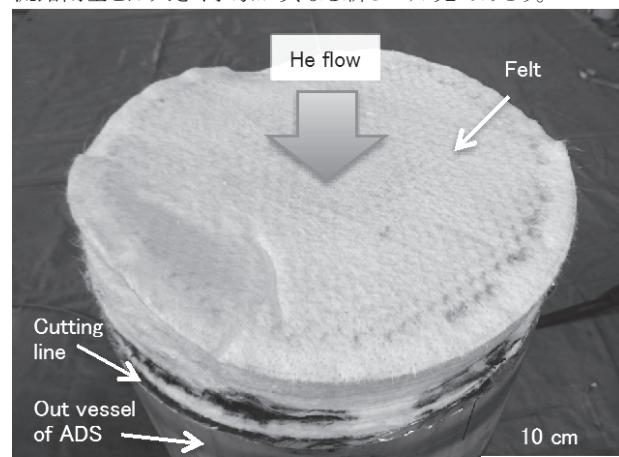


Fig. 2 Photograph of felt after dismantled ADS

J-PARC 大強度中性子源の液体水素循環システム用ヘリウム冷凍機の性能劣化 -性能劣化を誘発する差圧上昇に関わる要素試験-

Performance degradation of helium refrigerator for liquid hydrogen circulation system of J-PARC
high intensity neutron source

- Element test related to increasing differential pressure, which might cause performance degradation -

勅使河原 誠, 麻生 智一, 長谷川 勝一, 武藤 秀生, 青柳 克弘, 高田 弘, 池田 裕二郎(原子力機構)
TESHIGAWARA Makoto, ASO Tomokazu, HASEGAWA Shoichi, MUTO Hideki,
AOYAGI Katsuhiko, TAKADA Hiroshi, IKEDA Yujiro (JAEA)
E-mail: teshigawara.makoto@jaea.go.jp

1. はじめに

J-PARC の大強度中性子源において、液体水素循環システム用ヘリウム冷凍機は、2015 年より冷却性能が低下し、運転に支障を来した。原因究明の過程で、内部吸着器(ADS)内の活性炭を飛散しないよう配置したフェルト材の入口側表層に膜状の油の蓄積を確認した [1]。圧縮機由来の油で ADS が低温状態に移行する過程で、フェルトに付着した膜状の油が固化し、熱交換器-内部吸着器間の圧力損失を引き起こす要因と考察した。本件では、フェルト材の油の蓄積が性能低下の要因と成り得るのか実験的に調べた。

2. 低温窒素ガスを用いた要素試験

液体水素循環システム用ヘリウム冷凍機では、ADS 内のフェルト断面直径 $\phi 350$ mm に 270 g/s もの大流量の低温ヘリウムガスが流れる。その流量を有する試験設備が存在せず、代替として単位断面積当たりの流量をヘリウム相当質量流量とした低温窒素ガスの要素試験を計画した。要素試験で用いたフェルトの断面直径 $\phi 29$ mm では、1.9 g/s (5.5 Nm³/h) の窒素ガス流量に相当する。

Fig. 1 に要素試験の概念図を示す。フェルトは、実際の ADS に設置されている状態を模擬するため、自然長厚さ 12 mm、外径 $\phi 29$ mm の耐熱グラスフェルト B を 8 層重ね圧縮して 40 mm 厚さにした。そのフェルトを内径 $\phi 29$ mm の ICF70 フランジ付き配管の内部に配置し、実際と同様に両端をそれぞれ SUS304 製の金網と穴あき板で挟んで固定した。窒素ガスがフェルトに最初に流入する初層と 2 層目のフェルトには、約 55 wt% 程度の圧縮機油をしみ込ませた。これはヘリウム入口側表層に膜状に付着した初層のフェルトで計測された値の約 4 倍に相当する。試験では、フェルトに油をしみ込ませたケースと新品のフェルトのみのケースで行った。まず、系内を乾燥窒素ガス(露点 -70°C 以下)、ロータリーポンプを用いて真空窒素置換を行った。圧縮機油の蒸気圧は 10^{-6} Pa 以下と低いため、この程度の真空では揮発しない。窒素置換後、フェ

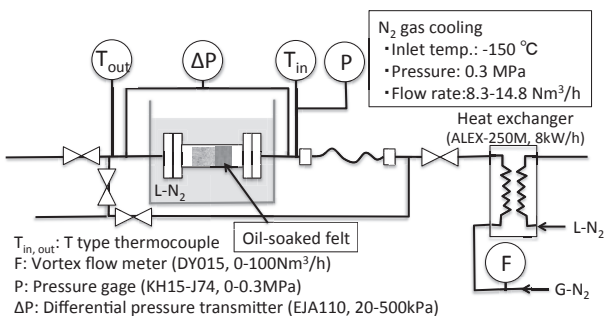
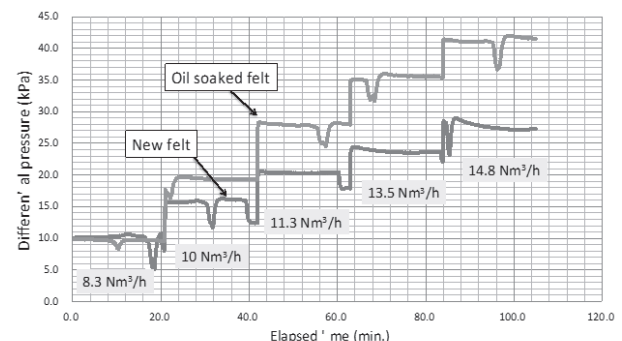


Fig. 1 Differential pressure measurement layout of oil-lightly-soaked felt by cooled N₂ gas flowing.

ルトを含む容器を液体窒素に浸漬して油を固化した。大流量の窒素ガスの下、窒素ガスでの冷却過程でフェルトにしみ込ませた油が移動するのを防止した。フェルトを含む容器が液体窒素温度に達した後、熱交換器に液体窒素を導入し、乾燥窒素ガスを試験温度の -150°C に達するまでフェルトに流れないようにバイパスした。その後、試験温度に達した窒素ガスをフェルトに流し差圧の測定を開始した。差圧の測定結果を Fig. 2 に示す。油をしみ込ませたフェルトは、新品のフェルトと比較して、流量の増加と共に差圧が増加した。固化した油が窒素ガスの流路を閉塞させ差圧を発生させたものと考えられる。このことから、ADS の表層領域に膜状に付着した油が低温になるにつれて徐々に固化し、それがヘリウムの流路を閉塞させ、ADS 内での差圧を増加させたと考察できる。しかしながら、ADS 直前に配置された熱交換器の差圧の増加にまで影響を及ぼしたと説明するには至っていない。



3. まとめ

油をしみ込ませたフェルトの低温窒素ガスを用いた流動試験では、新品のフェルトと比較して差圧が大きくなる結果が得られた。フェルトの表層に付着した油が低温で徐々に固まり、ヘリウムの流路を閉塞させ、それが差圧を発生させたものと考えられる。ヘリウム中に含まれる油の濃度が設計範囲内の少ない量であるとしても、本来、油のフィルタの機能を持たないはずのフェルトに部分的に高い濃度の油が付着することにより差圧が発生し得ることを実験的に確認した。

参考文献

- M. Teshigawara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.95 (2017) 本会講演予定(1D-a04)

J-PARC 大強度中性子源の液体水素循環システム用ヘリウム冷凍機の性能劣化 - 性能回復への手がかかりと今後の計画 -

Performance degradation of helium refrigerator for liquid hydrogen circulation system of J-PARC
high intensity neutron source

- Key points to performance recover and future plan -

麻生 智一, 勅使河原 誠, 長谷川 勝一, 武藤 秀生, 青柳 克弘, 高田 弘, 池田 裕二郎(原子力機構)
ASO Tomokazu, TESHIGAWARA Makoto, HASEGAWA Shoichi, MUTO Hideki,
AOYAGI Katsuhiko, TAKADA Hiroshi, IKEDA Yujiro (JAEA)
E-mail: aso.tomokazu@jaea.go.jp

1. はじめに

ヘリウム冷凍機の熱交換器及び内部吸着器(ADS)で運転中に圧力損失が増加し、冷却性能が劣化する事象の原因究明を行ってきた。本冷凍機における性能劣化に関わる原因究明[1], ADS での油の蓄積状況を実験的に調査した要素試験結果[2]を整理して、根本的な原因究明の手がかかりと今後の対策を検討する。

2. 性能劣化に関わる原因究明の結果

ガスクロマトグラフや四重極質量分析装置等の機器を駆使し、不具合を引き起こす可能性の高い水分、窒素、その他炭化水素系ガス等の不純物に着目した測定結果では、特異な不純物は検出されなかった。理研やCERNの過去の調査から、油による不具合事例と似ており、熱交換器の洗浄とADSの交換を油除去の対策として実施した。

油については、コールドトラップによる分析結果で、活性炭吸着器(OS-5)を通過した後のヘリウムガス中の濃度は約10ppbと設計範囲内であった。熱交換器の洗浄及びADSの内部に付着した油分析を行った結果、総量で約145gの油が回収された。この油の量は、コールドトラップで測定された油の濃度をそれまでの運転時間で積分して得られる値であった。これは理研での経験よりも1桁以上も下回る値であった[1]。

唯一、ADSの入口側フェルトの表面に膜状に蓄積した油が、新たな知見として観測された。フェルトに付着した油によって圧力損失が発生することを実験的にも確認し、ADSにおけるフェルトでの油の蓄積が本事象の原因となりうることを見出した[2]。

一方、熱交換器での圧力損失が10kPaを超えると、熱交換器出口温度に影響を及ぼし始める。ADSの圧力損失は熱交換器で発生するものより約1桁程度高く、それが熱交換器の圧力損失まで引き起こすという説明をするにはこの点を含めた説明が必要である。

3. 油への対処結果からの考察

コールドトラップによる油分析で測定されたヘリウム中の油の濃度は10ppbと低い値であったが、油による過去の不具合事例に類似していることから、熱交換器の洗浄及びADSの交換を行った[1]。不具合のあったADSを解体して、初めてフェルトの表層に油が蓄積していることが分かった。ADSの交換にあたって、内部の状況を調査した後に新規のADSを製作する期間の確保が困難であったため、同じフェルト材が新規に交換したADSに使用されている。現在、性能劣化に関わる圧力損失の増加は無く、総計約7ヶ月もの期間、安定に運転が継続可能となった(Fig.1)ものの、4~5年後には同様な圧力損失が発生することが予想される。このように、圧力損失の増加がなくなったことから、これらの機器が性能劣化の要因であることは明らかであるが、根本的な究明までには至っていない。

今後として、ガス分析による不純物の監視を継続して行うことはもとより、2017年夏季保守期間に第1熱交換器と第2熱交換器のそれぞれに差圧計を設置して、詳細に圧力損失発生状況を測れるようにした。加えて、圧縮機の油分離器と油吸着器にも差圧計を新たに設置し、油分離能力の状態を把握することとした。これら情報を積み重ねて、根本対策に向けた検討を進める。

参考文献

1. M. Teshigawara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.95 (2017) 本会講演予定(1D-a04)
2. M. Teshigawara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.95 (2017) 本会講演予定(1D-a05)

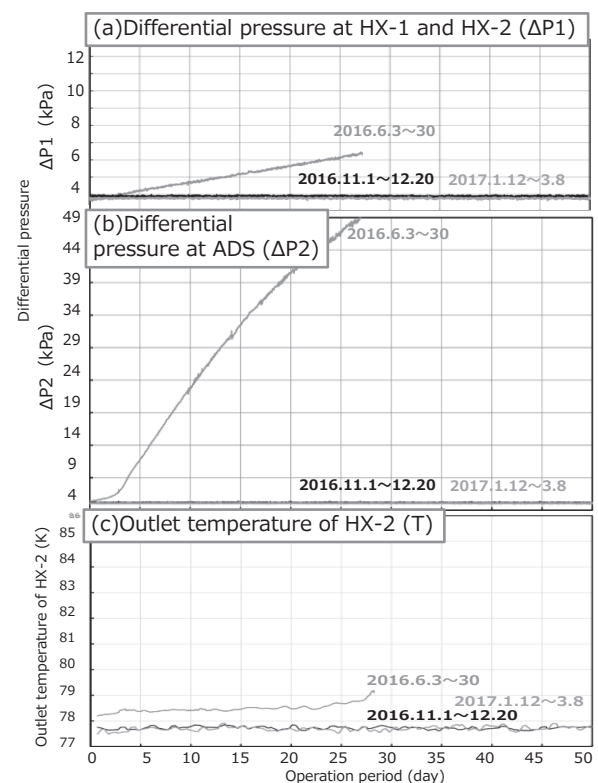


Fig.1 Trend of differential pressure at HX1-HX2 ($\Delta P1$) and ADS ($\Delta P2$), and outlet temperature of HX2 (T)

Er-Ho 二元窒化物蓄冷材による比熱曲線と 4K-GM 冷凍機の冷凍能力との関係

Correlation between heat capacity and cooling power of 4K-GM cryocooler with Er-Ho binary nitride regenerator

白石 拓也, 中川 貴, 山本 孝夫, 清野 智史, 藤本 靖(大阪大学); 増山 新二(大島商船高専)

SHIRAISHI Takuya, NAKAGAWA Takashi, YAMAMO A. Takao, SEINO Satoshi, FUJIMOTO Yasushi (Osaka Univ.);

MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College)

1. はじめに

ヘリウム の 液 化 温 度 へ の 冷 凍 に は、 現 在 GM(Gifford-McMahon)冷 凍 機 が 多 用 さ れ て い る。 そ の 冷 凍 性 能 を 左 右 す る 要 素 の 1 つ が 蓄 冷 材 の 特 性 で あ り、 極 低 温 で の 高 い 比 熱 と 熱 伝 導 度 が 要 求 さ れ る。 現 在 の 市 販 冷 凍 機 に は HoCu_2 が 主 に 使 用 さ れ て い る が、 冷 凍 効 率 の 向 上 や 省 エ ネ の 為 に は そ の 特 性 を 超 え る 新 た な 蓄 冷 材 の 開 発 が 望 ま れ て い る。

我 々 は 2003 年 以 後、 新 た な 蓄 冷 材 と し て 希 土 類 元 素 の 窒 化 物 を 適 用 す る 研 究 を 進 め、 Ho-Er の 二 元 系 窒 化 物 $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}\text{N}$ が HoCu_2 を 超 え る 蓄 冷 材 と な る 特 性 を 持 つ こ と を 報 告 し た [1]。 ま た、 異 な る 温 度 - 比 熱 曲 線 を 持 つ 材 料 を 適 切 に 配 置 す る こ と に よ り、 冷 凍 能 力 が 向 上 す る こ と も 報 告 さ れ て い る [2]。 こ れ ら は、 比 熱 の 大 き さ だ け で は な く、 温 度 - 比 熱 曲 線 の 形 状 も 冷 凍 能 力 に 影 響 し て い る こ と を 示 し て い る。 本 研 究 で は、 $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1$) を 作 製 し、 比 熱 と 冷 凍 能 力 を 測 定 し、 高 い 冷 凍 能 力 を も た ら ず 温 度 - 比 熱 曲 線 に つ い て 考 察 し た。

2. 実験手法

出 発 原 料 と し て $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}$ 合 金 球 ($x = 0, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1$) 粒 径 範 囲 $\phi 50-180 \mu\text{m}$ の 試 料 を 準 備 し た。 こ れ ら の 窒 化 に は、 先 行 研 究 と 同 じ く 熱 間 等 方 圧 加 圧 装 置 (株 神 戸 製 鋼 所、 O_2 - Dr-HIP) を 用 い た 高 温 高 圧 窒 素 (196 MPa, 1550 °C) 雰 囲 気 下 で の 処 理 を 施 し た。 窒 化 物 の 球 材 表 面 は ヘ プ タ ン 浴 中 で 超 音 波 処 理 を 施 し 表 面 突 起 を 除 去 し た。 試 料 の 評 価 に は、 XRD を 用 い た 結 晶 構 造、 SEM を 用 い た 試 料 の 表 面 と 断 面 の 観 察 を 行 っ た。 さ ら に、 物 理 物 性 測 定 装 置 (日 本 カ ン タ ム ・ デ ザ イ ン (株)、 PPMS) を 用 い て 低 温 域 で の 比 熱 を 測 定 し た。 冷 凍 能 力 は、 4K-GM 冷 凍 機 (住 友 重 機 械 工 業 (株) 製、 SRDK-101D)、 に 充 填 さ れ て い る HoCu_2 を こ れ ら の 試 料 に 置 換 し て 測 定 し た。

3. 実験結果・考察

ど の 組 成 で も 単 相 の $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}\text{N}$ が 得 ら れ て お り、 組 成 を 変 化 さ せ な が ら も 他 の 条 件 を 揃 え る こ と で、 比 熱 曲 線 の み 異 な る 窒 化 物 球 の 試 料 が 得 ら れ た こ と を 確 認 し た。 さ ら に、 こ れ ら の 試 料 の 冷 凍 試 験 を 行 っ た。 冷 凍 能 力 と 比 熱 曲 線 の 関 係 を 調 査 す る た め に、 比 熱 測 定 で 得 ら れ た 比 熱 曲 線 を 4.2 K から 7 K で 積 分 し た。 こ の 値 に、 実 際 に 蓄 冷 器 に 充 填 し た 量 を 乗 じ て

蓄 冷 器 の 4.2 K から 7 K ま で の 熱 容 量 を 求 め た。 積 分 の 数 値 計 算 は、 比 熱 曲 線 を 0.5 K 幅 で 台 形 近 似 し た。 Fig.1 冷 凍 能 力 に 対 し て 熱 容 量 (温 度 範 囲: 4.2 K-7K) を プ ロ ッ ト し た グ ラ フ を 示 す。 $\text{Er}_{0.75}\text{Ho}_{0.25}\text{N}$ は 熱 容 量 が 最 も 大 き く 冷 凍 能 力 も 最 も 高 く、 ErN は 熱 容 量、 冷 凍 能 力 と も に 小 さ か っ た。 一 連 の プ ロ ッ ト は、 $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1$) の 5 種 と HoCu_2 を 含 め て 直 線 関 係 を 示 唆 し て い る。 図 中 の 直 線 は 全 て の 点 か ら 直 線 回 帰 に よ り 決 め た も の で あ り、 R^2 値 は 0.875 で あ っ た。 こ の 熱 容 量 の 計 算 は 4.2 K から 7 K だ け で は な く 様 々 な 温 度 領 域 に つ い て 行 っ た が、 そ れ ら の 中 で も、 4.2 K - 7 K の 熱 容 量 と 冷 凍 能 力 の R^2 値 が 最 も 大 き か っ た。 こ の こ と よ り 4.2 K - 7 K の 熱 容 量 が 冷 凍 能 力 の 指 標 と な り う る こ と が 分 か っ た。 こ の 7 K は、 Pb と 低 温 側 の 蓄 冷 材 が 切 り 替 わ る 温 度 に 相 当 す る と 思 わ れ る。

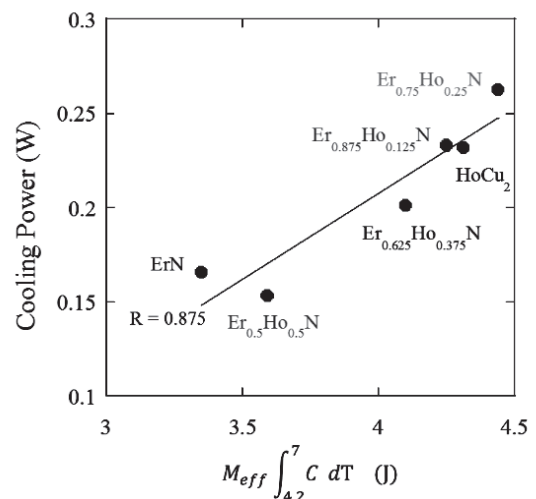


Fig. 1 Cooling power vs heat capacity of regenerator materials in second regenerator column.

参考文献

- [1] Y. Hirayama, *et al.*: Journal of Alloys and Compounds. Vol. 462(2008)L12.
- [2] T. Nakagawa, T. Miyauchi, T. Shiraishi, S. Seino, T. A. Yamamoto, Y. Fujimoto, S. Masuyama 2017 *J. Phys.: Conf ser* **897** 012008

宇宙用小型冷凍機のリニア圧縮機開発

Design of linear compressor for SHI new model space cryocoolers

湯本 健太, 平塚 善勝, 大塚 清見, 恒松 正二, 金尾 憲一, 檜崎 勝弘(住重)

YUMOTO Kenta, HIRATSUKA Yoshikatsu,

OTSUKA Kiyomi, TSUNEMATSU Shoji, KANAO Kenichi, NARASAKI Katsuhiko (SHI)

E-mail: kenta.yumoto@shi-g.com

1. はじめに

近年、民間企業が宇宙開発に参入し低コストの小型衛星の打ち上げ実験が盛んに行われており、また科学用途及び防衛関連においても人工衛星の果たす役割や重要性が高まっている。住友重機械工業ではこれまで衛星搭載用の冷凍機やクライオスタットを開発してきた実績がある[1]。宇宙用冷凍機には効率ほもとより、小型軽量性、ノーマンテナンス性や低振動性などが求められ、シビアな環境でも高い信頼性を実現する必要がある。冷凍能力に関しては冷凍機ユーザから大容量化の要求がなされており、このようなニーズに応えるため、当社では現行機種77Kで1W級から数W級へと冷凍能力を向上させた冷凍機を開発を開始した。本稿では上記数W級冷凍機に使用される最大120W入力可能な圧縮機的设计について紹介する。

2. 圧縮機開発コンセプトと目標仕様

圧縮機の開発コンセプトは当社現行の圧縮機(60W入力)と同等のサイズ・重量のまま高効率で120W入力可能な圧縮機を実現することである。Table.1 に開発機目標仕様と現行圧縮機の仕様を示す。マグネット可動型のリニアモータを対向で配置し、軸受にはフレクシャパネを用いてピストンと可動シリンダを非接触シールとしている。またコンタミネーションによる性能低下を抑えるため樹脂材などの使用は極力控えた。

3. 圧縮機設計

圧縮機的设计に際して、まず運用上の要請から運転周波数52Hz、ガス封入圧を3.0MPaと設定し、電流・電圧値も冷凍機ドライバを考慮し50V、4A以下とした。次に軸受け板バネの可動範囲やガスバネの影響を加味して必要な圧縮機P-V仕事を実現するピストン断面積と可動部のストロークを決め、簡易的な磁気回路の計算から必要な推力を得られる形状を検討した。コイル、マグネット、ヨークなどの詳細な形状については磁場解析ソフトを用いて動磁場解析を行い、モータ効率等を導出して所望の仕様を満足する形状を探索した。最終的にモータ効率85%、最大推力80Nが見込まれる形状が得られている。また可動部の軸受けとなる小型板バネについても新規に設計を行い、必要なバネ定数とストロークを得られる形状を決定した。Fig.1 に設計された圧縮機の外観を、Table.2 に設計された圧縮機の仕様を示す。

4. 性能予測数値計算

設計された圧縮機を膨張器と組み合わせた際の冷凍性能を数値計算によって予測した。膨張器として低振動性に優れたパルス管冷凍機を想定してモデル化し計算を行っている。Table.3 に数値計算結果を現行の1Wスターリング冷凍機との比較とともに示す。膨張器については今後、膨張器設計時により最適な形状を検討していく予定である。数値計算においては、新たな試みとして Gedeon associates(米)が提供している SAGE プログラムを用いた。計算時間が短く、豊富な部品ライブラリが使用できるのでよりスピーディな開発が可能となる。SAGE プログラムの導入にあたって実機試験結果との比較など計算結果の妥当性の確認を行った。詳細は発表にて報告する。

5. まとめと今後の展望

冷凍能力の大容量化に対応するため120W入力のリニア圧縮機的设计を行い、大きさ $\phi 110 \times L200$ mm、重量3.5kgでモータ効率85%が見込める圧縮機形状を決定した。当初の目標をほぼ達成し、現行の圧縮機サイズ・重量と同程度で倍の入力が可能な圧縮機となっている。今後は試作機の製作と性能確認を予定しており、あわせて膨張器の設計・試作を行い衛星搭載の2段冷凍機予冷用等への適用を目指す。

参考文献

- 1 K. Kanao, et al.: SPIE, Defence+Commercial Sensing TRI-TECHNOLOGY DEVICE REFRIGERATION(TTDR), Vol. 9821 C1-C10

Table.1 Target specification and 60W comp specification.

Item	Target spec	SHI 60W comp
Maximum input power	120 W	60 W
Compressor efficiency	> 82%	-
Motor efficiency	> 85%	-
Size	< $\phi 98$ mm < L230mm	$\phi 98$ mm L230mm
Mass	< 4.0 kg	3.3 kg

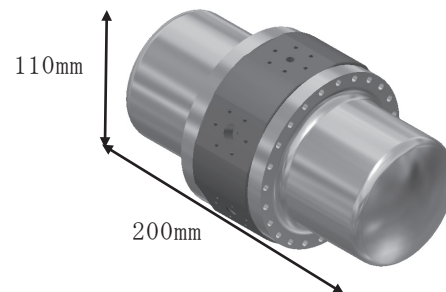


Fig.1 Schematic view of designed compressor.

Table.2 Specification of compressor at design.

Item	Specification
Maximum input power	120 W
Motor efficiency	85%
Size	$\phi 110$ mm \times L200mm
Mass	3.5 kg
Maximum trust force	80 N
Maximum voltage (rms)	47.9 V
Maximum current (rms)	3.2 A

Table.3 Result of calculation with pulse-tube expander model.

Item	Calculation result	SHI stirling
Cooling power	6.2 W at 77K	1W at 80K
Input power	120 W	40 W
Compressor efficiency	82.8 %	-
Operating frequency	52 Hz	52 Hz
Initial gas pressure	3.0 MPa	-

水素液化磁気冷凍用磁性体 $GdTiO_3$ 単結晶の磁気熱量効果

Magnetocaloric effect of single-crystal $GdTiO_3$

表 秀樹, 宇治山 崇, 松本 宏一(金沢大学);

Ildar Gilmutdinov, Airat Kiiamov, Dmitrii Tayurskii(カザン連邦大学)

OMOTE Hideki, UJIYAMA Takashi, MATSUMOTO Koichi(Kanazawa University);

ILDAR Gilmutdinov, AIRAT Kiiamov, DMITRII Tayurskii(Kazan Federal University)

E-mail: sennkouzi@stu.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

我々は磁性体の磁気熱量効果を利用した磁気冷凍に用いられる磁性材料の研究をしている。水素液化磁気冷凍機に用いられる磁性材料として、酸化物ガーネット・金属間化合物・希土類硫化物などの磁気熱量効果について報告してきた。

希土類-遷移金属酸化物 $GdTiO_3$ はペロブスカイト構造を持つフェリ磁性体であり、 Gd^{3+} イオンと Ti^{3+} イオン間で反強磁性相互作用が起こっている[1]。磁気転移温度が 34K 程度と水素液化温度の 20K に近いこと、また酸化物なので水素との反応が起こらないことから、水素液化磁気冷凍に用いる磁性材料に相当であると考えた。

本研究では単結晶 $GdTiO_3$ の作製を行い、磁化・比熱測定による磁気熱量効果の評価を行ったので報告する。

2. 単結晶 $GdTiO_3$ の作製

原料として純度が 99.9%以上の Gd_2O_3, TiO_2, Ti を用いて化学量論組成近傍の組成になるように秤量した。混合した粉末をラバーチューブに詰め、静水圧プレスで棒状多結晶体に成形した。できた原料棒をフローティングゾーン法により結晶育成させた。結晶育成には、クリスタルシステムズ社製赤外線単結晶製造装置を用い、育成時は、雰囲気中にアルゴンガスを流した。

X線回折により、 $GdTiO_3$ の単結晶が得られたことを確認し、結晶軸の確定を行った。Fig.1 に直方体に成形した $GdTiO_3$ サンプルを示す。

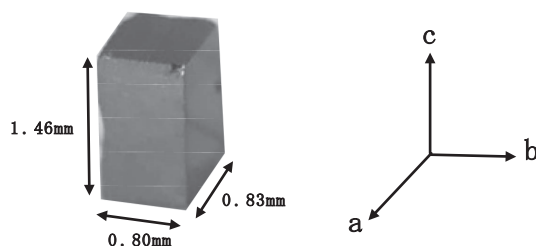


Fig.1 Single-crystal $GdTiO_3$ cuboid

3. 単結晶 $GdTiO_3$ の磁気熱量効果

磁化測定では Quantum Design 社製の MPMS(磁気特性測定システム)を用いて 5T までの磁化測定を行った。Maxwell の関係式からエントロピー変化を導出し、磁性体としての性能を評価した。また、比熱測定では Quantum Design 社製の PPMS(物理特性測定システム)を用いて、緩和法で 0~5T の磁場中比熱測定を行った。比熱から磁性体のエントロピーを導出した。

4. 実験結果

$GdTiO_3$ の 5K での磁化曲線の結晶軸異方性を Fig.2 に示す。磁場 $Heff$ は Fig.1 に示すサンプルを回転楕円体で近似することにより[2]、反磁界係数を見積もり、求められた有効磁場である。磁化曲線の立ち上がりから、b 軸方向が困難軸、a, c 軸方向が容易軸とわかった。磁気冷凍の動作温度範囲である 34K ではほとんど異方性は確認されなかった。また、磁気ヒステリ

シスも観測されなかった。ゼロ磁場での比熱は 34K に磁気相転移に伴う大きなピークを示した。磁場中比熱からエントロピー線図を求めた。

磁化の温度依存性(b 軸方向)から求められた $GdTiO_3$ の質量当たりの磁気エントロピー変化 ΔS を Fig.3 に示す。転移温度近傍である 34K に大きなエントロピー変化を示す。RCP(Relative Cooling Power)を計算すると、広温度領域でエントロピー変化を示すことから、 RT_2 (R : 希土類, $T=Al, Ni$) の金属間化合物と比べて大きな値をとる。また、 $GdTiO_3$ は水素との反応を起こさないことから他の磁性材料よりも実用的であると考えられる。

講演では、測定結果の詳細について報告する。

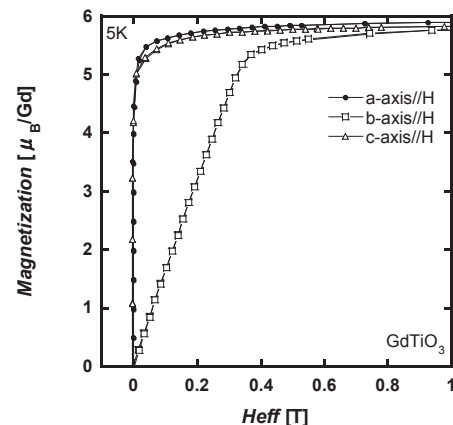


Fig.2 Magnetization of single-crystal $GdTiO_3$

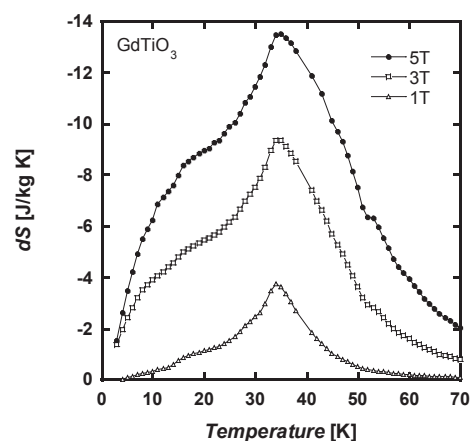


Fig.3 Entropy change of single-crystal $GdTiO_3$ along the b-axis

参考文献

1. Carl W. Turner, et al.: Journal of Solid State Chemistry 34, 207-213 (1980)
2. 太田恵造著: 磁気工学の基礎 I 1973 p37-39

車両空調を目指した磁気ヒートポンプの検討

Study of magnetic heat pump for on-board air conditioner

宮崎佳樹, 池田和也, 脇耕一郎(鉄道総研)
 MIYAZAKI Yoshiki, IKEDA Kazuya, WAKI Koichiro (RTRI)
 E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

ノンフロンで高効率期待される磁気ヒートポンプ技術の、鉄道車両空調への適用を目指した研究開発を行っている。これまでに試作した kW 級磁気ヒートポンプの課題であった熱損失の定量評価および低減、生成温度差の拡大、熱サイクル高速化による冷凍能力の向上について検討し、鉄道車両空調に磁気ヒートポンプを適用した場合の概念設計を、数値計算に基づき行った。

2. 冷凍能力及び生成温度差の拡大

これまでの検討により、AMR(Active magnetic regenerator) 近傍のデッドボリュームにおける熱損失や、磁性材料の充填不足などにより、冷凍能力が 60%程度に低下することを明らかにした[1, 2]。また、異なる動作温度を有する磁性材料を組み合わせて生成温度差を拡大する場合は、ある程度の充填量が必要になることもわかった[3]。しかし、使用する磁性材料充填量が増加すると、励消磁のための永久磁石の体積も増やさなければならない。軽量・コンパクト化のためには、熱サイクルを高速化し、使用する磁性材料を低減することが重要となる。

Fig 1 に、熱負荷が 5 W のときの生成温度差の回転数依存性の計算結果を示す。計算はガドリニウム (Gd) などの 2 次相転移材料の物性を用いた。磁性材料の積層数は 3、AMR 直径 11 mm、長さは 60 mm (AMR あたりの磁性材料約 26 g) である。回転数が 100 ~ 150 min^{-1} の間で、生成温度差が最大となる傾向を示す。磁性体充填量あたりの冷凍能力は、5 W/26 g = 192 W/kg (生成温度差 30 K) である。

Fig 2 には、kW 級磁気ヒートポンプに用いた磁性材料と同量 (7.2 kg) を用いた場合の冷凍能力の計算結果を、kW 級磁気ヒートポンプの実験結果とあわせて示している。サイクル高速化による小型軽量設計では、生成温度差 30 K を確保しながら、kW 級磁気ヒートポンプと同等の冷凍能力が得られている。

3. 空調装置質量の試算

2 章で検討した小型・軽量設計の考え方をもとに、磁気ヒートポンプを鉄道車両空調の規模に適用した場合の装置質量を Fig 3 に示す。蒸気圧縮式冷房装置の装置質量は 25 kW 換算で 350 kg 程度とした[4]。空調装置構成のうち、磁気ヒートポンプは、蒸気圧縮式冷房装置の圧縮機に相当する。

検討のベースとした Gd などの 2 次相転移材料を用いた場合には、圧縮機を磁気ヒートポンプに置き換えることにより重量増となってしまう。MnFe 系、LaFeSi などの能力の高い 1 次相転移材料の採用より軽量化が期待できる。

4. まとめ

鉄道車両空調に磁気ヒートポンプを適用した場合の概念設計を行うため、試作評価した kW 級磁気ヒートポンプの課題であった、熱損失の定量評価および低減、生成温度差の拡大、熱サイクル高速化による冷凍能力の向上について検討した。磁気ヒートポンプに 2 次相転移材料を用いた場合には従来装置よりも重量増となるが、1 次相転移材料を採用すれば装置質量が 290 kg 程度となり、蒸気圧縮式冷房装置より軽量化が期待できることがわかった。

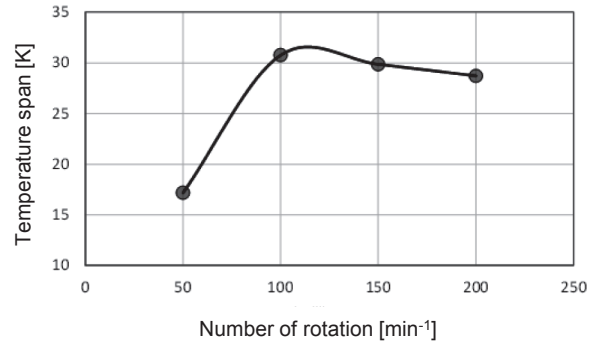


Fig. 1 Temperature span as a function of the number of rotation.

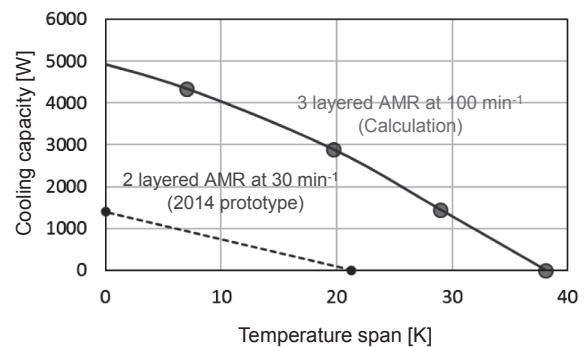


Fig. 2 Improvement of the cooling capacity with the high-speed cycle.

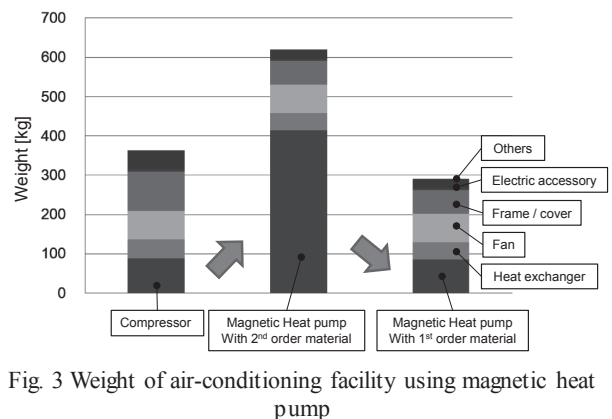


Fig. 3 Weight of air-conditioning facility using magnetic heat pump

参考文献

- [1] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p. 193.
- [2] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p. 238.
- [3] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p. 51.
- [4] S. Shimada, et al.: Railway Cybernetics Symposium, Vol. 39, No. 1 (2002) pp. 523, 1-4.

液体水素強制対流冷却下における円筒発熱体の膜沸騰領域熱伝達係数の計測

Heat transfer coefficient of liquid hydrogen under film boiling for a pipe

松本 太斗, 白井 康之, 塩津 正博, 藤田 勝千, 石見 佳紀(京大); 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文, 野中 聡(JAXA)
 MATSUMOTO Taito, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro, FUJITA Katsuyuki, IWAMI Yoshiki (Kyoto-Univ);
 KOBAYASHI Hiroaki, NARUO Yoshihiro, INATANI Yoshifumi, NONAKA Satoshi (JAXA)
 E-mail: t-matsumoto@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々の研究チームは、液体水素冷却超電導機器の設計において重要となる液体水素の熱伝達の測定を行っている。本研究では、内径 6 mm の SUS316L 製円筒発熱体を FRP 中に垂直設置し、液体水素強制対流下において、熱伝達特性の測定を行った。円筒発熱体については、既に核沸騰領域や、核沸騰限界における熱伝達特性の測定や表示式の提示などを行っている[1]。本発表では、膜沸騰領域における熱伝達特性の測定を行ったので、実験結果について発表する。

2. 供試体

Fig.1のような内径(d) 6 mm, 外径 6.5 mm, 加熱長さ(L) 200 mm の SUS316L 製パイプを FRP に支持した供試体を用いた。この供試体を垂直に支持し、上向きに液体水素を一定流速で流した状態で発熱部に指数関数状の発熱率を与える直流電流で加熱した。圧力は 400 kPa, 700 kPa, 1100 kPa (abs), 液温は 21 K に設定し、流速を最大 4.3 m/s まで種々変え、液体水素の強制流動下における膜沸騰領域での熱伝達率を測定した。

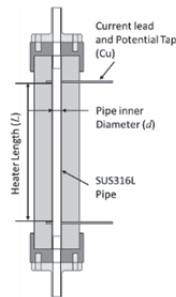


Fig.1 Test body

3. 実験結果, 考察

発熱率が指数関数状 $Q = Q_0 \exp(t/\tau)$ ($\tau = 10$ s) となるような直流電流で加熱を行い、発熱体が 220 K 付近まで上昇させたのち、 $\tau = -10$ s で発熱率を減少させ、極小熱流束まで膜沸騰熱伝達特性を測定した。詳細な実験方法は既に報告してある [2]。

Fig.2 に、圧力 400 kPa, サブクール度 5 K における膜沸騰熱伝達係数 h と過熱度 ΔT_{sat} の関係について、流速をパラメータとして示す。同様に Fig.3 に、圧力 700 kPa, サブクール度 8 K の、Fig.4 に、圧力 1100 kPa, サブクール度 11 K の上記の関係を示す。

ここで、これらの検討を行うために、Fig.5 に圧力をパラメータとした $\Delta T_{sat} = 150$ K における熱伝達係数と流速の関係を示す。図より、液体水素の液温が等しいとき、700 kPa, 1100 kPa における熱伝達率は、400 kPa よりも大きい。また、熱伝達率の流速に対する増加量に関しても、400 kPa に比べ、700 kPa, 1100 kPa のほうが大きい。一方、700 kPa と 1100 kPa における熱伝達率の大きさや流速依存性はあまり変わらない。

今後、発熱体形状、圧力やサブクール度、流速の異なる、より広い範囲での測定を行い、より詳細な考察を行うとともに、膜沸騰領域における熱伝達特性を示す表示式を導出することを目指している。

参考文献

- [1]. Y. Shirai, et al. : Adv Cry Egn ; 2012
- [2]. M. Shiotsu, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.192

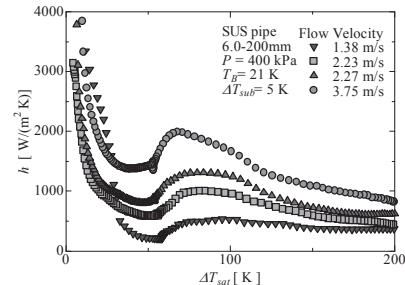


Fig.2 Film boiling heat transfer at $P = 400$ kPa and subcooling of 5 K with flow velocity as a parameter

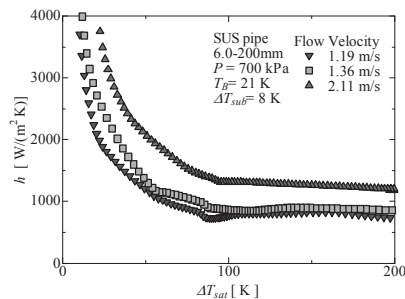


Fig.3 Film boiling heat transfer at $P = 700$ kPa and subcooling of 8 K with flow velocity as a parameter

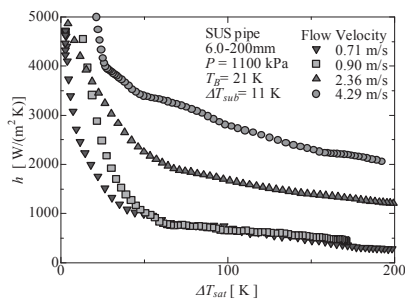


Fig.4 Film boiling heat transfer at $P = 1100$ kPa and subcooling of 11 K with flow velocity as a parameter

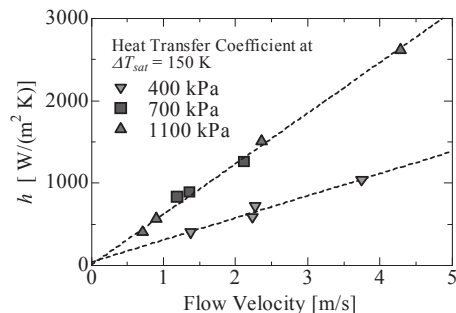


Fig.5 Film boiling heat transfer coefficient at $\Delta T_{sat} = 150$ K for various pressures

謝辞

本研究の一部は、JST 先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA) の助成を受け実施したものである。

加圧液体窒素の急減圧時における沸騰挙動に関する研究

Study on boiling behavior of pressurized liquid nitrogen under rapid depressurization

白井 智之, 宋 思遥, 前川 一真, 武田 実(神戸大)

USUI Tomoyuki, SO Siyo, MAEKAWA Kazuma, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.)

E-mail: 178w502w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

近年、原子力発電や化石燃料の枯渇、環境問題などエネルギーに関する課題が多い。そのため、これらの課題を解決し得る水素エネルギーが注目されている。そこで、水素エネルギー利用の発展を目指し大型船による液体水素(沸点 20.3 K)の海上輸送が計画されている[1]。その際、船舶の揺動により液体水素が蒸発しタンク内圧が上昇することにより破裂の危険性が考えられる。そのため、圧力を逃がすための安全弁や破裂板等が設置されるが、これらが作動した際の急減圧時における沸騰挙動は明らかになっていない。また、液体水素運搬船から陸上タンクへ荷揚げする場合、船側のタンクの圧力を一旦減圧するが、この時の減圧速度や減圧時間の最適値についても良くわかっていない。

本研究では、液体水素の貯蔵・輸送用容器及び安全弁の設計値や最適な減圧速度などを把握するための予備的研究[2]として、加圧液体窒素(沸点 77.4 K)を用いて沸騰挙動を解明することを目的とする。今回は急減圧時における過熱状態に伴って、急激な沸騰が開始するまでの時間(沸騰開始時間)に着目して解析したので報告する。

2. 実験装置

実験装置の写真を Fig.1 に示す。実験装置は光学クライオスタット、圧力計、流量計、データロガー、高速度カメラ等から構成され、蒸発ガスラインには流量調整用のニードル弁及び減圧用の開閉弁として電磁弁を取り付けている。

光学クライオスタットは、断熱真空槽、液体窒素槽(10.0 L)、液体水素槽(13.6 L)、サンプル槽(3.8 L)、光学観測窓等から構成されており、主な素材は SUS304 である。クライオスタット下部に光学観測窓が取り付けられており、内部の様子を観察することができる。

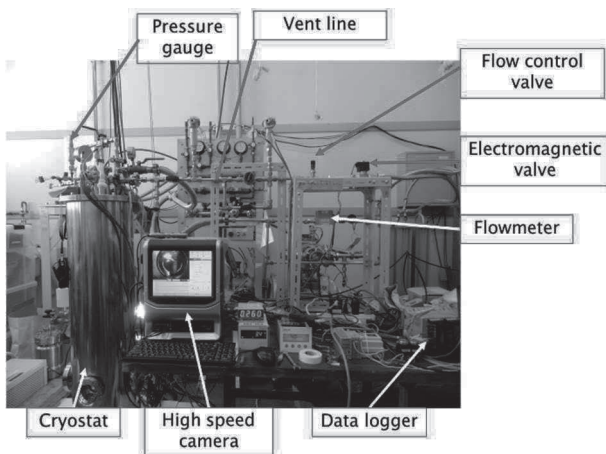


Fig.1 Photograph of experimental apparatus.

3. 実験方法

サンプル槽に液体窒素を一定量充填し、電磁弁を閉めてサンプル槽を密封する。外部加熱により液体窒素を蒸発させ設定圧力まで上げる。電磁弁を開とし、サンプル槽の密閉を

解くと同時に高速度カメラの撮影を開始する。以上の方法により減圧試験を行った。

極低温液体の急減圧時における沸騰挙動は、初期の液体状態、設定圧力、流出速度に大きく依存すると考えられていることから、次のように実験条件を設定した。(1)液体状態は飽和状態(温度均一)と成層状態(温度分布が存在)の2種類、(2)設定圧力は 0.4 MPaG, 0.2 MPaG の2種類、(3)流出速度はニードル弁の開度を変えることで流量計数 C_v を 0.16, 0.10, 0.02 とする3種類(高速、中速、低速)とした。

4. 実験結果と考察

Table 1 に急減圧試験で得られた沸騰開始時間を示す。例えば、run1, run2, run3 を見ると実験条件は流出速度のみが変化している。したがって、沸騰開始時間を比較すると流出速度が遅い方が、より沸騰開始時間が長くなる事が分かる。このように、3つの条件のうち2つが同じもの同士を比較することで沸騰開始時間への影響を考察した。その結果、流出速度、設定圧力が低いものほど、また成層状態の方が、沸騰開始時間が長いことが分かった。更に、沸騰を遅らせる要因が2つ以上重なると run5, run9 のように他のものに比べて大幅に沸騰開始時間が長くなることが分かった。

Table1 Experimental conditions and inception time of boiling.

	Liquid conditions	Set pressure [MPaG]	Depressurization speed	Inception time of boiling [sec]
run1	Saturation	0.4	High	0.9
run2	Saturation	0.4	Mediam	1.2
run3	Saturation	0.4	Low	3.5
run4	Saturation	0.2	High	1.4
run5	Saturation	0.2	Low	118.5
run6	Stratification	0.4	High	2.2
run7	Stratification	0.4	Low	10.4
run8	Stratification	0.2	High	6.5
run9	Stratification	0.2	Low	278

5. まとめ

様々な実験条件の中で行われた減圧試験において、沸騰開始時間に着目して解析を行った。沸騰開始時間は減圧前の液体状態、設定圧力、流出速度に大きく依存していることが分かった。今後の課題として、数値解析を行って沸騰挙動の解析を進めること、液体ヘリウムや液体水素といった他の極低温液体の沸騰挙動についても同様の実験を行い明らかにすることが挙げられる。

参考文献

1. S. Kamiya *et al.*: Physics Procedia, Vol. 67 (2015) PP. 11-19
2. J. Tanaka *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) P. 56

He II ノイジー膜沸騰で誘起される変動流れ場の PIV 解析

PIV analysis of the oscillating flow field in He II induced by noisy film boiling

村上 正秀 (筑波大); 高田 卓 (核融合研)
 MURAKAMI Masahide (U. Tsukuba); TAKADA Suguru (NIFS)
 E-mail: murakami@kz.tsukuba.ac.jp

1. まえがき

これまでの He II ノイジー膜沸騰研究では、気泡の大きさや形態、その発生周波数等が調べられ、また熱伝達率が求められて来た[1,2]。今回は更に詳しく実相を明らかにすべく、ヒーター・気泡周りの He II の流動に着目して PIV 解析を行った[3]。

2. 実験

沸騰は 10×39 mm の水平平板ヒーター (SUS 薄板) で発生させた (Fig. 1)。ノイジー膜沸騰では、1~2 cm サイズの気泡が乱立して約 40 Hz の周波数で大規模に成長・消滅を繰り返し、大きな音響ノイズを発生させる。PIV の素情報は、気泡と周囲に散在させたトレーサ粒子 (水素・重水素混合固体粒子) の動きを写した高速ビデオ画像である。レーザー光シートをヒーター面に垂直に照射して撮影を行った。PIV 解析では粒子や気泡の動きを追跡し、画像解析技術によりその速度を求める。

3. 実験結果

気泡発達域外の直ぐ上方位置で測った速度変動の一例を Fig. 2 に示した。急峻な起ち上がりは気泡の急激な成長に、それよりも緩やかな下降は気泡の収縮期にそれぞれ対応する。周波数は約 40 Hz 程度である。この様な流速変動に対する時間平均を Fig. 3-a) に示した。測定点は、ヒーター直上 (直上; $\theta = 0^\circ$) とそれから反時計回りに凡そ ($\theta =$) 45° の直線上 (斜め方向) である。ヒーター中心を $r=0$ とした。両計測点でデータは数値的にも定性的にも大きく異なっている。直上の計測値は、 $r \rightarrow 0$ で熱対向流の値 ($U_{n,theo}$) に漸近することが窺える。 r が 0 から離れたところの大きな正值は、浮力を受けた気泡の上方成長に誘起された背景的ブルームが形成されていることを表す。斜め方向データでは、 $r \rightarrow$ 大 で弱い負値となるが、これは上昇ブルームへのエントレインメントによる。また $r \rightarrow 0$ でやはり $U_{n,theo}$ へ漸近する傾向が見える。なお、 $r < 20$ mm のデータは、気泡成長期には測定点が気泡中にあるため求めるのが難しく、求まっても正確さを欠く。速度の時間変動成分の RMS 値 (時間平均値からの偏差の 2 乗平均) の空間変化を r に対して両対数プロットしたものを Fig. 3-b) に示した。実験条件は Fig. 3-a) と同じである。直上と斜め方向のデータはほぼ重なり、かつ直線状に変化することが分かる。さらに速度変動の RMS 値は r^2 に比例することも分かる。これらの結果は、流速変動が球対称的に広がって行くことを意味する。更にその伝播速度や気泡の成長速度の見積もりとの比較から、この変動が圧力波 (第 1 音波) 的に伝播することも示唆された。

4. まとめ

ヒーター+気泡周りの He II の流れは、背景としての熱対向流 (DC 流)、気泡上昇に誘起されたヒーター直上方の上昇ブルームとそれへのエントレインメント (AC 流)、そして気泡の成長に誘起される交番速度の第 1 音波的伝播、で構成される。

参考文献

1. S. Takada, M. Murakami, *et al.*: Cryogenics, 49-10 (2009), pp. 576.
2. M. Nozawa, *et al.*: Cryogenics, 49-10 (2009), pp. 583.
3. M. Murakami, *et al.*: Adv. Cryo. Engineering, 61A (2016) pp. 596.

本研究に対し科研費基盤(B) 25289300 の助成を受けた。

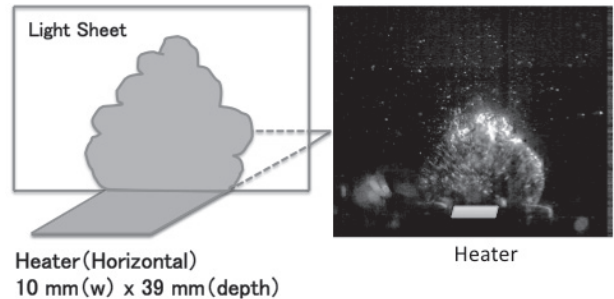


Fig. 1 Planar heater and visualization for PIV application.

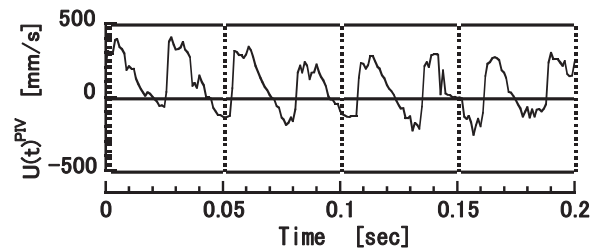


Fig. 2 Transient record of radial velocity. $T=2.1$ K, 4.44×10^4 W/m².

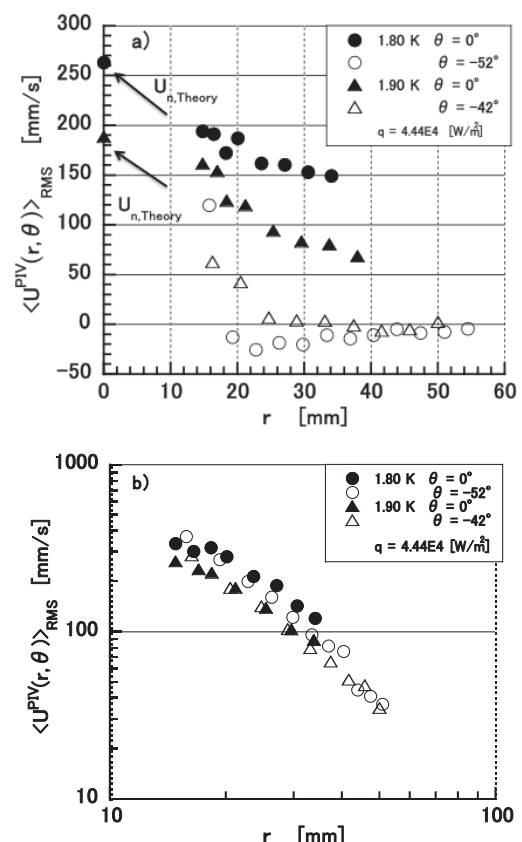


Fig. 3 Variation of radial velocity with r . $\theta=0^\circ$ and -52° for $T=1.8$ K, $\theta=0^\circ$ and -42° for 1.9 K, 4.44×10^4 W/m². a) Variation of time-averaged radial velocity, b) Logarithmic plot of RMS of fluctuating velocity.

横振動下における極低温液体の蒸発特性 -新型温度計の作製-

Evaporation characteristics of cryogen under horizontal vibration

-Making new type of thermometer-

宋 思遥, 白井 智之, 前川 一真, 武田 実(神戸大学)

SO Shiyo, USUI Tomoyuki, MAEKAWA Kazuma, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.)

1. はじめに

東日本大震災以降、日本の電源は火力発電を軸にしておりCO₂排出量は震災前よりも確実に増加していると考えられる。この状況を打開するために日本は水素戦略ロードマップを掲げており、長期的な展望として再生可能エネルギーによって発電した大量の電気エネルギーを貯蔵・輸送が有利な水素に変換する方法が注目されている。将来的には諸外国との輸出・輸入時の船舶海上輸送や国内でのトラック・鉄道輸送が期待されている。しかし、現時点では輸送時に発生する振動が液体水素の蒸発に与える影響がよくわかっていない。

本研究では、実験が難しい液体水素の代わりに液体窒素と液体ヘリウムを対象とし、横方向の加振により液体を振動させた場合の蒸発に伴う容器内部における温度・圧力等の変化を測定している。今回は、液体窒素に対する横振動試験結果と今後液体ヘリウム振動実験に使用する新型温度計の較正試験結果を発表する。

2. 窒化クロム測温抵抗体

液体ヘリウムの振動実験に必要な温度計を複数個作製した。温度計に使用した測温抵抗体は、窒化クロム測温抵抗体(CrN)である。この抵抗体は極低温領域での感度が高く、測温領域が広い(1~300 K)という特徴を持つ。また、100 K以下において反強磁性を示し、磁場の影響を受けにくくなる。寸法は0.8×2.0×0.5 mm(縦×横×厚さ)であり、シリコン基板上に窒化クロムの薄膜を設け、その上に電極を重ねている構造である。Fig.1に測温抵抗体の写真を示す。

3. 温度計較正実験装置

温度較正に用いた実験装置は「試料ホルダーユニット」、「試料ホルダー懸架ユニット」、「信号線導入口ユニット」が一体となった、全長約140 cmの温度較正試験用プローブと、それを収める「真空ジャケットユニット」で構成されている。

試料ホルダーには較正済みのセルノックス温度計が1つと、未較正の温度計を2つ取り付けることができる。懸架ユニットには外部からの熱伝導を防ぐために、8つのサーマルアンカーを設置している。信号線導入口には15ピンのコネクタプラグがあり、外部の計測機器とケーブルでつなぐことができる。真空ジャケットにはプローブ挿入口とは別に圧力計がついている真空排気口がある。

4. 実験方法

始めに、真空ジャケットに温度較正試験用プローブを挿入し、真空排気をした後にヘリウムガス置換を行った。ヘリウムガスは大気圧まで入れずに-0.05 MPaGまで入れた。その後、真空ジャケットを液体ヘリウムデューワーに挿入して徐々に温度を下げて、4.2 Kまでのデータを取った。次は徐々に抜いて行き、温度を上げながらデータを取った。

温度データは四端子法に基づいて、プログラミングソフトLabVIEWを用いて記録した。

5. 実験結果

今回の実験では、まずCrN温度計を2つ較正した。その結果をFig.2, Fig.3に示す。今回使用した較正済みセルノックス温度計は、1.4~120 Kまで較正されているものである。これら

の図より、共に極低温領域において傾きが急になっており、感度が高いことが分かる。液体窒素温度以上の領域では緩やかな傾きとなっていた。

5. まとめ

CrN温度計の較正曲線の作成に成功したが、近似曲線を一括で表示できなかったため、区間に分けて近似曲線を示すことで実際に利用できるようにしたい。また、この新型温度計を用いて液体ヘリウムの振動実験を行う予定である。

謝辞

温度計試料をご提供いただいた、大阪産業技術研究所の四谷勉博士にお礼を申し上げます。

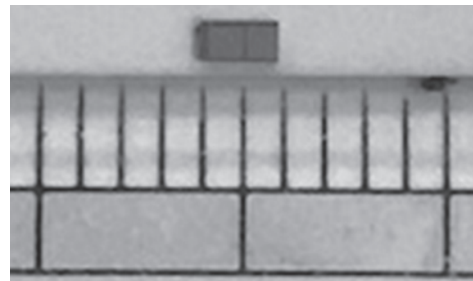


Fig.1 Photo of CrN temperature sensor.

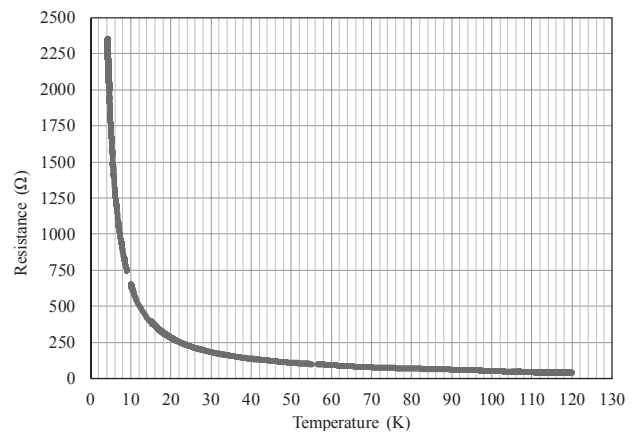


Fig.2 Calibration curve of CrN No.1.

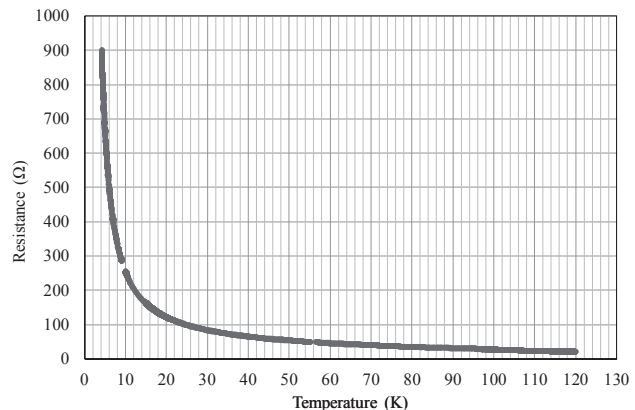


Fig.3 Calibration curve of CrN No.2.

超伝導 MgB₂ 液面センサーを用いた海上輸送時における液体水素タンク内部のスロッシング計測

Sloshing measurements inside liquid hydrogen tank using superconducting MgB₂ level sensors during marine transportation

前川 一真, 鈴木 康平, 三宅 勇希, 武田 実 (神戸大); 熊倉 浩明 (NIMS)

MAEKAWA Kazuma, SUZUKI Kohei, MIYAKE Yuuki, TAKEDA Minoru (Kobe University); KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: maekawa@maritime.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では、液体水素海上輸送のための基盤技術の提供を目指し、これまでに大型液体水素タンク用外部加熱型 MgB₂ 液面センサーの開発を行ってきた[1]。本研究では、神戸大学海事科学研究科附属練習船深江丸後部甲板に液体水素実験システムを構築し、光学観測窓付きクライオスタット (小型液体水素タンク: 容積約 20 L) と 400 L 液体水素タンクを積載した状態で、神戸大学深江キャンパスから関西空港沖まで往復の航海を行い、航海中における小型液体水素タンク内部の液面・温度・圧力、その時の船体揺動 (ロール角とピッチ角)、加速度、船速等のデータを計測した。

2. 実験方法

本実験では、小型液体水素タンク内部に5本の全長 500 mm 外部加熱型 MgB₂ 液面センサーを設置した。また、小型液体水素タンク内部の温度計測のために、中央の液面センサーを取り付けているプローブの 250 mm の位置と 125 mm の位置に CCS (カーボンセラミックセンサー) 温度計を設置した。本研究では、神戸大学深江キャンパス出港後、関西空港沖に至るまでの間、5本の液面センサーによる液面を計測するとともに、小型液体水素タンク内部の温度・圧力、船体動揺、加速度、船速等を同時に計測した。実験では、小型液体水素タンクの放出弁を閉じてから、タンク内圧が約 0.2 MPaG になるまで計測を行い、約 0.2 MPaG に達すると急減圧試験を行うことを繰り返した。なお、液面、温度、圧力に関してはデータロガーで収集し、船体動揺、加速度、船速等は深江丸の船内計測システムによって収集した。なお、データロガーと深江丸の計測システムは船内 LAN を通じて、同期している。

3. 実験結果

航海中における液面、温度の時間変化を Fig.1 に示す。また、その時の温度と圧力、船体揺動と加速度のデータを Fig. 2、Fig.3 に示す。Fig.1 を見ると、14 時 28 分から急激に液面が上昇するとともに、温度計 A の温度が下がっていることがわかる。これは、Fig.2 の同時刻の圧力のデータを見ると分かるように、急減圧を行ったためである。14 時 30 分から圧力が再び上昇しているが、これは放出弁を開けたためである。次に、Fig.3 をみると、14 時 35 分からロール角、Y 軸方向の加速度が大きく変化していることがわかる。これは、14 時 35 分から、船体を大きく揺らすための Z 試験をおこなったからである。同時刻における液面変化をみると、タンク内部の液面が揺動していることがわかる。それに伴い、圧力の上昇が大きくなったことも確認できた。圧力上昇率は Z 試験のロール角が最大 6 度程度の揺れの場合、約 0.68 MPaG/h であったのに対し、揺れが少ない場合 (ロール角がほぼ 0)、約 0.45 MPaG/h であった。これは、船体動揺に伴い、タンク内部でスロッシングが発生し、タンク内壁との熱交換等により、蒸発ガスが増加したためであると考えられる。

4. まとめ

今回、航海中における液体水素タンク内部の液面、温度、圧力、船体動揺、加速度等の同時計測を行った。船体が動

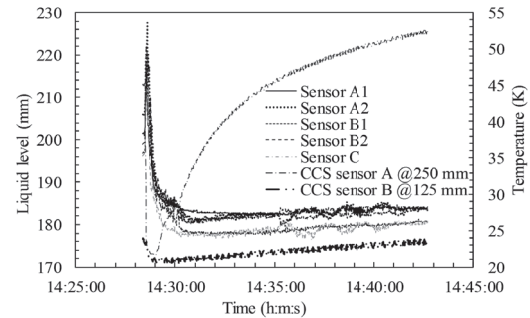


Fig.1 Time chart of liquid level and temperature inside the cryostat during marine transportation from 14:28pm to 14:42pm.

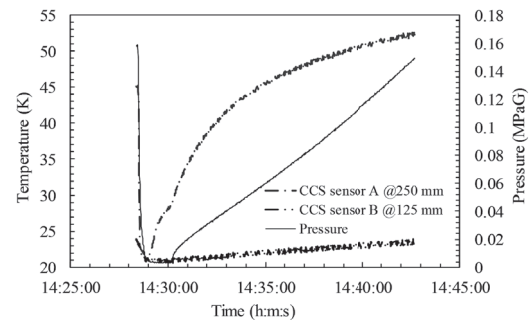


Fig.2 Time chart of temperature and pressure inside the cryostat during marine transportation from 14:28pm to 14:42pm.

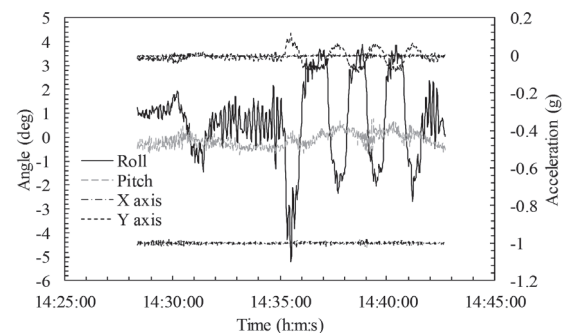


Fig.3 Time chart of angle and acceleration during marine transportation from 14:28pm to 14:42pm.

揺した場合、タンク内部でスロッシングが発生し、それに伴い、タンク内の圧力上昇率が大きくなることも確認できた。

謝辞

本研究の一部に対して、公益財団法人関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団研究助成金の援助を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

1. K. Maekawa, *et al.*: IEEE Transactions on Applied Superconductivity. **27**, (2017) 9000304.

深江丸航海中における MgB₂液面センサー5 本を用いた 液体水素容器内部の3D 液面表示

3D liquid level imaging inside liquid hydrogen vessel using five MgB₂ level sensors on board of training ship “Fukae-Maru”

鈴木 康平, 前川 一真, 三宅 勇希, 武田 実(神戸大学); 熊倉 浩明(NIMS)
SUZUKI Kohei, MAEKAWA Kazuma, MIYAKE Yuki, TAKEDA Minoru (Kobe University); KUMAKURA Hiroaki (NIMS)
E-mail: 167w514w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

水素エネルギーとしての活用が注目される中、本研究では、液体水素(LH₂)海上輸送の基盤研究として、大型液体水素タンク用外部加熱型 MgB₂ 液面センサーの開発を行ってきた。そして今回、神戸大学海事科学研究科附属の練習船深江丸を用いた液体水素海上輸送実験に成功した^[1]。

本研究では、深江丸にクライオスタット(LH₂槽容積:20 L)を積載した状態で航海実験を行い、MgB₂液面センサー5本を用いてクライオスタット内部の液体水素の挙動を調べた。その時に収集したデータを利用した3次元液面表示を試みたので、報告する。

2. 外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサー

外部加熱型超伝導 MgB₂液面センサーの原理を記す。液体水素中では、MgB₂線材は臨界温度以下になるため、電気抵抗がゼロになる。一方、液体水素に触れていない上部は常伝導状態になり、電流を流すと任意の抵抗値を示す。この電気抵抗値の差を利用して、液面の位置測定が可能となる。さらにこの液面センサーでは、蒸発ガスによる液面上部の温度低下を防ぐために、MgB₂線材の周りにヒーター線を巻いている。なお、本研究で用いた5本のMgB₂線材の臨界温度は32 K、長さは500 mm、直径は0.32 mmである。

3. 実験装置と実験方法

Fig 1 に実験装置の写真を示す。実験を行うにあたり、5本の液面センサーを挿入したクライオスタットと400L LH₂タンクを深江丸へ積載した。実験装置はこれらの他に、トランスフェータチューブ、温度計、圧力計、液面計などで構成されている。

始めに、クライオスタットの液体窒素(LN₂)槽にLN₂を充填後、LH₂槽(体積20 L)に400L LH₂タンクからLH₂を移送した。その後、本年2月2日(木)深江丸で大阪港へ出航した。5本の液面センサーに測定電流を10 mA 流し、ヒーター入力値が9 W の時に蓄圧、減圧を繰り返しながら、航海中の液面位置、加速度、圧力、そして2点の温度を測定した。

4. 実験結果と考察

航海中における、ある時間(1800 秒間)の5本の液面センサー(A1、A2、B1、B2、C)が示した液面位置をFig 2 に示す。このグラフでは測定開始と同時に蓄圧し、一定時間航海した後、クライオスタット内部を急減圧し、計測を終了している。センサーが示す液面位置を見ると、A2 が500秒あたりまで他のセンサーよりも高い位置を示している。また、その差は約5 mmと最も大きいことがわかる。

今回、オープンソースプログラムであるParaViewを用いて、3次元液面表示を試みた。航海中における、Fig 2 での100 sの5本の液面センサーの3次元液面表示をFig 3 に示す。クライオスタット内部に十字を形取るよう設置しているセンサーを簡略化し、図のように5本のセンサーをxy平面に規定した。また、液面の高さをz軸に取り、Fig 2 の値を示した。Fig 2 と同様、A2 が他のセンサーよりも高い位置を示していることがわかると同時に、容器内部の液面位置が、視覚的に理解しやすくなっている。

なっている。

この3次元液面表示を用いて、液面位置をアニメーション化することにより、液面位置の顕著な変化や容器内部の動きを解析している。これらの結果と、加速度・圧力・温度のデータとを比較する予定である。

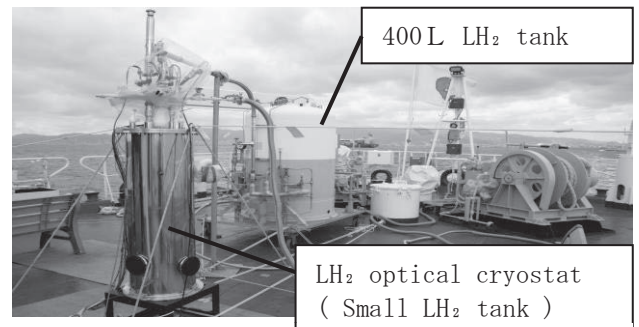


Fig 1. Photograph of experimental setup.

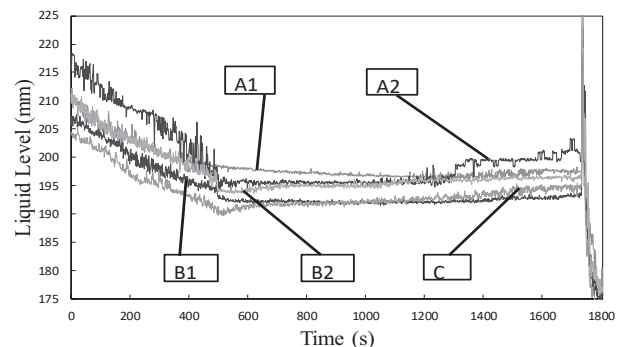


Fig 2. Time chart of liquid level detected by MgB₂ sensors.

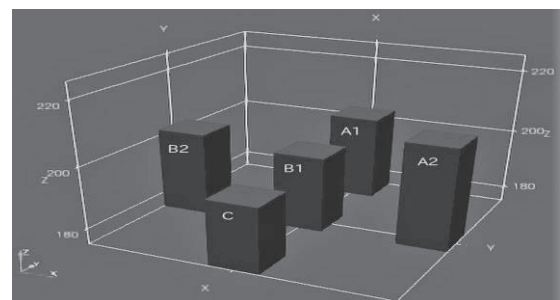


Fig 3. 3D liquid level imaging inside liquid hydrogen vessel.

謝辞

深江丸による液体水素海上輸送実験にご協力いただいた、矢野吉治船長、若林伸和教授および深江丸乗組員の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] K. Maekawa, *et al.* : Abstracts of CSSJ Conference, Vol.94 (2017) P.46

液体水素中での圧力センサー試験

Pressure transducer test in liquid hydrogen

塩津 正博, 白井 康之, 藤田 勝千, 松本 大斗(京大);
小林 弘明, 野中 聡, 成尾 芳博, 稲谷 芳文(JAXA)

SHIOTSU Masahiro, SHIRAI Yasuyuki, FUJITA Katsuyuki, MATSUMOTO Taito (Kyoto Univ.);
KOBAYASHI Hiroaki, NONAKA Satoshi, NARUO Yoshihiro, INATANI Yoshifumi (JAXA)
E-mail: shiotsu@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. 序論

液体水素を用いた機器では、タンク内の圧力分布や配管の圧力変動を直接測定する圧力センサーが必要である。筆者の知る限り液体水素中での動作を保証する圧力センサーは市販されていない。ここでは、液体窒素温度まで使用可能な2社の極低温用センサーについて液体水素中で使用可能か試験を行った結果について報告する。

2. 圧力センサー

試験には KYOWA 製極低温用小型圧力変換器 PHLA-B2MP-B と KULITE 製極低温用圧力センサー CCQ-093-17BAR を用いた。両者の概略仕様を以下に示す。

1) KULITE CCQ-093-17BAR

定格容量 1.7 MPa Absolute
定格出力 100 mV (10V DC 電源駆動)
温度補償範囲 -195.5~38 °C
ゼロ点ドリフト: ±5 mV (代表値)

2) KYOWA PHLA-B2MP-B

定格容量: 2 MPa Absolute
定格出力: 10.31 mV (5VDC 電源駆動)
温度補償範囲: -196~210 °C

3. 試験方法

これらの圧力センサーを秋田県能代市の JAXA ロケット実験場に設置した京大の液体水素実験装置内に取り付け、液体水素に浸漬した状態で大気圧から 1.1 MPa までの種々の圧力下でセンサー出力電圧を測定した。センサー出力信号は直流増幅器で 100 倍し 30 Hz のローパスフィルターを入れて測定し、1/100 倍してセンサー出力電圧を求めた。

4. 試験結果

Kulite 圧力センサーの試験結果を Table 1 と Fig.1 に示す。試験は、20.3 K~25.1 K の液温で圧力を 88 kPa から 1140kPa まで変えたグループ、液温を 26.1 K~27.2 K まで、圧力を 404kPa~1114kPa まで変えたグループ、液温 29 K で圧力を 694 kPa~1106kPa まで変えたグループに分けて整理した。Table 1 に示すように感度は殆ど一定であった。ゼロ点ドリフトは Fig. 1 に示すように +2.6 mV であった。定格出力に対して 2.6 % 程度である。メーカーの温度補償範囲での検査結果と比べると感度が 0.001mV/kPa 高いが、ゼロ点ドリフトは規格内である。

KYOWA のセンサーの試験結果を Fig. 2 に示す。図示するように、液体水素に浸漬すると定格出力 10.3 mV の約 2 割に当たる -2.5 mV までゼロ点がドリフトしてしまう。ドリフトを補正すると図示するようにメーカーの較正曲線 $y=5.154e-3*x$ と殆ど重なった。ドリフトは大きいですが感度は変わらないことが分かった。なお、実験終了後、目視検査の結果、規格よりはるかに低い温度の液中で使用したことによる機械的損傷は両者とも認められなかった。

5. まとめ

液体水素中では、両者とも感度は殆ど変化せずゼロ点がドリフトした。変動幅は、KULITE の場合定格電圧の 2.6 %、KYOWA は 24 % であった。ゼロ点のドリフトに注意すれば両者とも液体水素中で使用可能であるが、KYOWA の製品は感度が低くドリフト電圧の圧力換算が大きいので使いにくい印象を受けた。

Table 1.

Temp. K	Pressure kPa	Output mV	pressure差 kPa	Voltage差 mV	感度 mV/kPa
20.3	88	8.01			
21.9	422	28.3	334	20.29	6.08E-02
23.1	721	46.12	633	38.11	6.02E-02
25.1	1148	72.35	1060	64.34	6.07E-02
26.06	404	26.35			
26.35	705	44.12	301	17.77	5.90E-02
27.24	1114	69.19	710	42.84	6.03E-02
28.9	694	43.58			
29.2	914	56.76	220	13.18	5.99E-02
29.6	1106	68.79	412	25.21	6.12E-02

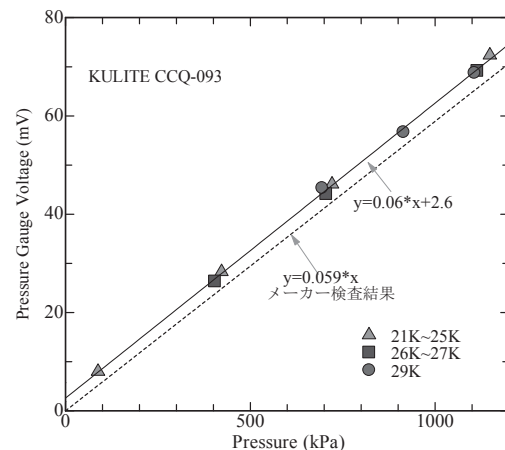


Fig.1 Characteristics of Kulite pressure sensor.

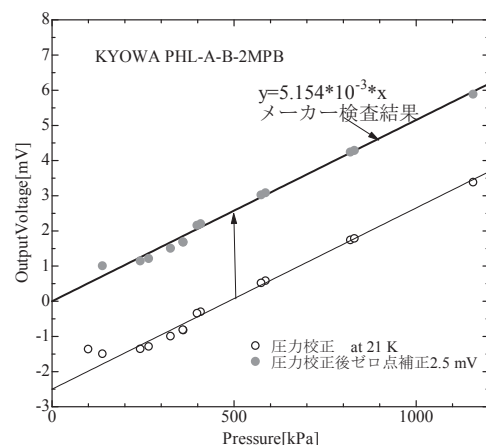


Fig. 2 Characteristics of Kyowa pressure sensor.

謝辞

本研究の一部は、JST 先端的低炭素化技術開発研究事業 (ALCA) の助成を受け実施したものである。