

Brass 母材を用いた内部拡散法 Nb₃Sn 線材の研究

Studies on Internal-tin processed Nb₃Sn wires fabricated by Brass method

伴野信哉 (物材機構); 宮本泰男 (東海大学); 太刀川恭治 (物材機構)
BANNO Nobuya (NIMS); MIYAMOTO Yasuo (Tokai University); TACHIKAWA Kyoji (NIMS)
E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

線材の機械的特性の改善を目標に、Cu の代わりに Cu-Zn (Brass)を母材とした内部拡散法 Nb₃Sn 線材の開発を進めている(便宜的に Brass 法と呼ぶ)。Cu-Sn-Zn 母材を用いたブロンズ法に比べ、Brass 法では母材中の Zn 固溶量を多く確保できると同時に、Sn 仕込み量を増大できるメリットがある。これまでの研究では、Brass 法 Nb₃Sn 線材において Zn は Nb₃Sn 層へ全く拡散せずそのまま母材に残留するのと同時に、Nb₃Sn 層への Sn の拡散を促進する効果が見られた。今回は伸線加工性の向上を目的に、Nb/Cu-15Zn と Sn/Cu 単芯線を多数本束ねた新しい構造の線材を作製し[1]、Sn の拡散、Nb₃Sn 層の生成、Zn の拡散挙動、残留ブロンズ組成等について研究した。

2. 実験方法

これまで初期ビレットは、Cu-Zn 母材、Nb 芯、Sn 芯を含んだ構造であったが、Cu-Zn の加工硬化による断線リスクが見られた。そこで Cu-Zn の加工硬化による断線リスクの軽減を目的に、Nb と Sn-Ti を別々に配置した初期単芯ビレットを準備し、それをスタック・加工して最終マルチ線材とする新しい設計を試みた。ここで、Nb 単芯材に対しては Cu-Zn 母材、Sn-Ti 単芯材に対しては Cu 母材を使用した。これにより、Cu-Zn の中間焼鈍が可能となり、伸線加工性が向上すると予期した。Fig. 1 に新しい設計の試作試料の断面写真を示す。伸線はスエージングとダイス引きで行った(試料名: 15Zn-0.6Ø~1.2Ø)。また Nb 芯材に対しては最終スタック前に 650°C の焼鈍を施した。参考試料として芯の配置が異なる Cu 母材線も準備した(Cu-0.6Ø~1.2Ø)。

作製した試料を 1 気圧の Ar ガス中で熱処理した。線材横断面を研磨したのち、EPMA 分析を行い、各元素の拡散の様子を研究した。

3. 結果と考察

Nb 単芯線における Nb 芯および Cu-15Zn 母材のビッカース硬さは、650°C の焼鈍によりそれぞれ 150 から 100 kgf/mm²、200 から 85 kgf/mm² に低減された。そのため、その後のマルチ線材の伸線加工は非常に良好であった。

Fig. 2(a) に 650°C × 100h の前段熱処理、(b) にはその後

700°C × 200h での熱処理を施した試料 15Zn-0.6Ø の Sn の EPMA マッピングを示す。本試料では中心部に Sn を重点的に配置したため、650°C では Sn の拡散が十分ではなく、中心部に共晶組織相が残った。650°C でも内側フィラメントには Nb₃Sn 層が見られる。700°C では、Sn は外側まで十分拡散し外側フィラメントにも Nb₃Sn 層が確認でき、内側フィラメントの Nb₃Sn 層は非常に厚い。Table 1 に各熱処理後の EDX 分析結果をまとめた。本試料は Cu-15Zn 母材と Cu 母材が混在した構造であるが、700°C の熱処理では内側と外側の母材の組成はほとんど変わらず Sn, Zn は一様に分布しており、Zn の拡散速度は十分速いことを示す。ブロンズ中の Sn 残留量は、0.6Ø 線の方が 1.0Ø 線よりも少なく、また、15Zn 母材線の方が Cu 母材線よりも少なかった。今後、線材の超電導特性についても研究する予定である。

[1] N. Banno et al., presented at EUCAS 2015.

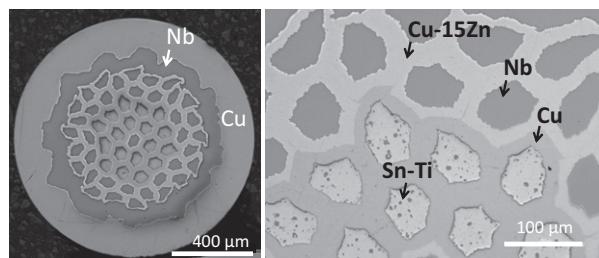


Fig. 1. Cross-section of 15Zn-1.2Ø Nb₃Sn precursor wire.

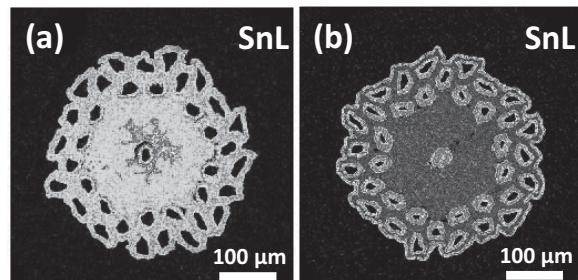


Fig. 2. Local EPMA (Sn) mappings on the cross-section of 15Zn-0.6Ø wires heat treated at (a) 650°C and (b) 700°C.

Table 1. EDX results for Cu-15Zn and Cu matrix wire.

Wire	T (°C)	Time (hr)	Matrix (wt%)						Nb ₃ Sn layer (wt%)		
			Eutectic region			Bronze region			Nb	Sn	Ti
			Cu	Sn	Zn	Cu	Sn	Zn			
15Zn-1.0Ø	550	100	71.34	22.95	5.72	80.98	3.36	15.66			
	650	100	69.56	25.76	4.68	81.17	7.41	11.42			
	700	200				83.44 (85.28)	4.75 (3.81)	11.82 (10.91)	73.28	25.52	1.20
15Zn-0.6Ø	650	100	69.44	26.51	4.05	81.09 (82.16)	7.96 (7.5)	10.95 (10.34)			
	700	200				85.37 (85.90)	3.02 (2.85)	11.62 (11.25)	74.47	24.37	1.17
Cu-1.0Ø	700	200				94.21	5.8		75.41	23.46	1.13
Cu-0.6Ø	700	200				95.55	4.45		74.79	21.12	1.09

新しい合金バリア Nb₃Al 線材の組織と臨界電流密度

Microstructure and Critical Current Density of New Alloy-Barriered Nb₃Al Wires

菊池 章弘 (NIMS); 土屋 清澄 (KEK); 飯嶋 安男 (NIMS)
KIKUCHI Akihiro (NIMS); TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); IIJIMA Yasuo (NIMS)
E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

急熱急冷・変態法 Nb₃Al 線材の母材には、高融点金属の純ニオブあるいは純タンタルが使用される。2,000°Cの高温熱処理に機械的に耐え得ることが必要だからである。また、母材は超伝導フィラメントを分割する役目を果たさなければならぬが、純ニオブの場合、4.2K、低磁場中ではフィラメント結合生ずる。4.2 K の低磁場では、フラックスジャンプが発生し、電磁気的に不安定となる[1-3]。一方、純タンタルの Tc は 4.45 K で、4.2 K ではフィラメント結合が抑制されて低磁場不安定性は改善される。しかし、2 K 以下に温度が低下すると、タンタルの超伝導性が強まって、ニオブ母材と同様な磁化異常が認められる[1-3]。超流動ヘリウムでの応用を想定するとタンタル母材は安定性を満足できない。さらにタンタルはニオブと同様に室温で延性に富むが、Nb₃Al の前駆体線材加工に対しては問題がある。冷間加工率が 99.9 % を超えたあたりから、タンタルを起点とした断線が多発する[4]。このように、急熱急冷・変態法 Nb₃Al 線材の母材には大きな問題が残されている。

2. 新しい前駆体構造(合金バリア)

2,000°Cの高温熱処理を行う限り、母材の一部または全部に高融点金属を使わざるを得ない。しかもその高融点金属は十分な冷間加工性にもつことが必要で、やはりニオブかタンタルが母材のベースとなる。それらの超伝導性を劣化させるには、アブリコソフーゴルコフ理論に基づいた不純物効果を利用することが考えられる。特に強磁性金属の固溶で超伝導特性は大幅に低下し、場合によっては消失する。従って、Nb₃Al の前駆体線材の母材として、ニオブ合金あるいはタンタル合金はフィラメント結合を改善する上で有望なアプローチである。しかし、ニオブ合金あるいはタンタル合金の冷間加工性は、純ニオブあるいは純タンタルよりも劣る可能性がある。従って、前駆体線材の原料には、純ニオブ箔あるいは純タンタル箔を使用し、それに加えてニッケル等の冷間加工性に優れた強磁性金属箔を適量使用する。この新しいアイデア[5]に基づいた

前駆体線材の断面構造の原理を Fig. 1 に示す。2,000°Cの急熱急冷処理で NbAl 過飽和固溶体フィラメントを合成するとともに、フィラメント間母材もニオブあるいはタンタルに強磁性金属が固溶した合金を生成させる。また、合金化により、Nb あるいは Ta は固溶強化されることとなり、即ち、磁気的不安定性の改善とともに線材の高強度化も図れることが期待できる。

3. キュプロニッケル箔を使用した線材試作

多芯化する前のジェリーロールシングル六角線の外周部に純ニオブ箔とともにキュプロニッケル(Cu-30wt.%Ni)箔を巻き込んだ(図2)。キュプロニッケルは冷間加工性に優れた銅合金として知られている。これを78本束ね、静水圧押出加工を行って多芯線材を試作した。目的の外径(Φ0.9)まで無断線で冷間引抜き加工でき、従来の純ニオブ母材と同等の優れた冷間加工性があることを確認した。この新しい合金バリア構造の前駆体線材に最高到達温度が異なる種々の条件の急熱急冷処理を施した。急熱急冷処理後の線材は、十分な安定化銅を強固に複合するために、連続イオンプレーティング並びに高速電解メッキを行った。銅メッキ前後の線材は種々の減面率の伸線加工を行った。また急熱急冷処理後の線材は、過飽和固溶体から A15 への相変態のために 800°C で 10 時間の熱処理を真空中で行った。試料の評価として、SQUID 磁力計による磁化率の測定、NIMS 強磁场ステーションの 18T 超伝導マグネット及び 30T ハイブリッドマグネットを用いた外部磁场中の臨界電流(4.2 K)の測定、光学顕微鏡御及び電界放出型 EPMA による組織観察と元素分析を実施した。本講演では、試作線材の評価結果について報告する。

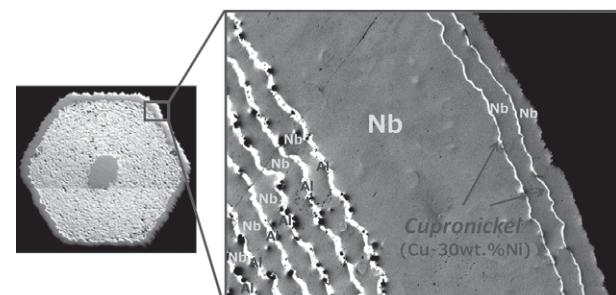


Fig. 2 Jelly Rolled single element with pure niobium and cupronickel lamination barrier.

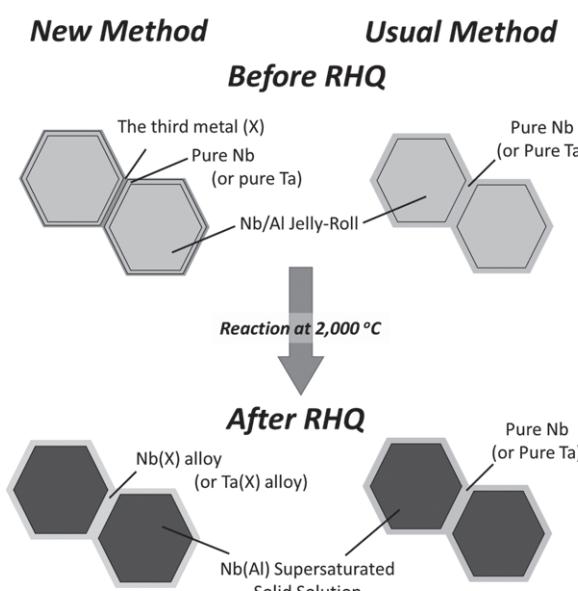


Fig. 1 New interfilament matrix for Nb/Al precursors.

参考文献

1. A. Kikuchi, et al.: "Characteristics of Round and Extracted Strands of Nb₃Al Rutherford Cable", IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 2697–2701.
2. A. Kikuchi, et al.: "Cu Stabilized Nb₃Al Strands for the High Field Accelerator Magnet", IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (2008) 1026–1030.
3. K. Tsuchiya, et al.: "Development of Nb₃Al Rutherford Cable for High-Field Accelerator Magnet Applications", IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 6000504.
4. 菊池章弘:「急熱急冷・変態法 Nb₃Al 線材の開発」, 低温工学 **47** (2012) 503–511.
5. 菊池章弘等:「Nb₃Al 超伝導線材用前駆体線材及び Nb₃Al 超伝導線材」, 特願 2015-107372 (2015 年 5 月 27 日)

パルス抵抗加熱及び不活性ガス噴射冷却の研究 -Nb₃Al 線材の新製法に向けて-

Investigation of Pulsed Ohmic Resistive Heating and Inert Gas Jet Cooling
-Toward A New Process for Nb₃Al Wires-

菊池 章弘, 飯島 安男 (NIMS)

KIKUCHI Akihiro, IIJIMA Yasuo (NIMS)

E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

長年、我々が研究開発を進めている急熱急冷法 Nb₃Al 線材では、0.3~1m/秒で移動するNb/Al前駆体線材に対して、直流通電により約 2,000°Cまで抵抗加熱し、引き続き Ga 浴を通過させて急冷する。Ga 浴の浴面は、線材移動の動きにより小刻みに変動して一定を保つことが難しい。さらに、熱を受け取った Ga 浴は熱膨張により液面が上昇する。しかしその反面、Ga は線材に付着して巻き上げられるので、Ga 浴面は低下する傾向がある。直接通電での熱処理制御にとって、通電間距離を一定に保つことが重要となるが、このような複雑な短周期のばらつきと長周期のばらつきを制御するのは至難の業である。さらに急熱急冷処理後の線材表面は Ga で著しく汚染され、Ga と Nb の化合物が生成している。安定化銅を付与しなければならないが、電気的・熱的・機械的に強固な密着性を得るには、それら Ga 及び Ga 化合物を完全に除去しなければならず、非常に煩雑な作業を必要とする。先に LBNL の Ciardella と Pickus 等は、ヘリウムガス急冷する Nb₃Al 線材の製法を提案した。1978 年ごろのことであるが、当時は、外径 0.5mm の Nb/Al 単芯線あるいは厚さ 0.37mm のテープ線を高温からヘリウムガス急冷して NbAl 固溶体を合成したと報告している [1-3]。しかし、その後に研究は中断され、詳細は不明のままになっている。そこで、我々は、Ga 浴による急冷を不活性ガス噴射による急冷に置き換えることを目指し、Nb/Al 拡散距離が短い最近の NbAl 前駆体線材を用いて、パルス抵抗加熱及び不活性ガス噴射冷却の研究を行った。

2. 実験方法

純銅を電極としたパルス通電加熱装置を作製した。Fig. 1 は、本研究の初期のセットアップの概略図と外観写真である。外径 1.0mm の短尺線材を電極間距離 60 mm の純銅電極に固定した。ガスノズルは市販製を使用し、線材の長手方向に對して垂直且つ水平に配置して、不活性ガス(アルゴン、窒素、ヘリウム)を噴射する。今回の最大ガス流量は、専用マスフローメーターの制限により、アルゴン及び窒素の場合は毎

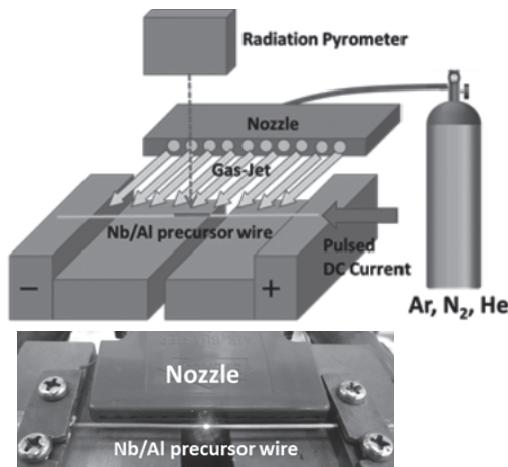


Fig. 1 Early setup of pulsed ohmic resistive heating and inert gas jet cooling apparatus.

分 1,600 L、ヘリウムの場合は毎分 2,000 L とした。また、線材中央部の加熱温度を単色放射温度計(計測レンジ: 800~2,500°C)で計測した。通電時間は 0.1 秒から 0.8 秒の間に設定し、一定流量の不活性ガスを吹き付けながら、定電流制御で直流通電加熱した。

3. 実験結果

市販の高速ガスノズルは、高速気流を噴出して強力な負圧を発生させ、ノズル周囲の大気を誘引する(ベルヌーイの定理)。そのため、噴射ガスには酸素が大量に供給されて結果的に線材は燃焼する事態となつた。そこで基本は Fig. 1 と同様だが、ノズルを自作し大気を巻き込まない構造に改造した。試行錯誤を重ねた現在のセットアップでは、線材は一切酸化しない。Fig. 2 は、通電電流を 280A、通電時間を 0.1 秒とし、アルゴンガスを任意の流量で吹き付けながらパルス通電加熱した線材表面(材質Nb)の温度変化である。ガス流量の増加とともに線材表面から奪われる熱量も多くなり、最高加熱温度は低下する。冷却速度もガス流量の増加とともに速くなる。1,600L/minの大流量の場合、冷却速度は約 1,500°C / 秒 (1,900°Cから800°Cの間)となり、先の LBNL グループの実験 [1]における冷却速度(500°C / 秒)の 3 倍に相当する。また、冷却時の 1,600°Cあたりにショルダーが認められ、線材内部で起こった何らかの反応を示唆するものと考えられる。

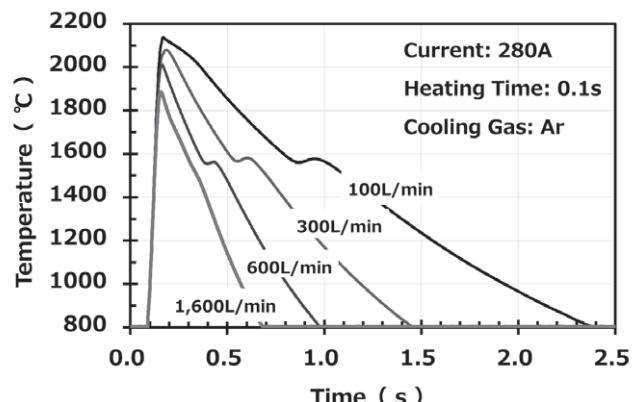


Fig. 2 Temperature of wire surface (Nb) measured by a radiation pyrometer.

参考文献

- R. L. Ciardella, et al.: "A Quench-Age Method for the Fabrication of Nb(A1) Superconductor", IEEE Transaction on Magnetics. Mag-13 (1977) 832-833.
- M. R. Pickus and R. L. Ciardella : "Quench-Age Method for the Fabrication of Niobium-Alminum Superconductors", United States Patent 4,088,512 (May 9, 1978).
- M. R. Pickus : "A15 Multifilamentary Superconductors by the Infiltration Process", Filamentary A15 Superconductors, Eds., M. Suenaga and A. F. Clark Plenum Press (New York, 1980) 331-353.

複数の Mn 合金を用いた室温磁気冷凍機の性能

Performance of a Room-temperature Magnetic Refrigerator with Multiple Mn alloys

有田 照平, 岡村 哲至(東工大); 裏 相哲(サンデンアドバンスドテクノロジー株式会社); 平野 直樹(中部電力)
ARITA Shohei, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); BAE Sangchul(SDAT); Hirano Naoki(Chubu Electric Power)

E-mail: arita.s.ab@m.titech.ac.jp

1. はじめに

室温磁気冷凍機は、代替フロンを使用しない冷凍機として注目されている。磁気冷凍機は、複数材料充填時に広い温度領域を得ることが期待されている。本報告では、これまで使用されていたGd合金より大きな磁気エントロピー変化量を持つMn合金を使用した場合の磁気冷凍機の性能について検討した。性能を考える上で、AMR (active magnetic regenerator)の高温端温度と低温端温度の差を温度スパンと定義し、一次元伝熱数値解析を用いて複数材料充填時の有用性を考察した。

2. 実験装置

Fig.1に実験装置の概略を示す。本磁気冷凍機システムは、2個のAMR ductとNd系永久磁石、永久磁石を回転させるモータ、熱輸送媒体(水)を循環させるポンプ、熱輸送媒体の流れを制御するためのロータリーバルブ、恒温槽などで構成されている。この実験装置において、磁石の回転数(励消磁の周波数)は最大で30 rpm(1.0Hz)、流量は最大で1.0 L/min.までとることができ、測定の際はAMRの周波数と流量をパラメータとする。また、磁性材料に印加される最大磁場は1.0Tである。

Fig.2に3種のMn合金とGd($T_c=20^\circ\text{C}$)、GdY1($T_c=15^\circ\text{C}$)、GdY2($T_c=10^\circ\text{C}$)の磁気エントロピー変化量を示す。3種のMn合金はそれぞれ 20.6°C 、 17.4°C 、 14.1°C のキュリー温度を持ち、以下Mn1、Mn2、Mn3とする。

実験では、AMR ductにMn1とGdを充填した場合についてそれぞれ実験を行った。

3. 一次元伝熱数値解析

磁性材料と熱交換媒体(水)のエネルギー保存方程式[1][2]を一次元伝熱数値解析により解き、実験結果と比較した。実験結果と解析結果の比較をFig.3に示す。実験、解析共に磁石の周波数は1.0Hz、低温端への熱負荷は0、高温端温度はMn1充填時 23.7°C 、Gd充填時 25°C とした。Mn1充填時の実験結果と解析結果を比較するとピーク値が概ね一致したがピークを得る流量の位置が異なる結果となった。

GdとMn1充填時の結果を比較すると、Gd充填時に得る温度スパンが大きい結果となった。Mn1はGdと比べ、比熱の値が3~4倍大きいことから温度スパンのピークを得る流量がGdより大きくなることが解析結果から予想されたが実験結果ではその傾向は見られなかった。

また、Fig.2に示されるMn合金、Gd合金を各3種使用時の解析についても行った。充填条件は高温端側から T_c が高い材料を同等の割合とした。解析結果から、3種のGd合金充填時は、単体使用時よりわずかな温度スパン向上となつたが、3種のMn合金充填時は単体時より二倍近い温度スパンの向上が得られた。

4.まとめ

Mn合金を用いた室温磁気冷凍機の実験、解析を行った。実験では単体充填の場合は、Mn1充填時に比べGd充填時に温度スパンが大きくなつた。一次元数値解析の結果から、複数材料充填時の温度スパンの向上は、Gd合金使用時よりMn合金使用時に大きいことが示唆された。

参考文献

1. K. L. Engelbrecht, et al., Predicting the Performance of an Active Magnetic Regenerator Refrigerator Used for Space Cooling and Refrigeration , HVAC&R Research, 2006, pp.1080-1083.
2. W. E. Ranz, W. R. Marshall, Evaporation from drops, Chem. Eng. Prog, 48(1952), pp.141-146

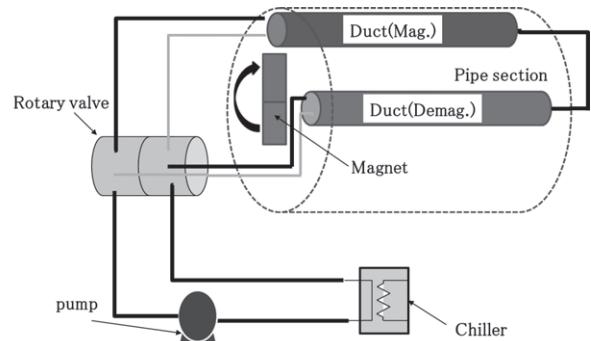


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

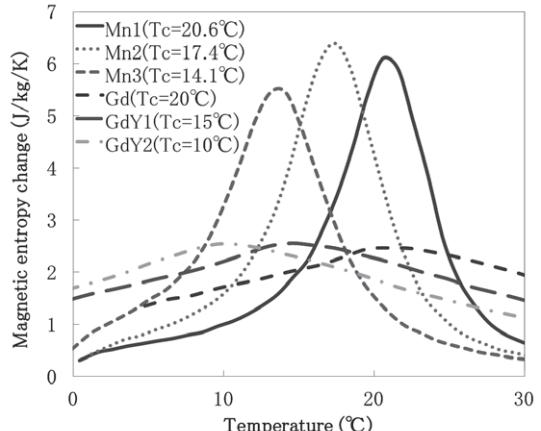


Fig.2 Magnetic entropy change of Mn alloys and Gd alloys.

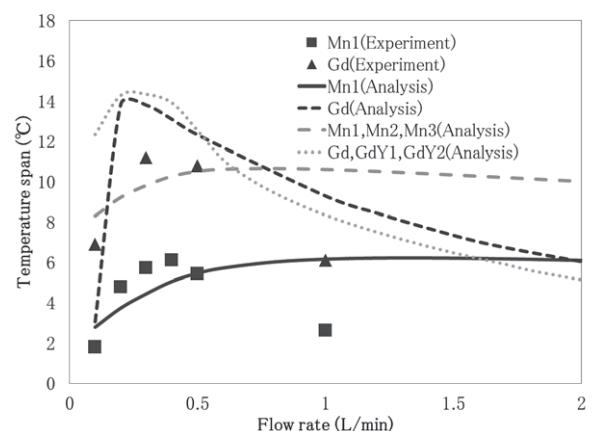


Fig.3 Experimental results and analysis results of temperature span at heat load in 0.

希土類硫化物 EuS の磁気熱量効果

Magnetocaloric effect of EuS

松本 宏一, 村山 大樹, 裏 雄太郎, 宇治山 崇(金沢大); 李 良, 平井伸治, 中村 英次(室蘭工大)
MATSUMOTO Koichi, MURAYAMA Daiki, URA Yutaro, UJIYAMA Takashi (Kanazawa U.); LI Liang, HIRAI Shinji, NAKAMURA
Eiji (Muroran Inst. Tech.)
E-mail: k.matsu@staff.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

磁性体の磁気熱量効果を用いた磁気冷凍の研究を進めている。水素液化磁気冷凍機に用いられる磁性材料として、酸化物ガーネットや金属間化合物を研究してきた。

希土類硫化物 EuS は NaCl 型結晶構造を持つ強磁性半導体である。EuS 中では Eu イオンは +2 価になっており、 $4f^7$ の電子配置を持つので $S=7/2$ の状態を持つ。従って、結晶場や磁気異方性の効果は小さく、典型的な等方的三次元強磁性体である。磁気相転移温度は 16 K 程度と水素液化温度の 20 K に近く、水素液化磁気冷凍の液化段に用いる磁性材料に適当であると考えられ、計算により磁気エントロピー変化の検討[1]や多結晶体での評価[2]などが行われている。

希土類硫化物 EuS の高密度な多結晶焼結体の作製を行い、その磁気熱量効果を評価したところ、従来の多結晶体より優れ、単結晶に近い特性が得られたので報告する。

2. EuS 焼結体の作製

EuS は Eu_2O_3 粉末を高温で CS_2 溶液から気化させた CS_2 ガスと反応させることで合成した。また、得られた合成粉末について、真空・加圧下でパルス通電焼結を行い焼結体を作製した[3]。

得られた焼結体について、X 線回折をおこない EuS の単相が得られたことを確認した。また、SEM 観測によって硫化温度が高温になるほど粒成長することが確認された。合成された焼結体の密度は条件によって異なるが、相対密度 95% 程度が得られた。

3. EuS の磁気熱量効果の評価

磁化測定と磁場中比熱測定を Quantum Design 社の MPMS と PPMS を用いて行った。磁気エントロピー変化を求め、比熱測定から得られるエントロピーと統合してエントロピー特性を求めた。

4. 結果

磁場中比熱測定の結果を Fig.1 に示す。磁場ゼロでの比熱は 16.5 K に磁気転移に伴う大きなピークを示す。EuS の磁場中比熱はピークが磁場により広がりながら高温にシフトするという強磁性-常磁性状態を二次相転移する磁性体の典型的な変化を示した。また、単結晶における比熱測定結果と良く一致している[4]。

磁化測定より求められた EuS の体積あたりの磁気エントロピー変化を Fig.2 に示す。17 Kあたりにピークを持つ山型のエントロピー変化の温度変化は、二次相転移する磁性体の典型的な変化である。先行研究の単結晶 EuS における[100][110] 軸方向における磁化測定では得られたエントロピー変化にもほとんど異方性はなかった。我々の多結晶焼結体のエントロピー変化は単結晶で得られた値とほぼ同じであった。これは EuS の等方的性質を反映している。多結晶体の先行研究も行われている[4]が、そこで報告された単位体積あたりのエントロピー変化に比べて、我々の焼結体はかなり大きなエントロピー変化を示している。また、単結晶と同等の性能を持ち、大きな実用的材料が低コストで作成出来る。

我々の EuS 多結晶焼結体は、20K 領域での体積あたりのエントロピー変化の大きさがガーネット系の磁性体よりかなり大きく、 $\text{RT}_2(\text{R:希土類, T=Al, Ni})$ の金属間化合物とはほぼ同等である。このように、EuS 多結晶焼結体が優れた特性を持っていることが分かった。

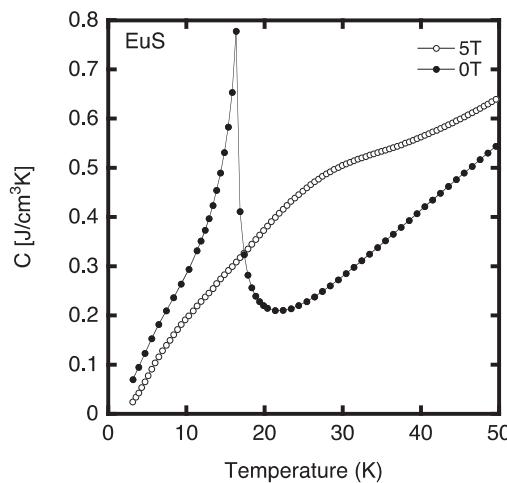


Fig.1 Specific heat of sintered EuS

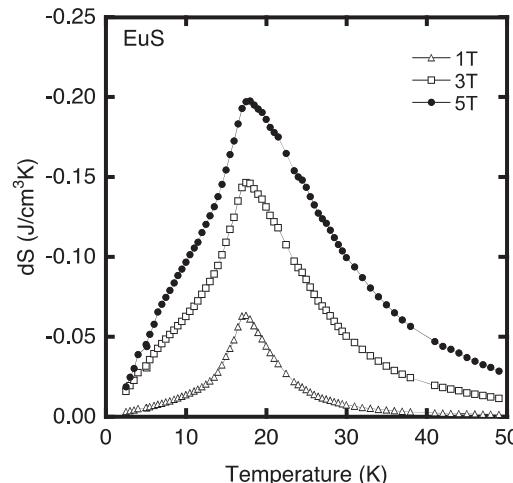


Fig.2 Entropy change of sintered EuS

参考文献

1. T. Hashimoto, et al.: Cryogenics, Vol. 21 (1981) pp.647-653.
2. P. Bredy and P. Seyfert: Cryogenics Vol. 28 (1988) pp.605-606
3. L. Li, et al.: 2015 年度資源・素材学会春季大会.
4. D. X. Li, et al.: Solid State Communication Vol. 193 (2014) pp.6-10.

小型 2KGM 冷凍システム用リニア圧縮機の要素技術開発 —2K 膨張機との接続試験結果—

Development of linear compressor for compact 2K GM cryocoolers

平塚 善勝, 包 乾, 許 名堯(住重)
HIRATSUKA Yoshikatsu, Qian Bao, Mingyao Xu (SHI)
E-mail: Yoshikatsu Hiratsuka@shi-g.com

1. はじめに

従来の光による通信は、エネルギーとしてのみの制御なため、波の性質まで利用することで今の光通信よりも遙かに多くの情報量を伝達することが可能となる。また、光は波の性質と同時に粒(光子)の性質も共有しているので、この特性を利用することで全ての盗聴を傍受することが可能となる。よって、光エネルギー量子である光子一個の到来を高感度で高速に検出する技術(単一光子検出器)の開発は、盗聴を完全に見破ることのできる量子暗号の要となる。しかし、現段階での光子検出器は、半導体を用いており、応答時間の限界や不十分な暗計数雑音抑制性、受光感度を持つ波長帯の制限により性能向上の制約要因となっているため長距離伝送が極めて困難となる。これらの解決策として、超伝導单一光子検出器(SSPD = Superconducting single photon detector)が検討される。しかし、SSPDシステムは、冷凍機が存在する分、半導体方式に比べサイズと電力消費が大きくなるため使用範囲などに制約が出る。さらにSSPDシステムの開発は、移動体に搭載しアドホックの光空間通信に適用し、災害時などに柔軟に大容量の光回線を構築することも可能となるが、システムサイズと消費電力を低減することが不可欠となる[1]。

我々は、光・量子情報通信における高い光子検出性能を達成できる温度領域(2K台)を実現するSSPDシステム冷却用の小型化冷凍システムの研究開発を行ってきた。圧縮機ユニット(SHI:CNA-11)は、冷媒ガス内部のオイルを除去する補機類の排除で小型化(現行比50%減)を図ることを目標とし、無潤滑リニア圧縮機を設計開発し、単体での性能を評価した[2]。本報告では、試作圧縮機と2KGM膨張機と接続し、冷凍機性能試験を行なったので、その結果について報告する。

2. 試験装置ならびに試験結果

先行して開発された小型 2KGM 膨張機[3]とリニア圧縮機との組合せ冷凍性能試験を行なった。Fig. 1, 2 には、試験装置の写真とクールダウン曲線がそれぞれ示されている。Table 1 には、圧縮機に CNA-11 とリニア圧縮機を使用した場合の冷凍性能試験結果の比較が示されている。

同図より、CNA-11 を使った場合の冷凍性能は、圧縮機電気入力 1.2 kW、2 段冷凍能力 17 mW at 2.3 K に対し、リニア圧縮機の電気入力 0.9 kW 時に CNA-11 圧縮機使用時と同等の値が得られている。冷却ファンと冷却水ポンプならびに膨脹機バルブモータの消費電力約 100W、インバータ効率を 80~90%と考えると圧縮機ユニットの消費電力 1.1~1.2 kW となり、電気入力 1.2 kW 以下で本性能を実現している。圧縮機のピストンとシリンダならびに弁の隙間を見直し漏れ損失を低減することで、容積効率を改善し圧縮機性能を向上している。

3. まとめと今後の予定

SSPD システム用の小型化冷凍システムの研究開発において、無潤滑圧縮機としてリニア圧縮機と 2KGM 膨張機と接続し冷凍機性能試験を行なった。その結果、現行圧縮機を使用した冷凍能力に対し、同等性能が得られることを確認した。今後、冷凍機の性能安定性の評価さらに圧縮機のユニット化検討を進めて行く予定である。

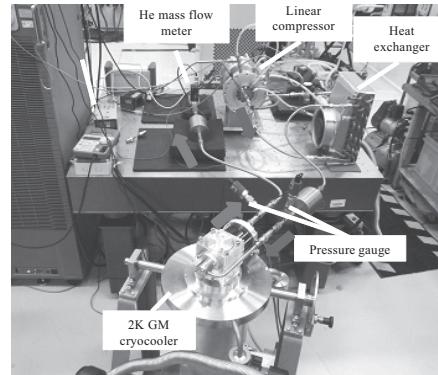


Fig. 1 Photograph of the test apparatus for the compressor performance.

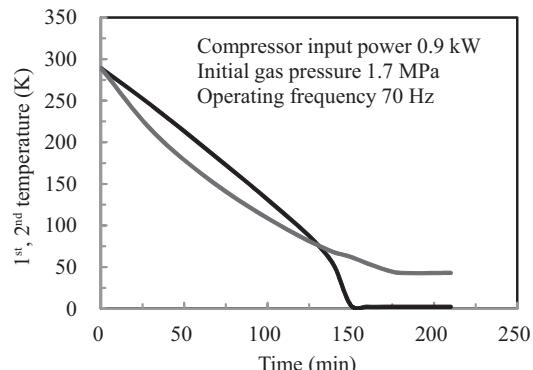


Figure 2. Cool down curves of a compact 2 K GM cryocooler with a linear compressor.

Table 1. Experimental results for a compact 2 K GM cryocooler with the linear compressor.

Item	With CNA-11	Measured results
Electric input power	1.2 kW / 50Hz	0.9 kW (Compressor input power)
1 st temperature with 1 W	45 K	49 K
2 nd temperature at 2.3 K	17 mW	17 mW
No-load 2 nd temperature	2.2 K	2.17 K

本研究開発は、(独)情報通信研究機構(NICT)の委託研究(光・量子情報通信用超伝導单一光子検出システムの小型化技術に関する研究開発)により得られた成果である。

参考文献

- S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki and Z. Wang, Optics Letters 35 (13) (2010) 2133-2135
- Y. Hiratsuka: Abstract of CSSJ conference, Vol.90 (2014) p63
- Q. Bao, et al.: Abstract of CSSJ conference, Vol.91 (2015) p97

磁気熱量効果を用いた除湿システムの基本特性

Fundamental Characteristics of Dehumidification System by Using Magnetocaloric Effect

長嶺 諒, 岡村 哲至(東工大)

NAGAMINE Ryo, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)

E-mail: nagamine.r.aa@m.titech.ac.jp

1.はじめに

現在一般的に使用される除湿器にはデシカント式やコンプレッサー式などの種類がある。本研究では、これらの仕組みとは大きく異なるものとして、磁気熱量効果を利用して除湿器に使われているヒーターやクーラーと同じ役割を果たす新しいシステムが考案された[1]。このシステムは、磁性材料の表面に収着剤を塗布し、磁気熱量効果による温度変化を用いて収着剤内の水分の吸脱着を促し、除湿や加湿を行うというものである。本研究では、実験や数値解析をもとにこのシステムの特性の調査を行った。

2. 実験装置

実験装置の概要を Fig.1 に示す。初めに、実験室の室温を空調機によって制御することで流入空気の温度を設定する。その後、コンプレッサーによって空気を装置に流し、湿度調整部によって湿度を所望の値に設定し、試験部へ流す。試験部は 1 列が幅 19mm、奥行 60mm、厚さ 1.66mm で、その内部に磁性材料であるガドリニウム(Gd)の表面に高分子収着剤が 0.08mm の厚さで塗布された板状の試験片が 5 枚ずつ 2 列に並べてある。試験片 1 枚の寸法は、幅 21mm、奥行 12mm、厚さ 0.66mm となっている[1]。また、この試験部に励磁(約 1T)・消磁できる永久磁石が備わっている。励磁による Gd の発熱で収着剤内の水分が脱着し、消磁による Gd の吸熱で収着剤が水分を収着する仕組みとなっている。

3. 数値解析

本研究では、実験を模擬した一次元の数値解析コードの開発を行った[2]。支配方程式は以下のとおりである。

$$\bullet \rho_{Gd} c_{Gd} \frac{dT_{Gd}}{dt} = \lambda_{Gd} \frac{dT_{Gd}^2}{dx^2} + \frac{\lambda_{Gd} S}{V_{Gd} H_{Gd}} (T_s - T_{Gd}) \quad (1)$$

$$\bullet \rho_s c_s \frac{dT_s}{dt} = \lambda_s \frac{dT_s^2}{dx^2} + \frac{q_{st} \alpha' S}{V_s} (X_a - X_s) + \frac{\alpha S}{V_s} (T_a - T_s) + c_v \frac{\alpha' S}{V_s} (X_a - X_s) (T_a - T_s) + q_{hl} \quad (2)$$

$$\bullet \rho_a (c_a + X_a c_v) \frac{dT_a}{dt} = -\rho_a u (c_a + X_a c_v) \frac{dT_a}{dx} + \lambda_a \frac{dT_a^2}{dx^2} + \frac{\alpha S}{V_a} (T_s - T_a) + c_v \frac{\alpha' S}{V_a} (X_s - X_a) (T_s - T_a) \quad (3)$$

$$\bullet \rho_s \frac{dX_s}{dt} = \lambda_g \frac{dX_s^2}{dx^2} + \lambda_{sf} \frac{dX_s^2}{dx^2} + \frac{\alpha' S}{V_s} (X_a - X_s) \quad (4)$$

$$\bullet \rho_a \frac{dX_a}{dt} = \lambda_a \frac{dX_a^2}{dx^2} + \frac{\alpha' S}{V_s} (X_s - X_a) \quad (5)$$

$$\bullet \frac{dX_{hm}}{dt} = K (X_a - X_{hm}) \quad (6)$$

添字 Gd,s,a,v,hl,hm,g,sf はそれぞれ Gd、収着剤、空気、水蒸気、熱侵入、湿度計、気体、表面を表しており、 α 、 α' は熱

伝達率、湿気伝達率を、 λ 、 λ' は熱伝導率、湿気伝導率をそれぞれ表しており、K は水分拡散率である。(1)～(3)式は Gd、収着剤、空気のエネルギー保存式であり、(4)～(6)式は収着剤、空気、湿度計の水分保存式である。

これらの支配方程式を解くことで出口の空気湿度を計算し、実験結果との比較を行ったものの一例が Fig.2 である。点で描かれているのが実験結果で、点線になっているのが出口空気の解析結果である。この 2 つを比較すると、解析結果が実験結果と大きく乖離していることがわかる。これは、使用している湿度計の応答遅れに原因があると考えられたため、湿度計の応答時間を調べる実験を行った結果、10～40s ほどの応答遅れを確認した。そこで、応答遅れを考慮する手法として(6)式を導入した。K は湿度計の寸法や材質、実験条件で決まるもので未知数であるため、実験結果に合うように値を調節した。その結果、実験結果との良い一致が確認できた。

4. まとめ

湿度計の応答遅れを考慮することで、磁気熱量効果を用いた除湿システムを計算できる数値解析コードを開発することができた。

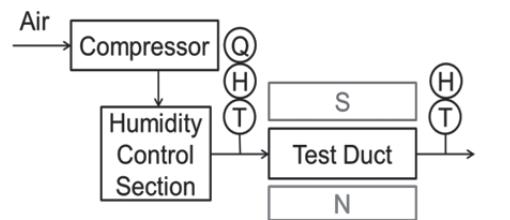


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

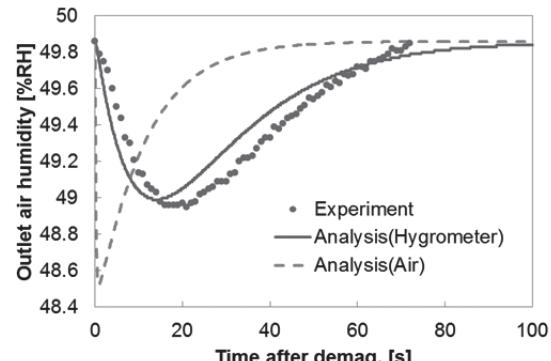


Fig.2 Comparison between the experiment and the analysis (20°C, 1L/min, 50%RH)

参考文献

- R. Nagamine, et al.: Proceedings of ICR(2015), E1-We-P, No.232
- T.S. Ge, et al.: Journal of Applied Thermal Engineering, Vol.30 (2010) p.1005–1015

2段式断熱消磁冷凍機の特性

Properties of two stage Adiabatic Demagnetization Refrigerator

福田 英史, 小林洋平(NIMS, 千葉大); 李 晶, 中込秀樹(千葉大); 沼澤健則(NIMS)
 FUKUDA Hidehito, KOBAYASHI Yohei (NIMS, Chiba Univ.); Jing Li, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);
 NUMAZAWA Takenori (NIMS)
 E-mail: afwa3286@chiba-u.jp

1. はじめに

近年、宇宙環境を利用した極低温・超低温ミッションが数多く計画されている。X線・赤外線天文学の分野において、宇宙背景放射の偏光測定に使用するTES型X線マイクロカロリメータを100 mKまで冷却することが求められている[1]。そこで我々は、連続冷凍が可能な連続作動型断熱消磁冷凍機(Continuous ADR)の開発を行っている[2][3]。しかし、開発されたCADRは連続運転で100 mKには到達できていない。これまでの研究から到達できない問題として、stage4-stage3間の伝熱量を向上させ、冷凍能力を向上させる必要があることがわかった。

stage4-stage3間を繋ぐ構成要素として、Passive型Gas-gap熱スイッチ(PGGHS)と銅製サーマルストラップが挙げられる。そこで、我々はstage間の伝熱量を増加させるため、PGGHSのON状態での性能向上、及びに以前使用したサーマルストラップより断面積が広いものを使用し、伝熱量増加を試みた。

2. 試験方法

CADRのstage4及びstage3はそれぞれ4.2 K Baseplate上に設置されている。なお、熱的接触があるのはstage4とBaseplateのみであり、熱スイッチを経由して接続されている。そして、stage4とstage3は熱スイッチを経由し、銅製サーマルストラップに接続されている。外観写真をFig.2に示す。左の写真が、今まで使用したサーマルストラップ、右の写真が、今回使用した新しいサーマルストラップである。伝熱量を増加させるため、厚さを0.5 mmから1 mmに増加させ、銅製ワイヤーでの接続をなくし、ストレートのものにした。

また、PGGHSのON状態での性能向上させるため、He⁴封入圧力を6 Torrから8 Torrに増加させた。

今回の実験手順を以下に示す。

1. stage4に3.99 T (3 A)の励磁。
2. stage4を消磁させ、stage3に1.5 T (3.75 A)の励磁。
3. stage3を消磁。

3. 実験結果と考察

Fig.3, Fig.4には、実験手順1-3の工程を行った実験結果を示す。Fig.3が、旧サーマルストラップを用いた実験結果、Fig.4が新しいサーマルストラップを用いた実験結果である。両者のグラフの1200秒から2000秒辺りに着目してほしい。stage4の消磁によりstage3,4の温度が低下していることがわかる。また、stage4消磁後、Fig.3はstage3の温度が2.65 Kに対して、Fig.4は、2.3 Kまで減少していることがわかる。さらに旧サーマルストラップを用いた方は、stage4とstage3の温度低下に遅れがあるのに対し、新サーマルストラップ用いた方は、温度低下に遅れがない。ここでstage4の消磁中の温度低下を比べると、サーマルストラップ改善により 2.59×10^{-3} K/sから 5.86×10^{-3} K/sに一秒あたりの温度低下が増加している。

しかし、Fig.4の2000秒付近に着目してほしい。stage4の温度が1.2 Kまで減少しているのに対して、stage3の温度は2.3 Kで一定になっている。そのため、stage4の冷凍能力を十分に活用できていないことがわかる。これは、PGGHSのスイッチ温度が2.3 K付近で働いたことが原因であると考えられる。よって、stage4の冷凍能力を十分に活用するためにPGGHSのスイッチ温度の低下が必要となる。

4. まとめ

本研究では、stage4-stage3間のサーマルストラップと熱スイッチを改善し、stage間の伝熱量を増加させた。今後の課題として、stage4の冷凍能力を十分に活用するためにPGGHSのスイッチ温度の低下が必要となる。

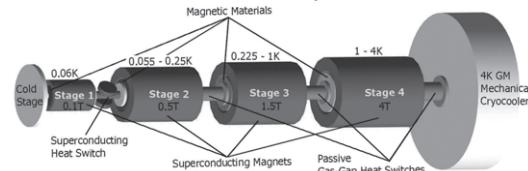


Fig.1 Conceptual design of the CADR

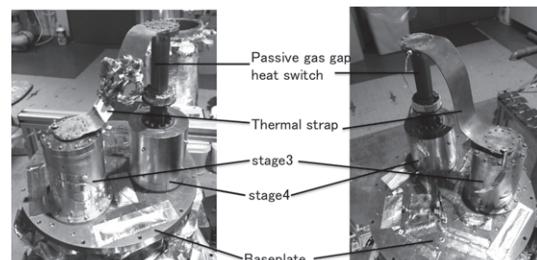


Fig.2 photograph of exterior of the 2-stage ADR system(right:previous thermal strap,left:new thermal strap)

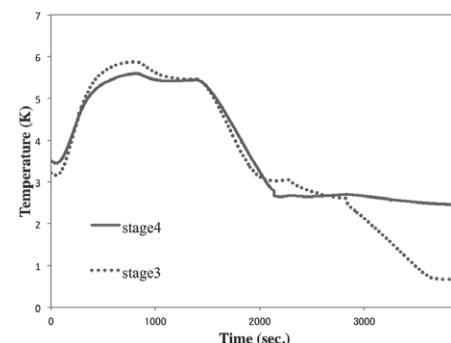


Fig.3 Temperature change of the previous thermal strap and He⁴ 6 Torr

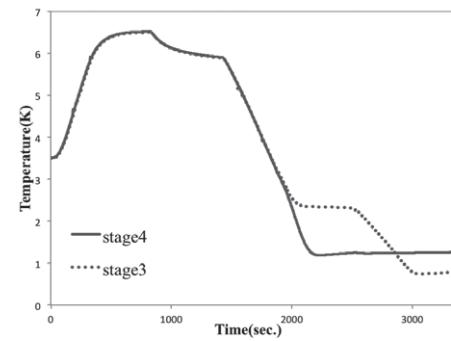


Fig.4 Temperature change of the new thermal strap and He⁴ 8 Torr

参考文献

- [1] H.Akamatsu et al 2008 J. Phys. Soc. Jpn 63 90 22pSH-11
- [2] Shirron P J et al 2000 Adv. Cryo. Eng. 45B 1629
- [3] Shirron P J et al 2002 Cryogenics 41 789

車載用超電導モータ及び冷却システムの開発 -車両試験結果-

Development of HTS motor and cooling system for vehicle -Results of vehicle test-

中野 恭介, 湯本 健太, 平塚 善勝, 加藤 隆典(住重);

荒川 聰, 新里 剛, 尾山 仁, 坂 寛延(住友電工)

NAKANO Kyosuke, Yumoto Kenta, Hiratsuka Yoshikatsu, Kato Takanori (SHI);

Arakawa Satoshi, Shinzato Tsuyoshi, Oyama Hitoshi, Saka Nobuaki (SEI)

E-mail: kyosuke.nakano@shi-g.com

1. はじめに

住友重機械工業では、住友電気工業との共同研究によってNEDO助成事業「戦略的省エネルギー技術革新プログラム実用化開発 車載超電導モータ用冷却システムの開発」に参画し、冷凍能力 151 W at 70K, 電気入力 2.15kW, COP0.07を有する超電導モータ冷却用スターリング冷凍機の開発した[1]。本年度では、開発した冷凍機とモータシステムとを組合せ、実車走行評価試験を行った、また冷凍機の信頼性についても調査を行ったのでその結果を報告する。

2. モータシステム概要

超電導モータシステムの外観図を Fig.1 に示す。システムはスターリング冷凍機、液体窒素循環装置、超電導モータから構成される。冷媒となる液体窒素は、冷凍機によって70Kの過冷却状態となり、小型ポンプによってモータ内を流量約 2L/min で循環している。冷凍機は、冷媒温度を計測しインバータ電源による PID 温調制御運転を行っている。

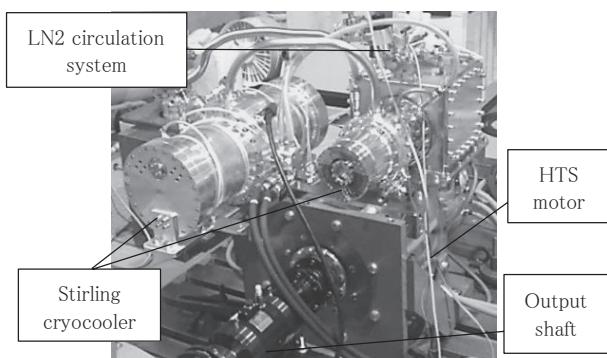


Fig.1 Picture of HTS motor system

3. 車載モータ評価試験・結果

本システムの搭載が想定される車両として、低回転時大トルクである超電導モータの特性から、走行パターンに停止・発進が頻繁に行われるコミュニティバスや空港設備車両等への応用を目指している。実車走行試験では、市販されている電気自動車のモータ部を超電導モータと置き換える、常電導モータとの比較性能評価を行った。Table 1 に試験項目と目標

Table 1 Design and results of the research

Research items	Final target	Conventional before research	Results of the research
1) HTS coil and cooling	•AC loss: 86W and under at 100kW (▲814W) •Thermal conduction at no load :59W and under	•AC loss: 900W at 100kW	•AC loss: Below 358W at 100kW (▲542W 67%) •Thermal conduction at no load :25W
2) HTS motor	•AC synchronous motor Power: 100kW Torque: 650Nm Revolution: 4000rpm Motor size: 100L	•DC motor Power: 30kW Torque: 120Nm Revolution: 3000rpm	•AC synchronous motor Power: 49kW Torque: 382Nm Revolution: 4000rpm Motor size: 69L
3) Cryocooler	•COP: 7% and over 150W at 70K	•COP 5% 150W at 70K	•COP 7% 151W at 70K
4) Vehicle test	•Efficiency merit vs. Electric Vehicle: 10% and over	•Efficiency merit vs. EV: Below 10%	•Efficiency merit vs. EV: 9.4% and over

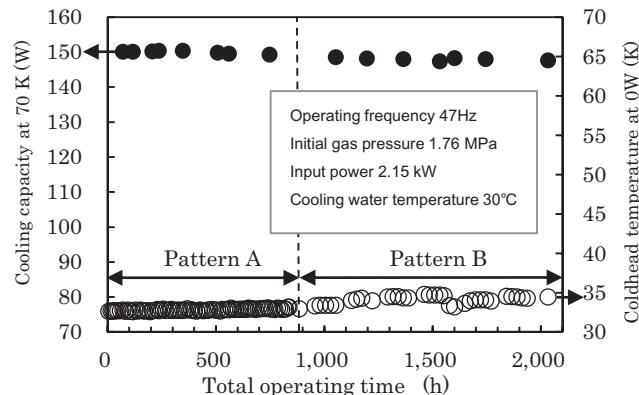


Fig.2 Graph of cooling performance vs. operating time

値、その結果について示す。トータルのシステム効率は、実車走行パターンをシミュレートし、常電導モータ燃費に対し 9.4% の改善が見込まれた。また冷凍機に関しては、振動対策や重量の軽量化、冷凍効率向上等の課題も明らかとなり、実用化に向けて更なる改善を図っていく予定である。

4. 冷凍機信頼性評価

開発冷凍機の初期信頼性を確認するため、短期間の連続運転試験を行った。結果を Fig.2 に示す。図は総運転時間に対する到達温度と冷凍能力を示しており、運転パターン A では日中運転し夜間停止、運転パターン B では日中夜連続運転している。結果、総運転 2000 時間で機械的な問題は発生しなかったが、約 2W の冷凍能力低下が見られた。また運転パターンによって能力低下の差異が生じており、凍機内部から発生したコンタミネーションが、冷却パターンによって異なるモードで蓄冷材へと吸着し性能影響を与えると考えられる。今回は機械的な初期不良を確認するため不完全な脱ガス処理で冷凍機の評価を行ったが、今後、内部コンタミネーション処理方法を含めた設計方法の確立を行っていく。

5. まとめ

高温超電導モータのシステムの評価を行った。トータルシステム効率は 9.4%までとどまったが、車載用超電導モータの実用化に向けて改善すべき課題点の抽出を行うことができた。今回の研究開発を通じ、幾多のトラブルや難題とぶつかったが、世界初となる小型冷凍機を搭載した車載超電導モータシステムの優位性を実車評価にて実証することができた。

謝辞

本研究は、「戦略的省エネルギー技術革新プログラム実用化開発 車載超電導モータ用冷却システムの開発」として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

1. K. Nakano, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.70

車両空調を目指した磁気ヒートポンプの損失評価

Loss evaluation 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), 川南剛(神戸大)

MIYAZAKI Yoshiki, IKEDA Kazuya, WAKI Koichiro (RTRI); KAWANAMI Tsuyoshi (Kobe Univ.)

E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

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, 熱サイクルにおける損失を評価するための基礎試験ならびに数値解析を進めている[1]。2015年春季低温工学では, AMR (Active magnetic regenerator)両端部のデッドボリュームで発生する損失について, 実験と数値解析による定量化を報告した[2]。今回 AMR に充填する磁気作業物質の充填率が, 磁気作業物質と熱交換流体の熱交換に与える影響について実験的に検討したので報告する。

2. 基礎試験装置

基礎試験装置の概略を Fig. 1, 2 に示す。永久磁石が往復動することにより, 固定された AMR を励消磁する。また, 往復ポンプを AMR の励消磁に合わせて駆動することで, 热交換流体(水)を磁気作業物質と熱交換させる。磁気作業物質はベンチマークとしてよく用いられるガドリニウム(Gd; 粒径 0.65 - 0.8 mm)である。永久磁石の極面積は 80 mm×80 mm, 極間の最大磁束密度は約 1 T, AMR 容器はアクリル製で外径 18 mm, 内径 14 mm, 充填長さは 60 mm である。Gd の充填率は Case1: 63% (充填量 46 g)と, Case 2: 58% (充填量 42 g)として, 2 ケースを比較した。AMR 両端部に熱電対を挿入して, 両端の温度差を評価した。

3. 試験結果

基礎試験は磁石移動速度を一定とし, 热交換流体流量および熱交換時間(τ)をパラメタとして, AMR 両端の温度差を評価した。温度差の流量依存性を熱交換時間 $\tau = 0.1$ sec とした結果を Fig. 3 に示す。Case 1, Case 2 いずれの温度差も流量に対して単調増加傾向を示している。しかし, Case 2 では充填量が減少した分, 冷凍能力が減少するため, Case 1 より温度差は小さい。

次に, 磁気作業物質の充填率が熱交換に与える影響について検討するため, 横軸を $\frac{1}{\Gamma} = \frac{\dot{m} c_p \tau}{M c}$ (熱交換流体熱容量/磁気作業物質熱容量)として規格化した。 \dot{m} , c_p はそれぞれ熱交換流体の流量, 比熱, M , c はそれぞれ磁気作業物質の充填質量, 比熱を表す。Fig. 3 の横軸を $1/\Gamma$ として規格化した結果を, Fig. 4 に示す。Case 1 に比べ, Case 2 では温度差がとれる $1/\Gamma$ の値が大きくなっていることがわかる。このことから, 温熱交換に寄与しない無効流量が増加(熱交換に有効な流量が減少)していることが示唆される。

4. まとめ

今回, AMR に充填する磁気作業物質の充填率の違いが, 热交換に与える影響を実験的に検討した。AMR 両端に生じる温度差の, 磁気作業物質と熱交換流体の熱容量比に対する依存性から, 充填率が低い場合には, 热交換に寄与しない無効流量が増加している傾向がうかがえる。

参考文献

- [1] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.59
- [2] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.193

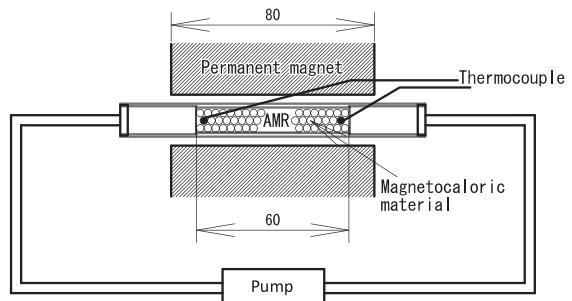


Fig. 1 Schematic of the fundamental set-up for magnetic refrigeration.

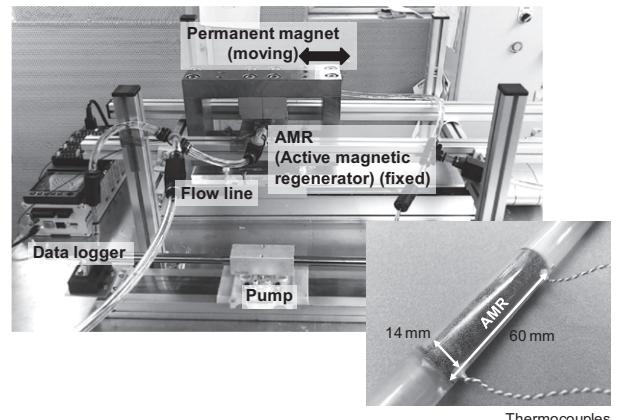


Fig. 2 Photograph of the fundamental set-up for magnetic refrigeration.

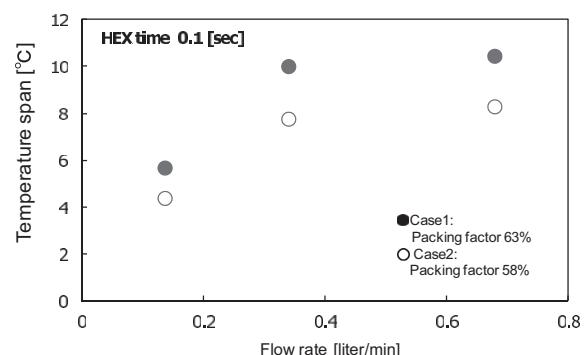


Fig. 3 Flow rate dependent of temperature span at the AMR.

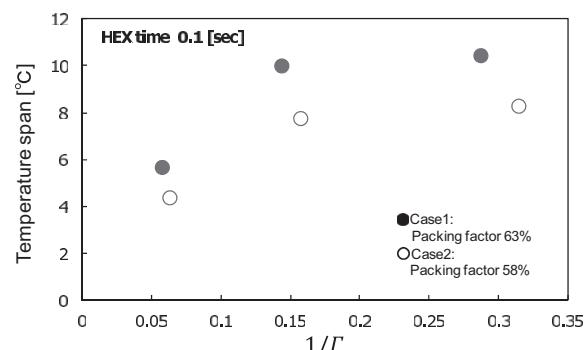


Fig. 4 $1/\Gamma$ dependent of temperature span at the AMR.

極低温における Ti-6Al-4V 合金針状組織材の疲労特性に及ぼす応力比の影響

Effect of stress ratio on fatigue properties for Ti-6Al-4V alloy with the lamellar microstructure at cryogenic temperature

由利 哲美、小松誠幸、小野 嘉則、緒形 俊夫(物質・材料研究機構); 長尾 直樹、堀 秀輔、竹腰 正雄(宇宙航空研究開発機構)
 Tetsumi Yuri, Masayuki Komatsu, Yoshinori Ono, Toshio Ogata (NIMS);
 Naoki Nagao, Shusuke Hori, Masao Takegoshi (JAXA)
 E-mail: YURI.Tetsumi@nims.go.jp

1. はじめに

我々はこれまでに、Ti-6Al-4V (Ti64)合金鍛造材を用い β 域まで加熱後、冷却速度(炉冷、空冷、水冷)を変えることにより針状組織の異なる β -anneal材を作製し、極低温(20 Kガスヘリウム(GHe)雰囲気)における高サイクル疲労特性(応力比:R=0.01)および破壊靶性について評価した結果を報告した[1,2]。その結果、 β -anneal材の炉冷および空冷(AC)材で、($\alpha+\beta$)-anneal材よりも良好な 10^7 回疲労強度-破壊靶性バランスが得られた。実際に使用する構造部材について、疲労特性への応力比効果を把握することは重要である。Ti64 ELI合金鍛造材では、77 KでR=0.01と0.5の 10^7 回疲労強度が、疲労限度線図から予測される強度よりも危険側になることが報告されている[3]。一方、室温におけるTi64合金圧延棒材のAC材では、R=0.01で安全側になるといった報告も見られる[4]。そこで本研究では、Ti64 ($\alpha+\beta$)-anneal材より 10^7 回疲労強度の高かったAC材を用いて、20 KGHe 中における高サイクル疲労特性に及ぼす応力比の影響について調べた。

2. 実験方法

供試材は、Ti64 合金鍛造材($\phi 350 \times 200$ 、AMS4928相当、940°C-120min 保持後水冷、705°C-170min 保持後空冷)の($\alpha+\beta$)-anneal材を用いた。試験片サイズの短冊状に切断後、 β 域温度の1050°C-60min 保持後、空冷を施した後、720°C-120min 保持後炉冷を行った。高サイクル疲労試験は、正弦波での荷重制御にて行い、応力比 R=-1, 0.01, 0.5、さらに最大応力 σ_{\max} を0.2%耐力($\sigma_{0.2}$)に固定し、応力比を固定しない試験($\sigma_{\max}=\sigma_{0.2}$ 試験[5])を行った。試験周波数は20 KGHe 中では10~15Hz および293 K(室温)では10~20Hzで行った。破断しない場合の試験打切り回数は、20 KGHe 中では 10^7 回、293 Kでは 2×10^7 回とした。20 KGHe 中における各試験は、冷凍機を用いて試験片を常時冷却しながら、ヒーターによる温度制御方法により実施した。各試験後 SEM による破面観察も行った。尚、各供試材の20 KGHe での $\sigma_{0.2}$ と引張強度(σ_B)はそれぞれ、($\alpha+\beta$)-anneal材:1604 MPa、1710 MPa、AC材:1523 MPa、1661 MPaである。

3. 実験結果

Fig.1にそれぞれの光学顕微鏡組織写真を示す。($\alpha+\beta$)-anneal材は、等軸 α 相と針状組織の混合組織を呈している。一方、AC材は、細かい針状組織から成り立っている。Fig.2(a)(b)に、それぞれ20 KGHe 中における($\alpha+\beta$)-anneal材およびAC材のS-N曲線を示す。それぞれの組織とも、Rが高くなるほどS-N曲線は低応力側にシフトする[3,4,5]。両者を比較すると、 $\sigma_{\max}=\sigma_{0.2}$ 試験を除き、 10^7 回疲労強度はAC材の方が($\alpha+\beta$)-anneal材より高い値を示す。Fig.3に20 KGHe 中における疲労限度線図を示す。両者とも修正グッドマン則による予測はR=0.8では安全側になるが、R=0.01と0.5では危険側になる[3,5]。($\alpha+\beta$)-anneal材では予測強度の70%程度、AC材でそれぞれ75%、90%であり、77 Kで50%程度であったTi64ELI合金[3]よりは予測強度の低下の割合は小さかつた。また、293 Kでは、($\alpha+\beta$)-anneal材のR=0.01と0.5、AC材のR=0.01が危険側となった。

参考文献

- (1) T.YURI et al.:Abstracts of CSSJ Conference, Vol.86(2012)p.225
- (2) T.YURI et al.:Abstracts of CSSJ Conference, Vol.88(2013)p.53
- (3) Y.ONO et al.:Abstracts of CSJ Conference, Vol.82(2010)p.20
- (4) 日本鉄鋼協会編: Ti-6Al-4V 合金の高サイクル疲労に関する共通試験結果報告書(1994)
- (5) E.TAKEUCHI et al.: TRANS. of JSME, A70, 698 (2004) p.1405-1411

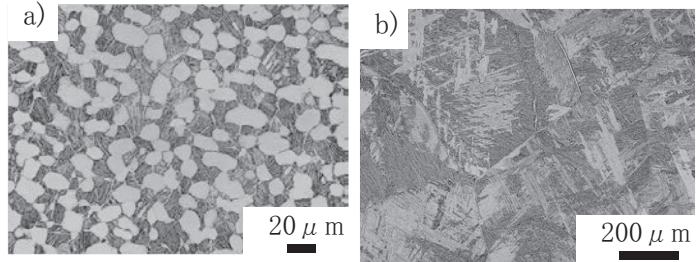


Fig.1 Optical micrographs of Ti-6Al-4V alloy.
a) ($\alpha+\beta$)-annealed, b) AC (β -annealed)

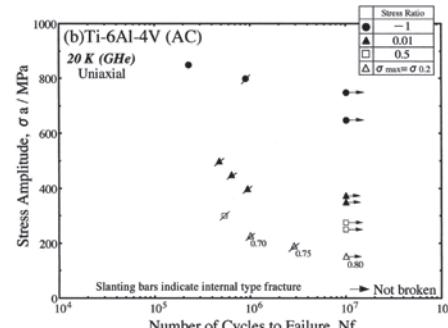
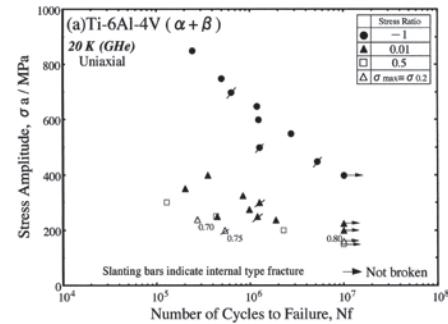


Fig.2 S-N curves of ($\alpha+\beta$) (a) and β -annealed (b) Ti-6Al-4V alloy in gaseous helium at 20 K.

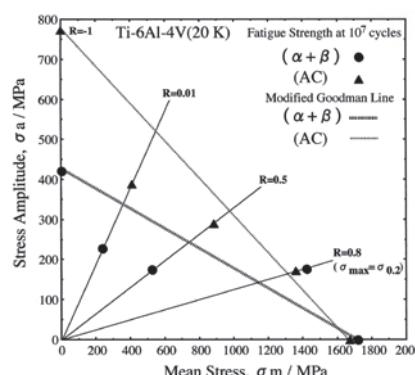


Fig.3 Endurance limit diagram of ($\alpha+\beta$) and β -annealed Ti-6Al-4V alloy in gaseous helium at 20 K.

Alloy718 電子ビーム溶接材の低温における高サイクル疲労特性 High-cycle fatigue properties of Alloy718 electron beam welded joint at low temperature

小野 嘉則, 由利 哲美, 長島 伸夫, 緒形 俊夫 (物材機構); 長尾 直樹, 堀 秀輔、竹腰 正雄 (宇宙航空研究開発機構)
ONO Yoshinori, YURI Tetsumi, NAGASHIMA Nobuo and OGATA Toshio (NIMS);
NAGAO Naoki, HORI Shusuke, TAKEGOSHI Masao (JAXA)

E-mail: ONO.Yoshinori@nims.go.jp

1. 緒言

Alloy 718 Ni 基超合金は、優れた強度一延性バランスを有し、溶接性も良いことから、航空・宇宙機器に多用されている。同合金は、液体ロケットエンジンの部材としても使用されており、種々の製造状態(鍛造材、铸造材、溶接材)や使用温度での強度特性データの蓄積が図られている[1]。電子ビーム(EB)溶接は、Alloy 718 を使用して構造体を造る上では重要な接合方法である。本研究では、EB 溶接後、溶体化処理と二段時効処理を施した Alloy718 について、引張特性と高サイクル疲労特性について評価した。

2. 実験方法

供試材は、AM5596 に準拠して作製された 10 mm 厚の板材である。EB 溶接は圧延方向(RD)に平行に、加速電圧 50 kV、ビーム電流 90 mA、溶接速度 0.5 m/min で行った。母材と EB 溶接材は、1228K で 1.8ks の溶体化処理後空冷したのち、993K で 28.8ks および 898K で 28.8ks の二段時効処理を施し、空冷した。硬さ試験は、押し込み荷重 0.9807 N(100 gf)で行った。引張試験片と高サイクル疲労試験片は、板幅方向(TD)に平行に採取した。引張試験と高サイクル疲労試験は、室温(293 K)と液体窒素温度(77 K)で行った。引張試験は、初期ひずみ速度 $4.2 \times 10^{-4} / \text{s}$ の条件下で行った。高サイクル疲労試験は、応力比(R)は -1 とし、周波数 10 Hz の正弦波軸荷重で 10^7 回まで行った。

3. 結果

Fig. 1 は、EB 溶接材の溶接部と母材部の境界部付近の組織写真である。溶接時には母材部側は熱影響を受けるが、境界付近の γ 粒は若干大きくなっている程度であった。Fig. 2 は、溶接部と母材部の境界部付近の硬さ測定の結果である。多少のばらつきはあるが、溶接部、溶接時の熱影響部(HAZ)に相当する部分、母材部の硬さに顕著な差は見られなかった。母材と EB 溶接材の 77 K での引張特性を Table 1 に示す。EB 溶接材では、母材に比べて引張強度と伸びが大きく低下している。EB 溶接材の応力-ひずみ曲線は、母材とはほぼ同様な傾向を示すが、母材に比べて早期に破断した。EB 溶接材は溶接部で破断していた。したがって、母材部に比べて溶接部の延性が低いため、溶接部で早期破断が起こり、その結果引張強度と伸びが低くなったと考えられる。Fig. 3 は、母材と EB 溶接材の 77 K での S-N 線図である。 10^7 回までの試験では疲労限は確認されなかった。また、両材料ともに短寿命側では表面破壊、長寿命側では内部破壊が起っていた。EB 溶接材の高サイクル疲労強度は、母材に比べて低い。EB 溶接材では、き裂は母材部、溶接部、溶接時の HAZ 部に相当する部分で発生していたが、き裂の発生点の違いに起因した疲労強度の差は見られなかった。293 K での試験でも同様な結果が得られている。また、EB 溶接材においては、長寿命側で溶接欠陥(ブローホール)を起点とした破壊が起っており、その結果、同試料の 10^7 回疲労強度は母材に比べて 250 MPa も低くなつた。

参考文献

- [1] Space Use Materials Strength Datasheet, National Institute for Materials Science, Nos.2, 4, 5, 8, 9, 10, 15, 18, 20, 21, 22, 24.

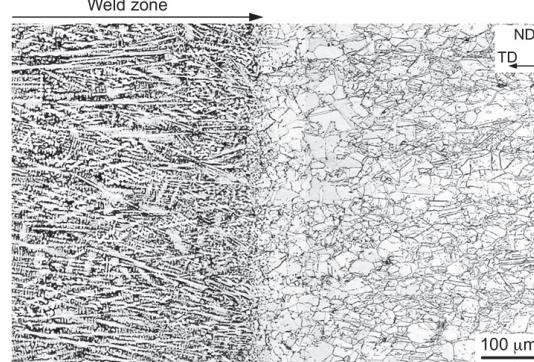


Fig. 1 Optical micrograph of the post heat-treated EB welded joint.

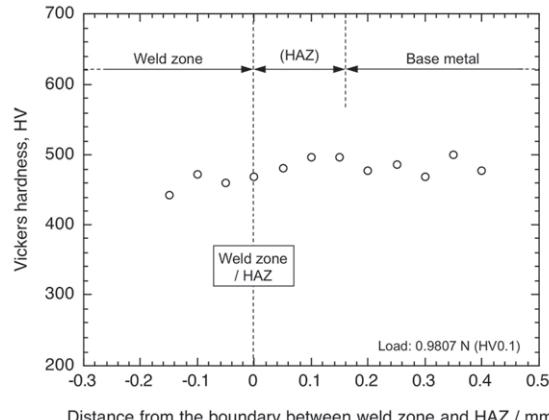


Fig. 2 Hardness distribution measured along the normal to the weld line at the mid-thickness in the EB welded joint.

Table 1 Tensile properties of base metal and EB welded joint at 77 K.

Sample	0.2% proof stress	Tensile strength	Elongation	Reduction of area
	$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_B / MPa	δ (%)	ϕ (%)
Base	1393	1817	25.8	29.7
EBW	1329	1706	12.2	24.2

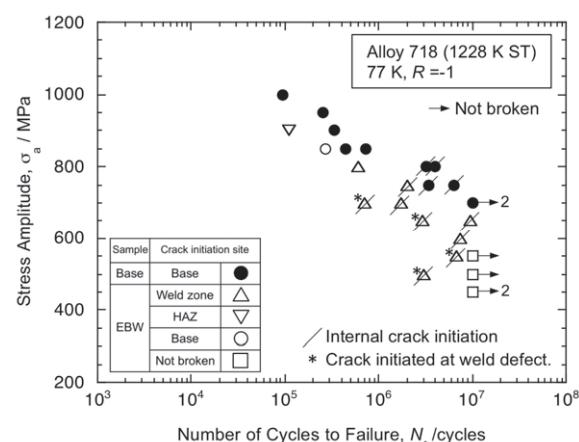


Fig. 3 S-N curves of Alloy718 base metal and EB welded joint at 77 K.

核融合炉用超電導磁石絶縁材料の放射線照射効果に関する研究 -組み合わせ応力下での破壊-

Irradiation Effect on Insulation Material for Superconducting Magnet of Nuclear Fusion Reactor – Fracture under Combined Stress –

高橋 知寛, 小林 浩二, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏(大阪大学)

TAKAHASHI Tomohiro, KOBAYASHI Koji, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University)
E-mail: takahashi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

ITER のトロイダル磁場(TF)コイルでは絶縁材料として有機高分子をマトリックス樹脂に用いたガラス繊維複合材料が使用されるが、実際の運転中は電磁力に起因した圧縮荷重とせん断荷重が同時に負荷される。有機高分子は一般に放射線感受性が高いため、核融合反応由来の放射線により劣化すると、荷重により亀裂が発生して絶縁性能が低下する恐れがある。そのため絶縁材料の耐放射線性と機械的強度は、核融合炉を実現する上で重要である。これまででは一方向の応力に対する絶縁材料の層間せん断強度(ILSS)が評価されてきた[1]が、実際の使用状況を考慮すれば、圧縮とせん断の組み合わせ応力に対する機械的特性を検討する必要があると言える。そこで本研究では絶縁材料に γ 線を照射し、斜め装填型治具を用いて圧縮とせん断の組み合わせ荷重を負荷することにより、その機械的強度と耐放射線性を評価した。

2. 実験方法

本研究ではまず二種類のガラス繊維強化プラスチック(GFRP)を作製した。S-ガラスクロスを45枚積層し100°Cで24時間真空乾燥させた。マトリックス樹脂として(i)エポキシ樹脂(EP)と硬化剤を混合したもの、(ii)耐放射線性が高いとされるシアネットエステル樹脂(CE)とエポキシ樹脂を重量比4:6で混合したものの二種類を調製し、真空含浸した。常圧で熱処理を行い、完成したGFRPはFig.1に示す試験片の形状に加工した。試験片は ^{60}Co 線源にて線量率40kGy/hで最大10MGyまで γ 線照射した。そしてFig.2に示す斜め装填型試験治具によって室温(RT)と液体窒素温度(LNT)で強度試験を行った。この試験治具は荷重Wを印加すると圧縮方向に $W\sin\theta$ 、せん断方向に $W\cos\theta$ の荷重を負荷することができ、破断荷重 W_B がかかった時の圧縮応力 σ 、せん断応力 τ はFig.1のように破断面の面積を bL とすると、それぞれ以下の式(1)、式(2)で表すことが出来る。

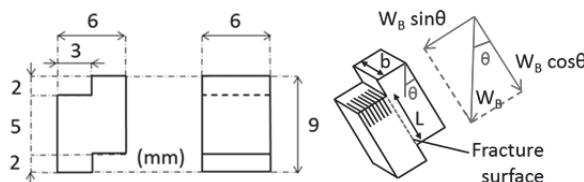


Fig.1 Geometry of specimen and load direction.

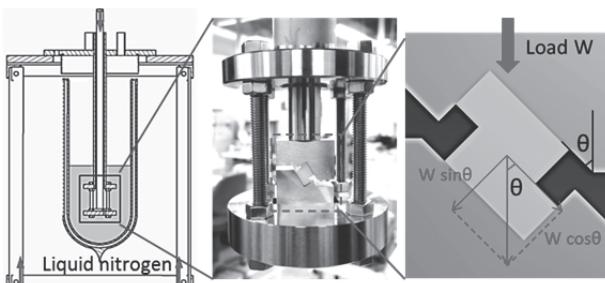


Fig.2 Pictures of test apparatus.

$$\sigma = W_B \sin \theta / bL \quad (1)$$

$$\tau = W_B \cos \theta / bL \quad (2)$$

また、角度の異なる治具に付け替えることで圧縮とせん断の比率を変えることが出来るため、さまざまな組み合わせ応力に対する絶縁材料の強度が評価できる。本研究では治具の角度 θ を30°、45°、60°の3通りに変化させて実験を行った。

3. 結果と考察

Fig.3に一部のデータを記載する。Fig.3に各条件におけるGFRPの破断荷重から算出した圧縮・せん断応力をプロットすることで得た破壊包絡線を示している。縦軸上にプロットされた点はダブルノッチ試験片によるILSS試験の結果[2]によるものである。この結果から、EP-0MGy-LNTとCE-0MGy-LNTにおいて、せん断応力のみを負荷した時(0°)は強度に差があったものの、角度を大きくして圧縮応力を大きくするにつれ、その差が小さくなつた。

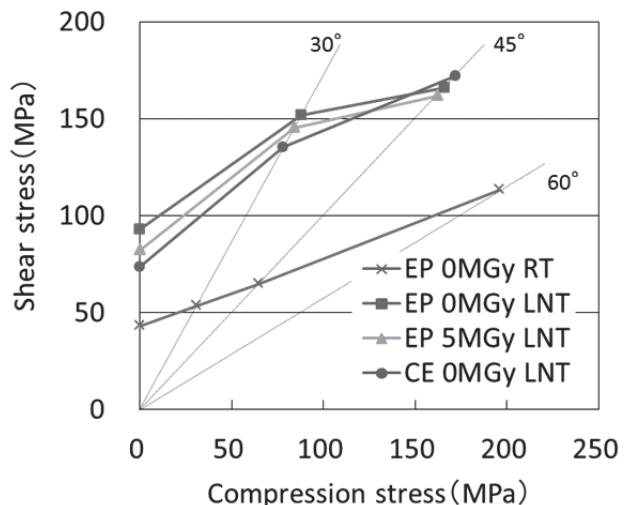


Fig.3 Fracture envelope of GFRP in several condition.

4. まとめ

本研究ではGFRPの組み合わせ応力に対する機械的特性と γ 線照射効果に関して検討した。今後ポリイミドフィルムを挟んだハイブリッド材料でも実験を行う予定である。

5. 謝辞

本研究で用いた資材は株式会社有沢製作所からご提供いただきました。また、本研究の一部は自然科学研究機構核融合科学研究所の「NIFS 一般共同研究プログラム(NIFS13KERA008)」の助成を得て実施いたしました。

参考文献

- [1]Y. Nakata et al.: CEC/ICMC, 2013, p.30.
- [2]Y. Tomi et al.: IEEE Trans. Vol.22, No.3, 2012.

核融合炉用超電導磁石絶縁材料の照射効果に関する研究 —マトリックスと界面の照射効果の検討—

Study on Irradiation Effect of the Insulation Materials for Superconducting Fusion Magnet
—Examination of the irradiation effect of the matrix and the interface—

小林 浩二, 高橋 知寛, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏(大阪大学)

KOBAYASHI Koji, TAKAHASHI Tomohiro, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University)

E-mail: k-kobayashi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

ITER で使用される超電導磁石の中で、トロイダル磁場 (Toroidal Field, TF) コイルは、核融合反応によって生じる放射線の影響を最も受ける。高速中性子フルエンスは 3.2×10^{21} n/m² に達し、最大で 45 MPa のせん断応力が負荷される。したがって、ITER 用超電導磁石の構成要素は、放射線環境下であることに加えて、冷媒である超臨界ヘリウム温度 (SHeT) で優れた強度を維持することが要求される。

超電導磁石の構成要素において、ガラスクロスとポリイミドフィルムを積層した絶縁材料は、マトリックスに使用される有機高分子の放射線感受性が高いことから、マトリックスの照射効果と界面の照射効果の評価は重要である。これまでの研究では、シアネットエステルとエポキシ樹脂の混合樹脂をマトリックスとしたガラス繊維強化プラスチック (Glass fiber reinforced plastics, GFRP) に対して大気雰囲気環境下で γ 線を照射し、液体窒素温度 (LNT, 77 K) で層間せん断強度 (Interlaminar Shear Stress, ILSS) 試験を実施したところ、ILSS の若干の増加が確認された。一方で、同様な条件で γ 線を照射した時、マトリックス樹脂では分子鎖の切断が確認され、同様な結果は先行の研究でも確認されている [1]。

2. 現在の問題点と考察

前節で述べた事実に対して、

- 1) この機構は何であるのか
- 2) 低温照射でも同様の現象が起こるのか
- 3) 低温照射後の昇温でこの現象は影響されるのか

等に答えることが重要であると考えられる。

1)について、以下の機構を提案している。すなわち、分子鎖の切断による低分子量化がマトリックスを軟化させ、亀裂先端の応力緩和が引き起こされる。この結果として ILSS を増加させる。

2)については、LNT ではエポキシ樹脂の副分散が発現する温度より低く、それに伴い分子崩壊の機構が変化する可能性がある。

3)については、照射により分子切断されたラジカルは低温では凍結されており、昇温とともに拡散し、結合してガスとなりスウェーリングを引き起こすことが知られている。特にフィルム材を含む絶縁材料では、フィルム/マトリックス界面にガスが蓄積されることが考えられ、このため、巨視的な破壊機構が変化する可能性がある。

ここで提起した 1)~3)の問題の中で、本研究では特に 2) と 3)に注目して実験を行うこととした。

3. 実験方法

真空容器内でガラス繊維を積層させ、ビスフェノール A 型エポキシ樹脂 (Diglycidyl ether bisphenol A, DGEBA) とポリエーテルアミン硬化剤を混合したものを真空含浸させて GFRP を作製した。また、同様の方法でシアネットエステル (CE) と DGEBA を質量比 4:6 で混合した樹脂による GFRP を作製した。それぞれの GFRP を目違い切欠き試験片に加工した後、

大気雰囲気環境下と液体窒素環境下でそれぞれ γ 線を照射した。Table 1 に照射条件と試験条件を示した。

Table 1 Test sample

コンディション	照射温度	温度履歴	実験温度
①	RT	冷却	LNT
②	LNT	RT 昇温後冷却	LNT
③	LNT	—	LNT

Fig.1 に ILSS 試験の概要図と試験片の形状の概略図を示す。ILSS の導出は、切欠き間距離を L 、幅を b 、せん断破壊が起きた時の荷重を P として、式(1)で導出された τ を ILSS とした。

$$\tau = \frac{P}{bL} \quad (1)$$

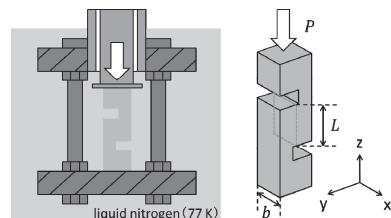


Fig.1 Outline of ILSS test and geometry of specimen

4. 実験結果

Fig.2 に①の条件で試験した DGEBA と CE/DGEBA の GFRP でそれぞれ得られた ILSS の結果を示す。 γ 線照射後、DGEBA による GFRP の ILSS は低下し、CE/DGEBA による GFRP の ILSS は増加した。すなわち、照射後の ILSS の増加は CE/DGEBA のみ見られた。

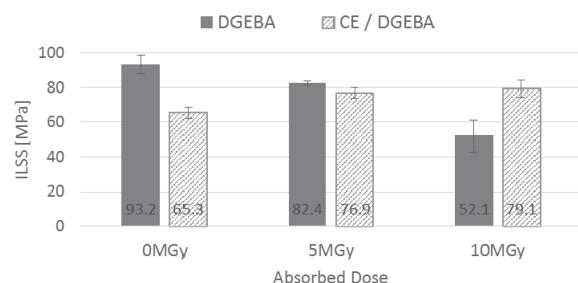


Fig.2 ILSS of GFRP irradiated at room temperature

5. 謝辞

本研究の一部は、自然科学研究機構核融合科学研究所の「NIFS 一般共同研究プログラム (NIFS13KERA008)」の助成を得て実施いたしました。

参考文献

- [1] Jingwen Li, et al : Fusion Engineering and Design, VOL.89, Issue 12(2014)pp.3112–3116

超伝導加速空洞横測定用 2K 冷凍機の開発

Construction of 2K refrigerator for superconducting cavity horizontal test

原 和文, 仲井 浩孝, 梅森 健成, 加古 永治, 阪井 寛志, 近藤良也(KEK); 仙入 克也, 津曲 健(三菱重工)
HARA Kazufumi, NAKAI Hirotaka, UMEMORI Kensei, KAKO Eiji, SAKAI Hiroshi, KONDOW Yoshinari(KEK);
SENNYU Katsuya, TSUMAGARI Ken (MHI)
E-mail: kazufumi.hara@kek.jp

1. はじめに 一超伝導加速空洞一

昨今の加速器技術として超伝導加速空洞の進歩は目覚ましいものがある。KEKにおいても KEKB の運転に超伝導加速空洞が継続的に用いられている。また、将来計画として研究開発を行っているリニアコライダーや ERL(エネルギー回収型リニアック)のための超伝導加速空洞が、我々の開発した 2K 冷凍機により長期間安定して冷却運転されている。

超伝導加速空洞の技術は日々進歩しているが、現在の大きな問題の1つがクライオモジュール組込時に空洞内部へ微小な異物が混入する事に起因した電界電子放出等による空洞性能劣化である。超伝導加速空洞の組立は、入力カブラー、HOM ダンパーやゲートバルブ等多くのコンポーネントを取り付けられるので、どの工程でその問題が発生するかを突き止めるのは、非常に重要である。そこで、超伝導加速空洞の性能劣化を調べるために、クライオモジュール組立を模擬したクライオスタッフに 2K 冷凍機を組み合わせた超伝導加速空洞横測定用クライオスタッフを製作した。この超伝導加速空洞横測定用クライオスタッフは、STF 棟や ERL 開発棟で長期間の連続運転を行っている 2K 冷凍機と違い、近くに液化ヘリウム冷凍システムが無い場所に設置される。したがって、冷媒をデュアードで供給するため、この冷却システムは、限られた冷媒で効率よく行うことを目標として設計を行った。

2. 2K 冷凍機とクライオスタッフ

超伝導加速空洞横測定用クライオスタッフシステムを Fig.1 に示す。システムは、大きく 2K 冷凍機とクライオスタッフに分かれられる。2K 冷凍機は、クライオスタッフの上部に配置されており、液体窒素と液体ヘリウム、超流動ヘリウムを、クライオスタッフ内に設置した超伝導加速空洞に供給する。

2K 冷凍機の熱交換器は、STF 棟や ERL 開発棟で使われている 2K 冷凍機と同じタイプを使用している。また、超伝導加速空洞の 2K ヘリウム供給パイプを大きくて約 10L の 2K ヘリウムのリザーバーとすることで 2K 冷凍機の高さが短くなり、システム全体の高さを低くすることができた。

4.2K ヘリウムは、2K 冷凍機内にある約 40L のリザーバーに蓄えられ内圧を一定にコントロールされる。超伝導加速空洞の冷却ステップにより適宜 4.2K テーブル、超伝導加速空洞予冷、熱交換器ラインに供給される。2K に冷却される超伝導加速空洞とそのコンポーネントは 4.2K テーブル上にあるので、テーブルを液体ヘリウムで冷却して 4.2K 輻射シールドとしている。80K 輻射シールドは、SUS316L φ14x0.5t パイプとパイプを挿入するアルミ材で構成され、パイプに液体窒素を供給してパイプクーリングとし、伝熱により冷却する。

2K 冷凍機とクライオスタッフの接続は、2K で使用実績のある ICF ガスケットと U タイプ・リングのフランジを用い、その配置を超伝導加速空洞の交換作業に干渉しない場所にした。これにより、比較的簡単に 4.2K テーブルごと超伝導加速空洞と 2K ヘリウムのリザーバーを引き出せる構造とした。

ヘリウム系のコンポーネントを液体ヘリウムの蒸発潜熱だけで室温から冷却する場合を想定すると、大量の液体ヘリウムが必要となり現実的でない。そこで、超伝導加速空洞とそのコンポーネントの予冷に、液体窒素循環システム開発に使用した原型試験機を改造しヘリウムガス循環装置を製作した。

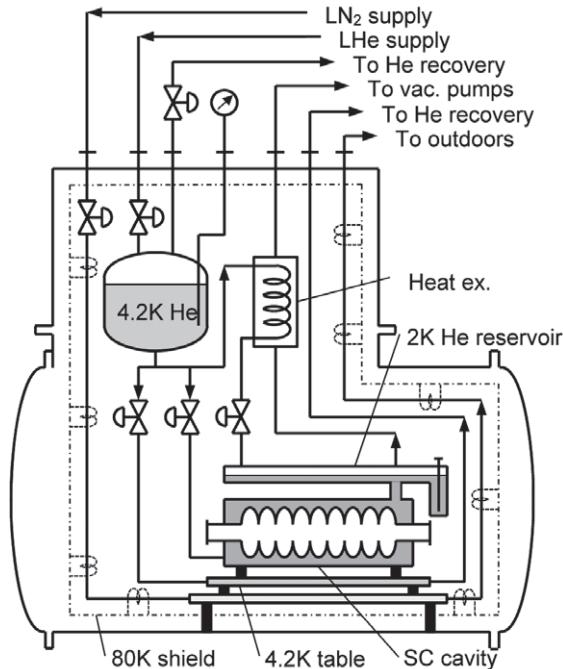


Fig.1 Flow of 2K Ref. System

3. 冷却

ヘリウムガス循環装置により液体窒素で冷却された約 80K のヘリウムガスを 2K 冷凍機の液体ヘリウム供給ラインより供給して室温からヘリウム系全体が 100K 以下になるまで予冷を行う。その後、液体ヘリウムをデュアードから 4.2K ヘリウムのリザーバーを通じて 4.2K テーブルと超伝導加速空洞に供給して冷却を継続し、4.2K 及び 2K ヘリウムのリザーバーに設定した値まで液体ヘリウムを貯める。

2K の液体ヘリウム生成は、液体ヘリウムを真空ポンプで減圧して行う。減圧し始めから λ 点手前までは、強制沸騰により蒸発した分の液体ヘリウムは、4.2K リザーバーから補給する。λ 点よりも温度が低くなり、超伝導液面計の指示が安定した後は、熱交換器を通して過冷却された液体ヘリウムをジュール・トムソン膨張させて連続的に超流動ヘリウムを生成させ、2K ヘリウムのリザーバー液面が一定になるように制御する。そして、減圧ラインの圧力が約 3kPa になるようにバルブでコントロールし、超伝導加速空洞を 2K に冷却維持する。

4. まとめ

本年 7 月に冷却テストを行った。ヘリウムガス循環装置を使用した予冷では 100K まで安定して冷却できることと、減圧して熱交換器を通じた過冷却ヘリウムをジュール・トムソン膨張させて供給配管内の液面を維持できることを確認した。しかし 4.2K ヘリウムのリザーバーのヘリウムガス回収ラインで熱振動が発生した。内圧をコントロールするバルブを 4.2K ヘリウムのリザーバーから離れた室温配管途中に設けたために発生したと考え、バルブ位置を出来るだけヘリウムガス回収ライン出口に近い場所へ移動した。次回の冷却試験で熱振動発生の有無を確認する予定である。

KEKにおける超伝導加速空洞用 2K 冷却制御システムの開発

Development of the 2K cooling control system for the superconducting cavity in KEK

中西 功太, 小島 裕二, 仲井 浩孝, 原 和文, 細山 謙二, 本間 輝也(高エネ研);
 飯田 隆, 吉川 剛史(日立テクノロジーアンドサービス); 遠藤 友成, (日立プラントメカニクス)
NAKANISHI Kota, KOJIMA Yuuji, NAKAI Hirotaka, HARA Kazufumi, HOSOYAMA Kenji, HOMMA Teruya (KEK);
 IIDA Takashi, YOSHIKAWA Takafumi (Hitachi Technologies and Services); ENDO Tomonari (Hitachi Plant Mechanics)
 E-mail: kota.nakanishi@kek.jp

1. はじめに

KEK に建設された超伝導加速空洞を利用した 2 つの加速器施設 STF, cERL の冷却制御システムを開発した。これらの施設では、ヘリウム液化冷凍機として、それぞれ TCF200 を使用している。また、KEK で開発した飽和超流動ヘリウムを用いた 2K 冷却システムにより空洞を冷却している。これらの冷却システムの制御システムを開発し、ユーザより要求された様々な冷却条件を満足することができた。また、冷却設備を安全に効率よく運転するための制御上の検討も行っている。

制御プログラムには、これらの加速器施設で RF 制御やビーム計測などに広く使用されている EPICS を使用した [1][2][3][4]。

2. 2K 冷却システム

2K 冷却システムは Fig1 に示す通り 4K ポットから 2K ポットに液化ヘリウムを供給し、2K ポット圧を 3kPa まで減圧する仕組みとなっている[5]。定常運転時は 4K および 2K 液面レベル、80K シールド、5K シールドの代表点の温度、2K ポット、4K ポットの圧力を制御しており、必要な制御ループの数は限られている。一方で、常温からの冷却中は制御ループが多くなり、制御が複雑になる。最も制限の多い cERL の主加速空洞を例にすると、2K、5K、80K のそれぞれの領域に取り付けられた温度計、各 29 点、11 点、8 点全ての冷却速度が 3K/h 以下であることが要求される。また、測定点の間に生じる温度差についても制限が課せられている。これらの冷却条件は 150K 以下では解除され、急冷することができる[4]。これらの温度は冷媒の供給バルブで制御されるため、一つのバルブを制御するために、多数の測定点のデータを利用する必要がある。測定点ごとに P または PI の制御ループを設定し、その最低値を探用している。PI ループについては現状のバルブ開度を考慮して開度要求を算出することで、注目すべき測定点が移った際にもオーバーシュートすることなく、安定した制御を行うことができるようになった。この制御プログラムは横河電機製 PLC の LinuxCPU 上で動作している。

3. ヘリウム液化冷凍機

cERL のヘリウム冷凍機制御システムは老朽化が著しく、cERL 施設に移設後の試運転において正常に動作しなかったため、2K 冷却システムと同じ横河電機製 PLC を用いて、新たに制御システムを構築した。計測器は全て既存のものを利用した。単体での液化能力は液面上昇で約 250L/h が得られており、制御システムを入れ替えたことによる性能の劣化は見られない。空洞を常温から冷却する際には、2K 冷却制御システムと連携しタービンを自動で起動・停止することで、温度制御したガスを供給する機能を追加した。

長期連続運転を行う上で、2K 冷却システムの 5K シールドや減圧ポンプからの戻りガスをヘリウム液化冷凍機に直接戻す運転を行うことが重要である。これらのガスを安定に受け入れるために、ヘリウム液化冷凍機のヘリウムガス圧縮機のサクション圧を安定して十分低く維持する必要がある。特に 5K シールドからの戻りガスの温度や流量の変化により、低圧側熱交換器のコンダクタンスが大きく変化するため、圧縮機に要求

される出力が変化する。圧縮機の出力が不足した場合に通常の制御では圧縮機の吐出圧を維持し、サクション圧が上昇するので、5K シールドや減圧ポンプ吐出圧が上昇する危険がある。これらの危険を回避するために、出力不足時には圧縮機のサクション圧を維持し、吐出圧を低下させる制御方式についても検討を進めている。

4. ユーザインターフェイス

EPICS レコードとして管理された測定値や設定値などのパラメータは、PC 上に表示し、設定値の変更操作ができる。操作画面は Java ベースのプログラム CSS を利用して作成した。操作画面の例を Fig1 に示す。

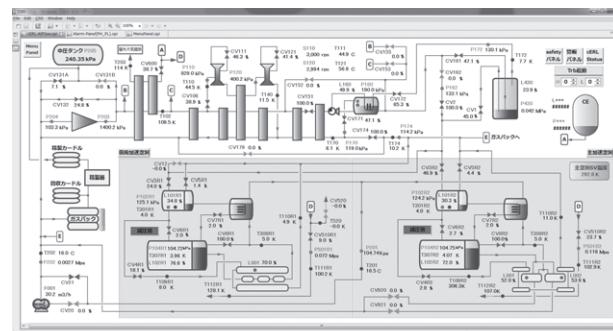


Fig.1 An Example of Operation Screen

5. 制御システム間の連携

異なる制御システムで測定した空洞の温度を参照して 2K 冷却システムを制御したり、2K 冷却システムにヘリウム液化冷凍機より温度制御したヘリウムガスを供給したり、各機器が連携して動作できるのは、各制御システムがデータを EPICS レコードとして管理し共有ができるためである。現在は、各施設内だけでなく、cERL, STF 間や、所内の他の加速器やヘリウム液化冷凍機とも情報を共有できるように作業を進めている。

参考文献

1. J.Odagiri, et al.: "Integration of PLC with EPICS IOC for SuperKEKB Control System", Proc of ICALEPCS2013, San Fransisco, USA
2. T.Miura, et al.: "Performance of RF System for Compact-ERL Main Linac at KEK", Proc of IPAC2014, Dresden, Germany.
3. T.Miura, et al.: "Performance of the Micro-TCA Digital Feedback Board for DRFS Test at KEK-STF", Proc of IPAC2011, San Sebastián, Spain
4. K.Nakanishi, et al.: "DEVELOPMENT OF THE HELIUM REFRIGERATOR CONTROL SYSTEM USING EPICS", Proc of 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan
5. J.Yoshida, et al.: "DEVELOPMENT OF STF CRYOGENIC SYSTEM IN KEK", Proc of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA

南極昭和基地での超伝導重力計の長期運転について(2)

For long-term operation of a superconducting gravimeter in Syowa Station at Antarctica (2)

池田 博(筑波大);青山雄一, 土井浩一郎(極地研)
IKEDA Hiroshi(Tsukuba Univ.) ; AOYAMA Yuichi, DOI Kouichiro(NIPR)
E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

1.はじめに

南極昭和基地では、南極で唯一の超伝導重力計による重力連続観測が1993年から行われている。第一世代は10KタイプGM冷凍機を装備した超伝導重力計(TT-70 #16)により行われた。第二世代として2003年から4KタイプGM冷凍機を装備した液体ヘリウム再凝縮型の小型超伝導重力計(CT #043)に更新され2009年12月末まで連続観測が行われた。現在、使用されている第三世代の超伝導重力計(OSG#058)は2010年1月より連続観測を開始しており、2012年2月までの2年間、設置後22132時間(国内での試運転時間を含む)、メンテナンス無しで連続観測に成功した[1]。その後、冷凍機と圧縮機を交換して2015年10月まで観測を継続している。これは超伝導重力計の連続観測の世界新記録である。本報告では2015年1月に行われた2回目の冷凍機及び圧縮機の交換についてと得られた長期データについて報告する。

2.長期連続運転

第3世代の4KタイプGM冷凍機を装備した液体ヘリウム再凝縮型の超伝導重力計(OSG#058)が2010年1月に導入され連続観測を開始して、今までの超伝導重力計では1年ごとに冷凍機の交換と圧縮機の交換を行って来たが、運転状況から2年間連続運転を行い2012年2月に初めて冷凍機の交換と圧縮機の交換を行った。これは超伝導重力計の連続観測としては新記録であった。交換した冷凍機と圧縮機は53次夏隊によって日本に持ち帰り、住友重機械工業によってメンテナンスを行った。その結果、持ち帰った時点での負荷性能試験を行ったところ1st 56.2K(60K以下)2st 3.49K(4.2K以下)の性能が得られ、設置当初の値1st 52.4K、2st 3.40Kからの性能劣化はほとんど無く、さらなる長期運転が可能であったことが示唆された。運転時間は2012年2月8日で22132時間であった。冷凍機の分解調整の結果、内部摺動部の異常磨耗やペーツ破損等も無かった。修理作業としては蓄冷材のベーキング、再組立て、リーク検査等を行った。交換部品としてはバルブ本体、バルブプレート、軸受ペアリング等を交換した。圧縮機についてはアドソーバの交換を行った。そのため今回は2012年に交換した冷凍機と圧縮機については2015年1月まで25822時間の3年間連続運転を試みた。その結果を調査するため交換した冷凍機は56次隊夏隊によって日本に持ち帰り、住友重機械工業によってメンテナンスを行った。その結果、持ち帰った時点での負荷性能試験を行ったところ1st 55.1K(60K以下)2st 3.40K(4.2K以下)の性能が得られ、設置当初の値1st 52.4K、2st 3.40Kからの性能劣化はほとんど無く、3年間の長期運転が可能であることが示唆された。

Fig.1に3年間連続運転したディスプレーサーの写真を示す。ほとんど劣化の様子は見受けられない。

3.長期連続観測データ

1回目の交換直前の2012年1月から2015年10月までの観測データをFig.2に示す。上から重力信号値、冷凍機1段温度、冷凍機2段温度、液体ヘリウム液面量の順である。3年間、欠測も無く、ステップも生じていない。冷凍機1段温度は1回目の冷凍機交換時には0.05V程低下したが2回目の交換では変化は無かった。冷凍機2段温度は、ほぼ一定である。ヘリウム液面は、交換時に多少減るがその後は一定である。

2015年1月13日に2回目の冷凍機と圧縮機の交換を行ったが、観測データはUPSがあるので継続されており、冷凍機交換によるステップも生じることは無かった。そのため今後も継続したデータが取得出来る。このように5年間の長期運転による高精度度のデータがこれほど長期に渡って得られたことは無く、今後もさらに継続されることを期待している。

4.まとめ

第3世代の超伝導重力計(OSG#058)が導入された2010年1月より連続観測を開始して2012年2月まで設置後22132時間、メンテナンス無しで連続観測に成功したが、それから3年経過して25822時間で2回目の冷凍機交換を行い無事に成功した。さらなる連続観測が期待される。

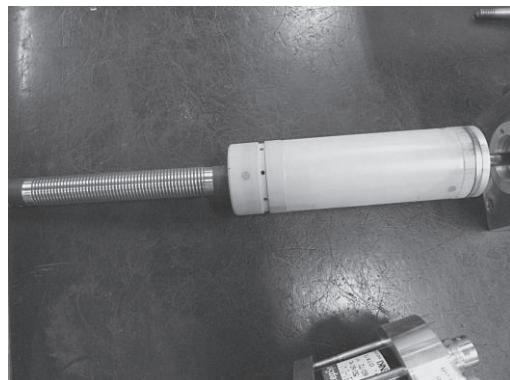


Fig.1 Displacer continuous operation for two years.

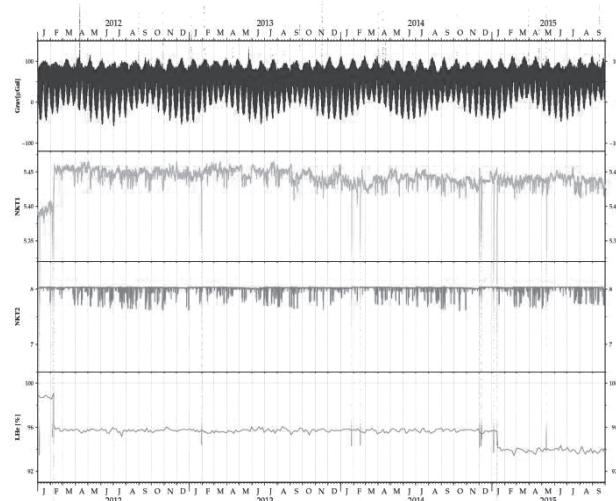


Fig.2 Observed data of superconducting gravimeter.

参考文献

1. H.Ikeda *et al.*: Abstract of CSJ Conference vol.86 (2012) p231

JT-60SA ヘリウム冷凍機システムの据付 Installation of Helium Refrigerator System of JT-60SA

夏目 恭平, 木津 要, 吉田 清, 小出 芳彦 (原子力機構); Christine Hoa (CEA)
 NATSUME Kyohei, KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi, KOIDE Yoshihiko (JAEA); HOA Chriistine (CEA)
 E-mail: natsume.kyohei@jaea.go.jp

1. はじめに

核融合プラズマ実験装置 JT-60 の超電導化改造計画が日本と欧州連合(EU)の共同プロジェクトとして、那珂核融合研究所において進められている。JT-60SA 用ヘリウム冷凍機システムは、4.5 K で約 9 kW の冷凍能力を持ち、欧州実施機関である Fusion For Energy(F4E) 及びフランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)が製作・海上輸送・据付・試運転等を担当する。原子力機構は国内輸送・建屋建設等を担当し、那珂核融合研究所での作業を補助する。本講演では、ヘリウム冷凍機システムの据付状況及び試運転過程について報告する。

2. JT-60SA ヘリウム冷凍機システムの設計と性能

日本と EU の共同で行われた熱負荷解析の結果決定された冷凍機の要求性能を Table 1 に示す[1][2]。また、超伝導コイル等の被冷却体を含めた簡易的な系統図を Figure 1 に、トカマク装置を含めた配置図を Figure 2 に示す。

本冷凍機の特徴の 1 つは、トカマク装置特有の大きな過渡的な熱負荷を平準化するために、コールドボックス内に比較的大きな液体ヘリウム槽(4.3 K, 約 7 m³)を備えていることである。CEA は JT-60SA の 1/20 スケールの冷却装置を準備し、実験的及び数値解析的にその有効性を確認した[2]。

Table 1 Requirements during normal operation mode [2]

	Average heat load (W)	Mass flow (g/s)	Supply pressure (MPa)	Supply temperature (K)
TS	42000	404	1.8	80
HTS-CL	-	25	0.4	50
TFC & CST	1794	876	0.5	4.4
CS&EFC	1850	960	0.5	4.4
Cryopump	84	270	0.5	3.7

TS: Thermal Shield

HTS-CL: High Temperature Superconducting Current Lead

TFC: Toroidal Field Coil CST: Coil Structure

CS: Central Solenoid EFC: Equilibrium Field Coil

3. JT-60SA ヘリウム冷凍機システムの据付

原子力機構は、2014 年 5 月から建屋及び基礎工事を開始し、2015 年 3 月にヘリウム冷凍機システムの受入準備が完了した。CEA と F4E の許で、フランス Air Liquide 社によって製作されたヘリウム冷凍機システムとポルトガル Silva Matos 社によって製作されたヘリウム貯槽は、2015 年 4 月から順次那

珂核融合研究所に輸送され、据付工事が開始された。据付工事の進捗は順調に推移し、2015 年 9 月に完了した。

4. JT-60SA ヘリウム冷凍機システムの試運転

2015 年 10 月から配管や機器等の乾燥窒素による洗浄とヘリウム圧縮機等の機器単体の動作試験を行っている。冷凍機システム全体としての冷却試運転は 2015 年 2 月開始を予定している。冷凍機の性能確認試験では、コールドボックス内に備えた加熱器を用いて系に入熱し、プラズマ実験時の過渡的な熱負荷を模擬する。

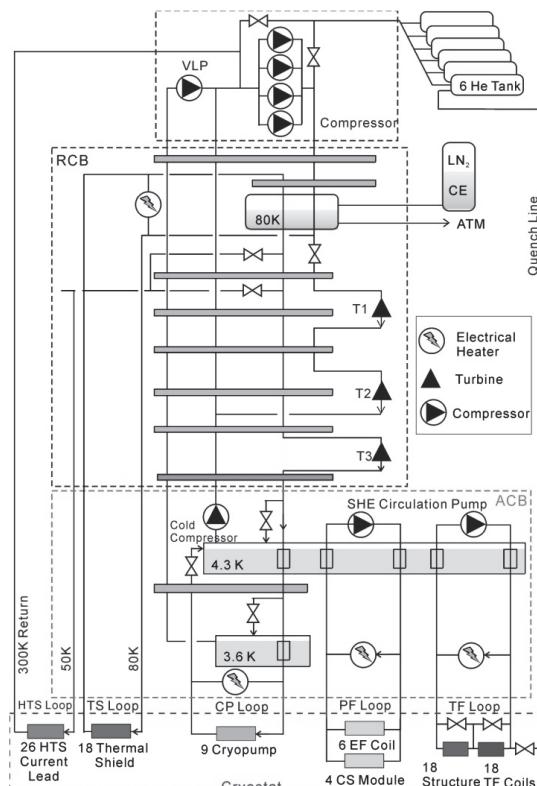


Figure 1 Flow diagram of cryogenic system for JT-60SA

参考文献

1. K. Kamiya et al.: Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan 46, 10-17 (2011)
2. F. Michel, et al.: Advances in Cryogenic, AIP Conference Proceedings 1434, 78-85 (2012)
3. C. Hoa, et al.: Physics Procedia 67, 54-59 (2015)

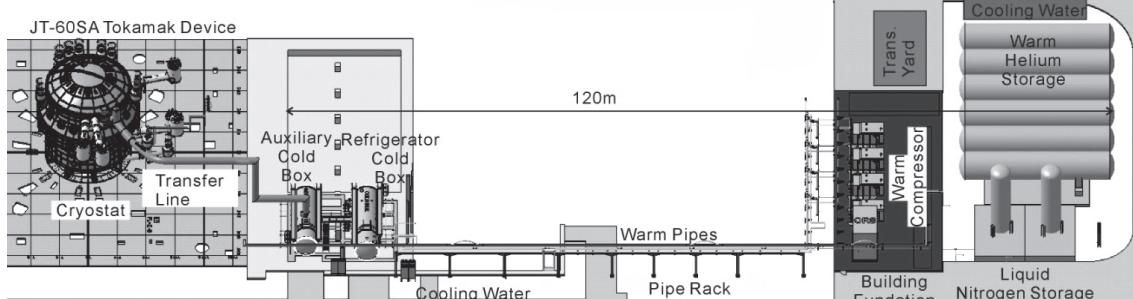


Figure 2 Layout of cryogenic system for JT-60SA. The tokamak cryostat and the transfer line has not been constructed yet.

クライオターゲット冷却系メタルガスケットのシール性能評価

He leak tightness of cryogenic target cooling system with metal gasket

岩本 晃史, 坂上 仁志(NIFS); 乗松 孝好, 中井 光男, 藤岡 慎介, 白神 宏之, 疋地 宏(阪大レーザー研)
 IWAMOTO Akifumi, SAKAGAMI Hitoshi (NIFS); NORIMATSU Takayoshi, NAKAI Mitsuo, FUJIOKA Shinsuke,
 SHIRAGA Hiroyuki, AZECHI Hiroshi (ILE, Osaka Univ.)
 E-mail: iwamoto.akifumi@LHD.nifs.ac.jp

1.はじめに

レーザー核融合実験用に開発を行っているクライオターゲットは周囲に満たされた低圧のヘリウムガスにより冷却され、固体燃料層の形成が行われる。そのため冷却容器にはヘリウムガスの気密性が要求されるが、同時にターゲット交換の利便性や頻度、実験の形態から気密構造は簡便であることが望まれる。通常メタルガスケットにはボルト締結型の一組の法兰ジ構造により高い圧縮荷重がかけられ、その性能を発揮する仕様になっているが、我々の装置では使用するヘリウムガス圧が低いので、ボルトを使用せずガスケットへの荷重制御系によって気密性を維持する機構を考えた。これまでにインジウムコーティング銅ジャケットのガスケットについて室温及び10K近傍で荷重とシール性能の関係を評価したので、その結果を報告する。

2.メタルガスケットの仕様

メタルガスケットの一例として臼井国際産業株式会社製のU-TIGHTSEAL®を使用した。の中でも、シールに必要な線荷重や極低温でのシール性能を考慮し、インジュームメッキ銅ジャケットの製品を選択した(Fig.1)。一般的にメタルガスケットに必要な圧縮と線荷重は Fig.2 のような関係にある。今回使用した圧縮中心径 83 mm のガスケットに必要とされる最適線荷重は 110 N/mm であり、全体では 29 kN の荷重が必要になる。しかし実際には F0 で示された低荷重からリークを抑えることができるはずである。

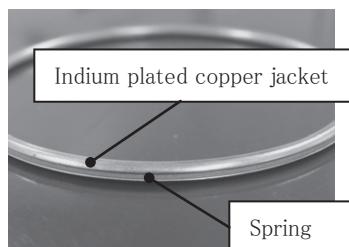


Fig.1 An example of metal gasket. U-TIGHTSEAL® (Usui Kokusai Sangyo Kaisha, Ltd.) with an inner diameter of 81 mm and a height of 3.1mm.

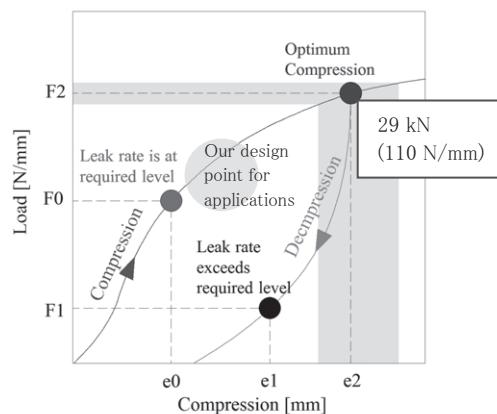


Fig.2 Load - compression curve of metal gasket.

3.実験装置の概要とリーク試験方法

Fig.3 に実験装置とリーク試験法の概要を示す。Target can に置かれたメタルガスケットには Loading system により荷重がかけられ、その荷重はロードセルにより測定される。Target can はヘリウムガスで満たされており、もしメタルガスケットからのリークがあればリークディテクターで検出できる。今回は Target can を約 10 K まで冷却し、その荷重とリーク量の関係について評価した。

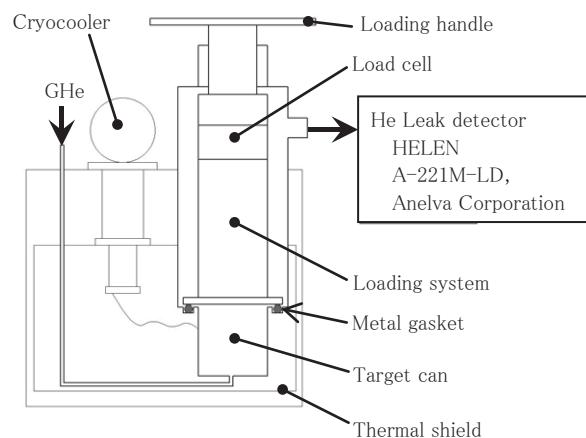


Fig.3 Diagram of gaseous He leak measurements.

4.シール性能評価結果

メタルガスケットへの初期荷重 3.5 kN と 7.0 kN について、リーク試験の手順とその結果を Table 1 に示す。3.5 kN では冷却後ヘリウムガス圧の上昇 (~50 Pa → 1.0 kPa) によりリークレートが上昇し、リークが確認された。一方、7.0 kN では冷却後ヘリウムガス圧を上昇させてもリークレートはバックグラウンドのまま変化せず、さらにその後、気密性を保ったまま 2.5 kN までの除荷が可能であった。2.3 kN ではリークが検出されたが、3.7 kN への再荷重により気密性を回復した。このガスケットについては昇温・除荷後、再度性能評価試験を行った。2回目の冷却後も同様にシール性能を発揮することが確認できた。

Table 1 Helium leak tests with a 3.5 kN and a 7.0 kN loads

	3.5 kN [Pa m³/s]	7.0 kN [Pa m³/s]
Background	4×10^{-11}	Background
3.5 kN at 1 kPa	No leak	7.0 kN at 1 kPa
cool down to ~10 K		
at ~50 Pa	3×10^{-11}	at ~50 Pa
at 1.0 kPa	8×10^{-11}	at 1.0 kPa
↓		↓
Warm up to R.T.		down to 2.5 kN
replaced the used gasket with the new one		at 2.3 kN
		8×10^{-11}
		↓
		up to 3.7 kN
		$< 1 \times 10^{-11}$