

ジェリーロール法 Nb₃Sn 線における線材パラメーターの影響

Effect of Wire Parameters on the Performance of Jelly Roll-Processed Nb₃Sn Wires

太刀川 恭治, 安藤 智紘(院), 梅本 恵(学部)(東海大・工); 竹内 孝夫, 瀧川 博幸(NIMS)
 K. Tachikawa, T. Ando, K. Umemoto, (Faculty of Engr., Tokai Univ.); T. Takeuchi, H. Takigawa(NIMS)
 E-mail: tacsuper@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

厚さ 80 μ m の Sn 基合金シートと Nb シートを用いてジェリーロール(JR)法 Nb₃Sn 線材を作製した。従来の厚さ 100 μ m の Nb シートを用いた線材では offset ~18.1K, 遷移幅 0.1K 以内の T_c と offset B_{c2} (4.2K) ~26.5T の特性が得られている。本研究では、組織や特性に対する Nb シートの厚さや線径の影響について検討した。

2. 実験方法

Sn 基合金の原料粉末の Sn に少量の Ti を置換し、全体に Cu を添加後、熔融拡散によりボタン状の Sn 基合金を作製した。これをプレス加工と圧延加工により厚さ 80 μ m のシートに加工した。次に、厚さ 100 μ m または 160 μ m の Nb シートと重ねて Nb-3.3at%Ta 芯に巻き付け Nb-3.3at%Ta シースに挿入し JR 複合体を作製した。この JR 複合体を溝ロール後 1.4 ϕ , 1.2 ϕ 及び 1.0 ϕ まで線引きした。これらの線材を熱処理後 EPMA や SEM により断面組織を観察し、さらに高磁界における non-Cu J_c を測定した。

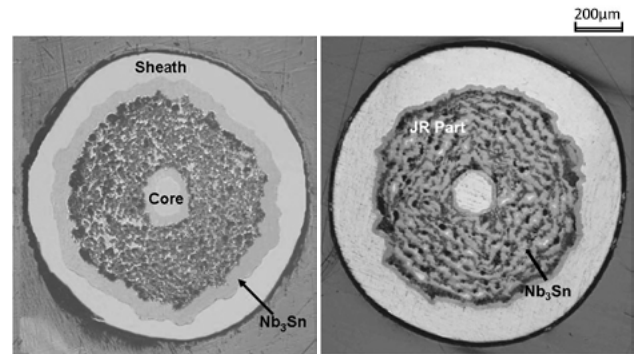
3. 実験結果と考察

Fig. 1 (a)と(b)にそれぞれ厚さ 100 μ m の Nb シートを用いた線材と厚さ 160 μ m の Nb シートを用いた線材の光学顕微鏡による熱処理後の断面写真を示した。従来の厚さ 100 μ m の Nb シートを用いた線材は JR 部の Nb シートが完全に消費され余った Sn がシース部とコア部に拡散して Ta を含む厚い Nb₃Sn 層が生成された。一方、厚さ 160 μ m の Nb シートを用いた線材は JR 部に Ti を含む厚い Nb₃Sn 層がらせん状に生成され、シース部とコア部の Nb₃Sn 層は著しく薄くなった。このように Nb シートを 100 μ m から 160 μ m に厚くすることで JR 部の組織が大きく変化した。

Table1(a)と(b)に厚さ 100 μ m の Nb シートを用いた線材のシース部の Nb₃Sn 層と、厚さ 160 μ m の Nb シートを用いた線材の JR 部の Nb₃Sn 層を点分析した結果を示した。100 μ m の Nb シートを用いた線材の Nb₃Sn 層は Sn 濃度がほぼ化学量論比組成で濃度勾配がなく、~3at%の Ta が Nb に置換されていた。一方、160 μ m の Nb シートを用いた線材の Nb₃Sn 層は Sn 濃度が~22at%に減少したが濃度勾配はなかった。また、JR 部の Nb₃Sn 層には Ta は含まないが ~1at%の Ti を含んでいた。Ti は Sn サイトに置換すると考えられる。

Fig.2に線径の異なる 100 μ m の Nb シートを用いた Sn-Ta 系シート線材と、160 μ m の Nb シートを用いた線材の高磁界における non-Cu J_c を示した。これより線径が細いほうが non-Cu J_c が増加することがわかった。これは図中に示したように Nb₃Sn の areal fraction が増すためと考えられる。さらに、Nb シートを厚くすると 22T 以下の磁界で

non-Cu J_c が著しく上昇した。100 μ m Nb シート線材ではシース部や芯部の Ta を含む Nb₃Sn 層が、また 160 μ m Nb シート線材では JR 部の Ti を含む Nb₃Sn 層が主に臨界電流に寄与すると考えられる。Ta 置換は 22T 以上の、Ti 添加は 22T 以下の J_c 向上に効果が大きいと考えられる。このように特に Nb シートの厚さは JR 法 Nb₃Sn 線材の組織と特性に対して著しい影響を与えることがわかった。



(a) 100 μ m Nb sheet wire (b) 160 μ m Nb sheet wire

Fig.1 Optical micrographs on the cross-section of JR wires heat treated at 750 $^{\circ}$ C for 100h (1.2mm ϕ).

Table1 Nb₃Sn layer composition (at%).

(b) Formed on the Nb-3.3at% Ta sheath

Nb	Sn	Ta	Ti	Cu
70.8	24.8	3.1	0.7	0.6

(a) Formed in the JR part of 160 μ m Nb sheet wire

Nb	Sn	Ta	Ti	Cu
77.1	21.8	0.0	1.1	0.0

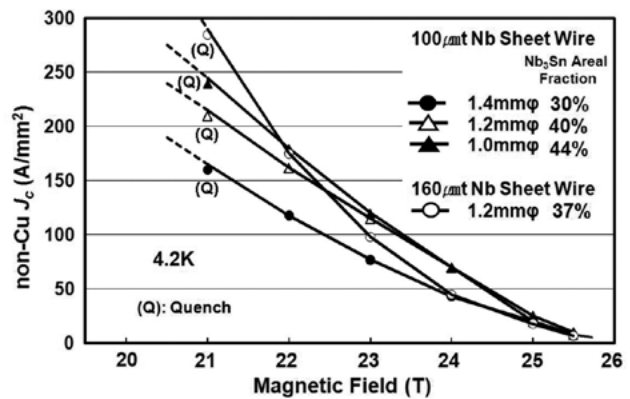


Fig.2 Non- J_c versus magnetic field curves of wires with different diameter and Nb sheet thickness. Heat treatment : 750 $^{\circ}$ C for 100h. Nb₃Sn areal fraction is inserted in the figure.

Ti 化合物分散ブロンズによる Nb₃Sn 線材の試作Trial Fabrication of Nb₃Sn Wires by using TCD(Ti-base Compound Dispersion) Bronze

菊池 章弘, 吉田 勇二 (NIMS); 谷口 博康 (大阪合金)

KIKUCHI Akihiro, YOSHIDA Yuji (NIMS); TANIGUCHI Hiroyasu (OAW)

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

1. はじめに

ブロンズ法 Nb₃Sn 線材の最大の課題は臨界電流密度の向上である。第一に原料のブロンズ中の Sn 濃度が Nb₃Sn 相の体積率を規制している。現在は 16wt%Sn 以下のブロンズが原料として使用されており、Sn 濃度が高くなると金属間化合物の δ 相が析出し、ブロンズの塑性加工性が著しく低下する。また、ブロンズ法線材で拡散生成した Nb₃Sn 相の組成には濃度勾配があり、結晶粒のサイズや形状も異なっている。これは臨界電流密度に影響を及ぼす第二の因子である。

我々は Ti 化合物を Sn のコンテナとして使い、ブロンズの Sn 濃度を増加させることに取り組んでいる。過去に、二元系の Ti₂Sn₃ 化合物粉末をブロンズ(16wt%Sn)中に局所的に配置する線材を試作し、臨界電流密度の向上が得られることを確認した。今回、線材断面の均質性を向上させるために、数ミクロン未満径の Ti 化合物粒子が分散し、冷間加工性が改善した新しい高 Sn 濃度ブロンズを開発した。さらに、この新しい高 Sn 濃度ブロンズを原料に実験室レベルの多芯線材を試作した。

2. Ti 化合物分散型(TCD)ブロンズの作製と評価

黒鉛坩堝を直接水冷しながら一方向凝固させる「水田式溶製法」により、Sn 濃度が 18.5wt%、Ti 濃度が 1.5~2.5wt%のブロンズ溶製塊を作製した。溶製塊は量産サイズ(φ220)よりも小さい(φ83)。溶製後、600℃で200hの溶体化熱処理を大気中で実施した。その後、外径80mm、高さ500mmにサイズを整え、700℃前後に加熱して、熱間鍛錬を大気中で実施した。鍛錬後のサンプルは、歪み除去のための焼鈍を実施した。微視的組織観察を行い、画像解析により CuSnTi 化合物の粒子径や分布について調査した。さらに、ビッカース硬度や引張試験等の機械的性質を評価した。Fig. 1 は作製したブロンズの組織であり、数ミクロン径の Ti 化合物粒子が均質に分散している。

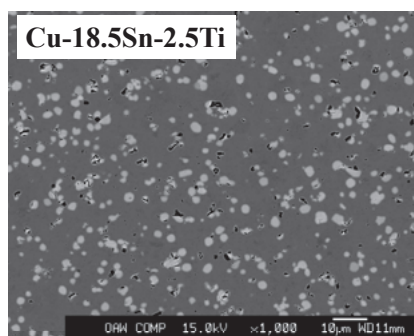


Fig. 1. New TCD(Ti-base Compound Dispersion) Bronze (Cu-18.5wt%Sn-2.5wt%Ti)

3. 多芯線材の試作と評価

作製した Ti 化合物分散型ブロンズにガンドリル加工により 19 芯の穴をあけ、そこに Nb 棒を挿入して静水圧押出を実施した。押出後、中間焼鈍を挿入しながら冷間加工を実施し、外径が 0.7mm まで減面した。加工と共に硬度の変化を調査した。また、量産されているブロンズ(Cu16wt%Sn0.3Ti)を用いて同様な断面の比較材も作製した。作製した試料は各種の条件で拡散熱処理を実施した。臨界温度を SQUID により測定し、4.2K、磁場中における臨界電流密度を 18T 超伝導マグネット及びハイブリッドマグネットを使用して測定した。

次に、前述の 19 芯材を束ねた 228 芯線材も作製した。同様に静水圧押出後、中間焼鈍を挿入しながら冷間加工を実施して加工性を評価した。228 芯線材は、19 芯線材と同様に各種の条件で拡散熱処理を実施して、組織と超伝導特性を評価した。Fig. 2 は加工直後の線材断面写真である。外径は 0.7mm で、Nb ファイラメント径は約 16 ミクロンである。銅比は約 1.0 で、拡散バリア材として Ta を安定化銅との境界に挿入している。一部の線材は、さらに外径 0.3mm まで伸線加工したが、特に異常な断線はなく良好な複合加工性を示した。

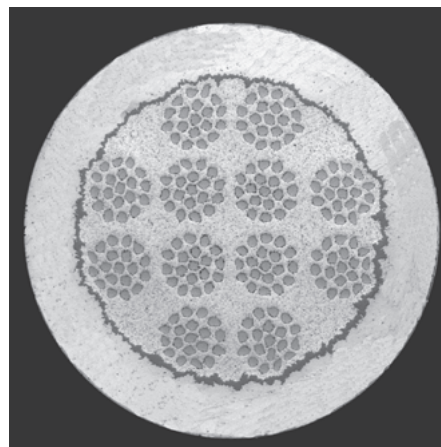


Fig. 2. 228 filaments/TCD Bronze(Cu-18.5wt%Sn-2.5wt%Ti) composite wire (Dia. : 0.7 mm, Cu ratio : 1.0)

謝 辞

本研究の一部は科研費(No. 23560854)により実施した。新ブロンズの開発にあたり、(株)大阪合金の関係各位には多大な支援を頂戴した。また、静水圧押出等では日立電線(株)の田川氏、都竹氏、鈴木氏、中川氏、櫻井氏の協力を得た。東海大の太刀川教授及び電力中央研究所の一瀬主席研究員からは有意義な助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。

Ga 添加 Nb₃Sn 線材の開発 —耐ひずみ性の改善を目指して—

Development of Ga doped Nb₃Sn multifilamentary wires

— In order to improve strain tolerance —

竹内 孝夫, 伴野 信哉, 吉田勇二, 瀧川博幸(NIMS);
金子俊輔, 斎藤 栄 (足工大); 松本 敏, 井上 廉(徳島大)

TAKEUCHI Takao, BANNO Nobuya, YOSHIDA Yuji, TAKIGAWA Hiroyuki (NIMS);
KANEKO Shunsuke, SAITO Sakae (AIT); MATSUMOTO Gen, INOUE Kiyoshi (Tokushima Univ.)
E-mail: TAKEUCHI.Takao@nims.go.jp

1. はじめに

大型で高磁場を必要とし且つ国際協力で建設が進む核融合実験装置 ITER の TF, CS コイルには、世界中で既に高磁場応用で広く普及している Nb₃Sn 超伝導線材が選定された。しかし、元々 Nb₃Sn 線材の弱点とされていた鋭いひずみ感受性の課題が解決したわけではなく、今後も Nb₃Sn 線材が大型超伝導機器線材に利用されてゆくためには、そのひずみ感受性の改善(鈍化)が必須と考えられる。しかし、ひずみ感受性の起源が明確でないこともあり、その改善指針を立てるのは容易でない。Fig. 1 に Ekin が整理した各種 A15 型化合物線材の規格化した臨界磁場 B_{c2} のひずみ依存性を示す。Nb₃Sn のひずみ感受性の改善指針として参考となるのが、Nb₃Sn の対極として同じ A15 型化合物に属するが鈍いひずみ感受性を示す Nb₃Al の状況であろう。拡散法や急熱急冷変態法で作成される Nb₃Al 線材の臨界温度 T_c はそれぞれ 15.5K と 17.6K で、化学量論比とされている Nb₃Al の T_c の値 19.4K と比べるといずれも低い。したがって両線材とも程度の差こそあれ化学量論比から Al が不足した Nb₃Al 組成になっている。Fig. 2 に Flükiger が整理した各種 A15 型化合物の規格化した臨界電流密度 J_c のひずみ依存性を示す。ひずみ感受性と長範囲規則度(結晶秩序度: S_a)の間には相関があるように思われる。すなわち、現象論的には、結晶秩序度の高い V₃Si や Nb₃Sn (S_a=1) ではひずみ感受性が高く、Al が不足した組成で S_a(0.95)が低い Nb₃Al ではひずみ感受性が鈍い。

これらのことは、逆に、Nb₃Sn であっても、むしろ積極的に結晶秩序度を S_a=1 から下げることができれば、T_c (∝ B_{c2}) の低下は避けられないもののひずみ感受性を改善できる可能性があることを示唆する。さらに、もしも Nb₃Sn の T_c (B_{c2}) をむしろ改善する適当な合金添加元素があれば、何らかの方法(高温度熱処理、急冷など)によって結晶秩序度を下げても T_c (B_{c2}) の低下が相殺され、ひずみ感受性だけを改善できる可能性もあるかも知れない。Nb₃Sn への合金添加データ(Fig. 1)を見直すと、高磁場特性でほぼ同等の添加効果で知られる Ti と Ta では、Sn サイト(bcc 副格子)への置換が推定される Ti のみがひずみ感受性を緩和しているように見える(ただし、原著論文ではひずみ感受性に元素添加効果はないと述べている)。

本研究では、Ti 添加と同じように高磁場特性とひずみ感受性の両方に改善効果がある Hf と Ga の同時添加効果に注目した。Sn サイトに置換するであろう Ga だけの単独添加で実際にひずみ感受性が改善するか確かめる。また、Nb₃Sn 相の合金化そのものが結晶秩序度を下げると期待できるので、Ga 固溶量の増大を狙って高 Ga 濃度の Cu-Sn-Ga 合金との拡散反応を試みる。

2. Ga 添加 Nb₃Sn 線材

ブロンズに Ga を添加する方法では、前駆体線の伸線加工性を確保するために Ga を添加した分ブロンズ中の Sn 濃度を下げる必要があった[3,4]。その分 Nb₃Sn 層の成長速度が遅く、また、厚く生成できなかった。本研究では、J_c 確保の観点から、(1) 通常の Sn 濃度であるブロンズ法 Nb₃Sn 多芯線に Ga メッキして熱処理する方法(外部 Ga 拡散法)、(2) Cu-45at%Sn および Cu-50at%Ga の銅合金粉末を原材料としてこれらを適

量混合して利用する改良型パウダーインチューブ法を採用した Ga 添加 Nb₃Sn 線材を製造した(Fig. 3)。詳細は当日報告する。

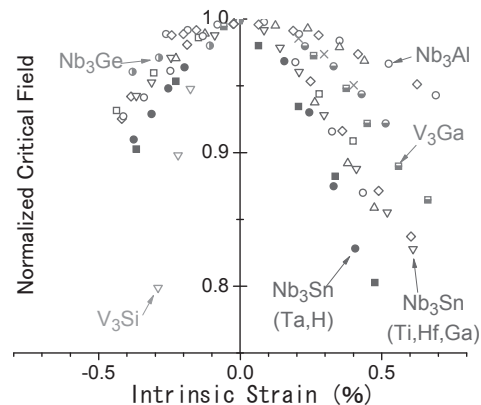


Fig. 1 Normalized critical field as a function of intrinsic strain [1].

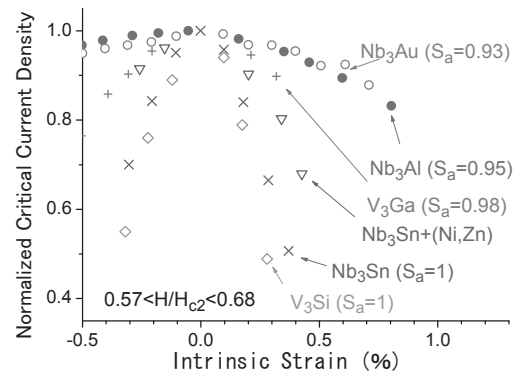


Fig. 2 Normalized critical current density as a function of intrinsic strain for various A15 compounds with different degree of atomic ordering [2].

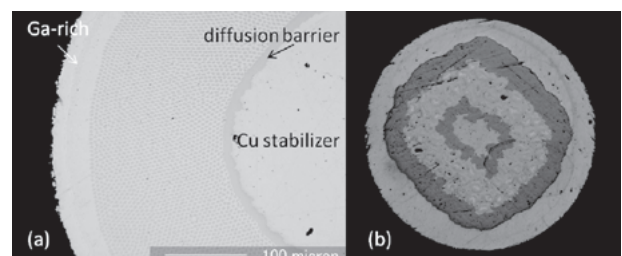


Fig. 3 Cross-sections of (a) externally Ga diffusion processed Nb₃Sn, and (b) modified powder-in-tube processed Nb₃Sn.

参考文献

- [1] J. W. Ekin, Adv. Cryog. Eng., **30** (1984) 823.
- [2] R. Flükiger et al., Adv. Cryo. Eng., **30** (1984) 851.
- [3] O. Horigami et al., Appl. Phys. Lett., **29** (1976) 738.
- [4] H. Sekine et al., Appl. Phys. Lett., **35** (1979) 472.

Ga 添加 Nb₃Sn 多芯線の開発 —高 Sn および高 Ga 銅合金粉末を利用して—

Development of Ga doped Nb₃Sn multifilamentary wires

— Using Cu based powders with high Sn and Ga concentrations—

金子俊輔, 齊藤栄(足利工大); 竹内孝夫, 瀧川博幸, 伴野信哉 (NIMS)

KANEKO Shunsuke, SAITO Sakae(Ashikaga Inst. Tech); TAKEUCHI Takao, TAKIGAWA Hiroyuki, BANNO Nobuya(NIMS)

Email:KANEKO.Shunsuke@nims.go.jp

1. はじめに

Ga 添加したブロンズ法 Nb₃Sn 線は、ブロンズに Ga を添加した Cu-Sn-Ga 三元系ブロンズ・マトリクスと Nb フィラメントとの界面に拡散反応により Ga が固溶した Nb₃Sn 層を生成させる。ブロンズ法ではブロンズ自身の加工硬化が顕著になると中間焼鈍の回数を増やさねばならず、これを避けるため Ga を添加した分ブロンズ中の Sn 濃度を下げる必要があった [1],[2]。一方、パウダーインチューブ法では各種の Sn 基金属間化合物粉を利用すると多量の Sn を含んで線状に加工することができる。本研究では、Sn と Ga を高濃度に含んだ銅合金原材料粉末を作製しこれらの混合比を変えて、数種類の合金組成の多芯線材を作製した。得られた線材の臨界電流密度 J_c、臨界温度 T_c に及ぼす合金組成の影響、熱処理時間の影響について報告する。

2. 実験方法

タンマン溶解炉にて溶製した Cu-45at%Sn、Cu-50at%Ga 合金を破砕して2種類の原材料粉末とした。これらの粉末を適量秤量して Table.1 に示す5種類の合金組成を有する混合粉末を作製した。各組成毎に混合粉末を Nb 管に充填し、溝ロール加工の後、カセットローラーダイスを用いて単芯六角線を作製した。この Nb/(混合粉末)・単芯六角線を、同様に作製した 19 本六角 Nb 線からなる中央ダミーフィラメントの周りに 66 本スタックし、Cu/Ta 二重管内に挿入した後、直径 1.0mm まで伸線加工を行い、66 芯の Cu/Ta/Nb/(混合粉末芯)線とした。これらを 650°C~800°C で 15 分~240 時間の熱処理を施し Nb₃(Sn,Ga)線とした。

作製した試料に対して 4 端子法により T_c、I_c (最大 18T まで) を測定した。また、曲率の異なる太鼓橋状真鍮板を用意し、試料を半田で真鍮板に固定して I_c の測定を行い、次いでより大きな曲率の真鍮板に順次変更して I_c 測定を繰り返すことにより、耐曲げ性も評価した。

3. 結果

Fig.1 に 66 芯 Cu/Nb/Ta/(Cu-35at%Sn-10.2at%Ga) 線を 750°C で 240 時間熱処理した全体および拡大断面組織を示す。各フィラメントには、破線で囲まれた領域の外側に Nb₃Sn 層が 4~5 μm の厚さで生成しており、Ga が 1at% 程度固溶している。また、未反応 Nb マトリクスとの境界には Ga を多く含んだ拡散層が SEM/EDS によって確認されている。Fig.2 に T_c 測定結果を示す。参照材として作製した Ga を含まない Nb₃Sn 線材で T_c 値が 17.5K で飽和するのに比べ、Cu-25.1at%Sn-21.0at%Ga 粉末を使用して作製した線材は約 0.6K も高い 18.1K で飽和する。Fig.3 に Cu 安定化材、Ta 拡散バリア、未反応 Nb を除く断面積で I_c を除して求めた J_c の磁場依存性を示す。15T 中で、Cu-40.4at%Sn-5.1at%Ga の試料では 261.0A/mm²、Cu-31.6at%Sn-14.9at%Ga の試料では 191.5 A/mm² という J_c 値が得られる。Ga 添加量が増加すると J_c の磁場依存性が小さくなるので、18T では J_c の高さは逆転する。耐曲げ性の結果は、当日報告する。

参考文献

- [1] O.Horigami et al. :Appl. Phys. Lett., **28**(1976), 738.
- [2] H.Sekine et al. :Appl. Phys. Lett., **35**(1979), 472.

Table.1 Composition of mixed powders used.

Cu-26.1at%Sn-21.0at%Ga
Cu-31.6at%Sn-14.9at%Ga
Cu-35.8at%Sn-10.2at%Ga
Cu-40.4at%Sn-5.1at%Ga
Cu-45at%Sn

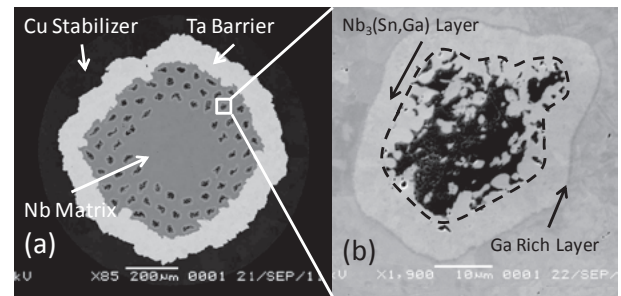


Fig.1 Cross sections of Cu/Ta/Nb/(Cu-35at%Sn-10.2at%Ga) wire reacted at 750°C for 240h.

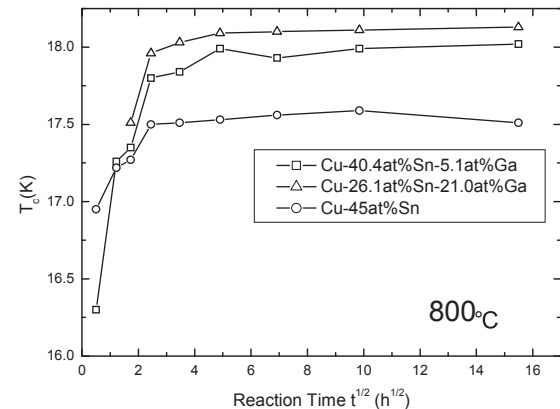


Fig.2 T_c as a function of the square root of reaction time t^{1/2}.

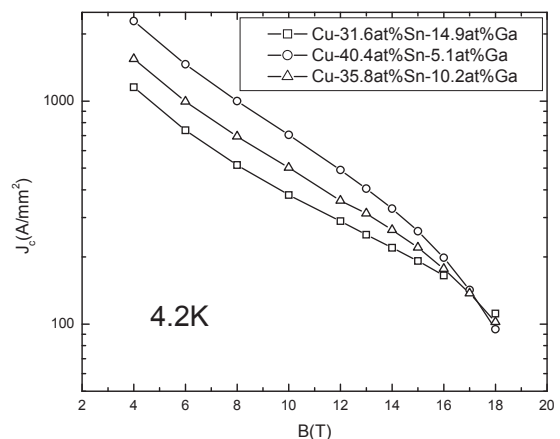


Fig.3 J_c versus magnetic field curves for Ga doped Nb₃Sn wires reacted at 750°C for 240h.

Nb₃Sn 線材の圧縮、引張りひずみ下における臨界電流特性

Critical current property of Nb₃Sn wires under compressive and tensile strain

諏訪 友音, 峯岸 一博, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 西島 元(物質・材料研究機構)
 SUWA Tomone, MINEGISHI Kazuhiro, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo(Tohoku Univ.);
 NISHIJIMA Gen (NIMS)
 E-mail: suwatomone@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Sn線材は、小さなひずみによって超伝導特性が大きく変化する。これは、Nb₃Sn線材をマグネット応用した場合、運転時の巨大な電磁力により引張りひずみ加わること、超伝導特性が低下することが問題となる。また、高強度化のためケーブル・イン・コンジット導体化した場合などは、補強材とNb₃Snの熱収縮率差によって圧縮残留ひずみ加わり、臨界電流I_cが低下する。

従来の研究では、Nb₃Sn線材の超伝導特性のひずみ依存性を線材の長手方向のひずみのみで議論していた。しかし、最近の研究で、線材の3次元ひずみを考えることで、より詳細にNb₃Sn線材の超伝導特性のひずみ依存性を表せることが分かった。

本研究では、二つのひずみ印加装置を用いることで、Nb₃Sn線材の臨界電流I_cのひずみ依存性を、圧縮ひずみから引張りひずみまでの広範囲にわたって測定した。得られた結果を、3次元ひずみを用いて詳細に考察した。

2. 実験

試料にCuNb 内部補強ブロンズ法 Nb₃Sn 線材を用いた。

ひずみ印加には、カム式ひずみ印加装置[1]とバックマン式ひずみ印加装置[2]を用いた。カム式ひずみ印加装置は、試料が二つの電極間にはんだ付けされており、片方の電極が動くことで試料に引張りひずみを印加することができる。バックマン式ひずみ印加装置は、CuBe のバックマンズスプリングの外縁部全体に試料がはんだ付けされており、スプリングを介して試料に圧縮ひずみと引張りひずみを印加することができる。

4.2 K、磁場中において、試料にひずみを印加しながらI_c測定を行った。電界基準は1 μV/cmとした。試料表面に接着したひずみゲージにより、軸方向と横方向のひずみを測定した。

3. 実験結果と考察

Fig.1にI_cの軸方向ひずみ依存性を示す。18 T中においてI_cの最大値I_{cm}と残留ひずみε_{am}は、バックマン式で測定した場合、I_{cm}=82.7 A、ε_{am}=0.318%となり、カム式で測定した場合、I_{cm}=81.1 A、ε_{am}=0.389%となった。二つの装置においてε_{am}が

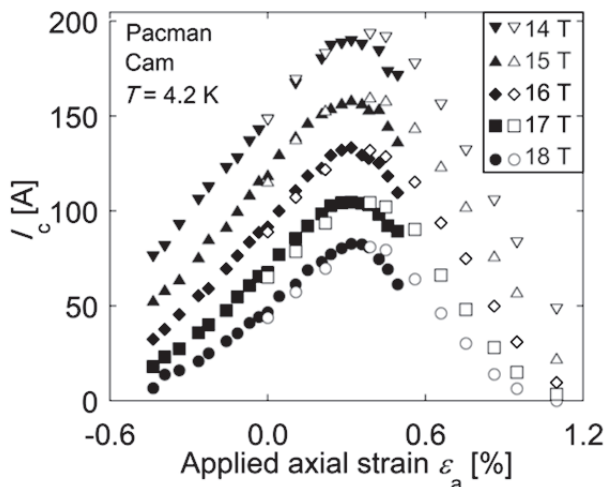


Fig.1 The applied axial strain dependence of I_c for the CuNb/Nb₃Sn wires measured by Pacman type strain measurement apparatus(solid symbols) and the cam type apparatus(open symbols).

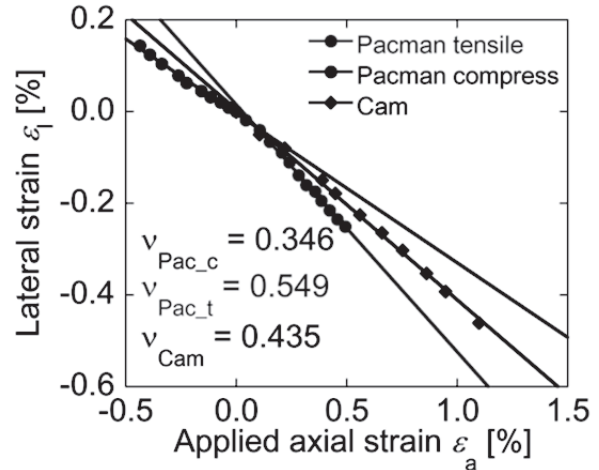


Fig.2 The relationship between the applied axial strain and lateral strain. v is the ratio of the lateral strain to the axial strain.

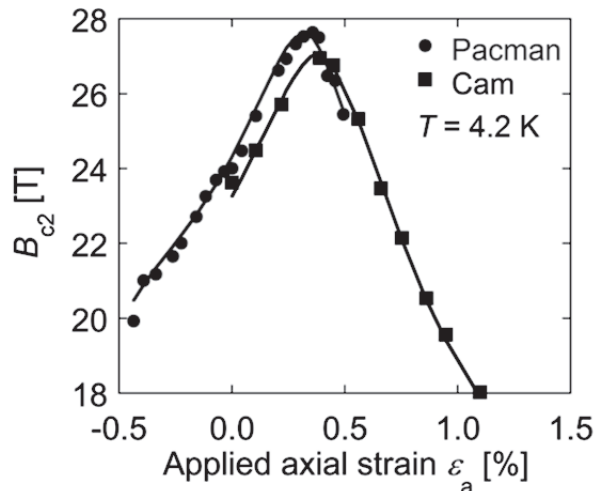


Fig.3 The applied axial strain dependence of the calculated upper critical field. The solid lines are calculated result by invariant strain function. The symbols are results of this experiment.

異なるのは、バックマン式では、試料がスプリングにはんだ付けされていることが原因と考えられる。また、バックマン式とカム式では、わずかに異なるひずみ依存性を示した。Fig.2に軸方向ひずみε_aに対する横方向ひずみε_lを示す。二つの装置において、それぞれひずみを印加した場合、有効ポアソン比 $v = -\epsilon_l / \epsilon_a$ が異なることが分かった。そこで、3次元ひずみを考慮して比較するため、ひずみ不変量関数[3]を用いてフィッティングを行った(Fig.3)。上部臨界磁場B_{c2}はKramerプロットによって求めた。このフィッティングによって、二つの装置で3次元ひずみが異なることが、ひずみ依存性が異なることの原因と考えることができる。

参考文献

1. A.Godeke, *et al.*, Rev. Sci. Instr. **75** (2004) 5112
2. K.Katagiri, *et al.*, Adv. Cryog. Eng. **36** (1990) 69
- 3 H.Oguro, IEEE. Trans. Appl. Supercond., **20** (2010) 1424

Nb₃Sn 線材における3次元歪み状態と超伝導特性Three-dimensional strain state and superconducting properties in Nb₃Sn wires

高橋 弘紀, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大);

町屋 修太郎(大同大); 鈴木 裕士(原子力機構); 長村 光造(応科研)

TAKAHASHI Kohki, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);

MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); SUZUKI Hiroshi (JAEA); OSAMURA Kozo (RIAS)

E-mail: kohki@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Sn 線材の超伝導特性が歪み/応力に非常に敏感であることはよく知られており, その強い歪み感受性が Nb₃Sn 線材の応用にとって問題になっている. 一方, 室温で事前曲げなどの機械的処理を施すことで超伝導特性が向上することも知られるようになり, 中性子回折による内部歪み測定から, 軸方向と横方向の残留歪みが事前曲げによって緩和されていることが明らかになった. このことから, 超伝導特性の軸歪み依存性を理解するためには, 3次元歪みを評価することが重要であると認識されてきている. 偏差歪み ϵ_{dev} と静水圧歪み ϵ_{hyd} を取り入れた3次元歪みモデルでは, 統一的なパラメータを用いて B_{c2} の歪み依存性を表すことができることが分かった[1]. そこで我々は, Nb₃Sn 線材における超伝導特性の軸歪み依存性と3次元歪みの関係を明らかにするため, 室温[2]と低温[3]における引っ張り応力下において, 中性子回折による歪み測定を行ってきた. 今回は特に低温での測定結果から, Nb₃Sn 線材における3次元歪み状態と超伝導特性の関係, 及びそれに対する事前曲げ処理の効果について解析を行ったので報告する.

2. 解析結果と考察

測定に用いた線材は, $\phi 1.0$ mm の CuNb 補強ブロンズ法 Nb₃Sn 超伝導線材で, CuNb を超伝導コアの外側に配置したものである. 中性子回折は, 熱処理のみ施した線材 (AR) と熱処理後に事前曲げ処理を施した線材 (PB) に対して行った. 伝導冷却によって 7 K に冷却された線材に対して引っ張り荷重を印加し, 線材の軸方向と径方向 (横方向) の格子定数を測定することによって歪みを求めた. 測定結果から, 横方向歪みの軸方向歪み依存性を調べると, AR, PB どちらの線材においても, 横, 軸方向歪み間には直線でフィットできることが分かった. この直線の傾きを有効ポアソン比 ν とすると, AR では $\nu = 0.36$, PB では $\nu = 0.37$ となり, 両者において違いは見られなかった.

偏差歪み ϵ_{dev} と静水圧歪み ϵ_{hyd} は, それぞれ次のように表すことができる.

$$\epsilon_{dev} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left| (1 + \nu)\epsilon_{tensile} + \epsilon_{ax0} - \epsilon_{lat0} \right|, \quad (1)$$

$$\epsilon_{hyd} = (1 - 2\nu)\epsilon_{tensile} + \epsilon_{ax0} + \epsilon_{lat0}. \quad (2)$$

ここで $\epsilon_{tensile}$ は線材に印加した引っ張り歪み, ϵ_{ax0} , ϵ_{lat0} は軸方向及び横方向の残留歪みである. Fig. 1, 2 に得られた ϵ_{dev} と ϵ_{hyd} をそれぞれ示す. 図中のシンボルは, 中性子回折で得られた歪みごとにそれぞれ求めた値 (観測値) であり, 計算値と観測値は良い一致を示している. 臨界電流の歪み依存性の測定により, 今回用いた線材においては, 偏差歪みが最小となる歪みは臨界電流が最大となる歪みはほぼ一致することが分かった. しかしながら, 超伝導特性の最大値を与える歪みと偏差歪みが最小となる歪みが必ずしも一致しない例もあることから, 超伝導特性を記述するのに偏差歪みだけでは不十分であると言える. そのために静水圧歪みを考慮する必要がある. Fig. 1 において PB に対して偏差歪みがゼロとなる印加歪みを外挿して求めると, その歪みにおける静水圧歪みは

AR の偏差歪みがゼロとなる印加歪みでの静水圧歪みと近い値を取ることが分かった. 今回用いた線材では, 臨界電流の最大値が AR と PB とほぼ同程度であり, この静水圧歪みの大きさが密接に関係していると考えられる.

3. まとめ

今回用いた CuNb 補強 Nb₃Sn 線材においては, 事前曲げ処理は軸方向と横方向の残留歪みを緩和するものの, 有効ポアソン比はほとんど変化させないことが分かった. そのため, 事前曲げ処理の効果は, 偏差歪みや静水圧歪みの3次元歪み状態を変化させることで超伝導特性に影響を及ぼしていると考えられる.

参考文献

1. H. Oguro, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21 (2010) p.2513
2. K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.53
3. K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.239

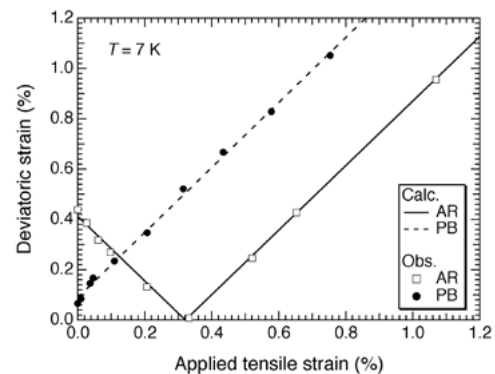


Fig.1 The tensile strain dependence of the deviatoric strain for the prebent (PB) and as-reacted (AR) CuNb/Nb₃Sn wires at 7 K.

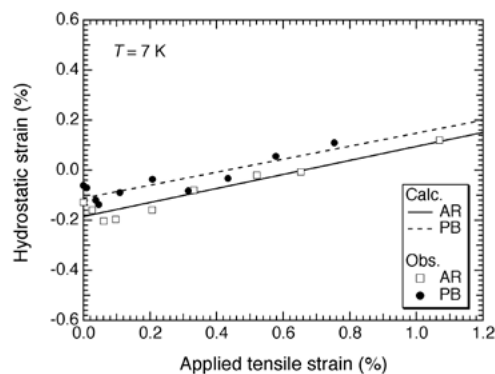


Fig.2 The tensile strain dependence of the hydrostatic strain for the prebent (PB) and as-reacted (AR) CuNb/Nb₃Sn wires at 7 K.

磁性蓄冷材 $\text{Ho}_x\text{Er}_{1-x}\text{N}$ の熱伝導率Thermal conductivity of a magnetic regenerator material $\text{Ho}_x\text{Er}_{1-x}\text{N}$

平山 悠介、伊澤 拓志、中野貴紀、中川 貴、山本 孝夫、藤本 靖 (阪大)
 HIRAYAMA Yusuke, IZAWA Takushi, NAKANO takanori, NAKAGAWA Takashi, YAMAMOTO Takao,
 FUJIMOTO Yasushi (Osaka Univ.);
 E-mail: y-hirayama@mit.eng.osaka-u.ac.

1. はじめに

現在He液化等に用いられる代表的な極低温冷凍機であるGM冷凍機は、システム内に蓄冷器を備えることで、極低温生成を可能としている。GM冷凍機の性能は蓄冷器に充填される蓄冷材に大きく依存する。求められる物性は、15 K以下での大きな比熱 C と高い熱伝導率 κ である。さらに、蓄冷材の実用化には球形材料への加工技術も重要な要素である。

これまで我々は、新たな優れた磁性蓄冷材として15 K以下で磁気転移に伴う大きな比熱を持つHoN、ErNとその二元系窒化物の可能性を報告してきた¹。さらに、HoNの球形材料化の成功も報告している²。本研究では、 $\text{Ho}_x\text{Er}_{1-x}\text{N}$ の熱伝導率を測定し、そのデータを用いた数値計算によって、4.2Kでの冷凍出力を評価する。

2. 実験

$\text{Ho}_x\text{Er}_{1-x}$ (2×2×15 mm、純度99.9%)を出発材料とし、高温高压(1550 °C、200 MPa)の窒素雰囲気下で48時間保持することで $\text{Ho}_x\text{Er}_{1-x}\text{N}$ ($x=0, 0.25, 0.5, 1$)を合成した。X線回折で生成相を調べ、PPMS (QUANTUM DESIGN INC.)を用いて、無磁場での熱伝導率 κ を300~2 Kの温度域で測定した。

REGEN3.3³を用い、それぞれの試料について粒径をパラメータとし、4.2 Kでの冷凍能力を評価した。実在冷凍機(SRDK 101D、0.1 W@4.2 K、1.2 Hzで動作)の蓄冷器の大きさ、He圧力を用いて計算した。

3. 結果

X線回折測定により全ての $\text{Ho}_x\text{Er}_{1-x}\text{N}$ 試料はNaCl構造の単相であることを確認した。Fig.1に熱伝導率の測定結果を示す。窒化物の熱伝導率は、全て約100 K付近に極大値を持ち、温度の低下と共にほぼ同じ傾きで低下した。その値は、ステンレスや Er_3Ni とほぼ同程度であった。熱伝導率と比熱の比で表される熱拡散係数 $D (= \kappa / C)$ をFig.2に示す。比較のため、 Er_3Ni と HoCu_2 の D も示した。ここで、 HoCu_2 の D の計算にはステンレスの熱伝導率を用いた。何れの試料に於いても比熱ピーク温度付近で D は大きく変化し、極小値を持った。4.2Kでは、この温度において最大の比熱を持つErNの D が最小であった。

ErNの D を用いREGEN3.3によって計算された冷凍出力によると、粒径が0.2~0.4 mmの出力に比べ、0.5 mm以上では、著しく冷凍能力は低下した。また、すべての試料の中で、最も冷凍出力が高かったのはErN (粒径0.3 mm)で、0.234 W@4.2 Kであった。この値は、同温度での HoCu_2 (粒径0.4 mm)の最高冷凍出力に比べ1.36倍であり、磁性蓄冷材として、非常に有望である。

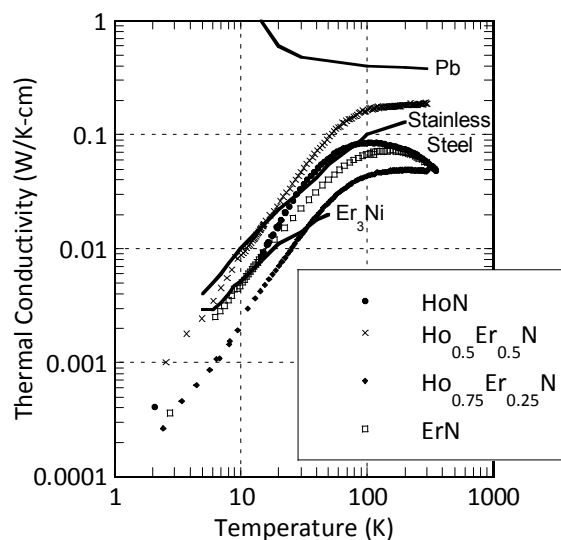


Fig.1 Thermal conductivity of $\text{Ho}_x\text{Er}_{1-x}\text{N}$ ($x=0, 0.25, 0.5, 1$)

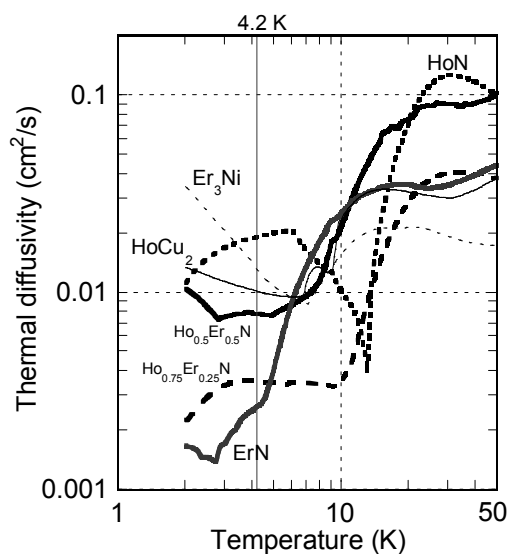


Fig.2 Thermal diffusivity D of $\text{Ho}_x\text{Er}_{1-x}\text{N}$ ($x=0, 0.25, 0.5, 1$) (The D of HoCu_2 was calculated by using the κ of stainless steel.)

参考文献

1. Y. Hirayama *et al.*, *J. Alloys and Comp.*, **462** (2008) L12-L15.
2. Y. Hirayama *et al.*, *Abstracts of CSJ Conference Vol.84* (2011) p.171.
3. REGEN3.3 package ; <http://math.nist.gov/~AOGallagher/auxfiles/regenstart.htm>

磁気冷凍機再生器形状に関する数値計算

A Modeling study on the Geometry of Active Magnetic Regenerator

李 晶(NIMS&千葉大学); 沼澤 健則(NIMS); 松本 宏一(金沢大学); 中込 秀樹(千葉大学)
 LI Jing, NUMAZAWA Takenori (NIMS); MATSUMOTO Koichi (Kanazawa univ); NAKAGOME Hideki (Chiba univ)
 E-mail: sita19@gmail.com

1. Introduction

Magnetic refrigeration, making use of the magnetocaloric effect (MCE), is an environmentally attractive alternative to vapor compression refrigeration that shows no Ozone Depletion Potential (ODP), small Global Warming Potential (GWP) and high efficiency.

One of the most common designs for magnetic refrigeration today is the AMR which makes possible the wide temperature spans with high efficiency and high cooling power. It is considered that there are 3 ways to optimize AMR system, the choice of material, the design of regenerators and magnetic array, the choice of heat exchanges and heat pump. Two kinds of regenerator geometries are widely used in AMR system, the flat plate regenerator and porous media regenerator. In this paper, 1 dimension model and Entropy Generation Minimization (EGM) method have been used to compare the 2 models. This not only includes a comparison of the 2 models but also discussion detail the various parameters of AMR models and how they affect the performance of AMR.

2. Approach

(1) 1 dimension model

1 dimension model has been constructed which can simulate various regenerators with no geometry limitation.

The fluid and magnetic material are modeled using equation (1) and (2).

$$\rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} A_c = -\dot{m}_f(t) C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + h_{eff} a_s A_c (T_r - T_f) + \left| \frac{f m^3(t)}{2 \rho_f^2 A_c^2 d_h} \right| \quad (1)$$

$$(1-\epsilon) \rho_r C_r \frac{\partial T_r}{\partial t} A_c = k_{eff} A_c (1-\epsilon) \frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} + h_{eff} a_s A_c (T_f - T_r) + (1-\epsilon) \rho_r T_r \frac{\partial S}{\partial B} \frac{\partial B}{\partial t} A_c \quad (2)$$

Period	Cold side	Hot side
Cold to hot	$T_f = T_{cold}$	$\partial T_f / \partial x = 0$
Hot to cold	$\partial T_f / \partial x = 0$	$T_f = T_{hot}$

Table 1 The boundary conditions in AMR cycle

(2) Entropy Generation Minimization (EGM)

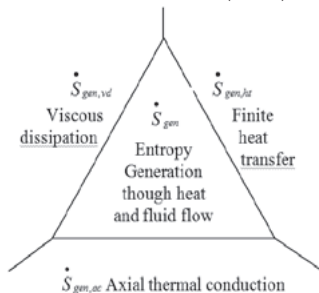


Fig.1 Basic considering of entropy generation in regenerator

In AMR systems, irreversibility is related to: heat and fluid flow in regenerator; pump inefficiency; the magnetization system; the process of magnetization and various heat leaks. Heat transfer between the fluid and the magnetocaloric

material is the major loss mechanism in AMR systems. In order to maximize AMR performance, it is critical to understand heat transfer processes and minimize the entropy generation through heat and fluid flow in the regenerator.

3. Result & discussion

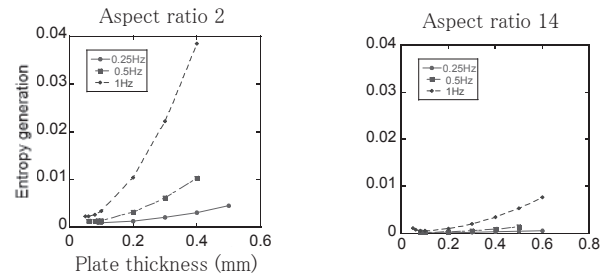


Fig.2 Entropy generation corresponding to the different plate thickness at frequency 0.25Hz, 0.5Hz, 1Hz in the flat plate model.

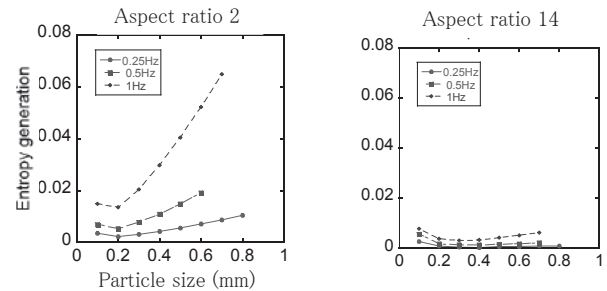


Fig.3 Entropy generation corresponding to the different particle size at frequency 0.25Hz, 0.5Hz, 1Hz in the porous media model.

Since the heat transfer mechanism in the AMR is same as that in the ordinary thermal regenerator except for the steps involving changing magnetic fields. EGM, which is widely used in heat exchanger optimization, can be used to optimize geometry and dimensions of regenerator. The 1 dimension flat plate model and porous media model have been constructed and compared with entropy generation, cooling capacity, coefficient of performance by changing plate thickness and sphere size at frequency 0.25Hz, 0.5Hz, 1Hz, aspect ratio 2, 7, 14. The result shows that the optimized sphere size will be around 0.2mm to 0.3mm. On the other hand, 0.1mm to 0.2mm thickness plate will be more efficient. Compared the 2 models, flat plate model can get a smaller entropy generation and achieve a higher cooling capacity. But sphere model is favored by lower cost and simplicity of construction.

References

1. John A. Barclay.: Selection of regenerator geometry for Magnetic refrigerator applications, 5th ASME Intersociety Cryogenic Symposium, Dec.9-13,1984.

La(Fe_xSi_{1-x})₁₃ 化合物の元素置換による転移点制御と磁気熱量効果

Transition temperature and magnetocaloric effect of La(Fe_xSi_{1-x})₁₃ compounds doped with Ga and rare earth elements

山田 啓志, 西村 優大, 川田 尚明, 朱 亦寅, 松本 宏一(金沢大); 高田 裕章, 入江 年雄, 中村 英次(三徳)
 YAMADA Keishi, NISHIMURA Yuta, KAWATA Naoaki, ZHU Yiyin, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa Univ.);
 TAKATA Hiroaki, IRIE Toshio, NAKAMURA Eiji (SANTOKU)
 E-mail: kec7@stu.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

磁気冷凍では磁場変化による磁性体の磁気熱量効果を利用して冷却を行う。磁気熱量効果は磁性体の転移点近傍で大きくなる。そのため、冷凍機を運転するには、その温度域に適した磁性体を必要とする。我々はこれまでに 20~110K の温度域における磁気熱量効果の研究を行ってきた[1]。また、室温付近までの磁気冷凍材料として Gd₂(Si_xGe_{1-x})₄ のエントロピーの評価も行ってきた[2]。今回報告する磁性体 La(Fe_xSi_{1-x})₁₃ 化合物は、200K 近傍という比較的室温に近い温度で一次相転移をもち、大きな磁気熱量効果を示す。この組成を変化させることで室温付近に転移点を制御できるため、室温磁気冷凍材料への応用が期待され、Co への置換などが行われている。本研究では、磁性体の転移点制御のために Fe-Si を Ga で置換、および La を Ce, Pr, Nd の希土類元素で置換を行った。物性測定結果から得られた転移点や磁気熱量効果について報告する。

2. 実験方法

La(Fe_{0.88}Si_{0.12})₁₃ を基本組成とし、元素置換した試料は高周波溶解後、均質化処理を施して作製しており、大きさ 1~2mm 程度の破砕材(Fig.1)である。物性測定は Quantum Design 社の MPMS を使い、2T までの磁場を印加して行った。その結果から、Maxwell の関係式を用いてエントロピー変化 ΔS を導出し、磁性体としての性能を評価した。また、Quantum Design 社の PPMS を用いた比熱測定も行った。



Fig.1 La(Fe_{0.86}Ga_{0.02}Si_{0.12})₁₃ particles.

3. 実験結果

Fig.2 は 2T と 0.1T の磁場を試料に印加した場合の磁化の温度依存性を示す。基本組成の試料は一次相転移の特徴を示しているが、Fe を Ga で置換した試料は二次相転移的になっている。また、置換を行うことで、転移点が高温側へシフトしていることを確認できる。Fig.3 は磁化測定結果から導出された 2T での ΔS の温度依存性を示す。置換することによって ΔS が広い温度範囲で大きな値をとることが分かった。

講演では、これらの結果の詳細、および希土類元素で置換した場合の結果についても併せて報告する。

参考文献

1. Y.Nishimura, et al. :Abstracts of CSJ Conference, vol.83 (2010) p.49. など
2. K.Matsumoto, et al. :IEEE Transactions on applied superconductivity, vol.14 (2004) p.1738-1741.

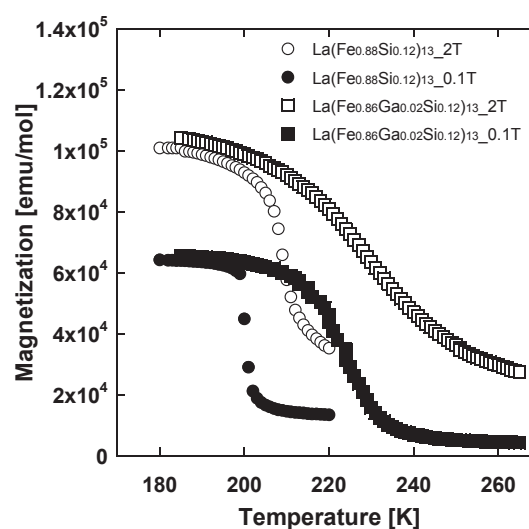


Fig.2 Magnetization of La(Fe_{0.88}Si_{0.12})₁₃ and La(Fe_{0.86}Ga_{0.02}Si_{0.12})₁₃ at 2T and 0.1T.

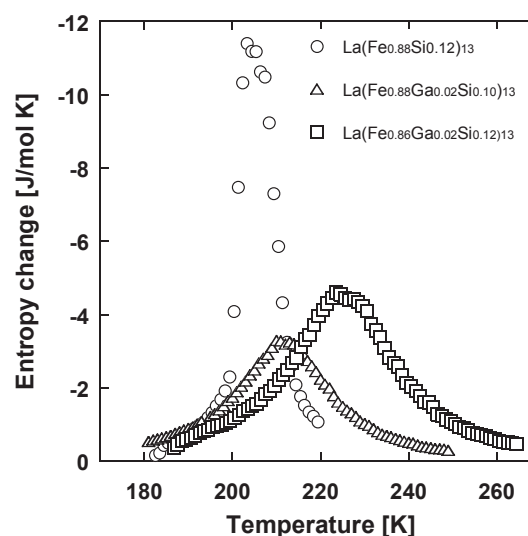


Fig.3 Entropy change of La(Fe_{0.88}Si_{0.12})₁₃ at 2T.

室温磁気冷凍の冷凍性能解析

Numerical analysis of magnetic refrigeration at room temperature

門間 大輔, 太田 匡則, 中込 秀樹(千葉大); 八木 亮介, 小林 忠彦, 加治 志織, 富松 師浩, 齋藤 明子(東芝)
 MONMA Daisuke, OTA Masanori, NAKAGOME Hideki (Chiba University);
 YAGI Ryosuke, KOBAYASHI Tadahiko, TOMIMATSU Norihiro, KAJI Siori, SAITO T. Akiko (Toshiba)
 E-mail: monma@chiba-u.jp

1.はじめに

室温磁気冷凍技術は環境負荷の小さい未来の冷凍技術として期待が寄せられている。これまでの研究により、永久磁石を用いた AMR(能動的蓄冷型磁気冷凍)方式により、室温付近から零下の温度生成を達成している[1]。

さらなる温度差の拡大には、磁性材料の多層ハイブリット化が有効であると考えられる。その理由は、キュリー温度(T_C)の異なる材料を組み合わせることにより、単一材料では働かない温度域まで仕事が可能となる点にある。そこで本研究はハイブリット化した際の冷凍性能を明らかにするため、材料の T_C と AMR サイクル条件が冷凍性能に及ぼす影響を一次元モデルによる数値実験で検討した。モデルでは AMR bed 内部での熱の移動と外部への吸放熱を表現し、実際の試験装置 (Fig. 1) を模擬した。

2. 計算モデル

数値実験では、AMR bed 内に充填される冷媒と磁性体間の熱移動と、冷媒と放熱部(Hot end)および吸熱部(Cold end)間の外部熱移動を考慮した。Fig.2 に、冷媒と磁性体のエネルギー保存式を示す。上が冷媒についてのエネルギー保存式、下が磁性体についてのエネルギー保存式である。試験装置の AMR bed を熱流方向に複数セルに分割し、各々のセルにおいて、エネルギー保存式の関係が成り立つようにした。磁性体の磁場印加・除去に伴う発熱・吸熱は、磁性体のエントロピー変化と比熱の温度依存性を考慮した。AMR サイクルにおける冷媒移動時間、距離については、実験と対応が取れる条件にて模擬した。

3. 数値実験結果

Fig.3 に典型的な AMR サイクルの運転に伴う高温端と低温端の温度変化の様子を模擬的に示す。十分な時間が経過すると高温端と低温端部間の温度差 (ΔT) が一定となるが、これは AMR bed 内部での熱移動と両端部からの放熱量が釣り合った状態である。本研究では両端部冷媒と外部環境との熱伝達率(h_a)を変動することで端部からの放熱を変化させ、それに伴う ΔT と外部への放熱、吸熱(Q_h , Q_c)の変化を評価した。

ハイブリット化については、低温側に位置する半分の材料の T_C を変動させ、2層型のモデルを検討した。 T_C の変動に伴い、エントロピー変化と比熱がシフトするものとした。Fig.4 に数値実験により求めた Q_c の h_a 依存性を示す。凡例に示す数値は T_C の差異である。この結果より h_a が小さい範囲では2層型は1層型より Q_c が大きくなるが、 h_a が大きい範囲において T_C をマイナス方向に 10°C シフトした2層型は1層型より Q_c が小さくなる傾向が示唆された。

これに加え、冷媒移動量や周波数などの AMR 運転条件による影響を検討した。数値実験の詳細、考察は講演にて報告する。

本研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務として実施されたものである。

参考文献

1 . T. Kobayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p. 138

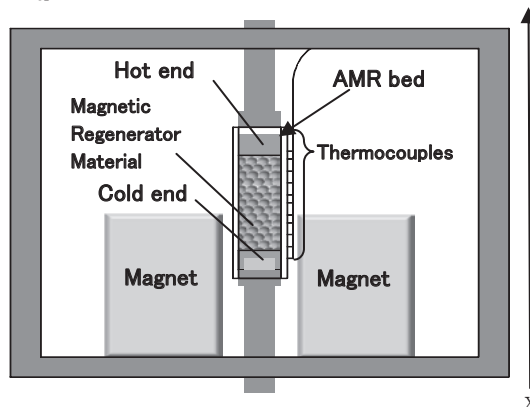


Fig.1 Schematic illustration of the experimental apparatus.

$$\rho_f c_f A dx \varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} + \dot{m} c_f dx \frac{\partial T_f}{\partial x} = \lambda_f A dx \varepsilon \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + h_f A_s (T_r - T_f) + h_a P dx (T_i - T_f)$$

$$\rho_r c_r A dx (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_r}{\partial t} = \lambda_r A dx (1 - \varepsilon) \frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} + h_f A_s (T_f - T_r) - \rho_r A dx (1 - \varepsilon) T_r \frac{\partial S_r}{\partial t}$$

T_f : 冷媒温度	c_f : 冷媒比熱	A : セル断面積	h_f : 磁性体-冷媒間
T_r : 磁性体温度	c_r : 磁性体比熱	A_s : 磁性体-冷媒	熱伝達率
T_i : 環境温度	λ_f : 冷媒熱伝導率	熱交換面積	h_a : 外部-冷媒間
ρ_f : 冷媒密度	λ_r : 磁性体熱伝導率	P : セル周囲長	熱伝達率
ρ_r : 磁性体密度	ε : 空隙率	S_r : 磁気エントロピー	
	dx : 単位長さ	\dot{m} : 質量流量	

Fig.2 Energy conservation equation.

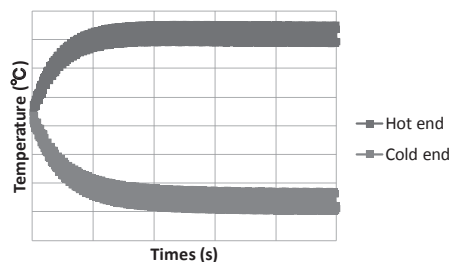


Fig.3 Temperature change of hot and cold ends in AMR cycle.

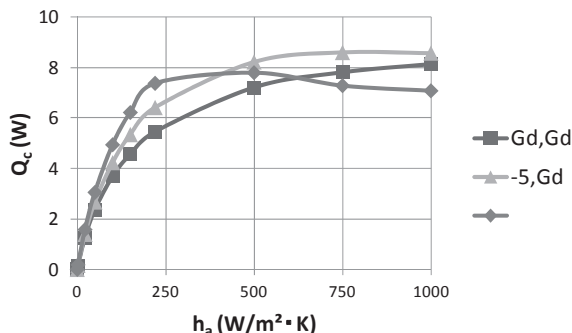


Fig.4 Heat transfer coefficient dependence of Q_c .

各パラメータが連続回転型室温磁気冷凍機の性能に及ぼす影響

Effects of parameters on performance of a room temperature magnetic refrigerator with continuous-magnet-rotation

下地 崇, 牧野 裕人, 岡村 哲至(東工大); 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力); 伊藤 孝治(蔵王精機)

SHIMOJI Takashi, MAKINO Hiroto, OKAMURA Tetsuji(Tokyo Tech);

HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.); ITO Kouji (Zaouseiki Co.)

E-mail: shimoji.t.aa@m.titech.ac.jp, tokamura@es.titech.ac.jp

1. はじめに

現在、地球温暖化の観点から冷凍・空調機器のノンフロン化が求められており、その解決策の1つとして室温磁気冷凍機が期待されている。この冷凍機は、近年国内外で着目され積極的に研究が進んでいるものの、実用化に向けて更なる冷凍能力および効率の向上が必要である。本研究では磁石連続回転型装置の各パラメータ変化による冷凍性能を実験的に評価し報告する。

2. 磁石連続回転型実験装置の構成

装置は磁性材料が充填されたダクト、磁場変化を与える永久磁石、磁石を回転させるモータ、冷媒供給方向の制御を行うロータリーバルブで構成されている。このため、磁石が回転する際に対角線上のダクトにそれぞれに磁場変化が生じる構造となっており、磁石の回転に合わせてロータリーバルブが励磁側のダクトでは放熱用熱交換器へ、消磁側は冷却ステージへと冷媒供給を行う。磁石連続回転型装置の特徴は12ダクト配置構造、ロータリーバルブの2点である。

3. 実験方法

実験ではダクト内に磁性材料のGdを充填し、高温端温度 $T_H = 21^\circ\text{C}$ 、励磁側・消磁側ともに4ダクトずつに冷媒が流れるようにパラレル接続する。また、磁石の回転数、流量、冷媒供給のタイミングをパラメータとして実験を行った。

本装置ではロータリーバルブの初期角度を変えることにより磁石の回転と冷媒供給のタイミングを変更することが可能である。Fig. 2 に初期角度が 28° の場合の磁場変化と冷媒供給方向の時系列を示す。実線は磁場変化、破線は冷媒供給方向を表している。冷媒を磁場変化より早いタイミングで流し始めているため、排熱過程では磁場変化がない箇所でも熱交換器へ冷媒を流す過程が生じる。その過程を励磁前熱交換時間、励磁による排熱を行う過程を励磁後熱交換時間と定義する。

Fig. 3 に初期角度変化による励磁前・励磁後熱交換時間の関係を示す。初期角度が大きくなる時、磁場変化より速い段階から冷媒を流すため励磁前熱交換時間が多くなる。励磁前熱交換時間は励磁前から熱交換が開始されるため、ダクト内の温度を低下させる働きがある。冷凍性能を向上させる要因として考えられる。そのため、実験ではこの2つの熱交換時間のうち、どちらが支配的なパラメータであるかを評価する。

また、このシステムの冷凍能力の定義は、熱量を冷却ステージから与え、低温端温度 T_L が一定となった時、与えた熱量をその温度における冷凍能力とする。

4. 結果

初期角度変化による冷凍能力曲線を Fig. 4 に示す。初期角度が小さいほうが冷凍能力・低温端温度が向上する結果が得られた。これにより、冷凍性能を向上させる為には励磁前熱交換時間を多くして励磁前にダクト内の温度分布を下げるよりは励磁してから排熱を行うための時間を多くとる必要があるとわかった。

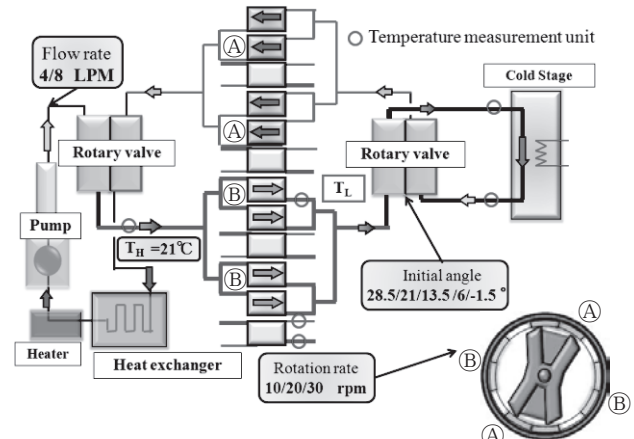


Fig. 1 Continuous-magnet-rotation type apparatus

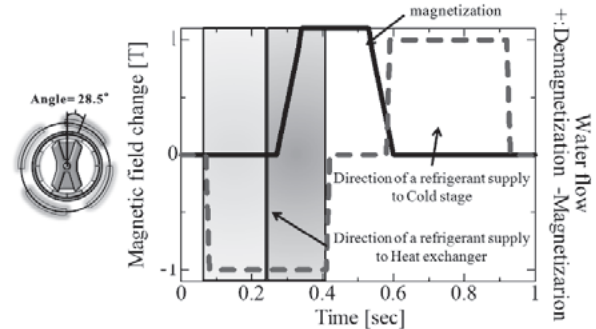


Fig. 2 Time sequence of magnetization and water flow.

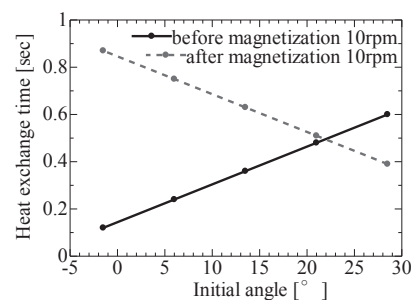


Fig. 3 Initial angle dependences of Heat exchange time

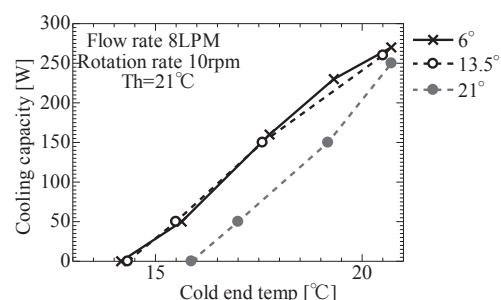


Fig. 4 Initial angle dependences of Cooling performance

大型低温重力波望遠鏡用低温設備の開発 (1)

-大型低温重力波望遠鏡の概要と低温設備-

Development of cryogenic system for Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (1) -Overview of LCGT Cryogenics-

鈴木 敏一, 木村 誠宏, 斎藤 芳男, 山本 明, 春山 富義(KEK);内山 隆, 榊原 裕介, 山元 一広, 大橋 正健, 黒田 和明, 梶田 隆章(宇宙線研);新富 孝和(日大); LCGT Collaboration

SUZUKI Toshikazu, KIMURA Nobuhiro, SAITO Yoshio, YAMAMOTO Akira, HARUYAMA Tomiyoshi (KEK); UCHIYAMA Takashi, SAKAKIBARA Yusuke, YAMAMOTO Kazuhiro, OHASHI Masatake, KURODA Kazuaki, KAJITA Takaaki (ICRR); SHINTOMI Takakazu (Nihon Univ.); LCGT Collaboration

E-mail: toshi.suzuki@kek.jp

1. LCGT の概要

大型低温重力波望遠鏡 (LCGT: Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) 計画は 2010 年度の文部科学省最先端研究基盤事業で採択され、建設がスタートした。LCGT は東京大学宇宙線研究所をホストとして、高エネルギー加速器研究機構並びに国立天文台をはじめとする国内外の研究機関と大学が協力して進めている計画で、天体起源の重力波の実験的検出と重力波を観測手段とする天文学の創成を目的としている。スケジュールは 2014 年度を目標に装置の骨格となる部分の建設設置を終え、300K での装置運転が可能なる状態までの調整と短期間の Engineering Run を行う。2016 年度末までに低温系と光学系の最終形態での整備を行い、2017 年度に運用を開始、欧米の同クラスの観測装置と同調した地球規模での重力波観測網を構築して連星中性子星合体から発生する重力波の検出を目指している。空間的に離れて置かれた試験質量の間の距離変化を測定する事で重力波の効果をとらえるため、検出器は絶対温度 20K に冷却したサファイア製の鏡を試験質量とした腕長 3km のマイケルソン型干渉計で構成される。干渉計の光源には 100W クラスのレーザーを用い、ビーム整形を経て 75W のレーザーパワーが干渉計に入射する。干渉計の 2 本の腕に沿って 2 つの鏡で光キャビティを形成し、キャビティに光子を蓄積することで実効光路長を稼ぐと同時にキャビティ内の光パワーを上げ鏡位置の読み出しのショットノイズを抑えている。このような干渉計を地盤振動の小さな神岡鉱山の地下に設置し、高性能の防振機構によって試験質量への外来振動の流入を遮断し、重力波が引き起こす試験質量間の微小な距離変化を量子雑音レベルで計測する。光路内は超高真空中に保ち残留ガスによる屈折率揺らぎの雑音を避けている。LCGT が目標とする感度での運転に達したときに予測される連星中性子星合体を起源とする重力波の検出頻度は年間数回であり、最適感度パターン方向での検出可能距離は 9 億光年である。Fig.1 に LCGT のイメージ図を示す。

2. LCGT の低温系の特徴

LCGT で干渉計の鏡を冷却する理由は熱雑音を抑制して、量子雑音レベルの計測を行うためである。[1] 鏡は大パワーのレーザー光の照射を常時受けるので、鏡基材と反射膜のわずかな光吸収が発熱源となる。試験質量である鏡を観測帯域で自由質点として運動させるために、鏡は振子状に懸架され、超高真空中に置かれる。鏡の冷却には懸架構造に沿った熱伝導を用いる。このとき、鏡の位置変化を起こす余計な振動を導入しない冷却を行わなければならない。LCGT では寒冷発生のために冷凍機を使用するので、冷凍機は嚴重な振動防除を施した冷凍機ユニットとして設置する。冷凍機ユニットの発生する振動は、設置環境に対して実用上無振動と見な

せるレベルまで低減する必要があり、LCGT ではプロトタイプでの基本設計を踏襲し、冷凍機パワーの増大に対応した設計と性能実証試験を行った。

懸架構造を含めて鏡の低温を保つクライオスタットは冷凍機ユニットからの伝熱で冷却され、常温部に向かって幾つもの開口を持つ。レーザー光路である 3km の長さの常温真空ダクト、鏡懸架系を支える常温の高性能防振装置との機械的結合のための開口があり、これらの部分には多重バブル構造の冷却シールドを設けて常温からの輻射の侵入を防ぐ。また、鏡位置モニターの目的で複数のビューポートを設ける。冷凍機による限られた冷凍力の下で、熱侵入と振動伝達を最小に抑えるクライオスタット設計を行う必要がある。

観測装置としての LCGT にとって鏡の冷却時間短縮は重要な課題である。300K からスタートする初期冷却において十分な冷却速度を得る目的で輻射伝熱の有効利用を図る。300K 黒体輻射のピーク近傍での材料表面の反射率測定と、冷却速度のシミュレーションを行った。材料表面の DLC コーティングにより現実的な冷却時間が達成できる見込みが立ち、実証実験へ進む予定である。

本講演では LCGT の概要を述べ、続く 3 講演で、低温設備の設計、冷凍機ユニットの性能実証、冷却時間短縮の検討、の各々について詳細報告を行う。

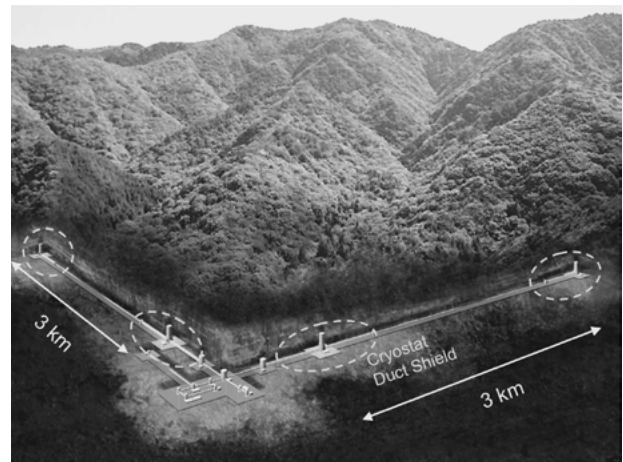


Fig.1 Image of LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope). The purpose of the LCGT is detection of gravitational waves and pioneering a new field of astronomy. A construction of the large interferometric GW detector with cryogenic mirrors has been started. The LCGT will be installed in the Kamioka mine.

参考文献

- Articles in Journal of the CSJ Vol. 46 No. 7 2011.

大型低温重力波望遠鏡用低温設備の開発 (2)

- 大型低温重力波望遠鏡用低温設備の設計 -

Development of cryogenic system for Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (2) -

Status of the Cryogenics Design for LCGT

木村 誠宏, 鈴木 敏一, 小池 重明, 久米 達哉, 山岡 広(KEK); 大森 隆夫,
高田 聡(帝京大); 斎藤 芳男, 佐藤 吉博(KEK); 榊原 裕介, 高橋 竜太郎,
大橋 正健, 黒田 和明, 山元 一広, 内山 隆(東京大学)

KIMURA Nobuhiro, SUZUKI Toshikazu, KOIKE Shigeaki, KUME Tatsuya, YAMAOKA Hiroshi (KEK);
OHMORI Takao, TAKADA Satoshi (Teikyo Uni.); SAITO Yoshio, SATO Yoshihiro (KEK); SAKAKIBARA Yusuke,
TAKAHASHI Ryutarou, OHASHI Masatake, KURODA Kazuaki, YAMAMOTO Kazuhiro, UCHIYAMA Takashi (Uni. of Tokyo)
E-mail: nobuhiro.kimura@kek.jp

1. はじめに

岐阜県飛騨市神岡の地下に建設される大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) は、熱雑音を低減するためマイケルソン型干渉計のサファイア単結晶製鏡を低振動冷凍機ユニットにより20Kまで冷却する¹⁾。このため、低温鏡を設置するクライオスタットの冷却設備として独立懸架型防振機構付冷凍機ユニット4台と5N8超高純度アルミ製伝導冷却体が組み込まれる

本報は、低温鏡クライオスタットの設計にあたって検討したクライオスタットの地面振動応答解析並びにクライオスタットの熱負荷特性について報告する。

2. 低温鏡クライオスタットの要求仕様

低温鏡クライオスタットは岐阜県飛騨市神岡鉱山に新に掘削される腕長 3km のトンネル内に設置する事を前提として計画された。検討段階で低温鏡クライオスタットに求められた要求仕様を次に示す。

- ・ パルス管冷凍機を使用した伝導冷却方式
- ・ 低温鏡を支持する低温懸架装置の冷却用熱リンク接続部の温度が 8 K 以下
- ・ 低温懸架装置の組み込みを行うための十分な作業空間をクライオスタット内に確保する
- ・ クライオスタットに接続する冷却装置全体が重力波観測時に影響を与えないようその振動が 10^{-9} m 以下であること
- ・ 運転時のクライオスタット内圧力を 10^{-7} Pa 以下に保持する²⁾
- ・ クライオスタットの製造場所からトンネル内設置箇所への輸送を考慮した設計であること

3. 設計検討

低温鏡クライオスタットの初期設計段階でクライオスタットを構成する真空容器並びに真空容器内部に設置する輻射シールド等の構造物の地面振動の応答解析を行った。この時、クライオスタット内の輻射シールドは 8 K 及び 80 K の 2 重構造とし、輻射シールドはクライオスタット内床面に設置されたベスペル製支持架台並びにクライオスタット上部と輻射シールドを接続するベスペル製ロッドにより支持される構造とした。応答解析に使用する振動データは神岡鉱山内の床面から測定された地面振動の測定値を入力した。Fig.2 にクライオスタットの応答解析から得た 8 K 輻射シールドの共振周波数の計算結果の一例を示す。

これら振動応答解析を基に設計した低温鏡クライオスタットの 3D 断面図を Fig. 2 に示す。最終的に本クライオスタットに神岡鉱山内の地面振動が加えられた場合、クライオスタットの振動振幅が 10^{-9} m 以下であることを確認した。この時、クライオスタットの設計上の熱負荷は

8 K 輻射シールドで 5.9 W at 8 K, 80 K 輻射シールドは 116 W at 80 K であった。

4. まとめ

LCGT 向け低温鏡クライオスタットの設計検討を行い、要求される性能仕様を満足できることを確認した。

今後クライオスタットの詳細設計並びに部品製作を進め、平成 24 年度末までに LCGT で必要とする 4 台の低温鏡クライオスタットの組立並びに性能確認試験を行う予定である。

参考文献

1. K. KURODA: CSJ. Vol. 46 (2011) p. 385
2. T. OHMORI: CSJ. Vol. 46 (2011) p. 408

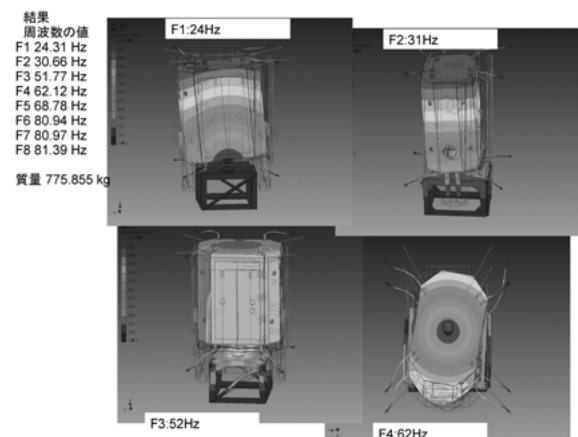


Fig.1 An example of resonance frequency of the 8 K inner shield in the LCGT cryostat by the modal analysis.

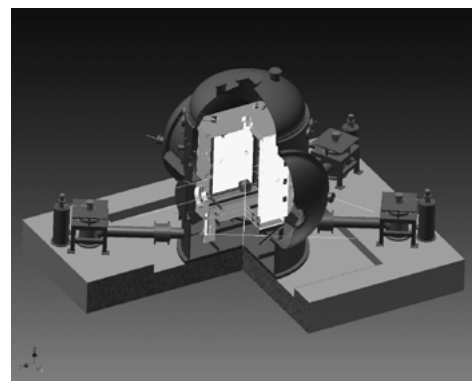


Fig.2 3D cut model of LCGT Cryogenic System.

大型低温重力波望遠鏡用低温設備の開発 (3)

- 試作 LCGT 用低振動冷凍機ユニットの試験結果 -

Development of cryogenic system for Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (3)

- Test results of proto-type of very low vibration cryo-cooler unit for LCGT -

木村 誠宏(KEK); 榊原 裕介(東京大学); 鈴木 敏一, 小池 重明, 久米 達哉(KEK);
山元 一広, 大橋 正健, 黒田 和明 (東京大学)

KIMURA Nobuhiro (KEK); SAKAKIBARA Yusuke (Uni. of Tokyo); SUZUKI Toshikazu, KOIKE Shigeaki,
KUME Tatsuya (KEK); YAMAMOTO Kazuhiro, OHASHI Masatake, KURODA Kazuaki (Uni. of Tokyo)

E-mail: nobuhiro.kimura@kek.jp

1. はじめに

LCGT では熱雑音を低減するためクライオスタット内に設置されたサファイア製鏡を低振動冷凍機ユニットにより 20K まで冷却する。今回、低温鏡冷却用として 0.9W/4K パルス管冷凍機と独立懸架型防振機構を組み合わせた低振動冷凍機ユニットを試作し、その性能評価を行った。

本報は、この試作低振動冷凍機ユニットの設計・製作並びに性能評価試験結果について報告する。

2. LCGT 用低振動冷凍機ユニットの設計・製作

低振動冷凍機ユニット(以下、冷凍機ユニット)の構造は、高エネ研で CLIO 向けに開発した冷凍機と独立懸架型防振機構の組み合わせを採用した²⁾。

低温鏡を設置するクライオスタットの要求仕様から、冷凍機ユニットの振動特性並びに冷凍能力を次のように決定した。

1) 振動特性

- ・ 8 K 伝導冷却路 最大振幅 ± 100 nm 以下
- ・ 80 K 伝導冷却路 最大振幅 ± 100 nm 以下

2) 冷凍能力

- ・ 8 K 伝導冷却路接続端温度 9 K において 2.5 W
- ・ 80 K 伝導冷却路接続端温度 70 K において 35 W

冷凍機ユニットの冷凍機は、住友重機製バルブ分離型 0.9W/4K パルス管冷凍機 (RP-082B) を採用した。冷凍機冷却ステージとクライオスタット内熱負荷を接続する 8 K 伝導冷却路及び 80 K 伝導冷却路には 5N8 高純度アルミ材及び A1070 純アルミ材をそれぞれ採用した。また、防振ステージに使用する熱リンク材として 6N 高純度銅撚り線を採用した。

Fig.1 に試作した冷凍機ユニットの構造図を示す。

3. 性能評価

完成した冷凍機ユニットの先端に可視化窓付の測定治具を装着して振動並びに冷凍能力の性能評価試験をそれぞれ独立して行った。

振動は、レーザー距離計のレーザー光を可視化窓から導入して伝導冷却路先端部の軸方向、水平及び垂直方向の 3 軸方向を直接測定した。測定結果から、先端部温度 8 K において軸法方向 ± 200 nm、垂直方向 ± 50 nm、水平方向 ± 20 nm の振動が冷却路先端部に生じていることが確認された。また、加速度センサーを使用して真空容器表面の振動分布を測定し、振動の伝搬経路が真空容器表面並びに伝導冷却路の支持構造材である事が確認され、真空容器構造設計に改良が必要であることが理解された。

冷凍能力は、前述の振動測定後に冷凍機ユニットを常温まで加温し、可視化窓の閉止並びに輻射シールド及び SI を装着した状態で測定した。Fig.2 に冷却曲線から得られた常温から運転温度予定温度までの冷凍機ユニットの 1 段 (80 K) 及び 2 段 (8 K) 冷却ステージの各温度での冷凍能力を示す。冷凍能力は、伝導冷却路が最低到達温度に達した後、冷却路先端に組み込まれたヒーターを使用して測定した。測定から、クライオスタット側との伝導冷却路接続部において次の結果を得た。

- ・ 8 K 伝導冷却路接続端部熱入力 2.7 W において温度 11.7 K

- ・ 80 K 伝導冷却路接続端部熱入力 30 W において温度 141 K

伝導冷却路の温度分布測定並びにパルス管冷凍機の動作温度から、パルス管冷凍機の冷却段に常温部から直達する熱侵入が存在し、輻射シールドの構造並びに SI の施工法に改良が必要であることが理解された。

4. まとめ

試作低振動冷凍機ユニットの性能評価試験の結果、LCGT クライオスタットから要求される仕様を満足するために改良すべき点があることを確認した。今後、冷凍機ユニットの改良設計を進めた後、LCGT に必要な 16 台の低振動冷凍機ユニットを平成 25 年 3 月までに完成する予定である。

参考文献

1. K. KURODA: CSJ. Vol. 46 (2011) p. 385
2. Y. IKUSHIMA, et al.: CSJ. Vol. 46 (2011) p. 400

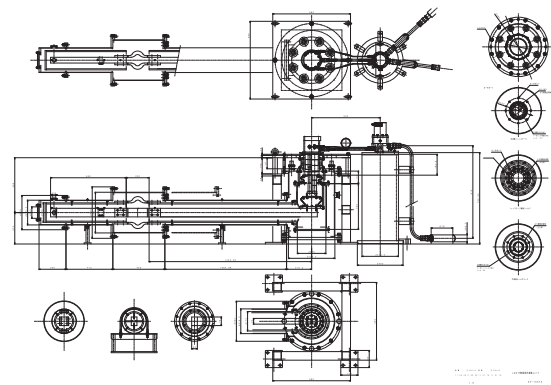


Fig.1 Cross sectional view of the cryo-cooler unit with an anti-vibration stage.

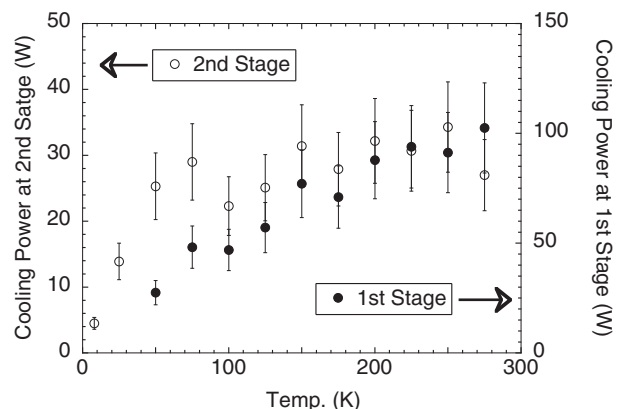


Fig.2 Performance of the proto-type cryo-cooler unit with an anti-vibration stage.

大型低温重力波望遠鏡用低温設備の開発(4)

- LCGTの鏡の初期冷却時間の低減 -

Development of cryogenic system for Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (4) - Reduction of initial cooling time of LCGT mirrors -

榊原 裕介, 黒田 和明, 山元 一広, 内山 隆(東大宇宙線研); 木村 誠宏, 鈴木 敏一, 齊藤 芳男(KEK)

SAKAKIBARA Yusuke, KURODA Kazuaki, YAMAMOTO Kazuhiro, UCHIYAMA Takashi (ICRR,UT);

KIMURA Nobuhiro, SUZUKI Toshikazu, SAITO Yoshio (KEK)

E-mail: ysakaki@icrr.u-tokyo.ac.jp

1 はじめに

神岡地下の大型低温重力波望遠鏡 (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope, LCGT) は、レーザー干渉計を用いて重力波検出を目指す。屈折率の変動によるノイズを防ぐため鏡 (test mass) は真空中に置かれ、熱雑音を低減するため鏡を冷却する。さらに、地面振動によるノイズを低減するため鏡は吊るされ、熱伝導体として細いファイバーが用いられる。地下で冷却ガスを使用することが危険であるため、鏡の冷却方法は熱放射とファイバーによる熱伝導に限られる。そのため、鏡の冷却に時間がかかり、LCGTの観測効率を左右するので、その計算を行った。さらに熱放射率 (emissivity) の高いコーティングを用いて、どの程度冷却時間を短縮できるかを検討したので報告する。

2 計算方法

LCGT では、Fig. 1 のように、防振のため test mass は platform、intermediate mass に懸架される。熱は test mass からサファイアファイバーを通して intermediate mass に、アルミニウムヒートリンクを通して intermediate mass から platform に、platform から inner shield に伝えられる。Inner shield は4台の低振動冷凍機の2段目に接続される。

各質量の温度の時間依存性を求めるため、大きさのない質点間を熱伝導、熱放射によって熱が伝わるというモデルを構築した。この際に、冷凍機の冷却能力の常温から低温までの温度依存性として、試作低振動冷凍機ユニットの性能試験結果から求めたデータを使用した。(前講演「大型低温重力波望遠鏡用低温設備の開発(3) - LCGT 用低振動冷凍機ユニットの試験結果 -」参照)

今回は以下のような順序で計算を行った。

1. 懸架系を考慮しない (Inner shield のみを考慮)
2. 懸架系を考慮、熱放射を考慮しない
3. 懸架系を考慮、熱放射を考慮
4. 懸架系を考慮、熱放射を考慮 (Test mass 以外の各質量と inner shield 内面に emissivity の高いコーティング、候補の1つに DLC、Diamond Like Carbon がある)

なお、DLC コーティングした金属の emissivity を推定するため、アルミニウム A1070 に化学研磨 (CP) 処理を施し、膜厚 1.0 μm の DLC をコーティングしたサンプルを作成し、波長 10 μm 、低温における反射率測定を行った。この測定方法は [1] に示されている。その結果、吸収率は 0.41 ± 0.02 であり、温度依存性は見られなかった。ここでは、DLC をコーティングした質量の emissivity としてこの値を用いた。

3 結果

1-4 のどの場合にも inner shield は10日程度で冷却可能であるという結果を得た。2の場合には、細いサファイアファイバーやヒートリンクの熱伝導が悪いため、鏡の冷却に約100日かかることが判明した。一方、3の場合には約

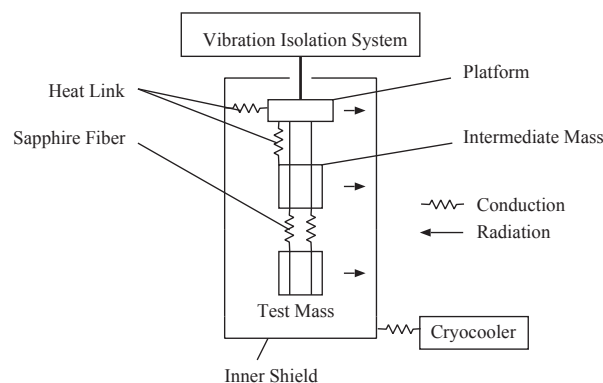


Fig. 1 Schematic diagram of the cryogenic suspension system of the LCGT. Heat is conducted from the test mass (sapphire mirror) to the intermediate mass by the sapphire fibers, from the intermediate mass to the platform and from the platform to the inner shield by the aluminum heat links. The inner shield is connected to the 2nd stages of the four cryocoolers.

60日で冷却可能であり、熱放射が冷却に重要な役割を果たすことが分かった。また、emissivity、熱伝導率の温度依存性を無視すれば、温度 T_x 、 T_y の質量間の伝熱は、熱放射は

$$T_x^4 - T_y^4 \quad (1)$$

に比例し、熱伝導は

$$T_x - T_y \quad (2)$$

に比例する。したがって、高温 (約 150 K 以上) では熱放射が、低温 (約 100 K 以下) では熱伝導が支配的になる。

さらに4の場合には、emissivity の高いコーティングのため、熱放射を増加させることができる。この場合には、冷却時間は約25日と、コーティングのない場合に比べ半分程度に低減可能であることが分かった。

4 結論

LCGT が効率的に観測を行うためには、冷却時間を1か月程度以内に抑える必要がある。これは test mass 以外の各質量と inner shield 内面に emissivity の高いコーティングを施すことで可能であることがわかった。今後、放射による冷却を検証するための小型の実験装置を作成し、このコーティングの有用性を含むこの計算モデルの有効性を確認する。その後、LCGT のクライオスタットの実証機を用いて、この計算を実証する予定である。

参考文献

- [1] Y. Sakakibara, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol. 46 (2011) 434-440