

高強度 Type HT-XX の開発

Development of the Type HT-XX wire with high mechanical strength

菊地 昌志, 鍵山 知宏, 山崎 浩平, 中島 隆芳, 武田 宗一郎, 小林 慎一, 長部 吾郎, 藤上 純,
林 和彦, 佐藤 謙一(住友電気工業); 北口 仁(物質・材料研究機構); 下山 淳一(東京大学)

KIKUCHI Masashi, KAGIYAMA Tomohiro, YAMAZAKI Kohei, NAKASHIMA Takayoshi, TAKEDA Soichiro,
KOBAYASHI Shinichi, OSABE Goro, FUJIKAMI Jun, HAYASHI Kazuhiko, SATO Kenichi

(Sumitomo Electric Industries, LTD.); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); SHIMOYAMA Junichi (The University of Tokyo)

E-mail: kikuchi-masashi@sei.co.jp

1. はじめに

当社は、補強前の線材に圧縮歪みを付与する Pre-tension 法を Type HT 製造技術に導入し、広い弾性域と高いヤング率を有する Ni-Cr 系合金を補強材に用いた Type HT-XX を開発しており、一部サンプル供試を開始している。開発過程において 500 MPa を超える引張り強度が得られるなど[1]、強磁場マグネットへの適用条件を満たしつつある。

Pre-tension によって線材にかかる予圧縮歪みに加えて、曲げ加工などによってさらに圧縮歪みがかかった場合、過度の圧縮歪みによって性能が劣化する懸念がある[2]。そこで、様々な Pre-tension で作製した Type HT-XX の引張り特性、引張り疲労特性と両曲げ特性を評価した。

2. 実験条件

上記試験用に厚み 35 μm の Ni-Cr 系補強材を使った Type HT-XX を準備した。予圧縮歪みの影響を明らかにするため、Pre-tension は 100 N, 140 N, 170 N の 3 種類とした。

引張り試験では、液体窒素中で一定の引張り応力を負荷した状態で I_c を測定後、さらに高い引張り応力を負荷するというサイクルを、 I_c が低下するまで繰り返すことによって実施した。引張り強度は I_c が試験前に対して 95%となる引張り応力として定義した。また疲労試験では、液体窒素中において引張り歪み 0.48% (485 MPa 相当) を歪み比 0.5 の条件下で 1,000,000 回繰り返した後、 I_c と N 値を評価した。なお、この試験に用いた線材は試験日程の都合上 Pre-tension=140 N の試料のみとした。

両曲げ試験では、一定の径で両方向に曲げた線材の I_c を除荷後に測定し、その後さらに小さい径に曲げるというサイクルで実施した。引張り強度と同様、 I_c が試験前に対して 95%となる径を許容曲げ径と定義した。

3. 引張り試験の結果

Fig.1 に I_c 維持率の引張り応力依存性を示す。Pre-tension=170 N において引張り強度は 537 MPa に到達している。引張り強度は Pre-tension に応じて改善する傾向が確認でき、予圧縮歪みの効果が現れたものと考えられる。また、疲労試験後の I_c 特性は試験前に対して全く劣化しておらず、励減磁や熱サイクルを想定した繰り返し引張り歪みに対しても良好な特性を示した。

4. 両曲げ試験の結果

Fig.2 に I_c 維持率の曲げ径依存性を示す。いずれの試料も許容曲げ径は 40 mm 以下となり、典型的な Type HT-SS や HT-CA の特性に対して大幅に改善しているものの、Pre-tension=170 N では許容曲げ径がやや大きくなる結果となった。このことから、Pre-tension<140 N の条件下では中立線よりも外層側における引張り歪みによるフィラメント破断の影響が、Pre-tension=170 N では中立線よりも内層側における圧縮歪みによりフィラメント中に入るなんらかのダメージの影響が支配的であると考えられる。

5. まとめ

Type HT-XX の引張り特性と曲げ特性を評価した結果、引張り強度は Pre-tension=170 N まで一様に増加する一方、許容曲げ径は Pre-tension=170 N で僅かに大きくなった。この結果は、Pre-tension と内層の曲げ歪みによって Bi2223 フィラメントに過剰な圧縮歪みが加えられた影響であると考えられる。今後は曲げや熱収縮により付加される圧縮歪みも考慮に入れた Pre-tension 最適化を進めていく。

当日は LNCMI の装置[3]で測定した磁場中 I_c (4.2 K) の結果も報告する予定であり、Pre-tension と熱収縮による性能への影響についても議論する。また、補強前の線材を薄肉化した new Type HT-XX や補強線の厚みを 30 μm にまで薄くした Type HT-XX の特性についても紹介する。

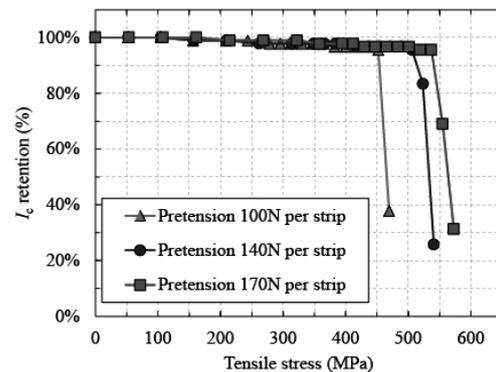


Fig.1 The tensile stress dependences of I_c retention at 77 K for the Type HT-XX wires.

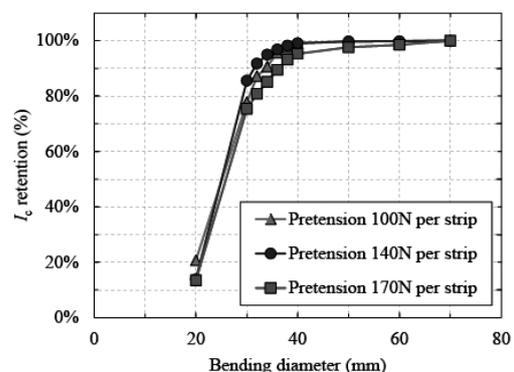


Fig.2 The bending diameter dependences of I_c retention at 77 K for the Type HT-XX wires.

参考文献

- [1] *Abstract of CSJ Conference*, vol. 89, p. 156
- [2] *Suerpcond. Sci. Technol.*, vol. 2, p.085005, 2014.
- [3] *IEEE Trans. Appl. Supecond.*, vol. 23, p. 9500204, 2013.

Bi2223 線材作製における低酸素分圧下一次焼成の効果

Effects of first sintering under low P_{O_2} on superconducting properties of Bi2223 tapes.

古木昌宏、下山淳一、山本明保、荻野拓、岸尾光二(東大院工);中島隆芳、小林慎一、林和彦(住友電気工業)
 FURUKI Masahiro, SHIMOYAMA Jun-ichi, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo);
 NAKASHIMA Takayoshi, KOBAYASHI Shin-ichi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
 E-mail: 4025066580@mail.eccu-tokyo.ac.jp

1. はじめに

最近の我々の研究より銀シース Bi2223 多芯線材の作製において、従来の $P_{O_2} \sim 8$ kPa[1]よりやや還元側の雰囲気である $P_{O_2} \sim 3$ kPa 下での一次焼成により最短 3 h で Bi2223 相が主相となることがわかっている。この手法においては、最適焼成温度が低下し、焼成時間が短いことにより不純物相の粗大化を抑制できるという利点がある[2]。そこで本研究では $P_{O_2} = 3$ kPa での一次焼成を行った試料に対し、二次焼成における雰囲気や焼成温度を検討し、二次焼成条件の最適化による Bi2223 線材の高臨界電流特性化を目指すとともに、Bi2223 線材の二次圧延後の結晶間の結合の回復について調べた。

2. 実験方法

121 芯の銀シース Bi2223 一次圧延線材(~ 4.2 mm \times 0.25 mm)に対し一次焼成を 3%O₂/Ar 気流中、820°C、12 h の条件で行い、800°C まで 6 h かけて徐冷後、炉冷した。なお、一次焼成前の酸化物層は Bi2212 が主相であり、一次焼成後にはほぼ Bi2223 単相となることを確認している。一次焼成線材をロール圧延した後、二次焼成を行った。二次焼成の条件は、3~10%O₂/Ar 気流中あるいは空气中、790~849°C で 1, 6, 24 h とした。得られた線材に対して、1%O₂/Ar 気流中、720°C で 100 h の還元ポストアニールを行った。構成相の同定は X 線回折測定、微細組織の観察は SEM、超伝導特性の評価は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により行った。また、77 K、自己磁場下の I_c は直流四端子法によって調べた。

3. 結果と考察

Table 1 に二次焼成時間 1 h および 24 h の代表的な試料の I_c を示した。二次圧延(ロール圧延)時に生じるクラックがわずかに 1 h で修復し ~ 120 A 程度の I_c が観測された一方、24 h 焼成試料は粒間結合の改善によって ~ 150 A の I_c を示した。二次焼成温度が一次焼成温度より低くても粒間結合の改善が起こったため、より低い温度で二次焼成を 6 h 行ったが、Fig. 1 に ZFC 磁化の温度依存性を示したように転移がブロードになったことから、結合の回復が不十分であることが示唆された。また、二次焼成時の P_{O_2} が高い試料では、より低温より磁場が侵入しており、Pb3221 など不純物の生成が、粒間結合が妨げられたことが考えられる。これらの結果は低酸素分圧下、800°C 付近において焼成時間を検討することが二次焼成条件の最適化につながる可能性を示唆している。Fig. 2 に 40 K における磁化ヒステリシスの幅 ΔM の磁場依存性を示した。高 P_{O_2} 下や低温、6 h 焼成試料では、不可逆磁場がやや低い傾向にあり、これは Bi2223 相における Pb 固溶量が Pb3221 相の生成によって減少したことから説明できる。なお、Fig. 2 の右側の軸は Bean モデルからフィラメント幅を ~ 200 nm として計算した J_c を目安として示したものである。当日は二次焼成温度、雰囲気、時間を変えた他の試料の特性および酸素アニールが超伝導特性に及ぼす影響についても報告する。

参考文献

1. U. Endo *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* 27 (1988) L1477.
2. R. Tajima *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23, (2013) 6400604

Table 1 I_c at 77 K of Bi2223 tapes re-sintered for 1 h determined by I - V measurement using a criterion of $1 \mu V/cm$.

Conditions of 2nd sintering	I_c / A
air, 849°C, 1 h	122.9
5%O ₂ /Ar, 815°C, 1 h	118.8
3%O ₂ /Ar, 810°C, 1 h	122.0
5%O ₂ /Ar, 815°C, 24 h	150.3
3%O ₂ /Ar, 810°C, 24 h	147.2

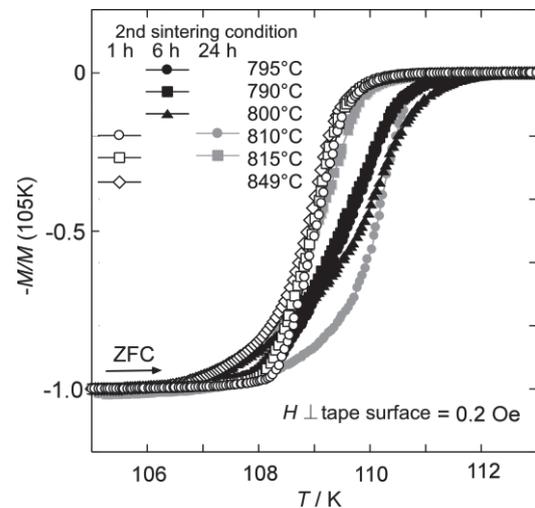


Fig. 1 ZFC magnetization curves for Bi2223 tapes re-sintered under various atmospheres. Circles, squares, triangles and diamonds correspond to 3%O₂/Ar, 5%O₂/Ar, 10%O₂/Ar and air, which are atmospheres during sintering.

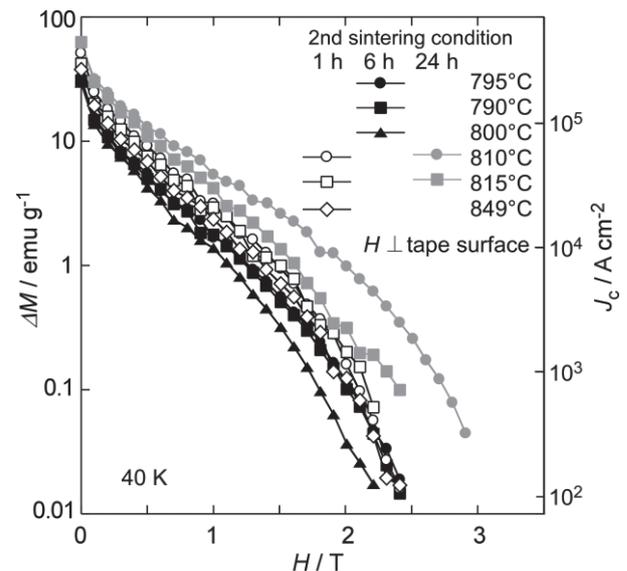


Fig. 2 ΔM vs H plot at 40 K for Bi2223 tapes re-sintered under various atmospheres. Circles, squares, triangles and diamonds represent atmospheres during sintering as in Fig. 1.

構造相変態 PIT 法により作製した鉄カルコゲナイド線材の超伝導特性評価

Superconducting properties of Iron-chalcogenide tapes by a chemical-phase-transformation PIT process

井澤 宏輝, 水口 佳一, 三浦 大介 (首都大学東京)
 IZAWA Hiroki, MIZUGUCHI Yoshikazu, MIURA Osuke (TMU)
 E-mail: izawa-hiroki@ed.tmu.ac.jp

1. はじめに

KFe_2Se_2 は $T_c > 30[\text{K}]$ および $H_{c2} > 50[\text{T}]$ の優れた超伝導特性を示すことから^{[1][2]}、非常に高いポテンシャルを有していることが知られている。しかしながら、K を含む物質であることから大気中での扱いが困難であり、線材としての成功例は未だに報告が無い。そこで筆者らは、構造相変態 PIT 法を用いた KFe_2Se_2 超伝導線材の作製を行い、各種測定および特性の評価を行った。本公演では、各種作製条件による、 KFe_2Se_2 超伝導線材の特性について最新の結果を報告する

2. 実験方法

構造相変態 PIT 法により $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}(\text{Se}_{1-z}\text{S}_z)_2$ 超伝導線材を作製した。線材コアの前駆体として、112 相である $\text{KFe}(\text{Se}_{1-z}\text{S}_z)_2$ を固相反応法により真空中、 600°C にて作製した。得られた $\text{KFe}(\text{Se}_{1-z}\text{S}_z)_2$ を Fe チューブに封入し、Fe キャップをして冷間圧延・平圧延を行った。圧延後、得られた線材切り分け再びガラス管に真空封入し、 $400 \sim 800^\circ\text{C} \cdot 1 \sim 48\text{h}$ の温度条件下にてアニールを行った。線引き以外の作業工程は glove box 内、アルゴン雰囲気中にて行う。アニール処理を施すことにより Fe シースから線材コアへ Fe を供給し、122 相である $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}(\text{Se}_{1-z}\text{S}_z)_2$ をコアとするテープ線材の作製を行った。

測定は、SQUID による磁化測定、4 端子法による ρ -T 測定、線材コアの X 線回折、光学顕微鏡および SEM・EDX による線材コア断面の観察を行った。

3. 実験結果と考察

SQUID による線材コアの磁化測定結果を、図 2 に示す。前駆体を $\text{KFe}(\text{Se}_{0.92}\text{S}_{0.08})_2$ とし、 $625^\circ\text{C} \cdot 5$ 時間アニールした後に急冷を行った線材コアにおいて、 $29.1[\text{K}]$ での超伝導転移を観測した。現在、S 置換量の増加とともに T_c が徐々に減少することを確認しており、Se の 12.5% を S に置換することにより $T_c = 27.5[\text{K}]$ 、25% においては $T_c = 20[\text{K}]$ となることを磁化測定にて観測している。しかしながら、S 置換を行うことにより、硬質なコアを得ることができることから、線材コアとしては多少の S 置換を行うことが望ましいと考えられる。

光学顕微鏡による線材コアの観察では、目立った void は観察されず、密に詰まった線材コアを確認した。

また、4 端子法による ρ -T 測定では、前駆体を $\text{KFe}(\text{Se}_{0.95}\text{S}_{0.05})_2$ とし、 $625^\circ\text{C} \cdot 5$ 時間アニールした後に急冷を行った線材コアにおいて、 $34[\text{K}]$ での $T_{c,onset}$ を観測した。しかしながら明確な $T_{c,zero}$ は観測できておらず、シース込みでの超伝導転移も観測できていないことから更なる作製条件の最適化が必要とされる。

当日は、各種前駆体およびアニール条件における線材特性および作製法の詳細を報告する。

参考文献

1. J. Guo et al., Phys. Rev. B Vol.82, (2010) pp. 180520
2. K. Wang et al., Phys. Rev. B Vol. 84 (2011) pp. 054526

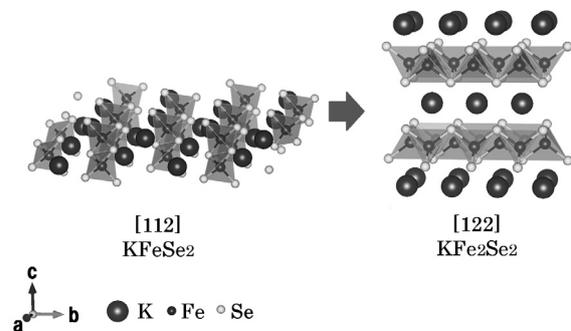


Fig.1 Crystal structure of KFeSe_2 and KFe_2Se_2 .

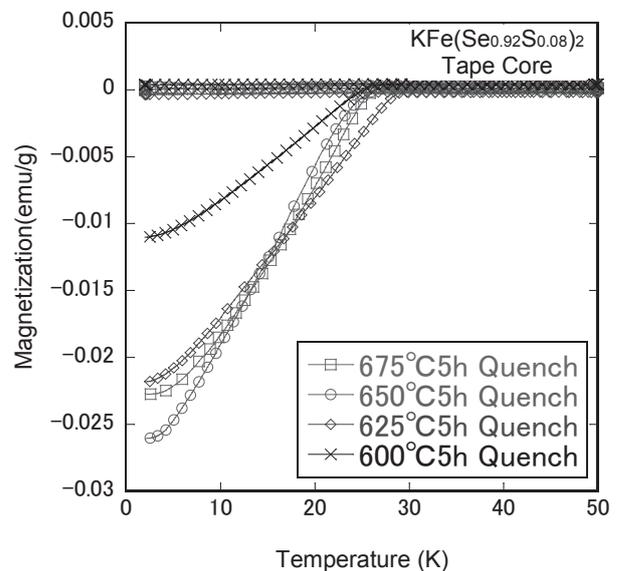


Fig.2 Temperature dependence of zero-field-cooled (ZFC) and field cooled (FC) magnetization of $\text{KFe}(\text{Se}_{0.92}\text{S}_{0.08})_2$ tape core.

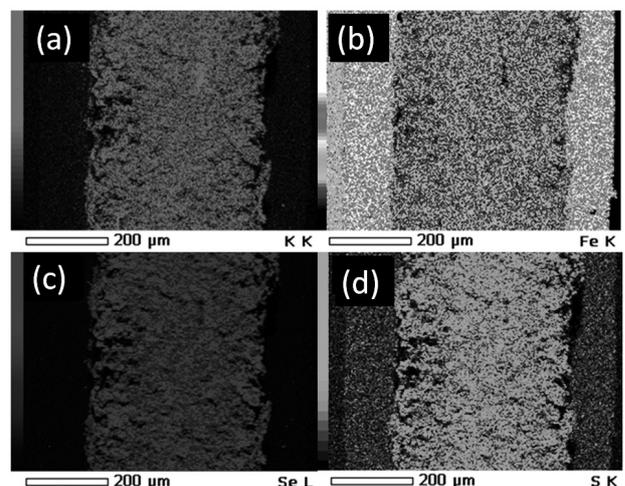


Fig.3 EDX mapping of (a)K, (b)Fe, (c)Se, (d)S for $\text{KFe}(\text{Se}_{0.92}\text{S}_{0.08})_2$ tape annealed at 650°C for 5h.

室温磁気冷凍の冷凍性能における材料積層効果

Cooling capacity of magnetic refrigeration at room temperature by multilayered materials effect

山田 雄太, 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)

YAMADA Yuuta, NAKAGOME Hideki (Chiba University);

YAGI Ryosuke, KOBAYASHI Tadahiko, TOMIMATSU Norihiro, KAJI Siori, SAITO T. Akiko (Toshiba)

E-mail: y.yamada@chiba-u.jp

1. はじめに

室温磁気冷凍技術は環境負荷の低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]。また室温域における磁気冷凍特性について、Gd 磁気冷凍材料をベースに実験および計算による検討を進めてきた。生成温度差を拡大させる手段として、異なるキュリー温度(T_c)の磁性材料を積層して用いる方法がある。ここでは、材料積層化により、生成温度差や熱負荷特性などの冷凍性能に与える効果を実験と数値解析で検討した。

2. 実験および計算方法

本試験装置の概略図を Fig.1 に示す。磁性材料を充填した熱交換容器 (AMR bed) が上下電動シリンダーによって永久磁石の磁場空間内に上下動することで磁界の印加・除去を行い、下部シリンダーに設置されたピストンにより冷媒を上下動する構成である。磁性材料は、 $600\ \mu\text{m}$ 程度の3種の Gd 合金の球状粒子を用いた。AMR bed の11ヶ所に熱電対を設置し、AMR サイクル運転における各部位の温度変化をモニターした。また、熱負荷特性を評価するために、ピストンの先端にヒーターを設置している。上記 AMR サイクルユニットは断熱ボックス内に設置され、外部温度制御ユニット(空調)によって環境温度を変化させることが可能である。本装置を用いて、AMR bed 内に Gd 合金を3層積層した場合と単層の場合について、冷凍試験を行った。

数値実験では実際の試験装置(Fig.1)を想定し、AMR bed 内に充填される冷媒と磁性体間の熱移動と、冷媒と外部環境間の熱移動を考慮した。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量、サイクル周波数については、実験と対応が取れる条件にて模擬した。

3. 実験結果

Fig.2 に AMR サイクルを運転して得られる高温端と低温端の温度差 ΔT_{span} の環境温度依存性を示す。材料単層(キュリー温度 $T_c=16^\circ\text{C}$ の材料)で用いた場合に比べて、3層積層($T_c=4^\circ\text{C}$ 、 10°C 、 16°C の材料)の場合では、低い環境温度での ΔT_{span} が増大する結果が得られた。Fig.3 は、AMR サイクル運転に伴う高温端と低温端の温度変化を示している。AMR bed は3層構成を用い、4100 秒でヒーターにより熱負荷を加えた。熱負荷印加により低温端の温度が上昇し、新たな定常状態で ΔT_{span} が得られるが、熱負荷の増加に伴いこの ΔT_{span} は減少し、ついには定常状態が得られなくなる。講演では、熱負荷特性の運転条件依存性や積層効果について、実験と数値計算による検討結果も併せて発表する。

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

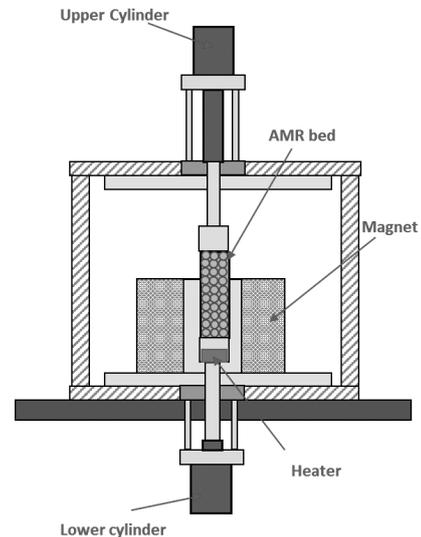


Fig.1 Schematic illustration of the test apparatus.

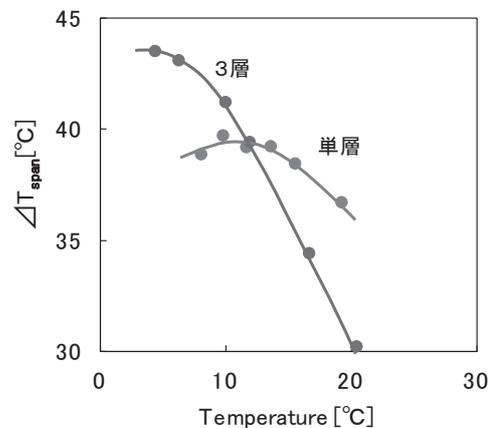


Fig.2 Temperature span of layered AMR bed.

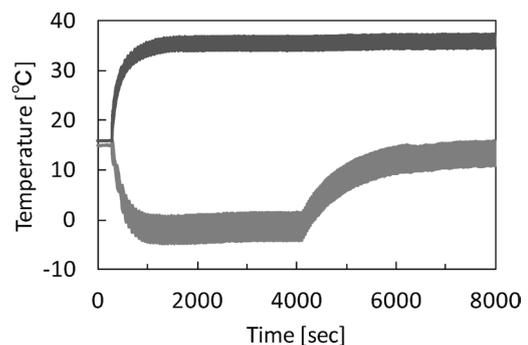


Fig.3 Temperature change of hot/cold ends in AMR cycle.

4K-GM冷凍機用のHo-Er 二元系窒化物蓄冷材の開発

Development of regenerator of Ho-Er binary nitrides for 4K-GM cryocooler

正田 康平, 宮内 隆至, 中川 貴, 山本 孝夫(阪大工); 藤本 靖(阪大レーザー研); 増山 新二(大島商船高専)
; 高田 裕章, 栗岩 貴寛, 山本 和彦((株) 三徳)

SHODA Kohei, MIYAUCHI Takayuki, NAKAGAWA Takashi, YAMAMOTO Takao (Osaka Univ.); FUJIMOTO Yasushi (ILE, Osaka Univ.); MASUYAMA Shinji (Oshima National college); TAKATA Hiroaki, KURIIWA Takahiro, YAMAMOTO Kazuhiko (SANTOKU Co.)

E-mail; shoda-k@mit.eng.osaka-u.ac.jp

1. 諸言

超伝導磁石の冷却などに用いられる Gifford-McMahon (GM) 冷凍機の性能は、蓄冷器に充填する蓄冷材の比熱により左右される。現在この蓄冷材には HoCu_2 が用いられているが、更なる冷凍能力の向上には、より高性能な材料の開発が必要である。我々のグループは希土類窒化物が HoCu_2 に並ぶ高い磁気比熱と熱伝導度を示す[1]ことを見出し、蓄冷材としての開発を行ってきた。REGEN3.3[2]による解析では、Ho-Er 窒化物の 4.2 K における冷凍能力は HoCu_2 のそれを上回る。しかしこれまでの試作球材は、酸化物相の析出や表面に生じる突起が原因で、実質の充填量が損なわれるため、期待された冷凍性能を発揮していない[3]。今回、より酸素不純物の少ない金属球を出発原料として用い、酸化物の析出を抑え、表面突起を超音波処理により取り除いた $\text{Ho}_{0.25}\text{Er}_{0.75}\text{N}$ の球材料を作製した。これらの材料を用い、実機での冷凍試験を行い、冷凍性能の改善の効果を調べた結果を報告する。

2. 実験

酸素不純物の含有量が 0.35 と 0.54 wt% の $\text{Ho}_{0.25}\text{Er}_{0.75}$ 金属球 ($\phi 180\text{--}212 \mu\text{m}$) を出発原料として、高温高压 (1550°C, 200 MPa) の N_2 中で窒化することで試料を作製した。表面の突起を溶媒 (ヘプタン) 中で超音波処理をすることで除去した。生成相の確認を X 線回折で、表面及び断面を SEM で、比熱を PPMS によってそれぞれ観察した。定格 0.1W 4K-GM 冷凍機 (SHI, SRDK-101D model) に Pb: 試料 = 6:4 の容積割合で充填し、4.2 K 付近での冷凍能力を測定した。

3. 結果

X 線回折により、試料は NaCl 構造の単相 $\text{Ho}_{0.25}\text{Er}_{0.75}\text{N}$ であることを確認した。また SEM による観察により、酸素量の低減が表面突起の低減に効果があることが分かった。さらに超音波処理により表面突起が除去できることを確認した。(Fig.1)

また実機への充填質量も大幅な改善が見られた。冷凍試験の結果を Fig.2 に示す。今回の試料の 4.2 K における冷凍能力は、0.206 W を示し、 HoCu_2 の 0.200 W を上回っている。

しかし充填質量は増えたものの、実質的な充填率は 52.5% であり HoCu_2 の 61.8% に劣っている。依然として残る表面突起や不純物酸素をより低減することで、さらに優れた性能が得られるはずである。

参考文献

1. Y. Hirayama *et al.*, J. Alloys and Comp., **462** (2008) L12-L15.
2. REGEN3.3 package ; <http://math.nist.gov/~AOGallagher/auxfiles/regenstart.htm>
3. T. Nakano, *et al.*, Appl. Phys. Lett, **101**(2012)251908.

謝辞

本研究の一部は公益財団法人岩谷直治記念財団科学技術研究助成により実地されたものである。

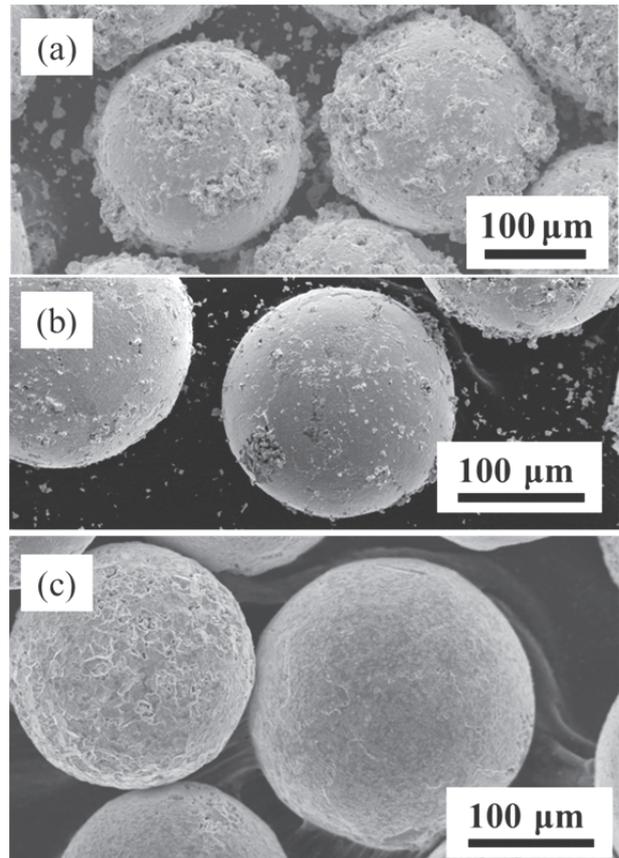


Fig.1 SEM images of $\text{Ho}_{0.25}\text{Er}_{0.75}\text{N}$ spheres of $\phi 180\text{--}212 \mu\text{m}$ (a) with oxygen content of 0.54 wt%, (b) 0.35 wt% and (c) 0.35 wt% after the ultrasonic process, respectively.

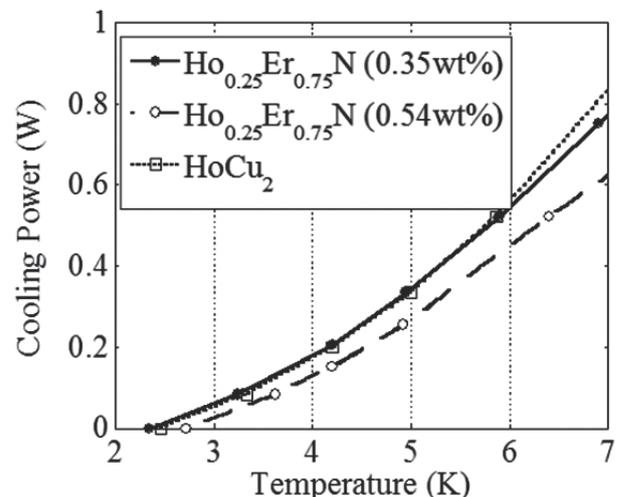


Fig.2 Cooling power of $\text{Ho}_{0.25}\text{Er}_{0.75}\text{N}$ spheres with oxygen content of 0.35 wt% and 0.54 wt% and HoCu_2 sphere.

蓄冷器形状の等価的变化による 4K-GM 冷凍機の冷凍性能改善 Improvement of cooling performance of a 4K-GM cryocooler by equivalent change of regenerator configuration

増山 新二 (大島商船高専); 沼澤健則 (NIMS)

MASUYAMA Shinji (National Institute of Technol., Oshima College); NUMAZAWA Takenori (NIMS)
E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

蓄冷式冷凍機の冷凍性能に大きな影響を与える要因の一つに、蓄冷器効率が挙げられる。これを向上するためには、冷却温度範囲において大きな体積比熱を持つ蓄冷材が蓄冷器内部に充填され、蓄冷器の熱容量を大きくすることが有効であると、一般的に考えられている。したがって、蓄冷器容積を小さくすることは好ましくないと考えるが、増山らが提案している等価的に蓄冷器形状を変化させる手法を用いると、必ずしもそうではない結果が報告[1]されている。

そこで今回は、蓄冷器の低温側にセラミックス蓄冷材を充填した構造を持つ 2 段 GM 冷凍機において、その手法を適用し、1・2 段ステージでの冷凍能力を測定した結果を報告する。

2. 2 段目蓄冷器構造の概略と GM 冷凍機

2 段目蓄冷器構造を Fig. 1 に示す。(a) は三層構造で、高温側に Pb 球、中間部に HoCu_2 球、低温側にセラミックス蓄冷材である $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$ (GOS) 球、または GdAlO_3 (GAP) 球が充填されている。Pb の割合は 50% 一定とし、 HoCu_2 とセラミックス蓄冷材の割合を変化させた時の冷凍性能を実験的に調査した。(b) はベークライト棒を Pb 側に挿入した状態であり、等価的に低温側の蓄冷器断面が細くなっている。挿入されたベークライト棒の長さは 7 cm、直径は 1 cm である。Pb 球の充填量は、(a) の構造より 30 g 少ない 300 g である。

試験に使用した 2 段 GM 冷凍機は、コールドヘッド: RDK-408D2 (SHI)、圧縮機: C300G (SUZUKISHOKAN) で、電気入力は 7.3 kW である。冷凍機の動作周波数は 1.2 Hz、ヘリウムガスの初期封入圧力は 1.6 MPa 一定とした。

3. 冷凍性能試験方法・結果

室温から運転された GM 冷凍機は、各ステージに取り付けである電気ヒータにより、1 段目ステージを 40 K、2 段目ステージを 4.2 K に固定した状態で冷凍能力の測定が行われた。試験結果を Fig. 2 に示す。横軸は、セラミックス蓄冷材と HoCu_2 の割合を表す。セラミックス蓄冷材が充填されていない状態 (0%) において、1.28 W at 4.2 K、44.0 W at 40 K の冷凍能力を有している。

つぎに、GOS を低温端側に充填した場合、2 段目ステージの冷凍能力は、GOS が 30% 時に最も大きな冷凍能力、1.43 W at 4.2 K、を発揮した。この値は、0% 時と比較して 0.15 W の能力改善であり、5 K 付近に比熱のピークを持つ GOS の効果が示されている。一方で、一段目ステージの冷凍能力は、最も小さい、37.9 W at 40 K、であった。これは、2 段目ステージに大きな熱負荷が加わったことが原因であり、両ステージの蓄冷器がシリーズに接続される現状の構造では避けられないことであると考えられる。

つづいて、GAP を低温端側に充填した場合、2 段目ステージの冷凍能力は、10% までは変化が見られないが、それ以降では大幅な減少となった。GAP の比熱のピークは、3.6 K 付近であるため 4.2 K で冷凍能力を改善する効果は期待できないと言える。一方、1 段目の冷凍能力も、0% よりも能力低下となった。これは、4.2 K での GAP の比熱が小さく、蓄冷効果がほぼないことに起因する蓄冷器効率の減少が原因であると考えられる。

つぎに、セラミックス蓄冷材が 30% の割合において、Pb 側

にベークライト棒を挿入 (Fig. 2 (b)) し能力測定を行った。いずれの場合も、4.2 K の冷凍能力は Pb を挿入しない場合とほぼ同程度の値であるが、1 段目ステージの 40 K での冷凍能力は、それより大きな冷凍能力が得られている。特に、GOS の場合は、2.0 W の改善が見られた。これは、ベークライト棒の挿入により、冷凍機内へ流入するヘリウムの流量が抑えられた効果に起因するものと考えられる。

4. まとめ

GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器の低温端側にセラミックス蓄冷材を充填し、1・2 段目ステージの冷凍能力を測定すると、GOS を充填した場合は、2 段目ステージの冷凍能力は大きな改善が見られた。この逆に GAP の場合は、大幅な能力低下となった。一方、1 段目ステージの冷凍能力は、セラミックス蓄冷材を充填することで低くなるのが分かった。

つぎに、高温側にベークライト棒を挿入し、蓄冷器の形状を等価的に変化させた場合では、2 段目ステージの冷凍能力はほぼ同程度であるが、1 段目ステージの冷凍能力に改善が見られた。

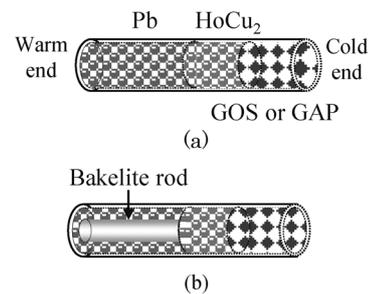


Fig. 1. Schematics of two types of the 2nd stage regenerator, (a) three layer layout, (b) three layer layout with bakelite rod.

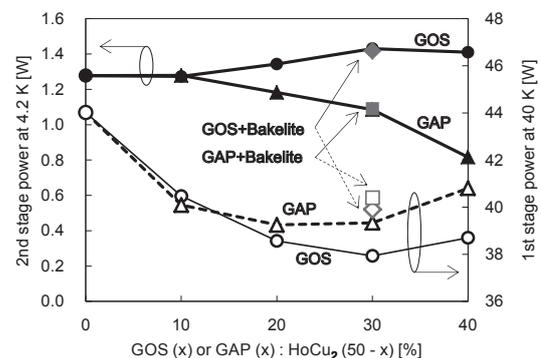


Fig. 2. Experimental results of the cooling power at 4.2 K and 40 K as a function of magnetic regenerator material filling rate.

謝辞 本研究は、科学研究費助成事業(基盤研究(C)24561064)、ならびに核融合科学研究所一般共同研究(NIFS13KECA022)の一部により実施された。

参考文献

1. S. Masuyama, Y. Suzuki, Y. Hiratsuka and T. Numazawa: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014), p. 115

小型 2KGM 冷凍システム用リニア圧縮機の要素技術開発 —1次試作設計検討—

Development of linear compressor for compact 2K GM cryocoolers

平塚 善勝(住重)

HIRATSUKA Yoshikatsu (SHI)

E-mail: Ysh_Hiratsuka@shi.co.jp

1. はじめに

超伝導単一光子検出システムの主要体積を占める極低温冷凍機を小型化しつつ、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)を維持できる超伝導単一光子検出システム用の小型化冷凍システムの研究開発を行っている[1]。圧縮機ユニット容積を小型化するためには、内部構成部品の最適化も検討されるが、課題となる現行容積を大幅に減らす(目標 50% 減)ことを考えると何かしらの大きな変更を余儀なくされる。圧縮機ユニットは、圧縮機本体とほぼ同体積となるアドソーバ、オイルセパレータが空間容積を大きく占拠していることから、この部品を排除した無潤滑圧縮機の開発が一つの有効な手段であることが提案されるとともに、潤滑油の存在故に不可能とされた用途も新たに創出できる可能性を有している。無潤滑圧縮機としてリニア圧縮機を選定し、1次試作機を設計製作し単体評価試験を行ったので、その内容について報告する。

2. リニア圧縮機の設計検討

2K 冷凍機に使用されるリニア圧縮機を設計するにあたり、SHI 製圧縮機ユニット CNA11 の仕様とほぼ同様の膨張機^{2nd}温度 4K 時の流量ならびに圧縮機比を設定した(Tab.1)。さらに決定した設計値に対し圧縮機の運動解析を行い、その後個々の要素部品モータ部、軸受けばねなどの設計計算を行った。解析方法は、圧縮機の作動空間に物理学の 3 保存則を適用し、さらにピストンと吸入吐出弁の運動、そしてモータ部にキルヒホッフの式を適用し、各方程式を連立し差分で解

Table. 1 Specification of the first designed target.

Maximum Input power	1.2 kW
Operating frequency	50Hz
Mass flow rate	0.8 g/sec
High/Low pressure	2.25/0.85 MPa
Compressor efficiency	>60%
Compressor P-V work	>800 W

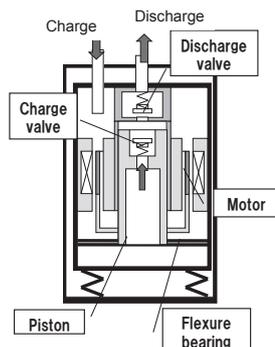


Fig. 1 Schematic draw of linear compressor.

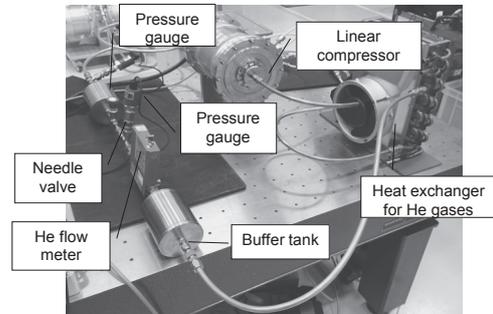


Fig. 2 Photograph of the test apparatus for the compressor performance.

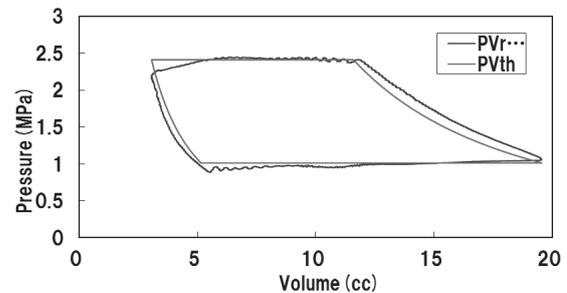


Fig. 3 P-V diagram of the compressor

いている。Fig. 1 には、リニア圧縮機概念図が示されている。計算結果より、吸入弁はピストン側から吐出弁をシリンダ上部に設置し、それぞれの圧力損失の低減を図っている。

3. 試験装置ならびに実験結果

計算結果を基に 1 次試作機の設計製作を行い、圧縮機単体の性能試験を行った。Fig. 2, 3 には、試験装置の写真と P-V 線図がそれぞれ示されている。電気入力 1.2kW 一定として、運転周波数 50Hz、高圧/低圧 2.41/1.01MPa、質量流量 0.8g/sec 時に P-V 仕事 830W が得られ、この時の図示効率 0.90、モータ効率 0.72、機械効率 0.97、容積効率 0.76 となり、圧縮機効率 0.48 となった。圧縮機効率が目標値よりも低い要因として、鉄損失が予測値よりも大きくモータ効率が設計値(0.8 以上)よりも低いこと、ピストンが中立位置で動かないために容積効率が低いことによるものと考えられる。

4. まとめと今後の予定

リニア圧縮機の 1 次試作機を設計製作し圧縮機単体評価試験を行い課題の抽出を行った。今後、得られた結果を基に、圧縮機の効率を向上させるとともに、膨張機との組合せ試験を実施していく予定である。

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単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す。

参考文献

1. M. Xu, et al. Abstract of CSSJ conference, Vol.89 (2014) p.39

SiO 援用 Dolan 法で作製した微小 Al トンネル接合列内での接合特性の均一性 Homogeneity of tunnel junction properties fabricated using a SiO-assisted Dolan method

徳山 貴斗, 島田 宏, 水柿 義直(電通大)
TOKUYAMA Takato, SHIMADA Hiroshi, MIZUGAKI Yoshinao (UEC Tokyo)
E-mail:tokuyama@w8-7f.ee.uec.ac.jp

1. はじめに

Dolan 法は、微小トンネル接合の作製において広く用いられてきた[1]。2層レジストと上層部にリソグラフィーで形成されるレジスト架橋構造を利用した斜め蒸着法と熱酸化によりトンネル接合を作製できる。ただし、この方法では、トンネル接合サイズを小さくするにつれ、架橋形状が接合サイズに及ぼす影響が大きくなる。その影響を低減するため我々は、SiO 援用 Dolan 法について取り組んでいる[2]。従来法と SiO 援用法でのトンネル接合断面模式図を Fig.1 に示す。従来法でのトンネル接合部となる Al 重なり幅 w_1 、および SiO 援用法でのそれ w_2 は、それぞれ Eq. (1), Eq. (2) で表される。

$$w_1 = d \times (\tan \theta_1 + \tan \theta_2) - L \tag{1}$$

$$w_2 = d \times (\tan \theta_2 - \tan \theta_3) \tag{2}$$

ここで、 $d, L, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ はそれぞれ、下層レジストの厚さ、レジスト架橋の長さ、1回目の Al 蒸着角度、2回目の Al 蒸着角度、SiO の蒸着角度である。Eq. (2)には L が含まれないことから、SiO 援用法では L のばらつきを排除でき、多数の接合を作製する際には、従来法よりも均一な重なり幅を実現できると期待される。そこで、本研究は SiO 援用法で作製した接合列内での接合特性均一性を評価する。

均一性を評価するにあたって、接合列の電気伝導特性に注目した。完全に均一な微小トンネル接合列において、微分コンダクタンス曲線の理論式は Eq. (3) で表される[3]。

$$\frac{G}{G_T} = 1 - \frac{E_C}{k_B T} g\left(\frac{eV}{N k_B T}\right) \tag{3}$$

ここで、 $G, G_T, E_C, k_B, T, e, N$ はそれぞれ、微分コンダクタンス、高い正負電圧での漸近したコンダクタンス、単一接合の帯電エネルギー、ボルツマン定数、温度、素電荷、接合列中の接合数、関数 $g(x) = [x \sinh(x) - 4 \sinh^2(x/2)] / [8 \sinh^4(x/2)]$ である。接合列内の接合特性にばらつきがあれば、微分コンダクタンス曲線は Eq. (3) と一致しなくなる。そこで、微分コンダクタンス曲線と Eq. (3) との一致具合を利用して均一性を評価した。

2. 実験方法

作製した素子は、 N 接合が電気的に直列接続された接合列である ($N = 12, 16, 32, 48, 64, 128$)。SiO 援用の効果の評価するために、現像時間・酸化条件を同一とした従来法 (w.o.SiO) と SiO 援用法 (w.SiO) によって、素子を作製し、液体 He 浴中 (4.2 K) で測定を行った。接合列に加える電圧を掃引し、流れた電流値を測定すると共に電流-電圧特性の差分からコンダクタンス値を算出した。

3. 測定結果

測定結果 (ChipA1, ChipA2 上の直列32接合列) より算出した微分コンダクタンス曲線を Fig.2 に示した。Eq. (3) の微分コンダクタンス曲線と測定結果の微分コンダクタンス曲線の最小値が一致するように Eq. (3) の E_C を調整した。± 0.07 V 付近では Eq. (3) と実験値のズレが生じているが、これは電流による発熱の影響である。発熱の影響を受けにくい 0 電圧付近では従来法を用いた実験結果は Eq. (3) とのズレが確認できる一方で、SiO 援用法を用いた実験結果は Eq. (3) とよく一致している。接合列内の均一性が良くなっていることを示している。

4種類の条件下で作製した全ての素子 (ChipA~D) に対して、実験結果と Eq. (3) との一致度を Fig.3 挿入図に示す V_w を用いて評価した。実験結果および Eq. (3) で得られる V_w をそれ

ぞれ $V_{w,exp}, V_{w,Eq.(3)}$ と記す。Fig.3 の縦軸 $V_{w,exp} / V_{w,Eq.(3)}$ の値が 1 に近いほど、均一性が高いことを意味する。SiO 援用法で作製した接合列が高い均一性を有することがわかる。

参考文献

- G. J. Dolan, Appl. Phys. Lett., **31** (1977) 337
- A. Ushizawa et al., The 74th JSAP Autumn Meeting, (2013) 20a-C11-5
- J.P. Pekola et al., Phys. Rev. Lett., **73** (1994) 2903

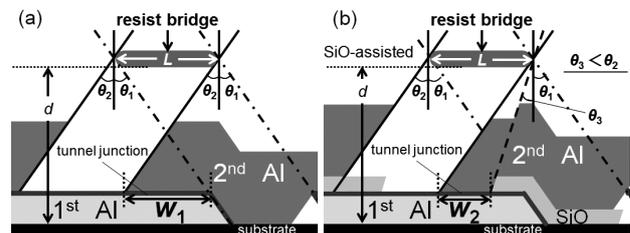


Fig.1 Cross-sectional view of shadow evaporation process (a)Dolan method (b) SiO-assisted Dolan method

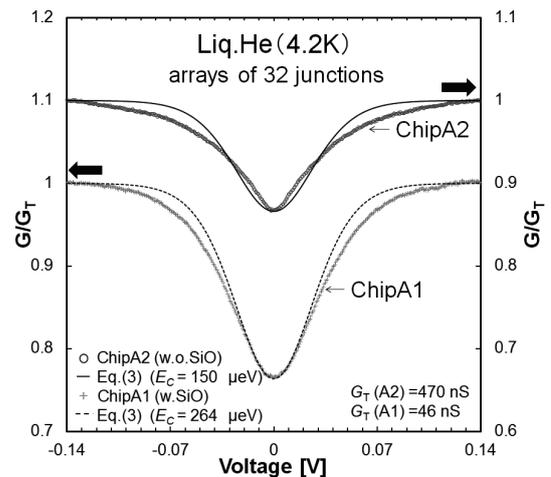


Fig.2 Normalized differential conductance characteristics vs. bias voltage for array of 32 junctions at 4.2K

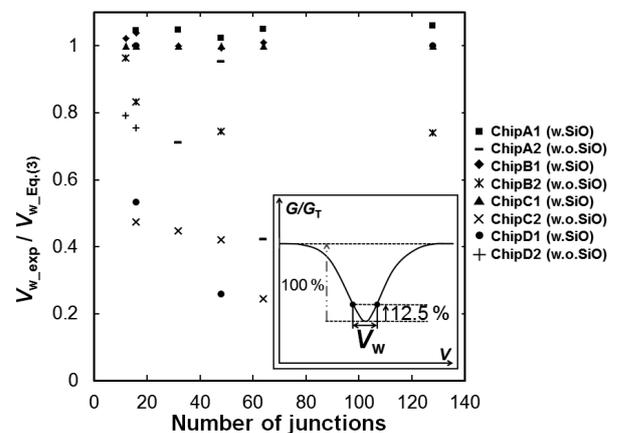


Fig.3 The width of the conductance curve $V_{w,exp}$ as scaled by the width of Eq. (3) value

Nb/AlOx/Nb 接合臨界電流密度の 3 インチウエハ内分布の測定

Measurement of distribution for Nb/AlOx/Nb Josephson junction critical current density in three inch wafer

日高 睦夫, 永沢 秀一, 佐藤 哲朗(産総研)
 HIDAKA Mutsuo, NAGASAWA Shuichi, SATOH Tetsuro (AIST)
 E-mail: m-hidaka@aist.go.jp

1. はじめに

Nb/AlOx/Nb ジョセフソン接合(JJ)は、デジタル回路を始めとして低温超伝導デバイスに最も多く使用されている JJ である。JJ で最も重要なパラメータは、臨界電流値 I_c であり、臨界電流密度 J_c と JJ 面積 A との積となる。Nb/AlOx/Nb 接合の J_c はこれまで各ウエハの代表値のみが示され、ウエハ内での J_c 分布はあまり議論されてこなかった。今回我々は大面积 JJ を用いて 3 インチウエハ上の J_c 分布を精密に測定した。

2. 従来の J_c 測定における問題点

これまでの J_c 測定では、実回路に用いる JJ と同程度の数 μm^2 レベルの微小 JJ を数種類用いて、 I_c の JJ 面積依存性から J_c を求めていた。しかし、この方法では JJ 面積変動の面積依存性や露光の run-to-run バラツキによって、得られる J_c の値が影響を受けることがあった。また、微小 JJ は I_c が小さいため、ノイズの影響を受けやすいことも正確な J_c 測定の障害となっていた。

3. 実験方法

露光による JJ 面積変動の影響が小さな 20 μm 角の大面积 JJ を用いて J_c の測定を行った。JJ 面積変動の大きな要因として角の丸まりがある。一辺 1 μm の正方形の角が丸まり円形になった場合、面積は 21.5% 減少するが、一辺 20 μm の正方形では同様の角の丸まりが生じて面積は 0.05% しか減少しない。また同じ J_c の場合、1 μm 角 JJ と比べて 20 μm 角 JJ は I_c が 400 倍になるため、ノイズの影響を小さくすることができる。

実験に用いた JJ は AIST-STP2[1]と同じ条件で作製した。 J_c の目標値は 2.5 kA/cm^2 である。20 μm 角 JJ を 100 個直列に接続した回路を測定単位とし、その電流電圧特性における I_c のほぼ中央値である電圧 0.15 V における I_c を測定した。この 100 個直列 JJ を 5mm 角 1 チップに 15 個配列し、それぞれの I_c 中央値を測定し、 J_c を求めた。この測定を図 1 に示される 3 インチウエハ対角線上にある 5 チップに対して行った。同様の測定を同条件で作製した 2 枚のウエハに対して行った。

4. 実験結果

図 2 に No.2 ウエハの測定結果を示す。横軸が JJ の位置、縦軸が J_c である。本実験では JJ 面積変動が極めて小さいため、 J_c の値の信頼性は高いと考えられる。図 2 から J_c は良くそろっており、3 インチウエハ上の分布は最大でも 5% 程度であること

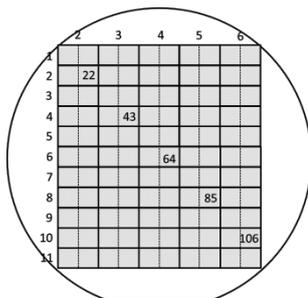


Fig.1 Positions of measured 5 mm-square chips.

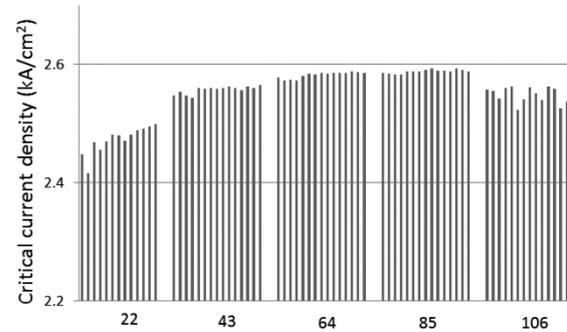


Fig.2 Measured J_c for 20- μm -square Nb/AlOx/Nb JJs in a 3-inch wafer.

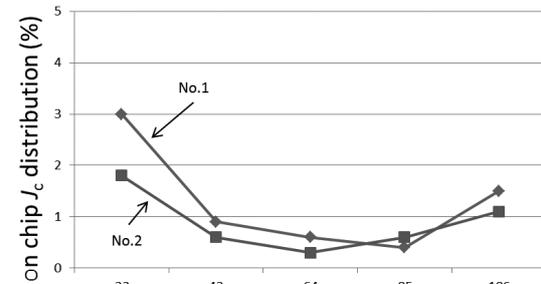


Fig.3 J_c distributions in a 5-mm-square chip.

がわかる。また、 J_c はウエハ中央で高く、周辺で若干低くなっている。特にオリフラを下にした時の左上の J_c が小さい。この傾向は No.1 ウエハでも全く同じである。本 JJ 作製時には、装置に対してオリフラを基準にウエハを常に同じ向きにセットすることから、JJ 作製時の何らかの条件が影響していると思われる。

5 mm 角 1 チップ上での J_c 分布も調べた。その結果を図 3 に示す。中央部 3 チップのチップ内 J_c 分布はいずれも 1% 以下であった。これに対して周辺部チップのチップ内 J_c 分布は若干大きく、2~3% 程度になることがわかった。これらのことから、両ウエハとも 1 チップ上での J_c 分布は、中央の方が周辺のチップより小さいことがわかった。

5. まとめ

面積変動の影響が小さい 20 μm 角の大面积 JJ を用いて Nb/AlOx/Nb 接合 J_c の 3 インチウエハ内分布を測定した。その結果、 J_c は中央で大きく、周辺で小さい傾向を示し、最大で 5% 程度の違いがあることが分かった。また、5mm 角チップ内の J_c 分布は中央が小さく、周辺部が大きい傾向を示し、その値は中央部で 1% 以内、周辺部で 2~3% であった。

謝辞

本研究の一部は、科研費 (26220904, 23226019) および ALCA-JST、先端計測-JST の支援を受けたものである。

参考文献

1. S. Nagasawa, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 5, (1995) p. 2447.

High-speed Demonstration of Bit-serial SFQ-based Computing for Integer Iteration Algorithms

Qiuyun Xu, Yuki Yamanashi, Nobuyuki Yoshikawa (Yokohama National University)
E-mail: olivia.hsu.cn@gmail.com

1. Introduction

Single-Flux-Quantum (SFQ) logic [1] is a superconducting electronics-based technology for constructing ultra-fast and low-power-dissipation integrated circuits. With tremendous high-energy efficiency when compared to CMOS technology, the SFQ logic comprises a promising perspective in building microprocessor.

The main contribution of this study is to implement a single-flux-quantum (SFQ)-based hardware algorithm that performs an exhaustive search to verify the Collatz conjecture, and demonstrate the first SFQ-based system combined with SFQ processor and SFQ memory working at high clock speed. The circuit consists of a 16-bit integer register, a high-frequency clock generator, and a central processor. This design can perform at up to a maximum clock frequency of 90 GHz with a total power consumption of about 0.85 mW based on the AIST 10 kA/cm² advanced Nb process. The assessments show that our design can process 2×10^7 numbers every second with an energy efficiency of about 5×10^{10} numbers per Joule. This application can further be adapted to investigate the stability of a relatively complex SFQ-based system.

2. System Design

The Collatz conjecture is concerned with the iterative behavior of the function $T(n)$:

$$f(n) = \begin{cases} n/2 & \dots n \equiv 0 \pmod{2} \\ 3n+1 & \dots n \equiv 1 \pmod{2} \end{cases}, \quad (1)$$

(n denotes the set of nonnegative integers).

This conjecture asserts that the repeated iteration of $T(n)$, starting from any positive integer n , eventually produces the value of '1' [2].

In this design, we built a bit-serial-based system consisting of I/O register files, a high-speed clock generator and a central calculation unit. Memory size of this system is 16 bits and the processor consists of two processing units to compute this mathematical problem. This system can stably work over 50 GHz by using the AIST 10 kA/cm² advanced Nb process, which was built with 2815 Josephson junctions and occupying a total area of 3.4 mm² (2.52 mm x 1.35 mm). The total bias current is 339 mA. A micrograph of a fabricated Collatz processor is shown in Fig.1.

3. Discussions

So far, several chips have been tested. Correct functional test results have been obtained, which demonstrate the successful iterative calculation capability of the system at low frequency. However, at the moment, this capability has not yet been observed at high clock frequencies around 50 GHz.

To get high-frequency results and investigate the stability of the system, we have designed high-speed test circuits to check the circuit operation corresponding to one iterative calculation step at high clock speed. The measurement of this

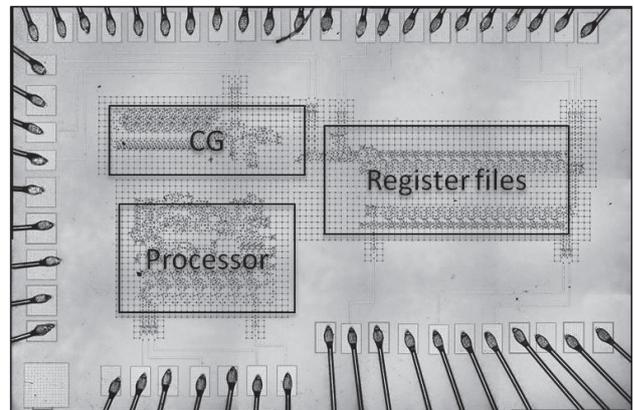


Fig. 1. Microphotograph of a 16-bit SFQ Collatz conjecture processor chip. Processor: a central processing unit. Register files: two 16-bit shift registers, where the upper register is used for writing data in and the lower register is used for reading data out. CG: high-speed clock pulse generator.

high-speed test system is currently in progress and the results will be reported at the presentation.

4. Conclusion

We have presented a computing system that performs the exhaustive search to verify the Collatz conjecture using SFQ-based technology. Functional test results show correct iterative operations for all tested patterns at low frequency. This is the first step towards demonstrating a computational component with a memory subsystem in superconducting technology.

Acknowledgment

The CONNECT ADP cell library and tools were used in this study. The circuits were fabricated in the clean room for analog-digital superconductivity (CRAVITY) of AIST with the advanced process 2 (ADP2).

Reference

1. K. K. Likharev and V. K. Semenov, "RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–28, Mar. 1991.
2. T. O. E. Silva, "Maximum Excursion and Stopping Time Record-Holders for the $3x+1$ Problem: Computation Results," *Mathematics of Computation*, vol. 68, no. 225, pp. 371–384, 1999.
3. Q. Xu, Y. Yamanashi, T. Ortlepp and N. Yoshikawa, "Analysis of Computational Energy Efficiency in Single-Flux-Quantum Electronics by Implementing an Integer-Based Hardware-Algorithm," in *ISEC2013*, Boston, MA, 2013.

上部グランド面を有する大規模単一磁束量子回路の評価

Evaluation of Large-Scale Single-Flux-Quantum Circuits with Upper Ground Plane

田中 雅光, 佐藤 諒, 藤巻 朗 (名大)
 TANAKA Masamitsu, SATOH Ryo, FUJIMAKI Akira (Nagoya Univ.)
 E-mail: masami_t@ieee.org

1. はじめに

単一磁束量子 (SFQ) 回路は、高速性と低消費電力性を兼ね備えた次世代デジタル回路技術である。極低温下でのデジタル信号処理技術を、高性能な超伝導検出器と組み合わせることにより、例えば、極低温 - 室温間のケーブルに要求される帯域を抑えながら多チャンネル化を実現することが可能となる。冷凍機内に実装した高度なセンサシステムは、中規模 SFQ 回路の有望な応用分野として期待される。

SFQ 回路は微弱な磁気信号を情報担体とするため、地磁気や環境から発生する外部磁場ノイズを遮蔽する必要がある。一般に、高透磁率合金などによる磁気シールドが用いられているが、中性子などの放射線検出応用では磁気シールドが放射化する問題があるため使用できない。そこで、集積デバイスの最上部超伝導配線層をグランド面とし、磁気遮蔽のために使用することが考えられる。この上部グランド面は、大規模 SFQ 回路で問題となる自己磁場による誤動作に対しても有効と考えられ、グランド面に意図的に電流を流してその影響を調べるといった実験がこれまでにに行われている [1]。

本報告では、より大規模 SFQ 回路として 240 bit シフトレジスタ (約 3000 接合) を試作し、上部グランド面の有無による回路動作の比較結果について述べる。

2. 設計

今回試作に用いたのは AIST 標準プロセス 2 で、下部グランド面を含め 4 層の超伝導層 (下から M1, M2, ... M4 と呼ぶ) が利用できる。M4 を上部グランド面とし、M2, M3 を回路の配線として用いる。

我々はこれまで集積回路設計におけるインダクタンスの計算に L-meter [2] を利用してきたが、下部及び上部にグランド面を有する超伝導線のインダクタンスの計算は複雑であり、計算結果に対する不確かさや計算時間の増大が懸念される。そこでまず、SQUID を用いて実験的にインダクタンスを評価した。測定によって得られた M2, M3 のシートインダクタンスはいずれも 0.38 pH であり、上部グランド面なしで L-meter を用いて計算した値のそれぞれ 0.51, 0.77 倍となった。回路設計では、これらを考慮して L-meter を用いて行った。

テスト回路として、240 bit のカウンタフロー型シフトレジスタを試作した。ジョセフソン接合数とバイアス電流の設計値はそれぞれ 2800, 340 mA であり、バイアス電流は 4 箇所のポートから供給できるようにした。Fig. 1 にチップレイアウトを示す。

3. 評価結果

一般に、バイアス供給ポートの数を増やした方が、バイアス電流を分散して供給できるため、自己磁場の影響が低減されると考えられる。そこで、使用するバイアス供給ポートを 4 箇所のうちいずれかのみとした場合と、4 箇所全てを使用して分散させて供給した場合のバイアスマージンの変化を比較した。

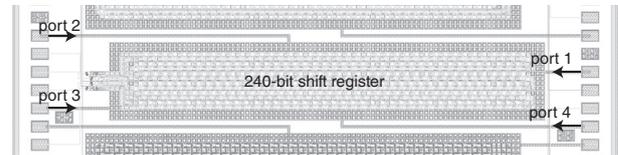


Fig. 1 Layout design of shift register with 4 bias feed ports.

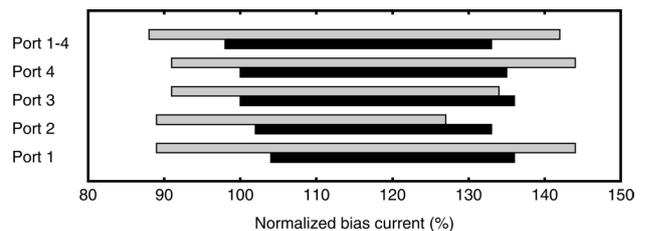


Fig. 2 Bias margins of shift registers with different bias supply (upper: normal, lower: designed with skyplane).

Fig. 2 に結果を示す。バイアス電流量は設計値で規格化した。バイアス電流の高い方へのシフトが見られるが、今回評価したチップでは、ジョセフソン接合の臨界電流値は設計値より 15% 高く、妥当なマージンが得られていると考えられる。従来の回路 (灰色) はバイアス供給方法によりバイアスマージンが変化しているが、上部グランド面を有する回路 (黒色) はほぼ一定となっており、自己磁場への耐性が上がっていることが期待される。ただし、上部グランド面を有するシフトレジスタのバイアスマージンの幅は従来回路よりも低い結果となった。これは、L-meter を用いて計算した値に補正定数を乗じる今回の方法では、十分な精度でインダクタンスの設計が行えていなかったことが原因と考えられる。より複雑な論理ゲートを含むセルライブラリの構築には、上部グランド面がある場合のインダクタンスの計算方法に関する再検討が必要と思われる。

参考文献

1. K. Fujiwara, T. Hikida, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, S. Yorozu, and H. Terai, Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) S362.
2. P. I. Bunyk and S. V. Rylov, 4th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC 1993) Ext. Abs., Boulder, USA, (1993) pp. 62.

謝辞

本研究は JST ALCA 及び 科学研究費 (23226019, 25630171) の助成を受けたものである。本研究に使用した回路は、(独) 産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導クリーンルーム (CRAVITY) において、AIST-STP2 プロセスを用いて作製された。また、本研究の一部は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通しケイデンス株式会社の協力で行われたものである。

非同期式バッファを有する単一磁束量子時間測定回路による 高分子の飛行時間型質量分析

Time-of-Flight Mass Spectrometry of High-Mass Molecules by using Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter with Asynchronous First-In First-Out Buffer

佐野 京佑, 村松 祐希, 下田 知毅, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大); 全 伸幸, 大久保 雅隆 (産総研)

SANO Kyosuke, MURAMATSU Yuki, SHIMODA Tomoki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.);

ZEN Nobuyuki, OHKUBO Masataka (AIST)

E-mail: sano-kyosuke-cw@ynu.jp

1. はじめに

質量分析の手法の一つとして飛行時間型質量分析法 (TOF-MS, Time of Flight Mass Spectrometry) が広く用いられている。近年, 高分子の高精度質量分析に向けて超伝導ストリップイオン検出器 (SSID, Superconducting Strip Ion Detector) が研究されている[1]。SSID を用いることで分子量に依存しない高感度なイオン検出が可能となる。しかし, SSID の検出面積は数 mm^2 と小さく検出効率の点で従来の検出器に劣る。SSID のアレイ化により検出面積を拡大できるが, 同時に多量の信号用配線を必要とし冷却コストと読み出し回路の複雑化が課題となる。

本問題の解決のため, 我々は単一磁束量子 (SFQ, Single Flux Quantum) 回路[2]を用いた高分解能時間測定回路 (TDC, Time-to-Digital Converter) の開発をしている。SFQ 回路を信号処理回路として SSID と同一の極低温環境に組み込むことで複数の検出器信号を高速に信号処理しデジタルデータとして室温に低速で読み出すことが可能になる。

今回, 単チャンネルの SSID から得られる信号を SFQ TDC の非同期読み出し機能を用いて分析したため, その結果について報告する。ただし, SSID と SFQ TDC は異なる冷凍機に実装されており, 両冷凍機間は室温を介して繋がれている。

2. SFQ TDC を用いた質量分析実験

SFQ TDC の構成を Fig. 1 に, 装置の構成を Fig. 2 に示す。SSID の検出信号の立ち上がりが数百 ps であるため TDC の時間分解能は 100 ps に, 検出目標の最大分子量が 60 万 Da であるためダイナミックレンジは 1.6 ms に設定した。また, $3 \times 24\text{-bit}$ の非同期式 First-In First-Out (FIFO) バッファを有し, 同時に 3 つまでの時間データを保持することができる。本回路は AIST 2.5 kA/cm^2 標準プロセス 2 を用いて製作された。

今回, SFQ TDC の非同期読み出し機能を用いて分子量約 14,000 Da のリゾチームの飛行時間を計測した。得られたヒストグラムを Fig. 3 に示す。Fig. 3(a) は非同期読み出し機能を使用せず, 測定終了後にバッファから測定データを読み出した結果である。このため, 最初に検出された三つのイオンの飛行時間データのみがバッファに保持される。一方, Fig. 2(b) は非同期読み出し機能を使用し, 50 μs 間隔で測定と同時に飛行時間を読み出した結果である。(a) と比較し (b) においては飛行時間の長いイオンのピークがはっきりと確認できる。これは非同期読み出し機能により, イオン検出の読み飛ばしが軽減されたことを意味する。本結果から, 非同期式バッファが正常に動作し高分子の分析が行えたことが確認された。

謝辞

本研究に使用された回路は, (独)産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導クリーンルーム (CRAVITY) において, AIST-STP2 プロセスを用いて作製された。

参考文献

1. N. Zen, et al.: Physics Procedia, Vol. 27 (2012) p.356
2. K. K. Likharev and V. K. Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 1 (1991) p.3

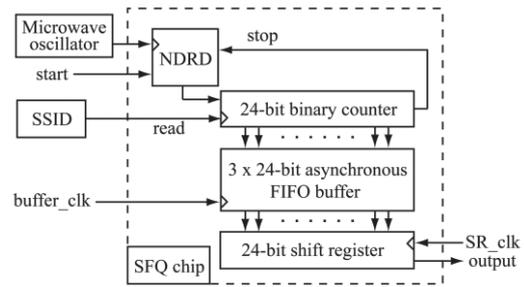


Fig.1 Block diagram of the SFQ TDC

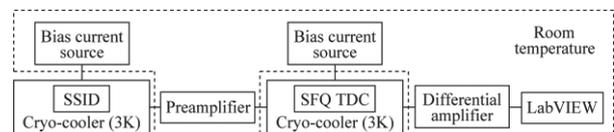
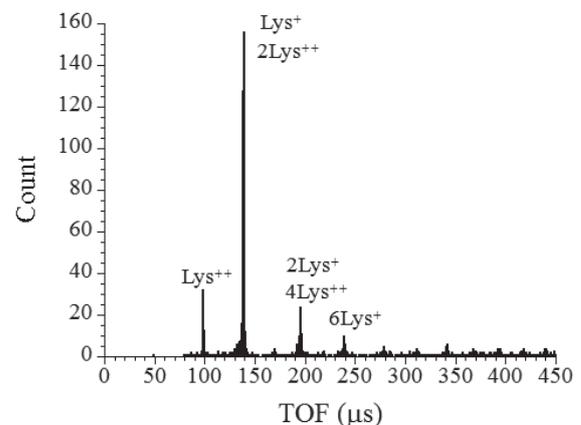
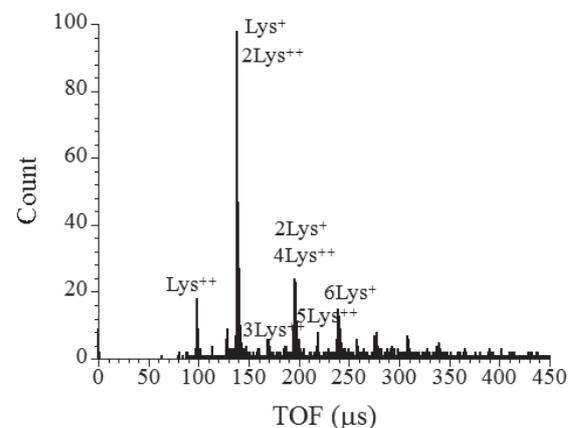


Fig.2 Measurement setup



(a) マススペクトル (測定時非同時読み出し)



(b) マススペクトル (測定時同時読み出し)

Fig.3 Mass spectrums of lysozyme (binwidth 64 ns)

車載超電導モータの開発

Development of Superconducting Motor for Electric Bus

尾山 仁, 荒川 聡, 新里 剛, 藤川 裕之, 坂 寛延 (住友電気工業株式会社)
 Oyama Hitoshi, Arakawa Satoshi, Sinzato Tsuyoshi, Fujikawa Hiroyuki,
 Saka Hironobu (Sumitomo Electric Industries, LTD.)
 E-mail: oyama@sei.co.jp

1. はじめに

近年、液体窒素温度で電気抵抗がゼロとなる高温超電導線材がめざましい性能の進歩を遂げており、電力ケーブル、船舶駆動用モータ、他への実用化に向けた応用開発が進められている。この研究は、超電導モータの低損失特性に着目し、大型電動車両の走行電費低減を目標に開発を進めている。今回は車載超電導モータと冷却システム的设计コンセプトについて報告する。

2. 電動バスへの超電導モータの適用

近年急速に自動車の電動化が進んでおり、乗用車に関してはハイブリッド自動車(HEV)が普及期を迎え、電気自動車(EV)も量産車が市場投入され実用化の段階に入った。

一方、大型商用車に関してみると、電動バスの実証試験が2010年より各地で開始されており、今後、環境意識の高い観光都市での導入や、スマートシティ構想の一部をなす移動手段としての導入を皮切りに、市場の成長が期待される。大型商用車の電動化における課題として、車体重量に加えて積載重量が大きく、搭載可能な電池容量に比べて駆動に必要なエネルギーが大きくなり、航続距離が伸ばせないことが挙げられている。超電導線をコイルとして用いたモータは銅損がなく、高効率化が期待できるため、本研究では高温超電導モータとその冷却システムを開発し、通常モータの電動車両に対し10%の電費向上を目標としている。

3. 車載超電導モータ及び冷却システム

電動バスの動力系は電源系(バッテリー)と駆動系(モータ/インバータ)からなる。超電導モータシステムでは、バッテリーの電力によって超電導モータを駆動するのに加えて、超電導特性を得るために必要な低温環境をバッテリーの電力を用いて駆動する冷凍機によって維持する構成となっている。Fig.1に車載超電導モータ及び冷却システムの構成図を示す。

本研究の超電導モータは、車載用としても実績のある永久磁石同期モータをベースにした電機子超電導モータである。電機子は、住友電気製TypeH超電導線材を用いた鞍型コイルからなり、ラジアルタイプの6スロット構成とした。冷却のためにコイルを収容するFRP製断熱容器は、真空断熱のための気密性確保、車載時の強度確保の観点から一体モールド成形によって作製した。冷凍機の膨張器、熱交換器、液体窒素ポンプ等の冷却要素ユニットは、車両への搭載性を考慮してモータ上部に集積して一体化する構造とした。Fig.2に超電導モータの外観図、Table1にモータの目標仕様を示す。

4. 今後の予定

超電導モータ及び冷却システムの試作を進めており、2014年12月にベンチ試験、2015年1月に電動バスに搭載しての実車試験を行う予定。

謝辞

この研究は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業として、住友重機械工業株式会社との共同研究、株式会社明電舎との委託研究の下に実施している。

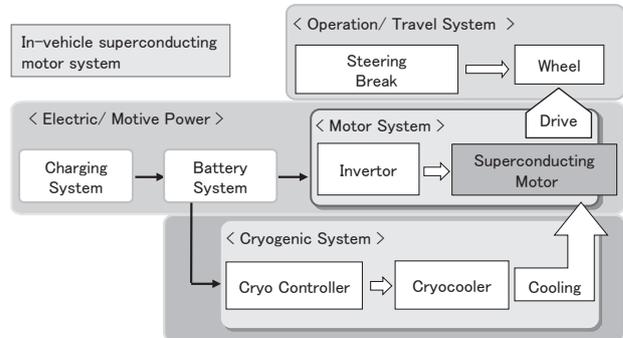


Fig.1 Superconducting Motor System

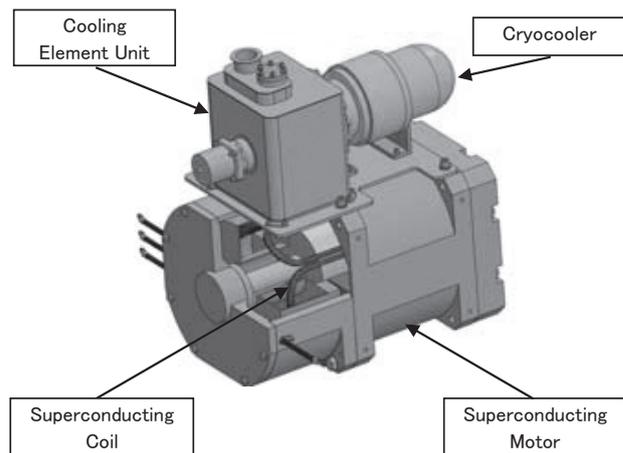


Fig.2 Superconducting Motor

Table1 Specification of Superconducting Motor

Specification	
Motor type	Permanent magnet synchronous motor (Superconducting armature type)
Cooling system	Liq.N ₂ refrigerant cooling system with Stirling cryocooler
MAX Power	100kW
MAX Torque	650Nm
MAX Speed	4,000rpm

参考文献

- H. Oyama, et al.: SEI Technical Review, Vol. 67 (2008) p.22
- T. Shinzato, et al.: SEI Technical Review, Vol. 75 (2012) p.62

車載用超電導モータ及び冷却システムの開発 —スターリング冷凍機の設計、性能試験結果—

Development of HTS motor and cooling system for vehicle

中野 恭介, 湯本 健太, 平塚 善勝, 三上 行雄, 加藤 隆典, 櫻庭 順二(住重); 新里 剛, 尾山 仁, 坂 寛延(住友電工)
 NAKANO Kyosuke, YUMOTO Kenta, HIRATSUKA Yoshikatsu, MIKAMI Yukio, KATO Takanori, SAKURABA Junji (SHI);
 SHINZATO Tsuyoshi, OYAMA Hitoshi, SAKA Hironobu (SEI)
 E-mail: Kys_nakano@shi.co.jp

1. はじめに

当社では超電導デバイスの実用化に向けて高効率冷凍機の開発を行っている。これまでにスターリング型パルス管冷凍機を試作し、性能試験結果について報告を行った[1]。しかし、超電導モータが既存技術に対し優位性を示すためには、冷凍機の効率をさらに上げる必要があり、そのために膨張機の方式をパルス管方式からスターリング方式へと変更した。今回、高温超電モータ冷却用のスターリング冷凍機を開発し、初期の開発目標としている冷凍能力 150W at 70K COP 0.07 の試作機を設計製作し、性能評価を行ったのでその内容について報告する。

2. 試作冷凍機

超電導モータとのシステム構成上の問題から圧縮機と膨張機を分離した構造としたスプリット型スターリング冷凍機試作機写真をFig.1に示す。本開発では、前年に開発されたリニア圧縮機を使用し、膨張機のみを開発を行った。超電導モータは循環する液体窒素は70Kの過冷却状態で、冷凍機からの伝導冷却によって冷却される。膨張機の設置方向はエンジンルーム内の制約のため水平にする必要がある。また一般的なスターリング冷凍機はディスプレイサ内部に蓄冷材が充填される形状をとるが、本試作機ではディスプレイサの外周に蓄冷材を固定し、可動部を軽量化したアニューラー形状としている。冷凍機本体から生じる振動は、動吸収振器によって抑制されている。駆動電源には車載バッテリーからのDC出力をAC出力へと変換するインバータ電源を開発し、PID制御により圧縮機の電気入力をコントロールしている。

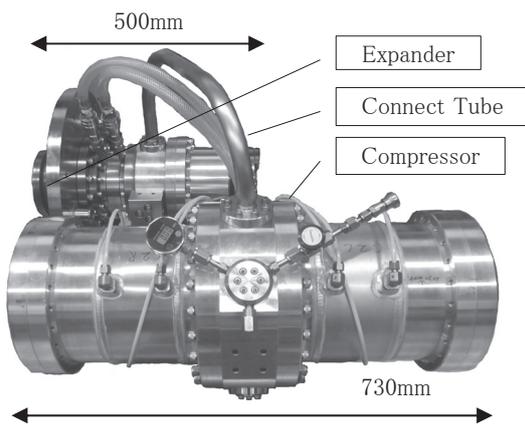


Fig. 1 Photograph of prototype Stirling cryocooler.

Table 1. Experimental and Numerical results.

Symbol	Experimental(W)	Numerical(W)
W_{cp}	1733	1767
W_{ea}	208	330
W_{ch}	Not measured	327
Q_{ch}	150.5	168

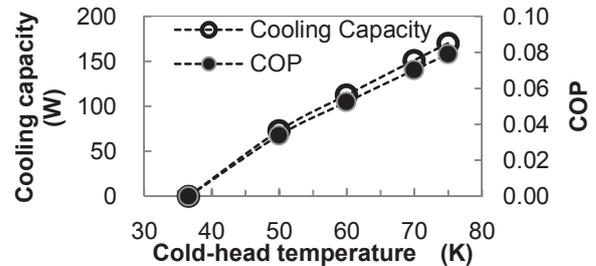


Fig. 2 Cooling capacity and COP VS Cold-head temperature.

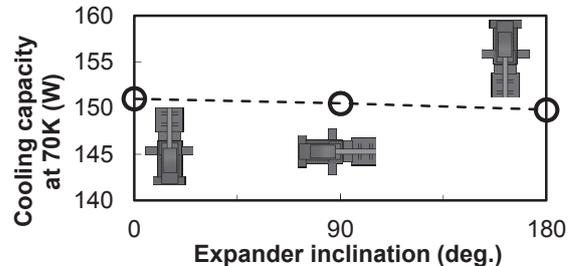


Fig. 3 Cooling capacity VS Expander inclination.

3. 実験結果ならびに数値計算結果

Fig.2, Fig.3に冷凍性能と設置方向による冷凍能力を示す。冷却水入口温度 30℃, 流量 15L/min, 封入圧を 1.7MPa, 電気入力を 2.15kW, 運転周波数を 47.0Hz としたとき、冷凍能力 150W@70K COP 0.07 が得られ、また膨張機部の設置方向による性能変化も見られなかった。Table.1に試作機の実験結果と同じ設計値を設定した数値計算の結果を示す。それぞれ圧縮機仕事 W_{cp} , 膨張機圧縮仕事 W_{ea} , 膨張機膨張仕事 W_{ch} , 冷凍能力 Q_{ch} を示している。実験結果では計算結果に比べ膨張機仕事小さい値となっている。試作機では圧縮機と膨張機の共振周波数のマッチングや位相制御が理想的に行えていないことが考えられ、今後の能力向上を検討する上での課題であると言える。

4. まとめ

車載用高温超電導モータ冷却用スターリング冷凍機の試作を行い、その性能評価を行った。本冷凍機を搭載した超電導モータシステムは車載実証走行試験を予定しており、今後実用化に向けて更なる信頼性と冷凍効率の向上を目指し研究を進めていく。

本研究は「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) から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. : “Analysis of Energy Flow in Stirling Pulse Tube Cryocooler for HTS Devices” TEION KOGAKU Vol.4 (2013)No7, pp. 364-369.

車載用超電導モータ及び冷却システムの開発 —スターリング冷凍機用圧縮機の性能試験結果—

Development of HTS motor and cooling system for vehicle—Performance test of compressor—

湯本 健太, 中野 恭介, 平塚 善勝, 三上 行雄, 加藤 隆典, 櫻庭 順二(住重); 新里 剛, 尾山 仁, 坂 寛延(住友電工)
 YUMOTO Kenta, NAKANO Kyosuke, HIRATSUKA Yoshikatsu, MIKAMI Yukio, KATO Takanori, SAKURABA Junji (SHI);
 SHINZATO Tsuyoshi, OYAMA Hitoshi, SAKA Nobuaki (SEI)
 E-mail: knt_yumoto@shi.co.jp

1. はじめに

住友重機械工業では 2013 年度から超電導モータ冷却用
 に高効率スターリング冷凍機の開発を行っており[1], 試作機
 として 70 K における冷凍能力 150 W, 電気入力 2.15kW,
 COP0.07 を得ている。冷凍機の圧縮機には 2012 年度にパ
 ルス管冷凍機用に開発された圧縮機を用いている。圧縮機
 には高効率と信頼性, 小型軽量化が求められており, 開発課題
 としてモータ部の銅損, 鉄損や機械損など各種損失の低減
 ならびに非接触シールによる信頼性の向上が挙げられる。そ
 こで本発表では, 設計製作した圧縮機の評価試験を行った結
 果について報告する。

2. 圧縮機設計

試作圧縮機概念図を Fig. 1 に示す。圧縮機は水冷式熱
 交換器を備えた対向型のリア圧縮機であり, 軽量化と信頼
 性を高めるためにシリンダ可動型を採用し, マグネットを可動
 とすることで高効率化を図っている。また可動部の信頼性を
 高めるために, より横剛性の高い構造となるカンチレバ式軸
 受を選定した。全体の形状は直径 300 mm, 長さ 730 mm, 総重
 量は約 100kg である。設計段階では所定の冷凍能力を得るた
 めの推力を設定しモータ効率 0.9 以上を狙い, FEMによる磁
 場解析を行いコイルやマグネットの諸元を決定した。また板ば
 ねは 5 万時間以上の機械寿命を持つように, 10^8 回以上の繰
 り返し応力に耐えられるように設計し, 耐久試験によって破壊
 なきことを確認した。さらに積層したバネの間に補助ばねを用
 いることで応力集中の低減を図った構造となっている(Fig.2)。

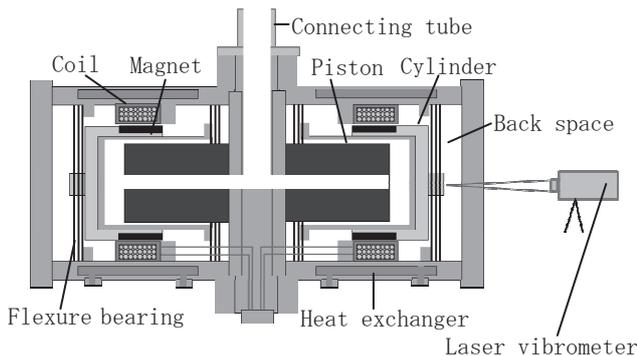


Fig.1 Schematic diagram of compressor unit

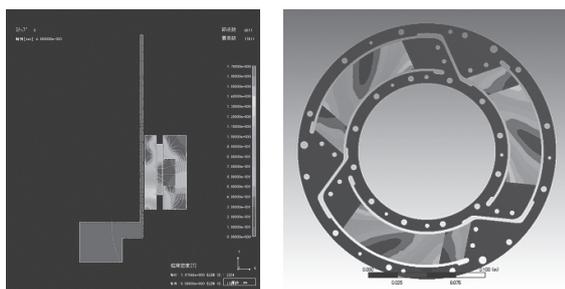


Fig.2 FEM models for motor and flexure bearing

Table 1 Calculation values and experimental results.

Item	Calculation	Experiment
Compressor P-V work	1767 W	1733 W
Back space P-V Work	-	23 W
Joule loss	298 W	255 W
Mechanical loss	-	26 W
Others	85 W	116 W
total	2150 W	2153 W

3. 圧縮機単体評価試験

試作圧縮機における諸損失の圧縮機単体での設計値との
 比較を行った。モータコイルの抵抗は設計値 0.53Ω に対し測
 定値 0.55Ω であり, コイル中心位置での推力定数は設計値
 52.8 N/A に対し 53.6 N/A の値が得られた。摩擦損失を見積
 るために粘性減衰定数の測定を行い, ガス封入圧 1.7 MPa
 のとき 65 N sec/m が得られた。またモータ可動部を固定した
 際の銅損, 鉄損を測定したところ, 入力電流 16.9 A , 周波数
 50 Hz における銅損が設計値 145.8 W に対して 159.9 W , 鉄
 損が設計値 54 W に対して 93.5 W と測定された。

4. 冷凍システム評価試験

Table 1 は試作したスターリング冷凍機と圧縮機を接続した
 際の圧縮機仕事と諸損失の内訳について数値計算結果と試
 験結果を示している。運転条件は電気入力 2.15 kW , 運転周
 波数 47 Hz である。試験では圧縮空間と膨張空間の圧力とシ
 リンダの変位を測定し, 圧縮空間の P-V 仕事が 1733 W , 背圧
 仕事が 23 W と計測され, 圧縮機効率は 80% となった。損失
 の内訳としてはモータコイルのジュール損失が 255 W , 粘性
 減衰定数から推定した摩擦による損失が 26 W となり, 残りの
 116 W が鉄損などの損失であると見積もられる。数値計算では
 入力電力 2150 W に対し圧縮機仕事が 1767 W , 圧縮機効率
 82% となり試験結果よりも効率がよく計算されているがこれは
 数値計算では背圧仕事やピストンとシリンダの間隙を通るガス
 の漏れによる損失などを考慮していないためと考えられる。

5. まとめ

2012 年度にパルス管冷凍機用として開発した圧縮機につ
 いて単体での性能確認とスターリング冷凍機に接続した際
 の評価試験を行い, 圧縮機効率 80% となった。今後はスター
 リング冷凍機に合わせ仕様を最適化し, システムとしての効
 率を高めることと小型軽量化, 車載時の耐振動性の評価など
 を行っていく予定である。

本研究は, 「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. Yumoto, et al. : “Development of High Capacity Split Stirling Cryocooler for HTS” 25th International Cryogenic Engineering Conference. To be published

磁気熱量効果を用いた除湿システムの基礎研究

Basic Study on Dehumidification System by Using Magnetocaloric Effect

松井 智亮, 岡村 哲至(東京工業大学); 平野 直樹(中部電力); 田中 規敏(竹中工務店)
 MATSUI Tomoaki, OKAMURA Tetsuji (Tokyo tech); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power);
 TANAKA Kitoshi (Takenaka Co)
 E-mail: matsui.t.ag@m.titech.ac.jp

1. はじめに

今日、除湿機にはコンプレッサー式とデシカント式の二つのタイプがある。コンプレッサー式の除湿機には冷媒が使用されており、使われている冷媒はHFC(Hydrofluorocarbon)やHCFC(Hydrochlorofluorocarbon)などの代替フロンが使われているが、代替フロンは地球温暖化係数がCO₂の2000倍近くあるため、環境への影響が懸念されている。そこで、冷媒を用いないデシカント式除湿機が注目されている。しかし、デシカント式除湿機にはデシカント材に吸着された水蒸気を脱着させるためにヒーターが必要不可欠であり、消費電力が大きいことが課題としてあげられる。そこで、新しい脱着方法が求められており、その脱着方法の一つとして磁性材料の磁気熱量効果を用いた脱着方法である。

本研究では磁性材料に高分子収着剤を塗布し、磁気熱量効果による収着及び脱着挙動を調べることを目的とする。

2. 実験装置及び方法

実験装置は Fig.1 のようになっており、コンプレッサーにより圧縮された空気は清浄・除湿され、一部の空気は混合部へ、残りの空気は加湿部で加湿された後、混合部へ排出される。加湿空気と除湿空気の流量を調整することで、混合空気の相対湿度を条件に合わせることが可能となる。温度はエアコンを用いて室温を調整する。混合部を出た混合空気は試験部を通過して室内に戻る。ここで、試験部の入口出口では温度と湿度が測定されている。また、試験部は磁石により励磁・消磁されるが、吸着過程では消磁(0T)、脱着過程では励磁(1T)をする。試験部は、直径 0.9mmのGdの表面に収着剤を塗布し、直径8mm、長さ60mmの円管ダクトに充填させたものを使う。流入する空気の条件は温度 20°C、s 相対湿度 50%RH、流量 3l/minとした。実験方法は、吸着過程では一度10%RHの空気により試験片を前処理した後、条件の空気を流入する。一方で、脱着過程では 90%RH の空気の前処理をした後、条件の空気を流入し、それぞれ結果を得た。

3. 結果

Fig.2 では吸着過程、Fig.3 では脱着過程における入口出口の湿度と温度をそれぞれ示している。まず吸着過程では、出口相対湿度が約30秒で25%RH程度まで急降した後、緩やかに入口湿度まで上昇し、開始後15分で定常にもどる。その一方で、脱着過程では約1分で80%RHまで上昇した後、緩やかに入口湿度まで下降し、開始後25分で定常にもどる。次に温度に注目すると、吸着・脱着過程における温度については、入口と出口での温度差がほとんど現れず吸脱着による温度変化は確認されなかった。温度変化が確認されなかった理由として、吸着過程では磁気熱量効果による吸熱と水分が収着剤に吸着されることによる発熱が相殺されていることが考えられ、脱着過程でも同様のことが言える。以上より、磁気熱量効果を利用することによる吸脱着を確認することができたが、一方で今回の条件では温度は変化しないことがわかった。

4. 参考文献

1. H. Inaba, et al: Thermal Science & Engineering Vol.15 No.3 (2007) p.141

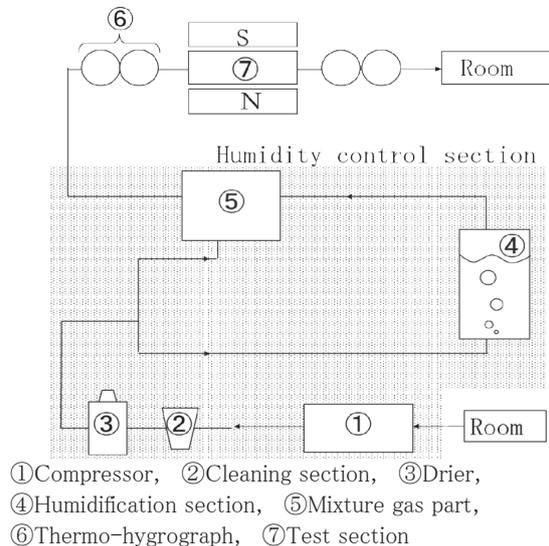


Fig.1 Experiment at setup

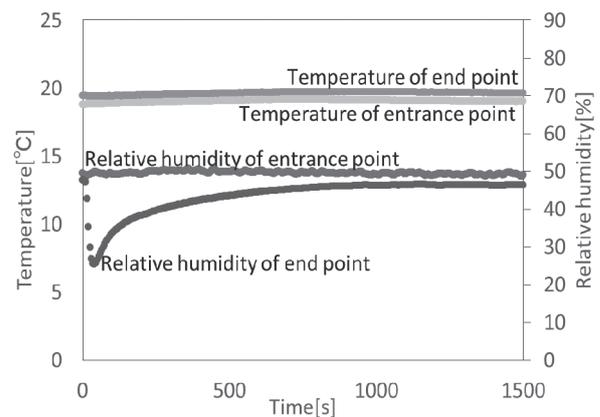


Fig.2 Temperature and relative humidity of entrance point and end point of absorption process

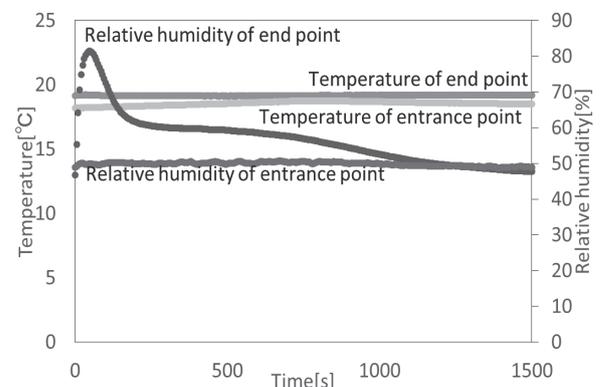


Fig.3 Temperature and relative humidity of entrance point and end point of desorption process

磁気冷凍機における異種材料充填ダクト内の熱流体特性

Heat Transfer Characteristics of Multiple Layered Bed of Magnetic Refrigerator

野口 芳直, 岡村 哲至(東工大)

NOGUCHI Yoshinao, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)

E-mail: noguchi.y.ac@m.titech.ac.jp

1. はじめに

磁性材料に与える磁場変化により温度変化が生じる磁気熱量効果を利用した室温磁気冷凍機は、代替フロンを用いない冷凍機として近年注目されている。複数の異種磁性材料を充填(カスケード)することにより、冷凍性能のうち温度スパンが拡大することが確認されているが、充填の際の配分比などカスケード方法の最適化に関しては、まだ不明な点が多い。本研究ではカスケードの際重要となりうる、材料充填ダクト内の温度分布測定実験を行うと同時に、異種材料を充填した場合のケースについて一次元伝熱数値解析を用いて検討したので報告する。

2. ダクト内温度分布測定

Fig.1 に示すように、T 型シーす熱電対を取り付けたダクト(Duct with thermocouple)と熱電対を取り付けないダクト(Normal duct)に、20°C付近にキュリー点を持つ直径1mmの球状ガドリニウム(Gd)を充填し冷凍実験を行った。充填率は0.6程度、熱交換媒体として純水を用いた。異種材料充填ダクト内の熱流体特性を明らかにするために、まずはGd単一材料での特性を明らかにする。

Fig.2 に、熱交換時間が0.4 sec、水の流量が0.8 L/min、熱負荷 0 において定常状態での実験結果を示す。なお、磁場変動による温度測定への影響をなくすため、測定時には磁石の回転および熱交換媒体(水)の流れを止めた。黒塗り点は、消磁後の熱交換終了時での温度分布を表し、白抜き点は励磁後の熱交換終了時での温度分布を表す。それぞれにおいて、熱交換後の定性的なダクト内温度分布[1]と一致が確認された。

黒塗り点の方が白抜き点より温度が高くなるのは、熱負荷 0 において、消磁後は温度が 20°Cに保たれた水が高温端側から低温端側へ流れ磁性材料と熱交換をし、励磁後は低温端温度とほぼ同じ温度の水が低温端側から高温端側へ流れ熱交換を行うためである。

3. 一次元伝熱数値解析結果

磁性材料と熱交換媒体(水)との間の一次元エネルギー保存方程式[2]を解くことにより、解析結果と実験結果と比較した。Fig.2 に数値解析と実験結果との比較を示す。数値解析において、理論熱伝達率の15%の熱伝達率を仮定した時、実験結果をおおむね模擬することができた。

熱伝達率が理論値より低くなった原因として、充填率が低いためダクト内で偏流が生じ、磁性材料と熱交換媒体との熱交換が十分に行われていないこと、また熱交換媒体の流れとともに磁性材料もダクト内で僅かに移動してしまうことが考えられる。

4. まとめ

ダクト内に熱電対を挿入することで、ダクト内の温度分布を測定することに成功した。また、実験結果は定性的な温度分布とはほぼ一致することが確認された。

一次元伝熱数値解析を行い、おおむね実験結果を模擬することができた。

当日はカスケードでの結果も合わせて報告予定である。

参考文献

1. Luca A. Tagliafico, et al., Refrigeration: Theory, Technology and Applications, pp. 71-131
2. 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.

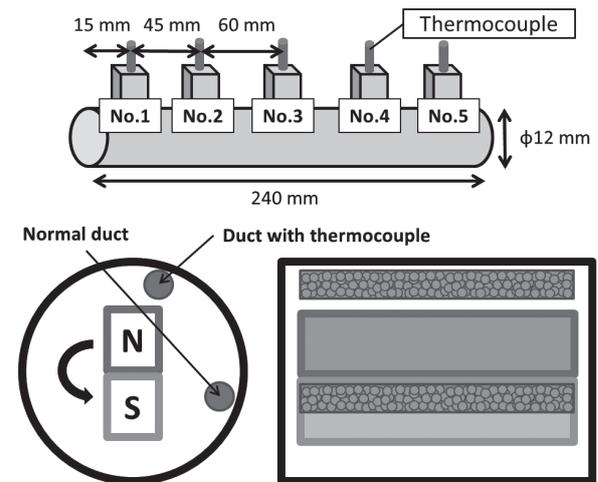


Fig.1 Thermocouple arrangement of AMR bed and experimental apparatus.

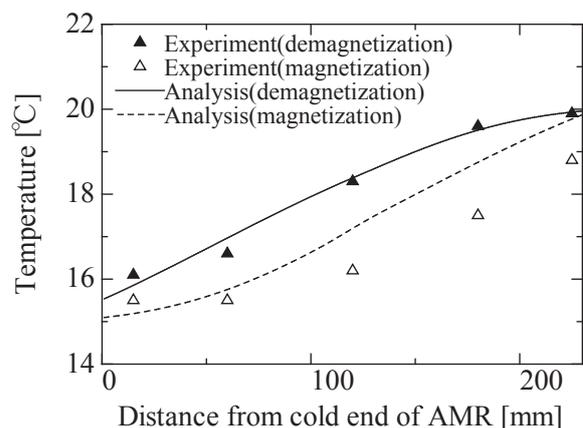


Fig.2 Comparison of temperature distribution in AMR beds between experimental results and numerical analysis results. Heat exchange time is 0.4 sec and flow rate is 0.8 L/min.