

REBCO 超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化要因について

Cause of Degradation of REBCO Tapes due to Over-current Pulse Drive

金光 雅也, 新井 道生, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早大); 齊藤 隆(フジクラ);
大松 一也, 大屋 正義(住電); 和泉 輝郎, 藤原 昇 (ISTEC-SRL)

KANEMITSU Masaya, ARAI Michio, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); SAITO Takashi (Fujikura); OMATSU Kazuya, OHYA Masayoshi (Sumitomo Elec.); IZUMI Teruro, FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL)
E-mail: atsushi @waseda.jp

1. はじめに

REBCO 超電導線材の電力応用において、突発的な短絡電流の流入により温度が急上昇し、線材が特性劣化する可能性がある。そのため線材が劣化や焼損しない限界の温度を設計の指標・基準の1つとして考える必要がある。そこで我々は劣化開始時の最高到達温度に注目し、過電流パルス通電試験を行ってきた[1][2]。今回は、超電導線材の劣化要因の一つと考えられる熱応力について、解析評価を実施したので報告する。

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 解析方法

過電流パルス通電時の超電導線材の熱応力分布を解析評価するために、二次元有限要素法を用いた計算機シミュレータを開発した。解析条件は、REBCO 超電導線材が Cu 電流リードに両端を機械的に拘束されている状況下であり、直状で変形しないと仮定している。また、REBCO 超電導線材の幅が十分に薄いと見做し、平面応力状態を仮定している。解析の基礎方程式は以下の式(1)を用いた。

$$\int_V [B]^T [D] [B] dV \{d\} = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon'\} dV \quad (1)$$

式(1)では[B]はひずみ-変位マトリクス、[D]は応力-ひずみマトリクス、{d}は接点変位ベクトル、{\epsilon'}は熱ひずみベクトルをそれぞれ表している。

3. 解析結果

解析に用いた超電導線材の諸元を Table 1 に示す。この試料線材のうち Sample1の電流通電による特性劣化試験結果(2007 年度実施)から、特性劣化が生じたときの線材長手方向の温度分布を用いて応力分布と歪み分布を求めた。その結果を Fig.1, 2 に示す。グラフは横軸に X 座標(線材長手方向)を取り、第一縦軸は温度、第二縦軸はそれぞれ応力、歪みを表している。Fig.1 より、X 方向(長手方向)応力には数 MPa の圧縮応力が発生し、劣化箇所付近において集中的に 700MPa 以上の大きな圧縮応力が発生した。Fig.2 より、劣化箇所付近で最大約1%の Y 方向歪み(引張り)が発生した。

4. まとめ

今回は過電流パルス通電時の REBCO 超電導線材にかかる熱応力・歪みについて二次元有限要素法を用いて解析した。実験において劣化が確認された過電流パルス通電時に、大きな応力・歪みが超電導線材の劣化箇所が生じるという解析結果が得られた。これより、曲げの力が加わるなどして、REBCO 層にダメージが与えられ特性劣化につながった可能性が考えられる。当日は Table.1 に挙げた残り2つの試料線材の結果についても報告する。

参考文献

1. A. Ishiyama, H. Ueda et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.91
2. A. Ishiyama, H. Ueda et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.88

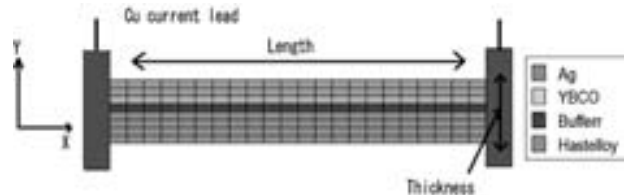


Fig.1 Model of Thermal Stress Analysis

Table.1 Specifications of REBCO tape

		Sample1	Sample2	Sample3
Manufacturing Method		IBAD/PLD	IBAD/MOCVD	PLD
Length	mm	70	70	70
Width	mm	5.0	2.0	2.0
Cu Thickness	μm	-	100	20
Ag Thickness	μm	20	15	10
YBCO Thickness	μm	1.7	0.9	-
Cd/Ba/Cu/Ox	μm	-	-	2.0
Buffer	μm	-	-	0.55
Hastelloy Thickness	μm	100	100	120
Operating Temperature	K	80	77	77

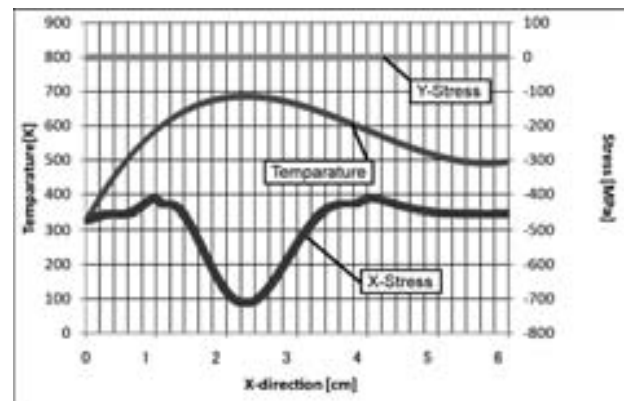


Fig.2 Distribution of Stress

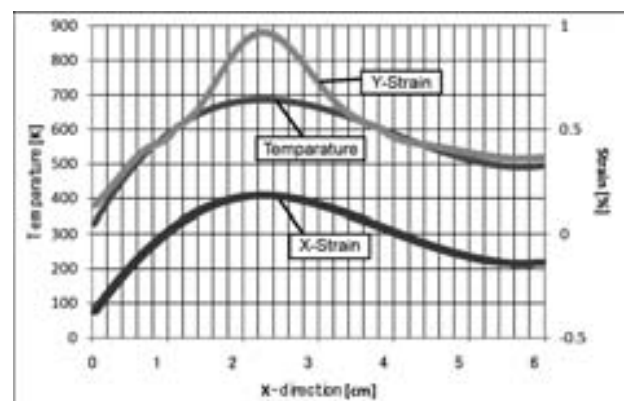


Fig.3 Distribution of Strain

YBCO 超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験

Degradation of YBCO coated conductors due to over current pulse drive

王 旭東, 新井 道生, 石山 敦士(早大); 齋藤 隆(フジクラ);

青木 裕治(昭和電線); 八木 正史(古河電工); 坂井 直道, 藤原 昇(ISTEC-SRL)

WANG Xudong, ARAI Michio, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); SAITO Takashi (Fujikura);

AOKI Yuji (SWCC Showa Holdings); YAGI Masashi (Furukawa Electric); SAKAI Naomichi, FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL)

E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

YBCO 超電導線材の電力応用において、突発的な短絡電流の流入により温度が急上昇し、線材の特性が劣化することが考えられる。そのため線材の特性劣化や焼損しない限界の温度を設計の指標・基準の一つとして考える必要がある。そこで我々は劣化開始時の最高到達温度に注目し、過電流パルス通電による特性劣化試験を行ってきた[1-2]。今回は、MO 観察 (Magneto-optical Imaging) により欠陥がある銅メッキ YBCO 超電導線材を用いて特性劣化試験を行い、劣化開始時の最高到達温度を測定し、劣化箇所の MO 観察を行ったので報告する。本研究は「リットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 過電流試験と MO 観察

過電流試験の配線写真を Fig.1 に示す。実験に用いた YBCO 超電導線材の諸元を Table.1 に示す。試料線材は IBAD/TFA-MOD 法で作製されたもので、安定化層として銀層に加え銅層がメッキ加工されている。過電流試験は GM 冷凍機による伝導冷却方式を採用し、線材両端から冷却し、運転温度は 77 K で行った。線材表面に電圧端子を圧着し、正極側から V1, V2, ... V9 とした。実験手順は以下の通りである。

- (1) 各区間の臨界電流値 I_c ($1 \mu V/cm$ 基準) を測定
- (2) I_c 以上の過電流パルスを 1 秒間通電し、銀層の抵抗-温度依存性より最高到達温度を算出
- (3) 再び I_c を測定し、劣化の有無を確認

なお、 I_c 測定には温度環境の変化などにより $\pm 2 A$ 程度の誤差が含まれるため、 $2 A$ 以上の I_c の低下かつ継続して I_c が低下することを劣化と定義した。 I_c の劣化が観測されるまで過電流パルスの最大値 I_{peak} を上げながら (2)、(3) の手順を繰り返し、劣化開始時の最高到達温度 T_{max} を求めた。

MO 観察は ISTEC-SRL に依頼し、測定条件は 60 K、60 mT として過電流試験の前後に行った (講演 1A-p05 参照)。

3. 結果

過電流試験の実験結果を Fig.2 に示す。横軸は電圧端子の位置を表し、第1縦軸と棒グラフが I_c を表している (左から初期値と $I_{peak}=202.5, 203.5, 206 A$ 通電後)。第2縦軸と折れ線が T_{max} を表している (下から $I_{peak}=202.5, 203.5, 206 A$ 通電時)。実験結果から $I_{peak}=206 A$ の通電により V45 と V56 区間で劣化が観測され、劣化開始温度は約 460 K 以上であった。

光学顕微鏡で見た線材表面の写真と過電流試験の前後に行った MO 観察結果を Fig.3 に示す。実験に用いた線材は、MO 観察により過電流試験前にも欠陥 (V45) があったが、過電流試験による劣化はむしろその隣の区間 V56 が大きかった。また V56 の劣化は MO 観察結果から幅方向に筋状に発生した。

4. まとめ

今回は欠陥がある YBCO 超電導線材を用いて、劣化開始時の最高到達温度を測定し、劣化箇所の MO 観察を行った。今後は劣化原因の究明のために、熱応力解析 (講演 1P-p01 参照) や SEM, TEM による観測も実施していく予定である。

Table.1 Specifications of YBCO coated conductor

Length (mm)	70
Width (mm)	5.0
Cu (μm)	50
Ag (μm)	30
YBCO (μm)	1.5
CeO ₂ (μm)	1
GZO (μm)	1.2
Hastelloy (μm)	100



Fig.1 Arrangement of voltage taps and thermo couple

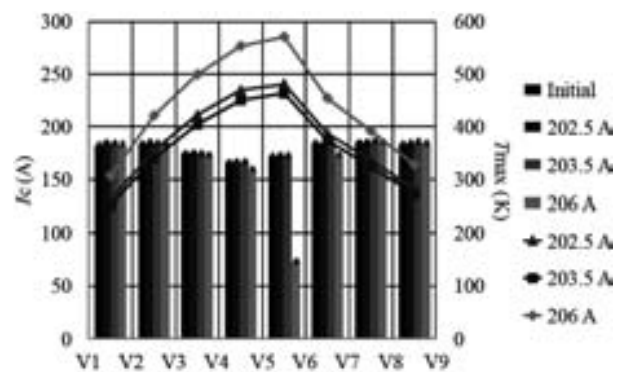
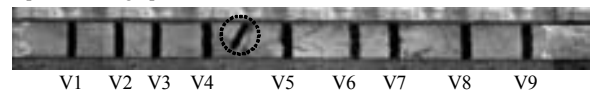


Fig.2 Results of I_c and T_{max}

Optical Micrograph



Magneto-optical Imaging

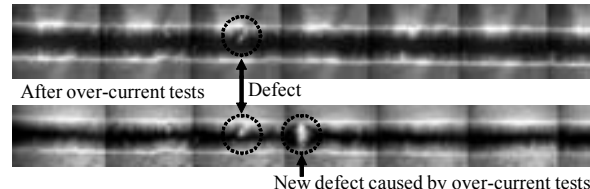


Fig.3 Results of magneto-optical imaging

参考文献

1. A. Ishiyama, Y. Nishio, H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19(2009), no.3, pp. 3483-3486
2. M. Arai, X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 81 (2009) p.91

CVD 法により作製された REBCO 線材の電流輸送特性

Current transport property on REBCO coated conductors fabricated by CVD process.

兒玉 青樹, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九州大学); 式町 浩二, 渡部 智則, 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力)
 KODAMA Seiju, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
 SHIKIMACHI Koji, WATANABE Tomonori, KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CEPCO)
 E-mail: s.kodama@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

将来の作製コスト低減が期待できる CVD 法による高温超伝導線材の開発研究が進められている[1,2]。これらは、SMES 等の電力機器への適用も検討されていることから、その電流輸送特性の詳細を明らかとするとともに、任意の温度や磁場における電流輸送特性を定量的に予測するモデルの確立が望まれている。

本研究では、CVD 法により作製された REBCO 線材の電界-電流密度 (E - J) 特性の温度、磁場、磁場印加角度依存性を実験により明らかとするとともに、我々のグループが提案しているパーコレーション転移モデル[3]に基づくピンニング特性の解析を行い、 E - J 特性の定式化について検討を行った。

2. 実験

試料は、Y と Gd の混晶系(Y:Gd=7:3)に Zr(1wt%)を添加した原料を用いて CVD 法にて作製された REBCO 線材である。超伝導層の膜厚は $1\mu\text{m}$ である。同線材を、幅 $100\mu\text{m}$ 、長さ 1mm のマイクロブリッジ形状に加工し、直流 4 端子法による E - J 測定を行った。温度、磁場、磁場印加角度は、それぞれ、 $20\text{K}\sim 77\text{K}$ 、自己磁場 $\sim 10\text{T}$ 、 $-10^\circ\sim 95^\circ$ の範囲に亘って系統的に変化させている。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に 77K 及び 65K における臨界電流密度 J_c の角度依存性を示す。膜面に平行 (0°) な状態から角度を増加させるに従い J_c がなだらかに減少し続けていることが分かる。垂直磁場方向 (90°) での J_c のピーク特性や、 J_c の異方性の低減も見られないことから、同線材においては添加等による明確なピンニング特性の変化は得られていないと考えられる。次に、角度に対する最小 J_c に相当する、垂直磁場中の J_c - B - T 特性を調べた。その結果を Fig.2 に示す。温度の低下とともに磁場中の J_c 特性が向上しており、SMES の運転温度として考えられている低温領域では高い J_c 値を保持していることが分かる。例えば 20K においては 10T の磁場中で $3.8\times 10^{10}\text{A/m}^2$ の J_c 値、($=380\text{A/cm}\cdot\text{w}$) が得られている。

実験で得られた E - J 特性を用いてパーコレーション転移モデルに基づくピンニング特性の解析を行った[3]。解析により得られたピンパラメータを用いて E - J 特性の解析解を求め、実験値と比較した結果を Fig.3 に示す。図中のプロットは実測値を、実線は解析解を示しており、4 桁程度の電界領域に亘って定量的に良く一致している。また、 J_c - B - T 特性の解析解を Fig.2 に実線で示しているが、幅広い温度、磁場領域に亘って良く一致していることが分かる。

謝辞： 本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として NEDO からの委託を受けて実施するとともに、日本学術振興会の科研費(20360143)の助成を得て行ったものである。

参考文献

1. N. Kashima et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 15 (2005) 2763.
2. S. Aoki et al., *Jap. J. Appl. Phys.* 31 (1992) L547.
3. T. Kiss et al., *SuST12* (1999)1079.

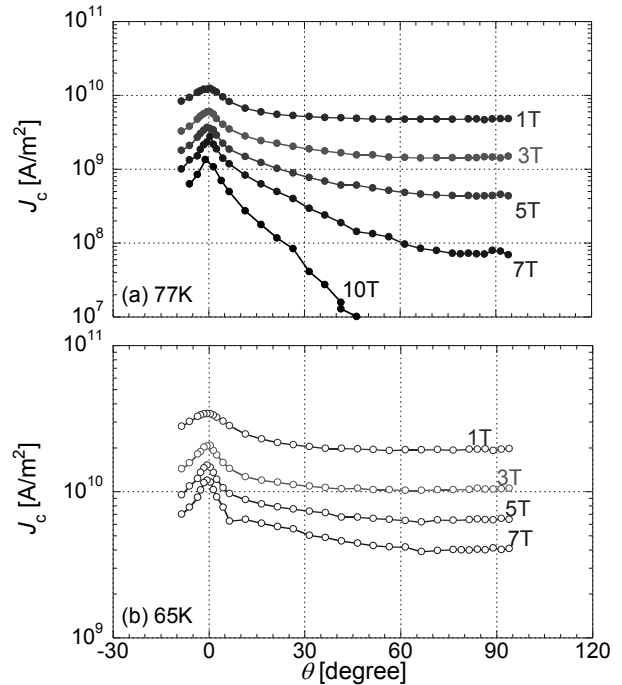


Fig.1 J_c - θ - B characteristic at (a) 77K and (b) 65K

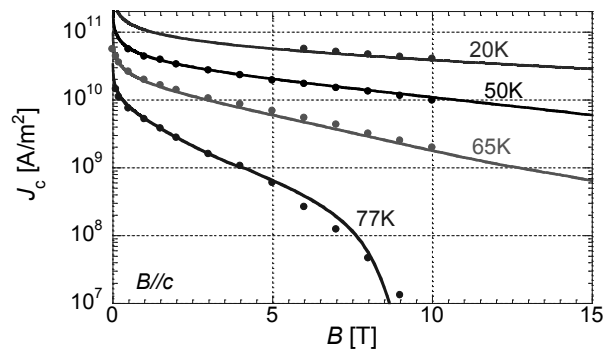


Fig.2 J_c - B - T characteristic at $B//c$. Dots are measurements whereas lines are analytical expression.

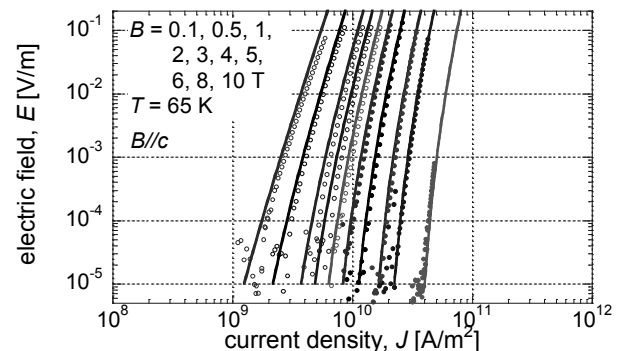


Fig.3 E - J characteristic at 65K , $B//c$. Dots are measurements whereas lines are analytical expression.

CVD 法による YGdBCO 線材の磁化緩和特性の超電導層厚依存性

Superconducting layer thickness dependence of magnetic relaxation property in CVD processed YGdBCO coated conductors.

高橋 祐治, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男(九工大);
式町 浩二, 渡部 智則, 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力);

TAKAHASHI Yuji, KIUCHI Masaru, OTABE Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. Tech.);
SHIKIMACHI Koji, WATANABE Tomonori, KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CEPCO);
E-mail: takahasi@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材は高磁界中で優れた臨界電流密度(J_c)特性を示す事から, SMES など様々な応用が期待されている。これまで特に優れた特性を示す線材の作製法として IBAD/PLD 法が用いられたが, 実用化の観点から他の作製法が試みられている。その中でも IBAD/CVD 法は製造コストが安価であり, 最近の特性向上から有望視されている。また, 近年の研究から, Y の一部を Gd で置換することで臨界温度(T_c)が高くなり, YBCO コート線材よりも高い J_c を得られることが期待される。YGdBCO コート線材の開発が進められている[1]。SMES の応用に向け, これらの線材の緩和特性を評価することが必要である。以前の研究で, IBAD/CVD 法で作製された YBCO 線材において, 超電導層厚(d)に依存し磁化緩和特性が異なることを明らかにしてきた[2]。しかし, 以前評価してきた線材では, d が大きくなると J_c が減少していたため, 超電導層厚が磁化緩和特性に本来与える影響の評価は容易ではなかった。

本研究では厚膜化による J_c 劣化の小さな YGdBCO 試料を用いることで, 超電導層厚と臨界電流特性の関係を今まで以上に明らかにする。

2. 実験

試料は IBAD/CVD 法により作製された $Y_{0.7}Gd_{0.3}BCO$ 線材であり, 超電導層厚が 0.33 - 1.43 μm の長尺線材から切り出したもので, それぞれ #1 - #6 とした。試料の d 及び T_c を Table 1 に示す。

測定は SQUID 磁力計を用いた直流磁化測定から J_c - B 特性を, 磁化緩和率測定から E - J 特性及び, 見かけのピンポテンシャル(U_0^*)を評価した。なお, 磁界はテープの広い面に対して垂直に加えた。

Table. 1 Specification of specimens.

specimen	#1	#2	#3	#4	#5	#6
d (μm)	0.33	0.55	0.77	0.99	1.21	1.43
T_c (K)	89.3	89.6	90.9	91.3	90.7	89.7

3. 結果及び検討

Fig. 1 に 20 - 77.3 K の温度領域における 0.1 T での J_c の超電導層厚依存性を示す。従来の YBCO 線材では, d が大きくなると超電導組織の劣化が原因で J_c が減少していた[2]。一方, YGdBCO 線材では, d が増加しても J_c は減少しておらず, 逆に d が大きくなると若干ではあるが, J_c が大きな値を示している。以上のことより, 超電導組織の劣化を伴わずに超電導層の厚膜化が実現できていると思われる。

Fig. 2 に 20 K における U_0^* の磁界依存性を示す。YGdBCO 線材, 従来の YBCO 線材, 共にサンプルナンバーが小さいほど超電導層の薄い試料となっている。従来の線材では低磁界領域では超電導層の劣化が少ない薄い試料の U_0^* が大きな値を示し, 高磁界領域では薄い試料で 2 次元ピンニングとなるため超電導層の薄い試料の U_0^* が大きく減少し, 厚い試料の U_0^* が大きな値を示していた。一方で YGdBCO 線材では低磁界領域では試料間で U_0^* がほぼ同程度の値を示し, 高磁界領域では厚い試料ほど大きな U_0^* を示す結果となった。

磁束クリープ・フローモデルを用いた解析, 及び詳細な議論は当日行う。

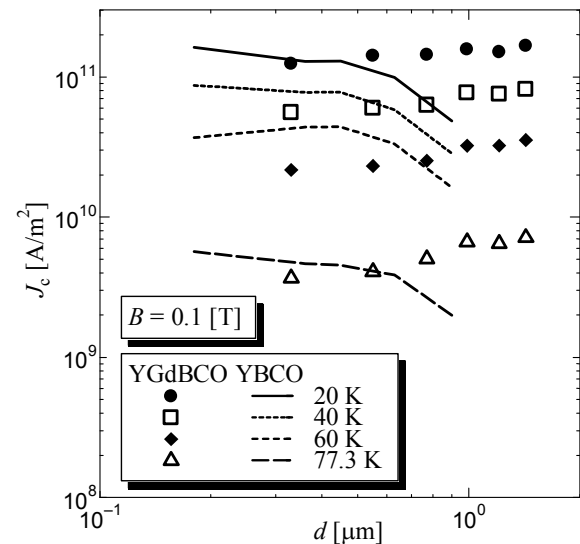


Fig. 1: Magnetization critical current density at 0.1 T vs. superconducting layer thickness in the temperature region of 20-77.3 K. The lines show the results of CVD processed YBCO tape²⁾.

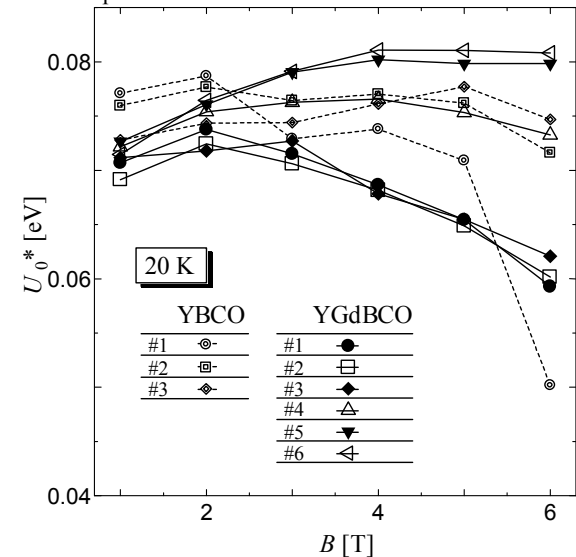


Fig. 2: Magnetic field dependence of apparent pinning potential at 20 K. Symbols with dotted lines show the results of CVD processed YBCO tapes²⁾.

謝辞 本研究は, NEDO の委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

参考文献

1. A. Kaneko *et al.*, Physica C 426-431 (2005) 949-953.
2. Y Takahashi, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) 1P-p14

YBa₂Cu₃O_y 擬似多層膜の臨界電流密度に対する BaZrO₃ ドープ量と重イオン照射の影響

Influences of BaZrO₃-dose and heavy-ion irradiation on critical current density in YBa₂Cu₃O_y quasi-multilayered films

末吉哲郎, 十河雄大, 森脇聡, 米倉健志, 藤吉孝則, 光木文秋, 池上知顯 (熊本大); 石川法人 (原子力機構)

SUEYOSHI Tetsuro, SOGO Takehiro, MORIWAKI Satoshi, YONEKURA Kenji, FUJIYOSHI Takanori,

MITSUMI Fumiaki, IKEGAMI Tomoaki (Kumamoto Univ.); ISHIKAWA Norito (JAEA)

E-mail: tetsu@cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導体の高磁場特性を改善するために、様々な人工ピンの導入が試みられている。ナノロッドのような 1 次元ピンは、その方向の磁場に対して顕著な臨界電流密度 J_c の向上を示す[1]。一方、3 次元ピンは全磁場方向において J_c を向上させる作用がある[2]。

本研究では、一般的にナノロッド導入に用いられる BaZrO₃ を擬似層として YBCO 多層膜を PLD 法により作製し、BaZrO₃ の堆積時のレーザーパルス数 m と層数 n を変化させたときのピンニング特性について調べた。また 1 次元ピンと 3 次元ピンが競合したピンニング特性を調べるために、BaZrO₃ がナノドットとして導入された擬似多層膜に対して重イオン照射により柱状欠陥を導入し、照射前後の J_c の磁場角度依存性の変化について議論した。

2. 実験方法

YBCO 擬似多層膜は、KrF エキシマレーザーを用いた PLD 法でのターゲット切替法により SrTiO₃ 基板上に作製した。エネルギー密度 1J/cm²、繰り返し周波数 5Hz のレーザー条件で、酸素雰囲気ガス 300mTorr、基板温度 780°C の下で成膜した。成膜後に 600Torr の酸素雰囲気中で室温まで自然冷却した。擬似多層膜の作製において、YBCO 層を堆積した後に BaZrO₃ を m パルスで堆積し、これを n 回繰り返して積層した試料を $B(m, n)$ と定義する。ここで全ての試料において YBCO 層の総堆積パルス数は 3625 パルスである。また参照試料として、ドーピング無し YBCO 薄膜 (pure YBCO) を用意した。柱状欠陥を導入するための重イオン照射は、試料 B(3,28) と pure YBCO に対して 200MeV の Xe イオンを用いて c 軸に対して $\theta = -6^\circ$ の方向で行った。照射量は 9.68×10^{11} ions/cm² ($B_\phi = 2T$) である。 J_c の評価は直流四端子法を用いて電界基準を $E_c = 1\mu\text{V}/\text{cm}$ として行った。 J_c の磁場角度依存性では電流と常に直交するように磁場を印加し、磁場と c 軸のなす角度 θ とした。

3. 結果および検討

前回 YBCO 擬似多層膜の B(3,28) において、高い J_c を示したことを報告した[3]。Fig.1 に、 $T=77.3\text{K}$, $B \parallel c$ における BaZrO₃ の総堆積パルス数 $m \times n = 84$ パルスの擬似多層膜の J_c の磁場依存性について示す。B(3, 28), B(2, 42) の両試料ともに pure YBCO より J_c が高く、高磁場では B(3, 28) の J_c がわずかに高い値を示している。一方、B(1, 84) においては飛躍的に高い J_c の向上が見られ、他の試料と比較して緩やかな磁場依存性を示している。

Fig.2(a) に、 $T=77.3\text{K}$, $B=1\text{T}$ における J_c の磁場角度依存性について示す。B(3,28) と B(2, 42) では、 $B \parallel ab$ でのみピークが現れていることから、これらの試料では BaZrO₃ はランダムピンとして作用していることが示唆される。一方、B(1, 84) では、 $B \parallel c$ においてブロードなピークを示している。コヒーレンス長より大きなサイズの 3 次元ピンの場合、 J_c - θ 特性において $B \parallel c$ 方向にブロードなピークを示すことが報告されている[4]。B(3,28) と B(2,42) においてはそのような振る舞いが見られないことから、試料内の

BaZrO₃ 粒子はコヒーレンス長より小さいことが示唆される。B(1,84) で現れた $B \parallel c$ 方向のピークは、各層の BaZrO₃ が膜厚方向に相関してほぼ同じ位置に配置したために生じたと考えられる。

Fig.2(b) に、B(3, 28) の照射前後の J_c の磁場角度依存性について示す。ドーピング無しの試料と比較して、B(3, 28) では同じイオン種、エネルギーで重イオン照射したにも関わらず、 J_c のピークの高さが低く、またトラップ角度も小さくなっている。

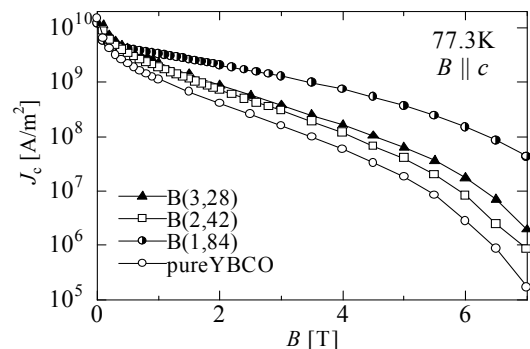


Fig.1 Magnetic field dependence of J_c at 77.3 K for $B \parallel c$.

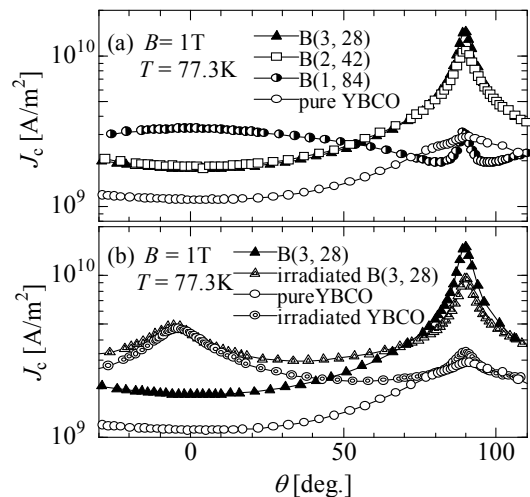


Fig.2 Angular dependences of J_c at 77.3 K for $B = 1\text{T}$ in (a) multilayered films and (b) irradiated ones.

参考文献

1. S. Kang, *et al.*: Physica C **457** (2007) 41.
2. M. Miura, *et al.*: Appl. Phys. Exp. **2** (2009) 023002.
3. T. Sueyoshi, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference **80** (2009) 160.
4. H. Yamasaki, *et al.* Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 125011.

第三高調波電圧誘導法による $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の磁場中臨界電流密度の測定

The inductive measurement of in-field critical current density of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thin films using the third harmonic voltage method

沖田 健佐, 足立 明隆, 藤吉 孝則, 末吉 哲郎 (熊本大学); 土井 俊哉 (鹿児島大学)
 OKITA Kensuke, ADACHI Akitaka, FUJIYOSHI Takanori, SUEYOSHI Tetsuro (Kumamoto Univ.);
 DOI Toshiya (Kagoshima Univ.)
 E-mail: okita@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導薄膜の臨界電流密度 J_c を測定する方法として、第三高調波電圧誘導法がある。この方法は微小なコイルに交流電流を流すことで、局所的な J_c の測定が可能である。また、試料の加工や電極の取り付けが不要であること、誘導電圧から評価するため非破壊かつ非接触で測定ができるといった利点がある。さらに、周波数を変えることで測定する電界領域を変更できるという特徴もある。本研究では、磁場中における第三高調波電圧誘導法を用いた J_c の測定値と四端子法による測定値を比較した結果を報告する。

2. 実験

超伝導薄膜に磁場を印加し、第三高調波電圧誘導法を用いてその磁場依存性を測定した。試料は、KrF エキシマレーザを用いた PLD 法により SrTiO_3 基板上に作製した YBCO 薄膜である。膜厚は 308nm であった。磁場の印加は永久磁石により行い、磁石と試料間の距離を変えることによって磁場を変化させた。ピックアップコイルは、400 回巻の線径 $50\mu\text{m}$ のエナメル銅線から成り、内径 1mm、外径 4.2mm、高さ 1mm、コイル定数が 113mm^{-1} である。

Fig.1 に測定回路を示す。信号発生器から交流電流を流し、コイルから誘導される第三高調波電圧をロックインアンプで測定し、コイルに流れる電流をモニターするためにシャント抵抗にかかる電圧をデジタルマルチメータで測定した。測定はステンレス容器内に、試料を取り付けたサンプルホルダーを固定し、さらに試料とコイルが直接触れないようにカプトンシートで試料をカバーした。

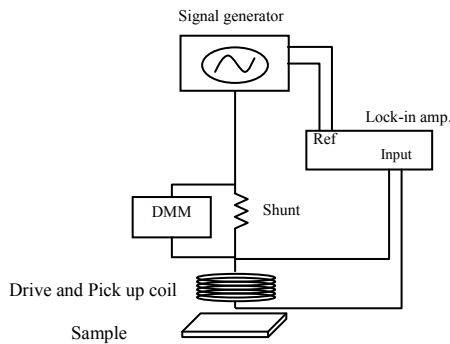


Fig.1 Electrical circuit of the third harmonic voltage method.

3. 実験結果

Fig.2 に磁場を 0.192T 印加したときの各周波数における I_0 - V_3/fI_0 特性を示す。この結果より、ノイズレベルを考慮した閾値インダクタンス L_{th} を $5\mu\text{H}$ とし、理論式[1]から電界 E と電流密度 J を算出した。

その後、試料をブリッジ形状に加工し、四端子法により測定した E - J 特性と、本測定によって測定した E - J 特性をそれぞれの磁場で比較したものを Fig.3 に示す。図から分かるように本測定法と四端子法で一致する結果が得られた。

この E - J 特性より、電界基準を $E_c=0.1\mu\text{V}/\text{cm}$ と定め、各磁場の J_c を導出した。得られた J_c - B 特性を Fig.4 に示す。磁場

が大きくなるにつれて J_c が減少しており、2つの測定法で、同様の結果が得られた。

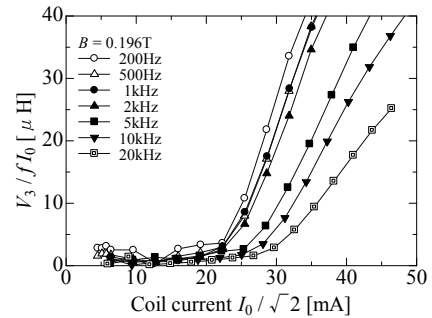


Fig.2 Third harmonic inductance V_3/fI_0 vs. coil current $I_0/\sqrt{2}$ curves.

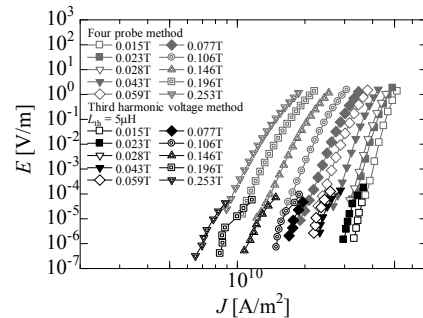


Fig.3 Electrical field E vs. current density J curves using the third harmonic voltage method and the four probe method.

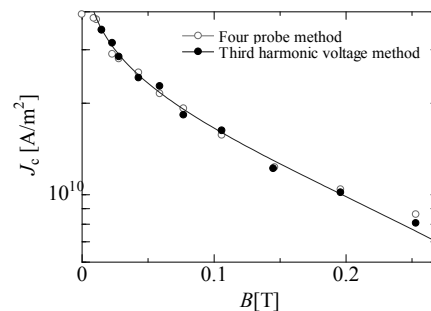


Fig.4 Magnetic field B vs. critical current density J_c curves using the third harmonic voltage method and the four probe method.

謝辞

駆動・ピックアップコイルをご提供して頂いた、独立行政法人産業技術総合研究所の山崎裕文博士に心より御礼申し上げます。

参考文献

1. H. Yamada, et al.: Physica C 451 (2007) 107-112.

遺伝的アルゴリズムを用いた磁束クリープ・フローモデルのパラメータ解析

Parametric Analysis of Flux Creep Flow Model with Genetic Algorithm

南 潤, 枝本 剛典, 小田部 莊司, 木内 勝, 松下 照男(九工大)

MINAMI Jun, EDAMOTO Takanori, OTABE Edmund Soji, KIUCHI Masaru, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.)
E-mail: minami@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

現在、超電導体は実用化の段階に入りつつある。そのなかでも近年、実用化に向けての期待が高まっているものに高温超電導体がある。この中でも液体窒素温度で動作するものは、冷却コストの削減の面からも注目されている。しかし高温超電導体には、高温領域における磁束クリープによる臨界電流特性の劣化が大きな問題として存在する。磁束クリープによる影響は磁束クリープ・フローモデル[1]により計算を行うことが可能であるが、計算するにあたって材料固有のパラメータを適切に設定する必要がある。これは現在、経験に頼って行っている部分が多く、磁束クリープ・フローモデルでの解析の障害となっている。このパラメータの決定を遺伝的アルゴリズム(以下 GA)を用いて行うことが本研究の目的である。

2. 解析方法

SQUID を用いて測定した電界-電流密度(E - J)特性に対し、パラメータの決定を行う。GA は実数値で行い、交叉にはブレンド交叉(Blend Crossover, BLX- α)を用いることとした。これは Fig. 1 のように、複数の親を頂点として作成された多次元直方体を両側に一定の割合で拡張した領域の内部から次の親を選ぶという方法である。なお、解析で用いるパラメータ、及び解析範囲を以下に示す。

- A_m : ピン力の最頻値を表す。この値が大きくなれば臨界電流密度 J_c は低下し、 E は上昇する。
解析範囲: $1.0 \times 10^{11} \sim 1.0 \times 10^{12}$
- σ^2 : ピンの分散を表す。この値が大きくなれば J_c は上昇し、 E は低下する。
解析範囲: $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$
- γ : クリープがないと仮定したときの仮想的な臨界電流密度 J_{c0} の磁場依存性を示す。この値が大きくなれば低磁場における J_{c0} の磁場依存性が小さくなる。0~1 の範囲をとる。
解析範囲: $1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0$
- m : J_{c0} の温度依存性を示す。この値が大きくなれば低磁場における J_{c0} の温度依存性が大きくなる。
解析範囲: $1.0 \sim 10$
- g^2 : 磁束バンドル内の磁束数を示す。1 より大きな値をとる。
解析範囲: 今回は 1 に固定。

3. 結果及び検討

1000世代を1回とする解析を50回行い、並行座標プロットを行った結果をFig. 2 に示す。各縦軸は変数ごとの軸になっており、それぞれの上限值と下限値は異なっている。各軸の点を結ぶ線は解の組み合わせを示す。これより真の最適解があるであろう領域を絞り込むことができる。Fig. 3 はSQUID による E - J の測定値と、解析による最適解の比較である。実験結果に対して近い結果が出ていることがわかる。今回計算した結果、完全なる収束は発生しなかったが有程度度の解の傾向を見て取ることができた。これは全く未知の超電導体の特性を推測することに役立つと考えられる。今後の課題としては収束率の向上がある。 γ や m に比べて A_m 、 σ^2 はばらつきが大きいように見える。これらを収束させるには評価関数の見直しが必要

有効であると考えられる。

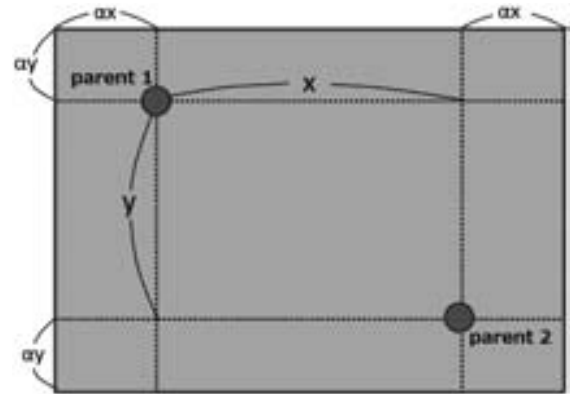


Fig. 1 BLX- α image

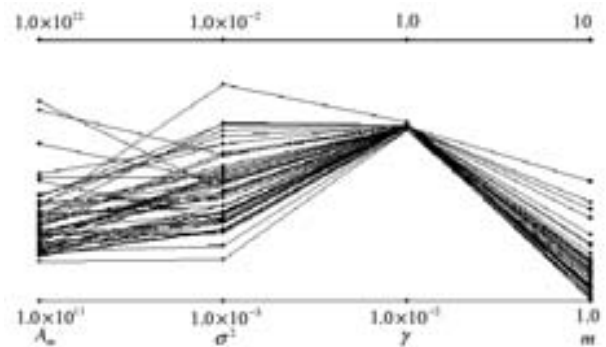


Fig. 2 Parallel coordinates plot of parameters

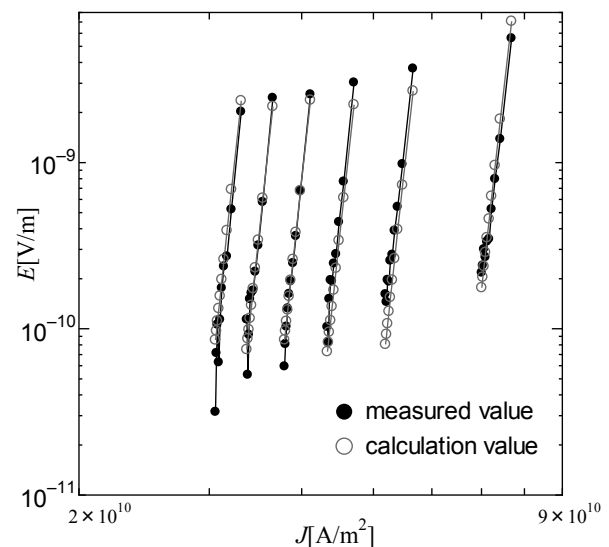


Fig. 3 Comparison of measured and analytical results

参考文献

- [1] T. Matsushita *et al.*, Appl. Phys. Lett. **56** (1990) 2039-2041.

イットリウム系線材の遮蔽磁界分布

Distributions of screening-current-induced fields for YBCO coated conductors

宮副 照久, 関野 正樹, 大崎 博之(東大); 木吉 司(物材機構)

MIYAZOE Akihisa, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (The Univ. of Tokyo); KIYOSHI Tsukasa (NIMS)

E-mail: miyazoe@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

テープ形状のイットリウム(Y)系線材によって作製される超電導コイルの発生磁界は、線材のテープ面を貫く磁界がもたらす遮蔽電流によって減少する[1]。核磁気共鳴分光計や磁気共鳴画像装置に用いられるような高い磁界均一度を有する超電導コイルにおいて、遮蔽電流によってもたらされる磁界が発生磁界の分布に影響をおよぼす。これまでに通電しない短尺の Y 系線材の幅方向中央上部における遮蔽磁界の分布が単純な遮蔽電流モデルによって表されることを示してきた[2]。本発表では通電した短尺の Y 系線材における遮蔽磁界の幅方向分布について報告する。

2. 実験方法

Fig. 1 に測定系の概要図を示す。 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ を線材の中央上部表面とする。ホールセンサを用いて Y 系線材によって生じる遮蔽磁界の z 方向成分の分布を測定した。外部直流電源より Y 系線材に電流を流し、さらに超電導マグネットにより線材のテープ面に対して垂直(z 軸正方向)に磁界を印加した。外部磁界を増減させたときの測定磁界の差の半分の値を遮蔽磁界と定義した。用いた Y 系線材は幅 4.1 mm の SCS4050 (SuperPower Inc.)である。

3. 測定結果と考察

Fig. 2 に、一枚の短尺線材において通電せずに外部磁界のみを印加した場合の遮蔽磁界の z 成分の分布を示す。測定は液体ヘリウム中で行われた。ホールセンサ表面と線材表面との距離は 0.9 mm ($z = 0.9$ mm)である。 $x = 0 - 2.05$ mm において遮蔽磁界の z 成分の x に対する勾配は各外部磁界においてほぼ一定であり、その勾配の磁界依存性は臨界電流の磁界依存性とほぼ一致した。

Fig. 3 に、 $z = 0.9$ mm の位置における一枚の短尺線材の遮蔽磁界分布の印加電流依存性を示す。Fig. 2 と同様、測定は液体ヘリウム中で行われた。外部磁界を印加する前に y 軸負方向に電流を印加し、定電流のもと、磁界を印加した。Fig. 3 は外部磁界が 1 T のときの遮蔽磁界の z 成分の x に対する勾配が緩やかとなる。また、印加電流 100 A の時、 $x = 1.7$ mm の位置では印加電流 0 A の場合と比べて遮蔽磁界が大きい。これらのことから線材への通電によって遮蔽電流分布が変化することが実験的に示された。

4. まとめ

Y 系線材における遮蔽磁界の幅方向の分布を測定した。1 T 以上の外部磁界中において通電していない線材における z 方向の遮蔽磁界強度は線材の中央からの距離とともに減少し、さらにその勾配の磁界依存性は臨界電流密度の磁界依存性とほぼ等しいことが明らかとなった。また、通電中の線材に対してテープ面に垂直な磁界が印加されると遮蔽電流の分布が変わり、これまで示してきたような遮蔽電流が流れるというモデルでは十分に示すことができないことが示された。当日の発表では遮蔽磁界から予測される遮蔽電流分布についても報告する。

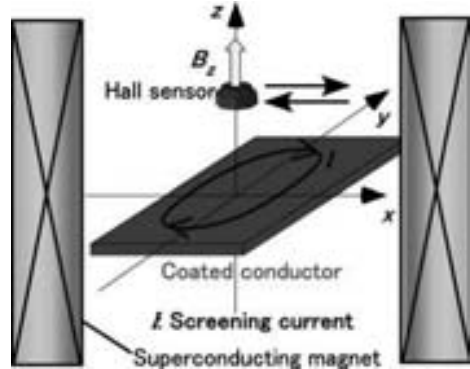


Fig.1 Schematic diagram of measurement of screening-current-induced fields

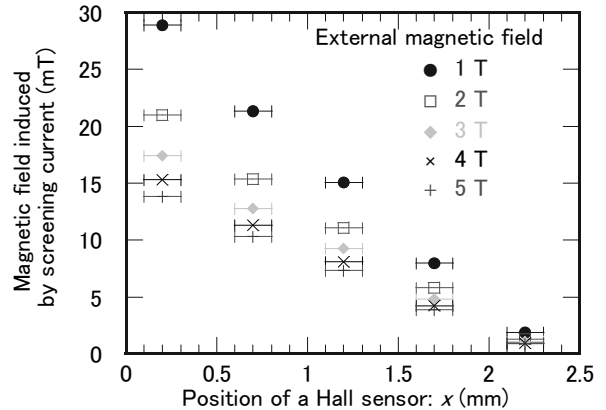


Fig.2 Distributions of screening-current-induced fields in a direction of z as functions of external fields

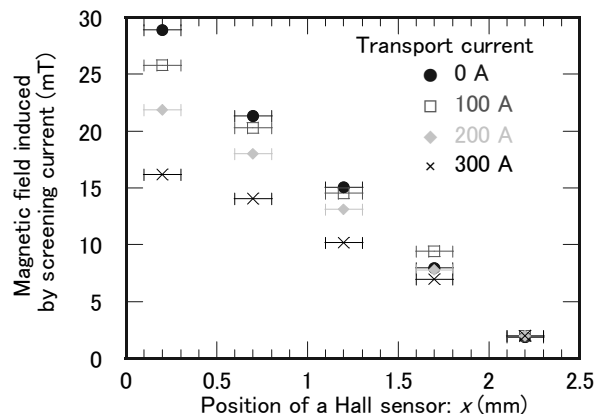


Fig.3 Distributions of screening-current-induced fields in a direction of z as functions of transport currents under external field of 1 T

参考文献

1. D. Uglietti and T. Kiyoshi: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.115
2. A. Miyazoe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., (2010) to be published

CVD 法で作製した $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 薄膜の J_c 特性における Zr 添加効果と強磁場プロセスの効果 Effect of Zr addition and magnetic field process on the J_c property of CVD- $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films

張 現平, 淡路 智, 石原 亮輔, 難波 雅史, 西島 元, 渡辺 和雄 (東北大)

Xianping Zhang, Satoshi Awaji, Ryosuke Ishihara, Masafumi Namba, Gen Nishijima, Kazuo Watanabe (Tohoku University)
E-mail: zxp@mail.iee.ac.cn

1. Introductions

Remarkable progresses have been made in the superconducting properties of second generation high temperature superconductor $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films in the past years. However, the critical current density (J_c) of REBCO films still decreases rapidly as the magnetic fields increases, especially for the field parallel to c -axis. One of the main reasons is that the naturally induced defects along c -axis are poor in as-grown REBCO thin films. This restricts the high field applications of REBCO films. Many studies in introducing artificial pinning centers (APCs), such as nanorods, nanoparticles and so on to the REBCO films, have already been conducted in the past years. In them, Zr doping as an easy-to-use approach has been hotly investigated recently [1, 2].

2. Experiments

$\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films were grown on SrTiO_3 single crystal (100) substrates by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) in high magnetic fields. The substrates were set in a vertical reactor, which was installed in the room-temperature bore of a cryogen-free superconducting magnet, and the film deposition was carried out at a constant vertical magnetic field of 0 and 8 T. The deposition conditions details were previously reported [3, 4]. The phase constituent and microstructure of the samples were investigated using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The transport J_c at 78 K and its magnetic field dependence were evaluated by a standard four-probe technique with a criterion of 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$.

3. Results and discussion

The field dependence of J_c at 78 K for different samples is shown in figure 1. As can be seen, the J_c values of Zr doped samples are improved in both $B//c$ -axis and $B//ab$ -plane compared to those of undoped samples. For example, the J_c value was enhanced from $2.1 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ for undoped samples to $5.8 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ for Zr doped samples at 5 T for $B//c$ -axis. On the other hand, the angular dependence of J_c shows obviously different behavior for the Zr doped samples fabricated with and without magnetic field. When the magnetic

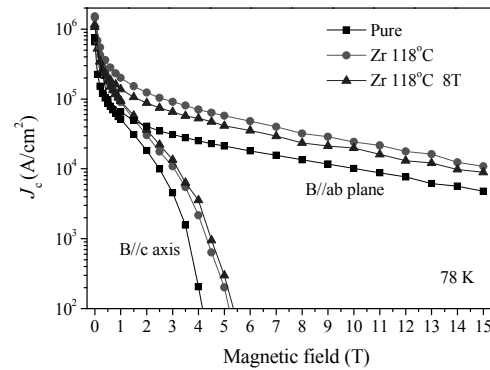


Fig.1 J_c - B properties of undoped and Zr doped samples

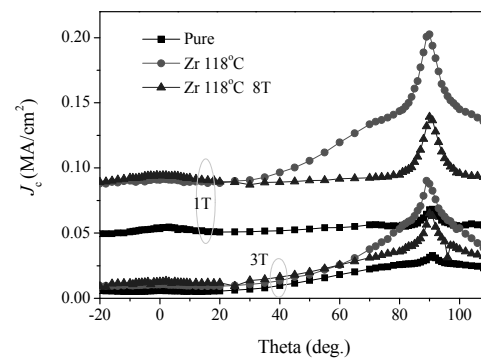


Fig. 2 Angular dependent J_c of three HoBCO films at 1 and 3 T.

field was applied during the sample fabrication process, an enhancement of J_c around the c -axis and a depressed J_c along the ab -plane was found for the Zr doped sample, which can be seen obviously from figure 2. This means that the magnetic field has a positive effect in the formation of c -axis correlated pinning centers. Further discussion is necessary for this phenomenon.

Reference

1. Driscoll J. L. MacManus, et al., Nat. Mater., Vol. 3 (2004) p. 439
2. S. Awaji, et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) p. 014006
3. Y. Ma, et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol 39 (2000) p. L726
4. Y. Ma, et al., Phys. Rev. B, Vol. 65 (2002) p. 174528

Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ 多結晶超電導体の臨界電流密度特性

Critical current density properties in polycrystalline Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ superconductors

村上 晃司, 吉田 信之, 木内 勝*, 小田部 莊司*, 松下 照男 (九工大); 葛君, 倪宝榮* (福工大);
王雷, 齊彦鵬, 張現平, 高召順, 馬衍偉* (中国科学院) (*JST-TRIP)

MURAKAMI Kouji, YOSHIDA Nobuyuki, KIUCHI Masaru*, OTABE Edmund Soji*

MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); GE Jun, NI Baorong* (Fukuoka Inst. of Tech.);

WANG Lei, QI Yanpeng, ZHANG Xianping, GAO Zhaoshun, MA Yanwei (Chinese Academy of Science) (*JST-TRIP)

E-mail : murakami@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

近年の研究において、REFeAsO と AFe₂As₂ の組成 (RE:希土類, A:アルカリ) を持つ新しい超電導体が発見され、50 K を超える臨界温度 T_c を持つ物質もあることから、注目が集まっている。しかしこれらの鉄ヒ素系超電導体ではまだ結晶が配向した試料が作製されておらず、粒間の臨界電流密度 J_c が弱結合により、粒内の電流密度に比べて低くなっている [1]。本研究では粒間の弱結合を改善するため、多結晶の Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ に銀をそれぞれ 10 wt%, 20 wt% 添加した試料の J_c を SQUID 磁力計を用いて評価し、銀添加の影響を調査した。また、残留磁化測定の結果より、超電導部分の割合の値を評価した。

2. 実験

試料は Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ 超電導体に銀をそれぞれ 10 wt%, 20 wt% 添加したものと無添加のもの 3 つを使用した。各試料とも一段固相反応によって作製された試料である。各試料のサイズを Table 1 に示す。磁場は、試料の広い面 (w - l 面) に垂直にかけているとしている。残留磁化測定の結果、2 種類の遮蔽電流の存在が確認されたため、それを粒間の臨界電流密度 J_c^{global} と粒内の臨界電流密度 J_c^{local} に分離した。 J_c^{global} は残留磁化の変化率の測定結果より得られた試料全体の中心到達磁場と試料のサイズより、 J_c^{local} は結晶粒の中心到達磁場と結晶粒のサイズより評価した。また、これらの値を用いて超電導の割合の値を評価した。

Table 1: Specification of specimens

specimen		w	l	t
		[mm]	[mm]	[mm]
#1	Sr _{0.6} K _{0.4} Fe ₂ As ₂	1.12	1.73	0.75
#2	Sr _{0.6} K _{0.4} Fe ₂ As ₂ +10Ag	3.53	3.53	1.16
#3	Sr _{0.6} K _{0.4} Fe ₂ As ₂ +20Ag	1.91	2.77	0.95

3. 結果及び検討

Fig. 1 に残留磁化測定の結果より得られた J_c^{local} , J_c^{global} の温度依存性を示す。無添加の試料では J_c^{local} しか確認することができなかったが、銀添加によって J_c^{local} と J_c^{global} の両方を確認することができた。また、銀を 10 wt% 添加したものより 20 wt% 添加したものの方が J_c^{global} の特性が良かった。5 K における J_c^{global} , J_c^{local} はそれぞれ 10^7 A/m² と 10^{10} A/m² のオーダーとなった。銀添加により J_c^{global} が評価できる値まで増加したのは、粒間の 5 nm のアモルファス層が取り除かれ、粒間の弱結合が改善されたためと考えられる [2]。 J_c^{global} が低い原因を調査するため、残留磁化測定の結果を用いて、超電導の割合 F の値を評価した。粒間、粒内の磁気モーメント m_g , m_l は、 J_c^{global} と J_c^{local} の値を用いてそれぞれ

$$m_g = \frac{(3l - w)w^2t}{12} J_c^{\text{global}} \quad (1)$$

$$m_l = \frac{R^4\pi^2}{8} J_c^{\text{local}} \quad (2)$$

と書ける。 R は結晶粒のサイズ (半径) であり、SEM の観察結果より、無添加のものが $0.25 \mu\text{m}$ 、10 wt% 銀を添加したものが $0.5 \mu\text{m}$ 、20 wt% 添加したものが $1.0 \mu\text{m}$ である [2]。全体の磁気モーメント m_R は粒間と粒内の磁気モーメントの重ね合わせであるので

$$m_R = m_l N_l + m_g \quad (3)$$

で表される。ここで、 N_l は結晶粒の数であり

$$N_l = \frac{V_g}{V_l} f \quad (4)$$

で表される。ただし、 $V_g = wlt$, $V_l = 4\pi R^3/3$ はそれぞれ試料と結晶粒の体積である。(3), (4) 式を用いて、無添加の試料と銀を 10 wt%, 20 wt% 添加した試料の超電導の割合を求めたところ、それぞれ 0.21, 0.69, 0.46 となった。3次元のサイト・パーコレーション理論より、充填率が閾値 0.3117 より低い時、試料全体に電流が流れない。以上のような結果となったのは、銀の添加により超電導の割合が閾値を超え、 J_c^{global} が測定できる値まで上昇したためと考えられる。また、銀を添加した試料の電氣的結合度より、非超電導層に覆われていない超電導粒の割合がそれぞれ 0.45, 0.67 程度であると推定できた。これらの結果より、 J_c^{global} の特性が低い要因として、試料の超電導の割合が低く、さらに非超電導層に覆われていない超電導粒の割合が低いことが考えられるため、作製法の改善が必要である。詳細な報告は当日行う。

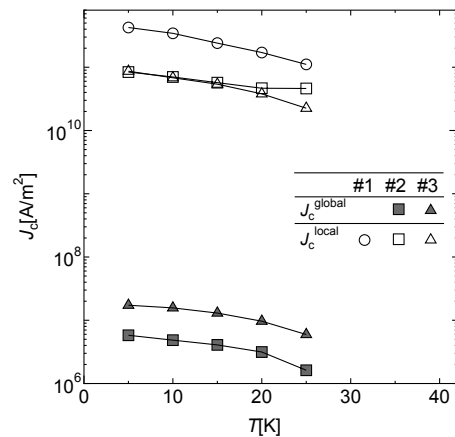


Fig. 1: Inter-grain and intra-grain critical current densities estimated by remanent magnetization method.

4. 参考文献

- [1] E. S. Otabe *et. al.*: Physica C 469 (2009) 1940–1944.
- [2] L. Wang *et. al.*: Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 025027.

Dy123 バルクの液体窒素温度下における機械的特性評価

Evaluation of mechanical properties of Dy123 bulks at liquid nitrogen temperature

村上 明, 大高 健, 三浦 剛(弘前大); 岩本 晃史(核融合研)
 MURAKAMI Akira, OTAKA Ken, MIURA Takeshi (Hiroasaki Univ.); IWAMOTO Akifumi (NIFS)
 E-mail: amura@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物超電導バルク(以下, バルク)は, 前駆体を加熱して半熔融状態にした後, その上部に種結晶を配置して温度勾配下で結晶成長させて作製される. この工程は大気中で行われることが多く, 結晶成長したバルクは, 必然的に気孔を含む材料となる(以下, 従来材). 一方, 前駆体の加熱を酸素雰囲気で行うことで, 内部に気孔を含まない緻密質のバルク(以下, 緻密材)が得られるようになり[1], それによる機械的特性の改善が報告されている[1,2]. しかし, これまでに報告されている緻密材の機械的特性は, 室温(以下, RT)での評価によるものが多く, 液体窒素温度(77 K)での機械的特性に関する報告は少ない. 本研究では, Dy 系の緻密材と従来材の機械的特性を 77 K において評価し, 緻密質化による機械的特性の改善効果について検討した.

2. 実験方法

新日鉄製の緻密材と従来材(ともに直径 30 mm, 厚さ 10 mm 程度)から採取した試験片を, 液体窒素に浸漬して曲げ試験を行い, 77 K での機械的特性を評価した. 両材料とも mol 比で 3:1 となるように秤量した $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ と $\text{Dy}_2\text{BaCuO}_5$ (以下, Dy211)の粉末に, 結晶成長過程で Dy211 粒子を微細にする効果のある Pt を 0.5 wt.% 添加して作製された. 従来材は, 大気中で前駆体を 1423 K まで加熱して 1 時間保持した後, 1313 K まで冷却し, Nd 系の種結晶を配置して徐冷・結晶成長させて作製された. 一方, 緻密材の作製では, 前駆体を 100% 酸素雰囲気中で 1423 K まで加熱して 1 時間保持した後, 1313 K まで冷却し, 大気中で Nd 系の種結晶を配置した. その後の工程は, 従来材と同様に行われた. 両材料から曲げ試験片(寸法 2.8 x 2.1 x 24 mm³)を採取し, 723 K で 100 時間の酸素アニールを施した. 試験片の 2.8 x 24 mm² 面にひずみゲージを貼り, その面が下側となるようにスパン 21 mm の曲げ治具に試験片を置いた. 試験片を治具とともに液体窒素に浸漬した後, クロスヘッド速度 0.1 mm/min で 3 点曲げ負荷を行い, それによる応力-ひずみ挙動からヤング率と曲げ強さを評価した. 破断面近傍側面の光学顕微鏡写真を画像解析することで気孔率を評価し, 機械的特性との関係を比較・検討した.

3. 結果

緻密材(DyHD)と従来材(DyP)から採取した試験片の 77 K におけるヤング率と気孔率との関係を Fig.1 に, 曲げ強さと気孔率との関係を Fig.2 に示す. 緻密材から採取した試験片は, 気孔を殆ど含まないことを確認した. 従来材でも表層付近から採取した試験片の気孔率は, 例外的に低い. 前駆体内部の不活性ガスなどが大気中に拡散しやすいことなどによると考えられる. 従来材の内部から採取した試験片の気孔率は, 13~18%程度であった. 従来材の実断面積は見かけの断面積よりも小さいが, 緻密材では両者はほぼ等しいため, 負荷に伴う緻密材の変形量は, 従来材と比較して小さく, ヤング率は高い. 気孔の減少に伴い実断面積が増加したことに加えて, 欠陥が有効体積中に含まれる確率が低下したことで, 曲げ強さにも気孔率の低下に伴う向上が見られる. また, 77 K でのヤング率・曲げ強さは, RT でのそれらより高く, 冷却に伴う結晶格子間隔の減少を反映している.

曲げ強さのばらつきをワイブル係数により評価した. 従来材の表層付近から採取した試験片は, 先述のように例外的に低い気孔率を有するため, それを除いて求めたワイブル係数は 19 であった. 一方, 緻密材の曲げ強さのワイブル係数は 10 であり, 緻密材の曲げ強さは従来材のそれと比較してばらつき傾向にあった. 緻密材の曲げ強さのばらつきは, 破壊の起点となり得る Pt 化合物の偏在[4]の分布状況と関係していると推測される.

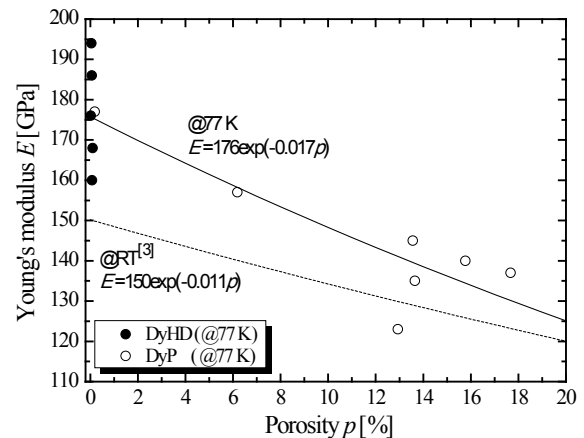


Fig.1 Relationship between Young's modulus at 77 K and porosity. Solid and broken lines represent approximations of data at 77 K and room temperature [3], respectively.

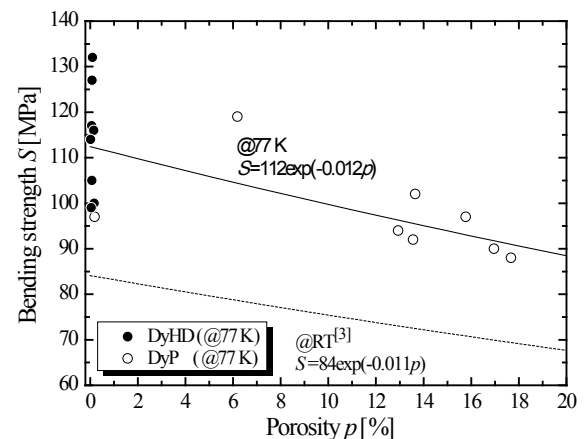


Fig.2 Relationship between bending strength at 77 K and porosity.

参考文献

- H. Teshima et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.158.
- A. Murakami et al.: IEEE Trans Appl. Supercond., Vol. 19 (2009) pp.2995-2998.
- A. Murakami et al.: Physica C, Vol. 468 (2008) pp.1395-1398.
- A. Murakami et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.93.

SMES用伝導冷却Y系超電導モデルコイルの通電・伝熱特性評価

Thermal Characteristics of Conduction cooled YBCO Model Coil for SMES

鈴木 貴裕, 室町 和輝, 青木 佳明, 植田 浩史, 石山 敦士(早稲田大学); 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)
 SUZUKI Takahiro, MUROMACHI Kazuki, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ); SHIKIMACHI Koji,
 HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)
 E-mail:atsushi@waseda.jp

1. はじめに

現在, NEDOプロジェクトにおいて通電容量 2kA, 絶縁電圧 2kV, 運転温度 20K のSMES用伝導冷却Y系超電導コイルの開発が進められている。超電導コイルの実用化に際しては, (1) 常電導領域の発生を防ぐ, (2) 常電導領域の伝播を防ぐ, (3) 超電導特性の劣化・焼損を防ぐ, という3つの段階を想定した安定性評価基準の確立が求められる。そのためには, コイルの熱的振る舞いを明らかにすることが重要である。現在開発中のSMES用超電導コイルは, Y系テープ線材の周囲をカプトンテープ (50 μ m) で巻いた上で, エポキシ含浸を施すことになっている。このような超電導コイルの運転温度 20K 領域での通電・伝熱特性を明らかにする必要がある。そこで, 我々はSMES用伝導冷却Y系超電導コイルと同様のターン間絶縁構造を持つ銅テープ巻線から成る伝導冷却モデルコイルについて, 通電・伝熱特性を評価したので報告する。

2. 解析モデル

今回は, SMES 用コイルを構成する一つのパンケーキコイルに注目して有限要素法による数値解析に基づく熱特性評価を行った。解析モデルを Fig.1 に示す(コイル内半径: 113mm, コイル外半径:140.4mm, コイル高さ:13.6mm, 1 ターン幅:5.3mm, 1 ターン厚(補強材):0.3mm(0.08mm), ターン数:80)。導体構成は, 現在試作を進めているSMES用モデルコイルを想定した 4 枚バンドル導体を用いたダブルパンケーキコイルである。回転対称有限要素法により, コイルの熱的挙動について解析を行った。解析領域は, Fig.1 に示したコイル・冷却板の断面である。境界条件は冷却板端面の温度を運転温度 20K で固定境界とした。コイル内部の熱的な振る舞いを解析するために, 式(1)に示す熱拡散方程式を用いて数値解析を行った。

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \{k(T) \nabla T\} + Q_j(T) \quad (1)$$

ここで, C : 熱容量[J/m³ K], T : 温度[K], t : 時間[s], k : 熱伝導率[W/m K], Q_j : ジュール発熱量[W/m³]である。

今後, 製作・実験予定の銅テープ線を用いたダミーコイル (Fig.2 参照) の通電・伝熱特性について解析した。銅ダミーコイルに電流を流した際に生じるジュール熱を超電導コイルにおける交流損失とみなし, コイル内部に熱が生じた場合の温度分布について過渡解析を行った。

3. 解析結果

解析結果を Fig.3, Fig4 に示す。Fig.3 は横軸が時間, 縦軸が温度を示しており, 内層から 40 ターンの線材の温度の時間変化を示している。Fig.4 は横軸が内層からのターン数, 縦軸が温度を示している。今回の解析では, 電流 20A, 30A を流した際, すなわち 5.9W, 13.5W の定常発熱がある場合, それぞれ最大温度 20.5K, 21.1K になることが確認できた。最内層で温度が低いのは巻枠である FRP へ熱が拡散しているためだと考えられる。また, 上段と下段で温度差はないのでコイル下部の冷却板とコイル上部の銅板をつないでいる熱伝導コネクタ (Fig.1 参照) によって十分冷却できていると考えられる。

解析結果の妥当性および, コイル内の発熱と冷却板界面の熱流束等を評価するため, 銅テープを巻線したダミーコイル (Fig.2) を作製した。今後実験を行う予定である。

本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

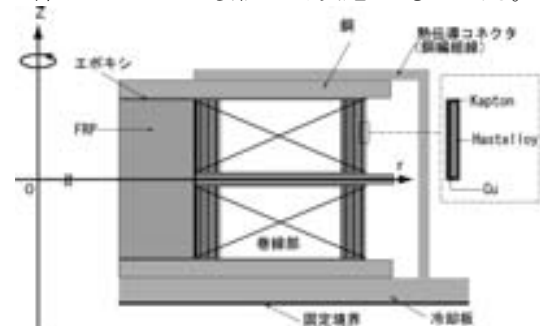


Fig.1 Simulation Model

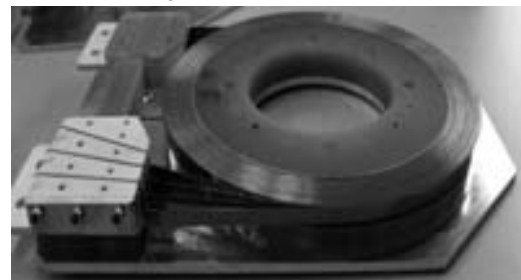


Fig.2 Dummy coil (Winding part)

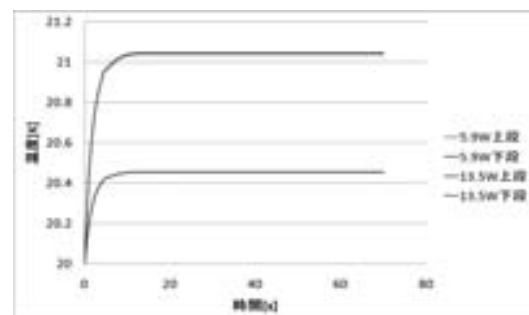


Fig.3 Time change of temperature

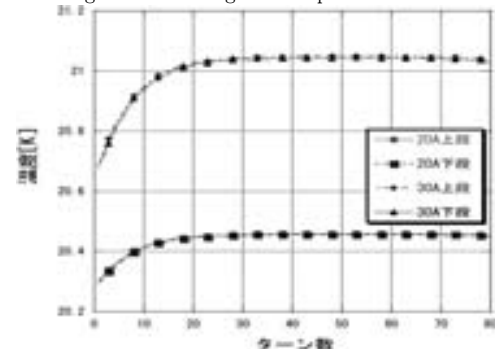


Fig.4 Distribution of temperature in coil

参考文献

1. T.Ando, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 68 (2006) p.44

イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発 (3)

- 細線化線材の過電流特性 -

Winding technology development of Y-based HTS power transformers (3)

- Over current characteristics of scribing wire -

岡元 洋, 林 秀美(九州電力); 岩熊成卓, 富岡 章(九州大学); 齊藤 隆(フジクラ);
五所嘉弘, 町敬人, 田辺圭一, 塩原 融(SRL)

OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); IWAKUMA Masataka, TOMIOKA Akira (Kyushu Univ.);
SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); GOSHO Yoshihiro, MACHI Takato, TANABE Keiichi, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail: hiroshi_a_okamoto@kyuden.co.jp

1. はじめに

経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の超電導変圧器技術開発では、変圧器の低損失化は細線化線材に対応する。5mm 幅の細線化線材は、レーザー加工による 3~5 分割の長尺化技術を開発中である。本プロジェクトが開発を見通す 20MVA (66/6.9kV, 175/1,674A) の超電導変圧器は、系統事故時の過電流は定格電流の約 7 倍程度、線材単長は 200~300m 程度である。現設計では、変圧器巻線素線の短絡電流は 465A (実効値) である。素線が一定時間の事故電流に耐えるには、超電導線材の安定化銀層を含めた銅などの保護構造の最適化が必要である。

今回は、5mm 幅線材を 3 分割した細線化線材による巻線の過電流特性の検証結果を報告する。

2. 実験方法

試料巻線の仕様は、巻線内径 ϕ 250mm、12 ターン、素線数 1、細線化線材 (3 分割:3 フィラメント) の各フィラメントの臨界電流 (9.9m 長の end-to-end) は 33~55A である。保護銅 0.1mm 厚は、超電導線材の銀層側の上に配置している。巻線の過電流特性は、サブクール液体窒素温度 (66K) で、上記の短絡電流 (交流) の通電時間を変化させ測定した。なお、細線化線材の劣化を判定するために、過電流を通電毎に巻線に直流通電し、巻線の臨界電流 I_c を評価した。

3. 実験結果

Fig. 1 には、細線化線材の過電流特性の通電エネルギーと規格化 I_c の関係を示す。100~200(J/m) 間の規格 I_c の低下は、サブクール液体窒素温度の上昇に伴う影響である。目標エネルギー (410J/m: 465A を 0.2 秒間の通電) 以内では、巻線 I_c の低下はほとんど見られないことから、細線化線材は保護銅の配置により、耐過電流特性が確認できた。

Fig. 2 には、巻線に通電した全電流と保護銅に流れた電流波形を示す。過電流通電時には、保護銅へ速やかな転流が分かる。Fig. 3 には、細線化線材の 3 フィラメント間の電流波形を示す。3 フィラメント間の電流は、中央部 (F2) が両端部 (F1, F3) に比べて若干小さいことが分かる。

今後、実器サイズの長尺細線化線材による過電流特性の検証が必要である。

謝辞

本研究は、経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発 (超電導変圧器技術開発)」を NEDO 委託事業により実施した。富士電機システムズ (株) 関係者の支援にも謝意を表します。

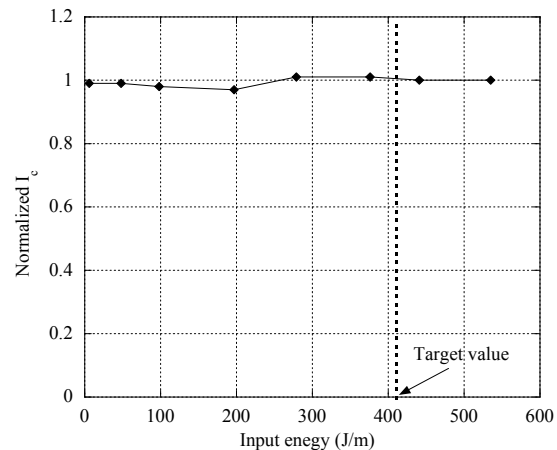


Fig.1 Over current characteristics of scribing wire by normalized I_c and input energy.

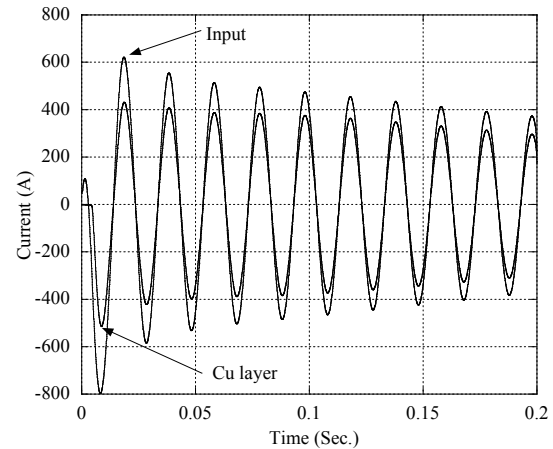


Fig.2 Current waveform between input and Cu layer.

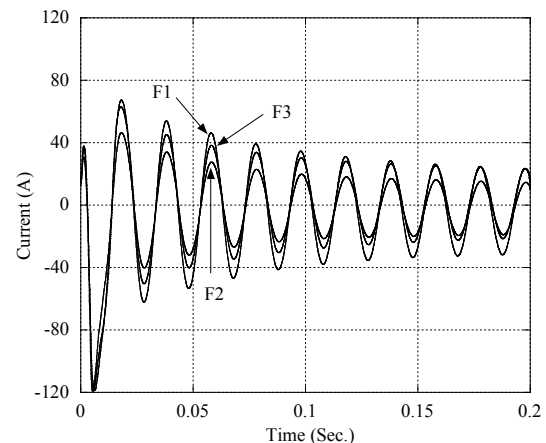


Fig.3 Current waveform among three filaments.

限流機能付き Y 系小型超電導変圧器の短絡電流に対する応答特性の研究(1) -実験-

Research on behavior characteristic to shorted current of a small-scale YBCO superconducting transformer with current limiting function.(1) -Experiment-

緒方 俊之, 乙成 貴明, 富岡 章, 松尾 政晃, 佐藤 誠樹, 岩熊 成卓(九州大学);
林 秀美, 岡元 洋(九州電力); 飯島 康裕, 齋藤隆(フジクラ);
青木 裕治(昭和電線); 藤原 昇, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

OGATA Toshiyuki, OTONARI Takaaki,

TOMIOKA Akira, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.);

HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co.); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.);

AOKI Yuji (SWCC-CS); FUJIWARA Noboru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: ogata@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

Y 系酸化物超電導体は高温酸化物超電導体の中でも磁場中での臨界電流特性が高く、次世代線材として様々な応用研究がなされている。一方、変圧器は雷サージや短絡事故による過電圧・突入電流が問題となっている。我々は限流機能付き Y 系超電導変圧器の開発を目指しており、これまで要素技術開発として4巻線構造の限流機能付き Y 系小型超電導変圧器を設計・試作し、突発短絡事故を模擬した過電流実験を行い超電導変圧器による限流効果について評価してきた。

今回は、補助巻線を接続しない 2 巻線における限流効果について評価したので報告する。

2. 実験結果

冷却は液体窒素浸漬冷却で行い、コイルの急激な熱収縮による J_c の劣化を抑えるために約 2.5h かけて 77K まで冷却した。

まず、漏れインダクタンスを測定と通常負荷として 12Ω を接続し通電試験を行い、2 巻線においても正常に動作することを確認した。電源は周波数を 60Hz とし 200,250,280,325V において突発短絡事故を模擬した実験を行った。325V,77K における突発短絡時の測定結果を Fig.1 に示す。短絡により過大電流が流れ抵抗が発生し、過大電流が限流していることがわかる。Fig2 には電源電圧 325V における4巻線での一次側主巻線電流波形と 2 巻線での一次側電流波形を比較して示している。両者に大差は見られなかった。また、通常負荷を 22Ω として電源電圧 250,300,325,350,400V における突発短絡事故を模擬した実験も行った。4 巻線と 2 巻線(負荷 12Ω 、 22Ω) において短絡事故後 0.1s での電流について限流効果が無い場合の過大電流に比べてどれくらい限流されているかを Fig3 に示す。限流効果に電圧依存性があり、4 巻線と 2 巻線で大きな違いは見られなかった。発生抵抗等については当日発表する。

$$\frac{I_{super}}{I_{normal}} = \frac{\text{超電導変圧器の過大電流}}{\text{常電導変圧器の過大電流}} \times 100 [\%]$$

3. まとめ

今回、試作した超電導変圧器を用いて 2 巻線における突発短絡事故の模擬実験を行い変圧器の限流機能を確認した。今後、数値解析により大容量変圧器の過大電流による巻線の常電導転移現象についての定量的把握を行っていく。

4. 謝辞

本研究はイットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

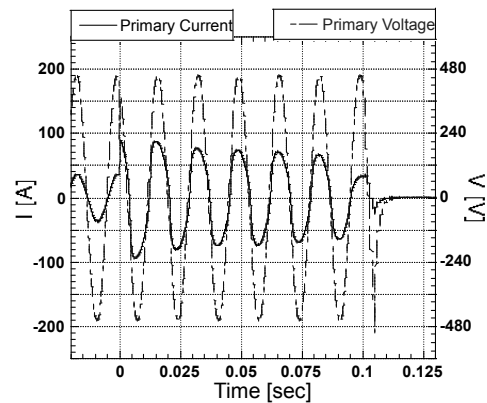


Fig.1 Primary current of sudden short circuit test

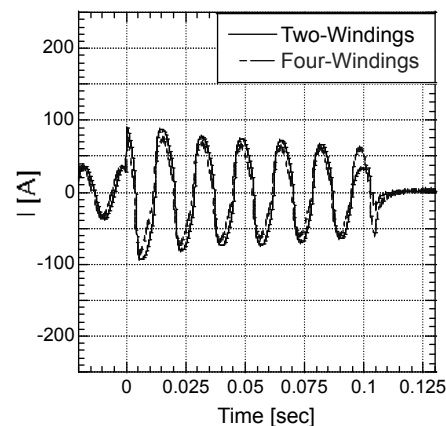


Fig.2 Compare Four-Windings current with Two-Windings current

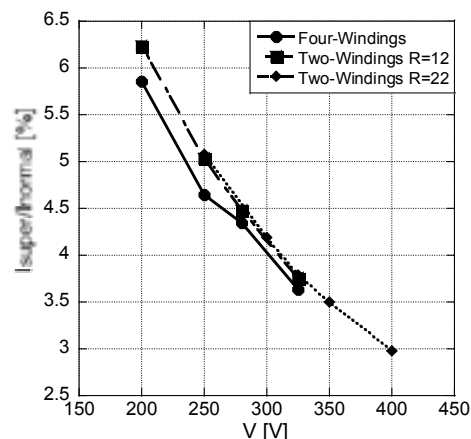


Fig.3 Percentage of limited current

限流機能付き Y 系小型超電導変圧器の短絡電流に対する応答特性の研究 (2)-数値解析-

Research on behavior characteristic to shorted current of a small-scale YBCO superconducting transformer with current limiting function (2).-Numerical analysis-

乙成 貴明, 緒方俊之, 富岡 章, 松尾 政晃, 佐藤 誠樹, 岩熊 成卓(九州大学);

林 秀美, 岡元 洋(九州電力); 飯島 康裕, 齋藤 隆(フジクラ);

青木 裕治(昭和電線); 藤原 昇, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

OTONARI Takaaki, OGATA Toshiyuki,

TOMIOKA Akira, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.);

HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co.); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.);

AOKI Yuji (SWCC-CS); FUJIWARA Noboru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: otonari@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では、これまで限流機能付きの Y 系超電導変圧器の設計・製作技術の確立を目指し、主巻線、補助巻線からなる小型の 4 巻線構造の Y 系超電導変圧器を試作し、2 次側地絡による突発短絡事故を模擬した突発短絡試験を行い、Y 系超電導変圧器の限流機能の動作確認を行った。そして、突発短絡試験を記述できる数値解析プログラムを作成し、超電導変圧器の短絡過大電流に対する応答特性の詳細把握を行った。

その後、通常の 2 巻線構造の超電導変圧器としての限流機能の動作を確認するため、補助巻線を外した状態で、突発短絡試験を行い、限流機能の動作確認を行った後、数値解析により超電導変圧器の短絡過大電流に対する応答特性の詳細把握を行った。本発表では、この数値解析結果について報告する。

2. 数値解析

数値解析プログラムには、次のような回路方程式を用いた。

$$L \frac{dI}{dt} + \rho_n \frac{l_n}{S} I + \int_0^l \rho_f \frac{I - I_c}{S} dx = V \quad (1)$$

L は変圧器巻線の 1 次 2 次巻線間の漏れインダクタンス、 ρ_n 、 l_n はそれぞれ、巻線の常電導部抵抗率、常電導領域長、 ρ_f 、 l_f はそれぞれ、巻線のフラックスフロー抵抗率、フラックスフロー領域長、 I は巻線の通電電流、 I_c は線材の臨界電流、 S は線材の断面積、 V は巻線の両端の電圧となっている。この回路方程式と熱方程式を連立することによって、通電電流、巻線温度、発生抵抗、常電導転移割合等の時間変化を算出した。

3. 結果・考察

突発短絡試験における通電電流の時間変化の実験結果と数値解析結果の比較を行ったので、電源電圧が 325V の時の比較結果を Fig.1 に示す。実験結果と、数値解析結果がほぼ一致しているため、数値解析プログラムは妥当であると考えられる。

次に、同じく電源電圧が 325V の時の 1 次巻線の温度上昇の時間変化の計算結果を Fig.2 に示す。T1、T2 はそれぞれ、内側 1 次主巻線最内層の上端部と中央部の温度上昇、T3、T4 はそれぞれ、外側 1 次主巻線最内層の上端部と中央部の温度上昇を表している。内側より外側の方が、また、中央部より上端部の方が温度上昇が大きくなることが分かる。内側よりも外側の方が巻線にかかる磁界が大きく、巻線中央部よりも上端部の方が、線材にかかる磁界の垂直成分が大きく、臨界電流が低下しやすくなるため、温度上昇が大きくなったと考えられる。

発生抵抗、常電導転移割合の時間変化等に関しては、当日に報告する。

4. 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

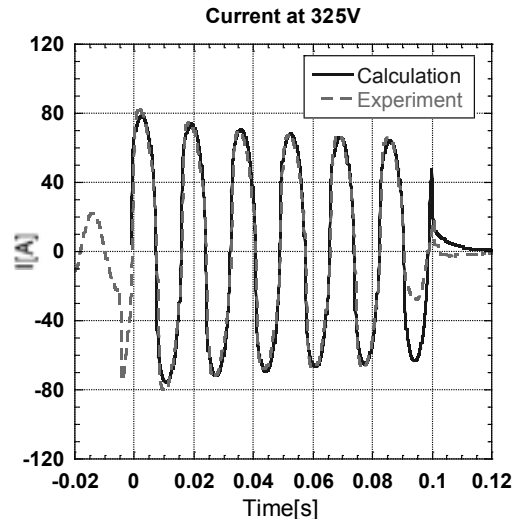


Fig.1 Comparison between experiment and calculation of current at sudden short circuit test.

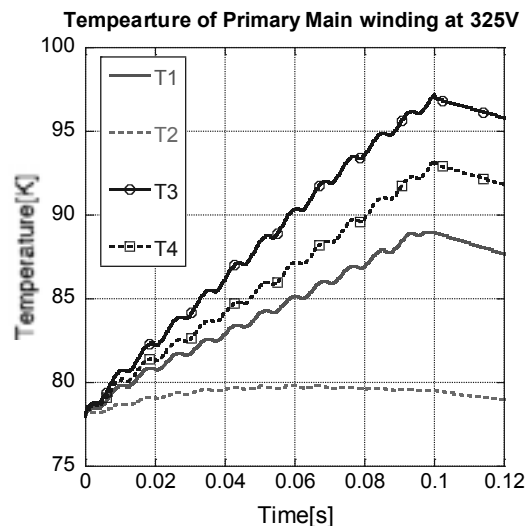


Fig.2 Temperature of Primary Main winding.

スパイラル構造を考慮したイットリウム系 2 層超伝導ケーブルの交流損失解析法

A method for ac loss calculations of two-layer cables comprising spirally-wound coated conductors

竹内 活徳, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大); 藤原 昇(SRL)

TAKEUCHI Katsutoku, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University); FUJIWARA Noboru (SRL)

E-mail: katsutoku@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

Y 系超伝導ケーブルの交流損失解析は各所で行なわれているが、その多くはケーブルのスパイラル構造を無視した断面内の 2 次元解析である。福井らは内層と外層のスパイラルピッチが等しい場合の 2 層 Y 系超伝導ケーブルの解析結果を発表している[1]。今回、我々は 2 層 Y 系超伝導ケーブルにおいて、内層と外層でスパイラルピッチが異なる場合の交流損失解析法を新たに提案する。

2. 解析方法

Y 系線材では超伝導層が極めて薄く、その断面内を要素分割する有限要素法では、要素のアスペクト比を小さく保つと要素数が増え、3 次元のスパイラル構造を考慮した解析は非現実的である。そこで本解析では、薄板近似を適用して超伝導体表面での解析を行なった。超伝導特性は n 値モデルで表現した。また、(1)導体の特性 (I_c 、ギャップ幅、線材幅など) は長手方向に一様、(2)導体中の線材の特性はすべて同一、という二つの仮定を行なった。このような条件下では Fig. 1 に示すように、長手方向の周期性より、隣り合う線材の電流分布は長手方向に x_s だけずらせば同一となる。この時の x_s は

$$x_s = \frac{2\pi}{N_i N_o \theta} (N_o - N_i) \quad \theta = 2\pi \left(\frac{1}{l_i} - \frac{1}{l_o} \right)$$

である。ただし内層と外層の線材枚数を N_i , N_o 、内層と外層のスパイラルピッチを l_i , l_o とした。内層と外層の線材をそれぞれ 1 本ずつ解析すればよいことが分かる。さらに、同一線材内においても電流分布が長手方向に周期性を持っていることが導かれる。内層の線材の電流分布の周期 X_i は

$$X_i = \frac{2\pi}{N_o \theta} = \left\{ N_o \left(\frac{1}{l_i} - \frac{1}{l_o} \right) \right\}^{-1}$$

と計算できる。外層の周期 X_o についても同様の式を導出できる。すなわち Fig. 1 に示すように、同一線材の長手方向、および同じ層における他の線材にあるドットで示した領域は斜線部と同じ電流分布をもつため、斜線部のみを解析すればよい。例えば $l_i=0.4$ m, $l_o=0.2$ m, $N_i=18$, $N_o=19$ の場合、周期は $X_i=0.021$ m, $X_o=0.022$ m となり、スパイラルピッチの 1/10 程度の範囲で解析可能である。これらによってモデルサイズを縮小でき、計算時間を実用的な範囲内に収めることができる。

3. 解析結果

Table 1 のような内層 18 枚、外層 19 枚の 4.5 mm 幅超伝導線材で構成された 2 層ケーブルにおいて、Table 2 のようにスパイラルピッチの異なる 4 種類のモデル (Model A,B,C,D) を作成し、解析を行なった。なお、先述のように、実際に解析を行なったのは内層、外層における線材 1 本ずつである。Model B において電流負荷率が 0.6 の時の、電流密度の線材幅方向成分の分布を Fig. 2 に示す。外層の線材(a)において、内層の線材間ギャップの上部にあたることを境として、電流の向きが反転していることが分かる。また、内層(b)でも同様の傾向がみられるが、その変化は小さい。負荷率 0.6 における交流損失解析結果を Table 3 に示す。スパイラルピッチを短くしても、内層の交流損失はほとんど変化しないが、外層の交流損失の増加は内層のそれより大きい。これは、外層の交流損失が内層の作る磁界の影響を大きく受けているためである。すなわち、スパイラルピッチが短くなることによって、外層から見た場合の内層の作る磁界の分布が相対的に大きく変化し、交流損失への影響が大きくなったためであると考えられる。

謝辞

本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託のもと、国際超伝導産業技術研究センターとの共同研究として実施されたものである。

Conductor width	4.5 mm
n value of superconductor	30
No. of conductor in inner / outer layer	18 / 19
Gaps of between conductors	0.778 mm
Total critical current	3700 A

Spiral pitch of	Model A	Model B	Model C	Model D
Inner layer	0.6 m	0.4 m	0.2 m	0.15 m
Outer layer	0.3 m	0.2 m	0.1 m	0.075 m

AC loss (mJ/m/cycle)	Model A	Model B	Model C	Model D
Inner layer	0.46	0.45	0.45	0.45
Outer layer	1.16	1.18	1.32	1.50
Total	1.61	1.63	1.78	1.95

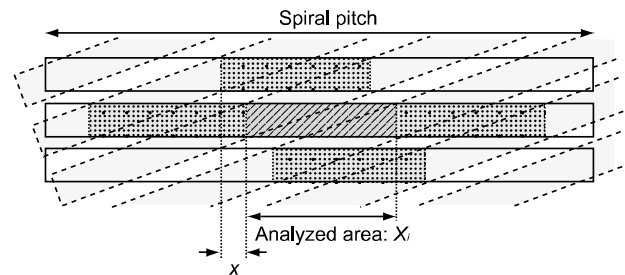


Fig. 1 Schematic of longitudinal periodic condition: Shadow area is calculated and dots area is the same electromagnetic field distribution with shadow area.

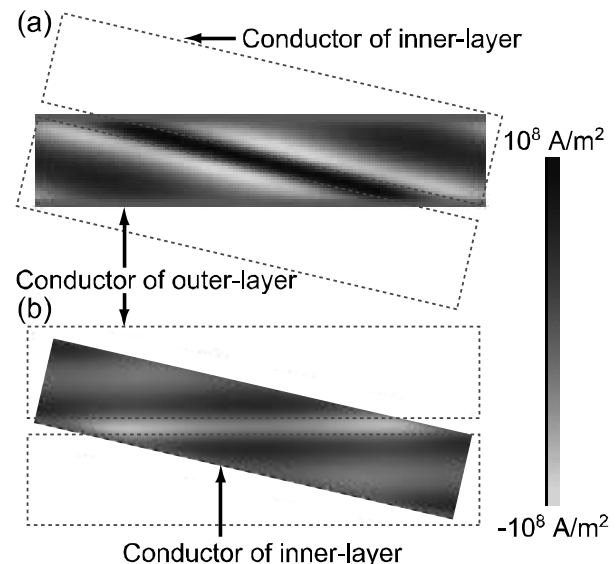


Fig. 2 Transverse current distributions of two-layer cable with $l_i=0.4$ m and $l_o=0.2$ m: (a) Outer-layer, (b) Inner-layer

参考文献

[1] 鈴木喜也ほか, 第81回低温工学・超伝導学会講演概要集, Vol. 81, pp174 (2009)

66kV 系統 REBCO 超電導モデルケーブルの過電流通電特性評価

Over-current characteristics in 66 kV REBCO Superconducting Model Cable

王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早大); 大屋 正義(住友電工); 藤原 昇(ISTEC-SRL)
 WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
 OYA Masayoshi (Sumitomo Elec.); FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL)
 E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

超電導線材を送電ケーブルに応用した際に、短絡事故電流により線材が劣化・焼損してしまわないよう、銅安定化層や銅フォーマを設計することが必要となる。そこで我々は、耐過電流導体構成技術の確立を目指して、超電導ケーブルの設計最適化に向けた検討を行っている。これまでに超電導線材や超電導モデルケーブルの過電流通電試験を行うとともに、計算機シミュレータの開発を行ってきた[1]。今回は 2 m 級 REBCO 超電導モデルケーブルを試作し、66 kV 系統を想定した短絡電流(31.5 kA_{rms}、2 s)による過電流通電試験を行った。また、開発した計算機シミュレータを用いて解析評価を行ったので報告する。

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 実験

実験で使用した超電導モデルケーブルの諸元を Table.1 に、構成を Fig.1 に示す。2本のモデルケーブルを用意し、片方のみ超電導線材が含まれており、もう一方は銅テープを用いた。超電導モデルケーブルの銅フォーマは断面積が 140 mm²で、HTS 導体層が 6 層、HTS シールド層が 3 層、銅シールド層の断面積が約 110 mm²である。線材は 2 mm 幅で、安定化層として銀層に加え銅層がメッキ加工されている。両ケーブルの導体層(銅フォーマ、HTS 導体層)は電源と直列接続し、シールド層(HTS シールド層、銅シールド層)は短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成されている。過電流通電によるケーブル内の温度上昇を測定するため、ケーブル長手方向の中央部に熱電対温度計を、電流計測用にログスキューコイルを設置した。実験は液体窒素浸漬冷却(77.3 K)で行い、交流過電流として約 10, 20, 31.5 kA_{rms}を通電した(60Hz)。

3. 数値解析

3次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布・熱伝導連成解析の計算機シミュレータを開発した。電流分布解析は式(1)(2)、熱解析は式(3)を用いて定式化した。超電導線材は3次元有限要素法を用いてモデル化し、I-V特性にはn値モデルを採用した。境界条件として、超電導線材は銅フォーマが端部のみで電氣的に接触し、ケーブルの最外層の保護層の表面が液体窒素に触れていると仮定し、飽和液体窒素の非線形熱伝達特性を考慮した。また、インダクタンス L、M は円筒モデルで近似し、集中定数とした。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} R_{cond} & 0 \\ 0 & R_{shield} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{cond} & M \\ M & L_{shield} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{cond} \\ V_{shield} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{cond} \\ \theta \end{Bmatrix} \tag{2}$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \quad (Q_q = h(T_s - T_b)) \tag{3}$$

式(1)の ϕ はスカラーポテンシャル、 σ は導電率を表す。式(2)の I は電流、 V は式(1)から得られる超電導線材の電圧降下、 E は両端電圧である。添え字の cond は導体層及び銅フォーマ、shield はシールド層を示す。式(3)の ρ は密度、 c は比熱容量、 k は熱伝導率、 Q_j は電流分布から求まるジュール発熱、

Q_q は液体窒素の冷却、 h は熱流束、 T_s はケーブル表面温度、 T_b は液体窒素温度を表す。

4. 結果と今後の予定

31.5 kA_{rms} 通電時の各層の温度上昇を Fig.2 に、電流分布を Fig.3 に示す。Fig.2 において実験値がプロットで、解析値は実線である。銅フォーマ、HTS 導体層、HTS シールド層、銅シールド層の温度上昇 ΔT は、約 250 K、150 K、100 K、150 K となった。解析は実験を再現できたといえる。今後は 66 kV 超電導ケーブルの耐過電流保護設計について検討していく予定である。

Table.1 Specifications of Superconducting Model Cable

	Outer diameter (mm)
Copper former	16.5 (140 mm ²)
HTS conductor layer	22
Electrical insulation layer	35
HTS shield layer	36
Copper shield layer	42

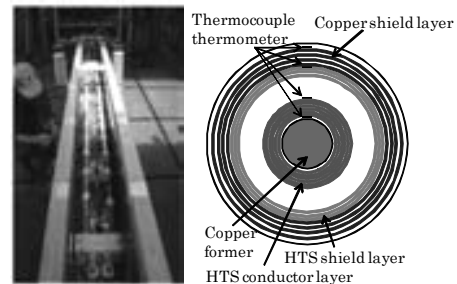


Fig.1 Composition of Superconducting Model Cable

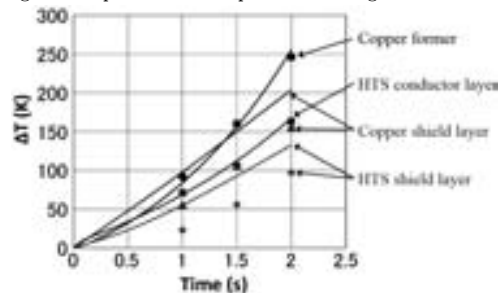


Fig. 2 Results of temperature rise

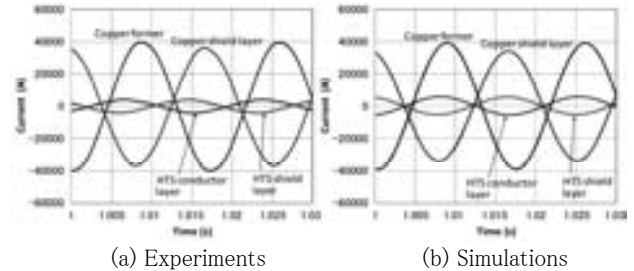


Fig. 3 Results of current distribution

参考文献

1. A. Ishiyama, X. Wang, H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18 (2008), no. 2, pp. 1228-1231
2. X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 80 (2009) p.49

200 m 級直流超伝導送電ケーブルの建設と通電試験 —速報—

Construction and current-feed test of 200 m DC superconducting power cable

浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男, 孫 建, IVANOV Yury, 杉本 達律,
芳村 幸治, 福田 真治, 藤井 友宏, 杉野 慎, 山口 作太郎(中部大)

HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, SUN Jian, IVANOV Yury, SUGIMOTO Tatsunori,
YOSHIMURA Kouji, FUKUDA Shinji, FUJII Tomohiro, SUGINO Makoto, YAMAGUCHI Sararou (Chubu Univ.)

E-mail: hamabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では、20m 級直流超伝導送電ケーブル試験装置による試験が成功裡に終了した[1]ことを受けて、新たに 200 m 級の直流超伝導送電ケーブルの試験装置の建設を 2009 年度より開始し[2]、2010 年 1 月に完成した。建設の後、速やかに冷却を行い、冷却開始後 4 日程度でケーブル全体が超伝導状態となったことを確認した。その後、液体窒素温度で 1.2kA の通電まで行った。

2. 建設

Table 1 に本試験装置の仕様を示す。これまでの 20 m 超伝導ケーブルでは電圧の仕様を単相としたため同軸単極構造としていたが、200 m ケーブルでは超伝導ケーブル本体の構成を電圧の仕様 ± 10 kV に合わせて同軸二極構造とした (Fig. 1 (a))。

また、屋外に設置した約 200 m の断熱配管ケーブルは 2000R の折り返しを持つヘアピン状の配置とし、2 台の端末部 (Fig. 1 (b)) 及び冷媒の冷却循環装置 (Fig. 1(c)) は実験室内に設置した。

これまでの 20 m ケーブルでは断熱配管をステンレス製のストレート管をまず設置し、その中に超伝導線材・絶縁体・アース導体からなるケーブル本体を挿入する設置方法を採用した。本試験装置においても同様に、ストレート管で製作した約 200 m の断熱用配管をあらかじめ設置し、その中にケーブル本体を挿入する形式をとった。2009 年 8 月に行われたこの挿入作業は、今回の 200 m ケーブルでも問題なく終了することができた。

本試験装置では、ケーブルを構成する HTS 線材一本に対して電流リードを一本接続する構成としている。電流リードにはペルチェ電流リード (PCL) を採用しているが、外側 HTS 線材層の一部には比較のため銅製の電流リードを接続した。PCL の性能試験の必要上、各電流リードには 3 本ずつの熱電対が取り付けられており、これらの配線作業の完成が 2009 年 12 月、その後、断熱配管・ケーブル端末部の真空排気が 2010 年 1 月に終了し、全装置が完成した。

Table 1 Specification of 200 m DC superconducting power cable test stand in Chubu University.

Current	DC 2 kA at 78 K
Voltage	DC ± 10 kV
Cable structure	Coaxial, bipolar current feed
SC tape	39 Bi2223 HTS tapes (23 tapes in inside SC layer, 16 tapes in outside SC layer)
Current leads	72 Peltier current leads and 6 copper leads
Cryogenic system	1 Stirling type cryocooler
Cooling power	1 kW at 77 K

3. 通電試験

冷却完了後、PCL の動作試験を兼ねて、ケーブル全体に 1.2 kA で 1 時間の通電試験を行った。本試験装置では、超伝導テープ線材毎に電圧タップを取り付け、各線材の特性をその結果、電流リードに PCL を採用していないもの (電流量が多い) を除いてケーブルの各線材が超伝導状態であることを確認するとともに、通電中でも PCL のペルチェ素子部 (厚さ 4 mm 程度) で 70~80 K 以上の温度分担が保持できていたことを確認した。

参考文献

1. M. Hamabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19 (2009) p.1778
2. S. Yamaguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.57

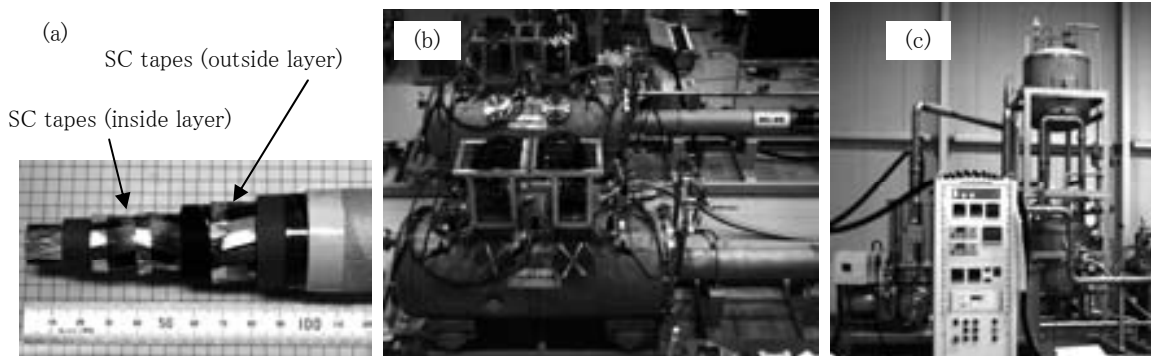


Fig. 1 (a) Cable core, (b) cryostat, and (c) cryogenic system of 200 m DC superconducting power cable test stand.

200m の超電導直流ケーブルの計測システムと冷却過程の計測 Measurement System and Cooling Process of A 200 M HTS DC Cable

孫 建, 江本 雅彦(核融合研), 芳村 幸治, イワノフ ユーリ, 渡邊 裕文, 浜辺 誠, 河原 敏男, 山口 作太郎(中部大)
SUN Jian, EMOTO Masahiko (NIFS), YOSHIMURA Koji, IVANOV Yury, WATANABE Hirofumi, HAMABE Makoto,
KAWAHARA Toshio, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

E-mail: j_sun@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

A new 200 m high temperature superconductive (HTS) cable test facility was constructed at Chubu University recently [1]. The test facility consists of cryogenics, vacuum system, HTS cable, control and measurement system. A KEITHLEY data acquisition system with 600 channels was developed to record various kinds of data of the test facility [2]. After construction of the facility finished at the beginning of 2010, we started the 1st cooling test of the facility, and the temperatures of the whole cable reached at the liquid nitrogen temperature within one week.

2. Measurement System

The measurement system was developed to collect sufficient information for the evaluation of the test facility performance. The data recorded include the temperature, pressure, level and flow rate of liquid nitrogen (LN₂) coolant, loading current, voltage and temperature of the conductors and pressure in the vacuum. The measurement system consists of 2 KEITHLEY 3706 data loggers, four PCs and visual monitoring system. The PC1 logs the data from the sensors with about 2.5 second intervals through the data loggers and the PC2 displays and makes a backup of the measurement. The PC3 is used to monitor and store the video from the network cameras located at the different places around the facility. The PC4 acts as a Web server and the actual measured values are accessible online via a Web browser. In Fig. 1, a screen picture of the monitoring system is shown. The measurement system was suitable for monitoring the HTS system with a number of sensors.

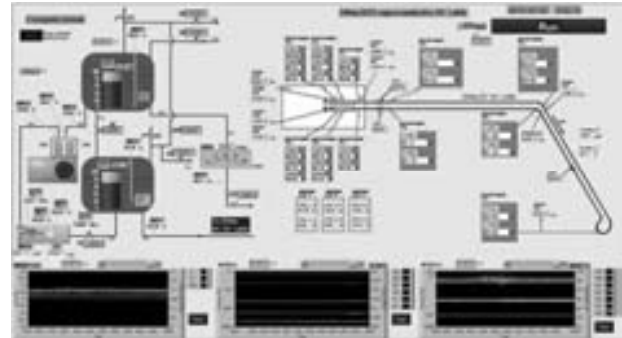


Fig.1 A Screen Picture of the Monitoring System

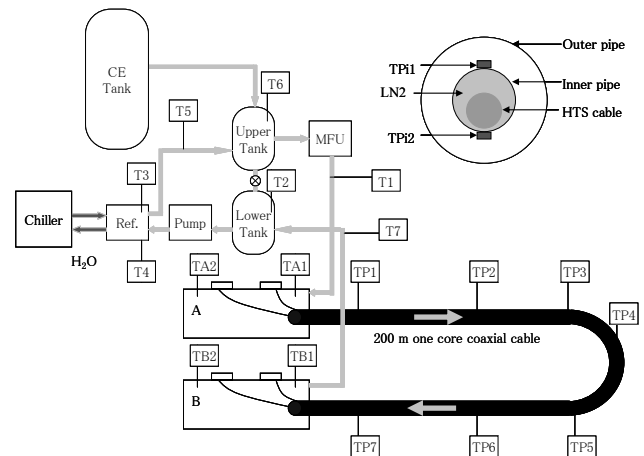


Fig.2 A Schematic Diagram of the Cooling Circulation.

3. 1st Cooling Test

We started the first cooling test from Jan. 19 to Mar. 8. Firstly, we replaced the residual gas in the inner pipe with the gaseous nitrogen (GN₂) and cooled down the HTS cable with cold GN₂ and LN₂. Fig. 2 shows a schematic diagram of the coolant circuit, which includes two LN₂ reservoirs, a stirling refrigerator, a cryopump, and the thermally insulated double pipes. The temperatures of the inner pipe were precisely measured with the Pt resistive thermometer devices at up and down as the inset of Fig.2. The HTS cable was cooled down to LN₂ temperature on Jan. 23. Fig.3 shows the time dependence of the inner pipe temperature at the both ends of the inner pipe. We tested cooling and warming up the cable repeatedly to evaluate the contraction of the cable due to the big decrease of the temperature. After cooling down the HTS cable, we tested the cryogenic circulation system. We found that the LN₂ was able to be circulated with the flow rate of 10 l/min. From the first cooling test, we found the total thermal loss was less than 1000 W mainly from two terminations and the 200 m pipes, which depended on the flow rate and pressure of the LN₂. In our presentation, we will report the cooling process of the facility with this measurement system.

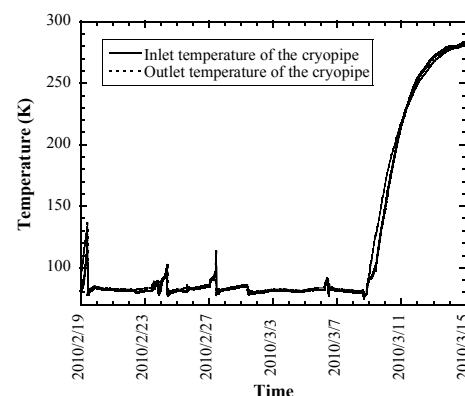


Fig.3 Time Dependence of the Inner Stainless Pipe Temperature for Two Months Cooling and Warming Test.

References

1. S. Yamaguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.57
2. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.10

超伝導直流送電用ケーブル通電による磁場分布と臨界電流

The magnetic field distribution and the critical current
in superconducting DC transmission power cables

渡邊裕文, 山内駿, 杉野慎, 孫建, 浜辺誠, 河原敏男, 山口作太郎 (中部大学)

WATANABE Hirofumi, YAMAUCHI Shun, SUGINO Makoto, SUN Jian, HAMABE Makoto,
KAWAHARA Toshio, and YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

E-mail: h_watanabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

線材をケーブル化する際に、線材間に隙間を空けて巻き付けてもケーブルの電流特性に変化が無ければ、線材を間引くことにより、用いる線材の数を減らすことができる。昨年の発表では、隙間を空けて巻き付けたとしても、線材のエッジにかかる磁場の変化は少ないことを、シミュレーションにより示した[1]。中部大学の 20m 超伝導直流送電実験装置の超伝導直流送電用ケーブルは線材間が絶縁されているために個々の線材に独立に電流を流すことが出来る。ケーブル中の一本の線材のみに電流を流した場合に比べ、その他の線材にも電流を流した場合、臨界電流の増加が見られた[2]。

線材間隔を空けることにより、磁場分布が変化した場合に、ケーブルの電流特性がどのように変化するかを定量的に評価するために、磁場が滑らかに線材外縁を周回する場合と、線材エッジに磁場がかかる場合の線材の電流-電圧特性を測定した。測定結果を検討するために、シミュレーションにより線材周りに発生する磁場の分布を求めた。

2. 方法

三本のテープ線材を平行に並べ、等量の電流を平行に流し、中心の線材に沿って発生する電圧を測定することにより、電流-電圧特性を測定した。線材の間隔が空くことによる磁場の変化の影響を見るために、臨界電流の線材間隔に対する依存性を測定した。

磁場の計算は ANSYS[3]と呼ばれるソフトウェアを用いて行った。対称性から二次元でモデル化し、ベクトルポテンシャル法を用いて行った。

3. 結果

図 1 に一本の線材に 160A の電流を流した場合の磁場分布の計算結果と、図 2 に 0.4mm の間隔を空けた三本の線材に 160A の電流を流した場合の磁場分布の計算結果を例として示す。三本の線材に電流を流した場合に比べ、一本の線材に電流を流した場合は、線材エッジに強い磁場がかかる領域が現れる。

図 3 に電流-電圧特性の一例を示す。三本の線材を 0.4mm の間隔を空けて配置した場合と、一本の線材の場合の結果である。三本の線材に電流を流した場合、一本の線材に電流を流した場合に比べ、臨界電流の増加が見られた。

本講演では、これらの結果に加え、線材の間隔を変化させることにより測定した臨界電流の結果と、線材周りに発生した磁場分布計算の結果により、線材の巻き付け方によるケーブルの臨界電流変化について議論する。

参考文献

1. H. Watanabe et al. Abstracts of CSJ Conference, Vol.81 (2009) p.110
2. M. Hamabe et al. Abstracts of CSJ Conference, Vol.81 (2009) p.23
3. <http://www.ansys.com/>

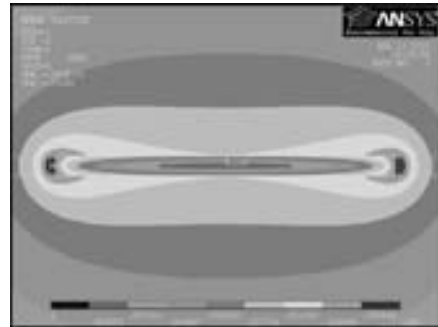


Fig.1 The magnetic field distribution around a HTS tape. The current of 160A is applied to a single HTS tape.

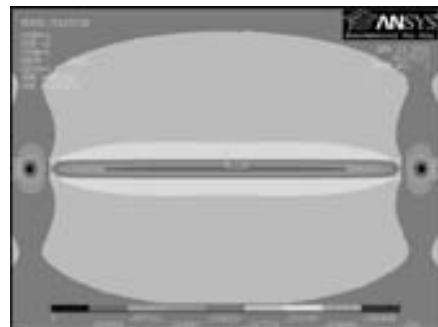


Fig.2 The magnetic field distribution around a HTS tape. The current of 160A is applied to three HTS tapes.

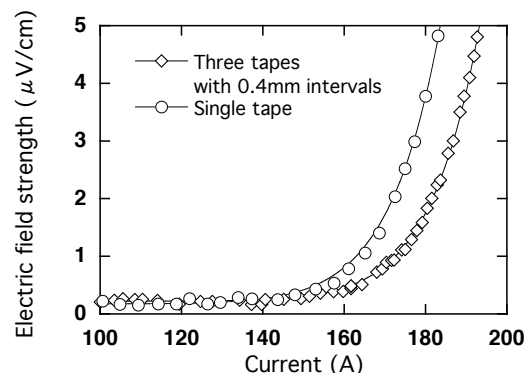


Fig.3 A comparison of I-V characteristics with respect to HTS tape arrangements.

ナノ磁気ビーズを用いた血液中水銀の磁気分離による浄化(その 2)

Research on purification by magnetic separation of mercury in blood using nano magnetic beads

岡本 貴之, 三浦 大介(首都大); 竹内 道広(駒沢腎クリニック)

OKAMOTO Takayuki, MIURA Osuke(TMU); TAKEUCHI Michihiro(KOMAZAWA JIN CLINIC)

E-mail: okamoto-takayuki@ed.tmu.ac.jp

1. はじめに

水銀は環境汚染重金属の中で最も有害と考えられる元素の一つである。これは金の採掘プロセスや石炭火力発電の排ガス等に含まれ、処理方法を誤ると川や海を汚染する。水銀に汚染された魚介類が食物連鎖により濃縮された形で人体に取り込まれる。人体に取り込まれた水銀は、半減期が約 60 日であり、蓄積されやすい。特に魚を多く食べる国では健康被害も報告されており、2010 年 1 月には日本の和歌山でも高濃度の水銀暴露が報告されており、人体から水銀を浄化する研究が必要とされている。

2. 目的

現在の水銀浄化方法である自然排泄やキレート療法はあまり効果的ではない。そこで私たちは人工透析装置のダイヤライザー部分を磁気分離装置に置き換え、磁性を持ち水銀を選択的に吸着する磁気ビーズを用いた磁気分離による水銀浄化方法の研究を行っている。本研究では、開発したナノサイズ磁気ビーズの吸着実験・再利用実験を行った。

3. 磁気ビーズ

開発した磁気ビーズの構造を Fig.1 に示す。強磁性体であるマグネタイトを核とし、直径は約 100nm と非常に小さく活性化に優れ、水銀と特異的に結合しやすい SH 基を固定している。さらに磁気ビーズは熱応答性高分子により温度変化で凝集・分散を繰り返すことができる。磁気分離の際は加熱をして磁気ビーズを凝集させ、体積を大きくして磁気力を高め、安価な永久磁石(0.5T)を用いて磁気分離することが可能である。開発した磁気ビーズは 2 タイプあり、磁気ビーズ Lot02 は Lot01 より SH 基を 2 倍に増加させたものである。

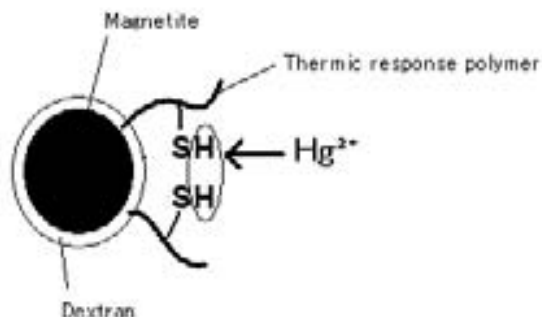


Fig.1 Nano magnetic beads

4. 実験方法

吸着実験では濃度 0.1ppm~50ppm のメチル水銀溶液をそれぞれ用意し、各濃度のメチル水銀溶液 0.4ml に対し、濃度 4mg/ml の磁気ビーズ溶液 0.2ml を加えて攪拌を 15 分、40℃湯煎を 2 分、磁気分離を 5 分を行い、その上澄みを高精度水銀分析装置(MA-1S)で分析して磁気ビーズ 1g 当たりの吸着量を算出した。再利用実験では水銀を吸着している磁気ビーズに DTT(1M)を加えて脱離処理をし、再度メチル水銀溶液を加えて磁気分離を行い、その上澄みを分析して再吸着量を確認した。

5. 結果と検討

Fig.2 に磁気ビーズ Lot01 と Lot02 の 1g 当たりの水銀吸着量を示す。Lot01 はラングミュア型吸着等温線に従い、磁気ビーズ 1g 当たり最大 6.3mg 吸着した。一方、Lot02 ではフロイントリッヒ型で最大 5.4mg 吸着することがわかった。Lot02 による再利用実験の結果を Fig.3 に示す。結果、水銀吸着後の磁気ビーズを脱離処理した後、再度水銀を吸着する事ができた。

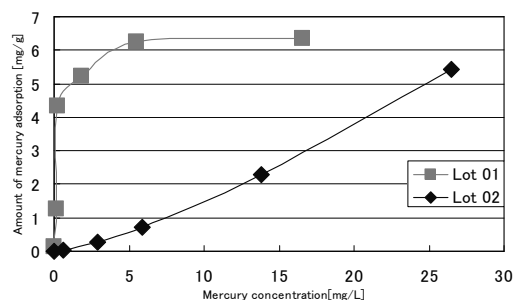


Fig.2 Concentration dependency of amount of mercury adsorption

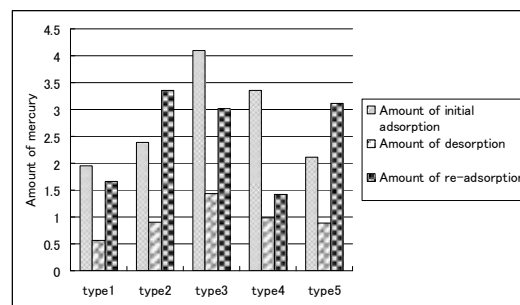


Fig.3 Mercury adsorption and desorption

6. まとめ

水銀を選択的に吸着する磁気ビーズを開発し、水銀吸着特性実験・再利用実験を行った。結果、磁気ビーズ Lot01, Lot02 の水銀吸着実験を行い、水銀を磁気ビーズ 1g 当たり、それぞれ最大で 6.3, 5.4mg 吸着した。また、Lot02 で行った再利用実験では水銀の再吸着を確認する事ができた。

謝辞

水銀の濃度測定をする上で、実験に協力して頂き、さらに研究を進める上で貴重な助言を下された(地方独立行政法人)東京都立産業技術研究センターの中川清子氏に深く感謝いたします。さらに、本研究で開発した磁気ビーズを作製して下さったマグナビート(株)の大西徳幸氏と江口優氏に謝意を表します。

参考文献

1. M. Andac, et al.: International Journal of Biological Macromolecules, **40** (2007). 159-166
2. T. Okamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.208

ジルコニウム・フェライト吸着剤と磁気分離による排水中のリンの浄化回収と再資源化Ⅲ

REMOVAL AND RECYCLING OF PHOSPHATE FROM WASTE WATER WITH ZIRCONIUM FERRITE ADSORBENT BY MAGNETIC SEPARATION III

細見 幸司, 清水 克哉, 三浦 大介(首都大), 代田 吉岳(東京都下水道局)
 HOSOMI Koji, SHIMIZU Katsuya, MIURA Osuke(TMU), YODA Yositake(BSTMG)
 E-mail: miurao@tmu.ac.jp

1. はじめに

近年、リンは枯渇資源として重要性が取り上げられる一方で、リン含有廃水が富栄養化を招き環境破壊の原因物質ともなっている。そうした中で、廃水中からリン資源を回収し再資源化することのできる技術開発が進められている。

本研究では、その有望な技術候補である下水からのリン回収のための磁気分離システムを具体化するに当たり、吸着剤であるジルコニウムフェライト(以下 ZrFe と表記)のリン吸脱着特性、及び磁気分離速度依存性を評価する。

2. 実験方法

2.1 リン吸着実験

ジルコニウムフェライト粉末吸着剤を用いた、リン吸着実験を行った。ZrFe をリン含有水 100mL に添加しリンを攪拌吸着した。試料には、リン濃度 0.92mg/L の中和したリン酸カリウム溶液とリン濃度 1.12mg/L の塩素処理前の実際の下水処理水を用いた。吸着剤投入量と吸着時間を変化させ、実用化に向けてリン除去率の最適化を行った。pH 調整溶液には、1M 水酸化ナトリウム(以下 NaOH)溶液を用いた。また、磁気分離前及び後の溶液のリン濃度はモリブデンブルー法を用い、分光光度計にて測定した。

2.2 磁気分離速度実験

磁気分離速度実験は、占有率 12.3%、100 μ m 磁性細線フィルタを詰めた全長 600mm 直径 7mm のキャニスタを用いた。ZrFe100mg/L を蒸留水 1L に添加攪拌し、高勾配磁気分離を行った。磁場と流速を変化させ、各磁場及び流速での吸着剤の漏洩を分光光度計により吸光度で評価した。

2.3 リン脱離実験

リンを吸着した ZrFe からリンを脱離し再生させるためリン脱離実験を行った。ZrFe100mg/L をリン濃度 1mg/L のリン酸カリウム溶液に添加し、リンを吸着させるために 60 分攪拌した。保留粒子径 3 μ m のろ紙で分離した吸着剤は、リンを脱離するために 60 分 NaOH 溶液に浸し攪拌した。水酸化ナトリウム溶液の濃度を変化させ、脱離効率の良い最適なアルカリ剤濃度を調べた。脱離させた溶液のリン濃度は実験 2.1 と同様、分光光度計にて測定した。

3. 結果と考察

図 2-1 にリン除去率の吸着時間依存性を示す。すべての検体において、吸着時間が長くなるにつれて除去率は単調増加した。吸着剤 500mg/L、吸着時間 15 分で最大の除去率 99.1%を達成した。リン濃度で 1.12mg/L から 0.01mg/L へ除去できた。リン吸着量は 5 分程度で飽和傾向を示し、吸着剤 500mg/L、吸着時間 1 分でも除去率 78.6%に達した。下水処理場に適応する際は敷地面積を抑えるための短い吸着時間が適するので、この条件が最適であると思われる。

図 2-2 に吸着剤漏洩量の磁場依存性を示す。磁気フィルタからの吸着剤の漏洩は、測定誤差を考慮すると分光光度計では 1T まで検出されなかった。この結果は ZrFe を用いた磁気分離が実用化に必要な流速 1m/sec、磁場 1T で利用できることを示した。

図 2-3 にリン回収率のアルカリ剤濃度依存性を示す。アルカリ剤濃度を濃くすると回収率が単調増加した。アルカリ剤濃度 10%で、最大の回収率 73.8%を達成した。回収率は、5%NaOH 溶液から飽和傾向を示した。

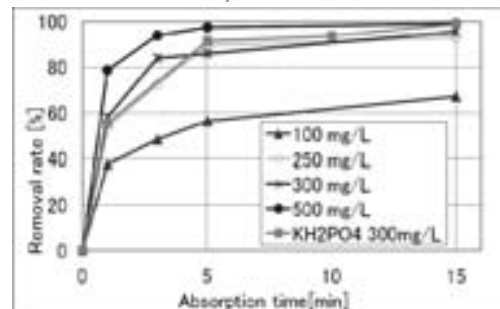


Fig.2-1 Adsorption time dependence of phosphorus removal rate.

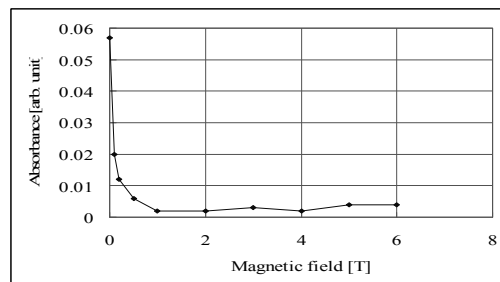


Fig.2-2 Magnetic field dependence of adsorbent leakage quantity.

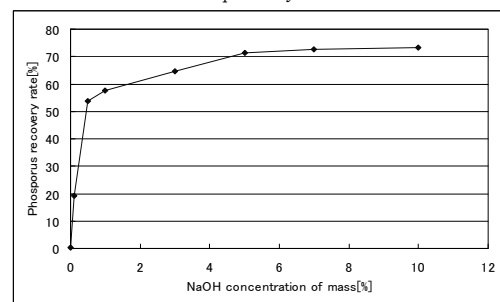


Fig.2-3 Alkali concentration dependence of phosphorus recovery rate.

4. 結論

ZrFe 吸着剤が再生利用可能なことを実験的に示した。したがって 二次廃棄物なしに下水処理水からリンの再生が可能なのがわかった。以上の研究結果を基に、下水処理場への高勾配磁気分離システムの導入を検討した結果、本システムの導入可能性が示された。

参考文献

Ishiwata et al. ISS2009 "Removal and recovery of phosphorus in wastewater by superconducting high gradient magnetic separation with ferromagnetic adsorbent" to be appeared Physica C.

高勾配磁気分離における磁気フィルターへの磁性微粒子の吸着現象のモンテカルロシミュレーション

Monte Carlo Simulation of Particle Capture on Magnetic Filter in High Gradient Magnetic Separation

菊地孝治, 八柳智也, 福井 聡, 小川 純, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, 今泉 洋 (新潟大学)
 KIKUCHI Koji, YATSUYANAGI Tomoya, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, OKA Tetsuo, SATO Takao,
 IMAIZUMI Hiroshi (Niigata University)
 E-mail : fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

実用的な磁気分離装置の磁気フィルターの設計を行なうことを考えた場合、捕獲すべき対象粒子の磁性や粒子径、単位時間当たりの必要処理量にあわせて、フィルターの磁性細線の寸法・充填率、磁性細線への付着飽和など設計或いは評価すべきファクターは多数あり、これらを系統的に扱える理論的な枠組みは未だ十分に確立されてはいない。我々は、磁気フィルターを構成する磁性線周囲の粒子付着・凝集現象を解析するモデルの開発を第一目標として研究を行っている。これが確立できれば、その発展形として、フィルター性能の経時変化を論じることが可能と考えられる。本稿では、均一磁場中に1本或いは複数本磁性細線を配置し、その周囲への磁性粒子の集積現象を、流れ場による影響を考慮したメトロポリス・モンテカルロ法によるモデル化について報告する。また、本稿の解析結果では非並行に設置された複数本の磁性細線の場合についてのみ掲載する。

2. モデル

本研究では、均一な強磁場中に置かれた1本の磁性曲線に、磁性微粒子が分散した液体を一定速度で流し、このときの磁性細線周囲への磁性粒子の集積現象をメトロポリス法によるモンテカルロシミュレーションを用いて行う。解析のアルゴリズムを以下にまとめる。

1. 解析領域内に粒子を初期配置させる。
2. 全粒子系のポテンシャルエネルギー U を以下の式で計算する。

$$U = U_M + U_F$$

$$U_M = \sum_{i=1}^N \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot (\mathbf{m}_{ip} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_i^e) + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot (\mathbf{m}_{if} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_i^e) \right) + \sum_{j=1}^N \sum_{i \neq j}^N \left(-\frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot (\mathbf{m}_{ip} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_{ij}^m) + \frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot (\mathbf{m}_{if} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_{ij}^m) \right)$$

$$\mathbf{m}_{ip} = \begin{cases} \frac{3\chi_p}{3 + \chi_p} \mathbf{H}_i^e & (|\mathbf{m}_{ip}| < m_{ps}) \\ m_{ps} \frac{\mathbf{H}_i^e}{|\mathbf{H}_i^e|} & (|\mathbf{m}_{ip}| \geq m_{ps}) \end{cases} \quad \mathbf{m}_{if} = \frac{3\chi_f}{3 + \chi_f} \mathbf{H}_i^e$$

$$\mathbf{H}_{ij}^m = -\text{grad} \left(\frac{1}{4\pi} \frac{\mathbf{m}_{jp} \cdot \mathbf{r}_{ji}}{|\mathbf{r}_{ji}|^3} \right) = \frac{1}{4\pi} \left(-\frac{\mathbf{m}_{jp}}{|\mathbf{r}_{ji}|^3} + \frac{3(\mathbf{m}_{jp} \cdot \mathbf{r}_{ji}) \mathbf{r}_{ji}}{|\mathbf{r}_{ji}|^5} \right)$$

$$U_F = \sum_{j=1}^N - \int 6\pi\eta r_p \cdot \mathbf{v}_{ji} \cdot d\mathbf{l}$$

$$\mathbf{v}_{ji} = (v_0 \frac{a^2}{r_{0i}^2} \sin 2\theta, v_0 (1 - \frac{a^2}{r_{0i}^2} \cos 2\theta))$$

ここで、 r_p は粒子半径、 χ_p は磁性粒子の磁化率、 χ_f は分散媒の磁化率、 \mathbf{m}_{ip} は粒子 i の磁化、 \mathbf{m}_{if} は粒子 i と同位置・同体積の分散媒の磁化、 m_{ps} は粒子 i の飽和磁化の大きさ、 \mathbf{H}_i^e は粒子 i の位置での外部磁場、 \mathbf{H}_{ij}^m は粒子 j の磁化 \mathbf{m}_{jp} が粒子 i の位置に作るの磁場、 \mathbf{r}_{ji} は粒子 j と粒子 i の中心間を結ぶ位置ベクトル、 v_0

は磁性線から十分離れた位置での一様流の流速、 a は磁性線の半径、 r_{0i} は磁性線中心から粒子までの距離である。

3. 粒子を1つ選び、粒子位置を乱数を用いてランダムに変位させる。
4. ポテンシャルエネルギーを再度計算しその変化 δU が負なら、これを新しい粒子状態としてステップ3から繰り返す。もし、 $\delta U > 0$ ならば、乱数列から更に c_{ran} を取り出し、 $\exp(-\delta U/kT) > c_{ran}$ の場合、粒子の移動後の状態をマルコフ連鎖の推移後の状態とみなして、ステップ3から繰り返す。 $\exp(-\delta U/kT) \leq c_{ran}$ の場合、粒子の移動する前の状態でステップ3から繰り返す。
5. 2~4の操作を系が平衡状態になるまで反復する。

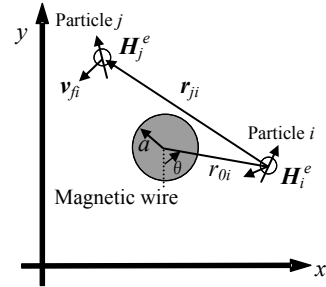


Fig.1 Analytical model of potential energy

3. 解析結果

まず解析領域内の磁場分布を FEM 解析する。初期状態として磁性粒子を磁性線の上部に100個配置し、1500MCステップ経過ごとに新たに粒子を追加していく。本研究では、磁性細線周囲の磁場勾配の大きい範囲に磁性粒子が集積しつつ、流れ場の影響により磁性細線下部へ粒子が移動していく様子が解析結果に表われている。種々の条件下で、このような結果を蓄積することにより、フィルターの捕獲率を求めることが可能になると考えられる。

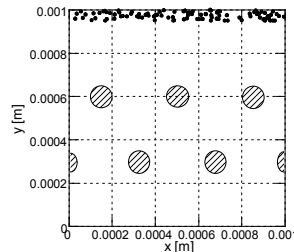


Fig. 2 MC = 0 step

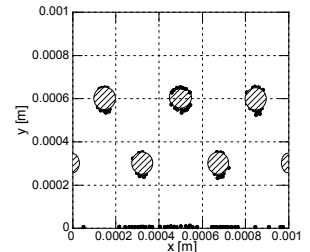


Fig. 3 MC = 1500 step

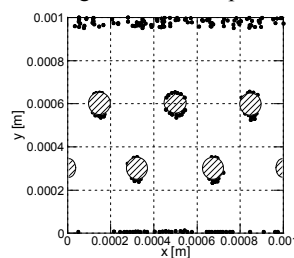


Fig. 4 Addition of particles

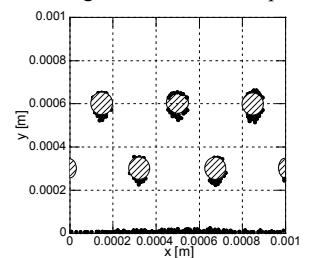


Fig. 5 MC = 3000 step

磁性メソポーラスカーボンを用いた難分解性溶存有機物の 高勾配磁気分離除去(その2)

High gradient magnetic separation of dissolved organic matters by magnetic mesoporus activated carbon (II)

三浦 大介, 近藤 慶(首都大学東京 理工学研究科)

MIURA Osuke, KONDO Kei (Tokyo Metropolitan University)
E-mail: miurao@tmu.ac.jp

1. はじめに

河川に含まれる難分解性有機物であるフミン質は浄水処理過程における塩素消毒により発がん性物質であるトリハロメタンを生成する。我々は再生可能な吸着剤としてメソ孔 (20~50 nm) を有し、高速で磁気分離可能な担磁した磁性メソポーラスカーボン (MMPC) の開発を進めている。今回は硝酸鉄の濃度や含浸条件、CO₂ 賦活時間を変化させたMMPCを作製し、その磁性や細孔分布の変化が吸着特性に与える影響を調べた。また再生条件や高勾配磁気分離システムの検討を行った。

2. 実験方法

硝酸鉄水溶液を含浸した市販の粒状活性炭を多段のガス賦活処理によりメソポアを有する磁性メソポーラスカーボンを作製した。これを粉砕し平均粒径 7.83 μm の粉末状 MMPC とした。磁化測定は SQUID で行い、TEM、SEM 観察、窒素吸着法による BJH 細孔分布及び BET 比表面積の測定、吸光度測定によるフミン酸吸着特性、及び 100 μm の磁性細線フィルターを用いた超伝導マグネットによる高勾配磁気分離実験を実施した。

3. 実験結果と結論

担磁された物質はマグネタイトであり、図1に見られるように粒径 1 μm 程度まではほぼ均一に分散していることがわかった。飽和質量磁化は硝酸鉄水溶液の濃度と含浸時間に比例して増加し、濃度 1.6 mol/L、含浸時間 3 時間の条件のもとで 30.7 emu/g に達した。硝酸鉄含浸条件、賦活条件により細孔分布が変化し、また市販の活性炭に比べ、フミン酸の吸着性能は大幅に向上した。フミン酸吸着能は細孔分布に依存し、15nm 程度の細孔が吸着能を大きく支配することが判明した。吸着後の磁性活性炭を N₂ 雰囲気中で再度熱処理することで 93.1% の吸着能が回復したが、同時に質量欠損が確認された。さらに 100 μm の磁性線フィルタを装填した磁場 0.5 T、流速 1 m/s の条件下では 20 emu/g 程度の磁化を持った MMPC であれば十分に高勾配磁気分離に可能であることが判った。

[参考文献]

1. S. Shiraishi, O. Miura et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 72 (2005) p.110.
2. I. Ihara, O. Miura et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.113.
3. O. Miura et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.171.
4. K. Kondo, T. Jin, O. Miura "Removal of less biodegradable dissolved organic matters in water by superconducting magnetic separation with magnetic mesoporus carbon" ISS 2009, to be appeared *Physica C*.

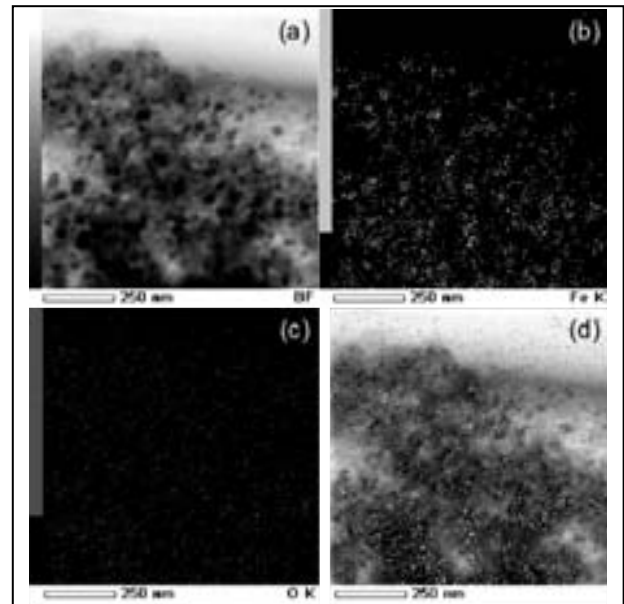
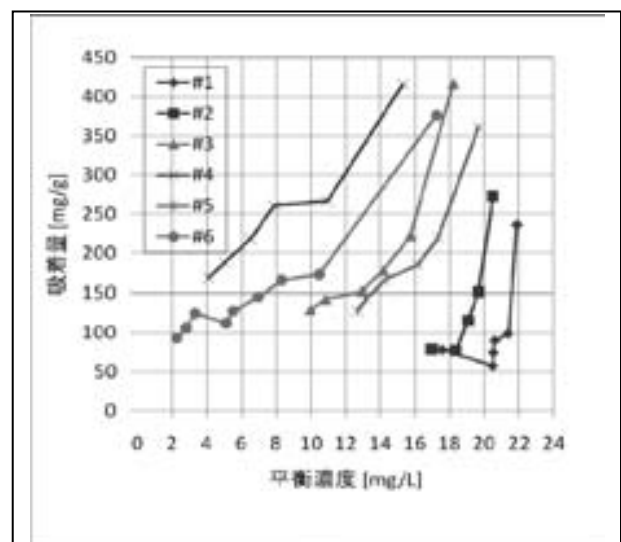


Fig. 1 TEM image and EDX mapping for typical MMPC.



	#1	#2	#3	#4	#5	#6
CO ₂ 熱処理 [min.]	なし	10	30	60	75	90

Fig. 2 Amount of adsorption of Humic acid for various MMPC.

酪農廃水から有機物・窒素・リンを除去するための磁化活性汚泥法を組み込んだプロセスの検討

Research on Purification Process Including Magnetic Activated Sludge Process for Organic Compounds, Nitrogen and Phosphate Removal from Dairy Wastewater

川上 芙美香, 酒井 保藏, 堀井 克浩, 岩渕 和則, 柏寄 勝(宇都宮大)

KAWAKAMI Fumika, SAKAI Yasuzo, HORII Katsuhiko, IWABUCHI Kazunori, KASHIWAZAKI Masaru (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

本研究は磁気分離できる水処理微生物を用いる磁化活性汚泥法と凝集法を組み合わせることで、有機物、窒素、リン、SS の濃度が高い酪農・畜産廃水の処理に適した新しい水処理プロセスを提案した。このプロセスでは、SS、リンを凝集除去し、窒素をアンモニアストリッピング法で除去し、有機物を磁化活性汚泥法で酸化分解することができた。維持管理も容易で、安定した浄化処理をおこなうことができた。

磁化活性汚泥法とは、活性汚泥に磁性粉(Fe_3O_4)を磁気シーディングし、磁気分離を適用した生物学的水処理法である。固液分離が簡単になるだけでなく、多様な微生物を磁気力で反応槽に保持し、難分解性有機物を分解したり、アンモニアを硝酸に酸化したりできる。

酪農・畜産廃水は、有機物、窒素、リン、SS の濃度が高く、活性汚泥法だけでは、排出基準を満たすことは困難である。

本研究では、酪農・畜産廃水処理のための維持管理が簡単で、安定した浄化処理をおこなえる新しい水処理法を提案することを目的として、磁化活性汚泥法単独、磁化活性汚泥法と凝集剤を組み合わせたプロセスなどについて、実廃水を用いて検討したので報告する。

2. 実験方法

酪農・畜産廃水は宇都宮大学附属農場の畜舎廃水を用い、磁化活性汚泥法には、槽容量 5L のベンチスケールの実験装置を用いた。実験は、(1)磁化活性汚泥法単独、(2)磁化活性汚泥法+凝集、(3)磁化活性汚泥法+凝集+アンモニアストリッピングと 3 つのプロセスでおこなった。

従来の活性汚泥法の処理フローを Fig.1 a), また実験 (1)-(3)の処理フローをそれぞれ Fig.1 b), c), d)に示す。

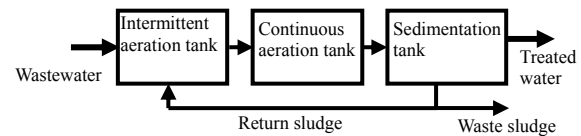
3. 結果と考察

(1) 磁化活性汚泥法単独 [Fig.1 b)]

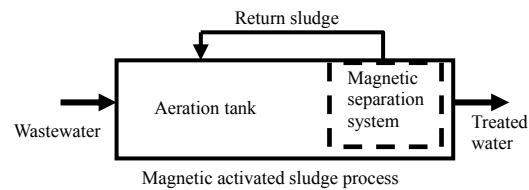
磁化活性汚泥(磁気シーディングされた微生物)は処理水から磁気分離により確実に分離された。しかしながら、リン、SS、有機物は排出基準に達しなかった。原因は、廃水中の SS が磁性粉を吸着しにくく、生分解も受けにくいので、処理水中に漏出したこと、及び SS には有機物が含まれているためと考えられる。

(2) 磁化活性汚泥法+凝集 [Fig.1 c)]

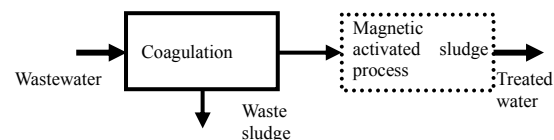
(1)の結果より、前処理として SS を予め取り除くために、塩化鉄を用いた凝集処理をおこない、次いで磁化活性汚泥法で有機物と窒素を除去することとした。その結果、リンはリン酸鉄として、SS はフロックを形成して凝集処理で除去できた。しかしながら、一部の有機物も除去されてしまったため、窒素を除去するための有機物が足りなくなり、窒素除去率が低下した。しかし、有機物が取り除かれたことで、高速処理が可能となった。



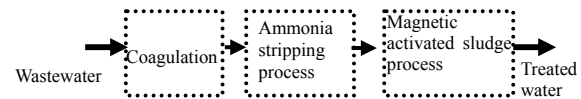
a) Flow of activated sludge process (present method)



b) Magnetic activated sludge process



c) Coagulation and magnetic activated sludge process



d) Coagulation, ammonia stripping and magnetic activated sludge process

Fig.1 Process flows of dairy wastewater

(3) 磁化活性汚泥法+凝集+アンモニアストリッピング [Fig.1 d)]

(2)の結果より、別の凝集剤を用いた。これにより、リンと SS は除去できた。アルカリ条件で、アンモニウムイオンをアンモニアガスとして放散させるアンモニアストリッピング法により、窒素の大部分を除去できた。この後に磁化活性汚泥法を取り入れたことで、残留していた窒素の除去や有機物を酸化分解することができた。

4. おわりに

凝集法とアンモニアストリッピング法を磁化活性汚泥法と組み合わせることで、安定した浄化処理ができた。維持管理も容易で、磁化活性汚泥法からの汚泥の発生はない。また、高速処理も可能である。ベンチスケールで酪農・畜産廃水の処理が可能となることも示唆された。今後も更なる改善を目指して検討中である。

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究(A)21241020 の支援を受けた。

鉛蓄冷材を使用しない 4K Gifford-McMahon 冷凍機の検討

Investigation of a 4 K Gifford-McMahon cryocooler without the lead regenerator material

福田 祐介, 田村 昂大, 増山 新二(大島商船高専); 沼澤 健則(NIMS)

FUKUDA Yusuke, TAMURA Kota, MASUYAMA Shinji(Oshima National College); NUMAZAWA Takenori(NIMS)

E-mail: d910@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

4K GM冷凍機の冷凍能力の向上を目的として, 2 段階蓄冷材にPb, HoCu₂, Gd₂O₂S(GOS)を充填して冷凍性能評価を行ってきた[1,2,3]。

しかし, 蓄冷材として使用している鉛は環境や人体への影響が懸念されている。欧州連合加盟国では, RoHS (Restriction of Hazardous Substances)指令により電気電子機器に含まれる鉛の量を指定の数値以下にする必要がある。現状では超電導機器や冷凍機などは直接的に規制を受けてはいない。しかし, 規制が拡大すると蓄冷材に鉛を使用している GM 冷凍機も対象となる可能性は高い。

そこで本研究では, 2 段階蓄冷材にSUSメッシュ, HoCu₂, GOSを準備し, 鉛蓄冷材を使用しない低コスト 4K GM 冷凍機の検討をしている。

2. 実験装置

本研究で使用した 2 段階 GM 冷凍機は, SHI 製で 0.1W@4.2K の仕様となっている。この冷凍機は, 100V 単相電源で動作する空冷コンプレッサ(消費電力 1.3kW@60Hz)を使用しているため, 実験・計測が手軽に行なえる冷凍機の一つである。実験では, 冷凍機を上下反対(コールドヘッドが上向き)で使用している。

3. 実験方法

Fig.1 に 2 段階蓄冷材の概略図を示す。長さ 100mm, 内径 15mmの円筒空間内に蓄冷材を充填させる。今回は, 高温端からSUSメッシュ(#200), HoCu₂球(直径 0.2mm), GOS球(直径 0.25mm)の順番に充填し, それらの割合を変化させながら性能試験を行った。また, SUSの部分に蓄冷材を使用せず, 空間(Emp)状態でも実験を行った。

4. 実験結果

Fig.2 は各蓄冷材での 2 段階ステージの冷凍能力を示す。磁性蓄冷材を使用することで, 到達温度はほぼ等しい値で約 3.2K が得られた。また, 2 段階ステージに取り付けた電気ヒータにより冷凍能力を測定したところ, GOS を低温側に充填している状態では 7K 以上の温度領域で冷凍能力に違いが現れた。

Fig.3 は, 4.2Kにおける冷凍能力の実験結果を示す。No.3 と 5, No.4 と 6 高温端から 20%にSUSを使用するより, 空間状態であるほうが高い冷凍能力を示した。また, No.6 の Emp:HoCu₂:GOS=20:55:25 の時, 最もよい冷凍能力となり, その値は 0.18Wが得られた。このことから, HoCu₂100% (No.1)と比較して約 20%冷凍能力が向上した。

5. まとめ

鉛蓄冷材を使用しない低コスト 4K GM冷凍機を検討し実験を行った。高温端にSUSを使用して実験を行った結果, 冷凍能力がHoCu₂100%と比較して低下したが, 4.2K で 0.1Wを上回っている結果が得られた。

また, 高温端から 20%を空間状態でHoCu₂とGOSを充填することにより, 本研究の目的である 4.2Kでの冷凍能力は, 約 20%向上した。

参考文献

1. T.Imazu, Y.Fukuda, S.Masuyama, T.Numazawa: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) P.79
2. Y.Fukuda, T.Imazu, S.Masuyama, T.Numazawa: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) P.74
3. S.Masuyama, Y.Fukuda, et al.: Abstracts of ACASC 2009, p.78

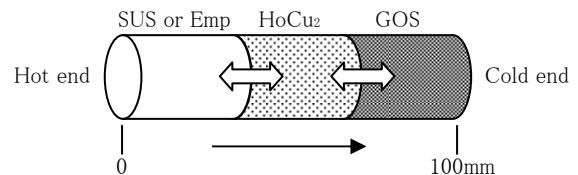


Fig.1 A schematic of three-layer regenerator materials

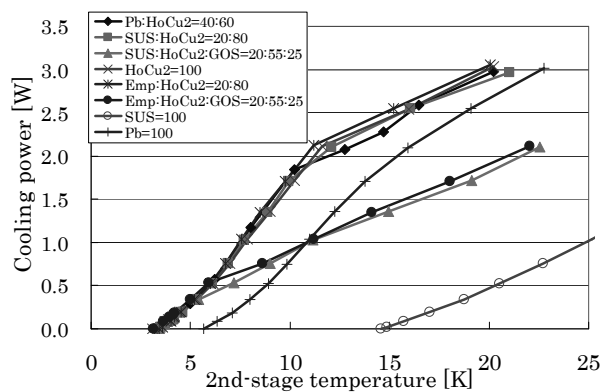


Fig.2 Cooling power of the 2nd-stage altering regenerator materials

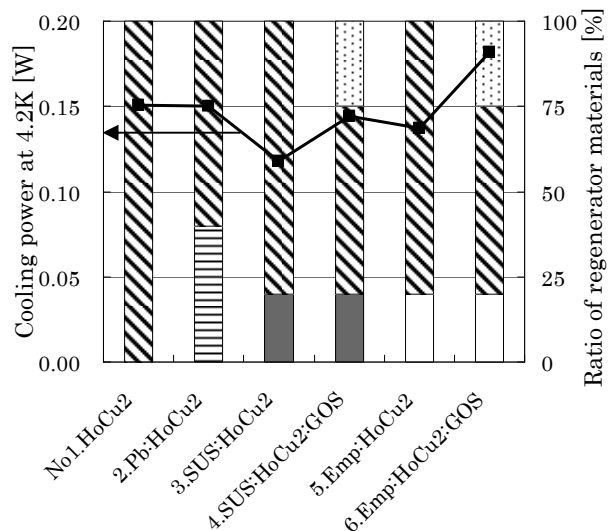


Fig.3 Cooling power at 4.2K and ratio of regenerator materials of the 2nd-stage

高温超電導機器冷却用パルス管冷凍機の開発

Development of Pulse Tube Refrigerator for HTS Instruments Cooling

池田和也, 長嶋 賢, 水野克俊(鉄道総研); 平井靖夫, 三条大輔, 岩本慎平 (エア・ウォーター)

IKEDA Kazuya, NAGASHIMA Ken, MIZUNO Katsutoshi(RTRI);

HIRAI Yasuo, SANJO Daisuke, IWAMOTO Shinpei(AWI)

E-mail: k-ikeda@rtri.or.jp

1. はじめに

伝導冷却する場合、冷却点が多くあった方が有利であることから、圧縮機、位相制御を共通化した複数のパルス管冷凍機により、超電導機器を冷却する方式を検討している。

200W@80K級の商用パルス管冷凍機をベース機として、50K で最適化した冷凍機を製作し、蓄冷器構成材を変更させることにより単段にて 20K を目指した。

4 この 50K 冷凍機により、1 台の圧縮機、1 組のアクティブバッファタンク、ガス切替バルブユニットに対して、冷凍機 2 台を並列に接続し、単体運転時と同様の圧縮機定格消費電力で運転した場合の冷凍能力を比較した。

2. 実験装置

Fig.1 に冷却試験装置の機器構成フローと冷却試験装置実機の外観を示す。冷凍機 2 台に対して、高低圧アクティブバッファタンクと圧縮機が、ガス切替バルブを介して接続されている。ガス圧力位相制御用の切替バルブは空圧バルブを採用し、単体運転切替、予冷時の流量アンバランスを調整するために、それぞれのラインに手動バルブを取り付けた。アクティブバッファ容量はそれぞれ 10L とし、圧縮機は SHI 製 CSA-71A を使用した。

3. 実験結果

50K 冷凍機単体運転時の冷凍能力、COP を Fig2 に、並列運転時の同結果を Fig.3 に示す。さらに 20K を目指した単体運転時の同結果を Fig.4 に示す。なお蓄冷材構成は、50K 冷凍機がステンレス製の#300(100 枚)、#200(1410 枚)の組合せとし、20K 冷凍機は 50K 冷凍機の蓄冷器冷端側に、少量の 0.3~0.4mm 径の鉛粒を充填した。

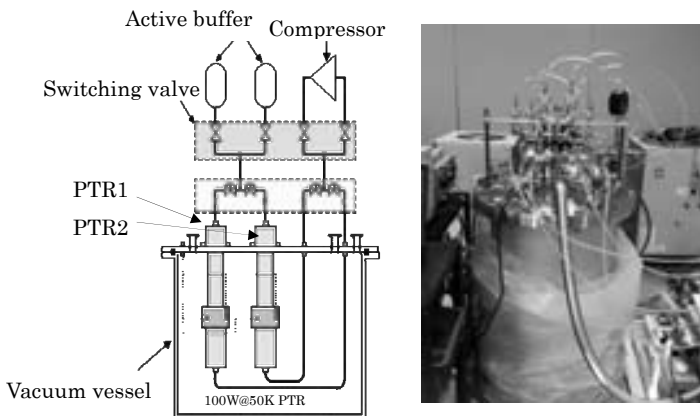


Fig.1 Instrument composition of cooling test equipment and appearance of the system

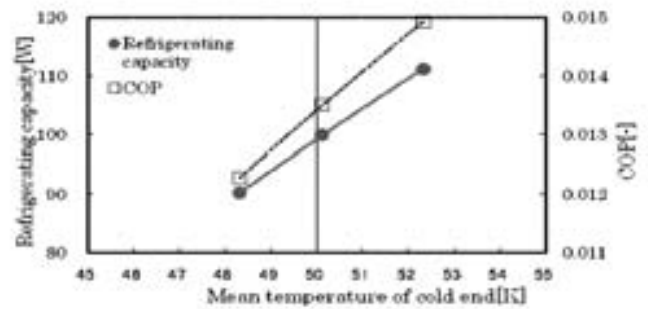


Fig.2 Refrigerating capacity and COP (single run)

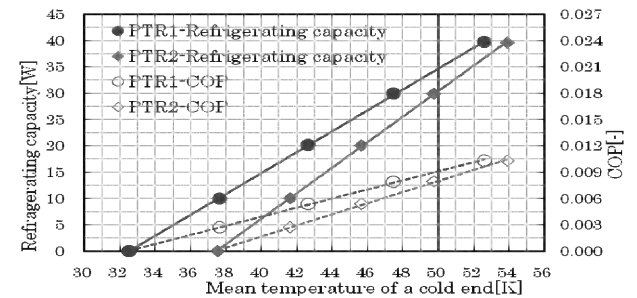


Fig.3 Refrigerating capacity and COP (parallel run)

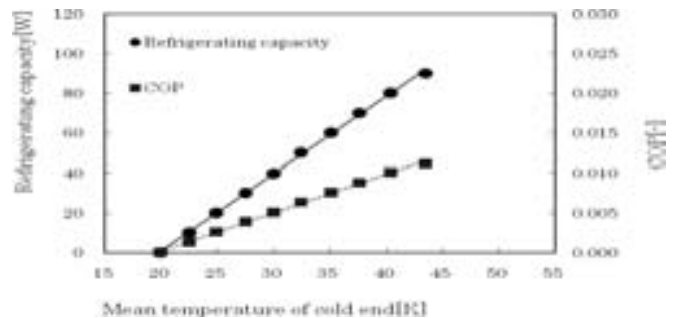


Fig.4 Refrigerating capacity and COP (lead contain)

4. まとめ

2 台並列運転時の冷凍能力合算値が、圧縮機消費電力が同じにもかかわらず、単体運転時の 99W に対して 65W となった。原因としては最適なガス切替周波数が 1.6Hz (単体)、1Hz (並列) と異なること、また並列運転では、蓄冷器入口の圧力振幅が小さくなり絶対値も変化していることが考えられる。今後ガス切替の位相を変えるなどして、並列運転時における合算冷凍能力低下の解消を目指す。また単段冷凍機の到達温度と COP 向上の可能性を見きわめるため、蓄冷材の構成を検討していく予定である。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

ハルバツハ配列を用いた室温磁気冷凍機用磁気回路の設計と製作

Design and Fabrication of Halbach-array Magnetic Circuit for Room-temperature Magnetic Refrigerator

脇 耕一郎, 荒井 有気, 水野 克俊, 長嶋 賢(鉄道総研); 伊藤 孝治(蔵王精機);
秋山 慎一(マグネオ技研); 池田 雅史, 村上 雅人(芝浦工大)

WAKI Koichiro, ARAI Yuuki, MIZUNO Katsutoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI); ITO Koji (ZAOUSEIKI);
AKIYAMA Shin-ichi (MAGUNEOGIKEN); IKEDA Masashi, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology)
E-mail: waki@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道車両の冷房機の COP(Coefficient of Performance: 成績係数)は, 車両に搭載する際の制約条件のために, 家庭用のそれに比べて低いものになっている。車両の運用に関わる省エネルギーを図るため, 現行の気体冷凍に代わる冷房技術として, 室温磁気冷凍の研究を進めている。

磁気冷凍は, 磁気熱量効果(ある種の強磁性体である磁気作業物質の励磁・消磁に伴う発熱・吸熱の作用)を応用するものである。室温領域の磁気冷凍には, AMR(Active Magnetic Regenerator: 能動型磁気熱量再生器)を用いた冷凍サイクルが採用されている[1]。

磁気作業物質に対して強い磁場を効率的に作用させる設計を行い, 円環状ハルバツハ配列の磁気回路の対と, その回転による励消磁という方式を採用した。そして, 円環状ハルバツハ配列の磁気回路などを製作したので報告する。

2. 設計方針と製作

超電導磁石は強い磁場を発生することができるが, 低温冷凍機が必要であり, また, 常電導磁石は磁場を発生させるために流す電流のジュール発熱が大きく, これらは室温磁気冷凍機に用いる磁石として適当でない。

永久磁石は発生する磁場に磁気特性上の限界があるが, 縦や横に磁化した磁石の組合せであるハルバツハ配列にすると, 磁束が集中して局所的に強い磁場を発生することができる。更に, ハルバツハ配列を円環状にすると, 端部からの磁束の漏れを抑えることができる。そして, この局所的に強い磁場が移動すれば, 磁気作業物質に対して励消磁を行うことができる。そこで, この励消磁が効率的なものとなるように, 円環状ハルバツハ配列の磁気回路を回転させることにした(Fig.1 参照)。

円環状ハルバツハ配列を, 半径方向に磁化した磁石と周方向に磁化した磁石の組合せとすると, 磁場の強い空間は円環の穴部にあり, その空間の体積は円環の内径で決まってしまう。また, その空間の磁場は半径方向になるので, 励消磁は軸方向への円環の往復によらざるを得ない。

しかしながら, Fig.2 の左に示すように, 円環状ハルバツハ配列を, 軸方向に磁化した磁石と周方向に磁化した磁石の組合せとし, 更に, 磁場が強め合うように二つの円環を対にすると, (磁気作業物質の充填槽が配置できるような)磁場の強い空間を, 対に挟まれた領域に広く形成することができる(Fig.2 の右

参照)。また, その空間の磁場は軸方向になるので, 円環の回転によって励消磁することができる。そこで, 磁気作業物質の充填槽を配置して回転に伴うトルクを受けた時でも, この磁場の強い空間が確実なものとなるように, このような円環二つを対にする際に共通軸へ嵌合することにした。加えて, 磁気作業物質の充填槽は, 回転に伴うトルクの変動を抑えるため, 可能な限り多数へ分割することにした。

以上に基づき, 円環状ハルバツハ配列の磁気回路や磁気作業物質の充填槽を製作して組み立てたところ, 同充填槽の外部表面における最大磁束密度は 1 T 程度となった。

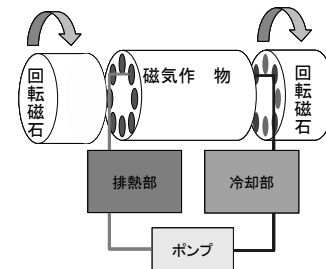


Fig.1 Schematic illustration of room-temperature magnetic refrigerator with rotating Halbach-array magnetic circuit rings

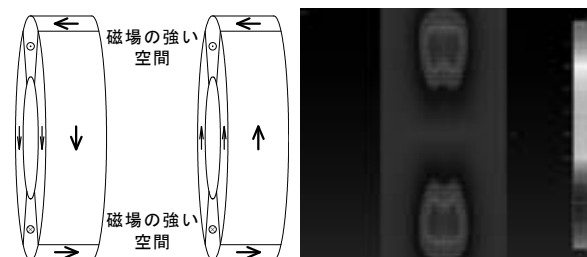


Fig.2 A pair of Halbach-array magnetic circuit rings composed of axially-directed magnets and roundly-directed magnets, and calculated distribution of flux density at the middle of the pair

3. 今後について

回転駆動機構や冷媒循環機構を追加製作し, 試験機として完成させた後, 室温磁気冷凍試験を実施する予定である。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. M. Saimaru, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.211

超電導ケーブル用冷却システムの構築

Construction of cryogenic cooling system for superconducting cable

池内 正充, 大野 隆介, 仲村 直子, 矢口広晴, 町田明登(前川); 渡部充彦, 増田孝人(住友電工); 野口裕, 鬼頭豊, 三村智男, 本庄昇一(東京電力)

IKEUCHI Masamitsu, ONO Ryusuke, NAKAMURA Naoko, YAGUCHI Hiroharu, MACHIDA Akito (Mayekawa); WATANABE Michihiko, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries); NOGUCHI Yu, KITO Yutaka, MIMURA Tomoo, HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company)

E-mail: masamitsu-ikeuchi@mayekawa.co.jp

1. はじめに

2007年度より新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受け、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」を実施中である。本プロジェクトでは高温超電導ケーブル(以下ケーブル)を東京電力・旭変電所内の66kV級電力系統に接続し1年にわたる実証運転を行う予定である。実系統に接続することから、冷却システムは電力負荷変動に対応した運転を行うと同時に、電力機器として高い信頼性が求められる。

昨年は本プロジェクトの研究概要を報告したが[1], 今回は冷却システムの構成や運転制御方法につき報告する。

2. 実証試験用冷却システムの構成

冷却システムは信頼性や圧力損失低減などを考慮しFig.1に示すように、冷却負荷に対応する6台の冷凍機(予備機1台を含む)を、3並列構成で配置した。液体窒素循環ポンプは冗長系を含めた2台構成である。リザーバタンクはケーブルと冷凍機を含めた10,000ℓ近い液体窒素の膨張・収縮を吸収する容積を有し、循環ポンプの吸入側に設置する。

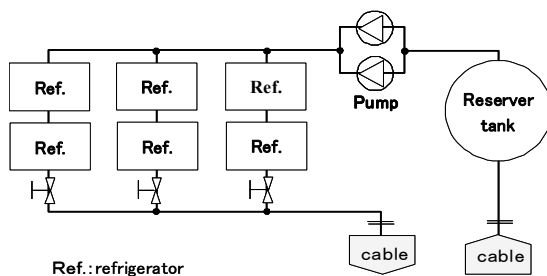


Fig.1 Flow diagram of cooling system

3. 冷却システムの運転

冷却システムの特徴として定常運転中は無人運転を実施することである。このため信頼性の高い運転を目指し、システム構成と運転方法につき検討を行った。

6台の冷凍機は、3並列の運転上の優先順位を決め、その優先順位を一定運転時間ごとに切り替えることにしている。具体的には、各列の役割を主列、副列、予備列とし、基本的に主列の冷凍機は常時運転、副列の冷凍機は熱負荷の変動に併せて発停させ、予備列は待機とする。列内では運転時間の短い冷凍機の運転優先順位を高くし、ケーブル熱負荷に併せて発停運転を行うことで各冷凍機の運転時間の平準化を図っている。冷却水は信頼性を考慮し、密閉式冷却水システムを冷凍機の各列に設置した。循環ポンプは回転数を固定し、一定時間ごとに2台を切り替えて運転を行う。

4. 冷却システムの制御

ケーブルを安定して冷却するため、冷却システムでは液体窒素の温度、圧力を制御する。

窒素温度はケーブル供給温度が一定範囲に収まる様に冷凍機を発停することで制御する。例えば、温度が目標範囲

を超えれば冷凍機を1台発停、さらに温度の上、下降が続くか、あるいは一定時間以上の目標値からの逸脱があれば優先順にさらに冷凍機を発停する。Fig.2にその検討例を示す。

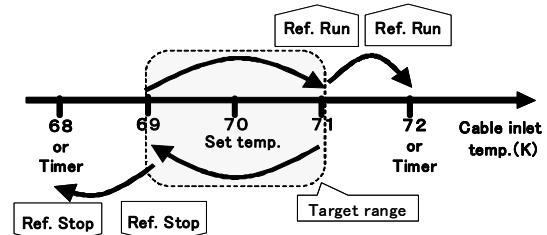


Fig.2 Temperature control

圧力は、系内で最低となるリザーバタンク内圧力を一定範囲内に保つことでケーブル内での気泡の発生や安全弁作動を防止する。そのため同タンク内の液体窒素の一部を外気温で蒸発させ加圧源として用いる自然加圧方式、タンク内のヒータで内圧を調整するヒータ加圧方式などの各方式を組み合わせ用いていることとしている。Fig.3に検討例を示す。

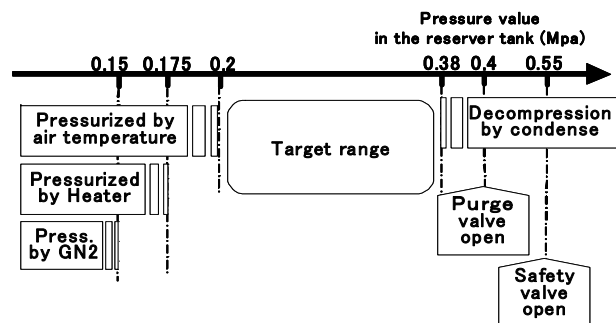


Fig.3 Pressure control

流量に関しては前述のとおり固定値とし、初期にポンプ回転数を調整した後は基本的に変更しない。冷凍機各列の流量はFig1に示すように各列内の流量調整弁で均等に分配することを想定している。

5. 今後の予定

本年5月までに前川製作所内にシステム検証用冷却システムを設置し、6月よりケーブル冷却に必要な能力・運転制御の妥当性等を事前確認し、12月からは実証試験先である旭変電所に移設を行う予定である。

6. おわりに

本研究は「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. Ikeuchi, et al.; Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.86

自励振動式ヒートパイプにおける低温動作特性の設置方向依存性 Effects due to directions on characteristics of cryogenic oscillating heat pipe

夏目 恭平(総研大); 三戸 利行, 柳 長門, 田村 仁(NIFS); 玉田 勉, 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)
NATSUME Kyohei (SOKENDAI); MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi (NIFS)
; TAMADA Tsutomu, SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki and NAGAYA Shigeo (CEPCO)
E-mail: natsume@nifs.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導マグネットの伝導・間接冷却用の自励振動式ヒートパイプ (oscillating heat pipes: OHP) の開発を行っている。OHPは高排熱性と高速応答性を備えた冷却デバイスであり、薄いシート状に加工してマグネットに組み込むことにより、大きな熱拡散率を持った効率の良い冷却ができると考えられる[1]。低温動作 OHP は設置方向によって、重力の影響を受け動作特性が変化する。その特性を評価するために設置方向を変えて実験を行った。また、上下両端を冷却し、中央を加熱する新しいタイプのヒートパイプを試作し、動作試験を行った。

2. 自励振動式ヒートパイプ (oscillating heat pipes: OHP)

一般に OHP は、加熱部と冷却部の間で一本の細管を何回も折り曲げたような構造をしている。その配管に蒸気圧曲線上で気液 2 相混合の状態になるように、適当な量の作動流体を封入する。加熱部では液が蒸発し、冷却部では凝縮する。その相転移に伴う圧力変化により、配管内に液柱と気泡が交互に分布し、振動流が駆動され、潜熱と顕熱の両方を以て熱が輸送される。

3. 低温動作特性の設置方向依存性

OHP を鉛直方向に設置し、上側を冷却、下側を加熱した場合は液柱と気泡がよく振動し、得られる等価的な熱伝導率は、高純度金属の低温での値に匹敵する[2]。しかし加熱と冷却を逆にした場合は、液体は重力の影響を受け、下部に溜まろうとするため、動作が安定しない。

そのような設置方向による不安定性を改善するために、Fig. 1 のように上下の配置が反対の二つの OHP のパイプ端を繋ぎ、低温での動作実験を行った。また上下両端を冷却し、中央を加熱する新しいタイプの OHP を考案した。Fig. 2 は実際に製作した両端冷却 OHP の構造と写真を示す。

4. 低温動作特性評価実験

真空クライオスタット内に配置された OHP は GM 冷凍機によって冷却部を冷やされ、各所に設置したフィルムヒーターと温度計によって温度と入熱量を調節される。ヒーターによって入熱した際の加熱部と冷却部との温度差を測定する事で OHP の実効的な熱伝導率を測定した。また、圧力振動は室温部にある圧力計で観測された。作動流体としては水素、ネオン、窒素を用いた。実験パラメーターは作動流体の種類、その封入量、加熱部入熱量、冷却部温度、パイプ材質(銅、ステンレス鋼)、OHP 配管径である。

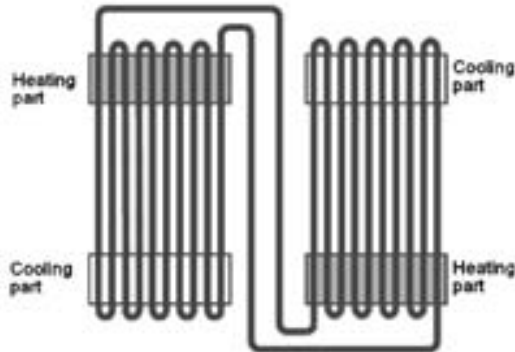


Fig. 1 Concept of combination OHP

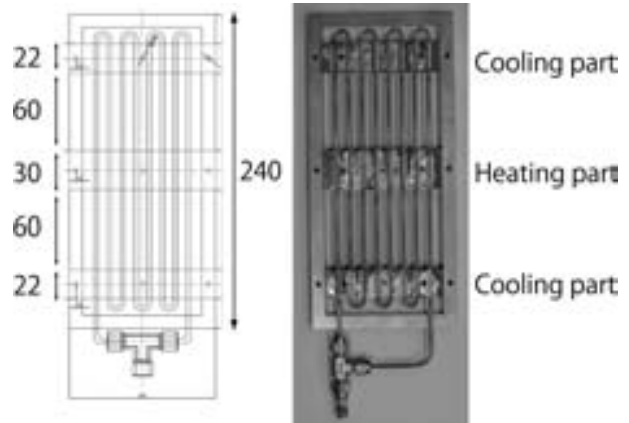


Fig. 2 Design and photograph of OHP

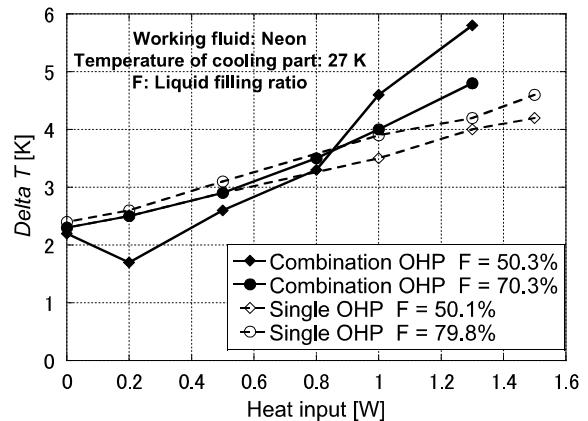


Fig. 3 Comparison between the results of combination OHP and single OHP experiments. Delta T shows the temperature difference between the cooling part and the heating part.

5. 実験結果

Fig. 3 は作動流体としてネオンを用いた場合の連結 OHP の実験結果と単独下側加熱 OHP の結果との比較を表している。測定された温度差に大きな差は無く、連結 OHP が単独の時と同様な特性を示していることがわかる。しかし連結 OHP の方が、観測された圧力振動の周期と振幅が大きく、不安定であった。発表では、単独 OHP と連結 OHP の実験結果の比較と、中央加熱両端冷却の実験結果について報告する。

本研究は、核融合科学研究所、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、科研費(21360456)の助成を受けたものである。

参考文献

[1]. 三戸利行他, 「超伝導コイルの効率伝導冷却技術の開発」2009 年度秋期低温工学・超伝導学会講演概要集, p. 140.
[2]. 夏目恭平他, 「超伝導マグネット冷却用自励振動式ヒートパイプの低温動作特性」2009 年度秋期低温工学・超伝導学会講演概要集, p. 160.

熱サイホンによる200m高温超伝導直流送電ケーブル冷却システム

The 200 m HTS DC cable cooling system operated in thermal siphon mode

イワノフ・ユージ、渡邊 裕文、河原 敏男、浜辺 誠、山口 作太郎 (中部大)

IVANOV Yury, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, HAMABE Makoto, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)
E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

The latest advances in high temperature superconducting (HTS) power transmission make it possible to use this technology to drastically increase the efficiency of energy management. Record low heat leakage should be achieved when constructing a large scale power transmission line. It is known that natural circulation of cryogen can be used to remove pump heat load. We are going to support the validity of this approach at a new 200 m HTS DC power transmission test facility which has been installed recently in Chubu University.

2. Experimental facility

The experimental setup is shown in Fig. 1. At the first stage the dependence of hydraulic resistance in the cryopipes as a function of flow rate of LN2 should be obtained. The pressure head can be controlled within wide range both by the levels of LN2 in the tanks and by the nitrogen gas pressures.

3. Numerical model

Design equations were obtained from Bernoulli's formula, correlations for pressure drop, and heat balance conditions. Mass flow of LN2 for slightly simplified model was estimated.

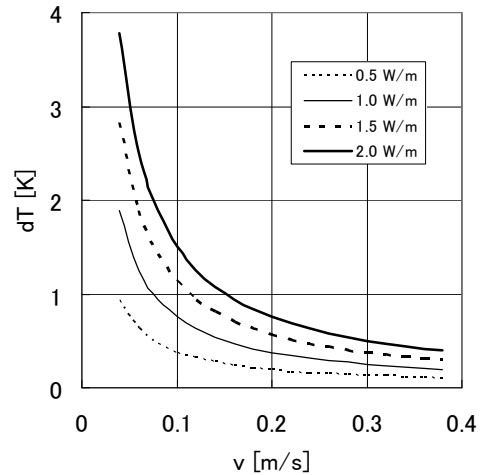


Fig.2 Temperature difference between incoming and outgoing flows of LN2 versus velocity for different heat loads.

Reference

Yu. Ivanov, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p. 82

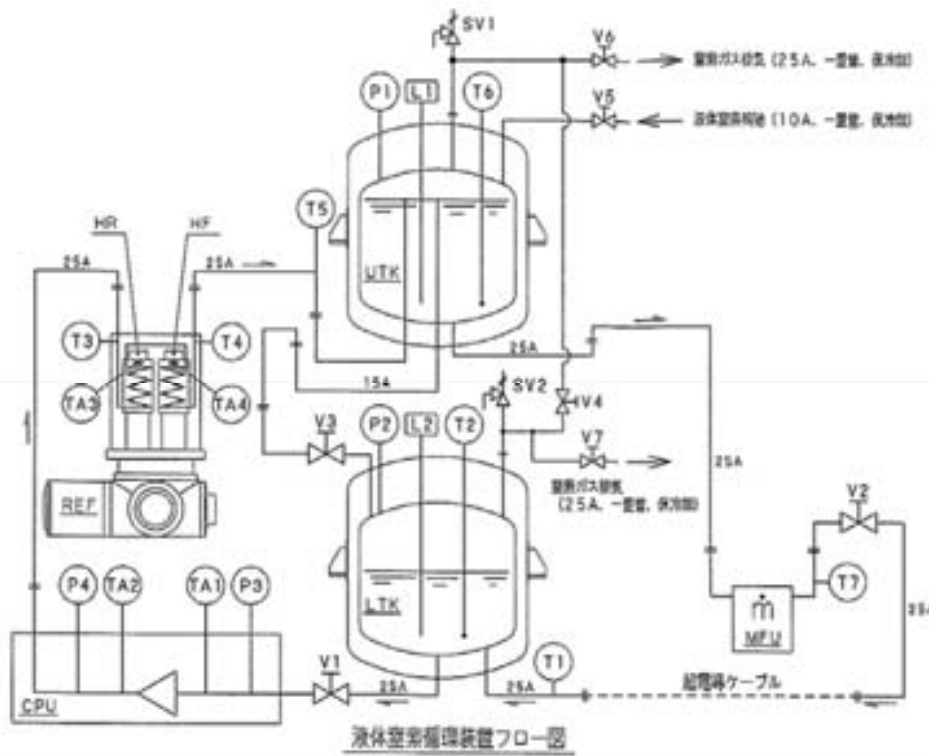


Fig.1 Design of 200 m HTS DC power transmission line in Chubu University.

直流超伝導ケーブル用断熱二重管における内管支持部からの熱侵入 Heat leak measurement from supporting structure on cryogenic pipe for DC superconducting cable

杉野 慎, 浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男, 山口 作太郎(中部大学)

SUGINO Makoto, HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

E-mail: te09009@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では高温超伝導体を送電ケーブルに用いた直流超伝導送電システムの実用化に向けて、研究を行っている。直流超伝導送電システムを数百 km 規模の距離で利用したときの効率が従来の銅ケーブルを使用した直流送電システムを上回るためには、断熱二重管での熱侵入量を 0.5 W/m 以下に抑える必要がある。そのために、断熱二重管の熱輻射シールドの簡素化を図る研究を、縦置き型の熱侵入量測定装置を用いて、長さ 1.65 m の断熱二重管で行ってきた。その結果、外管 150 A ($\phi 165.2 \text{ mm}$)、内管 80 A ($\phi 89.1 \text{ mm}$) において輻射熱侵入量を 0.5 W/m 程度まで低減できることが確認できた [1]。そこで、これらのような低熱量の輻射熱をさらに高精度で測定するために、新たに精密熱侵入量測定装置を設計・製作し [2]、測定を行っている。本報告では、精密熱侵入量測定装置において内管支持部からの伝導による熱侵入量を考慮に入れる必要があるため、シミュレーションと測定の結果から内管支持部からの熱侵入の比較・検討を行う。

2. 内管支持部

Fig.1 に内管支持部の写真を示す。構造は、アルミフレーム ($\phi 130 \text{ mm}$ 、厚さ 2.5 mm 、長さ 30 mm) に FRP ボルト (M8) を交互に通してあり、アルミフレームの中心で内管が支えられるようになっている。内管支持部は、横置き型の断熱二重管 (長さ: 約 3 m) に対して 2 箇所を用いる。

3. 内管支持部からの熱侵入

シミュレーションソフトである ANSYS を用いて、内管支持部における温度分布及び熱流束分布を調べた。ここで作成したモデルの FRP ボルトの寸法は、直径を M8 のボルトの有効径である $\phi 7.188 \text{ mm}$ とし、アルミフレームの外側に出ている方を長さ 37.35 mm 、内側に出ている方を 32.25 mm とした。温度条件は外管 ($\phi 216.3 \text{ mm}$) が 300 K 、内管 ($\phi 60.5 \text{ mm}$) が液体窒素温度の 77 K とした。Fig.2 に温度分布、Fig.3 に熱流束分布のシミュレーション結果を示す。熱流束分布の結果から得られた熱侵入量は約 0.16 W となった。

報告では、実際に内管支持部に熱電対を取り付け、温度を測定した結果から計算によって熱侵入量を算出し、これらの結果と比較・検討を行う予定である。

参考文献

1. Y. Nasu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.97
2. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.60

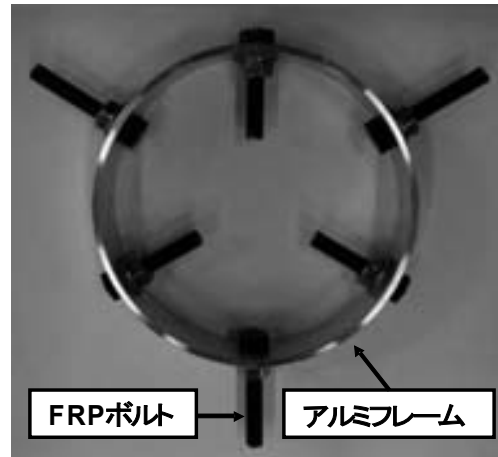


Fig.1 Picture of supporting structure.

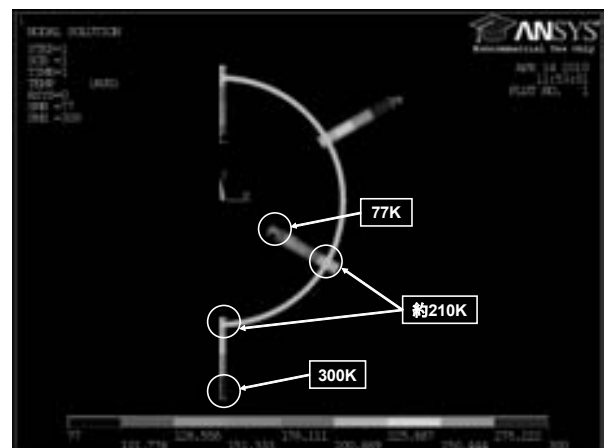


Fig.2 Temperature distribution of supporting structure in simulation.



Fig.3 Heat flux distribution of supporting structure in simulation.