

大電流通電可能な Gd 系高温超電導小型固定子巻線の開発

Development of Small Sized Gd-system HTS Stator Windings with Large Current Transport Capability

岡島 慎弥, 中村 武恒, 雨宮 尚之(京大); 永浜 恭秀, 鈴木 敏司(JASTEC)

OKAJIMA Shinya, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); NAGAHAMA Yasuhide, SUZUKI Toshiiji (JASTEC)

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

1. はじめに

我々は、かご型誘導モータの回転子を超電導化した高温超電導誘導同期モータ(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を行っている[1]。本研究では、HTS-ISM の高効率・高トルク密度化を実現するため、さらに固定子の超電導化とその大電流量化を目的としている。本講演では、Gd 系高温超電導コイルを用いた大電流小型固定子を試作し、その直流通電特性を実験的・解析的に評価したので報告する。

2. 固定子諸元

Fig.1 には、試作した超電導固定子の外観写真を示す。固定子巻線は、(株)フジクラ製 Gd 系高温超電導線材を用いたレーストラックシングルパンケーキコイルから構成されており、コイル直線部長 90 mm, 曲線部長約 31 mm, 使用線材長は約 1931 mm/個 である。固定子巻線コイルを 12 個作製し、3 相 2 極の集中巻構成とした。

3. 解析方法

試作した Gd 系コイルを固定子鉄心中に挿入した状態で、四端子法にて直流通電特性を測定した[2]。また、Gd 系高温超電導コイルの直流通電特性を、線材の自己磁界ならびに鉄心中設置に伴う鏡像効果を考慮して解析的に評価した。超電導線材における電界-電流密度特性の定量的評価式については、九州大学の木須らが提案しているパーコレーション遷移モデルに基づく解析式[3]を利用した。まず、Gd 系高温超電導コイルの 1/2 モデルについて、直流通電した際の垂直磁界成分の空間分布を電磁界解析により求めた。そして、メッシュ毎の垂直磁界から局所電圧を計算し、それをコイル全長に亘り加算することで総電圧を計算した。

4. 解析結果と考察

電磁界解析により求めた線材幅広面に垂直な磁束密度のコンター図を Fig.2 に示す。この磁束密度をもとに、コイルの電圧-電流特性を計算し測定結果と比較したところ、Fig.3 のようによく一致した。この結果により、鉄心中における Gd 系高温超電導コイルの非線形電界-電流密度特性が定量的に表現されたと考えられる。今後、本評価式を用いて HTS 固定子巻線の詳細設計と交流電特性解析を進めていく予定である。

謝辞

Gd 系高温超電導コイルの直流通電特性の測定実験を行って頂いた、京都大学大学院工学研究科電気工学専攻西村立男氏(H27 年 3 月修了)に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 中村武恒: 低温工学, Vol. 47, No. 6 (2012) pp. 384-391
 [2] 西村 立男: 京都大学修士論文(2014)
 [3] 木須 隆暢 他: 低温工学, Vol. 34, No. 7(1999) pp. 322-331

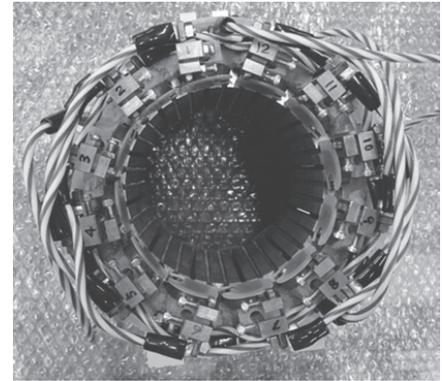


Fig. 1 Photograph of small sized Gd-system HTS stator

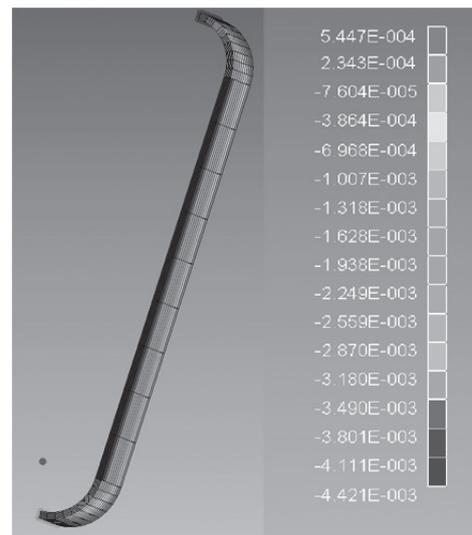


Fig. 2 Contour map of magnetic flux density that is vertical to the winding (analysis result)

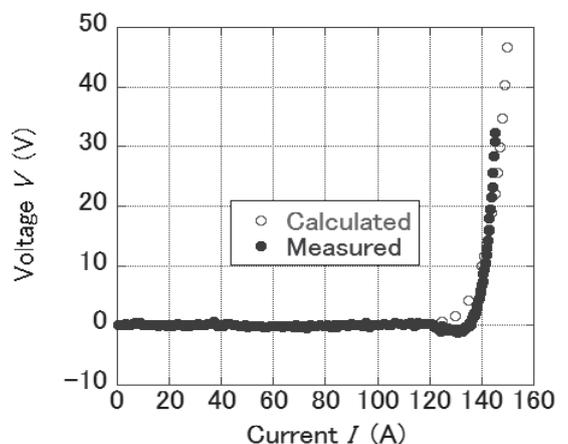


Fig. 3 Calculated and measured voltage-current characteristics of HTS stator winding

高温超電導誘導同期回転機における負荷特性の温度依存性

Temperature Dependence of Load Characteristics in HTS Induction/Synchronous Motor

中村 武恒, 西村 立男, 岡島 慎弥, 雨宮 尚之 (京大)

NAKAMURA Taketsune, NISHIMURA Tatsuo, OKAJIMA Shinya, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器や電力・産業応用を目指した高温超電導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) の研究開発を推進している[1-3]。当該モータの定常時運転温度は、システム総合効率最大化の観点から、冷凍機 COP とモータ特性のトレードオフとして決定されなければならない (一般に、冷凍機 COP が温度上昇に伴って向上するのに対して、超電導特性は逆の温度依存性を有する)。本研究では、数分程度以上の長い可変速時間を有するシステムにおいて、定常時は上記決定した効率最大化温度で運転する一方で、高負荷が要求される短時間運転モードでは温度を積極的に下げて、HTS 線材の臨界電流向上のみで駆動する技術を検討している。本講演では、温度可変駆動システム実現の一環として、10 kW 級 HTS-ISM における定常負荷特性の温度依存性を解析的に検討したので報告する。

2. 対象とした回転機と解析方法

Table Iには検討対象とした10 kW級HTS-ISMの諸元を、またFig. 1には二次元電磁界解析モデルをそれぞれ示す。さらに、Fig. 2には、HTSロータバー1本の電圧-電流特性から求めた非線形抵抗の温度依存性を示す。同特性において、大電流通電時は、銀シースへの分流を想定して一定抵抗値 (100 $\mu\Omega$) に固定している。上記抵抗特性を、Fig. 1のロータバー特性に反映して電磁界解析を実施した。

3. 解析結果と考察

Fig. 3には、解析によって得られた磁束密度コンター図 ($V=250$ V, $f=40$ Hz, $s=0.005$, $N=1194$ rpm) を示す。同図から明らかのように、運転温度77 Kと65 Kでは磁束密度分布に大きな変化が無く、即ち同一の起磁力条件では、電磁エネルギー変換に寄与する磁束の空間分布もほぼ同様と考えられる。換言すると、温度低下に伴う高出力化は、主としてHTSロータバーの誘導電流 (超電導遮蔽電流) の変化に帰着される。解析結果から、温度77 Kで10.4 kWの出力は、65 Kまで下げると15.0 kWにまで向上している。

具体的な解析方法など、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号: 26289076)の助成を受けて実施された。

参考文献

1. 中村武恒: 電気学会誌, Vol. 130, No. 12 (2010) pp. 828-831
2. 中村武恒: 低温工学, Vol. 47, No. 6 (2012) pp. 384-391
3. 中村武恒: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582

Table I Specifications of 10 kW class HTS-ISM

	Stator	Rotor
Pole number	4	-
Slot number	36	44
Outer diameter	157 mm	99.4 mm
Inner diameter	100 mm	31.0 mm
Length	88.0 mm	88.0 mm
Turn number	30	-

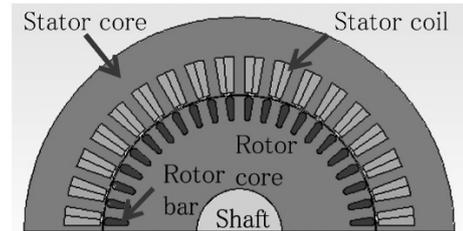


Fig. 1 2D model of 10 kW class HTS-ISM

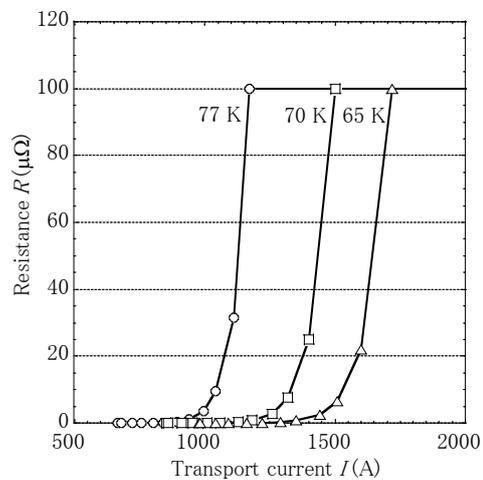
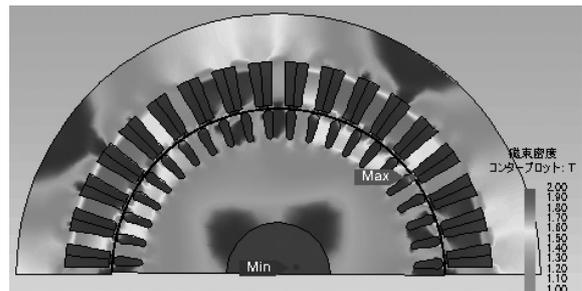
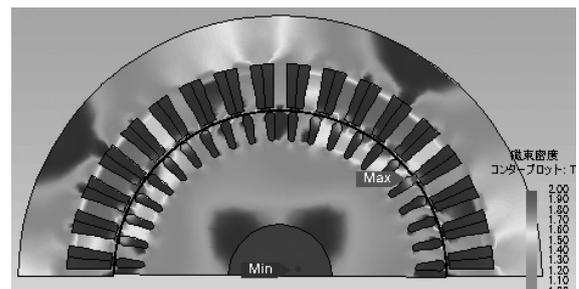


Fig. 2 Temperature dependence of nonlinear resistance of an HTS rotor bar



(a) $T=77$ K



(b) $T=65$ K

Fig. 3 Analysis results of magnetic flux density contours in HTS-ISM ($V=250$ V, $f=40$ Hz, $s=0.005$, $N=1194$ rpm)

20 kW 級高温超電導誘導同期モータの開発現状と将来展望

Development Status and Future Perspective of 20 kW Class HTS Induction/Synchronous Motor

中村 武恒, 松尾 哲司 (京大); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章, 寺澤 俊久 (イムラ材研);
大橋 義正 (アイシン精機); 古瀬 充穂 (産総研), 福井 聡 (新潟大)

NAKAMURA Taketsune, MATSUO Tetsuji (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI); FURUSE Mitsuo (AIST); FUKUI Satoshi (Niigata Univ.)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、JST-ALCA プロジェクト(先端的低炭素化技術開発)の一環として、輸送機器(バス,トラック,自動車 他)への実用を目指した高温超電導誘導同期モータ(HTS-ISM: High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor)の研究開発を推進している[1, 2]。本プロジェクトは、(1) HTS-ISM の研究開発, (2) 回転機制御技術開発, (3) 小型冷却構造・方式の研究開発, (4) 小型・高効率冷凍機の研究開発を 4 本柱としており、即ち超電導回転機システム全体の研究開発を実施している。本講演では、20 kW 級プロトタイプ機の開発現状について報告するとともに、次期 50 kW 級モデル機や 100 kW 級実用機開発のための将来展望について説明する。

2. 開発現状

Fig. 1には、開発した20 kW級プロトタイプ機の外観写真を示す。本機では、既試作のNEDOプロ20 kW級機に比較して磁気体積70%低減に挑戦し、定格出力(20.0 kW)および過負荷出力(26.8 kW)を実現した[3]。また、非線形磁束フロー抵抗を効果的に利用することで、急激な加減速に対しても回転安定であることを明確化した。その他、大電流量・低損失の固定子巻線技術も開発し、既に190 A@77 Kの固定子が完成しており、さらなる大電流量化の目途も立っている。

一方、上記モータを収容する冷却構造や冷却方法についても種々検討を進めている。特に、大トルクを室温空間に伝達する小型クライオスタットの開発に関しては、大きな温度勾配を補償してかつ固定子-回転子間のギャップ0.35 mm程度を維持する必要があるが、詳細な3次元熱歪解析に基づいて開発に成功している。その他、小型・高効率スターリング冷凍機についても試作が完了し、現在実験的かつ解析的検討を進めているところである。

3. 将来展望

Table Iには、50 kW級モデル機(固定子外径: 294 mm, 回転子外径: 160 mm, ギャップ長: 0.35 mm, 積厚: 100 mm)の電磁設計結果を示す[4]。同表に示すように、(電圧, 電流)=(267 V, 150 A)の駆動条件にて53 kWが実現されている。さらに、条件を(300 V, 300 A)にすると125 kWに達しており、即ち実用機の出力も実現可能と考えられる。Fig. 2には冷凍機一体型HTS-ISM駆動系のイメージ図を、またFig. 3にはパートレイン系の概念図をそれぞれ示す。今後、インバータも含めたシステム全体の最適構成を検討することによって、究極の低炭素化を目指していく予定である。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超電導回転機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. 中村武恒: 低温工学, Vol. 47, No. 6 (2012) pp. 384-391
2. 中村武恒: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582
3. T. Nakamura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, in press

4. 西村立男 他: 2015 年度春季低温工学・超電導学会 (2015) 1B-a04



Fig. 1 Photograph of 20 kW class prototype HTS-ISM

Table I Designed result of a 50 kW class model HTS-ISM (Drive frequency: 60 Hz, Short time rating)

Drive condition	Torque	Output power
267 V, 150 A	281 Nm	53 kW
300 V, 300 A	663 Nm	125 kW

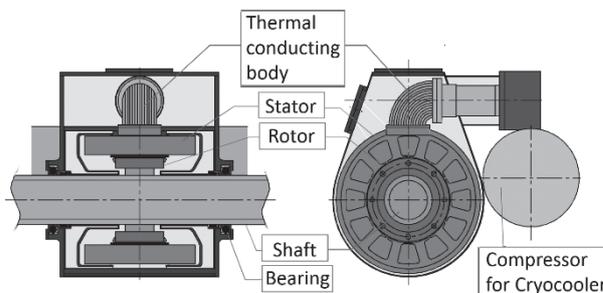


Fig. 2 Future image of HTS-ISM drive system

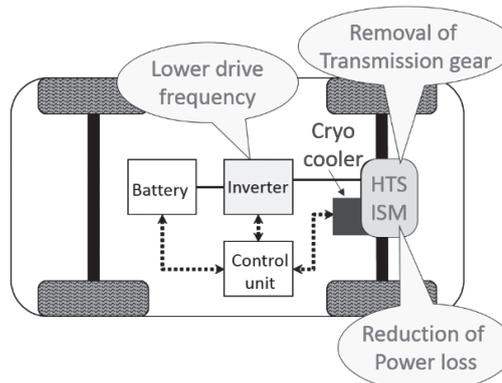


Fig. 3 Future image of HTS-ISM powertrain

輸送機器応用を目指した 50 kW 級高温超電導誘導同期モータの電磁設計

Electromagnetic Design of 50 kW Class HTS Induction/Synchronous Motor for Transportation Equipment

西村 立男, 中村 武恒, 岡島 慎弥, 郭 思宇, 松尾 哲司, 雨宮 尚之 (京大);
吉川 雅章, 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研究)

NISHIMURA Tatsuo, NAKAMURA Taketsune, OKAJIMA Shinya, KAKU Siyu, MATSUO Tetsuji,
AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); YOSHIKAWA Masaaki, ITOH Yoshitaka, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL)
E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器(電車, バス, 自動車 他)への実用を目指した高温超電導誘導同期モータ(HTS-ISM: High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor)の研究開発を実施している。これまで、20 kW 級プロトタイプ機を試作し、全負荷実験に成功している[1]。本開発で得られた知見をもとに、50 kW 級全超電導モデル機の電磁設計を行った。特に、HTS 磁気遮蔽体を利用したリラクタンストルク付与機の設計例について報告する。

2. 50 kW 級モデル機の諸元

Table I には、50 kW 級モデル機の諸元を示す。本開発では、固定子ならびに回転子を超電導巻線で作成する全超電導化に挑戦する。特に、HTS 固定子巻線については、許容曲げ径、テープ形状(幾何学的制約条件)や鉄心内通電特性(電磁的制約条件)を考慮した特有のコイル巻線形状などを考慮する必要があり、同特性に関するこれまでの知見をベースに構造を決定した。

3. 解析方法

Fig. 1には、2次元断面解析モデルを示す。同モデルについて、駆動周波数60 Hz、すべり 10^{-7} の準同期回転[2]を想定した電磁界解析を実施して、電磁トルクから機械出力を評価した。さらに、回転子鉄心中にHTS磁気遮蔽体も挿入して、始動・過負荷時のリラクタンストルク付与も検討した[3]。

4. 解析結果と考察

Fig. 2には、最大出力時における磁束密度コンター図の解析結果を示す。同図から明らかなように、最大出力時の磁束密度最大値は、磁気遮蔽体の有無に関わらずほぼ2.4 T程度となっている。なお、本磁束密度は短時間の最大出力時の値であり、定常駆動状態では非飽和領域で運転される。

Table IIには、得られたトルクならびに出力値を示す。磁気遮蔽体を挿入することによって、回転数300 rpm(定トルクモードの最高回転数)における最大トルク1631 Nm, 最大出力51.2 kWが得られている。その他、垂直巻法[4]なども提案しており、同巻線法による設計結果などについても、講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. T. Nakamura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, in press
2. G. Morita et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 19 (2006) pp. 473-478
3. T. Nishimura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 24, No. 3 (2014) 5200504
4. Unpublished

Table I Specifications of 50 kW class HTS-ISM

Item	Value
Pole number	4
Slot number of stator	12
Number of rotor bars	34
Stator's outer diameter	285 mm
Stator's inner diameter	160.6 mm
Rotor's outer diameter	160 mm
Rotor's inner diameter	50 mm
Gap length	0.3 mm
Stator's length	100 mm

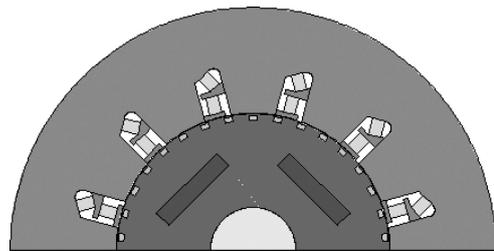
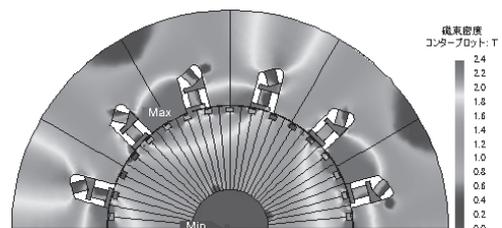
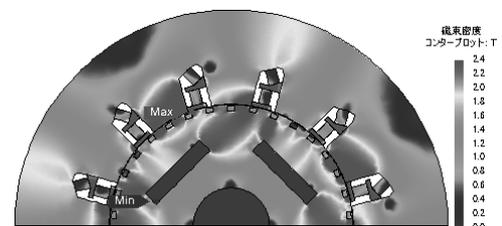


Fig. 1 Analysis model of 50 kW class fully superconducting HTS-ISM



(a) Without HTS shield body



(b) With HTS shield body

Fig. 2 Analysis results of magnetic flux density contours for 50 kW class HTS-ISM

Table II Analysis results of maximum output (300 rpm)

	Torque	Output power
Without HTS shield body	1569 Nm	49.3 kW
With HTS shield body	1631 Nm	51.2 kW

可変速駆動高温超電導誘導同期モータへの適用を志向した 比熱利用型冷却方式の提案と基礎特性評価

Proposal and Fundamental Characteristic Evaluation of Specific Heat Aided Cooling Method for HTS Induction/Synchronous Motor under Variable Speed Control

入山 周平, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大); 大橋 義正 (アイシン精機)

IRIYAMA Shuhei, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、JST-ALCA プロジェクト(先端的低炭素化技術開発)の一環として、輸送機器(バス、トラック、自動車 他)への実用を目指した高温超電導誘導同期モータ(HTS-ISM: High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor)システムを研究開発している[1, 2]。本講演では、始動時などの短時間過負荷時に比熱を利用して冷却する方法を提案する。また、同方法による回転機冷却特性を熱伝導方程式に基づいて評価したので報告する。

2. 比熱利用型冷却方式の考え方

HTS-ISMは、かご形誘導機と同様の構造を有しながら、同期ならびにすべり回転の両立、高トルク密度化などの特長を有する[1, 2]。一方で、同機は可変速駆動が前提となるため、その熱負荷(損失)が駆動モードによって大きく変化する。一般には、短時間継続する高出力始動時には大きな熱負荷が発生するが、一方で定常駆動時の熱負荷は比較的小さい。従って、冷凍機冷却を考える場合、熱負荷のピーク値に対して冷凍出力を設計すると、定常駆動時に冗長なスペックになってしまう、かつ冷却系が大きくなってシステムが成立しない。そこで、高出力時(短時間)には、冷凍機の冷凍出力を超える熱負荷を系の熱容量で吸収して温度上昇を抑え、定常出力時に、吸収した熱負荷を抜熱する冷却方式を提案する。本冷却方式を採用すれば、冷凍機に要求される冷凍出力を低減できると期待される。

3. 解析対象と一次元モデル

上記提案した冷却方式の成立性を検証するために、一次元熱解析モデルを作成して、差分法によりシミュレーションを行った。Fig. 1には、解析対象とした20 kW級HTS-ISMの外観写真を示す。なお、我々の先行研究[3]によって、積層ケイ素鋼板の積厚方向(モータシャフト軸方向)の熱通過率が、径方向に比較して極端に小さいことが解析的かつ実験的に明らかになっている。そこで、まず本研究では、コイルエンド部などの冷却効果は無視して、径方向の一次元熱伝導方程式を作成して、陰解法[4]によって解析した。Fig. 2に解析モデルを示すが、固定子端部には冷却のためのNeumann条件を、また回転子端部には断熱条件をそれぞれ設定した。さらに、固定子-回転子間のギャップはヘリウムガス冷却を想定しており、対流熱伝達率 h を仮定した。図中のTemp1~Temp6は、温度観測点を表す。

4. 解析結果と考察

Fig. 3には、シミュレーション結果の一例を示す。本解析に際して、HTS-ISM本体の熱負荷(発熱)は固定子及び回転子で一様に生じるものと仮定した。また、初期発熱はモータの定常出力時の熱負荷(156 W)として印加し、温度収束後に最大出力時の熱負荷(351 W)とした。解析結果から、モータの最大出力時において、二次巻線に用いた超伝導線材の臨界温度約110 K に達するまでに 10^5 sオーダーの時間がかかることが分かり、最大出力を短時間定格に適用した場合の、比熱利用型冷却方式の有効性が確かめられた。ギャップ熱伝達率が異なる場合の解析結果の比較検討他、詳細な検討内容は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. 中村武恒: 低温工学, Vol. 47, No. 6 (2012) pp. 384-391
2. 中村武恒: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582
3. 渡邊潤 他: 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 2C-a06 (2014)
4. 日本機械学会: 伝熱工学, (日本機械学会, 2005)

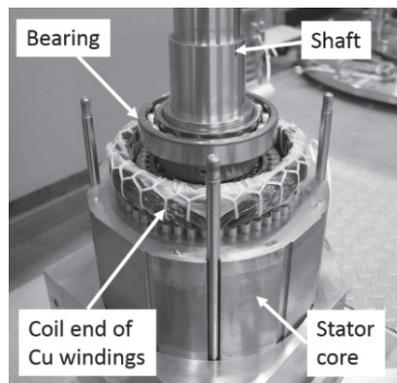


Fig. 1 Photograph of a 20 kW class HTS-ISM

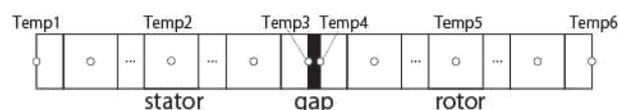


Fig. 2 One dimensional thermal analysis model

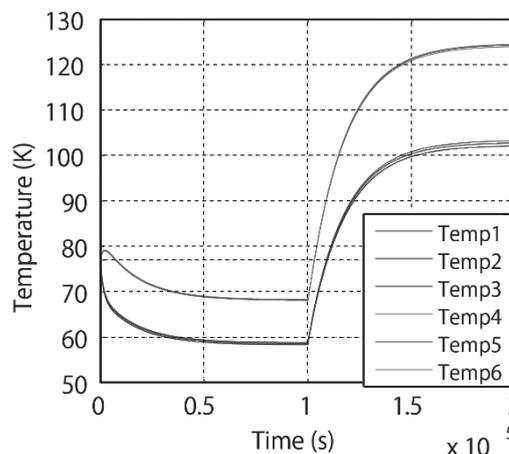


Fig. 3 Analysis result

20 kW 級高温超電導誘導同期モータの可変速駆動に向けた過渡特性評価

Transient Characteristic Evaluation of HTS Induction/Synchronous Motor for Variable Speed Control

村中 啓太郎, 中村 武恒, 小笠 卓郎, 雨宮 尚之(京大); 伊藤 佳孝(イムラ材研)
 MURANAKA Keitaro, NAKAMURA Taketsune, OGASA Takuro,
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka (IMRA MATERIAL)
 E-mail: k-muranaka@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への適用を目指した高温超電導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) の研究開発を実施している [1]。輸送機器への適用を目指す際、可変速駆動が必要不可欠であり、特有の駆動モードに対して最適な制御法を確立する必要がある。上記制御を実現するためには、HTS-ISM の過渡特性も含めた正確な特性解析コードが要求される。

本研究では、20 kW 級プロトタイプ機について、無負荷可変速試験を行い、過渡回転特性を実験的に評価しつつ MATLAB®/Simulink® 解析を実施したので報告する。

2. 対象とした回転機

Fig. 1には、実験および解析対象とした20 kW級HTS-ISMの外観写真を示す。本試作機は、3相8極であり、固定子の外径は265 mm、回転子の外径は159.4 mm、ギャップ長は0.6 mm、積み厚は206 mmである。

また、固定子巻線には8/9短節銅巻線を、回転子かご形巻線にはDI-BSCCO®線材をそれぞれ適用している。

3. 実験方法

過渡特性評価試験の構成図をFig. 2に示す。MATLAB®/Simulink®上でシミュレーションモデルを作成し、LT-RTSim-II®を介して任意のパターンの指令電圧および指令周波数をインバータに入力することが出来る。

この実験システムを利用して、加減速の時間を変えた可変速試験を無負荷で行った。なお、本実験では V/f の傾きは固定した。

4. 解析結果と考察

解析は、MATLAB®/Simulink®を用いて行った。かご形誘導機の電圧方程式ならびに力学方程式を適用し、2次側HTS巻線の非線形抵抗値を考慮した、HTS-ISMの解析コードを開発した。

Fig. 3には、加減速時間を5.0 sとした場合の実験および解析結果を示す。

様々な可変速パターンにおいて、二次側鎖交磁束の時定数が機械系の時定数よりも常に小さく、回転安定性[2]が保証されることを実験によって確かめ、その結果を解析と比較することが可能となった。

さらに詳細な検討は、講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. 中村武恒 他: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582.
2. H. Kitano et.al: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, no. 3 (2013.06) 5202505 (5 pp).



Fig. 1 Photograph of 20 kW class HTS-ISM considered for experiment and analysis

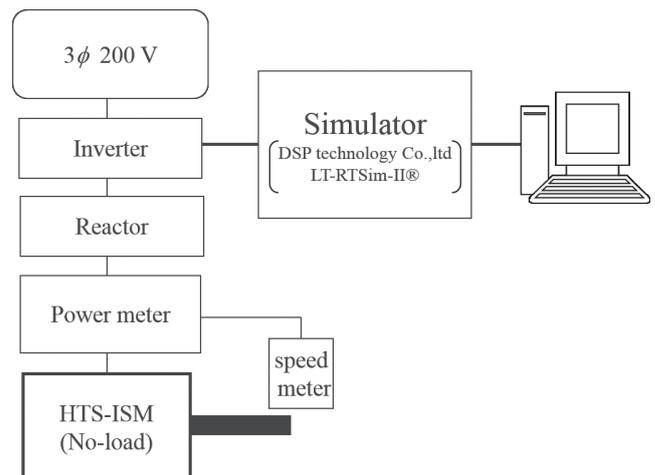


Fig. 2 Experimental system of 20 kW class HTS-ISM

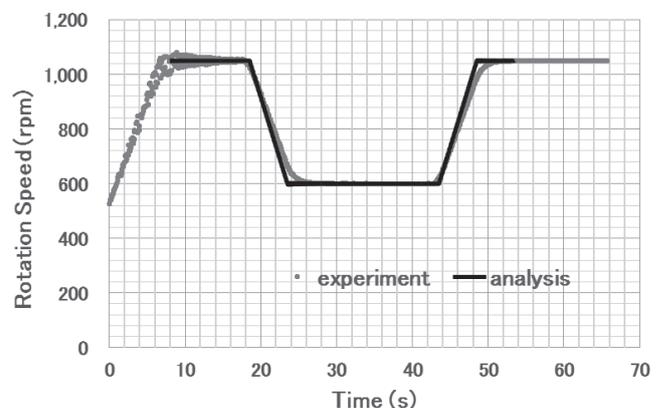


Fig. 3 Example of experimental and analytical results

Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ 超伝導テープの臨界電流特性と磁束ピン止め特性

Critical current and flux pinning characteristics in Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ superconducting tapes

顧 清洋, 倪 宝荣 (福岡工大); 張 献平, 馬 衍偉 (中国科学院)

GU Qingyang, NI Baorong (Fukuoka Institute of Technology); ZHANG Xianping, MA Yanwei (Chinese academy of Sciences)
E-mail: mam14006@bene.fit.ac.jp

1. Introduction

Recently, we successfully developed the Fe-sheathed superconducting Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ tape with the critical temperature of 32.5 K and fairly high critical current density of 1.5×10^8 A/m² at 10 T and 4.2 K.[1] The critical current characteristic is considered as one of the most important factors for the applications of superconducting materials. Therefore, precise estimation of temperature and magnetic field dependence of critical current density (J_c) is necessary. In this study, the J_c in the temperature range of 20 K to 30 K and in the magnetic field of up to 7 T were measured by using an inductive method (Campbell's method). Furthermore, basing on the experimental results of the penetrating ac magnetic flux profile and the feature of ac magnetic field dependence of penetration depth, the flux pinning mechanism of the sample within 20 K and 30 K was discussed.

2. Sample preparation and measurement

Fe-clad Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ tapes were fabricated by the ex situ PIT method. Sr fillings, K pieces, and Fe and As powder with a ratio of Sr: K: Fe: As = 0.6: 0.4: 2: 2 were mixed for 15h by the ball-milling method. 5% excess As and 10–20% excess K were also added to compensate for the loss during fabrication. The precursors were added 5 wt% Sn by hand with an agate mortar. The milled powders were packed into Nb tubes and then sintered at 900°C for 20–35 h. Then the fine powders were packed into Fe tubes, sealed and then cold worked into tapes by swaging, drawing and flat rolling. Finally, the tapes were cut into short samples and sintered at 850–900°C for 1–60 min.[1]

The measurement was carried out by the means of Campbell's method. An external dc magnetic field (B) and a small ac magnetic field (b_{ac}) were applied parallel to the long axis of a superconducting slab. By measuring the ac flux moving into and out of the sample, ac magnetic field dependence of penetrated ac flux can be obtained. And, according to the Bean-London model, the slope of increasing part of λ' vs. b_{ac} gives J_c in sample as

$$\frac{\partial \lambda'}{\partial b_{ac}} = \frac{1}{\mu_0 J_c} \quad (1)$$

Where μ_0 is space permeability.[2] And the displacement of flux lines (u) and their restoring force density (F_r) are derived as

$$u = \frac{\phi}{2Bw} \quad F_r = \frac{Bb_{ac}}{\mu_0 \lambda'}$$

respectively. The Labusch parameter (α_L) is determined from the slope of F_r vs. u curve in small displacement region, i.e., in the regime of reversible fluxoid motion.

3. Result and discussion

Fig.1 shows dc magnetic field dependence of J_c measured at different temperatures. As we can see in Fig.1, J_c denoted by the solid lines presents a sharp drop of critical current density when a small dc magnetic field below 0.5 T is applied, followed by gradually flat decrease when dc magnetic field increases continually from 0.5 T to 7 T. The results we obtained match well up with the previous data measured by the standard four-probe method at the temperature of 4.2 K as shown in

Fig.1 by dotted line. It turned out that J_c values of Fe-sheathed superconducting Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ tapes are fairly high during 20 K to 30 K. Our results indicate that the flux pinning mechanism of the sample in the temperature range of 20 K to 30 K is similar to that in 4.2K. Besides, the dash-dot lines presented in Fig.2 are the approximations of each experimentally obtained α_L with the relationship of $\alpha_L \propto B^{3/2}$ which can be considered as an evidence that the flux pinning behavior in the sample can be explained with conventional flux pinning theory.

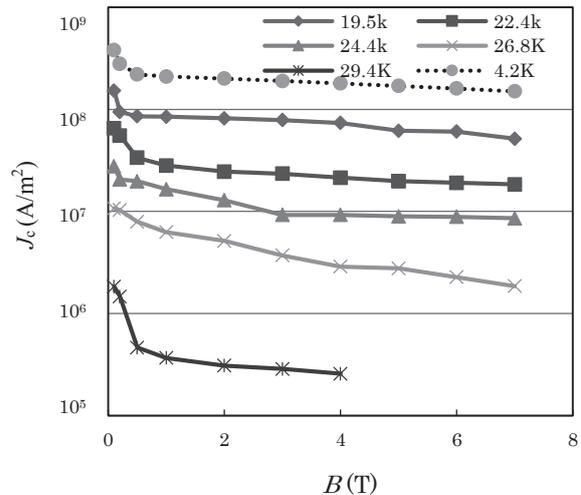


Fig.1 Dc magnetic field dependence of critical current density at different temperatures

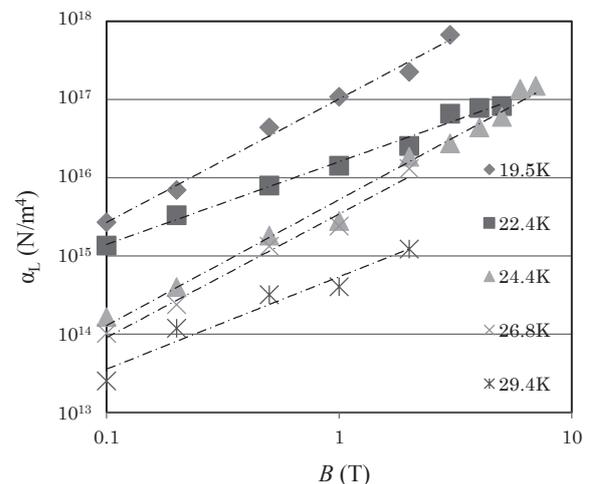


Fig.2 Dc magnetic field dependence of Labusch parameter at different temperatures

Reference

- He Lin et al.: Effects of heating condition and Sn addition on the microstructure and superconducting properties of Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ tapes. *Physica C* 2013;495: 48-54
- Campbell AM. The response of pinned flux vortices to low-frequency fields. *J Phys C* 1969;2:1492-1501.

銀シース(Sr, K)Fe₂As₂ 線材における臨界電流密度の異方性

Anisotropy of critical current densities in Ag-sheath (Sr, K)Fe₂As₂ tapes

淡路 智, 中澤 岳支朗, 土屋 雄司, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大); 林 鶴, 姚 超, 張 現平, 馬 衍偉(中国科学院)
 AWAJI Satoshi, NAKAZAWA Yushiro, TSUCHIYA Yuji, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); LIN He,
 YAO Chao, ZHANG Xianping, MA Yanwei (CAS)
 E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

鉄系超伝導線材のうち(Sr,K)Fe₂As₂ (Sr122)系の開発が進んでおり、4.2 K、10Tで10⁵A/cm²を越える実用レベルの臨界電流密度J_cが報告されている[1]。Sr122系は、高温超伝導体と同様にc軸に垂直な層状構造を有しており、これに起因した異方性が超伝導特性に現れるが、その異方性パラメータが2程度と小さく、強磁場応用に向いていると考えられる。結晶構造や物理定数から予想すると、磁場中の超伝導特性は、磁場をc軸に印加した場合に低く、ab面方向の場合に高くなる。しかし、一部の線材ではその逆の異方性がJ_cに現れる。特に、J_cの高い試料で、その傾向が強い。今回、J_cの異方性について議論するため、磁場・磁場角度依存性を測定し、その磁束ピンニング機構について議論する。

2. 実験方法

試料は中国科学院の馬グループにおいて powder in tube (PIT)法で作製された、Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As_{2.1}(Sr122)線材である[1]。900°Cで35 h熱処理をした焼結体の粉を、内径5 mm、外形8 mmの銀パイプへ入れ、線引き・圧延後に850-880°Cで30 minの熱処理をした。この際、一部の線材には、ホットプレスをした。試料は、角度回転プローブにセットし、4.2 Kでは液体ヘリウム浸漬冷却で、それ以上の高温ではヘリウムガスフロー中で温度制御を行った。臨界電流及び不可逆磁場を、4端子法によって測定した。

3. 実験結果

Fig. 1にホットプレスによって作製したAg/(Sr, Fe)122テープ線材の、4.2 KにおけるJ_cの磁場依存性を示す。10 T以下の低磁場では、B_⊥tapeのJ_cがB_∥tapeよりも大きくなっているが、高磁場では逆転していることが分かる。このテープは、ほぼc軸配向しているので、B_⊥tapeはB_∥cと同等と考えることができる。したがって、B_⊥cよりもB_∥cの方が小さくなっている低磁場のJ_c特性は、Sr122系の本質的な異方性とは異なっていると考えられる。実際、不可逆磁場は、B_⊥cの方がB_∥cよりも高く、J_cの高磁場側と同じ異方性を示した。図2に、各磁場のJ_cの角度依存性を示す。5 Tでは、θ = 0°付近にブロードなピークが存在し、θ = 40°付近に肩をもってそれ以上で急激に低下する振る舞いを示した。10 Tでは異方性がほぼ無くなってフラットとなり、15 Tではθ = 90°に向かって上昇する傾向を示し、有効質量モデルに近い振る舞いをしていることが分かる。同試料の30 KにおけるJ_cの角度依存性を、図3に示す。30 Kでは、J_cの異方性が逆転する磁場が、約1.5 Tと4.2 Kよりも低下している。J_cの角度依存性の磁場変化は、定性的に4.2 Kと類似しているが、低磁場のθ = 0°近傍のブロードなピークは、磁場の増加に伴って、一旦θ = 40°近傍のピークへと変化し、その後θ = 90°近傍のJ_cが相対的に向上することで、最終的にθ = 90°にピークを持つ角度依存性となっている。したがって、低磁場で有効に働く何らかの磁束ピンニングセンターが示唆され、これが、J_cを押し上げていると予想される。当日は、TEMや極点測定の結果なども合わせて、磁束ピンニングについて議論する。

参考文献

1. X. Zhang, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 104, (2014) 202601.

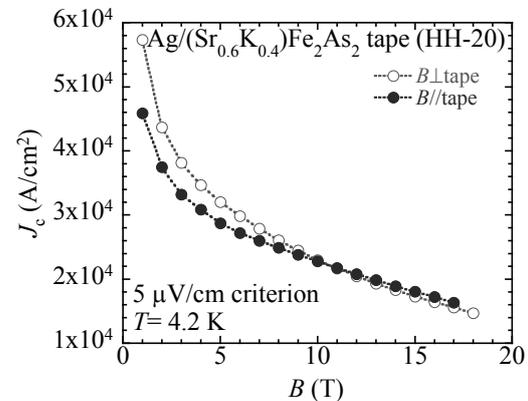


Fig. 1 Field dependence of J_c for hot pressed Ag/Sr122 at 4.2 K.

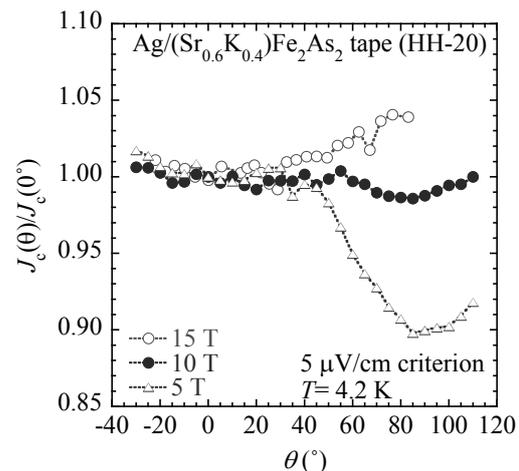


Fig. 2 Angular dependence of normalized J_c for hot pressed Ag/Sr122 at 4.2 K.

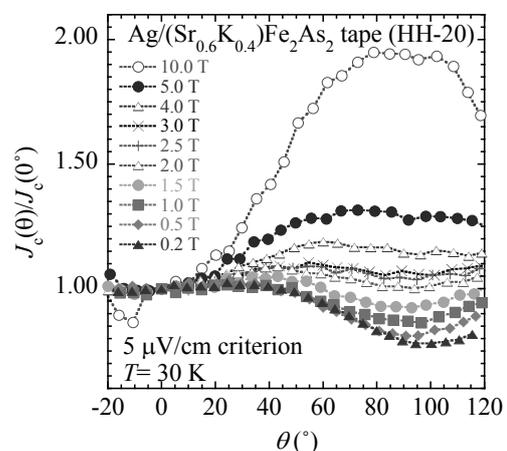


Fig. 3 Angular dependence of normalized J_c for hot pressed Ag/Sr122 at 30 K.

鉄系超伝導線材 Sr122 の機械特性と超伝導特性

Mechanical and superconducting properties of Sr122 Fe-based superconducting wire

小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 張 現平, 姚 超, 馬 衍偉(中国科学院)

OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); ZHANG Xianping, YAO Chao, MA Yanwei (CAS)

E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

鉄系超伝導線材は、低温での B_{c2} が高い事が知られており、強磁場応用に向けて線材開発が活発に行われている。この中で、既に実用に近い臨界電流密度 J_c に達している線材が現れており、磁場中における J_c 特性も高い線材が現れている[1]。そこで、実際の応用に向けた基礎特性の検証として、機械特性の評価をする必要があるが、その報告はまだ少ない[2]。

122 型超伝導体における臨界温度 T_c の圧力依存性はよく調べられており、 T_c が圧力により様々な変化をすることが知られている[3]。また、 T_c は Fe 及び As で形作られる四面体の構造に依存し、正四面体に近いほど T_c が高くなることが報告されている[4]。これは、結晶格子にひずみが生じることで超伝導特性が変化することを示している。このことから、鉄系線材を超伝導マグネットへ応用する時など、電磁力下で使用する場合には、超伝導特性が変化してしまう可能性がある。

本発表では、122 系の超伝導線材を用いて低温下で引張り試験を行い、超伝導特性の変化を調べた。さらに、超伝導特性に及ぼすひずみ効果の起源に関して考察した。

2. 実験方法

試料は中国科学院の馬グループより提供された、 $Sr_{0.6}K_{0.5}Fe_2As_{2.1}$ (Sr122)線材を用いた[1]。幅 4 mm 厚さ 0.5 mm のテープ形状であり、900°C で 35 h の熱処理をした焼結体の粉を銀シースへ入れ、線引き後に 850°C で 30 min の熱処理をした線材である。これにひずみゲージを貼り付け、強磁場低温下引張り試験機に取り付け、臨界電流 J_c のひずみ依存性を測定した。測定は、温度 4.2 K、磁場 18 T 以下で行った。また、 T_c のひずみ依存性を調べるため、引張りひずみ下において電気抵抗測定を行い、 T_c のひずみ依存性の測定も行った。 T_c は、相転移のカーブを外挿し、ゼロ抵抗となるとき温度として導出した。

3. 実験結果

Fig. 1 に、4.2 K において線材のテープ面に平行方向に 10 T を印加した際の、Sr122 線材の J_c のひずみ依存性を示す。これを見ると、0.05%以下のひずみを与えると J_c は低下するが、さらにひずみを大きくすると、 J_c が上がっていくことが分かった。Fig. 1 には、 n 値のひずみ依存性も示しているが、こちらはひずみにより低下する傾向は見られたが、20 以上の値を維持していたため、0.25%までは超伝導領域にクラックなどは入っていないことが予想される。0.25%以上のひずみを与えると、電流-電圧曲線に抵抗性電圧が発生することから、0.25%以上のひずみで何らかの劣化が始まっていることが確認された。

Fig. 2 に T_c の引張りひずみ依存性を示した。 T_c は 0.20%のひずみで劣化し始めているが、それより小さいひずみ領域においては、 J_c のひずみ依存性と同じ振る舞いを示した。これは、 J_c のひずみによる変化が、 $Sr_{0.6}K_{0.5}Fe_2As_{2.1}$ の超伝導特性そのものの変化が原因として起こっていることを示している。

Ag シース線材の J_c が引張りひずみを与えると向上する現象は、[2]の論文でも見られているが、0.05%以下のひずみで J_c が低下する現象は見えていない。原因として考えられることは、高圧下において見られる 2 GPa 以下の圧力下では T_c が向上し、それ以上の圧力をかけていくと T_c が下がっていく現象と、

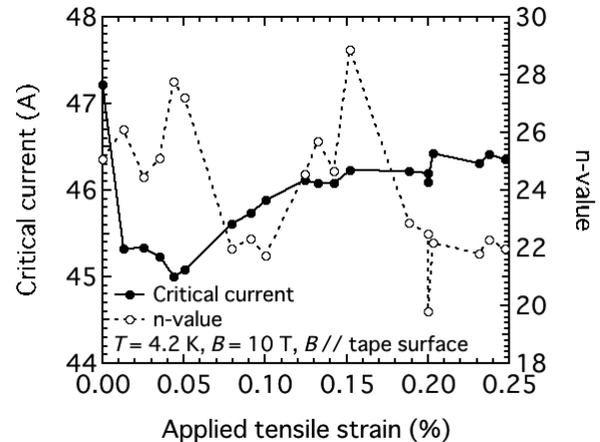


Fig. 1 Critical currents and n -values as a function of applied tensile strain for the Sr122 wire at 4.2 K and 10 T parallel to the tape surface.

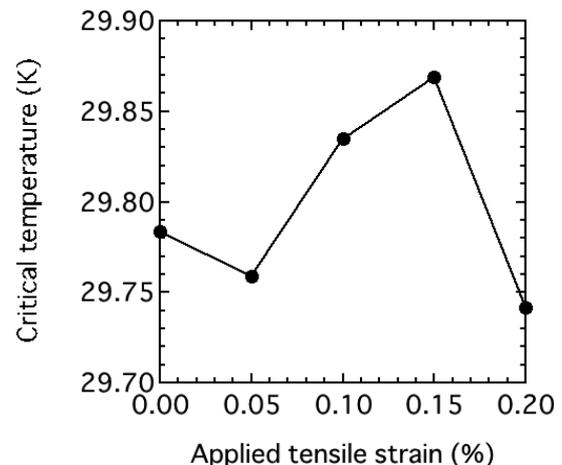


Fig. 2 Critical temperature as a function of applied tensile strain for the Sr122 wire.

Fe および As で作られる四面体構造の Fe と As との間の角度に依存した T_c の変化とが、組み合わせられて観測されていることが考えられる。これを確かめるためには、超伝導体に加わる残留ひずみを調べ、静水圧ひずみの大きさ、及び、格子定数を測定することで Fe と As のなす角度、つまり、格子の変形によるひずみ(偏差ひずみ)の影響を考慮する必要がある。

参考文献

1. X. Zhang, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 104, (2014) 202601
2. P. Kováč, et. al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 28, (2015) 035007
3. K. Igawa, et al.: J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 78, (2009) 025001
4. C. H. Lee, et al.: Solid State Commun., Vol. 152, (2012) 644

臨界電流密度の向上を目指した(Ba,K)Fe₂As₂ 超伝導線材の開発

Enhanced transport critical current densities of (Ba,K)Fe₂As₂ superconducting PIT wires

石井 慧, 麻生 達也, 伊豫 彰, 西尾 太郎(東理大);

石田 茂之, 土屋 佳則, 木方 邦宏, 李 哲虎, 松崎 邦男, 山崎 裕文, 鬼頭 聖, 馬渡 康徳, 永崎 洋, 吉田 良行(産総研)

ISHII Akira, ASO Tatsuya, IYO Akira, NISHIO Taichiro (TUS);

ISHIDA Shigeyuki, TSUCHIYA Yoshinori, KIHOU Kunihiro, LEE Chul-Ho, MATSUZAKI Kunio,
YAMASAKI Hirofumi, KITO Hijiri, MAWATARI Yasunori, EISAKI Hiroshi, YOSHIDA Yoshiyuki (AIST)

E-mail: ishii.a@aist.go.jp

1. はじめに

(Ba,K)Fe₂As₂ は高い超伝導転移温度 (T_c)、高い臨界磁場、低い異方性を持つことから高磁場応用に向けた線材化の研究が精力的に行われている。(Ba,K)Fe₂As₂ 超伝導 PIT 線材は、超伝導コア部分の高密度化により、その臨界電流特性が飛躍的に向上している[1,2]。本研究では、超伝導コア部分の高密度化とともに、コア部分試料の高品質化に着目し、線材の臨界電流密度 (J_c) を向上させることを目的として、(Ba,K)Fe₂As₂ 超伝導 PIT 線材の K 濃度 (x) の最適化及び、KAs 添加による超伝導コアの純良化に取り組んだ。また高品質化された原料粉末を用いて、コアの高密度化を目指したテープ線材を作製した。

2. 実験方法

さまざまな K 濃度 x を持つ (Ba,K)Fe₂As₂ 多結晶試料 ($x = 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45$) を合成し、*ex-situ* PIT 法を用いて超伝導線材化した。シース材には銀を用いて、各溝ロールにより圧延加工した後、長さ 5 cm 程度に短尺化して SUS 管に封入し、700°C で 20 時間の熱処理を行った。これらの線材に関して、磁化測定から T_c を決定し、コア部分の X 線回折 (XRD) スペクトルから不純物量の評価を行った。 $x = 0.3$ に関しては、多結晶試料に KAs を加えて銀管に詰めた線材を作製し、KAs 添加による不純物生成の抑制効果を検証した。

高 J_c 化には、テープ状に加工することが有効であることが報告されているため、「 $x = 0.3 + 0.04\text{KAs}$ 」の線材については、角溝ロールにより圧延加工した後、平ロールによりテープ化し、油圧プレスにより一軸圧縮を加えた。これらの線材について、4 端子法による臨界電流測定を行い、 J_c を評価した。

3. 結果

K 濃度の異なる多結晶試料を用いて作製した線材の T_c を調べたところ、Fig. 1 に示すように、 $x = 0.3$ の場合において最も高い $T_c \sim 38$ K が得られた。これは、もとの多結晶試料の T_c とほぼ同じ値である。

しかしながら、焼成後の線材コアの XRD パターンから、主に FeAs が不純物として生成することが確認された。この原因としては、熱処理中に K や As のような元素が欠損してしまうことが考えられたので、多結晶試料を銀管に詰める際に KAs を添加することで不純物の析出を抑制できるのではないかと考えた。そこで、高い T_c を持つ $x = 0.3$ の線材使用に着目し、モル比で 0-6% の KAs を添加した線材を作製し、KAs 添加による不純物の生成状況を XRD パターンで確認した。

Figure 2 に、 $x = 0.3$ の多結晶試料に KAs を 0-6% 加えて作製した線材コアの XRD パターンを示す。添加する KAs 量の増加に伴い、不純物として生成していた FeAs の回折ピークの減少が認められ、4% 以上の KAs 添加で、FeAs 由来のピークが観測されないことが判明した。

このように詰め込む多結晶試料の K 濃度や KAs 添加によって線材の特性が大きく変化することを明らかにした。講演では、それぞれの線材における J_c 測定の結果と合わせて報告する。

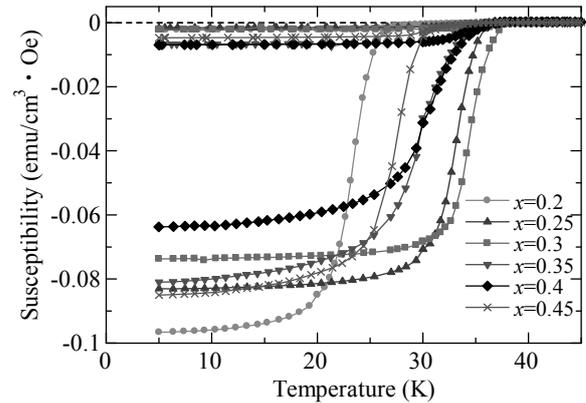


Fig.1 The temperature dependence of magnetic susceptibility of (Ba,K)Fe₂As₂ wires with various K concentration $x = 0.20-0.45$.

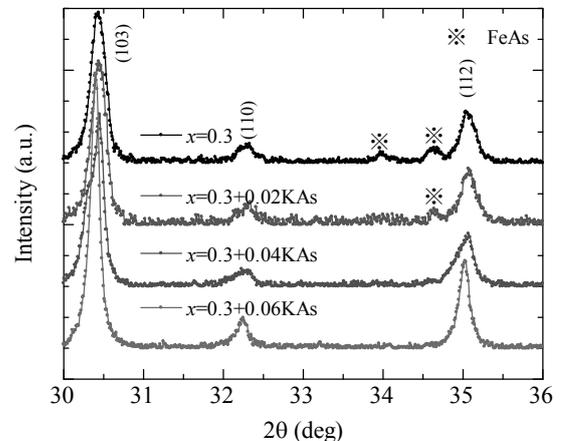


Fig.2 The powder XRD patterns of (Ba,K)Fe₂As₂ wires with different amount of excess KAs.

参考文献

1. J. D. Weiss, et al., *Nature Mater.* **11**, 682 (2012).
2. Z. Gao, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 012001 (2015).

Ag-Sn 合金を被覆材とした高 J_c PIT Ba-122 テープ線材の作製

Fabrication of PIT Ba-122 tape with high J_c by using Ag-Sn alloy sheath

戸叶 一正、Gao Zhaoshun、松本 明善、熊倉浩明 (NIMS)
E-mail: TOGANO.Kazumasa@nims.go.jp

1. はじめに

鉄系超伝導体は高い臨界温度 (T_c) と極めて高い上部臨界磁界 (H_{c2}) を有するため、液体ヘリウムのみならず液体水素、冷凍機冷却など中温度での強磁場発生用線材としての応用が期待されている。そのため Powder-in-tube (PIT) 法による線材化研究が行われてきているが、最近 Ba-122、Sr-122 を対象にして、磁界中、4.2 K で 10^5 A/cm² 近くの実用レベルの J_c が報告されるようになった。

PIT Ba-122 線材は通常純銀を被覆材として作製されている。しかし、純銀は機械的強度が弱く、将来のマグネット応用を考えた場合は、線材としての強度向上が課題となってくる。本研究では純銀の代わりに機械的強度の優れた Ag-Sn 合金を被覆材として使用した効果について報告する。

2. 実験方法

(Ba, K)Fe₂As₂ の前駆体は、各元素単体の原料をボールミルで混合、熱処理することによって作製し、次いでその粉末を Ag-Sn 合金管につめて溝ロール、圧延、プレスによりテープ状に加工した。Ag 中の Sn 濃度は 2-7at% の間で変化させた。Ag-Sn 合金は加工硬化が純銀より大きいため、必要に応じて中間焼鈍 (600°C) を加えた。最終熱処理は 700-850°C、2-5 時間の条件で行った。得られたテープについて、4.2 K、磁場中で臨界電流 (I_c) の測定を行い、Ag-Sn 合金被覆を除いたコア部の断面積で除して J_c を求めた。さらに顕微鏡観察、走査電顕観察、X 線回折、硬度試験などを実施し、Ag 被覆材への Sn 添加の影響について考察した。

3. 実験結果

Ag-Sn 合金を被覆した試料の臨界温度 (T_c) は磁化測定でオンセットが 37 K であり、この値は純銀を用いた場合と殆ど変化がない。Fig. 1 は Ag-5at%Sn/Ba-122 テープの J_c - H 特性を示す。通常の純銀を用いた ex-situ PIT テープでは、800°C 以上の熱処理を施さないと、 J_c 値は得られない。しかし、この図から分かるように、Ag-Sn 合金を被覆材とすると、700°C の低温熱処理でも 10^4 A/cm² (at 4.2K, 10T) を優に越える優れた J_c 特性が得られている。このような最適熱処理温度の低下は、微量な Sn がコア部に拡散したためと思われるが、詳細については現在研究中である。

Ag-Sn 被覆材によって期待されるもう一つの効果は機械的な強度の増加である。加工中は加工硬化によって硬度は上昇するが、Sn 添加したほうがその度合いは著しく大きい。その結果、Fig. 2 に示したように結晶配向が改善され、かつ組織が緻密化される。なお、最終熱処理後の被覆部の硬度は、純銀で $Hv=45.0$ 、Ag-7at%Sn で $Hv=61.4$ であった。

機械的強度の増加と熱処理温度の低下は、将来の実用化を考えた場合極めて有利である。現在組織との関連を調べると同時に、さらなる J_c の向上を目指して条件の適正化を試みている。

4. 謝辞

一部の Ag-Sn 合金の溶製にあたっては、NIMS、超伝導線材ユニットの菊池章弘氏からご協力を得た。ここに謝意を表したい。

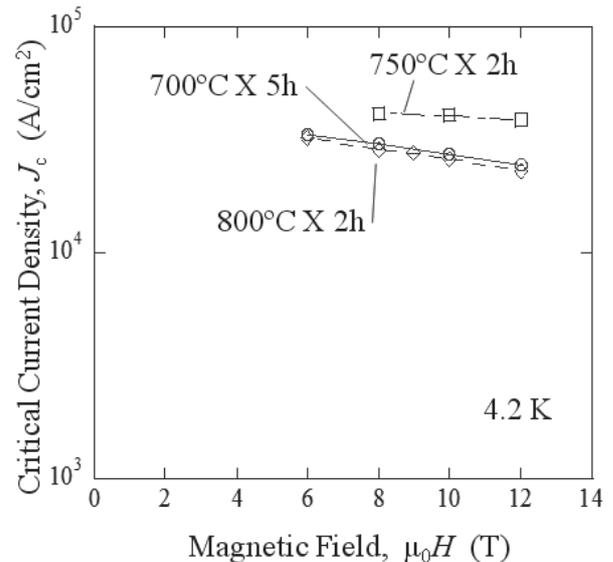


Fig. 1 J_c - H curves for the Ag-5at%Sn/Ba-122 tapes heat treated at different temperatures.

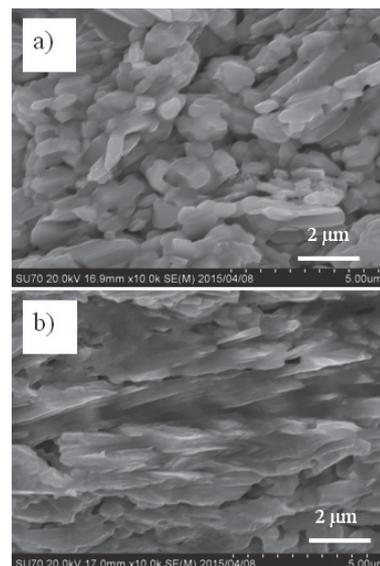


Fig. 2 Grain structures observed by SEM on the fractured cross sections of a) Ag/Ba-122 and b) Ag-5at%Sn/Ba-122 tapes.

圧延法によって作製した SUS/Ag 二重被覆 Ba-122 テープの高磁界特性

High magnetic field properties of stainless steel/Ag double sheathed Ba122 tapes fabricated by rolling process

高召順, 戸叶一正, 松本明善, 熊倉浩明 (物材機構)

GAO Zhaoshun, TOGANO Kazumasa, MATSUMOTO Akiyoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: gao.zhaoshun@nims.go.jp

1. Introduction

The iron-based superconductors with very high upper critical field (H_{c2}) and small anisotropy have been regarded as a potential candidate material for high field applications [1]. Recently, the transport J_c of Ag sheathed Ba(Sr)122 wires were greatly improved [2-4]. However, a drawback of using pure Ag as the sheathing material is that the mechanical properties are quite weak. It is crucial to fabricate mechanically strong conductors for high-field superconducting magnet. In this work, we propose a new sheath architecture of stainless steel (SUS)/Ag double sheath. The composite sheath consists of a SUS external layer and a protective Ag layer situated between the superconducting ceramic core and the SS layer. We found that the use of a double sheath is effective for improving the J_c - H performance.

2. Samples and experiments

The precursors of $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_{2.1}$ were prepared from Ba filings, K pieces, Fe powder and As pieces [3]. In order to compensate for loss of elements, the starting mixture contained 10-20% excess K. Ba122 tapes were fabricated by an *ex-situ* powder-in-tube (PIT) process. The details of fabrication process were described elsewhere [4]. The transport critical current I_c at 4.2 K and its magnetic field dependence were evaluated by the standard four-probe method, with a criterion of 1 μ V/cm. The transport critical current density, J_c , was calculated by dividing I_c by the cross sectional area of the Ba122 core. Magnetic fields up to 12 T were applied parallel to the tape surface. We also carried out I_c measurement in a 28 T hybrid magnet of the Tsukuba Magnet Laboratory (TML) of National Institute for Materials Science. We carried out mechanical polishing using emery paper and lapping paper, and then Ar ion polishing by cross section polisher to observe the surface morphologies of the tapes precisely. After the polishing, we performed scanning electron microscopy (SEM) observations using a SU-70 (Hitachi Co. Ltd.).

3. Experimental results and discussion

Figure 1 shows the in-field transport J_c performance of SUS/Ag double sheathed Ba-122 tapes along with reported values of conventional Nb based superconducting wires and PIT processed MgB_2 . The J_c - H curves for rolled and pressed tapes both show extremely small magnetic field dependence and exceed 3×10^4 A/cm² under 28 T, which are much higher than those of low-temperature superconductors. Very recently, further improvement of J_c values were achieved by optimizing the wire fabrication technology. At 4.2 K, the J_c reaches to the practical level of 10^5 A/cm² in magnetic fields up to 10 T for pressed tapes by intermediate annealing process. Even for the as-rolled tape a high J_c value of 8.6×10^4 A/cm² at 10 T was obtained after using the small size SUS pipe.

Figure 2 exhibits the typical SEM images of the fracture and polished surface for the rolled and pressed tapes. Both SUS/Ag double-sheathed tapes display a denser and more textured microstructure than the tape with Ag sheath. High strength and Young's modulus of SUS result in higher compression stress during cold rolling and heat treatment processes. Thus, the density and texture in the SUS/Ag double

sheathed tapes were improved comparing with the Ag single sheathed samples [3].

In conclusion, excellent transport J_c values under high magnetic field up to 28 T were achieved in SS/Ag double sheathed $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ tapes. The well textured superconducting grains and high core density are responsible for this high J_c performance. We believe that this simple and scalable process is very promising for fabricating long length Ba122 wires for high field magnets.

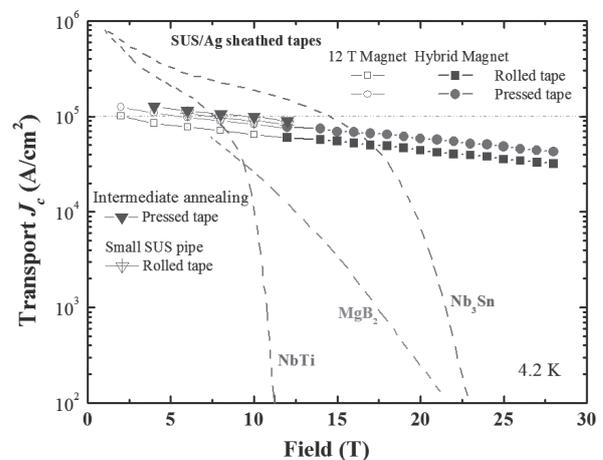


Fig. 1 Transport J_c values plotted as a function of applied magnetic field. J_c of Ba122 tapes are compared to commercial NbTi, Nb₃Sn and MgB₂ wires.

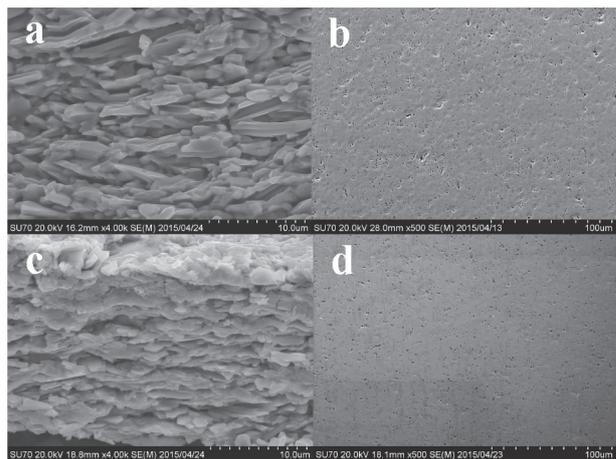


Fig. 2 Typical TEM images of fracture surfaces for rolled (a) and pressed (c) tapes and polished surfaces for rolled (b) and pressed (d) tapes, respectively.

参考文献

1. Y. Kamihara, et al. *J. Am. Chem. Soc.* 130 (2008) 3296.
2. K. Togano, et al. *Supercond. Sci. Technol.* 26 (2013) 115007.
3. Gao, Z. et al. *Sci. Rep.* 4, (2014) 4065.
4. Gao, Z. et al. *Supercond. Sci. Technol.* 28 (2015) 012001.

鉄系混合アニオン化合物 $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$ の輸送特性の評価

Transport properties of iron-based mixed anion compounds $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$

松本 裕介, 藤岡 弘孝, 的場 正憲, 神原 陽一(慶大); 瀬戸 誠, 北尾 真司(京大)

Matsumoto Yusuke, Fujioka Hiroataka, Matoba Masanori, Kamihara Yoichi(Keio Univ.); Seto Makoto, Kitao Shinji(Kyoto Univ.)

E-mail: yusukematsumoto@keio.jp

1. 研究背景と目的

鉄系超伝導体は FePn 層 ($\text{Pn} = \text{P}, \text{As}$) などのキャリア伝導層と、それを挟むキャリアブロック層から構成される結晶構造を示す。そのうち化学組成 $\text{Ae}_2\text{T}_m\text{FePnO}_{3-\delta}$ (Ae : アルカリ土類金属元素, T_m : Sc, V, Al, Pn : P, As, Sb) は 21113 と呼ばれる結晶形に分類され、これに分類される $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ は 37.2 K (onset) の超伝導転移温度 (T_c^{onset}) を示す [1] が、この超伝導性の制御要因として「結晶格子内の酸素欠損」 [2] が報告されている。

一方、同じ 21113 の結晶形に属する $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$ は先行報告において仕込み酸素欠損量 $d = 0$ の試料が合成されているが、超伝導は示さない [3, 4]。本研究では、酸素欠損を仕込み量で制御し、 $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$ の酸素欠損に因る輸送現象の変化を明らかにする。本稿では、仕込み酸素欠損量を d 、格子定数と酸素欠損量の線形関係を仮定して求めた酸素欠損量を δ として区別する。

2. 実験方法

$\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$ は固相反応により、2 段階に分けて合成した。一次焼成では Fe, As の粉末を組成比 Fe:As = 1:1 で混合磨砕し石英ガラスに減圧封管した後、熱処理を行い FeAs を合成した。二次焼成では、 SrO , Cr_2O_3 , Cr そして一次焼成で得られた FeAs を $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-d}$ ($d = -0.10, 0, 0.20, 0.40$) となるような化学量論比で秤量し、封入した。焼成は電気炉で 1030–1330 °C で 20–40 時間保持したあと炉冷もしくは徐冷し試料を合成した。

得られた試料に、Cu K α 線源を用いた粉末 X 線回折 (XRD) の測定と格子定数の算出、銀電極を用いた四端子法による電気抵抗率の温度依存性、超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いた磁化測定による自発磁化の温度依存性、 ^{57}Fe メスバウア分光測定 (^{57}Co 線源) による Fe サイトの磁性を調べた。

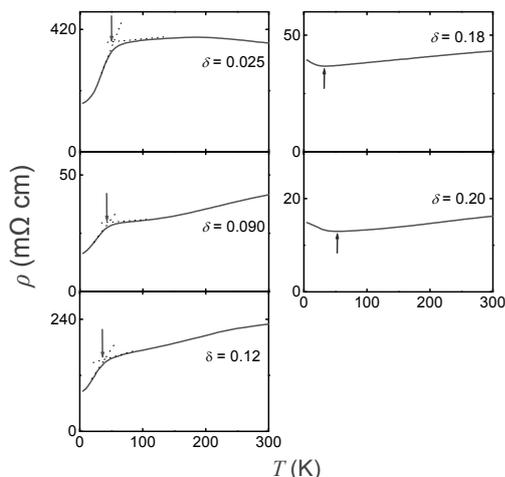


Fig. 1 Temperature (T) dependence of resistivity (ρ) of $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$ [$\delta = 0.025, 0.090, 0.120, 0.180$ and 0.20]. The solid lines (red) indicate observed values during the heating. The downward red arrows indicate temperatures of an anomalous kink in the ρ - T curve (T_{anom}). The upward blue arrows indicate minimum value (T_{min}).

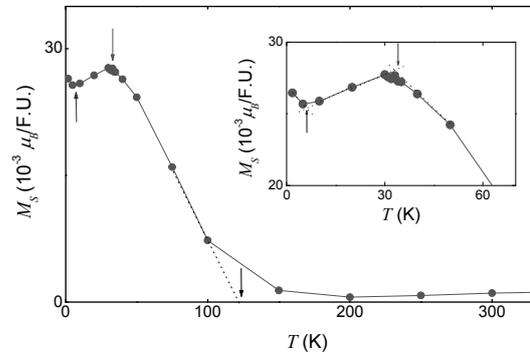


Fig. 2 Temperature (T) dependence of observed M_s of $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$ [$\delta = 0.18$]. The plots indicate observed values. The blue arrow and the red arrow indicate minimum value (T_{min,M_s}) and maximum value (T_{max,M_s}), respectively. The black arrow indicated the temperature under which T_{A_b} occurs.

3. 結果

XRD 測定の結果より、試料 ($d = -0.10, 0, 0.20, 0.40$) は主相として $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$ を含む。

電気抵抗率測定の結果を Fig. 1 に示す。 $\delta = 0.18, 0.20$ の試料では、32 K, 53 K より低い温度で電気抵抗率は増加する。一方 $\delta = 0.025, 0.090, 0.120$ の試料では、52, 45, 38 K より低い温度で電気抵抗率は減少する。

$\delta = 0.18$ の試料の、自発磁化 (M_s) 温度依存性を Fig. 2 に示す。試料は $T = 121$ K 以下の温度で有限の M_s を示し、温度の減少に伴い増大する。

$\delta = 0.18$ の ^{57}Fe メスバウアスペクトル 40–300 K において FeAs の副格子は非磁性である。しかしながら、 ~ 30 K 以下では磁気秩序が存在し、スピン密度波 (SDW) [5] と考えられる。

4. 結論

酸素欠損量 $\delta = -0.13 - 0.48$ の $\text{Sr}_2\text{CrFeAsO}_{3-\delta}$ を合成した。 $\delta = 0.18, 0.20$ の試料では、32, 53 K において電気抵抗率の最小値を示し、 $\delta = 0.025, 0.090, 0.120$ の試料では、52, 45, 38 K にそれぞれキックが存在する。磁化測定の結果、 $\delta = 0.18$ の試料は 121 K 以下で自発磁化 M_s を持ち、33 K において極大、6 K において極小を示す。 ^{57}Fe メスバウアスペクトルより、 $\delta = 0.18$ の試料の FeAs 副格子は、40–300 K において非磁性、 ~ 30 K 以下で SDW 相を示す。

参考文献

1. X. Zhu, *et al.*: Physical Review B, Vol. 79 (2009) p. 220512
2. F. Han, *et al.*: Science China Physics, Mechanics & Astronomy, VOL. 53 (2010) p. 1202
3. H. Ogino *et al.*: Superconductor Science and Technology, Vol. 22 (2009) p. 085001
4. M. Tegel, *et al.*: Zeitschrift Fur Anorganische und Allgemeine Chemie, Vol. 635 (2009) p. 2242
5. E. Fawcett *et al.*: Reviews of Modern Physics, Vol. 66 (1994) p.v25