フジサンケイビジネスアイ賞

ナノ組織制御による人工欠陥導入 次世代超電導線材の開発

~低炭素・安心・安全社会に向けて自然エネルギー を「作る」「貯める」「送る」次世代超電導線材~

1:成蹊大学大学院 理工学研究科

2: (公財) 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材・パワー応用研究部 3: 昭和電線ケーブルシステム(株) 超電導テクノロジーセンター 線材開発グループ

三浦 正志¹ 吉積 正晃² 和泉 輝郎² 塩原 融² 木村 一成³ 小泉 勉³

1. はじめに

超電導技術は、表1に示すように低炭素・安心・安全社会に向けたエネルギー・電力分野、 産業・輸送分野、診断・医療分野等の幅広い分野において従来技術では果たし得なかった機 器の実現や従来機器の大幅な性能向上を可能にする革新的技術として期待されている[1]。 特に超電導技術でしか実現できない磁気共鳴画像診断(MRI)装置、超電導電力貯蔵装置 (SMES)などが実用化され、核融合装置などの装置が実用化に向けて研究が進められている。 しかし、これらに用いられている材料は、NbTi、Nb₃Sn などの金属系超電導体であり、高 価な液体へリウム温度(4.2K)下で使用されている。そこで無尽蔵資源かつ安価である液体窒 素温度(77K)下でも超電導状態を示す REBa₂Cu₃O₉(RE; 希土類, REBCO)材料が注目され、 表1に示す応用に向け日米欧韓での技術開発競争が行われている。

分野	技術大分類	技術中分類	社会貢献内容	使用磁場	
エネルギー・ 電力分野	エネルギー貯蔵	SMES	電力品質維持・向上	~10T	
	送変配電	電力ケーブル	CO2低減・省エネルギー	_	
		電力用変圧器	CO2低減・省エネルギー	0.5T	
	発電	風力用発電機	CO2低減・省エネルギー	~3T	
		核融合用マグネット	非化石燃料エネルギー	$\sim 20 \mathrm{T}$	
産業・輸送分野	輸送用機器	船用・車載用モータ	小型化・軽量化・CO ₂ 低減	$\sim 3 \mathrm{T}$	
	磁場応用	磁気浮上式鉄道用 マグネット	小型化・軽量化・CO2低減	~3T	
診断・医療分野	マグネット応用	MRI	高度診断・創薬	~3T	
		NMR	高度診断・創薬	~45T	

表1 REBCO 線材を用いた技術

2. REBCO線材の応用に向けての課題点

実際の応用には REBCO 線材の低コスト化、磁場中臨界電流(*I*_c)の向上、不可逆磁場(*B*_{irr}; 実用上の臨界磁場)の向上、長尺化が必要である。以下にそれぞれの課題点について詳細に 述べる。

(1) 高品質 REBCO 線材作製の課題

REBCO 超電導体は、77K において高い *I*。を示す材料であるが、長尺線材を作製する上で 固有の電子状態ゆえに結晶配向性が REBCO 線材の結晶粒界 *I*。に大きな影響を与える。 REBCO 線材は図1 (a) に示すように金属基板上に超電導薄膜を積層した構造となっている。 このとき、超電導層は *c* 軸方向だけでなく、面内方向 (*a*, *b* 軸方向)を揃えた2軸配向構造(図 1 (b))でなければ結晶粒界 *I*。が低下する。この理由として図1(c)に示すようにクーパー対が CuO₂面において等方的でない *d* 波状態であるため、2軸配向でなければ結合できないため と考えられる。そのため、REBCO 線材の応用に向けて結晶配向性を人工的に制御する必要 がある。



図1 (a) REBCO 超伝導線材の概略図, (b) 中間層上の超伝導層の配向モデル, (c) 粒界にお けるd 波超伝導電子。

(2) 量子化磁束の運動抑制に向けた APC 導入の課題

① 磁場中臨界電流(/ん)向上に向けての課題

REBCO線材の応用の多くは、磁場中での応用である(表1)。図2(a)に示すように超電導体は、自己磁場下では高い*I*。を示し、超伝導状態を保つ。しかし、図2(b)に示すように磁場下では超電導体内にナノサイズの量子化磁束(直径10nm 程度)が超電導内にナノ間隔に侵入し、これらがローレンツ力を受け運動し、超電導状態が壊れる。そこでNbTi(@4.2K)などでは、磁束の運動を抑制するために磁束と同程度のナノサイズの人工欠陥(Artificial Pinning Center: APC)を導入することにより、図2(c)に示すように高磁場下においても高い臨界電流密度(*J*_c;単位面積当たりの*I*_c)を示す。一方、REBCO線材においても同様のナノサイズのAPCを導入し、磁場中*I*_c向上を目的に基礎研究は行われているが、未だ図3に示すように REBCO線材は電力機器応用実用化レベルである NbTi 程度の高*J*_c 特性は得られていない。





図3 超電導線材の臨界電流の磁場依存性。

更に REBCO 超電導体は、結晶構造に起因して超電導特性は異方性を有するため、図4(c) に示すように *ab* 面に対して平行に磁場印加した場合の *I*_c に比べて、*c* 軸方向に磁場を印加 した際の *I*_c が低いことが知られている。REBCO 線材を SMES、発電機などに用いる場合に ソレノイドコイル形状で用いられることが考えられる (図4(a))。この場合、図4(b) に示す ように発生磁場は、REBCOの ab 面から θ ずれた角度に磁場が加わる。そのため、図4(c) 中の赤線で示すようにあらゆる磁場印加角度に対しても高い I_c が求められる。



図4 (a) SMES 内部のソレノイドコイル、(b) ソレノイドコイルにおける磁場、
(c) 臨界電流の磁場印加角度依存性。



図5 異なる次元性を持つ人工欠陥(APC)導入 REBCO 線材の模式図。

磁束の運動を抑制するために磁束と同程度のナノサイズ APC を制御・導入する必要があ る。図5に次元性の異なる APC を示す。1次元 APC である刃状転位や2次元 APC である双 晶欠陥は、REBCO 線材を作製する際に自然に導入される欠陥である。本研究では、それら の欠陥を作製条件を制御することで密度を制御する。さらに図4(c) に示すようにあらゆる 磁場印加角度に対しても磁束の運動を止めるためには特に3次元 APC を導入する必要があ る。

② 不可逆磁場(Birr)向上に向けての課題

図6(a)に REBCO の温度 - 磁場相図を示す。上部臨界磁場 (B_{c2})は、電気抵抗がゼロである限界境界である。さらに B_{irr} を境界に $I_c = 0 \ge I_c \neq 0$ の領域が存在する。 $I_c = 0$ の領域は、電気抵抗がゼロであっても、電流を流せないという点から応用に用いることが不可能である。 言い換えれば、 B_{irr} は、 $I_c \neq 0$ の境界領域を示すため、実用上の臨界磁場である(図6(b))。 これまでの REBCO 線材の B_{irr} に関する研究により 10T 程度までは図5に示す APC を導入 することで B_{irr} の向上が確認されているが、NMR や ITER に向けて超高磁場中 B_{irr} への APC 導入の影響を調べる必要がある。



図6 (a)磁場 – 温度における不可逆磁場、(b)臨界電流 – 磁場における不可逆磁場。

(3) 長尺 APC 導入 REBCO 線材作製の課題

本研究では、REBCO線材作製方法として真空装置を必要としないため装置コストが他の 手法に比べて低く、原料高収率であるために低コスト化が期待される Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition (TFA-MOD)法を用いる。TFA-MOD法は、図7に示すように塗布・ 仮焼成・本焼成を行うことで REBCO 薄膜を結晶化させる方法である。TFA-MOD 法では、 数 cm 長の短尺線材では高特性が得られるのもの応用に必要な数百 m 長級の長尺 REBCO 線材では未だ特性が低い問題がある。本研究では短尺で得られた知見をもとに図8に示す昭 和電線ケーブルで開発された製造プロセスでの長尺線材の製造を試みる。



図7 TFA-MOD 法を用いた REBCO 超電導線材の結晶化プロセス。



バッチ焼成

図8 昭和電線ケーブルにおける TFA-MOD 法による長尺 REBCO 超電導線材の製造の流れ。

3. 実験方法

本研究では、Y:Gd:Ba:Cu = 0.77:0.23:1.5:3比で混合した Y_{0.77}Gd_{0.23}Ba₂Cu₃O_y (YGdBCO) 溶液を中間層付金属基板に塗布し、有機分を取り除くための仮焼成、結晶化す るための本焼成を行い YGdBCO を結晶化させた。また、3次元 APC として BaZrO₃ (BZO) を選択し、密度を変え導入した。

作製した YGdBCO 線材の結晶構造を X 線回折 (XRD) 法を用いて評価した。*J*_e, *I*_e は四端 子法を用いて評価した。薄膜微細構造評価を透過型電子顕微鏡 (TEM)、組成を TEM 装置 に付随したエネルギー分散型 XRD 分光法 (EDX)を用いて評価した。

4. 研究成果

(1) 成長環境制御による高品質 REBCO 線材の作製

図9(a) に本焼成における酸素分圧、成膜温度が YGdBCO 線材の結晶性に及ぼす影響を示 す。図より低 T_h 、高 PO₂(I 領域) では、図9(b) に示す XRD 結果より電流の流れを阻害する a 軸配向相が生成されることが確認された。さらに高 T_h 、低 PO₂(III 領域) では、超電導相 が分解していることが確認された(図9(b))。一方、II 領域では、良好な2軸配向 YGdBCO 線材が得られ、 $J_c > 4$ MA/cm(77K, 0T)と高い超電導特性を示した。

実際の応用では、 J_c ではなく I_c が必要となるため、超電導層の膜厚を厚くする必要がある。 しかし、図9に示す最適条件下(II領域)においても膜厚を1 μ m以上まで厚くすると図10(a) に示すように前駆体内に存在する RE₂Cu₂O₅異相が粗大化し、図11に示すように膜厚の増加 に伴い J_c が低下し高 I_c が得られないことが確認された。そこで、異相が粗大化する要因と して、超電導相の成長速度が遅いため前駆体内で異相が粗大化すると考えられた。そこで水 蒸気分圧、全圧を制御し超電導相の成長速度を高くすることで、図10(b)に示すように異相 の粗大化を抑制し、TFA-MOD線材として1.9 μ m 厚において I_c = 780A(77K, 0T)を得るこ とに成功した[2]。



図9 (a)温度 – 酸素分圧における YGdBCO 線材の配向状態図、(b) I、Ⅱ、Ⅲの条件下に おける XRD 結果。



図10 (a)低成長速度、(b)高成長速度下で作製した1.9µm 厚 TGdBCO 線材の微細構造。



図11 REBCO線材の成長速度の違いによる77Kにおける L。の膜厚依存性。

(2) 量子化磁束の運動抑制に向けた人工欠陥(APC)導入

① APC 導入による磁場中 /。向上

図4(c)に示すようにあらゆる磁場印加角度に対しても磁束の運動を抑制するため、3次元 APC として BZO を選択し TFA-MOD 法を用いて YGdBCO 超電導層への導入を行った。 図12に示すように YGdBCO は、 $T_h = 750$ °Cに達した時点(B地点)から成長し、C地点で完 全に前駆体から YGdBCO になる。しかし、BZO が本焼成時のどの温度で生成するのかは明 らかになっていないため、図12の各地点の微細構造観察を行った。図13(a)に示すように A 地点では BZO は成長していないことが分かる。一方、B 地点では YGdBCO 内部や前駆体 内に BZO が存在することが確認され(図13(b))、C 地点では超電導層全体に均一に分散し ていることが確認された[3]。



図12 YGdBCO + APC 線材の本焼成プロファイル。



図13 YGdBCO+APC線材の図9における(a)A、(b)B及び(c)におけるCu、Zr組成マッピング[3]。



図14 YGdBCO + APC 線材における (a) BZO 生成メカニズム、(b) 高分解 TEM 像[3]。



図15 1次元、2次元、3次元人工欠陥のハイブリッド化に成功した YGdBCO+APC 線材の微細構造。

図13の結果より図14(a)に示すように TFA-MOD 法において BZO ナノ粒子は、YGdBCO が生成する前に前駆体内に存在し、それらを取り込みながら YGdBCO が成長することを明 らかにした。そのため、パルスレーザ蒸着 (PLD) 法などの気相法により作製した APC 導入 REBCO 線材と異なるメカニズムであることを明らかにした。また、BZO ナノ粒子のサイ ズは図14 (b) に示すように磁束と同程度の25nm、間隔は、3T の磁束間隔と同じ~27nm 間 隔 (密度:5×10²²/m³) に導入することに成功した。図15に本研究で作製した YGdBCO + APC 線材の微細構造を示す。3次元 APC の BZO ナノ粒子だけでなく成長時に導入される1 及び2次元 APC も制御し、最終的に超電導相の結晶性を低下させることなく1.9 μ m 厚にお いて $I_c = 760A(77K, 0T)$ を得ることに成功した。



図16 YGdBCO + APC 線材 (1.9µm 厚)の77K における (a)磁場中 *J*_c、 (b)0.5T 及び (c)1T に おける *J*_cの磁場印加角度。



図17 YGdBCO + APC 線材(1.9µm 厚)の65K における(a)磁場中*J*_c、(b)3T 及び(c)5T に おける *J*_cの磁場印加角度。

図16 (a) に液体窒素温度 (77K) における YGdBCO 及び YGdBCO+APC 線材の磁場中 I_c 特性 ($B \parallel c$) を示す。図より YGdBCO+APC 線材はすべての磁場において YGdBCO より高い I_c を示すことが確認された。更に図16 (b) 及び (c) に示すようにあらゆる角度の磁束の運動を抑制し、変圧器、MRI 応用に求められる $I_c = 200A(0.5T)$, 150A(1T) 以上の TFA-MOD 線材では世界最高の I_c を得ることに成功した。

更に減圧することで容易に実現できる過冷却液体窒素温度(65K)においても図17に示すようにモーター(発電機)、SMES 応用に求められる $I_c = 200A(3T), 100A(5T)$ 以上の TFA-MOD 線材では世界最高の I_c を得ることに成功した。

APC 導入による B_{irr} 向上

超高磁場における Birr を向上させることは超電導線材の更なる磁場応用の可能性を広げる 上で重要であるが、これまで10T以上の磁場下において APC が REBCO 線材の Birr に及ぼ す影響を調べられていない。そこで本研究では米国ロスアラモス国立研究所の国立高磁場研 究所内の65T パルス磁場を用いて評価を行った。図18 (a) 及び (b) に示すように B || c 及び B || 45°においても YGdBCO+APC 線材は YGdBCOより高い Birr を60T まで示すことが確 認された [2]。これらのより APC が60T という超高磁場においても有効であるだけでなく、 YGdBCO+APC 線材は超高感度 NMR(45T) や ITER(20T) などにも応用が期待される線材 であることが確認された。

次に、なぜ超高磁場においても YGdBCO+APC 線材の B_{irr} が向上したかを調べるために 図19 (a) に示す磁束状態理論による電気抵抗率の温度依存性のスケーリングを行った [4]。 その結果、図19 (b) に示すように磁束状態理論によるスケーリングパラメータである臨界指 数(S)が YGdBCO 線材では4.5以上を示した。これは、磁束抑制力 (F_p)よりローレンツ力 (F_L) が強く、磁束が運動しているボルテックスグラス状態であることが確認された。一方、 YGdBCO+APC 線材ではS値が3.5以下を示し、APC が磁束の運動を抑制している ($F_p \ge F_L$) ボーズグラス状態であることを明らかにした。



図18 YGdBCO + APC 線材の(a)B||c、(b)B||45における不可逆磁場[4]。



図19 YGdBCO + APC 線材の *B*||45°における (a) 磁束状態理論によるスケー リング結果(5T)、(b) 臨界指数 *S* の温度依存性。

図19の結果より図20に示すように YGdBCO+APC 線材は、*B*||*c* 及び*B*||45°においても BZO のサイズが磁束のサイズの大きいことより1つの BZO で複数の磁束を捕捉するため~ 60T の超高磁場においても APC が磁束の運動を抑制しているボーズグラス状態となり YGdBCO 線材よりも10T 程度高い*B*_{irr} を示したと考えられる。



図20 YGdBCO + APC 線材の(a) TEM、(b) *B* || *c* 及び(c) *B* || 45°における磁束 と欠陥の関係。

(3) 長尺 APC 導入 REBCO 線材作製の製造

4. 研究成果 (1) 及び (2) 節で述べたように、これまで短尺 YGdBCO+APC 線材の成長環 境及び APC 制御により 1.9μ m 厚膜においても I_c = 760A(77K, 0T)、磁場中においても応用 に求められる世界最高の I_c を得ることに成功した。更に、60T という超高磁場においても 高い B_{irr} を示し、超高感度 NMR(45T)や ITER(20T) などにも応用が期待される成果を得た。 しかし、実際の応用には数百 m 級の REBCO 線材が必要となり、短尺で得られた知見を長 尺 YGdBCO+APC 線材作製にいかす必要がある。

本研究では、(公財)超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所及び成蹊大学で得ら れた短尺の知見をもとに昭和電線ケーブルシステム(株)超電導テクノロジーセンターにて長 尺線材の作製を試みた。図21に昭和電線ケーブルシステム(株)の長尺線材製造ライン(図8) で作製された124m 長の YGdBCO+APC 線材(nPAD-YBCO[®])の外観図を示す[5]。



図21 124m 長 YGdBCO + APC 線材の 外観図[5]。



図22 124m 長 YGdBCO + APC 線材の77K、3T における *J*。の磁場印加角度依存性[5]。

APC として短尺の成果をもとにサイズ・密度制御した BZO ナノ粒子を導入した。図22 に長尺 YGdBCO+APC 線材の77K, 3T における I_c の磁場印加角度依存性を示す[5]。図より 長尺 YGdBCO+APC 線材は、APC を導入していない長尺 YGdBCO 線材に比べあらゆる磁 場印加角度に対しても高い I_c を示し、TFA-MOD 長尺線材としては世界最高の $I_c = 50A$ を 達成した(表2)。

製法	線材長さ[m]	<i>I</i> _c [A/1cm 幅] @77K, 3T	製造機関
TFA-MOD 法	124	50	昭和電線、ISTEC-SRL(日本)
	短尺	56	昭和電線, ISTEC-SRL, 成蹊大(日本)
	短尺	10	AMSC(米国)
PLD 法	200	54	ISTEC-SRL(日本)
	50	14	SuperPower(米国)
	短尺	107	ISTEC-SRL(日本)
	短尺	86	SuperPower(米国)
	短尺	30	SuNAM(韓国)

表2 世界の APC 導入 REBCO 線材の特性比較(77K, 3T)



図23 昭和電線ケーブルで作製された124m 長 YGdBCO + APC 線材 (nPAD-YBCO[®])を使用して作製した電流リード[5]。

図23に長尺 YGdBCO+APC 線材を用いて作製した超電導電流リードの外観図を示す[5]。 電流リードとは、室温にある電源と液体ヘリウムや液体窒素で冷却された超電導マグネット などの機器へ電流を供給する導体である。現在では、SMES、核融合実験炉及びリニア用超 電導磁石に超電導電流リードが用いられ熱負荷の低減や冷凍コスト低減につながるため幅広 く用いられている。本研究で作製した YGdBCO+APC 線材は、磁場下においても高い *I*。を 示すため、従来の超伝導電流リードに比べよりマグネットに近い部分にも用いることが可能 となり超電導マグネットの運転コスト低減に貢献することが期待される。更に図22に示す ように77K、3T においても非常に高い磁場中 *I*。を示すことから今後は電流リードだけでな く変圧器、MRI、モーター(発電機)などのマグネットへの応用が期待される。

5. 低炭素・安心・安全社会に貢献する超電導技術

(1) APC 導入 REBCO 線材が拓く低炭素・安心・安全社会

これまで REBCO 超電導線材は、液体ヘリウムとは異なり無尽蔵に作製でき低コストな液体窒素 (77K)及び過冷却液体窒素 (65T)において、電気抵抗がゼロとなる超電導特性を示す にもかかわらずこれまで実用が遅れてきた。本研究では、REBCO 超電導線材の電力機器応 用に向け課題であった①低コスト化、②長尺化、③磁場中臨界電流 (*I*_c)の向上、③不可逆磁 場(*B*_{irr})の向上に向け研究を行ってきた。①、②に対しては低コストな TFA-MOD 法を用い、 ③、④に対しては YGdBCO 線材内に BZO を APC として導入することで電力機器応用に実用可能な I。まで向上させることに成功した。その結果、表1に示すエネルギー・電力分野、産業・輸送分野及び診断・医療分野への磁場応用が期待される。図24にそれらの超電導応用が拓く近い未来の低炭素・安心・安全社会を示す[6-8]。エネルギー・電力分野では、超電導マグネットを用いた風力発電機や核融合装置により自然エネルギーを「作り」、超電導電力貯蔵装置でエネルギーを「貯め」、超電導ケーブルでロスなしに「送る」。また、輸送分野では超電導を用いた船及び飛行機、そしてリニアモーターカー。さらに診断・医療分野では超電導マグネットを用いた MRI、重粒子線用加速器や NMR が可能となる。



図24 液体窒素使用 YGdBCO + APC 線材を用いた超電導技術が拓く 低炭素・安心・安全社会[6-8]。

(2) 新たな鉄系超電導材料への応用

近年、東京工業大学の細野秀雄教授のグループにより鉄を含む新たな超伝導材料が発見された[9]。その鉄系超伝導体の中でも $BaFe_2As_2(Ba122)$ は、臨界温度(T_c)が高いだけでなく、磁場応用上重要となる高い B_{irr} や小さい異方性(γ)を示すため、実用線材 NbTi(4.2K)等と置き換える材料として、世界中で注目されている。本研究で作製した YGdBCO+APC 線材のAPCと磁束の関係の知見を活かし、Ba122の磁場中 J_c 向上を試みた。超電導材料としては、Asの一部をPで置換した BaFe₂(As_1-xP_x)₂(Ba122:P)に着目し、パルスレーザ蒸着(PLD)法を用い薄膜作製を行った。また、APC としては、本研究の成果を元に BZO ナノ粒子のサイズ・密度を変え導入を試みた。

図25に Ba122:P+APC 薄膜の微細構造観察結果を示す[10]。図より図13(c) に示した YGdBCO+APC 線材同様に超電導層全体にナノサイズの BZO ナノ粒子が均一に分散させる ことに成功した。その結果、図26に示すように15K において Ba122:P+APC 薄膜は、液体 ヘリウム温度(4.2K) における NbTi や15K における MgB₂[11]、16K における Wisconsin 大 の APC 導入 Ba122 薄膜[12] より高い世界最高の磁場中 J。を得ることに成功した[10]。

現在、燃料電池自動車の開発により水素ステーションに水素を液体水素(20K)で貯めることが計画されている。もし、Ba122:P+APC線材の20Kにおける磁場中*J*。がNbTi(4.2K)と同程度の特性を得ることができれば、図27に示すように水素社会に貢献する超電導ケーブル、SMESへの応用が期待される。さらに本研究で得られた知見は、今後発見が期待される新たな超電導材料の磁場中特性向上に貢献が期待される。



図25 Ba122:P + APC 薄膜の(a) Zr 組成マッピング、(b) 高分解能 TEM 像[10]。



図26 Ba122:P + APC 薄膜の15K における磁場中 J_c 特性[10]。



図27 Bal22:P+APC 薄膜を用いた超電導技術が貢献する水素社会。

6. おわりに

REBCO 超電導体は、1986年の発見当時、液体窒素下で超電導特性を示すため、さまざま な分野に応用が期待されてきた。しかし、発見されてから多くの月日が経ったにもかかわら ず未だ夢の材料であった。そこで本研究では、長年の課題であった低コスト化、長尺化、磁 場中臨界電流(*I*_c)の向上、不可逆磁場(*B*_{irr})の向上に向け研究を行ってきた。低コストな TFA-MOD 法を用い、YGdBCO線材内に BaZrO₃を人工欠陥(APC)として導入し、世界最 高の磁場中臨界電流を得ることに成功した。また、短尺線材の知見をもとに124m 長の長尺 線材においても世界最高レベルの特性を得た。今後は、更なる APC の最適化と長尺化を行い、 日本のエネルギー問題、安心・安全社会にいち早く貢献すべく実用可能な超電導線材の開発 を推進していく所存である。

7. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託によって行われた「イットリウム系超電導電力機器技術研究開発」及び経済産業省の委託によって行われた「高温超電 導コイル基盤技術開発プロジェクト」の一環として実施されたものである。米国ロスアラモ ス国立研究所における研究はLDRD, US DOE, Office of Electricity Delivery & Energy Reliability, NHMFL-UCGPとUS NSFの支援を受けたものである。また、鉄系超伝導薄膜に 関する研究は、日本学術振興会 最先端研究開発支援プログラム(FIRST)の一環として東 京工業大学 細野秀雄教授のもと実施されたものである。ここに心より感謝申し上げる。

8. 参考文献

- [1] K. Kitazawa : Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 010001
- [2] M. Miura : Applied Superconductivity Conference 2010, Aug. 1-5, Washington, USA (Invited oral)
- [3] M. Miura et al. : Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 014013
- [4] M. Miura et al. : Appl. Phys. Lett. 96 (2010) 072506
- [5] "先進型イットリウム系超電導線材の長尺製造技術を確立",昭和電線ホールディングス(株)ニュースリリース,2013年6月19日(http://www.swcc.co.jp/news/pdf/130619 PRESS RELEASE.pdf)
- [6] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「超電導技術開発/イットリウム系 超電導電力機器研究開発」事後評価報告書(http://www.nedo.go.jp/content/ 100545219.pdf)
- [7] 奥野清:超電導 web21 2004年8月号 (http://www.istec.or.jp/web21/past-j/04_08_all. pdf)
- [8] G.Brown: "Materials Aspects of Turboelectric Aircraft Propulsion" NASA Technical Reports, 2009 Annual Meeting Fundamental Aeronautics Program; 29 Sep.- 1 Oct. 2009; Atlanta, GA, United States (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa. gov/20090042355.pdf)

- [9] Y. Kamihara et al. : J. Am. Chem. Soc. 130 (2008) 3296.
- [10] M. Miura et al. : Nature Communications 4 (2013) 2499
- [11] C. Zhuang et al. : Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 082002
- [12] S. Lee et al. : Nat. Mater. 12 (2013) 392.

9. 関連の報道事例

- 1. "鉄系磁石の磁力3倍に", 日経産業新聞, 2013年10月13日 7面
- "BaZrO₃ナノ粒子を均一に分散させた BaFe₂(As_{0.66}P_{0.33})₂超伝導薄膜における飛躍的に向 上した磁東ピン止め特性", Nature Japan, 注目論文
- 3. "イットリウム系超電導線材 昭和電線 MRI応用探る", 日経新聞, 2013年7月3日
- 4. "高磁場でも超電導", 日経産業新聞, 2013年6月20日
- 5. "イットリウム系超電導線材 低コスト製造",日刊工業新聞,2013年6月20日
- 6. "磁場中でも特性高く 高温超電導線材製造法を確立",電気新聞,2013年6月20日
- 7. "100メートル超の長尺化に成功 Y系酸化物超電導線材",化学工業日報新聞,2013年 6月20日
- 8. "昭和電線ケーブル 次世代超電導線材を事業化",鉄鋼新聞, 2013年6月20日
- 9. "昭和電線など 長尺製造技術を確立", 産業新聞, 2013年6月20日
- "Voltex Liquid-glass Transition Up to 60T in Nanoenginneered Coated Conductors", Magnet Science & Technology (2009 Annual reports, USA) chapter 2, P35-36
- 11. "高い磁場でも電気抵抗0-超電導の線材開発-"毎日新聞, 2009年11月10日 13面
- 12. "ISTEC、高磁場で超電導線材に超電導電流を確認",日刊工業(日刊工業新聞),2009 年11月6日
- 13. "高磁場で通電可能に",日本経済産業新聞,2009年11月4日 10面
- 14. "高磁場で超電導実証", 電気新聞, 2009年11月4日 4面
- 15. "高磁場で超電導維持", 日刊工業, 2009年11月3日 17面
- 16. "高磁場で超電導線材に超電導電流を確認", asahi.com(朝日新聞社), 2009年11月3日
- 17. "超電導の線材:高い磁場でも電気抵抗ゼロ リニアに応用期待",毎日 jp(毎日開社),2009年11月2日
- "International collaboration studies high-yield superconducting properties of coated conductors" Newsletter of the Materials Physics and Applications, Los Alamos National Laboratory, September 2009 P3-4

10. 関連の特許

- 1. 特願 2013-110254, "鉄系超電導材料、及びこれからなる鉄系超電導層、鉄系超電導テー プ線材、鉄系超電導線材", <u>三浦正志</u>、安達成司、田辺圭一、細野秀雄
- United State Patent: US 8,326,3687 B「RE-type oxide superconducting wire and process for producing the same」平成24年12月4日登録, 全発明者氏名: <u>M. Miura</u>, T. Nankanishi, Y. Sutoh, T. Izumi, Y. Shiohara
- 3. 特願 2009-164010, "RE 系酸化物超電導線材及びその製造方法", 三浦正志、中西達尚、

須藤泰範、和泉輝郎、塩原融