

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成23年11月22日

評価委員：（敬称略、五十音順）

榎 学 東京大学大学院 工学系研究科 教授

竹山雅夫 東京工業大学大学院 理工学研究科 教授

山崎裕文 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 グループ長

確定年月日：平成24年2月5日

プロジェクト名	ナノ構造制御による超伝導線材の高性能化
研究責任者の所属・役職・氏名	中核機能部門 強磁場共用ステーション長 （元超伝導材料センター長） 熊倉浩明
実施期間	平成18年度～平成22年度
研究目的と意義	「ビスマス系酸化物超伝導材料」「MgB ₂ 超伝導材料」「Nb ₃ Alなどの先進金属系超伝導材料」の三つの有望な超伝導材料に対して、これまでの研究手法に加えて、結晶や結晶粒界、不純物、空隙などのナノメートル～マイクロメートルレベルの構造制御に基づいた線材化研究を行い、高臨界電流密度(Jc)を有する線材を開発する。このために、ナノ構造を有する超伝導体を作製し、磁束線ピンニングメカニズムを解明するとともに、ナノ構造観察のためのSQUID（超伝導量子干渉素子）磁気顕微鏡を開発し、そこで得られたデータを線材の高性能化に役立てる。また、次世代線材のシーズとなる新超伝導物質の探索にもチャレンジする。線材応用として、上記の三つの線材の中から最適線材を選んでNMR（核磁気共鳴）用の内層コイルを試作し、強磁界NMRシステムを開発する。
研究内容	ビスマス系線材では、各種のナノスケールの構造制御技術を検討しつつ、Jc 特性評価結果や微細組織観察結果を線材作製にフィードバックする。MgB ₂ 線材では、パウダー・イン・チューブ法、Mg拡散法などにより線材化研究を進める。Nb ₃ Al線材では、急加熱・急冷/変態法において、前駆体のNb/Al 拡散対構造の微細均一化、急冷過飽和固溶体の強加工、などによりJc 特性の向上を図る。特性評価では、ナノ構造を有する超伝導体での磁束線ピンニング機構の解明を図る。またSQUID磁気顕微鏡を開発し、超伝導材料を評価する。新物質探索では、ベルト型高圧合成装置を用いた新物質合成ならびにソフト化学合成手法の物質創製への適用を精力的に推進する。NMRでは本プロジェクトで開発した線材を用いてNMRマグネットの内層コイルを試作し、NMRシグナルの観測を目指す。
ミッションステートメント（具体的な達成目標）	1) ビスマス系線材、MgB ₂ 線材、Nb ₃ Al線材の開発においては、それぞれ(30K、3T)、(20K、3T)ならびに(4.2K、15T)で実用レベルである10 ⁵ A/cm ² のJcの達成を目標とする。 2) 超伝導線材の特性評価では、ナノ構造を有する超伝導体での、人工的に制御された欠陥への磁束線ピンニング機構の静的・動的解明。また、ナノ構造観察のためのSQUID磁気顕微鏡を開発する。 3) 新超伝導体の探索では、超高圧、超高ガス圧、ソフト化学等のNIMSの得意な特殊合成環境を活用して、次世代の超伝導線材のシーズとなるべき新規超伝導体を探索・開発する。 4) NMRでは、試作した内層コイルを用いたNMRマグネットで、NMRシグナルを検出できることを目標とする。
平成18年度～平成22年度までの主な研究成果（アウトプット）及び研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）	1) 主な研究成果（アウトプット）： ビスマス系線材では、NIMSが主体となり、住友電気工業（株）が協力して産学独連携体制を構築・推進し、目標値を平成21年度に前倒しした形で達成することが出来た。 MgB ₂ 線材では、有機物（芳香族炭化水素）添加やMg 拡散法を開発し、20K、3Tで10 ⁵ A/cm ² 以上というMgB ₂ 線材としては世界最高のJcを達成し、目標値をクリアした。

	<p>Nb₃Al 線材では、独自の急熱急冷変態法を考案し、これによって高性能 Nb₃Al 多芯線材の開発を進め、臨界電流の目標値を達成するとともに、小型内層コイルを開発して金属系超伝導コイルとしては世界最高の磁界発生を達成した。</p> <p>線材磁場応用では、ビスマス系線材で作製した内層コイルを組み込んだ NMR システムを構築し、タンパク質の高精度 NMR シグナルの観測に成功した。これにより HTS (高温超伝導体) コイルが NMR 磁石として使用可能であることを世界で初めて実証するとともに、NMR マグネットの一層の強磁場化や小型化への道筋をつけた。</p> <p>2) 研究成果から生み出された (生み出される) 効果・効用 (アウトカム)、波及効果 (インパクト) :</p> <p>ビスマス系線材では、実用を目指した機器開発に進展した (JST 先端計測分析技術、JST S-イノベーション、NEDO エコイノベーション推進事業)。</p> <p>MgB₂ 線材では、ここで開発した有機物添加法や Mg 拡散法が世界的に広まりつつある (東海大学、オーストラリア Wollongong Univ.、米 Ohio State Univ. など)。また JST の先端的低炭素化技術開発プロジェクトに発展した。</p> <p>Nb₃Al 線材では、核融合炉用に日本原子力研究開発機構と、また次世代高エネルギー粒子加速器用に高エネルギー加速器研究機構及び米フェルミ国立加速器研究所と共同開発が進行しつつある。</p> <p>NMR では、高温酸化物系超伝導線材の NMR への応用を世界的に加速することになった (米 MIT、米フロリダ大学など)。</p>
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い :</p> <p>上記ミッションステートメントの四つのミッションを総合すると、全体としてほぼ目標を達成できた。</p> <p>自己点検・評価 :</p> <p>本プロジェクトの要である線材開発においては、いずれも Jc に対する数値目標を達成した。また、Bi-2223 線材を用いてマグネットを試作し、NMR シグナルの観測に成功し目標を達成した。超伝導体へのナノ構造の導入及びその特性の評価も順調に進展し目標を達成できた。また STM (走査型トンネル顕微鏡) -SQUID 磁気顕微鏡の開発にも成功したが、これら二つの研究の線材特性向上への寄与は大きくはなかった。超伝導体探索においては狭義の意味での新規超伝導は見いだせなかったが、超伝導発現に関係すると思われる特殊な物理メカニズムを有する多くの新しい物質を新規開発することに成功したことで、ある程度の目標を達成できたと考える。</p>
<p>【評価項目】</p>	<p>コメント</p>
<p>①研究計画、実施体制、マネージメント、連携 (計画はきめ細かったか、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネージメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか、どこが問題なのか、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ビスマス系、MgB₂、Nb₃Al などの有望な材料の線材化を通じた実用化を目標として掲げており、研究計画は適切であった。 ・研究内容は、基礎、プロセス、応用及び新物質の探索と、バランスが取れている。連携体制も良い。 ・サブテーマの内容が多岐にわたることもあり、サブテーマ個々の計画の是非については評価が難しい。 ・個々のサブテーマにおいては世界的な成果が得られているが、サブテーマ間の相互関連・連携の成果がはっきりしなかった。例えば、ビスマス系線材開発と MgB₂ 線材開発の間の連携がもっとあっても良かったのではないか。 ・多くの研究機関と連携する意義は大きいものの、目的がやや不明確になったきらいがある。トップダウン的な体制で集中した形でもよかったかと思われる。

<p><u>②研究開発の進捗状況及び具体的目標の達成度</u> (研究責任者の自己点検・評価を踏まえて、進み具合はどうだったか、目標は達成されたか、目標は具体的であったか、世界レベルで見て目標は高かったか・低かったか、問題点は何か、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・各サブテーマにおいて大幅な進歩が見られ、十分な成果が得られていると思われる。数値的な目標が設定しにくいサブテーマもあったが、世界的にも優れた成果が得られている。 ・線材のJc 目標値は、3つのサブテーマ(ビスマス系、MgB₂、Nb₃Al 線材)ですべて達成されている。 ・MgB₂ 線材について、拡散法で得られた緻密な組織で世界最高の Jc を得た点や、多芯線材を作製した点は評価できる。ただ、実施者も認識している通り生成層の占積率が小さいためそれがそのまま「実用レベルの Jc」とは言い難く、また、目標温度である 20K での最適化がなされなかったのは残念である。次期プロジェクトの成果に期待したい。 ・ビスマス系線材について、Jc 目標達成や今後の特性向上のためにNIMSが行った具体的な貢献があまり明確でないが、住友電工(株)・大学との共同研究で Jc 向上に寄与した点は評価できる。 ・産学独で連携がとれる体制を有しているにも関わらず、NIMSとしての成果が不明瞭である。NIMSの役割、NIMSの成果をもっと強調すべきではないか。 ・実用化においては大型のものを作製するということになるが、材料的な課題があまり明確ではなく、連携した研究機関の寄与あるいはNIMSとしての主導性がやや不明である。 ・プロジェクトの目的・内容に、「ナノスケールレベルの構造制御」、「磁束線ピンニングメカニズムの解明」というキーワードがあり、ビスマス系単結晶を用いた研究成果があったが、線材開発に有用な知見を与えるところまで進展しなかったのが残念である。 ・サブテーマ4「ナノ構造制御による超伝導材料の特性評価」の成果が不明瞭である。 ・新超伝導体の探索で、「次世代の超伝導線材のシーズとなるべき、新規超伝導体を探索・開発する」という目標は、やはり相当困難なようで、未達である。このような目標を立てること自体は評価できるが、そのためにどのような取り組みを行ったかがよく見えなかった。
<p><u>③論文・特許等の直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)</u> (世界レベルの質の成果が出たか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか(期待されるか)、研究タイプを考慮した費用対効果は、問題点は何か、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・論文・特許に関しては研究費に比して十分なアウトプットが得られている。 ・研究成果の発信には問題ない。 ・個々のサブテーマについてアピールしている成果は、いずれも世界的でレベルが高いものである。特に、NIMSが世界をリードしている金属系 Nb₃Al 線材の開発については Jc が2倍程度向上しており、外国の研究機関との共同研究を行っている点が評価できる。 ・重要な分野などで今後の展開を期待する。 ・NIMSが主導した Bi-2223 線材を用いた高磁界マグネットによるNMRの実証は、今後の高温超伝導NMRの実用化につながることを期待される。 ・これから実用に向けた応用研究がさらに期待されるので、サブテーマの集約化が必要と思われる。 ・人員は57名(平成22年度)とのことであるが、年齢構成が気になる。また、プロパーなのか、ポスドクなのか、人材育成はできているのか、単発で終わっていないかなど、一度精査してみてもどうか。
<p><u>④総合評価</u> (研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイントがあれば追加してコメント)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・個々のサブテーマで行っている研究や成果は、いずれも世界トップレベルであり、着実に進歩している。その意味で、優れたプロジェクトであった。 ・日本における超伝導材料の研究をリードするという役割を十分果たしている。引き続き基礎的な研究を行うことが期待される。 ・実用化に向けた研究は別の体制・枠組みでの取り組みが必要と思われる。 ・個々のサブテーマについては、優れた成果を出していることは理解できるが、サブテーマ間の連携が希薄である。もう少し有機的な体制が構築できれば、さらなる成果が期待できる。 ・サブテーマ間の連携が充分ではなかった。 ・超伝導のA～Zを網羅した研究になっている。しかし、新物質の探索から応用ま

		<p>で範囲が広すぎて、どこに目標を絞っているのかわからない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超伝導の分野においては線材の製造とその大型化が重要と思われるが30年前に比べてあまり変わっていない気がする。もう少し大きな視点から本プロジェクトのあるサブテーマに絞って研究を進めてはどうか。 ・（非常に困難な）新規超伝導材料の実用化や新しい研究分野の開拓につながるような、飛び抜けた成果が得られていないのが残念である。
各委員の総合評価点 (10点満点)		7、8、7 (順不同)
総合評価点平均 (10点満点)		7.3 (小数第二位以下四捨五入)
総合評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れていた。
9		多くの点において非常に優れていた。
8	A	総合的に優れていた。
7		優れたプロジェクトであった。
6		平均的なプロジェクトであった。
5	B	一部の計画の見直しが必要であった。
4		期待されたほどではなかった。
3		計画を見直して継続すべきであった。
2	C	プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要であった。
1		大きな問題があり、プロジェクトを中止すべきであった。