

# 1. 研究実施計画

研究課題名：超伝導マグネットコイル電流密度向上のための要素技術の開発

研究機関名：独立行政法人物質・材料研究機構

任期付研究員氏名：菊池 章弘

## 1. 研究の意義、目的、必要性

### (1) 意義、目的、必要性

超伝導マグネットのコイルの電流密度の向上は、超伝導マグネットの製造コスト、運転コストの大幅引き下げに繋がる重要技術である。従来、高電流密度化はマグネット設計を最適化することで行われてきた。ところが近年、臨界電流密度  $J_c$  の極めて大きい  $Nb_3Al$  新超伝導線材が実用化されようとしており、この線材を使うと潜在的には5倍近い高電流密度運転が可能になる。しかも、この新製造プロセスは他の金属系超伝導線材に適用しても高  $J_c$  化をもたらす可能性を持っている。しかし、コイルを高電流密度化するには、超伝導線材の  $J_c$  だけを向上してもだめであり、線材の巨大  $J_c$  に対応したマグネット作製技術、安定化技術、絶縁技術、接続技術、電流リード技術等の付帯要素技術を開発する必要がある。この付帯要素技術は極めて重要であるが、次世代超伝導材料は酸化物超伝導材料であるという強い思いこみがあるため、企業がこれらの研究を自らの予算を積極的に使って推進する状況にはない。国研が積極的にこの開発研究を推進する必要がある。なお、 $Nb_3Al$  新超伝導線材の製造プロセスは、金属材料技術研究所で開発したものであり、製造プロセスのノウハウを熟知しているのは金属材料技術研究所の研究者であり、当該研究機関が付帯要素技術の開発研究を担当するのが最も効率的である。この研究で主に取り上げる要素技術は高  $J_c$  線材、安定化材及び大容量電流リードである。

なお、この要素技術は、核融合炉、超伝導電力貯蔵装置 (SMES)、超高感度NMRスペクトロメーター用超伝導マグネット、粒子加速用超伝導ダイポールマグネット、磁気浮上列車などの殆ど全ての超伝導応用において小型化、軽量化、経済性向上等にも貢献するであろう。例えば、磁気浮上列車をとりあげると、山梨の実験車両では、1車両に1.5tの超伝導マグネットが4台積み込まれている。もし、この要素技術開発により、超伝導マグネット重量を0.5tまで、減らすことができれば、超伝導マグネット部の重量を4t減らすことができる。すなわち、他の部分の設計が同じだとして、1車両あたり、40人増の人間(100kg/人とした)を乗車させることが可能となり、経済効果は計り知れないほど大きい。また、核融合炉を考えてみると、建設費の半分以上が超伝導マグネット部の建設費だと言われている。超伝導マグネット部の建設費が大電流密度化に伴う小型化により、1/3に減らせるなら、数兆円の核融合炉建設費削減ができることになる。

## 2. 研究の概要

### (1) $Nb_3Al$ 線材への安定化銅複合法の検討

超伝導線材は、安定化のため、適量の純銅が複合していることが望ましい。急熱急冷法  $Nb_3Al$  線材は銅の融点より高い温度2000℃に加熱されるため、初めから銅複合をしておくわけにはいかない。急熱急冷処理後、鍍金、圧接、溶射等の手法で銅複合する必要があるが、どの方法がベストかを実験的に決定する。

### (2) 高 $J_c$ 新線材化法(急熱急冷法)の原理と波及効果の検討

急熱急冷法  $Nb_3Al$  線材において高  $J_c$  が得られることは明らかにされている。透過電顕、走査電顕、等を使って線材製造の各工程においてどのような相が生成し、どのような結晶粒分布にな

っているかを観察することで、高  $J_c$  発現要因を明らかにする。次いで、この新製法を他の有望な超伝導化合物の線材化に適用した場合、同様な高  $J_c$  化ができないか検討する。

(3) 熱侵入量の少ない電流リードの検討

大電流密度運転するには大電流を室温から極低温部へ送り込む電流リードの開発が不可欠である。酸化物超伝導体や熱電半導体を使うと熱侵入量の少ない電流リードの製作が可能となり冷却用運転コストが低減できる。すでに Bi 系超伝導酸化物と Y 系超伝導酸化物の電流リードは開発・市販されているが、より  $T_c$  の高い Tl 系や Hg 系酸化物を使った電流リードが実現すれば、より優れた特性が期待できるにもかかわらず、まだ、開発の試みもなされていないので、実用性の検討を行う。また、熱電半導体と酸化物超伝導体を組み合わせた電流リードも有望だが、詳細検討がなされていないので、実用性があるか検討を行う。

短期間で成果が出るように具体的にはこの番号どおりの優先順位で研究を進める。

3. 研究目標

(1)  $Nb_3Al$  線材への安定化銅複合法の検討

強固な Cu 鍍金のための Nb マトリックスの表面処理法を確立する。

(2) 高  $J_c$  新線材化法（急熱急冷法）の原理と波及効果の検討

$Nb_3Al$  の結晶粒径、 $J_c$  及び線材製造条件の相関関係を明らかにする。 $Nb_3Ge$  や  $Nb_3Ga$  の線材化に  $Nb_3Al$  線材化プロセスと類似の製造法が適用可能か検討する。

(3) 熱侵入量の少ない電流リードの検討

数値解析、モデル試作等による各種の酸化物超伝導電流リードの得失について検討を行う。

〔急熱急冷法Nb<sub>3</sub>Al線材が極めて高いJ<sub>c</sub>を示すことが見出されたことにより必要となった各種研究テーマと本提案の関係〕

本提案研究課題

J<sub>c</sub>向上の機構解明  
金相学的研究

本提案研究課題

他の超伝導体(Nb<sub>3</sub>Gc, Nb<sub>3</sub>Ga)  
への急熱急冷法適用

企業担当研究課題

工業規模急熱急冷法  
長尺線化、大容量化

急熱急冷法  
Nb<sub>3</sub>AlのJ<sub>c</sub>大幅向上

本提案研究課題(太字)

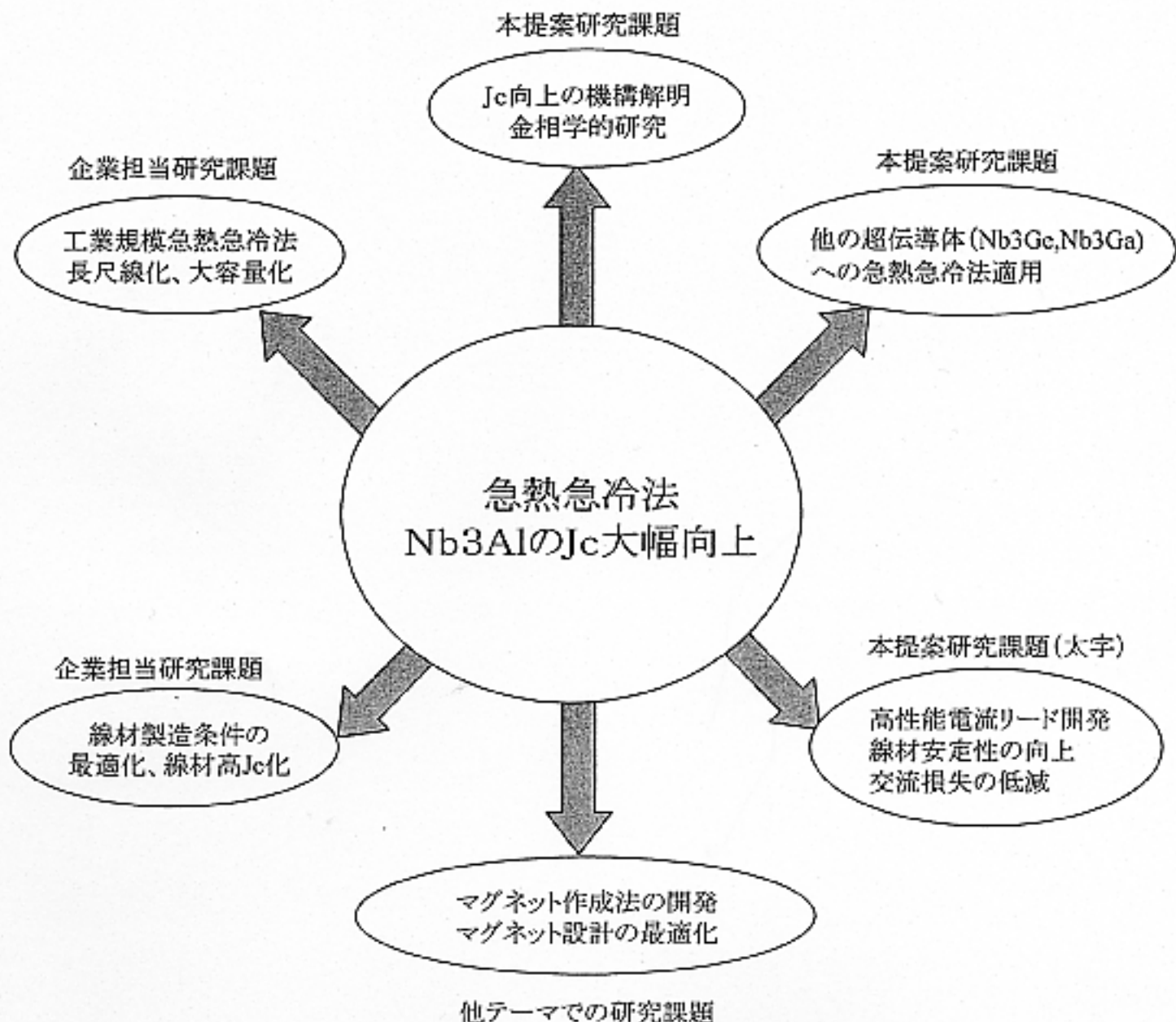
高性能電流リード開発  
線材安定性の向上  
交流損失の低減

企業担当研究課題

線材製造条件の  
最適化、線材高J<sub>c</sub>化

マグネット作成法の開発  
マグネット設計の最適化

他テーマでの研究課題



## 2. 研究成果の概要

### ① 研究成果

急熱急冷・変態法では、前駆体線材が通電加熱により銅の融点よりはるかに高い約2000℃まで急加熱されるため、急熱急冷処理後に安定化のための銅複合を行う必要がある。ところが、線材の母材となる Nb 上には強固な酸化物皮膜が存在するため、Nb/Cu 間における十分な電氣的・物理的接続を得るのが極めて困難であった。そこで Cu 電気メッキ法により厚く Cu を被覆する前に、前処理として Cu-イオンプレーティング法で数ミクロンの厚さの Cu 層を蒸着させると、Cu と Nb の電氣的・物理的接続性が著しく向上し、優れた超伝導安定性が得られることを見出した。前処理としてイオンプレーティングに要する時間は数秒～数十秒であり、実用化にも十分対応できる。さらに、線材の微視的組織を高分解能透過型電子顕微鏡により詳細に観察し、Nb<sub>3</sub>Al 超伝導フィラメント中に Al 濃度に富んだ積層欠陥が数十 nm の間隔で高密度に生成していることを発見した。これまでの A15 化合物相では報告例のない新しい知見であり、超伝導材料科学に与えるインパクトは大きい。さらに、この高密度面状欠陥は、急熱急冷・変態法 Nb<sub>3</sub>Al 線材の特異に大きい J<sub>c</sub> を説明できる新しいピンニングセンターである可能性が浮上し、今後の J<sub>c</sub> 向上のための材料開発に大きな波及効果を与えている。また、この発見により急熱急冷・変態法 Nb<sub>3</sub>Al が化学量論組成比からずれる原因も明らかとなった。化学量論組成の Nb<sub>3</sub>Al が安定して存在する 1900℃付近の高温で短時間変態熱処理を実施する新プロセス「2 段急熱急冷法」を開発した。Nb<sub>3</sub>Al の 3 つの臨界値を大幅に向上させる事に成功した。この新プロセスは、急熱急冷処理を 2 回繰り返すことを特徴とするため長尺線材に容易に適用でき、また、従来の前駆体線材にそのまま適用できるため新たな線材加工製造技術の開発を必要としない。今後、短期の研究開発により従来夢であった 25T 以上の超強磁場超伝導マグネットへの応用が期待できる。さらに、この急熱急冷・変態法を Nb<sub>3</sub>Al 以外の超伝導体へ適用することを検討し、Nb<sub>3</sub>(Al,Ge)多芯線材の作製に成功した。この先進 Nb<sub>3</sub>(Al,Ge)超伝導線材は 25T 以上の高磁場下での J<sub>c</sub> が世界最高レベルにあることが明らかとなった。また、超伝導マグネット用電流リード材として、Y 系酸化物超伝導体の研究を実施し、3 軸に結晶配向した組織を容易に実現できる新しいプロセスを開発し、低温短時間で高度な組織制御を行って、低熱進入および大電流通電を実現できる見通しを得た。

### ② 波及効果、発展方向、改善点等

本研究によりコイル電流密度を大幅に向上させる確かな見通しが得られた。特に、新プロセス 2 段急熱急冷法の開発により、従来夢であった 25T 超強超伝導マグネットの実現が強く期待できる。この成果は、強磁場利用の種々の分野（NMR スペクトロメータ、核融合炉、高エネルギー加速器、電磁推進船等）に巨大な波及効果を与えるものである。