

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340079

研究課題名(和文)次期加速器用Nb3Al高磁場超伝導磁石の開発

研究課題名(英文)Development of high field Nb3Al magnet for future accelerators

研究代表者

土屋 清澄(Tsuchiya, Kiyosumi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：20044787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：CERN-LHCのアップグレードなど次期加速器を目指したNb3Al高磁場超伝導磁石の開発を行った。具体的には長尺Nb3Al超伝導線材の製造技術の開発、Jc特性向上を目指した基礎研究、更にはNb3Al鞍型コイルの製作・試験を目標として研究を進めた。その結果、単長数百mのNb3Al線材を製作する事ができた。また、Jc特性に影響を与える製造パラメータに関する有益な情報も得られた。線材の製作が予定より遅れたため鞍型コイルの製作は出来なかったが、その代替としてNb3SnとNb3Alのレーストラックコイルからなるサブスケール磁石の冷却励磁試験を行い、これらコイルの各種特性データを得た。

研究成果の概要(英文)：Development of high field superconducting magnet using Nb3Al wires has been carried out for the future accelerators such as high luminosity upgrade of the CERN-LHC and/or muon collider at Fermilab. Specifically, we have aimed to establish the fabrication technology of long Nb3Al wire and performed the studies to increase the Jc of the wire. In addition to these items, we had planned to make a saddle shape coil with Nb3Al cables. Through this study, we could make about 500 m long Nb3Al wires and obtained the useful information concerning the fabrication parameters related to the Jc properties. Although we could not make a saddle shape coil due to the delay of the wire fabrication, instead, the excitation test of a sub-scale model magnet, which consists of Nb3Sn and Nb3Al racetrack coils, was carried out and the various data concerning these coils were obtained.

研究分野：低温・超伝導工学、加速器工学

キーワード：加速器 超伝導磁石 超伝導線材 Nb3Al超伝導線材

1. 研究開始当初の背景

超伝導磁石の進歩により、Large Hadron Collider (LHC)が実現し、今まさに新エネルギー領域の物理が開かれようとしている。この状況のなか、欧州原子核研究機構(CERN)ではLHCのアップグレード計画(ビーム衝突頻度を設計ビームルミノシティーの10倍に増強)の検討が進んでいる。この計画にはビーム衝突点両側に設置される磁石の高磁場化が必須であり、早期に15テスラ級磁石の可能性を示すことが要求されている。また、米国のフェルミ国立加速器研究所(Fermilab)ではミューオン・コライダー(0.75 TeV x 0.75 TeV)の検討も始まっている。これら次期加速器で必要となる磁石は、どの加速器においても13~15テスラの超伝導磁石となる。この高磁場を実現するためには、高い臨界磁場および臨界電流密度を有する化合物超伝導線材(Nb₃Sn, Nb₃Al)の採用が不可避である。しかしながら、NbTi線材と比べ、化合物線材は熱処理が必要であり、また、機械的に脆いため、その磁石製作には多くの研究開発が必要である。現在、欧米の研究所ではNb₃Sn線材を用いた高磁場磁石開発が精力的に進められている。我々は、欧米とは異なり、Nb₃Snよりも機械的歪みや応力に強いNb₃Al線材が高磁場磁石に適しているとの考えのもとに、その線材開発を続けており、今日では、加速器用磁石に必須となるラザフォードケーブルを試作するところまで達した。然し乍ら、磁石製作を進めるためには、より長尺の線材製作や線材のより高電流密度化が望まれている。

2. 研究の目的

次期加速器で必須となる高磁場(15テスラ級)超伝導磁石を目標に、Nb₃Al超伝導磁石の基礎開発を進める。具体的には、長尺Nb₃Al超伝導線材の製造技術の開発、Nb₃Al線材の特性向上を目指した基礎的研究、及びNb₃Al線材を用いたコイル試作とその特性データの収集を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 安定したNb₃Al線材製造法(長尺線材の製造技術)の開発

① 前駆体線材の伸線過程での断線解消:

磁気的不安定性の改善を目指したTaマトリックスNb₃Al線材では、Nb/Al前駆体線材の伸線加工中に断線が発生し長尺線材の製作を困難にしている。本開発ではNb/Alフィラメントの配置やフィラメント間材料に工夫をこらした数種類の線材試作を行い、その加工性や断線の具合を調べ、最良の線材断面構造を探った。

② 急熱急冷(RHQ)処理線の細線化:

急熱急冷法Nb₃Al線材の製造パラメータは非常に多く、現在では、それらパラメータ(寸法など)はかなり固定化されている。この標準寸法より細い線材の要求に答える方法とし

ては、銅メッキ被覆急熱急冷NbAl線のダイス伸線が考えられる。ここでは、ダイス加工により細線化した急熱急冷NbAl線を数種類準備し、その特性評価を行うことによりダイス伸線の可能性を調べた。

(2) Nb₃Al線材の特性向上を目指した基礎研究

① 銅マトリックスNb₃Al線材:

前駆体製造過程での断線解消と磁化特性改善を目指して、銅マトリックス線材の開発・試作を進めた。線材の製作性の調査のみでなく、超伝導特性の測定や顕微鏡による断面観察を行い、この線材の特性評価を行った。

② 2回急熱急冷法によるNb₃Al線材:

従来の1回急熱急冷法線材のフィラメント内Al元素の分布を調べると、必ずしも一様と言える状態ではない。そこで、2回急熱急冷処理を施すことによりNb₃Alの特性がどのように変化するかを調べた。急熱急冷条件や急熱急冷処理線の機械特性、超伝導特性を調べた。

③ 前駆体フィラメント内のAl厚がNb₃Al線材のJc値に与える影響の調査:

JR-NbAlフィラメントのAl厚を変えたサンプル線材を数種類作製し、その超伝導特性の比較により高Jc値が得られるAl厚を探った。

(3) Nb₃Al線材を用いたコイルの励磁試験と性能評価:

長尺Nb₃Al線の製作に手間取り、当初スケジュールより約1年の遅れが生じたためFermilabでのスケジュールの調整ができず、鞍型コイルの試作は出来なかった。その代替として、高エネ研において従来から準備を進めていたNb₃AlとNb₃Snのレーストラックコイルを組み合わせた磁石の冷却・励磁試験を行ない、Nb₃Alコイルの特性データを収集した。

4. 研究成果

(1) 安定したNb₃Al線材製造法の開発では以下の知見を得た。

① Taマトリックス前駆体の伸線加工中の断線はフィラメント間バリア部から発生する。図1にその様子を示す。



図1 線材断面(黒点部が断線の起点)

② 前駆体の伸線加工中の断線を解消するために種々の断面構造や製造法を試み、断線回

数を減らすことはできたが完全に解消するまでには至らなかった。断線は Ta の加工性の悪さに起因しているようである。

③ 急熱急冷 (RHQ) 処理後のダイス伸線は可能である。φ 1.0 mm から φ 0.7 mm まで細線化して諸特性を調べたが異常は無かった。図 2 ~ 4 に、伸線過程における線材各部の硬度、線材の銅比、電流密度の変化を示す。

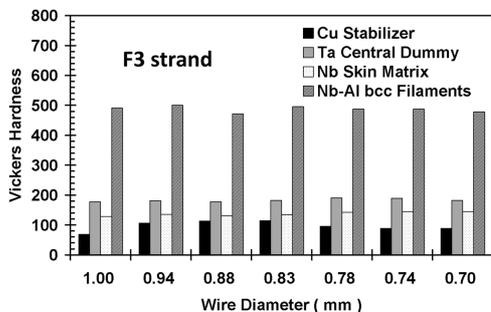


図 2 伸線過程での線材断面各部の硬度

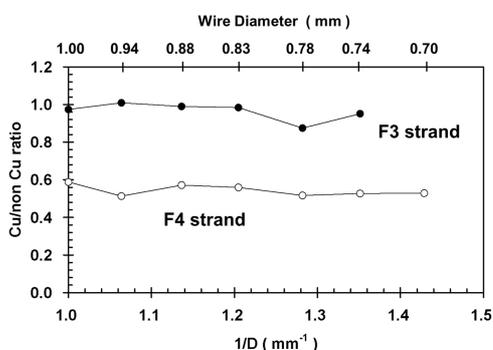


図 3 伸線加工線材の銅比の変化

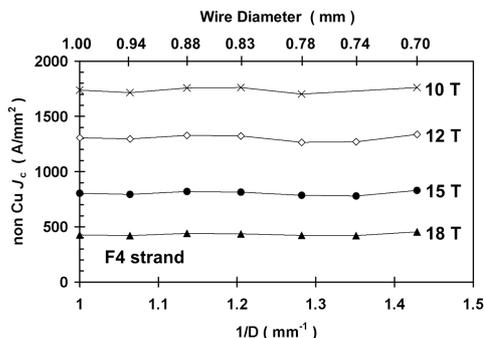


図 4 伸線加工線材の臨界電流密度

④ 前駆体加工時の断線回数を減らして単長数百 m の φ 0.7 mm (Cu 付き) の Nb₃Al 線材を製作出来るレベルに達した。

(2) Nb₃Al 線材の特性向上を目指した基礎研究では以下の知見を得た。

① 銅マトリックス線材では、前駆体の伸線加工時に断線は発生しない。しかしながら、RHQ 処理時にマトリックスの銅が溶け、NbAl フィラメント (bcc) の間隔が不均一になったり、銅がフィラメント内に侵入して線材を脆化するなどの現象が見られる。図 5 に RHQ 処理後の線材断面を示す。

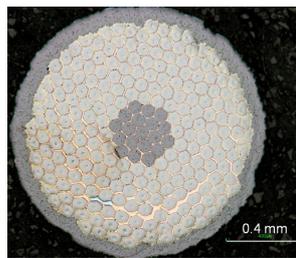


図 5 RHQ 処理後の銅マトリックス線断面

② 2 回急熱急冷 (DRHQ) 処理を行った線材の臨界電流密度は 1 回 RHQ 線と大差はない。また、フィラメント内 Al 元素の分布の均一性も両者で差は見られなかった。図 6 に 1 回 RHQ (RHQ) 線と 2 回 RHQ (DRHQ) 線の臨界電流密度を示す。

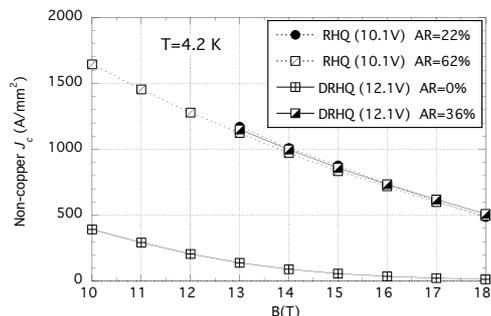


図 6 2 回 RHQ 線と 1 回 RHQ 線の J_c 比較

③ 前駆体フィラメント内 Al 厚が Nb₃Al 線材の J_c 値に与える影響の調査では Al 厚が薄い線材の方が高電流密度となることが分かった。図 7、8 に各種 Al 厚の線材の電流密度 (減面加工有りと無し) を示す。

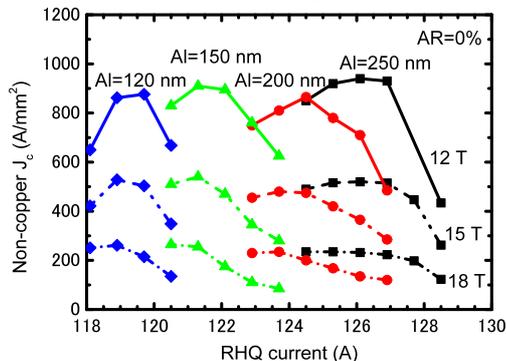


図 7 各種 Al 厚線材の電流密度 (AR=0%)

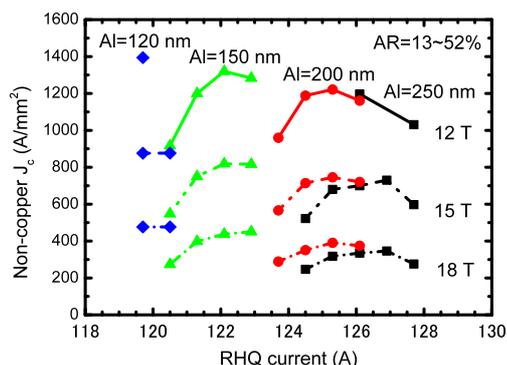


図 8 各種 Al 厚線材の電流密度 (AR)

(3) Nb₃Al と Nb₃Sn 線材を用いた複合磁石の励磁試験を行った (図 9 に磁石断面図を示す)。最大クエンチ電流は 9697 A で、Nb₃Sn コイルのクエンチであった。その時の Nb₃Al コイルの磁場は 8.2 T, Nb₃Sn コイルの磁場は 9 T であった。この実験により Nb₃Al コイルのクエンチ特性に関するデータを得た。

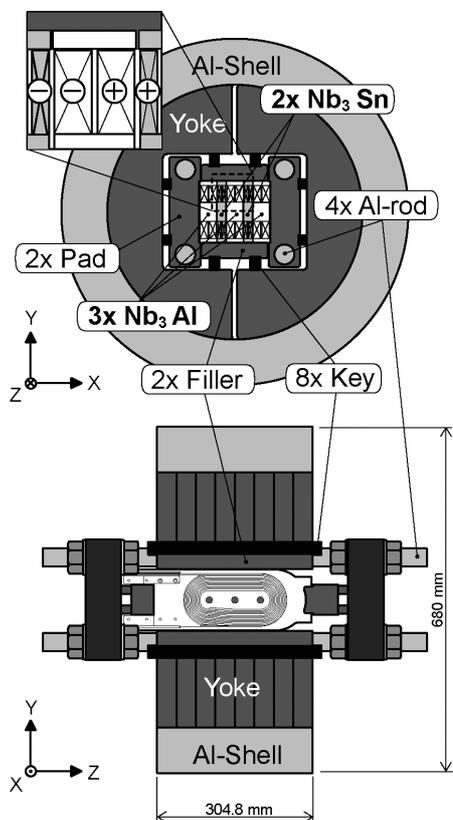


図 9 Nb₃Al と Nb₃Sn の複合磁石

(4) まとめ

Nb₃Al 線材の開発では単長数百 m の長尺線材を製作できるまでになったが、より一層の長尺化技術の開発が必要である。また Nb₃Al+Nb₃Sn 磁石の励磁試験により、Nb₃Al コイルの励磁特性、クエンチ特性のデータが得られ、今後の改善項目が明確になった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① M. Iio, Q. Xu, T. Nakamoto, K. Sasaki, T. Ogitsu, A. Yamamoto, N. Kimura, K. Tsuchiya, M. Sugano, S. Enomoto, N. Higashi, A. Terashima, K. Tanaka, R. Okada, N. Takahashi, Y. Ikemoto, A. Kikuchi, T. Takeuchi, G. Sabbi, A. Zlobin, E. Barzi, “Test results of Nb₃Al/Nb₃Sn subscale magnet for accelerator application”, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **25**(3) (2015) 4003405.
- ② N. Banno, K. Tsuchiya, T. Nakamoto, A.

Kikuchi, T. Takeuchi, Y. Iijima, K. Tomita, S. Kato, K. Suzuki, T. Takao, K. Nakagawa, “Influence of Al layer thickness on critical current density in transformation-processed Nb₃Al superconductors”, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **25**(3) (2015) 6000204.

③ M. Iio, T. Nakamoto, Q. Xu, N. Higashi, T. Ogitsu, K. Sasaki, A. Terashima, K. Tsuchiya, A. Yamamoto, A. Kikuchi, T. Takeuchi, G. Sabbi, S. Caspi, P. Ferracin, H. Felice, R. Hafalia, A. Zlobin, E. Barzi, R. Yamada, “Development of a Nb₃Al and Nb₃Sn hybrid subscale magnet”, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **23**(3) (2013) 4300605.

④ T. Takeuchi, K. Nakagawa, K. Tsuchiya, N. Banno, Y. Iijima, A. Kikuchi, T. Nakamoto, “Applicability of reel to reel RHQ treatments to Nb₃Al precursors with a Ta/Cu/Ta three-layer filament-barrier structure”, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **23**(3) (2013) 6000805.

⑤ A. Kikuchi, K. Tsuchiya, R. Yamada, E. Barzi, A. V. Zlobin, M. Yoshida, K. Tomita, T. Takao, T. Nakamoto, T. Takeuchi, “Feasibility studies of 0.7 mm Nb₃Al strands and Rutherford cable”, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **23**(3) (2013) 6001404.

⑥ T. Takeuchi, K. Tsuchiya, K. Nakagawa, S. Nimori, N. Banno, A. Kikuchi, T. Nakamoto, “A new RHQT Nb₃Al superconducting wire with a Ta/Cu/Ta three-layer filament-barrier structure”, *Supercond. Sci. Technol.* 査読有 **25** (2012) 065016 (8pp).

⑦ N. Banno, T. Takeuchi, K. Tsuchiya, K. Nakagawa, Y. Sakurai, K. Kurushima, M. Saeda, “Possible pinning centers in Transformation-Processed Nb₃Al superconductors”, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **22**(3) (2012) 6001504.

⑧ K. Tsuchiya, A. Kikuchi, T. Takeuchi, N. Banno, Y. Iijima, S. Nimori, H. Takigawa, A. Terashima, T. Nakamoto, Y. Kuroda, M. Maruyama, M. Yoshida, T. Takao, K. Nakagawa, E. Barzi, R. Yamada, A. Zlobin, “Development of Nb₃Al Rutherford cable for high-field accelerator magnet applications”, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **22**(3) (2012) 6000504.

[学会発表] (計 9 件)

① 加藤彰、土屋清澄、中本建志、伴野信哉、菊池章弘、竹内孝夫、飯島安男、富田浩介、鈴木恵子、高尾智明、中川和彦、急熱急冷・変態法 Nb₃Al 線材の臨界電流密度に与える Al 層厚の影響、電気学会 超電導機器研究会 (2015) 1 月 21 日 産業技術総合研究所 臨海副都心センター別館

② 伴野信哉、土屋清澄、中本建志、菊池章弘、竹内孝夫、飯島安男、富田浩介、加藤彰、鈴木恵子、高尾智明、中川和彦、急熱急冷・

変態法 Nb₃Al 線材の J_c に与える Al 層厚の影響、2014 年度春季 低温工学・超伝導学会 (2014) 5 月 26-28 日 東京 タワーホール船堀

③ 鈴木恵子、富田浩介、加藤 彰、高尾智明、土屋清澄、伴野信哉、RHQ-Nb₃Al 超電導線材の前駆体内 JR-Nb/Al フィラメントにおける Al 厚の影響、電気学会全国大会 (2014) 3 月 18-20 日 愛媛大

④ 富田浩介、加藤 彰、吉田雅史、高尾智明、土屋清澄、中本建志、菊池章弘、竹内孝夫、伴野信哉、飯嶋安男、二森茂樹、瀧川博幸、中川和彦、2 回 RHQ 処理を施した Nb₃Al 線材の性能、電気学会 超電導応用電力機器研究会 (2014) 1 月 30-31 日 成蹊大

⑤ 伴野信哉、竹内孝夫、土屋清澄、アトムプローブによる相変態 Nb₃Al 相内の Al 偏析の分析、2013 年度春季 低温工学・超伝導学会 (2013) 5 月 13-15 日 東京 タワーホール船堀

⑥ 加藤彰、吉田雅史、富田浩介、高尾智明、土屋清澄、中本建志、竹内孝夫、伴野信哉、飯嶋安男、菊池章弘、松本明善、中川和彦、Ta/Cu/Ta 三層フィラメント間バリア構造の RHQT 法 Nb₃Al 線材の特性調査、電気学会全国大会 (2013) 3 月 20-22 日 名古屋大

⑦ 菊池章弘、土屋清澄、山田隆治、Emanuela Barzic、Alexander Zlobin、吉田雅史、富田浩介、高尾智明、中本建志、竹内孝夫、線径 0.7 mm の Nb₃Al 素線とラザフォードケーブルの実現可能性、電気学会 超電導応用電力機器研究会 (2013) 1 月 15-16 日 つくば産業技術総合研究所

⑧ 伴野信哉、竹内孝夫、中川和彦、櫻井義博、土屋清澄、分散バリア型 Nb₃Al 超伝導線材の開発、2012 年度秋季 低温工学・超伝導学会 いわて県民情報交流センター

⑨ 富田浩介、丸山光大、吉田雅史、高尾智明、菊池章弘、竹内孝夫、伴野信哉、飯嶋安男、土屋清澄、中本建志、銅安定化材付き Nb₃Al 線材のダイス伸線の研究、電気学会全国大会 (2012) 3 月 21-23 日 広島工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 清澄 (TSUCHIYA, Kiyosumi)

高エネルギー加速器研究機構

名誉教授

研究者番号：20044787

(2) 研究分担者

増澤 美佳 (MASUZAWA, Mika)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研

究施設・教授

研究者番号：10290850

多和田 正文 (TAWADA, Masafumi)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研

究施設・准教授

研究者番号：30300677

菊池 章弘 (KIKUCHI, Akihiro)

物質・材料研究機構・超伝導線材ユニッ

ト・主席研究員

研究者番号：50343877

(3) 連携研究者

中本 建志 (NAKAMOTO, Tatsushi)

高エネルギー加速器研究機構・超伝導低

温工学センター・教授

研究者番号：20290851