

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340065

研究課題名（和文） 次世代加速器用 A15 系高磁場超伝導磁石の開発研究

研究課題名（英文） Development of high field superconducting magnets for future accelerators using with A15-type superconductors

研究代表者

中本 建志 (NAKAMOTO TATSUSHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授

研究者番号：20290851

研究成果の概要（和文）：

次世代加速器に向けた超伝導磁石の高磁場化に向けて、A15 化合物系超伝導磁石の研究開発を目的とした。具体的な目標として CERN-LHC 加速器アップグレードを想定し、実用に主眼を置いた研究開発を行った。高応力においても性能劣化の少ない Nb<sub>3</sub>Al 超伝導線材を用いた 15T 級超伝導磁石の製作基盤技術の確立を目指した。さらに『高磁場化』と『耐放射線性の向上』を達成するための基礎的な要素開発を行い、最終的に実際のモデル磁石開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

Development of high field superconducting magnets using A15-type superconductors has been carried out towards future accelerators such as high luminosity upgrade of the CERN-LHC. Practically, we have aimed to establish the fabrication technology of high field superconducting magnet beyond 15 T using with Nb<sub>3</sub>Al superconductor that is less sensitive to mechanical strain. In addition, some basic R&D items aiming high field and high radiation resistance have been carried out. Finally, the sub-scale model magnet has been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	8,600,000	2,580,000	11,180,000

研究分野：超伝導工学、加速器工学

科研費の分科・細目：物理学（素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理）

キーワード：加速器

## 1. 研究開始当初の背景

申請当時、欧州原子核研究機構（CERN）では大型ハドロン衝突型加速器（LHC）の建設がほぼ完了し、機器試験、試運転が急ピッチに進んでいた。LHC ではこれまで人類が到達したことのなかった最高衝突エネルギー 7+7TeV において陽子・陽子衝突実験を行い、

ヒッグス粒子や超対称性粒子を発見して、標準理論の検証やさらにそれを超える新しい物理を探求することが大きな目的である。

一方、建設と併行して、実験事象の統計量を飛躍的に向上させることを目標とする、将来の加速器アップグレード計画も設計検討されている。具体的には、現在の LHC のビー

ルミノシティ（設計値  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ）をさらに 10 倍に増強することが目標で、LHC 稼働から約 10 年後のアップグレードを目指している。ルミノシティ増強を図るために最も有効かつ重要と考えられているのは、ビーム衝突点両側に配置されるビーム強収束超伝導四極磁石の高磁場化である。磁石口径を拡大し、コイル磁場で 15 T 程度まで高磁場化することで、ビームをさらに細く絞り込ませ、もってビーム同士の衝突頻度を向上させる。なおルミノシティを増強することで、衝突二次粒子の収量も一層増加するため、超伝導コイルの耐放射線性も併せて求められる。つまり、ルミノシティ増強のために次世代の超伝導磁石に求められる性能は、さらなる『高磁場化』と『耐放射線性の向上』である。

## 2. 研究の目的

すでに性能限界にまで達している NbTi 超伝導磁石を 15 T 級まで高磁場化することは不可能であり、代わって、より高い臨界磁場及び臨界電流密度を有する A15 化合物系の超伝導線材 ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Al}$ ) の採用が考えられていた。しかしながら、これまで長い歴史の中で数多くの製作技術が蓄積されてきた NbTi 超伝導磁石と比較すると、その優れた潜在的な性能とは裏腹に、化合物系超伝導磁石には未だ多くの研究開発が必要だと言わざるを得ない。

そこで本研究では、『最終的な加速器応用を目標に、必要な磁場精度を満足しつつ、耐放射線性に優れた高磁場超伝導磁石を開発する』ことを目的とする。

具体的には、従来のエポキシ樹脂に置き換わる、極めて耐放射線性の高い有機樹脂を新たに開発してコイル成形を行う。超伝導線材としては、日本国内でユニークに開発が進められている急熱急冷法 (RHQ)  $\text{Nb}_3\text{Al}$  線材の適用を第一に考える。A15 化合物系超伝導線材の中で最も実用化が進んでいる  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  線材は、機械的歪みの増加により急激に臨界電流密度が低下してしまうことが良く知られている。一方で、 $\text{Nb}_3\text{Al}$  線材の機械歪み依存性は緩やかであるため、高磁場化による強大な応力にさらされる状況では非常に有利と言える。しかしながら、これまで  $\text{Nb}_3\text{Al}$  線材は加速器用超伝導磁石に全く応用されたことがないため、実用化を検証する観点からも、モデル磁石の開発は非常に重要となる。最終目標となる LHC アップグレード用超伝導磁石への第一歩として、15 T 級超伝導モデル磁石の試作を目指した。

## 3. 研究の方法

(1) まず第一に、ANSYS や Opera-3D などの汎用の有限要素プログラムを用いて、モデル

磁石の電磁設計及び機械構造設計を行った。超伝導コイルは、製作が容易なレーストラック型とし、ダブルパンケーキ巻きした 2 層コイルを 1 ユニットとして製作する。電磁設計の指針は、『電流 15000 A 以下（既存する電源の制限）で、コイル直線部において目標最高磁場 15 T が発生する』、『コイル端部にピーク磁場が発生しないよう、コイル形状を工夫する』ことで、これらを満足する様にターン数やコイル形状、鉄ヨーク寸法を決定した。一方、機械構造設計においては、『磁石組立』、『4.2 K 冷却』、『励磁』、といった各過程において超伝導磁石各部に発生する応力を詳細に検討した。特に機械的に脆い超伝導コイルに過剰な応力が集中しないように十分注意して、材料や形状、公差を決定した。

(2) モデル磁石に必要な RHQ- $\text{Nb}_3\text{Al}$  超伝導線材は、物質・材料研究機構、米国 Fermilab との共同研究により開発した。低磁場での磁気不安定性を解決するために Ta マトリックスの RHQ- $\text{Nb}_3\text{Al}$  超伝導素線を開発し、さらにラザフォードケーブル化のための R&D を行った。

(3) 巻き線後のコイルは、熱処理することで最終的な化合物超伝導体が生成される。一方で、コイルは非常に脆くなるため、真空樹脂含浸により機械的な補強を行う必要があり、これは磁石性能を決定する大変重要な構成要素と言える。これまではエポキシ樹脂が用いられてきたが、必ずしも高い耐放射線性を有していなかった。このため、本研究ではメーカー等と共同研究を実施し、耐放射線性に優れたシアネートエステル系の含浸用樹脂を開発した。また、その他にも高温熱処理 (800°C、10 時間) に耐えられ、かつコイル製作にも適応できる絶縁材料の開発も並行して実施した。

(4) (1) から (3) までの研究の集大成として、実際のモデル磁石の開発を行った。

## 4. 研究成果

(1) 最終的に設計されたモデル磁石の断面模式図と超伝導コイルの負荷曲線を、それぞれ図 1 及び図 2 に示す。検討の結果、超伝導ケーブル自体の制約（臨界電流、製作可能なケーブル長）から RHQ- $\text{Nb}_3\text{Al}$  超伝導コイル単独では高磁場を得ることが困難だと判断した。このため、電流密度の高い  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  コイル 2 台と RHQ- $\text{Nb}_3\text{Al}$  3 台を組み合わせることで、中央の RHQ- $\text{Nb}_3\text{Al}$  ケーブル上で 13T を超える磁場を発生することが可能となった。発生する強大な電磁応力は最外のアルミシェルで支持する構造となっている。磁石組立には、“ブラッダー”と呼ばれる金属製風船を水で加圧して隙間を空け、キー留めすることでコイルに必要な予備応力を与える。また、アル

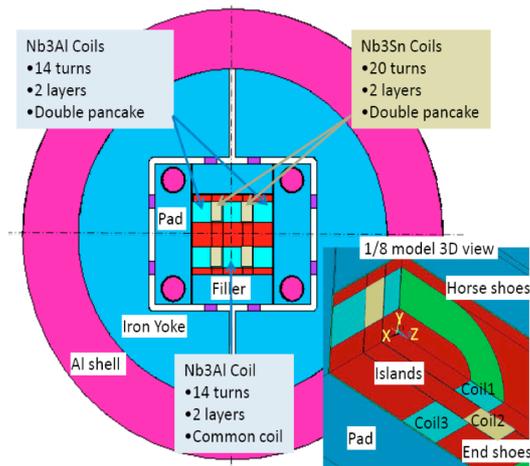


図1 モデル磁石の断面模式図

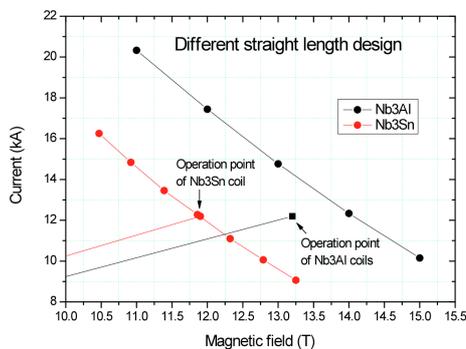


図2 モデル磁石の負荷率曲線

ミシェルを採用することで冷却時に熱応力が発生するので、常温での組立時に過剰な予備応力を与える必要がなくなり、結果的に超伝導コイルが経験する最大応力を減少させることが出来た。

(2) モデル磁石用に開発した RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 超伝導素線の臨界電流密度を図3に示す。仕様の異なる素線 (K1-K4) を設計、試作したが、磁石性能を決定する重要な指標である臨界電流密度について、外部磁界15Tにおいて700~800A/mm<sup>2</sup>程度に再現性良く揃うことを確認した。また Fermilab においてラザフォードケーブル化の R&D を行った。写真を図4に示す。硬い Ta マトリックス RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 素線を用いたにも関わらず、無地ケーブル化に成功した。ケーブル化による超伝導線の性能劣化は見られなかった。なお、Ta マトリックス RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 超伝導線の磁化曲線を測定し、4.2K において低磁場中でのフラックスジャンプなどの磁気不安定性が無いことを確認した。

(3) メーカー等と共同研究により耐放射線性に優れるシアネートエステル樹脂をベースとした加速器超伝導コイル含浸用樹脂を新規に開発した。図5に真空含浸した練習用ダミーコイルの写真を示す。耐放射線性と

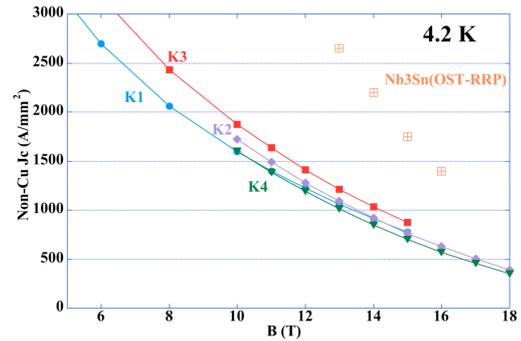


図3 モデル磁石用 RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 超伝導素線の臨界電流密度

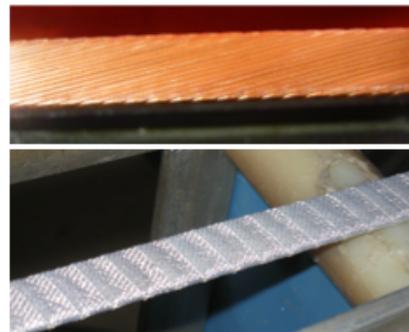


図4 RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ラザフォードケーブル。(上) 裸線 (下) アルミナ絶縁テープ処理したもの。



図5 新規開発した耐放射線シアネートエステル樹脂で真空含浸した練習用コイル。

取扱い易さを両立するため、エポキシとの混合樹脂としている。また、長さ数mにも達する実機用コイルを想定し、60℃でのポットライフを24時間以上、硬化温度を150℃以下という仕様を満足させた。

ケーブルや対地絶縁には、800℃、10時間の熱処理にも耐えられるアルミナ繊維をベースとしたテープ及びシート状の絶縁材料を開発した。テープの標準厚さは0.125mmであるが、超伝導ケーブルの工学的電流密度向上を目指した厚さ0.08mmのテープの試作にも成功している。

(4) 以上の要素開発の集大成として、Nb<sub>3</sub>Al サブスケールコイルの巻き線を行った。高エネルギー加速器研究機構の所内開発として、全ての治工具開発や実際の製作作業を実施した。事前に練習コイルを2台試作すること

で、巻き線、熱処理、真空樹脂含浸の各工程におけるエンジニアリングの問題点を解決した。

最終的に実機巻き線を行ったが、巻き線中にケーブルから素線が単独で飛び出る、いわゆるポップアップが発生したため、作業が大幅に遅れてしまい、年度内の磁石完成には至らなかった。このため、平成23年度も引き続き研究開発を進め、磁石の完成と性能評価試験を実施する予定である。

## 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6件)

- ① K. Sasaki, T. Nakamoto, K. Tsuchiya, A. Terashima, A. Yamamoto, L. Rossi, A. Verweij, L.R. Oberli, A. Kikuchi, T. Takeuchi, G.L. Sabbi, S. Caspi, P. Ferracin, H. Felice, R. Hannaford, R. Hafalia, R. Yamada, E. Barzi, A. Zlobin, “Nb3Al High Field Accelerator Magnet R&D”, Proceedings of WAMSDO Workshop Accelerator magnet superconductors, design and optimization, 査読無し, CERN, Geneva, Switzerland, 19-23 May 2008, pp. 132-135, CERN-2009-01.
- ② Q. Xu, K. Sasaki, T. Nakamoto, 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, “Design of a High Field Nb3Al Common Coil Magnet”, 査読有り, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp. 176-179, 2010.
- ③ A. Kikuchi, R. Yamada, K. Tsuchiya, T. Nakamoto, E. Barzi, D. Turrioni, K. Sasaki, Q. Xu, A. Terashima, H. Takigawa, A. Yamamoto, K. Nakagawa, T. Takeuchi, M. Lamm, A. V. Zlobin, “Strand and Cable Development for a High Field Nb3Al Common Coil Magnet”, 査読有り, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp. 1428-1431, 2010
- ④ Q. Xu, K. Sasaki, T. Nakamoto, A. Terashima, A. Yamamoto, “Improvement in Mechanical Support Structure of a High Field Nb3Al Common Coil Magnet”, 査読有り, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp. 1428-1431, 2010.
- ⑤ K. Tsuchiya, A. Kikuchi, T. Takeuchi, N. Banno, Y. Iijima, S. Nimori, H. Takigawa, A. Terashima, T. Nakamoto, Y. Kuroda, M.

Maruyama, T. Takao, K. Tanaka, K. Nakagawa, E. Barzi, R. Yamada, A. Zlobin, A. Ghosh, “Development of Ta-matrix Nb3Al strand and cable for high-field accelerator magnet”, 査読有り, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 2521-2524, 2011.

⑥ T. Nakamoto “KEK EFFORT FOR HIGH FIELD MAGNETS”, 査読無し, Proceedings of EuCARD-AccNet-EuroLumi Workshop: The High-Energy Large Hadron Collider, Villa Bighi, Malta, 14-16 October 2010, 41-44, CERN-2011-03 and EuCARD-Conf-2011-001

[学会発表] (計7件)

- ① 佐々木憲一, 徐慶金, 中本建志, 寺島昭男, 土屋清澄, 山本明, 菊池章弘, 竹内孝夫, Nb3Al 加速器用高磁場超伝導磁石の開発, 2008年度秋季低温工学・超電導学会, 高知市, 高知市文化プラザカルポート, 11月12-14日.
- ② Q. Xu, K. Sasaki, T. Nakamoto, A. Terashima, K. Tsuchiya, A. Yamamoto, Design of a high field Nb3Al common coil magnet, 2009年度春季低温工学・超電導学会, 東京都, 早稲田大学, 5月13-15日.
- ③ 菊池章弘, 竹内孝夫, 土屋清澄, 中本建志, 佐々木憲一, 徐慶金, 寺島昭男, 山本明, 山田隆治, E. Barzi, A. Zlobin, 13T Nb3Al/Nb3Sn マグネット用 Nb3Al 素線及びケーブルの研究開発, 2009年度春季低温工学・超電導学会, 東京都, 早稲田大学, 5月13-15日.
- ④ Q. Xu, K. Sasaki, T. Nakamoto, A. Terashima, K. Tsuchiya, A. Yamamoto, A. Kikuchi, T. Takeuchi, Design of a high field Nb3Al common coil magnet for LHC upgrade, 第6回日本加速器学会年会, 茨城県東海村, 日本原子力研究開発機構, 2009年8月5-7日.
- ⑤ 菊池章弘, 竹内孝夫, 山田隆治, E. Barzi, 土屋清澄, 中本建志, 中川和彦, 宮下克巳, RHQT 法 Nb3Al 線材と拡散法 Nb3Al 線材, 2009年度秋季低温工学・超電導学会, 岡山市, 岡山大学, 11月18-20日.
- ⑥ 菊池章弘, 竹内孝夫, 土屋清澄, 中本建志, 佐々木憲一, 徐慶金, 瀧川博幸, 山本明, 山田隆治, E. Barzi, A. Zlobin, L. Rossi, 高磁場加速器磁石のための Nb3Al 線材及びケーブルの開発, 2010年度春季低温工学・超電導学会, 川崎市, 川崎市産業振興会館, 5月12-14日.
- ⑦ 金新哲, 徐慶金, 中本建志, 荻津透, 土屋清澄, 山本明, 菊池章弘, 竹内孝夫, ハルヨステファヌス, 伊藤崇芳, 辺見努, 小黒英俊, 淡路智, 中性子回折による RHQ-Nb3Al 超伝導素線の残留歪み測定, 2010

年度秋季低温工学・超電導学会，鹿児島市，  
かごしま県民交流センター，12月1-3日。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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・准教授  
研究者番号：20290851

### (2) 研究分担者

山本 明 (YAMAMOTO AKIRA)  
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：30113418

土屋 清澄 (TSUCHIYA KIYOSUMI)  
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：20044787

荻津 透 (OGITSU TORU)  
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：30185524

佐々木 憲一 (SASAKI KEN-ICHI)  
高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温  
工学センター・研究機関講師  
研究者番号：70322831

徐 慶金 (XU QINGJIN)  
高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温  
工学センター・特別助教  
研究者番号：50551818