

DEVELOPMENT OF HIGH FIELD SUPERCONDUCTING MAGNETS FOR FUTURE PARTICLE ACCELERATORS (1)

- DEVELOPMENT OF RACETRACK COILS USING RHQ-Nb₃Al CABLE -

Masami Iio^{#,A)}, Qinjin Xu^{A)}, Tatsushi Nakamoto^{A)}, Kenichi Sasaki^{A)}, Norio Higashi^{A)}, Toru Ogitsu^{A)}, Akio Terashima^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Akira Yamamoto^{A)}, Akihiro Kikuchi^{B)}, Takeo Takeuchi^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{B)} National Institute for Materials Science (NIMS)

1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-0047

Abstract

A 13 T class sub-scale magnet has been developed for establishing a technology of high field accelerator magnet. The magnet was designed with minimum gaps of 5 or 4 racetrack coils of 300 mm in length to produce a high magnetic field efficiently in a so-called common coil configuration. Two Nb₃Sn coils were produced in LBNL. KEK developed other coils with Rutherford type cables comprised of 28 RHQ-Nb₃Al wires in collaboration with NIMS and FNAL. The production of two coils of the same configuration as double pancake structure of 13 turns per layer was completed by wind & react method. The assembling of the magnet and the preparations for cool-down and excitation tests are currently in progress.

次世代加速器にむけた高磁場超伝導磁石の開発 (1)

- RHQ-Nb₃Al ケーブルを用いたレーストラックコイルの開発 -

1. はじめに

高エネルギー粒子加速器では、装置の高エネルギー化、大型化に伴い、超伝導磁石が不可欠な基盤技術となっている。例として、欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) には、主だったものだけでも 1700 台を超える超伝導電磁石が配置されている。これらの磁石には NbTi 線材が用いられ、超流動ヘリウム冷却による 1.9 K の低温環境と、定格約 9 T の磁場を実現している。しかしながら、これは NbTi 線材の限界性であり、更なるルミノシティ及びエネルギーフロンティアを目指すためには、NbTi より高い臨界磁場を持つ線材を用いて、10 T を超える次世代の加速器用電磁石の開発が必要不可欠である。

高磁場磁石のための線材の候補として、まだ開発途上の高温超電導体 (HTS) を除くと、Nb₃Sn、Nb₃Al などの A15 系化合物超伝導線材がある。Nb₃Sn に関しては、いくつかの研究機関で開発研究が進められており、15 T において 1000 A/mm² を超える高い臨界電流密度を示しており [1]、現在、NMR 分析装置、核融合装置、冷凍機直冷型超伝導電磁石への応用が図られている。しかし、化合物系超伝導線は、超伝導性能が機械歪みにより劣化することが知られている。Nb₃Al の臨界電流密度は Nb₃Sn と比較すると低い、歪み依存性が緩やかであり、12 T の外部磁場中、横圧縮応力が 200 MPa となっても殆ど臨界電流は低下しない [2]。このため、高磁場化による強大な応力に曝される状況では非常に有利と言えるが、これまで加速器用超伝導磁石開発に応用された実績は

ほとんど無い。そこで、KEK は NIMS との共同研究として、加速器応用を目指した Nb₃Al を用いた高磁場超伝導磁石の開発研究を行っている。

2. 高磁場超伝導モデル磁石

我々は、Nb₃Al 線材の加速器応用の可能性を探るために、13 T 級のボア無しサブスケール磁石を試作し、その性能評価試験を行う。図 1 にサブスケール磁石の 1/2 断面図を示す。サブスケール磁石は、3 台の 300 mm 長 Nb₃Al コイルに、LBNL で開発された既存の Nb₃Sn コイル 2 台 [3] を組み合わせたハイブリッド型で、いわゆる common coil 型のコイル配置により効率良く高磁場を発生する設計となっている。サブスケール磁石の設計値を表 1 にまとめる。定格電流 11.8 kA において、中央の Nb₃Al コイルの磁場が 12.8 T になる。

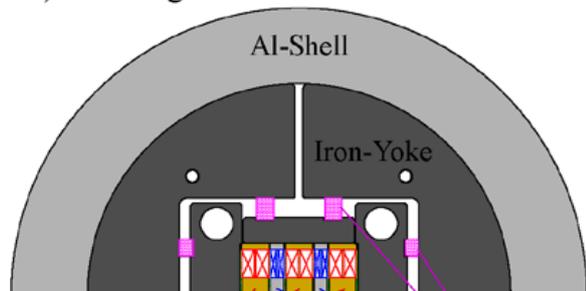
我々は、効率よく開発を進めるために、性能評価試験を段階的に行う。その第 1 段階として、まずは Nb₃Al コイル 2 台と Nb₃Sn コイル 2 台を用いて、図 1. A) の様な 4 コイル構成でのテストを行う予定である。その場合、定格電流 12.2 kA で、Nb₃Al コイルの最大磁場は 10.6 T、Nb₃Sn コイルの最大磁場は 11.8 T になる。

本サブスケールコイルでは、ローレンツ力によるコイルの過剰な変形や破壊が起きないように、予めそれを打ち消すような予備応力 (プリストレス) を供給する設計となっている。具体的には、コイルと鉄ヨークの隙間に、ブラダーと呼ばれるステンレススチール製のバルーンを挿入して加圧し、広がった隙間にキーを挿入することで、コイルに対し圧縮方

[#] masami.iio@kek.jp

向の予備応力を定常的に供給することができる。また、鉄ヨークの外側には、アルミニウムの外壳（シェル）が取り付けられ、低温になるとアルミニウムと内部の磁石部品の熱収縮率の差分に応じた応力が、コイルに対して圧縮方向に作用する。

A) 5-Configuration



B) 4-Configuration

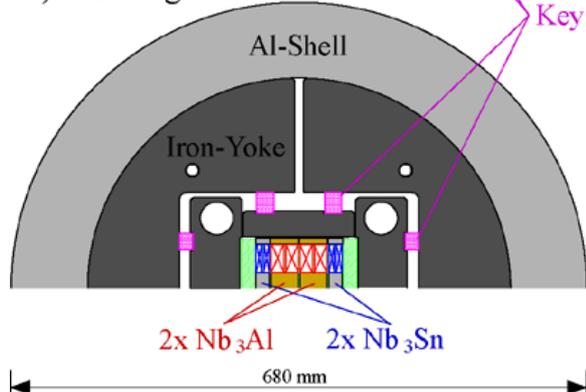


図 1 : サブスケール磁石の 1/2 断面図

表 1 : サブスケール磁石の設計値

パラメータ	5 コイル構成 (3-Nb ₃ Al, 2-Nb ₃ Sn)	4 コイル構成 (2-Nb ₃ Al, 2-Nb ₃ Sn)
定格電流	11.8 kA	12.2 kA
Nb ₃ Al コイルの最大磁場	12.8 T	10.6 T
Nb ₃ Sn コイルの最大磁場	11.6 T	11.8 T
蓄積エネルギー	67.5 kJ	62.5 kJ
インダクタンス	0.97 mH	0.83 mH
磁石長	740 mm	
シェルの外径	680 mm	
Nb ₃ Al ケーブル	28 strands, w: 13.93 mm, t: 1.84 mm	
Nb ₃ Al コイル	14 ターン、2 層	
Nb ₃ Sn ケーブル (LBNL)	20 strands, w: 7.88 mm, t: 1.27 mm	
Nb ₃ Sn コイル (LBNL)	20 ターン、2 層	

3. Nb₃Al レーストラックコイルの開発

線材としては、加速器応用を目指し、KEK、NIMS、FNAL で共同開発してきた急熱急冷変態法（Rapid Heating Quench）と呼ばれる一次熱処理を施した Nb₃Al 線を用いる[4,5]。

Nb₃Al は超伝導相を生成するために、800 °C での高温熱処理が必要であり、熱処理後は化合物となるため非常に脆くなる。そこで、コイルの製作は、巻き線を行った後に高温熱処理をする、いわゆる wind & react 法で製作された。また、コイルは、熱処理後のコイルの脆性と電気絶縁性能を改善するため、エポキシ樹脂により真空中で含浸された。

3.1 巻き線

ケーブルは、直径 1 mm の Nb₃Al 線 28 本をラザフォード型に束ねたものを用いた。一次絶縁材として、最終熱処理温度 800 °C と、エポキシ樹脂含浸時の浸透性を考慮し、厚さ 0.17 mm、幅 12.4 mm のアルミナ繊維テープを採用し、それをラザフォードケーブルにハーフラップで巻きつけることで絶縁を行った[5]。

図 2 に Nb₃Al レーストラックコイルの構造を示す。巻き線は、図 2 の中央に位置しているルミニウム青銅で作られた”アイランド”と呼ばれるア部品に半ターンずつ巻きつけることで行ったが、NbTi 線に比べ、Nb₃Al 線は硬いため、撚り線形状の崩壊（ポップアップやローピング）が起こり、それに起因した地絡やケーブル間の絶縁破壊などの様々な問題が起こった。アルミナ繊維テープの巻き増しや、厚さ 0.15 mm のマイカシートの挿入などで、トラブルに対処を行った。その結果、コイル全体の幅が増え、空間的な制限により、コイルの巻き数が設計よりもターン少なくなった。最終的に、11 ターンの Co 1 台、13 ターンの Co 2 台の合計 3 台の巻き線に成功した。

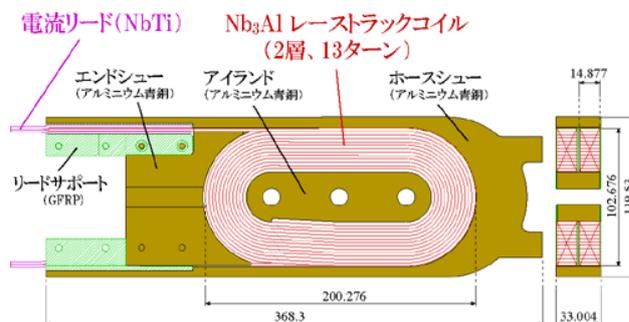


図 2 : Nb₃Al レーストラックコイルの構造

3.2 高温熱処理

巻き線後のコイルは、ホースシューやエンドシューと呼ばれる外側の部品で覆われ（図 2 参照）、更にその外側からステンレス製の治具で固定され、真空炉の中で熱処理された。炉は、窒素で 5 回ハ-

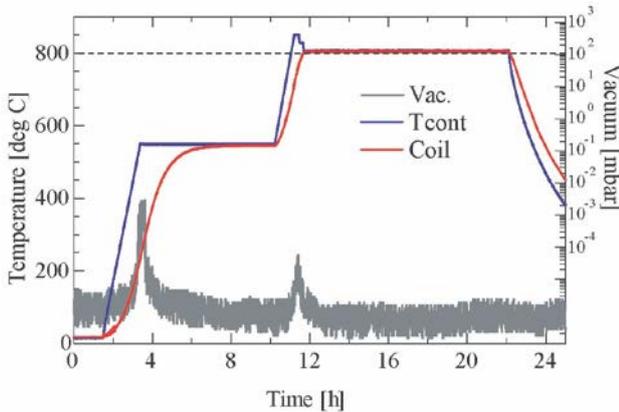


図3：熱処理時の温度と真空度のプロファイル

ジされた後に真空中に引かれ、真空度が 10^{-4} mbar 以下になったところで加熱された。図3に熱処理中の温度と真空度のプロファイルを示す。青が炉内の雰囲気温度で温度コントロールに用いられており、赤がコイルの中心温度である。また、灰色の線はピラニーゲージで測定された真空度を表している。

本真空炉は 10^{-2} mbar 以上まで真空度が上がるとインターロックでヒーターの加熱が止まる。それにより、昇温時のアウトガス放出による真空度の悪化で温度上昇の傾きをコントロールできなくなる場合がある。また、 Nb_3Al の最終熱処理では $500^{\circ}C$ 付近から $800^{\circ}C$ まで一気に過熱することが推奨されている。そこで、一度コイルを $550^{\circ}C$ で保持し、アウトガスを放出させてから、一気に $800^{\circ}C$ まで加熱することにした。図3においては、アウトガスの放出が見られるが、 10^{-2} mbar 以下なのでインターロックは掛かっていない。

コイルは、昇温開始から12時間後、温度が $800^{\circ}C$ で一定になったことを確認し、10時間保持された。コイルの巻き線毎に、3回同様の熱処理を行ったが、大きな問題もなく熱処理は終了した。

3.3 樹脂含浸

熱処理後は、コイルの外側の部品が一旦全部外され、GFRPなどの絶縁材を用いて再度組立てられた。その後、エポキシ樹脂を用いて真空中で含浸が行われた。含浸に用いた樹脂は、CTD社製の3液混合型の101Kを用いた[6]。CTD-101Kは $60^{\circ}C$ まで暖めると、粘度が $0.1 Pa \cdot s$ 、ポットライフが20時間となるので、混合後 $60^{\circ}C$ に保ちながら攪拌し、真空引することで脱泡した。90分の脱泡後に、エポキシは、真空中のコイルの中に輸送された。図4に硬化期間の温度プロファイルを示す。コイルの中心付近の温度を4点描いているが、温度差が無く均一に保たれていることが分かる。また、CTD-101の硬化時間条件は $110^{\circ}C$ で5時間、その後 $125^{\circ}C$ で16時間であり、安定に問題なく硬化条件の温度が保たれていたのが確認できた。

完成した Nb_3Al コイルの写真を図5に示す。3台のコイルとも、微小な気泡らしきものが見られるが、

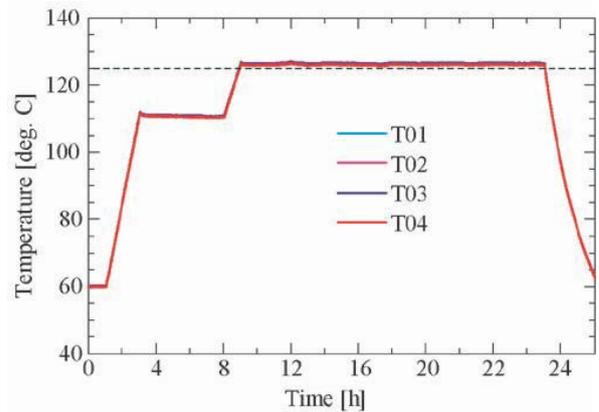


図4：樹脂含浸時の温度プロファイル

問題なく樹脂は硬化し、電気的な試験が行われた。励磁試験に使用予定の2台のコイル(13ターン)には、ケーブル間の電気的接触もない。コイルと導体部品間に絶縁が弱い部分が存在するが、補強することにより励磁試験に耐えうると予想される。



図5：完成した Nb_3Al コイル

4. 冷却試験の準備

現在、冷却試験に向けて磁石の組立を行っている。初めに鉄ヨークの組立を行った。ヨーク1枚の厚さは $38.1 mm$ で、直径 $500 mm$ の半円にコイルを収める部分が四角形に切り取られた構造をしている(図1参照)。これらを3次元方向から荷重をかけながら8枚ずつ連結した。寸法測定の結果、1枚の加工ミスを発見したが、それを修復し段差を許容範囲内に収めることができた。次に鉄ヨークをアルミニウムシェルに挿入した。シェルとシェルのはめ合いは $0.4 mm$ ときつく、更に連結後のヨークの重量は $154 kg$ になり、コントロールが困難であったが、無事挿入することができた。

2章に記述されているが、組立段階で磁石に予備応力を与える。しかし、過剰な予備応力を与えすぎるとコイルの破壊にもつながる。そこで、まずはコイルの代わりにアルミブロンズ性のダミーコイルブロックを用いて、ブラッダーと熱収縮による予備応力付与のデモンストレーションを行う。図6にダミーコイルを用いて仮組立てされた磁石の写真を示す。磁石内の応力は、シェルの外側とキーに接着さ

れたひずみゲージを用いて、測定された各部品のひずみ量から推定される。デモンストレーションでは、ひずみ測定の健全性の確認、ブラッダー加圧とキー挿入による応力の封じ込めを試みる。また、その後磁石全体を液体窒素で冷却し、熱収縮の効果も測定する予定である。



図 6：ダミーコイルを用いた磁石の仮組立

5. まとめと今後の展望

Nb₃Al 線材の加速器応用の可能性を検証するために、13 T 級サブスケール超伝導磁石の研究開発を進めている。

RHQ-Nb₃Al ラザフォードケーブルを用いて、ダブルパンケーキ型レーストラックコイルの製作を行った。巻き線、高温熱処理、エポキシ樹脂含浸の工程の中で、様々な問題に直面したが、一つずつ解決し最終的に、11 ターンが 1 台、13 ターンが 2 台で合計 3 台コイルを完成させることができた。そのうち 2 台 (13 ターン) は、サブスケール磁石に組み込み、冷却、励磁試験に用いる。

効率の良い段階的な開発を進めるために、Nb₃Al コイル 2 台と Nb₃Sn コイル 2 台を用いた 4 コイル構成での性能評価試験を先行して行う。そのために磁石の組立てを開始した。16 枚の鉄ヨーク片を 8 枚ずつ連結し、ヨークセットを完成させた。はめ合いがきつく苦労したが、鉄ヨークをアルミニウムシエルの中に挿入することができた。

過剰な応力によりコイルの破損を防止する為に、

ダミーコイルブロックを使った予備応力付与のデモンストレーションを行う。そのデモンストレーションでは、ひずみ測定の健全性、ブラッダーとキー挿入による応力の封じ込め、液体窒素冷却による熱収縮の効果等が確認される。

デモンストレーションで全ての健全性が確認された後、ダミーブロックを Nb₃Al と Nb₃Sn コイルに交換し、液体ヘリウム冷却による性能評価試験を行う。また並行して、5 コイル構成での励磁試験に向けて、Common coil 型の Nb₃Al コイルの製作も進めていく予定である。

6. 謝 辞

本研究開発を行うにあたって、Nb₃Sn コイルの提供と wind & react 法によるコイル製作技術を移転して下さったローレンスバークレー国立研究所の Sabbi 氏、Caspi 氏 Ferracin 氏、Felice 氏、Hafalia 氏に大変感謝いたします。また、Nb₃Al 線のラザフォードケーブル化及びアルミナ繊維テープによるケーブル絶縁を行って頂いたフェルミ国立加速器研究所の Zlobin 氏、Barzi 氏、山田氏にも大変感謝いたします。最後に、本研究開発に必要な不可欠な様々なサポートや装置の整備、運転をして下さった高エネルギー加速器研究機構の同僚の方々にも心より感謝致します。

参考文献

- [1] <http://magnet.fsu.edu/~lee/plot/plot.htm>.
- [2] A. Kikuchi, *et al.*, “Cu stabilized Nb₃Al strands for the high field accelerator magnet”, IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 18, p1026, 2008.
- [3] R. R. Hafalia *et al.*, “An Approach for Faster High Field Magnet Technology Development” IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 13, p1258, 2003.
- [4] A. Kikuchi *et al.*, “Strand and Cable Development for a High Field Nb₃Al Common Coil Magnet” IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 20, p1428, 2010.
- [5] R. Yamada *et al.*, “Feasibility Study of Nb₃Al Rutherford Cable for High Field Accelerator Magnet Application” IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 17, p1461, 2007.
- [6] <http://www.ctd-materials.com/>