

ITER-TF コイル容器の製作進捗と初号機完成

Manufacturing progress of ITER TF Coil Structure and completion of first product

井口 将秀, 櫻井 武尊, 尾関 秀将, HONG YunSeok, 藤原 英弘, 高野 克敏, 猪野 昌信, 堤 史明, 金森 信乃, 齋藤 健吾, 田中 信彦, 栗田 智久, 花岡 敏明, 中平 昌隆, 小泉 徳潔(量研機構)

IGUCHI Masahide, SAKURAI Takeru, OZEKI Hidemasa, HONG YunSeok, FUJIWARA Eikou, TAKANO Katsutoshi, INO Masanobu, TSUTSUMI Fumiaki, KANAMORI Shino, SAITO Kengo, TANAKA Nobuhiko, KURITA Tomohisa, HANAOKA Toshiaki, NAKAHIRA Masataka, KOIZUMI Norikiyo (QST)

E-mail: iguchi.masahide@qst.go.jp

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(量研機構)は ITER 計画において 19 個のトロイダル磁場コイル(TF コイル)構造物の調達を担当している。TF コイル構造物は超伝導巻線を格納する高さ 16.5m、幅 9m、重量 200トンのコイル容器本体とコイル間構造物から成る。TF コイル容器本体はサブ・アセンブリと呼ばれる 4 つの構造物から構成され、トカマク中心側(内側)容器のサブ・アセンブリを AU、その蓋となるサブ・アセンブリを AP と呼ぶ。同様に、外側のサブ・アセンブリはそれぞれ BU、BP と呼ぶ。(Fig.1) 量研機構では 2014 年 4 月から実機 TF コイル構造物製作を開始し、2017 年 7 月に内側構造物のサブ・アセンブリ初号機が、2017 年 12 月に外側構造物のサブ・アセンブリ初号機が完成した。さらに、同月に内側及び外側サブ・アセンブリに対する完成検査を実施し、世界で初めて TF コイル容器の製作を完了した。本稿ではその TF コイル容器初号機の製作における課題と対処をはじめとした TF コイル構造物製作の進捗について報告する。

2. サブ・アセンブリの製作

合理的に製作できる材料の大きさに限りがあるため、サブ・アセンブリはベーシック・セグメントというサブ・アセンブリを分割した単位で製作し、それらを溶接接合して製作する。ベーシック・セグメントを接合した主構造体を最終機械加工し、TF コイルを冷却するための冷却配管を取付けたことで、サブ・アセンブリが完成する。

3. 仮組検査

冷却配管取り付け完了後に、完成検査として仮組検査を実施する。TF コイルは、超伝導巻線部を TF コイル容器に格納した後、AU-AP, BU-BP, AU-BU をそれぞれ溶接し、一体化することで製作する。これらの溶接には裏波溶接を実施する必要があるが、溶接後裏側にアクセスすることが困難であることから、高品質の溶接を実施する必要がある。そのため非常に厳しい合わせ精度が溶接開先に求められている。仮組検査では、それらの溶接開先が要求精度を満足するかどうかを、実物同士を仮組みし、確認する。

AU-AP の仮組検査の成功は、前報にて報告済みである。BU-BP に対して、Fig.2 に示す姿勢で検査を実施した。BP は AP と異なり、幅が長手方向に一樣ではなく、端部から約 1m の位置から端部に向かって、急に広がっている。そのため、BP を BU に設置する際に、その広がり部の合わせ公差を達成しようとする、残り 15m の製作誤差が片側端部に積算していくことになる。そのため、長手方向中心を起点に設置できる AU-AP よりも高精度の加工技術が必要となる。対策として AU, AP 同様、BU, BP ともに温度管理下で機械加工することで、両者の誤差を小さくする方法を導入し、AU-AP と同じ要求精度(隙間:0.5mm±0.25mm, 食い違い:0.3mm 以下)を全長約 16m の開先に渡ってほぼ満足した。

AU-BU の仮組検査では、長さ TF コイルの高さ中心(赤道面)から 8m の位置で、+/-0.7mm の食い違いという非常に厳しい公差が、AU-BU 上部開先に要求されている。この要求を満

足するために、温度管理下での加工を実施するとともに、先に加工が終了した AU の開先位置を基準に、BU を加工する手法を導入した。検査の結果、隙間及び食い違いともに公差を満足していることを確認し、TF コイル容器最終検査を終了した。(Fig.3)

4. TF コイル構造物製作の進捗

上述の仮組検査の合格を以て、TF コイル構造物容器初号機の製作は完了した。本製品は 2018 年 1 月末に日本を出港し、2 月の末に欧州に到着し、3 月頭に TF コイル製作メーカーに到着した。残りの TF コイル容器についても製作中であり、完成し次第、順次 TF コイル製作メーカーに輸送する予定である。

謝辞

TF コイル構造物の調達活動にご協力頂いている三菱重工業(株)、現代重工業(株)、イーエナジー(株)、(株)東芝、並びに関連会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

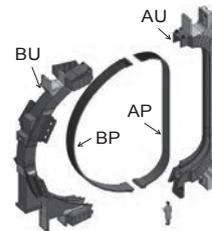


Fig. 1 Sub-assemblies of TF Coil Case

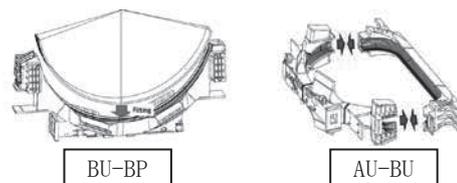


Fig. 2 BU-BP, AU-BU Fitting test



Fig. 3 Picture during AU-BU Fitting test

ITER TF コイル用 Nb₃Sn 線材の中性子照射効果 (その2)

Neutron Irradiation Effect of Nb₃Sn wires for ITER TF coil (Part II)

西村 新(NIFS); 中本 建志, 吉田 誠, 飯尾 雅実(高エネ研); 外山 健, 山崎 正徳(東北大)
 NISHIMURA Arata (NIFS); NAKAMOTO Tateshi, YOSHIDA Makoto, IIO Masami (KEK);
 TOYAMA Takeshi, YAMAZAKI Masanori (Tohoku Univ.)
 E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

中国 ASIPP 合肥研究所から提供を受けた ITER TF コイル用 Nb₃Sn 超伝導線材の、中性子照射効果を検討した。線材は直径 0.8mm であり、内部スズ法によって製作されている。試料をベルギーの BR2 に送り、最高温度 100℃ の環境下で原子炉照射し、その後、日本に戻されたものである。未照射材の測定結果と比較しながら、照射効果の概要を報告する。

2. 照射試料の準備と中性子照射

試験に供試した試料は、ITER TF コイル用の中国 Western Superconducting Technologies 製 Nb₃Sn 線材である。できるだけ直線となるように成型した後、ITER が定める標準熱処理条件で熱処理を行った。原子炉照射試料は、アルミキャプセルに封入し、He ガス置換を行い、ベルギーの BR2 に送付した。アルミキャプセルは BR2 原子炉内に設置され、最大 100℃ となる環境で原子炉照射された。1.0MeV 以上の中性子の照射線量は 1.8×10^{22} n/m² で、0.1MeV 以上の中性子照射線量は 4.9×10^{22} n/m² である。照射後、東北大学大洗センターに返送され、大洗センターの放射線管理区域で保管されている。今回報告する試料は内部スズ法で作製された Nb₃Sn 線材で、Sn の含有量がブロンズ法に比べ多いため、Sn の同位体からと思われる残留放射能が高い。原子炉照射後の試料は大洗センターで管理され、大洗センターの放射線管理区域内に設置された 15.5T 超伝導マグネットと温度可変インサートを用いて、超伝導特性を評価した。データ収集速度は 10Hz とした。

3. 臨界電流の変化

Fig. 1 に未照射線材、照射線材の臨界電流と磁場の関係を示す。試料温度は 5.18K、通電速度は 150A/s の場合の結果である。磁場が高くなるほど臨界電流は低下するが、照射線材の方が低磁場での臨界電流が未照射線材より低くなる。高磁場では、照射線材の臨界電流は未照射線材に比べほぼ同じか少し高くなる。中性子照射線量が高いために臨界電流が低下したことが考えられる。

10T および 15T の時の、臨界電流と通電速度の関係を Fig.2、Fig.3 に示す。高速通電になるほど計測点数が少なくなり、ばらつきが大きくなっている。15T では、10T での結果に比べ未照射線材と照射線材の臨界電流の絶対値が小さくなり、両者の違いは少なくなっていることがわかる。

10^{21} n/m² オーダーの中性子照射 ($E > 0.1$ MeV) では、臨界電流は未照射線材に比べて高くなり、磁場と臨界電流の関係は、その勾配が急になることを既に報告している。照射線量がある線量を超えると、臨界電流は低下することが知られている。しかし、その低下の挙動が磁場に対してどのような変化を示すかは十分明らかにされておらず、臨界電流低下の機構の詳細は検討課題である。

4. まとめ

東北大学大洗センターの共同利用の枠組みを利用し、内部スズ法で作製した ITER TF コイル用超伝導線材の原子炉照射を行った。そして、未照射線材と照射線材の臨界電流の磁場依存性について検討した。照射による臨界電流の変化

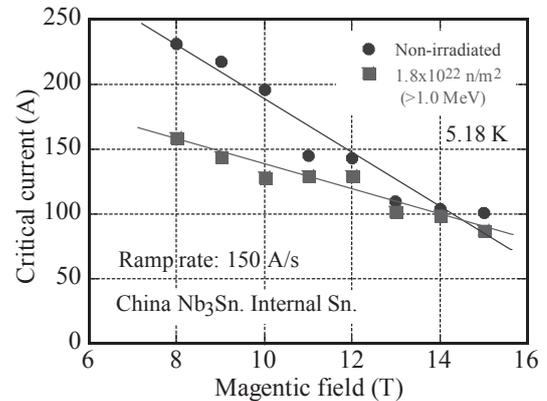


Fig. 1 Test results of non-irradiated and irradiated Nb₃Sn wires at ramp rate of 150 A/s.

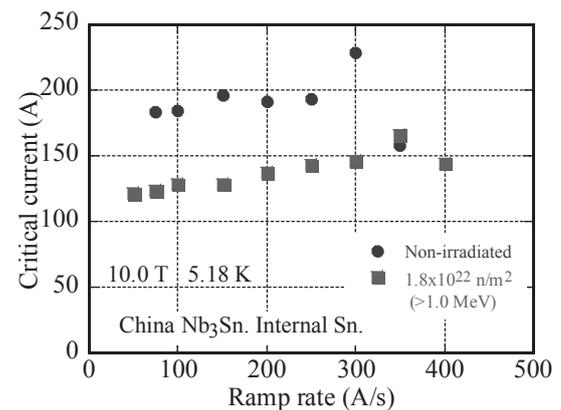


Fig. 2 Effect of ramp rate on I_c of non-irradiated and irradiated Nb₃Sn wires under 10.0 T.

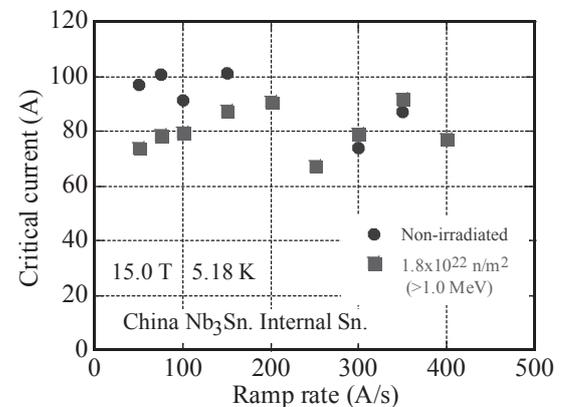


Fig. 3 Effect of ramp rate on I_c of non-irradiated and irradiated Nb₃Sn wires under 15.0 T.

挙動は十分に明らかにされておらず、今後ともさらに実験事実の蓄積を進め、それらに基づいて、中性子照射効果の機構を明らかにする予定である。

JT-60SA 超電導機器の製作進捗

Progress of Superconducting Components for JT-60SA

村上 陽之, 土屋 勝彦, 福井 良磨, 夏目 恭平, 神谷 宏治, 河野 勝己, 磯野 高明, 木津 要 (量研);
野元 一宏 (三菱電機); 高田 英治 (富士電機)

MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, FUKUI Kazuma, NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji, KAWANO Katsumi,
ISONO Takaaki, KIZU Kaname (QST); NOMOTO Kazuhiro (Mitsubishi Electric); TAKADA Eiji (Fuji Electric)

1. はじめに

欧州と日本が共同で製作を進めているJT-60SAの超電導機器のうち、トロイダル磁場コイルは欧州が製作を担当し、ポロイダル磁場コイル(中心ソレノイドおよび平衡磁場コイル)および給電用機器は日本が製作を担当する[1]。

トロイダル磁場コイルは18個のD形をしたコイルである。中心ソレノイドは4つのモジュールからなり、全てのモジュールの製作が完了した。平衡磁場コイルは、6個のコイル全ての製作が完了し、本体へ組み込むまで仮置きされている。

極低温で運転される超電導コイルと室温に置かれる電源を結ぶための給電装置(コイルターミナルボックス:CTB)は5個のうち3個が完成し、残る2個の製作が進められている。

本発表では、これらの超電導コイルおよび給電用機器の製作および組立の進捗状況について報告する。

2. 超電導コイルの製作・組立の進捗状況

トロイダル磁場コイルは、2018年2月に18個目のコイルが日本に到着し、最終セクターと呼ばれる20度分の真空容器とサーマルシールド、トロイダル磁場コイルなどを一体化する作業を行った。最終セクターは2018年4月にトカマク本体へ組み込まれた(図1)。既に設置済の340度分の機器と最終セクターを接続し、トロイダル磁場コイルの組み立ては完了する。

平衡磁場コイルは、下側3個のコイルは真空容器の組立を始める前の2014年1月にトカマク下部へ搬送し仮置きされている。上側3個のコイルは、真空容器やトロイダル磁場コイルの組立完了した後の2018年夏にトカマクに組み込まれる。

中心ソレノイド(CS)は2018年3月に4個全てのモジュールの製作が完了した(図2)。今後、4つのモジュールを積み重ねて、タイプレートと呼ばれる構造物で挟み込む一体化と呼ばれる工程に入る。一体化されたCSは100tを超える重量物であり、輸送の準備も平行して進めている。中心ソレノイドは、2019年初めにトカマクに組み込まれる予定である。

3. コイルターミナルボックス(CTB)

CTBは、高温超電導電流リードを介して、常温の銅ブスバーと極低温のNbTi超電導電流フィードを接続する給電機器である。JT-60SAでは加熱装置などを再利用するため、トカマク周辺の利用可能な空間は既存の設備を避けた場所に限られ、小型のCTBを5台、分散させて設置する設計である。これら5台のCTBのうち、最初のCTB1は2017年2月に完成した[2]。2つ目、3つ目のCTB4、CTB5は2017年12月に製作が完了した。残るCTB2およびCTB3の製作を進めており、5台全てのCTBが2018年秋に完成する予定である。

これらのCTBは上述の超電導コイルの組立が完了し、クライオスタートの蓋が閉じた後の、2019年夏頃にトカマクへ組み込まれる予定である。また、2018年にCTBの性能を確認するため、実機の単体冷却試験を実施する計画である。

参考文献

1. Y. Koide, et al.: Nuclear Fusion, Vol. 55, (2015) 086001
2. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.173

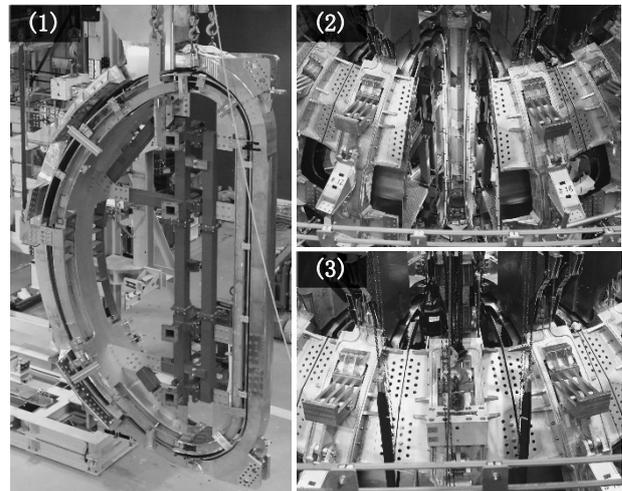


Fig.1 Installation of final sector
(1) Final sector (2) Before installation (3) After installation



Fig.2 Completed CS modules
(Left) CS4, CS2, CS1 modules (Right) CS3 module

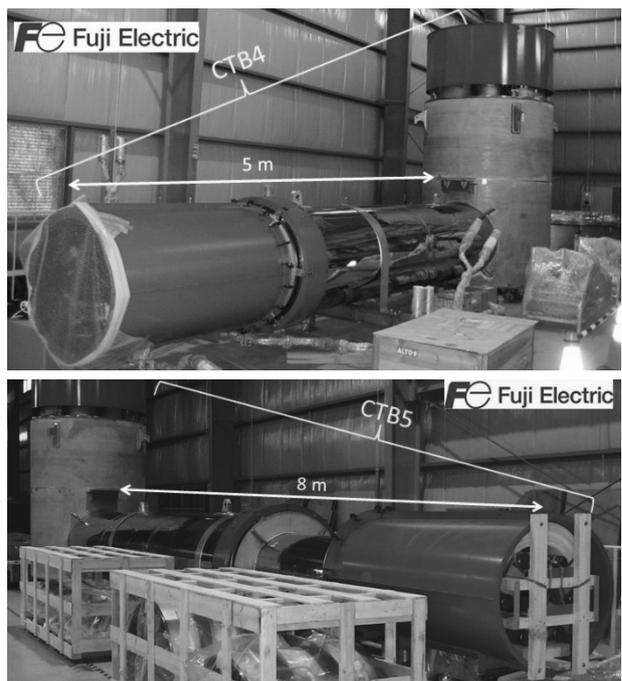


Fig.3 Completed CTB4 and CTB5

JT-60SA 冷媒ヘリウム配管の設計

Design of coolant helium pipes for JT-60SA

夏目 恭平, 神谷 宏治, 福井 良磨, 河野 勝己, 磯野 高明 (量研機構)
 NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji, FUKUI Kazuma, KAWANO Katsumi, ISONO Takaaki (QST)
 E-mail: natsume.kyohei@qst.go.jp

1. はじめに

核融合プラズマ実験装置 JT-60 の超電導化改造計画 (SA 計画) が進められている。JT-60SA の超電導コイルやサーマルシールドといった被冷却機器には、ヘリウム冷凍機システムから極低温ヘリウムが冷媒として供給される。冷媒配管は、配管自身の熱収縮や支持先である超電導コイルの熱収縮と電磁力、地震力などによる力及び変位に耐えられる構造としなければならない。本講演では、JT-60SA の冷媒ヘリウム配管の設計について報告する。

2. 冷媒配管の経路

冷媒を生成するヘリウム冷凍機システム (HRS) は、トカマク本体室の隣室に設置され、真空断熱多重配管 (Cryoline) でトカマククライオスタートに接続される。5 系統の循環経路があり、11 基あるバルブボックス (VB) と呼ばれる機器を通して、流量が調整され、被冷却体に分配される。Fig. 1 は、内部の冷媒配管が見えるように、一部を透明化した JT-60SA トカマククライオスタートの 3D モデルである。Cryoline から連絡された冷媒配管は、クライオスタート内上部で分岐し、VB に接続している。配管は再びクライオスタート内部に戻り、各機器に接続される。各機器からの戻りの経路も同様に VB を経由して、Cryoline を通して HRS に接続する[1]。

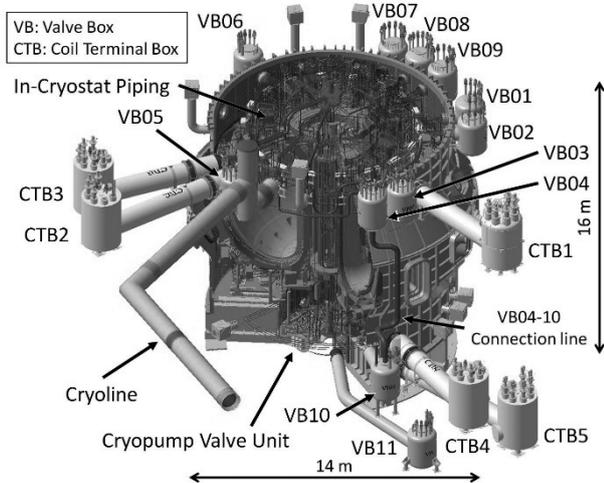


Fig. 1 JT-60SA Tokamak cryostat partially transparent view

3. 冷媒配管の機械設計

冷媒配管は、自重と地震による荷重だけでなく、自身の熱収縮による変位に対して健全でなくてはならない。また、配管は各経路・場所によって、異なる機器に支持されている。各機器は、地震による変位の他に、冷却による熱収縮や、超電導コイルであれば電磁応力、クライオスタートであれば真空引きによる力などによって変位する。各機器の変位を考慮して、配管の経路及び支持構造を設計する必要がある。

Fig. 2 に例として、Toroidal Field Coil (TFC) の冷媒配管接続部の冷却及び電磁応力による変位量を示す。TFC は 4 K 冷却時には、鉛直方向に約 38 mm 縮む。プラズマ燃焼終了時に電磁応力は最も大きく転倒力が働き、トロイダル方向の変位は約 11 mm に達する。

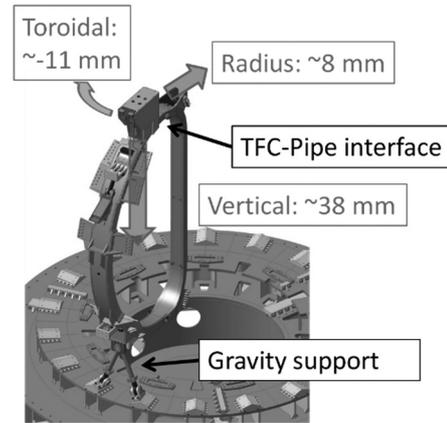


Fig. 2 Displacement of an interface between coolant pipes and Toroidal Field Coil

冷媒配管の健全性を確認するため、自重・地震による荷重及び各支持点の変位を条件として、有限要素法解析ソフトウェア ANSYS ver17.0 を用いて構造解析を実施した。Fig. 3 に例として、VB08 と TFC 及び CS (Central Solenoid) を接続している配管の計算モデル及び変位量の解析結果を示す。冷媒配管は接続部の間で、EFC (Equilibrium Field Coil) と TFC に支持を取っている。解析条件には、自重・真空・地震・冷却・電磁力が含まれる。TFC 支持部近傍で冷媒配管に約 47mm の変位があるが、配管及び支持構造に発生している応力は、SUS316L の許容応力である 350 MPa [2] を下回っているため、設計が成立していることが確認された。

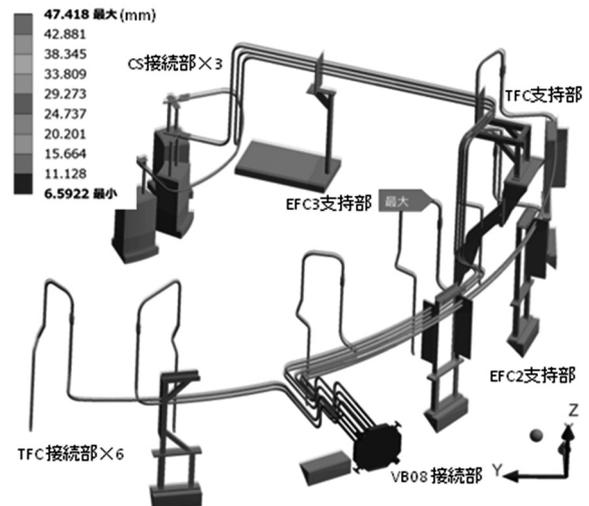


Fig. 3 Displacement of an interface between coolant pipes and Toroidal Field Coil

参考文献

1. K. Natsume, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.112
2. 核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格 (2008 年機械学会)

JT-60SA 冷却監視制御システムの開発

The Development of the Cooling Monitoring and Control System for JT-60SA

福井 良磨, 神谷 宏治, 磯野 高明, 夏目 恭平, 河野 勝己 (量子機構)

FUKUI Kazuma, KAMIYA Koji, ISONO Takaaki, NATSUME Kyohei, KAWANO Katsumi (QST)

E-mail: fukui.kazuma@qst.go.jp

1. はじめに

超伝導トカマク装置 JT-60SA は、日欧の国際協力の下で製作が進められている。冷凍機が精製冷却した冷媒の分配制御及び被冷却機器のパラメータの監視収集を目的としたシステム(マグネットコントローラ)が 2018 年 3 月に完成した。

2016 年 10 月に完成したヘリウム冷凍機は、各冷却機器の定格温度まで冷媒を冷却し、全体的な流量を制御するものである。冷凍機単体では機器の局所的な温度上昇や、LOFA などといった異常に対処することはできない。従って各流路の局所的な冷媒の分配制御が可能なマグネットコントローラを開発した[1]。本稿ではマグネットコントローラの紹介と、その役割の概要を報告する。

2. マグネットコントローラ

マグネットコントローラは PLC と制御 PC から成る。Fig.1 に示す様に、PLC は 3 つの盤で構成されており、それぞれ Main PLC 盤、Fast Discharge I/O(FD) 盤、Data Acquisition I/O(DAQ)盤と呼ぶ。

Main 盤は PLC やハード回路が実装されているほか、他設備との通信を行い、主にインターロック信号を送受信している。盤に実装されている PLC のシステムは冷凍機システムと同様の SIMATIC PCS 7 プロセスコントロールシステム(PCS 7)で構築している。高い稼働率を得るため、Operator Station(OS)サーバや PLC を二重化にし、片方には UPS を介して電力を供給している。FD 盤は主にクエンチに関連するデータを収集しており、DAQ 盤は主に各種計測値のデータを収集している。制御 PC には HMI が実装されており、オペレータはこの PC からマグネットコントローラを制御することができる。

3. 冷媒分配制御

Fig.2 に示すように、マグネットコントローラは冷凍機が機器に供給する冷媒を分配する役割を持つ[2]。Table.1 は被冷却機器と、その定格温度、定格流量を示したものである。マグネットコントローラは、それぞれの流路において、常に既定の流量や温度が確保できるように、TF/PF のフィード、HTS-CL の高温端の流量や、PF 出口弁開度などの PID 制御を行っている。計測している流量や温度、圧力などが閾値を跨いだとき、インターロックが作動し、既定の設備にインターロック信号を発信する。その他にも、クエンチ、電源の遮断など、種々のケースを想定したインターロック機能を実装している。殆どのインターロック信号は 3 つのアラームレベルに分類されており、所定の設備に送信した後、統括制御計算機システム(SCSDAS)にネットワーク信号でシステムの異常を知らせる。

Table.1 Nominal cooling specification for the cryogenic system

Cooling Structure	Loop1 TFC	Loop2 PFC	Loop3 Cryopump	Loop4 Thermal Shield	Loop5 HTS-CL
Temperature [K]	4.5	4.5	3.7	80	50
Mass flow [g/s]	876	960	270	404	30

4. 他設備との通信

Fig.3 は他設備とマグネットコントローラとの通信を示した図である。マグネットコントローラは 3 つの設備(SCSDAS、冷凍機

システム、電源設備)と通信を行う。SCSDAS と行う通信は、ステート移行に係る種々のメッセージや、設備の状態を知らせるためのプロセスデータ、インターロック信号、タイミング信号、コイル出入口温度である。冷凍機システムとは、冷凍機のステート移行に係る信号、冷凍機のステート、インターロック信号などである。電源設備とはコイルの電流値やクエンチ信号を送受信する。

参考文献

1. K. Kamiya et al, 2017 J. Phys.: Conf. Ser. **897** 012015
2. K. Yoshida : TEION KOGAKU (j. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 50, No. 12, (2015) p. 582

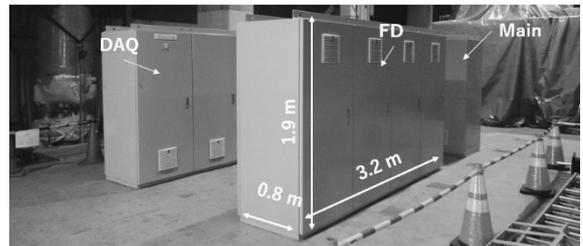


Fig.1. The exterior of the PLC panels

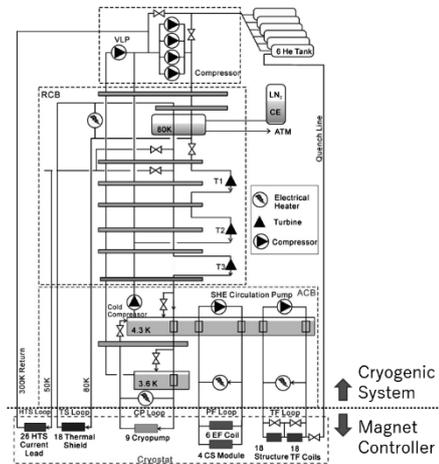


Fig.2 Flow diagram of the cryodistribution

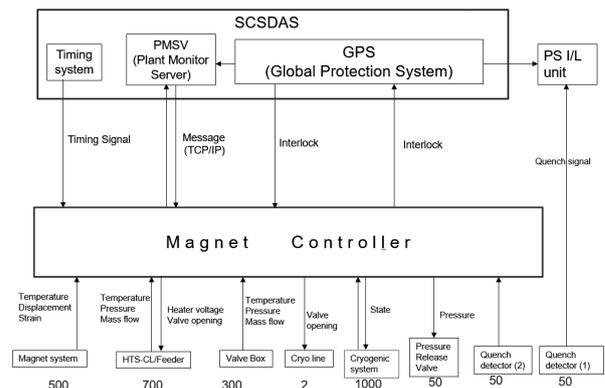


Fig.3 Signal transmission between other systems

LHD ポロイダルコイルの 20 年間の運転から学ぶ教訓 ～クエンチ検出器の誤検出と誤作動事象

Lessons learned from twenty-year operation of the Large Helical Device poloidal coils:
Malfunction and false detection events of the quench detection system

高畑 一也, 森内 貞智, 大場 恒揮, 鷹見 重幸, 三戸 利行, 今川 信作 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya, Sadatomo MORIUCHI, Kouki Ooba, Shigeyuki TAKAMI, Toshiyuki MITO, Shinsaku IMAGAWA (NIFS)

E-mail: takahata@nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)は、世界最大級の超伝導コイルを有するヘリカル型プラズマ実験装置である。超伝導コイルは、2 条のヘリカルコイルと 3 対 6 個のポロイダルコイルから構成される。1998 年 3 月 27 日のコイル初励磁、3 月 31 日のファーストプラズマ点火から、20 年間安定に運転を続けてきた。その間の超伝導コイルの冷却時間は 54,600 時間、励磁時間は 10,600 時間に達した[1]。

超伝導コイルが安定な運転を続ける一方で、周辺機器の不具合により、プラズマ実験が一時的に中断する事象が幾度か発生した。本発表では、ポロイダルコイルのクエンチ検出器に関連した誤検出と誤作動事象について紹介する。またそれらから得られた教訓について述べる。

2. クエンチ検出器の構成

図 1 にクエンチ検出・保護システムの回路図を示した。3 対のポロイダルコイルの 1 対ずつは、LHD の赤道面に対して上下対称に配置され、インダクタンスも同じである。そこで、上下のコイルでブリッジ回路を構成し、励磁中のインダクタンス成分をキャンセルする。バランス電圧を絶縁アンプに通し、時間、電圧共にしきい値以上発生したときに保護回路を動作させる。1 対のフィーダー部は直接電圧をモニタした。

システムは 2 種類の保護動作を持っており、0.1V の電圧が 1 秒継続した時に低速遮断(時定数 300 秒)、3 秒継続したときに高速遮断(時定数 30 秒)を行う。万が一常伝導転移した場合は高速遮断することが必須であるが、他の要因で不必要に高速遮断することは、逆に絶縁破壊の可能性を高めてしまう。そこでより緩やかな保護として低速遮断を準備した。

3. クエンチ検出器の誤検出/誤作動事象

表 1 に、この 20 年間の誤検出/誤作動事象を列記した。事象の総数は 10 である。連続で発生した誤検出は一つの事象とカウントした。なお、常伝導転移の検出による保護動作の経験は一度もない。

#2 と #3 (2004) の誤作動は、プラズマ加熱装置のコンディショニング運転と同期して発生した。#2 は計測線に 11V を超えるサージが入り、絶縁アンプが故障信号を発信したため

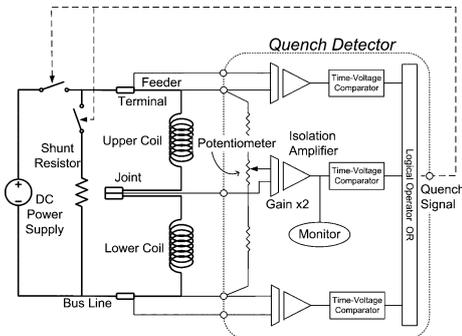


Fig. 1 Circuit diagram of the quench detection and protection systems for the LHD poloidal coils.

である。また #3 は遠隔操作のための制御ケーブルにサージが入ったためである。いずれも励磁中でなく、コンディショニング段階で発生したため、運転までに対策を講じることができた。コンディショニング中もクエンチ検出器を動作させることが重要であろう。

#6 (2005) と #8 (2008) の誤検出は、コイル電流を掃印しながらプラズマ実験を行ったときに発生した。インダクタンス成分を完全にキャンセルするようにポテンショメータを調整したが、結合電流ループによる電圧発生は完全にキャンセルできていなかったことが原因である。発生電圧の掃印速度依存性を調査し、時間のしきい値設定を 1 秒から 1.5 秒に変更することで誤検出を回避した。実験条件での結合電流による電圧発生を事前に評価し、しきい値設定に反映するべきであった。

#10 (2017) の誤作動は、検出器 6 台のうちの 1 台を更新したことで発生した。プラズマ実験直前のコイル励磁試験において、保護動作確認のため低速遮断を行った直後に検出器の基板の一部が損傷し、高速遮断に移行した。検出器の誤作動によって、通電中に高速遮断を行ったのはこれが最初である。長期運転において周辺機器の更新は不可欠であるが、導入にあたっては、より慎重な動作確認が必要であった。

参考文献

1. K. Takahata, et al.: Cryogenics, Vol. 91 (2018) p.1

Table 1 History of malfunctions and false detection events of the quench detection system for the LHD poloidal coils.

#	Demand signal	Excitation	Cause	Year/Month
1	Slow discharge	ON	Malfunction of timer circuit	2002/11
2	Fast discharge (frequently)	OFF	Surge voltage from NBI conditioning	2004/4
3	Fast discharge (frequently)	OFF	Surge voltage from NBI conditioning	2004/9
4	Slow discharge	ON	Unknown	2004/12
5	Fast discharge	OFF	Unknown	2005/6
6	Slow discharge	ON	False detection during magnetic axis swing operation	2005/11
7	Slow discharge	ON	Malfunction of potentiometer	2008/10
8	Slow discharge (3 times)	ON	False detection during magnetic axis swing operation	2008/10
9	Fast discharge	OFF	Lightning surge	2009/8
10	Fast discharge	ON	Malfunction of electronic substrate	2017/2

13 T-700 mm大口径高磁場導体試験装置用100 kA変流器の概念検討

Study on 100 kA superconducting transformer for 13 T - 700 mm conductor test facility

今川 信作, 力石浩孝 (NIFS, NINS)
 IMAGAWA Shinsaku, CHIKARAISHI Hiroataka (NIFS, NINS)
 E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所の大口径高磁場導体試験装置は、実使用状態と同じように電磁力による拡張力が働く状態で超伝導特性を調べるため、コイル形状の導体試験サンプルを想定している。Nb₃Sn 大電流高磁場導体では、繰返し電磁力や熱サイクルによって分流開始温度が変化することが報告されており、核融合炉用導体開発においては、電磁力影響の評価が益々重要となると考えられている。現状の装置は、既存の直流電源から供給可能な電流値が 50 kA に制約されており、核融合炉用の 100 kA 級導体の電磁力影響を評価するには電流値が不足している。そこで、100 kA 以上の電流を供給可能なコンパクトな超伝導変流器の概念検討を進めている。本研究では、一次コイルを伝導冷却方式の密巻コイルとして、試験サンプルおよび二次コイルの冷却に用いる超臨界圧ヘリウムで冷却するコンパクトな変流器システムの開発を目指している。試験サンプルがコイル形状であるため、変流器方式の採用においては外部磁場コイル電源との干渉についても検討が必要である。

2. 超伝導変流器の概念設計

変流器は、外部磁場コイルとの干渉を避けるために、図1に示すように軸が直交する配置とする計画である。図2に変流器の等価回路を示す。二次コイルとサンプルの接続抵抗 R_2 が二次コイルとサンプルのインダクタンス和 L_2+L_3 に対して十分に小さい場合、二次コイルの電流値 I_2 は次の近似式で与えられる。

$$I_2 \approx -k \frac{\sqrt{L_1 L_2}}{L_2 + L_3} \int \frac{dI_1}{dt} dt$$

大きな I_2 を得るには、結合係数 k と一次コイルのインダクタンス L_1 を大きくし、 L_3 を小さくすることが有効である。 L_1 を大きくする観点からは一次コイルを外側に配置する方が良いが、二次コイルとサンプルの接続構造の制約から、図 1 のように二次コイルを外側に配置する案を基本としている。

3. 電流解析

表1に示すような仕様の変流器について、一次コイル電源として ± 10 V, ± 200 A の電源を想定して「 dI_1/dt 一定制御で二次コイルを 100 kA まで励磁して保持」する場合の計算例を図3に示す。 R_2 が $3.0E-9$ ohm の場合は、15 s 以内での 100 kA 到達と 2,000 s 以上の電流保持が可能であるが、 $1.0E-8$ ohm の場合には、100 kA 保持時間は 600 s 程度に短くなる。

外部磁場コイルを遮断する場合の影響を考えると、試験サンプルには外部磁場コイルの磁束を鎖交しないように巻き戻しコイルを設ける必要があると考えられる。

Table 1. Specifications of a superconducting transformer

	Primary coil	Secondary coil
Inner diameter (m)	0.46	0.5
Outer diameter (m)	0.488	0.530
Winding length (m)	0.152	0.120
NbTi filament diameter (mm)	0.078	0.018
Filament number per strand	42	547
Strand diameter (mm)	-	0.81
Strand number	1	540 (3×3×6×10)
Conductor size (mm ²)	0.85×1.2	15×40
Turn number	16×120	1×3
Operating current (A)	±200	100,000

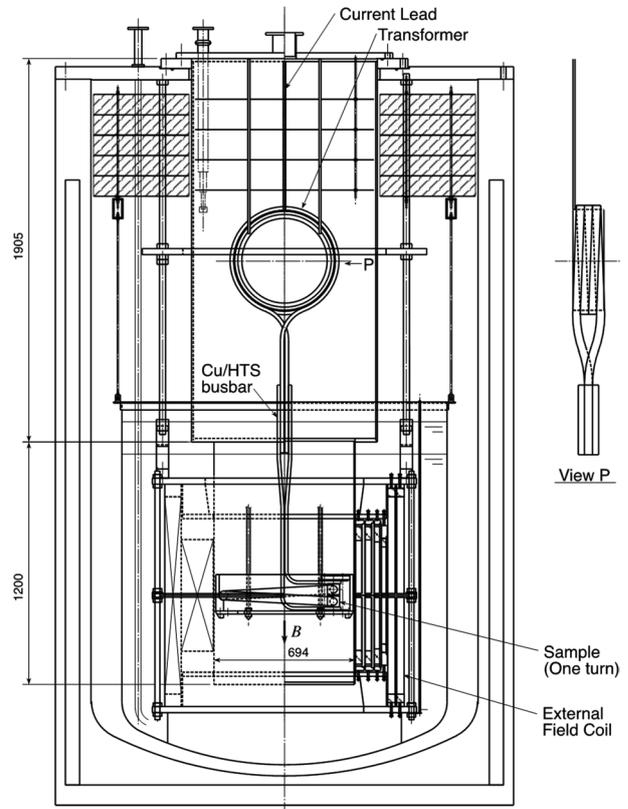


Fig. 1. Concept for setup of a superconducting transformer in 13 T - 700 mm conductor test facility.

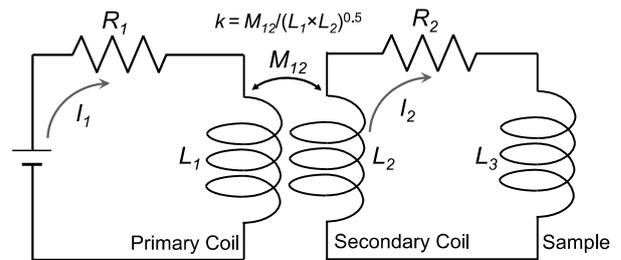


Fig. 2. Electric circuit of a transformer and a testing sample.

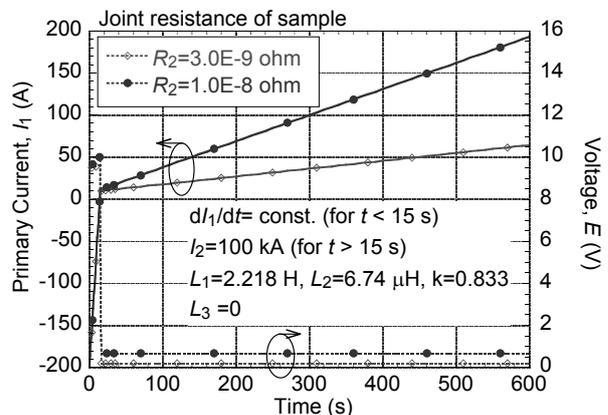


Fig. 3. A calculated result of the transformer in Table 1.

Nb₃Al 線材の大気中での急熱急冷処理における通線速度の影響

Effect of the Wire Moving Speed on the Rapid-Heating/Quenching Treatment in an Open Air for Nb₃Al Wires

古川 大 (上智大); 菊池 章弘, 飯嶋 安男, 櫻井 義博, 瀧川 博幸, 金井 秀之 (NIMS); 土屋 清澄 (KEK); 高尾 智明 (上智大)

Furukawa Dai (Sophia Univ.); KIKUCHI Akihiro, IJIMA Yasuo, SAKURAI Yoshihiro, TAKIGAWA Hiroyuki, KANAI Hideyuki (NIMS); TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.)

E-mail: d-furukawa-x5r@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

物質・材料研究機構 (NIMS) で考案された急熱急冷・変態 (Rapid-Heating/Quenching and Transforming) 法 Nb₃Al 線材は、既にキロメートルを超える長尺化に成功し、実用化が待望されるが、更なるプロセスの簡素化や低コスト化、一層の臨界電流密度の向上が求められている[1]。本研究では、大気中の急熱急冷処理において、熱処理時間を短くして Nb₃Al の有効ピン止め点である結晶粒の微細化を狙って、通線速度を速めた急熱急冷処理の影響について調査した。

2. 大気中での急熱急冷処理

急熱急冷処理は線材を約 2000°C に加熱し、液体 Ga によって室温まで瞬時に冷却する。その温度の高さから激しい酸化現象による線材の溶断が懸念され、従来は高真空中で行うことが通例であった。しかし昨年、我々は初の大気中での急熱急冷処理を行い、実際には線材の溶断は起こらず、大気中での連続処理が可能だということが判明した[2]。

大気中で急熱急冷処理した線材は、臨界温度、臨界電流密度ともに従来の高真空中で処理した線材と同等の特性を示している。これらのことから我々は、高真空中で急熱急冷処理することに比べ、いくつかのプロセスを省略できる大気中で急熱急冷した線材を性能の評価に用いた。

3. 急熱急冷処理条件の決定

現在の急熱急冷処理では電圧制御を用いている。印加電圧 (V_{RHQ}) を変化させると、同時に電流 (I_{RHQ}) も変化する。そこで、通電加熱時間 (t)、線材の断面積 (A) 及び通電距離 (L) とともに、(1)式によって得られる数値を投入エネルギー (E) とする[1]。

$$E \text{ (J/mm}^3\text{)} = \frac{I_{RHQ} \times V_{RHQ} \times t}{A \times L} \dots (1)$$

E の大きさは、加熱時のピーク温度 (T_{peak}) と一次近似することができ、 E が大きいほど T_{peak} は高い。通線速度を変化させる際には、 T_{peak} を等しくするために E が等しくなるよう必要がある。線材の断面積 A 、通電距離 L は変化させずに行った。そこで通線速度を速くすると(1)式における通電加熱時間 t が小さくなるため、印加電圧 V_{RHQ} を変更する必要がある。そこで、(2)式によって電圧値を変更した。

$$V_{RHQ} = V_o \times \sqrt{\frac{t_o}{t}} \dots (2)$$

V_o は速度変更前の印加電圧値、 t_o は速度変更前の通電加熱時間である。今回の実験では通線速度を 0.3 m/s と 1.0 m/s で行った。通電距離 L は 125 mm で行ったため、通線速度 0.3 m/s では通電加熱時間は約 0.42 秒であり、1.0 m/s では約 0.13 秒であった。以上より V_{RHQ} を決定した。

4. 通線速度を速くした線材の臨界電流密度

Fig. 1 は、代表的な断面仕様の Nb/Al ジェリーロール前駆体線材 (外径 1.36 mm、フィラメント数 132、母材 Nb) に急熱急冷処理を施し、その後に 800°C で相変態熱処理した試料の臨界電流密度 (4.2 K) の磁場依存性である。通線速度が 1.0 m/s で急熱急冷処理した場合と、0.3 m/s で急熱急冷処理した場合とで臨界電流密度を比較した。クレーマープロットから外挿して求めた上部臨界磁場は、いずれの通線速度でも約 25.5 T で同等であったが、臨界電流密度は明らかに 1.0 m/s の急熱急冷処理で高い値が得られることがわかった。但し、この線材試料は急熱急冷処理後の減面加工は行っていない。

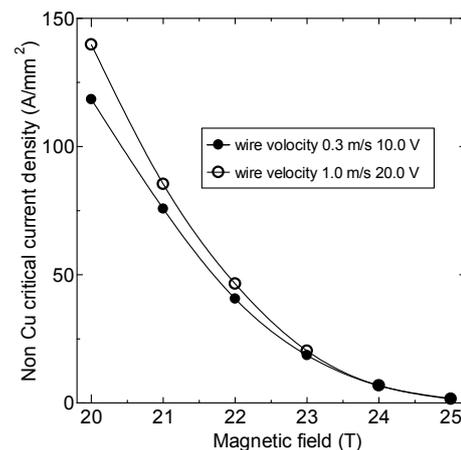


Fig. 1 Non Cu critical current density versus magnetic field curves for Nb matrix Nb₃Al wires through the RHQ treatment with the wire velocity 1.0 m/s (O) and 0.3 m/s (●).

5. まとめ

通線速度を 1.0 m/s で急熱急冷処理を行うと、0.3 m/s で処理した線材に比べ臨界電流密度が向上するという知見が得られた。本研究で通線速度が臨界電流密度に大きく影響を与えることが判明し、今後の Nb₃Al の臨界電流密度を向上させる足掛かりとなった。

謝辞

組織観察の一部は NIMS 材料分析ステーション、高磁場特性の評価は NIMS 強磁場ステーションの支援を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] A. Kikuchi: J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol. 47 No. 8 (2012) p.506
- [2] A.Kikuchi, et. al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.54

超高スズ濃度ブロンズ合金を用いて作製した Nb₃Sn 極細多芯線材の組織と超伝導特性

Microstructure and Superconducting Properties of Nb₃Sn Fine-Multifilamentary Wires Fabricated by Using Super-High Tin Bronze Alloys

菊池 章弘 (NIMS); 谷口 博康, 水田 泰次, 水田 泰成 (大阪合金); 飯嶋 安男 (NIMS)

KIKUCHI Akihiro (NIMS); TANIGUCHI Hiroyasu, MIZUTA Taiji, MIZUTA Yasunari (OAW); IJIMA Yasuo (NIMS)

E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

ブロンズ合金中のスズ濃度を高めると脆いδ相が析出するが、Ti 添加量も同時に適量高めると、δ相はCuSnTi相に完全に置き換わる。さらにCuSnTi相は粉碎性に優れていて熱間鍛造等で容易に微細分散させることができる。この組織制御により、従来は全く冷間加工ができなかった超高スズ濃度ブロンズに良好な延性を発現させることができ、従来通りのブロンズ法の工程で、極細多芯線材を作製することが可能となった。今回、試作した極細多芯線材の組織と超伝導特性について報告する。

2. 超高スズ濃度ブロンズの作製

新しい超高スズ濃度ブロンズ合金は、量産製法である「水田式溶製法」により溶製した。溶製塊はφ80の実験サイズで、溶製後は組織の均質化のために600℃で200hの均質化熱処理を実施した。組成はCu-17.5mass%Sn-1.0mass%TiとCu-18.5mass%Sn-1.6mass%Tiである。均質化熱処理後に熱間鍛錬を実施し、その後ひずみ除去熱処理を600℃で24h行った。

3. 熱間押出による多芯線材の試作

これまでのところ、上記の組織制御された超高スズ濃度ブロンズを用いて、外径が約60mmのミニビレットのステージで試作実績を蓄積している。19芯サブマルチ及び1,615芯マルチの製造において、押し詰まりや断線は一度もない。微細な化合物粒子が分散しているブロンズでも、数ミクロン径のNbフィラメントと複合加工ができる従来のブロンズ原料と同等の取扱いができる。Fig. 1はCu-18.5mass%Sn-1.6mass%Ti組成のブロンズで試作した線材断面の一例である。外径1.0mm、フィラメント数は1,615本、フィラメント径は約9ミクロンである。

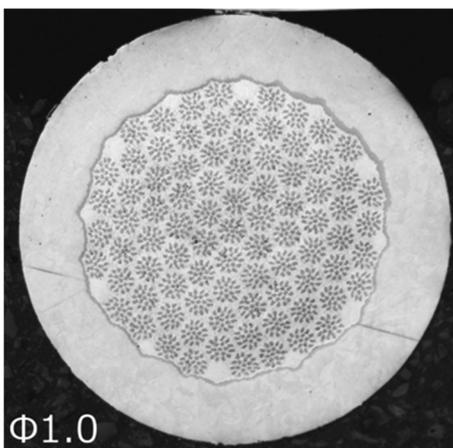


Fig. 1 1,615 filaments bronze-processed wire using Cu-18.5mass%Sn-1.6mass%Ti bronze alloy.

4. 最適熱処理温度と臨界電流密度

Ti 添加は Nb₃Sn の上部臨界磁場 (B_{c2}) を向上させる他、Nb₃Sn の生成を促進する効果があることが知られている。一般的なブロンズ法線材の原料ブロンズには、0.3~0.5mass%のTiが添加されているが、本研究におけるブロンズには、1.0~1.6mass%と3~5倍程度の多量のTiが含まれている。Fig. 2は、4.2 K、18 Tでの非銅部臨界電流密度 (non Cu J_c) と熱処理温度の関係である。Tiが多量に含まれているためか、低温でNb₃Snの生成が促進され、高いnon Cu J_cが得られる最適温度が600℃程度まで大幅に低下している。18.5mass%Snブロンズで生成されるNb₃Sn層は最も厚くなり、ブロンズ中のスズ濃度に応じている。すなわちnon Cu J_cの向上は、主としてNb₃Sn層の体積比率の増加に起因していると考えられる。

5. 上部臨界磁場とNb₃Sn相中のTi濃度

650℃の熱処理においても、18.5mass%Sn、17.5mass%Sn、16mass%Snの順にNb₃Sn層は厚く生成される。しかし、non Cu J_cは全く逆の順番になっている。即ち、18.5mass%Snブロンズで生成したNb₃Sn層あたりのJ_cは著しく低いものとなる。クレーマープロットから外挿して求めたB_{c2}は、18.5mass%Snブロンズで23.6 T、17.5mass%Snブロンズで23.8 Tであった。一方、従来の16mass%Snブロンズでは24.8 Tと約1 T高い値であった。EPMA分析により、Nb₃Sn層中のTi濃度を測定したところ、16mass%Snブロンズに生成したNb₃Snでは1.0~1.5at%Tiであったが、17.5mass%Snブロンズでは2.5~3.0at%Ti、18.5mass%Snブロンズでは3.0~3.5at%Tiと、従来と比較して3倍もの多量のTiがNb₃Snに取り込まれていることがわかった。即ち、超高スズ濃度ブロンズより生成したNb₃Snでは過剰にTiが固溶して、高いB_{c2}が得られる最適Ti濃度から大きくずれていることがわかった。

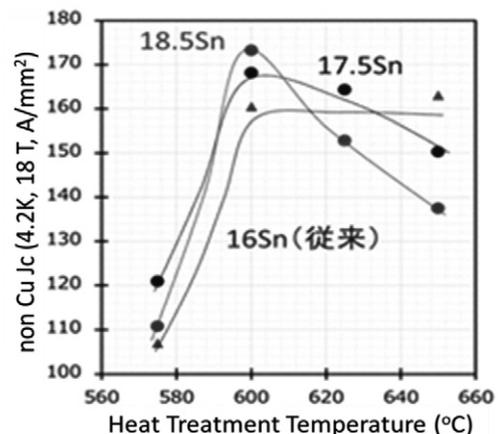


Fig. 2 Non Cu J_c (4.2 K, 18 T) of Nb₃Sn wires made by using 18.5%Sn, 17.5%Sn and 16%Sn bronze alloys.

Cu-Sn-In 三元系ブロンズを用いた Nb₃Sn 多芯線材の超伝導特性

Superconducting properties of Nb₃Sn multifilamentary wires using various Cu-Sn-In ternary bronze matrices

菱沼 良光(核融合研); 谷口 博康((株) 大阪合金工業所); 菊池 章弘(物質・材料研究機構)
 HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS); TANIGUCHI Hiroyasu (OAW); and KIKUCHI Akihiro (NIMS)
 E-mail:hishinuma.yoshimitsu@nifs.ac.jp

1. はじめに

最近、我々は Nb₃Sn 線材の高強度化を目的に、Zn を固溶した高 Sn 濃度 Cu-Sn-Zn 合金母材を用いた Nb₃Sn 極細多芯線材を提案した。その結果、Zn は Nb₃Sn 生成熱処理後のマトリックス中に均質に残存し、(Cu,Zn) 固溶体を形成することで線材強度を向上していることが示唆された。しかしながら、Cu-Sn-Zn 三元系合金中の Sn 量と Zn 量の間には Cu への固溶量においてトレードオフの関係が明らかになり、Sn 濃度を極端に減らすことなく高い臨界電流特性を維持し、その上で高強度化が両立するような溶質元素として In に注目している。前報では、種々の Cu-Sn-In 三元系合金の微細組織や Nb₃Sn 相の特性について報告した。

本研究では、種々の Nb/Cu-Sn-In-(Ti) の多芯構造を作製し、マトリックスの硬度及び超伝導特性における In 効果を明らかにする。

2. 実験方法

種々の Sn 量と In 量の Cu-Sn-In 母材を溶製し 600°C の溶体化処理を実施した。その後、19 本の Nb 棒を組み込み、Nb₃Sn 多芯線材(Nb 芯: 19 芯、線径: 1.0mm)を得た。用意した多芯前駆体を真空中で Nb₃Sn 生成熱処理を行った。

Cu-Sn-In マトリックスにおける熱処理後の硬度試験は、鏡面研磨を行った線材断面にて行い、四角錐型のダイヤモンド圧子によるビッカース硬度計(MITSUTOYO HM-200)を用いた。試験条件は 490 mN (50gf) の荷重を 30 秒間印加とし、任意の 5 箇所を測定し、それらの平均値を硬度とした。

臨界電流密度 (J_c) 特性については、4.2K 中で 18T までの外部磁場を印加させて直流 4 端子法にて臨界電流 (I_c) を測定した。なお、 I_c 基準は 1 μ V/cm の電圧が発生した時の電流値とした。また、本研究における J_c 特性の評価は Nb₃Sn 相断面あたりの J_c (Layer J_c) とし、Nb₃Sn 相の断面積で I_c 値を除いた値とした。

3. 実験結果

Fig.1 に、700°C で Nb₃Sn 拡散生成熱処理後のマトリックスにおけるビッカース硬度の比較を示すマトリックスの硬度は、Cu-Sn-In 三元系合金の硬度は通常のブロンズだけでなく、Cu-Sn-Zn 系と比較しても明らかに高いことが分かった。これは、In が Zn よりも Nb₃Sn 生成後のマトリックスにおける固溶強化機構の溶質元素として非常に有効であることを示唆している。

Fig.2 に Cu-14Sn-3.0In-0.3Ti 三元系マトリックスを用いた Nb₃Sn 多芯線材における Layer J_c 特性の磁場依存性を示す。Cu-Sn-In 三元系合金母材を用いた線材の Layer J_c 特性は、無添加の二元系ブロンズを用いた線材よりも高い特性を示し、特に中磁場領域では著しく高い傾向であった。この傾向は、

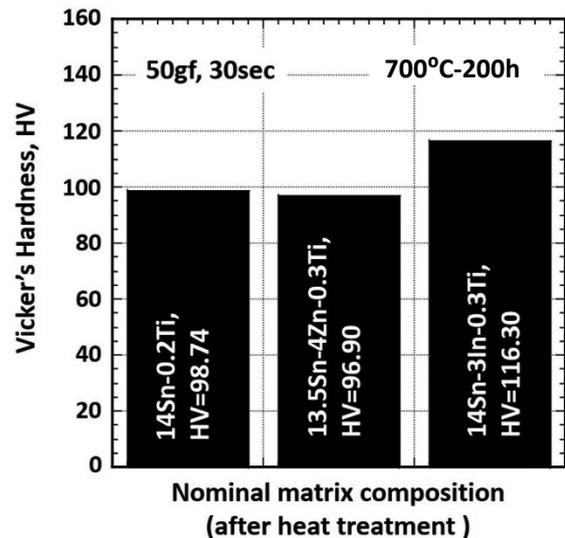


Fig. 1 Comparisons of Vickers hardness on the matrix alloy after Nb₃Sn synthesis heat treatment.

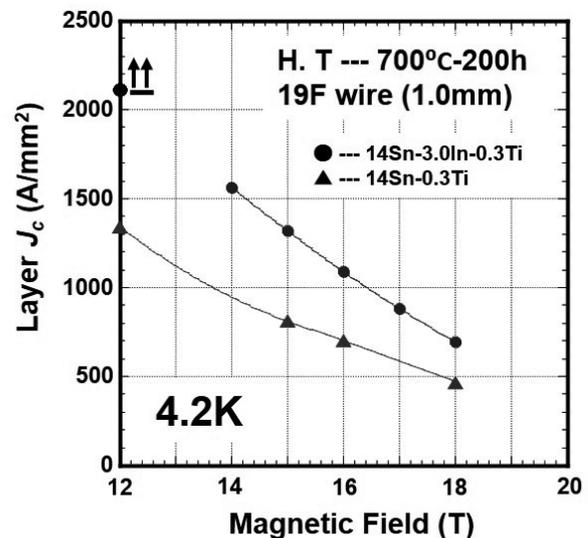


Fig. 2 Layer J_c -B performances of the Nb₃Sn wires using Cu-14Sn-3.0In-0.3Ti ternary alloy matrix

前回報告した単芯線材と同様であった。母材への In 添加は、マトリックスにおける固溶強化機構の溶質元素としてだけでなく、超伝導特性を改善することにも効果的であると考えられる。

本研究は、NIFS 核融合工学プロジェクト(UFFF036-1)、NIFS 一般共同研究(NIFS16KECF017)、及び科研費(基盤(B)16H04621)の支援を受けた。

ブラス母材内部拡散法 Nb₃Sn 線材における Ti ドープモードの影響 Influence of Ti-doping mode on brass matrix internal-tin Nb₃Sn conductors

伴野信哉(物材機構); 森田太郎(上智大, 物材機構);
谷貝剛(上智大); 宮本泰男(東海大); 太刀川恭治(物材機構, 東海大)
BANNŌ Nobuya (NIMS); MORITA Taro (Sophia Univ., NIMS);
YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); MIYAMOTO Yasuo (Tokai Univ.); TACHIKAWA Kyoji (NIMS, Tokai Univ.)
E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. 緒言

これまで我々は内部スズ法 Nb₃Sn 線材において、Cu 母材に元素添加し、Nb₃Sn 層生成促進や母材固溶強化など、結晶組織や超伝導特性に対する様々な効果を研究している。一方組織形成、特性改善には、Ti も重要な役割を担っている。Ti には Nb₃Sn 層の生成を促進する効果があることが知られているが、これまで Ti 添加の影響、特に内部スズ法における添加場所の影響については、詳細な研究がなされていなかった。本研究では、ブラス母材を用いた内部スズ法 Nb₃Sn 線材において、異なる Ti ドープモード試料を準備し、Ti ドープモードによる組織上の違い、超伝導特性の変化を調べた。併せて、参考として異なる Ti ドープモードで作製されたブロンズ法線材の特性とも比較しその効果を考察する。

2. 実験方法

線材は典型的なダブルスタックのロッドインチューブ法で作製する。Ti は Sn 芯もしくは Nb 芯にドープした。それぞれの合金における Ti ドープ量は 1.6wt% (3.88at%) 及び 0.41wt% (1at%) である。ここで各試料名を ST-3.9 線及び NT-1 線とする。Fig. 1 に各断面写真を示す。Nb 芯数は 684 本で芯径は 8.2 μm である。線材作製方法の詳細は文献[1, 2]を参照されたい。

各線材は 550°C × 100 h、650°C × 100 h の予備加熱をしたのち 700°C の熱処理を施した。熱処理は 1 気圧の Ar 雰囲気で行った。熱処理後の線材断面を FESEM、EPMA、EDX により観察し、マトリクスおよび Nb₃Sn 層の組成分析を行った。平均結晶粒径は、画像解析により求めた領域面積と、領域内の粒子数から求めた。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 は、550°C で熱処理した後の両試料の組織写真である。両試料とも、Sn 芯のあった位置で ε 相が生成し、次第に外周部へと拡散している様子がわかるが、ST-3.9 線の方が Sn の拡散が初期では遅い。マトリクス中の Ti が Sn 拡散を抑制していると思われる。Fig. 3 は 700°C 熱処理後の EPMA マップ (Sn, Ti) を表す。従来の Sn 芯に Ti を添加した試料では、Ti の拡散長が長くなり、断面内における Ti 分布の不均一やサブエレメント間での Ti の詰りが見られていたが、NT-1 線では Ti の分布は均一で詰りも大幅に抑えられている。本研究の結果は Ti が組織の界面に集まりやすい性質を表しているものと考えられる。Fig. 4 は Nb₃Sn フィラメントの結晶組織の SEM 写真である。ST-3.9 線ではフィラメント結晶粒がほぼ等軸晶的であるのに対し、NT-1 線ではマトリクス側は等軸晶で、中心部に行くにつれて柱状晶的な組織を示した。これは、従来のブロンズ法線材の Nb₃Sn フィラメントの結晶組織と類似した傾向である。Sn 拡散の駆動力の観点では、Ti はマトリクス側に存在する方が有利と考えられる。NT-1 線材の結晶粒径はマトリクス側で 218 μm、中心部で 261 μm であった。一方 ST-3.9 線材の粒径は 230 μm である。J_c-B 特性を比べると (1C-p05)、NT-1 線材は B₂ が低い一方、ST-3.9 線材に比べて急峻であった。NT-1 線材の B₂ が低い理由として、Ti 量が少なかったことが挙げられる。J_c-B 傾きの違いは、結晶粒径が大きく変わ

らないことから、先のブロンズ法線材におけるように結晶粒径以外の要因 (Ti 量) による可能性もあろう [3]。

[1] N. Banno, Y. Miyamoto, K. Tachikawa, Physica C, vol. 546, pp. 55-60, 2018. [2] N. Banno, Y. Miyamoto, K. Tachikawa, IEEE TAS 27 (2017) 6000205. [3] T. Asano, Y. Iijima, K. Itoh, K. Tachikawa, Trans. Jpn. Inst. Met. 27 (1986) 204.

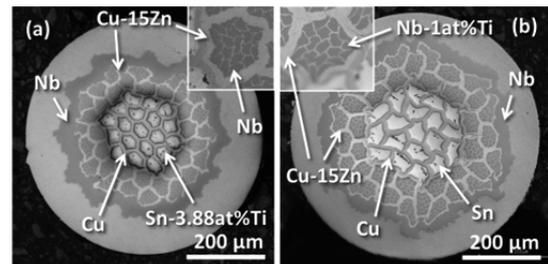


Fig. 1. Cross-sections of developed precursor wires. (a) ST-3.9 and (b) NT-1 wires.

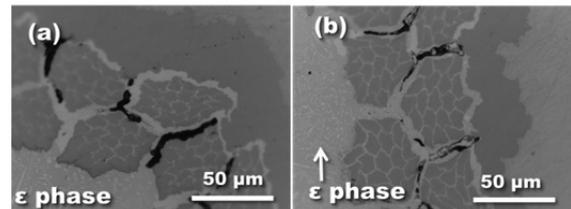


Fig. 2. Microstructures for (a) ST-3.9 and (b) NT-1 wires after heat treatment at 550°C for 200 h and 100h, respectively.

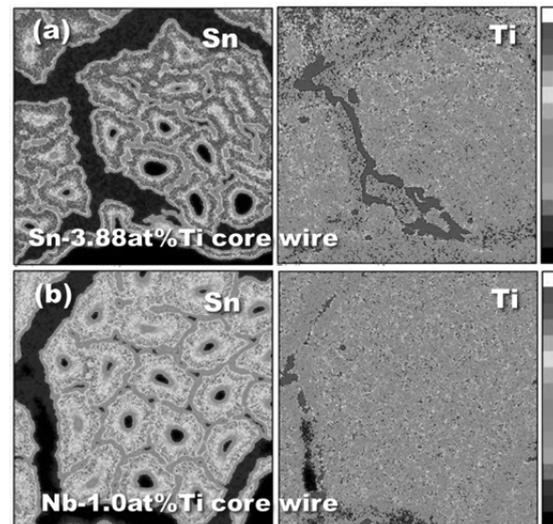


Fig. 3. EPMA mappings (Sn, Ti) on the cross-section of (a) ST-3.9 and (b) NT-1 wires after heat treatment at 700°C for 200 h.

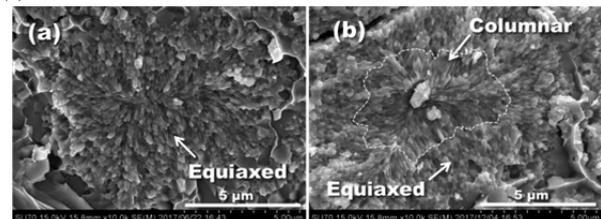


Fig. 4. Fractured microstructures of Nb₃Sn filament in (a) ST-3.9 and (b) NT-1 wires after heat treated at 700°C for 200 h.

Nb 芯へ Ti 添加した brass 母材内部スズ法 Nb₃Sn 線材の結晶組織と超伝導特性

Microstructure and Superconducting Properties of Brass Matrix IT Nb₃Sn Wire With Nb-Ti Alloy Core

森田 太郎 (上智大学, NIMS); 伴野 信哉 (NIMS); 谷貝 剛 (上智大学); 太刀川 恭治 (NIMS)

MORITA Taro (Sophia Univ, NIMS); BANNO Nobuya (NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ); TACHIKAWA Kyoji (NIMS)

Email: morita0079@eagle.sophia.ac.jp

1 はじめに

我々は、内部スズ法 Nb₃Sn 線材において、brass (Cu-15wt%Zn)あるいはさらに元素添加した母材を用いることで、Sn 化学ポテンシャルの改善や、化学量論性の改善、結晶粒の微細化を試みている[1]。従来のbrass法線材は線材断面中心に配置してある Sn コアに Ti 添加していたが、Ti 拡散長が長く、熱処理後の Ti 分布が不均一となることが問題であった。Ti は高磁界特性を飛躍的に改善する添加元素として知られており、Ti 分布の不均一を改善することで更なる J_c 向上が期待できる。内部スズ法 Nb₃Sn 線材における Ti 添加、特に Ti 場所の影響に関する研究はあまり行われていない。こうした背景から、今回brass法線材における Nb コアに Ti 添加を行い、熱処理条件や Ti 量の変化による組織形成や超伝導特性への影響について研究した。Ti 分布の改善により、大幅な特性向上が見られた。

2 試料作製

試料は従来のbrass母材内部スズ法 Nb₃Sn 線材と同様の工程によって作製した[1]。Nb コアには Nb-1at%Ti、Nb-1.54at%Ti コアの 2 種類の Nb 合金を用いた(試料名を NT-1, NT-1.54 とする)。従来試料として Sn コアに 3.88at%(1.6wt%)Ti 添加した試料(試料名: ST-3.9)を用意した。これらはスエージング加工、冷間引抜加工によって Ø0.6 mm まで伸線を行った後、550°C/100 h + 650°C/100 h の予備熱処理を行い、更にその後 700°C~750°C の範囲で最終熱処理を行った。Fig.1 に未熱処理の NT-1, NT-1.54 の断面写真を示す。熱処理後に結晶組織観察、粒径解析、元素分布解析を行った。また 10~22 T の外部印加磁場下にて 4 端子法によって I_c 測定を行った。

3 結果と考察

Fig.2 に Nb への 1at%Ti 添加試料の 700°C/200 h, 730°C/100 h 後の Nb₃Sn (NS) フィラメント結晶組織を示す。700°C では、母材側に微細な等軸晶が生成するが、ST 線材と異なり、中心部には柱状晶領域が広がっている。この組織は従来のbrass法線材の NS 層組織と類似する。NS 層中の Sn 濃度が低いと柱状結晶ができやすいことはよく知られており、1at%Ti では Ti 量が低く、大きな Sn 拡散駆動力が得られていなかったことを表している。730°C では Sn 拡散駆動力が改善され、全体的に等軸晶となり平均粒径は 210 nm となったが、それでも従来の ST-3.9 試料(粒径 230 nm)と比べると粒径は依然として小さい。Fig.3 に NT-1 および NT-1.54 の 715°C 熱処理後の NS 層結晶組織を示す。結晶粒径はそれぞれ 184 nm, 242 nm であり、過去に報告されているように Ti 添加量の増加により Sn 拡散駆動力が大幅に改善され、粒成長するとともに、等軸晶領域も大きく広がることが確認できた[2]。Fig.4 に NT-1, NT-1.54, ST-3.9 の J_c-B 特性を示す。NT-1 の B_{c2} は低いが、J_c-B 曲線は急峻であり、ST-3.9 では傾きが緩やかになる。NT-1.54 では、B_{c2} が大幅に改善される。EDX マップを見ると Ti 分布が明瞭に改善され、これらにより J_c が ST-3.9 の 20%~30% 改善される結果が得られた。16 T における J_c は 883 A/mm² となり、国内メーカー内部スズ法線材の最高値に近い値となった。この改善は Nb 芯中の Ti 量の増加によると考えられる[2]。今後の Ti 量の最適化によりさらなる改善が期待できる。

参考文献

- [1] N. Banno, Y. Miyamoto, Z. Yu, T. Morita, T. Yagai, S. Nimori and K. Tachikawa, "Effects of element addition into Cu matrix for IT-processed Nb₃Sn wires", *IEEE Trans Appl. Supercond.*, vol. 28, 2018, 6000905
- [2] T. Asano, "Effect of Titanium Addition to the Niobium Core on the Composite-Processed Nb₃Sn", *Trans. Japan Inst. Met.*, vol 27, no. 3, pp. 204-214, 1986.

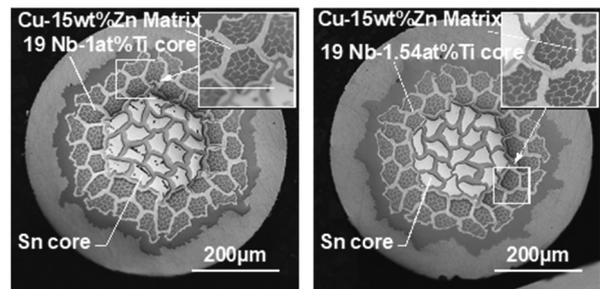


Fig.1 Cross section of NT-1 (left), and NT-1.54 (right) (Ø0.6 mm, non-annealed)

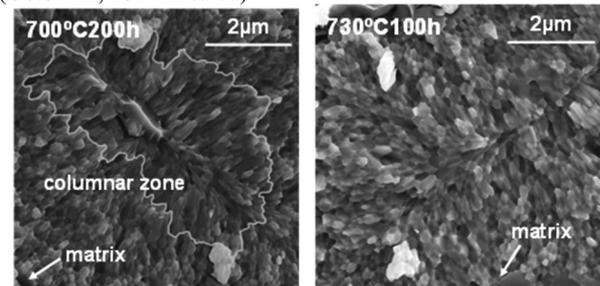


Fig. 2 Microstructure of NT-1 annealed at 700°C for 200 h (left), 730°C for 100 h (right)

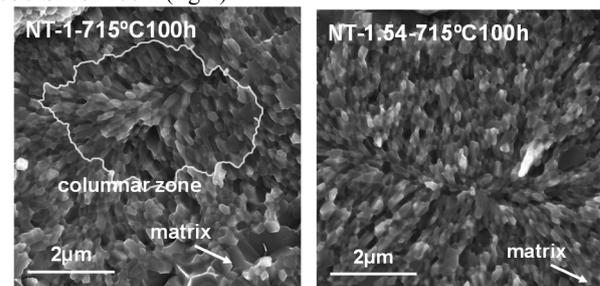


Fig.3 Microstructure of NT-1 (left) and NT-1.54 (right) annealed at 715°C/100 h

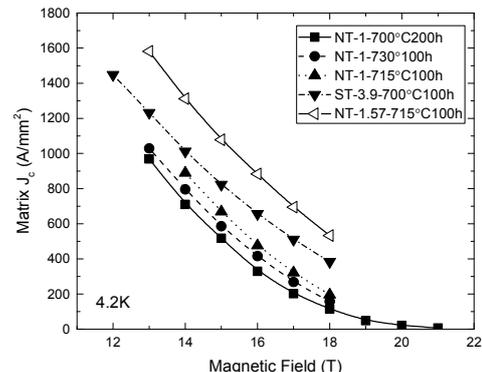


Fig. 4 J_c-B performance of NT-1, NT-1.54 and ST-3.9 with various heat treatment condition

加速器用 HTS マグネットの開発 (6-1)

-全体概要-

Development of HTS Accelerator magnet (6-1)

- Overview of the present progress -

土屋 清澄, 寺島 昭男, 王 旭東, 大内 徳人, 多和田 正文, 増澤 美佳 (KEK);
菊池 章弘 (NIMS); 藤田真司 (フジクラ)

TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio, WANG Xudong, OHUCHI Norihito, TAWADA Masafumi, MASUZAWA Mika (KEK);
KIKUCHI Akihiro (NIMS); FUJITA Shinji (Fujikura Ltd.,)
E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

1. はじめに

近年、CERN を中心として LHC の次期計画、100 TeV 級の超大型加速器 (FCC) の検討が始まっている。そこでは、主リング用として Nb₃Sn の 16 T マグネットと HTS の 20 T マグネットの 2 つが候補に上げられている。我々は HTS マグネットの基礎開発として 1) HTS マグネットの製作経験の蓄積とその特性調査を行う、2) 4.2 K、高磁場下における REBCO 線材の特性を明らかにし、高磁場マグネット設計のための基礎データを収集する、3) マグネット製作で不可欠である線材の接続方法と抵抗特性の関係を明らかにするの 3 点に焦点を絞って研究を進めている。本報ではその概略について報告する。

2. REBCO 六極マグネットの試作

SuperKEKB IR 用特殊六極マグネット¹⁾ をターゲットに REBCO 線材を用いた六極マグネットを試作した。設計では 1) 単純なレーストラック型コイルとする、2) 磁場勾配及び製作性を考慮して 2 層のコイル構造とする、3) 鉄ヨークを配置し、外部への漏れ磁場を小さくする、4) 運転電流を 300 A 以下とするなどを考慮し、多極磁場成分を 10⁻⁴ オーダー以下に抑えるコイル形状、配置を求めた。Fig. 1 に試作 6 極マグネットを示す。マグネット製作ではコイル間の渡り配線をどのようにするかは重要な課題である。ここでは、製作性と信頼性の観点から REBCO 線材を付けた銅板で接続した。LN₂ 浸漬冷却による励磁試験ではコイル単体時の通電特性とほぼ同じ特性が得られており、マグネット組立てによるコイル劣化などは見られなかった。また、コイル間の接続抵抗も 1.5 μΩ @ 77 K 程度であった。詳細は発表 (6-2) SuperKEKB 用 REBCO 六極マグネットの試作 で報告する。

3. 4.2 K、高磁場下における臨界電流特性

マグネット設計には線材の臨界電流特性のデータは不可欠である。我々は REBCO 高磁場マグネットの検討のための基礎データを得るために 1 kA 級の I_c 測定ホルダーを開発し、4 mm 幅の市販 REBCO 線材の臨界電流特性を調べた (B_L 下での特性は文献 2 を、B// 下でのプレリミナリーな結果については文献 3 を参照)。また、これらの測定を通じて線材により許容曲げ半径や取り扱い方法が異なることが明らかとなった。Fig. 2 に各種線材の I_c 値を示す。

4. REBCO 線材の接続抵抗特性の測定

線材の接続はマグネット製作のみでなく、I_c 測定ホルダーの開発でも重要な課題である。そこで接続部の抵抗特性を明らかにするため、各種パラメータを変えたハンダ接続サンプルを作成し、接続抵抗を測定した (Fig. 3 参照)。詳細は発表 (6-3) 77 K と 4.2 K 高磁場下における REBCO 線材の接続抵抗特性 で報告する。

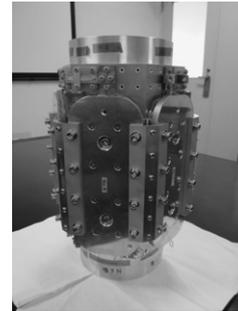


Fig. 1 Photograph of the prototype sextupole magnet before assembling the iron yoke.

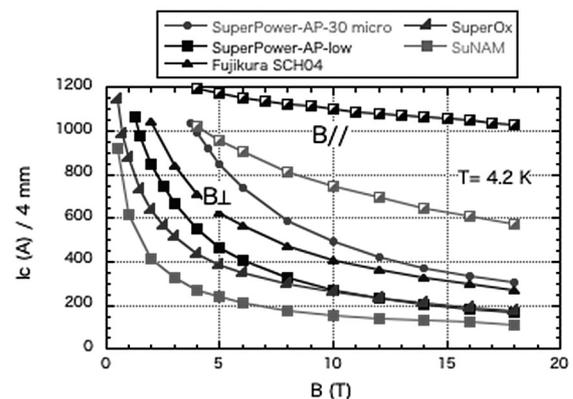


Fig. 2 Critical current of commercial REBCO conductors

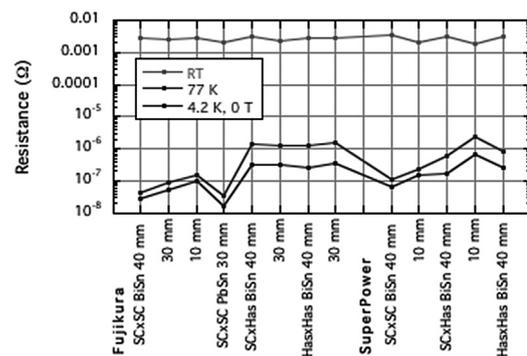


Fig. 3 Resistance of soldered joints.

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (15H03667) の助成により実施したものである。

参考文献

- 1) K. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Super., Vol. 26 (2016) 4100904.
- 2) K. Tsuchiya *et al.*, Cryogenics 85 (2017) pp. 1-3
- 3) K. Tsuchiya *et al.*, Abstracts of CSSJ Conf., vol. 95 (2017) p.10.

加速器用 HTS マグネットの開発(6-2)

—SuperKEKB 用 REBCO 六極マグネットの試作—

Development of HTS accelerator magnet (6-2)

— Fabrication of a REBCO model sextupole for SuperKEKB IR —

藤田 真司, 飯島 康裕 (フジクラ) ; 土屋 清澄, 王 旭東, 寺島 昭男,
大内 徳人, 多和田 正文, 増澤 美佳 (KEK) ; 菊池 章弘 (物材研)

FUJITA Shinji, IJIMA Yasuhiro (FUJIKURA) ; TSUCHIYA Kiyosumi, WANG Xudong, TERASHIMA Akio,
OHUCHI Norihito, TAWADA Masafumi, MASUZAWA Mika, (KEK) ; KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

加速器用 HTS マグネットの基礎開発として, REBCO 線材を用いた SuperKEKB IR 用色収差補正六極マグネットの検討を行っている[1]. 前報では, 六極マグネットに用いる6個の矩形レーストラック形状 REBCO コイルの試作結果について報告した[2]. 今回, それらを六極マグネットに組立て, 通電試験を行ったので, その結果について報告する.

2. REBCO 六極マグネットの試作

Fig. 1 に示すように, 6 個の矩形レーストラック形状 REBCO コイルをアルミ製部材に取付け, 口出し電極およびコイル間接続部材(銅板に REBCO 線材を半田付けしたもの)を半田で接続した. 6 個のコイルは直列に接続される. Fig. 2 に接続の概略図を示す. コイル間接続部材により, 電流ループが生じるため, これによる磁場を打ち消すように, コイル#6→コイル#1 に向かってループ電極(銅板に REBCO 線材を半田付けしたもの)を取付けた. コイルとアルミ部材間の絶縁としてアルミ部材にポリイミドを蒸着し, 隣合うコイルの直線部(長軸)の間にはコイル直線部の電磁力サポート部材を設置した.

3. 通電試験結果

組立て後の六極マグネットを LN₂ で冷却し, 通電試験を実施した. 各コイルおよび接続部の $I-V$ 特性を Fig. 3 に示す. 75 A まで通電し, コイル#1, #3, #4, #5 で電圧発生を確認した. 組立て前の各コイルの I_c, n 値(Before)と, 組立て後の各コイルの I_c, n 値(After)を Table 1 に示す. コイル#2, #6 はコイル単体で I_c が高かったものである. 電圧が発生したコイルの I_c は, コイル単体の I_c より 3%程度低くなっている. コイルを六極にしたことによる発生磁場の増加は, テープ垂直方向で 0.356 T → 0.400 T (70A 通電時)であり, これに伴う I_c の低下を, 線材の I_c-B 特性から見積ると約 4%であるので, I_c の低下は磁場の増加によるものである. コイル間接続の抵抗値は, すべて 1.5 $\mu\Omega$ 程度であり, コイル両端の口出し部も 4~6 $\mu\Omega$ であった.

4. まとめ

REBCO 線材を用いた SuperKEKB IR 用六極マグネットを試作した. コイル部, 接続部共に劣化無く良好な結果であった. 今後, マグネットの磁場精度評価を行う予定である.

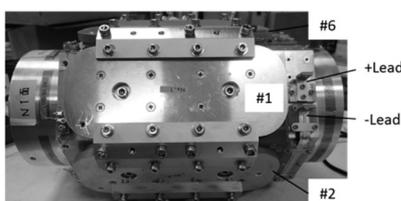


Fig. 1. Photograph of a REBCO model sextupole.

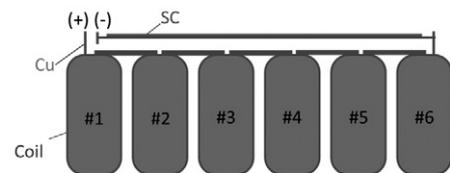


Fig. 2. Schematic image of inter-coil joints.

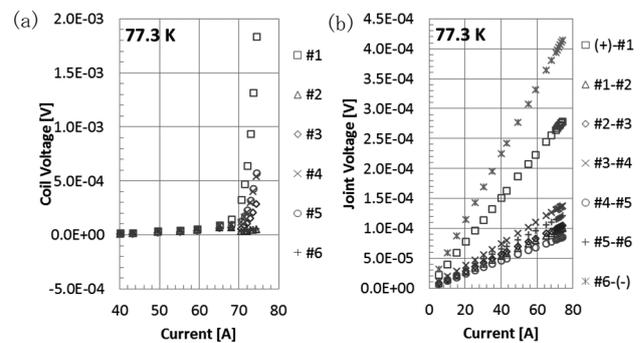


Fig. 3. $I-V$ characteristics of (a) HTS coils, (b) joint parts at 77.3 K.

Table 1. Results of transport tests at 77.3 K.

	#1	#2	#3	#4	#5	#6
(Before) I_c [A] (0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ criteria)	75.2	88.6	80.3	78.9	79.1	88.4
(Before) n -value (0.001 ~ 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)	36	37	34	31	29	30
(After) I_c [A] (0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ criteria)	73.4	>75	77.9	76.3	76.2	>75
(After) n -value (0.001 ~ 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)	33	-	31	30	30	-
I_c ratio	0.98	-	0.97	0.97	0.96	-

謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667)の助成により実施したものである.

参考文献

- [1] K. Tsuchiya et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26 (2016) 4100904.
- [2] S. Fujita et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.19.

加速器用 HTS マグネットの開発(6-3)

-77 K と 4.2 K 高磁場下における REBCO 線材の接続抵抗特性-

Development of HTS accelerator magnet (6-3)

-Splice resistance characteristics of REBCO conductors at 77 K and 4.2 K in high magnetic field-

王 旭東, 寺島 昭男, 土屋 清澄(KEK); 菊池 章弘(NIMS); 内田 聖, 高尾 智明(上智大学)
 WANG Xudong, TERASHIMA Akio, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS);
 UCHIDA Mio, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.)
 E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

REBCO 線材を用いた高磁場用磁石の開発が多くの高磁場研究所で盛んに行われている。加速器分野では、CERN が開発している 100 TeV クラスの超大型加速器 Future Circular Collider (FCC)において、REBCO 線材を用いた 20 T 級磁石が1つの候補として設計検討されており、その要素技術の開発が関連各所で進められている。REBCO 超電導磁石の実機製作ではコイル間などを接続する必要があり、特に加速器用磁石は複数のコイルから構成されるため、REBCO 線材の接続技術は重要な開発項目である。以上の背景から、我々は市販の REBCO 線材に半田接続を施し、77 K と 4.2 K 高磁場下における接続抵抗特性の評価を行ったので、その測定結果について報告する。

2. REBCO 線材と実験装置

実験に用いたフジクラ社と SuperPower 社の REBCO 線材の諸元を Table 1 に示す。実験装置の写真と接続方法の概略図を Fig. 1 に示す。2 本の REBCO 線材を互いに長さ 40 mm 重ね、低温半田 (SnBi) とスパークル半田 (SnPb) を用いて、200°C 未満で温度制御しながら加熱および加圧して接続した。各社の線材に対して超電導層同士を向かい合わせた向き (SC-SC) と、超電導層と基板を向かい合わせた向き (SC-Sub) と、基板と基板を向かい合わせた向き (Sub-Sub) の 3 種類の接続サンプルをそれぞれ作製した。測定用電圧端子は接続部区間 (約 50 mm) とその両隣 (約 10 mm) の 3 区間に設けた。接続サンプルは GFRP のホルダー両端の銅ブロックに半田接続して、測定スタンドに固定した。測定は液体窒素浸漬冷却自己磁場下で接続抵抗と I_c を測定し、接続部区間とその両隣の区間および公称の I_c と比較して劣化の有無を確認した。その後、NIMS 強磁場ステーションの 18 T ソレノイド磁石 (口径 52mm) のクライオスタット内に設置して、4.2 K において 0 T から 10 T までの平行磁場下で接続抵抗を測定した。

3. REBCO 線材の接続抵抗特性

4.2 K における接続抵抗率と外部磁場の関係を Fig. 2 に示す。外部磁場 0 T での 77 K と 4.2 K の接続抵抗率を Table 2 に示す。接続抵抗率は次式より算出した。

$$\rho_c = R \times w \times L$$

R は接続部の電圧と通電電流から計算した抵抗値、 w と L はそれぞれ REBCO 線材の幅と接続長である。SC-SC 接続の抵抗率が両社ともに $20 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 未満であり、磁場依存性もほとんど見られない。一方、SC-Sub と Sub-Sub 接続の抵抗率は $100\text{-}300 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と、SC-SC 接続の抵抗率の 5 倍以上と大きく、外部磁場に対してほぼ線形的に増加する。また、77 K の SC-SC 接続に対する SC-Sub と Sub-Sub 接続の抵抗率変化は 4.2 K のものより大きい。これは SC-Sub と Sub-Sub 接続の電流が線材幅方向の両側にある薄い銅メッキ層を介して流れることで、その銅メッキ層での抵抗が大きいことに加えて、抵抗の磁場依存性と温度依存性が顕著に反映されたためである。SC-SC 接続において、半田の抵抗特性の違いにより SnPb を用いた接続サンプルの抵抗率が SnBi のものより $5 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度低い結果となった。

	Fujikura FYSC-SCH04	SuperPower SCS4050
Width × Thickness	4.1 × 0.12 mm	4.0 × 0.10 mm
Substrate thickness	75 μm	50 μm
Copper thickness	2 × 20 μm	2 × 20 μm
Specified I_c	>165 A (77 K)	>88 A (77 K)

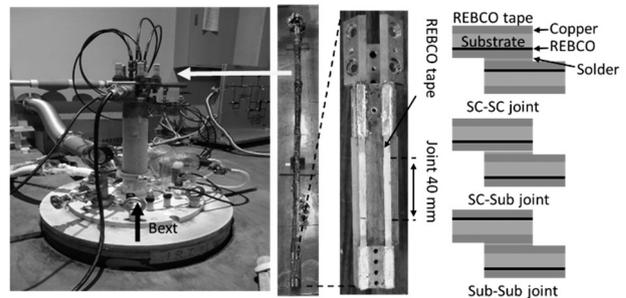


Fig. 1 Cryostat of 18 T solenoid magnet, test stand, REBCO sample holder, and three types of the joint structure.

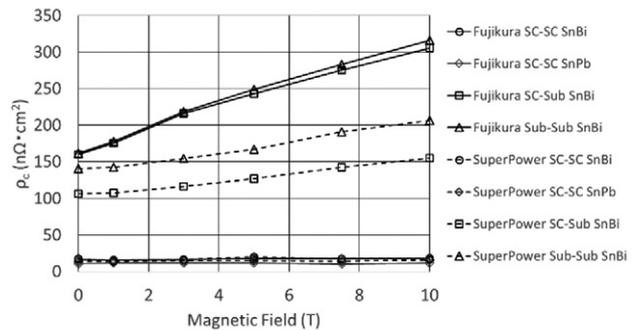


Fig. 2 Field dependence of the joint specific resistance of splice REBCO samples at 4.2 K.

Table 2 Joint specific resistance of splice REBCO samples in self-field at 77 K and 4.2 K

	Fujikura FYSC-SCH04			
	SC-SC	SC-SC	SC-Sub	Sub-Sub
Solder	SnBi	SnPb	SnBi	SnBi
ρ_c (77 K) $\text{n}\Omega \cdot \text{cm}^2$	26.0	17.3	685.4	739.6
ρ_c (4.2 K) $\text{n}\Omega \cdot \text{cm}^2$	16.4	10.9	159.7	161.5
	SuperPower SCS4050			
	SC-SC	SC-SC	SC-Sub	Sub-Sub
Solder	SnBi	SnPb	SnBi	SnBi
ρ_c (77 K) $\text{n}\Omega \cdot \text{cm}^2$	21.0	17.2	378.6	569.4
ρ_c (4.2 K) $\text{n}\Omega \cdot \text{cm}^2$	17.5	13.9	106.3	140.4

謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667)の助成により実施したものである。

高強度小型多機能スケルトンサイクロトロンの開発 — 全体概要 —

Development of high intensity compact multifunctional HTS cyclotron – Project overview –

福田 光宏(阪大); 石山 敦士(早稲田大学); 植田 浩史(岡山大学); 野口 聡(北海道大学);
渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力); 吉田 潤, 鶴留 武尚, 高橋 伸明, 三上 行雄(住友重機械)
FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.);
NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.);
YOSHIDA Jun, TSURUDOME Takehisa, TAKAHASHI Nobuaki, MIKAMAI Yukio (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.)
E-mail: mhfkuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

H29 年より, 科学技術振興機構 (JST) の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA) において, 「安心・安全・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」をテーマに研究開発が始まった。このテーマの目標は, IoT/IoE による超スマート社会の基盤を支える集積デバイスの二次宇宙線起因ソフトウェア評価技術 (加速試験) の確立, 難治性がん制圧のための第一選択治療法としてアルファ線核医学治療の普及などである。このキーテクノロジーの一つとして「量子や短寿命 RI の安定供給」が挙げられ, そのためには小型加速器・照射技術の高度化が必要となる。そこで, 我々は, 高温超電導技術を適用した空芯型サイクロトロン (スケルトンサイクロトロン) を提案し, エネルギー可変で多種類の粒子を加速可能な高強度小型サイクロトロンの開発に取り組んでいる。本発表では, プロジェクトの概要について報告する。

2. 小型加速器・照射技術の高度化

「安心・安全・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」をテーマとした本研究開発では, 量子ビームに関わる大学・機関・企業が共同で, 放射性核種・中性子・ミュオンなどの量子を高度にコントロールする新しい基盤技術を研究し, 超スマート社会の安全を支える基盤技術や, QOL の高い健康長寿社会を実現する量子の新規医療応用技術の開発を目指している。具体的な目標は, IoT/IoE による超スマート社会の基盤を支える集積デバイスの二次宇宙線起因ソフトウェア評価技術 (加速試験) の確立, 難治性がん制圧のための第一選択治療法としてアルファ線核医学治療の普及などである。Fig. 1 に示すように 8 つの研究開発課題を設定し, その内の一つが「小型加速器・照射技術の高度化」であり, 具体的な目標や性能は Fig. 2 に示す通りである。

3. アルファ線核医学治療

アルファ線核医学治療とは, がん患者にアルファ線放出核種を含む標的剤を投与し, その標的剤が体内のがん細胞に自発的に集積し, そこで飛程の短いアルファ線を放出することで, がん細胞のみを破壊する治療法である。従来の重粒子線加速器によって体外から重粒子をがん細胞に照射する重粒子線治療とは異なり, アルファ線放出核種を投与し体内からアルファ線をがん細胞にピンポイント照射するため, 周辺臓器への侵襲がなく, 初診時進行がんにも有効であるとされる。また, 短寿命核種を利用すれば, 治療時間の短縮になり, QOL も向上する。我々は, アルファ線放出核種として, 半減期が 7.2 時間であるアスタチン-211 (^{211}At) を用いる。

4. 小型多機能サイクロトロン

アルファ線核医学治療の普及のためには,

- 1) 現有の PET 施設の設定 (放射線遮蔽, GMP 施設) を活用するためには, PET 加速器並みにコンパクトな自己遮蔽型加速器が必要となる。

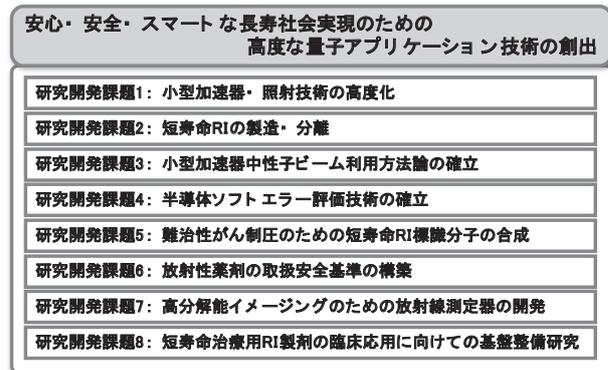


Fig. 1. Key issues of project “Quantum Innovation for Safe and Smart Society (QiSS)”

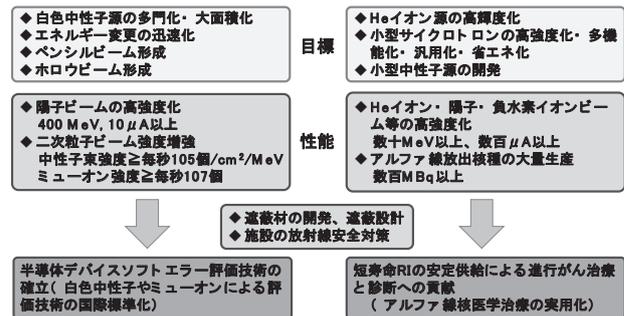


Fig. 2. Advancement of compact cyclotron and beam irradiation device for cosmic rays-induced soft error evaluation method and targeted alpha-particle therapy.

- 2) 医薬品メーカーの PET 工場や, がん診療連携拠点病院 (全国に 400) に順次導入することを想定すると, 専用加速器を開発が必要となる。
- 3) PET 加速器との置換を促すためには, PET 用 RI の製造機能を併せ持たせることも必要となる。

上記の要求を満たすためには, 小型加速器の開発が不可欠である。そこで, 我々は, 高温超電導技術を適用した空芯型サイクロトロン (スケルトンサイクロトロン) [1][2] を提案し, エネルギー可変で多種類の粒子を加速可能な高強度小型サイクロトロンの開発に取り組んでいる。

謝辞

本研究の一部は, 科学技術振興機構 (JST) の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA) に依ったことを付記する。

参考文献

1. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 4100205 (2013).
2. 特許5682903, 特許5708984, 特開2015-079626

高強度小型多機能スケルトンサイクロトロンの開発 — 超電導コイルシステム要求仕様 —

Development of high intensity compact multifunctional HTS cyclotron — Required specifications of HTS coil system —

石山 敦士(早稲田大学); 植田 浩史(岡山大学); 野口 聡(北海道大学); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);
吉田 潤, 鶴留 武尚, 高橋 伸明, 三上 行雄(住友重機械); 福田 光宏(阪大)

ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);
WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.); YOSHIDA Jun, TSURUDOME Takehisa,
TAKAHASHI Nobuaki, MIKAMAI Yukio (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.); FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、科学技術振興機構(JST)の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)において、エネルギー可変で多種類の粒子を加速可能な高強度小型サイクロトロンの開発に取り組んでいる。我々は、高温超電導技術を適用した空芯型サイクロトロン(スケルトンサイクロトロン)を提案している。スケルトンサイクロトロンは、高温超電導コイルでの高電流密度化による小型化、低温環境における磁場の安定性、空芯化による機器配置の自由度の向上、エネルギー可変等の点で、鉄心と常電導コイルによる従来型と比べ、優れている。本発表では、エネルギー可変・多種類加速粒子に対応した等時性磁場や AVF (Azimuthally Varying Field) の発生に要求される超電導コイルシステムの仕様について報告する。

2. スケルトンサイクロトロン

我々が提案しているスケルトンサイクロトロンは、従来の加速器では常識であった鉄心の使用を行わずに、Fig. 1 に示すような円形スプリットコイル(等時性磁場発生用)とセクターコイル(AVF: Azimuthally Varying Field 発生用)から成る空芯の高温超電導コイルだけで加速に必要な磁場形成を行うことが最大の特徴となっている[1]。高温超電導化および空芯化により、1) 高磁場が発生できるため、より小型・高効率で高エネルギーの出力が可能になる、2) 鉄心を用いないので、空間自由度を最大限活かした機器の構成・配置による電磁場形成が実現できるため、大電流のビームを入射し、集束させながら安定して加速し取り出すことができる、3) 励磁時の鉄心の発熱による磁場不安定性がなく、低温環境におけるため磁場の安定性が確保でき、エネルギー可変により多種類粒子を加速できる。

3. 超電導コイルシステム

Table 1 に示す粒子を加速できるサイクロトロン(設計(取り出し半径: 50 cm)を進めている。このサイクロトロンは、アルファ線核医学治療に用いられる ^{211}At を生成するために、 $^4\text{He}^{2+}$ を 36 MeV まで加速するものである。また、アルファ線核医学治療だけでなく、BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)用の中性子生成、SPECT(単一光子放射断層撮影)や PET(陽電子放出断層撮影)に用いられる RI 製剤の製造も可能な多機能サイクロトロンである。このサイクロトロンを実現するために、超電導コイルシステムには、要求される仕様は以下の通りである。

3.1 エネルギー可変・高磁場精度

Table 1 に挙げた多種類加速粒子をエネルギー可変で加速可能な等時性磁場および AVF をサイクロトロンに必要とされる発生磁場精度で実現することが要求される。コイル設計の詳細については別報 1P-p16 で報告する。また、高温超電導線材はテープ形状であるため、巻線精度や遮蔽電流が磁場精度に影響を与える。遮蔽電流磁場解析については別報 1P-p15 で報告する。

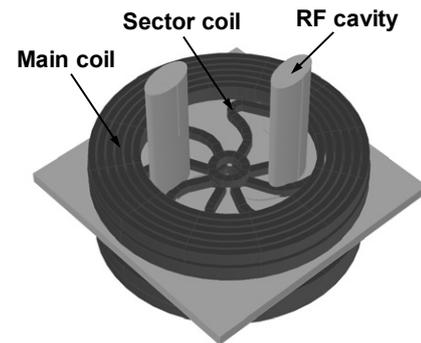


Fig. 1. Schematic drawing of Skeleton Cyclotron

Table 1. Accelerated ion and energy for various applications in K80 Skeleton Cyclotron

Ion	Energy (MeV)	B_{av} (T) @50 cm	f_{RF} (MHz)	h	Applications
$^4\text{He}^{2+}$	36	1.732	79.031	6	α -therapy, ^{211}At
$^4\text{He}^{2+}$	40	1.826	83.240	6	γ -SPECT, ^{210}At
$^4\text{He}^{2+}$	80	2.589	77.861	4	K-number
H ⁻	18	1.232	73.712	4	PET-CT, ^{225}Ac / ^{213}Bi
H ⁻	30	1.596	94.279	4	BNCT, ^{99m}Tc - ^{99m}Tc
H ⁺	50	2.071	59.937	2	BNCT, ^{99m}Tc - ^{99m}Tc
D ⁺ / H ₂ ⁺	40	2.589	77.861	4	BNCT, ^{99m}Tc - ^{99m}Tc

3.2 高電流密度化・高磁場化・高機械強度化

コイルの小型・低コスト化(使用線材量の削減)を達成するために、一部のコイルでは、無絶縁巻線[2]を採用する。また、スケルトンサイクロトロンは空芯コイルの組み合わせであるため、電磁力は巻線自身が受けることになり、コイル変形やコイル間吸引・反発力から支持する構造が必要となる。例えば、セクターコイルは直線部を含む非円形(三角形)コイルであるが、Yoroi 構造[3]を採用することで、直線部は電磁力による変形を抑える。

3.3 コイル高安定化・保護

本サイクロトロンは医療用であり、常電導転移事故に対する安定性を高めるとともに確実なコイル保護が要求される。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)に依ったことを付記する。

参考文献

1. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 4100205 (2013).
2. S. Hahn, Y. Iwasa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 1592-1595 (2011).
3. S. Nagaya, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 4601204 (2013).