

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25246032

研究課題名(和文) スプリット型25T無冷媒超伝導マグネットの開発研究

研究課題名(英文) Development of a split-pair type 25T cryogen-free superconducting magnet

研究代表者

渡辺 和雄 (WATANABE, Kazuo)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：30143027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,000,000円

研究成果の概要(和文)：高強度CuNb/Nb3Snのモノリス導体および等価断面積8本ラザフォードケーブル導体を作製し、React&Wind法15K、4Tでの $\epsilon=0.42\%$ コイル曲げ歪コイル特性を比較した。ラザフォードケーブルは、巻き線曲げ歪がモノリス導体に比べて緩和されることが分った。

世界で初めてのReact&Wind法CuNb/Nb3Snラザフォードケーブルコイルとして、300 mmのコールドポアに14.0 Tを発生する無冷媒超伝導マグネットからなる25T無冷媒超伝導マグネットを開発することに成功した。

RE123コイルのクエンチ特性と熱的安定性では、常伝導発生時の温度を高くすることが有効であるという知見を得た。

研究成果の概要(英文)：High strengthened CuNb/Nb3Sn monolithic conductor and equivalent cross-sectional 8-strand Rutherford cable conductor have been fabricated, and the critical current properties for react&wind processed coils with coil bending strain of  $\epsilon=0.42\%$  have been evaluated at 15 K and 4 T. It is found that the critical current properties of a Rutherford cable coil are superior to those of a monolithic coil in the react&wind method.

We succeeded in developing a 25 T cryogen-free superconducting magnet composed of the world's first react&wind CuNb/Nb3Sn Rutherford cable 14.0 T cryogen-free superconducting magnet.

Concerning quench characteristic and thermal stability of a high-Tc RE123 coil, we obtained that the higher temperature operation for a high-Tc RE123 coil is the suitable condition in case of occurrence of the normal transition.

研究分野：超伝導工学

キーワード：無冷媒超伝導マグネット スプリット型超伝導マグネット ニオブ3スズ超伝導線材 高温超伝導内挿コイル モノリス超伝導線材 高温超伝導テープ スプリ

### 1. 研究開始当初の背景

磁場は、物性物理学、材料工学、分子化学などにおいて温度や圧力と同様に重要な熱力学のパラメーターである。近年、米国及び欧州では精密な定常強磁場を用いた中性子回折実験や分光実験が重要視されており、特に米国立強磁場研究所では、強磁場分光測定用として大電力 27MW のスプリット型 25T 水冷銅マグネットの開発に成功している。しかし、世界で計画されている水力発電所並の膨大な電力を使用する強磁場発生法に追従することは、電気代の高価な日本の実情に合わない。わが国としては、ほとんど電力を必要としない超伝導を駆使した定常強磁場発生技術が必要である。これまで、我々は世界に先駆けて液体ヘリウムを使わない無冷媒超伝導マグネットを開発してきた。この技術は、世界の省エネルギー技術の最先端となるわが国独自の超伝導技術である。最近、学術会議において、わが国が整備すべき大型実験設備として定常強磁場建設計画が採択された。今後の無冷媒超伝導技術の発展により、超伝導マグネット単独で 30T 以上にまで高められることが期待できる。そこで、わが国が整備すべき強磁場分光用のスプリット型マグネットとして、大電力不要の無冷媒 25T 超伝導マグネット開発研究に着目した。

無冷媒超伝導マグネットは小さな冷凍能力で運転するため、強大な電磁力にも耐えられるコンパクトな超伝導マグネットの実現が決め手となる。コンパクトなマグネットを開発するためには、細い線材のままで補強がなされた高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材が必要である。これまでに、研究代表者は、CuNb、CuNbTi、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などを内部補強材とした高強度線材を開発している。また、コイル製造コストが大幅に安くできるプロセスとして、反応済み Nb<sub>3</sub>Sn 線材を用いてコイル巻きする React & Wind 法の新しい製造法を開発してきた。その結果、高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材を用いることで、室温ボア 360mm 大口径の 9.7T 強磁場超伝導マグネットを作製することに成功し、8MW-28T 無冷媒ハイブリッドマグネットの開発へと発展させることができた。さらに、RE123 コートテープを用いて強磁場下での大口径テストコイルに電流通電試験を行い、1000MPa までの電磁応力に対して十分に耐える能力を確認している。したがって、無冷媒型の伝導冷却技術を活用することで強磁場化を十分に推進できる状況にある。

世界の戦略物資であるヘリウムは、石油の埋蔵と類似しており 20~30 年後には枯渇するものと見られている。省エネルギー・省資源という世界が直面している重要課題に対処することが求められるため、強磁場の電磁力に耐える独創的な細い高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 線材によるコンパクト化を実現させて、液体ヘリウム不要の無冷媒型超伝導マグネットの強磁場化を進めることが必要である。

### 2. 研究の目的

強磁場と組み合わせる分光測定では、20T を超える垂直磁場方向の定常強磁場中で水平方向からの分光実験が可能なスプリット型超伝導マグネットの開発が求められている。本研究の目的は、わが国の大型設備整備計画として学術会議で採択された次期定常強磁場施設に設置すべき 25T 発生のスプリット型無冷媒超伝導マグネットの開発研究を行う。大型化する無冷媒強磁場超伝導マグネットのクエンチ時における高電圧発生を抑える必要があるため、高強度で高導電率の安定化基材を用いた細い高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 線材によるコンパクト化を実現させる。さらに、RE 系超伝導体のホットスポット問題を克服できる 25T 無冷媒超伝導マグネットの等価耐電磁応力テストコイルを用いて、RE 系超伝導テープと Nb<sub>3</sub>Sn 線材を組み合わせたスプリット型 25T 無冷媒超伝導マグネットの実現検証を行う。

### 3. 研究の方法

無冷媒超伝導マグネットに最適となるコンパクトなマグネット用線材として、25T までの磁場領域を分担する RE123 テープと RE123 テープの電流密度よりも大きくなる 14T 以下の低磁場側で Nb<sub>3</sub>Sn 線材の開発を研究する。Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材に対して、細い線径で大口径超伝導マグネット用の Nb ロッド法補強安定化基材を用いた高強度・高導電率 CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn 線材を開発する。さらに、RE123 テープからなる強磁場発生用の無冷媒超伝導マグネットの実証を行うため、既存の GM 冷凍機冷却方式の温度可変大口径無冷媒クライオスタットを改造する。25T 無冷媒超伝導マグネットの等価耐電磁応力試験を行うため、無冷媒 RE123 テープ超伝導テストコイルを用いて検証する。また、RE123 テープのクエンチ時の熱的安定性を調べ、臨界電流に対する運転電流の最適な比率を見出す。

高強度・高伝導率安定化 CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn 線と Y123 テープからなるスプリット型 25T 無冷媒超伝導マグネットの設計を行い、コイルの電磁解析を行うことでクエンチ時の安全性を評価する。

### 4. 研究成果

(1) 高強度 Nb<sub>3</sub>Sn モノリス導体のコイル試験および等価断面積 8 本ラザフォードケーブルコイル試験を行ってきた。テストサンプルとして作製した高強度 CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn モノリス導体および 8 本 CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn ラザフォードケーブル導体は、 と のような諸元を持っている。

モノリス導体：幅 3.05mm 厚み 1.41mm で +0.48%/-0.52%繰り返し曲げ 10 回の事前曲げ加工を施している。4.2K、15T での 0.1 μV/cm 電界基準での臨界電流値 I<sub>c</sub> = 816A で事前曲げ無しの場合の I<sub>c</sub> = 555A に対して 47%向上している。このモノリス導体をダブルパンケーキコイルとして内径 150mm と内径 110mm の 4

層コイルを作製した。コイル曲げ歪は、それぞれ  $\approx 0.42\%$ ,  $0.76\%$  である。

ラザフォードケーブル導体：幅 3.35mm 厚み 1.54mm で  $+0.48\%/-0.3\%$  繰返し曲げ 10 回の事前曲げ加工を施している。4.2K、15T での  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$  電界基準での臨界電流値  $I_c = 651\text{A}$  で事前曲げ無しの場合の  $I_c = 485\text{A}$  に対して  $34\%$  向上している。このラザフォードケーブル導体をダブルパンケーキコイルとして内径 110mm と内径 70mm の 4 層コイルを作製した。コイル曲げ歪は、それぞれ  $\approx 0.43\%$ ,  $0.84\%$  である。

コイルの特性評価は、5T までの磁場印加で 220mm 室温ボアにセットできる GM 冷凍機冷却温調クライオスタットを用いて、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  の臨界温度に近い 14K ~ 16K の高温領域で 200A 以下の通電電流領域の評価を行った。結果は、 $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$  モノリス導体コイル  $\approx 0.42\%$ ,  $0.76\%$  コイル曲げ歪印加において 16K 温度と 2T 磁場でそれぞれコイル  $I_c = 104\text{A}$ ,  $75\text{A}$ 、また 15K 温度と 4T 磁場でそれぞれコイル  $I_c = 97\text{A}$ ,  $68\text{A}$  が得られた。これに比較して、 $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$  ラザフォードケーブル導体コイル  $\approx 0.43\%$ ,  $0.84\%$  コイル曲げ歪印加において 16K 温度と 2T 磁場でそれぞれコイル  $I_c = 185\text{A}$ ,  $100\text{A}$ 、また 15K 温度と 4T 磁場でそれぞれコイル  $I_c = 164\text{A}$ ,  $93\text{A}$  が得られた。

React & Wind 法  $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$  ラザフォードケーブルコイルの特性が、React & Wind 法  $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$  モノリス導体コイルよりも優れた特性を示すことが分った。コイル巻き線前はモノリス導体がラザフォードケーブル導体よりも優れていたものが、コイル巻き線後には逆転している。ラザフォードケーブルは、巻き線ひずみがモノリス導体に比べて緩和されることと対応するものと考えられる。この結果は、中性子回折実験において得られた引張り歪印加でのラザフォードケーブル導体に印加される有効歪みが導体の歪よりも小さくなっていることと類似しており、ラザフォードケーブル導体の巻き線ひずみの優位性が得られている。

(2) 25T 無冷媒超伝導マグネットの実証試験を行った。30T 発生のおール超伝導マグネットは、わが国の学術会議によって次世代強磁場施設に必須の超伝導マグネットであると認められ建設が計画されている。その中で、25T 無冷媒超伝導マグネット (25T-CSM) の開発を 30T 超伝導マグネット建設の R&D を兼ねて先行して実施してきた。このマグネットは、 $\text{NbTi}$  及び  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ラザフォードケーブルを使用した低温超伝導 (LTS) コイルで 14 T、高温超伝導 (HTS) コイルを用いて 10.5 T を発生させることで、合計 24.5 T 以上を発生させる設計である。LTS コイルは GM-JT 冷凍機 2 台で冷却し、4.3 K 程度まで冷却される。

$\text{Nb}_3\text{Sn}$  ラザフォードケーブルに関しては、Nb rod 法  $\text{CuNb}$  補強  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  素線を新たに開発し、この高強度線材を用いてケーブルの作製を行った。このケーブルを用いて実機を模擬した小型多層コイルを作製し、低温強磁場中での通電特性を調べ、4.2K 温度で 14T 磁場中における臨界電流を実測した。結果として、16 本ストランド  $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$  ラザフォードケーブルの性能と期待される 1823A の良好な特性が得られることを確認した。その後、25T-CSM の実機 14T-LTS コイルを製作した。LTS コイルは、 $\text{NbTi}$  と  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ともラザフォードケーブルを採用して、素線は 16 本、パッキングファクターは加速器で採用されている値よりかなり小さく  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  では  $83.1\%$  としている。 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ラザフォードケーブルには非常に大きな電磁力 251 MPa が加わるため、素線に  $\text{CuNb}$  補強  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ( $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$ ) 線材を使用している。 $\text{CuNb}/\text{Nb}_3\text{Sn}$  線材は不可逆応力が 300MPa 以上なので、電磁力が大きく加わる運転条件でも使用できる。ラザフォードケーブルは  $670^\circ\text{C}$  で 96h の熱処理を行った後に、 $0.5\%$  の事前曲げ処理を行った。このケーブルを用いて、React & Wind 法で世界初の  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ラザフォードケーブルコイルの作製を行った。LTS コイルはエポキシ含浸を施してある。

LTS コイルは運転電流 854A で、300mm のコールドボアに 14T を発生させる設計である。冷却は GM-JT 冷凍機 2 台で行い、その冷却能力は 4.3K において 8.4W となる。励磁中に温度を維持するために、大きな冷却能力を持たせている。図 1 に励磁時の通電電流、磁場、温度、電圧の様子を示す。

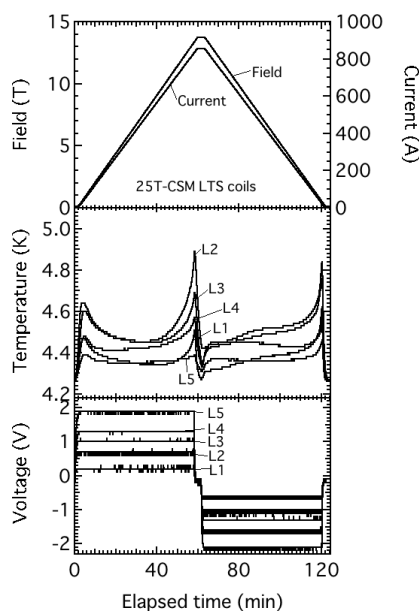


図 1 14T-LTS コイルの励磁試験

通電電流は、電源のシャント抵抗電圧より求め、磁場はホール素子を用いて測定した。60分で定格である854 Aに到達出来たことが分かる。このとき、温度は最も高いL2コイルで5K以下であり、安全に運転が出来ることが分かった。電圧はスパイクなどのノイズは見えず、数回の通電テストを行ったが、大きな問題は現れなかった。運転電流通電時の電磁力は最大で267 MPaとなり、 $Nb_3Sn$ にとっては非常に大きな値であるが、 $CuNb/Nb_3Sn$ ラザフォードケーブルを用いたため、この電磁力でも問題は現れなかった。磁場の値はホール素子を用いて測定しており、HTSコイルを外して励磁した際に、14.0Tの発生を確認した。数回の励磁テストの後の結果であるが、最初の励磁時にも、トレーニングによるクエンチが見られなかった。この原因は、ラザフォードケーブルのパッキングファクターを小さくしたことで、素線の隙間にエポキシが入り込み、素線の大きな動きを妨げたためと考えている。以上により、 $CuNb/Nb_3Sn$ ラザフォードケーブルを用いて、事前曲げ処理を利用したReact & Wind法で作製した14T-LTSコイルは、25T無冷媒超伝導マグネット用コイルとして、十分な能力を持つことが分かった。世界で初めてのReact & Wind法 $CuNb/Nb_3Sn$ ラザフォードケーブルコイルとして、300mmのコールドポアに14.0Tを発生する無冷媒超伝導マグネットを開発することに成功した。

さらに、HTSコイルの励磁試験に関しては、実機コイルを大口径のGM冷凍機冷却型温調クライオスタットを製作してコイルをセットし、バックグラウンド磁場を11Tまで印加して等価耐電磁応力（フープ応力）試験を行った。HTS等価耐電磁応力試験コイルとして、RE123の4積層コイルを準備した。大口径無冷媒温度可変クライオスタットにセットし、強磁場センターの360mm室温ポア超伝導マグネットを用いて、11Tのバックアップ磁場中で試験を行った。コイルに磁場中で通電することで、コイル内部に電磁力を10K以下の低温で、25T-CSMと同等レベルの電磁力まで印加した。このとき、10Kでは通電電流はコイルの臨界電流 $I_c$ よりも十分低いのでコイル電圧が発生しないため、電磁力を低温で印加した後に、77Kまで温度を上げ、外部磁場なしで電圧-電流（ $V-I$ ）特性を測定することで、電磁力印加によるコイルの健全性をチェックする方法をとった。コイル内部に誘起する電磁力は、コイル巻線が独立と仮定した場合、磁場と電流密度およびコイル半径の積（BJR）で表すことができる。

RE123内挿コイルを使用した25T-CSMにおいて想定される最大電磁力は、24.5Tで367MPa、25Tで387MPaとなる。一方で4積層コイルをバックアップ磁場11Tで運転した場合、最大電磁力は180Aで369MPa、192Aで391MPaとなり、25T-CSMで想定される電磁力を若干上回る。図2(a)に、25T-CSMと4積層コ

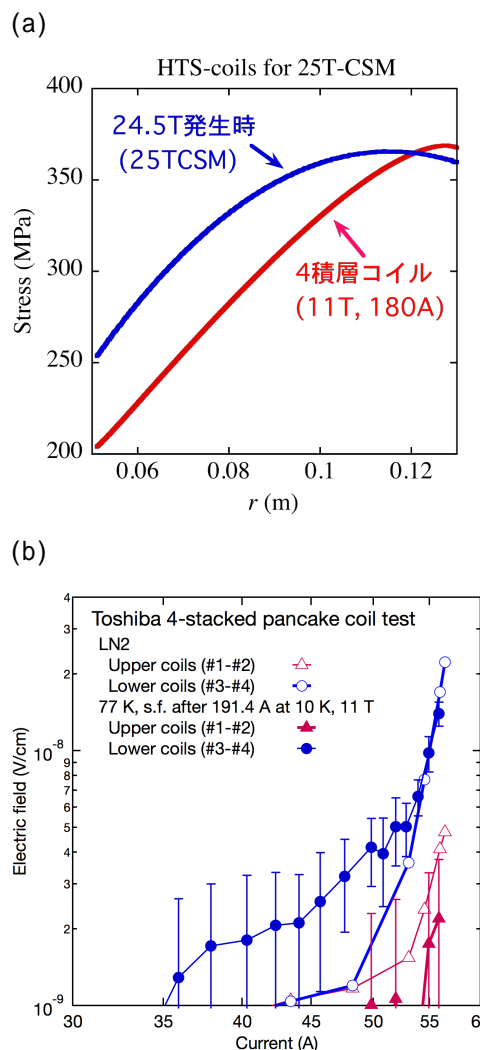


図2 RE123コイルの等価耐電磁応力試験。

(a)  $T=10K, B=11T$  (b)  $T=77K, B=0T$

イル内部の電磁力分布を示す。両者ともコイルの外形に近い部分で最大応力となっている。この電磁力印加後に、77Kに昇温して測定したコイルIV特性の測定結果を図2(b)に示す。比較のため、電磁力試験を実施する前に液体窒素を用いて行った結果もプロットしてあり、50A付近から急激に立ち上がっている電圧が $I_c$ に相当する。電磁力印加前後で、コイルの $I_c$ がほとんど変わっていないことが分かる。この結果により25T-CSMのRE123高温超伝導コイルは、定格の25Tの発生においても十分なパフォーマンスを発揮できることが分かった。

しかし、無冷媒超伝導マグネットに不可欠なエポキシ含浸の手法は、LTSコイルによる14Tバックグラウンド磁場中で実機コイルとして10.0Tでホットスポットによる熱暴走を生じる結果となった。RE123内挿コイル使用では25T-CSM発生磁場は23.9Tまでとなっており、10.5T発生時のRE123コイルを実現できなかった。等価耐電磁応力試験では、数100m長の

コイルで問題がなかったが、実機の本 RE123 コイルは 20km 長のテープを用いており、エポキシ含浸による径方向剥離のリスクを 20km 全長で回避することに難点があったことと推定される。実用レベル長尺 RE123 テープのエポキシ含浸による剥離問題の克服には、まだ至っていない。

RE123 内挿コイルの不具合な結果を受けて、現状で実現可能な Bi2223 コイルを 25T-CSM 用の HTS 内挿コイルとして 25T-CSM 実現の再挑戦を行った。その結果、Bi2223 内挿コイルでは、単独で 11.5T 発生に成功し、LTS コイルとの組み合わせ試験において 24.6T まで到達することができた。

(3) Gd123 コイルのクエンチ特性と熱的安定性を調べた。高温超伝導 RE123 コイルにおけるクエンチ特性を測定するため、外挿の超伝導マグネットクエンチによる磁場減衰によって、内挿 RE123 コイルへ過電流を誘起させる装置を立ち上げた。この磁場遮断装置を用いて、最も RE123 コイルにおける劣化が起こる可能性が高い状況を模擬した実験を行った。しかし、装置の制限から実験温度領域が 20-50K であり、他の温度領域 (4.2-20K、50-77K) での結果が不足していた。そこで磁場遮断装置を用いて、RE123 コイルに過電流が流れた際の発熱分布を実験的に測定し、数値計算の結果と照らし合わせることで、さらに広い温度領域で詳細にクエンチ特性を測定し、数値計算により予測することで、RE123 コイルのクエンチ保護手法について議論した。

熱電磁気シミュレーションに用いた試料の形状は、LTG 外挿コイルと RE123 内挿コイルについては実験と同様の形状とした。また、RE123 コイル内のテープ 1 層に対して、軸方向に 51 セルを設け、各セル内での臨界電流密度  $J_c$ 、温度  $T$ 、磁場  $B$  の値を保持した。その後、 $T$ 、 $B$ 、磁場印加角度  $\theta$  を用いてテープ 1 層ごとの  $I_c$  を計算した。その際、 $J_c(T, B, \theta)$  には、短尺線材をブリッジ加工して測定した特性を用いた。コイル電流値は、外挿 LTS コイルとの電磁誘導、RE123 コイルのコイル抵抗を考慮して計算した。コイル電流値から、各層における安定化銅層への分流の  $n$  値を考慮した分流モデルにより計算し、コイル構造物質の典型的な比熱を用いて温度上昇を計算した。電流値と電圧値に対して、実験結果と数値計算結果が一致した。特に電圧値について、実験結果は、自己磁場と LTS マグネットによる外部磁場によりコイル内の  $I_c$  が分布していることを示しており、さらに数値計算において、テープ素線から求めた  $I_c$  分布は実験結果をよく再現したと言える。

保護抵抗値を固定して初期温度を変化させた場合の温度分布の終状態の計算を行った。10K においては、 $I_c$  が高いため発熱がなく温度上昇がない。それに対し 20-50K においては、コイル内径外径中心付近において

以上の温度に上昇するホットスポットが見られた。また、初期温度 65K に対してコイル内の温度は均一に上昇し、最大温度は  $T_c$  を越えず、初期温度 50K よりも終温度が低いという結果であった。これは、コイル  $I_c$  が低いためにコイル全体でエネルギーを消費することによって温度上昇が均一になったためと考えられる。RE123 コイル内温度上昇最大値のコイル時定数、初期温度依存性に関しては、初期温度が低いほどコイル時定数が高くなるまで温度上昇は見られない。これは低温ほど  $I_c$  が高いためであると考えられる。また、初期温度が高いほどホットスポットが発生した場合の温度上昇が小さくなる結果が得られた。RE123 コイルのクエンチ保護に関して、ホットスポットが発生した時点のコイルの温度が高いほど、温度上昇領域が広くなり、保護が容易であることが明らかとなった。この結果から、RE123 コイルのクエンチ保護に向けて、RE123 コイルの高温運転、またはクエンチヒーターによる温度情報が提案される。このとき、本研究において温度上昇均一性が示唆された 65K 程度以上の温度でクエンチが発生しても、保護は容易であると考えられる。

以上の結果から、高強度・高伝導率安定化 CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn 線と Y123 テープからなるスプリット型 25T 無冷媒超伝導マグネットは、14T 以下の磁場発生を受け持つ高強度 CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn ラザフォードケーブルコイルによって極めて高い信頼性があるバックグランドマグネットが実現できることが実証された。また、そのバックグランド磁場中での内挿コイルとして、RE123 コイルの採用は実機コイルとしての信頼性に難点があることが判明した。テストコイルとしては実現可能である特性を示すことから、実機コイルとして数 10km 長の長尺 RE123 テープを用いたコイル製作の信頼性を如何にして確立するかが製造法の課題として残っている。

そのような状況においても、Bi2223 内挿コイルとしたバージョンでは、14T CuNb/Nb<sub>3</sub>Sn ラザフォードケーブルコイルとの組み合わせで 52mm 室温ボアに 24.6T までの磁場発生を実現させており、Bi2223 内挿コイル採用での 30T 無冷媒超伝導マグネットの設計が可能である。Bi2223 内挿コイルのスプリットマグネットとしては、25T スプリット無冷媒超伝導マグネットに相当する規模である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

S. Awaji, H. Oguro, K. Watanabe, S. Hanai, H. Miyazaki, T. Tosaka, S. Ioka, S. Fujita, M. Daibo and Y. Iijima, 10T Generation by an Epoxy Impregnated GdBCO Insert Coil for the 25T-Cryogen-Free Superconducting Magnet, Supercond. Sci. Technol., 査読有, vol. 29, 2016, 055010(5pp)

DOI: 10.1088/0953-2048/29/5/055010

S. Awaji, K. Kajikawa, K. Watanabe, H. Oguro, T. Mitose, S. Fujita, M. Daibo, Y. Iijima, H. Miyazaki, M. Takahashi and S. Ioka, AC Losses of an HTS Insert in a 25-T Cryogen-Free Superconducting Magnet, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 25, 2015, 4601405 (5pp)  
DOI: 10.1109/TASC.2014.2366552

H. Oguro, T. Omura, S. Awaji, K. Watanabe, S. Nimori, M. Sugimoto, H. Tsubouchi and S. Hanai, Transport Properties of CuNb Reinforced Nb<sub>3</sub>Sn Rutherford Coils in High Fields, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 25, 2015, 8800104 (4pp)  
DOI: 10.1109/TASC.2014.2363039

K. Takahashi, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, S. Harjo, T. Kawasaki, K. Aizawa, T. Hemmi and T. Nakamoto, Internal Strain Measurement for a Nb<sub>3</sub>Sn Rutherford Cable Using Neutron Diffraction, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 25, 2015, 8400104 (4pp)  
DOI: 10.1109/TASC.2014.2363043

H. Miyazaki, S. Iwai, M. Takahashi, T. Tosaka, K. Tasaki, S. Hanai, S. Ioka, K. Watanabe, S. Awaji and H. Oguro, Design of a REBCO Insert Coil for a Cryogen-Free 25-T Superconducting Magnet, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 25, 2015, 4603205 (4pp)  
DOI: 10.1109/TASC.2014.2380783

K. Watanabe, S. Awaji, H. Oguro, Y. Tsuchiya, S. Hanai, H. Miyazaki, T. Tosaka, M. Takahashi and S. Ioka, Construction of a 25-T Cryogen-free Superconducting Magnet, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, vol. 568, 2014, 032019 (5pp)  
DOI: 10.1088/1742-6596/568/3/032019

K. Watanabe, H. Oguro, S. Awaji, H. Kumakura, M. Sugimoto and H. Tsubouchi, Rutherford Flat Cable Composed of CuNb-Reinforced Nb<sub>3</sub>Sn Strands, Adv. Cryo. Eng., 査読有, vol. 60, 2014, 186-191  
DOI: 10.1063/1.4860622

S. Awaji, K. Watanabe, H. Oguro, S. Hanai, H. Miyazaki, M. Takahashi, S. Ioka, M. Sugimoto, H. Tsubouchi, S. Fujita, M. Daibo, Y. Iijima and H. Kumakura, New 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet Project at Tohoku University, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 24, 2014, 4302005 (4pp)  
DOI: 10.1109/TASC.2013.2292367

H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, M. Sugimoto, and H. Tsubouchi, Prebending Effect for Mechanical and Superconducting Properties of Nb-Rod-Processed Cu-Nb Internal-Reinforced Nb<sub>3</sub>Sn Wires, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 24, 2014, 8401004 (4pp)  
DOI: 10.1109/TASC.2013.2292507

H. Miyazaki, S. Iwai, T. Tosaka, K. Tasaki, S. Hanai, S. Ioka, K. Watanabe, S. Awaji, H. Oguro, S. Fujita, M. Daibo and Y. Iijima, Design of YBCO Insert Coil for a Cryogen-Free 22 T Superconducting Magnet, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 24, 2014, 4601704 (4pp)  
DOI: 10.1109/TASC.2013.2287059

[学会発表](計51件)

K. Watanabe, Advanced Cryogen-Free Superconducting Magnets at the High Field Laboratory for Superconducting Materials, International Conference on Magnet Technology, 2015年10月19日~2015年10月23日, Seoul(Korea)

S. Awaji, The Performance Test of the 25T Cryogen-Free Superconducting Magnet, 4th Japanese-French High Field Research Collaboration Workshop, 2015年9月3日~2015年9月4日, Grenoble(France)

K. Watanabe, Construction of a 25-T Cryogen-Free Superconducting Magnet, Twenty-Seventh International Conference on Low Temperature Physics(LT-27), 2014年8月6日~2014年8月13日, Buenos Aires(Argentina)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

渡辺 和雄 (WATANABE, Kazuo)  
東北大学・金属材料研究所・教授  
研究者番号：30143027

### (2)研究分担者

淡路 智 (AWAJI, Satoshi)  
東北大学・金属材料研究所・准教授  
研究者番号：10222770

小黑 英俊 (OGURO, Hidetoshi)  
東北大学・金属材料研究所・助教  
研究者番号：90567471