

ラザフォードケーブル（成型撚り線）を使用した SMES コイルの製作

森田佳隆^{A)}、江崎和弘^{A)}、横田光弘^{A)}、小川英樹^{A)}、杉戸正治^{A)}、馬場智澄^{A)}、

山内健治^{A)}、妹尾和威^{A)}、力石浩孝^{A)}、三戸利行^{A)}、

川越明史^{B)}、中西 誠^{B)}、辺見 努^{C)}、阿部 亮^{D)}、牛久俊郎^{D)}、奥村嘉賀男^{E)}

^{A)}核融合科学研究所、^{B)}鹿児島大学、^{C)}総合研究大学院大学、^{D)}東京電子（株）、^{E)}（株）テクノバ

1 はじめに

核融合科学研究所では共同研究の一環として、瞬時電圧低下対策用 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) コイルの試作を行っている (図 1)。この研究は NEDO (新エネルギー・産業技術開発機構) の基盤技術研究促進事業として「高精度電圧変動補償装置による高品位電力供給システムの開発」というテーマに基づきおこなわれている。SMES とは、電気抵抗がゼロになると減衰や発熱がなくなり、リング状にした超伝導コイルに電流を流すとロスなく流れ続けることを利用して電気をためておく装置である。本コイルで使用される超伝導体は交流損失を最小にするために導体を捻りながら巻き取っていく必要があり、そのための巻き線機が製作され、技術部が制御装置の製作、導体の捻り角度の検出と巻き線作業を担当した。

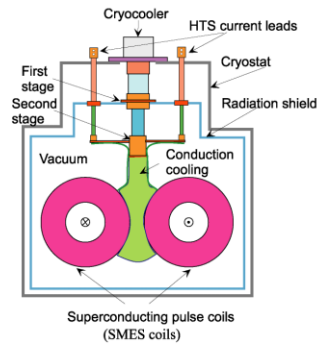


図 1 SMES の構造図

本報告ではこの巻き線機を使用した SMES 用ダミーコイル及びその巻き線作業について述べる。また、制御装置及び、捻り角度の検出についても本研究会で別の報告がされる。

2 コイルの特徴

SMES コイルは、高い信頼性と扱いやすさを実現するために伝導冷却方式を採用した。熱伝導路には熱伝導率が非常に高い素線絶縁された銅編線（リッツ線）を使用した。編み線であるので、渦電流が発生しにくい。伝導冷却は液体ヘリウム冷却に比べて冷却効率が悪い。そのためにエネルギー放出時の交流損失を最小限にしなければならない。これを実現するため本コイルに使用する導体は、8 本の超伝導体 (NbTi/Cu) の素線を断面が縦 2 本、横 4 本になるように撚り合せた物をアルミニウムと共に押出成型したものを使用する (図 2)。

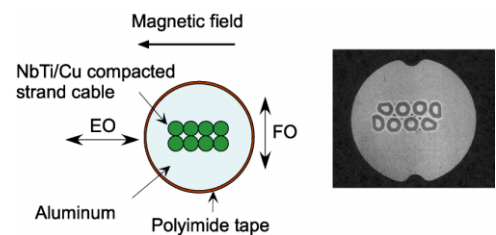


図 2 導体の構造図と写真

導体断面の幅広面と磁場方向をそろえるように導体を捻りながら巻き線をおこなう。この捻り角が導体外観から判別できるように導体長手方向に二つの溝がある。また、最外周に絶縁のためにカプトンが巻きつけてある。導体が円断面であるため、巻き取ったときに導体間に隙間ができる。この隙間をダイニーマ製のスペーサーと熱伝導線として利用する銅のリッツ線を交互に入れることによって機械的強度と熱伝導度の両立を図っている (図 3)。

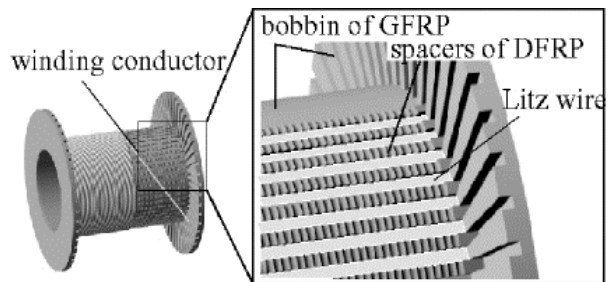


図 3 コイルの構造図

3 巻き線機の構成

このコイルは以下の条件で巻き取っていく。

- ・張力 1000N ・角度誤差 ±5 度

巻き線機は巻き出し部、捻り部、巻き取り部の3つの部分に分かれている。巻き出し部は導体が巻かれているドラムを固定し、トルク巻きの際に巻取りとは反対方向の力を加える。捻り部は外周にウレタンのある5個のプーリーを持ち、摩擦力を利用して導体を捻る。この部分は張力検出器を設置し導体への張力を測定している。以上2つの部分は導体断面の円周方向に回転し、この二つが連動して回転することにより導体に捻りを加える。捻り部に角度検出器を備え、導体に加えた捻りの角度を測定する。巻き取り部はコイルを固定する主軸があり、ここを回転させることによりコイルを製作する。(図4)

巻き出し部

捻り部

巻き取り部

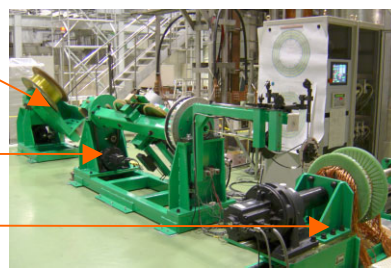


図4 巻き線機の写真

4 巻き線機の改良点

この巻き線機において導体への張力制御は巻きだし部でのトルクの制御により行なっている。巻き取り部で一定の速度で巻き取りながら 巻き出し部では約 1000N の力を加えた。その結果一定の速度でトルク巻きを行うことが可能となった。

捻り部は全体が回転するため作業者等の安全を確保するため作業エリアを限定し、非常停止などを設置している。

5 巻き線作業

今回製作したコイルは 27 ターン 14 層のもので、各層の導体巻き取りは自動化した巻き線機で行った。層間には其々48本のスペーサーおよびリッツ線を入れる必要がある。スペーサー同士の間隔は巻き始めの最下層で 10 mm、巻き終わりの最上層では 23 mmに広がる。これは層があがると巻き取り半径が大きくなり外周が長くなるが、スペーサーの厚さはすべて同じであるから、各層に同数だけ入れるとその間隔が広がっていく。リッツ線は、スペーサー同士の隙間を埋めるように入れていく。今回は各層ごとにリッツ線の幅が異なった 15 通りのものを製作した。コイルの側板にはスペーサーの

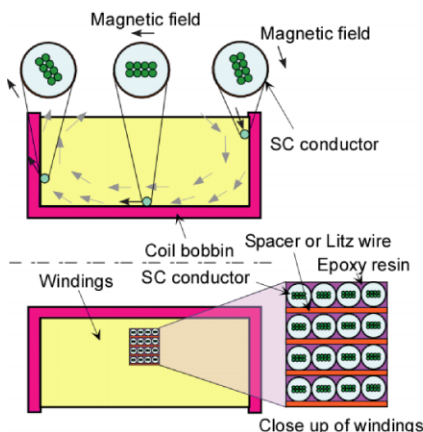


図5 SMES コイル原理図

間隔に応じた穴があけてあり、その穴からリッツ線を外部に出し冷凍機に接続する。(図3)

スペーサーおよびリッツ線の総数は 1400 本ほどになる。現状ではそれらの挿入を手作業で行っている。一層当たりはそれぞれ、導体巻き取りに 4 時間、リッツ線の加工に 10 時間、スペーサーとリッツ線の挿入に 2 時間の時間を要する。トータルで 16 時間かかる。導体の巻き取りとリッツ線の加工は平行して進められるため 1 層 / 日であり、今回のコイル全体を巻き終わるのに半月程度必要とした。将来の量産化も視野に入れており、リッツ線加工の高速・効率化も重要なテーマである。

6 リッツ線の加工

リッツ線は一定の長さで購入できないため、キログラム単位で購入する(ドラム単位)ため、必要な形状に加工する必要がある。リッツ線の加工工程は大きく分けて次の3つがあり、以下にその詳細を説明する。

必要な長さに切断する。

導体と接触する面を絶縁する。

両端を束ね側板に通しやすく切りそろえる。

6.1 リッツ線の切断

冷凍機と接続するのに必要な長さに切断するときは、長さを測り、切断する（3種類）。この手順をドラムごとに、長さを測り（目印のカプトンテープを貼り）、別のドラムに巻き取っていくことを繰り返したあとで、目印のカプトンテープ部の切断を繰り返すという方式で行った。撚り線のほつれを防ぐためにカプトンテープを貼りその部分で切断した。また、1本ずつ測っては切断する手順より1/5程度短い時間で切断することができた。図6にリッツ線製作工程を示す

6.2 絶縁処理

コイルの励磁状態では導体に高電圧がかかり、リッツ線とコイル導体が接触するところで放電が起こるのを防ぐために絶縁処理を行う。この処理のためにリッツ線にカプトンテープを巻く。

絶縁部の寸法は、コイルの幅と同等でコイルの幅（250mm程度）と同じ長さそれぞれの側板の穴の幅、高さが1.5mm必要である。

この絶縁作業を行うために型枠を製作した。型枠の種類は側板の穴の数と同数、15種類製作した。

今回使用したリッツ線断面幅が5mmほどであるため、2～4本を必要な幅になるように型枠に平行に並べてから均等に押し込む。幅が狭い場合、つよく押し込まなければならない、または幅が広い場合、網目を広げ、型枠の幅にできるだけ合わせる。（図7）

6.3 カプトンテープで絶縁処理

リッツ線は直径0.1mmの絶縁された銅線を撚り合わせて出来ているためにそれぞれの線は非常に切れやすく、素線の切断面は鋭いのでカプトンテープを貫通したり手に刺さったりするので注意が必要である。貫通してしまうと絶縁がやぶれてしまうのでその場合は作り直しである。リッツ線を型に押し込んだら長手方向に沿ってカプトンテープを貼り付ける。このときに固定をしておかないと作業途中や保存中に剥れることがある。接着後、型から外し、テープを張った面を下にして再度押し込む。はみ出したテープをたたむようにし貼り付け押さえ込む。テープで覆われていない部分はもう一枚のテープで隙間なく覆う。側板の穴の厚さはリッツ線2本分と同等の3mmのため、テープが重なる厚さを出来るだけ小さくしなければならない。そのため重複を避ける必要がある。この作業ではカプトンテープに隙間や穴、裂け目などを作らないようにすることが重要である。また、高湿度の状態にさらされるとテープの粘着力が落ちてしまい、端のほうからはがれていくということが起こった。そのため梅雨時や夏場などの高湿度の時期には乾燥した場所で作業し、完成品を保管した。

6.4 端末の切り揃え

リッツ線の両端を切りそろえる工程は最初の段階では想定してなかった作業である。絶縁した部分が一部巻き枠の中に入り、穴の中でまったく型崩れを起こさないものと考えていた。一つの穴に厚さ1.5mmのリッツ線が上下2層分重なって入る。巻き線作業の工程上、各層の導体巻き取り終了後にしかリッツ線を入れることができない。切りそろえる前は製作したリッツ線の両端はばらばらであり、リッツ線2枚分の厚さと同

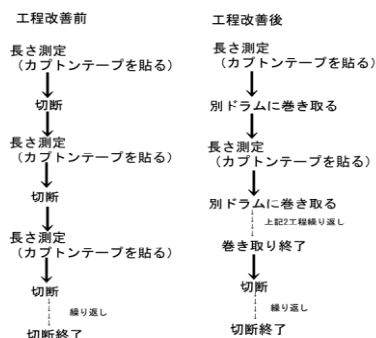


図6 リッツ線製作工程表

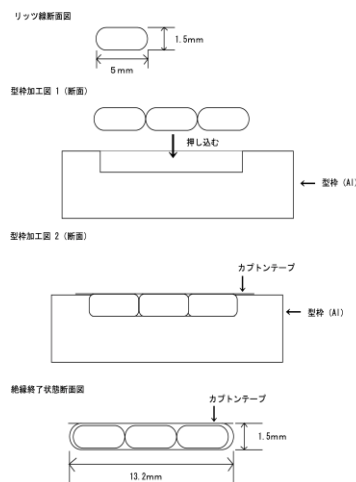


図7 リッツ線絶縁工程図



図8 リッツ線挿入風景

じ大きさの穴に入れることはできない。さらにリッツ線は柔軟性があるので後ろから押し込むことも出来ない。入れるための工夫として再度リッツ線のねじれをとり、絶縁のときに使用した型に押し込んでその片端付近の 10cm ぐらいにカプトンテープを貼り固定した。その後ハンマーで叩いてしっかりと成型、テープの端寄りを断面長手方向に対して 45 度位の角度で切り取る。他端も同様に束ねたあとテープで簡易的に固定し断面長手方向に切りそろえておく。

7 スパースとリッツ線の挿入

作業を行っている層の導体を 26 ターン目まで巻き終わり、スパースとリッツ線の挿入を行う。ここからは巻き線機を手動で運転し、30 度巻き取り、スパースとリッツ線を交互に 4 づつ本入れていく。スパースは側板に加工された溝に挿入するだけであるが、挿入位置毎に導体の並び方が異なっているため、入れ間違えないように注意が必要である。リッツ線は一層当たり 3 種類の長さのものが用意しており、挿入位置によって冷凍機までの距離が変わるのでそれに応じた線を選定して両側板の穴に通していく。この作業は各層ごとに行われる。

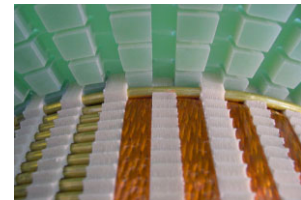


図9 コイル要素写真

8 巻き終わりと評価

最終層が巻き終わると、外筒 (GFRP) をかぶせ、導体固定のために、樹脂で真空含浸した。真空含浸は電磁場によってコイルの巻き緩みや破損が起こることを防ぎ、除熱面積の確保を目的とする。使用樹脂は常温で低粘度液状 (作業がしやすい) 極低温性、ヒートサイクル性、および電気絶縁性に優れている性質を持つ数種類を選び実験を行なった。その中で気泡ができにくいなどの条件にあったものを選定した。この樹脂を用い真空注型を行い、その後加熱硬化させた。

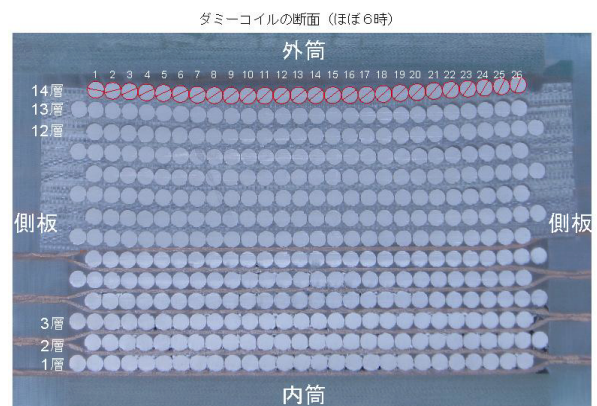


図10 ダミーコイル断面写真

含浸作業終了後、導体巻き角度の評価の為にコイルを垂直に切断し、切断面を研磨した。図10にコイル切断面を示す。

この切断面においてそれぞれの導体のねじれ角度を計測した。設定角度と実測値を比較した。これらより巻き線機の調整、捻りプログラムの改善を行った結果、設定角度 (計算による設計角度) と 14 層目での実測値 (測定角度) の誤差は要求誤差 ± 5 度を満たしていることを確認した。

コイル中央部では凹みが観測された。その原因はスパースの導体に接する曲面の設定直径 (6.0 mm; 導体直径 5.9mm) が多少大きかった。対策としてスパースの両端の高さを 0.1mm 程度小さくする。

側板付近で樹脂が入らず気泡が残った部分がある。対策として側板の穴を厚さを 1 mm 大きくする。次に計画している 100kJ 級のコイルでは上記の点などを改善し作業を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 三戸利行, et al, “瞬低対策用 UPS-SMES の開発”, 第 69 回 2003 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 2003 年 12 月, P37
- [2] 川越明史, et al, “瞬低対策用 100kJ 級 SMES に用いる伝導冷却型 LTS パルスコイルの設計・製作”, 第 69 回 2003 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 2003 年 12 月, P38