

# SMES コイル用巻き線機の製作

横田光弘<sup>A)</sup>、小川英樹<sup>A)</sup>、森田佳隆<sup>A)</sup>、江崎和弘<sup>A)</sup>、杉戸正治<sup>A)</sup>、馬場智澄<sup>A)</sup>、  
山内健治<sup>A)</sup>、妹尾和威<sup>A)</sup>、力石浩孝<sup>A)</sup>、三戸利行<sup>A)</sup>、  
川越明史<sup>B)</sup>、中西 誠<sup>B)</sup>、辺見 努<sup>C)</sup>、阿部 亮<sup>D)</sup>、牛久俊郎<sup>D)</sup>、奥村嘉賀男<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup>核融合科学研究所

<sup>B)</sup>鹿児島大学

<sup>C)</sup>総合研究大学院大学

<sup>D)</sup>東京電子(株)

<sup>E)</sup>(株)テクノバ

## 1 はじめに

核融合科学研究所では民間との共同研究プロジェクトがいくつか立ち上がっている。その一環として本研究は NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) 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新電力供給システムの開発」をテーマとして東京電子(株)、(株)テクノバと協力して行なわれている。超電導電力貯蔵装置 (SMES) に高速電源切替装置と瞬低検出回路を組み入れた高精度電圧変動補償装置を開発し、この装置をユーザー施設の電力系統に接続することで、施設全体をカバーできる瞬低対策用の高品位新電力供給システムの実現を目指すものである。

SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) とは、臨界温度以下で電気抵抗がゼロになる超伝導体をコイル状にして電流を流すことにより、エネルギーを磁気として貯めておくことができる装置である。そのコイルで使用される超伝導体の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。

## 2 SMES コイルの概要

SMES コイルには信頼性と取扱いの容易さが要求される。この為、本研究では低温超伝導体を用いた伝導冷却型パルスコイル方式を選定した<sup>[1]</sup>。この方式は、ヘリウムの高い比熱に頼った冷却ができないため、導体の交流損失を低減すると共に導体温度上昇を抑えた超伝導体が必要であ

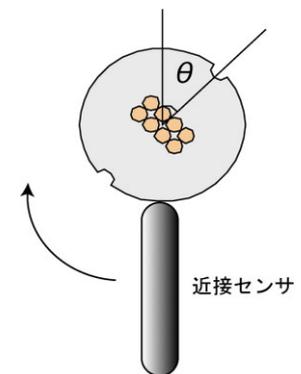


図 1. 導体断面

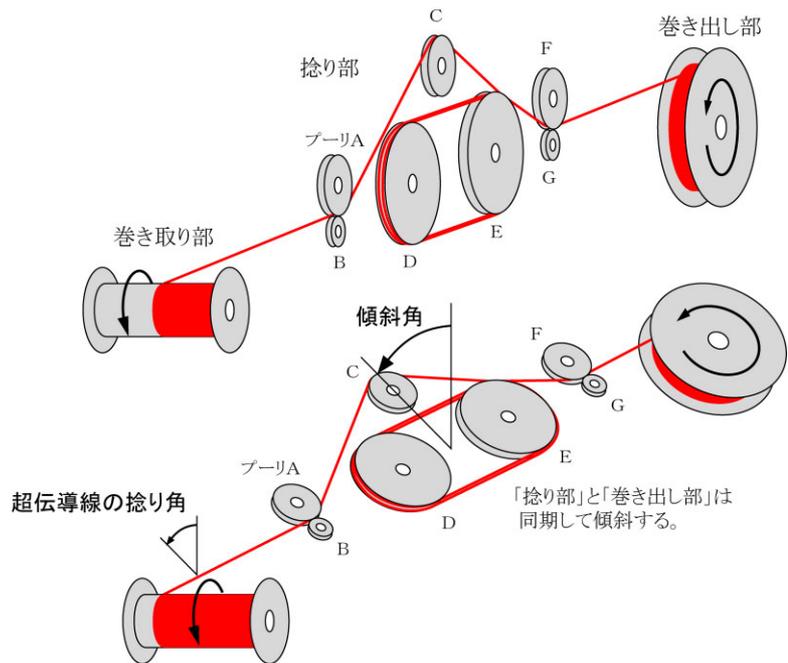


図 2. 捻り巻き線の原理

る。今回使用した導体は、NbTi/Cu 成型撚線をアルミニウムと共に押出成型したものである<sup>[2]</sup>。コイルの巻き線は前述の理由により導体を捻りながら行う必要があるため、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は二つの溝がある（図 1）。コイル内には高熱伝導率を確保するための素線絶縁した銅撚線（リッツ線）とダイニーマ製のスペーサを交互に配置することで機械強度と熱伝導度の両立を図っている。



図 3. 巻き線機

### 3 巻き線機について

SMES コイルを巻くために必要な巻き線機は、前述のように円断面の超伝導導体を設計値  $\pm 5$  度の精度で捻りながら、コイルに蓄積した電力を取り出す際に生じる力に備えて、1000N の張力で巻く必要がある。これを実現するために図 4 のような巻き線機を製作した。巻取り部にはコイルの巻取りモーターと横行モーターを、捻り部には 1000N の張力を検出する張力検出器と張力を制御するための中間軸モーターを、巻き出し部には、巻き出し張力を一定に保つための巻き出しモーターを設置した。また、導体を捻るため捻り部と巻き

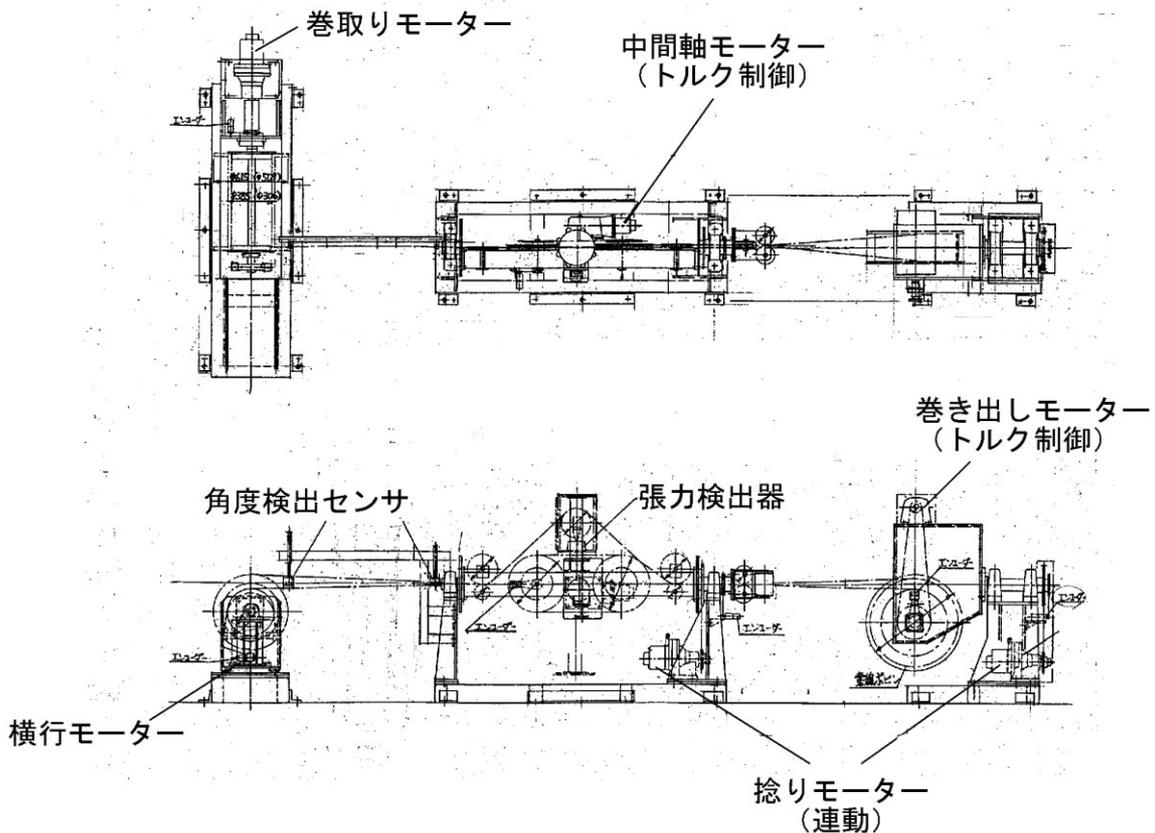


図 4. 巻き線機図面

出し部に捻りモーターを1台ずつ設置している。この他に導体の捻り角度を検出するための近接センサを巻取り部と中間部の間のコイルよりに設置している(図4)。近接センサは、駆動用モーターによって導体外周に沿うように回転し、溝を検出する。

#### 4 制御機器の構成

今回巻いたコイルは27ターン14層のもので、各層間には其々48本のスペーサとリッツ線を入れる必要がある。現状ではそれらを手作業で挿入するため、巻き線作業においては各層を巻き終わる毎に断続的に巻取る必要がある。スペーサとリッツ線はトータルで1400本程度になり、1日の巻き線作業では到底終わらない<sup>[3]</sup>。また、前述のように巻き線作業を中断している時でも1000Nの張力を維持する必要がある。このため、各サーボモーターの制御にPLC(Programmable Logic Controller)を使用することにした。制御対象のモーターは8台あり、そのうちの巻取り、中間、巻き出しモーターはトルク制御する必要がある。モータードライバにパルス列を入力すると位置決めされ、アナログ信号を加えるとその電圧に応じたトルクで回転する。各モーターは、停止時に張力を維持するために電磁ブレーキ付のものを選定したため、ブレーキの制御も必要になる。また、各モーターの回転位置を知るためにロータリーエンコーダの信号を取り込み、回転角に応じた横行モーターの制御を行う。各モーターの出力が比較的大きく(最大トルク14.4~50.1N・m)、誤動作時の被害が心配されるため、非常停止スイッチ、モーターのトルク・速度制限等のインターロックを厳重に行った。

#### 5 制御方法

導体の内部にある超伝導成型撚り線に加わる磁場がその撚り線に対して平行になっているとき交流損失(結合損失)は最も小さくなる。したがって、コイル断面における各導体はあらかじめ計算した磁場角度と図1に示した導体角度が一致するように捻りながら巻線を行えば、損失を低減することができる。あらかじめ計算した磁場角度は数値データとして与えられる。コイル巻枠に導体を巻き取る巻線部の手前に図6のような捻り角度検出・制御部を用意する。導体を捻る場合、巻線部手前のプーリは固定で中間軸を回転させることによって導体に捻りを加える。そのとき、二つのプーリ間の導体角度は、近接セン

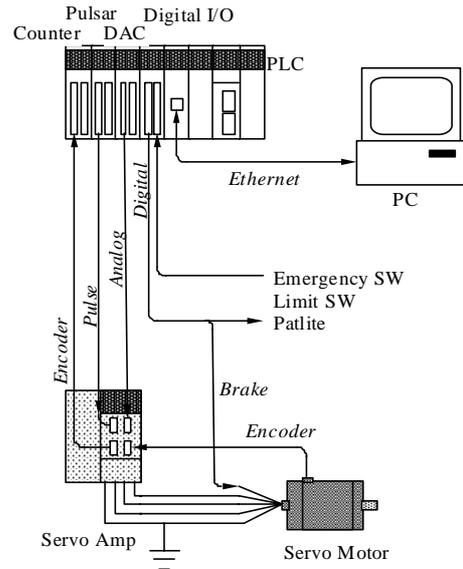


図5. 制御機器構成

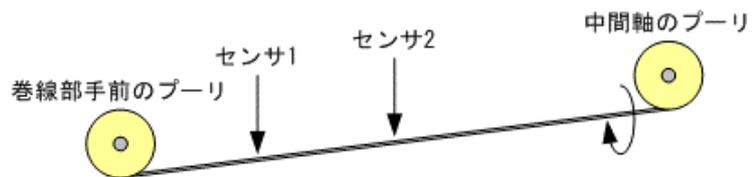


図6. 捻り制御部

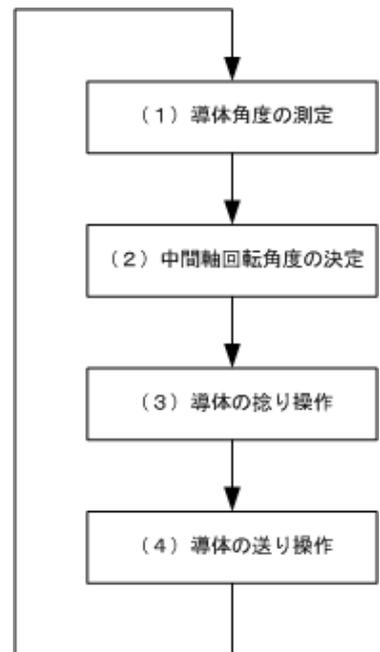


図7. 捻り巻き線制御手順

サによって測定された 2 箇所の導体角度から直線近似することにより求める。導体を捻りながら巻線を行うときの制御手順を図 7 に示す。

- (1) 近接センサを用いて 2 箇所の導体角度を計測し、捻り前の角度関数を求める
- (2) 中間軸の回転角度を求める。
- (3) 求めた回転角度を用いて中間軸を回転させ、導体に捻りを加える。
- (4) 導体を指定した間隔だけ送り、巻線を行う。

以上のような操作を繰り返して捻り巻線制御を行う。これらを行うために専用のパソコンを用意し、計算結果に基づいた動作指令を PLC に与えることにより、巻き線作業を進めた。制御プログラムは Visual Basic .NET を使って開発を行った。これは、巻き線開始時に捻り角度制御方針が確定していなかったためと、担当者が使い慣れており、巻き線作業と平行して自動巻きプログラムを開発するためである。制御画面を図 8 に示す。画面左上の二つの波形が角度検出用近接センサからの信号である。

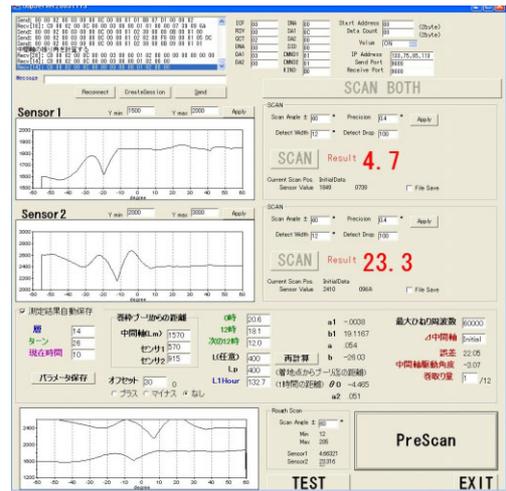


図 8. 制御画面

## 6 巻き線結果と今後の課題

上述の方法で巻いたコイルを、評価のためにカットしたものが図 9 である。制御方式確立のためのデータ取りと、プログラム開発を行ないながら巻いたため、実際に導体の歪み等の影響を最小限に抑え目標誤差範囲  $\pm 5$  度以内の精度で巻けたのは最終層のみとなった。今後予定されている 100kJ 級コイル、1MJ 級コイルは、今回巻いたものよりもターン数が多いため、より短時間で巻くために現在 PLC 経由で行っている角度検出部の計測と制御をパソコンで直接行うことによる高速化と、精度を向上させるために改善作業を進めている。

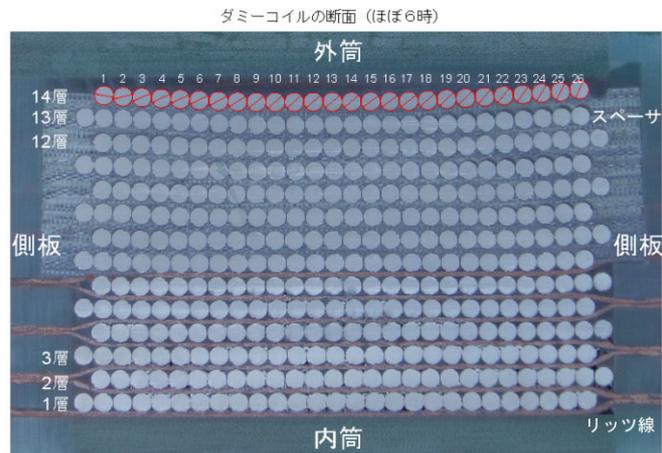


図 9. コイル断面

## 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
- [3] 森田 佳隆, et al, “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”, 当研究会