SMES モデルコイル—機械的特性—

和智 良裕, 花井 哲, 河合 正道, 小野 通隆, 平岸 政洋,
浜島高太郎, 石尾光太郎^{*1}, 中嶋 秀夫^{*1}, 辻 博史^{*1}, 篠田 公之^{*2},
峯村 徹^{*2}, 姫野 隆^{*3}, 高野 一郎^{*3}, 佐藤 隆^{*4}

(株)東芝 横浜市鶴見区末広町 2-4

^{*1} 日本原子力研究所 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

^{*2} 中部電力(株)電力技術研究所 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1

^{*3} (財)国際超電導産業技術研究センター 東京都港区新橋 5-34-3

^{*4} 核融合科学研究所 土岐市下石町 322-6

(1998 年 4 月 13 日受理)

Test Results of the SMES Model Coil—Mechanical Performance—

Yoshihiro WACHI, Satoshi HANAI, Masamichi KAWAI, Michitaka ONO, Hiroshi HIRAGISHI,
Takataro HAMAJIMA, Kotaro ISHIO,^{*1} Hideo NAKAJIMA,^{*1} Hiroshi TSUJI,^{*1}
KimiYuki SHINODA,^{*2} Toru MINEMURA,^{*2} Takashi HIMENO,^{*3}
Ichiro TAKANO^{*3} and Takashi SATO^{*4}

Toshiba Corporation, 2-4 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045

^{*1} Japan Atomic Energy Research Institute, 801-1 Mukouyama, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki 311-0193

^{*2} Chubu Electric Power Co., Inc., 20-1 Oodaka-cho, Midori-ku, Nagoya 459-8001

^{*3} International Superconductivity Technology Center, 5-34-3 Shinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0004

^{*4} National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki 509-5292

(Received April 13, 1998)

Synopsis:

The mechanical performance of a SMES model coil was measured by strain gauges, displacement gauges and acoustic emission (AE) sensors attached to the coil surface during an overcharge test. The displacements of the SMES model coil were proportional to the squared currents during charging up until 35.4 kA. It was clear that the coil became deformed elastically by the electromagnetic force during overcharging. The test results obtained by the measurement of strains were compared with calculated results obtained by finite element method analysis. As a result of the comparison, good agreement was found in both stresses, and the values were sufficiently small. It was demonstrated that the coil had no problem regarding mechanical performance. It was clarified that AE signals significantly decreased in the current region after repeated excitation. Furthermore, the characteristics of AE signals were different from the coil windings with coil supports. The wave of AE signals in the windings was minimal ms and more than 100 kHz, and in the coil support more than 10 ms but less than 40 kHz.

Keywords: superconducting magnets, mechanical performance, SMES

1. はじめに

通産省資源エネルギー庁は、日本における超電導電力貯蔵装置 (SMES) 開発のはじめとして、小規模

SMES パイロットプラント建設に必要な要素技術の確立のため、1991 年よりプロジェクトを開始し、(財)国際超電導産業技術研究センターが中心となって推進してきている¹⁻³⁾。本プロジェクトのパイロットプラ

ント最終目標として、約30年間にわたる充放電の繰り返し運転が想定されている。この間、SMES超電導コイルは10万サイクル相当の繰り返し電磁力や冷却、昇温時の熱サイクル履歴を経験することになる。パイロットプラントは電力基幹系統内に接続しての運用が検討されており、長期的な超電導コイルの電気的のみならず機械的信頼性が非常に重要となる。しかしながら大型超電導コイルの長期的な運転実績はまだ少なく、ほとんどが定常通電運転であり、短時間に電力の出し入れが要求されるSMESのような運転条件下での機械的特性については未だ定量的な把握がなされていないのが現状である。

本研究プロジェクトの一環としてパイロットプラント用SMESモデルコイルを製作し⁴⁾、日本原子力研究所との共同研究で性能評価試験を実施した⁵⁻⁹⁾。引き続き、国際協力のもと米国ローレンスリバモア国立研究所の超電導コイル試験装置(FENIX)を用いてSMESモデルコイルの長期充放電繰り返し通電試験が98年度に計画されている⁹⁾。

本研究では、米国試験における長期信頼性試験の評価、判定のベースとなる機械的特性について把握するとともに、パイロットプラントにおける電磁力環境下での健全性について検討することを目的としている。モデルコイルはSMES要素コイルの1/2サイズ(4ダブルパンケーキコイル)であるため⁴⁾、試験では定

格電流20kAの約1.8倍である35.4kAまでの通電によりコイルの変位、歪みおよび励・消磁中のAE信号などを測定した⁴⁾。測定結果は電磁力から推定される応力と比較し、弾性変形内での挙動であることを確認した。また、AE信号からコイル励磁中の微小な動きを定性的に観測した。

2. 測定方法

SMESモデルコイルの機械的特性を調べるために、コイル各部には変位計16点、3軸歪みゲージ40点(+各予備1点)、およびAEセンサー3点を配置し、通電時の機械特性を測定した。代表的な変位計、歪みゲージ、AEセンサーの配置をFig. 1に示す。図に示すように、変位計は20°、110°、200°、290°近傍の周方向4カ所のコイル内径側およびコイル外径側、および110°、290°近傍の周方向2カ所のコイル上下面、計16点に配置した。一方、図に示すように歪みゲージは10°、80°、100°、170°、190°、260°、290°、350°近傍の周方向8カ所のコイルサポート表面のコイル内径側、コイル外径側、コイル上面側の24点、また30°、120°、210°、300°の周方向4カ所のコイル表面のコイル内径側、コイル外径側、コイル上下面側の16点、合計40点に配置した。また、AEセンサーは、図に示すように0°近傍のコイル表面1点、コイルサポート表面2点の計3点に配置した。

Fig. 1 Locations of the displacement gauges, strain gauges and acoustic emission sensors.

モデルコイルの通電は5 kA ステップで定格電流 20 kA の約 1.8 倍である 35.4 kA まで行った。この電流値においてモデルコイルに発生する電磁力はパイロットプラントにおける電磁力の 77 % に相当する値である。

3. 測定結果

3.1 変位特性

Fig. 2, Fig. 3 にそれぞれ通電電流とコイル内径、外径方向変位の関係を示す。コイル内外周とも径方向に広がっており、モデルコイルの定格電流 20 kA において、コイル内径で約 0.15 mm, コイル外径で約

Fig. 2 Relation of the rated current between displacement of the inner radial direction in the model coil.

Fig. 3 Relation of the rated current between displacement of the outer radial direction in the model coil.

0.05 mm となった。一方, Fig. 4 に示すコイル軸方向変位は, コイル上面において 20 kA で下方向に約 0.07 mm 変位した。これに対してコイル下面の変位量はほぼ 0 mm であった。

Fig. 5 に通電電流値の 2 乗と変位の関係を示す⁹⁾。この図において, モデルコイルの変位は通電電流の 2 乗に比例している。通電電流の 2 乗はコイル電磁力に比例することから, コイルが電磁力に比例して弾性変形していることが確認できる。20 kA 通電時のコイルの変形モードを変位から推定すると Fig. 5 に示すコイル変形図のように電流リード近傍のコイル支持脚を固定端 (20°) として対面 (200°) の位置で 0.2 mm, また, 110°, 290° の箇所それぞれ 0.15 mm, 0.14 mm コイルが径方向に一樣に広がるように変形していることがわかる。

3.2 コイルの歪み特性

コイルの歪み測定には 3 軸の歪みゲージを用い, 各測定点において 2 枚の歪みゲージを用いるダミーゲージ法によって測定を行った。この測定により得られた歪みを, 以下の式にて変換し, 最大主歪 SS_1 (ppm), 最小主歪 SS_2 (ppm), 最大主応力 ST_1 (MPa), 最小主応力 ST_2 (MPa) を求めた。

$$SS_1 = \frac{e_x + e_y + \sqrt{(e_x - e_y)^2 + (e_x + e_y - 2e_{xy})^2}}{2}$$

$$SS_2 = \frac{e_x + e_y - \sqrt{(e_x - e_y)^2 + (e_x + e_y - 2e_{xy})^2}}{2}$$

$$ST_1 = \frac{0.001 \times E(SS_1 + \nu \cdot SS_2)}{1 - \nu^2}$$

Fig. 4 Relation of the rated current between displacement of the axial direction in the model coil.

Fig. 5 The displacement of the model coil.

$$ST_2 = \frac{0.001 \times E(SS_2 + \nu \cdot SS_1)}{1 - \nu^2}$$

ここで、 e_x は周方向の歪み (ppm)、 e_y は上下方向の歪み (ppm)、 e_{xy} は e_x と e_y の 45° 方向の歪み (ppm) である。また、 E は弾性係数 (GPa)、 ν はポアソン比であり、コイルでは $E=30$ GPa、 $\nu=0.1$ 、サポートでは $E=190$ GPa、 $\nu=0.3$ をそれぞれ計算に用いた。

上記方法にて算出した最大主歪、最小主歪、最大主応力、最小主応力を Table 1 に示す。

3.3 AE 特性

AE 信号についてはセンサーの出力をディスクリミネーターで弁別し、一定レベル以上の信号のみを AE 信号としてカウントし、励・消磁の繰り返しによるカウント数の推移を調べた。また、一部の AE 信号は高速レコーダーに入力し、トランジェントモードでリアルタイム波形を観察するとともに FFT アナライザーに入力し、周波数分析を行った。

コイル励磁中の AE 信号とコイルバランス電圧に観測された電圧パルスの発生時期とを比較したが、このデータだけでは電圧パルスと AE 信号の明確な相関関

Table 1 The strain and stress characteristics in the SMES model coil charged up at 19.2 kA.

Location	30°	120°	210°	300°
Maximum strain (ppm)				
Inner circumference	191.4	195.2	197.2	168.8
Outer circumference	90.9	81.7	108.7	97.9
Minimum strain (ppm)				
Inner circumference	-265.5	-182.3	-216.4	-163.4
Outer circumference	-73.3	-34.2	-121.5	-214.5
Maximum stress (MPa)				
Inner circumference	4.99	5.06	5.32	4.56
Outer circumference	2.53	2.37	2.93	2.32
Minimum stress (MPa)				
Inner circumference	-7.47	-7.96	-5.96	-4.45
Outer circumference	-1.95	-0.79	-3.35	-6.2

係は得られなかった。一方、AE 信号のカウンタデータからは、モデルコイルの初回励磁領域では多くの AE 信号が観測され、2 回目以降カウンタ数が減少するという現象が見られた^{5,10,11)}。導体上の AE センサーによるカウンタ数をショットごとに励磁電流値で区切って表示したグラフを Fig. 6 に示す。初回励磁時に多数発生していた AE 信号が、2 回目以降、励磁経験領域に達するまで激減していることがわかる。なお、12 kA 以下の電流領域では数回励磁を繰り返した後は AE 信号の発生がほとんど見られなくなったのに対し、12 kA 以上の電流領域ではその回数は緩やかに減少するものの、何度励磁を繰り返しても多くの AE

Fig. 6 The relation between number of the signal of acoustic emission during coil charges and the test numbers.

Fig. 7 The wave form of an AE signal (short-pulse type). This signal is the case of shot number 7-1 at a charge current of 3 kA.

信号の発生が見られた。

励磁試験中に観測された AE 信号波形は大別すると 2 種類に分類される。初回励磁領域で発生する信号は Fig. 7 に示すように持続時間の短い (数 ms) 信号が多いのに対し、繰り返し領域および消磁中には Fig. 8 に示すように持続時間の長い (数 10 ms) 信号が多く観測された。Fig. 7 の信号は導体上の計測点 (AE1) に多く見られ、Fig. 8 の信号はコイルサポート上の計測点 (AE2, AE3) で多く見られた。これらの信号を周波数分析すると持続時間の短い信号は Fig. 9(a) に示すように周波数が高く (100 kHz 以上)、持続時間の長い信号は Fig. 9(b) に示すように周

Fig. 8 The wave form of an AE signal (long-pulse type). This signal is the case of shot number 7-1 during a discharge current of 0.2 kA.

Fig. 9 The results of a FFT analysis of the AE signal. (a) Short-pulse type, (b) Long-pulse type.

波数が低い (~ 40 kHz) という測定結果が得られた。

4. 考 察

本モデルコイルの設計はコイル電磁力をコンジットの剛性で持たせ、超電導燃線の剛性は期待しないという方針で行われている⁴⁾。そこで、導体の剛性をコンジットの剛性だけで近似し、20 kA 通電時の構造解析を行った。解析の結果、導体コンジットのフープ応力は 40.2~57.8 MPa、ミーゼスの応力は最大で 63.2 MPa であった。また、絶縁部分 (FRP) のフープ応力は 5.4~8.4 MPa、ミーゼスの応力の最大値は 8.5 MPa であった。19.2 kA 通電におけるコイル外周表面 (FRP 部) のフープ応力は測定結果から 4.6~5.3 MPa であり、20 kA 通電に換算すると 5.0~5.7 MPa と解析結果に良く一致していることがわかる。

35.4 kA の拡張通電試験では、コイル表面の応力 (ミーゼスの応力) および導体コンジットの応力 (ミーゼスの応力) の最大値はそれぞれ 26.6, 198 MPa であった。また、パイロットプラントと等価な電磁力が得られる 40.4 kA 通電時の応力はそれぞれ 34.7, 258 MPa である。これらの値は絶縁材の強度、コンジット材の S_m 値 (446 MPa) と比較しても十分低く、問題ないと考えられる。

今回の試験において 35.4 kA (パイロットプラントにおける電磁力の 77 % に相当) までの拡張通電を行い、モデルコイルの機械的特性の確認を行った。その結果、モデルコイルは弾性範囲内の挙動を示した。また、応力解析との比較から検討すると本モデルコイルはパイロットプラントが置かれる電磁力環境下においても健全であると評価できる。

5. ま と め

SMES モデルコイルの長期信頼性試験の評価、判定のベースとなる機械的特性について把握するとともに、パイロットプラントにおける電磁力環境下での健全性について検討を行った。

モデルコイルは SMES パイロットプラント要素コ

イルの 1/2 サイズであるため、試験では定格電流 20 kA の約 1.8 倍である 35.4 kA までの通電によりコイルの変位、歪みおよび励・消磁中の AE 信号などを測定した。

測定の結果、コイルの変位は、35.4 kA までの拡張通電中、通電電流の 2 乗に比例しており、励磁中の電磁力に比例して弾性的に変形していることが確認できた。FEM の解析結果と歪みから求めた応力は良く一致し、値としても十分低く、強度的に問題ないことが実証できた。また、AE 信号からコイル励磁中の微少な動きを観測し、コイルの励・消磁を繰り返すことにより、一度励磁した電流値までは AE 発生シグナル数が激減すること、複合材で構成されるコイル巻線部と単一材であるコイルサポート部での AE 発生シグナルが巻線部では数 ms, 100 kHz 以上の周波数域であるのに対し、サポート部では数 10 ms, 40 kHz 以下の周波数域で明らかに異なることが判明した。

SMES モデルコイルの開発作業および実験の遂行に御尽力いただいた多くの関係者の皆様に心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) E. Masada, et al.: Proc. IEA-Symposium on the Use of Superconductivity in Energy Storage, Karlsruhe (1994) 97
- 2) 山本政弘ら: 低温工学 **33** (1998) 454
- 3) Y. Murakami, et al.: Proc. ICEC-16/IMC (1997) 1041
- 4) 花井 哲ら: 低温工学 **33** (1998) 460
- 5) T. Satow, et al.: The International Conference on Electrical Engineering '97 (1997) 122
- 6) 濱田一弥ら: 低温工学 **33** (1998) 467
- 7) 磯野高明ら: 低温工学 **33** (1998) 473
- 8) 伊藤智庸ら: 低温工学 **33** (1998) 485
- 9) 浜島高太郎ら: 低温工学 **33** (1998) 492
- 10) N. Maeda, et al.: Cryogenics **22** (1982) 473
- 11) K. Takahata, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 477