

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14220

研究課題名(和文) 超高磁場・超高貯蔵密度を実現する革新的高温超伝導コイル化技術に関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic Study on innovative high temperature superconducting coil technology realizing ultra-high magnetic field and ultra-high storage density

研究代表者

石山 敦士 (Ishiyama, Atsushi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00130865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導電力貯蔵装置(SMES)は長寿命且つ大電力の瞬時応答が可能という特長を有するが、貯蔵密度がLiイオン電池等と比べ大きく劣っている。そこでSMES用高温超伝導コイルの超高磁場・超高貯蔵密度化(600kWh/m<sup>3</sup>)を目的として、1)超高強度コイル支持構造「Super-YOROI」と、2)高電流密度化と高熱的安定化の両立を可能とする「層間電気抵抗制御技術」の適用による超高貯蔵密度SMESの実現可能性を、数値解析に基づき評価・検証した。

研究成果の概要(英文)：The Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) device has the feature of a long lifetime and instantaneous response of large power. However, the storage density is much inferior to that of Li-ion batteries and the like. Therefore, with the aim of ultra-high magnetic field and ultra-high storage density (600 kWh / m<sup>3</sup>) of high-temperature superconducting coil for SMES, the feasibility of ultra-high storage density SMES by applying "Super-YOROI" high-strength coil support structure and "interlayer electric resistance control technology" which realizes both high current density and high thermal stability, has been evaluated and verified by numerical analyses.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導コイル 超伝導電力貯蔵 高磁場 高電流密度 高機械強度 高貯蔵密度 数値解析

## 1. 研究開発開始当初の背景

NEDO「超電導電力貯蔵 (SMES) システム技術開発: 高温超電導 SMES 技術調査 (H11~H15)」からはじまり、NEDO「イットリウム系超電導電力機器開発 (H20~H24)」まで、SMES 用高温超電導コイルシステムの開発が継続して行われた。そして、高磁場 (10T 級)、大口径 (m 級)、貯蔵密度  $6\text{kWh/m}^3$  を実現するためのコイル化基盤技術の確立に目途がついた。風力や太陽光などの再生可能エネルギー発電の大量導入に当たっては、大容量・高貯蔵密度の蓄電設備が不可欠となる。本研究で設定した貯蔵密度の最終目標値 ( $600\text{kWh/m}^3$ ) は、上記  $6\text{kWh/m}^3$  より 2 桁大きく、次世代 Li イオン電池の目標値とほぼ同等である。目標とする SMES が実現すると、その適用範囲が大幅に拡がり、その結果、再生可能エネルギーの導入・拡大を促進することが可能となる。本研究課題は、以上のような背景と近年の高温超伝導線材およびコイル化技術の開発動向を踏まえ提案するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目標は、 $600\text{kWh/m}^3$  という超高貯蔵密度の SMES の実現を可能とする超高磁場を発生できる次世代超伝導コイルシステムの開発である。そして本研究課題では、SMES 用コイルシステムの超高磁場化と超高貯蔵密度化を可能とする基盤技術の確立を目指した。

## 3. 研究の方法

超高磁場化に不可欠となる高機械強度化技術 (Super-YOROI コイル構造)、高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術 (層間電気抵抗制御)、超伝導コイルシステムの設計最適化

技術 (目標とする貯蔵密度および貯蔵容量を実現するためのコイルシステム設計) の 3 つの基盤技術の確立を目指す。ここでは高機械強度化技術と層間電気抵抗制御方法について設定した目標値 (耐フープ応力:  $5\text{GPa}$ , 工学的電流密度:  $500\text{A/m}^2$ ) の達成可能性を詳細な数値解析に基づく評価により検証して行った。

## 4. 研究成果

SMES 用コイルのための使用線材としては、現状最も優れた超伝導特性を有していることから、REBCO 系テープ線材の使用を想定した。また、コイル巻線方式としては、高機械強度化を念頭にパンケーキ巻を採用することとした。以下に得られた成果をまとめる。

### (1) 高強度化技術

超伝導コイル巻線に作用するフープ応力は、磁束密度  $B$  と電流密度  $J$  および半径  $R$  の積 ( $B \times J \times R$ ) で表される。従って SMES 用途として必要とされる大口径 ( $R$ ) のコイルで高磁場 ( $B$ ) を発生させるには、コイルの高機械強度化が不可欠となる。機械的強度を高められれば、より高い電流密度 ( $J$ ) での設計ができ、その結果、コイルの高磁場化・小型化、使用線材量の低減・低コスト化が可能となる。そこで本研究においては、前例のない圧倒的な高機械強度化を実現するため、NEDO プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」(H20~H24) で開発し、耐フープ応力  $1.7\text{GPa}$  を達成した「YOROI コイル(Y-based Oxide superconductor and Reinforcing Outer Integrated coil)構造」<sup>①</sup> をさらに改良・発展させた「Super-YOROI コイル構造」<sup>②</sup> を採用することとした。YOROI 構造は、REBCO 線材の引張強度 ( $\sim 800\text{MPa}$ ) のみに依存するのでは

なく、コイル巻線がローレンツ力によって拡張するように受ける応力をコイル外周に配置された外枠を介して、上下側板へ伝えることで応力分担する機構を持つ。Super-YOROI 構造は、YOROI 構造には無かった内枠を新たに設け、これも含めて上下側板に応力を分担することでさらなる高機械強度を実現しようとしたものである。

本研究では、SMES 用の実規模コイルを想定した内径 1000mm のパンケーキコイルシステムを対象として Super-YOROI 構造の補強効果を 3 次元有限要素構造解析により評価・検証した。SMES 用コイルシステムは図 1 に示すようなダブルパンケーキコイルを積層した要素コイルをさらに積み重ね、トロイダル構造や、マルチソレノイド構造を想定した。そして本研究では、まず要素コイルを構成する一つのコイルを解析対象として、線材の強度限界である引張り応力 800MPa とひずみ 0.4% を満たす構造を探り、高貯蔵密度化の実現可能性の検証を行った。

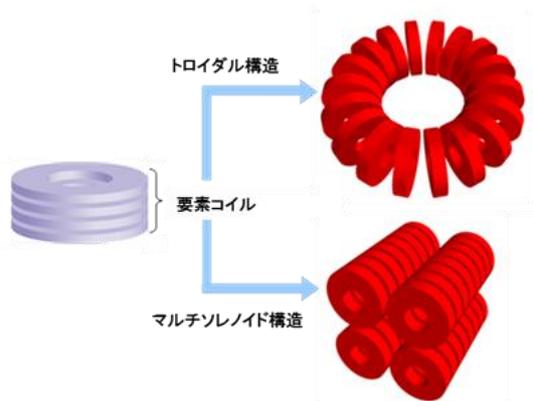


図 1. 実規模 SMES 用コイルシステム概念図

① 単一コイルの数値解析モデル

解析モデルを図 2 に、コイル諸元を表 1 に、各材料の物性値を表 2 に示す。補強構造の材料は SUS304 とし、コイル巻線は異方性を考慮し、複合則により、ハステロイ、銅、ポリア

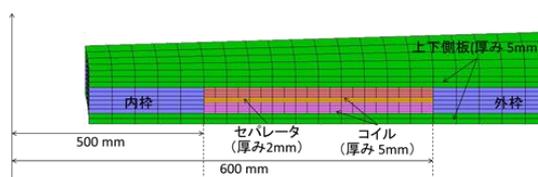


図 2. 数値解析モデル

表 1 コイル諸元

Parameter	Value
Coil winding	
Inner diameter	1000 mm
Outer diameter	1200 mm
Height	5 mm
Material	Hastelloy:Cu:PAI = 1:1:1
Super-YOROI	
Upper plate	5 mm
Lower plate	5 mm
Inner flame	50 mm
Outer flame	50 mm
Material	SUS304

表 2 各材料の物性値

Parameter	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	CTE at 300K ( $10^{-6}/K$ )
Hastelloy	200	0.32	11.2
Copper	110	0.35	16.5
Polyamide-imide	4.9	0.45	30.0
SUS304	193	0.3	17.5

ミドイミドそれぞれ 1:1:1 の一体モデルとした。計算時間を短縮するため、周方向断面は対称境界条件、すなわち、回転方向に固定して、周方向に 5 度のモデルを採用した。

② 単一コイルの数値解析結果

まず、外部磁場を 50 T、電流密度を 500 A/mm<sup>2</sup> として、内枠と外枠の厚みを増やしていったときの補強効果の解析を行った。内枠外枠厚みが 50mm のときのコイル断面の応力分布を図 3 に、内枠外枠厚みに対する補強効果を図 4 に示す。補強しない場合コイルにかかるフープ応力 ( $BJR$ ) の最大値 (14273MPa) に対して大幅に低減されているが (3557MPa)、

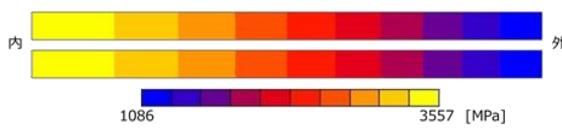


図 3. コイル断面の応力分布 (両枠：50mm)

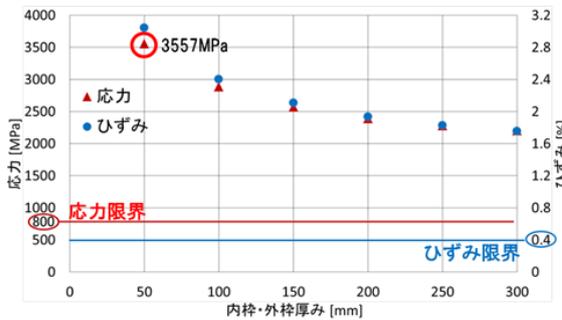


図 4. 両枠厚みに対する最大応力とひずみ

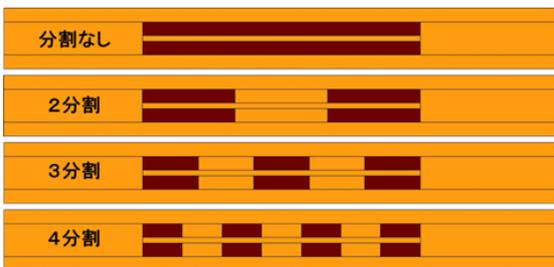


図 5. 分割型 Super-YOROI 構造のコイル断面

図 4 にあるとおり線材の強度限界を大きく上回っている。そこで、コイルを径方向に分割し補強構造を挟む分割型 Super-YOROI 構造 (図 5) について検討を行った。コイル間に補強構造を挟むことで電流密度が低下するのを抑えるため、コイル部分の面積に応じて電流密度を高め、補強部も含めた全体の電流密度が  $500 \text{ A/mm}^2$  となるようにした。断面の応力分布を図 6 に、内枠外枠厚みに対する最大応力を図 7 に示す。コイルの分割数が増えると、コイル部の電流密度が増えるため、BJR は大きくなる。しかし、それ以上に分割することによる応力得られていることが分かる。また図 7 より、分担効果が大きいことから、高い補強効果を内枠外枠の厚みを  $250 \text{ mm}$  とする

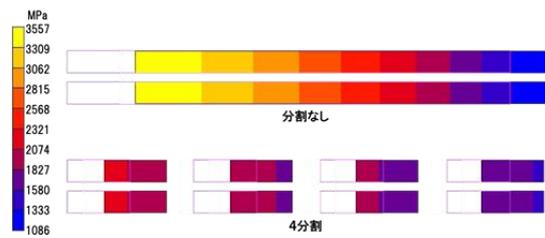


図 6. コイル断面の応力分布 (両枠：50mm)

上図：分割なし 下図：4分割

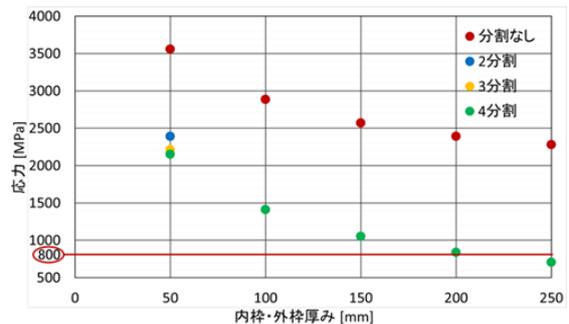


図 7. 内外枠厚みに対する最大応力

と、分割しない構造と 4 分割した構造とでは応力は  $2278 \text{ MPa}$  から  $704 \text{ MPa}$  に、ひずみは  $1.8\%$  から  $0.34\%$  に大きく低減され、線材の強度限界以下になることが分かった。

### ③ 実規模を想定した多層コイルの解析

実規模を想定した多層コイルの解析を行った。ここでは要素コイルとして内径  $1000 \text{ mm}$  のダブルパンケーキコイルを同心軸上に上下方向に  $100$  個積層すると仮定した。補強構造には、4 分割した Super-YOROI 構造を適用した。また、これまでの解析では外部磁場を一樣としていたが、この解析では  $100$  層のコイルから発生する磁場を考慮し、ローレンツ力解析と構造解析を行った。詳細は省略するが、コイル外径をパラメータとして解析・評価した結果、外径  $1300 \text{ mm}$  コイルがコンパクトでかつ、貯蔵密度の大きい構造であるということが分かった (内枠・外枠： $100 \text{ mm}$ 。電流密度  $500 \text{ A/mm}^2$ 、巻線内最大磁場： $37.8 \text{ T}$ )。また、そのときの貯蔵密度は、現状の SMES の貯蔵

密度  $6\text{kWh/m}^3$  の15倍の  $90\text{kWh/m}^3$  となった。目標の  $600\text{kWh/m}^3$  には及ばなかったが、さらにトロイダル形状やマルチコイル構造(図1)とすることにより貯蔵密度の向上が期待できると考える。

## (2) 層間電気抵抗制御技術

REBCO 超伝導線材・コイルは熱的安定性が極めて高いが、従来の低温金属系超伝導線材・コイルと同様に、局所的な常電導転移等の事故発生に対して、銅やアルミニウムなどの電気抵抗の小さな金属を複合させ、これに電流をバイパスさせることにより、常電導領域の拡大を抑え、熱的安定性を確保している。従って、線材の臨界電流・運転電流が大きくなると、安定化材の断面積も必然的に大きくする必要があり、結果的に安定化材を含めた線材総断面における臨界電流密度(「工学的臨界電流密度  $J_e$ 」と呼ばれる)を向上させることができない。このように、高電流密度化と高熱的安定化は二律背反の関係にあり、線材の臨界電流の向上、すなわち、超伝導材料開発のみでは、目的とする高貯蔵密度化を達成することはできない。そこで、貯蔵密度  $600\text{kWh/m}^3$  達成に必要となる高電流密度化 ( $500\text{A/mm}^2$ ) と高熱的安定化の両者を成り立たせるために、「無絶縁コイル巻線方式」<sup>③</sup>を採用した「層間電気抵抗制御技術」について SMES 応用への適用可能性を検証した。

### ① 解析・評価方法

対象としたコイルの諸元を表3に示す。運転温度を20K、周方向電流最大値を540A、最小値を420Aとし(NEDO「リチウム系超電導電力機器開発(H20~H24)」で用いた値)、一定電力での充放電制御を仮定のもとで、図8の簡易等価回路モデルによる電流解析を行

表1 無絶縁 REBCO パンケーキコイルの諸元

REBCO conductor	Overall width [mm]	4.02
	Overall thickness [μm]	206
NI Coil	i.d; o.d [m]	1.000; 1.041
	Height [mm]	4.02
	Number of Turns	100
	Inductance [H]	0.0296

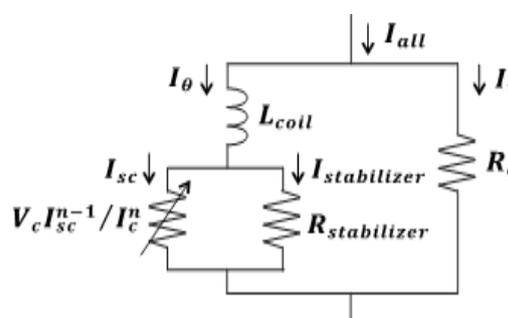


図8 簡易等価回路モデル

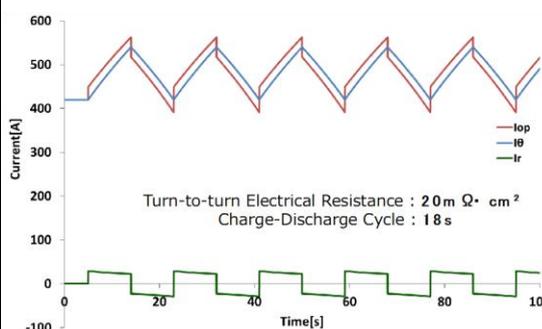


図9 電流波形

(層間電気抵抗  $20\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、充放電周期18秒)

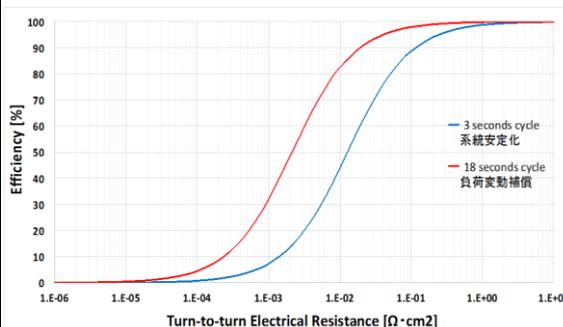


図10 層間接触電気抵抗と効率

った。このとき、層間接触電気抵抗率を  $1\mu\Omega\cdot\text{cm}^2\sim 10\Omega\cdot\text{cm}^2$  の範囲で変化させ、充放電周期について系統安定化を想定した 3 秒、負荷変動保障を想定した 18 秒とした。得られた解析結果から、磁気エネルギーとして蓄積される量と 1 周期の充放電でのジュール損失を計算し、効率を求めた。

## ② 解析・評価結果

電流の解析結果の一例を図 9 に示す。周方向電流の時間変化によるコイル誘導起電力が径方向の層間電気抵抗に印加され径方向電流が流れる。層間電気抵抗が小さいほど径方向電流は大きくなる。層間接触電気抵抗率と効率の関係を図 10 に示す。当然、効率は電気抵抗が小さいほど悪く、大きいほど良いが、長い充放電周期であれば層間電気抵抗が  $10\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  程度の有限の値でも高効率を示している。このことから、SMES に無絶縁巻線方式の採用と層間電気抵抗の最適化制御を施すことで、高電流密度化により高貯蔵密度化を達成できる可能性があると考えられる。

## <引用文献>

- ① S.Nagaya, T.Watanabe, T.Tamada, M. Naruse, N.Kashima, T.Katagiri, N.Hirano, S. Awaji, H.Oguro, A.Ishiyama, “Development of High Strength Pancake Coil With Stress Controlling Structure by REBCO Coated Conductor,” IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 23, NO. 3, 4601204, 2013
- ② Y.Kashiwazaki, A.Ishiyama, X.Wang, H. Ueda, T.Watanabe, S.Nagaya, “Numerical Evaluation of the Reinforcing Effect of the Advanced YOROI Coil Structure for the HTS Coil,” IEEE TRANSACTIONS ON

APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 27, NO. 4, 4601804, 2017

- ③ T.Wang, S.Noguchi, X.Wang, I.Arakawa, K.Minami, K.Monma, A.Ishiyama, S.Hahn, Y.Iwasa, “Analyses of Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coils During Sudden Discharging and Overcurrent”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 25, NO. 3, 4603409, 2015

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 金原 徹郎\*, 矢代 聡佳, 鄭 齊一, 市川 哲理, 柿本 雄太, 石山 敦士「無絶縁 REBCO パンケーキコイルの電力貯蔵装置への応用可能性に関する検討」平成 30 年電気学会全国大会, 2018
- ② 石山 敦士, 我妻 洸, 齋藤 隆, 野口 聡, 植田 浩史, 金 錫範, 渡部 智則, 長屋 重夫「(50T・500A/mm<sup>2</sup>・5GPa)-REBCO 超電導コイルシステムの開発」2016 年度秋季低温工学・超電導学会, 講演概要集, 2P-p16, 2016

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石山 敦士 (ISHIYAMA, Atsushi)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号：00130865

### (2) 研究分担者

金 錫範 (KIM, Seokbeom)  
岡山大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号：00287963