超電導エネルギー貯蔵装置用電磁力平衡コイルの最適化

正員 佐藤 義久 (東芝)   正員 大崎 朋也 (日本鋼管)
 学生員 野村 新一 (東工大)   正員 近藤 潤次 (電総研)
 正員 浜島高太郎 (山口大)   正員 嶋田 隆一 (東工大)

Optimization of a Force-balanced Coil for Superconducting Magnetic Energy Storage

Yoshihisa Sato, Member (Toshiba Corporation)

Tomoya Osaki, Member (NKK Corporation)

Shinichi Nomura, Student Member (Tokyo Institute of Technology)

Junji Kondoh, Member (Electrical Technology Laboratory)

Takataro Hamajima, Member (Yamaguchi University)

Ryuichi Shimada, Member (Tokyo Institute of Technology)

Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) is very promising for the future power storage system because of fast response, low loss and high efficiency. We proposed the Force-balanced Coil (FBC) concept for the SMES and demonstrated it by the experiment. Moreover, we studied on coil winding configuration for SMES. The results were compared with the toroidal type configuration and ordinary helical type one. It is shown that the Force-balanced Coil is superior than the others in view points of electromagnetic force and per-unit length stored energy of the superconductor. Finally, optimization of the Force-balanced Coil for SMES (FBC-SMES) has been done. The key parameters of superconductor stress, length, maximum field and stored energy were surveyed and optimized under the restriction of critical field and critical current. It is shown that the optimized FBC-SMES is obtained in case of which parameters are pitch $\rho=3$ and aspect ratio $A=1.79$.

キーワード：超電導エネルギー貯蔵、SMES、電磁力平衡コイル、最適化、超電導線、エネルギー蓄積密度

1. まえがき

増大する電力需要の季節変動及び昼夜間変動を緩和し、電力設備の利用効率を向上させるためには電力貯蔵装置の導入が必要不可欠である。超電導エネルギー貯蔵／SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) は超電導コイルに磁気エネルギーの形で電力を貯蔵するので高効率、即応性の観点より将来の電力貯蔵方式の有力な候補として世界中で研究・開発されている(1)・(2)・(3)。近年、超電導線も高臨界電流密度化、機械的高強度化の方向で開発が進み、装置の大型化、高磁界化が急速に進んでいる。超電導コイルの大型化・高磁界化に伴って発生する巨大な電磁力、特にコイルに働く向心力のサポートは、装置の設計・製作上大きな制約条件になってきている。この問題を解決する為トロイダル磁界コイルを中心にさまざまな研究開発がなされて来た(4)・(5)・(6)。我々は、電磁力平衡コイルをSMESに適用することを提案し、電磁力計算により大半径方向電磁力の平衡を計算により示すと共に超電導小型電磁力平衡コイルを設計・製作し、励磁試験を実施して

電磁力平衡コイルの有効性を実証した(7)・(8)・(9)。また、中規模SMES用超電導コイルの巻き線方式として、電磁力平衡コイル、トロイダル磁界コイル、ヘリカルコイルを想定し、各巻き線方式の比較検討を行なった。その結果、電磁力平衡コイルは超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギーが最大となるSMESとして最も優れた巻き線方式であることを示す事ができた(10)・(11)・(12)。更に、本論文では電磁力平衡コイルを1MWh級中規模SMESに適用する場合を想定し、ピッチ数 ρ をパラメーターとした最適化計算を行い、コイルに働く電磁力、SMES装置の全蓄積エネルギー、超電導線の単位長さ当たりのエネルギー蓄積密度等の性能面からの評価のみならず、巻線機械による実機の製作性をも考慮した総合評価により、ピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ 、の場合が中規模SMES用電磁力平衡コイルの最適解であることを示す。

2. 電磁力平衡コイル

電磁力平衡コイルの概念は仮想変位の考え方をを用いて、

次のように説明できる(7)。多極ヘリカル巻コイルにおいて、トロイダル磁界とポロイダル方向電流成分によって発生する大半径方向の電磁力は、トロイダル磁界が大半径にほぼ反比例するため、ポロイダル方向に沿って一周積分すると、全体として装置の中心に向かう向心力になる。この向心力をトロイダル方向電流成分によるフープ力で相殺することにより大半径方向の電磁力平衡が得られる。簡単のため、大半径 R_0 、小半径 a でポロイダル方向に Np 、トロイダル方向に Nt 回巻いているトーラス型多極ヘリカルコイルを考える。このコイルの自己インダクタンス L は、ポロイダル方向電流成分による等価インダクタンス L_p とトロイダル方向電流成分による等価インダクタンス L_t の和によって表され、ポロイダル方向電流分布がトロイダル角に対して一様でかつアスペクト比 $A (=R_0/a)$ が充分大きい場合

$$L = L_p + L_t \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$L_p = \mu_0 N p^2 (R_0 - \sqrt{R_0^2 - a^2}) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$L_t = \mu_0 N t^2 R_0 (\ln 8 R_0 / a - 2) \quad \dots \dots \dots (3)$$

と求められる。但し、 μ_0 は真空の透磁率である。

このとき大半径方向の電磁力が平衡する条件は

$$\frac{\partial}{\partial R_0} \left(\frac{1}{2} L I^2 \right) \Big|_{I=\text{const.}} = 0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

である。コイルの総エネルギーが大半径 R_0 に対して極小値をとる点があり、そこが平衡点である。ポロイダル方向の巻数 Np とトロイダル方向の巻数 Nt の比をピッチ数 ρ と定義すると大半径方向電磁力の平衡は(4)式より、アスペクト比 A を用いて次のように表される。

$$\rho = Np / Nt = \{ (\ln 8A - 1) / (A / \sqrt{A^2 - 1} - 1) \}^{1/2} \quad \dots \dots (5)$$

3. 装置規模の決定

電磁力平衡コイルを用いたSMES装置(FBC-SMES)の最適化を行なうにあたり、装置の規模によって設計・製作上の制約条件が異なってくるのでまず装置の規模を決定する必要がある(3)、(12)。本論文では、現在検討の中心となりつつある多目的・中規模SMES(1MWh級)を選び、具体的な装置規模を以下のような考え方で決定した(10)、(11)、(12)。

〈3. 1〉 蓄積エネルギー／装置の大きさ／最大磁界

FBC-SMESの蓄積エネルギーは核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のヘリカルコイルの蓄積エネルギーが約1GJである(13)ことより、LHDから類推可能な範囲として1MWh級(3.6GJ)とした。但し、正確な蓄積エネルギー値は後述の最適化によって決まる。装置の大半径はLHDの大半径3.9mを参考に $R_0=5\text{m}$ とした。小半径 a はピッチ数 ρ により(5)式より決まる。最大磁界もLHDのヘリカルコイルの最大磁界が6.9Tであることから、本論文で検討する電磁力平衡コイルの最大磁界は7Tとした。以上の検討より、これから最適化計算を行なう多目的・中規模FBC-SMESの装置規模は表1の通りとする。

表1 FBC-SMESの装置規模

Table 1. Key parameters of FBC-SMES.

大半径 R_0	5 m
最大磁界 B_{max}	7T
蓄積エネルギー E	1MWh級

〈3. 2〉 超電導線材

蓄積エネルギーが1MWh級と大きく、超電導線にかかる電磁力が巨大になることより、冷却方式は機械的に強固な強制冷却方式とする。また、超電導線材は臨界電流密度、臨界磁界の観点からも現在世界最高レベルにあるLHDの1Vコイル用の超電導体を参考に表2に示すケーブル・イン・コンジット・タイプ・ケーブル(CICC)とした(14)、(15)、(16)。但し、コンジットの厚みは後述のFBC-SMESの最適化で決まる超電導線材に働く電磁力を全てコンジットで受け持たせるのか、あるいはコンジットとコイルの支持構造物等で分担して受け持つのかで全く異なってくる。本論文では最適化の制約条件として臨界磁界を優先するので、臨界磁界に対応する電磁力は全てコンジットで受け持つものとして、その張力に耐えるようコンジットの厚みをあとから決めるものとする。FBC-SMESの実用化にとって、電磁力をどのように分担・支持するかは設計・製作上極めて重要な問題であり(17)、FBC-SMESの実用化に向けて取り組まなければならない今後の重要な課題である。

表2 超電導体の仕様

Table 2. Specifications of superconducting cable.

タイプ	Cable-in-conduit
材質	Nb-Ti
定格電流 : (KA)	20.8
臨界電流 : (KA)	51.7 at 7T
コンジットの内寸法 : (mm)	17×21.6

〈3. 3〉 コイル極数

核融合実験装置ではプラズマ・エッジでのトロイダル磁界のリップルを0.5%程度に抑える条件より、コイル極数 n_p (コイル極数 $n_p \times$ ピッチ数 ρ がトロイダル磁界コイルの個数に相当する)はある数以上でなければならない。一方、SMESではそのような物理的な制約条件はないが、システム運用上、以下の点を考慮してコイル極数を決める必要がある。すなわち、コイルの1極がクエンチしたときにもシステムの機能ある程度維持する為には蓄積エネルギーの変化量のある値以下にする必要がある。電流値を一定とするとコイルの蓄積エネルギーはコイル極数 n_p の2乗に比例するので1極がクエンチしたときのコイル残存エネルギーを例えば70%以上とすると

$$\{(n_p - 1) / n_p\}^2 \geq 0.7 \quad \dots \dots \dots (6)$$

となる。(6)式よりコイル極数 n_p は $n_p \geq 7$ となる。

一方、コイルの1極がクエンチした時に当該コイルの電流を急速に減磁すると健全側のコイル電流は電磁誘導により増加する。この値を過電流保護の整定値以下に抑える条件からもコイル極数はある値以上にする必要がある。簡単の為にコイルの各極のカップリングを1とするとコイルの1極がクエンチしたときの健全側コイルの過電流レベルは $n_p/(n_p-1)$ で与えられる。例えば過電流の保護レベルを115%とすると

$$n_p/(n_p-1) \leq 1.15 \quad \dots \dots \dots (7)$$

となる。(7)式よりコイル極数 n_p は $n_p \geq 8$ となる。

以上のシステム運用上の観点より、コイル極数 n_p を8とする⁽¹²⁾。

4. 最適化計算

以上の検討により1MWh級中規模・多目的SMES装置の概要、すなわち、大半径 R_0 、最大磁界 B_{max} 、コイル極数 n_p が決定したので、次に大半径 R_0 を一定としてピッチ数 ρ を2、3、4、5と順次増やして行き、その時(5)式を満たす、すなわち電磁力平衡状態でのアスペクト比 $A=R_0/a$ を求め、大半径方向電磁力の大きさ、超電導コイルに貯えられるエネルギー、超電導線材の長さ、超電導線材の単位長さ当たりの蓄積エネルギー密度を比較検討し、1MWh級中規模・多目的SMESの最適解を求める。大半径 R_0 一定のもとでピッチ数 ρ を2、3、4、5と増加させたときの装置の外観を図1に示す。電磁力平衡状態ではアスペクト比 $A=R_0/a$ は(5)式により一意に決まり、FBC-SMES装置はピッチ数の増加にしたがって図1に示すようにドーナツの環状部が順次細くなる形状の装置になる。

図1 ピッチ数 ρ をパラメーターとしたFBC-SMES概観
Fig.1. Configurations of the FBC-SMES ($\rho=2$, $\rho=3$, $\rho=4$, $\rho=5$).

図1には後述の電磁力の検討(図3～図6)で比較の対象となる従来の巻線方式であるヘリカルコイル(HC)トロイダル磁界コイル(TFC)も参考の為合わせて示した。

〈4. 1〉計算手法

図2に示すFBC-SMESの設計フローチャートにしたがって電磁力平衡コイルの最適化計算について説明する。まず、前節で述べた装置の大きさ R_0 、最大磁界 B_{max} 、超電導線材の制約条件(I_0 , σ_{max})を与える。次にアスペクト比 ρ を決めると(5)式を満たす小半径 a が一意的に決まる。 $\rho=2$ の場合を例に、具体的な計算手順について、詳しく述べる。ピッチ数 $\rho=2$ を与えると、(5)式により電磁力平衡となるアスペクト比が $A=1.45$ と決まり、大半径 $R_0=5\text{m}$ は固定としたので小半径が $a=3.45\text{m}$ と決まる。超電導線材の定格電流 $I_0=20.8\text{kA}$ を与える。また最大磁界を $B_{max} \leq 7\text{T}$ として、大半径方向電磁力の平衡、転倒力の低減、の制約条件のもとで起磁力(A/T)を増やして行き、超電導体の許容応力 σ_{max} を 400MPa ($\sigma_{max} = 1/3\sigma_u$, $\sigma_u=1200\text{MPa}$, SUS316L)として、この制約条件を超えないように超電導体のコンジットの厚さを増加させ $B_{max} \leq 7\text{T}$ 、になったところをFBC-SMESの最適解とした。このときの小半径方向電磁力のポロイダル角に対する分布、蓄積エネルギー、超電導線の長さを求め、超電導線材の単位長さ当たりのエネルギー蓄積密度を求めた。

以下同様にピッチ数 $\rho=3$ 、 $\rho=4$ および $\rho=5$ の場合についても同一の手法で最適化計算を行った。

図2 FBC-SMESの設計フローチャート
Fig.2. Flow chart for FBC-SMES design.

〈4. 2〉計算結果及び比較検討

(1) 小半径方向電磁力分布 先ず、ピッチ数 $\rho=2$ 、アスペクト比 $A=1.45$ の場合の計算結果を図3に示す。図3には比較の為電磁力平衡コイル(FBC)と同一ディメンジョンのトロイダル磁界コイル(TFC)及びヘリカルコイル

(HC) の小半径方向電磁力も示した。図3に示す通り、FBCはコイル内側（ポロイダル角 $\theta = 135^\circ \sim 225^\circ$ ）においてTFC、HCと比較して小半径方向電磁力が大幅に低減され、コイル最内周部（ $\theta = 180^\circ$ ）においては 2.65×10^5 N/mとTFC、HCの小半径方向電磁力の約1/50まで大幅に低減されていることがわかる。

図3 小半径方向電磁力のポロイダル角分布 ($\rho=2$)
Fig. 3. Minor radius direction Electromagnetic force VS. Poloidal angle ($\rho=2$).

次に、図4に示すピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ の場合の計算結果について考察する。図4に示すピッチ数 $\rho=3$ の場合も定性的には図3に示すピッチ数 $\rho=2$ の場合と同様である。ただし、小半径方向電磁力の低減の度合はピッチ数 $\rho=2$ の場合に比べて少なくなり、コイル最内周部（ $\theta = 180^\circ$ ）において 2.13×10^6 N/mとなり、TFC、HCと比較してその低減度は約1/5となる。

図4 小半径方向電磁力のポロイダル角分布 ($\rho=3$)
Fig. 4. Minor radius direction Electromagnetic force VS. Poloidal angle ($\rho=3$).

さらにピッチ数を増し $\rho=4$ 、アスペクト比 $A=2.14$ とした場合の計算結果を図5に示す。ピッチ数 $\rho=4$ の場合はさらに小半径方向電磁力の低減度が少なくなり、コイル最内周部においてその値は 3.05×10^6 N/mとなりTFC、HCの約1/3

となる。

図5 小半径方向電磁力のポロイダル角分布 ($\rho=4$)
Fig. 5. Minor radius direction Electromagnetic force VS. Poloidal angle ($\rho=4$).

さらにピッチ数を増加させた $\rho=5$ 、 $A=2.49$ の場合の小半径方向電磁力のポロイダル角分布は図6に示すようにより平坦に又TFC、HCとの差異も少なくなる傾向にある。コイル最内周部における電磁力の低減度は約1/2であるが工学的にはまだ充分大きなメリットが得られる。

図6 小半径方向電磁力のポロイダル角分布 ($\rho=5$)
Fig. 6. Minor radius direction Electromagnetic force VS. Poloidal angle ($\rho=5$).

ピッチ数 ρ をパラメーターとした電磁力平衡コイル (FBC) の小半径方向電磁力のポロイダル角分布を図7にまとめて示す。図7より電磁力の低減度はピッチ数 $\rho=2$ において最も顕著であり、ピッチ数 ρ が3、4、5と増加するにしたがってその低減度は小さくなることがわかる。また、小半径方向電磁力のポロイダル角分布はピッチ数 ρ の増加にしたがってより平坦になることがわかる。しかし、いずれの場合においても小半径方向電磁力はコイル最内周部（ $\theta = 180^\circ$ ）において最小となり、コイル製作上の観点からはいずれの場合でも非常に大きなメリットがある。

図7 ピッチ数 ρ をパラメーターとした小半径方向電磁力のポロイダル角分布

Fig. 7. Minor radius direction Electromagnetic force VS. Poloidal angle ($\rho=2, \rho=3, \rho=4, \rho=5$).

このようにピッチ数 ρ を2から順次増加させ、その各々の場合の小半径方向電磁力を比較検討(図3～図7)した結果、図7に示すように、ピッチ数 $\rho=2$ 、アスペクト比 $A=1.45$ の場合の小半径方向電磁力はほぼ全ポロイダル角において最小となるばかりでなくコイル最内周部 ($\theta=180^\circ$) において、その絶対値の低減度が最も顕著になり、電磁力低減の観点のみからは $\rho=2, A=1.45$ の場合が最も優れていることが分かる。

(2) 蓄積エネルギー 電磁力平衡コイルのピッチ数 ρ をパラメーターとし、大半径方向電磁力の平衡条件のもとで最適解を求め、そのときのFBC・SMES装置の蓄積エネルギーをピッチ数 ρ に対して表すと図8のようになる。同図からも明らかなように中規模・多目的FBC・SMESにおいてはピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ で蓄積エネルギーは最大値を持つことが分かる。

図8 蓄積エネルギー対ピッチ数

Fig. 8. Stored energy VS. Pitch.

(3) 超電導線の長さ 電磁力平衡コイルの超電導線の長さをピッチ数 ρ に対して表すと図9のようになる。同図からも明らかなように1MW級FBC・SMESにおいてはピッチ

数 $\rho=2$ の場合が必要な超電導線の長さは最も短く、ピッチ数 $\rho=3$ で超電導線の長さは最大となり、さらにピッチ数 ρ を増加させると、必要な超電導線の長さも順次短くなる事が分かる。

図9 超電導線の長さ対ピッチ数

Fig. 9. Superconductor Length VS. Pitch.

(4) 超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギー

一方、超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギーをピッチ数 ρ に対して表すと図10のようになる。同図からも明らかなように、FBC・SMESの超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギー密度はピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ で最大値をとることが分かる。

図10 超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギー対ピッチ数

Fig. 10. Per unit length stored energy VS. Pitch.

以上の結果をまとめて図11に示す。SMES装置にとって蓄積エネルギーの絶対値そのものが大きいことは非常に大きなメリットであるが、それ以上に超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギーは装置の経済的な設計・製作上の観点より最も重要なパラメーターであり、この観点からは超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギーが最大となるピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ のケースがFBC・SMESの最適解となることが分かる。

図11 電磁力平衡コイルの蓄積エネルギー (E)、超電導線の長さ (L)、超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギー (E/L) 対ピッチ数

Fig.11. Stored energy, Superconductor length and per-unit length stored energy of the superconductor VS. Pitch.

5. 製作性からの考察

電磁力平衡コイルを用いた超電導エネルギー貯蔵装置 (FBC-SMES) は大半径方向の電磁力が平衡するだけでなく、トロイダル磁界コイル (TFC) 及びヘリカルコイル (HC) と比較して、小半径方向電磁力そのものも大幅に低減される巻線方式であるが、ヘリカルコイルゆえの製作性すなわち“巻き易さ”の点にやや問題がある。そこで、ピッチ数 $\rho=2$ とピッチ数 $\rho=3$ のいずれの場合が装置として優れているか、製作性の観点からの考察を加えることにする。

図12にピッチ数 $\rho=2$ とピッチ数 $\rho=3$ の場合のFBC-SMESの平面図、すなわち装置を上から見た場合のコイルの1極分の軌道と巻棒の関係を示す。同図において巻棒の上側にあるコイルを白抜きで、また下側にあるコイルは色付きで示した。図12に示すようにピッチ数 $\rho=2$ のコイル軌道はコイル最内周部 ($\theta=180^\circ$) で巻棒に対しての曲率が反転し、張力を掛けながら超電導線を巻棒に巻き付けて行く従来の巻線方式ではコイルが巻棒から離れてしまい、従来の巻方では巻けない。一方、ピッチ数 $\rho=3$ のコイル軌道はコイル最内周部 ($\theta=180^\circ$) でも巻棒に対して曲率は反転せず、張力を掛けながら超電導線を巻棒に巻き付けて行く従来の巻線方式で巻くことができる。FBC-SMESの実用化の為に巻線機械の開発が必要不可欠であり、ピッチ数 $\rho=2$ の場合のようにコイル軌道がコイル最内周部で巻棒に対して負の曲率を持つコイルの巻線機械の開発は非常に困難である。一方、ピッチ数 $\rho=3$ のコイルは巻棒に対して常に正の曲率を持ち、張力を掛けながら超電導線を巻棒に巻き付けて行く従来の巻線方式で巻けるので、巻線機械の開発も比較的容易である。以上、実用化に向けた製作性の観点からピッチ数 $\rho=2$ とピッチ数 $\rho=3$ の場合を比較すると、ピッチ数 $\rho=3$ の場合の方がより優れた解と言える。

図12 コイル軌道と巻棒の関係

Fig.12. Coil trace VS. winding structure.

6. まとめ

電磁力平衡コイルを用いた1MWh級中規模・多目的SMES (FBC-SMES) の最適化計算を行った結果、小半径方向電磁力はピッチ数 $\rho=2$ のとき最少となり、コイル最内周部において従来の巻線方式 (TFC, HC) に比べ約1/50と大幅に低減される。ピッチ数の増加にしたがってその低減度は減少するがピッチ数 $\rho=3$ の場合で従来の巻線方式に比べて約1/5、ピッチ数 $\rho=4$ の場合で約1/3、ピッチ数 $\rho=5$ の場合でも約1/2と工学的には充分意味のある値に低減されている。一方、蓄積エネルギー及び超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギーはピッチ数 $\rho=3$ のとき最大となることが分かった。更に巻線機械による実機の製作性の面からは超電導線に張力を印加しながら巻棒に巻きつけていく従来の巻線方式が適用可能なピッチ数 $\rho=3$ 以上が望ましいことも分かった。以上、小半径方向の電磁力の低減、蓄積エネルギー、超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギー、製作性の観点より総合評価するとピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ の場合がFBC-SMESの最適解であることが分かった。以上の結果を表3及び図13にまとめて示す。

表3 最適化されたFBC-SMESの諸元

Table3. Optimized parameters for FBC-SMES.

大半径: R (m)	5.0
小半径: a (m)	2.79
定格電流: I_0 (kA)	20.8
最大経験磁界: B_{max} (T)	7.0
超磁力 AT (MAT)	81.4
最内周部小半径方向電磁力: (MN/m)	2.13
コイル引張応力: σ (MPa)	400
蓄積エネルギー: E (GJ)	5.09
超電導線の長さ: L (km)	75.3
超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギー E/L : (MJ/km)	67.6

図13 最適化されたFBC-SMESの概観図

Fig.13 Configuration of the optimized FBC-SMES.

7. むすび

電磁力平衡コイルを1MWh級中規模・多目的超電導エネルギー貯蔵装置（FBC-SMES）に適用し、ピッチ数 ρ をパラメータとした最適化計算及び製作性の検討を行い、以下の成果を得た。

- (1) FBC-SMESの小半径方向電磁力はピッチ数 $\rho=2$ 、アスペクト比 $A=1.45$ のとき最小となることが分った。
- (2) FBC-SMESの小半径方向の電磁力の低減度はピッチ数 $\rho=2$ において最も顕著であり、ピッチ数 ρ の増加にしたがって、その低減度は順次小さくなるが、いずれの場合においても従来の巻線方式（TFC、HC）に

比べて充分低減されており、工学的に大きなメリットがあることが分かった。

- (3) FBC-SMESの蓄積エネルギーはピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ のとき最大となることが分った。
- (4) FBC-SMESの超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギーはピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ のとき最大となることが分った。
- (5) ピッチ数 $\rho=2$ のコイル軌道はコイル最内周部で巻棒に対する曲率が反転し、張力を掛けながら超電導線を巻棒に巻き付けて行く従来の巻線方式では巻けないことが分った。
- (6) ピッチ数 $\rho=3$ のコイル軌道はコイル最内周部でも巻棒に対して曲率は反転せず、張力を掛けながら超電導線を巻棒に巻き付けて行く従来の巻線方式で巻くことができることが分かった。

以上、ピッチ数 ρ をパラメータとしたFBC-SMESの最適化を行った結果、小半径方向電磁力はピッチ数 $\rho=2$ のとき最小となり、電磁力平衡コイルの特徴が最も顕著に現れるが、コイル最内周部で曲率が反転し、超電導線に張力を掛けながら巻棒に巻き付けて行く従来の巻線方式では巻けず、製作性に問題があることが分った。一方、ピッチ数 $\rho=3$ のときは蓄積エネルギー及び超電導線の単位長さ当たりの蓄積エネルギーが最大になるだけでなく、コイル軌道は巻棒に対して常に同一方向の曲率を持ち、張力を掛けながら超電導線を巻棒に巻き付けて行く従来の巻線方式で巻けるので、巻線機械の開発も比較的容易であることが分った。以上の総合評価より、電磁力平衡コイルを1MWh級中規模・多目的超電導エネルギー貯蔵装置に適用した場合の最適解はピッチ数 $\rho=3$ 、アスペクト比 $A=1.79$ の場合に得られることを示すことができた。

今後の課題として現在開発中の巻線機械を完成させ、より精度の高い実験装置を設計・製作し、励磁試験を行い、実機の開発に向けたデータの収集に努め、そのデータに基づく実機の工学設計を行い、電磁力平衡コイルを用いた超電導エネルギー貯蔵装置（FBC-SMES）の実用化に貢献したいと考えている。

（平成11年4月21日受付、平成11年8月5日再受付）

文 献

- (1) A. Ter-Gazarian, ENERGY STORAGE FOR POWER SYSTEMS, IEEE NERGY SERIES6 ISBN 0 86341 2645
- (2) W. Hassenzahl, "SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE", IEEE Trans. Magn., vol. 25, No. 2, pp. 750-758, MARCH 1989
- (3) C. A. Luongo, "Superconducting Storage Systems: An Overview", IEEE Trans. Magn., Vol. 32, pp. 2214-2223, 1996
- (4) H. P. Furth, S. C. Jardin, D. B. Montgomery, "Force-Free Coil Principles Applied to High-

Temperature", Superconducting Materials, IEEE Trans. On Magn. Vol.24, No.2, March 1988

- (5) T. Shintomi, T. Nakano, "DESIGN STUDY OF TOROIDAL 6MWH SMES FOR MAGLEV", The Proceeding of the IEA Symposium on USE OF SUPERCONDUCTIVITY IN ENWERGY STORAGE, Karlsruhe, Germany, 25-27 October, 1994
- (6) Dennis W. Lieurance, Global Cost Optimization of 1-10MWh Toroidal SMES, IEEE Trans. App. Super. vol. 7, No. 1, pp. 14-17, MARCH 1997
- (7) 佐藤義久、京藤誠、近藤潤次、花井哲、嶋田隆一、浜島高太郎、"超電導電磁力平衡コイルの実験"、電学論D、118巻3号、平成10年 (pp.402-409)
- (8) Y. Sato, J. Kondoh, R. Shimada, M. Kyouto, S. Hanai, T. Hamajima "Experiment of the Force-balanced coil for Superconducting magnetic energy storage", 15th International Conference on Magnet Technology, Oct. 20-24, 1997, Beijing, China
- (9) 近藤潤次、藤田崇、筒井広明、佐藤義久、飯尾俊二、嶋田隆一、"電磁力平衡コイルのトカマク装置への適用"、電学論B、118巻2号、平成10年 (pp.191-198)
- (10) Y. Sato, S. Nomura, T. Osaki, J. Kondoh, R. Shimada, T. Hamajima "Optimization of Force-balanced coil for SMES", 15th International Conference on Magnet Technology, Oct. 20-24, 1997, Beijing, China
- (11) 佐藤義久、野村新一、大崎朋也、近藤潤次、浜島高太郎、嶋田隆一、"SMES用電磁力平衡コイルの最適化" 1997年度低温工学・超電導学会講演概要集、p139 (1997)
- (12) 佐藤義久、野村新一、大崎朋也、近藤潤次、浜島高太郎、嶋田隆一、"超電導エネルギー貯蔵装置用電磁石の巻線方式の比較検討"、電学論D、118巻10号、平成10年 (pp.1157-1164)
- (13) 本島修、"大型ヘリカル装置計画"、低温工学、Vol. 32, NO. 11, pp. 540-547 (1997)
- (14) 高畑一也、"ポロイダルコイルの製作"、プラズマ・核融合学会誌、Vol.72, No.12, PP1334-1339 (1996)
- (15) 佐藤隆、"大型ヘリカル装置の超伝導システム概要"、低温工学、Vol.32, No.11, pp. 548-552 (1997)
- (16) 今川信作、"超伝導ヘリカルコイルの開発と製作"、低温工学、Vol. 32, NO. 11, pp.553-562 (1997)
- (17) 西村 新、今川 信作、田村 仁 "大型ヘリカル装置の極低温構造材料と構造設計" 低温工学、Vol.1.32, No.11 (1997)、pp.586-595

佐藤 義久

(正員) 1950年4月21日生。76年3月東京工業大学大学院修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。主として、核融合、加速器、超電導応用装置の技術開発に従事。98年3月東京工業大学大学院博士課程創造エネルギー専攻修了。現在、(株)東芝 電力システム社 電力技術管理部部長。プラズマ・核融合学会、低温工学会会員。工学博士

大崎 朋也

(正員) 1975年1月31日生。97年3月立教大学理学部物理学科卒業。97年4月東京工業大学大学院修士課程創造エネルギー専攻入学。主として、プラズマ核融合、超電導、電力工学の研究に従事。99年3月東京工業大学大学院修士課程修了。同年4月日本鋼管(株)入社現在に至る。

野村 新一

(学生員) 1973年6月20日生。96年3月明治大学理工学部電気工学科卒業。98年3月東京工業大学大学院修士課程修了。同年4月東京工業大学大学院博士課程入学、現在に至る。主として、プラズマ核融合、超電導、電力工学の研究に従事。プラズマ・核融合学会会員。

近藤 潤次

(正員) 1972年2月6日生。95年3月東京工業大学大学院修士課程終了。98年3月東京工業大学大学院博士課程修了、同年4月電総研入所、現在に至る。主として、核融合、大電流、超電導工学の研究に従事。プラズマ・核融合学会、日本原子力学会会員。工学博士

浜島高太郎

(正員) 1948年2月7日生。77年3月東京工業大学大学院博士課程終了。同年4月(株)東芝入社。主として、核融合装置、超電導応用装置の技術開発に従事。99年4月山口大学工学部電気・電子工学科教授、現在に至る。IEEE、日本物理学会、低温工学会会員。工学博士。

嶋田 隆一

(正員) 1948年1月31日生。75年3月東京工業大学大学院博士課程終了。同年4月、日本原子力研究所入所、核融合の研究に従事。88年4月東京工業大学工学部電気電子工学科助教授、90年3月教授、90年5月原子炉工学研究所 教授、現在に至る。主として、大電流工学、核融合プラズマの制御、大電力システム、電力貯蔵の研究に従事。工学博士。