

高温超電導線材を用いたSMES用コイルの設計

56216 橋本 昌樹

(指導教員 大崎 博之 教授)

Key Words : SMES, superconducting technology, HTS-coil, cost-reduction

1. はじめに

超電導磁気エネルギー貯蔵システム（以下SMES：Superconducting Magnetic Energy Storage）は、電力の貯蔵効率がよく貯蔵・放出時の応答が速いなどの特徴を有しているため、電力の変動負荷補償や分散型電源を含んだ電力供給システムにおいて系統安定化などの役割が期待されている。これまでもSMESは電力の高品質性が要求される半導体産業等において、落雷などで一時的に電圧が低下する瞬時電圧低下(瞬低)を補償する瞬低対策用、系統末端における系統電圧低下時の電圧回復用などに低温超電導体を利用したものが実用化されている。

このように電力貯蔵装置として大容量・低コスト化の期待されるSMES（超電導磁気エネルギー貯蔵装置）用コイルについて高温超電導線材を用いた設計を行った。具体的には高温超電導線材を用いたSMESコイルの設計コードを作成し、それを用いてBi2223系線材及びY系線材といった線材についての設計・検討を行った。

2. 方法

高温超電導SMES用コイルについて、最大貯蔵容量100MJ、輸送を考慮して最大コイル外径3mとしてコイルを設計した。設計に当たっては各コイル形状ごとの印加磁界、コイルインダクタンス、高温超電導線材電流特性、周方向フープ応力等を計算によって導くことで、機械設計と電気設計を行い、流す電流に必要な線材量やフープ応力に耐えるために必要な補強材の量を求め、コイル形状内に収まるように設計した。また、漏洩磁界についても考慮した。線材の電流密度特性は印加する磁界の角度依存性を考慮したパーコレーションモデルに基づいた式[1]より、磁界計算についてはビオ・サバルの法則より導出した式を数値積分[2][3]して、応力計算は最大経験磁界を内周磁界、外周磁界を0として線形減衰を仮定した電磁力印加圧肉円筒モデルとして計算している。インダクタンス及び漏洩磁界の導出は磁界計算に準じるが、自己インダクタンスには近似式[3]を、トロイダルコイル相互インダクタンスについてはコイルを線素分割して線素間インダクタンスとして[2]、ソレ

ノイドコイル、マルチポールソレノイドの相互インダクタンスはコイルに鎖交する磁界を数値積分することによって導出している。

設計条件として、温度・線材・補強材の他に、コイル間隔など様々なパラメータを変動させての繰り返し設計を行うため、本設計コードでは、簡略化した応力計算とすること、先に計算に時間の掛かる磁界・インダクタンス計算を済ませ、設計時にそのデータを参照という形にすること、の二点で繰り返し計算時の積分計算を避け高速化を図った。設計したコードのフローチャートを図1に示す。

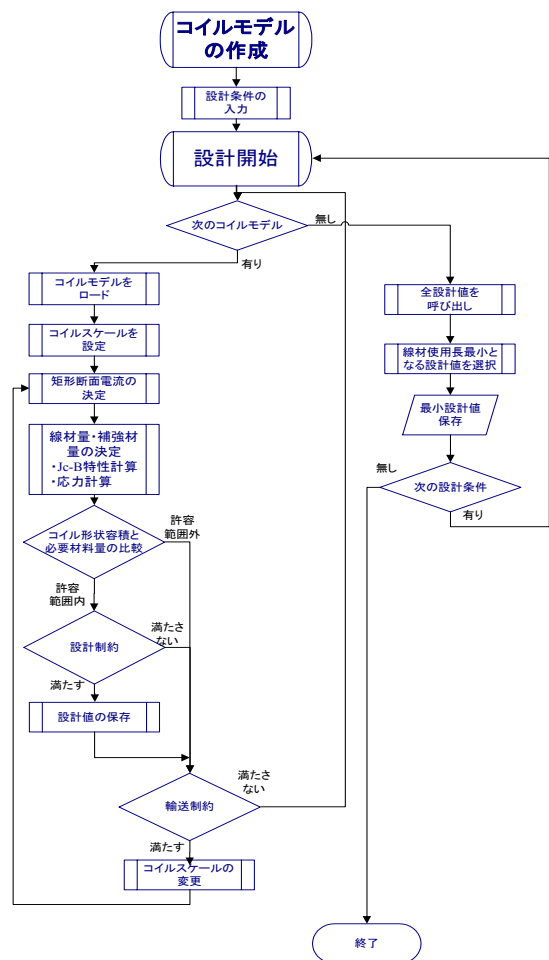


図1 計算の流れ

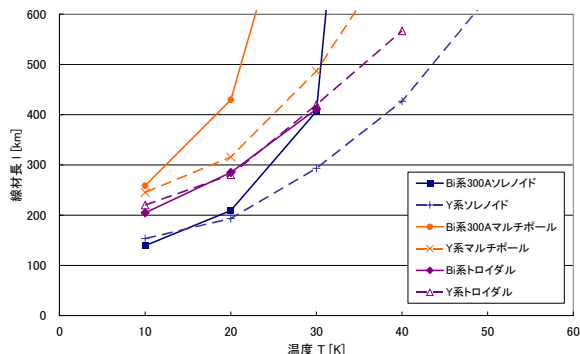


図2. コイル形状や温度と線材長の関係

3. 結果と考察

線材にBi2223系線材及びY系線材を、補強材は設計限界として760MPaとした高窒素SUS316LNをそれぞれ使い、10K~50Kの温度範囲で実際に設計を行った。コイル形状としてはシンプルなソレノイドコイル、要素ソレノイドコイル4つを隣接するコイルの極が反転するように設置したマルチポールソレノイド、ドーナツ状に要素ソレノイドコイルを配置したトロイダルコイルの3通りを考えた。設計結果として使用した線材長の比較を図2に、温度20Kの場合の設計値とその形状を表1、図3、図4、に示す。

表1 100MJ 20K におけるSMESコイル設計例

形状 線材	ソレノイド		マルチポール		トロイダル		
	Bi系 300A級	Y系	Bi300A 級	Y系	Bi系 200A級	Y系	
使用線材長 [km]	209	193	430	316	285	280	
最大経験磁界 [T]	16	12	17	17	14	14	
臨界電流密度 J_c [10 ⁹ A/m ²]	0.85	20.08	0.54	17.69	0.95	24.00	
J_c 規定磁界 [T]	7.4	8.1	10.7	11.8	13.6	13.4	
J_c 規定磁界角度 [°]	49	66	57	60	6.2	6.5	
インダクタンス [μ H]	1.08E+00	2.34E+00	3.01E+00	3.38E+00	7.82E-05	5.28E-05	
組み 合わせ コイル	要素コイル数 [m]	1	1	4	4	24	20
	最大外径 [m]	2.83	2.64	3.00	2.80	2.88	2.92
要素 コイル	コイル間隔 * [m]			0.060	0.056	0.848	0.834
	全体積 [m ³]	1.245	0.682	0.833	0.641	0.663	0.650
	平均半径 [m]	0.786	1.017	0.431	0.434	0.424	0.417
	軸長 [m]	0.236	0.203	0.258	0.260	0.037	0.036
	幅 [m]	1.258	0.610	0.345	0.260	0.339	0.417
中心磁界 [T]		14	6	12	11	9	9
	矩形断面電流 [MA]	13.63	9.25	8.15	7.69	1.60	1.95
	周方向フープ応力 [MPa]	678	647	494	566	543	590
補強材構成比	5.30	2.53	1.05	1.03	1.46	1.32	

*トロイダル大半径/マルチポールコイル間隔

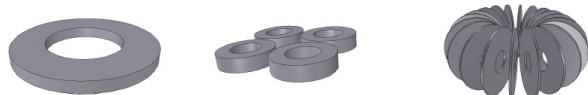


図3 20KにてY系を用いた場合の形状



図4 20KにてBi系を用いた場合の形状

それぞれ、ソレノイドコイル(左)、マルチポールソレノイド(中央)、トロイダルコイル(右)

なお、漏洩磁界も実際にSMESを工場などへ設置す

る際、重要になる。温度20K, Y系線材を用いて設計した時の漏洩磁界の尺度として5 Gauss ($5 \cdot 10^{-4}$ T) 以下となる地点を5 Gaussラインとし、これがコイル中央から半径何mまでとなるかを次表2に示した。

表2 漏洩磁界の比較

形状	トロイダルコイル			マルチポールソレノイド	ソレノイドコイル
	要素コイル数	6	20		
5Gauss Line[m]	4.22	2.05	1.99	6.32	18.4

以上の各種設計を行い次のような知見を得た。

- Bi系では角度依存が大きく効いてくるため、トロイダルコイル形状が良い。Y系においても線材長はトロイダルコイルが総じて少ないものの、トロイダルコイルは要素コイル数が多く、全体の機械設計もマルチポールコイル以上に難しくなる可能性もあり、さらに詳細な設計より判断する必要がある。
- 漏洩磁界の点では、トロイダルコイルが優れており、要素コイル数を増やすほど漏洩は低くなる。一方、マルチポールソレノイドも十分に現実的な値である。
- 設計結果はY系線材の高温域での強さが発揮される結果であったが、Bi系も低温域においては十分に産業応用の可能性がある。

4. 結論と今後の課題

繰り返し計算に適した高温超電導SMES用コイルの設計コードを開発し、実際にBi系線材及びY系線材を用いて設計し、比較を行い検討した。各コイル形状における漏洩磁界を見た。

一部で高磁界設計を出してしまったため、詳細な応力解析にて改良を検討する必要がある。今回提示したコイル設計に、さらに用途を特定して冷却や電力変換も考慮し、高温超電導SMESシステム全体設計としたい。

参考文献：

- [1] T. Kiss, M. Takeo : 「Angular dependence of critical current properties in YBCO coated tape under high magnetic field up to 18 T」, Physica C, Vol. 378-381, No. 2, pp. 1113-1117(2002)
- [2] 吉田清, 奥野清 : 「空心コイル電磁計算プログラム: COIL」, JAERI-Data/Code 2003-014(2003)
- [3] 柁川一弘, 海保勝之 : 「矩形断面円筒形コイル用自己インダクタンス計算式の適用範囲について」, 低温工学, Vol. 30, No. 7, pp. 324-332.(1995)