超電導磁気エネルギー貯蔵用電磁力平衡コイルの実験

正員 佐藤 義久 (東工大) 非会員 京藤 誠 (東芝)
 学生員 近藤 潤次 (東工大) 非会員 花井 哲 (東芝)
 正員 嶋田 隆一 (東工大) 正員 浜島高太郎 (東芝)

Experiment of Force-balanced coil for Magnetic Energy Storage
 Yoshihisa Sato, Member, Junji Kondoh, Student-member,
 Ryuichi Shimada, Member (Tokyo Institute of Technology),
 Makoto Kyouto, Non-member, Satoshi Hanai, Non-member, Takataro Hamajima, Member (Toshiba)

Higher Magnetic field is of great advantage to Superconducting Magnetic Energy Storage because it promises a compact device. However, the serious problem of huge electromagnetic forces caused by high magnetic fields and large coil current, still remains. Electromagnetic stresses, reaching as much as several hundred bars, thus become a major factor in determining whether a large sized strong magnetic field system could be established. In order to solve this problem, we propose the force-balanced coil (FBC) concept that reduces the huge centering electromagnetic forces by balancing it with the hoop forces caused by toroidal current. Then we designed and fabricated a small size superconducting FBC system to demonstrate the FBC concept. It was successfully excited up to near rated current. It is shown that the FBC system has a potential for simplifying the supporting structures and making the facility compact.

キーワード: 電磁力平衡コイル、超電導エネルギー貯蔵、コイルの支持、超電導、強磁界

1. まえがき

超電導磁気エネルギー貯蔵 (Superconducting Magnetic Energy Storage, 以下 SME S と略称) などの強磁界を利用する装置においては、常電導の 3 倍、すなわち 6 T 以上の超強磁界が実現できれば蓄積エネルギー密度が約一桁上昇し、コンパクトで経済的な装置の設計・製作が可能となる。強磁界発生用の超電導線材は高臨界電流密度化、機械的高強度化の方向で急速に開発が進みつつあるが、装置が強磁界を発生する際に付随して発生する数百気圧にも達する電磁力は依然として装置の設計・製作上大きな問題となっている。この巨大な電磁力を支持するための支持構造物 (例えば岩盤) や構造材料が装置の基本設計・サイズを決定する大きな因子とまでなっている⁽¹⁾。

磁気閉じ込め核融合炉においても同様な問題があり、巨大な電磁力を低減するための精力的な検討がなされてきた。H. P. Furth らはトロイダルコイルの小半径方向の電磁力を低減するための無力磁界コイル構成を提案した⁽²⁾。

しかし、SME S では、大半径方向の電磁力のほうが大きく、この構成では問題は解決されない。大半径方向の電磁力を低減する方法の一つとして、ポロイダルコイルとトロイダルコイルを組み合わせたハイブリッド方式が提案された⁽³⁾。

また、ヘリカルコイル配位でも同様に大半径方向の電磁力を低減する方式が提案された⁽⁴⁾。しかし、ヘリカルコイルには転倒力が発生し、その支持構造が依然として問題として残る。三浦らはアスペクト比の小さなトーラス型核融合装置において、大半径方向の電磁力を低減するだけでなく、トーラス内側部の局所的な電磁力を分散する多極ヘリカル巻電磁力平衡コイル (Force-balanced Coil、以下 FBC と略称) を提案した⁽⁵⁾。

SME S はエネルギーを磁気的な形で貯蔵する装置なので、プラズマを閉じ込める核融合装置とは異なり、コイル配位に対する制約が少ない。著者らは多極ヘリカル巻電磁力平衡コイルの概念を更に発展させて、SME S 装置に適用した。SME S コイル配置として、FBC 方式と、トロイダルコイル方式 (TFC) およびヘリカルコイル方式 (HC) を選りこぼしに作用する電磁力低減効果の比較検討を行った。

また、実際に FBC 方式による電磁力低減の有効性を実証するために、超電導小型 FBC 装置を設計・製作し、励磁試験を行い、評価した。

2. 電磁力平衡コイル

<2.1> 電磁力平衡コイルの概念 多極ヘリカル巻電磁力平衡コイルの概念は次のように説明できる。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に、ポロイダル方向に沿って一周すると、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。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、以下のように説明することができる。簡単のため、大半径 R_0 、小半径 a の円形トーラスにトロイダル方向に全電流 I が流れ、かつ N 回ポロイダル方向に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

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

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

$$L_t = \mu_0 R_0 (\log \frac{8R_0}{a} - 2) \quad \dots \dots \dots (3)$$

と求められる。

ただし、 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

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

である。総インダクタンス L は R_0 に対して極小な点がありそこが平衡点である。その点は巻数 N とアスペクト比との関係では

$$N = \{ (\log 8A - 1) / (A/\sqrt{A^2 - 1} - 1) \}^{1/2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

となり、概略の巻数 N とアスペクト比との関係が得られる⁽⁵⁾。 N は整数とはならないので詳細は次節で述べるように巻線ピッチ角をポロイダル方向に変化させてつり合わせる。

<2.2>コイル導体の中心軌跡 大半径 R_0 、小半径 a 、楕円度 K 、三角度 δ (断面の頂点と断面中心とのずれを表す)のD型断面をもつ軸対称なトーラス表面上に参照点 $P_i(r_i, \theta_i, z_i)$ を図1に示すように n 個与え、各参照点 P_i の座標は

$$r_i = R_0 + a \cos(\theta_i + \delta \sin \theta_i) \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$z_i = aK \sin \theta_i \quad \dots \dots \dots (7)$$

とする。総ポロイダル方向電流を I_p とすると各参照点でのポロイダル方向電流密度 J_{pi} は

$$J_{pi} = I_p / 2\pi r_i \quad \dots \dots \dots (8)$$

と表される。一方、各参照点でのトロイダル方向電流密度 J_{ti} は赤道面に対して上下対称なコイルの場合4次までの自由度をもったピッチパラメータを $c = (c_1, c_2, c_3, c_4)$ として

$$J_{ti} = I_t / (n l_i) (1 + \sum_{k=1}^4 C_k \cos k\theta_i) \quad \dots \dots \dots (9)$$

と表される。ただし、 I_t は総トロイダル方向電流、 l_i は参照点 P_i が代表する区間の長さである。このときコイル中心軌跡がトーラス副軸となす角すなわちピッチ角 α_i をそれぞれの

参照点について求めると、

$$\alpha_i = \tan^{-1} (J_{pi} / J_{ti}) \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる。これから、各参照点のポロイダル角 θ_i に対してトロイダル角 ϕ_i を求めると、

$$\phi_i = \sum_{j=1}^{i-1} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \frac{dj}{r_j \tan \alpha_j} d\theta_j \quad \dots \dots \dots (11)$$

となる。ただし、 dj は i 番目から $i+1$ 番目の参照点までの区間のポロイダル方向の長さである。以上からコイル導体の中心軌跡の座標は(7)式および以下のように求められる。

$$X_i = \{ R_0 + a \cos(\theta_i + \delta \sin \theta_i) \} \cos \phi_i \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$Y_i = \{ R_0 + a \cos(\theta_i + \delta \sin \theta_i) \} \sin \phi_i \quad \dots \dots \dots (13)$$

また、参照点を通る法線とトーラス赤道面がなす角 γ_i も以下のように求められる。

$$\gamma_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{(1 + \delta \cos \theta_i) \sin(\theta_i + \delta \sin \theta_i)}{K \cos \theta_i} \right\} \quad \dots \dots \dots (14)$$

図1 電磁界計算に用いる座標系

Fig.1. A toroidal coordinate system.

<2.3>電磁力計算 与えられた電流分布より、各参照点に働く電磁力を求める。まず、トロイダル方向電流成分 J_{ti} によって発生する電磁力を求める。各参照点に主軸と同軸とするリングが配置されており、それぞれに(9)式によって決定される電流が流れているとする。トロイダル電流成分による電磁力はこれらのリング間に働く電磁力として求める。各参照点における磁界 B_i はビオ・サバールの法則によって求める(ただし、以下の計算では電流素片と参照点との距離が 1.0×10^{-6} m以下の点は除いた)。各参照点に働く大半径方向の電磁力 F_{Rti} と垂直方向の電磁力 F_{zti} は

$$F_{Rti} = J_{ti} B_{zi} \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$F_{zti} = J_{ti} B_{Ri} \quad \dots \dots \dots (16)$$

と求められる。

次に、ポロイダル方向電流成分 J_{pi} によって発生する電磁力を求める。各参照点 P_i におけるトロイダル磁界 B_{ti} は

$$B_{ti} = \mu_0 I_p / 2\pi r_i \quad \dots \dots \dots (17)$$

となり、発生する電磁力 F_{pi} は

$$F_{pi} = 1/2 J_{pi} B_{ti} \quad \dots \dots \dots (18)$$

ここで係数 $1/2$ は表面電流分布を考慮したためである。(18)式で表される電磁力は磁気圧としてトーラス表面に垂直な方向に働くので、ポロイダル方向電流成分による大半径方向の電磁力 F_{Rpi} と垂直方向の電磁力 F_{zpi} は参照点 P_i におけるトーラス表面に対する垂線がR軸となす角を γ_i として、以下のように表せる。

$$F_{Rpi} = F_{pi} \cos \gamma_i \quad \dots \dots \dots (19)$$

$$F_{zpi} = F_{pi} \sin \gamma_i \quad \dots \dots \dots (20)$$

各参照点に働くトロイダル方向、ポロイダル方向両電流成分による大半径方向の電磁力 F_{Ri} および垂直方向の電磁力 F_{zi} は

$$F_{Ri} = F_{Rpi} + F_{Rpi} \quad \dots \dots \dots (21)$$

$$F_{zi} = F_{zti} + F_{zpi} \quad \dots \dots \dots (22)$$

と求められ、(21) (22) 式の右辺の各値は (15)、(16) (19)、(20) 式より求めることができる。

以上の計算手法により、表1に示す諸元の電磁力平衡コイルについて、磁界強度分布、大半径方向電磁力、垂直磁界、コイル電流と磁界のなす角を計算し、中心磁界を同一とした場合のトロイダルコイル、巻線ピッチ角を変化させない通常のヘリカルコイルと比較検討した。

表1 超電導小型実験装置の諸元

Table 1. Key parameters of small size experimental Force-balanced coil.

	設計値	達成値
大半径	0.18m	
小半径	0.061m	
コイル巻数	5ターン×5極	
コイル電流	200A	180A
コイル電流密度	400A/mm ²	360A/mm ²
最大磁場	2T	1.8T

<2.4>計算結果

(i) 大半径方向電磁力の平衡あるいは大幅な低減

電磁力平衡コイルは大半径方向の電磁力を平衡させ、外部からの支持を大幅に簡略化できるのみならず、巻線ピッチ角(α)をポロイダル角(θ)に対して変化させることによって電磁力分布を変化させ、局所的な応力集中を回避できる。すなわち通常のトロイダル磁界コイルではコイルノーズ部と呼ばれる大半径方向内側において発生する最大磁界とコイル電流が直交するため、このコイルノーズ部に最大の電磁力が発生し、コイルが発生できる磁界強度はコイルノーズ部での最大磁界と構造材の許容応力の関係によって制限される。これに対して巻線ピッチ角を変化させ

た電磁力平衡コイルの場合はトーラス大半径方向内側に集中していた電磁力を分散させ、構造材の電磁力分布をほぼ均一にすることが可能となり、トーラス中心部での発生磁界強度を増加させることができる。図2に、表1に示した諸元をもつFBC装置の小半径方向電磁力のポロイダル角に対する分布を示す。同図に、トロイダル磁界コイル(TFC)巻線ピッチ角を変化させない通常のヘリカルコイル(HC)の計算結果についても重ねて示す。図2から明らかなように電磁力平衡コイルの小半径方向電磁力はトロイダル磁界コイルの小半径方向電磁力に比べて大幅に低減されコイルノーズ部($\theta = 180$ [deg.])では実に40%に低減されることがわかる。

図2 小半径方向電磁力のポロイダル角分布

Fig.2. Minor radius direction Electromagnetic Force along the poloidal angle.

(ii) 転倒力の大幅な低減

巻線ピッチ角を変化させない通常のヘリカルコイルではトロイダル方向電流成分による垂直磁界のため、コイルに大きな転倒力が働くが、電磁力平衡コイルでは、巻線ピッチ角を変化させることによって、トロイダル方向電流成分のポロイダル角に対する分布を変化させることができる。すなわちポロイダル角 $\theta = 90, 270$ [deg.] 近傍の垂直磁界を低減させることによって、転倒力の大幅な低減が可能となる。

図3 垂直磁界のポロイダル角分布

Fig.3. Z direction Magnetic field distribution along the poloidal angle.

垂直磁界のポロイダル角に対する分布の計算結果を図3に示す。同図に、トロイダル磁界コイル、巻線ピッチ角を変化させない通常のヘリカルコイルの計算結果も重ねて示す。図3から明らかなように、電磁力平衡コイルでは巻線ピッチ角を変化させることによって、通常、最大の転倒力を発生する $\theta = 90, 270$ [deg.] 付近の垂直磁界をほぼゼロにすることができる。したがって、電磁力平衡コイルでは、垂直磁界によって発生する転倒力を大幅に低減できることがわかる。

(iii) 磁界並行効果による臨界電流の上昇

一般に超電導コイルの臨界電流はコイル導体の最大経験磁界によって制限される。ただし、超電導材には、磁界並行効果といわれる電流と磁界が鋭角に交わることによって臨界電流が上昇する現象が報告されている⁽⁶⁾。電磁力平衡コイルでは、巻線ピッチ角を変化させることによって最大磁界を経験するコイルノーズ部分において電流と磁界を鋭角に交わらせることで、上記の磁界並行効果による臨界電流の上昇が期待できる。コイル電流と磁界のなす角 (θ_c) のポロイダル角 (θ) に対する分布を図4に示す。同図にトロイダル磁界コイル、巻線ピッチ角を変化させない通常のヘリカルコイルの計算結果も重ねて示す。最大磁界を経験する $\theta = 180$ [deg.] において電流と磁界のなす角が鋭角になり、磁界並行効果が期待できる。したがってコイルの通電電流を増加させることができ、同規模の装置でより強い中心磁界を発生することができる。

図4 コイル電流と磁界のなす角のポロイダル角分布
Fig.4. Cross angle between coil current and magnetic field along the poloidal angle.

3. 電磁力平衡コイルの設計・製作

電磁力平衡コイルの有効性を実証するために超電導小型FBC装置を設計製作した。

<3.1> 超電導小型FBC装置の設計 (サイズの決定)

超電導小型FBC装置の諸元は既存の試験用クライオスタットの大きさ (直径650mm)、巻線 (手巻) 時に用いるボビンの大きさ (直径150mm) 等を考慮して表1の通りと

した。(5)式で示す通り、装置のアスペクト比とヘリカルコイルがトロイダル方向に一周するために必要なターン数は大半径方向電磁力の平衡を実現する重要な要素でありアスペクト比3に対して巻数は約5ターンとなる。巻線に用いた超電導線材の諸元を表2に示す。

表2 超電導線の諸元

Table 2. Parameters of NbTi superconducting wire.

導体寸法	0.8mm ϕ
仕上寸法	平均0.889mm ϕ
絶縁被膜	ホルマール40 μ m
銅比	3.11
フィラメント数	40
フィラメント径	62 μ m ϕ
ツイストピッチ	34mm

<3.2> 冷却方式とコイル巻枠構造 超電導小型FBC装置はNbTiフィラメントの超電導線を手巻きで製作すること、また装置が小型であることから、強制冷却方式ではなく、簡便な浸漬冷却方式とした。GFRP製のコイルの巻枠は、計算によって求めた座標 ((7)式および(12)式、(13)式参照) にしたがって導体通過部分に溝を切る構造とした。この溝はヘリカル巻線時のガイドとなる他、転倒力の支持も兼ねる。

<3.3> コイル導体 超電導電磁力平衡コイルのコイル巻線は、表2に示される超電導線を一層あたり15本、全体で15層から構成される。さらに各層間には、層間絶縁と導体固定のため、熱硬化性樹脂をしみこませた厚さ0.2mmのプリプレグガラステープ (PGテープ) を挿入した。コイルは5極で構成され、総数5625ターンとなる。巻線は一極ごとに行い、各極間は5極すべて直列に接続される。このようにして構成されるコイル導体断面図を図5に示す。

図5 コイル導体断面図

Fig.5. Cross section of a coil.

<3.4> 巻線方法 電磁力平衡コイルはヘリカル巻線の変形例であるため、ソレノイド型超電導コイルで一般的

に用いられる張力をかけて巻く方法は不可能である。核融合科学研究所で建設が進められている大型ヘリカル装置(LHD)のような大型装置では正確に数値制御された専用巻線機により、巻線時にわずかに位置をずらしておき、巻線後に正しい位置に矯正することにより、位置精度の確保と同時に張力を印加している。一方、本実験装置の場合は小形である為、巻線機も使えず、巻線の全体の位置を決めるコイルガイドの中に一層当たり15本、全体で15層の超電導線を張力を印加せずに、手巻きで順次置いて行く方法を採用した。巻線後の含浸によってコイル導体の固定を行なった。但し、含浸はコイル導体をFBCとして決められた位置に固定することが目的であるから通常の含浸方法ではなく真空含浸後にいったんコイルを樹脂槽から引上げて、エアーガンにより樹脂を吹き飛ばした後昇温・加圧処理により樹脂を硬化させ、導体を固定した。また、層間に挿入したPGテープが樹脂止めとなり、コイル導体のみを含浸によって固定することに成功した。この方法により、導体周囲に十分な冷却チャンネルを形成することにも成功した。図6に巻線終了時の概観を示す。

図6 超電導エネルギー貯蔵用小型電磁力平衡コイル
Fig. 6. Small size experimental superconducting Force-balanced coil.

4. 電磁力平衡コイルの励磁試験結果

製作した超電導電磁力平衡コイルの励磁試験の結果について述べる。このコイルは、FBCの有効性を実証するため、電磁力を導体の張力で支持し、外部からの支持を設けていない。したがって、電磁力によって導体が動くワイヤムーブメントによりクエンチする可能性があるため励磁には慎重を期した。製作した超電導電磁力平衡コイルの励磁特性を図7に示す。破線は、素線の臨界電流の磁界依存性を表し、右上がりの直線は製作したコイルの負荷特性を表す。負荷特性線上的実線は本コイルの励磁できた範囲を示す。コイルの形状および支持構造と $\Delta T = 3K$ などを考慮して決定した定格電流(200A)の90%(180A、最大磁界1.8T)まで励磁することに成功した。

図7 超電導電磁力平衡コイルの励磁特性

Fig. 7. Excitation performance on a load line of small size experimental superconducting FBC.

<4.1>大半径方向電磁力の平衡 電磁力平衡コイルは、大半径方向電磁力を平衡させるように設計されている。そこで、その効果を確認するため、コイルの巻枠を形成しているFRP板の円周方向のひずみを測定した。FRP板の円周方向のひずみを測定するひずみゲージの配置を図8に示す。測定の結果、図9に示すようにA、B、Cの各位置にはほぼ等しいわずかな円周方向のひずみが生じていることがわかる。これは、大半径方向外側向きに電磁力が発生していることを示す。この原因は、大半径方向の電磁力はバランスするように設計したが、製作誤差のため、大半径方向の電磁力がわずかながら発生し、FRP板に様なる内圧がかかり、大半径方向の変位が生じたためと思われる。電磁力平衡コイルの製作誤差として巻線時の素線の落ち込みが考えられる。すなわち、素線の上に素線を乗せる方法で一層あたり15本×15層の巻線を行ったので素線間に次層の素線が落ち込み、小半径が設計値より小さくなるのが考えられる。図10に示すような素線の落ち込みが15層の半分について発生したとすると小半径は (素線直径 $\phi 0.889$) $\times (1 - \sin \pi/3) \times 15$ (層) $\times 1/2 = 0.893\text{mm}$ 小くなり、小半径 $a = 61\text{mm}$ に対して、 $\Delta a = -0.893\text{mm}/61\text{mm} = -1.46\%$ の誤差をもつことになる。中心磁界を同一(2T)として、小半径方向に誤差をもつ電磁力平衡コイルの大半径方向電磁力を求めると図11のとおりとなる。図11より本実験装置にかかる大半径方向外向きの電磁力は約2.5[kN]と推定される。これは中心磁界を同一としたときのトロイダルコイルの大半径方向電磁力の計算値である31.3[kN]に比べて1/10以下である。同様に、各電流値での大半径方向電磁力を求め、それをFRP支持円板内径側からの均一圧力としてFRP支持円板の円周方向ひずみを計算した結果を図9に重ねて示す。ただし、極低温での剛性試験の結果からFRPの繊維方向、および繊維に垂直な方向のヤング率はそれぞれ26[GPa]、6.1[GPa]とした。計算結果と実測値は定性的によく一致し、又定量的にもほぼ一致し、大半径方向外向きに発生しているわずかな電磁

力は製作誤差に起因するものと考えられる。以上より、本実験装置では製作誤差の為、大半径方向電磁力がわずかながら発生しているがトロイダルコイルに比べると1/10以下であり、FBC方式では大幅な電磁力の低減が実現されていることがわかる。

図8 ひずみゲージ取り付け位置
Fig.8. Location of strain gauges.

図9 FRP支持円板に生じる周方向ひずみの電流依存性
Fig.9. Strains of ϕ direction as a function of current square.

図10 素線の落ち込みによる小半径方向の製作誤差
Fig.10. Fabrication error of minor radius at winding.

図11 小半径方向の製作誤差によって発生する大半径方向電磁力

Fig.11. Major radius direction electromagnetic force caused by minor radius error.

<4.2> 転倒力の低減 一般にヘリカルコイルではトロイダル方向電流成分によって垂直磁界が発生し、コイルに転倒力を生じる。一方、電磁力平衡コイルでは、巻線ピッチ角を変化させることにより、転倒力発生の一因である垂直磁界の分布を変化させ、転倒力を低減することによりコイル支持構造を簡略化することができる。そこで、ホールセンサにより垂直磁界強度分布を測定し、その効果を確認した。磁界強度を測定するためのホールセンサの取り付け位置を図12に示す。通電電流140Aでの各位置における磁界強度の測定値を図13に示す。図13には、測定値と比較するため、電磁界解析の結果得られた電磁力平衡コイル、および巻線ピッチ角を変化させない通常のヘリカルコイルの磁界強度分布を重ねて示す。垂直磁界強度分布の測定値と計算値は非常によく一致した。計算結果および試験結果を示した図13から、電磁力平衡コイルでは、トロイダル角 90 [deg.] 近傍で垂直磁界 B_z を大幅に低減できることがわかる。以上より、巻線ピッチ角を変化させた電磁力平衡コイルでは、転倒力を大幅に低減できることが計算と実験の両面より示された。

測定点A, B, Cの座標は
A (14.0, 0.75), B (18.0, 4.0), C (22.0, 0.75)

図12 ホールセンサー取り付け位置
Fig.12. Location of Hall sensors.

図13 小半径上の垂直磁界強度分布

Fig.13. Magnetic field of z-direction along the minor radius.

<4.3> 磁界並行効果 磁界並行効果については磁界と電流のなす角度 θ を測定し、間接的にその可能性を示した。磁界の測定には、前節と同様のホールセンサを使用した。測定位置は、コイルの最下層に接する部分である。測定値と比較するため、トロイダル角に対するコイル電流とそこを横切る磁界のなす角 θ の分布の計算結果を図14に示す。測定値は、計算値とほぼ一致していることがわかる。本実験装置の場合、最大磁界を経験するコイルノーズ部 ($\theta = 180$ [deg.]) での、コイル電流と磁界のなす角 θ は約35 [deg.] であった。

以上より、間接的にはあるが、従来のトロイダルコイル、ヘリカルコイルと比較して、少なくともコイル電流と磁界のなす角が鋭角になる分臨界電流の上昇が期待できることが示された。

図14 コイル電流とそこを横切る磁界のなす角 θ_c のトロイダル角に対する分布

Fig.14. Cross angle between coil current and magnetic field along the poloidal angle.

5. むすび

電磁力平衡コイルの概念をSME S装置に適用し、超電導小型FBC装置の設計・製作・励磁試験を行い、以下の成果が得られた。

(1) 超電導磁気エネルギー貯蔵装置において、実機の設計・製作上の制約条件となっている大半径方向電磁力をFBC方式のコイル配置により大幅に低減可能であることを計算で示した。また、超電導小型FBC実験装置の巻枠のひずみを測定することにより、大半径方向電磁力が平衡あるいは大幅に低減できていることを実験的に確認した。

(2) ヘリカルコイルで問題となる転倒力の大幅な低減が可能であることを計算で示し、垂直磁界強度分布の計算値とホールセンサによる垂直磁界の実測値が非常によく一致することより、転倒力の大幅な低減が可能であることを示した。

(3) コイルが最大磁界を経験するコイルノーズ部において、磁界とコイル電流のなす角度がトロイダルコイルおよび巻線ピッチ角を変えない通常のヘリカルコイルに比べて小さくなることを計算と実測で示し、磁界並行効果による超電導線材の臨界電流の上昇が期待できることを示した。

以上、バインド線での固定もコイルケースも施さない手巻コイルが約2 Tまで励磁できたことは電磁力平衡コイルの有効性を実証しているものと思われる。

今後はヘリカル型コイルの巻線機の簡易化、電磁力平衡コイルのモジュール化あるいは複数個の電磁力平衡コイルをトロイダルコイルの如く、トラス状に配置した場合等について検討を行い、SME S装置としての最適化技術の向上に努め、SME S装置の実用化に貢献したい。

(平成9年6月24日受付、平成9年9月19日再受付)

文 献

- (1) M. Shimizu, et al., "FEASIBILITY STUDY OF A 10-Gwh TOROIDAL SUPERCONDUCTIVE MAGNETIC ENERGY STORAGE SYSTEM", JOURNAL DE PHYSIQUE, C1-581-585 (1984)
- (2) H.P. Furth and S.C. Jardin, "Forth-Free Coil Principles Applied to High-Temperature Superconducting Materials", IEEE Trans. Magn., 24, 1467 (1988)
- (3) 岡庭、原他：「ハイブリッド型SMESの基礎検討」、電気学会全国大会講演論文集8-105 (平3)
- (4) S.V. Sciver, et al., "Engineering Design of Superconducting Magnets for a Torsatron Experiment", Proceeding of the 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, 2, 759 (1979)
- (5) 三浦 友史、迫田 充代、嶋田 隆一：「強磁界発生用超電導電磁力平衡コイルの概念検討」、電学論D、114巻11号、1155-1161 (1994)
- (6) H.P. Furth, et al., Princeton Plasma Physics Laboratory Report, PPPL-2,465 (1987)

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終了。同年4月(株)東芝入社。現在、技術企画部 参事。主として、核融合装置加速器、超電導応用装置の技術開発に従事。96年4月東京工業大学大学院社会人博士課程入学、現在に至る。プラズマ・核融合学会、低温工学会会員。

京藤 誠

(非会員) 1972年3月30日生。96年3月東京工業大学大学院修士課程終了。同年4月(株)東芝入社。現在、京浜事業所 機器装置部に所属。主として、核融合装置の開発設計に従事。プラズマ・核融合学会会員。

近藤 潤次

(学生員) 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。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、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。

花井 哲

(非会員) 1957年5月10日生。82年3月東京大学大学院修士課程終了。同年4月(株)東芝入社。現在、京浜事業所 機器装置部 主査。主として核融合装置、超電導応用装置の開発・設計に従事。プラズマ・核融合学会、低温工学会、日本AEM学会会員。

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、大電力システムの研究に従事。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。現在、重電技術研究所 電磁装置・放電応用技術開発部 主幹。主として、核融合装置、超電導応用装置の技術開発に従事。IEEE、日本物理学会、低温工学会会員。工学博士。