MHD 実験装置 FUJI-1 のディスク型 発電機用超電導磁石 (設計)[†]

岡村哲至, 塩田 進, 梶島成治, 真田芳直*

東京工業大学総合理工学研究科
横浜市緑区長津田町4259

*(株)東芝浜事業所 横浜市鶴見区末広町2-4

(1985年5月28日受理)

Superconducting Magnet for a Disk Generator of the FUJI-1 MHD Facility (Design)

Tetsuji OKAMURA, Susumu SHIODA, Shigeharu KABASHIMA and Yoshinao SANADA*

Tokyo Institute of Technology, The Graduate School at Nagatsuta, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

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

(Received May 28, 1985)

Synopsis :

Design of a superconducting magnet to be coupled with a disk MHD generator in the closed cycle MHD experimental facility FUJI-1 is described. The superconducting magnet consists of two separated windings whose shape is of the circular Helmholtz type. A new structure between the windings has been proposed which supports magnetic force induced between the two windings and, at the same time, minimizes the heat leakage to the windings.

1. はじめに

クローズドサイクルMHD発電実験装置“FUJI-1”¹⁾が, 1981年4月から1984年3月にかけて東京工業大学に設置された。この装置はブローダウン実験用で, 作動流体はカリウムをシードしたアルゴン, 熱入力は6 MW, 実験時間は約1分間である。FUJI-1 を用いての研究目的は, 低シード率でシード物質を完全電離させた時のディスク型発電機の性能について調べることである。MHD 発電流路内で必要とする高い電子温度を得るには電子が十分ジュール加熱されなければならない, そのためには高磁界が要求され超電導磁石が必要となる。

本報告では, FUJI-1 に組み込まれたディスク型発電機用超電導磁石の設計内容について述べる。

2. 設計の基本条件

FUJI-1 の MHD 発電流路はディスク型であるために, 超電導磁石の形態は, 二つの円筒型のコイルが

発電流路を挟んで向い合うヘルムホルツ型となる。つまり, 二つのコイルの間に発電流路があるためコイル間に作用する電磁力をヘリウム容器間で直接支持することは難しい。そこで4.2Kのヘリウム容器から常温の真空容器に電磁力を伝え, かつそこからの熱侵入をできるだけ抑えるような支持構造部が必要になり, その設計に特に工夫を要する。本磁石では限られた空間で電磁力支持部の伝熱距離を長くすることにより, コイルへの伝導による熱侵入を抑えた。これは, 線型MHD 発電機用の鞍型磁石²⁾と対照的である。鞍型磁石では二つのコイルの直線部分を4.2Kの構造物で支持できるため, コイル間の電磁力支持構造を比較的簡単なものとする事ができる。

信頼性があり, 操作しやすい磁石という観点から本磁石のコイル設計は実績をベースにした保守的なものとし, コイルはダブルパンケーキ巻きで液体ヘリウム浸漬冷却方式とした。また超電導線は, 技術的に完成したと考えられる銅で安定化された NbTi 極細多芯線を用いることにした。

本磁石の設計を行うために必要となった条件の概略

[†] 英語論文は Cryogenics 誌 Vol. 25 No. 9 に掲載

を Fig. 1 に示す。コイルの形状の空間的制限としては、作動流体を発電流路に導びく導入管の直径、発電流路の高さ、断熱構造部の厚さなどを考慮するとコイルの内径は 500mm より小さくできず、二つのコイル間の距離は 400mm より小さくできない。また要求される磁界の強さはディスク中心部、アノード部、カソード部でそれぞれ 4.5T, 4.3T, 3.4T 以上である。

3. コイルの構造

この条件をふまえて本コイルの諸量を次のように決めた。まずコイルの安定性に関しては、定格電流値が Maddock の等面積法³⁾により得られる最小伝搬電流値 (Imp) より小さくなるように設定した。つまり Fig. 2 に示す本コイルのロードラインおよび Imp の磁界特性から Maddock の等面積法により算出した Imp が 2,600 A になることより定格電流値は 2,550 A とした。次にコイルの形状に関しては、要求される磁界分布を満たしコイルの体積が最小になるようなコイル厚さ、外径、内径を選んだ。また本超電導線は無酸素銅安定化 NbTi 極細多芯線の 8.0mm×6.6mm フラット・ワイズ型で、安定性の良いコイルとするために比較的高い銅比 9 となっている。さらに両側面には液体ヘリウムによる冷却のために幅約 1.6mm、深さ 0.7mm の溝が 2 本ずつ掘ってある。この溝加工をすることにより、冷却面積が溝なしの場合と比べて約 2 倍となる。Table 1 に本コイルおよび超電導線の諸元を、Fig. 3 に超電導線の断面を示す。コイル厚さ、外径、内径はそれぞれ 200.0mm, 1,288.8mm, 500.0mm である。

Winding inner diameter	≥ 500 mmφ
Distance between the windings	≥ 400 mm
Magnetic field at the center	≥ 4.5 T
Magnetic field at the anode	≥ 4.3 T
Magnetic field at the cathode	≥ 3.4 T

Fig. 1 Basic requirements for designing the magnet.

Fig. 2 Load line for the magnet and critical current, where
 --- minimum propagating current
 - · - critical current (designed)
 · · · critical current (short sample test)
 Ir-rated current

Fig. 3 Cross-sectional view of the superconductor.

Table 1 Selected set of parameters for which the minimum volume of the super-conductor is achieved.

Winding shape	Circular
Winding concept	Double pancakes
Cooling concept	Pool cooling at 4.2K
Rated current	2,550A
Average current density	37.5A/mm ²
Winding inner diameter	500.0mm
Winding outer diameter	1,288.8mm
Winding width	200.0mm
Magnetic field at the center	4.7T
Magnetic field at the anode	4.3T
Magnetic field at the cathode	3.4T
Maximum magnetic field	7.0T
Number of turns	1,160
Electromagnetic attractive body force	336 tons
Self inductance	1.0H
Mutual inductance	0.19H
Stored energy	8 MJ
Superconductor	
Material	Nb-Ti monolith
Conductor size	6.6×8.0mm ²
Critical current	3,300A (at 7T)
Diameter of filament	70μm
Number of filaments	1,200
Copper-non copper ratio	9

また、コイル間の電磁力は 336 トン、蓄積エネルギーは 8 MJ となる。

巻線部は10個のダブルパンケーキからなり、パンケーキ当りのターン数は58ターンである。ターン間には 0.2mm 厚のエポキシガラステープが電気絶縁物として巻込まれ、パンケーキ間には2.0mm厚の FRP 板が電気絶縁と冷却流路を作ることとを目的として放射状に置かれている。パンケーキ面のこの FRP 板によるカバー率は約30%である。各ダブルパンケーキは積層され、その両面に 12mm 厚 SUS304L 側板を用意し通しボルトにて締付け一体化した後、ヘリウム容器に格納されている。コイルの断面およびパンケーキ間の FRP 板の配置の様子を Fig. 4 に示す。

4. コイル部の応力計算

励磁時の電磁力によるコイルの変形を 2 次元軸対称の有限要素法によって計算した。Fig. 5 はコイルの要素分割および境界条件を示す。節点番号 1 から 4 が MHD 発電流路側で、その四つの節点は中心軸方向に固定、ただし半径方向には自由に動けるとした。要素番号 1, 2, 3, 13, 14, 15 は SUS304L の側板、その他の要素番号は巻線部にあたる。巻線部は銅と FRP のみでできているとし、その体積混合比やパンケーキ間の電気絶縁スペーサの空間占積率30%を考慮して等価物性値を算出した。Table 2 に本計算で用いた物性値

Fig. 4 Cross-sectional view of the winding and arrangement of the spacers which are used between the pancakes.

Fig. 5 Subdivision of elements and boundary conditions to calculate displacement of the winding.

Table 2 Material properties used to calculate displacement of the winding, where
 E —modulus of longitudinal elasticity, Pa
 G —modulus of transverse elasticity, Pa
 N —Poisson's ratio
 θ —azimuthal direction
 r —radial direction
 z —axis direction

Material		Properties
SUS 304L	E	2.020×10^{11}
	G	7.924×10^{10}
	N	0.275
OFHC	E	1.383×10^{11}
	G	5.198×10^{10}
	N	0.33
FRP	E	1.961×10^{10}
	G	6.865×10^9
	N	0.3
Winding	$E\theta$	9.427×10^{10}
	Er	8.563×10^{10}
	Ez	2.417×10^{10}
	$Gr\theta$	3.219×10^{10}
	$G\theta z$	3.545×10^{10}
	Gzr	3.220×10^{10}
	$Nr\theta$	0.328
	$N\theta z$	0.251
	Nzr	0.242

(4 Kでの値)⁴⁾を示す。また、電磁力は巻線部節点への集中荷重として入力した。以上の条件を基に定格電流 (2550 A) 通電時のコイル変位を計算した結果を Fig. 6 に示す。点線が通電前、実線が通電中のコイル断面の様子であるが、この図では変位が実際よりも誇張してある。コイルの半径方向には膨張力 (フープ応力) が作用し最内周部で約 0.15 mm, 最外周部で約 0.10 mm 広がり, 軸方向には圧縮力が働き約 0.05 mm 縮まることがわかる。巻線部内に発生するフープ応力は最内周部で最大となり, その値は 4.2×10^7 Pa で, このときの歪量は 6×10^{-4} となる。これは ASME コードに準拠して評価した 4 K における無酸素銅の許容応力値 1.25×10^8 Pa に対して, かなり余裕がある値である。

5. 電磁力支持部の強度評価および熱負荷

Fig. 7 にクライオスタット内の構造の概略を示す。コイルはヘリウム容器に収められ, さらに真空容器で囲まれている。ヘリウム容器と真空容器の間には, 液

Fig. 6 Displacement of the winding at the rated current level of 2550 A.

Fig. 7 Assembly layout of the cryostat.

体室素温度 (78K) の輻射熱シールドが挟んである。また 4.2K のヘリウム容器から常温の真空容器まで電磁力を伝える支持構造部は、コイル外周部と内周部に 2 箇所あり FRP と SUS 304 の円筒を組み合わせることによって伝熱距離をかなり長くしそこからの侵入熱を抑える工夫がしてある。つまり、真空容器からヘリウム容器に到達する侵入熱はまず FRP の円筒を通り、次いで SUS 304 の円筒そして最後に FRP の円筒を経なければならない。この間の伝熱距離は約 40cm と長く、設計ではこの 2 箇所の支持部からの侵入熱は約 4.0W と小さい値となる。その他の部分からコイルへの熱負荷の設計値も Table 3 にまとめた。定格電流通電時にコイル内周支持部に誘起されるコイル間の電磁力は、外周部にかかるそれより大きく FRP の円筒には圧縮力として約 1.16×10^8 Pa, SUS 304 の円筒には引張り力として約 1.10×10^8 Pa が作用する。ASME コードに基づく FRP の圧縮強度および SUS304 の許容応力値は Table 4 のようになり、本支持構造部は電磁力に十分耐えられることがわかる。ここで使用

Table 3 Predicted heat leakage per cryostat.

Items		Heat leak (W)
Radiation	L N ₂ shield panel	0.66
	Winding supports	4.53
Conduction	Leads for measurement	0.74
	Others	2.15
Joule heat	Current lead	6
	Helium level indicator	0.81
	Others	0.6
Total		15.49

Table 4 Mechanical properties of SUS 304 (tensile strength, Pa) and FRP (G-10) (compressive strength, Pa).

	300K	78K	4 K
SUS 304	1.57×10^8	1.86×10^8	2.65×10^8
FRP (G-10)	1.50×10^8	3.75×10^8	3.75×10^8

されている FRP の種類は G-10 と同等品であり、厚さ 0.2mm のグラスファイバークロスを 15mm の厚さに積層しエポキシで固めたもので、このタイプの FRP は圧縮力に強い。

6. 初期冷却解析

コイル各部の初期冷却特性を差分法によって計算した。本磁石の冷却重量は、コイル (2 個) 3.2 トンおよびヘリウム容器 (2 個) 2.0 トンの合計 5.2 トンであり、ヘリウム冷凍液化機の液化能力は 34l/h、冷凍能力は 92W (at 4.6K) である。冷凍液化システムおよび初期冷却手順については別報で詳しく述べる。Fig. 8 は本計算に用いたヘリウムガスの流れ方向およびそれに垂直方向の要素分割を示す。冷媒であるヘリウムガスはコイルの最下部、つまり要素番号 10 と 110 の間から流入して、左右対称にそれぞれ 9 分割ずつされた要素内を通り、コイルの最上部つまり同図の要素番号 90 と 190 の間で合流し流出する。また冷却物は巻線部 (無酸素銅, FRP) とヘリウム容器 (SUS 304L) とし、ヘリウム容器についてはコイル内周部、外周部、左右側面部の四つの部分に分けた。次に、コイル入口のヘリウム温度はステップ状に変わるとし、このステップ形状は冷却による温度分布の不均一さから生ずる

熱収縮応力が過大にならないよう考慮して決めた。さらにその流量はヘリウム冷凍液化機的能力から 4 g/s とした。ヘリウムと巻線部および容器間の熱伝達 は 実際は乱流熱伝達と思われるが、ここでは計算の簡単化のために層流熱伝達と仮定して、 Nu (ヌッセルト数) は円管内層流熱伝達のうち最も乱流熱伝達に近い値である 3.65 とし、熱伝達係数 $h=k \cdot Nu/D$ とした。ここに k はヘリウムの熱伝導率、 D は水力直径である。以上の仮定のもとに各要素間の熱結合つまり要素 N_i と N_j の間の熱通過率を次式で計算した。

$$U_{ij}=A_{ij}\left\{\frac{d_i}{k_i}+\frac{d_j}{k_j}+\frac{1}{h_{ij}}\right\}^{-1}$$

ここに U_{ij} は熱通過率、 A_{ij} は接続面積、 d_i, d_j は接点から接続面への熱伝導路の長さ、 k_i, k_j は要素の平均熱伝導率、 h_{ij} は接続面間の熱伝達係数である。この U_{ij} を使うと、要素 N_i の温度の時間変化は次のようになる。

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau}=\frac{1}{\rho_i C_i V_i} \sum_j U_{ij}\left(T_j-T_i\right)$$

Fig. 8 Subdivision of elements used along and normal to the flow direction of helium to calculate cool down characteristics of the windings.

Fig. 9 Cool down characteristics results obtained from the numerical analysis, where
— bottom of the winding
--- top of the winding

ここに T_i, T_j は絶対温度、 τ は時間、 ρ_i は密度、 C_i は比熱、 V_i は要素の体積である。上式を用いて、ある時間きざみ $\Delta \tau$ に対する各要素の温度変化を求める。このとき、熱伝導率と比熱は極低温では温度に大きく依存するため、これらの値はエイトキン・ラグランジュ法により温度の関数として補間近似によって求めた。この初期冷却解析で得られた結果を Fig. 9 に示す。この図から、130 時間 (約 5 日半) あれば十分初期冷却可能であることがわかる。

7. 磁石の構造概略

本超電導磁石の概略図を Fig. 10 に、FUJI-1 に組み込んだときの写真を Fig. 11 に示す。磁石の高さは 4,012mm で、二つのクライオスタットの間には 12本の 100mmφ SUS 304 電磁力支持棒が円周方向に等間隔で挟まれ、電磁力を支持する。また MHD 発電回路など二つのクライオスタットに挟まれている部分に何らかの問題があった場合、容易に分解、組立ができるように片側のクライオスタットはレールの上に置かれ可動式となっている。

8. ま と め

クローズドサイクル MHD 発電実験装置 “FUJI-1” に組み込まれた、ディスク型発電機用超電導磁石の設計内容について述べた。本磁石はヘルムホルツ型で、このタイプの磁石では二つのコイルの間に誘起される大きな電磁力を支持し、かつ熱負荷の小さい電磁力支持部が必要となる。このような要求を満たすため SUS

Fig. 10 Schematic view of the superconducting magnet.

304 と FRP を組み合わせた伝熱距離の長い支持部が設計された。

さらに、別の報告で記すように本磁石はすでに試験により所定の性能を満足することが実証されている。

謝 辞

本超電導磁石の設計、製作に際して東京京浜事業所の皆様に多大な御協力を頂きましたので、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) S. Shioda et al.: 20th Symposium on Engineering Aspects of MHD (1982) 6.5.1
- 2) A. M. Hatch, J. Zar and F. E. Becker: Cryogenics 18 (1978) 67
- 3) B. J. Maddock, G. B. James, and W. T. Norris: Cryogenics 9 (1969) 261
- 4) "Handbook on materials for superconducting machinery" National Bureau of Standard, Boulder, Colorado (1977)

Fig. 11 Photograph of the superconducting magnet coupled with the FUJI-1 facility.