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

岡村哲至, 塩田 進, 栢島成治, 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)東芝東浜事業所 横浜市鶴見区末広町2-4

(1985年5月29日受理)

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

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 29, 1985)

Synopsis :

The performance results of the tests of a superconducting magnet coupled with a disk MHD generator in the closed cycle MHD experimental facility FUJI-1 are described. At first the performance tests of the superconducting magnet only were carried out at Toshiba, secondly the magnet was coupled with the FUJI-1 facility at Tokyo Institute of Technology and the performance tests were carried out. Both these tests have shown successful performance of the magnet.

1. はじめに

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は別報に記した。本報告では、この超電導磁石の性能試験結果について述べる。

性能試験は本磁石が FUJI-1 に組み込まれる前にまず東芝で行われた。そこでは主に初期冷却特性、MHD 発電回路内の磁界分布、熱侵入量、電磁力について調べられた。東芝で性能試験を終えた後、磁石は東京工業大学に輸送され FUJI-1 に組み込まれて再び性能試験が行われ、特に洩れ磁界による FUJI-1 内の各機器や電気制御系などへの影響が調べられた。

一連の性能試験で、本磁石は設計性能を十分満足することが実証された。

2. ヘリウム冷凍液化システム

本超電導磁石のために FUJI-1 に設置されたヘリウム冷凍液化システムを Fig. 1 に示す。このヘリウ

ム冷凍液化機の液化能力は 34L/h、冷凍能力は 92W (at 4.6K) であり磁石の冷却は次の手順で行われる。

初期冷却を始める前に、まずヘリウムデューワーに約 1,000 L 液化しておく。そして初期冷却の第1段階は、冷凍モードの冷凍液化機により冷凍されたヘリウムガスをコイル下部から取り入れコイル上部から取り出すことにより行われる。コイルの温度が 20K 以下になると初期冷却の第2段階として液体ヘリウムをデューワー

Fig. 1 Schematic view of the helium refrigerator/liquefier system in the FUJI-1 facility.

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

からコイルへ移送する。このシステムでは、通電可能なだけの量の液体ヘリウムをクライオスタット内に貯液できる時間が10時間以上であり、この間にブローダウン発電実験が最大3回できる。蒸発したヘリウムはガスバッグに一旦貯められ、回収圧縮機によって精製器を介して純カードルに圧縮充填される。

3. 性能試験 (於 東芝)

本磁石が FUJI-1 に組み込まれる前の 1984 年 2 月に、東芝において初期冷却および励磁試験が行われた。

この試験で用いられたヘリウム冷凍液化機的能力は 100 l/h, 200 W (at 4.6 K) であり、FUJI-1 に設置されたものの約 3 倍の能力を有する。試験中には主に次の 4 項目について測定された。

- (1) 初期冷却中のコイル各部の温度変化
- (2) 発電回路内の磁界分布
- (3) ヘリウム液面降下速度
- (4) クライオスタット間の電磁力支持棒の歪量

Fig. 2 に測温体およびヘリウム液面計が取り付けられている位置を示す。また、コイル間に誘起される電磁力を測定するために電気抵抗線式歪計が電磁力支持

Fig. 2 Thermometers and liquid helium level gauges in the cryostat, where
CC—copper-constantan thermocouple;
PT—platinum resistance thermometer;
CGR—carbon-glass resistance thermometer;
CR—carbon resistance level gauge;
LI—continuous helium level indicator

棒の表面に貼り付けられた。測温体としては白金抵抗測温体、カーボンガラス抵抗測温体、銅・コンスタンタン熱電対が用いられている。これらの測温体はコイルに擾乱を及ぼす危険性があるため、直接巻線部には貼り付けずすべてヘリウム容器の外壁に貼り付けられている。また各温度計の測定精度を考慮して、銅・コンスタンタン熱電対は常温から 77 K まで、白金抵抗測温体は常温から 20 K まで、カーボンガラス抵抗測温体は 30 K から 4.2 K までの温度範囲の測定に用いる。ヘリウム液面計としては、カーボン抵抗液面計と連続液面計の 2 種類がコイル上方のヘリウム貯槽部内に取り付けられている。前者は、コイルに通電するための安全レベル内に液面があることを確認するためのものであり、後者は連続的に液面の位置の情報を得ることができるため液面降下速度などを測定するのに用いる。

3-1 初期冷却特性

初期冷却試験中の冷却曲線を Fig. 3 (a) に示す。この図から、約 72 時間で初期冷却が終了したことがわかる。両方のコイルで冷却曲線の様子が少し異なるが、これは両コイルでのヘリウムガス流量の不均衡に起因すると考えられる。

3-2 励磁試験

初期冷却終了後、励磁試験が行われた。この試験は四つのモードから成っており、それを Fig. 4 (a) に示す。まず 100 A 通電、次に 100 A 遮断、そして 1,000 A 通電、最後に定格電流 (2,550 A) 通電を 30 分間保持した後 1,000 A からの遮断試験である。モード 1 から 3 は主に測定計の較正を目的としている。

100 A 通電時と定格電流通電時に、ホール素子により発電回路内の半径方向磁界分布の測定を行った。その結果を設計値と共に Fig. 5 に示す。測定では発電機の中心で 4.7 T、アノード部で 4.3 T、カソード部で 3.4 T が得られ、設計値と良い一致を示すことがわかる。

また Fig. 6 (a) には、ヘリウム貯槽部内の液面降下曲線を示す。点線は非通電時、実線は約 1,500 A 通電時の様子を表わし、その傾きからコイル一つあたりの熱負荷を算出すると、それぞれ 8.3 W, 12 W となりほぼ設計値通りである。

定格電流通電時には、クライオスタット間の電磁力支持棒の歪が測定され、その歪量からコイル間の電磁力は 330 トンであるという結果が得られた。これは設計値の 336 トンとほぼ一致する。また、低温部の支持構造の歪量は測定していないが、磁界分布およびコイ

ル間の電磁力支持棒に作用する圧縮力がほぼ設計値通りになっていることから、設計値と大きく異なるコイルの変形や移動は考えられず、したがって低温支持部に作用する力もほぼ設計値通りであると予想される。

4. 性能試験（於 東工大）

東芝で性能試験を終えた後、磁石は東工大に輸送され1984年3月にFUJI-1に組み込まれた。東工大での励磁試験では特に洩れ磁界によるFUJI-1内の各機器（熱交換器、MHD 発電機、シード注入装置など）、電気制御系、電磁弁への影響が調べられ、それぞれの機能に支障を及ぼすような障害がないことが確かめられた。

FUJI-1のヘリウム冷凍液化機およびトランスファーチューブは東芝で使用されたものとは違うために、そこでの試験の時とは特にコイルの冷却特性が異なるであろうと予想され、東工大でも再度初期冷却特性、ヘリウム貯槽部内の液面降下速度が測定された。ただし測温体や液面計の位置および初期冷却方法は、東芝での試験の時とまったく同じである。

4-1 初期冷却特性

東工大での初期冷却曲線を Fig. 3 (b) に示す。この図から約96時間で初期冷却が終了したことがわかる。これは、別報に記す初期冷却解析で得られた設計値(130時間)の約75%である。この差は、解析ではコイルの熱歪を考慮してヘリウム入口温度を50K程度の階段状に変化させているが、実験ではそれを連続的に変化させて冷却したために生じたものと考えられる。

また、コイル下部の冷却曲線が東芝においてははなめらかなものとなっているのに対しここでは100K付近で折れ曲っている。これは、FUJI-1のヘリウム冷凍液化機の能力が東芝のものに比べ小さいため、冷凍モード切り換えの影響が顕著に表われたことを示している。

4-2 励磁試験

励磁試験は Fig. 4 (b) に示すように四つのモードで行われた。モード1と2は東芝での試験とほとんど同じであるが、モード3では1,000A 通電から定格電流通電までコイルの電流を50A ずつ増しては数分間保持し、その各段階でFUJI-1内の各機器および測定系への洩れ磁界の影響の有無が調べられた。モード4では定格電流まで45分間かけて連続的に掃引され、定格電流通電状態で90分間保持された。その間に電気制御系や電磁弁などの作動チェックが行われ、すべて正常に

Fig. 3 Cool down characteristics of the windings, (a)-at Toshiba Corporation, (b)-at T. I. T., where
— PT-1;
--- PT-3;
-●- PT-4 in Fig. 2

Fig. 4 Current charging and discharging operation modes, (a)-at Toshiba Corporation, (b)-at T. I. T.

Fig. 5 Magnetic field distribution along radial direction in the central plane of the disk generator, where
●—measured value at current level of 2550 A;
○—measured value at current level of 100 A;
— calculated value

作動することが確かめられた。このとき、磁石に一番近い電磁弁は磁石の中心から約1.7mのところであり、そこでの磁界は約300 Gaussとなる。また、電気制御系の中で一番磁石に近い部分はそれから約5.4m離れており約20 Gaussの磁界がかかる。

Fig. 6(b) は非通電時のヘリウム貯槽部内液体ヘリウムの減少の様子である。これからコイルへの熱負荷は9.0Wとなり、この値は東芝において得られた結果とほぼ等しい。

5. ま と め

クローズドサイクル MHD 発電実験装置“FUJI-1”

のディスク型発電機用超電導磁石が設計、製作されその性能試験が行われた。

定格電流励磁ではその過程で常電導転移を起こすこともなく、また試験結果はほぼ予想通りのものとなった。Table 1 に、コイルへの熱負荷およびコイル間に誘起される電磁力について性能試験で得られた実験値と設計値の比較を示す。

励磁試験中には洩れ磁界による FUJI-1 内の各機

器、電気制御系、電磁弁への影響がチェックされ、すべての機器が支障なく正常に作動することが確かめられた。

謝 辞

本超電導磁石の性能試験では、東芝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。

Fig. 6 Time variation of the quantity of liquid helium in the cryostat which is measured by the continuous helium level indicator (a) -at Toshiba Corporation, (b) -at T. I. T., where
○—winding-A;
●—winding-B;
— when the windings are charged;
--- when the windings are not charged

Table 1 Comparative study between the designed and the measured values of some important parameters.

		Heat leakage per cryostat		Electromagnetic attractive body force
		Windings are charged	Windings are not charged	
Designed		15.5W (2,550A)	8.1W	336 tons (2,550A)
Measured	Toshiba	12W (1,500A)	8.3W	330 tons (2,550A)
	T. I. T.		9.0W	