クラスター・テスト計画 TMC-I 熱の実験

多田 栄介, 桧山 忠雄, 辻 博史, 奥野 清, 加藤 崇
河野 勝己, 高橋 龍吉, 神谷 祥二, 山口 方士, 島本 進

日本原子力研究所 核融合研究部
311-02 茨城県那珂郡那珂町向山801-1
(1985年2月12日受理)

Thermal Test of the Test Module Coil (TMC-I)

Eisuke TADA, Tadao HIYAMA, Hiroshi TSUJI, Kiyoshi OKUNO, Takashi KATO,
Katsumi KAWANO, Ryukichi TAKAHASHI, Syoji KAMIYA, Masahito YAMAGUCHI,
and Susumu SHIMAMOTO

Naka Fusion Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
801-1 Mukaiyama, Naka-Machi, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 311-02 Japan
(Received February 12, 1985)

Synopsis :

The test module coil (TMC-I) is the first test coil wound with multifilamentary Nb_3Sn conductor in order to demonstrate high field superconducting toroidal field coils for fusion. The TMC-I was constructed in 1982 and the electrical, mechanical, and thermal characteristics were tested at the magnetic field of 10.2T by using the Cluster Test Facility (CTF). Thereafter, the TMC-I was successfully charged up to 11.1T in the Cluster Test Facility reinforced by adding two more back-ground coils (CBC) to the existing Cluster Test Coils (CTC). This paper describes thermal characteristics obtained in the cool-down, the heat load measurements, and the manual dump test of the TMC-I.

1. はじめに

クラスター・テスト装置 (CTF)¹⁾ は、核融合トカマク装置の高磁界超電導トロイダル・コイル開発と同時に、冷凍系、真空系、電源保護系および計測制御系等の周辺技術開発を目的として建設された実験装置である。この試験装置に組込んだ最初の被試験コイルであるテスト・モジュール・コイル (TMC-I) は、 Nb_3Sn 導体を用いた大型超電導コイルであり、最初の励磁実験において、最大磁界10.2Tを発生し、優れた電気的、機械的および熱的特性を有していることが明らかとなった。さらに、その後、二つのバイアス磁界コイル (CBC) を補強して拡張実験を行い、最大磁界11.1Tにおいて十分な安定性特性を有していることを実証した。

本報告は、これらのTMC-Iの実験で得られた(1)初期冷凍特性、(2)定常熱損失特性および(3)ダンプ特性等

の熱的特性について記述する。なお、TMC-Iの電気・機械的特性については、別報に記述する。

2. コイル系熱設計

クラスター・テスト装置 (CTF) における超電導コイル・システムは、被試験コイルであるテスト・モジュール・コイル (TMC-I)、TMC-Iにトロイダルバイアス磁界を供給する2個のクラスター・テスト・コイル (CTC-1および2)、および拡張実験において、11T達成のために増設した2個のクラスター・バックアップ・コイル (CBC-1および2) から構成される。これら5個のコイルの冷凍方式は、浸漬冷凍である。これらのコイルは、Fig. 1 (a) に示すように、周囲を液体窒素シールド板およびスーパーインシュレーションで断熱された直径3m、高さ5mの真空容器に設置されている。CTCおよびTMC-Iは、それぞれ真空容器底部より窒素冷却サーマルアンカを途中にはさん

だガラス強化エポキシ製断熱支持脚により重力支持されている。これらの支持構造は、冷凍時の熱応力緩和のために一点を中心として水平方向に滑ることができる機構となっている。また、CTC と TMC-I 間には、電磁力支持のためのステンレス製支持構造物が組込まれている。

拡張実験のために増設した2個のCBCは、それぞれ CTC のボア内に設置され、楔を介して CTC によ

り固定されている。楔による初期締め付量は、初期冷凍時に、CTC 内周リングと CBC 外周リングの温度差が50Kとなっても、CTC と CBC 間にすきまが生じないように設定した。

これら5個のコイルの幾何学的形状および熱的諸元をそれぞれFig. 1 (b)および Table 1 に示す。Table 1 より、拡張実験においては、CBC の増設で約3.1ton 冷凍重量が増加し、支持構造物を含めたコイル系の総

Fig. 1 Cluster test facility assembly
(a) Overview of the cluster test facility
(b) Array of the CTC, TMC-I, and CBC

Table 1 Designed thermal characteristics of coils in the Cluster Test Facility

	operating current (A)	helium inventory (l)	cooling weight (ton)	heat load			
				current lead (1/h)		others (W)	
				0 A	rated current	0 A	rated current
CTC-1	2,145	250	5.6	4.3	7.2	9.6	10.9
CTC-2	2,145	250	5.6	4.3	7.2	9.6	10.9
TMC-I	6,000	191	7.1	11.4	19.8	16.3	26.0
CBC-1	2,145	90	1.55	3.0	3.0	8.7	10.0
CBC-2	2,145	90	1.55	3.0	3.0	8.7	10.0
structure	—	—	6.6	—	—	—	—
cryogenic piping	—	—	—	—	—	29.7	—
TOTAL	—	871	28.0	25.9	40.2	82.6	97.5

冷凍重量は、約 28ton となることがわかる。また、コイル系の液体ヘリウム保有量および定格通電時の低温配管を含めたコイル系の定常熱負荷は、増設により約 20% 増加し、それぞれ約 87 l および 98W+40l/h となる。40l/h は電流リードによる液化負荷を示す。なお、CTC と CBC は、電氣的に直列接続となっており、電流リード冷却に伴う液化負荷の軽減化を計るために、CBC 間の接続は、伝導による冷凍のみでほぼ 5 K 以下の超電導状態を保つ構造の結合リードにより行っている。

3. 冷凍システム概要

コイル系の冷凍を行うヘリウム液化・冷凍機²⁾は、4.4K における定常状態で、液化能力として 100l/h あるいは冷凍能力として 220W の定格能力を有している。これに対して、コイル系の熱負荷設計値は、拡張実験の場合に最大で約 98W+40l/h であるから、冷凍能力の余裕は、実測した液化・冷凍能力曲線より、約 25% と見込まれる。また、ヘリウム液化・冷凍機は、液体窒素温度から液体ヘリウム温度領域で、22W/K 以上の初期冷凍能力を有しているので、この温度領域での初期冷凍速度は、拡張実験の場合に、これまでの実験結果^{3),4)}より約 1.5K/h と見積ることができる。

ヘリウム液化・冷凍機およびコイル系のシステム・フローを Fig. 2 に示す。ヘリウム液化・冷凍機には、コイル異常時に逆圧力によるタービン膨張器（#1 お

よび #2）の破損を防ぐため、タービン膨張器ライン（リサイクル・ライン）とコイル冷凍ライン（フィード・ライン）を分離したため、ヘリウム圧縮機が 2 台（C10 および C60）設置されている。この分離サイクルは、逆圧力に対するタービン膨張器の保護に有効であると同時に、タービン膨張器の温度制御を容易にし、液化・冷凍における最適な JT 圧力をタービン膨張器と独立に選択できるという特徴を有している。ヘリウム液化・冷凍機の主要構成機器の諸元は、Fig. 2 に示す通りである。

拡張実験のために増設した 2 個の CBC コイルは、Fig. 2 に示すように、CTC および TMC-I と並列に接続され、5 個のコイルの初期冷凍および定常冷凍が、それぞれ独立して行えるようなシステム・フローとなっている。すなわち、初期冷凍時の流量制御は、各コイルの下部配管に取付けられた制御弁（V7～V11）により、また定常冷凍時の液位制御は、各コイルの上部配管に取付けられた外部 JT 弁（V12～V16）により、それぞれのコイル毎に行うことができる。各コイルの電流リードからの回収ヘリウム・ガスおよび液体窒素温度以上の初期冷凍におけるコイルからの戻りヘリウム・ガスは、常温回収ライン③を通して直接あるいは回収系を介してフィード圧縮機（C10）に導かれる。また、液体窒素以下の初期冷凍におけるコイルからの戻りヘリウム・ガスは、低温戻りライン②を通して液化・冷凍機に戻り、V4～V6 により温度条件に応

Fig. 2 Cryogenic flow diagram of the cluster test facility

じた熱交換器に導かれる。

4. 初期冷凍実験

4-1 初期冷凍特性

初期冷凍は、各コイル内、コイル間、およびコイル-支持構造物間に過大な熱応力が発生しないように、各コイルの温度分布を基に供給冷媒の流量および温度を計算機制御する自動冷凍運転で行った。この計算機制御のブロック線図を Fig. 3 に示す。この制御では、コイル系および冷凍系の温度、圧力、流量および弁開度等の百点近くの情報を計算機(PDP-11/34)に入力し、あらかじめ熱応力解析等で求めた初期冷凍条件を満足するように供給冷媒の温度および各コイルへの分配流量を計算機が制御していく。なお、温度制御に用いる 300 K, 80 K, および 4 K の制御弁は、Fig. 2 中の V1, V2, および V3 にそれぞれ対応する。Table 3 は、拡張実験における初期冷凍条件を示しており、熱応力解析による許容温度差に対して 10~20% の安全率を考慮した値となっている。また、流量配分は、各コイルの重量比によって定めた。

計算機制御によって得られた拡張実験における TM C-I の初期冷凍特性を Fig. 4 に示す。コイル内最高温度差 80K, 平均冷媒流量 4.5g/s に自動的に制御が

Fig. 3 Automatic cool-down block diagram of the cluster test facility

Table 2 Cool-down conditions in the extended test

Item	Object	Criteria
Mass flow rate	TMC-I	4.5 g/s
	CTC	4.2×2 g/s
	CBC	1.0×2 g/s
Allowable temperature difference	top and bottom of coil	80K
	right and left of coil	30K
	CTC-TMC	30K
	CTC-CBC	-10~30K
	structure-TMC	50K

Fig. 4 Measured cool-down characteristics of the TMC-I

なされ、初期冷凍は、約 160 時間で終了したことがわかる。また、5 個のコイルの初期冷凍における平均温度に相当するコイル抵抗の変化は、Fig. 5 に示す通りである。初期冷凍の前半で CBC-2 に冷え残りが生じているが、これは、実流量と流量計指示値の不一致のために生じたものであり、その後の調整により自動的に解消され、5 個のコイルとも均一に初期冷凍されていることがわかる。核融合炉では、数十個の大型超電導コイルの同時初期冷凍を行う必要があり、このような自動初期冷凍技術開発の意義は大きい。なお、同様な計算機制御により CBC 増設前に行った CTC および TMC-I の初期冷凍実験⁷⁾での初期冷凍時間は、約 140 時間であるので、CBC の増設による冷凍重量の増加分 (約 12%) に対応して初期冷凍時間が約 20 時間程余分に必要となったことになる。

4-2 初期冷凍効率

ヘリウム液化・冷凍機の液体窒素温度から液体ヘリウム温度領域における冷凍能力 (初期冷凍能力) は、その温度領域でのコイルの温度降下速度を決定する。今、コイルの温度降下に有効に使われた初期冷凍能力とその時冷凍システムで発生した全初期冷凍能力の比を初期冷凍効率と定義すると、任意のコイル系を所定の時間で初期冷凍するのに必要な冷凍システムの初期冷凍能力は、コイル温度降下速度から求めた初期冷凍能力を初期冷凍効率で除した値となる。コイル系が大型化するに伴い、初期冷凍能力は、冷凍システム全体の容量を決定することになるので、初期冷凍効率を把握することは、冷凍システム設計上重要となる。

TMC-I 拡張実験において測定したコイル温度降下速度から求めたコイル冷凍に有効な初期冷凍能力を Fig. 6 中の黒丸表示で示す。図中破線は、28ton のコイルを 1.5K/h で冷凍するのに要する初期冷凍能力計算値を示しており、TMC-I 拡張実験におけるコイル系温度降下速度は、100K 以下の温度領域で約 1.5K/h となることからわかる。また、Fig. 6 には、この温度領域における冷凍システムの設計初期冷凍能力を示しているが、設計初期冷凍能力の約 1/2 が有効にコイル冷凍に寄与しており初期冷凍効率は、約 50% であった。これは、これまでの CTF³⁾ および LCT 国内試験⁴⁾における初期冷凍実験と同じ結果である。つまり、浸漬冷凍型超電導コイルを所定の時間で初期冷凍する場合、冷凍システムの初期冷凍能力は、コイル温度降下速度から求める初期冷凍能力の約 2 倍必要であることを意味している。

5. 定常熱負荷測定

コイルの定常熱負荷の測定は、冷凍系からの冷媒供給を停止した後、蒸発法により行った。今回の TMC-I 拡張実験およびこれまでの一連の実験で得られた各コイルの定常熱負荷測定結果と設計値の比較を Table 3

Fig. 5 Measured cool-down characteristics of the CTC, TMC-I, and CBC

Fig. 6 Refrigeration power for the cool-down

に示す。表中の総合熱負荷は、電流リード負荷を含むコイル総熱負荷を示しており、実測の非通電時および定格通電時のコイル系総熱負荷合計は、それぞれ58.2Wおよび77.4Wとなる。これに対して非通電時および通電時の設計熱負荷は、それぞれ70.9Wおよび93.8Wであるので実測値の方が設計値より約20%程度低い値となっていることがわかる。この差の主な要因は、下記の通りである。

①TMC-I における超電導導体接続部（33ヶ所）の接触抵抗を設計では、 Nb_3Sn 線材の曲げ歪みによる劣化を見込んで、実証試験等による測定結果の約5倍に相当する10Wと安全側に評価したこと。

②TMC-I, CBC-1 および 2 の輻射による熱損失を、設計ではほとんど全表面に渡って考慮したが、実際には、かなりの表面が CTC-1 および 2 によって熱シールドされたこと。

一方、電流リードによる液化負荷総計は、通電時において設計値が 40.2l/h であるのに実測値が 71.4l/h と約2倍の負荷となっている。これは、CBC 用電流リードを除いた他の電流リードの熱交換特性が、設計値よりも悪いために、安定通電には設計値の2～3倍の冷媒流量を要したためである。この液化負荷増大のために、冷凍負荷が設計値以下であったにもかかわらずコイル系の総熱負荷が冷凍システムの液化・冷凍能力を上回ってしまい、結果的には、全コイルの定格通電時に -13l/h の液体ヘリウムの損失となった。これは、コイルの安定通電に支障を及ぼすほどの損失量ではなかったが、電流リードの熱特性の最適化が、大電流化が必要不可欠である核融合用超電導コイル・システムにとって、特に重要であることを示している。なお、CBC 用電流リードには、熱特性の優れた大型電流リード開発⁹⁾の第一段階として製作したバンドル型電流リードを採用しており、今回の拡張実験において、通電電流値 2,145A のとき、冷媒流量 0.1g/s、発生電圧 30mV、高温端温度 290K と理想的な熱特性を有していることが明らかとなった。また、CBC 間の結合リードは、CBC-1 および 2 端からの伝導冷却だ

Table 3 Measured and designed heat load of coils in the Cluster Test Facility

		heat load of current lead (l/h)		total heat load (W)	
		design	measured	design	measured
CTC-1	0 A	2.13×2	3.0+ 3.4	12.6	15.6
	2,145 A	3.60×2	9.0+ 9.0	14.9	16.8
CTC-2	0 A	2.13×2	4.1+ 3.6	12.6	15.0
	2,145 A	3.60×2	9.0+ 9.0	14.9	16.1
TMC-I	0 A	5.70×2	12.0+ 6.0	24.3	16.2
	6,000 A	9.90×2	15.0+14.4	40.0	26.9
CBC-1	0 A	3.0	3.0	10.7	6.5
	2,145 A	3.0	3.0	12.0	9.2
CBC-2	0 A	3.0	3.0	10.7	6.5
	2,145 A	3.0	3.0	12.0	8.4
TOTAL	0 A	25.9	38.1	70.9	58.2
	rated current	40.2	71.4	93.8	77.4

けで 5 K 以下での安定通電が可能であり、液化負荷の軽減に有効であった。

6. ダンプ実験

TMC-I 異常時の保護のために設置したしゃ断器を手動で開とすることにより、TMC-I の蓄積エネルギーを外部保護抵抗に放出し、コイル電流を急速に放電するダンプ実験を 20, 40, 60, 80 および 100 % の各電流値で行った。

6-1 コイル内圧力および液位変化

定格電流値から時定数約14秒でダンプした場合のコイル内圧力および液位変化を Fig. 7 に示す。ダンプと同時にコイル内圧力および液位は、上昇しダンプ後15秒付近で安全弁が作動することにより圧力は、降下するが、安全弁が閉となった時点で再び0.04atm程度の圧力上昇が生じている。また、コイル内液位は、安全弁および常温回収ラインを介してコイルからのヘリウム放出量が増加する結果、圧力降下とともに減少し、最終的にはダンプによる熱損失で蒸発した分だけ減少する。

このように定格電流値からのダンプの場合には、安全弁が作動するが、80%電流値以下でのダンプでは、安全弁設定圧力以上のコイル内圧力上昇は見られなかった。Fig. 8 に時定数14秒で各電流値からのダンプの場合に測定したコイル内圧力上昇および液体ヘリウム

蒸発量を示す。図よりダンプ開始電流値が増加すると圧力上昇および液体ヘリウム蒸発量が増加することがわかる。安全弁が作動することにより 100 % 電流値からのダンプにおける最大圧力上昇は、約 0.18 atm となり、そのときの液体ヘリウム蒸発量は、約 25 l であった。

6-2 熱損失特性

外部保護抵抗値を変化することによりダンプ時定数を変数として TMC-I の熱損失特性を測定した。時

Fig. 7 Transient behavior of liquid helium in the TMC-I during manual dump from 100% current with time constant 14 sec.

Fig. 8 Pressure rise and liquid helium evaporation in the TMC-I due to manual dump with time constant 14 sec.

Fig. 9 Eddy current losses of the TMC-I due to manual dump with time constant 4.0 and 6.6 sec.

定数 4.0 秒および 6.6 秒の場合の熱損失特性結果を Fig. 9 に示す。この場合の損失熱量は、液体ヘリウムの蒸発量を潜熱で換算した値である。図より、時定数 4.0 秒の方が 6.6 秒の場合よりも約 2 倍程度ダンプによる熱損失が大きいことがわかる。また、時定数 14 秒の場合の熱損失は、Fig. 8 のヘリウム蒸発量から 100 % 電流値で約 57 KJ となる。これは、時定数 6.6 秒の場合の約 1/2 の熱損失量であり、コイル蓄積エネルギーの約 0.7 % に相当している。このように、TMC-I のダンプによる熱損失は、時定数に反比例していることが明らかとなった。

Fig. 9 には、ダンプ時のうず電流損失計算結果も同時にプロットしてあるが、実測値と計算値は、比較的良好に一致しており、ヘリウムの蒸発が、うず電流損失によって生じたことがわかる。なお、計算では、コイル巻線部とステンレス容器とのうず電流損失の比は、1 対 2 となっており、ステンレス容器での熱損失が支配的となっている。

拡張実験においては、今回増設した CBC-1 および 2 のダンプ実験を TMC-I と同様に 20% の電流値ごと

に実施した。この場合の時定数は、3.7秒であり、100 %電流値からのダンプによる熱損失は、CBC-1 で約 5.3KJ, CBC-2 で約 11.4KJ という結果となった。この差は、CBC-1 および 2 で使用している導体が、それぞれコンパクト・ストランド型およびモノリス型と異なっていて、しかも CBC-2 の線材の撚りピッチが、CBC-1 の約 5 倍であることに帰因している。CBC-1 および 2 の熱損失はそれぞれコイル蓄積エネルギーの約 0.8 % および 1.7 % に相当しており、うず電流損失計算値ともよい一致を示した。

7. むすび

拡張実験を中心とした一連の TMC-I の実験で得られた熱的結果の要約は、以下の通りである。

(1) 初期冷凍

CTC-1 および 2, TMC-I, CBC-1 および 2 の合計 5 個の超電導コイルの同時初期冷凍は、過度な熱応力を発生しないようにコンピュータによって流量および温度制御を行った結果、約 160 時間で終了した。また、総重量 28ton のコイル系の初期冷凍効率率は、約 50% であった。

(2) 定常冷凍

5 個の超電導コイルを外部 JT 弁による冷凍モードで約 200 時間以上 4 K に保持し、コイルの安定通電を行うことができた。ただし、全コイル定格通電時には、電流リードによる液化負荷が設計値の約 2 倍となり、系全体では、液化能力が、約 13l/h 不足した。

(3) コイル熱負荷

コイル系の定常熱負荷を蒸発法により測定した結果、電流リードを含めた全コイルの総熱負荷は、定格通電時約 78W であった。

(4) ダンプ実験

TMC-I は、20, 40, 60, 80 および 100 % 電流値の各段階でダンプされたが、これによりコイル異常は発生しなかった。ダンプによる熱損失は、時定数に反比例しており、時定数 14 秒で 100 % 電流値における熱損失は、約 57KJ であった。

クラスター・テスト装置を用いた一連の TMC-I の実験を通じて、Nb₃Sn 導体を用いた大型超電導コイルの実用化への実証と同時に、熱特性の異なる複数個の超電導コイルの冷凍技術をより一層確立するとともに、複数個の大型超電導コイルの熱的振舞いを明らかにすることができた。

謝辞

本研究を達成するに当り御鞭撻、激励をいただいた森理事、磯センター長、小幡部長、故日大理工学部教授・原研特別研究員 安河内昂先生に深く感謝致します。

TMC-I 製作担当の株式会社製作所、CBC 製作担当の株式会社および CBC 用電流リード製作を含むクラスター・テスト装置拡張を担当した株式会社富士電機の並々なぬ努力に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 安藤俊就，他：低温工学 19 (1984) 81
- 2) 吉田清，他：低温工学 19 (1984) 91
- 3) 島本進，他：低温工学 19 (1984) 105
- 4) 多田栄介，他：低温工学 19 (1984) 153
- 5) T. Ando, et al., : Calloque C1, supplément au n°1, Tome 45, janvier 1984, Journal de Physique PCI-101
- 6) 多田栄介，他：第32回低温工学研究発表会予稿集 (1984) 175