

JAERI-Tech  
2003-030



JP0350215



JT-60U ECHジャイロトロン用  
超伝導コイルの運転経験

2003年3月

五十嵐 浩一・関 正美・下野 貢  
寺門 正之・石井 和宏・高橋 正己

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Tech  
2003-030



JP0350215



JT-60U ECHジャイロトロン用  
超伝導コイルの運転経験

2003年3月

五十嵐 浩一・関 正美・下野 貢  
寺門 正之・石井 和宏・高橋 正己

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Nakagun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

# J T - 6 0 U E C H ジャイロトロン用

## 超伝導コイルの運転経験

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

五十嵐 浩一\*・関 正美・下野 貢  
寺門 正之・石井 和宏\*・高橋 正己\*

(2003年1月31日 受理)

JT-60U における電子サイクロトロン加熱 (E C H) 装置は、局所加熱あるいは電流駆動をすることが可能であり、動作周波数 110GHz において、出力約 1 MW, 最大パルス幅 5 秒を出力するジャイロトロン 4 基を用いる。電子サイクロトロン波によるジャイロトロンが 110GHz の高周波を発振するために必要な超伝導コイル (以降 S C M と記す) は、ジャイロトロン内部のキャビティ付近に最大 4.5T の強磁場を発生する。この超伝導コイルの特徴は、4 K ヘリウム冷凍機をコイルに搭載することによって、液体窒素を全く使用することなく運転することが可能であり、メンテナンス性が非常に優れています。

ジャイロトロン用超伝導コイルを高出力・長パルスの環境で長期間継続運転した経験の報告は、これまであまりなく、大変貴重である。ジャイロトロン用超伝導コイルの運転経験から、E C H 装置の運転における以下のような重要な知見を得た。4 K ヘリウム冷凍機の交換時期の推定方法を試案して、E C H 装置の順調な運転に寄与した。さらに、4 K ヘリウム冷凍機停止が、150 時間以下の場合は再起動後 200 時間程度以内で S C M の温度が通電可能温度 (5.0K 以下) まで到達することを実証できた。

## Operational Experiences of the Super Conducting Magnet for a Gyrotron of the JT-60U ECH System

Koichi IGARASHI<sup>\*</sup>, Masami SEKI, Mitsugu SHIMONO,  
Masayuki TERAKADO, Kazuhiro ISHII<sup>\*</sup> and Masami TAKAHASHI<sup>\*</sup>

Department of Fusion Facilities  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2003)

The JT-60U electron cyclotron heating (ECH) system can heat plasmas locally and drive a plasma current with four 1 MW-5 sec gyrotrons. The super conducting magnets (SCM) are required for oscillation of the gyrotron at a working frequency of 110 GHz. The SCM provides a high magnetic field of 4.5T at the cavity inside the gyrotron. This SCM system is characterized by 1) operation without liquid Helium owing to a 4 K-refrigerator applied to the magnetic coils, 2) easy maintenance.

Operational experiences about the SCM system through a long term experiment for a high power gyrotron are very valuable. According to those operational experiences, it is clarified the 4 K-refrigerator should be renewed in order to keep low temperature of the SCM. It is also found that 200 hours or less are required for the super conducting condition (<5K) after long stopping time of the refrigerator up to 150 hours. This is useful information for making a plan about ECH experiments.

Keywords: JT-60U, ECH, Gyrotron, SCM, 4K-refrigerator, Operational Experiences

---

<sup>\*</sup>Cooperative Staff

## 目次

1. はじめに .....	1
2. 装置概要 .....	2
2.1 電子サイクロトロン加熱（E C H）装置の概要 .....	2
2.2 S C Mの概要 .....	2
2.3 S C Mの特徴 .....	3
2.4 S C Mの仕様 .....	3
3. 運転経験 .....	1 3
3.1 冷凍機の交換時期 .....	1 3
3.2 冷凍機再起動後の通電可能になるまでの時間 .....	1 5
3.3 長期停止後の再起動結果 .....	1 5
3.4 冷凍機再起動後の温度低下 .....	1 7
3.5 連続通電時の温度上昇 .....	1 8
3.6 クエンチの発生 .....	1 8
4. メンテナンス履歴 .....	1 9
5. 検討事項など .....	2 1
5.1 今後の検討事項 .....	2 1
5.2 S C M用ユーティリティの不具合 .....	2 1
6. まとめ .....	2 2
 謝辞 .....	2 2
参考文献 .....	2 3
付録 .....	2 4

## Contents

1 . Introduction .....	1
2 . System Description .....	2
2 . 1 Overview of the JT-60U ECH System .....	2
2 . 2 Overall of the SCM System for a Gyrotron .....	2
2 . 3 Characteristics of the SCM System .....	3
2 . 4 Specifications of SCM System .....	3
3 . Experience of SCM System Operation .....	1 3
3 . 1 Time Span of Renewal of Refrigerators .....	1 3
3 . 2 Time Span up to the Operational Temperature of the SCM after Re-start of Refrigerators .....	1 5
3 . 3 Results of Re-start after Long Time Stop .....	1 5
3 . 4 Time Behavior of Temperature of Refrigerators after Re-start .....	1 7
3 . 5 Temperature Increase in Continue Operation .....	1 8
3 . 6 Occurrence of Quench .....	1 8
4 . Maintenance History of the SCM .....	1 9
5 . Discussions .....	2 1
5 . 1 Future Subjects .....	2 1
5 . 2 Troubles on Utilities for the SCM .....	2 1
6 . Summary .....	2 2
 Acknowledgements .....	2 2
References .....	2 3
Appendix .....	2 4

## 1. はじめに

J T - 6 0 U 実験においてプラズマの不安定性を抑制するために、局所的な加熱もしくは電流を流すことが必要である。その方法として、ミリ波帯の高周波を用いた電子サイクロトロン加熱あるいは電流駆動（E C H／E C C D）がある。J T - 6 0 U では、高周波加熱装置の 1 つとして、動作周波数 110GHz において、出力約 1MW、最大パルス幅 5 秒を出力するジャイロトロン<sup>1)</sup> を用いた局所加熱あるいは電流駆動が可能な電子サイクロトロン加熱（E C H）装置が設置されている。E C H 装置は、ジャイロトロンの改良<sup>2) 3)</sup> および増設による発振出力の増大と伝送系の敷設精度を高めたことによってプラズマ入射パワーが進展し、プラズマ不安定性の抑制、高電子温度の達成およびパルス変調入射による閉じこめ特性研究などに貢献している。

ジャイロトロン用超伝導コイルは、ジャイロトロンが 110GHz の高周波を発振するために用いられ、ジャイロトロン内部のキャビティ付近に最大 4.5T の強磁場を発生する。この超伝導コイルの特徴は、4 K ヘリウム冷凍機をコイルに搭載することによって、液体窒素を全く使用することなく運転することが可能であり、メンテナンス性が非常に優れていることである。ジャイロトロン用超伝導コイルを、高出力・長パルス運転の環境で長期間継続運転した経験の報告は、これまであまりなく、大変貴重である。そこで、ジャイロトロン用超伝導コイルの運転から得られたデータを基に、冷凍機の交換時期および再起動後の運転可能になるまでの期間などの推定を行い、E C H 装置の運転における重要な知見を得た。

本報告は、ジャイロトロン用超伝導コイルの運転経験をまとめたもので、第 2 章に装置概要を述べ、第 3 章において、4 K ヘリウム冷凍機の交換時期および再起動後の通電可能になるまでの時間の推定、4 K ヘリウム冷凍機の再起動による温度低下などを述べる。第 4 章には、メンテナンスの履歴を記述し、第 5 章では検討事項などを述べ、第 6 章で、まとめを述べる。

## 2. 装置概要

### 2.1 電子サイクロトロン加熱（ECH）装置の概要<sup>4)</sup>

本 ECH 装置は、図-1 に示すように、110GHz の大電力高周波を発生する大電力電子管（ジャイロトロン）と、それを駆動するための高電圧電源、発生した大電力高周波を伝送する伝送系およびアンテナなどから構成される。110GHz 大電力電子管の動作には、周波数に対応した磁場が必要であり、約 4.5T の強磁場を発生するジャイロトロン用超伝導コイルを用いている。

発生した高周波は、整合器により低損失な高周波モードに変換され、伝送系導波管に導かれる。伝送系からの高周波は、真空窓を介してアンテナに導かれる。この真空窓は、高周波損失が小さく、熱伝導率の大きい人工ダイヤモンド<sup>5)</sup>が用いられており、定常的な大電力透過が可能である。アンテナは、二つの準光学鏡を有している。一つは高周波ビームのプラズマ中での発散を押さえるための収束鏡であり、もう一つは高周波ビームの入射方向を制御する可動鏡である。JT-60U ECH 装置では、プラズマ中へ高周波を任意の方向で入射し、加熱あるいは電流分布制御することができる。ECH 装置の制御システムは、高周波の発振を制御する大電力制御系とアンテナの可動鏡などを制御するアンテナ入射制御系からなり、実験条件に応じて最適な加熱あるいは電流駆動を行うことができる。

なお、JT-60U では、これらの装置が 4 系統設置されており、それらを、 ECH #1～4 と呼ぶ。

### 2.2 SCM の概要

SCM は、周波数 110GHz 帯のジャイロトロンに使用する。ジャイロトロンは、電子サイクロトロン共鳴メーザの原理を用いた電子発振管のため、SCM には精度の高い強磁場が必要となる。

SCM は、大きく分けてコイル部とクライオスタッフ部および超伝導コイル制御盤部から構成される。クライオスタッフ部には超伝導コイルが格納され 4K ヘリウム冷凍機が搭載されている。コイル部は、最大 4.5T の強磁場を発生する。超伝導コイル制御盤部は、超伝導コイルを高精度に励磁するために必要な電源および制御回路であり、制御盤に格納されている。また、4K ヘリウム冷凍機用のヘリウム圧縮機が必要となる。

S C Mは、冷凍機が短時間停止しただけでも温度が上昇する。そのため、これらの機器はできる限り停電の起こらない無停電電源系統から供給している。装置構成概略を図－2に示す。

### 2.3 S C Mの特徴<sup>6)</sup>

このS C Mの最大の特徴は、(株)東芝製の液体ヘリウムを使用しない「冷凍機直冷方式」を使用していることである。従来型の超伝導コイルは、液体ヘリウムや液体窒素などの極低温冷媒を使用し、それらを大型の断熱容器から定期的に補給しなければならない。この作業は重労働であるうえに、加圧などの煩雑な手順を間違えると容器の破損や閉塞による破裂事故につながる危険性も考えられる。これに対して冷凍機直冷方式は、極低温冷媒の補給が不要で、液体ヘリウムや液体窒素などを全く使用せずに運転することができる。

また、常温ボア径が直径 245mm と大きいのも特徴の 1 つである。

### 2.4 S C Mの仕様

外形概略を図－3に示す。

#### 2.4.1 主要諸元

- (1) キャビティ中心磁場 : 4.5T (付録－1に工場出荷時の磁場強度を示す)
- (2) ガン中心磁場 : 0.225T±10%
- (3) 常温ボア径 :  $\phi$  245mm (E C H # 1のみ  $\phi$  240mm)
- (4) 外形寸法 :  $\phi$  750mm
- (5) 取合いフランジ径 :  $\phi$  950mm × PCD850mm × 16 -  $\phi$  16 穴
- (6) 質量 : 約 800 kg
- (7) 耐震性 : 980Gal

## 2.4.2 コイル部

### (1) コイル構成

SCMは、主コイルとしてキャビティコイル（Cコイル）、補助コイルとしてバッキングコイル（Bコイル）およびガンコイル（Gコイル）の2つ、合計3つの超伝導コイルから構成され、これらのコイルは、直列に接続されている。図-4に接続図を示す。

### (2) コイル線材

ニオブチタン（NbTi）および銅（Cu）

### (3) コイルの自己および相互インダクタンス

表-1に、各コイルの自己および相互インダクタンスを示す。

表-1 各コイルの自己および相互インダクタンス表

	Cコイル	Bコイル	Gコイル
Cコイル	93.1 (H)	-2.4 (H)	0.24 (H)
Bコイル	-2.4 (H)	3.49 (H)	-0.23 (H)
Gコイル	0.24 (H)	-0.23 (H)	0.176 (H)

### (4) 磁界条件

- 1) 主コイル（Cコイル）の軸方向をz軸とし、主コイル領域の中心（z=10mm）から±5mmの範囲で垂直（z方向）磁界の変動が1.25T/m以下である。  
(dB/dz≤1.25T/m)
- 2) 補助コイル領域の中心（z=400mm）から±5mmの範囲で垂直磁界の変動が0.875T/m以下である。(dB/dz≤0.875T/m)
- 3) 主コイル領域の中心と補助コイル領域の中心距離は400mm以下

### (5) 据付精度

コイルボアの中心軸は、磁気軸から1mm以内である。

### 2.4.3 クライオスタート部

#### (1) 4Kヘリウム冷凍機

主コイルおよび補助コイルなどを超伝導温度まで直接冷却するものである。

概略外形を図-5に、工場出荷時の冷却特性を付録2~5に示す。

- 1) 冷凍方式 : 2段式 GM(ギフォード・マクマホン)冷凍機
- 2) 冷凍能力(5.3kW 入力時) : 1段蓄冷器 : 30W (40K)  
: 2段蓄冷器 : 0.7W (4.2K)
- 3) 使用冷媒 : 高純度ヘリウムガス
- 4) 重量 : 約 25kg
- 5) 定期メンテナンス : 900時間または発停<sup>\*1</sup> 10回毎に実施  
(※1 : 発停とは、1時間以上の  
冷凍機停止→再運転を意味する)

#### (2) 4Kヘリウム冷凍機用圧縮機

- 1) 電源／消費電力 : 3φ 200V／5.9kW
- 2) 起動／定格電流 : 76A／18.5A
- 3) 冷却水流量／圧力 : 6.5~8.0 ℥/min／0.7MPa 以下
- 4) 冷却水入口温度 : 4~32°C
- 5) 冷媒 : 99.995%ヘリウムガス (露点温度-62°C)
- 6) 冷媒充填圧力 : 1.95MPa at 20°C
- 7) 重量 : 105 kg

#### (3) 真空容器

真空容器は、超伝導コイルなどを格納し、断熱支持のために内部を真空状態に保つものである。その中心に常温ボア部を有し、そこに、ジャイロトロン発振部が収まるようになっている。

### 2.4.4 電源および制御部

#### (1) 超伝導コイル用電源

##### 1) 入力電源

- ① 電圧 : AC 200V ±10%
- ② 周波数 : 50/60Hz
- ③ 相数／相間不平衡率 : 3相／3%
- ④ 受電容量 : 約 4kVA

## 2) 最大出力(電流／電圧)

- ① 主コイル電源 : 110A／±8V
- ② Bコイル用補助電源 : ±15 A／±3V
- ③ Gコイル用補助電源 : ±15 A／±3V

## (2) 温度検出器

- 1) 出力定格 : DC1V-10  $\mu$ A (±5%)
- 2) 電流安定度 :  $10^{-3}$  / 4時間以下(定格電流にて)
- 3) 温度測定センサ : Carbon-Glass Resister (略称:CGR、0~2k $\Omega$ )
- 4) 表示(電圧計) : デジタル3桁(0~20.0mV)  
表示精度±1.5%以内

## (3) 電源・制御盤

- 1) 外形寸法 : 幅 700mm×奥行 850mm×高さ 2000mm
- 2) 重量 : 500kg

## 2.4.5 コイル使用条件

## (1) 通電電流

表-2に、各系統毎の典型的な通電電流値を示す。

表-2 コイル通電電流値一覧

コイル	# 1	# 2	# 3	# 4
C (キャビティ)	103(A)	104(A)	104(A)	103(A)
B (バッキング)	-0.3(A)	-1.2(A)	-2.1(A)	-0.3(A)
G (ガン)	-0.5(A)	-0.2(A)	-0.3(A)	0.3(A)

(2) 運転パターン

1) JT-60U における実験運転例

ほとんどの場合は、週の火～金曜日の午前 8 時頃通電を開始し、午後 9 時 30 分頃停止というパターンである。

(通電時間：連続 13 時間 30 分)

2) エージング運転例

主に発振調整を行う場合であり、午前 10 時頃通電を開始し、午後 4 時 30 分頃停止というパターンである。

(通電時間：連続 6 時間 30 分)

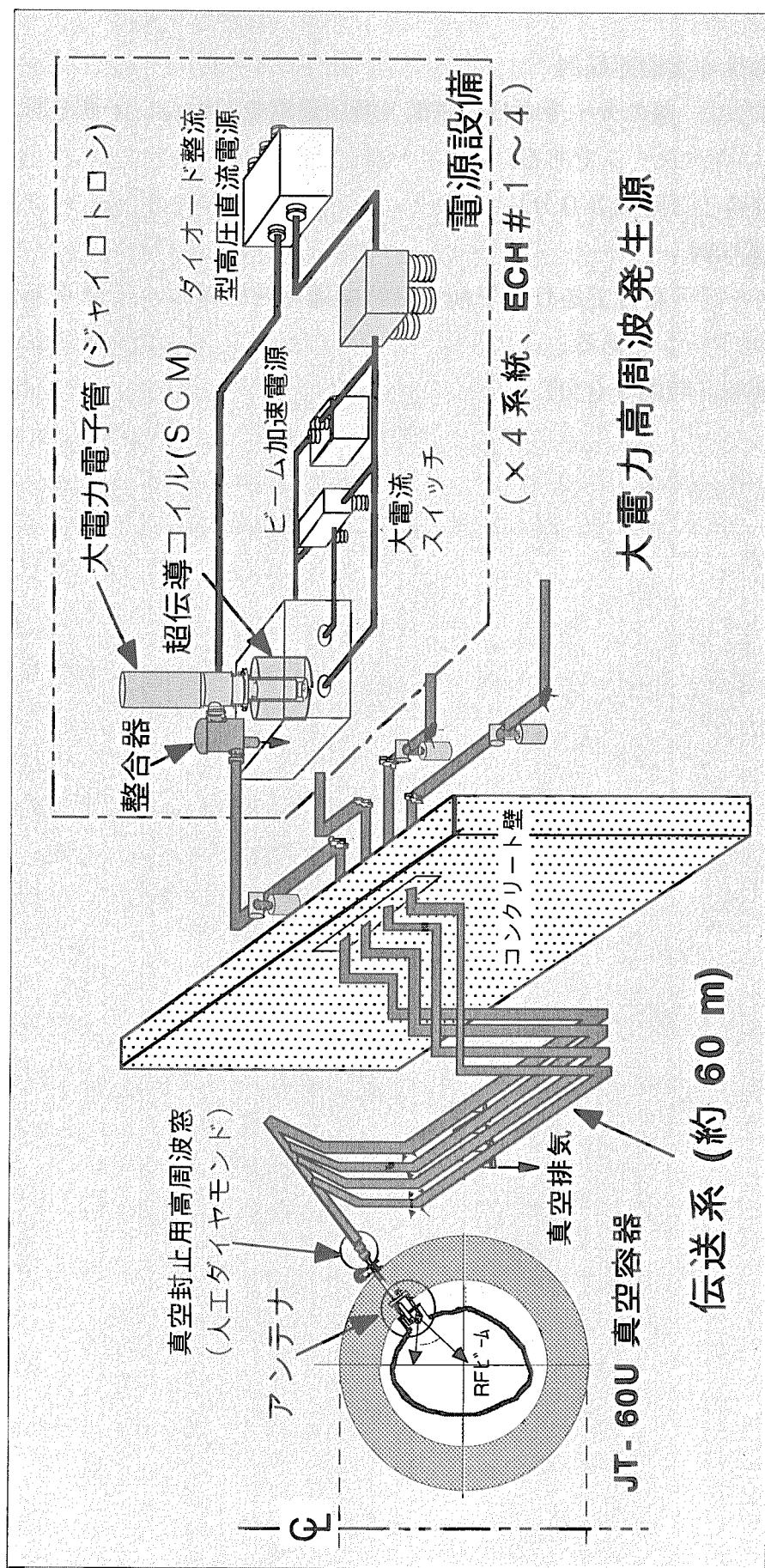


図-1 JT-60U 電子サイクロトロン加熱(ECH)装置の概要

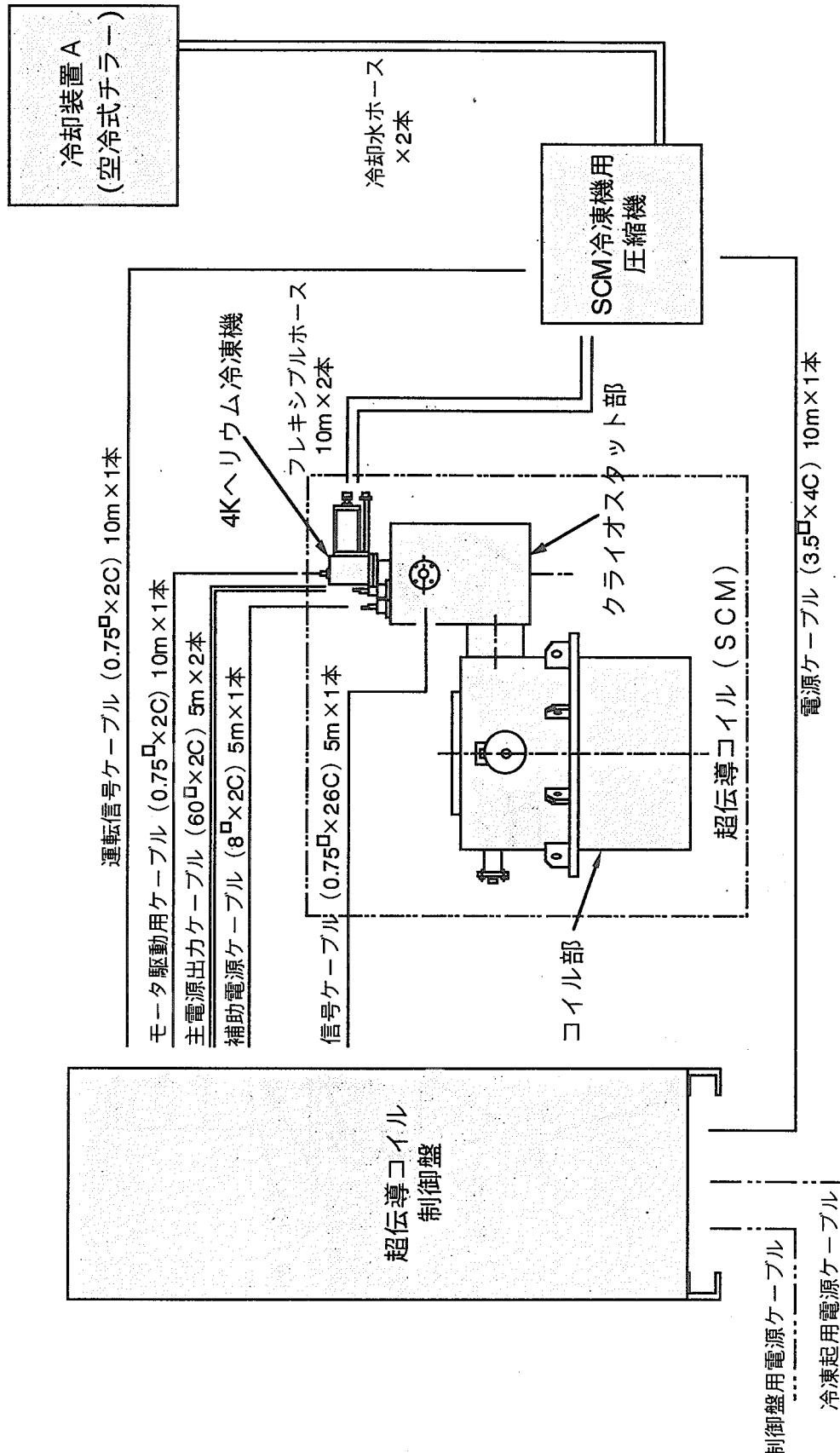


図-2 SCMの概略系統図

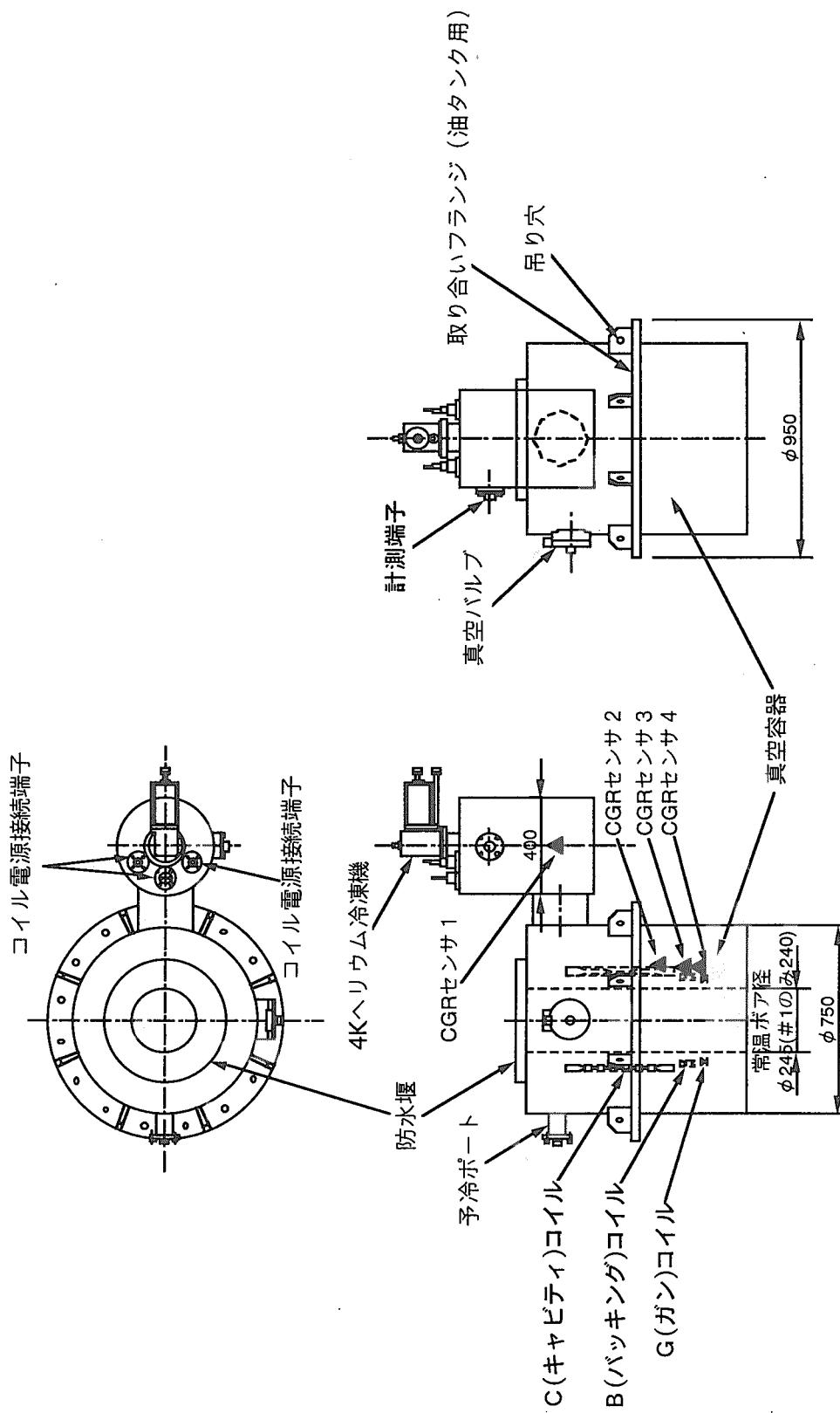


図-3 超伝導コイル外形図

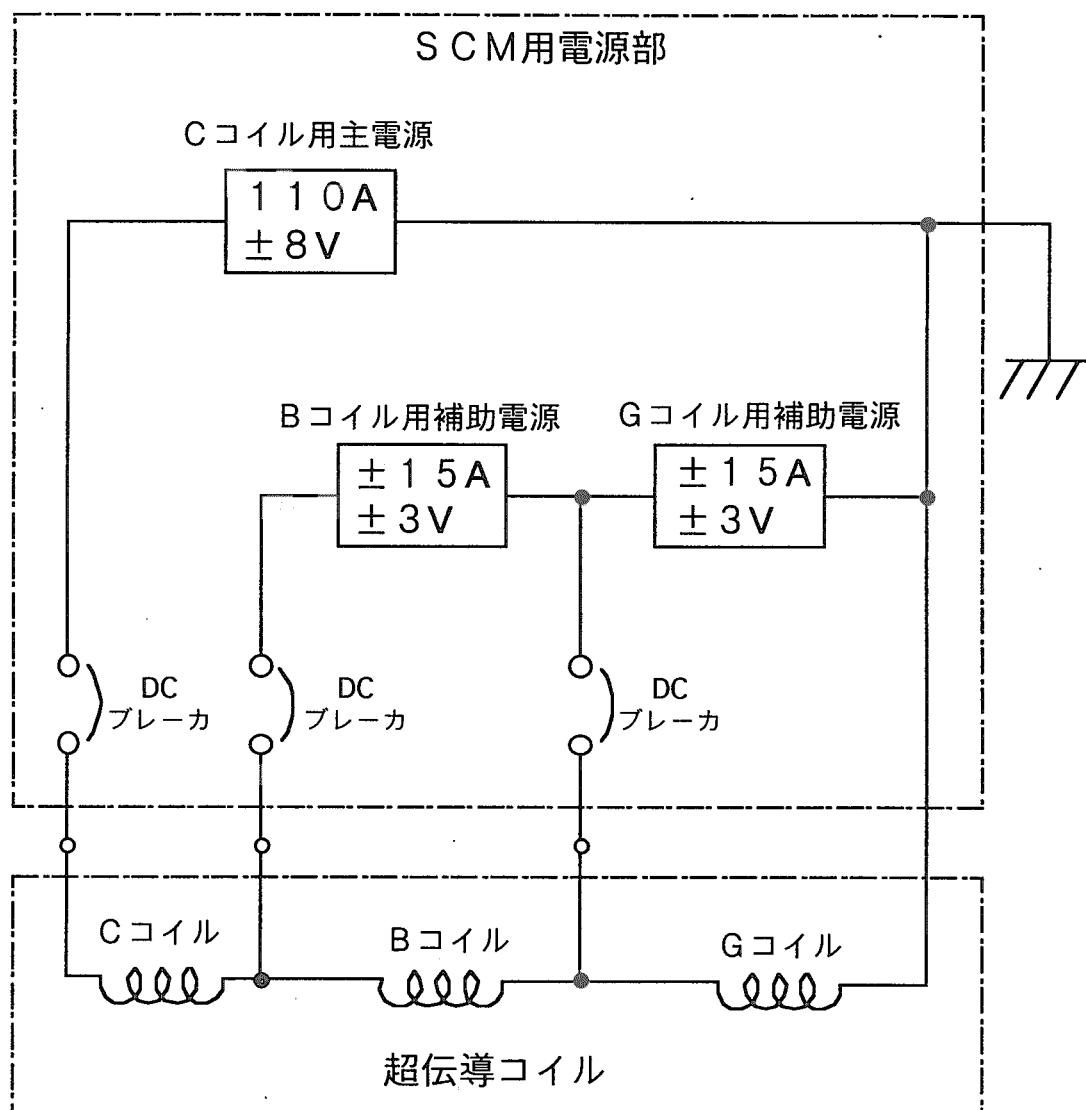


図-4 S C M電源～コイル接続図

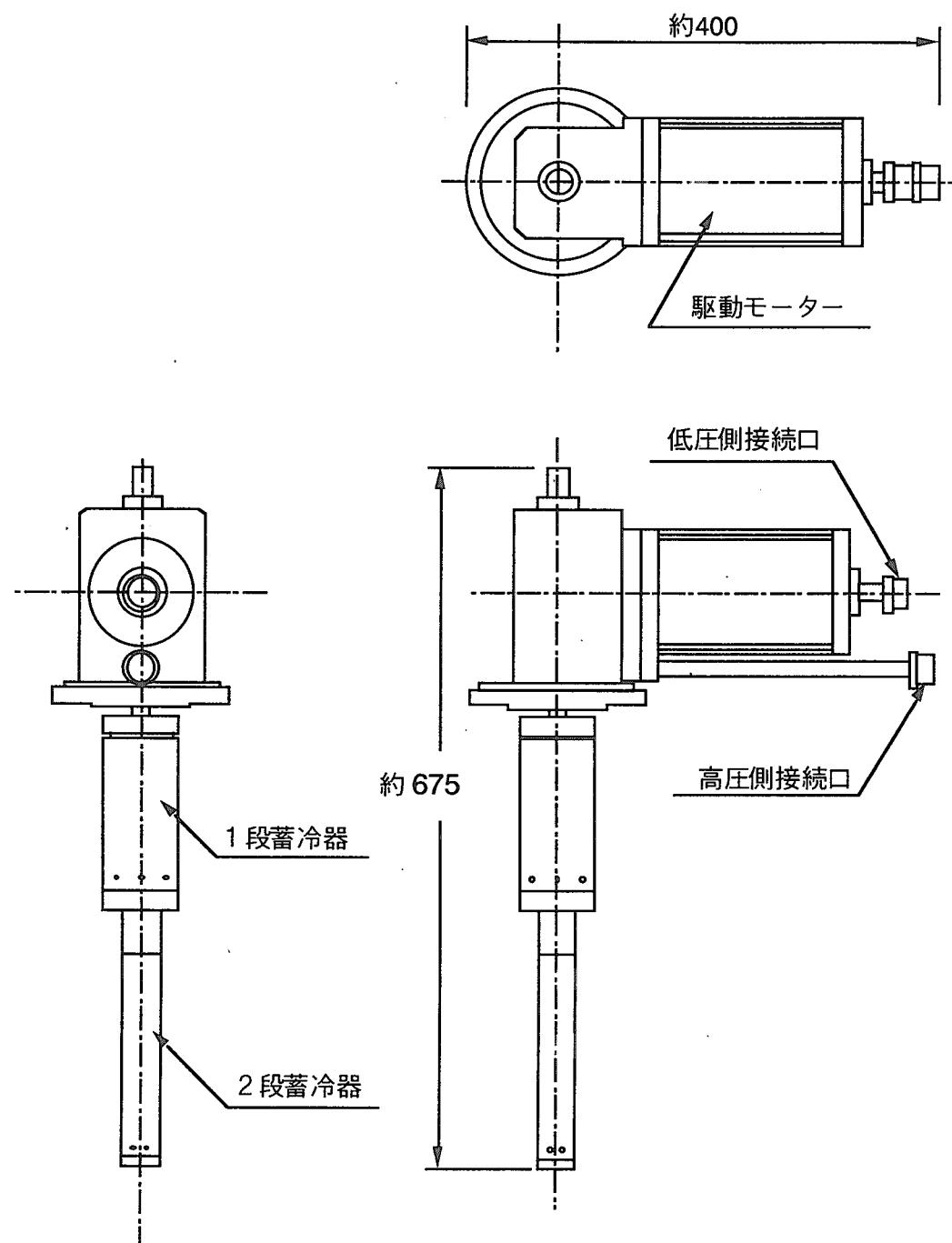


図-5 超伝導磁石用4Kヘリウム冷凍機外観図

### 3. 運転経験

J T - 6 0 U 実験運転において、停電、冷凍機の交換および定期点検などの時期があらかじめわかっていると、実験運転スケジュールなどを決定する上で非常に都合がよい。そのため、冷凍機を停止して再起動した場合の通電可能になるまでの期間および 4 K ヘリウム冷凍機の交換時期などを、運転経験から事前に推定できるよう検討した。

参考として、これまでの S C M 温度データグラフを、付録-6～9 に示す。

#### 3.1 冷凍機の交換時期

4 K ヘリウム冷凍機は、製造メーカーによる冷凍機の交換時期条件前でも、急に性能が劣化したり、交換時期である 9 0 0 0 時間を越えても冷凍機の性能に劣化の兆候が認められない場合もある。現状では、4 K ヘリウム冷凍機の運転可能期間を判断するのが非常に難しい。劣化の兆候が認められない場合は、冷凍機の交換を行わずに運転を継続することもある。逆に、実験運転を中断して冷凍機の交換を実施しなければならない場合も発生する。その場合は、実験内容の変更などにより実験スケジュールに支障をきたすこともある。

##### 3.1.1 冷凍機交換の目安（判定基準）

製造メーカーによると冷凍機の交換時期は、内部のシールが摩耗するなどの理由で、運転時間が 9 0 0 0 時間を越える、または発停 1 0 回を越えて運転した場合または、4 K ヘリウム冷凍機の性能が劣化し、S C M の温度が十分に冷却されない場合とされている。

十分に冷却されない場合とは、超伝導状態が保たれる温度まで冷却されないことであり、材質がニオブチタン (NbTi) および銅 (Cu) の S C M の場合は、5.5K 程度であるとされている。しかし、超伝導状態が破れる温度の 5.5K 程度ぎりぎりまで運転を行った場合には、超伝導状態が破れクエンチが発生し、S C M の破損につながる恐れが十分に考えられる。そのため、安全マージンを見込んで S C M の温度が 5.0K を越えると予想される場合に、冷凍機の交換をすることにした。

### 3.1.2 冷凍機交換時期の推定方法

冷却性能の劣化を表す代表的な事象であるSCMの温度上昇から、性能劣化の予兆を捉えて冷凍機の交換時期の推定方法を試案した。その予兆とは、冷凍機の運転中は、一定になっているはずのSCMの温度が、ある時期から上昇し始め、通電を停止しても温度が復旧しなくなる事象である。

以下に推定方法の試案を示す。今後、データの積み重ねにより、確実性を検証する予定である。

#### (1) 温度上昇傾向発生時の冷凍機交換具体例

実際の推定方法を、図-6を用いて説明する。

まず、SCM温度の上昇に従い、予想線を引く。次に、その線と5.0Kの線と交差する点に垂線を引き、日付軸との交点を交換予想日とする。

この具体例の場合、温度が5.0Kを越えるとの予想に従い、実際に冷凍機の交換を実施した。その結果、実験運転を中断することなくECH装置の順調な運転に寄与した。

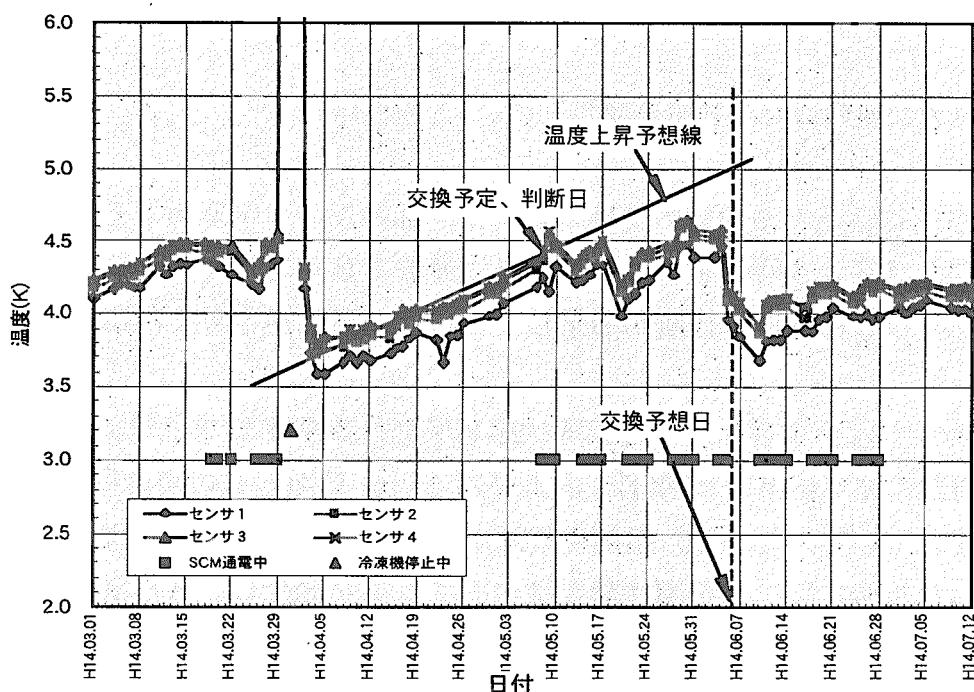


図-6 #1 SCM温度上昇傾向具体例

### 3.2 冷凍機再起動後の通電可能になるまでの時間

電源関係の定期点検などにより、冷凍機を停止しなければならないことが、年に何回か発生する。冷凍機の停止時間から通電可能な温度（5.0K以下）まで冷却される時間が推測できると、実験運転スケジュールを決定する上で、非常に都合がよい。

これまでの運転データ（付録－10～13参照）から、推測を試みた。データ数が少ないため確実性は低いが、おおよその時間は推測可能である。

図－7に示すように、JT-60U ECH 装置の冷凍機再起動後の通電可能になるまでの期間はばらつきが多いが、150時間（6日）程度の停止であれば、遅くとも200時間（8日）以内に通電可能になると推定できる。冷凍機を停止して再起動した場合の通電可能温度になるまでの時間は、今後も、データを補充し確実性を上げるために再評価していく。

### 3.3 長期停止後の再起動結果

150時間（6日）以上の長期停止した実績は、ECH #3のSCMにおいて平成14年7月から11月までの約5ヶ月間（150日=3600時間）がある。エージング運転を再開するため、平成14年11月21日に4Kヘリウム冷凍機の再起動作業を開始した。この作業は、製作メーカーの取扱説明書に従い実施した。平成14年11月21日は、真空容器部の弁を閉状態でターボ分子ポンプを起動し、真空容器部の真空排気を行った。真空度が、 $1.3 \times 10^{-4}$ Pa となった時点で真空容器部の弁を開とした。その後、4Kヘリウム冷凍機を起動し、冷凍機による冷却を開始した。取扱説明書に従い真空排気を継続し、真空度が、 $1.6 \times 10^{-5}$ Pa まで低下した時点で真空容器部の弁を閉とし、真空排気を停止した。冷凍機による冷却を続け平成14年12月6日に、通電可能な温度である3.7Kまで到達した。

通電可能温度までの到達時間は、約336時間（14日）であった。それは、工場出荷時の約250時間（付録－4参照）と比べると、35%ほど長い。しかし、ECH #3の冷凍機は、交換期間の9000時間を超える14400時間運転しており、そのことにより、到達時間が伸びたと考えられる。

また、SCMは真空容器部によって断熱されているために、4Kヘリウム冷凍機の停止時間がある時間を越えて再起動された場合には、通電可能温度までの到達時間が、一定になると考えられる。図－7は、長期停止および工場出荷時と3.2項に使用した運転データをまとめたものであり、通電可能温度までの到達時間の概略を見積もることができる。

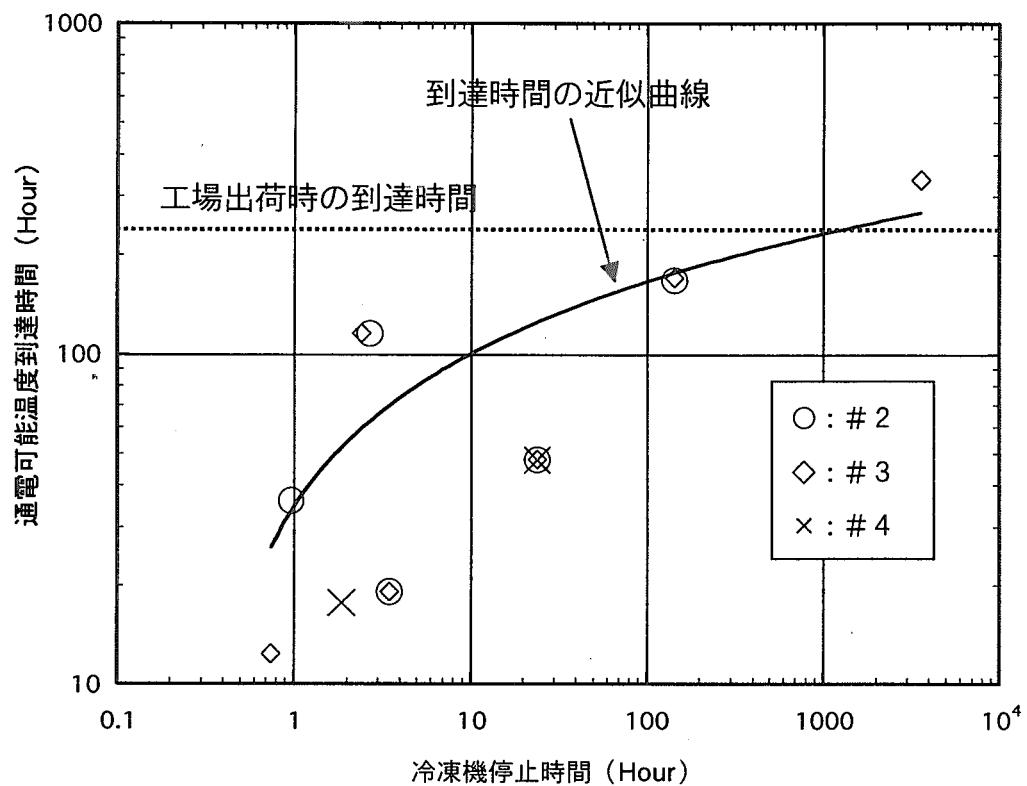


図-7 冷凍機停止時間一通電可能温度到達時間

### 3.4 冷凍機再起動後の温度低下

図-8に示すように、数日間冷凍機を停止した後に、再起動すると、多くの場合、SCMの温度が停止前と比べて下がる現象が見られる。この現象は、限られた系統によるものではない。

運転スケジュールに余裕がある場合に、4Kヘリウム冷凍機の停止・再起動を実施すると、SCMの温度を下げる効果が見られる。その場合、4Kヘリウム冷凍機の交換を行わずに運転を継続することができる。

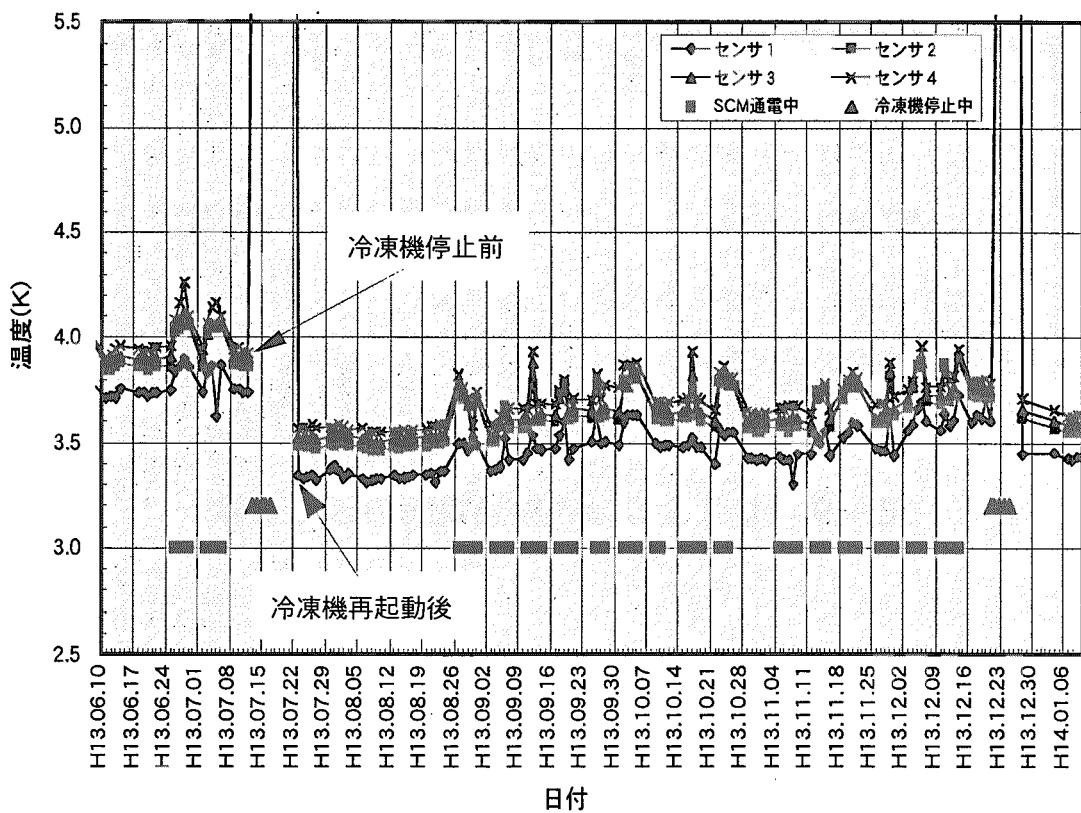


図-8 #1 冷凍機再起動後の温度低下

### 3.5 連続通電時の温度上昇

図-9に示すように、ジャイロトロンを発振させるために、SCMを連続通電すると、温度が上昇する事象がある。

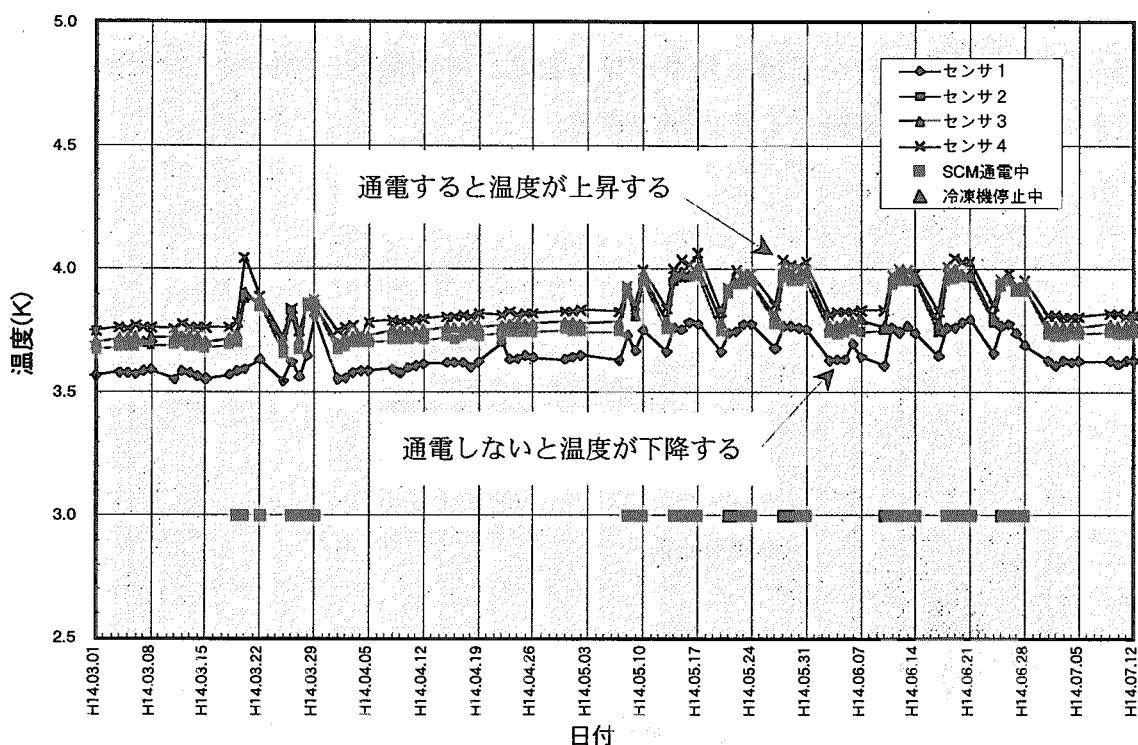


図-9 #3 SCM連続通電時の温度上昇

### 3.6 クエンチの発生

各系統とも、これまでに数回クエンチが発生している。発生の原因は、装置の制御不具合によるもの以外、よく解っていない。

クエンチ発生後のSCM温度であるが、発生直後は、温度(CGR)センサーにて測定不能な温度まで上昇し、通電が不可能となる。クエンチ発生後の通電可能な温度に到達する時間は、これまでの経験上、およそ24時間(1日)である。

クエンチ発生によるSCMの損傷は、これまでに無い。SCMの性能低下もジャイロトロンの発振状況から見ると、認められない。

## 4. メンテナンス履歴

表-3に、系統毎の運転期間および4Kヘリウム冷凍機の交換回数を示す。

表-3 4Kヘリウム冷凍機交換回数

系統	運転期間	交換回数	平均運転期間
# 1	38ヶ月	4回	9.5ヶ月／回
# 2	32ヶ月	4回	8.0ヶ月／回
# 3	26ヶ月	3回	8.7ヶ月／回
# 4	19ヶ月	2回	9.5ヶ月／回

表-4に、これまでの起動／停止状況を示す。この表には、停止の原因（停電・トリップなど）や、交換時期を示している。

表－4 「SCM冷凍機」起動／停止一覧

#1		#2		#3		#4	
起動/停止日	理由など	起動/停止日	理由など	起動/停止日	理由など	起動/停止日	理由など
H11.06.30	運転開始						
H11.07.13	クエンチ						
H11.08.12							
H11.11.10							
H11.11.15	H11.11.15 運転開始	H12.02.01	運転開始	H12.02.01	運転開始		
H12.02.01	停電	H12.02.01 停電					
H12.01.23							
H12.02.08							
H12.02.10							
H12.03.27	停電	H12.03.27 停電		H12.03.27 停電			
H12.07.17	冷凍機交換	H12.07.17 冷凍機交換		H12.06.20	冷凍機交換		
H12.08.16	停電	H12.08.16 停電		H12.08.09	クエンチ		
H12.10.04	冷却装置Aトリップ/圧縮機停止	H12.10.04 冷却装置Aトリップ/圧縮機停止		H12.08.16	停電		
H12.12.14	停電	H12.12.14 停電		H12.10.04	冷却装置Aトリップ/圧縮機停止		
H13.01.16	R F 定常系停電	H13.01.16 R F 定常系停電		H12.12.14	停電	H12.12.14 運転開始	
H13.01.22	R F 定常系停電復電	H13.01.22 R F 定常系停電復電		H13.01.16	R F 定常系停電	H13.01.16 R F 定常系停電	
H13.01.22	R F 定常系停電復電	H13.01.22 R F 定常系停電復電		H13.01.22	R F 定常系停電復電	H13.01.22 R F 定常系停電復電	
H13.02.02							
H13.02.08	停電	H13.02.08 停電		H13.02.08	停電	H13.02.08 停電	
H13.07.12	冷却装置Aトリップ/圧縮機停止	H13.07.12 冷却装置Aトリップ/圧縮機停止		H13.04.13	冷凍機交換		
H13.09.03	冷凍機交換	H13.09.03 冷凍機交換		H13.07.12	冷却装置Aトリップ/圧縮機停止	H13.07.12 冷却装置Aトリップ/圧縮機停止	
H13.12.26	全停	H13.12.26 全停		H13.12.26	全停	H13.09.07	
H14.01.16	R F 定常系停電	H14.01.16 R F 定常系停電		H14.01.16	R F 定常系停電	H13.12.13	
H14.01.28	R F 定常系停電復電	H14.01.28 R F 定常系停電復電		H14.01.28	R F 定常系停電復電	H13.12.26 全停	
H14.04.01	瞬停	H14.04.01 瞬停		H14.04.01	瞬停	H14.01.16 R F 定常系停電	
H14.06.04	冷凍機交換	H14.04.09 冷凍機交換				H14.03.22 クエンチ	
H14.07.23	圧縮機停止冷却装置Aトリップ	H14.07.23 圧縮機停止冷却装置Aトリップ		H14.07.23	圧縮機停止冷却装置Aトリップ	H14.04.01 瞬停	
H14.07.26	冷凍機・圧縮機・冷却装置A停止	H14.07.26 冷凍機・圧縮機・冷却装置A停止		H14.07.26	冷凍機・圧縮機・冷却装置A停止	H14.06.04 冷凍機交換	

## 5. 検討事項など

### 5.1 今後の検討事項

これまでに、コイル通電不能などのSCMそのものに関わる不具合等の発生は、無かった。しかし、冷凍機再起動後の通電可能になるまでの期間については、今後、再評価する必要がある。また、冷凍機を再起動すると冷凍機停止前に比べてSCM温度が低下することや、連続通電するとSCM温度が上昇することについては、今後の検証課題である。

### 5.2 SCM用ユーティリティの不具合

4Kヘリウム冷凍機用ヘリウム圧縮機へ冷却水を供給している「冷却装置A」と呼ぶ空冷式のチラー装置が、外気雰囲気が高温のためにトリップしたことがある。その結果、4Kヘリウム冷凍機用ヘリウム圧縮機へ冷却水が供給できずに、4Kヘリウム冷凍機用ヘリウム圧縮機が過負荷となってしてしまい4Kヘリウム冷凍機が停止した。今後、トリップを繰り返すようであれば、「冷却装置A」と呼ぶチラー装置を、空冷式から水冷式に変更するなどの根本的な改善措置が必要になると考えられる。

## 6. まとめ

これまでの運転経験より、以下のような結果を得た。

- S C Mの温度上昇傾向による、4 Kヘリウム冷凍機の交換時期の推定方法を試案し、活用できた。
- 6日（150時間）程度、4 Kヘリウム冷凍機を停止した場合は、8日間（200時間）程度の運転でS C Mは通電可能となる。
- 約5ヶ月間（150日=3600時間）の長期間、4 Kヘリウム冷凍機を停止した場合は、約336時間（14日）程度の運転でS C Mは通電可能となる。
- クエンチした場合は、1日（24時間）で、S C Mが通電可能となる。
- 4 Kヘリウム冷凍機を数日停止して、再起動すると、S C Mの温度が低下することがある。その場合、4K ヘリウム冷凍機の交換を行わずに運転を継続することができる。

## 謝辞

本経験を得るにあたり、装置の運転・データ収集に支援して頂きましたR F 装置試験室員の皆様に感謝いたします。また、本経験をまとめるにあたり、ご指導いただきました藤井常幸R F 装置試験室長に感謝いたします。

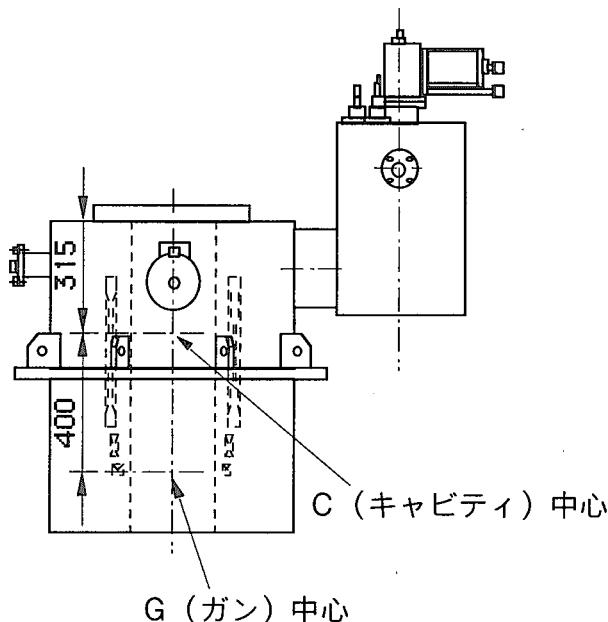
### 参考文献

- 1) A.Kasugai, et al. : 1MW and long pulse operation of Gaussian beam output gyrotron with CVD diamond window for fusion devices, Fusion Eng.design, 53 (2001)399-406.
- 2) K.Kajiwara, et al. : High power operation of 110Ghz Gyrotron at 1.2MW on the JT-60 ECRF system, Fusion Eng. Design, (to be published).
- 3) 春日井 敦 他 : JAERI-Research 2002-027, “不要 R F の抑制による ジャイロトロンの高性能化” (2002).
- 4) 池田佳隆 : JAERI-Research99-061, “JT-60U における 100GHz 局所加熱／電流駆動システムの高周波入射系の基本設計” (1999).
- 5) A.Kasugai,et al. : Rev.Sci, Instrum 69,2160 (1998).
- 6) 浦田昌身 : Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.71, No11 (1995), pp.1095~1103.

## 付録－1 SCM工場出荷時「磁場測定」結果

測定位置 キャビティ中心から	磁場強度 (T)			
	# 1	# 2	# 3	# 4
0mm	4.5025	4.507	4.507	4.501
+5mm	4.5004	4.505	4.505	4.499
-5mm	4.5019	4.508	4.508	4.499
-50mm	4.3940	4.410	4.410	4.404
-100mm	4.0372	4.066	4.066	4.065
-150mm	3.4221	3.461	3.461	3.462
-200mm	2.5698	2.615	2.615	2.607
-250mm	1.6357	1.677	1.677	1.648
-300mm	0.8223	0.845	0.845	0.823
-350mm	0.3581	0.368	0.368	0.357
-400mm	0.2251	0.225	0.225	0.225

測定位置 ガン中心から	磁場強度 (T)			
	# 1	# 2	# 3	# 4
0mm	0.2251	0.225	0.225	0.225
+5mm	0.2285	0.229	0.229	0.228
-5mm	0.2235	0.223	0.223	0.223

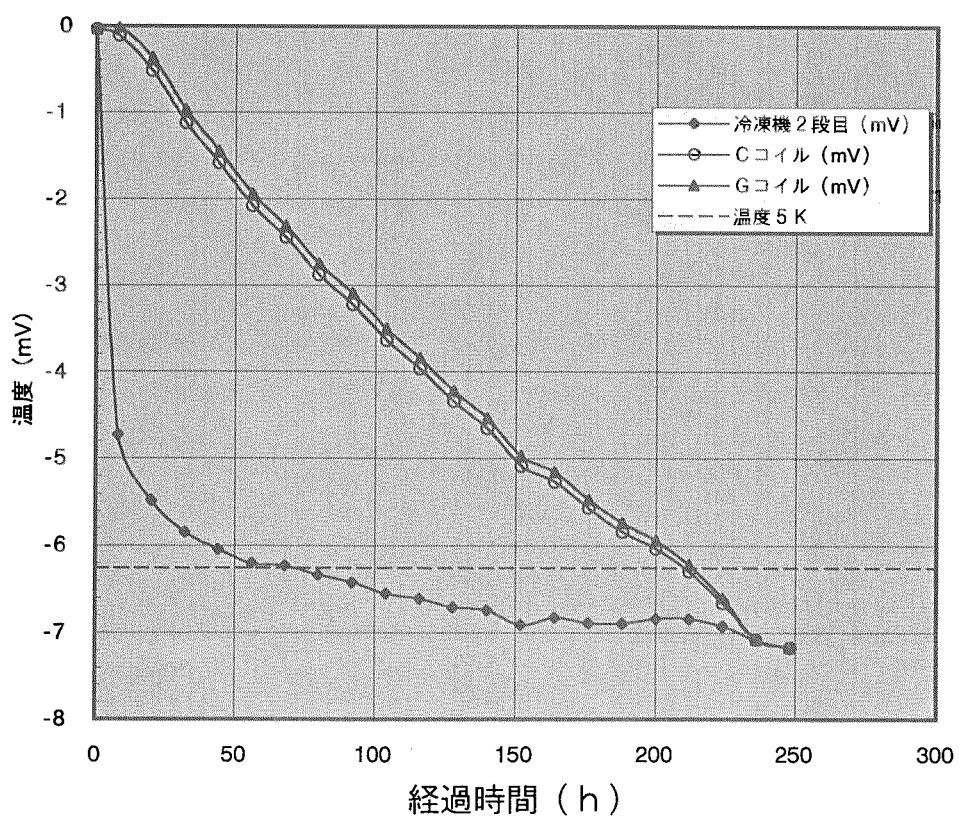


### 通電条件

	C(キャビティ)	B(バックギング)	G(ガン)
# 1	106.3 A	+0.3 A	0.0 A
# 2・3	108.1 A	-0.1 A	0.0 A
# 4	107.7 A	+1.4 A	0.0 A

## 付録－2 #2 SCM工場出荷時の冷却特性試験結果 (1999/12/15)

経過時間 (h)	冷凍機2段目 (mV)	Cコイル (mV)	Gコイル (mV)	温度 5 K
0	-0.025	-0.038	-0.036	-6.255
8	-4.728	-0.112	-0.013	
20	-5.481	-0.523	-0.371	
32	-5.844	-1.124	-0.974	
44	-6.042	-1.592	-1.452	
56	-6.200	-2.080	-1.945	
68	-6.232	-2.451	-2.318	
80	-6.335	-2.882	-2.750	
92	-6.424	-3.228	-3.099	
104	-6.550	-3.632	-3.505	
116	-6.609	-3.965	-3.840	
128	-6.709	-4.341	-4.220	
140	-6.745	-4.650	-4.533	
152	-6.912	-5.086	-4.972	
164	-6.829	-5.266	-5.157	
176	-6.889	-5.567	-5.467	
188	-6.898	-5.837	-5.736	
200	-6.840	-6.033	-5.941	
212	-6.844	-6.297	-6.220	
224	-6.927	-6.658	-6.607	
236	-7.085	-7.083	-7.079	
248	-7.177	-7.175	-7.171	
300				-6.255

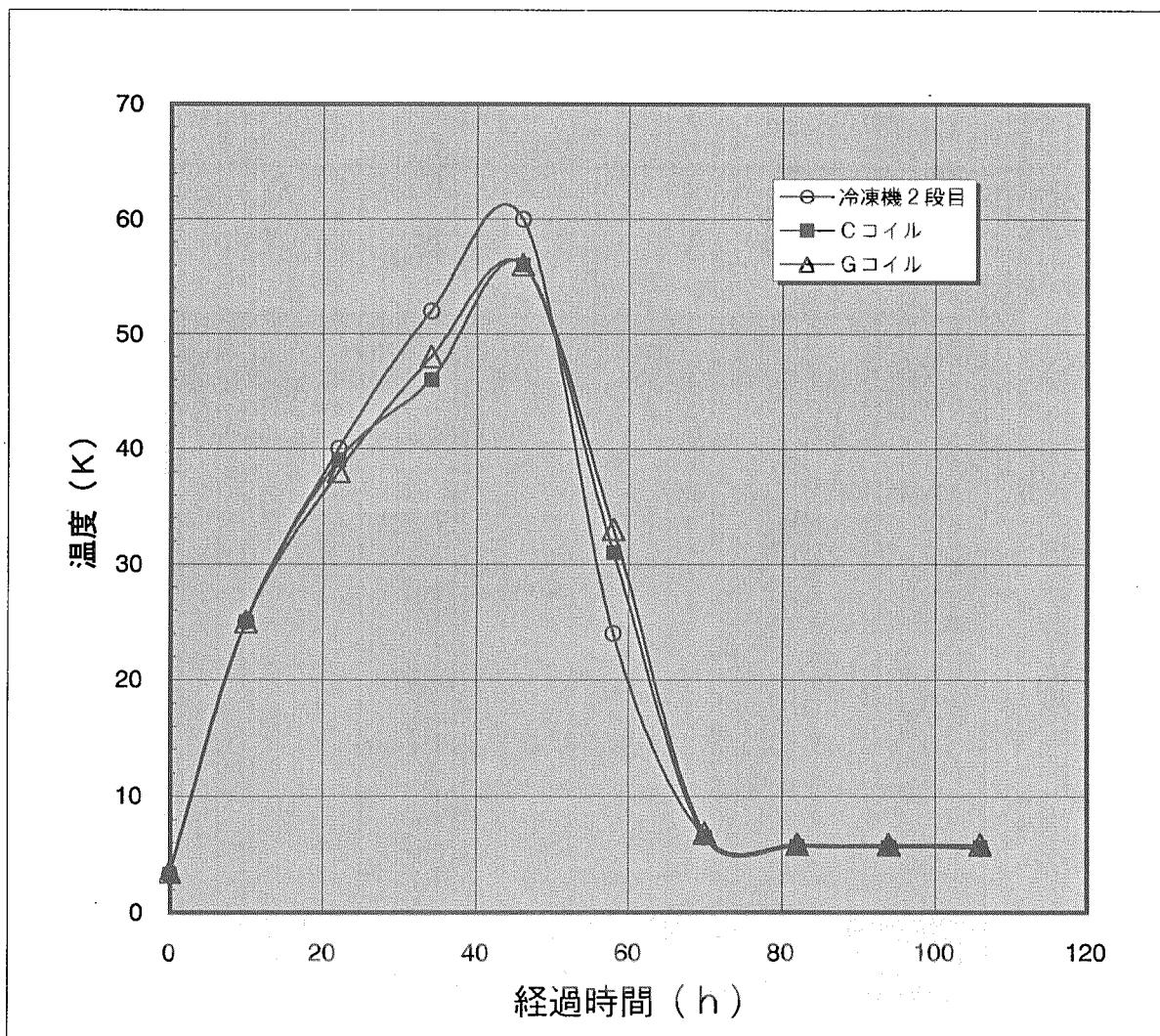


## 付録－3 #2 SCM工場出荷時の再起動冷却特性試験結果

(1999/12/15)

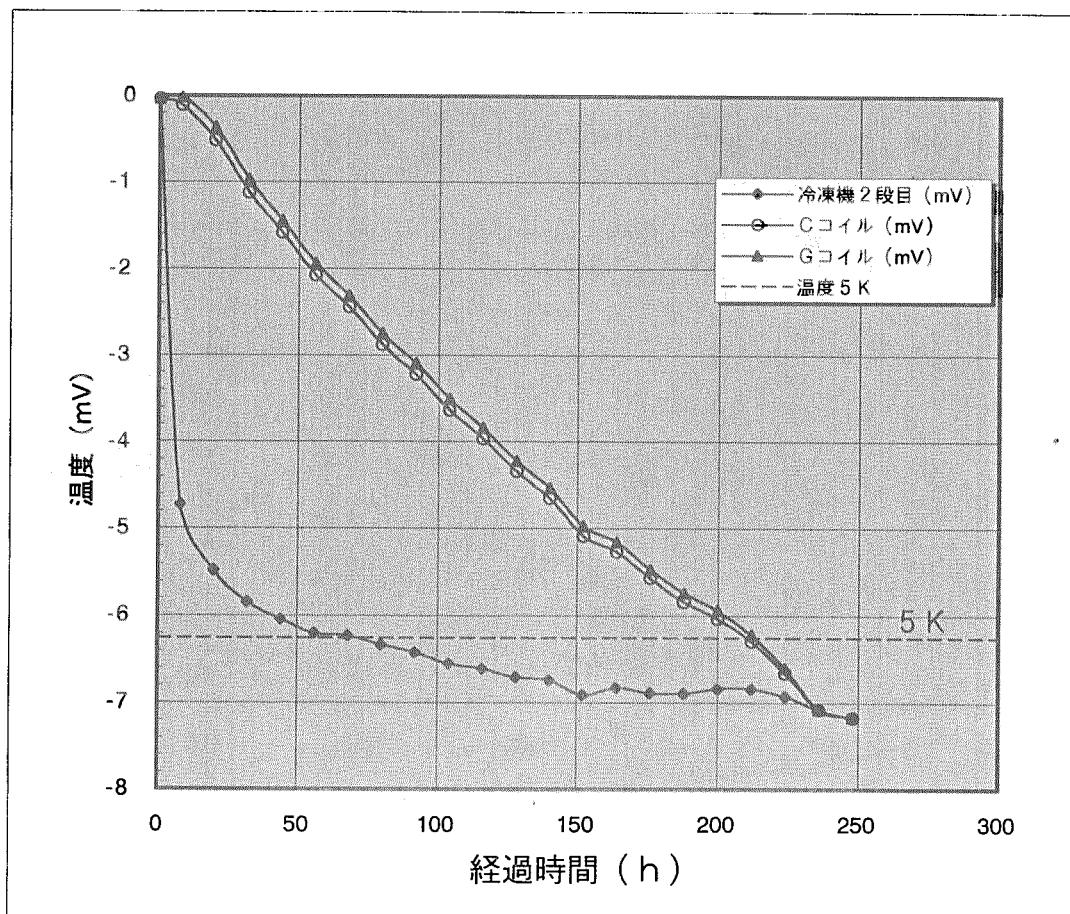
冷凍機を48時間停止して、再起動した場合。CGR温度センサーにて測定

経過時間 (h)	冷凍機2段目		Cコイル		Gコイル	
	(mV)	(K)	(mV)	(K)	(mV)	(K)
0	41.58	3.3	26.56	3.3	20.50	3.5
10	0.29	25.0	0.39	25.0	0.37	25.0
22	0.19	40.0	0.27	39.0	0.26	38.0
34	0.16	52.0	0.24	46.0	0.22	48.0
46	0.14	60.0	0.21	56.0	0.20	56.0
58	0.30	24.0	0.32	31.0	0.29	33.0
70	3.63	6.5	3.06	6.5	2.63	6.8
82	4.90	5.7	4.33	5.7	3.75	5.9
94	4.91	5.7	4.51	5.6	3.88	5.8
106	5.55	5.5	4.55	5.6	3.93	5.8



## 付録－4 #3 SCM工場出荷時の冷却特性試験結果 (1999/11/09)

経過時間 (h)	冷凍機 2段目 (mV)	Cコイル (mV)	Gコイル (mV)	温度 5 K
0	-0.025	-0.038	-0.036	-6.255
8	-4.728	-0.112	-0.013	
20	-5.481	-0.523	-0.371	
32	-5.844	-1.124	-0.974	
44	-6.042	-1.592	-1.452	
56	-6.200	-2.080	-1.945	
68	-6.232	-2.451	-2.318	
80	-6.335	-2.882	-2.750	
92	-6.424	-3.228	-3.099	
104	-6.550	-3.632	-3.505	
116	-6.609	-3.965	-3.840	
128	-6.709	-4.341	-4.220	
140	-6.745	-4.650	-4.533	
152	-6.912	-5.086	-4.972	
164	-6.829	-5.266	-5.157	
176	-6.889	-5.567	-5.467	
188	-6.898	-5.837	-5.736	
200	-6.840	-6.033	-5.941	
212	-6.844	-6.297	-6.220	
224	-6.927	-6.658	-6.607	
236	-7.085	-7.083	-7.079	
248	-7.177	-7.175	-7.171	
300				-6.255

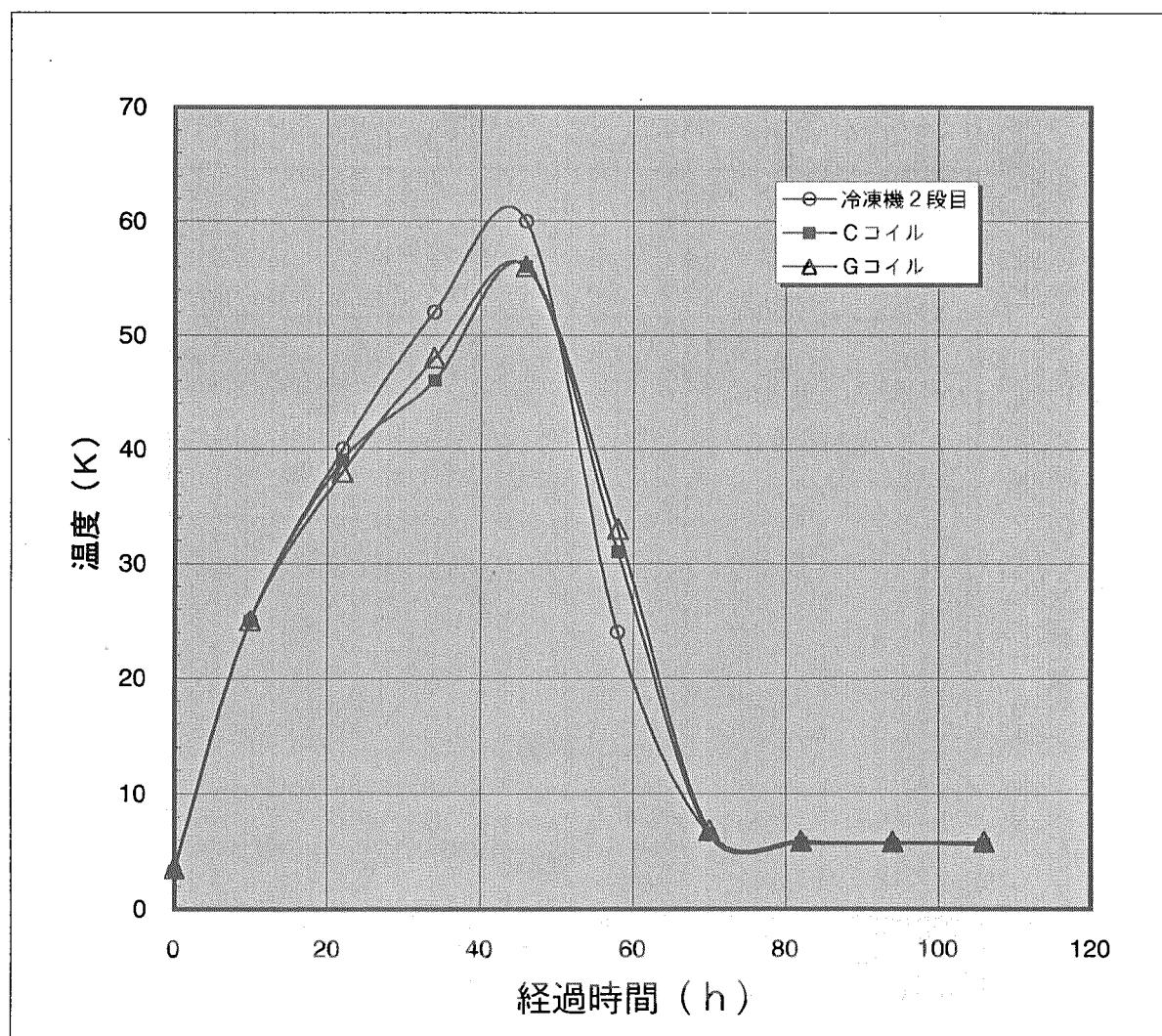


## 付録－5 #3 SCM工場出荷時の再起動冷却特性試験結果

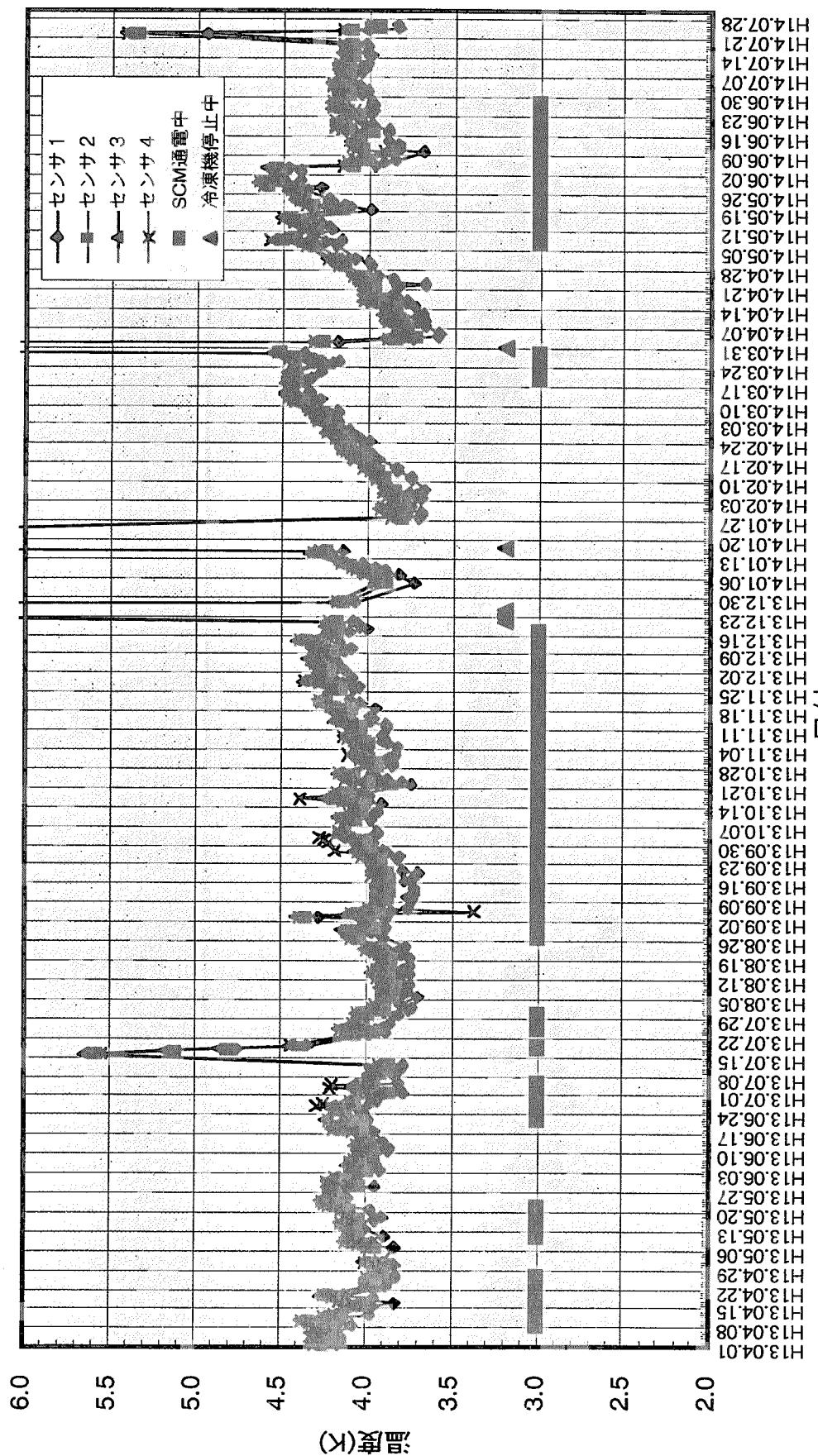
(1999/11/09)

冷凍機を48時間停止して、再起動した場合。CGR温度センサーにて測定

経過時間 (h)	冷凍機2段目		Cコイル		Gコイル	
	(mV)	(K)	(mV)	(K)	(mV)	(K)
0	41.58	3.3	26.56	3.3	20.50	3.5
10	0.29	25.0	0.39	25.0	0.37	25.0
22	0.19	40.0	0.27	39.0	0.26	38.0
34	0.16	52.0	0.24	46.0	0.22	48.0
46	0.14	60.0	0.21	56.0	0.20	56.0
58	0.30	24.0	0.32	31.0	0.29	33.0
70	3.63	6.5	3.06	6.5	2.63	6.8
82	4.90	5.7	4.33	5.7	3.75	5.9
94	4.91	5.7	4.51	5.6	3.88	5.8
106	5.55	5.5	4.55	5.6	3.93	5.8

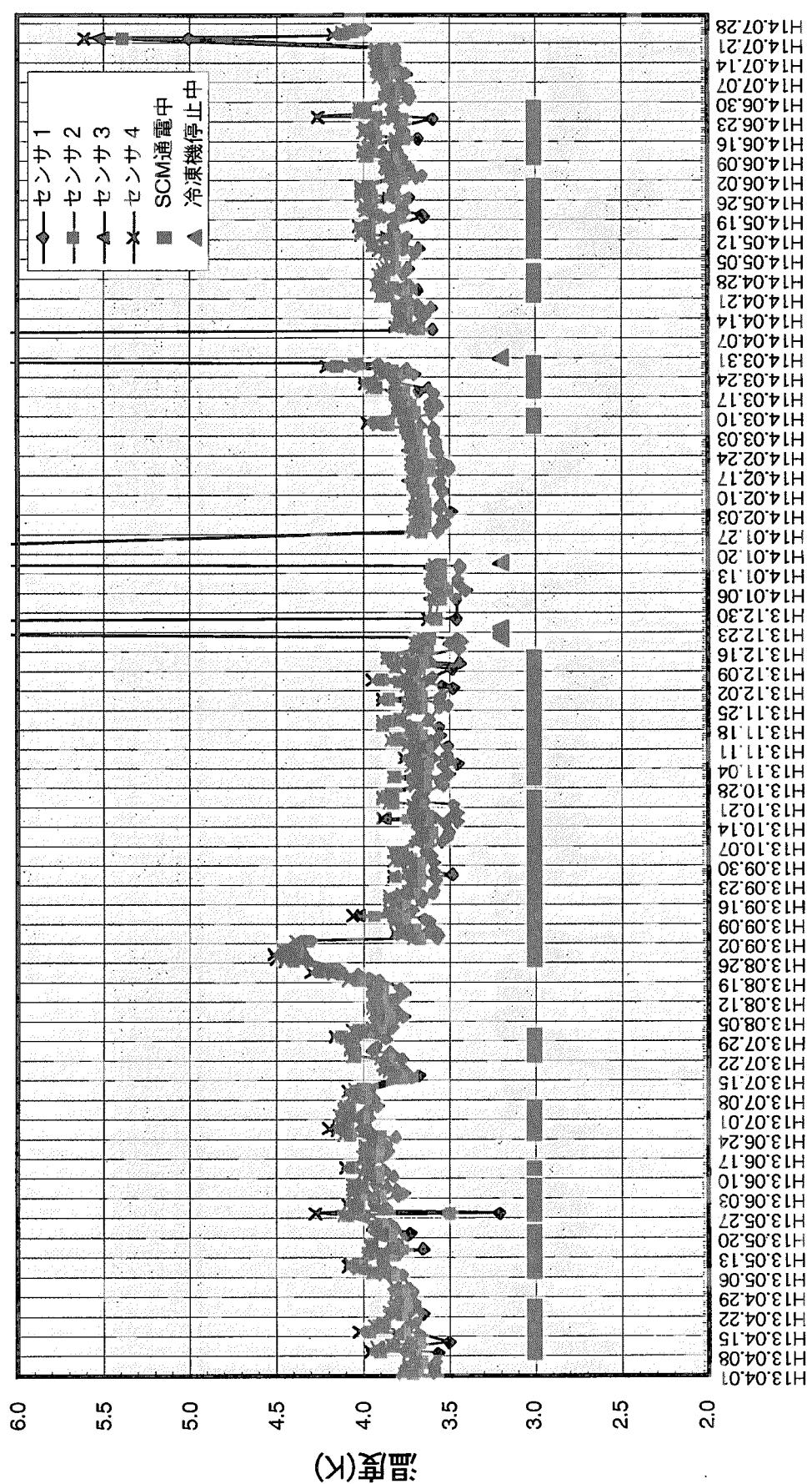


## 付録-6 ECH #1 SCM温度

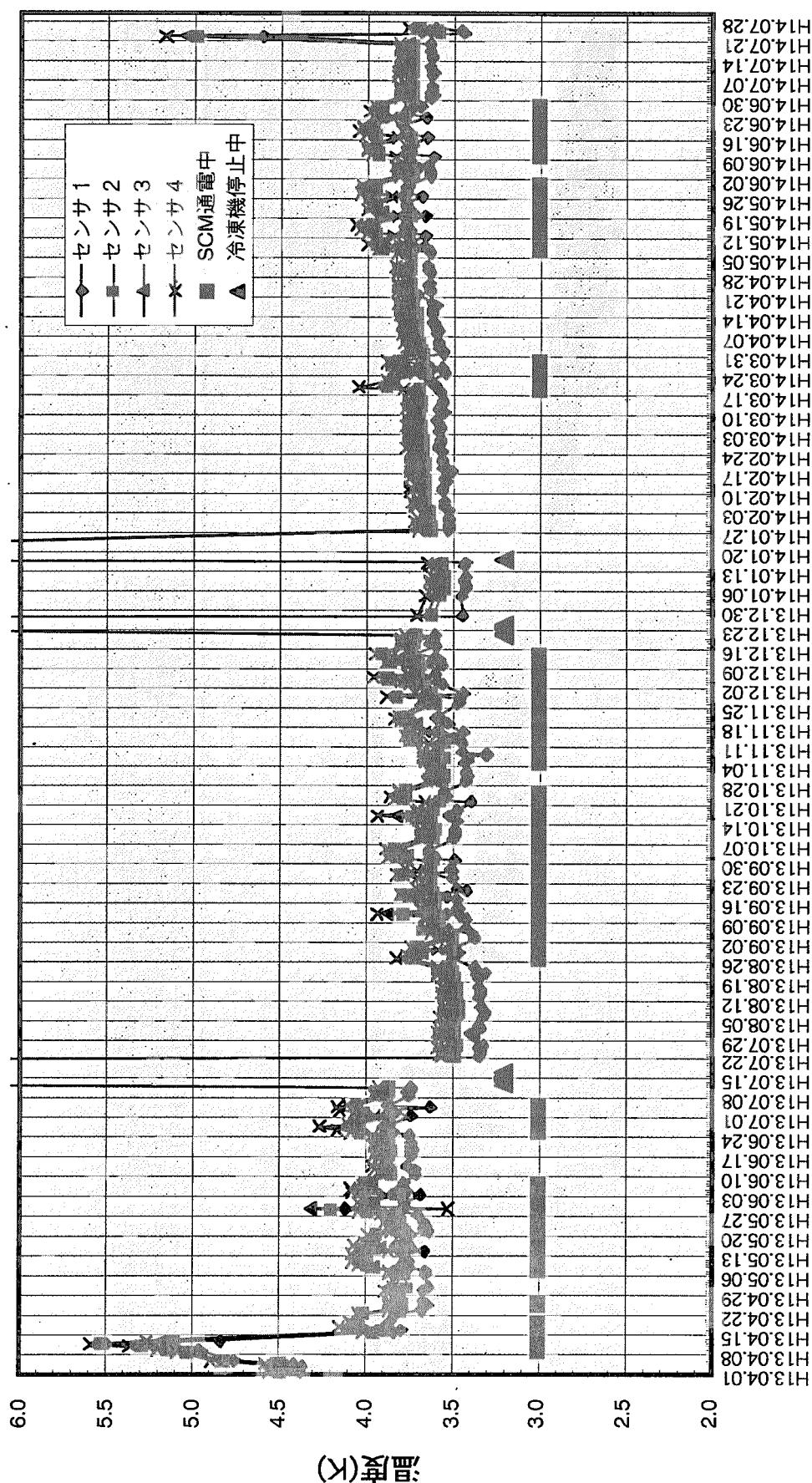


## 付録一7 ECH #2 SCM温度

日付

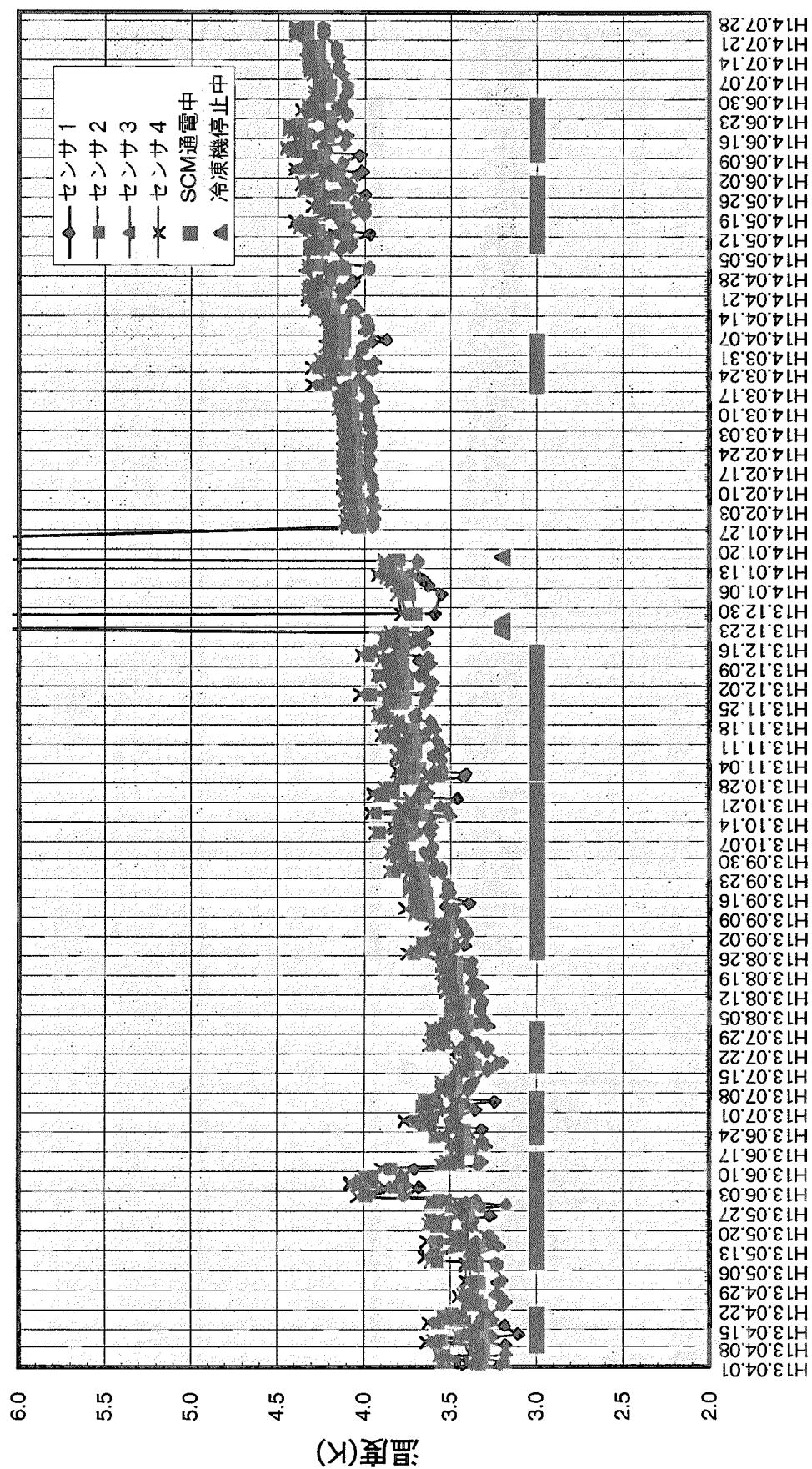


付録—8 ECH #3 SCM温度  
日付



## 付録—9 ECH #4 SCM温度

日付



## 付録－10 #1 SCM 用冷凍機再起動後の通電可能温度到達時間(1/3)

停止理由「停電」		S C M 温度			
停止	平成12年03月21日 10:34	停止時間			
再起動	平成12年03月27日 11:00	144:26	センサ1	センサ2	センサ3
	平成12年03月27日 15:15		0.2 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成12年03月28日 09:55		6.0 mV	3.3 mV	3.7 mV
	平成12年03月28日 14:50	降下時間	8.7 mV	4.4 mV	5.1 mV
	平成12年04月03日 13:40	170:40	32.0 mV	26.7 mV	31.9 mV
		7.1	到達温度	3.23K	3.33K
				3.40K	3.41K
停止理由「停電」		S C M 温度			
停止	平成12年08月16日 10:38	停止時間	センサ1	センサ2	センサ3
再起動	平成12年08月16日 14:00	3:22	0.7 mV	0.6 mV	0.6 mV
	平成12年08月16日 15:36		21.3 mV	14.6 mV	17.2 mV
	平成12年08月17日 09:07	降下時間	38.0 mV	29.6 mV	34.7 mV
	平成12年08月18日 09:07	43:07	41.1 mV	30.1 mV	25.5 mV
		1.8	到達温度	3.04K	3.23K
				3.59K	3.33K
停止理由「冷却装置Aトリップ」		S C M 温度			
停止	平成12年10月04日 19:00	停止時間	センサ1	センサ2	センサ3
再起動	平成12年10月04日 19:59	0:59	4.4 mV	2.5 mV	2.8 mV
	平成12年10月04日 20:11		9.8 mV	5.7 mV	6.5 mV
	平成12年10月04日 19:59		29.2 mV	21.9 mV	25.6 mV
	平成12年10月05日 08:06		36.9 mV	27.7 mV	32.5 mV
	平成12年10月06日 08:03	降下時間	35.3 mV	25.1 mV	29.9 mV
	平成12年10月10日 09:10	133:11	5.5	39.0 mV	28.7 mV
			到達温度	3.08K	3.27K
				3.36K	3.37K
停止理由「R F 定常系停電」 常用電源から仮設電源へ		S C M 温度			
停止	2001.1.16 不明		センサ1	センサ2	センサ3
再起動	平成13年01月16日 09:43		8.1 mV	5.9 mV	6.9 mV
		降下時間	降下日数		
	平成13年01月19日 09:10	71:27	3.0	20.7 mV	16.2 mV
			到達温度	3.60K	3.76K
				3.83K	3.83K
停止理由「R F 定常系停電」 仮設電源から常用電源へ		S C M 温度			
停止	2001.1.22 不明		センサ1	センサ2	センサ3
再起動	平成13年01月22日 11:45		0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成13年01月23日 16:30		2.5 mV	2.1 mV	2.4 mV
	平成13年01月24日 09:10		15.4 mV	12.3 mV	14.6 mV
	平成13年01月25日 09:10		22.9 mV	18.4 mV	22.0 mV
	平成13年01月26日 09:10	降下時間	降下日数	21.4 mV	25.8 mV
	平成13年01月29日 09:10	165:25	6.9	27.7 mV	22.4 mV
			到達温度	3.35K	3.47K
				3.56K	3.56K

## # 1 SCM 用冷凍機再起動後の通電可能温度到達時間(2/3)

		SCM温度			
停止	停止理由「停電」	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
停止	平成13年02月08日 13:28	停止時間			
再起動	平成13年02月08日 16:09	2:41	2.2 mV	1.3 mV	1.5 mV
		降下時間	降下日数		
	平成13年02月13日 11:24	115:15	4.8	21.8 mV	17.3 mV
			到達温度	3.55K	3.70K
				3.78K	3.76K
		SCM温度			
停止	停止理由「冷却装置Aトリップ」	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
停止	平成13年07月12日 15:00				
再起動	不明				
	平成13年07月16日 16:30		3.5 mV	3.3 mV	3.8 mV
	平成13年07月17日 09:05		4.9 mV	4.7 mV	5.5 mV
	平成13年07月18日 09:05		6.7 mV	6.1 mV	7.2 mV
	平成13年07月19日 09:10		9.7 mV	8.7 mV	10.4 mV
	平成13年07月23日 09:10		13.7 mV	11.9 mV	14.4 mV
	平成13年07月24日 09:10		15.2 mV	13.3 mV	16.0 mV
		到達温度	3.88K	3.95K	4.01K
		SCM温度			
停止	停止理由「冷凍機交換」	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
停止	平成13年09月03日 13:30	停止時間			
再起動	平成13年09月03日 17:30	4:00			
	平成13年09月04日 09:10		10.3 mV	9.0 mV	10.8 mV
	平成13年09月05日 09:10	降下時間	降下日数	14.8 mV	12.2 mV
	平成13年09月06日 09:10	63:40	2.7	15.7 mV	13.3 mV
			到達温度	3.85K	3.95K
				4.02K	4.01K
		SCM温度			
停止	停止理由「全停」	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
停止	平成13年12月25日 09:15	停止時間			
再起動	平成13年12月26日 09:15	24:00			
	平成13年12月27日 09:05		0.2 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成13年12月28日 09:06	降下時間	降下日数	12.6 mV	11.1 mV
	平成14年01月04日 09:10	215:55	9.0	18.0 mV	14.3 mV
			到達温度	3.72K	3.88K
				3.96K	3.95K
		SCM温度			
停止	停止理由「RF定常系停電」	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
停止	平成14年01月16日 13:30				
再起動	不明	降下時間	降下日数	18.5 mV	15.8 mV
	平成13年01月28日 10:36	# ## #	# ## #	3.70K	3.79K
			到達温度		
		SCM温度			
停止	停止理由「冷凍機交換」	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
停止	平成14年06月04日 10:01	停止時間			
再起動	平成14年06月04日 12:05	2:04			
	平成14年06月05日 13:17		0.3 mV	0.3 mV	0.3 mV
	平成14年06月06日 09:10	降下時間	降下日数	0.6 mV	0.5 mV
	平成14年06月07日 09:45	69:40	2.9	14.7 mV	11.7 mV
			到達温度	14.2 mV	9.3 mV
				15.0 mV	9.7 mV
				4.01K	4.08K
				4.08K	

## # 1 SCM 用冷凍機再起動後の通電可能温度到達時間(3/3)

	停止理由「冷却装置A トリップ」						
停止	2002.7.23 10時頃不明			S C M 温度			
再起動	平成14年07月23日 10:30			センサ 1	センサ 2	センサ 3	センサ 4
	平成14年07月23日 10:21			7.1 mV	3.9 mV	4.5 mV	3.2 mV
	平成14年07月24日 09:41	降下時間	降下日数	17.8 mV	11.5 mV	13.7 mV	9.1 mV
	平成14年07月25日 09:43	47:13	2.0	21.1 mV	13.6 mV	16.3 mV	10.5 mV
			到達温度	3.58K	3.93K	4.00K	4.00K

## 付録－11 #2 SCM 用冷凍機再起動後の通電可能温度到達時間(1/2)

停止理由「停電」		停止時間					
停止	平成12年03月21日 10:30	停止時間		SCM温度			
再起動	平成12年03月27日 11:30	145:00		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成12年03月27日 15:15			0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成12年03月28日 09:55			0.5 mV	0.4 mV	0.4 mV	0.5 mV
	平成12年03月28日 14:50	降下時間	降下日数	4.9 mV	2.9 mV	2.5 mV	4.3 mV
	平成12年04月03日 10:55	167:25	7.0	25.6 mV	15.8 mV	14.1 mV	28.6 mV
			到達温度	3.23K	3.55K	3.60K	3.58K
停止理由「停電」				SCM温度			
停止	平成12年08月16日 10:35	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成12年08月16日 14:03	3:28		0.5 mV	0.4 mV	0.4 mV	0.6 mV
	平成12年08月16日 15:35	降下時間	降下日数	12.1 mV	8.0 mV	6.8 mV	12.9 mV
	平成12年08月17日 09:08	19:05	0.8	27.7 mV	21.0 mV	18.5 mV	37.5 mV
			到達温度	3.17K	3.31K	3.36K	3.35K
停止理由「冷却装置Aトリップ」				SCM温度			
停止	平成12年10月04日 19:00	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成12年10月04日 19:58	0:58		2.9 mV	1.7 mV	1.5 mV	2.5 mV
	平成12年10月04日 20:12			6.7 mV	4.6 mV	3.7 mV	7.0 mV
	平成12年10月04日 21:35			18.5 mV	13.6 mV	11.8 mV	23.3 mV
	平成12年10月05日 08:07	降下時間	降下日数	25.4 mV	19.0 mV	16.7 mV	33.9 mV
	平成12年10月06日 08:03	36:05	1.5	35.3 mV	25.1 mV	29.9 mV	18.7 mV
			到達温度	2.98K	3.16K	2.98K	3.97K
停止理由「RF定常系停電」 常用電源から仮設電源へ				SCM温度			
停止	2001.1.16 不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年01月16日 09:45	降下時間	降下日数	8.7 mV	6.4 mV	5.4 mV	10.5 mV
	平成13年01月19日 09:10	71:25	3.0	19.4 mV	15.8 mV	14.1 mV	28.2 mV
			到達温度	3.46K	3.55K	3.60K	3.59K
停止理由「RF定常系停電」 仮設電源から常用電源へ				SCM温度			
停止	2001.1.22 不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年01月22日 11:45			0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成13年01月23日 16:30	降下時間	降下日数	6.5 mV	4.7 mV	4.0 mV	7.2 mV
	平成13年01月24日 09:12	45:27	1.9	20.5 mV	16.0 mV	14.3 mV	28.4 mV
			到達温度	3.41K	3.54K	3.59K	3.58K
停止理由「停電」				SCM温度			
停止	平成13年02月08日 13:30	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年02月08日 16:11	2:41		1.2 mV	1.0 mV	0.9 mV	1.4 mV
		降下時間	降下日数				
	平成13年02月13日 11:25	115:14	4.8	19.2 mV	15.8 mV	14.1 mV	28.1 mV
			到達温度	3.47K	3.55K	3.60K	3.59K

## # 2 SCM 用冷凍機再起動後の通電可能温度到達時間(2/2)

停止理由「冷却装置Aトリップ」				S C M 温度			
停止	平成13年07月12日 15:00			S C M 温度			
再起動	不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成13年07月16日 09:10			14.5 mV	12.4 mV	11.1 mV	21.9 mV
		到達温度		3.71K	3.77K	3.83K	3.82K
	停止理由「冷凍機交換」						
停止	平成13年09月03日 10:00	停止時間					
再起動	平成13年09月03日 12:30	2:30		S C M 温度			
		降下時間	降下日数	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成13年09月04日 09:10	20:40	0.9	17.0 mV	13.9 mV	12.4 mV	24.7 mV
			到達温度	3.57K	3.67K	3.72K	3.71K
	停止理由「全停」			S C M 温度			
停止	平成13年12月25日 09:15	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年12月26日 09:15	24:00		0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成13年12月27日 09:08	降下時間	降下日数	0.2 mV	0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成13年12月28日 09:08	47:53	2.0	19.4 mV	15.4 mV	13.8 mV	27.3 mV
			到達温度	3.46K	3.57K	3.62K	3.62K
	停止理由「R F 定常系停電」						
停止	平成14年01月16日 13:10			S C M 温度			
再起動	不明	降下時間	降下日数	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成13年01月28日 10:36	#####	#####	17.1 mV	14.0 mV	12.5 mV	24.6 mV
			到達温度	3.57K	3.66K	3.71K	3.71K
	停止理由「冷凍機交換」			S C M 温度			
停止	2002.4.9 不明	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成14年04月09日 15:00	#####		0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV	0.3 mV
	平成14年04月09日 13:17	降下時間	降下日数	0.6 mV	0.5 mV	0.4 mV	0.6 mV
	平成14年04月10日 09:10	18:10	0.8	16.5 mV	13.8 mV	12.4 mV	24.6 mV
			到達温度	3.60K	3.67K	3.72K	3.71K
	停止理由「冷却装置Aトリップ」						
停止	2002.7.23 10時頃不明	停止時間		S C M 温度			
再起動	平成14年07月23日 10:30	#####		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成14年07月23日 10:25			4.3 mV	3.0 mV	2.6 mV	4.5 mV
	平成14年07月24日 09:43	降下時間	降下日数	9.8 mV	8.7 mV	8.0 mV	15.1 mV
	平成14年07月25日 09:45	47:15	2.0	10.3 mV	9.2 mV	8.4 mV	16.0 mV
			到達温度	4.04K	4.07K	4.11K	4.12K

## 付録－12 #3 SCM用冷凍機再起動後の通電可能温度到達時間(1/2)

停止理由「停電」							
停止	平成12年03月21日 10:34	停止時間		SCM温度			
再起動	平成12年03月27日 11:30	144:56		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成12年03月27日 15:15			0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV
	平成12年03月28日 09:55			7.0 mV	4.0 mV	3.8 mV	3.4 mV
	平成12年03月28日 14:50	降下時間	降下日数	10.0 mV	6.2 mV	5.9 mV	5.2 mV
	平成12年04月03日 13:45	170:15	7.1	19.0 mV	14.5 mV	14.0 mV	12.9 mV
			到達温度	3.93K	3.92K	3.95K	3.97K
停止理由「停電」				SCM温度			
停止	平成12年08月16日 10:34	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成12年08月16日 14:02	3:28		0.7 mV	0.7 mV	0.7 mV	0.7 mV
	平成12年08月16日 15:34	降下時間	降下日数	4.9 mV	3.6 mV	3.4 mV	3.1 mV
	平成12年08月17日 09:09	19:07	0.8	20.8 mV	14.0 mV	13.4 mV	12.0 mV
			到達温度	3.84K	3.96K	4.00K	4.05K
停止理由「冷却装置Aトリップ」				SCM温度			
停止	平成12年10月04日 19:00	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成12年10月04日 19:45	0:45		12.1 mV	7.5 mV	7.3 mV	6.7 mV
	平成12年10月04日 20:13			16.7 mV	10.6 mV	10.2 mV	9.1 mV
	平成12年10月04日 21:36	降下時間	降下日数	17.2 mV	11.5 mV	11.0 mV	9.7 mV
	平成12年10月05日 08:08	12:23	0.5	19.3 mV	12.7 mV	12.3 mV	11.0 mV
			到達温度	3.91K	4.06K	4.09K	4.14K
停止理由「RF定常系停電」 常用電源から仮設電源へ				SCM温度			
停止	2001.1.16 不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年01月16日 09:45	降下時間	降下日数	0.8 mV	1.0 mV	1.0 mV	1.0 mV
	平成13年01月19日 09:10	71:25	3.0	1.2 mV	1.3 mV	1.3 mV	1.3 mV
			到達温度	7.78K	7.54K	7.56K	7.43K
停止理由「RF定常系停電」 仮設電源から常用電源へ				SCM温度			
停止	2001.1.22 不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年01月22日 11:44			0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV
	平成13年01月23日 16:30	降下時間	降下日数	3.5 mV	2.9 mV	2.8 mV	2.6 mV
	平成13年01月24日 09:12	45:28	1.9	20.5 mV	16.0 mV	14.3 mV	28.4 mV
			到達温度	3.85K	3.82K	3.93K	3.20K
停止理由「停電」				SCM温度			
停止	平成13年02月08日 13:47	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年02月08日 16:12	2:25		0.9 mV	1.0 mV	1.0 mV	0.9 mV
		降下時間	降下日数				
	平成13年02月13日 11:26	115:14	4.8	15.6 mV	10.9 mV	10.4 mV	9.5 mV
			到達温度	4.12K	4.24K	4.29K	4.32K

## # 3 SCM 用冷凍機再起動後の通電可能温度到達時間(2/2)

停止理由「冷凍機交換」				S C M 温度			
停止	平成13年04月13日 14:00	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年04月13日 18:30	4:30		0.4 mV	0.4 mV	0.4 mV	0.4 mV
	平成13年04月13日 21:26	降下時間	降下日数	8.2 mV	5.5 mV	5.2 mV	4.6 mV
	平成13年04月14日 08:47	14:17	0.6	21.0 mV	14.2 mV	13.7 mV	12.4 mV
			到達温度	3.83K	3.94K	3.98K	4.01K
停止理由「冷却装置Aトリップ」				S C M 温度			
停止	平成13年07月12日 15:00			S C M 温度			
再起動	不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成13年07月19日 10:10			0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV
	平成13年07月23日 09:23			36.4 mV	22.3 mV	21.4 mV	19.1 mV
			到達温度	3.34K	3.49K	3.52K	3.56K
停止理由「全停」				S C M 温度			
停止	平成13年12月25日 09:15	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年12月26日 09:15	24:00		0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV
	平成13年12月27日 09:08	降下時間	降下日数	0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV
	平成13年12月28日 09:09	47:54	2.0	32.2 mV	19.5 mV	18.7 mV	16.5 mV
			到達温度	3.45K	3.62K	3.65K	3.71K
停止理由「R F 定常系停電」				S C M 温度			
停止	平成14年01月16日 13:10			S C M 温度			
再起動	不明	降下時間	降下日数	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成13年01月28日 10:36	# #####	# #####	29.3 mV	19.3 mV	18.5 mV	16.6 mV
			到達温度	3.53K	3.63K	3.66K	3.70K
停止理由「冷却装置Aトリップ」				S C M 温度			
停止	2002.7.23 10時頃不明			S C M 温度			
再起動	平成14年07月23日 10:30			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成14年07月23日 10:26	降下時間	降下日数	10.0 mV	6.0 mV	5.7 mV	4.9 mV
	平成14年07月24日 09:43	23:13	1.0	32.5 mV	20.3 mV	19.5 mV	17.4 mV
			到達温度	3.44K	3.58K	3.61K	3.66K
停止理由「ECH運転休止」				S C M 温度			
「長期停止後の真空引き実施再立ち上げ」				S C M 温度			
停止	平成14年07月26日 15:00			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成14年11月21日 10:10	停止時間		0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成14年11月29日 10:40	2827:10		0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV	0.2 mV
	平成14年12月02日 10:25	降下時間	降下日数	22.00K	15.50K	15.00K	13.50K
	平成14年12月03日 10:22	288:12	12.0083	23.00K	16.20K	15.80K	14.20K
			到達温度	3.75K	3.80K	3.82K	3.86K

## 付録－13 #4 SCM 用冷凍機再起動後の通電可能温度到達時間

停止理由「R F 定常系停電」 常用電源から仮設電源へ				S C M 温度			
停止	2001.1.16 不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	2001.1.16 9:45:00 仮設電源切替			4.0 mV	3.5 mV	3.6 mV	3.3 mV
	平成13年01月19日 09:10			5.6 mV	5.5 mV	5.6 mV	5.1 mV
		到達温度	4.58K	4.62K	4.65K	4.67K	
停止理由「R F 定常系停電」 仮設電源から常用電源へ				S C M 温度			
停止	2001.1.22 不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年01月22日 11:47 頃			0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成13年01月23日 16:30			0.3 mV	0.3 mV	0.3 mV	0.3 mV
	平成13年01月26日 09:12	降下時間	降下日数	0.4 mV	0.4 mV	0.4 mV	0.4 mV
	平成13年02月13日 11:31	527:44	22.0	27.8 mV	24.8 mV	24.5 mV	21.3 mV
		到達温度	3.01K	3.14K	3.19K	3.22K	
停止理由「冷却装置Aトリップ」				S C M 温度			
停止	平成13年07月12日 15:00			S C M 温度			
再起動	不明			センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成13年07月17日 09:15			20.0 mV	18.5 mV	18.5 mV	16.1 mV
		到達温度	3.28K	3.38K	3.42K	3.46K	
停止理由「全停」				S C M 温度			
停止	平成13年12月25日 09:15	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成13年12月26日 09:15	24:00		0.2 mV	0.1 mV	0.1 mV	0.1 mV
	平成13年12月27日 09:06	降下時間	降下日数	0.4 mV	0.3 mV	0.3 mV	0.3 mV
	平成13年12月28日 09:07	47:52	2.0	14.1 mV	13.0 mV	12.8 mV	11.4 mV
		到達温度	3.60K	3.71K	3.76K	3.79K	
停止理由「R F 定常系停電」				S C M 温度			
停止	平成14年01月16日 13:10			S C M 温度			
再起動	不明	降下時間	降下日数	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
	平成13年01月28日 10:36	#####	#####	9.8 mV	9.4 mV	9.3 mV	8.4 mV
		到達温度	3.95K	4.03K	4.08K	4.10K	
停止理由「冷凍機交換」				S C M 温度			
停止	平成14年06月04日 13:36	停止時間		センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
再起動	平成14年06月04日 15:28	1:52		0.3 mV	0.3 mV	0.3 mV	0.3 mV
		降下時間	降下日数				
	平成14年06月05日 09:10	17:42	0.7	7.8 mV	7.1 mV	6.9 mV	6.4 mV
		到達温度	4.20K	4.33K	4.41K	4.40K	

# 国際単位系(SI)と換算表

表 1 SI 基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表 3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フーラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表 2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表 5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

1. 表 1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1eV および1uの値は CODATA の1986年推奨値によった。

2. 表 4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表 2 のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHg を表 2 のカテゴリーに入れている。

## 換算表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P}(\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St}(\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m		kW·h		cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
		1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889				
	9.80665		1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.184 J (熱化学)
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>		1	8.59999 × 10 <sup>4</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1855 J (15 °C)
	4.18605	0.426858		1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	1055.06	107.586		2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1.35582	0.138255		3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>		4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci		吸収線量	Gy	rad
		1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>			
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	100	1

照射線量	C/kg	R		吸収線量	Gy	rad
		1	3876			
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	1	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	1

線量当量	Sv	rem		線量当量	Gy	rad
		1	100			
	0.01	1	1	0.01	1	1

(86年12月26日現在)

JT-60U ECH シャイロトロン用超伝導コイルの運転経験



古紙配合率100%  
白色度70%の再生紙を使用しています