

JAERI-M

8134

大電流超電導導体の熱伝達特性の  
測定と安定性解析

1979年3月

西 正孝・安藤 俊就・吉田 清・島本 進

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

大電流超電導導体の熱伝達特性の測定と安定性解析

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

西 正孝・安藤 俊就・吉田 清

島本 進

(1979年1月31日受理)

冷却面に溝を設けたいくつかの模擬導体を作製し、そのヘリウム沸騰熱伝達特性の測定を行なった。次に、この結果を使用して、大型超電導トロイダルコイルの安定性解析を行なった。解析モデルは、導体に沿っての磁界および冷却特性の変化を考慮したものである。

JAERI-M 8134

Measurement of Heat Transfer Characteristics  
and Stability Analysis of Large Superconductors

Masataka NISHI, Toshinari ANDO, Kiyoshi YOSHIDA,  
and Susumu SHIMAMOTO

Division of Thermonuclear Fusion Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 31, 1979)

Boiling helium heat transfer characteristics of grooved model conductors were measured. With these data, stability of large superconducting toroidal coils were analyzed. In this analysis, the distributions of magnetic field and heat transfer characteristic along conductor were considered.

Keywords: Superconductor, Heat Transfer, Helium Boiling,  
Grooved Surface, Stability, Toroidal Coil,  
Large Current

## 目 次

1 序 論 .....	1
2 模擬導体の熱伝達特性の測定 .....	1
2.1 試 料 .....	2
2.2 実験装置 .....	2
2.3 実験方法 .....	6
2.4 実験結果 .....	6
3 超電導トロイダルコイルの安定性解析 .....	14
3.1 解析モデル .....	14
3.1.1 計 算 式 .....	14
3.1.2 導体モデル .....	15
3.1.3 コイル形状 .....	15
3.1.4 導体上の磁界 .....	16
3.1.5 解析に用いた物性値 .....	16
3.2 計 算 .....	20
3.3 解析結果 .....	20
3.3.1 常電導伝播速度 .....	20
3.3.2 導体温度の時間変化 .....	21
4 結 論 .....	27
謝 辞 .....	28
参考文献 .....	28

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Heat Transfer Characteristic Measurement of Model Conductors .....	1
2.1 Samples .....	2
2.2 Experimental Apparatus .....	2
2.3 Procedure .....	6
2.4 Results .....	6
3. Stability Analysis of Superconducting Toroidal Coils .....	14
3.1 Model for Analysis .....	14
3.1.1 Equation .....	14
3.1.2 Conductor Model .....	15
3.1.3 Coil Shape .....	15
3.1.4 Magnetic Field along Conductor .....	16
3.1.5 Parameters used in Analysis .....	16
3.2 Calculation .....	20
3.3 Analysis Results .....	20
3.3.1 Normal Front Wave Velocity .....	20
3.3.2 Temperature Profiles of Conductor .....	21
4. Conclusions .....	27
Acknowledgement .....	28
Reference .....	28

## 1. 序 論

超電導磁石には、一般に、主に機械的な要因によるある種の騒乱の発生があり、超電導磁石としての性能を劣化させるという現象（degradation 効果）が存在する。この現象の程度は騒乱の大きさに関係する。この騒乱を小さくすることは可能であるが、現在のところ、完全に取り除く技術は、まだ、開発されていない。今日の超電導導体は、この騒乱の影響を緩和させるために、Stekly ら<sup>(1)</sup>の提唱したCryostatic Stabilization の理論により、高純度の銅を超電導導体に付着させ、複合導体としており、今までに製作された超電導磁石において多くの成功を収めて来ている。

核融合炉用超電導トロイダルコイルでは、電磁力や電圧などの点から、10,000 A を超す大電流導体が要求されるが、このような大電流導体で、単に銅を付着させるだけで十分な安定性を得ようとすると、電流密度が低下し、コイルが大きくなつて、製作コストや運転に対する負荷の増加を招くことになる。そのため、高電流密度で安定化できるコイルの開発が要望され、近年、それに対する研究が盛んになって来ている。例えば、これまで作られた超電導磁石で最大の蓄積エネルギー（800 MJ）をもつCERN のBEBC（泡箱用超電導磁石）は  $13 \text{ A/mm}^2$  の電流密度であるが、IEA で計画されている Large Coil Task<sup>(2)</sup>（略称 LCT）用コイル(800 MJ)に要求されている電流密度は  $25 \text{ A/mm}^2$  である。安定化に必要な銅の超電導導体に占める割合は、導体表面から冷媒への伝達熱量に依存し、従つて、高電流密度で安定化を得るために、冷却効率の良い超電導導体の研究が必要となって来ている。

本研究では、この高電流密度超電導導体の予備的研究として、冷却面に深さの異なる溝を設けたいいくつかの模擬導体を試作し、液体ヘリウムとの熱伝達特性の測定を行ない、さらに、実際にトロイダルコイルに適用した場合について、その安定性の解析を行なつた。このとき、トロイダルコイルの巻線構造に特に注目し、熱伝達特性の異方性を実験にて測定し、解析にも、これを考慮した。

## 2. 模擬導体の熱伝達特性の測定

通電電流が数千 A を超す大電流導体では、それに安定に通電できる電流値の増加のために、導体の冷却面に何らかの加工を施すことによって熱伝達の向上を図るのが有効な方法と考えられる。導体表面の加工法は多種多様であるが、今回は、表面に縦溝を掘った導体のみについて、実際に近い状態でのヘリウム沸騰熱伝達特性の測定を行なつた。このとき、特に、導体をトロイダルコイルに巻いた場合を考え、導体方向とヘリウムの気泡の流れの方向の違いによる熱伝達特性の変化に着目して調査した。

## 1. 序論

超電導磁石には、一般に、主に機械的な要因によるある種の騒乱の発生があり、超電導磁石としての性能を劣化させるという現象（degradation 効果）が存在する。この現象の程度は騒乱の大きさに関係する。この騒乱を小さくすることは可能であるが、現在のところ、完全に取り除く技術は、まだ、開発されていない。今日の超電導導体は、この騒乱の影響を緩和させるために、Stekly ら<sup>(1)</sup>の提唱したCryostatic Stabilization の理論により、高純度の銅を超電導導体に付着させ、複合導体としており、今までに製作された超電導磁石において多くの成功を収めて来ている。

核融合炉用超電導トロイダルコイルでは、電磁力や電圧などの点から、10,000 A を超す大電流導体が要求されるが、このような大電流導体で、単に銅を付着させるだけで十分な安定性を得ようとすると、電流密度が低下し、コイルが大きくなつて、製作コストや運転に対する負荷の増加を招くことになる。そのため、高電流密度で安定化できるコイルの開発が要望され、近年、それに対する研究が盛んになって来ている。例えば、これまで作られた超電導磁石で最大の蓄積エネルギー（800 MJ）をもつCERN のBEBC（泡箱用超電導磁石）は  $13 \text{ A/mm}^2$  の電流密度であるが、IEA で計画されている Large Coil Task<sup>(2)</sup>（略称 LCT）用コイル（800 MJ）に要求されている電流密度は  $25 \text{ A/mm}^2$  である。安定化に必要な銅の超電導導体に占める割合は、導体表面から冷媒への伝達熱量に依存し、従つて、高電流密度で安定化を得るために、冷却効率の良い超電導導体の研究が必要となって来ている。

本研究では、この高電流密度超電導導体の予備的研究として、冷却面に深さの異なる溝を設けたいいくつかの模擬導体を試作し、液体ヘリウムとの熱伝達特性の測定を行ない、さらに、実際にトロイダルコイルに適用した場合について、その安定性の解析を行なった。このとき、トロイダルコイルの巻線構造に特に注目し、熱伝達特性の異方性を実験にて測定し、解析にも、これを考慮した。

## 2. 模擬導体の熱伝達特性の測定

通電電流が数千 A を超す大電流導体では、それに安定に通電できる電流値の増加のために、導体の冷却面に何らかの加工を施すことによって熱伝達の向上を図るのが有効な方法と考えられる。導体表面の加工法は多種多様であるが、今回は、表面に縦溝を掘った導体のみについて、実際に近い状態でのヘリウム沸騰熱伝達特性の測定を行なった。このとき、特に、導体をトロイダルコイルに巻いた場合を考え、導体方向とヘリウムの気泡の流れの方向の違いによる熱伝達特性の変化に着目して調査した。

## 2.1 試 料

Fig. 2.1 に、今回、測定の試料として用いた模擬導体の断面形状を示す。これは、 $10 \times 26 \times 50$  mm のタフピッチ銅に機械加工で溝を掘ったものであり、熱伝達測定のためヒーターおよび温度測定子用孔をあけてある。溝の深さ  $d$  は、0 mm (溝無し), 0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mm のものを用意した。さらに、溝深 1.5 mm の試料については、測定後、溝の山の角を丸めて新しい試料とした。

加熱のために試料中に埋め込んだヒーターは、マンガニン線を巻いて製作したものであり、約 60 Wまでの熱発生が可能である。

試料の温度測定用としては、金 + 0.07% 鉄対クロメルの熱電対と Ge 温度測定子を採用し、試料中に、Fig. 2.1 の位置に埋め込んだ。ここで使用した熱電対は 4 Kにおいて  $12.226 \mu\text{V}/\text{K}$ , 20 Kにおいて  $16.305 \mu\text{V}/\text{K}$  の性能を有するものである。また、Ge 温度測定子 (Scientific Instrument 社製) は、1.5 Kから 20 Kまで較正済のもので、4 Kにおいて  $341.72 \Omega$ , 20 Kにおいて  $73.765 \Omega$  の抵抗を有するものである。

## 2.2 実験装置

今回の実験に用いた装置および測定系を Fig. 2.3, Fig. 2.4 に示す。ヒーターおよび温度測定子を埋め込んだ試料は、4 面をベークライトにて熱絶縁され、ヒーターによって導入された熱量は、溝をきった 2 面からのみ放出されるように、また、溝のついた面が垂直面になるよう装備にセットされた。このときの各試料の冷却面積を Table 2.1 に示す。

溝の方向が水平面となす角  $\theta$  (Fig. 2.2) は、実際に、このタイプの導体をコイルに巻くことを想定して  $0^\circ$  から  $90^\circ$  まで変化させてセットした。

Table 2.1 COOLED PERIMETERS OF CONDUCTOR MODELS

depth of channels ( $d$ ) (mm)	cooled perimeter (cm)	normalization
0 (PLANE)	5.20	1
0.5	6.03	1.16
1.5	9.52	1.83
1.5 (BLUNT EDGE)	9.10	1.75
2.5	13.40	2.58

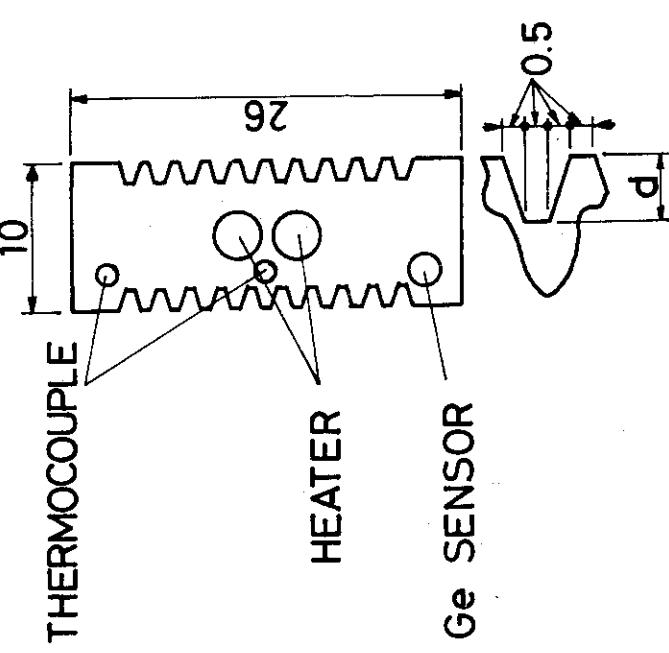


Fig. 2.1 CROSS - SECTION OF CONDUCTOR MODEL

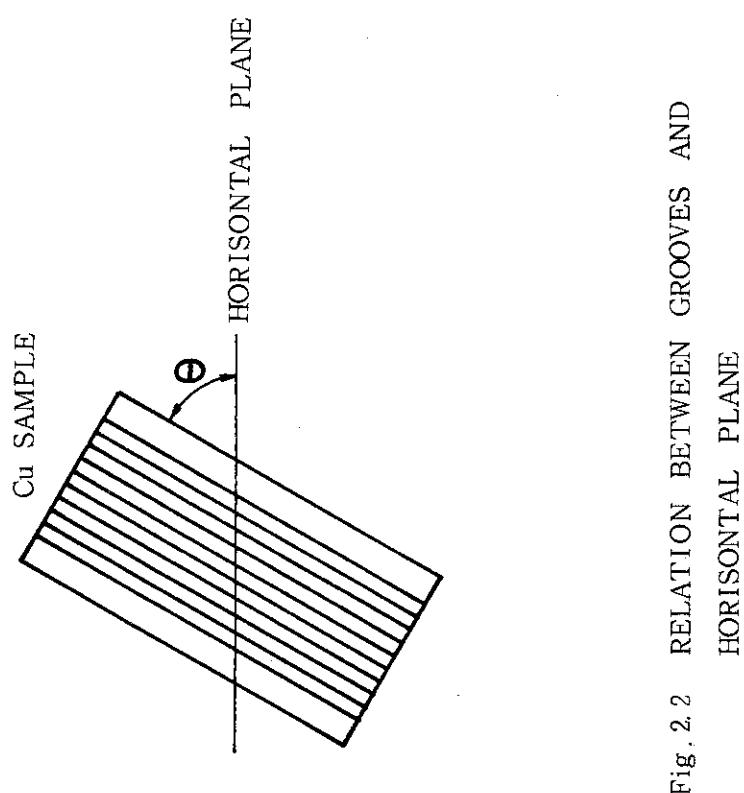


Fig. 2.2 RELATION BETWEEN GROOVES AND HORIZONTAL PLANE

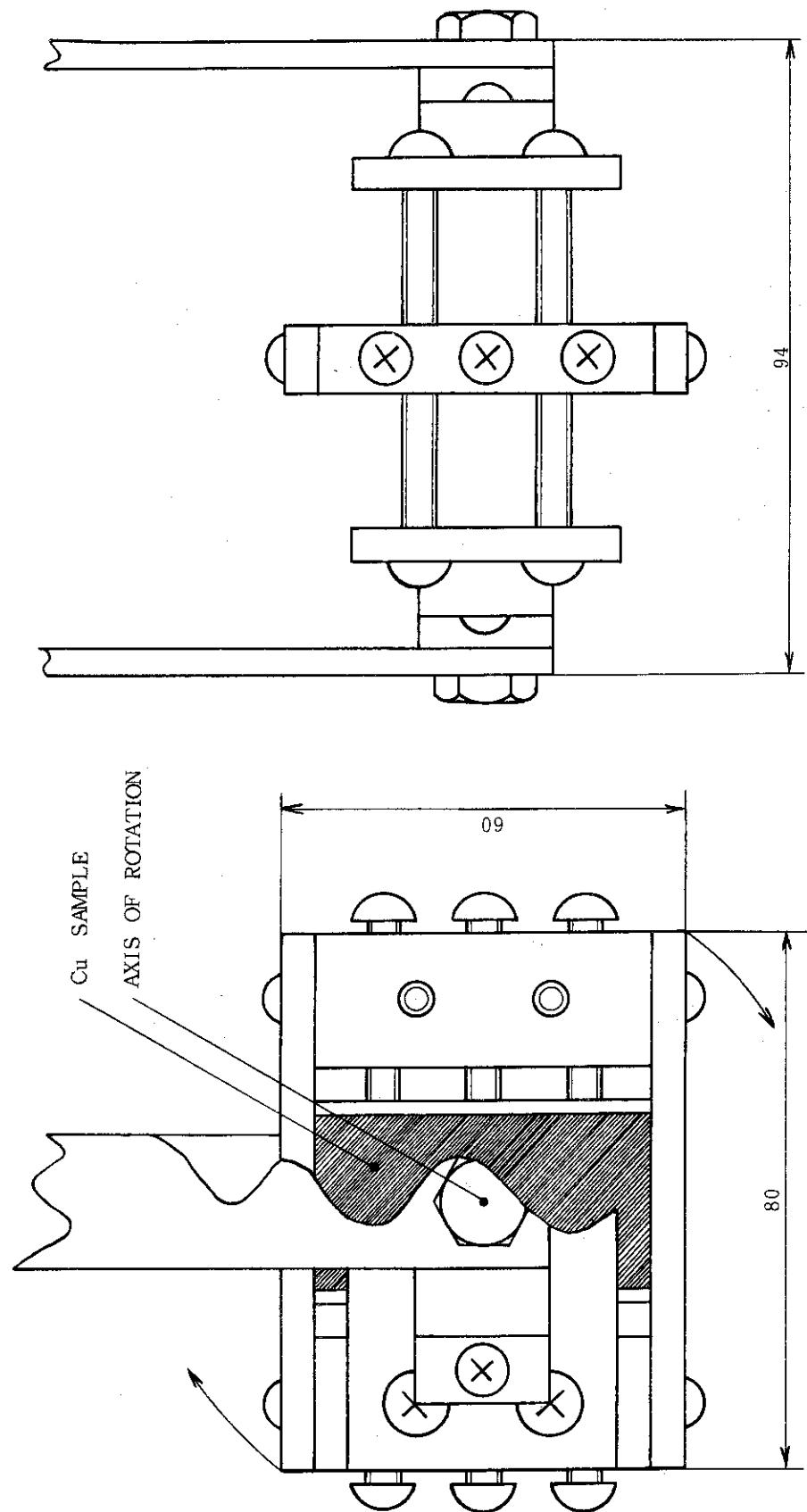


Fig. 2.3 EXPERIMENTAL APPARATUS

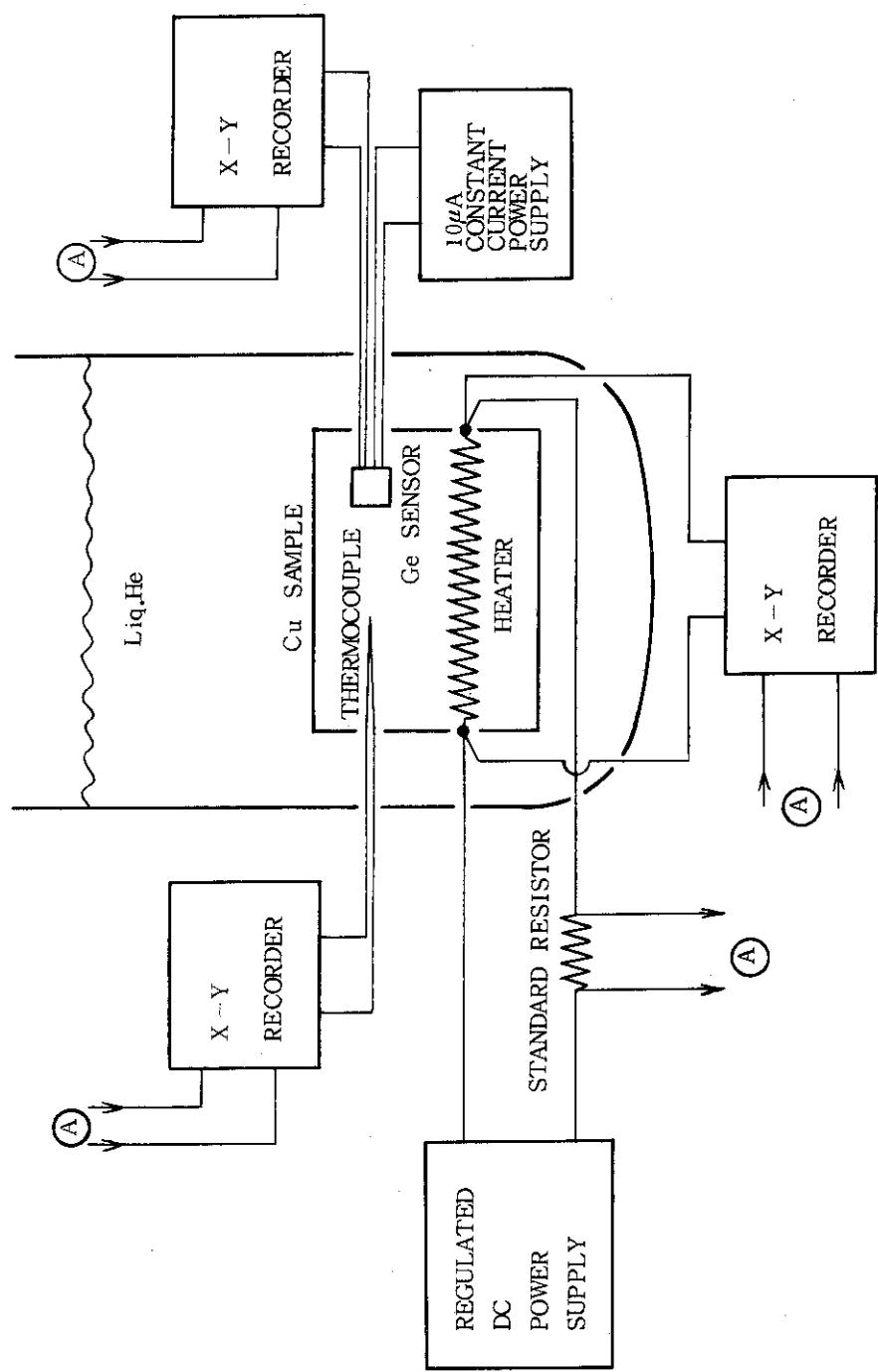


Fig. 2.4 MEASUREMENT CIRCUIT OF HEAT FLUX EXPERIMENT

### 2.3 実験方法

実験は、試料を装着し、傾斜角  $\theta$  をセットした装置をクライオスタットに挿入して行なわれた。使用したクライオスタットは、内径 110 mm  $\phi$ 、深さ 1000 mm のガラス製のものである。

液体ヘリウムの液面の高さの違いによる測定結果の変動が考えられたので、液体ヘリウムの液面の高さが試料上方 100 mm の場合と 500 mm の場合の実験結果を比較したが、変化は見られなかった。よって、今回の実験中、液体ヘリウムの液面の高さには特に注意はしなかった。ただし、実験進行中に液面が試料上方 150 mm 以下に下がった場合には、実験を一時停止し、液体ヘリウムの補充を行なった。

試料への熱量の導入速度は 0.5 W/min から 4.0 W/min の範囲内で測定結果に変化が見られなかつたので 3 ~ 4 W/min で行なった。

試料の温度測定用に熱電対と Ge 温度測定子の 2 種の測定素子を試料中に埋め込んだが、熱電対の場合、今回の測定では外乱が大きく、正確な温度測定には使用できなかつた。一方、Ge 温度測定子の計測系には、特に外乱は見られず、よって、試料温度は、Ge 温度測定子により測定した。

### 2.4 実験結果

本実験で得られた熱伝達特性図を Fig. 2.5 (a) ~ (n) に示す。図の横軸は試料温度と冷媒温度（液体ヘリウム温度、~4.22 K）との差、縦軸は導入熱量を Table 2.1 に示した冷却面積で割った、単位面積あたりの熱流束である。

Fig. 2.5 (a) は、溝深  $d = 0$ 、すなわち冷却面が平らな試料での結果であり、他の試料における結果に対して、その評価の基準となるものである。1 気圧下における清浄な銅の垂直面から液体ヘリウムへの熱伝達のいくつかの研究より Maddock らは 1 つの代表的特性図を与えており<sup>(6)</sup>、今回の結果はそれと良く一致している。

Fig. 2.6 は最大核沸騰熱流束  $Q_n$  と最小膜沸騰熱流束  $Q_f$  の傾斜角  $\theta$  との関係を示した図である。また、Fig. 2.7 は、溝を掘ることによって生じた冷却面積の増大を無視、すなわち溝深に関係なく、導入熱量を冷却面が平ら ( $d = 0$ ) の場合の冷却面積で割った実効熱流束  $Q_{neff.}$ 、 $Q_{feff.}$  と傾斜角  $\theta$  の関係図である。Fig. 2.8 には、傾斜角  $\theta = 90^\circ$  の場合について、溝深  $d$  と  $Q_n$ 、 $Q_f$ 、 $Q_{neff.}$ 、 $Q_{feff.}$  の関係を示した。

以下に、本測定より得られた結果を述べる。

- ①  $Q_n$  は、溝をつけたことにより  $\theta$  に依存し、 $30^\circ$  以下で減少する。
- ②  $Q_n$  は、溝深  $d$  の増加とともに減少する。逆に、 $Q_{feff.}$  は、 $0^\circ$  の近傍を除いて、 $d$  の増加とともに増加する。
- ③  $Q_f$  は、 $\theta$  にはほとんど依存しない。
- ④  $Q_f$  は、 $d = 1.5 \text{ mm}$  のものが 1 番大きく、以下、 $0$ 、 $0.5$ 、 $2.5 \text{ mm}$  の順である。 $Q_{feff.}$  で比較した場合は、 $1.5$ 、 $2.5$ 、 $0$ 、 $0.5 \text{ mm}$  の順であり、 $d = 1.5 \text{ mm}$  における値が、やはり、最大である。

- ⑤ 溝の山の角を丸めた場合、 $Q_n$ ,  $Q_{neff}$ ,  $Q_f$ ,  $Q_{feff}$  のいずれの値も、丸めない場合より低い値を示す。

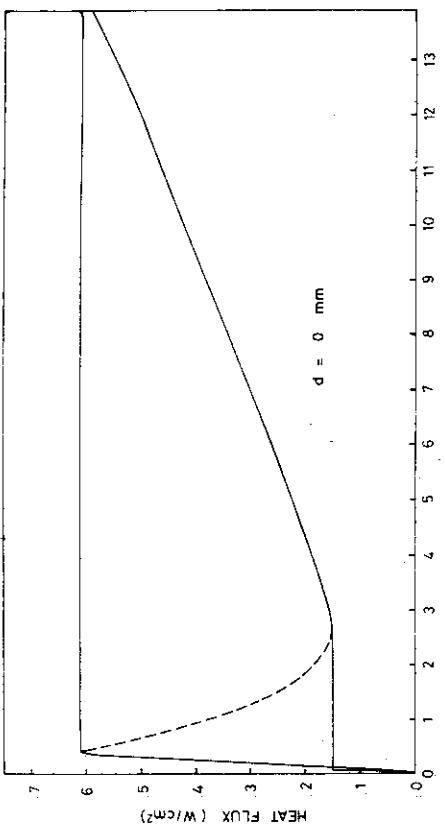


Fig. 2.5 (a) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 0$  mm)

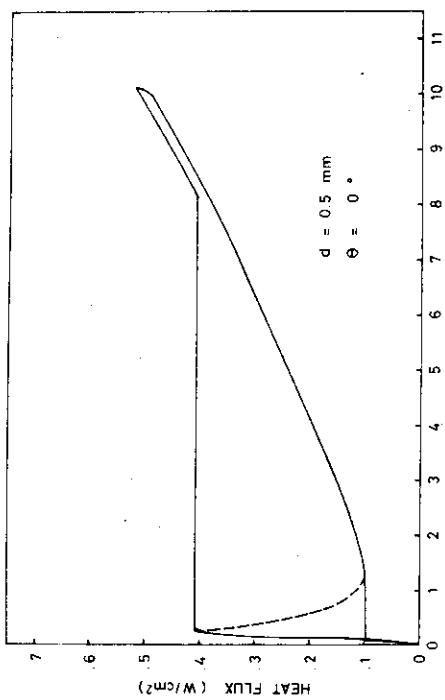


Fig. 2.5 (b) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 0.5$  mm  $\theta = 0^\circ$ )

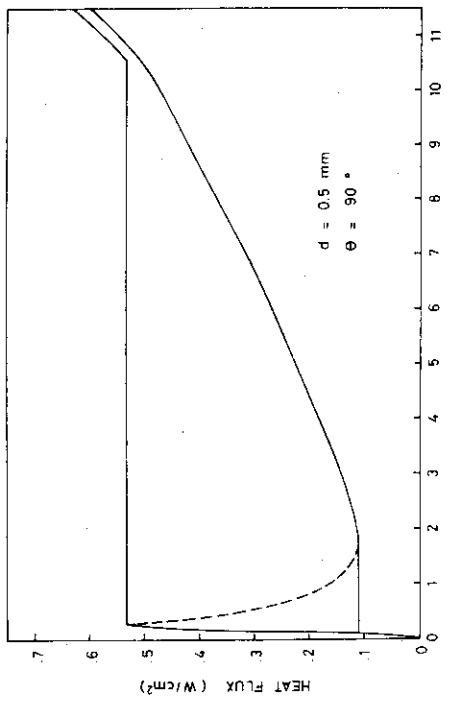


Fig. 2.5 (c) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 0.5$  mm  $\theta = 90^\circ$ )

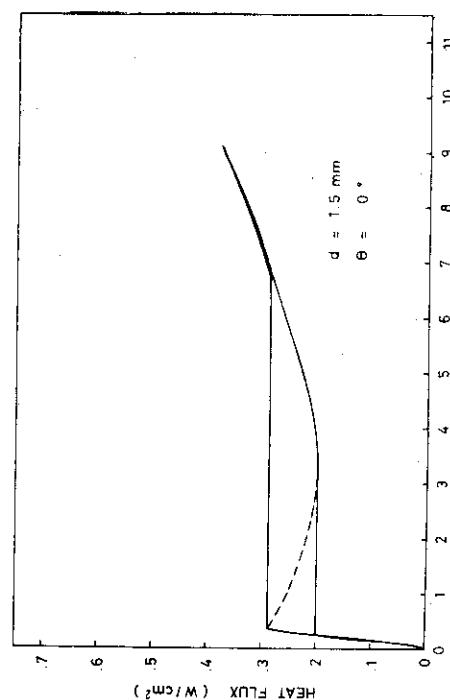


Fig. 2.5 (d) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 1.5$  mm  $\theta = 0^\circ$ )

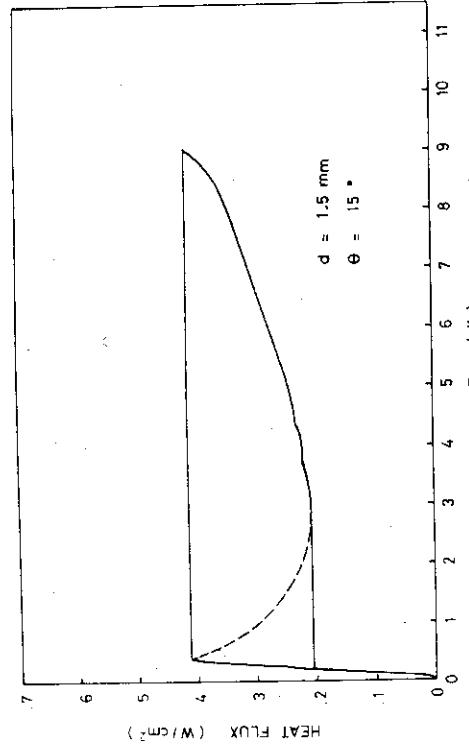


Fig. 2.5 (e) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 1.5\text{ mm } \theta = 15^\circ$ )

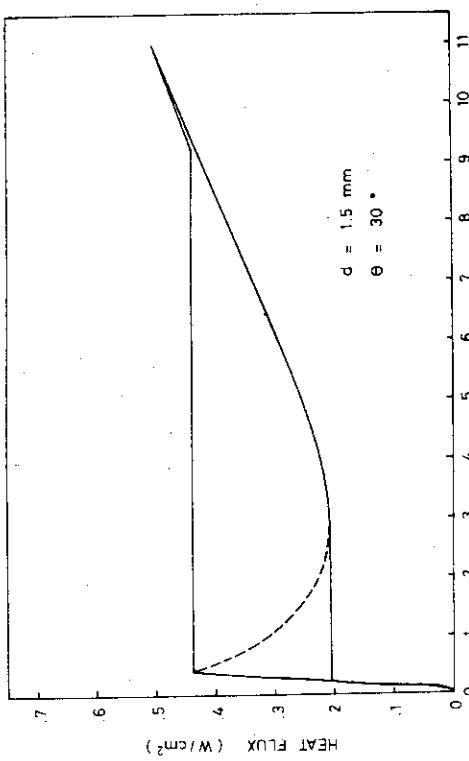


Fig. 2.5 (f) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 1.5\text{ mm } \theta = 30^\circ$ )

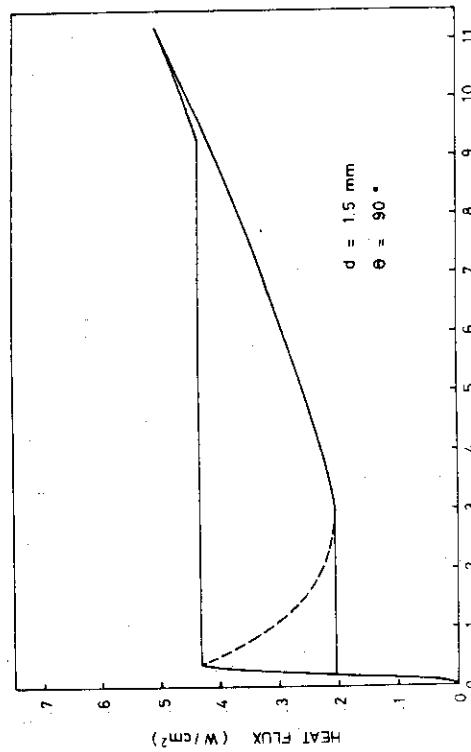


Fig. 2.5 (g) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 1.5\text{ mm } \theta = 90^\circ$ )

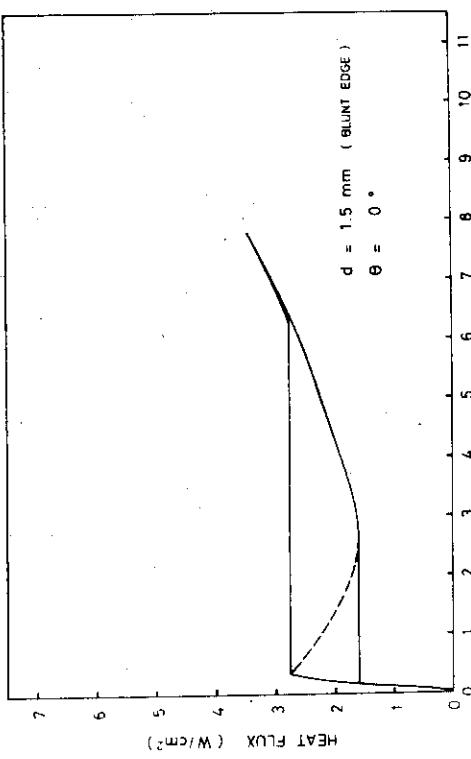


Fig. 2.5 (h) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 1.5\text{ mm Blunt Edge } \theta = 0^\circ$ )

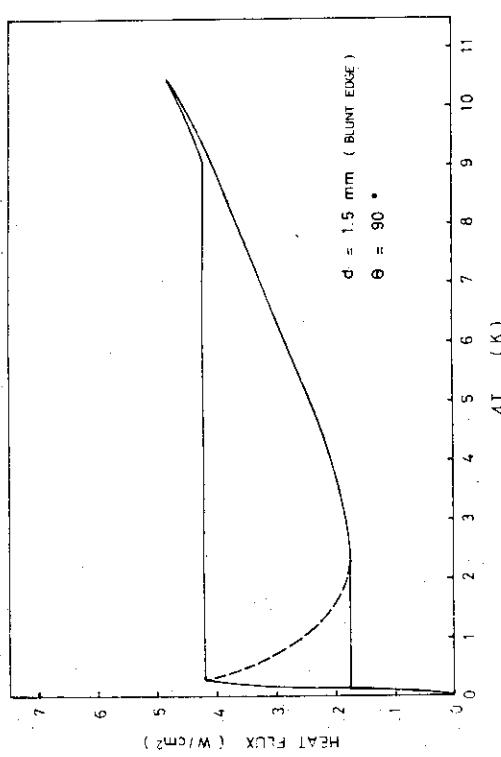


Fig. 2.5 (i) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 1.5\text{ mm}$  Blunt Edge  $\theta = 90^\circ$ )

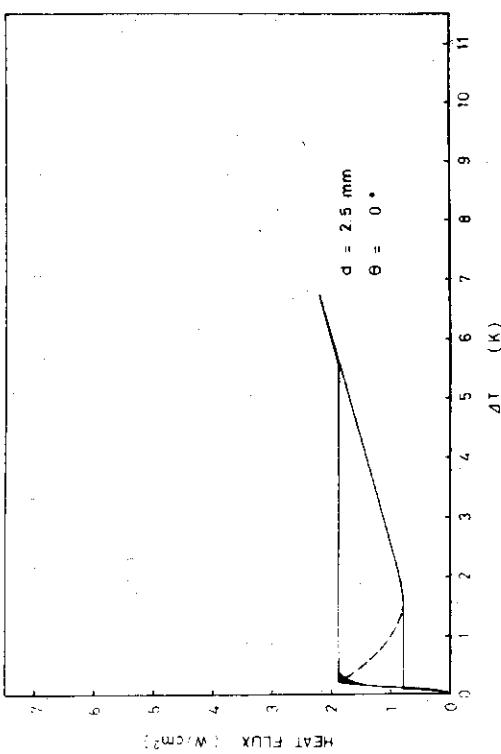


Fig. 2.5 (j) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 2.5\text{ mm}$   $\theta = 0^\circ$ )

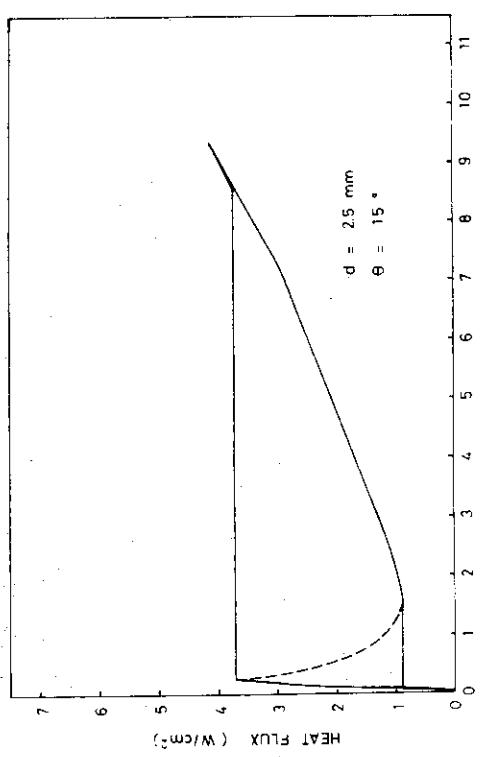


Fig. 2.5 (k) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 2.5\text{ mm}$   $\theta = 45^\circ$ )

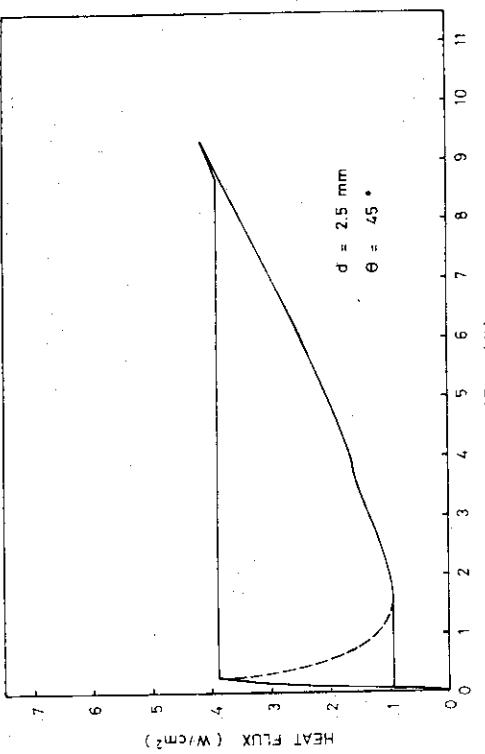


Fig. 2.5 (l) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 2.5\text{ mm}$   $\theta = 15^\circ$ )

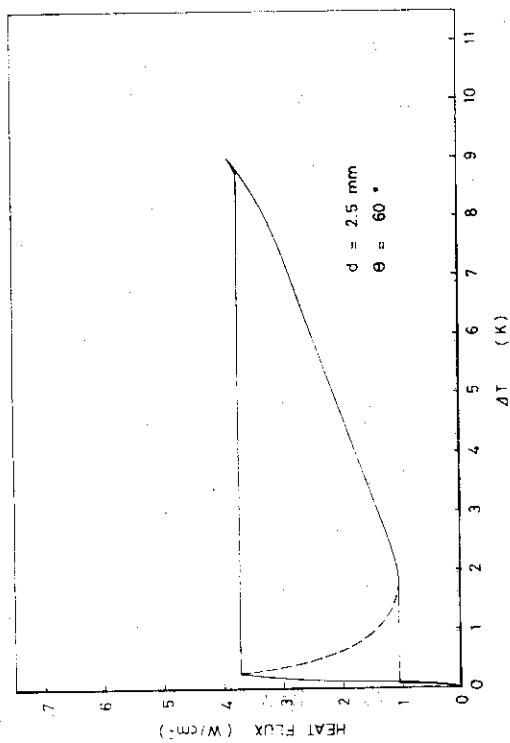


Fig. 2.5 (n) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 2.5\text{ mm}$   $\theta = 60^\circ$ )

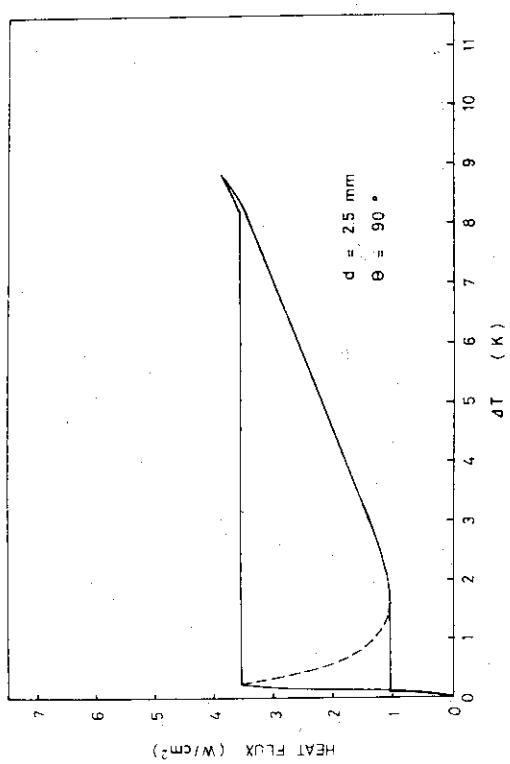


Fig. 2.5 (n) BOILING HELIUM HEAT TRANSFER  
CHARACTERISTIC ( $d = 2.5\text{ mm}$   $\theta = 90^\circ$ )

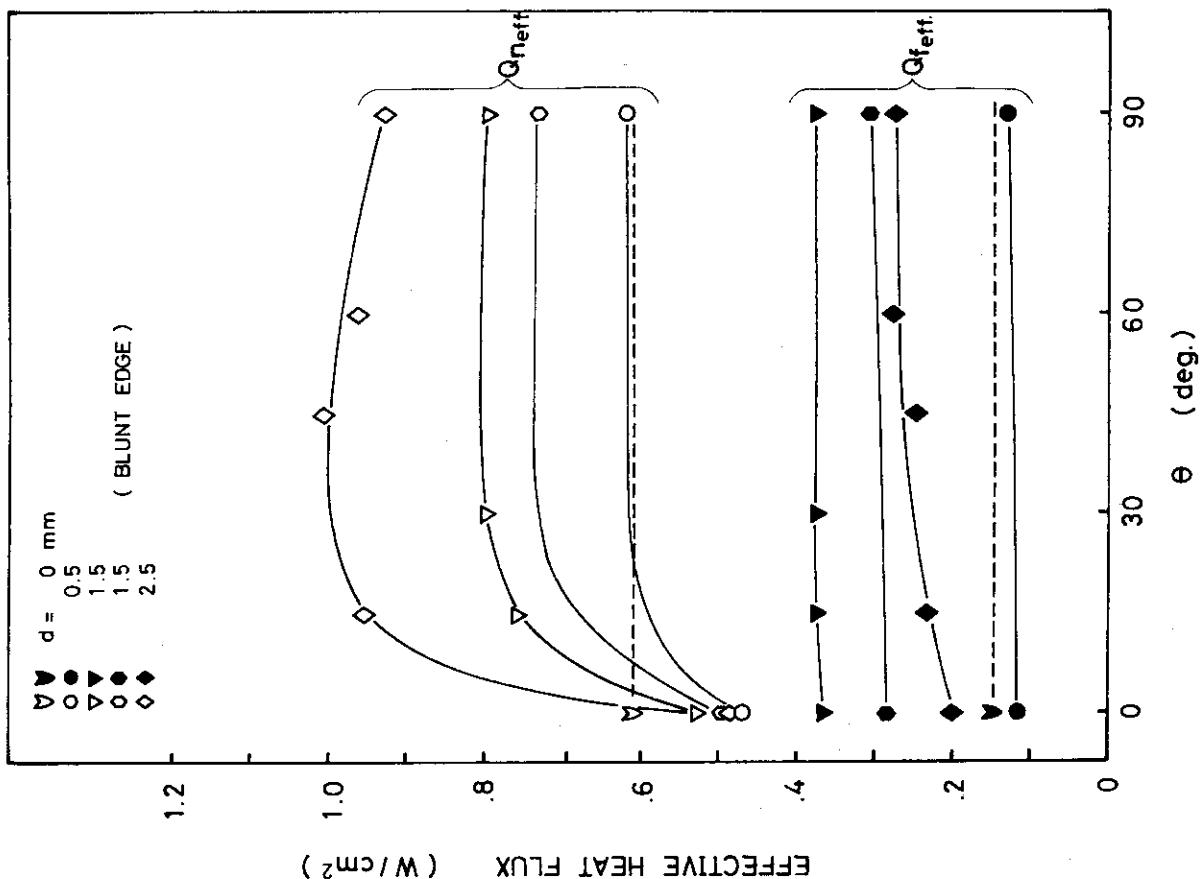


Fig. 2.7 ANGLE DEPENDENCE OF EFFECTIVE HEAT FLUX

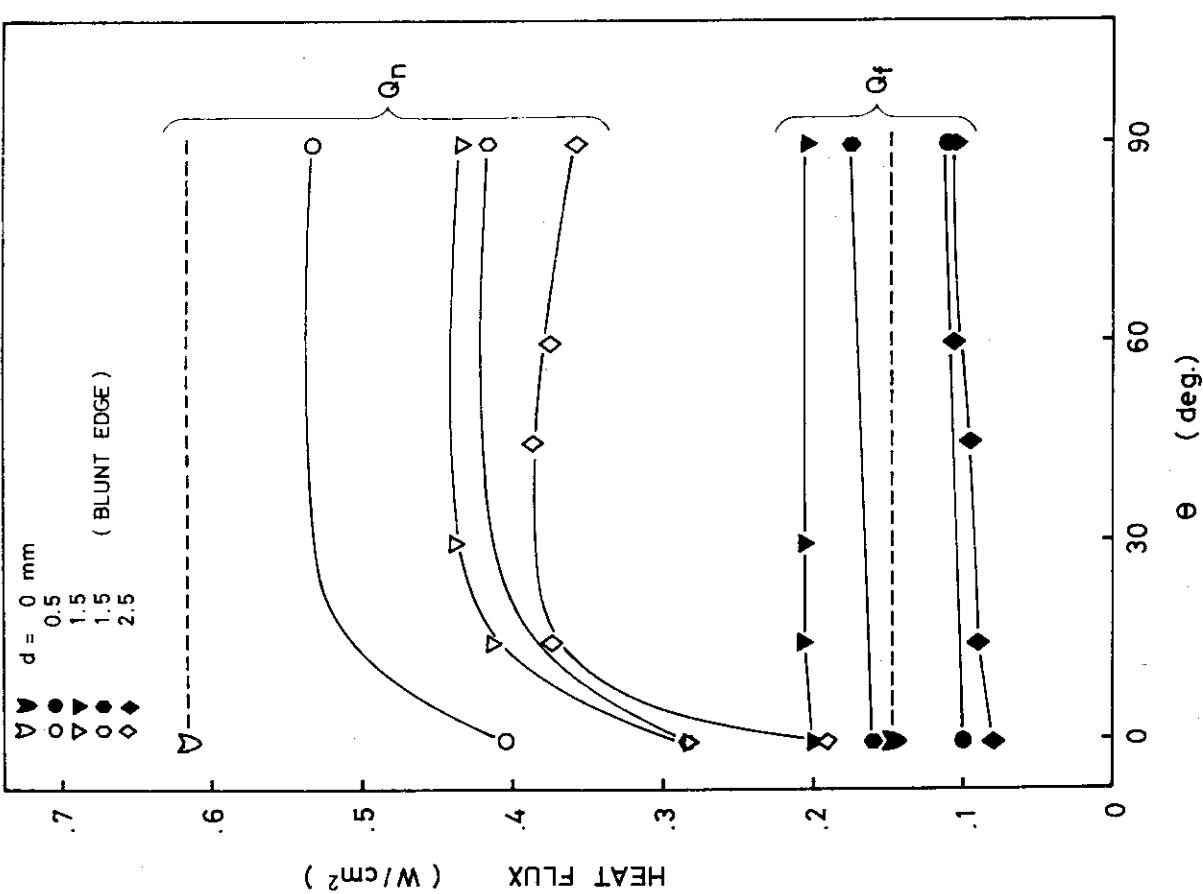


Fig. 2.6 ANGLE DEPENDENCE OF HEAT FLUX

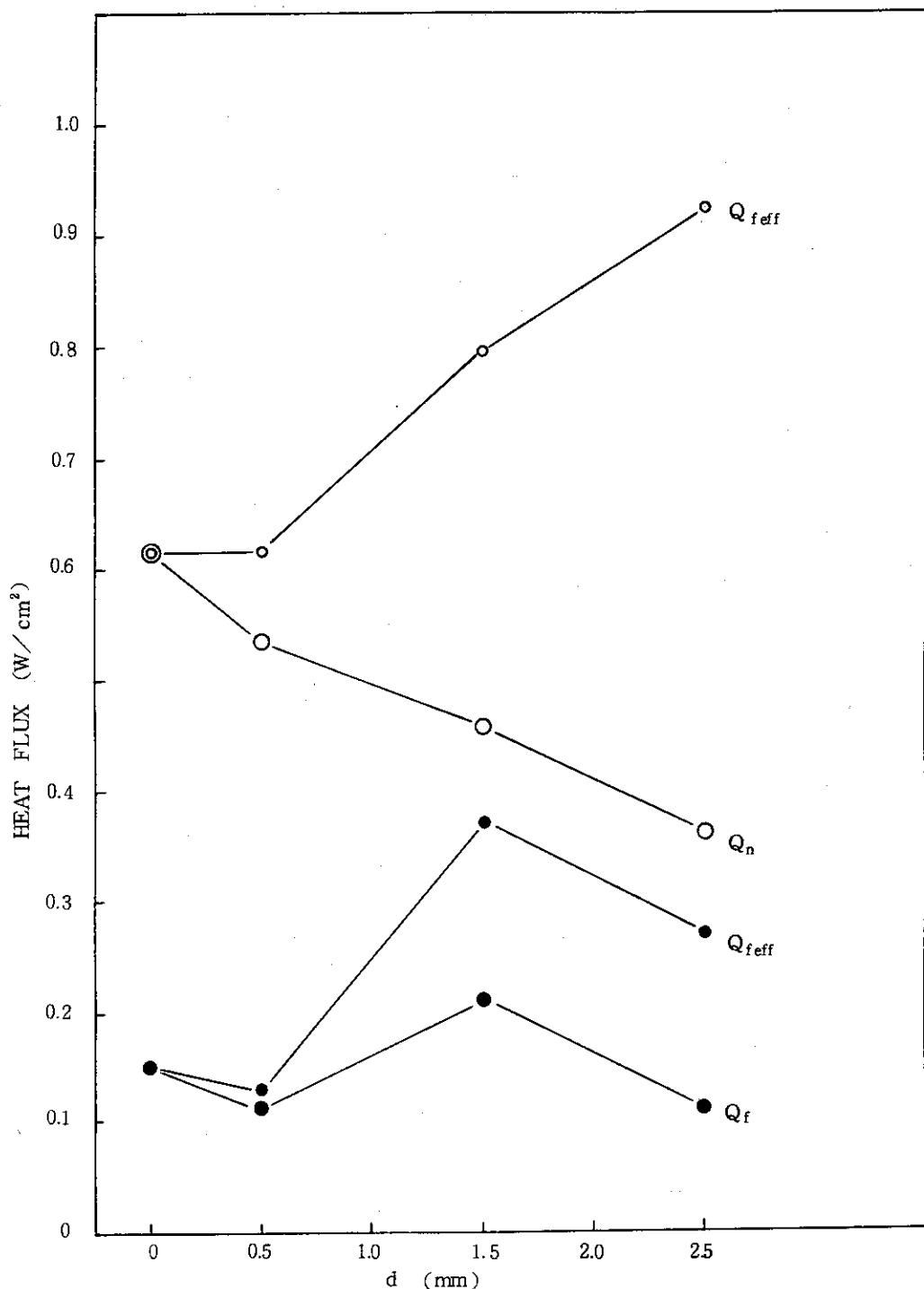


Fig. 2.8 GROOVE DEPTH DEPENDENCE OF HEAT FLUX ( $Q_n$ ,  $Q_f$ )  
AND EFFECTIVE HEAT FLUX ( $Q_{neff}$ ,  $Q_{fneff}$ ) AT  $\theta=90^\circ$

### 3. 超電導トロイダルコイルの安定性解析

トカマク型核融合炉に使用される超電導トロイダルコイルには、他のコイルやプラズマ等から入ってくる多くの外乱に耐えるように、高度の安定度が要求される。故に、その製作にあたっては、あらかじめ、詳細な解析によって、コイルが十分に安定であることを証明しておかねばならない。今回の解析は、その第1歩として、簡単な1次元モデルに、今回測定された溝付導体の冷却特性、特に、その傾斜角依存性を考慮し、また、導体上の磁界分布も入れて行なったものである。なお、コイルの安定性の基準には、LCTの仕様書<sup>(2)</sup>において述べられている、コイルの1/2ターンに渡って常電導状態が急激に発生された場合においても、超電導状態に十分回復する能力を有することを採った。

#### 3.1 解析モデル

今回の解析は、導体断面内で温度は均一であると仮定し、1次元モデルで行なった。

##### 3.1.1 計算式

今回の解析で立てた1次元熱方程式を以下に示す。

$$\rho \cdot C(T) \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(T, B(x)) - \frac{P_{eff}}{A_{cu}} \cdot H(T, \theta) \quad \dots \dots (3-1)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq T \leq T_s \quad Q = 0 \\ T_s < T < T_c \quad Q = R(B) \cdot \frac{I_c(B) \cdot I_t}{A_{cu}^2} \cdot \left( \frac{T}{T_c(B)} + \frac{I_t}{I_c(B)} - 1 \right) \\ T_c \leq T \quad Q = R(B) \cdot \left( \frac{I_t}{A_{cu}} \right)^2 \end{array} \right\} \quad (3-2)$$

- $t$  ; 時刻 [ sec ]
- $x$  ; 導体に沿っての長さ [ m ]
- $\theta$  ; 導体が水平面となす傾斜角
- $T(x, t)$  ; 導体の温度 [ K ]
- $P_{eff}$  ; 導体の実効冷却周長 [ m ]

$A_{Cu}$	導体の安定化母材の断面積 [ $m^2$ ]
$H(T, \theta)$	導体から冷媒への熱流束 [ $W/m^2$ ]
$B(x)$	導体上の磁界 [ T ]
$Q(T, B)$	導体中に発生する熱量 [ $W/m^3$ ]
$\rho$	安定化母材の密度 [ $kg/m^3$ ]
$C(T)$	安定化母材の比熱 [ $J/kg \cdot K$ ]
$\lambda(T)$	安定化母材の熱伝導度 [ $W/m \cdot K$ ]
$R(B)$	安定化母材の電気抵抗率 [ $\Omega \cdot m$ ]
$T_c(B)$	超電導線の臨界温度 [ K ]
$T_s(B)$	超電導線の分流開始温度 [ K ]
$I_c(B)$	超電導線の臨界電流 [ A ]
$I_t$	コイルの通電電流

式(3-1)の各項の意味は次の通りである。

左辺 : 導体の単位体積当り、単位時間に温度上昇に費される熱量

右辺第1項 : 導体中の熱伝導により、単位時間に導体の単位体積中に蓄積される熱量

右辺第2項 : 電力損失により、単位時間に導体の単位体積中に発生する熱量

右辺第3項 : 热伝達により、単位時間に導体の単位体積より冷媒中へ放出される熱量

以上の計算モデルを図解したのがFig. 3.1である。

### 3.1.2 導体モデル

解析の対象とした導体モデルをFig. 3.2に示す。導体の安定化母材は銅、超電導線はNb-Tiである。この導体は、8 Tの磁界中において、10,000 Aの電流を安定に流すこと目標として考案された導体モデルの1つである。大きな冷却面積を得るために、このモデルではエッジワイヤーを想定しており、さらに、冷却面には、実験で好結果を得た溝深1.5 mmの溝を設けている。

この導体モデルより、以下の値が決定される。

① 導体の実効冷却周長  $P_{eff} = 8.8$  [ cm ]

導体モデルより計算される冷却周長は11 cmであるが、スペーサによる冷却面積の減少を導体全域で平均的に20 %であるとして上記の値に定めた。

② 導体の安定化母材の断面積  $A_{Cu} = 2.7$  [  $cm^2$  ]

③ 導体から冷媒への熱流束  $H(T, \theta)$  ..... Fig. 3.3

Fig. 3.3は、前章に示した測定結果を折線近似したものである。図中には、通電電流10, 11, 12 kA、導体上の磁界8 Tの場合における熱発生の線も描き添えた。

### 3.1.3 コイル形状

解析に用いたコイルの形状をFig. 3.4に示す。寸法はLCTコイルに準拠したものである。ここで、図中に示すように、トーラス中心方向で、導体の、水平面に対する傾斜角 $\theta$ が90°である点を、計算式におけるx座標の原点とする。このコイル形状では、傾斜角が0°になるxは

2.09 m, また, 1周の長さは 9.26 mである。また, 傾斜角  $\theta$  は, Fig. 3.5 に示す通りとなる。

### 3.1.4 導体上の磁界

Fig. 3.6 に, ここで使用した導体上の磁界分布を示す。この磁界分布は, LCTコイルを定常運転したときに生ずる磁界分布<sup>(6)</sup>を折線近似したものである。なお, LCTコイルにおける定常運転とは, 6個のLCTコイルをトーラス状に並べ, 試験コイルには定格値の電流を, 他の5つのコイルには定格値の80%の電流を通電する運転をいい, このとき, 試験コイルの, Fig. 3.4 で示すx座標の原点の位置で, 少くとも 8 Tの磁界を発生することが要求されている。

### 3.1.5 解析に用いた物性値

解析に使用する, 安定化母材(銅), 超電導線(Nb-Ti)の物性値を以下のように定めた。

$$(1) \text{ 銅の密度 } \rho = 8930 [\text{ kg/m}^3 ]$$

$$(2) \text{ 銅の比熱 } C(T) = 1.08 \times 10^{-2} \cdot T + 7.48 \times 10^{-4} \cdot T^3 [\text{ J/kg} \cdot \text{K}] \quad \dots \dots (3-3)$$

$$(3) \text{ 銅の熱伝導度 } \lambda(T) = 76.77 \cdot T^{0.88} [\text{ W/m} \cdot \text{K}] \quad \dots \dots (3-4)$$

$$(4) \text{ 銅の電気抵抗 } R(B) = 5.25 \times 10^{-11} \cdot B + 1.3 \times 10^{-10} [\Omega \cdot \text{m}] \quad \dots \dots (3-5)$$

ここでは, 8 Tで  $5.5 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$  に規格化した。

$$(5) \text{ 超電導線の臨界温度 } T_c(B) = 8.56 \cdot \left( 1 - \frac{B}{14.7} \right)^{\frac{1}{2}} [\text{ K}] \quad \dots \dots (3-6)$$

$$(6) \text{ 超電導線の分流開始温度 } T_s(B) = T_c \cdot \left( 1 - \frac{I_t}{I_c} \right) [\text{ K}] \quad \dots \dots (3-7)$$

$$(7) \text{ 超電導線の臨界電流 } I_c(B) = -6000 \cdot B + 63000 [\text{ A}] \quad \dots \dots (3-8)$$

ここでは, 8 Tで 15000 A となるように定めた。

ここで, 銅の比熱, 熱伝導度, および, 超電導線の磁界電流の各式は, それぞれ示した参考文献のデータより導出したものである。

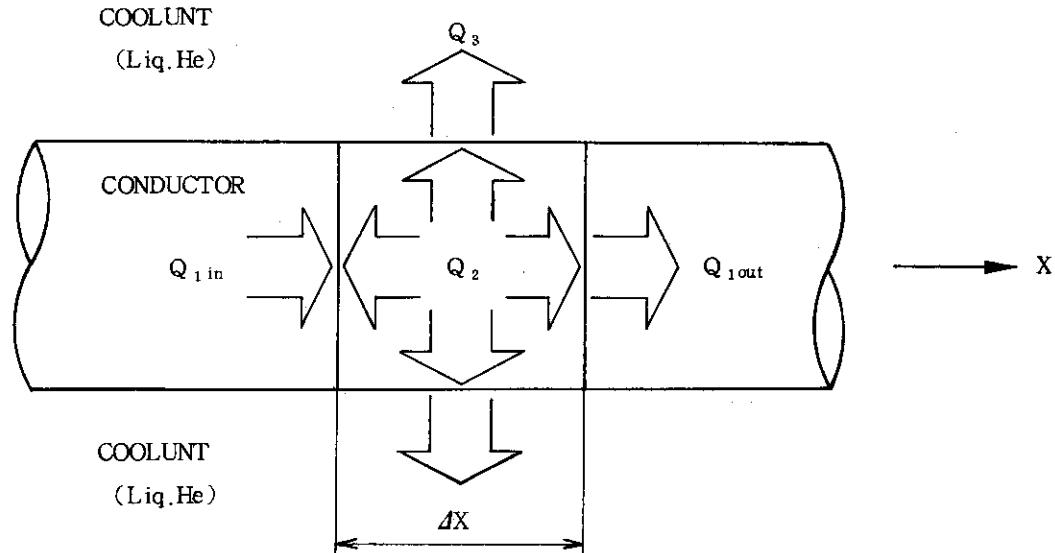


Fig. 3.1 MODEL FOR PRESENT ANALYSIS (ONE DIMENSION)

$$Q_1 = Q_{1\text{ in}} - Q_{1\text{ out}} : \text{HEAT INFLUX}$$

$$Q_2 : \text{HEAT GENERATION}$$

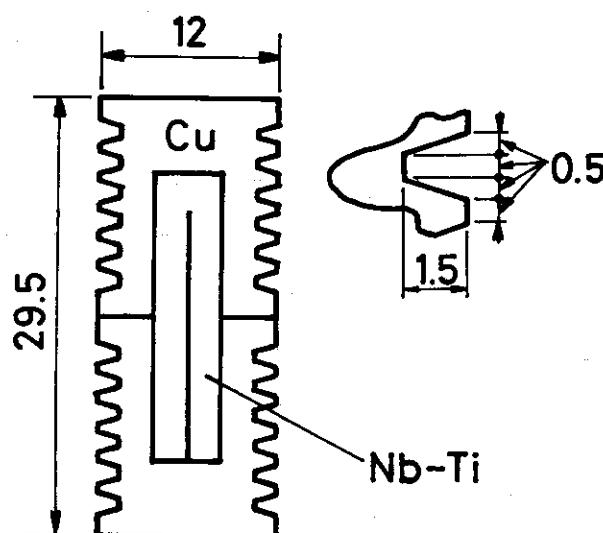
$$Q_3 : \text{HEAT LOSS}$$


Fig. 3.2 CROSS-SECTION OF CONDUCTOR MODEL FOR ANALYSIS

$$A_{\text{cu}} = 2.7 \text{ cm}^2$$

$$P_{\text{eff}} = 8.8 \text{ cm}$$

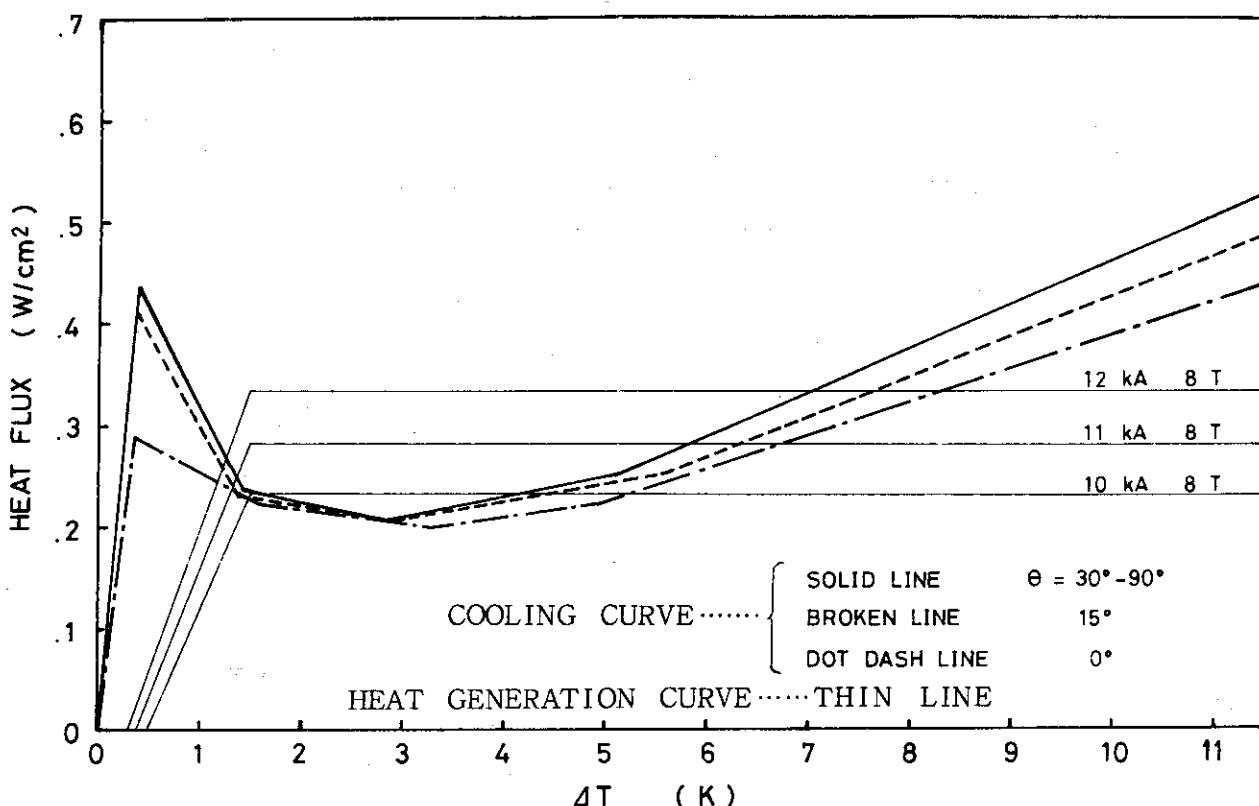


Fig. 3.3 COOLING CURVES FOR CALCULATION AND HEAT GENERATION LINE

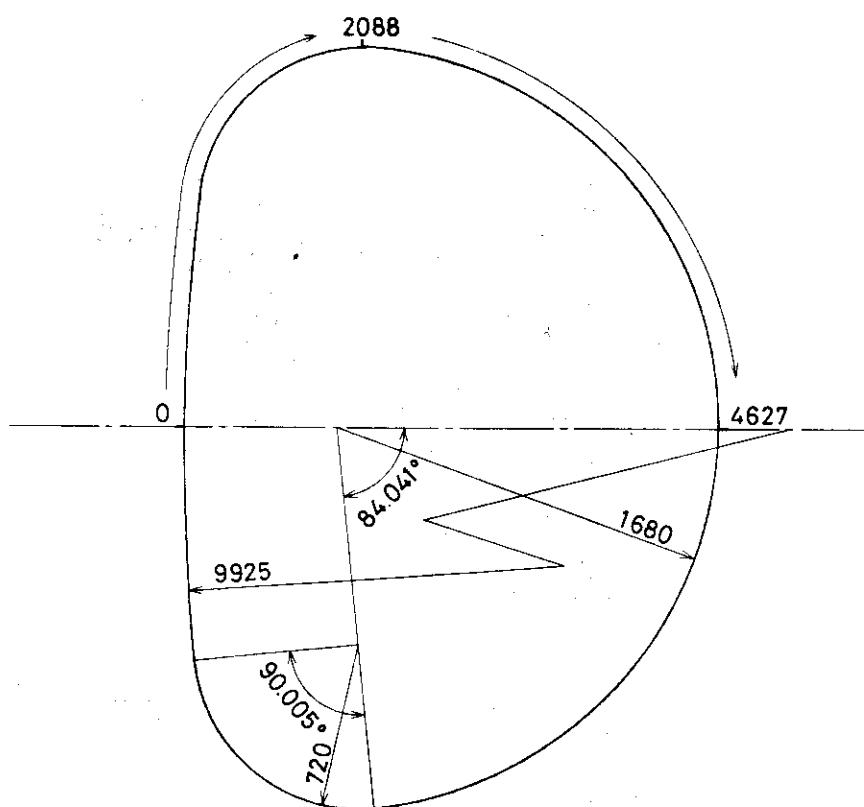


Fig. 3.4 INNER MOST TURN SIZE OF LCT AND DISTANCE ALONG CONDUCTOR

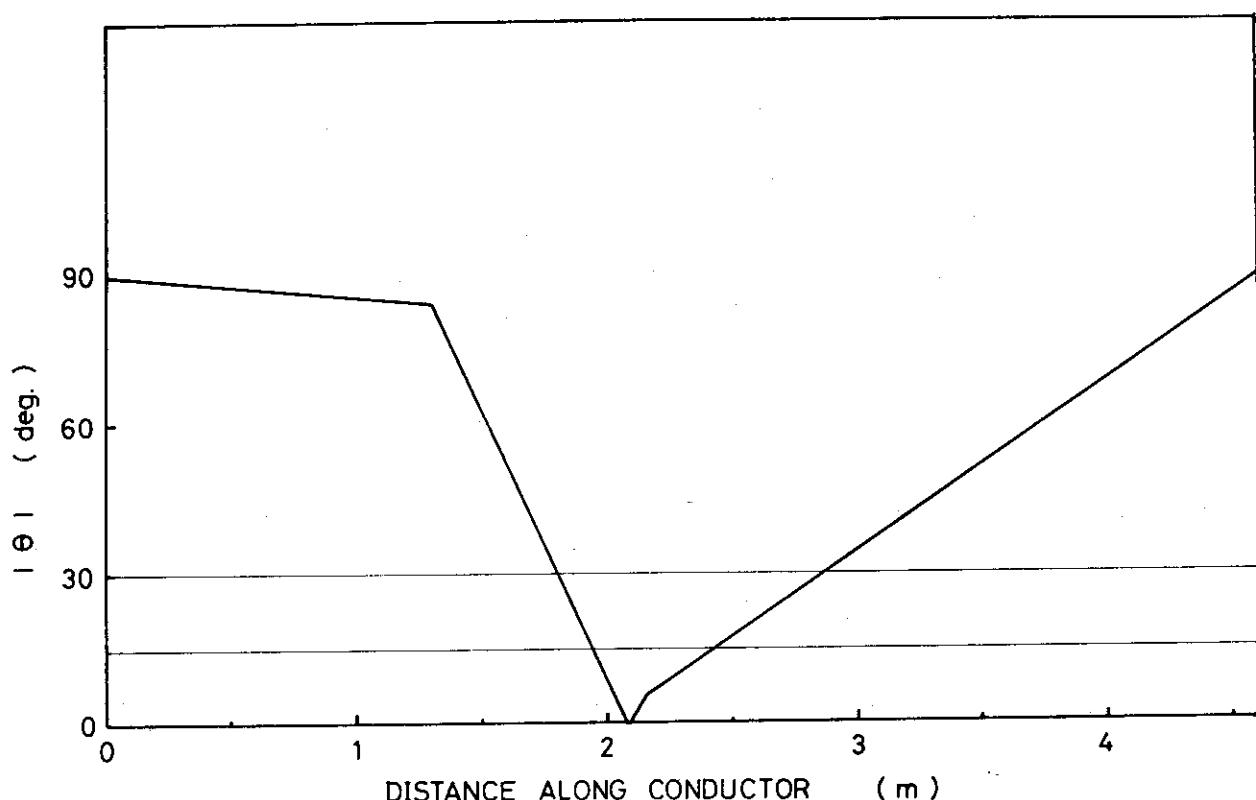


Fig. 3.5 ANGLE DISTRIBUTION ALONG CONDUCTOR

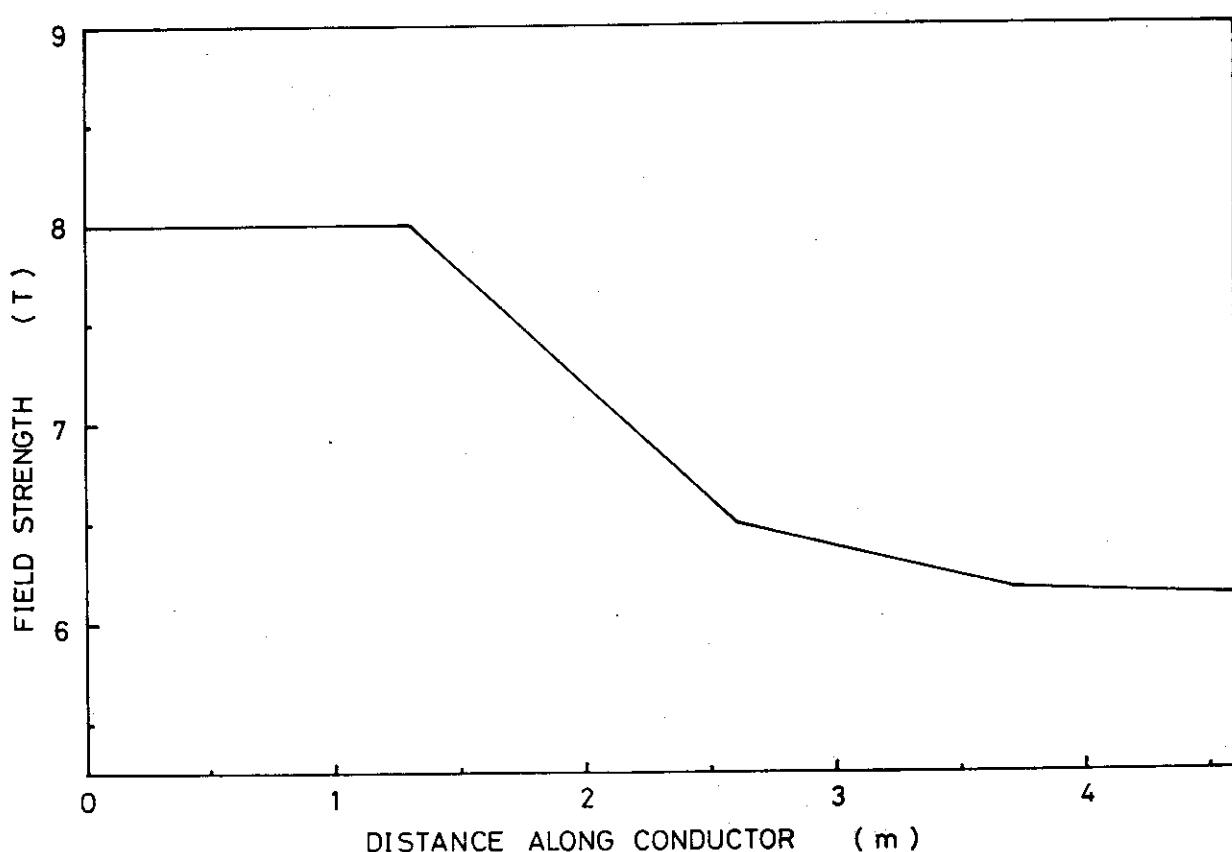


Fig. 3.6 MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION ALONG CONDUCTOR

### 3.2 計 算

安定性解析は、式(3-1)を、電子計算機を用い、差分近似によって解くことにより行なった。

初期条件としては、コイルの1/2ターンに臨界温度以上の温度を与えた。コイルの1/2ターンのとり方は無限にあるが、常電導転移した場合、銅の電気抵抗の磁場依存性で、トーラス内側の磁場の強い部分における発熱が最も大きい。また、冷却特性の最も悪い位置は、傾斜角 $\theta$ が $0^\circ$ の位置、即ちXが±2.09mの場所であり、この位置はトーラス内側の1/2ターンに含まれる。よって、初期条件として温度を与える1/2ターンとして、ここでは、トーラス内側の1/2ターンをとることにした。

コイルは上下対称形であり、初期条件も同様である。よって、ここでは、あらゆる条件が上下で等しいとして、X=0~4.63mの範囲で計算することとした。実際のコイルにおいては、下方で冷媒中に発生した泡が上方に影響する等の上下非対称性がある。

傾斜角 $\theta$ が $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ ~ $90^\circ$ の冷却特性はFig.3.3に示した。 $\theta$ が $0^\circ$ から $15^\circ$ 、および、 $15^\circ$ から $30^\circ$ の間の冷却特性については、それぞれの折点を $0^\circ$ と $15^\circ$ 、あるいは $15^\circ$ と $30^\circ$ の折点の位置より直線近似で計算し、各 $\theta$ に合う冷却特性を求めた。

### 3.3 解析結果

#### 3.3.1 常電導伝播速度

3.1で与えたすべての条件を入れての計算を行なうに先立って、コイル全域に渡って、磁界は8T、冷却特性は $\theta=90^\circ$ の特性をもつ、として常電導端の伝播速度を計算した。この条件は、X=0~1.3mの領域において満足されるものであり、安定限界を与える電流の概略値を得ることと、1/2ターンを常電導転移させたときに超電導復帰が最も遅れると思われるこの領域の解析を行なっておくことにより、最終的に安定を判別するときの参考とする目的で計算を行なったものである。

Fig.3.7に常電導伝播速度の計算結果を示す。図の横軸は通電電流、縦軸は常電導伝播速度であり、正は常電導領域の拡大(不安定)、負は縮小(安定)を表わす。今回のモデルでは、約11kAの通電電流のときに、常電導伝播速度が0、という結果を得た。

導体が十分に長く、その一端の温度が $T_1$ 、他端の温度が $T_2$ で、両端において、流入熱量と流出熱量は等しく、かつ、温度勾配が0の場合、次式が成立すれば、導体上の温度分布は定常に保たれる<sup>(4)</sup>。

$$\int_{T_1}^{T_2} [q(T) - g(T)] \cdot \lambda(T) dT = 0 \quad \dots \dots (3-9)$$

$q(T)$  : 冷媒へ流出する熱量

$g(T)$  : 導体中に発生する熱量

$\lambda(T)$  : 導体の熱伝導度

今回の計算条件を式(3-9)に入れれば、式(3-9)に課せられた条件の範囲内で、導体

上の温度分布が定常，即ち，常電導伝播速度が0となる通電電流値を算出できる。その計算結果は10.934 Aとなり，常電導伝播速度の計算からの値と良い一致をみた。

Fig. 3.7中には，原研において計画されているクラスター・テスト装置におけるテストモジュールコイル（略称：TMC）<sup>(9)</sup>を対象モデルとして計算した結果も，比較のために描いた。TMCの1周の長さは2.1 m，また，導体モデルは，寸法が小さくなっている（安定化母材の断面積：2.4 cm<sup>2</sup>，実効冷却周長：7.28 cm）以外は，Fig. 3.2の導体モデルと同じであり，他のパラメータもすべて同一である。今回のTMCに対する計算では，通電電流値が約9.5 kAのとき，常電導伝播速度が0である，という結果を得た。式(3-9)の計算からは，9.431 Aという電流値が得られ，これも良い一致をみた。

### 3.3.2 導体温度の時間変化

次に，3.1のすべての条件（導体に沿っての磁界の変化，および，冷却特性の変化を考慮）を入れて，通電電流が10 kA, 10.5 kA, 11 kA, 12 kA, 13 kAの場合について行なった計算の結果をFig. 3.7～11に示す。縦軸は導体と冷媒の温度差，横軸は導体に沿っての長さである。また，比較のために，電流値10.5 kAを例にとって，

- ① 磁界は導体上で一様に8 T，かつ，冷却特性は $\theta$ に依存せず $\theta=0^\circ$ の特性。
- ② 磁界はFig. 3.5の分布をもつが，冷却特性は $\theta$ に依存せず $\theta=0^\circ$ の特性。
- ③ 磁界は導体上で一様に8 Tとするが，冷却特性は $\theta$ に依存させる。

の3つの場合についても計算を行なった。その結果をFig. 3.13, 3.14, 3.15に示す。

①の場合の結果であるFig. 3.13の常電導端付近における温度分布は熱伝導によって生じたものである。また，常電導端付近まで一様である温度( $\Delta T \sim 5.85$  K)は，Fig. 3.3の冷却曲線と，電流値10.5 kAに対応する熱発生の曲線より定まる平衡温度である。

②の場合の結果は，Fig. 3.14に示すように， $X \gtrsim 1.3$  mにおいて温度の下降を示した。これは，磁界の強さの減少によるものである。導体に発生する熱量は，通電電流値と電気抵抗により定まり，銅の電気抵抗は磁界の強さの減少により減少する。即ち， $X \gtrsim 1.3$  mにおいては，発生熱量が減少し，冷却曲線との間で定まる平衡温度も下がる。

③の場合は，Fig. 3.15に示すように， $X \sim 2$  mにおいて温度のピークが現われた。これは， $X = 2.09$  mにおいて $\theta$ が $0^\circ$ となり，冷却特性が最も悪くなることに起因するものである。

以上の3つの結果より，Fig. 3.8～12に現われている温度分布の成因は明らかである。即ち， $X \gtrsim 1.3$  mにおける温度の下降は磁界の減少によるものであり， $X \sim 2$  mにおける温度のピークは冷却特性の $\theta$ 依存性によるものである。

電流値10 kA, 10.5 kAの場合においては，計算した時間範囲内で $X \sim 2$  mの温度のピークを越えている。また，Fig. 3.7より8 T部分において，これらの電流値では常電導端は後退する。よって，10 kA, 10.5 kAの電流値では，コイルの1/2ターンに常電導状態が出現しても，コイルは超電導に復帰する，といえる。

電流値11 kAの場合には，計算した時間範囲内で温度のピークを越えていない。しかし，このピークを越えたとしても，8 T部の常電導伝播速度がほぼ0であることから，超電導復帰の可能性は少ない。

電流値 12 kA の場合には、100 msec 以後、常電導端は X ~ 2.43 m で停止している。これは、 $1/2$  ターンを越えて伝播して来た常電導領域が、磁界の強さの減少による発生熱量の減少と、X = 2.09 m を越えて向上して来た冷却特性により、この位置において平衡状態に達したものと解される。よって、超電導復帰は不可能である。

電流値 13 kA の場合には、常電導領域は徐々に拡大しており、明らかに超電導復帰は不可能である。

以上、今回の解析モデルにおいては、10.5 kA までの電流値ならば、 $1/2$  ターンの常電導転移に対して安定である、という結果が得られた。この安定に使用できる電流値は 11 kA 付近まで拡大できると思われるが、11 kA を越えると不安定となる。

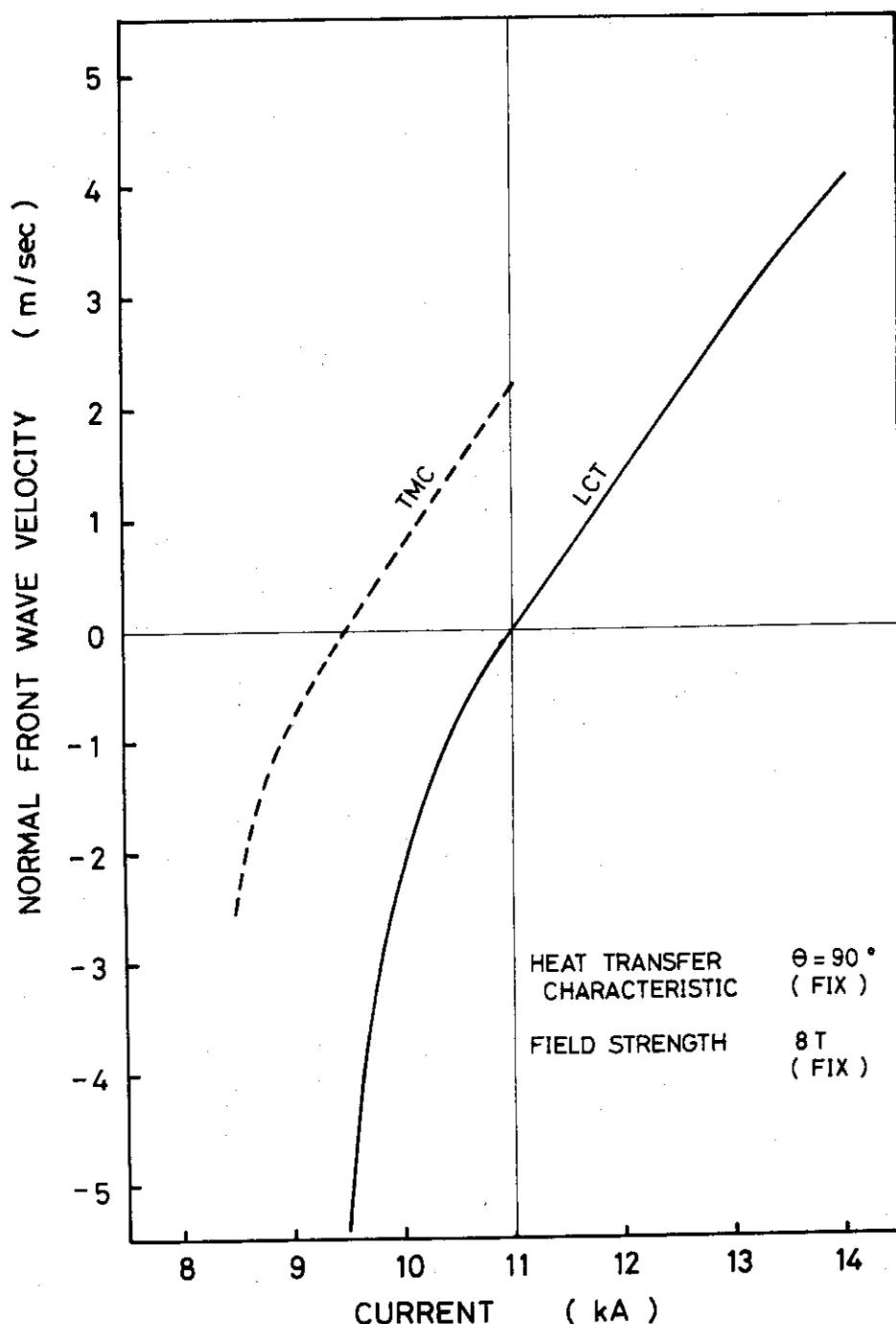


Fig. 3.7 NORMAL FRONT WAVE VELOCITY

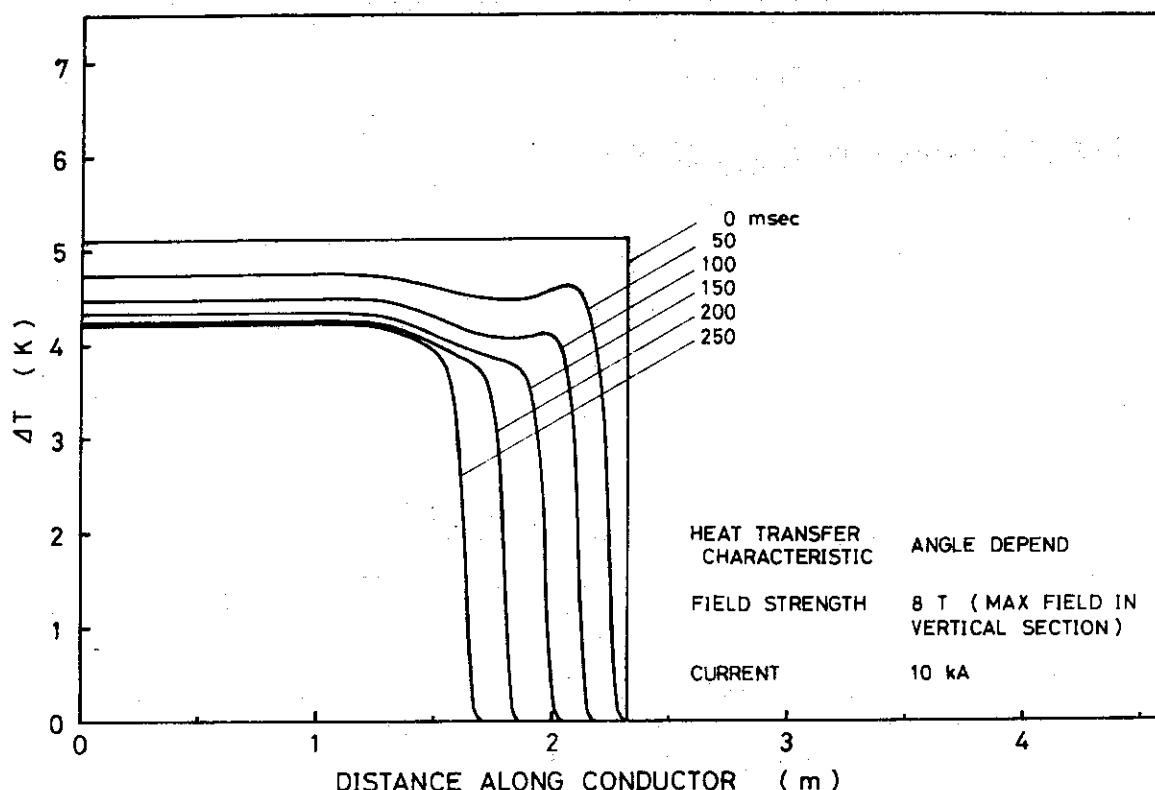


Fig. 3.8 TEMPERATURE PROFILES AFTER HALF TURN NORMAL  
 $( I_t = 10 \text{ kA} )$

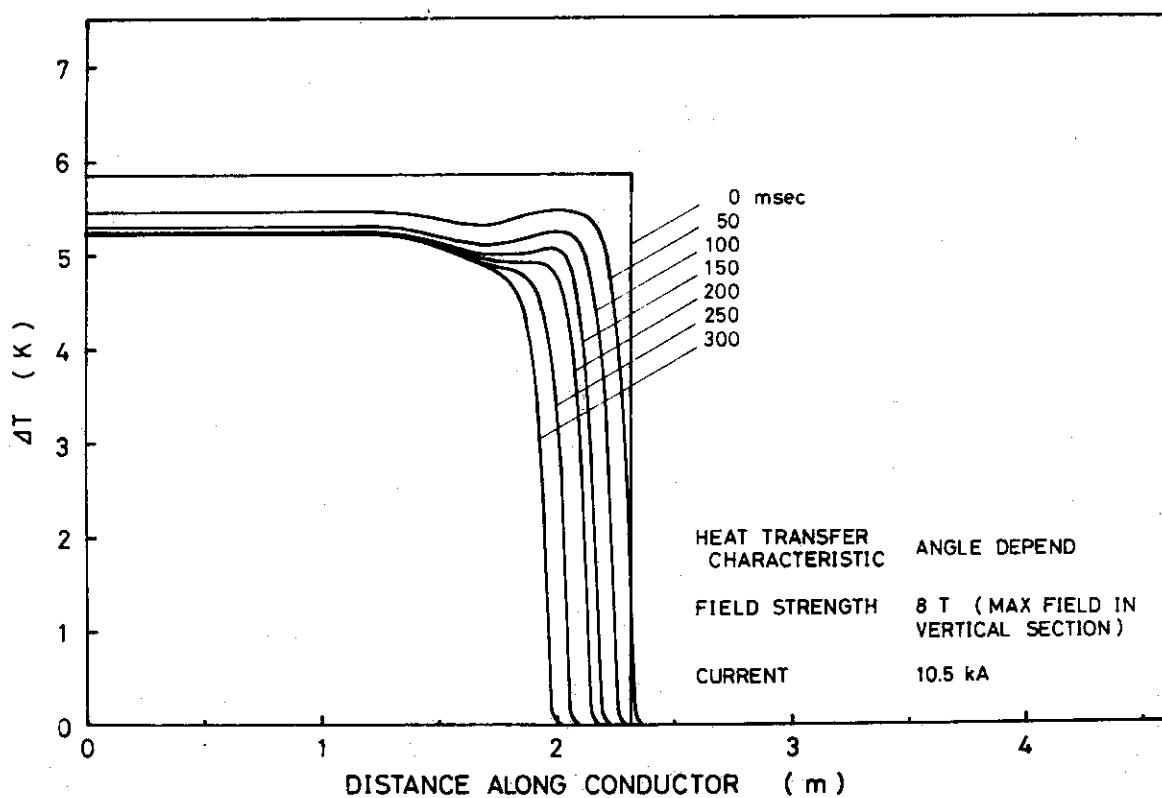


Fig. 3.9 TEMPERATURE PROFILES AFTER HALF TURN NORMAL  
 $( I_t = 10.5 \text{ kA} )$

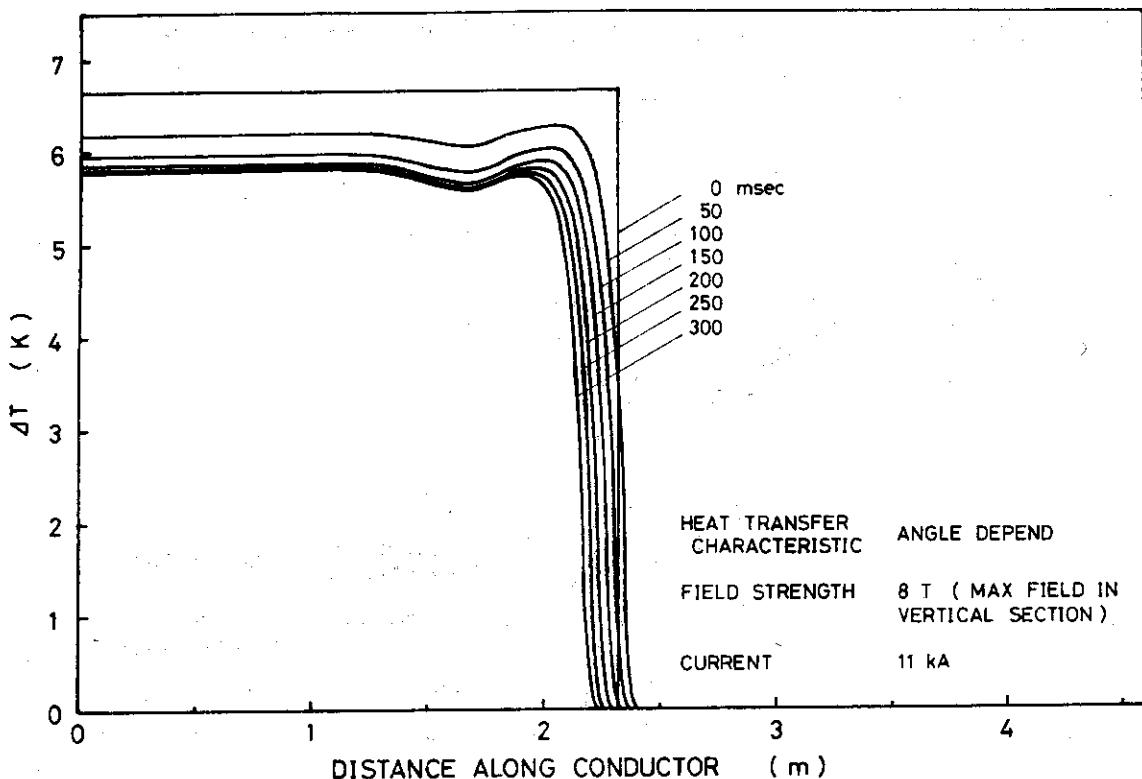


Fig. 3.10 TEMPERATURE PROFILES AFTER HALF TURN NORMAL  
( $I_t = 11$  kA)

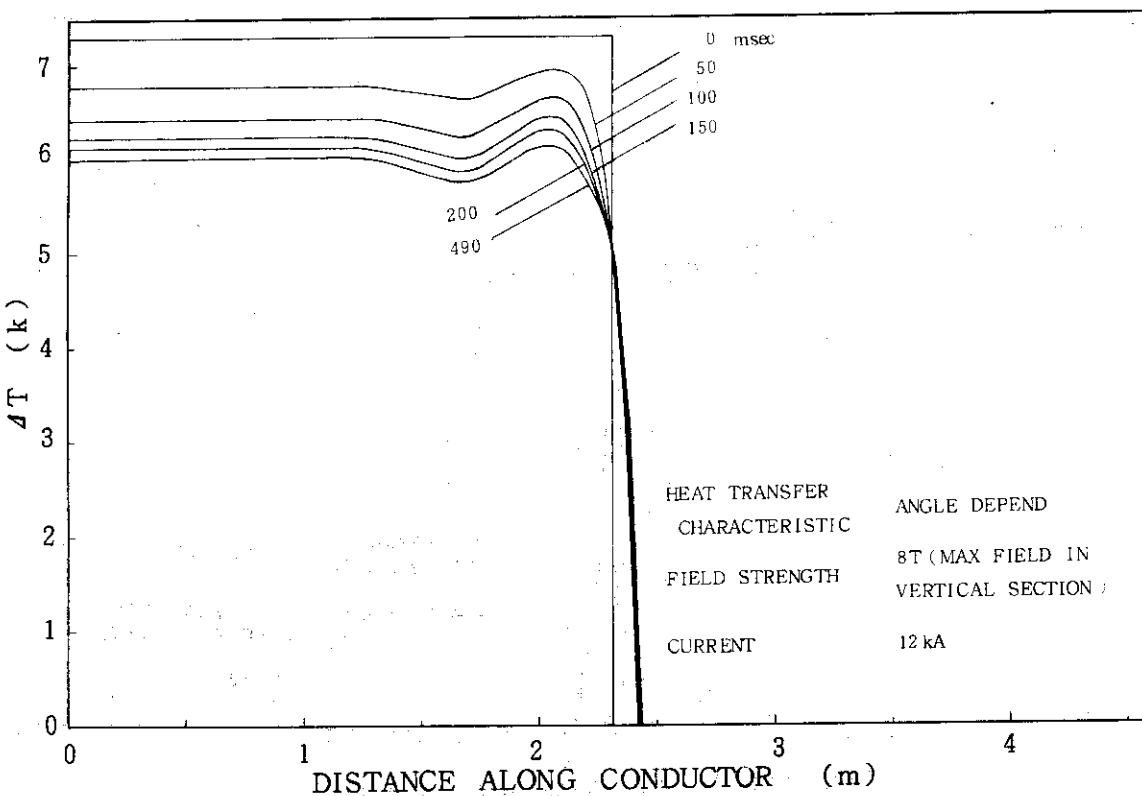
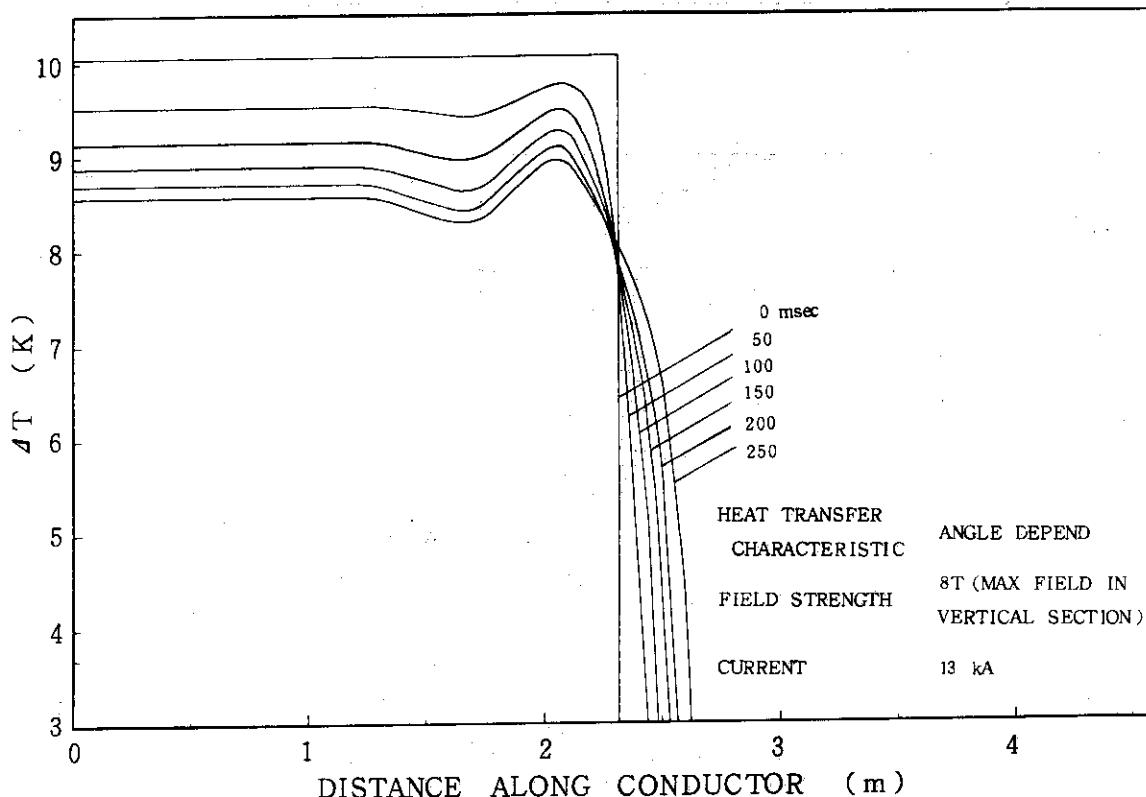
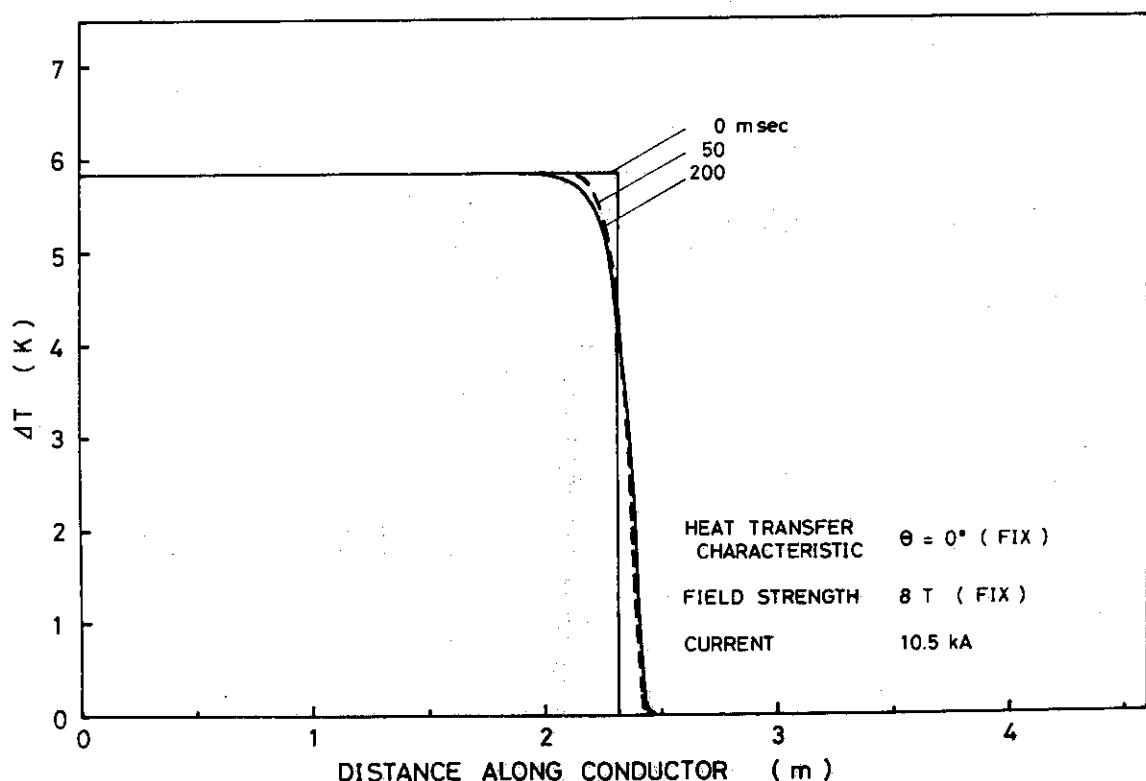


Fig. 3.11 TEMPERATURE PROFILES AFTER HALF TURN NORMAL ( $I_t = 12$  kA)

Fig. 3.12 TEMPERATURE PROFILES AFTER HALF TURN NORMAL ( $I_t=13$  kA)Fig. 3.13 TEMPERATURE PROFILES AFTER HALF TURN NORMAL  
(Angle  $\theta$  and field strength are fixed.)

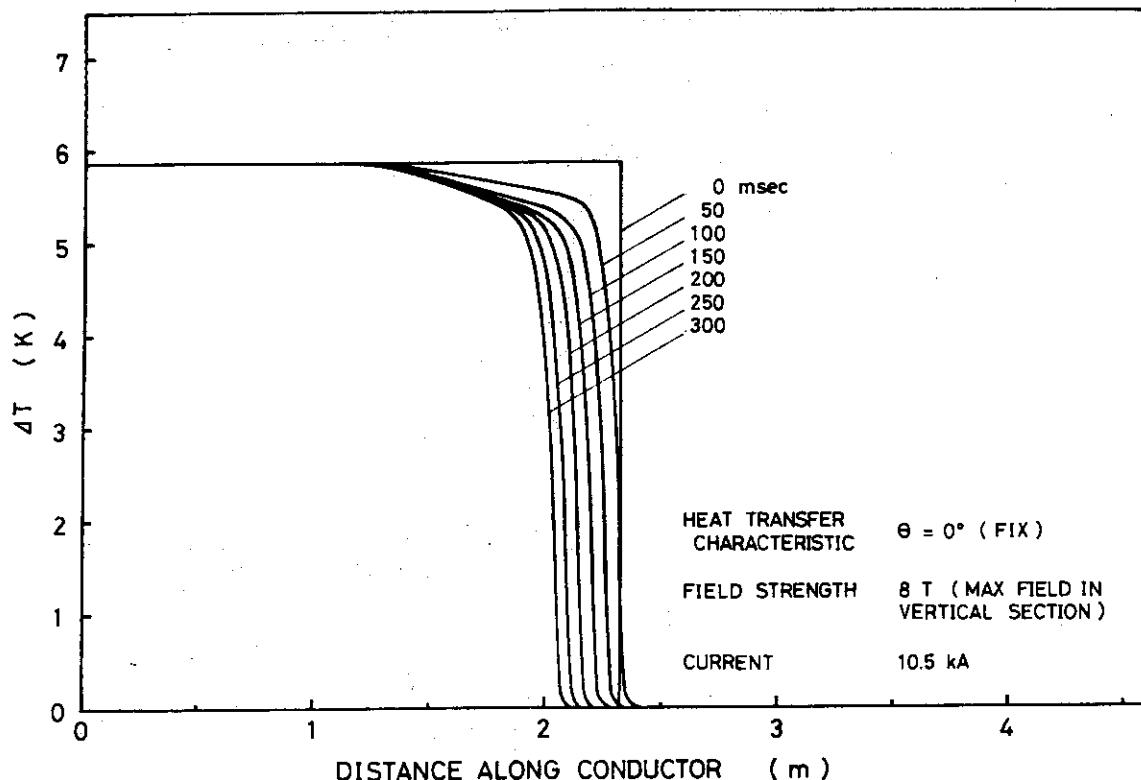


Fig. 3.14 TEMPERATURE PROFILES AFTER HALF TURN NORMAL  
(Angle  $\theta$  is fixed.)

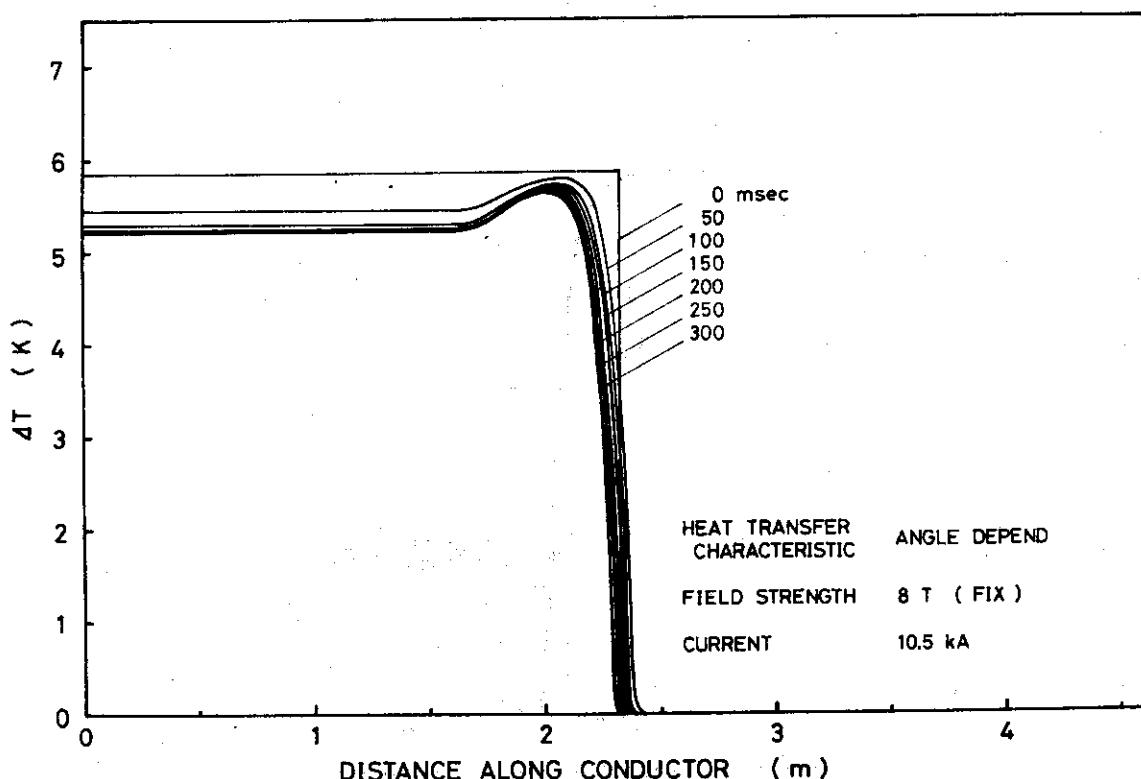


Fig. 3.15 TEMPERATURE PROFILES AFTER HALF TURN NORMAL  
(Field strength is fixed.)

## 4. 結 論

核融合炉用超電導トロイダルコイルに使用する大電流高電流密度導体の研究開発の1つとして行なった、冷却面に溝を設けた模擬導体のヘリウム沸騰熱伝達特性の測定、および、その結果を大型超電導トロイダルコイルに適用して行なった安定性解析より得られた結論を以下に述べる。

- (1) 導体冷却面に溝をつけて冷却周長を増加し、導体の冷却効率の増加を図るのは有効な方法である。このとき、溝深には最適値が存在する。すなわち、最大核沸騰熱流束は、溝深の増加とともに単調に減少するが、冷却周長の増加率をこれにかけた実効最大核沸騰熱流束は単調に増加する。つまり、核沸騰領域における冷却効率は、溝が深いほど良くなるが、一方、最小膜沸騰熱流束は、溝深 1.5 mm で極大を示す。実効最小膜沸騰熱流束をとった場合にも、溝深 1.5 mm において極大となり、このため、Fig. 2.1 に示した溝構造においては、今回の実験範囲内で、深さ 1.5 mm の溝をもった導体が最も良い冷却効率を与える。  
(Fig. 2.6, 2.7, 2.8, Table 2.1)
- (2) 今回測定した縦溝付導体では、溝の方向が水平軸となす傾斜角が 0° の近傍において、最大核沸騰熱流束の低下による、急激な、熱伝達特性の悪化がみられた。これは、安定に通電できるコイル電流の最大値を決定する因子の1つを与え、コイルの形状や運転状態によっては、最も厳しい条件の1ともなるので注意が必要である。  
なお、最小膜沸騰熱流束には、傾斜角依存性はほとんどみられなかった。(Fig. 2.6, 2.7)
- (3) 実際のコイル状態に近づけるため、安定性解析には、導体長手方向に、本実験で得られた冷却特性の角度依存性と磁界分布を考慮した。結果には、どちらの効果もはっきりと現れている。  
冷却特性の角度依存性のみを考慮した場合には、冷却特性の悪い、導体が水平となる部分に形成された温度の山のために、安定に通電できるコイル電流の最大値は低下している。一方、磁界分布のみを考慮した場合には、磁界の強さの減少とともに温度の下降がみられる。  
今回の導体およびコイル・モデルにおいて両方の分布を同時に考慮した解析では、冷却特性の悪い部分が、安定に通電できるコイル電流の最大値を決定するかどうか微妙という結果になった。冷却特性の悪化がより極端であったり、磁界の強さがあまり減少しない、あるいは、導体が水平近くにある部分がより広いようなコイルにおいては、しかし、この温度の山がコイル電流の最大値を決定するものとなろう。(Fig. 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15)
- (4) 今回解析のモデルとした Fig. 3.2 の導体モデルでは、Fig. 3.4 のコイル形状において、最高 8 T の磁界のもとで、10.5 kA までの通電電流ならばコイルの  $\frac{1}{2}$  ターンが常電導転移しても十分超電導復帰しうるという結論が得られた。応力や製造上、その他多くの問題

は残されているが, Fig. 3.2の導体モデルは, 核融合炉用超電導トロイダル・コイルに使用する導体の設計のための1つの土台となろう。

以上, 大電流高電流密度超電導導体の安定化についての第1段階での検討を行なったが, 今後, さらに高性能の安定化導体の開発のために, 最適な溝形状や溝寸法の追求, あるいは, 溝以外の他の冷却面構造, 特に, 熱伝達特性の異方性の少ない面構造の研究などが必要である。超電導導体に実際にこれを応用する場合には, 増大する冷却効率と, その加工のために銅が減少することに起因する発熱量の増加の兼合いも, 考えなければならない問題である。また, 解析においても, 今回は1次元によるものであったが, ターン間や層間の熱移動, 冷却チャンネルや大量の気泡の発生などを考慮した, 詳細な検討が必要である。

## 謝 辞

本研究は, 核融合用超電導磁石の開発を熱心に指導されている, 森茂核融合研究開発推進センター長のもとに行なわれたものである。森センター長の激励をここに深く感謝致します。また, 小幡行雄核融合研究部長には日頃, 御指導賜り感謝致します。本実験および計算には, 当研究室の辻博史, 多田栄介両研究員に御協力頂きました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) Stekly, Z. J. J., and Zar, J. L. ; IEEE Transactions NS - 12, 367 (1965)
- (2) ORNL - Technical Specification TS - 14700
- (3) 西, 安藤, 吉田, 島本; 第21回低温工学研究発表会予稿集, 75 (1978)
- (4) Maddock, B. J., James, G. B., and Norris, W. J.; Cryogenics, 9, 261 (1969)
- (5) 西, 安藤; 第21回低温工学研究発表会予稿集, 74 (1978)
- (6) 吉田, 安藤, 島本; JAERI-M 7543 (1978)
- (7) Johnson, V. J. ; Properties of Materials at Low Temperature (Phase I), Pergamon Press (1961)
- (8) Turner, L. R., and Abdou, M. A. ; Pro. of 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, 762 (1977)
- (9) Ando, T., Shimamoto, S., and Yasukochi, K. ; Applied Superconductivity Conference, Pittsburg (1978)

は残されているが, Fig. 3.2の導体モデルは, 核融合炉用超電導トロイダル・コイルに使用する導体の設計のための1つの土台となろう。

以上, 大電流高電流密度超電導導体の安定化についての第1段階での検討を行なったが, 今後, さらに高性能の安定化導体の開発のために, 最適な溝形状や溝寸法の追求, あるいは, 溝以外の他の冷却面構造, 特に, 熱伝達特性の異方性の少ない面構造の研究などが必要である。超電導導体に実際にこれを応用する場合には, 増大する冷却効率と, その加工のために銅が減少することに起因する発熱量の増加の兼合いも, 考えなければならない問題である。また, 解析においても, 今回は1次元によるものであったが, ターン間や層間の熱移動, 冷却チャンネルや大量の気泡の発生などを考慮した, 詳細な検討が必要である。

## 謝 辞

本研究は, 核融合用超電導磁石の開発を熱心に指導されている, 森茂核融合研究開発推進センター長のもとに行なわれたものである。森センター長の激励をここに深く感謝致します。また, 小幡行雄核融合研究部長には日頃, 御指導賜り感謝致します。本実験および計算には, 当研究室の辻博史, 多田栄介両研究員に御協力頂きました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) Stekly, Z. J. J., and Zar, J. L. ; IEEE Transactions NS - 12, 367 (1965)
- (2) ORNL - Technical Specification TS - 14700
- (3) 西, 安藤, 吉田, 島本; 第21回低温工学研究発表会予稿集, 75 (1978)
- (4) Maddock, B. J., James, G. B., and Norris, W. J.; Cryogenics, 9, 261 (1969)
- (5) 西, 安藤; 第21回低温工学研究発表会予稿集, 74 (1978)
- (6) 吉田, 安藤, 島本; JAERI-M 7543 (1978)
- (7) Johnson, V. J. ; Properties of Materials at Low Temperature (Phase I), Pergamon Press (1961)
- (8) Turner, L. R., and Abdou, M. A. ; Pro. of 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, 762 (1977)
- (9) Ando, T., Shimamoto, S., and Yasukochi, K. ; Applied Superconductivity Conference, Pittsburg (1978)

は残されているが, Fig. 3.2の導体モデルは, 核融合炉用超電導トロイダル・コイルに使用する導体の設計のための1つの土台となろう。

以上, 大電流高電流密度超電導導体の安定化についての第1段階での検討を行なったが, 今後, さらに高性能の安定化導体の開発のために, 最適な溝形状や溝寸法の追求, あるいは, 溝以外の他の冷却面構造, 特に, 熱伝達特性の異方性の少ない面構造の研究などが必要である。超電導導体に実際にこれを応用する場合には, 増大する冷却効率と, その加工のために銅が減少することに起因する発熱量の増加の兼合いも, 考えなければならない問題である。また, 解析においても, 今回は1次元によるものであったが, ターン間や層間の熱移動, 冷却チャンネルや大量の気泡の発生などを考慮した, 詳細な検討が必要である。

## 謝 辞

本研究は, 核融合用超電導磁石の開発を熱心に指導されている, 森茂核融合研究開発推進センター長のもとに行なわれたものである。森センター長の激励をここに深く感謝致します。また, 小幡行雄核融合研究部長には日頃, 御指導賜り感謝致します。本実験および計算には, 当研究室の辻博史, 多田栄介両研究員に御協力頂きました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) Stekly, Z. J. J., and Zar, J. L. ; IEEE Transactions NS - 12, 367 (1965)
- (2) ORNL - Technical Specification TS - 14700
- (3) 西, 安藤, 吉田, 島本; 第21回低温工学研究発表会予稿集, 75 (1978)
- (4) Maddock, B. J., James, G. B., and Norris, W. J.; Cryogenics, 9, 261 (1969)
- (5) 西, 安藤; 第21回低温工学研究発表会予稿集, 74 (1978)
- (6) 吉田, 安藤, 島本; JAERI-M 7543 (1978)
- (7) Johnson, V. J. ; Properties of Materials at Low Temperature (Phase I), Pergamon Press (1961)
- (8) Turner, L. R., and Abdou, M. A. ; Pro. of 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, 762 (1977)
- (9) Ando, T., Shimamoto, S., and Yasukochi, K. ; Applied Superconductivity Conference, Pittsburg (1978)