

JAERI-M  
7546

ORNL-Large Coil Taskにおける熱的問題  
の検討

1978年2月

細田 義門\*・島本 進

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.

ORNL-Large Coil Taskにおける熱的問題の検討

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

細田義門\*・島本 進

(1978年1月27日受理)

ORNLの Large Coil Task の Specificationのうち、熱的問題の検討を行った。熱的問題には、Stability, Nuclear Heating Simulation, 及び初期冷却と Warm-up の問題が含まれる。

Stability の問題に関しては、コイルの $\frac{1}{2}$ ターンが常電導転位した時、超電導状態に復帰する条件を求めた。Nuclear Heating Simulation はヒーターテストでは殆んど問題のないことが判った。初期冷却と Warm-up に関しては、その所要時間と熱応力を求めた。

JAERI-M 7546

Study of Thermal Problems in ORNL-Large Coil Task

Yoshikado HOSODA<sup>\*</sup> and Susumu SHIMAMOTO

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai Research Establishment,  
JAERI

(Received January 27, 1978)

Thermal problems in the ORNL-Large Coil Task specification have been studied, including stability, nuclear heating simulation, initial cooling and warm-up.

The conditions for half turn of the coil to recover the superconducting state after a normal transition were obtained in stability problem. Nuclear heating simulation test has little problem in the heater test. Operation time and thermal stress in the initial cooling and warm-up are calculated.

Keywords: Superconductor, Toroidal Coil, Stability, Large Coil Task, Nuclear heating simulation, Thermal stress, Initial cooling

---

\* On leave from Sumitomo Electric Industries, Ltd.

## 目 次

1. まえがき.....	1
2. LCT-Technical Spacification における熱的問題.....	1
2.1 Stabilityの問題.....	1
2.2 Nuclear Heating Simulation .....	2
2.3 初期冷却と Warm-up.....	2
3. Stability の検討 .....	4
3.1 検討対象及びそのモデル化.....	4
3.2 解析に用いる特性値.....	5
3.3 解析結果とその考察.....	15
4. Nuclear Heating Simulation の検討 .....	24
5. 初期冷却及び Warm-up の検討.....	25
6. むすび.....	36
謝 辞.....	36
参考文献.....	37

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Thermal problems in LCT-technical specification .....	1
2-1 Stability .....	1
2-2 Nuclear heating simulation .....	2
2-3 Initial cooling and warm-up .....	2
3. Study of the stability .....	4
3-1 Object of study and its model for analysis .....	4
3-2 Some characteristics for study .....	5
3-3 Results and its consideration .....	15
4. Study of nuclear heating simulation .....	24
5. Study of initial cooling and warm-up .....	25
6. Conclusion .....	36
Acknowledgement .....	36
Reference .....	37

## 1. ま え が き

大型トカマクの開発において、実験炉（EPR）段階から、超電導コイルが使用される。その為に現在大型超電導トロイダル・コイルの研究が各所で計画されており、その中でもORNLのLarge Coil Task（略称；LCT）は、最も大きな計画の1つであり、日本も、その中のコイルを1つ製作し、参加することが検討されている。

本報告書では、ORNL からU.S.A. 国内のメーカーに提示された、Specificationのうち、熱的問題を取上げ、検討を行った。

熱的問題には、Stabilityの問題、Nuclear Heating Simulationの問題、初期冷却及びWarm-upの問題が含まれる。

Stabilityの問題では $\frac{1}{2}$ ターンが常電導転位した時に、超電導復帰する条件、Nuclear Heating Simulationの問題では、Simulationによる発熱量、初期冷却及びWarm-upの問題では、その所要時間及び、熱応力を求めた。

## 2. LCT-Technical Specification における熱的問題<sup>(1)</sup>

ここに述べる Specification は、ORNL から、U.S.A. 国内メーカーに提示されたものであり、必ずしも、我々が束縛されるものではないが、現時点では、LCTに関して、最適な検討対象と考えられるものである。Specificationには、電磁気的問題、機械的問題、熱的問題、試験手順、cost-estimation、材料等について、詳しく述べられているが、ここでは、本報告書に関連のある、熱的問題について整理する。

Specification 中の熱的問題に関する記述は次の3つの問題にまとめられる。

- (i) Stability
- (ii) Nuclear Heating Simulation
- (iii) 初期冷却と warm-up

以下、各項目の詳細について述べる。

### 2.1 Stability の問題

Specification では、“少なくとも、コイルのどの $\frac{1}{2}$ ターンが、常電導転位しても、超電導状態に復帰すること”が要求されている。この性能は、設計時に満足されることも、もちろん、試験時において、実証されなければならない。試験は、コイルの最外周と最内周に位置する導体の $\frac{1}{2}$ ターン相当分を、ヒーター加熱により、強制的に、常電導転位させて行われる。ヒーターは、Fig. 2-1 に示す様に、コイルの最外周と最内周に4列、 $\frac{1}{2}$ ターン相当長で16個、配置される。

## 1. ま え が き

大型トカマクの開発において、実験炉（EPR）段階から、超電導コイルが使用される。その為に現在大型超電導トロイダル・コイルの研究が各所で計画されており、中でもORNLのLarge Coil Task（略称；LCT）は、最も大きな計画の1つであり、日本も、その中のコイルを1つ製作し、参加することが検討されている。

本報告書では、ORNL から U.S.A. 国内のメーカーに提示された、Specificationのうち、熱的問題を取上げ、検討を行った。

熱的問題には、Stabilityの問題、Nuclear Heating Simulationの問題、初期冷却及びWarm-upの問題が含まれる。

Stabilityの問題では $\frac{1}{2}$ ターンが常電導転位した時に、超電導復帰する条件、Nuclear Heating Simulationの問題では、Simulationによる発熱量、初期冷却及びWarm-upの問題では、その所要時間及び、熱応力を求めた。

## 2. LCT-Technical Specification における熱的問題<sup>(1)</sup>

ここに述べる Specification は、ORNL から、U.S.A. 国内メーカーに提示されたものであり、必ずしも、我々が束縛されるものではないが、現時点では、LCTに関して、最適な検討対象と考えられるものである。Specificationには、電磁気的問題、機械的問題、熱的問題、試験手順、cost-estimation、材料等について、詳しく述べられているが、ここでは、本報告書に関連のある、熱的問題について整理する。

Specification 中の熱的問題に関する記述は次の3つの問題にまとめられる。

- (i) Stability
- (ii) Nuclear Heating Simulation
- (iii) 初期冷却と warm-up

以下、各項目の詳細について述べる。

### 2.1 Stability の問題

Specification では、“少なくとも、コイルのどの $\frac{1}{2}$ ターンが、常電導転位しても、超電導状態に復帰すること”が要求されている。この性能は、設計時に満足されることも、もちろん、試験時において、実証されなければならない。試験は、コイルの最外周と最内周に位置する導体の $\frac{1}{2}$ ターン相当分を、ヒーター加熱により、強制的に、常電導転位させて行われる。ヒーターは、Fig. 2-1 に示す様に、コイルの最外周と最内周に4列、 $\frac{1}{2}$ ターン相当長で16個、配置される。



例えば Fig. 2-1 中, C 列には 1-2, 2-3, 4-5 及び 5-6 間に 4 つのヒーターが配置される。ヒーターの配置法は, 超電導々体表面に密着させる方法や, 導体内部に埋込む方法が考えられている。又, ヒーター容量に関しては, 当初 300 W といわれていたものが, 数 kW 必要とされるようになってきており, 現時点では, 指定はない。

常電導転位に対する Stability の評価値である“ $\frac{1}{2}$ ターン”は, 電磁力により, 一度に動く量と考えられており, mechanical instability による, 常電導転位の長さと考えられているが<sup>(2)</sup>, 十分に学問的根拠があって定められたものではない。しかしながら技術的には, mechanical instability に限らず何らかの Heat Input が  $\frac{1}{2}$  ターンにあった時の超電導電磁石の安定性という観点から, 充分意味があると同時に, かなり, 厳しい試験であると考えられる。

## 2.2 Nuclear Heating Simulation

実際の核融合炉においては, 炉心からの中性子や中性粒子入射装置 (NBI) からの中性子により, 超電導電磁石内部で発熱する。この発熱によって, 超電導電磁石が常電導転位等の不安定現象を生じないかどうかを, LCP では, シミュレーションによって, 試験する。

シミュレーションは, Fig. 2-1 に示した, ヒーターによって, 等価な発熱量を与えることによって行われる。

発熱は, 時間的には, Fig. 2-2 に示される, パルス磁場が, 印加されている期間だけ, 生じるとし, 空間的には, 式 (2.1) で分布すると近似する。

$$Q(r) = Q_0 e^{-0.01 m(r)} \dots\dots\dots (2.1)$$

但し:

$$Q_0 = 1 \times 10^{-4} \text{ w/g}$$

$m$  ; プラズマ中心からの半径に沿って, コイル中心から,  $r$  - 点迄に存在する質量  $\text{g/cm}^2$

$r$  ; プラズマ中心からの半径方向の距離

更に, 局所的には, Fig. 2-3 に示す, コイル内周部導体の赤道面を中心とした 0.6 m 長の部分に,  $5 \times 10^{-4} \text{ w/g}$  の発熱があるとする。これは NBI からの中性子がコイルに当ることによって, 生じる, 発熱をシミュレートしたものである。尚, このシミュレーションと Stability の試験は重畳しない。

## 2.3 初期冷却と warm-up

初期冷却と warm-up に要する時間は, 試験に要する時間を支配する。その他に冷凍設備や, 通電による warm-up の場合は, 電源等の設備容量に関連し, コイル側では, 熱応力が問題となる。Specification では, 初期冷却は 300 k-4 k 迄, He のみを用いて, 120 時間以内, warm-up は, 60 時間以内 (通電による warm-up を考えても良い) とされている。

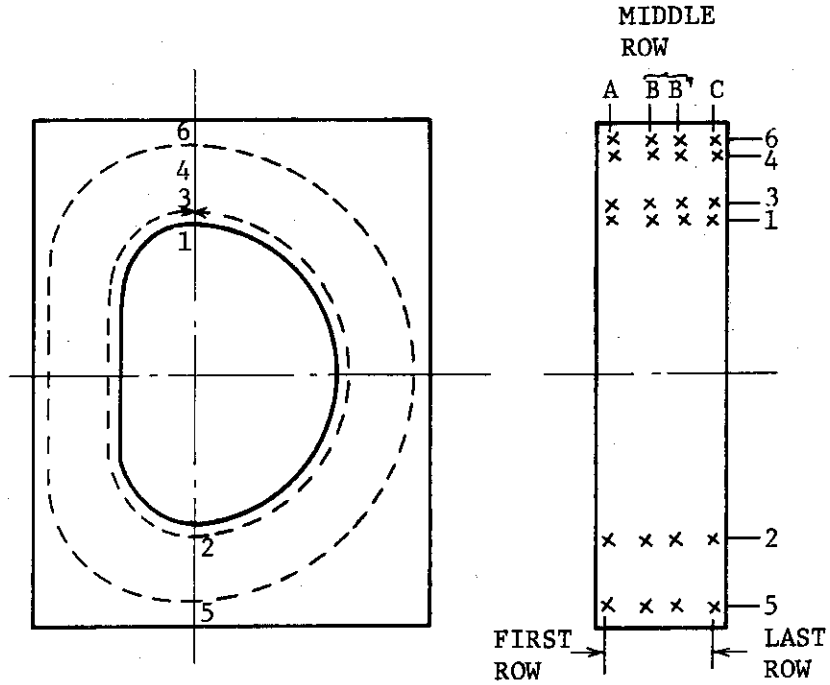


Fig. 2-1 Heater Map of LCT-Coil

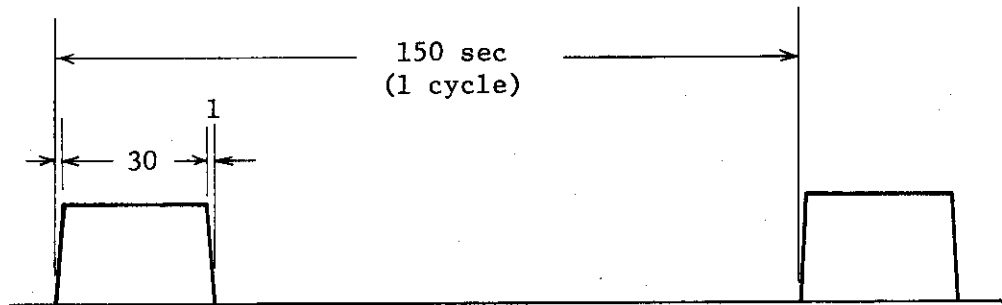
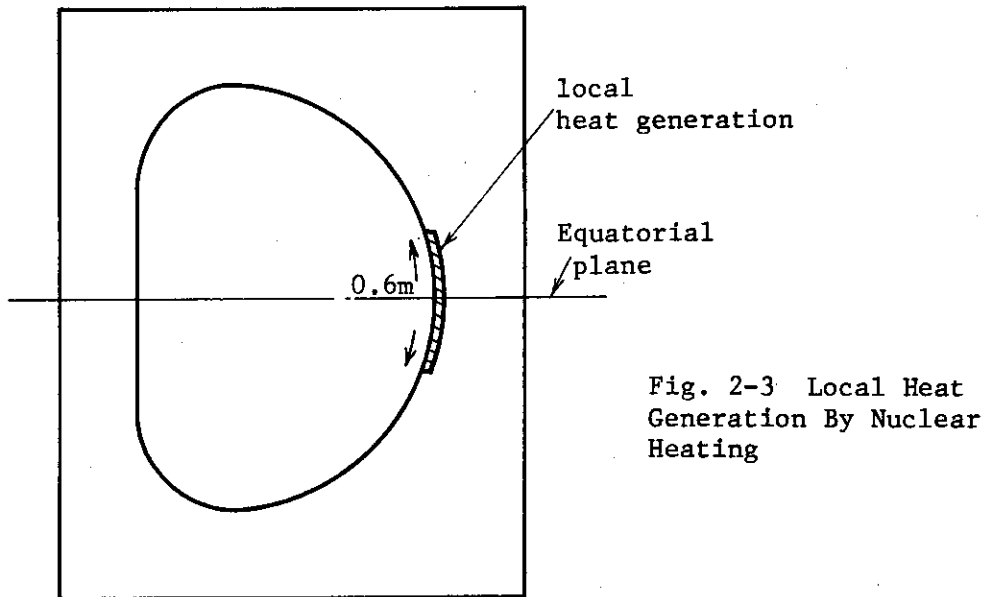


Fig. 2-2 Pulse Magnetic Field Cycle



### 3. Stability の検討

LCPのTest Facilityには、コイルの冷却方式として、プール沸騰冷却方式と、超臨界 He 又は2相流 He による強制冷却方式の、いずれに対しても、設備がなされている。本報告書では、これらの冷却方式を想定し、次の2つのモデルで検討を行った。1つは、液体 He と導体との間の熱伝達率が、液体 He と導体との間の温度差  $\Delta T$  に依らず一定としたもので、これは、液体 He に沸騰のない場合（超臨界 He による強制冷却）や導体表面に coating のある場合をモデル化したものである。他の1つは、液体 He の沸騰を考慮して、液体 He と導体との間の熱伝達率が、液体 He と導体との間の温度差  $\Delta T$  に依り変化する、としたもので、液体 He の流量が小さい場合は、沸騰冷却を、液体 He の流量が大きい場合は、2相流 He による強制冷却をモデル化したものである。

解析検討には、伝熱計算コード、TRUMP<sup>(3)</sup>を用いた。TRUMPの基礎方程式は(3.1)式であり、これを Step by Step 法と反復法により解く。

$$\rho C (\partial T / \partial t + \bar{v} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot k \nabla T + G \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

但し：

- $\rho$  ; 密度
- $C$  ; 比熱
- $k$  ; 熱伝導度
- $\bar{v}$  ; 流速
- $G$  ; 熱発生率

計算コードの特徴は、①3次元非定常、②比熱、熱伝導度、熱発生率が温度関数、③冷媒の潜熱、流速、温度上昇を含むという点にある。

#### 3.1 検討対象及びそのモデル化

検討の対象としたLCT-COILの外形寸法をFig. 3-1<sup>(4)</sup>に示す。D-形に巻かれた、導体はSUS材で補強される。SUS材は気密構造となり、クライオスタットをも形成している。更に外側には、トロイダル形状を構成する為の強度部材としてのBucking StructureやTongueが、設けられる。このコイルを計算コードTRUMPにINPUTする為、Fig. 3-2に示す様にNODE分割し、モデル化を行った。周方向には7等分し、断面内では、実際のコイルの場合、約700ターンある導体を3箇所集中し、液体 He の通路をその両側に配した導体と、液体 He 通路の総断面比は1:1とした。SUS-補強材は両側と、内側、外側の4つに分割し、BEARING SURFACE等、4角の枠材はSUSの占積率を1/4として、外側のNODE 10に含めた。Heの流れの方向は100→200→300→……→700とした。Nodeの識別No  $k$  は、Fig. 3-2に示される周方向の識別Noを $\ell$ 、断面内での識別Noを $m$ とした時、(3.2)式で与えられた。

$$k = \ell + m \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

### 3.2 解析に用いる特性値

#### (1) 材料特性値

超電導々体、液体 He 及び SUS の特性値を Table 3-1 ~ Table 3-3 に示す。超電導々体と SUS の比熱及び熱伝導度は表中の値に基づき、折線近似で与えられる。超電導々体は大部分 (90%以上) が銅であるので、銅の特性値とした。比熱は (3.3) 式から導出し、熱伝導度は文献<sup>(5),(6)</sup>によった。SUS の場合は比熱、熱伝導共、文献値<sup>(5),(6)</sup>を用いた。

$$C = 0.286 \left( \frac{T}{320} \right)^3 \int_0^{320/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

C ; 比熱 (cal/g-k)

T ; 温度 (k)

#### (2) 内部 thermal connection

液体 He と超電導々体との間の熱伝達率を一定として扱う場合は、熱伝達率を  $5 \times 10^{-3}$  cal/sec-cm<sup>2</sup>-k とした。熱流を変える場合は、接触面積を変えて計算した。計算コード TRUMP において、接触面積は独立したパラメータとして扱える。

液体 He と超電導々体との間の熱伝達率が、沸騰冷却特性に依る場合は、次に述べる方法でその熱伝達特性を与えた。

Fig. 3-3 に示す様に、超電導々体と、液体 He の間に境界 Node を設ける。この Node の熱容量が全体の特性に影響を与えない様、極めて薄いものにする。更にこの境界 Node の熱伝達率を、超電導々体の温度の関数として与える (ある Node の特性値を異った Node の温度の関数として与えることが出来るのも、計算コード TRUMP の特徴の 1 つである。)

このモデルにおいて、超電導々体と、液体 He との間の熱伝達率は、(3.3) 式で与えられる。

$$K_{sh} = \left( \frac{d_h}{\lambda_h} + \frac{d_B}{\lambda_B} + \frac{d_s}{\lambda_s} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

但し

$K_{sh}$  ; 超電導々体-液体 He 間の熱伝達率 (cal/s-cm<sup>2</sup>-k)

$\lambda_B$  ; 境界 Node の熱伝導度 (cal/s-cm-°k)

$\lambda_h$  ; 液体 He の熱伝導度 (cal/s-cm-k)

$\lambda_s$  ; 超電導々体の熱伝導度 (cal/s-cm-k)

$d_h$  ; 液体 He の Node 代表点から、境界迄の距離 (cm)

$d_B$  ; 境界 Node の厚さ (cm)

$d_s$  ; 超電導々体の Node 代表点から境界迄の距離 (cm)

この計算モデルでは  $d_h = 10^{-3}$  cm,  $d_s = 3.75$  cm であり、 $d_B = 10^{-6}$  cm として、表 3-4 に示す境界 Node の熱伝導度特性を与えた。その結果、Fig. 3-4 に示す、熱伝達特性が得られた。この特性は、液体 He の沸騰冷却の特性のパターンを表わすものである。熱流を変える場合、接触面積をパラメータとして変化させれば、Fig. 3-4 と同じパターンで、熱流の値が変化する。

#### (3) 外部 thermal connection

Fig. 3-2 で示されたモデルは、Specification に従い、次の条件で外部と熱伝達があるとした。

全体は 80 k の真空容器壁で囲まれ、コイルと真空容器壁との間には、輻射係数が 0.1 の輻射による熱伝達がある。コイルが取り付けられる、Test Facility の構造物は 5 k に保たれる。コイルとは Node 511, 611, 711 に対応する Tongue 部分及び、Node 112~412, 113~413 に対応する Torque Ring の Bearing Surface 部分で、接触する。

(4) 熱発生率

熱発生率は、(3.5) 式で与えられる。

$$W = \rho x j^2 / 4.2 \text{ cal/sec-cm}^3 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

但し、 $\rho$  ; 固有抵抗 ( $\Omega$ -cm)

$j$  ; 導体電流密度 ( $A/cm^2$ )

本計算例では、 $j = 5 \text{ kA/cm}^2$  であり、 $\rho$  は、(3.6) 式<sup>(7)</sup>より求めた。

$$\rho = 0.0025 \frac{T^5}{(320)^5} \int_0^{320/T} \frac{z^5 dz}{(e^z - 1)(1 - e^{-z})} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

但し、 $T$  ; 温度 (k)

(3.6) 式の適用範囲は、20 k 以上とし、6 k ~ 20°k の値の抵抗値は、残留抵抗比  $r = 302$  の値で一定となるとした。4.6 k から 6 k 迄電流は、超電導材料と、安定化材に分流していると考え、抵抗は 0 から直線的に上昇するとした。この様な考え方に基づいて、与えた、熱発生率を表 3-5 に示す。

(5) 入力データ-の例

上述の考え方によるモデルの TRUMP への入力データ-例を表 3-6 に示す。

BLOCK 1 はコントロール部、BLOCK 2 は材料特性、BLOCK 4 は Node 記述、BLOCK 5 は内部 thermal connection、BLOCK 6 は外部 thermal connection、BLOCK 7 は外部温度、BLOCK 8 は熱発生率、BLOCK 9 は初期温度、BLOCK 10 は質量流 connection、そして BLOCK 12 は、異なった Node 間の関数関係を与えるものである。

Table 3 - 1 Heat Conductivity and Specific Heat of Superconductor

密 度	8.9 g/cm <sup>3</sup>	
熱 伝 導 度	温 度 (K)	熱伝導度(cal/s-cm-K)
	2.0	0.24
	4.0	0.59
	8.0	1.20
	16.0	2.12
	28.0	2.98
	40.0	2.26
	60.0	1.48
	80.0	1.17
	100.0	1.0
	200.0	0.95
	300.0	0.95
比 熱	温 度 (K)	比 熱 (cal/g-K)
	0.0	0.0
	4.0	$1.45 \times 10^{-5}$
	8.0	$1.16 \times 10^{-4}$
	16.0	$9.29 \times 10^{-4}$
	26.0	$3.96 \times 10^{-3}$
	36.0	$1.0 \times 10^{-2}$
	46.0	$1.87 \times 10^{-2}$
	56.0	$2.78 \times 10^{-2}$
	76.0	$4.5 \times 10^{-2}$
	102.0	$6.1 \times 10^{-2}$
	202.0	$8.44 \times 10^{-2}$
	302.0	$9.02 \times 10^{-2}$

Table 3 - 2 Characteristics of Liq. He

密 度	0.125 g/cm <sup>3</sup>
比 熱	1.08 cal/g-c
熱 伝 導 度	$6 \times 10^{-5}$ cal/s-cm-c
沸 点	4.2 K
潜 熱	5 cal/g

Table 3 - 3 Heat Conductivity and Specific Heat of Stainless Steel

密 度	7.9 g/cm <sup>3</sup>	
熱 伝 導 度	温 度 (K)	熱伝導度 (cal/s-cm-K)
	4.0	$2.4 \times 10^{-4}$
	8.0	$1.38 \times 10^{-3}$
	10.0	$1.84 \times 10^{-3}$
	20.0	$4.76 \times 10^{-3}$
	40.0	0.011
	60.0	0.016
	80.0	0.019
	100.0	0.023
	200.0	0.078
	300.0	0.184
比 熱	温 度 (K)	比 熱 (cal/g-K)
	0.0	0.0
	4.0	$5.17 \times 10^{-4}$
	8.0	$9.5 \times 10^{-4}$
	10.0	$1.2 \times 10^{-3}$
	20.0	$2.5 \times 10^{-3}$
	40.0	$7.1 \times 10^{-3}$
	80.0	0.04
	120.0	0.071
	160.0	0.085
	200.0	0.1
300.0	0.475	

Table 3 - 4 Heat Transfer Characteristics  
at Boundary Node

超電導々体温度	境界 Node 熱電導度
4.2 (K)	10.0 (c/s-cm <sup>2</sup> -K)
4.3	10.0
5.2	10.0
6.2	$4.8 \times 10^{-3}$
10.2	$5.8 \times 10^{-6}$
80.2	$5.0 \times 10^{-6}$
300.2	$5.0 \times 10^{-6}$

Table 3 - 5 Heat Generation Rate in Function  
of Temperature

温度 (K)	熱発生率 (cal/s-cm <sup>3</sup> )
4.0	0.0
4.6	0.0
6.0	$3.4 \times 10^{-2}$
20.0	$3.4 \times 10^{-2}$
30.0	$4.0 \times 10^{-2}$
36.0	$9.1 \times 10^{-2}$
46.0	$2.5 \times 10^{-1}$
56.0	$5.0 \times 10^{-1}$
76.0	1.18
102.0	2.23
302.0	10.3



Table 3 - 6 Example of Input Data

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8

\* LCPAANTEISEI NO KEISAN  
BLOCK 1 CONTROLES

30	1	10000						
1	2			3,6E+04		0,1		
4,0								

BLOCK 2 MATERIAL SUPERCONDUCTOR

1	12	11	8,9					
0,0	0,0	1,49E-05	4,0	1,16E-04	8,0	9,29E-04	16,0	
3,96E-03	26,0	1,0E-02	36,0	1,87E-02	46,0	2,78E-02	36,0	
4,5E-02	76,0	6,1E-02	102,0	8,44E-02	202,0	9,02E-02	302,0	
0,24	2,0	0,59	4,0	1,2	8,0	2,12	16,0	
2,98	28,0	2,26	40,0	1,46	60,0	1,17	80,0	
1,0	100,0	0,95	200,0	0,95	300,0			

LIQUID HELIUM

2			0,125	1,08	6,0E-03	4,2	5,0	
---	--	--	-------	------	---------	-----	-----	--

SUS

3	11	10	7,9					
0,0	0,0	5,17E-04	4,0	9,5E-04	8,0	1,2E-03	10,0	
2,5E-03	20,0	7,1E-03	40,0	0,04	80,0	0,071	120,0	
0,085	160,0	0,1	200,0	0,113	300,0			
2,4E-04	4,0	1,38E-03	8,0	1,84E-03	10,0	4,76E-03	20,0	
0,011	40,0	0,016	60,0	0,019	80,0	0,023	100,0	
0,078	200,0	0,184	300,0					

KYOOKAI

4	7		8,9	1,08				
10,0	4,0	10,0	4,1	10,0	5,0	0,48E-04	6,0	
5,8E-06	10,0	2,0E-06	80,0	5,0E-06	300,0			

BLOCK 4 NODE

101	6	100	1	7,5	162,0	60,0		
102	6	100	1	7,5	162,0	60,0		
103	6	100	1	7,5	162,0	60,0		
104	6	100	2	7,5	162,0	60,0		
109	6	100	2	7,5	162,0	60,0		
105	6	100	2	3,75	162,0	60,0		
106	6	100	2	3,75	162,0	60,0		
107	6	100	2	3,75	162,0	60,0		
108	6	100	2	3,75	162,0	60,0		
54	6	100	2	7,5	1,0E-03	60,0		
59	6	100	2	7,5	1,0E-03	60,0		
55	6	100	2	3,75	1,0E-03	60,0		
56	6	100	2	3,75	1,0E-03	60,0		
57	6	100	2	3,75	1,0E-03	60,0		
58	6	100	2	3,75	1,0E-03	60,0		
111	6	100	3	7,5	162,0	44,8		
113	6	100	3	7,5	162,0	44,8		
110	6	100	3	7,5	162,0	85,0		
612			3	7,5	162,0	85,0		
512	1	200	3	1,0	154707,0	1,0		
112	3	100	3	1,0	190995,0	1,0		
114	6	100	3	162,0	1,0E-03	85,0		
116	6	100	3	162,0	1,0E-03	85,0		
115	6	100	3	162,0	1,0E-03	44,8		
117	6	100	3	162,0	1,0E-03	44,8		
121	6	100	4	60,0	162,0	1,0E-03		
122	6	100	4	60,0	162,0	1,0E-03		
123	6	100	4	60,0	162,0	1,0E-03		
124	6	100	4	60,0	162,0	1,0E-03		
125	6	100	4	60,0	162,0	1,0E-03		
126	6	100	4	60,0	162,0	1,0E-03		

BLOCK 5 INTERNAL

101	201	5100100	81,0	81,0	60,0	7,5		
102	202	5100100	81,0	81,0	60,0	7,5		
103	203	5100100	81,0	81,0	60,0	7,5		
101	701		81,0	81,0	60,0	7,5		
102	702		81,0	81,0	60,0	7,5		
103	703		81,0	81,0	60,0	7,5		
104	204	5100100	81,0	81,0	60,0	7,5		
109	209	5100100	81,0	81,0	60,0	7,5		
105	205	5100100	81,0	81,0	60,0	3,75		
106	206	5100100	81,0	81,0	60,0	3,75		
107	207	5100100	81,0	81,0	60,0	3,75		
108	208	5100100	81,0	81,0	60,0	3,75		
111	211	5100100	81,0	81,0	44,8	7,5		
113	213	5100100	81,0	81,0	44,8	7,5		
110	210	5100100	81,0	81,0	85,0	7,5		
112	212	5100100	81,0	81,0	85,0	7,5		
111	711		81,0	81,0	85,0	7,5		
113	713		81,0	81,0	85,0	7,5		
112	712		81,0	81,0	85,0	7,5		
110	710		81,0	81,0	85,0	7,5		
110	113	6100100	3,75	22,8	7,5	162,0		
110	111	6100100	3,75	22,8	7,5	162,0		
112	111	6100100	3,75	22,8	7,5	162,0		
112	113	6100100	3,75	22,8	7,5	162,0		
104	111	6100100	1,0E-03	3,75	7,5	162,0	5,0E-03	
104	113	6100100	1,0E-03	3,75	7,5	162,0	5,0E-03	
104	110	6100100	1,0E-03	3,75	60,0	60,0	5,0E-03	
105	111	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
105	113	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
106	111	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
106	113	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
107	111	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
107	113	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
108	111	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
108	113	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
109	111	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
109	112	6100100	1,0E-03	3,75	60,0	60,0	5,0E-03	
109	113	6100100	1,0E-03	3,75	3,75	162,0	5,0E-03	
107	108	6100100	3,75	3,75	60,0	162,0		
105	106	6100100	3,75	3,75	60,0	162,0		
114	110	6100100	1,0E-03	7,5	85,0	162,0		
116	112	6100100	1,0E-03	7,5	85,0	162,0		
115	111	6100100	1,0E-03	7,5	44,8	162,0		
117	113	6100100	1,0E-03	7,5	44,8	162,0		
101	121	6100100	3,75	5,0E-04	132,0	162,0		
101	122	6100100	3,75	5,0E-04	132,0	162,0		

Table 3 - 6 つづき

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8

102 123 6100100      3,75  5,0E-04      132,0      162,0
102 124 6100100      3,75  5,0E-04      132,0      162,0
103 125 6100100      3,75  5,0E-04      132,0      162,0
103 126 6100100      3,75  5,0E-04      132,0      162,0
121 104 6100100      5,0E-04  1,0E-06      132,0      162,0
122 105 6100100      5,0E-04  1,0E-06      132,0      162,0
123 106 6100100      5,0E-04  1,0E-06      132,0      162,0
124 107 6100100      5,0E-04  1,0E-06      132,0      162,0
125 108 6100100      5,0E-04  1,0E-06      132,0      162,0
126 109 6100100      5,0E-04  1,0E-06      132,0      162,0

BLOCK 6 EXTERNAL
114 1000 6 100 0      75,0      162,0      0,0      0,1
115 1000 6 100 0      44,8      162,0      0,0      0,1
117 1000 6 100 0      44,8      162,0      0,0      0,1
516 1002 1 200 0      150,0      85,0
616 1002      160,0      85,0
116 1001 3 100 0      1,0      10000,0
55 1003 3 1 0      60,0      3,75      1,0E+12      0,0
54 1003 1 5 0      60,0      7,5      1,0E+12      0,0
116 1000 3 100 0      1,0      2500,0      0,0      0,1

BLOCK 7 EXTERNAL TEMP
1000      80,0
1001      5,0
1002      5,0
1003      4,0

BLOCK 8 HEAT1 GENE
101 6 100 11 0,0      4,0      0,0      4,2      3,4E-02      6,0
3,4E-02 20,0 4,0E-02 30,0 9,1E-02 36,0 2,5E-01 46,0
0,5 56,0 1,18 76,0 2,23 102,0 10,3 302,0
102 6 100 11 0,0      4,0      0,0      4,2      3,4E-02      6,0
3,4E-02 20,0 4,0E-02 30,0 9,1E-02 36,0 2,5E-01 46,0
0,5 56,0 1,18 76,0 2,23 102,0 10,3 302,0
103 6 100 11 0,0      4,0      0,0      4,2      3,4E-02      6,0
3,4E-02 20,0 4,0E-02 30,0 9,1E-02 36,0 2,5E-01 46,0
0,5 56,0 1,18 76,0 2,23 102,0 10,3 302,0

BLOCK 9 INITIAL
103 3 100      36,4

BLOCK10 MASSFLOW
54 104 6 100 100      7,2E+04 1,0E-03      81,0
104 154 5 100 100      7,2E+04      81,0 1,0E-03
59 109 6 100 100      7,2E+04 1,0E-03      81,0
109 159 5 100 100      7,2E+04      81,0 1,0E-03
55 105 6 100 100      1,0E-03      81,0
105 155 5 100 100      81,0 1,0E-03
106 156 5 100 100      81,0 1,0E-03
107 157 5 100 100      81,0 1,0E-03
108 158 5 100 100      81,0 1,0E-03
56 106 6 100 100      1,0E-03      81,0
57 107 6 100 100      1,0E-03      81,0
58 108 6 100 100      1,0E-03      81,0

BLOCK12 REMOTE
121 101 2 6 100 100 0
122 101 2 6 100 100 0
123 102 2 6 100 100 0
124 102 2 6 100 100 0
125 103 2 6 100 100 0
126 103 2 6 100 100 0

ENDED-1
*SPLIT

```

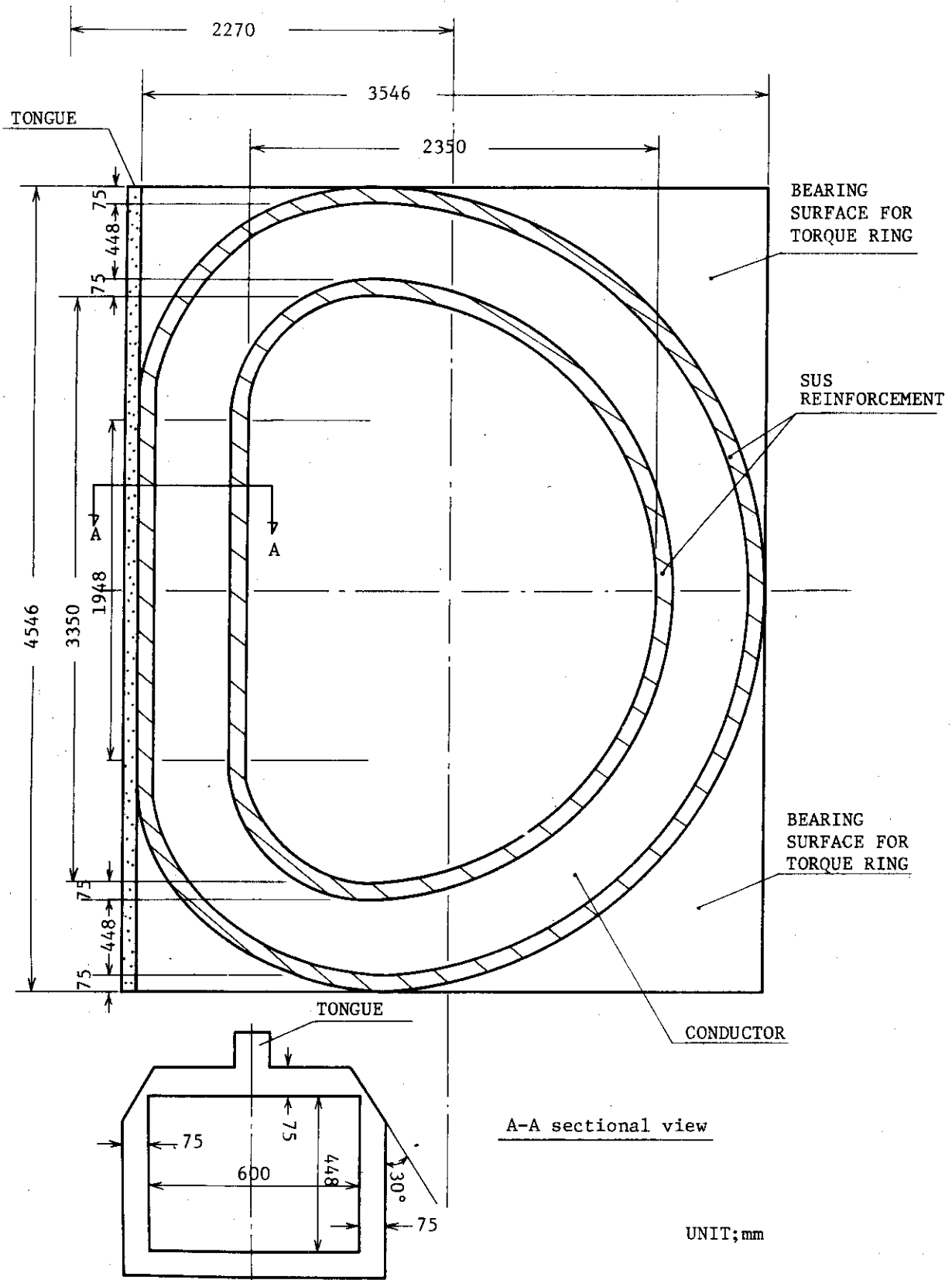
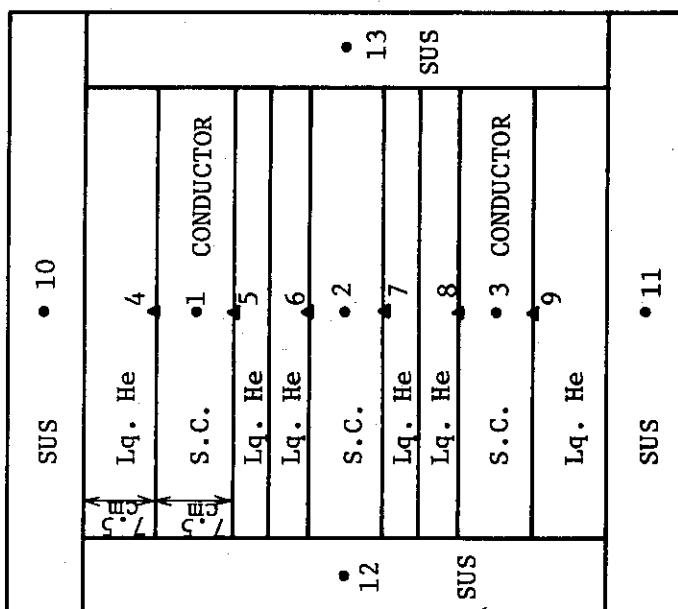
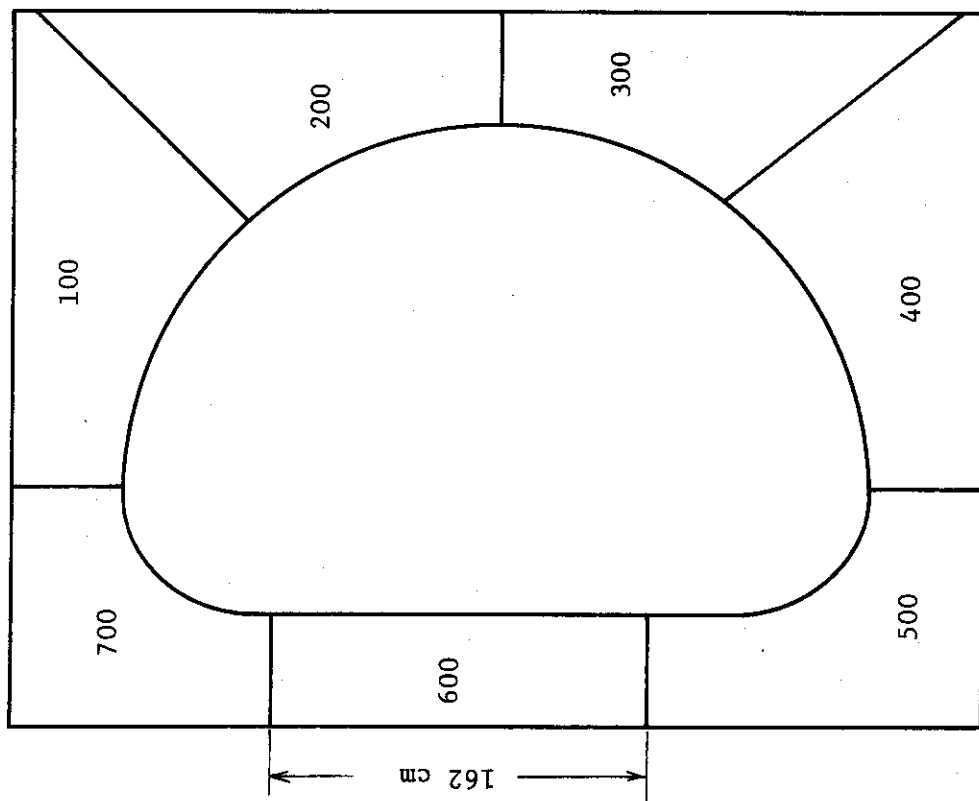


Fig. 3-1 LCT-COIL



Circumferential Division

Cross Sectional Division

Fig. 3-2 Node Division for TRUMP

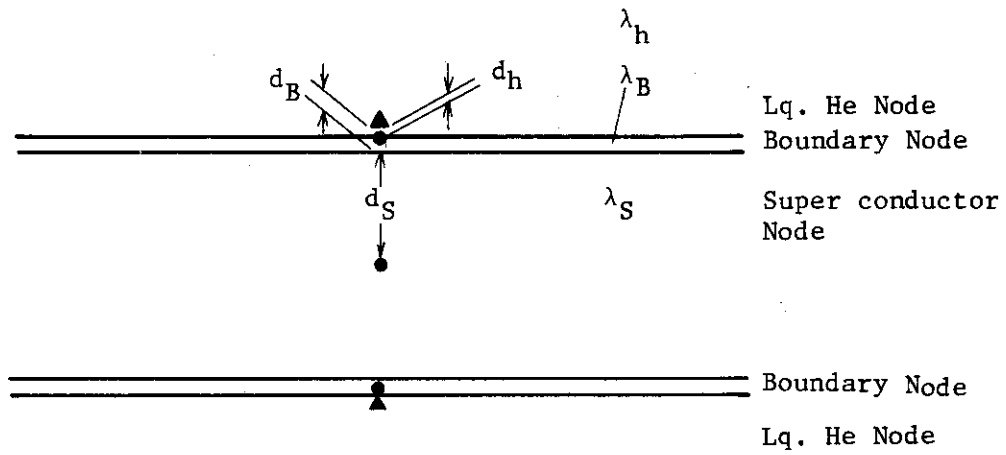


Fig. 3-3 Special Boundary Node  
For Boiling Heat Transfer

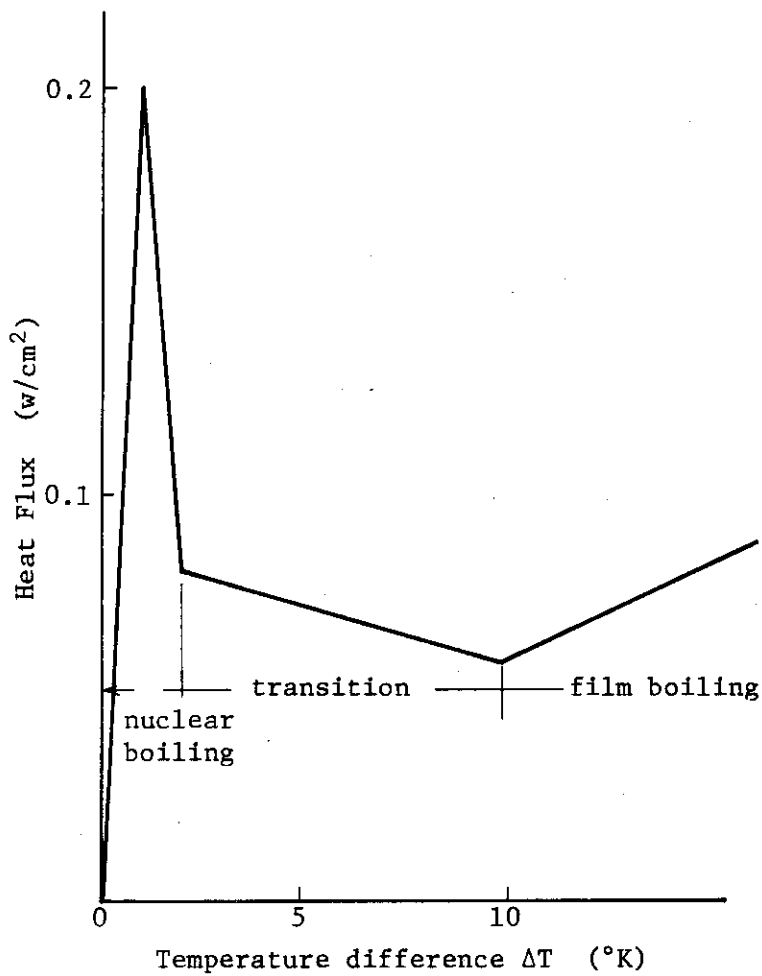


Fig. 3-4 Heat Transfer Characteristics  
for Boiling Helium

### 3.3 解析結果とその考察

常電導転位した時の初期温度や、位置或いは、液体 He の流速、液体 He と超電導々体との間の接触面積をパラメータとして、常電導転位部の消滅条件や温度上昇を求めた。

解析結果は、超電導々体単位長当りの発熱量と、冷却熱量の大小関係で整理した。単位長当りの発熱量は、

$$Q_g = \rho(T) j^2 S / 4.2 \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

但し、 $Q_g$  ; 導体単位長当りの発熱量 (cal/sec)

$\rho(T)$  ; 固有抵抗 ( $\Omega$ -cm)

$j$  ; 電流密度 ( $A/cm^2$ )

$S$  ; 導体断面積 ( $cm^2$ )

冷却熱量は、

$$Q_c = K_{sh} \cdot P \cdot \Delta T \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

但し、 $Q_c$  ; 導体単位長当りの冷却熱量 (cal/sec)

$K_{sh}$  ; 導体と液体 He 間の熱伝達率 (cal/s-cm<sup>2</sup>-K)

$P$  ; 導体と液体 He との間の接触面積 ( $cm^2$ )

$\Delta T$  ; 導体と液体 He との間の温度差 ( $^{\circ}K$ )

で与えられる。

計算コード TRUMP においては、導体と液体 He との間の熱伝達率  $K_{sh}$  は、

$$K_{sh} = \left( \frac{d_h}{\lambda_h} + \frac{1}{k_{sh}} + \frac{d_s}{\lambda_s} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

但し、 $\lambda_h$  ; 液体 He の熱伝導度 (cal/s-cm-K)

$\lambda_s$  ; 超電導々体の熱伝導度 (cal/s-cm-K)

$k_{sh}$  ; 液体 He と超電導々体の境界の熱伝達率 (cal/s-cm<sup>2</sup>-K)

$d_h$  ; 液体 He の Node 代表点から境界迄の距離 (cm)

$d_s$  ; 超電導々体の Node 代表点から、境界迄の距離 (cm)

で与えられる。(沸騰熱伝達特性の場合は、(3.4) 式参照)

これら熱量はグラフ上では、 $6^{\circ}K - 20^{\circ}K$  の間の発熱量 (一定値) で規格化されている。

#### (1) Linear heat flux 特性

本章の冒頭で述べた様に、計算モデルの1つとして、超電導々体と、液体 He との間の熱伝達率が、両者間の温度差  $\Delta T$  に依らず一定であるモデルを取上げる。このモデルでは、冷却熱量は、超電導々体と液体 He との間の温度差に比例する。

又、このモデルは、検討が容易であるとともに、現実には、超臨界 He による冷却や、導体表面に coating のある場合の冷却特性に対応させることが出来る<sup>(8)</sup>。

解析の結果を Fig. 3 - 5 (a) ~ (g) に示す。Fig. 3 - 5 (a) は、液体 He の流量が  $0.16 g/sec - cm^2$  で、He 下流側の  $\frac{1}{2}$  ターンに相当する、503 ~ 703 の Node が常電導転位した場合の結果を示すものである。a は、発熱量を示す線であり、 $b_1 \sim b_5$  は冷却熱量を示す線である。常電導転位した時の初期温度を  $6 K$  ( $\Delta T = 1.8 K$ ) で与えると、冷却特性が  $b_1$  で示される場合は、 $\bigcirc 1$

→●1の位置に時間経過と共に温度が下降し、超電導に復帰する。他方冷却特性が、 $b_2 \sim b_5$ の場合は、温度は上昇し、超電導には復帰しない。ここで、例えば図中 $b_4$ ラインのP点は発熱量と冷却熱量が見かけ上一致する点であり、その点でバランスしても良いと考えられるが、Heの流量が、 $0.16 \text{ g/sec-cm}^2$ と小さい場合は、He側にも温度上昇が生じ、真の $\Delta T$ とグラフ上の $\Delta T$ に差が生じ（グラフ上の $\Delta T$ はHe温度が4.2K）て、冷却熱量が小さくなる為である。これを模式的に示したものがFig. 3-6であり、Heの温度上昇と共に、冷却特性が $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ と変化し、冷却熱量は発熱量を越えることなく、温度上昇が継続することが判る。

Fig. 3-5 (b)は、He流量を $1.6 \text{ g/sec-cm}^2$ とした場合であり、この場合はHe流量が大きいため、He温度は4.2Kに保持され、●2、●3に示す点で、温度上昇は定常に達する。

Fig. 3-5 (c)は、He流量が $16 \text{ g/sec}$ の場合であり、この場合も超電導状態には復帰しないが一定の温度でバランスする状態（●2、●3）が存在する。

Fig. 3-5 (d)は、He上流側の $\frac{1}{2}$ ターンに相当するNode 103~403が常電導転位した場合であり、下流側への影響を調べた場合の結果である。下流側のNodeの温度は、4.2°K近傍に留まり、上流側からの影響は微かであった。 $b_5$ に示す様な冷却特性の悪い場合でも常電導転位した時の初期温度がバランス点に近ければ、○5→●5に示す様に、比較的導体温度の高いところでもバランスする。

Fig. 3-5 (e)は常電導転位した場合の初期温度が8°Kの場合、Fig. 3-5 (f)はそれが5°Kの場合である。

Fig. 3-5 (g)は、Node 103と403が5Kで常電導転位し、Node 203と303が6°Kで常電導転位した場合である。この場合、 $b_2$ の特性の場合は、Node 103と403は超電導に復帰する（ $\Delta 2 \rightarrow \bullet 2'$ ）が、Node 203と303は、バランス点迄温度上昇し、（○2→●2）周方向のNodeは互に影響していない。 $b_3$ 特性の場合は、103~403の4つのNodeは全てバランス点迄温度上昇する（○3、 $\Delta 3 \rightarrow \bullet 3$ ）。この場合Fig. 3-5 (f)に示した、4つのNode全てが5°Kになった場合超電導に復帰することと比較すると、Node 103, 403（5°KのNode）は明らかにNode 203, 303（6°KのNode）からの影響を受けている。

以上の結果を整理すると

- (i) 冷却熱量が発熱量を全温度範囲で上廻っている場合（Fig. 3-5 (a)の $b_1$ 特性）はもちろん、少くとも常電導転位した初期温度以下の領域で上廻っている場合（Fig. 3-5 (f)の $b_2$ ,  $b_3$ 特性）は、超電導状態に復帰する。
- (ii) Heの流量が充分で、Heに温度上昇が見られない場合は、初期温度に拘らず、冷却熱量と発熱量がバランスする温度の近傍で定常状態に達する。
- (iii) 周方向に隣接するNodeが高温の場合は、同じ温度の場合に比べ特性が悪くなる。（Fig. 3-5 (f)の $b_3$ 特性で超電導復帰したものがFig. 3-5 (g)の $b_3$ 特性では、バランス点迄温度が上昇する。）

## (2) boiling heat flux 特性

超電導々体表面で液体Heの沸騰がある場合は、熱伝達特性は一般には、Fig. 3-4に示す様に、核沸騰領域、遷移領域、膜沸騰領域からなる特性となる。プール含浸による沸騰冷却や、二相流Heによる強制冷却の場合は、この特性を考える必要がある。

解析の結果を Fig. 3-7 (a)~(d) に示す。Fig. 3-7 (a) は、He の flow-rate が  $0.16 \text{ g/sec-cm}^2$  で、冷却特性の min. point を、発熱量に一致させたものである。この場合、常電導転位した初期温度が  $9.2 \text{ K}$  (○1→●1) 以下では、超電導状態に復帰するが、それ以上の温度では、温度が上昇する。この場合、初期において、冷却熱量が発熱量より大きくても、温度上昇が止まらない事 (○2~○5) は注意すべきである。これは、Fig. 3-6 で述べた様に He の温度が上昇することによる。次に Fig. 3-7 (b) は He の flow rate が、 $1.6 \text{ g/sec-cm}^2$  の場合であり、この場合は、常電導転位した初期温度が、 $10.2 \text{ K} \sim 14.2 \text{ K}$  の範囲のものは、He の温度上昇がないにも拘らず、超電導状態には復帰しない。但し、温度上昇は高温側のバランス点 ( $14.2^\circ\text{K}$ ) で定常に達する。(○2~○5→●2~●5)。バランス点のうち、最も高温 ( $36.4^\circ\text{K}$ ) 近傍で、常電導転位したものは、温度上昇を続ける (○7)。Fig. 3-7 (c) と (d) は、それぞれ He の流量が、 $16 \text{ g/sec-cm}^2$  及び  $160 \text{ g/sec-cm}^2$  の場合であり、いずれも常電導、転位した初期温度が  $10.2 \text{ K} \sim 14.2 \text{ K}$  迄のものは  $14.2 \text{ K}$  で定常に達し、超電導状態には復帰しない。又、 $36.4 \text{ K}$  近傍で、常電導転位したものは、その近傍で、定常状態に達する。

以上述べた、linear heat flux 特性と boiling heat flux 特性の解析結果から、“少くとも  $\frac{1}{2}$  ターンが常電導転位しても、超電導状態に復帰すること”という LCP の Specification を満足する為には、「超電導々体単位長当りの発熱量が、冷却熱量より小さく、かつ液体 He の供給が充分 ( $1.6 \text{ g/s-cm}^2$  の流量) であって、常電導転位した時の初期温度が、 $9.5^\circ\text{K}$  を越えない」という条件で、設計すれば良いことが判った。バランス点で、平衡に達する条件のものについては、例えば通電々流値を  $\sim 10\%$  程度、低減する、partial dump を行なうことにより、超電導状態に復帰する可能性をもっている。この結論は机上検討では容易であるが、寸法、電流、冷却能力等が指定されている、現実の LCT-コイルでは、相当困難であり、又、解析に用いた、特性値の代わりに、実際の特性値を、用いることを考えると、今後、数多くの実験と検討を行わねばならないと考える。



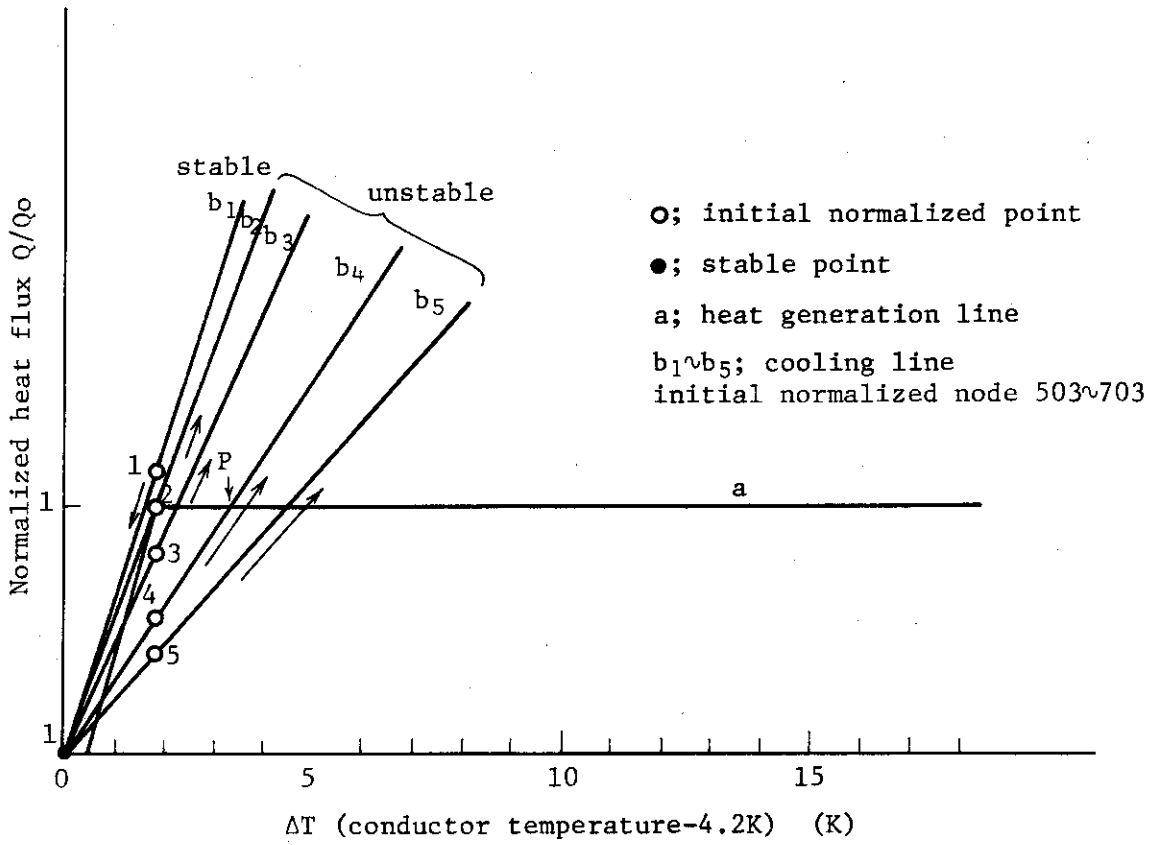


Fig. 3-5(a) Stability Characteristics (linear heat flux)

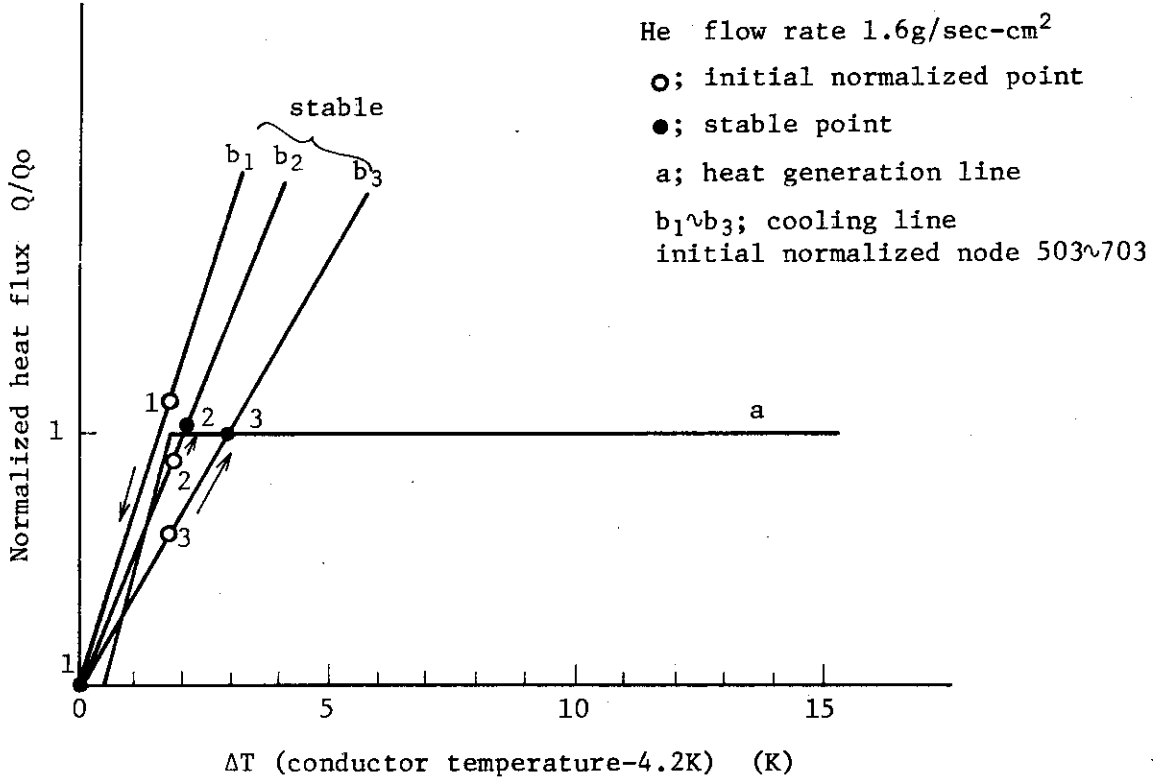


Fig. 3-5(b) Stability Characteristics (linear heat flux)

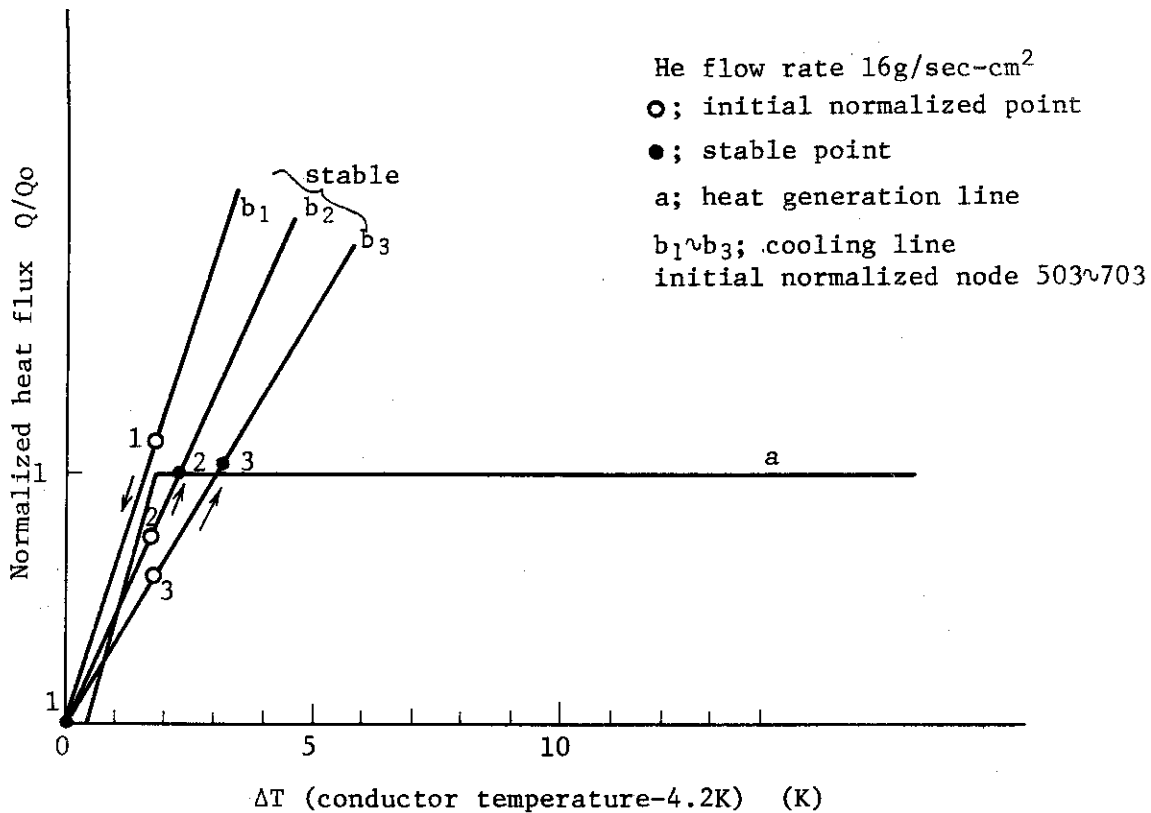


Fig. 3-5(c) Stability Characteristics (linear heat flux)

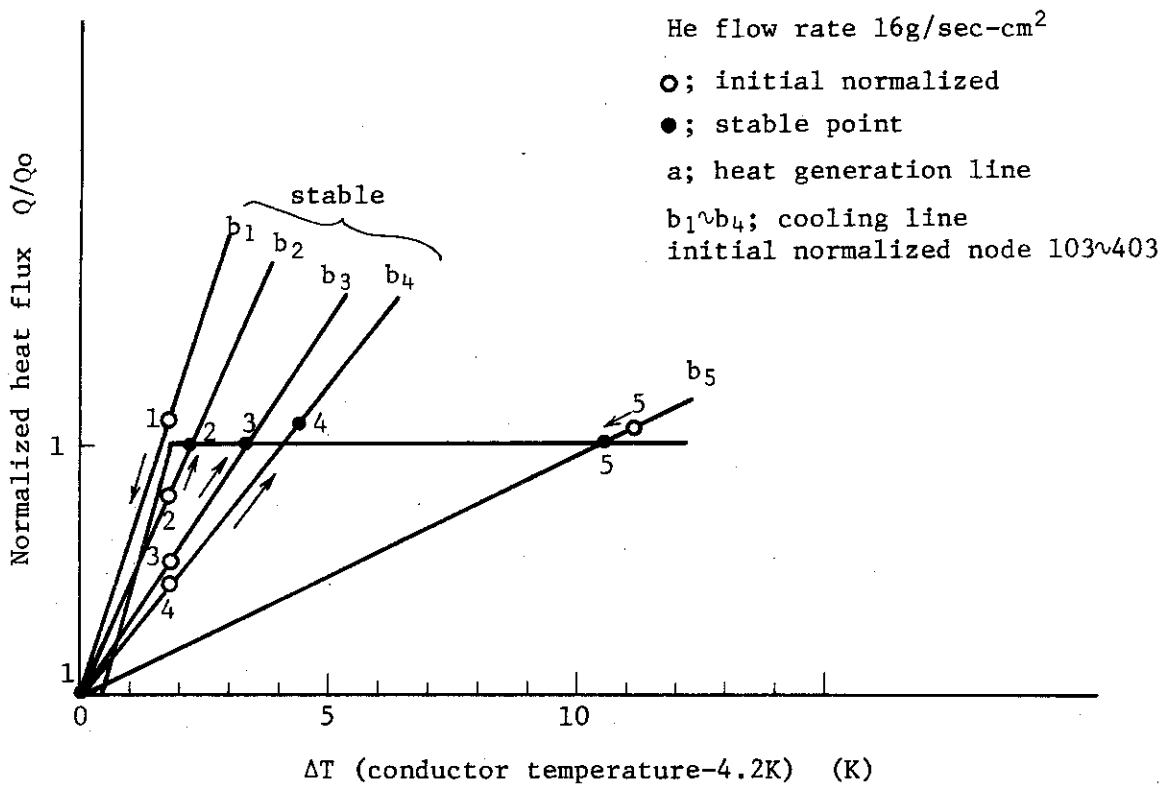


Fig. 3-5(d) Stability Characteristics (linear heat flux)

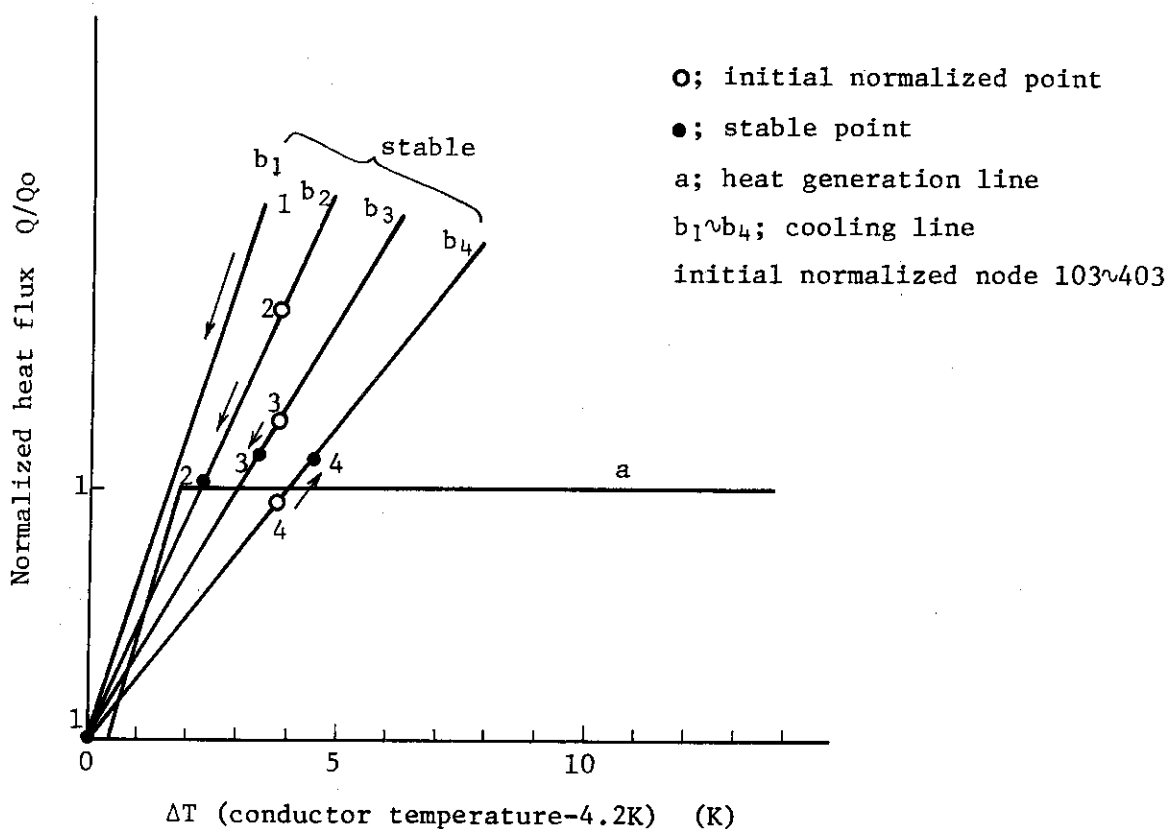


Fig. 3-5(e) Stability Characteristics (linear heat flux)

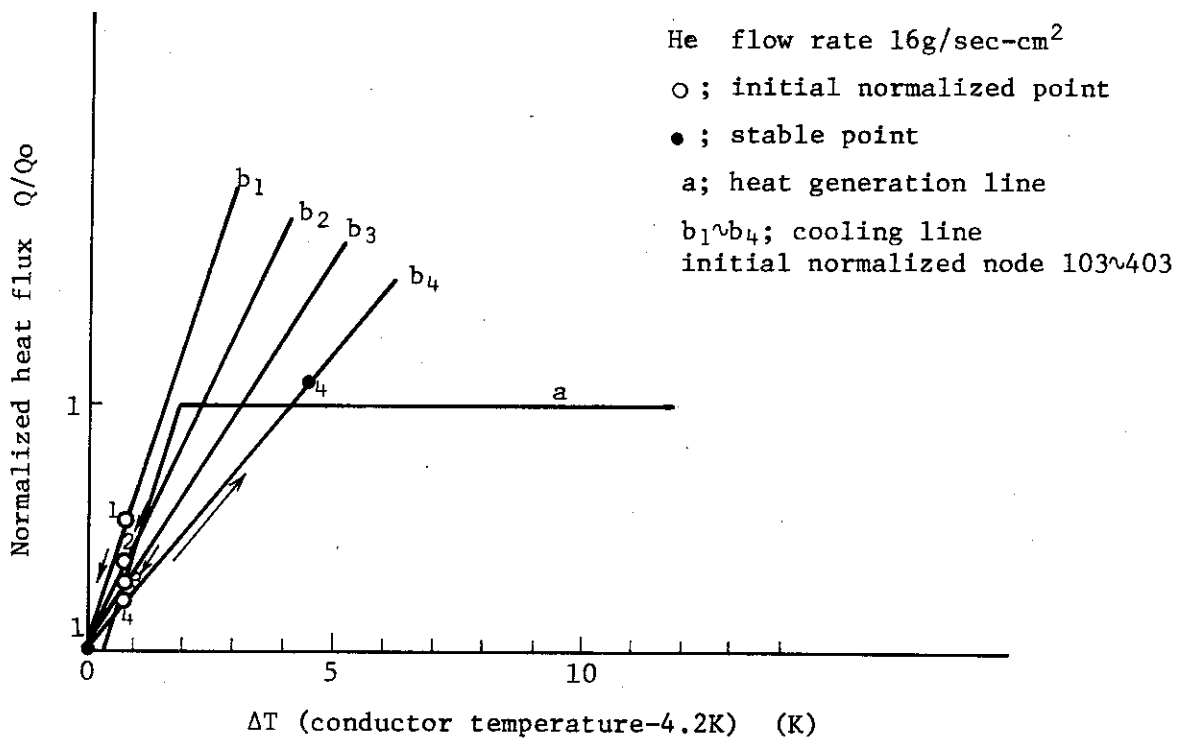


Fig. 3-5(f) Stability Characteristics (linear heat flux)

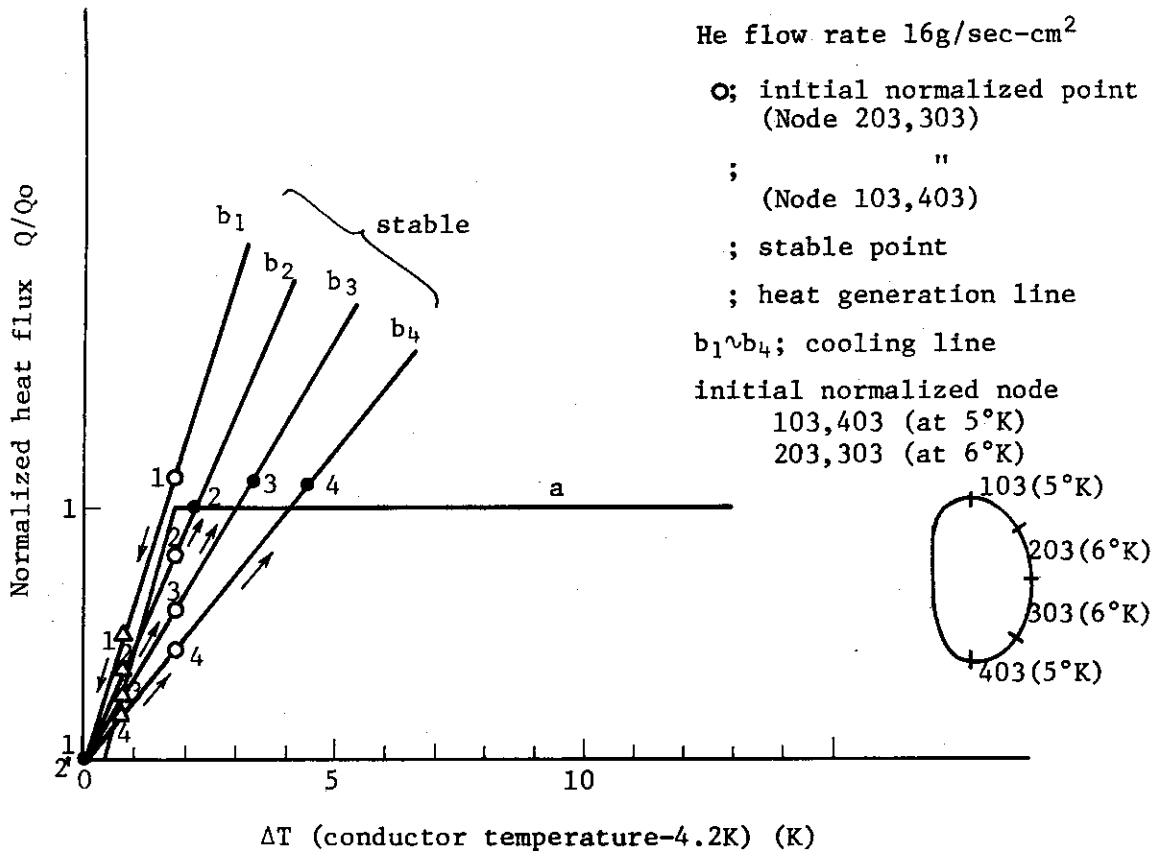


Fig. 3-5(g) Stability Characteristics (linear heat flux)

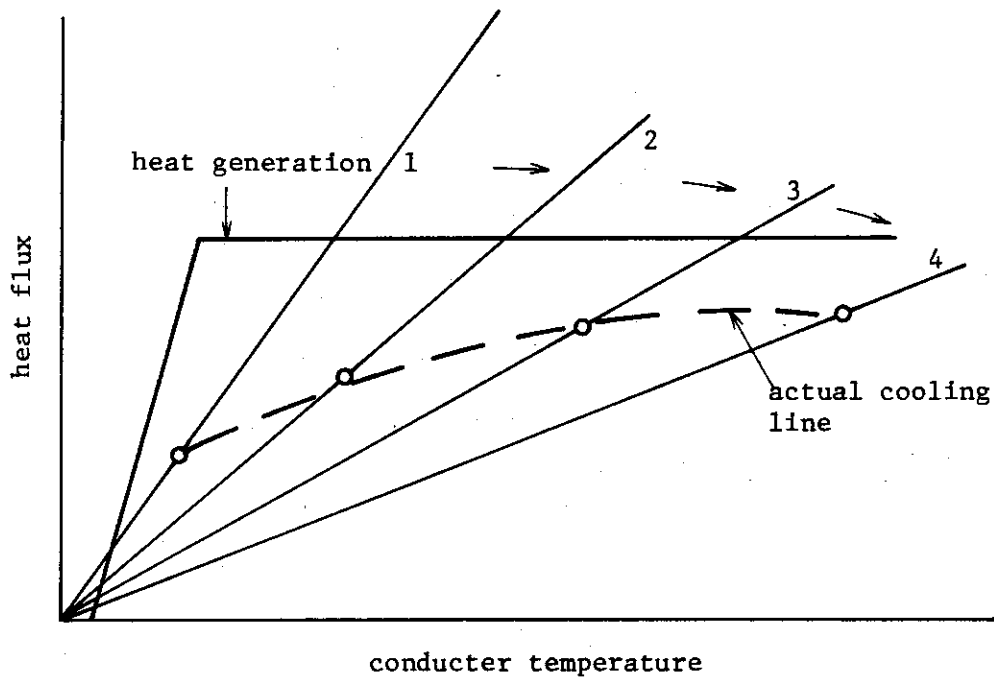


Fig. 3-6 Schema of Stability Characteristics in the Temperature Rising

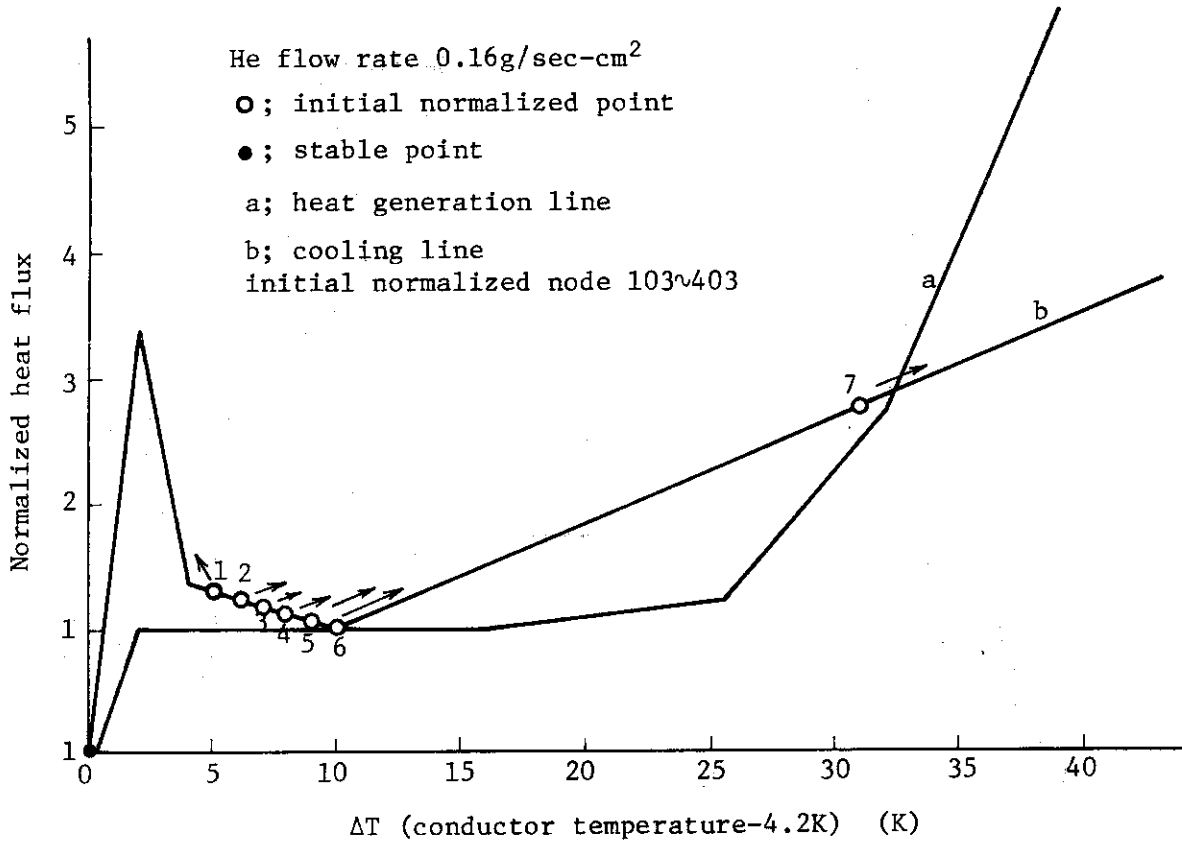


Fig. 3-7(a) Stability Characteristics (Boiling heat transfer)

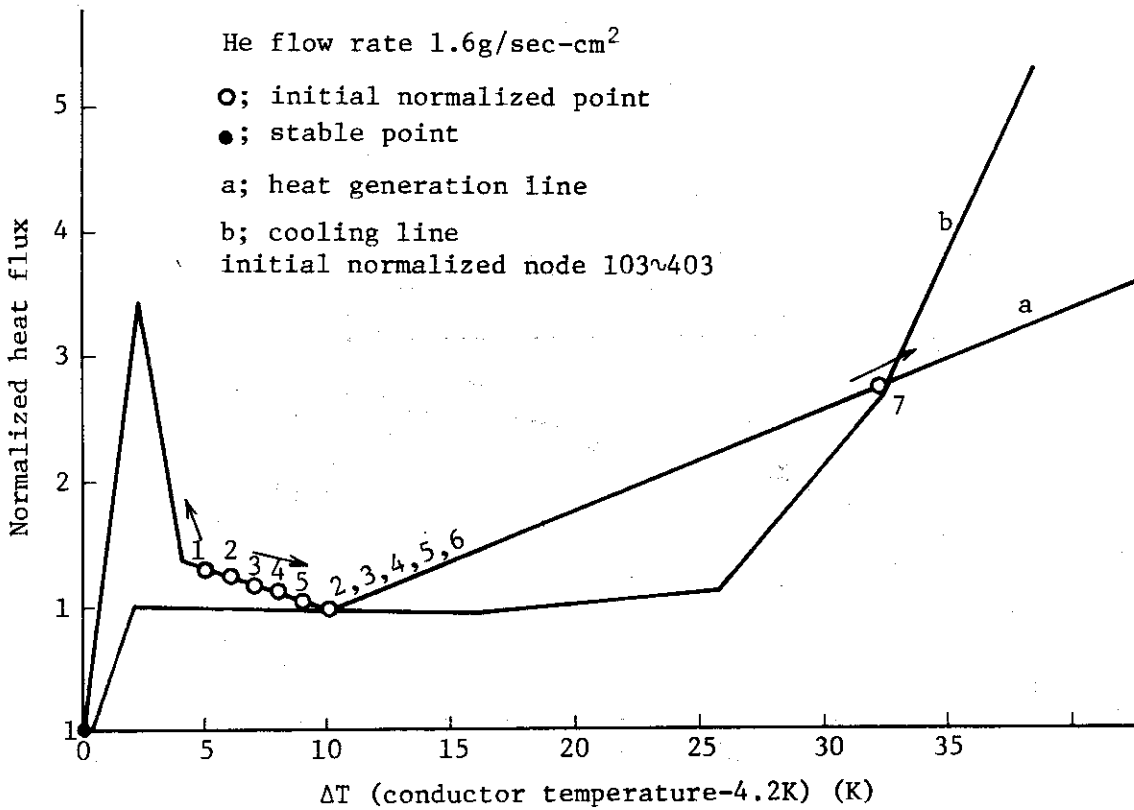


Fig. 3-7(b) Stability Characteristics (Boiling heat transfer)

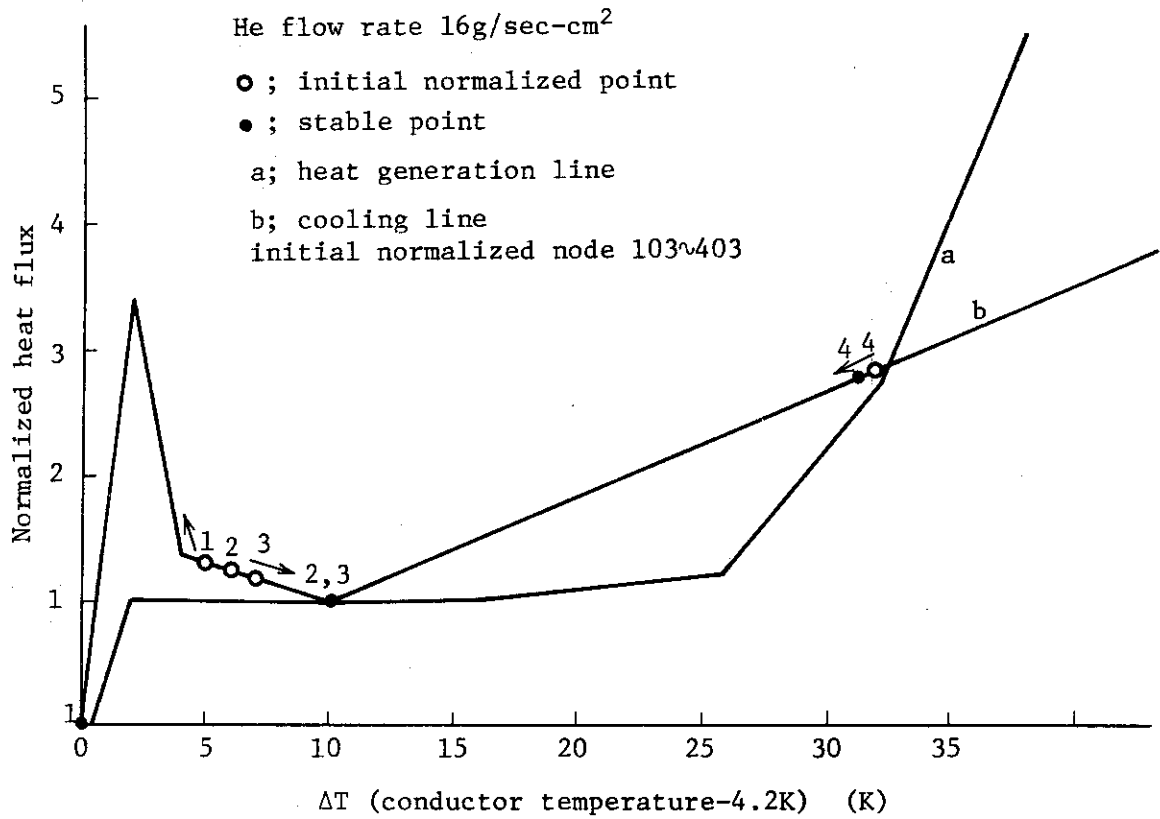


Fig. 3-7(c) Stability Characteristics (Boiling heat transfer)

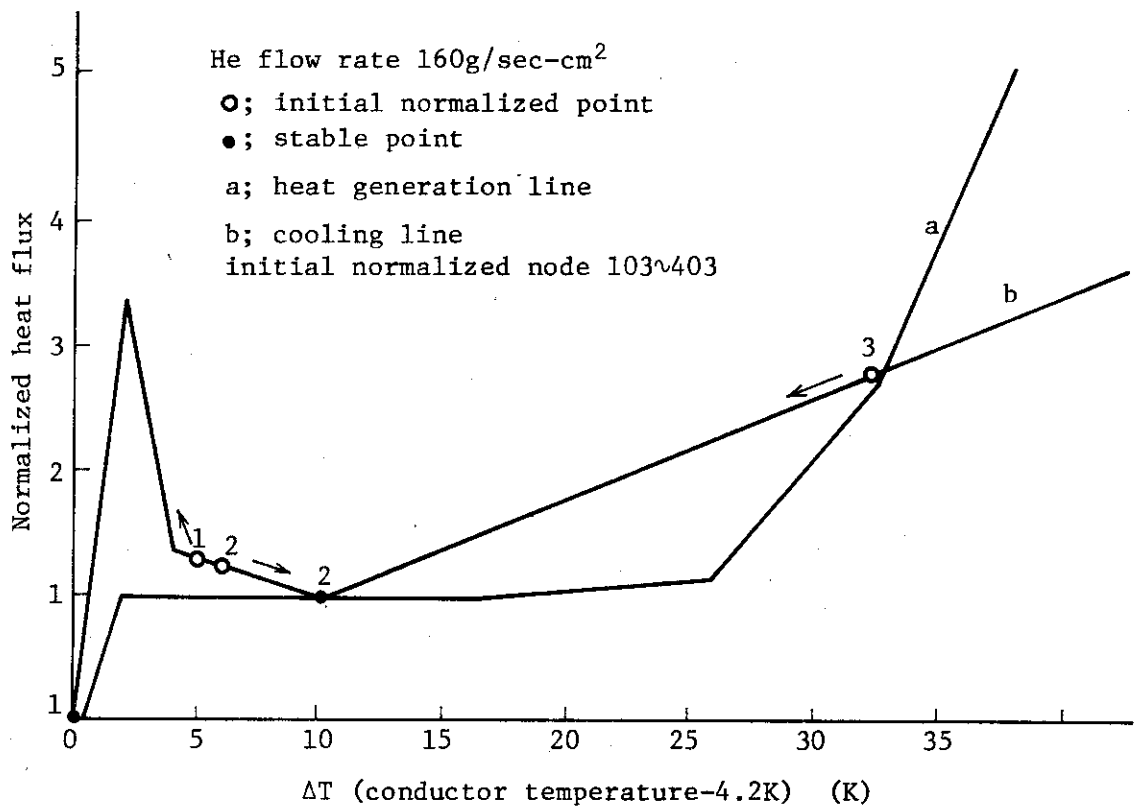


Fig. 3-7(d) Stability Characteristics (Boiling heat transfer)

## 4. Nuclear Heating Simulation の検討

Nuclear Heating Simulation により、ヒーターの発熱量が決定される。ここでは、その発熱量が、冷却負荷として、どの程度の大きさになるか、検討する。

LCT のコイル断面は、半径方向に 59.8 cm の厚さを持ち、巾は、75 cm である。この断面内に  $7.9 \text{ g/cm}^3$  の密度の SUS が 40%、 $0.125 \text{ g/cm}^3$  の密度の He が 30%、 $8.9 \text{ g/cm}^3$  の密度の導体が 30% 存在するとする。平均密度は、 $5.9 \text{ g/cm}^3$  となり、(2.1) 式中の  $m$  は、

$$m = 5.9 \cdot r_1 \quad (\text{g/cm}^2) \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$r_1$  : コイル内面からの半径方向の距離 (cm)

従って、発熱量は (2.1) 式に (4.1) 式を代入して

$$\begin{aligned} Q(r) &= 1 \times 10^{-4} e^{-0.059r} \quad (\text{w/g}) \\ &= 5.9 \times 10^{-4} e^{-0.059r} \quad (\text{w/cm}^3) \quad \dots\dots\dots (4.2) \end{aligned}$$

で与えられ、従って全発熱量は、周長を、1137 cm として、

$$\begin{aligned} Q_{\text{total}} &= 1137 \times 70 \times \int_0^{60} e^{-0.059r} \cdot dr \\ &= 772 \text{ W} \end{aligned}$$

となる。この値は Fig. 2-2 に示すサイクルのうち pulse field が、印加されている期間だけ、生じる為、時間平均では、 $772 \times 30 / 150 = 154.4 \text{ watt}$  となる。コイルは約 700 ターンで構成される為、 $1/2$  ターンに設けられているヒータ 16 本では  $154.4 \text{ w} / 700 \times 8 = 1.76 \text{ w}$  の発熱量となる。この値は、現実のヒーター試験に於ては、20 w の heat-leak やパワーリードからの熱侵入 40 w 等と比べると殆んど問題にならない値である。

### 5. 初期冷却及び warm-up の検討

初期冷却及び warm-up に関しては、その所要時間と、熱応力が問題となる。

(1) 初期冷却の所要時間

LCT の Specification では「He のみで冷却して、120 時間以内に、初期冷却が完了すること」となっている。

冷却手順としては、先づ 100 K の He ガスで 100 K 迄冷却し、続いて、20 K の He-ガスで 20 K 迄冷却、そして、最終的に 4.2 K の He で、4.2°K 迄冷却するという手順を考える。

He の注入孔は、コイルの上下にあるので、下の注入孔から流入させ、上の注入孔から流出させる。計算モデルでは、Fig. 3-2 に示した、周方向の分割番号で He は 500 → 600 → 700, 400 → 300 → 200 → 100 の 2 系統に parallel に流れるとした。

He と超電導々体との間の熱伝達率を円管内の、乱流熱伝達率を表わす式で近似すると (5.1) 式で与えられる。

$$h = Nu/d \cdot \lambda \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

h ; He と超電導々体との間の熱伝達率 (cal/sec-cm<sup>2</sup>-°K)

Nu ; ヌセルト数 = 0.023 Re<sup>0.8</sup> Pr<sup>0.4</sup>

d ; 管内径 (cm)

λ ; 流体の熱伝導度 (cal/sec-cm-°K)

Re ; レイノルズ数

Pr ; プラントル数

管内径 d は次の考え方で近似的に求めた。コイルのターン数を 700 T とし、He の流路数も 700 とする。断面の 1/2 を He 流路の断面とすると、1 流路の断面積は (60 cm × 44.8 cm) / 2 / 700 = 1.92 cm<sup>2</sup> となる。これを円形断面と近似し、管内径を 1.56 cm とした。

熱伝達率の算出に用いた、He の特性値を表 5-1 に示す。

Table 5-1 Liq. He Characteristics

温度 (°K)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比熱 (cal/g-K)	熱伝導度 (cal/s·°K·cm <sup>2</sup> )	粘性係数 (upoise)
4.2	0.125	1.08	6 × 10 <sup>-5</sup>	35.0
20	0.014	1.3	6.4 × 10 <sup>-5</sup>	35.4
100	2.8 × 10 <sup>-3</sup>	1.3	1.9 × 10 <sup>-4</sup>	103

超電導々体や SUS の特性値は、表 3-1, 表 3-3 に示した値を用い、計算コード TRUMP により計算した結果を Fig. 5-1 (a)~(d), Fig. 5-2 (a)~(d), Fig. 5-3 (a)~(d) に示す。

各々のグラフは、冷却途中の各時間における、導体 (Node 101~701) の温度分布を示したも



のである。

Fig. 5-1 (a)~(d) は、He の流速  $v$  をパラメータとして 300°K のコイルを 100 K の He で冷却する時の特性であり、冷却所要時間は図中  $t_1$  で示した。

Fig. 5-2 (a)~(d) は、He の流速  $v$  をパラメータとして、100 K のコイルを 20 K の He で冷却する時の特性であり、冷却所要時間は図中  $t_2$  で示した。

Fig. 5-3 (a)~(d) は、He の流速  $v$  をパラメータとして、20 K のコイルを 4.2°K の He で冷却する時の特性であり、冷却所要時間は、図中  $t_3$  で示した。

300 K から 4.2 K 迄の冷却に必要な時間は、 $t_1 + t_2 + t_3$  で得られる。He 流速に対する、冷却所要時間を Fig. 5-4 に示した。計算例では、He の流速、 $0.027 \text{ g/sec-cm}^2$  の場合が 108 時間であり Specification に最も近い結果となった。この流速をコイルへの He 注入量に換算すると計算モデルでは、 $60 \text{ cm} \times 44.8 \text{ cm} / 2 = 1334 \text{ cm}^2$  の断面積の流路が、2 系統 parallel に存在するので、コイルへの注入量は、 $0.027 \times 1344 \times 2 = 72.5 \text{ g/sec}$  となる。

(2) Warm-up の所要時間

Warm-up に際しては、Warm-N<sub>2</sub> ガスを循環させたり、導体に電流を通電し、Joule 熱を発生させる方法が考えられるが、ここでは、通電による Warm-up について検討する。

第 3 章で述べた特性値を用いて、通電々流値と、warm-up 時間との関係を求めた結果を Fig. 5-5 に示す。Fig. 5-5 から、LCT の Specification (60 Hr 以内) を満足する為には、180 A ~ 190 A の通電々流値が必要であることが判る。

180 A ~ 190 A の通電々流値は、~ 20 kW の消費電力に対応し、コイル端子電圧は ~ 110 V となる。

(3) 初期冷却時の熱応力について

初期冷却時に各部に発生する熱応力を、幾つかのモデルにより検討する。冷却条件は、He の流速を  $0.027 \text{ g/sec-cm}^2$  (冷却時間 108 時間) とする。その場合、各部の温度勾配が、最も大きいと思われる。時点の温度分布を Fig. 5-6 に示した。図中○印は超電導々体の温度分布、×印は SUS 構造材の内周部の温度分布 (外周部の温度分布も殆んど等しい)、△印は側面部の温度分布である。

(1) 導体中の周方向の温度分布による熱応力

周方向の温度勾配については、Fig. 5-6 から明らかな様に、超電導々体中の方が SUS 中よりも遥かに大きい。今、超電導々体から長さ  $2C$  の部分を切出す。Fig. 5-7 (a) に示す座標系で考えて、拘束のない場合、応力は、 $x$  方向に発生し、その大きさは、(5.2) 式で与えられる<sup>(4)</sup>。

$$\sigma_x = -\alpha ET(y) + \frac{1}{2C} \int_{-c}^c \alpha ET(y) dy + \frac{3y}{2C^3} \int_{-c}^c \alpha ET(y) y \cdot dy \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

但し、 $\alpha$  ; 線膨張係数  
 $E$  ; 縦弾性係数 ( $\text{kg/cm}^2$ )

である。

Fig. 5-6の温度分布をみると、100→400、500→700の間は、直線分布、即ち  $T = Ky$  であると近似してよい。この場合、(5.2)式の2項は0となり、第1項と第3項の和も0となって、熱応力は発生しない。しかし、300→400→500→600の部分を見ると、温度分布は、Fig. 5-7(b)に示す様に、上下対称となる。この場合は、(5.2)式の第1項が残り、 $\sigma_x$ は  $\alpha ET(y)$  で与えられる。(5.2)式は帯板の熱応力を表わす式であるので、Cとしては導体巾のせいぜい1/2程度の範囲で有効と考えられるので、導体巾を3cmとして、Cを1.5cmとする。温度勾配は、0.216 k/cmであるので、 $T(y)_{\max} = T(C) = 0.324^\circ K$ となる。 $\alpha = 16.6 \times 10^{-6}$ 、 $E = 10^6 \text{ kg/cm}^2$ とすると熱応力は、 $\sigma_x = 5.4 \text{ kg/cm}^2$ となる。

(ii) HeによるSUS構造材表面急冷時の熱応力

Fig. 5-6からも明らかな様に、SUS構造材中の温度分布は極めて小さいので、ここでは、温度分布による熱応力を考えず、表面が冷媒で急激に冷された場合の表面の熱応力を考える。熱応力は、(5.3)式で与えられる<sup>(9)</sup>。

$$\sigma = \{ \alpha E (T - T_{\text{He}}) / (1 - \nu) \} \sigma^* \dots\dots\dots (5.3)$$

但し、 $\nu^*$  ; Biot数 ( $h \cdot d / \lambda$ ) の関数

$\lambda$  ; 板の熱伝導度 cal/s-cm-k

$d$  ; 板厚 cm

$h$  ; 板表面の熱伝達率 cal/s-cm<sup>2</sup>-k

$h = 2.9 \times 10^{-4} \text{ cal/s-cm}^2\text{-k}$ 、 $\lambda = 0.184 \text{ cal/s-cm-k}$ 、 $d = 7.5 \text{ cm}$ とするとBiot数は、0.012となり、 $\sigma^*$ は0.01となる。 $\alpha = 11.7 \times 10^{-6}$ 、 $E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $T - T_{\text{He}} = 200 \text{ k}$ 、 $\nu = 0.3$ とすると、熱応力は、 $66.9 \text{ kg/cm}^2$ となる。

(iii) 超電導々体と、SUS構造材間の絶縁物に発生する熱応力

Fig. 5-6から明らかな様に、超電導々体とSUS構造材との間に、150kの温度差が生じるので、ここでは、両者の間にある、絶縁物に発生する熱応力について検討する。板の両面に $\Delta T$ の温度差があり、曲りが完全に阻止されると考えると、熱応力は(5.4)式で与えられる<sup>(9)</sup>。

$$\sigma = E \alpha \Delta T / 2 (1 - \nu) \dots\dots\dots (5.4)$$

絶縁材料として、ガラス布積層FRP板を考えると、 $E = 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\alpha = 20 \times 10^{-6}$ 、 $\nu = 0.16$ 程度であり、 $\Delta T = 150 \text{ k}$ として $1.785 \text{ kg/cm}^2$ の応力となる。この値は、材料の破壊強度  $3000 \sim 4000 \text{ kg/cm}^2$  に比べ、無視出来ない値である。

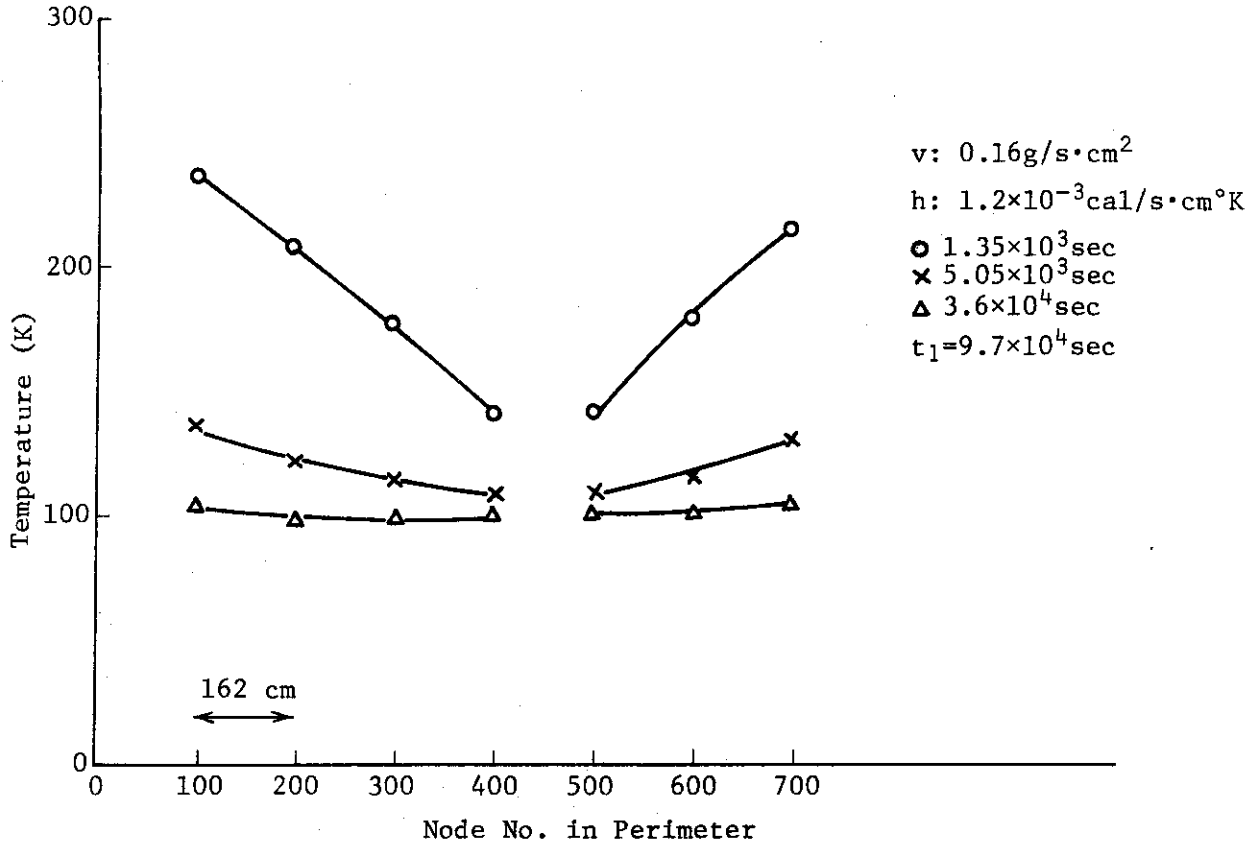


Fig. 5-1(a) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

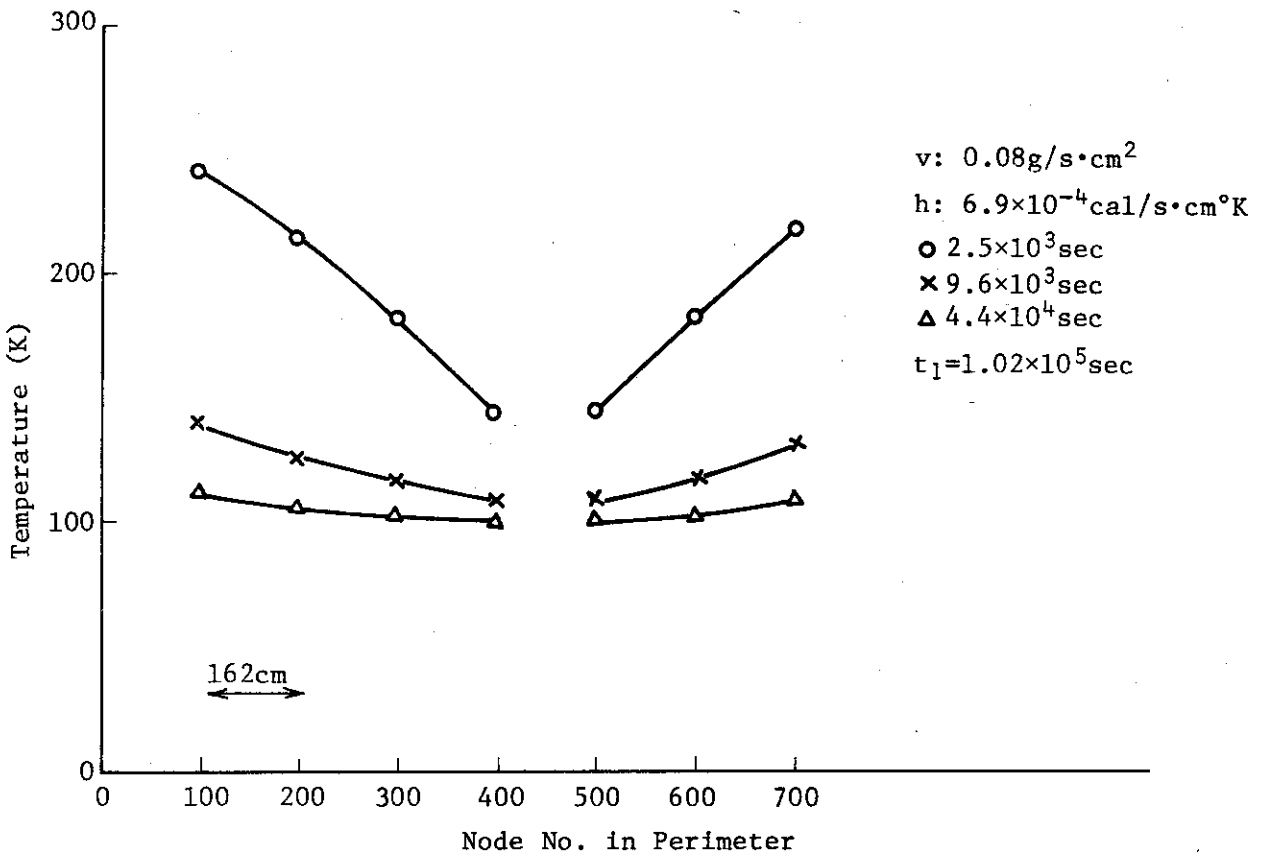


Fig. 5-1(b) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

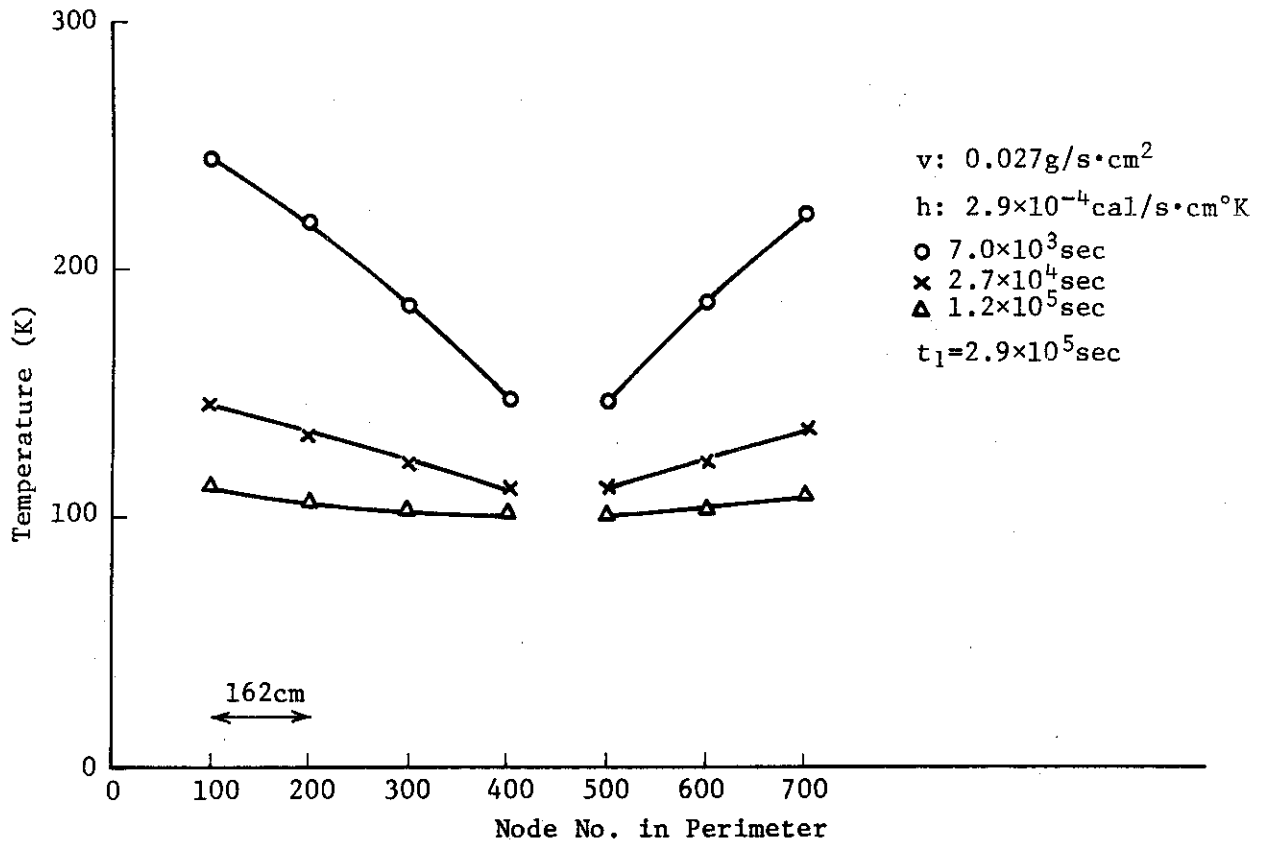


Fig. 5-1(c) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

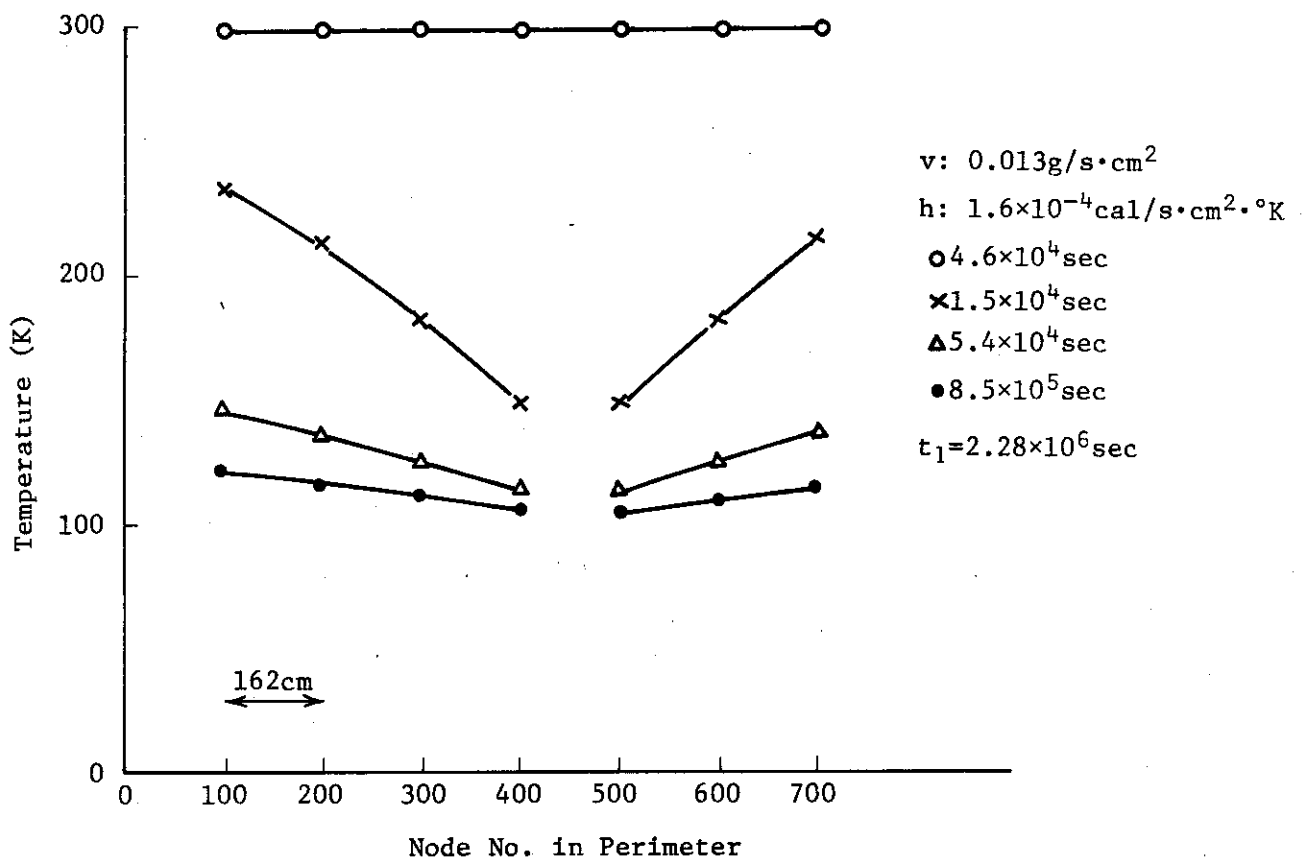


Fig. 5-1(d) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

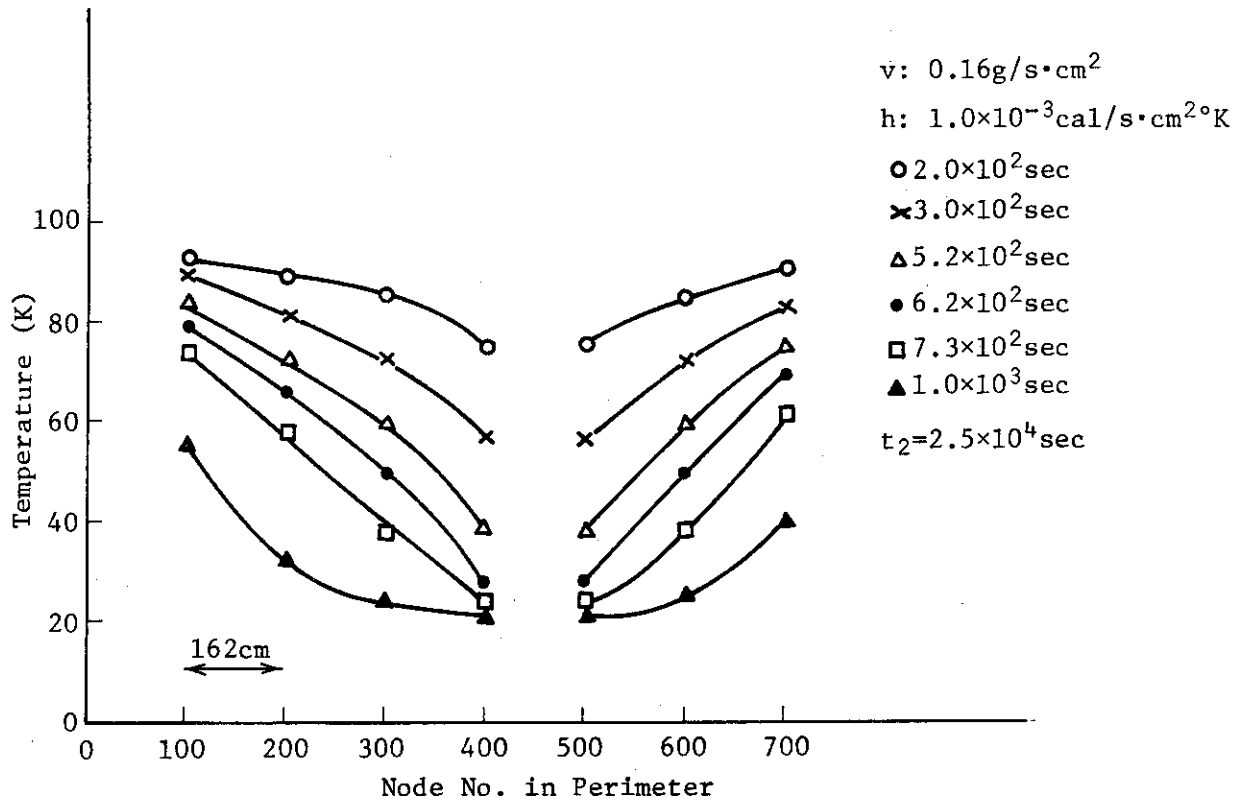


Fig. 5-2(a) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

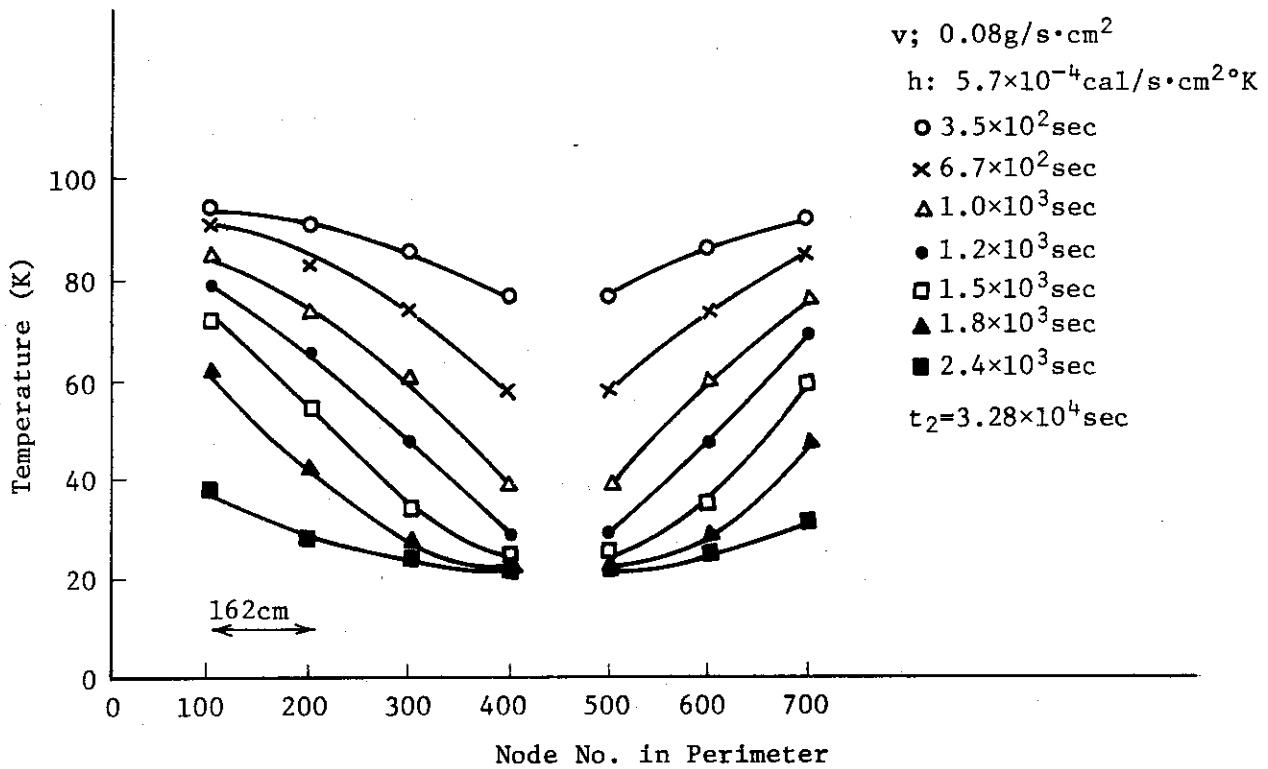


Fig. 5-2(b) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

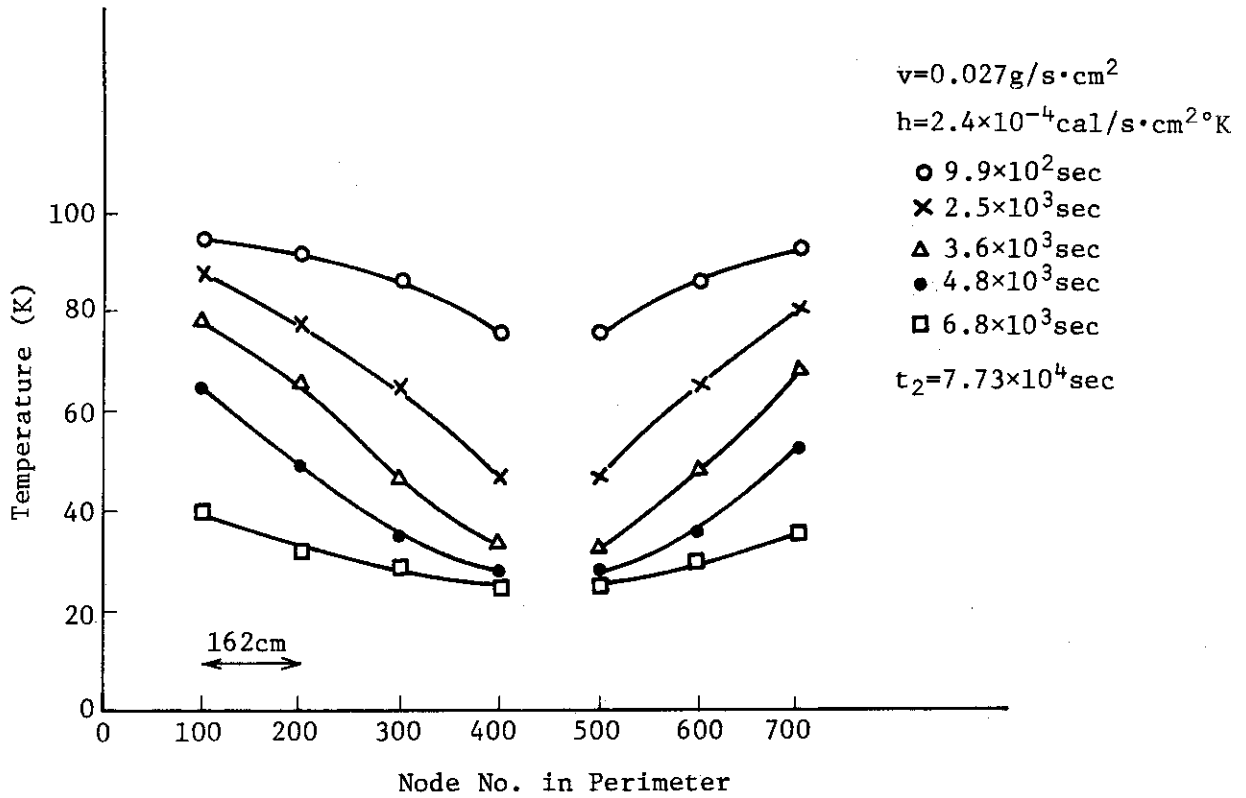


Fig. 5-2(c) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

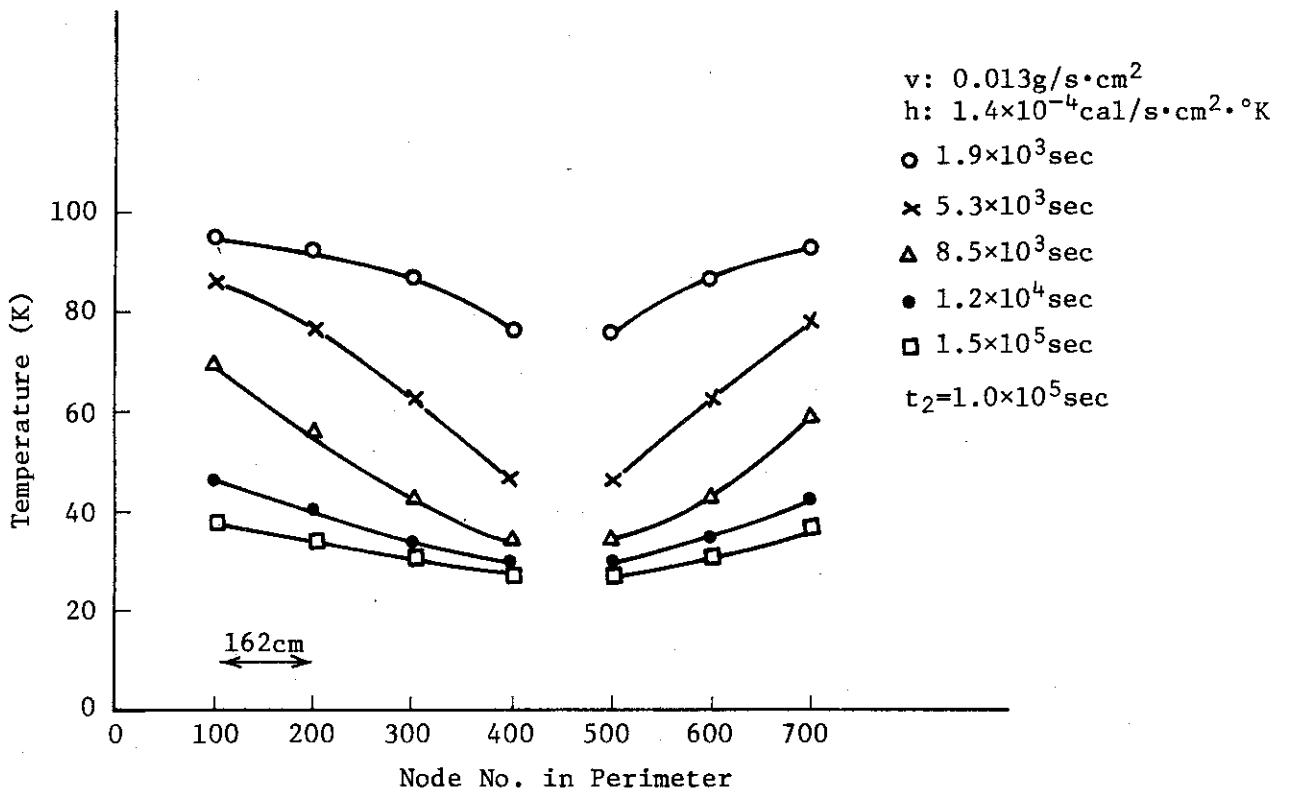


Fig. 5-2(d) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

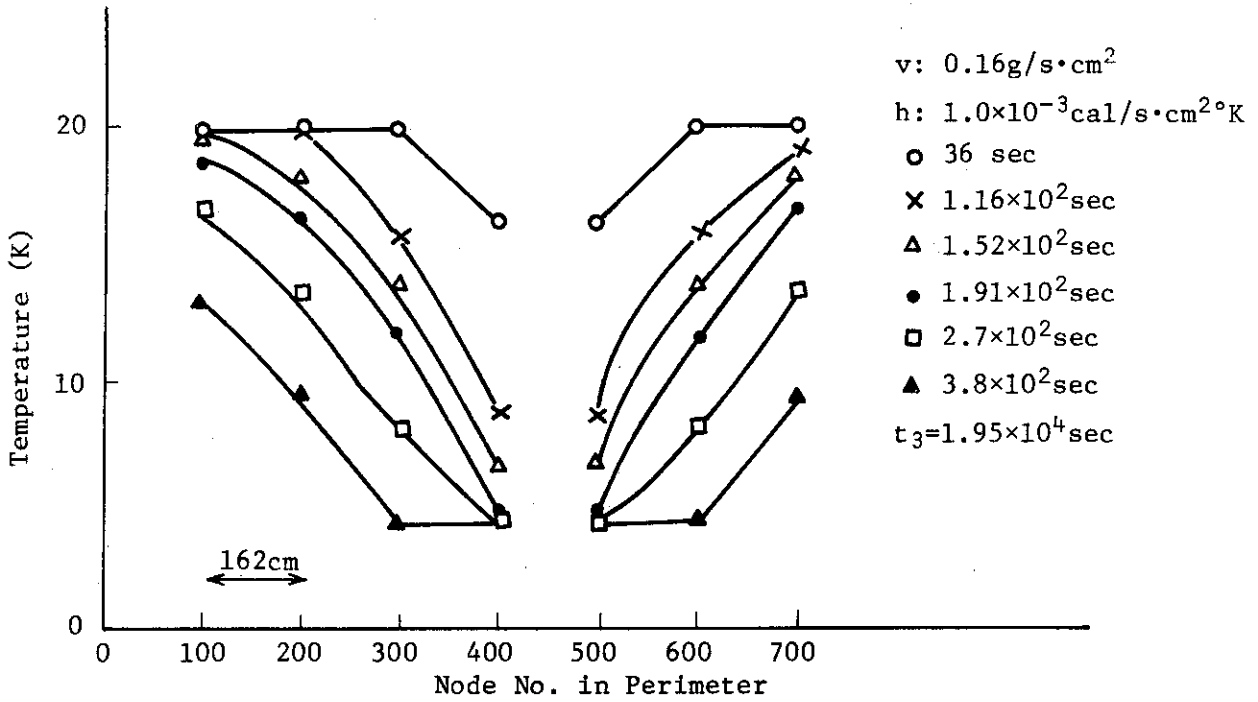


Fig. 5-3(a) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

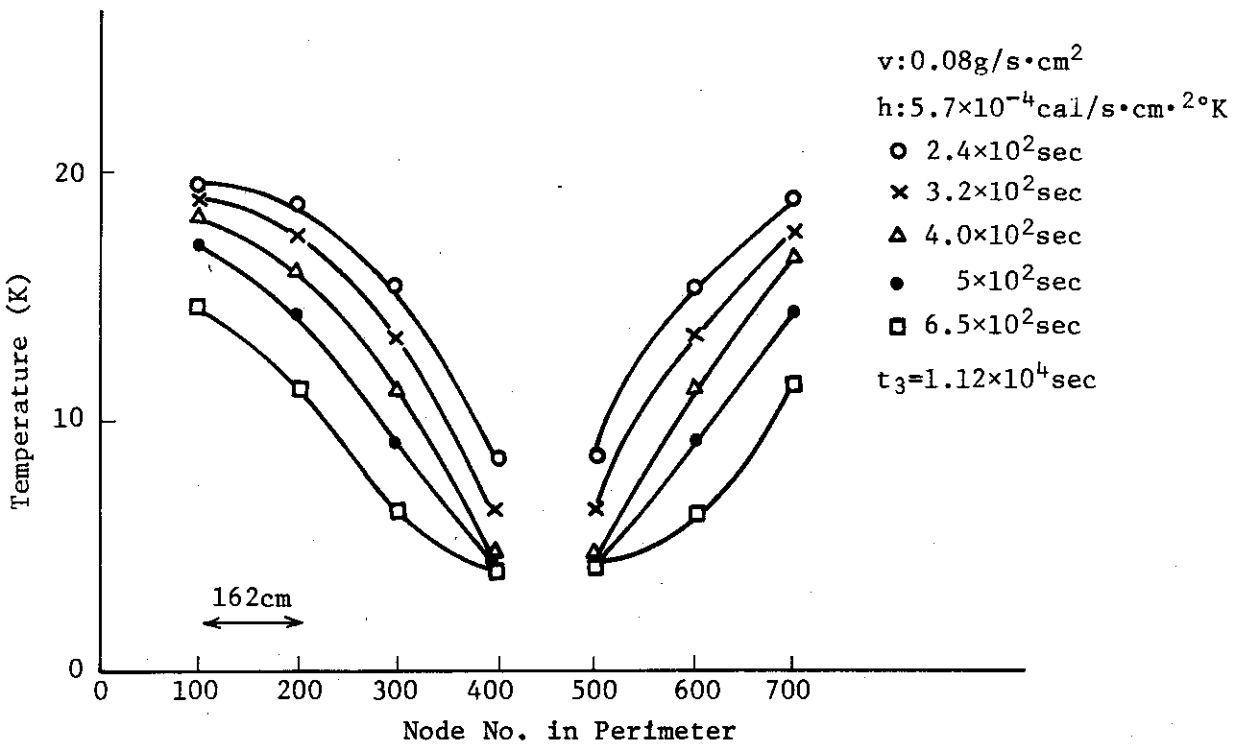


Fig. 5-3(b) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

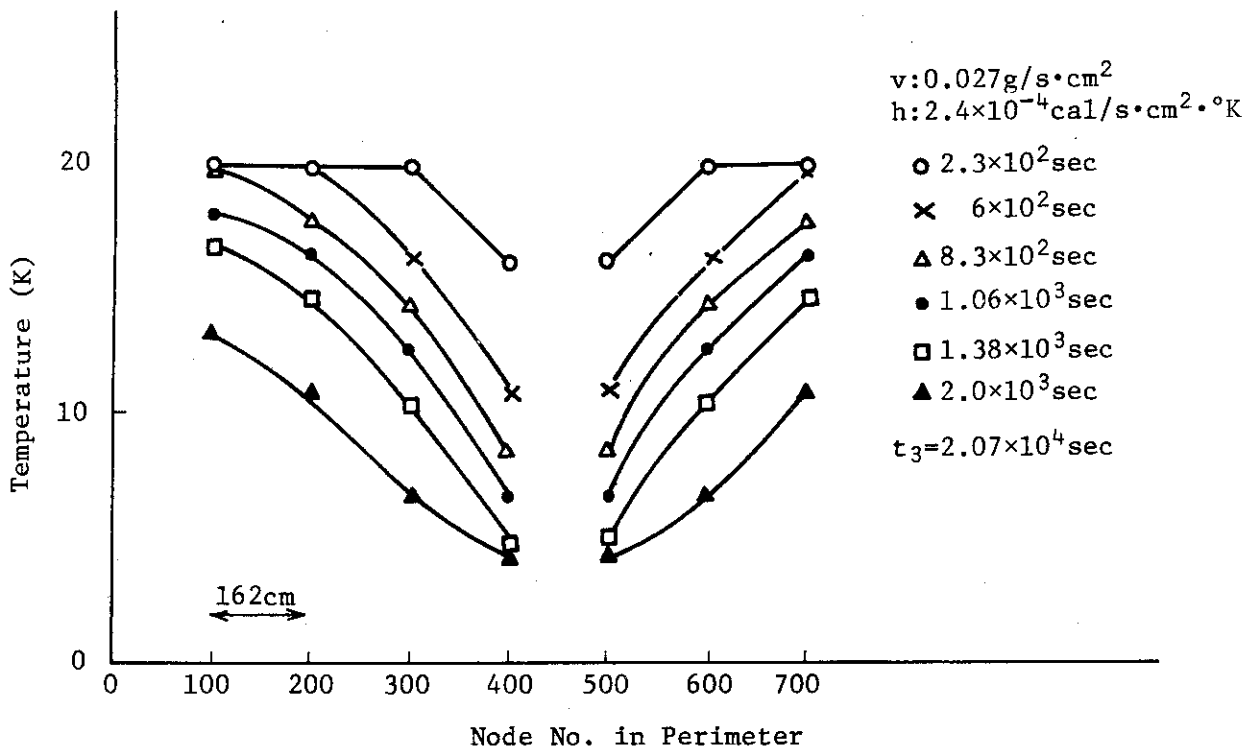


Fig. 5-3(c) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)

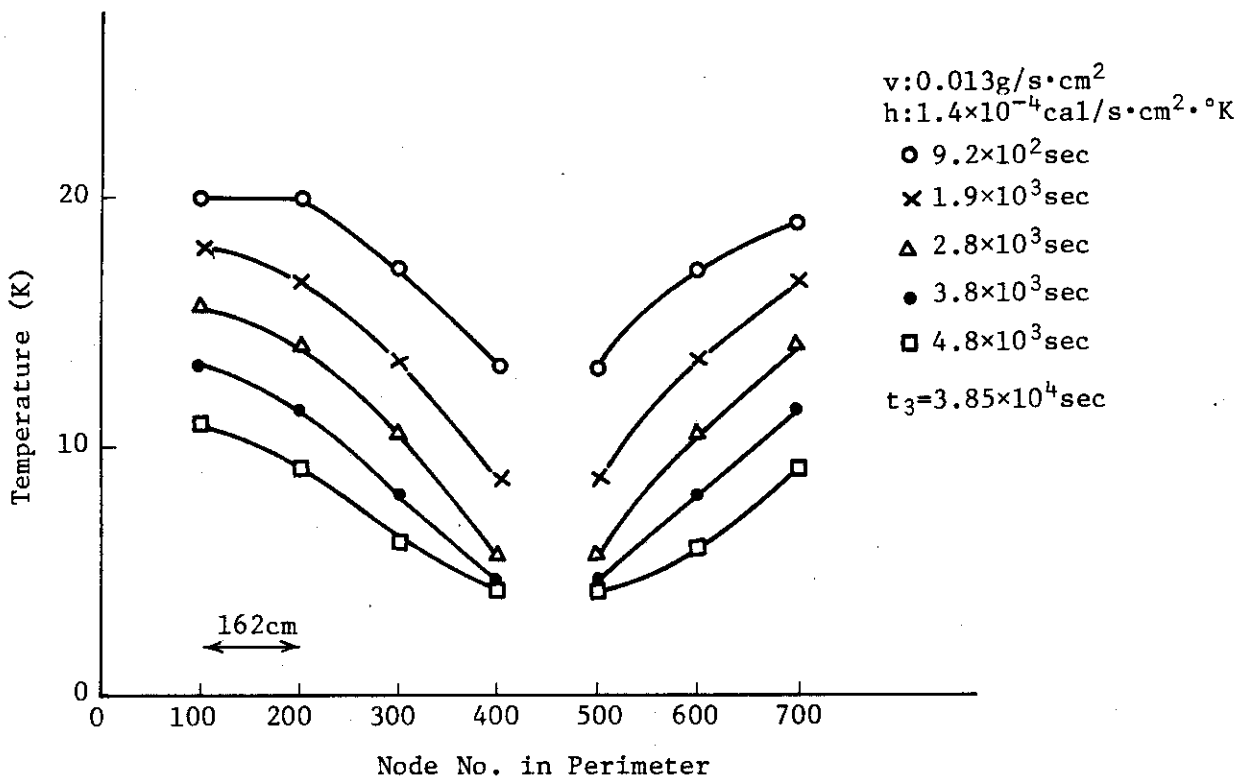


Fig. 5-3(d) Temperature Distribution in Conductor (Node 101~701)



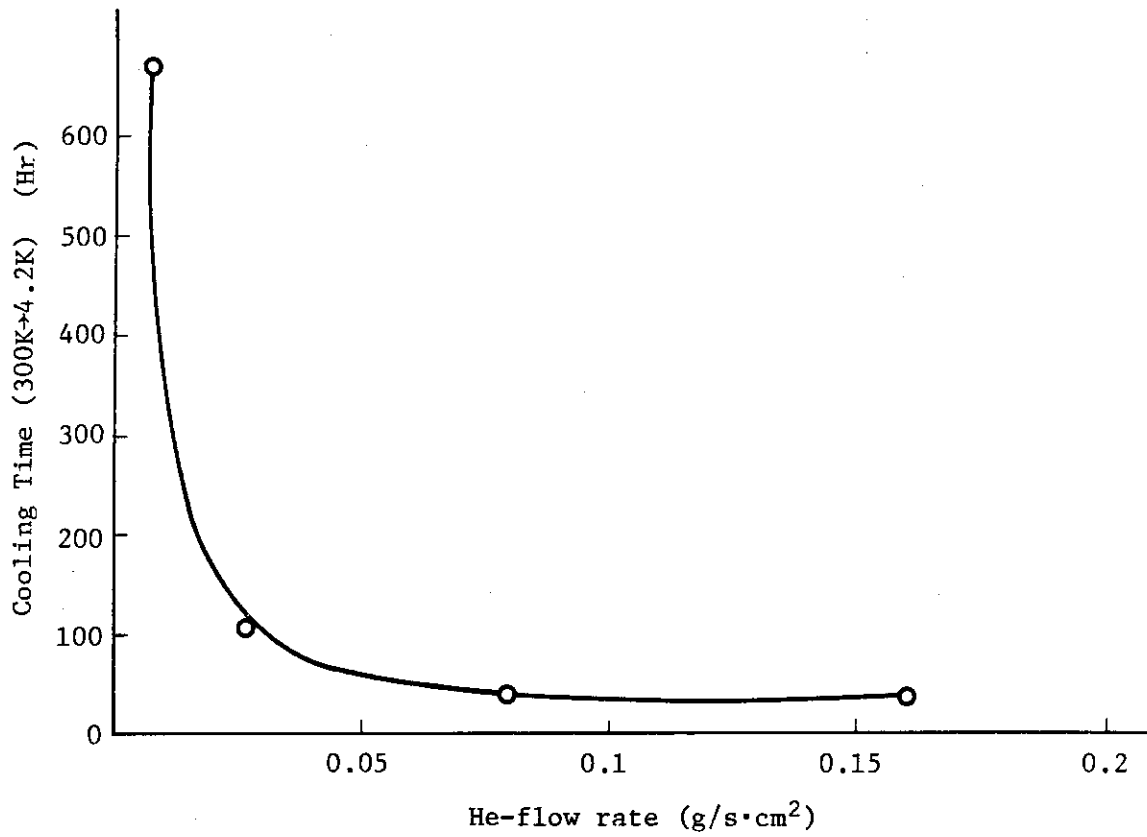


Fig. 5-4 Cooling Time vs. He-flow Rate Characteristics

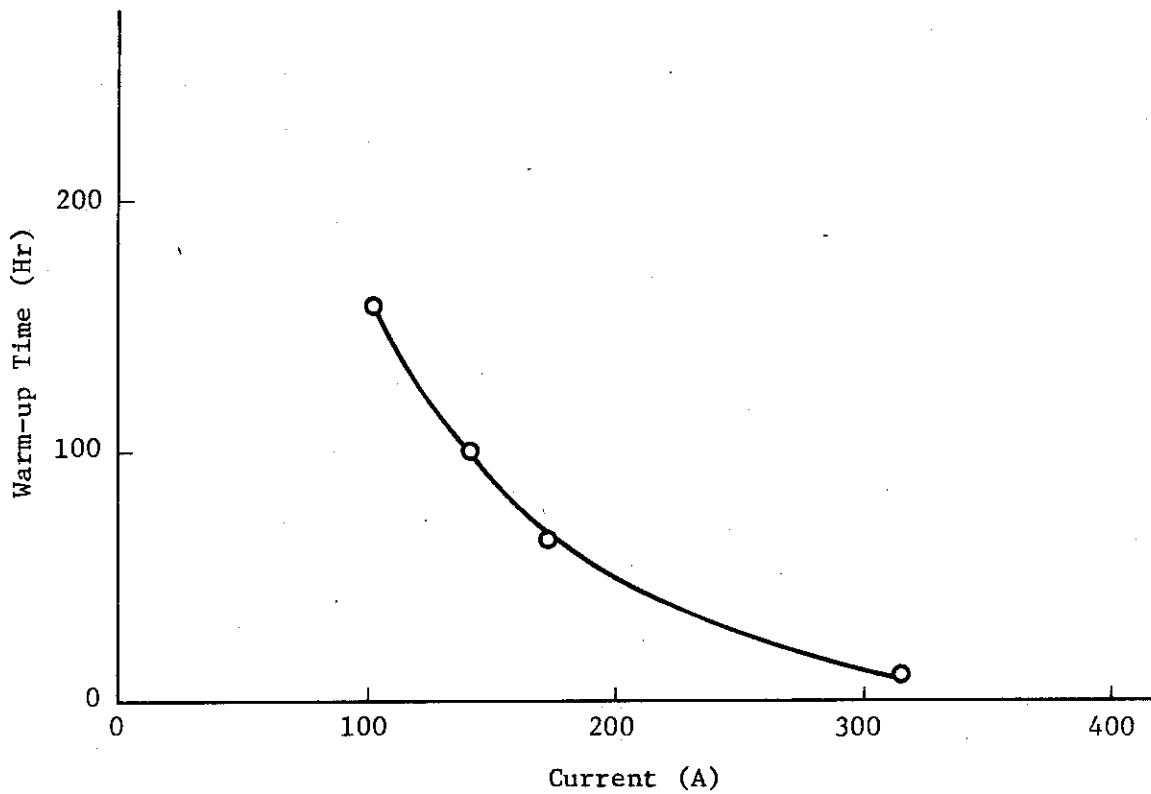


Fig. 5-5 Warm-up Time vs. Current Characteristic

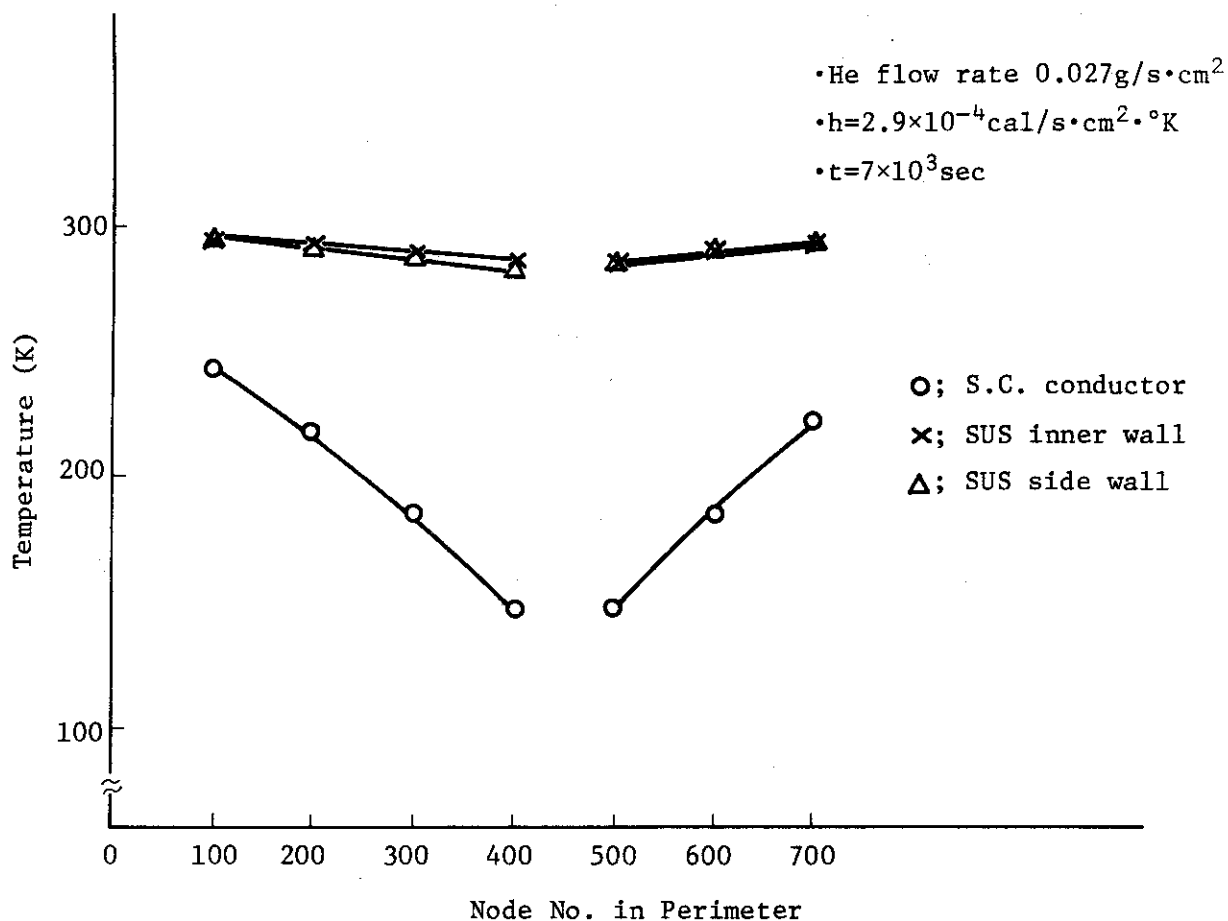


Fig. 5-6 Temperature Distribution in Initial Cooling

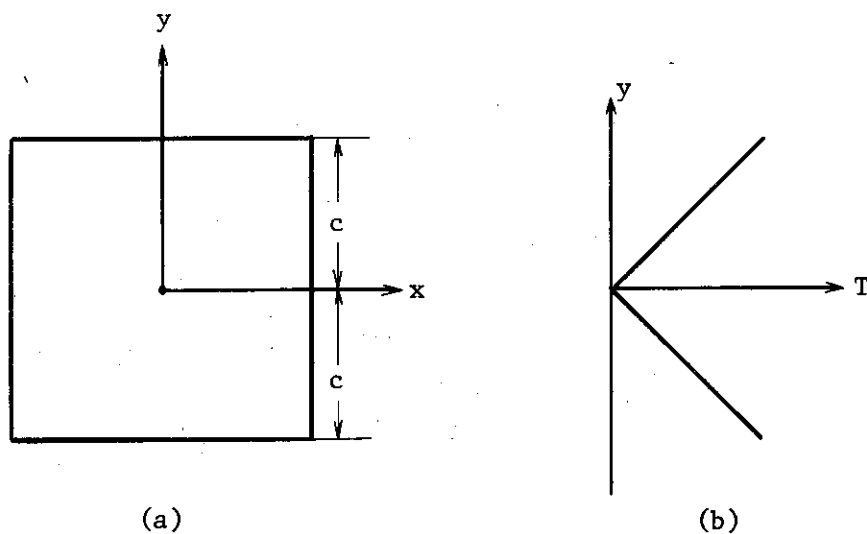


Fig. 5-7 Model for Thermal Stress Analysis

## 6. む す び

LCT の Specification で規定された、熱的問題を検討した結果、次の結論が得られた。

(1) “少くとも  $\frac{1}{2}$  ターンが常電導転位しても超電導状態に復帰すること” という仕様を満足する為には、

- (i) 超電導々体単位長当りの発熱量を冷却熱量より少なくする。
- (ii) 常電導転位部に液体 He を充分 ( $1.6 \text{ g/sec-cm}^2$  程度) 供給する。
- (iii) 常電導転位した時の初期温度は  $9.5 \text{ K}$  以下となるようにする。

という条件が必要である。

(2) Nuclear Heating Simulation による発熱量については、コイル全体では  $154.4 \text{ w}$  とかなり大きく算出されるもの、実際のテストでは  $700$  ターンのうち僅か  $8$  ターンにのみヒーターが取り付けられるにすぎず、テスト中のヒーター発熱量は、Total  $1.76 \text{ w}$  であり、殆んど問題のない値となる。

(3) 初期冷却は、 $100 \text{ K He}$ 、 $20^\circ \text{ K He}$  及び  $4.2 \text{ K He}$  による 3 段階の冷却を行なうと考える。コイル全体に、 $72.5 \text{ g/sec}$  の He を注入すれば  $108$  時間で完了し、LCT の仕様 “ $120$  時間以内” を満足する。

Warm-up は、コイルに  $180 \text{ A} \sim 190 \text{ A}$  の電流を通電することにより、LCT の仕様 “ $60$  時間以内” を満足出来る。

初期冷却中の熱応力に関しては、導体中の周方向の温度分布による熱応力は  $5.4 \text{ kg/cm}^2$ 、He による SUS 構造材表面急冷時の熱応力は  $66.9 \text{ kg/cm}^2$  といずれも小さい。しかしながら、超電導々体と SUS 構造材間の絶縁物に発生する熱応力は  $1785 \text{ kg/cm}^2$  の応力となり、材料の破壊強度、 $3000 \sim 4000 \text{ kg/cm}^2$  と比べ、無視出来ない値となった。

## 謝 辞

本報告の作業は、核融合用超電導磁石の開発を熱心に指導されている、森核融合研究部長のもとに行われたものであり、森部長の激励をここに深く感謝致します。又、小幡次長には、日頃、細い点につき御指導賜り、感謝致します。又、当研究室の安藤俊就、吉田 清、両研究員には、LCT の Specification の解釈につき、種々、討論を頂くと共に、材料特性等の文献調査にも御協力頂いたことを感謝致します。

## 6. む す び

LCT の Specification で規定された、熱的問題を検討した結果、次の結論が得られた。

(1) “少くとも  $\frac{1}{2}$  ターンが常電導転位しても超電導状態に復帰すること” という仕様を満足する為には、

- (i) 超電導々体単位長当りの発熱量を冷却熱量より少なくする。
- (ii) 常電導転位部に液体 He を充分 ( $1.6 \text{ g/sec-cm}^2$  程度) 供給する。
- (iii) 常電導転位した時の初期温度は  $9.5 \text{ K}$  以下となるようにする。

という条件が必要である。

(2) Nuclear Heating Simulation による発熱量については、コイル全体では  $154.4 \text{ w}$  とかなり大きく算出されるもの、実際のテストでは  $700$  ターンのうち僅か  $8$  ターンにのみヒーターが取付けられるにすぎず、テスト中のヒーター発熱量は、Total  $1.76 \text{ w}$  であり、殆んど問題のない値となる。

(3) 初期冷却は、 $100 \text{ K He}$ 、 $20^\circ \text{ K He}$  及び  $4.2 \text{ K He}$  による 3 段階の冷却を行なうと考える。コイル全体に、 $72.5 \text{ g/sec}$  の He を注入すれば  $108$  時間で完了し、LCT の仕様 “ $120$  時間以内” を満足する。

Warm-up は、コイルに  $180 \text{ A} \sim 190 \text{ A}$  の電流を通電することにより、LCT の仕様 “ $60$  時間以内” を満足出来る。

初期冷却中の熱応力に関しては、導体中の周方向の温度分布による熱応力は  $5.4 \text{ kg/cm}^2$ 、He による SUS 構造材表面急冷時の熱応力は  $66.9 \text{ kg/cm}^2$  といずれも小さい。しかしながら、超電導々体と SUS 構造材間の絶縁物に発生する熱応力は  $1785 \text{ kg/cm}^2$  の応力となり、材料の破壊強度、 $3000 \sim 4000 \text{ kg/cm}^2$  と比べ、無視出来ない値となった。

## 謝 辞

本報告の作業は、核融合用超電導磁石の開発を熱心に指導されている、森核融合研究部長のもとに行われたものであり、森部長の激励をここに深く感謝致します。又、小幡次長には、日頃、細い点につき御指導賜り、感謝致します。又、当研究室の安藤俊就、吉田 清、両研究員には、LCT の Specification の解釈につき、種々、討論を頂くと共に、材料特性等の文献調査にも御協力頂いたことを感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) ORNL-Technical Specification TS-14700
- (2) R.P. Krause and E.H. Christensen, 'Stability Analysis of Composite Superconductors by Thermal Analyzer Digital Computer Program' 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research Oct.25-28, 1977
- (3) 細田, 島本; "トロイダル・コイル常電導転位時の伝熱解析" 第19回低温工学研究発表会, 1977年
- (4) 吉田, 安藤, 島本; "ORNL-LCT の磁界と応力の解析" 原研 JAERI-M 7543
- (5) Gibbons; BOC Data Book
- (6) H. Brechna 'Super Conducting Magnet Systems' Springer-Verlag 1973
- (7) 例えば菅原 忠; "低温物理" 岩波書店, 1965.
- (8) B. J. Maddock, et. al. 'He at Transfer and Steady State Stabilization' Cryogenics Vol.9 (1969) p261~273.
- (9) 伝熱工学資料; 日本機械学会編
- (10) 平 修二; "熱応力と熱疲労" 昭和51年 日刊工業新聞社 p. 22