

JAERI-M

8771

大電流超電導導体を目的とした種々の  
構造の表面の熱伝達特性

1980年3月

西 正孝・安藤俊就・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、お申しこしてください。

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.

JAERI-M 8771

大電流超電導導体を目的とした種々の構造の表面の熱伝達特性

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・島本 進

(1980年2月6日受理)

大電流高電流密度超電導導体の開発のため、種々の加工を施した冷凍表面構造をもつ模擬導体のヘリウム沸騰定常熱伝達特性を測定し、その有効性について評価・検討を加えた。

Heat Transfer Characteristics of Large Superconductors  
with Different Surface Conditions

Masataka NISHI, Toshinari ANDO  
and Susumu SHIMAMOTO

Division of Thermonuclear Fusion Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received February 6, 1980)

For the development of large current, high current density superconductors, steady-state boiling helium heat transfer characteristics of the model conductors having different cooling surfaces were measured. This reports describes example conditions, experimental conditions, measurement means and results.

Keywords: Superconductor, Heat Transfer, Helium Boiling, Cooling Surfaces,  
Large Current, High Current Density

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 模擬導体 .....	1
2.1 寸 法 .....	1
2.2 表面構造 .....	2
3. 実 験 .....	3
3.1 実験装置 .....	3
3.2 測定系 .....	3
3.3 実験方法 .....	3
3.4 実験結果 .....	4
4. 結 論 .....	5
謝 辞 .....	6
参考文献 .....	6

Contents

1. Introduction .....	1
2. Model Conductors .....	1
2.1 Size .....	1
2.2 Surface Structure .....	2
3. Experiments .....	3
3.1 Experimental Apparatus .....	3
3.2 Measurement Circuit .....	3
3.3 Procedure .....	3
3.4 Results .....	4
4. Conclusions .....	5
Acknowledgement .....	6
Reference .....	6

## 1. 序 論

トカマク型核融合炉用超電導トロイダルコイルでは、その蓄積エネルギーは100 GJを越すことが予想されるが、このような大きな超電導コイルが常電導転移を起こした場合、その再冷凍、再励磁には数週間が必要とされ、炉の稼動効率上、また、安全上からも、常電導転移はできる限り避けねばならない。

超電導導体の安定度は、何らかの擾乱によって発生した常電導部分における発生熱量と、その部分の熱放出能力との関係で定まる。即ち、放出熱量が発生熱量を上回っていれば常電導領域は超電導に回復するが、逆に、発生熱量が放出熱量を上回っていれば常電導領域はコイル全体に広がって行く。超電導線に付帯させる安定化母材の量を増加し常電導発生時における導体の電気抵抗を下げてやれば、発生熱量は減少し安定度は高くなるが、導体の断面積は大きくなり、電流密度は低下して、コイル自体の寸法は大きくなる。一方、導体の熱放出能力が向上すれば、安定化母材の必要量は減少し、コイルはコンパクトになって、運転に対する負荷が軽減されるなど好ましい点が多い。導体の熱放出能力の向上のための方法は多数あるが、導体の冷凍表面に加工を施し、冷凍性能の向上を図るのも有効な方法の1つであり、高電流密度導体開発のために、この方面の研究が必要とされる。

先の研究<sup>(1)</sup>では、導体長手方向に縦溝を設けることによる、銅表面から液体ヘリウムへの定常沸騰熱伝達特性の変化を測定し、その有効性について報告したが、本研究では、縦溝に限らず、種々の加工を施した表面構造をもつ模擬導体を作製し、そのヘリウム沸騰定常熱伝達特性を測定して、それらの有効性について比較・検討を行った。

## 2. 模 擬 導 体

本研究用に浸漬冷凍型の模擬導体を数種類作製した。本模擬導体は熱伝達特性測定用として銅のみにて作製されたものであり、超電導線は含まれておらず、代りに、熱供給用のヒータと温度測定子を埋め込むための孔が設けられたものである。

### 2.1 寸 法

トカマク型炉のトロイダル磁界用の超電導導体としては、10 KA以上の大電流導体が必要とされる。例えば、超電導トロイダル磁界コイルの試験を目的として現在進められているLarge Coil Task<sup>(2)</sup>では、仕様で、通電電流値は10 KA～18 KAと決められている。よって、本研究では、10 KA級の導体を想定して、断面寸法10 mm×26 mmの模擬導体を作製し、26 mm幅の2面に、冷凍性能の向上を目差した加工を施した。また、導体長手方向の寸法は、ホルダーに入れるため、50 mmとして統一した。Fig. 1に今回作製した模擬導体の概略形状を示す。

## 1. 序 論

トカマク型核融合炉用超電導トロイダルコイルでは、その蓄積エネルギーは100 GJを越すことが予想されるが、このような大きな超電導コイルが常電導転移を起こした場合、その再冷凍、再励磁には数週間が必要とされ、炉の稼動効率上、また、安全上からも、常電導転移はできる限り避けねばならない。

超電導導体の安定度は、何らかの擾乱によって発生した常電導部分における発生熱量と、その部分の熱放出能力との関係で定まる。即ち、放出熱量が発生熱量を上回っていれば常電導領域は超電導に回復するが、逆に、発生熱量が放出熱量を上回っていれば常電導領域はコイル全体に広がって行く。超電導線に付帯させる安定化母材の量を増加し常電導発生時における導体の電気抵抗を下げれば、発生熱量は減少し安定度は高くなるが、導体の断面積は大きくなり、電流密度は低下して、コイル自体の寸法は大きくなる。一方、導体の熱放出能力が向上すれば、安定化母材の必要量は減少し、コイルはコンパクトになって、運転に対する負荷が軽減されるなど好ましい点が多い。導体の熱放出能力の向上のための方法は多数あるが、導体の冷凍表面に加工を施し、冷凍性能の向上を図るのも有効な方法の1つであり、高電流密度導体開発のために、この方面の研究が必要とされる。

先の研究<sup>(1)</sup>では、導体長手方向に縦溝を設けることによる、銅表面から液体ヘリウムへの定常沸騰熱伝達特性の変化を測定し、その有効性について報告したが、本研究では、縦溝に限らず、種々の加工を施した表面構造をもつ模擬導体を作製し、そのヘリウム沸騰定常熱伝達特性を測定して、それらの有効性について比較・検討を行った。

## 2. 模 擬 導 体

本研究用に浸漬冷凍型の模擬導体を数種類作製した。本模擬導体は熱伝達特性測定用として銅のみにて作製されたものであり、超電導線は含まれておらず、代りに、熱供給用のヒータと温度測定子を埋め込むための孔が設けられたものである。

### 2.1 寸 法

トカマク型炉のトロイダル磁界用の超電導導体としては、10 kA以上の大電流導体が必要とされる。例えば、超電導トロイダル磁界コイルの試験を目的として現在進められているLarge Coil Task<sup>(2)</sup>では、仕様で、通電電流値は10 kA～18 kAと決められている。よって、本研究では、10 kA級の導体を想定して、断面寸法10 mm×26 mmの模擬導体を作製し、26 mm幅の2面に、冷凍性能の向上を目差した加工を施した。また、導体長手方向の寸法は、ホルダーに入れるため、50 mmとして統一した。Fig. 1に今回作製した模擬導体の概略形状を示す。

## 2.2 表面構造

冷凍性能を向上させる表面構造は数多く考えられる。例えば、冷凍表面に起伏を設ければ冷媒への伝達表面積が増加し、全体として良く冷却される。また、冷凍表面を粗くすれば気泡の発生が容易となり熱伝達率が向上することは既に一部で知られている<sup>(3)</sup>。さらに、冷凍表面に熱伝導性の悪い膜をつければ最小膜沸騰熱流束が増加することもまた一部で知られている<sup>(4)</sup>。これら一部で知られている現象を自分達で把握し、なおかつこれを大型超電導体に実際に応用することを常に念頭において作製した以下に述べる20個の模擬導体について実験研究<sup>(5)</sup>を行なった。

A 表面に機械加工を施さず、平らな面をもった導体。

A-1 表面に全く手を加えない導体。この導体より得られた結果が、他の導体における結果の評価の基準となる。

A-2 表面に10  $\mu\text{m}$ の熱伝導性の悪いホルマル被膜をつけた導体。A-3, A-4との3つの結果より膜の厚さの効果について調べる目的で作製した。

A-3 表面に25  $\mu\text{m}$ のホルマル被膜をつけた導体。

A-4 表面に40  $\mu\text{m}$ のホルマル被膜をつけた導体。

A-5 表面を酸化処理し、表面に酸化被膜を発生させた導体。

B 表面に、幅1 mm, 深さ1.5 mm, ピッチ2 mmで導体長手方向に縦溝を11本設けた導体。溝を設けることにより、本導体の場合、冷凍表面積が約2.3倍となっている。

B-1 表面に他の処理を施さない導体。

B-2 表面をA-5と同じく酸化処理した導体。

C 表面をブラスティング処理し、冷凍表面を粗くした導体。

C-1 表面の平均粗さが約45  $\mu\text{m}$ の導体。

C-2 表面の平均粗さが約60  $\mu\text{m}$ の導体。

D Fig. 2に示す海綿状の金属多孔体の約1.5 mm厚の膜を表面に半田付けした導体。

E Fig. 3に示すように、表面に上底1.5 mm, 下底0.5 mm, 深さ1.5 mmの台形溝を導体長手方向に対して45°方向にピッチ2 mmで格子状に設けた導体。先の研究で性能の良かった台形溝を、先の研究のように1方向だけでなく2方向から設けたものである。

F 表面に深さ1.8 mm, 頂角30°の3角溝を導体長手方向に対して45°方向に格子状に設け、4角錐の針を並べた形にした導体。Fig. 4にその表面状態を示す。

G Fig. 5に示すように、表面に鋸歯状の突起を設けた導体。なお、Fig. 5において、導体長手方向は左下↔右上の方向である。

G-1 突起の高さが0.5 mmの導体。

G-2 突起の高さが0.8 mmの導体。

G-3 突起の高さが1.1 mmの導体。

G-4 突起の高さが1.8 mmの導体。

H Gの表面の突起の先端を横に寝かせて、表面からはFig. 6のように規則的に細孔が並んでいるように見え、表皮の下にはトンネルが走っている形状の表面構造をもった導体。

- H-1 細孔の平均開孔径が0.10 mmの導体。
- H-2 細孔の平均開孔径が0.12 mmの導体。
- H-3 細孔の平均開孔径が0.20 mmの導体。
- H-4 細孔の平均開孔径が0.22 mmの導体。

### 3. 実 験

#### 3.1 実験装置

Fig. 7 に本研究で使用した実験装置を示す。模擬導体は、加工を施した26 mm×50 mmの表裏2面以外はベークライトにて熱絶縁される。模擬導体の冷凍表面は常に鉛直面になるように装置は作られているが、冷凍表面の加工の方法により、熱伝達特性に異方性の生じることを考慮して、Fig. 2の中に示したように模擬導体が回転できるようになっている。模擬導体の回転を、装置全体を液体ヘリウム中から取り出し、常温に戻して回転させた後再冷凍するような操作を行なった場合、時間がかかるばかりでなく、模擬導体を一旦大気に触れさせることによって表面状態が微妙に変化し、誤差範囲の拡大を招く結果となる。よって、本装置では、模擬導体の回転を、模擬導体が液体ヘリウムに浸ったままの状態を外から遠隔操作可能なように製作した。

#### 3.2 測定系

今回の測定実験で使用した測定系をFig. 8に示す。模擬導体中に埋め込んだ素子は、模擬導体を加熱するためのヒータと、模擬導体の温度を測定するためのゲルマニウム温度測定素子及び熱電対である。

ヒータはマンガン線で作成したものであり、最大熱発生量は約60 Wである。

ゲルマニウム温度測定素子はScientific Instrument社製モデルN1Dであり、1.5 Kから20 Kまで校正済のもので、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。

熱電対は金+0.07%鉄対クロメルであり、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。

#### 3.3 実験方法

実験は、模擬導体を装着した装置をクライオスタットに挿入し、内部を十分ヘリウム・ガスにて置換した後、液体ヘリウムを貯めて行なった。ここで使用したクライオスタットは内径110 mm、深さ1000 mmのガラス製のものである。

試料への熱量の導入は、模擬導体の温度が十分定常であることを確認しながら行なった。結果として、平均熱量導入速度は約1.5 W/minで実験は行なわれた。

- H-1 細孔の平均開孔径が0.10 mmの導体。
- H-2 細孔の平均開孔径が0.12 mmの導体。
- H-3 細孔の平均開孔径が0.20 mmの導体。
- H-4 細孔の平均開孔径が0.22 mmの導体。

### 3. 実 験

#### 3.1 実験装置

Fig. 7に本研究で使用した実験装置を示す。模擬導体は、加工を施した26 mm×50 mmの表裏2面以外はベークライトにて熱絶縁される。模擬導体の冷凍表面は常に鉛直面になるように装置は作られているが、冷凍表面の加工の方法により、熱伝達特性に異方性の生じることを考慮して、Fig. 2の中に示したように模擬導体が回転できるようになっている。模擬導体の回転を、装置全体を液体ヘリウム中から取り出し、常温に戻して回転させた後再冷凍するような操作を行なった場合、時間がかかるばかりでなく、模擬導体を一旦大気に触れさせることによって表面状態が微妙に変化し、誤差範囲の拡大を招く結果となる。よって、本装置では、模擬導体の回転を、模擬導体が液体ヘリウムに浸ったままの状態を外から遠隔操作可能なように製作した。

#### 3.2 測定系

今回の測定実験で使用した測定系をFig. 8に示す。模擬導体中に埋め込んだ素子は、模擬導体を加熱するためのヒータと、模擬導体の温度を測定するためのゲルマニウム温度測定素子及び熱電対である。

ヒータはマンガン線で作成したものであり、最大熱発生量は約60 Wである。

ゲルマニウム温度測定素子はScientific Instrument社製モデルN1Dであり、1.5 Kから20 Kまで校正済のもので、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。

熱電対は金+0.07%鉄対クロメルであり、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。

#### 3.3 実験方法

実験は、模擬導体を装着した装置をクライオスタットに挿入し、内部を十分ヘリウム・ガスにて置換した後、液体ヘリウムを貯めて行なった。ここで使用したクライオスタットは内径110 mm、深さ1000 mmのガラス製のものである。

試料への熱量の導入は、模擬導体の温度が十分定常であることを確認しながら行なった。結果として、平均熱量導入速度は約1.5 W/minで実験は行なわれた。

模擬導体の温度は、専らゲルマニウム温度測定素子にて測定し、熱電対は補助として使用した。

Fig. 1 に示した模擬導体をエッジワイズ巻きにしてトロイダル・コイルを製作した場合、導体冷凍面は常に鉛直面となつてはいるが、導体の長手方向は $360^\circ$ 回転する。よつて、冷凍表面の熱伝達特性に方向依存性がある場合、導体長手方向の角度を変えて何点か測定する必要がある。ここでは、最低限の測定として、方向依存性のあると予想される模擬導体についてのみ、導体の長手方向が水平の場合と鉛直の場合についての2点の測定を行なつた。方向依存性のない模擬導体については、導体の長手方向が水平の場合についてのみ測定した。なお、導体長手方向の方向変換は、模擬導体を液体ヘリウムに浸した状態のまま、外からの遠隔操作によつて行なつた。

### 3.4 実験結果

Fig. 9 ~ Fig. 25(b) に各模擬導体について実験して得られたヘリウム沸騰定常熱伝達特性を示す。グラフの縦軸は、ヒータによつて模擬導体内に供給された熱量 (W) を模擬導体の冷凍表面の投影面積 (cm<sup>2</sup>) で割つた熱流束、横軸は、模擬導体の温度と冷媒である液体ヘリウム温度 (4.2 K) との差である。ここで投影面積とは、表面加工によつて増加した冷凍面積の増加分を考慮しない面積であり、本研究の場合は模擬導体の寸法を統一しているのて全模擬導体に対して冷凍面の投影面積は 2.6 cm<sup>2</sup> (2.6 cm 幅 × 5 cm 長 × 2 面) である。

以下に各模擬導体についての結果を述べる。

#### A-1 (Fig. 9)

無加工の銅表面に対して与えられている代表的熱伝達特性<sup>(4)</sup>とほぼ一致する測定結果である。

#### A-2 (Fig. 10), A-3 (Fig. 11), A-4 (Fig. 12)

表面につけたホルマルの皮膜が厚くなるに従つて最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束ともに増加している。この上昇の割合を、縦軸に熱流束、横軸にホルマル被膜の厚さをとつてグラフにしたものが Fig. 26 である。一方、核沸騰領域における模擬導体の温度の上昇はホルマル被膜の厚さの増加とともに著しく増加し、結果として、この領域における熱伝達率はホルマル被膜の厚さの増加とともに低下する。Fig. 27 にはバーンアウト点における熱伝達率とホルマル被膜の厚さの関係を示した。

#### A-5 (Fig. 13)

A-1 と比較して、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束ともにやや増加し、また、核沸騰領域における熱伝達率は低下している。

#### B-1 (Fig. 14(a), 14(b))

水平方位、垂直方位いずれの場合においても、A-1 と比較して、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束ともに増加しており、また、核沸騰、膜沸騰のどちらの領域においても熱伝達率は向上している。水平方位と垂直方位の比較では、あらゆる点で垂直方位の冷凍性能が勝つている。

#### B-2 (Fig. 15(a), 15(b))

B-1と比較して、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束ともに非常に増加している。しかし、核沸騰領域における熱伝達率はやや低下している。

C-1 (Fig. 16), C-2 (Fig. 17)

C-1, C-2はほとんど同一の熱伝達特性を示し、A-1と比較して、核沸騰領域における熱伝達率は良くなっているが、最大核沸騰熱流束は減少している。また、最小膜沸騰熱流束はA-1とほぼ同じである。

D (Fig. 18)

他のすべての熱伝達特性と異なり、核沸騰と膜沸騰におけるヒステリシスの存在しない熱伝達特性を示している。

E (Fig. 19), F (Fig. 20)

最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束、熱伝達率のすべてに亘ってA-1より、またFはEより勝っている。

G-1 (Fig. 21(a), 21(b)), G-2 (Fig. 22(a), 22(b)), G-3 (Fig. 23(a), 23(b)), G-4 (Fig. 24(a), 24(b))

Gの型の模擬導体の場合、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束のいずれも水平方位の方が垂直方位よりも勝っている。また、フィンの高さを高くするに従って、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束ともにほぼ単純に増加の傾向を示している (Fig. 28)。核沸騰領域の熱伝達率は、いずれの場合もA-1よりも勝っており、また、膜沸騰領域では、フィンの高さの増加とともに熱伝達率は高くなっている。

H-1, H-2, H-3, H-4 (Fig. 25(a), 25(b))

Hの型の模擬導体では、その平均開孔径による差は見られなかった。方位による冷凍性能の差も、水平方位がやや良い程度で、A-1との差も小さい。

Fig. 29には、以上測定した各タイプの模擬導体中、特徴的なものの最大核沸騰熱流束、及び、最小膜沸騰熱流束をまとめて、無処理平面模擬導体の結果と比較する形で示した。

#### 4. 結 論

核融合炉用超電導コイルで必要とされる安定度の高い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、種々の冷凍表面を持った模擬導体のヘリウム沸騰定常熱伝達特性の測定実験について、その結論を以下に述べる。

(1) 冷凍表面にホルマルの被膜をつけることは、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束を増加させる点では有効である。しかし、熱流束の増加の割合に比べて温度の上昇は急激であり、使用する超電導線の種類によって、その臨界温度との関係で、ホルマル被膜の厚みを増加することは、かえって導体の安定性に有害となる<sup>(6)</sup>。よって、ホルマル被膜を導体冷凍面につける方法は、そのみでは有効性は小さい。導体冷凍面を酸化処理し、酸化被膜を形成させることについても同じことがいえる。

(2) 導体冷凍面に縦溝を設けることは、それによって拡大された冷凍表面積分の熱流束の増大は望めないが、有効な方法の1つである。さらにその表面に酸化被膜をつけること

B-1と比較して、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束ともに非常に増加している。しかし、核沸騰領域における熱伝達率はやや低下している。

C-1 (Fig. 16), C-2 (Fig. 17)

C-1, C-2はほとんど同一の熱伝達特性を示し、A-1と比較して、核沸騰領域における熱伝達率は良くなっているが、最大核沸騰熱流束は減少している。また、最小膜沸騰熱流束はA-1とほぼ同じである。

D (Fig. 18)

他のすべての熱伝達特性と異なり、核沸騰と膜沸騰におけるヒステリシスの存在しない熱伝達特性を示している。

E (Fig. 19), F (Fig. 20)

最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束、熱伝達率のすべてに亘ってA-1より、またFはEより勝っている。

G-1 (Fig. 21(a), 21(b)), G-2 (Fig. 22(a), 22(b)), G-3 (Fig. 23(a), 23(b)), G-4 (Fig. 24(a), 24(b))

Gの型の模擬導体の場合、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束のいずれも水平方位の方が垂直方位よりも勝っている。また、フィンの高さを高くするに従って、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束ともにほぼ単純に増加の傾向を示している (Fig. 28)。核沸騰領域の熱伝達率は、いずれの場合もA-1よりも勝っており、また、膜沸騰領域では、フィンの高さの増加とともに熱伝達率は高くなっている。

H-1, H-2, H-3, H-4 (Fig. 25(a), 25(b))

Hの型の模擬導体では、その平均開孔径による差は見られなかった。方位による冷凍性能の差も、水平方位がやや良い程度で、A-1との差も小さい。

Fig. 29には、以上測定した各タイプの模擬導体中、特徴的なものの最大核沸騰熱流束、及び、最小膜沸騰熱流束をまとめて、無処理平面模擬導体の結果と比較する形で示した。

#### 4. 結 論

核融合炉用超電導コイルで必要とされる安定度の高い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、種々の冷凍表面を持った模擬導体のヘリウム沸騰定常熱伝達特性の測定実験について、その結論を以下に述べる。

(1) 冷凍表面にホルマルの被膜をつけることは、最大核沸騰熱流束、最小膜沸騰熱流束を増加させる点では有効である。しかし、熱流束の増加の割合に比べて温度の上昇は急激であり、使用する超電導線の種類によって、その臨界温度との関係で、ホルマル被膜の厚みを増加することは、かえって導体の安定性に有害となる<sup>(6)</sup>。よって、ホルマル被膜を導体冷凍面につける方法は、そのみでは有効性は小さい。導体冷凍面を酸化処理し、酸化被膜を形成させることについても同じことがいえる。

(2) 導体冷凍面に縦溝を設けることは、それによって拡大された冷凍表面積分の熱流束の増大は望めないが、有効な方法の1つである。さらにその表面に酸化被膜をつけること

により冷凍性能は大幅に向上する。特に、最小膜沸騰熱流束の増加は著しく、酸化被膜をつけない場合の3倍以上の値となっており、この冷凍面の採用によって2倍近い導体の高電流密度化が可能と考えられる。

- (3) プラスティング処理や、模擬導体Hのように比較的起伏の小さい冷凍表面構造では、冷凍性能は向上していない。一方、起伏の大きい、E、F、Gのタイプの模擬導体では、良い冷凍性能が示されており、また、フィンの高さを変えた模擬導体Gの測定結果からも、導体冷凍面は粗雑化の程度の大きいものほど良い冷凍性能が期待されうるものと考えられる。
- (4) 模擬導体Dの示した熱伝達特性は核沸騰⇔膜沸騰におけるヒステリシスが存在しないという特異なものである。しかし、冷媒との温度差0.3 K、熱流束0.44 W/cm<sup>2</sup>を境としてそれ以上では熱伝達率が低下しており、臨界温度の低い超電導線には有効ではない。一方、臨界温度の高い超電導線に対しては非常に有効な冷凍面構造と考えられる。

以上、今回測定した模擬導体の冷却表面構造の有効性について述べた。Fig. 29を見れば、B-2（溝加工+酸化処理）、F（フィン加工）、G-4（フィン加工）の模擬導体の熱流束値、とりわけ最小膜沸騰熱流束値が他と比較して著しく高く、これらの冷凍面構造が非常に有効であることは明白である。特に、酸化処理によって大幅な冷凍性能の向上が得られることが明らかになった事は、超電導導体の開発上大きな前進である。この酸化処理と表面機械加工の組み合わせを工夫することにより、さらに良い性能を持ったものも期待される。また、今回の実験は冷却チャンネルのないオープンな状態で行なったものであるが、実際にコイルに応用するためには、狭い冷却チャンネルが熱流束値にどのような影響を及ぼすか調べる必要があり、そのための研究が進行中である。

## 謝 辞

本研究は、核融合炉用超電導コイルの開発を熱心に指導されている森核融合研究開発推進センタ長、並びに、小幡核融合研究部長のもとに行なわれたものである。ここに、森センタ長、小幡部長に深く感謝致します。また、安河内特別研究員には日頃、御指導賜り感謝致します。模擬導体の一部は民間企業より提供頂いたものである。ここに、模擬導体の提供をしていただいた民間企業に感謝致します。実験に当たっては、辻研究員、吉田研究員、及び、岡外来研究員の助力を得ました。ここに各研究員に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 西, 安藤, 吉田, 島本: JAERI-M 8134 (1979)
- (2) ORNL-Technical Specification TS-14700
- (3) O'Neill, P. S., Gottzman, C. F., and Terbot, J. W.; Adv. Cryo. Eng., 17, 420 (1972)

により冷凍性能は大幅に向上する。特に、最小膜沸騰熱流束の増加は著しく、酸化被膜をつけない場合の3倍以上の値となっており、この冷凍面の採用によって2倍近い導体の高電流密度化が可能と考えられる。

- (3) プラスティング処理や、模擬導体Hのように比較的起伏の小さい冷凍表面構造では、冷凍性能は向上していない。一方、起伏の大きい、E、F、Gのタイプの模擬導体では、良い冷凍性能が示されており、また、フィンの高さを変えた模擬導体Gの測定結果からも、導体冷凍面は粗雑化の程度の大きいものほど良い冷凍性能が期待されうるものと考えられる。
- (4) 模擬導体Dの示した熱伝達特性は核沸騰⇔膜沸騰におけるヒステリシスが存在しないという特異なものである。しかし、冷媒との温度差0.3K、熱流束0.44W/cm<sup>2</sup>を境としてそれ以上では熱伝達率が低下しており、臨界温度の低い超電導線には有効ではない。一方、臨界温度の高い超電導線に対しては非常に有効な冷凍面構造と考えられる。

以上、今回測定した模擬導体の冷却表面構造の有効性について述べた。Fig. 29を見れば、B-2（溝加工+酸化処理）、F（フィン加工）、G-4（フィン加工）の模擬導体の熱流束値、とりわけ最小膜沸騰熱流束値が他と比較して著しく高く、これらの冷凍面構造が非常に有効であることは明白である。特に、酸化処理によって大幅な冷凍性能の向上が得られることが明らかになった事は、超電導導体の開発上大きな前進である。この酸化処理と表面機械加工の組み合わせを工夫することにより、さらに良い性能を持ったものも期待される。また、今回の実験は冷却チャンネルのないオープンな状態で行なったものであるが、実際にコイルに応用するためには、狭い冷却チャンネルが熱流束値にどのような影響を及ぼすか調べる必要があり、そのための研究が進行中である。

## 謝

## 辞

本研究は、核融合炉用超電導コイルの開発を熱心に指導されている森核融合研究開発推進センタ長、並びに、小幡核融合研究部長のもとに行なわれたものである。ここに、森センタ長、小幡部長に深く感謝致します。また、安河内特別研究員には日頃、御指導賜り感謝致します。模擬導体の一部は民間企業より提供頂いたものである。ここに、模擬導体の提供をしていただいた民間企業に感謝致します。実験に当たっては、辻研究員、吉田研究員、及び、岡外来研究員の助力を得ました。ここに各研究員に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 西, 安藤, 吉田, 島本: JAERI-M 8134 (1979)
- (2) ORNL-Technical Specification TS-14700
- (3) O'Neill, P. S., Gottzman, C. F., and Terbot, J. W.; Adv. Cryo. Eng., 17, 420 (1972)

により冷凍性能は大幅に向上する。特に、最小膜沸騰熱流束の増加は著しく、酸化被膜をつけない場合の3倍以上の値となっており、この冷凍面の採用によって2倍近い導体の高電流密度化が可能と考えられる。

- (3) プラスティング処理や、模擬導体Hのように比較的起伏の小さい冷凍表面構造では、冷凍性能は向上していない。一方、起伏の大きい、E、F、Gのタイプの模擬導体では、良い冷凍性能が示されており、また、フィンの高さを変えた模擬導体Gの測定結果からも、導体冷凍面は粗雑化の程度の大きいものほど良い冷凍性能が期待されうるものと考えられる。
- (4) 模擬導体Dの示した熱伝達特性は核沸騰⇔膜沸騰におけるヒステリシスが存在しないという特異なものである。しかし、冷媒との温度差0.3 K、熱流束0.44 W/cm<sup>2</sup>を境としてそれ以上では熱伝達率が低下しており、臨界温度の低い超電導線には有効ではない。一方、臨界温度の高い超電導線に対しては非常に有効な冷凍面構造と考えられる。

以上、今回測定した模擬導体の冷却表面構造の有効性について述べた。Fig. 29を見れば、B-2（溝加工+酸化処理）、F（フィン加工）、G-4（フィン加工）の模擬導体の熱流束値、とりわけ最小膜沸騰熱流束値が他と比較して著しく高く、これらの冷凍面構造が非常に有効であることは明白である。特に、酸化処理によって大幅な冷凍性能の向上が得られることが明らかになった事は、超電導導体の開発上大きな前進である。この酸化処理と表面機械加工の組み合わせを工夫することにより、さらに良い性能を持ったものも期待される。また、今回の実験は冷却チャンネルのないオープンな状態で行なったものであるが、実際にコイルに応用するためには、狭い冷却チャンネルが熱流束値にどのような影響を及ぼすか調べる必要があり、そのための研究が進行中である。

## 謝

## 辞

本研究は、核融合炉用超電導コイルの開発を熱心に指導されている森核融合研究開発推進センタ長、並びに、小幡核融合研究部長のもとに行なわれたものである。ここに、森センタ長、小幡部長に深く感謝致します。また、安河内特別研究員には日頃、御指導賜り感謝致します。模擬導体の一部は民間企業より提供頂いたものである。ここに、模擬導体の提供をしていただいた民間企業に感謝致します。実験に当たっては、辻研究員、吉田研究員、及び、岡外来研究員の助力を得ました。ここに各研究員に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 西, 安藤, 吉田, 島本: JAERI-M 8134 (1979)
- (2) ORNL-Technical Specification TS-14700
- (3) O'Neill, P. S., Gottzman, C. F., and Terbot, J. W.; Adv. Cryo. Eng., 17, 420 (1972)

- (4) Jackson, J., and Fruin, A. S. ;Proc. of 2nd Int. Conf. on Magnet Technology, Oxford (1967), 494
- (5) 西, 安藤 ;第22回低温工学研究発表会予稿集 (1979)
- (6) Maddock, B. J., James, G. B., and Norris, W. J. ;Cryogenics, 9, 261 (1969)

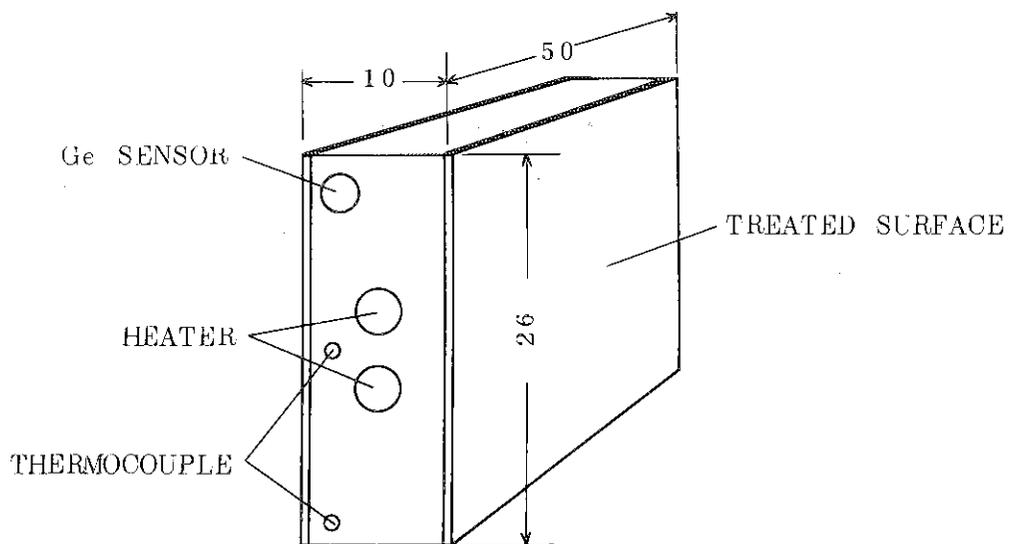


Fig. 1 MODEL CONDUCTOR

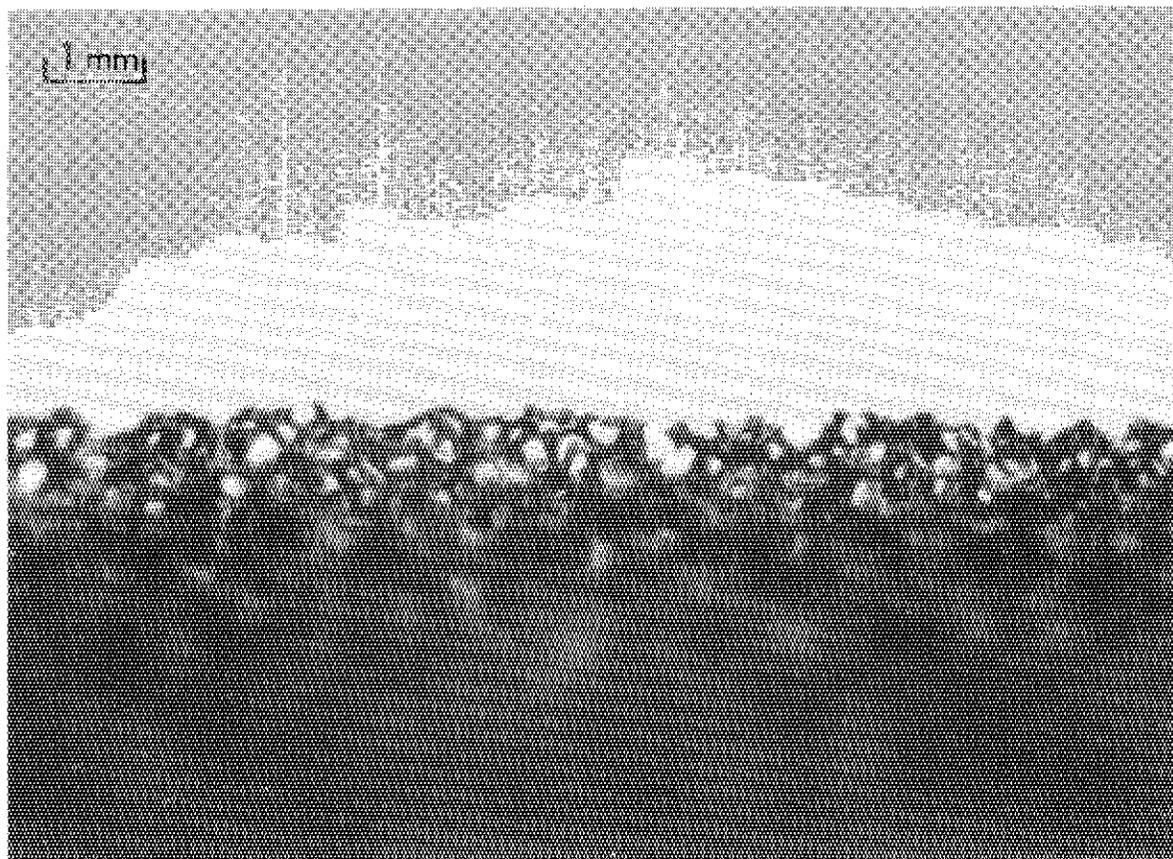


Fig. 2 SURFACE STRUCTURE OF MODEL CONDUCTOR D

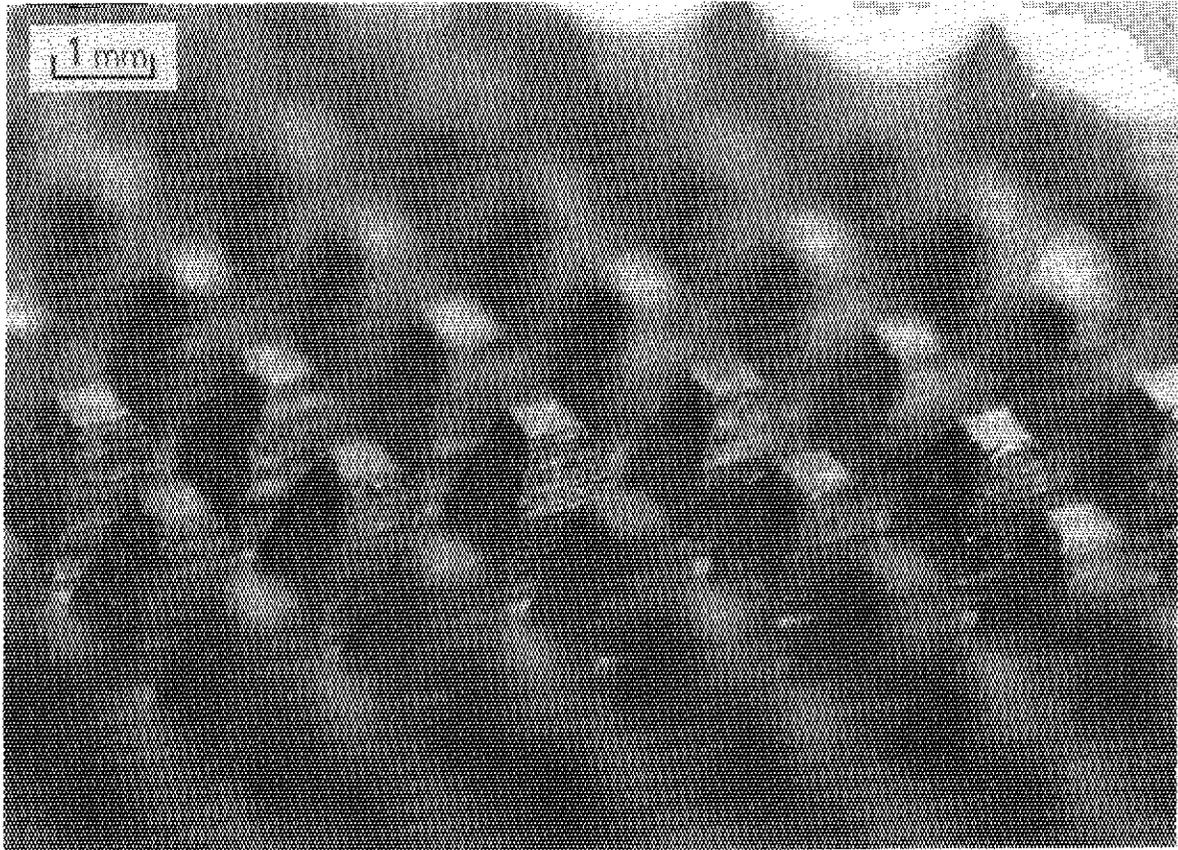


Fig. 3 SURFACE STRUCTURE OF MODEL CONDUCTOR E

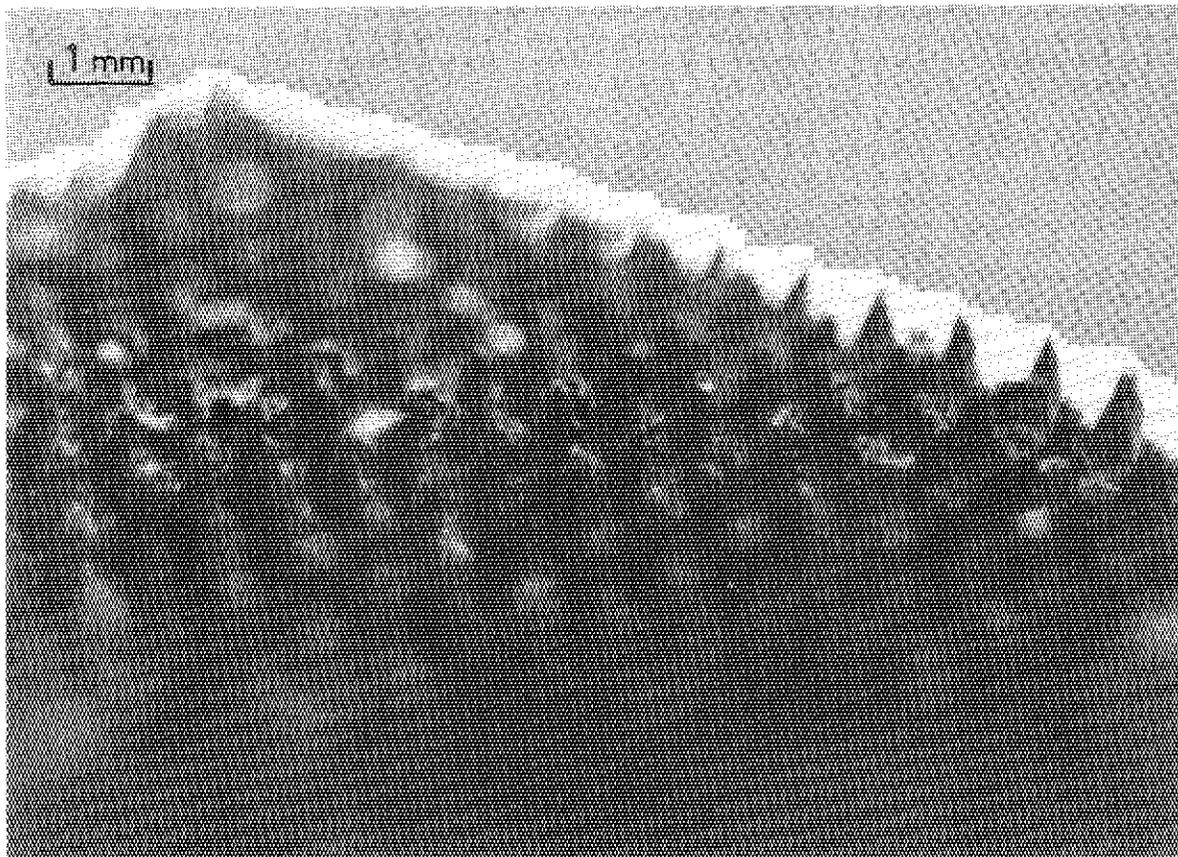


Fig. 4 SURFACE STRUCTURE OF MODEL CONDUCTOR F

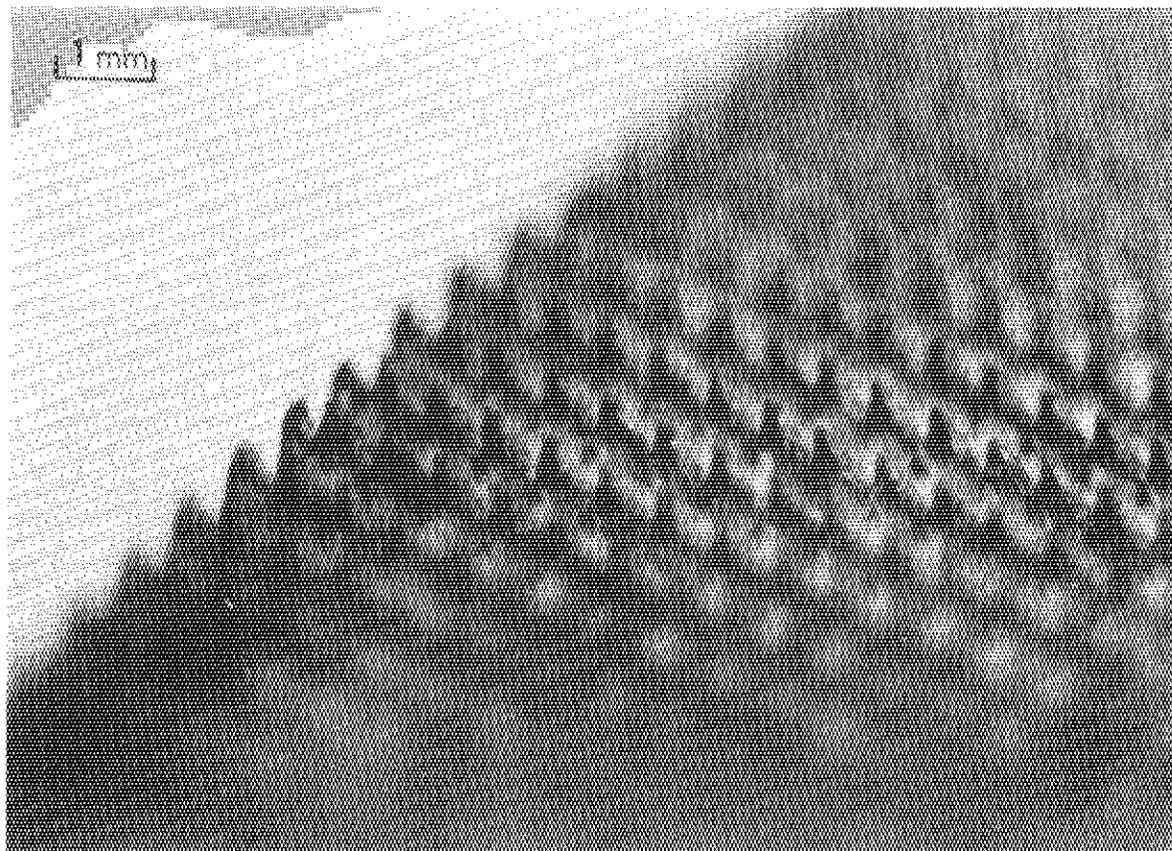


Fig. 5 SURFACE STRUCTURE OF MODEL CONDUCTOR G

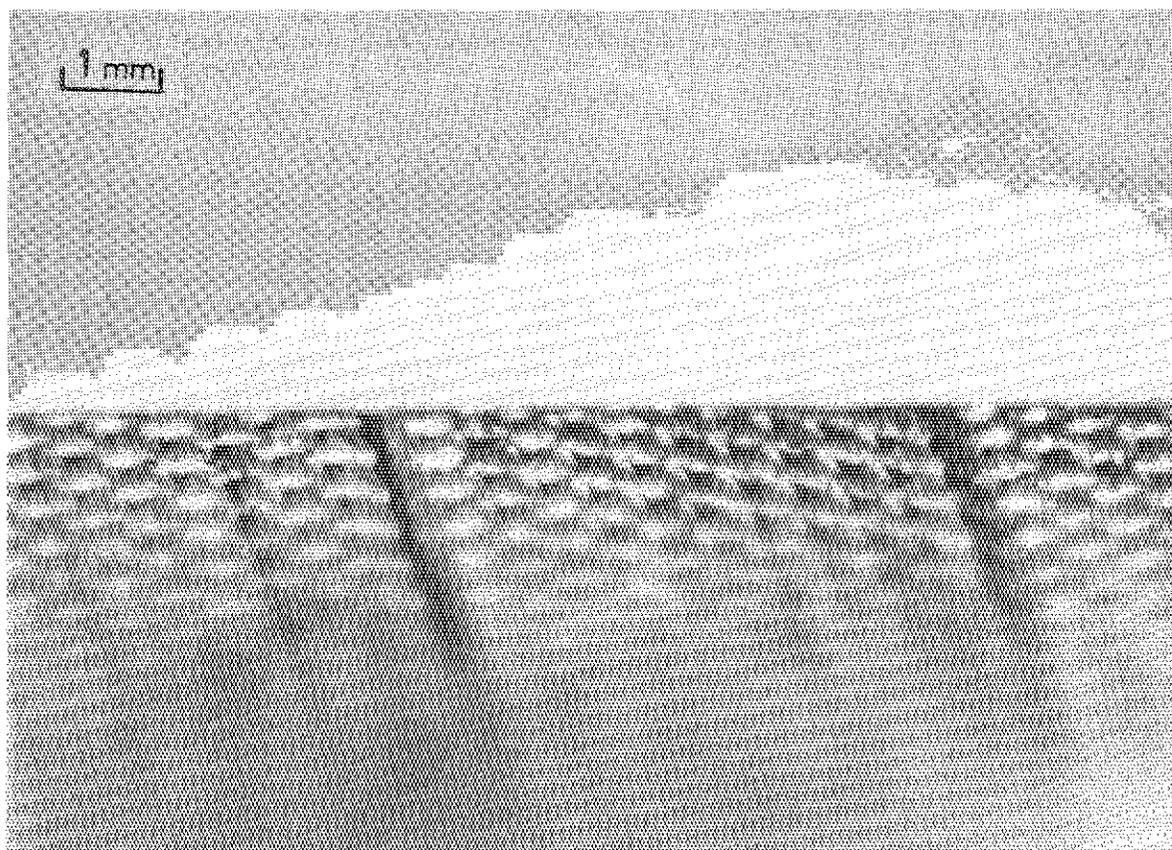


Fig. 6 SURFACE STRUCTURE OF MODEL CONDUCTOR H

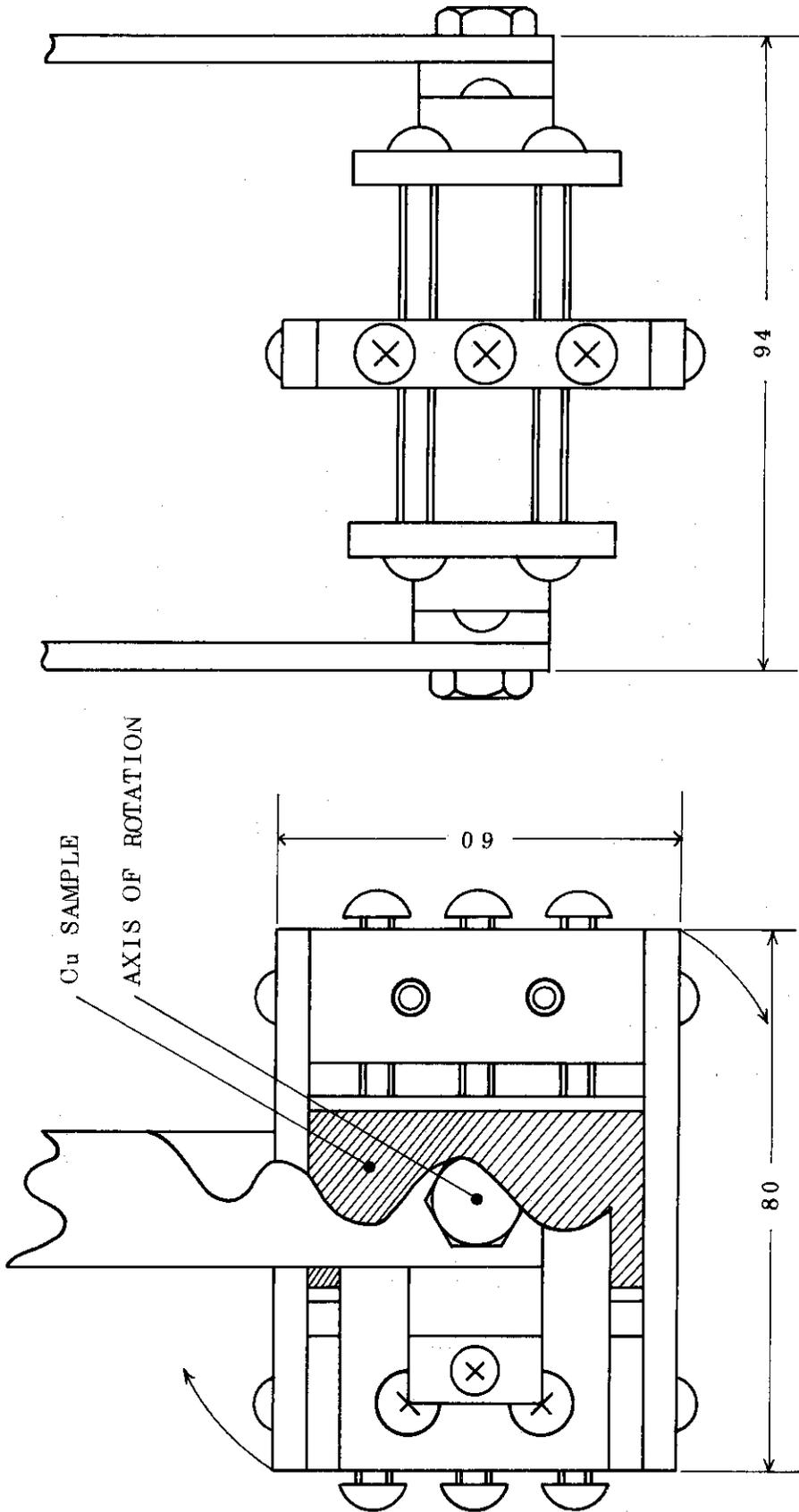


Fig. 7 EXPERIMENTAL APPARATUS

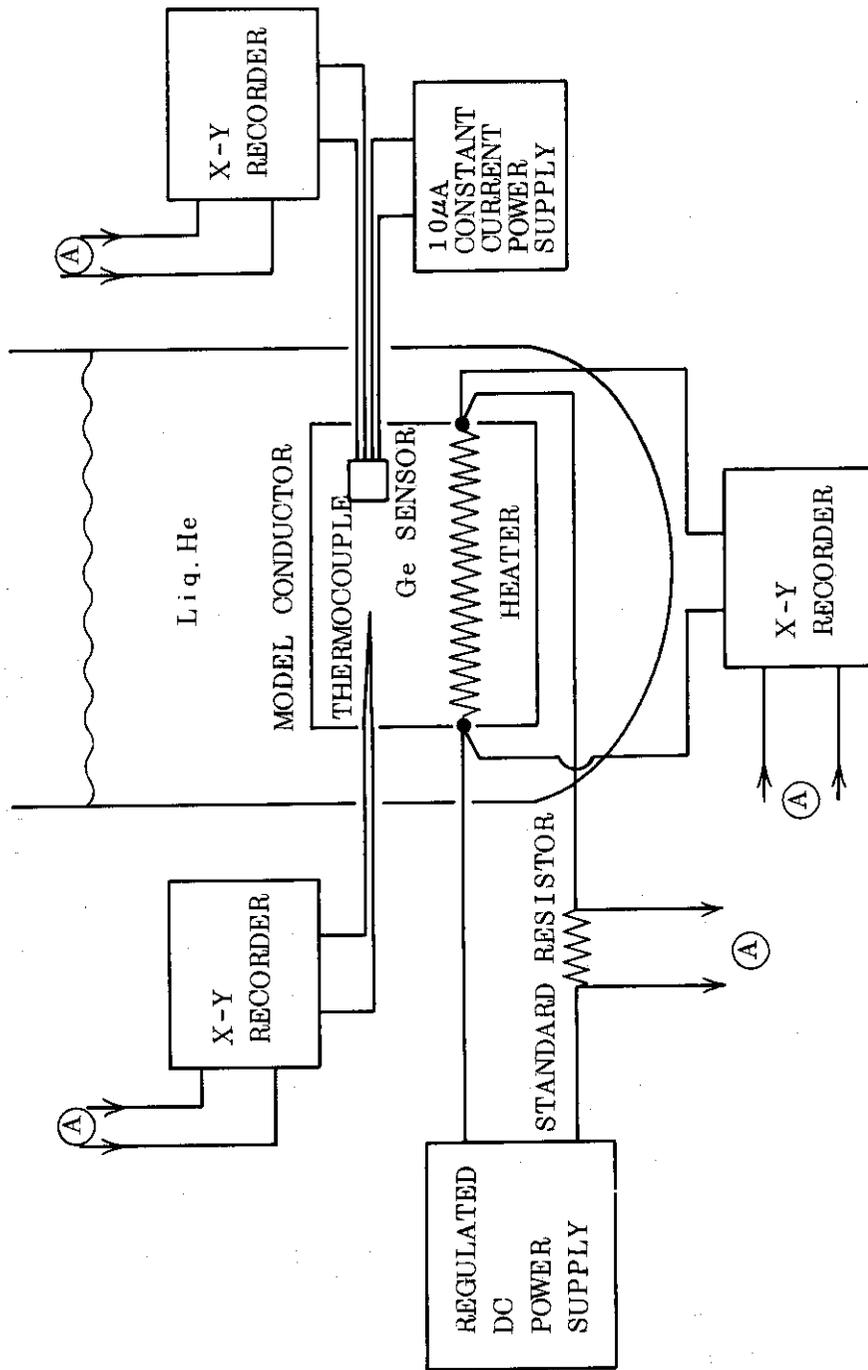


Fig. 8 MEASUREMENT CIRCUIT OF HEAT FLUX EXPERIMENT

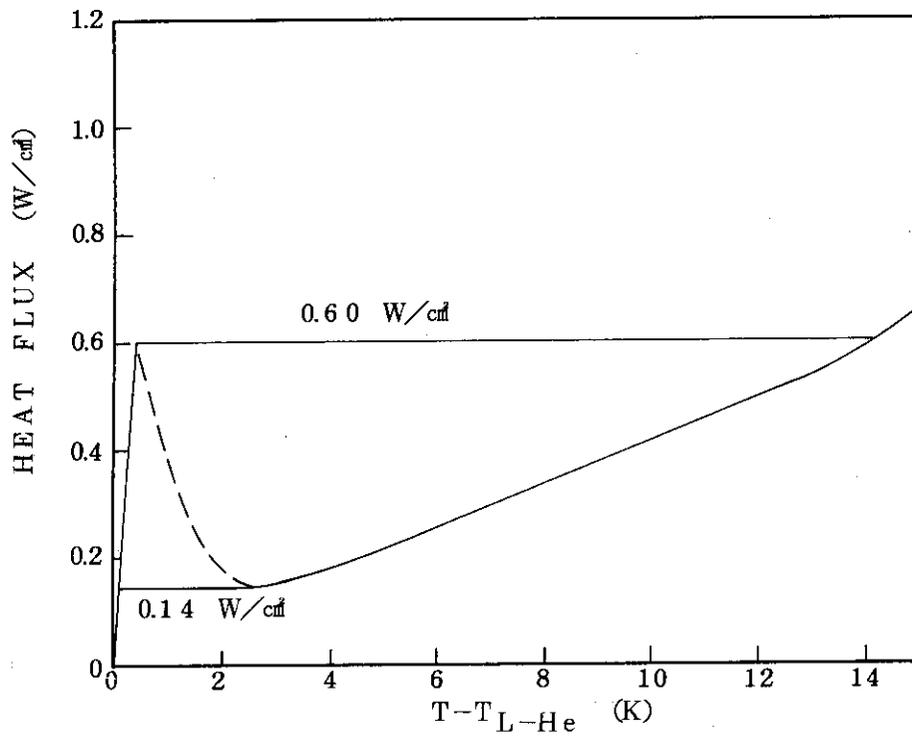


Fig. 9 MODEL CONDUCTOR A-1

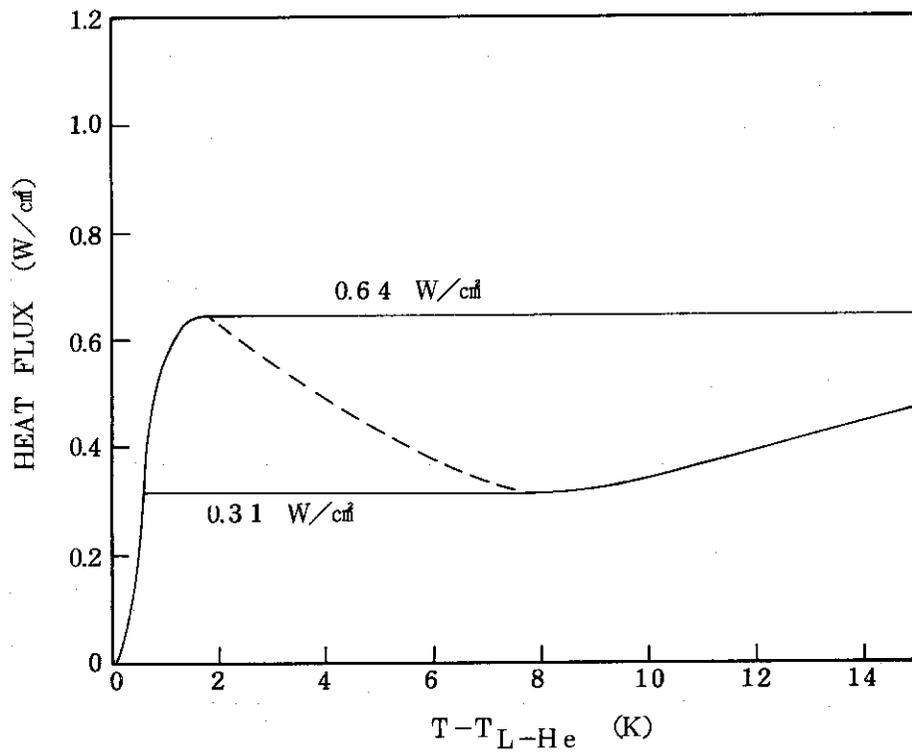


Fig. 10 MODEL CONDUCTOR A-2

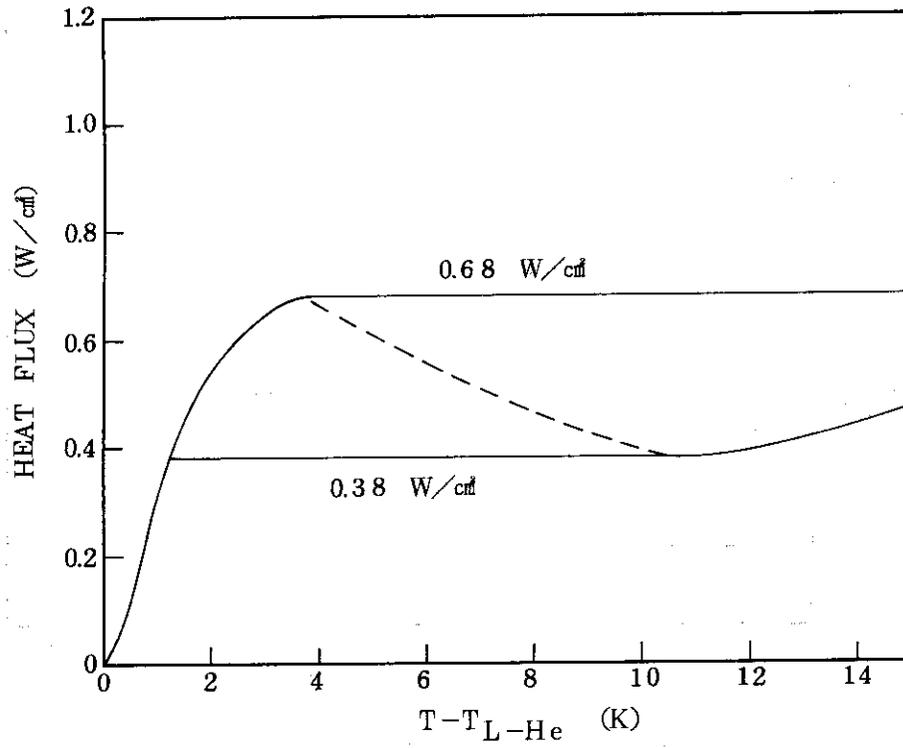


Fig. 11 MODEL CONDUCTOR A-3

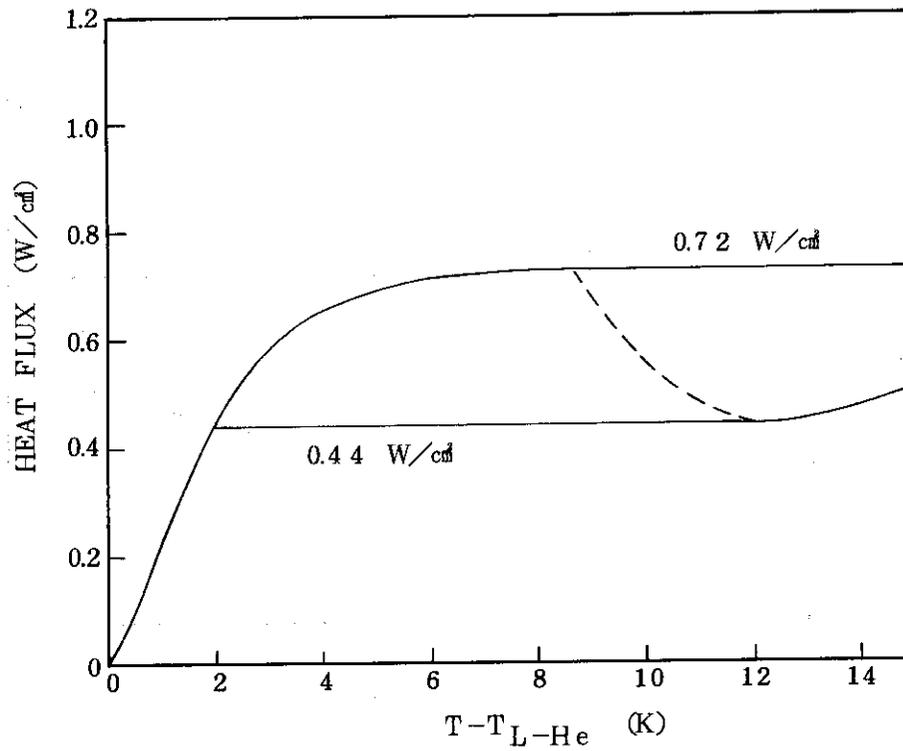


Fig. 12 MODEL CONDUCTOR A-4

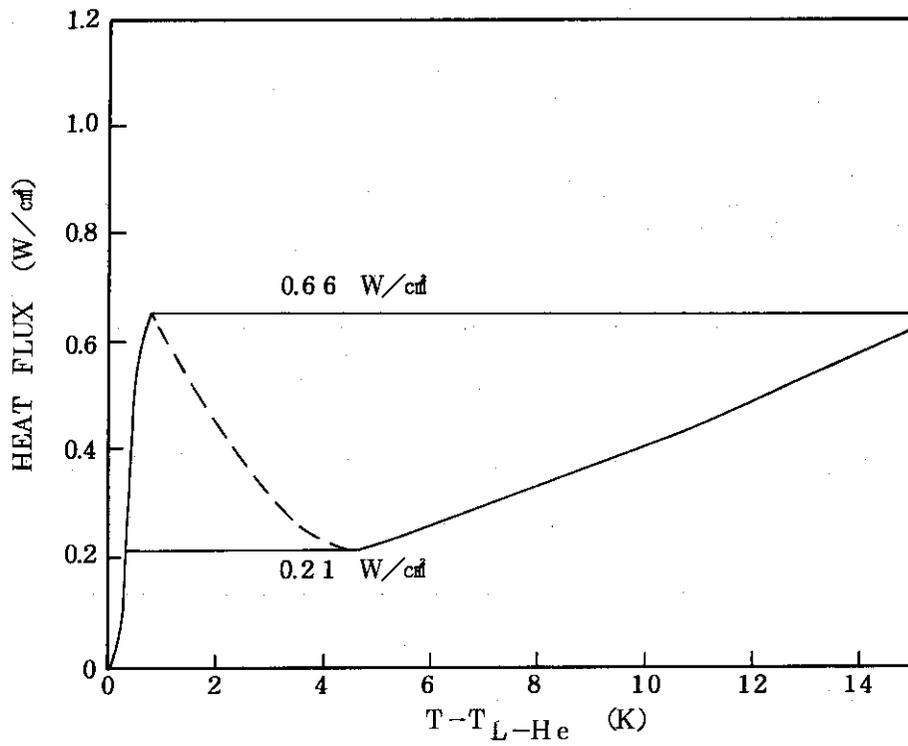


Fig. 13 MODEL CONDUCTOR A-5

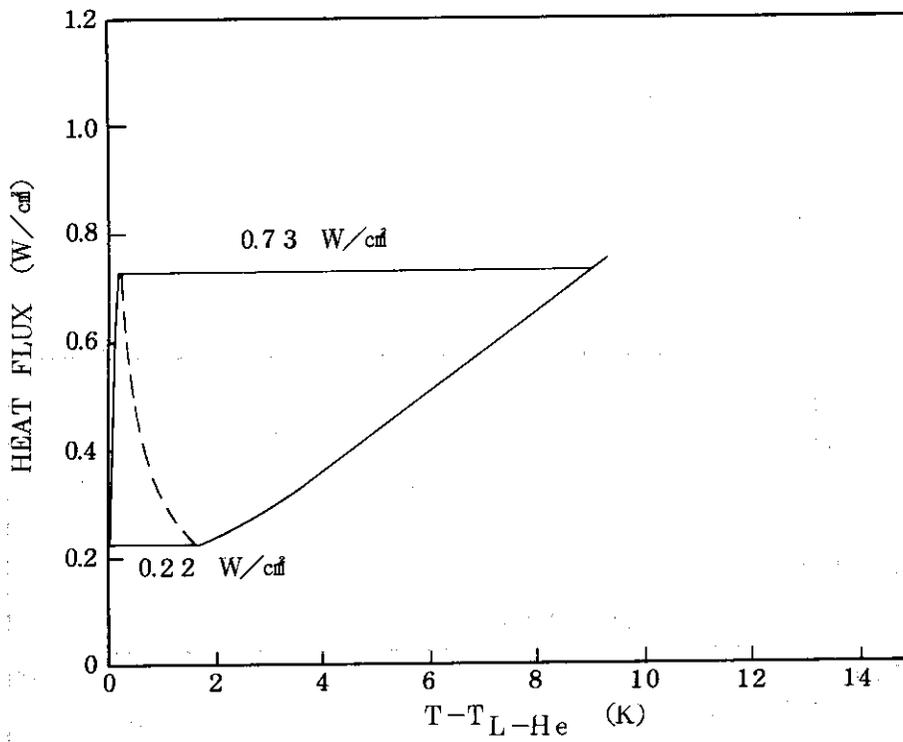


Fig. 14 (a) MODEL CONDUCTOR B-1 ( HORIZONTAL ORIENTATION )

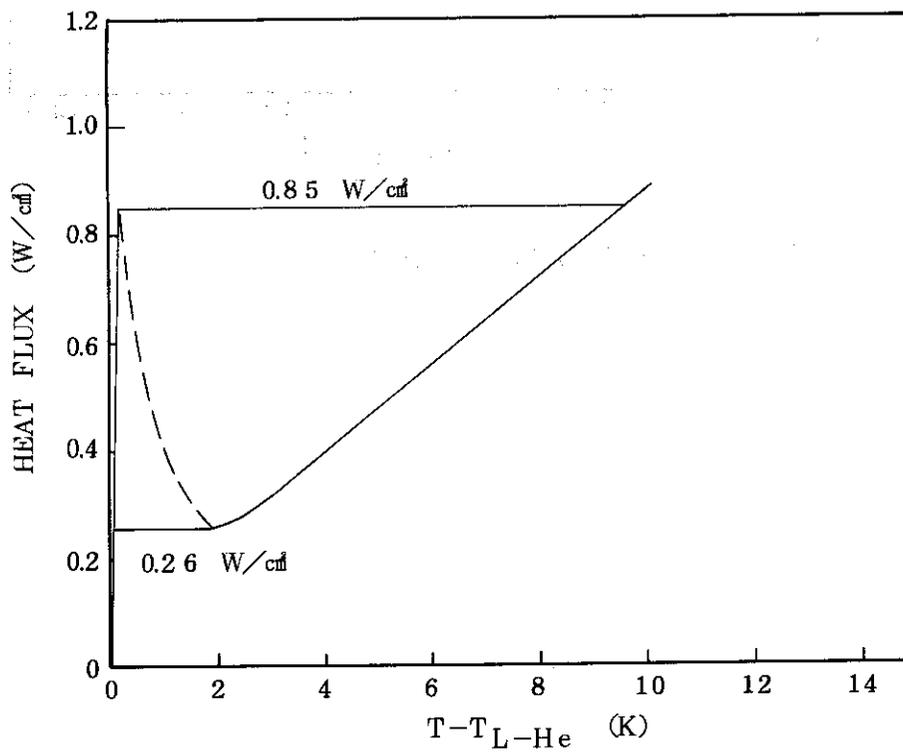


Fig. 14 (b) MODEL CONDUCTOR B-1 ( VERTICAL ORIENTATION )

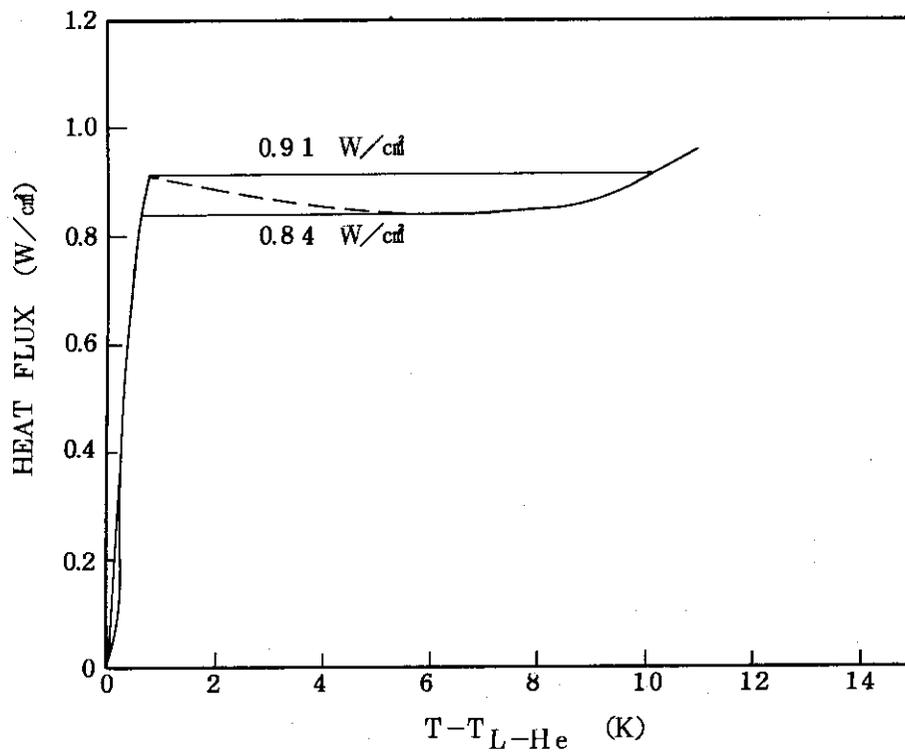


Fig. 15 (a) MODEL CONDUCTOR B-2 ( HORIZONTAL ORIENTATION )

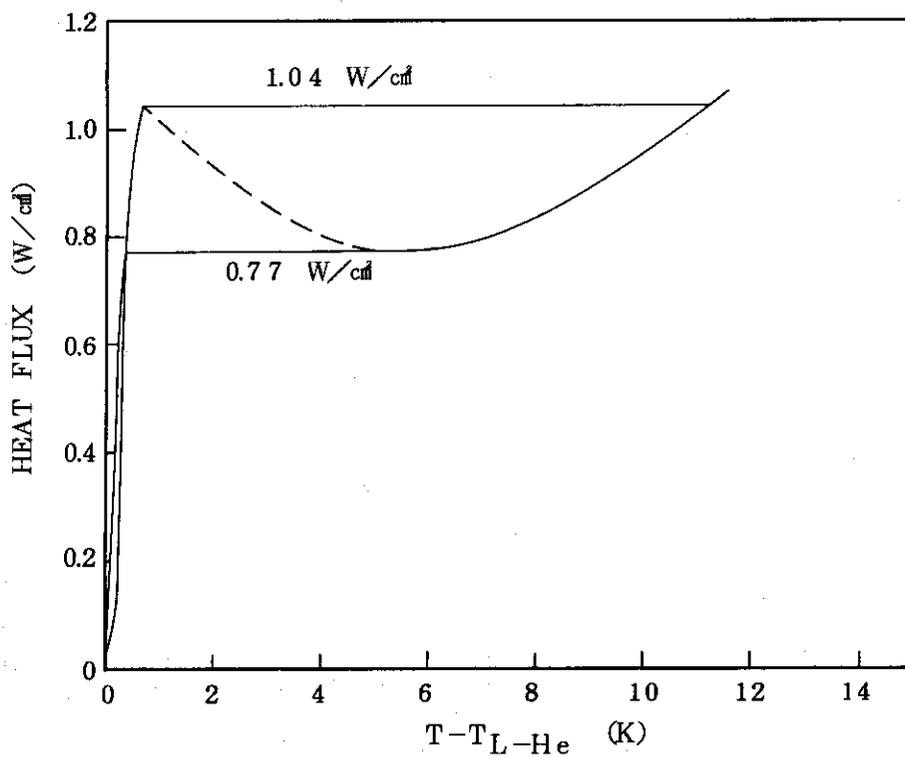


Fig. 15 (b) MODEL CONDUCTOR B-2 ( VERTICAL ORIENTATION )

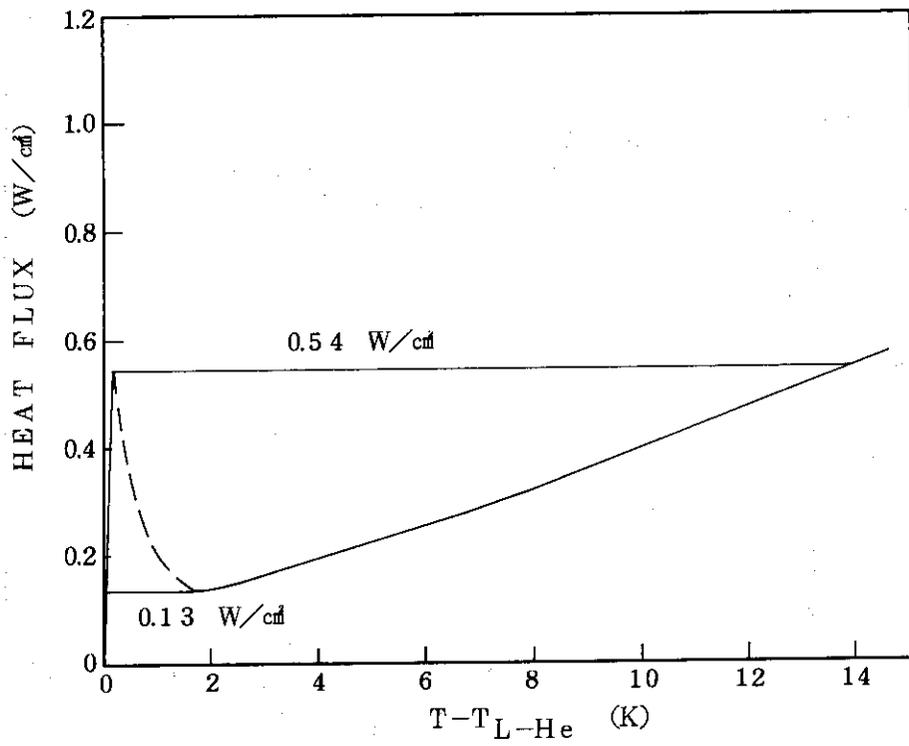


Fig. 16 MODEL CONDUCTOR C-1

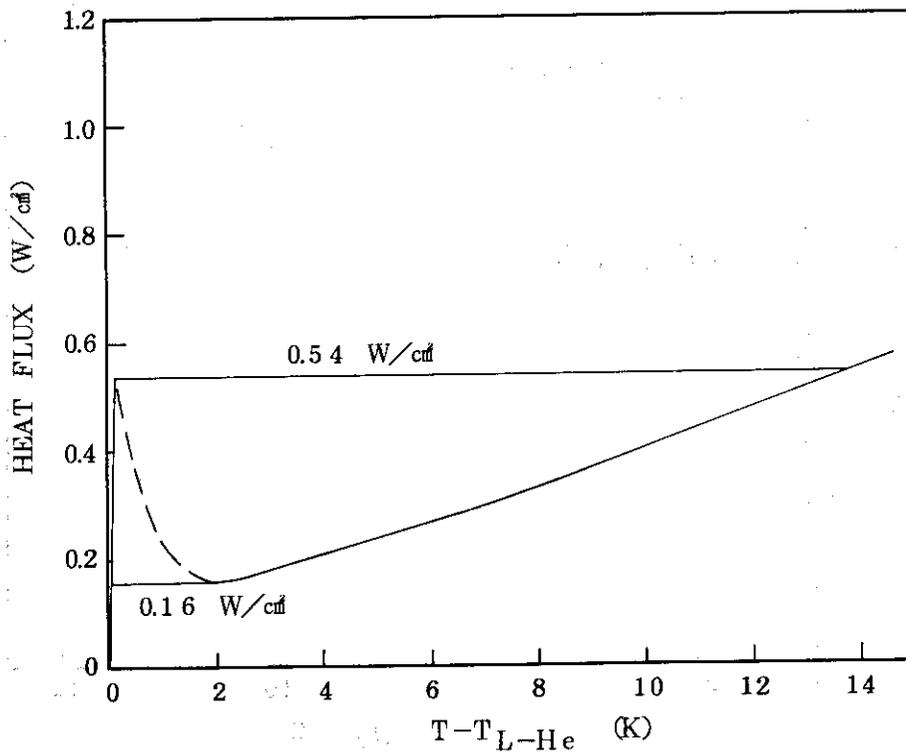


Fig. 17 MODEL CONDUCTOR C-2

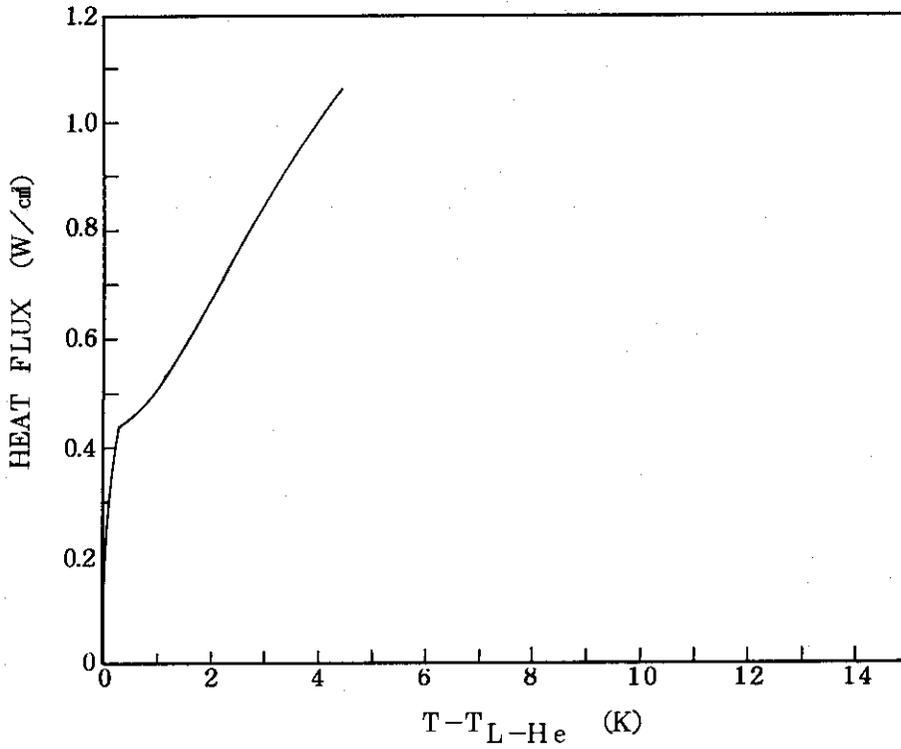


Fig. 18 MODEL CONDUCTOR D

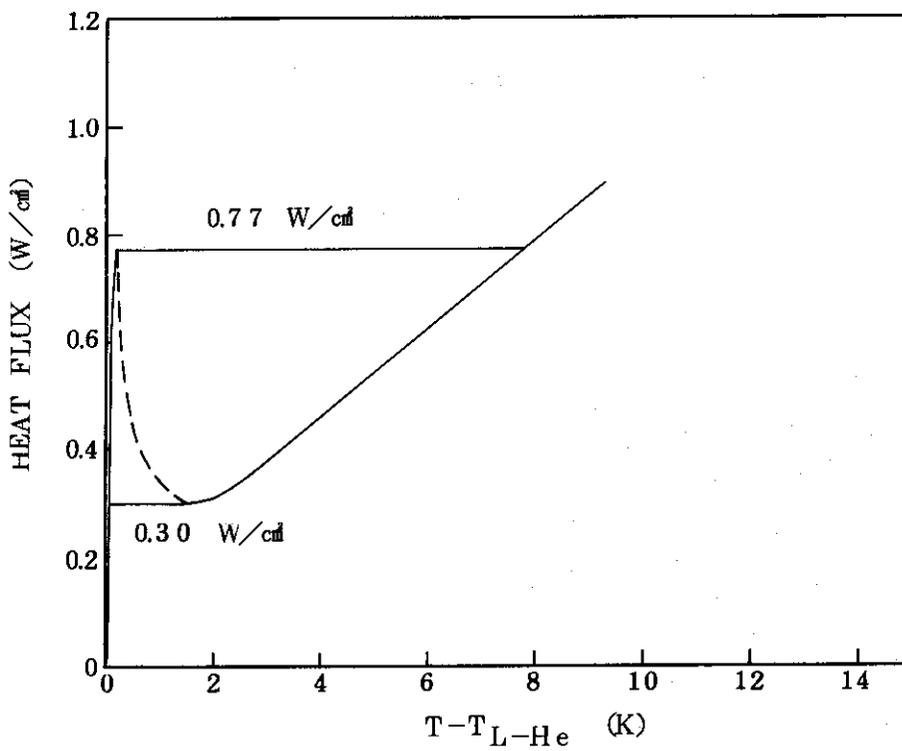


Fig. 19 MODEL CONDUCTOR E

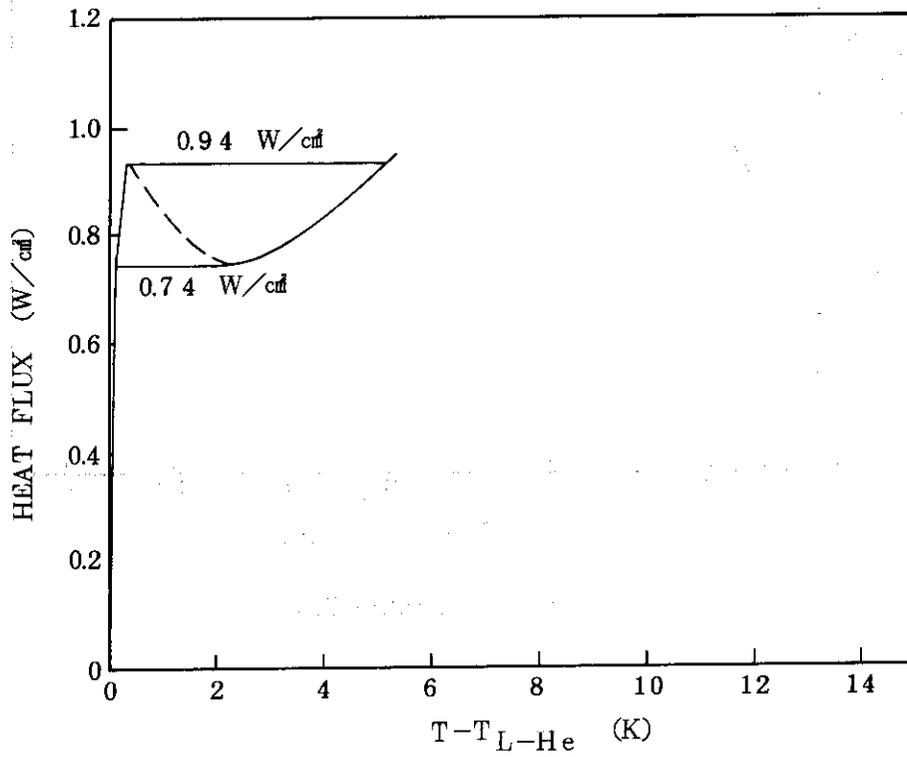


Fig. 20 MODEL CONDUCTOR F

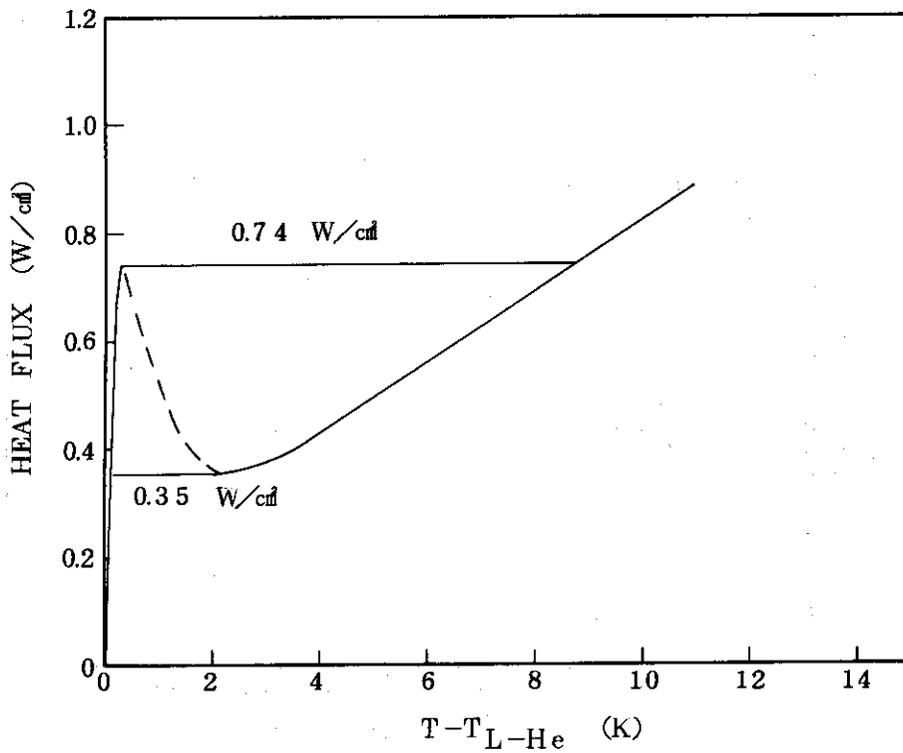


Fig. 21 (a) MODEL CONDUCTOR G-1 ( HORIZONTAL ORIENTATION )

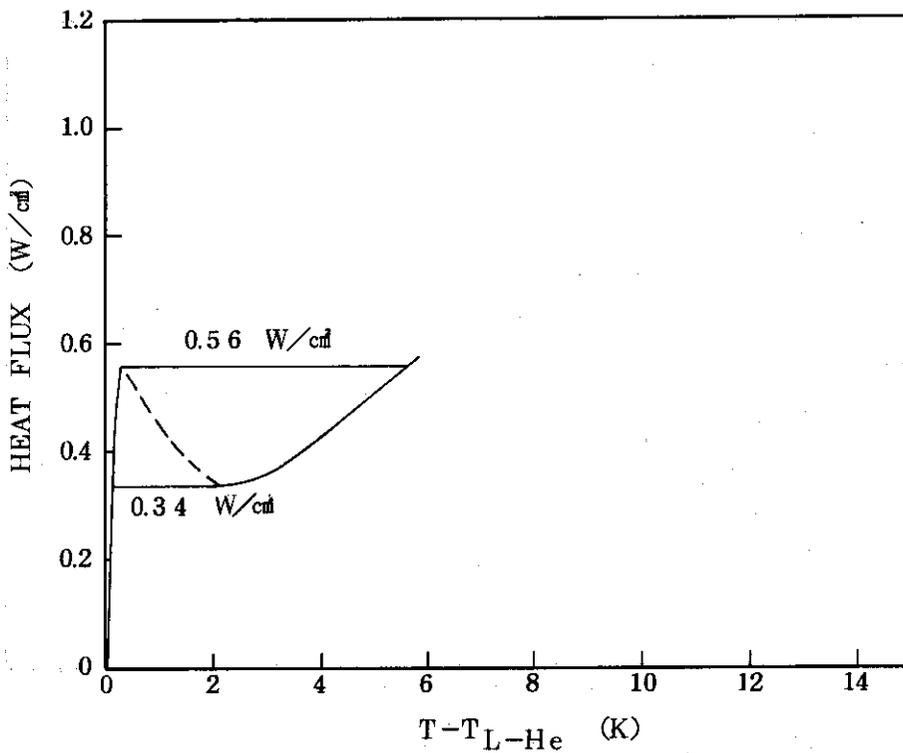


Fig. 21 (b) MODEL CONDUCTOR G-1 ( VERTICAL ORIENTATION )

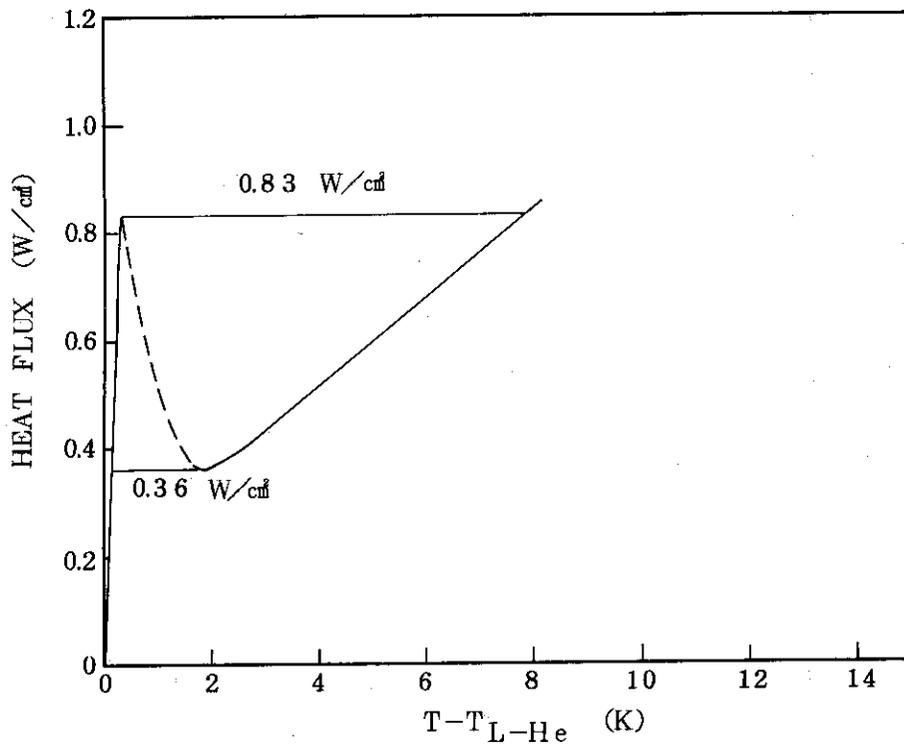


Fig. 22 (a) MODEL CONDUCTOR G-2 ( HORIZONTAL ORIENTATION )

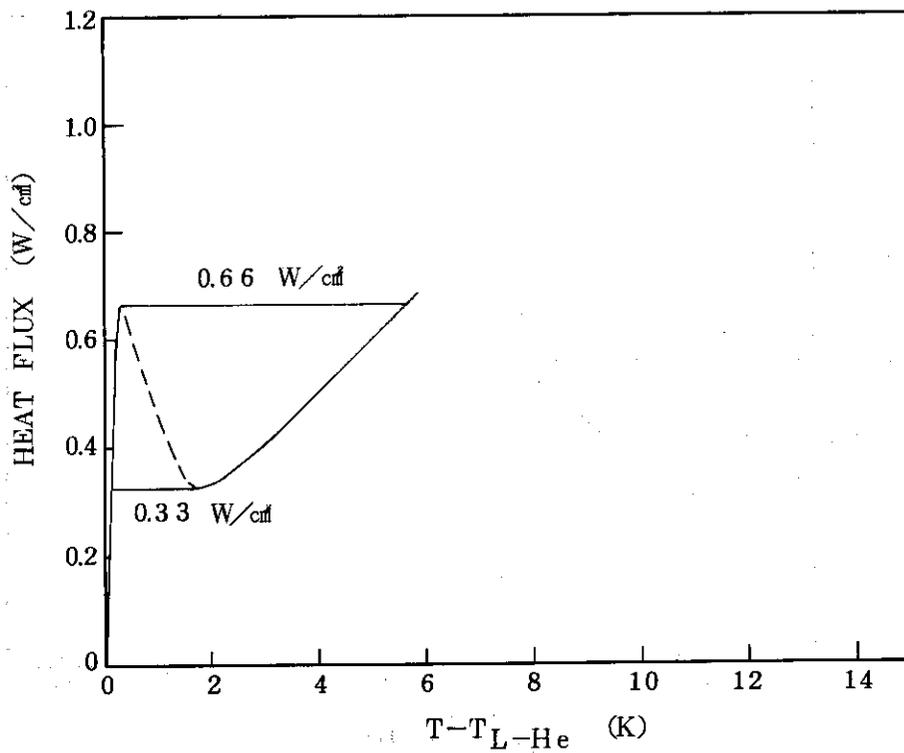


Fig. 22 (b) MODEL CONDUCTOR G-2 ( VERTICAL ORIENTATION )

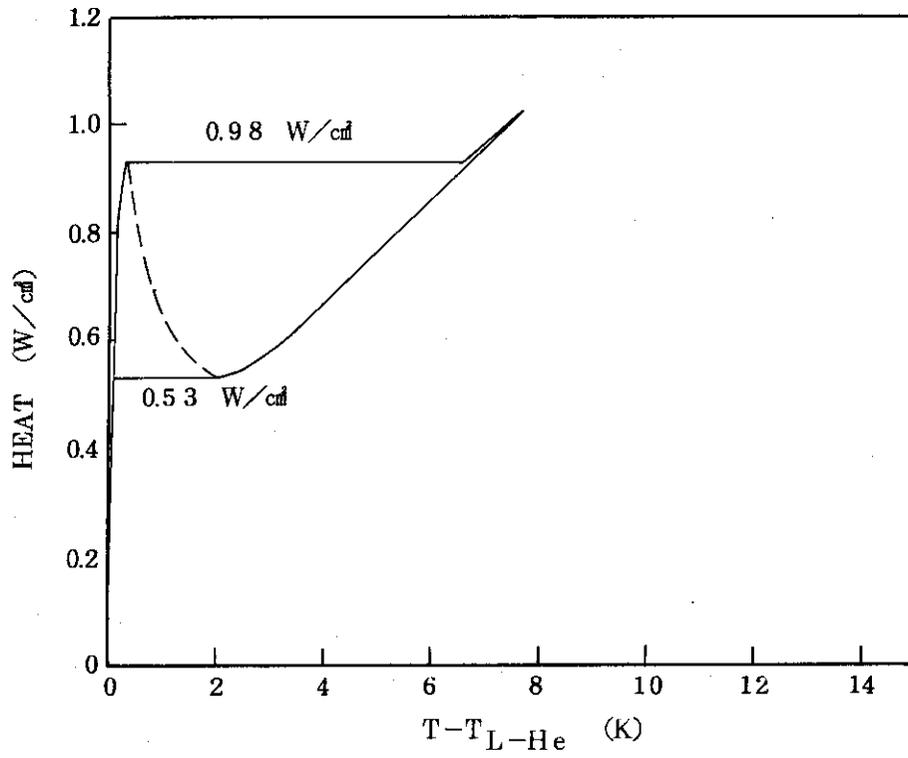


Fig. 23 (a) MODEL CONDUCTOR G-3 ( HORIZONTAL ORIENTATION )

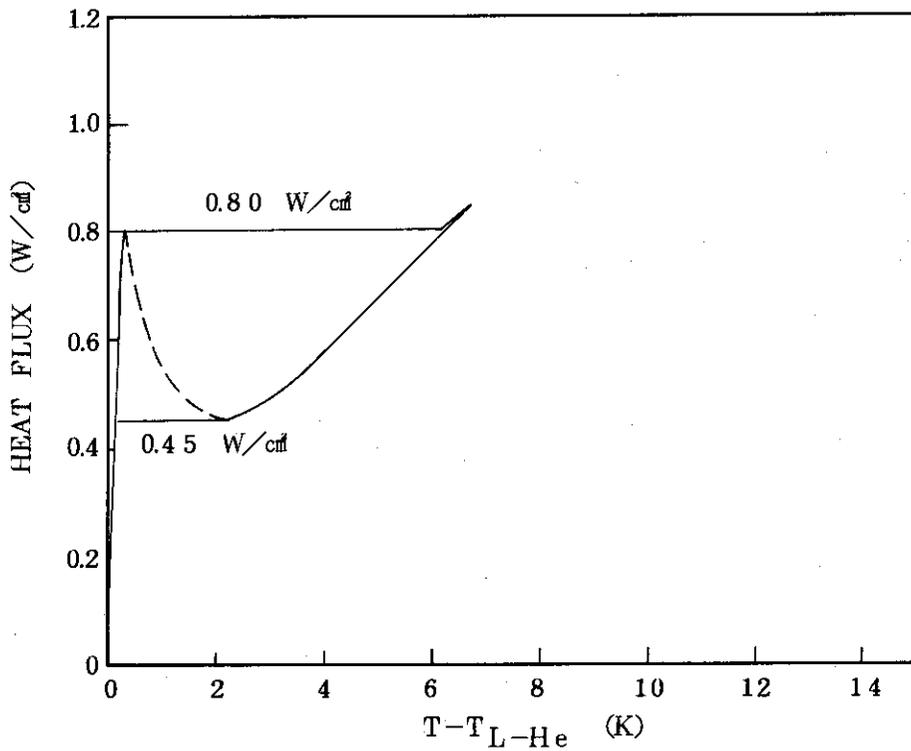


Fig. 23 (b) MODEL CONDUCTOR G-3 ( VERTICAL ORIENTATION )

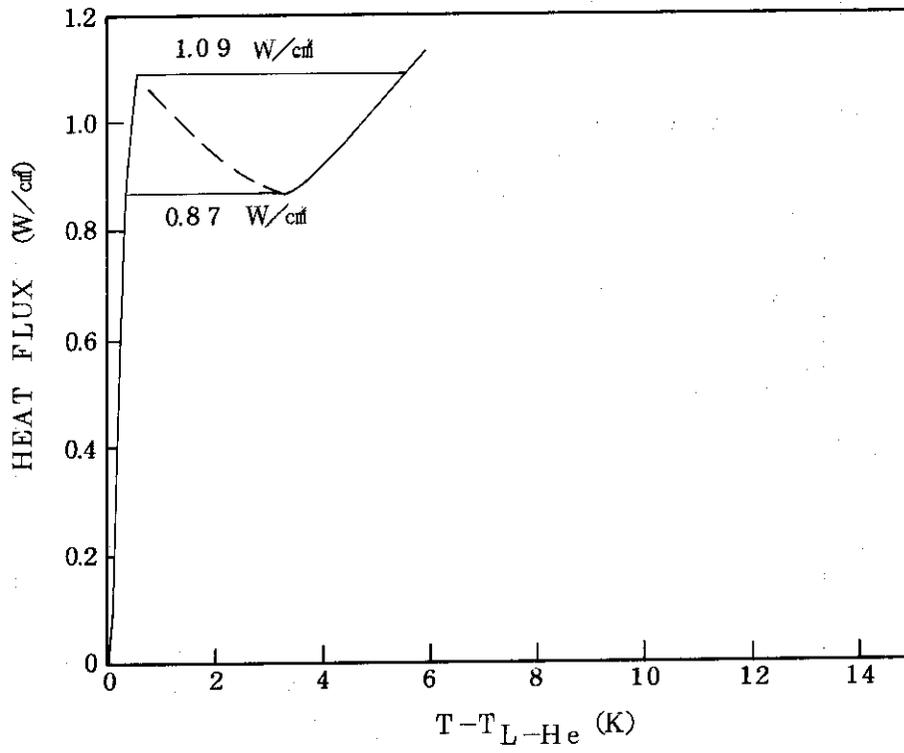


Fig. 24 (a) MODEL CONDUCTOR G-4 ( HORIZONTAL ORIENTATION )

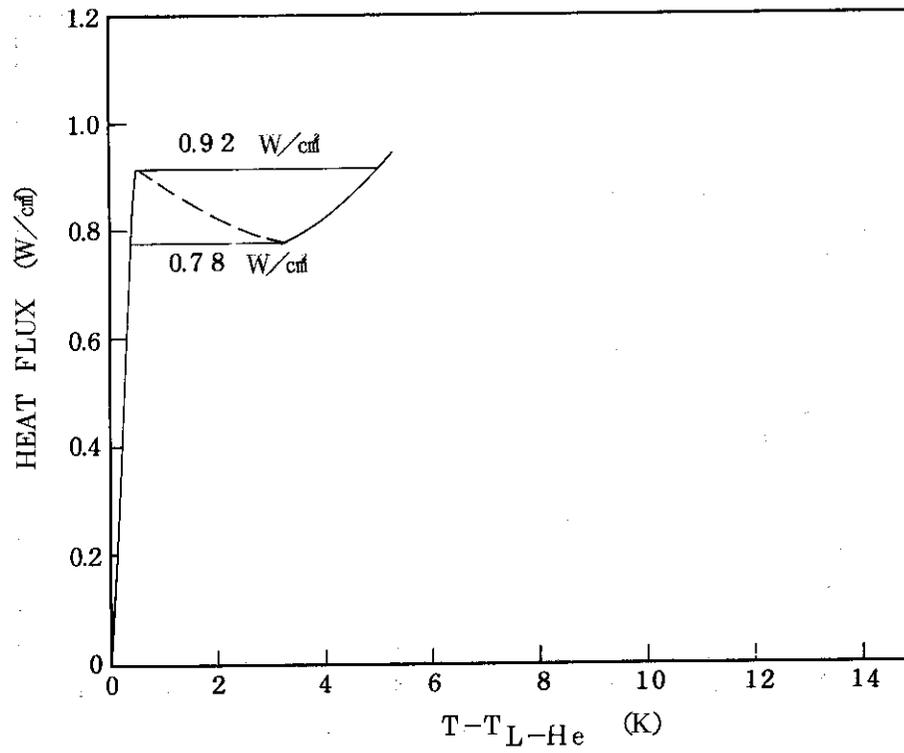


Fig. 24 (b) MODEL CONDUCTOR G-4 ( VERTICAL ORIENTATION )

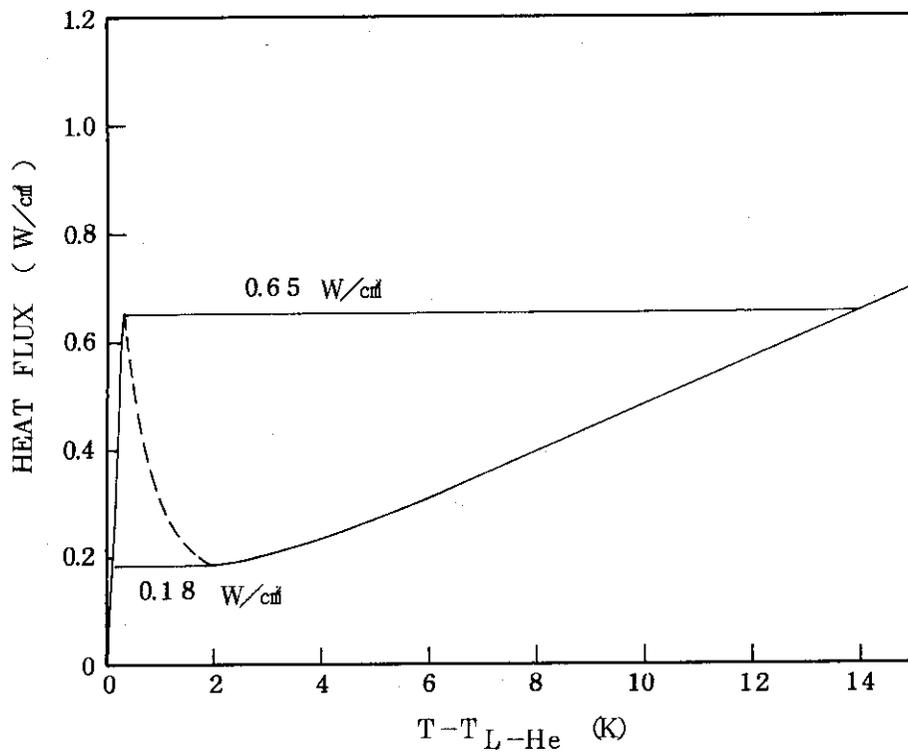


Fig. 25 (a) MODEL CONDUCTOR H-4 ( HORIZONTAL ORIENTATION )

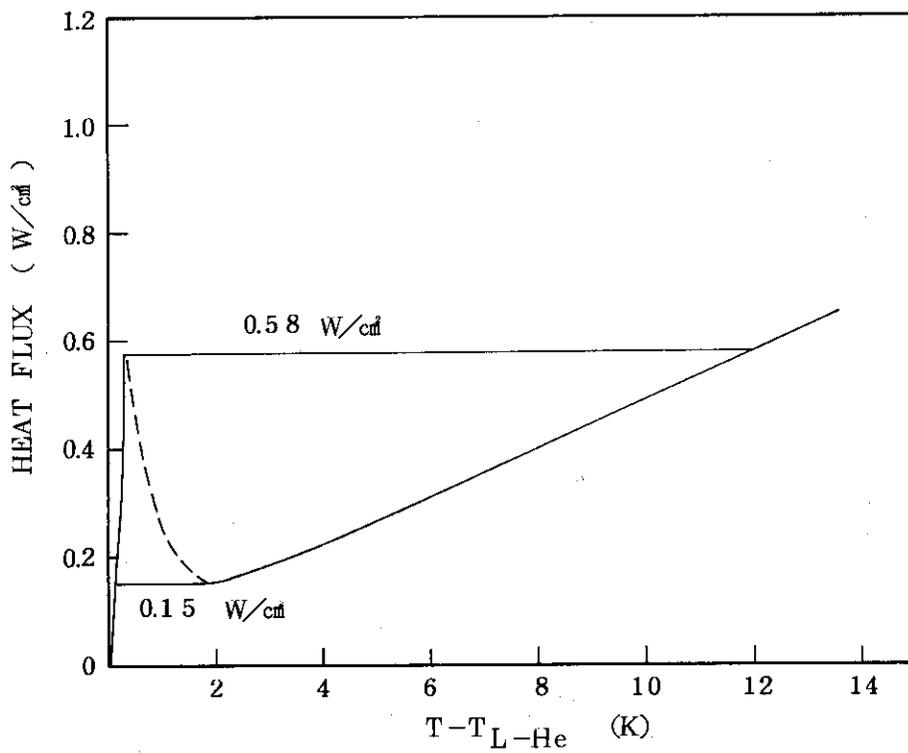


Fig. 25 (b) MODEL CONDUCTOR H-4 ( VERTICAL ORIENTATION )

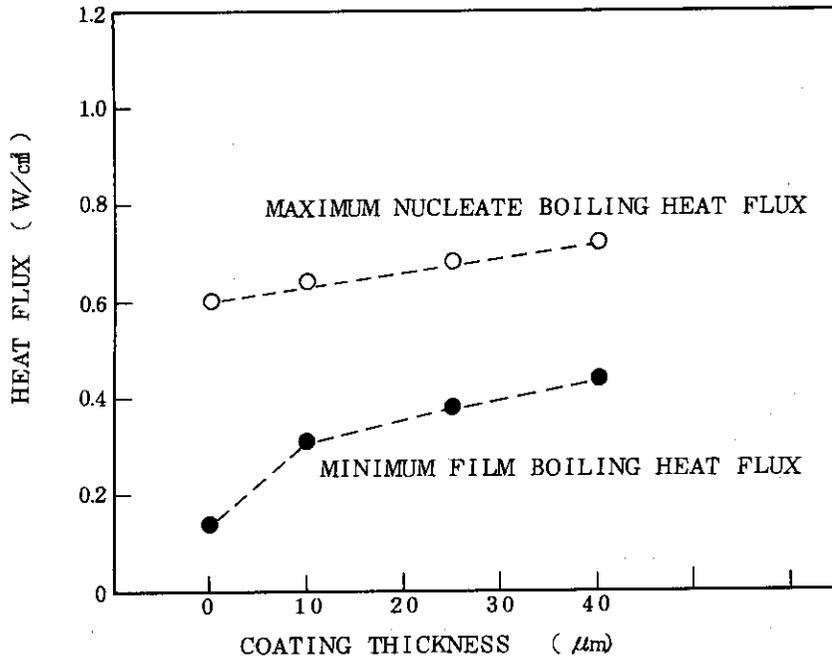


Fig. 26 EFFECT OF FORMAL SURFACE COATING ON MAXIMUM NUCLEATE BOILING HEAT FLUX AND MINIMUM FILM BOILING HEAT FLUX

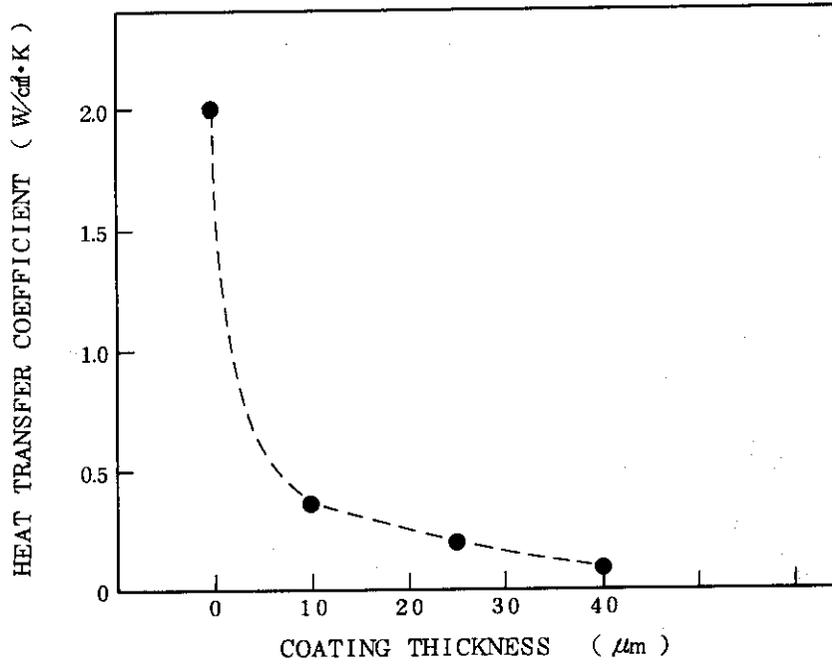


Fig. 27 EFFECT OF FORMAL SURFACE COATING ON HEAT TRANSFER COEFFICIENT AT BURNOUT POINT

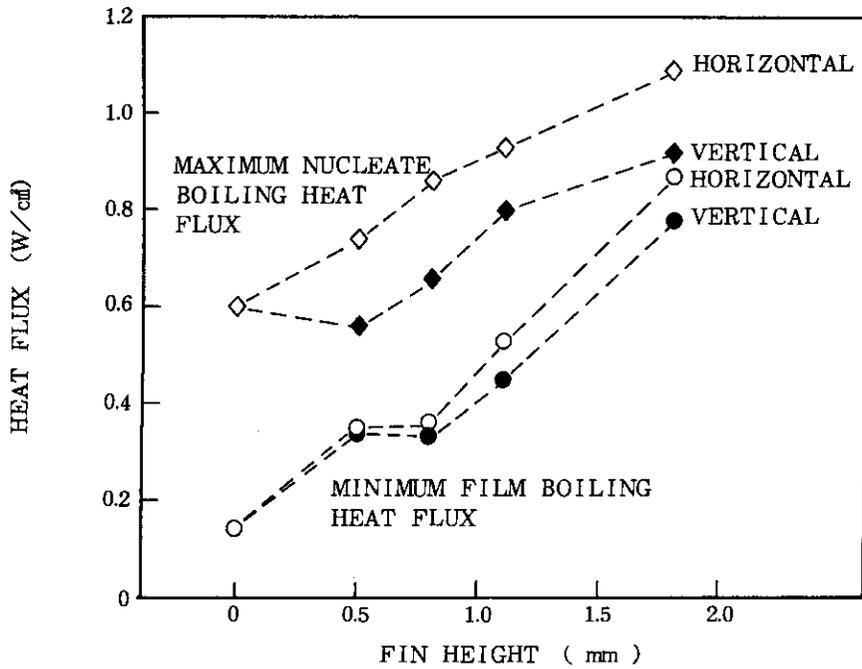


Fig. 28 FIN HEIGHT DEPENDENCE OF MODEL CONDUCTOR G

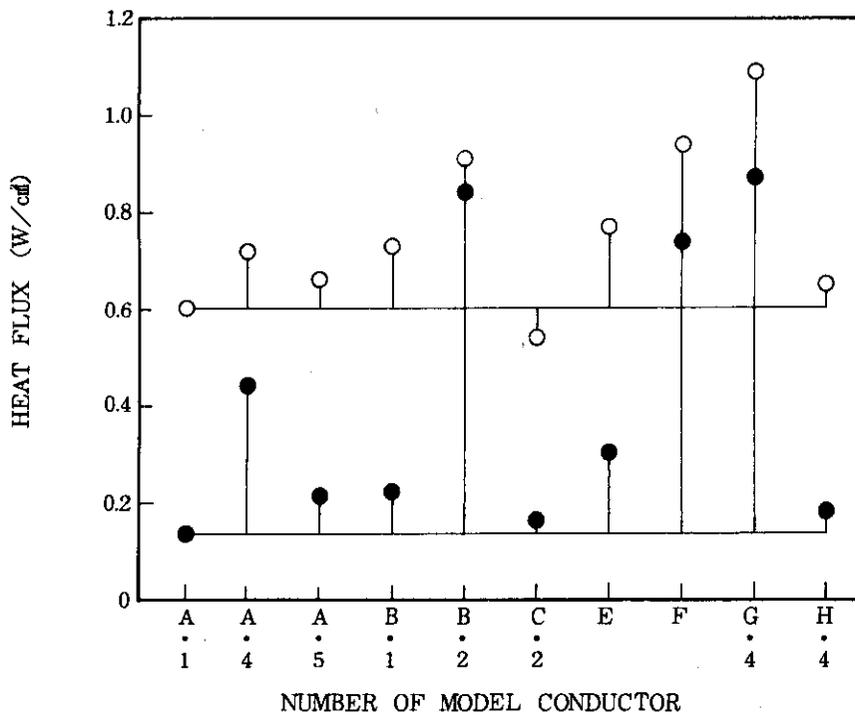


Fig. 29 MAXIMUM NUCLEATE BOILING HEAT FLUX (○) AND MINIMUM FILM BOILING HEAT FLUX (●) OF TESTED MODEL CONDUCTORS