

JAERI-M

8785

高磁界中でのNb-Ti超電導線の超電導特性

1980年3月

多田 栄介・安藤 俊就・岡 皓一^{*}・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.

高磁界中でのNb - Ti超電導線の超電導特性

日本原子力研究所 東海研究所 核融合研究部
多田 栄介・安藤 俊就・岡 皓一*・島本 進

(1980年2月13日受理)

現在、国際協力によるIEA - LCT計画の、日本のLCTコイルに用いるNb - Ti超電導導体を開発するに当たり、現状のNb - Ti超電導線材の超電導特性、特に8 T以上の高磁界中における特性を調査するために、国内外の代表的なNb - Ti超電導線の短尺試験を行ったので、ここに報告する。

試験の結果、1)外国製の線材の性能が、国産の線材の性能より優れている、2)LCT実験計画の中の拡張試験の一つである8.9 Tの磁界条件を満足することは、Nb - Tiの臨界電流密度の立場からは十分可能であることがわかった。

* 外来研究員 日立電線(株)

Superconducting Characteristic of Nb-Ti Alloy
in High Magnetic Field

Eisuke TADA, Toshinari ANDO, Koichi OKA*
and Susumu SHIMAMOTO

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received February 13,1980)

Superconducting characteristic measurements were carried in development of a conductor for the Japanese LCT coil which should satisfy a field more than 8 T. The experimental results of practical Nb-Ti samples, foreign-made and Japanese-made, were compared. A measured maximum critical current density is about 9.2×10^4 A/cm² at 8 T. In critical current density, there is no problem in Nb-Ti, concerning the ALT.C test (8.9 T) of LCT experimental conditions.

Keywords: Superconductor, Niobium-Titanium Alloy, Critical Current Density, Large Coil Task, Coil, High Magnetic Field

* On leave from Hitachi Wire and Cable Ltd.

目 次

1. はじめに.....	1
2. 超電導特性の測定.....	1
2.1 試料.....	1
2.2 実験装置.....	1
2.3 実験方法.....	2
3. 実験結果.....	2
4. 結論.....	3
謝辞.....	3
参考文献.....	3
付録.....	33

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Superconducting Characteristics Measurement	1
2.1 Samples	1
2.2 Experimental Apparatus	1
2.3 Procedure	2
3. Results	2
4. Conclusions	3
Acknowledgement	3
Reference	3
Appendix	33

1. はじめに

核融合用大型超電導トロイダル・コイルに用いられる超電導導体は、8 T以上の高磁界中で運転される⁽¹⁾。また、現在国際協力で進めているIEA-LCT計画の拡張試験には、140%励磁(8.9 T)という試験が含まれている⁽²⁾。さらに、最近Nb-Ti合金で10 T(内径22 cm)の超電導コイルの製作計画⁽³⁾が発表されるなど、Nb-Ti線材の高磁界化への要望は、非常に強い。

大型超電導コイルの導体は、加工性および耐応力性の観点からNb-Ti合金超電導線が取扱いやすい。しかし今までNb-Ti超電導線については、核融合用トロイダル・コイルの設計に必要な8 T~13 Tでの超電導特性に関するデータは、国内および国外でも殆んどなく、原研が国内で最も優れた導体試験装置(13 T超電導コイル等)を整えたことによって、高磁界中での超電導特性の測定が可能となった。

原研では、IEA-LCT計画での日本のLCTコイルのための超電導導体の開発に当り、1)加工性 2)安定化材のCuとの複合加工の容易性 3)超電導特性の耐応力性⁽⁴⁾さらには、4)化合物系の超電導線の製作技術の現状等の観点からNb-Ti合金超電導線に注目し、現状のNb-Ti超電導線の性能、特に8 T以上の超電導特性を把握するために、国内外の代表的な線材の短尺試験を行なった。これらの結果をまとめたのが本報告書である。

2. 超電導特性の測定

2.1 試料

実験に用いた短尺試料(切出し試料)の特性をTable 2.1に示す。短尺試料は、AからYまで計25種類でAからCの三試料が、外国メーカーの線材である。すべての短尺試料は、多心(Multi-filament; MF)線で、銅母材中に一定のピッチで長手方向にツイストされた多数の超電導極細線(フィラメント)が配列されている。Fig. 2.1に代表的なNb-Ti超電導MF線の断面を図式的に示す。短尺試料の断面顕微鏡写真の一例をFig. 2.2(a)~(g)に示す。Table 2.1でCu/S・C RATIOは、安定化銅と超電導線の占積率を、CONTENT OF Tiは、Nb-Ti合金のTi含有量(原子分量)を、およびTAP DISTANCEは、試料の発生電圧を取り出す電圧タップ間の距離を示す。

2.2 実験装置

今回実験に使用した装置をFig. 2.3に示す。

実験装置は、Nb₃Snテープ製13 T超電導コイル(IGC社製)、クライオ・スタット、短尺試料を取り付けるサンプル・ホルダ、13 T超電導電磁石と短尺試料の液体ヘリウム領域を分離する

1. はじめに

核融合用大型超電導トロイダル・コイルに用いられる超電導体は、8 T以上の高磁界中で運転される⁽¹⁾。また、現在国際協力で進めているIEA-LCT計画の拡張試験には、140%励磁(8.9 T)という試験が含まれている⁽²⁾。さらに、最近Nb-Ti合金で10 T(内径22 cm)の超電導コイルの製作計画⁽³⁾が発表されるなど、Nb-Ti線材の高磁界化への要望は、非常に強い。

大型超電導コイルの導体は、加工性および耐応力性の観点からNb-Ti合金超電導線が取扱いやすい。しかし今までNb-Ti超電導線については、核融合用トロイダル・コイルの設計に必要な8 T~13 Tでの超電導特性に関するデータは、国内および国外でも殆んどなく、原研が国内で最も優れた導体試験装置(13 T超電導コイル等)を整えたことによって、高磁界中での超電導特性の測定が可能となった。

原研では、IEA-LCT計画での日本のLCTコイルのための超電導体の開発に当り、1)加工性 2)安定化材のCuとの複合加工の容易性 3)超電導特性の耐応力性⁽⁴⁾さらには、4)化合物系の超電導線の製作技術の現状等の観点からNb-Ti合金超電導線に注目し、現状のNb-Ti超電導線の性能、特に8 T以上の超電導特性を把握するために、国内外の代表的な線材の短尺試験を行なった。これらの結果をまとめたのが本報告書である。

2. 超電導特性の測定

2.1 試料

実験に用いた短尺試料(切出し試料)の特性をTable 2.1に示す。短尺試料はAからYまで計25種類でAからCの三試料が、外国メーカーの線材である。すべての短尺試料は、多心(Multifilament; MF)線で、銅母材中に一定のピッチで長手方向にツイストされた多数の超電導極細線(フィラメント)が配列されている。Fig. 2.1に代表的なNb-Ti超電導MF線の断面を図式的に示す。短尺試料の断面顕微鏡写真の一例をFig. 2.2(a)~(g)に示す。Table 2.1でCu/S・C RATIOは、安定化銅と超電導線の占積率を、CONTENT OF Tiは、Nb-Ti合金のTi含有量(原子分量)を、およびTAP DISTANCEは、試料の発生電圧を取り出す電圧タップ間の距離を示す。

2.2 実験装置

今回実験に使用した装置をFig. 2.3に示す。

実験装置は、Nb₃Snテープ製13 T超電導コイル(IGC社製)、クライオ・スタット、短尺試料を取り付けるサンプル・ホルダ、13 T超電導電磁石と短尺試料の液体ヘリウム領域を分離する

ためのインサート・デュワ、短尺試料に通電するための直流電源および測定系から構成される。サンプル・ホルダおよび測定系をFig. 2.4～2.6に示す。サンプル・ホルダ(A)は、同時に3本の短尺試料を取付けることが可能な構造で、短尺試料F以外の短尺試料に使用した。

短尺試料Fは、外形寸法が7 mm × 7 mmと大きいため、Fig. 2.4に示すサンプル・ホルダ(B)で測定した。

2.3 実験方法

実験は、以下の手順で行なわれた。

- ① 13 T 超電導コイルのBore (有効半径 70 mm) の中心に短尺試料を取付けたサンプル・ホルダをセットする。
- ② 13 T 超電導コイルを励磁し、磁界 (外部磁界) を発生させる。
- ③ 一定の外部磁界下で、直流電源より短尺試料に、通電し、電流値を増加させる。
- ④ この電流値上昇中、短尺試料から電圧が発生し、その値が急激に増加した折、試料の焼損を避けるために電流値を降下させる。
- ⑤ 発圧電圧と通電電流をX-Y記録計に記録する。
- ⑥ 外部磁界を変化させ、③～⑤を行なう。
- ⑦ ⑤で得られた電圧-電流曲線より臨界電流値 (I_c) および臨界電流密度 (J_c) を算出する。

(Fig. 2.7 参照) 臨界電流値は、各短尺試料の試験条件、たとえば通電電流値およびタップ間距離等に対応して、超電導線の比抵抗(ρ)が、Fig. 3.1(a)～(y)に示す値となる点で定義した。

3. 実験結果

本実験で得られたNb-Ti超電導線の超電導特性をFig. 3.1(a)～(y)に示す。縦軸は、臨界電流値 (I_c) および臨界電流密度 (J_c) を、横軸は、外部磁界 H を示す。また、 H_{c2} は、 I_c - H 曲線と横軸 (磁界軸) との交点の値で、これ以上の磁界では、超電導線がすべて常電導となる上部臨界磁界を意味する。ほとんどの短尺試料の超電導特性曲線は、8 T 付近に変曲点を右するが、それ以外は、磁界の増加に伴ない、ほぼ直線的に臨界電流値が減少する。最もすぐれた特性を示す試料は、短尺試料B (Fig. 3.1(b)) で、その臨界電流密度は8 T で $9.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ また上部臨界磁界は、約 10.7(T)に達する。

Fig. 3.2 は、国外と国内のNb-Ti線材の超電導特性の比較を示す。外国製の線材の性能は、国産のそれよりも優れており、8 T 以上の高磁界側での性能の両者の差は、平均で $2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 程度である。また、高磁界側での超電導特性曲線の傾きは、両者ともほとんど同じで、その平均値は、約 $2.4 \times 10^4 (\text{A/cm}^2)/\text{T}$ である。図中のALT・A, B, C およびN は、LCT計画での各種拡張試験条件に対応する動作点を示す。図より、拡張試験のうち磁界的に最も厳しいALT・C (8.9 T) の条件を満足することは現状のNb-Ti線の臨界電流密度の面からは、充分可能であ

ためのインサート・デュワ、短尺試料に通電するための直流電源および測定系から構成される。サンプル・ホルダおよび測定系をFig. 2.4～2.6に示す。サンプル・ホルダ(A)は、同時に3本の短尺試料を取付けることが可能な構造で、短尺試料F以外の短尺試料に使用した。

短尺試料Fは、外形寸法が7 mm × 7 mmと大きいため、Fig. 2.4に示すサンプル・ホルダ(B)で測定した。

2.3 実験方法

実験は、以下の手順で行なわれた。

- ① 13 T 超電導コイルのBore (有効半径 70 mm) の中心に短尺試料を取付けたサンプル・ホルダをセットする。
- ② 13 T 超電導コイルを励磁し、磁界 (外部磁界) を発生させる。
- ③ 一定の外部磁界下で、直流電源より短尺試料に、通電し、電流値を増加させる。
- ④ この電流値上昇中、短尺試料から電圧が発生し、その値が急激に増加した折、試料の焼損を避けるために電流値を降下させる。
- ⑤ 発圧電圧と通電電流を X - Y 記録計に記録する。
- ⑥ 外部磁界を変化させ、③～⑤を行なう。
- ⑦ ⑤で得られた電圧 - 電流曲線より臨界電流値 (I_c) および臨界電流密度 (J_c) を算出する。

(Fig. 2.7 参照) 臨界電流値は、各短尺試料の試験条件、たとえば通電電流値およびタップ間距離等に対応して、超電導線の比抵抗(ρ)が、Fig. 3.1(a)～(y)に示す値となる点で定義した。

3. 実験結果

本実験で得られた Nb - Ti 超電導線の超電導特性を Fig. 3.1(a)～(y)に示す。縦軸は、臨界電流値 (I_c) および臨界電流密度 (J_c) を、横軸は、外部磁界(H)を示す。また、 H_{c2} は、 $I_c - H$ 曲線と横軸 (磁界軸) との交点の値で、これ以上の磁界では、超電導線がすべて常電導となる上部臨界磁界を意味する。ほとんどの短尺試料の超電導特性曲線は、8 T 付近に変曲点を右するが、それ以外は、磁界の増加に伴ない、ほぼ直線的に臨界電流値が減少する。最もすぐれた特性を示す試料は、短尺試料 B (Fig. 3.1(b)) で、その臨界電流密度は 8 T で $9.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ また上部臨界磁界は、約 10.7(T)に達する。

Fig. 3.2 は、国外と国内の Nb - Ti 線材の超電導特性の比較を示す。外国製の線材の性能は、国産のそれよりも優れており、8 T 以上の高磁界側での性能の両者の差は、平均で $2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 程度である。また、高磁界側での超電導特性曲線の傾きは、両者ともほとんど同じで、その平均値は、約 $2.4 \times 10^4 (\text{A/cm}^2) / \text{T}$ である。図中の ALT・A, B, C および N は、LCT 計画^[4]での各種拡張試験条件に対応する動作点を示す。図より、拡張試験のうち磁界的に最も厳しい ALT・C (8.9 T) の条件を満足することは現状の Nb - Ti 線の臨界電流密度の面からは、充分可能であ

ることがわかる。Fig. 3.3は、短尺試料A～Yのうち同一条件と見なせる短尺試料の臨界電流密度(J_c)および上部臨界磁界(H_{c2})に及ぼすTi含有量の影響を示す。Ti含有量が、約60% (原子分量)付近で、 J_c および H_{c2} がピーク値を示すことがわかる。

4. 結 論

IEA-LCT計画での日本のLCTコイルに用いるNb-Ti超電導体開発のために、各種Nb-Ti短尺試料の超電導特性測定試験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 外国製の短尺試料の超電導特性は、国産の短尺試料の特性より優れており、その臨界電流密度は、8Tで $9.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ に達する。
- 2) LCT計画での拡張試験ALT・C (8.9T)の試験を満足することは、現状のNb-Ti超電導線の臨界電流密度の面からは、充分可能である。
- 3) 8.5T～10Tの高磁界側のNb-Ti超電導線材の特性は、ほぼ直線となりその傾きは、約 $2.4 \times 10^4 \text{ (A/cm}^2\text{)}/\text{T}$ である。
- 4) Nb-Ti合金のTi含有量が、約60% (原子分量)であるとき、臨界電流値の特性がピーク値を示す。

以上、IEA-LCT計画での日本のLCTコイルのNb-Ti超電導体の開発にあたり、現状のNb-Tiの超電導特性の調査を行なったが、国内で作られたNb-Ti超電導線材の特性は、この時点では国外水準よりも低く、今後高磁界化のために、Ti含有量および熱処理・加工条件等の最適条件の検討を充分行なう必要がある。

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。専門的立場から、安河内特別研究員から賜った御指導に感謝致します。本実験に当たり、当研究室の辻博史、吉田清、西正孝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) 島本 進; 日本原子力学会誌, 21, 3 (1979)
- 2) ORNL - Technical Specification TS - 14700
- 3) M. Otavka, J. Alcorn, J. Purcell, W. Chen and W. Toffolo; IEE Trans. Mag. - 15 (1979) 807
- 4) J. W. Ekin; Appl. Phys. Lett. 29 (1976) 216

ることがわかる。Fig. 3.3は、短尺試料A～Yのうち同一条件と見なせる短尺試料の臨界電流密度 (J_c) および上部臨界磁界 (H_{c2}) に及ぼすTi含有量の影響を示す。Ti含有量が、約6.0% (原子分量) 付近で、 J_c および H_{c2} がピーク値を示すことがわかる。

4. 結 論

IEA-LCT計画での日本のLCTコイルに用いるNb-Ti超電導体開発のために、各種Nb-Ti短尺試料の超電導特性測定試験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 外国製の短尺試料の超電導特性は、国産の短尺試料の特性より優れており、その臨界電流密度は、8Tで $9.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ に達する。
- 2) LCT計画での拡張試験ALT-C (8.9T)の試験を満足することは、現状のNb-Ti超電導線の臨界電流密度の面からは、充分可能である。
- 3) 8.5T～10Tの高磁界側のNb-Ti超電導線材の特性は、ほぼ直線となりその傾きは、約 $2.4 \times 10^4 \text{ (A/cm}^2\text{)}/\text{T}$ である。
- 4) Nb-Ti合金のTi含有量が、約60% (原子分量) であるとき、臨界電流値の特性がピーク値を示す。

以上、IEA-LCT計画での日本のLCTコイルのNb-Ti超電導体の開発にあたり、現状のNb-Tiの超電導特性の調査を行なったが、国内で作られたNb-Ti超電導線材の特性は、この時点では国外水準よりも低く、今後高磁界化のために、Ti含有量および熱処理・加工条件等の最適条件の検討を充分行なう必要がある。

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長のもとに行なわれたものである。森センタ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。専門的立場から、安河内特別研究員から賜った御指導に感謝致します。本実験に当たり、当研究室の辻博史、吉田清、西正孝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) 島本 進; 日本原子力学会誌, 21, 3 (1979)
- 2) ORNL - Technical Specification TS - 14700
- 3) M. Otavka, J. Alcorn, J. Purcell, W. Chen and W. Toffolo; IEE Trans. Mag. - 15 (1979) 807
- 4) J. W. Ekin; Appl. Phys. Lett. 29 (1976) 216

ることがわかる。Fig. 3.3は、短尺試料A～Yのうち同一条件と見なせる短尺試料の臨界電流密度(J_c)および上部臨界磁界(H_{c2})に及ぼすTi含有量の影響を示す。Ti含有量が、約6.0% (原子分量)付近で、 J_c および H_{c2} がピーク値を示すことがわかる。

4. 結 論

IEA-LCT計画での日本のLCTコイルに用いるNb-Ti超電導体開発のために、各種Nb-Ti短尺試料の超電導特性測定試験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 外国製の短尺試料の超電導特性は、国産の短尺試料の特性より優れており、その臨界電流密度は、8Tで 9.2×10^4 A/cm²に達する。
- 2) LCT計画での拡張試験ALT-C (8.9T)の試験を満足することは、現状のNb-Ti超電導線の臨界電流密度の面からは、充分可能である。
- 3) 8.5T～10Tの高磁界側のNb-Ti超電導線材の特性は、ほぼ直線となりその傾きは、約 2.4×10^4 (A/cm²)/Tである。
- 4) Nb-Ti合金のTi含有量が、約60% (原子分量)であるとき、臨界電流値の特性がピーク値を示す。

以上、IEA-LCT計画での日本のLCTコイルのNb-Ti超電導体の開発にあたり、現状のNb-Tiの超電導特性の調査を行なったが、国内で作られたNb-Ti超電導線材の特性は、この時点では国外水準よりも低く、今後高磁界化のために、Ti含有量および熱処理・加工条件等の最適条件の検討を充分行なう必要がある。

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。専門的立場から、安河内特別研究員から賜った御指導に感謝致します。本実験に当たり、当研究室の辻博史、吉田清、西正孝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) 島本 進; 日本原子力学会誌, 21, 3 (1979)
- 2) ORNL - Technical Specification TS - 14700
- 3) M. Otavka, J. Alcorn, J. Purcell, W. Chen and W. Toffolo; IEE Trans. Mag. - 15 (1979) 807
- 4) J. W. Ekin; Appl. Phys. Lett. 29 (1976) 216

ることがわかる。Fig. 3.3は、短尺試料A～Yのうち同一条件と見なせる短尺試料の臨界電流密度 (J_c) および上部臨界磁界 (H_{c2}) に及ぼすTi含有量の影響を示す。Ti含有量が、約6.0% (原子分量) 付近で、 J_c および H_{c2} がピーク値を示すことがわかる。

4. 結 論

IEA - LCT計画での日本のLCTコイルに用いるNb - Ti超電導導体開発のために、各種Nb - Ti短尺試料の超電導特性測定試験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 外国製の短尺試料の超電導特性は、国産の短尺試料の特性より優れており、その臨界電流密度は、8 Tで $9.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ に達する。
- 2) LCT計画での拡張試験ALT・C (8.9 T) の試験を満足することは、現状のNb - Ti超電導線の臨界電流密度の面からは、充分可能である。
- 3) 8.5 T～10 Tの高磁界側のNb - Ti超電導線材の特性は、ほぼ直線となりその傾きは、約 $2.4 \times 10^4 \text{ (A/cm}^2\text{) / T}$ である。
- 4) Nb - Ti合金のTi含有量が、約60% (原子分量) であるとき、臨界電流値の特性がピーク値を示す。

以上、IEA - LCT計画での日本のLCTコイルのNb - Ti超電導導体の開発にあたり、現状のNb - Tiの超電導特性の調査を行なったが、国内で作られたNb - Ti超電導線材の特性は、この時点では国外水準よりも低く、今後高磁界化のために、Ti含有量および熱処理・加工条件等の最適条件の検討を充分行なう必要がある。

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。専門的立場から、安河内特別研究員から賜った御指導に感謝致します。本実験に当たり、当研究室の辻博史、吉田清、西正孝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) 島本 進; 日本原子力学会誌, 21.3 (1979)
- 2) ORNL - Technical Specification TS - 14700
- 3) M. Otavka, J. Alcorn, J. Purcell, W. Chen and W. Toffolo; IEE Trans. Mag. - 15 (1979) 807
- 4) J. W. Ekin; Appl. Phys. Lett. 29 (1976) 216

Table 2.1 CHARACTERISTICS OF Nb-Ti SHORT SAMPLE

No.	SAMPLE NAME	PRODUCT NAME	MAKER	OVERALL DIMENSION (mm)	FILAMENT DIAMETER (μm)	NUMBER OF FILAMENT	Cu/S.C RATIO	TWIST PITCH (mm)	CONTENT OF Ti (at %)	TAP DISTANCE (mm)
A	JG78-001	HIC-254B	MCA*	$\phi 1.005$	46.16	132	2.6	25.4	62.5	137
B	JG78-002	CRYOSTRAND-Ti	IGC*	$\phi 1.00$	34.02	144	5.0	12.7	61.15	132
C	JG78-003	C361/75	IMI*	$\phi 0.8$	24.31	361	2.0		58.31	124
D	JG78-004	FM114	V	$\phi 0.998$	38.16	114	5.0	12.7	50	113
E	JG78-005	S-1	S	0.87×2.65 R0.5	25.87	1566	1.8	22	63.52	115
F	JG78-006	S-CTC	S	7.0×7.0 R0.5	96	750	8.0	150	65.71	190
G	JG78-007	F-8T	F	1.9×3.8	36	2302	2.08	27	65.98	138
H	JG78-008	F-P1	F	$\phi 2.2$	11.5	11000	3.25		65.98	144

* FOREIGN MANUFACTURER

Table 2.1 (Continued)

No.	SAMPLE NAME	PRODUCT NAME	MAKER	OVERALL DIMENSION (mm)	FILAMENT DIAMETER (μm)	NUMBER OF FILAMENT	Cu/S·C RATIO	TWIST PITCH (mm)	CONTENT OF Ti (at %)	TAP DISTANCE (mm)
I	JG78-009	F-P2	F	$\phi 2.2$	11.5	11000	3.25		65.98	144
J	JG78-010	F-P3	F	$\phi 2.2$	11.5	11000	3.25		65.98	113
K	JG78-011	F-P4	F	$\phi 2.2$	11.5	11000	3.25		65.98	135
L	JG78-013	Sh-2	SW	$\phi 1.0$	33	568	2.1		70	130
M	JG78-014	Sh-3	SW	$\phi 1.0$	34	514	1.9		60	118
N	JG78-015	Sh-4	SW	$\phi 0.69$	20	169	3.0		50	108
O	JG79-018	Sh-10	SW	$\phi 1.0$	33	568	2.1		63	27
P	JG79-019	Sh-11	SW	$\phi 0.98$	32.2	568	2.1		63	27

Table 2.1 (Continued)

No.	SAMPLE NAME	PRODUCT NAME	MAKER	OVERALL DIMENSION (mm)	FILAMENT DIAMETER (μm)	NUMBER OF FILAMENT	Cu/S.C RATIO	TWIST PITCH (mm)	CONTENT OF Ti (at %)	TAP DISTANCE (mm)
Q	JG79-020	Sh-12	SW	$\phi 0.95$	31.3	568	2.1		63	27
R	JG79-021	Sh-15	SW	$\phi 0.775$	25.6	568	2.1		60	25
S	JG79-022	Sh-21	SW	$\phi 0.775$	25.6	568	2.1		70	25
T	JG78-016	TF12-14	H	$\phi 2.3$	58.6	271	4.6	29	Ti 62.5 Zr 2.5	115
U	JG78-017	H-P	H	$\phi 0.778$	45.1	127			Ti 62.7 Zr 2.5	65
V	JG78-018	H-N	H	$\phi 0.778$	46.8	127			Ti 57.6 Zr 2.5	30
W	JG79-023	331NTH-2-2C	H	$\phi 1.53$	47.2	331	2.17	20	62.5	70
X	JG79-024	331NTH-2-4C	H	$\phi 1.53$	47.2	331	2.17	20	62.5	70
Y	JG79-025	331NTH-2-4CA	H	$\phi 1.53$	47.2	331	2.17	20	62.5	70

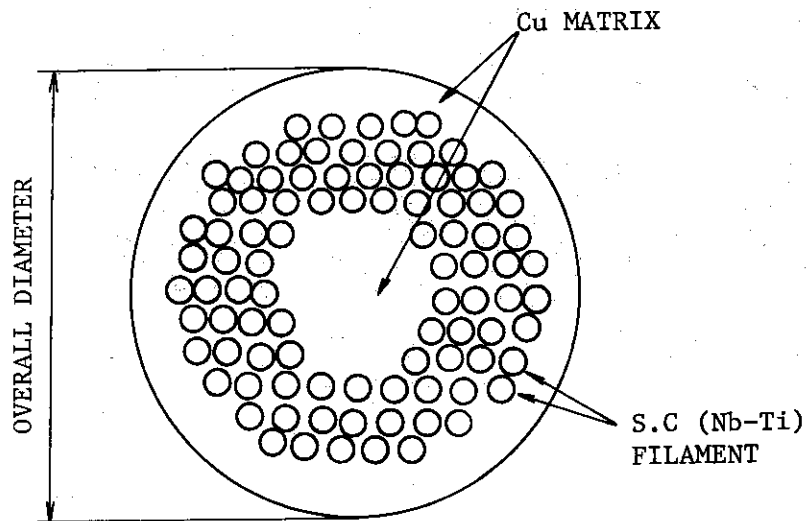
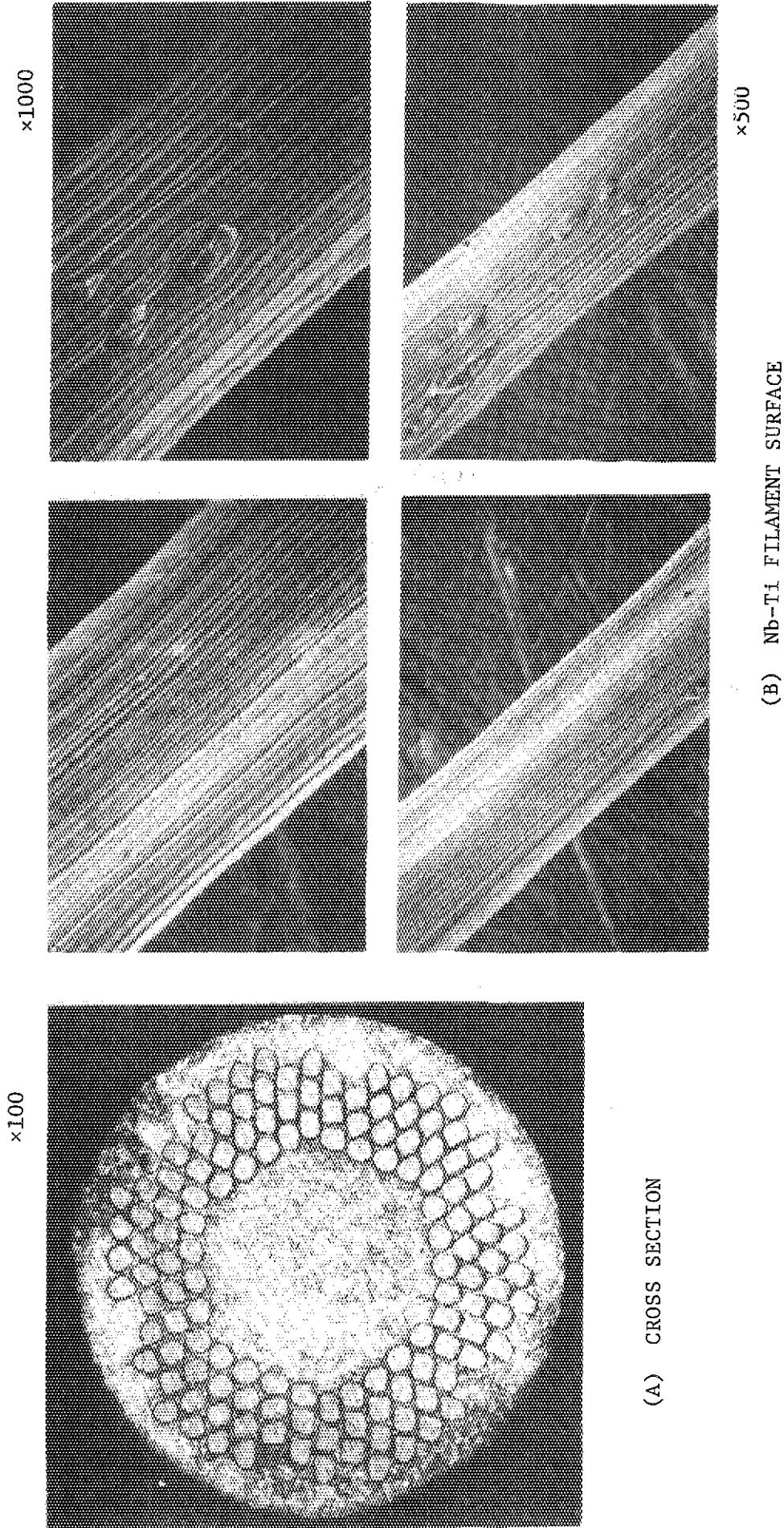


Fig. 2.1 CROSS SECTION OF Nb-Ti SUPERCONDUCTING WIRE.



x1000

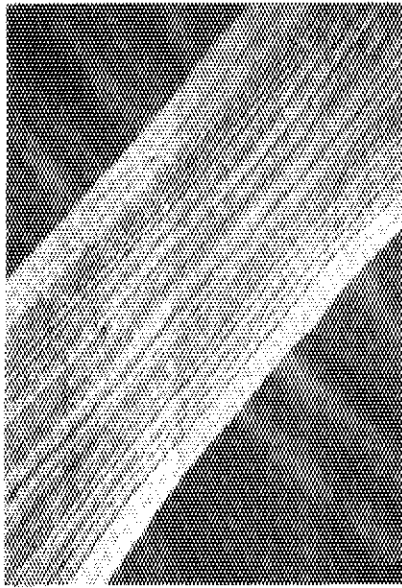
x500

x100

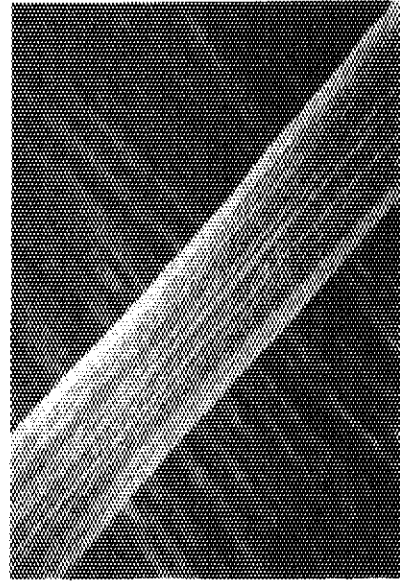
(B) Nb-Ti FILAMENT SURFACE

(A) CROSS SECTION

Fig. 2.2(a) CROSS SECTION OF SHORT SAMPLE A.



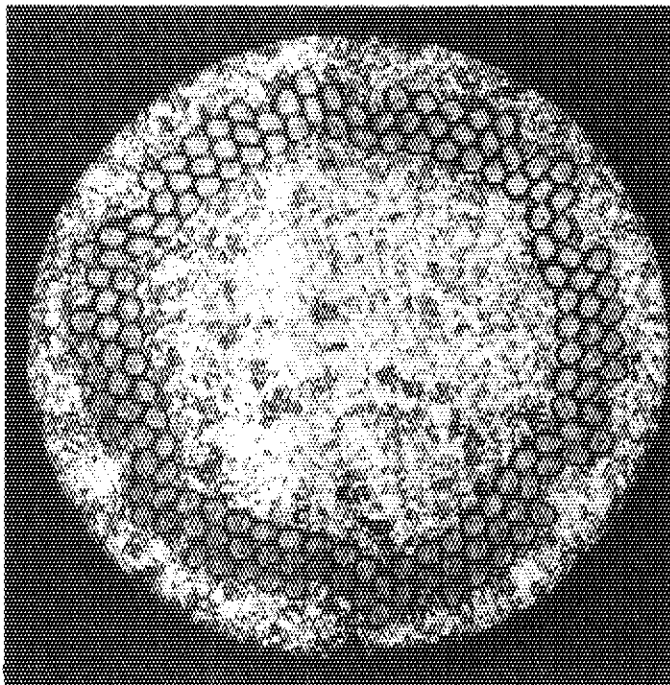
x1000



x500

(B) Nb-Ti FILAMENT SURFACE

x100

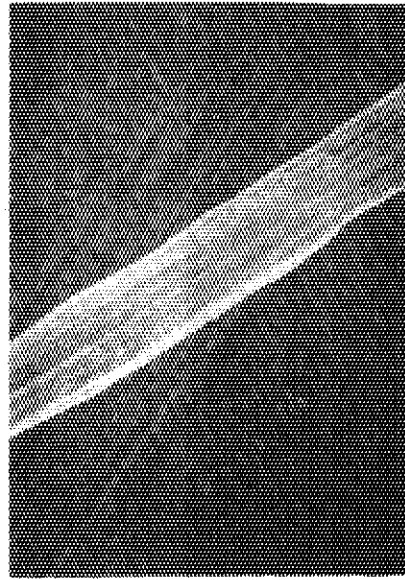


(A) CROSS SECTION

Fig. 2.2(b) CROSS SECTION OF SHORT SAMPLE B.



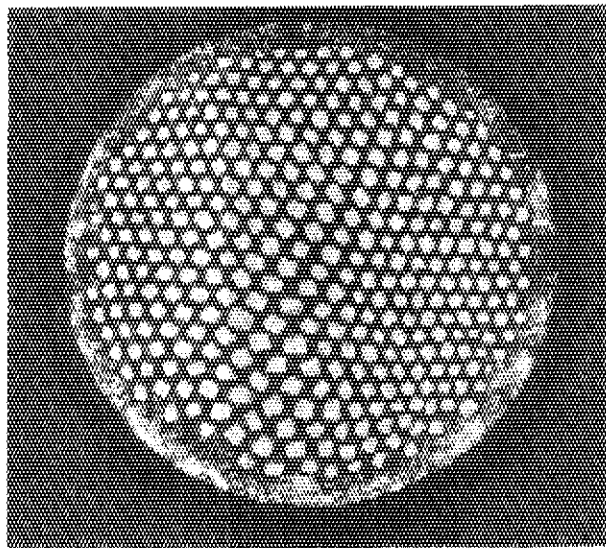
x1500



x500

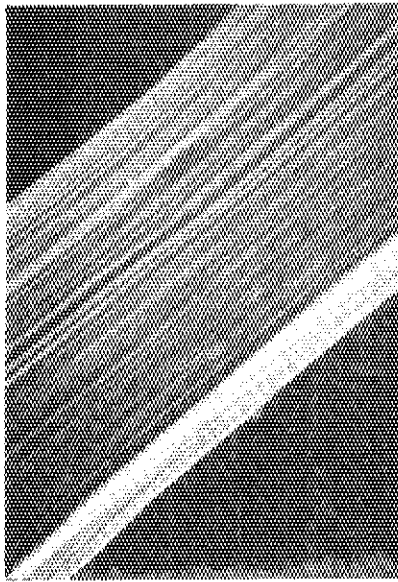
(B) Nb-Ti FILAMENT SURFACE

x100

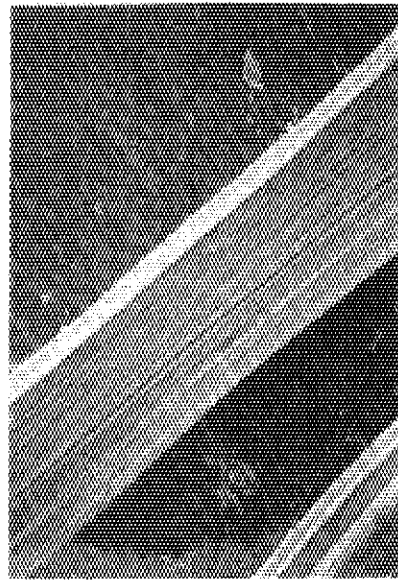


(A) CROSS SECTION

Fig. 2.2(c) CROSS SECTION OF SHORT SAMPLE C.



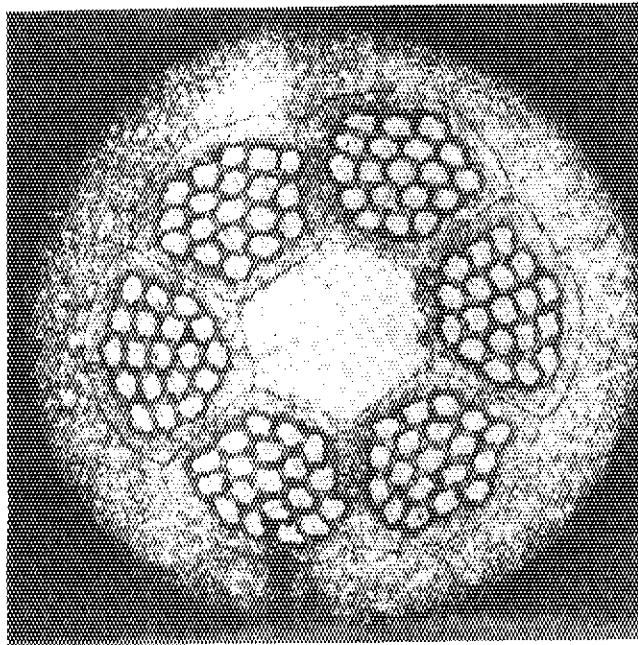
x1000



x500

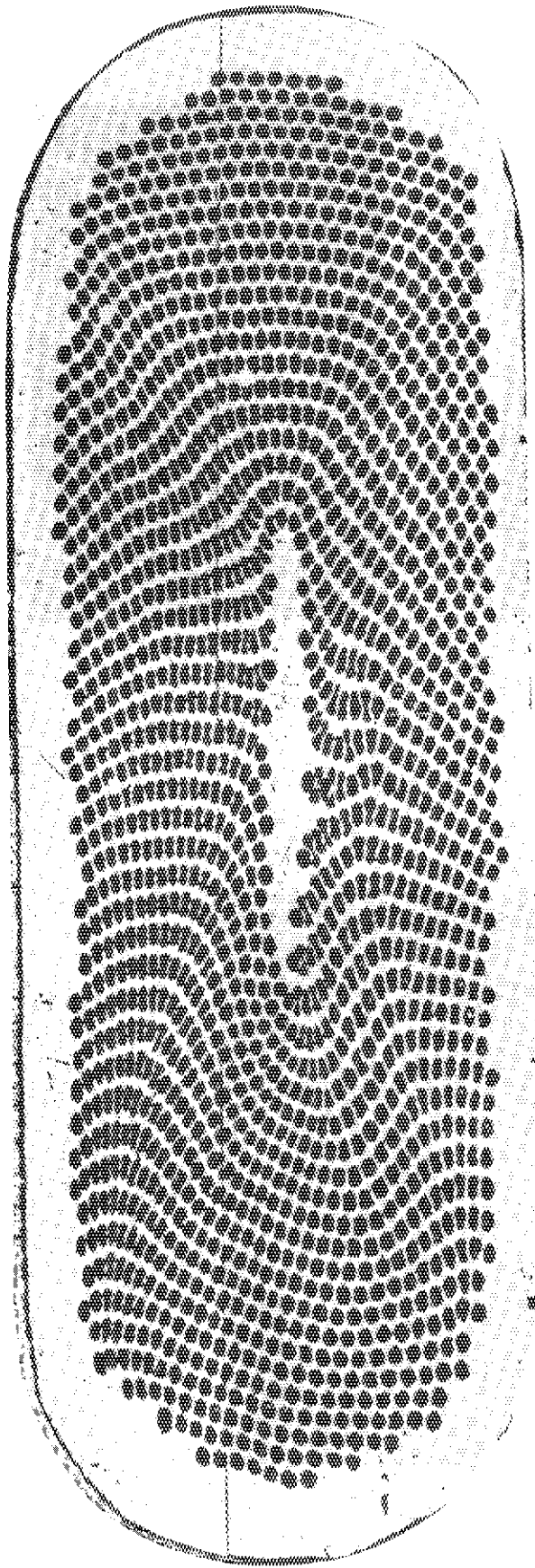
(B) Nb-Ti FILAMENT SURFACE

x100



(A) CROSS SECTION

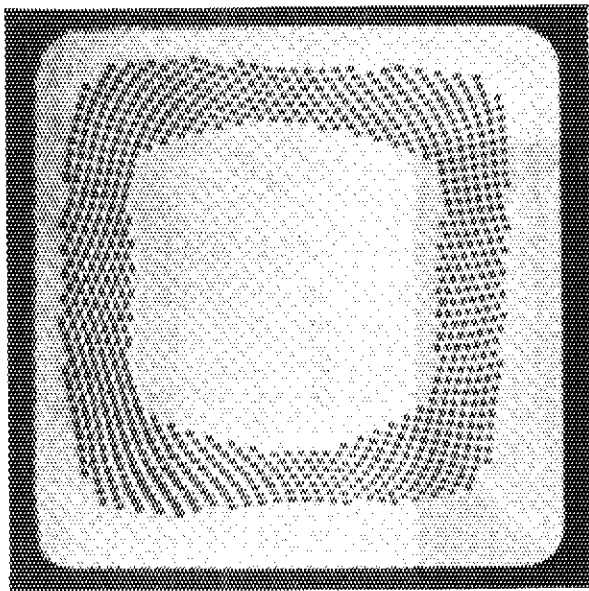
Fig. 2.2(d) CROSS SECTION OF SHORT SAMPLE D.



x88

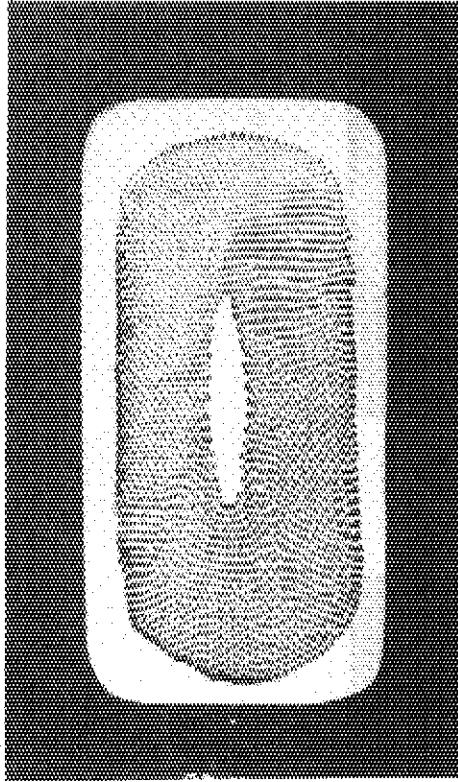
Fig. 2.2(e) CROSS SECTION OF SHORT SAMPLE E.

x10



(A) SAMPLE F

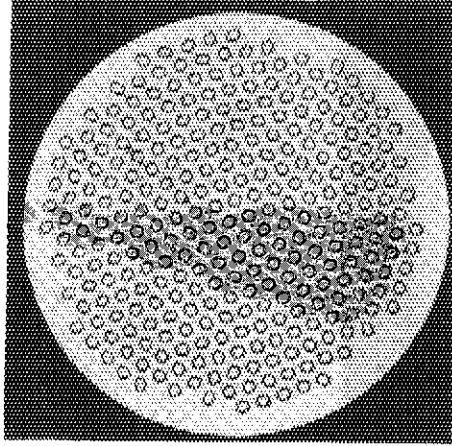
x20



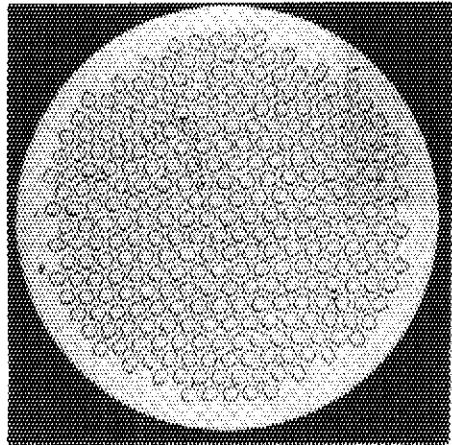
(B) SAMPLE G

Fig. 2.2(f) CROSS SECTION OF SHORT SAMPLES.

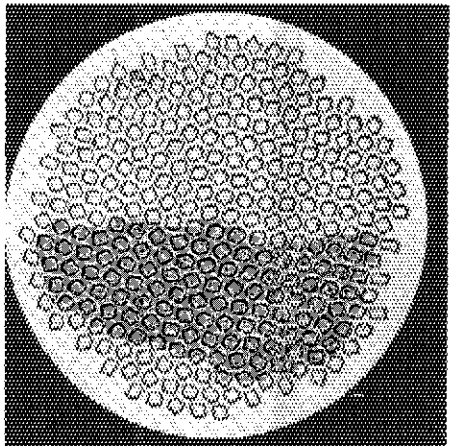
x50



(C) SAMPLE N



(B) SAMPLE M



(A) SAMPLE L

Fig. 2.2(g) CROSS SECTION OF SHORT SAMPLES.

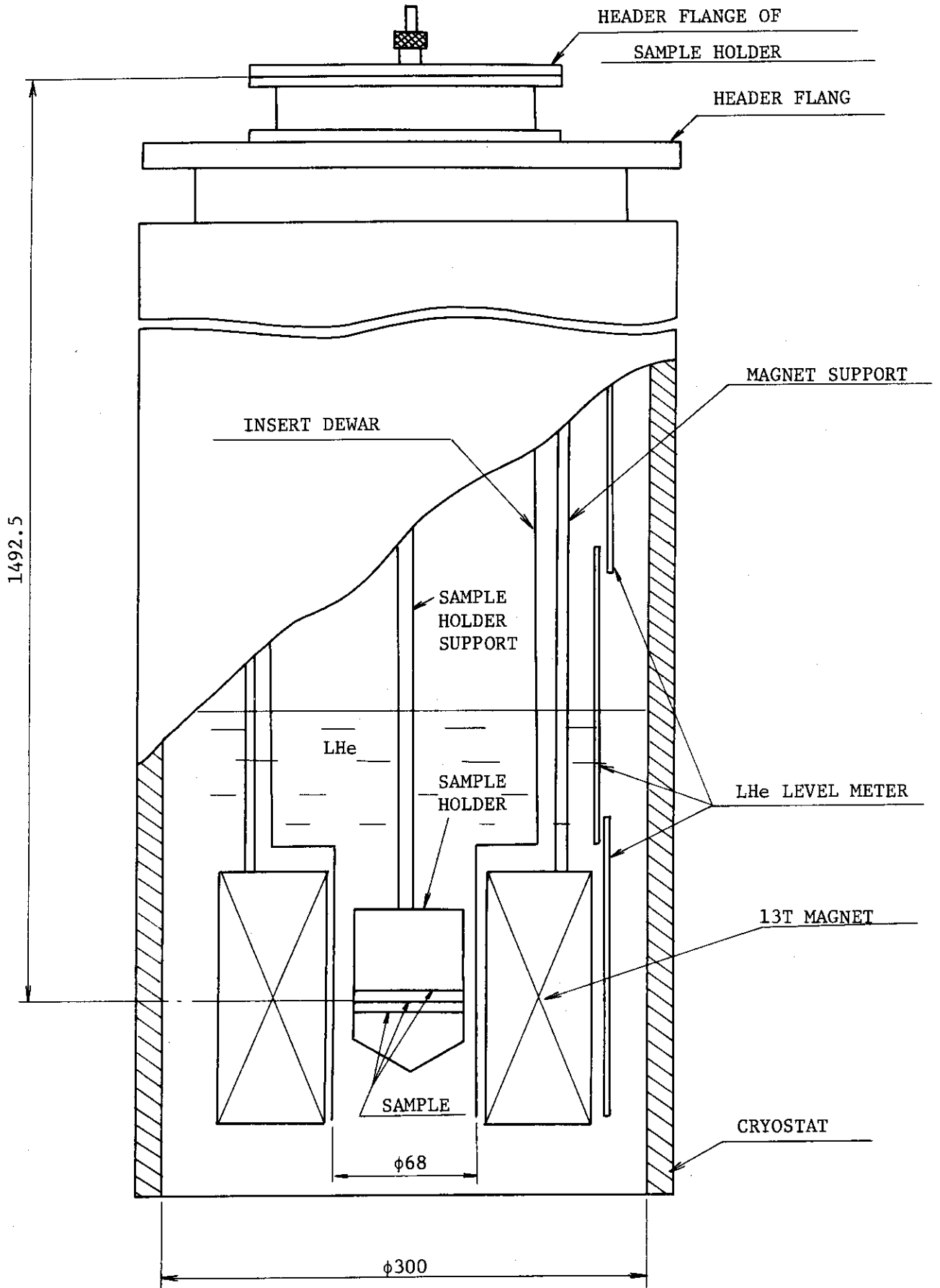


Fig. 2.3 EXPERIMENTAL APPARATUS

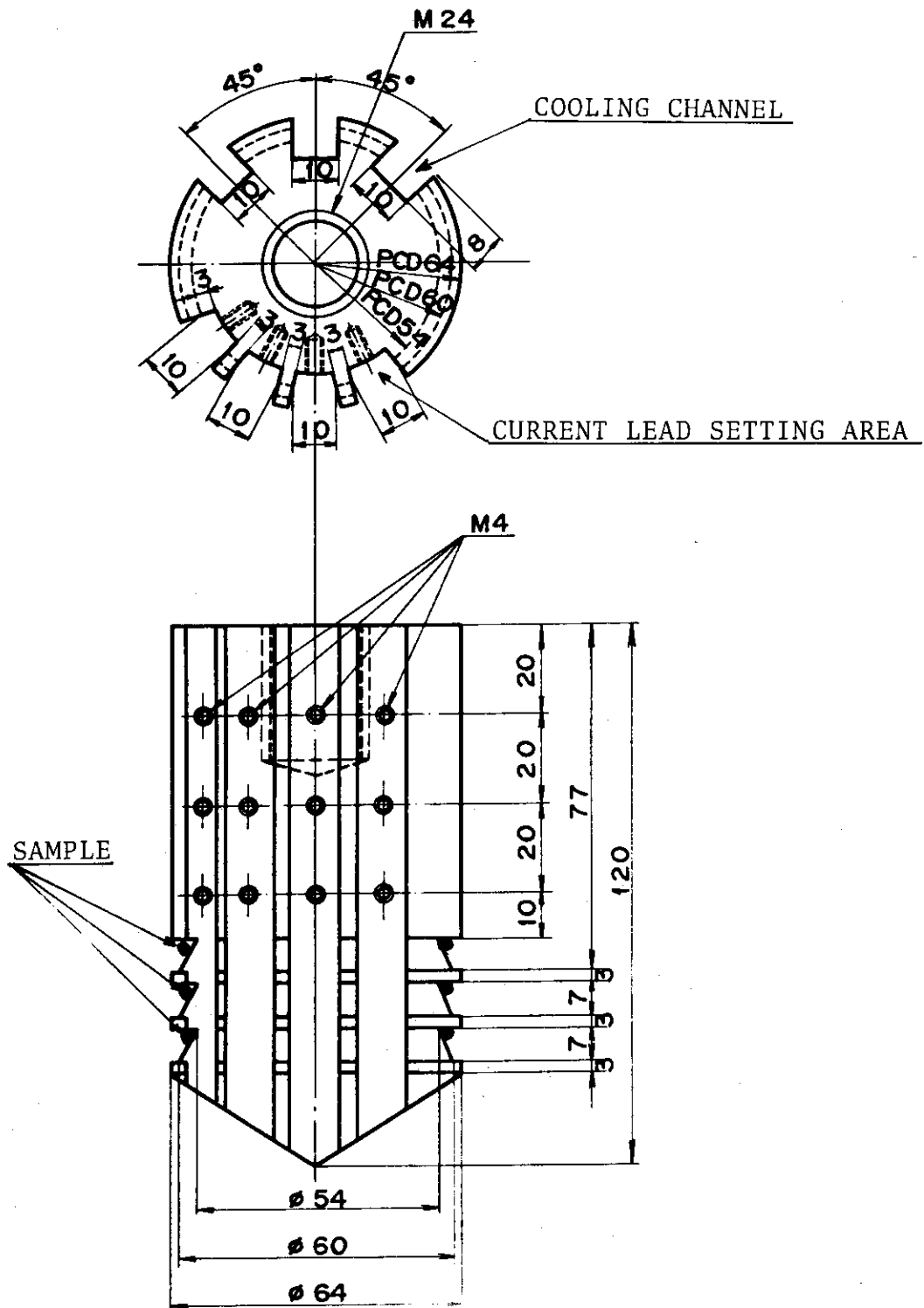


Fig. 2.4 SAMPLE HOLDER (A)

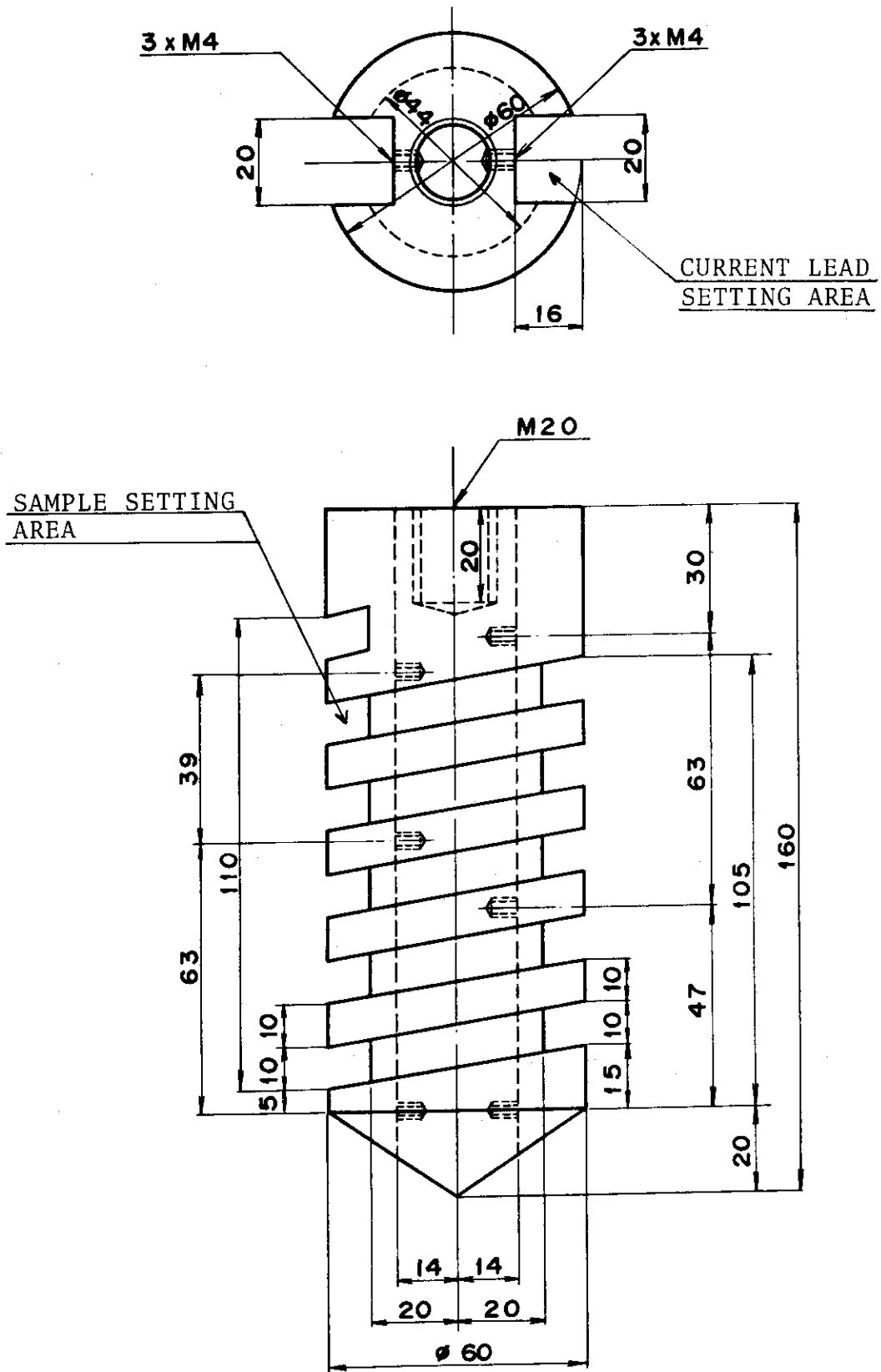


Fig. 2.5 SAMPLE HOLDER (B)

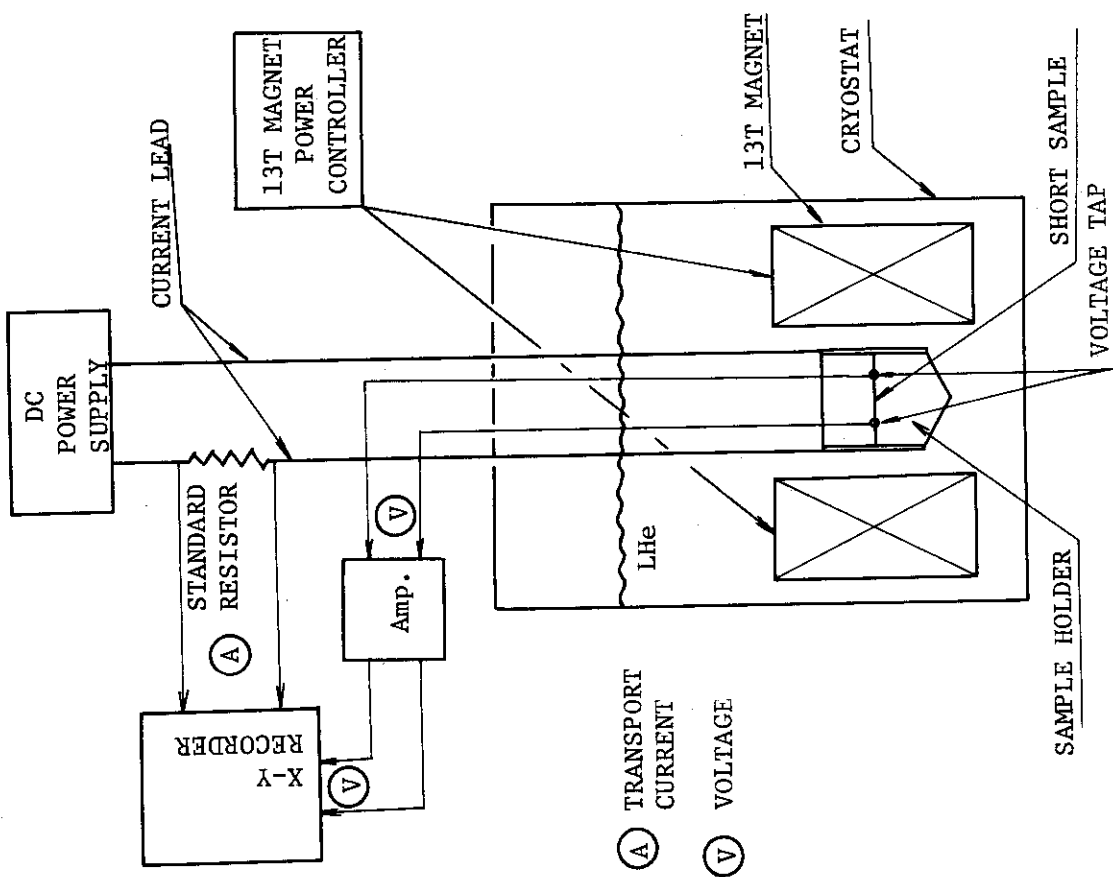
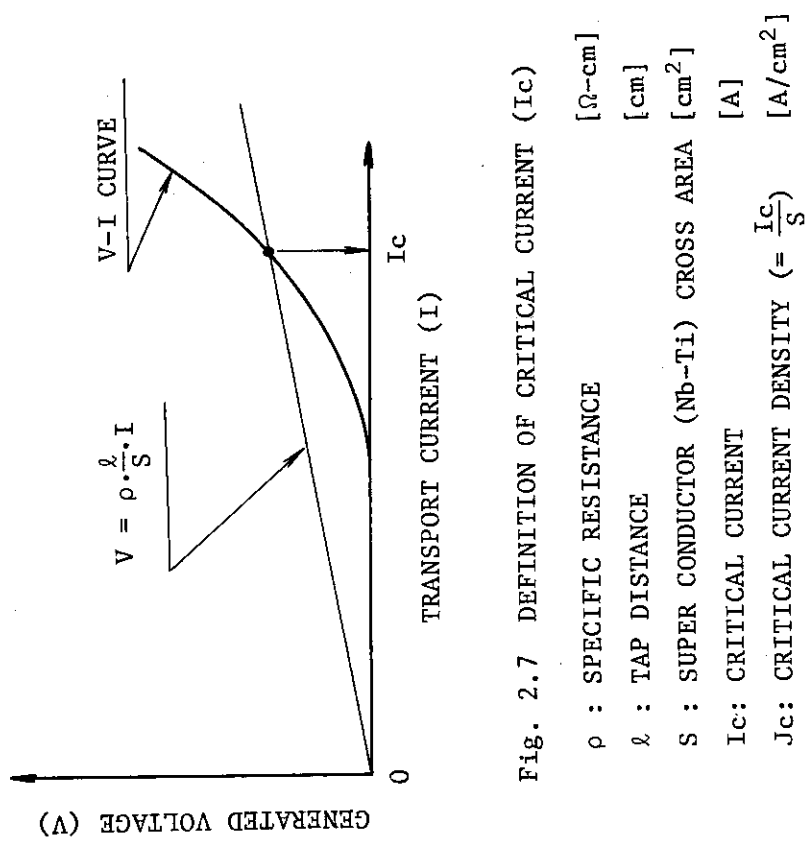


Fig. 2.6 MEASUREMENT CIRCUIT OF SHORT SAMPLE TEST



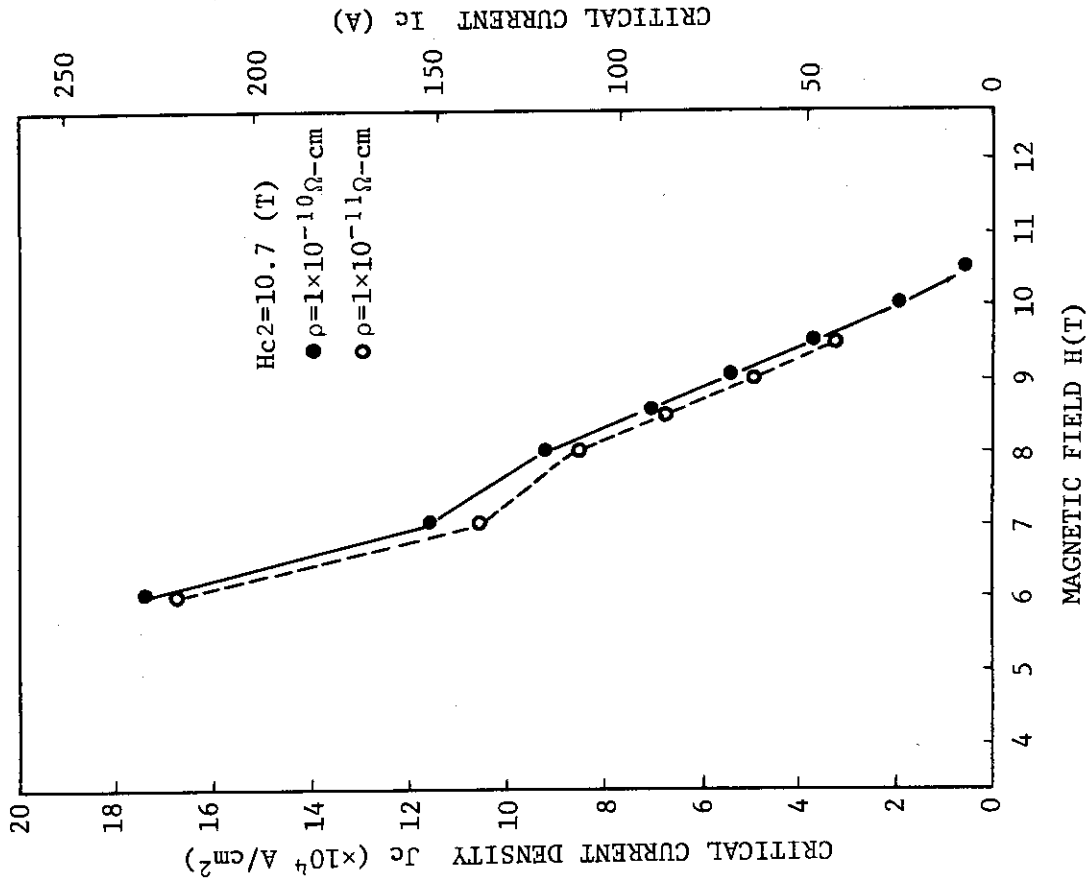


Fig. 3.1(b) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE B.

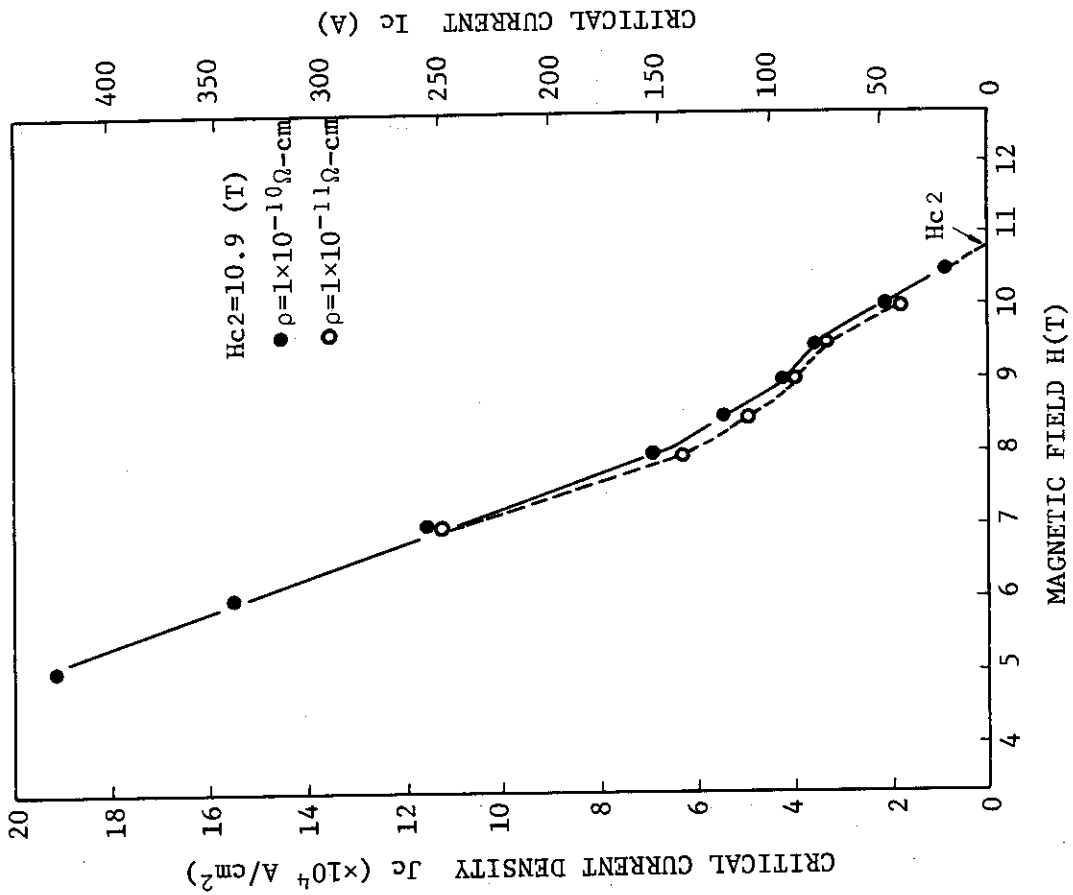


Fig. 3.1(a) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE A.

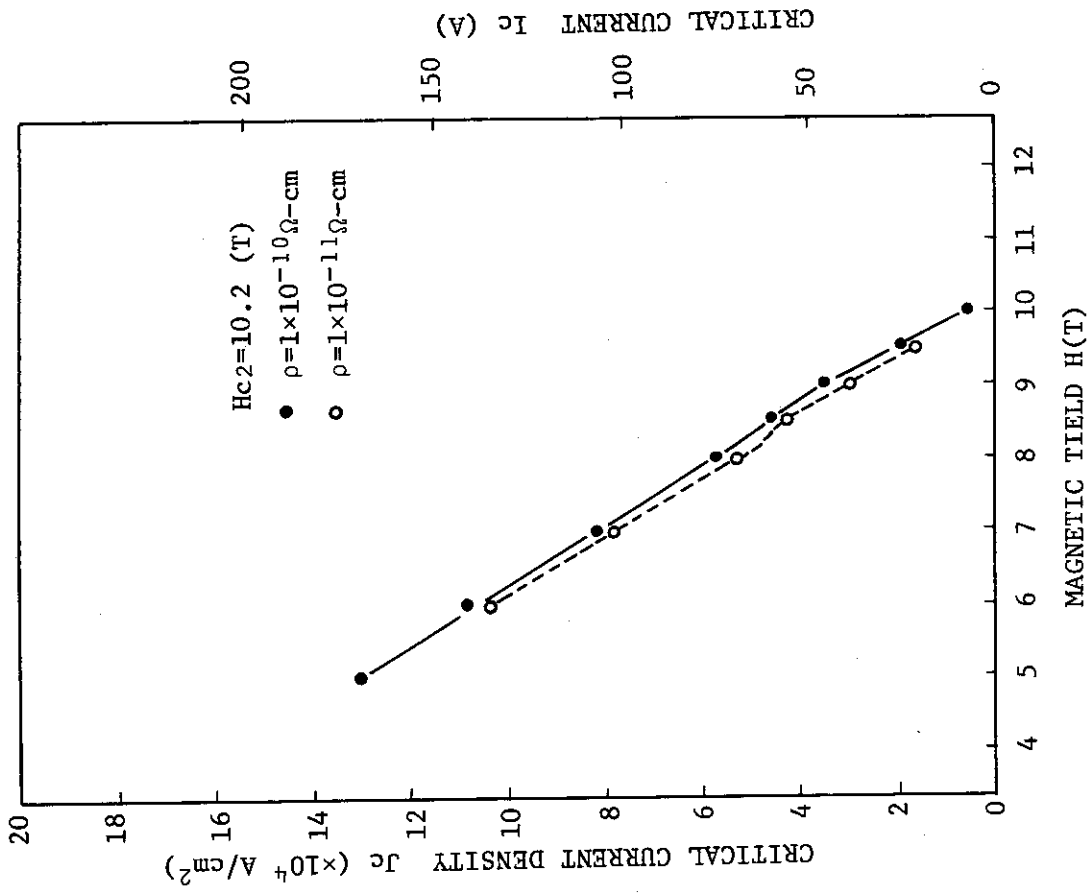


Fig. 3.1(d) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE D.

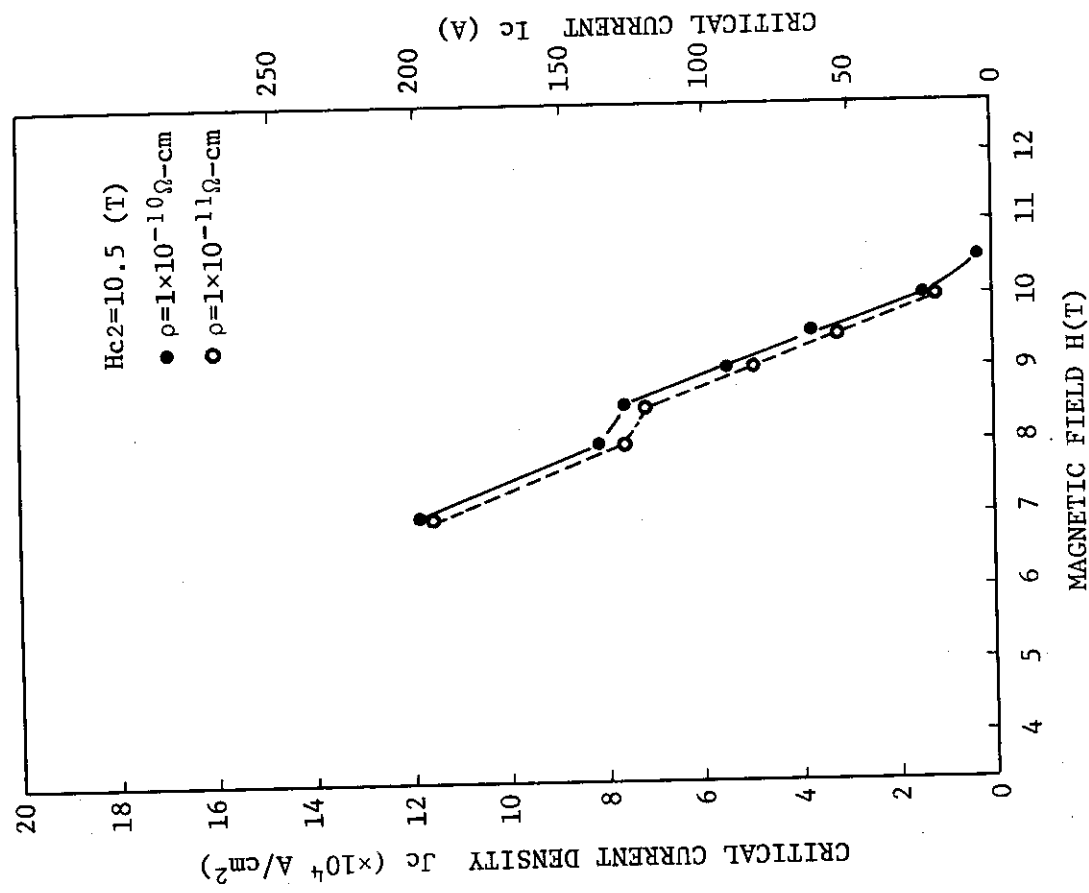


Fig. 3.1(c) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE C.

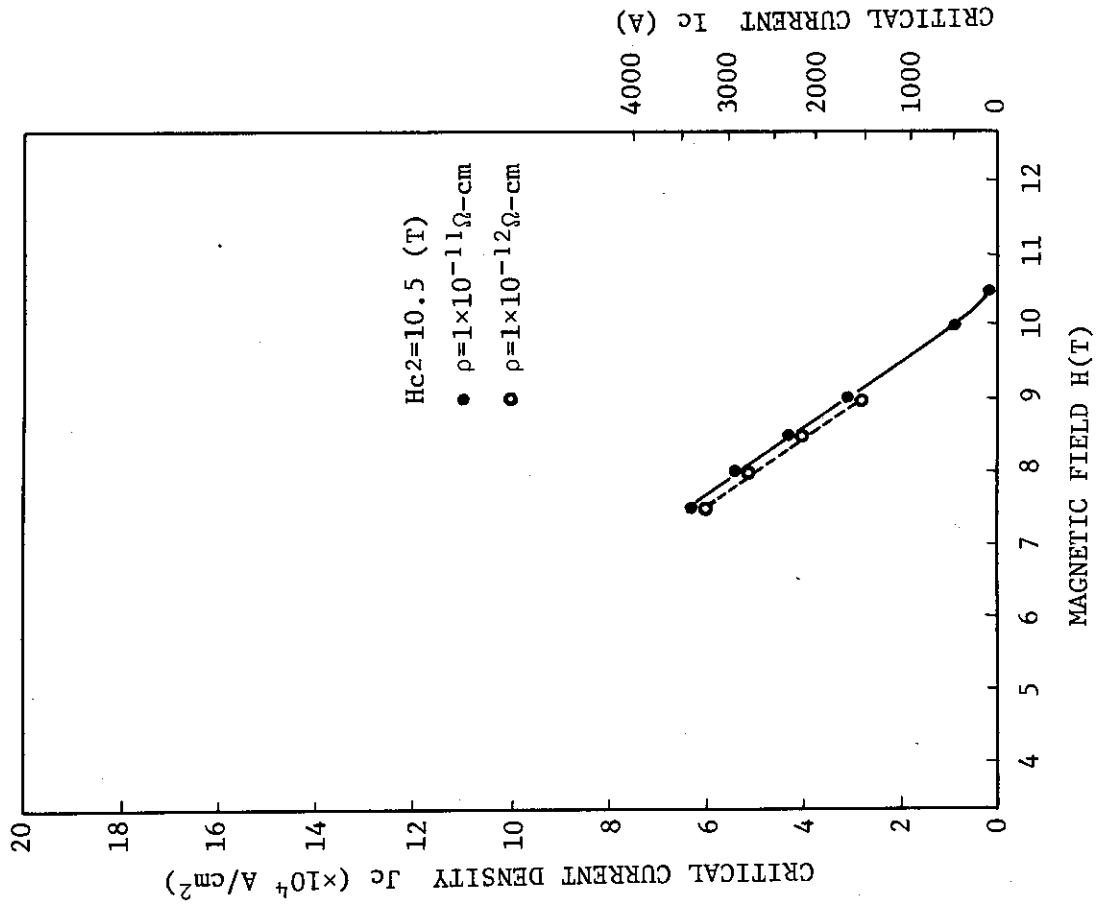


Fig. 3.1(f) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE F.

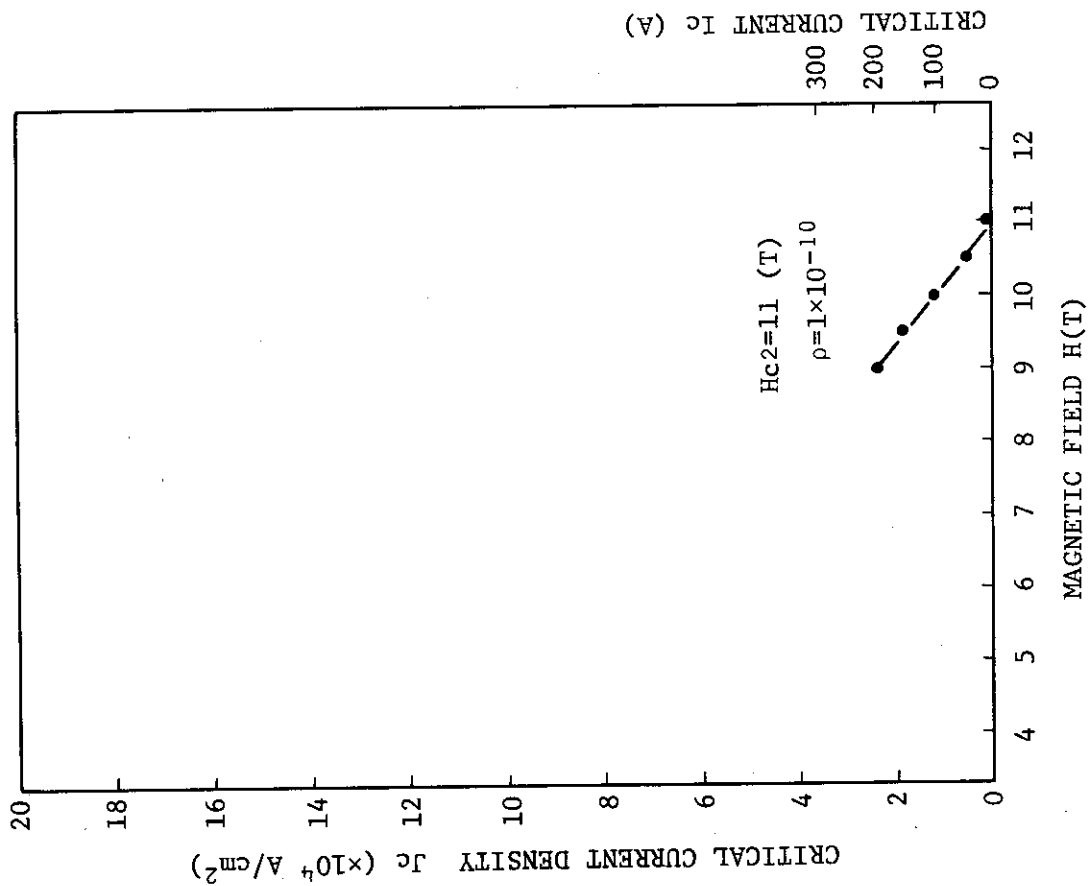


Fig. 3.1(e) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE E.

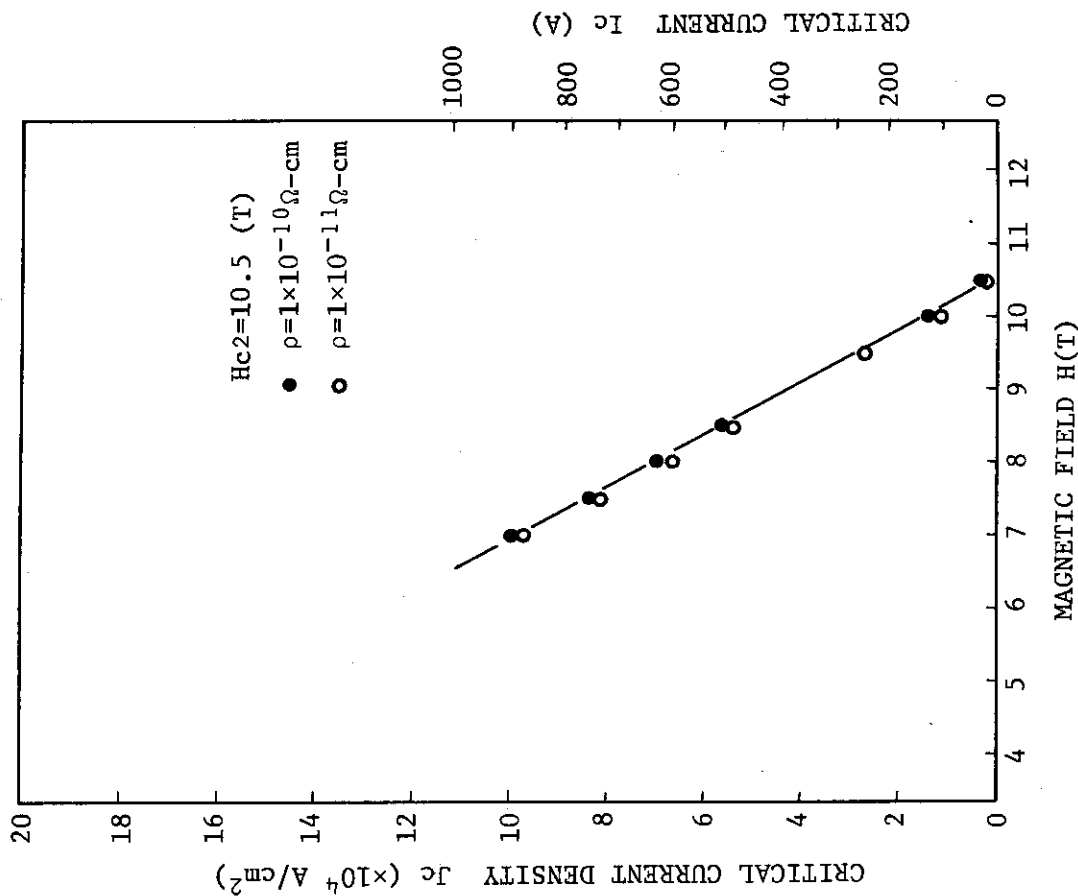


Fig. 3.1(h) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE H.

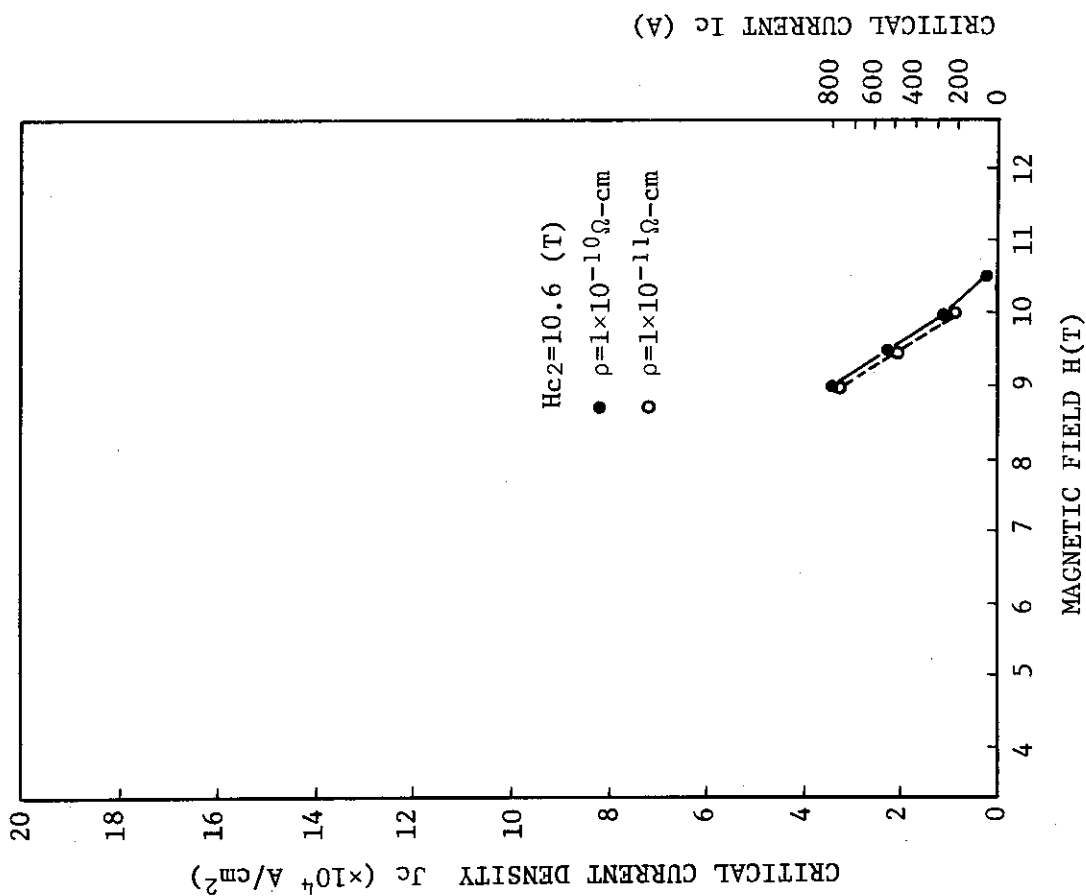


Fig. 3.1(g) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE G.

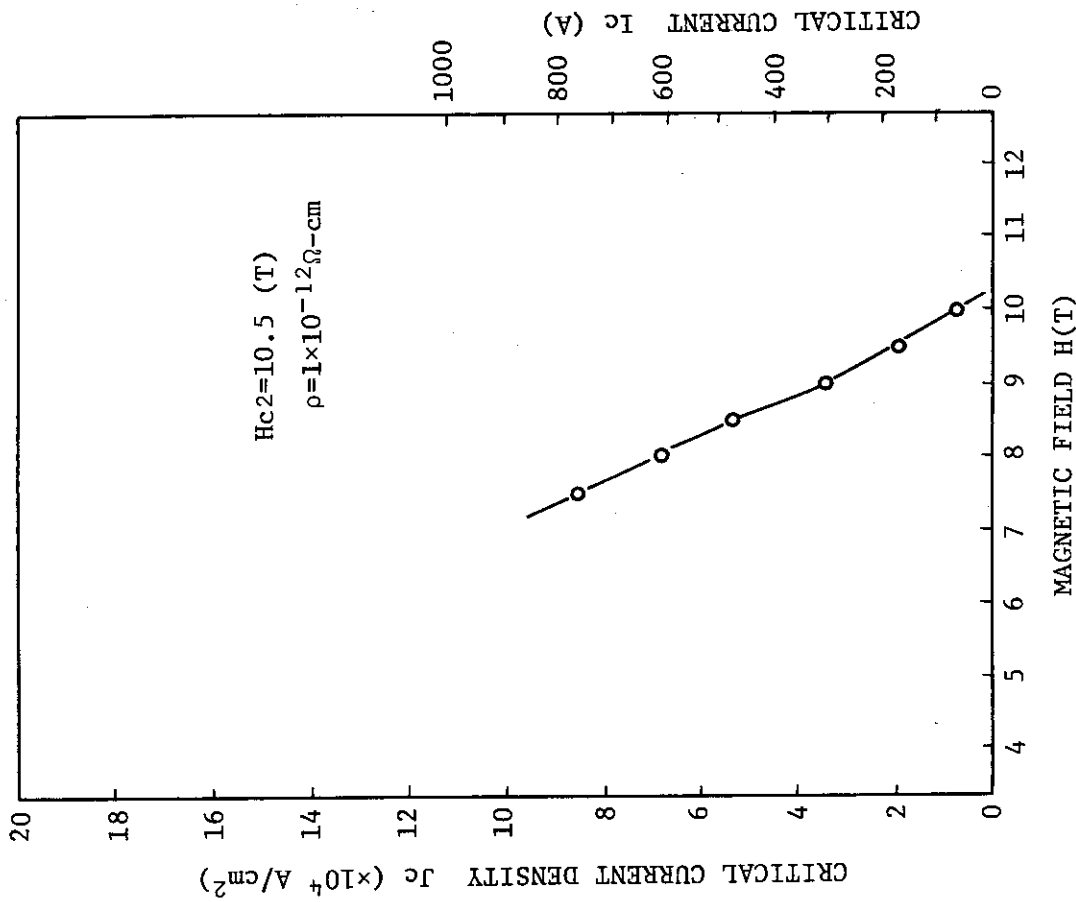


Fig. 3.1(j) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE J.

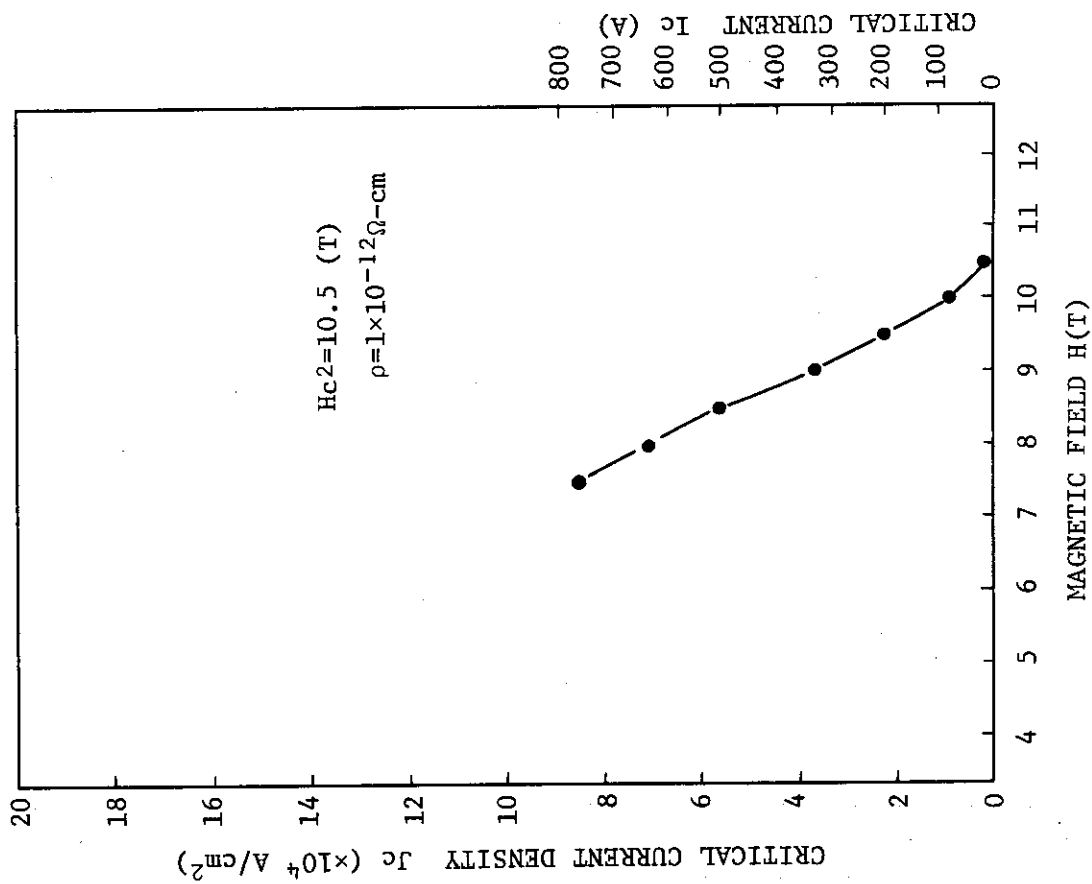


Fig. 3.1(i) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE I.

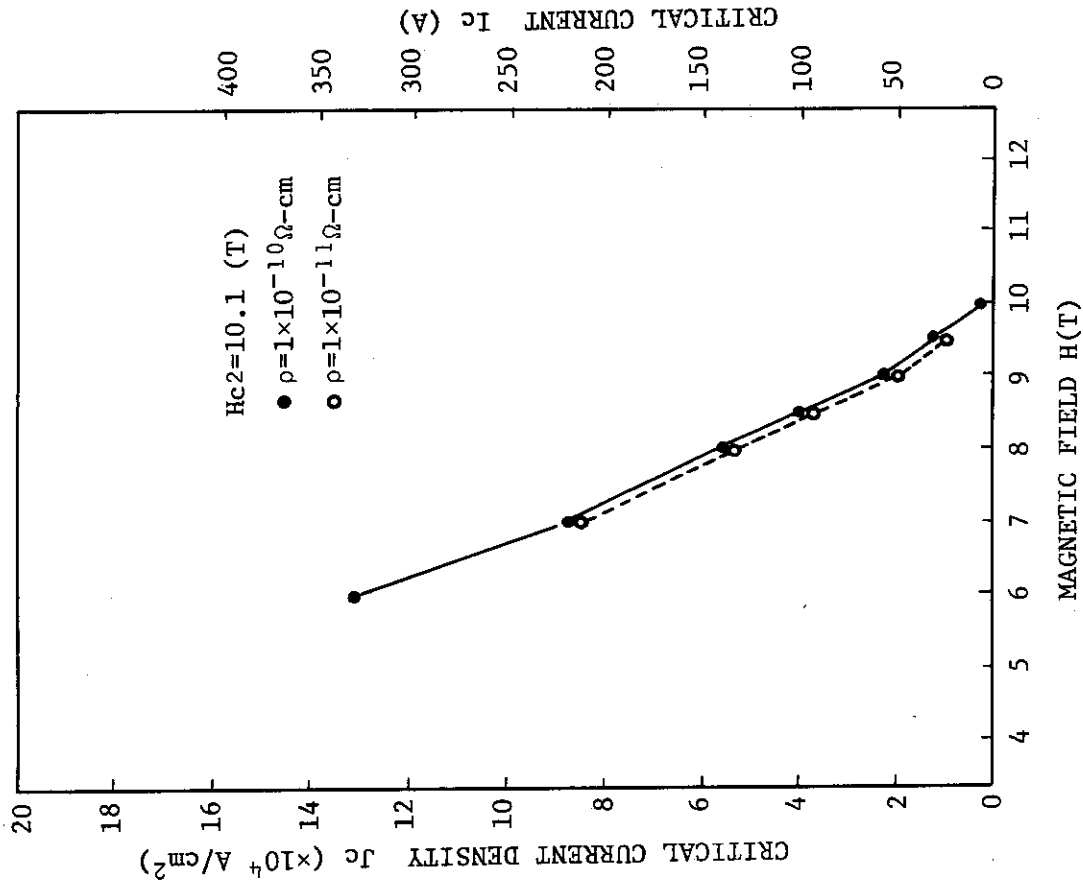


Fig. 3.1(l) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE L.

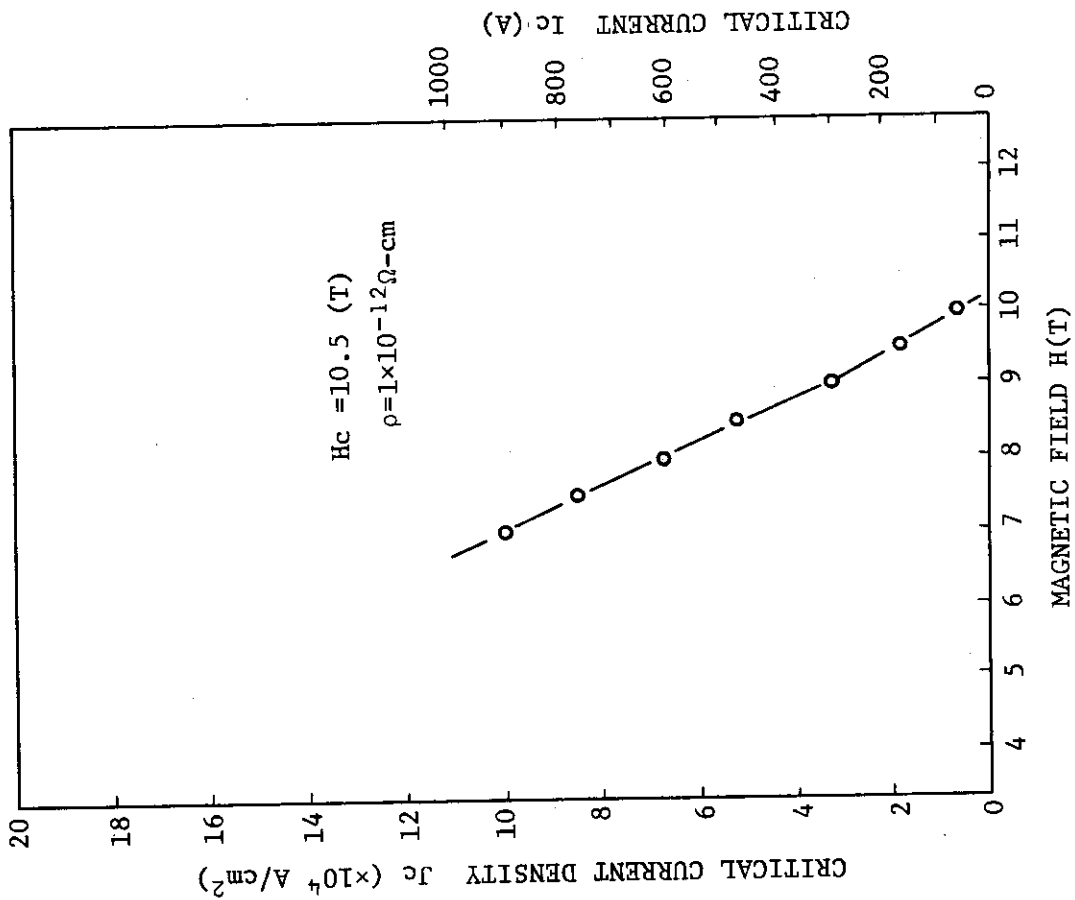


Fig. 3.1(k) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE K.

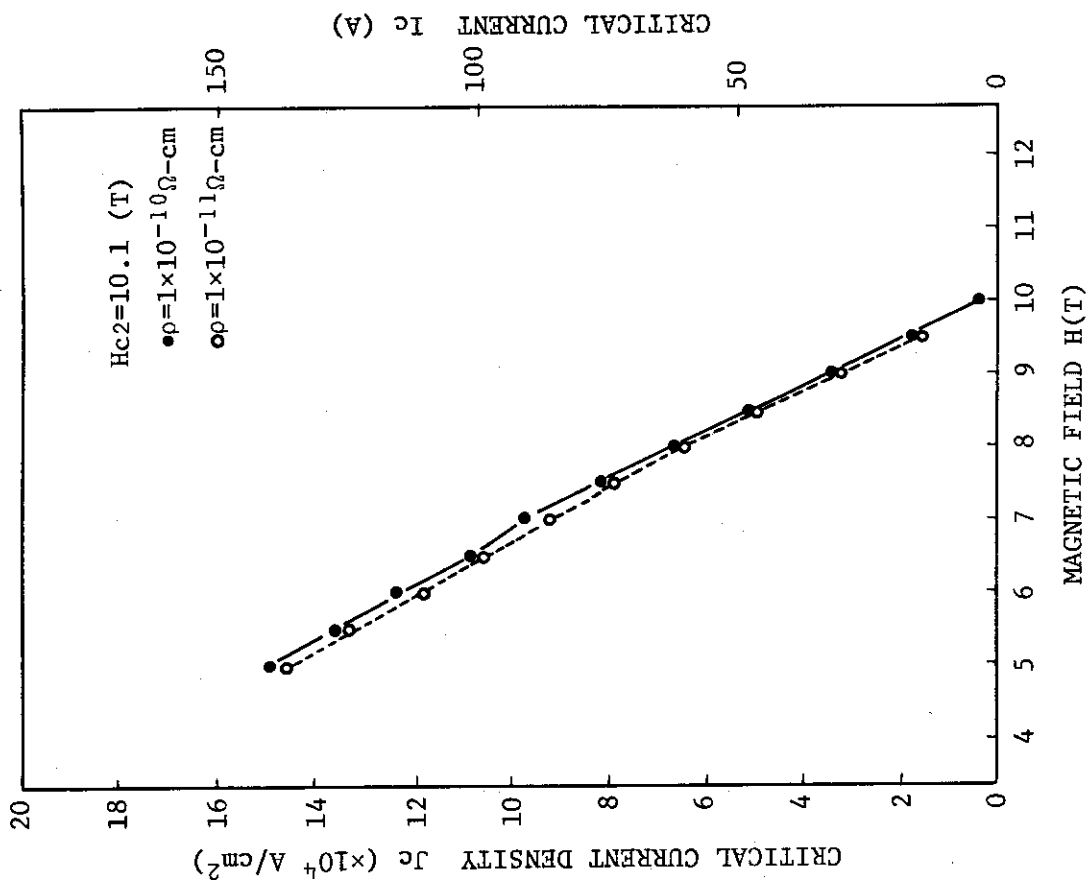


Fig. 3.1.(n) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE N.

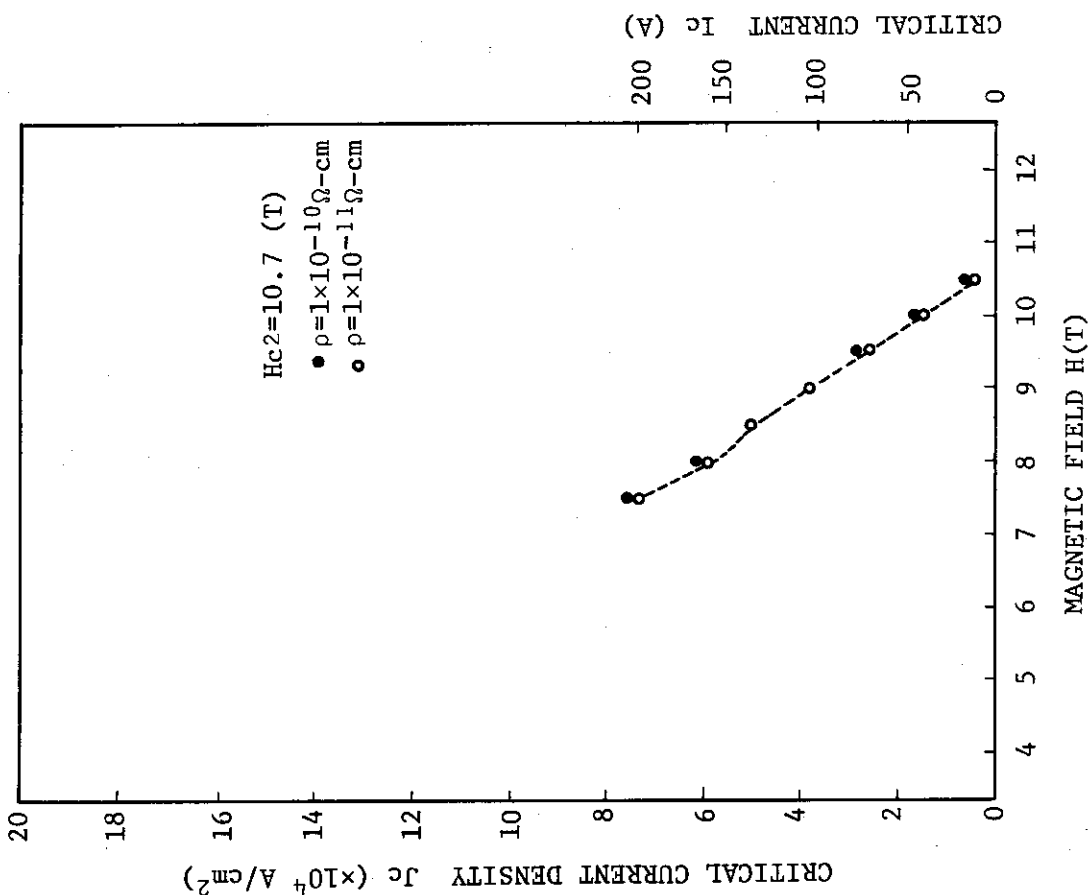


Fig. 3.1.(m) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE M.

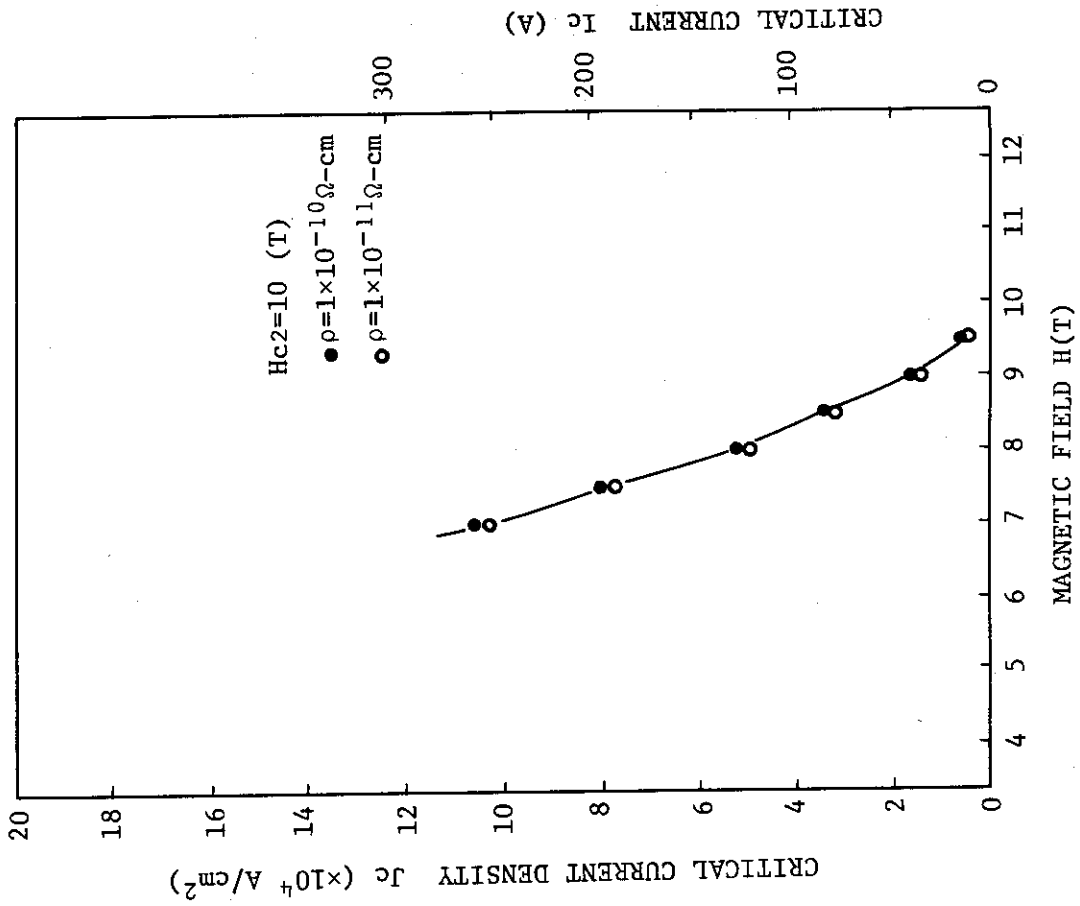


Fig. 3.1(p) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE P.

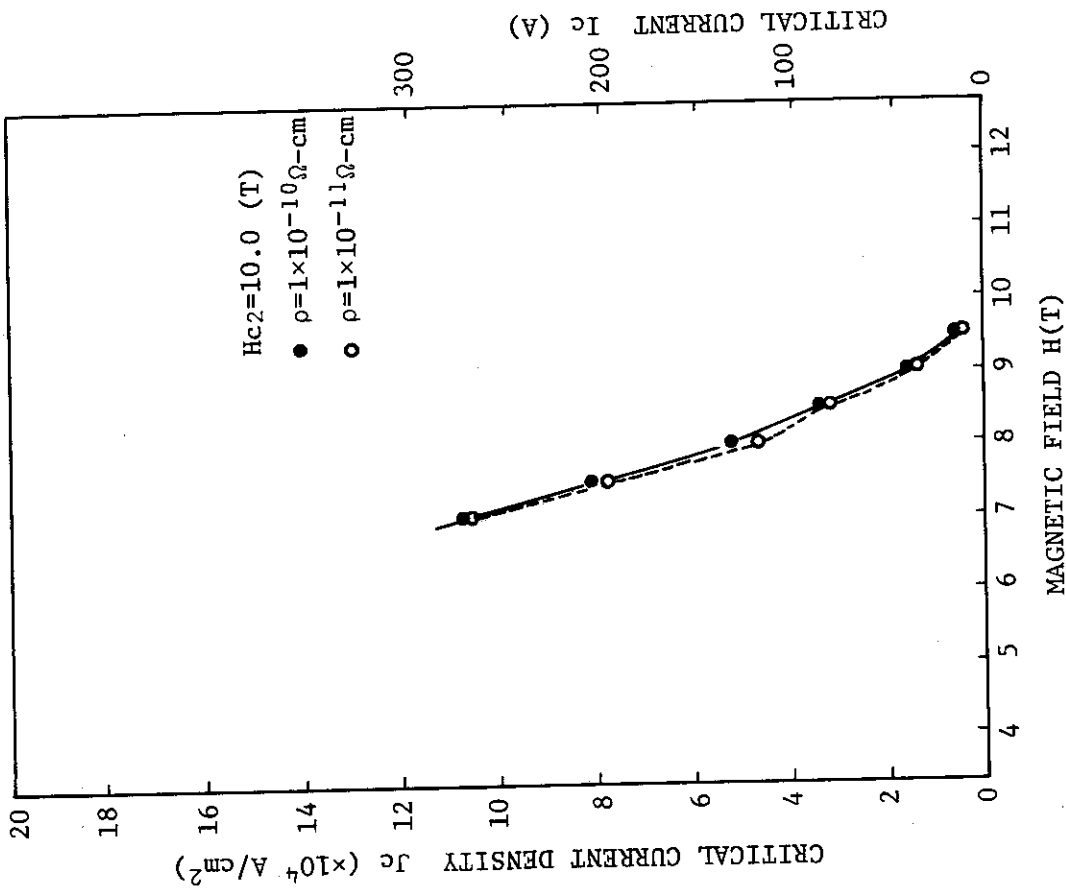


Fig. 3.1(o) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE O.

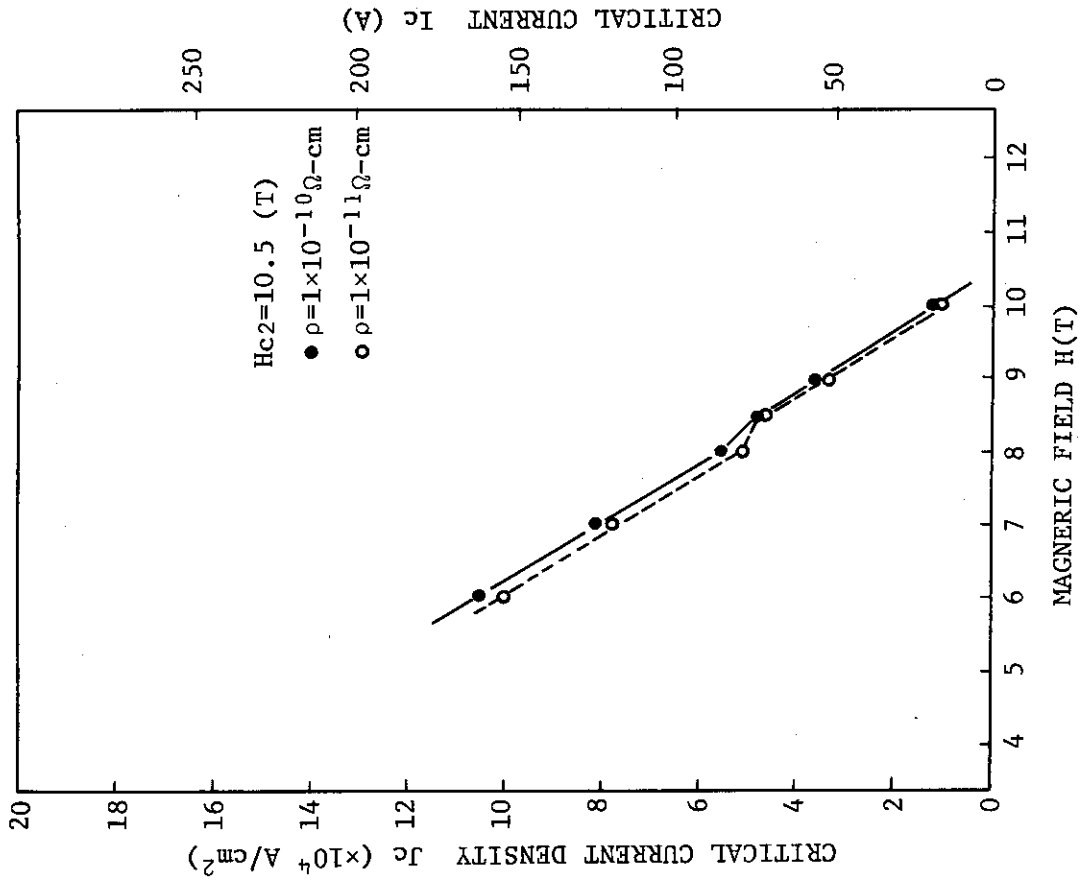


Fig. 3.1(r) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE R.

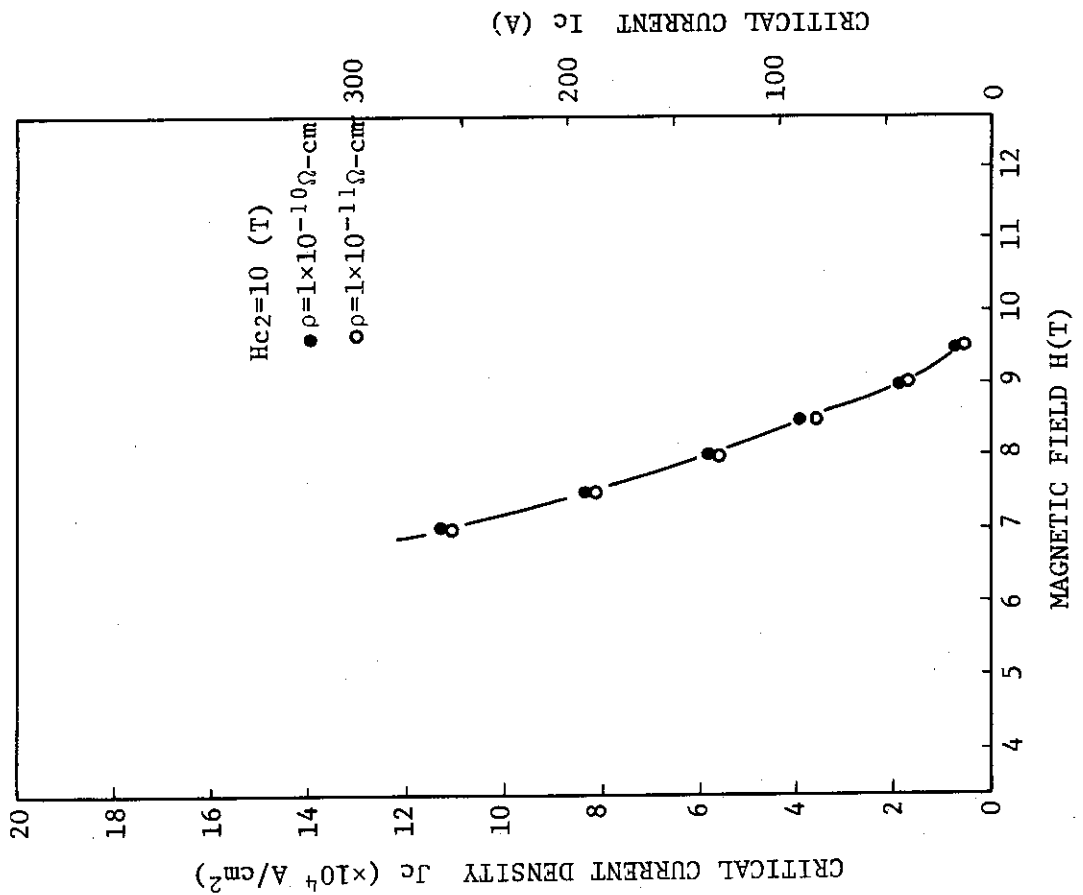


Fig. 3.1(q) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE Q.

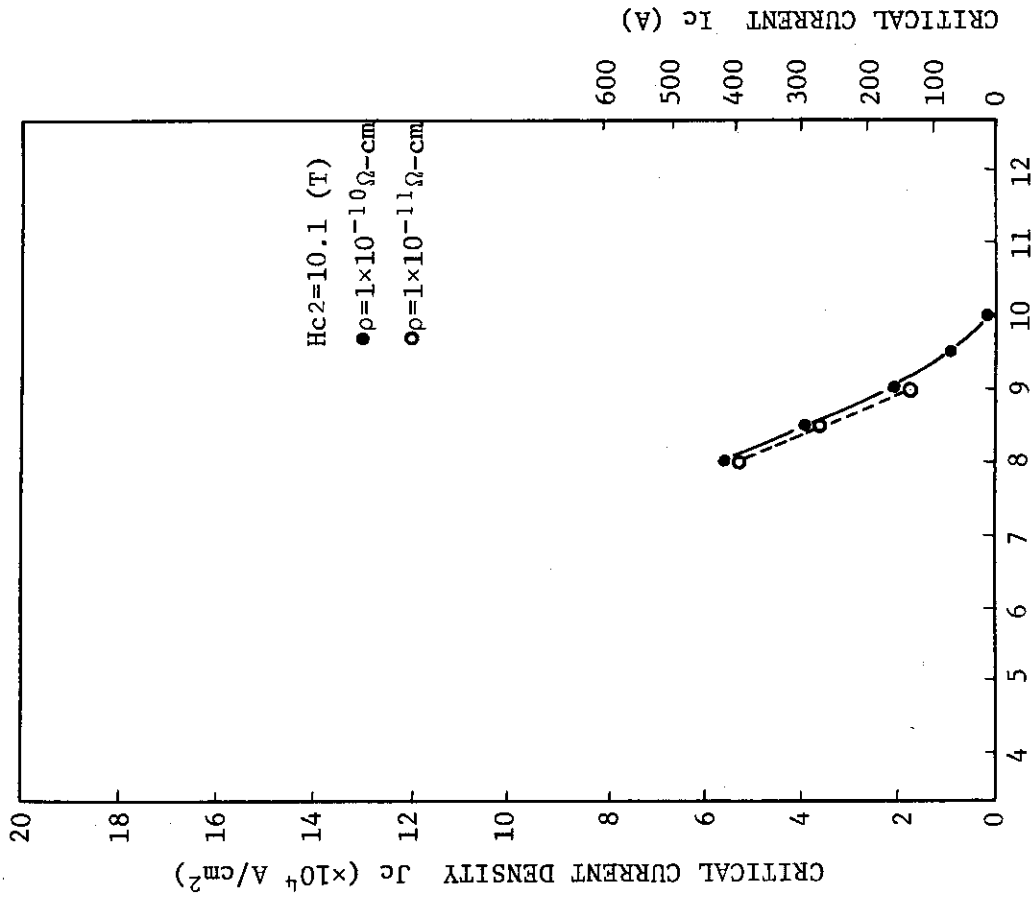


Fig. 3.1(t) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE T.

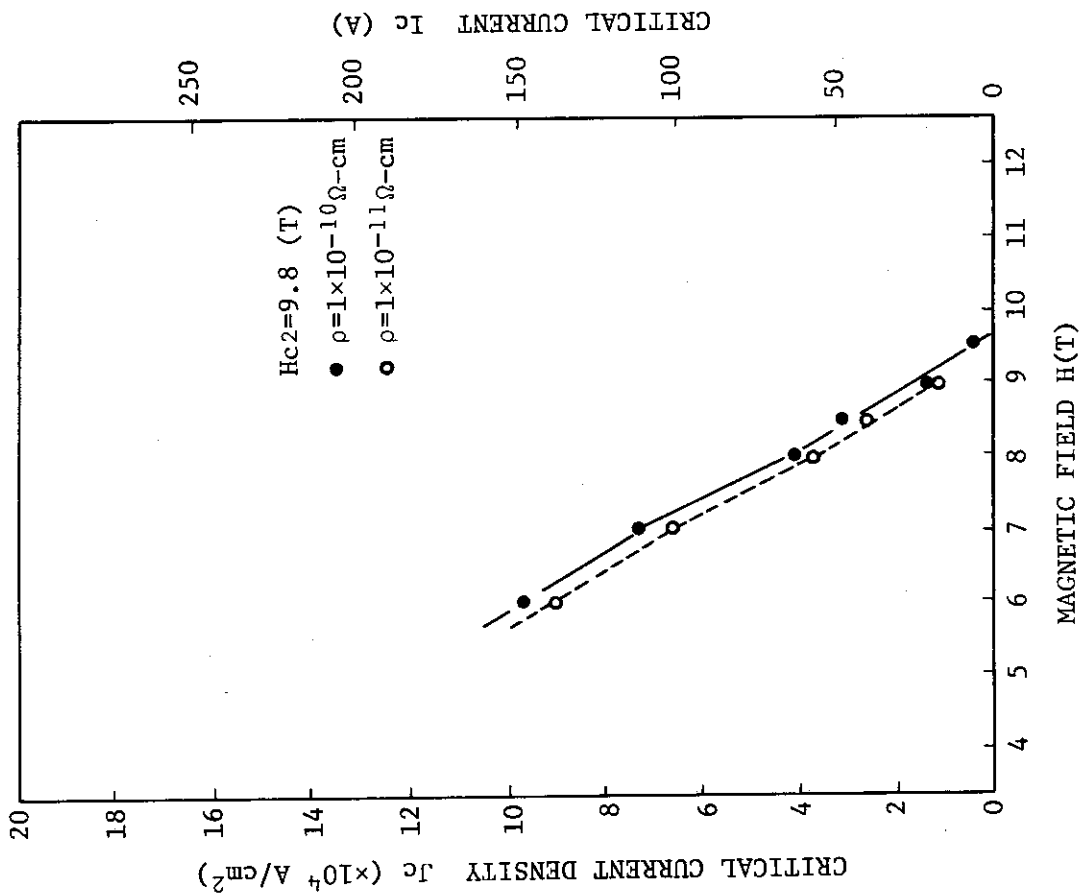


Fig. 3.1(s) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE S.

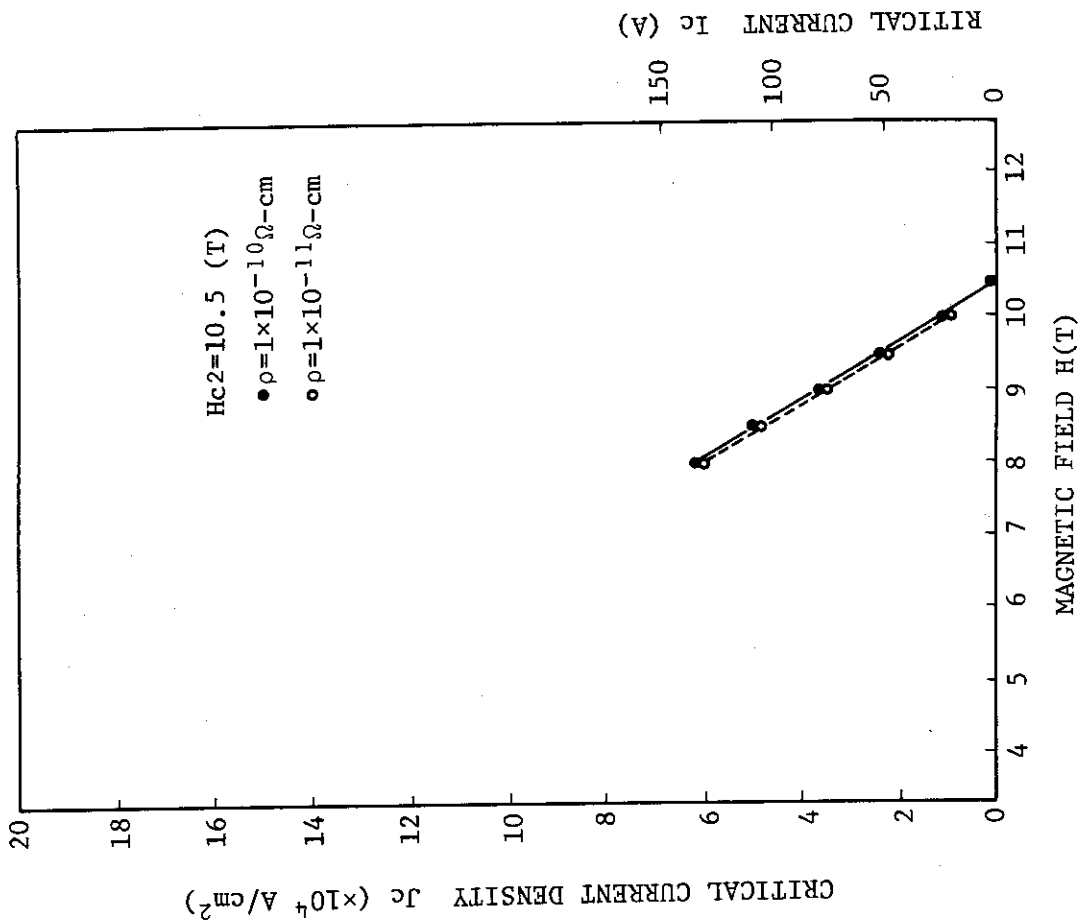


Fig. 3.1(v) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE V.

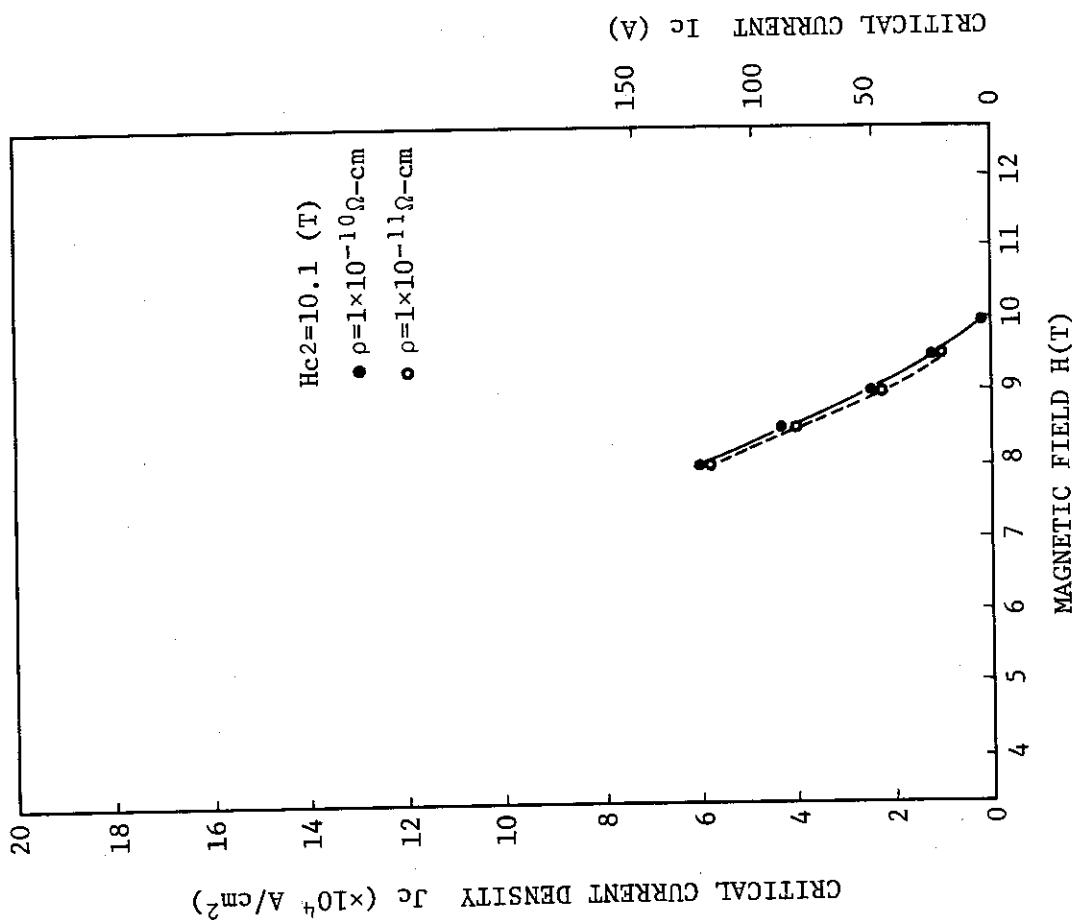


Fig. 3.1(u) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE U.

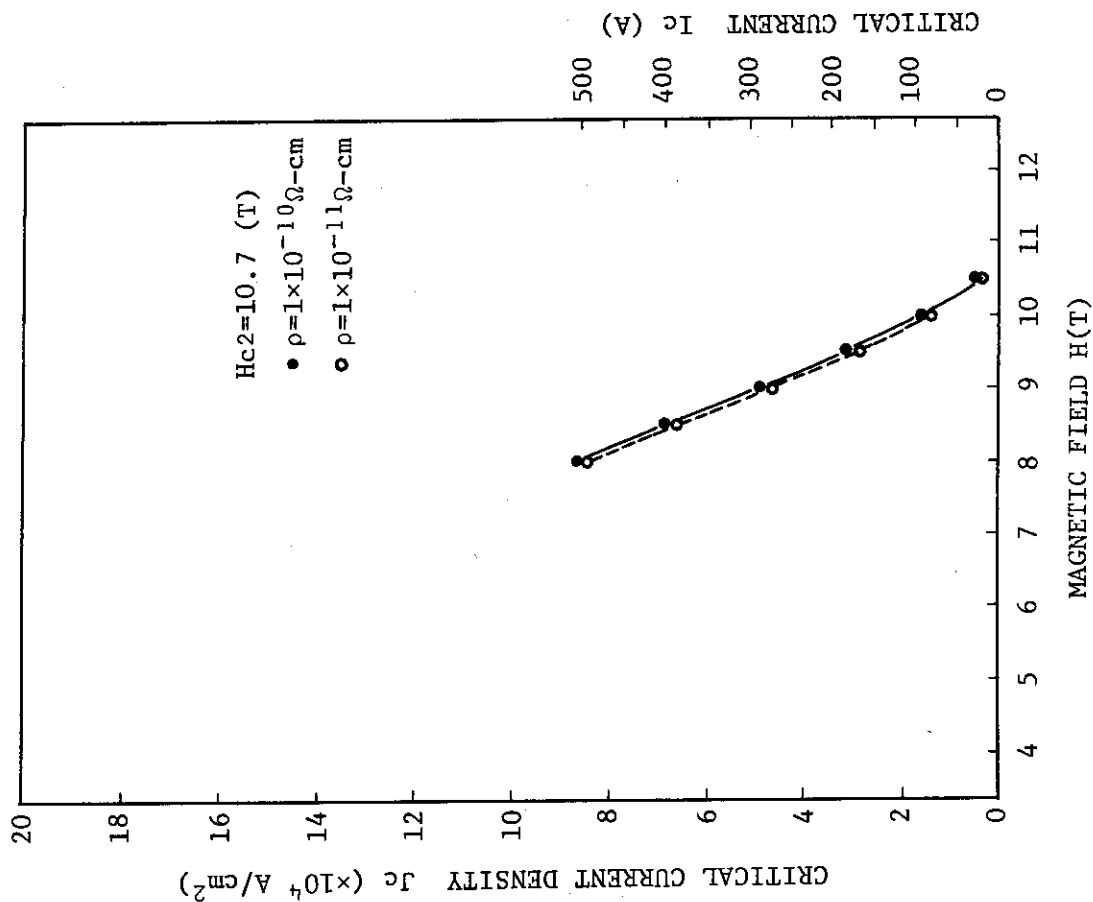


Fig. 3.1(x) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE X.

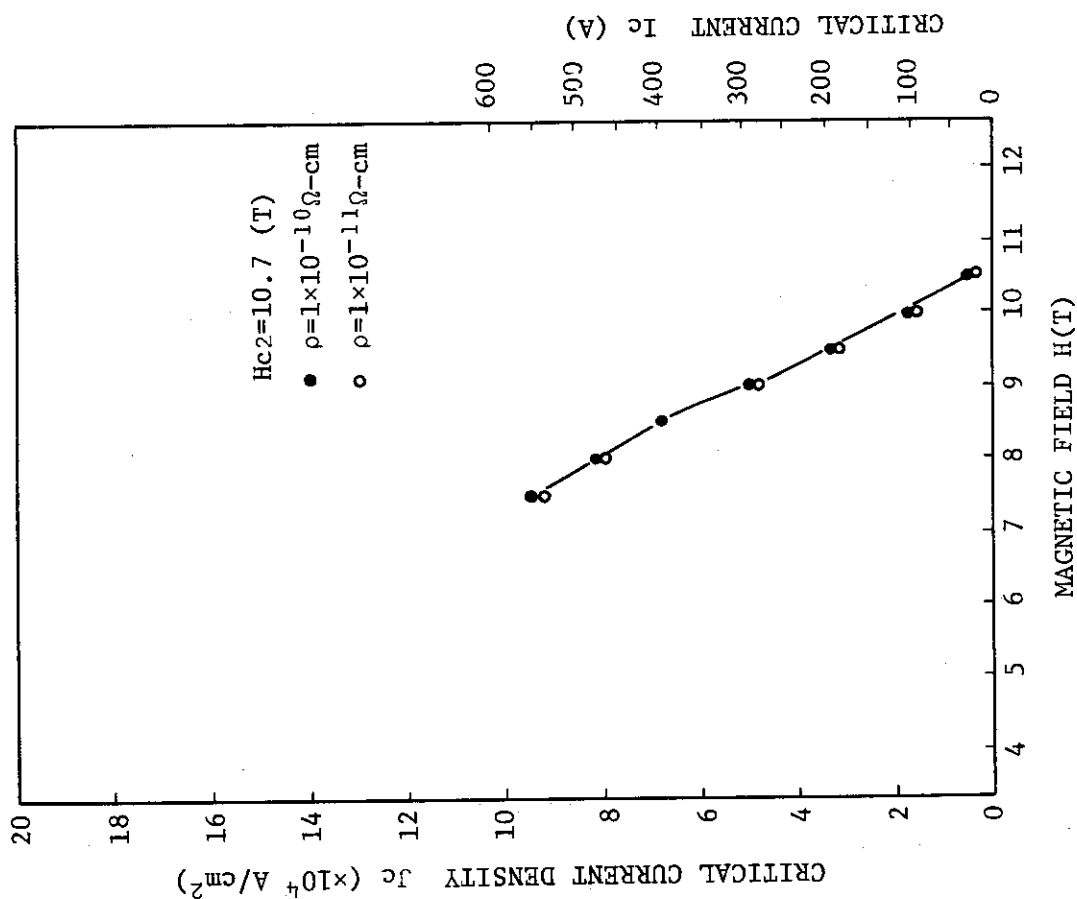


Fig. 3.1(w) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE W.

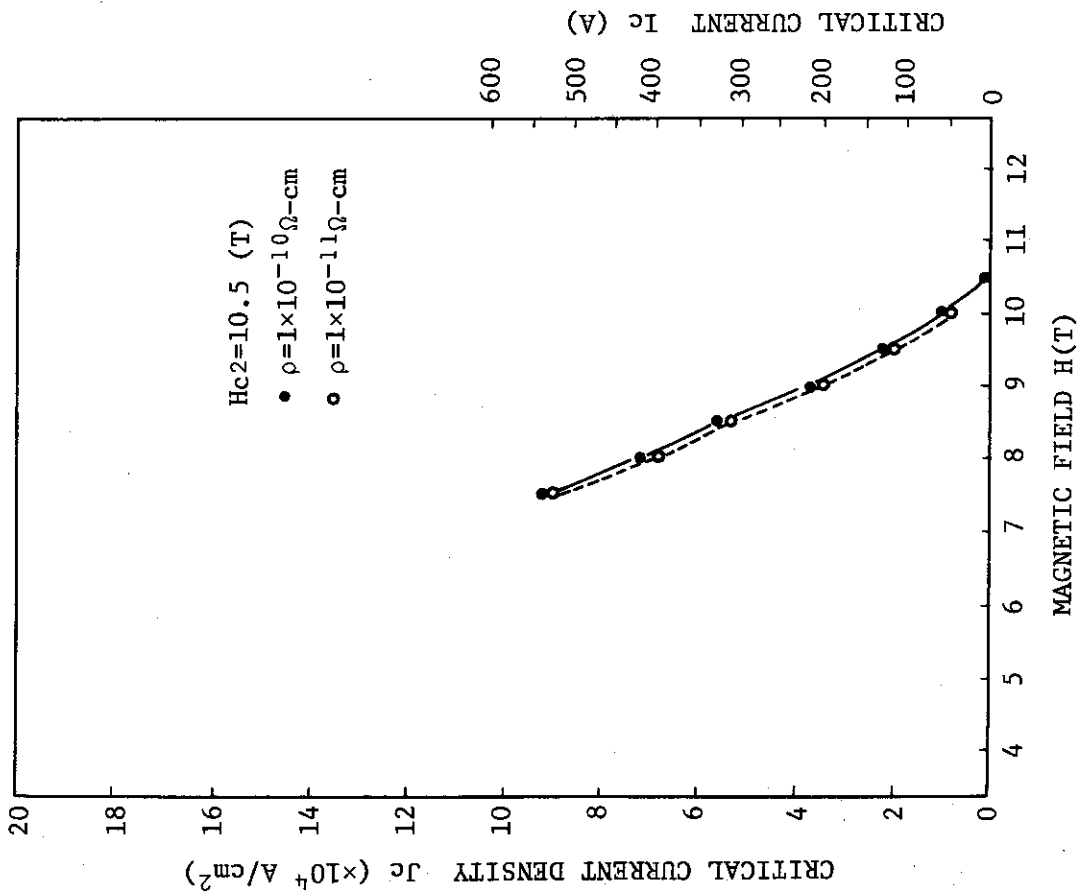


Fig. 3.1(y) SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF SHORT SAMPLE Y.

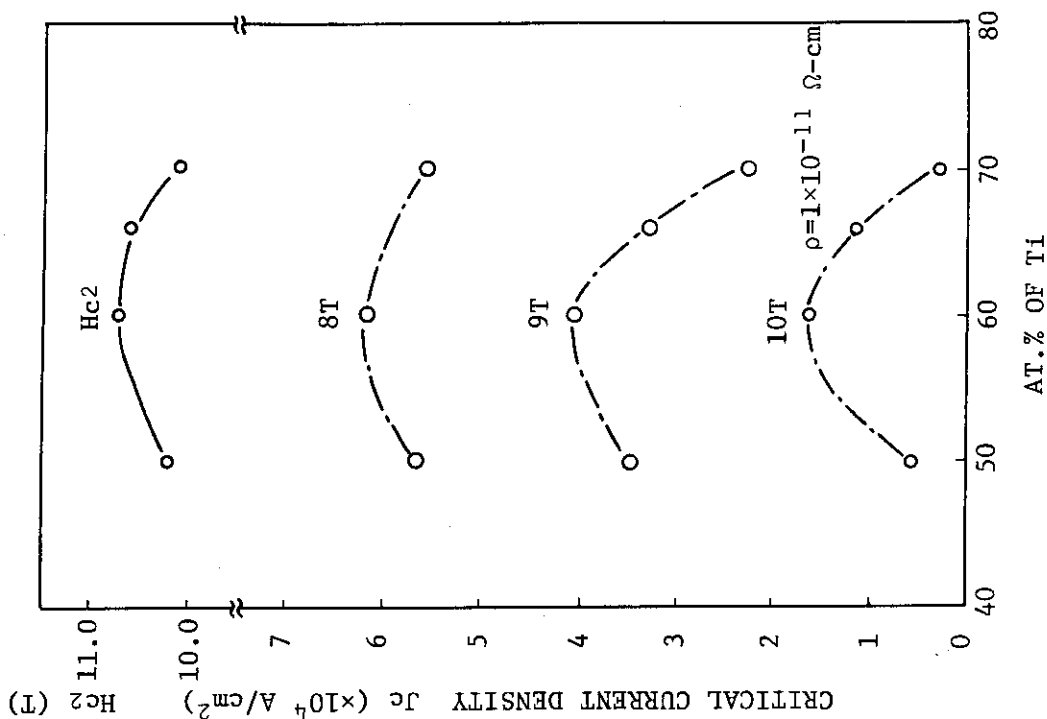


Fig. 3.3 J_c AND H_{c2} VERSUS CONTENT OF Tl AT VARIOUS MAGNETIC FIELD.

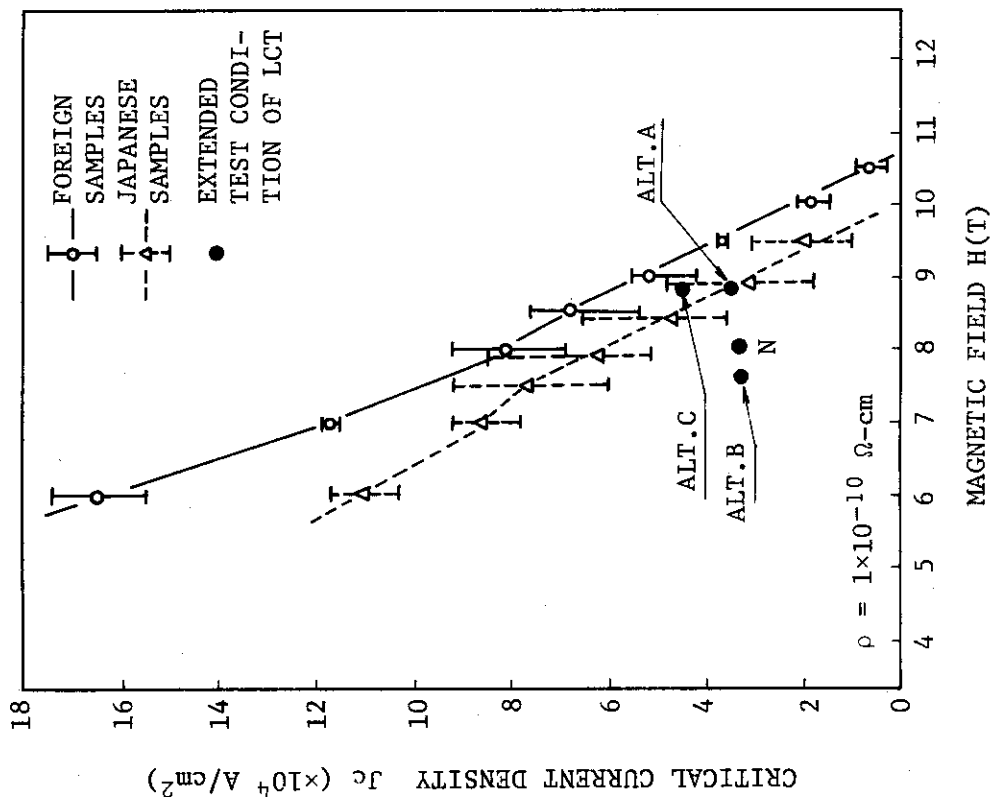


Fig. 3.2 SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS OF FOREIGN AND JAPANESE Nb-Tl SHORT SAMPLES.

付 録

10 KA 級大電流導体の短尺試験

IEA - LCT 計画に関する技術開発の一環として, 10 KA 級超電導導体の超電導特性測定技術を確立するために行なった短尺試験について付記する。

目 次

1. はじめに.....	34
2. 短尺試験.....	34
2.1 試料.....	34
2.2 実験装置.....	34
2.3 実験方法.....	35
3. 実験結果.....	35
4. 結論.....	35
参考文献.....	36

1. はじめに

核融合用大形超電導トロイダル・コイルの研究・開発の一環として、現在国際協力でIEA-LCT計画が進められている。⁽¹⁾⁽²⁾日本のLCTコイルに用いる超電導導体は、Nb-Ti合金で、その臨界電流値は、8 Tで15 KAを超える。このような高磁界・大電流のNb-Ti超電導導体の開発および大電流導体の超電導特性の測定技術の確立は、重要である。10 KA級大電流導体の短尺試験は、国外でも少なく、国内では、全く行なわれていない。原研で、国内で最も優れた導体試験装置を整えたことにより、大電流導体の超電導特性の測定が可能となった。本件では、LCTコイル導体を模擬したNb-Ti 10 KA級超電導導体の短尺試験を行なったので、ここに報告する。

2. 短尺試験

2.1 試料

実験に用いた試料の特性および試料の断面形状を、Fig. A-1に示す。

試料は、AおよびBの2種類で、試料Aは、試料Bを4本束ねて、門形の安定化銅の中に、はんだで溶着させた試料である。試料Aは、LCTコイル導体⁽³⁾の外形寸法と、ほぼ等しく、その臨界電流値もLCTコイル導体の場合を模擬した10 KA級大電流超電導導体である。尚試料Bは、試料Aの測定結果との比較を行なうためのものである。

2.2 実験装置

試料Aの短尺試験に用いた実験装置をFig. A-2に示す。

実験装置は、試料に通電する出力10 V、12 KA直流電源、ガス冷却式電流リード、短尺試料を取付けるサンプル・ホルダ、外部磁界を発生させるNb-Ti 8 T超電導電磁石⁽⁴⁾、短尺試料と8 T超電導電磁石の液体ヘリウムの領域を分離するためのインサート・デュワおよびクライオ・スタットから構成される。

Fig. A-3に、今回試作したサンプル・ホルダを示す。8 Tの外部磁界中で、10 KAの電流を試料に通電すると、試料は約10 ton/mの力を受けることになる。サンプル・ホルダは、Fig. A-3に示す様に、電流の行き（超電導短尺試料部）と戻り（超電導）部を同一平面にセットし、10 ton/mの力が両者を吸引する方向に作用する様な構造となっている。

又、電流リード部からの熱侵入量を最小限にとどめる様に、ガス冷却式の10 KA用電流リードを使用した。尚、短尺試料Bの短尺試験は、Nb₃Snテープ製の13 T超電導コイルを使用して行なった。

2.3 実験方法

短尺試料Aを取付けたサンプル・ホルダをNb-Ti 8 T超電導電磁石のボP中心にセットした後、8 T電磁石を励磁し、特定の外部磁界下で、直流電源から試料に通電する。臨界電流値(Ic)は、四端子法によって測定した電圧-電流曲線より、比抵抗 ρ が $1 \times 10^{-11} \Omega\text{-cm}$ となる点で定義した。四端子法による電圧-電流曲線の測定において、短尺試料と戻り部に発生する電磁力の影響、および外部磁界と試料および電流リード間に発生する電磁力の影響、および電圧タップ取付位置に及ぼす電流リードと試料取付部の電流のshearingの影響等を予備実験で確認し、Fig. A-4(a)および(b)に示す様な実験装置とした。Fig. A-4(a)および(b)は、サンプル・ホルダとガス冷却式電流リードの組立外観および試料取付部をそれぞれ示す。また(c)は、実験中の模様を示す。

3. 実験結果

Fig. A-5に、短尺試料Aの7 Tおよび8 Tでの電圧-電流曲線を示す。縦軸は、短尺試料からの発生電圧を、横軸は、通電電流を示す。7 Tおよび8 Tでの電圧-電流曲線で、電圧が途中から急に直線的に増加しているのは、安定化銅の量が不足していることに帰因している。Fig. A-6に、短尺試料AおよびBの臨界電流値(Ic)と外部磁界(H)の関係を示す。図中のBの値は、短尺試料Bの測定結果を4倍したもので短尺試料Aの結果と等価である。4本束ねた試料AのIcが、試料BのIcよりわずかに低い値を示すが、これは読み取り誤差範囲内であると考えられる。

4. 結論

大電流超電導導体の超電導特性の測定技術を確立するために、LCTコイル実寸法導体を模擬した大電流超電導導体を試作し、その短尺試験を行なった結果以下の結論を得た。

以下の点を充分考慮してサンプル・ホルダ等を設計すれば、大電流導体の臨界電流値の測定は、可能である。

- 1) 試料と戻り部に発生する電磁力
- 2) 外部磁界と試料および電流リード間に発生する電磁力
- 3) 電流リードからの熱侵入量
- 4) 電圧タップ取付位置と電流リードと試料取付部の距離
- 5) サンプル・ホルダの可動範囲

本実験の成功は、日本のLCTコイルの設計・製作段階で行なうLCT実寸法導体の臨界電流値(Ic)測定の実証試験のために、あるいは、今後高磁界・大電流超電導コイルの研究・開発を進めていくうえでも非常に意義深いものである。

参 考 文 献

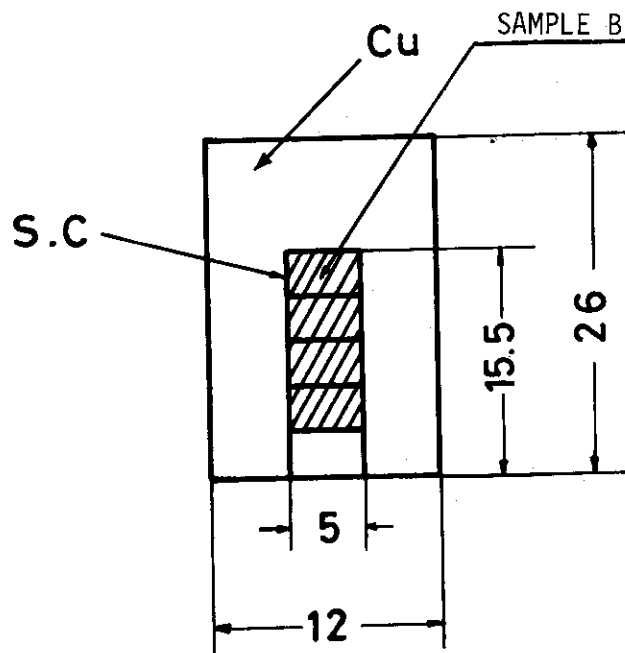
- (1) ORNL - Technical Specification TS - 14700
- (2) 島本; 日本原子力学会誌 21.3 (1979)
- (3) S. Shimamoto etc; Proc. of 8th, on Engineering problems of Fusion
San Francisco. 1979
- (4) S. Shimamoto, T. Ando, M. Nishi and K. Yoshida.

No	DIMENSION	Df (μm)	Nf	Cu/S·C
A	2.1×5.0×4	41.18	2257×4	2.3
B	2.1×5.0	41.18	2257	2.3

Df : FILAMENT DIAMETER

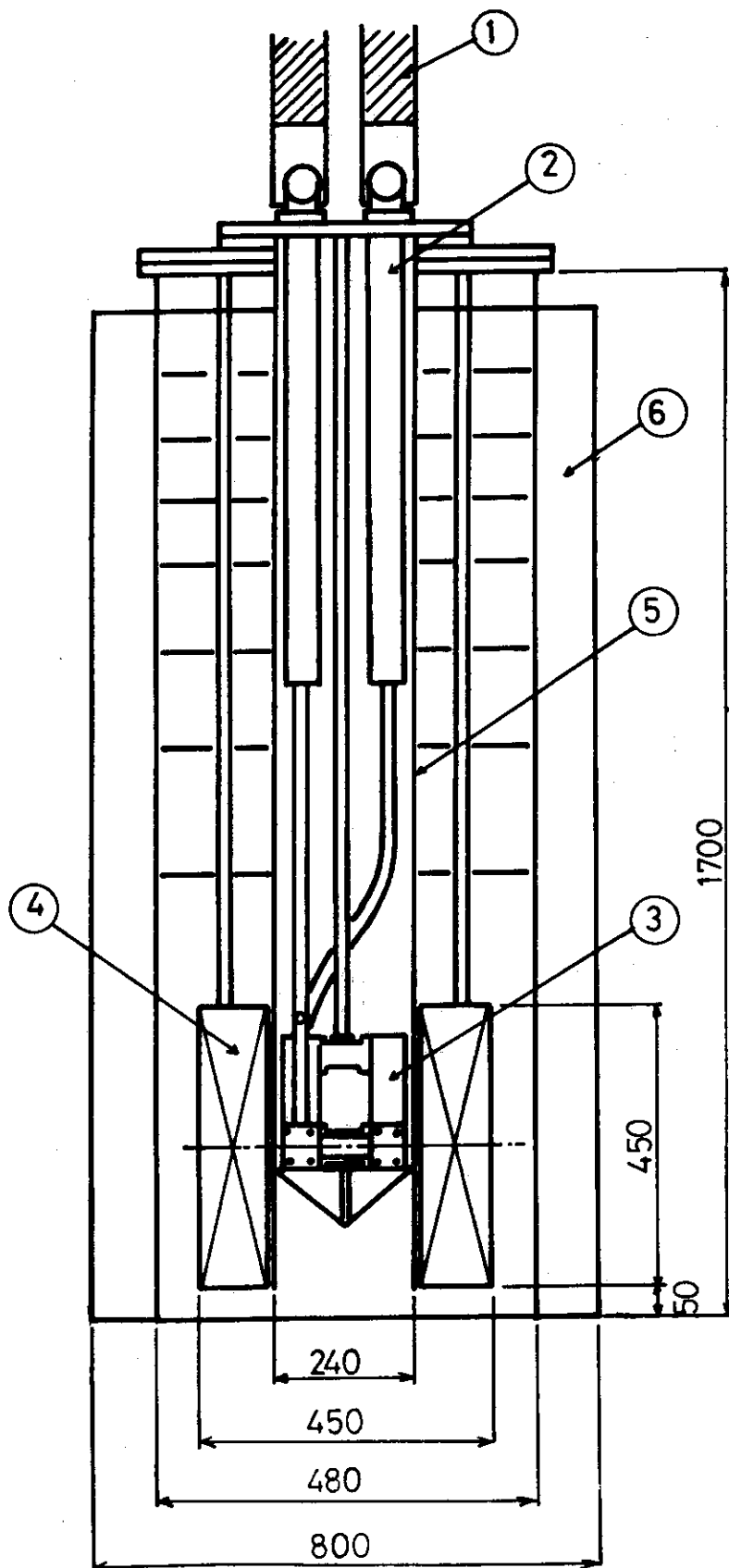
Nf : FILAMENT NUMBER

(a) SHORT SAMPLE CHARACTERISTICS



(b) CROSS SECTION OF SAMPLE A

Fig. A-1 SCHEMATIC OF Nb-Ti SHORT SAMPLE AND SHORT SAMPLE PARAMETER



- 1 CURRENT LEAD
- 2 GAS COOLED CURRENT LEAD
- 3 SAMPLE HOLDER
- 4 8.5 T MAGNET
- 5 INSERT DEWAR
- 6 CRYOSTAT

Fig. A-2 EXPERIMENTAL APPARATUS

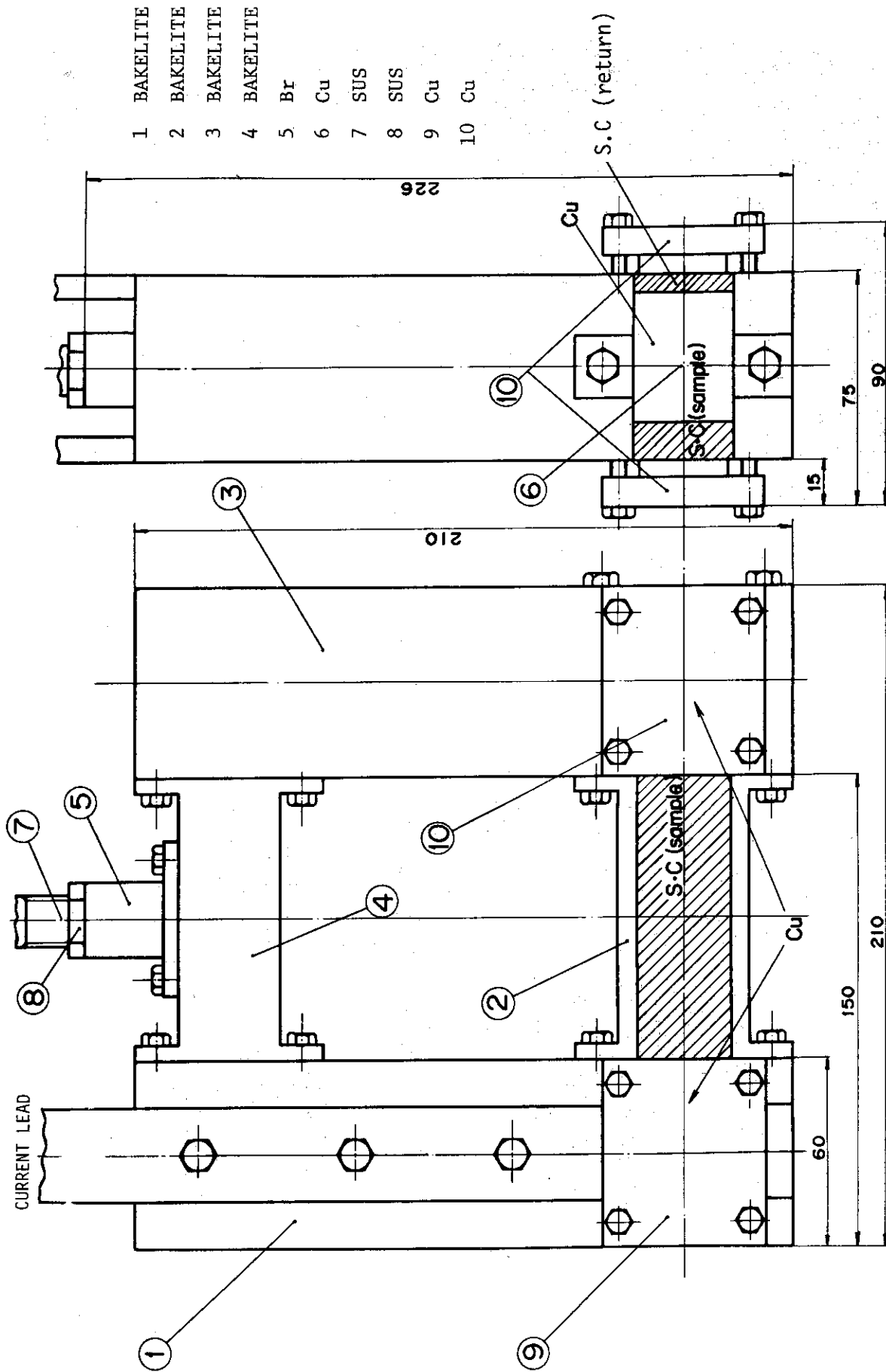
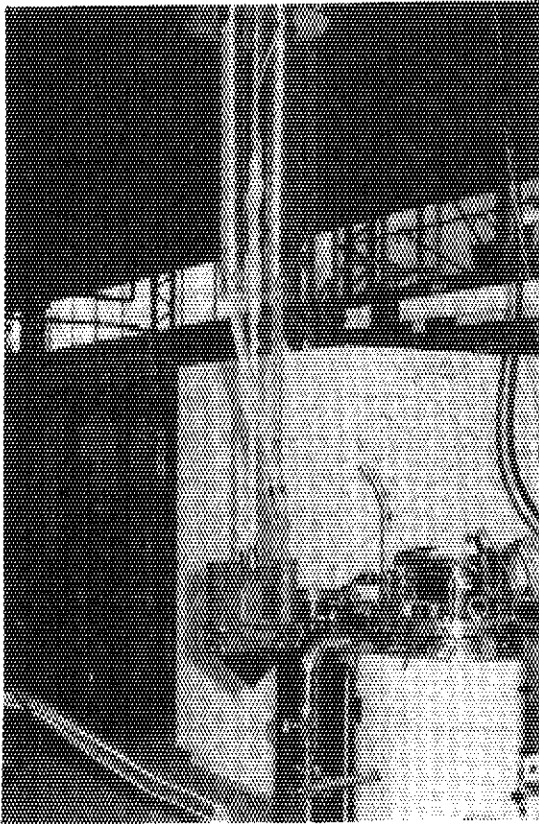
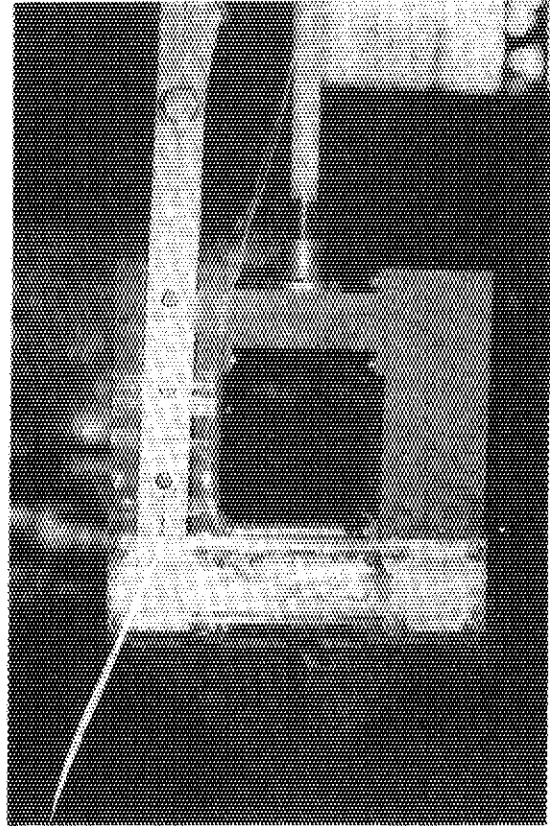


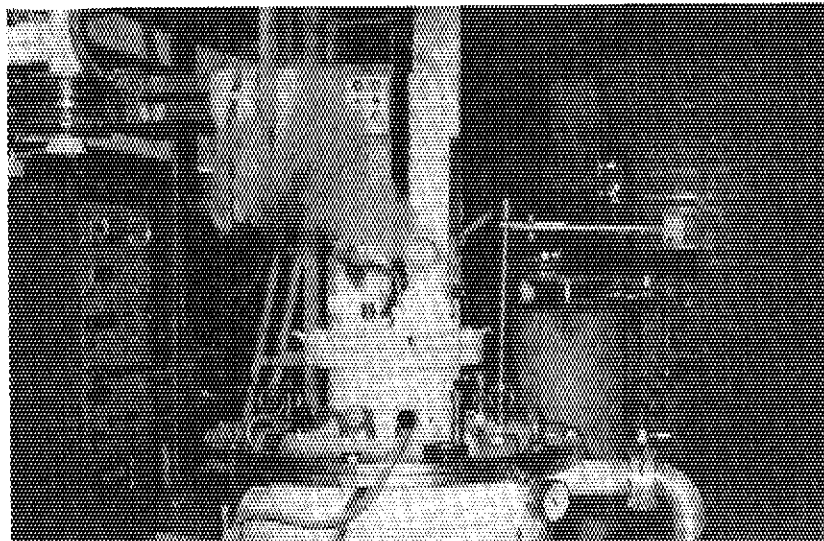
Fig. A-3 SAMPLE HOLDER



(a) SAMPLE HOLDER AND GAS
COOLED CURRENT LEAD



(b) SAMPLE HOLDER



(c) TOP VIEW OF EXPERIMENTAL APPARATUS

Fig. A-4 EXPERIMENTAL VIEW

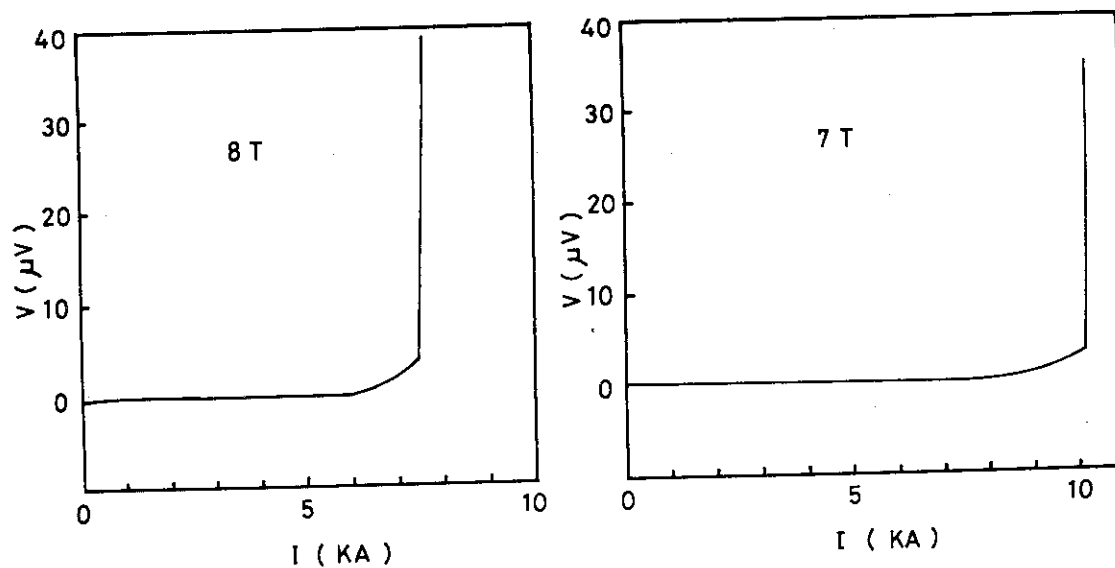


Fig. A-5 V-I CURVES AT 7 T AND 8 T

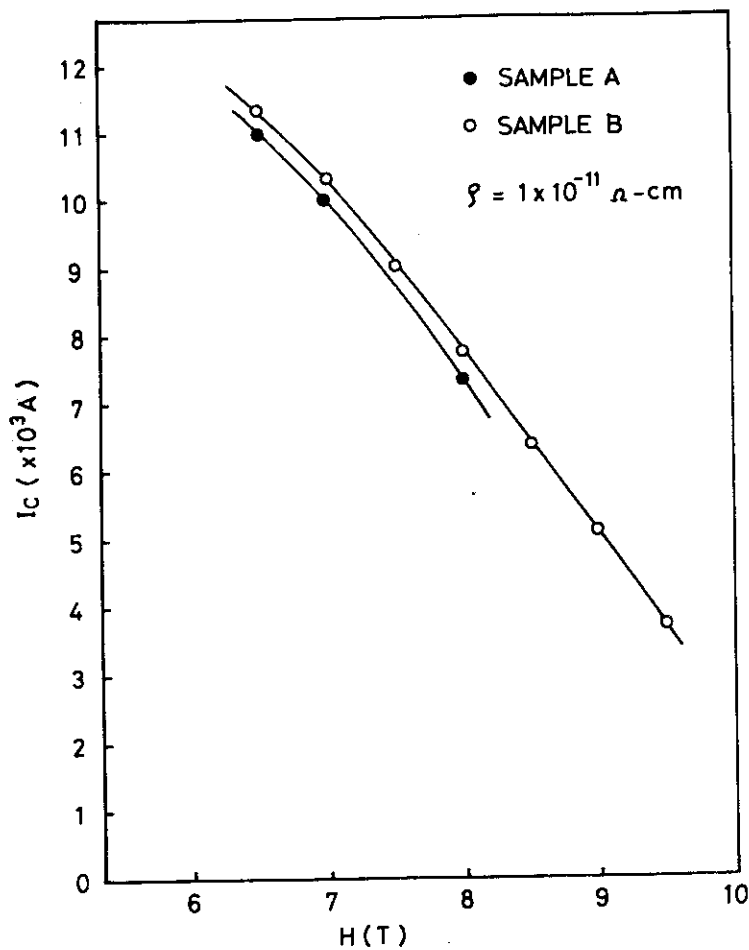


Fig. A-6 I_c -H CURVES