

JAERI-M
84-105

TiCその場コーティング用チタン蒸発線
の性能試験

1984年6月

稲川幸之助*・阿部 哲也・広木 成治
小原健治郎・村上 義夫

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, -Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

TiC その場コーティング用チタン蒸発線の性能試験

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部
稲川幸之助*・阿部 哲也・広木 成治・小原建治郎
村上 義夫

(1984年5月18日受理)

TiC その場コーティング用のチタン蒸発源を開発するため、各種チタン蒸発線を試作して、それらの性能試験を行った。最良の特性を示した蒸発線の構成において、タングステン芯線のまわりにチタン線とともに巻いたモリブデン線は、芯線に沿ってチタン線を一様に溶かす作用をし、また外周に巻くタングステン製ガード線はチタンが球状になったり熔融垂れするのを防ぐ役目をする。試作した蒸発線の典型的な形状は外形4mm ϕ で有効長さ140mmである。このチタン蒸発線からの蒸発効率および蒸発速度はチタン装荷量3.2gに対して、それぞれ70~80% (2~2.5g) および0.14gmin⁻¹であった。この実験結果をもとにJT-60への適用性を検討した。

* 外来研究員；日本真空技術（株）超材料研究所

PERFORMANCE TEST OF TWISTED-WIRED TITANIUM
EVAPORATORS FOR IN-SITU TiC DEPOSITION

Konosuke INAGAWA*, Tetsuya ABE, Seiji HIROKI,
Kenjiro OBARA and Yoshio MURAKAMI

Department of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 18, 1984)

In order to establish the titanium evaporation source for in-situ TiC deposition, performance test has been made for several types of twisted-wired, ohmic-heating titanium evaporators. The evaporator which exhibited the best performance consists of three tungsten wires twisted as the core of the composite, three titanium wires and a molybdenum wire densely wound around the core, and a thin tungsten wire coarsely wound at the outermost side of the composite. The molybdenum wire around the core plays an important role in wetting the core surface uniformly with the melt of titanium. The tungsten wire at the outermost side prevents the molten titanium from dropping to the inside wall of the vacuum vessel. A typical size of the evaporator is 4 mm in diameter and 140 mm in length. In this case 2~2.5g of titanium, which corresponds to 70 - 80 % of charged amount(3.2g), can be evaporated at a rate of about 0.14 g/min. On the basis of the experimental results, the applicability of the evaporator to JT-60 is discussed.

Keywords : Titanium Evaporation Source, Twisted-wired, Ohmic-heated
Evaporators, In-situ Coating, JT-60, Experimental

* On leave from the Institute for Super Materials, ULVAC Corporation.

目 次

1. はじめに	1
2. チタン蒸発線の試作	1
2.1 試作品の仕様	1
2.2 試作品の分類	2
3. 実験方法	5
4. 結果および考察	5
4.1 電流-電圧特性	5
4.2 電流密度	7
4.3 チタンの溶融開始電力	8
4.4 溶断特性	9
4.5 蒸発特性	9
4.6 蒸発線の健全性	10
5. JT-60 その場コーティング装置への適用性	10
5.1 膜厚	10
5.2 析出速度	11
5.3 蒸着時間	11
6. まとめ	12
謝 辞	13
参考文献	13
付 録	13

Contents

1.	Introduction	1
2.	Fabrication of Twisted-Wired Titanium Evaporators	1
2.1	Specifications of Titanium Evaporators	1
2.2	Classification of Titanium Evaporators	2
3.	Experimental Procedure	5
4.	Results and Discussions	5
4.1	Current - Voltage Characteristics	5
4.2	Current Density	7
4.3	Electric Power Required for Titanium Melting	8
4.4	Wire Fusing Characteristics	9
4.5	Titanium Evaporation Characteristics	9
4.6	Soundness of Titanium Evaporators	10
5.	Applicability to JT-60 In-situ Coating	10
5.1	Film Thickness	10
5.2	Deposition Rate	11
5.3	Deposition Time	11
6.	Conclusions	12
	Acknowledgements	13
	References	13
	Appendix	13

1. はじめに

核融合装置において、第一壁とプラズマとの相互作用により、第一壁構成元素が不純物としてプラズマ中に混入することは、高温プラズマの達成にとって大きな障害となる。すなわち、プラズマ中の不純物は放射損失によりプラズマ温度を低下させ、その影響は原子番号(Z)が大きいほど顕著であることが知られている¹⁾。そのため現在建設中の臨界プラズマ試験装置 JT-60 では、この不純物対策の一環として真空容器内に設置されるモリブデン製リミタ・ライナおよびインコネル 625 製ライナ表面を低 Z 材である炭化チタン (TiC) で被覆 (コーティング) することが決定している。

コーティング方法には①プレコーティング (Pre-Coating) と②その場コーティング (In-situ Coating) とがある。プレコーティングは第一壁を真空容器内に組込む前に炭化チタンをコーティングするものであり、そのコーティング膜厚は 20 μm である。一方、その場コーティングとは、第一壁が真空容器内に設置された後に、その場でコーティングするものであり、プラズマとの相互作用により損耗を受けたプレコーティング膜を補修するために行われる。著者らはこれまで、JT-60 第一壁へ炭化チタンその場コーティングを行うための概念設計²⁾、および TiC 膜作製のための基礎実験を行ってきた³⁾。その結果、膜作製法としてはチタン (Ti) - アセチレン (C_2H_2) 系による反応性蒸着法が最も適していることがわかった。本報告では Ti - C_2H_2 反応系を用いて TiC その場コーティングを行う上で必要な大型チタン蒸発源の試作ならびにその試験結果について報告する。

反応性蒸着用のチタン蒸発源には、抵抗加熱、電子ビーム加熱などが利用されるが、前者は取り扱う機器が簡便でその操作も容易であることから、蒸発源として最も一般的な方法である。抵抗加熱蒸発源はポート状と線状のものに大別される。ポート状の蒸発源では蒸気流が上方のみに制限されるため、おもに全方位蒸着を目的としているその場コーティングには適しておらず、線状蒸発源の方が有利である。線状蒸発源の一つとしては、市販のサブリメーションポンプ用チタン蒸発線が応用できる。しかし、市販のチタン蒸発線は蒸発チタン量が少ないこと、および蒸発後、線材が機械的に脆弱化するなど、JT-60 その場コーティング用として、そのまま使用することは極めて難しい。そのため、各種チタン蒸発線を試作し、ついで、それら試作品に対してチタン蒸発量、蒸発速度などの蒸発特性試験ならびに蒸発前後の線材の健全性試験など各種の性能試験を実施した。

2. チタン蒸発線の試作

2.1 試作品の仕様

試作品の主な仕様は次のようである。

1. はじめに

核融合装置において、第一壁とプラズマとの相互作用により、第一壁構成元素が不純物としてプラズマ中に混入することは、高温プラズマの達成にとって大きな障害となる。すなわち、プラズマ中の不純物は放射損失によりプラズマ温度を低下させ、その影響は原子番号(Z)が大きいほど顕著であることが知られている¹⁾。そのため現在建設中の臨界プラズマ試験装置 JT-60 では、この不純物対策の一環として真空容器内に設置されるモリブデン製リミタ・ライナおよびインコネル 625 製ライナ表面を低 Z 材である炭化チタン (TiC) で被覆 (コーティング) することが決定している。

コーティング方法には①プレコーティング (Pre-Coating) と②その場コーティング (In-situ Coating) とがある。プレコーティングは第一壁を真空容器内に組込む前に炭化チタンをコーティングするものであり、そのコーティング膜厚は 20 μm である。一方、その場コーティングとは、第一壁が真空容器内に設置された後に、その場でコーティングするものであり、プラズマとの相互作用により損耗を受けたプレコーティング膜を補修するために行われる。著者らはこれまで、JT-60 第一壁へ炭化チタンその場コーティングを行うための概念設計²⁾、および TiC 膜作製のための基礎実験を行ってきた³⁾。その結果、膜作製法としてはチタン (Ti) - アセチレン (C_2H_2) 系による反応性蒸着法が最も適していることがわかった。本報告では Ti - C_2H_2 反応系を用いて TiC その場コーティングを行う上で必要な大型チタン蒸発源の試作ならびにその試験結果について報告する。

反応性蒸着用のチタン蒸発源には、抵抗加熱、電子ビーム加熱などが利用されるが、前者は取り扱う機器が簡便でその操作も容易であることから、蒸発源として最も一般的な方法である。抵抗加熱蒸発源はポート状と線状のものに大別される。ポート状の蒸発源では蒸气流が上方のみに制限されるため、おもに全方位蒸着を目的としているその場コーティングには適しておらず、線状蒸発源の方が有利である。線状蒸発源の一つとしては、市販のサブリメーションポンプ用チタン蒸発線が応用できる。しかし、市販のチタン蒸発線は蒸発チタン量が少ないこと、および蒸発後、線材が機械的に脆弱化するなど、JT-60 その場コーティング用として、そのまま使用することは極めて難しい。そのため、各種チタン蒸発線を試作し、ついで、それら試作品に対してチタン蒸発量、蒸発速度などの蒸発特性試験ならびに蒸発前後の線材の健全性試験など各種の性能試験を実施した。

2. チタン蒸発線の試作

2.1 試作品の仕様

試作品の主な仕様は次のようである。

- (1) 芯線はすべてタングステン線（0.8～1.0mmφ）を用い，その使用本数は1～3本のいずれかである。2，3本のときはより線にする。
- (2) 蒸発チタン線の太さは0.95～1.2mmφで，3あるいは4本巻きである。
- (3) チタン線を巻くとき同時にモリブデン線（0.7あるいは1mmφ）を巻き，チタンの間にモリブデン線が添え巻きされる場合もある。この添え巻きモリブデン線は，芯線タングステンとともに加熱源となり，チタン線を側面からも加熱する役目をはたすと期待される。
- (4) チタン線を巻き終えた後で，0.3～0.5mmφのタングステンあるいはモリブデンのガード線を外周に巻く場合もある。これは熔融チタンが球状になるのを防ぐ役目をするを期待される。
- (5) チタン蒸発線の長さは約150mmとする。この長さでは巻線後ほぼ直線状態が保たれる。

2.2 試作品の分類

試作したチタン蒸発線に使用された，タングステン芯線，モリブデン添え巻き線，チタン蒸発線およびガード線，タングステンおよびモリブデンの線径，本数および重量をTable 1に示す。重量は試作品を分解して測定した値である。各試作品は，芯線およびチタン線の本数，添え巻き線およびガード線の有無について種々作製された。一例として，添え巻き線およびガード線を備えたU-7Bの様子をFig. 1に示す。3本のタングステンをよって芯線にし，そのまわりに3本の蒸発チタン線と1本の添え巻きモリブデン線を巻き，さらに外周に細いタングステン線のガードをしてある。用いた各線材の純度はタングステン99.99%，モリブデン99.9%，チタン99.8%である。

なお比較のために使用した市販のチタンサブレーションポンプ用チタン蒸発線の仕様は次のようである。線径の単位はmmである。

芯線：0.8φタングステン1本
 添え巻き線：0.4φモリブデン1本
 蒸発線：0.8φチタン1本，約1g
 長さ：約150mm

次に各試作品の仕様を分類別に説明する。U-1，…U-10の番号1，…10は製作された順番を表わしており，蒸発実験結果に基づき再試作された経緯を示している。長さはすべて150mmである。

(1) U-1

芯線：0.8～0.9φタングステン1本
 添え巻き線：0.7φモリブデン1本
 蒸発線：1.2φチタン3本
 ガード線：なし

市販品に近い形状であるが，蒸発チタンが多くとれるようにチタン量を多くしてある。芯線は市販品とほぼ同じ太さで1芯であるが，添え巻きモリブデン線は少し太い。

(2) U-2

芯 線：0.8～0.9φタングステン1本

添え巻き線：なし

蒸発線：1.2φチタン4本

ガード線：なし

U-1 とほぼ同じであるが、チタン量を多くするために添え巻き線を用いずに、4本のチタン線だけが巻かれている。

(3) U-3A

芯 線：0.8～0.9φタングステン1本

添え巻き線：0.7φモリブデン1本

蒸発線：1.2φチタン3本

ガード線：0.3φタングステン1本

U-1 の外側にガードとして0.3φのタングステン線を巻いている。なおガード線付きの品番がU-3A, U-3BのようにA, Bの記号がつくが、Bの方が線径がAのそれよりも太い。

(4) U-3B

芯 線：0.8～0.9φタングステン1本

添え巻き線：0.7φモリブデン1本

蒸発線：1.2φチタン3本

ガード線：0.5φタングステン1本

U-1 に0.5φのタングステンガード線を巻いている。

(5) U-4A

芯 線：0.8～0.9φタングステン1本

添え巻き線：なし

蒸発線：1.2φチタン4本

ガード線：0.3φタングステン1本

U-2 に0.3φのタングステン線ガードを巻いている。

(6) U-4B

芯 線：0.8～0.9φタングステン1本

添え巻き線：なし

蒸発線：1.2φチタン4本

ガード線：0.5φタングステン1本

U-2 に0.5φのタングステン線ガードを巻いている。

(7) U-5

芯 線：1.0φタングステン1本

添え巻き線：1.0φモリブデン1本

蒸発線：1.2φチタン3本

ガード線：0.3φタングステン1本

芯線、添え巻き線ともにU-1, U-2, U-3A, U-3Bより線径が少し太く、形状はU-

3Aと同じである。

(8) U-6

芯線：1.0φタングステン1本
 添え巻き線：1.0φモリブデン1本
 蒸発線：1.2φチタン3本
 ガード線：0.3φモリブデン1本

ガード線が0.3φモリブデン線であるほかはU-5と同じである。

(9) U-7

芯線：1.0φタングステン3本ヨリ
 添え巻き線：0.7φモリブデン1本
 蒸発線：0.95φチタン3本
 ガード線：なし

加熱源の中心となる芯線および添え巻き線のうち、芯線の数を増やして3本にしている。

(10) U-7A

U-7の外周に0.3φのタングステン線ガードを巻いている。

(11) U-7B

U-7の外周に0.4φのタングステン線ガードを巻いている。

(12) U-8

芯線：1.0φタングステン2本ヨリ
 添え巻き線：0.5φモリブデン1本
 蒸発線：0.95φチタン3本
 ガード線：なし

芯線の本数をU-1～U-6型とU-7型の中間の2本にしている。

(13) U-8A

U-8の外周に0.3φのタングステン線ガードを巻いている。

(14) U-8B

U-8の外周に0.4φのタングステン線ガードを巻いている。

(15) U-9

芯線：1.0φタングステン3本ヨリ
 添え巻き線：なし
 蒸発線：0.95～1.0φチタン4本
 ガード線：0.4φタングステン1本

芯線はU-7型と同じ3本であるが、チタン量を多くするためチタン線を4本にして添え巻き線は使用していない。

(16) U-10

芯線：1.0φタングステン2本ヨリ
 添え巻き線：なし
 蒸発線：0.95～1.0φチタン4本

ガード線：0.4φタングステン1本

U-9と同じく添え巻き線を用いずにチタン量を多くし、かつ芯線を2本に減らしている。以上のように16種類のチタン蒸発線を試作した。

タングステンとモリブデンの電気抵抗率はほぼ同じで、例えば2,200°Kでは両者とも $58 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であり、同等に加熱源となる。ちなみに、チタン熔融直前の温度(1,100°K)での電気抵抗率はチタン： $\sim 165 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 、タングステンおよびモリブデン：約 $25 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であり、チタンはタングステンおよびモリブデンの6.6倍の大きさである。⁴⁾

市販品と試作品について(タングステン+モリブデン)とチタンとを分けて、重量、断面積、重量比、断面積比をTable 2に示す。重量は現品を分解して測った値であり、断面積は使用した線径を単純に加算した値である。Fig. 2～4にそれらの関係を示す。

3. 実験方法

蒸発実験に用いた電極の様子をFig. 5に示す。チタン蒸発線を保持する部分は非常に高温になるため、銅板を用いずにステンレス製の棒柱にした。蒸発線の両端約5mmをはさみ、約140mmが加熱されるようにした。図には示していない銅板部はICF 203フランジに設置してある電流導入端子に固定してある。フランジ面と蒸発線との距離は約200mmである。

蒸発実験は、以前に実施した炭化チタン膜その場コーティングの基礎実験³⁾と同じ方法で行った。すなわち、先ず $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ まで真空槽を排気した。次にチタンに通電して脱ガスを十分に行った後、徐々に電力を増加させてチタンを熔融蒸発させるとともに、アセチレンガスを $6.5 \sim 13 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ の圧力になるまで導入した。一定電力の下では時間がたつとともにチタンの蒸発量が少なくなるので、圧力の上昇が観測される。しかし本実験では、それが起らないように電力を時間とともに徐々に増加させていき、蒸発チタン量が一定になるように操作した。そのときの蒸発線への印加電圧、電流を測定し、かつ熔融チタンのぬれ状態も目視観察した。蒸発線の溶断後あるいは実験終了後(溶断しないため実験を中断した試作品もかなりあった。)、チタンの蒸発量を知るために直示天秤を用いて重量測定を行った。

4. 結果および考察

4.1 電流—電圧特性

チタン蒸発線への印加電圧と電流との関係、および電力との関係をFig. 6—(1)～(22)に示す。図中Ti meltedの矢印はチタンの熔融開始を、fusedのそれは蒸発線材の溶断を表わす。またTi melted and fusedはチタンの熔融開始直後あるいは電力を増加させる前に溶断したことを示す。U-1(830127-1, 2)では溶断時の電流を確認できたが、U-2, U-3A, U-3Bでは溶断後の電流を測定する余裕もなく溶断が生じた。したがってFig. 6—(4)～(6)のTi melted

ガード線：0.4φタングステン1本

U-9と同じく添え巻き線を用いずにチタン量を多くし、かつ芯線を2本に減らしている。以上のように16種類のチタン蒸発線を試作した。

タングステンとモリブデンの電気抵抗率はほぼ同じで、例えば2,200°Kでは両者とも $58 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であり、同等に加熱源となる。ちなみに、チタン溶融直前の温度(1,100°K)での電気抵抗率はチタン： $\sim 165 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 、タングステンおよびモリブデン：約 $25 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であり、チタンはタングステンおよびモリブデンの6.6倍の大きさである。⁴⁾

市販品と試作品について(タングステン+モリブデン)とチタンとを分けて、重量、断面積、重量比、断面積比をTable 2に示す。重量は現品を分解して測った値であり、断面積は使用した線径を単純に加算した値である。Fig. 2～4にそれらの関係を示す。

3. 実験方法

蒸発実験に用いた電極の様子をFig. 5に示す。チタン蒸発線を保持する部分は非常に高温になるため、銅板を用いずにステンレス製の棒柱にした。蒸発線の両端約5mmをはさみ、約140mmが加熱されるようにした。図には示していない銅板部はICF 203フランジに設置してある電流導入端子に固定してある。フランジ面と蒸発線との距離は約200mmである。

蒸発実験は、以前に実施した炭化チタン膜その場コーティングの基礎実験³⁾と同じ方法で行った。すなわち、先ず 1.3×10^{-4} Paまで真空槽を排気した。次にチタンに通電して脱ガスを十分に行った後、徐々に電力を増加させてチタンを溶融蒸発させるとともに、アセチレンガスを $6.5 \sim 13 \times 10^{-3}$ Paの圧力になるまで導入した。一定電力の下では時間がたつとともにチタンの蒸発量が少なくなるので、圧力の上昇が観測される。しかし本実験では、それが起らないように電力を時間とともに徐々に増加させていき、蒸発チタン量が一定になるように操作した。そのときの蒸発線への印加電圧、電流を測定し、かつ溶融チタンのぬれ状態も目視観察した。蒸発線の溶断後あるいは実験終了後(溶断しないため実験を中断した試作品もかなりあった。)、チタンの蒸発量を知るために直示天秤を用いて重量測定を行った。

4. 結果および考察

4.1 電流—電圧特性

チタン蒸発線への印加電圧と電流との関係、および電力との関係をFig. 6-(1)～(2)に示す。図中Ti meltedの矢印はチタンの溶融開始を、fusedのそれは蒸発線材の溶断を表わす。またTi melted and fusedはチタンの溶融開始直後あるいは電力を増加させる前に溶断したことを示す。U-1(830127-1, 2)では溶断時の電流を確認できたが、U-2, U-3A, U-3Bでは溶融後の電流を測定する余裕もなく溶断が生じた。したがってFig. 6-(4)～(6)のTi melted

ガード線：0.4φタングステン1本

U-9と同じく添え巻き線を用いずにチタン量を多くし、かつ芯線を2本に減らしている。以上のように16種類のチタン蒸発線を試作した。

タングステンとモリブデンの電気抵抗率はほぼ同じで、例えば2,200°Kでは両者とも $58 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であり、同等に加熱源となる。ちなみに、チタン熔融直前の温度(1,100°K)での電気抵抗率はチタン： $\sim 165 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 、タングステンおよびモリブデン：約 $25 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であり、チタンはタングステンおよびモリブデンの6.6倍の大きさである。⁴⁾

市販品と試作品について(タングステン+モリブデン)とチタンとを分けて、重量、断面積、重量比、断面積比をTable 2に示す。重量は現品を分解して測った値であり、断面積は使用した線径を単純に加算した値である。Fig. 2～4にそれらの関係を示す。

3. 実験方法

蒸発実験に用いた電極の様子をFig. 5に示す。チタン蒸発線を保持する部分は非常に高温になるため、銅板を用いずにステンレス製の棒柱にした。蒸発線の両端約5mmをはさみ、約140mmが加熱されるようにした。図には示していない銅板部はICF 203フランジに設置してある電流導入端子に固定してある。フランジ面と蒸発線との距離は約200mmである。

蒸発実験は、以前に実施した炭化チタン膜その場コーティングの基礎実験³⁾と同じ方法で行った。すなわち、先ず 1.3×10^{-4} Paまで真空槽を排気した。次にチタンに通電して脱ガスを十分に行った後、徐々に電力を増加させてチタンを熔融蒸発させるとともに、アセチレンガスを $6.5 \sim 13 \times 10^{-3}$ Paの圧力になるまで導入した。一定電力の下では時間がたつとともにチタンの蒸発量が少なくなるので、圧力の上昇が観測される。しかし本実験では、それが起らないように電力を時間とともに徐々に増加させていき、蒸発チタン量が一定になるように操作した。そのときの蒸発線への印加電圧、電流を測定し、かつ熔融チタンのぬれ状態も目視観察した。蒸発線の溶断後あるいは実験終了後(溶断しないため実験を中断した試作品もかなりあった。)、チタンの蒸発量を知るために直示天秤を用いて重量測定を行った。

4. 結果および考察

4.1 電流—電圧特性

チタン蒸発線への印加電圧と電流との関係、および電力との関係をFig. 6-(1)～(22)に示す。図中Ti meltedの矢印はチタンの熔融開始を、fusedのそれは蒸発線材の溶断を表わす。またTi melted and fusedはチタンの熔融開始直後あるいは電力を増加させる前に溶断したことを示す。U-1(830127-1, 2)では溶断時の電流を確認できたが、U-2, U-3A, U-3Bでは溶断後の電流を測定する余裕もなく溶断が生じた。したがってFig. 6-(4)～(6)のTi melted

and fused は溶融する直前の値である。なお溶断電圧は表に示されていないが、溶融開始電圧に等しい。unfused は長時間の連続蒸発にもかかわらず溶断が起らず、かつ蒸発チタン量が少なくなったと思われたため、その時点で実験を中断したことを表わす。

実験後のチタン蒸発線全体の様子を未使用品とともに Photo. 1~14 に示す。溶融部を拡大して観察したのが Photo. 15~19 である。また Photo. 20 には実験には供しなかった試作品 U-4A, U-4B, U-6 を示している。

市販品は Photo. 1 に見られるように、チタンが溶融して 5 ケの球状塊になり、それが時間とともにいくらか小さくなってその後溶断した。蒸発時間は 5 min および 6.5 min であり、線材溶断時の電力が溶融開始電力より僅かに大きい (Fig. 6-(1)~(2))。

U-1, U-2, U-3A, U-3B はチタン溶融後 10 sec 以内で溶断が生じた。U-5 は溶融後約 30 sec で溶断した。すなわち、これらの試作品においては、溶融されるべきチタン量に比べて、加熱体となるタングステンおよびモリブデン量が少ないため、チタン溶融のためにタングステンおよびモリブデンの単位量当りの発熱量を多くする必要がある。そのため線温が非常に高くなり、チタン溶融と同時にタングステン-チタンおよびモリブデン-チタンの合金化反応が起り、その結果として、これら加熱体の融点が下って溶断が生じたものと考えられる。Photo. 15 と Photo. 16 とを比べると、外周にガード線のある U-3A, U-3B, U-5 では溶融チタンが球状にならず、一様にぬれる傾向がある。電流-電圧特性は Fig. 6-(3)~(7) に示した。加熱体となるタングステン芯線、モリブデン添え巻き線や外周ガードタングステン線の付加、すなわち加熱体の全断面積の増加とともに電流が増加し、 $U-2, U-1 < U-3A < U-3B < U-5$ となっている。また U-4A, U-4B, U-6 については、これまで述べた試作品の結果とあまり変わらないと予測されたため、蒸発実験は行わなかった。

次に、タングステン芯線の数を 3 本に増加させた試作品の結果が Fig. 6-(8)~(13) であり、実験後の形状が Photo. 7~9, 17 である。溶融開始電圧は Table 3 にあるように、これまでの U-1, U-2, U-3A, U-3B, U-5 では 6.0~7.3V であったが、U-7, U-7A, U-7B では 3.9~5.2V に下る。これは芯線の本数増加によって電流が増加し、そのため低い電圧でも溶融のための電力供給が十分になされたことを示している。U-7 の実験番号 830301 はチタンが溶融して一様にぬれたが、実験番号 830302-2 ではぬれのほかに 2 ケの球状塊が生じ、時間とともに蒸発して小さくなった。電流-電圧特性は溶融の前後で異なる。すなわち、溶融後は電気抵抗が大きくなり、電圧増加に対する電流増加の割合が減少する。830301 は 15 分間蒸発させたが溶断しなかった。830302-2 は 20 分間の加熱で溶断した。ガード線のある U-7A, U-7B ではすべての試作品において、溶融チタンが一様にぬれ、球状塊は生じなかった。このようにガード線は溶融チタンを加熱体の全体にわたって均一に分布させるのに非常に有効であることがわかる。電流-電圧特性は U-7 とほぼ同じである。蒸発時間 15, 20, 16, 12 分に対してすべて溶断しなかった。加熱体の本数が多いため 1 本当りの線温もあまり高くなく、また溶融チタンが加熱体のまわりに一様にぬれるため局所的に高温になり過ぎることもないため加熱体の機械的強度も保たれるものと考えられる。このように芯線を 1 本から 3 本にすることにより寿命が延び、蒸発特性が著しく改善された。

Photo. 17 の最上 U-7 の左方のふくらみは溶融開始当初の球状チタンの残部である。U-7A お

よびU-7Bではチタンが多量に蒸発したため、残りが少なくなっている。このように加熱体となるタングステンおよびモリブデンの量を多くすることによって、効率よくチタンを蒸発させることが可能となる。(タングステン+モリブデン)とチタンとの重量比 $(W+Mo)/Ti$ は Table 2 に示しているように、U-1, U-2, U-3A, U-3B, U-5 では 0.42 ~ 1.65 であるのに対して、U-7, U-7A, U-7B では 2.78 ~ 3.27 である。

芯線を2本(重量比 1.85 ~ 2.36)にした結果が Fig.6-(14)~(18) であり、実験後の形状が Photo.10 ~ 12, 18 である。U-8 は2試料とも2ヶのチタン球状塊が生じたが、U-8A, U-8B は一様にぬれた。実験番号 830303-1 (U-8) は 20 min の蒸発でも溶断しなかったが、他はすべて溶断した。電流値は当然ながら3本芯線に比べて小さい。試験後の観察から、芯線が3本の場合に比べて、チタンの熔融状態が均一性において劣っているのがわかる。U-8 の 830225 では球状塊の残部が確認される (Photo.18)。

芯線を3本にして、添え巻き線をなくしたのが U-9 で前述の重量比が 2.8 である。電流-電圧特性が Fig.6-(19)~(20) であり、蒸発実験後の形状が Photo.13, 19 である。熔融後の電流値がこれまでのデータに比べてばらついている。これは、添え巻き線がないためにチタンの側面からの加熱がなく、そのため均一状態での熔融が保たれないことによると考えられる。試験後の観察では、球状塊にはならないが、まばらに熔融した跡を残している。これから、添え巻き線の存在がチタンを均一に熔融させる上で非常に重要であることがわかる。

U-9 と同様添え巻き線がなく、さらに芯線を2本に減らして重量比を 1.71 にした U-10 の結果が Fig.6-(21)~(22) および Photo.14, 19 である。両方の試作品とも熔融後約 30 sec で溶断した。蒸発後の状態も非常に局所的に熔融した様子を呈しており、芯線が1本多い U-9 に比べて未蒸発チタン量が多い。

以上述べた様に、電流-電圧特性はタングステンとモリブデンの量が多くなるほど電流値が大きくなり、また熔融蒸発状態は重量比 $(W+Mo)/Ti$ に強く依存する。すなわち、 $(W+Mo)/Ti$ が大きくなれば熔融しやすくなり蒸発量も多くなる。また添え巻き線はチタンを均一に熔融させる役目をしている。

4.2 電流密度

2.2 においてタングステンとモリブデンの電気抵抗率はほぼ同じで、チタンはそれらの 6.6 倍であることを述べた。したがって電流はおもにタングステンおよびモリブデン中を流れているといえよう。また熔融蒸発中はチタン量が時間経過とともに変化している。加熱体となる(タングステン+モリブデン)の単位面積当りの電流値で 4.1 の電流-電圧特性を整理した結果が Fig.7-(1)~(10) である。各試作品においてほぼ再現性のある電流-電圧特性が得られている。どの試料も熔融前ではほぼ原点を通過する比例関係にあると見てよいが、熔融後は電圧に対する電流値の伸びが減少する。これは、熔融と同時にタングステンおよびモリブデンの各々とチタンとの合金化が急激に進むため、電気抵抗が増大したことによると考えられる。合金化した場合の電気抵抗率は、不純物元素の種類および混入量にもよるが、一般に純金属のその数倍¹⁰⁾ ~ 数十倍である。

溶融状態が比較的良好であったU-7, U-7A, U-7B, U-8, U-8A, U-8BおよびU-9について溶融後の単位面積当りの電流値を比較してみる。電圧によって多少のばらつきがあるので、電圧一定10Vでの値をみると、各試料によらず70~80A/mm²ではほぼ一定である。同様に4.1で述べた電流値を電圧10Vで比べてみると、140~205Aでかなりの差がある。一例としてU-7B(芯線3本)とU-8B(芯線2本)とを比較すると、単位面積当りの電流値は両方とも約70Aではほぼ等しいが全電流は200A(U-7B)と140A(U-8A)であり、U-7BはU-8Bの約1.4倍である。この値はTable 2に示したU-7BとU-8Bについての(タングステン+モリブデン)の断面積比 $2.87/1.89=1.5$ に近い。

溶融後短時間で溶断したU-1, U-2, U-3A, U-3B, U-5, U-10についての溶融直前の加熱体の単位面積当りの電流値は90~150Aである。この値は(タングステン+モリブデン)の断面積のみで、説明することはできず、相対的にチタン断面積が大きいのでチタンに流れる電流が無視できなくなることの意味している。このように、断面積比 $(W+Mo)/Ti$ が大きい場合、例えば0.83(U-8)以上であれば加熱体に流れる電流に比較してチタンに流れる電流を無視してよいが、0.44(U-10)以下のように小さい場合は、チタンにも相当量の電流が流れ、チタンからの寄与を無視することはできない。

4.3 チタンの溶融開始電力

これまでの電流-電圧特性をもとにチタン蒸発線の溶融特性および溶断特性を整理した結果をTable 3に示した。4.1で述べた様に、U-2, U-3A, U-3BについてはFig.6-(4)~6-(6)の値を用いずに実際の溶融開始電圧を掲げてある。

溶融チタンを加熱線材に沿って一様にぬらして蒸発させるには、芯線の数、添え巻き線およびガード線の有無が大切であることは4.1で詳しく述べた。これと同様あるいはそれ以上にチタン蒸発線にとって重要なことは、4.1で述べたように加熱源となる(タングステン+モリブデン)と蒸発チタンの量的関係であると考えられる。そのためそれらの重量比 $(W+Mo)/Ti$ をパラメータとして種々の特性を整理した。

溶融開始電圧と重量比との関係をFig.8に示す。溶融開始電圧は重量比約1.7を境にして分れているように見える。1.7以下では重量比とともにいくらか増加している。それより大きい場合は4~5Vで重量比にあまり依存しない。前者は加熱源となるタングステンとモリブデンが少ないため電流が少なく、そのため溶融開始電圧が高い。一方、後者では電流が大きいため低い電圧でも溶融可能であり、溶融状態も重量比が大きくなるにつれて良好になる。

溶融開始電流をFig.9に示す。重量比とともにほぼ直線的に増大している。

(タングステン+モリブデン)の単位面積当りの溶融開始電流をFig.10に示す。重量比とともに減少するが、 $(W+Mo)/Ti \approx 2$ 以上では60A程度であまり変化がない。これについては4.2と同様の考察ができる。すなわち、タングステンとモリブデンの量が少ないときはチタンに流れる電流を無視できず、単位面積当りの電流値が大きくなる。しかしタングステンとモリブデンの量が多くなると、全電流はFig.9の様にかかなりの差があるにもかかわらず、電流はおもにタングステンとモリブデン中を流れるため、単位面積当りの電流はほとんど一定である。

溶融開始のための電力を Fig.11 に示す。溶融開始のために 500～1000W の電力を必要とする。

4.4 溶断特性

溶断時の電圧を Fig.12 に示す。重量比が小さい領域では溶融開始電圧と溶断時の電圧が等しく、重量比が大きくなるにしたがって溶断電圧が急激に増大する。重量比が大きければ大きいほど線材としての強さが大きく、かつ同じ高温にするにも多くの熱量を必要とすることから溶断に要する電力もそれに対応して大きくなると考えられる。さらに重量比が大きくなると溶断しない。unfused の試料はチタンが十分蒸発し、それ以上蒸発しないと思われた時点で中止した時の電圧を示す。

溶断電流を Fig.13 に示す。重量比に比例して増加しており、Fig.9 の溶融開始電流に比べて直線の傾きが大きい。

(タングステン+モリブデン) の単位面積当りの溶断電流を Fig.14 に示す。溶融開始電流と同様の傾向を示すが、重量比が大きい領域では Fig.10 に比べ値が大きい。

溶断時の電力を Fig.15 に示す。Fig.12 と Fig.13 との相乗効果に対して急激な増加を示している。前述した如く、タングステンとモリブデンの量が多くなればなるほど溶断時の電力が大きくなっている。重量比が 3 近傍の試料の多くは 2000～3000W の電力でも溶断が生じない。これらは、500～1000W の電力でチタンの溶融が始まるものである。

4.5 蒸発特性

重量比 (W+Mo)/Ti に対する蒸発特性、すなわちチタンの蒸発量、蒸発率、蒸発速度を Fig.16～18 に示す。

Fig.16 より、蒸発量は重量比 2 近傍で急激な立上りを示し、それ以上では 2g 程度でほぼ一定である。また Fig.17 より蒸発率、すなわち Fig.5 に示された有効蒸発線長さ 140mm に含まれるチタン量に対する蒸発量の割合も、重量比 2 付近で急な増大を示して 2.3 あたりで 70～80% に達し、その後はほぼ一定になる。重量比が小さい領域では、溶融開始後間もなく溶断が生じ、蒸発率も小さく 5% 以下である。タングステンとモリブデンの量を多くして、実験に供された重量比の最大値 3.3 よりも大きな値にしても、Fig.17 より蒸発率はあまり変化しないと考えられる。また線材の価格は、タングステン>モリブデン>チタンの順であり、全体費用を低く押える点からも、できるだけタングステンとモリブデンの量を少なくして、効率よくチタンを蒸発させることが望ましい。これらの点を考慮すると、満足すべき重量比の最低値は 2.3 であることがわかる。實際上、作製するに当っては安全を見積って 2.5～3 にしておくのが無難であろう。重量比 2.78 のデータのうちのひとつが 44% という低い蒸発率の値になっているが、これは加熱昇温の誤操作によるものである。

次に、重量比に対する蒸発速度の結果を Fig.18 に示す。測定点はばらついているが、重量比が 2 より小さい場合は増加の傾向を示すが、それ以上ではあまり重量比に依存せず 0.1～0.2g/min である。重量比が小さい場合は、前述したようにチタン溶融後、間もなく溶断し、その仕

方も重量比が小さいほど短時間で溶断するため、電力供給の制御が十分でなく、比較的大きい電力が投入されたため結果として蒸発速度が大きくなったと考えられる。

4.6 蒸発線の健全性

蒸発実験後の線材の様子を Photo. 1～19 に示す。JT-60 実機へ適用する場合、蒸発後の線材が真空容器内に落下することなく、取り出されなければならない。

チタン蒸発線は3で述べた様に、フランジを通じて真空槽内に設置されている。蒸発線の固定は一回毎にフランジを取りはずして行った。したがって、蒸発後の線材はフランジ取りはずしの際の衝撃あるいは振動を受けることになる。蒸発後、フランジを真空槽に固定したままでは、市販品および試作品ともに線材が崩れ落ちることはなかった。しかしフランジを取りはずす際に、市販品は線材の一部が崩れ落ちることがわかった。しかし重量比 $(W+Mo)/Ti \geq 2.3$ を満たす U-7, U-7A, U-7B, U-8B では一様な加熱溶融が行われるため、局部的に強度が脆弱化することなく非常に健全であり、そのため蒸発後の取りはずしで崩れることはなかった。

5. JT-60 その場コーティングへの適用性

試作した蒸発線が JT-60 に適用可能であるかどうかについて、膜厚、析出速度および蒸着時間の観点から検討する。

5.1 膜厚

プレコーティングでは JT-60 第一壁基材に $20 \mu\text{m}$ の炭化チタン膜がコーティングされる。炭化チタンが水素のスパッタリングのみで侵食されるとすると、その寿命は JT-60 第一壁に入射するエネルギー水素量を $1 \times 10^{18} \text{個} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、1 放電 (ショット) 時間を 10 秒として、約 2,000 ショットと見積られる⁵⁾。JT-60 のショット数を 1 年あたり 1000 ショットと仮定すると 2 年間のプラズマ実験で消耗してしまうことになる。したがって消耗量を補うために、定期的にその場コーティングを行う必要がある。その頻度はその場コーティングのために必要な JT-60 真空容器本体のベーキング等を考慮すると 1 ヶ月に 1 回程度である。1 ヶ月の損耗量を単純平均すると $0.85 \mu\text{m}$ 程度となり、これだけの炭化チタン膜を補給しなければならない。

一方、炭化チタン蒸着膜の厚さ $D(\text{Å})$ は、被膜が JT-60 真空容器内のコーティングされる全面積にわたって、均一な厚さで蒸着されると仮定すれば、蒸発チタンの重量 $M(\text{g})$ の関数として次式で表される。^{注1)}

$$D = 18.8 \times M \quad (1)$$

注 1) (1)式の導出は付録参照

方も重量比が小さいほど短時間で溶断するため、電力供給の制御が十分でなく、比較的大きい電力が投入されたため結果として蒸発速度が大きくなったと考えられる。

4.6 蒸発線の健全性

蒸発実験後の線材の様子を Photo. 1～19 に示す。JT-60 実機へ適用する場合、蒸発後の線材が真空容器内に落下することなく、取り出されなければならない。

チタン蒸発線は3で述べた様に、フランジを通じて真空槽内に設置されている。蒸発線の固定は一回毎にフランジを取りはずして行った。したがって、蒸発後の線材はフランジ取りはずしの際の衝撃あるいは振動を受けることになる。蒸発後、フランジを真空槽に固定したままでは、市販品および試作品ともに線材が崩れ落ちることはなかった。しかしフランジを取りはずす際に、市販品は線材の一部が崩れ落ちることがわかった。しかし重量比 $(W+Mo)/Ti \geq 2.3$ を満す U-7, U-7A, U-7B, U-8B では一様な加熱溶融が行われるため、局部的に強度が脆弱化することなく非常に健全であり、そのため蒸発後の取りはずしで崩れることはなかった。

5. JT-60 その場コーティングへの適用性

試作した蒸発線が JT-60 に適用可能であるかどうかについて、膜厚、析出速度および蒸着時間の観点から検討する。

5.1 膜厚

プレコーティングでは JT-60 第一壁基材に $20 \mu\text{m}$ の炭化チタン膜がコーティングされる。炭化チタンが水素のスパッタリングのみで侵食されるとすると、その寿命は JT-60 第一壁に入射するエネルギー水素量を $1 \times 10^{18} \text{個} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、1 放電 (ショット) 時間を 10 秒として、約 2,000 ショットと見積られる。⁵⁾ JT-60 のショット数を 1 年あたり 1000 ショットと仮定すると 2 年間のプラズマ実験で消耗してしまうことになる。したがって消耗量を補うために、定期的にその場コーティングを行う必要がある。その頻度はその場コーティングのために必要な JT-60 真空容器本体のベーキング等を考慮すると 1 ヶ月に 1 回程度である。1 ヶ月の損耗量を単純平均すると $0.85 \mu\text{m}$ 程度となり、これだけの炭化チタン膜を補給しなければならない。

一方、炭化チタン蒸着膜の厚さ $D(\text{Å})$ は、被膜が JT-60 真空容器内のコーティングされる全面積にわたって、均一な厚さで蒸着されると仮定すれば、蒸発チタンの重量 $M(\text{g})$ の関数として次式で表される。^{注1)}

$$D = 18.8 \times M \quad (1)$$

注 1) (1) 式の導出は付録参照

したがって1ヶ月の損耗量を補充するためには、450 g程度のチタンを蒸発させる必要がある。Fig.19に、JT-60 その場コーティングの概念図を示す。

ほぼ90°間隔に配分された4ヶ所のU₄ポートに4台のコーティング装置を設置し、それぞれからチタン蒸発線を装備した腕を真空容器内へ挿入し、チタンを蒸発させる。腕の長さは真空容器の直径および形状に依存するが、JT-60ではFig.19に示すように2mである。したがって各U₄ポートごとにポートの左右にそれぞれ2mの蒸発線を張ることができる。実験に用いた蒸発線の長さは15cmであるから、電極等を考慮に入れても2mの腕には直列に10本の線を固定できる。Fig.20にチタン蒸発源用の腕の概念図を示す。試作品の蒸発量は4.5で述べたように、重量比が2.3以上の蒸発線のとき約2gであるから、4ヶのポートを使って得られるチタンの総重量は

$$4(\text{ヶ}) \times 2(\text{左右}) \times 10(\text{本}) \times 2(\text{g}) = 160 \text{ g}$$

である。これは1列の場合であり、3列にすれば480 gとなり、前述の1ヶ月に受けるスパッタリングによる損耗を補修することが可能である。実験には腕および他の蒸発線のため陰になる部分が生じるため、少し多目の配列が必要となるかもしれない。U₄ポートの直径は200mmφであるため、チタン蒸発部の形状大きさに制限をうけるが、電極等の配置空間を考慮しても1本の腕に12列程度までは比較的容易に配置できると考えられる。なお、市販品のチタン蒸発線は蒸発量が少なく（試作品の10⁻¹程度）かつ蒸着後、線材が脆弱化するため、実機には使用できない。

5.2 析出速度

Ti-C₂H₂系反応性蒸着法で化学量論組成を有するTiC膜を形成させる場合、C₂H₂圧に対応して最適TiC析出速度も変化する。たとえば、C₂H₂圧7.5×10⁻³ Paのとき最適TiC析出速度は1.5 Å sec⁻¹であり、このとき化学量論組成のTiC膜が形成される。³⁾

今回行った試作品1本の蒸発速度はFig.18より約0.14 g min⁻¹本⁻¹である。したがって直列に並んだ10本の蒸発線からのチタン蒸発速度は1.4 g min⁻¹となり、それによる蒸発チタンはおもにその腕近傍の1/8分割真空容器の内壁にコーティングされるとみてよい。したがってTiC析出速度は(1)式から、

$$18.8 \times 8 \times 1.4 \text{ Å min}^{-1} = 3.5 \text{ Å sec}^{-1}$$

となる。この値は前述したように、たとえばC₂H₂圧7.5×10⁻³ Paのときに必要とされるTiC析出速度1.5 Å sec⁻¹を充分満たすものである。なおTiC析出速度1.5 Å sec⁻¹はチタン蒸発線10本1列当りのチタン蒸発速度0.6 g min⁻¹（すなわち0.06 g min⁻¹本⁻¹）に相当する。

5.3 蒸着時間

アセチレンガス圧が7.5×10⁻³ Paの場合を例としてJT-60第一壁をTiCコーティングする

のに要する時間を検討する。このとき、TiC膜を形成させるために必要なチタン蒸発速度は、 $0.6 \text{ g min}^{-1} (10 \text{ 本})^{-1}$ である。

5.1で述べたように、月に1度その場コーティングを行うとすれば、4つのU₄ポートにおのおのコーティング装置を設置し、同時に蒸着を行えば効率がよい。Fig.20に示したように、各装置の腕には1列当り10本の蒸発線を有する列が6列づつ備えられており、各ポートの左右でおのおの3列づつ使用されるとすれば、所定の膜厚を得ることができる。すなわち左側で3列を順次蒸発させ、その後、腕を右側に移動させて残りを蒸発させればよい。1列10本からの蒸発量は約20gであるから、その蒸発時間は1列当り $20/0.6 \text{ min}$ となる。したがって前述のコーティング条件下でU₄ポート4ヶ所を同時使用してJT-60第一壁全面へ $0.85 \mu\text{m}$ のTiC膜をコーティングするのに要する蒸着時間は単純計算すると $(20/0.6) \times 3 (\text{列}) \times 2 (\text{左右}) = 200 \text{ min}$ となる。なおJT-60真空容器を 300°C 以上にベーキングするためには、数10時間程度を必要とする。

以上、膜厚、析出速度、蒸着時間について検討したが、本実験で試作されたものの中で適切な条件を満すもの、すなわち添え巻き線および外周ガード線があり、かつ重量比が $(W+Mo)/Ti \geq 2.3$ のチタン蒸発線は、JT-60への炭化チタン膜その場コーティングのチタン蒸発線として使用可能である。なお、4.6で詳述した様に、蒸発後の線材の健全性の点でもJT-60への適用が可能である。

6. ま と め

JT-60第一壁への炭化チタン膜その場コーティングを行うためのチタン蒸発線の開発を行った。芯線およびチタン線の本数、添え巻き線および外周ガード線の有無のいろいろな試作品を製作し、それらを用いて反応性蒸着を想定した蒸着試験を行って諸特性を調べ、それに基づいてJT-60実機への適用可能性を検討した。その結果適切な条件を満す蒸発線はJT-60での使用が可能である。また比較のために、市販のサブリメーションポンプ用チタン蒸発線についても試験を行った。

蒸発線の電気的特性については4.1～4.4に詳しく説明してあるのでここでは触れない。試作チタン蒸発線を用いた、蒸発試験の主な結果を以下に列挙する。

(1) チタン線と同時に巻く添え巻き線は、芯線とともに加熱源となり、チタン線を測面から加熱するためチタンを一様に溶融させる。

(2) 最外周に巻くガード線は溶融チタンが球状になるのを防いでいる。

(3) 添え巻き線とガード線とにより溶融チタンは加熱線材に沿って均一にぬれるため、局部的な加熱による線材の脆弱化が起らない。

(4) 加熱源となるタングステン芯線およびモリブデン添え巻き線とチタン蒸発線との重量比 $(W+Mo)/Ti$ が2付近で蒸発率が急激に増加し、2.3あたりで70～80%に達し、それ以上ではほぼ一定である。重量比 ≥ 2.3 の場合、有効長さ140mmの蒸発線の蒸発量は約2gであり、また蒸発後も線材の健全性が保たれるため、JT-60実機へ適用できる。

のに要する時間を検討する。このとき、TiC膜を形成させるために必要なチタン蒸発速度は、 $0.6 \text{ g min}^{-1} (10 \text{ 本})^{-1}$ である。

5.1で述べたように、月に1度その場コーティングを行うとすれば、4つのU₄ポートにおのおのコーティング装置を設置し、同時に蒸着を行えば効率がよい。Fig.20に示したように、各装置の腕には1列当り10本の蒸発線を有する列が6列づつ備えられており、各ポートの左右でおのおの3列づつ使用されるとすれば、所定の膜厚を得ることができる。すなわち左側で3列を順次蒸発させ、その後、腕を右側に移動させて残りを蒸発させればよい。1列10本からの蒸発量は約20gであるから、その蒸発時間は1列当り $20/0.6 \text{ min}$ となる。したがって前述のコーティング条件下でU₄ポート4ヶ所を同時使用してJT-60第一壁全面へ $0.85 \mu\text{m}$ のTiC膜をコーティングするのに要する蒸着時間は単純計算すると $(20/0.6) \times 3 (\text{列}) \times 2 (\text{左右}) = 200 \text{ min}$ となる。なおJT-60真空容器を 300°C 以上にベーキングするためには、数10時間程度を必要とする。

以上、膜厚、析出速度、蒸着時間について検討したが、本実験で試作されたものの中で適切な条件を満すもの、すなわち添え巻き線および外周ガード線があり、かつ重量比が $(\text{W}+\text{Mo})/\text{Ti} \geq 2.3$ のチタン蒸発線は、JT-60への炭化チタン膜その場コーティングのチタン蒸発線として使用可能である。なお、4.6で詳述した様に、蒸発後の線材の健全性の点でもJT-60への適用が可能である。

6. ま と め

JT-60第一壁への炭化チタン膜その場コーティングを行うためのチタン蒸発線の開発を行った。芯線およびチタン線の本数、添え巻き線および外周ガード線の有無のいろいろな試作品を製作し、それらを用いて反応性蒸着を想定した蒸着試験を行って諸特性を調べ、それに基づいてJT-60実機への適用可能性を検討した。その結果適切な条件を満す蒸発線はJT-60での使用が可能である。また比較のために、市販のサブリメーションポンプ用チタン蒸発線についても試験を行った。

蒸発線の電気的特性については4.1～4.4に詳しく説明してあるのでここでは触れない。試作チタン蒸発線を用いた、蒸発試験の主な結果を以下に列挙する。

(1) チタン線と同時に巻く添え巻き線は、芯線とともに加熱源となり、チタン線を測面から加熱するためチタンを一様に溶融させる。

(2) 最外周に巻くガード線は溶融チタンが球状になるのを防いでいる。

(3) 添え巻き線とガード線とにより溶融チタンは加熱線材に沿って均一にぬれるため、局部的な加熱による線材の脆弱化が起らない。

(4) 加熱源となるタングステン芯線およびモリブデン添え巻き線とチタン蒸発線との重量比 $(\text{W}+\text{Mo})/\text{Ti}$ が2付近で蒸発率が急激に増加し、2.3あたりで70～80%に達し、それ以上ではほぼ一定である。重量比 ≥ 2.3 の場合、有効長さ140mmの蒸発線の蒸発量は約2gであり、また蒸発後も線材の健全性が保たれるため、JT-60実機へ適用できる。

(5) 投入電力 500～1000W でチタンが溶融し始め、さらに連続して蒸発させるために時間とともに電力を増加させていくと、2000～2500W で蒸発がほぼ完了する。

(6) 重量比 $(W+Mo)/Ti$ が 3 近傍の蒸発線の多くは、2000～3000W の電力を投入しても溶断しない。

謝 辞

本研究を進めるにあたって有益なご討論を頂いた日本原子力研究所・大型トカマク開発部 JT-60 第 1 開発室の各位に感謝する。また終始激励を頂いた太田充 JT-60 第 1 開発室長、飯島勉大型トカマク開発部次長、吉川允二大型トカマク開発部長、苫米地顕部長、田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長ならびに磯康彦核融合研究センター所長に深く感謝する。なおチタン蒸発線の試作にはウィザップタンングステン工業（株）および（株）偕揚社の協力をいただいた。両社の協力に感謝する。

参 考 文 献

- (1) IAEA: INTOR Report (VIENNA, 1980) Zero Phase, P.128
- (2) 阿部哲也, 他; 真空, 26 (1983) 488-493
- (3) 稲川幸之助, 他; 真空, 26 (1983) 494-498
- (4) R.C. Weast; "CRC Handbook of Chemistry and Physics" (CRC Press Inc., USA, 1982) 63 rd ed.
- (5) Y. Murakami, T. Abe and H. Nakamura; J. Nucl. Mater. 111& 112 (1982) 861-863

付 録

チタン蒸発量と炭化チタン析出膜の厚さとの関係

JT-60 真空容器内をアセチレンガス雰囲気にしてチタン蒸発源からチタンを蒸発させ第一壁面上に炭化チタンをコーティングした時の膜厚を求める。

計算に際しては次の 2 つの仮定をおく。

(1) 反応性蒸着により、蒸発チタン原子はアセチレンガスと反応してすべて NaCl 型構造をもつ TiC 膜となる。

(2) 膜厚は容器内面のコーティングされるすべての場所で均一である。

コーティングされる表面積 S は約 136 m^2 (ペロー, ポート部を除く) である。 $M(\text{g})$ のチタンを蒸発させて厚さ D (cm) の TiC 膜が形成されたとすると、TiC 膜の体積 V は、

$$V = S \times D = 136 \times 10^4 \times D \text{ (cm}^3\text{)} \quad (1)$$

(5) 投入電力 500～1000W でチタンが溶融し始め、さらに連続して蒸発させるために時間とともに電力を増加させていくと、2000～2500W で蒸発がほぼ完了する。

(6) 重量比 $(W+Mo)/Ti$ が 3 近傍の蒸発線の多くは、2000～3000W の電力を投入しても溶断しない。

謝 辞

本研究を進めるにあたって有益なご討論を頂いた日本原子力研究所・大型トカマク開発部 JT-60 第 1 開発室の各位に感謝する。また終始激励を頂いた太田充 JT-60 第 1 開発室長、飯島勉大型トカマク開発部次長、吉川允二大型トカマク開発部長、苫米地頭部長、田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長ならびに磯康彦核融合研究センター所長に深く感謝する。なおチタン蒸発線の試作にはウィザップタンングステン工業（株）および（株）偕揚社の協力をいただいた。両社の協力に感謝する。

参 考 文 献

- (1) IAEA: INTOR Report (VIENNA, 1980) Zero Phase, P.128
- (2) 阿部哲也, 他; 真空, 26 (1983) 488-493
- (3) 稲川幸之助, 他; 真空, 26 (1983) 494-498
- (4) R.C. Weast; "CRC Handbook of Chemistry and Physics" (CRC Press Inc., USA, 1982) 63 rd ed.
- (5) Y. Murakami, T. Abe and H. Nakamura; J. Nucl. Mater. 111&112 (1982) 861-863

付 録

チタン蒸発量と炭化チタン析出膜の厚さとの関係

JT-60 真空容器内をアセチレンガス雰囲気にしてチタン蒸発源からチタンを蒸発させ第一壁面上に炭化チタンをコーティングした時の膜厚を求める。

計算に際しては次の 2 つの仮定をおく。

(1) 反応性蒸着により、蒸発チタン原子はアセチレンガスと反応してすべて NaCl 型構造をもつ TiC 膜となる。

(2) 膜厚は容器内面のコーティングされるすべての場所で均一である。

コーティングされる表面積 S は約 136m^2 (ベロー, ポート部を除く) である。M(g) のチタンを蒸発させて厚さ D (cm) の TiC 膜が形成されたとすると、TiC 膜の体積 V は、

$$V = S \times D = 136 \times 10^4 \times D \text{ (cm}^3\text{)} \quad (1)$$

(5) 投入電力 500～1000W でチタンが溶融し始め、さらに連続して蒸発させるために時間とともに電力を増加させていくと、2000～2500W で蒸発がほぼ完了する。

(6) 重量比 (W+Mo)/Ti が 3 近傍の蒸発線の多くは、2000～3000W の電力を投入しても溶断しない。

謝 辞

本研究を進めるにあたって有益なご討論を頂いた日本原子力研究所・大型トカマク開発部 JT-60 第 1 開発室の各位に感謝する。また終始激励を頂いた太田充 JT-60 第 1 開発室長、飯島勉大型トカマク開発部次長、吉川允二大型トカマク開発部長、苫米地顕部長、田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長ならびに磯康彦核融合研究センター所長に深く感謝する。なおチタン蒸発線の試作にはウィザップタンングステン工業(株)および(株)偕揚社の協力をいただいた。両社の協力に感謝する。

参 考 文 献

- (1) IAEA: INTOR Report (VIENNA, 1980) Zero Phase, P.128
- (2) 阿部哲也, 他; 真空, 26 (1983) 488-493
- (3) 稲川幸之助, 他; 真空, 26 (1983) 494-498
- (4) R.C. Weast; "CRC Handbook of Chemistry and Physics" (CRC Press Inc., USA, 1982) 63 rd ed.
- (5) Y. Murakami, T. Abe and H. Nakamura; J. Nucl. Mater. 111&112 (1982) 861-863

付 録

チタン蒸発量と炭化チタン析出膜の厚さとの関係

JT-60 真空容器内をアセチレンガス雰囲気にしてチタン蒸発源からチタンを蒸発させ第一壁面上に炭化チタンをコーティングした時の膜厚を求める。

計算に際しては次の 2 つの仮定をおく。

(1) 反応性蒸着により、蒸発チタン原子はアセチレンガスと反応してすべて NaCl 型構造をもつ TiC 膜となる。

(2) 膜厚は容器内面のコーティングされるすべての場所で均一である。

コーティングされる表面積 S は約 136 m^2 (ベロー, ポート部を除く) である。 $M(\text{g})$ のチタンを蒸発させて厚さ D (cm) の TiC 膜が形成されたとすると、TiC 膜の体積 V は、

$$V = S \times D = 136 \times 10^4 \times D \text{ (cm}^3\text{)} \quad (1)$$

(5) 投入電力 500～1000W でチタンが溶融し始め、さらに連続して蒸発させるために時間とともに電力を増加させていくと、2000～2500W で蒸発がほぼ完了する。

(6) 重量比 (W+Mo)/Ti が 3 近傍の蒸発線の多くは、2000～3000W の電力を投入しても溶断しない。

謝 辞

本研究を進めるにあたって有益なご討論を頂いた日本原子力研究所・大型トカマク開発部 JT-60 第 1 開発室の各位に感謝する。また終始激励を頂いた太田充 JT-60 第 1 開発室長、飯島勉大型トカマク開発部次長、吉川允二大型トカマク開発部長、苫米地顕部長、田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長ならびに磯康彦核融合研究センター所長に深く感謝する。なおチタン蒸発線の試作にはウィザップタンングステン工業(株)および(株)借揚社の協力をいただいた。両社の協力に感謝する。

参 考 文 献

- (1) IAEA: INTOR Report (VIENNA, 1980) Zero Phase, P.128
- (2) 阿部哲也, 他; 真空, 26 (1983) 488-493
- (3) 稲川幸之助, 他; 真空, 26 (1983) 494-498
- (4) R.C. Weast; "CRC Handbook of Chemistry and Physics" (CRC Press Inc., USA, 1982) 63 rd ed.
- (5) Y. Murakami, T. Abe and H. Nakamura; J. Nucl. Mater. 111& 112 (1982) 861-863

付 録

チタン蒸発量と炭化チタン析出膜の厚さとの関係

JT-60 真空容器内をアセチレンガス雰囲気にしてチタン蒸発源からチタンを蒸発させ第一壁面上に炭化チタンをコーティングした時の膜厚を求める。

計算に際しては次の 2 つの仮定をおく。

(1) 反応性蒸着により、蒸発チタン原子はアセチレンガスと反応してすべて NaCl 型構造をもつ TiC 膜となる。

(2) 膜厚は容器内面のコーティングされるすべての場所で均一である。

コーティングされる表面積 S は約 136 m^2 (ベロー, ポート部を除く) である。 $M(\text{g})$ のチタンを蒸発させて厚さ D (cm) の TiC 膜が形成されたとすると、TiC 膜の体積 V は、

$$V = S \times D = 136 \times 10^4 \times D \text{ (cm}^3\text{)} \quad (1)$$

である。また炭化チタンの単位胞の体積 v は、格子定数 $a = 4.328 \text{ \AA}$ より $v = a^3 = 81.07 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$ であり、その中には4ケのチタン原子が含まれている。したがって(1)式に含まれているチタンの数は

$$\frac{V}{v} \times 4 = \frac{136 \times 10^4 \times D}{81.07 \times 10^{-24}} \times 4 = 6.71 \times 10^{28} \times D \quad (\text{個}) \quad (2)$$

となる。

一方、蒸発チタン重量 $M(\text{g})$ に含まれるチタンの個数は、チタンの1g原子量47.90gおよびアボガドロ数 $6.022 \times 10^{23} \text{ 個 mol}^{-1}$ から

$$\frac{M}{47.90} \times 6.022 \times 10^{23} = 1.26 \times 10^{22} \times M \quad (\text{個}) \quad (3)$$

となる。したがって(2)式 = (3)式より

$$6.71 \times 10^{28} \times D = 1.26 \times 10^{22} \times M$$

となる。したがって膜厚がチタン蒸発量の関数として求められ、次式のようになる。

$$\begin{aligned} D &= 1.88 \times 10^{-7} \times M \quad (\text{cm}) \\ &= 1.88 \times 10^{-3} \times M \quad (\mu\text{m}) \\ &= 18.8 \times M \quad (\text{\AA}) \end{aligned}$$

Table 1 The dimensions and material compositions of the titanium evaporation wires tested. Weight unit; g.

Wire materials	Diameter (mm)	Classification of sample								Diameter (mm)	Classi. of sample		
		U-1	U-2	U-3A	U-3B	U-4A	U-4B	U-5	U-6				
① W	0.8~0.9φ (ellipse)	one 1.55	one 1.55	one 1.55	one 1.55	one 1.55	one 1.55	one 1.55	one 1.55	1.0 φ	one 2.35	U-6	
② Ti	1.2 φ	three 2.70	four 3.65	three 2.70	three 2.75	four 3.60	three 3.55	three 3.55	three 3.55	1.2 φ	three 2.95	U-6	
③ Mo	0.7 φ	one 0.85	one 0.85	one 0.85	one 0.7	one 0.85	one 0.7	one 0.85	one 0.7	1.0 φ	one 1.60	U-6	
④ W (guard)	0.3 φ	/	/	/	/	/	/	one 0.85	one 0.85	0.3 φ (guard)	one 0.85	/	
④' W (guard)	0.4 φ	/	/	/	/	/	/	one 2.3	one 2.4	0.3 φ (guard)	one 0.45	/	
Total weight		5.1		5.2		5.9		7.3		6.0		7.5	

* Modification

Wire materials	Diameter (mm)	Classification of sample								Diameter (mm)	Classi. of sample		
		U-7	U-7A	U-7B	U-8	U-8A	U-8B	U-9	U-10				
①' W	1.0 φ	three(1**) 7.65	three(1**) 7.6	three(1**) 7.6	two(1**) 5.0	two(1**) 4.95	two(1**) 4.85	three(1**) 7.65	two(1**) 5.0	1.0 φ	three(1**) 7.65	U-10	
②' Ti	0.95 φ	three 3.2	three 3.2	three 3.2	three 3.0	three 3.0	three 2.9	four 4.05	four 3.8	0.95 φ	four 4.05	U-10	
③ Mo	0.7 φ or 0.5 φ	0.7 φ one 1.25	0.7 φ one 1.25	0.7 φ one 1.25	0.5 φ one 0.55	0.5 φ one 0.5	0.5 φ one 0.5	0.5 φ one 0.5	0.5 φ one 0.5	/	/	/	
④ W (guard)	0.3 φ	/	one 0.9	/	/	one 0.8	/	/	/	0.3 φ (guard)	/	/	
④' W (guard)	0.4 φ	/	/	one 1.6	/	one 1.5	/	/	/	0.4 φ (guard)	one 1.6	U-10	
Total weight		12.1		12.95		13.65		8.55		9.25		10.3	

** Twisted three or two wires

Table 2 Weight ratio and cross-sectional area ratio of the evaporation wires.

Classification of sample	Weight of (W + Mo) (g)	Area* of (W + Mo) (mm ²)	Weight of Ti (g)	Area* of Ti (mm ²)	Weight ratio (W+Mo)/Ti(W+Mo)/Ti	Area* ratio
C.a. sample**	2.3	0.63	1.0	1.01	2.3	0.63
U - 1	2.4	0.95	2.7	3.39	0.89	0.28
U - 2	1.55	0.56	3.65	4.52	0.42	0.12
U - 3A	3.2	1.02	2.70	3.39	1.19	0.30
U - 3B	4.55	1.08	2.75	3.39	1.65	0.32
U - 5	4.8	1.02	2.95	3.39	1.63	0.30
U - 7	8.9	2.74	3.2	2.13	2.78	1.28
U - 7A	9.75	2.81	3.2	2.13	3.05	1.32
U - 7B	10.45	2.87	3.2	2.13	3.27	1.35
U - 8	5.55	1.77	3.0	2.13	1.85	0.83
U - 8A	6.25	1.84	3.0	2.13	2.08	0.86
U - 8B	6.85	1.89	2.9	2.13	2.36	0.88
U - 9	9.25	2.48	4.05	2.83	2.28	0.88
U - 10	6.5	1.26	3.8	2.83	1.71	0.44

* Cross-sectional area

** Commercially available sample

Table 3 Evaporation condition for the wires.

Experimental number	Classification of sample	Condition for Ti melt beginning			Condition for fusing				Evaporation time (min)	
		Voltage (V)	Current (A)	Current* (A/mm ²)	Power (W)	Voltage (V)	Current (A)	Current* (A/mm ²)		Power (W)
830126-1	C. a. sample**	5.5	86	131	473	6.2	82	131	508	5
830126-2	"	5.8	"	"	500	6.9	79	126	582	6.5
830127-1	U-1	6.4	91	96	582					~0.2
830127-2	"	6.5	90	95	585					"
830127-3	U-2	6.4								<0.1
830127-4	"	6.0								"
830127-5	"	6.4								"
830201-1	U-3A	6.7								<0.1
830201-2	"	"								"
830201-3	"	7.1								"
830209-1	U-3B	7.2								<0.1
830209-2	"	7.1								"
830209-3	"	"								"
830209-4	U-5	7.3								~0.4
830209-5	"	"								~0.3
830301	U-7	4.3	181	66	783	11.7	222	81	2597	15
830302-1	"	3.9	138	50	538	10.3	221	81	2276	20
830312	U-7A	4.4	181	64	796	11.0	209	74	2299	15
830317	"	"	178	63	783	13.6	219	78	2978	20
830302-2	U-7B	5.1	191	66	975	9.7	198	69	1921	16
830311-1	"	5.2	185	65	962	10.9	215	75	2344	12
830225	U-8	4.6	138	78	635	8.6	136	77	1170	11
830303-1	"	"	107	61	492	13.0	160	91	2080	20
830311-2	U-8A	4.6	116	63	534					4
830226	U-8B	5.2	138	73	718	9.1	128	68	1165	10
830304	"	5.3	134	71	710	10.4	140	74	1456	16
830309	U-9	4.5	170	69	765	12.1	158	64	1900	17
830310-1	"	"	174	70	783	5.8	170	69	986	4
830310-2	U-10	5.3	117	93	620					~0.5
830310-3	"	"	119	94	"					"

* Current per unit area of (W+Mo)

**Commercially available sample

Table 4 Test results of the evaporation wires at acetylene pressures of $6.5 - 13 \times 10^{-3}$ Pa.

Experimental number	Classification of sample	Weight of evaporated Ti (g)	Evaporation percentage of Ti (%)	Evaporation rate of Ti (g/min)	Melting state of Ti	Fusing
830126 - 1	C.a. sample*	0.2	21	0.04	five drops	yes
830126 - 2	"	"	"	0.03	"	"
830127 - 1	U - 1	~0.05	2	0.25	"	"
830127 - 2	"	"	"	"	"	"
830127 - 3	U - 2	~0.03	1	"	"	"
830127 - 4	"	"	"	"	"	"
830127 - 5	"	"	"	"	"	"
830201 - 1	U - 3A	~0.03	1	"	"	"
830201 - 2	"	~0.04	"	"	"	"
830201 - 3	"	"	"	"	"	"
830209 - 1	U - 3B	~0.03	1	"	"	"
830209 - 2	"	"	"	"	"	"
830209 - 3	"	"	"	"	"	"
830209 - 4	U - 5	~0.06	2	0.15	"	"
830209 - 5	"	"	"	0.20	"	"
830301	U - 7	1.3	44	0.09	uniformly wet	no
830302 - 2	"	2.4	80	0.12	two drops	yes
830312	U - 7A	2.2	74	0.15	uniformly wet	no
830317	"	2.5	84	0.13	"	"
830302 - 1	U - 7B	2.0	67	0.13	"	"
830311 - 1	"	2.4	80	0.20	"	"
830225	U - 8	1.7	61	0.15	two drops	yes
830303 - 1	"	2.5	89	0.13	"	no
830311 - 2	U - 8A	0.1	3	0.03	uniformly wet	yes
830226	U - 8B	1.6	59	0.16	"	"
830304	"	1.9	72	0.12	"	"
830309	U - 9	2.8	74	0.16	ununiformly wet	"
830310 - 1	"	0.6	16	0.15	"	"
830310 - 2	U - 10	0.1	3	0.20	"	"
830310 - 3	"	0.2	5	0.40	"	"

* Commercially available sample

Ti wire for evaporation (U - 7B)

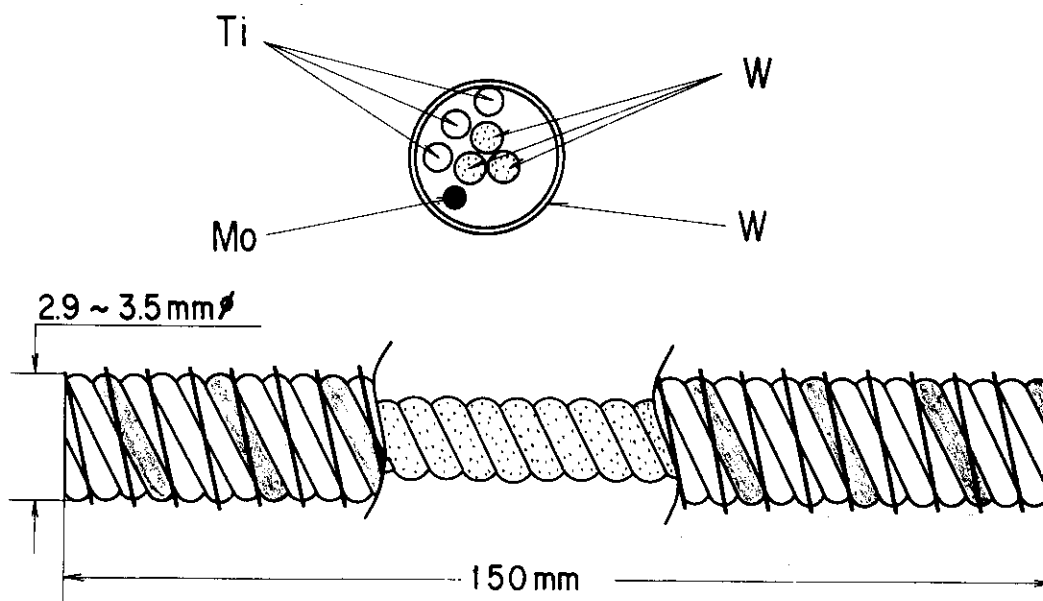


Fig.1 Sketch of a typical titanium evaporation wire(U - 7B).

Three titanium wires are wound around the three core tungsten wires together with a molybdenum wire. The slender tungsten wire acted as a guard is wound around the outside of the evaporation wire.

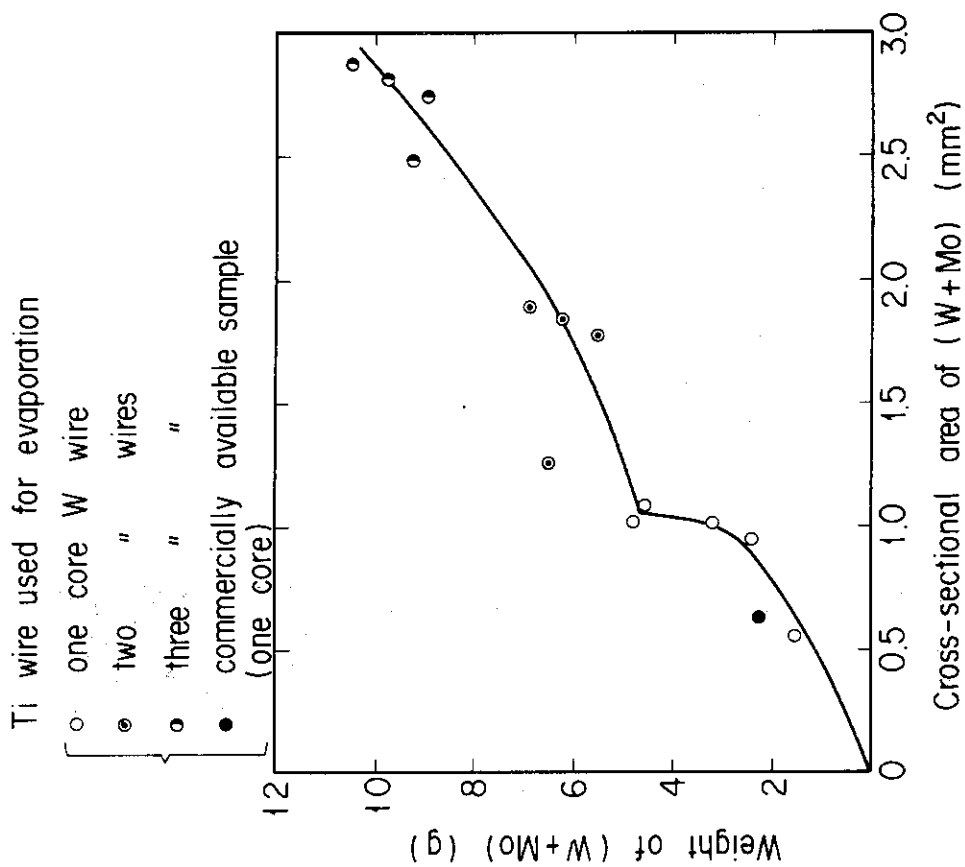


Fig. 2 Relationship between the weight of Ti and the cross-sectional area of Ti of the evaporation wires.

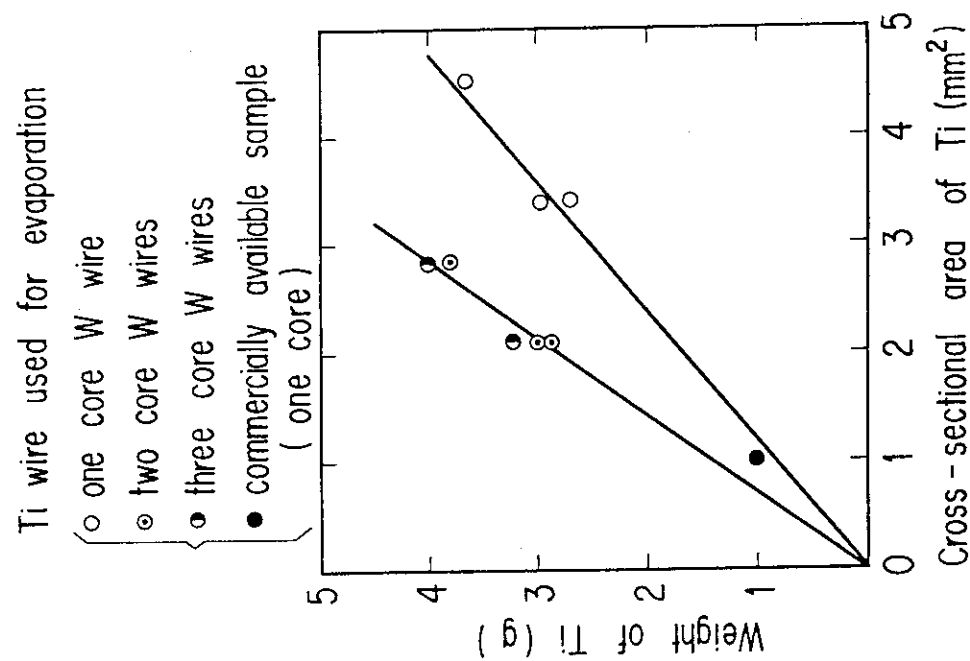


Fig. 3 Relationship between the weight of Ti and the cross-sectional area of (W+Mo) of the evaporation wires

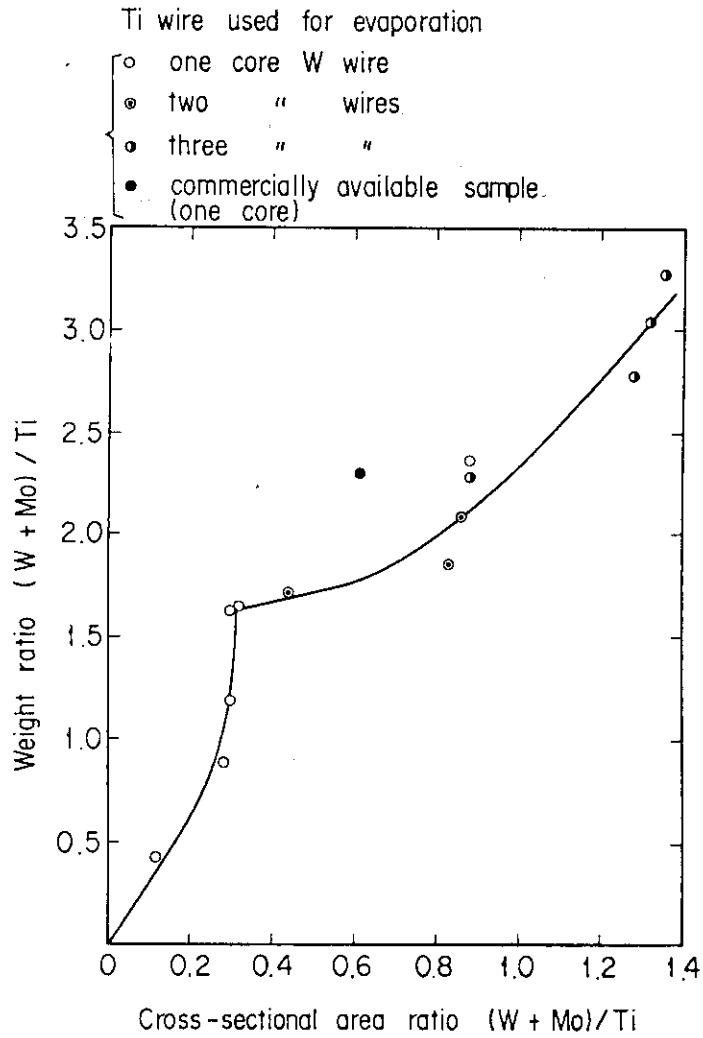


Fig. 4 Relationship between the weight ratio (W+Mo)/Ti and the cross-sectional area ratio (W+Mo)/Ti of the evaporation wires

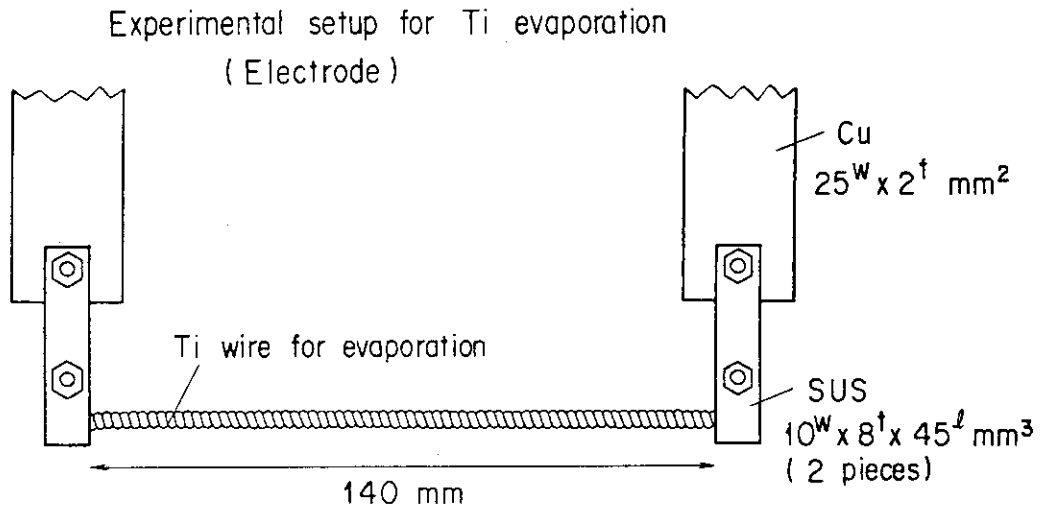
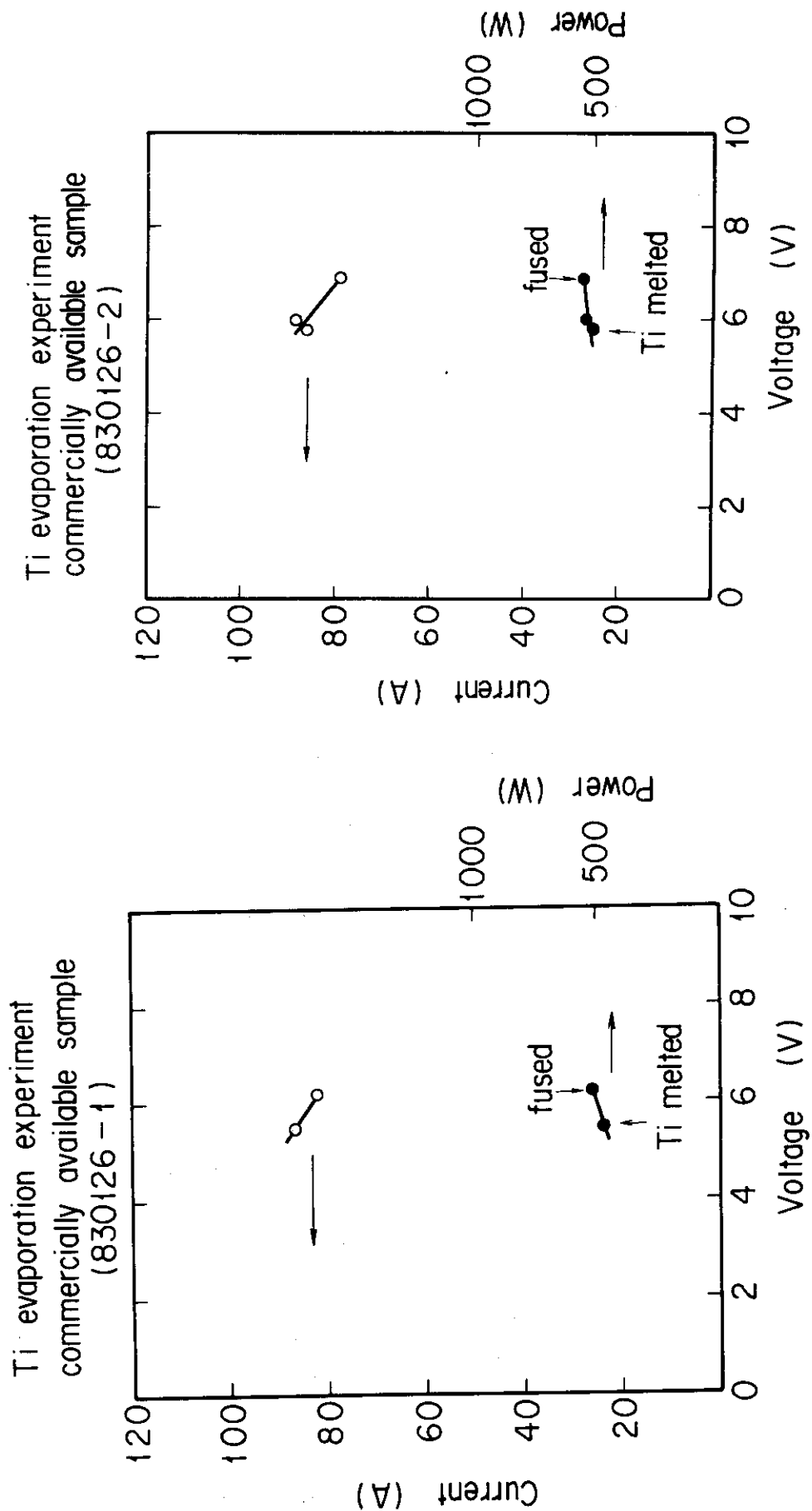


Fig. 5 Experimental set up for Ti evaporation from the evaporation wires



(1) Commercially available sample; (830126-1) (2) Commercially available sample; (830126-2)

Fig.6 Heating current and power for various evaporation wire sample as a function of applied voltage in the evaporation experiments. "Ti melted" and "fused" mean the titanium wires melted and the evaporation wire fused down, respectively.

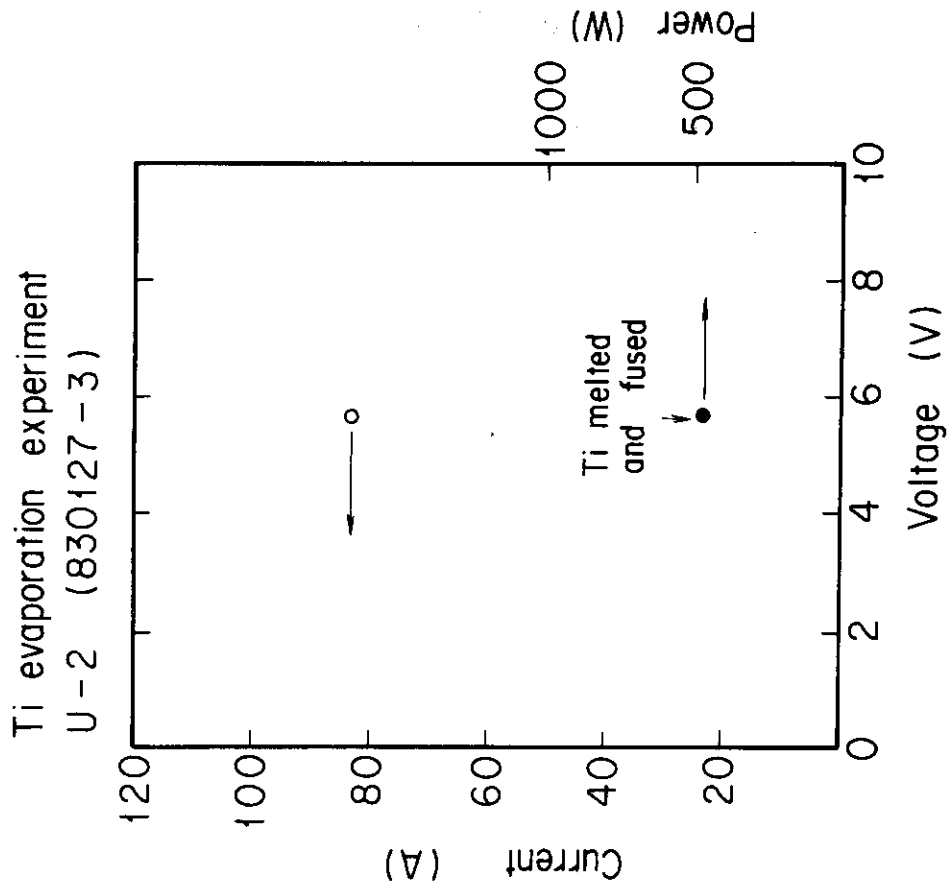


Fig. 6-(4) U - 2

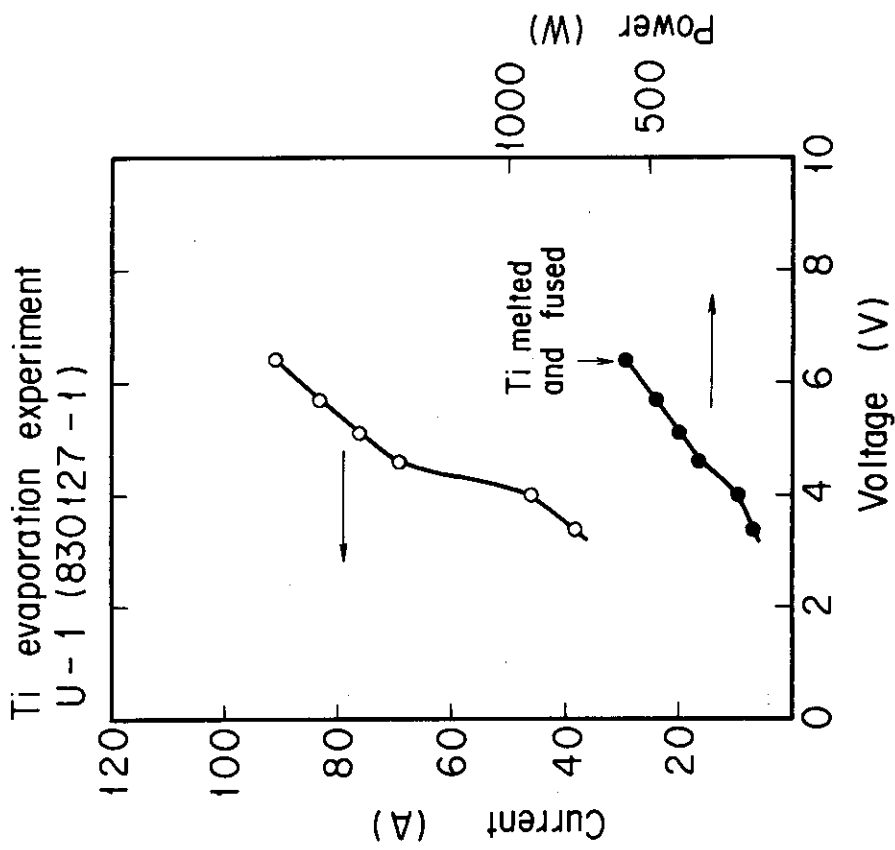


Fig. 6-(3) U - 1

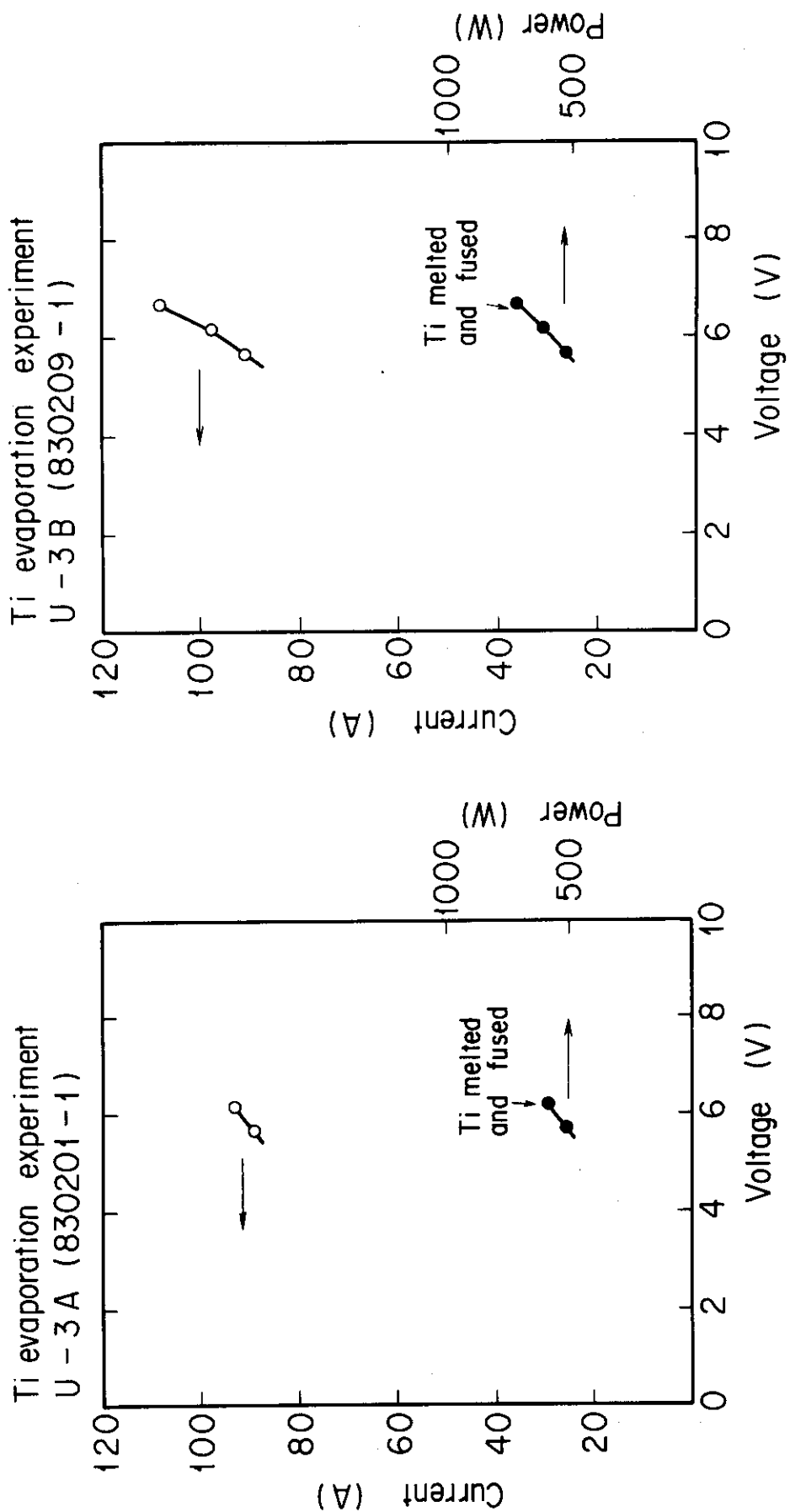


Fig.6-(6) U - 3B

Fig.6-(5) U - 3A

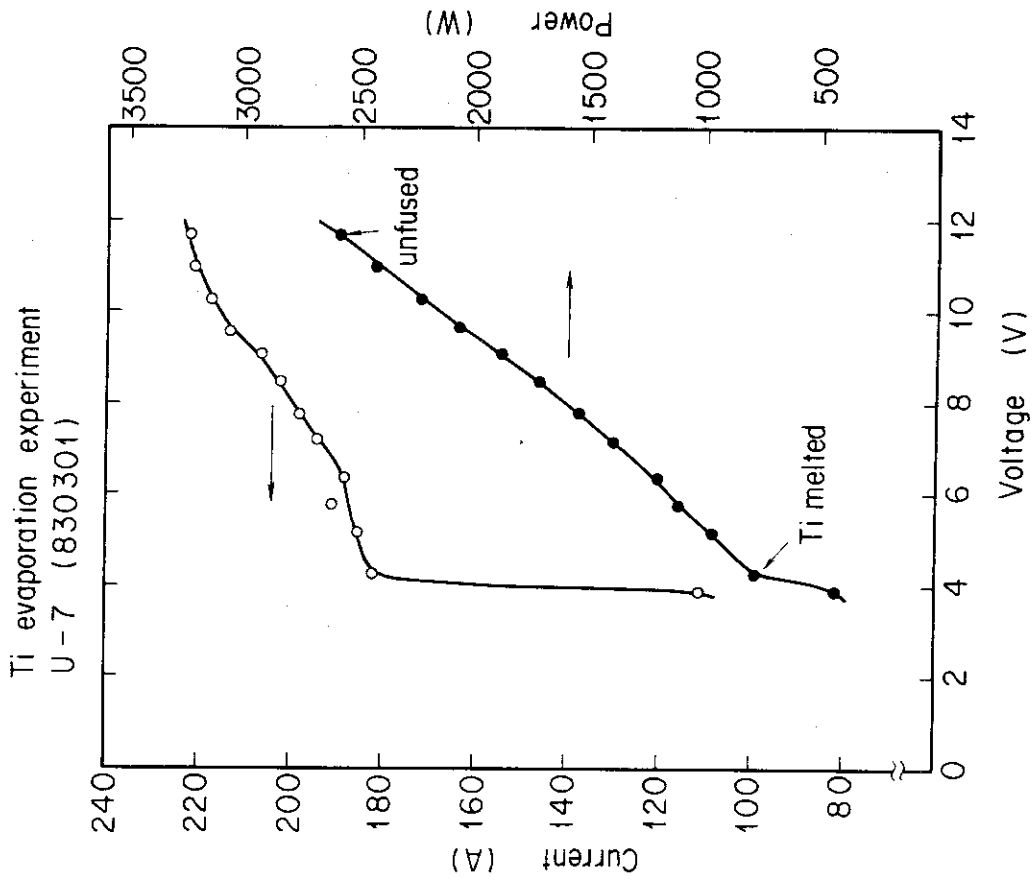


Fig.6-(8) U - 7(830301)

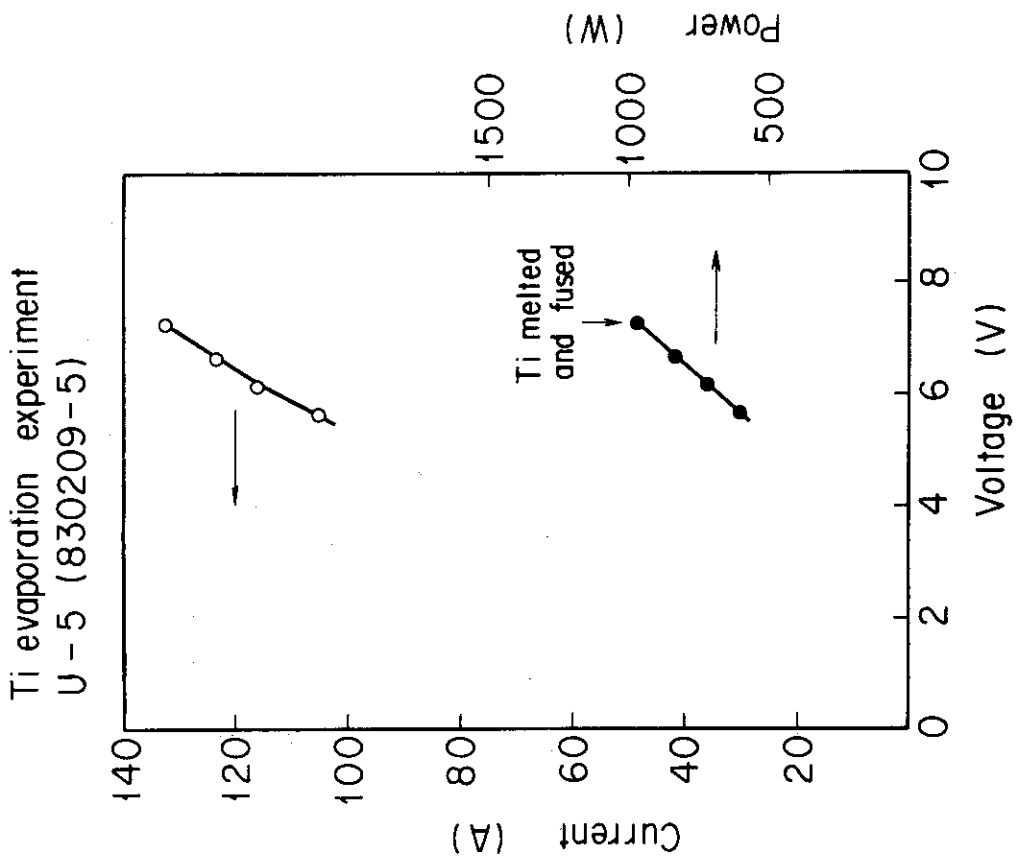


Fig.6-(7) U - 5

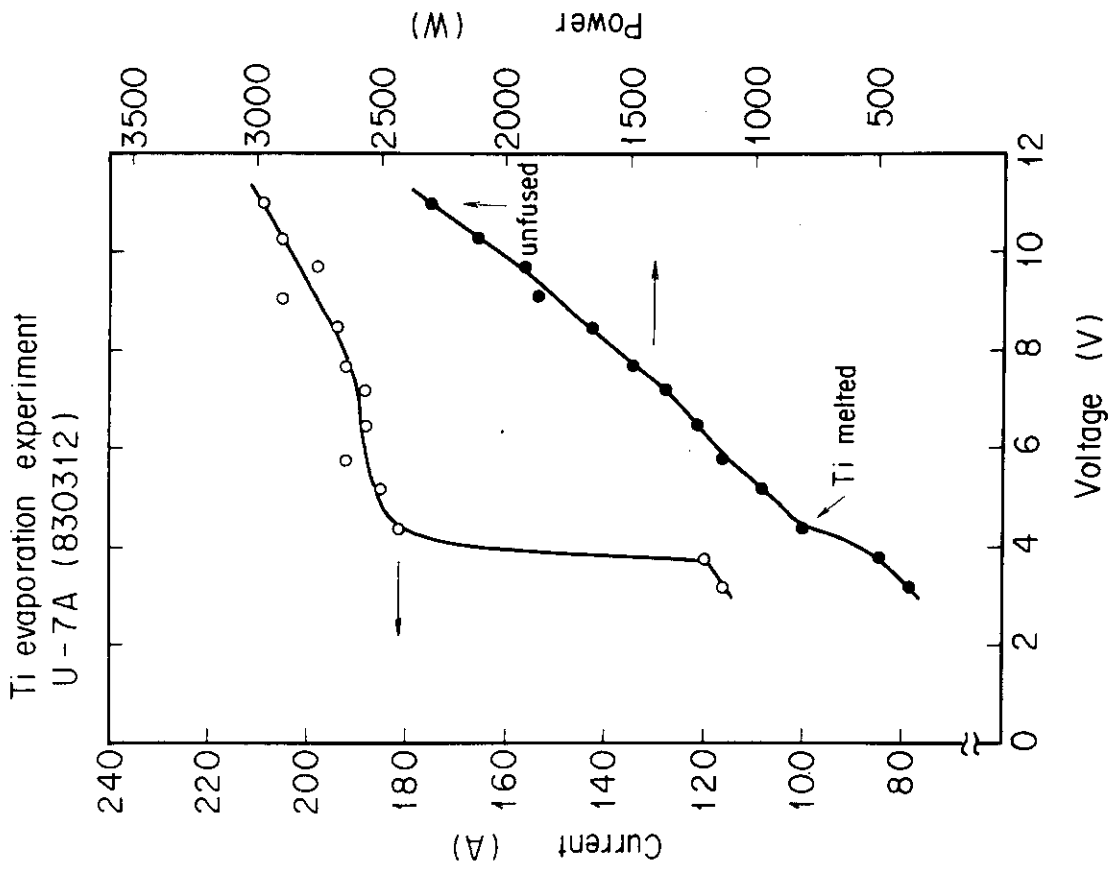


Fig. 6-(10) U - 7A(830312)

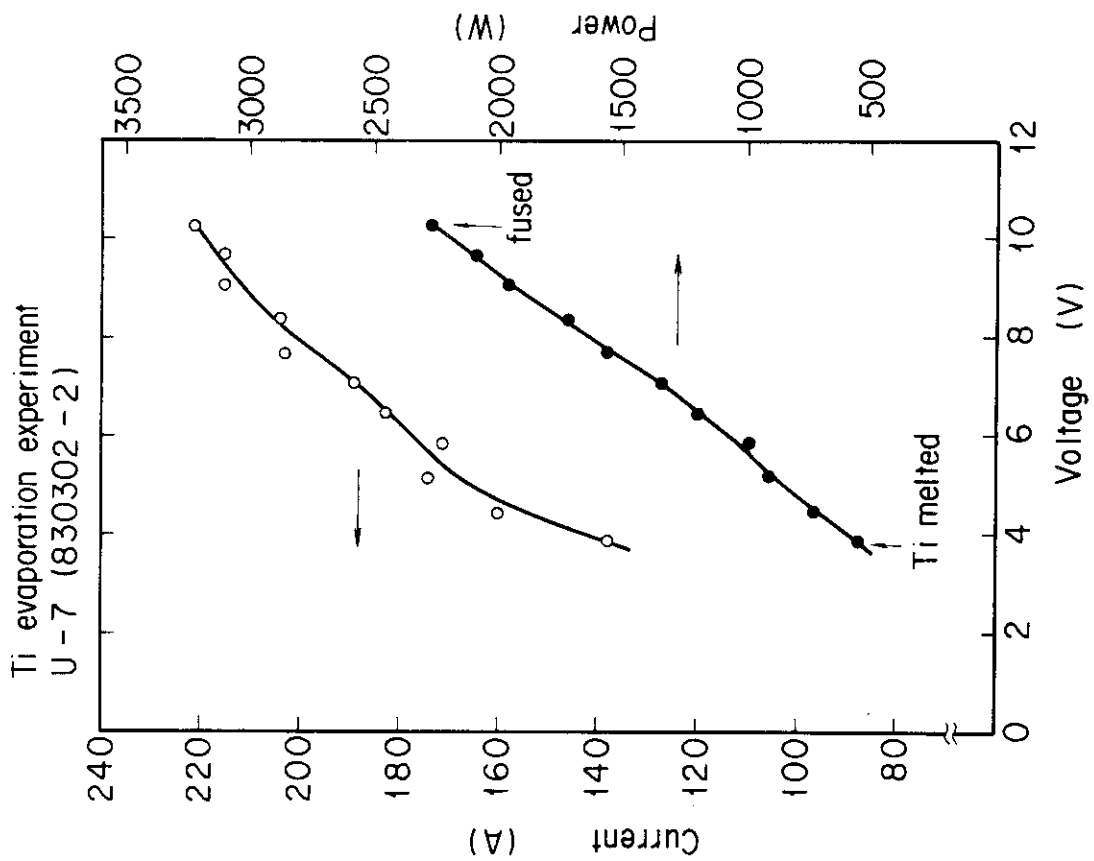


Fig. 6-(9) U - 7(830302-2)

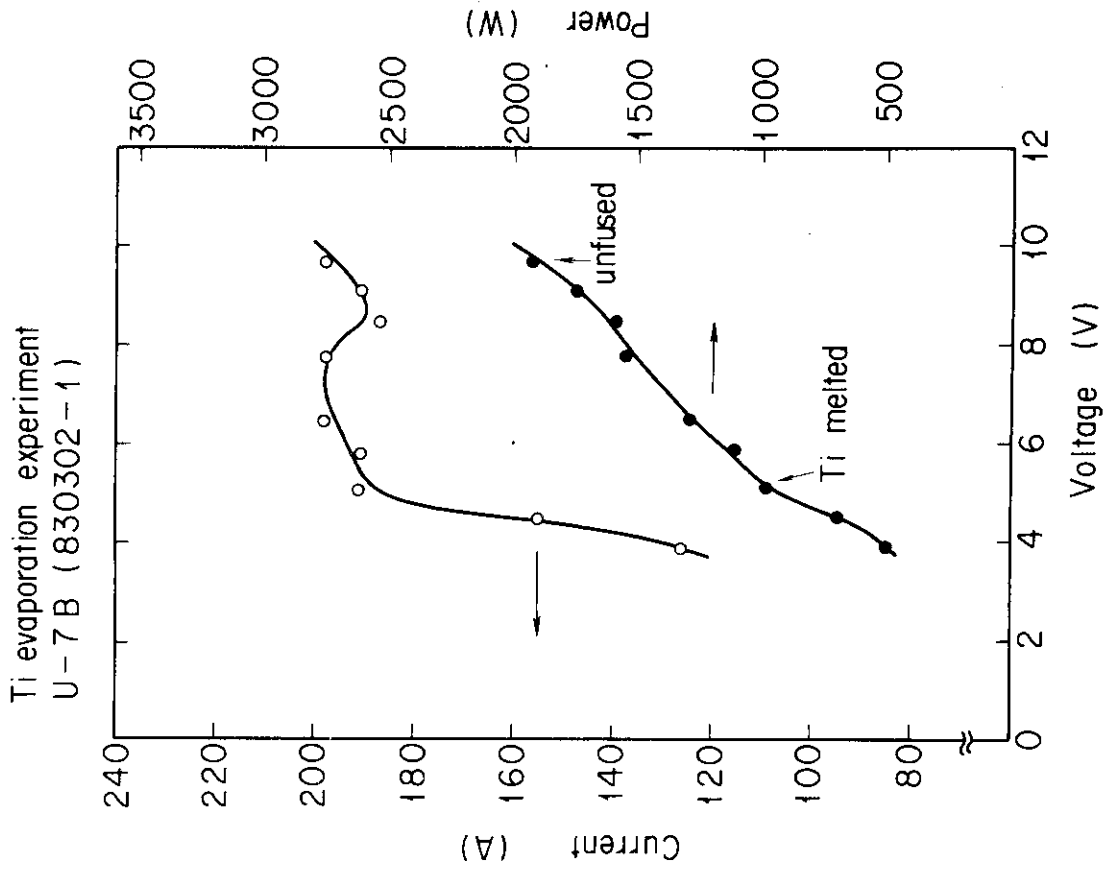


Fig. 6-(12) U - 7B(830302-1)

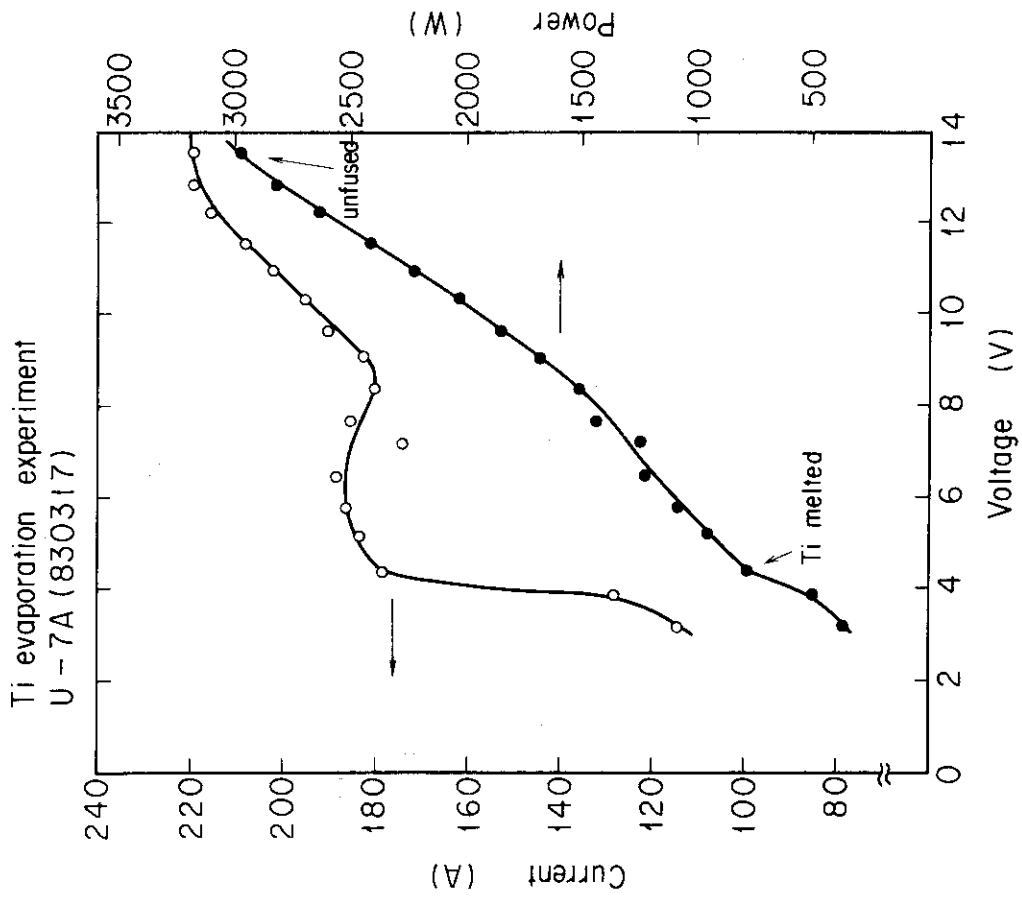


Fig. 6-(11) U - 7A(830317)

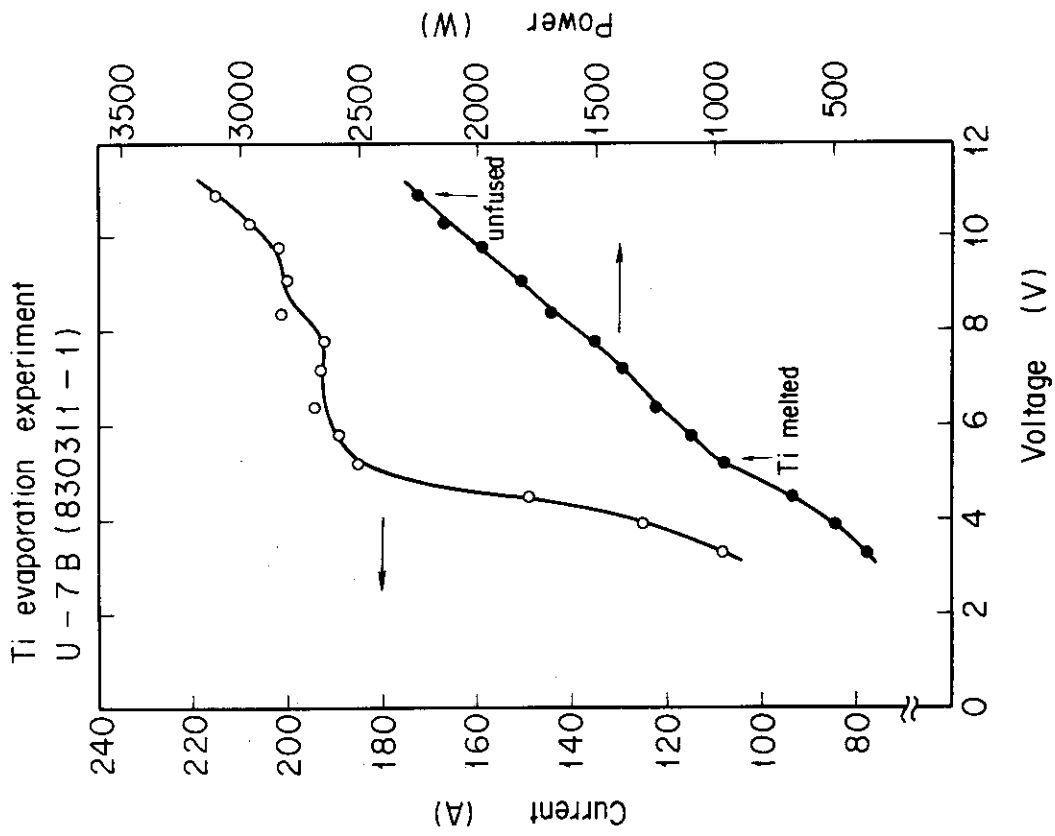


Fig. 6-(13) U - 7B(830311-1)

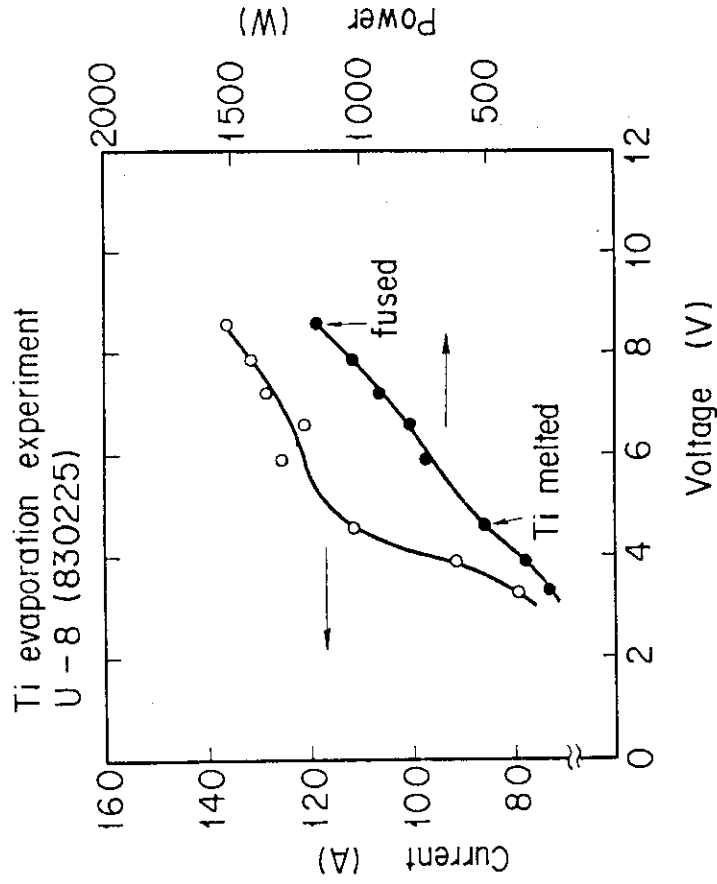


Fig. 6-(14) U - 8(830225)

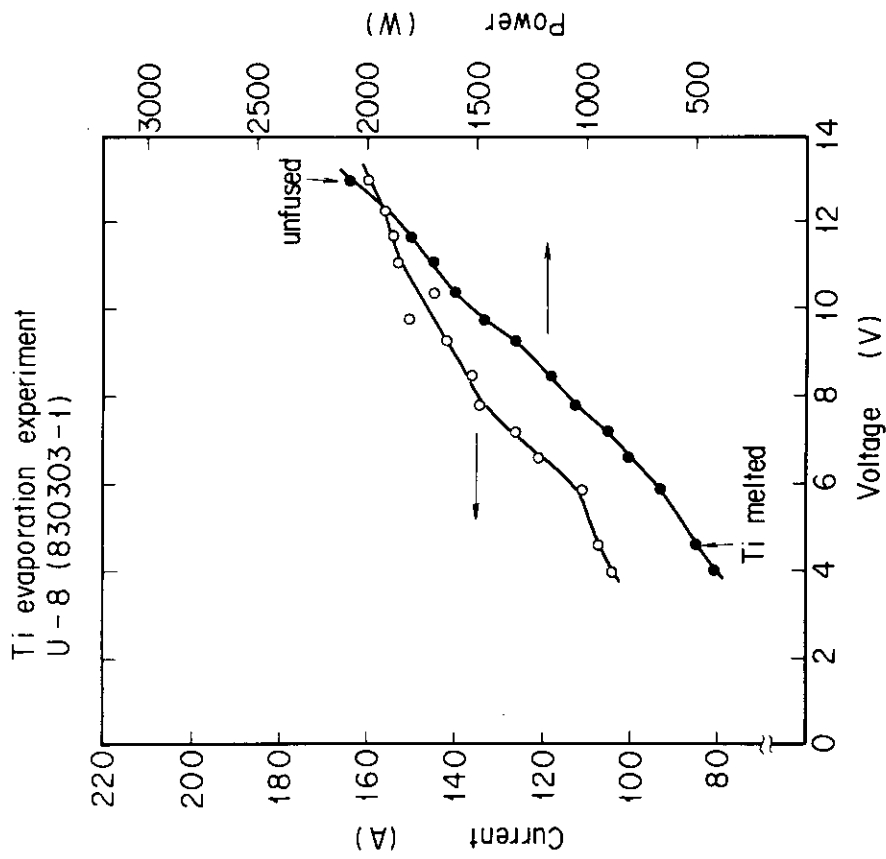


Fig. 6-(15) U - 8(830303-1)

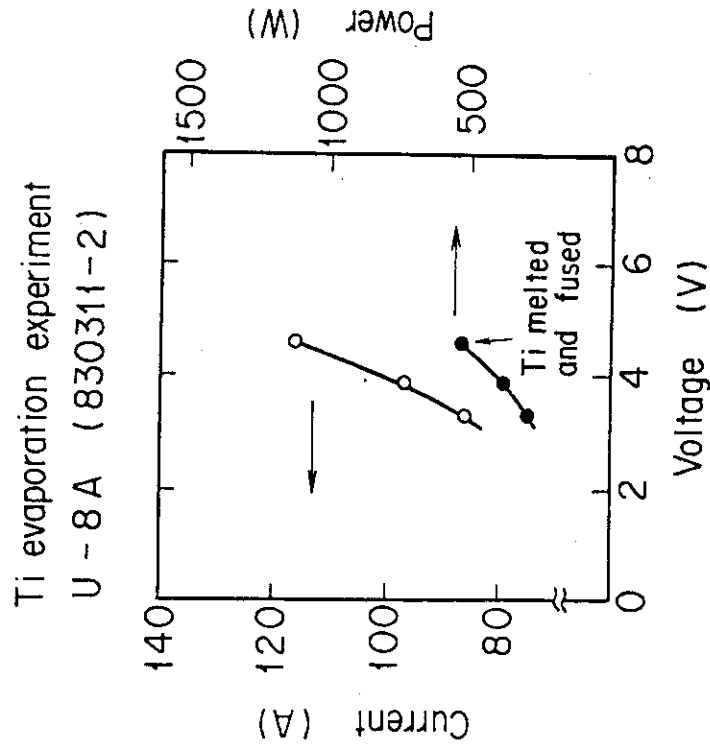


Fig. 6-(16) U - 8A(830311-2)

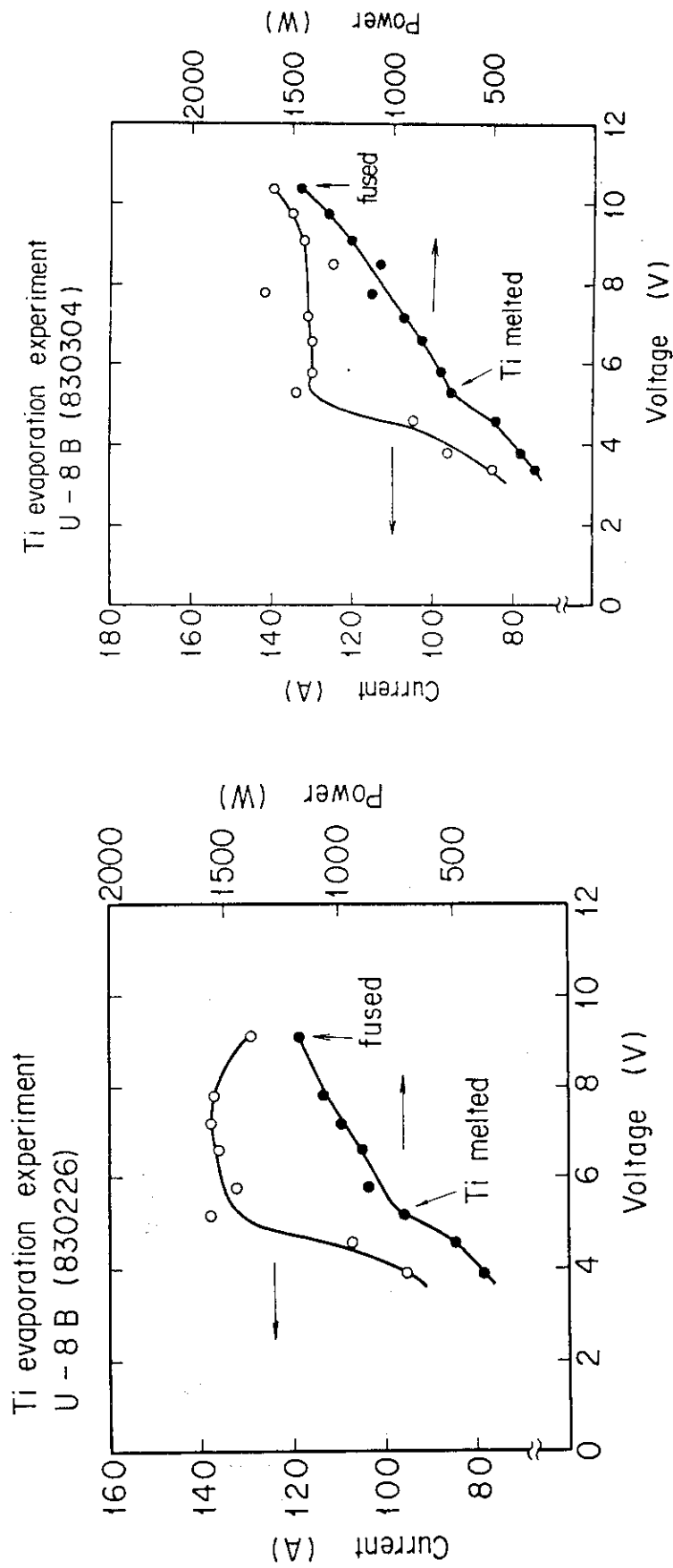


Fig. 6-(18) U - 8B(830304)

Fig. 6-(17) U - 8B(830226)

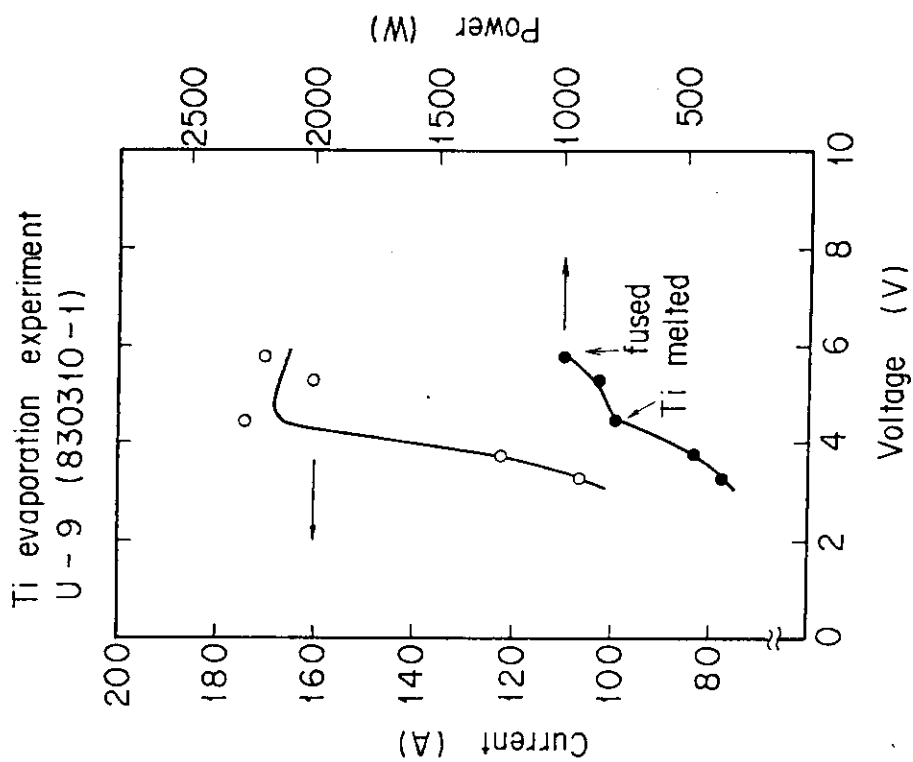


Fig. 6-(20) U - 9 (830310-1)

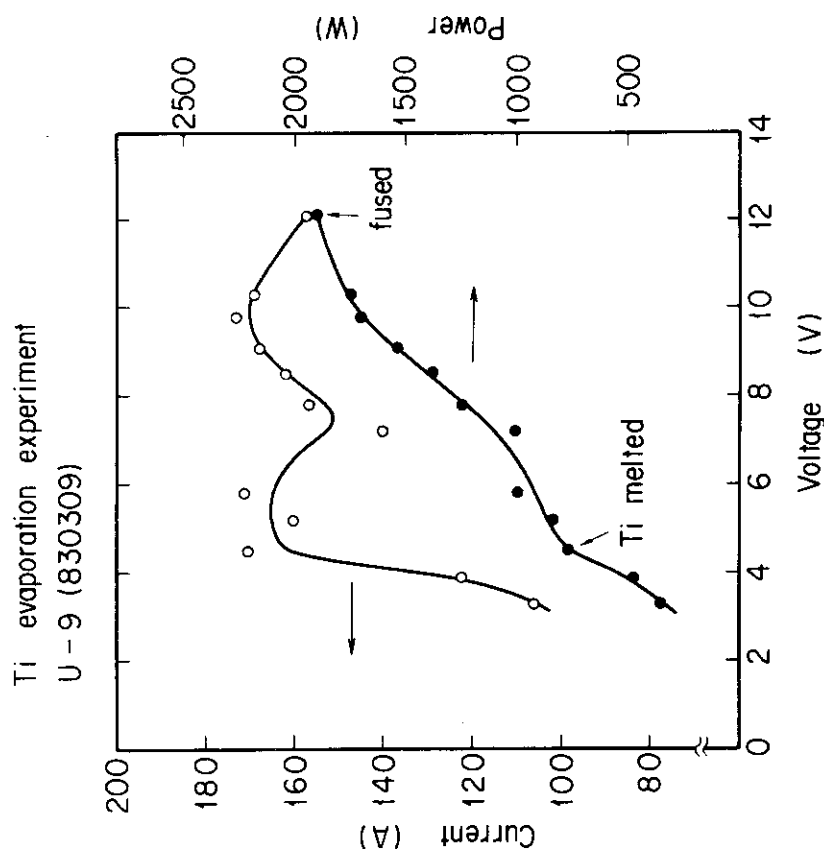


Fig. 6-(19) U - 9 (830309)

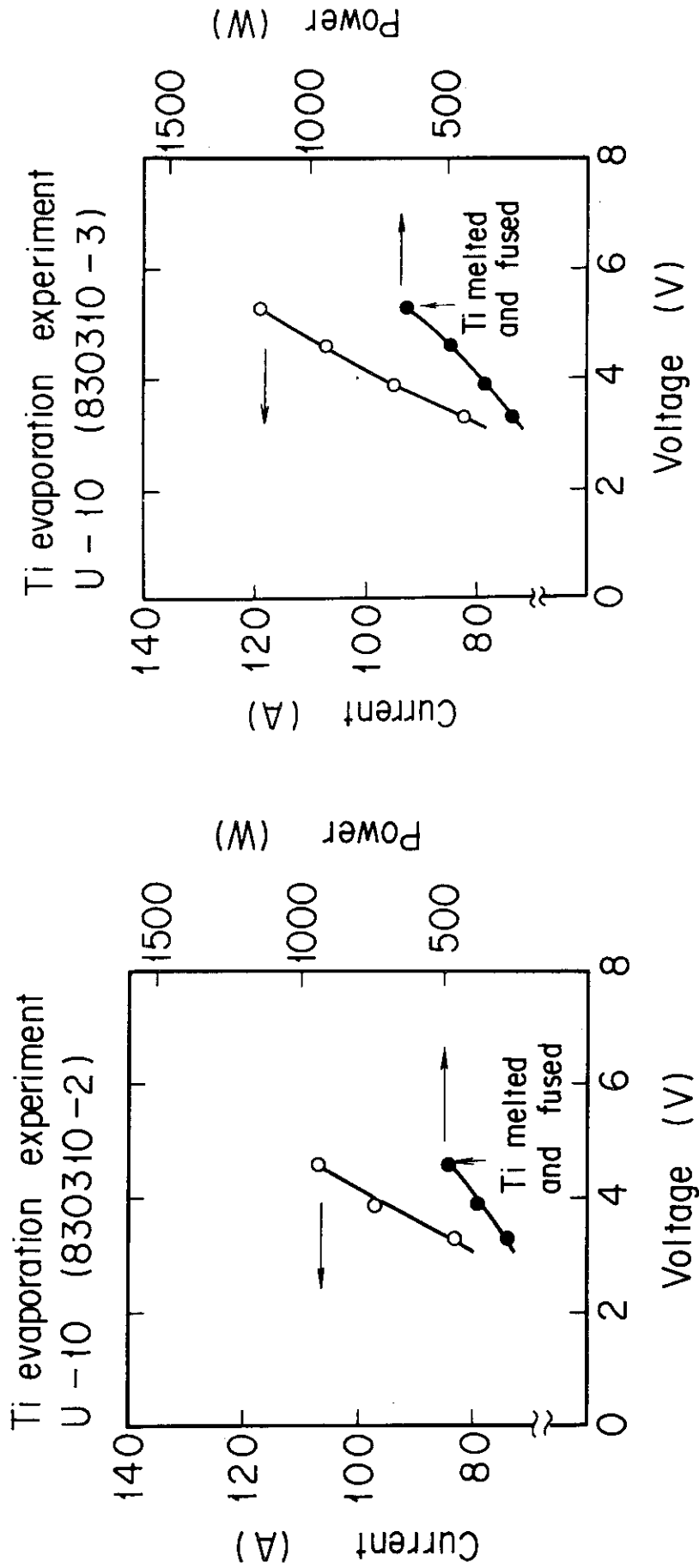
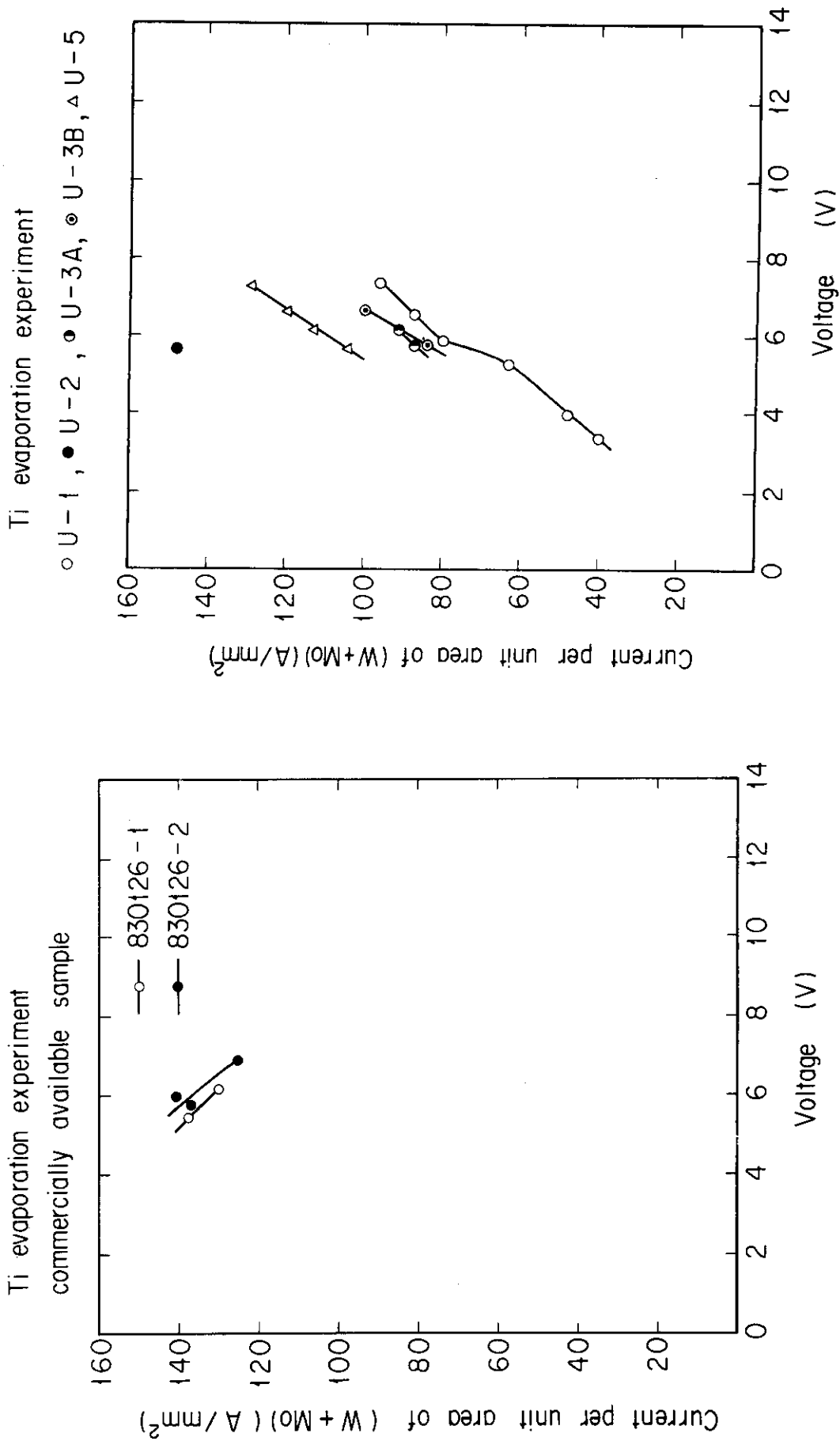


Fig. 6-(22) U - 10(830310-3)

Fig. 6-(21) U - 10(830310-2)



(1) Commercially available sample

(2) U - 1,2,3A,3B,5.

Fig.7 Heating current per unit area of (W+Mo) for various evaporation wire samples as a function of applied voltage in the evaporation experiments

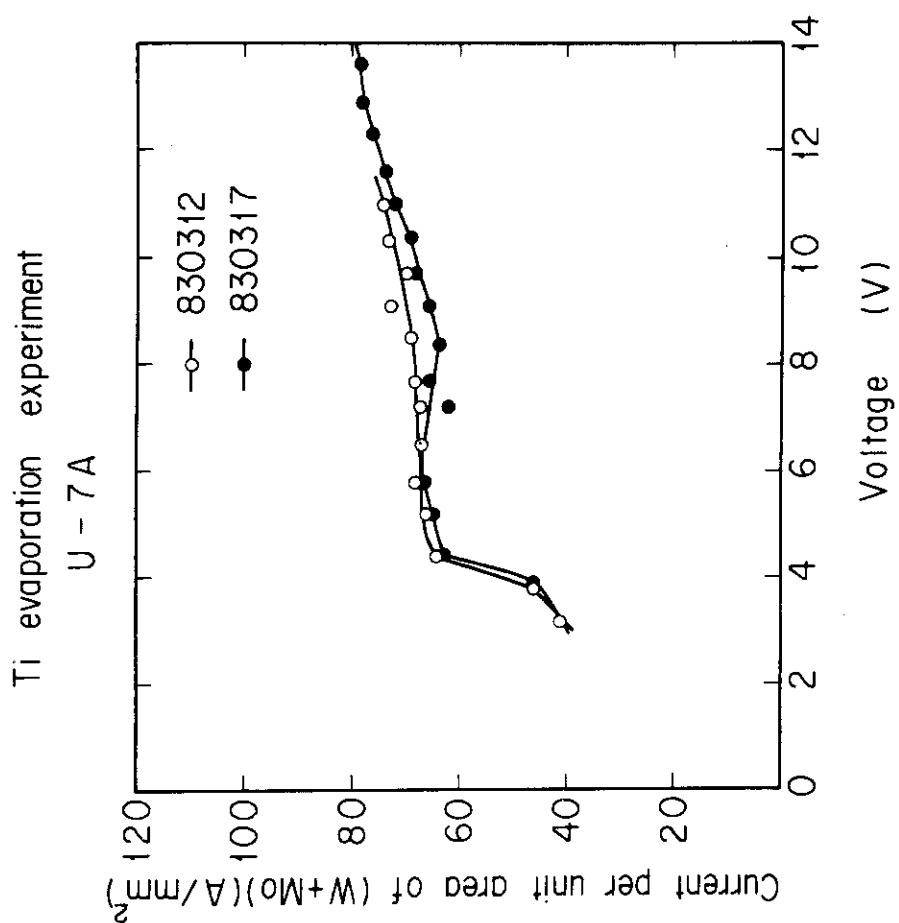


Fig. 7-(4) U - 7A

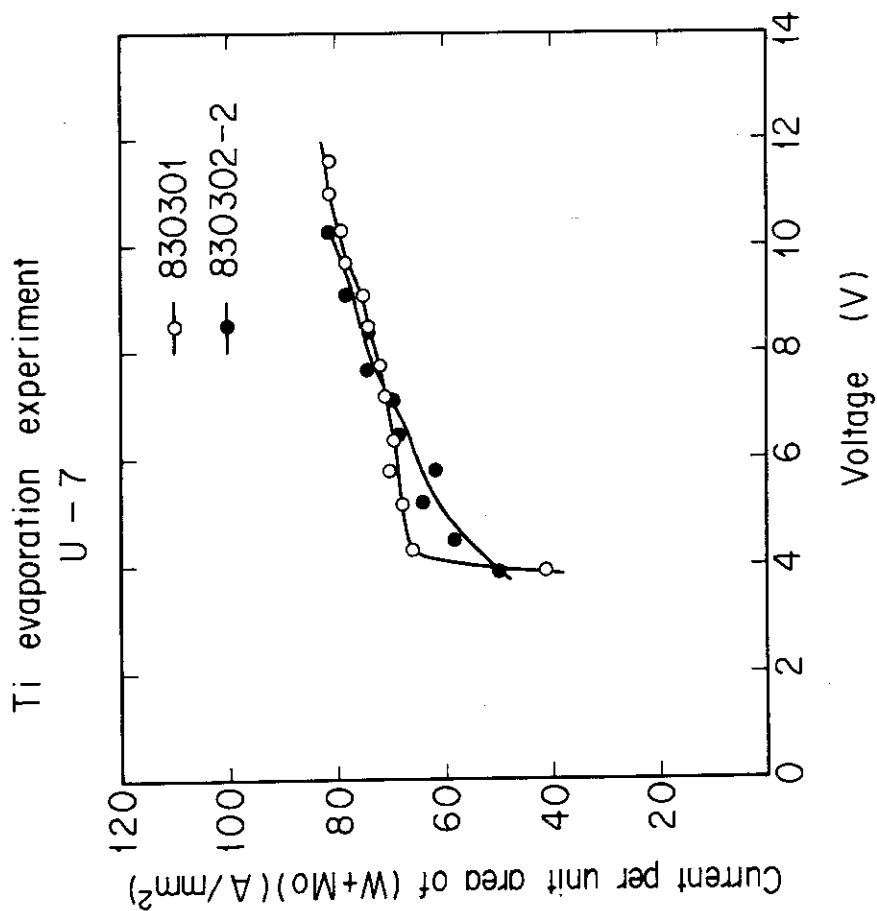


Fig. 7-(3) U - 7

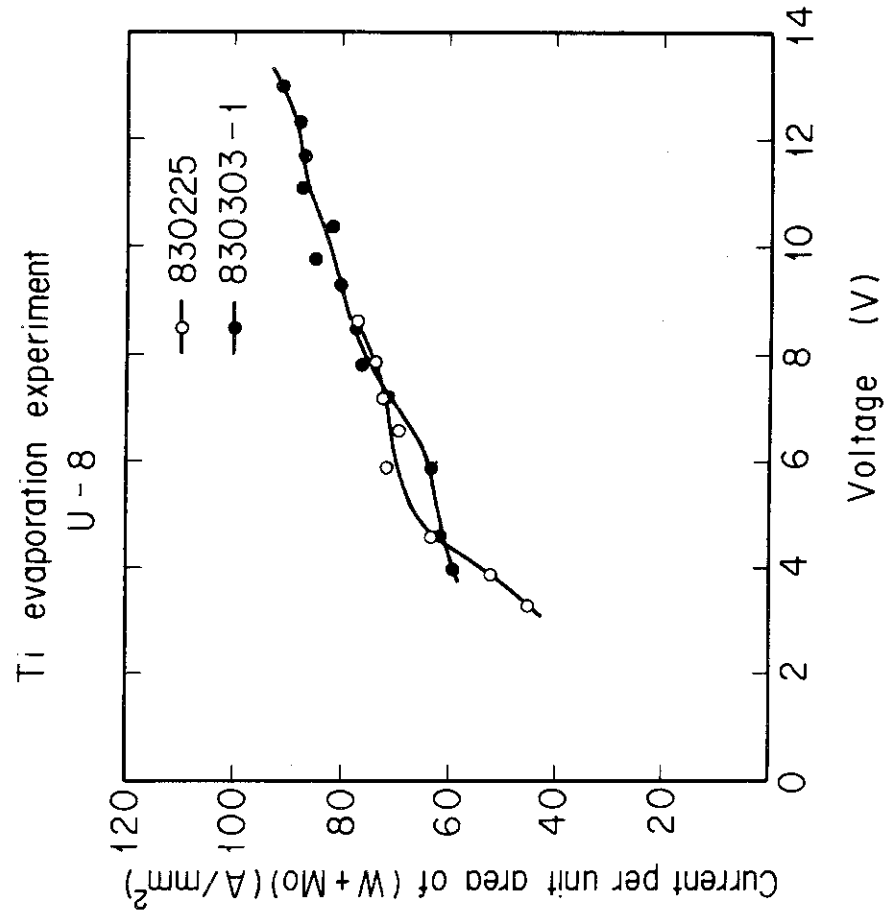


Fig. 7-(6) U - 8

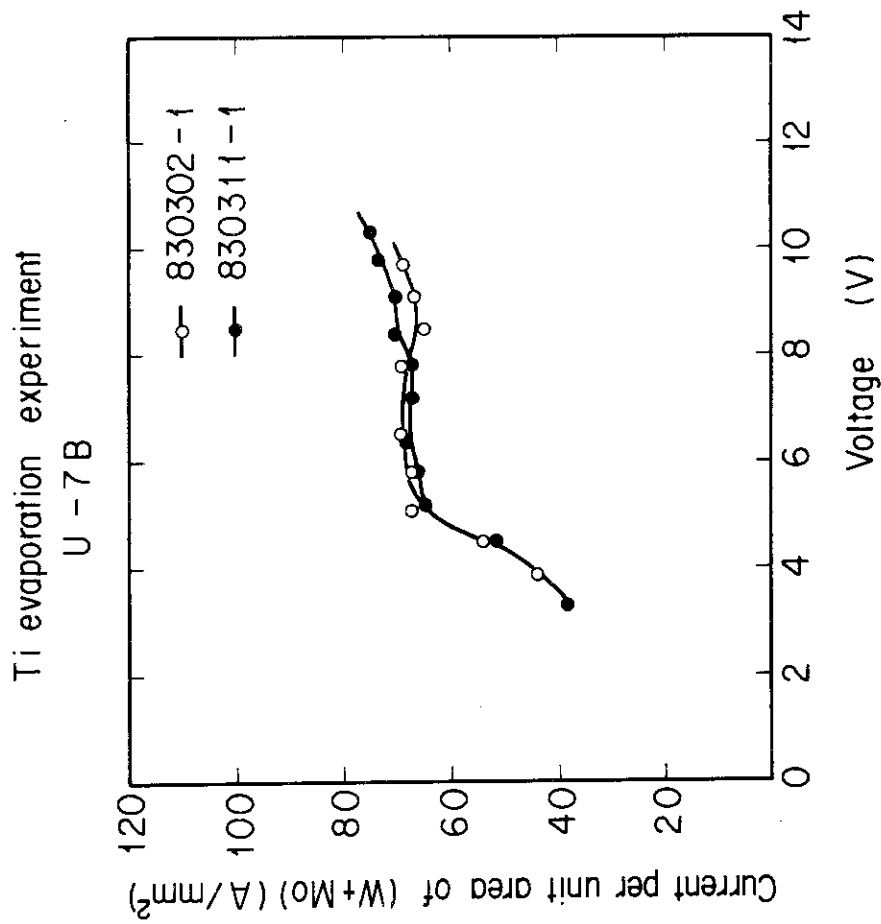


Fig. 7-(5) U - 7B

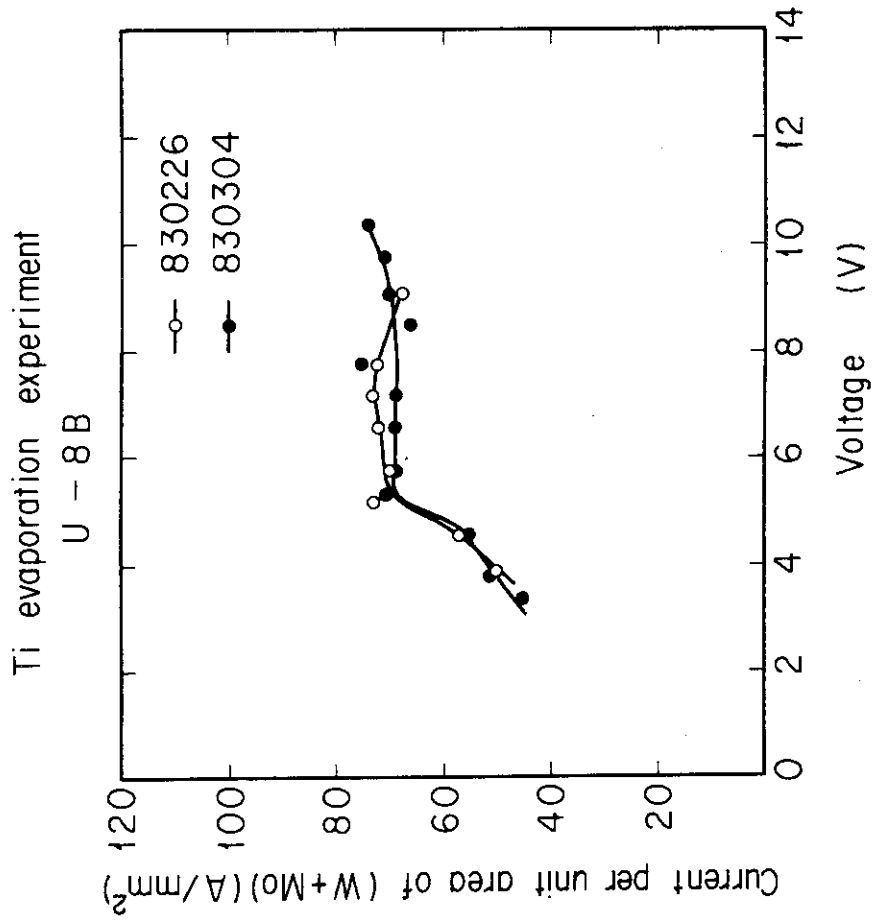


Fig. 7-(8) U - 8B

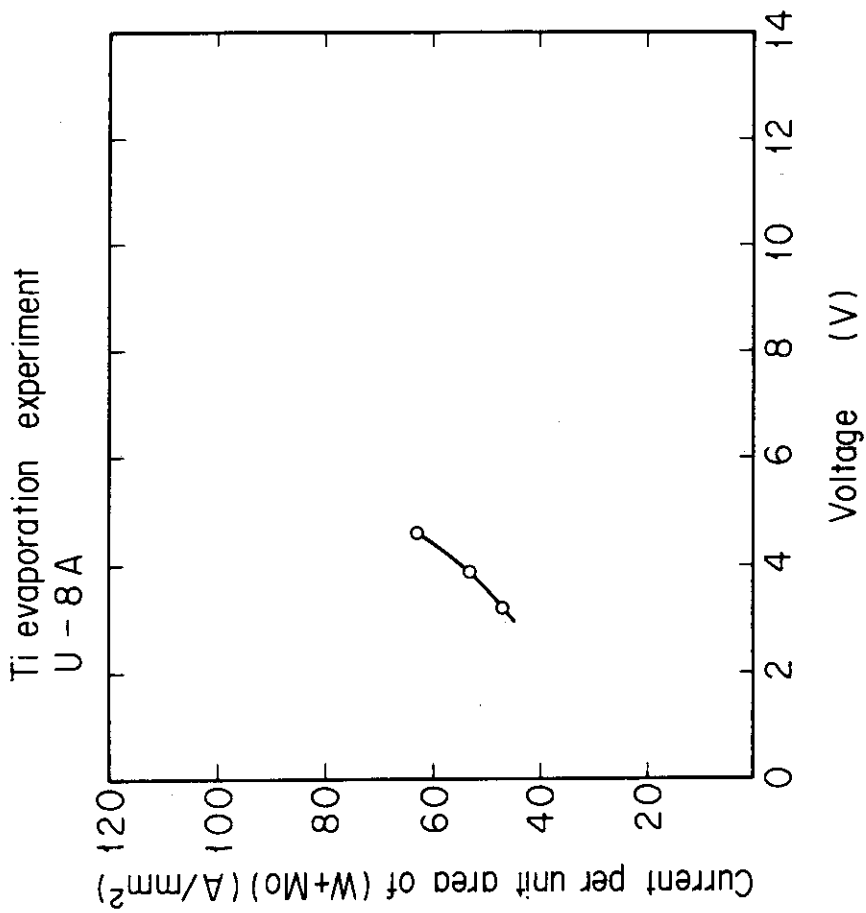


Fig. 7-(7) U - 8A

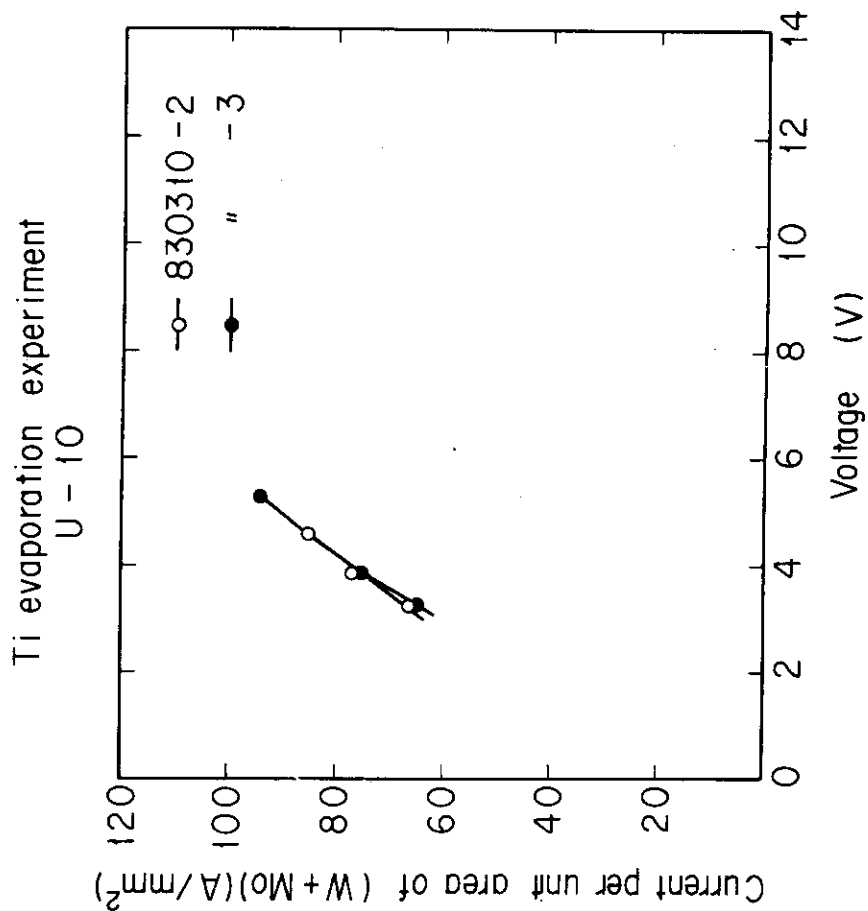


Fig. 7-(10) U - 10

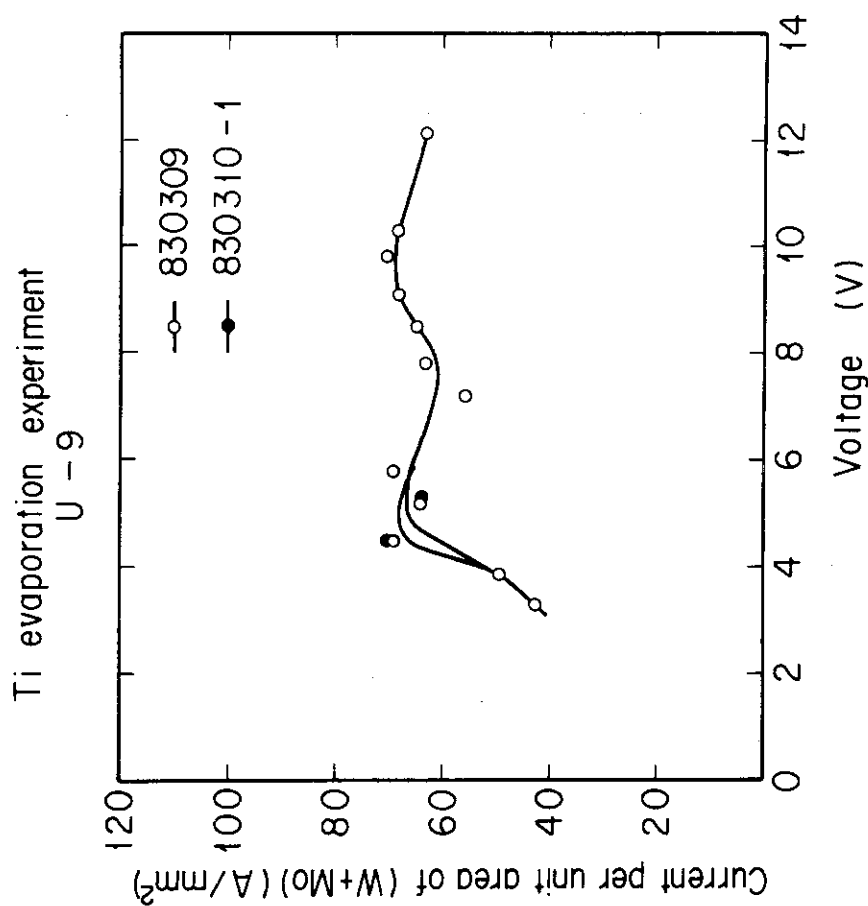


Fig. 7-(9) U - 9

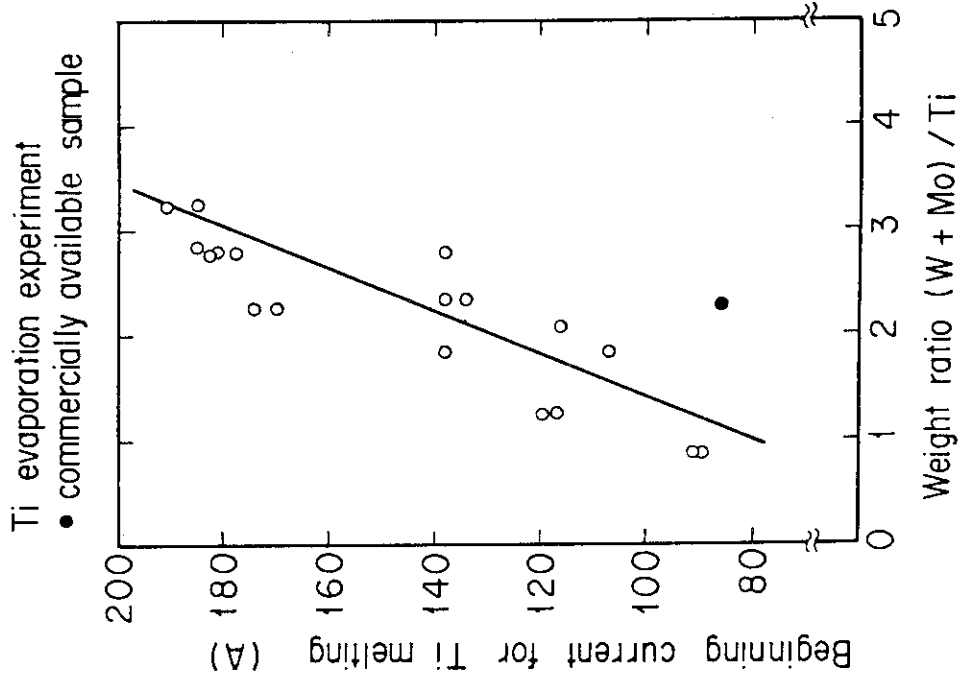


Fig.8 Necessary voltage for titanium melting as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti, in the evaporation wires

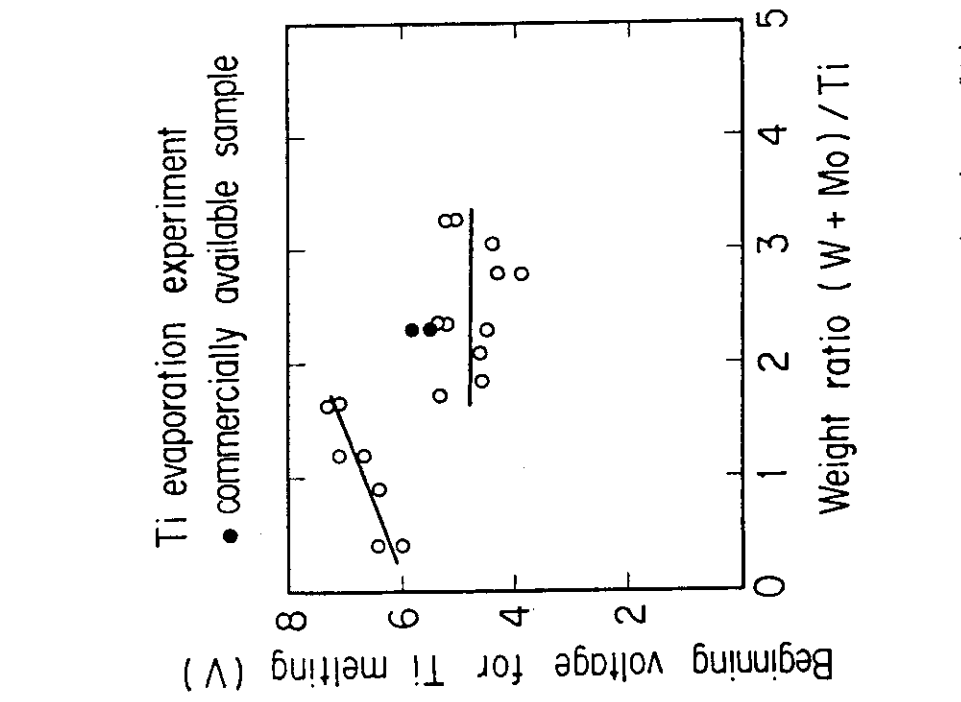


Fig.9 Necessary current for titanium melting as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti, in the evaporation wires

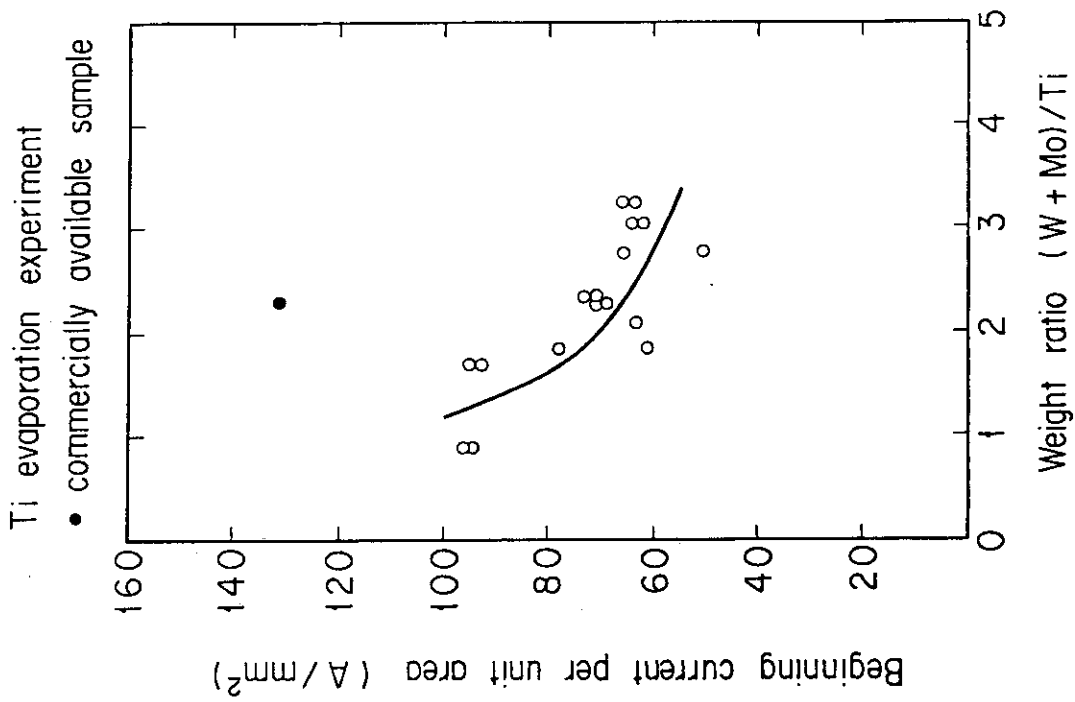


Fig.10 Necessary current per unit area of (W+Mo) for titanium melting as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires

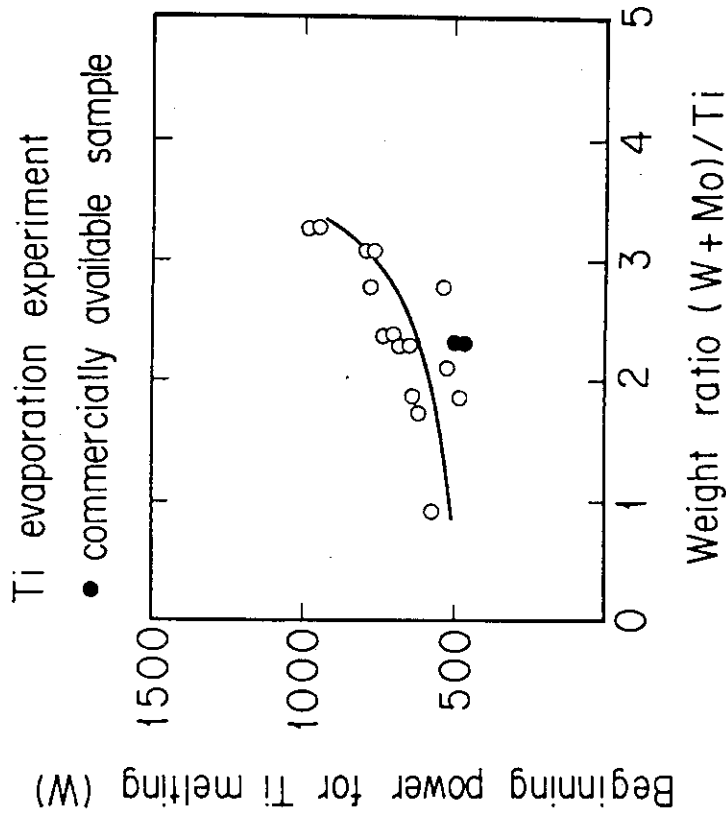


Fig.11 Necessary power for titanium melting as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires

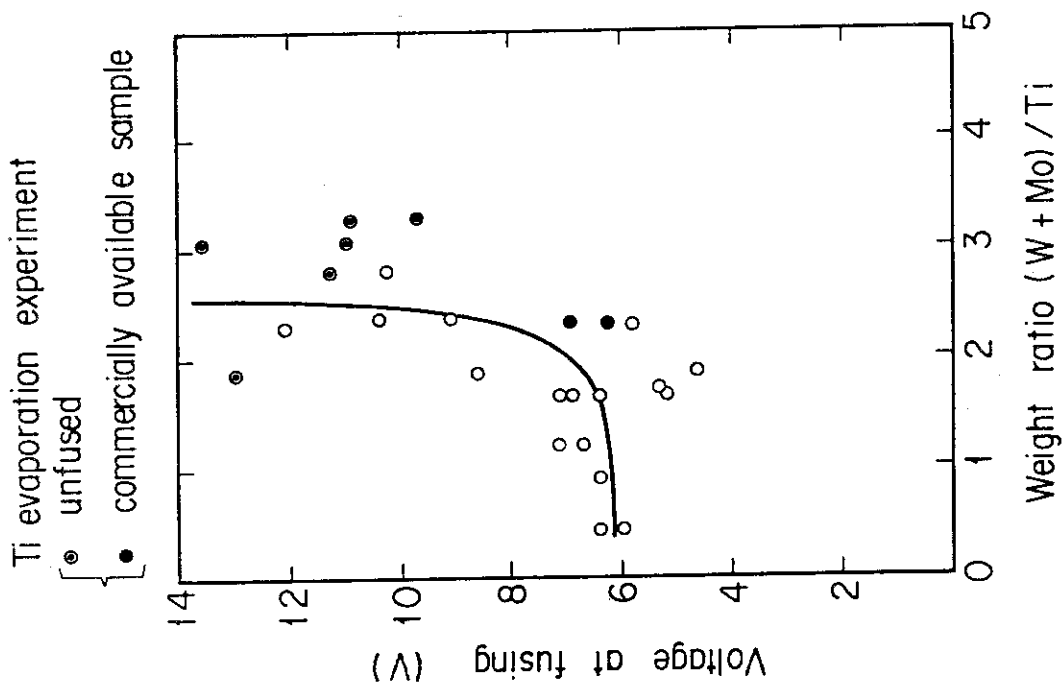


Fig.12 Heating voltage at fusing as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires. The dotted circles mean that the evaporation the evaporation wires did not fuse under high applied heating power

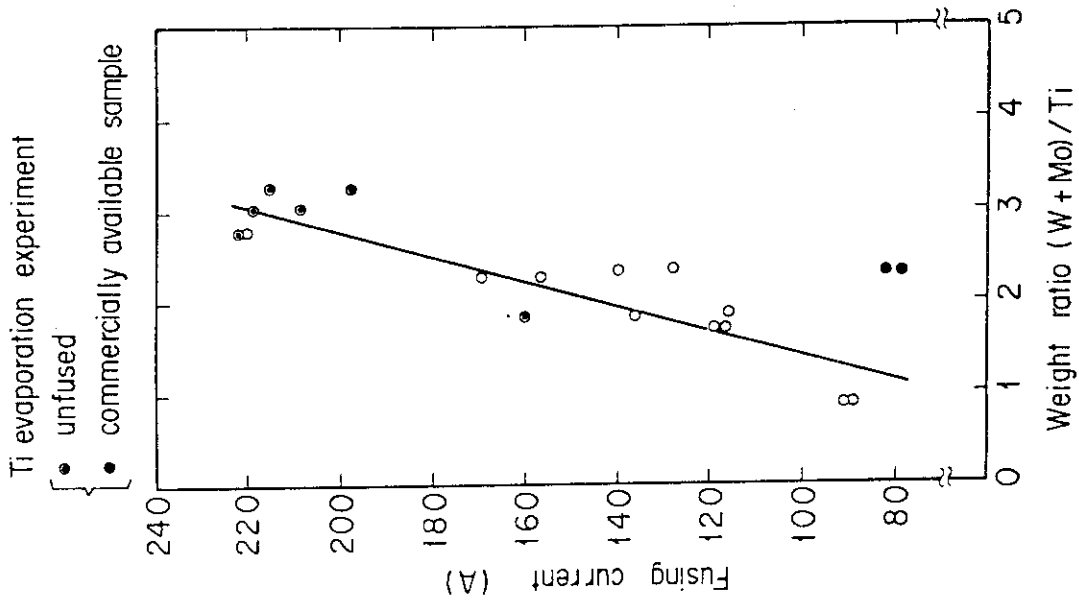


Fig.13 Fusing current as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires

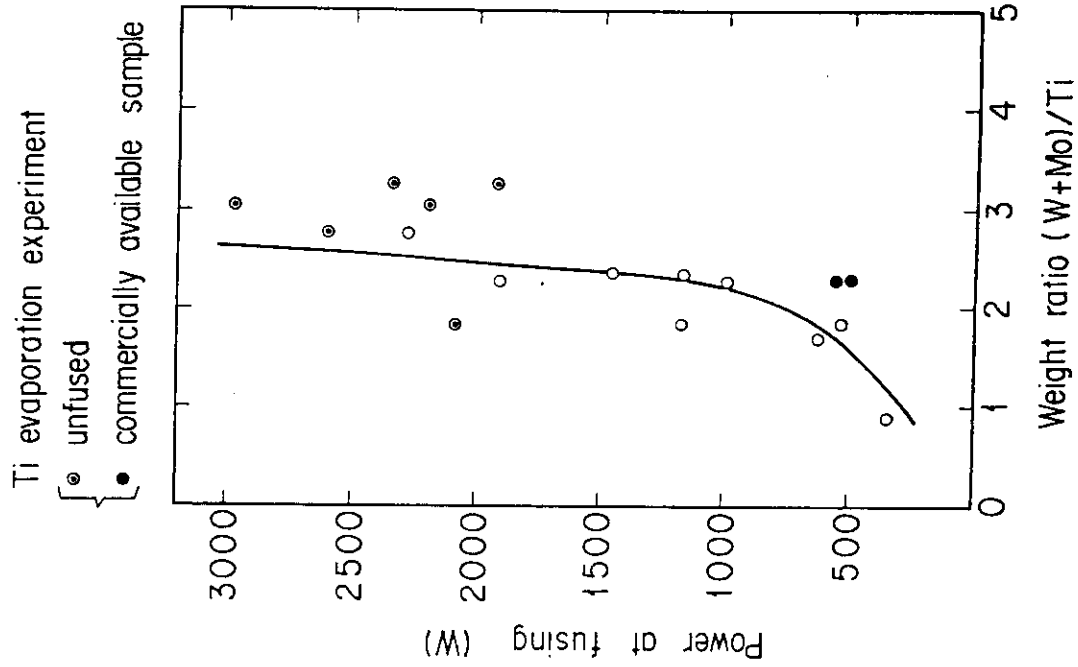


Fig.15 Heating power at fusing as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires

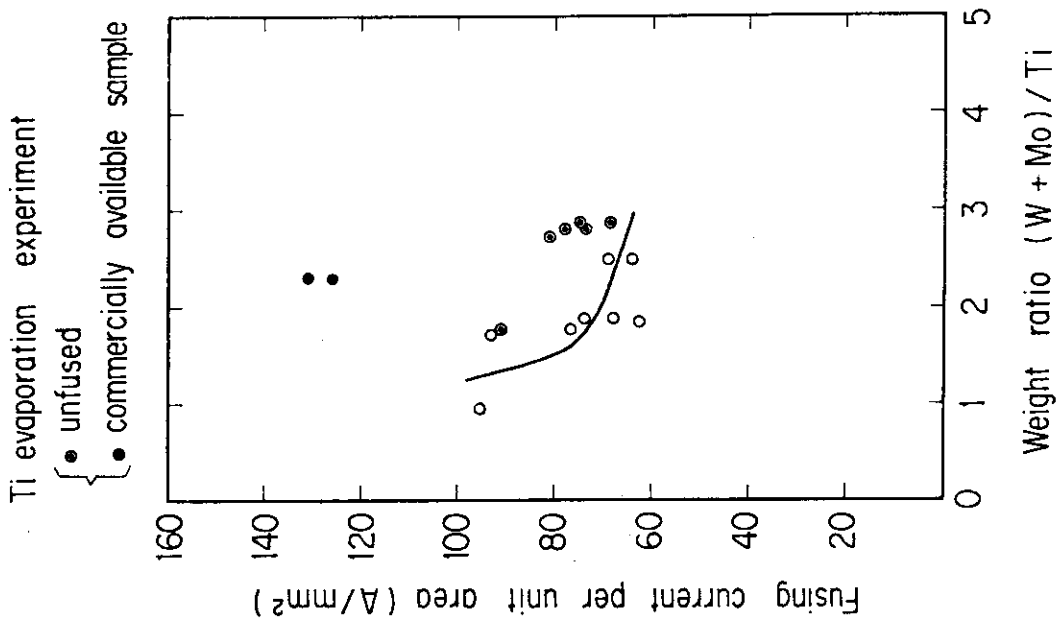


Fig.14 Fusing current per unit area as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires

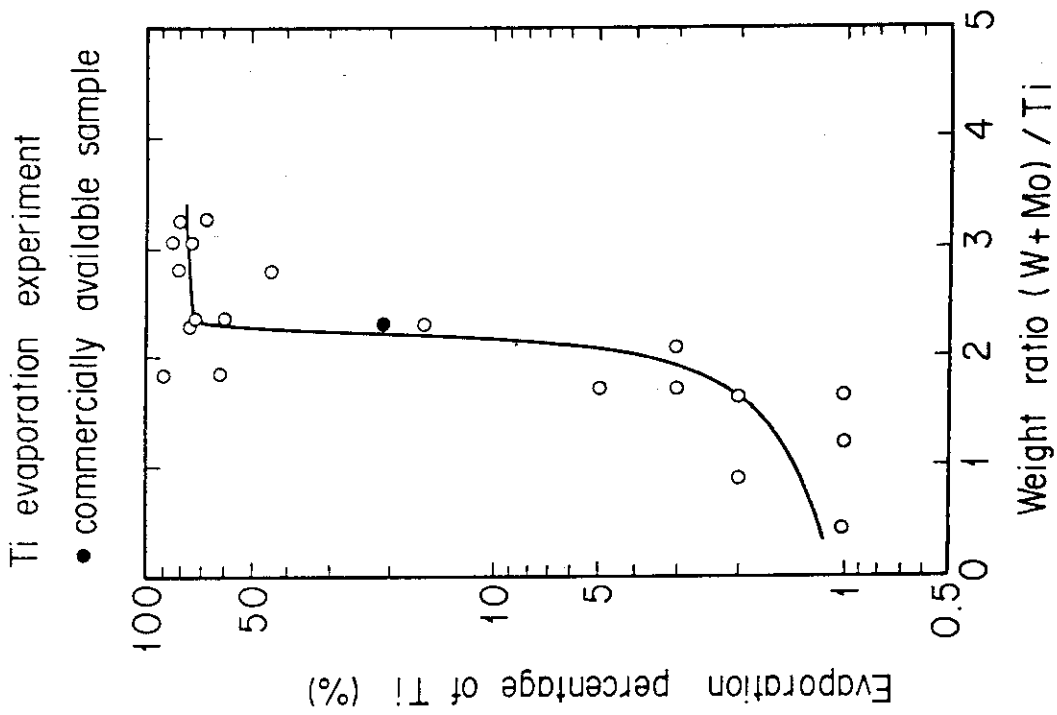


Fig.17 Evaporation percentage of titanium as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires

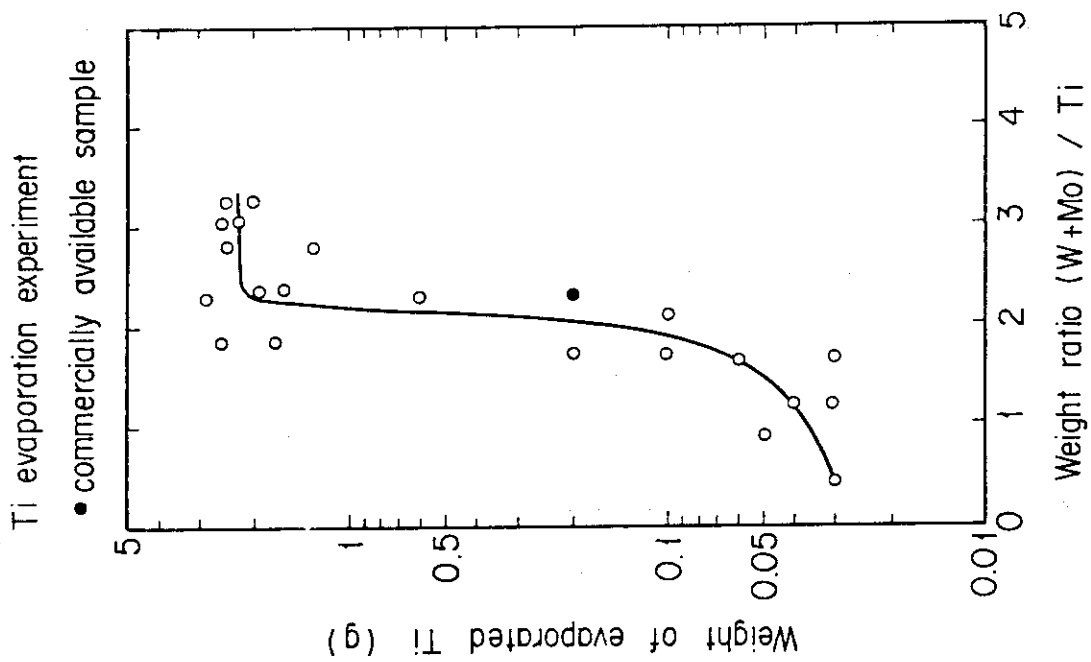


Fig.16 Weight of evaporated titanium as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires

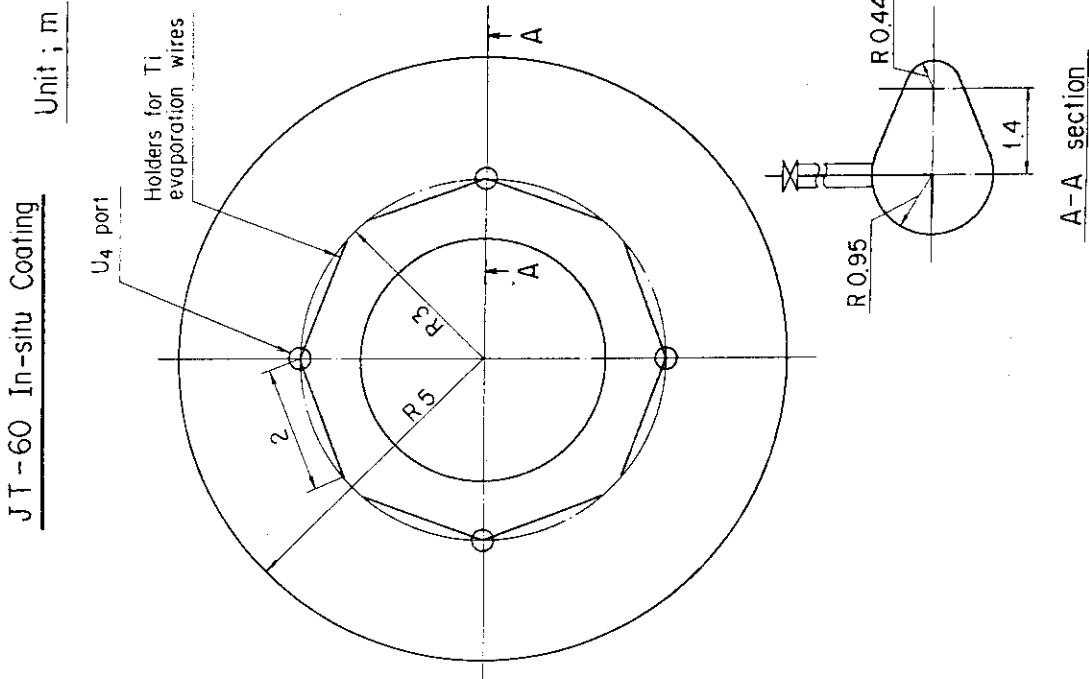


Fig.19 Geometrical arrangement of in-situ coating equipments for JT-60

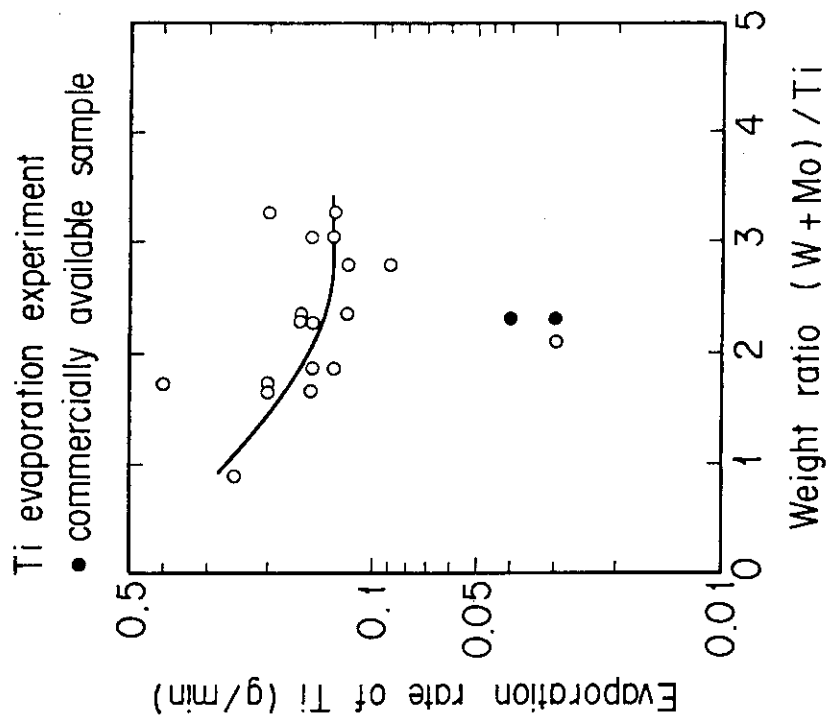


Fig.18 Evaporation rate of titanium as a function of weight ratio, (W+Mo)/Ti in the evaporation wires

Schematic view of arm for Ti evaporation source

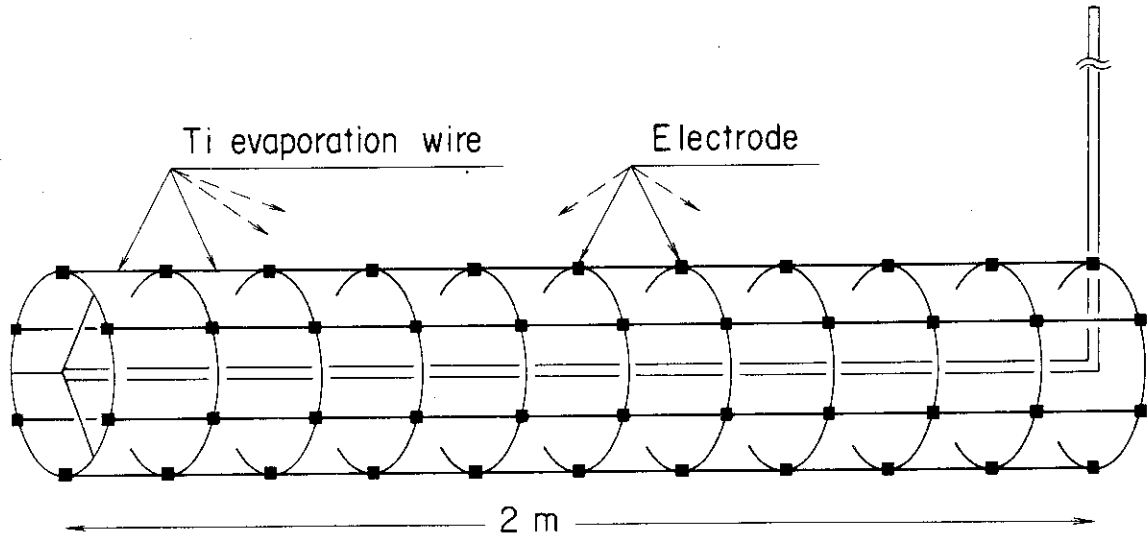


Fig.20 Sketch of manipulator arm having titanium evaporation wires for JT-60 in-situ coating.

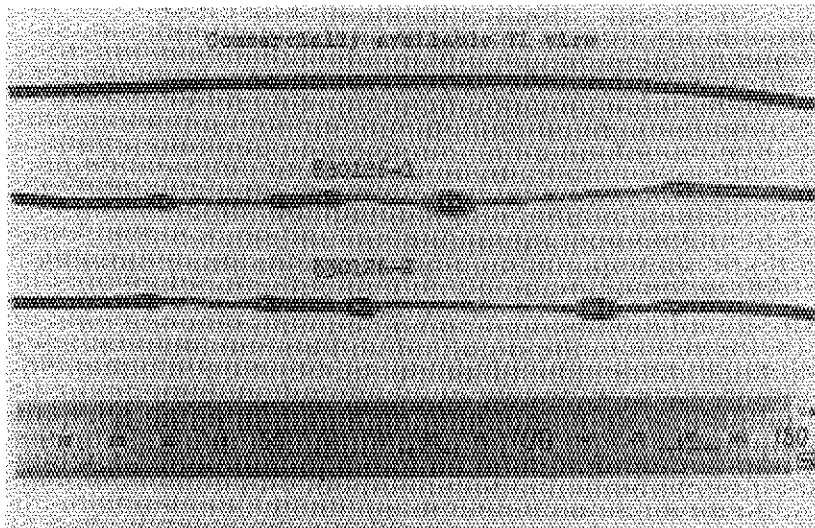


Photo.1 A commercially available titanium wire for sublimation pumps after the evaporation experiment. The upper wire is unused one.

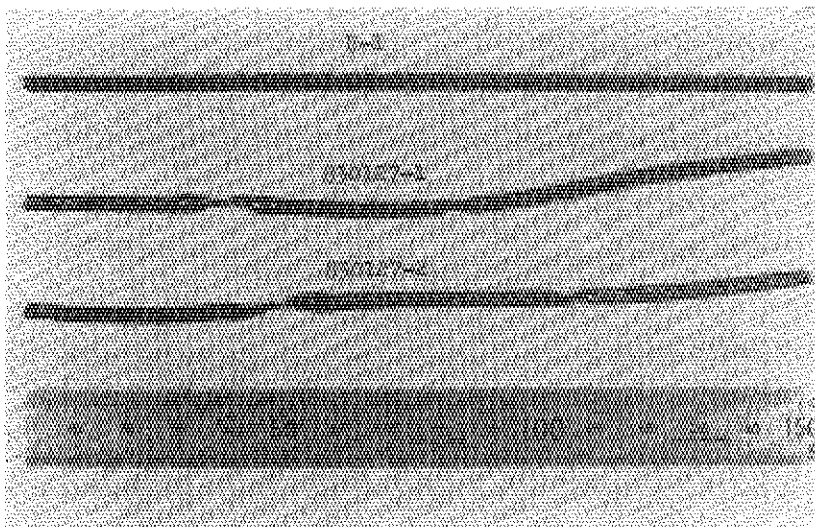


Photo.2 The titanium evaporation wire (U-1) after the evaporation experiment. The upper wire is unused one.

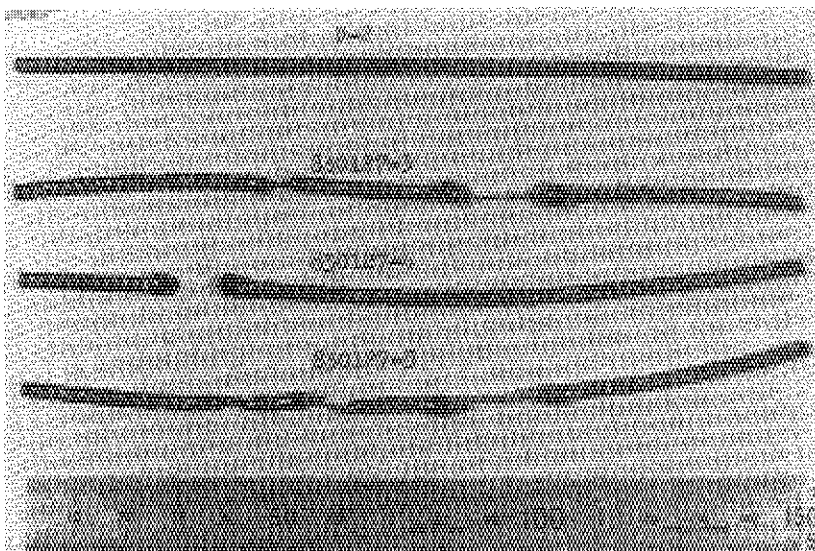


Photo.3 The titanium evaporation wire (U-2) after the evaporation experiment. The upper wire is unused one.

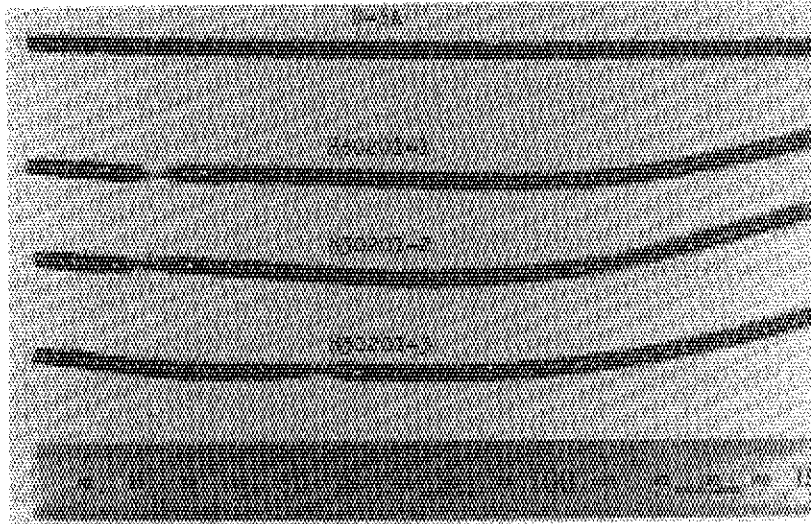


Photo.4 The titanium evaporation wire (U-3A) after the evaporation experiment.
The upper wire is unused one.

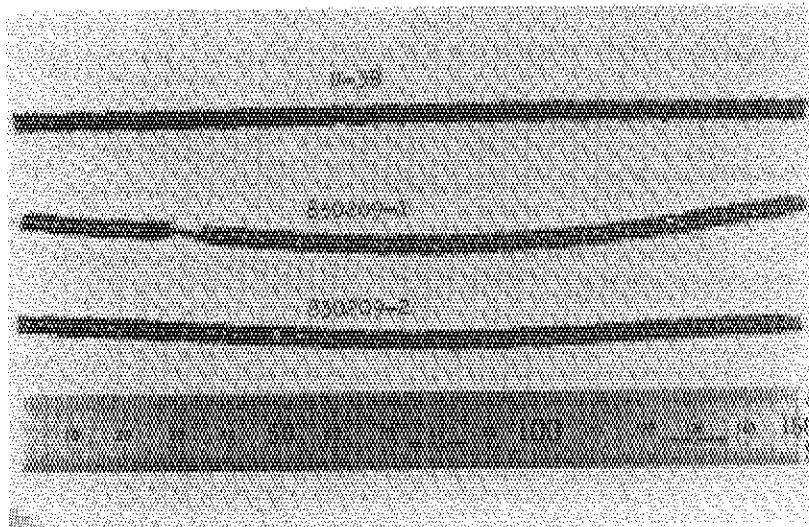


Photo.5 The titanium evaporation wire (U-3B) after the evaporation experiment.
The upper wire is unused one.

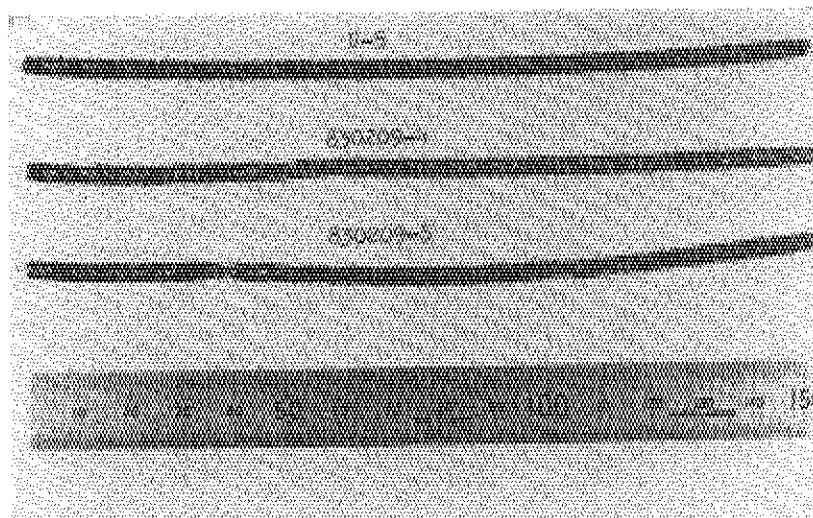


Photo.6 The titanium evaporation wire (U-5) after the evaporation experiment.
The upper wire is unused one.

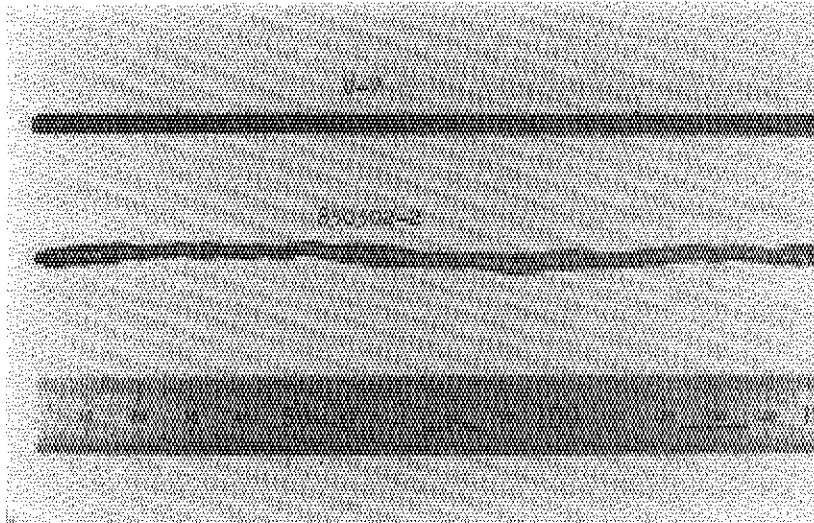


Photo.7 The titanium evaporation wire (U-7) after the evaporation experiment. The upper wire is unused one.

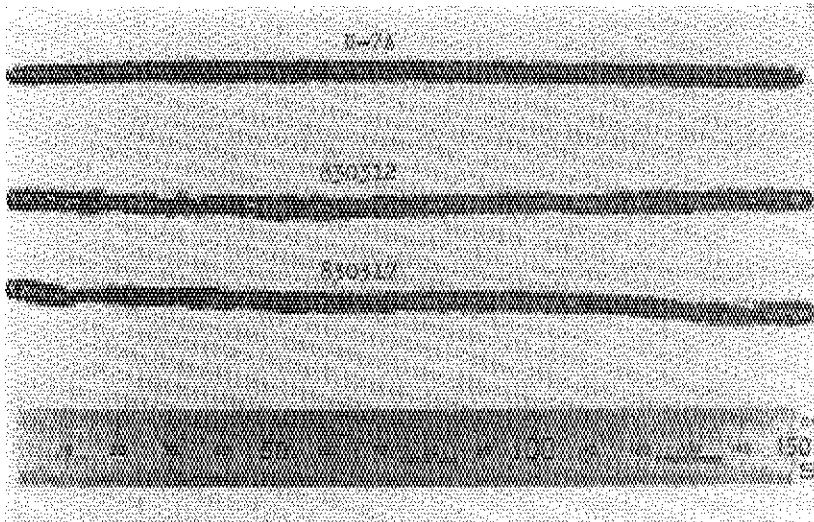


Photo.8 The titanium evaporation wire (U-7A) after the evaporation experiment. The upper wire is unused one.

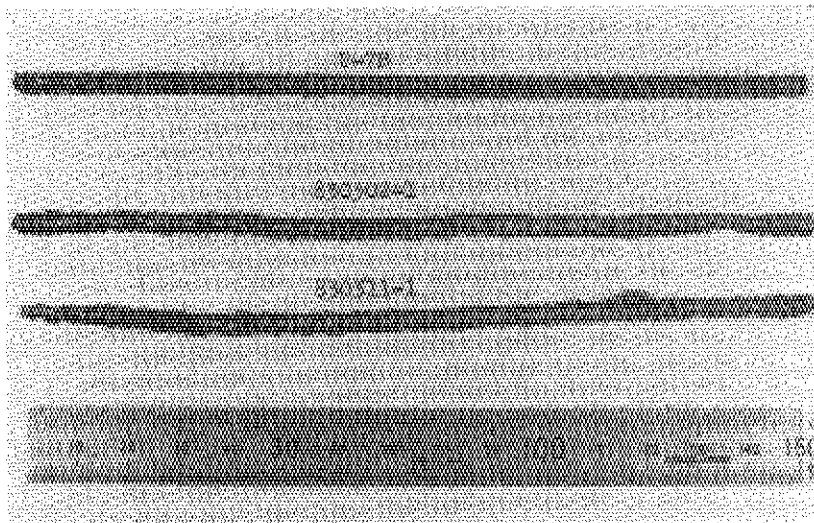


Photo.9 The titanium evaporation wire (U-7B) after the evaporation experiment. The upper wire is unused one.

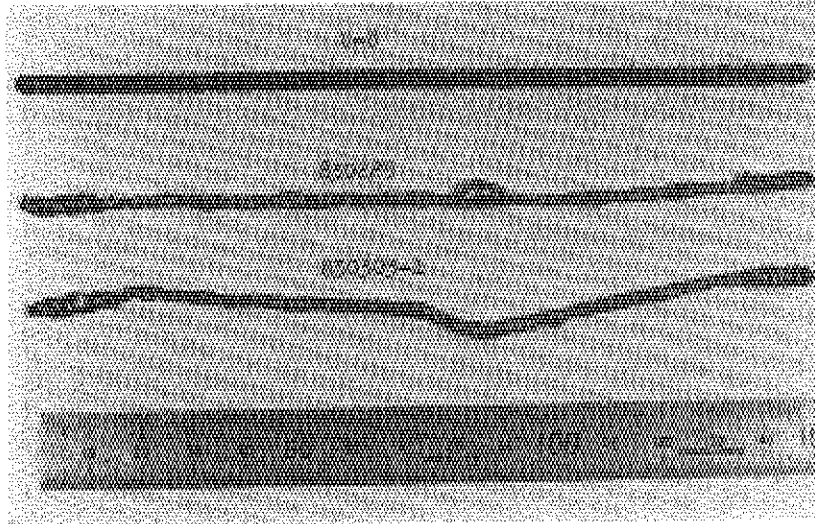


Photo.10 The titanium evaporation wire (U-8) after the evaporation experiment.
The upper wire is unused one.

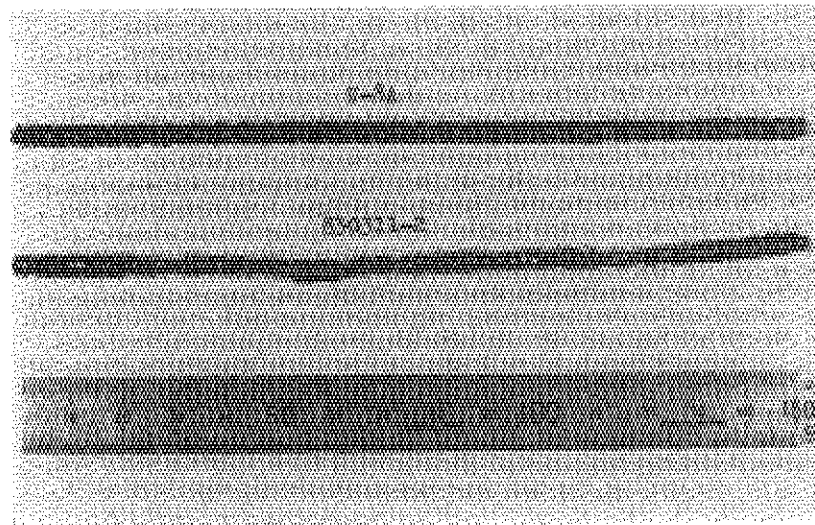


Photo.11 The titanium evaporation wire (U-8A) after the evaporation experiment.
The upper wire is unused one.

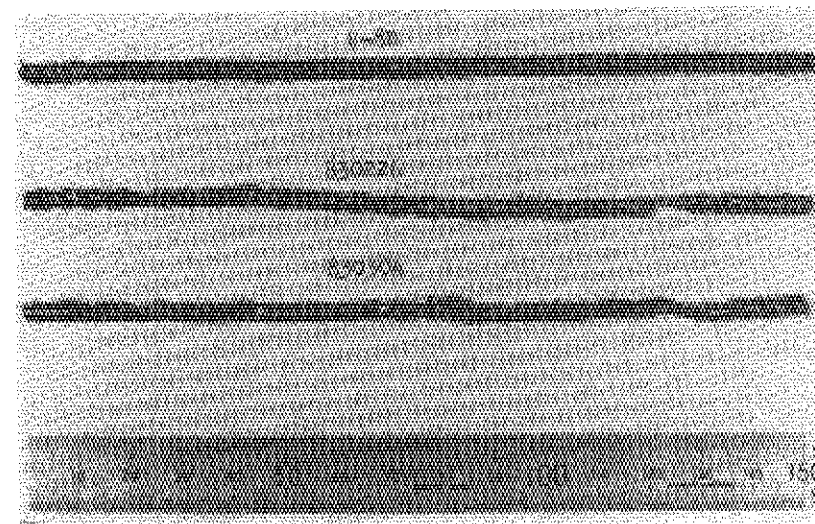


Photo.12 The titanium evaporation wire (U-8B) after the evaporation experiment.
The upper wire is unused one.

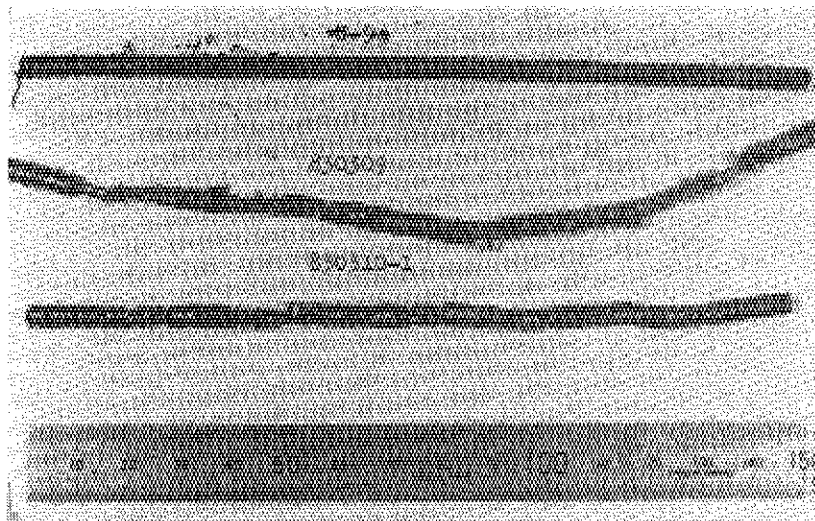


Photo.13 The titanium evaporation wire (U-9) after the evaporation experiment. The upper wire is unused one.

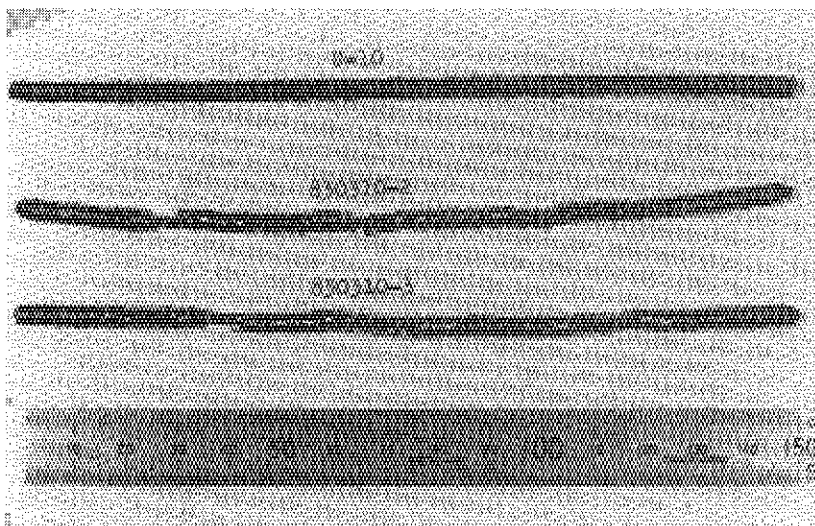


Photo.14 The titanium evaporation wire (U-10) after the evaporation experiment. The upper wire is unused one.

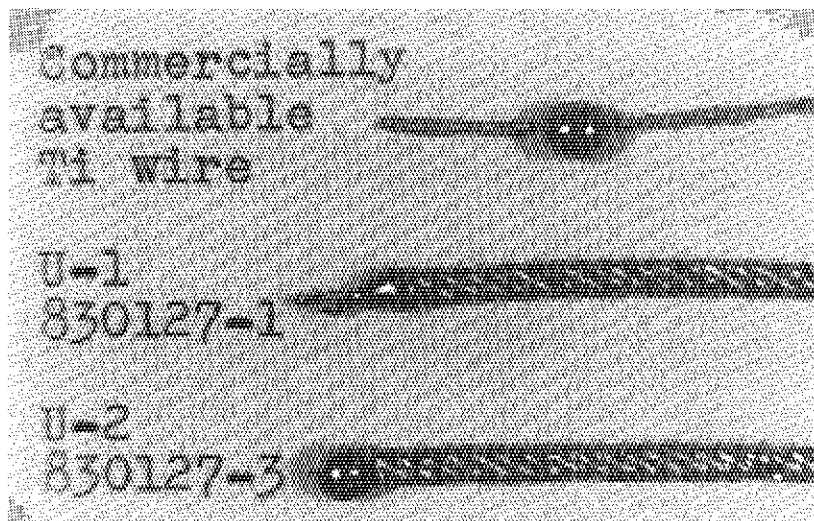


Photo.15 The magnified look of a commercially available titanium wire for sublimation pumps and the titanium evaporation wires (U-1,U-2) after the evaporation experiment.

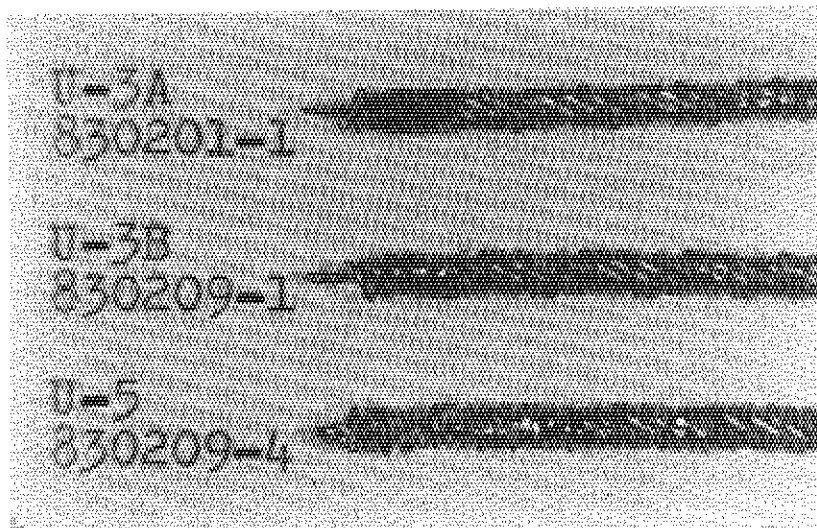


Photo.16 The magnified look of the titanium evaporation wires (U-3A,U-3B, U-5) after the evaporation experiment.

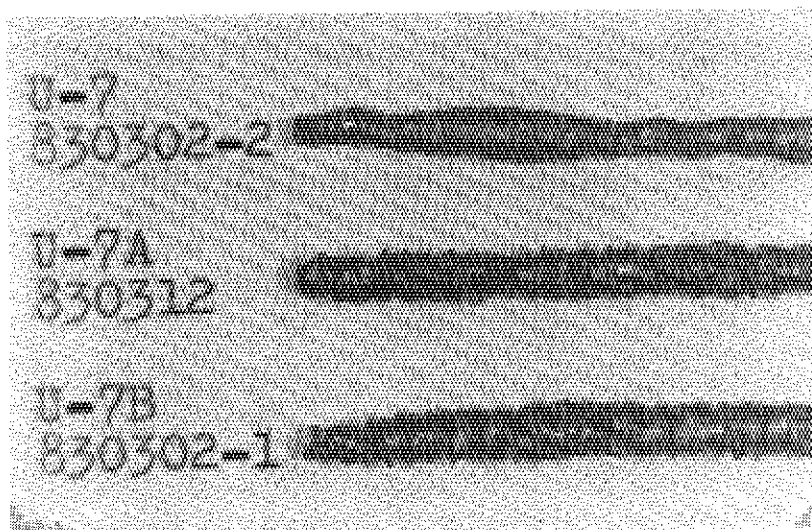


Photo.17 The magnified look of the titanium evaporation wires (U-7,U-7A, U-7B) after the evaporation experiment.

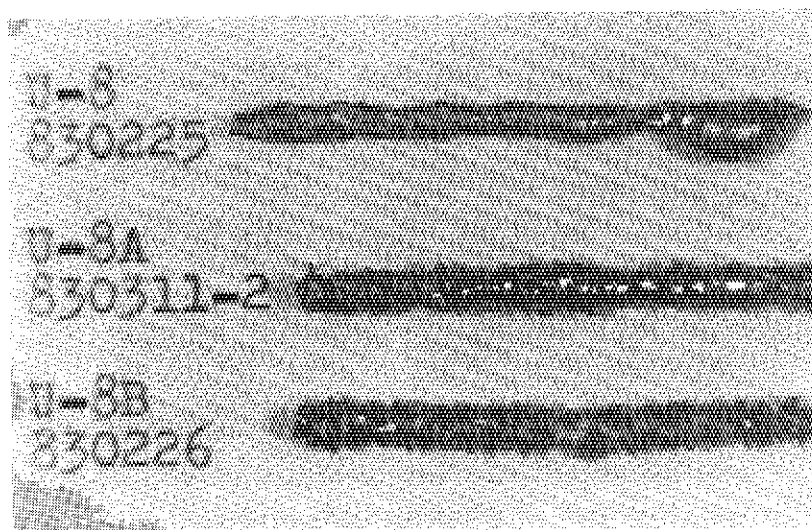


Photo.18 The magnified look of the titanium evaporation wires (U-8,U-8A, U-8B) after the evaporation experiment.

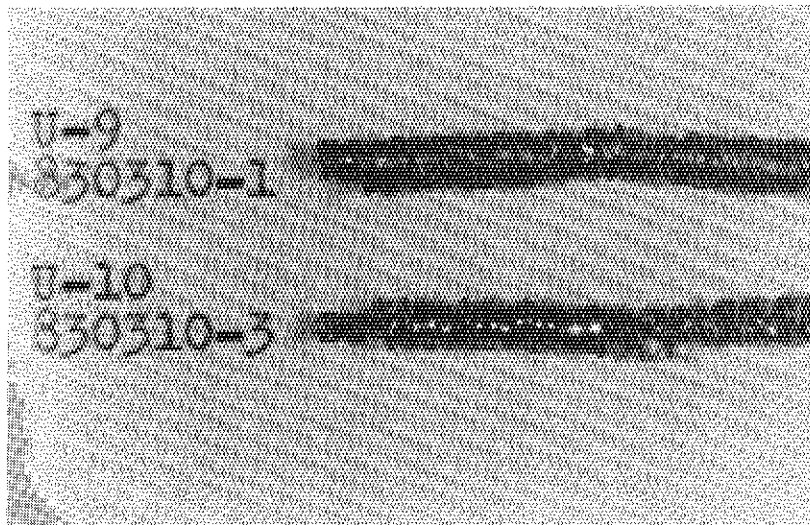


Photo.19 The magnified look of the titanium evaporation wires (U-9,U-10) after the evaporation experiment.

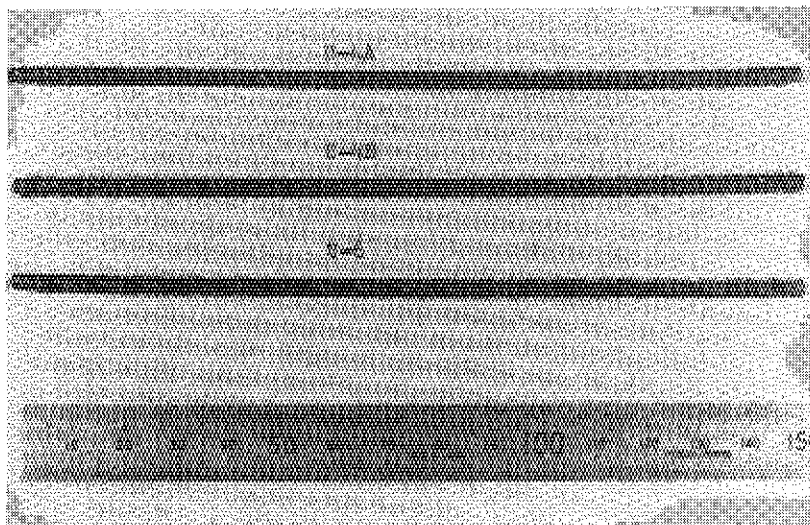


Photo.20 The titanium evaporation wires (U-4A,U-4B,U-6) which were not used in the evaporation experiment.