

JAERI - M
86-048

炭化チタン被覆モリブデンおよび黒鉛
リミタの高熱負荷試験

1986年3月

中村 博雄・新倉 節夫・内川 高志*・小野塚正紀*
山尾 裕行*・名山 理介*・伊尾木公裕**

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。
入手の問い合わせは、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 Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷株式会社

炭化チタン被覆モリブデンおよび
黒鉛リミタの高熱負荷試験

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

中村博雄・新倉節夫・内川高志・小野塚正紀^{*}
山尾裕行^{*}・名山理介^{*}・伊尾木公裕^{**}

(1986年2月5日受理)

トカマク装置のリミタ材としての炭化チタン被覆モリブデン(TiC / Mo), 高級黒鉛(IG-11 AXF-5Q, ATJ)および熱分解黒鉛(PYROID)の熱衝撃特性・熱疲労特性を調べるために, 120kW級の電子ビーム加熱装置を用いて高熱負荷試験を行なった。試料形状はJT-60リミタ形状(TiC/Mo), 平板形状(IG-11, AXF-5Q, ATJ, PYROID)およびバンパーリミタ形状(IG-11)の3種類とした。実験条件は, 熱衝撃試験の場合, 熱負荷は $0.9\text{kw}/\text{cm}^2 \sim 22\text{kw}/\text{cm}^2$, 加熱時間は $2.5\text{sec} \sim 21\text{sec}$, また, 熱サイクル試験の場合, 熱負荷は $340\text{w}/\text{cm}^2$, 加熱時間は 3sec , 加熱回数は1000回とした。TiC/Moの場合, $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 11\text{sec}$ の条件では, 損傷が見られなかった。一方, $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 21\text{sec}$ および $2.2\text{kw}/\text{cm}^2 \times 2.5\text{sec}$ の条件では, 表面溶融およびTiC層の剥離が見られた。熱サイクル試験では, 1000回の加熱後も損傷は見られなかった。IG-11, AXF-5Q, ATJの平板形状黒鉛の場合, $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 11\text{sec}$ では損耗は見られなかった。一方, $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 21\text{sec}$ および $2.2\text{kw}/\text{cm}^2 \times 4.0\text{sec}$ では, 蒸発による損耗が見られた。しかし, クラックは生じなかった。PYROIDの平板形状黒鉛の場合, $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 31\text{sec}$ でも損耗は見られなかった。バンパーリミタ形状黒鉛の場合, $0.9\text{kw}/\text{cm}^2 \times 10\text{sec}$ の条件でクラックが生じた。TiC/Moおよび黒鉛材の損傷や損耗を詳細に調べるため, SEM, AES, EPMAにより表面観察と表面分析を行なった。又, 熱解析および熱応力解析も行なった。

那珂研究所: 茨城県那珂郡那珂町大字向山

* 三菱重工業株式会社

** 三菱原子力工業株式会社

High Heat Flux Tests on TiC Coated Molybdenum
and Graphite Limiters for Tokamak Experiments

Hiroo NAKAMURA, Setsuo NIIKURA, Takashi UCHIKAWA*,
Masanori ONOZUKA*, Hiroyuki YAMAO*, Michisuke NAYAMA*
and Kimihiro IOKI**

Department of Large Tokamak Research,
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 5, 1986)

High heat flux tests have been performed using a 120 kW electron beam test facility to study thermal shock and thermal cycle resistances of TiC coated molybdenum, three kinds of high grade graphite (IG-11, AXF-5Q, ATJ) and pyrolytic graphite (PYROID) as tokamak limiter materials. Three types of samples were used; JT-60 fixed limiter type (TiC/Mo), plate type (IG-11, AXF-5Q, ATJ, PYROID) and bumper limiter type (IG-11). Test conditions are $0.9\sim 2.2$ kW/cm² × 2.5~21 sec in the thermal shock tests, and 340 W/cm² × 3 sec × 1000 cycles in the thermal cycle tests, respectively. In the case of TiC/Mo, no damage was observed in the condition of 1.1 kW/cm² × 11 sec. In the conditions of 1.1 kW/cm² × 21 sec and 2.2 kW/cm² × 2.5 sec, surface melting and cracking of TiC coating were observed. In the thermal cycle test of TiC/Mo, there was no damage. In the case of plate type graphites (IG-11, AXF-5Q, ATJ), there was no damage in the condition of 1.1 kW/cm² × 11 sec. On the other hand, surface erosions were observed in the conditions of 1.1 kW/cm² × 21 sec and 2.2 kW/cm² × 4.0 sec. However, there was no cracking. In the case of PYROID, there was no surface erosion in the condition of 1.1 kW/cm² × 31 sec. In the case of bumper limiter type graphite, cracking was

* Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

** Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

observed in the conditions of $0.9 \text{ kW/cm}^2 \times 10 \text{ sec}$. Observation and surface analyses by SEM, AES and EPMA have been performed. Also, thermal and structural analyses have been performed.

Keywords: High Heat Flux, Titanium Carbide Coating, Molybdenum, Graphite, Limiter, Tokamak, Thermal Shock, Thermal Cycle, Cracking, Evaporation, Erosion, JT-60 Toroidal Limiter, Bumper Limiter

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 試験装置および試験方法	2
2.2 予備試験	2
3. 試験結果と解析	11
3.1 TiC 被覆モリブデン (JT-60リミタ形状)	11
3.2 黒鉛, 熱分解黒鉛 (平板形状)	12
3.3 黒鉛 (バンパーリミタ形状)	13
4. おわりに	46
謝 辞	47
参考文献	48

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	2
2.1 Experimental devices and procedures	2
2.2 Preliminary test	2
3. Results and discussions	11
3.1 TiC coated molybdenum (JT-60 limiter type)	11
3.2 Graphite, pyrolytic graphite (Plate type)	12
3.3 Graphite (Bumper limiter type)	13
4. Summary and conclusions	46
Acknowledgements	47
References	48

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置JT-60は、トカマク型核融合装置の科学的実証を目指して昭和60年4月にプラズマ実験を開始した。⁽¹⁾ JT-60では、臨界プラズマ条件達成のため30MWの第2段加熱を行なうとともに、核融合炉心プラズマの開発研究のため、5～10秒の準定常長パルス放電を行なう。このため、プラズマに関連した熱的条件は従来装置に比較して格段に厳しくなっており、真空容器の内壁を構成するリミタやライナ等（第1壁と総称）への高熱負荷対策が重要な技術的課題のひとつである。

JT-60の第1壁材には、1974～1976年度の事前評価および試作開発に基づき、モリブデン、黒鉛、熱分解黒鉛の中からモリブデンを採用し、1978年度からの設計を開始した。JT-60の実験モードは磁気リミタ試験モードと固定リミタ実験モードに分けられる。とくに後者の場合にはプラズマとリミタの相互作用による高原子番号(Z)材不純物対策が重要課題となる。このため、モリブデン表面を低Z材で被覆することを検討し、1980年度の検討および開発試験に基づいてJT-60第1壁表面材料として炭化チタン(TiC)を選択し、実機第1壁へのコーティングを行なった。

本報告は、JT-60第1壁に選んだ炭化チタン被覆モリブデン(TiC被覆モリブデン)および比較材として、従来よりも特性の向上が見られる等方性黒鉛、異方性黒鉛および熱分解黒鉛等について、120kw級の電子ビーム装置を熱源として高熱負荷試験を行ない、耐熱性および耐熱衝撃性を調べたものである。第2章では実験装置および実験方法について述べ、第3章では実験結果および解析について述べる。また、まとめを第4章に記す。

2. 試験方法

2.1 試験装置および試験方法

Table 2 - 1 に示す通り試験対象とした材料は、TiC 被覆モリブデン，等方性黒鉛IG-11（東洋炭素），AXF-5Q（POCO Grdphite, Inc, U.S.A），異方性黒鉛ATJ（Union Carbide Co. U.S.A）および熱分解黒鉛PYROID（Pfizer Co., U.S.A）である。試験片の形状はTiC被覆モリブデンはJT-60実機リミタ形状であり，黒鉛（IG-11, AXF-5Q, ATJ, PYROID）は平板形状およびバンパタリミタ形状（ただし，IG-11のみ）である。

試験には120kw級電子ビーム溶接装置（電圧100kv，電流1.2A，真空度 5×10^{-4} Torr）を熱源として用いた。試験装置の概略図をFig. 2 - 1に示す。試験片は，真空容器内に設置した移動架台上に複数個を固定し，上部方向より電子ビームを照射した。Fig. 2 - 2に試験片の取付け状況の写真を示す。試験片の表面温度は赤外線放射温度計（日本アビオニクス製サーモビデオ）により，また，バルク温度は熱電対により測定した。電子ビームの照射条件をTable 2 - 2に示す。電子ビームは偏向コイルにより2方向に三角波形でオシレーションさせ，形照射領域を形成した。Fig. 2 - 3にビーム波形を示す。熱流速分布については2.2(2)項に示す。試験はそれぞれ1回のパルス照射を行なう熱衝撃試験（ $1.1 \sim 2.2 \text{kw/cm}^2 \times 2.5 \sim 31 \text{sec}$ ）および1000回の繰り返し照射を行なう熱サイクル試験（ $0.9 \text{kw/cm}^2 \times 3 \text{sec}$ ）よりなる。

2.2 予備試験

加熱試験に先立ち，温度測定の較正試験および熱負荷の較正試験を行なった。

(1) 温度較正試験

赤外線放射温度計（サーモビデオ）による試験片表面温度測定値は，試験片表面の輻射率，測定用窓ガラス等での赤外線透過率に依存し，また試験片以外からの反射光等にも影響されため，実際の表面温度を知るにはデータの較正が必要である。

本試験では，等方性黒鉛IG-11について温度較正を実施した。Fig. 2 - 4に示すように，試験片表面に一定熱流束（2.2(2)項参照）を与えた際（定常熱負荷），試験片内部厚さ方向に設置された熱電対により得られた温度の差（ $T_1 - T_2$ ）から，試験片表面の温度は T_0 は1次元モデルを考え，物性値の温度依存性を無視すれば次式で表わされる。

$$T_0 = T_1 + \frac{\ell_2}{\ell_1} (T_1 - T_2) \quad (1)$$

T_0 : 試験体表面温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）

T_1 : 上部熱電対測定温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）

T_2 : 下部熱電対測定温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）

l_1 : 熱電対間距離 (25 mm)

l_2 : 試験体表面と上部熱電対間の距離 (10 mm)

二式1)より算定された試験体表面温度とサーモビデオによる計測値から求めたIG-11に関する較正データをFig. 2.5に示す。その他の黒鉛についても全てFig. 2-5の較正データを用いて温度較正を行なった。TiC被覆モリブデンに関しては輻射率を0.25として算出した較正温度値を用いた。

(2) 熱流束分布の測定と評価

照射条件の確認のため、電子ビームの形照射領域の熱流束分布および入熱量の測定と評価を行なった。Fig. 2-6に示すように真空断熱に近い条件(輻射およびサポートからの熱伝導ロスは約1%)にて複数個の18mm立方銅製ブロックの表面に一定熱流束 q を負荷した。Fig. 2-7に、熱流束分布測定の模式図を示す。各々の銅製ブロックの温度 ΔT を計測することにより断熱条件では熱流束分布が次式2)より求められる。

$$q = \frac{C_p \cdot r \cdot V \cdot \Delta T}{\Delta t \cdot A} \quad (2)$$

ΔT : ブロック温度上昇 ($^{\circ}\text{C}$)

q : 熱流束 (W/cm^2)

C_p : ブロック比熱 (= $0.398 \text{ J}/\text{g k}$)

r : ブロック比重 (= $8.96 \text{ g}/\text{cm}^3$)

A : 照射面積 (= 3.24 cm^2)

V : ブロック体積 (= 5.832 cm^3)

Δt : 照射時間 (sec)

ここでは2方向のオンレーションの周波数を各々23Hzおよび1000Hzとしたときの熱流束分布を測定した結果をFig. 2-8およびFig. 2-9に示す。周波数の低い方向(23Hz)では照射領域全体にはほぼ一様な熱流束分布が得られている。一方、周波数の高い方向(1000Hz)では、照射領域の約80%ではほぼ一様な分布が得られており、両端部分に高熱流束部分が存在する。これは、周波数の高い方向において三角波の走査コントロール信号に対し、偏向コイル電流の追従が鈍り、電流波形が正弦波に近くなったためである。従って、本試験および温度較正試験においては低周波(23Hz)方向は100%の照射領域を用い、高周波数(1000Hz)方向は70%以内の中央領域を用い、試験体照射領域に対し均一な熱流束の電子ビーム照射を行なった。高周波数(1000Hz)方向におけるピーク部の損失(約35%)を差し引いて求めた熱流束を、Table 2-2に示す。熱衝撃試験では、JT-60リミタ形状TiC/Moおよび平板形状黒鉛の場合、 $1.1 \text{ kw}/\text{cm}^2$ および $2.2 \text{ kw}/\text{cm}^2$ 、バンパーリミタ形状黒鉛の場合、 $0.9 \text{ kw}/\text{cm}^2$ であった。熱サイクル試験では、 $0.3 \text{ kw}/\text{cm}^2$ であった。

Table 2-1 Test samples

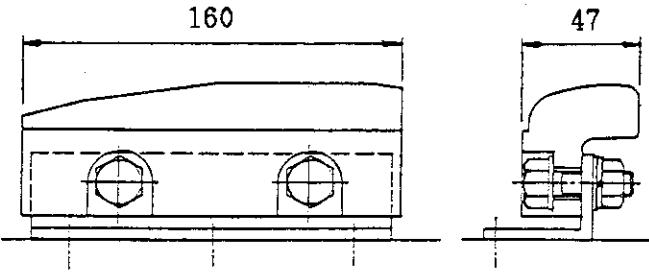
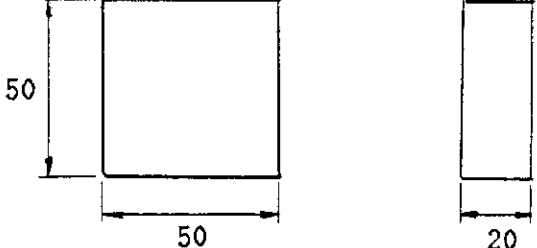
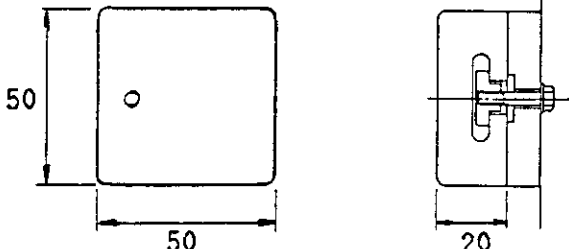
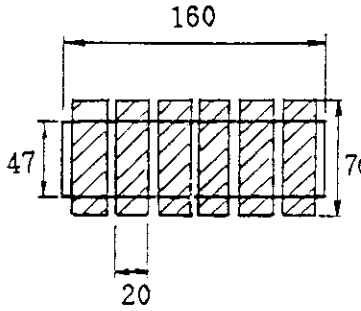
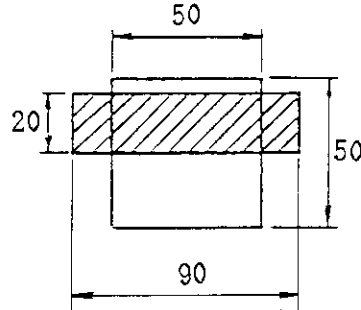
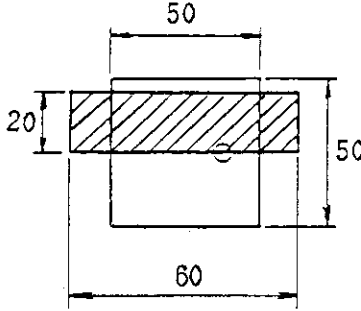
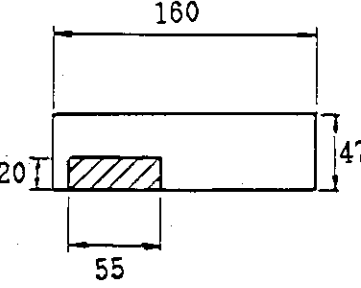
Materials	Structures
TiC coated molybdenum	 <p>JT-60 limiter type</p>
Isotropic graphite IG-11 AXF-5Q Nonisotropic graphite ATJ Pyrolytic graphite PYROID	 <p>Plate type</p>
Isotropic graphite IG-11	 <p>Bumper limiter type</p>

Table 2-2 High heat load testing conditions

Purpose	Sample type	Heated area	Heat flux (kW/cm ²)
Thermal shock test	JT-60 limiter type		(a) 1.1 (60kV) (b) 2.2 (80kV)
	Plate type		(a) 1.1 (60kV) (b) 2.2 (80kV)
	Bumper limiter type		(c) 0.9 (60kV)
Thermal cycle test	JT-60 limiter type		(d) 0.34 (60kV)

() : Accelerating Voltage

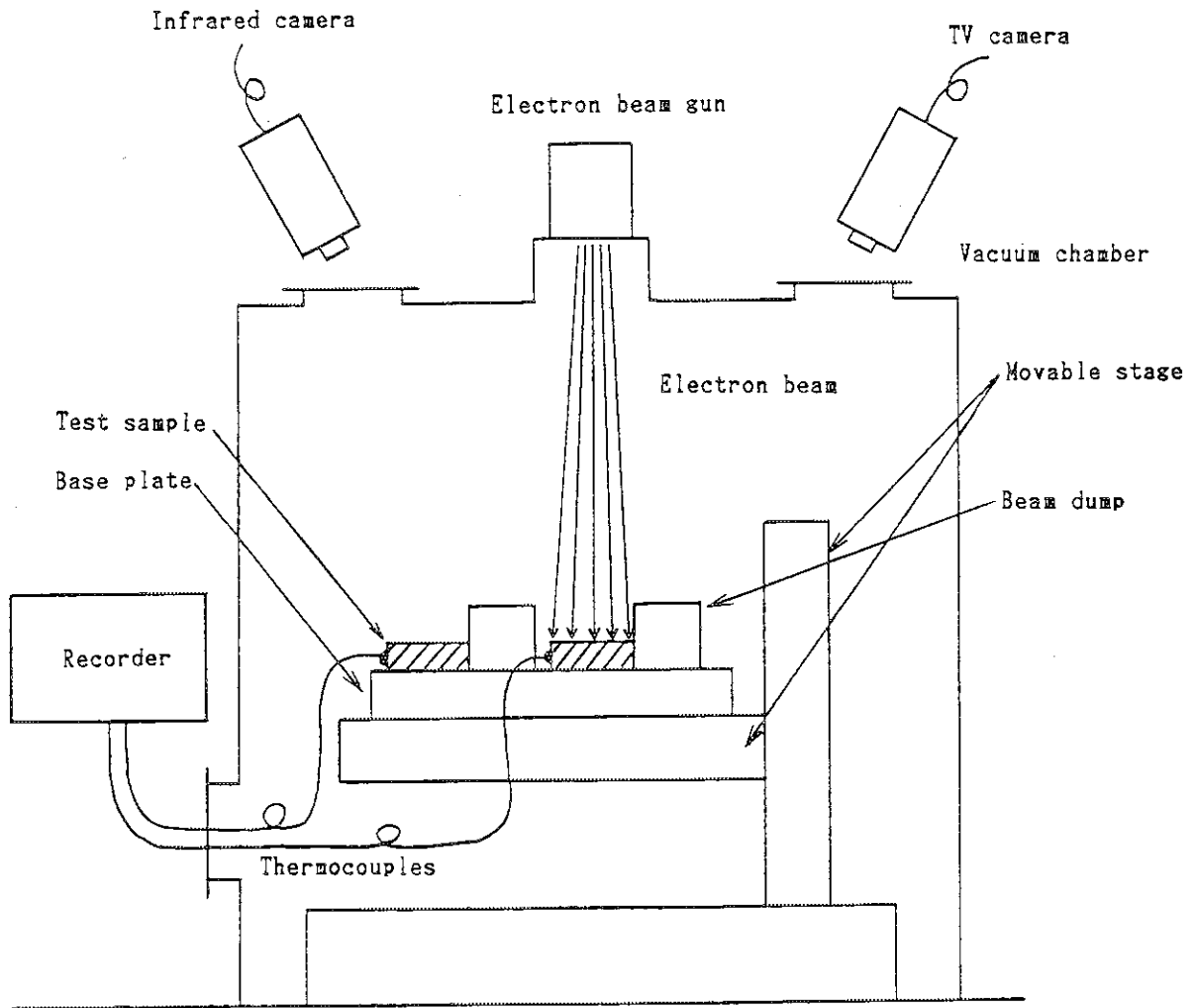


Fig. 2-1 Experimental apparatus

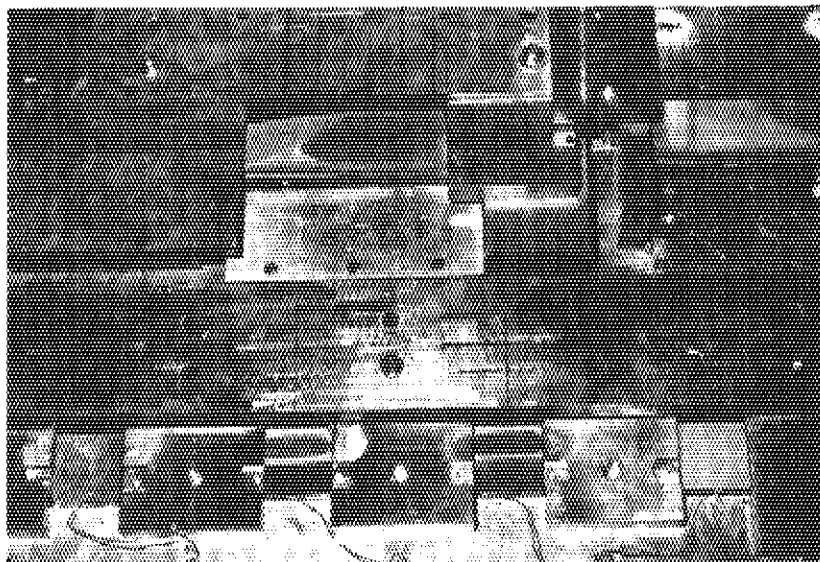


Fig. 2-2 Set-up of test samples

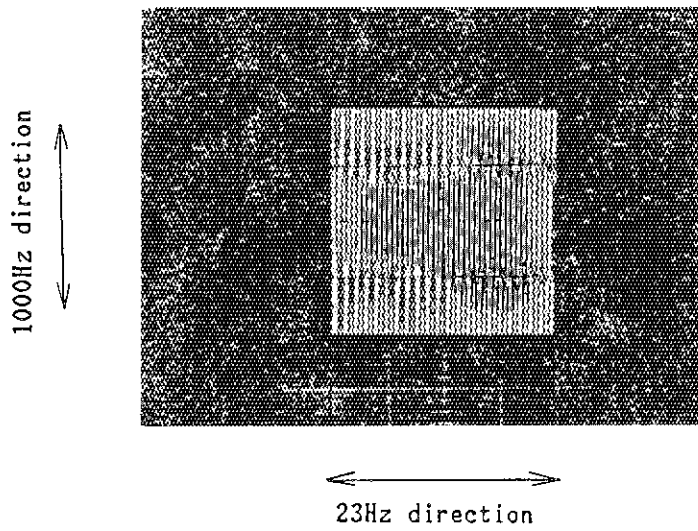


Fig. 2-3 Profile of beam oscillation

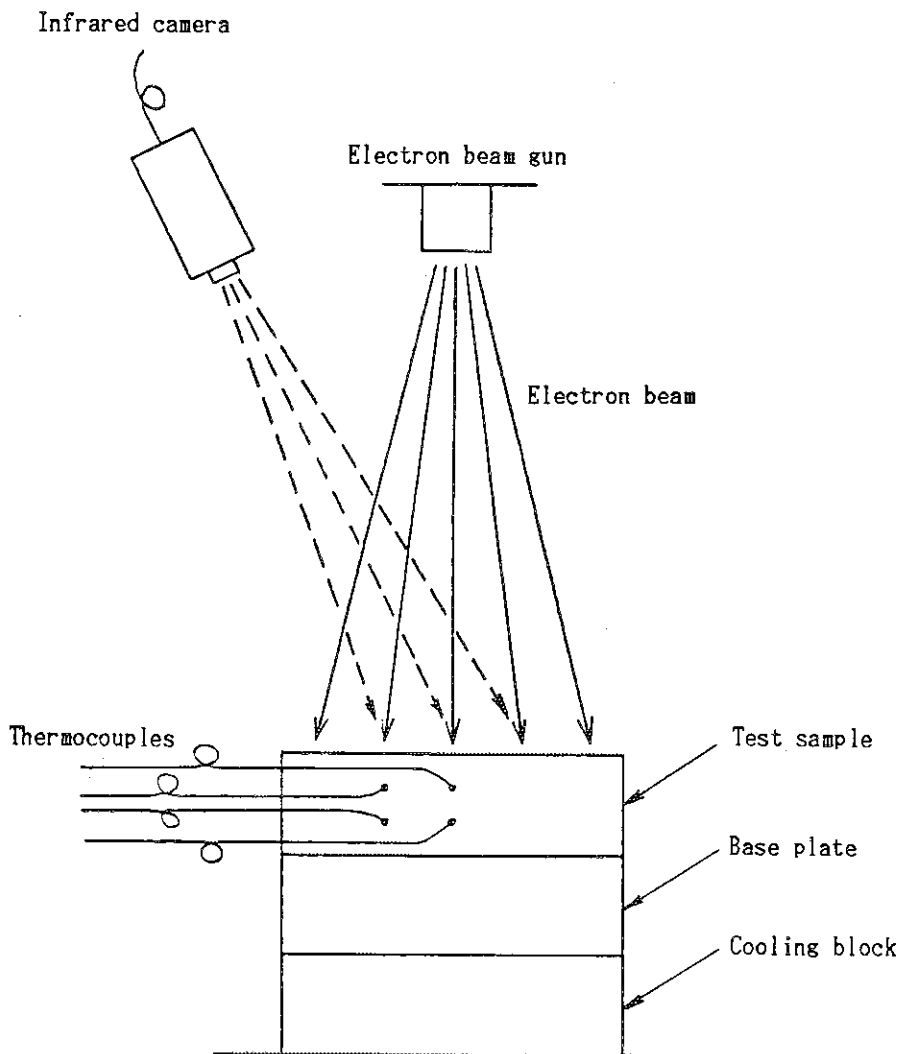


Fig. 2-4 Experimental apparatus for temperature calibration

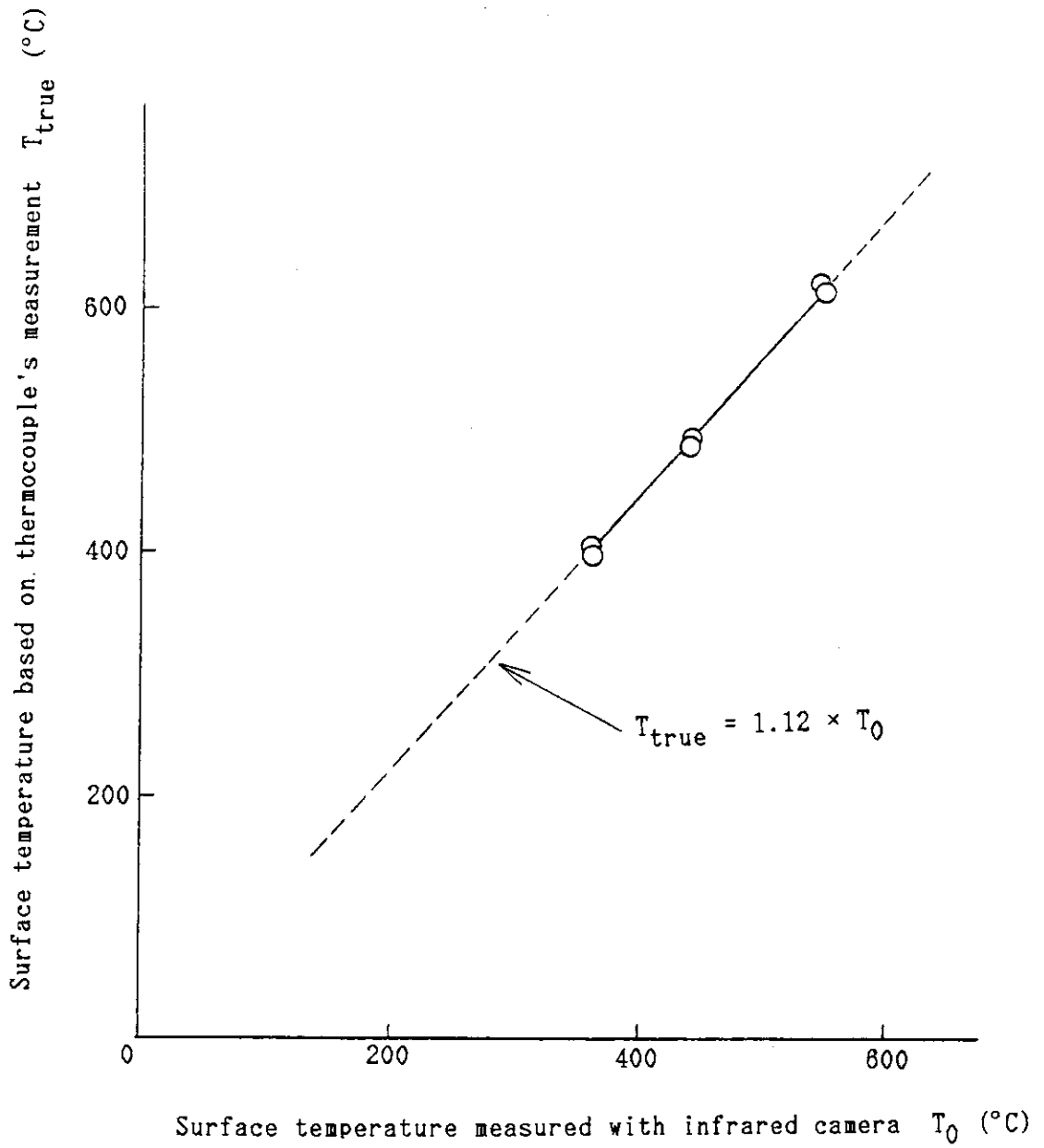


Fig. 2-5 Calibration of temperatures measured with infrared camera



Fig. 2-6 Copper cubes for heat flux measurement

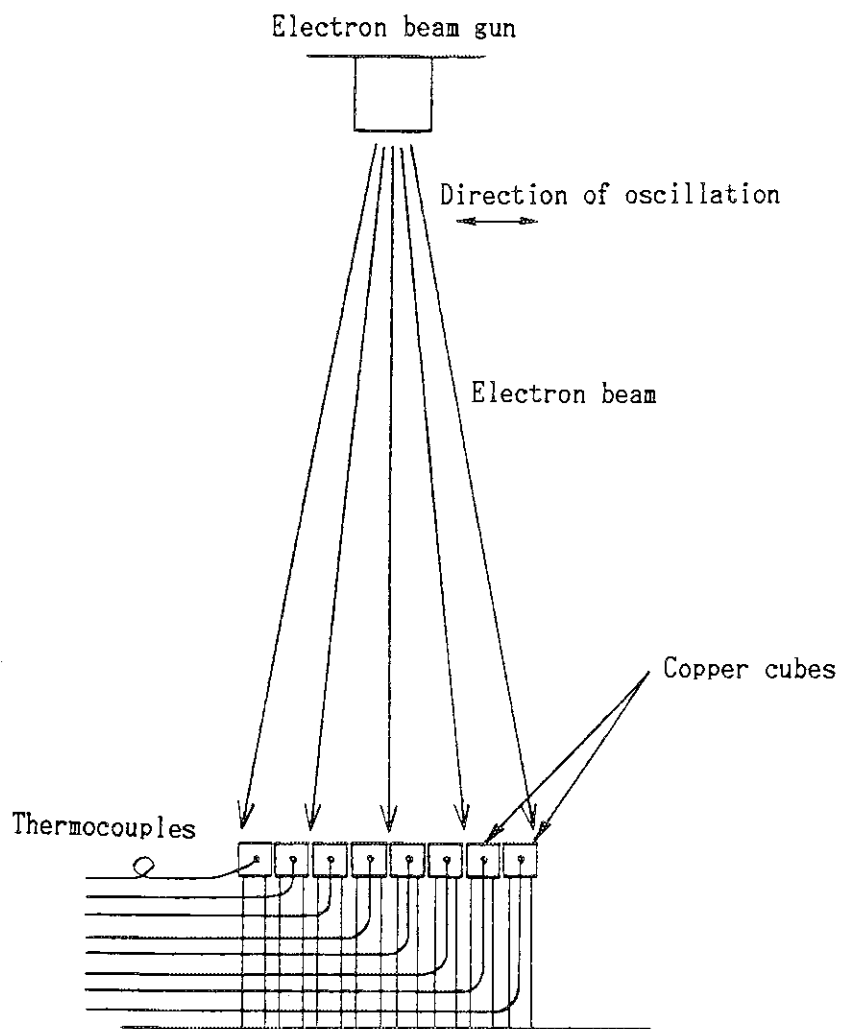


Fig. 2-7 Experimental apparatus for heat flux distribution

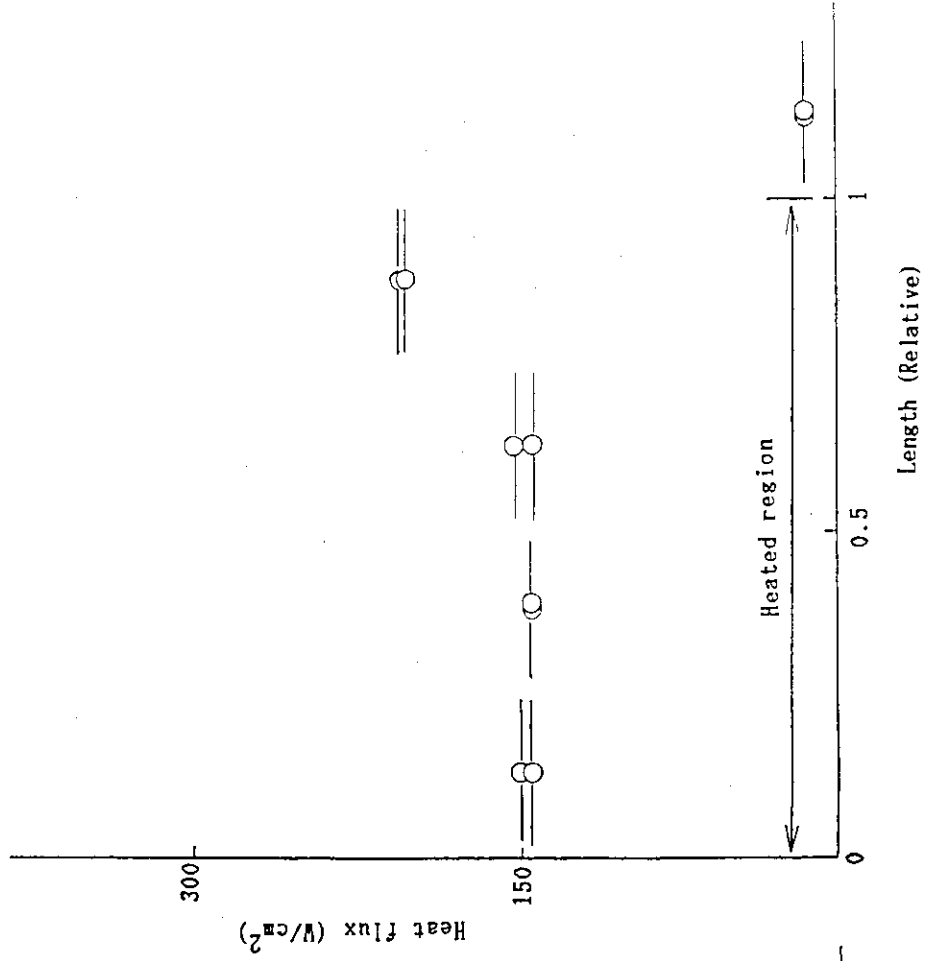


Fig. 2-9 Heat flux distribution in 1000Hz direction

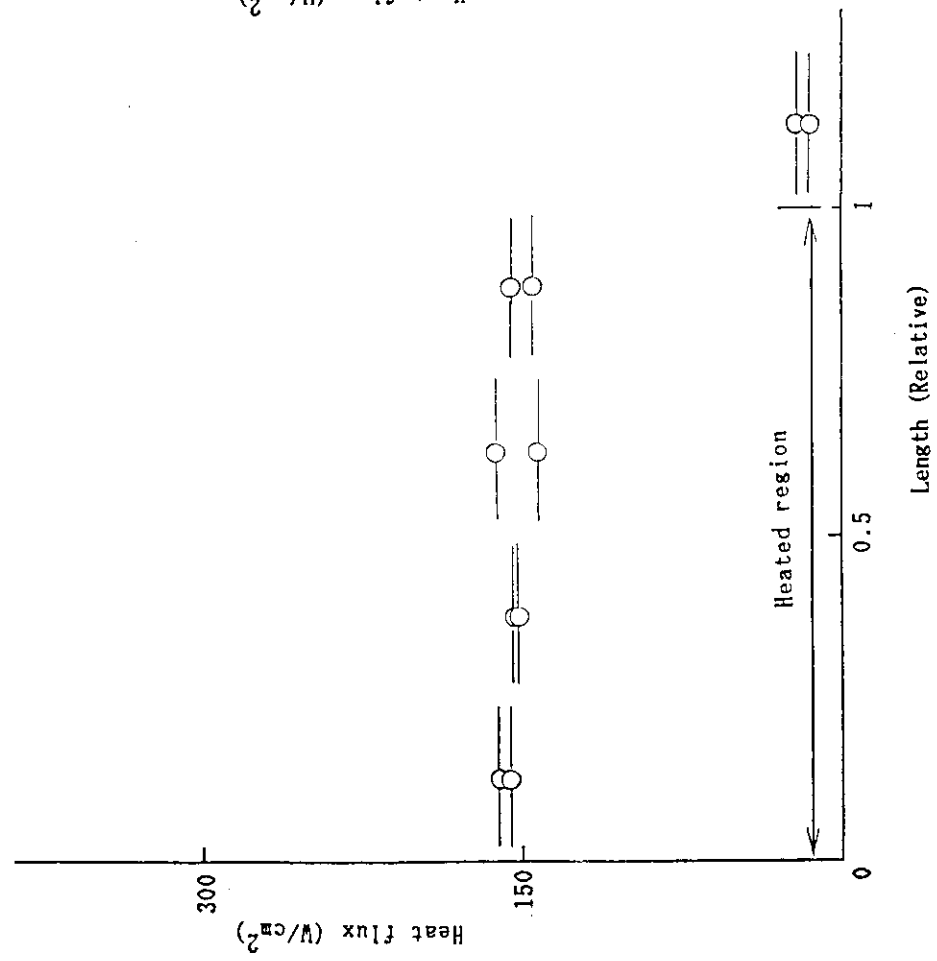


Fig. 2-8 Heat flux distribution in 23Hz direction

3. 試験結果と解析

3.1 TiC被覆モリブデンの評価

電子ビームを照射したTiC被覆モリブデンについて下記の分析と評価を行なった。

(1) 照射部の外観観察

各熱負荷条件に関する照射結果をTable 3-1に示す。また、熱負荷条件 $2.2\text{kw}/\text{cm}^2 \times 6\text{sec}$ および $340\text{W}/\text{cm}^2 \times 3\text{sec} \times 1000\text{cycles}$ の結果の詳細をFig. 3-1およびFig. 3-2に示す。さらにTiC被覆モリブデンが損傷を受ける熱負荷条件をFig. 3-3にまとめた。TiC被覆モリブデンは入射量 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 11\text{sec}$ 以下では表面に損傷は生じなかったが、 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2$ の場合、2sec以上および $2.2\text{kw}/\text{cm}^2$ の場合、2.5sec以上の高熱負荷条件ではTiC被覆層に割れ、剥離およびモリブデン基材に溶融等の損傷が認められた。各照射条件について測定したTiC被覆モリブデンの最高表面温度と時間との関係をFig. 3-4に示す。これよりTiC被覆層が飛散し、モリブデン基材が溶融したケース（熱流束 $2.2\text{kw}/\text{cm}^2 \times 10\text{sec}$ 前後の場合）では、試験片表面温度はモリブデンの融点（ 2620°C ）前後に達していることが推定される。

一方、TiC被覆モリブデンへの熱サイクル試験（ $340\text{W}/\text{cm}^2 \times 3\text{sec} \times 1000\text{cycles}$ ）では、とくに表面状態の著しい変化および損傷は認められなかった。

(2) 照射部の表面および断面観察

熱負荷条件 $2.2\text{kw}/\text{cm}^2 \times 6\text{sec}$ および $340\text{W}/\text{cm}^2 \times 3\text{sec} \times 1000\text{cycles}$ にて電子ビーム照射を受けた各々の領域について、走査型電子顕微鏡（SEM）による表面観察および光学顕微鏡による断面ミクロ観察を行なった。Fig. 3-5～Fig. 3-7に観察結果を示す。これらの結果を以下に示す。

- 1) 入熱量 $2.2\text{kw}/\text{cm}^2 \times 6\text{sec}$ の照射を受けた領域（重損傷部）では、Fig. 3-7(a)②およびFig. 3-7(b)③に示す様にTiC（融点 3067°C ）層およびモリブデン（融点 2620°C ）層が溶融し、デンドライト（樹枝状結晶）状組織になっているのが認められる。
- 2) 重損傷部の近傍（中損傷部）においては、Fig. 3-7(a)②およびFig. 3-7(b)④に示す様にモリブデンが溶融してTiC層を押し上げている部分およびTiC層が剥離している部分が認められる。
- 3) 照射領域周辺（軽損傷部）においては、Fig. 3-5④、Fig. 3-7(a)①およびFig. 3-7(b)⑤に示す様にTiC層（約 $17\mu\text{m}$ ）に亀裂および剥離が認められる。
- 4) 照射領域のモリブデン基材は、Fig. 3-7(a)およびFig. 3-7(b)に示す様に照射により、再結晶しているのが認められる。
- 5) $340\text{W}/\text{cm}^2 \times 3\text{sec} \times 1000\text{cycles}$ の熱サイクルの場合、TiC被覆モリブデンの表層にはとくに損傷は認められないが、Fig. 3-6に示す様に粒子状のものが付着したような表面状態が観察される。

(3) 照射部の組成分析

熱負荷条件 $2.2\text{kw}/\text{cm}^2 \times 6\text{sec}$ の電子ビーム照射を受けた領域の表面および断面について、X線マイクロアナライザー (EPMA) およびオージェ電子分光分析装置 (AES) を用いて組成分析を行った。Fig. 3-8, Fig. 3-9 および Fig. 3-10 に EPMA による表面の面分析および線分析の結果を示す。また、Fig. 3-13 ~ Fig. 3-15 に AES による表面分析の結果を示す。

これらの結果から、重損傷部、中損傷部の表面では Mo, Ti および C の各成分が混在しており損傷を受けている状況が確認される。一方、軽損傷部、無損傷部の表面では Ti および C が主要構成元素であり TiC 層の存在が認められる。

次に照射域の深さ方向 (断面方向) の組成データを得るために EPMA により組成分析を行なった。この結果を Fig. 3-11 および Fig. 3-12 に示す。照射により生じたデンドライト状組織には Mo, Ti および C が混在しており、TiC 層とモリブデン層の溶融が認められる。

3.2 黒鉛, 熱分解黒鉛 (平板形状)

電子ビームを照射した平板形状の各種黒鉛 (IG-11, AXF-5Q, ATJ, PYROID) について、下記の分析・評価を行なった。

(1) 照射部の外観観察

各種黒鉛の照射前後の外観例 (照射条件 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 31\text{sec}$) を Table 3-2 に示す。また各種黒鉛の損傷と熱負荷条件との関係を Fig. 3-16 にまとめた。各種熱負荷条件での黒鉛の最高表面温度 (測定値) を Fig. 3-17 に示す。

これらの結果により、等方性黒鉛 (IG-11, AXF-5Q) および異方性黒鉛 (ATJ) は入熱量 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 1\text{sec}$ 以下では表面に損傷は見られず、入熱量 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 21\text{sec}$ 以上では表面温度が 2000°C 以上に達し、昇華を生じている。一方熱分解黒鉛 (PYROID) は、入熱量 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 31\text{sec}$ においても優れた熱伝導特性 (積層面方向) のために表面温度の上昇が小さく、熱分解黒鉛が等方性黒鉛 (異方性黒鉛の ATJ を含む) に比べて耐熱性に優れていることが認められる。

(2) 照射部の表面および断面分析

$1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 31\text{sec}$ の電子ビーム照射を受けた各種黒鉛について、SEM による表面分析および光学顕微鏡による断面観察を行った。Fig. 3-18 ~ Fig. 3-25 にその観察結果を示す。また、昇華による表面損傷を受けた各種黒鉛については、断面観察によりその損耗量を測定した。その結果を Fig. 3-26 に示す。これらの結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 熱負荷による損耗の大きさは、Fig. 3-22 ~ Fig. 3-26 から判る様に、大きいほうから ATJ, IG-11, AXF-5Q, PYROID の順であった。特に PYROID の耐熱性 (積層面に平行な方向に入熱の場合) は他の黒鉛に比べ著しく良好であることが認められる。
- 2) 黒鉛の焼結組織については、Fig. 3-18 ~ Fig. 3-20 に示す様に ATJ, IG-11, AXF-5Q, の順に粒子径が細かく組織が緻密であることが認められる。

(3) 解析との比較

各種黒鉛が熱負荷を受けた際の表面損傷について計算コード CALIP を用いて解析を行い、実験結果との比較を行った。解析モデルは Fig. 3-27 に示す 2次元モデルを採用した。板厚は 20

mm であり、表面の 20mm 巾が熱負荷領域である。熱負荷領域以外は断熱境界とした。IG-11 AXF-5Q, AJT および PYROID について熱負荷 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2$ の場合の解析を行った。IG-11 について熱負荷 $1.6\text{kw}/\text{cm}^2$ についても解析した。温度分布の 1 例として IG-11 の $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 31\text{sec}$ 熱負荷時の結果を Fig. 3-28 に示す。Fig. 3-29 は熱流束 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2$ に対し、照射時間をパラメータとして、各種黒鉛の表面温度および昇華による損耗量を解析したものである。この結果によると表面温度および損耗量の値の大きな材料を順番に並べると ATJ, IG-11, AXF-5Q, PYROID である。一方 IG-11 を対象として熱負荷 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2$ および $1.6\text{kw}/\text{cm}^2$ についての解析結果を図示したものが Fig. 3-30 である。損耗量は入熱量の増大に伴い急激に大きくなる傾向が認められる。

以上の解析により得られた損耗量を 3.2(2)項の実験結果と比較したものが Fig. 3-31 である。材料依存性、熱流束および照射時間との相関については一致した傾向が見られるが、実験値は解析値のほぼ 2 倍の値を示しているが、この差の原因としては、解析の際に用いた各種黒鉛の物性値（飽和蒸気圧、昇華潜熱を含む）の誤差および実験における入熱量評価値の誤差が考えられるが、この他に黒鉛における損耗のメカニズムが昇華現象以外の事象（例えば微細粒子としての離脱）とも関連している可能性も挙げられる。この原因を明らかにするのは今後の検討課題である。

3.3 黒鉛（バンパーリミタ形状）

構造材としてのバンパーリミタ形状試験片（材質 IG-11）に対し電子ビーム照射を行った結果、 $0.9\text{kw}/\text{cm}^2 \times 10\text{sec}$ の熱負荷を与えた時、試験片 2 個の内 1 個に Fig. 3-32 に見られるような照射領域での破損が生じた。ここでは破損原因を検討するために、有限要素法計算コード TESTRUN による熱解析および熱応力解析を行った。解析モデルは Fig. 3-33 に示す 2 次元モデルを採用した。板厚は 20mm で表面の 20mm 巾が熱負荷領域である。熱負荷条件は、実際の入力量を上回る $1.5\text{kw}/\text{cm}^2 \times 10\text{sec}$ とした。熱負荷 10sec 後の温度分布、変形および主応力分布をそれぞれ Fig. 3-34, 3-35, 3-36 に示す。解析結果によると表面の最高温度は 2340°C であり、照射領域（破損箇所）の最大応力は $5.4\text{kgf}/\text{mm}^2$ （圧縮応力）である。この値は IG-11 の常温における圧縮強度 $8\text{kgf}/\text{mm}^2$ を下回っている。また、内部空隙部の周辺（側部、底部）には常温における引張強度 $2.5\text{kgf}/\text{mm}^2$ を上回る引張応力（最大 $4.9\text{kgf}/\text{mm}^2$ ）が発生しているが破損箇所とは対応していない。これより、本解析の結果から直ちに破損原因を推定することはできないが、破損原因として次のような事項が考えられる。

- 1) 本実験での試験片の取付状態に起因して、試験片に予め変形および応力が生じていた。
- 2) 材料の内部欠陥が存在し許容限度を下回る熱負荷条件で破損した。

バンパーリミタ形状黒鉛の耐熱衝撃特性を、より定量的に明らかにするためには、今後、より多くの試験片を用いた実験や、素材の内部欠陥の検査が必要である。

Table 3-1 Surface damage of TiC coated molybdenum

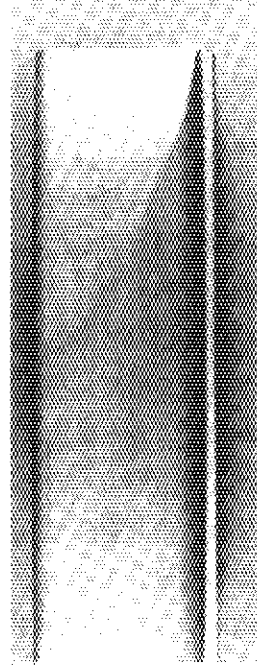
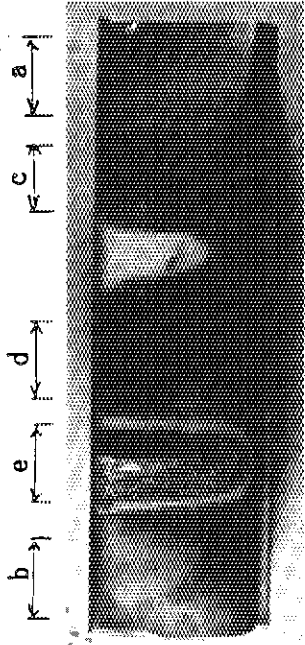
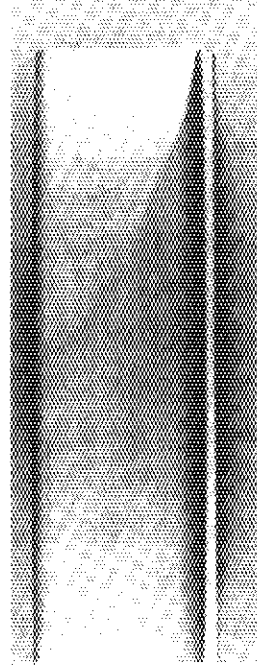
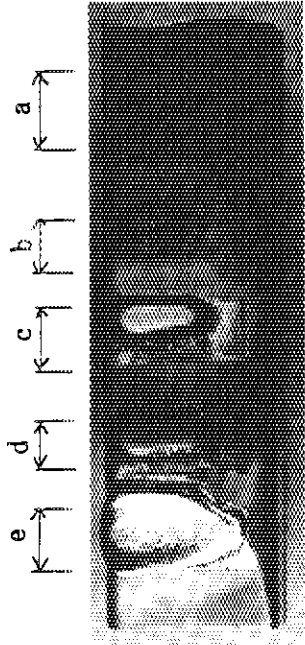
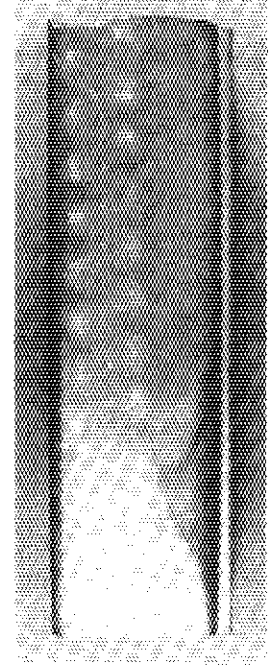
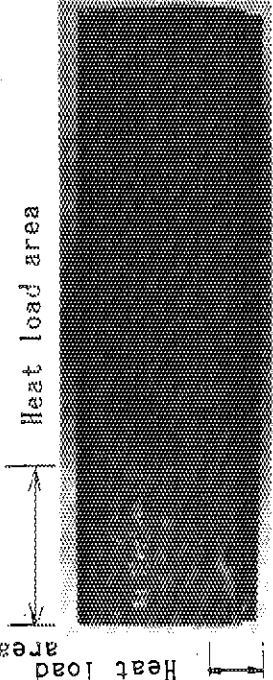
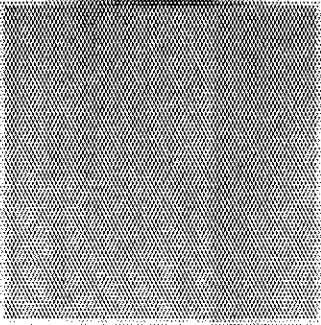
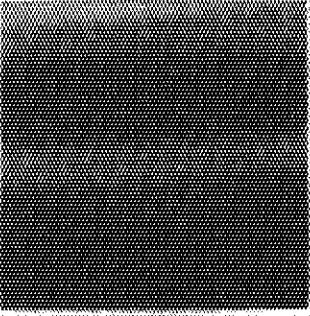
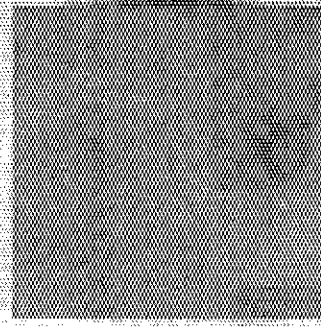
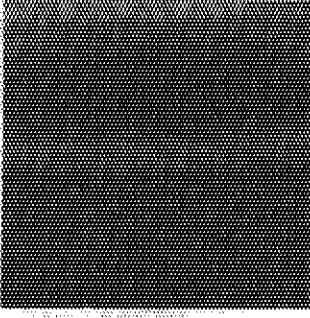
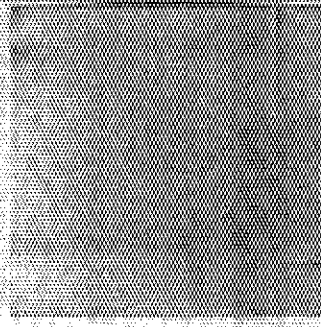
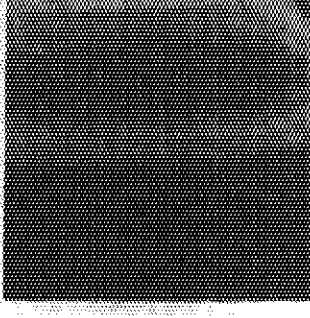
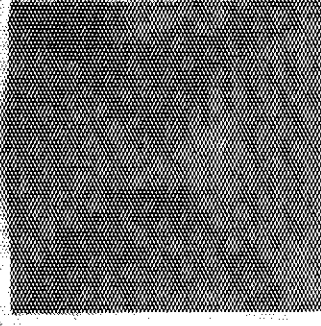

Heat load	Before heat load	After heat load
$\text{kW/cm}^2 \text{ sec}$ a : 1.1 x 2.5 b : 1.1 x 4 c : 1.1 x 11 d : 1.1 x 21 e : 2.2 x 6		
$\text{kW/cm}^2 \text{ sec}$ a : 1.1 x 21 b : 2.2 x 2.5 c : 2.2 x 4 d : 2.2 x 6 e : 2.2 x 11		
$340\text{W/cm}^2 \times 3\text{sec}$ $\times 1000\text{cycles}$		

Table 3-2 Surface damage of graphite

Material	Before heat load	After heat load (1.1kw/cm ² × 31sec)
IG-11		
AXF-5Q		
ATJ		
PYROID		

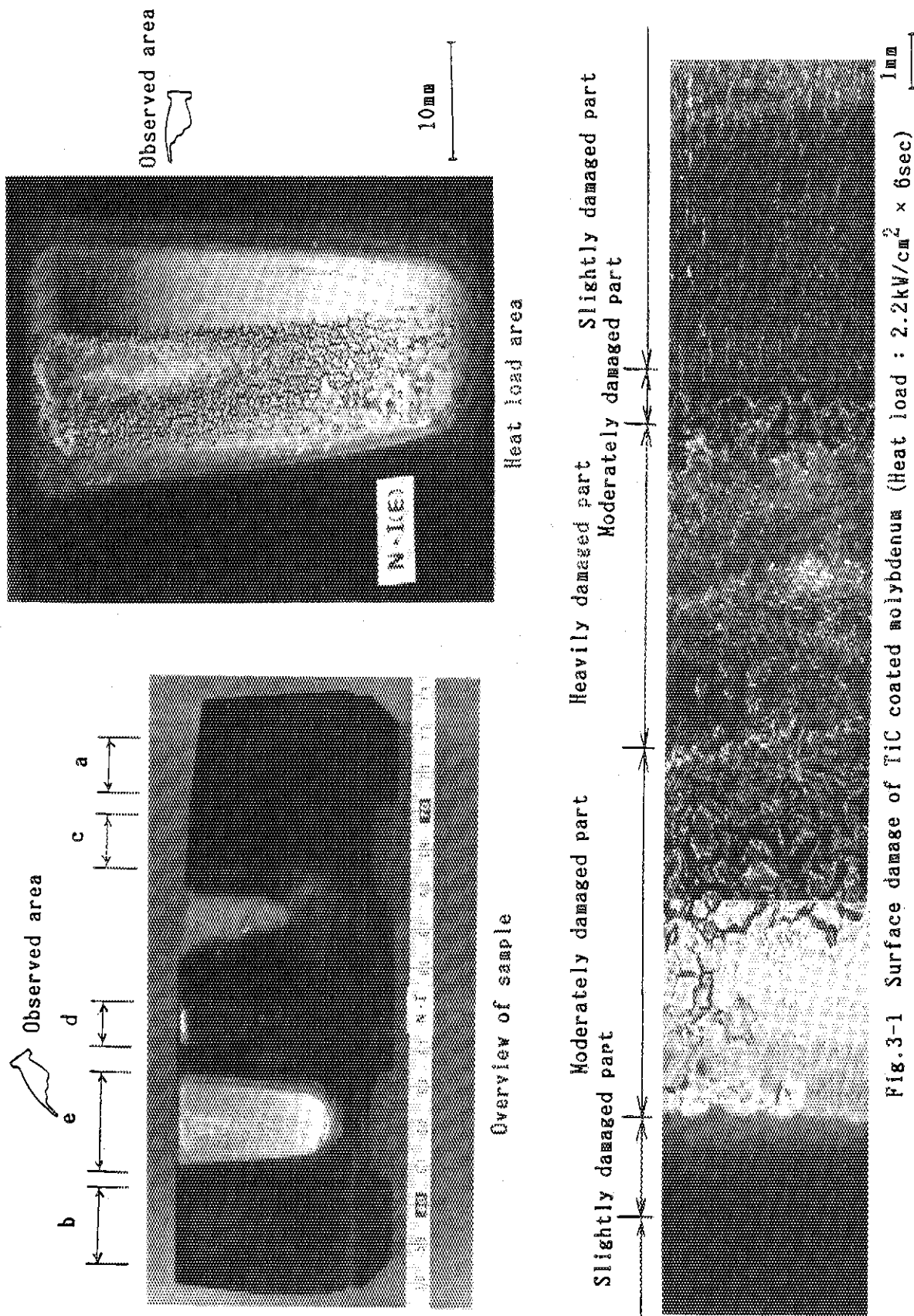


Fig.3-1 Surface damage of TiC coated molybdenum (Heat load : $2.2\text{kW}/\text{cm}^2 \times 6\text{sec}$)

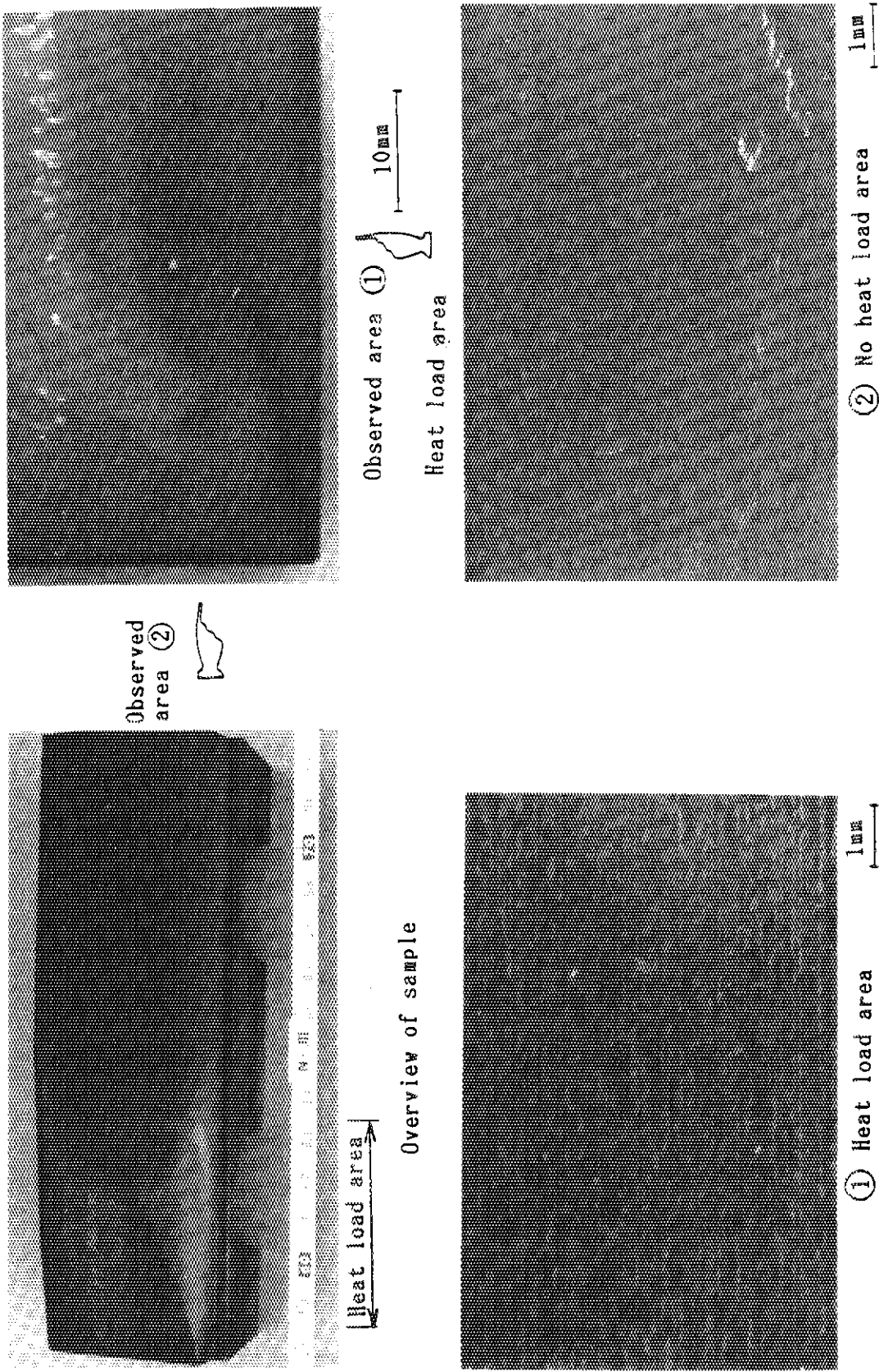


Fig.3-2 Surface damage of TiC coated molybdenum (Heat load : $340\text{W}/\text{cm}^2 \times 3\text{sec} \times 1000\text{cycle}$)

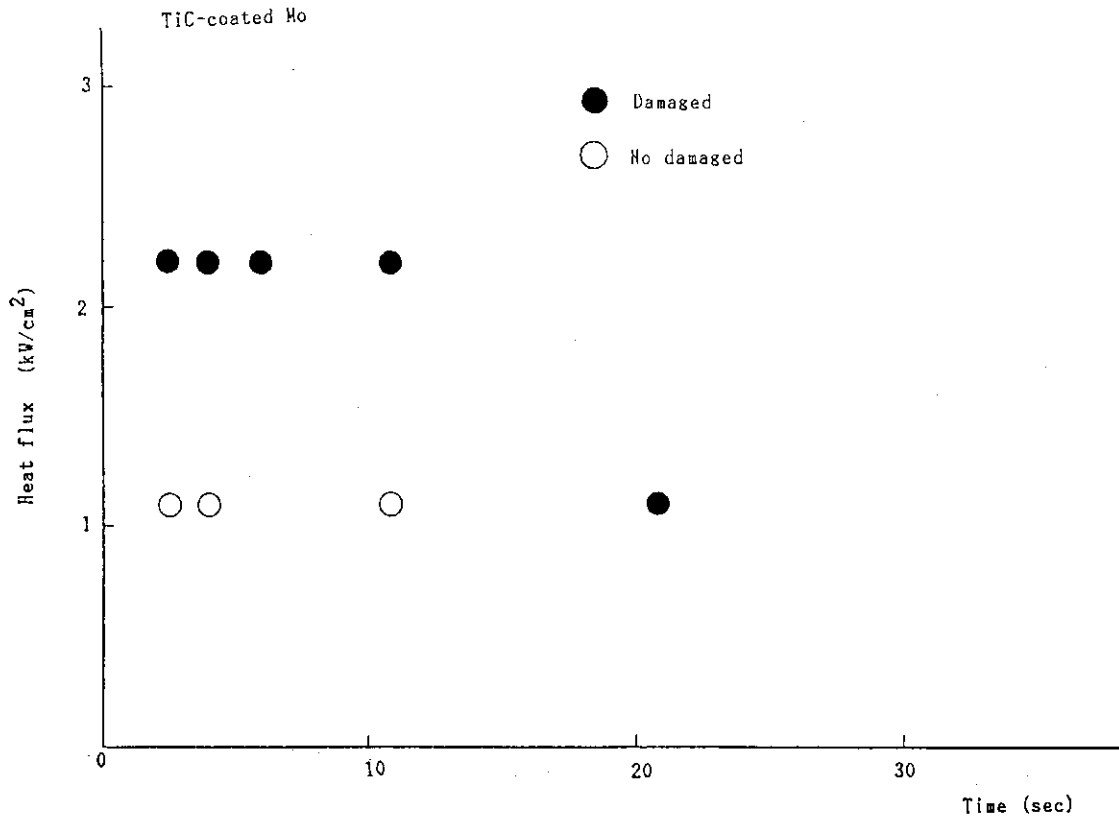


Fig. 3-3 Heat load conditions inducing surface damage of TiC coated molybdenum

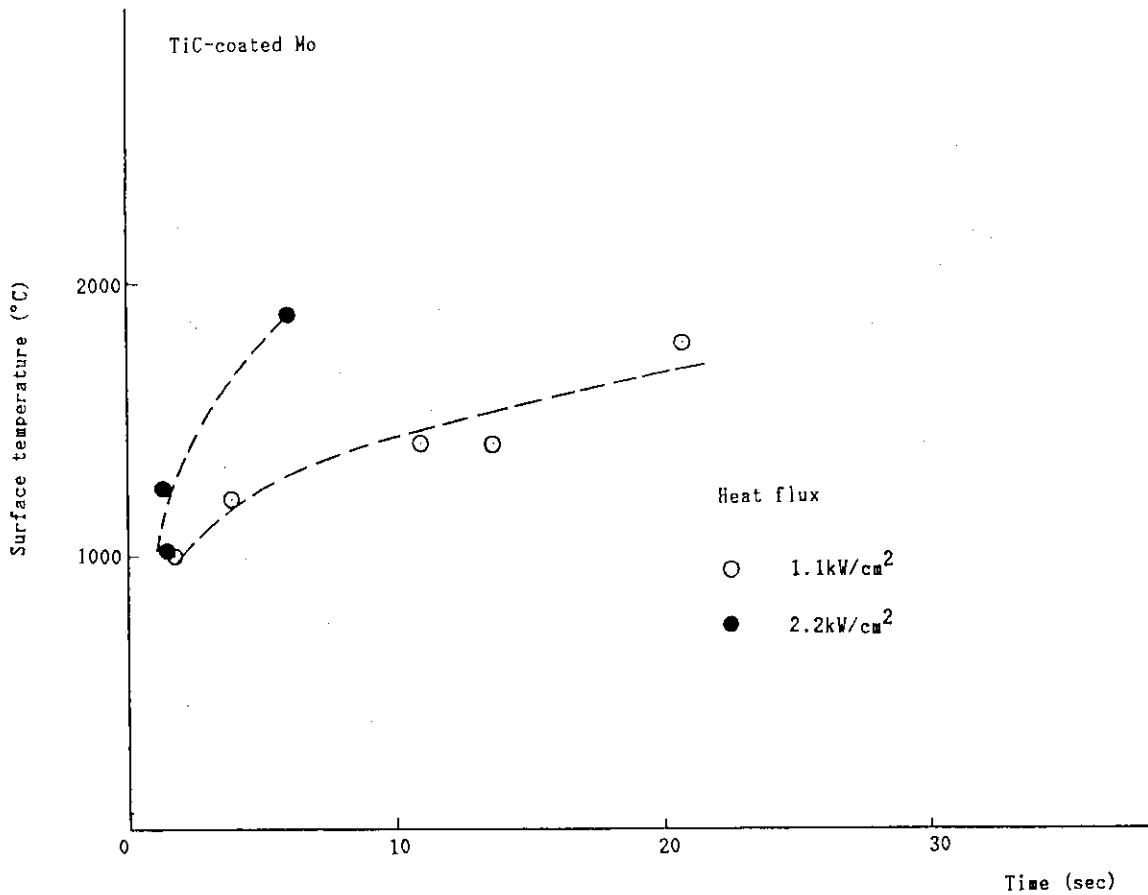


Fig. 3-4 Surface temperature change of TiC coated molybdenum

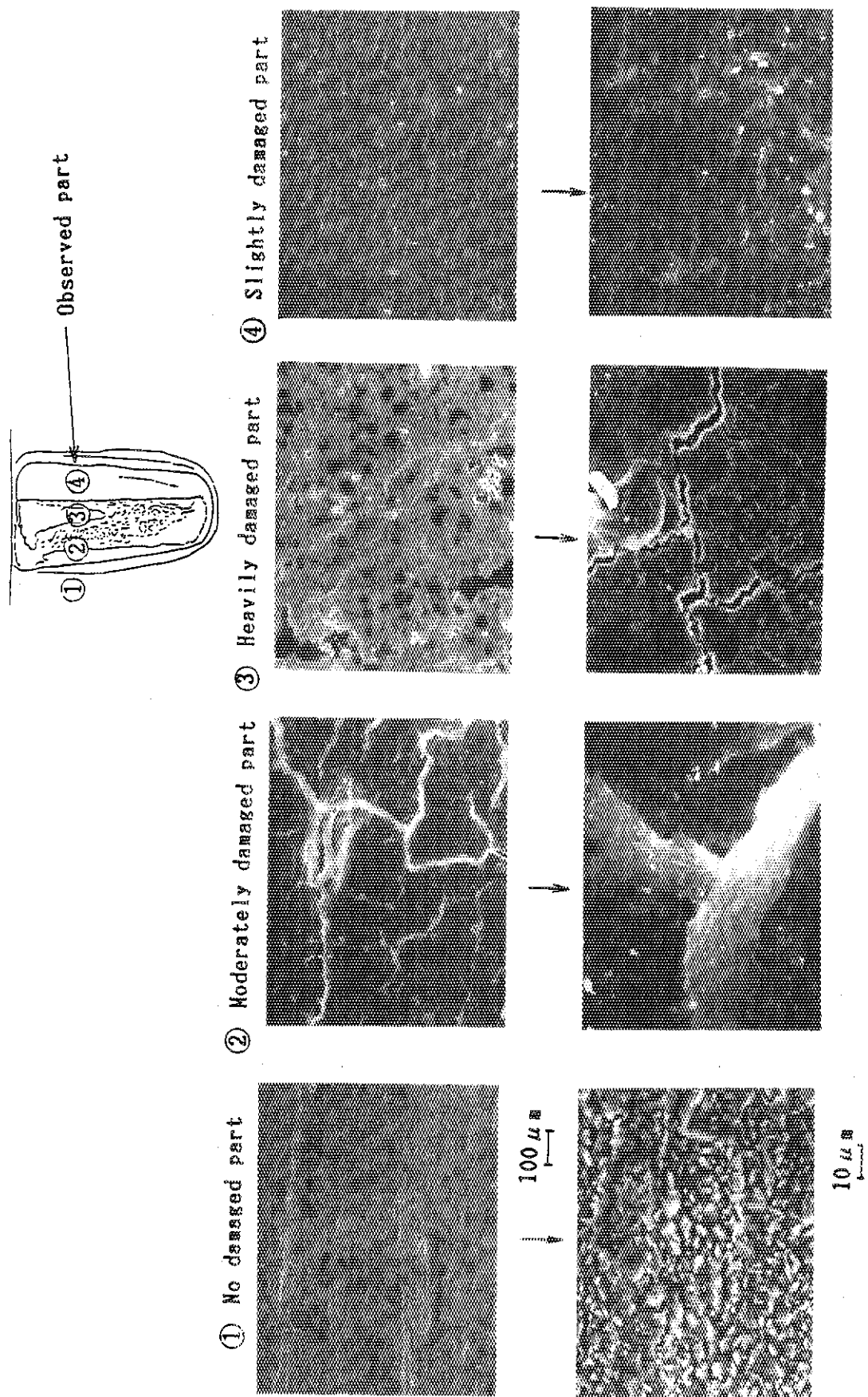


Fig. 3-5 Surface of TiC coated molybdenum observed with SEM (Heat load : $2.2 \text{ kW/cm}^2 \times 6 \text{ sec}$)

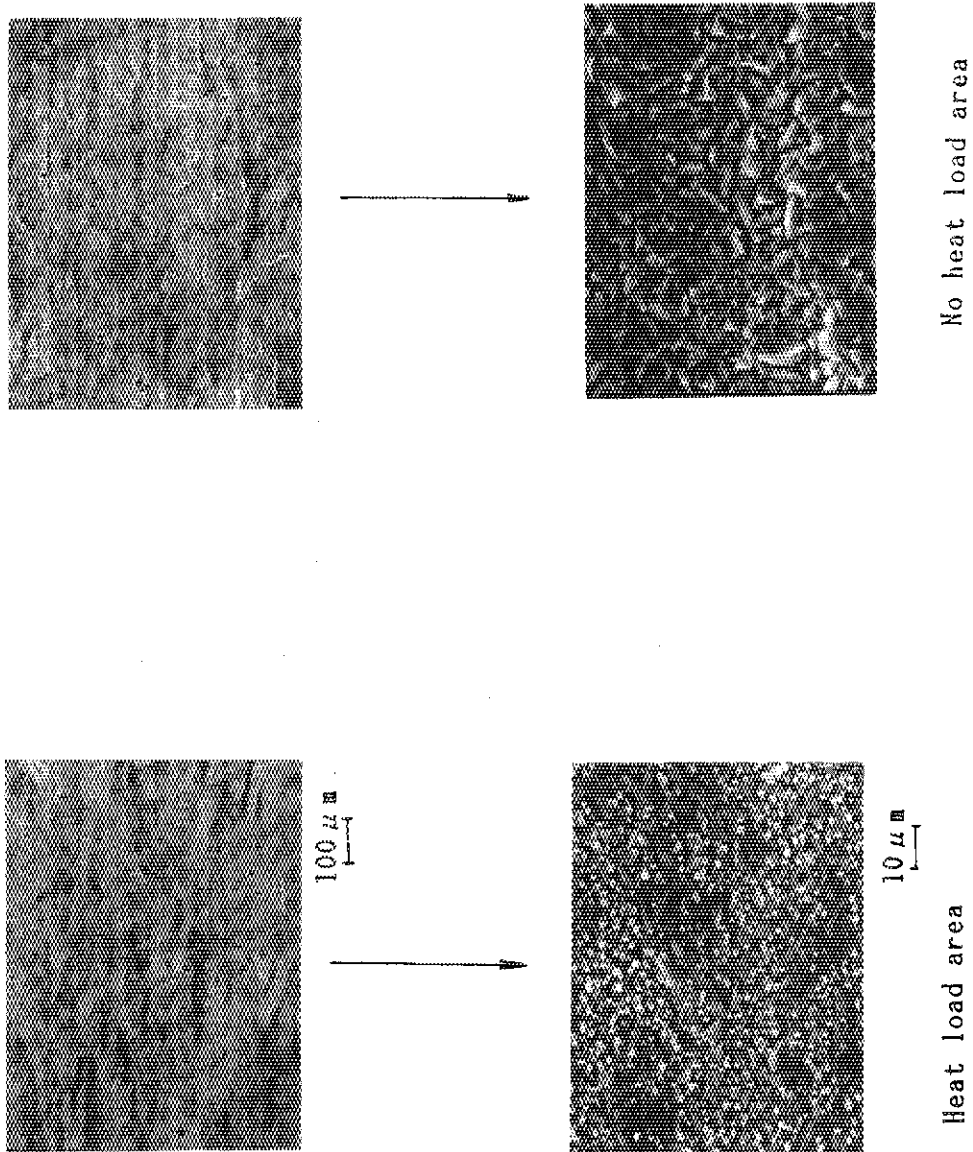


Fig. 3-6 Surface of TiC coated molybdenum observed with SEM (Heat load : $340\text{W}/\text{cm}^2 \times 3\text{sec} \times 1000\text{cycle}$)

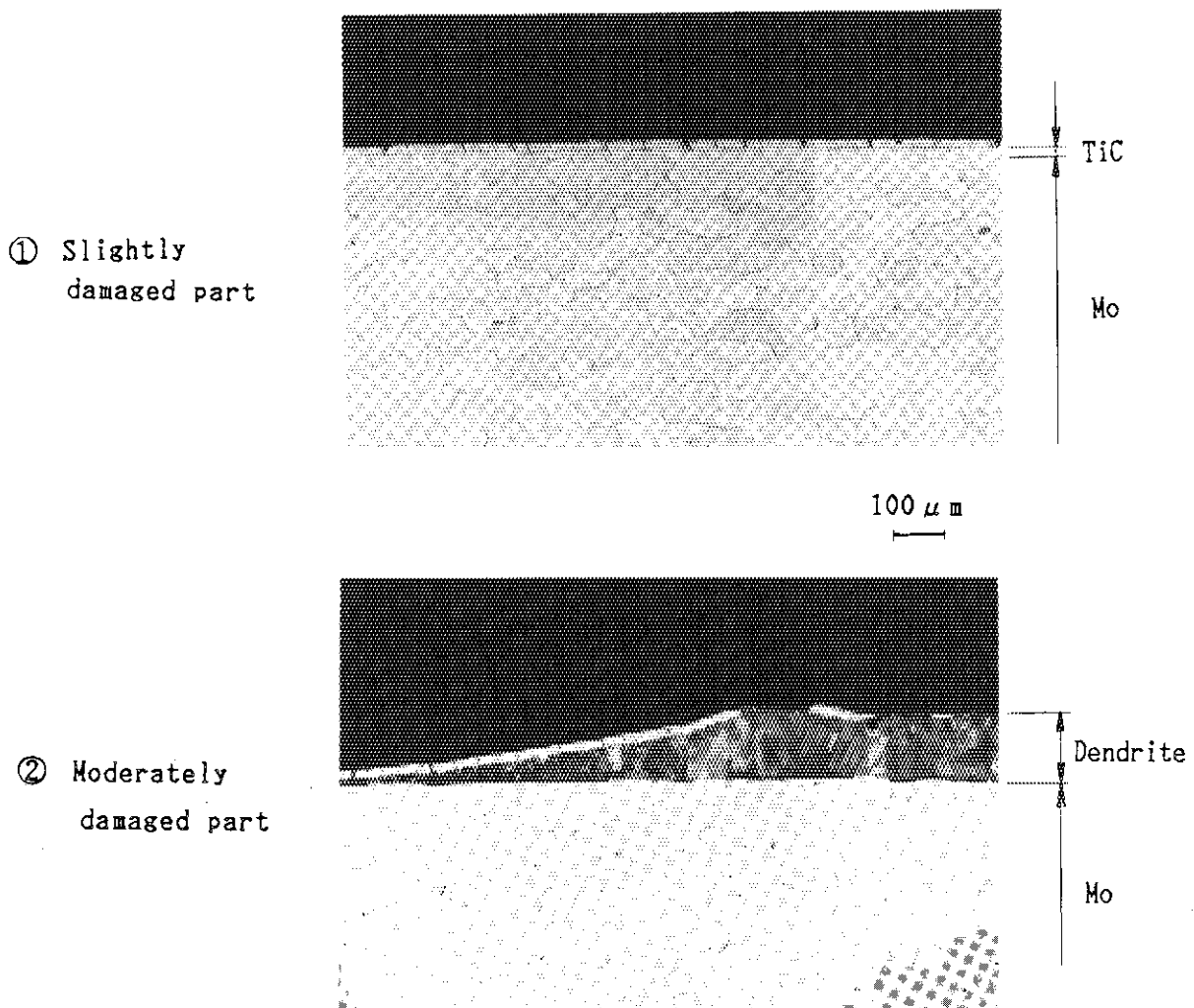
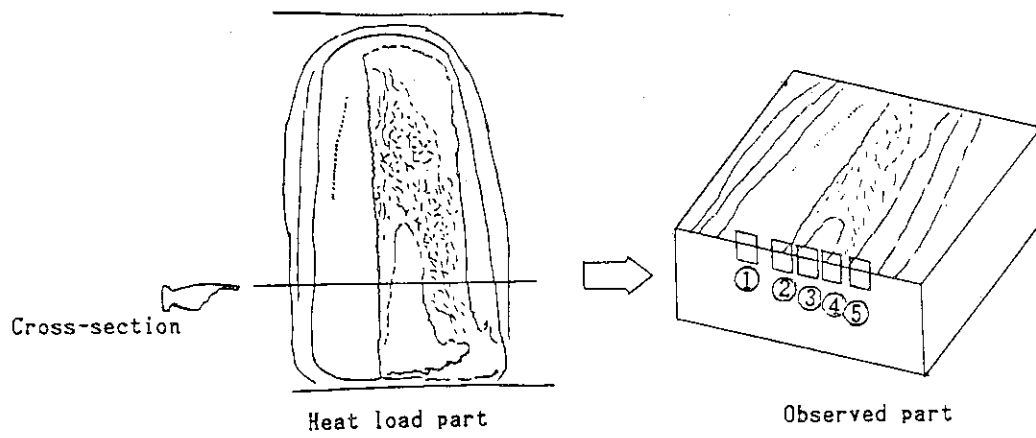


Fig. 3-7(a) Cross section of TiC coated molybdenum
(Heat load : $2.2\text{kW/cm}^2 \times 6\text{sec}$)

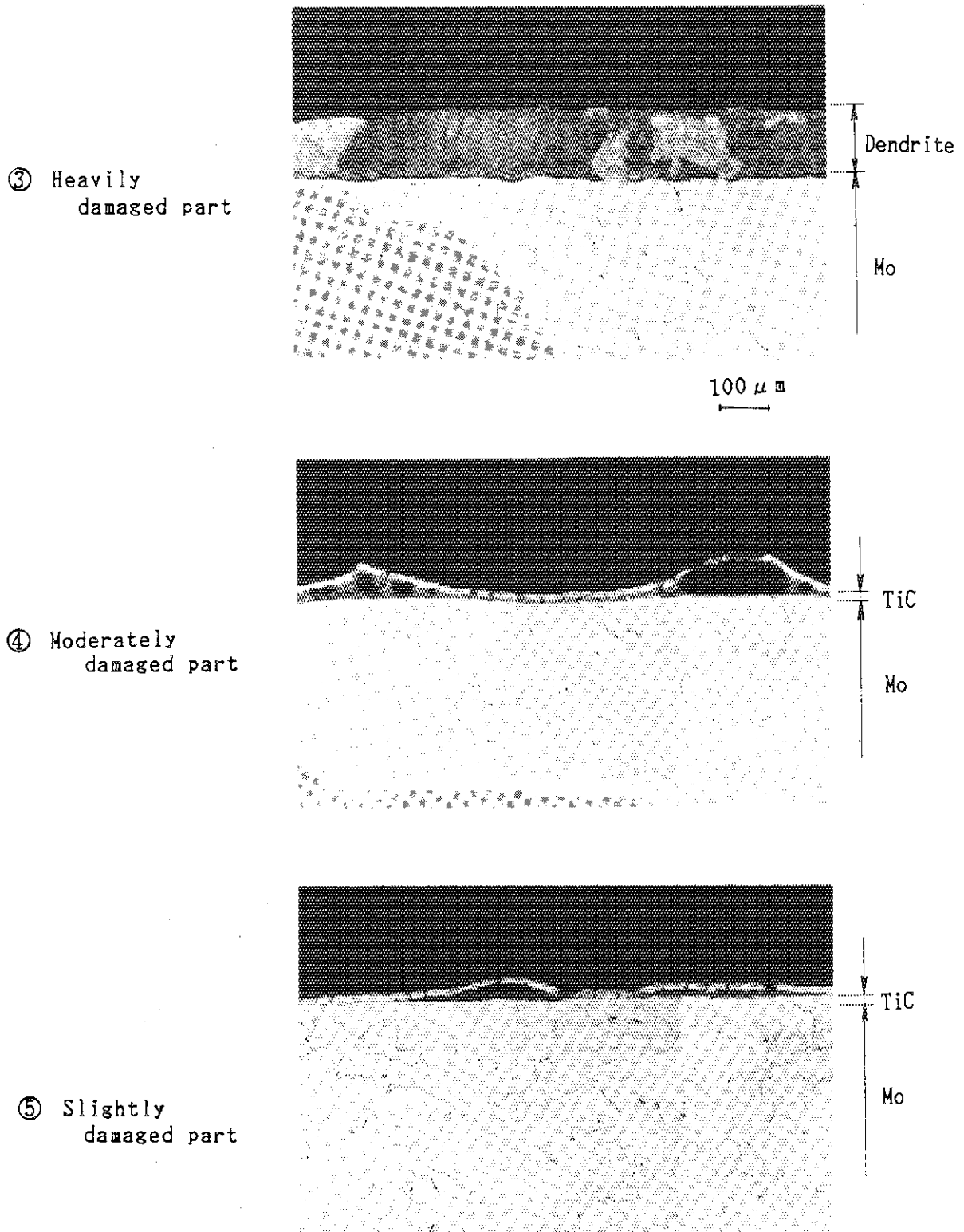


Fig. 3-7(b) Cross section of TiC coated molybdenum
 (Heat load : $2.2\text{kW/cm}^2 \times 6\text{sec}$)

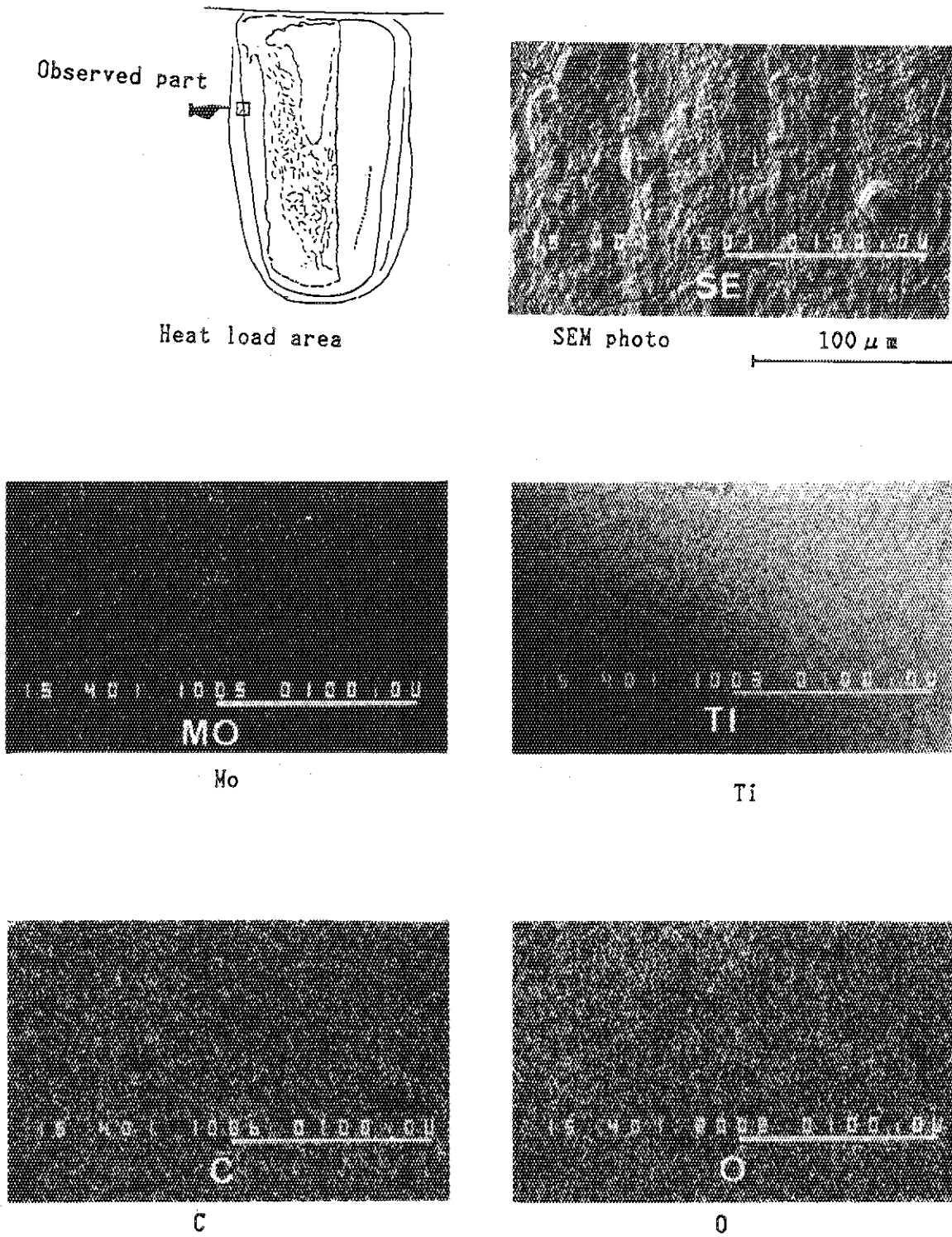


Fig. 3-8 EPMA surface analysis of slightly damaged part of
TiC coated molybdenum (Heat load : $2.2\text{kW/cm}^2 \times 6\text{sec}$)

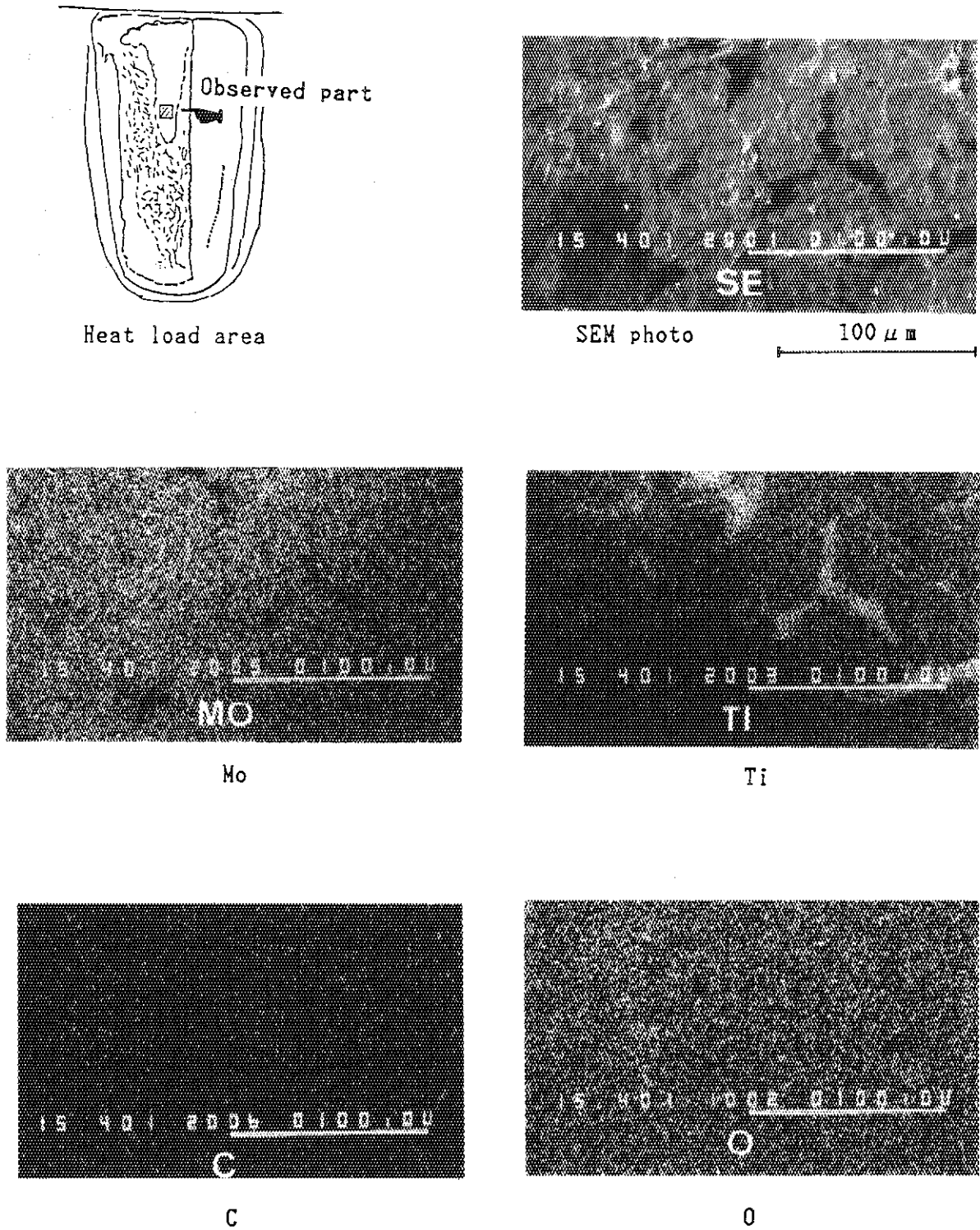


Fig. 3-9 EPMA surface analysis of heavily damaged part of
TiC coated molybdenum (Heat load : $2.2\text{kW}/\text{cm}^2 \times 6\text{sec}$)

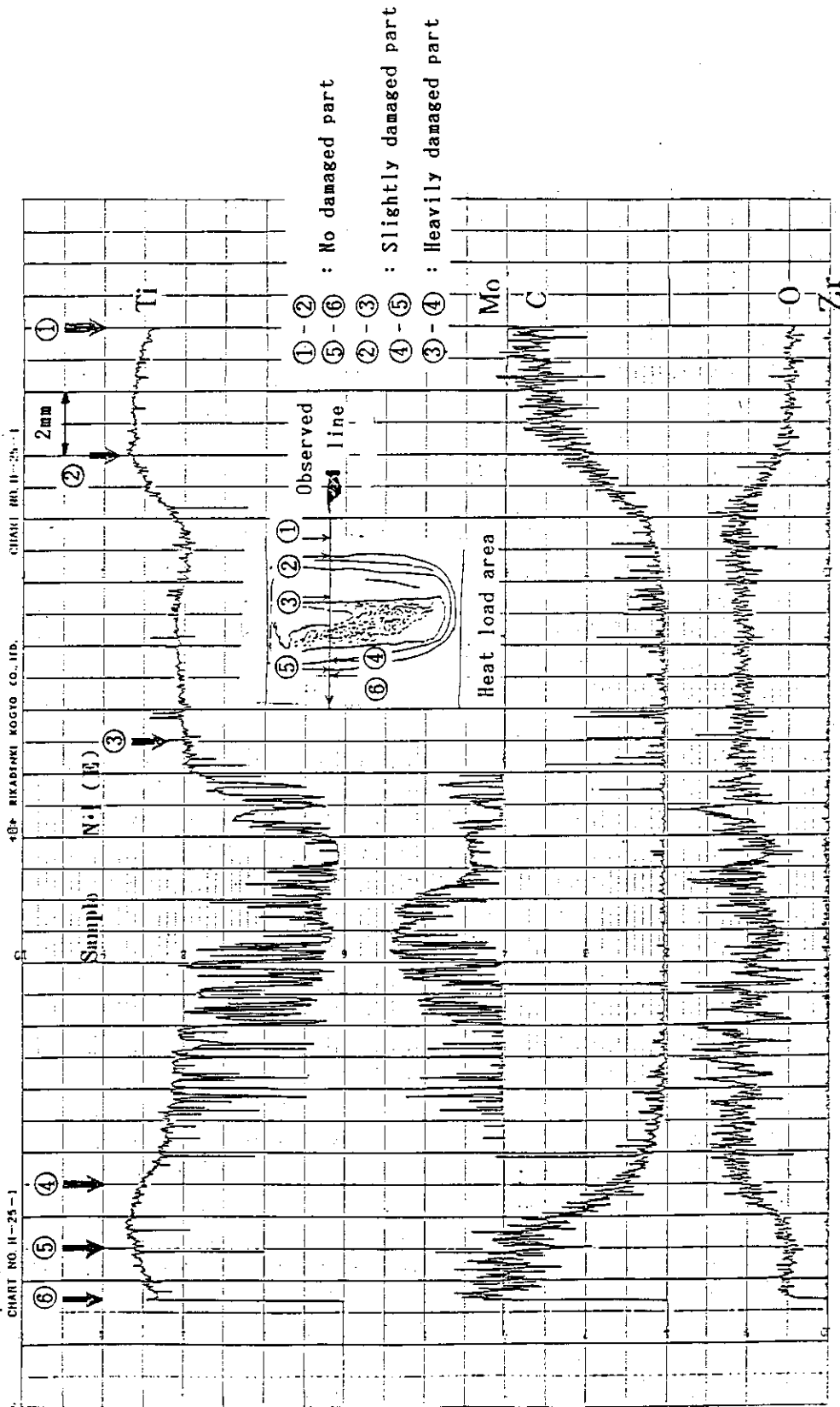


Fig. 3-10 EPMA surface line analysis of TiC coated molybdenum
 (Heat load : $2.2\text{kW}/\text{cm}^2 \times 6\text{sec}$)

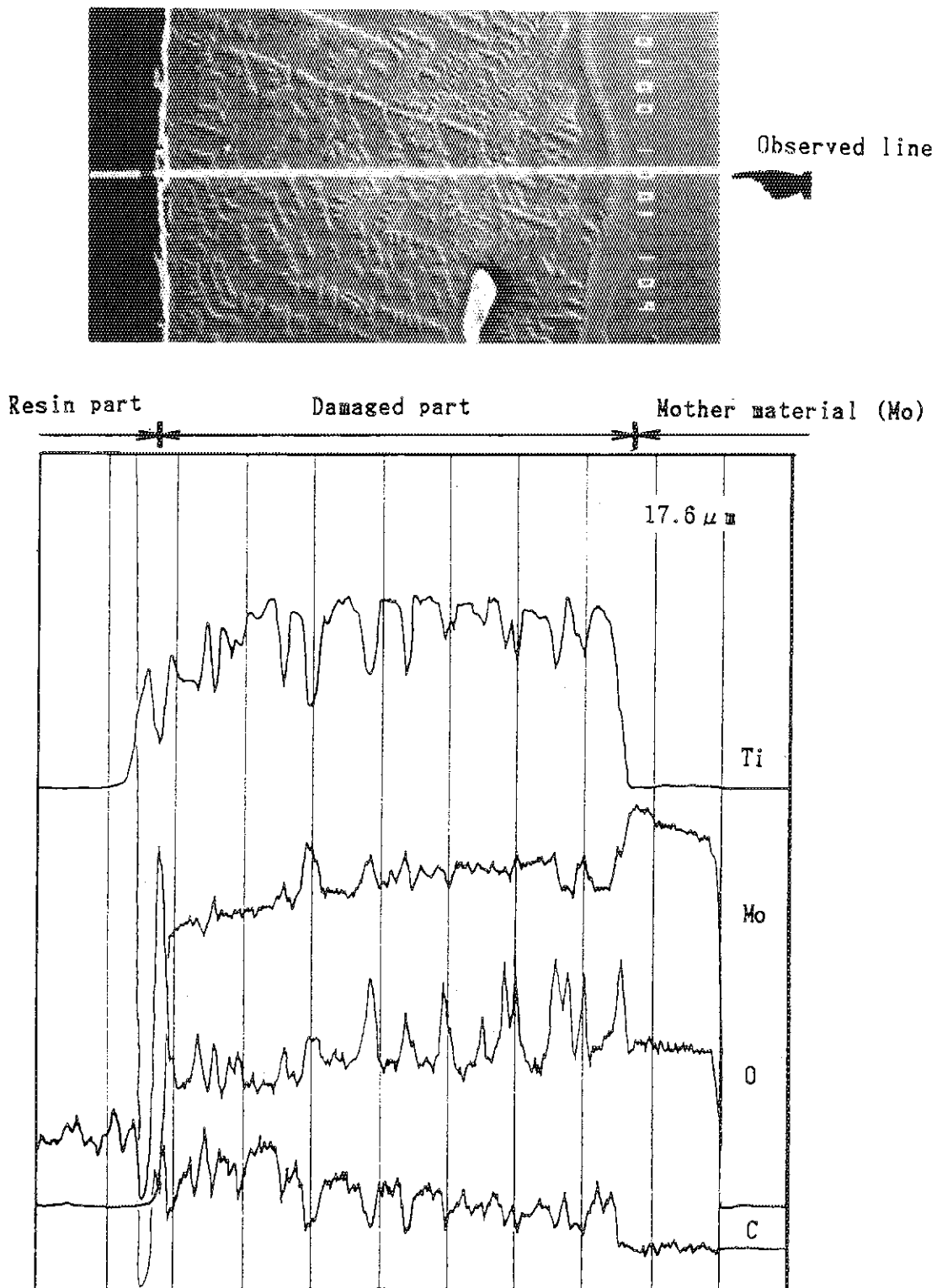


Fig. 3-11 EPMA cross-section line analysis of heavily damaged part of TiC coated molybdenum (Heat load : $2.2\text{kW/cm}^2 \times 6\text{sec}$)

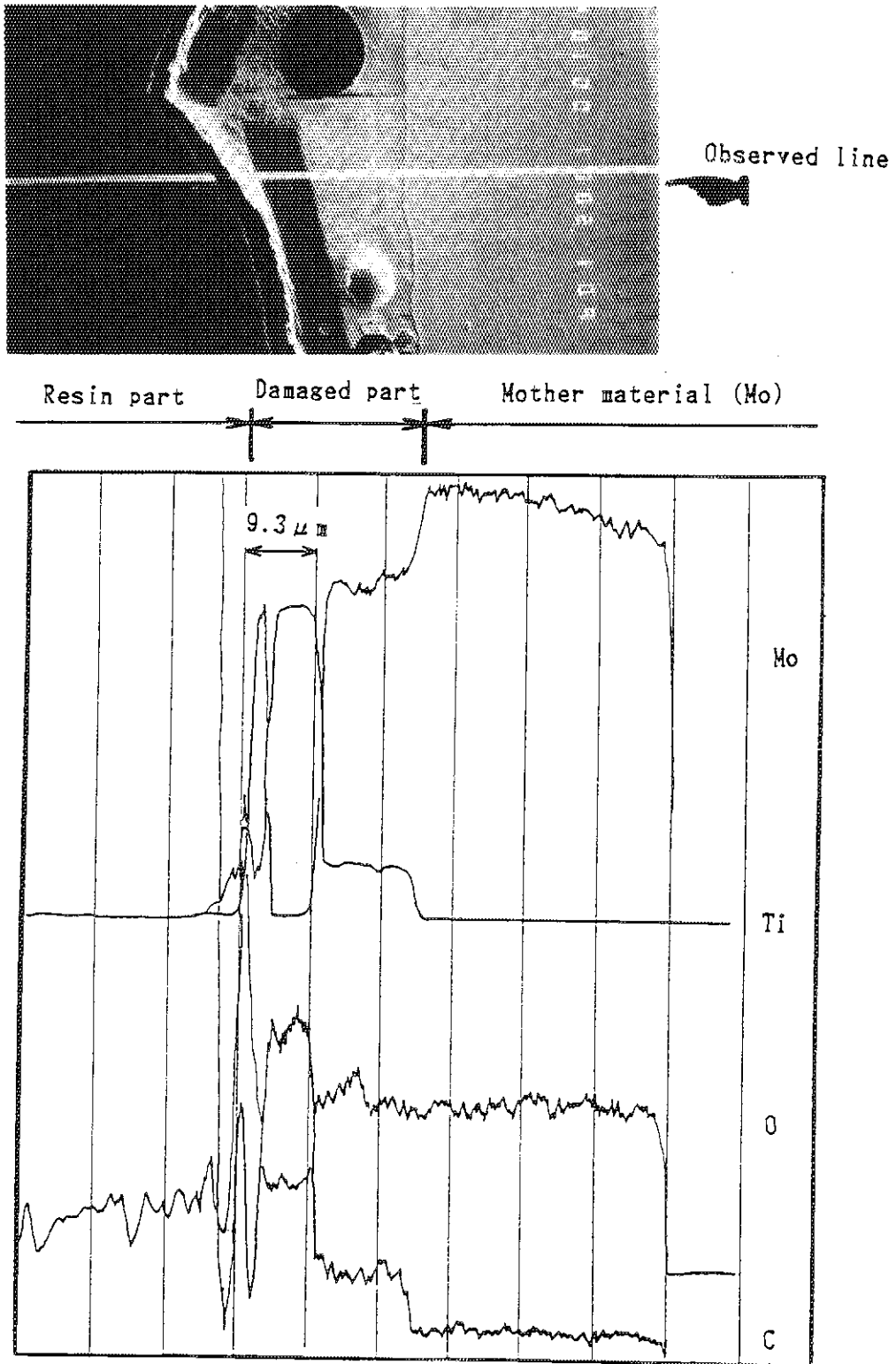
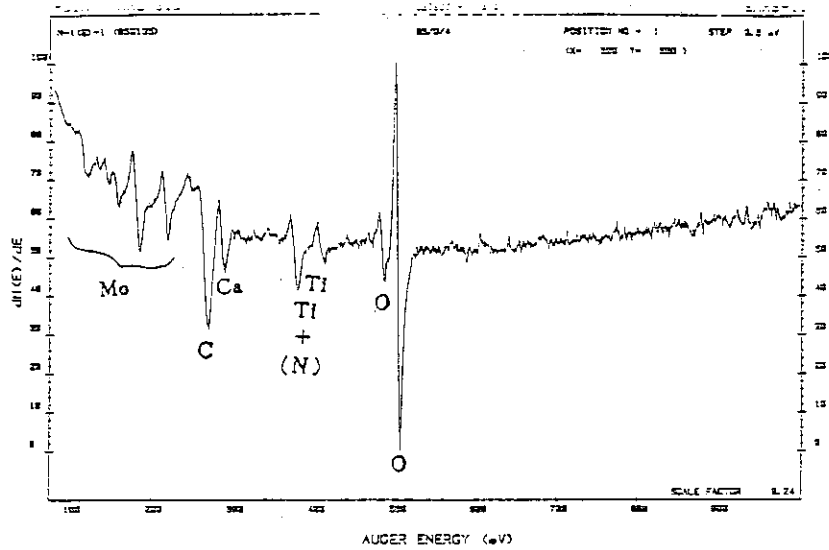
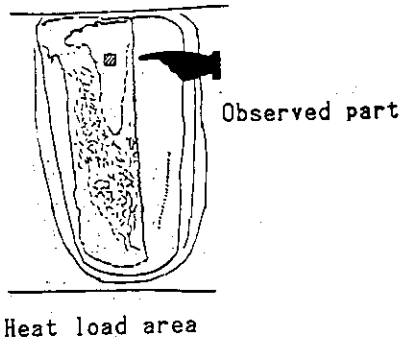
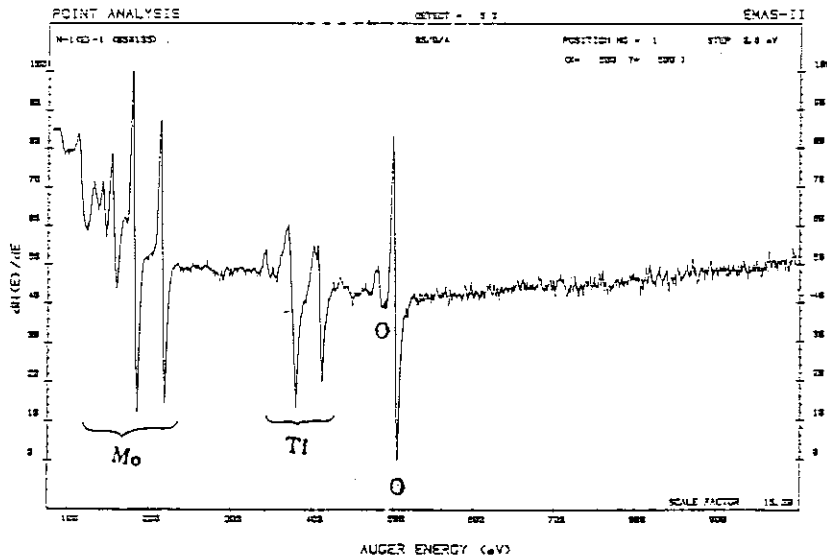


Fig. 3-12 EPMA cross-section line analysis of moderately damaged part of TiC coated molybdenum (Heat load : $2.2\text{kW}/\text{cm}^2 \times 6\text{sec}$)

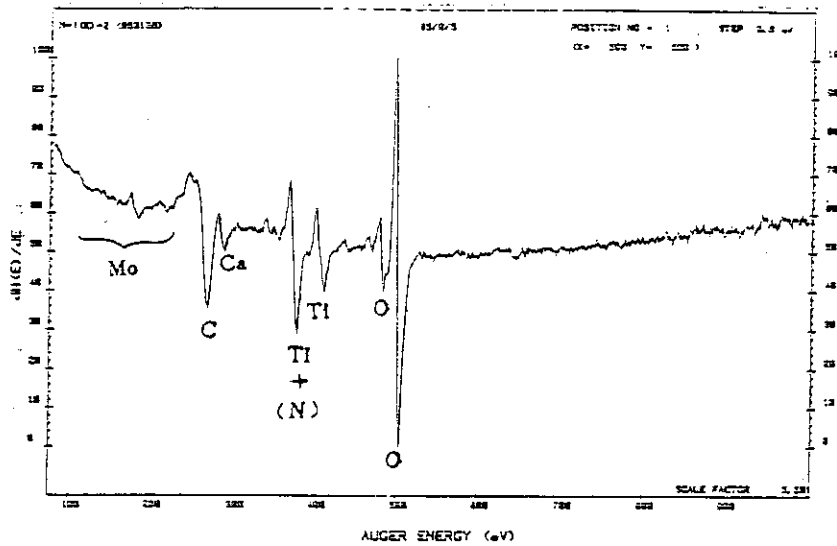
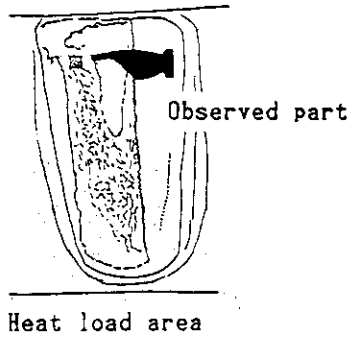


Before Ar ion etching

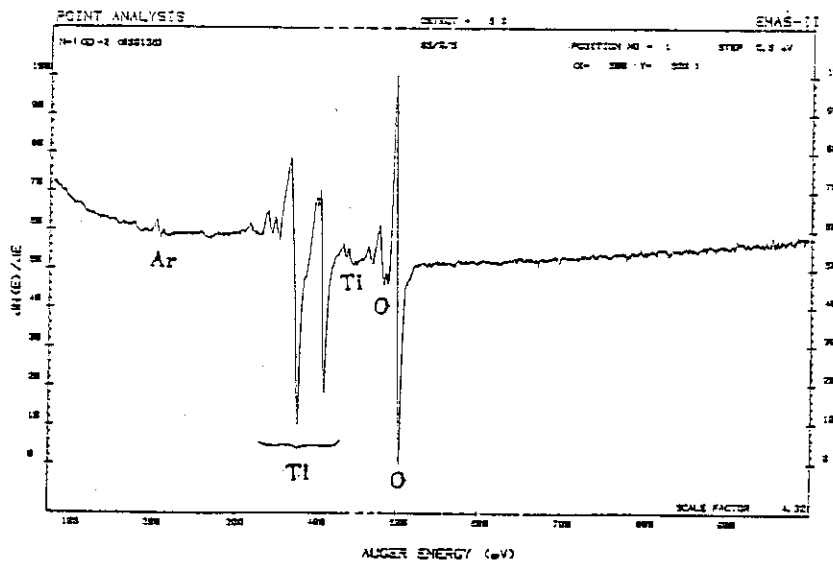


After Ar ion etching for 60min

Fig. 3-13 AES spectrum of heavily damaged part of
TiC coated molybdenum (Heat load : $2.2\text{kW/cm}^2 \times 6\text{sec}$)

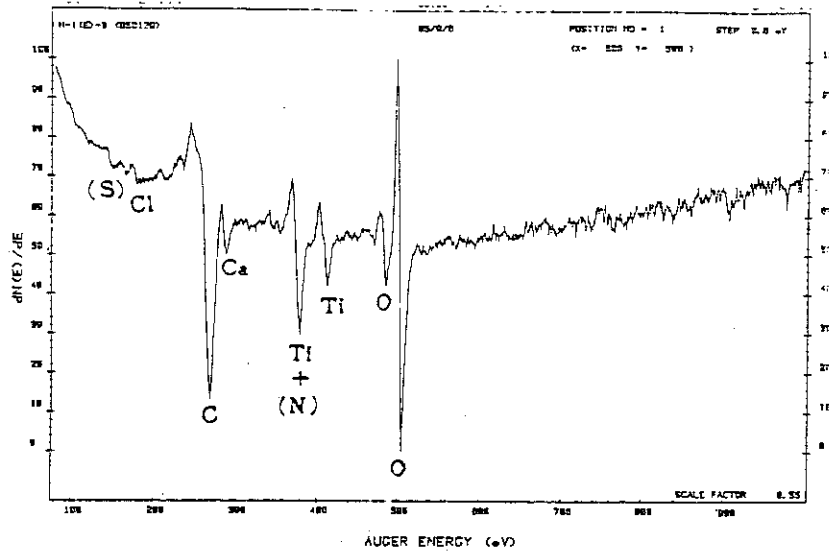
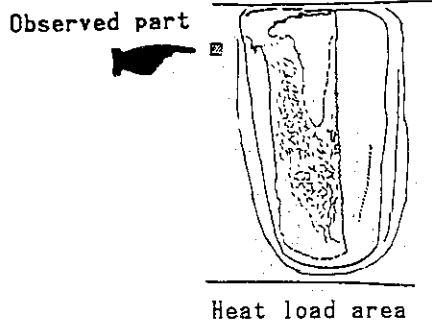


Before Ar ion etching

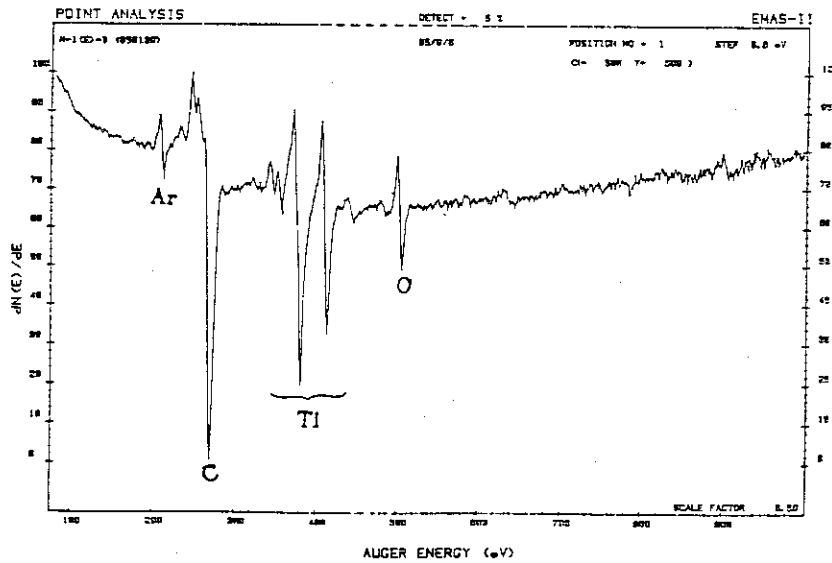


After Ar ion etching for 60min

Fig. 3-14 AES spectrum of moderately damaged part of
TiC coated molybdenum (Heat load : $2.2\text{kW/cm}^2 \times 6\text{sec}$)



Before Ar ion etching



After Ar ion etching for 60min

Fig. 3-15 AES spectrum of no damaged part of
TiC coated molybdenum (Heat load : $2.2\text{kW/cm}^2 \times 6\text{sec}$)

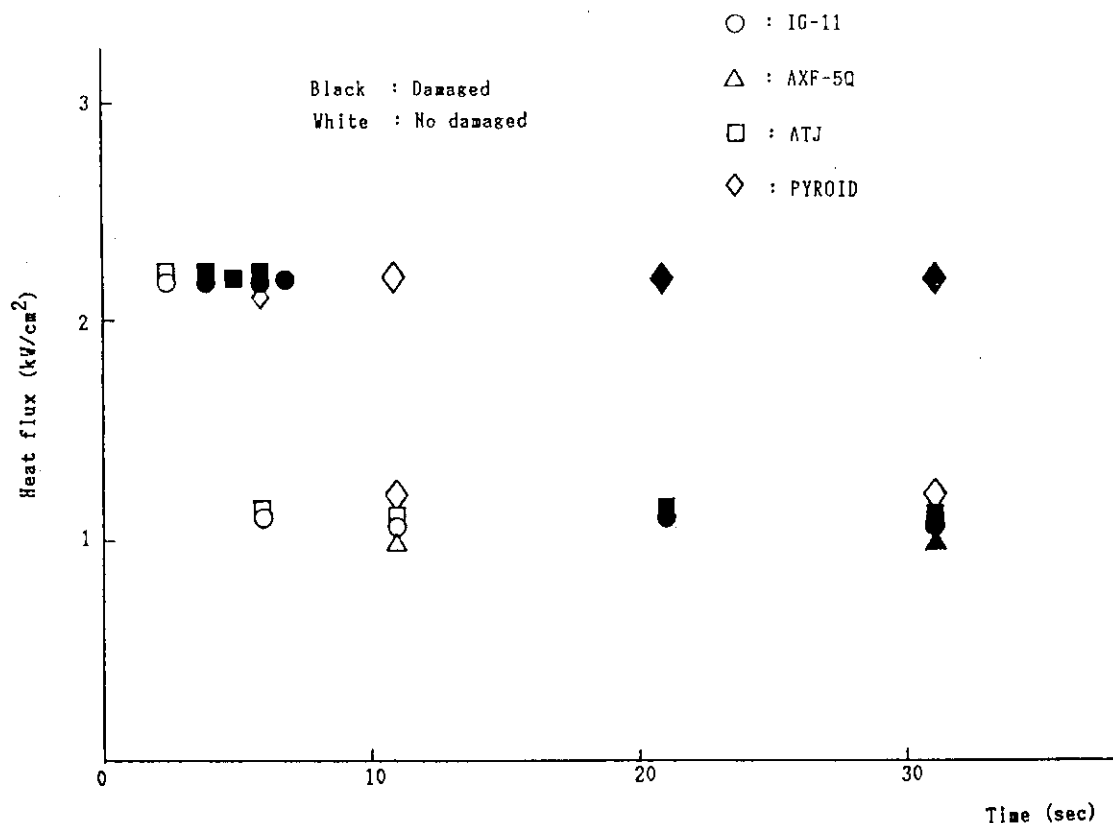


Fig. 3-16 Heat load conditions inducing surface damage of graphite

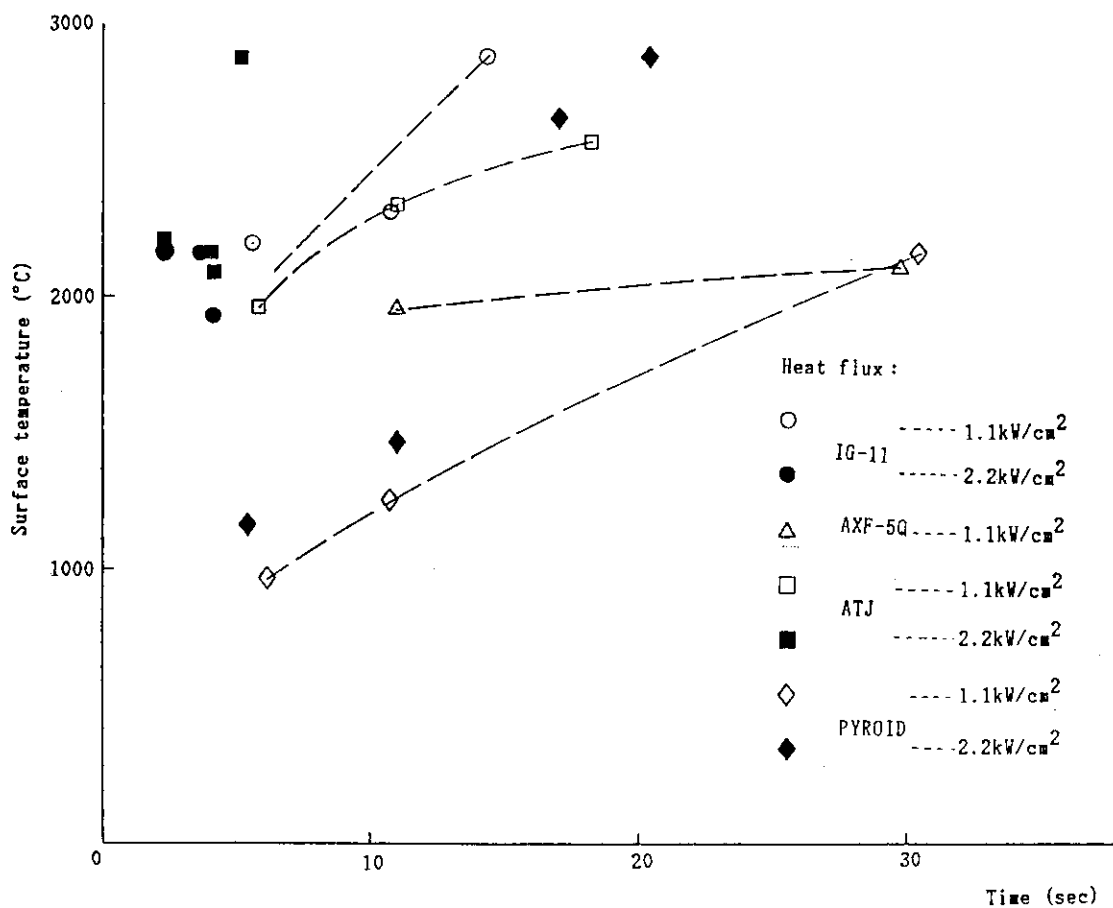


Fig. 3-17 Surface temperature change of graphite

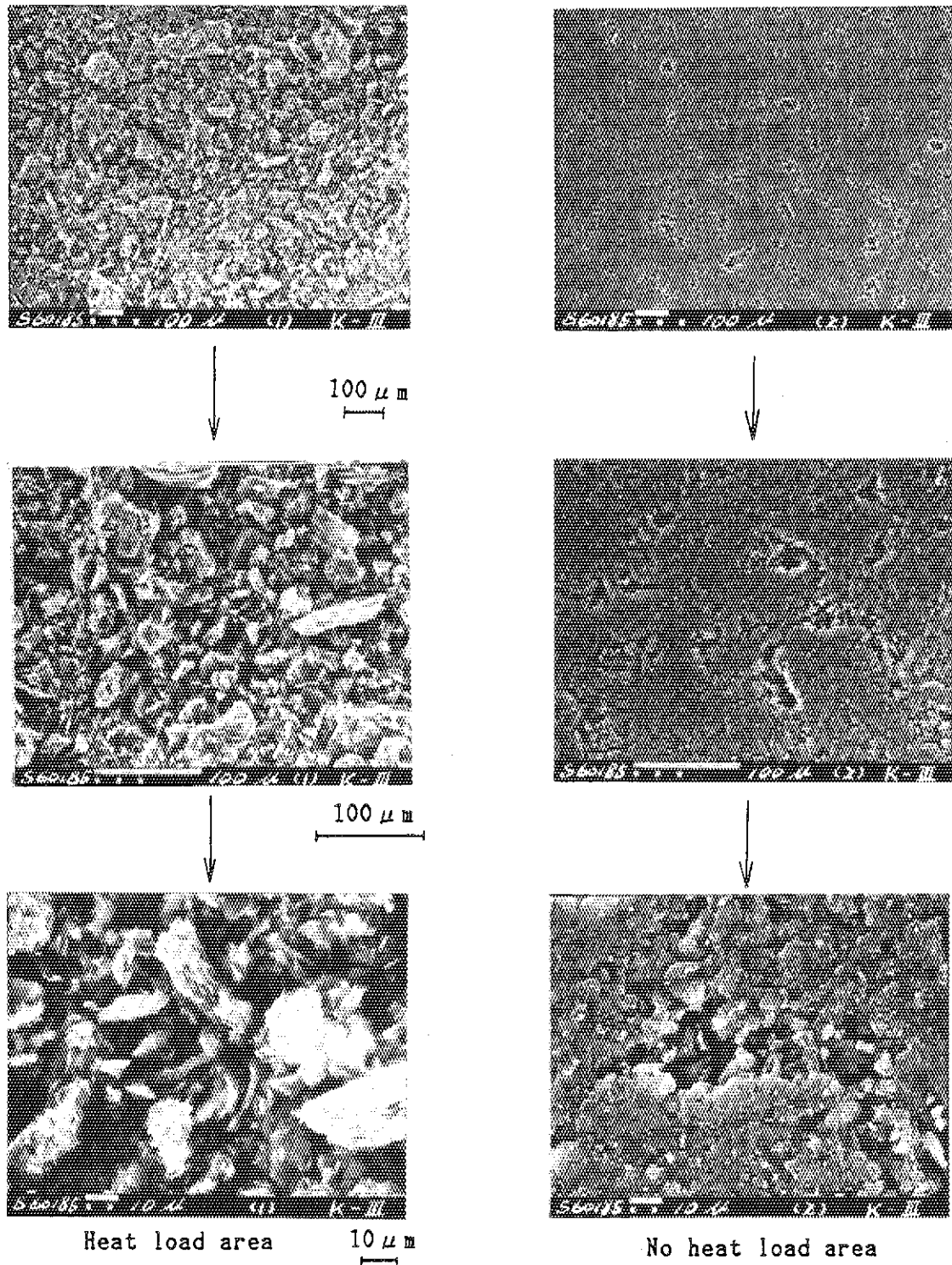


Fig. 3-18 Surface of IG-11 observed with SEM
(Heat flux : $1.1\text{kW}/\text{cm}^2 \times 31\text{sec}$)

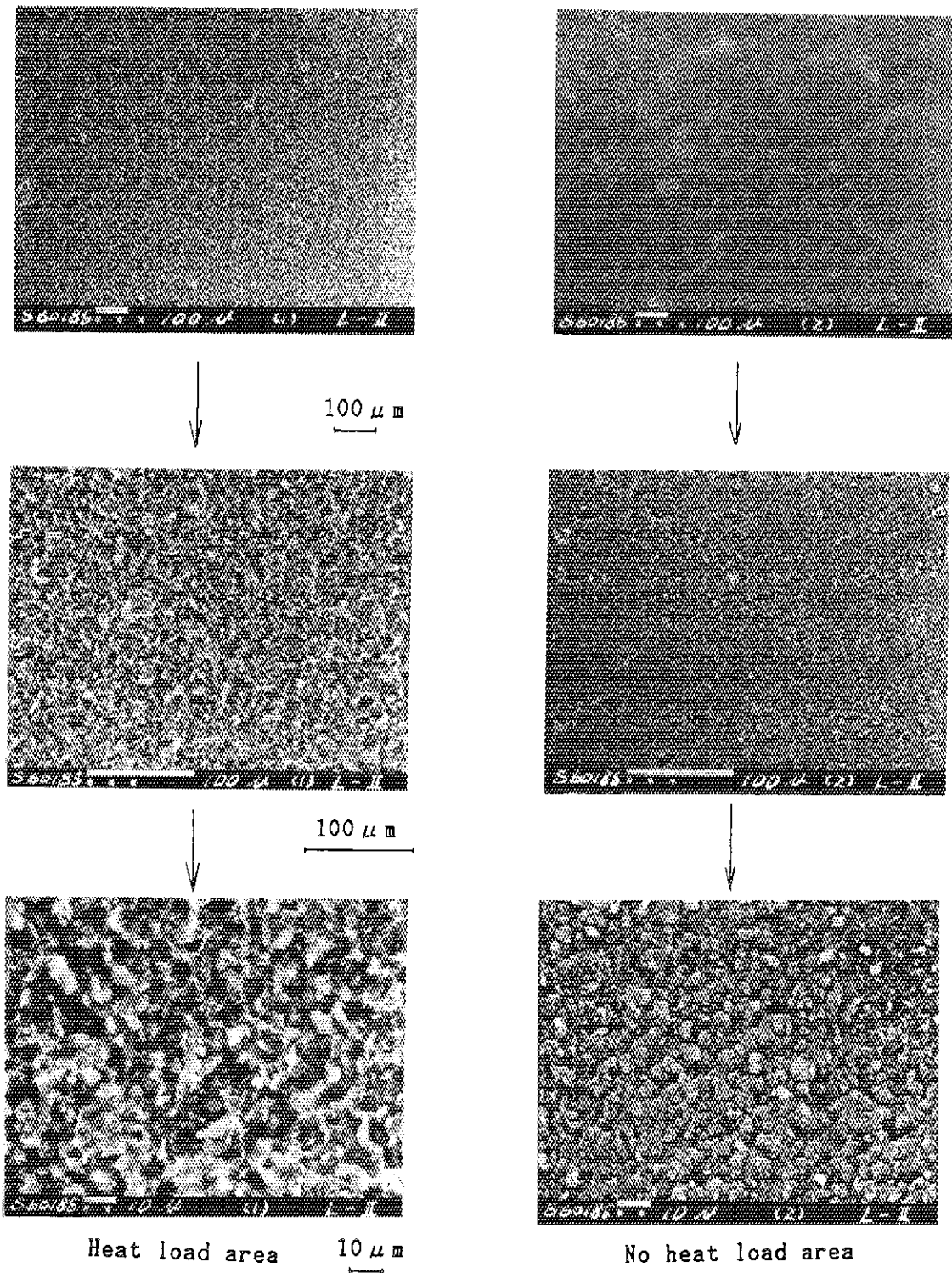


Fig. 3-19 Surface of AXF-5Q observed with SEM
(Heat flux : $1.1\text{kW/cm}^2 \times 31\text{sec}$)

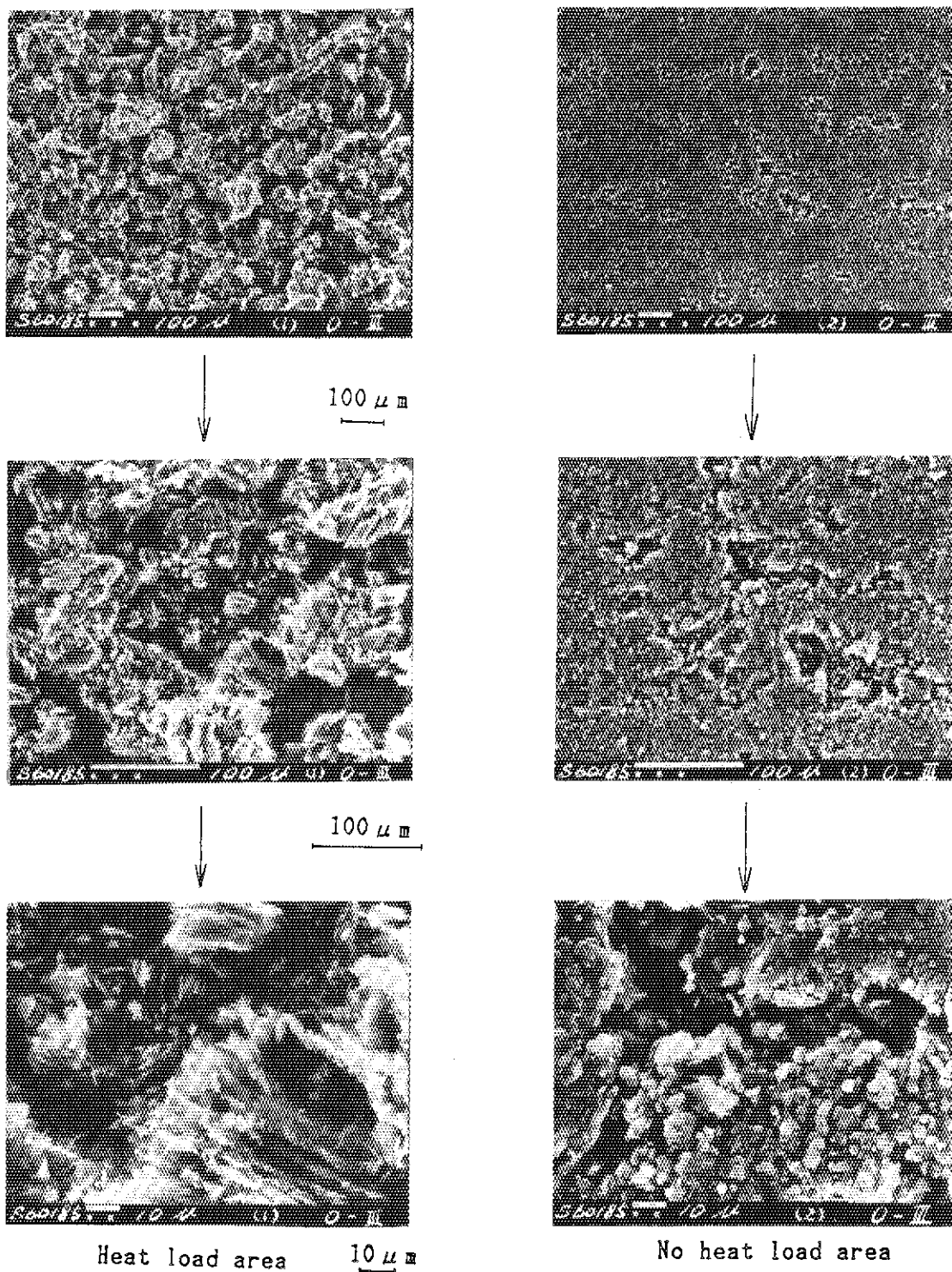


Fig. 3-20 Surface of ATJ observed with SEM
(Heat flux : $1.1\text{kW/cm}^2 \times 31\text{sec}$)

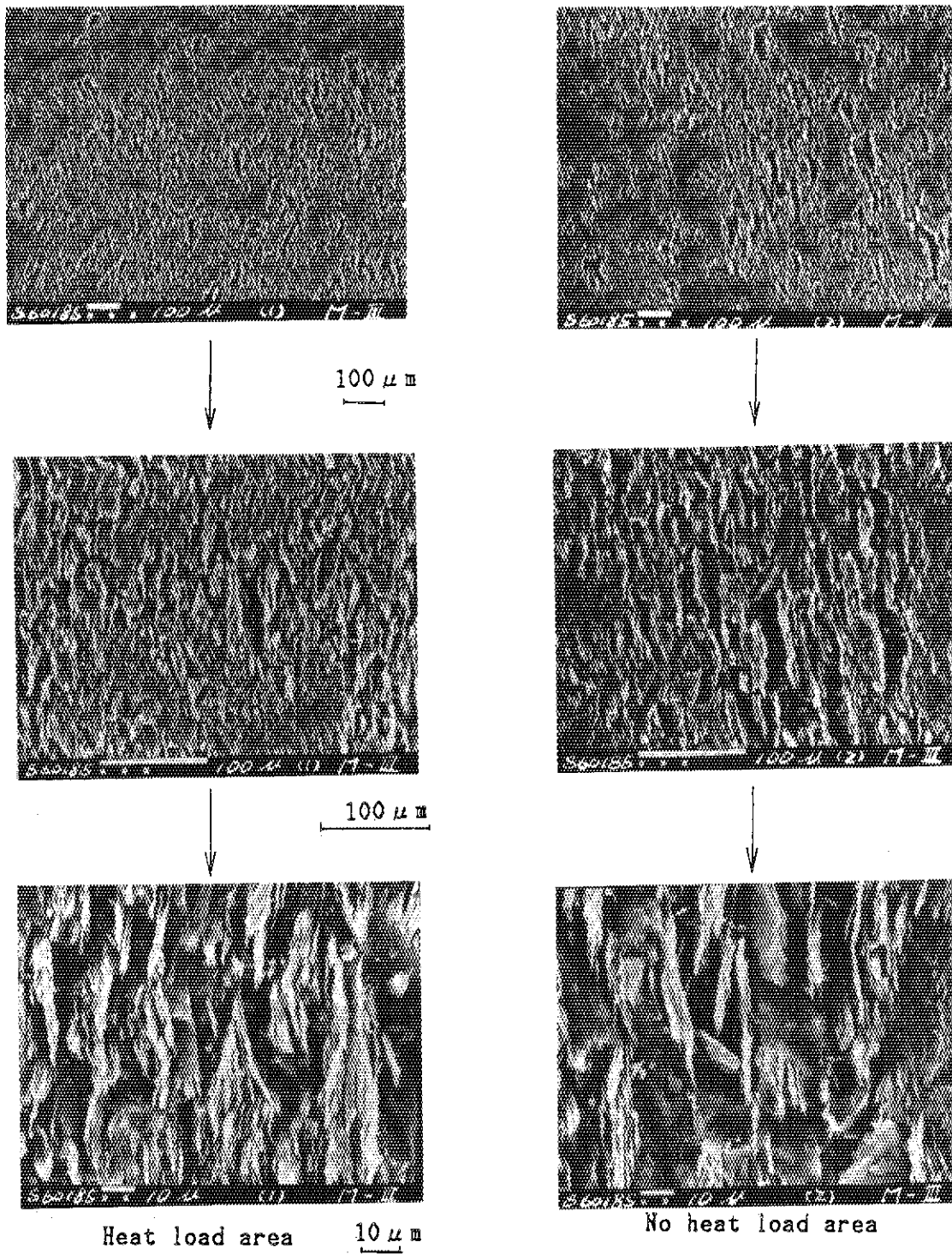
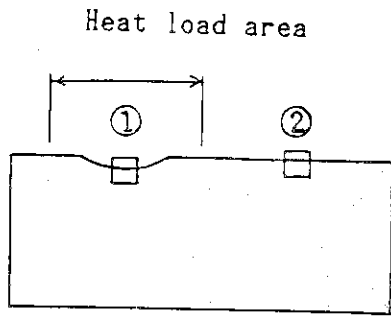
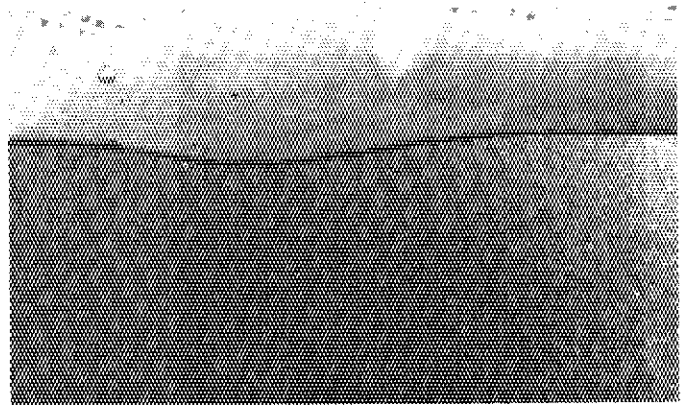


Fig. 3-21 Surface of PYROID observed with SEM
(Heat flux : $1.1\text{kW/cm}^2 \times 31\text{sec}$)

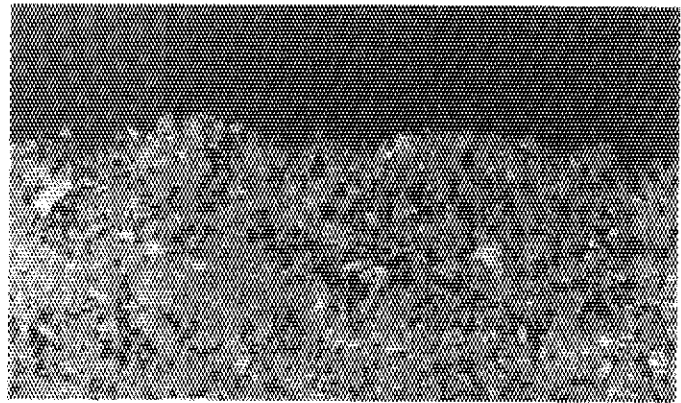


Observed part



Overview of heat load area 1mm

① Heat load part



100 μm

② No heat load part

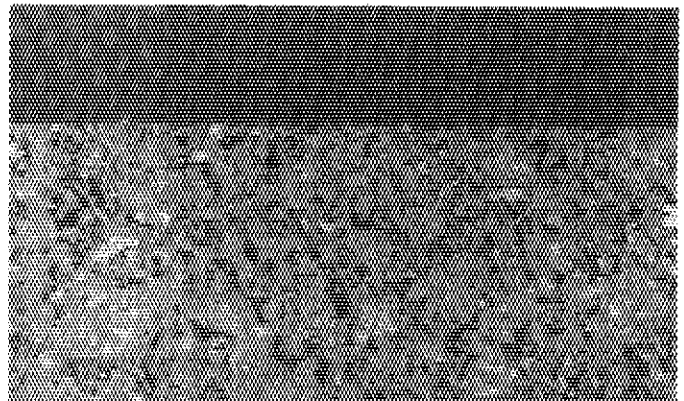
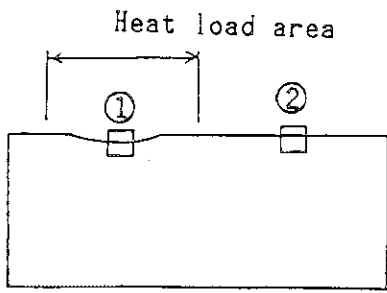
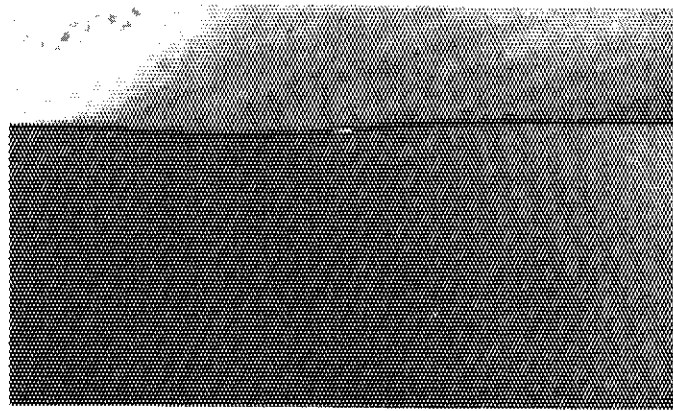


Fig. 3-22 Cross section of IG-11 (Heat flux : $1.1\text{kW/cm}^2 \times 31\text{sec}$)

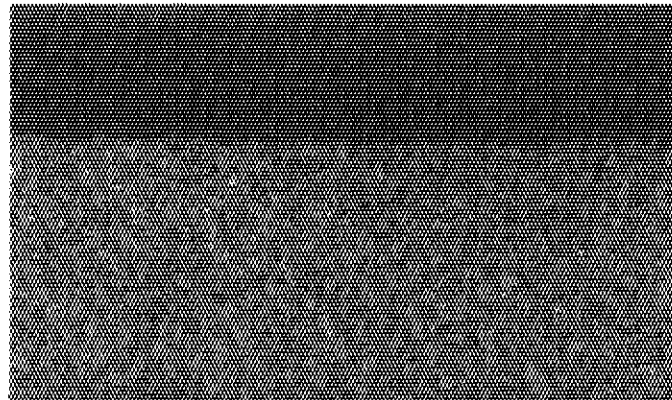


Observed part



Overview of heat load area 1mm

① Heat load part



100 μm

② No heat load part

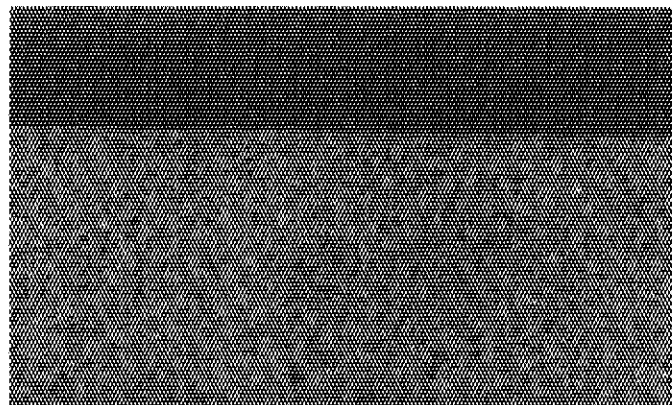
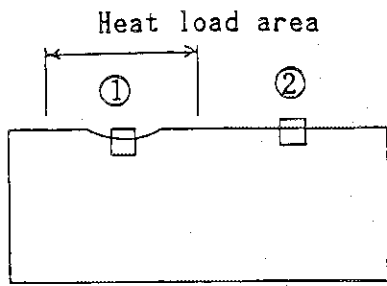
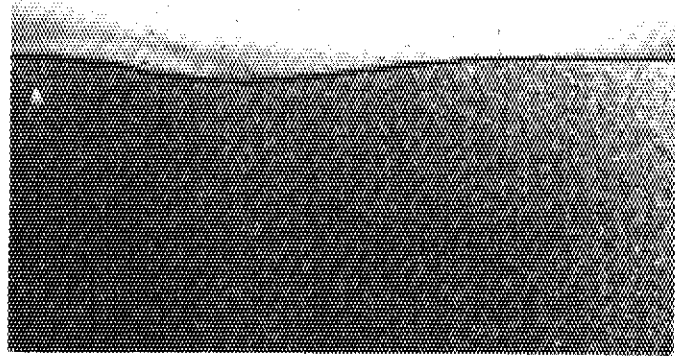


Fig. 3-23 Cross section of AXF-5Q (Heat flux : $1.1\text{kW/cm}^2 \times 31\text{sec}$)



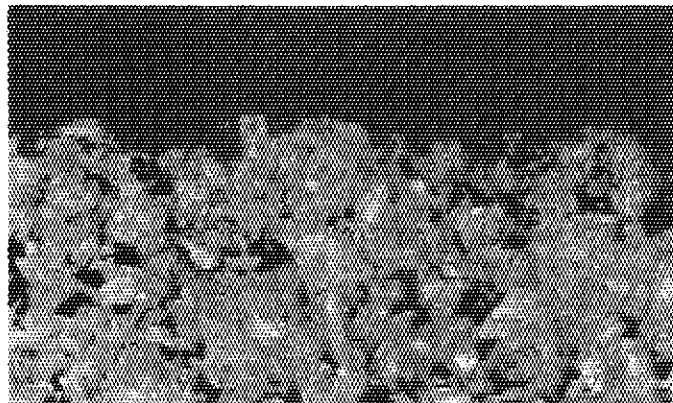
Observed part



Overview of heat load area

1mm

① Heat load part



100 μm

② No heat load part

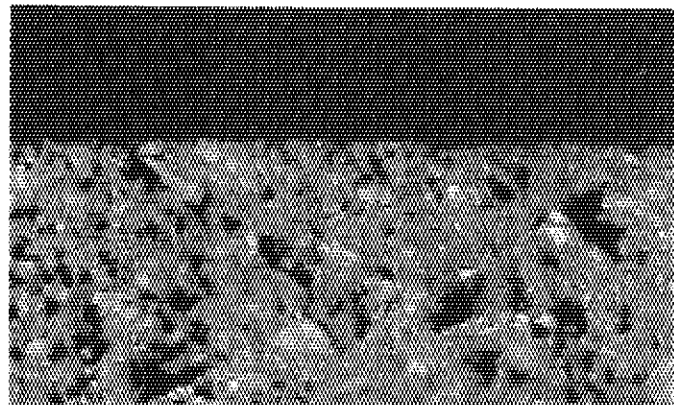
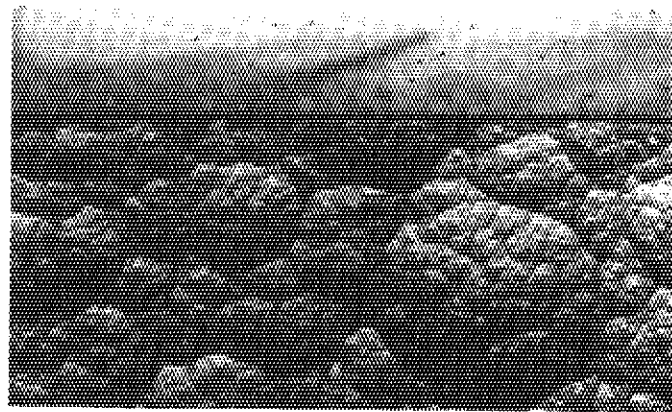
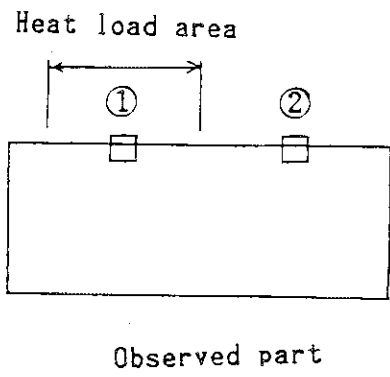
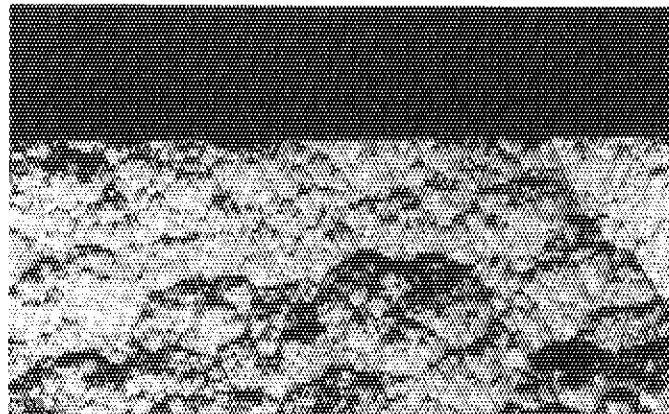


Fig. 3-24 Cross section of ATJ (Heat flux : $1.1\text{kW/cm}^2 \times 31\text{sec}$)



Overview of heat load area 1mm

① Heat load part



100 μm

② No heat load part

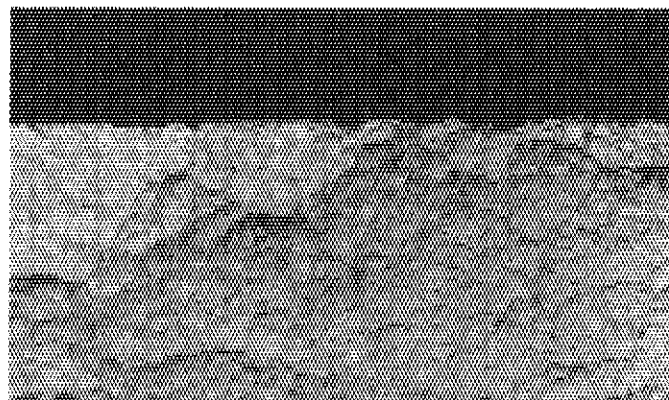


Fig. 3-25 Cross section of PYROID (Heat flux : $1.1\text{kW/cm}^2 \times 31\text{sec}$)

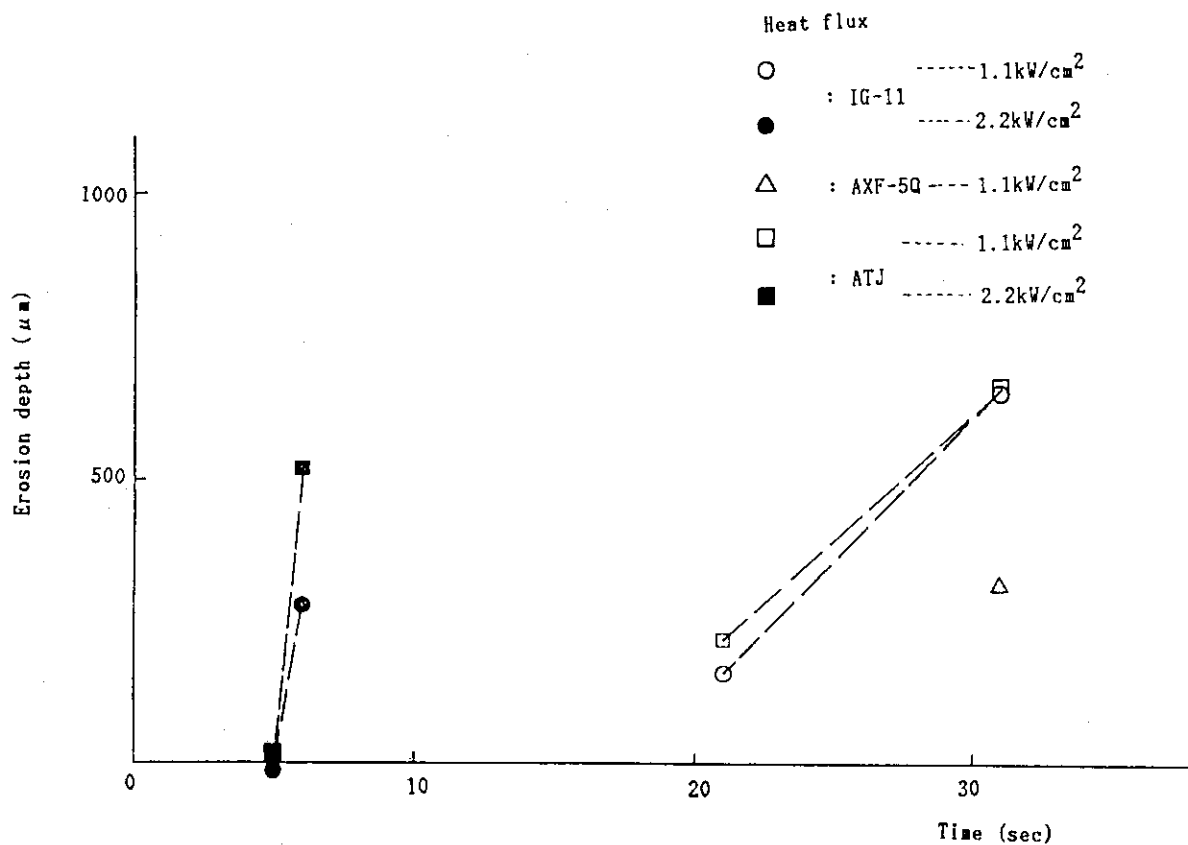


Fig. 3-26 Erosion depth of graphite

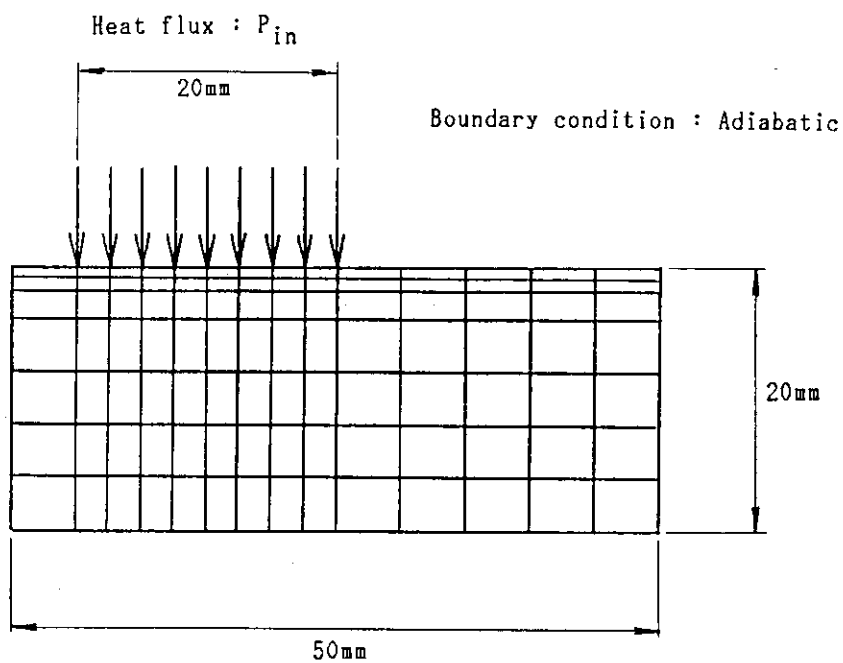


Fig. 3-27 Analysis model

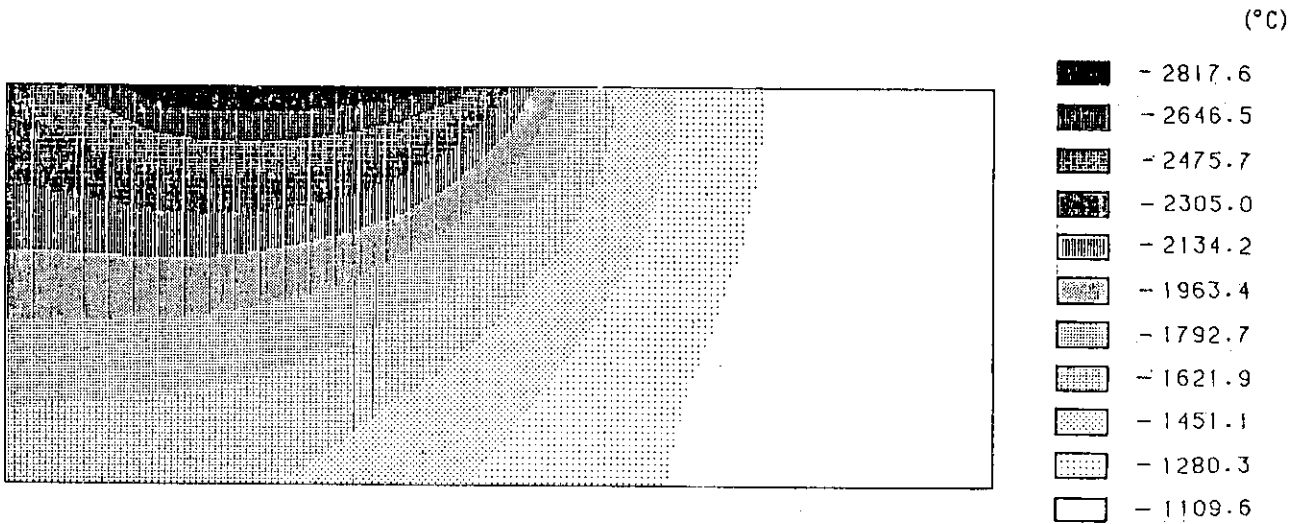


Fig. 3-28 Temperature distribution in cross section of graphite sample (IG-11, Heat flux : $1.1\text{kW}/\text{cm}^2 \times 31\text{sec}$)

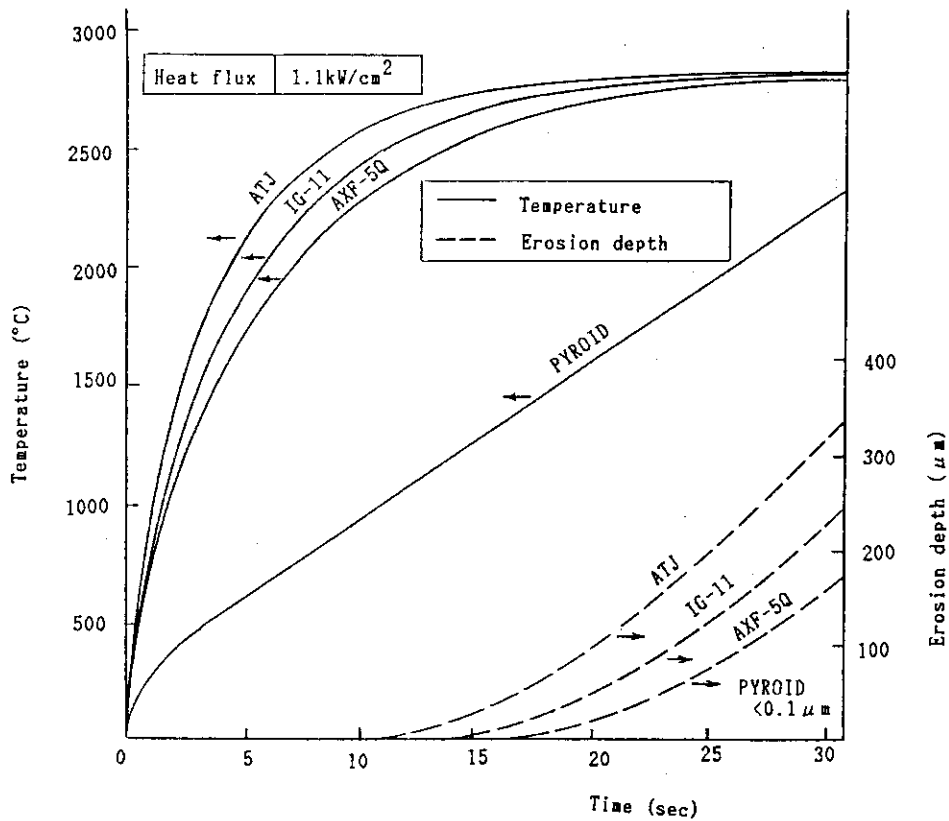


Fig. 3-29 Time evolution of maximum temperature and erosion depth of graphite (IG-11, AXF-5Q, ATJ, PYROID, Heat flux : $1.1\text{kW}/\text{cm}^2$)

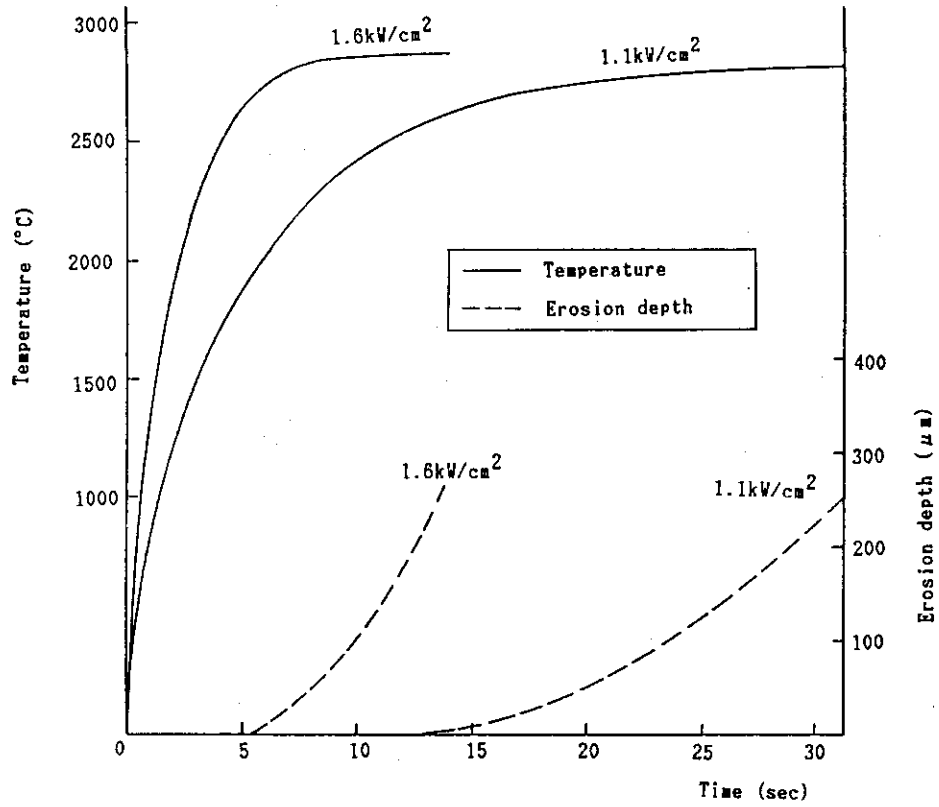


Fig. 3-30 Time evolution of maximum temperature and erosion depth (IG-11, Heat flux : 1.1, 1.6kW/cm²)

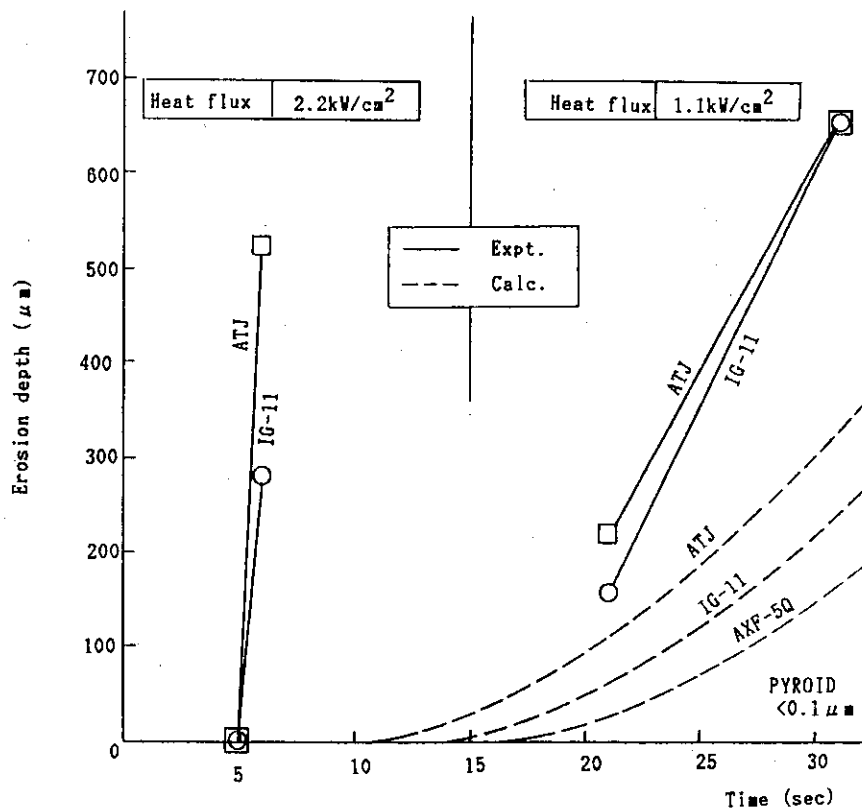


Fig. 3-31 Comparison between calculated and experimental values of maximum erosion depth

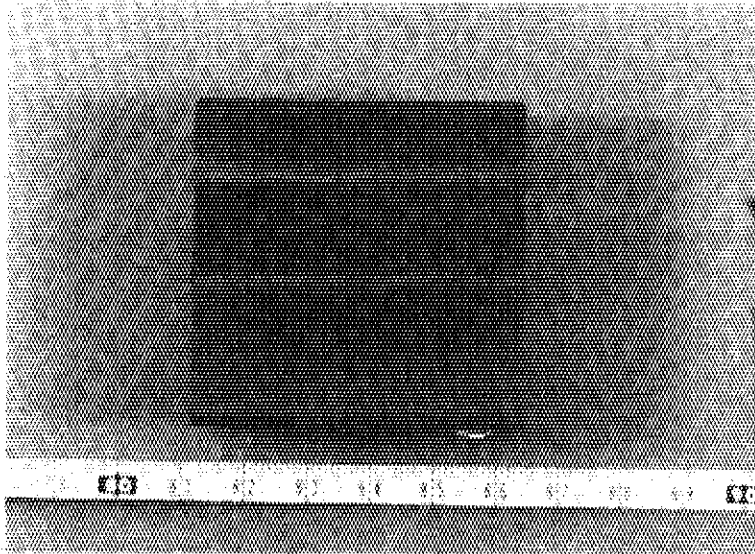


Fig. 3-32 Damaged bumper limiter

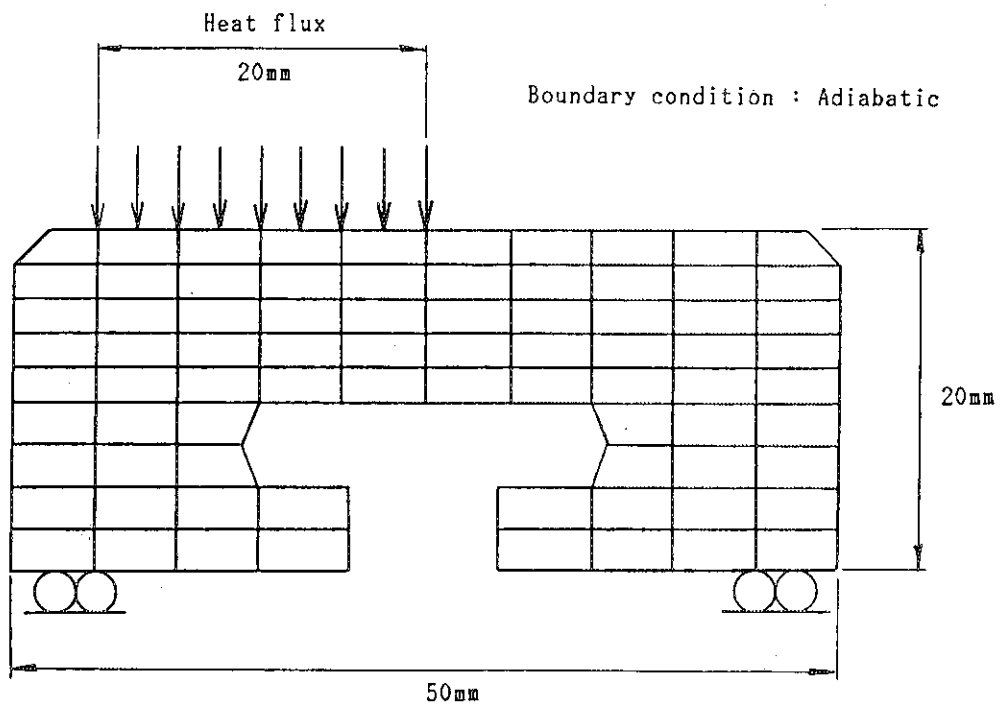


Fig. 3-33 Analysis model

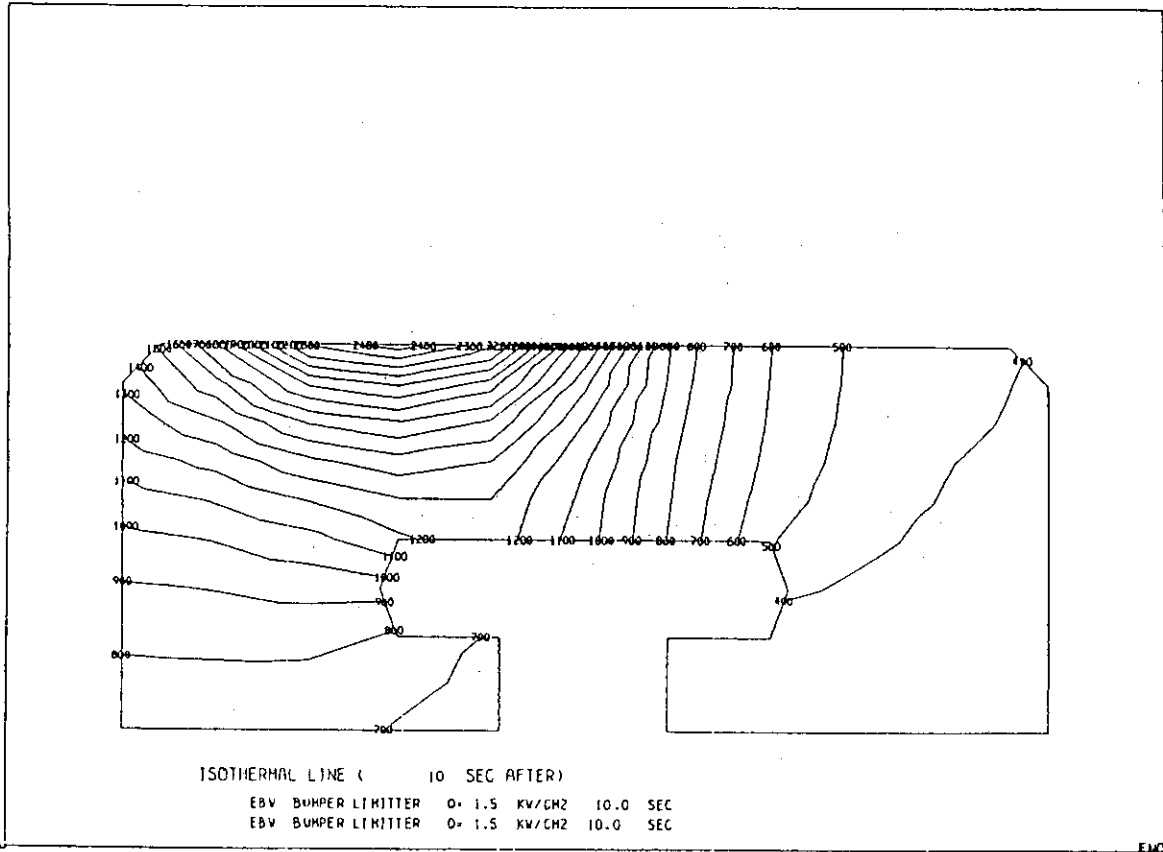


Fig. 3-34 Temperature distribution in bumper limiter

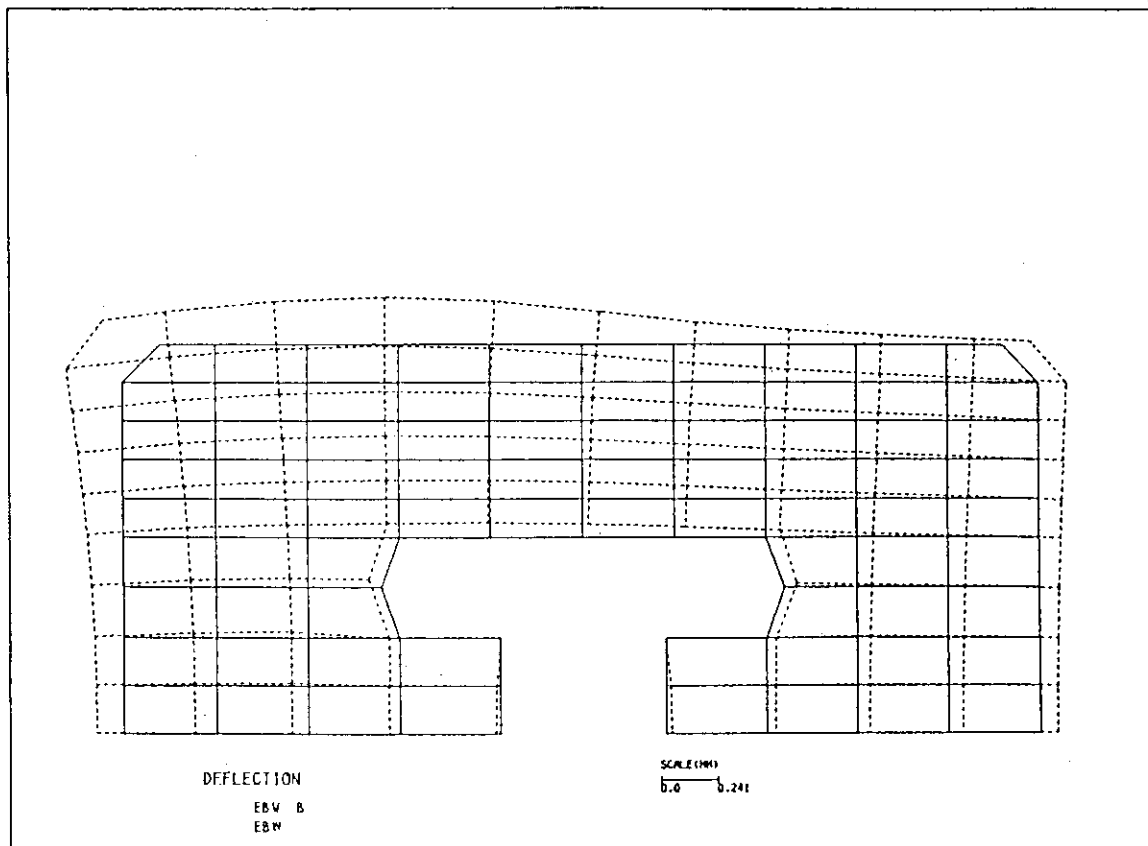


Fig. 3-35 Deformation of bumper limiter

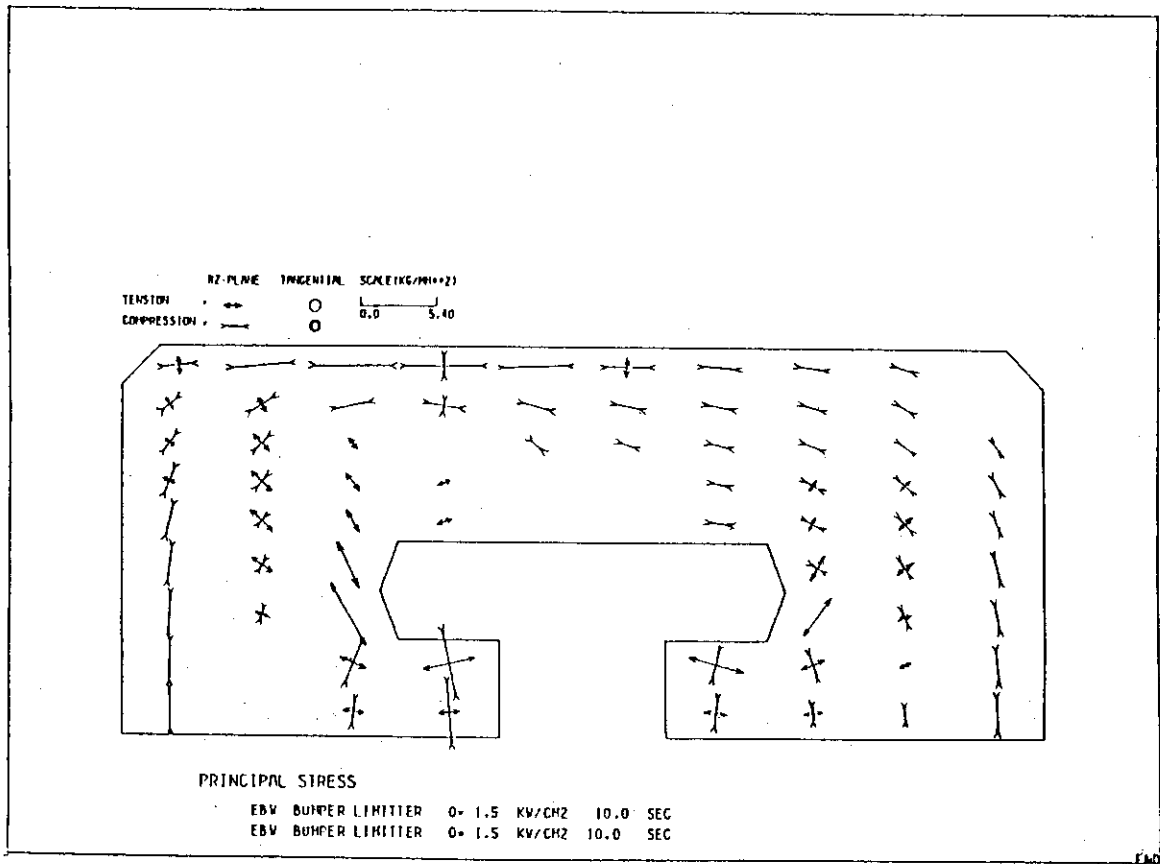


Fig. 3-36 Stress distribution in bumper limiter

4. お わ り に

JT-60の第1壁材料であるTiC被覆モリブデンおよび比較材としての等方性黒鉛IG-11, AXF-5Q, 異方性黒鉛ATJおよび熱分解黒鉛PYROIDについて、電子ビームによる高熱負荷試験を行ない、次の結果を得た。

- (1) TiC被覆モリブデンは、熱衝撃試験において $1.1\text{kw}/\text{cm}^2$ の場合11sec以下の熱負荷では損傷の発生は認められず、TiC被覆に割れ等の表面損傷が生じたのは21sec以上の熱負荷条件であった。一方、 $2.2\text{kw}/\text{cm}^2$ の場合、2.5secで同様の表面損傷が生じた。
- (2) TiC被覆モリブデンへの $340\text{W}/\text{cm}^2 \times 3\text{sec} \times 1000\text{cycles}$ の熱サイクル試験において表面損傷は発生しなかった。
- (3) IG-11, AXF-5Q, ATJの各種黒鉛に関しては、 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 1\text{sec}$ 以下の熱負荷では損傷はないが、 $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 21\text{sec}$ 以上および $2.2\text{kw}/\text{cm}^2 \times 4.0\text{sec}$ 以上の熱負荷条件では昇華による表面の損耗を生じた。PYROIAは $1.1\text{kw}/\text{cm}^2 \times 31\text{sec}$ においても大きな損耗は生じなかった。
- (4) 黒鉛の同一熱負荷条件下における損耗量の絶対値は、大きいものからATJ, IG-11, AXF-5Q, PYROIDの順であった。
- (5) バンパーリミター形状試験片への高熱負荷試験において $0.9\text{kw}/\text{cm}^2 \times 10\text{sec}$ の熱負荷条件で試験体2個のうち1個に破損が生じたが、その原因は熱応力解析結果からは特定できなかった。

上記の結果からTiC被覆モリブデンは、JT-60の設計熱負荷条件($305\text{w}/\text{cm}^2 \times 10\text{sec}$)に対しては健全性を保つことが確認された。IG-11, AXF-5Q, ATJ等の黒鉛は優れた耐熱衝撃性を有するが、プラズマへの不純物制御の観点から昇華損耗が高熱負荷に係わる課題である。また、熱分解黒鉛は、積層面に平行な方向に対しては極めて優れた熱伝導特性を有し高熱負荷材料として高く評価されるが、材料の大きさの制約、取付方法、強度の異方性、経済性(材料コスト)等の点でその適用性は限定される。

謝 辞

本試験において、電子ビーム型照射試験を実施して頂いた三菱重工業高砂研究所溶接総合研究室および第3実験課の皆様には感謝致します。また、試験片の各種表面分析を担当して頂いた高砂研究所材料強度研究室の河合久孝氏に感謝致します。

本試験の試験内容検討に際し、有益な助言を頂いた下村安夫臨界プラズマ実験室長代理に感謝致します。また、太田充JT-60第2試験室長には、JT-60のTiC被覆モリブデンリミタの提供に対し感謝致します。最後に、JT-60第2試験室、炉心工学研究室および炉設計研究室の皆様には、試験結果に対して貴重な議論をして頂き感謝致します。

参考文献

- (1) Yoshikawa, M., and JT-60 Team, Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 12th Europ. Conf. Budapest, 1985).
- (2) Tajima, T., Gomay, Y., Proc. Int. Symp. Plasma Wall Interaction, Jülich, 1976, 559.
- (3) Nakamura, H., Shimizu, M., Ohta, M., Aizawa, T., Naito, T., Kasai, M., Proc. 7th Symp. on Engineering Prob. of Fusion Research, 1977, 1669.
- (4) 山本正弘, 清水正亜, 中村博雄, 高津英幸, 西郷奉素他, J. At. Energy Soc. Japan, 20, (1978), 258.
- (5) 中村博雄, 清水正亜, 榊田道夫, 清水徹, 宮内康行, 太田充, JAERI-M 84-062 (1984).
- (6) Nakamura, H., Proc. US-Japan Workshop on Divertors. First Wall Materials and Impurity Control. Tokai, 1980, JAERI-M 8971 (1980), 330.
- (7) 中村博雄, 荻原徳男, 稲川幸之助, 高橋善和, 伊藤昭夫, JAERI-M 85-022 (1985).
- (8) Murakami, Y., Abe, T., and Nakamura, H., J. Nucl. Mater. 111 & 112 (1982), 861.
- (9) Abe, T., Murakami, Y., Obara, K., Hiroki, S., Nakamura, K., et al., J. Nucl. Mater. 133 & 134 (1985), 254.
- (10) Onozuka, M., et al., 11th Symp. on Fusion Engineering, Austin, Texas, 1985, To be published.
- (11) Uchikawa, T., et al., Fusion Technology (6th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, San Francisco, California, 1985), Vol.8, 1985, 1748.
- (12) 内川高志他, 第2回プラズマ核融合学会予稿集, 1985, 196
- (13) Ioki, K., et al., J. of Nucl. Sci. Tech., Vol.22, No.7, 1985, 529.
- (14) 中村博雄, 清水正亜, 牧野俊郎, 国友猛, JAERI-M 85-007 (1985)
- (15) Ioki, K., et al., 11th Symp. on Fusion Engineering, Austin, Texas, 1985, To be published.
- (16) 三菱重工業株で開発した計算コード。