

JAERI-M
94-046

JT-60U用B₄C表面改質炭素材の高熱負荷試験

1994年3月

中村 和幸・石川 博史*・安東 俊郎
佐藤 和義・横山 堅二・鈴木 哲
大槻 正幸・荒木 政則・秋場 真人

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。
入手の問合せは、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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

J T - 60 U 用 B₄C 表面改質炭素材の高熱負荷試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

中村 和幸・石川 博史*・安東 俊郎+・佐藤 和義

横山 堅二・鈴木 哲・大楽 正幸・荒木 政則

秋場 真人

(1994年2月7日受理)

J T - 60 U では、ダイバータの一部に表面を B₄C 転化した炭素繊維強化複合材 (CFC 材) が試験的に用いられている。この材料の実機への本格的な適用を検討するため、B₄C の被覆方法 (CVD 法、プラズマスプレー法、CVR 法) による耐熱特性の違い (照射条件 : 5~40MW/m², 5sec 及び 550MW/m², 5~10ms) を前回調査し、CVR 法によって表面を B₄C 転化した試料にのみ剥離が見られず、密着性に最も優れていることを明らかにした。一方、J T - 60 U の場合、ダイバータ等のプラズマ対向機器を交換するためには、多大の費用と時間を費やすため、被覆効果を長期間に渡って持続する必要がある。そこで、前回最も優れた被覆法と判断された CVR 法によって、より厚膜化した B₄C 転化試料を作製し、その耐熱特性を調べた。

試料には、三種類の CFC 材及び五種類の等方性黒鉛材を基材 (25mm × 25mm × 25mm) として、B₄C 皮膜の厚さが 150~1300 μm のものを用意した。熱源には電子ビーム加熱装置 (JEBIS) を用い、照射は各試料につき 1 回のみとした。照射条件は通常運転時に想定される 5, 10, 20MW/m², 5 sec, 及びディスラプション時に想定される約 3MJ/m² (1100MW/m², 3ms, 及び 1600MW/m², 2ms) とした。測定項目は照射後試料の表面状態の観察、照射前後における試料の重量変化、IR カメラによる照射中試料表面温度、照射後試料表面の元素分析である。

その結果、通常運転時に想定される熱負荷条件 (10MW/m², 5sec) では、B₄C 転化膜の厚さが 600 μm 以上の試料に溶融、剥離等の損傷が見られたが、それ以下の膜厚では J T - 60 U で使用上問題となるような損傷は見られなかった。また、剥離は B₄C 転化膜内に存在するポーラスな層のところで生じていることが、表面分析結果より確認されており、この層を改善することにより、さらに密着性を向上させることができるとの見通しが得られた。ディスラプション時に想定される熱負荷条件 (約 3MJ/m²) では、PD-330S, PD-600S, HCB-5S1 (等方性黒鉛) を基材とした試料に剥離と溶融が、PCC-2S, MFC-1, MC1-felt (CFC 材) 及び ETP-10, STP-60 (等方性黒鉛) を基材とした試料に溶融が見られる等、基材依存性の存在することが明かとなった。

那珂研究所 : 〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

+ 核融合装置試験部

* 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所

High Heat Flux Experiment on B₄C-converted Carbon Based Materials
for Plasma Facing Materials of JT-60U

Kazuyuki NAKAMURA, Hiroshi ISHIKAWA*, Toshiro ANDO[†], Kazuyoshi SATOH
Kenji YOKOYAMA, Satoshi SUZUKI, Masayuki DAIRAKU, Masanori ARAKI
and Masato AKIBA

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

(Received February 7, 1994)

High heat flux experiments have been previously carried out on three kinds, namely low pressure plasma spray(LPPS), chemical vapor deposition (CVD) and conversion(CVR) methods, of B₄C-overlaid CFCs using the JAERI electron beam irradiation system(JEBIS). As a result, it turned out that CVR method has the best adhesion property between B₄C layer and bulk carbon. However, thicker B₄C layer is necessary to use in long period as the divertor tiles of JT-60U. The purpose of this experiment is to investigate the thermal property of B₄C-converted carbon based materials which have thicker B₄C layer than the previous experiments.

Irradiations were performed under two different heating conditions, namely in the normal condition(5~20 MW/m², 5 s) and in the disruption conditions(1100~1600 MW/m², 2~3 ms). The dimensions of the samples were 25mm × 25mm × 25mm, and B₄C-converted layers were made on the three kinds of CFCs and fifth kinds of isotropic graphites. The thickness of B₄C layer was 150~1300μm. Measurements were made with respect to the weight loss, changes of the surface morphology and the surface temperature.

In the normal condition, the damages such as surface melting and

+ Department of Fusion Facility

* Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

exfoliation were not observed on the samples which have B₄C layer below 600μm in thickness. In the disruption condition, melting and exfoliation were observed on the surfaces of the samples whose substrates were PD-330S, PD-600S and HCB-5S, and melting was observed on the surfaces of the samples whose substrates were PCC-2S, MFC-1, MCI-felt, ETP-10 and STP-60. It is considered that the porous layer in the B₄C layer caused the severe exfoliation from the measurement of the surface composition.

Keywords: JT-60U, B₄C, Conversion Method(CVR), Plasma Facing Materials, First Wall, JEBIS, High Heat Flux Experiment, Adhesion, Exfoliation, CFC

目 次

1. はじめに	1
2. 試験装置および試験条件	1
3. 試験結果	2
3.1 通常熱負荷試験	2
3.2 ディスラプション熱負荷試験	3
4. まとめ	4
謝 辞	4
参考文献	4

Contents

1. Introduction	1
2. Facility and Condition of Tests	1
3. Results of Tests	2
3.1 Normal Heat Load Test	2
3.2 Disruption Heat Load Test	3
4. Summary	4
Acknowledgment	4
Reference	4

1. はじめに

JT-60Uでは、プラズマ中に不純物として混入した場合の放射冷却損失の観点から、ライナー等の部分には等方性黒鉛が、また、より高い熱負荷を受けるダイバータ部分には、炭素繊維強化複合材(CFC材)等の低原子番号材料が使用されている。しかしながら、炭素系材料は、化学スパッタリング収率が大きく、水素を多量に吸蔵するなどの問題点を有するため、これらの問題点を解決する手段として、化学スパッタリング収率や水素吸蔵量の小さなB₄Cを炭素系材料の表面へ被覆することが提案されている¹⁾。B₄Cの使用をバルクとしてではなく被覆材とした理由は、B₄Cは融点が低く、熱伝導率もCFC材より1桁程度小さいため、バルクとして使用した場合、表面が溶融したり蒸発したりする恐れがあるからである。

前回の耐熱試験では^{2, 3)}、低圧プラズマスプレー(LPPS)法、化学蒸着(CVD)法、コンバージョン(CVR)法の三種類の被覆法で被覆した材料(厚さ100~150 μm)の加熱試験を行い、1) 通常運転時に想定される10MW/m²の熱負荷に対しては、三種類の被覆法とも損傷を受けないこと、2) ディスラプション時に想定される550MW/m²の熱負荷に対しては、CVR法が最も耐熱特性、特に密着性に優れた被覆法であること、などの結論が得られている。一方、ダイバータタイル等の交換には、多大の費用と時間を必要とすることから、B₄C皮膜の厚膜化を図り、出きる限り交換頻度を下げることが装置の維持管理上から望ましい。そこで、前回試験したB₄C被膜より膜厚の大きな試料を作製し、これらに対する耐熱試験を再度実施し、膜厚と耐熱特性の関係を実験的に調べたので報告する。

2. 試験装置および試験条件

本試験の熱源として用いた原研NBI加熱研究室の電子ビーム加熱装置(JEBIS)の概略をFig.1に示す^{4, 5, 6)}。電子ビームの最大加速電圧は100KV、最大出力は400KWである。熱源から放出された電子ビームの熱負荷は、φ1mmのスリット及び熱電対を埋め込んだ炭素チップから成るカロリーメータを用いて測定した。JT-60Uのダイバータ部では、通常運転時には約10MW/m²で5秒間、また、ディスラプション時には約3MJ/m²(数ミリ秒以内と推定されている)の熱負荷が想定されているので、これらの想定熱負荷条件を基に、本実験での熱負荷条件を下記のとおりとした。

通常熱負荷条件 : 5, 10, 20MW/m², 5sec

ディスラプション熱負荷条件 : 1100MW/m², 3ms, 1600MW/m², 2ms

通常熱負荷条件下での熱負荷分布は試料上でほぼ一様であるのに対し、ディスラプション熱負荷条件下での熱負荷分布は鋭いピークを有する分布となる。ディスラプション熱負荷条件下における試料位置での熱負荷分布をFig.2に示す。X方向、Y方向ともに対称性の良い分布を示している。この条件下でのピーク熱負荷は1800MW/m²であるが、

1. はじめに

JT-60Uでは、プラズマ中に不純物として混入した場合の放射冷却損失の観点から、ライナー等の部分には等方性黒鉛が、また、より高い熱負荷を受けるダイバータ部分には、炭素繊維強化複合材(CFC材)等の低原子番号材料が使用されている。しかしながら、炭素系材料は、化学スパッタリング収率が大きく、水素を多量に吸蔵するなどの問題点を有するため、これらの問題点を解決する手段として、化学スパッタリング収率や水素吸蔵量の小さなB₄Cを炭素系材料の表面へ被覆することが提案されている¹⁾。B₄Cの使用をバルクとしてではなく被覆材とした理由は、B₄Cは融点が低く、熱伝導率もCFC材より1桁程度小さいため、バルクとして使用した場合、表面が溶融したり蒸発したりする恐れがあるからである。

前回の耐熱試験では^{2), 3)}、低圧プラズマスプレー(LPPS)法、化学蒸着(CVD)法、コンバージョン(CVR)法の三種類の被覆法で被覆した材料(厚さ100~150 μm)の加熱試験を行い、1) 通常運転時に想定される10MW/m²の熱負荷に対しては、三種類の被覆法とも損傷を受けないこと、2) ディスラプション時に想定される550MW/m²の熱負荷に対しては、CVR法が最も耐熱特性、特に密着性に優れた被覆法であること、などの結論が得られている。一方、ダイバータタイル等の交換には、多大の費用と時間を必要とすることから、B₄C皮膜の厚膜化を図り、出きる限り交換頻度を下げることが装置の維持管理上から望ましい。そこで、前回試験したB₄C被膜より膜厚の大きな試料を作製し、これらに対する耐熱試験を再度実施し、膜厚と耐熱特性の関係を実験的に調べたので報告する。

2. 試験装置および試験条件

本試験の熱源として用いた原研NBI加熱研究室の電子ビーム加熱装置(JEBIS)の概略をFig.1に示す^{4), 5), 6)}。電子ビームの最大加速電圧は100KV、最大出力は400KWである。熱源から放出された電子ビームの熱負荷は、φ1mmのスリット及び熱電対を埋め込んだ炭素チップから成るカロリーメータを用いて測定した。JT-60Uのダイバータ部では、通常運転時には約10MW/m²で5秒間、また、ディスラプション時には約3MJ/m²(数ミリ秒以内と推定されている)の熱負荷が想定されているので、これらの想定熱負荷条件を基に、本実験での熱負荷条件を下記のとおりとした。

通常熱負荷条件 : 5, 10, 20MW/m², 5sec

ディスラプション熱負荷条件 : 1100MW/m², 3ms, 1600MW/m², 2ms

通常熱負荷条件下での熱負荷分布は試料上ではほぼ一様であるのに対し、ディスラプション熱負荷条件下での熱負荷分布は鋭いピークを有する分布となる。ディスラプション熱負荷条件下における試料位置での熱負荷分布をFig.2に示す。X方向、Y方向ともに対称性の良い分布を示している。この条件下でのピーク熱負荷は1800MW/m²であるが、

1100MW/m² 及び1600MW/m² の場合もほぼ同様の分布である。

本実験には、三種類の炭素繊維強化複合材(PCC-2S,MFC-1,MCI-felt)及び五種類の等方性黒鉛材(PD-330S,PD-600S,HCB-5S,ETP-10,STP-60)を基材(25mmx25mmx25mm)として、CVR法によって表面にB₄Cを150～1300μm被覆した試料を用いた。基材であるCFC材及び等方性黒鉛材の熱伝導率をTable 1に示す。CFC材の熱伝導率は一般的に異方性があるため、熱伝導率の最も高い方向と垂直な面が被覆面となるように試料を作製した。CVR法の製膜原理は、真空中で加熱蒸発した酸化ボロンが、2000°C程度の高温に保持された基材中の炭素と化学反応（置換反応）することによって、基材表面にB₄C皮膜が形成されることを利用したものである。この被覆方法に特徴的なことは、酸化ボロンの蒸気が基材に染み込むことによってB₄C皮膜を形成するため、基材である炭素の特性によって皮膜の断面形状が異なることである。すなわち、基材がポーラスであるCFC材では、置換反応が細孔にそって進行した結果、B₄C皮膜が枝状に成長するのに対し、そのような細孔の少ない等方性黒鉛材を基材に用いた場合には、B₄C皮膜はほぼ一様な厚さで形成され、皮膜と基材との境界も比較的はっきりしている。今回、B₄C被覆材料を作製する際、1回の被覆処理で形成される皮膜が150～700μm程度に限られたため、それ以上厚いB₄C被覆膜を得るために複数回の被覆処理を行った。試料の基材の種類と皮膜の厚みをまとめたものをTable 2に示す。CFC材の膜厚に関しては、前述したように膜厚が場所によって異なるため、最大値と最小値を示した。また、基材名の後の（）中の数字は被覆処理回数を表している。

照射は、各試料につき1回のみ行った。照射による重量損失は、照射前後にそれぞれ大気中で試料の重量を電子天秤を用いて測定することにより求めた。通常熱負荷条件での照射中及び照射後の表面温度は、赤外線カメラを用いて測定した。また、損傷を受けた試料については、電子顕微鏡による表面形状観察及びX線マイクロアナライザーによる組成分析を行った。

3. 試験結果

3-1 通常熱負荷試験

通常熱負荷条件(5～20MW/m²,5sec)で照射した後の試料の表面形状をFig.3に示す。また、試料の表面損傷状態の目視による判定結果及び重量損失のまとめをTable 3に示す。損傷状態を示す記号は、Severe Exfoliationは表面が完全に基材から剥離しているもの、Exfoliationは表面の一部が剥離しているもの、Meltは試料表面が面状あるいは斑点状に溶融しているもの、No Failureは上記のような損傷が全く認められなかったものを示している。この図及び表から、PD-600S基材の膜厚600μmの試料を除き、被覆処理を複数回行った試料にのみ、Severe Exfoliationが生じていることが解る。一回目の処理で形成された皮膜と二回目以降の処理によって形成された皮膜との間にポーラスな層の存在が電子顕微鏡による断面形状観察によって確認されており、かつ剥離がその部分で生じていることから、これら材料の剥離は被覆処理を複数回行った際に生じたポーラスな層の存在が原因と判断される。照射による重量減少に関しては、膜厚が厚いほど、また、熱負荷

1100MW/m² 及び1600MW/m² の場合もほぼ同様の分布である。

本実験には、三種類の炭素繊維強化複合材(PCC-2S,MFC-1,MCI-felt)及び五種類の等方性黒鉛材(PD-330S,PD-600S,HCB-5S,ETP-10,STP-60)を基材(25mmx25mmx25mm)として、CVR法によって表面にB₄Cを150～1300μm被覆した試料を用いた。基材であるCFC材及び等方性黒鉛材の熱伝導率をTable 1に示す。CFC材の熱伝導率は一般的に異方性があるため、熱伝導率の最も高い方向と垂直な面が被覆面となるように試料を作製した。CVR法の製膜原理は、真空中で加熱蒸発した酸化ボロンが、2000°C程度の高温に保持された基材中の炭素と化学反応（置換反応）することによって、基材表面にB₄C皮膜が形成されることを利用したものである。この被覆方法に特徴的なことは、酸化ボロンの蒸気が基材に染み込むことによってB₄C皮膜を形成するため、基材である炭素の特性によって皮膜の断面形状が異なることである。すなわち、基材がポーラスであるCFC材では、置換反応が細孔にそって進行した結果、B₄C皮膜が枝状に成長するのに対し、そのような細孔の少ない等方性黒鉛材を基材に用いた場合には、B₄C皮膜はほぼ一様な厚さで形成され、皮膜と基材との境界も比較的はっきりしている。今回、B₄C被覆材料を作製する際、1回の被覆処理で形成される皮膜が150～700μm程度に限られたため、それ以上厚いB₄C被覆膜を得るために複数回の被覆処理を行った。試料の基材の種類と皮膜の厚みをまとめたものをTable 2に示す。CFC材の膜厚に関しては、前述したように膜厚が場所によって異なるため、最大値と最小値を示した。また、基材名の後の（）中の数字は被覆処理回数を表している。

照射は、各試料につき1回のみ行った。照射による重量損失は、照射前後にそれぞれ大気中で試料の重量を電子天秤を用いて測定することにより求めた。通常熱負荷条件での照射中及び照射後の表面温度は、赤外線カメラを用いて測定した。また、損傷を受けた試料については、電子顕微鏡による表面形状観察及びX線マイクロアナライザーによる組成分析を行った。

3. 試験結果

3-1 通常熱負荷試験

通常熱負荷条件(5～20MW/m²,5sec)で照射した後の試料の表面形状をFig.3に示す。また、試料の表面損傷状態の目視による判定結果及び重量損失のまとめをTable 3に示す。損傷状態を示す記号は、Severe Exfoliationは表面が完全に基材から剥離しているもの、Exfoliationは表面の一部が剥離しているもの、Meltは試料表面が面状あるいは斑点状に溶融しているもの、No Failureは上記のような損傷が全く認められなかったものを示している。この図及び表から、PD-600S基材の膜厚600μmの試料を除き、被覆処理を複数回行った試料にのみ、Severe Exfoliationが生じていることが解る。一回目の処理で形成された皮膜と二回目以降の処理によって形成された皮膜との間にポーラスな層の存在が電子顕微鏡による断面形状観察によって確認されており、かつ剥離がその部分で生じていることから、これら材料の剥離は被覆処理を複数回行った際に生じたポーラスな層の存在が原因と判断される。照射による重量減少に関しては、膜厚が厚いほど、また、熱負荷

が高いほど重量減少が大きくなる傾向が見られた。

PCC-2Sを基材とした異なる膜厚を有する試料（被覆無しも含む）に $10\text{MW}/\text{m}^2, 5\text{sec}$ の熱負荷条件を与えた時の表面温度の変化をFig.4に示す。この図から、B₄C皮膜が厚くなるに従って最大表面温度は上昇し、B₄C皮膜の最も厚い試料では表面の一部が溶融していることが解る。この結果から、PCC-2Sを基材とした場合の限界膜厚は $200\sim 600\mu\text{m}$ であることが明かとなった。同じ熱負荷条件下で基材がPD-330Sの場合の表面温度変化をFig.5に示す。PCC-2S基材の時と同様にB₄C層が厚くなるに従って最大表面温度の上昇が見られる。また、PD-330S(2)の試料では、照射開始から約一秒後に温度の減少が見られるが、これは、B₄Cの表面が溶融して表面の輻射率が減少した結果、見かけ上表面温度が減少したように見えるためである。

表面温度の上昇に対する基材の影響を比較するため、B₄C皮膜の厚みがほぼ等しい試料、PCC-2S(2)及びPD-330S(1)の表面温度変化をFig.6に示す。この図によれば、PCC-2S(2)の最高表面温度はPD-330S(1)のそれよりも約 250°C 低くなっている。基材の種類が試料表面温度に影響を及ぼしていることが解ったが、この差がB₄C皮膜そのものの違いによるものか、単に基材の熱伝導率の差によるものかは、熱伝導解析を行う必要があるため、今回の結果からは明かに出来なかった。

3-2 ディスラプション熱負荷試験

ディスラプション熱負荷条件（ $1100\sim 1600\text{MW}/\text{m}^2, 2\sim 3\text{ms}$ ）で照射した後の試料の表面形状をFig.7に示す。また、表面の損傷状態を通常熱負荷条件の時と同様の判定基準でまとめたものをTable 4に示す。複数回被覆処理を行った等方性黒鉛基材の試料にのみ剥離が生じている点では、通常熱負荷条件の時とほぼ同様の結果となっているが、熱負荷の値及びその分布が異なるため、損傷状態は通常熱負荷条件の場合と大幅に異っている。

$1600\text{MW}/\text{m}^2, 2\text{ms}$ で照射されたPCC-2S(2)及びPD-330S(2)の照射後表面の電子顕微鏡写真をFig.8に示す。溶融（照射）領域のB₄Cは、非溶融（未照射）領域のそれと比べ結晶粒が大きくかつ表面が滑らかになっている。これは、B₄C皮膜が短時間で溶融再結晶する場合の方が、CVR法でゆっくり形成される場合に比べ、下地の影響を受け難いためと考えられる。

4. まとめ

JT-60Uダイバータ部等への適用を目的としたB₄C皮膜の厚膜化を検討するため、種々の膜厚を有するB₄C転化炭素系材料の高熱負荷試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 通常運転時に想定される10MW/m²,5secの熱負荷に対して、PCC-2Sを基材とした場合、B₄C皮膜の厚さが200-600 μmまでは溶融しないこと、また、等方性黒鉛を基材とした場合、複数回の被覆処理を行った試料にのみB₄C皮膜の剥離がみられ、その原因が皮膜中に形成されたポーラスな層のためであることが明かとなった。
- (2) ディスラプション時に想定される約3MJ/m²の熱負荷に対して、PD-330S, PD-600S, HCB5S1を基材とした場合に、B₄C皮膜の剥離が見られ、それ以外の材料を基材とした場合に、剥離が生じなかつたことが明かとなつた。

謝　　辞

本報告書を作成するに当り、終始有益な御意見、御指導を頂いた、小原祥裕NBI加熱研究室長、島本進核融合工学部長に心より感謝致します。また、本試験を遂行するに当たり、熱心な討論を頂いたNBI加熱研究室の皆様に深く感謝致します。

参　考　文　献

- 1) R. Jimbou et al. : J.Nucl.Mater. 196-198 (1992) 958-962
- 2) K.Nakamura et al. : J.Nucl.Mater. 196-198 (1992) 627-632
- 3) 中村 和幸、他： JAERI-M 92-052
- 4) S. Tanaka et al. : Rev. Sci. Instrum. 62(1991)761
- 5) M. Akiba et al. : Plasma Devices and Operations 1(1991)205
- 6) 秋場 真人、田中 茂、関 昌弘：日本原子力学会誌 33 (1991) 41

4. まとめ

JT-60Uダイバータ部等への適用を目的としたB₄C皮膜の厚膜化を検討するため、種々の膜厚を有するB₄C転化炭素系材料の高熱負荷試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 通常運転時に想定される10MW/m²,5secの熱負荷に対して、PCC-2Sを基材とした場合、B₄C皮膜の厚さが200-600 μmまでは溶融しないこと、また、等方性黒鉛を基材とした場合、複数回の被覆処理を行った試料にのみB₄C皮膜の剥離がみられ、その原因が皮膜中に形成されたポーラスな層のためであることが明かとなった。
- (2) ディスラプション時に想定される約3MJ/m²の熱負荷に対して、PD-330S, PD-600S, HCB5S1を基材とした場合に、B₄C皮膜の剥離が見られ、それ以外の材料を基材とした場合に、剥離が生じなかったことが明かとなった。

謝　　辞

本報告書を作成するに当り、終始有益な御意見、御指導を頂いた、小原祥裕NBI加熱研究室長、島本進核融合工学部長に心より感謝致します。また、本試験を遂行するに当たり、熱心な討論を頂いたNBI加熱研究室の皆様に深く感謝致します。

参　考　文　献

- 1) R. Jimbou et al. : J.Nucl.Mater. 196-198 (1992) 958-962
- 2) K.Nakamura et al. : J.Nucl.Mater. 196-198 (1992) 627-632
- 3) 中村 和幸、他： JAERI-M 92-052
- 4) S. Tanaka et al. : Rev. Sci. Instrum. 62(1991)761
- 5) M. Akiba et al. : Plasma Devices and Operations 1(1991)205
- 6) 秋場 真人、田中 茂、関 昌弘：日本原子力学会誌 33 (1991) 41

4. まとめ

JT-60Uダイバータ部等への適用を目的としたB₄C皮膜の厚膜化を検討するため、種々の膜厚を有するB₄C転化炭素系材料の高熱負荷試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 通常運転時に想定される10MW/m²,5secの熱負荷に対して、PCC-2Sを基材とした場合、B₄C皮膜の厚さが200-600 μmまでは溶融しないこと、また、等方性黒鉛を基材とした場合、複数回の被覆処理を行った試料にのみB₄C皮膜の剥離がみられ、その原因が皮膜中に形成されたポーラスな層のためであることが明かとなった。
- (2) ディスラプション時に想定される約3MJ/m²の熱負荷に対して、PD-330S, PD-600S, HCB5S1を基材とした場合に、B₄C皮膜の剥離が見られ、それ以外の材料を基材とした場合に、剥離が生じなかつたことが明かとなつた。

謝　　辞

本報告書を作成するに当り、終始有益な御意見、御指導を頂いた、小原祥裕NBI加熱研究室長、島本進核融合工学部長に心より感謝致します。また、本試験を遂行するに当たり、熱心な討論を頂いたNBI加熱研究室の皆様に深く感謝致します。

参　考　文　献

- 1) R. Jimbou et al. : J.Nucl.Mater. 196-198 (1992) 958-962
- 2) K.Nakamura et al. : J.Nucl.Mater. 196-198 (1992) 627-632
- 3) 中村 和幸、他：JAERI-M 92-052
- 4) S. Tanaka et al. : Rev. Sci. Instrum. 62(1991)761
- 5) M. Akiba et al. : Plasma Devices and Operations 1(1991)205
- 6) 秋場 真人、田中 茂、関 昌弘：日本原子力学会誌 33 (1991) 41

Table 1 Summary of Physical and Mechanical Properties
for Substrates

CFC		
Materials	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/mK)
*PCC-2S (2次元配向)	1.81	x: 316 y: 310 z: 188
MFC-1 (1次元配向)	1.96	x,y: 40 z: 550
*MCI-felt type2H (2次元配向)	1.92	x,y: 340 z: 60

Isotropic Graphite		
Materials	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/mK)
*PD-330S	1.80	181
PD-600S	1.81	110
HCB-5S1	1.60	60
*ETP-10	1.76	91
STP-60	1.80	135

*Reference : M.Yamamoto,et al
(JAERI -M 90-119)

Table 2 Summary of Substrates and Thickness of B₄C Layers

Substrates		Thickness of B₄C Layers(μm)
CFC	PCC-2S(0)	-
	PCC-2S(1)	150 - 600
	PCC-2S(2)	200 - 600
	PCC-2S(3)	400 - 800
	MFC-1(1)	250 - 700
I.G.	MCI-felt(1)	200 - 600
	PD-330S(0)	-
	PD-330S(1)	300
	PD-330S(2)	600
	PD-330S(3)	700
	PD-600S(0)	-
	PD-600S(1)	250
	PD-600S(2)	600
	PD-600S(3)	700
	HCB-5S1(0)	-
	HCB-5S1(1)	250 - 600
	HCB-5S1(2)	1200
	HCB-5S1(3)	1300
	ETP-10(0)	-
	ETP-10(1)	150 - 500
	STP-60(0)	-
	STP-60(1)	180 - 500

Table 3 Summary of Surface Damage and Weight Loss under the Normal Condition

Substrate	Thickness of B_4C Layers(μm)	Normal Condition		
		5MW/m ² 5sec	10MW/m ² 5sec	20MW/m ² 5sec
CFC	PCC-2S(0)	-	-	○ 2.53
	PCC-2S(1)	150 - 400	-	○ 0.51
	PCC-2S(2)	200 - 600	-	○ 1.62
	PCC-2S(3)	400 - 800	-	□ 5.34
	MFC-1(1)	250 - 700	-	○ 0.93
	MCI-felt(1)	200 - 600	-	-
I.G.	PD-330S(0)	-	-	○ 2.74
	PD-330S(1)	300	-	○ 1.04
	PD-330S(2)	600	○ 0.97	× □ 54.1
	PD-330S(3)	700	× 17.1	× □ 21.1
	PD-600S(0)	-	-	○ 4.47
	PD-600S(1)	250	-	○ 1.57
	PD-600S(2)	600	× 42.1	× □ 198
	PD-600S(3)	700	× 20.8	× □ 182
STP	HCB-5S1(0)	-	-	○ 2.00
	HCB-5S1(1)	250 - 600	-	○ 6.67
	HCB-5S1(2)	1200	× 11.9	× □ 18.4
	HCB-5S1(3)	1300	× 9.46	× □ 136
	ETP-10(0)	-	-	-
	ETP-10(1)	150 - 500	-	○ 0.61
STP	STP-60(0)	-	-	-
	STP-60(1)	180 - 500	-	○ 0.77
○:No Failure, □:Melt, ●:Exfoliation, ×:Severe Exfoliation , and Weight Loss(mg)				

Table 4 Summary of Surface Damage and Weight Loss under the Disruption Condition

Substrate	Thickness of B ₄ C Layers(μm)	Disruption Condition	
		1100MW/m ² 3ms	1600MW/m ² 2ms
CFC	PCC-2S(0)	-	○ 1.00
	PCC-2S(1)	150 - 400	□ 1.63
	PCC-2S(2)	200 - 600	□ 7.42
	PCC-2S(3)	400 - 800	□ 4.63
	MFC-1(1)	250 - 700	□ 1.81
	MCI-felt(1)	200 - 600	□ 4.02
I.G.	PD-330S(0)	-	○ 1.06
	PD-330S(1)	300	● □ 8.73
	PD-330S(2)	600	● □ 13.4
	PD-330S(3)	700	× □ 6.98
	PD-600S(0)	-	○ 1.09
	PD-600S(1)	250	● □ 9.75
	PD-600S(2)	600	● □ 12.0
	PD-600S(3)	700	× □ 12.2
STP	HCB-5S1(0)	-	○ 1.21
	HCB-5S1(1)	250 - 600	● □ 1.85
	HCB-5S1(2)	1200	× □ 3.05
	HCB-5S1(3)	1300	× □ 7.90
	ETP-10(0)	-	○ 1.10
ETP	ETP-10(1)	150 - 500	□ 0.29
	STP-60(0)	-	○ 0.60
STP	STP-60(1)	180 - 500	□ 0.37

○:No Failure, □:Melt, ●:Exfoliation, ×:Severe Exfoliation , and Weight Loss(mg)

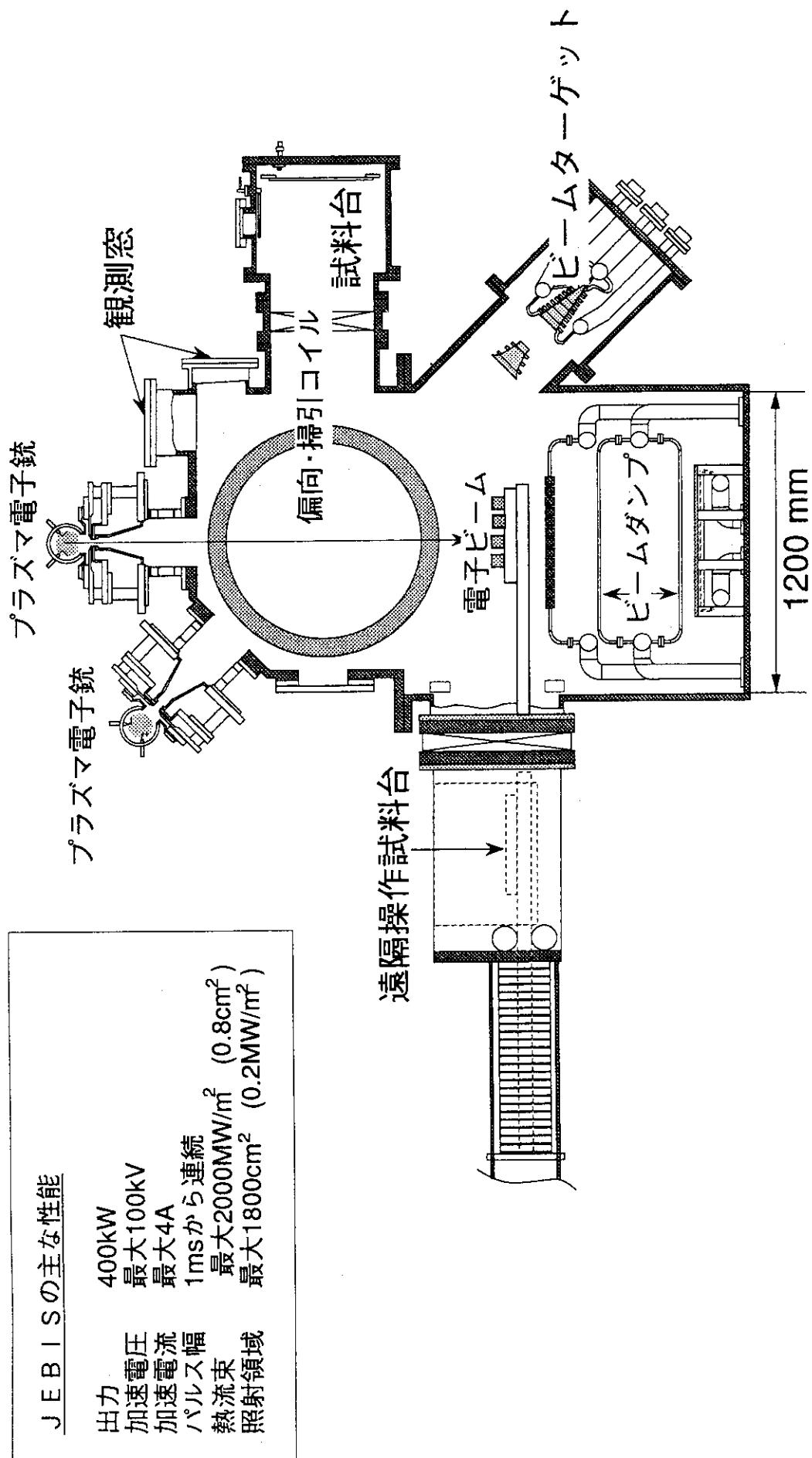


Fig. 1 Schematic of the JAERI Electron Beam Irradiation System(JEBIS). JEBIS has the ability to irradiate small and large samples with electron beam under maximum heat flux of over $2000\text{MW}/\text{m}^2$ for 1ms to continuous mode and 1800cm^2 in irradiated area.

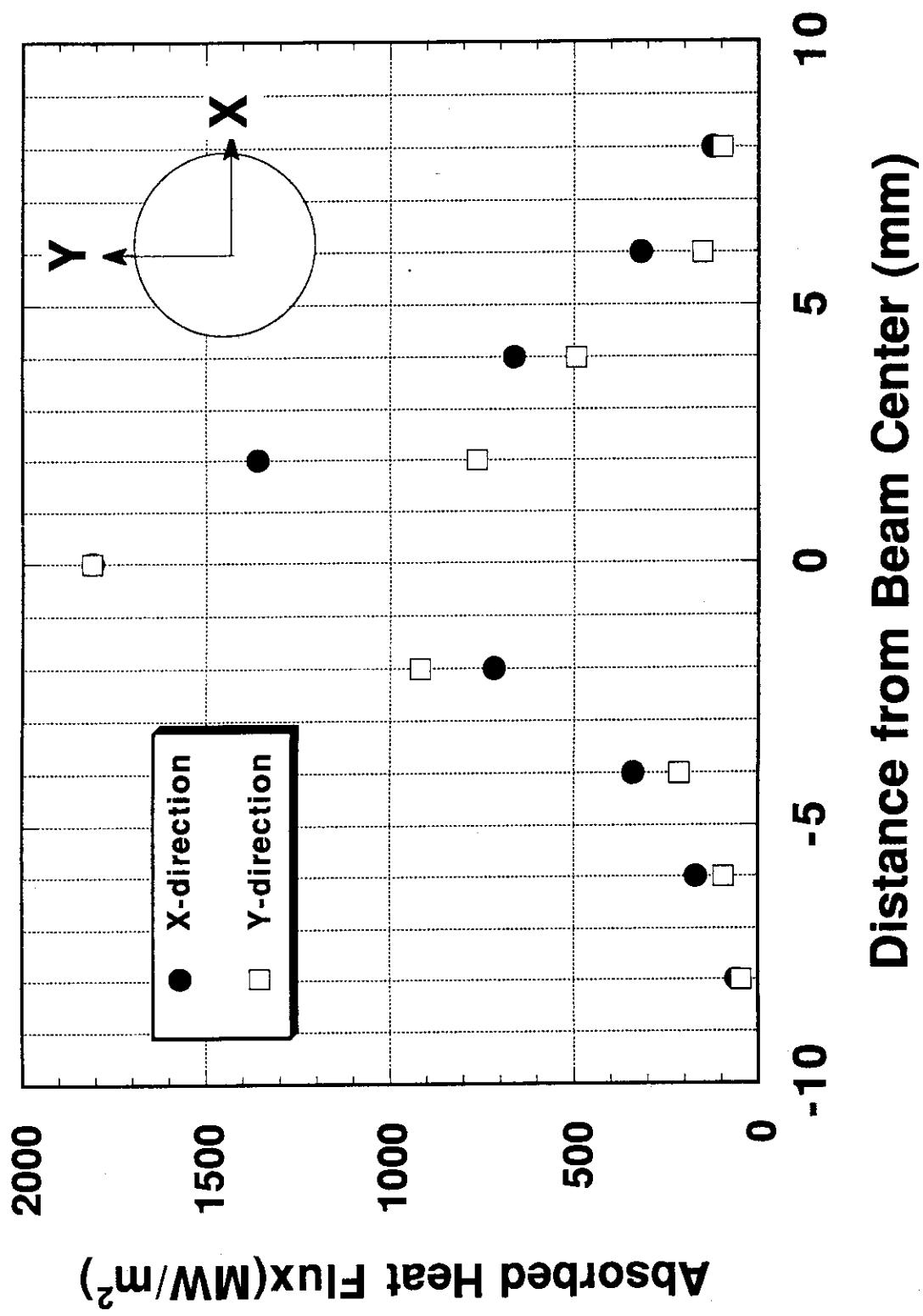


Fig. 2 Profile of heat flux of electron beam

PCC-2S

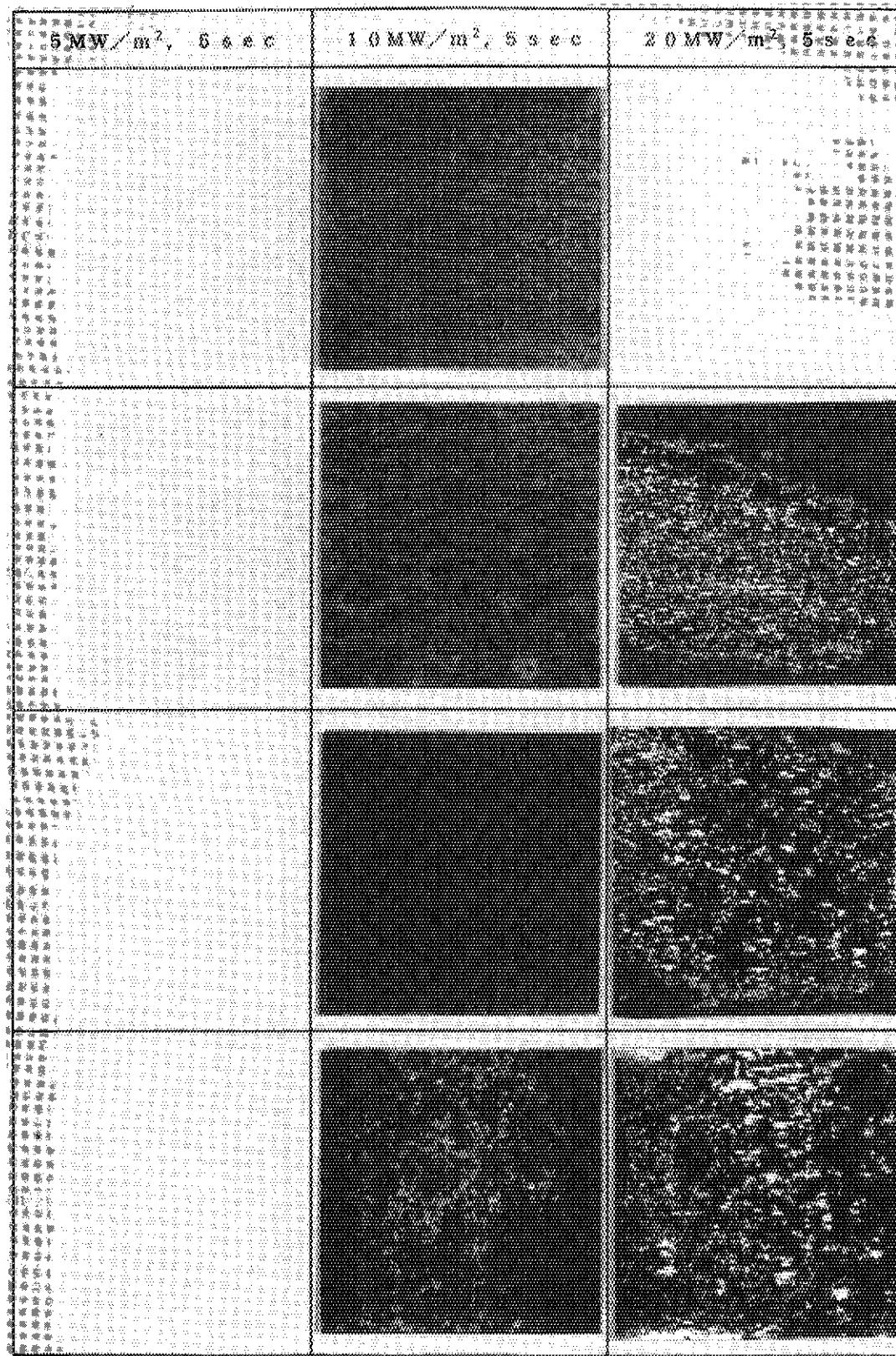


Fig. 3 Photographs of CFCs and Isotropic Graphites
after irradiation with a normal heat load

PD-330S

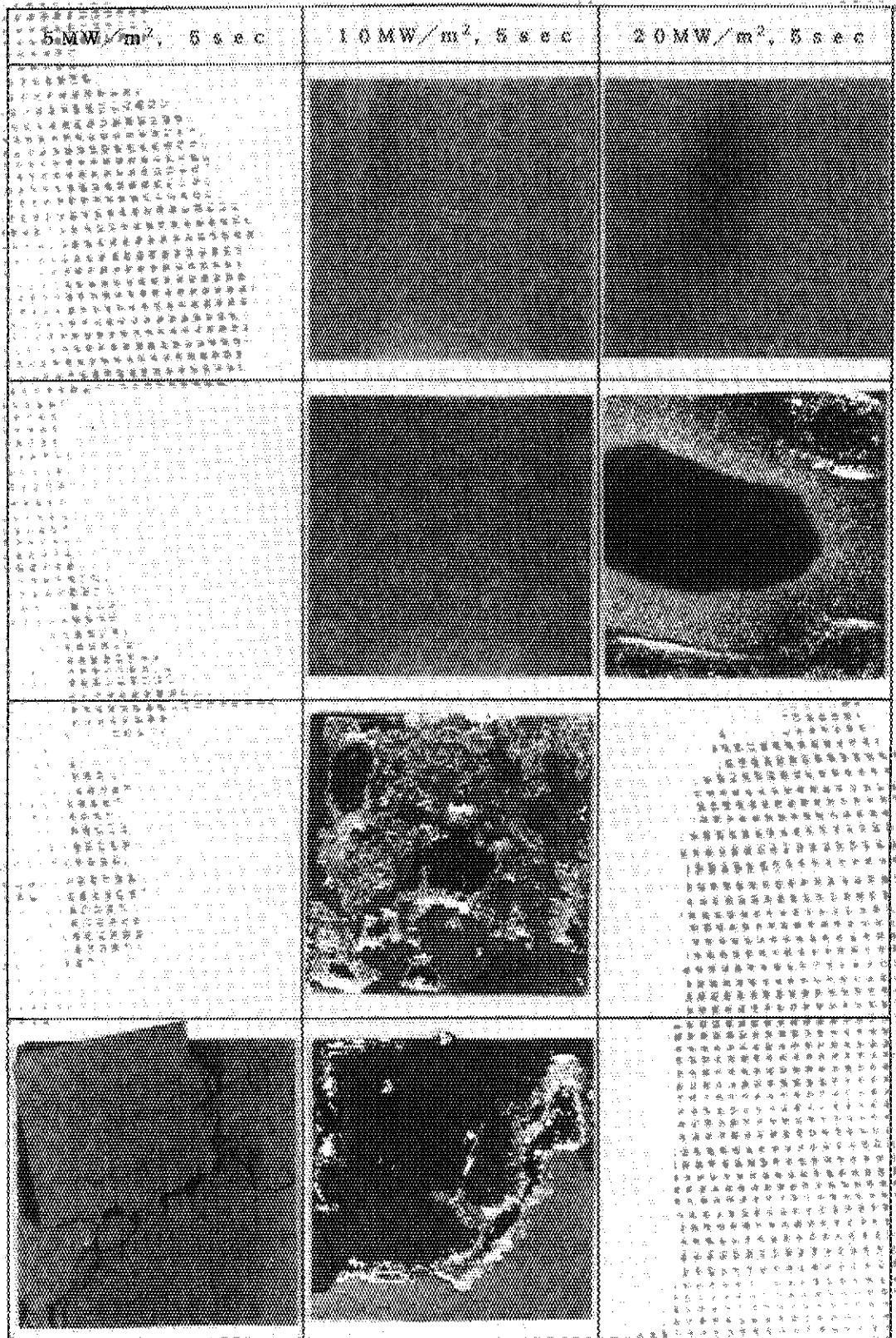
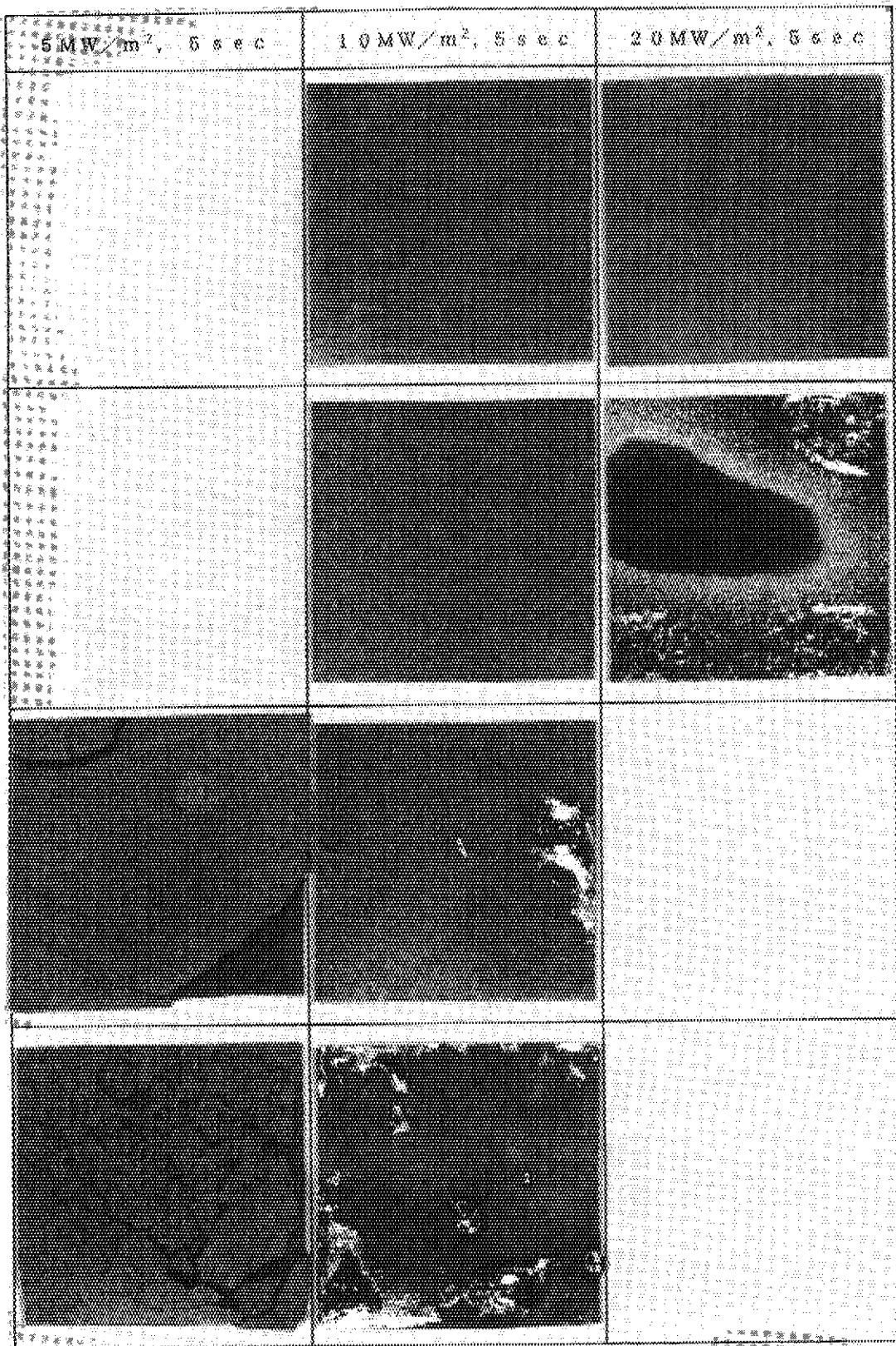


Fig. 3 Continued

PD-600S



CVR (0)

CVR (1)

CVR (2)

CVR (3)

Fig. 3 Continued

HCB-5S1

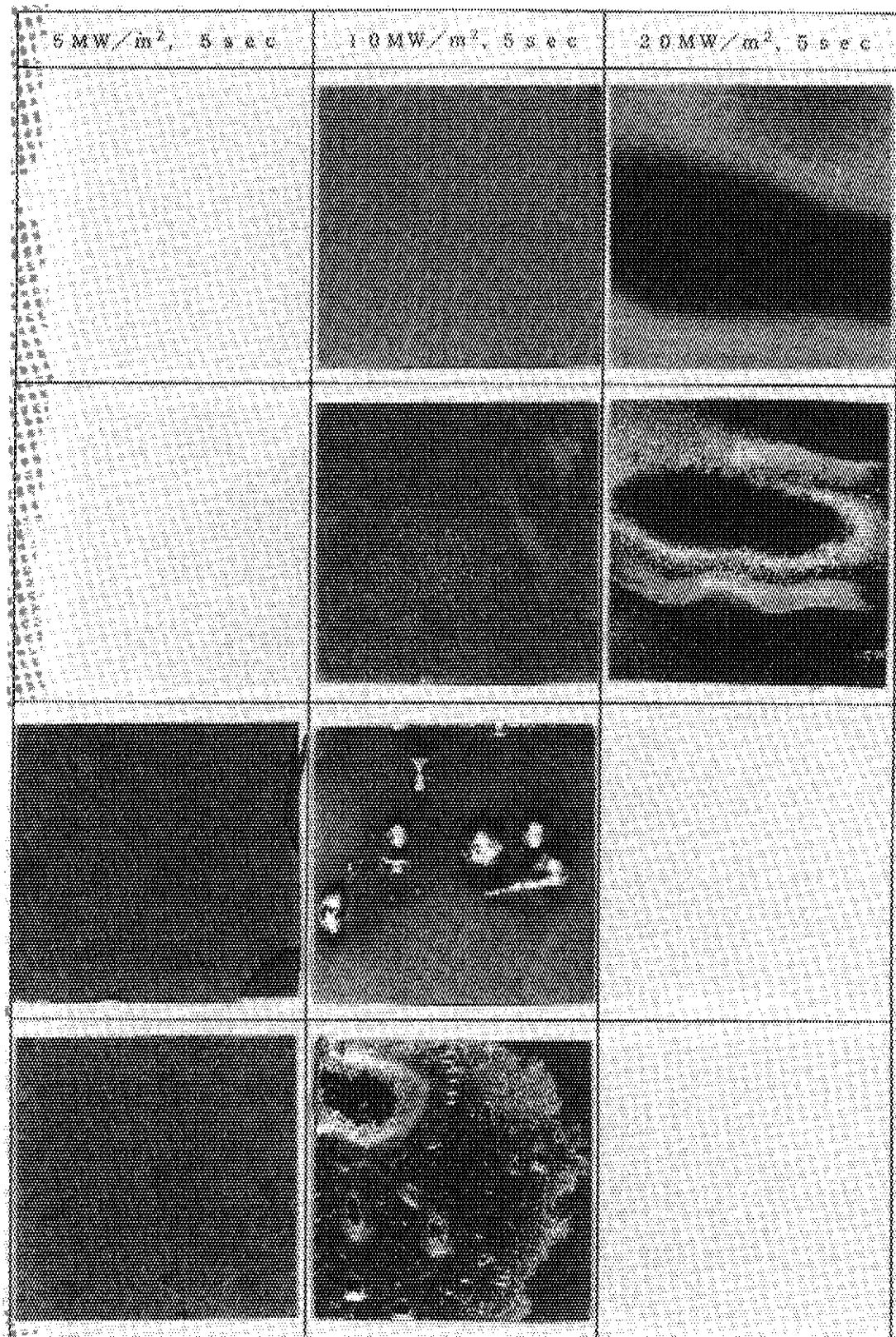
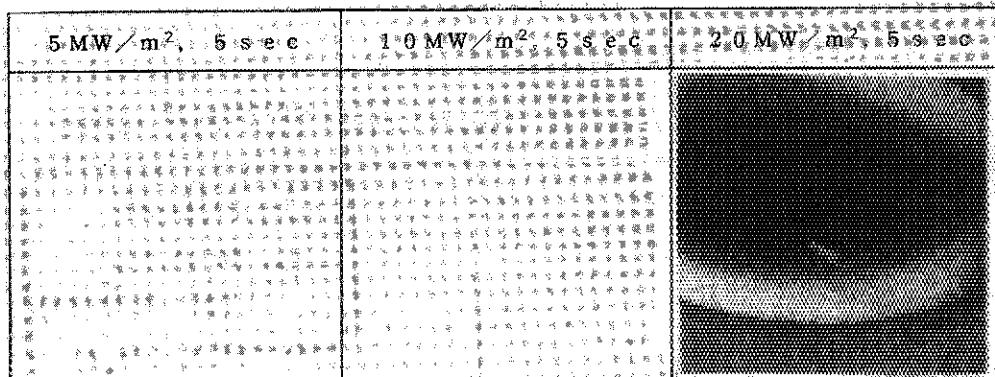


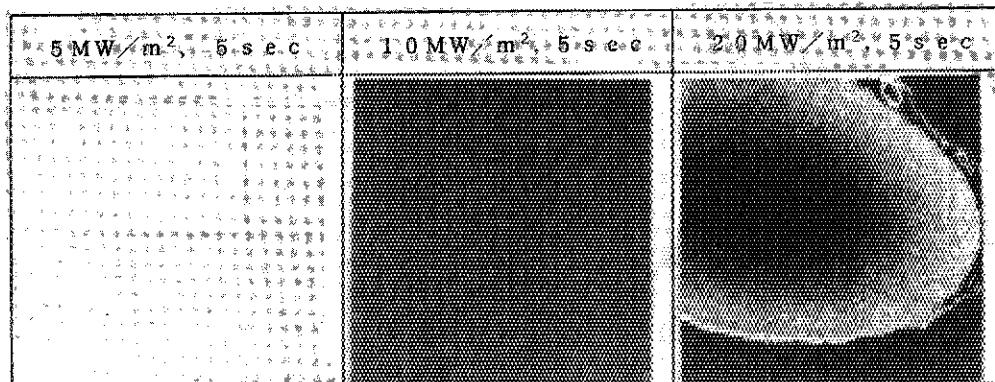
Fig. 3 Continued

ETP-10(1)

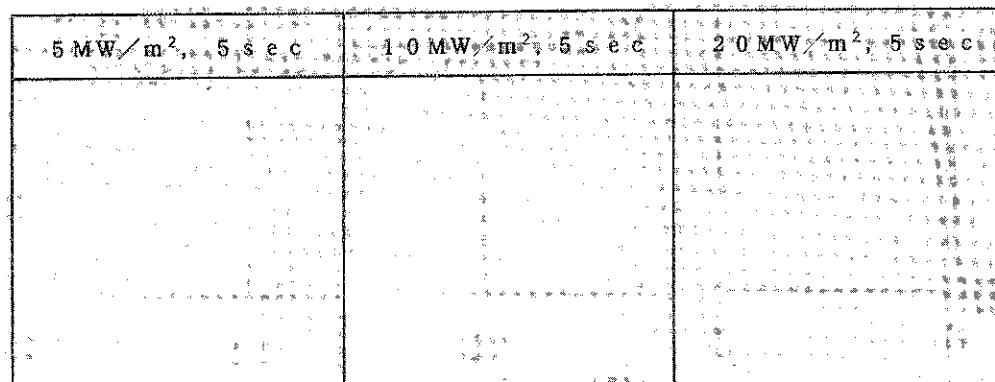


CVR(1)

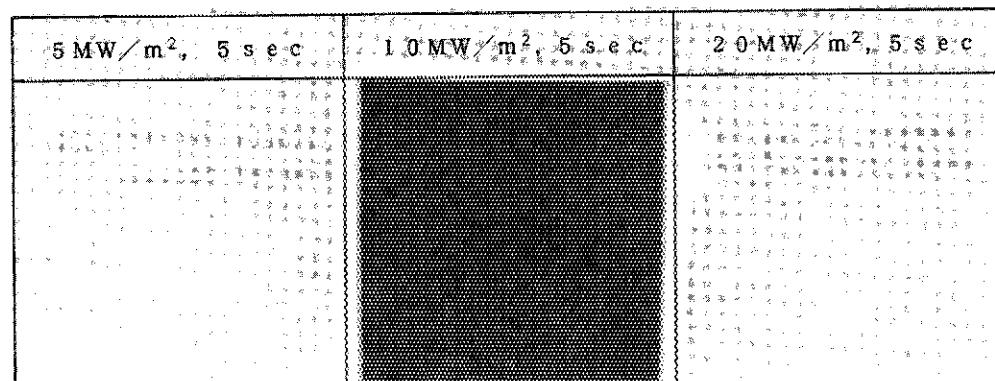
STP-60(1)



CVR(1)



MFC-1(C)



CVR(1)

Fig. 3 Continued

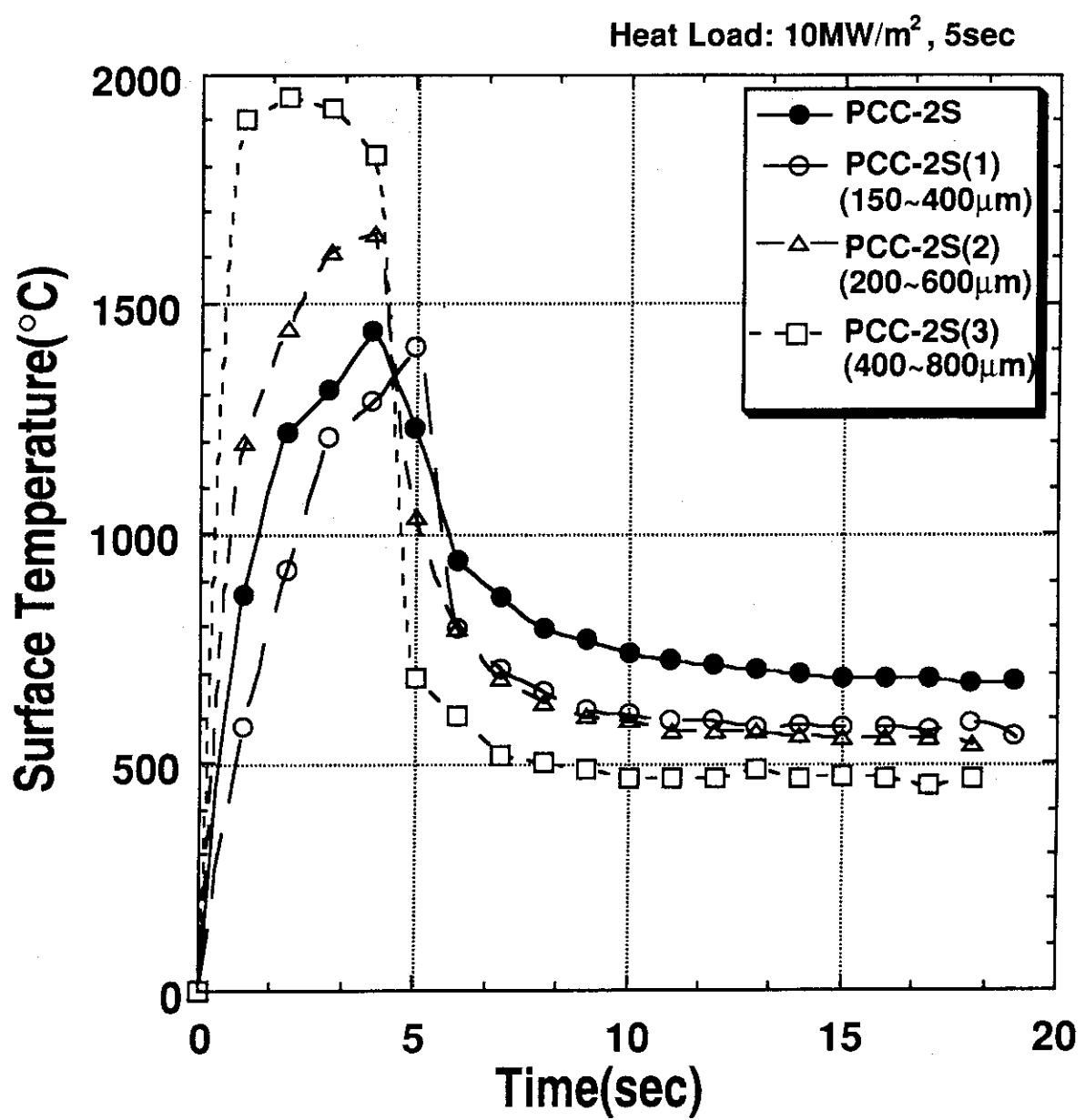


Fig. 4 Changes of surface temperature of B_4C -overlaid CFC(PCC-2S) with 10 MW/m^2 irradiation measured by infrared camera

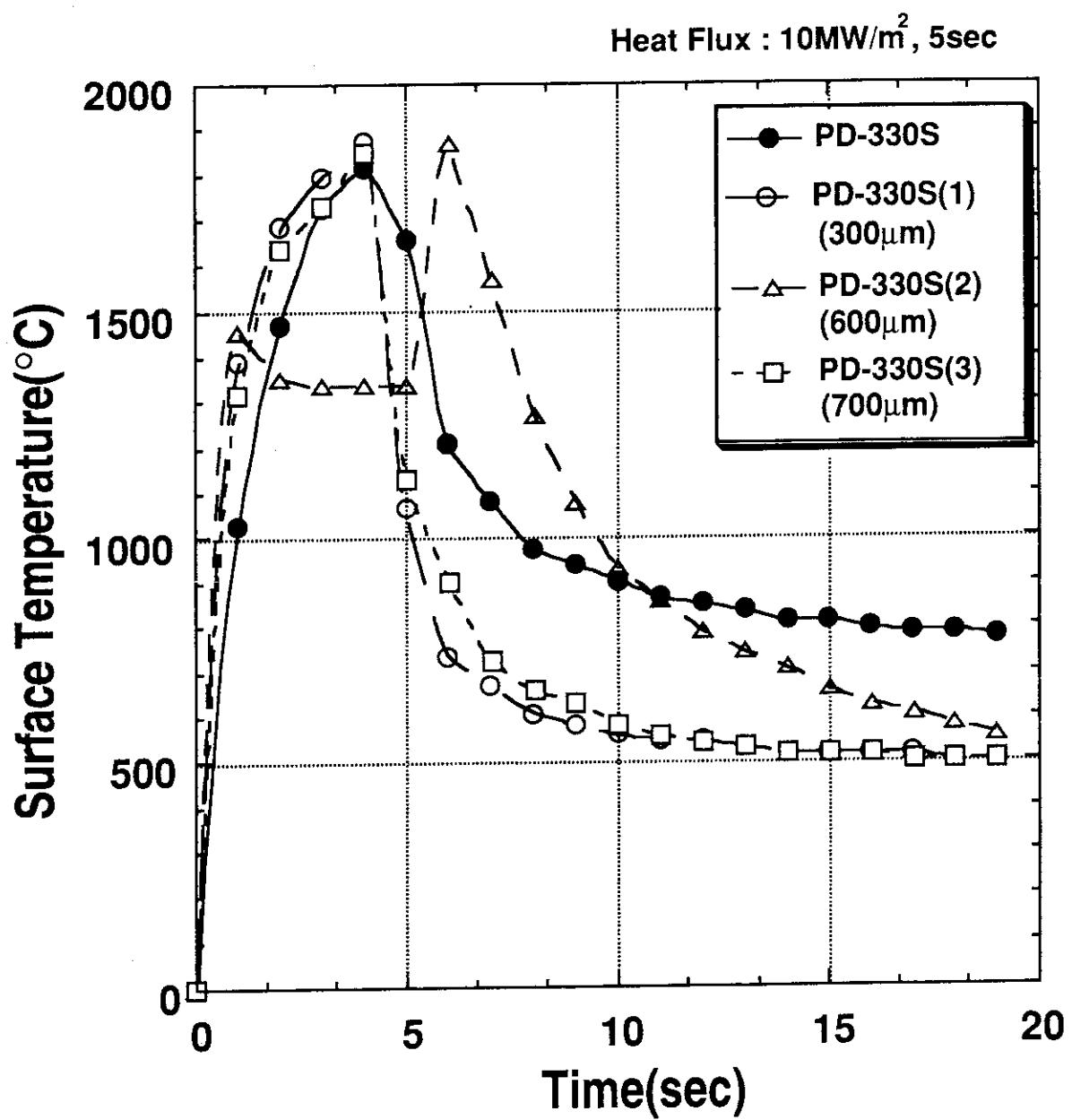


Fig. 5 Changes of surface temperature of B_4C -overlaid CFC(PD-330S) with 10 MW/m^2 irradiation measured by infrared camera

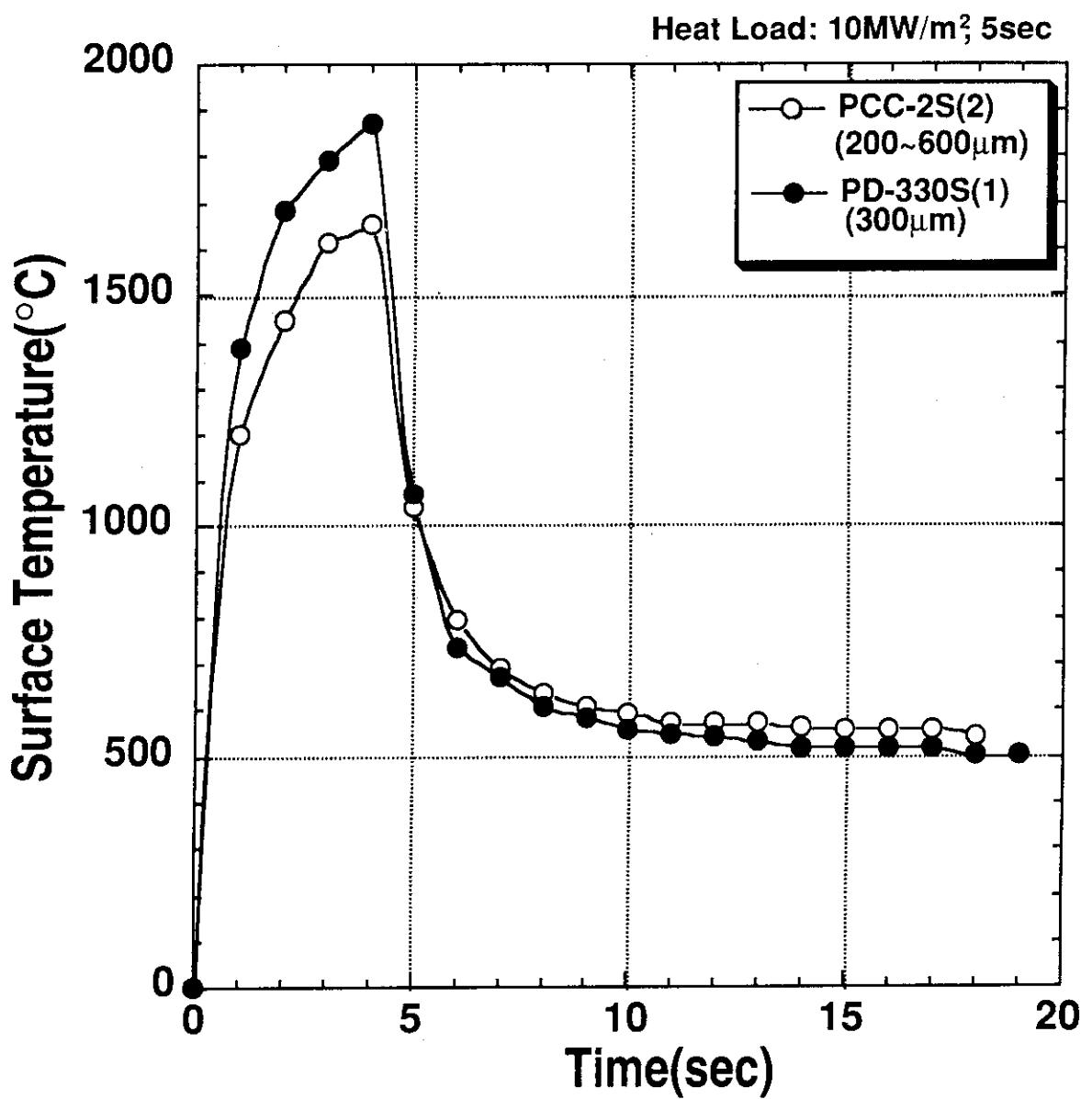


Fig. 6 Changes of surface temperature of B_4C -overlaid PCC-2S and PD-330S with 10 MW/m^2 irradiation measured by infrared camera

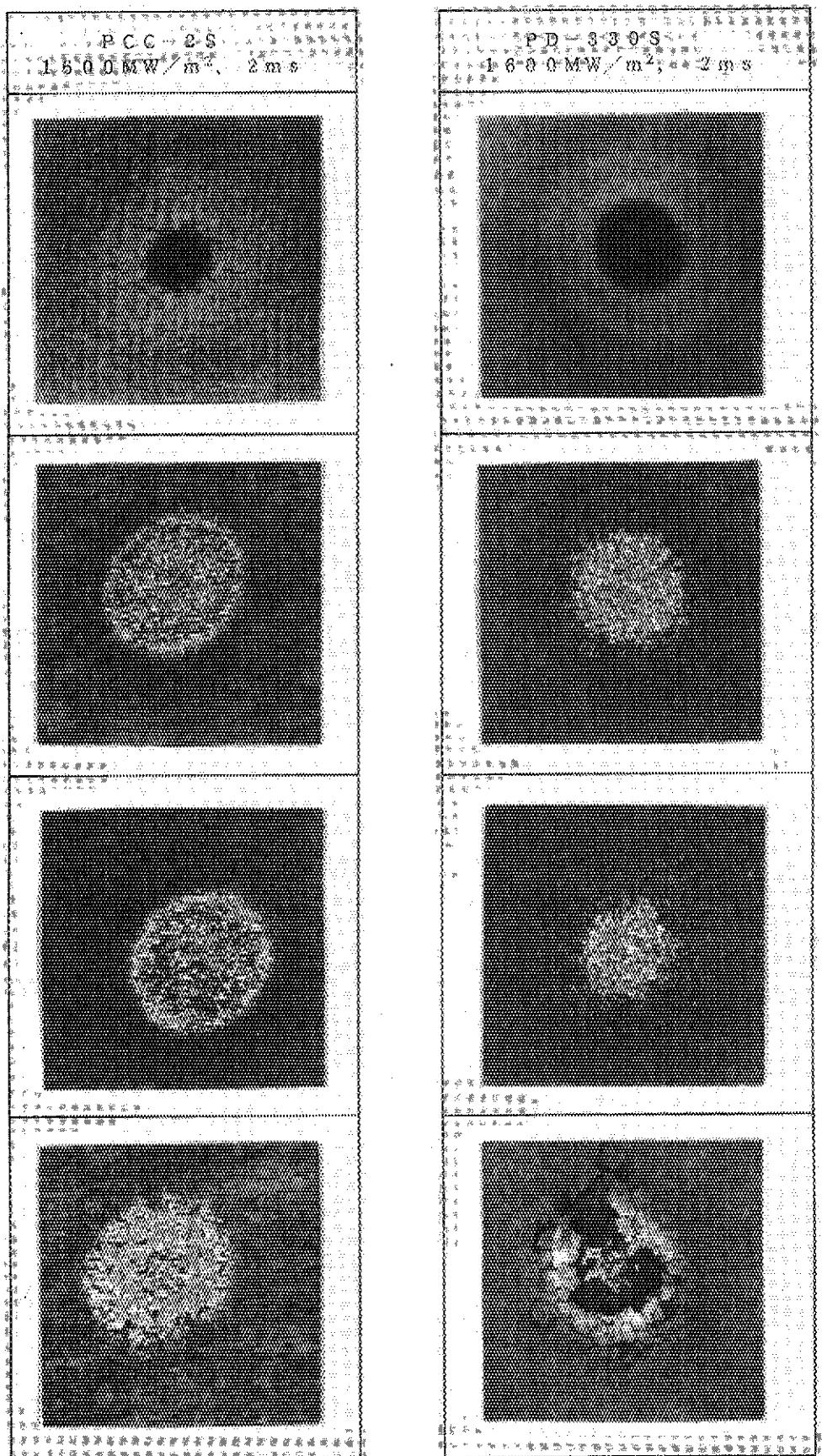


Fig. 7 Photographs of CFCs and Isotropic Graphites
after irradiation with a disruption heat load

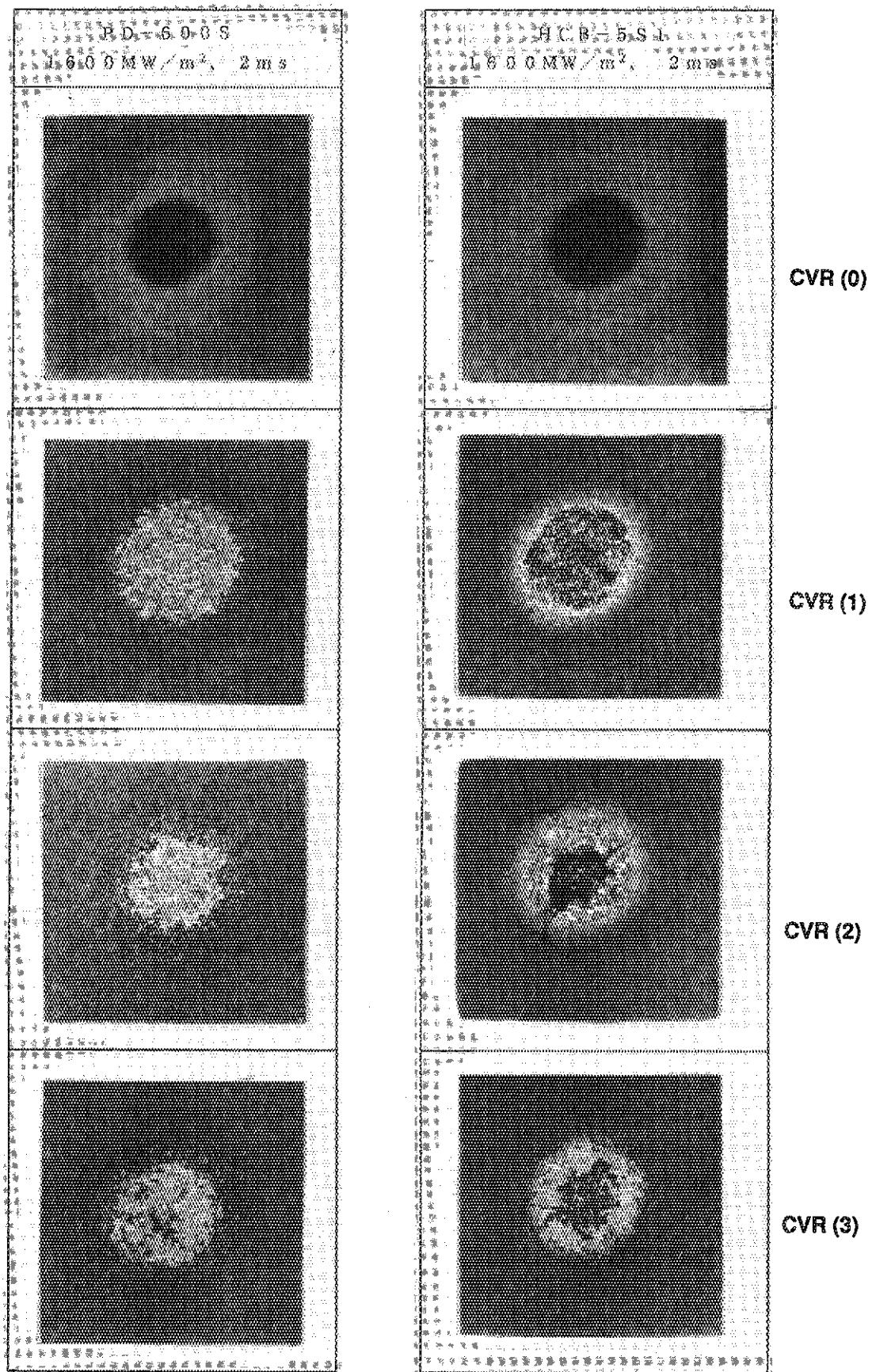


Fig. 7 Continued

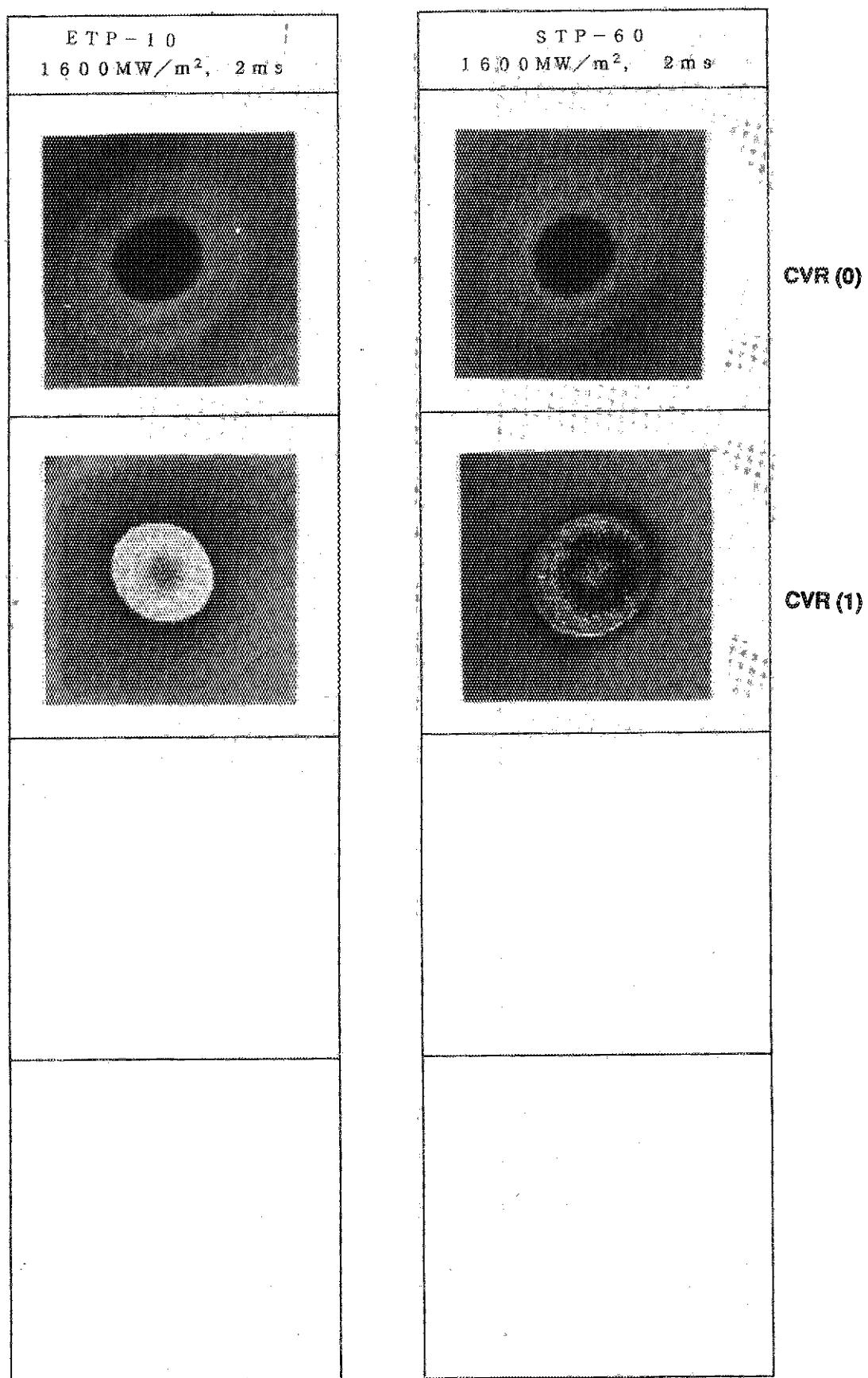


Fig. 7 Continued

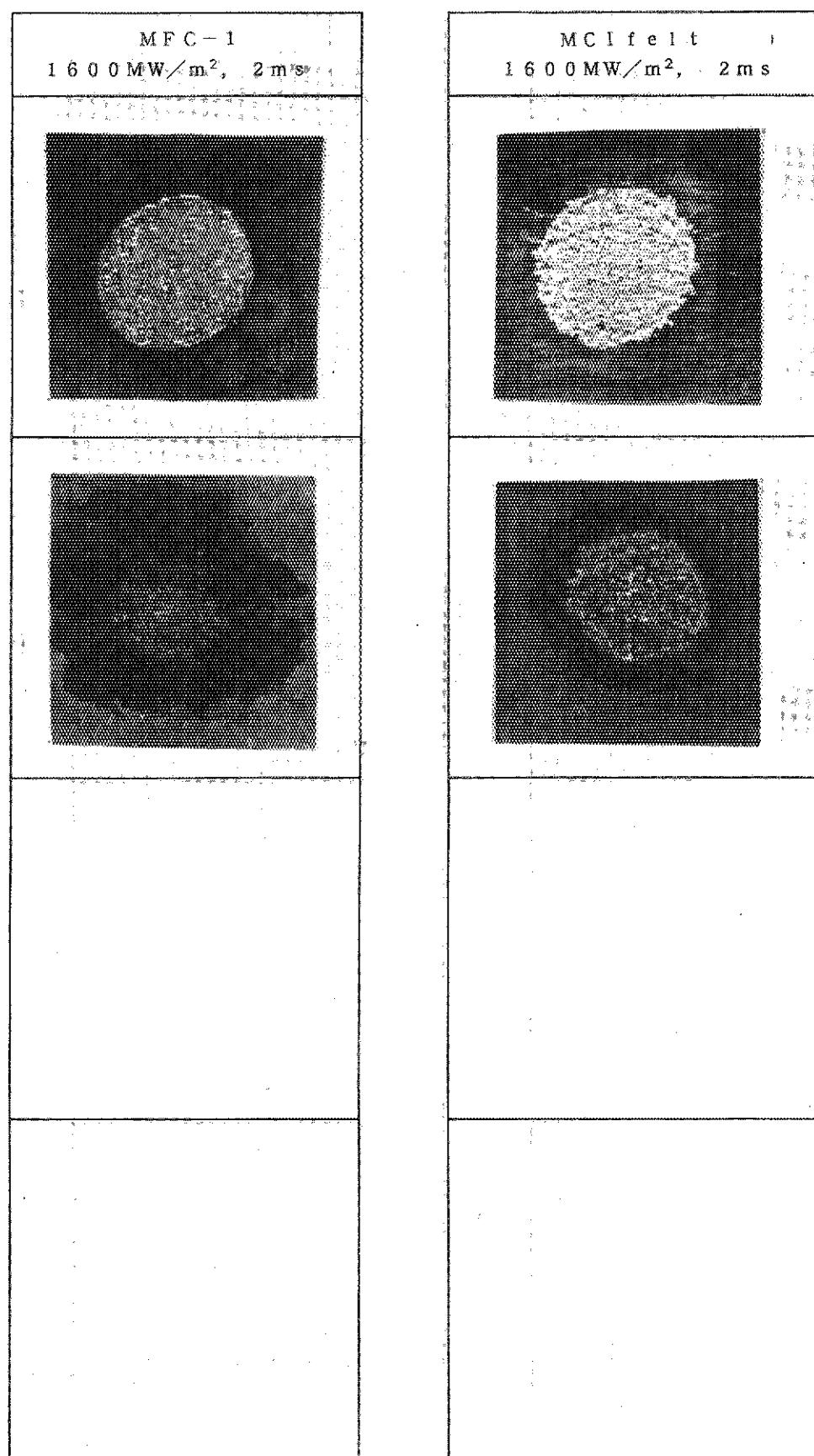


Fig. 7 Continued

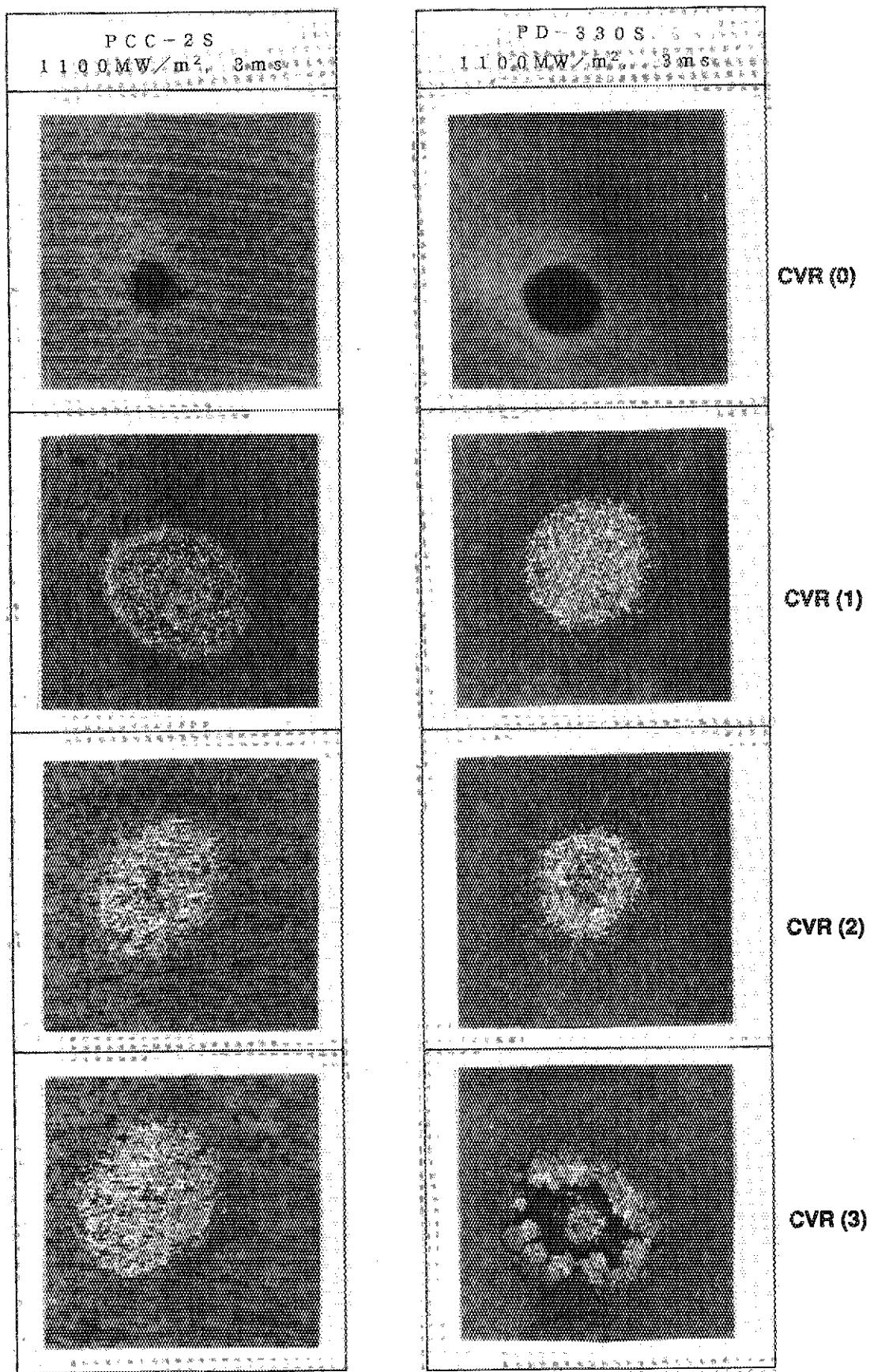


Fig. 7 Continued

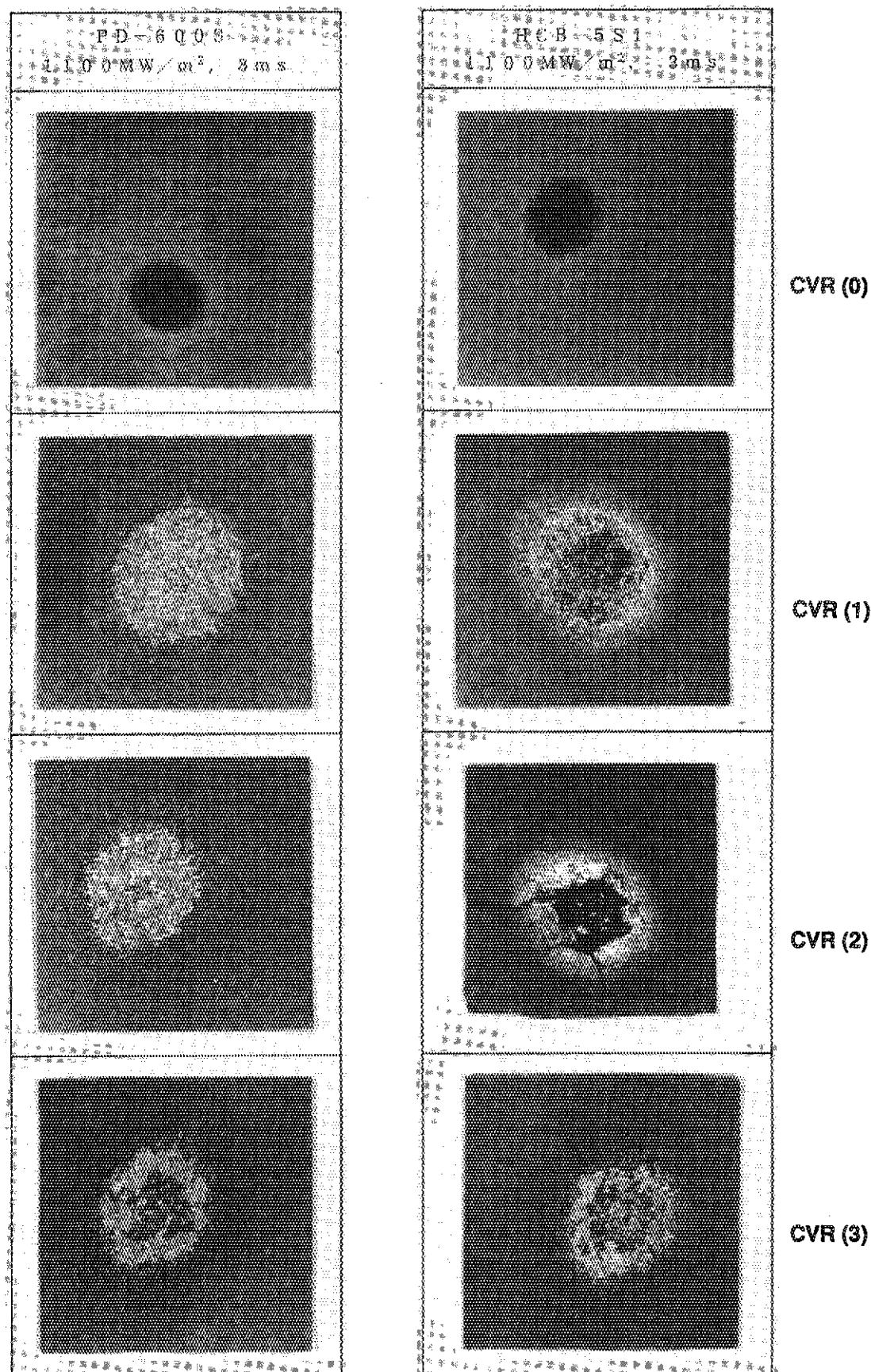


Fig. 7 Continued

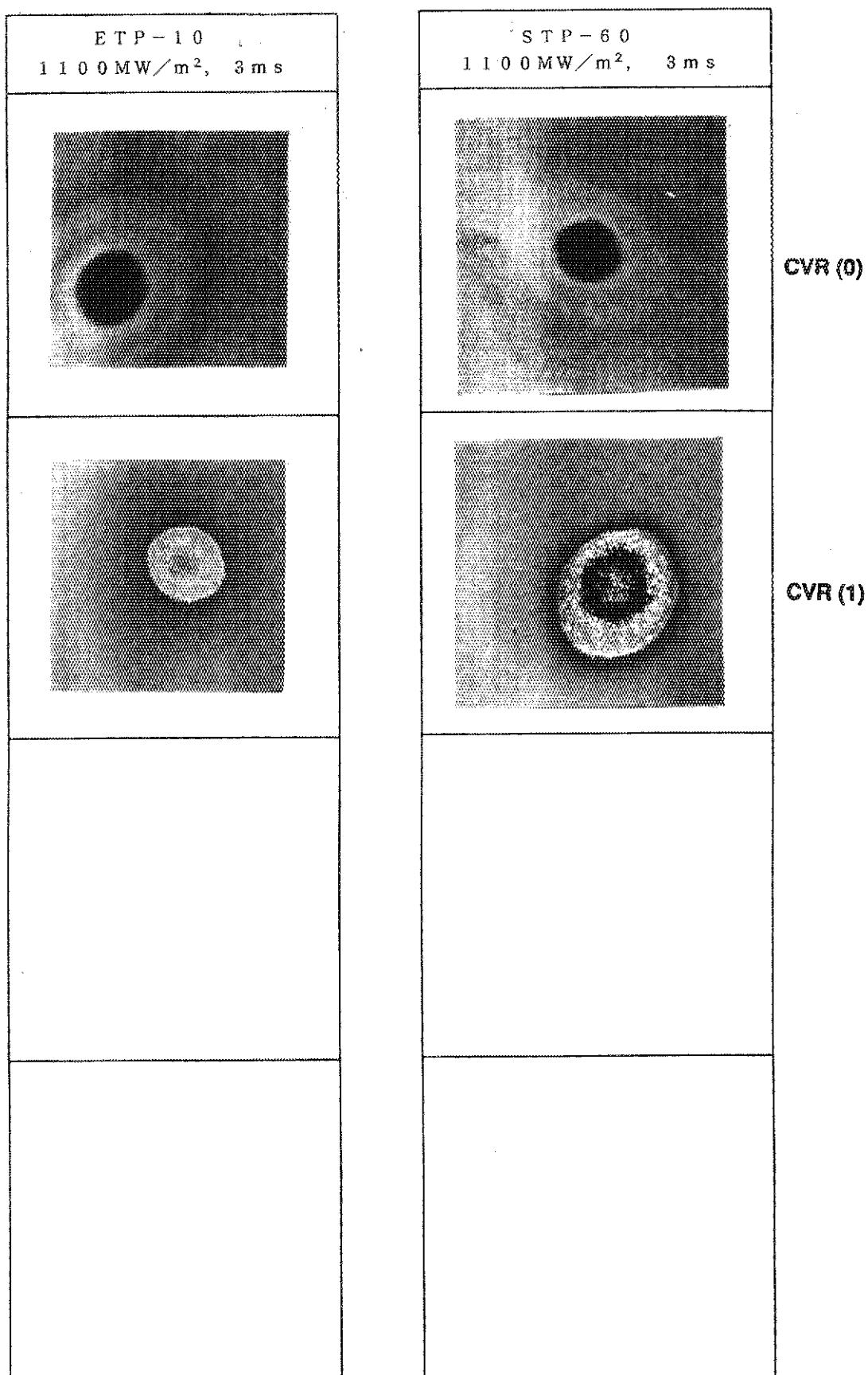


Fig. 7 Continued

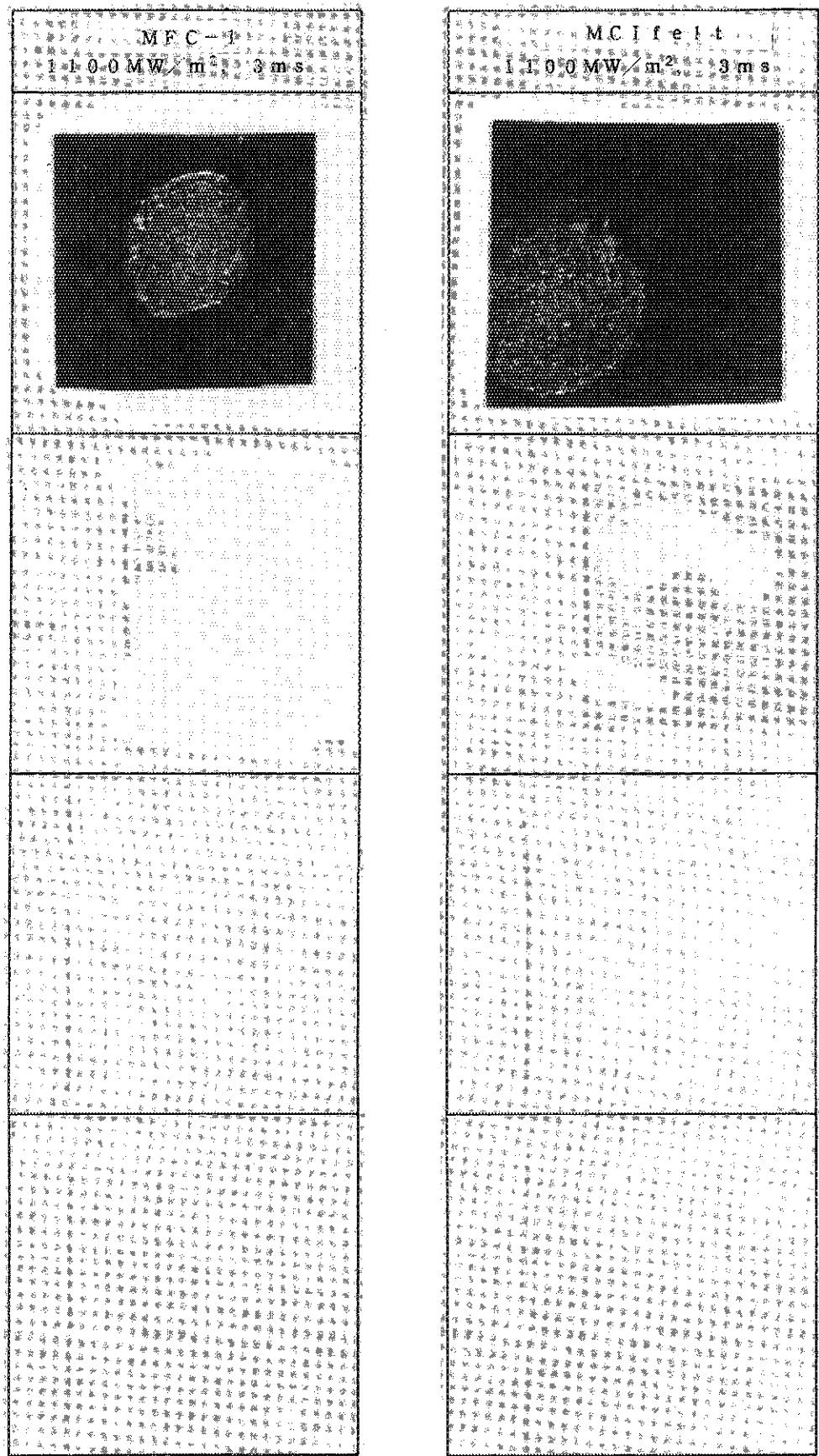


Fig. 7 Continued

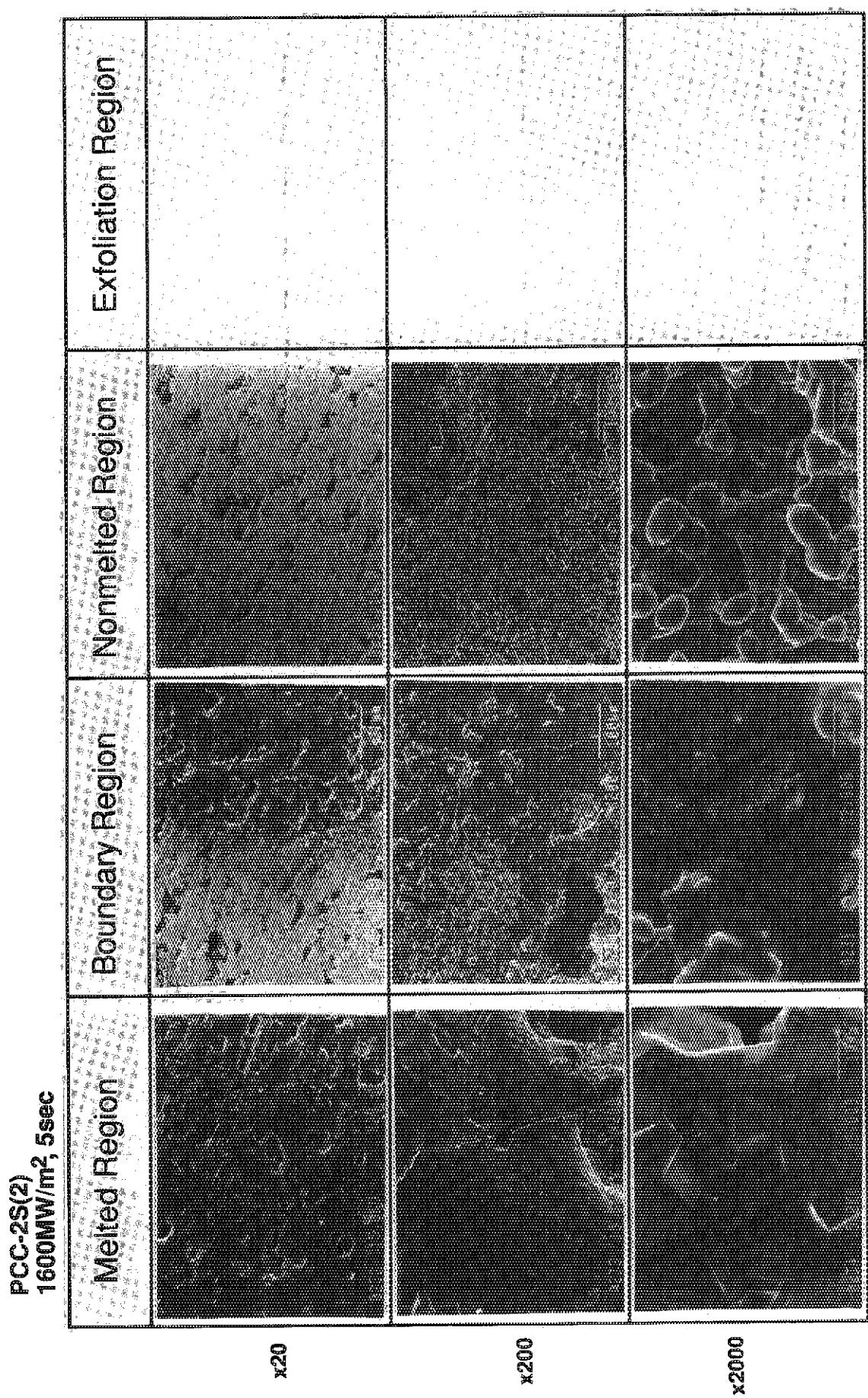


Fig. 8(a) The micrographs of PCC-2S(2) that was not exfoliated after irradiation with a disruption heat load (1600MW/m², 2ms)

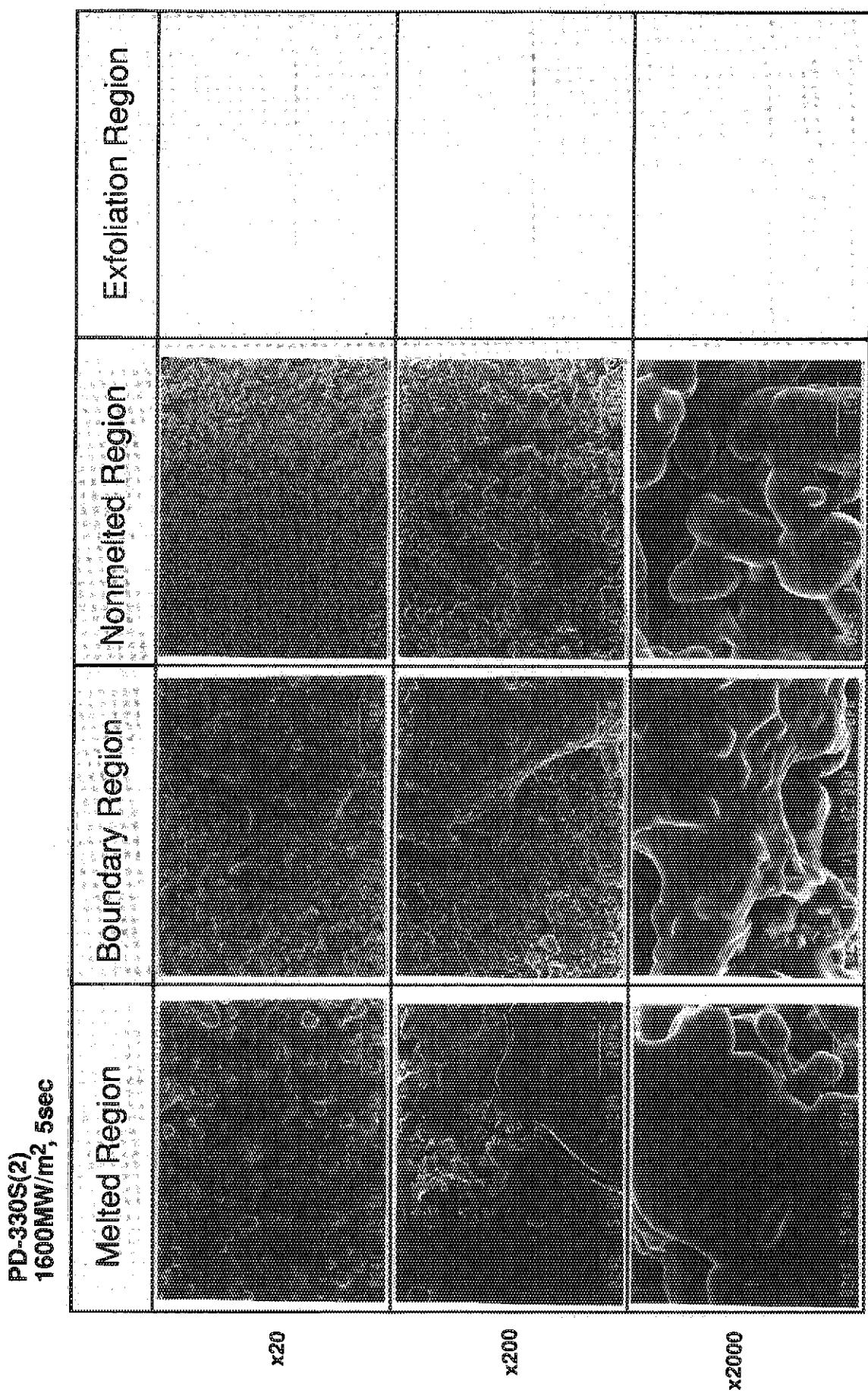


Fig. 8(b) The micrographs of PD-330S(2) that was exfoliated a little after irradiation with a disruption heat load (1600MW/m², 2ms)