

JAERI - M
93-048

KFA におけるダイバータ模擬試験体の
電子ビーム加熱実験

1993年3月

鈴木 哲・秋場 真人・荒木 政則
Jochen LINKE*・Reiner DUWE*・Erich WALLURA*

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、お申しこしてください。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. 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)原子力資料サービス

K F Aにおけるダイバータ模擬試験体の電子ビーム加熱実験

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

鈴木 哲・秋場 真人・荒木 政則

Jochen LINKE* ・Reiner DUWE* ・Erich WALLURA*

(1993年2月9日受理)

1992年2月に日欧共同実験の一環として、K F Aユーリッヒ研究所(独)にて実施したダイバータ模擬試験体の電子ビーム加熱実験について報告する。次期核融合実験炉(I T E R : International Thermonuclear Experimental Reactor)用に試作したサドル型ダイバータ模擬試験体に対して、ユーリッヒ研究所のホットセル内に設置された電子ビーム照射装置(J U D I T H : Juelich Divertor Test Facility Hot Cells)において加熱実験を実施した。この装置は昨年、同研究所に設置されたもので、中性子照射後試料等の放射化した材料の加熱実験を行うことのできる装置である。今回の実験では、I T E Rのダイバータ板に定期的に入射する熱負荷を模擬するために、定常熱負荷 $10\text{MW}/\text{m}^2$ の条件の下で1000サイクルの熱サイクル実験を行った。さらに、ダイバータ模擬試験体接合部が健全性を喪失する熱流束を求めるスクリーニング実験及びディスラプション模擬実験を行った。

熱サイクル実験中、この試験体にはアーマタイトの剝離や除熱性能の劣化といった損傷はみられなかった。さらに、目視可能な亀裂等も観察されなかった。しかし、試験後にK F Aで行った光学顕微鏡による断面観察の結果、試験体製作時に生じたと思われる接合不良が観察された。また、スクリーニング実験ではこの試験体は $16\text{MW}/\text{m}^2$ の熱負荷に耐えることが確認された。ディスラプション模擬実験は推定熱負荷約 $600\text{MW}/\text{m}^2$ 、照射時間 90ms の条件で行った。

Electron Beam Irradiation Experiments of a Divertor Module at KFA

Satoshi SUZUKI, Masato AKIBA, Masanori ARAKI
Jochen LINKE*, Reiner DUWE* and Erich WALLURA*

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

(Received February 9, 1993)

This report presents the results of high heat flux experiment for a divertor mock-up by the use of an electron beam test system at KFA. The experiments were carried out at KFA on 1992 February under a collaboration between Japan and the European Community. The saddle-type divertor module, which was developed for ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), was tested at JUDITH (Juelicher Divertor Test Facility Hot Cells) in KFA. JUDITH is an electron beam test facility which can test radioactive materials. In this experiments, a thermal cycling experiment was performed at a heat flux of 15 MW/m^2 to simulate the divertor plates in ITER. Moreover, a screening experiment and a disruption simulation experiment were carried out.

As a result of the thermal cycling experiment, damage of the module, such like the detachment of the armor tile or the degradation of the thermal response, was not found during the experiment. No crack was observed at the surface of the module. In the screening experiment, the divertor module could withstand against a surface heat flux of 16 MW/m^2 with a duration of 20 s. In disruption simulation experiment, the expected surface heat flux of 600 MW/m^2 was applied to the module at a duration of 90 ms.

*Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Keywords: ITER, Divertor Plate, Saddle Type, JUDITH, Electron Beam
Irradiation, Thermal Cycle, Screening Test, Disruption
Simulation Test

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Setup	2
2.1 Judith	2
2.2 Divertor Mock-up	2
3. Basic Experiments	3
3.1 Beam Current Measurement	3
3.2 Heat Flux Measurement	4
4. Thermal Cycling Experiment	4
4.1 Experimental Condition	5
4.2 Experimental Results	5
4.3 Comparison Between Analytical Results and Experimental Results	6
5. Screening Experiment	6
5.1 Experimental Condition	7
5.2 Experimental Results	7
6. Disruption Simulation Experiment	7
6.1 Experimental Condition	8
6.2 Experimental Results	8
7. Conclusion	9
Acknowledgments	9
References	10

目 次

1. 序 論	1
2. 実験装置	2
2.1 JUDITH	2
2.2 ダイバーク模擬試験体	2
3. 予備実験	3
3.1 ビーム電流測定実験	3
3.2 熱負荷測定	4
4. 熱サイクル実験	4
4.1 実験条件	5
4.2 実験結果	5
4.3 数値解析結果との比較	6
5. スクリーニング実験	6
5.1 実験条件	7
5.2 実験結果	7
6. ディスラプション模擬実験	7
6.1 実験条件	8
6.2 実験結果	8
7. 結 論	9
謝 辞	9
参考文献	10

1. 序 論

原研では次期大型核融合実験装置 (ITER/FER) 用のプラズマ対向機器の開発研究を進めている。これらの大型装置では現有の実験装置に比べ長パルスの運転を予定しているために、ダイバータ板・第1壁等のプラズマ対向機器は厳しい熱負荷・粒子負荷にさらされる。特にダイバータ板は ITER における想定熱負荷が 15MW/m^2 以上であり、その構造材料にとって非常に厳しいものとなっている。このため、原研では黒鉛系材料及び炭素繊維強化炭素複合材料 (CFC材料) のアーマタイルを備えたダイバータ模擬試験体を試作し、異種材料の接合性及び残留応力等の評価、さらには原研の高熱負荷試験装置 JEBIS を用いて、ITER で予想される熱負荷を模擬した加熱実験を実施して熱サイクルに対する異種材料接合体の健全性及び耐久性を評価している。

一方、ITER では核融合炉の実燃料である D 及び T を使用した実験が主に計画されており、D-T 反応により生成される中性子による材料及び接合構造体の損傷、さらには、中性子損傷を受けた接合体の熱サイクル及び熱衝撃に対する挙動の把握等も今後の開発研究課題として挙げられる。

このような観点から、中性子等により放射化及び損傷を受けた材料の高熱負荷実験の必要性が異種材料接合技術の進展に伴って重要視されてきている。

本実験では、1991年にKFAユーリッヒ (独) のホットセル施設内に完成した高熱負荷試験装置 JUDITH (Juelicher Divertor Test Facility Hot Cells) に原研が試作したサドル型ダイバータ模擬試験体を持ち込んで電子ビームによる加熱実験を行った。この高熱負荷試験装置 JUDITH はホットセル内に設置されているため、中性子照射後の放射化した材料/構造体の加熱実験を行うことができる電子ビーム照射装置である。また、本実験で採用したダイバータ模擬試験体構造はサドル型と呼ばれるもので、熱負荷を受けている際にダイバータブロックに発生する応力の低減、さらに実機への適用を考えた場合、炉内補修 (in-situ repair) が可能であるという特長を持っている。本実験の目的は、今回初めて採用したサドル型ダイバータ構造の健全性を評価することにある。

本報告ではダイバータ模擬試験体に対する熱サイクル実験、スクリーニング実験及びディスラプション模擬実験の結果について述べる。

2. 実験装置

2.1 JUDITH (Juelicher Divertor Test Facility Hot Cells)

本実験では熱源としてKFAユーリッヒの高熱負荷試験装置JUDITHを用いた。装置の概要を図1に、主要性能を表1に示す。

表1 JUDITHの主要性能

加速電圧 (kV)	～ 150 kV
ビーム電流 (A)	～ 0.4 A
照射領域	$\phi 2$ mm (minimum) 10 × 10 cm (maximum)
冷却水圧力	～ 3 MPa
冷却水流量	～ 60 l/min
計測機器	パイロメータ1 (1000 ～ 3500 °C) パイロメータ2 (200 ～ 1100 °C) 赤外カメラ

本装置は放射化した材料の加熱実験が行えるように、遠隔操作によって試料の交換及び装置のメンテナンスが可能な設計となっている。

2.2 ダイバータ模擬試験体

実験に供試したダイバータ模擬試験体の外観及び断面をそれぞれ図2及び図3に示す。これまでに原研では銅製のヒートシンクをもたないモノブロック型ダイバータ模擬試験体を試作し、熱負荷 15MW/m^2 ・定常というITERのダイバータ熱負荷条件を達成したが、今回採用したのはサドル型と呼ばれるものである。サドル型は図3に示されているように冷却管をまたぐようにアーマタイルがロウ付けされた構造である。このため、サドル型ダイバータは実機においてはアーマタイルの交換が可

能であるという点で平板型と同様、従来のモノブロック型にはない長所を備えている。また、アーマタイル材料としてはプラズマへの不純物混入を極力抑え、かつ、プラズマからの定常熱負荷及びディスラプションによる熱衝撃から冷却管を保護するために、低原子番号材料である黒鉛系材料が用いられてきたが、今回も黒鉛系材料である炭素繊維強化型炭素複合 (CFC) 材料 (CX-2002U) を採用した。この材料は炭素繊維を 2 次元的に配向し、炭素繊維をもたない従来の等方性黒鉛材料に比べ強度及び熱伝導率の点で優れた特性をもっている。さらに、冷却管には除熱性能を向上させるために、管内にステンレス製のねじりテープ (板厚 1.0mm) を挿入したスワール管 (テープツイスト比 = 2.5) を冷却管として用いている。このスワール管は、ねじりテープをもたない冷却管と比べて、全周加熱の場合では約 2 倍の熱伝達性能を有していると報告されている。⁽¹⁾ この試験体では、アーマタイル、銅ヒートシンク及び冷却管を 1 回の真空ロウ付けで接合し、製作時に余分な熱サイクルが模擬試験体に負荷されることを抑制している。なお、使用したロウ材は Ti-Cu-Ag 系のものである。

3. 予 備 実 験

3.1 ビーム電流測定実験

JUDITHはビーム電流と加速電圧を制御コンピュータ上で設定し、ビーム照射の制御を行っているが、ビーム電流の設定値と実際に試料 (被照射材) に吸収されるビーム電流との間には、試料の材質による電子ビームの反射係数の違いから差が生じる。このため、実際に試料に吸収されるビーム電流を把握しておくことが必要である。実験を行う前に予備実験として、今回のダイバータ模擬試験体のアーマタイルと同一の CFC 材料に対して電子ビームの照射を行い、この材料に吸収されるビーム電流の測定を行った。測定方法は図 4 に示す通りである。試料に 100Ω の抵抗を接続し、照射時に発生する電圧を測定することで試料に入射するビーム電流を決定する。

測定結果を図 5 に示す。この図を見てもわかるように、ビーム電流設定値と実際に試料に吸収されるビーム電流はほぼ比例することがわかった。

能であるという点で平板型と同様、従来のモノブロック型にはない長所を備えている。また、アーマタイル材料としてはプラズマへの不純物混入を極力抑え、かつ、プラズマからの定常熱負荷及びディスラプションによる熱衝撃から冷却管を保護するために、低原子番号材料である黒鉛系材料が用いられてきたが、今回も黒鉛系材料である炭素繊維強化型炭素複合 (CFC) 材料 (CX-2002U) を採用した。この材料は炭素繊維を 2 次元的に配向し、炭素繊維をもたない従来の等方性黒鉛材料に比べ強度及び熱伝導率の点で優れた特性をもっている。さらに、冷却管には除熱性能を向上させるために、管内にステンレス製のねじりテープ (板厚 1.0mm) を挿入したスワール管 (テープツイスト比 = 2.5) を冷却管として用いている。このスワール管は、ねじりテープをもたない冷却管と比べて、全周加熱の場合では約 2 倍の熱伝達性能を有していると報告されている。⁽¹⁾ この試験体では、アーマタイル、銅ヒートシンク及び冷却管を 1 回の真空ロウ付けで接合し、製作時に余分な熱サイクルが模擬試験体に負荷されることを抑制している。なお、使用したロウ材は Ti-Cu-Ag 系のものである。

3. 予 備 実 験

3.1 ビーム電流測定実験

JUDITHはビーム電流と加速電圧を制御コンピュータ上で設定し、ビーム照射の制御を行っているが、ビーム電流の設定値と実際に試料 (被照射材) に吸収されるビーム電流との間には、試料の材質による電子ビームの反射係数の違いから差が生じる。このため、実際に試料に吸収されるビーム電流を把握しておくことが必要である。実験を行う前に予備実験として、今回のダイバータ模擬試験体のアーマタイルと同一の CFC 材料に対して電子ビームの照射を行い、この材料に吸収されるビーム電流の測定を行った。測定方法は図 4 に示す通りである。試料に 100Ω の抵抗を接続し、照射時に発生する電圧を測定することで試料に入射するビーム電流を決定する。

測定結果を図 5 に示す。この図を見てもわかるように、ビーム電流設定値と実際に試料に吸収されるビーム電流はほぼ比例することがわかった。

3.2 熱負荷測定

熱サイクル実験では表面熱負荷 $10\text{MW}/\text{m}^2$ で、試験体が熱的に定常状態になるまで照射を行う。そこで、熱サイクル実験のビーム条件を決定するために熱負荷測定を行った。実験状態の模式図を図6に示す。電子ビームは被照射材の材質、表面性状等によって反射率が大きく異なる。このため、ダイバータ試験体のアーマタイルと反射率がほぼ等しい等方性黒鉛製のチップをカロリメータとして使用した。スリットも同じく等方性黒鉛製で、チップに入射するビームの面積を決定するためのものである。スリットの孔径によってカロリメータの分解能が決るが、今回は 4mm ϕ の孔径のものを使用した。このカロリメータはチップを熱電対自身によって断熱支持し、ビーム照射後に熱的に平衡状態になったチップの温度上昇から熱負荷を算定する。実験は加速電圧を 140kV に固定し、ビーム電流の設定値を変化させ、各電流値に対する熱負荷を測定した。設定電流値と熱負荷の関係は、図7に示すように熱サイクル実験で使用した $10\text{MW}/\text{m}^2$ 付近の熱負荷領域ではほぼ線形関係にあると言える。

熱サイクル実験では掃引コイルを用いて、電子ビームを約 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ の矩形領域に照射する。この照射領域内で熱負荷がどのような分布をもっているかを調べるために、同様の方法で熱負荷分布を測定した。ここではカロリメータを真空容器内に設置された可動テーブル上にセットし、照射領域内の9箇所それぞれ熱負荷の測定を行い、熱負荷分布を算定している。得られた熱負荷分布を図8に示す。今回の熱サイクル実験で使用した熱負荷は照射領域内ではほぼ一様な分布をもっていることを確認した。

4. 熱サイクル実験

CFC銅接合型ダイバータ模擬試験体のロウ付け接合部の健全性を評価するために、原研では高熱負荷試験装置JEBIS及び粒子工学試験装置PBEFにおいて熱サイクル実験を数多く行っているが、今回もそれらと同等の方法で熱サイクル実験を行った。原研の実験では主に複数のアーマタイルに同時に電子ビーム、あるいは水素イオンビームを照射している。しかし、今回の実験ではJUDITHが試験体からの漏れ電子を

3.2 熱負荷測定

熱サイクル実験では表面熱負荷 $10\text{MW}/\text{m}^2$ で、試験体が熱的に定常状態になるまで照射を行う。そこで、熱サイクル実験のビーム条件を決定するために熱負荷測定を行った。実験状態の模式図を図6に示す。電子ビームは被照射材の材質、表面性状等によって反射率が大きく異なる。このため、ダイバータ試験体のアーマタイルと反射率がほぼ等しい等方性黒鉛製のチップをカロリメータとして使用した。スリットも同じく等方性黒鉛製で、チップに入射するビームの面積を決定するためのものである。スリットの孔径によってカロリメータの分解能が決るが、今回は 4mm ϕ の孔径のものを使用した。このカロリメータはチップを熱電対自身によって断熱支持し、ビーム照射後に熱的に平衡状態になったチップの温度上昇から熱負荷を算定する。実験は加速電圧を 140kV に固定し、ビーム電流の設定値を変化させ、各電流値に対する熱負荷を測定した。設定電流値と熱負荷の関係は、図7に示すように熱サイクル実験で使用した $10\text{MW}/\text{m}^2$ 付近の熱負荷領域ではほぼ線形関係にあると言える。

熱サイクル実験では掃引コイルを用いて、電子ビームを約 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ の矩形領域に照射する。この照射領域内で熱負荷がどのような分布をもっているかを調べるために、同様の方法で熱負荷分布を測定した。ここではカロリメータを真空容器内に設置された可動テーブル上にセットし、照射領域内の9箇所それぞれ熱負荷の測定を行い、熱負荷分布を算定している。得られた熱負荷分布を図8に示す。今回の熱サイクル実験で使用した熱負荷は照射領域内ではほぼ一様な分布をもっていることを確認した。

4. 熱サイクル実験

CFC/銅接合型ダイバータ模擬試験体のロウ付け接合部の健全性を評価するために、原研では高熱負荷試験装置JEBIS及び粒子工学試験装置PBEFにおいて熱サイクル実験を数多く行っているが、今回もそれらと同等の方法で熱サイクル実験を行った。原研の実験では主に複数のアーマタイルに同時に電子ビーム、あるいは水素イオンビームを照射している。しかし、今回の実験ではJUDITHが試験体からの漏れ電子を

吸収するためのビームダンプをもたないために、できる限り電子ビームの漏れを低減する必要がある。このため、図9に示すように、 20×20 mmの領域に照射するように電子ビームの掃引幅を狭め、試験体のアーマタイル1個のみに電子ビームを照射する形で熱サイクル実験を行った。なお、掃引は冷却水の流れ方向に5kHz、垂直方向に50kHzの周波数で行った。

4.1 実験条件

実験条件を以下に示す。

・加速電圧	140 kV
・ビーム電流	30 mA
・ピーク表面熱負荷	10 MW/m ²
・照射時間	20 s
・冷却時間	10 s
・冷却水流量	60 l/min (軸流速：約13 m/sに相当)
・冷却水圧力	30 barG

図10に実験の照射パターンを示す。実験はこのような熱サイクルを1000サイクルにわたり試験体に繰り返し負荷した。

実験中の映像を図11に示す。電子ビーム照射はこの図に示すように#2のタイルの 20×20 mmの矩形領域(タイルの寸法は 25×25 mm)に対して行った。照射は1000サイクル行い、途中100サイクルごとに熱電対出力及びパイロメータ出力を記録して、試験体の冷却時定数の変化を観察した。

4.2 実験結果

図12に各サイクルにおける熱電対出力(冷却管外面の温度変化)とパイロメータ出力(アーマタイル表面の温度変化)の比較例を示す。この図から試験体は照射後ほぼ15秒程度で熱的に定常状態に達することがわかる。100サイクル目と1000サイクル目の温度変化を比較した場合、その冷却時定数に変化はなく、試験体の除熱性能の劣化は認められなかった。したがって、このダイバータ模擬試験体は熱負荷10MW/m²(定常)、1000サイクルの繰り返し照射に対して除熱性能を維持することができることを確認した。

4.3 数値解析結果との比較

熱サイクルを受けるダイバータ模擬試験体の2次元非定常熱伝導解析を行った。解析モデルはダイバータ模擬試験体の断面の1/2モデルとし、解析コードは汎用有限要素コードABAQUSを使用した。図13に解析で使用したメッシュ構成図を示す。この解析では8節点アイソパラメトリック要素を使用した。同図に示すように本解析では境界条件としてアーマタイルの受熱表面に一様熱負荷 10MW/m^2 を与え、さらに、冷却管内面には平滑管の2倍の熱伝達係数 $72000\text{W/m}^2\text{K}$ を冷却管壁温に依存しない一定値として与えている。また、試験体からの輻射冷却は今回の解析では特に考慮していない。

解析の結果を図14に示す。実験ではアーマタイル表面の最高温度は 1100°C 前後であったが、解析では 800°C 以下となっており、冷却管の熱電対取り付け位置における最高温度も実験では 100°C 前後であったのに対し、解析では 200°C 前後であった。熱サイクル実験後、試験体の断面観察を行った結果、図15に示すように冷却管とアーマタイル間にギャップがあり、これは製作時のロウ付け不良と考える。このギャップが熱サイクル実験中に発生・進展したものでないことは、実験を通して試験体各部の到達温度に変化がなかったことから明かである。このギャップによって、アーマタイルと冷却管の間の熱伝達が阻害され、熱解析と実験結果との間に上記のような差が生じたものと考えられる。

5. スクリーニング実験

今回試験体として採用したサドル型構造における接合部の耐久性を把握するために、スクリーニング実験を行った。スクリーニング実験は熱サイクル実験と同様にアーマタイル1個に対して電子ビーム照射を行い、熱流束を段階的に増加させる。その際、アーマタイルが冷却管、あるいはヒートシンクとのロウ付け部から剥離したり、冷却条件によっては冷却管がバーンアウトすることも考えられる。このように、試験体の健全性が失われた時点での表面熱流束を、ここではダイバータ模擬試験体の限界熱流束と定義する。この実験ではダイバータ模擬試験体に対して同一の表面熱負荷において熱的に定常状態になるまでの照射を数サイクル行い、表面温度の変化及び熱電対出力の変化から接合部の状態を確認し、限界熱流束を決定する。

4.3 数値解析結果との比較

熱サイクルを受けるダイバータ模擬試験体の2次元非定常熱伝導解析を行った。解析モデルはダイバータ模擬試験体の断面の1/2モデルとし、解析コードは汎用有限要素コードABAQUSを使用した。図13に解析で使用したメッシュ構成図を示す。この解析では8節点アイソパラメトリック要素を使用した。同図に示すように本解析では境界条件としてアーマタイルの受熱表面に一様熱負荷 10MW/m^2 を与え、さらに、冷却管内面には平滑管の2倍の熱伝達係数 $72000\text{W/m}^2\text{K}$ を冷却管壁温に依存しない一定値として与えている。また、試験体からの輻射冷却は今回の解析では特に考慮していない。

解析の結果を図14に示す。実験ではアーマタイル表面の最高温度は 1100°C 前後であったが、解析では 800°C 以下となっており、冷却管の熱電対取り付け位置における最高温度も実験では 100°C 前後であったのに対し、解析では 200°C 前後であった。熱サイクル実験後、試験体の断面観察を行った結果、図15に示すように冷却管とアーマタイル間にギャップがあり、これは製作時のロウ付け不良と考える。このギャップが熱サイクル実験中に発生・進展したものでないことは、実験を通して試験体各部の到達温度に変化がなかったことから明かである。このギャップによって、アーマタイルと冷却管の間の熱伝達が阻害され、熱解析と実験結果との間に上記のような差が生じたものと考えられる。

5. スクリーニング実験

今回試験体として採用したサドル型構造における接合部の耐久性を把握するために、スクリーニング実験を行った。スクリーニング実験は熱サイクル実験と同様にアーマタイル1個に対して電子ビーム照射を行い、熱流束を段階的に増加させる。その際、アーマタイルが冷却管、あるいはヒートシンクとのロウ付け部から剥離したり、冷却条件によっては冷却管がバーンアウトすることも考えられる。このように、試験体の健全性が失われた時点での表面熱流束を、ここではダイバータ模擬試験体の限界熱流束と定義する。この実験ではダイバータ模擬試験体に対して同一の表面熱負荷において熱的に定常状態になるまでの照射を数サイクル行い、表面温度の変化及び熱電対出力の変化から接合部の状態を確認し、限界熱流束を決定する。

5.1 実験条件

熱サイクル実験と同様に電子ビームをダイバータ模擬試験体のアーマタイル1個に照射する形で実験を行った。熱負荷は 12MW/m^2 から 17MW/m^2 まで順次増加させ、それぞれの熱負荷においてダイバータ模擬試験体が熱的に定常状態に達するまで照射を行った。なお、照射の繰り返し数は同一の熱負荷において2～3サイクルである。冷却条件は熱サイクル実験と同一である。

5.2 実験結果

図16に熱負荷 16MW/m^2 における試験体各部の温度変化を示す。試験体はビーム照射終了後速やかに冷却され、この時点では除熱性能の劣化は観察されなかった。次に図17に熱負荷 17MW/m^2 における試験体各部の温度変化を示す。ビーム照射途中で数回ビームがストップしていることがわかる。この実験ではJUDITHのもつ排気能力が問題となった。JUDITHは排気速度 2200 l/s のターボ分子ポンプを1機装備している。しかし、熱負荷が 17MW/m^2 となったところで、アーマタイルからのアウトガスやsublimationが排気能力を上回り、真空度が急激に低下してビームが自動的にストップし、実験続行が不可能となった。このため、アーマタイルの剥離等によって試験体接合部の健全性が失われるまで熱負荷を増加させてビーム照射を行うことができず、限界熱流束を決定することができなかった。今後、JUDITHにおいて同様の実験をする場合には、真空ポンプの増設等の改善が必要であることがわかった。

6. ディスラプション模擬実験

原研の高熱負荷試験装置 JEBIS において数多く実施されているディスラプション模擬実験との比較を行うために、JUDITHにおいて同様の実験を行った。この実験はダイバータ模擬試験体、すなわちロウ付け接合部をもつ構造体に直接電子ビームによってプラズマディスラプションを模擬した高熱負荷を与えるという意味では初の試みである。プラズマディスラプションを模擬した熱負荷をダイバータ模擬試験体に与えることによって、アーマタイル表面には局部的に高い応力が極めて高い歪速

5.1 実験条件

熱サイクル実験と同様に電子ビームをダイバータ模擬試験体のアーマタイル1個に照射する形で実験を行った。熱負荷は 12MW/m^2 から 17MW/m^2 まで順次増加させ、それぞれの熱負荷においてダイバータ模擬試験体が熱的に定常状態に達するまで照射を行った。なお、照射の繰り返し数は同一の熱負荷において2～3サイクルである。冷却条件は熱サイクル実験と同一である。

5.2 実験結果

図16に熱負荷 16MW/m^2 における試験体各部の温度変化を示す。試験体はビーム照射終了後速やかに冷却され、この時点では除熱性能の劣化は観察されなかった。次に図17に熱負荷 17MW/m^2 における試験体各部の温度変化を示す。ビーム照射途中で数回ビームがストップしていることがわかる。この実験ではJUDITHのもつ排気能力が問題となった。JUDITHは排気速度 2200 l/s のターボ分子ポンプを1機装備している。しかし、熱負荷が 17MW/m^2 となったところで、アーマタイルからのアウトガスやsublimationが排気能力を上回り、真空度が急激に低下してビームが自動的にストップし、実験続行が不可能となった。このため、アーマタイルの剥離等によって試験体接合部の健全性が失われるまで熱負荷を増加させてビーム照射を行うことができず、限界熱流束を決定することができなかった。今後、JUDITHにおいて同様の実験をする場合には、真空ポンプの増設等の改善が必要であることがわかった。

6. ディスラプション模擬実験

原研の高熱負荷試験装置 JEBIS において数多く実施されているディスラプション模擬実験との比較を行うために、JUDITHにおいて同様の実験を行った。この実験はダイバータ模擬試験体、すなわちロウ付け接合部をもつ構造体に直接電子ビームによってプラズマディスラプションを模擬した高熱負荷を与えるという意味では初の試みである。プラズマディスラプションを模擬した熱負荷をダイバータ模擬試験体に与えることによって、アーマタイル表面には局部的に高い応力が極めて高い歪速

度で発生すると考えられる。本実験では、この応力が接合部に対してどのような損傷を与えるかに注目している。

6.1 実験条件

JUDITHでは運転条件を調整することによってビーム径が2mm程度の極めて細かいビームを発生することができる。しかし、この実験では被照射材がCFC材料であるために、径の小さな電子ビームではCFC材料を構成する炭素繊維及び炭素マトリクスの分布状態によって損傷深さに大きなバラツキが生じると予想される。このため、今回の実験ではビーム径が約6mm程度となるよう運転条件を調整した。

実験条件を以下に示す。

・加速電圧	140 kV
・ビーム電流	90 mA
・照射時間	90 ms
・ビーム径	約 6 mm
・熱負荷	約 600MW/m ²

※冷却水は試験体が破損することを考えて通水しない。

この実験では原研から持ち込んだカロリメータの分解能が4mmであり、ビーム径6mmに対して不十分であったため熱負荷分布の測定は行わなかった。上記の熱負荷はビーム形状とビーム電流値から推測したものである。

6.2 実験結果

上記の条件の下でディスラプションを模擬した照射を行っても、試験体接合部の剥離等は目視では観察できなかった。照射後のダイバータ模擬試験体のアーマイル表面をSEMによって観察した。図18-(I)~(II)はそれぞれアーマイル照射位置のマクロ観察像、照射位置中央部の損傷域を示している。電子ビーム照射によって損傷を受けた領域は炭素繊維及び炭素マトリクスが蒸発、あるいは粒子飛散を生じ、製造過程で炭素繊維のまわりに付着したと考えられている熱分解黒鉛層が主に残留している。この層は炭素繊維や炭素マトリクスと比較して熱伝導率が高い性質をもつ

ている。このため、ビーム照射時に熱伝導率の低い炭素繊維と炭素マトリクスが選択的に蒸発し、図18に示されるような様相を呈していると考えられる。

7. 結 論

- 1) 熱サイクル実験の結果、ダイバータ模擬試験体には目視で確認可能な亀裂や除熱性能の劣化といった損傷はみられず、本試験体は $10\text{MW}/\text{m}^2$ ・定常、1000サイクルの繰り返し熱負荷に対して熱的には健全性を維持することがわかった。
- 2) スクリーニング実験の結果、本試験体は少なくとも $16\text{MW}/\text{m}^2$ の熱負荷に対して耐えることが確認された。
- 3) ディスラプション模擬実験の結果、ダイバータ模擬試験体のアーマタイル表面は損傷を受けたものの、照射の際に受熱面に発生する熱応力によるロウ付け部の剥離は観察されなかった。
- 4) 実験後の断面観察の結果、試験体冷却管とアーマタイルの間には接合過程で発生したと考えられるギャップが確認され、サドル型ダイバータ構造の製作過程に改善の必要があることがわかった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をしていただいた小原祥裕室長をはじめとするNBI加熱研究室の諸氏に感謝の意を表します。また、終始激励していただいた島本進 核融合工学部長、鹿園直基 那珂研究所長に感謝します。

ている。このため、ビーム照射時に熱伝導率の低い炭素繊維と炭素マトリクスが選択的に蒸発し、図18に示されるような様相を呈していると考えられる。

7. 結 論

- 1) 熱サイクル実験の結果、ダイバータ模擬試験体には目視で確認可能な亀裂や除熱性能の劣化といった損傷はみられず、本試験体は $10\text{MW}/\text{m}^2$ ・定常、1000サイクルの繰り返し熱負荷に対して熱的には健全性を維持することがわかった。
- 2) スクリーニング実験の結果、本試験体は少なくとも $16\text{MW}/\text{m}^2$ の熱負荷に対して耐えることが確認された。
- 3) ディスラプション模擬実験の結果、ダイバータ模擬試験体のアーマタイル表面は損傷を受けたものの、照射の際に受熱面に発生する熱応力によるロウ付け部の剥離は観察されなかった。
- 4) 実験後の断面観察の結果、試験体冷却管とアーマタイルの間には接合過程で発生したと考えられるギャップが確認され、サドル型ダイバータ構造の製作過程に改善の必要があることがわかった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をしていただいた小原祥裕室長をはじめとするNBI加熱研究室の諸氏に感謝の意を表します。また、終始激励していただいた島本進 核融合工学部長、鹿園直基 那珂研究所長に感謝します。

ている。このため、ビーム照射時に熱伝導率の低い炭素繊維と炭素マトリクスが選択的に蒸発し、図18に示されるような様相を呈していると考えられる。

7. 結 論

- 1) 熱サイクル実験の結果、ダイバータ模擬試験体には目視で確認可能な亀裂や除熱性能の劣化といった損傷はみられず、本試験体は $10\text{MW}/\text{m}^2$ ・定常、1000サイクルの繰り返し熱負荷に対して熱的には健全性を維持することがわかった。
- 2) スクリーニング実験の結果、本試験体は少なくとも $16\text{MW}/\text{m}^2$ の熱負荷に対して耐えることが確認された。
- 3) ディスラプション模擬実験の結果、ダイバータ模擬試験体のアーマタイル表面は損傷を受けたものの、照射の際に受熱面に発生する熱応力によるロウ付け部の剥離は観察されなかった。
- 4) 実験後の断面観察の結果、試験体冷却管とアーマタイルの間には接合過程で発生したと考えられるギャップが確認され、サドル型ダイバータ構造の製作過程に改善の必要があることがわかった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をしていただいた小原祥裕室長をはじめとするNBI加熱研究室の諸氏に感謝の意を表します。また、終始激励していただいた島本進 核融合工学部長、鹿園直基 那珂研究所長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) W.R. Gambill, R.D. Bundy and R.W. Wansborough, "Heat transfer, burnout and pressure drop for water in swirl flow through tubes with internal twisted tapes", ORNL-2911, OakRidge National Laboratory, 1960.
- 2) S.Suzuki, M. Akiba, M. Araki, K. Yokoyama, "Thermal cycling experiments of monoblock divertor modules for fusion experimental reactors", Fusion Technology 21 (1992) 1858-1862
- 3) M. Araki, M. Ogawa, M. Akiba, S. Suzuki, "Experimental and analytical evaluations on critical heat flux under one sided heating condition for fusion applications", Fusion Technology 21 (1992) 1835-1839
- 4) T. Kuroda and G. Vieider, ITER plasma facing components, ITER documentation series No. 30, IAEA, Vienna, 1990

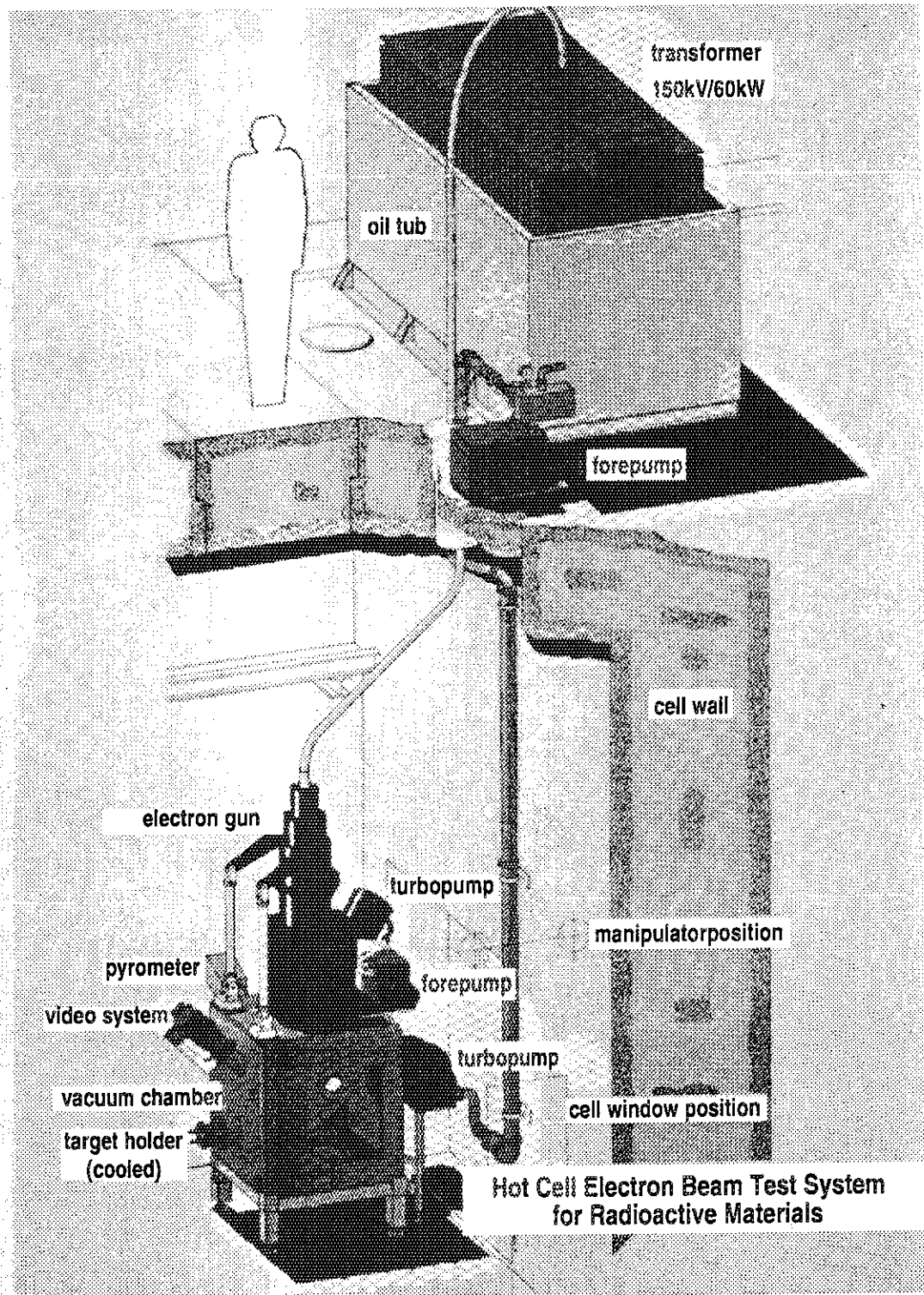


図1 JUDITH(Juelicher Divertor Test Facility Hot Cells)

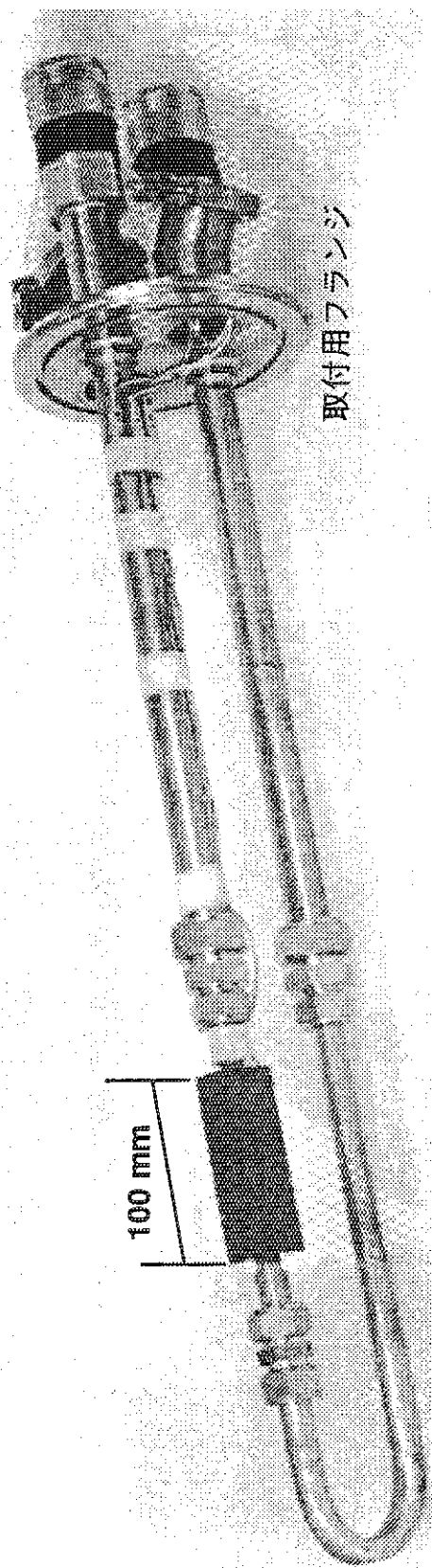


図2 ダイバータ模擬試験体外観

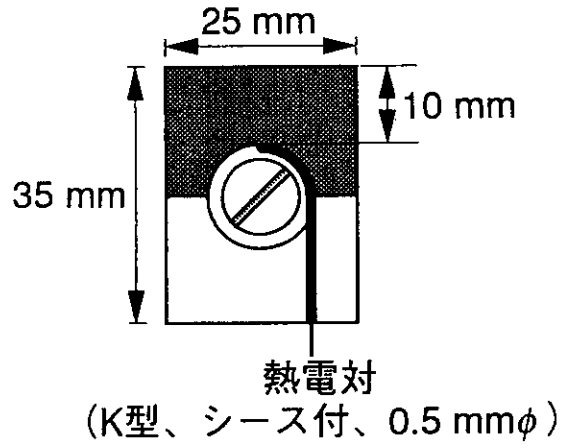


図3 ダイバーク模擬試験体断面図
(熱電対は冷却管に設けた溝に直接ロウ付けされている。)

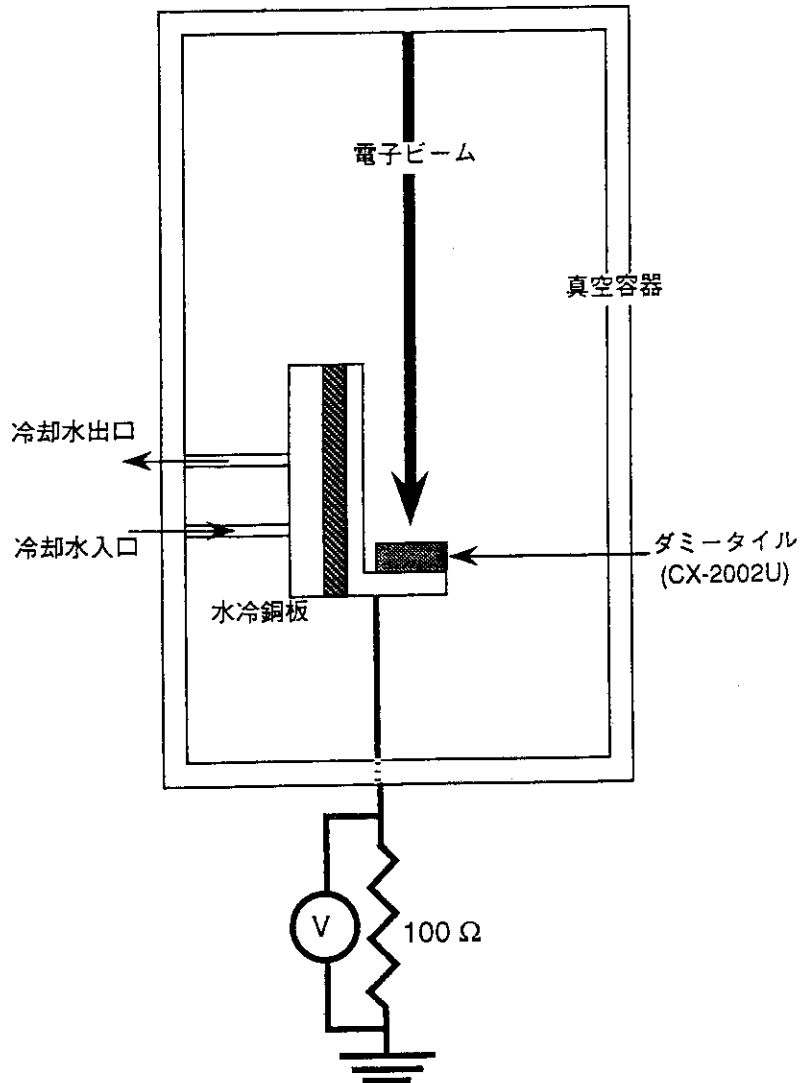


図4 ビーム電流測定実験 概略図

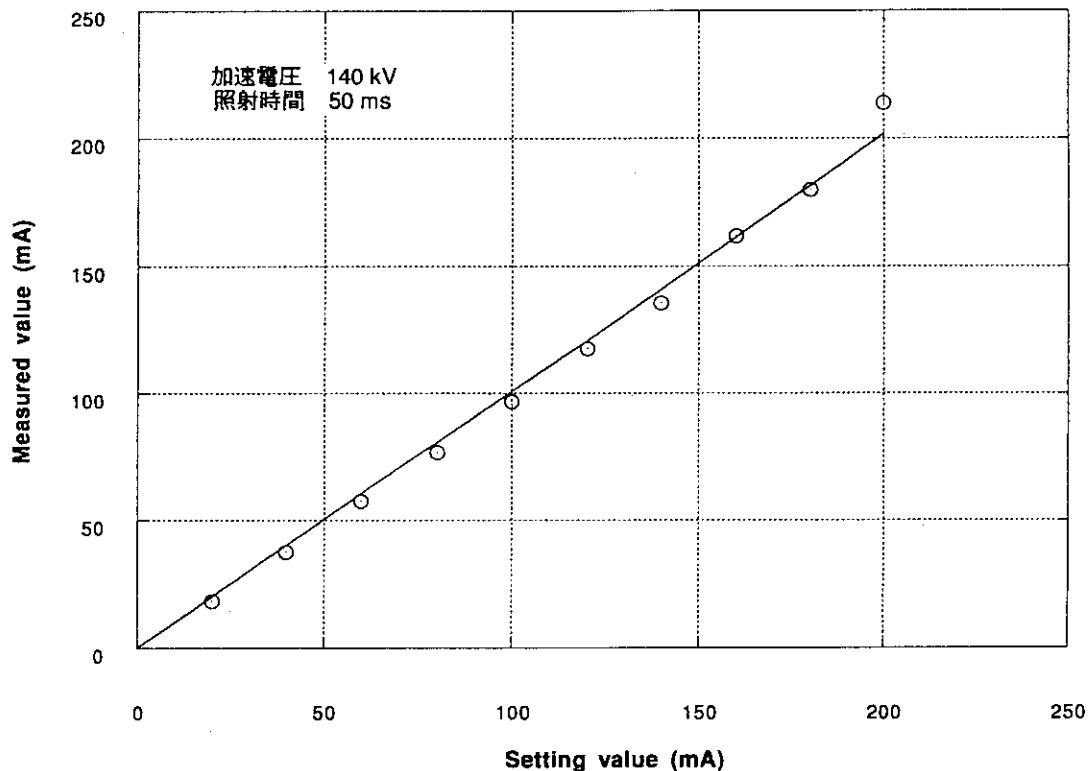


図5 ビーム電流測定結果
 (ビーム電流設定値と実際に試料に吸収される電流は比例する。)

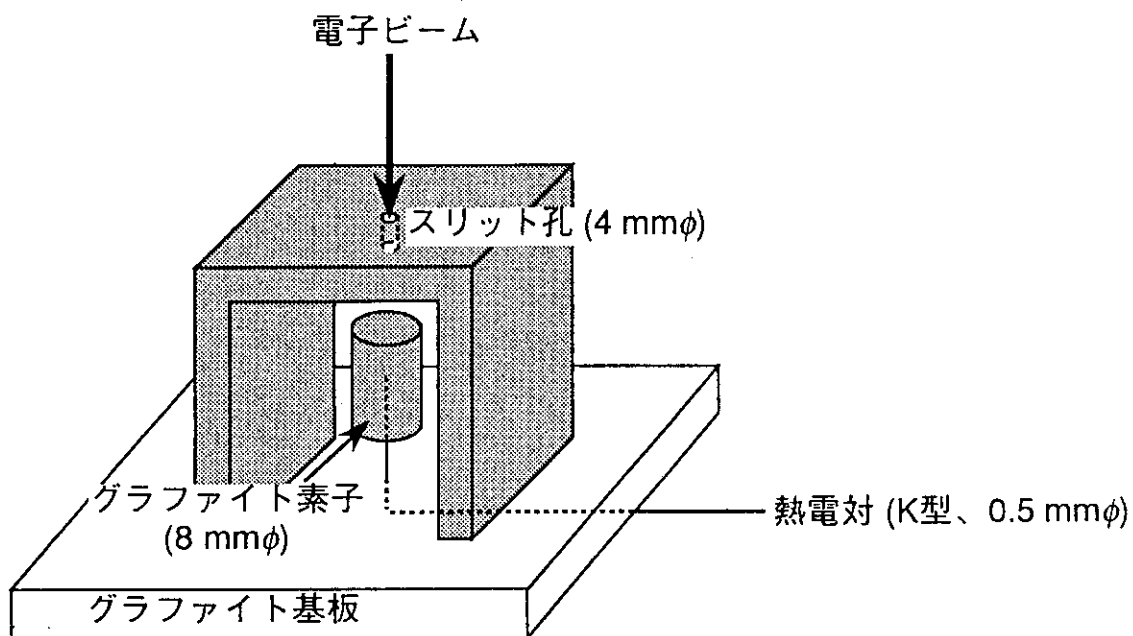


図6 熱負荷分布測定用グラファイト製カロリメータ
 (グラファイト素子は熱電対自身によって断熱支持される。)

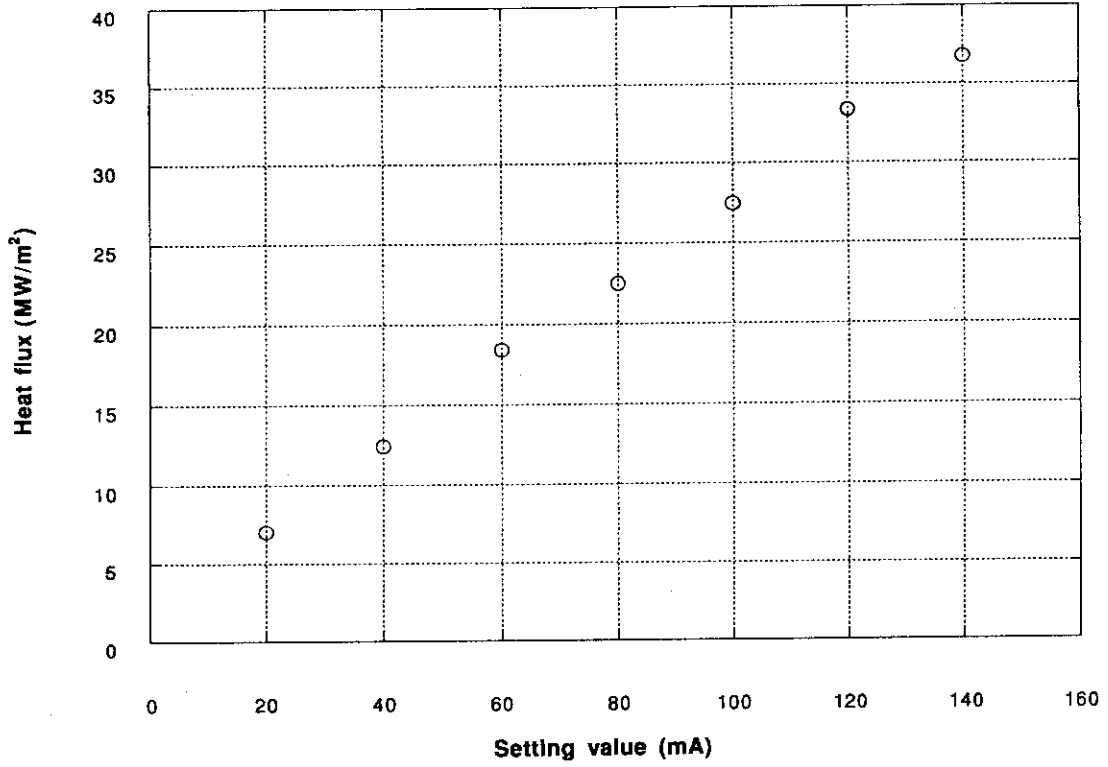


図7 ビーム電流設定値と熱負荷の関係
 (熱負荷10MW/m²近辺では両者はほぼ線型関係にある。)

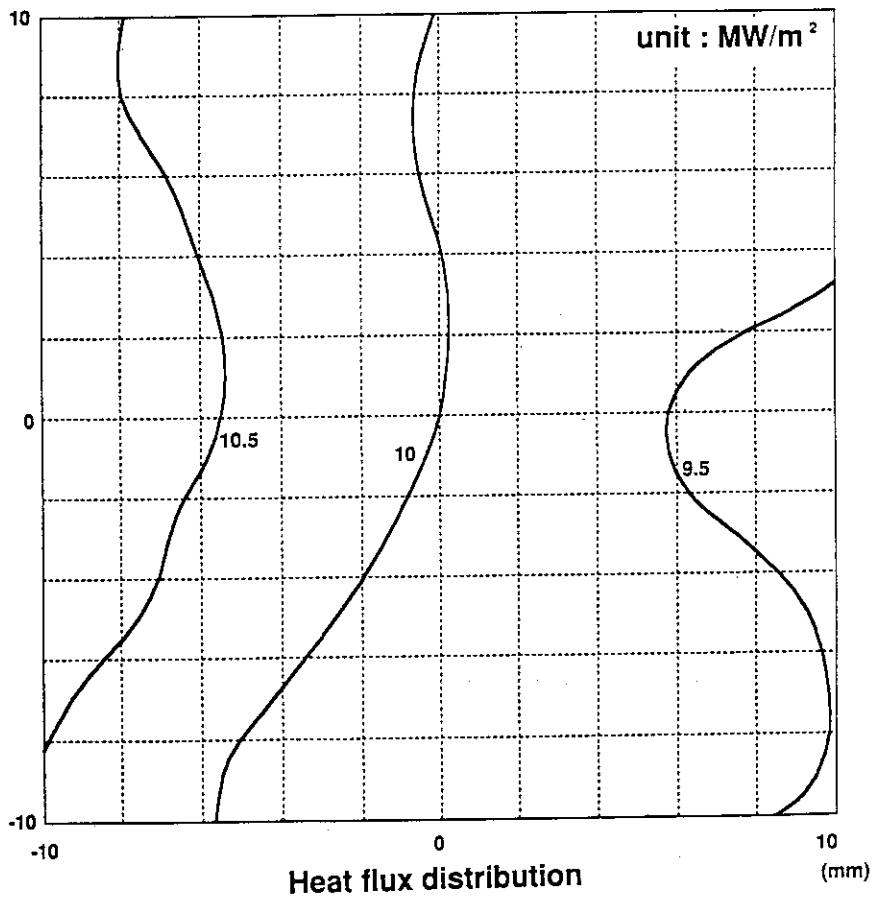


図8 熱サイクル実験における熱負荷分布

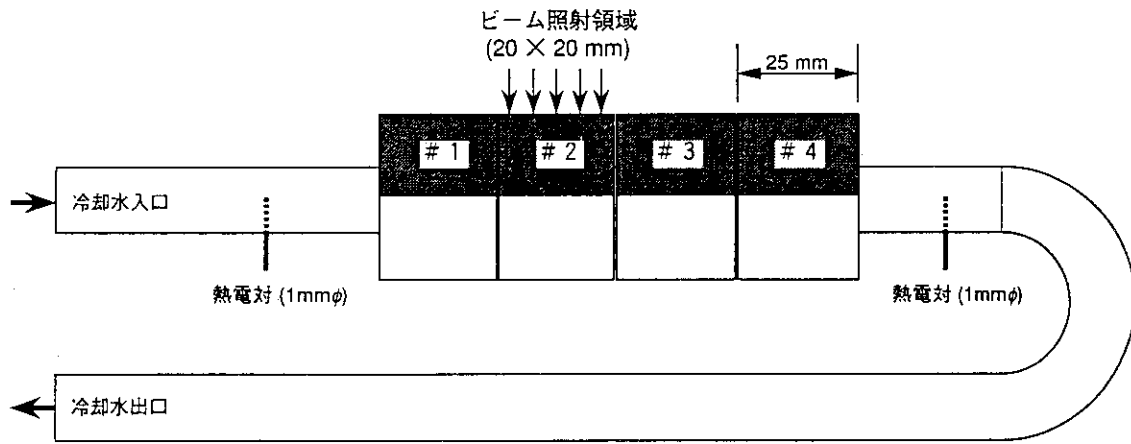


図9 サドル型ダイバータ模擬試験体

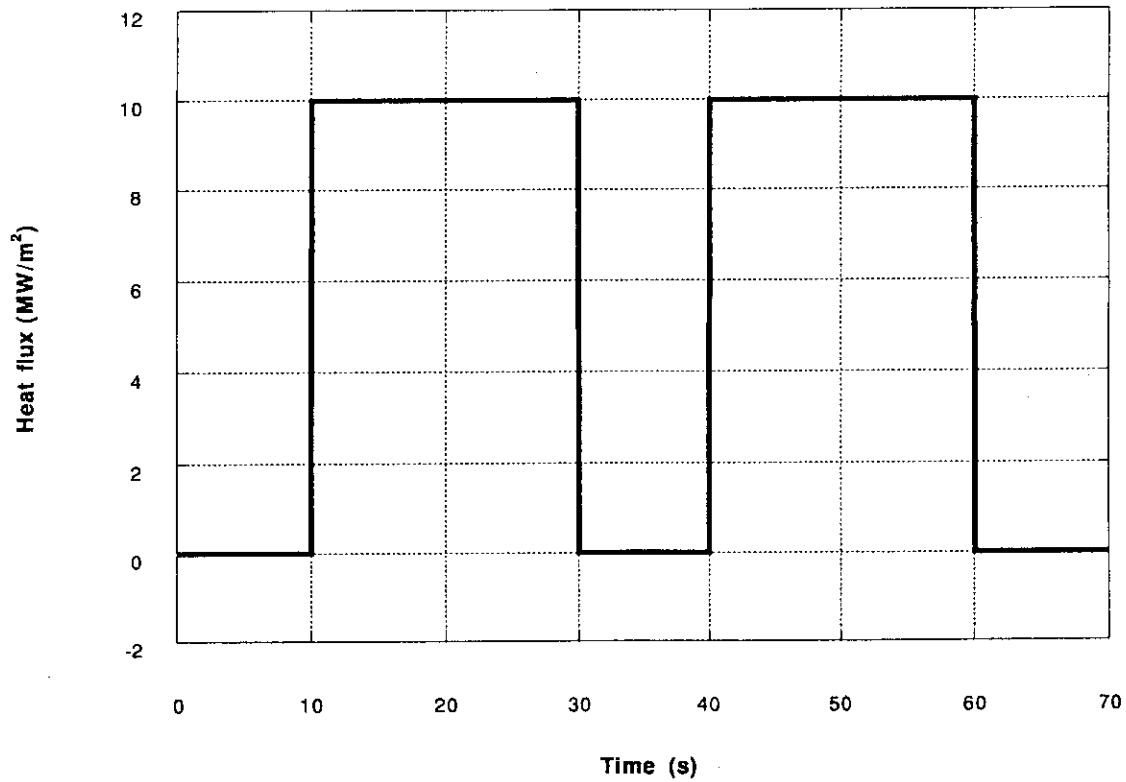


図10 熱サイクル実験における照射パターン

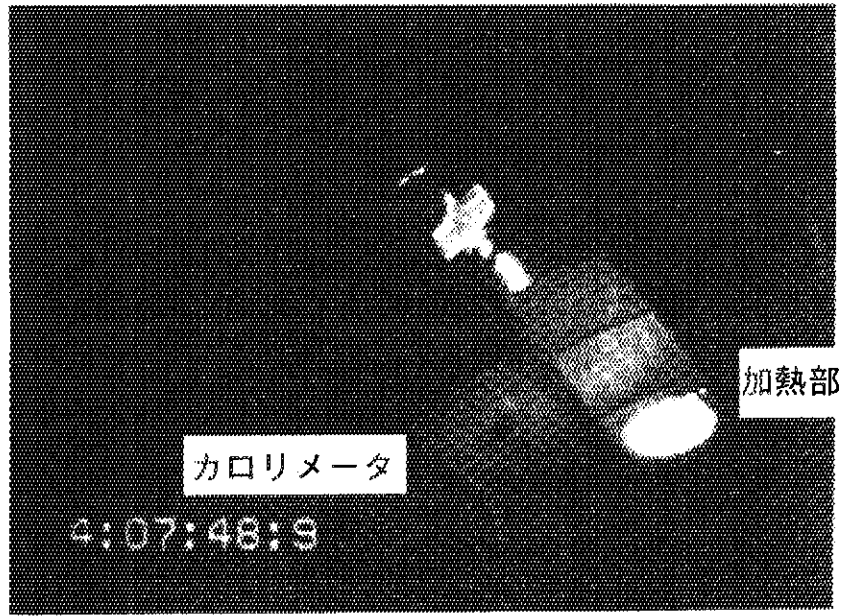


図11 熱サイクル実験中のダイバータ試験体
(断面右下の白く見えるタイルが加熱部)

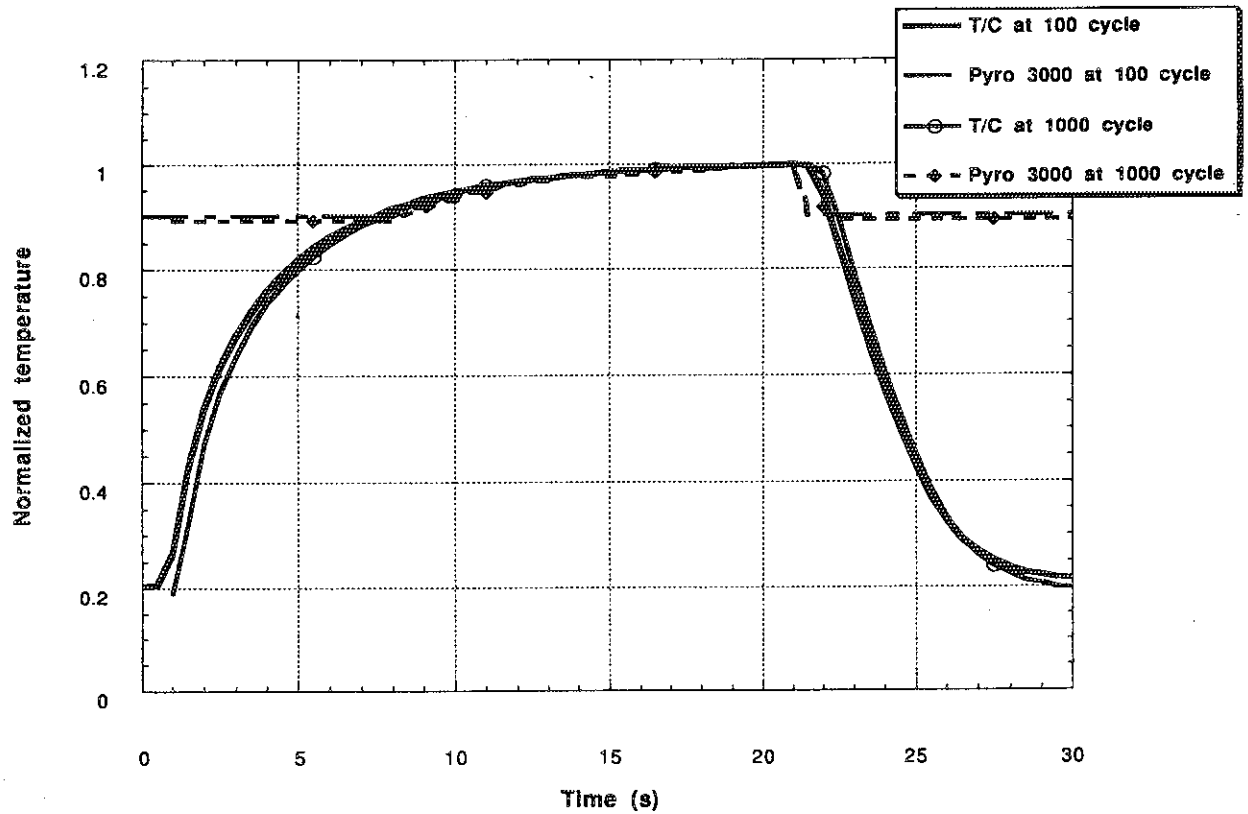


図12 熱サイクル実験の100サイクル目と1000サイクル目の各部の温度変化

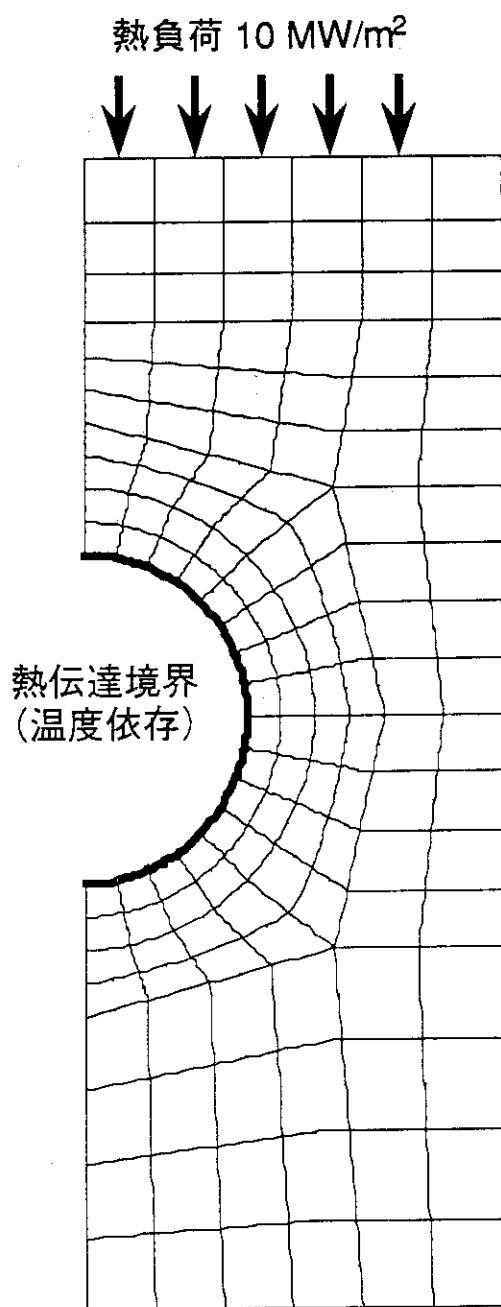


図13 数値解析に使用したメッシュ構成図

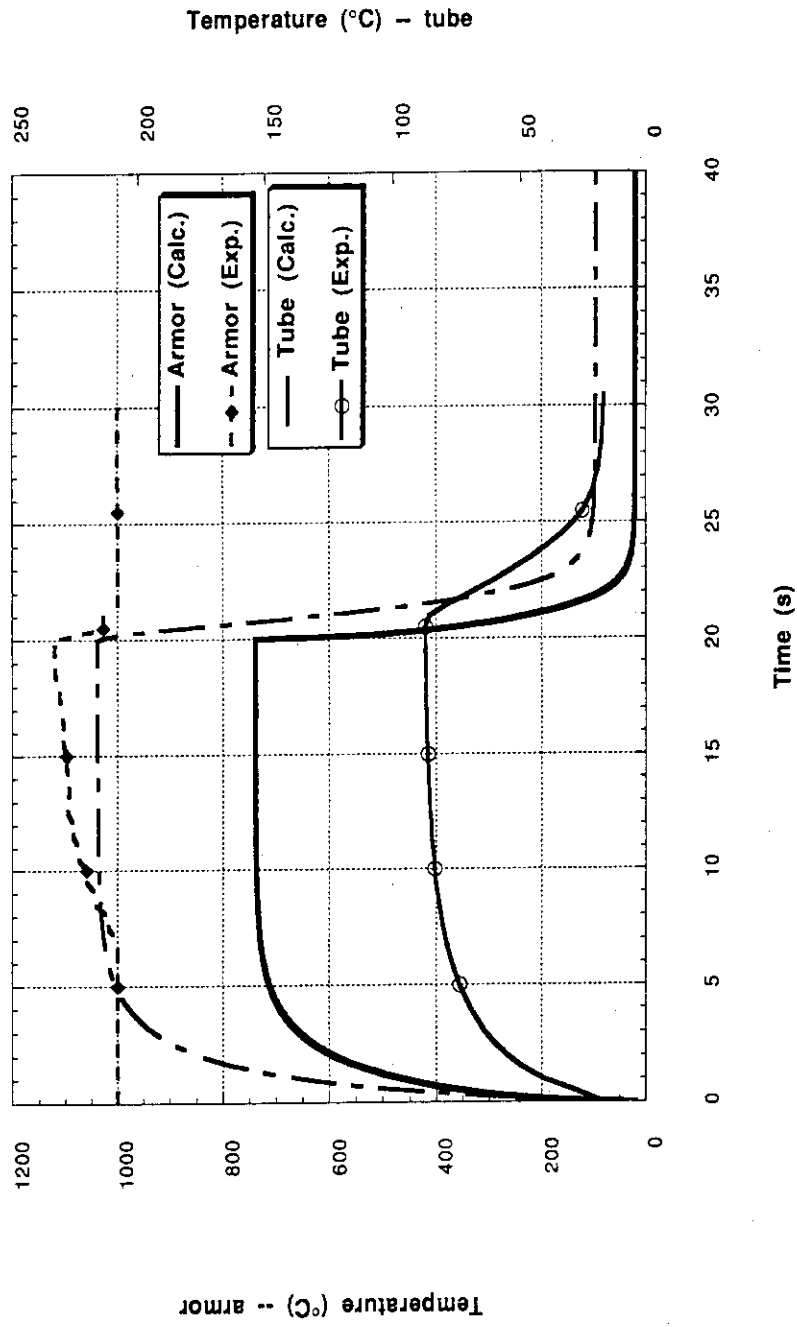


図14 熱サイクル実験を模擬した数値解析結果

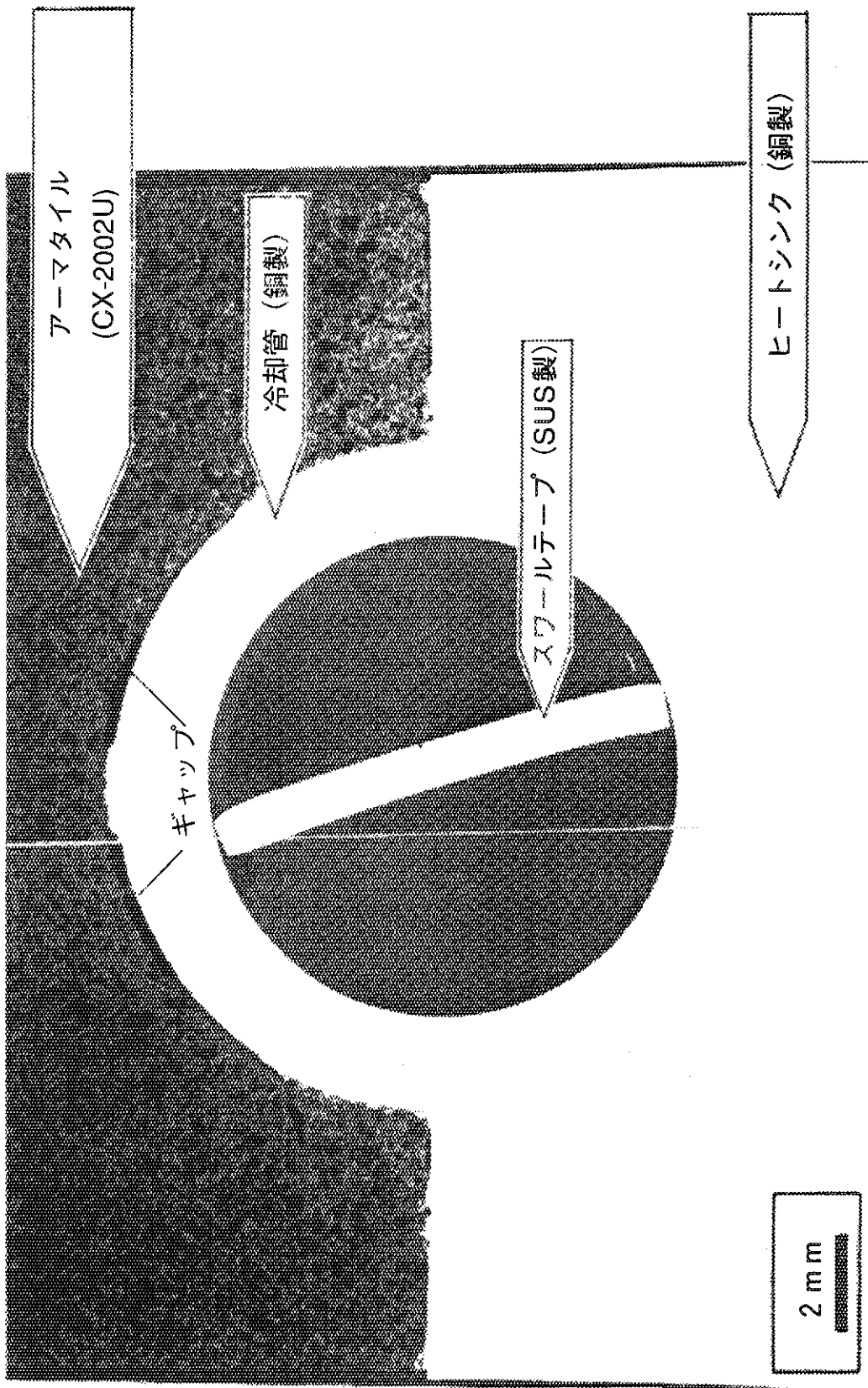


図15 試験体断面図 (冷却管とアーマータイルの接合部にギャップを確認)

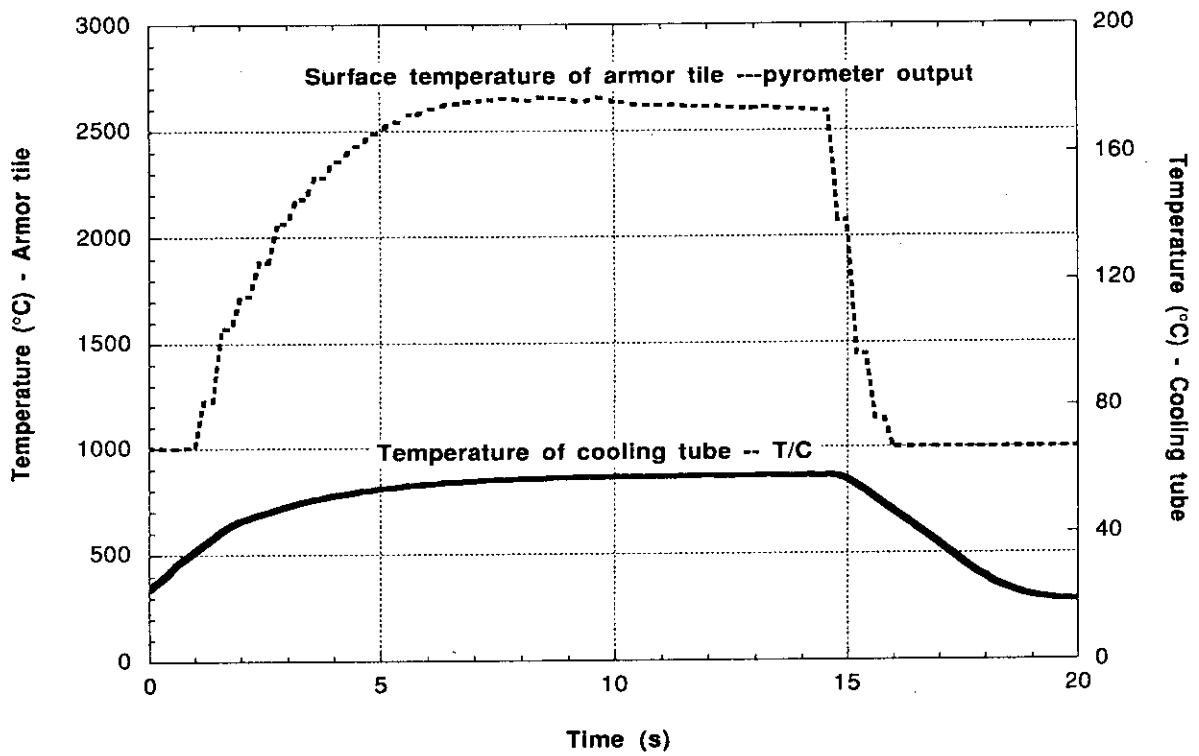


図16 熱負荷16MW/m²におけるスクリーニング実験結果

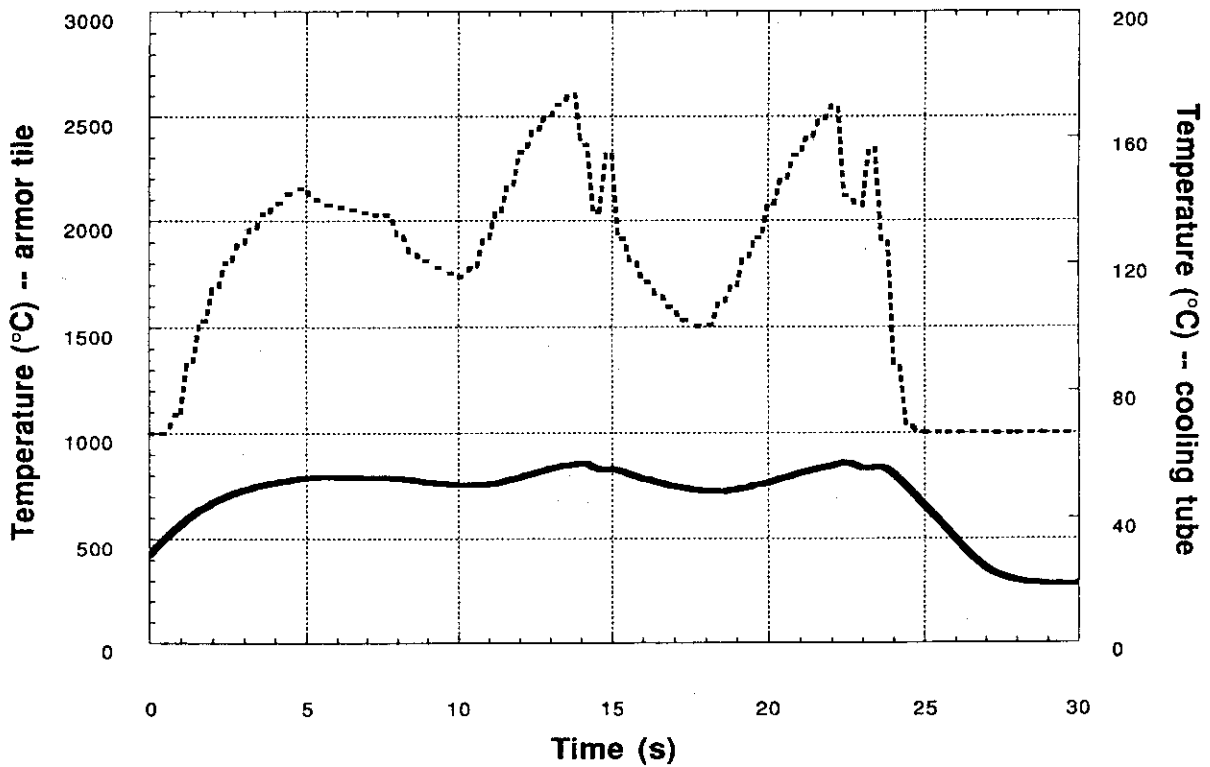


図17 熱負荷17MW/m²におけるスクリーニング実験結果
(ビームが照射中数回にわたってストップしている。)

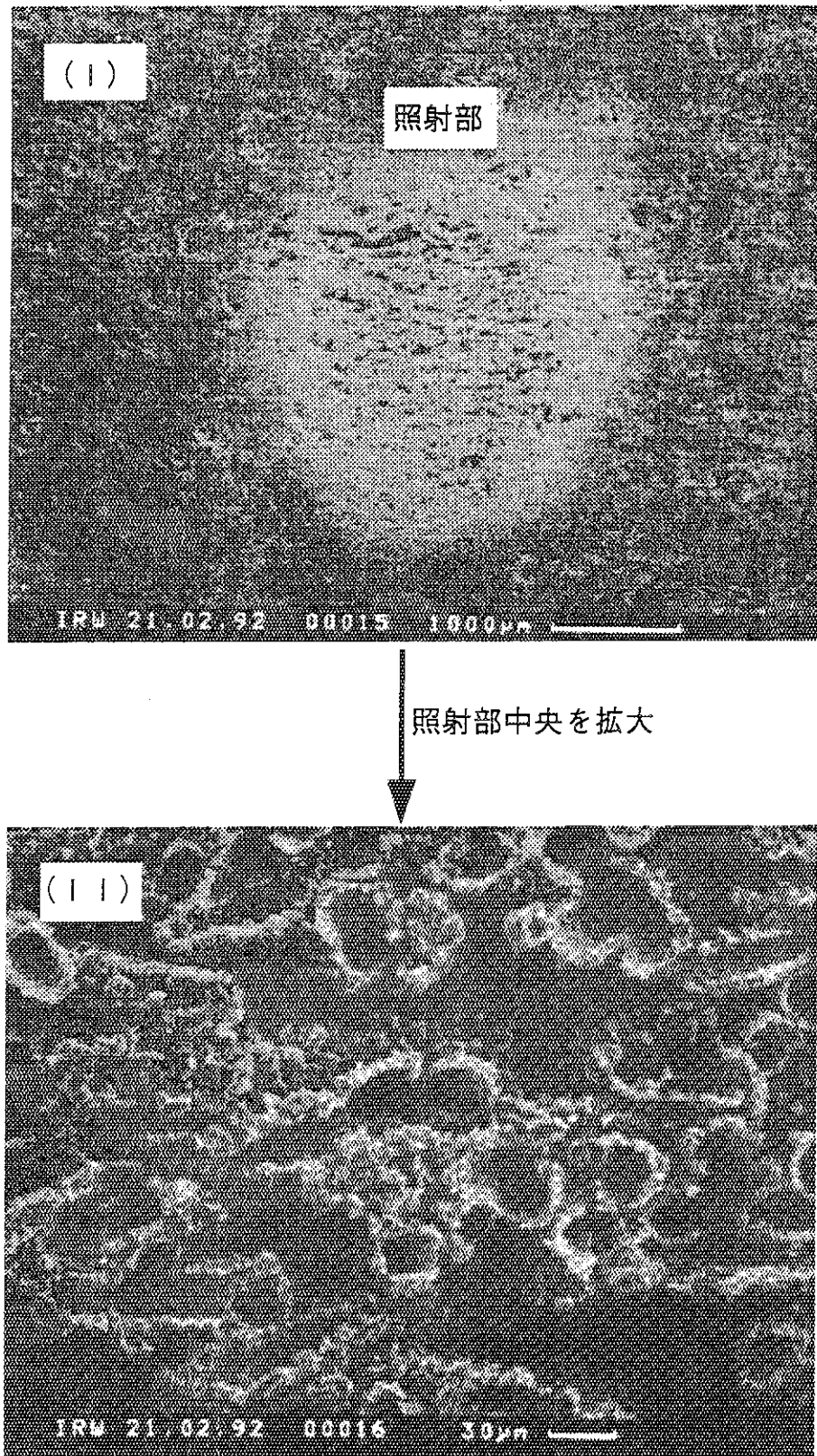


図18 アーマタイル照射部のSEM観察像