

JAERI - M  
91-085

核融合実験炉用第1壁模擬試験体の  
電子ビーム照射実験 (I)

1991年5月

鈴木 哲・秋場 真人・荒木 政則  
大楽 正幸・伊勢 英夫\*・横山 堅二

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, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 ㈱原子力資料サービス

核融合実験炉用第1壁模擬試験体の電子ビーム照射実験 (I)

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

鈴木 哲・秋場 真人・荒木 政則・大楽 正幸  
伊勢、英夫\*・横山 堅二

(1991年4月19日受理)

核融合実験炉用第1壁は定常熱負荷に耐えるため、強制冷却構造をもつことが要求される。そこで、矩形冷却チャンネルをもつ放射冷却型・伝導冷却型第1壁模擬試験体に対して定常熱負荷による熱サイクル実験を行った。一般熱負荷部 ( $0.2 \text{ MW/m}^2$ , 定常) を模擬した実験ではこれらの模擬試験体は健全性を維持できることが確認された。しかし、高熱負荷部 ( $0.6 \text{ MW/m}^2$ , 定常) を模擬した実験では放射冷却型第1壁模擬試験体はスリーブが溶融し、健全性を維持できず、構造に改善の必要があることが明かとなった。

Electron Beam Irradiation Experiments of  
First Wall Mock-Ups for Fusion Experimental Reactors (I)

Satoshi SUZUKI, Masato AKIBA, Masanori ARAKI  
Masayuki DAIRAKU, Hideo ISE\* and Kenji YOKOYAMA

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

(Received April 19, 1991)

It is necessary for the first wall of fusion experimental reactors to be equipped with actively cooled structures. Thermal cycling experiments for the radiation cooling type first wall mock-up and the conduction cooling type of first wall mock-up were carried out. As results of the experiments simulating normal heat load part of first wall ( $0.2 \text{ MW/m}^2$ , continuous), both types of the mock-ups demonstrated their durabilities against the cyclic heat loads. On the other hand, in the experiments simulating high heat load part ( $0.6 \text{ MW/m}^2$ , continuous), a sleeve made of titanium in the radiation cooling type mock-up has melted. It was recognized that the structure of a radiation cooling type first wall should be improved.

Keywords: Radiation Cooling Conduction Cooling Steady-State Heat Flux  
Thermal Cycle

---

\* on leave from Kawasaki Heavy Industry

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験装置 .....	2
3. 第1壁模擬試験体の構造 .....	2
3.1 放射冷却型第1壁模擬試験体 .....	2
3.2 伝導冷却型第1壁模擬試験体 .....	3
4. 実 験 .....	3
4.1 一般熱負荷部を模擬した熱サイクル実験 .....	3
4.2 高熱負荷部を模擬した熱サイクル実験 .....	4
5. 解 析 .....	5
5.1 2次元非定常熱伝導解析 .....	5
5.2 2次元平面歪弾性熱応力解析 .....	5
6. ま と め .....	6
謝 辞 .....	6
参考文献 .....	6

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Test facility .....	2
3. Structure of first wall mock-ups .....	2
3.1 Radiation cooling type first wall .....	2
3.2 Conduction cooling type first wall mock-up .....	3
4. Experiments .....	3
4.1 Thermal cycling experiments simulating normal heat load part of first wall .....	3
4.2 Thermal cycling experiments simulating high heat load part of first wall .....	4
5. Analysis .....	5
5.1 2-D transient thermal conduction analysis .....	5
5.2 2-D plane-strain elastic thermal stress analysis .....	5
6. Summary .....	6
Acknowledgement .....	6
Reference .....	6

## 1. はじめに

核融合実験炉用プラズマ対向機器は現有の大型核融合実験装置、例えば JT-60 や TFTR, JET と比べ高熱流束、長パルスの高熱負荷・粒子負荷を受ける。このため、ITER/FER 等の次期大型実験装置では強制冷却構造を備えた第1壁構造が採用される。この強制冷却構造を有する第1壁として、中性粒子加熱装置(NBI)対向面等の高熱負荷部用に放射冷却型構造が、その他の一般熱負荷部用として伝導冷却型構造の2つの構造が考えられている。これまで第1壁の健全性を評価するために行われてきた実験は、第1壁構造材料に対する材料試験(疲労試験、靱性試験等)がほとんどで、その評価方法も微視的な観察結果に重点を置いたものが主体であった。しかし、現在提案されている次期装置用第1壁構造の成立性を検討するためには、第1壁構造全体をモデル化した実験を行う必要がある。そこで今回、放射冷却型構造及び伝導冷却型構造の健全性を評価するために各々の構造の実物大の要素模擬試験体を製作し、熱源として JEBIS (原研電子ビーム照射装置)を用いて定常熱負荷による熱サイクル実験を行った。

次期大型装置の第1壁においては NBI 対向面等の高熱負荷部で  $0.6 \text{ MW/m}^2$ 、一般熱負荷部で  $0.2 \text{ MW/m}^2$  程度の熱負荷が定常的に入射するものと考えられる。このような定常熱負荷は基板材料であるベアステンレスにとって非常に厳しいものである。また、基板表面をプラズマからの粒子負荷やディスラプション等の損傷から守るため、第1壁は表面に炭素系材料のアーマタイルを備えた構造が必要である。放射冷却型構造はアーマタイルが受けた熱を輻射によって基板部に伝え、同時にアーマタイル表面から再放射も行うことによって基板部への入熱量を定量的に低減し、冷却を行うものである。この構造のもつ課題はアーマタイル締結部への入熱を極力抑え、基板部及び台座(ペDESTAL)部に応力集中の原因となるホットスポットが生じるのを防ぐことが挙げられる。一方、伝導冷却型構造はアーマタイルが受けた熱を接触熱伝達によって、基板部に伝えて冷却を行うものである。この構造の課題は、1つは熱伝達性能がアーマタイルの初期締結状態に依存するという不確定性であり、もう1つはアーマタイルの熱変形によるアーマタイル-基板間の熱伝達の低下である。これらの課題を克服するため、今回採用した放射冷却型第1壁模擬試験体ではアーマタイル締結部に比較的熱伝導率が低いセラミック材料を採用して断熱性を高めている。また、伝導冷却型第1壁模擬試験体ではアーマタイルと基板の間にカーボンシートを挿入することによって密着性を高め、アーマタイルが熱変形を生じても熱伝達性能に不均一性が生じないように配慮した。

今回の報告では主に放射冷却型第1壁模擬試験体に対する熱サイクル実験結果と熱伝導解析及び熱応力解析の結果について述べる。

## 2. 実験装置

本実験では熱源としてJEBIS（原研電子ビーム照射装置）<sup>(1)</sup>を用いた。装置の断面図を図1に示す。

JEBISはプラズマ電子銃を備え、加速電極の引出し孔を変更することによりペンシル状ビームからシート状ビームまで引き出すことが可能である。また、偏向コイルを用いて掃引を行うことにより、さらに大面積の照射も可能である。今回はテストセクションの大きさが100×300mm程度のため、掃引は行わずに照射を行った。

## 3. 第1壁模擬試験体の構造

### 3.1 放射冷却型第1壁模擬試験体

実験に供試した放射冷却型第1壁模擬試験体の外観及び断面模式図を図2、図3に示す。模擬試験体の基板部の寸法は500(l)×158(w)mmで、150(l)×100(w)×27(t)mmのアーマタイルを備えている。プラズマに直接面するアーマタイルは高熱負荷・粒子負荷にさらされることによって損傷を受け、プラズマに不純物が混入する可能性がある。この不純物の混入によるプラズマの冷却を避けるために、アーマタイル材は低原子番号材料であることと、耐熱特性が良好であることが要求される。放射冷却型構造ではタイルが損傷を受けて交換が必要となることも考えられるため、アーマタイルの交換が容易に行える構造を有することも必要となる。この試験体のアーマタイルは図4のようにタイル締結ボルト導入用のスリットを備えている。今回製作した試験体では炭素系材料である等方性黒鉛(IG-430U)をアーマタイル材として採用した。等方性黒鉛材は最近開発の進んでいるCFC材(炭素繊維強化炭素複合材)と比べ熱伝導率や強度は低いものの、物性値のバラつきが少なく信頼性の高い材料と言える。基板は材料データが豊富で信頼性も高く、製作性も優れているステンレス鋼(SUS316)を採用した。図3に示すようにこの基板は表面から深さ5mmの位置に合計11本の矩形冷却チャンネルを備えている。さらに、基板表面のアーマタイルを見込む面にはクロミナ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )コーティングによる黒化処理が施され、放射率を向上して冷却効率を高めている。また、スリーブ固定用の台座(ペDESTAL)はステンレス鋼基板に冶金的に接合されるため交換が困難である。このため、特に高温での信頼性の高い耐熱金属であるモリブデン合金(TZM)を採用し、HIP(Hot Isostatic Press)処理によって基板に固定している。放射冷却型構造で特に懸念されるのが台座-基板接合部の不均一な温度分布によってホットスポットが発生することである。このホットスポットによって基板には局部的に高い熱応力が生じ、基板の健全性に重大な影響を及ぼす。これを避けるためにアーマタイル締結ボルト材としてセラミック材のアルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )と窒化珪素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )を採用して断熱性の高い



## 2. 実験装置

本実験では熱源として JEBIS (原研電子ビーム照射装置)<sup>(1)</sup> を用いた。装置の断面図を図 1 に示す。

JEBIS はプラズマ電子銃を備え、加速電極の引出し孔を変更することによりペンシル状ビームからシート状ビームまで引き出すことが可能である。また、偏向コイルを用いて掃引を行うことにより、さらに大面積の照射も可能である。今回はテストセクションの大きさが  $100 \times 300$  mm 程度のため、掃引は行わずに照射を行った。

## 3. 第 1 壁模擬試験体の構造

### 3.1 放射冷却型第 1 壁模擬試験体

実験に供試した放射冷却型第 1 壁模擬試験体の外観及び断面模式図を図 2, 図 3 に示す。模擬試験体の基板部の寸法は  $500$  (l)  $\times$   $158$  (w) mm で、 $150$  (l)  $\times$   $100$  (w)  $\times$   $27$  (t) mm のアーマタイルを備えている。プラズマに直接面するアーマタイルは高熱負荷・粒子負荷にさらされることにより損傷を受け、プラズマに不純物が混入する可能性がある。この不純物の混入によるプラズマの冷却を避けるために、アーマタイル材は低原子番号材料であることと、耐熱特性が良好であることが要求される。放射冷却型構造ではタイルが損傷を受けて交換が必要となることも考えられるため、アーマタイルの交換が容易に行える構造を有することも必要となる。この試験体のアーマタイルは図 4 のようにタイル締結ボルト導入用のスリットを備えている。今回製作した試験体では炭素系材料である等方性黒鉛 (IG-430U) をアーマタイル材として採用した。等方性黒鉛材は最近開発の進んでいる CFC 材 (炭素繊維強化炭素複合材) と比べ熱伝導率や強度は低いものの、物性値のバラつきが少なく信頼性の高い材料と言える。基板は材料データが豊富で信頼性も高く、製作性も優れているステンレス鋼 (SUS316) を採用した。図 3 に示すようにこの基板は表面から深さ  $5$  mm の位置に合計 11 本の矩形冷却チャンネルを備えている。さらに、基板表面のアーマタイルを見込む面にはクロミナ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) コーティングによる黒化処理が施され、放射率を向上して冷却効率を高めている。また、スリーブ固定用の台座 (ペDESTAL) はステンレス鋼基板に冶金的に接合されるため交換が困難である。このため、特に高温での信頼性の高い耐熱金属であるモリブデン合金 (TZM) を採用し、HIP (Hot Isostatic Press) 処理によって基板に固定している。放射冷却型構造で特に懸念されるのが台座-基板接合部の不均一な温度分布によってホットスポットが発生することである。このホットスポットによって基板には局部的に高い熱応力が生じ、基板の健全性に重大な影響を及ぼす。これを避けるためにアーマタイル締結ボルト材としてセラミック材のアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) と窒化珪素 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) を採用して断熱性の高い

支持構造とし、アーマタイルから基板部への伝導による熱の移動を抑えている。スリーブ材にはこれらのセラミック材との接合性と共に、アーマタイルから基板部への電気的接地が要求される。今回はセラミック材と線膨張係数が大差なく、接合性も良い金属材料であるチタンを使用した。

### 3.2 伝導冷却型第1壁模擬試験体

伝導冷却型第1壁模擬試験体の外観を図5に示す。試験体は計4枚のアーマタイルを備えている。この内、中央の100 (l) × 100 (w) × 25 (t) の大きさの2枚のタイルがテストセクションとなっている。この試験体の基板は図6(A)・(B)のように厚さ20 mm のステンレス鋼 (SUS304) 製で内部に6本の矩形冷却チャンネルを備えている。アーマタイル固定用のスタッドボルト及びナットもステンレス鋼 (SUS304) 製である。スタッドボルトは基板にロウ付けで固定している。なお、組立の際にナットは100 kg・m の締め付けトルクで固定した。アーマタイルとキャップはCFC材 (CX-2002U) を採用した。このCFC材は異方性を有しており、板厚方向に熱伝導率が高くなるように加工してある。伝導冷却型構造で問題となるのがアーマタイルの熱変形によってタイルと基板の間の密着性が失われ、熱伝達性能が低下することである。今回の実験では2種類の対策を採用した。1つはタイル自身の熱変形を低減するためにCFC材をTZMにロウ付けしたアーマタイルを製作した。もう1つは、タイル-基板間にカーボンシートを挟み込むことにした。カーボンシートは厚さ0.2 mm のものを2枚挟み込んだ。このカーボンシートは実験での熱サイクルによるナットの緩みを防止する機能も併せてもっている。この試験体では図6(A)・(B)に示すようにインサート材 (銅, TZM) をロウ付けしたタイルとインサート材をもたないタイルの2種類を同時に試験することによって、繰り返し熱変形に対するインサート材の有効性を検証できるようにした。

## 4. 実 験

放射冷却型及び伝導冷却型第1壁模擬試験体に対して表面熱流束の大きさを変えて2種類の熱サイクル実験を行った。

### 4.1 一般熱負荷部を模擬した熱サイクル実験

一般熱負荷部を模擬するために表面熱流束を0.2 MW/m<sup>2</sup> として繰り返し加熱を行う熱サイクル実験を行った。

実験時の熱負荷分布を図7(A)・(B)に示す。実機における使用環境を考え、模擬試験体への表面熱流束が一様な分布となるように比較的なだらかな熱負荷分布をもつビームを用いて照射を行った。実験中、基板の冷却チャンネルには流速3.5 m/s で常時冷却水 (純水, 常温, 2 MPa) を通して冷却を行った。また、試験体各部に取り付けたCA熱電対 (シース形, 非接地, 0.5

支持構造とし、アーマタイルから基板部への伝導による熱の移動を抑えている。スリーブ材にはこれらのセラミック材との接合性と共に、アーマタイルから基板部への電気的接地が要求される。今回はセラミック材と線膨張係数が大差なく、接合性も良い金属材料であるチタンを使用した。

### 3.2 伝導冷却型第1壁模擬試験体

伝導冷却型第1壁模擬試験体の外観を図5に示す。試験体は計4枚のアーマタイルを備えている。この内、中央の100 (l) × 100 (w) × 25 (t) の大きさの2枚のタイルがテストセクションとなっている。この試験体の基板は図6(A)・(B)のように厚さ20 mmのステンレス鋼 (SUS304) 製で内部に6本の矩形冷却チャンネルを備えている。アーマタイル固定用のスタッドボルト及びナットもステンレス鋼 (SUS304) 製である。スタッドボルトは基板にロウ付けで固定している。なお、組立の際にナットは100 kg・mの締め付けトルクで固定した。アーマタイルとキャップはCFC材 (CX-2002U) を採用した。このCFC材は異方性を有しており、板厚方向に熱伝導率が高くなるように加工してある。伝導冷却型構造で問題となるのがアーマタイルの熱変形によってタイルと基板の間の密着性が失われ、熱伝達性能が低下することである。今回の実験では2種類の対策を採用した。1つはタイル自身の熱変形を低減するためにCFC材をTZMにロウ付けしたアーマタイルを製作した。もう1つは、タイル-基板間にカーボンシートを挟み込むことにした。カーボンシートは厚さ0.2 mmのものを2枚挟み込んだ。このカーボンシートは実験での熱サイクルによるナットの緩みを防止する機能も併せてもっている。この試験体では図6(A)・(B)に示すようにインサート材 (銅, TZM) をロウ付けしたタイルとインサート材をもたないタイルの2種類を同時に試験することによって、繰り返し熱変形に対するインサート材の有効性を検証できるようにした。

## 4. 実 験

放射冷却型及び伝導冷却型第1壁模擬試験体に対して表面熱流束の大きさを変えて2種類の熱サイクル実験を行った。

### 4.1 一般熱負荷部を模擬した熱サイクル実験

一般熱負荷部を模擬するために表面熱流束を0.2 MW/m<sup>2</sup>として繰り返し加熱を行う熱サイクル実験を行った。

実験時の熱負荷分布を図7(A)・(B)に示す。実機における使用環境を考え、模擬試験体への表面熱流束が一般的な分布となるように比較的なだらかな熱負荷分布をもつビームを用いて照射を行った。実験中、基板の冷却チャンネルには流速3.5 m/sで常時冷却水 (純水, 常温, 2 MPa) を通して冷却を行った。また、試験体各部に取り付けたCA熱電対 (シース形, 非接地, 0.5

mmφ)と赤外カメラによって温度変化を観察した。

放射冷却型第1壁模擬試験体に対して最大照射時間23分、62サイクルにわたって繰り返しビームを照射し、熱サイクル実験を行った。図8に試験体に取り付けた熱電対(T/C)の位置を示す。また、熱サイクル実験中の試験体各部の温度変化の例を図9に示す。この時のビーム照射時間は約13分であったが、試験体各部は未だ熱的に定常状態に達していないことがわかる。また、スリット部の板厚は他の部分に比べて薄くなっているため、赤外カメラによる観察の結果、スリット部の表面温度は1000℃程度となることが確認された。

この実験後も、放射冷却型第1壁模擬試験体は各部に損傷もなくアーマタイトルの着脱も可能であった。

また、伝導冷却型第1壁模擬試験体に対しても同様の条件の下で熱サイクル実験を行った。サイクル数は57、最大照射時間は61分である。図10(A)・(B)に試験体に取り付けた熱電対の位置を示す。実験中の試験体各部の温度変化の例を図11に示す。この時のビーム照射時間は約12分であり、試験体は約10分程度で熱的に定常状態に達していることがわかる。このことから、アーマタイトルの熱変形によって熱伝達性能に不均一性が生じ、タイトルの表面温度が急激に上昇するようなことはないことが明かである。

この実験の後、伝導冷却型第1壁模擬試験体においてはインサート材(銅、TZM)をもつタイトルにも、もたないタイトルにもき裂等の損傷は認められなかった。また、伝導冷却型構造で懸念されていた熱サイクルによるナットの緩みについても、実験後の検査の結果、両タイトルともに緩みはなかった。さらに、図11に示すようにインサート材をもつタイトルともたないタイトルの温度変化を比較してもそれほど顕著な差は認められなかった。

#### 4.2 高熱負荷部を模擬した熱サイクル実験

次期大型装置のNBI対向面等の高熱負荷部を模擬するために表面熱流束を $0.6 \text{ MW/m}^2$ として同様の熱サイクル実験を行った。図12にこの実験で用いた電子ビームの熱負荷分布を示す。熱負荷分布は一般熱負荷部を模擬した実験と同様に比較的平坦なピークをもっている。ビーム照射は2枚あるアーマタイトルの一方にピークを合わせて行った。この表面熱流束における熱サイクル実験は放射冷却型第1壁模擬試験体に対してのみ実施した。図13に試験体に取り付けた熱電対の位置を示す。ビーム照射時間はITER物理フェーズの平均バークタイムを考慮して200秒～240秒とし、1サイクル約15分の条件の下で74サイクルにわたりビーム照射を繰り返して各部の温度変化を観察した。この際の冷却条件は一般熱負荷部を模擬した実験と同様である。ビーム照射時間が232秒の時の試験体各部の温度変化を図14に示す。

この熱サイクル実験中、チタンスリーブが溶融してアーマタイトルと融着し、アーマタイトルの交換に重大な支障をきたした。(写真1参照)これはビーム照射開始時のアーマタイトルの初期温度が熱サイクル毎に徐々に上昇する傾向にあり、照射中にチタンスリーブが融点(1670℃)を越えてしまったためと考えられる。

## 5. 解 析

以下に示す 2次元非定常熱伝導解析を実施し、実験から得られた試験体各部の温度変化に関するデータと比較した。実験時には試験体の台座（ペDESTAL）及び基板に歪ゲージを取り付けて各部の熱歪の測定を行った。しかしながら、ビーム照射中のノイズや熱によって歪ゲージが使用不能となり、実験から応力値を算定することが不可能となった。このため、熱伝導解析の結果をもとにして 2次元平面歪弾性応力解析を行い、実験中に試験体内部に発生する熱応力、及び試験体の変形量を算定することにした。なお、解析対象は放射冷却型第 1 壁模擬試験体の高熱負荷部を模擬した実験とした。

### 5.1 2次元非定常熱伝導解析

使用コード——HEATING-6VP (FDM)

図 15、図 16 に解析モデル及びメッシュ構成図を示す。図 15 に示されるようにアーマタイル、セラミックボルト（アルミナ）、チタンスリーブ及び台座（ペDESTAL）が互いに接触する部分には接触熱コンダクタンス（ $H = 1.0 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ ）を有する要素を挿入して実験状態を模擬した。アーマタイルに与える表面熱流束は実験で得られた熱負荷分布をそのまま各節点に与えた。アーマタイル、クロミナコーティング部及び実験装置の真空容器内壁の放射率は実験体系から考えてそれぞれ、1.0、0.8、0.4 とし、アーマタイルからの再放射による冷却も考慮した解析を行った。解析に使用した各材料の物性値は主に温度依存型のものを使用した。（表 1）<sup>(2)</sup>

図 17 に試験体各部の温度変化の解析値と実験値を比較したものを示す。台座（ペDESTAL）及び基板部の温度変化の解析値は実験値と比較的良く一致しているものの、アーマタイル内部（T/C1）の温度変化は 800 °C 前後から解析値の方が高くなった。この原因として、試験体に取り付けた熱電対の耐熱温度が 500 °C であったため、それを越える温度域では出力に問題があったためと考えられる。

### 5.2 2次元平面歪弾性熱応力解析

使用コード——SAP-V (FEM)

熱解析から得られた節点温度データをもとに、特に台座（ペDESTAL）とステンレス鋼基板に発生する応力に注目した弾性熱応力解析を行った。解析モデル、メッシュ構成は熱解析と同様のものとし、試験体の温度分布は照射終了時刻（ $t = 232 \text{ s}$ ）の解析結果を使用した。（図 18 参照）この時の試験体基板部の変形を図 19 に示す。拘束条件は、図の対称軸（CL）上の節点の X 方向の変位を拘束し、さらに図中に「・」で示した節点のみ Y 方向の変位も拘束した。この結果、試験体に発生する最大変形量は約 0.2 mm 程度と予想される。また、図 20 に等応力（von Mises 応力）線図を示す。試験体に発生する最大応力は 252 MPa で、この値は今回基板に使用したステンレス鋼の 0.2 % 耐力内にある。この結果、試験体の台座（ペDESTAL）及び基板には強度

上特に問題があると考えられるような熱応力は発生していないことが明らかになった。

## 6. ま と め

- (1) 次期装置第1壁の一般熱負荷部を模擬した実験では放射冷却型試験体も伝導冷却型試験体も懸念された点に特に問題はなく、 $0.2 \text{ MW/m}^2$ の定常熱負荷に対して健全性を保つことが確認された。
- (2) 伝導冷却型第1壁模擬試験体においてアーマタイルにインサート材（銅，TZM）を有するものと、有さないものを同時に照射したが、どちらのタイルにもき裂等の損傷は観察されず、アーマタイルの耐久性に対するインサート材の有効性は検証できなかった。
- (3) 高熱負荷部を模擬した実験において、放射冷却型第1壁模擬試験体は $0.6 \text{ MW/m}^2$ の定常熱負荷に対してチタンスリーブとアーマタイルが融着し、タイルの交換に重大な問題が生じた。放射冷却型第1壁はアーマタイルの交換を考えているため、今回採用した模擬試験体の構造には改善すべき点があることが明らかになった。
- (4) 2次元平面歪弾性熱応力解析の結果、放射冷却型第1壁模擬試験体内部には特に問題となるような応力の発生はないと予想された。しかし、今回実験に供したのは部分模擬試験体であり、実験時には熱変形に対して特に拘束を与えなかったため発生する熱応力の値は比較的小さいものと考えられる。さらに、要素試験体のため寸法が小さく、強度上重大な欠陥が存在する確率も少なかったと考えられる。

核融合実験炉用第1壁の成立性を検討するためには、今後さらに構造及び構造材料の開発研究を進める必要がある。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をして頂いた小原祥裕室長をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝の意を表します。また終始激励して頂いた関昌弘核融合計画室長、島本進核融合研究部長、飯島勉那珂研究所長に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) S. Tanaka et al.; Rev. Sci. Instrum., 62, (3), (1991)
- 2) 日本機械学会；「伝熱工学資料 改訂第4版」

上特に問題があると考えられるような熱応力は発生していないことが明らかになった。

## 6. ま と め

- (1) 次期装置第1壁の一般熱負荷部を模擬した実験では放射冷却型試験体も伝導冷却型試験体も懸念された点に特に問題はなく、 $0.2 \text{ MW/m}^2$ の定常熱負荷に対して健全性を保つことが確認された。
- (2) 伝導冷却型第1壁模擬試験体においてアーマタイルにインサート材（銅，TZM）を有するものと、有さないものを同時に照射したが、どちらのタイルにもき裂等の損傷は観察されず、アーマタイルの耐久性に対するインサート材の有効性は検証できなかった。
- (3) 高熱負荷部を模擬した実験において、放射冷却型第1壁模擬試験体は $0.6 \text{ MW/m}^2$ の定常熱負荷に対してチタンスリーブとアーマタイルが融着し、タイルの交換に重大な問題が生じた。放射冷却型第1壁はアーマタイルの交換を考えているため、今回採用した模擬試験体の構造には改善すべき点があることが明らかになった。
- (4) 2次元平面歪弾性熱応力解析の結果、放射冷却型第1壁模擬試験体内部には特に問題となるような応力の発生はないと予想された。しかし、今回実験に供したのは部分模擬試験体であり、実験時には熱変形に対して特に拘束を与えなかったため発生する熱応力の値は比較的小さいものと考えられる。さらに、要素試験体のため寸法が小さく、強度上重大な欠陥が存在する確率も少なかったと考えられる。

核融合実験炉用第1壁の成立性を検討するためには、今後さらに構造及び構造材料の開発研究を進める必要がある。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をして頂いた小原祥裕室長をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝の意を表します。また終始激励して頂いた関昌弘核融合計画室長、島本進核融合研究部長、飯島勉那珂研究所長に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) S. Tanaka et al.; Rev. Sci. Instrum., 62, (3), (1991)
- 2) 日本機械学会；「伝熱工学資料 改訂第4版」

上特に問題があると考えられるような熱応力は発生していないことが明らかになった。

## 6. ま と め

- (1) 次期装置第1壁の一般熱負荷部を模擬した実験では放射冷却型試験体も伝導冷却型試験体も懸念された点に特に問題はなく、 $0.2 \text{ MW/m}^2$ の定常熱負荷に対して健全性を保つことが確認された。
- (2) 伝導冷却型第1壁模擬試験体においてアーマタイルにインサート材（銅，TZM）を有するものと、有さないものを同時に照射したが、どちらのタイルにもき裂等の損傷は観察されず、アーマタイルの耐久性に対するインサート材の有効性は検証できなかった。
- (3) 高熱負荷部を模擬した実験において、放射冷却型第1壁模擬試験体は $0.6 \text{ MW/m}^2$ の定常熱負荷に対してチタンスリーブとアーマタイルが融着し、タイルの交換に重大な問題が生じた。放射冷却型第1壁はアーマタイルの交換を考えているため、今回採用した模擬試験体の構造には改善すべき点があることが明らかになった。
- (4) 2次元平面歪弾性熱応力解析の結果、放射冷却型第1壁模擬試験体内部には特に問題となるような応力の発生はないと予想された。しかし、今回実験に供したのは部分模擬試験体であり、実験時には熱変形に対して特に拘束を与えなかったため発生する熱応力の値は比較的小さいものと考えられる。さらに、要素試験体のため寸法が小さく、強度上重大な欠陥が存在する確率も少なかったと考えられる。

核融合実験炉用第1壁の成立性を検討するためには、今後さらに構造及び構造材料の開発研究を進める必要がある。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をして頂いた小原祥裕室長をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝の意を表します。また終始激励して頂いた関昌弘核融合計画室長、島本進核融合研究部長、飯島勉那珂研究所長に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) S. Tanaka et al.; Rev. Sci. Instrum., 62, (3), (1991)
- 2) 日本機械学会；「伝熱工学資料 改訂第4版」



上特に問題があると考えられるような熱応力は発生していないことが明らかになった。

## 6. ま と め

- (1) 次期装置第1壁の一般熱負荷部を模擬した実験では放射冷却型試験体も伝導冷却型試験体も懸念された点に特に問題はなく、 $0.2 \text{ MW/m}^2$ の定常熱負荷に対して健全性を保つことが確認された。
- (2) 伝導冷却型第1壁模擬試験体においてアーマタイルにインサート材（銅，TZM）を有するものと、有さないものを同時に照射したが、どちらのタイルにもき裂等の損傷は観察されず、アーマタイルの耐久性に対するインサート材の有効性は検証できなかった。
- (3) 高熱負荷部を模擬した実験において、放射冷却型第1壁模擬試験体は $0.6 \text{ MW/m}^2$ の定常熱負荷に対してチタンスリーブとアーマタイルが融着し、タイルの交換に重大な問題が生じた。放射冷却型第1壁はアーマタイルの交換を考えているため、今回採用した模擬試験体の構造には改善すべき点があることが明らかになった。
- (4) 2次元平面歪弾性熱応力解析の結果、放射冷却型第1壁模擬試験体内部には特に問題となるような応力の発生はないと予想された。しかし、今回実験に供したのは部分模擬試験体であり、実験時には熱変形に対して特に拘束を与えなかったため発生する熱応力の値は比較的小さいものと考えられる。さらに、要素試験体のため寸法が小さく、強度上重大な欠陥が存在する確率も少なかったと考えられる。

核融合実験炉用第1壁の成立性を検討するためには、今後さらに構造及び構造材料の開発研究を進める必要がある。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をして頂いた小原祥裕室長をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝の意を表します。また終始激励して頂いた関昌弘核融合計画室長、島本進核融合研究部長、飯島勉那珂研究所長に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) S. Tanaka et al.; Rev. Sci. Instrum., 62, (3), (1991)
- 2) 日本機械学会；「伝熱工学資料 改訂第4版」

表1 解析に使用した物性値

## a) アーマタイル(IG-430U)

熱伝導率 $\lambda$ (W/m $\cdot$ K)		比熱 $C_p$ (J/kg $\cdot$ K)		密度 $\rho$ (kg/m $^3$ )
300K	155	300K	718	1810(Const.)
400K	140	400K	1000	
700K	100	700K	1500	
900K	78	900K	1700	
1773K	50	1773K	2000	

## b) セラミックボルト1 (アルミナ)

$\lambda$		$C_p$		$\rho$
300K	36	300K	779	3810(Const.)
500K	20	500K	1040	
800K	10	800K	1181	
1300K	6	1300K	1271	
1800K	5.6	1800K	1323	

## c) スリーブ (チタン)

$\lambda$		$C_p$		$\rho$
300K	22	300K	522	4510(Const.)
600K	19	600K	610	
800K	20	800K	674	
1000K	21	1000K	732	
1200K	22	1200K	700	

## d) 台座 (TZM)

$\lambda$		$C_p$		$\rho$
373K	122	373K	225	10000(Const.)
773K	113	773K	255	
1273K	98	1273K	295	
1773K	85	1773K	330	

## e) 基板 (SUS316)

$\lambda$		$C_p$		$\rho$
300K	16	300K	479	7810(Const.)
400K	16.5	400K	499	
600K	19	600K	527	
800K	22.5	800K	549	
1000K	25.7	1000K	570	

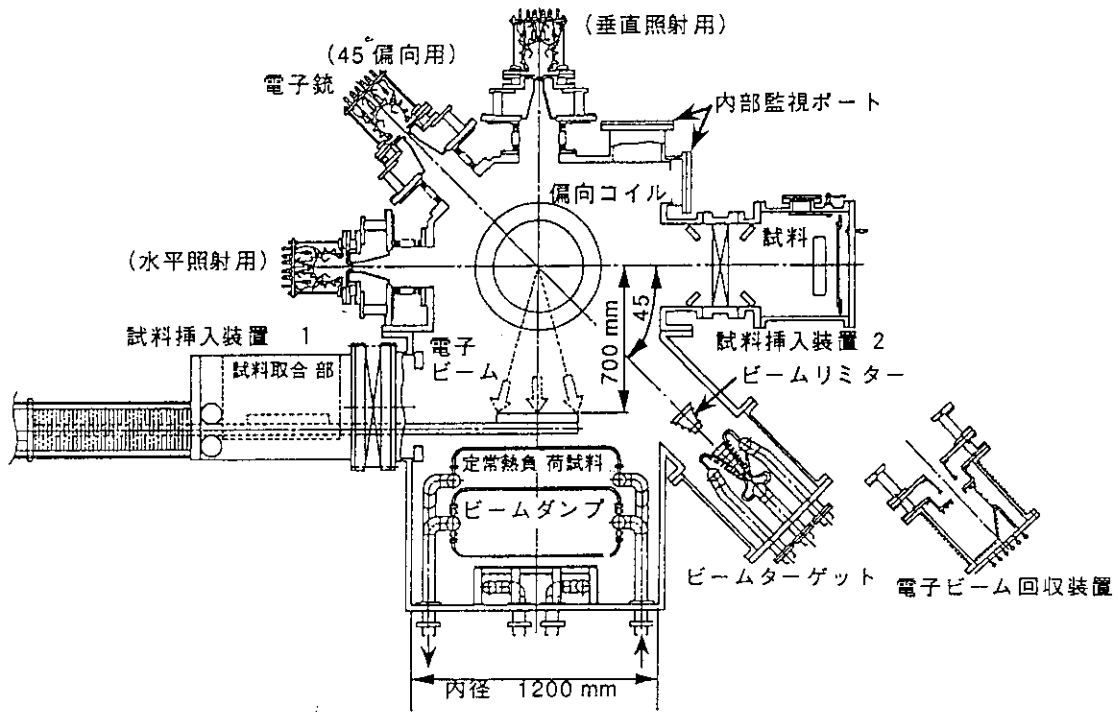


図1 JEBIS (原研電子ビーム照射装置) 全体断面図

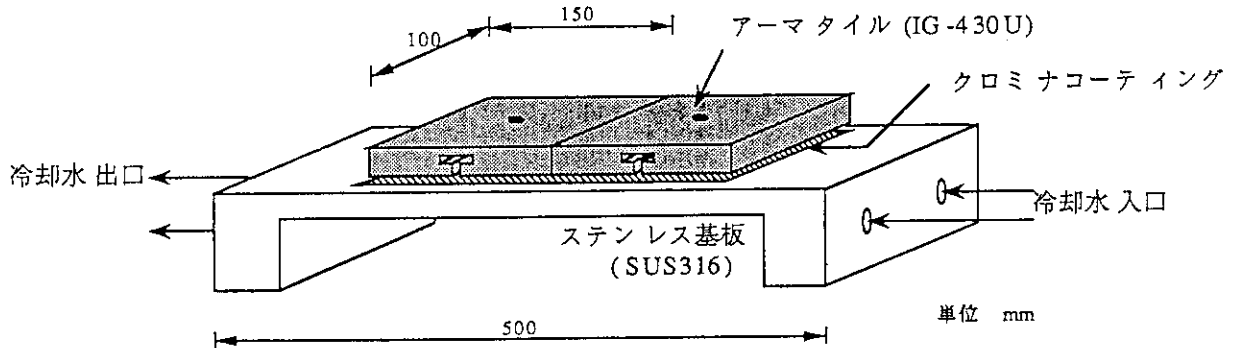


図2 放射冷却型第1壁模擬試験体の外観

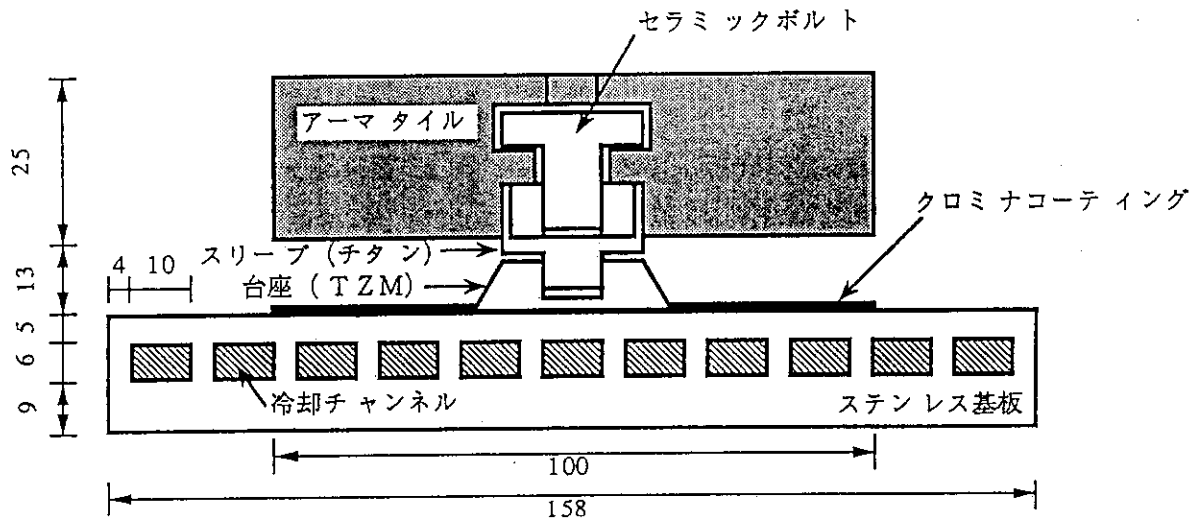


図3 放射冷却型第1壁模擬試験体の断面図

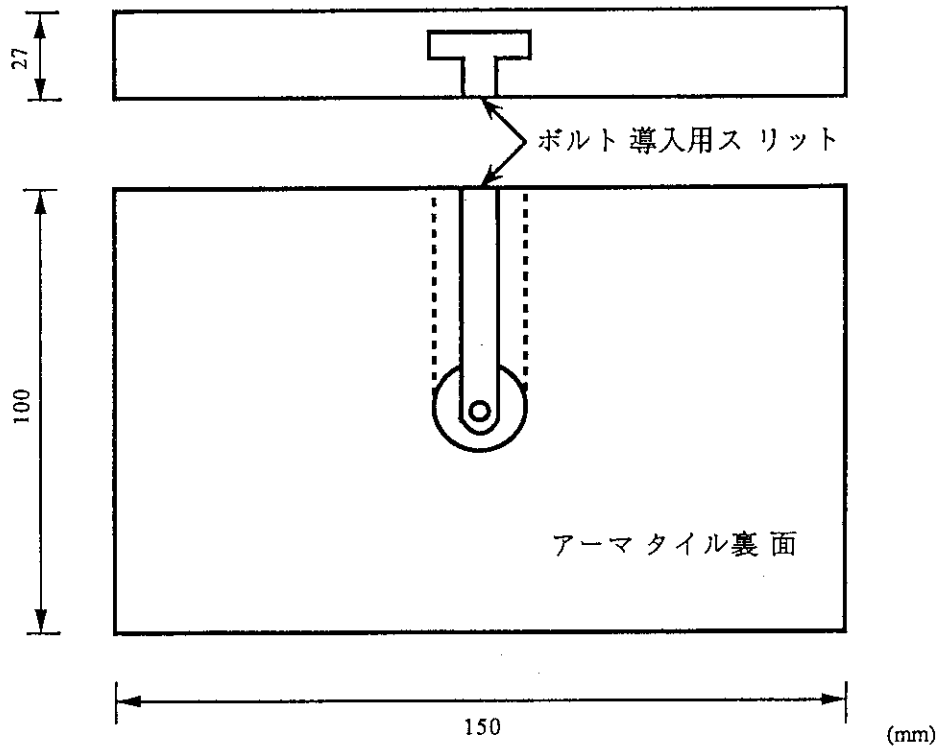


図4 放射冷却型第1壁用アーマタイル形状

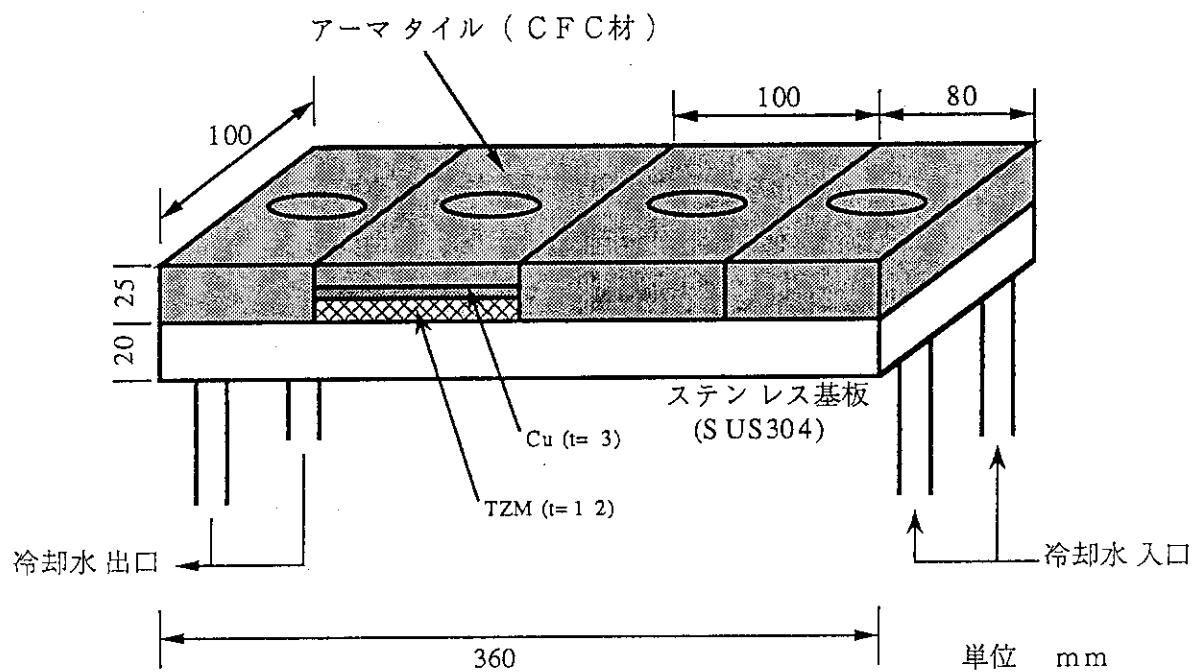


図5 伝導冷却型第1壁模擬試験体の外観

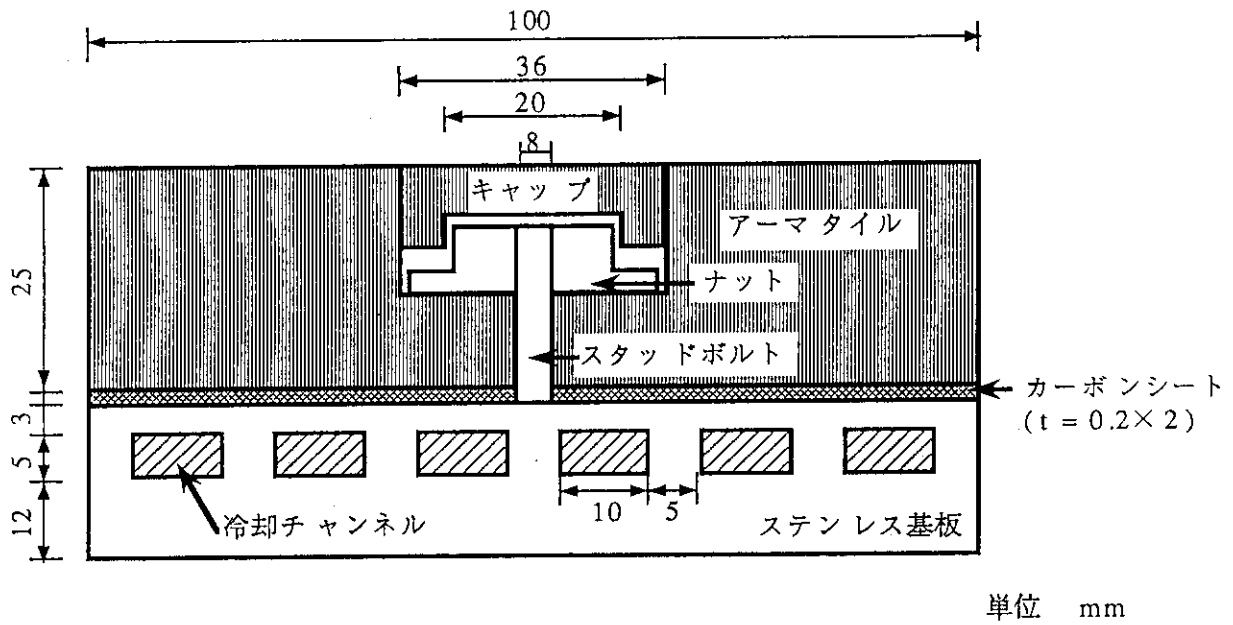


図 6(a) 伝導冷却型第 1 壁模擬試験体断面図 (インサート材なし)

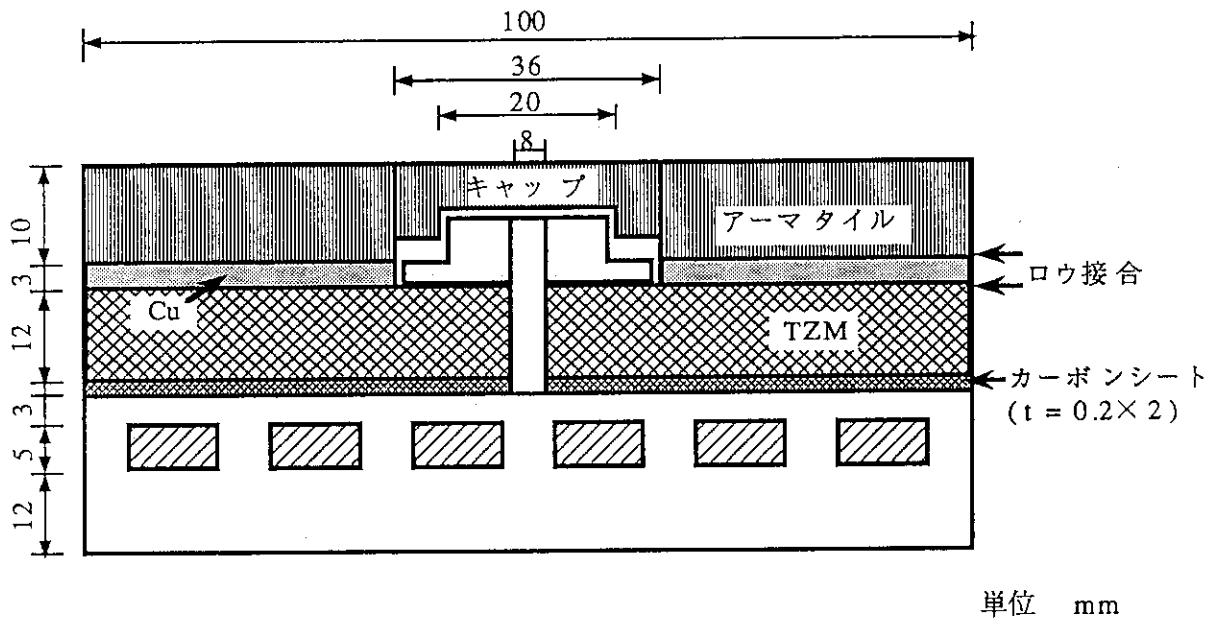


図 6(b) 伝導冷却型第 1 壁模擬試験体断面図 (インサート材あり)

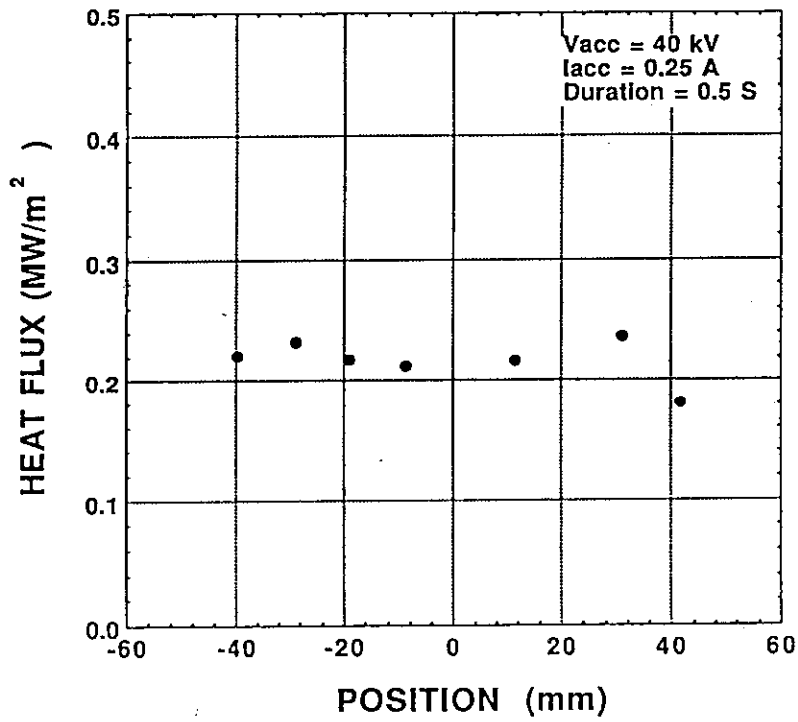


図 7(a) 熱負荷分布 (試験体短手方向)

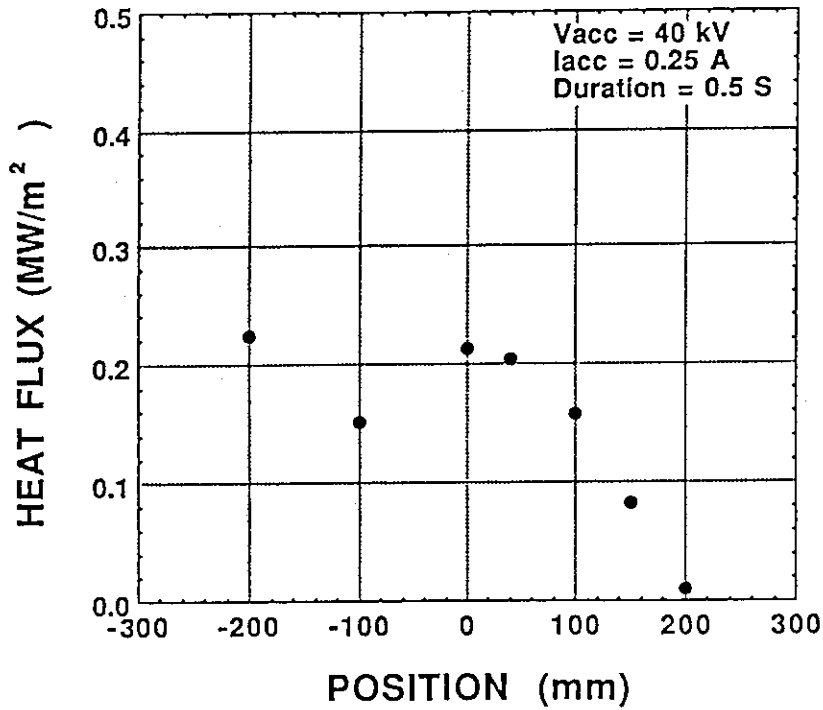


図 7(b) 熱負荷分布 (試験体長手方向)

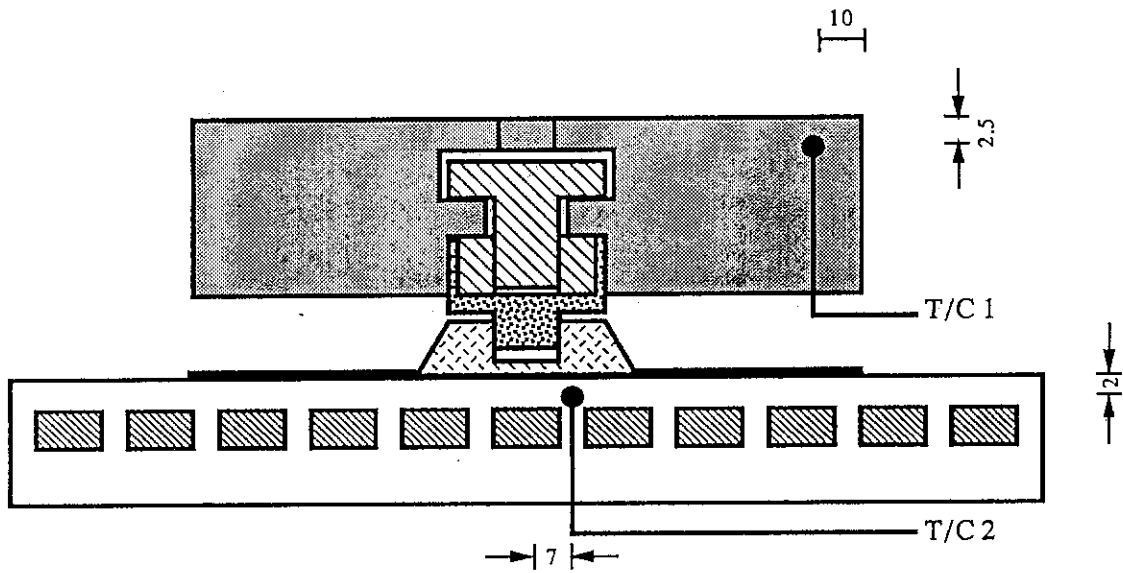


図8 放射冷却型第1壁模擬試験体の熱電対取付位置

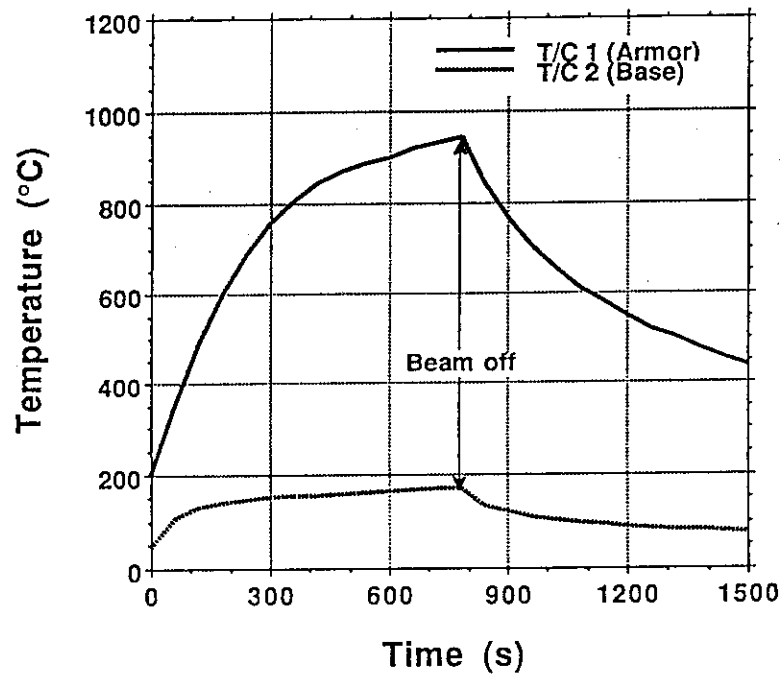


図9 放射冷却型第1壁模擬試験体各部の温度変化



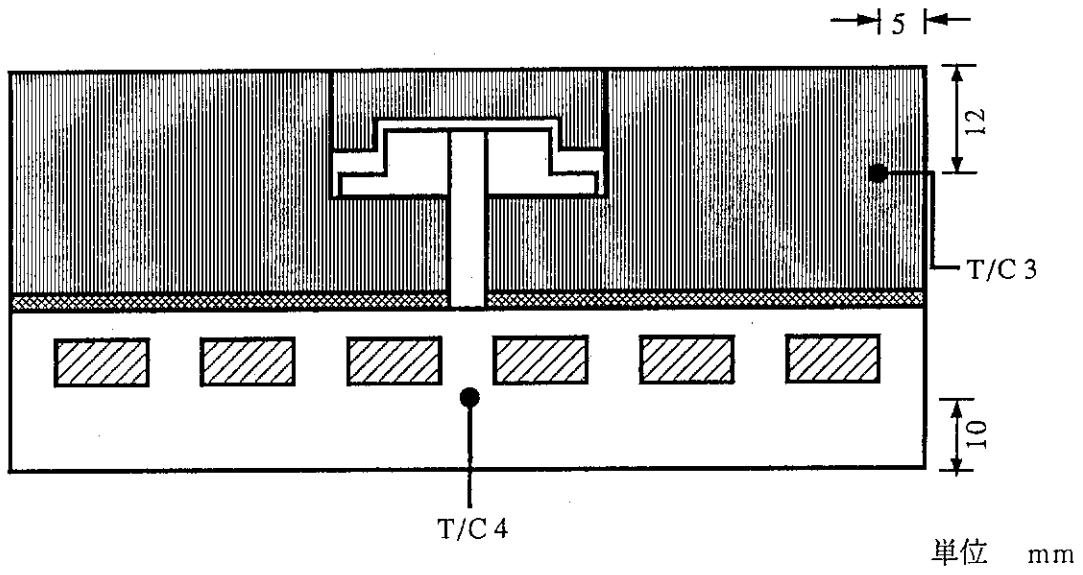


図10(a) 伝導冷却型第1壁模擬試験体熱電対位置 (インサート材なし)

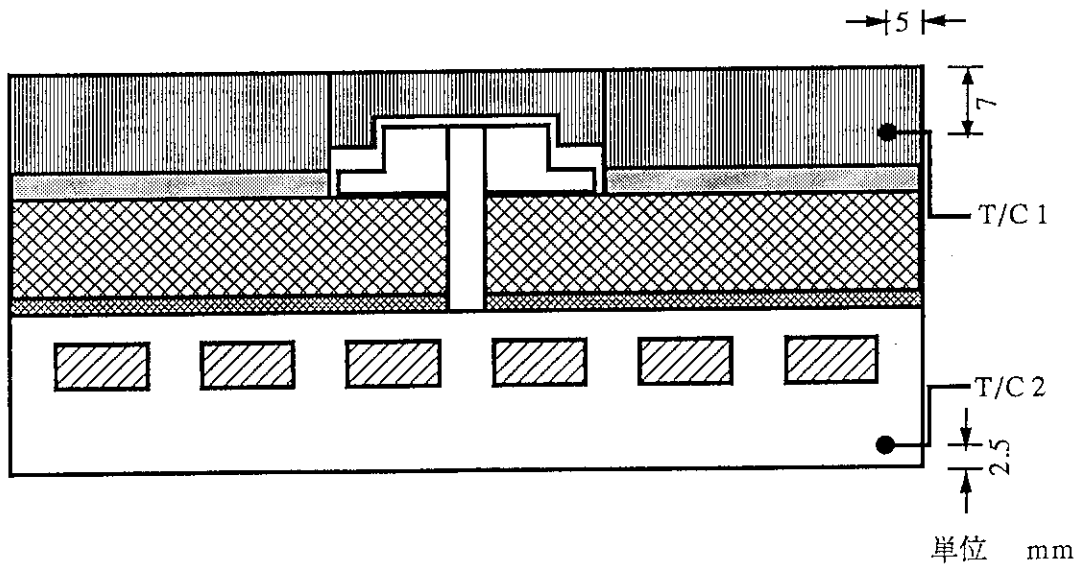


図10(b) 伝導冷却型第1壁模擬試験体熱電対位置 (インサート材あり)

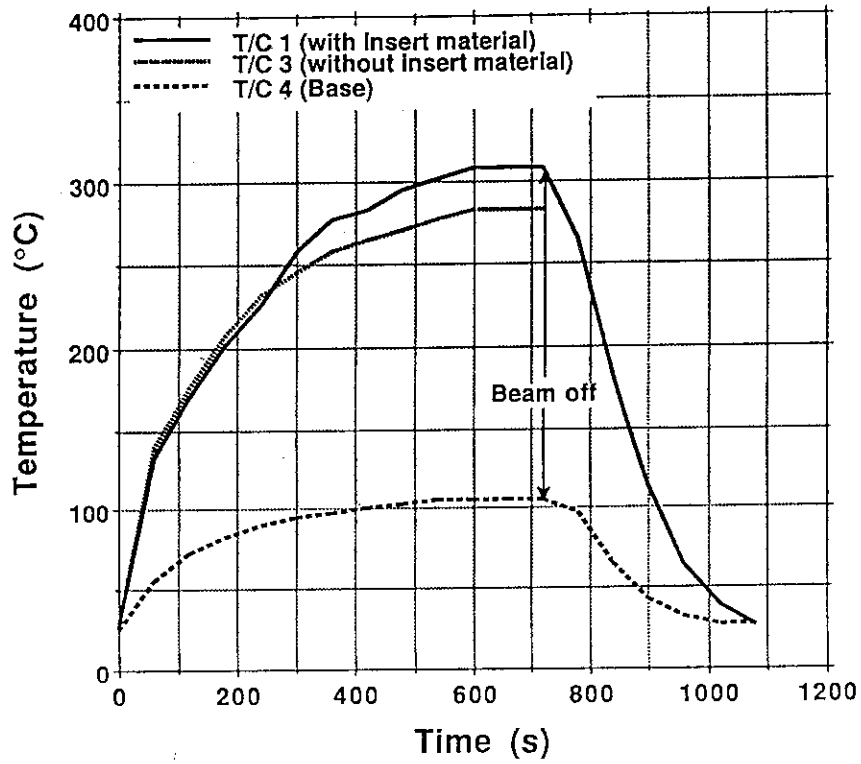


図11 伝導冷却型第1壁模擬試験体各部の温度変化

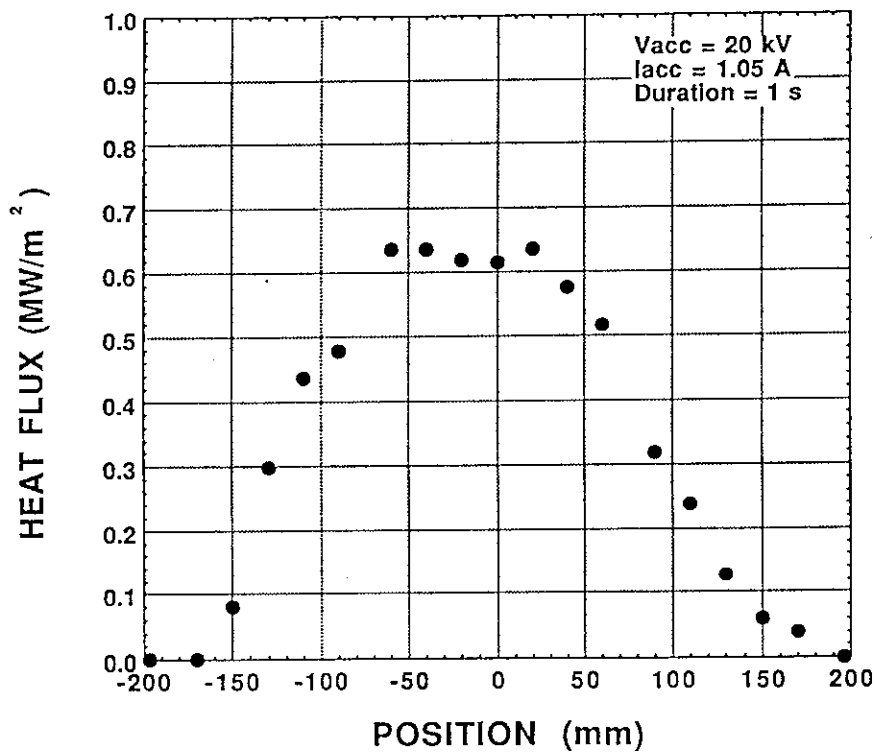


図12 熱負荷分布 (試験体短手方向)

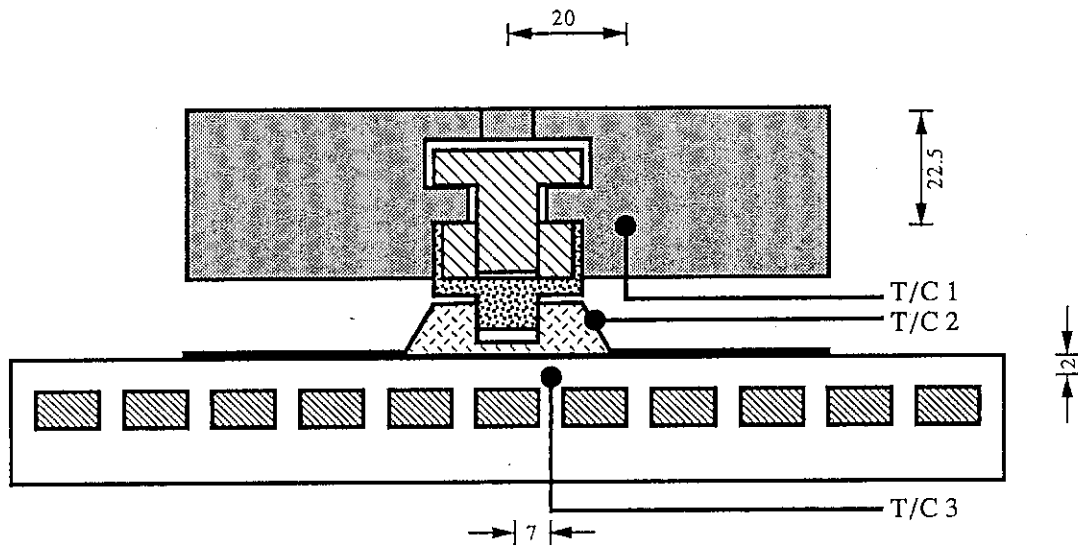


図13 放射冷却型第1壁模擬試験体の熱電対取付位置

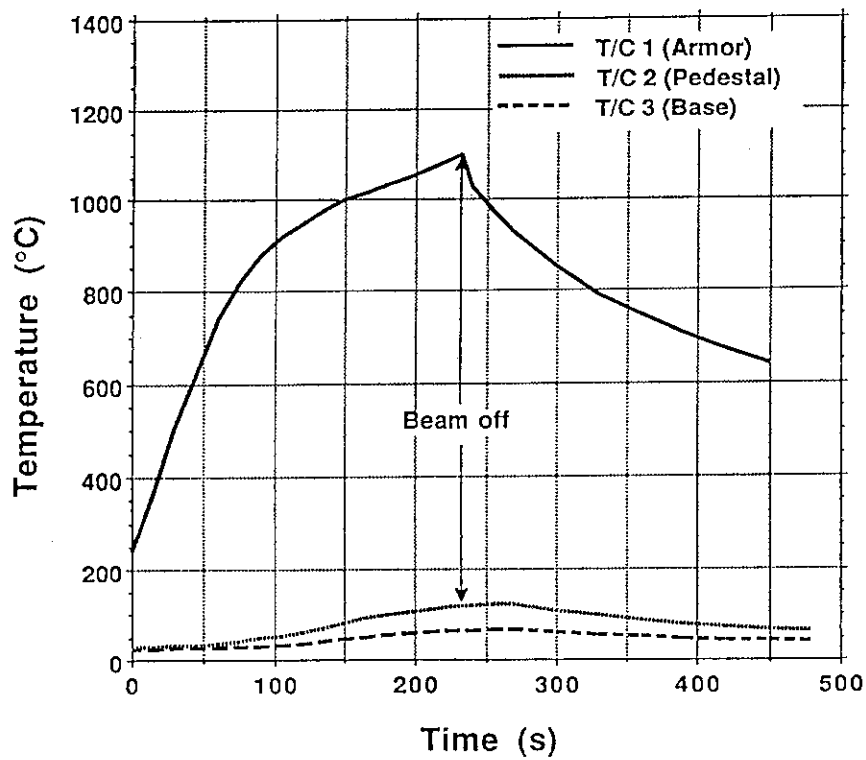


図14 放射冷却型第1壁模擬試験体各部の温度変化

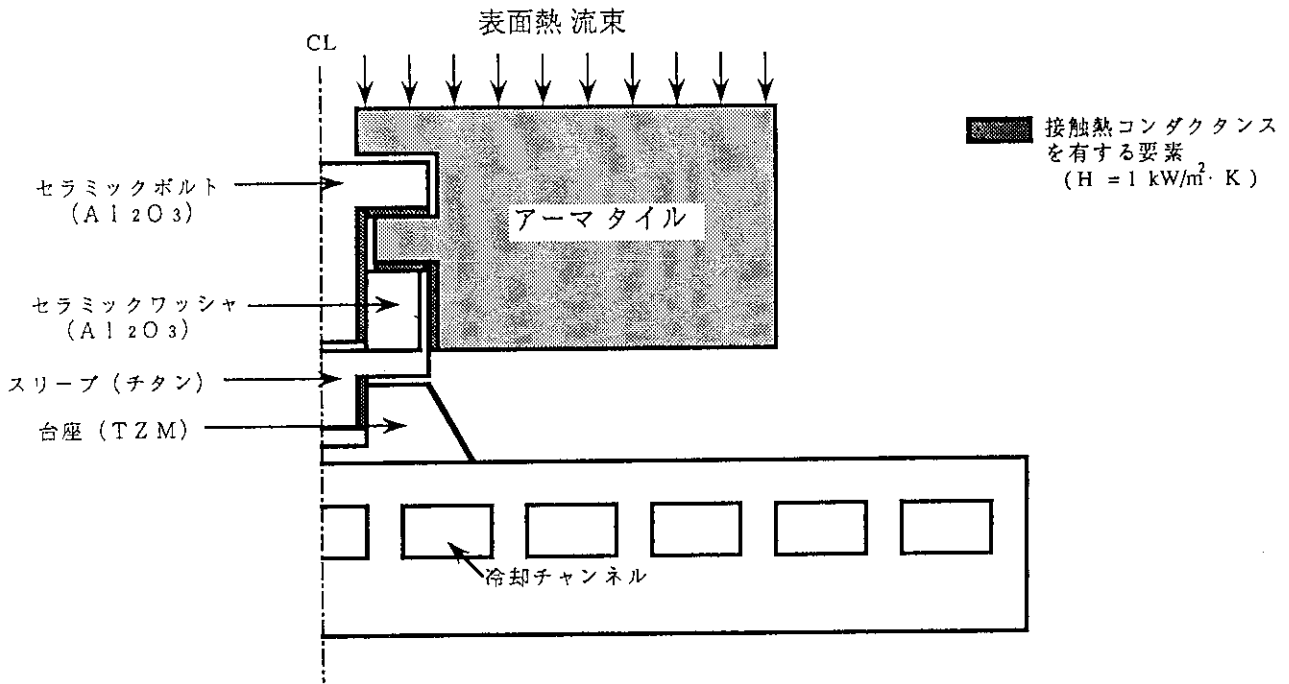


図15 解体モデル (タイル表面からの再放射を考慮)

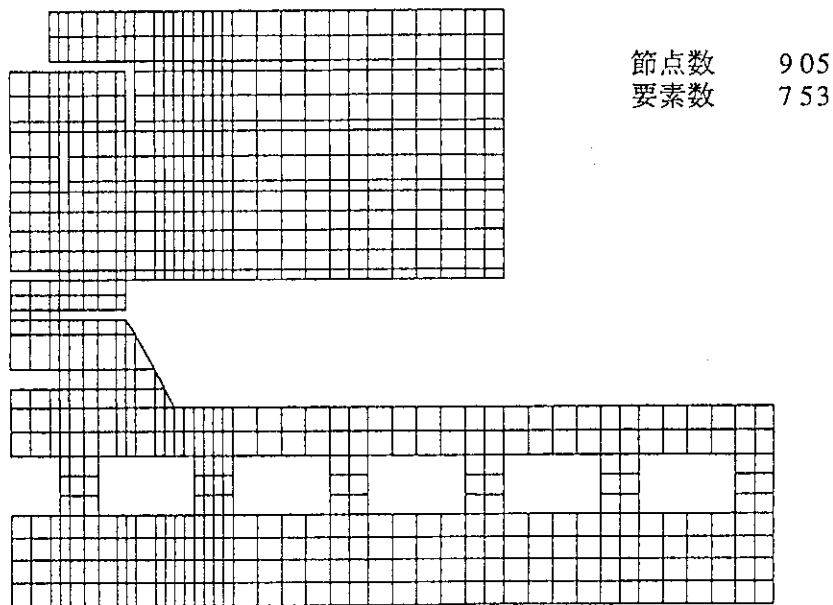


図16 メッシュ構成図

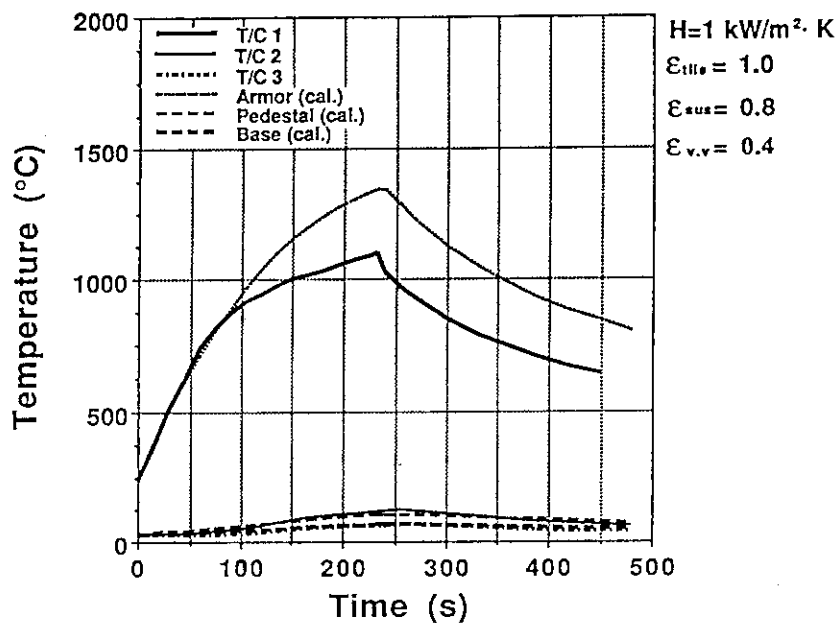


図17 熱伝導解析値と実験値との比較

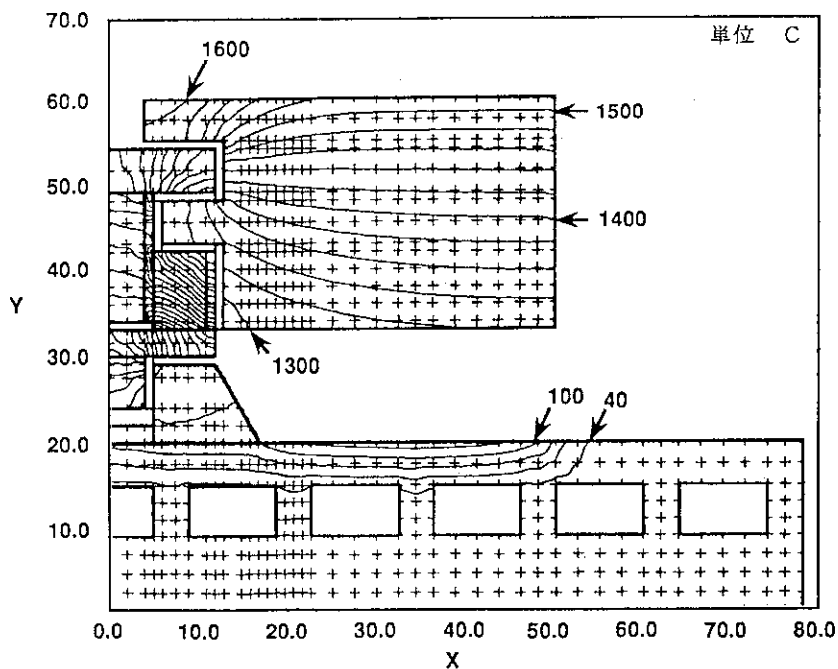


図18 照射終了時 (t = 232 s) の試験体の温度分布

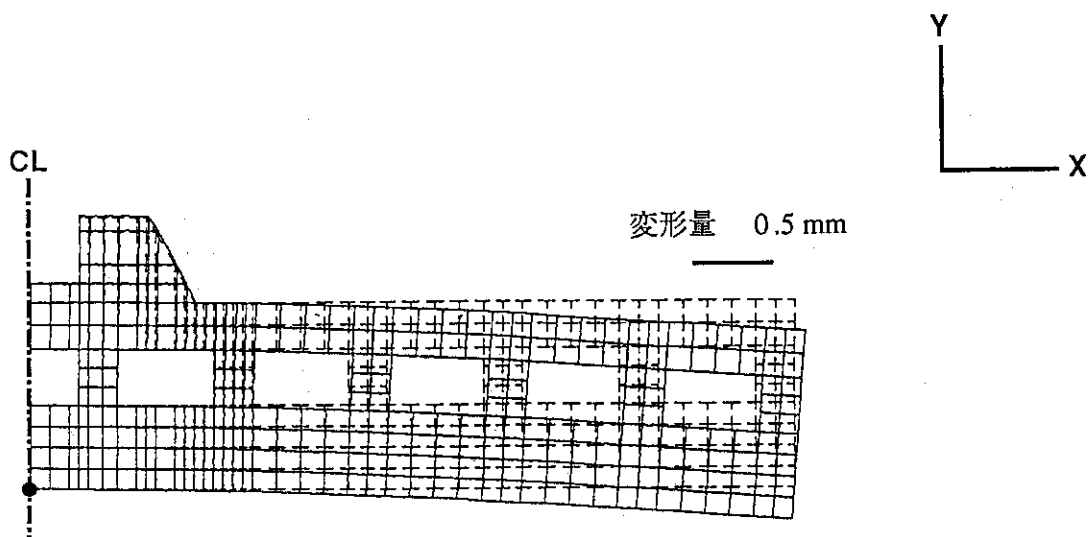


図19 照射終了時 (t = 232 s) の試験体の変形

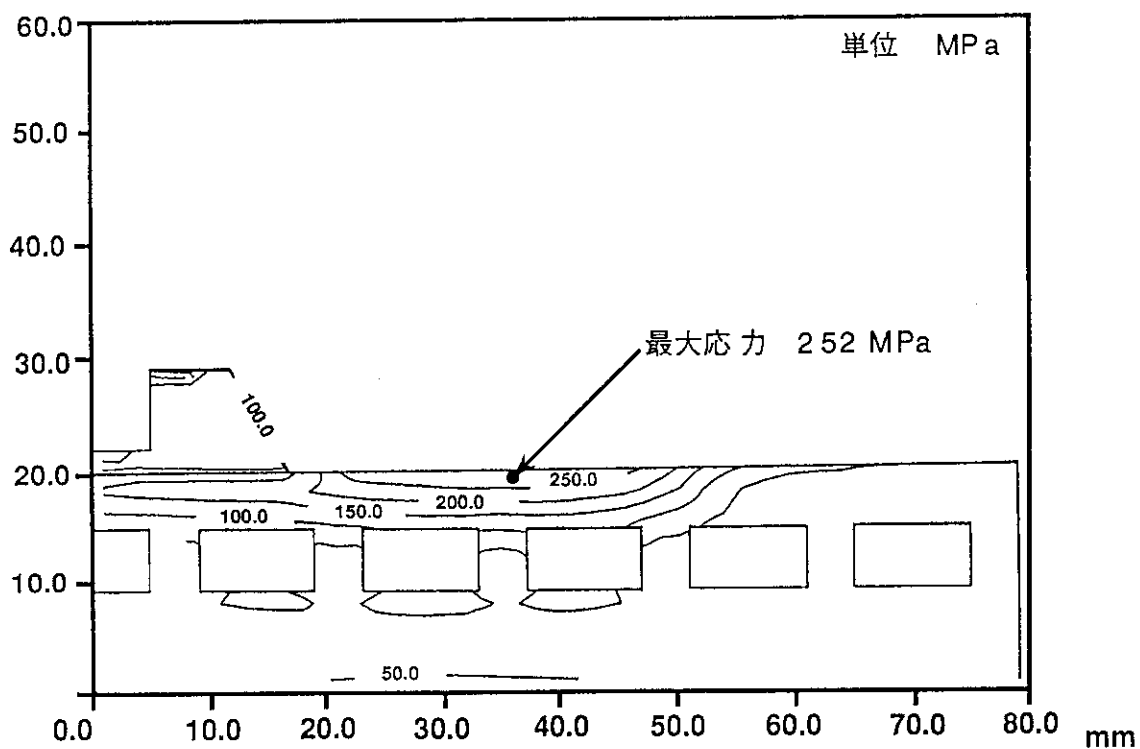


図20 照射終了時 (t = 232 s) に試験体に発生する応力 (von Mises 応力)

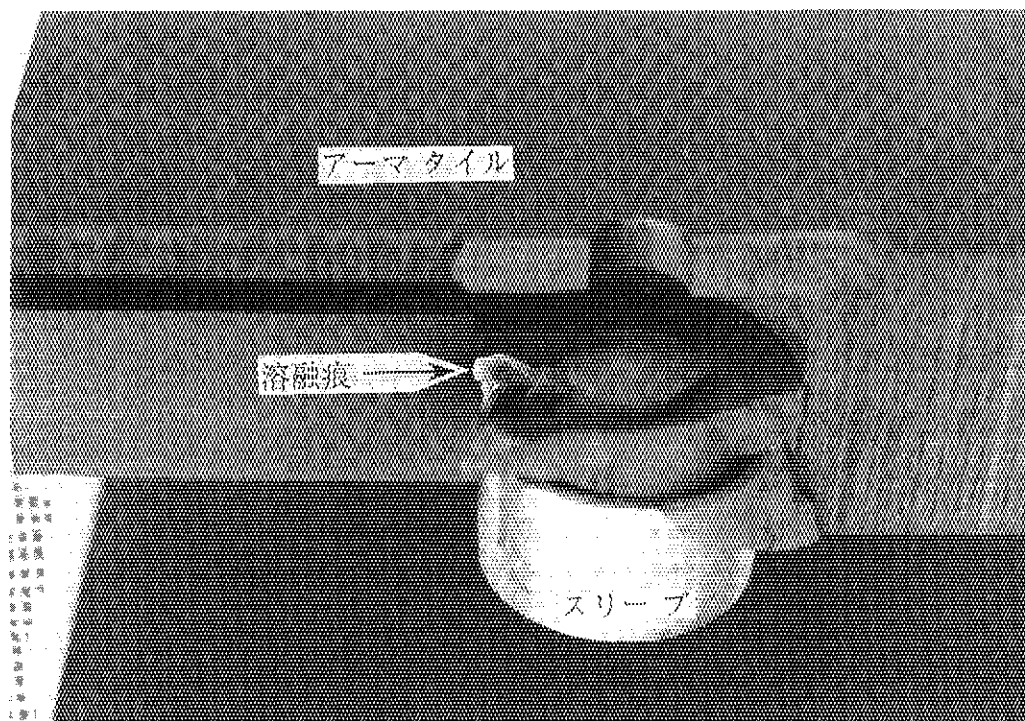


写真1 アーマタイルと融着したチタンスリーブ