

JAERI - M  
83-167

OGL-1照射燃料体用黒鉛ブロック  
の熱応力解析

1983年10月

湊 和生・福田幸朔・小林紀昭・井川勝市

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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 柳高野高速印刷

OG L - 1 照射燃料体用黒鉛ブロックの熱応力解析

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部  
湊 和生・福田幸朔・小林紀昭・井川勝市

(1983年9月22日受理)

照射中における黒鉛ブロックの耐熱応力強度を確認する目的で、1本燃料棒型のOG L - 1 照射燃料体用黒鉛ブロックの熱応力解析を行った。温度条件には、第6次燃料体の照射試験データを用いた。また黒鉛の物性値には、黒鉛ブロックの素材であるIG - 1 1 黒鉛の物性値を用いた。解析の結果、照射により黒鉛物性値が変化するので、最大引張応力および最大圧縮応力は、照射量とともに増大することが明らかになった。しかし、最大引張応力および最大圧縮応力は、タイロッド挿入用孔径が8 mmあるいは9 mmの場合ともに、高速中性子照射量が $0 \sim 3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の範囲で、それぞれの許容応力よりも小さかった。このことから、1本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの耐熱応力強度は、計画されている最長の照射期間の場合でも、十分に確保されていることがわかった。

## 目 次

1. はじめに	1
2. 燃料体の構造	1
3. 解析方法	2
3.1 解析手順	2
3.2 燃料体全体の伝熱解析	3
3.3 黒鉛ブロックの温度解析	3
3.4 黒鉛ブロックの熱応力解析	4
3.5 黒鉛物性値	4
4. 解析結果および検討	5
4.1 燃料体全体の伝熱解析	5
4.2 黒鉛ブロックの温度解析	5
4.3 黒鉛ブロックの熱応力解析	5
5. 結 論	7
謝 辞	7
参考文献	7

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Structure of the fuel element .....	1
3. Analytical method .....	2
3.1 Procedure of analysis .....	2
3.2 Thermal analysis of the fuel element .....	3
3.3 Temperature analysis of the graphite block .....	3
3.4 Thermal stress analysis of the graphite block .....	4
3.5 Physical properties of graphite .....	4
4. Results and discussion .....	5
5. Conclusion .....	7
Acknowledgement .....	7
References .....	7

## 1. はじめに

多目的高温ガス実験炉用燃料の照射試験は、キャプセル照射および OGL-1 (Oarai Gas Loop-1) 照射によって行なわれている。OGL-1 は、JMTR (Japan Material Testing Reactor) の反射体領域に取り付けられている炉内ループ照射装置であり、高温高压流動ヘリウムガス雰囲気での照射試験が可能である。また、OGL-1 は、照射孔径が大きいので、照射試料の構造も多目的高温ガス実験炉燃料に類似した、いわゆる pin-in-block 型にすることができる。すなわち、燃料コンパクトを黒鉛スリーブに収めて燃料棒とし、これを黒鉛ブロックの孔に挿入し、冷却材のヘリウムガスは黒鉛ブロックと燃料棒の間を流れる構造としたものである。キャプセル照射では、燃料コンパクトの照射試験しか行なえないが、OGL-1 照射では、黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロックを含めた燃料体としての照射試験が行なえる。この点が OGL-1 照射の大きな特徴である。

OGL-1 における燃料体の照射試験は、毎年 1 体ずつ行なわれている。現在のところ、第 1 次燃料体から第 7 次燃料体までの照射試験が終了している。第 8 次燃料体の照射開始は、59 年 1 月の予定である。

OGL-1 照射用燃料体には、大きく分けて 2 通りのものがある。1 つは、外径 24 mm の燃料コンパクトから成る燃料棒 3 本を装荷する 3 本燃料棒型燃料体であり、他の 1 つは、外径 36 mm の燃料コンパクトから成る燃料棒 1 本を装荷する 1 本燃料棒型燃料体である。いままでは、燃料コンパクト 60 個を装荷できる、3 本燃料棒型燃料体が主流であった (第 1 次、第 2 次、第 4 次、第 5 次、および第 7 次燃料体)。しかし、今後 (第 8 次燃料体以降) は、多目的高温ガス実験炉燃料と同様な仕様の、外径 36 mm の燃料コンパクトの照射試験を主に行なう計画であるので、1 本燃料棒型燃料体が主流になる。今後の照射試験計画では、最長の照射期間は 7 原子炉サイクル (約 140 日間) であり、燃料コンパクトの最高温度は 1450~1500°C を予定している。

ここで報告する解析の目的は、OGL-1 照射用の 1 本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックが、照射によってこの黒鉛ブロックに発生する熱応力に耐え得ることを確認するとともに、黒鉛ブロックのタイロッド用孔径の大きさの影響についても明らかにすることである。

なお、OGL-1 照射用の 3 本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの熱応力解析については、報告済みである。<sup>(1)</sup>

## 2. 燃料体の構造

OGL-1 照射燃料体には、1 本燃料棒型と 3 本燃料棒型の 2 種類があるが、ここでは、1 本燃料棒型燃料体の構造について述べる。現在までに製作した 1 本燃料棒型燃料体は、第 3 次燃料体、第 6 次燃料体、および第 8 次燃料体である。これらの構造は、細部においてそれぞれ異なっているが、基本的な構造は同じである。また、今後に製作を予定している燃料体も、これらと同様のものである。

燃料試験体の全体図を、第 6 次燃料試験体を代表例として、Fig.1 に示す。燃料体は、ハステロイ X 材のハンガーロッドによって吊り下げられる構造である。ハンガーロッドの上部には、中性子遮蔽体を設けてある。燃料試験体は、OGL-1 の炉内管である内径 84 mm のハステロイ X 材の仕切管

## 1. はじめに

多目的高温ガス実験炉用燃料の照射試験は、キャプセル照射および OGL-1 (Oarai Gas Loop-1) 照射によって行なわれている。OGL-1 は、JMTR (Japan Material Testing Reactor) の反射体領域に取り付けられている炉内ループ照射装置であり、高温高圧流動ヘリウムガス雰囲気での照射試験が可能である。また、OGL-1 は、照射孔径が大きいので、照射試料の構造も多目的高温ガス実験炉燃料に類似した、いわゆる pin-in-block 型にすることができる。すなわち、燃料コンパクトを黒鉛スリーブに収めて燃料棒とし、これを黒鉛ブロックの孔に挿入し、冷却材のヘリウムガスは黒鉛ブロックと燃料棒の間を流れる構造としたものである。キャプセル照射では、燃料コンパクトの照射試験しか行なえないが、OGL-1 照射では、黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロックを含めた燃料体としての照射試験が行なえる。この点が OGL-1 照射の大きな特徴である。

OGL-1 における燃料体の照射試験は、毎年 1 体ずつ行なわれている。現在のところ、第 1 次燃料体から第 7 次燃料体までの照射試験が終了している。第 8 次燃料体の照射開始は、59 年 1 月の予定である。

OGL-1 照射用燃料体には、大きく分けて 2 通りのものがある。1 つは、外径 24 mm の燃料コンパクトから成る燃料棒 3 本を装荷する 3 本燃料棒型燃料体であり、他の 1 つは、外径 36 mm の燃料コンパクトから成る燃料棒 1 本を装荷する 1 本燃料棒型燃料体である。いままでは、燃料コンパクト 60 個を装荷できる、3 本燃料棒型燃料体が主流であった (第 1 次、第 2 次、第 4 次、第 5 次、および第 7 次燃料体)。しかし、今後 (第 8 次燃料体以降) は、多目的高温ガス実験炉燃料と同様な仕様の、外径 36 mm の燃料コンパクトの照射試験を主に行なう計画であるので、1 本燃料棒型燃料体が主流になる。今後の照射試験計画では、最長の照射期間は 7 原子炉サイクル (約 140 日間) であり、燃料コンパクトの最高温度は 1450~1500°C を予定している。

ここで報告する解析の目的は、OGL-1 照射用の 1 本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックが、照射によってこの黒鉛ブロックに発生する熱応力に耐え得ることを確認するとともに、黒鉛ブロックのタイロッド用孔径の大きさの影響についても明らかにすることである。

なお、OGL-1 照射用の 3 本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの熱応力解析については、報告済みである。<sup>(1)</sup>

## 2. 燃料体の構造

OGL-1 照射燃料体には、1 本燃料棒型と 3 本燃料棒型の 2 種類があるが、ここでは、1 本燃料棒型燃料体の構造について述べる。現在までに製作した 1 本燃料棒型燃料体は、第 3 次燃料体、第 6 次燃料体、および第 8 次燃料体である。これらの構造は、細部においてそれぞれ異なっているが、基本的な構造は同じである。また、今後に製作を予定している燃料体も、これらと同様のものである。

燃料試験体の全体図を、第 6 次燃料試験体を代表例として、Fig.1 に示す。燃料体は、 Hastelloy-X 材のハンガーロッドによって吊り下げられる構造である。ハンガーロッドの上部には、中性子遮蔽体を設けてある。燃料試験体は、OGL-1 の炉内管である内径 84 mm の Hastelloy-X 材の仕切管

に挿入され、その試験は、燃料試験体最下部の先端金物を仕切管内部に設けた試料受け具に収めた状態で行なわれる。燃料試験体および仕切管は、照射中は高温になり熱膨張する。燃料試験体の方が仕切管よりも高温になるため熱膨張も大きい、この熱膨張の差は、燃料試験体上部で吸収される構造である。燃料試験体は、全長約7.5 mであるが、燃料体はそのうちの約1 mである。

燃料体の組立図を、第6次燃料体を代表例として、Fig.2に示す。燃料体は、燃料棒、黒鉛ブロック、ハステロイ-X材のタイロッド、および吊り金具などから構成されている。燃料棒は、黒鉛スリーブに燃料コンパクトを収めたもので、上下端に黒鉛ウールの緩衝材を収めた後に、黒鉛製の端栓で閉じたものである。燃料コンパクトは、被覆燃料粒子を黒鉛粉およびバインダーのフェノール樹脂と混ぜて均一に分散させ、外径36 mmの円筒型に焼成したものである。被覆燃料粒子は、二酸化ウラン ( $UO_2$ )の微小球燃料核を、緩衝用の低密度熱分解炭素層 (buffer-PyC)、内側の高密度熱分解炭素層 (IPyC)、炭化ケイ素層 (SiC)、および外側の高密度熱分解炭素層 (OPyC)の4層で被覆した、Triso型である。黒鉛ブロックは、IG-11黒鉛から加工した、外径80 mmおよび内径50 mmの円筒形である。燃料棒は、黒鉛ブロック中心の孔に挿入される。黒鉛ブロックの全長は、燃料体により少し異なるが、約800 mmである。また、黒鉛ブロックには、燃料体を吊り下げるためのタイロッドの挿入用孔が120°間隔で3本ある。この孔径は、いままでのところ8 mmであるが、今後、タイロッド径を太くすることも考えられる。そこで、ここでは、タイロッド挿入用孔径が8 mmおよび9 mmの両方の場合について解析を行なった。これらの孔のほかに、黒鉛ブロックには、熱電対挿入用の孔および溝、ならびに燃料棒支持用の溝がある。

燃料体の冷却は、高圧ヘリウムガス流れによって行なわれる。その冷却方法の概念図を、Fig.3に示す。ヘリウムガスは、炉外部より内壁管と仕切管の間を燃料試験体の上部から下部へ向って流れ (下降流)、燃料試験体下部において、仕切管に設けられた孔を通して向きを変え、今度は仕切管内部を上向きに流れる。上向きの流れは、黒鉛ブロックと仕切管の間の流れ (バイパス部流)と黒鉛ブロックと燃料棒の間の流れ (燃料部流)に分岐する。分岐したヘリウムガス流れは、燃料体上部において再び混合し、炉外部へ導かれる。

### 3. 解析方法

#### 3.1 解析手順

黒鉛ブロックの熱応力解析の手順は、Fig.4に示すように、3段階に分けられる。第1段階では、燃料体の照射試験データに基づいて、燃料体全体の伝熱解析を行なった。この解析には、OGL-1静特性熱計算プログラムSTPDSP2<sup>(2)</sup>を用いた。これにより、黒鉛ブロックの温度解析に必要な黒鉛ブロック周辺の熱特性を明らかにした。第2段階では、第1段階で得られた冷却材温度を境界条件として、黒鉛ブロックの温度を3次元で解析した。この解析には、熱伝導計算プログラムHEATING-III<sup>(3)</sup>を用いた。温度解析は、対称性を考慮して、黒鉛ブロックの周方向の1/2領域を対象とした。第3段階では、第2段階で得られた黒鉛ブロックの温度に基づいて、黒鉛ブロックの熱応力を3次元で解析した。この解析には、応力計算プログラムSAP-VI<sup>(4)</sup>を用いた。

以下に、解析の順序に従って、それぞれの解析の方法および条件について述べる。また、解析に用



に挿入され、その試験は、燃料試験体最下部の先端金物を仕切管内部に設けた試料受け具に収めた状態で行なわれる。燃料試験体および仕切管は、照射中は高温になり熱膨張する。燃料試験体の方が仕切管よりも高温になるため熱膨張も大きい、この熱膨張の差は、燃料試験体上部で吸収される構造である。燃料試験体は、全長約7.5 mであるが、燃料体はそのうちの約1 mである。

燃料体の組立図を、第6次燃料体を代表例として、Fig.2に示す。燃料体は、燃料棒、黒鉛ブロック、ハステロイ-X材のタイロッド、および吊り金具などから構成されている。燃料棒は、黒鉛スリーブに燃料コンパクトを収めたもので、上下端に黒鉛ウールの緩衝材を収めた後に、黒鉛製の端栓で閉じたものである。燃料コンパクトは、被覆燃料粒子を黒鉛粉およびバインダーのフェノール樹脂と混ぜて均一に分散させ、外径36 mmの円筒型に焼成したものである。被覆燃料粒子は、二酸化ウラン ( $UO_2$ )の微小球燃料核を、緩衝用の低密度熱分解炭素層 (buffer-PyC)、内側の高密度熱分解炭素層 (IPyC)、炭化ケイ素層 (SiC)、および外側の高密度熱分解炭素層 (OPyC)の4層で被覆した、Triso型である。黒鉛ブロックは、IG-11黒鉛から加工した、外径80 mmおよび内径50 mmの円筒形である。燃料棒は、黒鉛ブロック中心の孔に挿入される。黒鉛ブロックの全長は、燃料体により少し異なるが、約800 mmである。また、黒鉛ブロックには、燃料体を吊り下げるためのタイロッドの挿入用孔が120°間隔で3本ある。この孔径は、いままでのところ8 mmであるが、今後、タイロッド径を太くすることも考えられる。そこで、ここでは、タイロッド挿入用孔径が8 mmおよび9 mmの両方の場合について解析を行なった。これらの孔のほかに、黒鉛ブロックには、熱電対挿入用の孔および溝、ならびに燃料棒支持用の溝がある。

燃料体の冷却は、高圧ヘリウムガス流れによって行なわれる。その冷却方法の概念図を、Fig.3に示す。ヘリウムガスは、炉外部より内壁管と仕切管の間を燃料試験体の上部から下部へ向って流れ (下降流)、燃料試験体下部において、仕切管に設けられた孔を通して向きを変え、今度は仕切管内部を上向きに流れる。上向きの流れは、黒鉛ブロックと仕切管の間の流れ (バイパス部流) と黒鉛ブロックと燃料棒の間の流れ (燃料部流) に分岐する。分岐したヘリウムガス流れは、燃料体上部において再び混合し、炉外部へ導かれる。

### 3. 解析方法

#### 3.1 解析手順

黒鉛ブロックの熱応力解析の手順は、Fig.4に示すように、3段階に分けられる。第1段階では、燃料体の照射試験データに基づいて、燃料体全体の伝熱解析を行なった。この解析には、OGL-1静特性熱計算プログラムSTPDSP<sup>(2)</sup>を用いた。これにより、黒鉛ブロックの温度解析に必要な黒鉛ブロック周辺の熱特性を明らかにした。第2段階では、第1段階で得られた冷却材温度を境界条件として、黒鉛ブロックの温度を3次元で解析した。この解析には、熱伝導計算プログラムHEATING-III<sup>(3)</sup>を用いた。温度解析は、対称性を考慮して、黒鉛ブロックの周方向の1/2領域を対象とした。第3段階では、第2段階で得られた黒鉛ブロックの温度に基づいて、黒鉛ブロックの熱応力を3次元で解析した。この解析には、応力計算プログラムSAP-VI<sup>(4)</sup>を用いた。

以下に、解析の順序に従って、それぞれの解析の方法および条件について述べる。また、解析に用

いた黒鉛の物性値については、3.5節にまとめて示す。

### 3.2 燃料体全体の伝熱解析

第6次燃料体のJMT R第59原子炉サイクル後半の照射データに基づいて、燃料体全体の伝熱解析を行なった。この照射条件をTable1に示す。この照射条件は、温度に関しては今後計画している照射試験の最高値である。したがって、この条件に基づいて熱応力解析を行なうことは、必要かつ十分である。

燃料体全体の伝熱解析に用いたOGL-1静特性熱計算プログラムSTPDSP 2は、燃料体全体の伝熱を1次元で解析するモデルに基づいており、以下の条件を仮定している。

- 1) 発熱分布は、軸方向にのみ変化し、半径および周方向には一様であるとする。
- 2) 熱の流れは、周および軸方向には考慮せず、半径方向のみとする。
- 3) 燃料体は、軸方向について燃料コンパクト1個を1メッシュ（全体で20メッシュ）に区切り、冷却材の温度変化を連続条件とする。

このモデルを用いて伝熱解析を行なうことにより、各流路の冷却材温度および構造材の温度が得られる。

この解析において、冷却孔における熱伝達率 $h$ は、つぎの式に従った。

$$h = \lambda \cdot \text{Nu} / D_e \quad (\text{W/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{Nu} = 0.023 \times \text{Re}^{0.8} \times \text{Pr}^{0.4} \quad (\text{McAdamsの式})$$

ここで、 $\lambda$  : 冷却材熱伝導率 ( $\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$D_e$  : 相当直径 (cm)

$\text{Nu}$  : ヌセルト数

$\text{Re}$  : レイノルズ数

$\text{Pr}$  : プラントル数

### 3.3 黒鉛ブロックの温度解析

燃料体全体の伝熱解析で得られた冷却材温度および熱伝達係数を境界条件として、黒鉛ブロックの温度解析を3次元で行なった。温度解析には、熱伝導計算コードHEATING-IIIを用いた。

解析の対象の黒鉛ブロックは、外径80mm、内径50mm、および長さ800mmとし、120°間隔でタイロッド挿入用孔が3本設けられている構造とした。タイロッド挿入用孔径は、8mmと9mmの2通りを対象とした。解析の対象にした黒鉛ブロックのX-Y断面図を、Fig.5に示す。実際の黒鉛ブロックには、第2章で述べたように、熱電対挿入用孔などがあり、Z方向の位置によってはFig.5の断面図とは異なるが、ここでは簡単化したモデルを用いた。

温度解析を行なうために、Fig.6およびFig.7に示すように、黒鉛ブロックを要素分割した。黒鉛ブロックの周方向については、対称性を考慮し、1/2対称領域を解析対象とした。直径8mmまたは9mmのタイロッド挿入用孔は、4本の外接線で近似した。このモデルでは、X-Y断面を86節点（57要素）に、Z方向を9節点（8要素）に分割したので、全体で774節点（456要素）の分割

である。ここでは、この分割モデルを、456要素モデルと呼ぶことにする。また、比較のために、Fig.8に示すように、X-Y断面をより細分割したモデルを用いた解析も行なった。このモデルでは、黒鉛ブロックの1/2領域が全体で2439節点（1728要素）に分割されており、この分割モデルを1728要素モデルと呼ぶことにする。なお、これらの要素分割は、熱応力解析にも共通して用いた。

温度解析における境界条件を、Fig.9に示す。黒鉛ブロックの内面および外面は、冷却材温度および熱伝達率を与えた境界とした。タイロッド挿入用孔の内面は、安全側を考慮して、断熱境界とした。また、対称性から、1/2対称切断面は、断熱境界とした。なお、黒鉛ブロックの発熱は考慮しなかった。

### 3.4 黒鉛ブロックの熱応力解析

黒鉛ブロックの温度分布をもとに、黒鉛ブロックの熱応力解析を3次元で行なった。熱応力解析には、応力計算コードSAP-VIを用いた。

熱応力解析を行なうための黒鉛ブロックの要素分割モデルは、温度解析に用いた要素分割モデルと同一のものである。すなわち、456要素モデルおよび1728要素モデルである。

熱応力解析における拘束条件を、Fig.10に示す。対称性から、1/2対称切断面においては、Y軸方向の移動を拘束した。また、基準点を設けるために、黒鉛ブロック全体で1点だけは、すべての方向への移動を拘束した。

### 3.5 黒鉛物性値

黒鉛ブロックの素材であるIG-11黒鉛は、静水圧加圧により成形された等方性黒鉛であり、ここで用いた物性値の異方性も極めて少ないことが確認されている。したがって、本解析では、黒鉛は等方的であるとした。解析に用いた黒鉛の物性値を、Table 2に示す。IG-11黒鉛の物性データが充分にはそろっていないので、部分的には他の黒鉛銘柄の物性データを用いた。以下に、それぞれの物性値について順に述べる。なお、 $3.0 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ )の高速中性子照射量は、今後予定している最長の照射（7原子炉サイクル）における照射量に対応している。

熱伝導率Kについては、つぎの式を用いた。

$$K = 0.84 - 0.32 \times 10^{-3} t \quad (\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C})$$

ただし、t ( $^\circ\text{C}$ )

この式は、未照射IG-11黒鉛についての測定値<sup>(5)</sup>に基づいており、700 $^\circ\text{C}$ ~1000 $^\circ\text{C}$ においてまとめたものである。熱伝導率は、照射によって減少すると考えられるが、IG-11黒鉛の熱伝導率の照射量依存性のデータが少ないこと、および他の物性値に比べて熱応力値への影響が少ないことから、熱伝導率の照射量依存性は考慮しなかった。

熱膨張率 $\alpha$ については、つぎの式に従い、800 $^\circ\text{C}$ での値を用いた。

$$\alpha = 3.3 \times 10^{-6} + 1.9 \times 10^{-9} t \quad (1/^\circ\text{C})$$

ただし、t ( $^\circ\text{C}$ )

この式は、未照射 IG-11 黒鉛についての測定から得られたものである。<sup>(1)</sup> IG-11 黒鉛の熱膨張率の照射量依存性については、まだ不確かなので、熱膨張率の照射量依存性は考慮しなかった。

比熱  $C_p$  については、つぎの式に従い、800°Cでの値を用いた。

$$C_p = 0.54212 - 2.42667 \times 10^{-6} t - 9.02725 t^{-1} \\ - 4.34493 \times 10^4 t^{-2} + 1.59309 \times 10^7 t^{-3} \\ - 1.43688 \times 10^9 t^{-4}$$

ただし、 $t$  (K)

この式も、IG-11 黒鉛についての測定から得られたものである。<sup>(6)</sup>

ヤング率については、800°Cでの値を用いた。未照射での値は、IG-11 黒鉛のものである。<sup>(6)</sup> 照射量依存性については、SM1-24 黒鉛のデータである。ヤング率の照射量依存性のデータを、Fig.11に示す。図中では、SM1-24 黒鉛についてのデータは実線で、IG-11 黒鉛についてのデータは黒点で、それぞれ表わしてある。この図から、IG-11 黒鉛のヤング率の照射量依存性は、SM1-24 黒鉛のものと同様であると考えられる。

ポアソン比については、IG-11 黒鉛についての測定値のうち、最大のものを用いた。<sup>(7)</sup>

## 4. 解析結果および検討

### 4.1 燃料体全体の伝熱解析

燃料体全体の伝熱解析の結果を、Fig.12に示す。燃料コンパクト温度および冷却材温度の熱電対による測定値も、Fig.12に同時に示した。解析結果は、測定値によく一致していることがわかる。

黒鉛ブロックの温度解析に用いた冷却材温度および熱伝達率をFig.13に示す。黒鉛ブロックの温度解析では、黒鉛ブロックを軸方向に8等分するので、そのモデルに合わせて、Fig.12からFig.13を作成した。

### 4.2 黒鉛ブロックの温度解析

黒鉛ブロックの温度解析結果を、Fig.14およびFig.15に示す。ここでは、代表例として、456要素モデルによる、タイロッド挿入用孔径が9mmの場合の黒鉛ブロック下端から400mmおよび800mmの断面における温度分布を示した。タイロッド挿入用孔の周辺に、急激な温度勾配がついている。他の位置における黒鉛ブロックの断面においても、同様な傾向である。また、タイロッド挿入用孔径が8mmの場合も、これらと同様である。

なお、これらの黒鉛ブロックの温度分布は、黒鉛ブロックの熱応力解析の入力データである。

### 4.3 黒鉛ブロックの熱応力解析

タイロッド挿入用孔径が9mmおよび高速中性子照射量がゼロの条件で、黒鉛ブロックの要素分割数

この式は、未照射 IG-11 黒鉛についての測定から得られたものである。<sup>(1)</sup> IG-11 黒鉛の熱膨張率の照射量依存性については、まだ不確かなので、熱膨張率の照射量依存性は考慮しなかった。

比熱  $C_p$  については、つぎの式に従い、800°Cでの値を用いた。

$$C_p = 0.54212 - 2.42667 \times 10^{-6} t - 9.02725 t^{-1} \\ - 4.34493 \times 10^{-4} t^{-2} + 1.59309 \times 10^{-7} t^{-3} \\ - 1.43688 \times 10^{-9} t^{-4}$$

ただし、 $t$  (K)

この式も、IG-11 黒鉛についての測定から得られたものである。<sup>(6)</sup>

ヤング率については、800°Cでの値を用いた。未照射での値は、IG-11 黒鉛のものである。<sup>(6)</sup> 照射量依存性については、SM1-24 黒鉛のデータである。<sup>(6)</sup> ヤング率の照射量依存性のデータを、Fig.11に示す。図中では、SM1-24 黒鉛についてのデータは実線で、IG-11 黒鉛についてのデータは黒点で、それぞれ表わしてある。この図から、IG-11 黒鉛のヤング率の照射量依存性は、SM1-24 黒鉛のものと同様であると考えられる。

ポアソン比については、IG-11 黒鉛についての測定値のうち、最大のものを<sup>(7)</sup>用いた。

## 4. 解析結果および検討

### 4.1 燃料体全体の伝熱解析

燃料体全体の伝熱解析の結果を、Fig.12に示す。燃料コンパクト温度および冷却材温度の熱電対による測定値も、Fig.12に同時に示した。解析結果は、測定値によく一致していることがわかる。

黒鉛ブロックの温度解析に用いた冷却材温度および熱伝達率をFig.13に示す。黒鉛ブロックの温度解析では、黒鉛ブロックを軸方向に8等分するので、そのモデルに合わせて、Fig.12からFig.13を作成した。

### 4.2 黒鉛ブロックの温度解析

黒鉛ブロックの温度解析結果を、Fig.14およびFig.15に示す。ここでは、代表例として、456要素モデルによる、タイロッド挿入用孔径が9mmの場合の黒鉛ブロック下端から400mmおよび800mmの断面における温度分布を示した。タイロッド挿入用孔の周辺に、急激な温度勾配がついている。他の位置における黒鉛ブロックの断面においても、同様な傾向である。また、タイロッド挿入用孔径が8mmの場合も、これらと同様である。

なお、これらの黒鉛ブロックの温度分布は、黒鉛ブロックの熱応力解析の入力データである。

### 4.3 黒鉛ブロックの熱応力解析

タイロッド挿入用孔径が9mmおよび高速中性子照射量がゼロの条件で、黒鉛ブロックの要素分割数

の異なる2通りのモデル(456要素モデルおよび1728要素モデル)により、黒鉛ブロックの熱応力解析を行なった。各断面における最大の最大主応力の軸方向分布および最小の最小主応力の軸方向分布を、Fig.16およびFig.17に、それぞれ示す。最大主応力(引張)および最小主応力(圧縮)ともに、要素分割数の少ない456要素モデルによる方が大きな絶対値に計算された。要素分割数の多い1728要素モデルの方が、456要素モデルよりも黒鉛ブロックをよりよく近似している。したがって、1728要素モデルによるよりも応力値を大きく計算する456要素モデルを熱応力解析に用いることは、安全側の選択である。そこで、以下の解析では、456要素モデルを用いている。

タイロッド挿入用孔径が9mmおよび高速中性子照射量がゼロの場合の黒鉛ブロック下端から650mmの断面における、最大主応力分布および最小主応力分布をFig.18およびFig.19に、それぞれ示す。最大主応力は、タイロッド挿入用孔の外側で最大になっている。また、最小主応力は、タイロッド挿入用孔の内側で最小になっている。各断面における最大の最大主応力の軸方向分布および最小の最小主応力の軸方向分布を、Fig.20およびFig.21にそれぞれ示す。最大引張応力および最大圧縮応力ともに、黒鉛ブロック下端から650mmで発生すると考えられる。また、照射が進むにつれて、最大引張応力および最大圧縮応力ともに増加すると考えられる。

同様に、タイロッド挿入用孔径が8mmの場合の、各断面における最大の最大主応力および最小の最小主応力の軸方向分布を、Fig.22およびFig.23に、それぞれ示す。タイロッド挿入用孔径が8mmの場合の方が、9mmの場合よりも、最大引張応力および最大圧縮応力ともに、それぞれ小さい値である。

つぎに、これらの応力値と強度との関係を評価する。未照射時におけるIG-11黒鉛の引張強さは、 $200 \text{ kg/cm}^2$ <sup>(8)</sup>である。ヤング率は、Fig.11に示したように、照射によって増大するが、それにもない強度も変化する。IG-11黒鉛の曲げ強さの変化とヤング率の変化との関係は、つぎの式<sup>(9)</sup>で表わされる。

$$\sigma_b / \sigma_o = E / E_o$$

ここで、 $\sigma_o$  : 未照射時の曲げ強さ

$\sigma_b$  : 照射後の曲げ強さ

$E_o$  : 未照射時のヤング率

$E$  : 照射後のヤング率

引張強さも同様に变化すると考えられるので、許容引張強さを引張強さの0.33倍とすると、許容引張強さは照射とともに变化する。各照射量における最大引張応力および許容引張強さを、Table3およびFig.24に示す。最大引張応力は、タイロッド挿入用孔径が8mmおよび9mmの場合ともに、許容引張強さ以下である。

同様に、未照射時におけるIG-11黒鉛の圧縮強さは、 $600 \text{ kg/cm}^2$ である。許容圧縮強さを圧縮強さの0.33倍とすると、許容圧縮強さは $198 \text{ kg/cm}^2$ である。各照射量における最大圧縮応力および許容圧縮強さを、Table4に示す。最大圧縮応力は、タイロッド挿入用孔径が8mmおよび9mmの場合ともに、許容圧縮強さ以下である。

## 5. 結 論

- OGL-1 照射用 1 本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの熱応力解析を行ない、つぎの結論を得た。
- (1) 黒鉛ブロックのタイロッド挿入用孔径が 8 mm の場合の方が、9 mm の場合よりも、最大引張応力および最大圧縮応力は、それぞれ小さかった。
  - (2) 照射により黒鉛物性値が変化するために、最大引張応力および最大圧縮応力は、照射量とともに増大した。
  - (3) 最大引張応力および最大圧縮応力は、タイロッド挿入用孔径が 8 mm あるいは 9 mm の場合ともに、高速中性子照射量が  $0 \sim 3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$  の範囲で、それぞれの許容応力よりも小さかった。
  - (4) 1 本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの耐熱応力強度は、今後、照射が計画されている最長 (JMTR 7 原子炉サイクル) の照射期間の場合でも、十分に確保されている。

## 謝 辞

本解析を実施するにあたり、御激励下さった燃料工学部長岩本多実氏に感謝致します。本報告をまとめるにあたり、有益な御助言をして下さった、多目的高温ガス実験炉設計室荒井長利氏、佐藤貞夫氏、および伊与久達夫氏に感謝致します。本解析で用いた計算コード HEATING-III および SAP-VI の使用法について詳細に御指導下さった、JT-60 第 4 開発室荒木政則氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 湊 和生他, JAERI-M 9036 (1980).
- (2) 馬場 治, 私信 (1979).
- (3) 荒木政則, 私信 (1983).
- (4) 荒木政則, 私信 (1983).
- (5) 燃料工学部, JAERI-M 8068 (1979).
- (6) 多目的高温ガス実験炉設計室, VHTR-D2-1035 (1983).
- (7) 東洋炭素, 私信 (1982).
- (8) 日本原子力研究所, OGL-1 照射試料 80LF-20A の製作 (1981).
- (9) 奥 達夫他, 日本原子力研究所未公開資料 (1983).

## 5. 結 論

- OGL-1照射用1本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの熱応力解析を行ない、つぎの結論を得た。
- (1) 黒鉛ブロックのタイロッド挿入用孔径が8 mmの方が、9 mmの場合よりも、最大引張応力および最大圧縮応力は、それぞれ小さかった。
  - (2) 照射により黒鉛物性値が変化するために、最大引張応力および最大圧縮応力は、照射量とともに増大した。
  - (3) 最大引張応力および最大圧縮応力は、タイロッド挿入用孔径が8 mmあるいは9 mmの場合ともに、高速中性子照射量が $0 \sim 3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の範囲で、それぞれの許容応力よりも小さかった。
  - (4) 1本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの耐熱応力強度は、今後、照射が計画されている最長（JMTR7原子炉サイクル）の照射期間の場合でも、十分に確保されている。

## 謝 辞

本解析を実施するにあたり、御激励下さった燃料工学部長岩本多実氏に感謝致します。本報告をまとめるにあたり、有益な御助言をして下さった、多目的高温ガス実験炉設計室荒井長利氏、佐藤貞夫氏、および伊与久達夫氏に感謝致します。本解析で用いた計算コードHEATING-ⅢおよびSAP-VIの使用法について詳細に御指導下さった、JT-60第4開発室荒木政則氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 湊 和生他, JAERI-M 9036 (1980).
- (2) 馬場 治, 私信 (1979).
- (3) 荒木政則, 私信 (1983).
- (4) 荒木政則, 私信 (1983).
- (5) 燃料工学部, JAERI-M 8068 (1979).
- (6) 多目的高温ガス実験炉設計室, VHTR-D2-1035 (1983).
- (7) 東洋炭素, 私信 (1982).
- (8) 日本原子力研究所, OGL-1照射試料80LF-20Aの製作 (1981).
- (9) 奥 達夫他, 日本原子力研究所未公開資料 (1983).



## 5. 結 論

- OGL-1 照射用 1 本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの熱応力解析を行ない、つぎの結論を得た。
- (1) 黒鉛ブロックのタイロッド挿入用孔径が 8 mm の場合の方が、9 mm の場合よりも、最大引張応力および最大圧縮応力は、それぞれ小さかった。
  - (2) 照射により黒鉛物性値が変化するために、最大引張応力および最大圧縮応力は、照射量とともに増大した。
  - (3) 最大引張応力および最大圧縮応力は、タイロッド挿入用孔径が 8 mm あるいは 9 mm の場合ともに、高速中性子照射量が  $0 \sim 3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$  の範囲で、それぞれの許容応力よりも小さかった。
  - (4) 1 本燃料棒型燃料体の黒鉛ブロックの耐熱応力強度は、今後、照射が計画されている最長 (JMTR 7 原子炉サイクル) の照射期間の場合でも、十分に確保されている。

## 謝 辞

本解析を実施するにあたり、御激励下さった燃料工学部長岩本多実氏に感謝致します。本報告をまとめるにあたり、有益な御助言をして下さった、多目的高温ガス実験炉設計室荒井長利氏、佐藤貞夫氏、および伊与久達夫氏に感謝致します。本解析で用いた計算コード HEATING-III および SAP-VI の使用法について詳細に御指導下さった、JT-60 第 4 開発室荒木政則氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 湊 和生他, JAERI-M 9036 (1980).
- (2) 馬場 治, 私信 (1979).
- (3) 荒木政則, 私信 (1983).
- (4) 荒木政則, 私信 (1983).
- (5) 燃料工学部, JAERI-M 8068 (1979).
- (6) 多目的高温ガス実験炉設計室, VHTR-D2-1035 (1983).
- (7) 東洋炭素, 私信 (1982).
- (8) 日本原子力研究所, OGL-1 照射試料 80LF-20A の製作 (1981).
- (9) 奥 達夫他, 日本原子力研究所未公開資料 (1983).

Table 1 Irradiation data of 6th OGL-1 fuel element.

<u>Helium coolant</u>	
Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	29.4
Flow rate	
Downward flow (g/s)	50.9
Bypass flow (g/s)	30.5
Fuel cooling flow (g/s)	20.4
Temperature	
Fuel specimen inlet (°C)	671
Fuel specimen outlet (°C)	906
<u>Fuel compacts</u>	
Max. temperature (°C)	1480

Table 2 Physical properties of graphite used for the analysis.

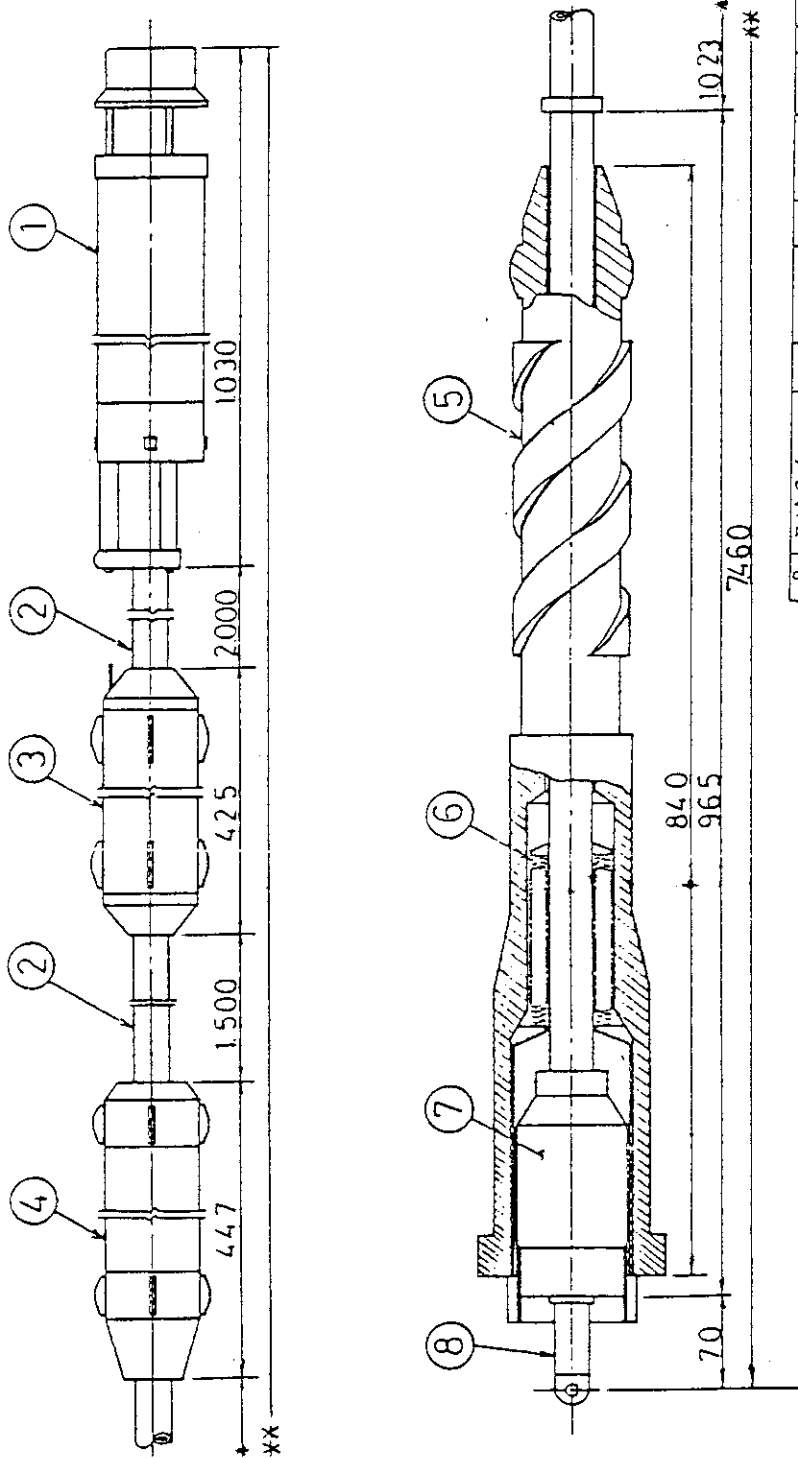
	Fast neutron fluence ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ , $n/\text{cm}^2$ )		
	$0.0 \times 10^{20}$	$1.0 \times 10^{20}$	$2.0 \times 10^{20}$
Thermal conductivity ( $w/\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}$ )			
(600°C)	$6.48 \times 10^{-2}$	$6.48 \times 10^{-2}$	$6.48 \times 10^{-2}$
(700°C)	$6.16 \times 10^{-2}$	$6.16 \times 10^{-2}$	$6.16 \times 10^{-2}$
(800°C)	$5.84 \times 10^{-2}$	$5.84 \times 10^{-2}$	$5.84 \times 10^{-2}$
(900°C)	$5.52 \times 10^{-2}$	$5.52 \times 10^{-2}$	$5.52 \times 10^{-2}$
(1000°C)	$5.20 \times 10^{-2}$	$5.20 \times 10^{-2}$	$5.20 \times 10^{-2}$
Thermal expansivity ( $1/^\circ\text{C}$ )			
(0-800°C)	$4.82 \times 10^{-6}$	$4.82 \times 10^{-6}$	$4.82 \times 10^{-6}$
Specific heat ( $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )			
(800°C)	$1.797 \times 10^3$	$1.797 \times 10^3$	$1.797 \times 10^3$
Young's modulus ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )			
(800°C)	$0.94 \times 10^3$	$1.03 \times 10^3$	$1.09 \times 10^3$
Poisson's ratio			
	0.20	0.20	0.20

Table 3 Dependence of calculated maximum tensile stress and permissible tensile stress on fast neutron fluence.

	Fast neutron fluence ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ , $n/\text{cm}^2$ )		
	$0.0 \times 10^{20}$	$1.0 \times 10^{20}$	$3.0 \times 10^{20}$
Permissible stress ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	66	72	80
Max. tensile stress ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )			
(diameter=9mm)	65	71	79
(diameter=8mm)	61	67	74

Table 4 Dependence of calculated maximum compressive stress and permissible compressive stress on fast neutron fluence.

	Fast neutron fluence ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ , $n/\text{cm}^2$ )		
	$0.0 \times 10^{20}$	$1.0 \times 10^{20}$	$3.0 \times 10^{20}$
Permissible stress ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	198	198	198
Max. compressive stress ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )			
(diameter=9mm)	65	71	80
(diameter=8mm)	60	66	74



設計	S.S. 12	渡田 永	
製図	S.S. 12	渡田 永	
審査	S.S. 2	伊藤 紀	
予引金具 (2>7)	1	SUS 316	80LF-20A 全体組立図 添付図-5
予引金具	1式	SUS 316	
軸線	1	SUS 316L	
遮蔽フロッグ	1	HA104-X	
試験片	1式	HA101-X	
中性子遮蔽棒	1式	重鉛+鉛C	
ハンダロフト	1式	HA101-X	
部品名	部数	材質	
品番			

Fig. 1 Drawing of 6th OGL-1 fuel assembly.



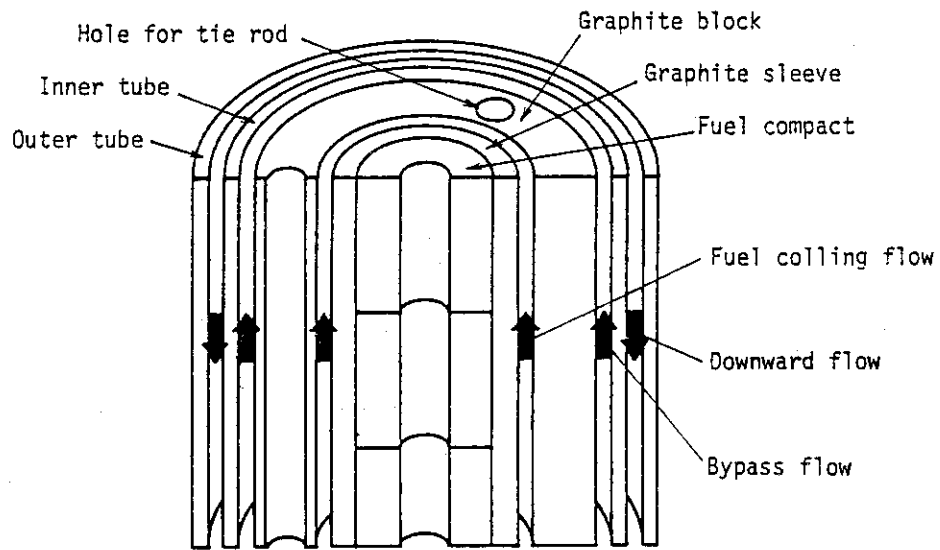


Fig. 3 Schematic representation of the cooling system for OGL-1 fuel element.

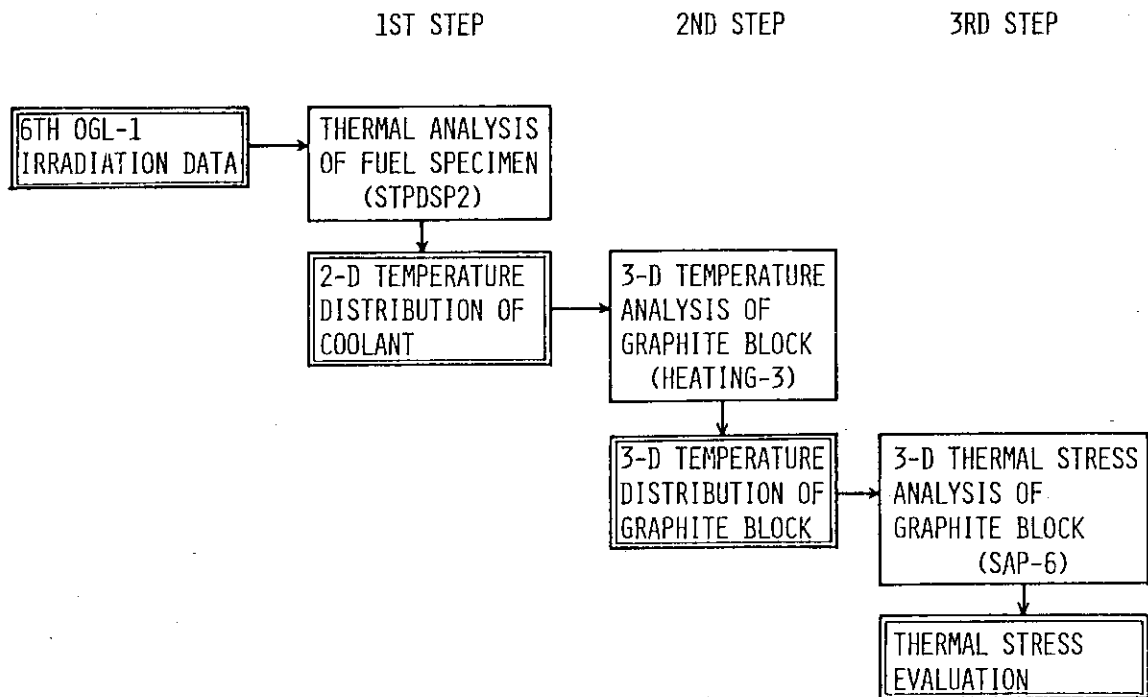


Fig. 4 Procedure of thermal stress analysis on the graphite block of OGL-1 fuel element.

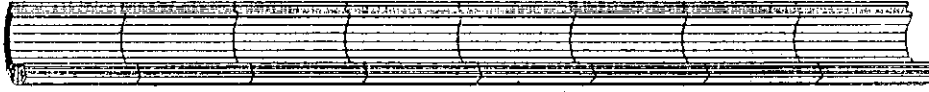


Fig. 6 A bird's-eye view of the element model of the graphite block.

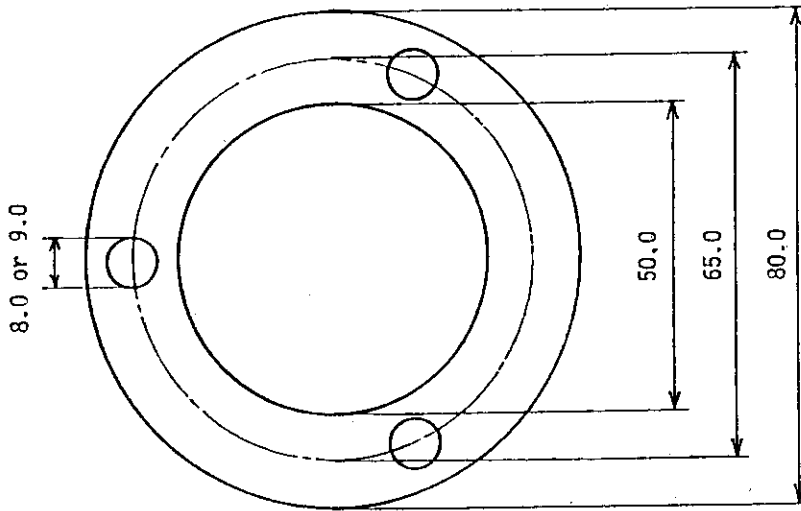


Fig. 5 Graphite block model for temperature and thermal stress analysis.



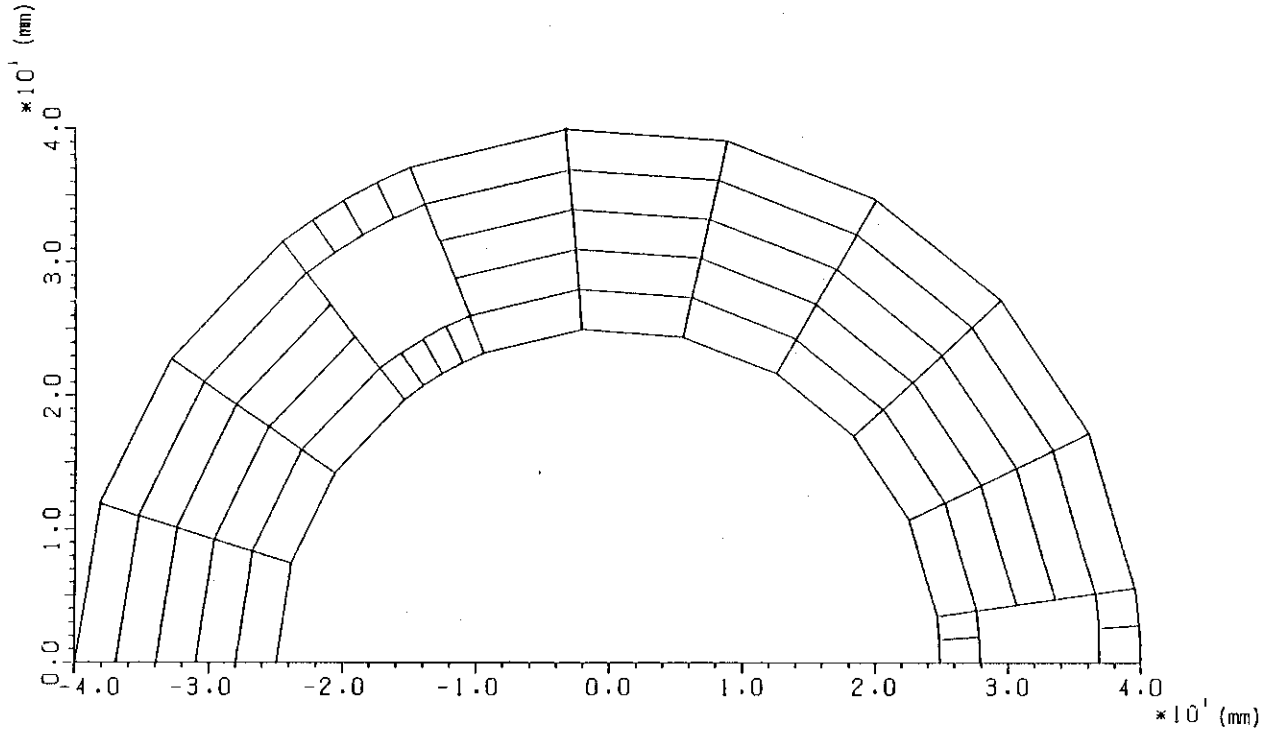


Fig. 7 456 element model of the graphite block for temperature and thermal stress analysis.

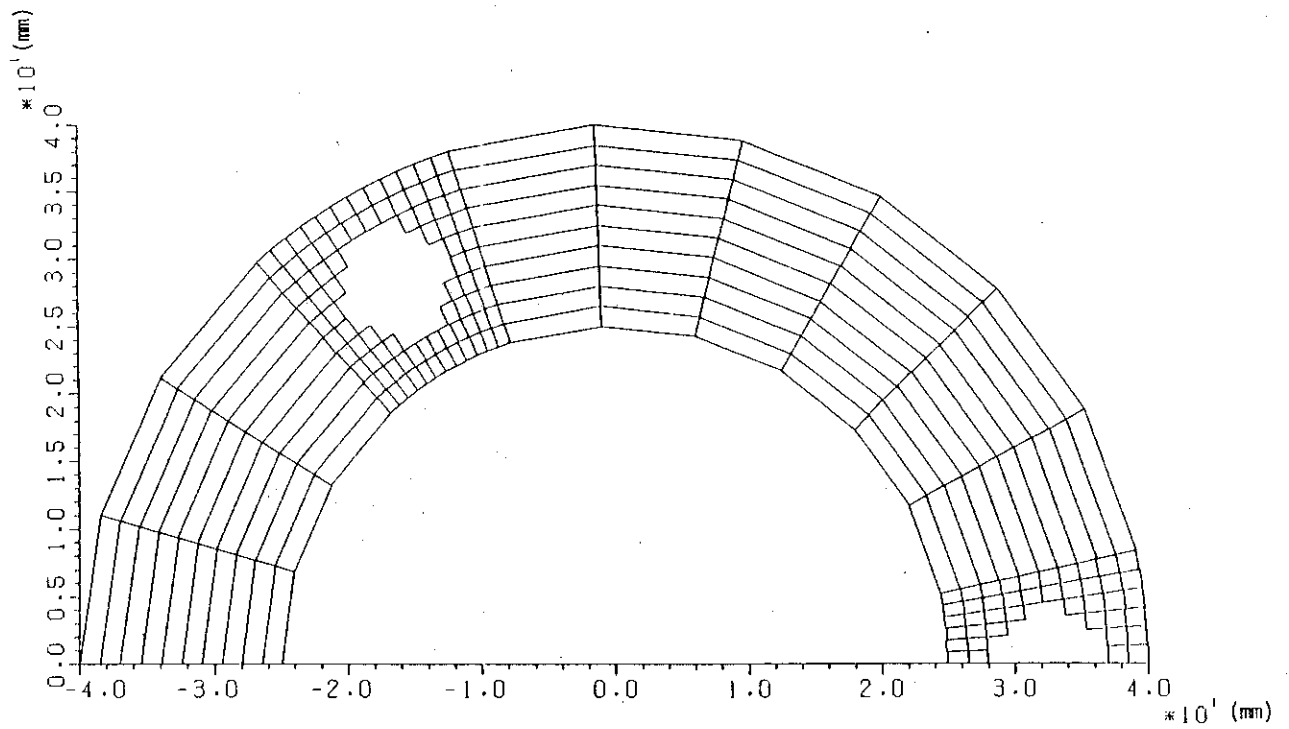


Fig. 8 1728 element model of the graphite block for temperature and thermal stress analysis.

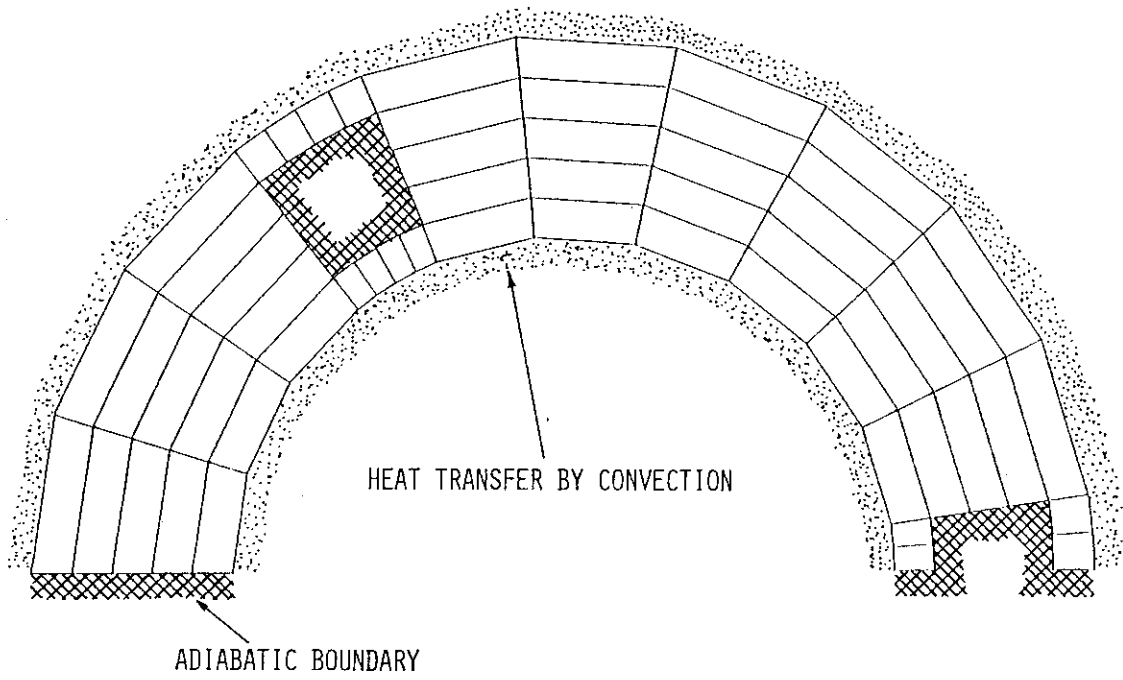


Fig. 9 Boundary conditions for temperature analysis on the graphite block.

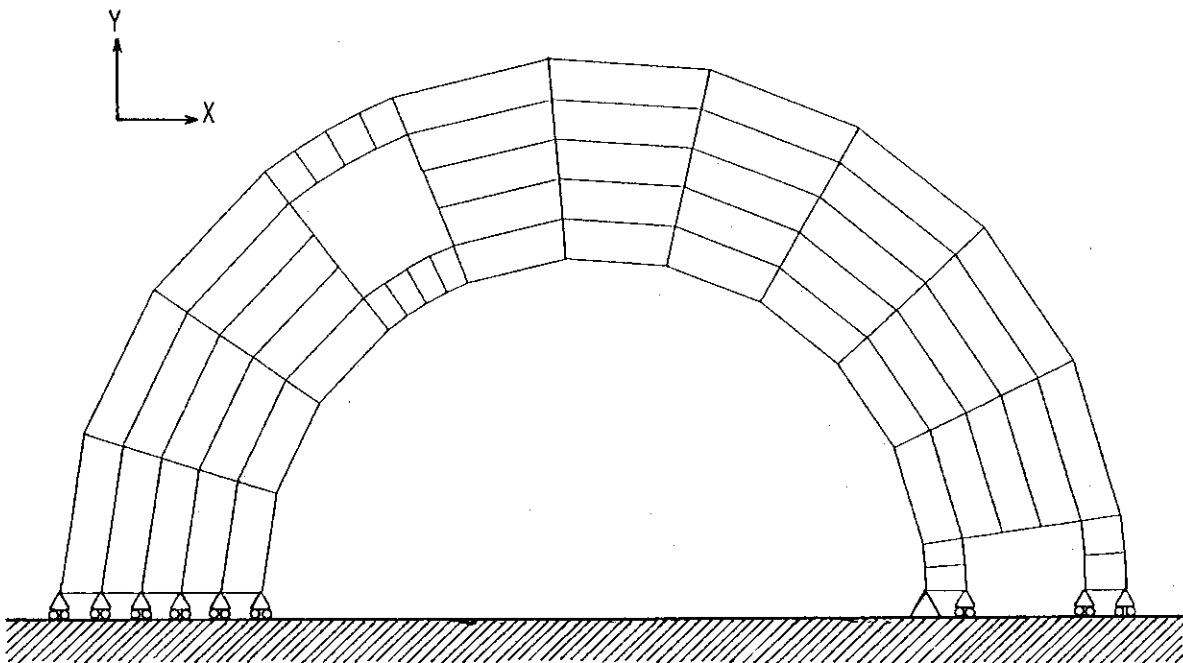


Fig. 10 Restraint conditions for thermal stress analysis on the graphite block.

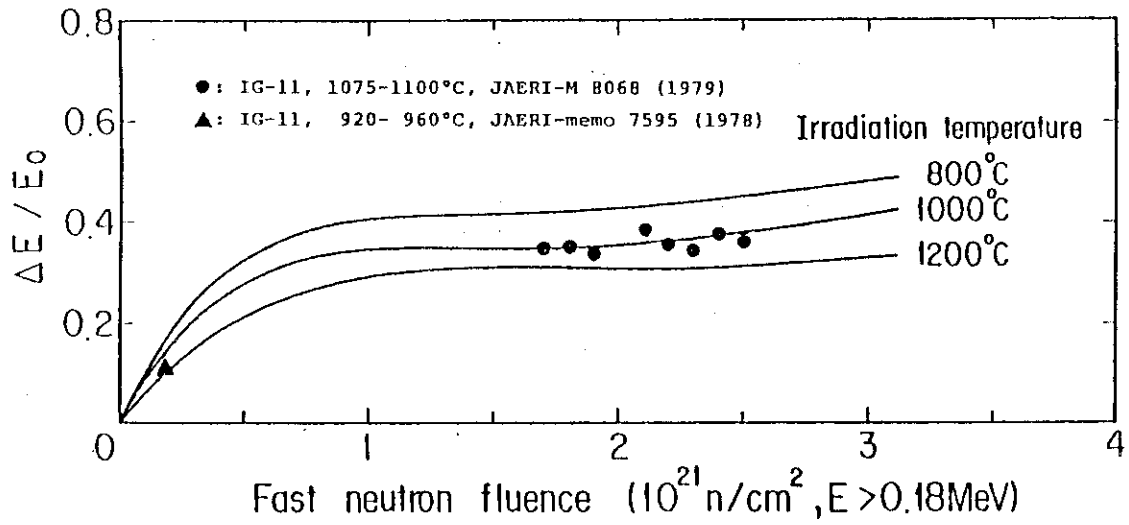


Fig. 11 Dependence of Young's modulus of graphite on fast neutron fluence.

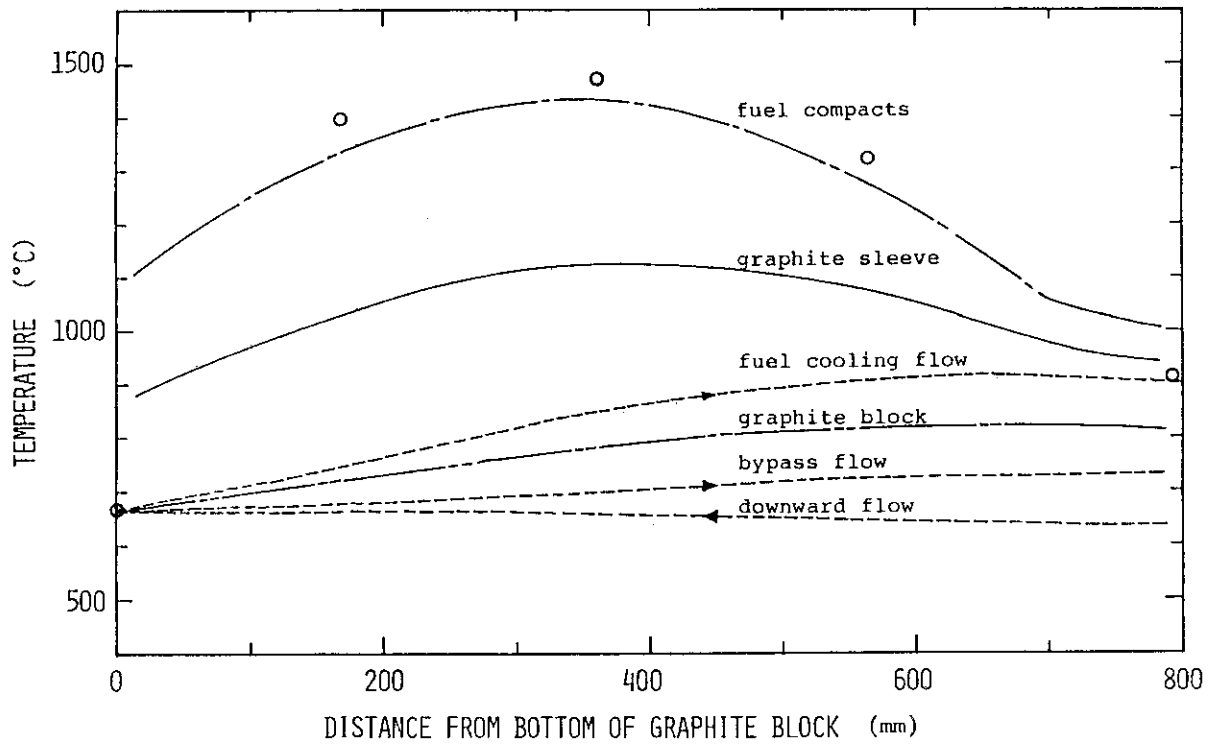


Fig. 12 Results of thermal analysis on the fuel element.

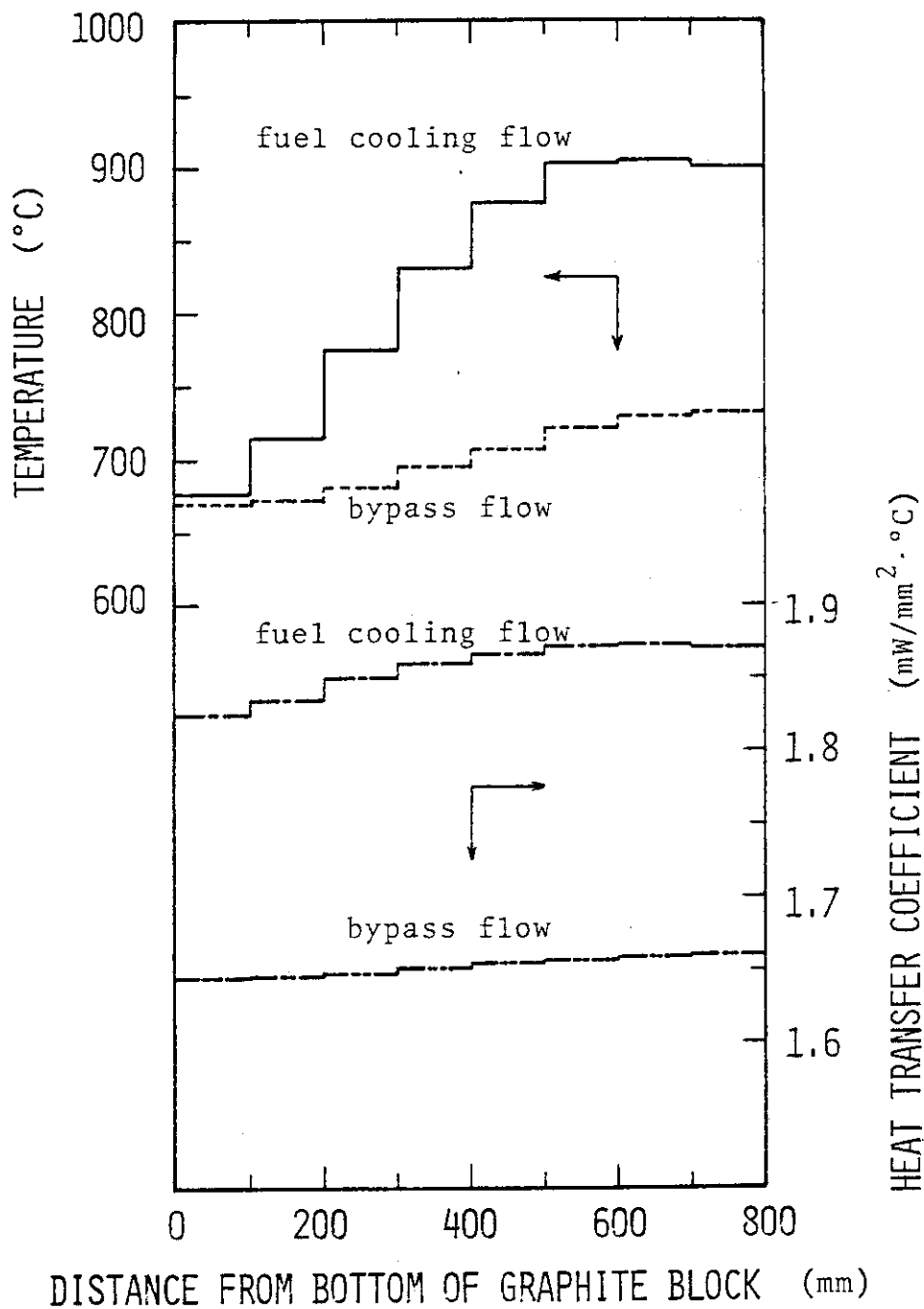


Fig. 13 Input data for temperature analysis on the graphite block.

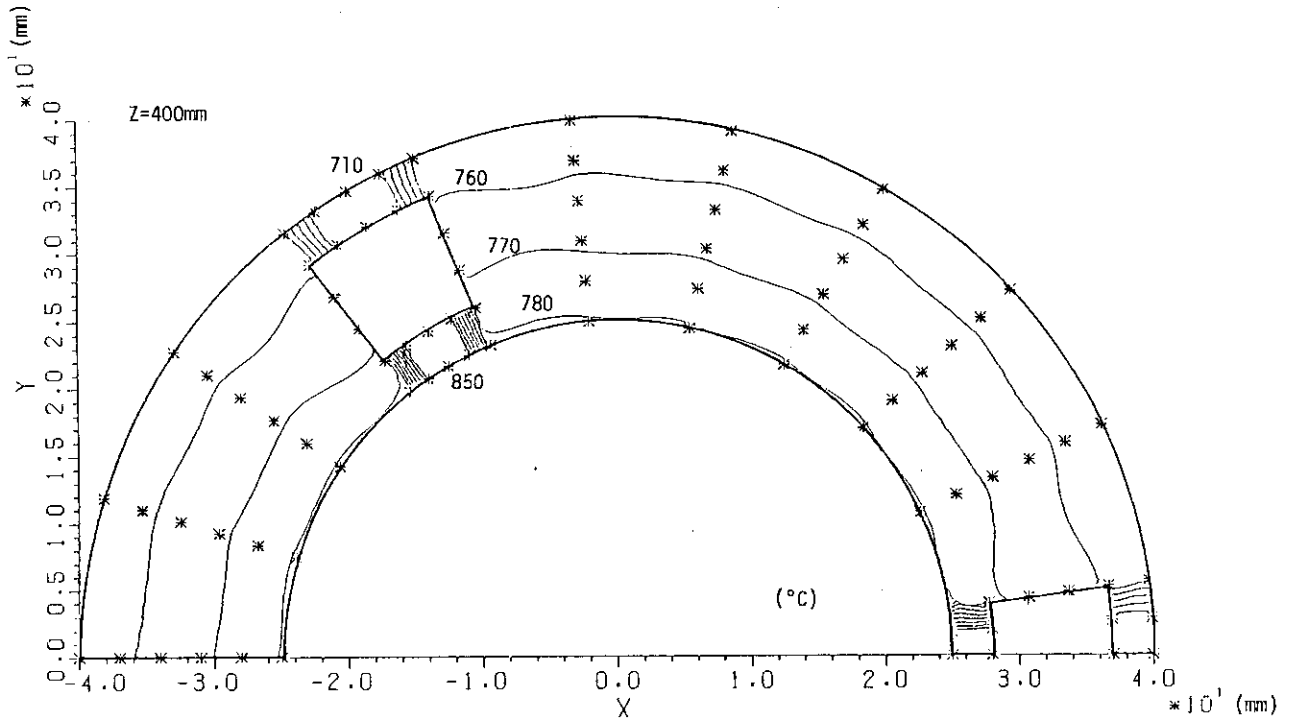


Fig. 14 Calculated graphite block temperature at 400 mm distant from bottom of the graphite block. A diameter of the hole for the tie rod is 9 mm.

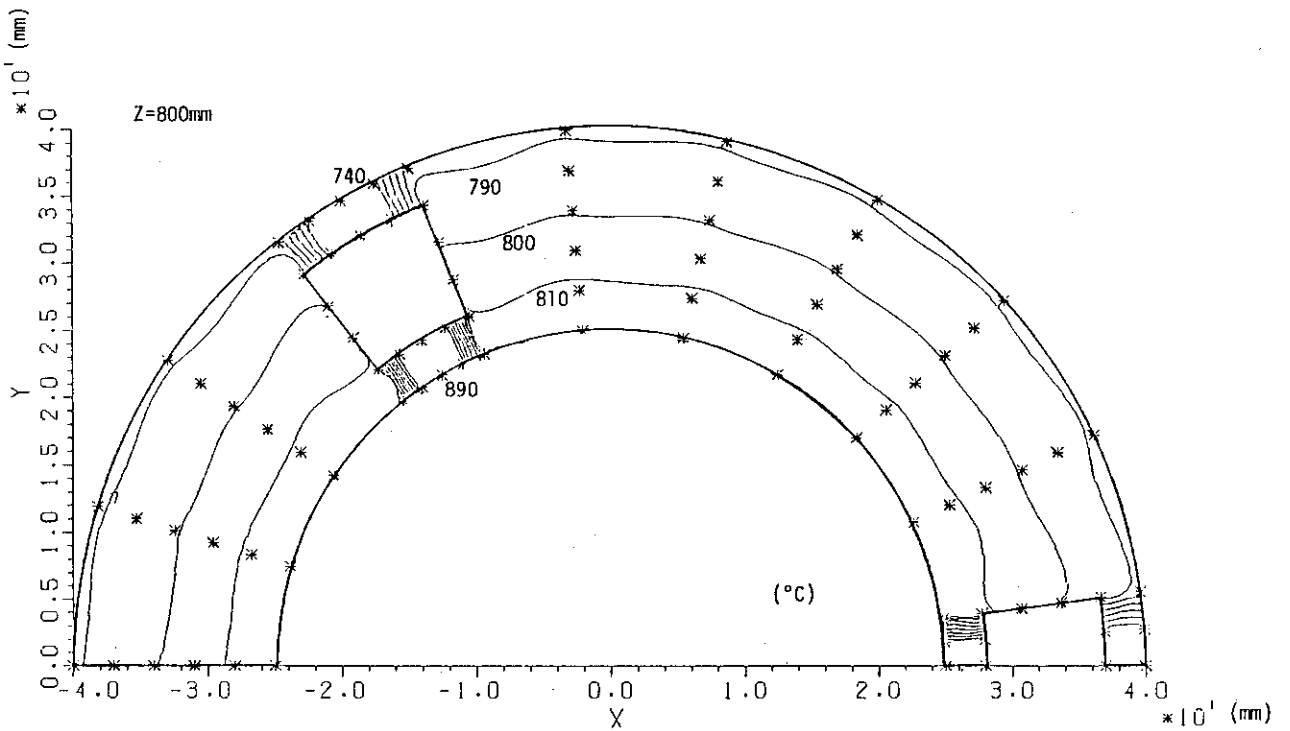


Fig. 15 Calculated graphite block temperature at 800 mm distant from bottom of the graphite block. A diameter of the hole for the tie rod is 9 mm.

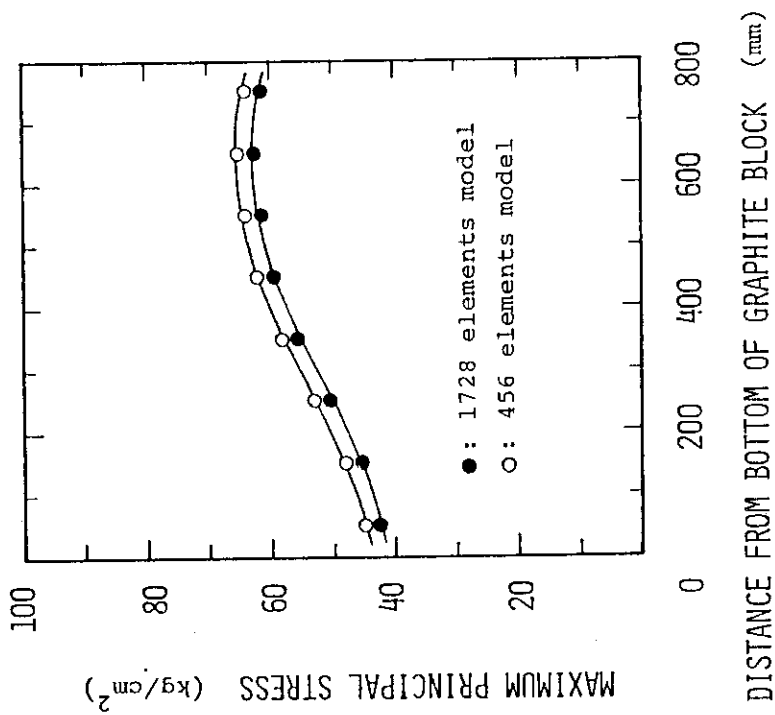


Fig. 16 Comparison between maximum tensile stresses resulted from 456 element model and 1728 element model.

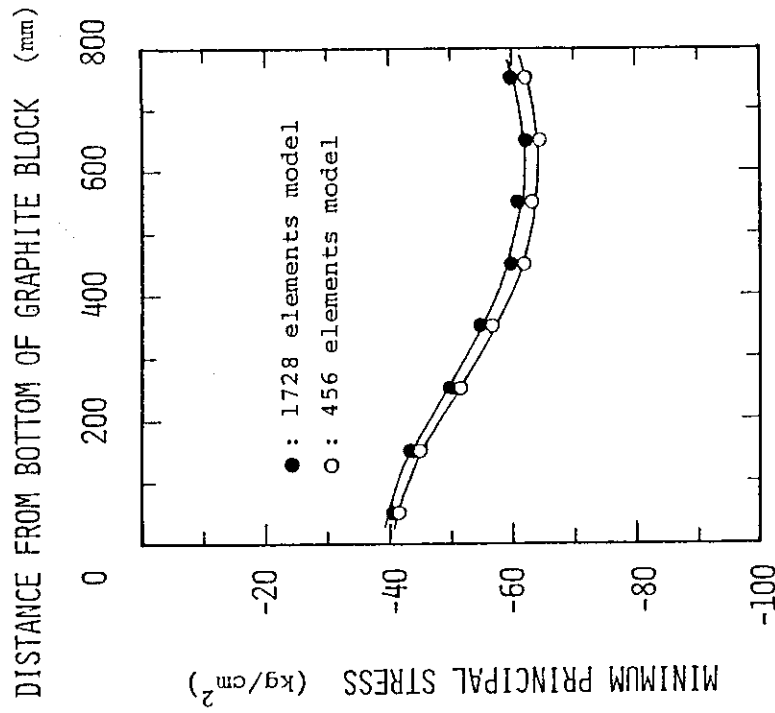


Fig. 17 Comparison between maximum compressive stresses resulted from 456 element model and 1728 element model.

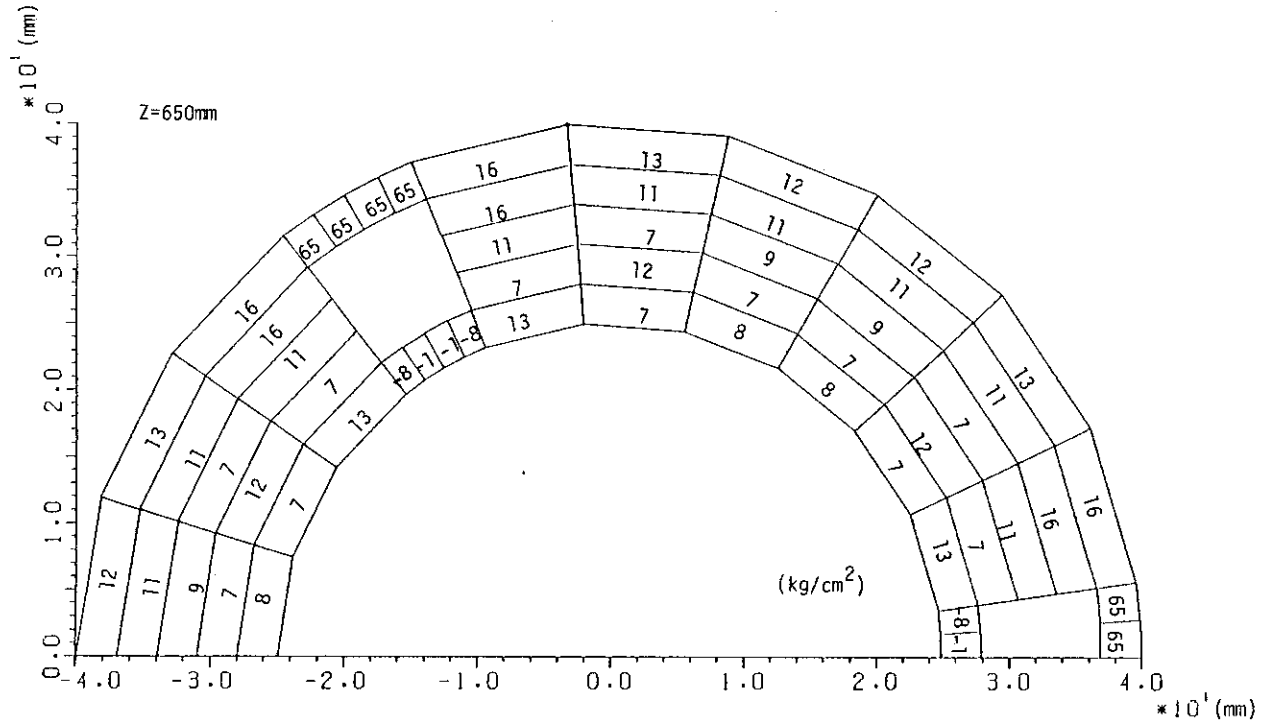


Fig. 18 Calculated maximum tensile stresses at 650 mm distant from bottom of the graphite block. A diameter of the hole for the tie rod is 9 mm.

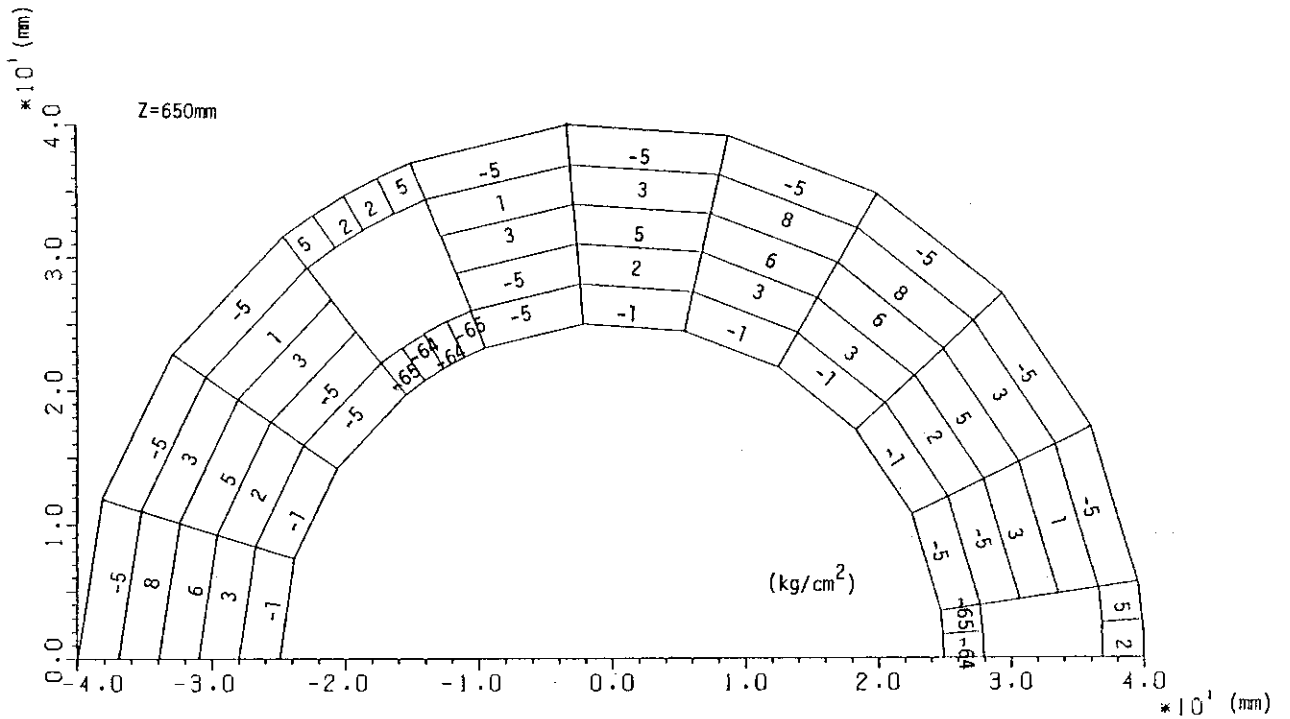


Fig. 19 Calculated maximum compressive stresses at 650 mm distant from bottom of the graphite block. A diameter of the hole for the tie rod is 9 mm.

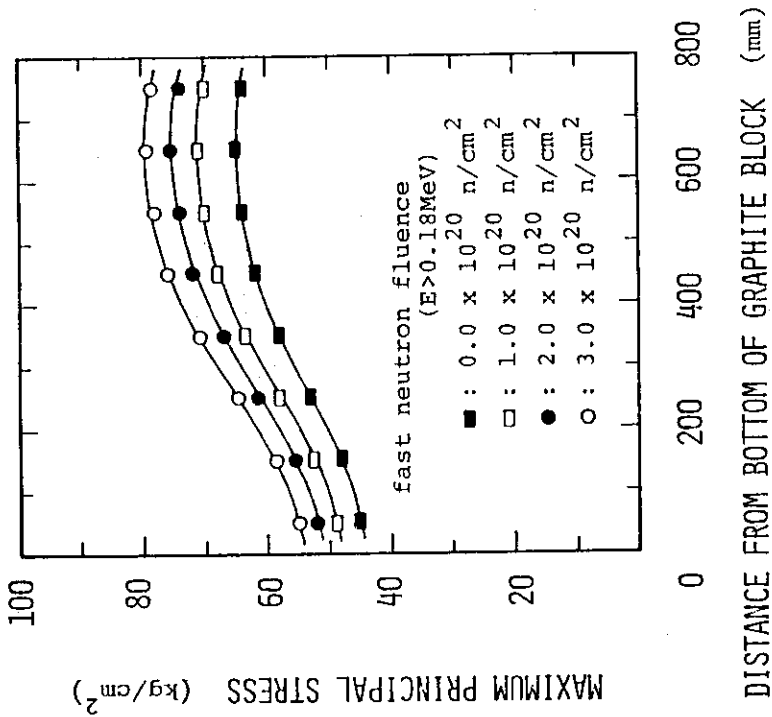


Fig. 20 Axial distribution of calculated maximum tensile stresses.  
A diameter of the hole for the tie rod is 9 mm.

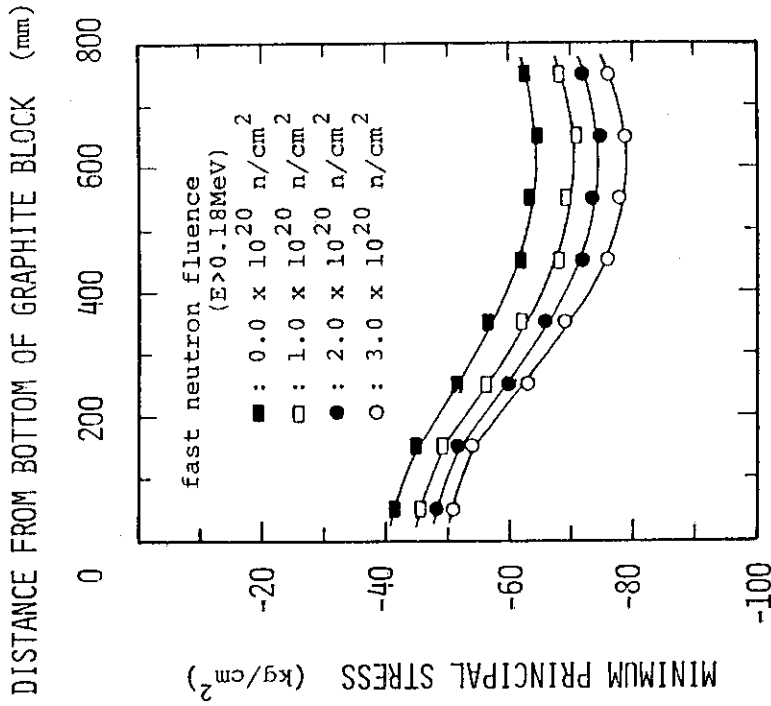


Fig. 21 Axial distribution of calculated maximum compressive stresses.  
A diameter of the hole for the tie rod is 9 mm.



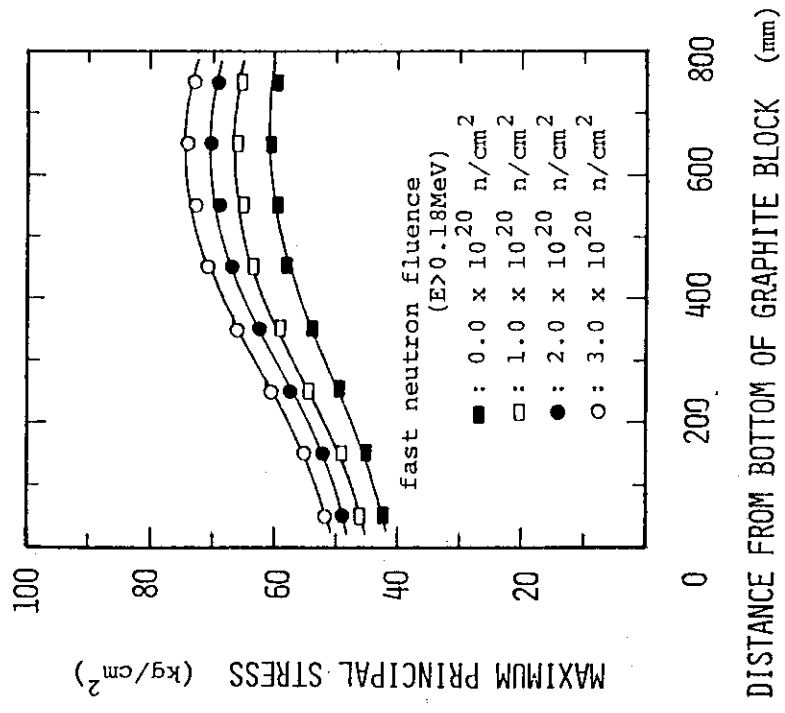


Fig. 22 Axial distribution of calculated maximum tensile stresses.  
A diameter of the hole of the tie rod is 8 mm.

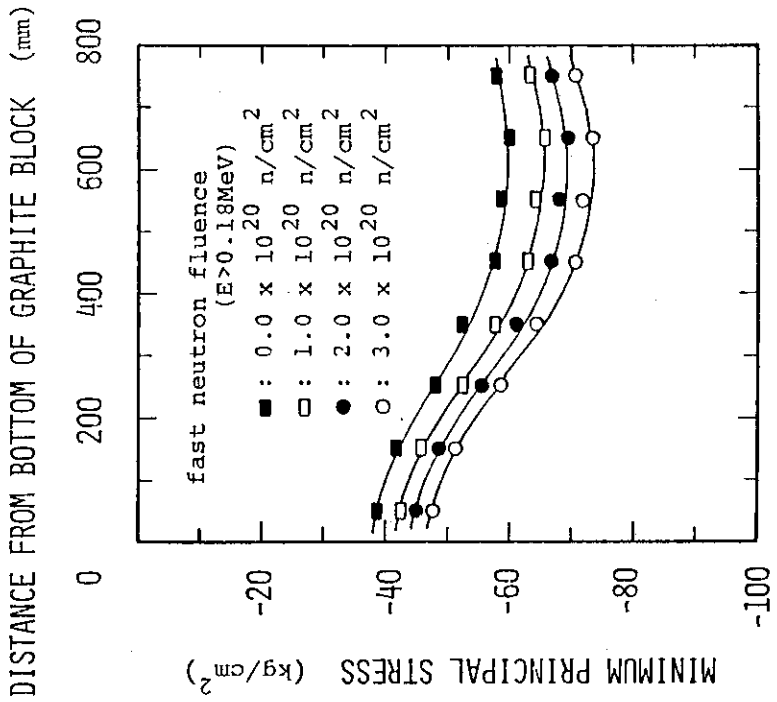


Fig. 23 Axial distribution of calculated maximum compressive stresses.  
A diameter of the hole of the tie rod is 8 mm.

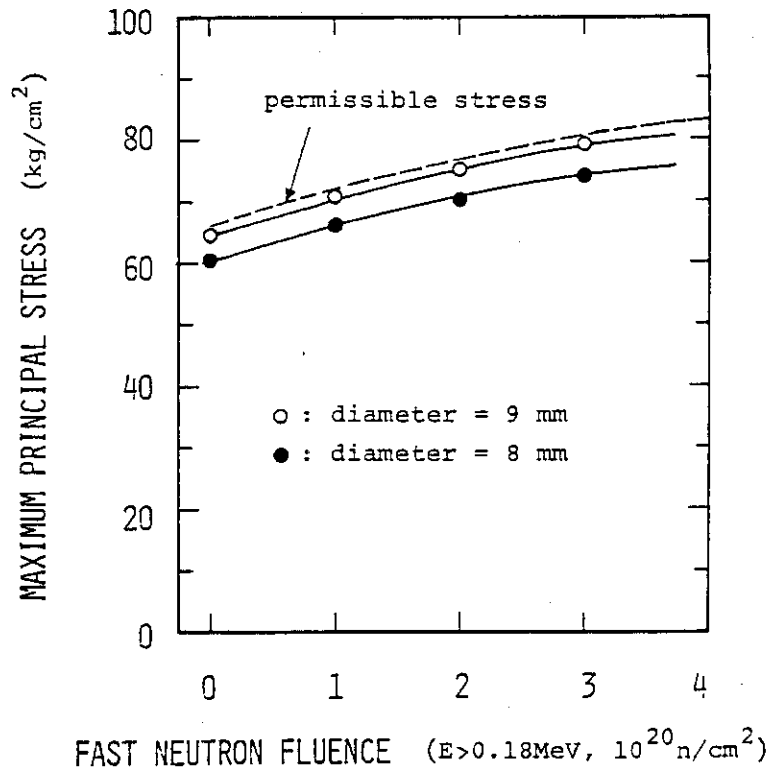


Fig. 24 Dependence of calculated maximum tensile stress and permissible tensile stress on fast neutron fluence.