

JAERI-Tech

2002-054



JP0250383



高温工学に関する先端的基礎研究用  
HTTR照射試料の温度評価

2002年7月

石原 正博・馬場 信一・高橋 常夫・相原 純  
柴田 大受・星屋 泰二

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

## 高温工学に関する先端的基礎研究用 HTTR 照射試料の温度評価

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

石原 正博・馬場 信一・高橋 常夫・相原 純・柴田 大受・星屋 泰二

(2002年5月7日受理)

HTTR を用いた高温工学に関する先端的基礎研究としての照射試験は平成15年度に開始される予定である。試験では、照射温度が 400℃から 600℃、高速中性子照射量 ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) が  $1 \times 10^{21}$  から  $3 \times 10^{23} \text{ m}^{-2}$  を目標としている。照射予定の試験片は、高温半導体 SiC 試験片、超電導体 Bi-2212 試験片、耐熱セラミックス系の黒鉛試験片、SiC 試験片及びジルコニア試験片である。

そこで、熱伝導率の高い黒鉛試験片と熱伝導率の低いジルコニア試験片を評価対象として、キャプセル内に装荷された試験片の温度を解析的に検討した。検討の結果、本キャプセルにより黒鉛試験片では約 450℃～590℃の温度域で照射試験が可能で、かつ試料装荷領域内でほぼ均一の温度条件が達成されること、ジルコニア試験片では 450℃～600℃の温度域で照射試験が可能で、試料装荷領域内の温度差は最大 30℃程度見積もられること、炉心上部可動反射体領域の照射ではジルコニア試験片も試料装荷領域内の温度差が 1℃以下と小さくなり、ほぼ均一の照射温度が達成できること等が明らかとなった。

Temperature Evaluation of Irradiation Specimens in the HTTR for  
Innovative Basic Research

Masahiro ISHIHARA, Shinichi BABA, Tsuneo TAKAHASHI,  
Jyun AIHARA, Taiju SHIBATA and Taiji HOSHIYA

Department of Advanced Nuclear Heat Technology  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 7, 2002)

The irradiation test as an innovative basic research in the field of high temperature engineering using the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) is planned at 2003. In the test, specimens are to be irradiated at temperature ranges from 400°C to 600°C with fast neutron fluences from  $1 \times 10^{21} \text{m}^{-2}$  to  $3 \times 10^{23} \text{m}^{-2}$  ( $E > 0.18 \text{MeV}$ ); irradiation test specimens are, high temperature SiC semiconductor, high temperature Bi-2212 superconductor, graphite, SiC and zirconia. The temperature evaluation was, then, carried out on two kinds of typical specimens; the one is the graphite, high thermal conductivity and the other is the zirconia, low thermal conductivity. Obtained results in this study are summarized as follows:

- For the graphite specimen, possible temperature range in the irradiation test is from 450°C to 590°C, and almost uniform temperature condition within specimen loading area will be achieved.
- For the zirconia specimen, possible temperature range in the irradiation test is from 450°C to 600°C, and temperature difference within specimen loading area is estimated below 30°C.
- For zirconia specimen, temperature difference within specimen loading area is estimated below 1°C loaded at the top removable reflector region, and then almost uniform temperature condition within specimen loading area will be possible to achieve.

Keywords: Temperature Evaluation, Irradiation Specimen, HTTR, Analysis,  
Finite Element Method

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	照射場の評価	10
2.1	照射カラム内の発熱量評価	10
2.1.1	解析方法	10
2.1.2	解析条件	11
2.1.3	解析結果	11
2.2	照射カラム周囲の黒鉛ブロック温度評価	11
2.2.1	解析方法	11
2.2.2	解析条件	12
2.2.3	解析結果	12
3.	試料ホルダー及び照射試料の温度評価	70
3.1	照射キャプセルの温度評価	70
3.1.1	解析方法	70
3.1.2	解析条件	70
3.1.3	解析結果	70
3.2	試料ホルダーの温度評価	71
3.2.1	解析方法	71
3.2.2	解析条件	71
3.2.3	解析結果	72
3.3	照射試料の温度評価	74
3.3.1	解析方法	75
3.3.2	解析条件	75
3.3.3	解析結果	75
4.	まとめ	134
	謝辞	136
	参考文献	136
	付録1 等価熱伝導率の設定について	137
	付録2 各試料ホルダーの温度評価ライン上の温度分布	147

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Evaluation of Irradiation Field -----	10
2.1 Evaluation of Heat Generation within Irradiation Column -----	10
2.1.1 Analytical Method -----	10
2.1.2 Analytical Condition -----	11
2.1.3 Analytical Results -----	11
2.2 Temperature Evaluation of Graphite Block within Irradiation Column -----	11
2.2.1 Analytical Method -----	11
2.2.2 Analytical Condition -----	12
2.2.3 Analytical Results -----	12
3. Temperature Evaluation of Specimen Holder and Specimens -----	70
3.1 Temperature Evaluation of Irradiation Capsule -----	70
3.1.1 Analytical Method -----	70
3.1.2 Analytical Condition -----	70
3.1.3 Analytical Results -----	70
3.2 Temperature Evaluation of Specimen Holder -----	71
3.2.1 Analytical Method -----	71
3.2.2 Analytical Condition -----	71
3.2.3 Analytical Results -----	72
3.3 Temperature Evaluation of Specimens -----	74
3.3.1 Analytical Method -----	75
3.3.2 Analytical Condition -----	75
3.3.3 Analytical Results -----	75
4. Summary -----	134
Acknowledgements -----	136
References -----	136
Appendix1 Determination of a Coefficient of Equivalent Thermal Conductivity -----	137
Appendix2 Temperature Distributions on the Temperature Evaluation Lines of Specimen Holders -----	147

## List of Tables

- 表 1-1 HTTR の照射条件一覧表
- 表 2-1 HTTR 照射カラム (可動反射体 A 領域) の中性子束及び  $\gamma$  線束
- 表 2-2 中性子カーマ係数及び  $\gamma$  線質量エネルギー吸収係数
- 表 2-3(1) B の発熱量 (W/g)
- 表 2-3(2) C の発熱量 (W/g)
- 表 2-3(3) Cr の発熱量 (W/g)
- 表 2-3(4) Fe の発熱量 (W/g)
- 表 2-3(5) Ni の発熱量 (W/g)
- 表 2-3(6) Zr の発熱量 (W/g)
- 表 2-3(7) Al の発熱量 (W/g)
- 表 2-3(8) Si の発熱量 (W/g)
- 表 2-4 材料番号一覧表
- 表 2-5(1) 材料番号 1 ~6 に対する等価熱伝導率 (kcal/mh $^{\circ}$ C)
- 表 2-5(2) 材料番号 7~13 に対する等価熱伝導率 (kcal/mh $^{\circ}$ C)
- 表 2-5(3) 材料番号 14~19 に対する等価熱伝導率 (kcal/mh $^{\circ}$ C)
- 表 2-5(4) 材料番号 20~26 に対する等価熱伝導率 (kcal/mh $^{\circ}$ C)
- 表 2-6(1) 材料番号 1~8 に対する比熱 (kcal/kg $^{\circ}$ C)
- 表 2-6(2) 材料番号 9~16 に対する比熱 (kcal/kg $^{\circ}$ C)
- 表 2-6(3) 材料番号 17~24 に対する比熱 (kcal/kg $^{\circ}$ C)
- 表 2-6(4) 材料番号 25,26 に対する比熱 (kcal/kg $^{\circ}$ C)
- 表 2-7 領域毎の密度 (kg/m $^3$ )
- 表 2-8(1) 流路番号 1~6 に対する熱伝達式
- 表 2-8(2) 流路番号 7~12 に対する熱伝達式
- 表 2-8(3) 流路番号 13~18 に対する熱伝達式
- 表 2-8(4) 流路番号 19~25 に対する熱伝達式
- 表 2-8(5) 流路番号 26~31 に対する熱伝達式
- 表 2-8(6) 流路番号 32~40 に対する熱伝達式
- 表 2-8(7) 流路番号 41~45 に対する熱伝達式
- 表 2-8(8) 流路番号 46~51 に対する熱伝達式
- 表 2-8(9) 流路番号 52~60 に対する熱伝達式
- 表 2-8(10) 流路番号 61~66 に対する熱伝達式
- 表 2-8(11) 流路番号 67~72 に対する熱伝達式
- 表 2-8(12) 流路番号 73~81 に対する熱伝達式
- 表 2-8(13) 流路番号 82~89 に対する熱伝達式
- 表 2-8(14) 流路番号 90 に対する熱伝達式
- 表 2-9 圧力容器内の輻射伝熱式
- 表 2-10 定格運転時の流量
- 表 2-11 定格運転時の燃料体の発熱量

表 2-12	定格運転時の燃料体以外の発熱量
表 2-13	照射カラム黒鉛ブロックの温度評価解析ケース
表 3-1	照射キャプセルの温度評価の解析ケース
表 3-2	照射ユニットの温度解析に用いた熱伝導率
表 3-3	照射キャプセル外表面の温度境界条件
表 3-4	照射キャプセルの温度評価に用いる発熱量
表 3-5	各試料ホルダーの照射キャプセル内への装荷位置
表 3-6	試料ホルダー温度解析の解析規模
表 3-7	試料ホルダー温度解析の解析ケース
表 3-8	試料ホルダー温度解析の熱伝導率
表 3-9	試料ホルダー温度解析の温度境界条件
表 3-10	試料ホルダー温度解析の発熱量
表 3-11	照射試料温度解析の解析規模
表 3-12	照射試料の発熱量 (試料装荷位置 No.1)
表 3-13	照射試料温度解析の熱伝導率

### List of Figures

図 1-1	HTTR の照射試料装荷位置 (鉛直断面図)
図 1-2	HTTR の照射試料装荷位置 (水平断面図)
図 1-3	照射キャプセルの HTTR への装荷図
図 1-4	金属製照射キャプセルの概略図
図 1-5	黒鉛製試料ホルダーの概略図
図 1-6	照射試験片の温度評価の流れ図
図 2-1	温度評価モデル図 (鉛直方向)
図 2-2(1)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-1 面)
図 2-2(2)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-2 面)
図 2-2(3)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-3 面)
図 2-2(4)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-4 から Level-8 面)
図 2-2(5)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-9 面)
図 2-2(6)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-10 面)
図 2-2(7)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-11 面)
図 2-2(8)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-12 面)
図 2-2(9)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-13 面)
図 2-2(10)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-14 面)
図 2-2(11)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-15 面)
図 2-2(12)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-16 面)
図 2-2(13)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-17 面)
図 2-2(14)	温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-18 面)



- 図 2-3 流路モデル図 (鉛直方向)
- 図 2-4(1) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-1 から Level-3 面)
- 図 2-4(2) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-4 から Level-7 面)
- 図 2-4(3) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-8 面)
- 図 2-4(4) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-9 面)
- 図 2-4(5) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-10 面)
- 図 2-4(6) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-11 面)
- 図 2-4(7) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-11 と Level-12 の境界面)
- 図 2-4(8) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-12 面)
- 図 2-5 カラム番号一覧
- 図 2-6 HTTR の炉床部構造図
- 図 2-7 照射カラムの高さ方向の温度分布図
- 図 2-8(1) 炉心縦断面内の温度分布図  
(解析 : Case-1、ノミナルケース)
- 図 2-8(2) 炉心縦断面内の温度分布図  
(解析 : Case-2、照射カラム温度高温側評価条件)
- 図 2-8(3) 炉心縦断面内の温度分布図  
(解析 : Case-3、照射カラム温度低温側評価条件)
- 図 3-1(1) 照射キャプセル温度解析に用いた解析メッシュ図
- 図 3-1(2) 照射キャプセル温度解析に用いた解析メッシュ図
- 図 3-2(1) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case1;0mm から 450mm)
- 図 3-2(2) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case1;450mm から 1200mm)
- 図 3-2(3) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case1;1200mm から 1900mm)
- 図 3-2(4) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case1;1900mm から 2647mm)
- 図 3-3(1) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case2;0mm から 450mm)
- 図 3-3(2) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case2;450mm から 1200mm)
- 図 3-3(3) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case2;1200mm から 1900mm)
- 図 3-3(4) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case2;1900mm から 2647mm)
- 図 3-4(1) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case3;0mm から 450mm)
- 図 3-4(2) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case3;450mm から 1200mm)
- 図 3-4(3) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case3;1200mm から 1900mm)
- 図 3-4(4) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case3;1900mm から 2647mm)
- 図 3-5(1) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case1;200mm から 1100mm)
- 図 3-5(2) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case1;1350mm から 1800mm)
- 図 3-6(1) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case2;200mm から 1100mm)
- 図 3-6(2) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case2;1350mm から 1800mm)

- 図 3-7(1) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case3;200mm から 1100mm)
- 図 3-7(2) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case3;1350mm から 1800mm)
- 図 3-8(1) Type-I 試料ホルダーの構造図
- 図 3-8(2) Type-II 試料ホルダーの構造図
- 図 3-8(3) Type-III 試料ホルダーの構造図
- 図 3-8(4) Type-IV 試料ホルダーの構造図
- 図 3-9 試料ホルダー容器の構造図
- 図 3-10(1) Type-I 試料ホルダーの解析メッシュ図
- 図 3-10(2) Type-II 試料ホルダーの解析メッシュ図
- 図 3-10(3) Type-III 試料ホルダーの解析メッシュ図
- 図 3-10(4) Type-IV 試料ホルダーの解析メッシュ図
- 図 3-11(1) Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン
- 図 3-11(2) Type-II 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン
- 図 3-11(3) Type-III 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン
- 図 3-11(4) Type-IV 試料ホルダーの温度評価ライン
- 図 3-12 Type-I 試料ホルダーの温度解析結果
- 図 3-13 Type-I 試料ホルダーのジルコニア試験片温度に与えるパラメータの影響
- 図 3-14 Type-II(1) 試料ホルダーの温度解析結果
- 図 3-15 Type-II(1) 試料ホルダーのジルコニア試験片温度に与えるパラメータの影響
- 図 3-16 Type-II(2) 試料ホルダーの温度解析結果
- 図 3-17 Type-II(2) 試料ホルダーのジルコニア試験片温度に与えるパラメータの影響
- 図 3-18 Type-III 試料ホルダーの温度解析結果
- 図 3-19 Type-III 試料ホルダーのジルコニア試験片温度に与えるパラメータの影響
- 図 3-20 Type-IV 試料ホルダーの温度解析結果
- 図 3-21 Type-IV 試料ホルダーの黒鉛試験片温度に与えるパラメータの影響
- 図 3-22(1) ギャップ幅 0mm の場合の照射試料の温度解析モデル
- 図 3-22(2) ギャップ幅 1mm の場合の照射試料の温度解析モデル
- 図 3-22(3) ギャップ幅 2mm の場合の照射試料の温度解析モデル
- 図 3-22(4) ギャップ幅 5mm の場合の照射試料の温度解析モデル
- 図 3-22(5) ギャップ幅 10mm の場合の照射試料の温度解析モデル
- 図 3-23(1) 照射試験片 (黒鉛) の温度解析結果 (温度評価 Line-1 上の温度分布)
- 図 3-23(2) 照射試験片 (ジルコニア) の温度解析結果 (温度評価 Line-1 上の温度分布)

## 1. はじめに

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor, HTTR) を用いた照射研究として、高温工学に関する先端的基礎研究を効率的に実施するために、

- 1) 新素材・材料開発分野
- 2) 放射線化学・核融合関連分野
- 3) 高温照射技術・その他原子力関連分野

の3つの分野の7研究テーマについて予備試験を実施している<sup>(1)</sup>。予備試験の結果、HTTRを用いて、まず照射試験を実施する研究テーマが、

- 1) 新素材・材料開発分野<sup>(2)</sup>の
  - ①「高温酸化物超伝導体の照射による特性改良の研究」
  - ②「高温用半導体の中性子転換ドーピングの研究」
  - ③「耐熱セラミックス複合材料の照射損傷機構に関する研究」及び
- 3) 高温照射技術・その他原子力関連分野の  
「耐熱耐放射線光ファイバの開発」

に絞り込まれている。

HTTRを用いた最初の照射試験は、平成15年度開始予定で、照射温度が400℃から600℃、高速中性子照射量 ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) が  $1 \times 10^{21}$  から  $3 \times 10^{23} \text{ m}^{-2}$  を目標としている。なお、「耐熱耐放射線光ファイバの開発」により試作・開発された光ファイバをキャプセル内に装荷し、温度及び線量計測を行なうことも計画されている。なお、照射試験片の詳細については、参考文献を参照願いたい<sup>(3)</sup>。

照射試験は、HTTRの出口冷却材温度が850℃の定常運転状態で実施される。HTTRでは、表1-1に示すように燃料領域、可動反射体領域及び固定反射体領域に試験片を装荷した照射試験が可能である。図1-1及び図1-2はHTTRの試料装荷位置の鉛直及び水平断面を示したものである。燃料領域の装荷試料のうち、中央カラム領域での照射は燃料照射試験に限定されている。ここで、平成15年度開始予定の照射試験は、可動反射体A領域で実施するものである。

照射キャプセルは図1-3に示すように、原子炉压力容器上部にある照射スタンドパイプから炉内に装荷されて、1年間の照射期間を経た後に炉外に取り出される<sup>4)</sup>。1次系のヘリウムガスの圧力バウンダリは、照射スタンドパイプクローゼーションにて保たれる構造である。照射試験片は図1-4に示すように金属製のキャプセル(図1-3中の照射ユニット)内に直径約100mm、長さ約100mmの黒鉛製試料ホルダー(図1-5参照)に入れて装荷される。なお、図1-4でキャプセル先端部は炉内黒鉛ブロック積層部に入り、照射量(高速中性子束:  $\sim 2 \times 10^{16} (\text{n} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ )、熱中性子束:  $\sim 4 \times 10^{17} (\text{n} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$  ( $E < 2.38 \text{ eV}$ ))及び温度が高い領域(550~600℃)に装荷されるが、炉心から上方向に離れるにした

がい照射量、温度ともに低い照射条件となる。

平成 15 年度の照射試験では、4 種類の試料ホルダーを異なる鉛直方向の位置に装荷し、照射量、温度の異なる照射試験を実施する予定である。ここでは、試料ホルダーの識別を図 1-4 に示すように、Type-I、Type-II(1)、Type-II(2)、Type-IIIとする。また、炭素繊維強化炭素複合材料 (C/C 材) の制御棒被覆管用材料の照射も予定されており、この試料ホルダーを Type-IVとする。

本報告は、これら試料ホルダー内の試験片の温度について解析的な検討を行なった結果をまとめたものである。

照射試験片の温度評価の流れを図 1-6 に示す。温度評価では、まず、

- 1) 照射場の発熱量の評価 (2.1 節で述べる) 及び照射キャプセル周囲の黒鉛ブロックの温度評価 (2.2 節で述べる) を行う。
- 2) 次に、得られた発熱量及び周囲の温度条件をもとに、照射キャプセルの温度評価 (3.1 節で述べる) を行い、上で述べた試料ホルダーの位置での熱的境界条件を定める。
- 3) さらに、この熱的境界条件を用いて照射ホルダーの温度評価 (3.2 節で述べる) を行なうとともに、試料ホルダー内の照射試料の温度評価 (3.3 節で述べる) を行なう。

なお、照射キャプセル内には、先にも述べたように計装用として耐熱・耐放射線光ファイバを装荷し、これにより照射キャプセル内の温度及び中性子・ $\gamma$ 線の線量を実測する予定である。また、照射試料ホルダー内には、照射温度を実測するために熔融タイプの温度モニターを、また照射量を実測するためにフルーエンスモニターを装荷することとしている。

表 1-1 HTTR の照射条件一覧表

照射位置 項目	燃料領域		③ 可動反射体 A 領域	④ 可動反射体 B 領域	⑤ 固定反射体領域
	① 中央カラム領域	② 試験燃料装荷領域			
照射条件 形式 最大寸法 試料数 (最大)	六角柱状ブロック 平径：360 mm 高さ：580 mm 1カラム	同左 同左 同左 3カラム	円柱状 直径：300 mm 高さ：500 mm 3カラム	円柱状 直径：130 mm 高さ：500 mm 12カラム	円柱状 直径：100 mm 高さ：3000 mm 4孔
最大中性子束 (n/m <sup>2</sup> ・s)	~2×10 <sup>17</sup>	~2×10 <sup>17</sup>	~2×10 <sup>16</sup>	~2×10 <sup>16</sup>	~8×10 <sup>14</sup>
高速中性子束 (>0.18 MeV)	~7×10 <sup>17</sup>	~5×10 <sup>17</sup>	~4×10 <sup>17</sup>	~4×10 <sup>17</sup>	~3×10 <sup>17</sup>
熱中性子束 (<2.38 eV)	~1×10 <sup>22</sup>	~1×10 <sup>22</sup>	~3×10 <sup>21</sup>	~3×10 <sup>21</sup>	~3
γ線強度 (Gy/s)	400~1100	400~1100	400~800	400~800	400~600
雰囲気温度 (°C)	400~1100	400~1100	400~800	400~800	400~600
炉内計装	温度測定, 熱中性子束測定, 中性子束モニター, 燃料破損検出 (FFD) 系				

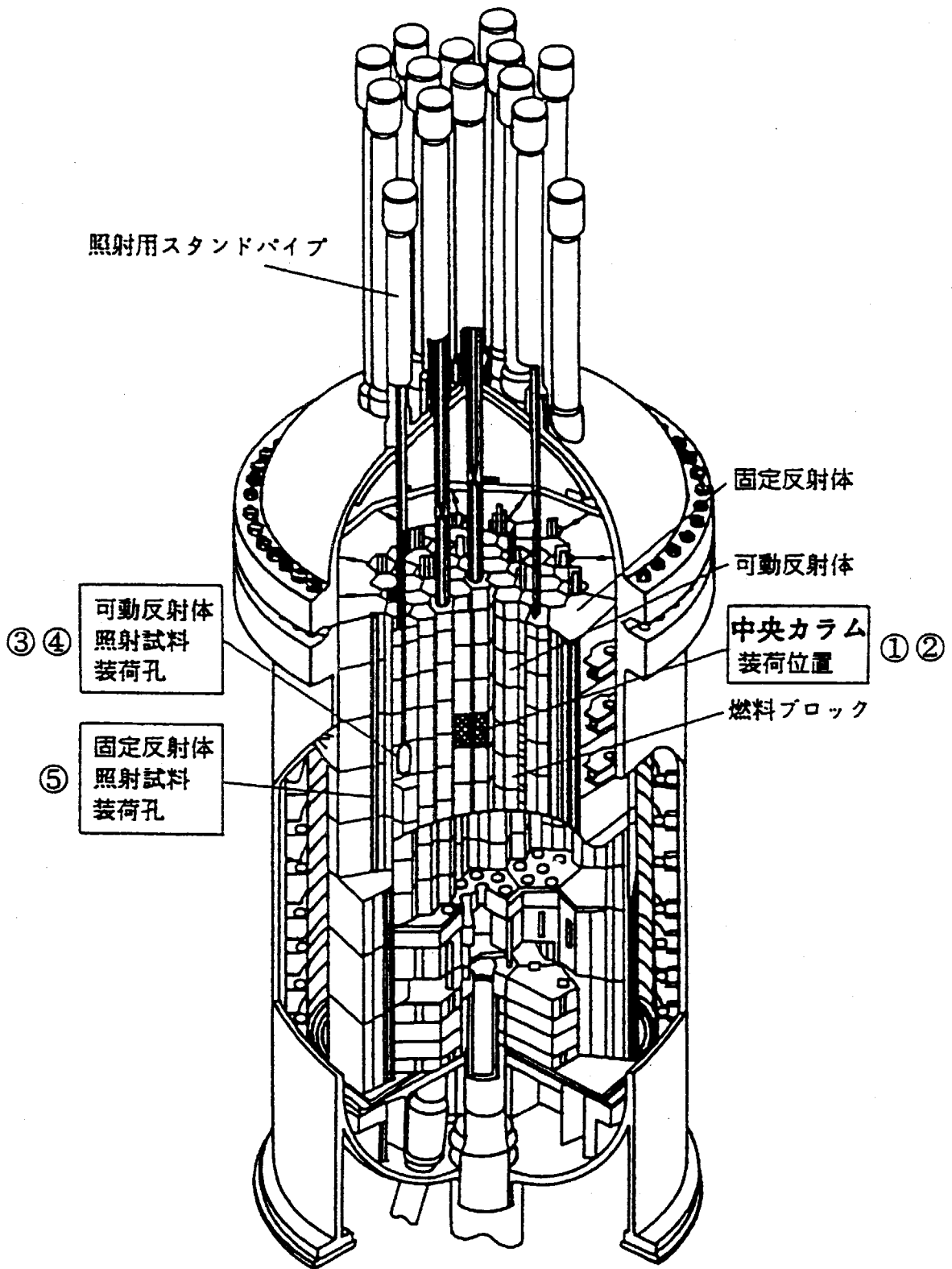


図 1-1 HTTR の照射試料装荷位置 (鉛直断面図)

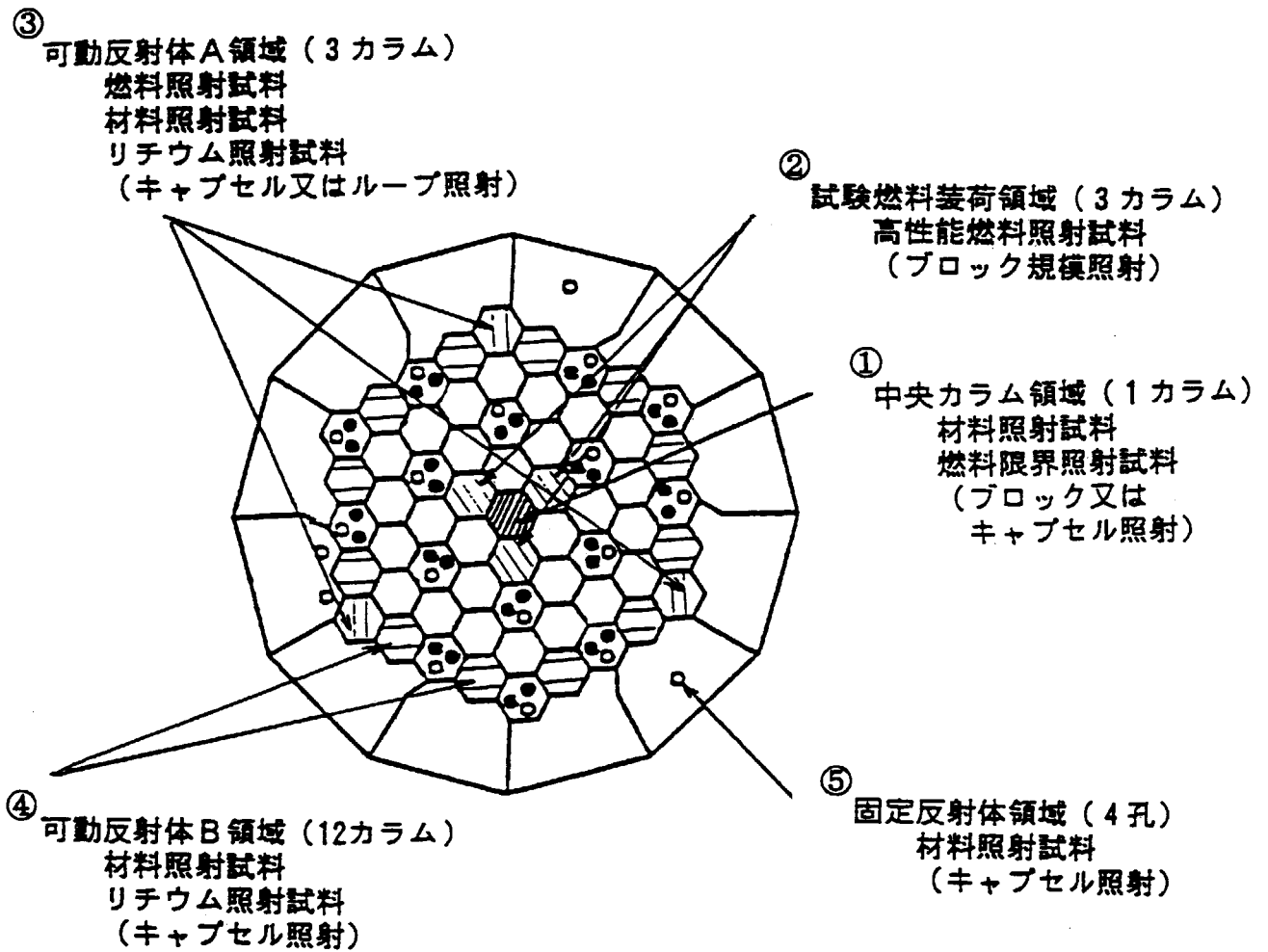


図 1-2 HTTR の照射試料装荷位置 (水平断面図)

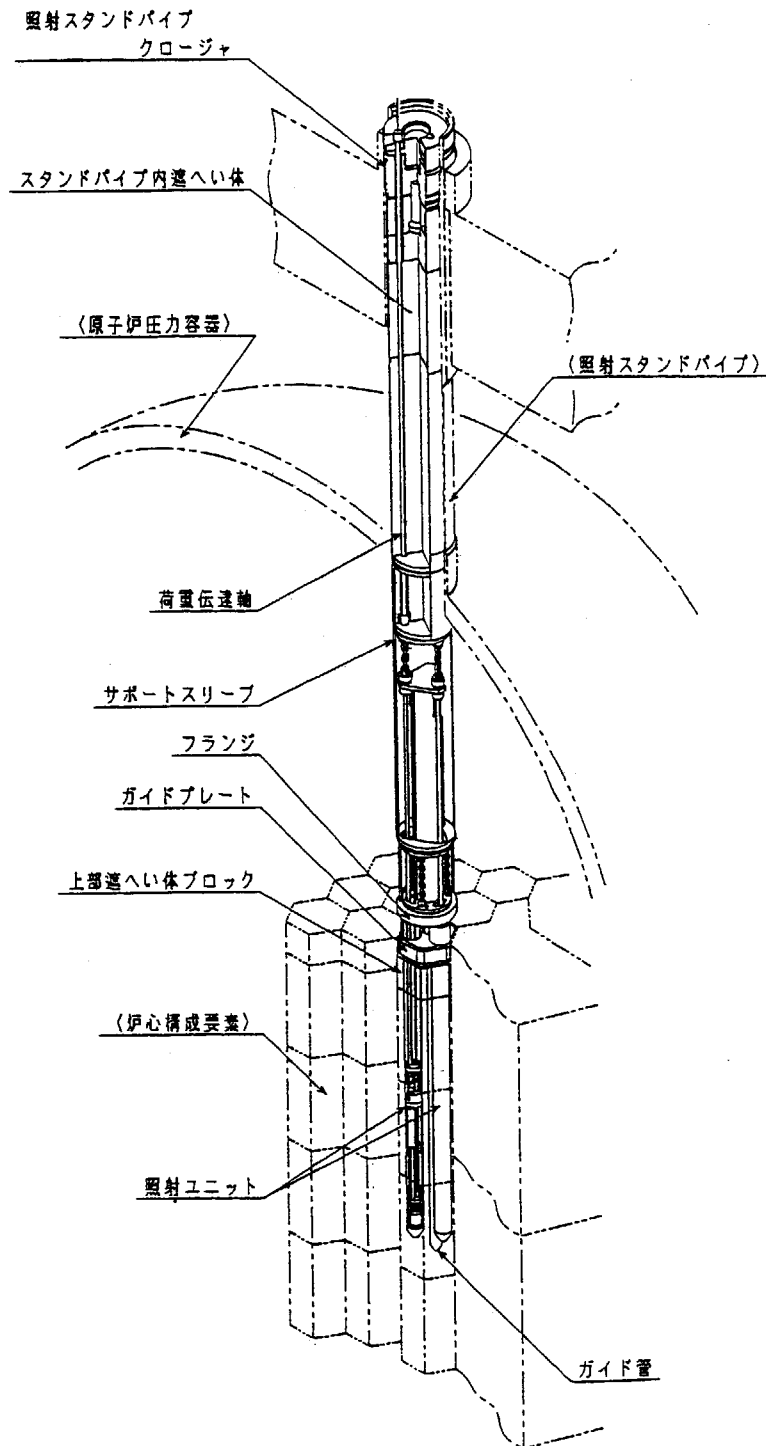


図 1-3 照射キャプセルの HTTR への装荷図



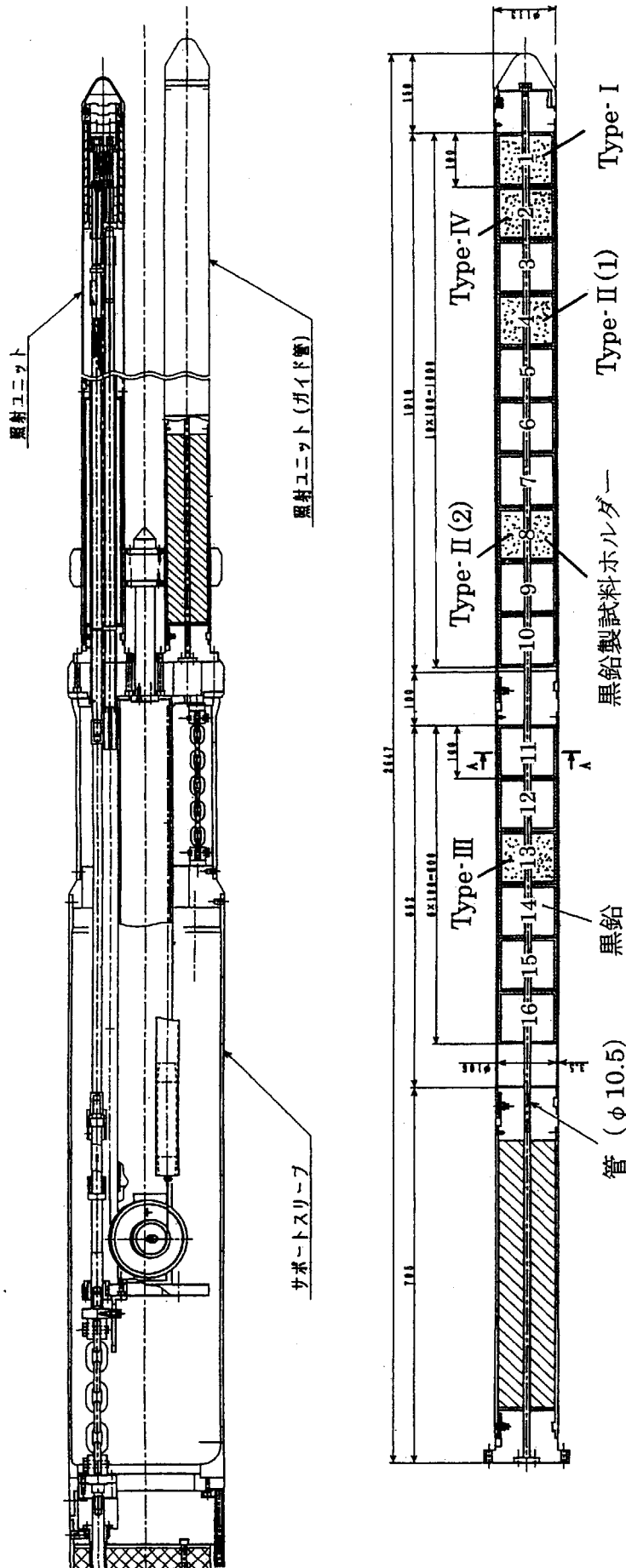


図 1-4 金属製照射キャプセルの概略図

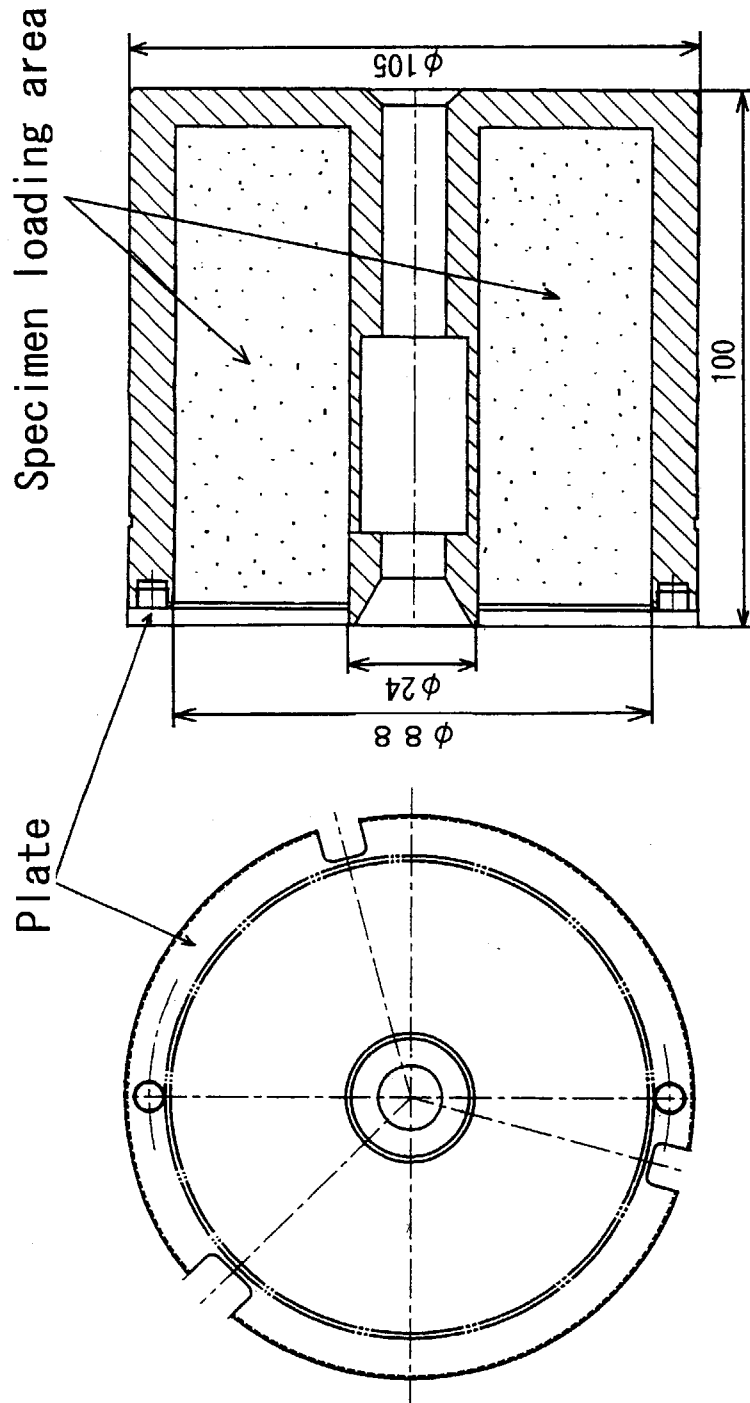


図 1-5 黒鉛製試料ホルダーの概略図

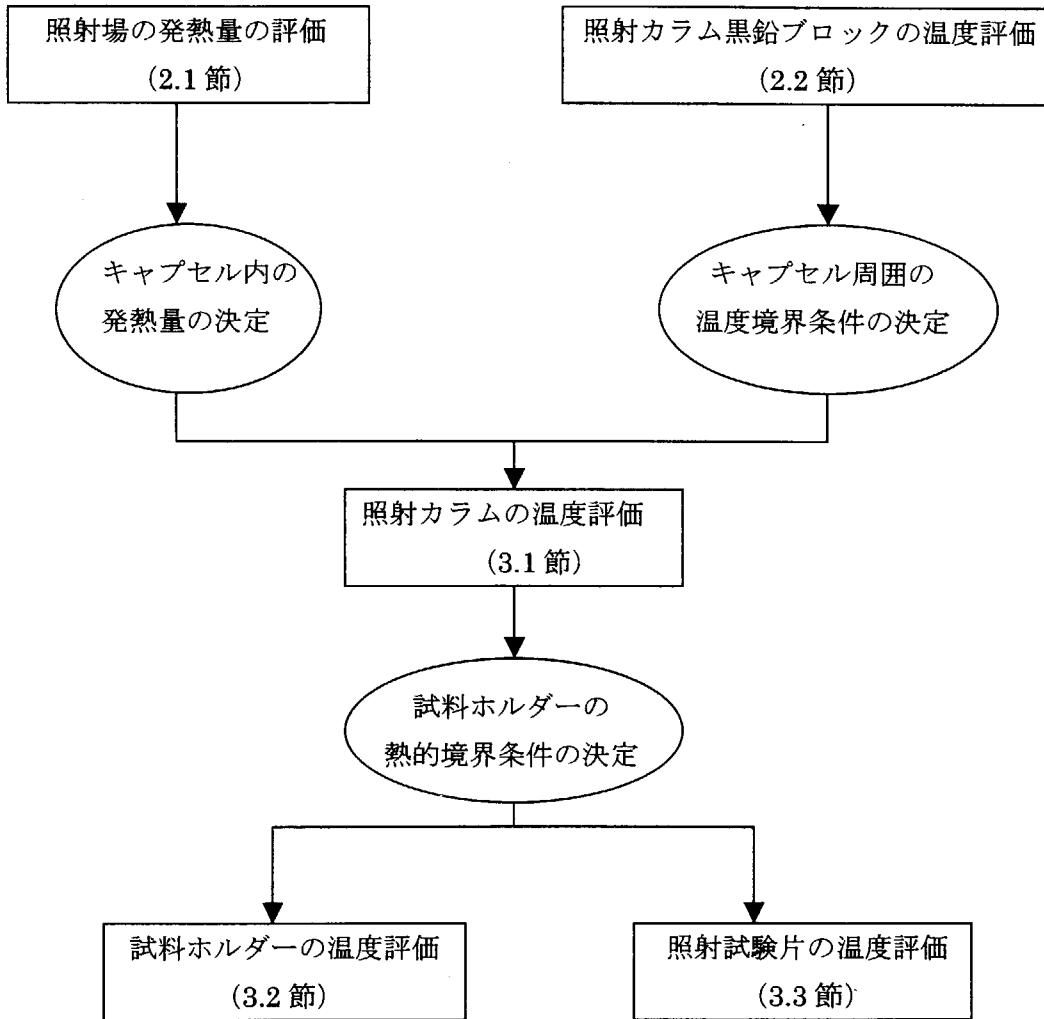


図 1-6 照射試験片の温度評価の流れ図

## 2. 照射場の評価

可動反射体A領域に装荷する照射試料の温度を評価するために、本章では照射カラム内の発熱量及び照射カラム周囲の黒鉛ブロックの温度を評価する。ここで、照射カラム周囲の黒鉛ブロックの温度解析は、照射キャプセルの熱的境界条件を定めるために必要となるものである。

### 2.1 照射カラム内の発熱量評価

まず、HTTR照射カラム内に試験片を装荷した場合の原子炉運転時中性子及び $\gamma$ 線による発熱量を評価する。発熱量は、照射カラム内鉛直方向に上部可動反射体1段目から炉心ブロック3段目まで合計5ブロックについて、各ブロックの中央と下端の10レベルの位置で評価する。解析対象とした元素は、HTTRの照射試料を参考にB,C,Cr,Fe,Ni,Zr,Al,Siの8元素とし、発熱量は各元素1g当たりの値を評価する。

#### 2.1.1 解析方法

##### (1) 中性子による発熱

中性子による発熱は、中性子束とカーマ係数により、次式を用いて評価した。

$$\begin{aligned} Q_n &= C \int_0^{E_{n,\max}} K(E_n) \phi(E_n) dE_n \\ &= C \sum_i K_i \Phi_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、それぞれの記号は

$Q_n$ : 単位質量当たり吸収される中性子エネルギー (W/g)

$K(E_n)$ : カーマ係数 (erg/g/(neutron/cm<sup>2</sup>))

$K_i$ : 第*i*群中性子のカーマ係数

$\phi(E_n)$ : 中性子束 (neutron/cm<sup>2</sup>/MeV/sec)

$\Phi_i$ : 第*i*群中性子束 (neutron/cm<sup>2</sup>/sec)

$C$ : エネルギー換算係数 (=1.0x10<sup>-7</sup>, erg→J)

を示す。

##### (2) $\gamma$ 線による発熱

$\gamma$ 線による発熱は、 $\gamma$ 線束とし質量エネルギー吸収係数により、次式を用いて評価した。

$$\begin{aligned} Q_\gamma &= C \int_0^{E_{\gamma,\max}} E_\gamma \frac{\mu_{en}}{\rho}(E_\gamma) \phi(E_\gamma) dE_\gamma \\ &= C \sum_j E_j \frac{\mu_j}{\rho} \Psi_j \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、それぞれの記号は

- $Q_\gamma$  : 単位質量当たり吸収される  $\gamma$  線エネルギー (W/g)  
 $\mu_{en}(E_\gamma) / \rho$  : 質量エネルギー吸収係数 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )  
 $\mu_j / \rho$  : 第  $j$  群  $\gamma$  線の質量エネルギー係数  
 $\phi(E_r)$  :  $\gamma$  線束 ( $\text{photon}/\text{cm}^2/\text{MeV}/\text{sec}$ )  
 $\Psi_j$  : 第  $j$  群  $\gamma$  線束 ( $\text{photon}/\text{cm}^2/\text{sec}$ )  
 $E_j$  : 第  $j$  群  $\gamma$  線のエネルギー (MeV) (上限値で代表させている)  
 $C$  : エネルギー単位換算係数 ( $=1.602 \times 10^{-13}$ , MeV  $\rightarrow$  J)

### 2.1.2 解析条件

#### (1) 中性子及び $\gamma$ 線束

中性子及び  $\gamma$  線束は、HTTR 全炉心の 2 次元円柱体系の計算結果 (DOT-3.5 コードによる) から、照射カラム位置の 21 群中性子束及び 7 群  $\gamma$  線の値を用いる。解析に用いた照射カラム (可動反射体 A 領域) の中性子束及び  $\gamma$  線束の計算条件を表 2-1 に示す。

#### (2) 中性子カーマ係数及び $\gamma$ 線質量エネルギー吸収係数

中性子カーマ係数は田中らの求めた値<sup>(5)</sup>を用いた。また、 $\gamma$  線質量エネルギー吸収係数は、原子炉ハンドブックに記載されている値を用いた<sup>(6)</sup>。解析に用いた中性子カーマ係数及び  $\gamma$  線質量エネルギー吸収係数を表 2-2 に示す。

### 2.1.3 解析結果

B, C, Cr, Fe, Ni, Zr, Al, Si の 8 元素について計算した元素 1g 当たりの発熱量を表 2-3(1)~(8)にまとめて示す。本発熱量は、第 3 章の照射試料ホルダー及び照射試料の温度評価の解析に用いるものである。

## 2.2 照射カラム周囲の黒鉛ブロック温度評価

### 2.2.1 解析方法

HTTR 炉心の対象性を考慮して、60 度セクターの 3 次元解析モデル (1/6 モデル) を用いた温度解析により照射カラムの温度分布を求めた。HTTR 炉心鉛直方向は、図 2-1 に示すように鉛直方向に 18 断面 (Level 1 から Level 18) を考慮した。それぞれの断面内における水平方向の 1/6 モデルを図 2-2(1)~(14)に示す。図中○印内の数字は、表 2-4 に示すように構造物の識別番号を示している。なお、各構造物に対応する等価熱伝導率を表 2-5(1)~(4)、比熱を表 2-6(1)~(4)、密度を表 2-7 に示す。等価熱伝導率の設定方法については、付録 1 にまとめて示す。

原子炉内の冷却材の流れは、図 2-3 に示すように原子炉压力容器下部の高温 2 重管の外管より入り、炉心の外側を上向きに流れ、上鏡部で下降流となる。その後、炉心部の燃料領域で加熱されて高温 2 重管の内管より冷却器に向かう流れとなる。同図中、△印内の数字は流路を示しており、各流路の熱伝達式は表 2-8(1)~(14)の値を用いている。また、□内の数字は輻射熱伝達を考慮した箇所を示し

ており、輻射熱伝達式は表 2-9 に示す値を用いている。各鉛直断面内での流路のモデルを図 2-4(1)～(8)に示す。

なお、温度解析には、有限要素法解析コード ANSYSVer.5 を使用した。

### 2.2.2 解析条件

照射試験は定格運転状態で実施され、このときのプラントの運転状態値は、

- ・原子炉出力                   30MW
- ・冷却材流量                 12.4kg/s
- ・冷却材原子炉出口温度   850℃
- ・冷却材原子炉入口温度   395℃

である。定格運転時の冷却材流量分布を表 2-10 に示す<sup>(7)</sup>。同表で、番号は図 2-3 及び図 2-4 の流路番号に対応している。また、定格運転時の炉心（燃料体）の発熱分布を表 2-11 に示す。さらに、燃料体以外の炉心の発熱分布を表 2-12 に示す。なお、表中の□内の数値は図 2-5 に示す構造物の番号に対応している。

温度解析では、

- 1) 熱伝導率、比熱等の材料物性値、熱伝達率等は HTTR 原子炉本体の設計解析に用いているノミナル値（特性値の平均値）の解析<sup>(8)</sup>、
- 2) 物性値等の不確かさを考慮して照射カラムの温度が高くなる解析、及び
- 3) 物性値等の不確かさを考慮して照射カラムの温度が低くなる解析

の 3 種類の解析を実施した。なお、2)及び3)の解析では、照射カラムの温度に与える影響として、すぐ外側を取り囲む固定反射体に着目し、その水平方向の熱伝導率と外面熱伝達率をパラメータとして設定した。固定反射体の水平方向の熱伝導率については、物性値の不確かさについての検討<sup>(9)</sup>を踏まえて定めた。

また、固定反射体外面熱伝達率については、図 2-6 に示す炉心下部にあるシールプレート下面の冷却材が 10～15%以内のばらつきで等方的に流れるという炉床部流量配分試験の結果から、20%の不確かさを考慮した。照射カラム黒鉛ブロックの温度評価の解析ケースを表 2-13 にまとめて示す。

### 2.2.3 解析結果

照射カラム黒鉛ブロックの高さ方向の温度分布を図 2-7 に示す。照射キャプセルは炉心第 2 段目まで挿入される。炉心第 2 段の下部でノミナルケースと高温側低温側の結果に差が大きくなっているが、黒鉛ブロックの温度としては高々 10℃程度である。すなわち、物性値等の不確かさによる黒鉛ブロックの温度への影響は小さいものと言える。参考までに、炉心全体の鉛直断面の温度分布を図 2-8(1)～(3)に示す。

表 2-1 HTTR 照射カラム (可動反射体 A 領域) の中性子束及び  $\gamma$  線束

neutron 21gr(neutron/cm2/sec)		炉心3段目下炉心3段目中炉心2段目下炉心2段目中炉心1段目下炉心1段目中可反2段目下可反2段目中可反1段目下可反1段目中								
Neutron-1	6.420E+10	8.358E+10	1.069E+11	1.206E+11	1.265E+11	1.088E+11	3.823E+10	4.256E+09	5.965E+08	1.102E+08
2	2.210E+11	2.874E+11	3.692E+11	4.169E+11	4.387E+11	3.797E+11	1.341E+11	1.136E+10	1.234E+09	1.799E+08
3	5.549E+11	7.247E+11	9.289E+11	1.051E+12	1.104E+12	9.560E+11	3.222E+11	2.415E+10	2.285E+09	2.947E+08
4	9.424E+11	1.235E+12	1.575E+12	1.786E+12	1.869E+12	1.616E+12	5.850E+11	5.210E+10	4.913E+09	5.931E+08
5	9.955E+11	1.306E+12	1.662E+12	1.886E+12	1.970E+12	1.701E+12	6.418E+11	6.313E+10	6.019E+09	7.130E+08
6	9.455E+11	1.242E+12	1.577E+12	1.791E+12	1.867E+12	1.610E+12	6.213E+11	6.568E+10	6.357E+09	7.504E+08
7	8.747E+11	1.150E+12	1.457E+12	1.656E+12	1.724E+12	1.484E+12	5.864E+11	6.649E+10	6.547E+09	7.742E+08
8	8.203E+11	1.080E+12	1.365E+12	1.552E+12	1.612E+12	1.386E+12	5.591E+11	6.788E+10	6.808E+09	8.090E+08
9	1.394E+12	1.837E+12	2.314E+12	2.633E+12	2.727E+12	2.334E+12	9.649E+11	1.312E+11	1.368E+10	1.650E+09
10	1.470E+12	1.939E+12	2.433E+12	2.768E+12	2.857E+12	2.433E+12	1.046E+12	1.614E+11	1.761E+10	2.169E+09
11	1.432E+12	1.888E+12	2.363E+12	2.687E+12	2.764E+12	2.341E+12	1.042E+12	1.804E+11	2.067E+10	2.606E+09
12	1.410E+12	1.859E+12	2.319E+12	2.635E+12	2.702E+12	2.277E+12	1.044E+12	2.006E+11	2.419E+10	3.129E+09
13	1.393E+12	1.836E+12	2.284E+12	2.593E+12	2.651E+12	2.222E+12	1.046E+12	2.208E+11	2.808E+10	3.734E+09
14	1.377E+12	1.813E+12	2.250E+12	2.551E+12	2.599E+12	2.167E+12	1.048E+12	2.405E+11	3.230E+10	4.420E+09
15	1.358E+12	1.786E+12	2.211E+12	2.504E+12	2.543E+12	2.110E+12	1.046E+12	2.594E+11	3.681E+10	5.189E+09
16	1.658E+12	2.178E+12	2.687E+12	3.036E+12	3.069E+12	2.533E+12	1.295E+12	3.508E+11	5.335E+10	7.817E+09
17	1.593E+12	2.089E+12	2.567E+12	2.893E+12	2.911E+12	2.390E+12	1.274E+12	3.777E+11	6.152E+10	9.370E+09
18	1.474E+12	1.930E+12	2.363E+12	2.656E+12	2.660E+12	2.175E+12	1.230E+12	4.023E+11	7.012E+10	1.110E+10
19	1.371E+12	1.790E+12	2.186E+12	2.450E+12	2.445E+12	1.994E+12	1.181E+12	4.201E+11	7.828E+10	1.286E+10
20	1.070E+12	1.394E+12	1.697E+12	1.898E+12	1.888E+12	1.536E+12	9.255E+11	3.476E+11	6.820E+10	1.153E+10
21	2.599E+13	3.215E+13	3.542E+13	3.649E+13	3.411E+13	2.928E+13	3.152E+13	3.056E+13	1.910E+13	8.382E+12
gamma 7gr(photon/cm2/sec)		炉心3段目下炉心3段目中炉心2段目下炉心2段目中炉心1段目下炉心1段目中可反2段目下可反2段目中可反1段目下可反1段目中								
Gamma-1	1.237E+09	1.498E+09	1.901E+09	2.137E+09	2.279E+09	2.093E+09	1.048E+09	5.170E+08	1.474E+09	4.075E+09
2	3.093E+10	3.738E+10	4.804E+10	5.424E+10	5.831E+10	5.318E+10	2.335E+10	4.743E+09	3.409E+09	7.194E+09
3	3.409E+11	4.192E+11	5.207E+11	5.777E+11	6.009E+11	5.362E+11	2.920E+11	1.380E+11	7.857E+10	3.938E+10
4	5.439E+11	6.663E+11	8.472E+11	9.505E+11	1.006E+12	8.946E+11	3.503E+11	5.375E+10	1.743E+10	9.415E+09
5	1.198E+12	1.455E+12	1.872E+12	2.105E+12	2.254E+12	2.031E+12	7.990E+11	1.186E+11	4.081E+10	2.053E+10
6	2.808E+12	3.380E+12	4.366E+12	4.902E+12	5.239E+12	4.750E+12	1.857E+12	2.028E+11	5.614E+10	4.581E+10
7	9.356E+12	1.116E+13	1.421E+13	1.606E+13	1.706E+13	1.543E+13	9.933E+12	2.714E+12	7.414E+11	4.577E+11

表 2-2 中性子カーマ係数及びγ線質量エネルギー吸収係数  
 kerma(erg/g/n\*cm2) by JAERI-M 6348(1975)

	energy (upper-MeV)	B10	B11	B	C	Cr	Fe	Ni	Zr	Al	Si
Neutron-1	14.92	3.40E-07	1.10E-07	1.56E-07	1.00E-07	1.20E-08	2.00E-08	6.30E-08	3.40E-08	6.10E-09	9.80E-08
2	5.49	2.70E-07	7.80E-08	1.16E-07	8.10E-08	5.80E-09	5.80E-09	2.40E-09	2.00E-08	1.50E-09	1.60E-08
3	3.33	2.50E-07	5.70E-08	9.56E-08	5.30E-08	4.00E-08	3.70E-09	7.00E-09	1.30E-09	1.10E-09	1.00E-08
4	2.02	1.90E-07	4.20E-08	7.16E-08	3.60E-08	2.10E-09	2.20E-09	2.30E-09	8.80E-10	7.40E-09	8.20E-09
5	1.22	1.50E-07	3.30E-08	5.64E-08	2.70E-08	1.60E-09	1.40E-09	1.60E-09	7.00E-10	6.00E-09	6.00E-09
6	0.743	2.50E-07	2.80E-08	7.24E-08	2.10E-08	1.10E-09	1.10E-09	1.10E-09	5.80E-10	4.80E-09	4.20E-09
7	0.45	3.00E-07	2.00E-08	7.60E-08	1.60E-08	5.00E-10	6.00E-10	7.20E-10	4.70E-10	2.70E-09	2.80E-09
8	0.273	4.40E-07	1.20E-08	9.76E-08	1.00E-08	5.30E-10	4.00E-10	3.20E-10	3.90E-10	2.40E-09	3.00E-09
9	0.166	5.40E-07	6.30E-09	1.13E-07	6.10E-09	4.00E-10	2.10E-10	2.10E-10	1.90E-10	1.30E-09	3.90E-10
10	6.74E-02	7.30E-07	3.00E-09	1.48E-07	2.20E-09	9.50E-11	1.90E-10	2.10E-10	7.70E-11	2.50E-10	1.50E-10
11	2.48E-02	1.30E-06	1.10E-09	2.61E-07	8.00E-10	4.60E-11	3.00E-11	2.00E-11	3.00E-11	4.00E-11	8.00E-11
12	9.12E-03	2.10E-06	3.40E-10	4.20E-07	3.00E-10	1.20E-10	3.30E-11	5.20E-11	1.00E-11	2.20E-11	2.70E-11
13	3.35E-03	3.70E-06	1.20E-10	7.40E-07	1.10E-10	1.70E-11	1.10E-11	2.10E-11	4.30E-12	1.00E-11	1.00E-11
14	1.23E-03	5.80E-06	5.00E-11	1.16E-06	4.10E-11	5.70E-12	4.80E-12	7.10E-12	1.80E-12	4.10E-12	4.30E-12
15	4.54E-04	9.20E-06	1.80E-11	1.84E-06	1.40E-11	2.20E-12	1.90E-12	2.30E-12	9.80E-13	1.90E-12	2.10E-12
16	1.67E-04	1.50E-05	5.80E-12	3.00E-06	4.20E-12	9.70E-13	6.10E-13	7.60E-13	4.70E-13	8.20E-13	9.50E-13
17	4.79E-05	3.10E-05	2.00E-12	6.20E-06	1.40E-12	3.90E-13	2.70E-13	2.60E-13	2.30E-13	3.50E-13	4.30E-13
18	1.37E-05	6.60E-05	5.60E-13	1.32E-05	4.20E-05	1.30E-13	1.00E-13	8.50E-14	1.10E-13	1.50E-13	1.90E-13
19	3.93E-06	1.10E-04	1.70E-13	2.20E-05	1.40E-13	5.00E-14	3.70E-14	2.80E-14	5.20E-14	6.50E-14	8.60E-14
20	1.13E-06	2.10E-04	5.40E-14	4.20E-05	4.20E-14	1.90E-14	1.40E-14	9.50E-15	2.50E-14	2.80E-14	3.90E-14
21	4.14E-07	4.20E-04	1.50E-14	8.40E-05	1.40E-14	7.40E-15	5.10E-15	3.20E-15	1.20E-14	1.20E-14	1.70E-14

mass absorption coef.(cm2/g) by REACTOR HANDBOOK 2nd ed. Vol.1 Part G(1960)

	energy (upper-MeV)	B	C	Cr	Fe	Ni	Zr	Al	Si
Gamma-1	14	1.80E-02	2.00E-02	2.40E-02	3.10E-02	3.20E-02	2.80E-02	2.20E-02	2.40E-02
2	8	2.20E-02	2.50E-02	2.90E-02	3.10E-02	3.20E-02	3.10E-02	2.40E-02	2.60E-02
3	5	2.70E-02	3.00E-02	3.40E-02	3.30E-02	3.50E-02	3.40E-02	2.80E-02	3.00E-02
4	3	3.60E-02	4.00E-02	3.80E-02	3.90E-02	4.00E-02	3.60E-02	3.50E-02	3.70E-02
5	2	5.10E-02	5.20E-02	5.20E-02	4.90E-02	5.00E-02	4.10E-02	4.30E-02	4.50E-02
6	1	5.90E-02	6.40E-02	7.80E-02	7.70E-02	7.90E-02	5.80E-02	6.20E-02	6.40E-02
7	0.4	8.80E-02	9.50E-02	8.30E-02	9.40E-02	9.70E-02	8.70E-02	9.30E-02	9.60E-02



表 2-3(1) B の発熱量 (W/g)

B (B10 20%+B11 80%)

	炉心3段目下	炉心3段目中	炉心2段目下	炉心2段目中	炉心1段目下	炉心1段目中	可反2段目下	可反2段目中	可反1段目下	可反1段目中
Neutron-1	1.001E-03	1.304E-03	1.668E-03	1.892E-03	1.973E-03	1.697E-03	5.964E-04	6.639E-05	9.306E-06	1.720E-06
2	2.572E-03	3.345E-03	4.297E-03	4.825E-03	5.107E-03	4.419E-03	1.561E-03	1.322E-04	1.436E-05	2.094E-06
3	5.305E-03	6.928E-03	8.881E-03	1.005E-02	1.056E-02	9.139E-03	3.080E-03	2.309E-04	2.184E-05	2.817E-06
4	6.747E-03	8.841E-03	1.128E-02	1.279E-02	1.338E-02	1.157E-02	4.189E-03	3.730E-04	3.518E-05	4.247E-06
5	5.615E-03	7.368E-03	9.373E-03	1.064E-02	1.111E-02	9.593E-03	3.620E-03	3.561E-04	3.395E-05	4.021E-06
6	6.845E-03	8.992E-03	1.141E-02	1.297E-02	1.352E-02	1.166E-02	4.498E-03	4.755E-04	4.602E-05	5.433E-06
7	6.648E-03	8.742E-03	1.107E-02	1.259E-02	1.310E-02	1.128E-02	4.457E-03	5.054E-04	4.976E-05	5.884E-06
8	8.006E-03	1.054E-02	1.332E-02	1.515E-02	1.574E-02	1.353E-02	5.457E-03	6.625E-04	6.645E-05	7.896E-06
9	1.576E-02	2.077E-02	2.616E-02	2.976E-02	3.082E-02	2.639E-02	1.091E-02	1.483E-03	1.546E-04	1.865E-05
10	2.181E-02	2.877E-02	3.611E-02	4.108E-02	4.239E-02	3.611E-02	1.552E-02	2.395E-03	2.614E-04	3.219E-05
11	3.736E-02	4.926E-02	6.164E-02	7.010E-02	7.209E-02	6.108E-02	2.717E-02	4.707E-03	5.393E-04	6.800E-05
12	5.926E-02	7.812E-02	9.747E-02	1.108E-01	1.136E-01	9.568E-02	4.386E-02	8.429E-03	1.017E-03	1.315E-04
13	1.031E-01	1.358E-01	1.691E-01	1.919E-01	1.962E-01	1.644E-01	7.744E-02	1.634E-02	2.078E-03	2.764E-04
14	1.597E-01	2.103E-01	2.610E-01	2.959E-01	3.015E-01	2.514E-01	1.215E-01	2.789E-02	3.747E-03	5.128E-04
15	2.499E-01	3.287E-01	4.069E-01	4.607E-01	4.679E-01	3.883E-01	1.925E-01	4.774E-02	6.773E-03	9.548E-04
16	4.974E-01	6.533E-01	8.060E-01	9.107E-01	9.207E-01	7.598E-01	3.885E-01	1.052E-01	1.600E-02	2.345E-03
17	9.875E-01	1.295E+00	1.592E+00	1.794E+00	1.805E+00	1.482E+00	7.900E-01	2.342E-01	3.814E-02	5.809E-03
18	1.946E+00	2.548E+00	3.120E+00	3.506E+00	3.511E+00	2.871E+00	1.624E+00	5.310E-01	9.256E-02	1.465E-02
19	3.015E+00	3.938E+00	4.808E+00	5.391E+00	5.379E+00	4.386E+00	2.597E+00	9.242E-01	1.722E-01	2.829E-02
20	4.492E+00	5.856E+00	7.128E+00	7.972E+00	7.928E+00	6.453E+00	3.887E+00	1.460E+00	2.864E-01	4.844E-02
21	2.183E+02	2.701E+02	2.975E+02	3.065E+02	2.865E+02	2.459E+02	2.647E+02	2.567E+02	1.604E+02	7.040E+01
Gamma-1	4.995E-05	6.049E-05	7.672E-05	8.625E-05	9.201E-05	8.449E-05	4.230E-05	2.087E-05	5.951E-05	1.645E-04
2	8.719E-04	1.054E-03	1.354E-03	1.529E-03	1.644E-03	1.499E-03	6.584E-04	1.337E-04	9.613E-05	2.028E-04
3	7.374E-03	9.066E-03	1.126E-02	1.249E-02	1.300E-02	1.160E-02	6.315E-03	2.984E-03	1.699E-03	8.516E-04
4	9.411E-03	1.153E-02	1.466E-02	1.644E-02	1.740E-02	1.548E-02	6.060E-03	9.300E-04	3.015E-04	1.629E-04
5	1.957E-02	2.378E-02	3.058E-02	3.440E-02	3.683E-02	3.319E-02	1.306E-02	1.939E-03	6.669E-04	3.355E-04
6	2.654E-02	3.195E-02	4.127E-02	4.633E-02	4.952E-02	4.490E-02	1.755E-02	1.917E-03	5.306E-04	4.330E-04
7	5.276E-02	6.295E-02	8.010E-02	9.058E-02	9.617E-02	8.702E-02	5.601E-02	1.530E-02	4.181E-03	2.581E-03
SUM	230.05	285.42	316.27	327.55	307.55	263.17	274.64	260.07	161.05	70.51

表 2-3(2) C の発熱量 (W/g)

	炉心3段目下	炉心3段目中	炉心2段目下	炉心2段目中	炉心1段目下	炉心1段目中	可反2段目下	可反2段目中	可反1段目下	可反1段目中
Neutron-1	6.420E-04	8.358E-04	1.069E-03	1.206E-03	1.265E-03	1.088E-03	3.823E-04	4.256E-05	5.965E-06	1.102E-06
2	1.790E-03	2.328E-03	2.990E-03	3.377E-03	3.554E-03	3.075E-03	1.086E-03	9.200E-05	9.996E-06	1.457E-06
3	2.941E-03	3.841E-03	4.923E-03	5.569E-03	5.853E-03	5.067E-03	1.708E-03	1.280E-04	1.211E-05	1.562E-06
4	3.392E-03	4.445E-03	5.670E-03	6.429E-03	6.729E-03	5.817E-03	2.106E-03	1.876E-04	1.769E-05	2.135E-06
5	2.688E-03	3.527E-03	4.487E-03	5.093E-03	5.320E-03	4.592E-03	1.733E-03	1.705E-04	1.625E-05	1.925E-06
6	1.986E-03	2.608E-03	3.311E-03	3.761E-03	3.921E-03	3.381E-03	1.305E-03	1.379E-04	1.335E-05	1.576E-06
7	1.400E-03	1.840E-03	2.331E-03	2.650E-03	2.758E-03	2.375E-03	9.383E-04	1.064E-04	1.048E-05	1.239E-06
8	8.203E-04	1.080E-03	1.365E-03	1.552E-03	1.612E-03	1.386E-03	5.591E-04	6.788E-05	6.808E-06	8.090E-07
9	8.503E-04	1.121E-03	1.412E-03	1.606E-03	1.663E-03	1.424E-03	5.886E-04	8.004E-05	8.342E-06	1.006E-06
10	3.234E-04	4.265E-04	5.353E-04	6.090E-04	6.284E-04	5.353E-04	2.301E-04	3.551E-05	3.875E-06	4.772E-07
11	1.146E-04	1.511E-04	1.890E-04	2.150E-04	2.211E-04	1.873E-04	8.333E-05	1.443E-05	1.654E-06	2.085E-07
12	4.230E-05	5.576E-05	6.957E-05	7.906E-05	8.105E-05	6.830E-05	3.131E-05	6.017E-06	7.257E-07	9.388E-08
13	1.533E-05	2.019E-05	2.513E-05	2.852E-05	2.916E-05	2.444E-05	1.151E-05	2.428E-06	3.089E-07	4.108E-08
14	5.645E-06	7.431E-06	9.223E-06	1.046E-05	1.066E-05	8.886E-06	4.295E-06	9.859E-07	1.324E-07	1.812E-08
15	1.901E-06	2.501E-06	3.096E-06	3.506E-06	3.560E-06	2.955E-06	1.465E-06	3.632E-07	5.154E-08	7.264E-09
16	6.963E-07	9.147E-07	1.128E-06	1.275E-06	1.289E-06	1.064E-06	5.439E-07	1.473E-07	2.241E-08	3.283E-09
17	2.230E-07	2.924E-07	3.594E-07	4.050E-07	4.075E-07	3.345E-07	1.784E-07	5.288E-08	8.613E-09	1.312E-09
18	6.192E-08	8.106E-08	9.926E-08	1.116E-07	1.117E-07	9.134E-08	5.167E-08	1.690E-08	2.945E-09	4.660E-10
19	1.919E-08	2.506E-08	3.060E-08	3.430E-08	3.423E-08	2.791E-08	1.653E-08	5.882E-09	1.096E-09	1.801E-10
20	4.492E-09	5.856E-09	7.128E-09	7.972E-09	7.928E-09	6.453E-09	3.887E-09	1.460E-09	2.864E-10	4.844E-11
21	3.638E-08	4.501E-08	4.959E-08	5.108E-08	4.775E-08	4.099E-08	4.412E-08	4.278E-08	2.674E-08	1.173E-08
Gamma-1	5.550E-05	6.721E-05	8.525E-05	9.583E-05	1.022E-04	9.387E-05	4.700E-05	2.319E-05	6.612E-05	1.828E-04
2	9.908E-04	1.198E-03	1.539E-03	1.738E-03	1.868E-03	1.704E-03	7.482E-04	1.520E-04	1.092E-04	2.305E-04
3	8.193E-03	1.007E-02	1.251E-02	1.388E-02	1.444E-02	1.289E-02	7.017E-03	3.316E-03	1.888E-03	9.462E-04
4	1.046E-02	1.281E-02	1.629E-02	1.827E-02	1.933E-02	1.720E-02	6.734E-03	1.033E-03	3.351E-04	1.810E-04
5	1.996E-02	2.424E-02	3.118E-02	3.507E-02	3.755E-02	3.384E-02	1.331E-02	1.977E-03	6.800E-04	3.420E-04
6	2.879E-02	3.465E-02	4.477E-02	5.026E-02	5.372E-02	4.870E-02	1.904E-02	2.079E-03	5.756E-04	4.697E-04
7	5.695E-02	6.796E-02	8.647E-02	9.779E-02	1.038E-01	9.394E-02	6.047E-02	1.652E-02	4.514E-03	2.786E-03
SUM	0.14	0.17	0.22	0.25	0.26	0.24	0.12	0.03	0.01	0.01

表 2-3(3) Cr の発熱量 (W/g)

	炉心3段目下	炉心3段目中	炉心2段目下	炉心2段目中	炉心1段目下	炉心1段目中	可反2段目下	可反2段目中	可反1段目下	可反1段目中
Neutron-1	7.704E-05	1.003E-04	1.283E-04	1.448E-04	1.518E-04	1.305E-04	4.587E-05	5.107E-06	7.158E-07	1.323E-07
2	1.282E-04	1.667E-04	2.141E-04	2.418E-04	2.545E-04	2.202E-04	7.778E-05	6.588E-06	7.158E-07	1.043E-07
3	2.220E-03	2.899E-03	3.716E-03	4.203E-03	4.417E-03	3.824E-03	1.289E-03	9.661E-05	9.138E-06	1.179E-06
4	1.979E-04	2.593E-04	3.308E-04	3.750E-04	3.926E-04	3.393E-04	1.229E-04	1.094E-05	1.032E-06	1.246E-07
5	1.593E-04	2.090E-04	2.659E-04	3.018E-04	3.152E-04	2.721E-04	1.027E-04	1.010E-05	9.631E-07	1.141E-07
6	1.040E-04	1.366E-04	1.734E-04	1.970E-04	2.054E-04	1.771E-04	6.834E-05	7.225E-06	6.992E-07	8.254E-08
7	4.374E-05	5.751E-05	7.285E-05	8.281E-05	8.618E-05	7.421E-05	2.932E-05	3.325E-06	3.273E-07	3.871E-08
8	4.348E-05	5.721E-05	7.233E-05	8.225E-05	8.545E-05	7.345E-05	2.963E-05	3.598E-06	3.608E-07	4.288E-08
9	5.576E-05	7.348E-05	9.258E-05	1.053E-04	1.091E-04	9.338E-05	3.859E-05	5.249E-06	5.470E-07	6.599E-08
10	1.397E-05	1.842E-05	2.312E-05	2.630E-05	2.714E-05	2.312E-05	9.936E-06	1.533E-06	1.673E-07	2.061E-08
11	6.587E-06	8.687E-06	1.087E-05	1.236E-05	1.271E-05	1.077E-05	4.791E-06	8.299E-07	9.510E-08	1.199E-08
12	1.892E-05	2.230E-05	2.783E-05	3.162E-05	3.242E-05	2.732E-05	1.252E-05	2.407E-06	2.903E-07	3.755E-08
13	2.369E-06	3.120E-06	3.883E-06	4.408E-06	4.506E-06	3.777E-06	1.779E-06	3.753E-07	4.774E-08	6.348E-09
14	7.848E-07	1.033E-06	1.282E-06	1.454E-06	1.481E-06	1.235E-06	5.971E-07	1.371E-07	1.841E-08	2.520E-09
15	2.988E-07	3.930E-07	4.865E-07	5.509E-07	5.594E-07	4.643E-07	2.301E-07	5.707E-08	8.098E-09	1.142E-09
16	1.608E-07	2.112E-07	2.606E-07	2.945E-07	2.977E-07	2.457E-07	1.256E-07	3.402E-08	5.175E-09	7.583E-10
17	6.212E-08	8.147E-08	1.001E-07	1.128E-07	1.135E-07	9.319E-08	4.969E-08	1.473E-08	2.399E-09	3.654E-10
18	1.917E-08	2.509E-08	3.072E-08	3.453E-08	3.458E-08	2.827E-08	1.599E-08	5.230E-09	9.116E-10	1.442E-10
19	6.853E-09	8.951E-09	1.093E-08	1.225E-08	1.223E-08	9.969E-09	5.903E-09	2.101E-09	3.914E-10	6.431E-11
20	2.032E-09	2.649E-09	3.225E-09	3.606E-09	3.586E-09	2.919E-09	1.758E-09	6.605E-10	1.296E-10	2.191E-11
21	1.923E-08	2.379E-08	2.621E-08	2.700E-08	2.524E-08	2.166E-08	2.332E-08	2.261E-08	1.413E-08	6.202E-09
Gamma-1	6.680E-05	8.065E-05	1.023E-04	1.150E-04	1.227E-04	1.126E-04	5.640E-05	2.783E-05	7.935E-05	2.193E-04
2	1.149E-03	1.389E-03	1.785E-03	2.016E-03	2.167E-03	1.976E-03	8.679E-04	1.763E-04	1.267E-04	2.674E-04
3	9.285E-03	1.142E-02	1.418E-02	1.573E-02	1.637E-02	1.460E-02	7.953E-03	3.758E-03	2.140E-03	1.072E-03
4	9.934E-03	1.217E-02	1.547E-02	1.736E-02	1.836E-02	1.634E-02	6.397E-03	9.816E-04	3.183E-04	1.719E-04
5	1.996E-02	2.424E-02	3.118E-02	3.507E-02	3.755E-02	3.384E-02	1.331E-02	1.977E-03	6.800E-04	3.420E-04
6	3.509E-02	4.223E-02	5.456E-02	6.125E-02	6.547E-02	5.936E-02	2.321E-02	2.534E-03	7.015E-04	5.724E-04
7	4.976E-02	5.938E-02	7.555E-02	8.543E-02	9.071E-02	8.208E-02	5.283E-02	1.443E-02	3.943E-03	2.434E-03
SUM	0.13	0.15	0.20	0.22	0.24	0.21	0.11	0.02	0.01	0.01

表 2-3(4) Fe の発熱量 (W/g)

	炉心3段目下	炉心3段目中	炉心2段目下	炉心2段目中	炉心1段目下	炉心1段目中	可反2段目下	可反2段目中	可反1段目下	可反1段目中
Neutron-1	1.284E-04	1.672E-04	2.139E-04	2.413E-04	2.529E-04	2.175E-04	7.646E-05	8.511E-06	1.193E-06	2.205E-07
2	1.282E-04	1.667E-04	2.141E-04	2.418E-04	2.545E-04	2.202E-04	7.778E-05	6.588E-06	7.158E-07	1.043E-07
3	2.053E-04	2.681E-04	3.437E-04	3.888E-04	4.086E-04	3.537E-04	1.192E-04	8.936E-06	8.453E-07	1.090E-07
4	2.073E-04	2.717E-04	3.465E-04	3.929E-04	4.112E-04	3.555E-04	1.287E-04	1.146E-05	1.081E-06	1.305E-07
5	1.394E-04	1.829E-04	2.327E-04	2.641E-04	2.758E-04	2.381E-04	8.985E-05	8.838E-06	8.427E-07	9.982E-08
6	1.040E-04	1.366E-04	1.734E-04	1.970E-04	2.054E-04	1.771E-04	6.834E-05	7.225E-06	6.992E-07	8.254E-08
7	5.248E-05	6.901E-05	8.742E-05	9.937E-05	1.034E-04	8.905E-05	3.518E-05	3.990E-06	3.928E-07	4.645E-08
8	3.281E-05	4.318E-05	5.459E-05	6.208E-05	6.449E-05	5.543E-05	2.236E-05	2.715E-06	2.723E-07	3.236E-08
9	2.927E-05	3.858E-05	4.860E-05	5.529E-05	5.726E-05	4.902E-05	2.026E-05	2.756E-06	2.872E-07	3.464E-08
10	2.793E-05	3.683E-05	4.623E-05	5.260E-05	5.427E-05	4.623E-05	1.987E-05	3.066E-06	3.346E-07	4.121E-08
11	4.296E-06	5.665E-06	7.089E-06	8.061E-06	8.291E-06	7.024E-06	3.125E-06	5.412E-07	6.202E-08	7.819E-09
12	4.653E-06	6.134E-06	7.653E-06	8.698E-06	8.916E-06	7.513E-06	3.444E-06	6.618E-07	7.983E-08	1.033E-08
13	1.533E-06	2.019E-06	2.513E-06	2.852E-06	2.916E-06	2.444E-06	1.151E-06	2.428E-07	3.089E-08	4.108E-09
14	6.609E-07	8.700E-07	1.080E-06	1.224E-06	1.248E-06	1.040E-06	5.028E-07	1.154E-07	1.550E-08	2.122E-09
15	2.581E-07	3.394E-07	4.201E-07	4.758E-07	4.832E-07	4.010E-07	1.988E-07	4.929E-08	6.994E-09	9.859E-10
16	1.011E-07	1.328E-07	1.639E-07	1.852E-07	1.872E-07	1.545E-07	7.899E-08	2.140E-08	3.254E-09	4.768E-10
17	4.300E-08	5.640E-08	6.931E-08	7.811E-08	7.859E-08	6.452E-08	3.440E-08	1.020E-08	1.661E-09	2.530E-10
18	1.474E-08	1.930E-08	2.363E-08	2.656E-08	2.660E-08	2.175E-08	1.230E-08	4.023E-09	7.012E-10	1.110E-10
19	5.071E-09	6.624E-09	8.087E-09	9.068E-09	9.047E-09	7.377E-09	4.368E-09	1.554E-09	2.896E-10	4.759E-11
20	1.497E-09	1.952E-09	2.376E-09	2.657E-09	2.643E-09	2.151E-09	1.296E-09	4.867E-10	9.548E-11	1.615E-11
21	1.325E-08	1.640E-08	1.806E-08	1.861E-08	1.739E-08	1.493E-08	1.607E-08	1.558E-08	9.740E-09	4.275E-09
Gamma-1	8.603E-05	1.042E-04	1.321E-04	1.485E-04	1.585E-04	1.455E-04	7.285E-05	3.595E-05	1.025E-04	2.833E-04
2	1.229E-03	1.485E-03	1.908E-03	2.155E-03	2.317E-03	2.113E-03	9.278E-04	1.884E-04	1.355E-04	2.858E-04
3	9.012E-03	1.108E-02	1.376E-02	1.527E-02	1.588E-02	1.417E-02	7.719E-03	3.647E-03	2.077E-03	1.041E-03
4	1.019E-02	1.249E-02	1.588E-02	1.781E-02	1.885E-02	1.677E-02	6.565E-03	1.007E-03	3.267E-04	1.765E-04
5	1.881E-02	2.284E-02	2.938E-02	3.305E-02	3.539E-02	3.188E-02	1.254E-02	1.863E-03	6.407E-04	3.223E-04
6	3.464E-02	4.169E-02	5.386E-02	6.047E-02	6.463E-02	5.860E-02	2.291E-02	2.501E-03	6.925E-04	5.650E-04
7	5.635E-02	6.725E-02	8.556E-02	9.676E-02	1.027E-01	9.295E-02	5.983E-02	1.635E-02	4.466E-03	2.757E-03
SUM	0.13	0.16	0.20	0.23	0.24	0.22	0.11	0.03	0.01	0.01

表 2-3(5) Ni の発熱量 (W/g)

	炉心3段目下	炉心3段目中	炉心2段目下	炉心2段目中	炉心1段目下	炉心1段目中	可反2段目下	可反2段目中	可反1段目下	可反1段目中
Neutron-1	4.04E-04	5.26E-04	6.73E-04	7.60E-04	7.96E-04	6.85E-04	2.40E-04	2.68E-05	3.75E-06	6.94E-07
2	5.30E-04	6.89E-04	8.86E-04	1.00E-03	1.05E-03	9.12E-04	3.21E-04	2.72E-05	2.96E-06	4.31E-07
3	3.84E-04	5.07E-04	6.50E-04	7.35E-04	7.73E-04	6.69E-04	2.25E-04	1.69E-05	1.59E-06	2.06E-07
4	2.16E-04	2.84E-04	3.62E-04	4.10E-04	4.29E-04	3.71E-04	1.34E-04	1.19E-05	1.13E-06	1.36E-07
5	1.59E-04	2.09E-04	2.65E-04	3.01E-04	3.15E-04	2.72E-04	1.02E-04	1.01E-05	9.63E-07	1.14E-07
6	1.04E-04	1.36E-04	1.73E-04	1.97E-04	2.05E-04	1.77E-04	6.83E-05	7.22E-06	6.99E-07	8.25E-08
7	6.29E-05	8.21E-05	1.04E-04	1.19E-04	1.24E-04	1.06E-04	4.22E-05	4.78E-06	4.71E-07	5.57E-08
8	2.62E-05	3.45E-05	4.36E-05	4.96E-05	5.15E-05	4.43E-05	1.78E-05	2.17E-06	2.17E-07	2.58E-08
9	2.92E-05	3.85E-05	4.86E-05	5.52E-05	5.72E-05	4.90E-05	2.02E-05	2.75E-06	2.87E-07	3.46E-08
10	3.08E-05	4.07E-05	5.11E-05	5.81E-05	5.99E-05	5.11E-05	2.19E-05	3.38E-06	3.69E-07	4.55E-08
11	2.84E-05	3.77E-05	4.72E-05	5.37E-05	5.52E-05	4.68E-05	2.08E-05	3.60E-06	4.13E-07	5.21E-08
12	7.32E-06	9.66E-06	1.20E-05	1.37E-05	1.40E-05	1.18E-05	5.42E-06	1.04E-06	1.25E-07	1.62E-08
13	2.92E-06	3.85E-06	4.79E-06	5.44E-06	5.56E-06	4.66E-06	2.19E-06	4.63E-07	5.89E-08	7.84E-09
14	9.77E-07	1.28E-06	1.59E-06	1.81E-06	1.84E-06	1.53E-06	7.43E-07	1.70E-07	2.29E-08	3.13E-09
15	3.12E-07	4.10E-07	5.08E-07	5.75E-07	5.84E-07	4.85E-07	2.40E-07	5.96E-08	8.46E-09	1.19E-09
16	1.26E-07	1.65E-07	2.04E-07	2.30E-07	2.33E-07	1.92E-07	9.84E-08	2.66E-08	4.05E-09	5.94E-10
17	4.14E-08	5.43E-08	6.67E-08	7.52E-08	7.56E-08	6.21E-08	3.31E-08	9.82E-09	1.60E-09	2.43E-10
18	1.25E-08	1.64E-08	2.00E-08	2.25E-08	2.26E-08	1.84E-08	1.04E-08	3.41E-09	5.96E-10	9.43E-11
19	3.83E-09	5.01E-09	6.12E-09	6.86E-09	6.84E-09	5.58E-09	3.30E-09	1.17E-09	2.19E-10	3.60E-11
20	1.01E-09	1.32E-09	1.61E-09	1.80E-09	1.79E-09	1.46E-09	8.79E-10	3.30E-10	6.47E-11	1.09E-11
21	8.31E-09	1.02E-08	1.13E-08	1.18E-08	1.09E-08	9.36E-09	1.00E-08	9.77E-09	6.11E-09	2.68E-09
Gamma-1	8.89E-05	1.07E-04	1.36E-04	1.53E-04	1.63E-04	1.50E-04	7.52E-05	3.71E-05	1.05E-04	2.92E-04
2	1.28E-03	1.53E-03	1.97E-03	2.22E-03	2.39E-03	2.18E-03	9.57E-04	1.94E-04	1.39E-04	2.95E-04
3	9.58E-03	1.17E-02	1.46E-02	1.62E-02	1.68E-02	1.50E-02	8.18E-03	3.80E-03	2.20E-03	1.10E-03
4	1.04E-02	1.28E-02	1.62E-02	1.82E-02	1.93E-02	1.72E-02	6.73E-03	1.03E-03	3.35E-04	1.81E-04
5	1.91E-02	2.31E-02	2.99E-02	3.37E-02	3.61E-02	3.25E-02	1.28E-02	1.90E-03	6.53E-04	3.28E-04
6	3.54E-02	4.27E-02	5.52E-02	6.20E-02	6.63E-02	6.01E-02	2.35E-02	2.56E-03	7.10E-04	5.79E-04
7	5.81E-02	6.93E-02	8.82E-02	9.98E-02	1.06E-01	9.59E-02	6.17E-02	1.68E-02	4.60E-03	2.84E-03
SUM	0.14	0.16	0.21	0.24	0.25	0.23	0.12	0.03	0.01	0.01

表 2-3(6) Zr の発熱量 (W/g)

	炉心3段目下	炉心3段目中	炉心2段目下	炉心2段目中	炉心1段目下	炉心1段目中	可反2段目下	可反2段目中	可反1段目下	可反1段目中
Neutron-1	2.183E-05	2.842E-05	3.636E-05	4.101E-05	4.300E-05	3.698E-05	1.300E-05	1.447E-06	2.028E-07	3.748E-08
2	4.419E-05	6.748E-05	7.383E-05	8.337E-05	8.775E-05	7.593E-05	2.682E-05	2.272E-06	2.468E-07	3.598E-08
3	7.214E-05	9.421E-05	1.208E-04	1.366E-04	1.436E-04	1.243E-04	4.188E-05	3.140E-06	2.970E-07	3.831E-08
4	8.293E-05	1.087E-04	1.386E-04	1.572E-04	1.645E-04	1.422E-04	5.148E-05	4.584E-06	4.324E-07	5.219E-08
5	6.969E-05	9.144E-05	1.163E-04	1.320E-04	1.379E-04	1.191E-04	4.493E-05	4.419E-06	4.214E-07	4.991E-08
6	5.484E-05	7.204E-05	9.144E-05	1.039E-04	1.083E-04	9.339E-05	3.603E-05	3.809E-06	3.687E-07	4.352E-08
7	4.111E-05	5.406E-05	6.848E-05	7.784E-05	8.101E-05	6.975E-05	2.756E-05	3.125E-06	3.077E-07	3.639E-08
8	3.199E-05	4.210E-05	5.322E-05	6.052E-05	6.288E-05	5.405E-05	2.181E-05	2.647E-06	2.655E-07	3.155E-08
9	2.649E-05	3.490E-05	4.397E-05	5.003E-05	5.180E-05	4.435E-05	1.833E-05	2.493E-06	2.598E-07	3.134E-08
10	1.132E-05	1.493E-05	1.874E-05	2.132E-05	2.200E-05	1.874E-05	8.053E-06	1.243E-06	1.356E-07	1.670E-08
11	4.296E-06	5.665E-06	7.089E-06	8.061E-06	8.291E-06	7.024E-06	3.125E-06	5.412E-07	6.202E-08	7.819E-09
12	1.410E-06	1.859E-06	2.319E-06	2.635E-06	2.702E-06	2.277E-06	1.044E-06	2.008E-07	2.419E-08	3.129E-09
13	5.991E-07	7.893E-07	9.822E-07	1.115E-06	1.140E-06	9.552E-07	4.500E-07	9.493E-08	1.208E-08	1.606E-09
14	2.478E-07	3.263E-07	4.049E-07	4.592E-07	4.678E-07	3.901E-07	1.886E-07	4.328E-08	5.814E-09	7.956E-10
15	1.331E-07	1.751E-07	2.167E-07	2.454E-07	2.492E-07	2.088E-07	1.025E-07	2.542E-08	3.607E-09	5.085E-10
16	7.792E-08	1.024E-07	1.263E-07	1.427E-07	1.442E-07	1.190E-07	6.086E-08	1.649E-08	2.507E-09	3.674E-10
17	3.663E-08	4.804E-08	5.904E-08	6.654E-08	6.694E-08	5.498E-08	2.931E-08	8.688E-09	1.415E-09	2.155E-10
18	1.622E-08	2.123E-08	2.600E-08	2.922E-08	2.926E-08	2.392E-08	1.353E-08	4.425E-09	7.714E-10	1.221E-10
19	7.127E-09	9.309E-09	1.137E-08	1.274E-08	1.271E-08	1.037E-08	6.139E-09	2.185E-09	4.071E-10	6.688E-11
20	2.674E-09	3.486E-09	4.243E-09	4.745E-09	4.719E-09	3.841E-09	2.314E-09	8.691E-10	1.705E-10	2.883E-11
21	3.119E-08	3.858E-08	4.250E-08	4.378E-08	4.093E-08	3.513E-08	3.782E-08	3.667E-08	2.292E-08	1.006E-08
Gamma-1	7.770E-05	9.409E-05	1.193E-04	1.342E-04	1.431E-04	1.314E-04	6.580E-05	3.247E-05	9.257E-05	2.559E-04
2	1.229E-03	1.485E-03	1.908E-03	2.155E-03	2.317E-03	2.113E-03	9.278E-04	1.884E-04	1.355E-04	2.858E-04
3	9.285E-03	1.142E-02	1.418E-02	1.573E-02	1.637E-02	1.460E-02	7.953E-03	3.758E-03	2.140E-03	1.072E-03
4	9.411E-03	1.153E-02	1.466E-02	1.644E-02	1.740E-02	1.548E-02	6.060E-03	9.300E-04	3.015E-04	1.629E-04
5	1.574E-02	1.911E-02	2.459E-02	2.765E-02	2.961E-02	2.668E-02	1.050E-02	1.559E-03	5.361E-04	2.697E-04
6	2.609E-02	3.140E-02	4.057E-02	4.555E-02	4.868E-02	4.414E-02	1.726E-02	1.884E-03	5.216E-04	4.256E-04
7	5.216E-02	6.224E-02	7.919E-02	8.955E-02	9.508E-02	8.603E-02	5.537E-02	1.513E-02	4.133E-03	2.552E-03
SUM	0.11	0.14	0.18	0.20	0.21	0.19	0.10	0.02	0.01	0.01

表 2-3(7) Al の発熱量 (W/g)

	炉心3段目下	炉心3段目中	炉心2段目下	炉心2段目中	炉心1段目下	炉心1段目中	可反2段目下	可反2段目中	可反1段目下	可反1段目中
Neutron-1	3.916E-04	5.098E-04	6.523E-04	7.358E-04	7.715E-04	6.634E-04	2.332E-04	2.596E-05	3.639E-06	6.725E-07
2	3.315E-04	4.311E-04	5.537E-04	6.253E-04	6.581E-04	5.695E-04	2.012E-04	1.704E-05	1.851E-06	2.699E-07
3	6.104E-04	7.972E-04	1.022E-03	1.156E-03	1.215E-03	1.052E-03	3.544E-04	2.657E-05	2.513E-06	3.241E-07
4	6.973E-04	9.138E-04	1.166E-03	1.321E-03	1.383E-03	1.196E-03	4.329E-04	3.855E-05	3.636E-06	4.399E-07
5	5.973E-04	7.838E-04	9.971E-04	1.132E-03	1.182E-03	1.021E-03	3.851E-04	3.788E-05	3.612E-06	4.278E-07
6	4.538E-04	5.962E-04	7.568E-04	8.597E-04	8.963E-04	7.728E-04	2.982E-04	3.153E-05	3.051E-06	3.602E-07
7	2.362E-04	3.106E-04	3.934E-04	4.472E-04	4.654E-04	4.007E-04	1.583E-04	1.795E-05	1.768E-06	2.090E-07
8	1.969E-04	2.591E-04	3.275E-04	3.725E-04	3.869E-04	3.326E-04	1.342E-04	1.629E-05	1.634E-06	1.942E-07
9	1.812E-04	2.388E-04	3.009E-04	3.423E-04	3.544E-04	3.035E-04	1.254E-04	1.706E-05	1.778E-06	2.145E-07
10	3.675E-05	4.847E-05	6.084E-05	6.921E-05	7.141E-05	6.083E-05	2.615E-05	4.035E-06	4.403E-07	5.423E-08
11	5.728E-06	7.554E-06	9.462E-06	1.075E-05	1.105E-05	9.365E-06	4.166E-06	7.216E-07	8.269E-08	1.043E-08
12	3.102E-06	4.089E-06	5.102E-06	5.798E-06	5.944E-06	5.009E-06	2.296E-06	4.412E-07	5.322E-08	6.884E-09
13	1.393E-06	1.836E-06	2.284E-06	2.593E-06	2.651E-06	2.222E-06	1.046E-06	2.208E-07	2.808E-08	3.734E-09
14	5.645E-07	7.431E-07	9.223E-07	1.046E-06	1.086E-06	8.886E-07	4.295E-07	9.859E-08	1.324E-08	1.812E-09
15	2.581E-07	3.394E-07	4.201E-07	4.758E-07	4.832E-07	4.010E-07	1.988E-07	4.929E-08	6.994E-09	9.869E-10
16	1.359E-07	1.786E-07	2.203E-07	2.489E-07	2.517E-07	2.077E-07	1.062E-07	2.876E-08	4.375E-09	6.410E-10
17	5.574E-08	7.311E-08	8.985E-08	1.013E-07	1.019E-07	8.364E-08	4.460E-08	1.322E-08	2.153E-09	3.280E-10
18	2.212E-08	2.895E-08	3.545E-08	3.984E-08	3.990E-08	3.262E-08	1.845E-08	6.034E-09	1.052E-09	1.664E-10
19	8.909E-09	1.164E-08	1.421E-08	1.593E-08	1.589E-08	1.296E-08	7.674E-09	2.731E-09	5.088E-10	8.360E-11
20	2.995E-09	3.904E-09	4.752E-09	5.314E-09	5.285E-09	4.302E-09	2.591E-09	9.733E-10	1.910E-10	3.229E-11
21	3.119E-08	3.858E-08	4.250E-08	4.378E-08	4.093E-08	3.513E-08	3.782E-08	3.667E-08	2.292E-08	1.006E-08
Gamma-1	6.105E-05	7.393E-05	9.377E-05	1.054E-04	1.125E-04	1.033E-04	5.170E-05	2.551E-05	7.273E-05	2.011E-04
2	9.512E-04	1.150E-03	1.477E-03	1.668E-03	1.794E-03	1.636E-03	7.183E-04	1.459E-04	1.049E-04	2.213E-04
3	7.647E-03	9.401E-03	1.168E-02	1.296E-02	1.348E-02	1.203E-02	6.549E-03	3.095E-03	1.762E-03	8.831E-04
4	9.149E-03	1.121E-02	1.425E-02	1.599E-02	1.691E-02	1.505E-02	5.892E-03	9.041E-04	2.932E-04	1.584E-04
5	1.650E-02	2.005E-02	2.579E-02	2.900E-02	3.105E-02	2.798E-02	1.101E-02	1.635E-03	5.623E-04	2.828E-04
6	2.789E-02	3.357E-02	4.337E-02	4.869E-02	5.204E-02	4.718E-02	1.845E-02	2.014E-03	5.576E-04	4.550E-04
7	5.575E-02	6.653E-02	8.465E-02	9.573E-02	1.016E-01	9.197E-02	5.919E-02	1.617E-02	4.419E-03	2.728E-03
SUM	0.12	0.15	0.19	0.21	0.22	0.20	0.10	0.02	0.01	0.00

表 2-3(8) Si の発熱量 (W/g)

	炉心3段目下	炉心3段目中	炉心2段目下	炉心2段目中	炉心1段目下	炉心1段目中	可反2段目下	可反2段目中	可反1段目下	可反1段目中
Neutron-1	6.291E-04	8.191E-04	1.048E-03	1.182E-03	1.239E-03	1.066E-03	3.746E-04	4.170E-05	5.846E-06	1.080E-06
2	3.536E-04	4.599E-04	5.907E-04	6.670E-04	7.020E-04	6.075E-04	2.146E-04	1.817E-05	1.975E-06	2.878E-07
3	5.549E-04	7.247E-04	9.289E-04	1.051E-03	1.104E-03	9.560E-04	3.222E-04	2.415E-05	2.285E-06	2.947E-07
4	7.727E-04	1.013E-03	1.292E-03	1.464E-03	1.533E-03	1.325E-03	4.797E-04	4.272E-05	4.029E-06	4.864E-07
5	5.973E-04	7.838E-04	9.971E-04	1.132E-03	1.182E-03	1.021E-03	3.851E-04	3.788E-05	3.612E-06	4.278E-07
6	3.971E-04	5.216E-04	6.622E-04	7.522E-04	7.843E-04	6.762E-04	2.609E-04	2.758E-05	2.670E-06	3.152E-07
7	2.449E-04	3.221E-04	4.080E-04	4.637E-04	4.826E-04	4.155E-04	1.642E-04	1.862E-05	1.833E-06	2.168E-07
8	2.461E-04	3.239E-04	4.094E-04	4.656E-04	4.837E-04	4.157E-04	1.677E-04	2.036E-05	2.042E-06	2.427E-07
9	5.437E-05	7.165E-05	9.026E-05	1.027E-04	1.063E-04	9.104E-05	3.763E-05	5.118E-06	5.334E-07	6.434E-08
10	2.205E-05	2.908E-05	3.650E-05	4.153E-05	4.285E-05	3.650E-05	1.569E-05	2.421E-06	2.642E-07	3.254E-08
11	1.146E-05	1.511E-05	1.890E-05	2.150E-05	2.211E-05	1.873E-05	8.333E-06	1.443E-06	1.654E-07	2.085E-08
12	3.807E-06	5.018E-06	6.262E-06	7.115E-06	7.295E-06	6.147E-06	2.818E-06	5.415E-07	6.531E-08	8.449E-09
13	1.393E-06	1.836E-06	2.284E-06	2.593E-06	2.651E-06	2.222E-06	1.046E-06	2.208E-07	2.808E-08	3.734E-09
14	5.921E-07	7.794E-07	9.673E-07	1.097E-06	1.118E-06	9.320E-07	4.505E-07	1.034E-07	1.389E-08	1.901E-09
15	2.852E-07	3.751E-07	4.644E-07	5.258E-07	5.340E-07	4.432E-07	2.197E-07	5.448E-08	7.730E-09	1.090E-09
16	1.575E-07	2.069E-07	2.552E-07	2.884E-07	2.916E-07	2.406E-07	1.230E-07	3.332E-08	5.068E-09	7.426E-10
17	6.849E-08	8.982E-08	1.104E-07	1.244E-07	1.252E-07	1.028E-07	5.479E-08	1.624E-08	2.646E-09	4.029E-10
18	2.801E-08	3.667E-08	4.490E-08	5.047E-08	5.054E-08	4.132E-08	2.337E-08	7.643E-09	1.332E-09	2.108E-10
19	1.179E-08	1.540E-08	1.880E-08	2.107E-08	2.103E-08	1.715E-08	1.015E-08	3.613E-09	6.732E-10	1.106E-10
20	4.171E-09	5.438E-09	6.619E-09	7.402E-09	7.361E-09	5.992E-09	3.609E-09	1.356E-09	2.660E-10	4.498E-11
21	4.418E-08	5.466E-08	6.021E-08	6.203E-08	5.798E-08	4.977E-08	5.358E-08	5.195E-08	3.247E-08	1.425E-08
Gamma-1	6.660E-05	8.065E-05	1.023E-04	1.150E-04	1.227E-04	1.126E-04	5.640E-05	2.783E-05	7.935E-05	2.193E-04
2	1.030E-03	1.246E-03	1.601E-03	1.807E-03	1.943E-03	1.772E-03	7.781E-04	1.580E-04	1.136E-04	2.397E-04
3	8.193E-03	1.007E-02	1.251E-02	1.388E-02	1.444E-02	1.289E-02	7.017E-03	3.316E-03	1.888E-03	9.462E-04
4	9.672E-03	1.185E-02	1.506E-02	1.690E-02	1.788E-02	1.591E-02	6.229E-03	9.558E-04	3.099E-04	1.674E-04
5	1.727E-02	2.098E-02	2.699E-02	3.035E-02	3.250E-02	2.928E-02	1.152E-02	1.711E-03	5.884E-04	2.960E-04
6	2.879E-02	3.465E-02	4.477E-02	5.026E-02	5.372E-02	4.870E-02	1.904E-02	2.079E-03	5.756E-04	4.697E-04
7	5.755E-02	6.868E-02	8.738E-02	9.881E-02	1.049E-01	9.493E-02	6.110E-02	1.669E-02	4.561E-03	2.816E-03
SUM	0.13	0.15	0.19	0.22	0.23	0.21	0.11	0.03	0.01	0.01



表 2-4 材料番号一覧表

番 号	材 料
①	燃料体
②	制御棒案内ブロック (制御棒あり)
③	制御棒案内ブロック (制御棒なし)
④	可動反射体 A : 燃料体カラム
⑤	可動反射体 B : 下部
⑥	可動反射体 C : 側部
⑦	上部遮蔽体 A (SUS) : 燃料体カラム
⑧	上部遮蔽体 B (SUS) : 制御カラム
⑨	上部遮蔽体 C (SUS) : 可動反射体カラム
⑩	上部遮蔽体 A (B <sub>4</sub> C) : 燃料体カラム
⑪	上部遮蔽体 B (B <sub>4</sub> C) : 制御カラム
⑫	上部遮蔽体 C (B <sub>4</sub> C) : 可動反射体カラム
⑬	固定反射体
⑭	シール用高温プレナムブロック
⑮	キー結合用高温プレナムブロック
⑯	高温プレナム下部ブロック
⑰	断熱ブロック
⑱	下端ブロック
⑲	炉心支持板
⑳	炉心支持格子
㉑	側部遮蔽体 (SUS)
㉒	側部遮蔽体 (B <sub>4</sub> C)
㉓	圧力容器内管
㉔	圧力容器
㉕	冷却材 (脚)
㉖	冷却材

表 2-5(1) 材料番号 1 ~ 6 に対する等価熱伝導率 (kcal/mh °C)

温度	①		② 制御棒案内 ブロック (制御棒あり)	③ 制御棒案内 ブロック (制御棒なし)	④		⑤ 可動反射体 B : 下部	⑥ 可動反射体 C : 側部
	燃料体				可動反射体A : 燃料体カラム			
	水	垂 直			水	垂 直		
100 °C	594.5	73.66	68.99	66.83	501.1	86.38	85.64	97.44
200	524.9	65.19	61.16	59.01	442.4	76.27	75.61	86.03
300	466.4	58.08	54.58	52.43	393.1	67.77	67.18	76.44
400	417.6	52.14	49.09	46.94	352.0	60.67	60.15	68.44
500	377.0	47.20	44.53	42.38	317.8	54.78	54.31	61.79
600	343.4	43.11	40.75	38.60	289.4	49.89	49.47	56.28
700	315.6	39.73	37.63	35.48	266.0	45.86	45.47	51.73
800	292.7	36.94	35.05	32.90	246.7	42.53	42.16	47.97
900	273.8	34.64	32.93	30.78	230.8	39.32	39.44	44.87
1000	258.2	32.74	31.17	29.02	217.6	37.51	37.19	42.31
1100	245.3	31.18	29.72	27.57	206.7	35.64	35.33	40.20
1200	234.7	29.88	28.53	26.38	197.8	34.10	33.80	38.46
1300	226.0	28.83	27.56	25.41	190.5	32.84	32.56	37.04

表 2-5(2) 材料番号 7~13 に対する等価熱伝導率 (kcal/mh °C)

温度	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	
	上部遮蔽体 A (SUS) ; 燃料体カラム	上部遮蔽体 B (SUS) ; 制御カラム	上部遮蔽体 C (SUS) ; 可動 反射体カラム	上部遮蔽体 A (B <sub>4</sub> C) ; 燃料体カラム	上部遮蔽体 B (B <sub>4</sub> C) ; 制御カラム	上部遮蔽体 C (B <sub>4</sub> C) ; 可動 反射体カラム	固定	反射体
	水	平	垂	直	水	平	垂	
100 °C	12.37	9.57	13.95	20.0	15.3	22.7	83.96	74.52
200	13.59	10.52	15.33	→	→	→	76.91	67.54
300	14.77	11.44	16.66	→	→	→	70.53	61.34
400	15.89	12.30	17.92	→	→	→	64.77	55.86
500	16.97	13.14	19.13	→	→	→	59.62	51.06
600	—	—	—	—	—	—	55.03	46.88
700	—	—	—	—	—	—	50.97	43.29
800	—	—	—	—	—	—	47.42	40.23
900	—	—	—	—	—	—	44.35	37.65
1000	—	—	—	—	—	—	41.71	35.51
1100	—	—	—	—	—	—	39.48	33.75
1200	—	—	—	—	—	—	37.63	32.32
1300	—	—	—	—	—	—	36.13	31.19

表 2-5(3) 材料番号 14~19 に対する等価熱伝導率 (kcal/mh °C)

温度	⑭		⑮		⑯	⑰	⑱	⑲
	シール用高温プレナムブロック		キ結合用高温プレナムブロック					
	水	平	垂	直	水	平	垂	直
100 °C	77.84	76.76	76.84	75.92	⑳固定反射体 と同じ	7.46	㉑固定反射体 と同じ	31.74
200	71.30	69.57	70.52	68.80		7.88		31.92
300	65.39	63.18	64.67	62.49		8.24		31.53
400	60.05	57.53	59.39	56.90		8.55		30.57
500	55.27	52.59	54.67	52.02		8.81		29.02
600	51.02	48.29	50.46	47.76		9.03		-
700	47.25	44.59	46.73	44.10		9.21		-
800	43.96	41.44	43.48	40.99		9.36		-
900	41.12	38.79	40.66	38.36		9.47		-
1000	38.67	36.57	38.24	36.17		9.56		-
1100	36.60	34.77	36.20	34.38		9.62		-
1200	34.89	33.30	34.50	32.93		9.67		-
1300	33.50	32.12	33.13	31.77		9.71		-

表 2-5(4) 材料番号 20~26 に対する等価熱伝導率 (kcal/mh °C)

温度	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖
	炉心支持 格子	側部遮蔽体 (SUS)	側部遮蔽体 (B <sub>4</sub> C)	压力容器 内管	压力容器	冷却材(脚)	冷却材
100 °C	2.37	13.95	23.8	0.5	31.74	1.23	0.155
200	2.40	15.33	→	→	31.92	1.37	0.183
300	2.40	16.66	→	→	31.53	1.49	0.210
400	2.36	17.92	→	→	30.57	1.62	0.236
500	2.27	19.13	→	→	29.02	1.73	0.260
600	—	—	→	→	—	—	0.283
700	—	—	→	→	—	—	0.304
800	—	—	→	→	—	—	0.323
900	—	—	→	→	—	—	0.342
1000	—	—	→	→	—	—	0.360
1100	—	—	→	→	—	—	0.377
1200	—	—	→	→	—	—	0.395
1300	—	—	→	→	—	—	0.412

表 2-6(1) 材料番号 1~8 に対する比熱 (kcal/kg°C)

温度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
	燃料体	制御棒案内 ブロック (制御棒あり)	制御棒案内 ブロック (制御棒なし)	可動反射体 A: 燃料体 カラム	可動反射体 B: 下部	可動反射体 C: 側部	上部遮蔽体 A (SUS): 燃料体カラム	上部遮蔽体 B (SUS): 制御体カラム
100 °C	0. 214	0. 220	②に同じ	②に同じ	②に同じ	②に同じ	0. 120	⑦に同じ
200	0. 269	0. 278					0. 126	
300	0. 312	0. 322					0. 131	
400	0. 344	0. 356					0. 134	
500	0. 368	0. 381					0. 136	
600	0. 388	0. 401					-	
700	0. 403	0. 417					-	
800	0. 414	0. 429					-	
900	0. 425	0. 440					-	
1000	0. 432	0. 448					-	
1100	0. 440	0. 456					-	
1200	0. 466	0. 462					-	
1300	0. 451	0. 467					-	

表 2-6(2) 材料番号 9~16 に対する比熱 (kcal/kg°C)

温度	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
	上部遮蔽体 C (SUS) : 可動 反射体カラム	上部遮蔽体 A (B,C) : 燃料体カラム	上部遮蔽体 B (B,C) : 制御カラム	上部遮蔽体 C (B,C) : 可動 反射体カラム	固定反射体	シールド用 高温プレナム ブロック	キー結合用 高温プレナム ブロック	高温プレナム 下部ブロック
100 °C	⑦に同じ	0.180	0.173	0.184	②に同じ	②に同じ	②に同じ	②に同じ
200		0.218	0.207	0.223				
300		0.246	0.232	0.252				
400		0.268	0.251	0.275				
500		0.284	0.266	0.292				
600		-	-	-				
700		-	-	-				
800		-	-	-				
900		-	-	-				
1000		-	-	-				
1100		-	-	-				
1200		-	-	-				
1300		-	-	-				

表 2-6(3) 材料番号 17~24 に対する比熱 (kcal/kg°C)

	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔
	断熱 ブロック	下 端 ブロック	炉心支持板	炉心支持 格 子	側部遮蔽体 (SUS)	側部遮蔽体 (B <sub>4</sub> C)	* 圧力容器 内 管	圧力容器
温度	100 °C	②に同じ	0.112	0.118	⑦に同じ	②に同じ	0.116	⑨に同じ
	200		0.122	0.128			↓	
	300		0.132	0.138				
	400		0.143	0.149				
	500		0.156	0.162				
	600		-	-				
	700		-	-				
	800		-	-				
	900		-	-				
	1000		-	-				
	1100		-	-				
	1200		-	-				
	1300		-	-				

\*ライナー (ハイテロイ) を考える。



表 2-6(4) 材料番号 25,26 に対する比熱 (kcal/kg°C)


温度	⑫⑤ 冷却材 (脚)	⑫⑥ 冷却材						
	100 °C 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300	0. 126 0. 132 0. 137 0. 139 0. 141 — — — — — — —	1. 24 					

表 2-7 領域毎の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

領 域		密 度	領 域		密 度
①	燃料体	1879	⑭	シール用高温 プレナムブロック	1604
②	制御棒案内ブロック (制御棒あり)	1260	⑮	キー結合用高温 プレナムブロック	1586
③	制御棒案内ブロック (制御棒なし)	1194	⑯	高温プレナム 下部ブロック	1730
④	可動反射体A : 燃料体カラム	1549	⑰	断熱ブロック	1650
⑤	可動反射体B : 下部	1536	⑱	下端ブロック	1730
⑥	可動反射体C : 側部	1750	⑲	炉心支持板	7850
⑦	上部遮蔽体A (SUS) : 燃料体カラム	7020	⑳	炉心支持格子	553
⑧	上部遮蔽体B (SUS) : 制御カラム	5412	㉑	側部遮蔽体 (SUS)	7930
⑨	上部遮蔽体C (SUS) : 可動反射体カラム	7930	㉒	側部遮蔽体 (B <sub>4</sub> C)	1700
⑩	上部遮蔽体A (B <sub>4</sub> C) : 燃料体カラム	2154	㉓	圧力容器内管	341*
⑪	上部遮蔽体B (B <sub>4</sub> C) : 制御カラム	1810	㉔	圧力容器	7850
⑫	上部遮蔽体C (B <sub>4</sub> C) : 可動反射体カラム	2349	㉕	冷却材 (脚)	622
⑬	固定反射体	1730	㉖	冷却材	

\* ライナー7 mm を考える。

表 2-8(1) 流路番号 1~6 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Re数	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950°C定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
△1	自然対流程度として, h = 10 [kcal/m <sup>2</sup> h°C]	-	-	-	-	$2\pi \times 2750^2 \times 1/6$ = $7.92 \times 10^6$	h = 10
△2	熱交換しない。	-	-	-	-	-	-
△3	i) Re > 1400 $Nu = 0.019 \left(\frac{do}{di}\right)^{0.16} Re^{0.8} Pr^{0.5}$ ii) Re ≤ 1400 Nu = 5.14 di = 572, do = 680	伝熱工学資料 (第4版) P. 56 (39) 式 P. 51	do - di 108	$Re = \frac{(0.68 - 0.57) \cdot G \cdot 6}{\rho \cdot \nu \cdot \frac{\pi}{4} (0.68^2 - 0.57^2)}$ = $6.114 \frac{G}{\rho \nu}$	-	$\pi \times 680 \times 1000 \times 1/6$ = $3.56 \times 10^6$	Re = $2.39 \times 10^5$ Nu = 315 h = 688
△4	i) Re > 6000 Nu = 0.0203 Re <sup>0.789</sup> Pr <sup>0.333</sup> ii) Re ≤ 3000 Nu = 8.23 iii) 3000 < Re ≤ 6000 Nu = 8.23 (Re/3000) <sup>1.0323</sup>	GA-A12985 伝熱工学資料 (第4版) P. 51	50	$Re = \frac{0.05 \cdot G \cdot 6}{\rho \cdot \nu \cdot \pi \cdot 2.0 \cdot 0.05}$ = $0.954G / \rho \nu$	-	$\frac{\pi}{4} (4800^2 - 750^2) \times 1/6$ = $2.942 \times 10^6$	Re = $3.73 \times 10^4$ Nu = 71.0 h = 335
△5	熱交換しない。	-	-	-	-	-	-
△6*	i) Re > 6000 Nu = 0.0203 Re <sup>0.789</sup> Pr <sup>0.333</sup> ii) Re ≤ 3000 Nu = 8.23 iii) 3000 < Re ≤ 6000 Nu = 8.23 (Re/3000) <sup>1.0323</sup>	GA-A12985 伝熱工学資料 (第4版) P. 51	50	$Re = \frac{0.05 \cdot G \cdot 6}{\rho \cdot \nu \cdot 0.05 \cdot 1.14 \cdot 12}$ = $0.439G / \rho \nu$	-	$1140 \times 2450 \times 2$ = $5.586 \times 10^6$	Re = $1.07 \times 10^4$ Nu = 26.5 h = 125

\* △は内側/外側共、同じ伝熱面積とする。

表 2-8(2) 流路番号 7~12 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950℃定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h℃]
△7*	△6に同じ	△6に同じ	50	△6に同じ	1140×1160×2 =2.645×10 <sup>6</sup>	△6に同じ
△8*	△6に同じ	△6に同じ	50	△6に同じ	1140×2900×2 =6.612×10 <sup>6</sup>	Re=1.06×10 <sup>4</sup> Nu=26.3 h=124
△9*	△6に同じ	△6に同じ	50	△6に同じ	1140×1460×2 =3.329×10 <sup>6</sup>	Re=1.05×10 <sup>4</sup> Nu=26.1 h=123
△10	△6に同じ	△6に同じ	507	$Re = \frac{0.507 \cdot G \cdot 6}{\rho \cdot \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (5.5^2 - 4.97^2)}$ =0.698 G / $\rho \nu$ *流路面積は、压力容器内面と側部遮蔽体間隙から拘束バンドの分を差し引いた値を設定した。	内側 1140×7920×2 =1.806×10 <sup>7</sup> 外側 $\pi \times 5500 \times 8620 \times 1/6$ =2.482×10 <sup>7</sup>	Re=1.71×10 <sup>4</sup> Nu=38.4 h=17.9
△11	自然対流程度として, h=10 [kcal/m <sup>2</sup> h℃]	-	-	-	-	h=10
△12	i) Re>6000 Nu=0.023 Re <sup>0.8</sup> Pr <sup>0.4</sup> 但し、トリップ時は1.91倍とする。 ii) Re≤2000 Nu=4.36 iii) 2000<Re≤6000 Nu=4.36 (Re/2000) <sup>1.4041</sup>	伝熱工学資料 (第4版) P.56	370	$Re = \frac{0.37 \cdot G \cdot 6}{\rho \cdot \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.37^2}$ =20.6 G / $\rho \nu$	$\pi \times 370 \times 3680 \times 1/6$ =7.129×10 <sup>5</sup>	Re=6.71×10 <sup>5</sup> Nu=888 h=842

\* △7, △8, △9は内側/外側共、同じ伝熱面積とする。

表 2-8(3) 流路番号 13~18 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950°C定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
△ <sub>13</sub>	i) Re > 6000 Nu = 0.023 Re <sup>0.8</sup> Pr <sup>0.4</sup> ii) Re ≤ 2000 Nu = 4.36 iii) 2000 < Re ≤ 6000 Nu = 4.36 (Re/2000) <sup>1.4041</sup>	伝熱工学資料 (第4版) P.56	123	$Re = \frac{0.123 \cdot G \cdot 0.5 \cdot 6}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.123^2}$ = 31.06G / $\rho \nu$	$\pi \times 123 \times 1460 \times 2$ $\times 1/6$ = 1.881 × 10 <sup>5</sup>	Re = 5470 Nu = 17.9 h = 34.4
△ <sub>14</sub>	i) Re > 6000 Nu = 0.023 Re <sup>0.8</sup> Pr <sup>0.4</sup> ii) Re ≤ 2000 Nu = 4.36 iii) 2000 < Re ≤ 6000 Nu = 4.36 (Re/2000) <sup>1.4041</sup>	伝熱工学資料 (第4版) P.56	23	$Re = \frac{0.023 \cdot G \cdot 2}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.023^2 \times 33}$ = 3.355G / $\rho \nu$	$\pi \times 23 \times 1460 \times 33$ $\times 1/2$ = 1.741 × 10 <sup>6</sup>	Re = 1.64 × 10 <sup>4</sup> Nu = 45.4 h = 466
△ <sub>15</sub>	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ	23	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ
△ <sub>16</sub>	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ	123	$Re = \frac{0.123 \cdot G \cdot 0.5 \cdot 2}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.123^2}$ = 10.35G / $\rho \nu$ $Re = \frac{0.023 \cdot G}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.023^2 \times 33}$ = 1.678G / $\rho \nu$	$\pi \times 123 \times 1460 \times 2$ $\times 1/2$ = 5.642 × 10 <sup>5</sup> $\pi \times 23 \times 1460 \times 33$ = 3.481 × 10 <sup>6</sup>	Re = 6080 Nu = 20.5 h = 39.4 △ <sub>14</sub> に同じ
△ <sub>17</sub>	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ	23	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ
△ <sub>18</sub>	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ	123	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ	△ <sub>13</sub> に同じ

表 2-8(4) 流路番号 19~25 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950℃定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
19	△に同じ	△に同じ	23	$Re = \frac{0.023 \cdot G \cdot 2}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.023^2 \cdot 31}$ $= 3.571G / \rho \nu$	$\pi \times 23 \times 1460 \times 31$ $\times 1/2$ $= 1.635 \times 10^6$	Re=1.56×10 <sup>4</sup> Nu=43.7 h=448
20	△に同じ	△に同じ	23	$Re = \frac{0.023 \cdot G}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.023^2 \cdot 31}$ $= 1.786G / \rho \nu$	$\pi \times 23 \times 1460 \times 31$ $= 3.270 \times 10^6$	Re=1.54×10 <sup>4</sup> Nu=43.2 h=443
21	△に同じ	△に同じ	23	△に同じ	△に同じ	△に同じ
22	△に同じ	△に同じ	23	△に同じ	△に同じ	Re=1.55×10 <sup>4</sup> Nu=43.4 h=445
23	△に同じ	△に同じ	123	△に同じ	△に同じ	Re=5620 Nu=18.6 h=35.7
24	△に同じ	△に同じ	123	$Re = \frac{0.123 \cdot G \cdot 0.5}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.123^2}$ $= 5.176G / \rho \nu$	$\pi \times 123 \times 1460 \times 2$ $= 1.128 \times 10^6$	Re=5320 Nu=17.2 h=33.0
25	△に同じ	△に同じ	123	△に同じ	$\pi \times 123 \times 580 \times 3.5$ $\times 2 \times 1/6$ $= 2.615 \times 10^5$	Re=3640 Nu=10.1 h=28.8

表 2-8(5) 流路番号 26~31 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950℃定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h℃]
26	i) $Re > 6000$ $Nu = 0.020 \left(\frac{do}{di}\right)^{0.16} Re^{0.8} Pr^{0.4}$ ii) $Re \leq 1800$ $Nu = 5.60$ iii) $1800 < Re \leq 2000$ $Nu = 5.60 \times (Re/1800)^{2.887}$	JAERI-M88-154	$do = di$ 7 $di = 34$ $do = 41$	$Re = \frac{0.007G \cdot 2}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} (0.041^2 - 0.034^2) \cdot 33}$ $= 1.029G / \rho \nu$	$\pi \times 41 \times 2900 \times 33$ $\times 1/2$ $= 6.163 \times 10^6$	$Re = 3340$ $Nu = 11.4$ $h = 572$
27	26に同じ	26に同じ	7	26に同じ	26に同じ	26に同じ
28	26に同じ	26に同じ	123	26に同じ	$\pi \times 123 \times 580 \times 3.5$ $\times 2 \times 1/2$ $= 7.844 \times 10^5$	$Re = 4050$ $Nu = 11.7$ $h = 33.4$
29	26に同じ	26に同じ	7	$Re = \frac{0.007G}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} (0.041^2 - 0.034^2) \cdot 33}$ $= 0.514G / \rho \nu$	$\pi \times 41 \times 2900 \times 33$ $= 1.233 \times 10^7$	26に同じ
30	26に同じ	26に同じ	123	26に同じ	26に同じ	26に同じ
31	26に同じ	26に同じ	7	$Re = \frac{0.007G \times 2}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} (0.041^2 - 0.034^2) \cdot 31}$ $= 1.095G / \rho \nu$	$\pi \times 41 \times 2900 \times 31$ $\times 1/2$ $= 5.790 \times 10^6$	$Re = 3190$ $Nu = 11.0$ $h = 552$

表 2-8(6) 流路番号 32~40 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950°C定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
32	32に同じ	32に同じ	7	$Re = \frac{0.007 \cdot G}{\rho \nu \frac{\pi}{4} (0.041^2 - 0.034^2) \cdot 31}$ $= 0.548 G / \rho \nu$	$\pi \times 41 \times 2900 \times 31$ $= 1.158 \times 10^7$	Re=3150 Nu=10.9 h=547
33	33に同じ	33に同じ	7	33に同じ	33に同じ	33に同じ
34	34に同じ	34に同じ	7	34に同じ	34に同じ	34に同じ
35	35に同じ	35に同じ	123	35に同じ	35に同じ	35に同じ
36	36に同じ	36に同じ	123	36に同じ	$\pi \times 123 \times 580 \times 3.5$ $\times 2$ $= 1.569 \times 10^6$	Re=3840 Nu=10.9 h=31.1
37 ~ 39	h = 10 <sup>3</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h°C]	-	-	-	$2900 \times (2150 - 1485)$ $= 1.929 \times 10^6$	h = 10 <sup>3</sup>
40	40に同じ	40に同じ	140	$Re = \frac{0.14 \cdot G \cdot 0.5 \cdot 6}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \cdot 0.14^2}$ $= 27.28 G / \rho \nu$	$\pi \times 140 \times (580 \times 1.5)$ $\times 2 \times 1/6$ $= 1.275 \times 10^6$	Re=2660 Nu=6.5 h=16.3



表 2-8(7) 流路番号 41~45 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950°C定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
41	41に同じ	41に同じ	140	$Re = \frac{0.14 \cdot G \cdot 0.5 \cdot 2}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \cdot 0.14^2}$ $= 9.10G / \rho \nu$	$\pi \times 140 \times 580 \times 1.5$ $\times 2 \times 1 / 2$ $= 3.826 \times 10^5$	Re=3020 Nu=7.8 h=19.6
43	43に同じ	43に同じ	140	43に同じ	43に同じ	Re=3730 Nu=10.5 h=26.3
44	44に同じ	44に同じ	140	$Re = \frac{0.14 \cdot G \cdot 0.5}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \cdot 0.14^2}$ $= 4.55G / \rho \nu$	$\pi \times 140 \times 580 \times 1.5$ $\times 2$ $= 7.653 \times 10^5$	Re=3550 Nu=9.8 h=24.6
45	45に同じ	45に同じ	140	45に同じ	45に同じ	45に同じ

表 2-8(8) 流路番号 46~51 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950°C定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
46	$\Delta_{46}$ に同じ	$\Delta_{46}$ に同じ	23	$\Delta_{46}$ に同じ	$\pi \times 23 \times 580 \times 33$ $\times 1/2$ $= 6.915 \times 10^5$	Re = $1.09 \times 10^4$ Nu = 32.9 h = 502
47	$\Delta_{47}$ に同じ	$\Delta_{47}$ に同じ	140	$\Delta_{47}$ に同じ	$\pi \times 140 \times 580 \times 2$ $\times 1/2$ $= 2.551 \times 10^5$	$\Delta_{47}$ に同じ
48	$\Delta_{48}$ に同じ	$\Delta_{48}$ に同じ	23	$\Delta_{48}$ に同じ	$\pi \times 23 \times 580 \times 33$ $= 1.383 \times 10^6$	$\Delta_{48}$ に同じ
49	$\Delta_{49}$ に同じ	$\Delta_{49}$ に同じ	140	$\Delta_{49}$ に同じ	$\Delta_{49}$ に同じ	$\Delta_{49}$ に同じ
50	$\Delta_{50}$ に同じ	$\Delta_{50}$ に同じ	23	$\Delta_{50}$ に同じ	$\pi \times 23 \times 580 \times 31$ $\times 1/2$ $= 6.496 \times 10^5$	Re = $1.04 \times 10^4$ Nu = 31.7 h = 484

表 2-8(9) 流路番号 52~60 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Re数	伝熱面積 (mm <sup>2</sup> )	参考値 (950℃定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
52 ・ 53	△Aに同じ	△Aに同じ	23	△Aに同じ	△Aに同じ	$\pi \times 23 \times 580 \times 31$ $= 1.299 \times 10^6$	Re=1.03×10 <sup>4</sup> Nu=31.4 h=479
54	△Aに同じ	△Aに同じ	23	△Aに同じ	△Aに同じ	△Aに同じ	Re=1.05×10 <sup>4</sup> Nu=31.9 h=487
55	△Aに同じ	△Aに同じ	140	△Aに同じ	△Aに同じ	△Aに同じ	Re=3910 Nu=11.2 h=28.1
56	△Aに同じ	△Aに同じ	140	△Aに同じ	△Aに同じ	$\pi \times 140 \times 580 \times 2$ $= 5.102 \times 10^5$	Re=3820 Nu=10.8 h=27.1
57 ~ 59	$h = 10^3$ [kcal/m <sup>2</sup> h°C]	-	-	-	-	$580 \times 2 \times$ (2150-1485) $= 7.714 \times 10^5$	h=10 <sup>3</sup>
60	i) Re > 6000 Nu = 0.023 Re <sup>0.8</sup> Pr <sup>0.4</sup> ii) Re ≤ 2000 Nu = 4.36 iii) 2000 < Re ≤ 6000 Nu = 4.36 (Re/2000) <sup>1.4041</sup>	伝熱工学資料 (第4版) P.56	6	$Re = \frac{0.006 \cdot G \cdot 0.5 \cdot 6}{\rho \nu \cdot 3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.006^2}$ $= 212G / \rho \nu$	△Aに同じ	$\pi \times 6 \times 580 \times 6$ $\times 1/6$ $= 1.093 \times 10^4$	Re=20700 Nu=55.0 h=3220

表 2-8(10) 流路番号 61~66 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 (mm <sup>2</sup> )	参考値 (950℃定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
△61 ・ △62	i) Re > 6000 Nu = 0.023 Re <sup>0.8</sup> Pr <sup>0.4</sup> ii) Re ≤ 2000 Nu = 4.36 iii) 2000 < Re ≤ 6000 Nu = 4.36 (Re/2000) <sup>1.4041</sup>	伝熱工学資料 (第4版) P. 56	54	Re = $\frac{0.054 \cdot G \cdot 2}{\rho \nu \cdot 6 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.054^2}$ = 7.86G / $\rho \nu$	$\pi \times 54 \times 580 \times 6$ $\times 1/2$ = 2.952 × 10 <sup>5</sup>	Re = 25000 Nu = 63.9 h = 415
△63 ・ △65	△60に同じ	△60に同じ	6	Re = $\frac{0.006 \cdot G \cdot 0.5 \cdot 2}{\rho \nu \cdot 3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.006^2}$ = 70.7G / $\rho \nu$	$\pi \times 6 \times 580 \times 6$ $\times 1/2$ = 3.280 × 10 <sup>4</sup>	Re = 23500 Nu = 60.8 h = 3560
△64	△61に同じ	△61に同じ	54	Re = $\frac{0.054 \cdot G}{\rho \nu \cdot 6 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.054^2}$ = 3.93G / $\rho \nu$	$\pi \times 54 \times 580 \times 6$ = 5.904 × 10 <sup>5</sup>	△61に同じ
△66	△61に同じ	△61に同じ	54	△61に同じ	△61に同じ	Re = 23500 Nu = 60.8 h = 395

表 2-8(11) 流路番号 67~72 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 (mm <sup>2</sup> )	参考値 (950℃定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h℃]
67 ・ 68	67に同じ	67に同じ	54	67に同じ	67に同じ	Re=23600 Nu=61.0 h=397
69	67に同じ	67に同じ	54	67に同じ	67に同じ	Re=23800 Nu=61.4 h=399
70	67に同じ	67に同じ	6	67に同じ	67に同じ	Re=30400 Nu=74.7 h=4370
71	67に同じ	67に同じ	6	$Re = \frac{0.006 \cdot G \cdot 0.5}{\rho \nu \cdot 3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.006^2}$ $= 35.4G / \rho \nu$	$\pi \times 6 \times 580 \times 6$ $= 6.560 \times 10^4$	Re=29700 Nu=73.3 h=4290
72	i) Re>6000 $Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ ii) Re≤2000 $Nu = 4.36$ iii) 2000<Re≤6000 $Nu = 4.36 (Re/2000)^{1.4041}$	伝熱工学資料 (第4版) P.56	50	$Re = \frac{0.05 \cdot G \cdot 6}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.05^2}$ $= 152.8G / \rho \nu$	$\pi \times 50 \times 250 \times 1/6$ $= 6.545 \times 10^3$	Re=1.79×10 <sup>4</sup> Nu=48.9 h=343

表 2-8(12) 流路番号 73~81 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 (mm <sup>2</sup> )	参考値 (950℃定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
△△ ・ △△	△△に同じ	△△に同じ	80	$Re = \frac{0.08G \cdot 2}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \times 0.08^2}$ $= 31.83G / \rho \nu$	$\pi \times 80 \times 250 \times 1 / 2$ $= 3.142 \times 10^4$	Re=1.03×10 <sup>5</sup> Nu=198 h=869
△△	△△に同じ	△△に同じ	50	$Re = \frac{0.05G \cdot 2}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \times 0.05^2}$ $= 50.93G / \rho \nu$	$\pi \times 50 \times 250 \times 1 / 2$ $= 1.964 \times 10^4$	Re=1.99×10 <sup>4</sup> Nu=53.2 h=374
△△	△△に同じ	△△に同じ	80	$Re = \frac{0.08G}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \times 0.08^2}$ $= 15.92G / \rho \nu$	$\pi \times 80 \times 250$ $= 6.283 \times 10^4$	△△に同じ
△△	△△に同じ	△△に同じ	50	△△に同じ	△△に同じ	△△に同じ
△△	△△に同じ	△△に同じ	80	△△に同じ	△△に同じ	Re=9.27×10 <sup>4</sup> Nu=182 h=800
△△ ・ △△	△△に同じ	△△に同じ	80	△△に同じ	△△に同じ	Re=9.15×10 <sup>4</sup> Nu=180 h=792
△△	△△に同じ	△△に同じ	80	△△に同じ	△△に同じ	Re=9.45×10 <sup>4</sup> Nu=185 h=812

表 2-8(13) 流路番号 82~89 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950°C定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h°C]
82	△に同じ	△に同じ	50	△に同じ	△に同じ	Re=2.29×10 <sup>4</sup> Nu=59.6 h=418
83	△に同じ	△に同じ	50	Re= $\frac{0.05G}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \times 0.05^2}$ =25.46G / $\rho \nu$	$\pi \times 50 \times 250$ =3.927×10 <sup>4</sup>	Re=2.24×10 <sup>4</sup> Nu=58.5 h=411
84 ~ 86	$h = 10^3$ [kcal/m <sup>2</sup> h°C]	-	-	-	2450 × (2150-1485) =1.629×10 <sup>6</sup>	h = 10 <sup>3</sup>
87	△に同じ	△に同じ	350	Re= $\frac{0.35G \cdot 6}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \cdot 0.35^2}$ =21.83G / $\rho \nu$	$\frac{\pi}{2} \times 120 \times (684-350)$ ×3 + $\pi \times 350 \times 550$ =7.936×10 <sup>5</sup>	Re=1.41×10 <sup>5</sup> Nu=255 h=256
88	△に同じ	△に同じ	290	Re= $\frac{0.29G}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \cdot 0.29^2}$ =4.390G / $\rho \nu$	$\frac{\pi}{2} \times 120 \times (684-290)$ ×3 + $\pi \times 290 \times 550$ =7.239×10 <sup>5</sup>	Re=1.16×10 <sup>5</sup> Nu=218 h=264
89	Nu=0.94 Re <sup>0.5</sup> Pr <sup>0.4</sup>	伝熱工学資料 (第4版)	290	Re= $\frac{0.29G}{\rho \nu \frac{\pi}{4} \cdot 0.29^2 \cdot 1.17}$ =3.753G / $\rho \nu$	$\frac{\pi}{4} \times 2200^2 \times 1/6$ =6.336×10 <sup>5</sup> (上/下面共, 上の値とする。)	Re=1.22×10 <sup>5</sup> Nu=264 h=320

表 2-8(14) 流路番号 90 に対する熱伝達式

流路	熱伝達式	出典	代表長 D [mm]	Re数 G [kg/s], $\nu$ [m <sup>2</sup> /s], $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱面積 [mm <sup>2</sup> ]	参考値 (950℃定格) Re, Nu, h [kcal/m <sup>2</sup> h℃]
△	△と同じ 但し、トリップ時はNuを1.74倍する。	△と同じ	360	$Re = \frac{0.36 \cdot G \cdot 6}{\rho \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.36^2}$ $= 21.2G / \rho \nu$	$\pi \times 360 \times 350 \times 1 / 6$ $= 6.597 \times 10^4$	Re=697000 Nu=916 h=893



表 2-9 圧力容器内の輻射伝熱式

番号	ふく射面	ふく射式	出典
1	固定反射体外表面と側部遮蔽体内面の間。	$Q = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \cdot \frac{A}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [\text{kcal/h}]$ $\varepsilon_1 = 1.0 \text{ (黒鉛)}, \varepsilon_2 = 0.6 \text{ (SUS316)}$ $A = 1140 \times 7920 \times 2 = 1.806 \times 10^7 \text{ [mm}^2\text{]}$	内田編「伝熱工学」 (裳華房) P. 343 “平行 2 平面間のふく射”
2	側部遮蔽体外表面と圧力容器内面の間。	$Q = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \cdot \frac{A}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [\text{kcal/h}]$ $\varepsilon_1 = 0.6, \varepsilon_2 = 0.6 \text{ (SUS316)}$ $A = \pi \times 5500 \times 8620 \times 1/6 = 2.482 \times 10^7 \text{ [mm}^2\text{]}$	同上
3	上部遮蔽体上面と圧力容器上鏡内面の間。	$Q = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \cdot A_1 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad [\text{kcal/h}]$ $\varepsilon_1 = 0.15 \text{ (鋼研磨面)}, \varepsilon_2 = 0.36/12 = 0.03$ $A_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 362^2 \times 61 \times 1/6 = 1.154 \times 10^6 \text{ [mm}^2\text{]}$ $A_2 = 2 \pi \times 2750^2 \times 1/6 = 7.92 \times 10^6 \text{ [mm}^2\text{]}$	内田編「伝熱工学」 (裳華房) P. 343 “1 個の凸面の周囲を他面が完全に囲む”
4	高温ブレナム内壁間。	$Q = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \cdot A$ $A = \frac{\pi}{4} \times 2200^2 \times 1/6 = 6.336 \times 10^5 \text{ [mm}^2\text{]}$	黒体ふく射とする。 ( $\varepsilon = 1.0$ )

表 2-10 定格運転時の流量

[kg/s]

△ 番 号	流 量	△ 番 号	流 量	△ 番 号	流 量	△ 番 号	流 量
1	1.683	19	0.153	37	0.001	72	0.005
2	1.346	20	0.307	38	0.003	73	0.163
3	1.346	21	0.307	39	0.001	74	0.163
4	1.346	22	0.153	45, 60	0.005	75	0.017
5	0.337	23	0.020	46, 61	0.163	76	0.326
6	0.842	24	0.037	47, 62	0.163	77	0.017
7	0.837	25, 40	0.005	48, 63	0.017	78	0.153
8	0.832	26	0.163	49, 64	0.326	79	0.307
9	0.827	27	0.163	50, 65	0.017	80	0.307
10	0.841	28, 41	0.017	51, 66	0.153	81	0.156
11	1.668	29	0.326	52, 67	0.307	82	0.023
12	1.683	30, 42	0.017	53, 68	0.307	83	0.046
13	0.005	31	0.153	54, 69	0.155	84	0.001
14	0.163	32	0.307	55, 70	0.022	85	0.003
15	0.163	33	0.307	56, 71	0.043	86	0.001
16	0.017	34	0.154	57	0.001	87	0.331
17	0.326	35, 43	0.021	58	0.003	88	1.352
18	0.017	36, 44	0.040	51	0.001	89, 90	1.683

表 2-11 定格運転時の燃料体の発熱量

[kcal/hm<sup>3</sup>]

level \ カラム (図 2-5)	1	2	3	4
level 4	3.42 + 6	3.50 + 6	3.27 + 6	3.22 + 6
level 5	3.59 + 6	3.75 + 6	3.43 + 6	3.47 + 6
level 6	2.96 + 6	3.09 + 6	2.79 + 6	2.76 + 6
level 7	2.09 + 6	2.10 + 6	1.84 + 6	1.87 + 6
level 8	1.51 + 6	1.51 + 6	1.30 + 6	1.30 + 6

基準炉心：燃焼 660 日，出口ガス温度 950℃

表 2-12 定格運転時の燃料体以外の発熱量

level	[kcal/hm <sup>3</sup> ]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
level 1, 2	4.7+2	4.7+2	4.7+2	4.7+2	4.7+2	1.8+2	5.8+2	2.8+3	2.2+2	1.2+1
level 3	2.2+4	2.2+4	2.2+4	2.2+4	2.2+4	6.1+3	5.8+2	2.8+3	2.2+2	1.2+1
level 4~8	表 2-11	表 2-11	表 2-11	表 2-11	1.1+5	2.8+4	3.2+3	4.0+4	1.3+3	6.6+1
level 9, 10	1.8+4	1.8+4	1.8+4	1.8+4	1.8+4	4.8+3	8.3+2	1.8+4	4.3+2	3.4+1
level 11, 12	6.2+1	6.2+1	6.2+1	6.2+1	6.2+1	6.2+1	2.0+1	2.8+2	9.5+0	2.8+0

表 2-13 照射カラム黒鉛ブロックの温度評価解析ケース

解析ケース	固定反射体	水平方向熱伝導率	固定反射体外面熱伝達率
case 1	設計ノミナル値		$Nu=0.0203Re^{0.789}Pr^{0.333}$
case 2	設計ノミナル値	-9 kcal/mh°C	case A の -20%
case 3	設計ノミナル値	+9 kcal/mh°C	case A の +20%

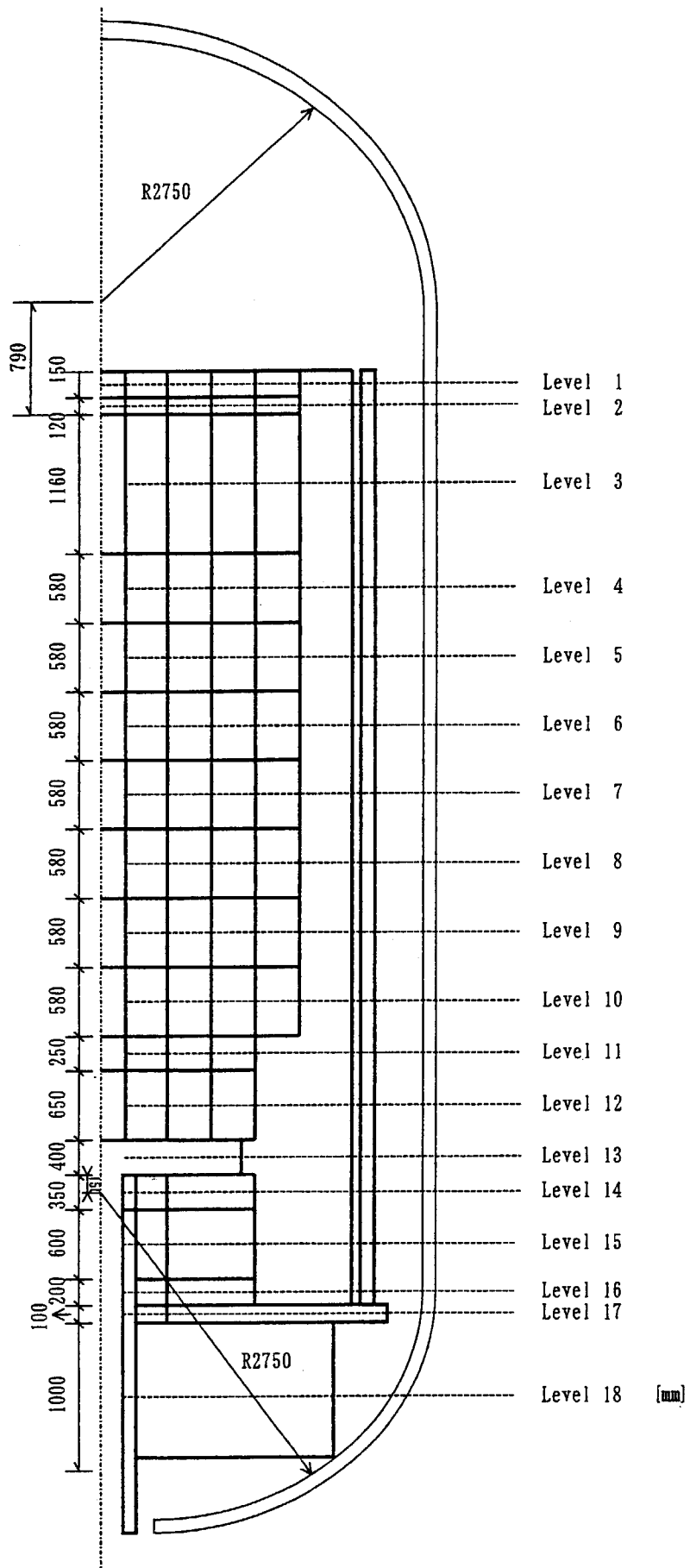


図 2-1 温度評価モデル図 (鉛直方向)

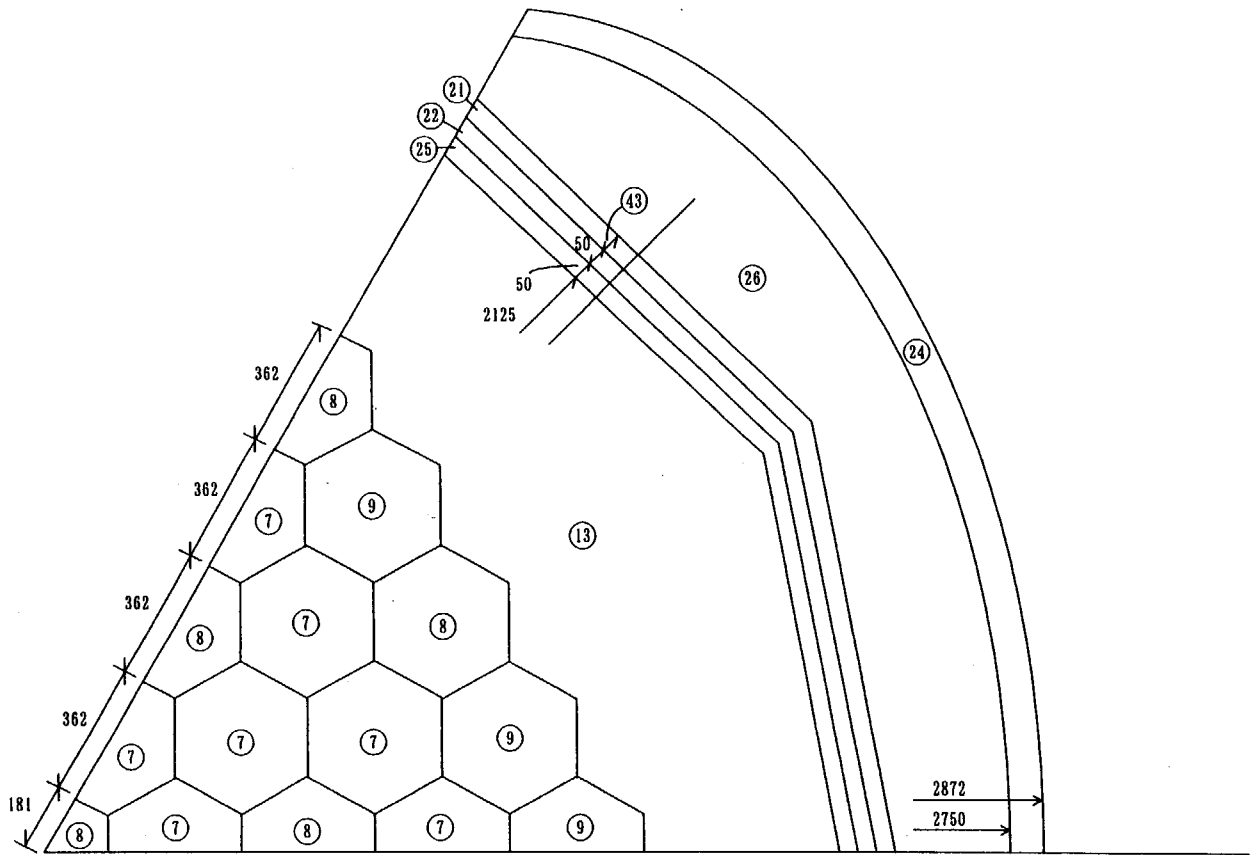


図 2-2(1) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-1 面)

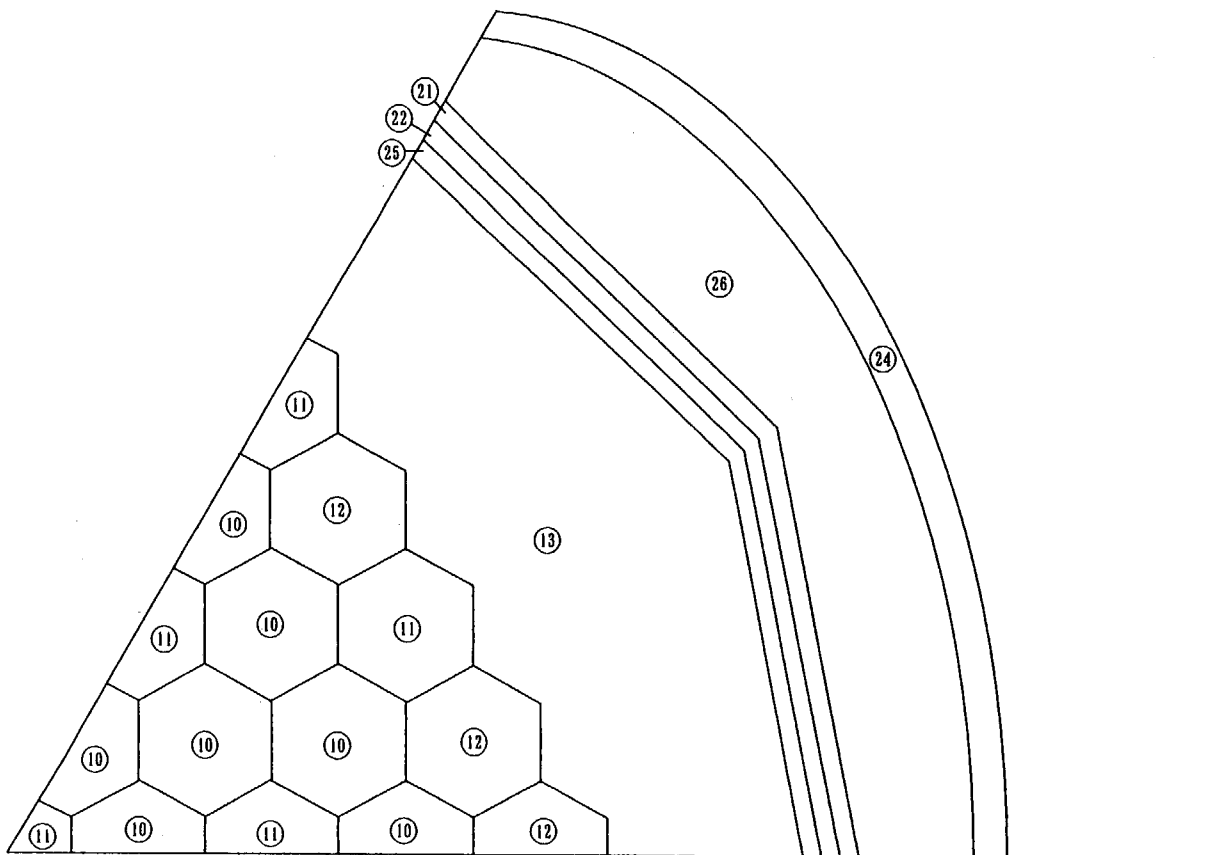


図 2-2(2) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-2 面)

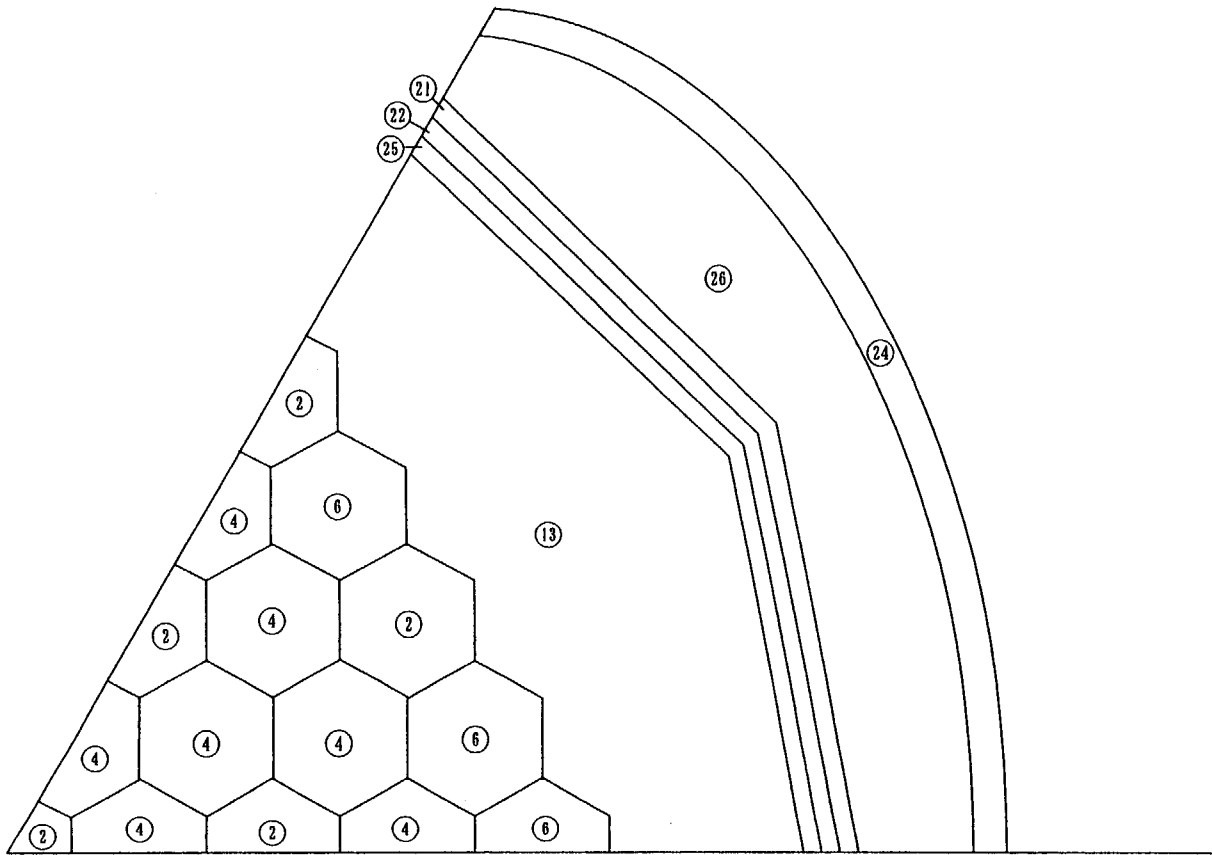


図 2-2(3) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-3 面)

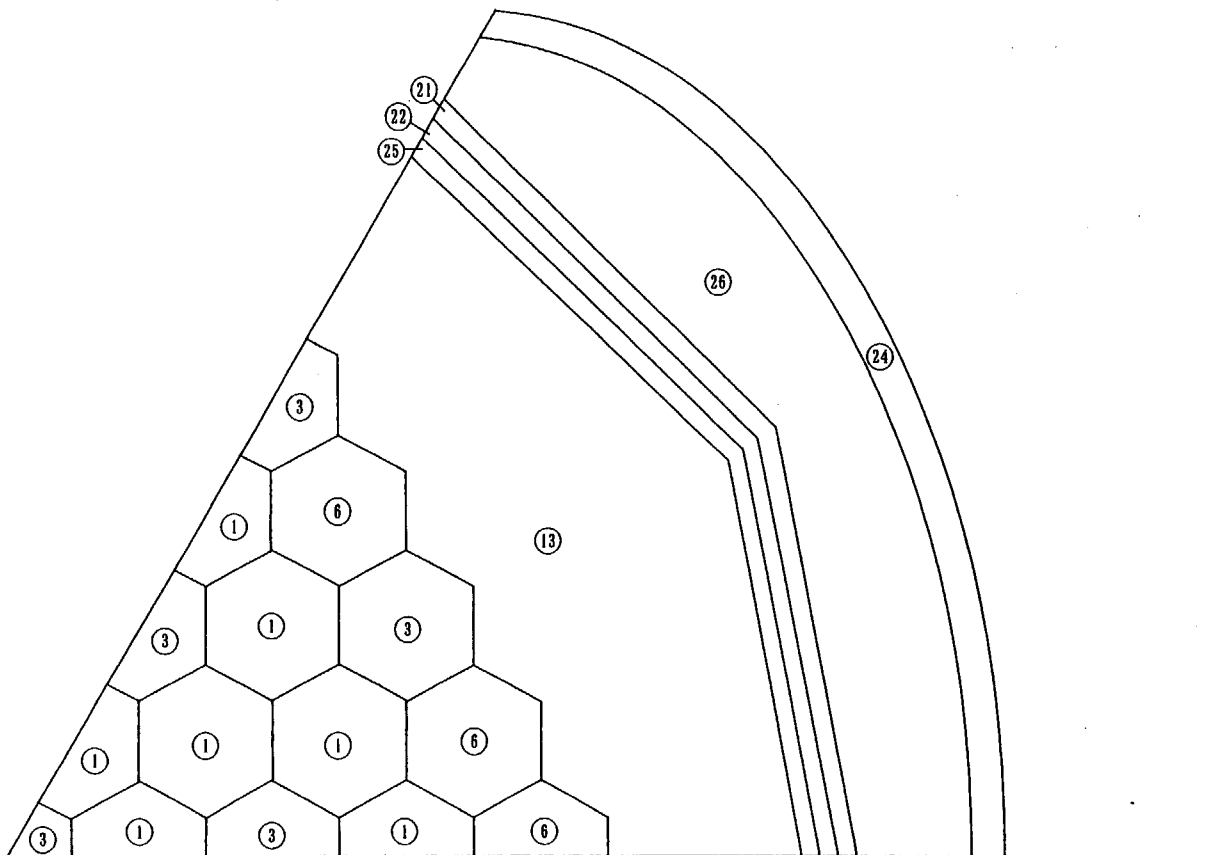


図 2-2(4) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-4 から Level-8 面)

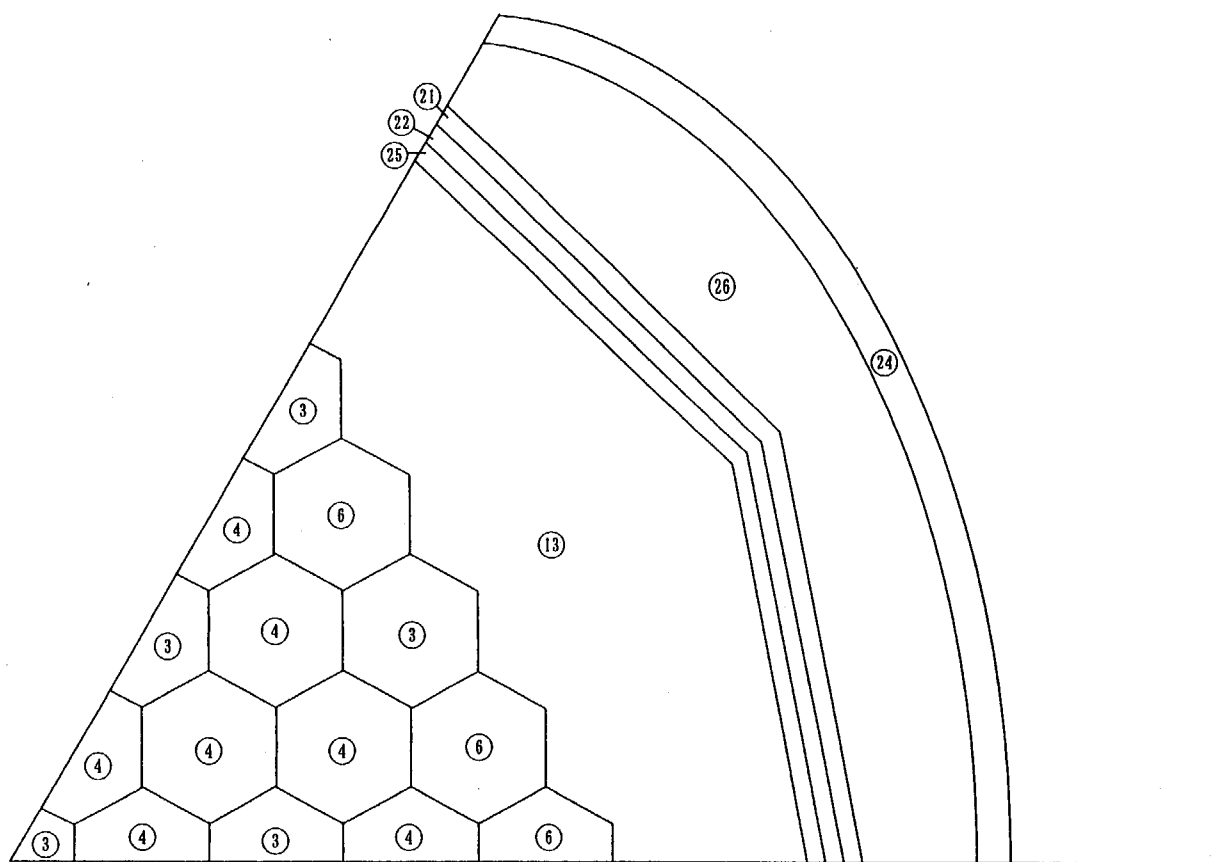


図 2-2(5) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-9 面)

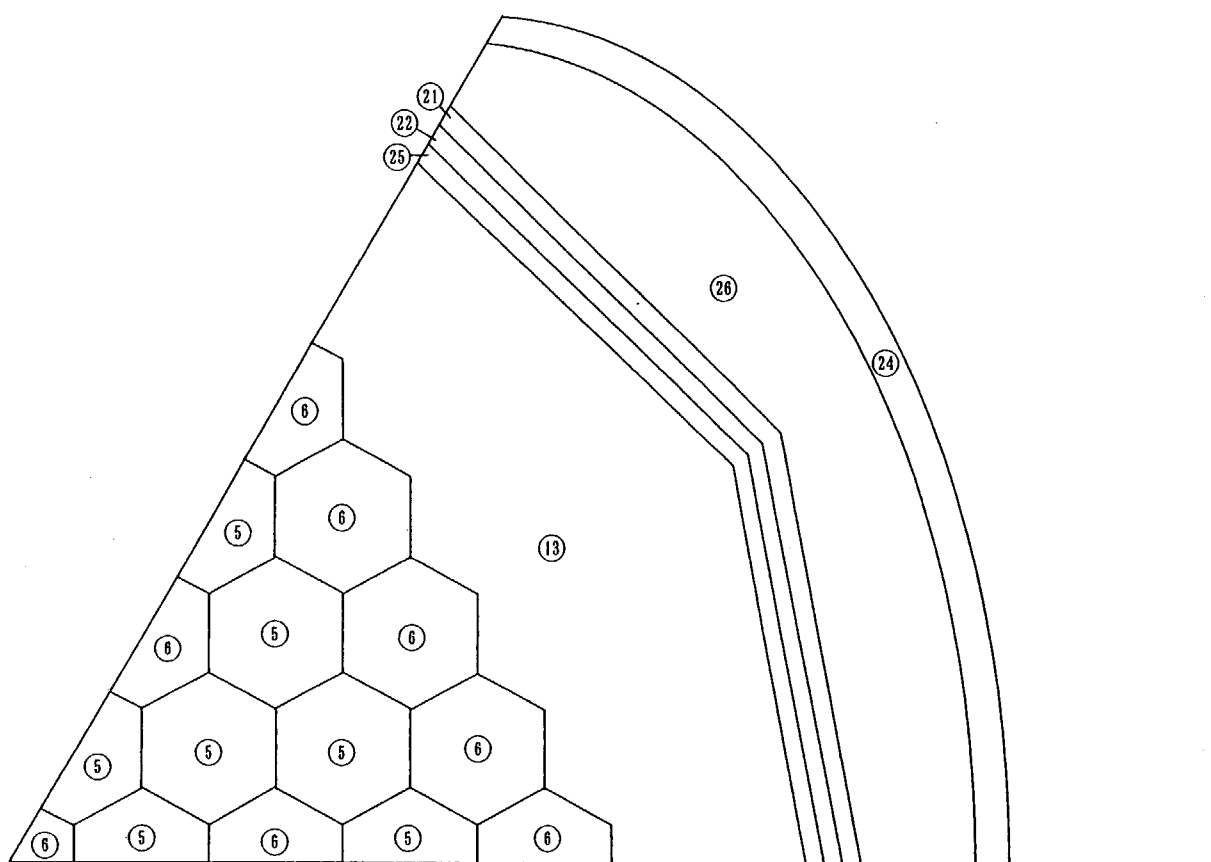


図 2-2(6) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-10 面)



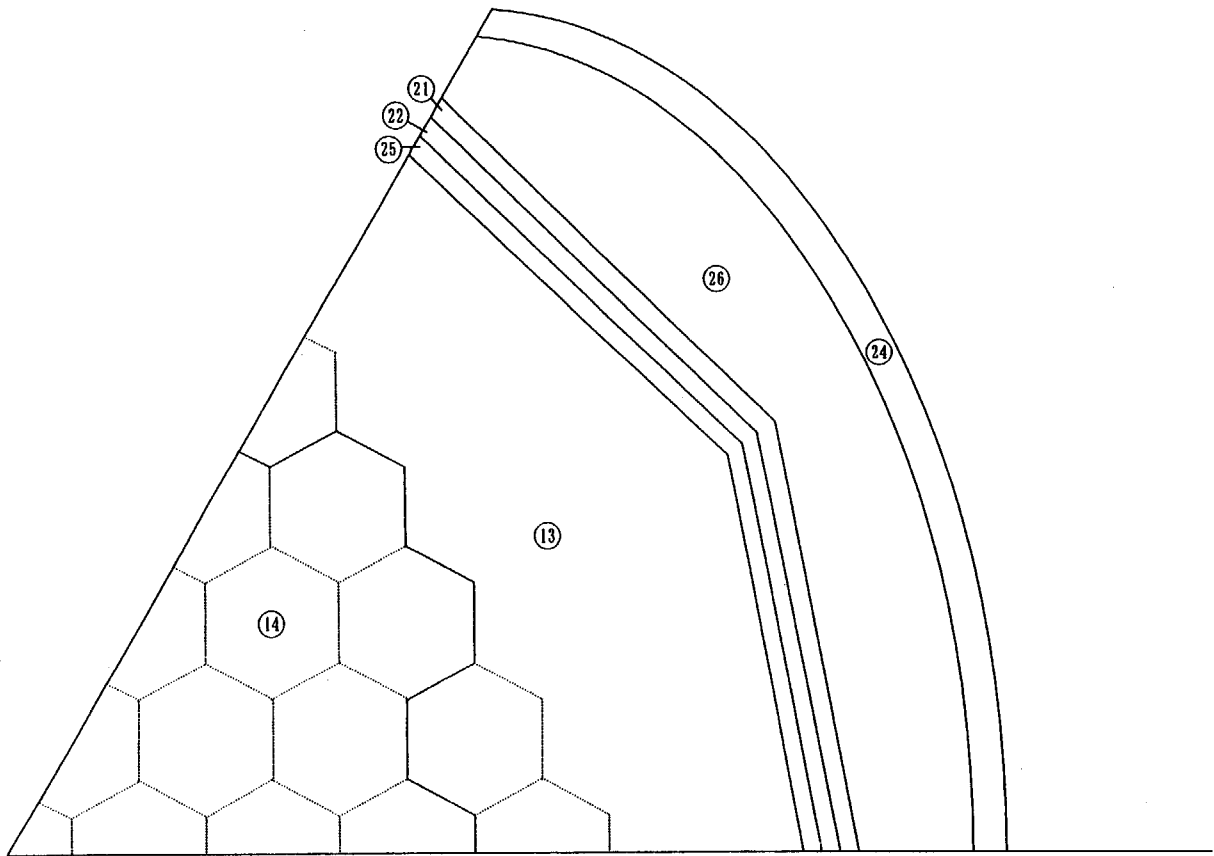


図 2-2(7) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-11 面)

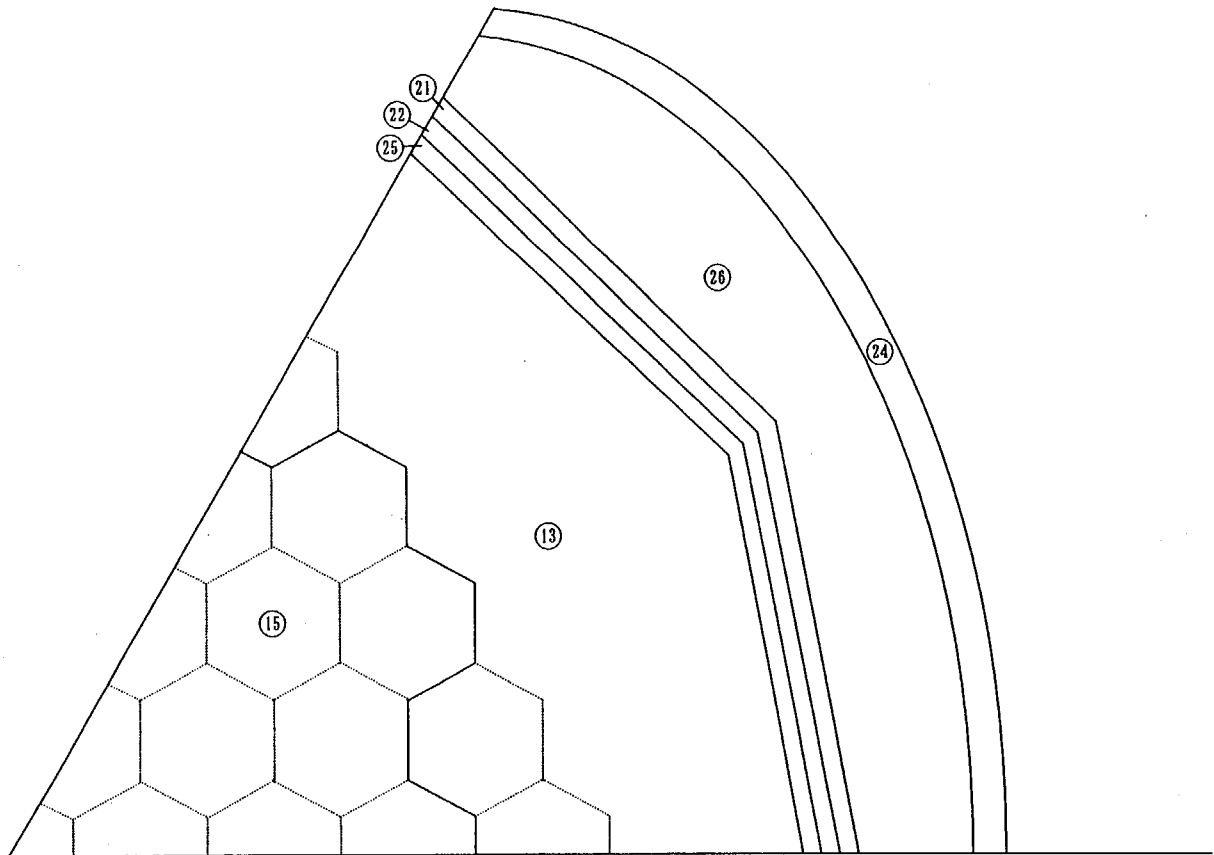


図 2-2(8) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-12 面)

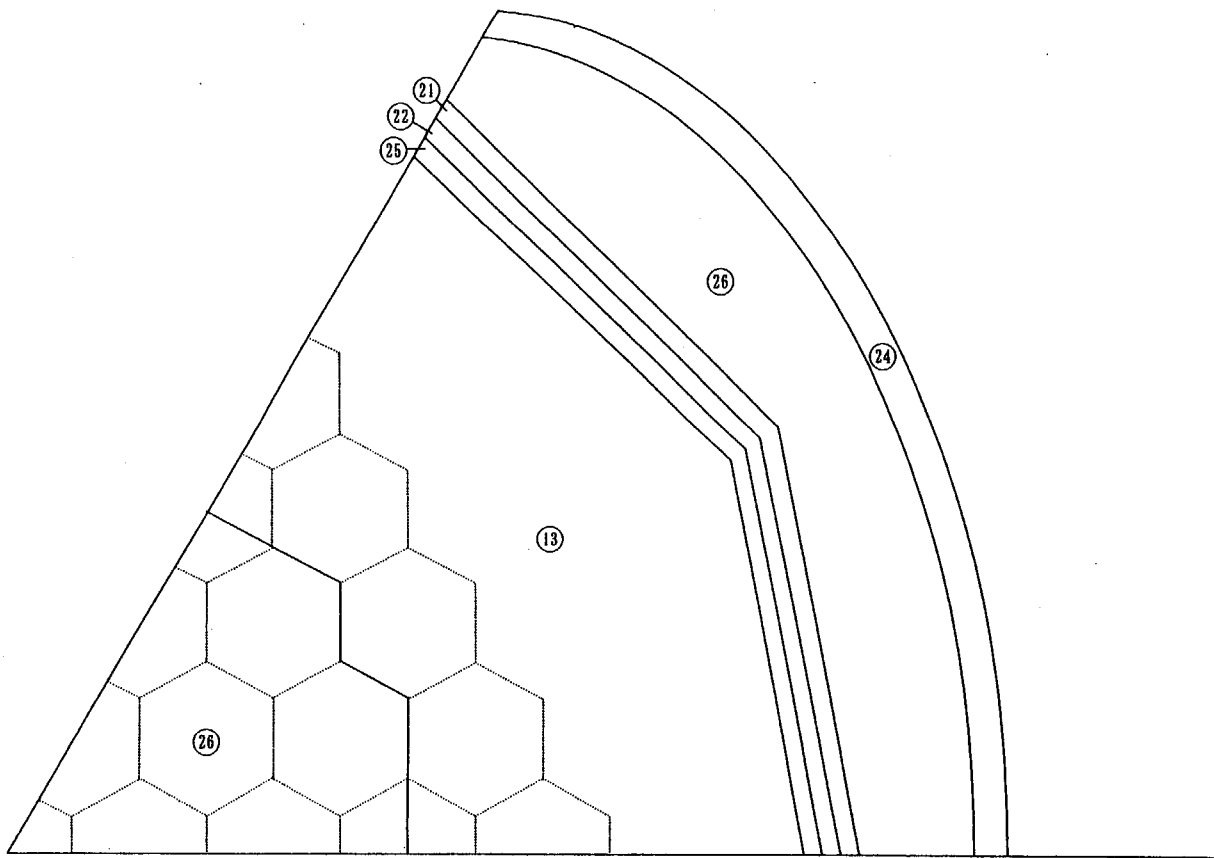


図 2-2(9) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-13 面)

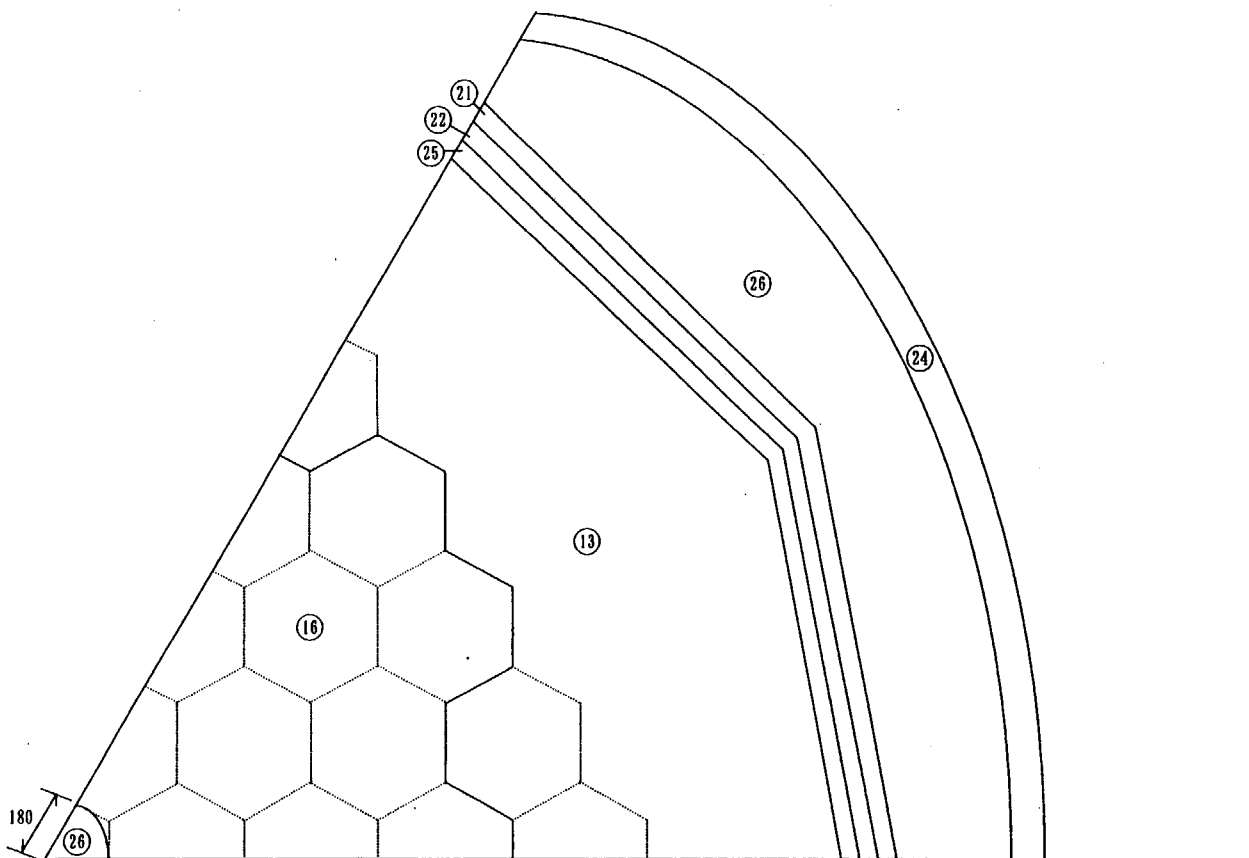


図 2-2(10) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-14 面)

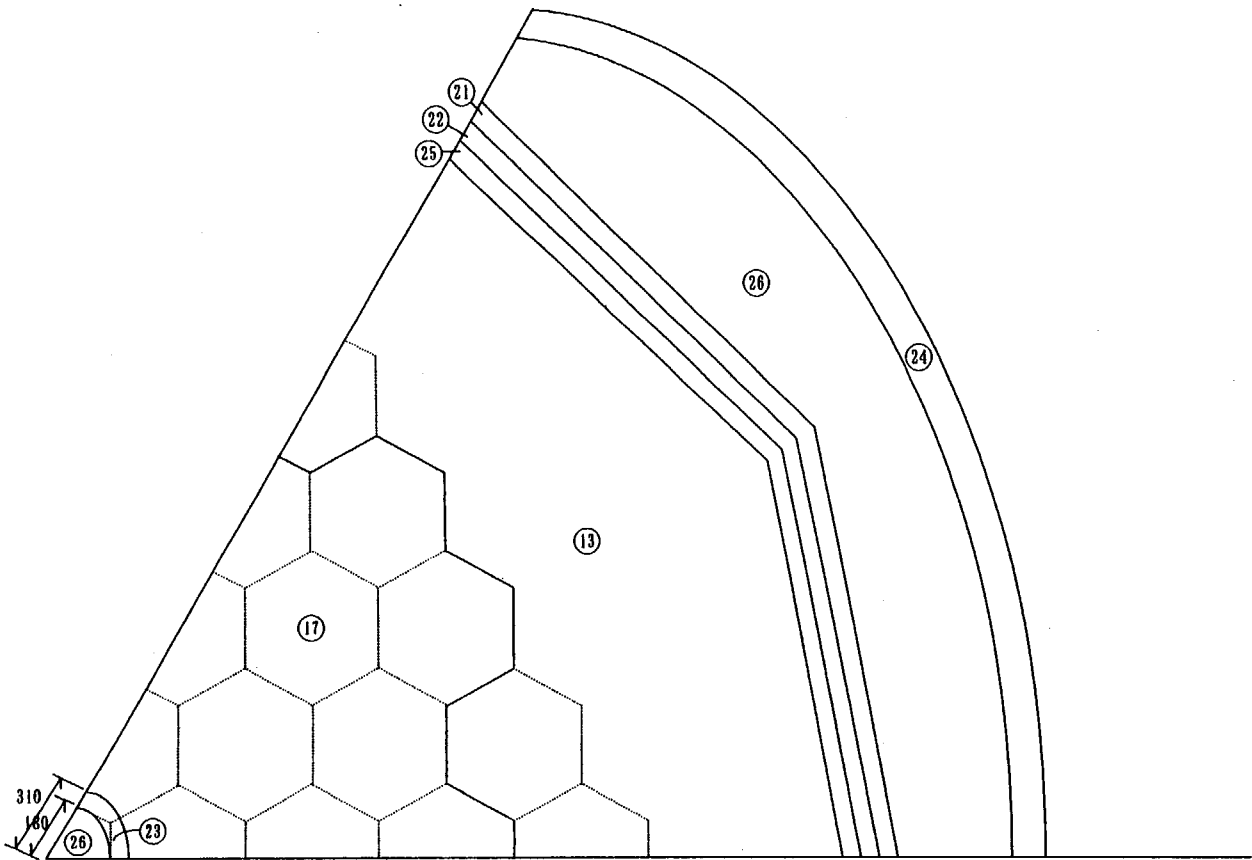


図 2-2(11) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-15 面)

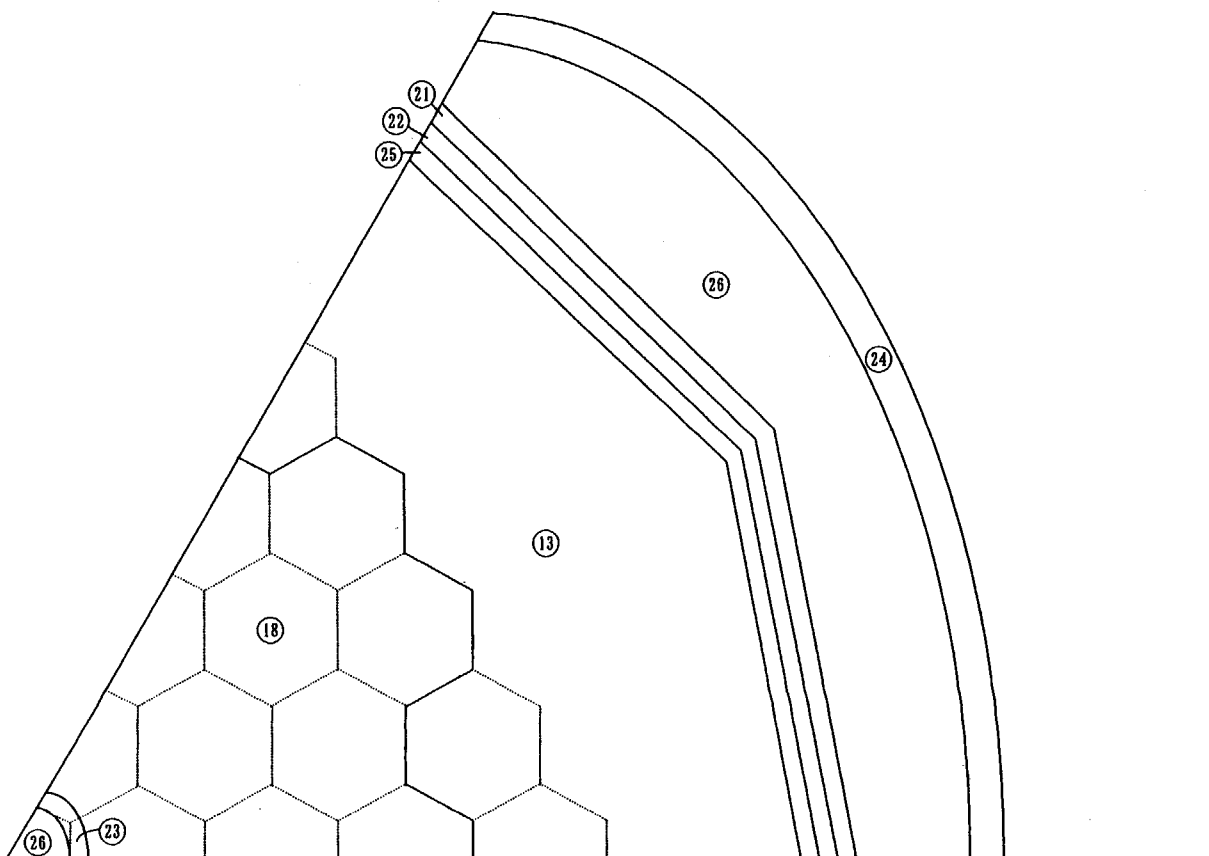


図 2-2(12) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-16 面)

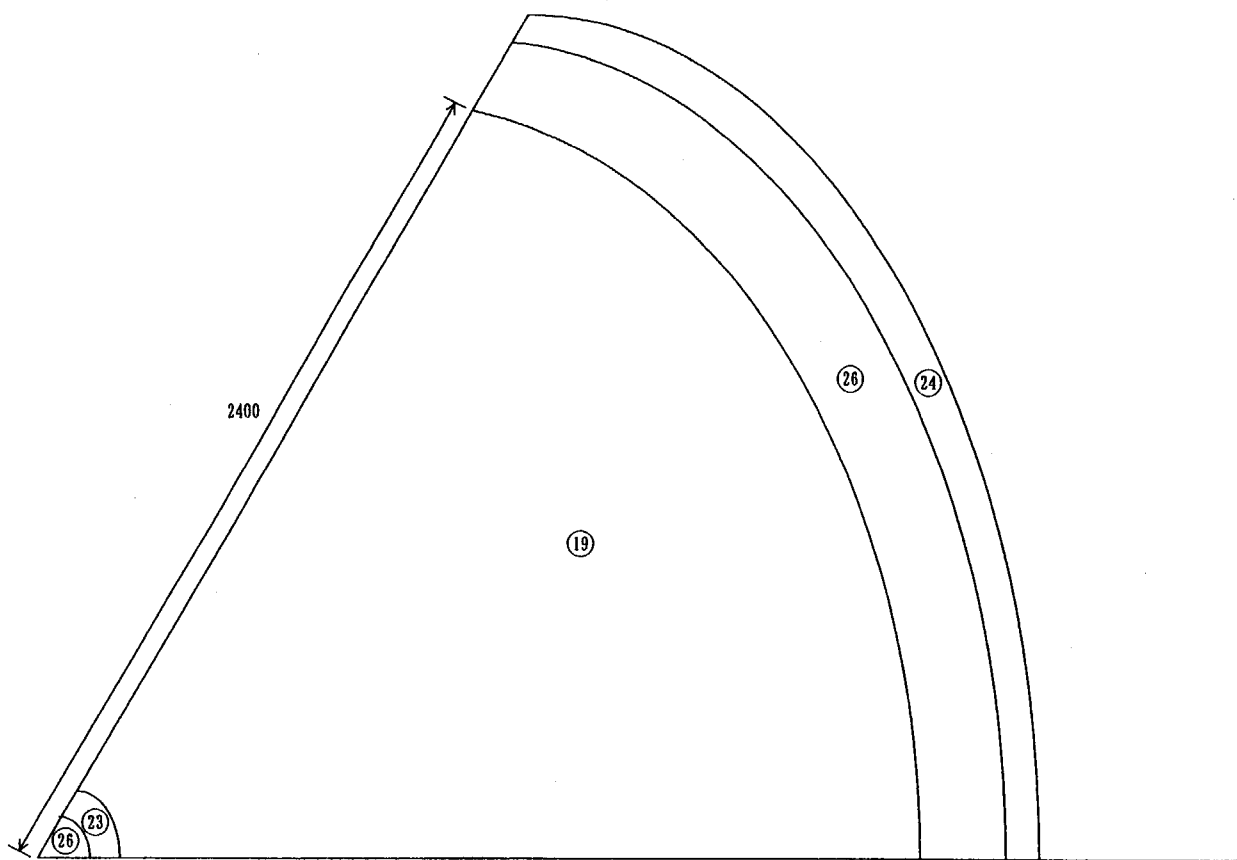


図 2-2(14) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-18 面)

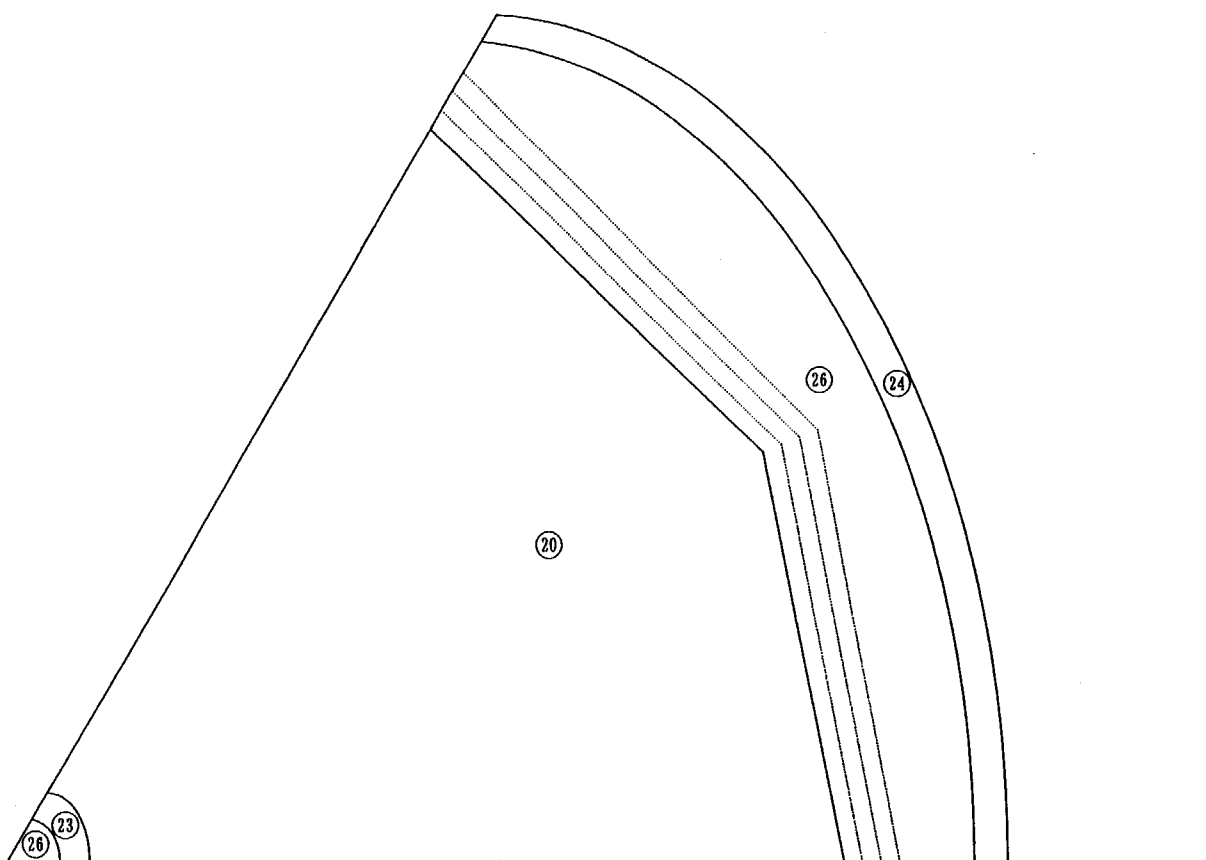


図 2-2(13) 温度評価モデル図 (水平方向 ; Level-17 面)

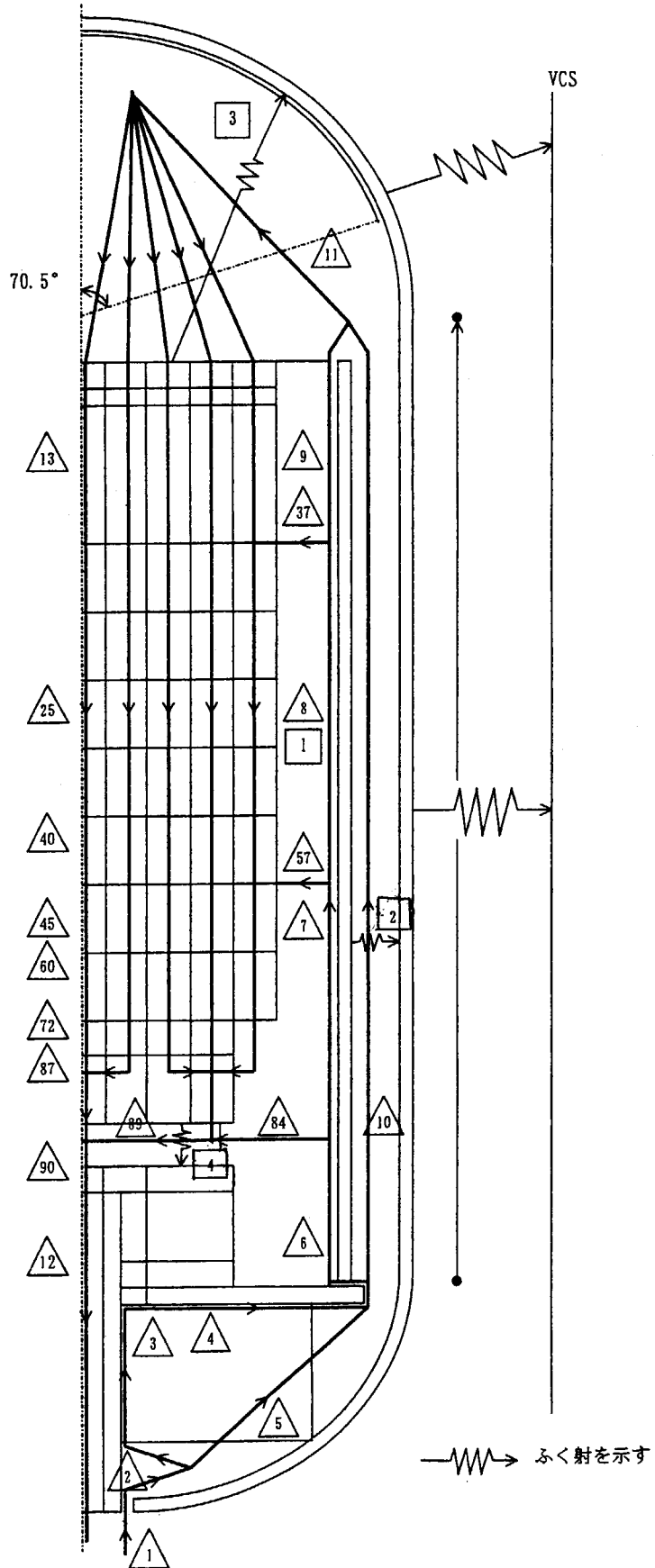


図 2-3 流路モデル図 (鉛直方向)

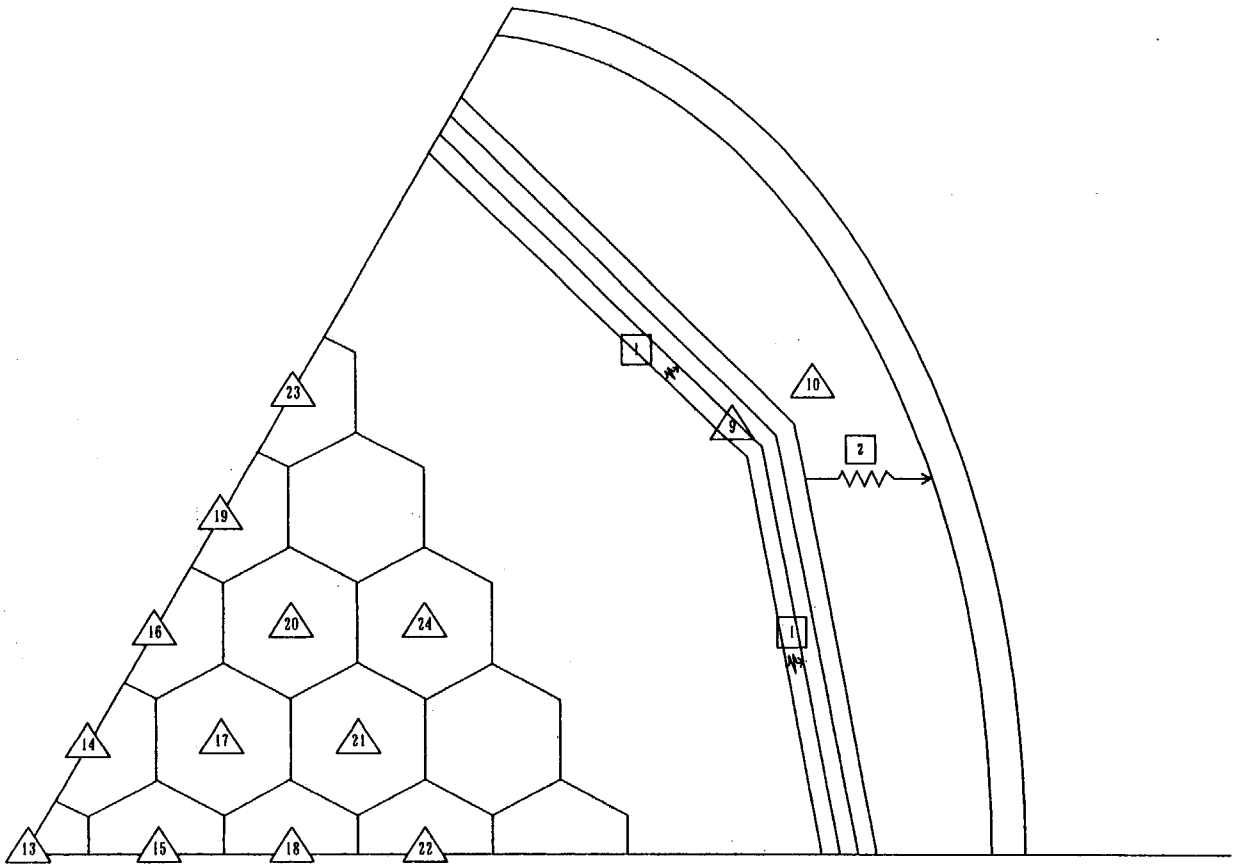


図 2-4(1) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-1 から Level-3 面)

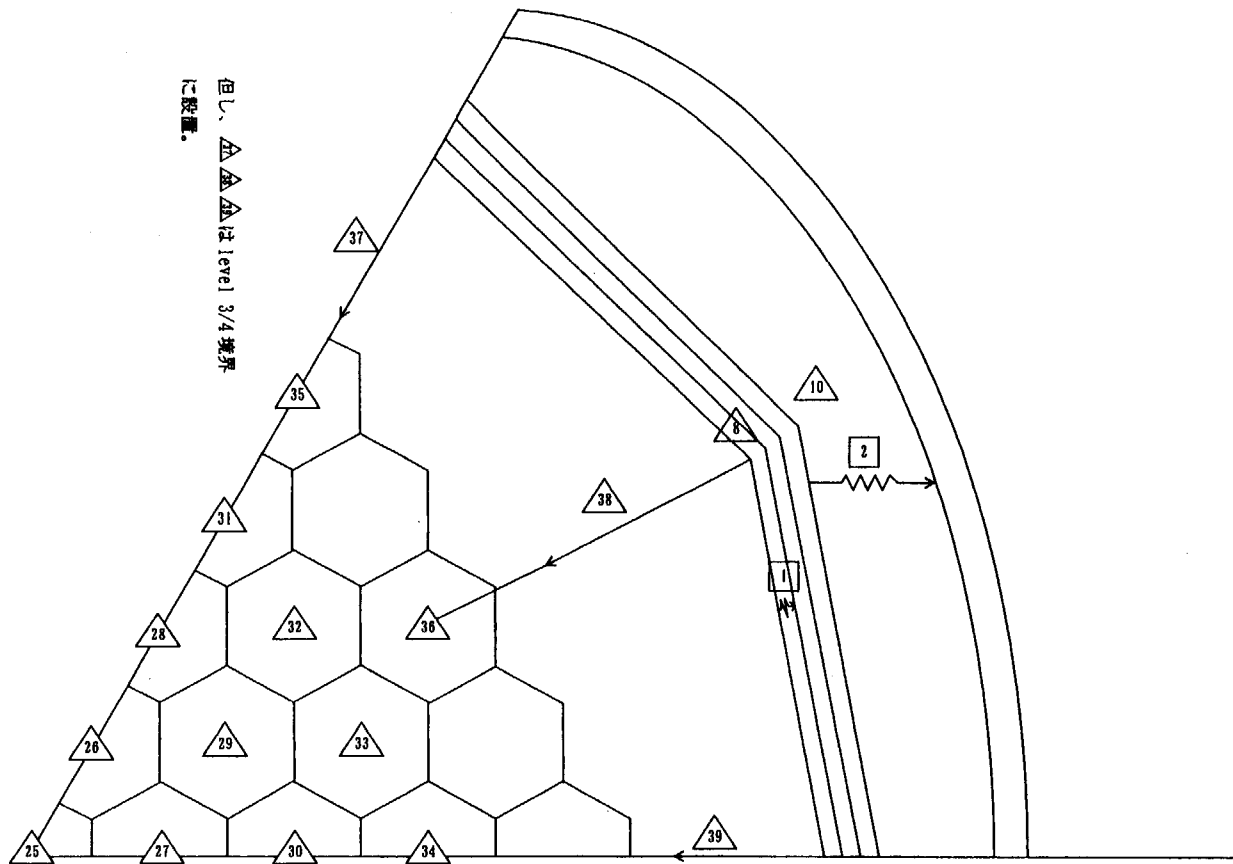


図 2-4(2) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-4 から Level-7 面)

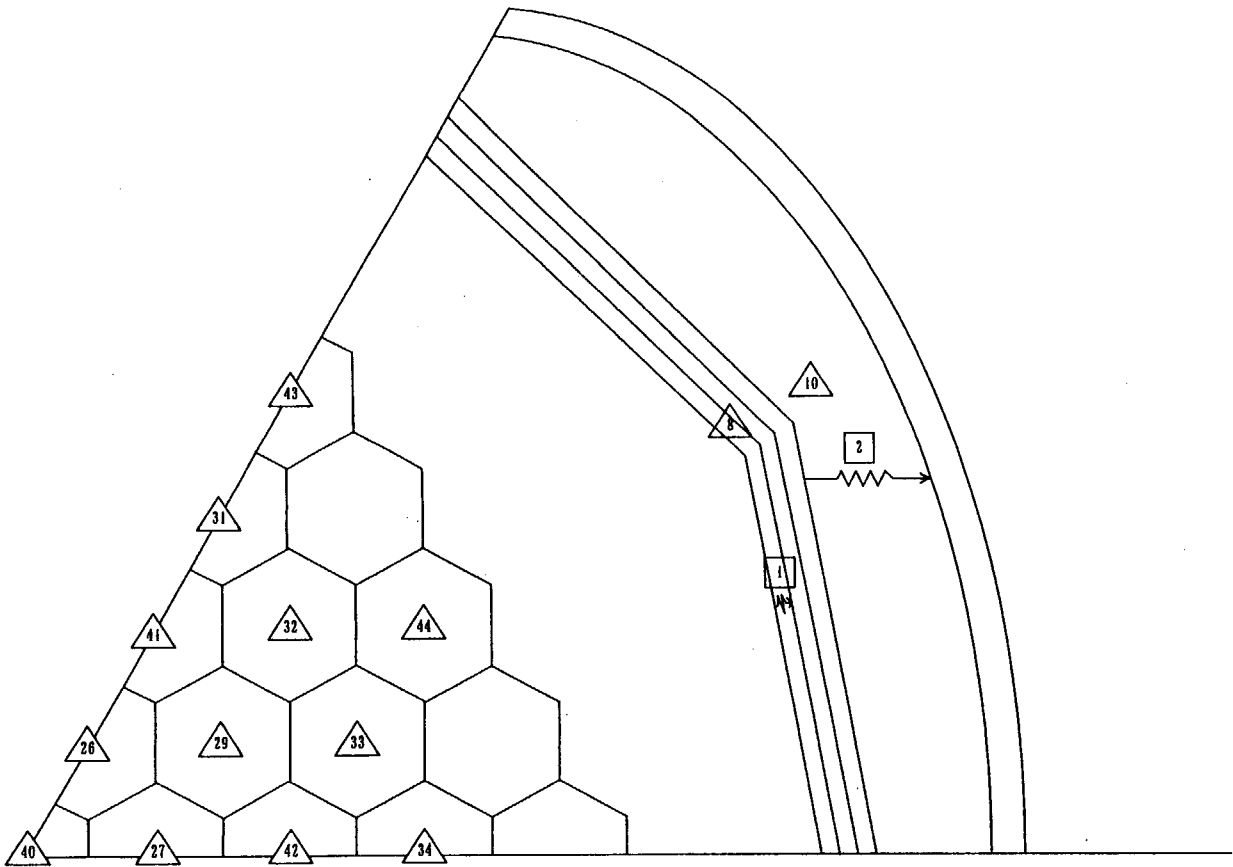


図 2-4(3) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-8 面)

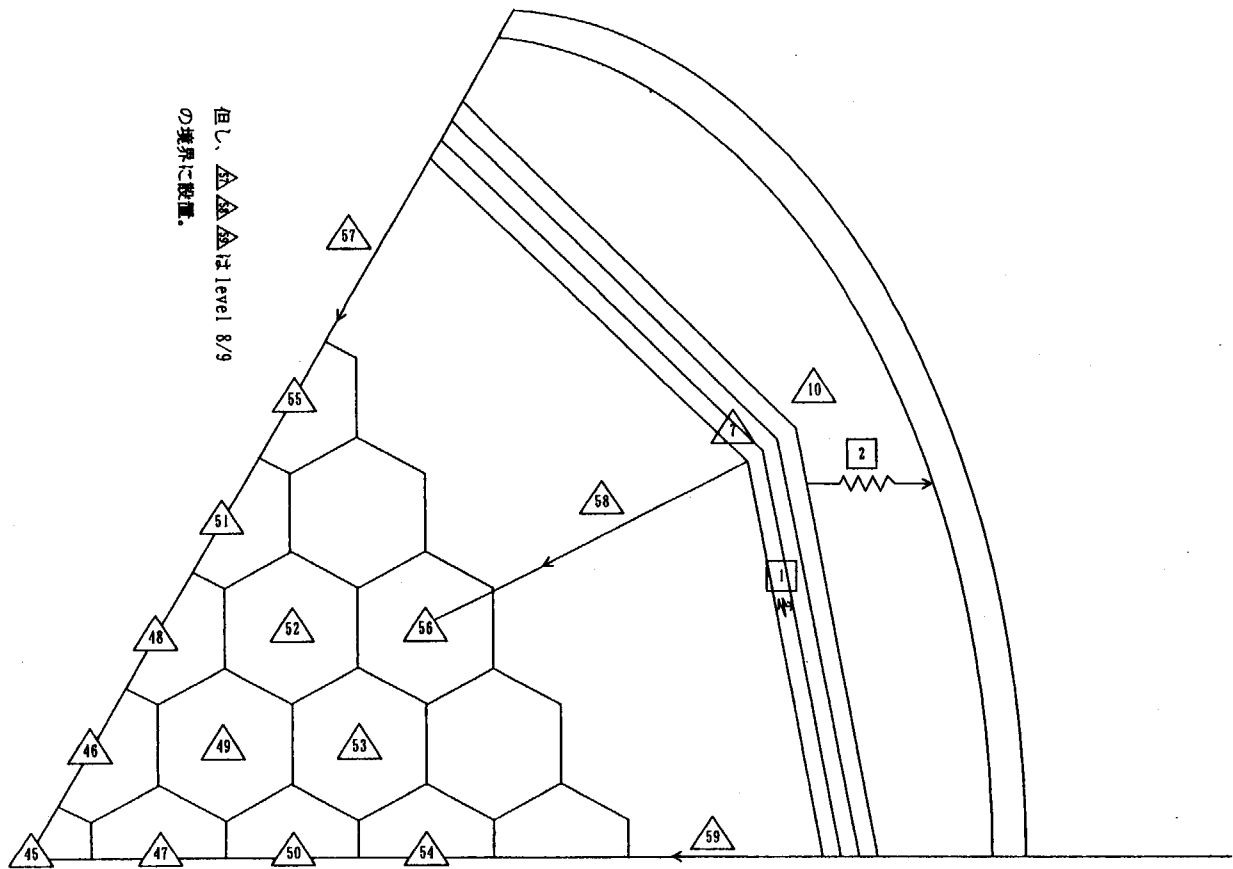


図 2-4(4) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-9 面)

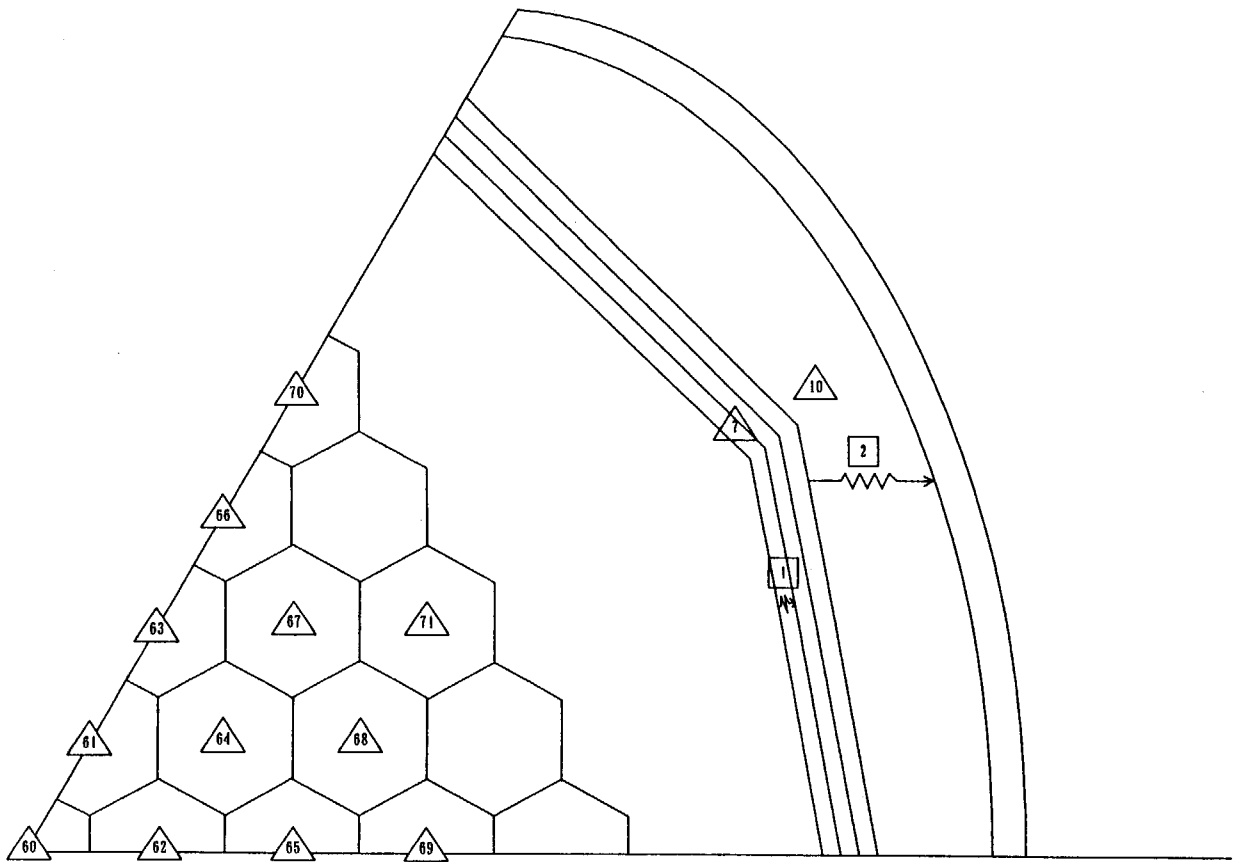


図 2-4(5) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-10 面)

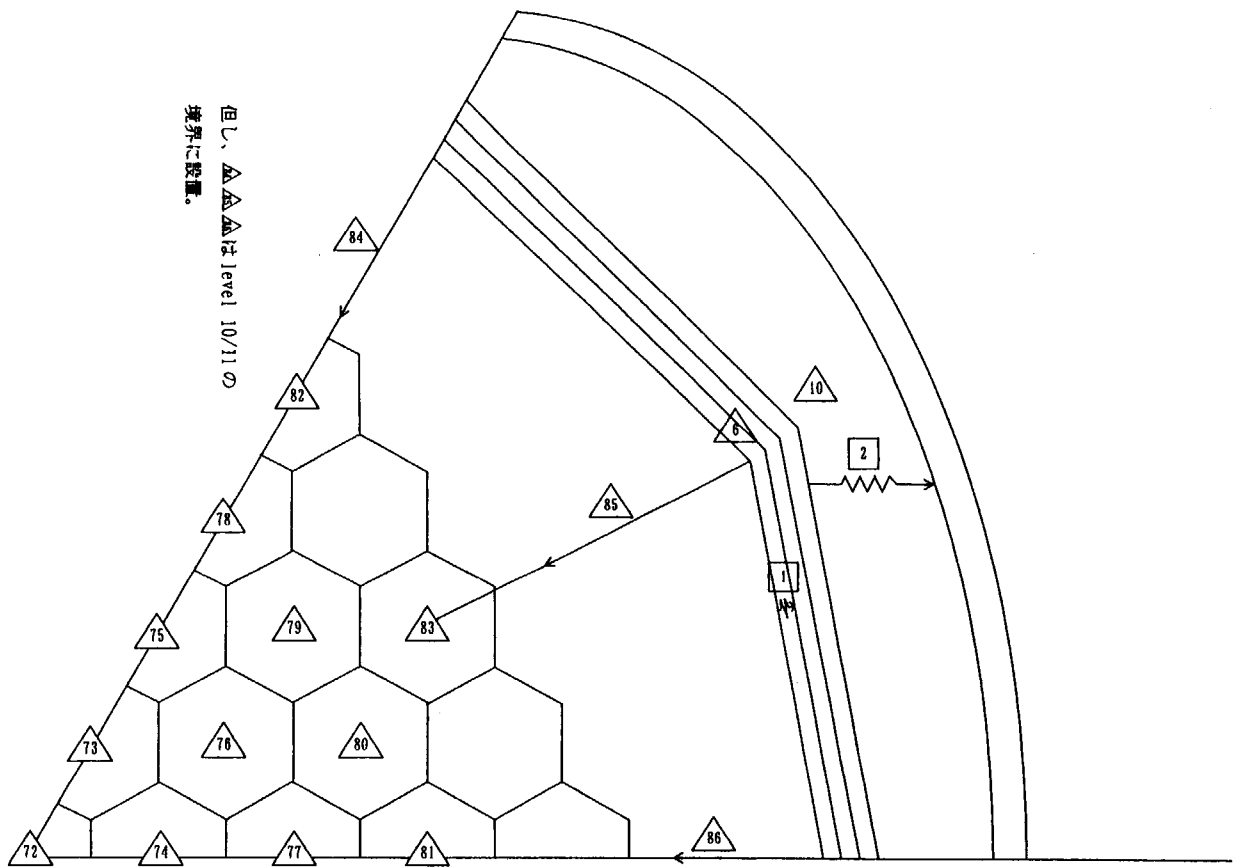


図 2-4(6) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-11 面)



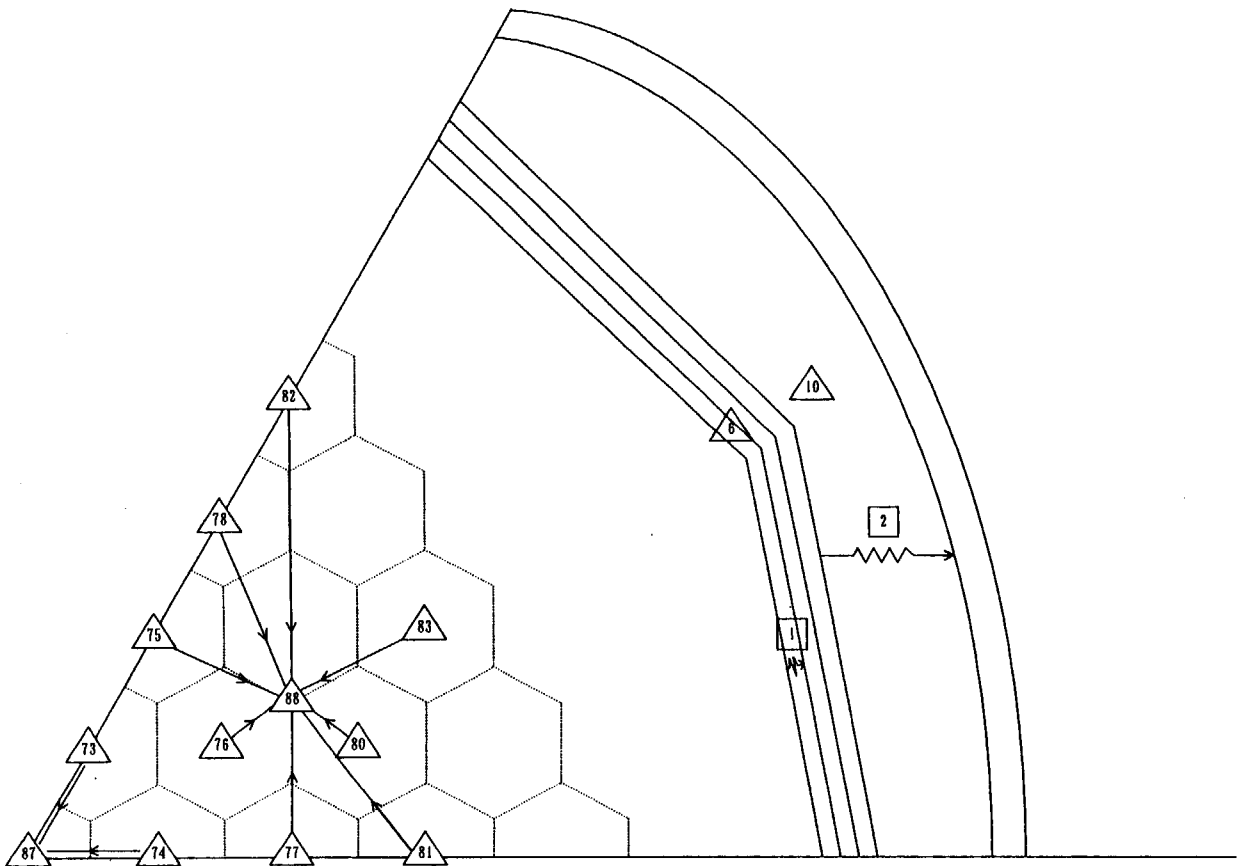


図 2-4(7) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-11 と Level-12 の境界面)

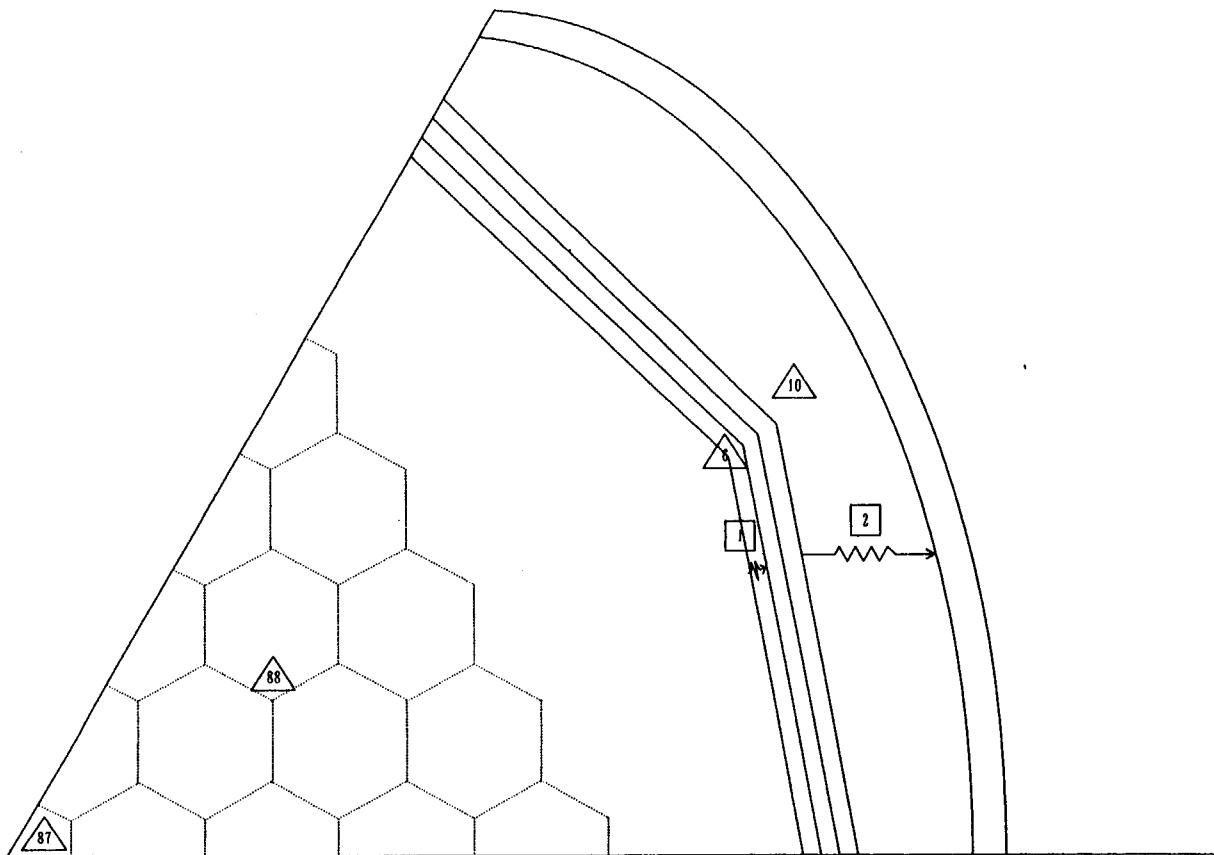


図 2-4(8) 流路モデル図 (水平方向 ; Level-12 面)

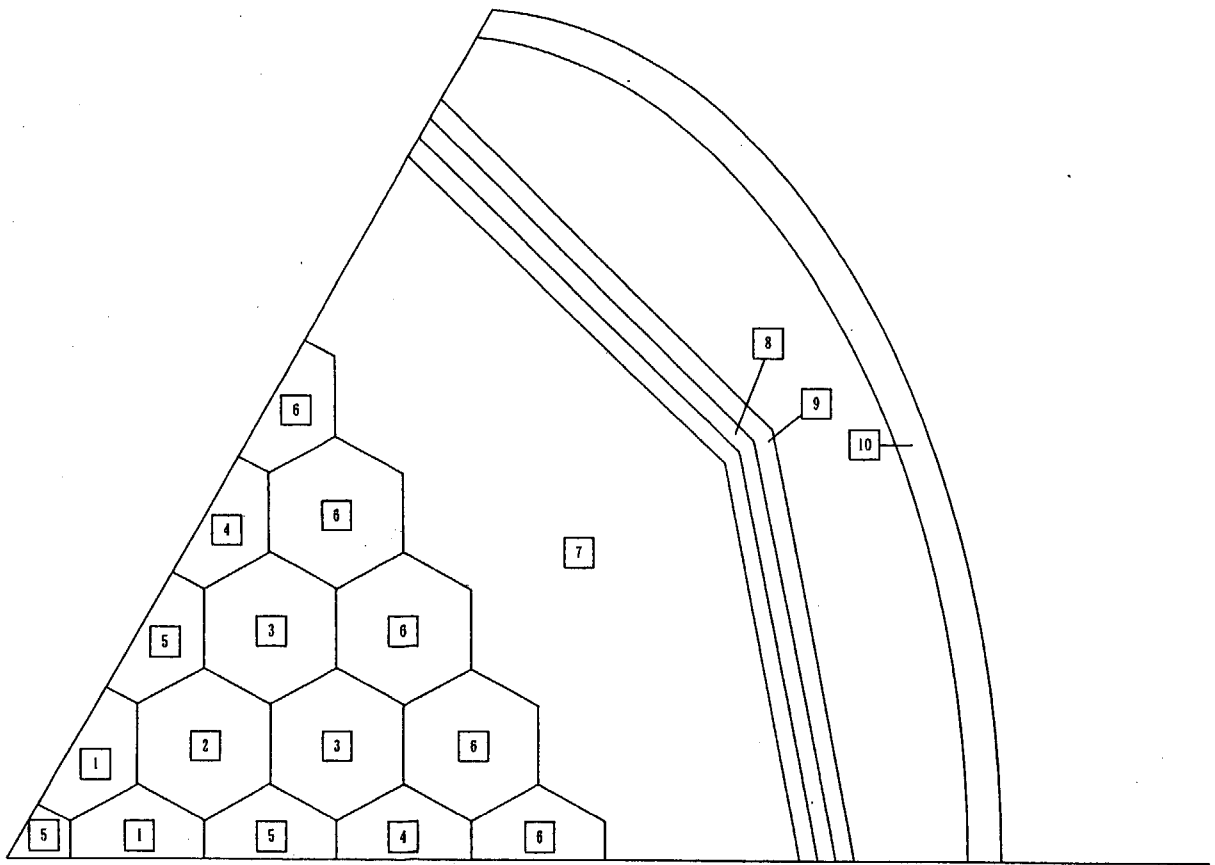


図 2-5 カラム番号一覧

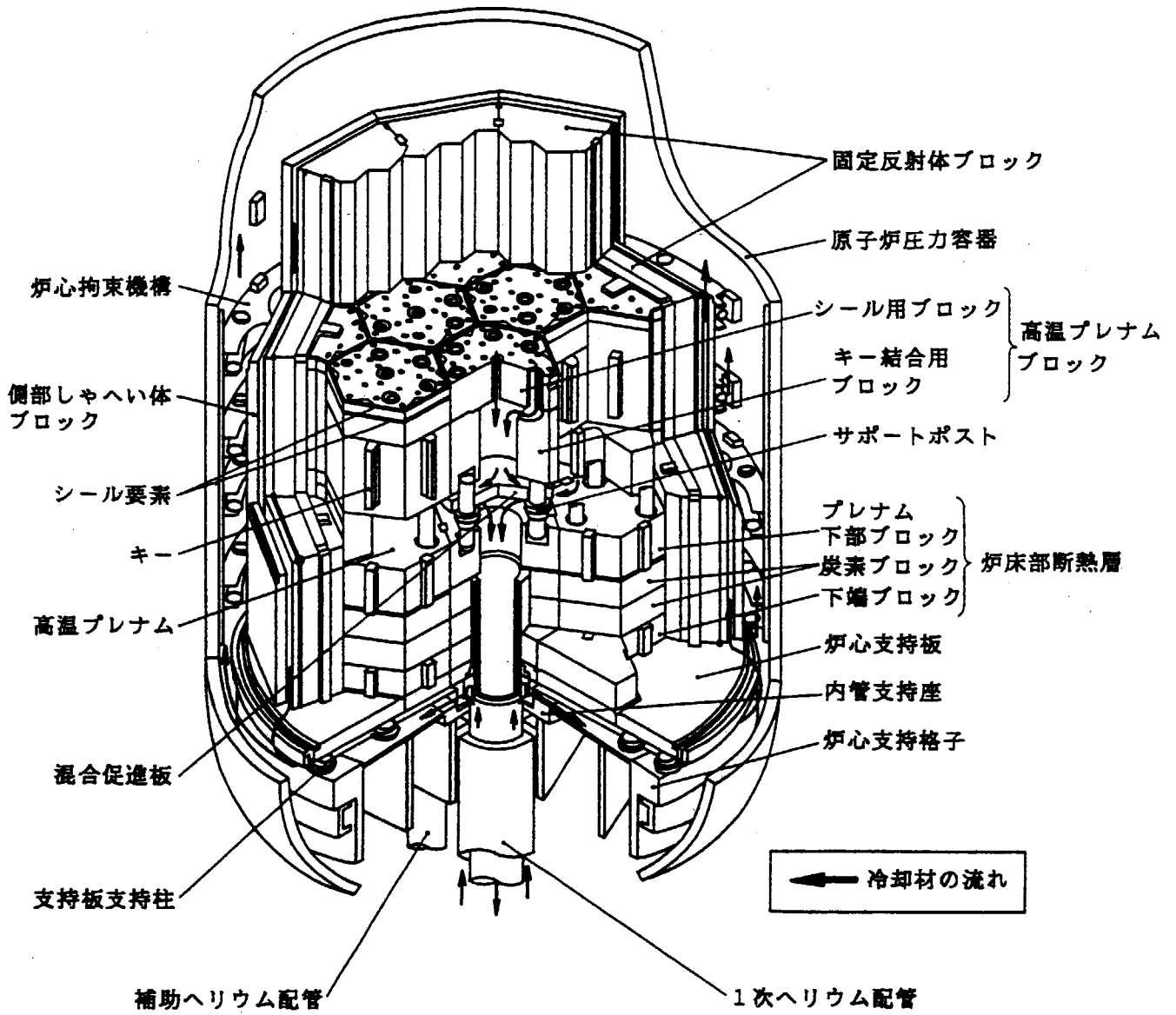


図 2-6 HTTR の炉床部構造図

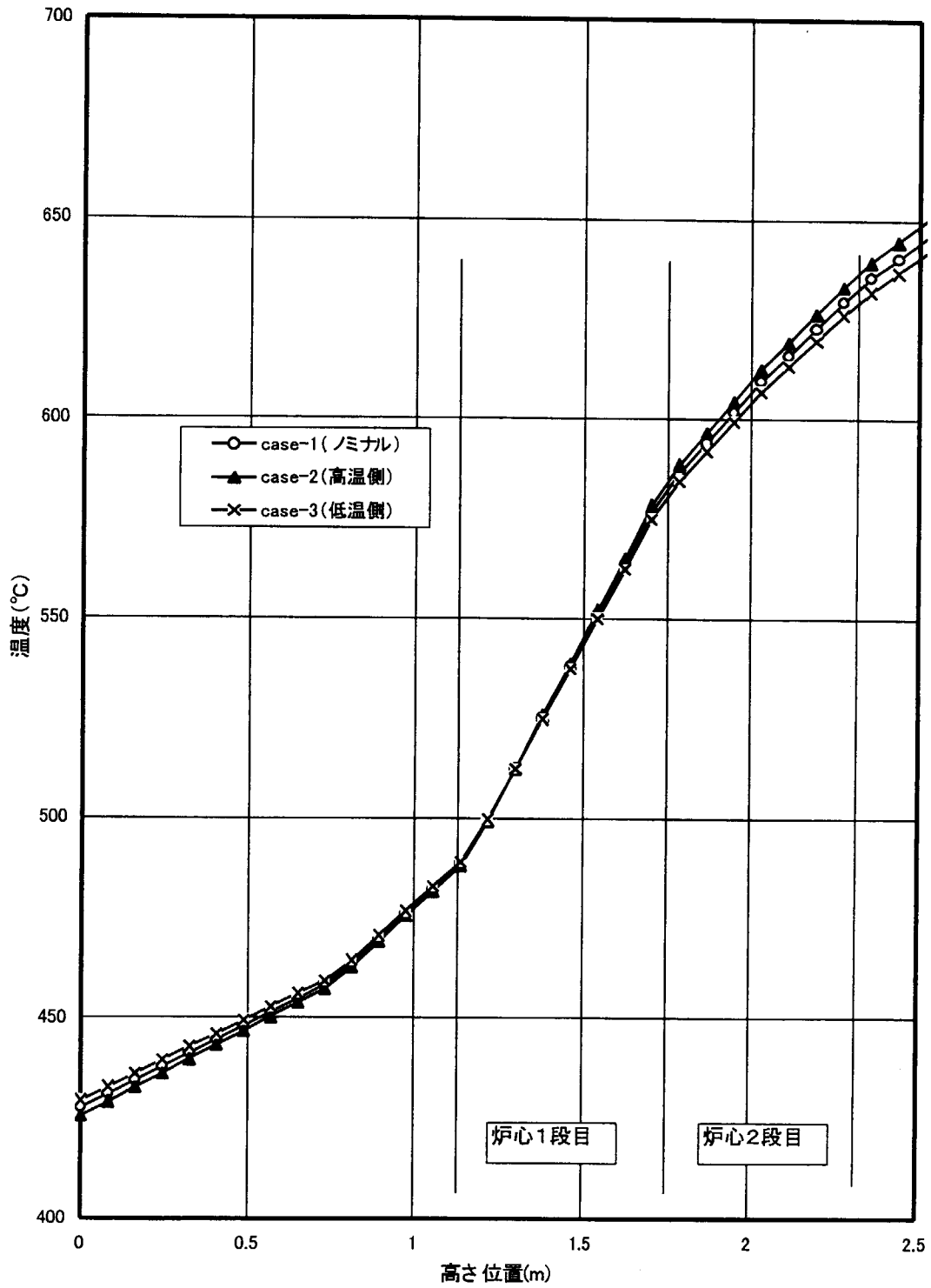


図 2-7 照射カラムの高さ方向の温度分布図

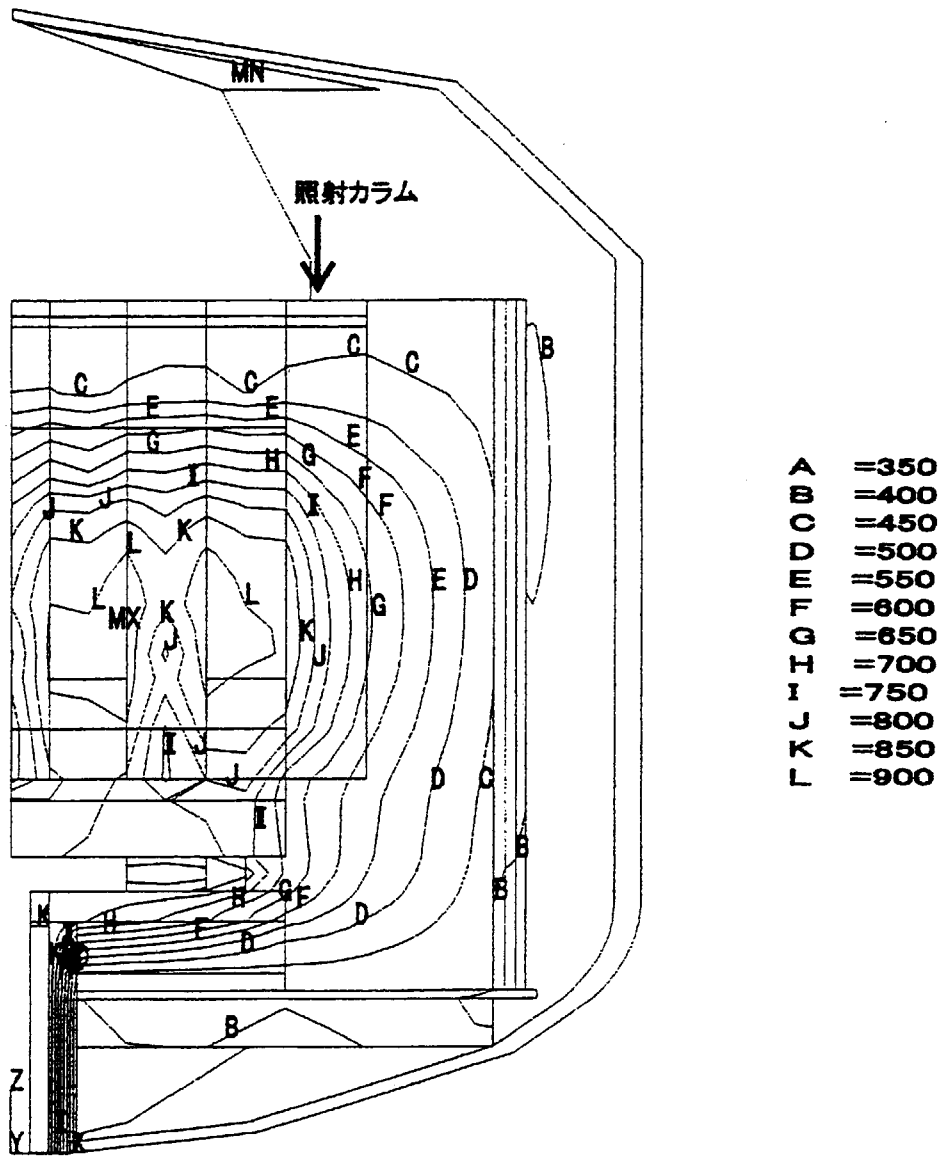


図 2-8(1) 炉心縦断面内の温度分布図  
 (解析：Case-1、ノミナルケース)

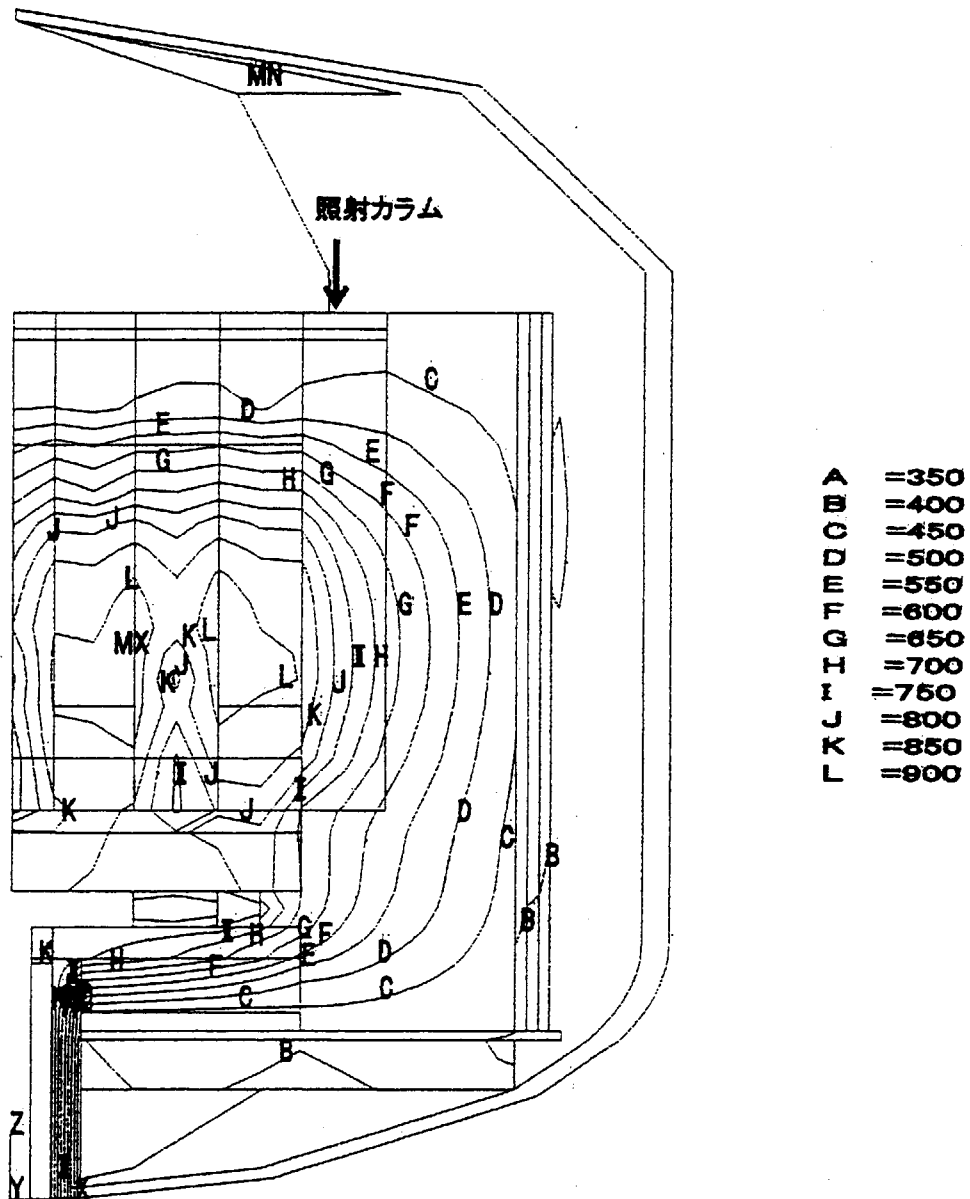


図 2-8(2) 炉心縦断面内の温度分布図  
 (解析：Case-2、照射カラム温度高温側評価条件)

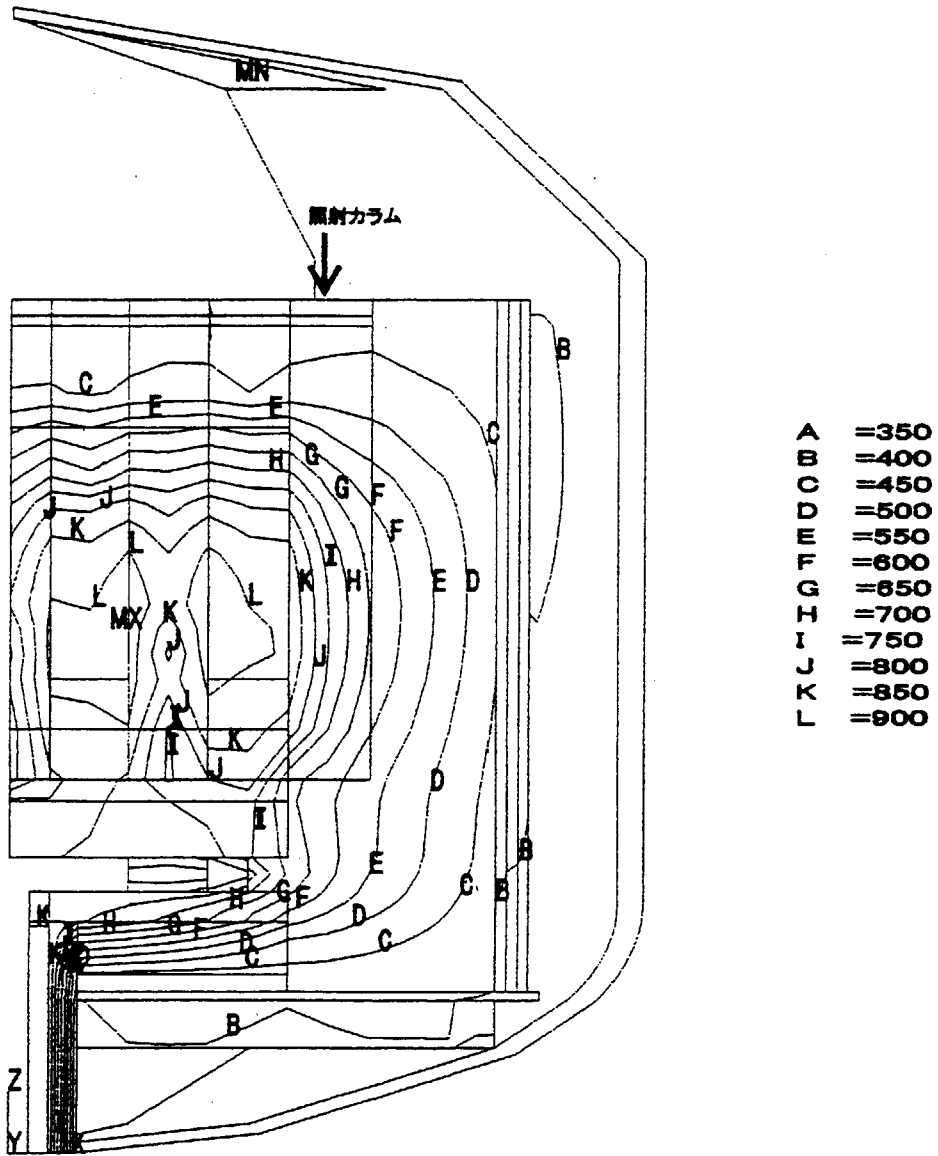


図 2-8(3) 炉心縦断面内の温度分布図  
 (解析: Case-3、照射カラム温度低温側評価条件)

### 3. 試料ホルダー及び照射試料の温度評価

本章では、照射キャプセルの温度を前章で求めた照射カラム内の発熱量及び照射カラム周囲の黒鉛ブロックの温度を熱的境界条件として求める。その後、得られた照射キャプセルの温度を熱的境界条件として、試料ホルダーの温度を評価するとともに、照射試験片温度の評価を行なう。

#### 3.1 照射キャプセルの温度評価

##### 3.1.1 解析方法

ここでの解析対象のキャプセルは、図 1-4 に示した照射キャプセルの炉心内に装荷される部分である。キャプセルの外筒はステンレス鋼製で、その中に黒鉛製の試料ホルダーが装荷される体系となっている。温度解析では、解析対象物の形状及び熱的境界条件の対象性を考慮し 2 次元軸対象でモデル化し、定常状態の温度解析を実施した。解析に用いた計算コードは NISA-II<sup>(10)</sup>である。図 3-1 に本解析に用いたメッシュ図を示す。使用した要素は伝熱解析用軸対象 8 節点四角形要素及び 6 節点三角形要素で、解析規模は要素数が 3178、節点数が 10086 である。

解析ケースは、表 3-1 に示すようにノミナル値ベースのもの (case1) と温度を高温側に見積もるよう発熱量を+20%、熱伝導率を-20%としたもの(case2)及び低温側に見積もるよう発熱量を-20%、熱伝導率を+20%としたもの (case3) の 3 ケースである。なお、解析に用いた熱伝導率を表 3-2 に示す。ここで、図 3-1 中の空間部分は 4MPa のヘリウムガスで満たされているものとし、ヘリウムガスによる熱伝導を考慮する。

##### 3.1.2 解析条件

照射キャプセルの温度解析では、2.2 節で示した照射カラム黒鉛ブロックの温度をキャプセル外表面の温度として、内部構造物の発熱を考慮した定常温度解析を行なった。照射キャプセル外表面の温度境界条件を表 3-3 に示す。また、照射キャプセル内部の発熱量は、2.1 節の結果から表 3-4 に示す値を用いる。

##### 3.1.3 解析結果

照射キャプセルの温度解析結果 (等温線図) を図 3-2 (Case1)、図 3-3 (Case2) 及び図 3-4 (Case3) に示す。試料ホルダーを装荷する位置は、図 1-4 に示した No.1、No.2、No.4、No.8 及び No.13 で、温度解析結果の図から、試料ホルダーを装荷する位置では軸方向及び径方向の温度勾配が小さいことがわかる。図 3-5 (Case1)、図 3-6 (Case2) 及び図 3-7 (Case3) に照射ユニットの中心部と外表面部の温度のモデル下端からの変化を示す。当然のことながら、中心部と外表面部との温度差は Case2>Case1>Case3 の順番に小さくなっている。温度差が大きい Case2 の場合でも、高温の炉内に入る照射キャプセル下端に近い部分で、温度差は 10°C以内となり、比較的均一に近い照射が可能であることがわかる。



### 3.2 試料ホルダーの温度評価

前節の解析により得られた照射キャプセル外表面温度を境界条件として、照射キャプセル内部の照射ホルダーの温度を評価する。

#### 3.2.1 解析方法

解析対象の試料ホルダーは、図 3-8(1)～(4)に示した Type-I、Type-II、Type-III 及び Type-IV の 4 種類で、図 3-9 に示す試料ホルダー容器内に装荷され容器蓋により固定される構造である。各試料ホルダーの照射キャプセル内への装荷位置及び温度評価での試料ホルダー名との対応を表 3-5 に示す。Type-II(1)と Type-II(2)は、ホルダーの形状は同じであるが装荷位置が異なるため温度境界及び発熱といった解析条件が異なる。

試料ホルダー内には、黒鉛系の試験片、SiC 系の試験片や熱伝導率の低いジルコニア系の試験片が装荷される。各試料ホルダーへの装荷試験片の詳細は参考文献を参照願いたい<sup>(3)</sup>。

ここでの解析では、照射試料の中でも熱伝導が比較的高い黒鉛系の試験片と熱伝導率が低いジルコニア系の試験片を解析対象とし、試料ホルダー内に装荷した試験片の温度を評価する。使用した計算コードは、有限要素法による汎用コード NISA-II である。図 3-10(1)～(4)に本解析に使用した 4 種類の試料ホルダーの解析メッシュ図を示す。使用した要素は、伝熱解析用軸対象 8 節点四角形要素及び 6 節点三角形要素で、解析規模は表 3-6 に示すように要素数が約 1400～2300、節点数が約 3000～5000 である。

解析ケースは、表 3-7 に示したようにノミナル値をベースとしたもの (Case1) と温度を高温側に見積もるよう発熱量を+20%、熱伝導率を-20%としたもの (Case2) 及び低温側に見積もるよ発熱量を-20%、熱伝導率を+20%としたもの (Case3) の 3 ケースである。なお、解析に用いたジルコニア及び黒鉛の熱伝導率を表 3-8 に示す。

#### 3.2.2 解析条件

試料ホルダーの外周部には、前節で求めた照射キャプセル内面温度を温度境界条件として与え、試料ホルダーの形状、装荷される材料 (黒鉛及びジルコニア) の内部発熱を考慮して温度解析を実施した。試料ホルダー外周部の温度境界を表 3-9 に示す。ここで、図 3-10 に示すそれぞれの試料ホルダーの解析メッシュ図で、中心の円形領域は断熱境界とした。また、2.1 節で求めた発熱量から定めた黒鉛及びジルコニアの発熱量を表 3-10 にまとめて示す。

Type-I 試料ホルダーの温度解析では、図 3-11(1)に示す Line2 上の試験片装荷位置 1 をジルコニア試験片とし、残りは黒鉛とした。また、Type-II 及び Type-

Ⅲ試料ホルダーでは、図 3-11(2)及び(3)に示す試験片装荷位置 1 をジルコニア試料とし、残りは黒鉛とした。さらに、Type-Ⅳ試料ホルダーには炭素繊維強化炭素材料 (C/C コンポジット) を装荷するため、図 3-11(4)に示す領域全てを黒鉛とした。なお、これらの図中の Line 番号は、温度評価ラインの番号を示している。

### 3.2.3 解析結果

#### (1) Type-Ⅰ試料ホルダーの温度解析結果

Type-Ⅰ試料ホルダーの温度解析結果を図 3-12 に示す。温度評価ラインの Line2 がジルコニア試料を装荷する領域を含むところである。Line2 以外は黒鉛系材料の領域で、Line 間で比較するとほとんど温度に差がない。図は、Line2 と Line6 を比較したものである。この図からわかるように、黒鉛系材料では試料装荷領域内の温度差が 1℃程度で、照射温度の平均は約 593℃となっている。すなわち、HTTR の中性子束のほぼピークとなる位置での照射でも、内部発熱による温度への影響はほとんどなく、ほぼ均一な照射温度で照射試験ができることがわかる。

一方、ジルコニア試験片では、ジルコニアの熱伝導率が低いことに起因して、試料装荷領域中心部の温度は 599℃となり極大値を示すが、試料装荷領域内の温度差は 5~6℃とそれほど大きくない。すなわち、熱伝導率の極端に悪いジルコニア試験片においても、ほぼ均一な温度条件での照射が可能であることがわかる。

さらに、温度を高温側及び低温側に見積もるように設定した場合についての比較を図 3-13 に示す。Line2 上のジルコニア試料装荷領域で比較しているが、ノミナル値の場合、最高温度約 599℃のものが、高めに見積もった場合約 4℃高い 603℃、低めに見積もった場合では約 2℃低い 597℃となり、発熱量及び熱伝導率の見積もり誤差の感度は低いことがわかる。また、試料装荷領域内の温度差もノミナルの条件では約 5~6℃であるが、高温側に見積もった場合には約 10℃と 2 倍程度、低めに見積もった場合には約 3~4℃と約半分程度となっている。

著者らは、過去に JMTR でのジルコニア試験片の照射を検討し、JMTR の発熱条件でジルコニア試験片の温度を評価したところ、試料内での温度差が 200℃~300℃以上となり、また試料とホルダーとのクリアランスの大小により温度の絶対値も大きく変化するといったことを明らかとしたが<sup>(11)</sup>、HTTR での照射の場合には内部発熱量が JMTR に比べ一桁以上小さいこともあり、中性子束の高い図 1-4 に示した本試料ホルダー位置 No.1 での照射では、温度がほぼ均一で照射試験が達成できることが明らかとなった。

#### (2) Type-Ⅱ試料ホルダーの温度解析結果

Type-Ⅱ試料ホルダーは、No.4 (解析ケース : Type-Ⅱ(1)) 及び No.8 解析ケース : Type-Ⅱ(2)の 2 か所の位置に装荷される (図 1-4 参照)。

## (i) Type-II(1)試料ホルダー

Type-II(1)試料ホルダーの温度解析結果を図 3-14 に示す。図中 Line3 がジルコニア試料の装荷領域を含むもので、Line 1 は黒鉛材の部分である。この図から、本試料ホルダーの装荷位置 No.4 (図 1-4 参照) では、黒鉛系材料の照射温度が約 557°C、試料装荷領域内の温度差は約 3°C とほぼ均一な温度での照射試験が可能であることがわかる。

一方、ジルコニア試験片については、最大温度が約 588°C で、試料装荷領域内の温度差は約 30°C となった。試料装荷領域内の温度差が Type-I 試料ホルダーに比べ増加したのは、ジルコニアの装荷領域が Type-II では大きくなっていること等に起因するものである。

ここで、ジルコニア試験片について、温度を高温側及び低温側に見積もるように設定した場合についての比較を図 3-15 に示す。ノミナル値の場合、最高温度が約 588°C のものが、高めに見積もった場合約 18°C 高い 606°C、低めに見積もった場合では約 10°C 低い 578°C となり、発熱量及び熱伝導率の見積もり誤差の感度は約 10~20°C 程度となった。また、試験片内の温度差も、ノミナルの条件では約 30°C であるが、高温側に見積もった場合には約 50°C、低めに見積もった場合には約 20°C となっている。すなわち、ジルコニア試験片の装荷領域が大きいと当然のことながら装荷領域内の温度差も大きくなる。

## (ii) Type-II(2)試料ホルダー

Type-II(2)試料ホルダーの温度解析結果を図 3-16 に示す。Type-II(1)試料ホルダーと同様、図中 Line3 がジルコニア試験片の存在するところ、Line 1 は黒鉛材の部分である。この図から、本試料ホルダー装荷位置 No.8 (図 1-4 参照) では黒鉛系材料の照射温度が約 513°C、試料ホルダーの内側と外側の温度差は約 2°C とほぼ均一な照射温度条件となることがわかる。ジルコニア試験片については、最大温度が約 542°C で、試験片内での温度差は約 25°C である。

一方、ジルコニア試験片について、温度を高温側及び低温側に見積もるように設定した場合についての比較を図 3-17 に示す。ノミナル値の場合最高温度が約 542°C のものが、高めに見積もった場合約 16°C 高い 558°C、低めに見積もった場合では約 10°C 低い 532°C で、発熱量及び熱伝導率の見積もり誤差の感度は約 10~16°C 程度である。また、試験片内の温度差も、ノミナルの条件では約 25°C であるが、高温側に見積もった場合には約 40°C、低めに見積もった場合には約 16°C となっている。すなわち、Type-II(2)の試料ホルダー装荷位置 No.8 は、炉心から上方に遠ざかった位置であるため内部発熱量が減少し、このため試料装荷領域内の温度差が小さくなったものと考えられる。

### (3) Type-III 試料ホルダーの温度解析結果

Type-III 試料ホルダーの温度解析結果を図 3-18 に示す。図中 Line6 がジルコニア試料の装荷領域を含むもので、Line3 は黒鉛材の部分である。なお、Line6 以外の黒鉛系材料部分の温度分布はほとんど同じである。この図から、本試料ホルダーの装荷位置 No.13 (図 1-4 参照) では、黒鉛系材料の照射温度が約 446°C、試料装荷領域内の温度差は約 0.2°C 以下と極めて均一な温度での照射試験ができることがわかる。また、ジルコニア試験片についても、最大温度が約 447.4°C で、試料装荷領域内での温度差は約 1°C とこれも極めて均一な温度での照射試験ができることがわかる。これは、試料ホルダーの装荷位置が炉心からかなり離れ、内部発熱量が表 3-10 に示したようにその他のものと比べて一桁以上小さくなったことによるものである。

参考までに、ジルコニア試験片について、温度を高温側及び低温側に見積もるよう設定した場合についての比較を図 3-19 に示す。ノミナル値の場合、最高温度が約 447.4°C のものが、高めに見積もった場合約 0.6°C 高い 448°C、低めに見積もった場合では約 0.4°C 低い 447°C となり、発熱量及び熱伝導率の見積もり誤差の感度は約 1°C 未満である。また、試験片内の温度差も、高温側に見積もった場合でも約 2°C 以下で、均一な温度での照射試験が可能であることがわかる。

### (4) Type-IV 試料ホルダーの温度解析結果

C/C コンポジットのみを装荷した Type-IV 試料ホルダーに対する温度解析結果を図 3-20 に示す。この図から、本試料ホルダーの装荷位置 No.2 (図 1-4 参照) では、装荷領域内の最高温度が約 582.5°C で、試料装荷領域内の温度差は約 2°C 以下と極めて均一な温度での照射試験ができることがわかる。さらに、温度を高温側及び低温側に見積もるよう設定した場合についての比較を図 3-21 に示す。ノミナル値で評価した場合、装荷領域内の最高温度が約 582.5°C のものが、高めに見積もった場合約 0.5°C 高い 583°C、低めに見積もった場合では約 0.5°C 低い 582°C となり、発熱量及び熱伝導率の見積もり誤差の感度は極めて低いことがわかる。これは、黒鉛の内部発熱による熱発生量にくらべて黒鉛の熱伝導率が高いために伝熱量が大きくなっていることによる。

なお、図 3-11(1)~(4)に示した各照射ホルダーの温度評価ライン上の温度分布を付録 2 に参考までに示す。

## 3.3 照射試料の温度評価

試験片を照射試料ホルダーに装荷して照射する際、実際には試料ホルダーと試験片との間にギャップが存在するが、3.2 節での試料装荷領域での温度評価ではこれを無視して連続体として熱伝導を扱っていた。そこで、実際に即した体系として、ここでは照射試料と黒鉛製試料ホルダーとの間のギャップが与える試験片温度への影響を検討する。

### 3.3.1 解析方法

試料ホルダー内の試験片装荷領域の大きさを考慮して、ここでは直径 20mm の試験片を想定した。試験片のまわりには 4MPa のヘリウムガスで満たされた環状のギャップを考慮し、そのまわりに黒鉛製試験片ホルダーとして一定温度で厚さ 20mm の円筒状黒鉛を配置した。ギャップ幅としては、0mm、1mm、2mm、5mm 及び 10mm の 5 種類とした。試験片装荷領域の材料としては、熱伝導率の高い黒鉛と逆に熱伝導率の低いジルコニアを評価の代表として選んだ。

解析には有限要素法による汎用コード NISA-II を用いた。図 3-22(1)~(5)に本解析に使用した 5 種類のギャップ幅の異なる解析モデルを示す。使用した要素は、伝熱解析用軸対象 6 節点三角形要素で、解析規模は表 3-11 に示すように要素数が約 700~1100、節点数が約 1400~2300 である。

### 3.3.2 解析条件

内部発熱量の大小が解析結果に与える影響が大きいと考えられるため、解析では内部発熱量が大きい Type-I 試験片ホルダーを対象とする。すなわち、試験片ホルダーの温度を、Type-I 試験片ホルダー装荷位置 (No.1、図 1-4 参照) 中央高さにおける照射キャプセルの温度 (=593.4°C) とした。また、ギャップ部分は 4MPa のヘリウムガスに満たされているものとし、ヘリウムガスによる熱伝導を考慮した。解析に用いた発熱量及び熱伝導率は、表 3-12 及び表 3-13 に示す。

### 3.3.3 解析結果

黒鉛試験片及びジルコニア試験片に対する試験片と試験片ホルダーのギャップを変化させた場合の試験片の温度を図 3-23(1)及び(2)に示す。黒鉛試験片の場合には、試験片内の温度がほぼ均一となり、ギャップが 0mm では約 593.5°C、ギャップが 1mm ではそれよりも約 0.3°C 高い約 593.8°C とギャップの影響がほとんど現れないことがわかる。試料は黒鉛製の詰め具によりギャップをなるべく持たないような装荷をしているため、ギャップ幅は実際 1mm より小さくなっている。解析での最大ギャップ幅 10mm の場合でも、ギャップの無い場合に比べて約 2.3°C 高い 595.8°C と大幅にギャップ幅が増加しても試験片温度にはほとんど影響していないことがわかる。

一方、ジルコニア試験片では、図 23(2)に示したように試験片内で温度勾配を生じている。ギャップが無い場合には、試験片最高温度は約 606.2°C で試験片内で約 13°C の温度勾配を生じている。ギャップ幅が大きくなると試験片最高温度も上昇し、ギャップ幅 1mm では約 607°C、10mm では約 614°C となるが、試験片内の温度差は約 14°C とギャップが変化してもそれほど変わっていない。すなわち、ギャップ幅の影響は試験片最高温度には顕著に表われるが、試験片内の温度差には影響しないことがわかる。

以上、試験片の代表的なものとして、熱伝導率の比較的高い黒鉛材と熱伝導率の低いジルコニアを対象に試験片温度に及ぼすギャップの影響を検討したが、実際の試験片装荷におけるギャップ幅（1mm 以下）を考慮しても評価温度に与える影響は小さいことが明らかとなった。

表 3-1 照射キャプセルの温度評価の解析ケース

解析ケース	発 熱 量	熱 伝 導 率
Case 1	ノミナル値	ノミナル値
Case 2	ノミナル値 + 20%	ノミナル値 - 20%
Case 3	ノミナル値 - 20%	ノミナル値 + 20%

表3-2 照射ユニットの温度解析に用いた熱伝導率

(1) ヘリウム及び金属

ケース名	熱伝導率 (W/mm・°C)	
	ヘリウム (4MPa)	金属 (SUS304)
ノミナル	1.22E-02	2.25E-02
高温側	9.76E-03	1.80E-02
低温側	1.46E-02	2.70E-02

\*:800Kの値を用いた

(2) 黒鉛

黒鉛の熱伝導率は、温度依存性を考慮した以下に示す式を用いた

$$K_{(T)} = C_0 + C_1 * T + C_2 * T^2 + C_3 * T^3 + C_4 * T^4$$

$K_{(T)}$  : 温度Tにおける熱伝導率 (W/mm・°C)

T : 温度 (°C)

$C_0 \sim C_4$  : 定数

定数 $C_0 \sim C_4$ は以下に示すとおりである。

	ノミナル	高温側	低温側
$C_0$	1.290E-01	1.032E-01	1.548E-01
$C_1$	-1.707E-04	-1.707E-04	-1.707E-04
$C_2$	1.397E-07	1.397E-07	1.397E-07
$C_3$	-5.984E-11	-5.984E-11	-5.984E-11
$C_4$	1.092E-14	1.092E-14	1.092E-14

表3-3 照射キャプセル外表面の温度境界条件

(1) 2.2節で求めた温度

キャプセル高さ (mm)	キャプセル外表面温度 (°C)
-70.0	626.0
510.0	554.0
1090.0	491.0
1670.0	429.0
2250.0	421.0
2647.0	400.0

原子炉炉内中心部



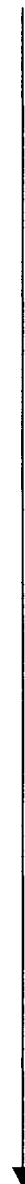
炉心上部

\*: 照射キャプセル最上部

(2) キャプセル外表面温度境界条件

キャプセル高さ (mm)	キャプセル外表面温度 (°C)
0.0	617.3
50.0	611.1
150.0	598.7
250.0	586.3
350.0	573.9
450.0	561.4
550.0	549.7
650.0	538.8
750.0	527.9
850.0	517.1
950.0	506.2
1050.0	495.3
1150.0	484.6
1260.0	472.8
1360.0	462.1
1460.0	451.4
1560.0	440.8
1660.0	430.1
1760.0	427.8
1860.0	426.4
1942.0	425.2
2042.0	423.9
2142.0	422.5
2242.0	421.1
2342.0	416.1
2442.0	410.8
2542.0	405.6
2647.0	400.0

\*: 照射キャプセル最下部



\*: 照射キャプセル最上部



表3-4 照射キャプセルの温度評価に用いる発熱量

(1) 黒鉛の発熱量 (W/mm<sup>3</sup>)

	ノミナル	高温側	低温側
炉心2段目下	3.85E-04	4.62E-04	3.08E-04
炉心2段目中	4.37E-04	5.25E-04	3.50E-04
炉心1段目下	4.55E-04	5.46E-04	3.64E-04
炉心1段目中	4.20E-04	5.04E-04	3.36E-04
可反2段目下	2.10E-04	2.52E-04	1.68E-04
可反2段目中	5.25E-05	6.29E-05	4.20E-05
可反1段目下	1.75E-05	2.10E-05	1.40E-05
可反1段目中	1.75E-05	2.10E-05	1.40E-05

(2) SUSの発熱量 (W/mm<sup>3</sup>)

	ノミナル	高温側	低温側
炉心2段目下	1.5860E-03	1.9032E-03	1.2688E-03
炉心2段目中	1.8239E-03	2.1887E-03	1.4591E-03
炉心1段目下	1.9032E-03	2.2838E-03	1.5226E-03
炉心1段目中	1.7446E-03	2.0935E-03	1.3957E-03
可反2段目下	8.7230E-04	1.0468E-03	6.9784E-04
可反2段目中	2.3790E-04	2.8548E-04	1.9032E-04
可反1段目下	7.9300E-05	9.5160E-05	6.3440E-05
可反1段目中	7.9300E-05	9.5160E-05	6.3440E-05

	高さ (mm)		
	下端		上端
炉心2段目下	0.0	~	150.0
炉心2段目中	150.0	~	350.0
炉心1段目下	350.0	~	650.0
炉心1段目中	650.0	~	900.0
可反2段目下	900.0	~	1150.0
可反2段目中	1150.0	~	1460.0
可反1段目下	1460.0	~	1710.0
可反1段目中	1710.0	~	1942.0

表 3-5 各試料ホルダーの照射キャプセル内への装荷位置

キャプセル内装荷位置 (下図参照)	装荷試料ホルダーの種類	試料ホルダーの温度解析 でのホルダー名
No.1	Type-I	Type-I
No.2	Type-IV	Type-IV
No.4	Type-II	Type-II (1)
No.8	Type-II	Type-II (2)
No.13	Type-III	Type-III

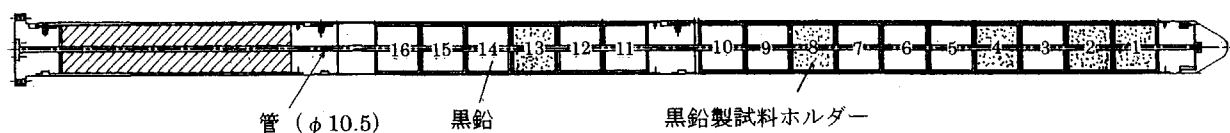


表 3-6 試料ホルダー温度解析の解析規模

解析対象試料ホルダー	要素数	節点数
Type-I	2344	4800
Type-II	2158	4428
Type-III	2298	4708
Type-IV	1408	2928

表 3-7 試料ホルダー温度解析の解析ケース

## (1) ノミナルケース (Case1)

解析対象試料ホルダー	解析ケース名	キャプセル内装荷位置
Type-I	Type-I	200.0mm
Type-II	Type-II (1)	500.0mm
Type-II	Type-II (2)	900.0mm
Type-III	Type-III	1510.0mm
Type-IV	Type-IV	300.0mm

## (2) 高温側ケース (Case2)

解析対象試料ホルダー	解析ケース名	キャプセル内装荷位置
Type-I	Type-I	200.0mm
Type-II	Type-II (1)	500.0mm
Type-II	Type-II (2)	900.0mm
Type-III	Type-III	1510.0mm
Type-IV	Type-IV	300.0mm

## (3) 低温側ケース (Case3)

解析対象試料ホルダー	解析ケース名	キャプセル内装荷位置
Type-I	Type-I	200.0mm
Type-II	Type-II (1)	500.0mm
Type-II	Type-II (2)	900.0mm
Type-III	Type-III	1510.0mm
Type-IV	Type-IV	300.0mm

表 3-8 試料ホルダー温度解析の熱伝導率

	熱伝導率 (W/mm・°C)
ジルコニア*1	0.0029*2

\*1: 3mol%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加のジルコニア

\*2: 600°Cの値

黒鉛の熱伝導率は、温度依存性を考慮した以下の式を用いた。

$$K_{(T)} = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot T^3 + C_4 \cdot T^4$$

$K_{(T)}$  : 温度Tにおける熱伝導率 (W/mm・°C)

T : 温度 (°C)

$C_0 \sim C_4$  : 定数

定数 $C_0 \sim C_4$ は以下に示すとおりである。

	ノミナル	高温側	低温側
$C_0$	1.290E-01	1.032E-01	1.548E-01
$C_1$	-1.707E-04	-1.707E-04	-1.707E-04
$C_2$	1.397E-07	1.397E-07	1.397E-07
$C_3$	-5.984E-11	-5.984E-11	-5.984E-11
$C_4$	1.092E-14	1.092E-14	1.092E-14

表 3-9 試料ホルダー温度解析の温度境界条件

ホルダー名	試料ホルダーの位置	温度 (°C)
Type-I	炉心 2 段目中	592.5
Type-II (1)	炉心 1 段目下	555.2
Type-II (2)	炉心 1 段目中	511.6
Type-III	可反 1 段目下	446.1
Type-IV	炉心 2 段目中	581.3

表 3-10 試料ホルダー温度解析の発熱量

## (1) 黒鉛の発熱量

	位置	発熱量 (W/mm <sup>3</sup> )		
		ノミナル	高温側	低温側
Type-I	炉心 2 段目中	4.38E-04	5.25E-04	3.50E-04
Type-II 1	炉心 1 段目下	4.55E-04	5.46E-04	3.64E-04
Type-II 2	炉心 1 段目中	4.20E-04	5.04E-04	3.36E-04
Type-III	可反 1 段目下	1.75E-05	2.10E-05	1.40E-05
Type-IV	炉心 2 段目中	4.38E-04	5.25E-04	3.50E-04

## (2) ジルコニアの発熱量

	位置	発熱量 (W/mm <sup>3</sup> )		
		ノミナル	高温側	低温側
Type-I	炉心 2 段目中	1.21E-03	1.45E-03	9.68E-04
Type-II 1	炉心 1 段目下	1.27E-03	1.52E-03	1.02E-03
Type-II 2	炉心 1 段目中	1.15E-03	1.38E-03	9.20E-04
Type-III	可反 1 段目下	6.05E-05	7.26E-05	4.84E-05
Type-IV	炉心 2 段目中	装荷せず	装荷せず	装荷せず

表 3-11 照射試料温度解析の解析規模

試料と試料ホルダーとの ギャップ幅	要素数	節点数
0 mm	704	1473
1 mm	746	1557
2 mm	720	1505
5 mm	914	1901
10 mm	1094	2269

表 3-12 照射試料の発熱量 (試料装荷位置 No.1)

	発熱量
	(W/mm <sup>3</sup> )
黒鉛	4.38E-04
ジルコニア	1.21E-03

表 3-13 照射試料温度解析の熱伝導率

熱伝導率 (W/mm・°C)	
ヘリウム	ジルコニア
2.90E-03	6.65E-03

黒鉛の熱伝導率は、温度依存性を考慮した以下に示す式で求める。

$$K_{(T)} = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot T^3 + C_4 \cdot T^4$$

$K_{(T)}$  : 温度Tにおける熱伝導率 (W/mm・°C)

T : 温度 (°C)

$C_0 \sim C_4$  : 定数

定数 $C_0 \sim C_4$ は以下に示すとおりである。

	数 値
$C_0$	1.290E-01
$C_1$	-1.707E-04
$C_2$	1.397E-07
$C_3$	-5.984E-11
$C_4$	1.092E-14

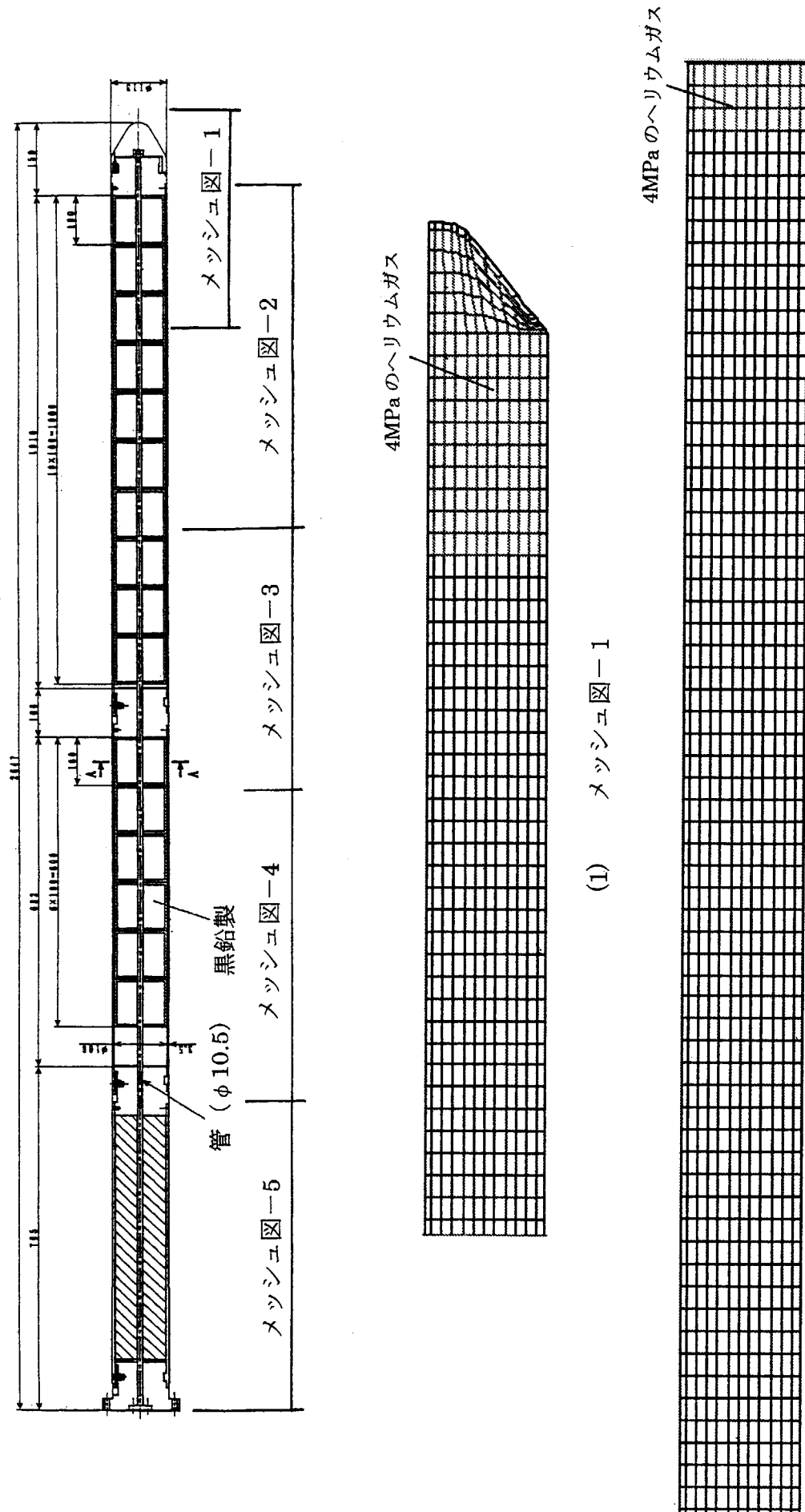


図 3-1(1) 照射キャプセル温度解析に用いた解析メッシュ図



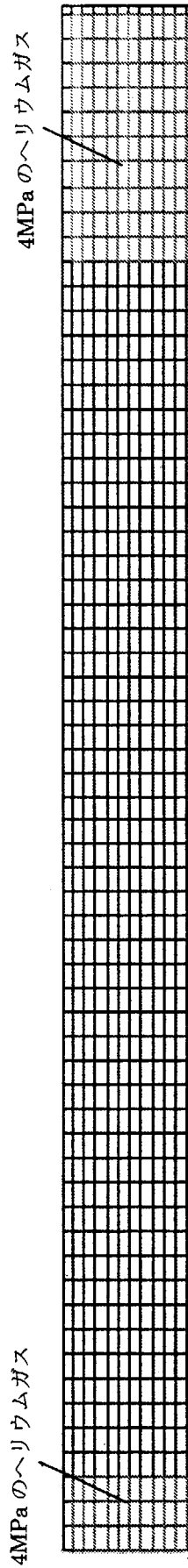
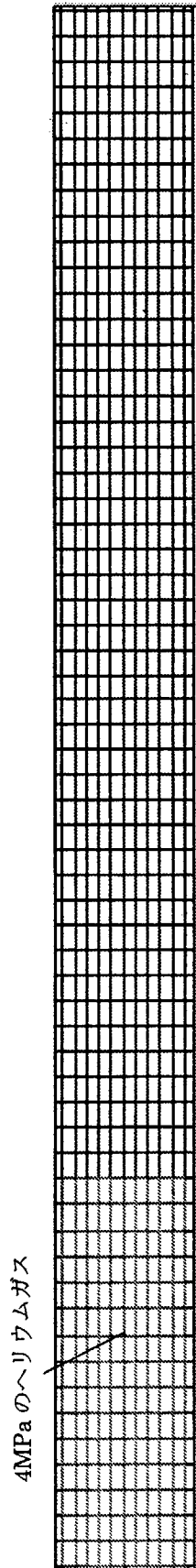
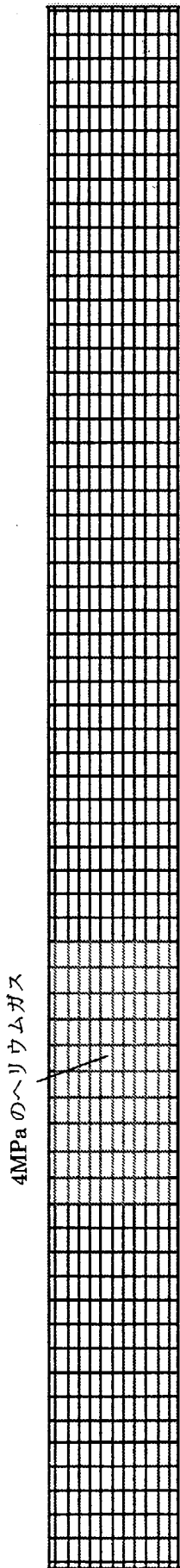


図 3-1(2) 照射キャプセル温度解析に用いた解析メッシュ図

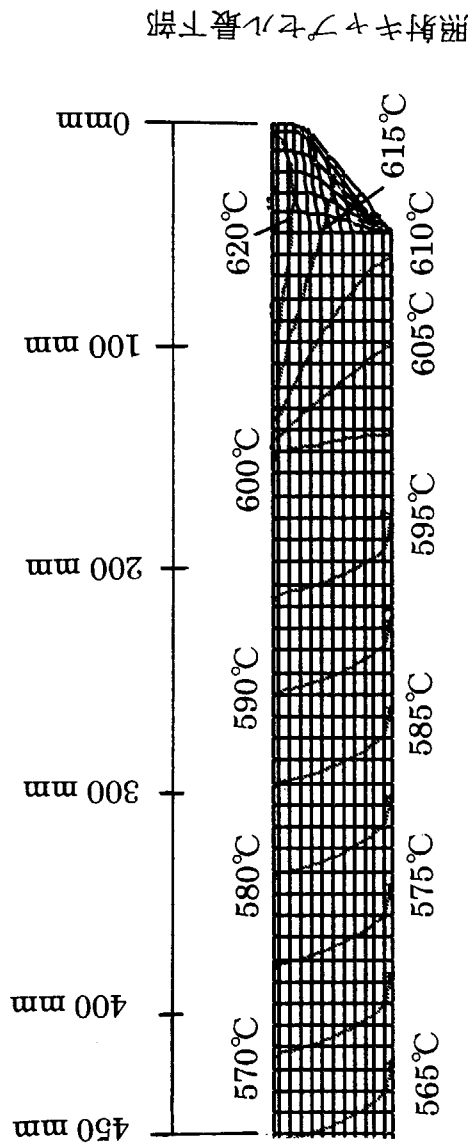
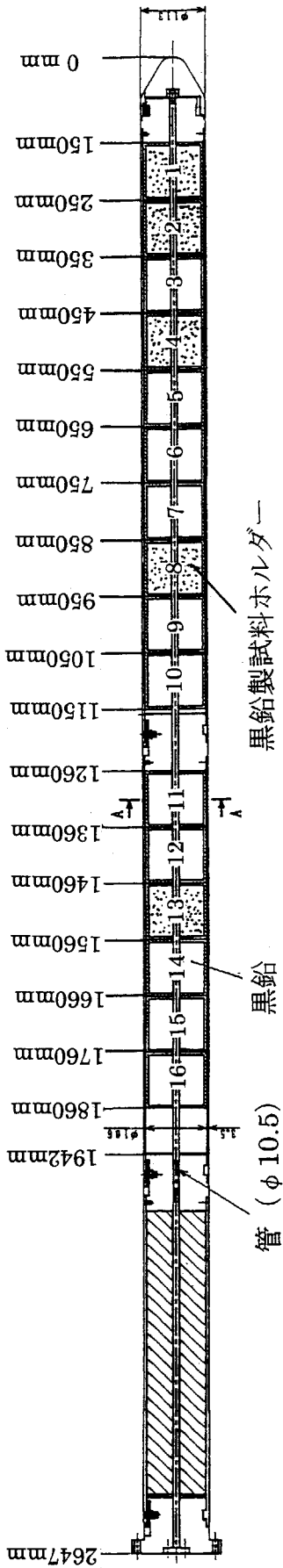


図 3-2(1) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case1 ; 0mm から 450mm)

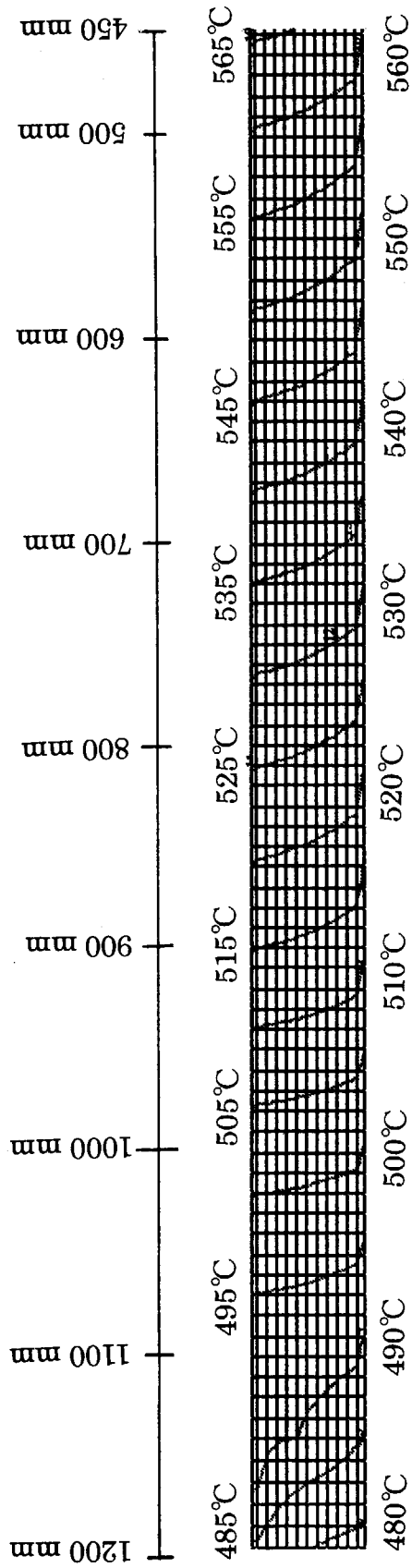
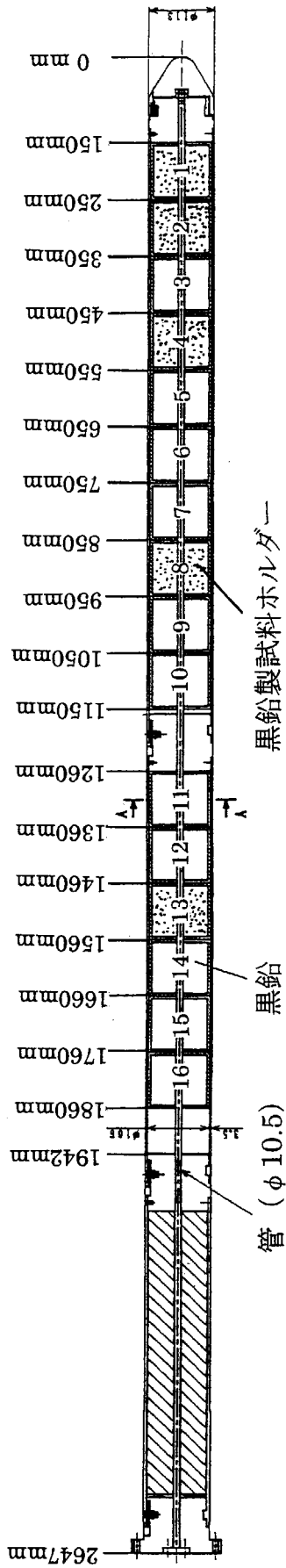


図 3-2(2) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case1 ; 450mm から 1200mm)

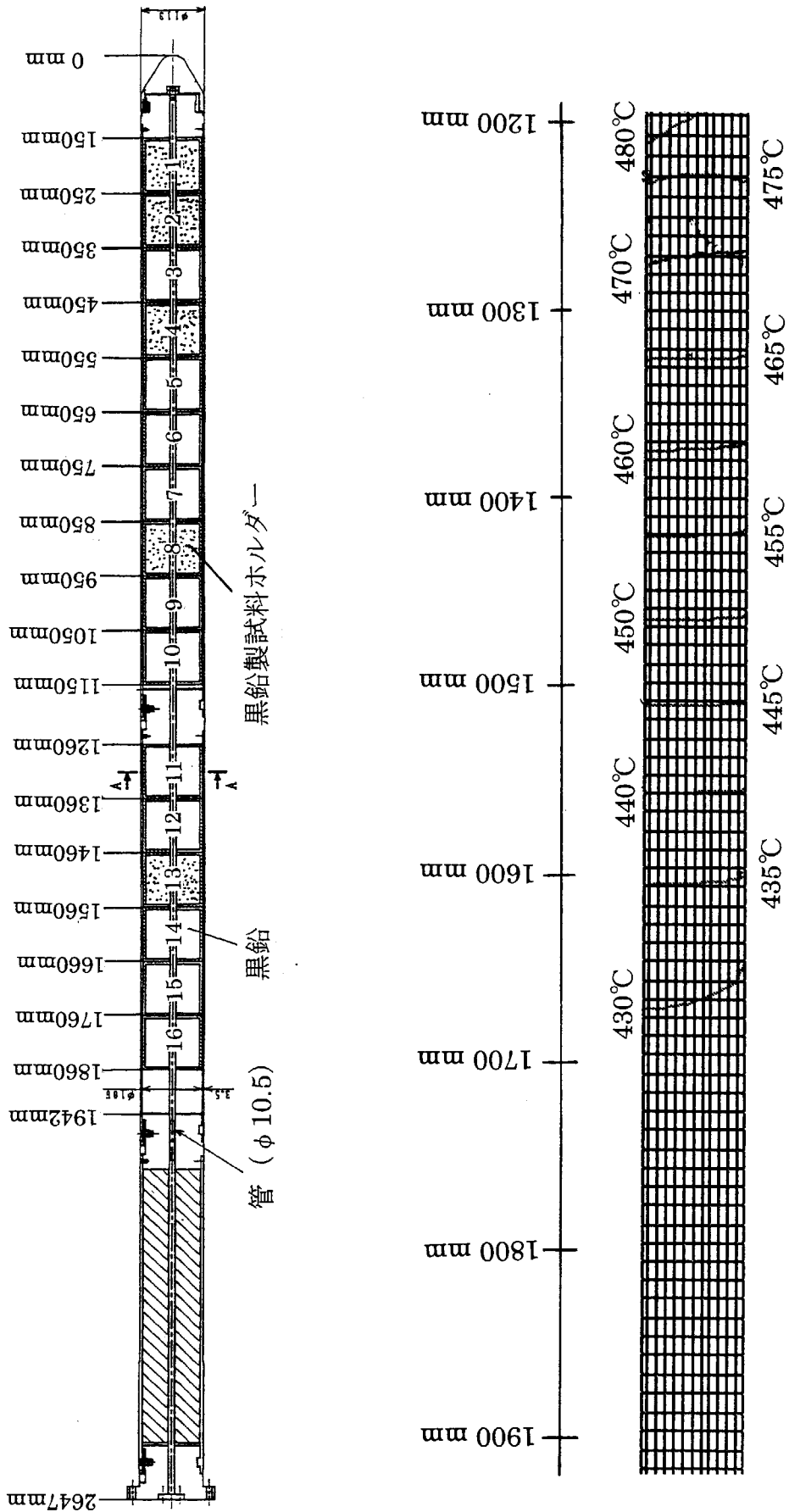


図 3-2(3) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case1 ; 1200mm から 1900mm)

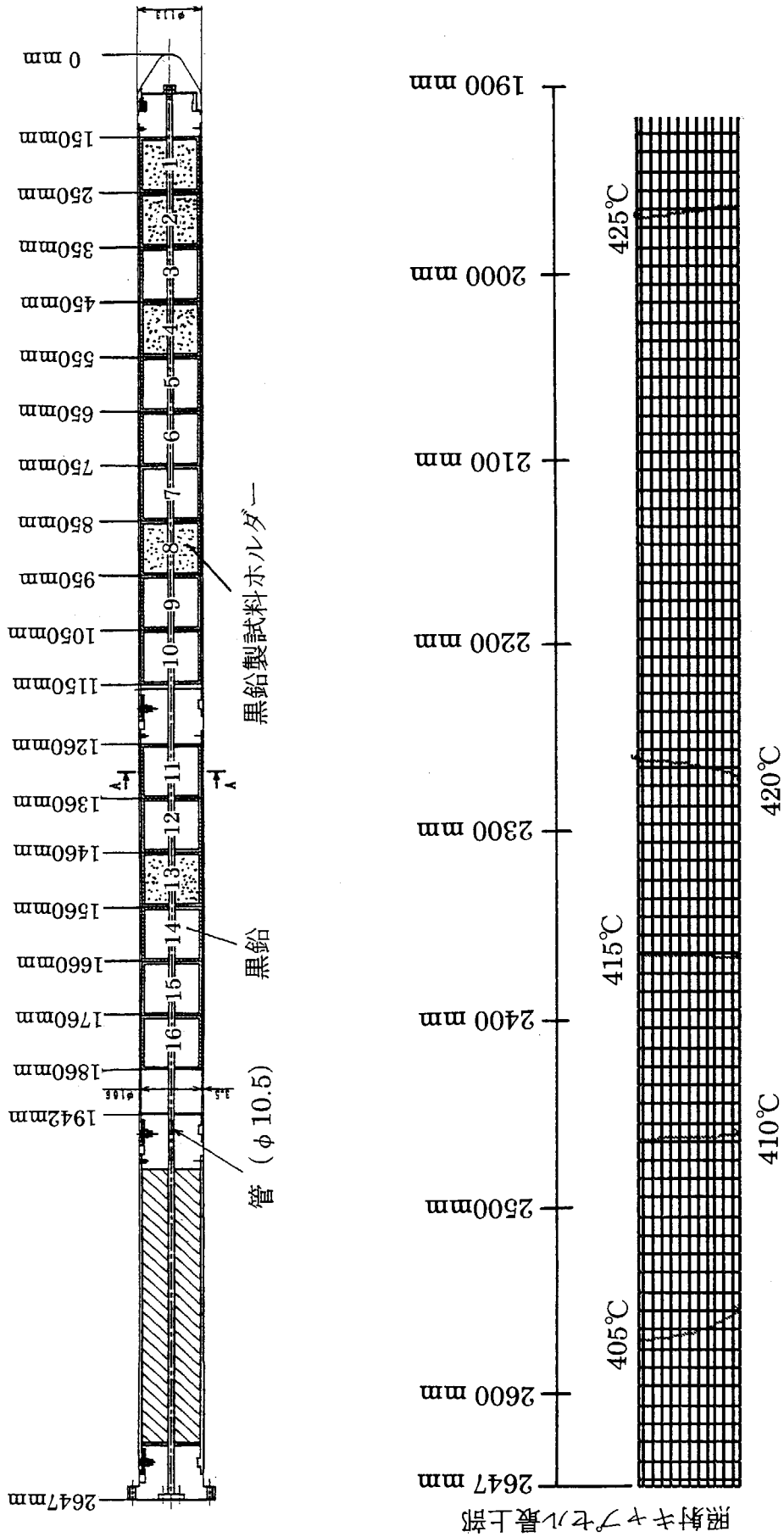


図 3-2(4) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case1 ; 1900mm から 2647mm)

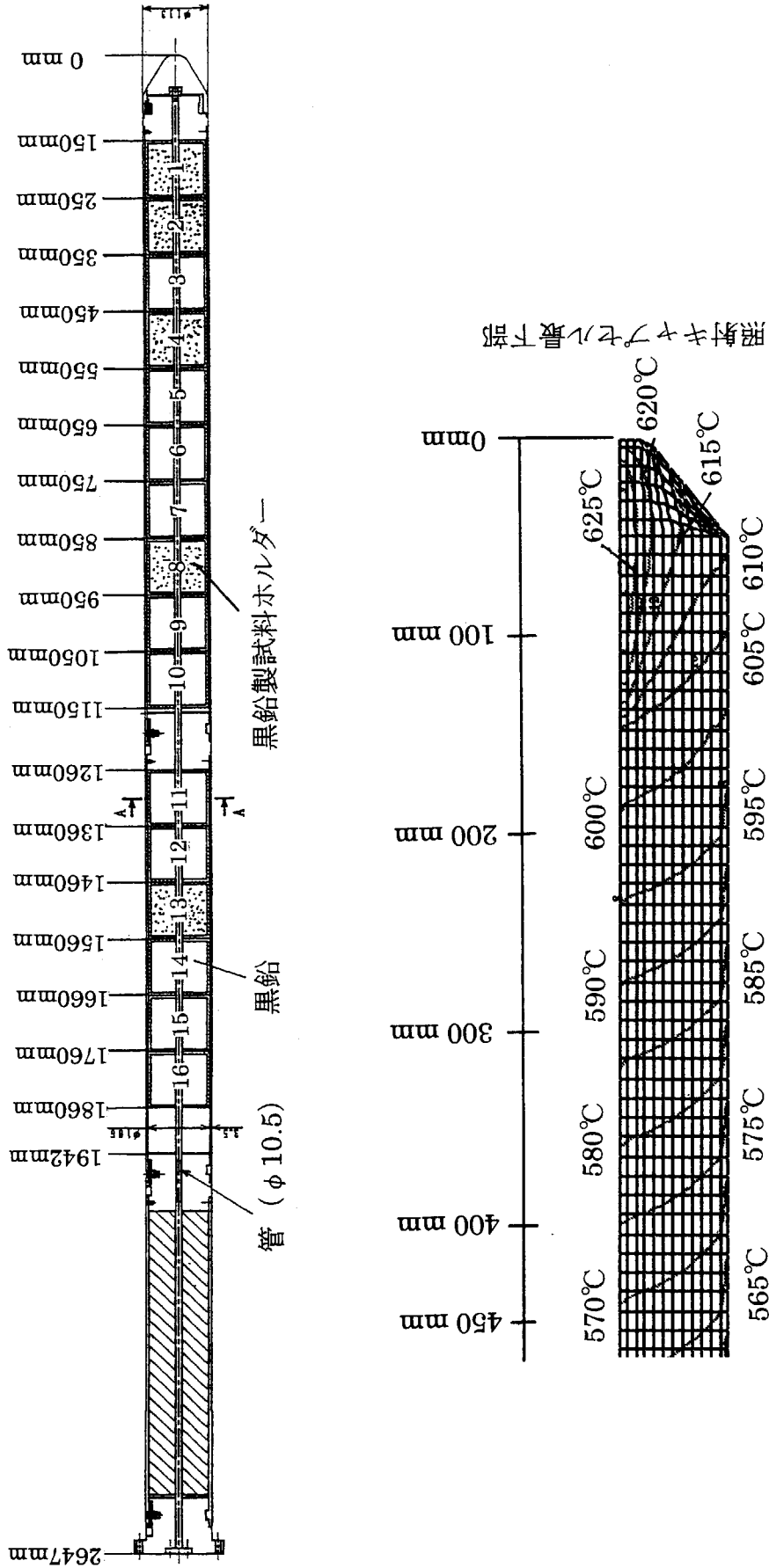


図 3-3(1) 照射キヤプセルの温度解析結果 (Case2 ; 0mm から 450mm)

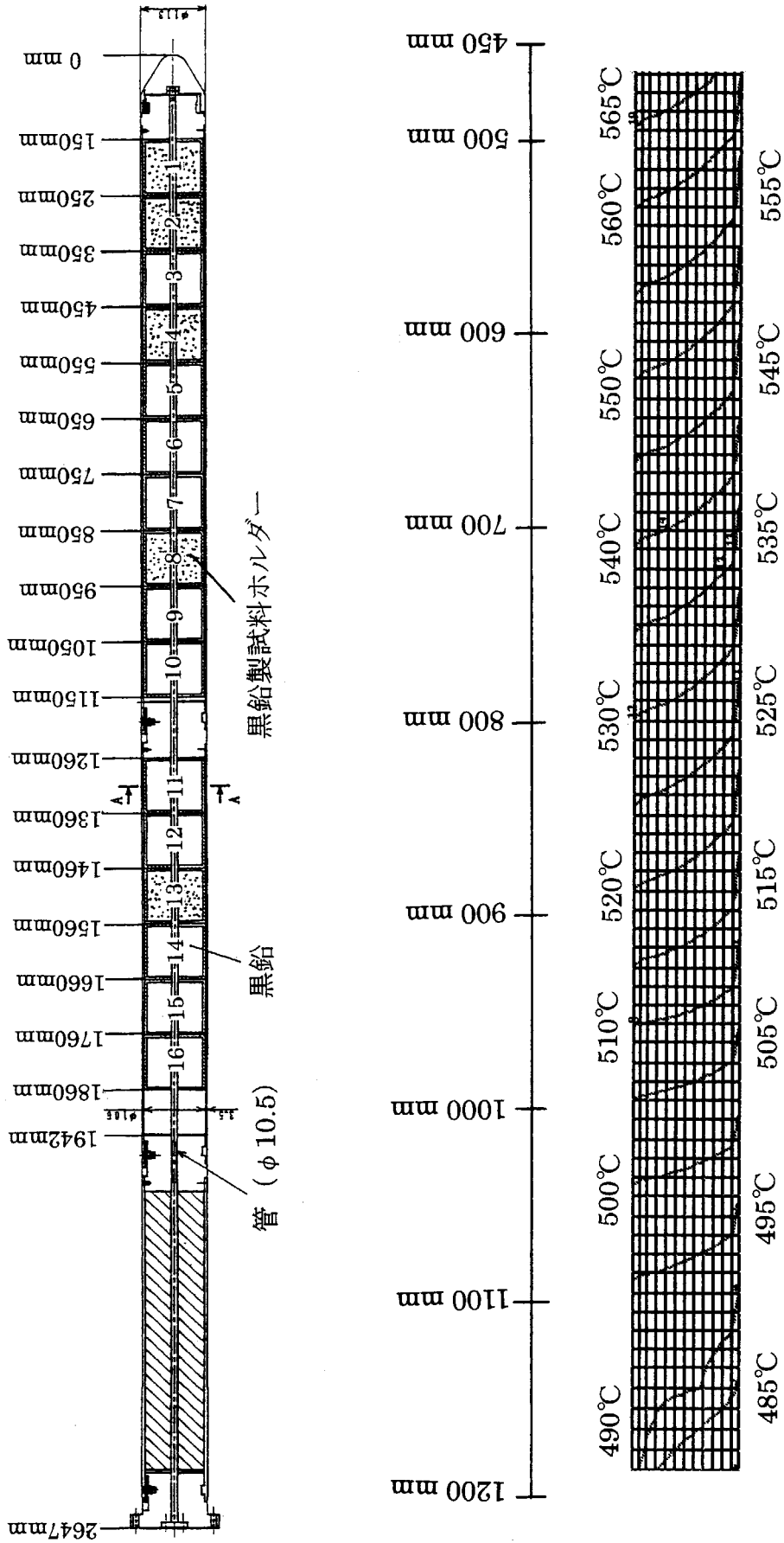


図 3-3(2) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case2 ; 450mm から 1200mm)

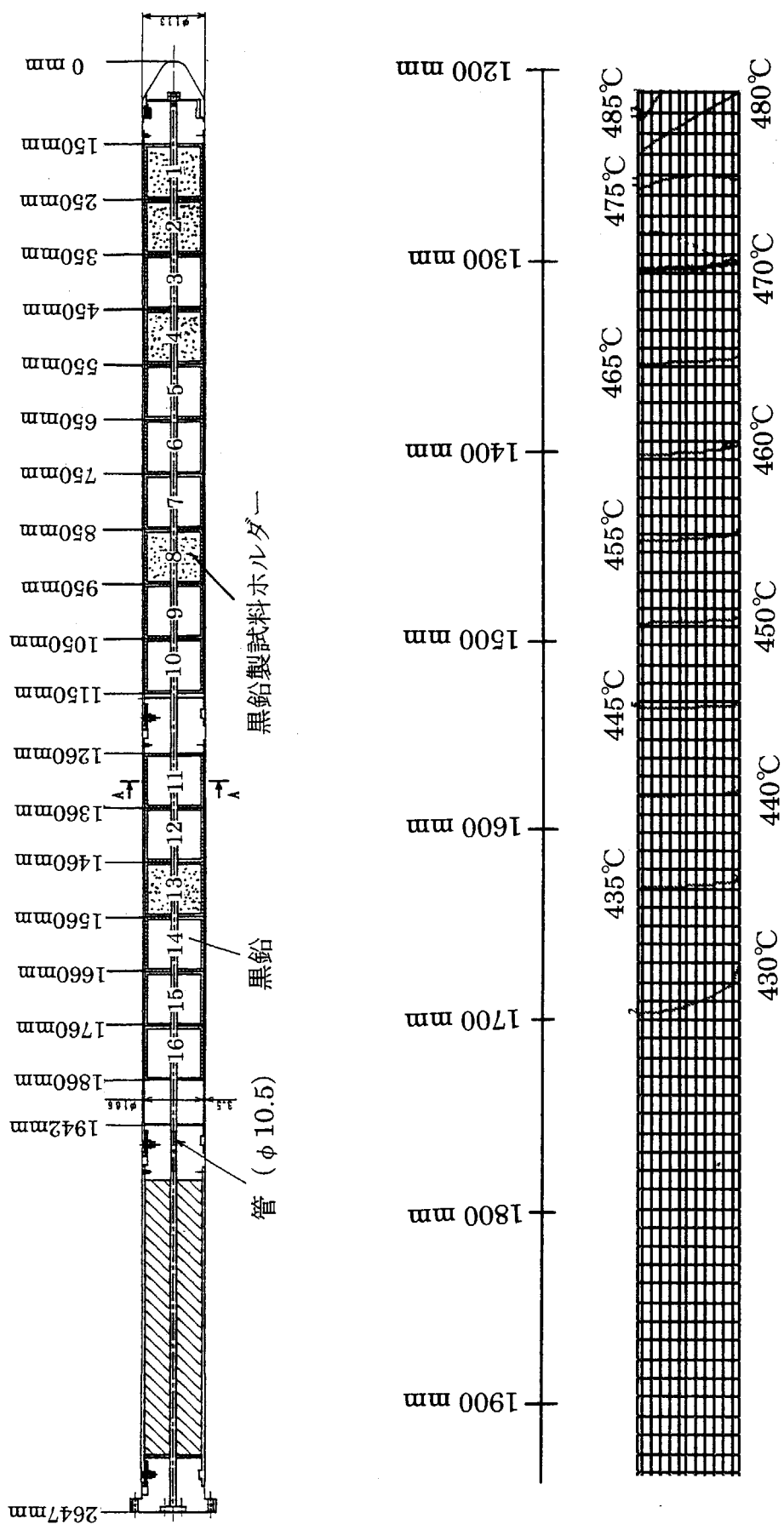


図 3-3(3) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case2 ; 1200mm から 1900mm)



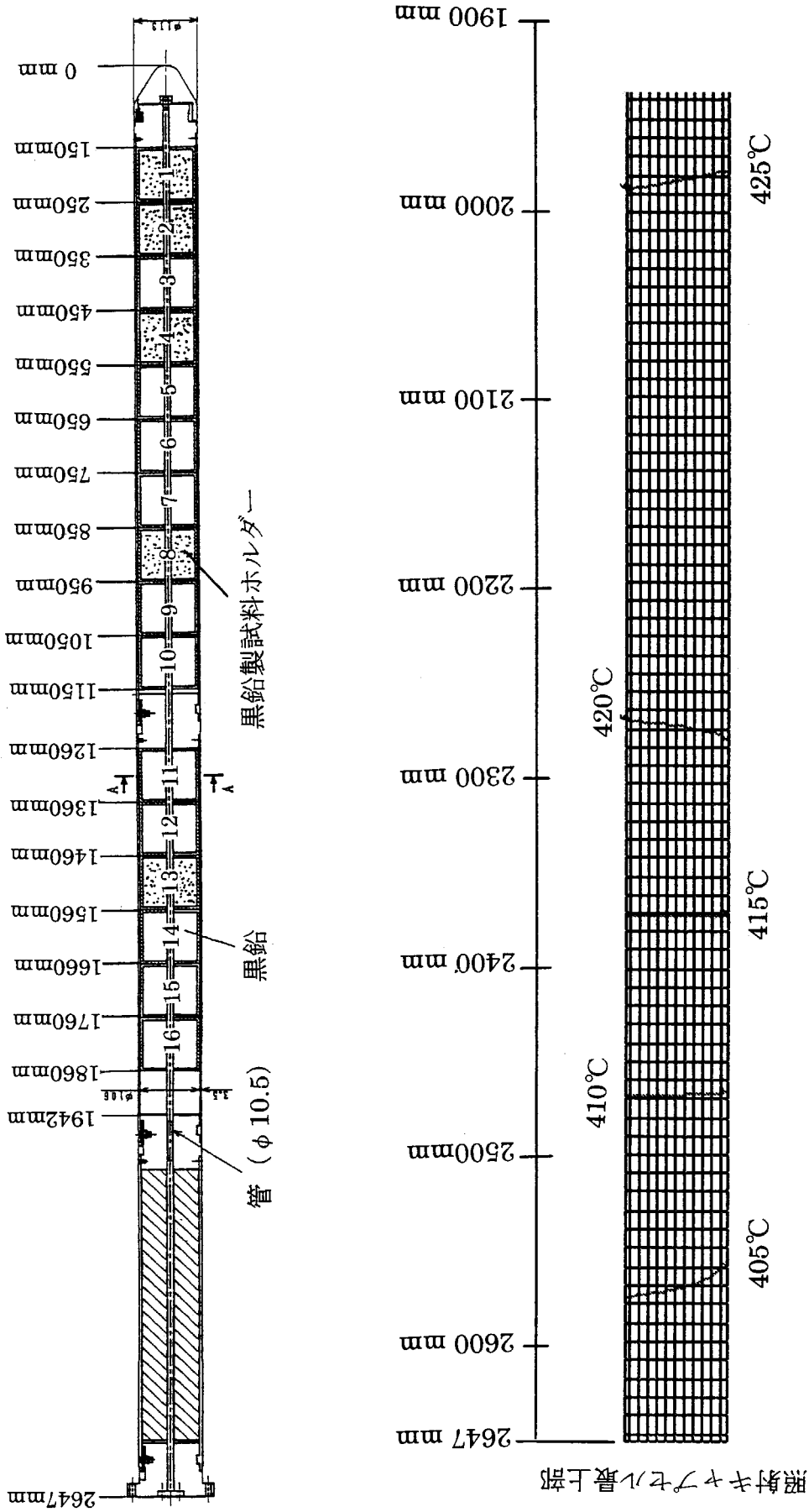


図 3-3(4) 照射キヤプセルの温度解析結果 (Case2 ; 1900mm から 2647mm)

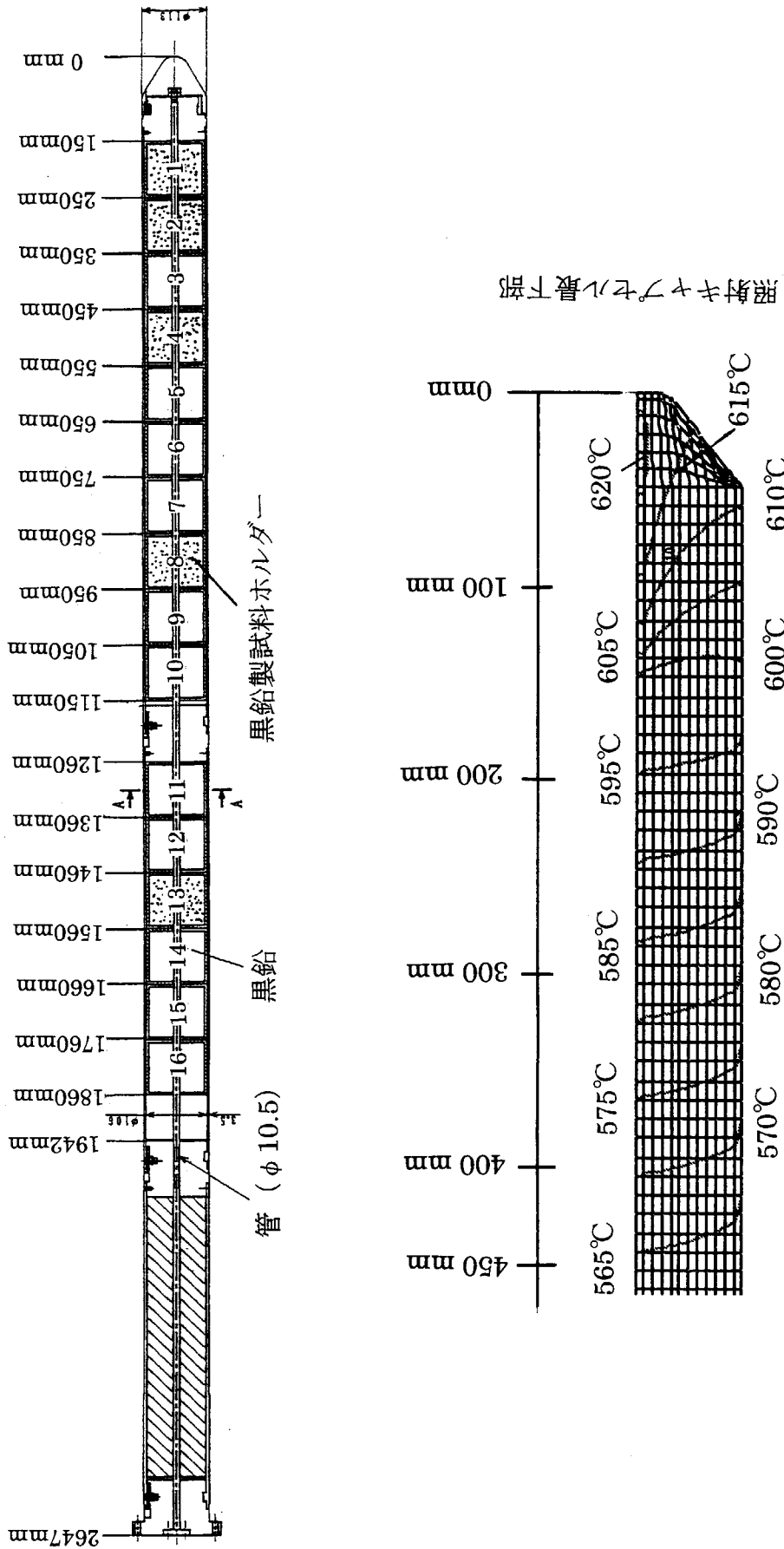


図 3-4(1) 照射キヤプセルの温度解析結果 (Case3; 0mm から 450mm)

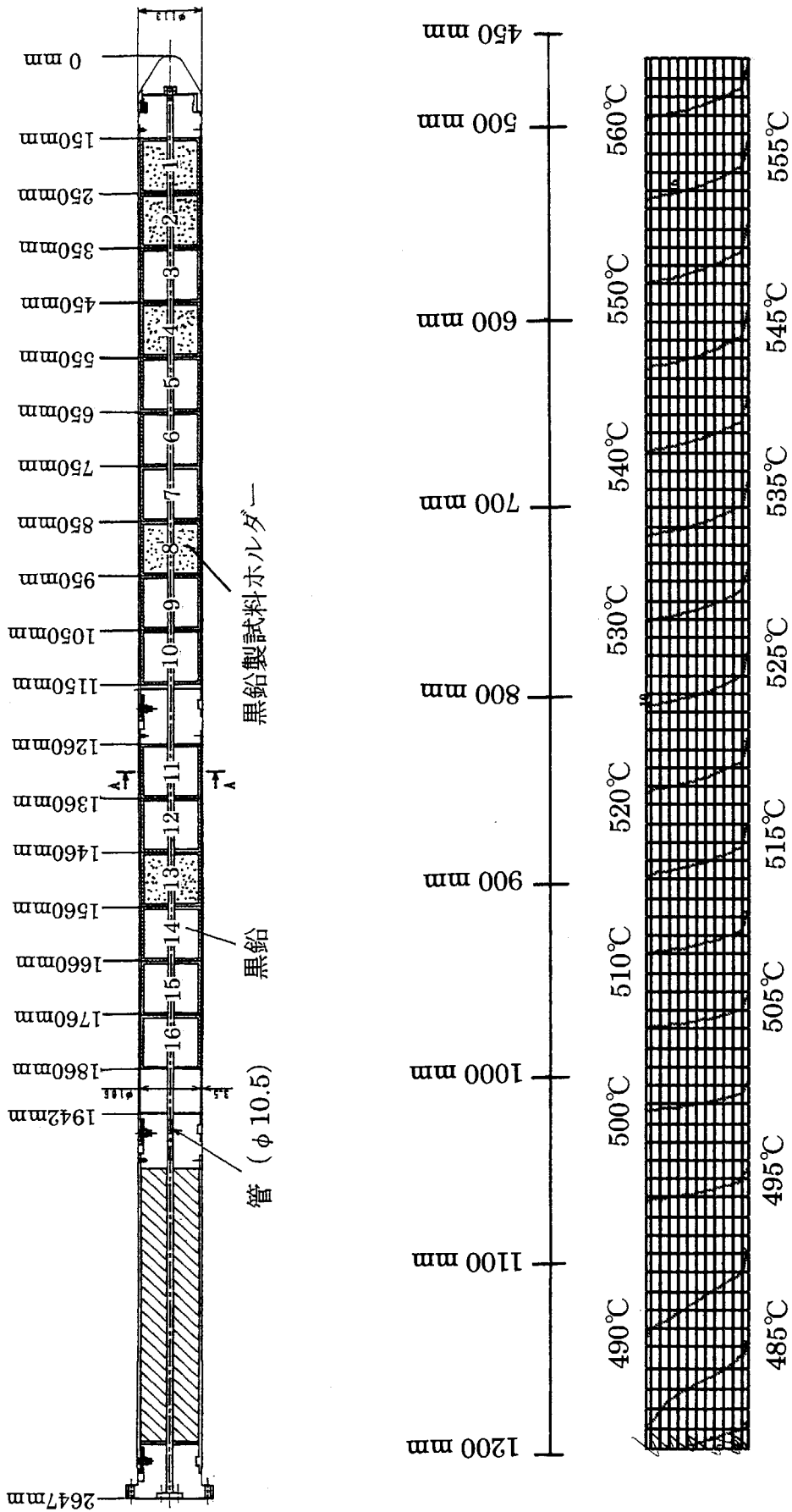


図 3-4(2) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case3 ; 450mm から 1200mm)

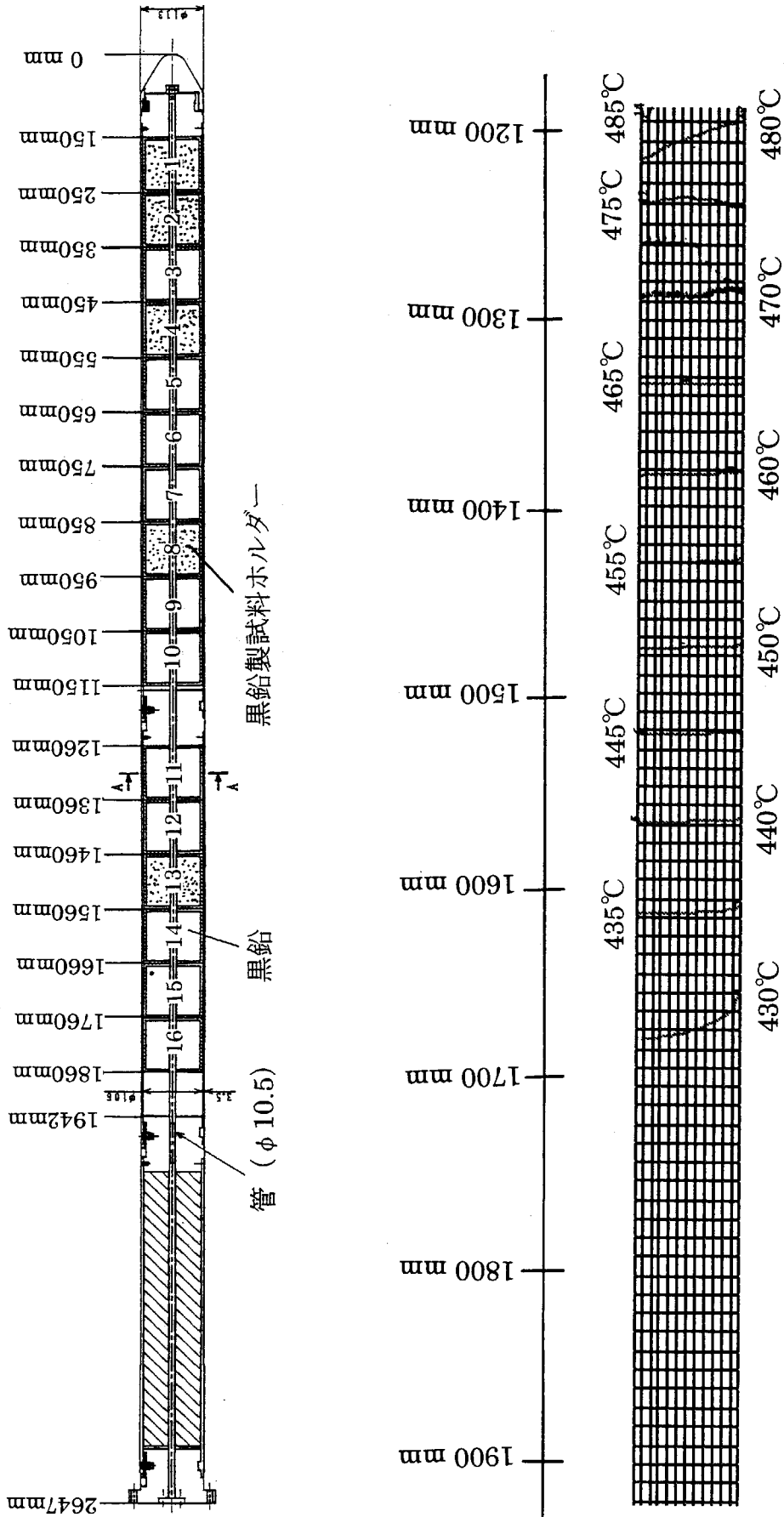


図 3-4(3) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case3 ; 1200mm から 1900mm)

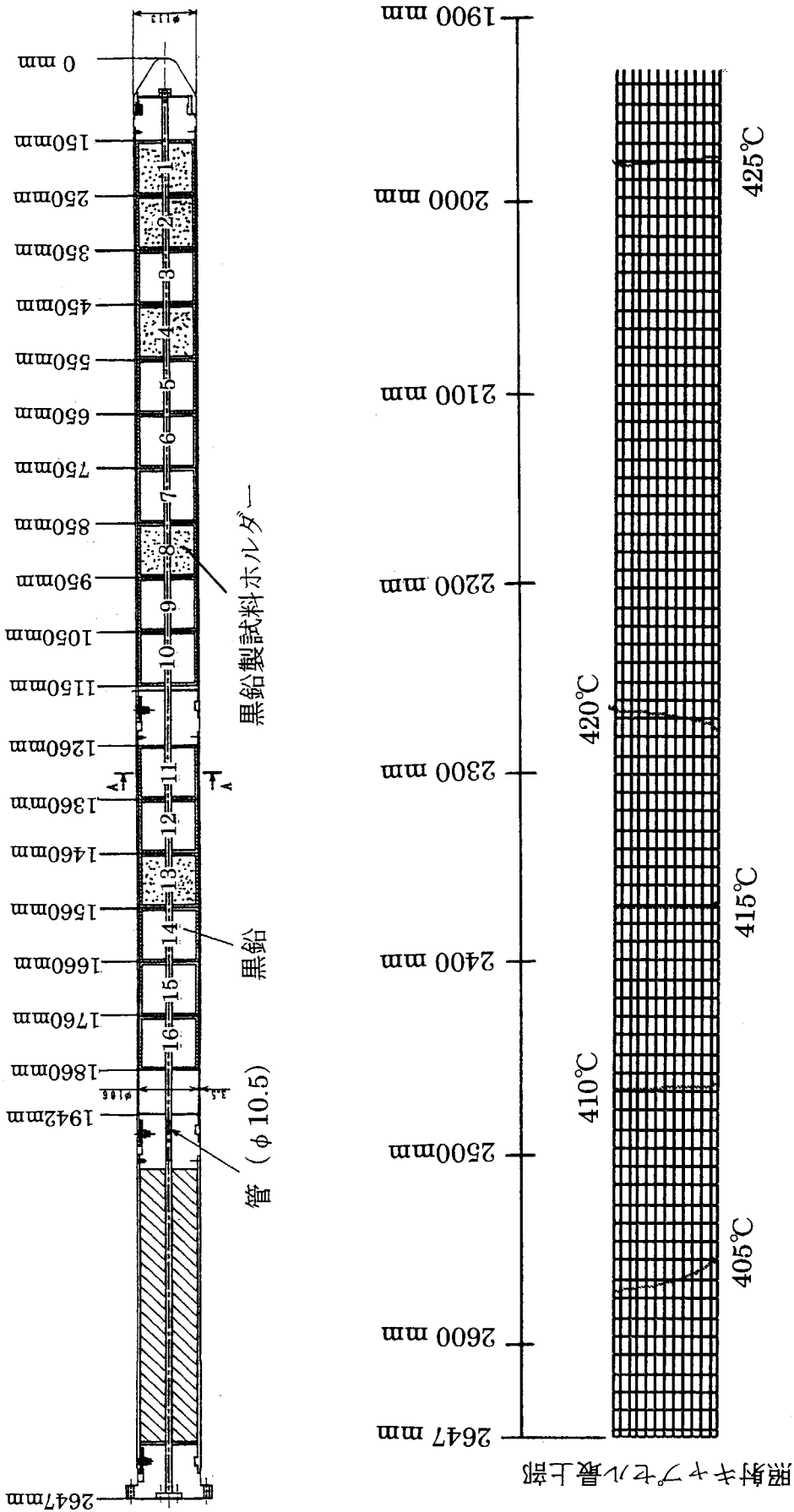


図 3-4(4) 照射キャプセルの温度解析結果 (Case3 ; 1900mm から 2647mm)

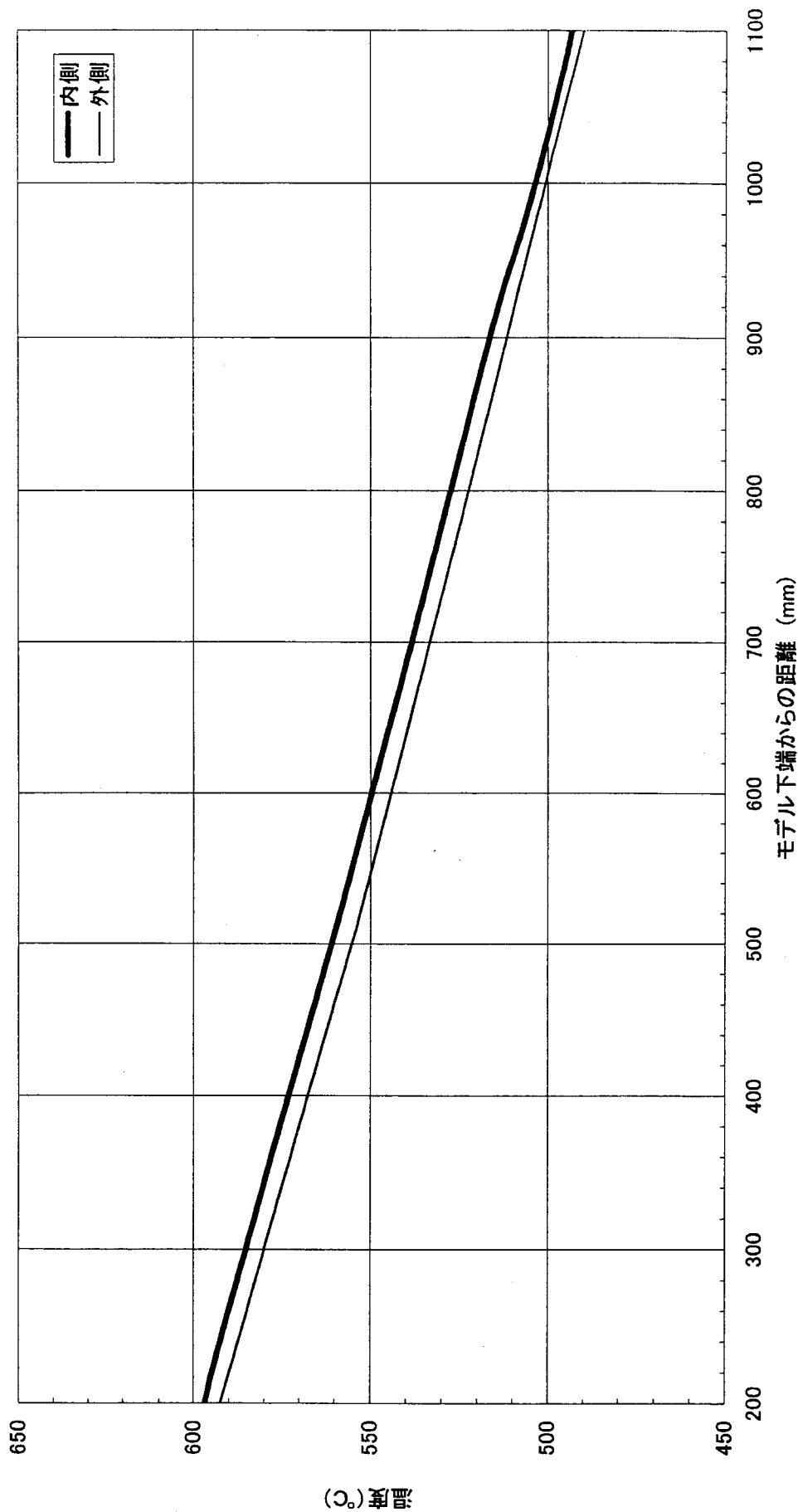


図 3-5(1) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case1:200mm から 1100mm)

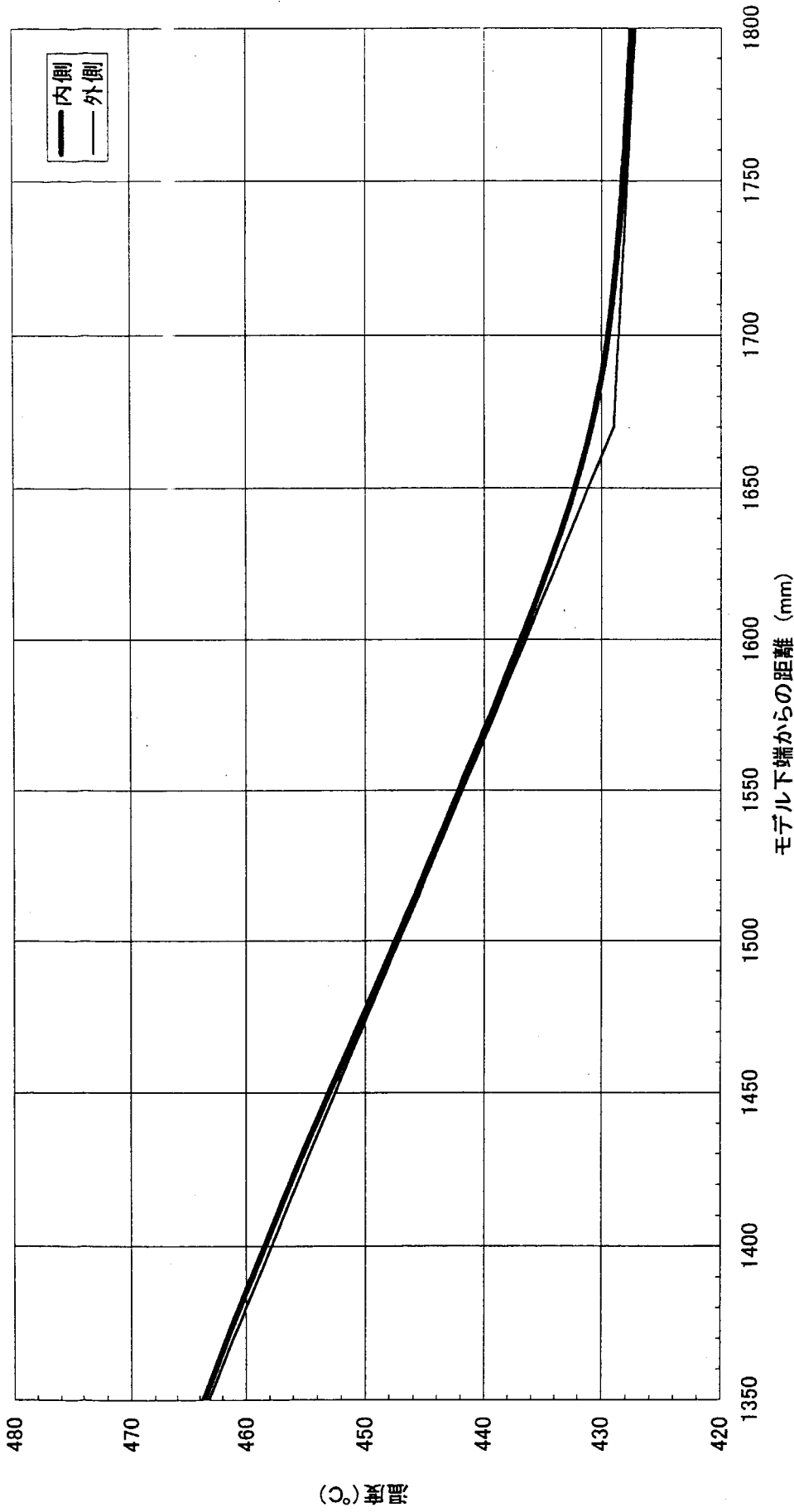


図 3-5(2) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case1;1350mm から 1800mm)

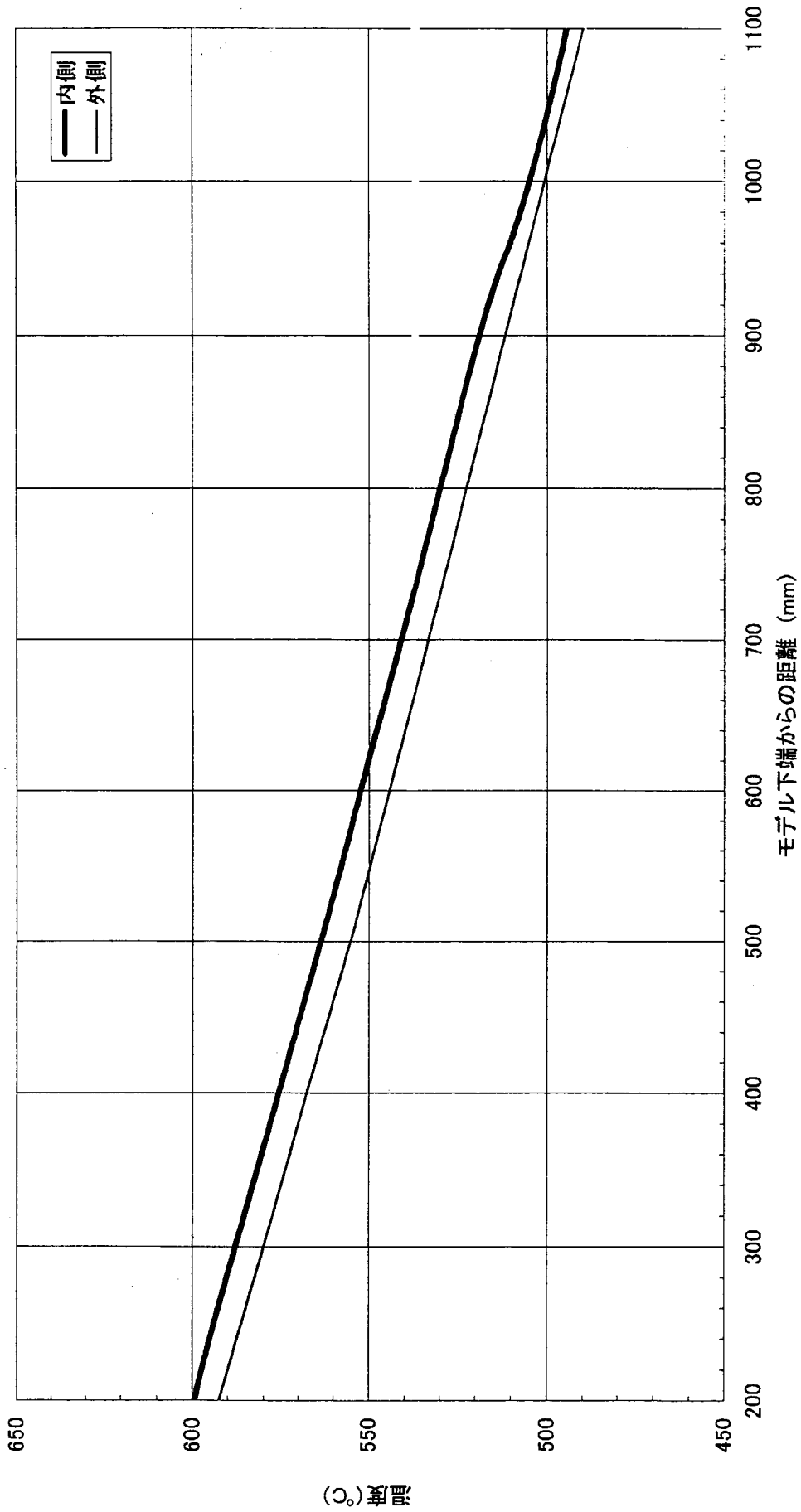


図 3-6(1) 照射キヤプセル内外面の温度解析結果  
(Case2;200mm から 1100mm)



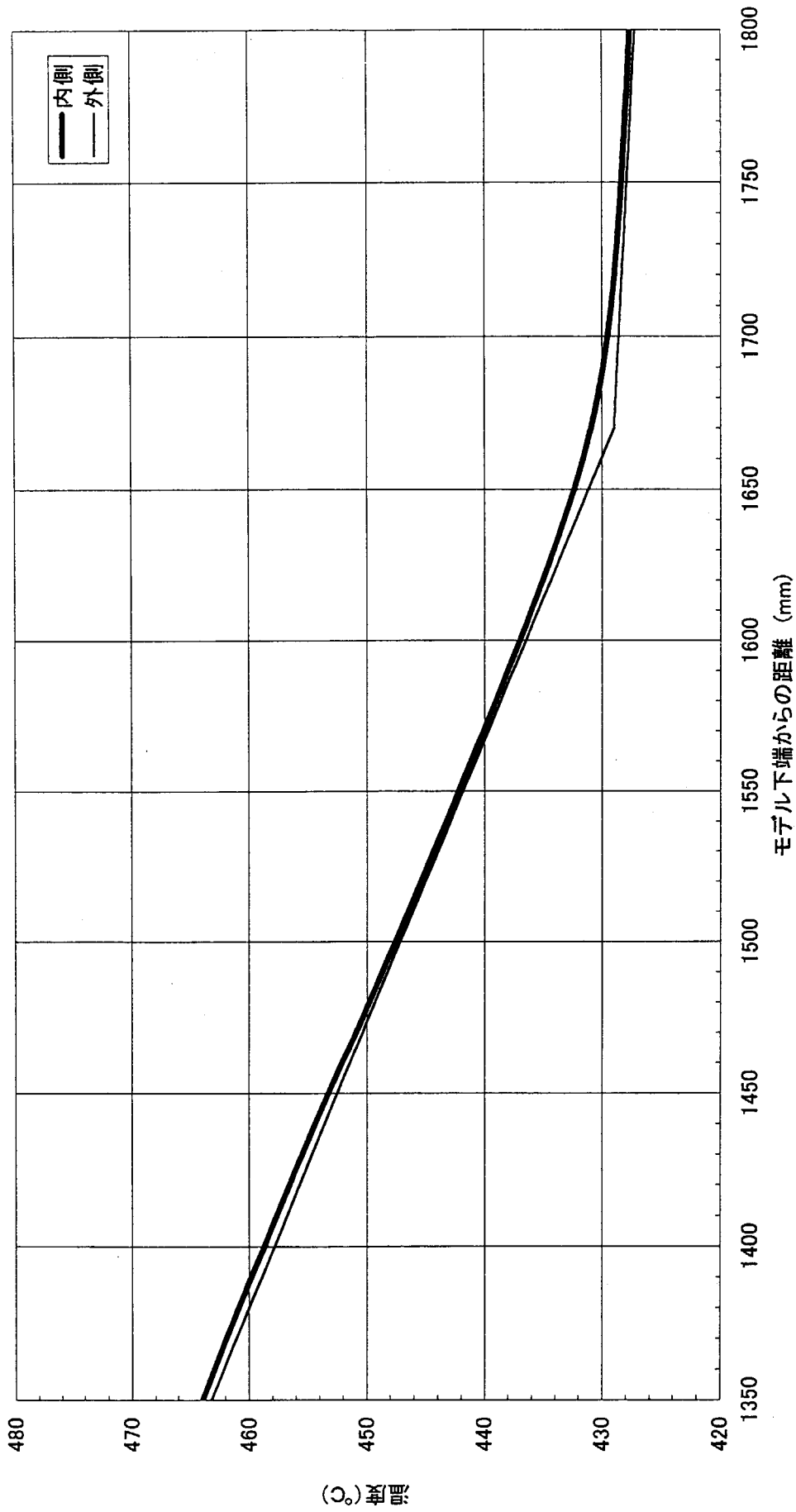


図 3-6(2) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case2;1350mm から 1800mm)

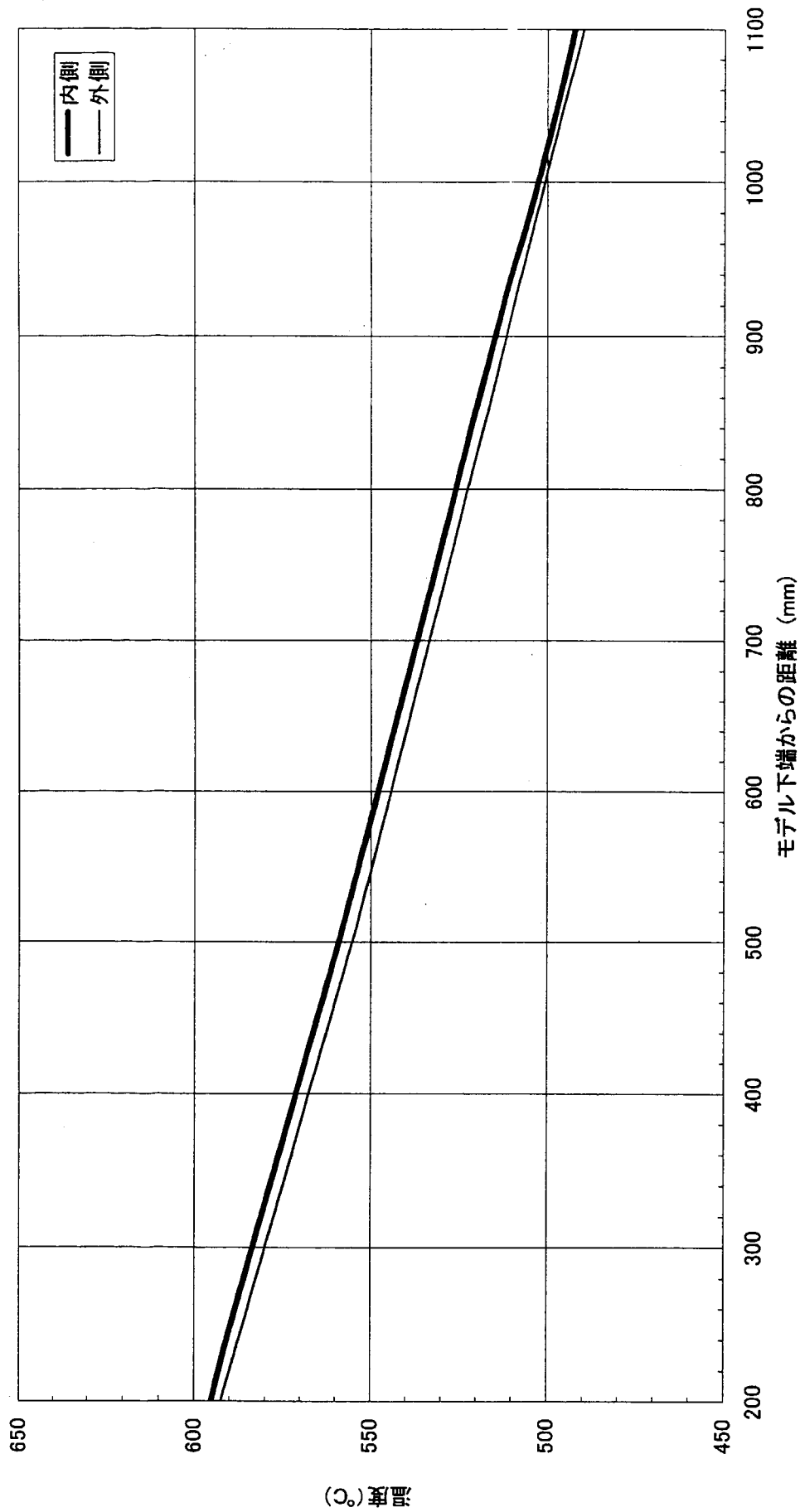


図 3-7(1) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case3:200mm から 1100mm)

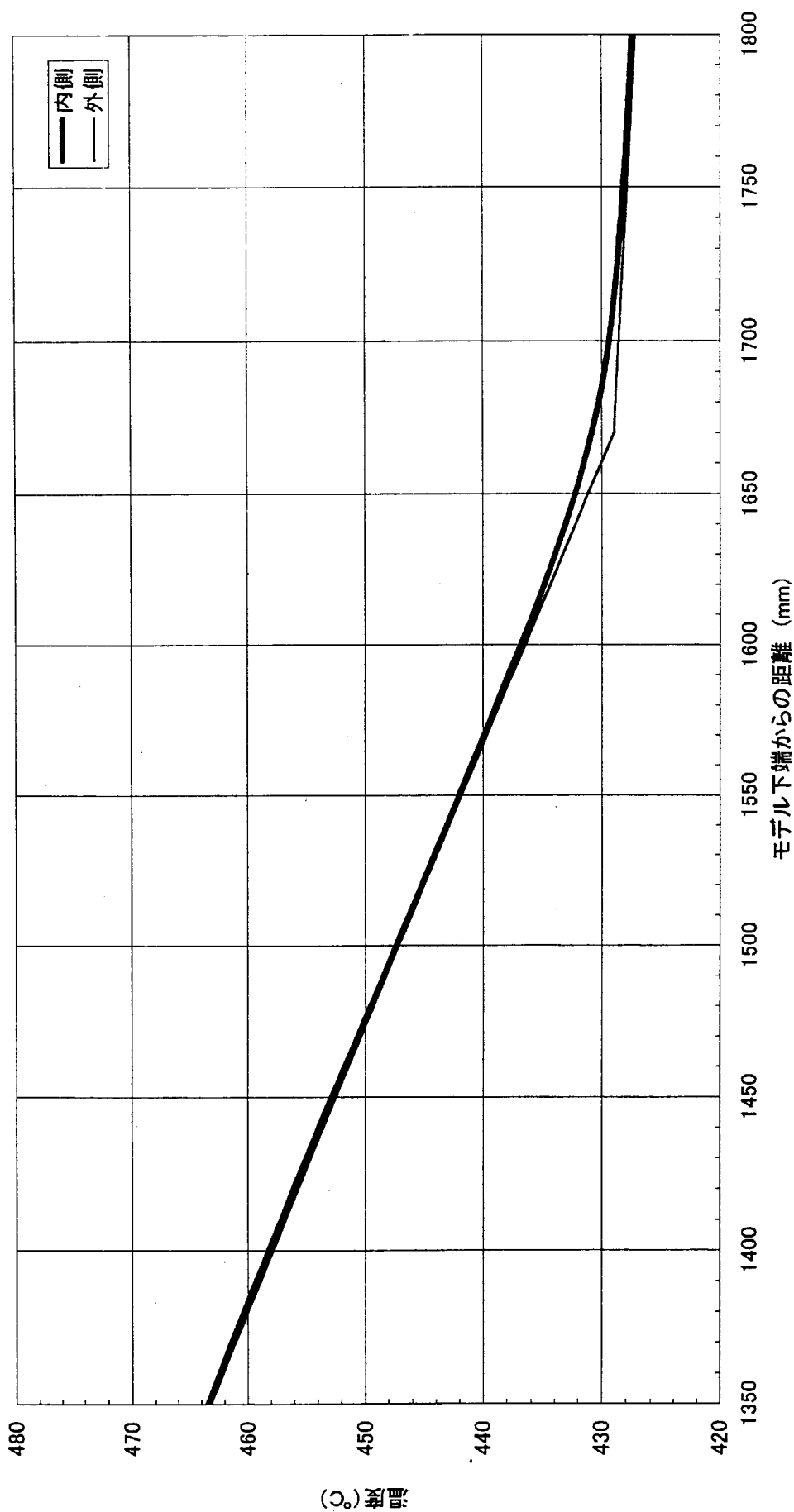


図 3-7(2) 照射キャプセル内外面の温度解析結果  
(Case3;1350mm から 1800mm)

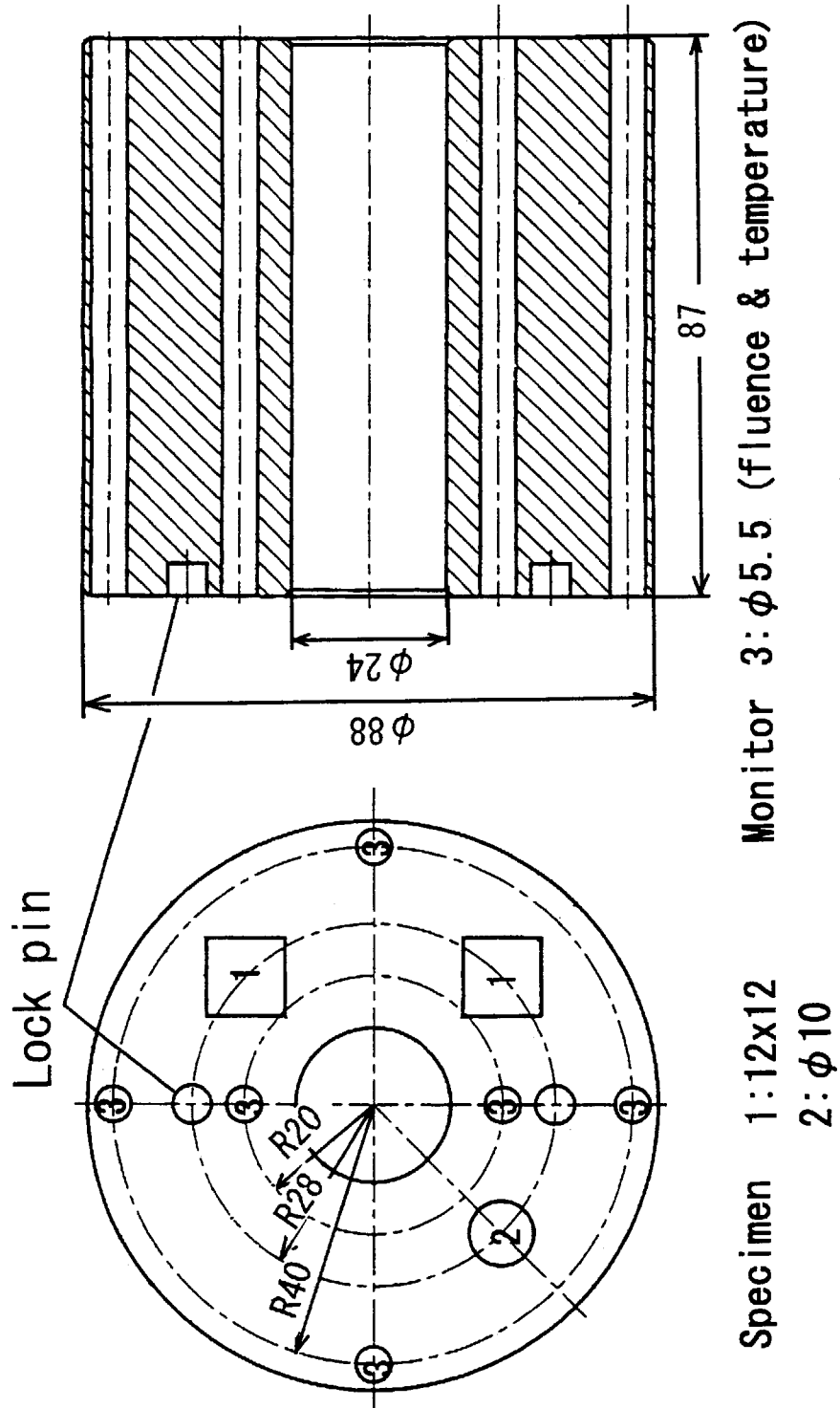
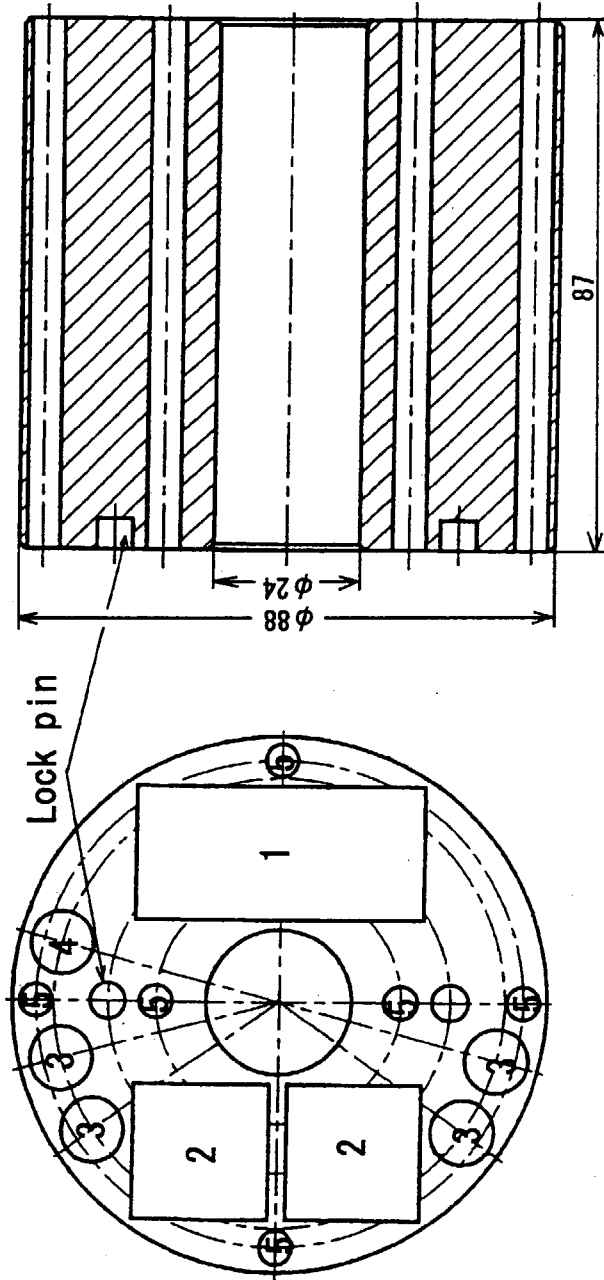


図 3-8(1) Type-I 試料ホルダーの構造図



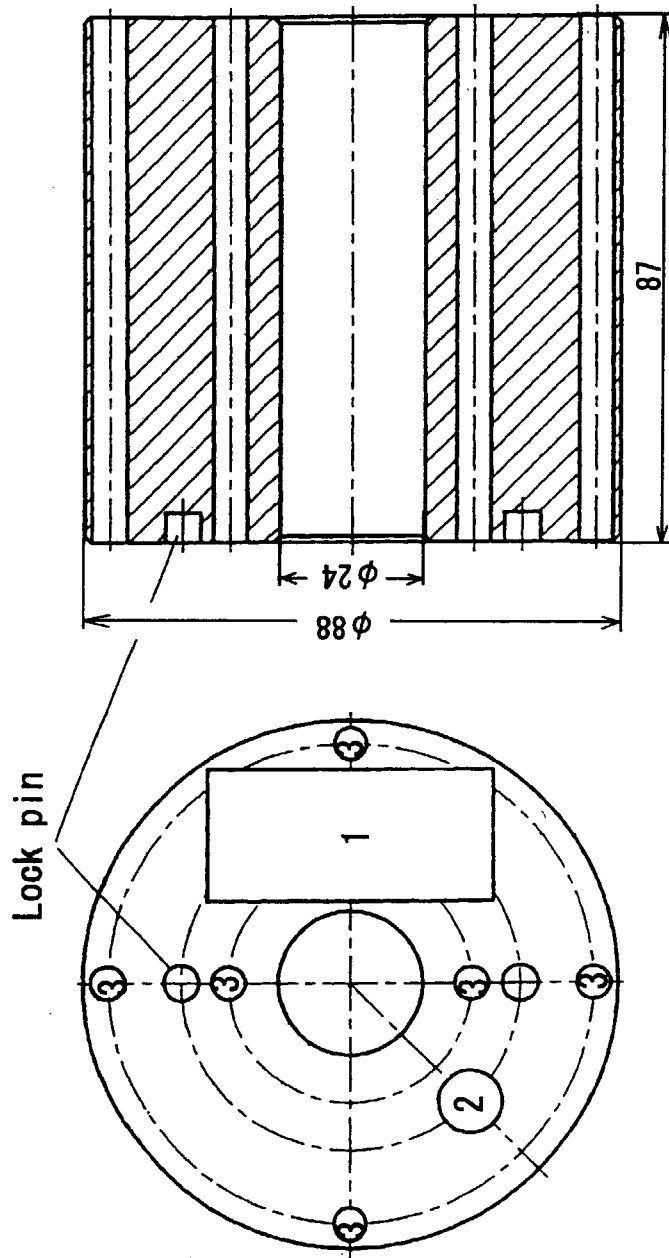
Monitor 5:  $\phi 5.5$  (fluence & temperature)

Specimen 1: 22x47

2: 22x22

3&4:  $\phi 10.5$

図 3-8(2) Type-II 試料ホルダーの構造図



Monitor 3:  $\phi 5.5$  (fluence & temperature)

Specimen 1: 22x47  
2:  $\phi 10.5$

図 3-8(3) Type-III 試料ホルダーの構造図

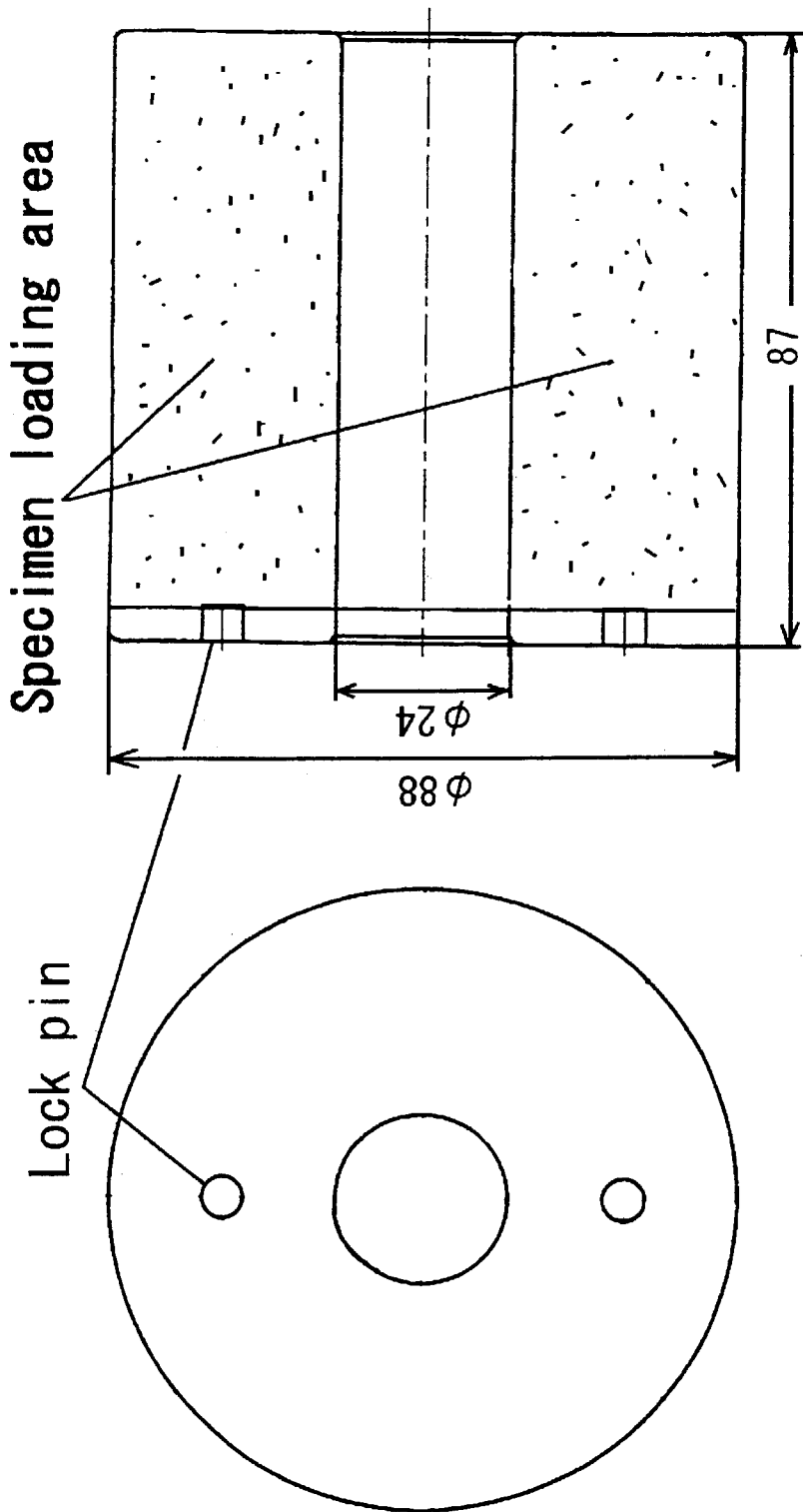
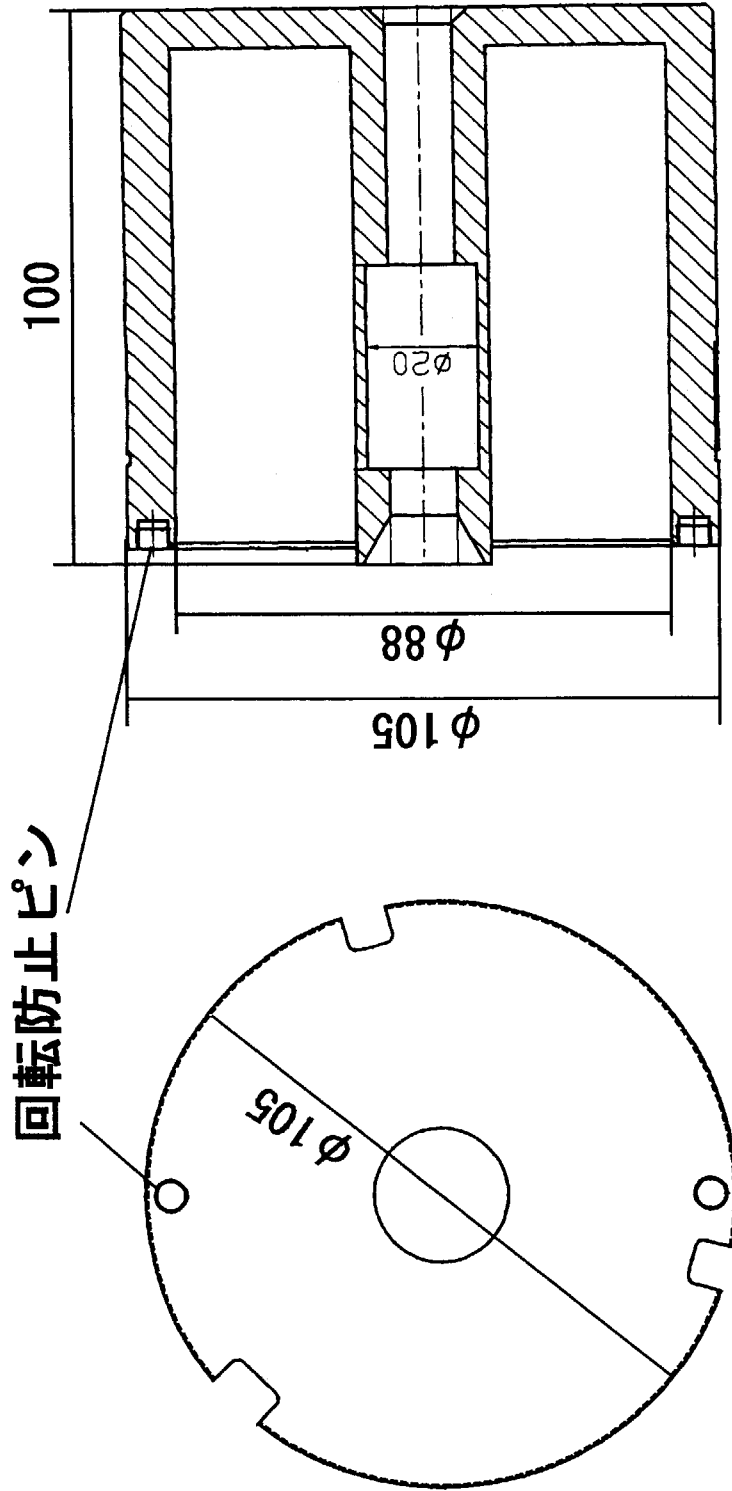


図 3-8(4) Type-IV 試料ホルダーの構造図



# 試料ホルダー容器

# 容器蓋

図 3-9 試料ホルダー容器の構造図



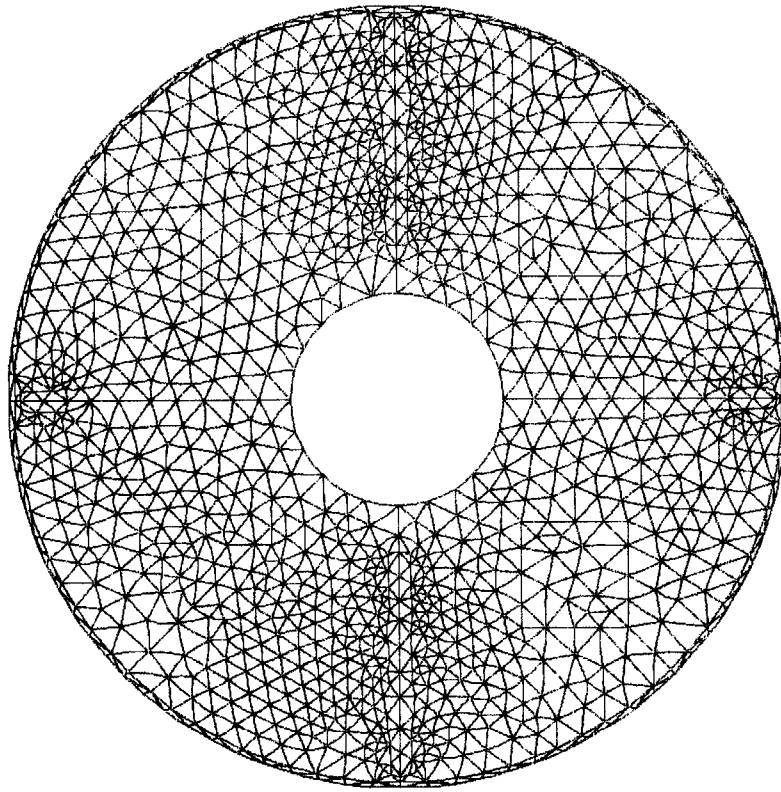


図 3-10(1) Type-I 試料ホルダーの解析メッシュ図

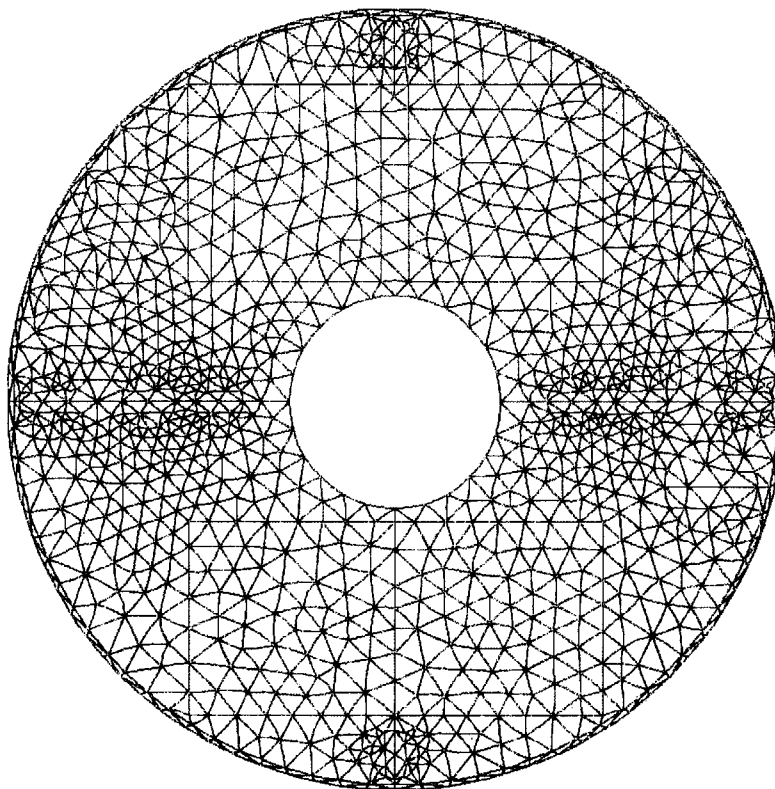


図 3-10(2) Type-II 試料ホルダーの解析メッシュ図

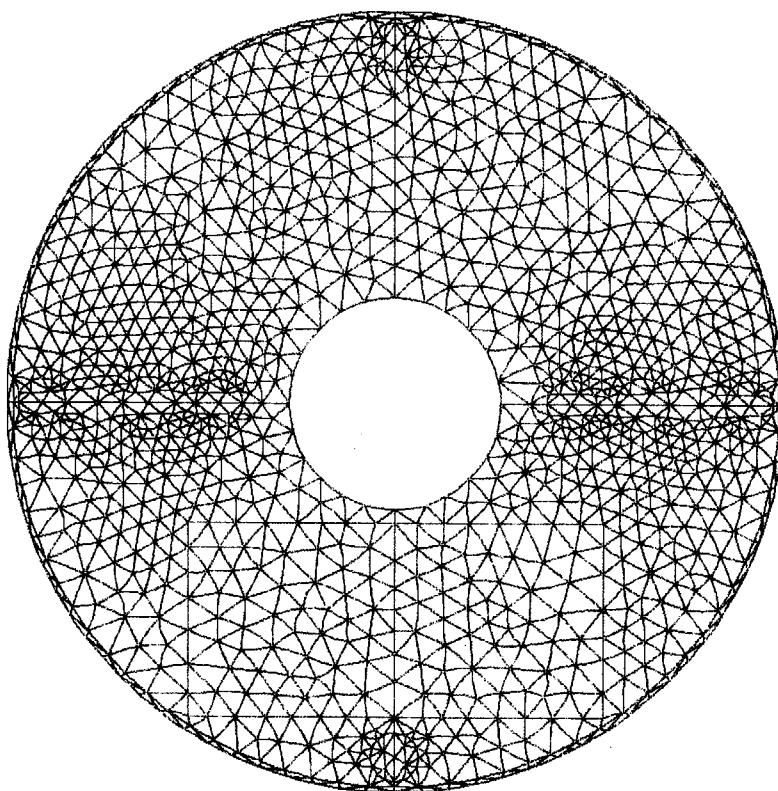


図 3-10(3) Type-III 試料ホルダーの解析メッシュ図

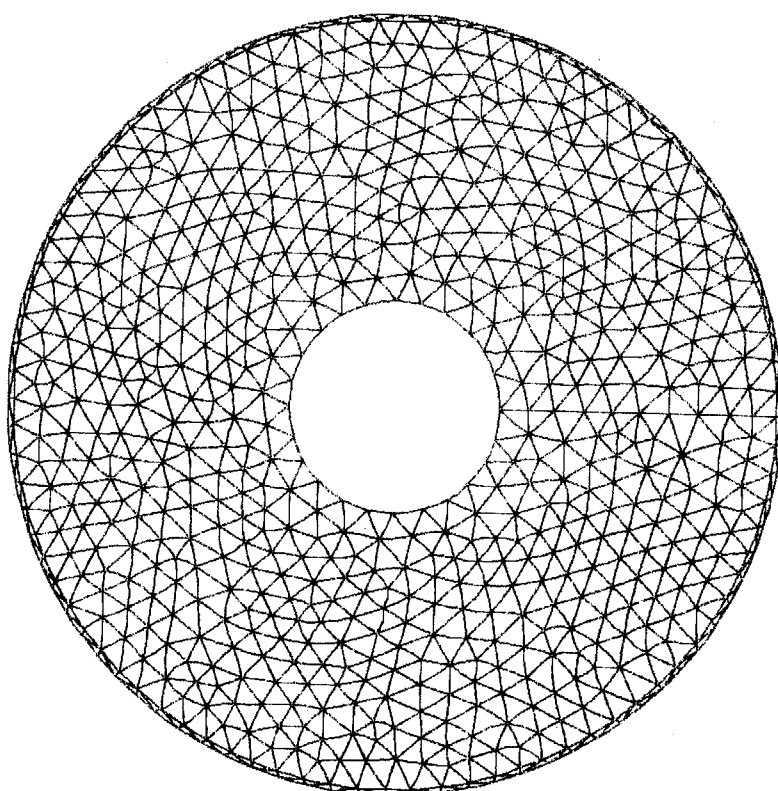


図 3-10(4) Type-IV 試料ホルダーの解析メッシュ図

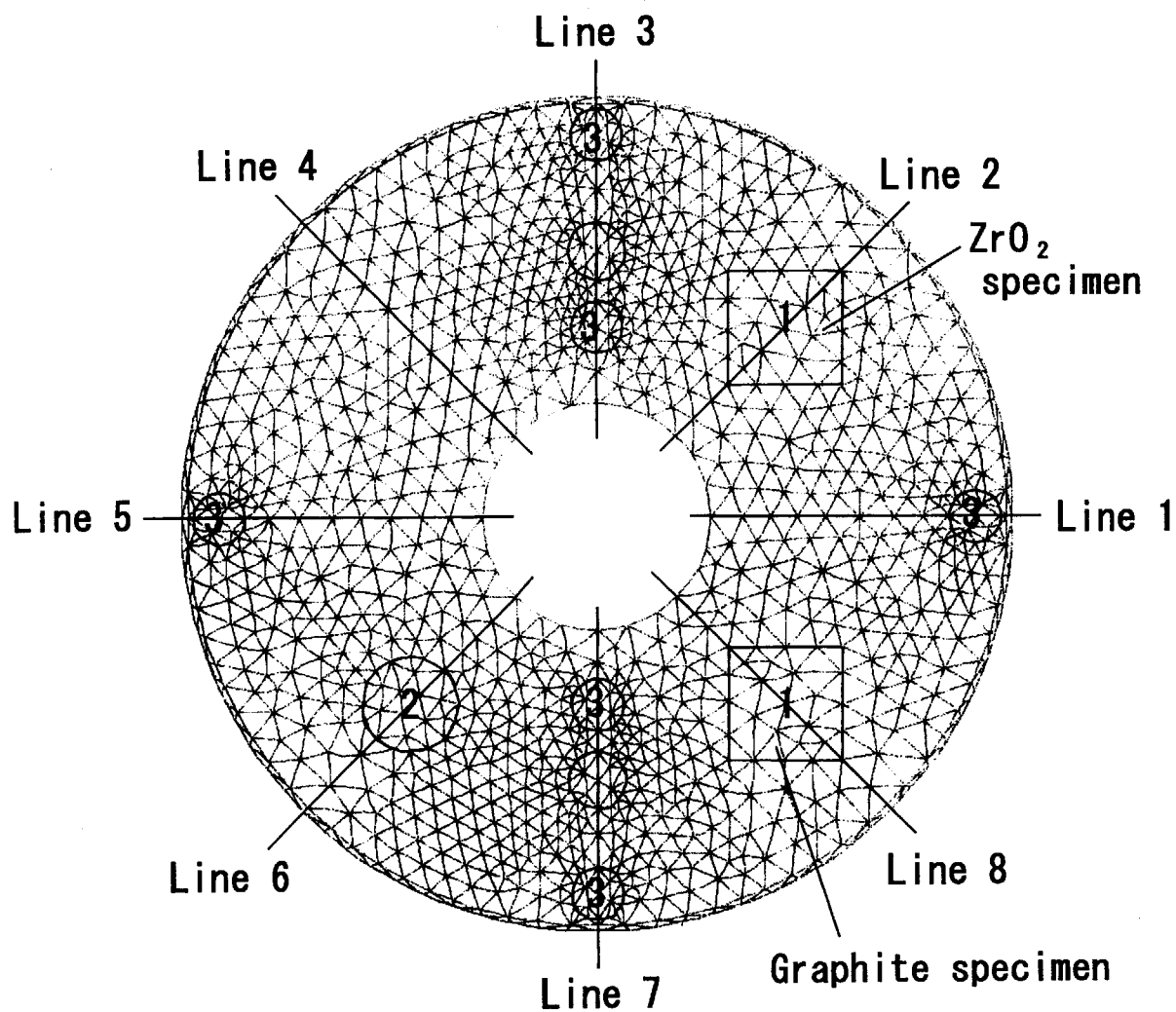


図 3-11(1) Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン

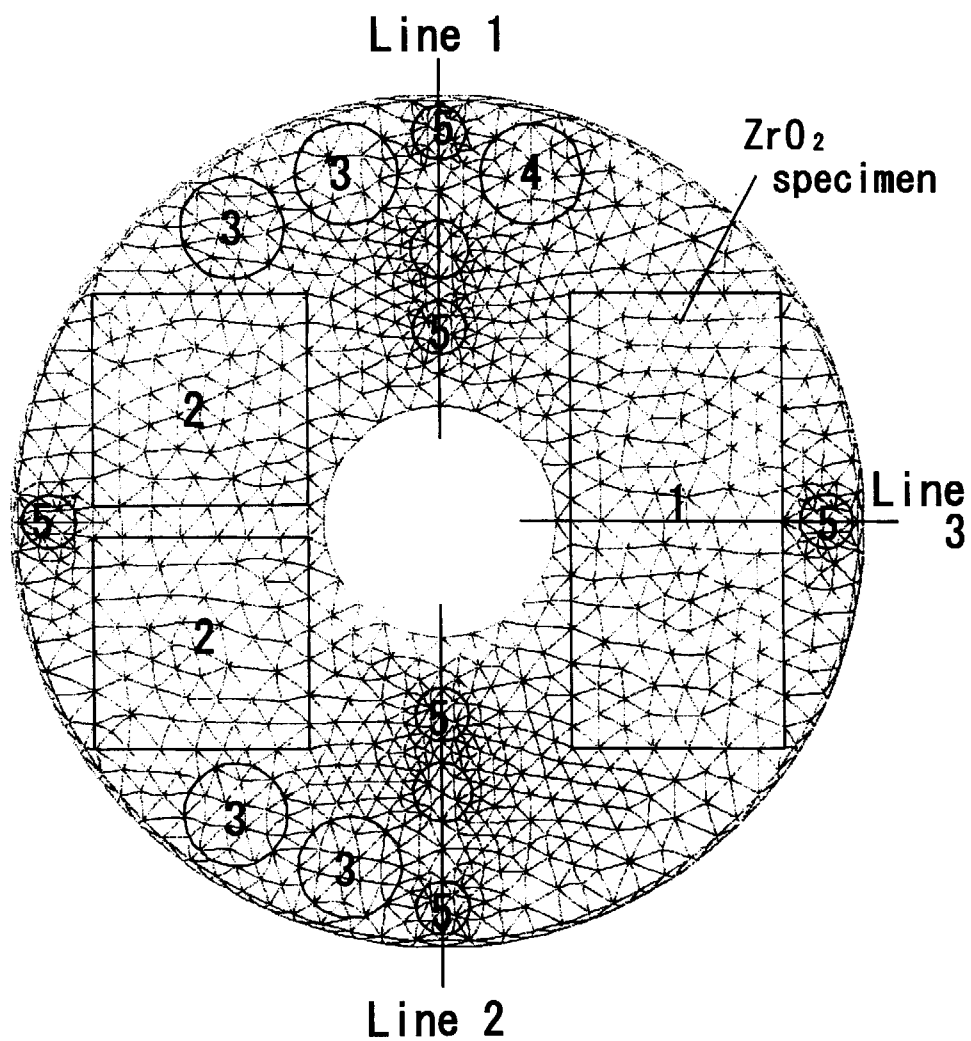


図 3-11(2) Type-II 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン

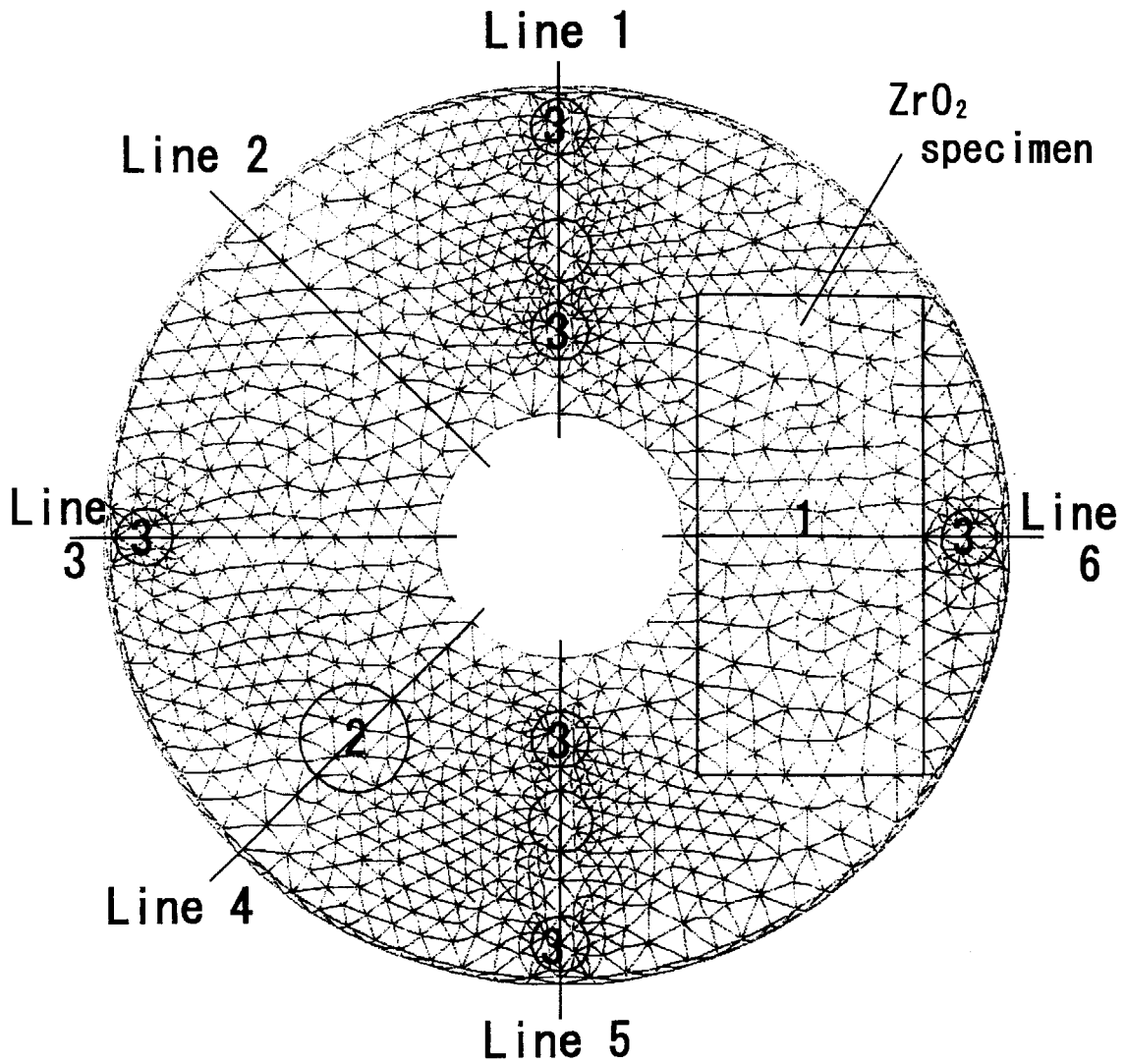


図 3-11(3) Type-III 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン

Line 1

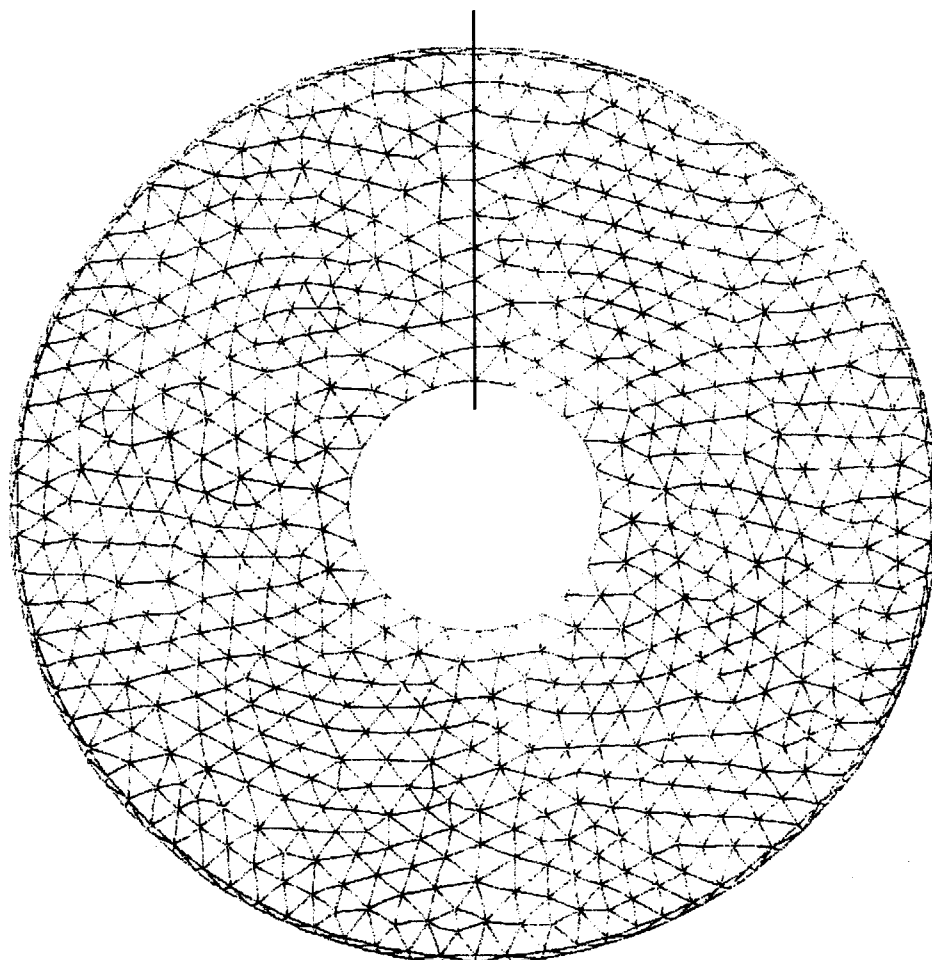


図 3-11(4) Type-IV 試料ホルダーの温度評価ライン

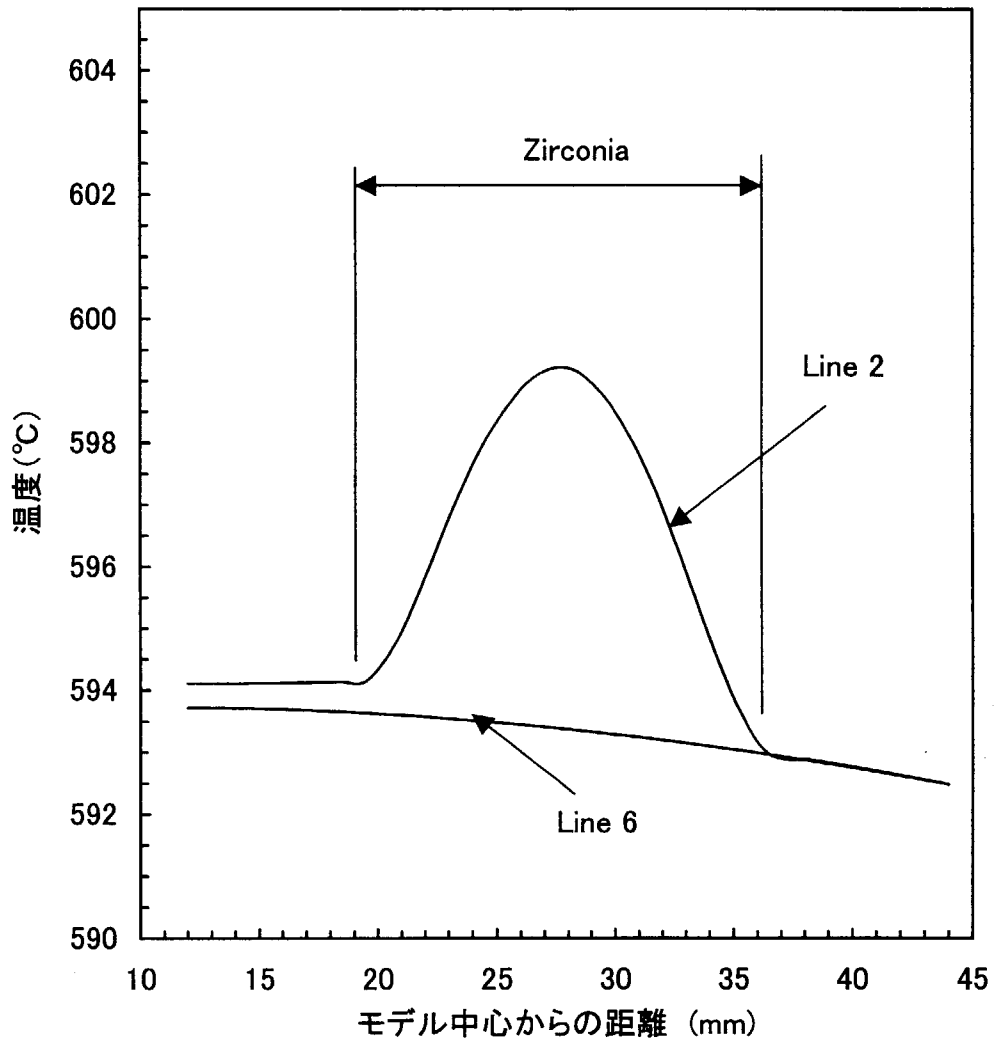


図3-12 Type-I 試料ホルダーの温度解析結果

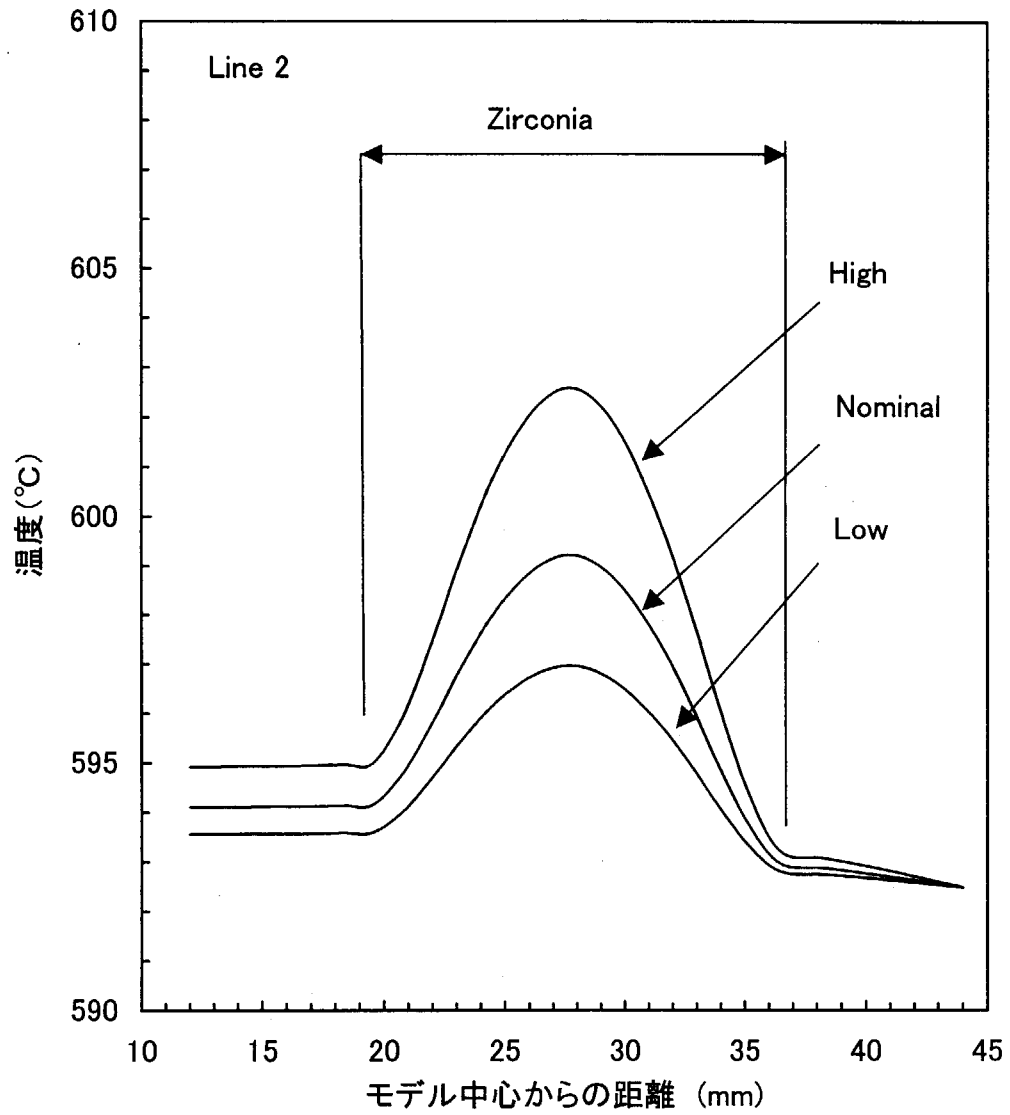


図3-13 Type-I 試料ホルダーのジルコニア試験片温度に与えるパラメータの影響



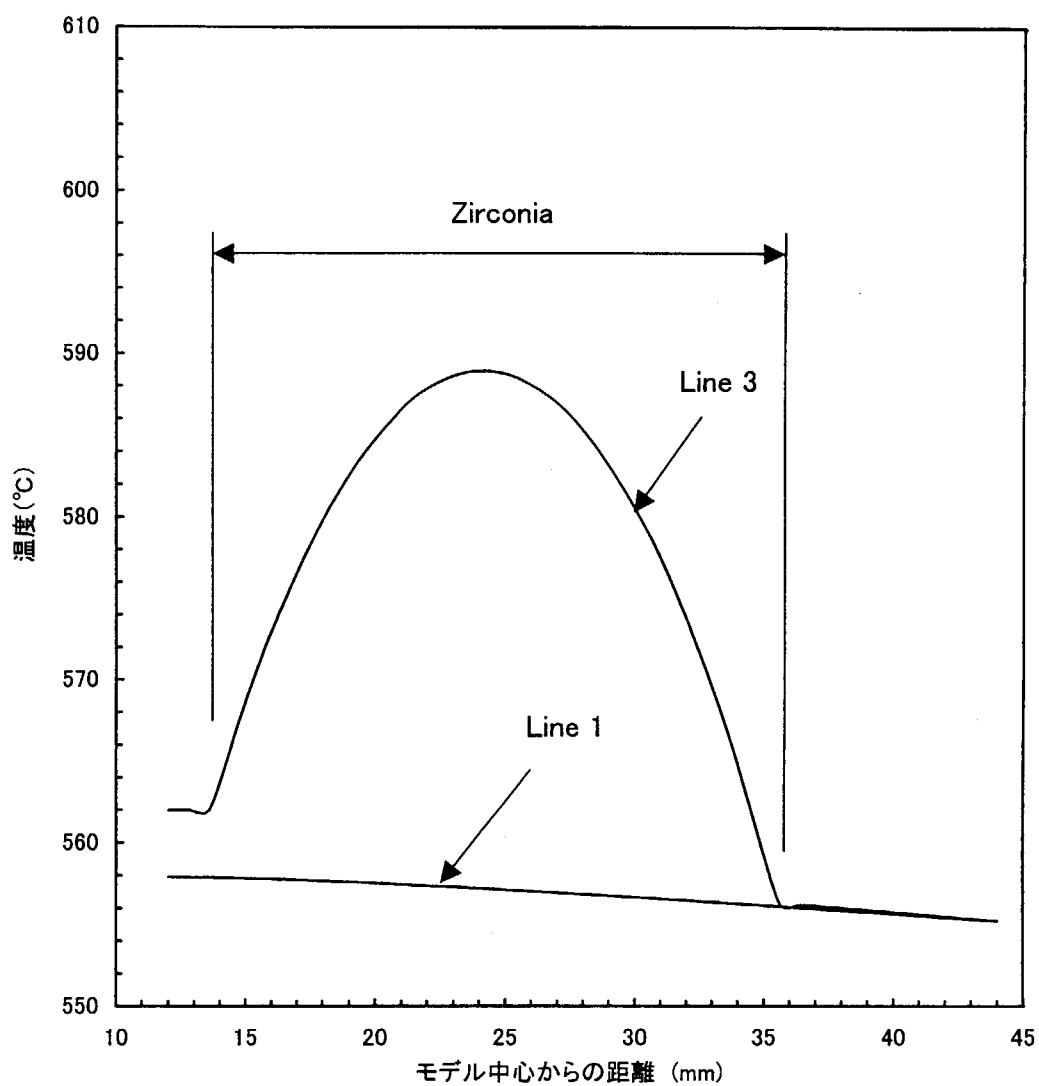


図 3-14 Type-II (1) 試料ホルダーの温度解析結果

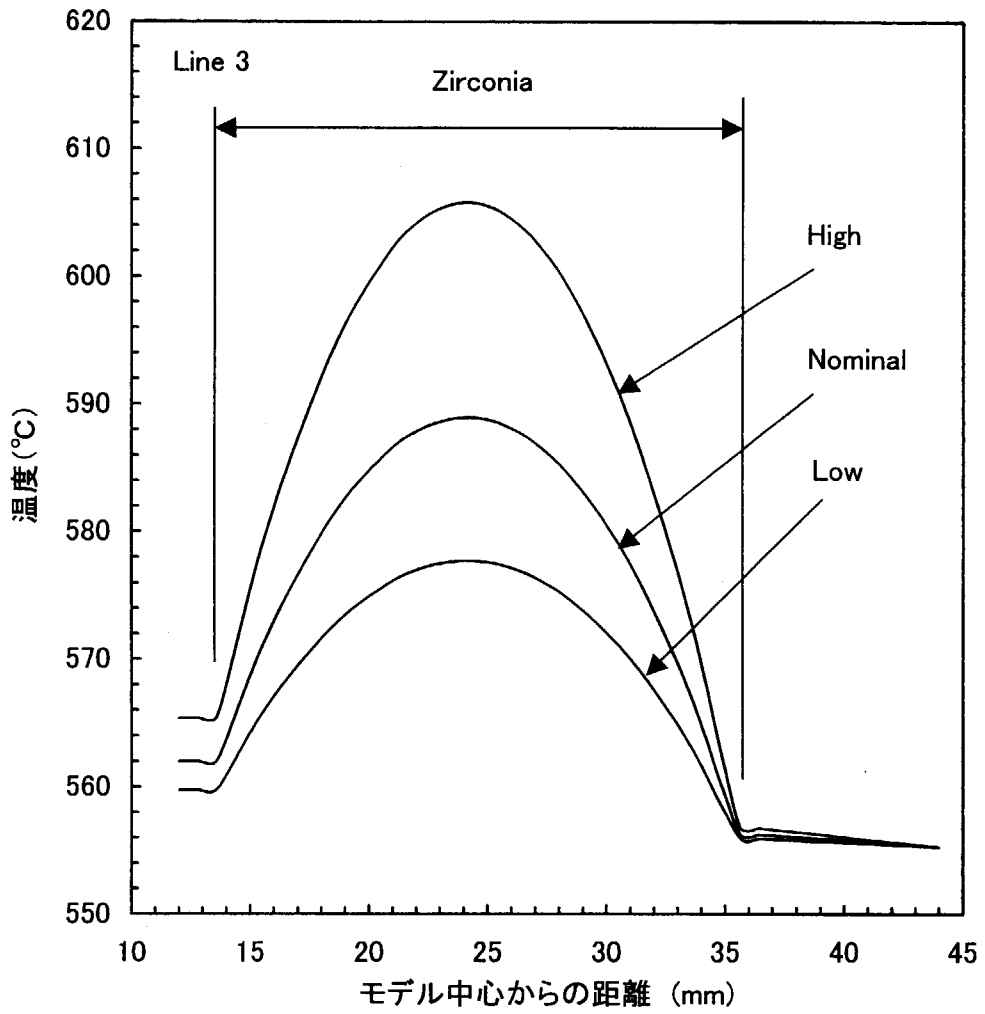


図3-15 Type-II (1) 試料ホルダーのジルコニア試験片温度に与えるパラメータの影響

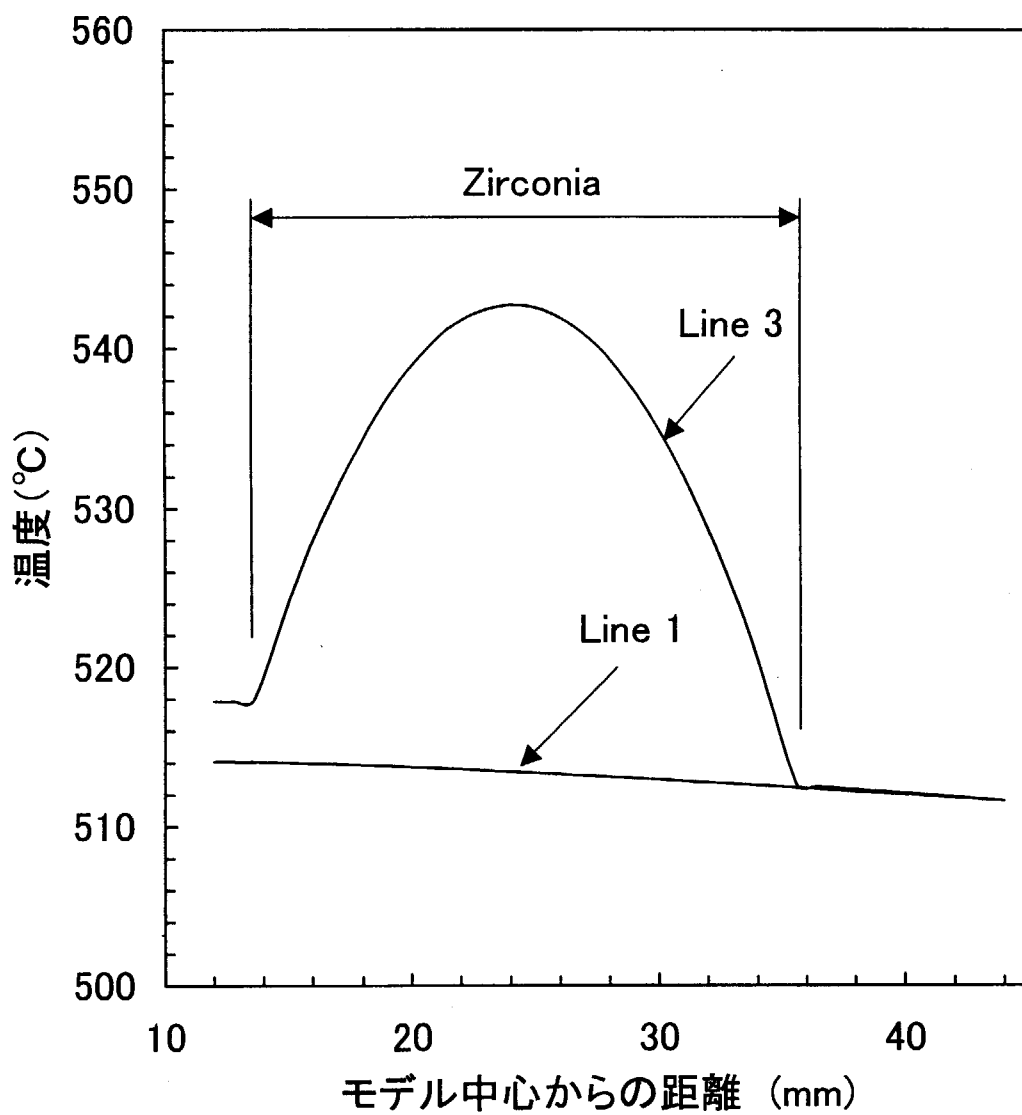


図3-16 Type-II (2) 試料ホルダーの温度解析結果

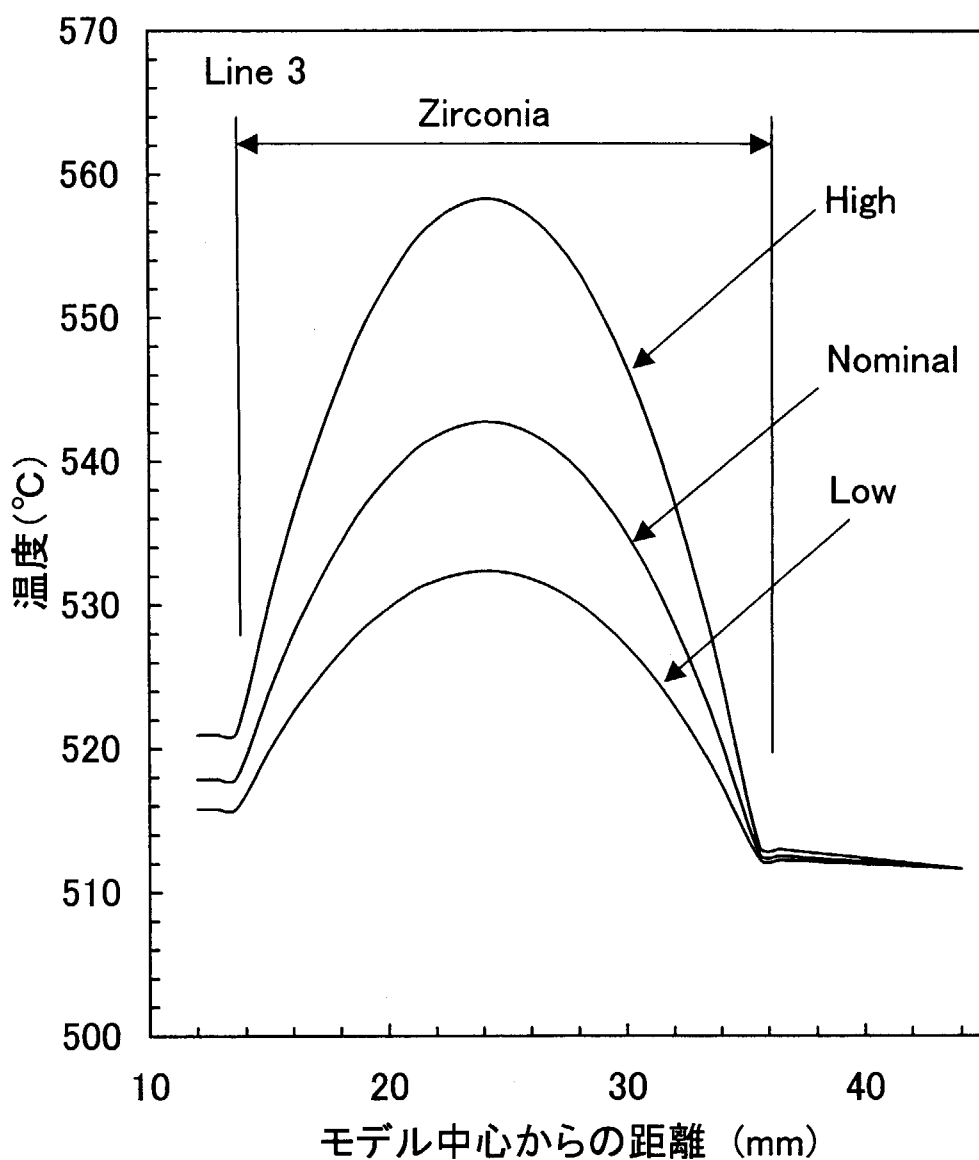


図3-17 Type-II(2)試料ホルダーのジルコニア試験片温度に与えるパラメータの影響

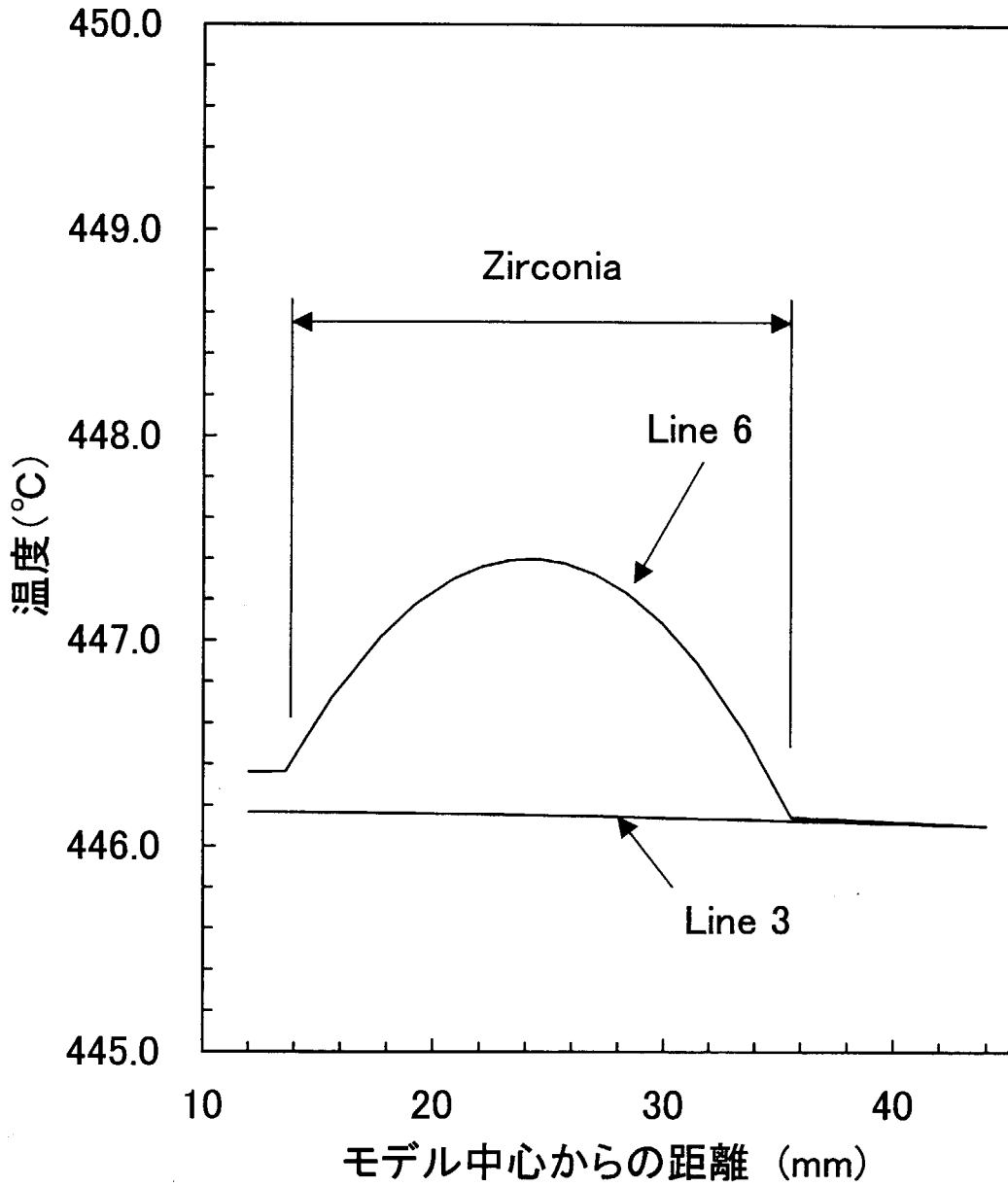


図3-18 Type-III試料ホルダーの温度解析結果

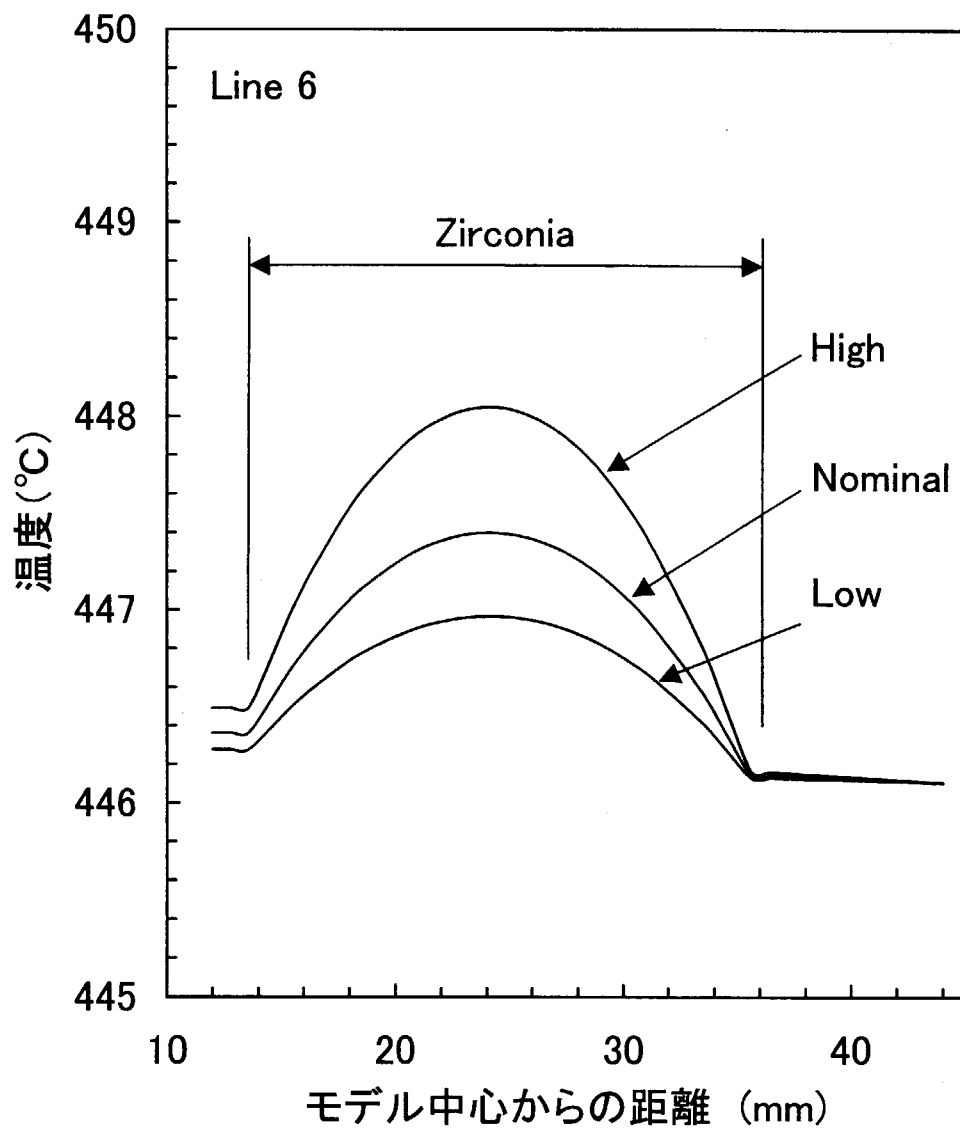


図3-19 Type-III 試料ホルダーのジルコニア試験片温度に与えるパラメータの影響

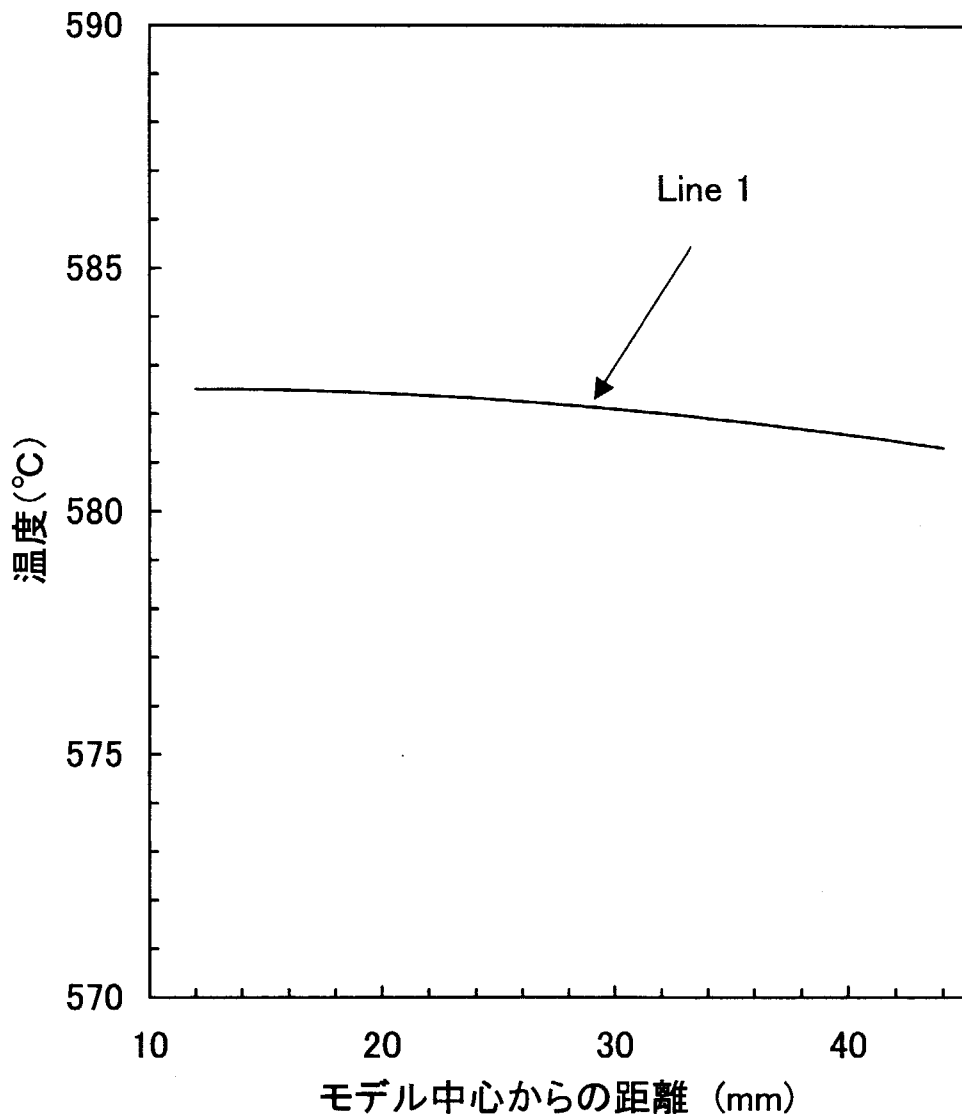


図3-20 Type-IV試料ホルダーの温度解析結果

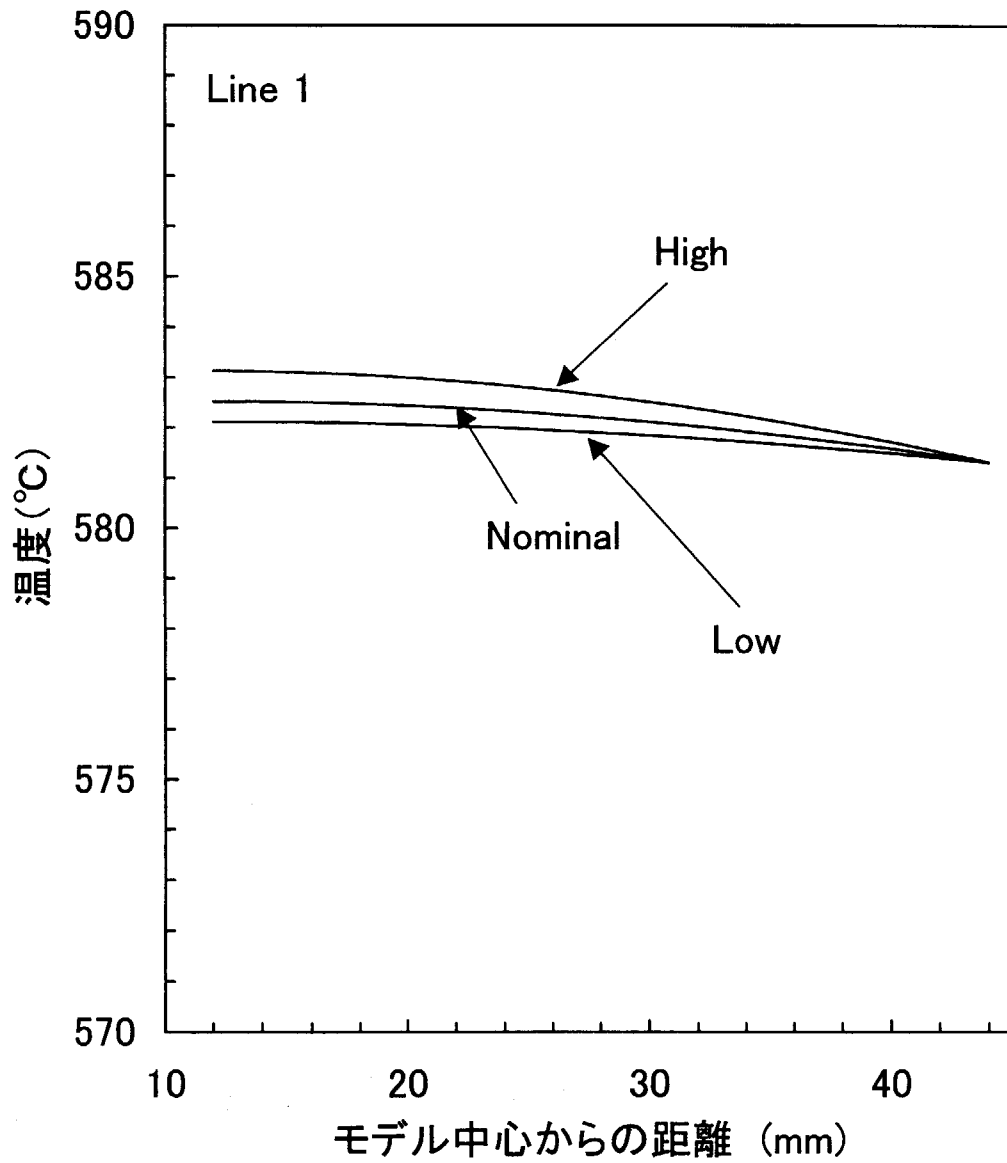


図3-21 Type-IV試料ホルダーの黒鉛試験片温度に与えるパラメータの影響



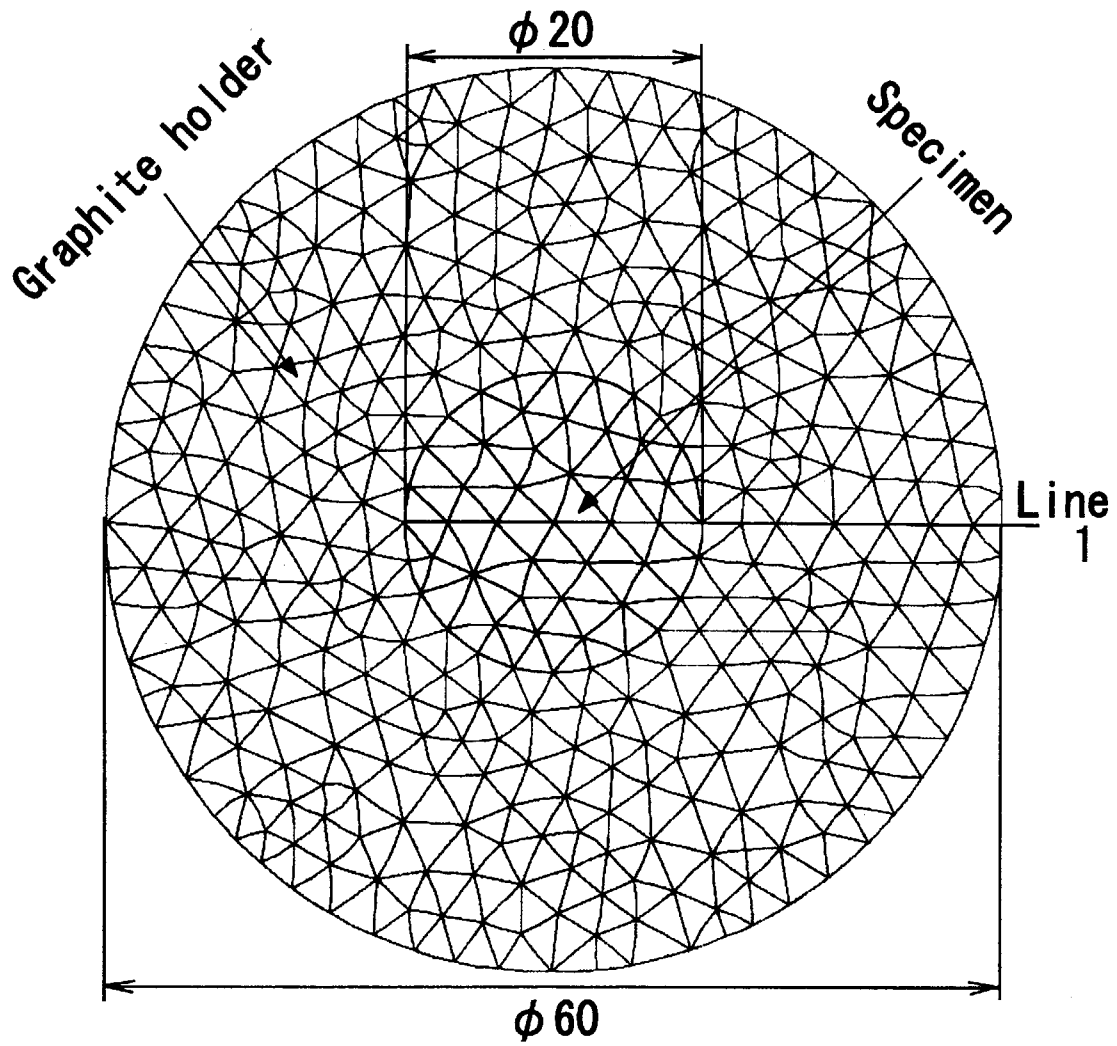


図 3-22(1) ギャップ幅 0mm の場合の照射試料の温度解析モデル

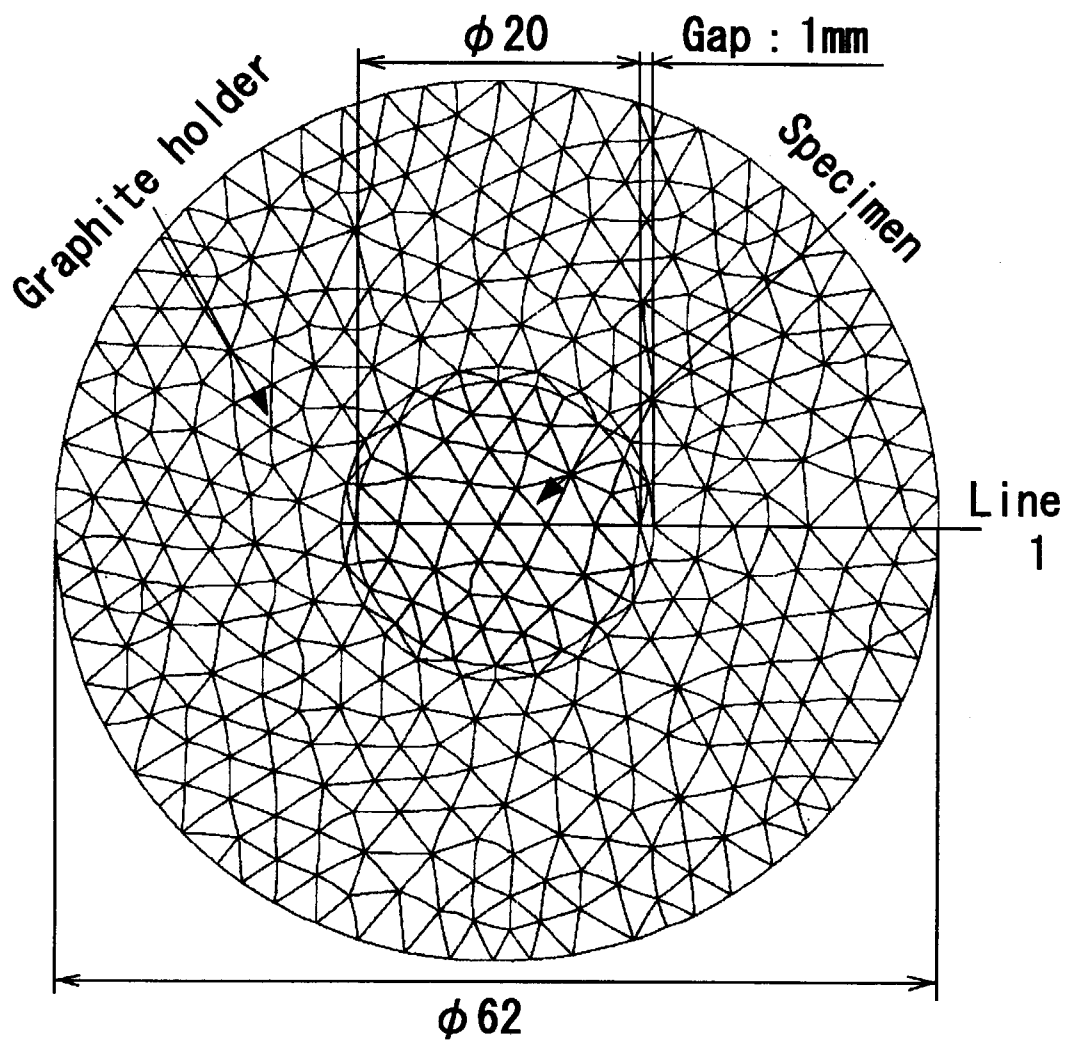


図 3-22(2) ギャップ幅 1mm の場合の照射試料の温度解析モデル

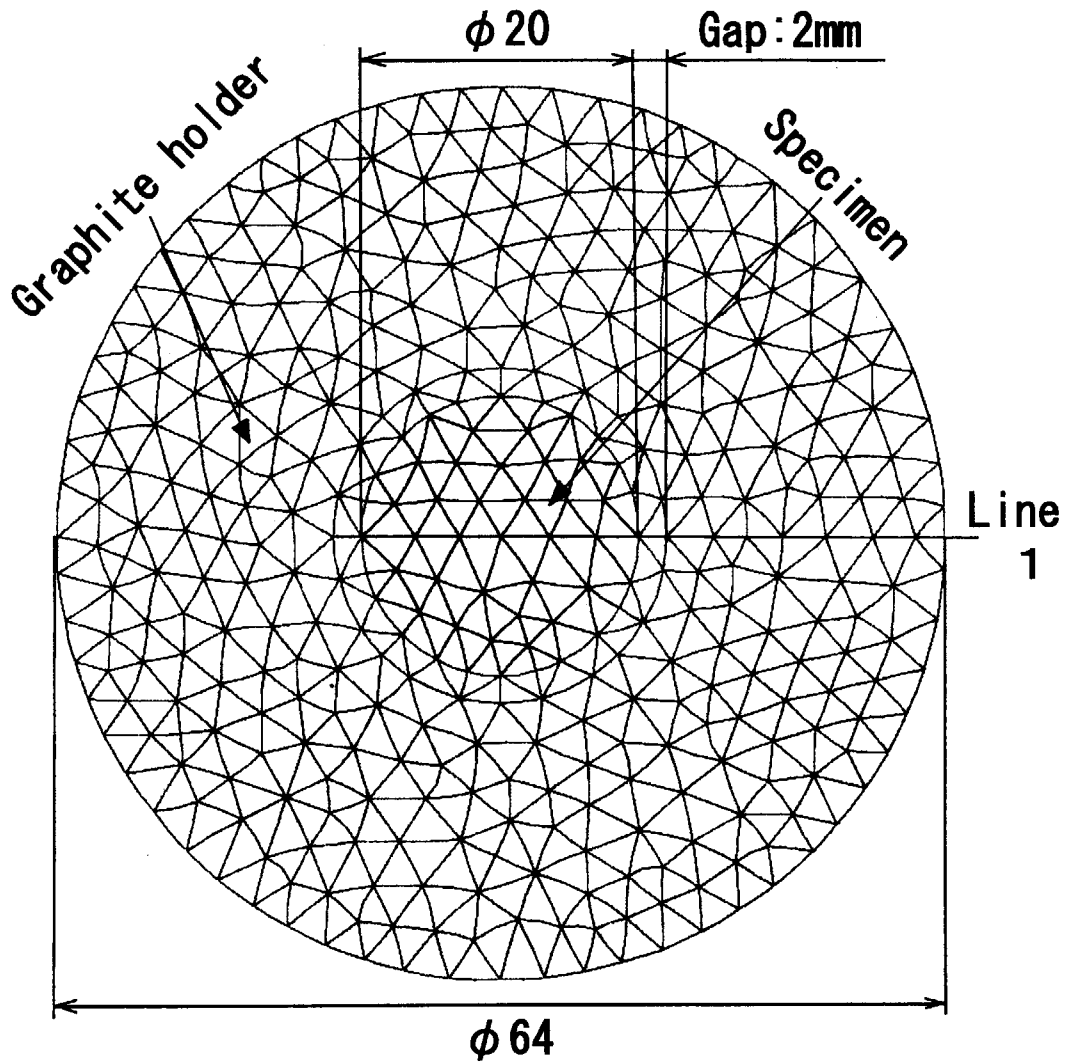


図 3-22(3) ギャップ幅 2mm の場合の照射試料の温度解析モデル

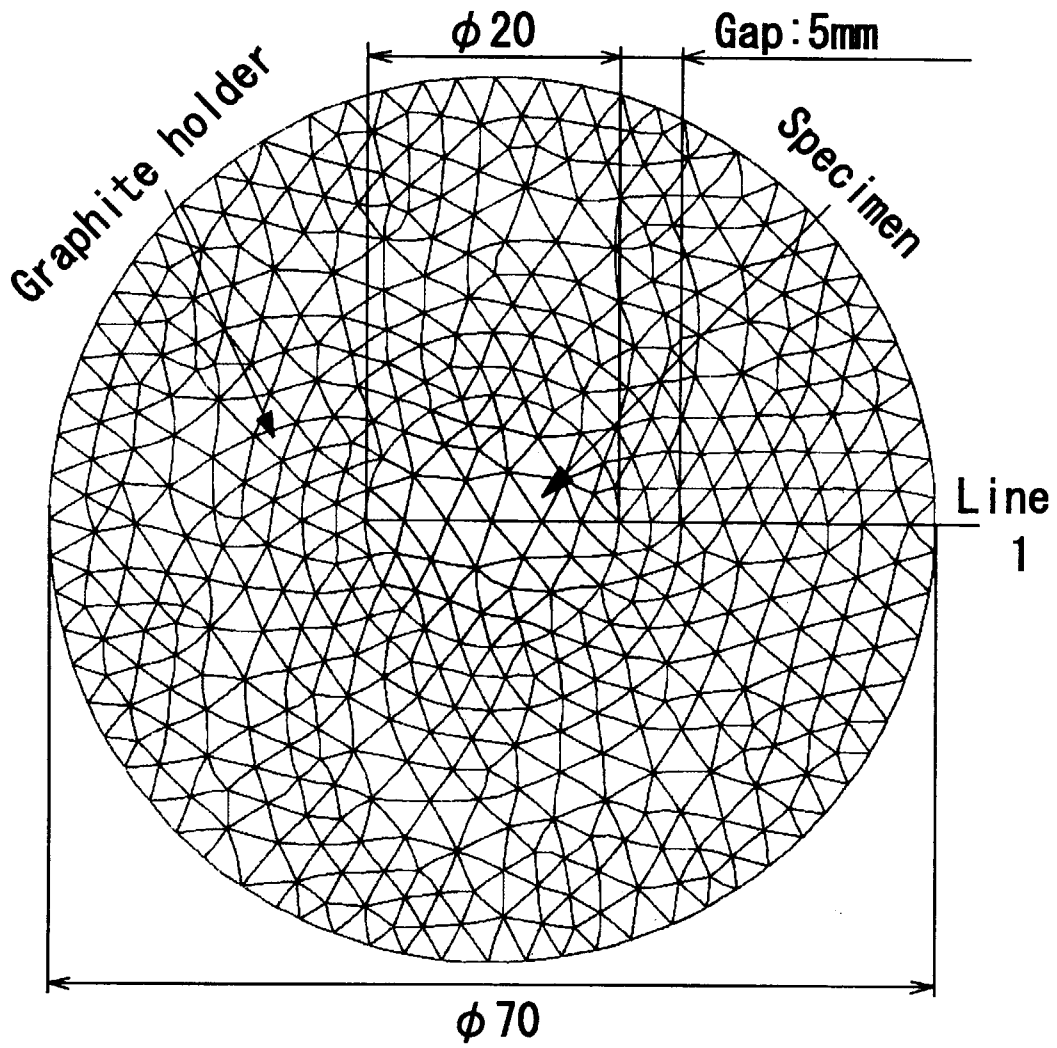


図 3-22(4) ギャップ幅 5mm の場合の照射試料の温度解析モデル

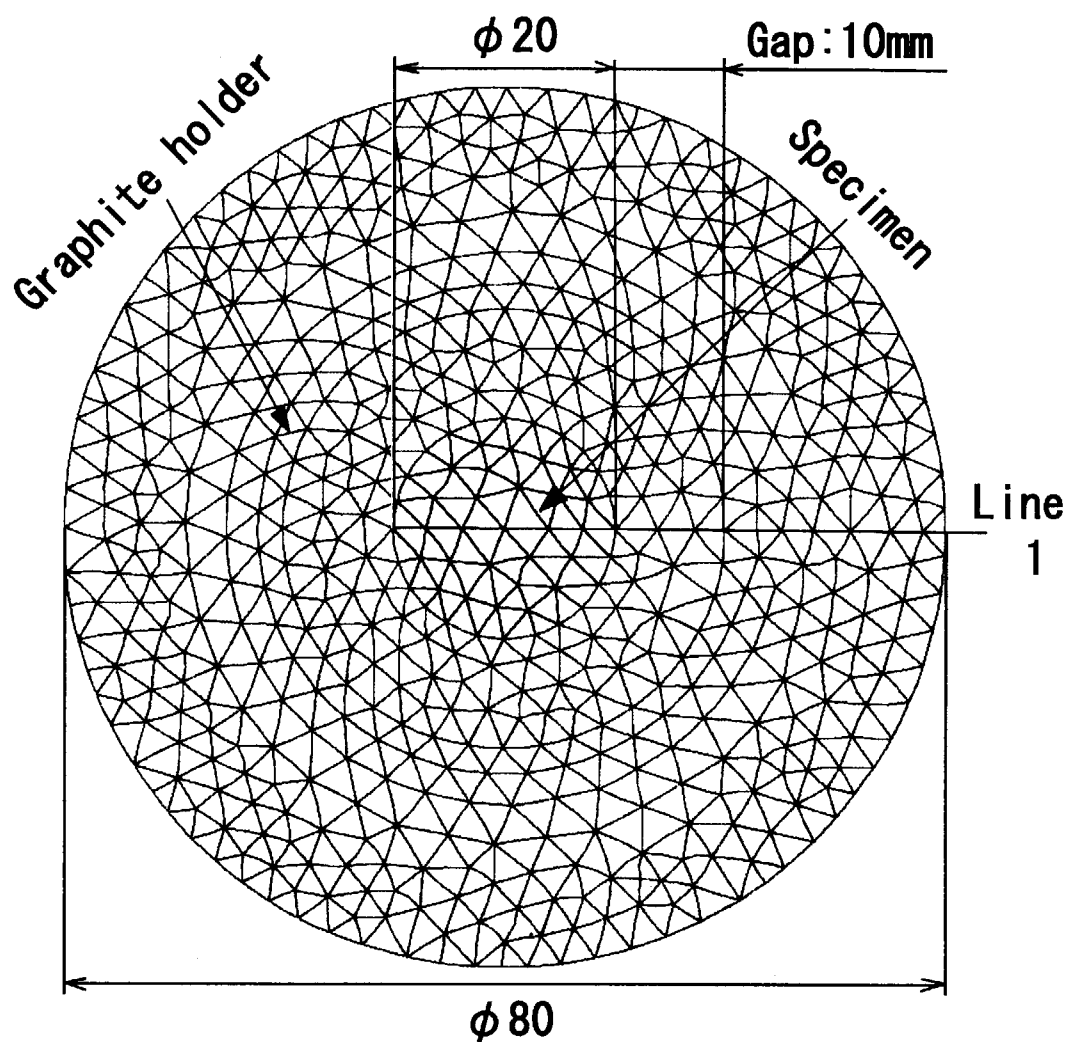


図 3-22(5) ギャップ幅 10mm の場合の照射試料の温度解析モデル

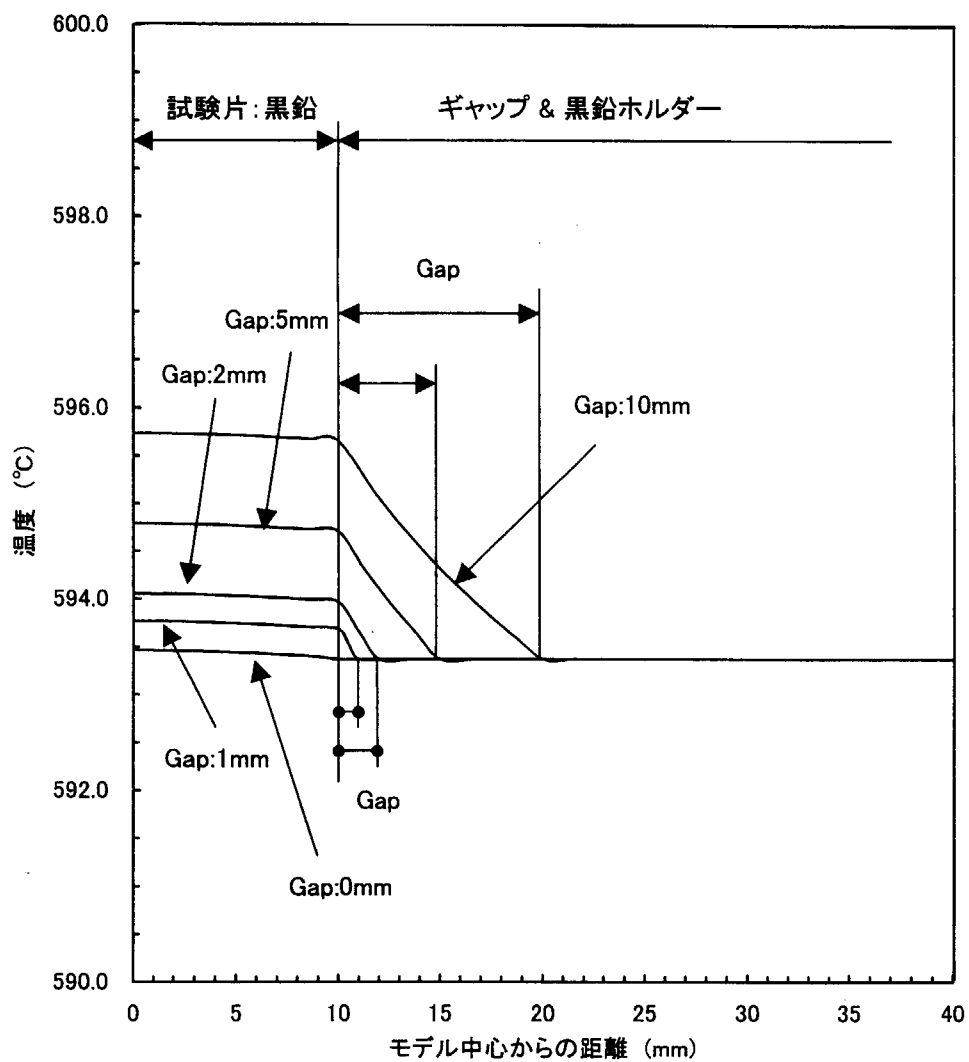


図3-23(1) 照射試験片(黒鉛)の温度解析結果(温度評価Line1上の温度分布)

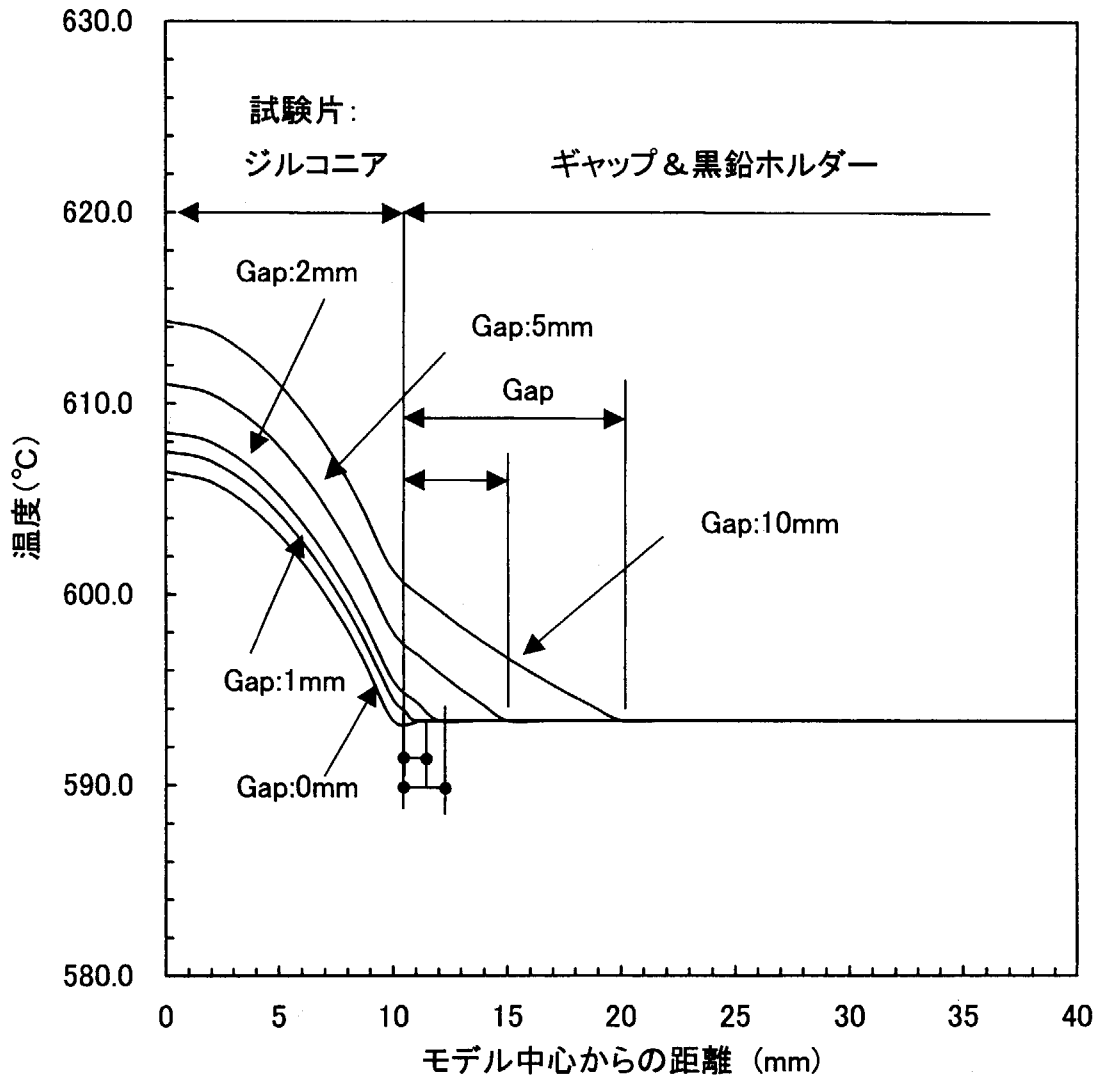


図3-23(2) 照射試験片 (ジルコニア) の温度解析結果 (温度評価Line1上の温度分布)

## 4. まとめ

HTTR を用いた高温工学に関する先端的基礎研究のための照射試験は、平成 15 年度に開始される予定で、照射温度が 400°C から 600°C、高速中性子照射量 ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) が  $1 \times 10^{21}$  から  $3 \times 10^{23} \text{ m}^{-2}$  を目標としている。照射予定の試験片は、高温半導体 SiC 試験片、超電導 Bi-2212 試験片、耐熱セラミックス系の黒鉛試験片、SiC 試験片及びジルコニア試験片である。

そこで、熱伝導率の高い黒鉛試験片と熱伝導率の低いジルコニア試験片を対象として、試験片温度を解析的に検討した。検討では、まず、照射キャプセル位置における発熱量及び照射キャプセル周囲の黒鉛ブロックの温度評価を行い、照射キャプセルの熱的境界条件を定めた。次に、得られた照射キャプセルの熱的境界条件を用いて照射キャプセルの温度評価を行い、キャプセル内に装荷される試料位置の熱的境界条件を定めた。最後に、この熱的境界条件を用いて試料ホルダー及び照射試料の温度を評価するとともに、試料と試料ホルダーのギャップの影響について検討した。

検討の結果、

- 1) 炉心内に最も深く装荷される Type-I 試料ホルダーでは、黒鉛系試料では照射温度が約 593°C で試料装荷領域内の温度差が 1°C 程度とほぼ均一の照射試験が可能である。また、ジルコニア試験片でも、試料装荷領域中心部で最高温度約 599°C、装荷領域内の温度差も 5~6°C とほぼ均一な照射試験が可能である。
- 2) Type-II 試料ホルダーを照射キャプセル内 No.4 試料ホルダー位置（燃料領域第 1 段下部）に装荷した場合には、黒鉛系試料では照射温度が約 557°C で試料装荷領域内の温度差が 3°C 程度とほぼ均一の照射試験が可能である。一方、ジルコニア試験片では、試料装荷領域中心部で最高温度約 588°C で、装荷領域内の温度差は 30°C 程度となる。
- 3) Type-II 試料ホルダーを照射キャプセル内 No.8 試料ホルダー位置（燃料領域第 1 段上部）に装荷した場合には、黒鉛系試料では照射温度が約 513°C で試料装荷領域内の温度差が 2°C 程度とほぼ均一の照射試験が可能である。一方、ジルコニア試験片では、試料装荷領域中心部で最高温度約 542°C で、装荷領域内の温度差は 25°C 程度となる。
- 4) Type-III 試料ホルダーでは、黒鉛系試料では照射温度が約 446°C で試料装荷領域内の温度差が約 0.2°C 以下と極めて均一の照射試験が可能である。また、ジルコニア試験片でも、試料装荷領域中心部で最高温度約 447°C、装荷領域内の温度差は 1°C 以下と均一の照射試験が可能である。
- 5) C/C コンポジット試料のみ装荷予定の Type-IV 試料ホルダーでは、照射温度が約 583°C で試料装荷領域内の温度差が 2°C 程度と極めて均一の照射試験が可能である。



- 6) 試料と試料ホルダーのギャップの影響は、装荷時のギャップを 1mm と大きめに見積もった場合、発熱量の高い No.1 試料装荷位置において、ギャップが無い場合に比較して試料温度の違いはジルコニア試験片でも 1°C程度で、ギャップの試料温度への影響は顕著に現れない。

ことが明らかとなった。

なお、照射キャプセル内には、計装用として耐熱・耐放射線光ファイバを装荷し、これにより照射キャプセル内の温度及び中性子・ $\gamma$ 線の線量を実測することを予定している。また、照射試料ホルダー内には、照射温度を実測するために熔融タイプの温度モニターを、また照射量を実測するためにフルエンスモニターを装荷することとしている。照射試料の温度は、これら得られた実測データと本解析結果等からより詳細に評価されることとなる。

## 謝 辞

本報告書をまとめるに当たり貴重な助言を頂きました高温工学試験研究炉開発部 HTTR 技術開発室の伊与久達夫室長に感謝の意を表します。また、本解析的検討は、企画室調査役林君夫氏が高温照射研究室長の時に着手したもので、検討に際して多々の助言を頂きました。ここに同氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

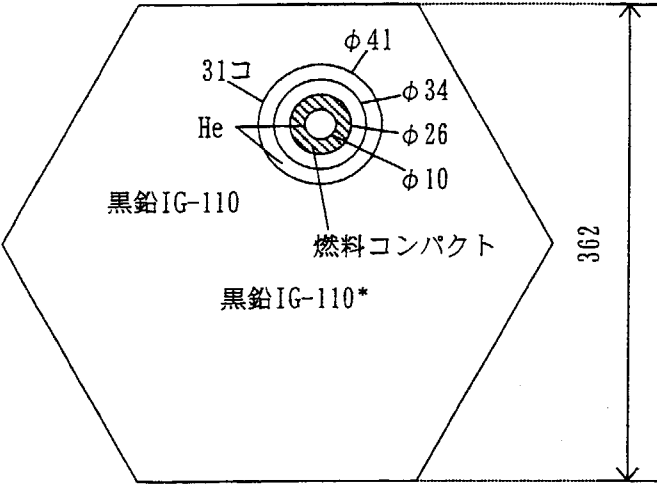
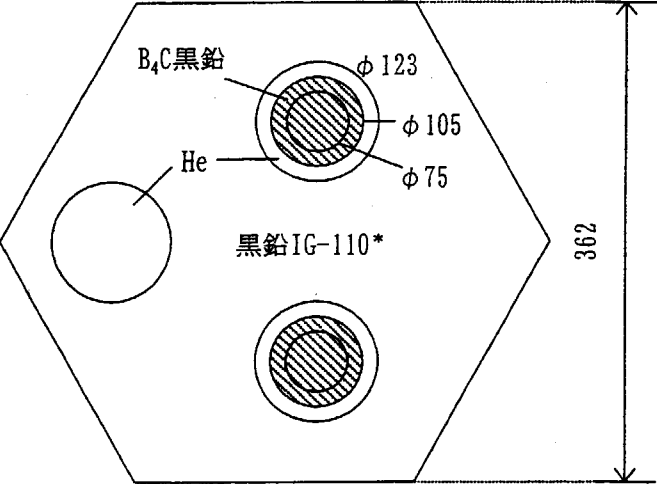
- (1) HTTR 利用研究委員会、高温工学に関する先端的基礎研究の成果及び今後の計画、JAERI-Review 2001-016(2001).
- (2) 石野栞、他、セラミックス系新素材の高温照射試験計画に関する調査、JAERI-Review 99-019(1999).
- (3) 馬場信一、石原正博、鈴木世志夫、高橋常夫、星屋泰二、HTTR 照射試験用試料データ集—第 1 次及び第 2 次照射試験用—、JAERI-Data/Code 2002-008 (2002).
- (4) T.Shibata, T.Kikuchi, S.Miyamoto, K.Ogura and Y.Ishigaki, "Development of the I-I type Irradiation Equipment for HTTR", 2<sup>nd</sup> Information Exchange Meeting on Basic Studies in the Field of High Temperature Engineering, OECD/NEA/NSC, 10-12 October, Paris, France (2001).
- (5) 田中、竹内、"種々の中性子に対する Kerma のエネルギーレスポンス"、JAERI-M6348 (1975) .
- (6) Reactor Handbook 2<sup>nd</sup> ed.Vol.1、PartG(1960).
- (7) 日本原子力研究所、日本原子力研究所大洗研究所の原子炉施設 [HTTR (高温工学試験研究炉)] の変更に係る設計及び工事の方法の認可申請書—第 3 回申請—、平成 4 年 2 月 (1992).
- (8) S.Saito, et al., Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), JAERI 1332(1994)
- (9) 丸山他、私信 (1988) .
- (10) NISA-II User's Manual Ver.92, Engineering Mechanics Research Corporation, U.S.A(1992).
- (11) 板橋、他、私信 (1999) .

付録 1

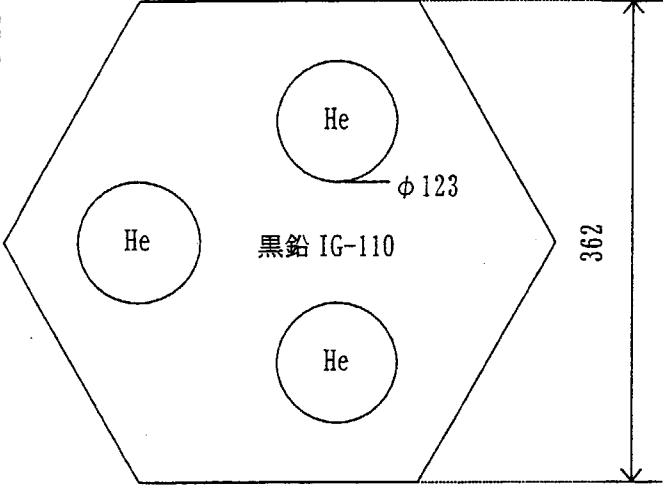
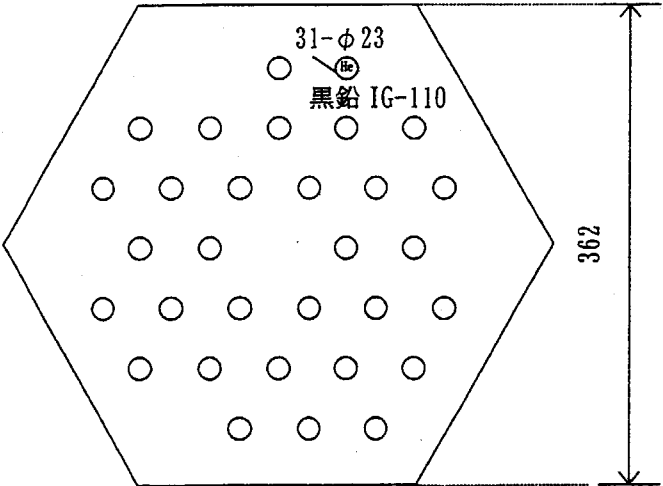
等価熱伝導率の設定について

This is a blank page.

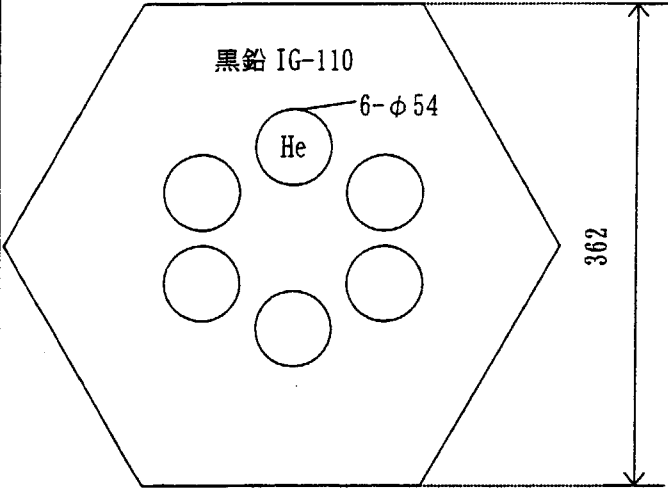
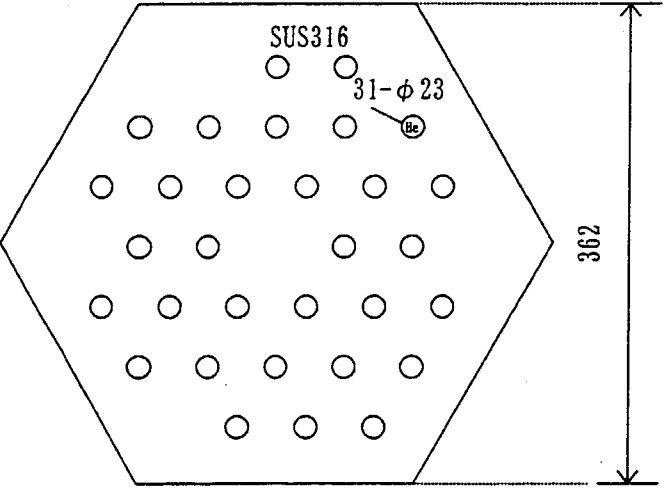
付表 1(1) 等価熱伝導率の設定法

材 料	設 定 方 法	出 典
燃料体	<p>(水平方向)                      冷却孔間は温度差がつかないとして、最外側の冷却孔とブロック外側とのリガメント分だけの温度差に相当する熱伝導率を設定する。</p> <p style="text-align: center;"> <math display="block">\text{黒鉛IG-110の熱伝導率}^* \times \frac{360}{59}</math> </p> <p>*未照射材の値を使う。</p> <p>(垂直方向)                      下図モデルにおける面積比で平均する。</p>  <p>*未照射材の値を使う。</p>	
制御棒案内ブロック (制御棒あり)	<p>下図モデルにおける面積比で平均する。</p>  <p>*黒鉛IG-110の熱伝導率は、未照射材値を用いる。</p>	

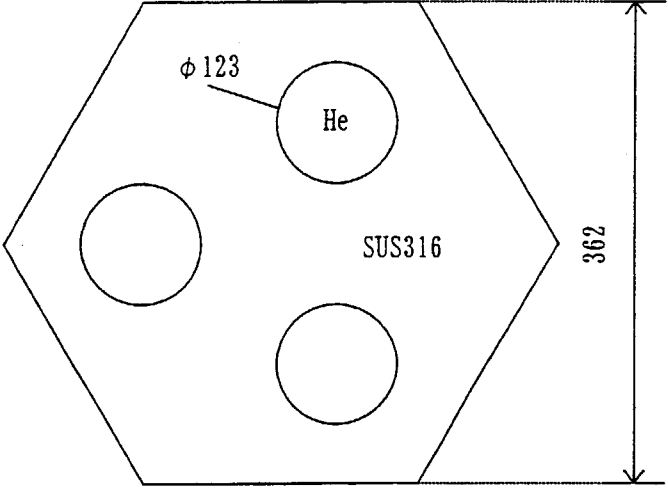
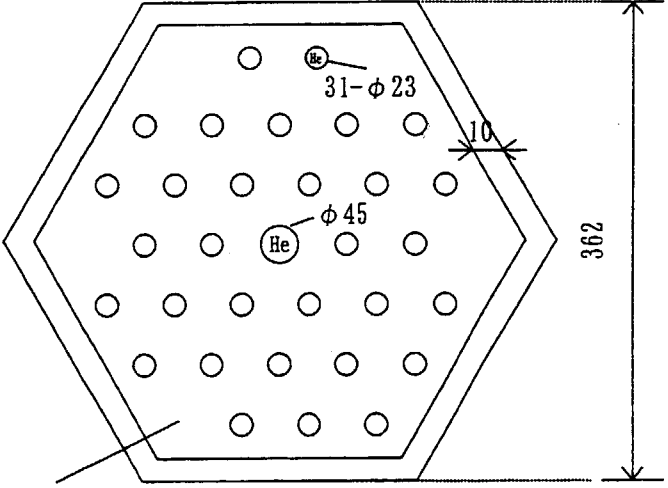
付表 1(2) 等価熱伝導率の設定法

材 料	設 定 方 法	出 典
制御棒案内ブロック (制御棒なし)	<p>下図モデルにおける面積比で平均する。</p>  <p>黒鉛IG-110の熱伝導率は、未照射材値を用いる。</p>	
可動反射体A (燃料体カラム)	<p>(水平方向)                      燃料体と同様に最外側冷却孔リガメント相当の熱伝導率を設定する。</p> $\text{黒鉛IG-110の熱伝導率} * \times \frac{360}{70}$ <p>(垂直方向)                      下図モデルによる面積比で平均する。</p>  <p>* 黒鉛IG-110の熱伝導率は、未照射材値を用いる。</p>	

付表 1(3) 等価熱伝導率の設定法

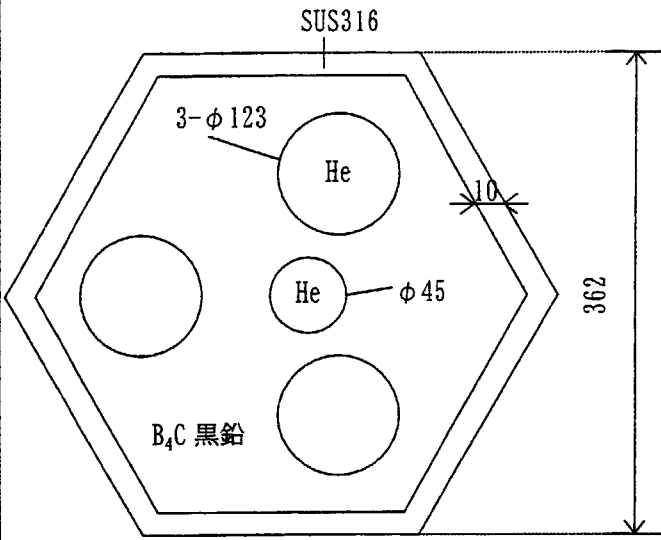
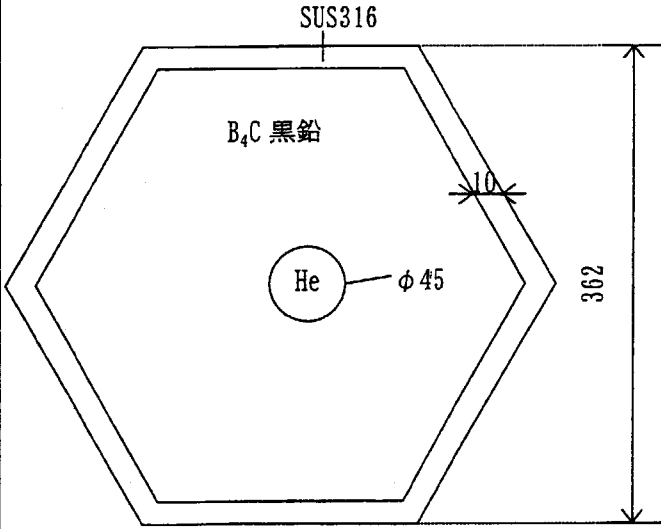
材 料	設 定 方 法	出 典
可動反射体B (下部)	<p>下図モデルにおける面積比で平均する。</p>  <p>黒鉛IG-110の熱伝導率は、未照射材値を用いる。</p>	
可動反射体C (側部)	<p>流路孔がないので、黒鉛IG-110の値をそのまま使う。 但し、未照射材値を用いる。</p>	
上部遮蔽体A (SUS) ; 燃料体カラム	<p>下図モデルにおける面積比で平均する。</p>  <p>水平・垂直方向共、同じ値を使う。</p>	SUS316 ASME Sec III App. 1 (1986 ed.)

付表 1(4) 等価熱伝導率の設定法

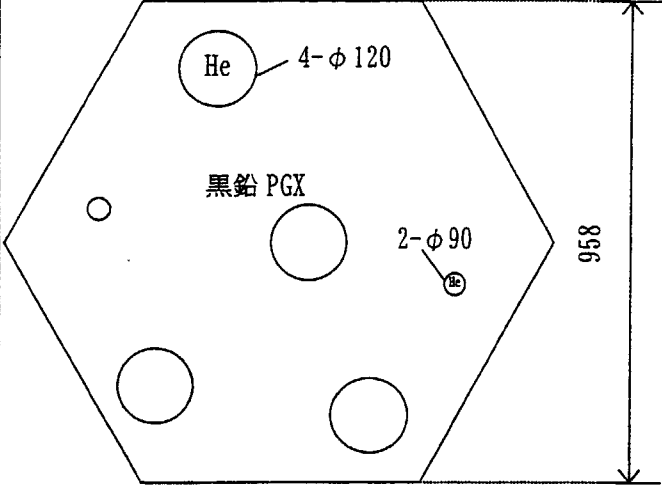
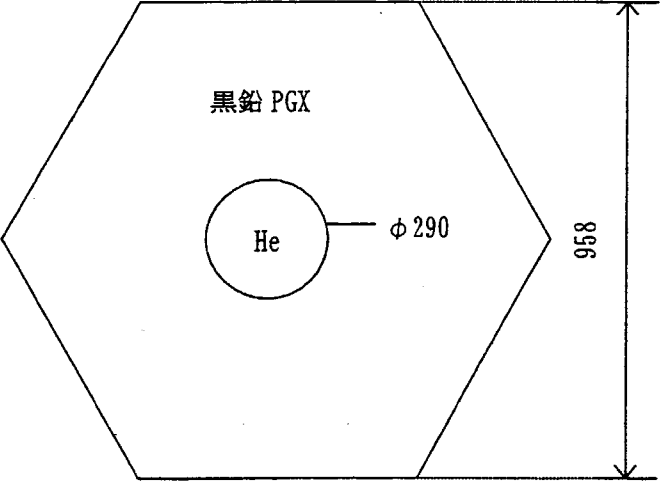
材 料	設 定 方 法	出 典
上部遮蔽体 B (SUS) ; 制御カラム	下図モデルにおける面積比で平均する。  <p>水平・垂直方向共, 同じ値を使う。</p>	SUS316 ASME Sec III App. 1 (1986 ed.)
上部遮蔽体 C (SUS) ; 可動反射体カラム	流路孔が無いので, SUS316の値をそのまま使う。	SUS316 ASME Sec III App. 1 (1986 ed.)
上部遮蔽体 A (B <sub>4</sub> C) ; 燃料体カラム	下図モデルにおける面積比で平均する。  <p>B<sub>4</sub>C 黒鉛</p>	SUS316 ASME Sec III App. 1 (1986 ed.)



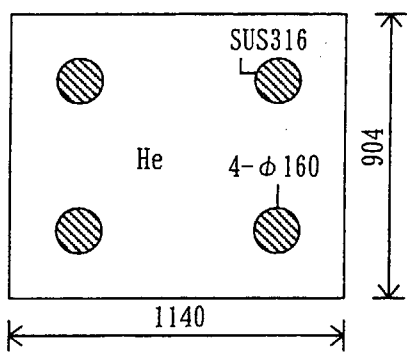
付表 1(5) 等価熱伝導率の設定法

材 料	設 定 方 法	出 典
上部遮蔽体B (B <sub>4</sub> C) ; 制御カラム	<p>下図モデルにおける面積比で平均する。</p>  <p>B<sub>4</sub>C黒鉛の熱伝導率は、社内試作品測定値を使う。</p>	SUS316 ASME SecIII App. 1 (1986 ed.)
上部遮蔽体C (B <sub>4</sub> C) ; 可動反射体カラム	<p>下図モデルにおける面積比で平均する。</p> 	SUS316 ASME SecIII App. 1
固定反射体	黒鉛PGXの未照射材値をそのまま使う。	

付表 1(6) 等価熱伝導率の設定法

材 料	設 定 方 法	出 典
シール用高温プレナムブロック	<p>下図モデルにおける面積比で平均する。</p>  <p>黒鉛スリーブの存在は無視する。 黒鉛PGXの熱伝導率は未照射材値を使う。</p>	
キー結合用高温プレナムブロック	<p>下図モデルにおける面積比で平均する。</p>  <p>上図は、周辺領域ブロックであり、中心領域ブロックは穴径がφ350であるが、解析上は個数の多い周辺領域ブロックに統一し、上図を採用する。 黒鉛PGXの熱伝導率は未照射材値を使う。</p>	
高温プレナム下部ブロック	<p>黒鉛PGXの値をそのまま使う。但し、未照射材値を使う。</p>	

付表 1(7) 等価熱伝導率の設定法

材 料	設 定 方 法	出 典
断熱ブロック	炭素ASR-ORBの値をそのまま使う。 但し、ノミナル値を使う。	
下端ブロック	黒鉛PGXの値をそのまま使う。但し、未照射材値を使う。	
炉心支持板	SUS316と2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼で構成されるが、熱伝導率としては、量的に多い2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の値をそのまま使う。	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼 ASME SecIII App. 1 (1986 ed.)
炉心支持格子	He93%, 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼7%の比で平均する。	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼 ASME SecIII App. 1
側部遮蔽体 (SUS)	SUS316の値をそのまま使う。	SUS316 ASME SecIII App. 1 (1986 ed.)
側部遮蔽体 (B <sub>4</sub> C)	B <sub>4</sub> C黒鉛の値をそのまま使う。値は社内試作品測定値を使う。	
圧力容器内管	アルミナ繊維による断熱材の熱伝導率は、データがないが、カタログ値 (max0.3kcal/mh℃) を安全側に見て、0.5kcal/mh℃とする。	
圧力容器	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の値をそのまま使う。	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼 ASME SecIII App. 1
冷却材 (脚)	下図モデルにおける面積比で平均する。 	SUS316 ASME SecIII App. 1 (1986 ed.)
冷却材	Heの値をそのまま使う。	

This is a blank page.

付録 2

各試料ホルダーの温度評価ライン上の温度分布

This is a blank page.

## 付表・付図リスト

## 付表 2-1 試料ホルダーの温度解析ケース一覧表

付図 2-1(1)	Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン
付図 2-1(2)	Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン
付図 2-1(3)	Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン
付図 2-1(4)	Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン
付図 2-2	Type-I 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: N-1)
付図 2-3	Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: N2-1)
付図 2-4	Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: N2-2)
付図 2-5	Type-III 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: N-3)
付図 2-6	Type-IV 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: N-4)
付図 2-7	Type-I 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: H-1)
付図 2-8	Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: H-2-1)
付図 2-9	Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: H-2-2)
付図 2-10	Type-III 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: H-3)
付図 2-11	Type-IV 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: H-4)
付図 2-12	Type-I 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: L-1)
付図 2-13	Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: L-2-1)
付図 2-14	Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: L-2-2)
付図 2-15	Type-III 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: L-3)
付図 2-16	Type-IV 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: L-4)

付表2-1 照射ホルダーの温度解析ケース一覧表

## (1) ノミナルケース (Case1)

解析ケース名	試料ホルダー	ガイド管位置		図面番号
N-1	Type-I	Type-I	200.0mm	付図2-2
N-2-1	Type-II	Type-II(1)	500.0mm	付図2-3
N-2-2	Type-II	Type-II(2)	900.0mm	付図2-4
N-3	Type-III	Type-III	1510.0mm	付図2-5
N-4	Type-IV	Type-IV	300.0mm	付図2-6

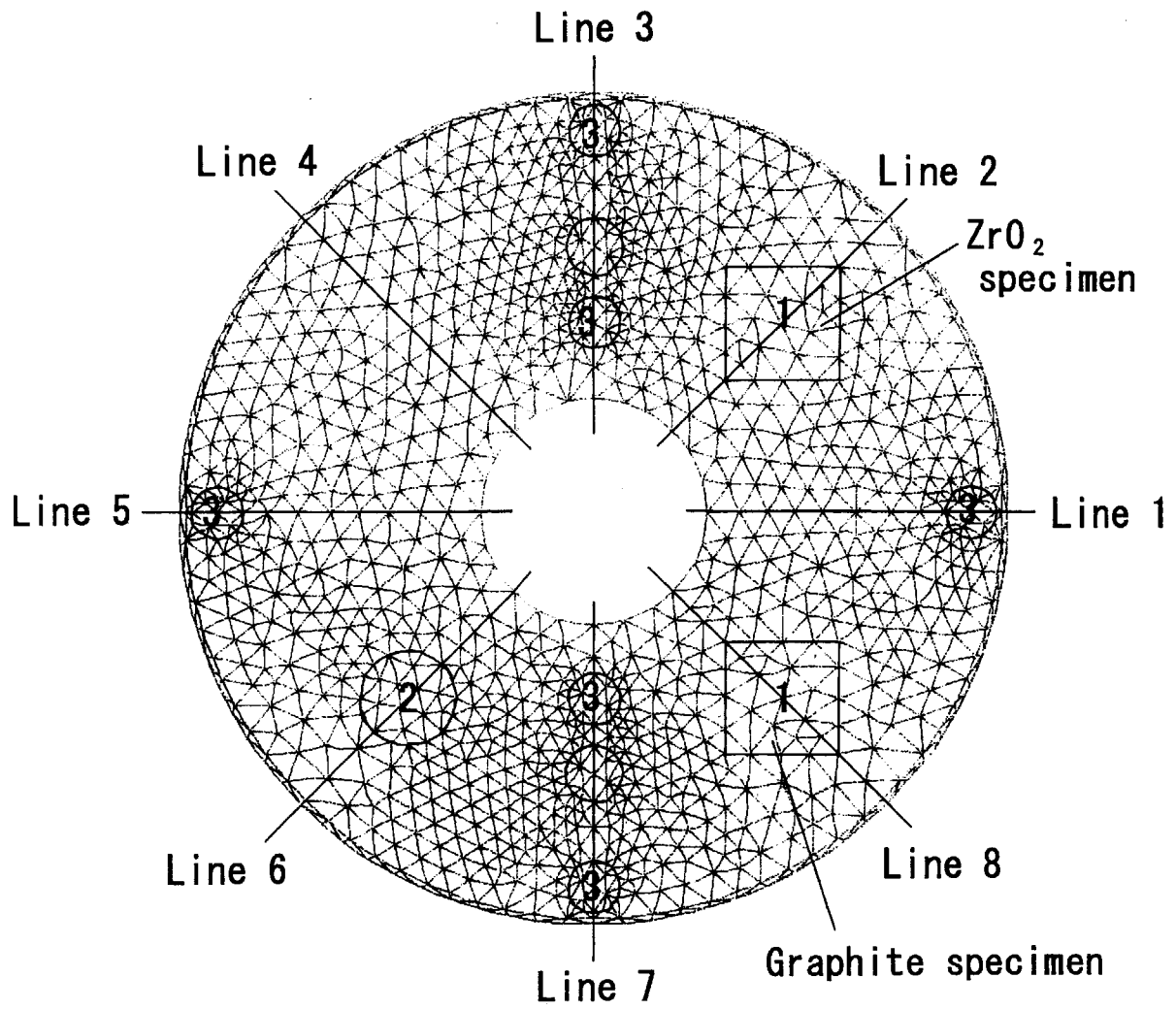
## (2) 高温側ケース (Case2)

解析ケース名	試料ホルダー	ガイド管位置		図面番号
H-1	Type-I	Type-I	200.0mm	付図2-7
H-2-1	Type-II	Type-II(1)	500.0mm	付図2-8
H-2-2	Type-II	Type-II(2)	900.0mm	付図2-9
H-3	Type-III	Type-III	1510.0mm	付図2-10
H-4	Type-IV	Type-IV	300.0mm	付図2-11

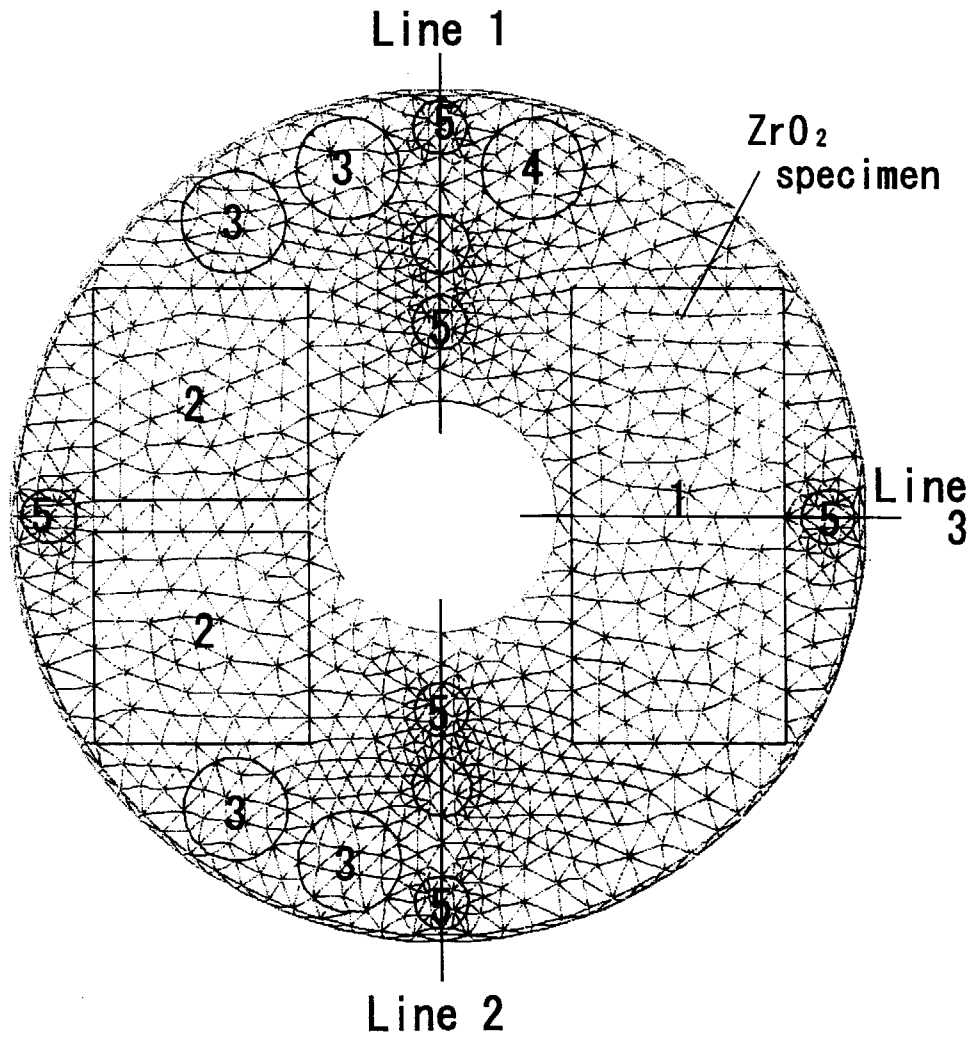
## (3) 低温側ケース (Case3)

解析ケース名	試料ホルダー	ガイド管位置		図面番号
L-1	Type-I	Type-I	200.0mm	付図2-12
L-2-1	Type-II	Type-II(1)	500.0mm	付図2-13
L-2-2	Type-II	Type-II(2)	900.0mm	付図2-14
L-3	Type-III	Type-III	1510.0mm	付図2-15
L-4	Type-IV	Type-IV	300.0mm	付図2-16

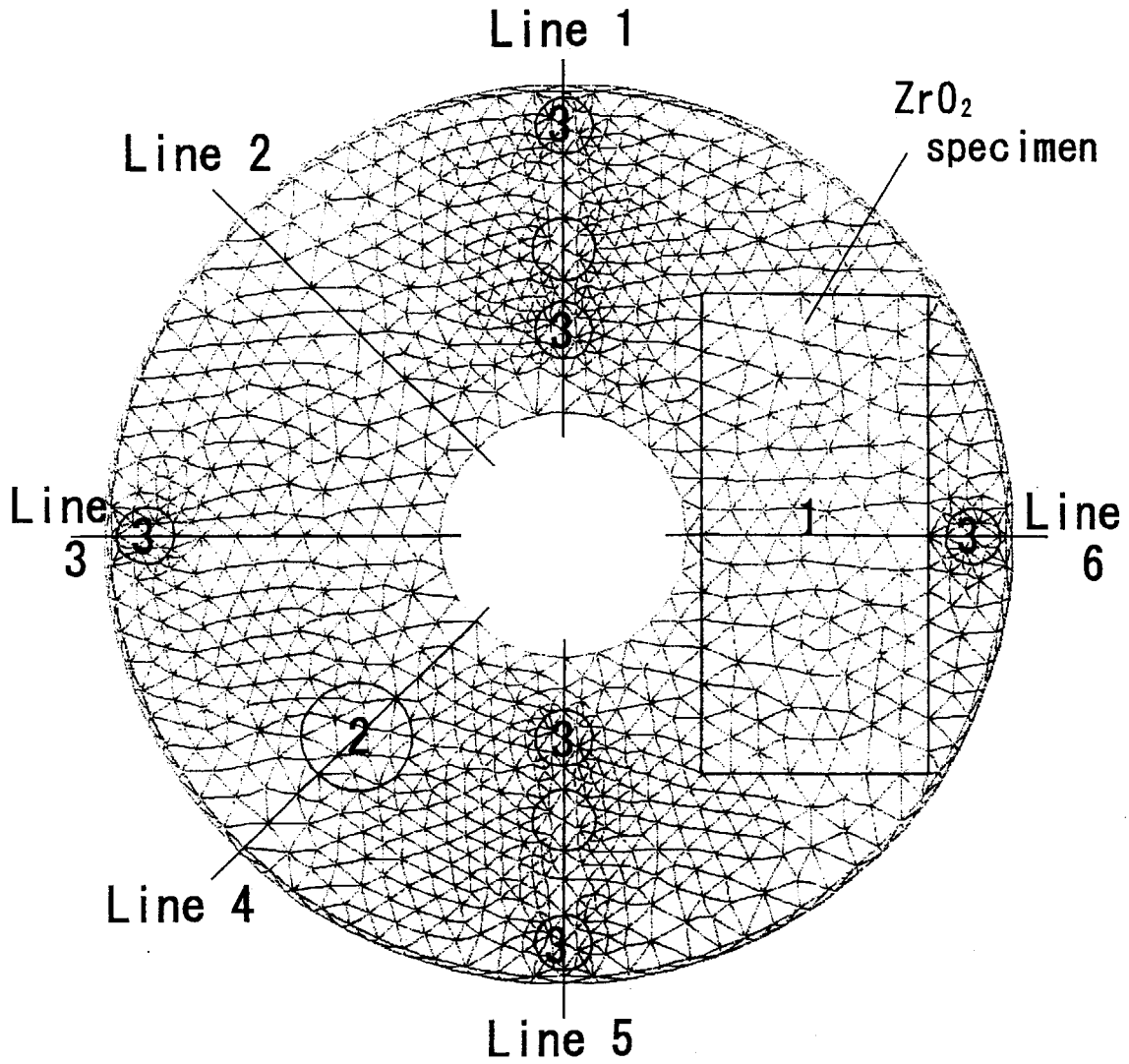




付図 2-1(1) Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン

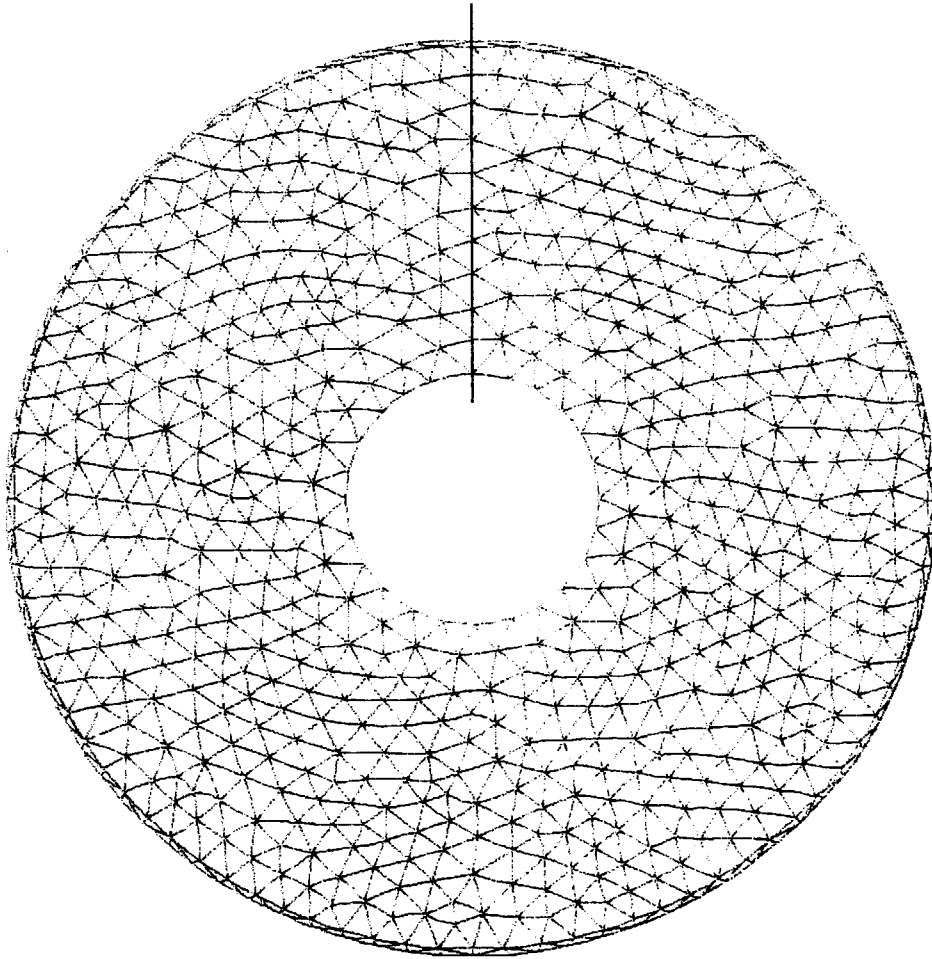


付図 2-1(2) Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン

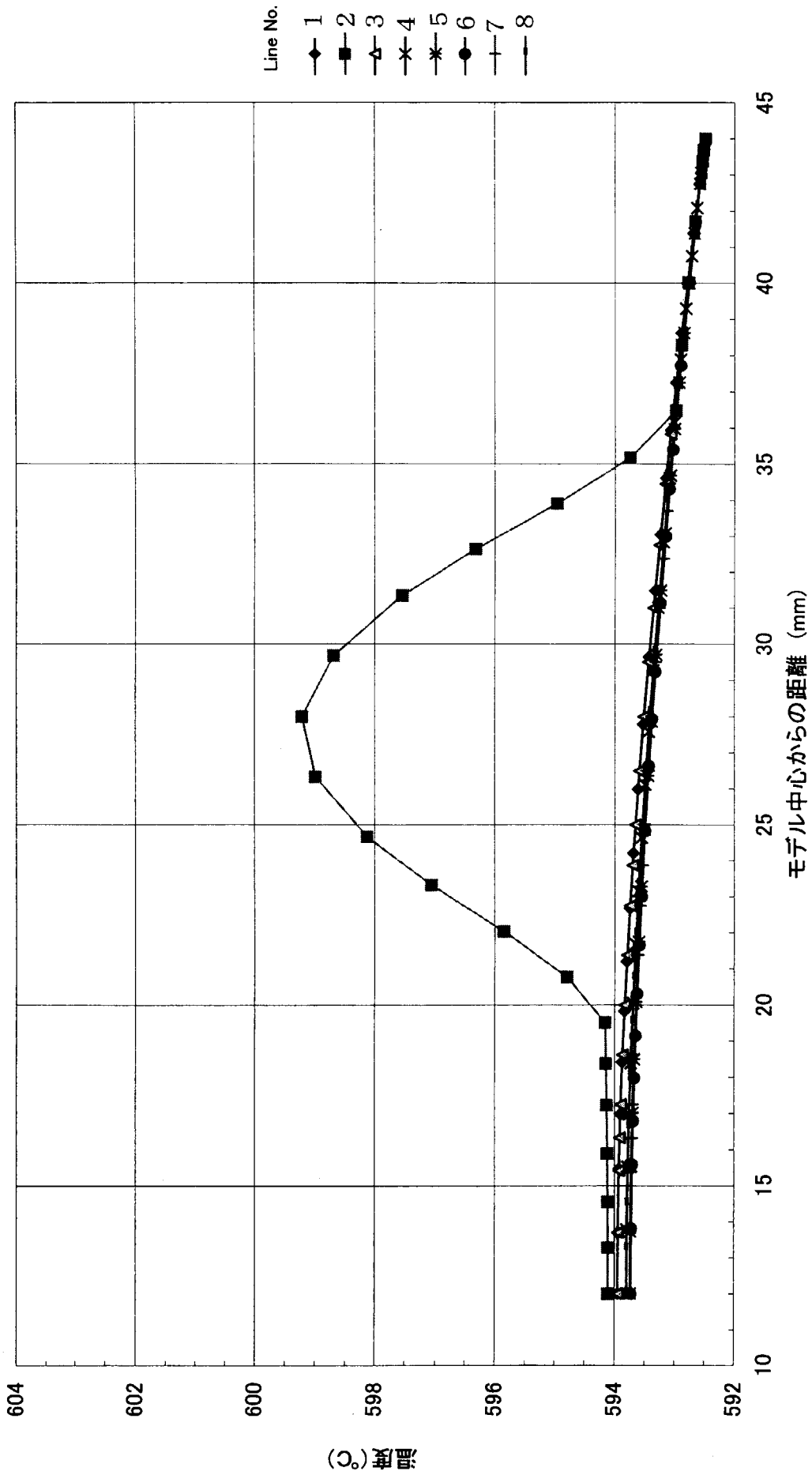


付図 2-1(3) Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン

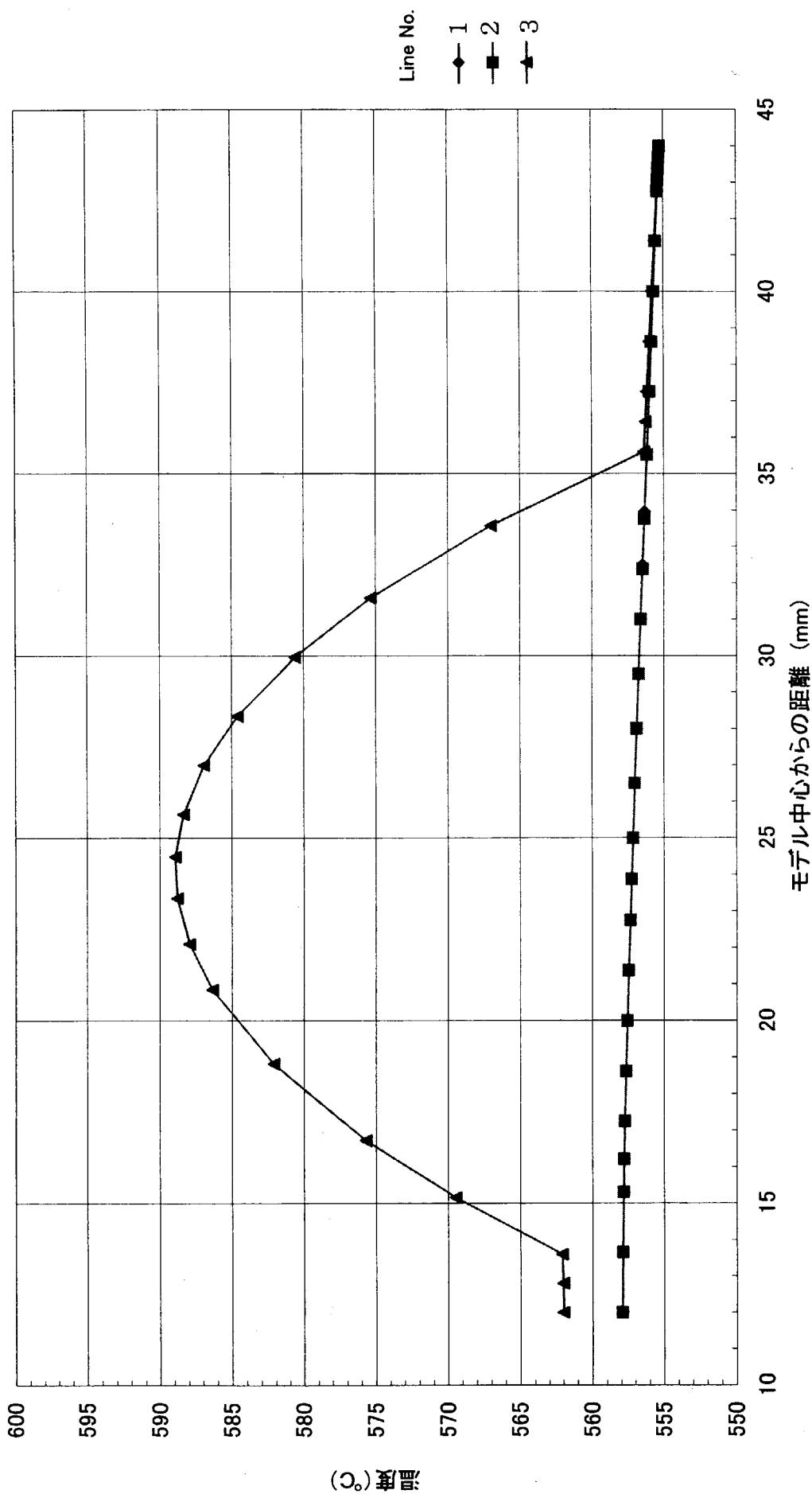
Line 1



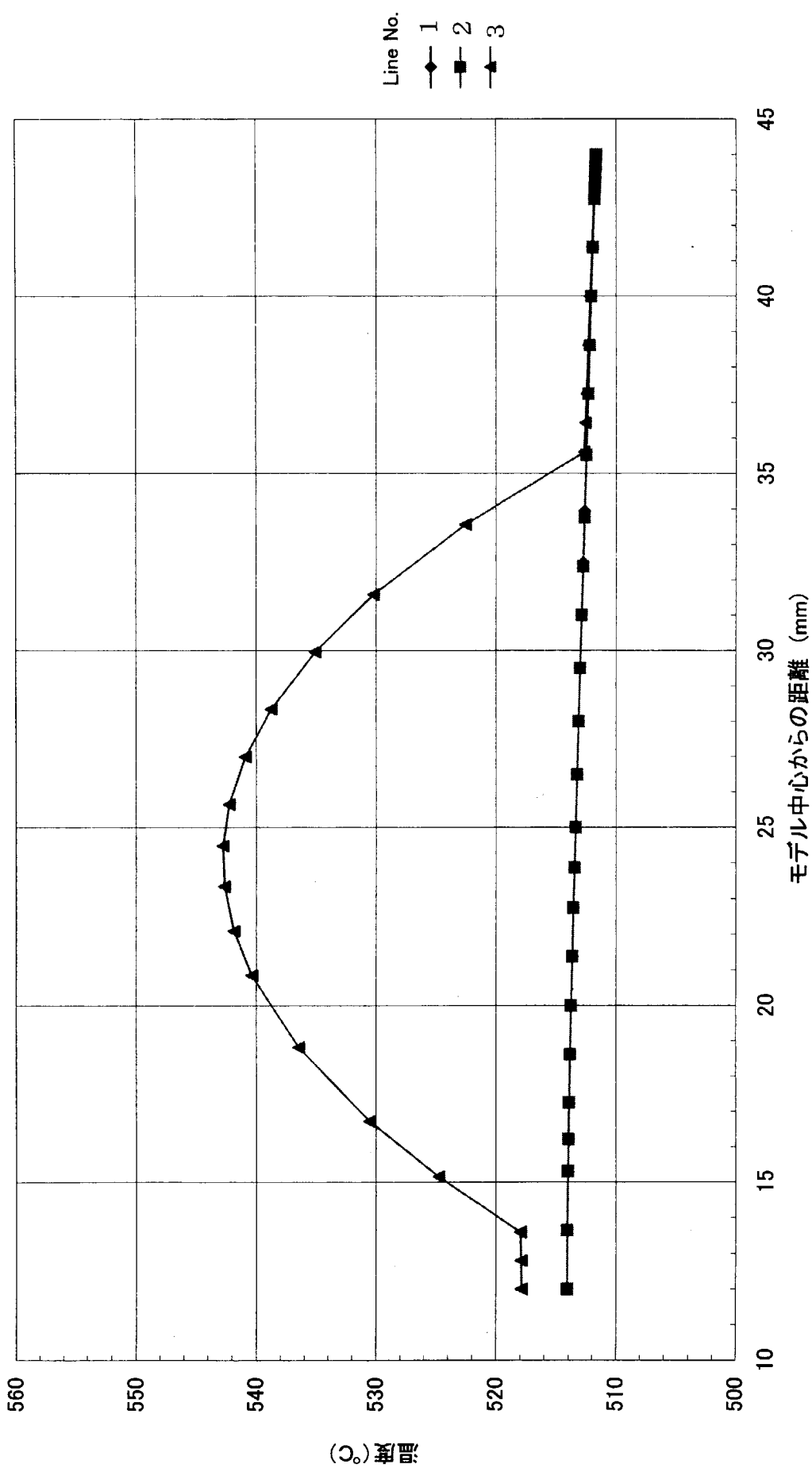
付図 2-1(4) Type-I 試料ホルダーの試験片装荷位置と温度評価ライン



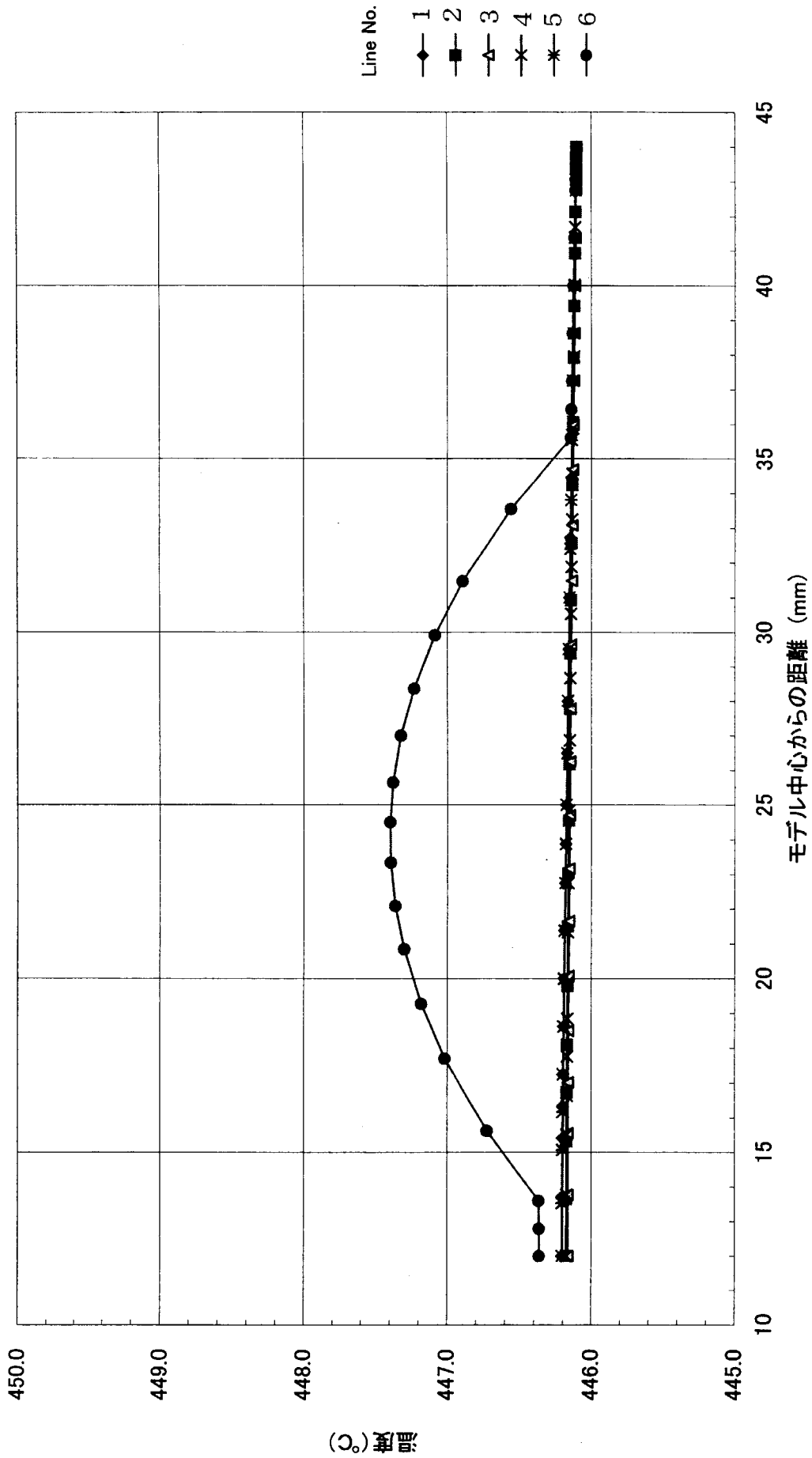
付図2-2 Type-I 試料ホルダの温度解析結果 (解析ケース名: N-1)



付図2-3 Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: N2-1)

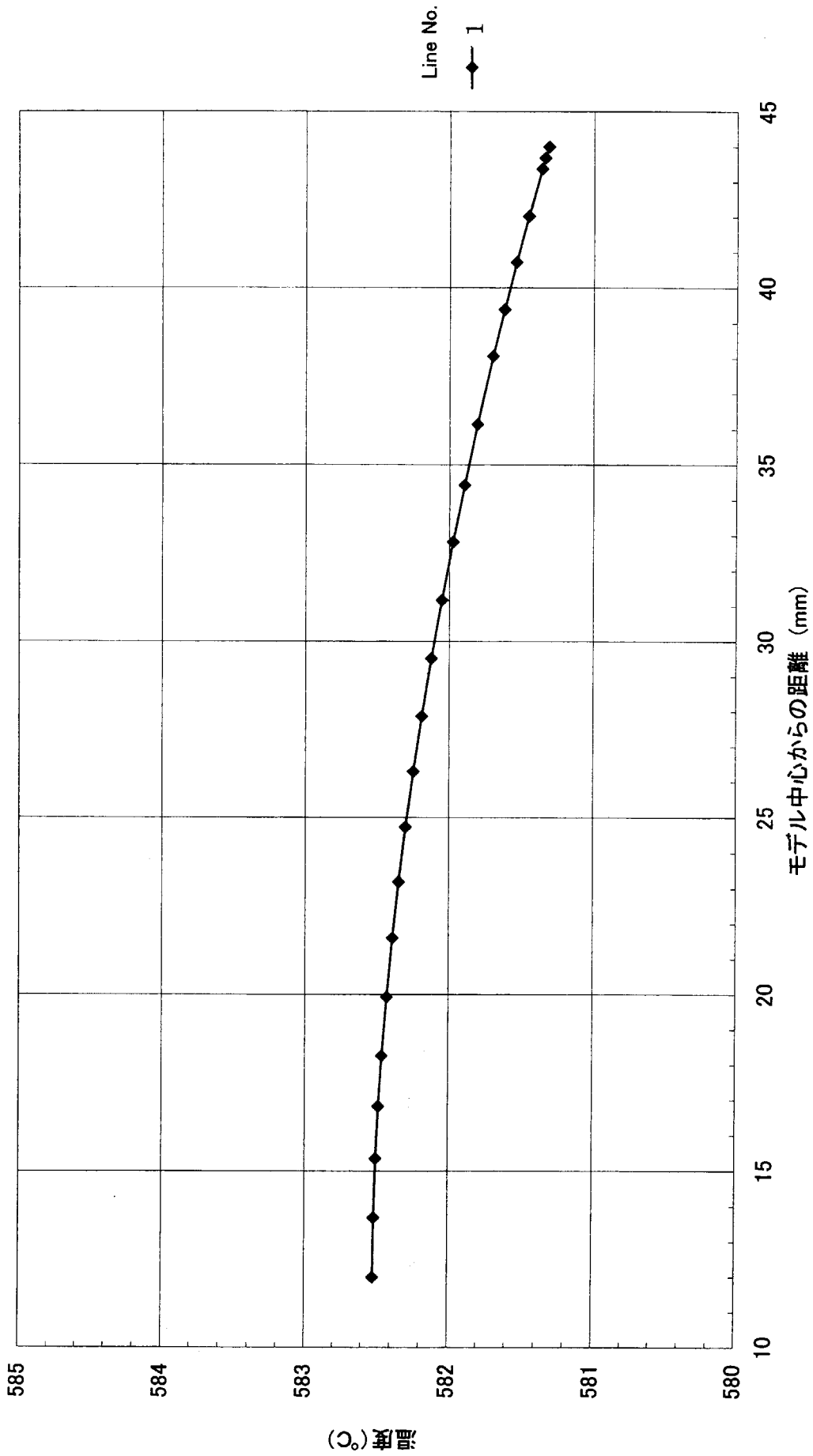


付図2-4 Type-II 試料ホルダの温度解析結果 (解析ケース名: N2-2)

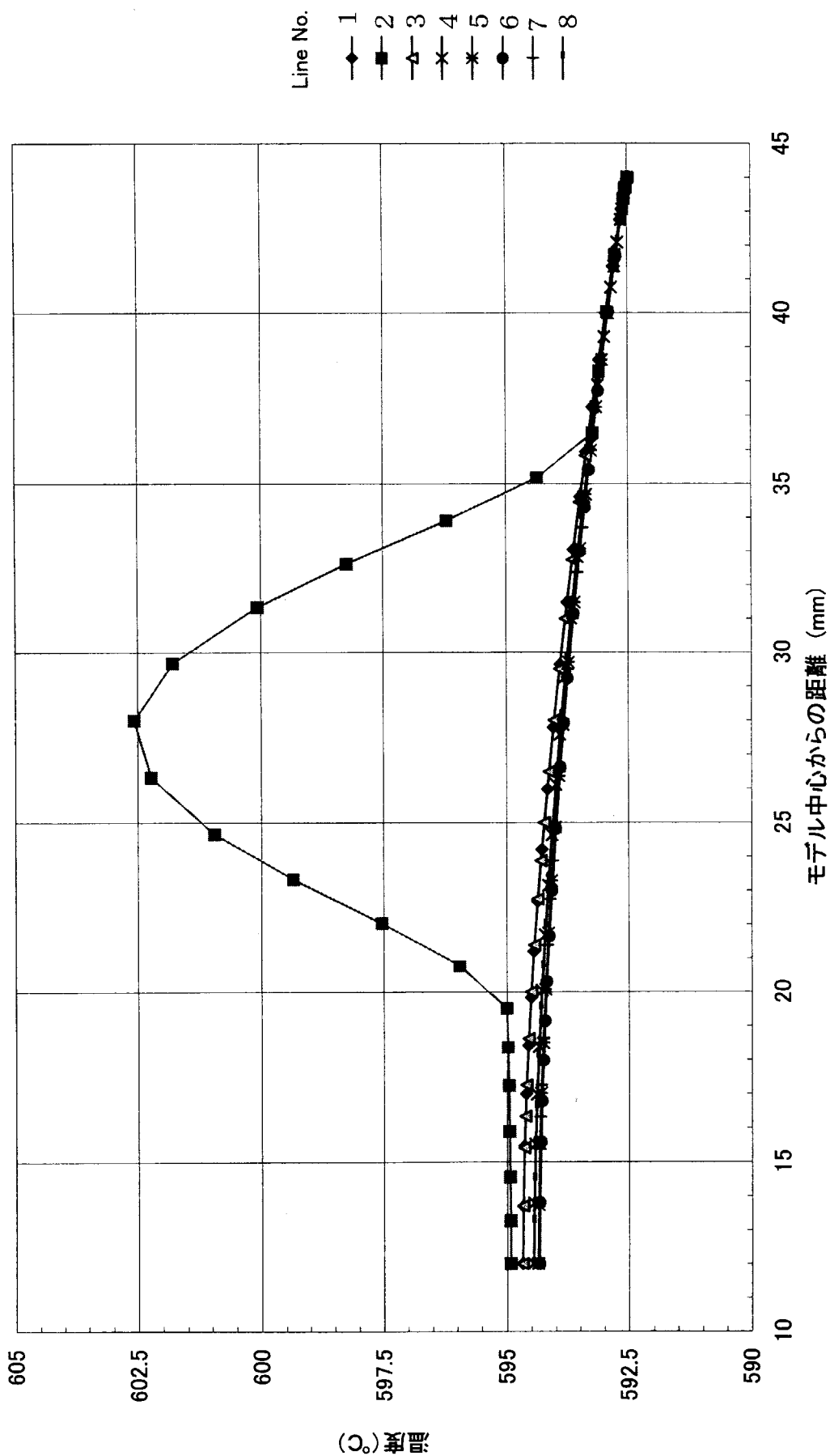


付図2-5 Type-III 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: N-3)

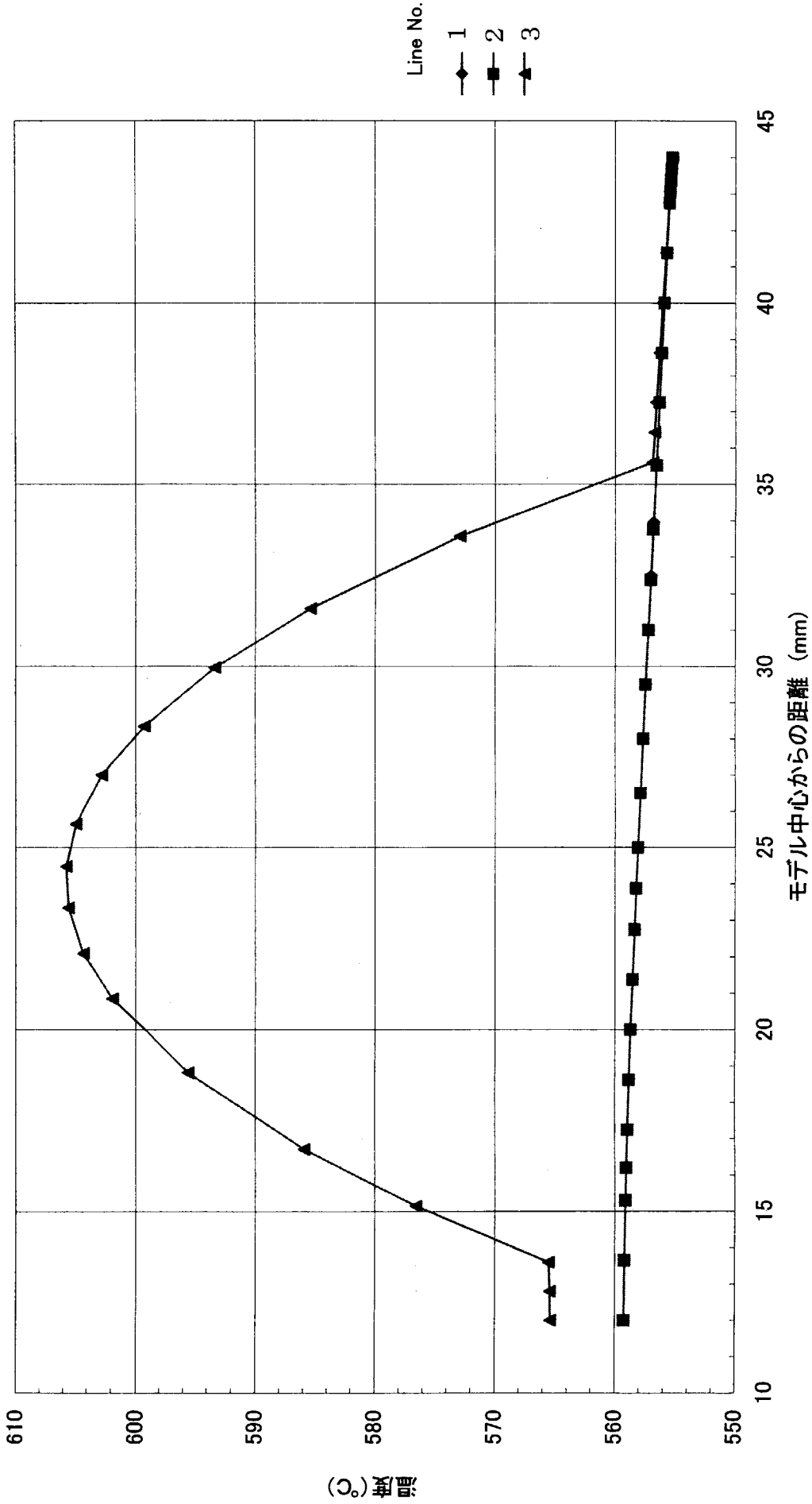




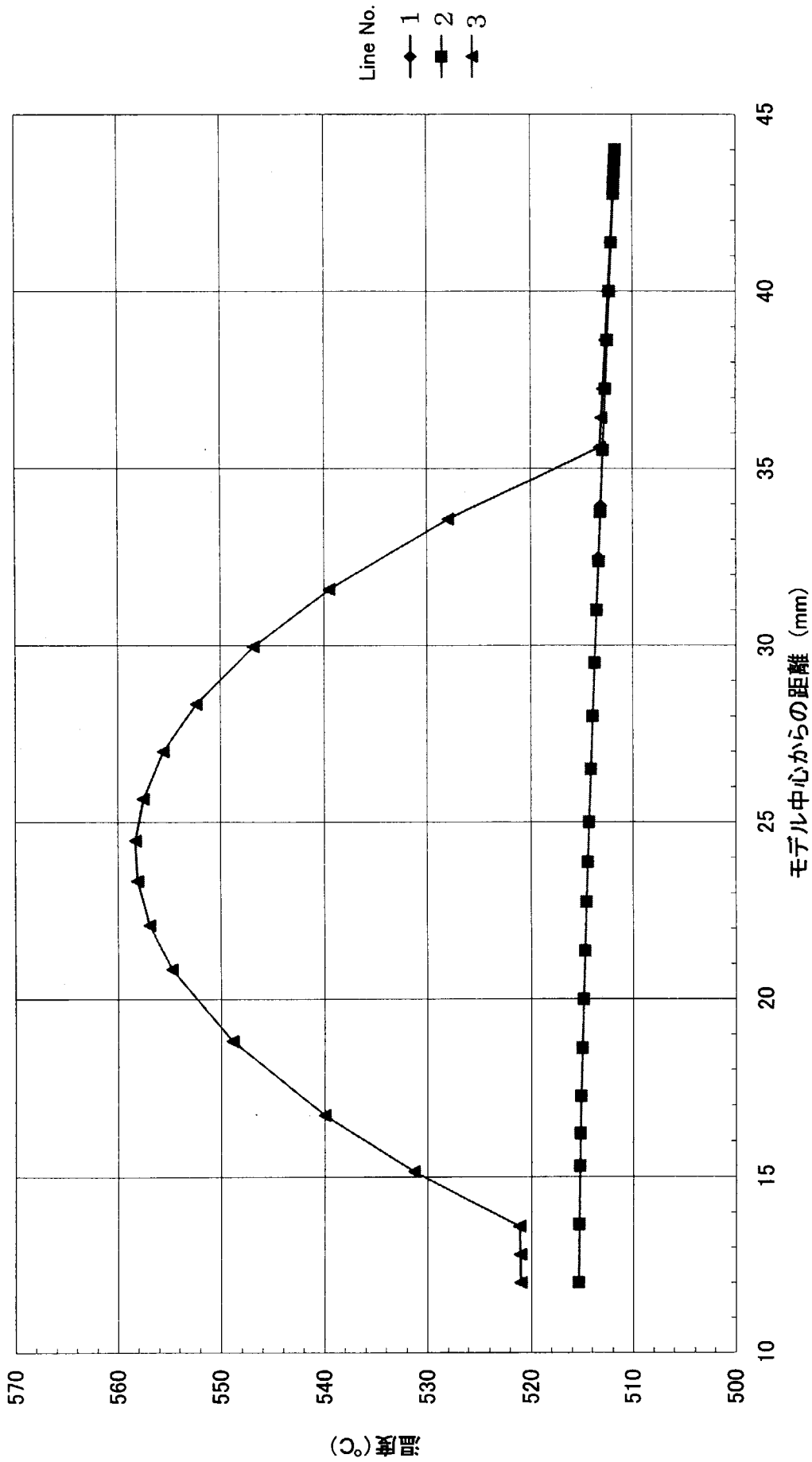
付図2-6 Type-IV試験ホルダの温度解析結果 (解析ケース名 : N-4)



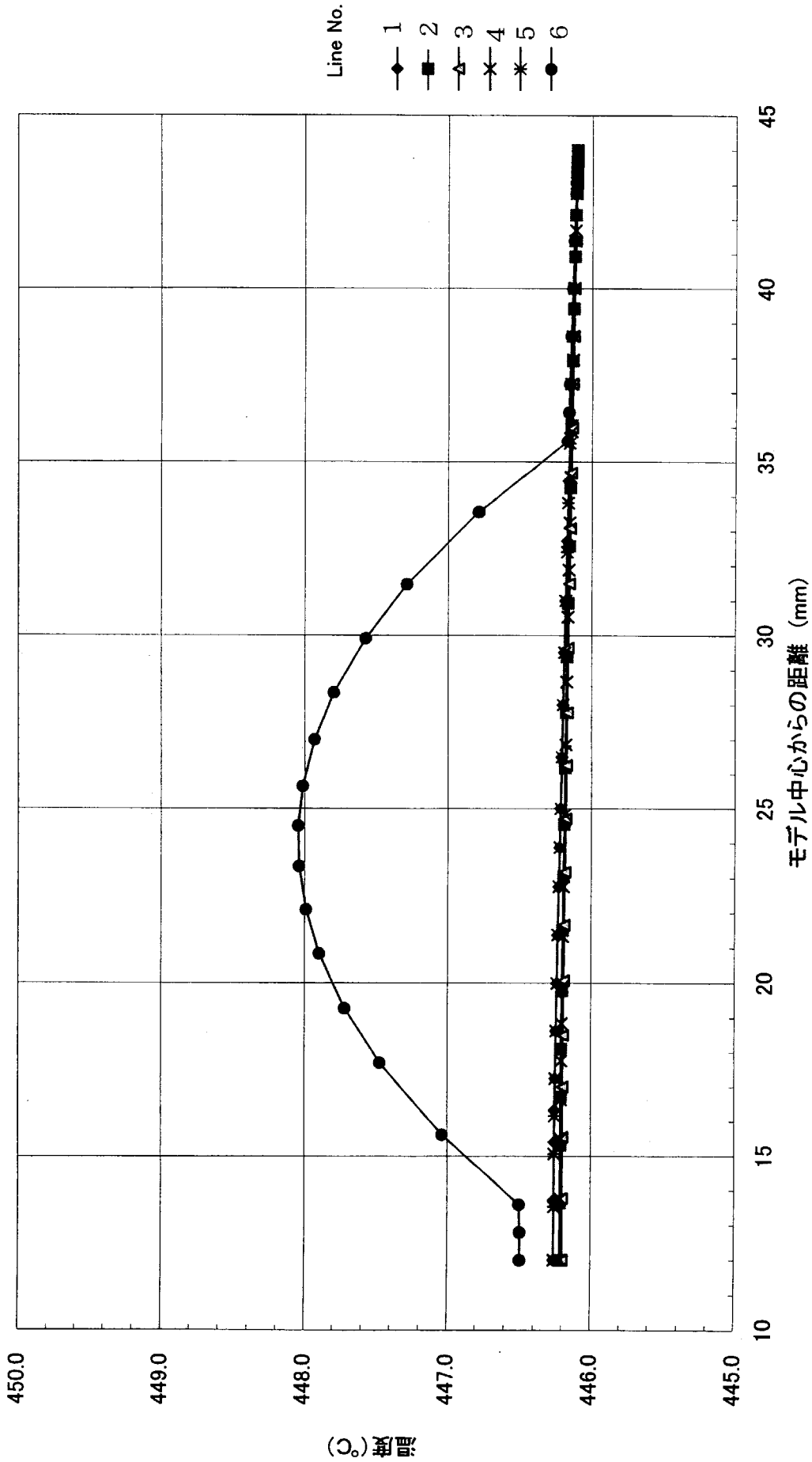
付図2-7 Type-I 試料ホルダの温度解析結果 (解析ケース名: H-1)



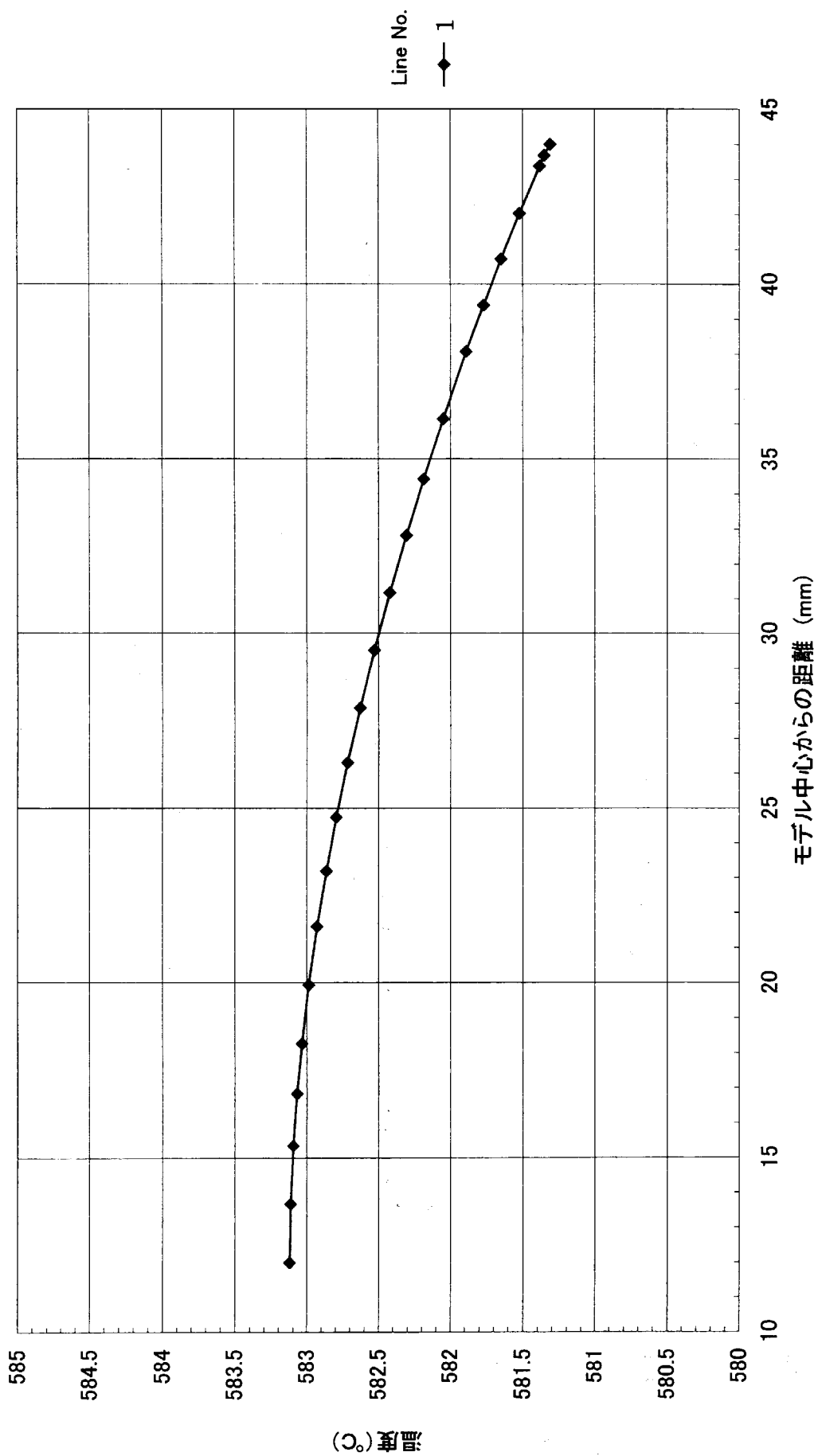
付図2-8 Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: H-2-1)



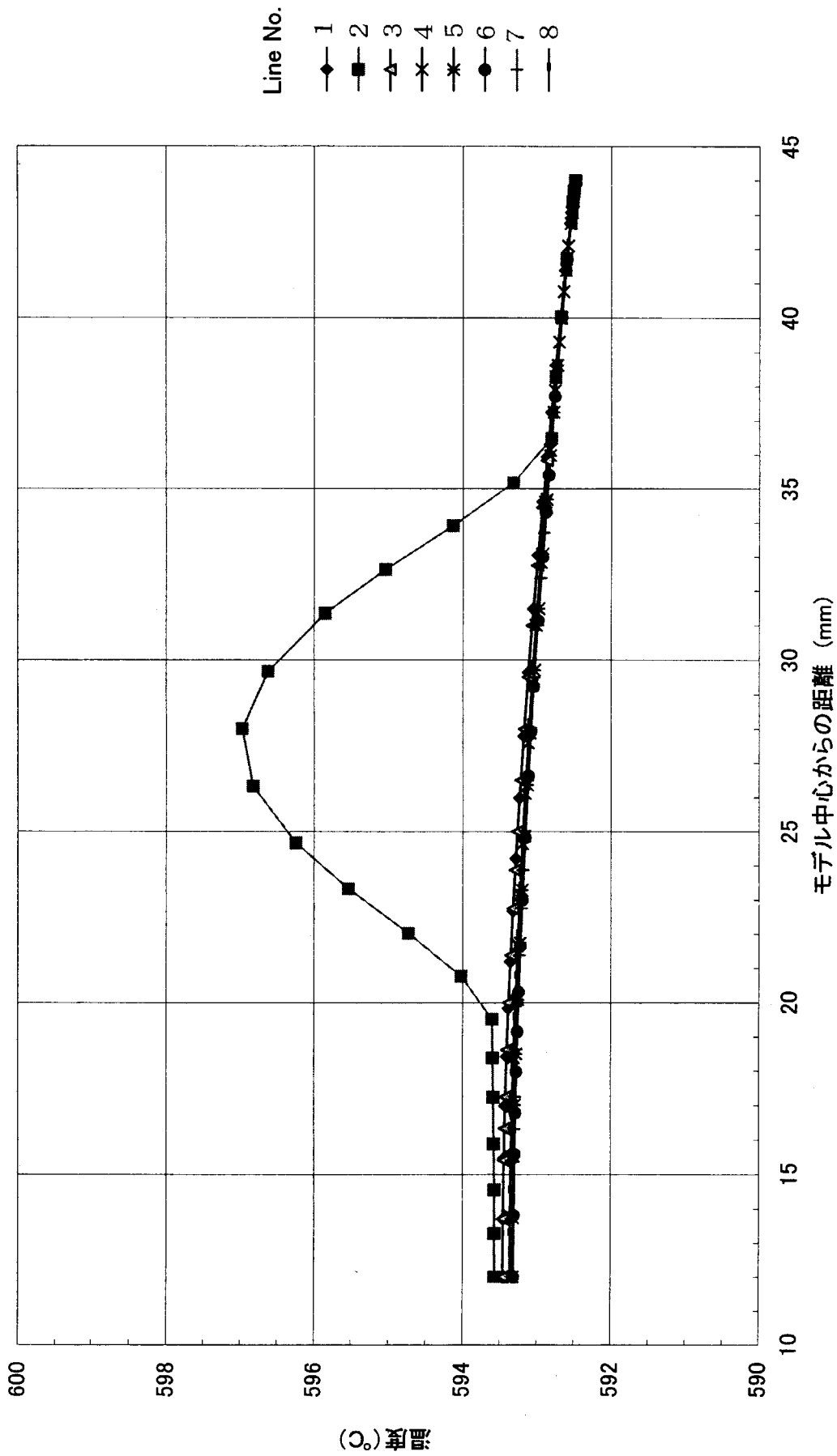
付図2-9 Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名 : H-2-2)



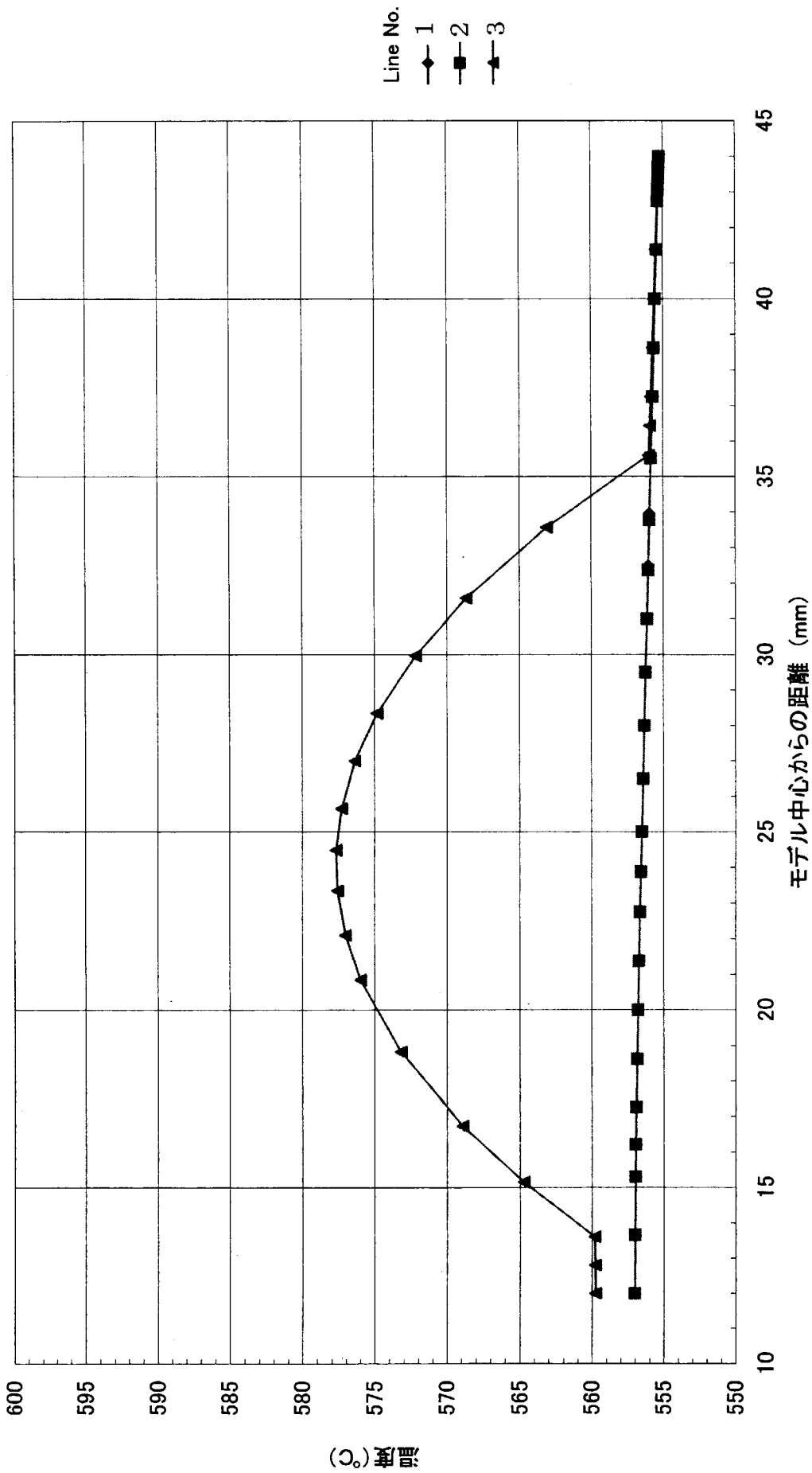
付図2-10 Type-III 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: H-3)



付図2-11 Type-IV試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名 : H-4)

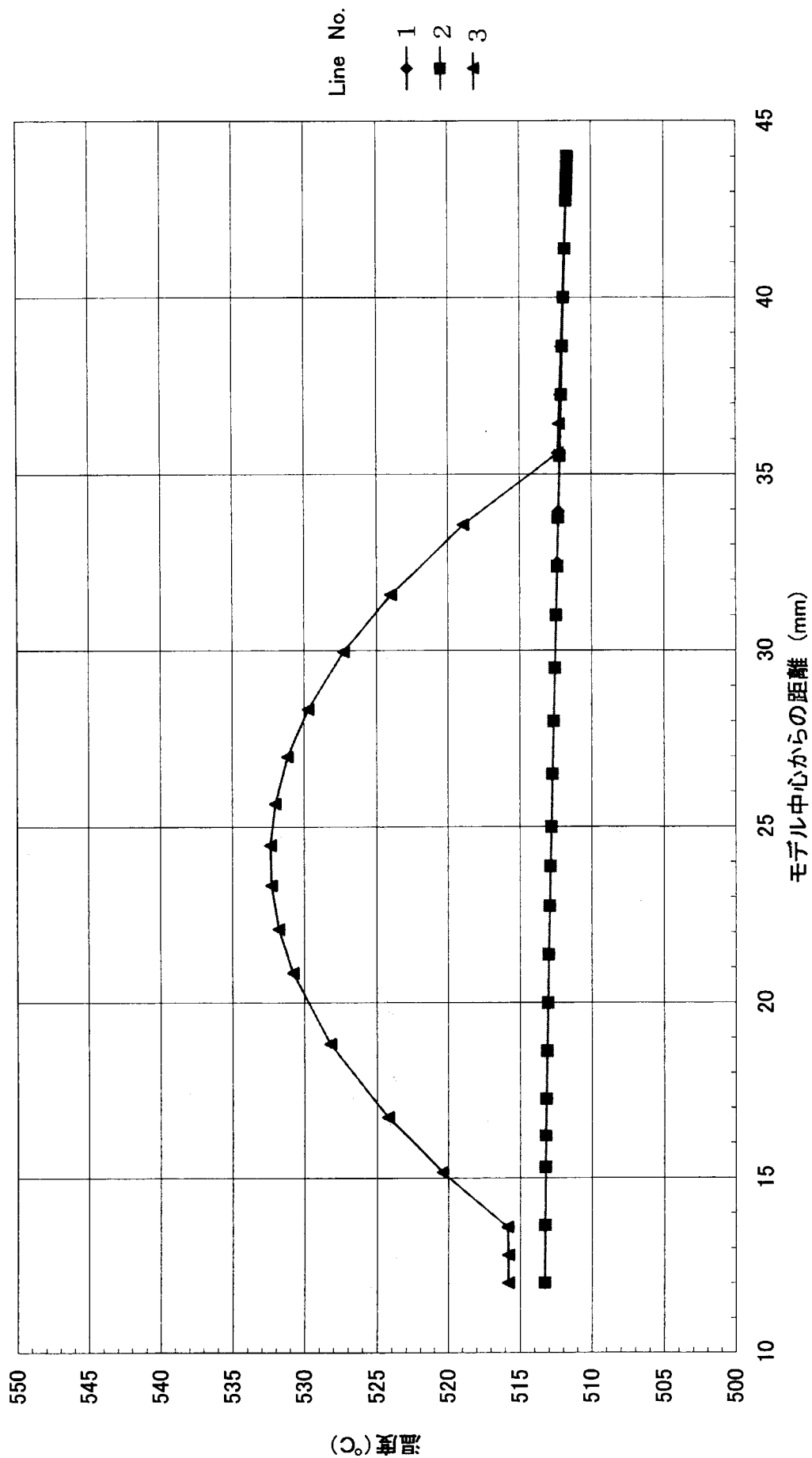


付図2-12 Type-I 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名: L-1)

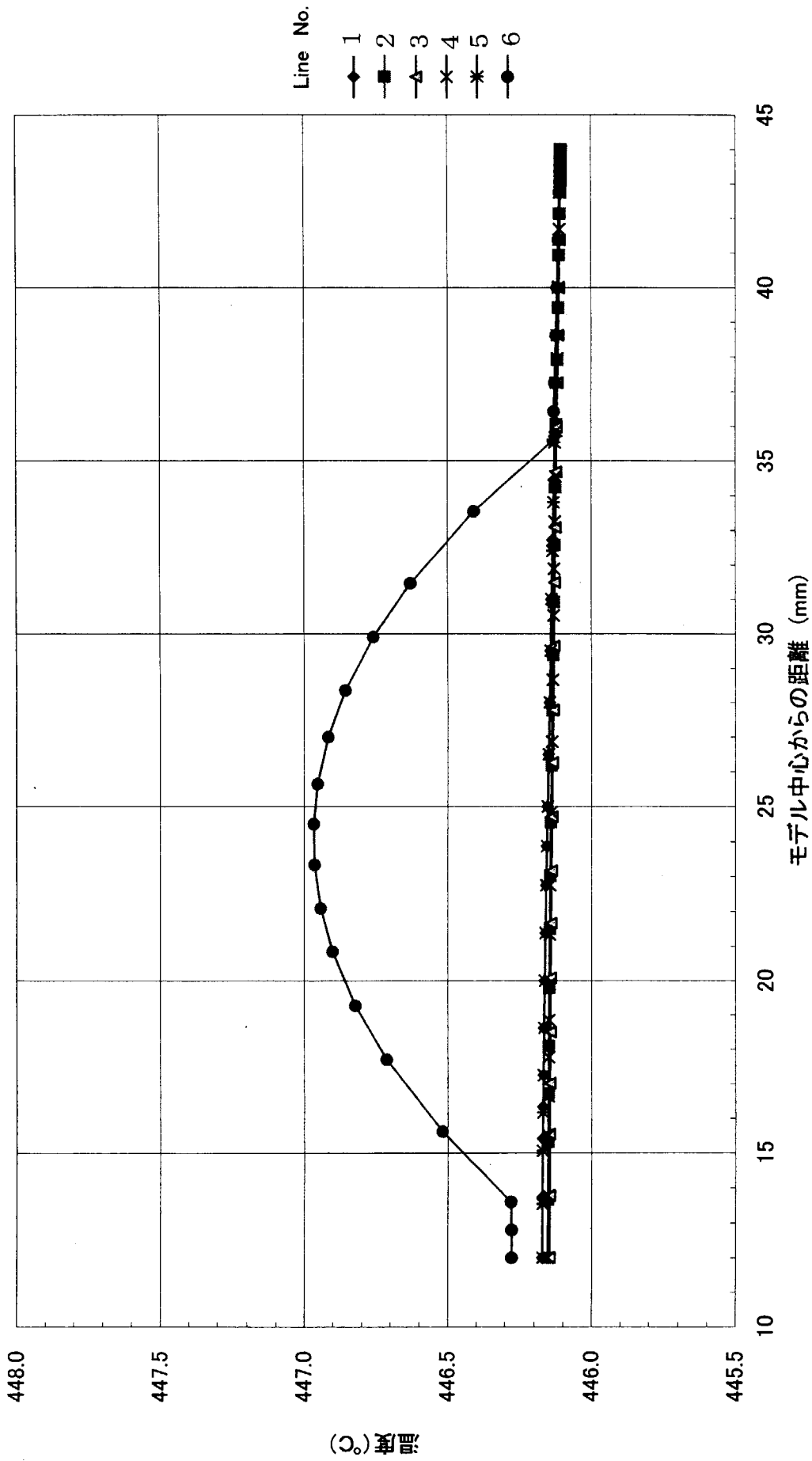


付図2-13 Type-II 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名 : L-2-1)

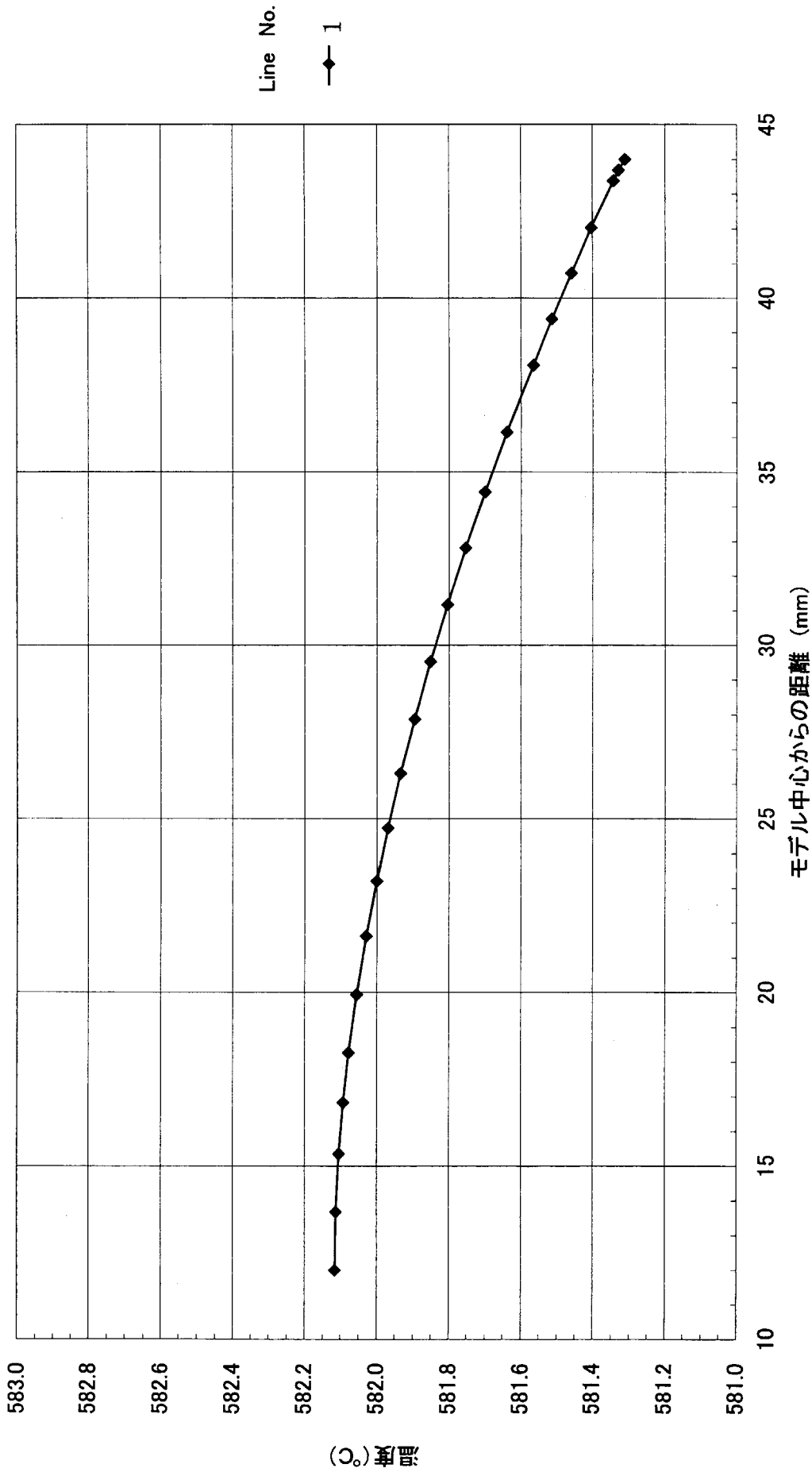




図付図2-14 Type-II 試料ホルダの温度解析結果 (解析ケース名: L-2-2)



付図2-15 Type-III 試料ホルダの温度解析結果 (解析ケース名: L-3)



付図2-16 Type-IV 試料ホルダーの温度解析結果 (解析ケース名 : L-4)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
 1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位 による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1nm = 10<sup>-10</sup>m  
 1 b = 100fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>  
 1 bar = 0.1MPa = 10<sup>5</sup>Pa  
 1 Gal = 1cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>  
 1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup>Bq  
 1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup>C/kg  
 1 rad = 1cGy = 10<sup>-2</sup>Gy  
 1 rem = 1cSv = 10<sup>-2</sup>Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは略、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C関係理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (= 10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	1	2.20462
4.44822	1	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (= N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (= 10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
1	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665	1	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	1	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>	
6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	1	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (= 10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
1	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
9.80665	1	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
4.18605	0.426858	1	1	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
1055.06	107.586	1	1	1	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
1.35582	0.138255	1	1	1	1	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
1.60218 × 10 <sup>19</sup>	1.63377 × 10 <sup>20</sup>	1	1	1	1	1	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
 = 4.184 J (熱化学)  
 = 4.1855 J (15°C)  
 = 4.1868 J (国際蒸気表)  
 仕事率 1 PS (馬力)  
 = 75 kgf·m/s  
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
1	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	1

吸収線量	Gy	rad
1	1	100
0.01	1	1

照射線量	C/kg	R
1	1	3876
2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	1

線量当量	Sv	rem
1	1	100
0.01	1	1

高温工学に関する先端的基礎研究用HTR照射試料の温度評価