

FLUSHによる遮蔽プラグの熱流力－熱応力特性の解析

FLUSHによる遮蔽プラグの熱流力－熱応力特性の解析

1988年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

FLUSH による遮蔽プラグの熱流力－熱応力特性の解析

大平 博昭*

要 旨

流体の熱流力特性とそれに接する構造物の熱応力を連成して解析する目的で開発した熱流力－熱応力解析プログラム(FLUSH)を用いて、「もんじゅ」総合断熱試験装置(SPINTA)で発生した自然対流による周方向温度分布、及びそれに起因する熱応力の解析を実施し、測定データとの比較・検討を通じて本システムの検証を行った。

得られた結果は次の通りであった。

- (1) 遮蔽プラグの温度分布は17%以内の精度で実測値と一致した。
- (2) 応力解析機能が正常に作動することを確認した。
- (3) 本解析により、温度差のノルムが0.27%の精度で収束することが確認された。又、解析に費された総CPU 時間は約122 分であった。

以上の結果から、FLUSH の解析精度、及びCPU 時間等運用面での利便生について、その有効性が確認された。

*大洗工学センター 機器構造開発部 機器システム開発室

December, 1988

The analysis of thermal-hydraulics and thermal structural
responses of a shield plug through FLUSH

HIROAKI OHIRA*

Abstract

The FLUSH, which has been developed for the purpose of calculating the interaction between thermal-hydraulics and thermal structural responses, was validated through the calculation of SPINTA and the comparizon of its experimental results.

The results obtained are as follows;

- (1) The temperature distributions of the shield plug were able to simulate within 17% error of the experimental results,
- (2) The thermal stress distributions were normally calculated,
- (3) The iteration was converged in 0.27% of the norm of temperature, and it took about 122 minutes as the total CPU time of the calculation.

These results show that even the large components of FBR can be analysed sufficiently and accurately in reasonable CPU time through the FLUSH.

* O-arai Engineering Center

Systems and Components Development Section

目 次

1. 緒言	1
2. FLUSH によるSPINTAの解析	2
2.1 SPINTAの概要	2
2.2 解析条件	2
2.2.1 カバーガス空間のモデル化	2
(1) メッシュ分割	2
(2) 境界条件	2
(3) 初期条件	3
(4) Arガスの物性値	3
(5) 境界表面熱伝達率	4
(6) 流動抵抗要素	4
(7) 収束条件	5
(8) 解法	5
2.2.2. 遮蔽プラグの熱伝導解析	6
(1) 構造及び断面形状	6
(2) 有限要素モデル	6
(3) 物性値	7
(4) 熱的境界条件及び物性値	7
(5) 輻射伝熱のモデル化	7
2.2.3 遮蔽プラグの熱応力解析	8
(1) 構造及び断面形状	8
(2) 有限要素モデル	9
(3) 物性値	9
(4) 拘束条件及び初期条件	9
2.3 解析結果及び考察	9
2.3.1 計算時間及びメッシュ分割	9
2.3.2 収束状態	10
2.3.3 遮蔽プラグの温度分布	10
2.3.4 アニュラス領域及びサーマルライナーの温度分布	11

2.3.5 遮蔽プラグの応力分布及び変形	12
3. 「もんじゅ」、大型炉への応用	13
4. 結言	14
5. 今後の課題	15
参考文献	16

表 リ ス ト

表 2. 1	「もんじゅ」とSPINTAの基本仕様	17
Table 2. 1	Characteristic Dimensions of "Monju" and SPINTA	
表 2. 2	SPINTA 温度分布解析の比較	18
Table 2. 2	Comparzon with the temperature calculations of SPINTA	
表 2. 3	軸射率	8
Table 2. 3	Emissiuities	
表 2. 4	炭素鋼のヤング率	19
Table 2. 4	Young's Modulus (Carbon Steel)	
表 2. 5	炭素鋼の熱膨張係数	19
Table 2. 5	Coefficient of Linear Expansion (Carbon steel)	
表 2. 6	SPINTA解析に必要としたCPU 時間	20
Table 2. 6	CPU Time of the Calculation of SPINTA	

図 リ ス ト

図2.1	試験装置の縦断面図	21
Fig. 2.1	Vertical Cross Sectional View of Test Apparatus	
図2.2	カバーガス空間のメッシュ分割図	22
Fig. 2.2	Meshes of the Cover-gas Region	
図2.3	半径方向の流動抵抗要素	23
Fig. 2.3	Radial Force Structures	
図2.4	周方向の流動抵抗要素	24
Fig. 2.4	Azimuthal force Structures	
図2.5	軸方向の流動抵抗要素	25
Fig. 2.5	Axial force Structures	
図2.6	総合断熱試験装置 3次元定常温度分布解析モデル (0° - 180° 断面)	26
Fig. 2.6	3-Dimensional steady State Temperature Distribution (0° - 180°)	
図2.7	SPINTA 3次元解析モデル～カバーガス領域～ (5層)	27
Fig. 2.7	3-Dimensional model of SPINTA (5 Section)	
図2.8	SPINTA 3次元解析モデル～カバーガス中熱遮蔽板 (下) ～ (6層)	28
Fig. 2.8	3-Dimensional Model of SPINTA (6 Section)	
図2.9	SPINTA 3次元解析モデル～熱遮蔽層下面～ (9層)	29
Fig. 2.9	3-Dimensional Model of SPINTA (9 Section)	
図2.10	SPINTA 3次元解析モデル～熱遮蔽層下面～ (10層)	30
Fig. 2.10	3-Dimensional Model of SPINTA (10 Section)	

図 2.11	SPINTA 3 次元解析モデル～放射線遮蔽層～（16層）	31
Fig. 2.11	3-Dimensional Model of SPINTA (16 Section)	
図 2.12	SPINTA 3 次元解析モデル～上板～（24層）	32
Fig. 2.12	3-Dimensional Model of SPINTA (24 Section)	
図 2.13	SPINTA 3 次元解析モデル（9' 及び10層）	33
Fig. 2.13	3-Dimensional Model of SPINTA (9', 10 Section)	
図 2.14	HHE X 8 による 3 角柱モデル	7
Fig. 2.14	Frignol Prisw Model	
図 2.15	SPINTA 3 次元解析モデル（0° - 180° 断面）～規定温度～	34
Fig. 2.15	3-Dimensional Model of SPINTA～Specified Temperature～	
図 2.16	SPINTA 3 次元解析モデル（0° - 180° 断面）～熱伝達率～	35
Fig. 2.16	3-Dimensional Model of SPINTA～Heat Transfer Coefficients～	
図 2.17	SPINTA 3 次元解析モデル（0° - 180° 断面）～軸射要素～	36
Fig. 2.17	3-Dimensional Model of SPINTA～Radiation Elements～	
図 2.18	軸射要素の支配面積	8
Fig. 2.18	Cross Section of the Radiation Element	
図 2.19	総合断熱試験装置 3 次元熱応力分布解析モデル（0° - 180° 断面）	37
Fig. 2.19	3-Dimensional Steady State Thermal Stoess Model (0° - 180°)	
図 2.20	垂直断面等温線図（0° - 180°）	38
Fig. 2.20	Vertical Section Isothermal Map (0° - 180°)	
図 2.21	水平断面等温線図～カバーガス中熱遮蔽板（下）～（6層）	39
Fig. 2.21	Horigontal Section Isothermal Map (6 Section)	

図 2.22	水平断面等温線図～熱遮蔽層下面～ (10層)	40
Fig. 2.22	Horizontal Section Isothermal Map (10 Section)	
図 2.23	水平断面等温線図～熱遮蔽層中部～ (14層)	41
Fig. 2.23	Horizontal Section Isothermal Map (14 Section)	
図 2.24	水平断面等温線図～放射線遮蔽層～ (17層)	42
Fig. 2.24	Horizontal Section Isothermal Map (17 Section)	
図 2.25	水平断面等温線図～冷却層～ (23層)	43
Fig. 2.25	Horizontal Section Isothermal Map (23 Section)	
図 2.26	水平断面等温線図～上板～ (25層)	44
Fig. 2.26	Horizontal Section Isothermal Map (25 Section)	
図 2.27	固定プラグ軸方向温度分布 (0° 方向)	45
Fig. 2.27	Axial Temperature Distribution of Fixed Plug (0°)	
図 2.28	固定プラグ軸方向温度分布 (90° 方向)	46
Fig. 2.28	Axial Temperature Distribution of Fixed Plug (90°)	
図 2.29	固定プラグ軸方向温度分布 (270° 方向)	47
Fig. 2.29	Axial Temperature Distribution of Fixed Plug (270°)	
図 2.30	固定プラグ軸方向温度分布 (0° 方向)	48
Fig. 2.30	Axial Temperature Distribution of Fixed Plug (0°)	
図 2.31	固定プラグ軸方向温度分布 (180° 方向)	49
Fig. 2.31	Axial Temperature Distribution of Fixed Plug (180°)	
図 2.32	アニュラス領域及びJCS 近傍での流速分布と温度分布	50
Fig. 2.32	Velocity and Temperature Profile in the Annulus and UCS Region.	

図2.33	カバーガス領域の温度分布及び流速分布 (60°)	51
Fig. 2.33	Temperatue and Verosity Profile in the cover Gas Region (60°)	
図2.34	アニュラス領域の温度分布	52
Fig. 2.34	Temperature Distributions in Annulus Region	
図2.35	サーマルライナー温度分布	53
Fig. 2.35	Temperature Distributions of Thermal Liner	
図2.36	サーマルライナー軸方向温度分布 (0° 方向)	54
Fig. 2.36	Axial Temperature Distributions of thermal Liner (0°)	
図2.37	サーマルライナー軸方向温度分布 (90° 方向)	55
Fig. 2.37	Axial Temperature Distributions of thermal Liner (90°)	
図2.38	サーマルライナー軸方向温度分布 (180° 方向)	56
Fig. 2.38	Axial Temperature Distributions of Thermal Liner (180°)	
図2.39	サーマルライナー軸方向温度分布 (270° 方向)	57
Fig. 2.39	Axial Temperature Distributions of thermal Liner (270°)	
図2.40	垂直断面変形図及び等応力線図 (0° - 180°)	58
Fig. 2.40	Vertical Section Deformed Shape and Isostress Map (0° - 180°)	
図2.41	水平断面変形図及び等応力線図～上板～ (25層)	59
Fig. 2.41	Horizontal Section Deformed Shape and Isostress Map (25 section)	

1. 緒 言

FBR の遮蔽プラグや他の主要機器に於けるカバーガスの自然対流が、それらの構造物の温度分布や熱応力分布に与える影響を評価するために、FLUSHを開発し、FLUSHの検証を目的に昭和56年に実施された「もんじゅ」遮蔽プラグ総合断熱試験の一条を用いて解析を行ったので、結果を報告する。

2. FLUSHによるSPINTAの解析

今回開発したFLUSH を用いて、昭和56年に当室で試験が実施されたSPINTAのナトリウム液面上部を解析し、実検結果と比較して本システムの検証を行なった。以下に解析内容及びその結果を示す。

2.1 SPINTAの概要

本試験装置は、「もんじゅ」遮蔽プラグを径方向縮尺1/2.5，軸方向実寸大で模擬したもので、主として、回転プラグ、固定プラグ及び模擬炉心上部機構より構成されている。いずれも熱遮蔽層、放射線遮蔽層及び窒素ガス冷却層を備えている。

本試験装置の縦断面及び横断面を図2.1に、又、「もんじゅ」実機との比較を表2.1に示す。ただし、今回の解析は、対流防止板の設置されてない昭和56年当時の構造である。なお、本試験装置の詳細御及び試験結果の詳細は文献3)，6)，9)を参照のこと。

2.2 解析条件

2.2.1 ガバーガス空間のモデル化

ナトリウム液面上部のカバーガス空間、固定プラグと回転プラグ間のアニュラスギャップ、固定プラグとサーマルライナー間のアニュラスギャップで、Arガスの自然対流が生じ、遮蔽プラグへの伝熱に大きく影響していることが試験により確かめられている^{3) 6)}。

遮蔽プラグへの熱流束、Arガスの対流速度を計算するために、上記の固定プラグと回転プラグと回転プラグ間のアニュラスギャップを除いた領域を有限差分法を用いたAQUAにより、次のようにモデル化した。

(1) メッシュ分割

図2.2に示すように、円筒座標によるメッシュ分割をおこなった。

現在のSPINTAと「もんじゅ」実機では、両アニュラスギャップに自然対流防止板が設置されているが、本モデルでは、計算による自然対流が実際の現象をどこまでシミュレートできるかを確かめるために、昭和56本当時の自然対流防止板の設置されていない時^{3)・6)・}

⁹⁾ (初期のナトリウム中試験)の構造をモデル化した。

(2) 境界条件

本モデルでの境界条件は以下の通りである。

① 温度境界条件

図 2. 2 に示す境界面（面番号①～⑧は、全て一定温度条件とした。

- (i) 境界面⑤はナトリウム液面，⑥，⑦はナトリウムと接するバケット部分であるため，530℃一定。
- (ii) (i)以外の境界面は，各々の面要素毎に一定温度。

② 速度境界条件

全ての境界面は非スリップ境界(no-slip) 条件。境界表面要素の各温度は，最初 FINAS でカバーガス空間を含むモデルにより計算した値を用いた。本手法を用いた理由は以下の通りである。

- (i) FLUSHでのFINASとAQUAとのイタレーション回数を減らしてCPUを節約するため。
- (ii) 現在の FLUSH には，2つのコード(AQUA, FINAS) 間のイタレーションの安定，不安定を判定する機能が備わっていない。そのため，任意の境界温度で計算を行なうと解が発散してしまう可能性があるため。

(3) 初期条件

以下の初期条件から計算を開始した。

- ① 全要素の初期速度 0.001(m/s)
- ② 境界表面初期温度
 - (i) 境界面番号⑤，⑥，⑦ 530℃
 - (ii) 境界面番号①，②，③，④，⑧ FINAS Arガスを含むモデルより
- ③ 初期圧力 $1,55262 \times 10^5$ (Pa)
- ④ 全内部セルの初期温度 450(℃)
- ⑤ Z方向重力加速度 $-9,807$ (m/s²)

(4) Arガスの物性値

エンタルピー，密度，熱伝導率，粘性係数及び定圧比熱を次のように温度の一次式で近似した。

① エンタルピー (h)

$$h = 1.42316 \times 10^5 + 5.21 \times 10^5 \times T \quad (\text{J/kg})$$

② 密度 (ρ)

$$\rho = 2.338851 - 2.9787 \times 10^{-5} \times T \quad (\text{kg/m}^3)$$

③ 熱伝導率 (λ)

$$\lambda = 1.71811 \times 10^{-2} + 3.9417 \times 10^{-5} \times T \quad (\text{W/m}\cdot\text{k})$$

④ 粘性係数 (μ)

$$\mu = 2.23336 \times 10^{-5} + 4.90286 \times 10^{-8} \times T \quad (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

⑤ 定圧比熱 (C_p)

$$C_p = 521.0 \quad (\text{一定}) \quad (\text{J/kg} \cdot \text{K})$$

(5) 境界表面熱伝達率

自然対流場での固体壁面の平均熱伝達率 (Nu数) は、式 (2.1) 及び式 (2.2) を用いて求めた。

① 水平平板 (上向き加熱又は、下向き冷却)

(i) 層流 ($Ra < 8 \times 10^6$) の場合

式 (2.2(a)) を使用する。

(ii) 乱流 ($8 \times 10^6 \leq Ra < 10^{11}$) の場合

$$Nu = 0.15 (Pr \cdot Gr)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2.1(b))$$

② 垂直平板又は、垂直円柱

(i) 層流 ($10^4 < Ra < 10^9$) の場合

$$Nu = 0.59 (Pr \cdot Gr)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (2.2(a))$$

(ii) 乱流 ($10^9 \leq Ra < 10^{13}$) の場合

$$Nu = 0.10 (Pr \cdot Gr)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2.2(b))$$

(6) 流動抵抗

Arガスと境界表面との摩擦損失及びカバーガス空間とアニュラスギャップ間の急縮小、急拡大損失を以下の式で計算した。図2.3～図2.5に流動抵抗要素の位置を示す。

① 摩擦損失

$$\Delta P = -f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho \langle v \rangle^2$$

$$f = \begin{cases} 64/Re & (Re \leq 2000) \\ 0.3164/Re^{0.25} & (Re > 2000) \end{cases}$$

$$Re = \langle v \rangle D \rho / \mu$$

D = 水力等価直径, Z : 特性長さ

ここで、水力等価直径Dには、アニュラスギャップではギャップ幅の2倍、その他の境界表面では損失を考える方向の境界面の長さとした。又、特性長さLは該当セル長さである。

② 急縮小及び急拡大損失

$$\Delta P = -\xi \cdot \rho \cdot v^2 / 2$$

ξ : 急縮小, 又は急縮小損失係数

アニュラスギャップとカバーガス領域間及びカバーガス中熱遮蔽板と模擬 UCS, 及びサーマルライナー間の Z 方向の面積比 (A_1/A_2) は, A_2 が A_1 に比べて十分に大きいことから, 縮小率と拡大率はほぼ零である。したがって,

急縮小損失係数 $\xi_c = 0.5$

急拡大損失係数 $\xi_d = 1.0$

とした。

(7) 収束条件

AQUAでの収束条件 は以下の通り¹⁰⁾。

$$\text{EPS } 1 = 1.0 \times 10^{-4}$$

$$\text{EPS } 3 = 5.0 \times 10^{-4}$$

$$\text{EPS } 5 = 1.0 \times 10^{-4}$$

(8) 解 法

① 運動量及びエネルギー計算

(i) 完全陰解法 (SIMPLEST版)

(ii) 1 次風上差分法

② 圧力ポアソン方程式の計算

I.C.C.G 法

注) 次の条件が満たされるとき, 定常状態に達したとみなす。

1. (セル残差の最大値) / DCONV < 1.0

ここで, DCONV = EPS1 * (UVWMAX + 1.0E-6)

サブルーチンCUTOFFによりUVWAXを計算する。

2. (x 方向速度成分の変化) / (全域の速度の絶対値の最大値) < EPS 3

$$\Delta U / |u|_{\max} < \text{EPS } 3$$

3. (y 方向速度成分の変化) / (全域の速度の絶対値の最大値) < EPS 3

- $$\Delta V / |u|_{\max} < \text{EPS } 3$$
4. (z 方向速度成分の変化) / (全域の速度の絶対値の最大値) < EPS 3
- $$\Delta W / |u|_{\max} < \text{EPS } 3$$
5. (エンタルピー変化) / (現エンタルピー) < EPS 3
- $$(DH/H) < \text{EPS } 3$$

2.2.2 遮蔽プラグ熱伝導解析

SPINTAの熱伝導モデル解析は、昭和56年及び59年に東芝委託研究として、NASTRAN により行なわれた^{3), 5)}。そこで、今回は、基本的にはNASTRANの入力データをFINAS 入力データに変換することにより解析を実施した。なお、上記の2者と今回のFLUSH のモデルとの比較を表2.2に示す。NASTRAN/VANACによる解析との相違点は以下の通り。

- ・カバーガス空間及び固定プラグ～サーマルライナー間のアニュラス領域はAQUAの自然対流解析モデルによる。
- ・固定プラグ～回転プラグ間のアニュラス領域はFINAS の熱伝導解析モデルによる。

(1) 構造及び断面形状

図2.6にSPINTAモデルの 0° - 180° 断面図を、又、図2.7～図2.13に代表的な層の横断面図を示す。

図2.13は遮蔽プラグの最下面で、カバーガス領域との境界領域である。カバーガス領域はAQUAのメッシュ分割図(図2.2)に示したように円筒座標であるが、遮蔽プラグには偏心した回転プラグが存在するので、カバーガスと接する面(図2.9)は円筒座標、遮蔽プラグ上部と接する面(図2.10)は偏心した回転プラグと一致するように9'層を作成した。図2.13に9'及び10層を示す。

(2) 有限要素モデル

以下に示す有限要素モデルを用いてモデル化した。

① 熱伝導要素 …… HHEX 8

図2.10～図2.12にみられるように、回転プラグが偏心しているために3角柱の要素が必要となる。ここにHPENT15を使用すると6面体要素にはHHEX20を用いなければならない。このことは、HHEX 8を使用するのに比べて2.5倍の節点数となり、計算時間が膨大となることが予想される。

したがって、本モデルでは図2.14のようにHHEX 8を“特殊3角柱”と考えることによりモデル化した。

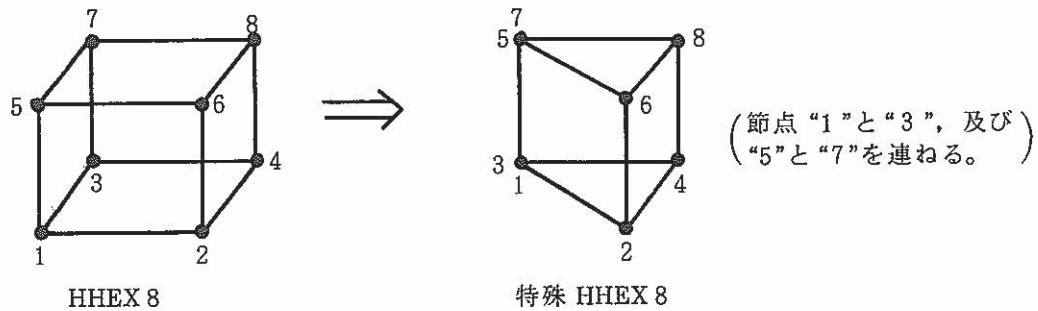


図2.14 HHEX 8 による三角柱モデル

Fig. 2.14 Trigonal Prism Model

- ② 熱伝達要素 FQFAC 4 及び CSLINK 8
- ③ 幅射伝熱要素 RALINK 2

(3) 物 性 値

参考文献 3) の値を用いた。

(4) 熱的境界条件及び初期条件

図2.15及び図16に熱的境界条件を示す。又、初期温度は全要素を300℃とした。

(5) 幅射伝熱のモデル化

図2.17に幅射伝熱要素を示す。

幅射伝熱モデルに関しては、これまでのSPINTA解析によりパラメータサーベイがなされている^{5), 8)}。したがって、本モデルではこの結果に従い、以下のようにモデル化した。

- ① 幅射による伝熱は、相対する面間のみで行われるものとする。
- ② 形態係数 1.0
- ③ 幅 射 率 表3.3
- ④ 支配面積 図2.18の斜線部分
- ⑤ スティファン・ボルツマン係数 4.88×10^{-14} (Kcal/mm²hK⁴)

表2.3 幅 射 率

Table 2.3 Emissivities

伝 熱 箇 所	幅射率
Na	0.05
バケット	0.20
カバーガス中熱遮蔽層	0.25
熱遮蔽層	0.55
銀色塗装面	0.35

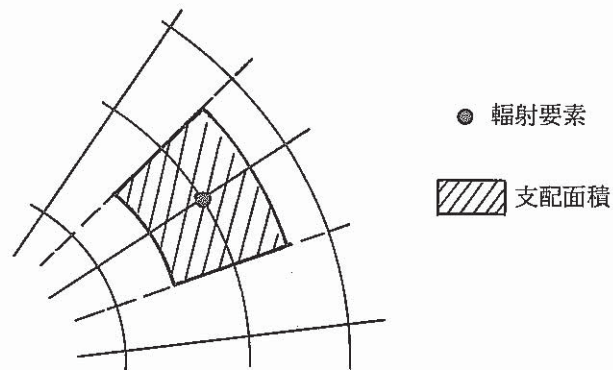


図2.18 輻射要素の支配面積

Fig. 2.18 Cross Section of the Radiation Element

2.2.3 遮蔽プラグ熱応力解析

(1) 構造及び断面形状

図2.19に熱応力解析モデルの縦断面を示す。本モデルは、以下の方針により作成した。

- ① 熱伝導解析モデルのメッシュを基本的に用いる。
- ② 炉容器壁，ソールプレートは除き，遮蔽プラグ上板を主として評価する。
- ③ 遮蔽プラグ（回転プラグ及び固定プラグ）中の冷却層と熱遮蔽層の重量は，それぞれの外胴に印加する。
- ④ UCSの重量は，UCS外胴に印加する。
- ⑤ 上記①～④の他は，SUS304と炭素鋼のみの自重とし，それ以外の要素は除く。

(2) 有限要素モデル

熱伝導モデルと同様，“特殊HEX 8”により3角柱をモデル化した。本モデルで使
用した要素はHEX 8のみである。

(3) 物 性 値

① SUS304の物理定数

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| (i) ヤング率, ポアソン比及び熱膨張係数 | FINAS の材料データライブラリー
を使用 |
| (ii) 比 重 | 8.03 (一定) |

② 炭素鋼の物理定数

- | | |
|-----------------|------------|
| (i) ヤング率, 熱膨張係数 | 表 2. 4 |
| (ii) ポアソン比 | 0.3 (一定) |
| (iii) 比 重 | 7.850 (一定) |

(4) 拘束条件及び初期条件

- | | |
|--------------|--------------|
| ① ペDESTAL部下面 | x, y, z 方向固定 |
| ② 模擬 UCS胴 | 半径方向のみ固定 |

図 2.19 に拘束条件及び荷重ベクトルを示す。又，初期温度は全要素 300℃ とし，FNSEDIT
により熱伝導解析で得られた各節点温度を入力する。

2. 3 解析結果及び考察

2. 3. 1 計算時間及びメッシュ分割

FLUSHによる本解析に要したCPU時間を，各ジョブステップ毎に表 2. 6 に示す。

Arカバーガスの自然対流解析は，図 2. 2 に示したように，遮蔽プラグからの制約から，
メッシュ間隔が不均一となり，クーラン条件を満たすための時間ステップが非常に小さな
値となった。クーラン条件を満足するための時間ステップ間隔は，最初の 300 ステップでは
 $\Delta t = 0.010$ ，301 ステップ以後は $\Delta t = 0.001$ となり， $\text{EPS } 3 = 5.0 \times 10^{-4}$ で収束するため
に，7034 ステップCPU時間にして約 60 分を要した。

カバーガスの自然対流解析では，少なくとも上記の収束条件を満たす程度の精度が必要で
あり，1 サイクル目での収束条件が甘いとステップを繰り返すたびに誤差が増大して行き，
現在のFLUSHでのイタレーションは発散してしまう。なお，2 サイクル以後はほとんどCPU時
間は必要としなかった。

現在のFLUSHでの解析では，構造物の要素分割数を考慮しつつ，流体のメッシュ間隔を主

体としなければならない。

2.3.2 収束状態

収束判定条件は、2.2.1項で示したように $NRTD \leq 5 \times 10^{-3}$ である。本解析では $NRTD = 2.7 \times 10^{-3}$ で2サイクルで収束し、熱応力解析が実行された。

FLUSHには、収束判定に最大温度差(MXTD)を制限する方法と、温度の最大ノルム(NRTD)を制限する方法があるが、本解析でNRTDを用いた理由は以下の通りである。

本解析きように比較的粗いメッシュで、しかも各々のメッシュ間隔に大きな差がある場合、部分的にかけ離れた解が出現することがある。このような時、MXTDで収束判定を行うと、いつまでも“収束”が得られないことが考えられる。それに比べて、NRTDは“平均的な温度差の程度”であるから上記のような場合でも十分意味のある判定ができる。本解析の場合は、前サイクルとの平均的な温度差は0.27%程度である。

2.3.3 遮蔽プラグの温度分布

図2.20～図2.26にFLUSHによる遮蔽プラグ断面の等温線図と、実測値から作成した等温線図及び代表点での両者の温度を示す。以下に比較した結果を列挙する。

(1) 図2.20；垂直断面等温線図（0°～180°）

- ① 計算値は、メッシュ間隔が広いことから、全体的に等温線は平坦となっている。これは、図2.21～図2.26についても同様である。
- ② 遮蔽プラグ下面での温度は、計算値の方が高くなっている。（回転プラグでは7.5%、固定プラグでは14%の誤差）。
- ③ 遮蔽プラグ上板表面の温度は、回転プラグで17%の誤差がある。

(2) 図2.21；水平断面等温線図～カバーガス中、熱遮蔽板（下）～

計算値は、240°付近で高温域、60°付近で低温域が見られるが、400～443℃まで均一に広がっている。おおむね実値と合っているが、実験値に見られる30°付近の450℃部分は得られていない。誤差は最大10%程度。

(3) 図2.22；水平断面等温線図～熱遮蔽層下面～

- ① 計算値及び実験値共に、240°方向に高温部、60°方向に低温部が存在する。
- ② 計算値の方が7.5～14%高くなっている。（(1)②）

(4) 図2.23；熱遮蔽層中間部

240℃方向で最大誤差約10%。十分シミュレートできている。

(5) 図2.24；放射線遮蔽層

UCSの一部と固定プラグ0°方向で最大15%実測値の方が高くなっている。その他は概ね合っている。

(6) 図2.25；冷却層

実測値では回転プラグ180°方向に100℃のホットスポットが存在し、計算値では存在しないが、その他は十分にシミュレートできている。

(7) 回転プラグ 180° 方向で最大17%実測値の方が高くなっている。

次に、図2.27～図2.31に遮蔽プラグ（固定プラグ及び回転プラグ）の軸方向温度分布を示す。

これらの図の中で、実測値と解析値との間に大きな差があるのは、固定プラグ90°方向の熱遮蔽層（図2.28）に於いてである。

固定プラグの0°方向中央部での熱遮蔽層に於いても最大約100℃の差があるが、この部分は図2.20にあるように、熱伝対不良の箇所である。むしろ解析による温度分布の方が実際の現象に近いと考えられる。上記以外の部分は、15%程度の誤差でシミュレートできている。

以上を総合すると、遮蔽プラグの温度分布は、コールドレグ付近で実測値より高い値となっていることがわかる。この原因は、後に述べるように、Arガスの最大流速が2.02m/sと高く、60°付近に下向流が集中したためであると考えられる。

2.3.4 アニュラス領域及びサーマルライナの温度分布

図2.32～図2.34に、アニュラス領域でのArガス特性を示す。

図2.32及び図2.33から、Arガスは主として、240°方向から上昇し、60°方向で下向流となっている。アニュラス領域での自然対流は下向流が60°方向に集中している。又、カバーガス領域では、UCSの周囲のみで他はほとんど（最大流速 8.7×10^{-2} m/s）対流は生じていないことがわかる。なお、自然対流の最大流速は、60°方向熱遮蔽層下部で、2.02m/sとなった。

図2.34は、アニュラス領域の周方向温度分布を示したものである。この図から次の事がわかる。

- (1) コールドレグの位置は実測データと解析結果で一致している。
- (2) NL860(熱遮蔽層下部)に於けるカバーガス温度は、270° 近傍を除いて、約30℃程度の差で一致している。
- (3) NL1990(放射線遮蔽層)では、全体的に解析値の方が実測値を約100℃上回っている。このことは、Arガス流速が実際の流速よりも大きく、高温のArガスが上部まで輸送されていることを示している。

次に、サーマルライナーの周方向温度分布を図2.35に、又、軸方向温度分布を図2.36～図2.39に示す。

図2.35から、サーマルライナーの周方向温度は、NL 860での90° 方向を除いてほぼ一致している。(しかし、60° 付近にはコールドレグが存在するにもかかわらず測定データが存在しない。)

図2.36～図2.39では、90° 方向(図2.37)以外は実測値を十分シミュレートできている。

実機では、Arガス中にナトリウムミストが含まれ、壁面への凝縮、拡散及び合体沈降が生じ、Arガスの対流挙動、プラグへの伝熱に影響しているものと考えられる。

ナトリウムミストを含んだArガスの物性値(密度、熱伝導率、粘性係数及び低圧比熱)は、Arガスのみの場合より大きく、今回の結果に対して、

- ① Arガスのみよりも早く熱が伝わるため、周方向自然対流では下向流となる領域が本解析の場合より広がる。
- ② 図3.22(c)に於いても、240° 方向の上部に現れているが、図2.34に見られるような270° 付近の“温度のへこみ”が生じる。

以上から、アニュラス領域高温化の原因として、以下の2点が考えられる。

- (1) 遮蔽プラグの熱遮蔽層下部で実測値より約17%高くなっているため。
- (2) カバーガスとしてArガスのみを扱っているため。

2.3.5 遮蔽プラグの応力分布及び変形

図2.40及び図2.41に応力分布及び変形図を示す。本解析でのメッシュは、熱伝導解析を主体としたため、詳細な値は得られないが、プラグ上板に於いて妥当なものと評価できる。又、最大変形量もプラグ上板では、妥当な値となっている。

詳細な応力計算を行なう時は、注目したい部分のみを細分化したメッシュとして、熱伝導解析から始めなければならない。

3. 「もんじゅ」，大型炉への応用

「もんじゅ」及び実証炉の遮蔽プラグをFLUSH コードで解析するためには，今回のSPINTAでの解析での経験から，以下のように現在のFLUSH コードを改良し，又，解析モデル作成に注意しなければならないと考えられる。

- (1) Arガス空調と遮蔽プラグ領域のメッシュ分割が独立して行えるシステムとする。

現在のFLUSH コードでは，カバーガス空間と遮蔽プラグ領域の境界面のメッシュを一致させなければならない。このことは，AQUA，FINAS供，互いにメッシュ分割に制約を受け，各々の計算手法の特徴が十分に生かされていないことがわかる。

したがって，各領域でのメッシュ分割は互いに独立して行わない，境界面での熱流束又は温度は，2次のスムージング関数を用いて内挿した値を受渡すシステムに改良する。

- (2) メッシュ幅の均一化

メッシュ幅（特にAQUAのメッシュ幅）はできる限り均一化しなければならない。このことは，安定した計算を少ない CPU時間で行うために必要である。

- (3) 応力解析のためのメッシュ分割

熱伝導解析で得られた温度分布が応力解析にそのまま用いられるため，応力分布を評価すべき領域は熱伝導解析モデルに於いて細かくメッシュ分割を行なっておく必要がある。

4. 結 言

今回開発したFLUSHを用いてSPINTAの解析を行なった結果、以下の事柄が明らかになった。

- (1) FLUSH による遮蔽プラグの温度分布は、17%以内の精度で実測値と一致した。
- (2) 応力解析機能が正常に作動することを確認した。
- (3) 本解析では、温度差のノルムが0.27%の精度で収束することが確認された。又、解析に費された総CPU時間は約122分であった。

以上の結果から、FLUSHの解析精度、及びCPU時間等運用面での利便性について、その有効性が確認された。

5. 今後の課題

現在のFLUSH は、まだ十分とは言い難く、第4節(1)の改良点に加えて以下の点を改良し、より汎用かつ精度の高い解析が行えるようにする必要がある。

- (1) ナトリウムミストによる影響も計算できるコードに改良する。

実際のFBR プラントでは、Arカバーガス中にナトリウムミストが含まれ、カバーガスと共に輸送され、壁面へ付着、あるいは凝縮するといった現象が存在し、遮蔽プラグへの伝熱に影響している。したがって、このナトリウムベーパーの挙動現象も計算できるコードに改良する。

- (2) 任意形状が扱えるコードに改良する。

今回のSPINTA解析では、回転プラグと固定プラグ間のカバーガス挙動は、回転プラグが炉容器中心軸より偏心し、円筒座標系では扱えないため計算できなかった。又、炉容器底部とガードベッセル間のアニュラス部分のような形状も扱うことができない。このため、今後は任意形状をも扱うことのできるBoundary-Fit曲線座標系を導入する予定である。

- (3) 非定常解析機能の追加

現在のFLUSH での解析は定常状態に限られている。

今後は、熱過渡状態をもつ計算できるコードに改良する予定である。

参 考 文 献

- 1) 甲藤好郎 電熱概論 養賢堂
- 2) 日本機械学会 電熱工学資料
- 3) 遮蔽プラグ・炉容器・ペデスタル部
総合断熱試験 (I)
成果報告書
SJ 201 81-41
- 4) 遮蔽プラグ・炉容器・ペデスタル部
総合断熱試験 (II)
成果報告書
SJ 201 82-23
- 5) 遮蔽プラグ・炉容器・ペデスタル部
総合断熱試験 (III)
成果報告書
PNC SJ 901 84-12
- 6) 「もんじゅ」しゃへいプラグ総合断熱試験 (I)
初期アトリウム中試験
PNC SN 941 82-12
- 7) 「もんじゅ」しゃへいプラグ総合断熱試験 (II)
カバーガス空間の熱伝達
PNC N 941 82-257
- 8) 「もんじゅ」しゃへいプラグ総合断熱試験 (III)
自然対流防止構造の効果
PNC SN 941 85-08
- 9) 「もんじゅ」しゃへいプラグ総合断熱試験 (I), (II) データ集
PNC ZN 945 85-02
- 10) 单相多次元熱流動解析コードAQUA入力マニュアル
PNC N9520 87-011

表 2.1 「もんじゅ」とSPINTAの基本仕様

Table 2.1 Characteristic Dimensions of "Monju" and SPINTA

基 本 寸 法	もんじゅ：A	総合断熱試験装置：B	A／B
原子炉容器外径	7880	3138	2.5
回転プラグ偏心量	1080	430	2.5
原子炉容器板厚	50	19	2.6
固定プラグ			
i) シャヘイ胴外径	7590	2970	2.6
ii) " 上部板厚	50	20	2.5
iii) " 下部板厚	20	8	2.5
iv) 中間フランジ上面レベル	NL 1820	NL 1820	—
回転プラグ			
i) 上部シャヘイ胴外径	4890	1940	2.5
ii) " 板厚	40	16	2.5
III) 上部シャヘイ胴外径	4650	1700	2.7
iv) " 板厚	20	8	2.5
v) オフセットレベル	NL 1990	NL 1990	—
炉心上部機構			
i) 上部シャヘイ胴外径	2260	700	3.2
ii) " 板厚	60	30	2.0
III) 上部シャヘイ胴外径	2140	609.6	3.5
iv) " 板厚	60	38.9	1.5
v) オフセットレベル	NL 1990	NL 1990	—
炉容器サーマルライナ			
i) 胴外径	7740	3060	2.5
ii) 胴板厚	50	20	2.5

表2.2 SPINTA温度分布解析の比較

Table 2.2 Comparizon with the temperature calculation of SPINTA

解 析 領 域		NASTRAN (昭和56年)	NASTRAN/VANAC (昭和59年)	FLUSHコード
カバーガス空間		NASTRAN (熱伝導モデル)	NASTRAN (熱伝導モデル)	AQUA (3次元)
遮蔽プラグ		〃	〃	NASTRAN (熱伝導モデル)
ア ニ ュ ラ ス 領 域	固定プラグ ～サーマイルライナー	〃	〃	AQUA (3次元)
	固定プラグ ～回転プラグ	〃	AQUA (3次元)	NASTRAN (熱伝導モデル)
	サーマイルライナー ～炉壁	〃	NASTRAN (熱伝導モデル)	〃

表 2. 4 Young's Modulus (Carbon Steel)

Table 2. 4 炭素鋼のヤング率

t (°C)	熱膨張点数 ($\times 10^{-6}$)	t (°C)	熱膨張点数 ($\times 10^{-6}$)
50	11.13	225	12.41
75	11.33	250	12.57
100	11.53	275	12.73
125	11.71	300	12.90
150	11.89	325	13.08
175	12.07	350	13.24
200	12.24	375	13.42

表 2. 5 炭素鋼の熱膨張係数

Table 2. 5 Coefficient of Linear Expansion (Carbon Steel)

t (°C)	熱膨張点数 ($\times 10^{-6}$)	t (°C)	熱膨張点数 ($\times 10^{-6}$)
50	11.13	225	12.41
75	11.33	250	12.57
100	11.53	275	12.73
125	11.71	300	12.90
150	11.89	325	13.08
175	12.07	350	13.24
200	12.24	375	13.42

表 2. 6 所要CPU時間

Table 2. 6 CPU Time

解析内容	サイクル数	JOB STEP	CPU Time	
			NIN	SEC
熱伝導・自然対流解析	1	INTER	0	15.57
		AQUA	59	15.67
		INTER	0	1.25
		FINAS	29	17.61
		INTER	0	1.24
	2	AQUA	0	1.77
		INTER	0	2.43
		FINAS	29	12.38
		INTER	0	0.96
熱応力解析	—	FNSEDIT	0	0.87
		FINAS	3	36.93

計 121 MIN. 46.59 SEC

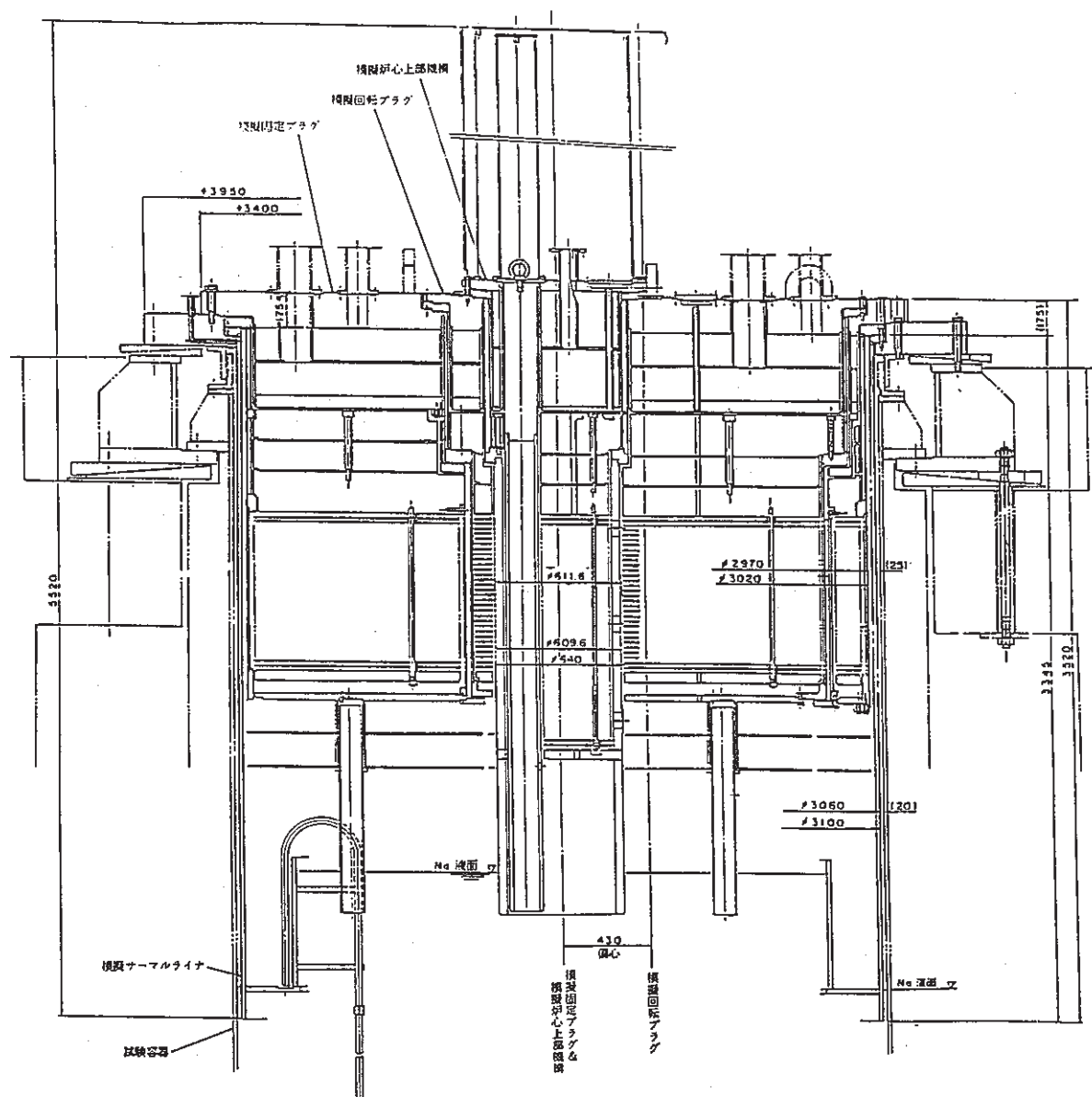
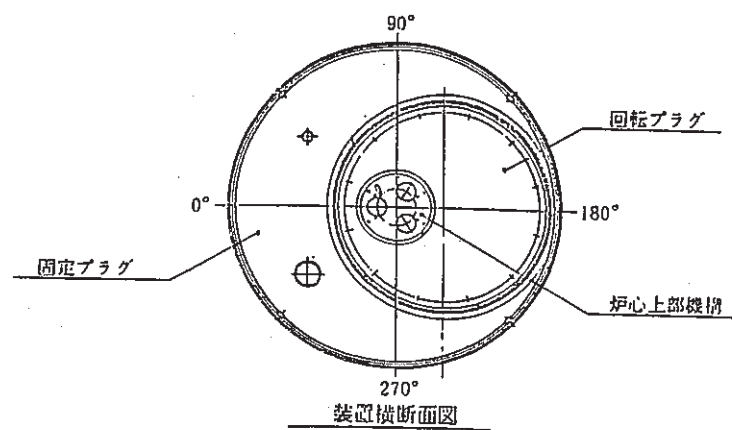


図 2.1 試験装置の縦断面図

Fig. 2.1 Vertical Cross Sectional View of Test Apparatus

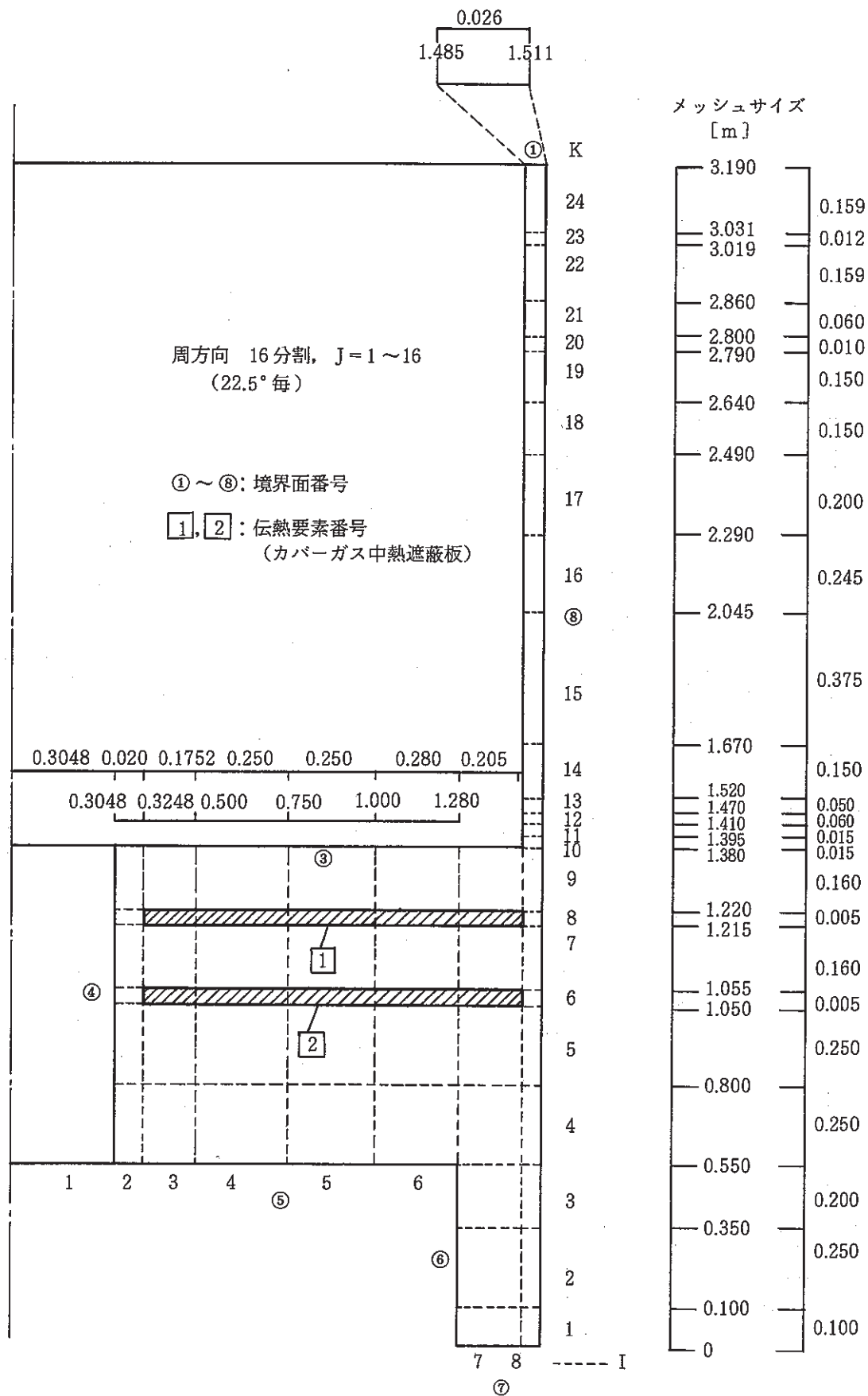


図 2.2 カバーガス空間のメッシュ分割図
Fig. 2.2 Meshes of the Cover-gas Region

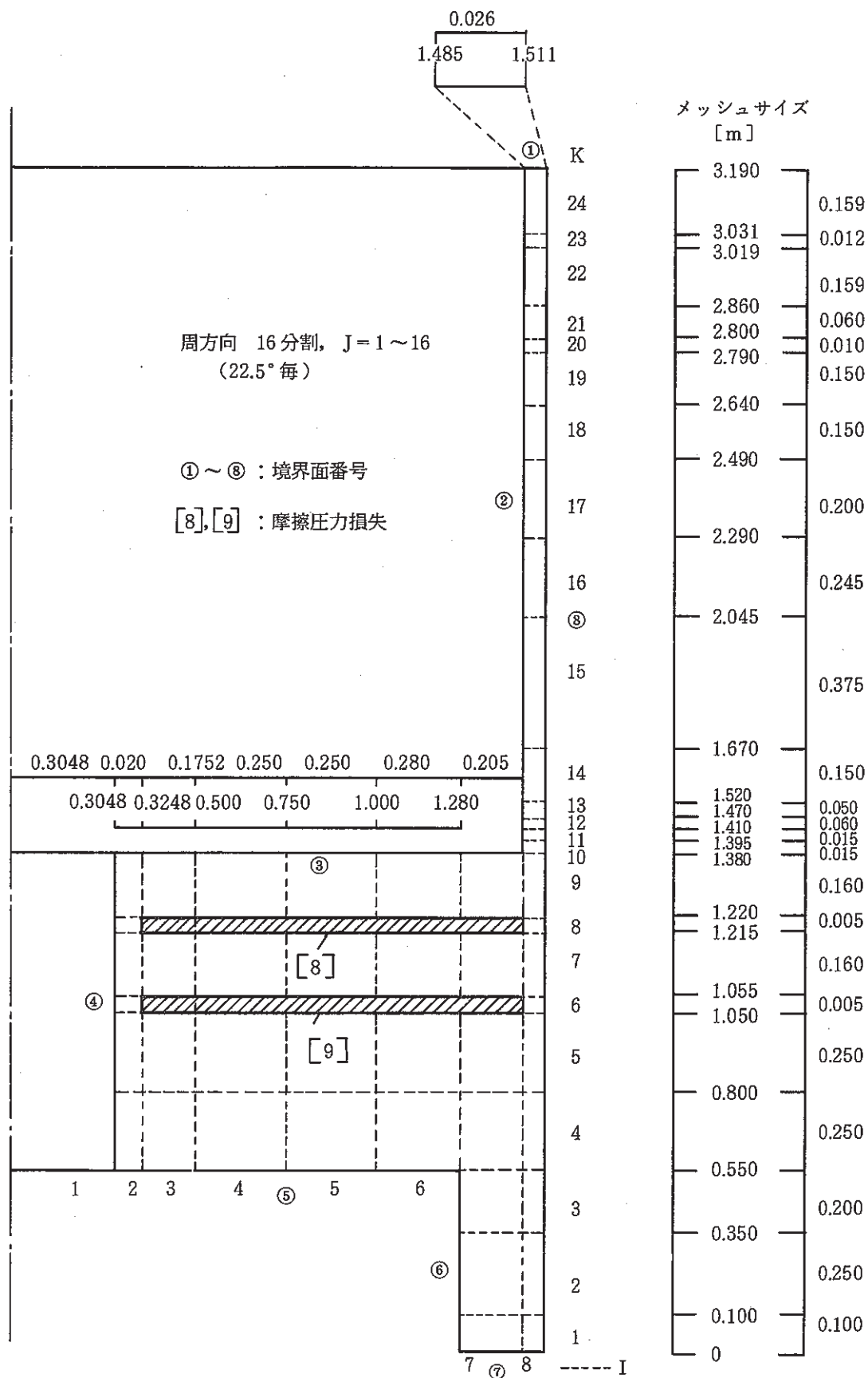


図 2.3 半径方向の流動抵抗要素

Fig. 2.3 Radial Force Structures

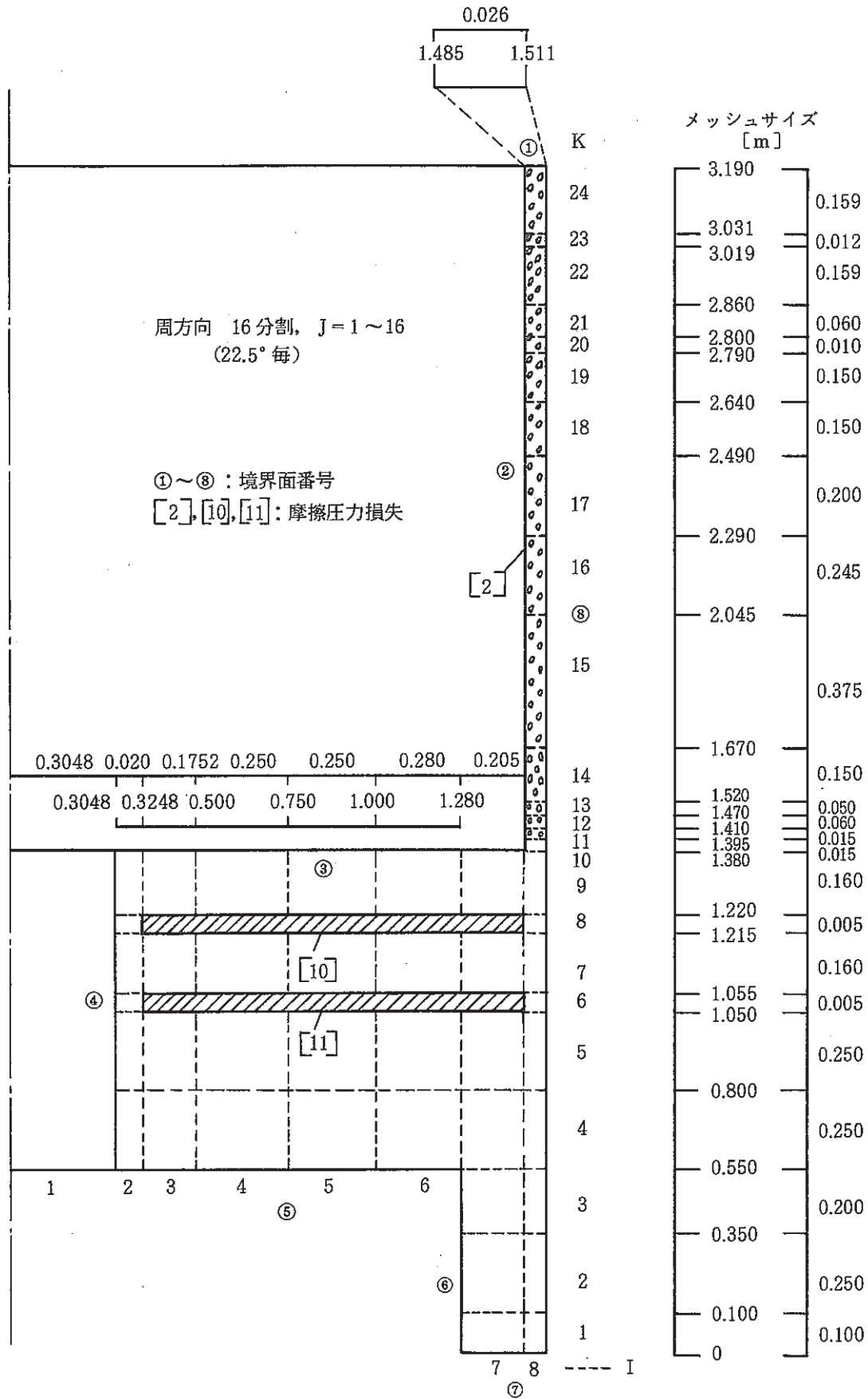


図 2.4 周方向の流動抵抗要素

Fig. 2.4 Azimuthal Force Structures

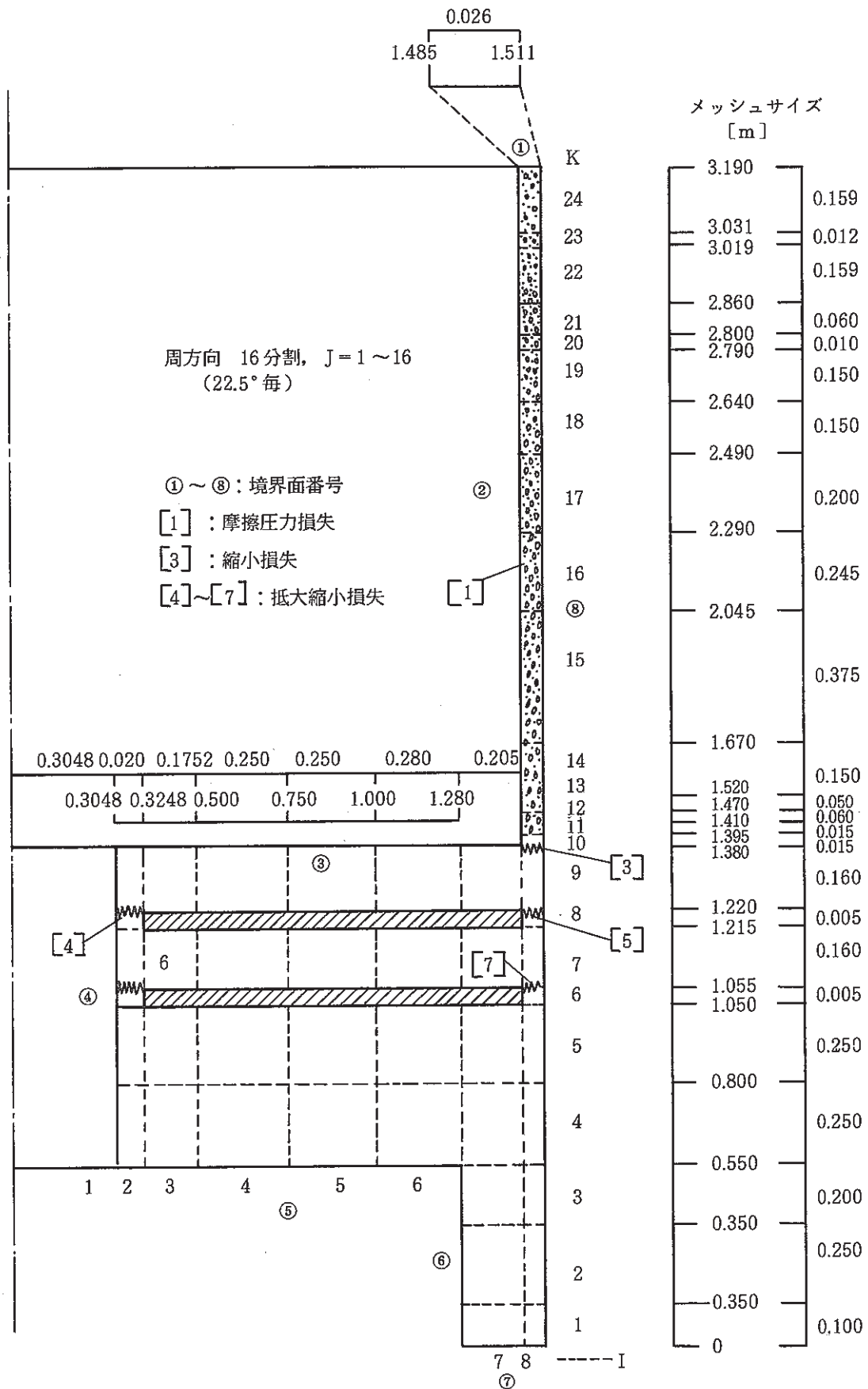


図 2.5 軸方向の流動抵抗要素

Fig. 2.5 Axial Force Structures

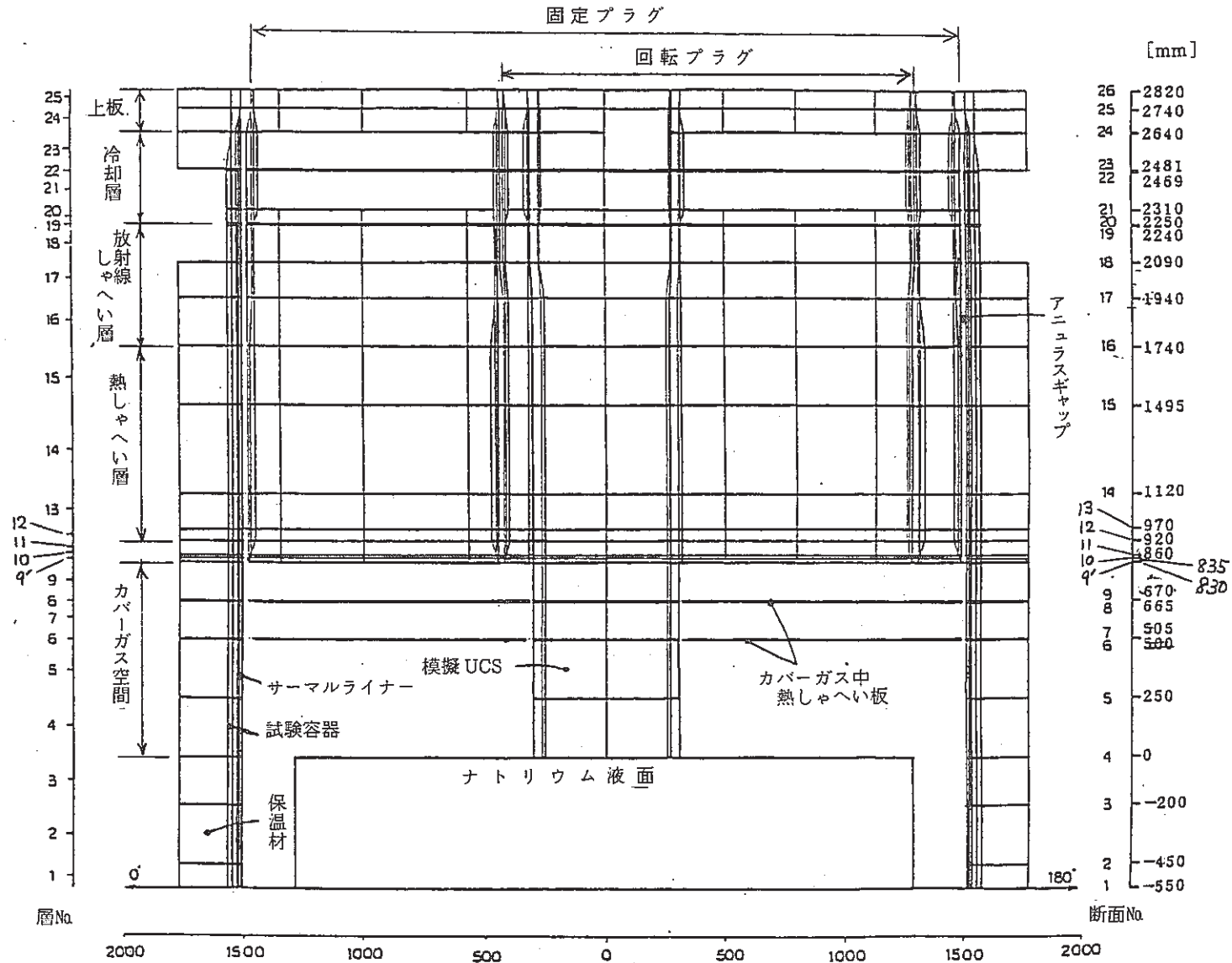


図 2.6 総合断熱試験装置 3次元定常温度分布解析モデル (0°-180°断面)

Fig. 2.6 3-Dimensional Steady State Temperature Distribution (0°-180°)

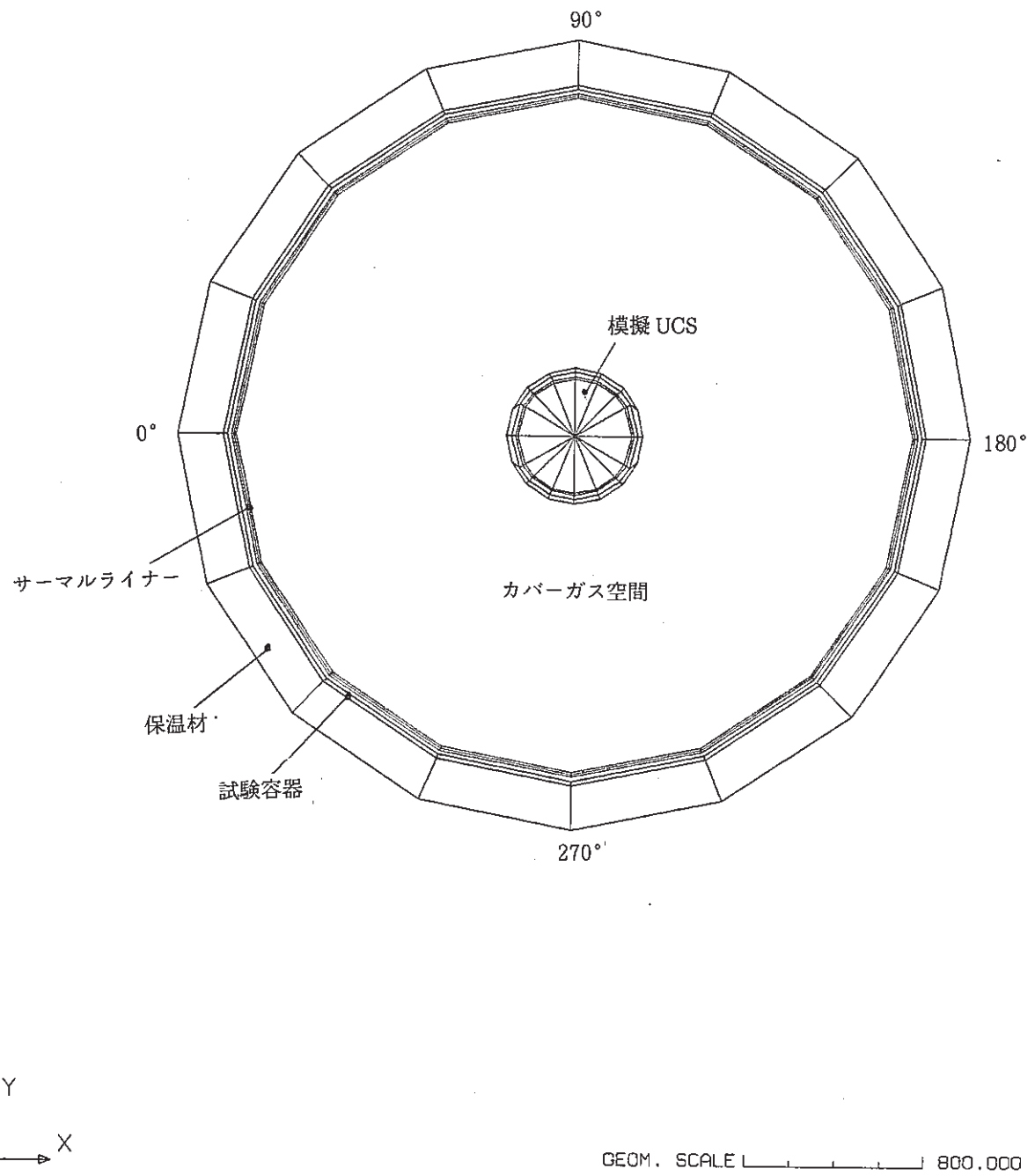


図 2.7 SPINTA 3次元解析モデル (5層)

Fig. 2.7 3-Dimensional Model of SPINTA (5 Section)

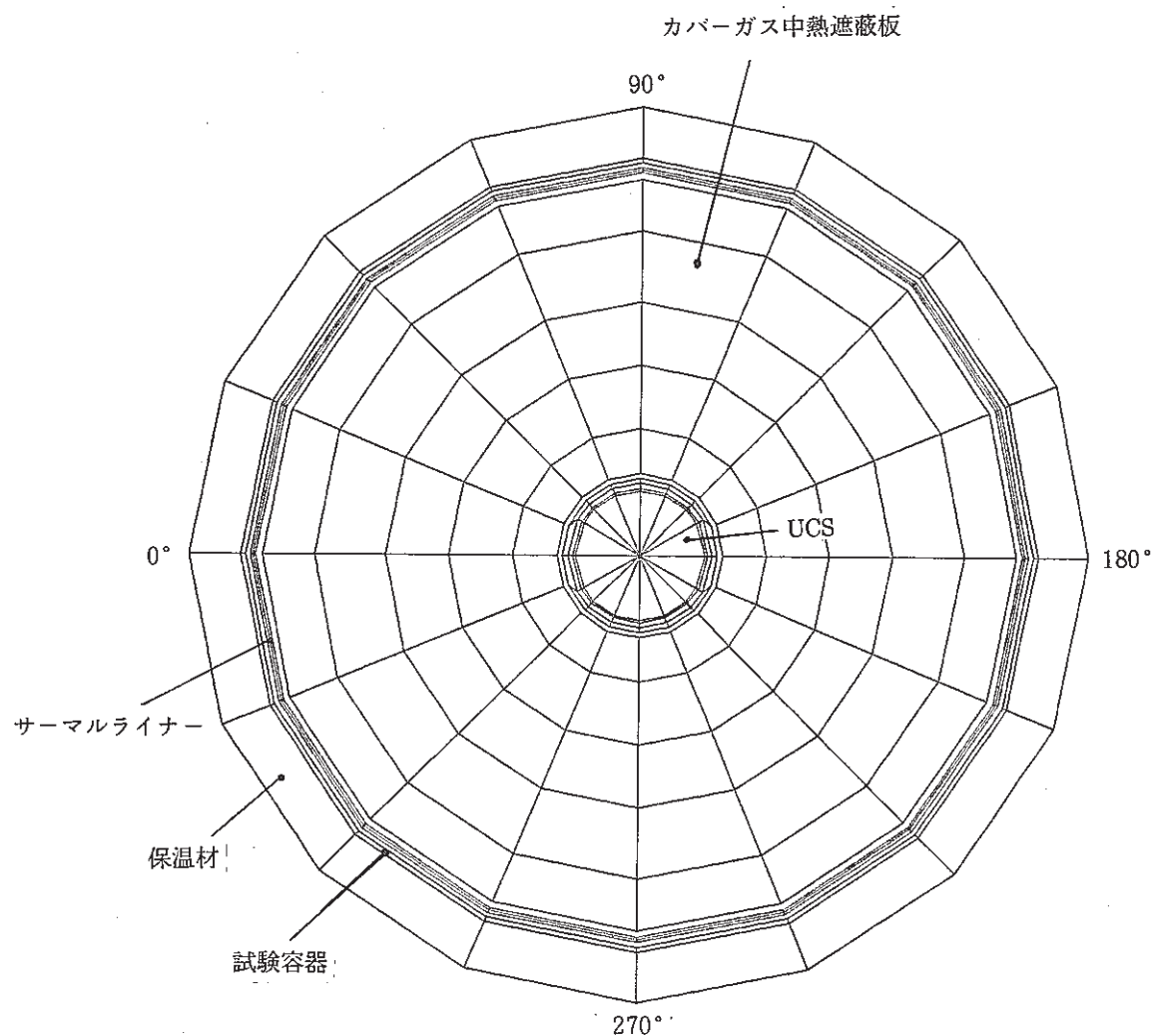


図 2.8 SPINTA 3次元解析モデル～カバーガス中熱遮蔽板～(6層)

Fig. 2.8 3-Dimensional Model of SPINTA (6 Section)

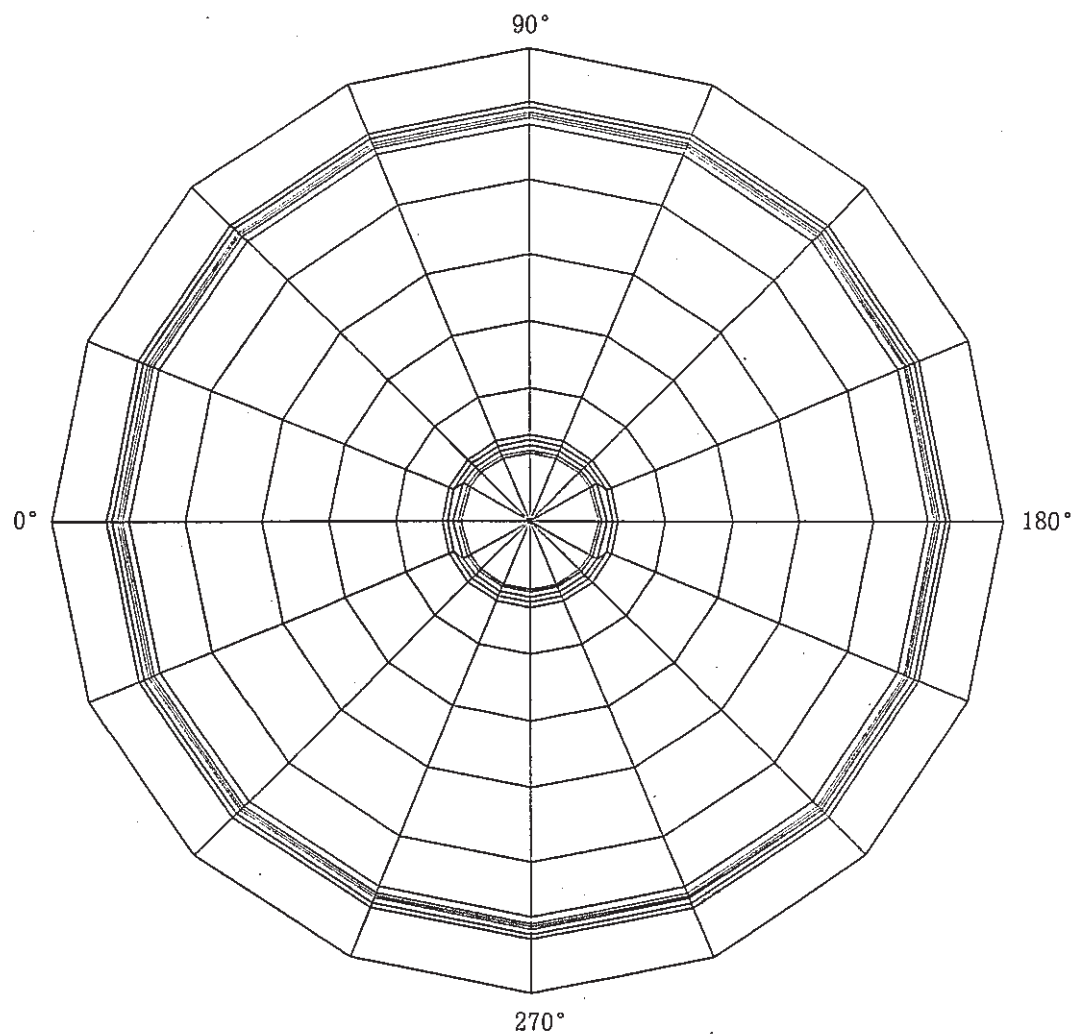
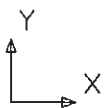
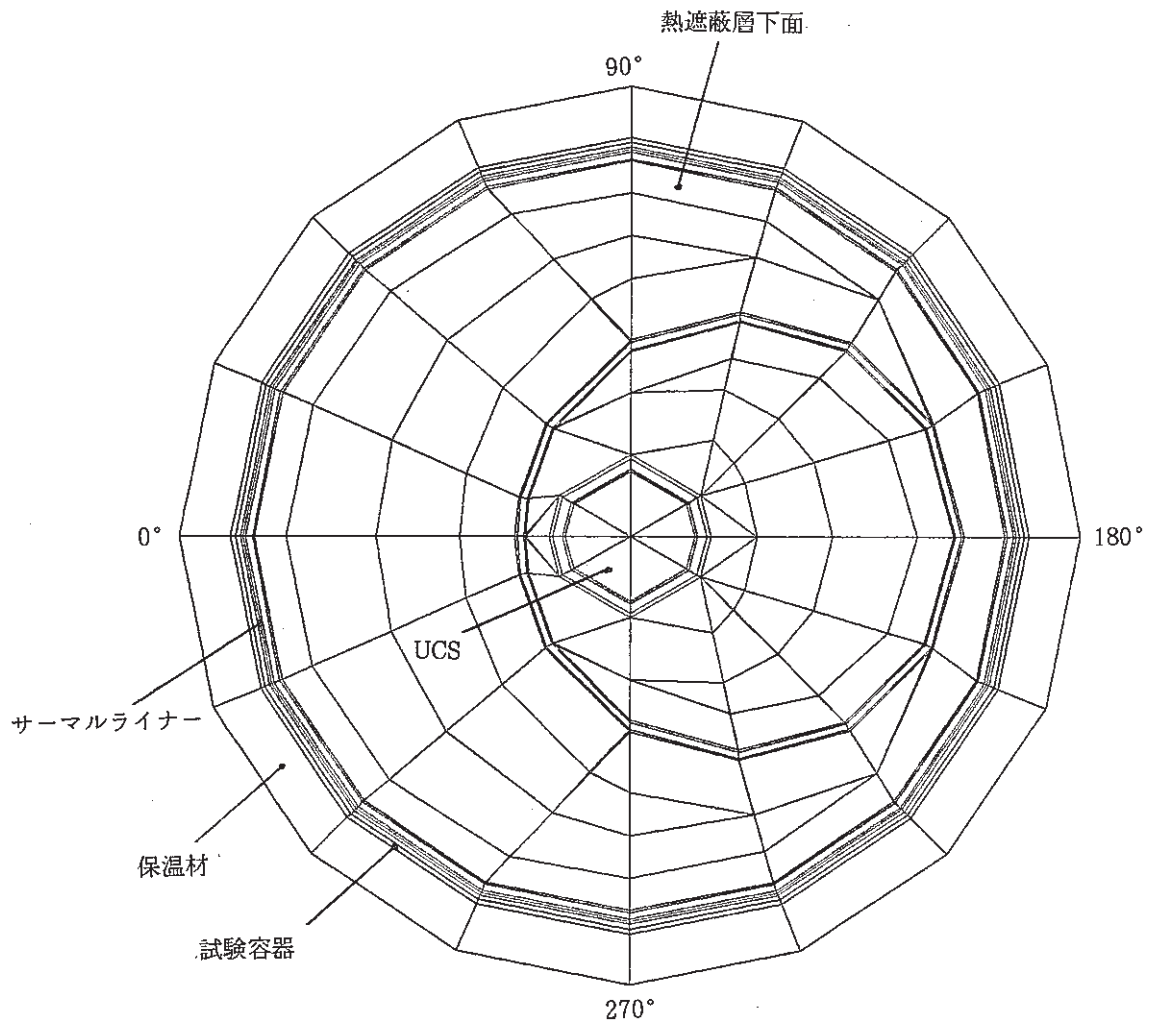


図 2.9 SPINTA 3次元解析モデル(9'層下面)

Fig. 2.9 3-dimensional Model of SPINTA (9' Section)



GEOM. SCALE 800.000

図 2.10 SPINTA 3次元解析モデル～熱遮蔽層下面～(10層)

Fig. 2.10 3-Dimensional Model of SPINTA (10 Section)

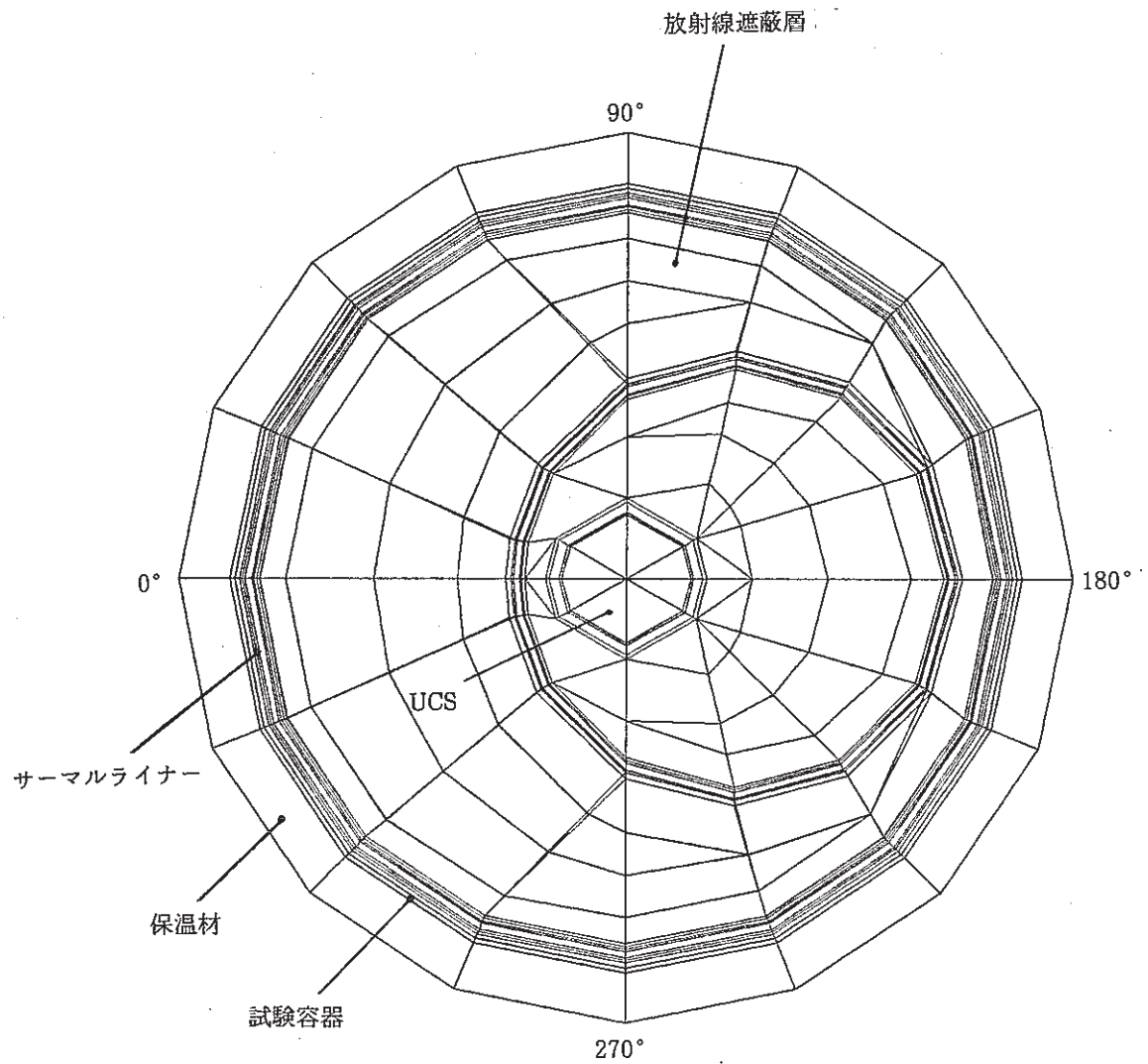


図 2.11 SPINTA 3次元解析モデル～放射線遮蔽層～(16層)

Fig. 2.11 3-Dimensional Model of SPINTA (16 Section)

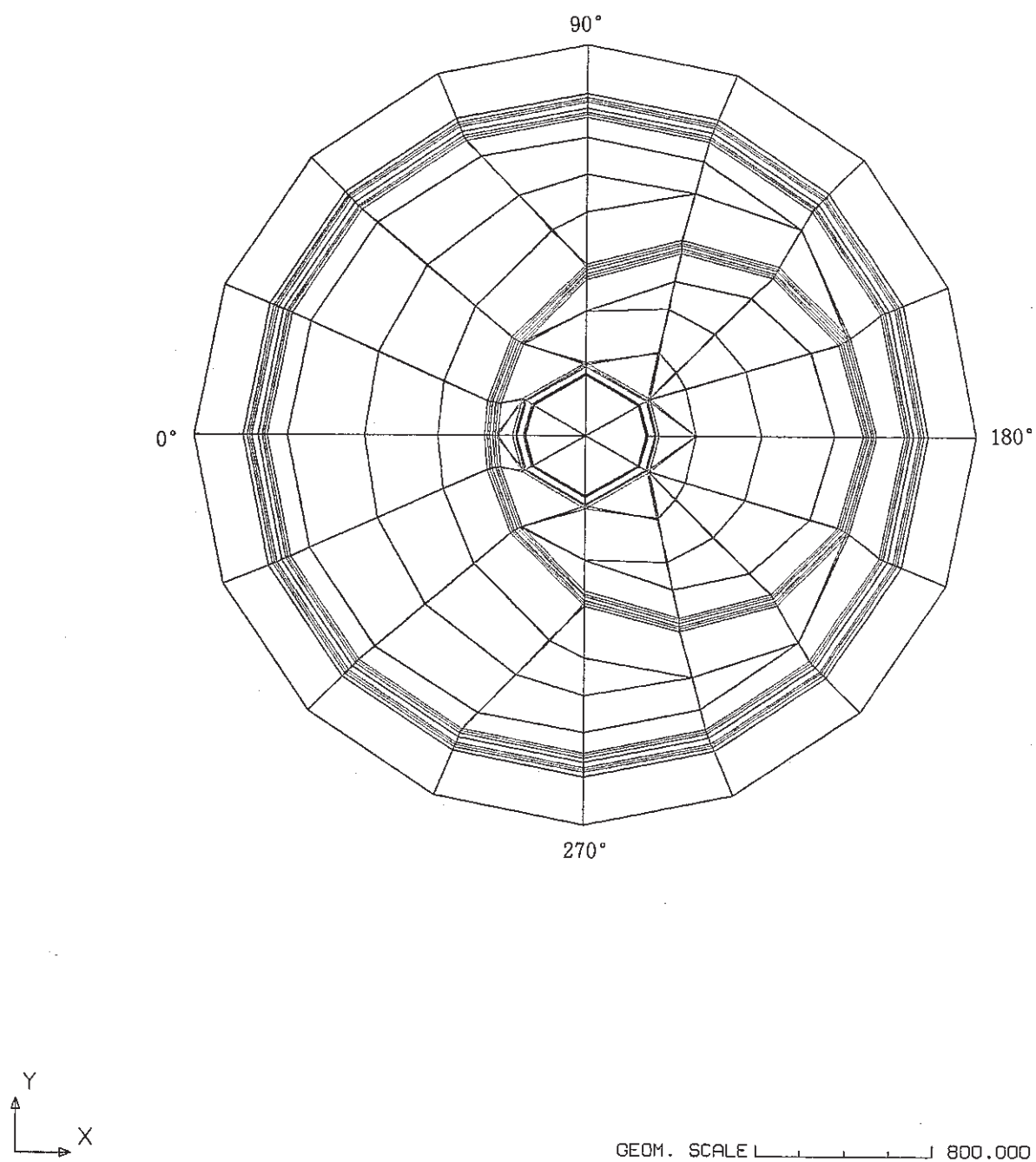


図 2.12 SPINTA 3次元解析モデル～上板～（24層）

Fig. 2.12 3-Dimensional Model of SPINTA (24 Section)

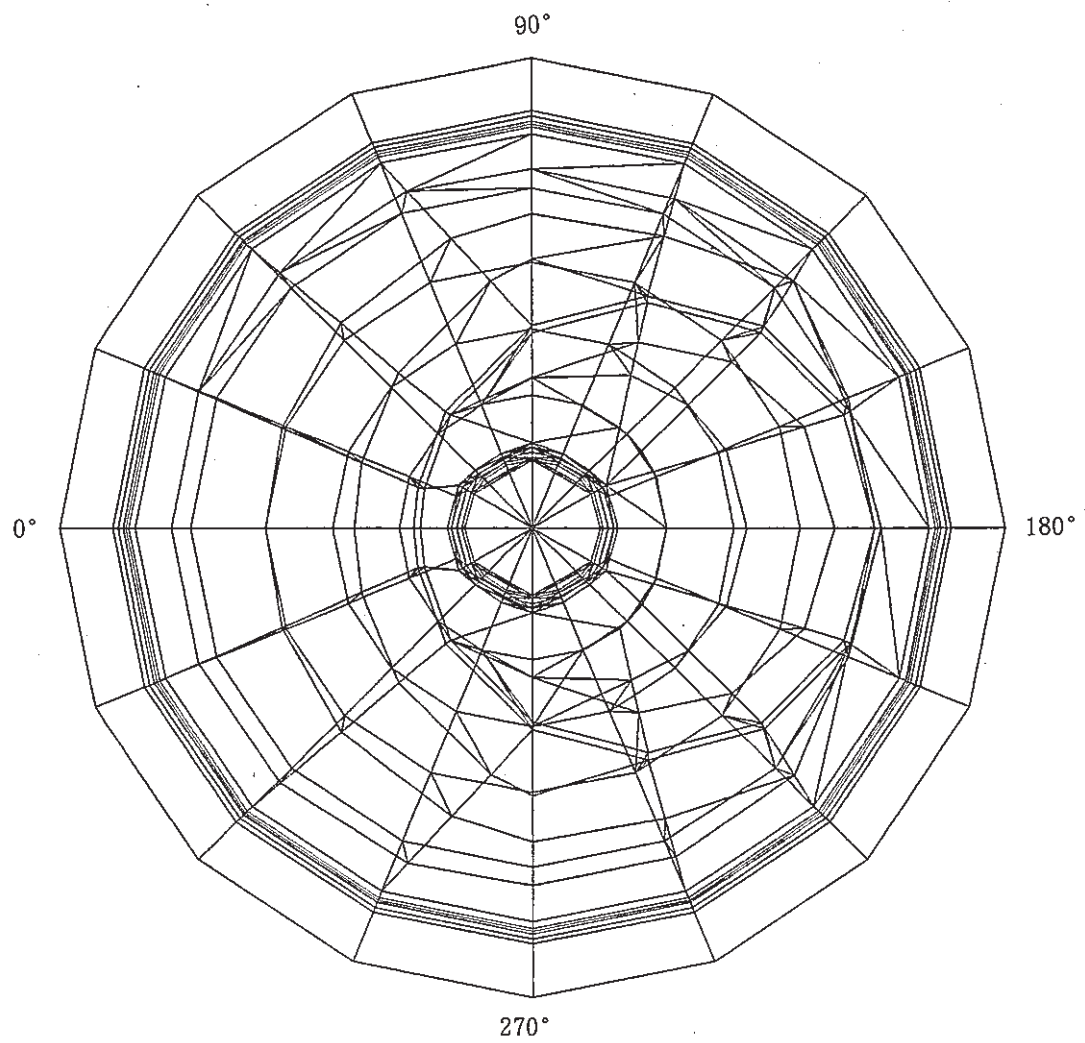


図 2.13 SPINTA 3次元解析モデル(9' 及び 10 層)

Fig. 2.13 3-Dimensional Model of SPINTA (9', 10 Section)

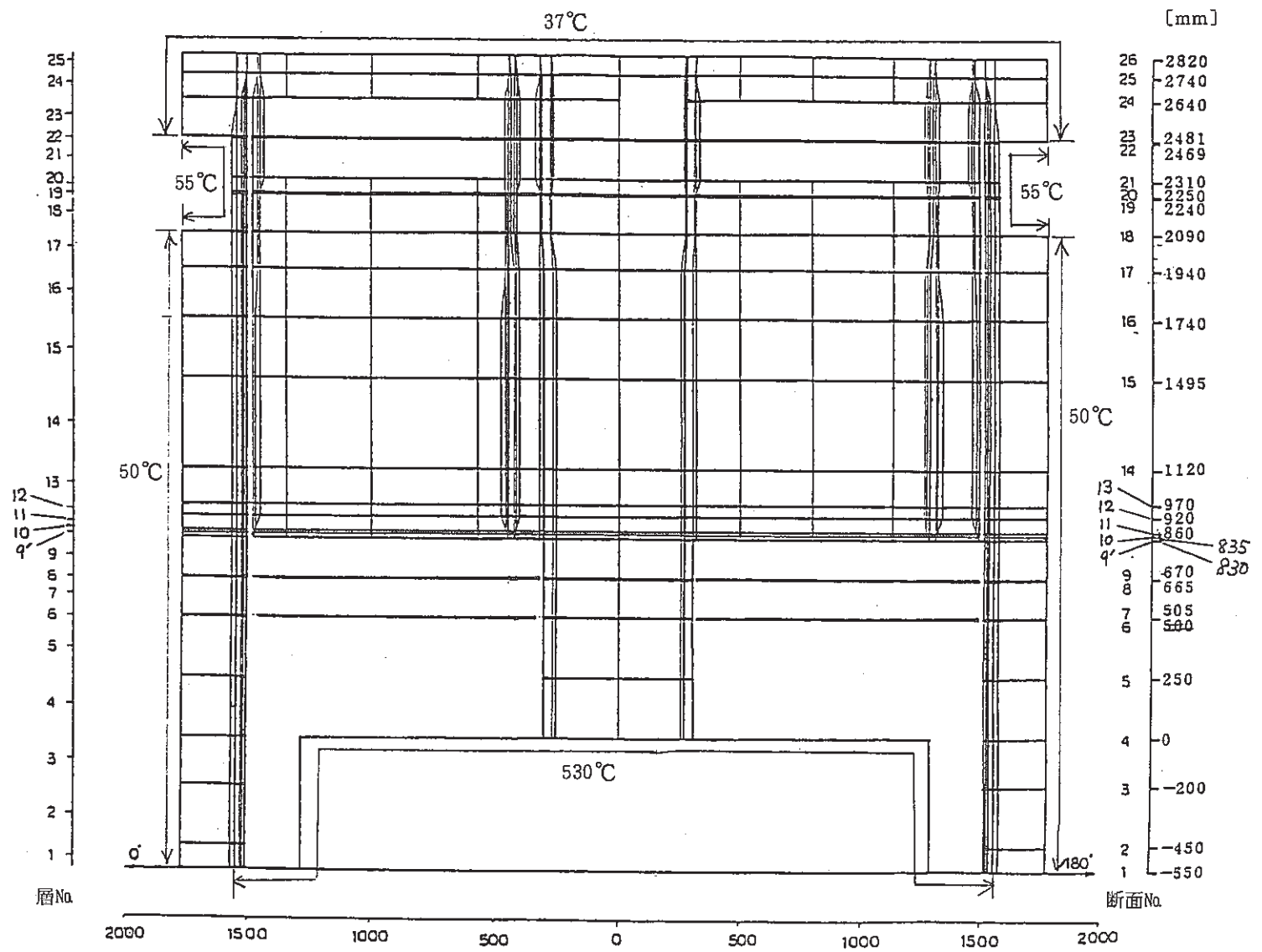


図 2.15 SPINTA 3次元解析モデル (0°-180° 断面) —規定温度—

Fig. 2.15 3-Dimensional Model of SPINTA

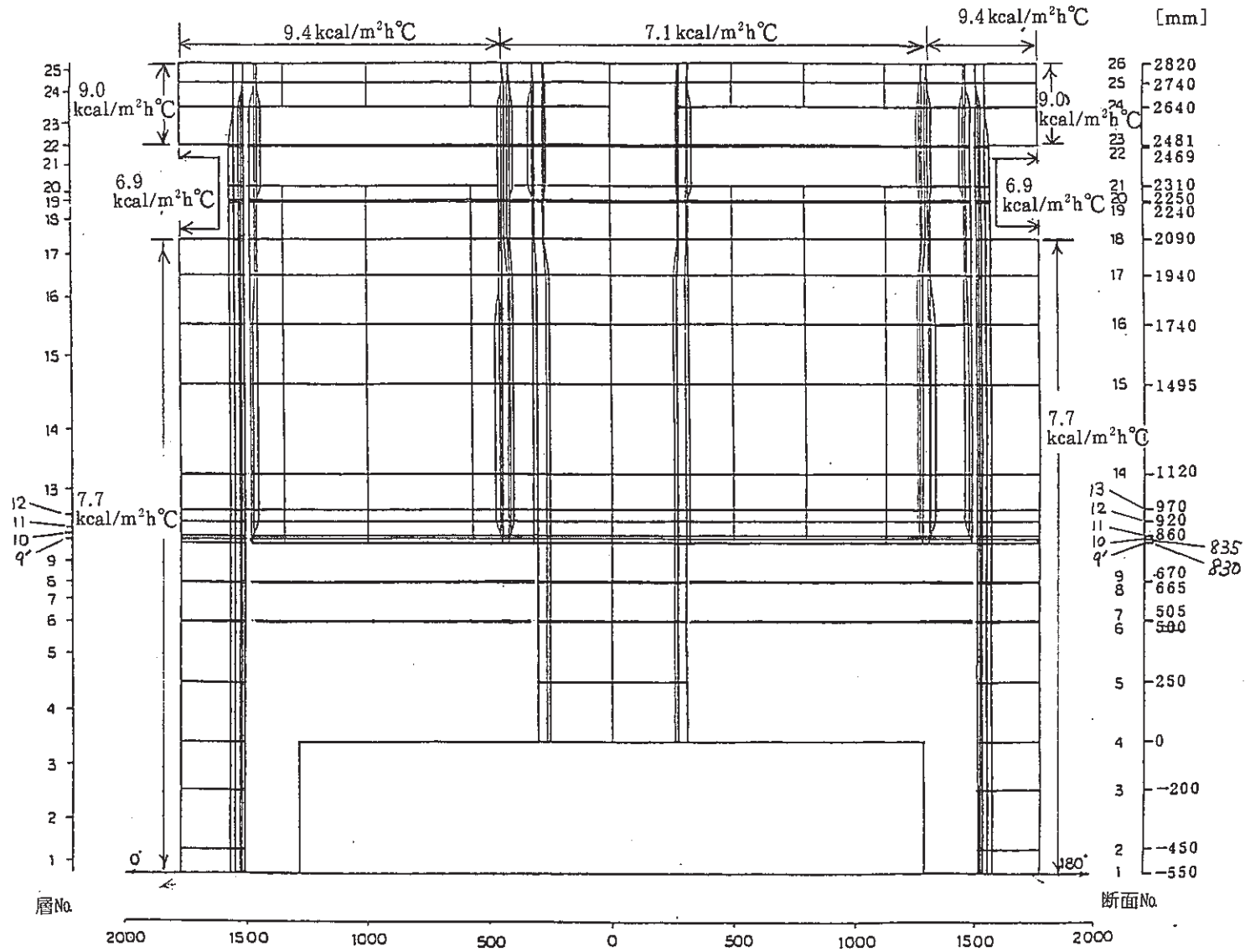


図 2.16 SPINTA 3次元解析モデル (0°-180° 断面) 一熱伝達率一

Fig. 2.16 3-Dimensional Model of SPINTA

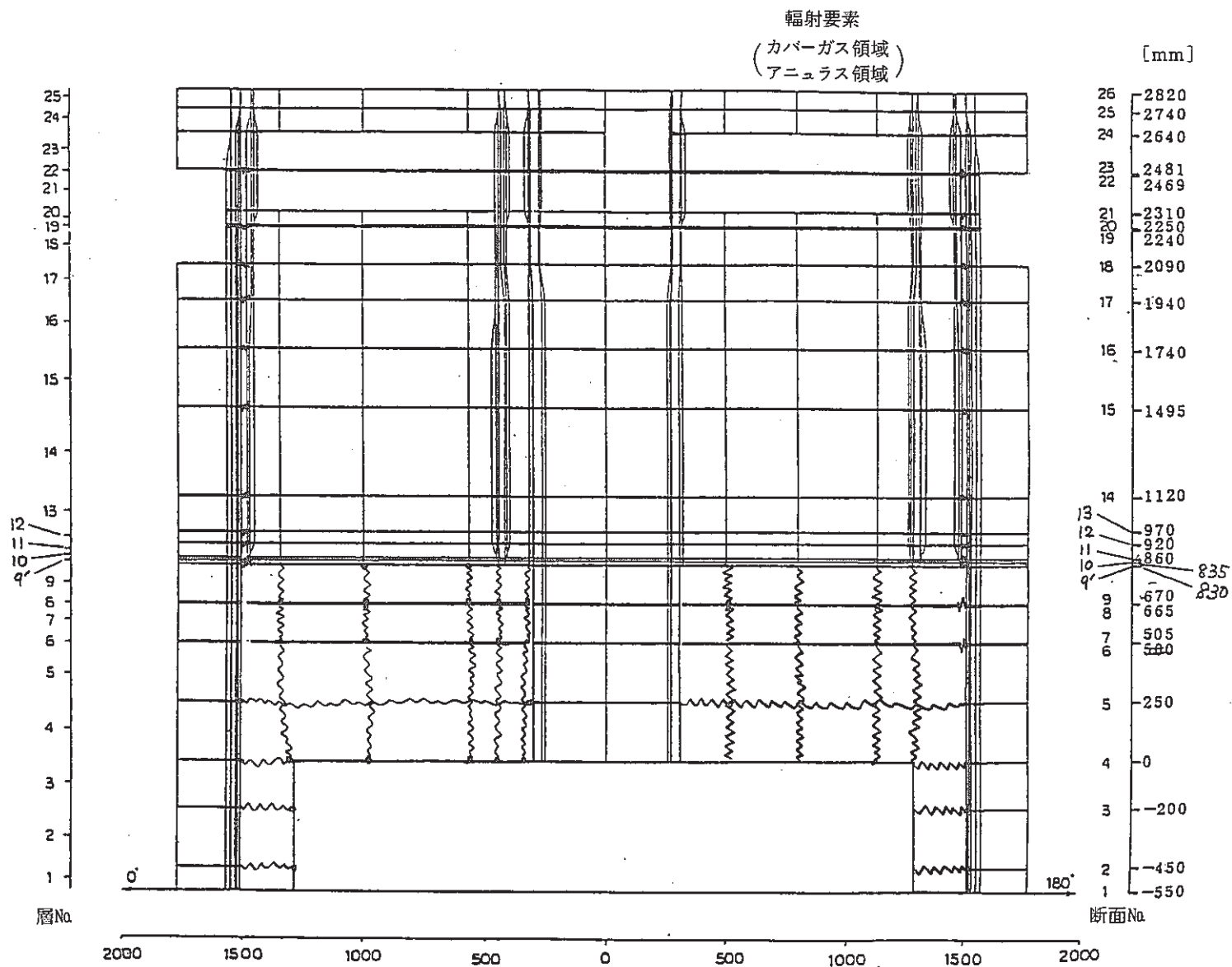


図 2.17 解析モデル (0°-180° 断面) — 輻射要素 —

Fig. 2.17 3-Dimensional

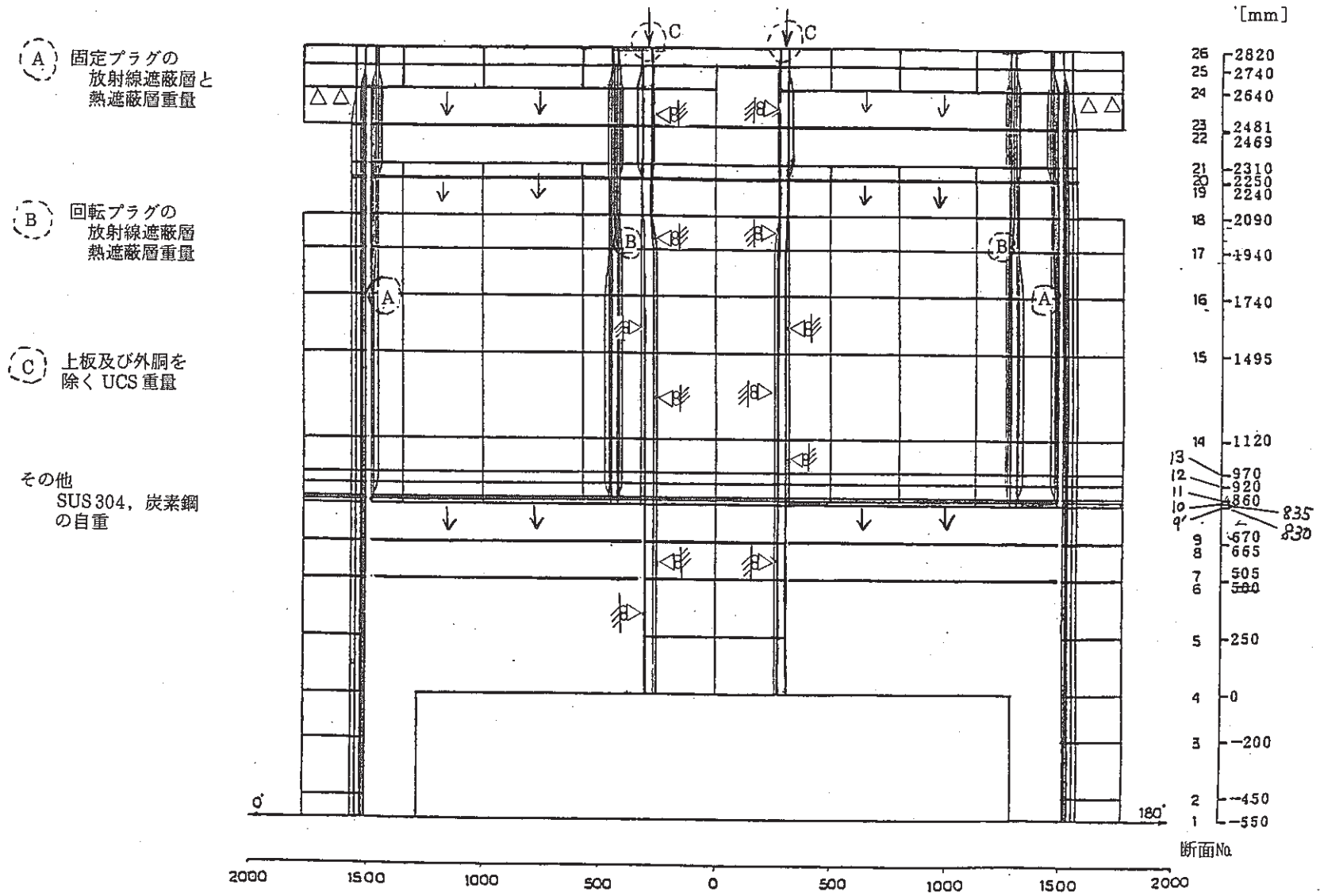


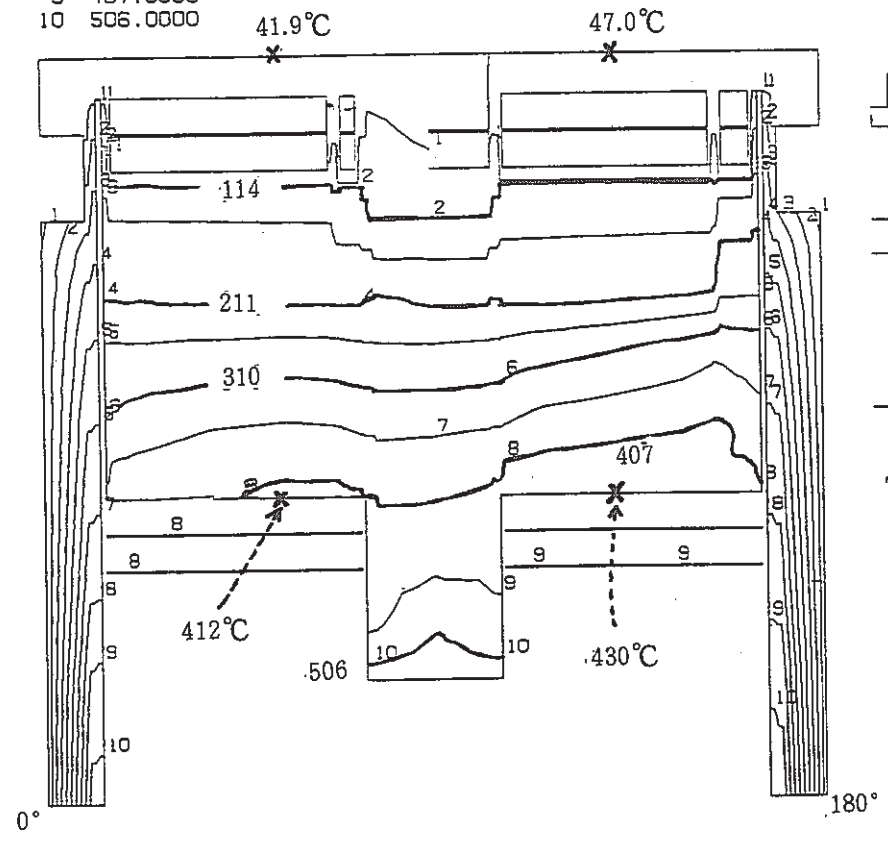
図 2.19 総合断熱試験装置 3次元熱応力分布解析モデル (0°-180° 断面)

Fig. 2.19 3-Dimensional Steady State/Thermal Stress Model (0°-180°)

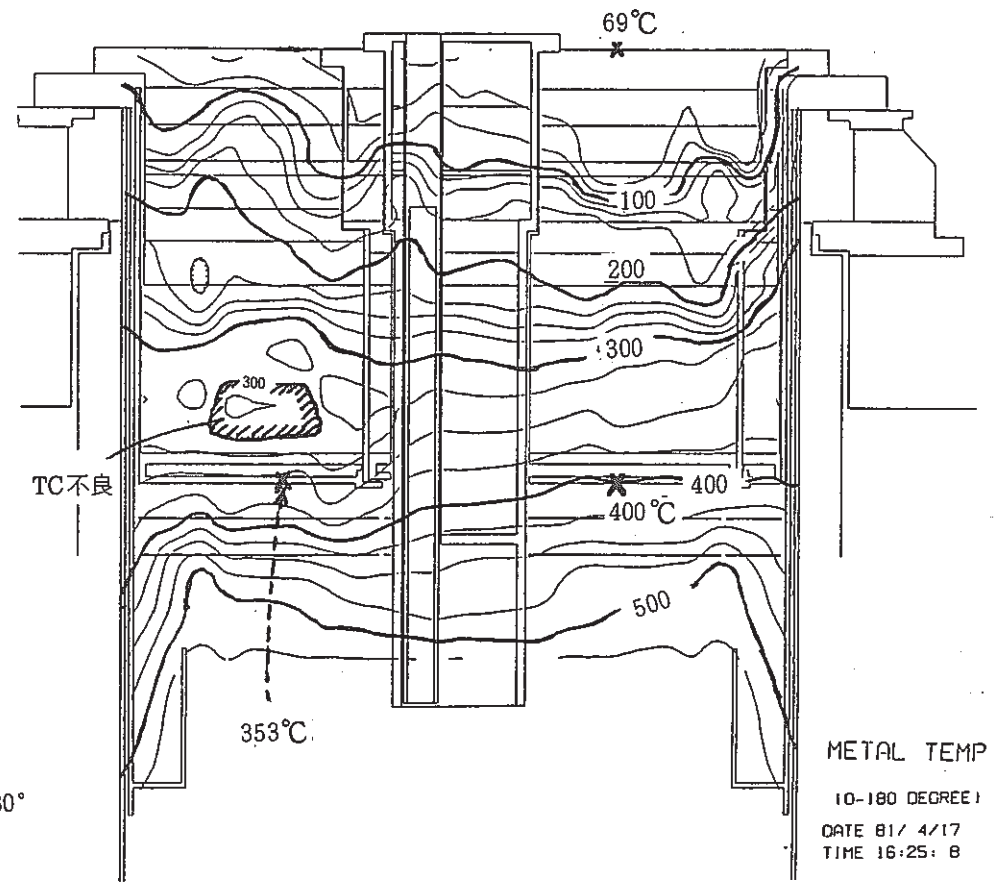
CONTOUR VALUES [°C]

- 1 65.00000
- 2 113.99999
- 3 163.00000
- 4 211.99999
- 5 260.99999
- 6 310.00000
- 7 359.00000
- 8 407.99999
- 9 457.00000
- 10 506.00000

計算値



実測値



METAL TEMP
10-180 DEGREE
DATE 81/ 4/17
TIME 16:25: 8

DATA NO. I-4-29

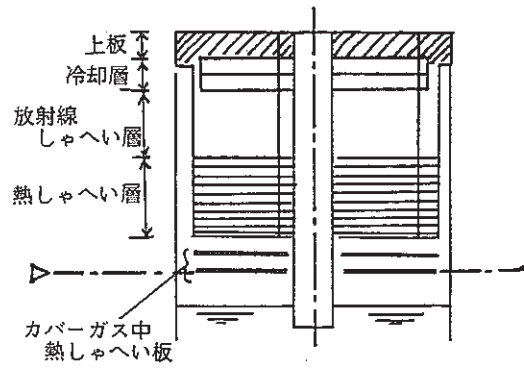
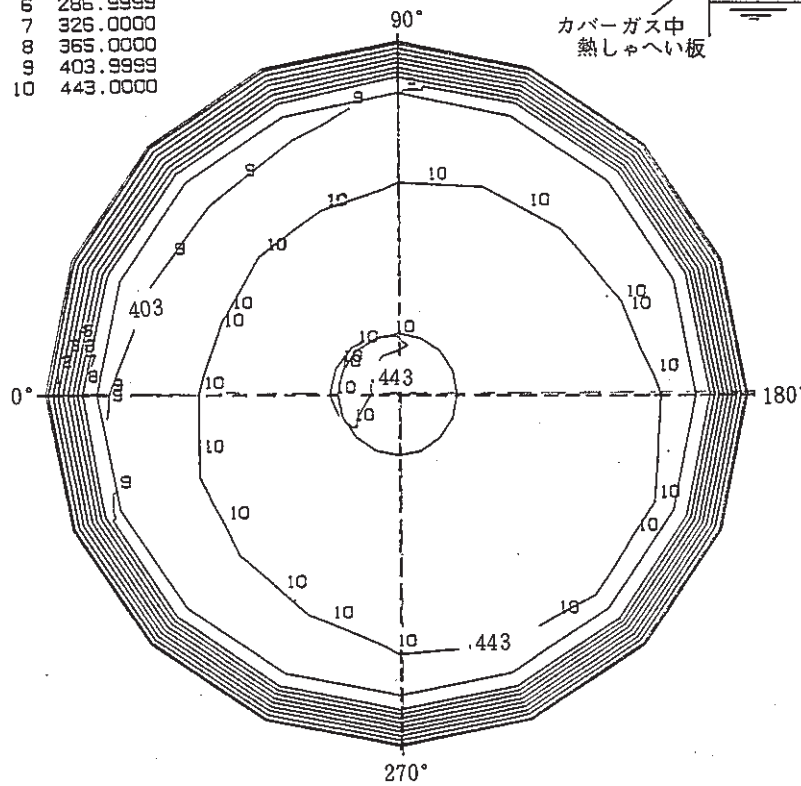
図 2.20 垂直断面等温線図 (0°-180°)

Fig. 2.20 Vertical Section Isothermal Map (0°-180°)

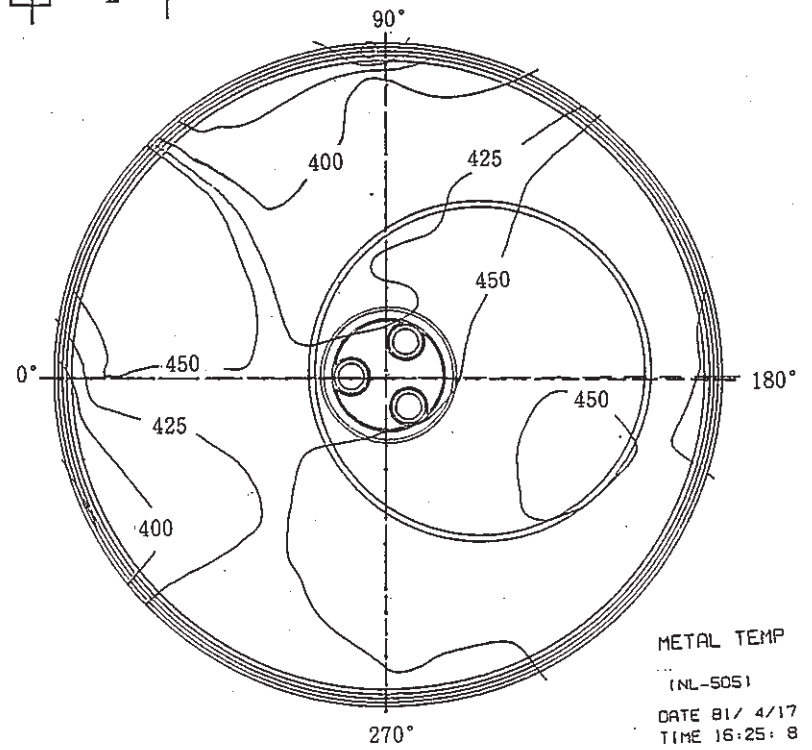
CONTOUR VALUES [°C]

1	92.00001
2	130.9999
3	169.9999
4	209.0000
5	247.9999
6	286.9999
7	325.0000
8	365.0000
9	403.9999
10	443.0000

計算値



実測値



METAL TEMP
(NL-505)
DATE 81/ 4/17
TIME 16:25: 8

DATA NO. I-4-29

図 2.21 水平断面等温線図～カバーガス中熱遮蔽板(下)～(6層)

Fig. 2.21 Horizontal Section Isothermal Map (6 Section)

CONTOUR VALUES

1	89.00001
2	125.9999
3	163.0000
4	200.0000
5	236.9999
6	273.9999
7	310.9999
8	348.0000
9	385.0000
10	422.0000

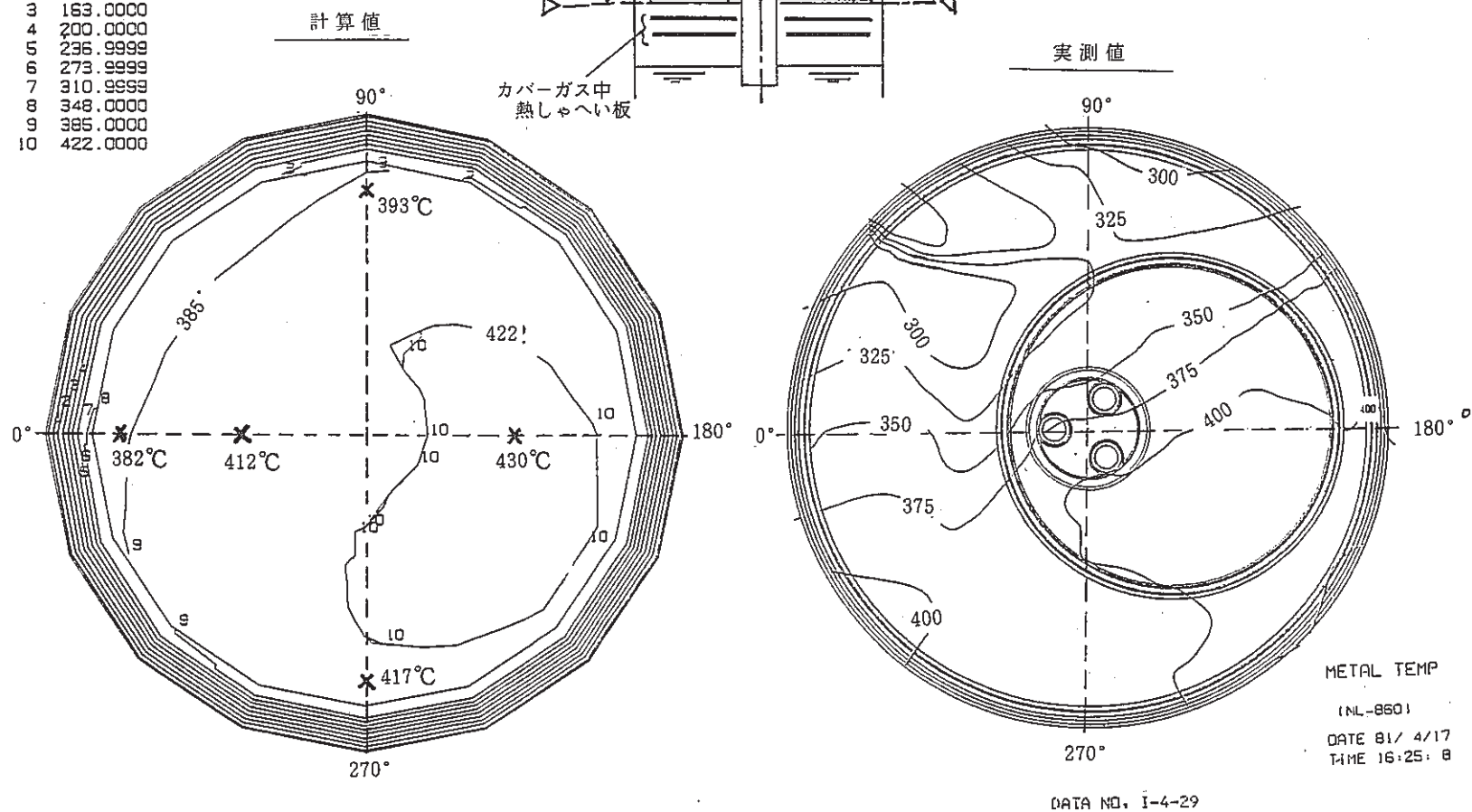


図 2.22 水平断面等温線図～熱遮蔽層下面～(10層)

Fig. 2.22 Horizontal Section Isothermal Map (10 Section)

CONTOUR VALUES

1	83.00001
2	113.0000
3	142.9999
4	172.9999
5	202.9999
6	232.9999
7	263.0000
8	293.0000
9	323.0000
10	352.9999

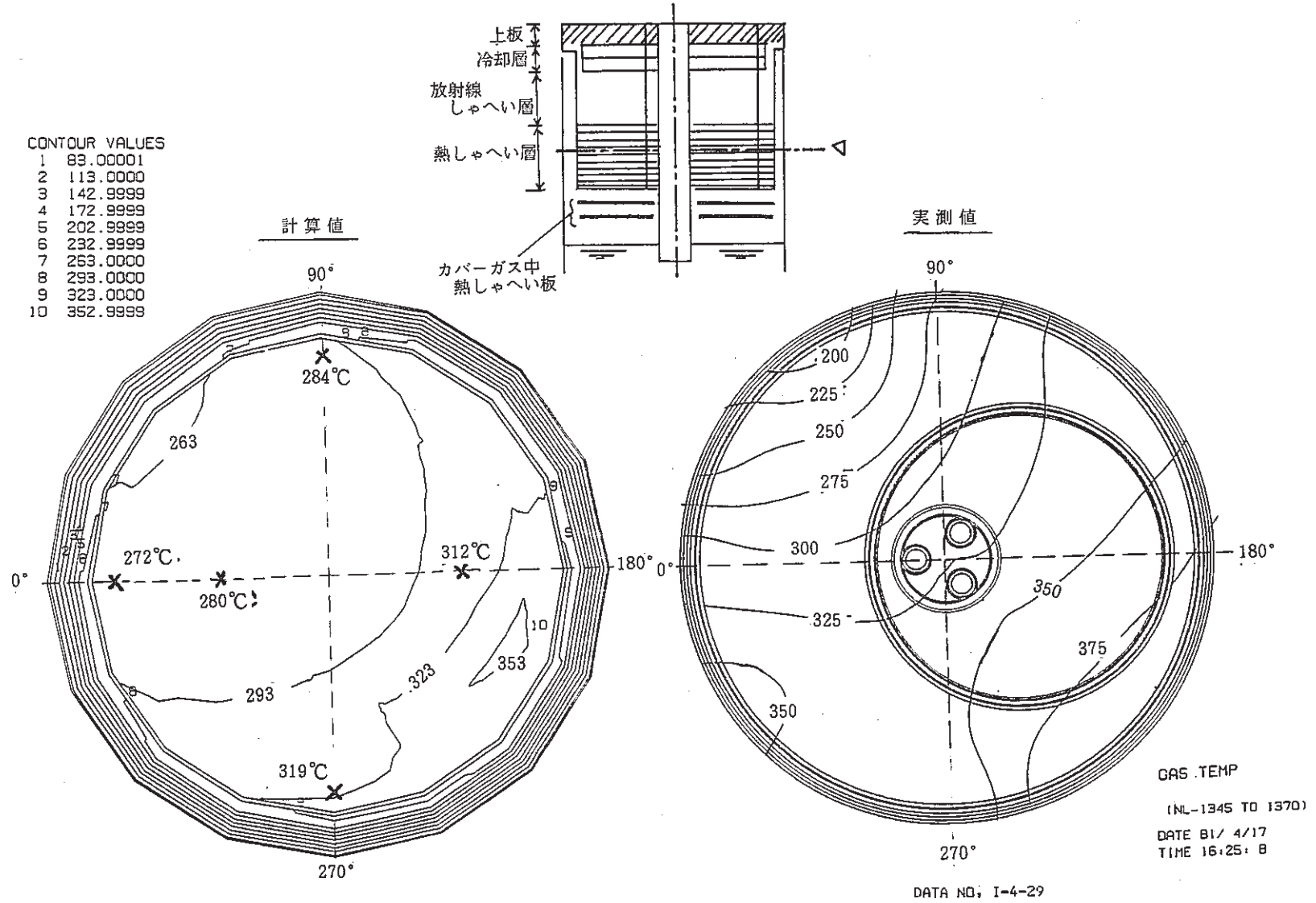


図 2.23 水平断面等温線図～熱遮蔽層中部～(14層)

Fig. 2.23 Horizontal Section Isothermal Map (14 Section)

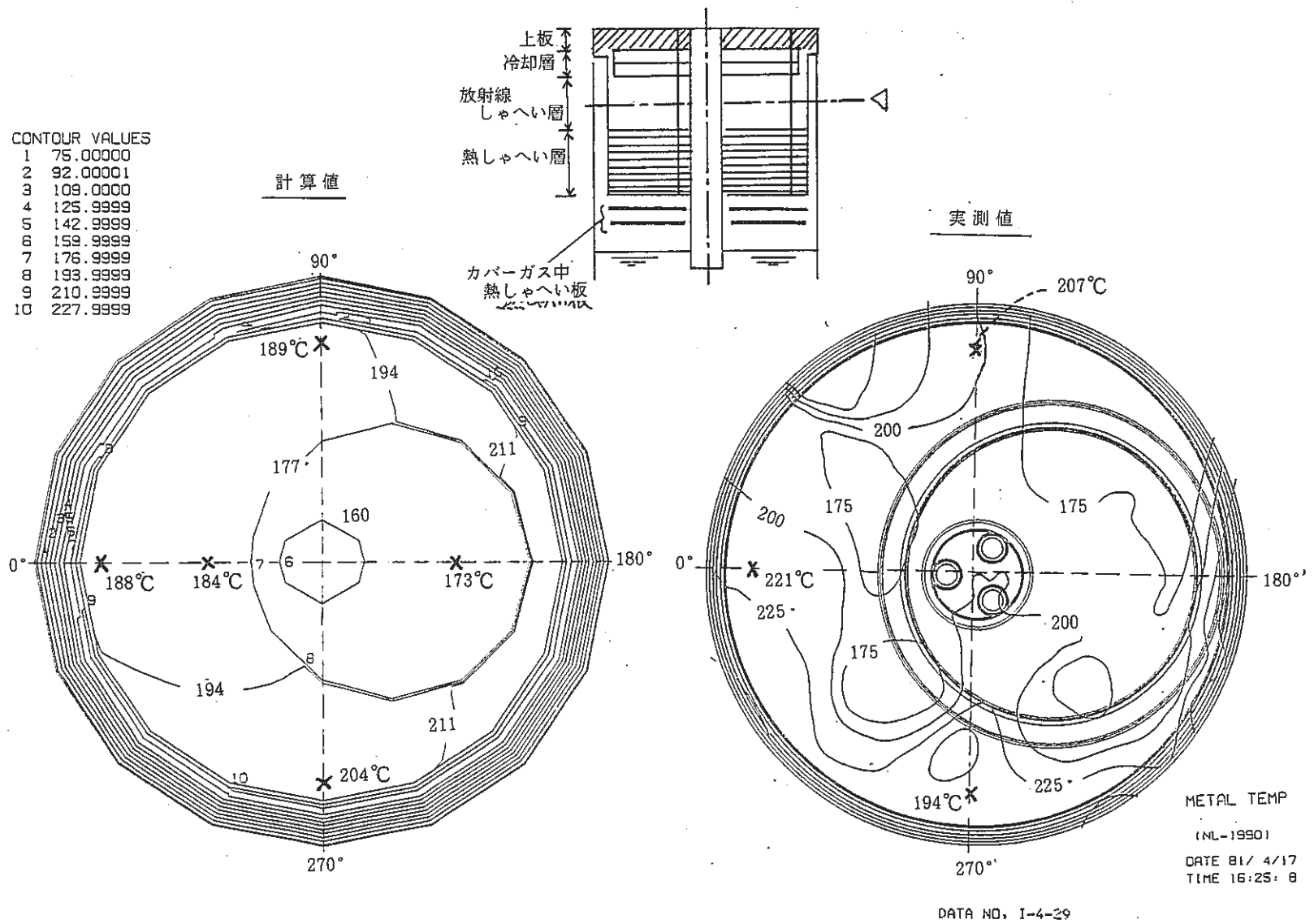
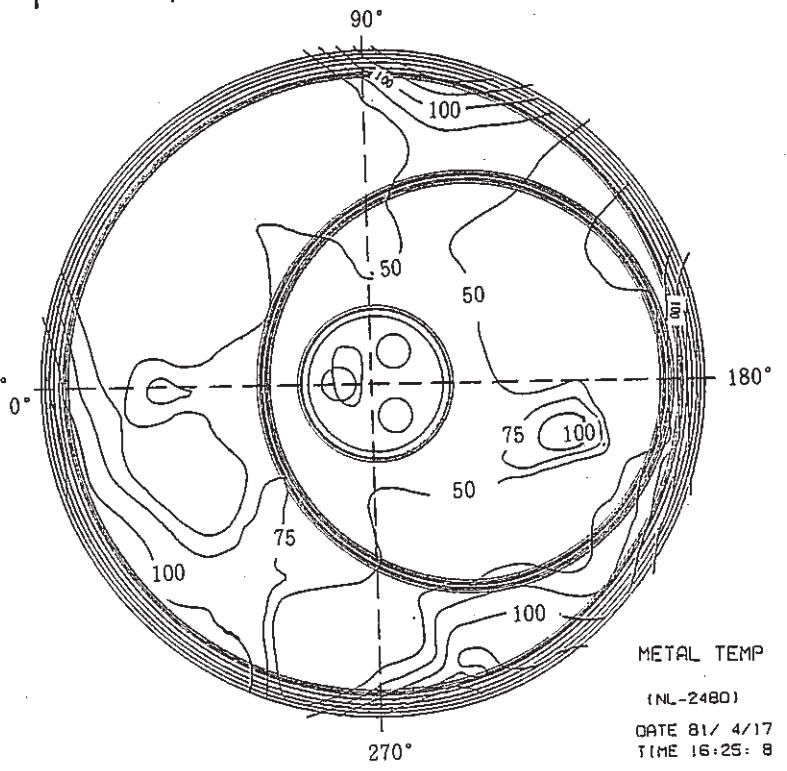
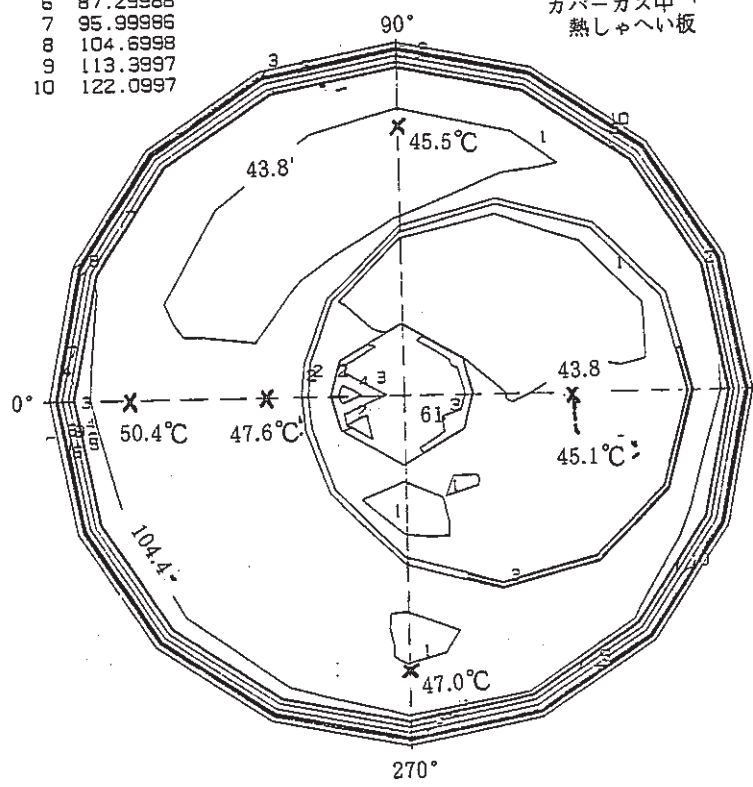
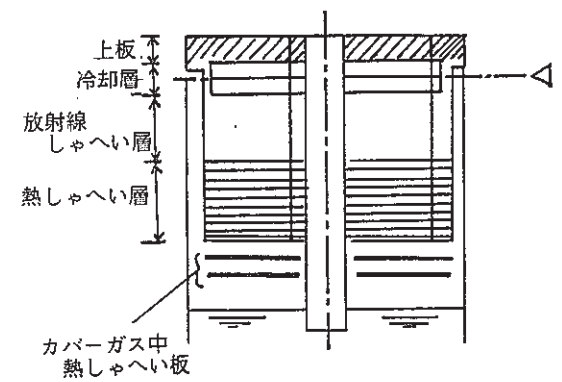


図 2.24 水平断面等温線図～放射線遮蔽層～(17 層)

Fig. 2.24 Horizontal Section Isothermal Map (17 Section)

CONTOUR VALUES

1	43.79996
2	52.49994
3	61.19993
4	69.89991
5	78.59990
6	87.29988
7	95.99986
8	104.6998
9	113.3997
10	122.0997



METAL TEMP
(NL-2480)
DATE 81/ 4/17
TIME 16:25: 8

DATA NO. I-4-29

図 2.25 水平断面等温線図～冷却層～(23 層)

Fig. 2.25 Horizontal Section Isothermal Map (23 Section)

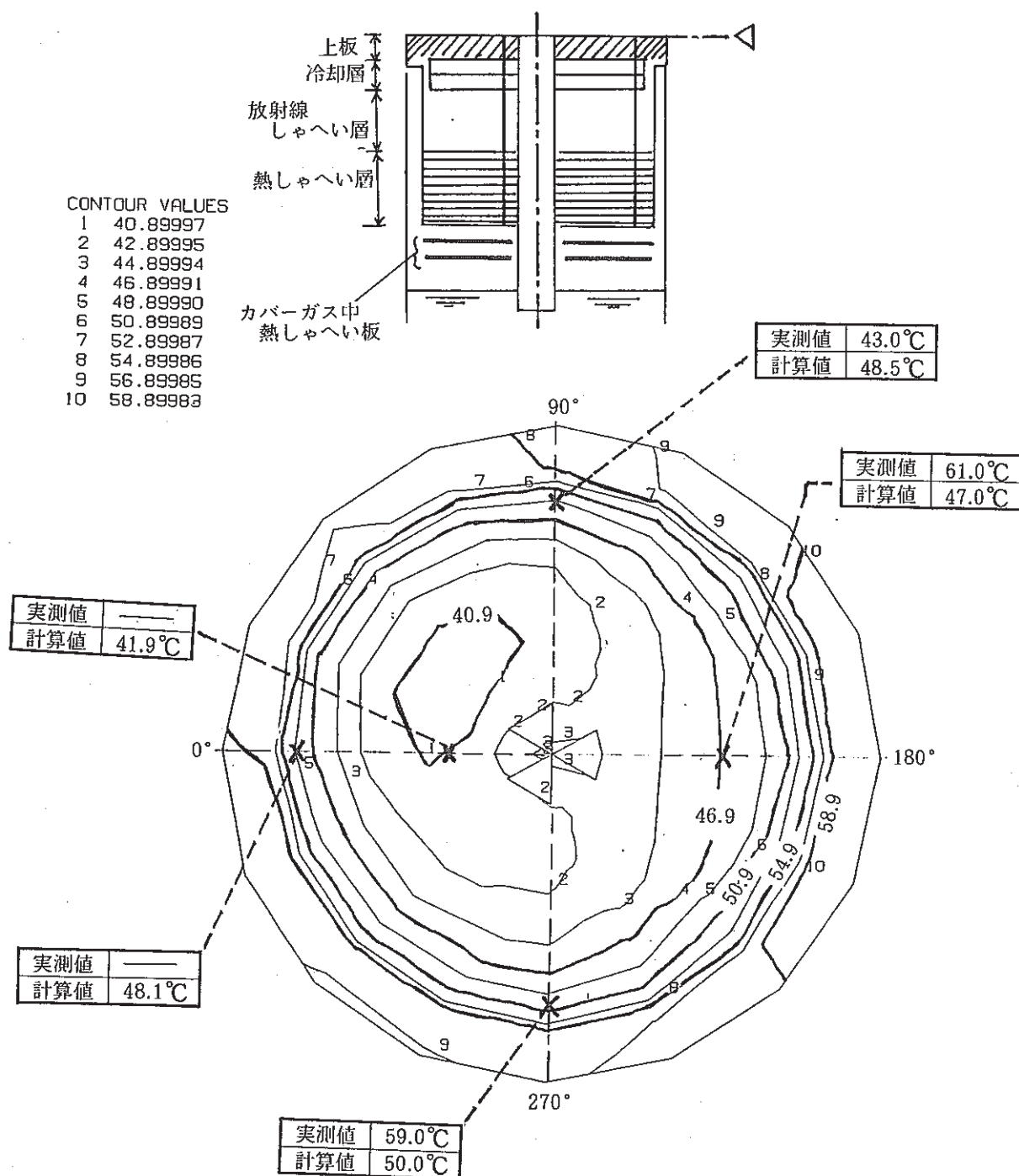


図 2.26 水平断面等温線図～上板～(25 層)

Fig. 2.26 Horizontal Section Isothermal Map (25 Section)

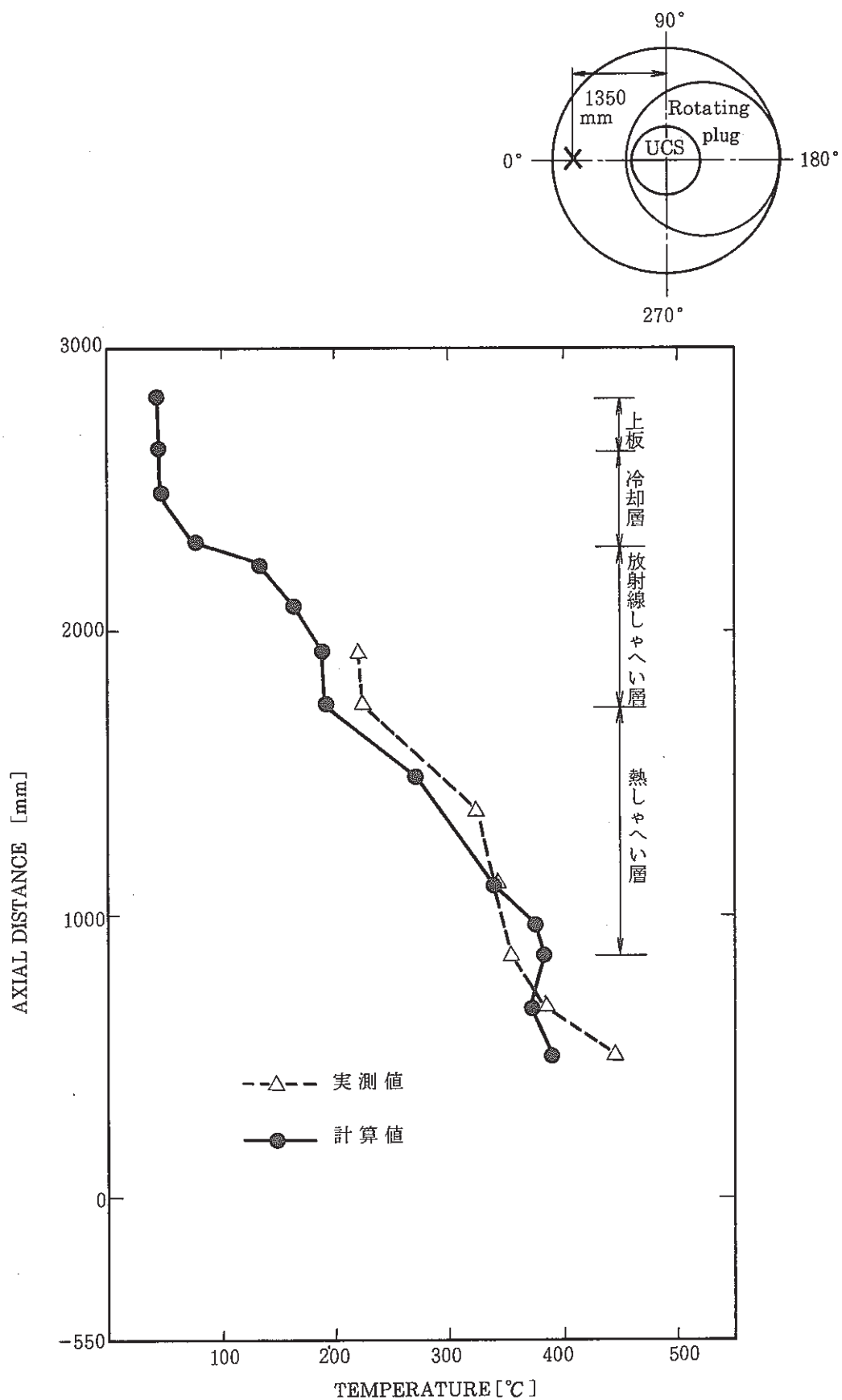


図 2.27 固定プラグ軸方向温度分布 (0°方向)

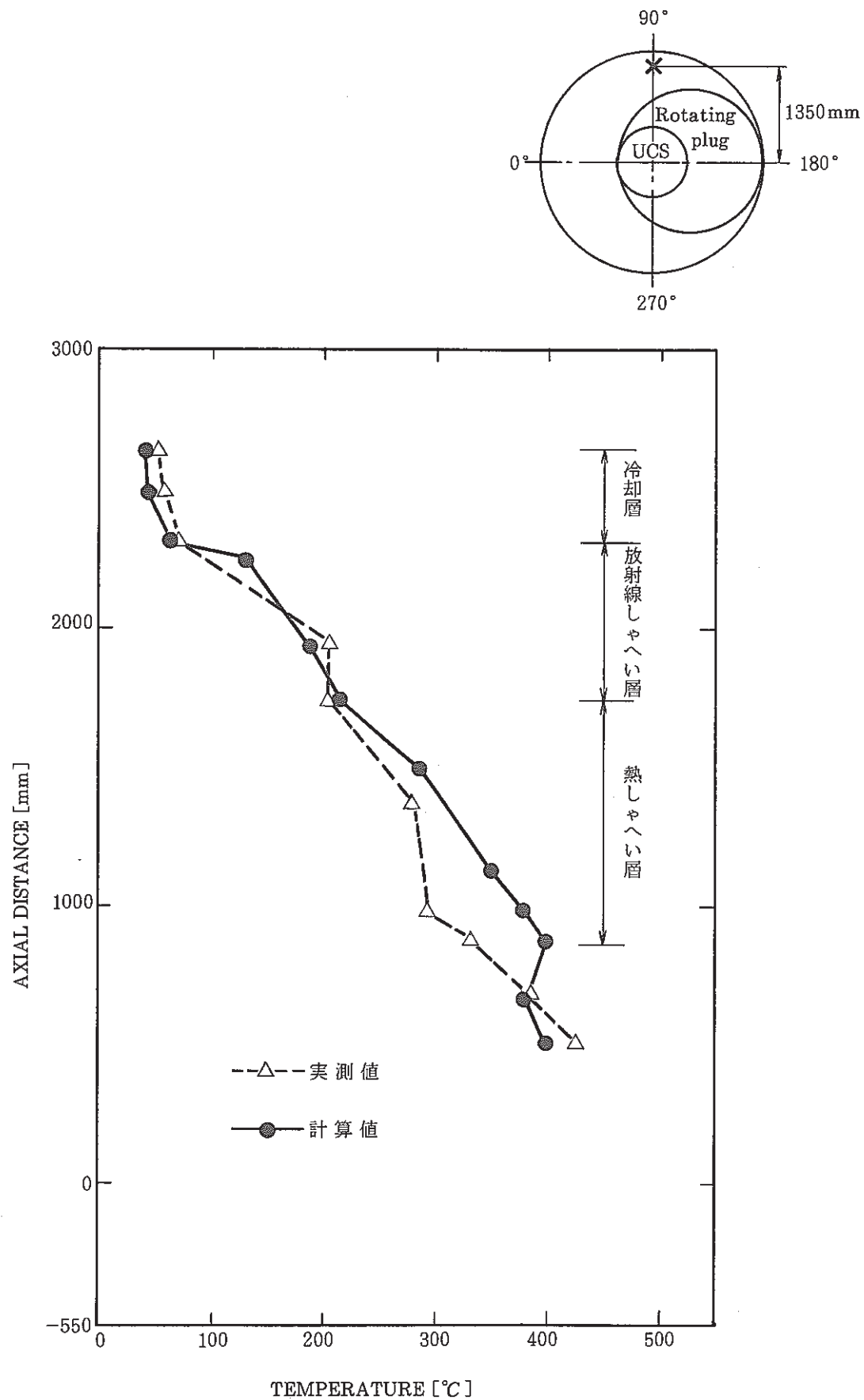


図 2.28 固定プラグ軸方向温度分布 (90° 方向)

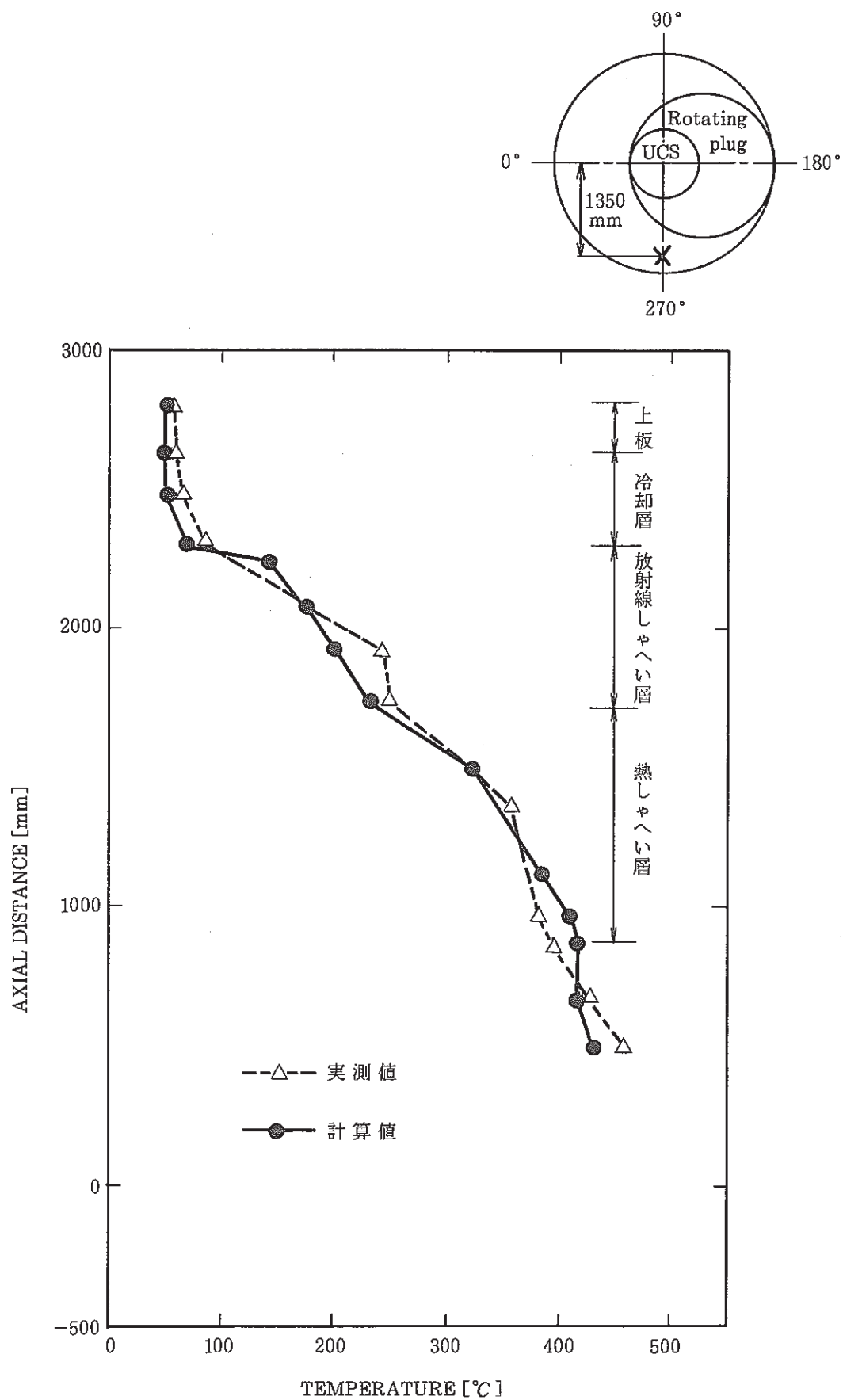


図 2.29 固定プラグ軸方向温度分布 (270°方向)

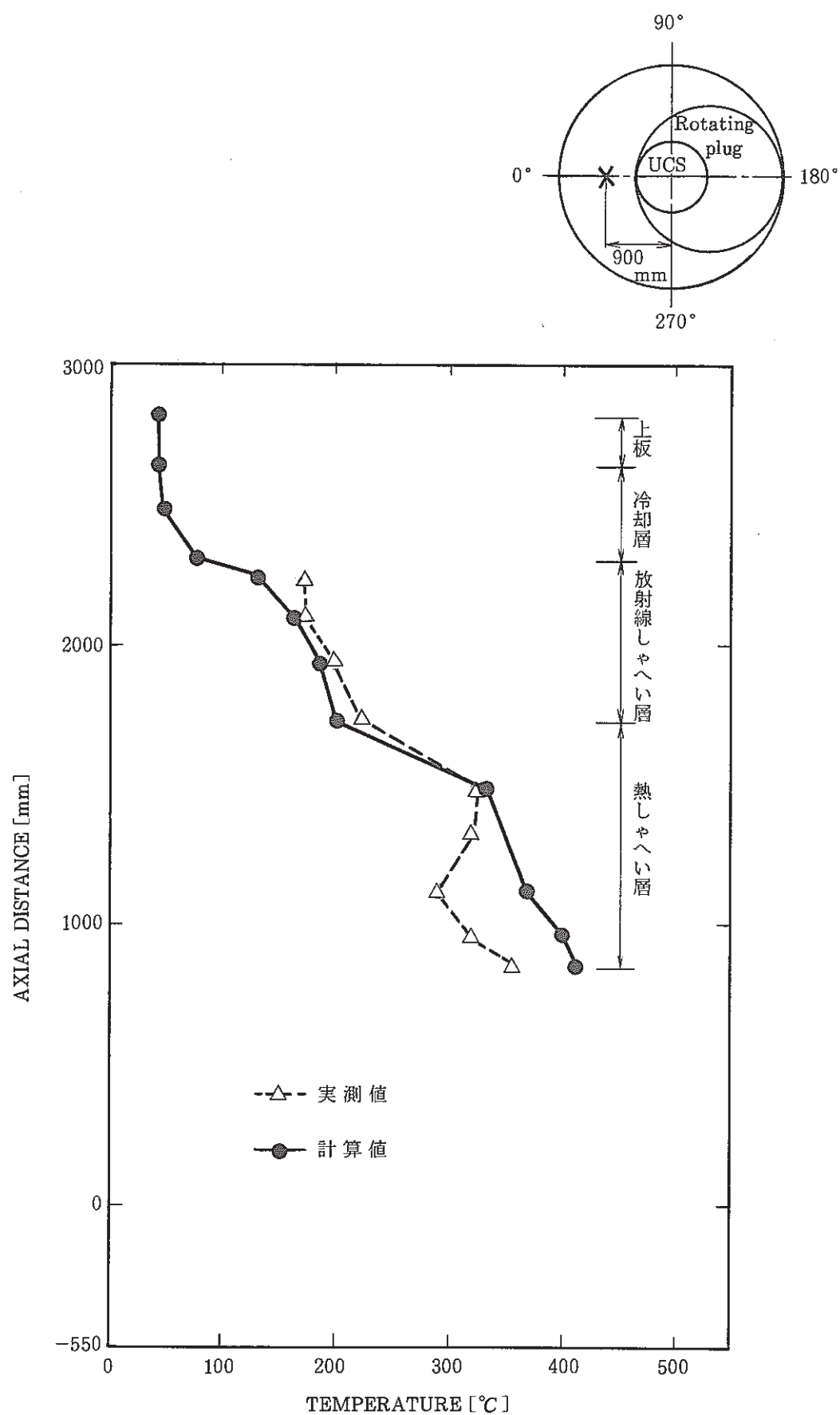


図 2.30 固定プラグ軸方向温度分布 (0° 方向)

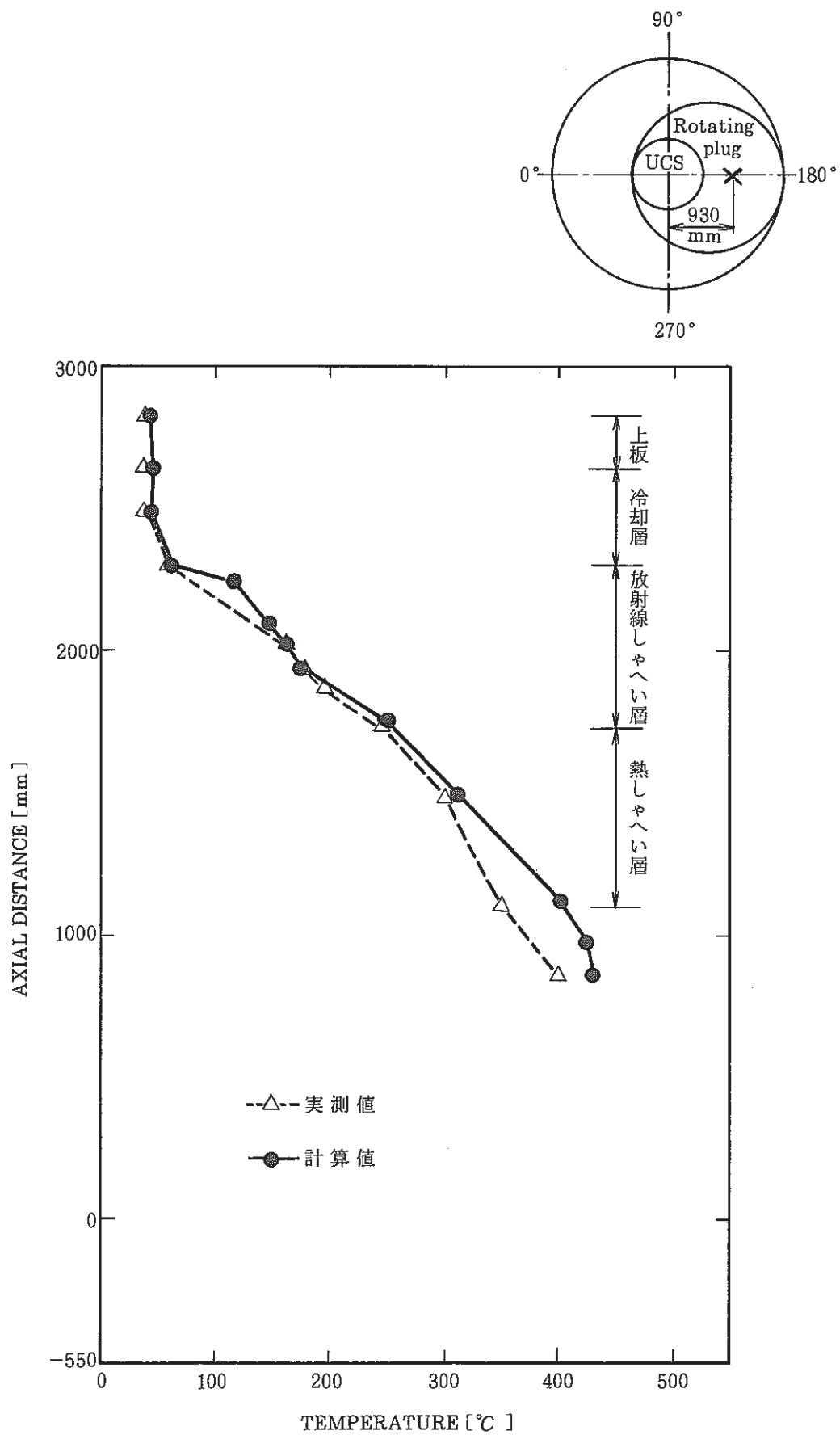


図 2.31 回転プラグ軸方向温度分布 (180° 方向)

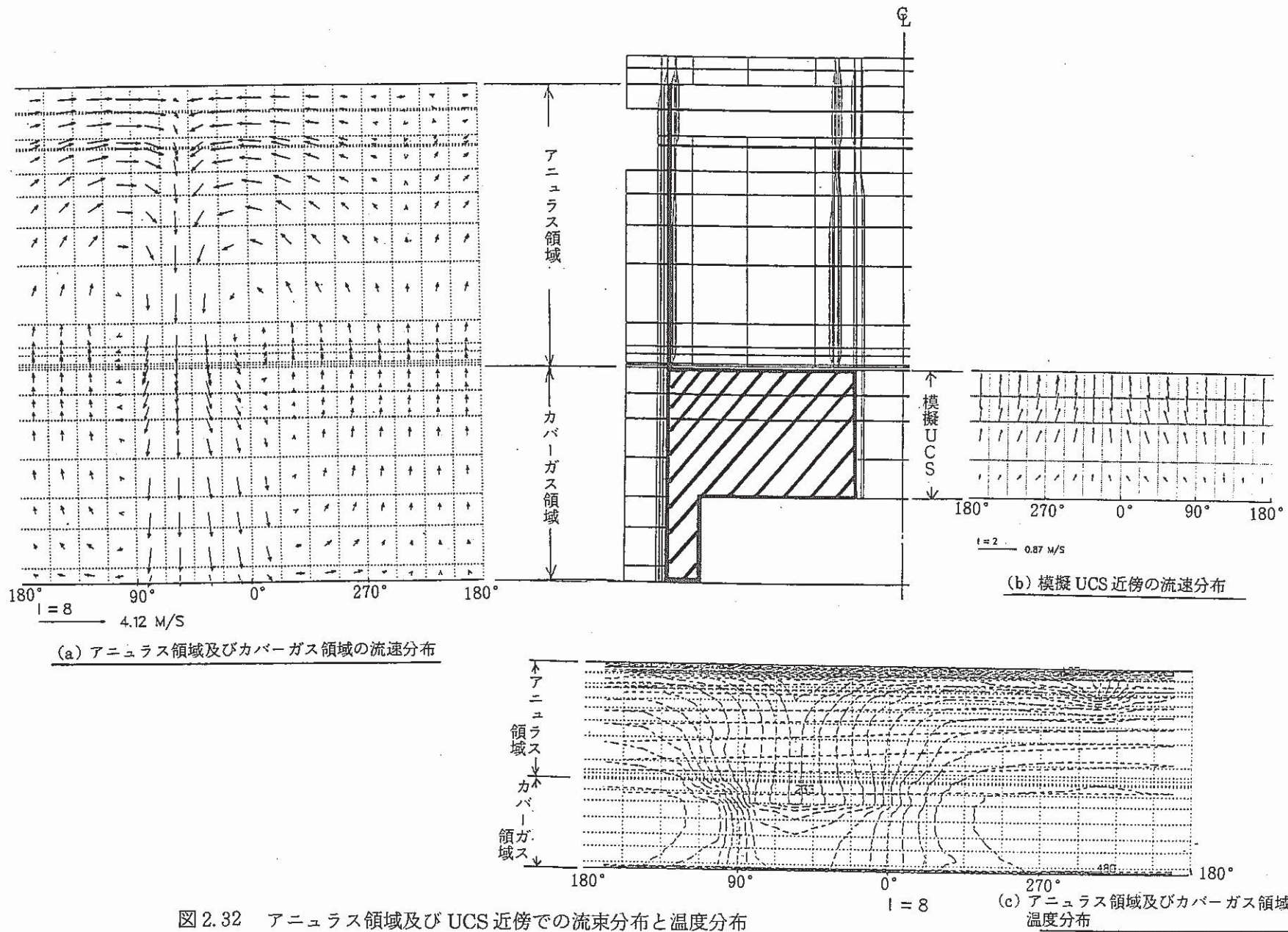


図 2.32 アニュラス領域及び UCS 近傍での流速分布と温度分布

Fig. 2.32 Velocity and Temperature Profile in the Annulus and UCS Region

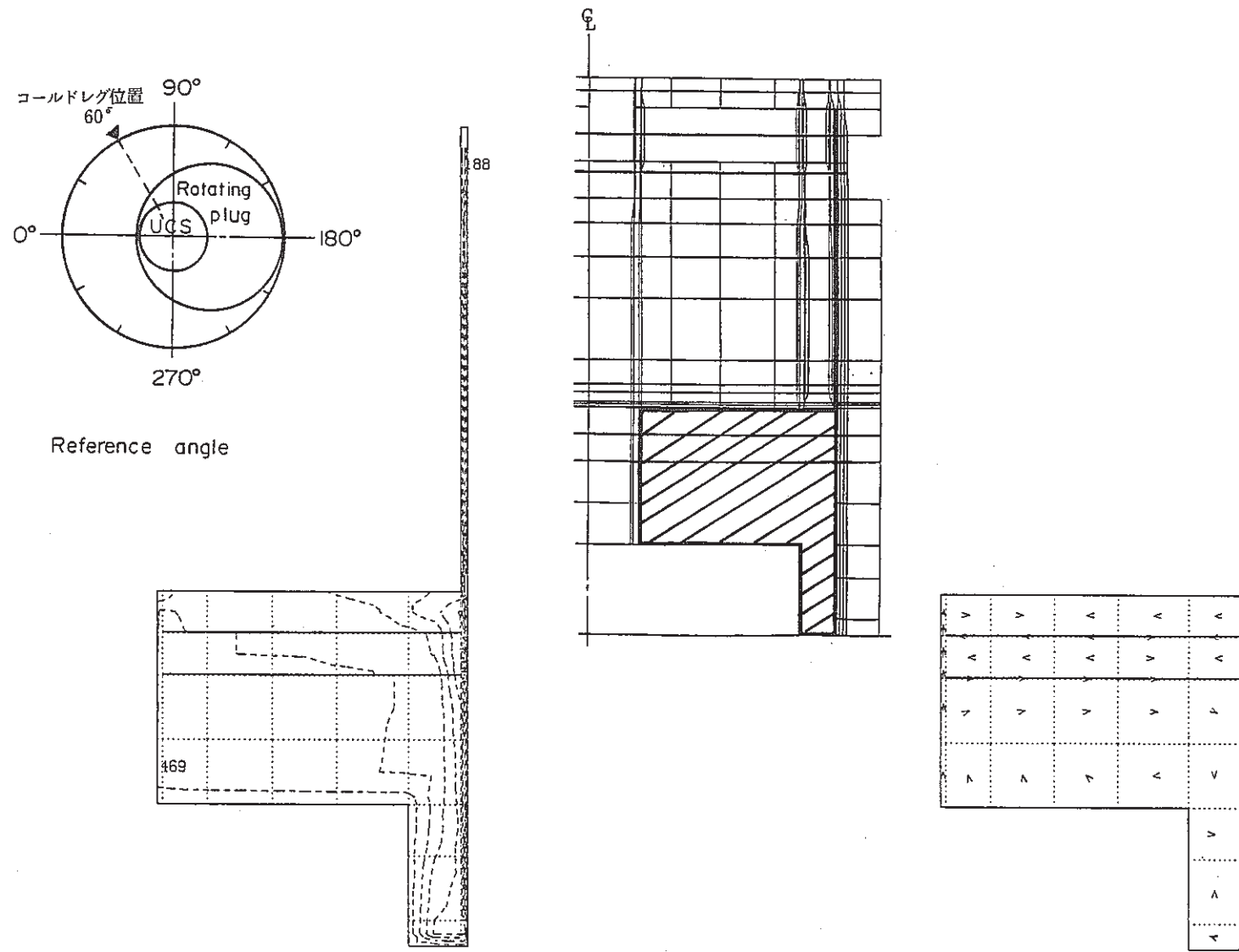


図 2.33 カバーガス領域の温度分布及び流束分布 (60°)

Fig. 2.33 Temperature and Velocity Profile in the Cover-gas region (60°)

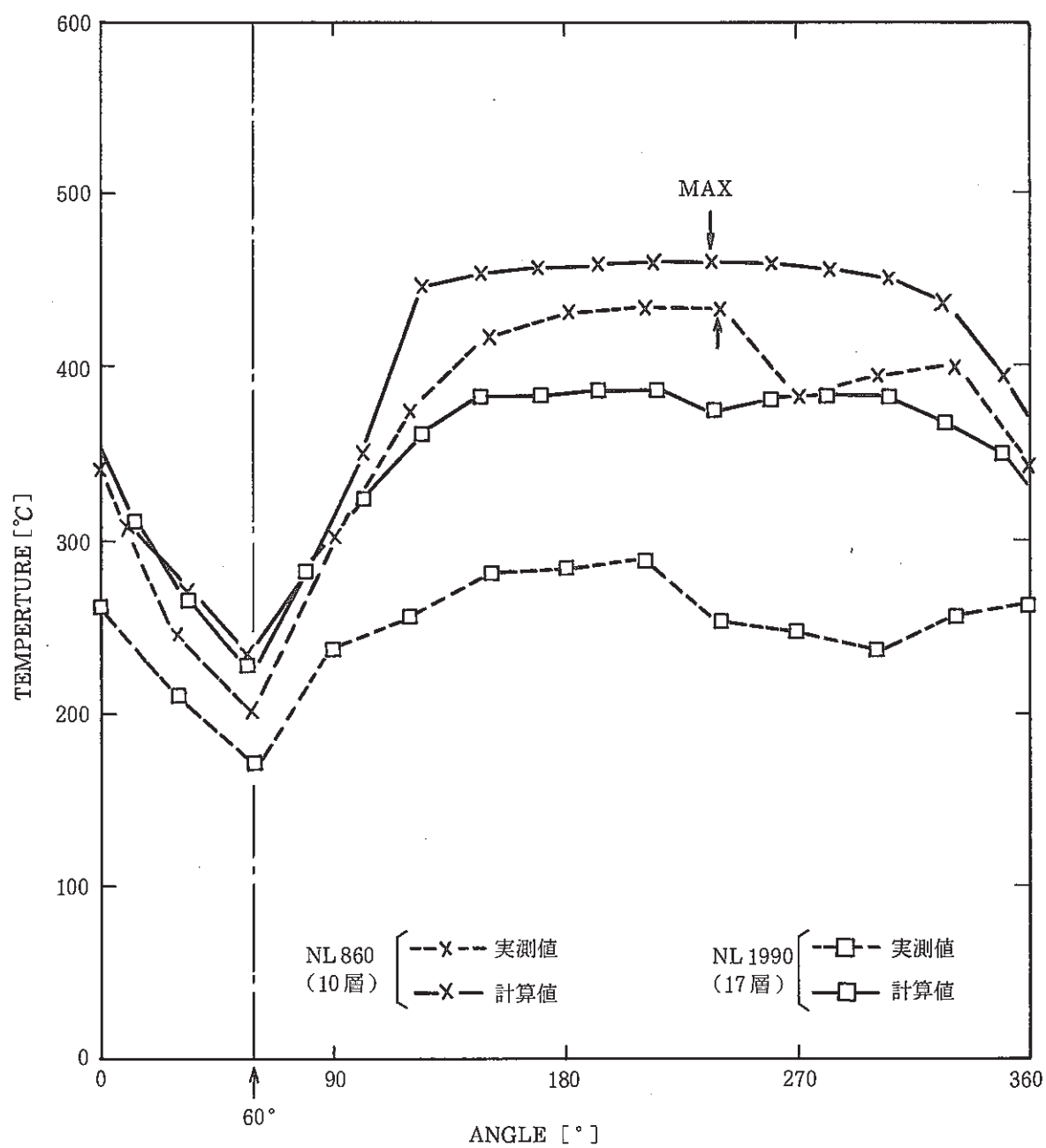


図 2.34 アニュラス領域の温度分布

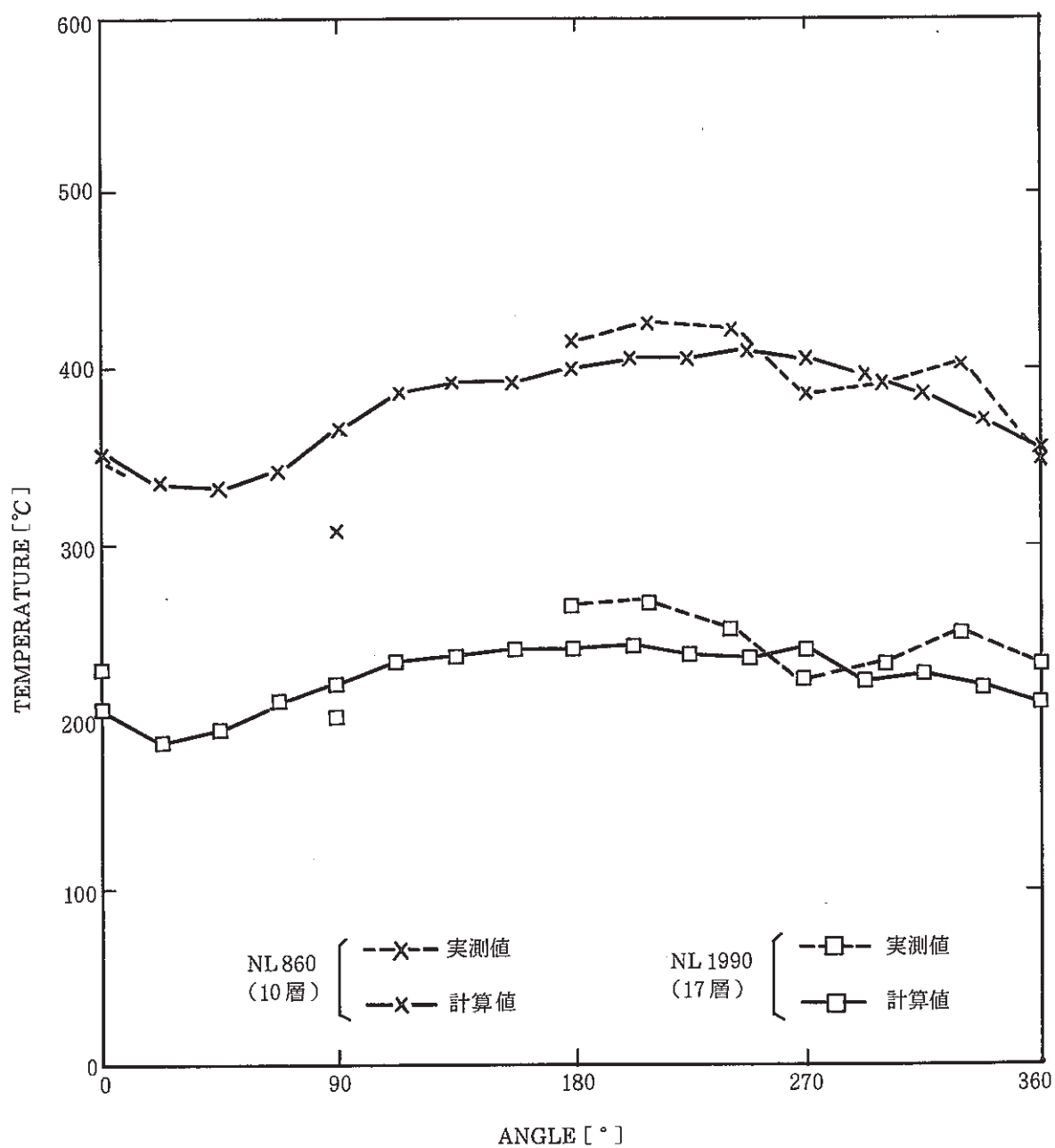


図 2.35 サーマルライナー温度分布

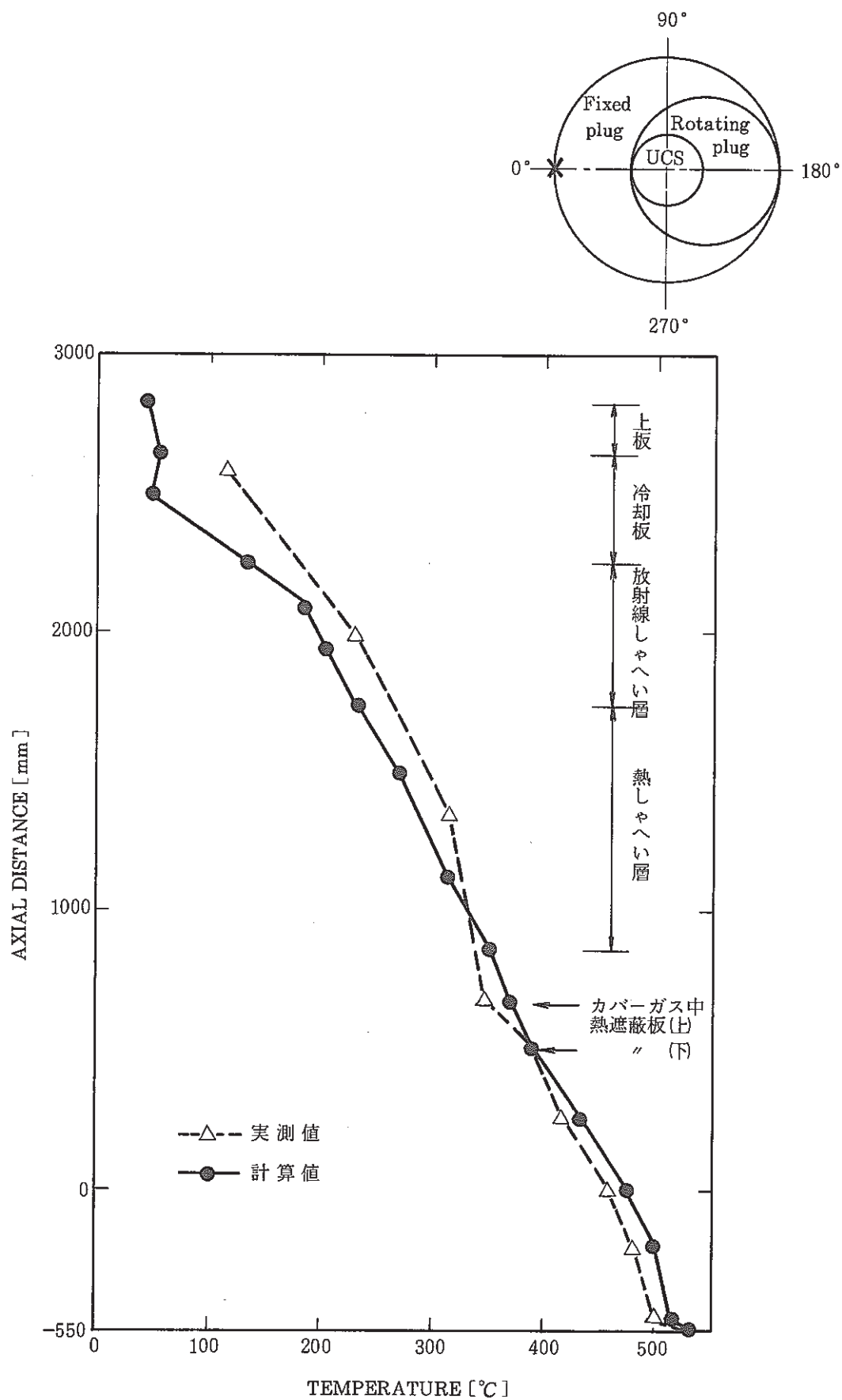


図 2.36 サーマルライナー軸方向温度分布 (0° 方向)

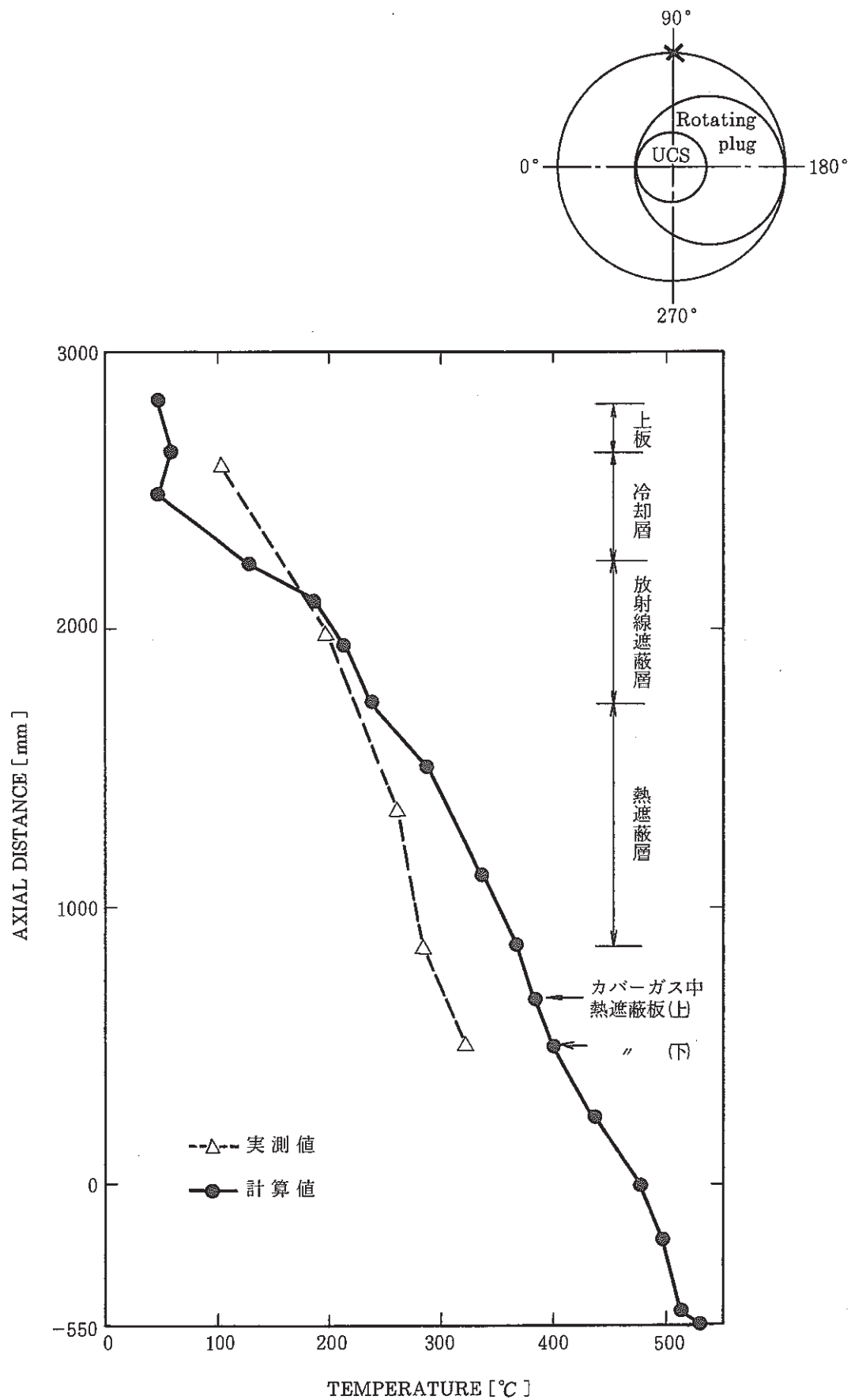


図 2.37 サーマルライナー軸方向温度分布 (90°方向)

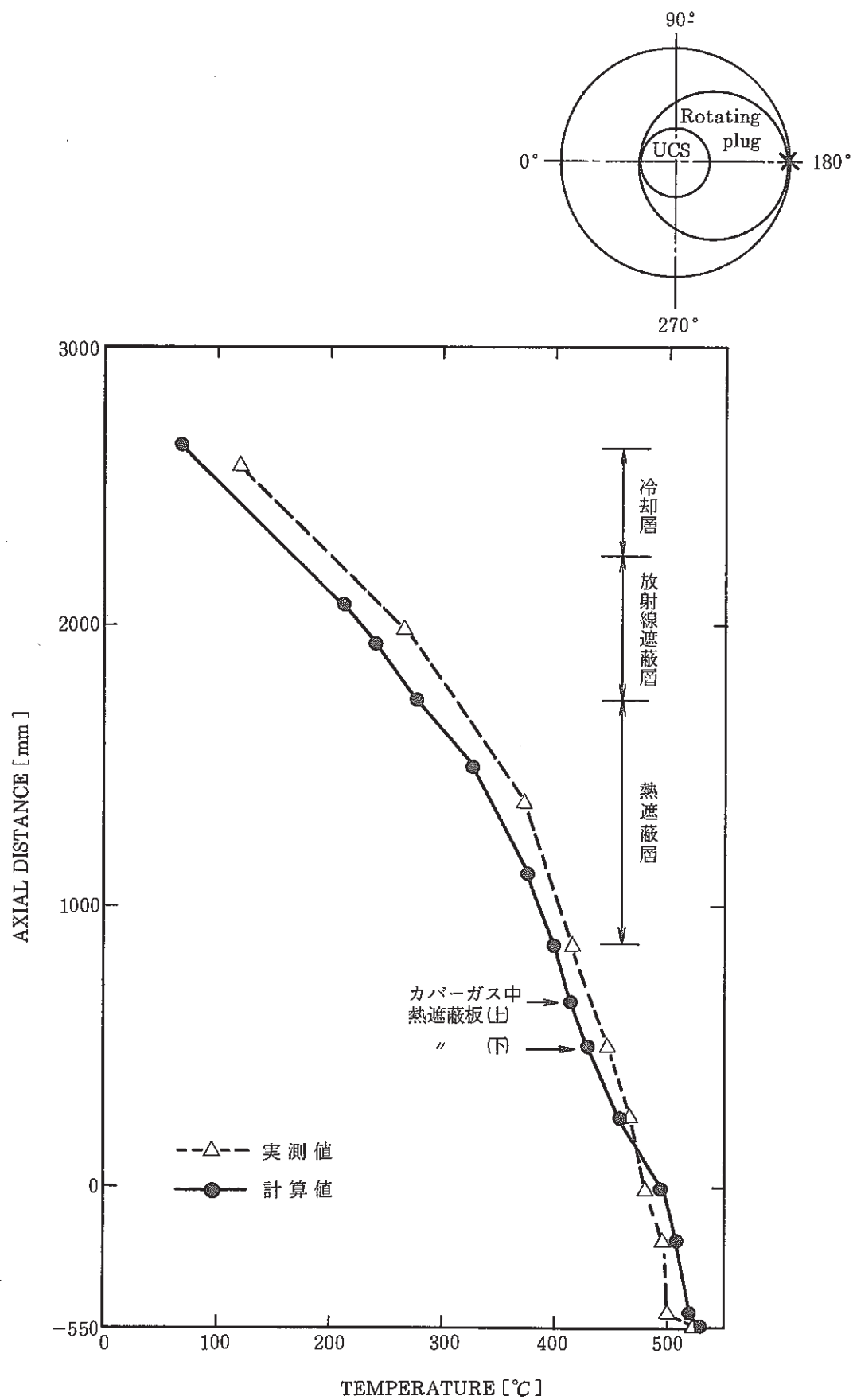


図 2.38 サーマルライナー軸方向温度分布 (180°方向)

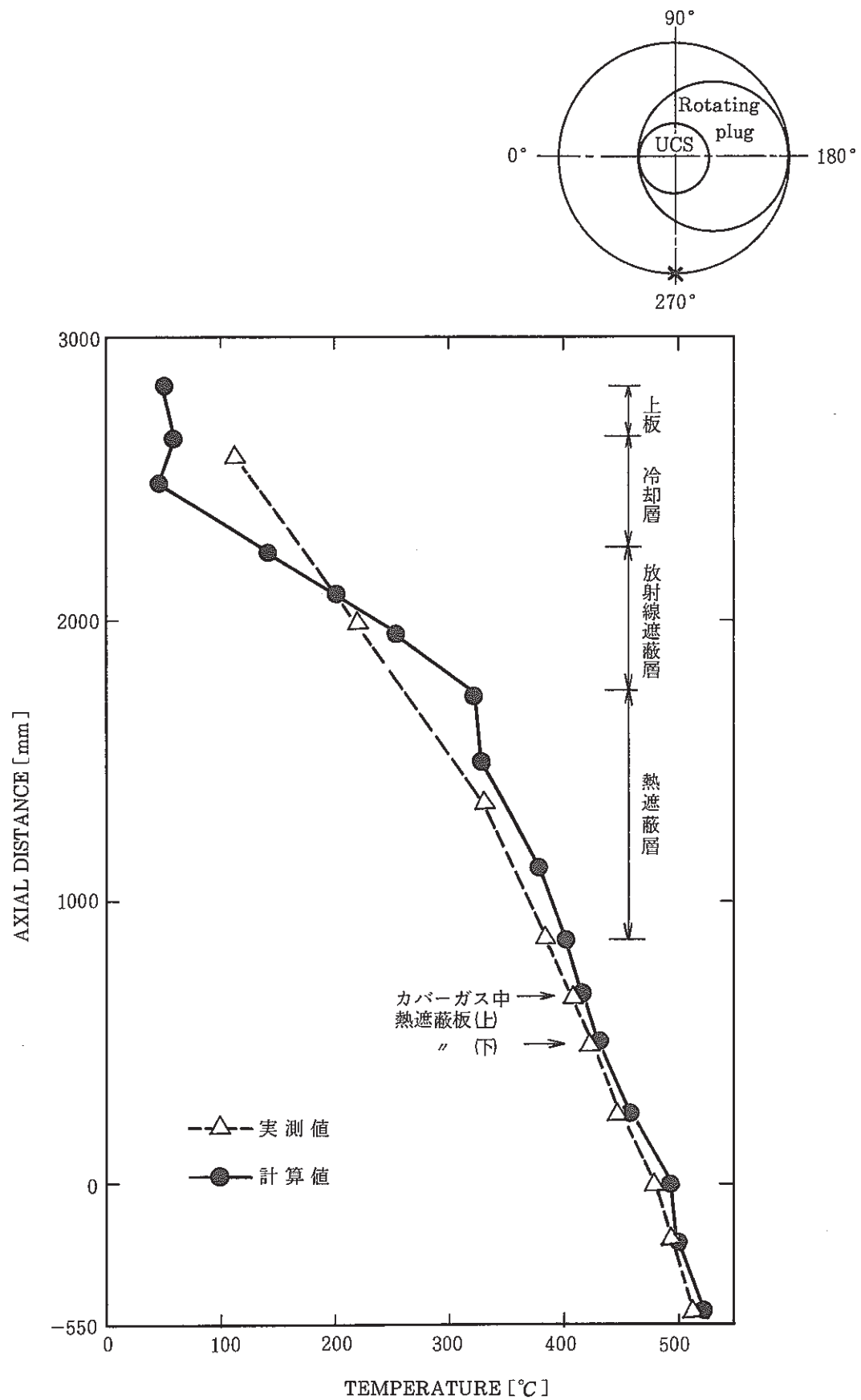
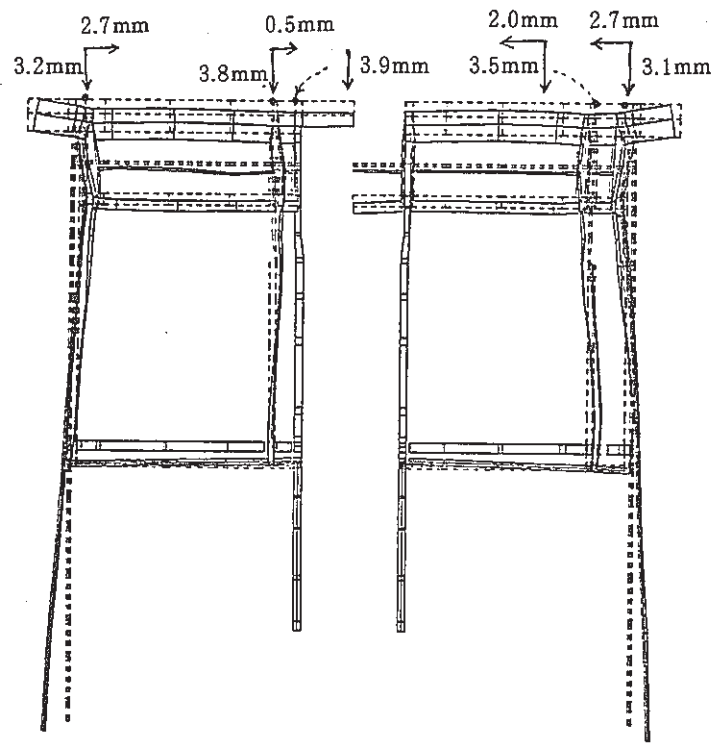
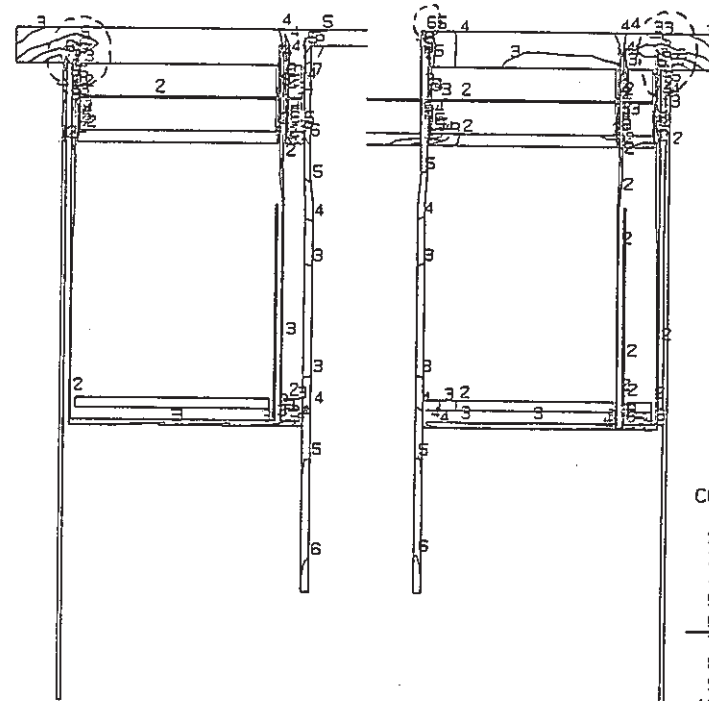


図 2.39 サーマルライナー軸方向温度分布 (270°方向)



DEFORMED SHAPE

DISP. SCALE  50.0000
 GEOM. SCALE  800.000
 [mm]



VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES [N/mm ²]	
1	-11.0000
2	8.000000
3	25.999999
4	46.000000
5	65.000000
6	84.000001
7	102.999999
8	121.999999
9	140.999999
10	159.999999

図 2.40 垂直断面変形図及び等応力線図 (0°-180°)

Fig. 2.40 Vertical Section Deformed Shape and Stress Contour Values (0°-180°)

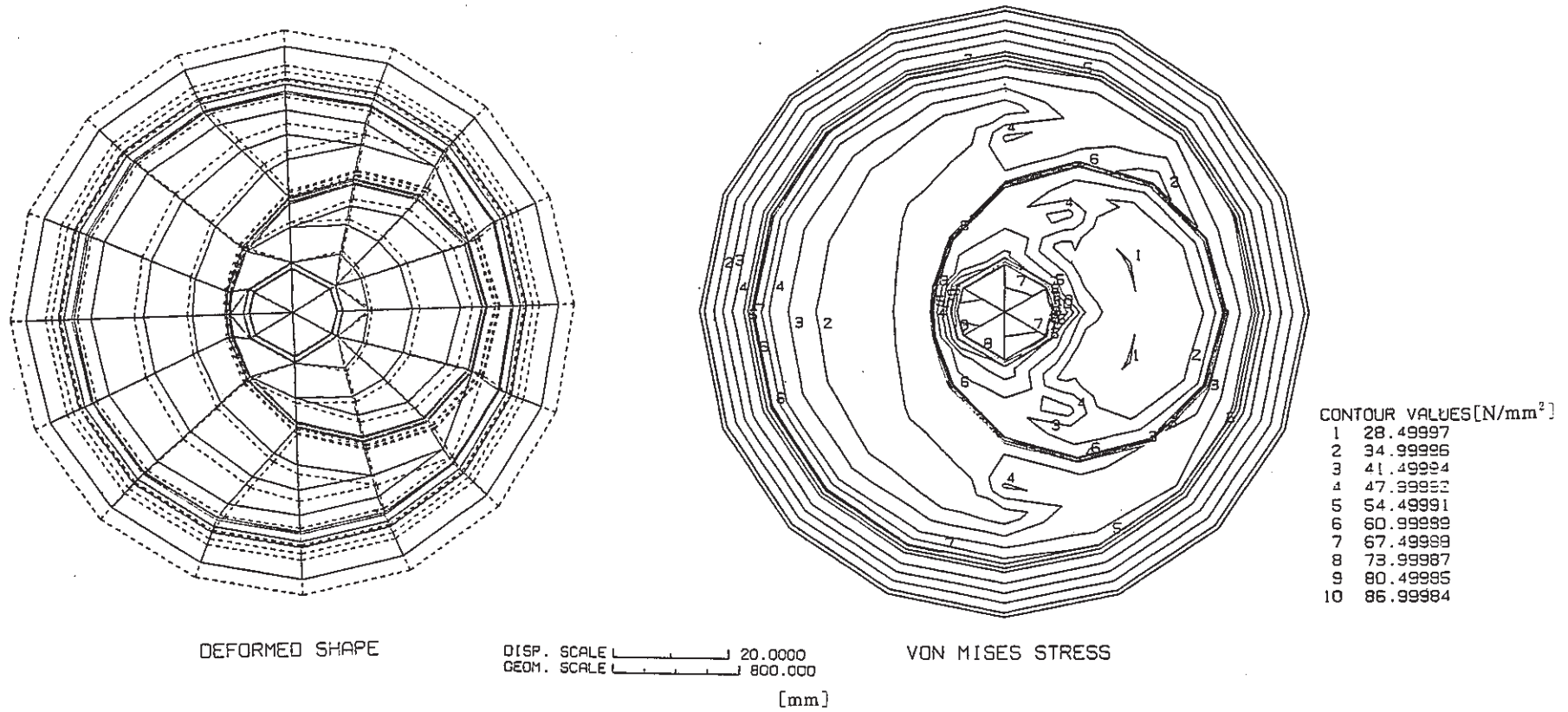


図 2.41 水平断面変形図及び等応力線図～上板～(25 層)

Fig. 2.41 Horizontal Section Deformed Shape and Stress Contour Values (25 Section)