

SNR300遮蔽プラグの3次元温度-応力分布解析

INTERATOM-PNCベンチマーク解析 (PNC側解析結果)

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)

SNR300遮蔽プラグの3次元温度-応力分布解析 - INTERATOM-PNC ベンチマーク解析 (PNC 側解析結果) -

大平 博昭*

要 旨

SNR300遮蔽プラグ外周にあるアニュラス状“h”-GapにおけるArガス自然対流と構造材との相互作用を評価するために、西ドイツInteratom社とPNCの間でそれぞれ所有のコードを用いたベンチマーク解析を行っている。

PNC 側は先に開発した、熱流体-構造物連成解析のためのインターフェイスプログラム (FLUSH) を用いて、SNR300遮蔽プラグの詳細形状データを基にナトリウム温度420℃及び556℃の2条件について、Arガスの自然対流に起因するガス及び構造材の3次元温度分析を実施した。得られた結果は次の通り。

- (1) 遮蔽プラグ上面温度は 106.6℃～ 176.0℃と比較的高い範囲で分布している。これは、ECC(Emergency Cooling Circuit)が発熱原として効いていることに因る。
- (2) “h”-Gapにおける周方向温度分布は最大81.0℃であった。又、これに起因する遮蔽プラグ上板での応力値は最大37.6N/mm²であった。

今後、Interatom 側での解析結果及び試験データとの比較・検討を通じて総合的に評価が行われる。

*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

3 Dimensional Temperature-Stress Analysis of SNR300 Shield Plug

INTERATOM-PNC Benchmark Calculations (PNC side report)

Hiroaki OHIRA^{*}

Abstract

In order to evaluate the natural convection of Ar gas and structures interaction of the upper closure system of SNR300, the benchmark calculations were carried out at both Interatom GmbH and PNC in the same conditions.

Three dimensional temperature distribution analysis of the cover gas and the shield plug, and thermal stress analysis of the shield plug were carried out in the different two cases of sodium temperature, 420°C and 556°C, using the Interface Program for Fluid and Structures Interaction, "FLUSH", at PNC. And following results were obtained;

- (1) The surface temperature on the upper plate was in the region of 106.6°C~176.0°C. These rather high values were caused by the ECC (Emergency Cooling Circuit) in the shield plug being performed as the heat source.
- (2) The maximum circumferential temperature difference was 81.0°C, and the maximum thermal stress on the upper plate caused by that ununiform temperature difference was 37.6 N/mm².

The technical information exchange meeting is going to be held in order to compare the PNC results with the SNR300 experimental data and the calculation results performed by using COMMIX/STINT code at Interatom.

* 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
3. FLUSH によるSNR300のベンチマーク解析	2
3.1 SNR300炉上部機構の概要	2
3.2 “h”-Gap空間のモデル化	2
(1) メッシュ分割	3
(2) 境界条件	3
(3) 初期条件	3
(4) Arガスの物性値	3
(5) 境界表面熱伝達率	3
(6) 対流防止板のモデル化	3
(7) 対流抵抗要素	4
(8) 収束条件	4
(9) 解法	4
3.2.2 遮蔽プラグ熱伝導解析モデル	4
(1) 構造及び断面形状	4
(2) 有限要素モデル	4
(3) 物性値	4
(4) 境界条件及び初期条件	5
(5) “h”-Gap空間を含んだモデル	5
3.2.3 遮蔽プラグ熱応力解析モデル	5
(1) 有限要素モデル	5
(2) 物性値	5
(3) 境界条件及び初期条件	6
3.3 解析結果及び考察	6
3.3.1 収束判定及び計算時間	6
3.3.2 温度分布解析	6
3.3.3 熱応力解析	7

4. 結 言	9
5. 今後の課題	10
6. 謝 辞	11
参 考 文 献	12
Appendix	63

List of Tables

Table 1	Characteristic length of "Monju" and SNR300	13
Table 2	Structures of "Monju" and SNR300	13
Table 3	Mesh sizes in z-direction	14
Table 4	Mesh sizes in ϕ -direction	14
Table 5	Mesh sizes in r-direction	15
Table 6	Volume Porosity in "h"-Gap	16
Table 7	Correlations of Force Structures	17
Table 8	Surrounding temperature and correlations	18
Table 9	Young's Modulus of Ferritic Steel	19
Table 10	Expansion Coefficients of Ferritic Steel	19
Table 11	CPU time ($T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$)	20
Table 12	CPU time ($T_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C}$)	21

List of Figures

Fig. 1	Upper closure system of SNR300	22
Fig. 2	"h"-gap around fixed plug	23
Fig. 3	Axial cross sections of "Monju" and SNR300	24
Fig. 4	Meshes of upper closure system	25
Fig. 5	Boundary temperature of "h"-Gap ($T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$)	26
Fig. 6	Boundary temperature of "h"-Gap ($T_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C}$)	27
Fig. 7	Boundary surface and heat transfer coefficients	28
Fig. 8	Heat source distribution	29
Fig. 9	Shielding plate and meshes	30
Fig. 10	Force structures	31
Fig. 11	Finite elements model of thermal conduction (except Ar gas)	32
Fig. 12	Nodes numbers	33
Fig. 13	Elements numbers	34
Fig. 14	Boundary conditions	35
Fig. 15	Boundary elements of heat transfer	36
Fig. 16	Boundary elements of heat transfer in "h"-Gap	37
Fig. 17	Surface boundary elements	38
Fig. 18	No.s of heat transfer elements	39
Fig. 19	Specified temperature	40
Fig. 20	No.s of radiation elements	41
Fig. 21	Radiation elements	42
Fig. 22	Heat transfer elements in "h"-Gap	43
Fig. 23	Finite elements of thermal stress	44
Fig. 24	Boundary conditions	45
Fig. 25	SNR300 upper closure system (θ -1, sodium temp. 420°C) ..	46
Fig. 26	SNR300 upper closure system (Z_M -4, sodium temp. 420°C)	47
Fig. 27	SNR300 upper closure system (θ -1, sodium temp. 556°C) ..	48
Fig. 28	SNR300 upper closure system (Z_M -4, sodium temp. 556°C)	49
Fig. 29	Designed temperature of "Monju" and the calculated temperature of SNR300 ($T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$)	50
Fig. 30	Designed temperature of "Monju" and the calculated temperature through FLUSH and 1-dim calculation ($T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$)	51
Fig. 31	Designed temperature of "Monju" and the calculated temperature of SNR300 ($T_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C}$)	52
Fig. 32	Designed temperature of "Monju" and the calculated temperature through FLUSH and 1-dim calculations ($T_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C}$)	53

Fig. 33	Comparison of the two cases through FLUSH and 1-dim. calculation	54
Fig. 34	SNR300 upper closure system (Theta-19, sodium temp. 420°C)	55
Fig. 35	SNR300 upper closure system (Theta-19, sodium temp. 420°C)	56
Fig. 36	SNR300 upper closure system (Z _M -4, sodium temp. 420°C) ...	57
Fig. 37	SNR300 upper closure system (Z _M -4, sodium temp. 420°C) ...	58
Fig. 38	SNR300 upper closure system (Theta-19, sodium temp. 556°C)	59
Fig. 39	SNR300 upper closure system (Theta-19, sodium temp. 556°C)	60
Fig. 40	SNR300 upper closure system (Z _M -4, sodium temp. 556°C) ...	61
Fig. 41	SNR300 upper closure system (Z _M -4, sodium temp. 556°C) ...	62

1. 緒 言

昭和62年、西ドイツInteratom 社からSNR300のシールドプラグアニュラス部で発生した温度布に関し、SNR300/Monju協力協定に基づく技術情報交換の要請があった。

そこで当室で開発したFLUSH を紹介したところ、FLUSHとInteratomのCOMMIX/STINTコードとのベンチマーク計算を行うこととなり、入力条件、試験データ、解析の方法等詳細について手紙及び電話にて調査しつつ、双方にてそれぞれ解析を行った。

本報告書では、運転条件の異なる2 ケース、すなわち、ナトリウム温度が420℃及び556℃、についてFLUSH により解析した結果を報告する。

なお、本解析結果は、Interatom 社からの提案により、技術交換会議の場でCOMMIX/STINTコードによる解析結果、及びSNR300の実測データと比較検討される予定である。

2. FLUSHによるSPINTAの解析

前回報告したSPINTA解析²⁾により、FLUSH は「もんじゅ」、大型炉に十分適用できることが検証されている。解析の詳細については、前回の報告書²⁾を参照のこと。

3. FLUSHによるSNR300のベンチマーク解析

3.1 SNR300炉上部機構の概要

Fig. 1 及び Fig. 2 に SNR300 の炉上部構造図を示す。

遮蔽プラグの構成は、ナトリウム液面から上方向へそれぞれ、熱遮蔽層、放射線遮蔽層及び上板より構成されている。固定プラグと回転プラグ間、及び炉容器壁と固定プラグ間には“h”型をしたArガスのアニュラス空間（いわゆる“h”-Gap）が存在する。

Fig. 3 に「もんじゅ」及びSNR300の縦断面簡易図を示す。本図は軸方向長さを実寸大縮尺したものである。又、Table 1 及び Table 2 は上記 2 者の主要寸法及び遮蔽プラグ構造を比較してもので、次のようになる。

- (1) 遮蔽プラグの厚さはほぼ等しい。
- (2) 上板厚さはほぼ等しい。
- (3) 「もんじゅ」にはN₂ガス冷却層があるが、SNR300には冷却層は存在しない。
- (4) 「もんじゅ」では放射線遮蔽層はSUS304で厚さ545mm であるのに対して、SNR300では厚さ約1300mmの層の中に径約8mmの玄武粉末が自然充填されている。
- (5) 熱遮蔽層は両者とも存在するが、「もんじゅ」では885mm、SNR300では約550mmである。
- (6) SNR300では、ECC(Emergency Cooling Circuit)による発熱源が遮蔽プラグの内部に存在する。このECC は、常時ナトリウム液面下からナトリウムを吸い上げ、炉外で熱交換を行っているため、ナトリウム液面温度を等しくなっている。

3.2 解析条件

主な解析条件はInteratom 社より提供され、一部FLUSH 用アレンジして解析を行った。Appendix B に提供された資料を示す。主要な解析条件は次の通り。

3.2.1 “h”-Gap空間のモデル化

(1) メッシュ分割

Fig. 4 にメッシュ分割図を示す。軸方向は、Table 3 に示したように22分割、周方向はTable 4 に示したように36分割、半径方向はTable 5 に示したように18分割である。

(2) 境界条件

Fig. 5 にはTsodium = 420°C (Tsodium ; ナトリウム温度) 時の、又、Fig. 6 にはTsodium = 556°C時の境界表面幼要素の温度を示す。これらの温度は、後で述べるように、まずFINAS で“h”-Gapをも含めたモデルで予備解析を行ない、次に得られた境界面温度を周方向に平均して求めた値である。

(3) 初期条件

“h”-Gap内の初期温度は全ての要素で300°Cとした。

(4) Arガスの物性値

Arガスの物性値は、Interatom 社より提供された次の値を用いた。

- | | | |
|-------------|--|----------------------|
| (i) 密度 | : $\rho = 1.944 - 236 \times 10^{-3} \cdot \theta$ | [kg/m ³] |
| (ii) エンタルピー | : $h = 1.423 \times 10^5 + 521 \cdot \theta$ | [J/kg] |
| (iii) 熱伝導率 | : $\lambda = 2.86 \times 10^{-2}$ (一定) | [W/mk] |
| (iv) 動粘性係数 | : $\nu = 2.34 \times 10^{-6} + 4.34 \times 10^{-8} \cdot \theta$ | [kg/m. s] |
| | θ : 温度 [°C] | |

(5) 境界表面熱伝達率

Fig. 7 に境界表面番号及び熱伝達率を、又、Fig. 8 には“h”-Gap内での発熱源を示す。これらの値はいずれもInteratom 社より提供された値である。

(6) 対流防止板のモデル化

Fig. 9 は自然対流防止板(Shielding plate)を周方向に展開した図である。本プレートは合計36枚より構成され、各々のプレート間には約7.15mmのギャップが、又、60°毎に溶接部を検査するための径230mmの孔(Inspection hall)が存在する。詳細はAppendix BのAbb. 13参照のこと。

このプレートがFig. 4の斜線で示した部分であり、斜めに設置されているため、FLUSHではArガスの対流計算にはTable 6に示したVolume porosity⁴⁾で、又、熱伝導計算に関して

は後で述べるように等価熱伝導率を用いてモデル化した。

(7) 流動抵抗

Fig. 10に流動抵抗要素を、又、Table 7に圧力損失を与える式を示す。

(8) 収束条件

AQVAでの収束条件は、2 ケースとも以下の通り⁴⁾。

(i) $ESP1 = 5.0 \times 10^{-4}$

(ii) $ESP3 = 1.0 \times 10^{-4}$

(iii) $ESP5 = 1.0 \times 10^{-4}$

(9) 解法

Arガス自然対流計算には以下の解法⁴⁾を使用した。

(i) 運動力、及びエネルギー計算

Implicit (SIMPLEST) 版

(ii) 圧力に関するポアソン方程式

ICCG法

3. 2. 2 遮蔽プラグの熱伝導解析モデル

(1) 構造及び断面形状

遮蔽プラグのメッシュ分割図をFig. 4に示す。図中 $r = 1355 \sim 2614 \text{mm}$ 間 ($R_M = 2$) を、Table 5に示したように、さらに6分割した。これは、 $R_M = 2$ と $R_M = 3$ でのメッシュ間隔差が大き過ぎるため、解が不安定となることを避けるためである。なおこのことはInteratom 社の了解を得ている。

(2) 有限要素モデル

Fig. 11～Fig. 13に熱伝導要素モデルを示す。本モデルには、SPINTA解析と同様、熱伝導8節点要素 (HHEX 8) を用いた。

(3) 物性値

物性値は、基本的にはInteratom 社より提供された値を用いた。AppendixB のAbb. 1～Abb. 9を参照のこと。

ただし、Shielding Plateに関しては周方向メッシュ間隔とShielding Plate幅が一致せず、しかもInspection hall が存在するのでAppendixA に示した方法で等価熱伝導を算出

し、この値を用いた。

(4) 境界条件及び初期条件

境界条件をFig. 14～Fig. 21に示す。規定温度、熱伝導率及び輻射率はAbb. 10～Abb. 12を参照のこと。

ここで、Abb. 10で与えられている規定温度は、要素の中心温度でありFINAS の入力フォーマットとは一致しない³⁾。したがって、Interatom社の了解を得た上でTable 8 に示した関係式を用いた。

(5) “h” -Gap空間を含んだモデル

“h” -Gapの初期境界温度を求めるために、FINAS による“h” -Gapを含んだモデルで予備解析を行った。本モデルのArガス空間を除く部分は上記モデルと同様であるが、Arガス空間は熱伝導8節点要素(HHEX 8)及びFig. 22に示した黒塗りで示した熱伝達リンク8節点要素(CSLINK 8)でモデル化した。各々の物性値は、3.2.1項(4)に示した熱伝達率、及びAbb. 12に示した熱伝達率を用いた。

本モデルによる解析結果から、“h” -Gap内のArガスと構造物との境界温度を求め、これらの値を周方向に平均してAQUAの入力値とした。

3.2.3 遮蔽プラグ熱応力解析モデル

(1) 有限要素モデル

熱応力解析における有限要素モデルは、フェライト及びオーステナイトのみモデル化した。Fig. 23に有限要素モデルを示す。使用要素は8節点要素(HEX 8)である。

(2) 物性値

オーステナイトのヤング率、ポアソン比及び熱膨張係数はFINAS のSUS304の材料データライブラリー³⁾を使用した。

フェライトについてはTable 9 及びTable 10に示す。ポアソン比以外は温度依存性を考慮した。

(3) 境界条件及び荷重条件

Fig. 24に境界条件を示す。又、荷重条件は、熱伝導解析で得られた結果(熱荷重)、フェライトとオーステナイトの自重、及び玄武岩の重さ($P = 2024 \text{ Kg/m}^2$)とした。

3.3. 解析結果及び考察

3.3.1 収束判定条件及び計算時間

収束判定条件は、 $T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$ では $\text{NRTD}^{1)} \leq 1.0 \times 10^{-3}$ 、 $T_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C}$ では $\text{NRTD} \leq 5.0 \times 10^{-4}$ とした。

実績は、各々、 7.0×10^{-4} 及び 4.0×10^{-4} であった。

Table11及びTable12に各ケースの各々のジョブステップでのCPU 時間を示す。

3.3.2 温度分布解析

FLUSH コードによる温度分布解析結果をFig. 25～Fig. 29に示す。これらの図には「もんじゅ」の設計温度を比較したもの、及びSNR300のECC による発熱源が存在しない場合の軸方向1次元温度分布も示した。

以下に各ケースについて結果を列挙する。

$T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$

- (1) 本解析体系内には、ECC (Emergency Cooling Circuit) による発熱源が存在し、遮蔽プラグ上面温度は、 $106.6 \sim 167.6^{\circ}\text{C}$ となった。

これは発熱源が存在しない場合の軸の方向1次元温度分布より、約 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 程度高くなっている。(Fig. 30)

- (2) “h”-gapに於いて、周方向最大温度差は 74.5°C となった。
- (3) “h”-gap中のArガス自然対流の最大流速は、以下の通りとなった。

半径方向…………… 0.108m/s

周方向…………… 0.234m/s

軸方向…………… 0.392m/s

- (4) SNR300で、発熱源が存在しない場合の軸方向1次元温度分布は、熱遮蔽層に於いて、約 270°C 温度が下がっている。この温度降下は「もんじゅ」熱遮蔽層での温度降下とほぼ等しい。(Fig. 30)

- (5) SNR300の玄武岩粉末層では、FLUSH による解析結果と軸方向1次元温度分布計算は、共に約 70°C 温度が降下する。(Fig. 25及びFig. 26)

- (6) FLUSH による解析（発熱源が存在）では、熱遮蔽層で約 120°C しか温度が下がらない。(Fig. 29)

Tsodium = 556°C

- (1) 本解析体系にもECCによる発熱源が存在し、遮蔽プラグ上面温度は、132.6～176.0 °Cとなった。(Fig. 31)
- (2) “h” -Gapに於いて、周方向最大温度差は81.0°Cとなった。
- (3) “h” -Gap中のArガス自然対流の最大流速は、以下の通りとなった。
半径方向……………0.084m/s
周方向……………0.198m/s
軸方向……………0.343m/s
- (4) SNR300で、発熱源が存在しない場合の軸方向1次元温度分布は、熱遮蔽層では、約336°C温度が下がっている。(Fig. 32)
- (5) FLUSH による解析（発熱源が存在）では、熱遮蔽層で約180°C温度が下がっている。(Fig. 32)

Tsodium = 420°Cと556°Cとの比較

- (1) 熱遮蔽層上部では、殆ど温度は下がらない。(Fig. 33)
(Tsodium = 420°Cでは20°C, 556°Cでは約5°C)
これは、発熱源が存在するためと考えられる。
- (2) 供に、“h” -Gap下面より上部での温度は、ほぼ等しい。(Fig. 33)

3.3.3 熱応力解析

Fig. 34～Fig. 37にTsodium=420°Cの代表的な結果を、そしてFig. 38～Fig. 41に Tsodium=556°Cの代表的な結果を示す。又、以下に結果を要約する。

Tsodium = 420°C

- (1) SNR300の上板での最大熱応力は約37.6 [N /mm²] が得られた。
- (2) 遮蔽プラグ上面での最大変形量は半径方向に約4.5mmとなった。

Tsodium=556°C

- (1) SNR300の上板での最大熱応力は約38.1 [N /mm²] が得られた。
- (2) 遮蔽プラグ上面での最大変形量は半径方向に約4.2mmとなった。

4. 結 言

当室で開発したFLUSH を用いてSNR300炉上部機構の解析を実施したところ、次の結果が得られた。

- (1) 本解析体系内には、ECC (Emergency Cooling Circuit) による発熱源が存在し、遮蔽プラグ上面温度は、

$T_{\text{sodium}}=420^{\circ}\text{C}$ の時、 $106.6\sim 167.6^{\circ}\text{C}$

及び、

$T_{\text{sodium}}=556^{\circ}\text{C}$ の時、 $132.6\sim 176.0^{\circ}\text{C}$

となった。これらの値は「もんじゅ」の最高許容温度 70°C を上回っている。

- (2) “h” -Gapに於いて、周方向の最大温度差は上記2 ケースで、各々 74.5°C 、及び 81.0°C となった。又、Arガスの自然対流の周方向最大流速は各々、 0.234m/s 、及び 0.198m/s となった。

- (3) 遮蔽プラグの熱応力では、上面での応力分布は妥当なものと評価された。

5. 今後の課題

FLUSH による解析結果では、遮蔽プラグ上板での温度が「もんじゅ」での許容温度70℃を大幅に上回っている。この点について、Interatom社に問い合わせたところ、556℃の時の予備解析結果の概要しか得られなかったが、それによると、FLUSH による上板での温度は予備解析での平均温度より約30℃高くなっている。どちらの値が試験データに近いかは今後明らかにされる予定である。

又、本解析結果はInteratom社と技術交換会議を催し、実機運転データ、及びCOMMIX/STINTの結果と比較・検討される予定である。

6. 謝 辞

本解析は、本社開発推進調整部の松野部長の多大な御尽力により遂行できたもので、心から謝意を表したい。また、報告書作成に当り多大な御指導を頂いた機器室の亀井室長、久保田担当役及び小鷹GLに厚く御礼申し上げる次第です。

参 考 文 献

- 1) 熱流体－構造物解析のためのインターフェイスプログラム（FLUSH）の開発
PNC SN9410 88-179
- 2) FLUSHによる遮蔽プラグの熱流力－熱応力特性の解析
PNC SN9410 88-182
- 3) 汎用非線形構造解析システムFINAS
使用説明書
PNC N9520 87-004
- 4) 単相多次元熱流動解析コードAQUA
入力マニュアル
PNC N9520 87-011

Table 1 Characteristic length of "Monju" and SNR300

	「もんじゅ」	SNR300
(1) 固定プラグ 1) 最大径 2) 全高さ 3) 遮蔽胴外径	9480 3700 7590	約11900 約 3680 約 6450
(2) 回転プラグ 1) 最大径 2) 上部胴内径 3) 遮蔽胴外径 4) 全高さ	単回転プラグ 5290 4850 4890 2800	二重回転プラグ
(3) 原子炉容器 1) 下部プレナム胴 2) 上部プレナム胴 3) 遮蔽プラグ挿入部 4) 内 筒 5) 支持フランジ 最大外径 6) 全高さ	(内径×厚さ) 7060×50 7060×50 7780×50 6520×40 8760 17780	(内 径) 6700 6700 6700 6700 約15200
(4) ギャップ幅 1) 固定プラグと 回転プラグ間 2) 炉容器と 固定プラグ間	10/25mm 10/25mm	

Table 2 Structures of "Monju" and SNR300

	「もんじゅ」	SNR300
1) 熱遮蔽層	885mm	約570mm
2) 放射線遮蔽層	545mm (SUS304)	約1300mm (玄武岩粉末)
3) ガス冷却層	390mm	無 し
4) 上 板	620mm (回転プラグ) 1500mm (固定プラグ)	約600mm
5) その他	30mm (各層間ギャップ)	

Table 3 Mesh sizes in z-direction

Z_M	1	2	3	4	5	6	7
ΔZ [m]	0.100	0.155	0.105	0.120	0.120	0.100	0.130
Z [mm]	6535 $\pm$ 100	6690	6795	6915	7035	7135	7265

Z_M	8	9	10	11	12	13	14
ΔZ [m]	0.130	0.130	0.099	0.099	0.112	0.050	0.034
Z [mm]	7395	7525	7624	7723	7835	7885	7919

Z_M	15	16	17	18	19	20	21	22
ΔZ [m]	0.0375	0.0375	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.100
Z [mm]	7.956.5	7994	8142	8290	8438	8586	8734	8834

Table 4 Mesh sizes in ϕ -direction

ϕ_M	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18
$\Delta \phi$ [deg.]	7.0	13.0	7.0	13.0	7.0	13.0
ϕ [deg.]	21.0	60.0	81.0	120.0	141.0	180.0

ϕ_M	19-21	22-24	25-27	28-30	31-33	34-36
$\Delta \phi$ [deg.]	7.0	13.0	7.0	13.0	7.0	13.0
ϕ [deg.]	201.0	240.0	261.0	300.0	321.0	360.0

Table 5 Mesh sizes in r-direction

R_M (Structires)	1	2 *	3	4	5	6	7	8
Δr [m]	1.355	1.259	0.036	0.015	0.040	0.040	0.115	0.115
r [mm]	1355	2614	2650	2665	2705	2745	2860	2975
R_M ("H-gap")	1			2	3	4	5	6
Δr [m]	2.650			0.015	0.040	0.040	0.115	0.115
r [mm]	2650			2665	2705	2745	2860	2975

R_M (Structires)	9	10	11	12	13	14	15
Δr [m]	0.180	0.080	0.040	0.0175	0.0175	0.040	0.100
r [mm]	3155	3235	3275	3292.5	3310	3350	3450
R_M ("H-gap")	7	8	9	10	11	—	—
Δr [m]	0.180	0.080	0.040	0.0175	0.0175	—	—
r [mm]	3155	3235	3275	3295.5	3310	—	—

* $R_M=2$ for Structures

R_M (Structires)	2					
Δr [m]	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.059
r [mm]	1655	1955	2255	2455	2555	2614

Table 6 Volume Porosity in "h"-Gap

(1) $\phi = 1 + n * 6$ ($n = 0, \dots, 5$)

$\phi = 3 + n * 6$

$Z_M \backslash R_M$	10	11
14	1.000	0.102
13	0.993	0.109
12	0.894	0.208
11	0.750	0.352
10	0.619	0.490
9	0.461	0.644
8	0.283	0.819
7	0.126	0.976

(2) $\phi = 2 + n * 6$ ($n = 0, \dots, 5$)

$Z_M \backslash R_M$	10	11
14	1.000	0.086
13	0.993	0.077
12	0.893	0.198
11	0.865	0.649
10	0.225	0.286
9	0.083	0.101
8	0.270	0.816
7	0.110	0.975

(3) $\phi = 4 + n * 6$ ($n = 0, \dots, 5$)

$\phi = 6 + n * 6$

$Z_M \backslash R_M$	10	11
14	1.000	0.094
13	0.993	0.086
12	0.893	0.202
11	0.748	0.346
10	0.614	0.484
9	0.456	0.640
8	0.277	0.817
7	0.119	0.976

(4) $\phi = 5 + n * 6$ ($n = 0, \dots, 5$)

$Z_M \backslash R_M$	10	11
14	1.000	0.103
13	0.993	0.110
12	0.894	0.209
11	0.751	0.353
10	0.620	0.491
9	0.462	0.644
8	0.284	0.819
7	0.127	0.976

Table 7 Correlations of Force Structures

流動抵抗要素番号	流動抵抗	No.	関 係 式
[1], [2], [3], [4]	急 拡 大 損 失	(1)	$\Delta P = -\xi \cdot \frac{1}{2} \rho < v >^2, \quad \xi = 1.0$
[5]	摩 擦 圧 力 損 失	(2)	$\Delta P = -f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho < v >^2$ $f = \begin{cases} 64.0/Re & (Re \leq 2000) \\ 0.3164/Re^{1/4} & (Re > 2000) \end{cases}$ L ; 各セル長さ, D ; 特性距離
[6]	急 縮 小 損 失	(3)	$\Delta P = -\xi \cdot \frac{1}{2} \rho < v >^2, \quad \xi = 0.5$

Table 8 Surrounding temperature and Correlation

 $R_M=15$, $T_{\text{sodium}}=420^\circ\text{C}$

Z [mm]	8734	8536	8438	8290	8192	7994	7956.5	7919	7885	7835	7723	7624
T [$^\circ\text{C}$]	97.43	101.91	106.91	110.88	114.07	116.69	117.35	118.01	118.62	119.50	121.48	123.24
Correlations	$T = -0.0303 * Z + 362.07$					$T = -0.0177 * Z + 258.18$						

Z [mm]	7525	7395	7265	7135	7035	6915	6795	6690	6535
T [$^\circ\text{C}$]	140.69	178.29	215.88	253.48	282.40	317.10	351.81	372.37	385.13
Correlations	$T = -0.2892 * Z + 2316.92$						$T = -0.0823 * Z + 922.96$		

 $R_M=15$, $T_{\text{sodium}}=556^\circ\text{C}$

Z [mm]	8734	8536	8438	8290	8192	7994	7956.5	7919	7885	7835	7723	7624
T [$^\circ\text{C}$]	123.11	130.69	137.08	144.06	150.02	154.27	155.35	156.42	157.40	158.84	162.05	164.89
Correlations	$T = -0.0472 * Z + 535.35$					$T = -0.0287 * Z + 383.70$						

Z [mm]	7525	7395	7265	7135	7035	6915	6795	6690	6535
T [$^\circ\text{C}$]	182.65	234.00	285.35	336.70	363.58	393.82	424.06	446.03	472.38
Correlations	$T = -0.2892 * Z + 2316.92$				$T = -0.252 * Z + 2136.40$			$T = -0.0823 * Z + 922.96$	

Table 9 Young' s Modulus of Ferritic Steel

温 度 (°C)	ヤング係数 (kg/m ²)	温 度 (°C)	ヤング係数 (kg/m ²)	温 度 (°C)	ヤング係数 (kg/m ²)
50	1.96×10^{10}	225	1.88×10^{10}	400	1.74×10^{10}
75	1.95	250	1.86	425	↓
100	1.95	275	1.84	450	
125	1.94	300	1.82	475	
150	1.93	325	1.80	500	
175	1.91	350	1.77	525	
200	1.91 ↓	375	1.74 ↓	550	

Table 10 Expansion Coefficients of Ferritic Steel (m/m °C)

温 度 (°C)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$)	温 度 (°C)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$)	温 度 (°C)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$)
50	11.13	225	12.41	400	13.42
75	11.33	250	12.57	425	↓
100	11.53	275	12.73	450	
125	11.71	300	12.90	475	
150	11.89	325	13.08	500	
175	12.07	350	13.24	525	
200	12.24	375	13.42	550	

ポアソン比

$$\nu = 0.3$$

Table 11 CPU time (Tsodium=420°C)

リスタート回数	サイクル数	ジョブステップ	所要CPU時間	
			分	秒
0	1	INTER AQUA INTER FINAS	1 23 0 38	23.80 12.39 2.03 38.03
	2	INTER AQUA INTER FINAS	0 1 0 38	3.58 42.92 4.24 34.98
	3	INTER AQUA INTER	0 0 0	3.90 5.28 6.09
1	4	INTER AQUA INTER FINAS	1 0 0 38	24.13 3.01 1.50 35.00
	5	INTER AQUA INTER FINAS	0 0 0 38	3.56 5.19 3.75 36.62
	6	INTER AQUA INTER FINAS	0 0 0 38	3.93 5.10 5.63 35.47
	7	INTER AQUA INTER	0 0 0	0.42 5.67 7.81
2	8	INTER AQUA INTER FINAS	1 0 0 38	24.29 3.07 1.59 48.15
	9	INTER AQUA INTER FINAS	0 0 0 38	3.61 5.49 3.59 44.08
	熱応力解析	INTER FNSEDIT FINAS	0 0 18	17.80 1.70 41.83

合計 320分9.23秒

Table 12 CPU time (Tsodium=556°C)

リスタート回数	サイクル数	ジョブステップ	所要CPU時間	
			分	秒
0	1	AQUA	20	7.19
1	2	INTER	1	25.77
		AQUAR	21	17.95
		INTER	0	2.06
2	3	INTER	1	24.25
		AQUA	0	6.12
		INTER	0	1.54
		FINAS	38	37.00
	4	INTER	0	3.58
		AQUA	0	18.48
		INTER	0	0.35
3	5	INTER	1	23.12
		AQUA	0	2.70
		INTER	0	1.49
		FINAS	38	54.78
	6	INTER	0	3.55
		AQUA	0	5.25
		INTER	0	0.42
4	7	INTER	1	22.99
		AQUA	0	2.72
		INTER	0	1.49
		FINAS	38	37.86
	8	INTER	0	3.59
		AQUA	0	5.32
		INTER	0	0.42
5	9	INTER	1	24.59
		AQUAR	0	2.66
		INTER	0	1.50
		FINAS	38	52.22
	熱応力解析	INTER	0	15.78
		FNSEDIT	0	1.85
		FINAS	18	39.27

合計 223分27.86秒

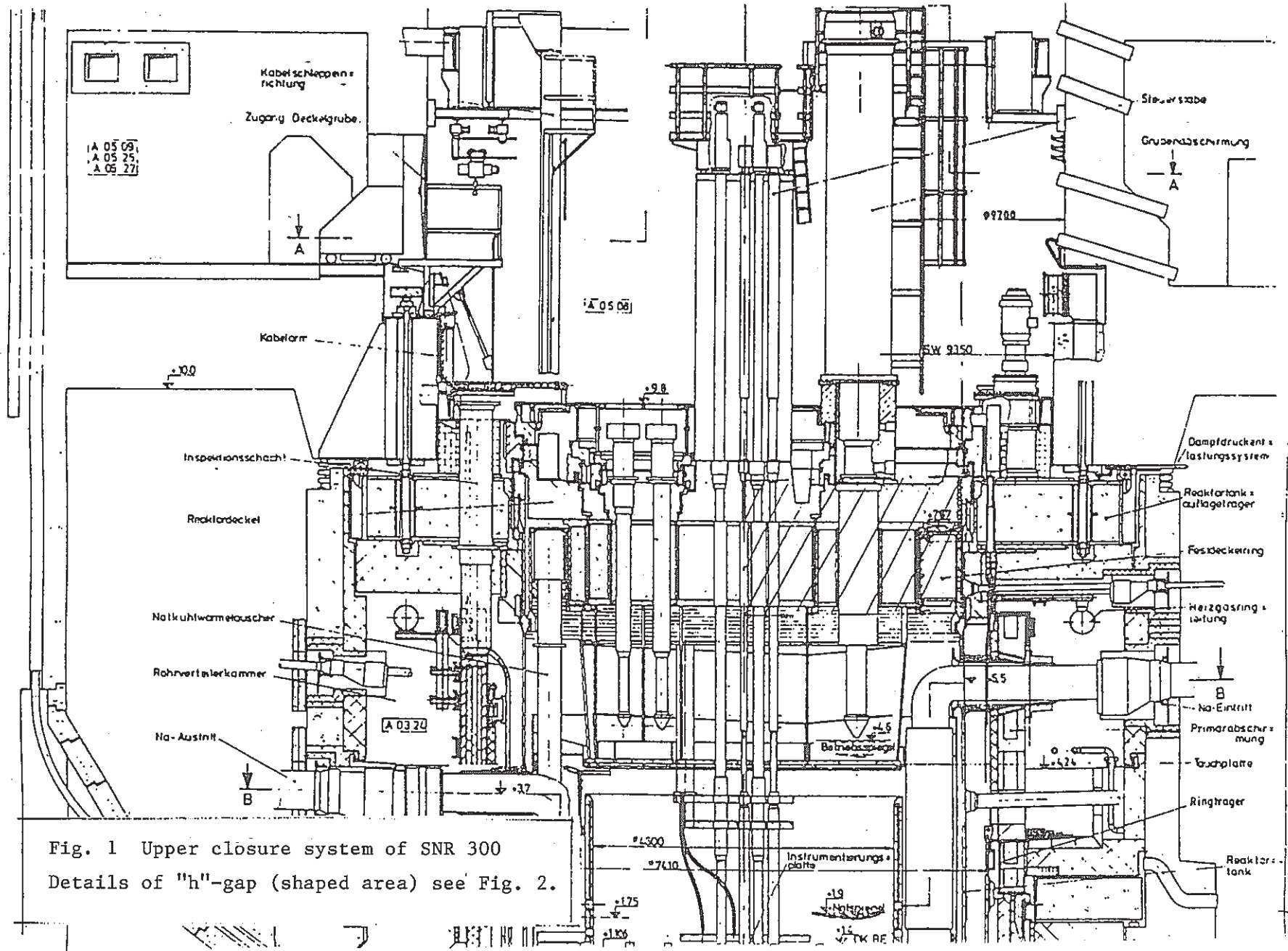
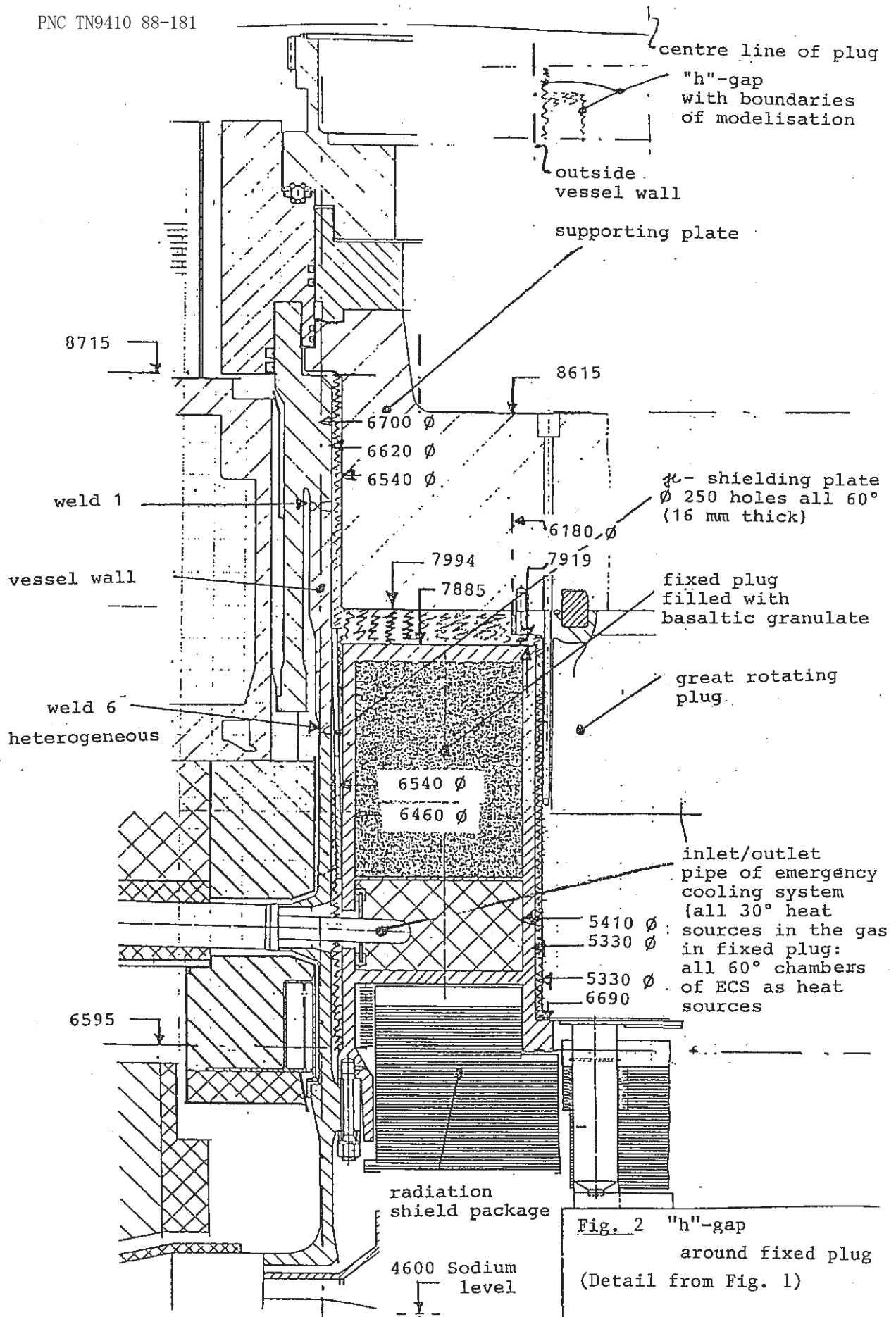


Fig. 1 Upper closure system of SNR 300
Details of "h"-gap (shaped area) see Fig. 2.



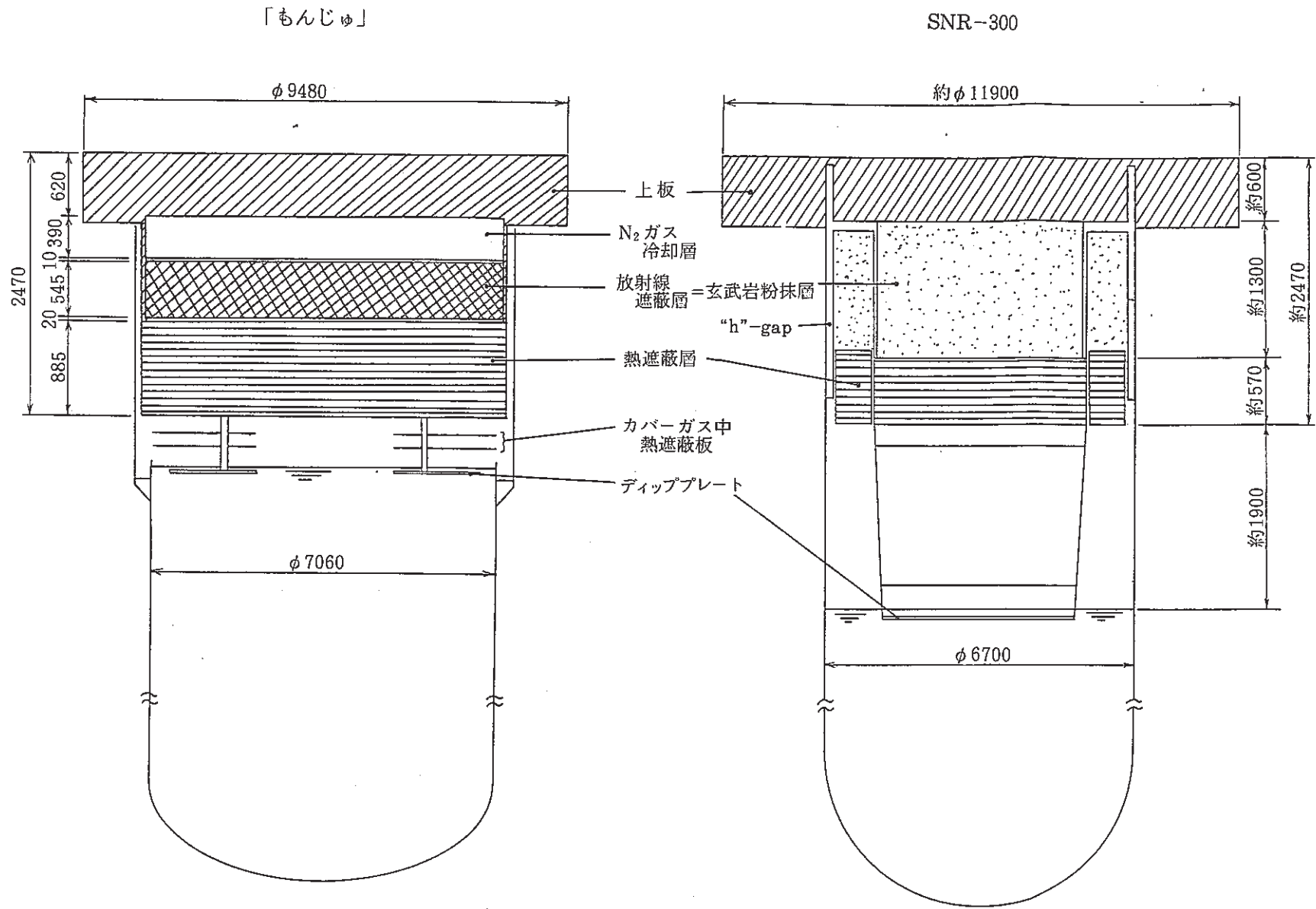


Fig. 3 Axial cross section of "Monju" and SNR300

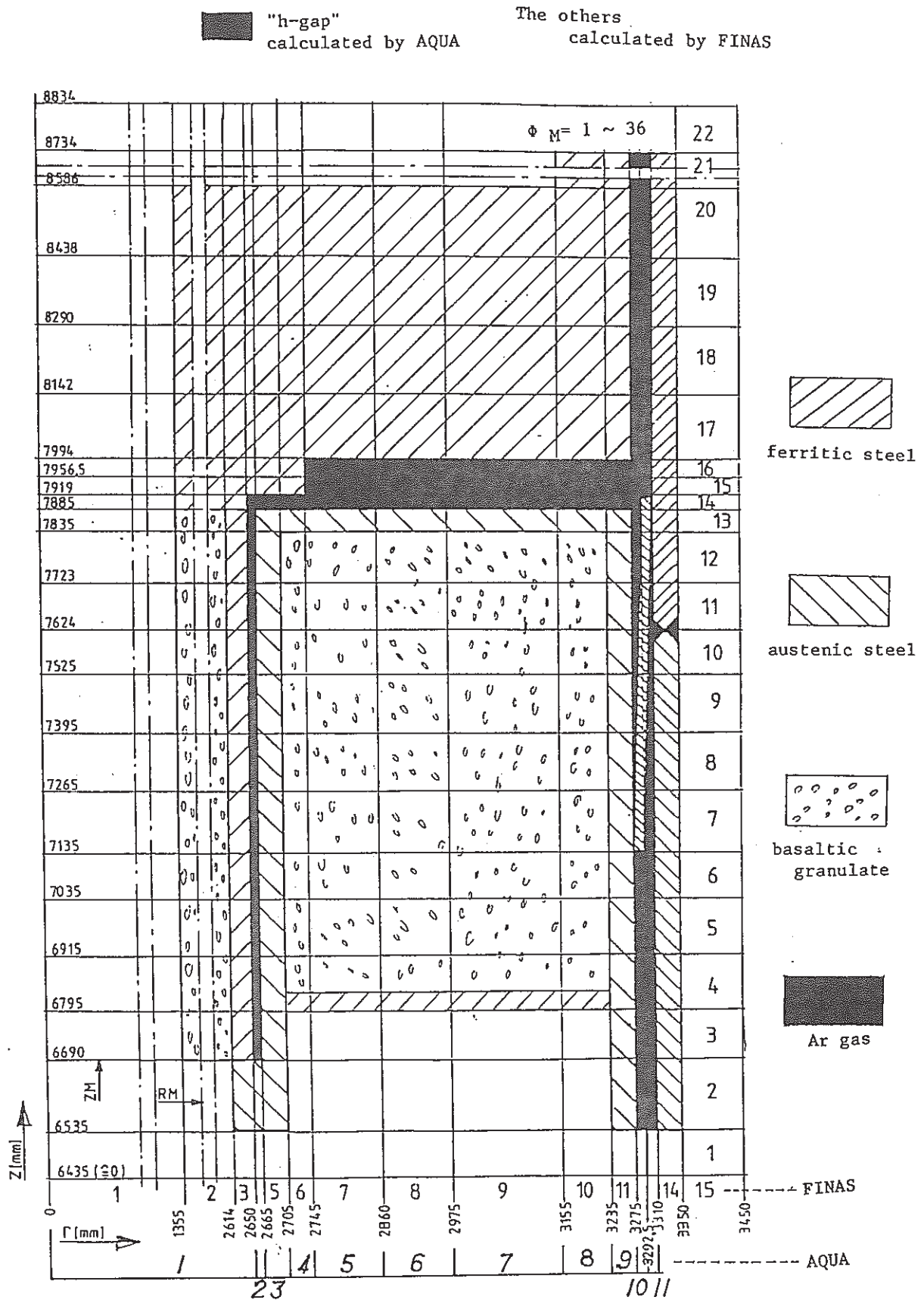


Fig. 4 Meshes of upper closure system

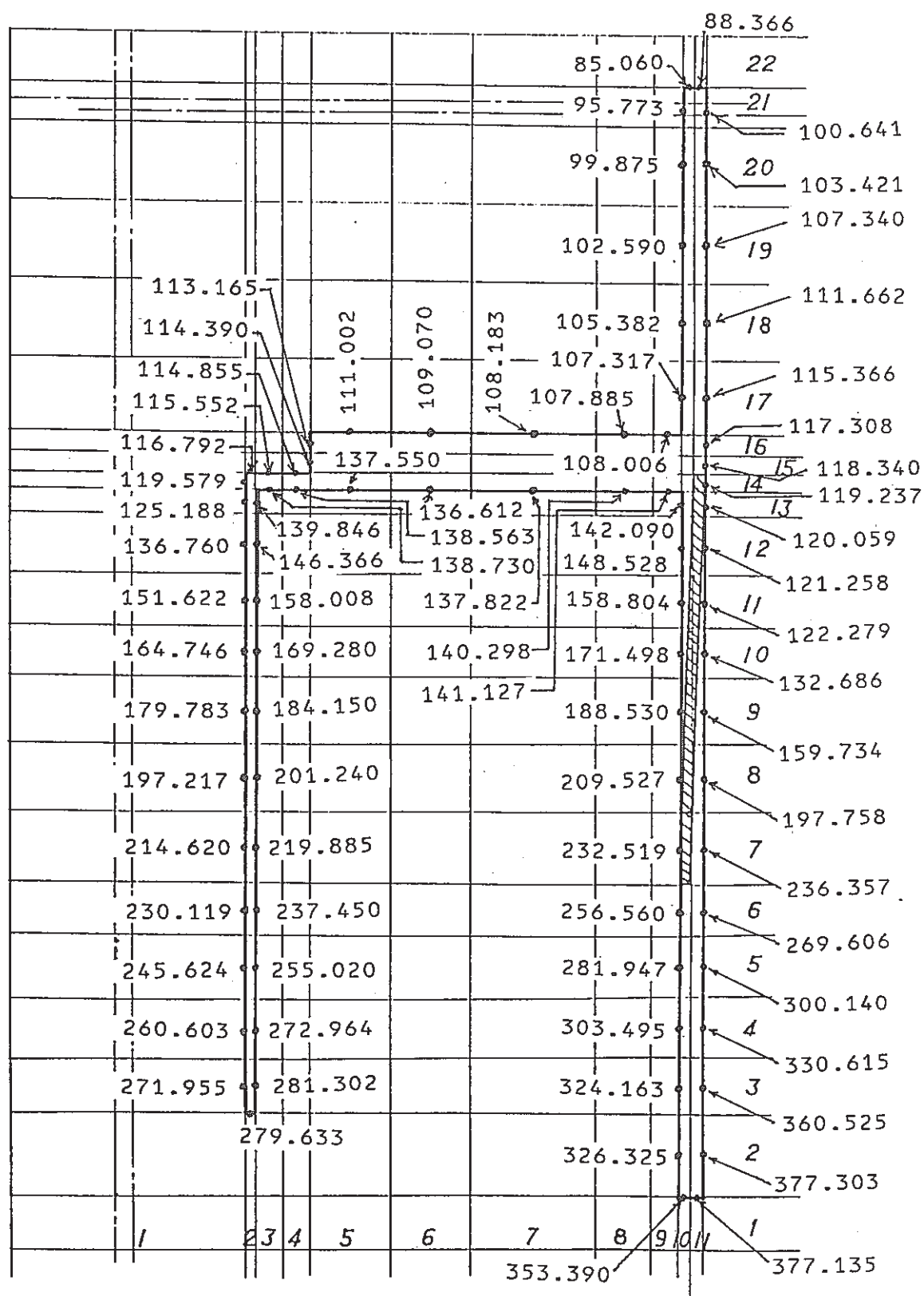
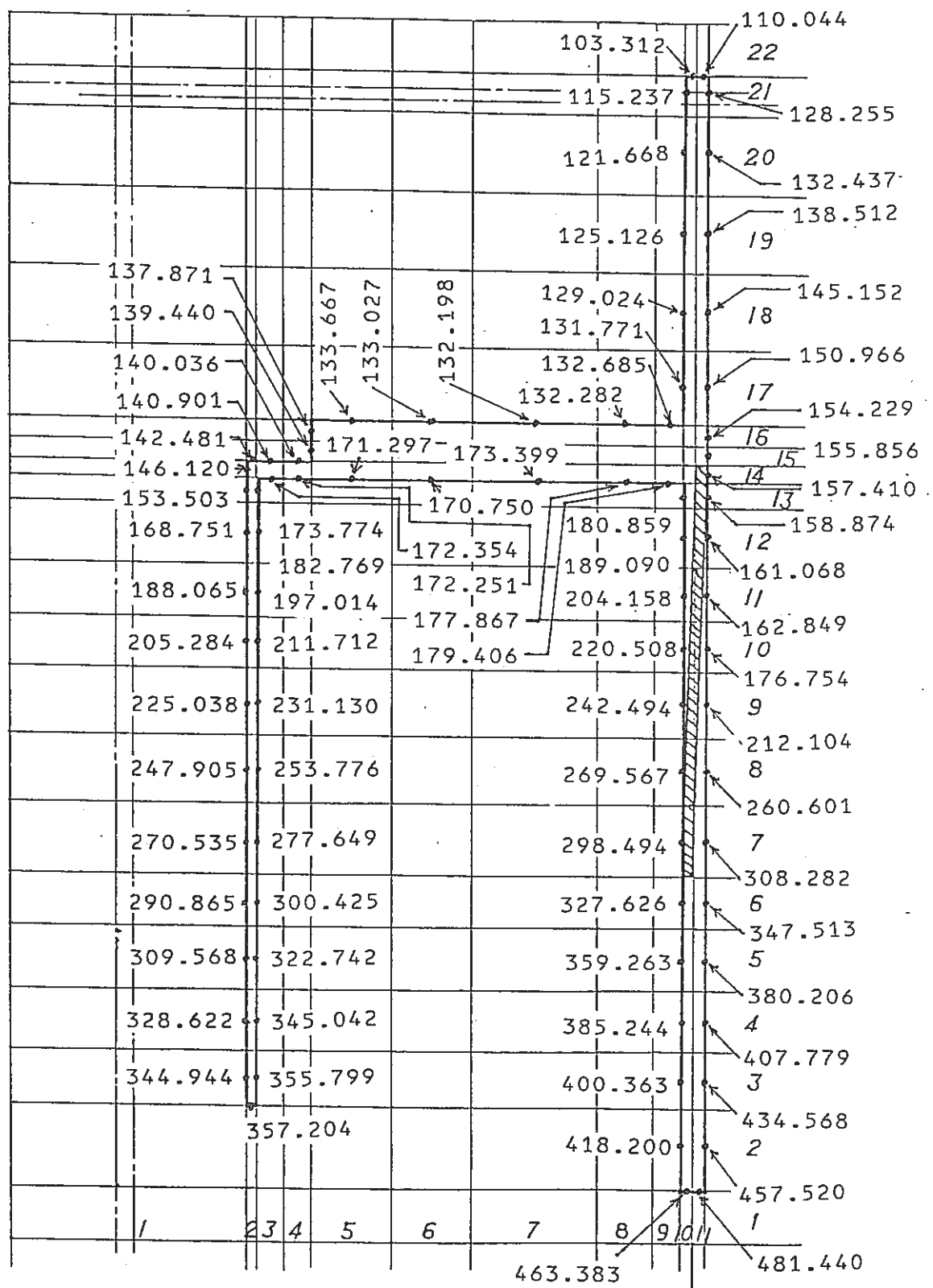


Fig. 5 Boundary temperature of "h"-Gap ($T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 Boundary temperature of "h"-Gap ($T_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C}$)

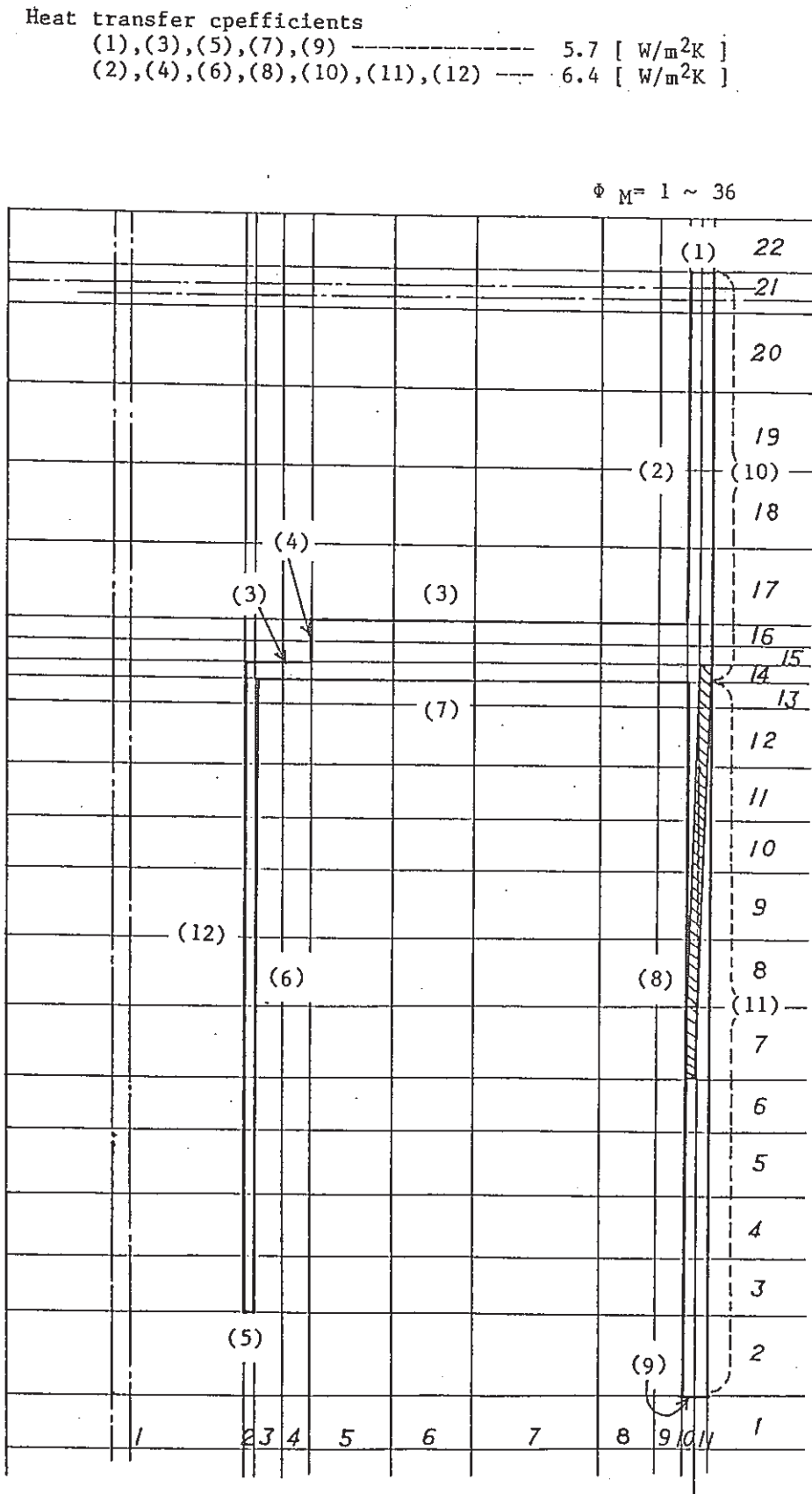


Fig. 7 Boundary surface and heat transfer coefficients

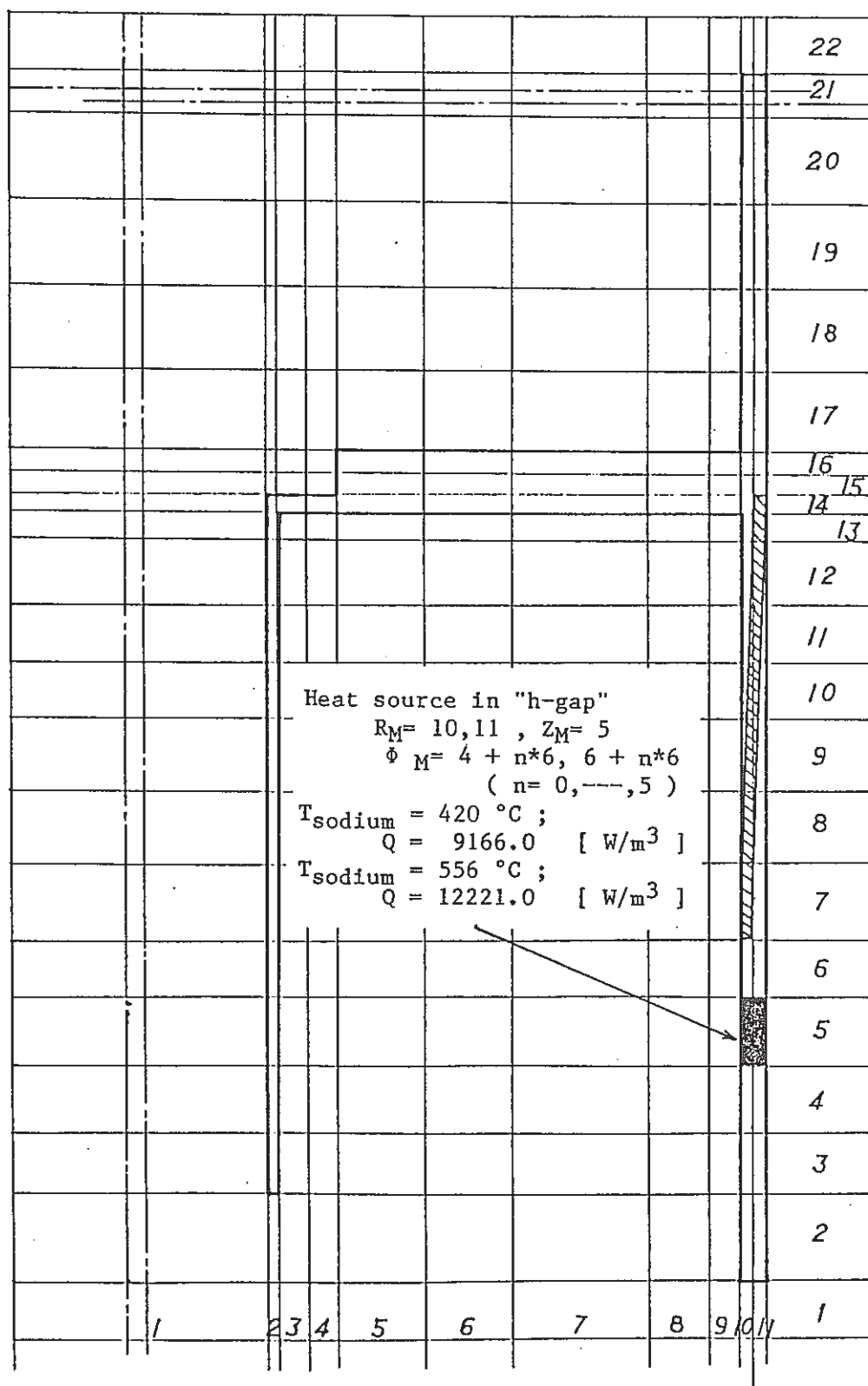
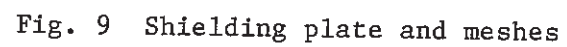


Fig. 8 Heat source distribution



[n] ; Force structure No.

,(m) ; Force structure correlation No.

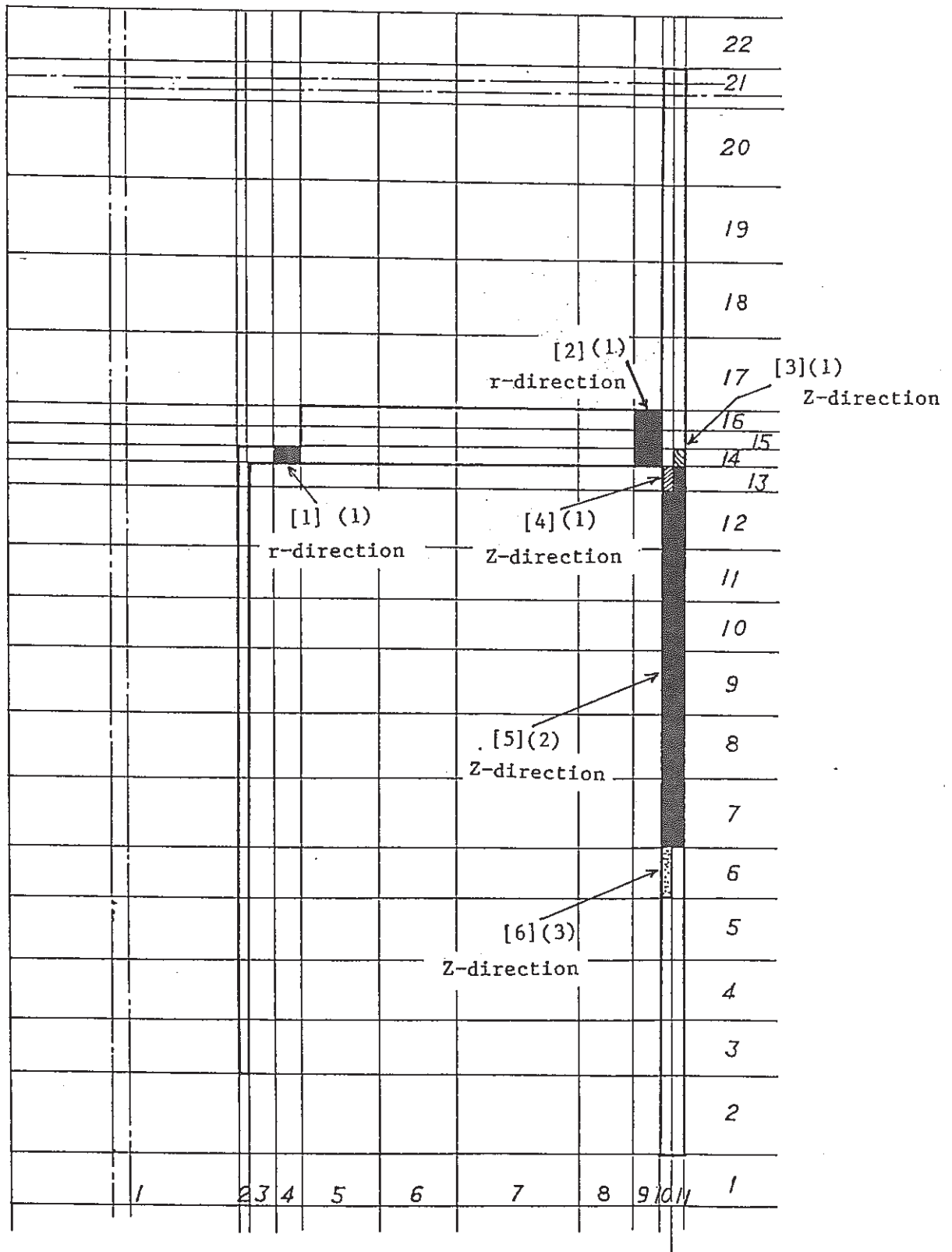
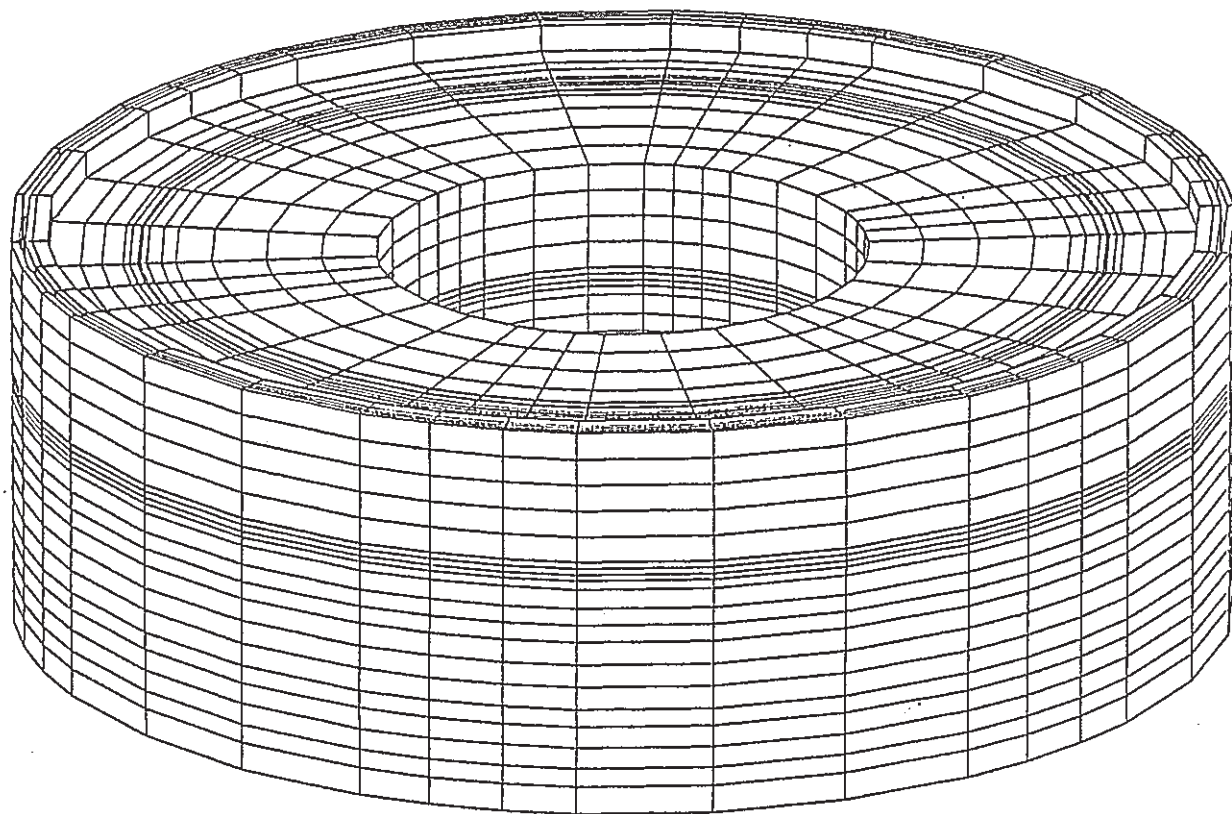


Fig. 10 Force structures



UPPER CLOSURE SYSTEM ..

Fig. 11 Finite elements model of thermal conduction
(except Ar gas)

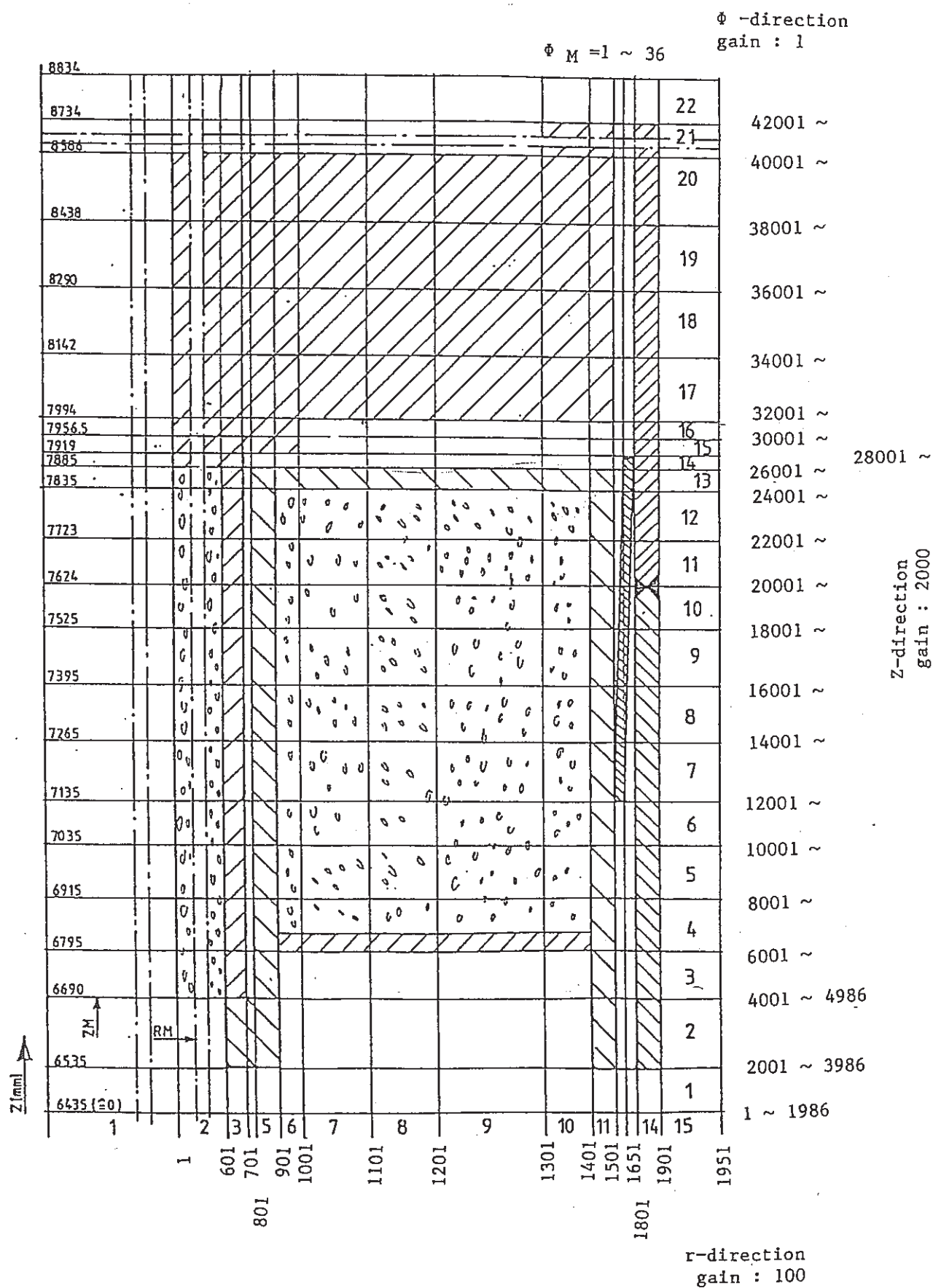


Fig. 12 Nodes numbers

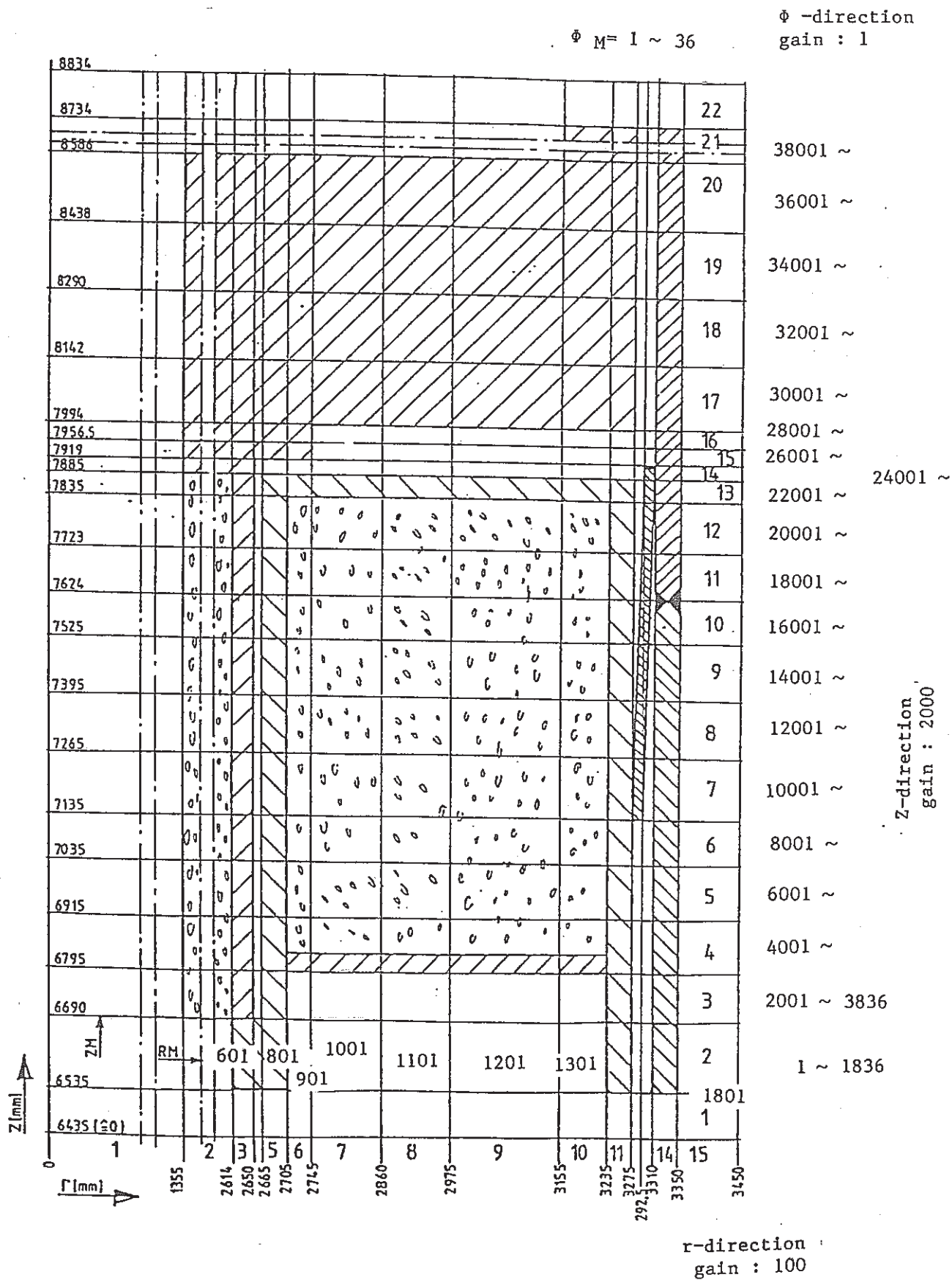


Fig. 13 Elements numbers

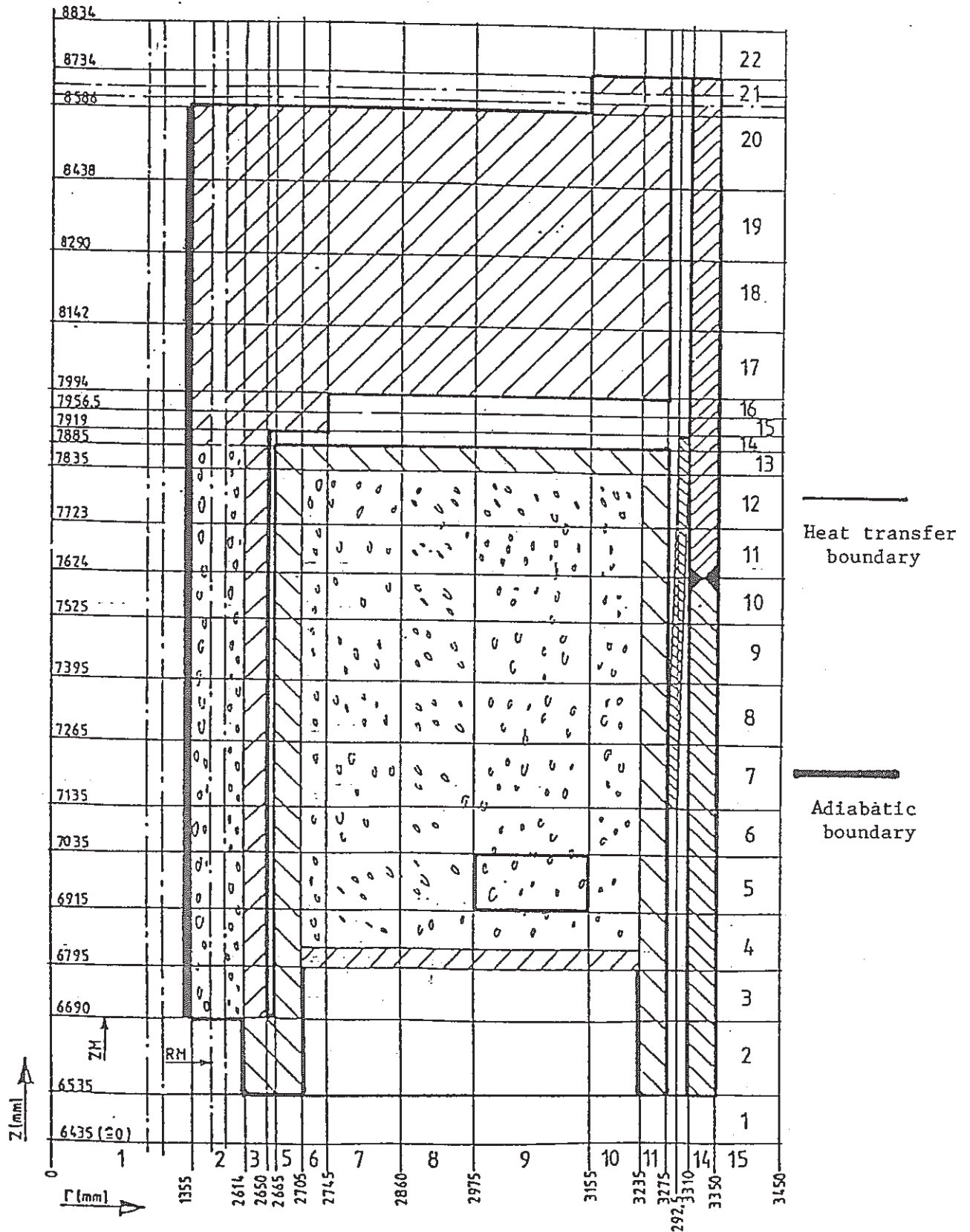
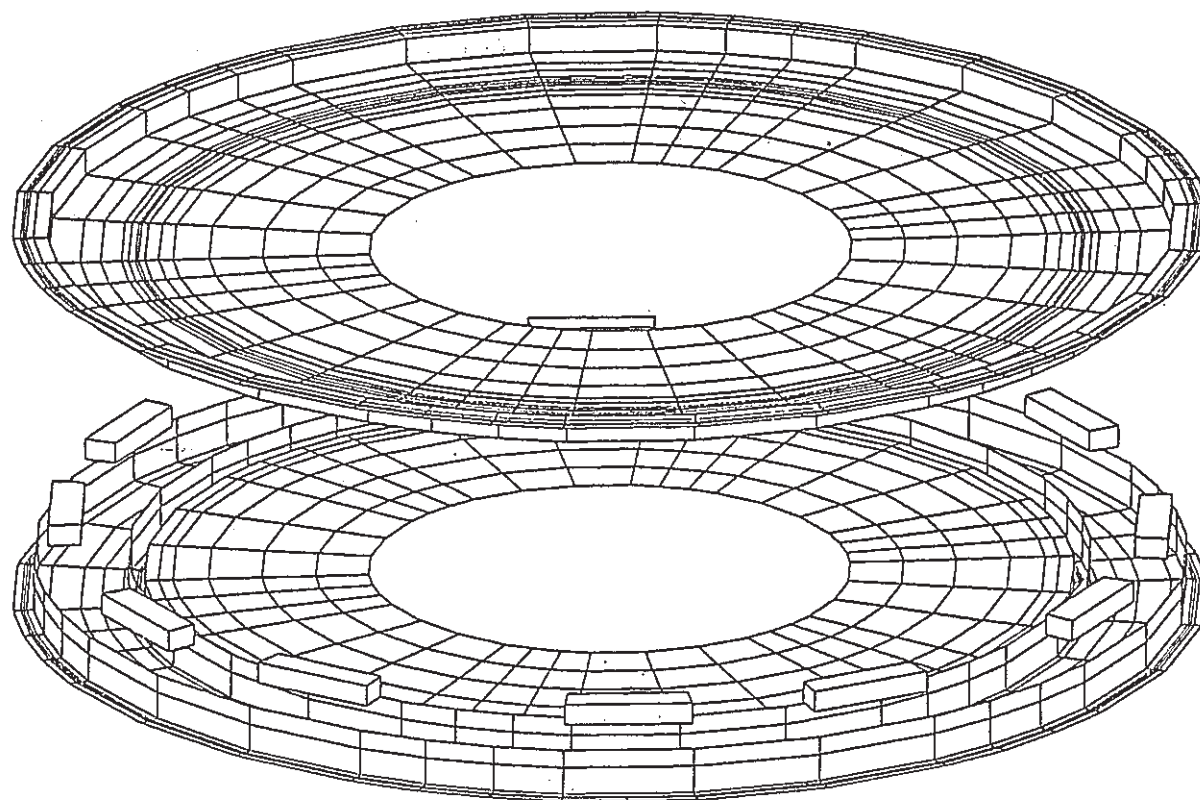
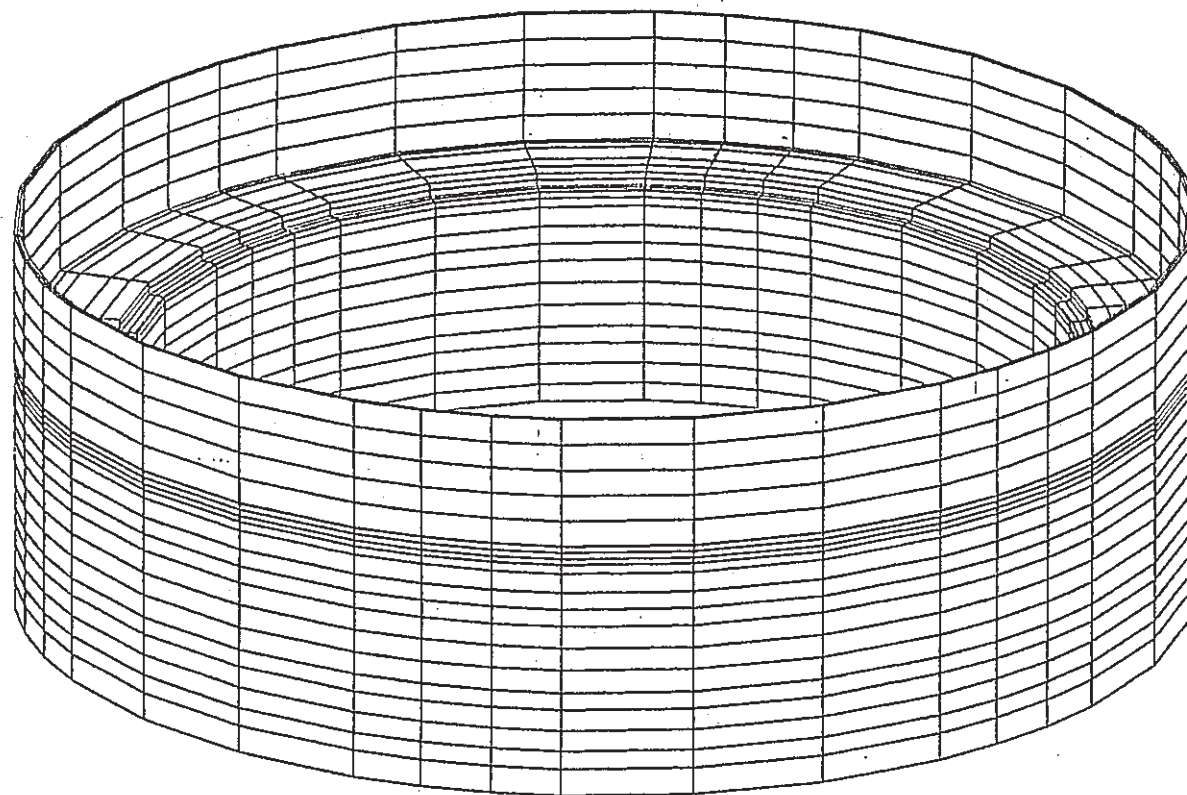
$\Phi M = 1 \sim 36$ 

Fig. 14 Boundary conditions



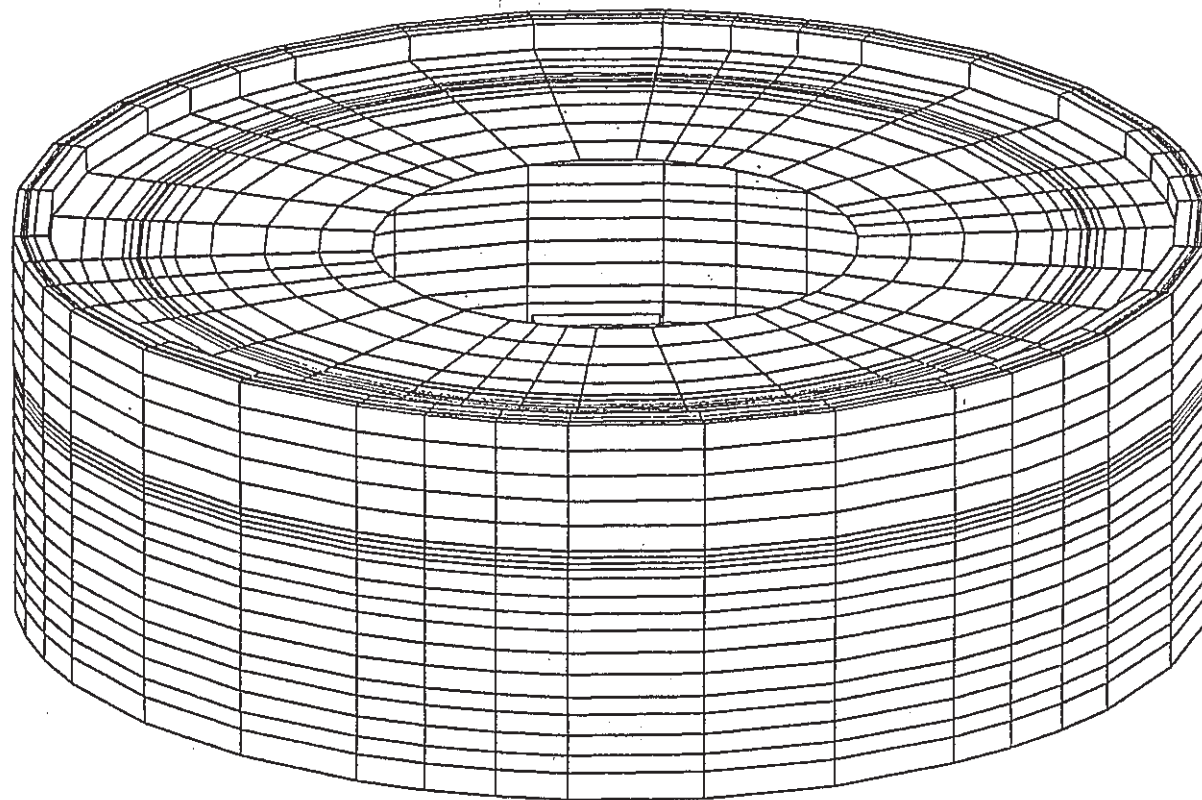
UPPER CLOSURE SYSTEM

Fig. 15 Boundary elements of heat transfer



UPPER CLOSURE SYSTEM

Fig. 16 Boundary elements of heat transfer in "h"-Gap



UPPER CLOSURE SYSTEM

Fig. 17 Surface boundary elements

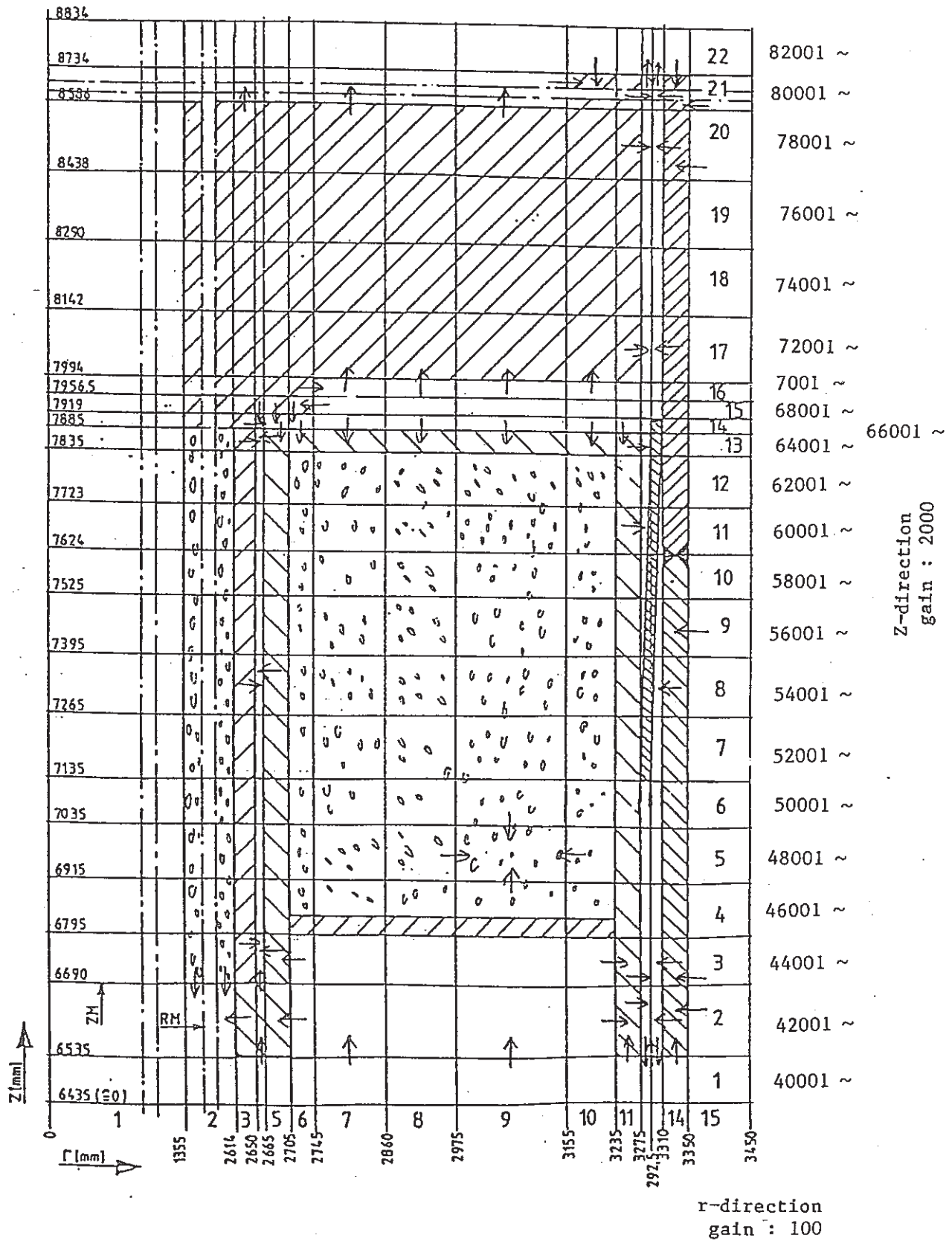
$\Phi M = 1 \sim 36$ Φ -direction
gain : 1

Fig. 18 No.s of heat transfer elements

$\Phi M = 1 \sim 36$

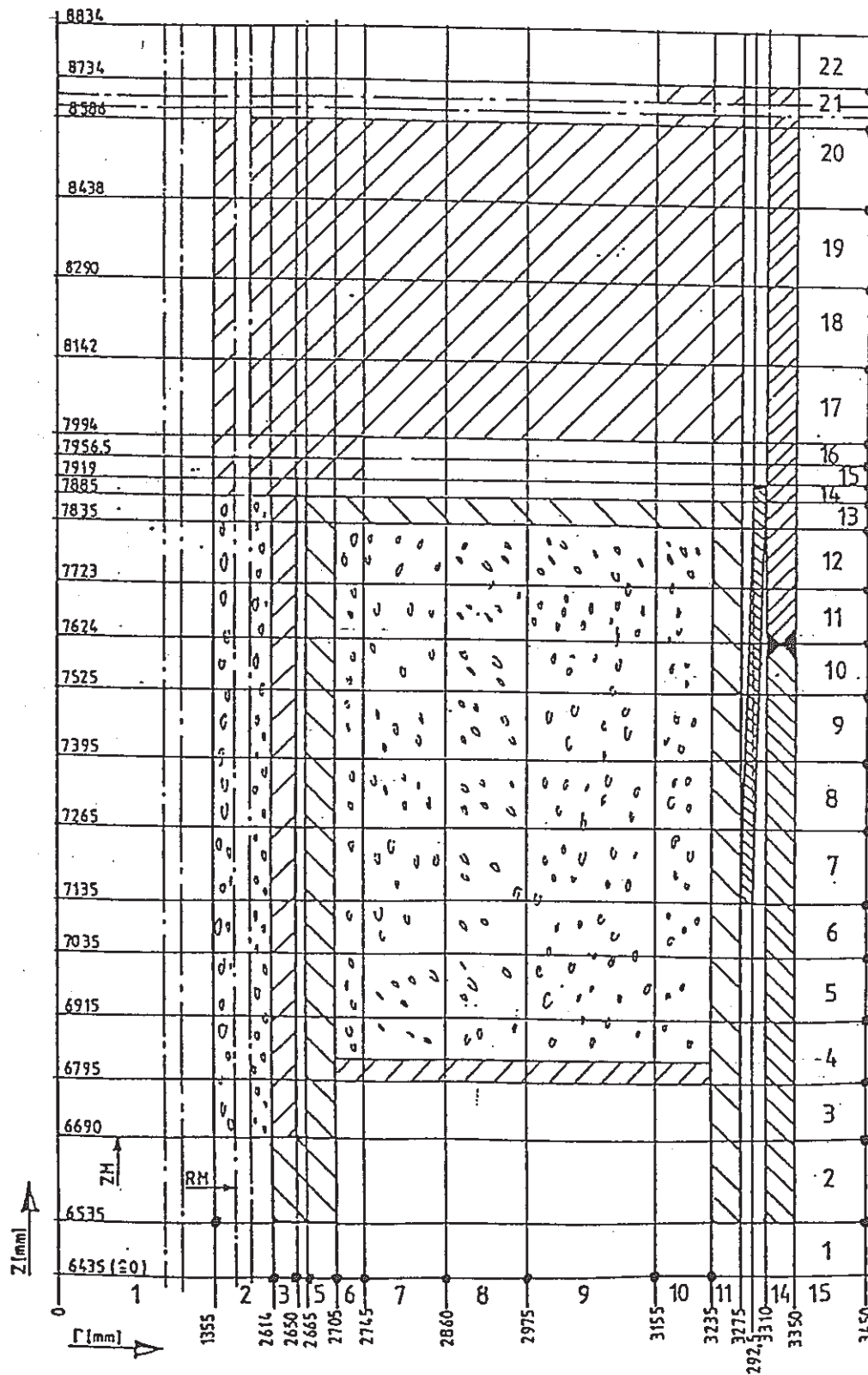
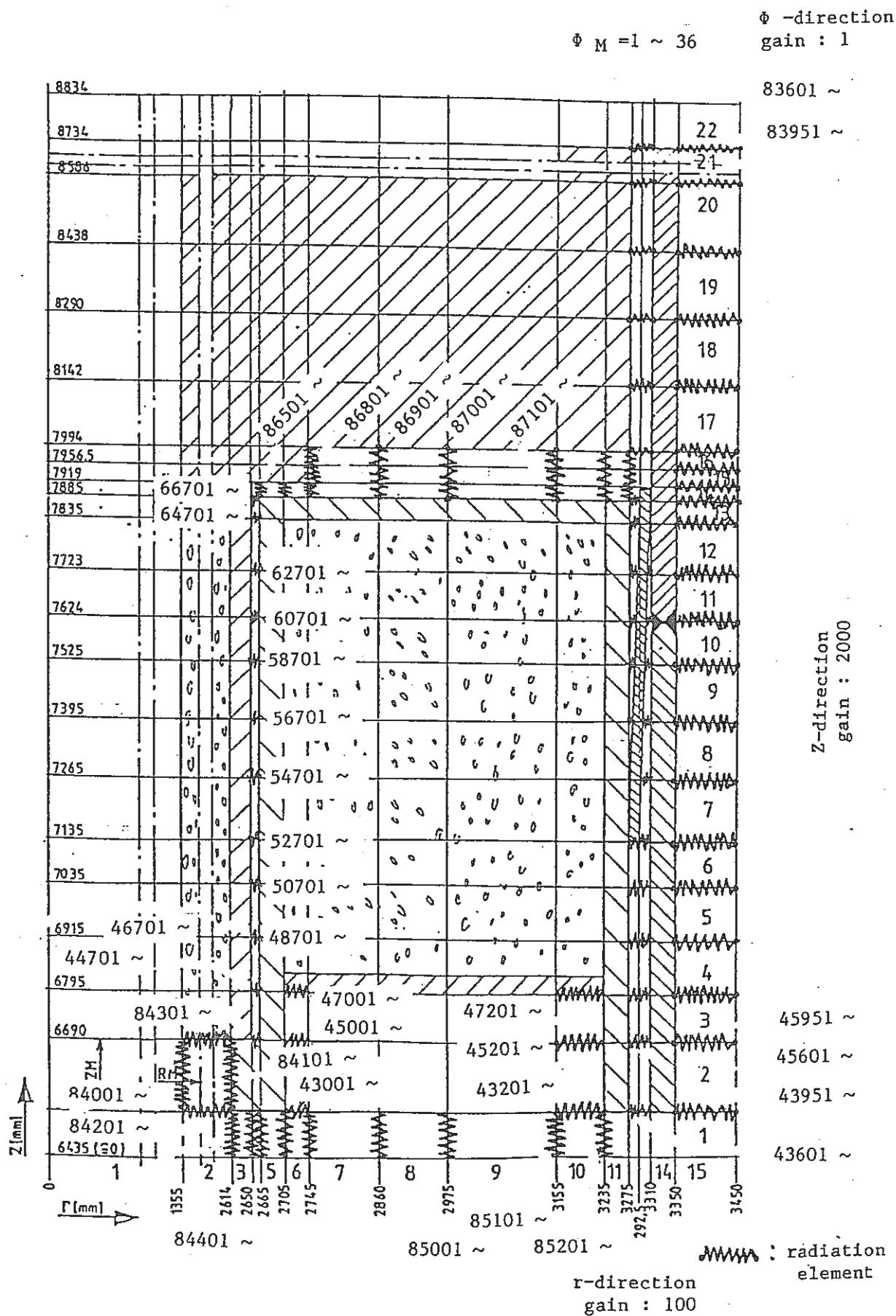
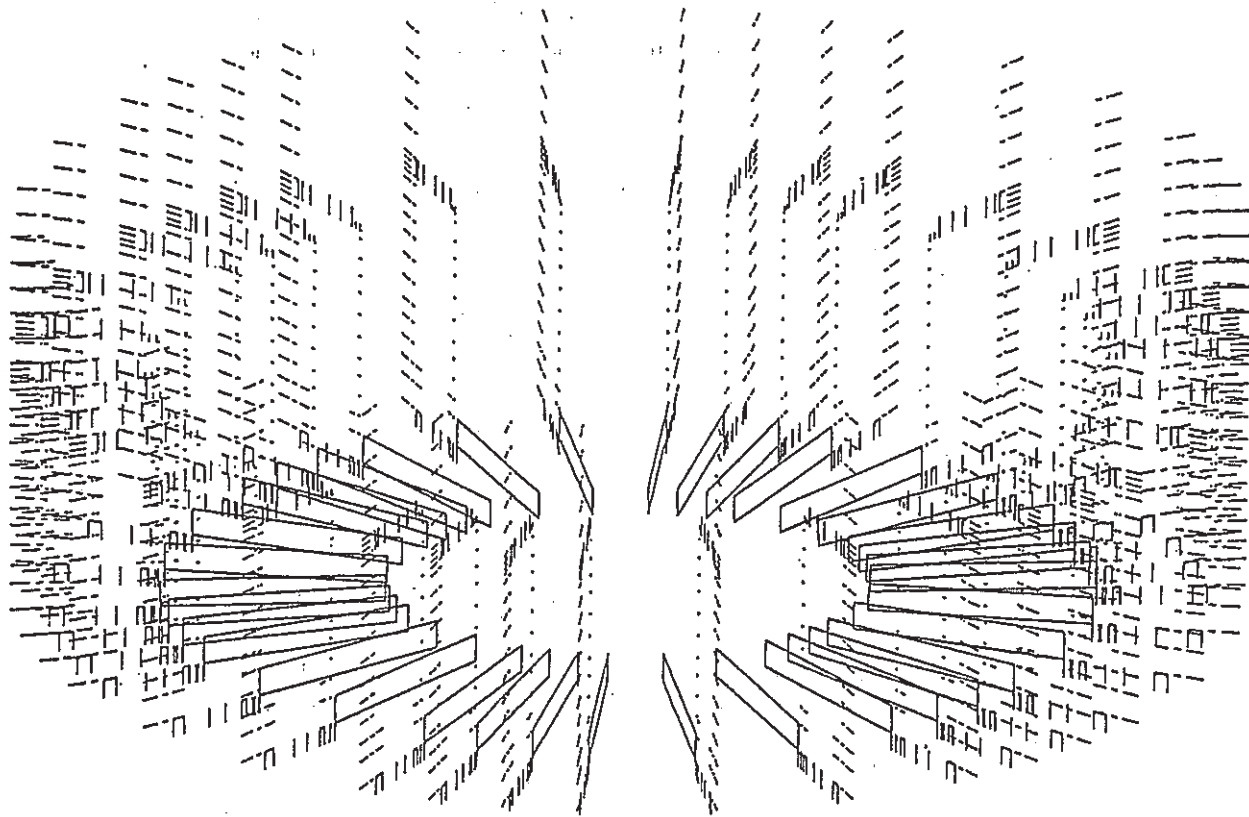


Fig. 19 Specified temperature





UPPER CLOSURE SYSTEM

Fig. 21 Radiation elements

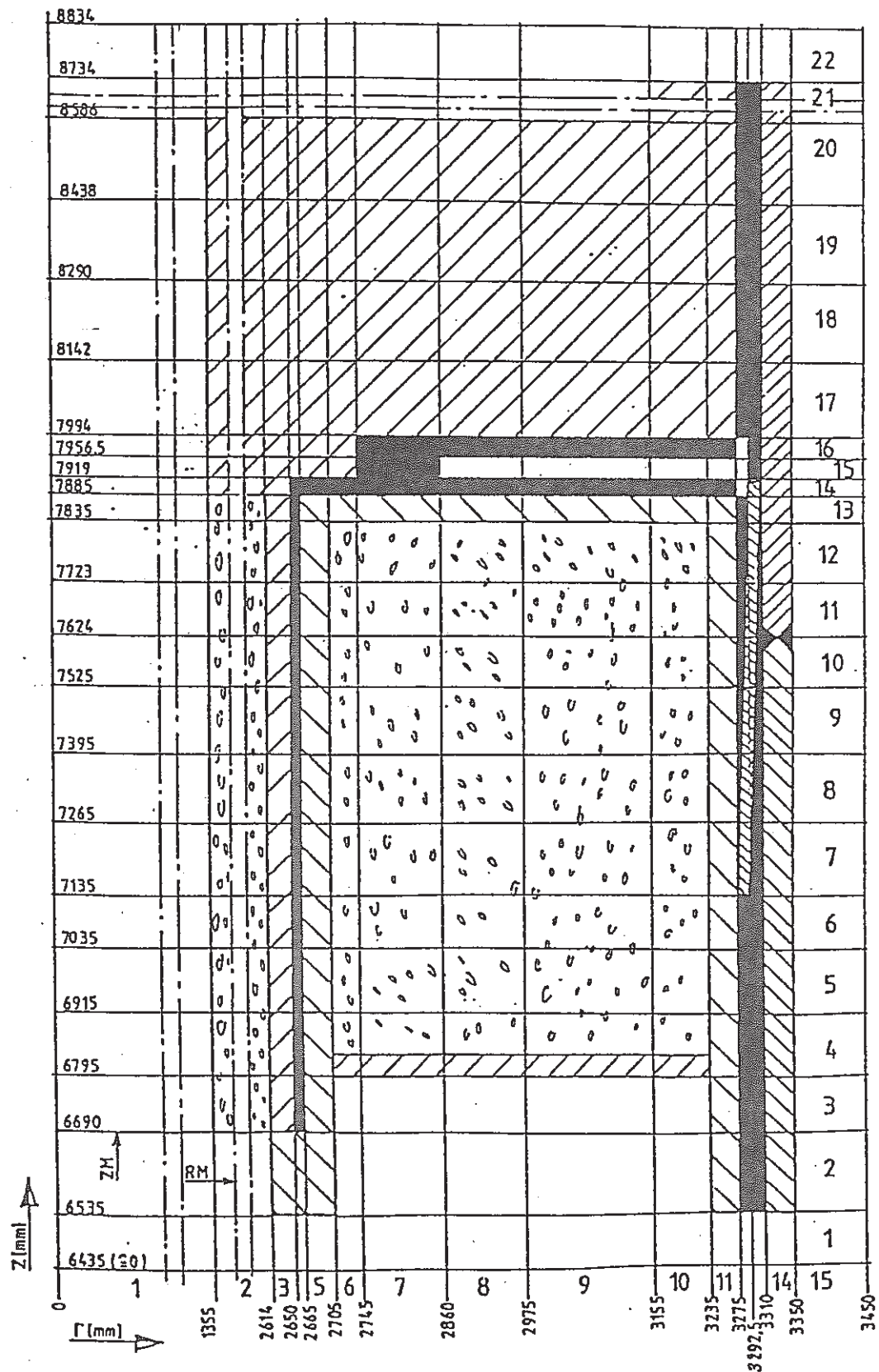
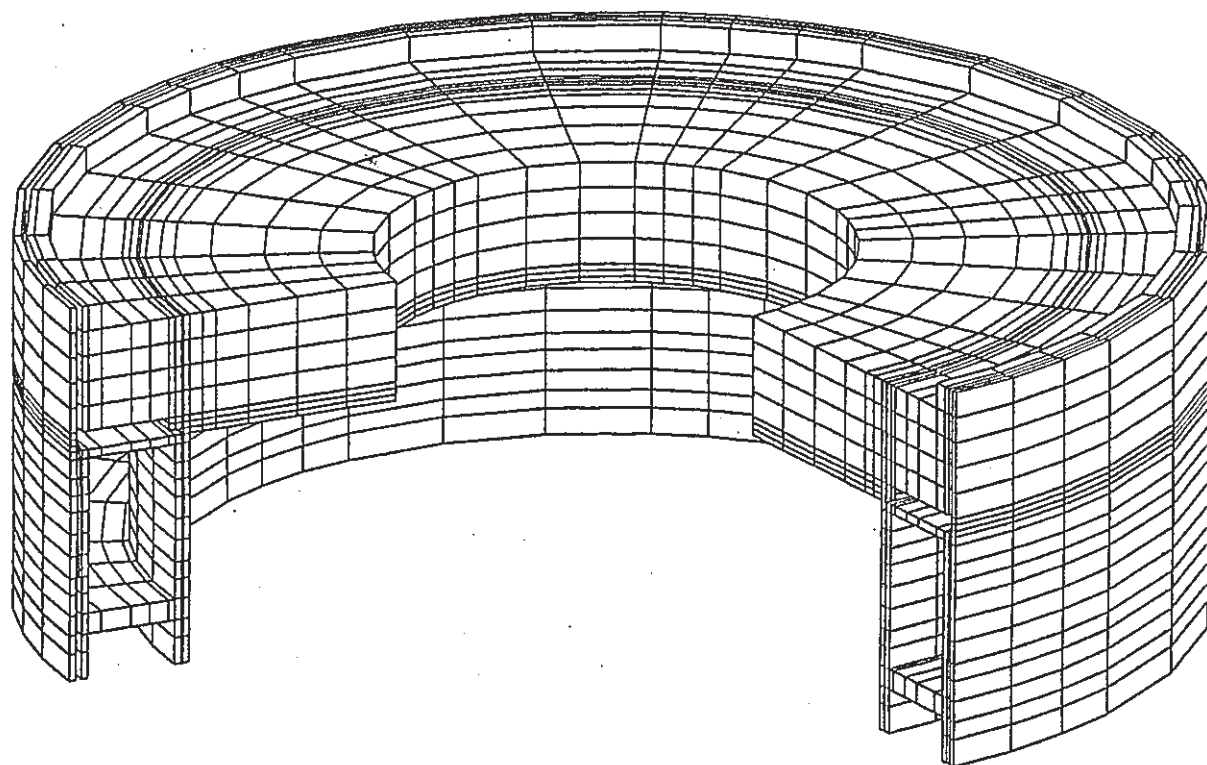
$\Phi M = 1 \sim 36$ 

Fig. 22 Heat transfer elements in "h"-Gap



UPPER CLOSURE SYSTEM

Fig. 23 Finite elements of thermal stress

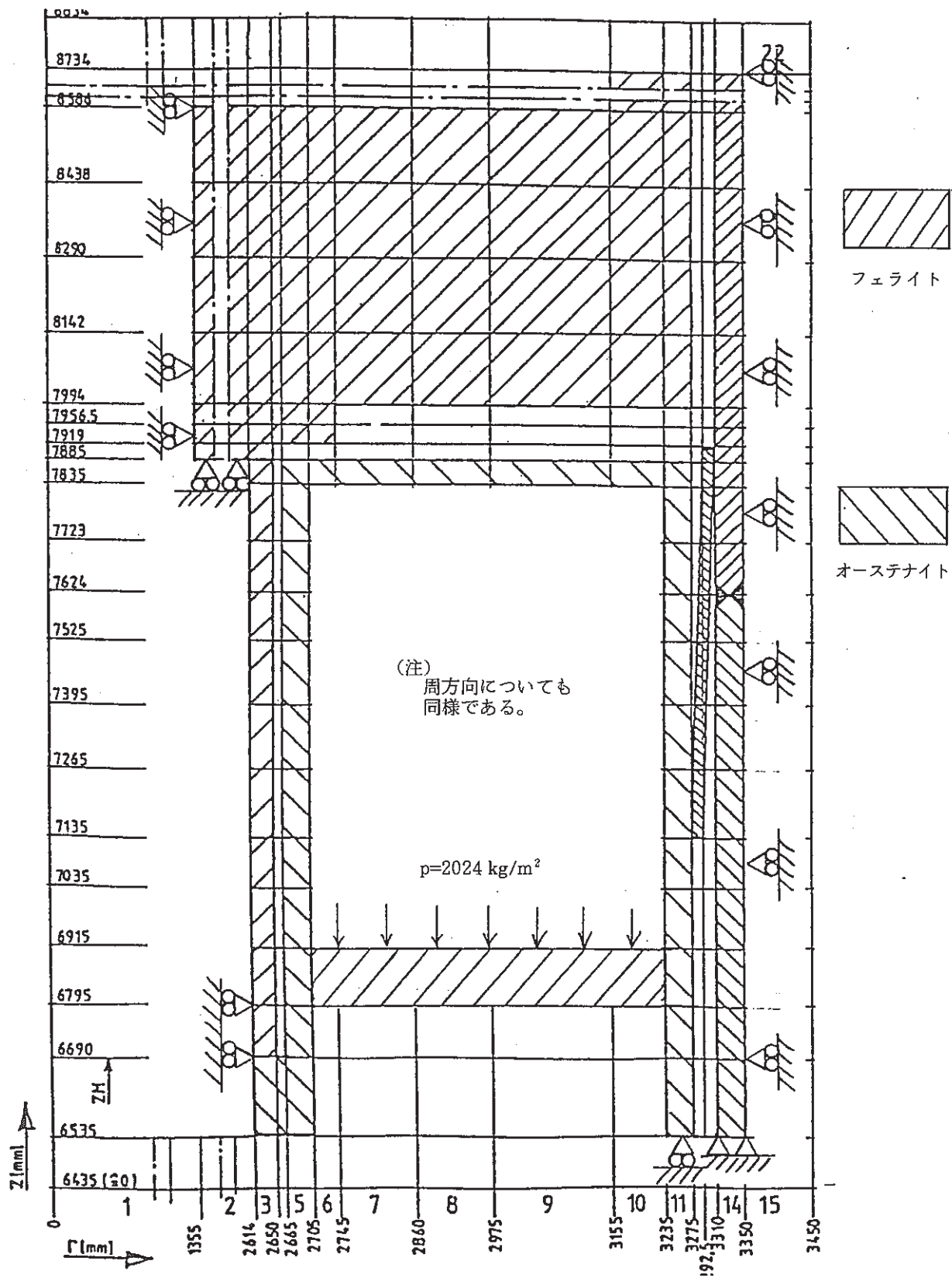
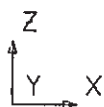
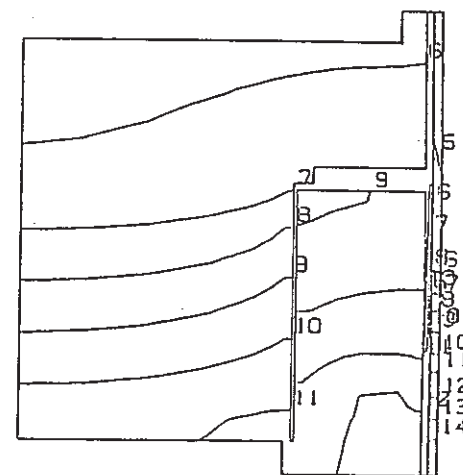
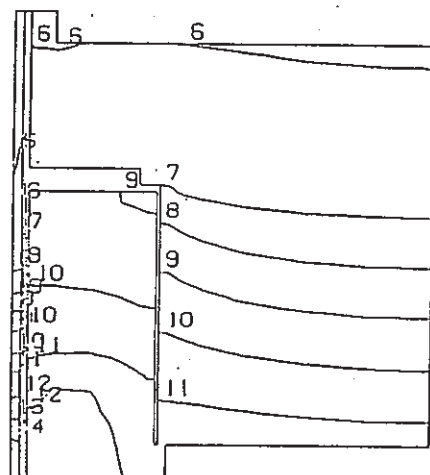


Fig. 24 Boundary conditions

CONTOUR VALUES [$^{\circ}\text{C}$]

1	7.000000
2	35.00000
3	63.00001
4	91.00001
5	118.9999
6	146.9999
7	175.0000
8	202.9999
9	230.9999
10	259.0000
11	286.9999
12	314.9999
13	343.0000
14	371.0000
15	398.9999



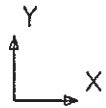
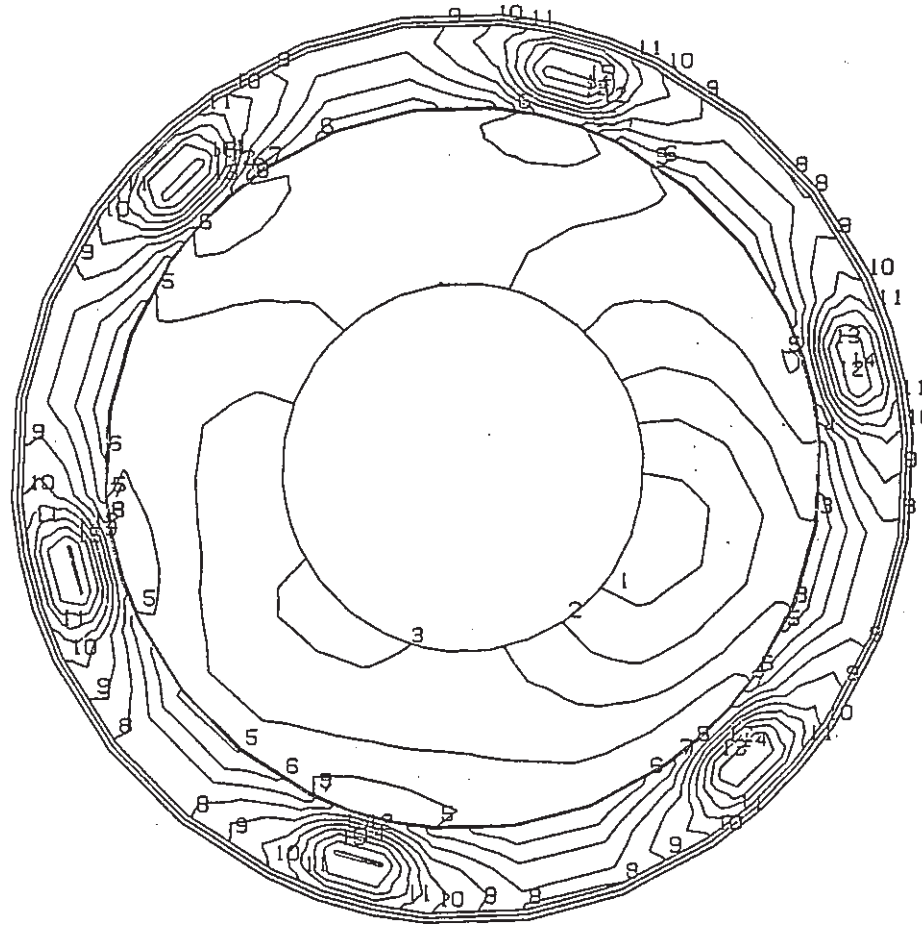
GEOM. SCALE 1.00000

Fig. 25 SNR300 upper closure system (THETA-1, Sodium Temp. 420°C)

TEMPERATURE

CONTOUR VALUES [°C]

1	275.9995
2	280.8994
3	285.7993
4	290.6991
5	295.5990
6	300.4990
7	305.3989
8	310.2988
9	315.1987
10	320.0985
11	324.9985
12	329.8984
13	334.7983
14	339.6982
15	344.5981



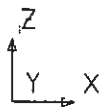
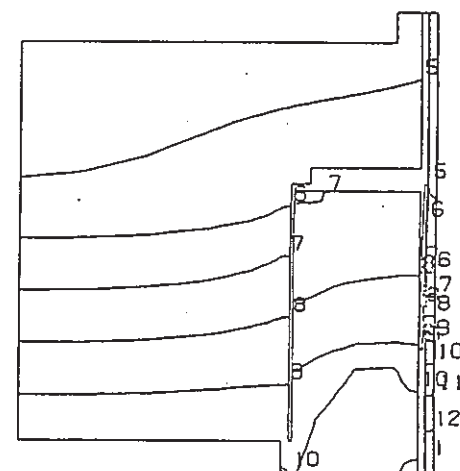
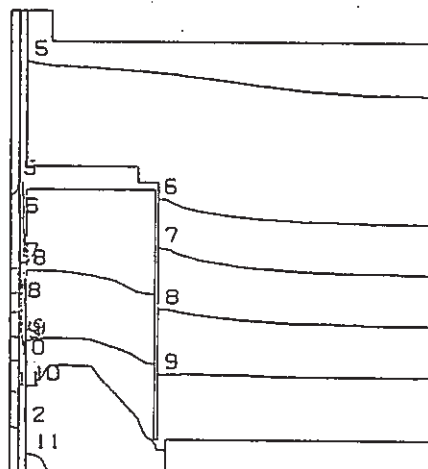
GEOM. SCALE 1 1.50000

Fig. 26 SNR300 upper closure system (ZM-4, Sodium Temp. 420°C)

TEMPERATURE

CONTOUR VALUES [$^{\circ}\text{C}$]

1	4.000000
2	43.00000
3	82.00001
4	121.0000
5	159.9999
6	198.9999
7	238.0000
8	276.9999
9	315.9999
10	355.0000
11	394.0000
12	432.9999
13	472.0000
14	511.0000
15	550.0000



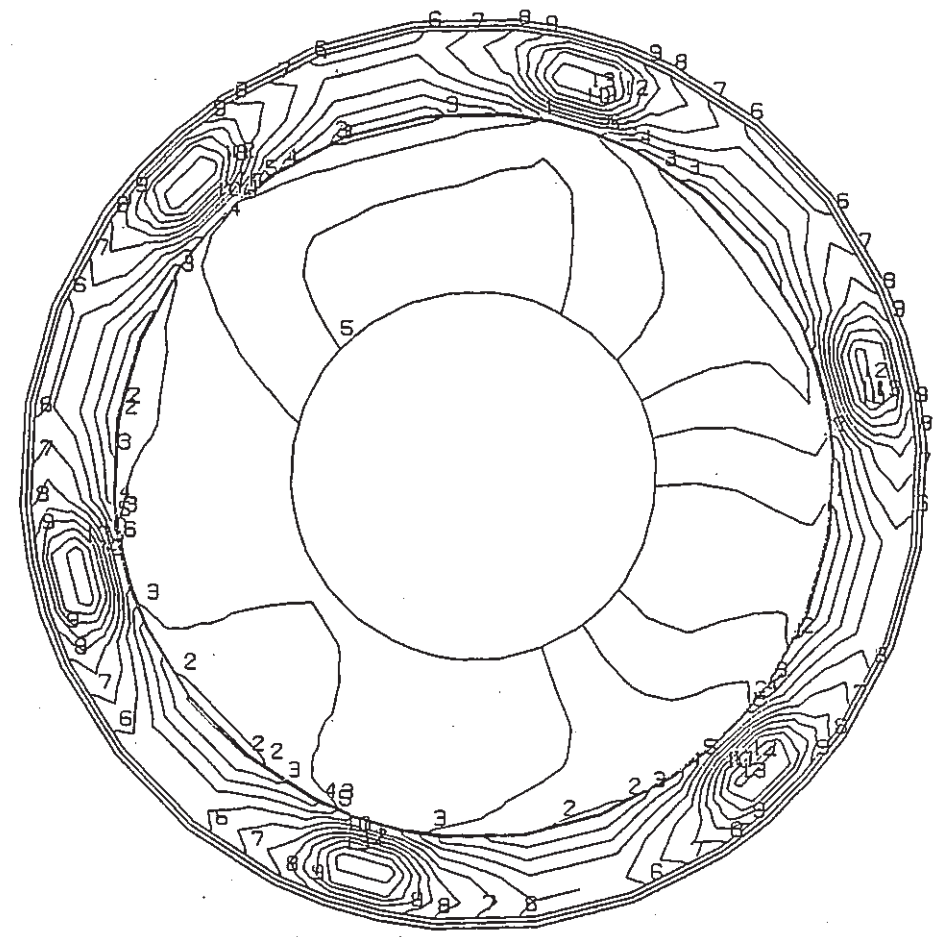
GEOM. SCALE 1.00000

Fig. 27 SNR300 upper closure system (THETA-1, Sodium Temp. 556°C)

TEMPERATURE

CONTOUR VALUES [°C]

1	331.9994
2	338.0993
3	344.1991
4	350.2990
5	356.3989
6	362.4987
7	368.5986
8	374.6985
9	380.7983
10	386.8982
11	392.9980
12	399.0979
13	405.1978
14	411.2976
15	417.3974



GEOM. SCALE 1.50000

Fig. 28 SNR300 upper closure system (ZM-4, Sodium Temp. 556°C)

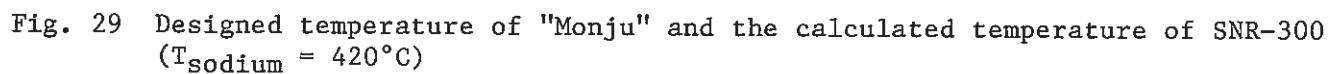


Fig. 29 Designed temperature of "Monju" and the calculated temperature of SNR-300
($T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$)

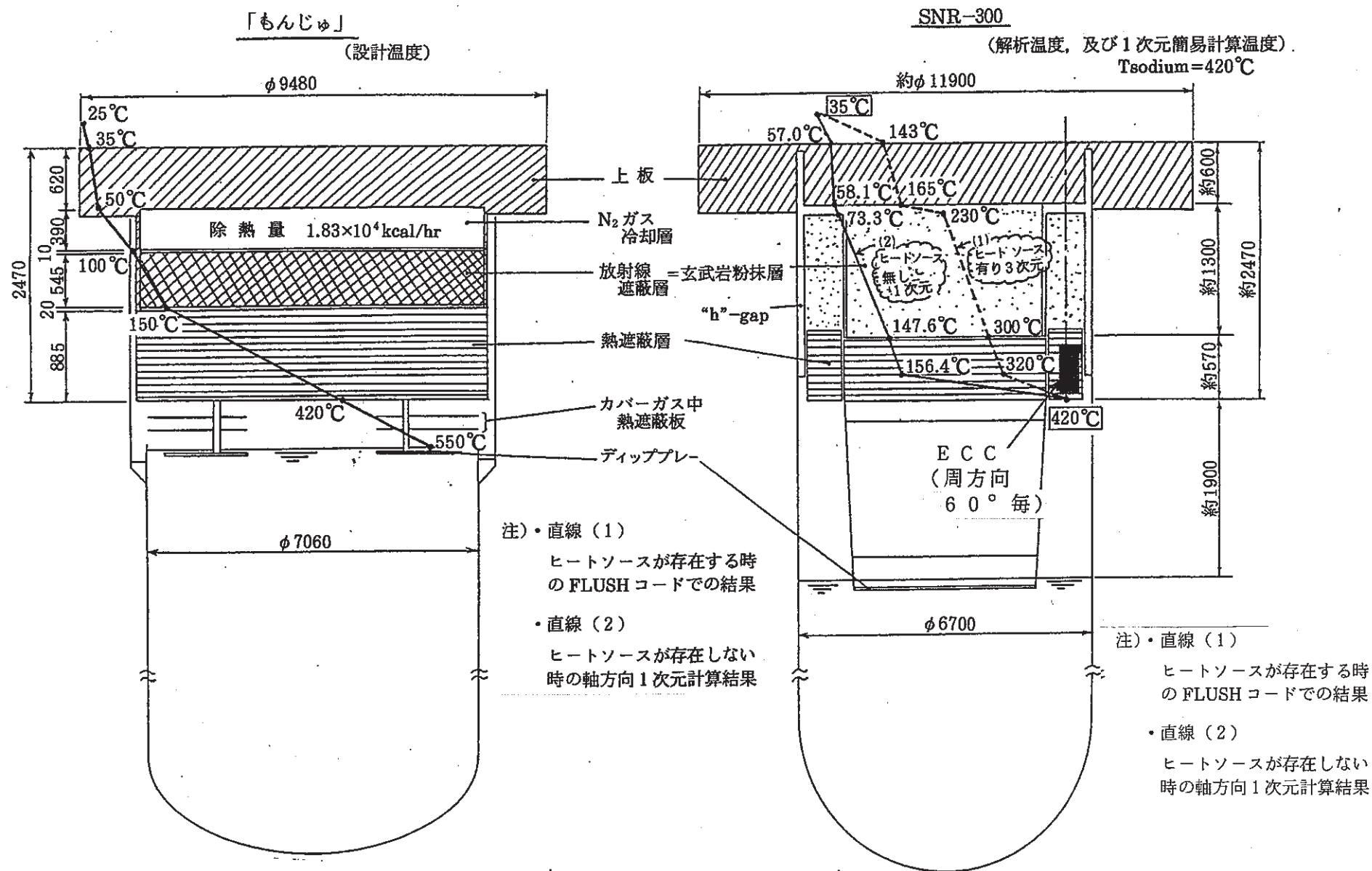


Fig. 30 Designed temperature of "Monju" and the calculated temperature through FLUSH and 1-dim. calculation ($T_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C}$)

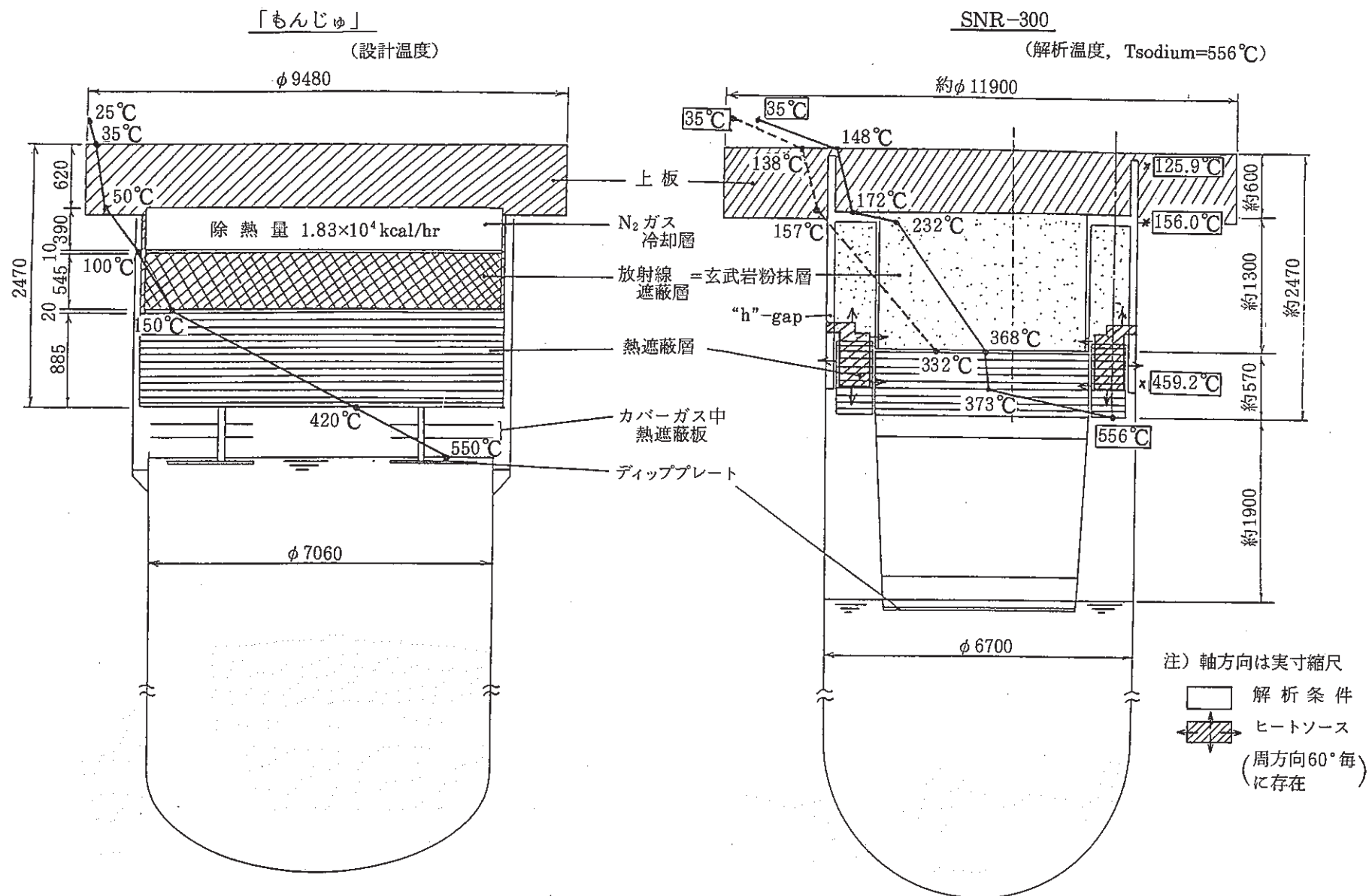


Fig. 31 Designed temperature of "Monju" and the calculated temperature of SNR-300 ($T_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C}$)

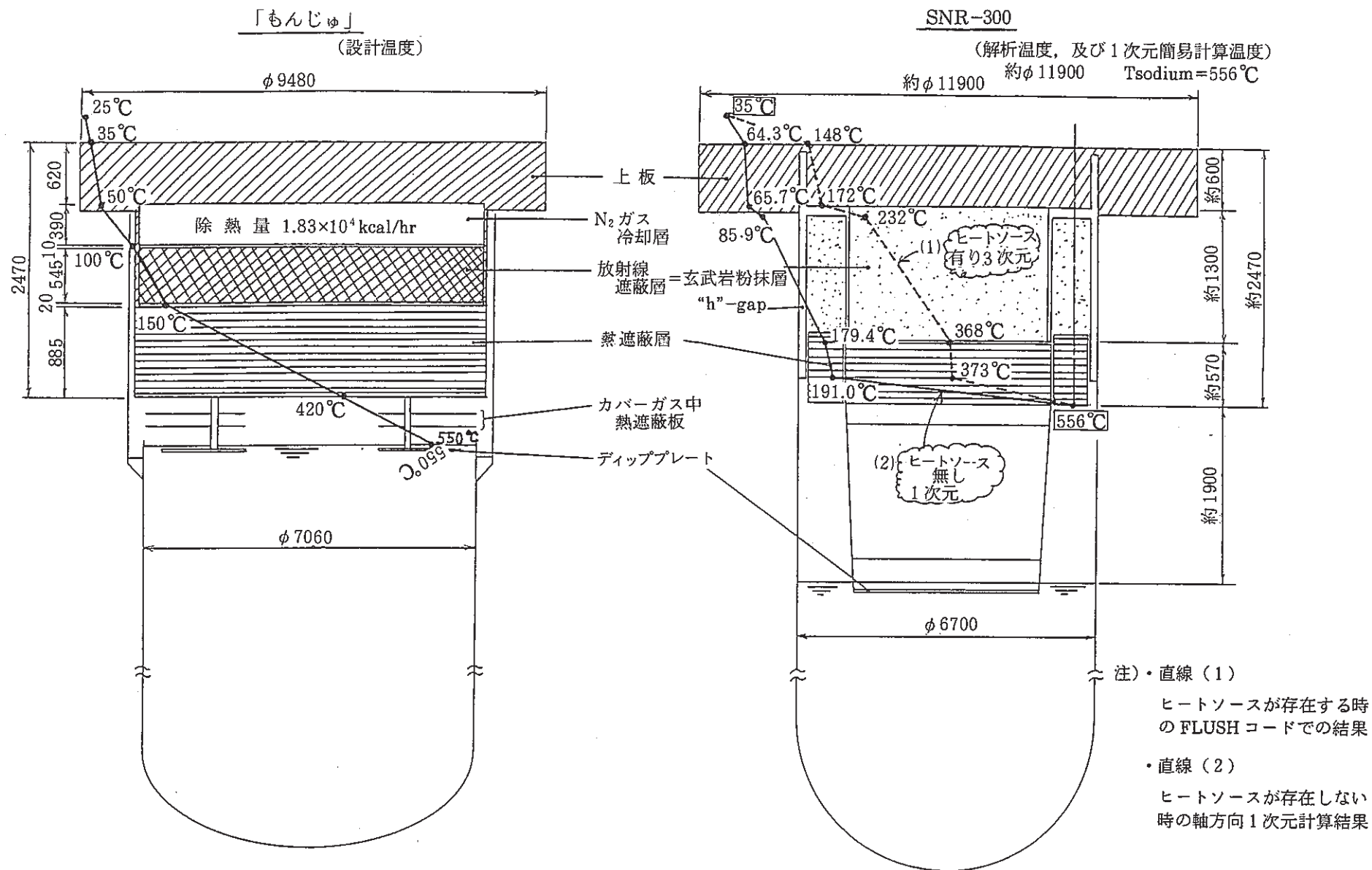


Fig. 32 Designed temperature of "Monju" and the calculated temperature through FLUSH and 1-dim. calculation ($T_{\text{sodium}} = 556^\circ\text{C}$)

SNR-300

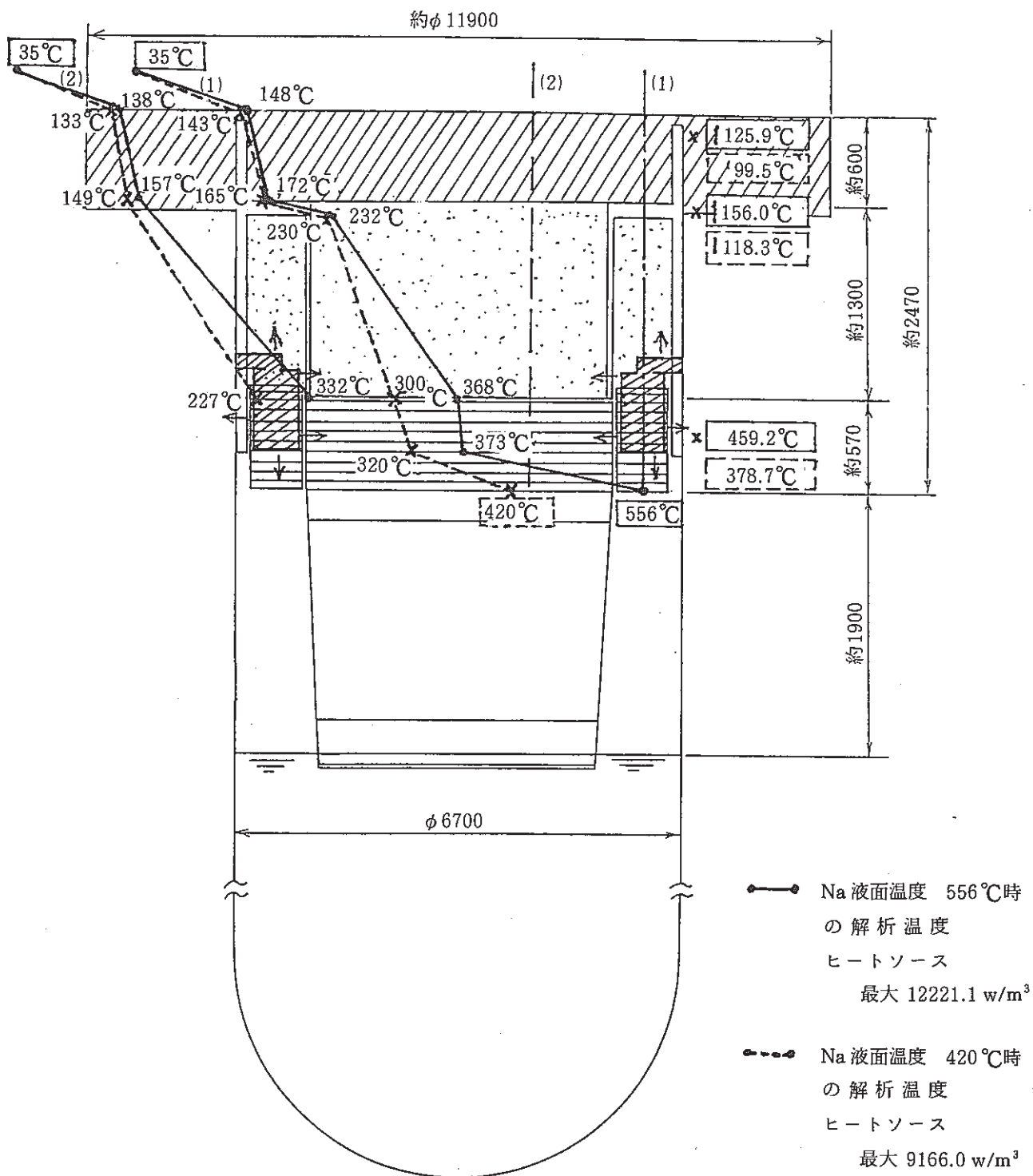
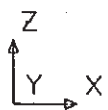
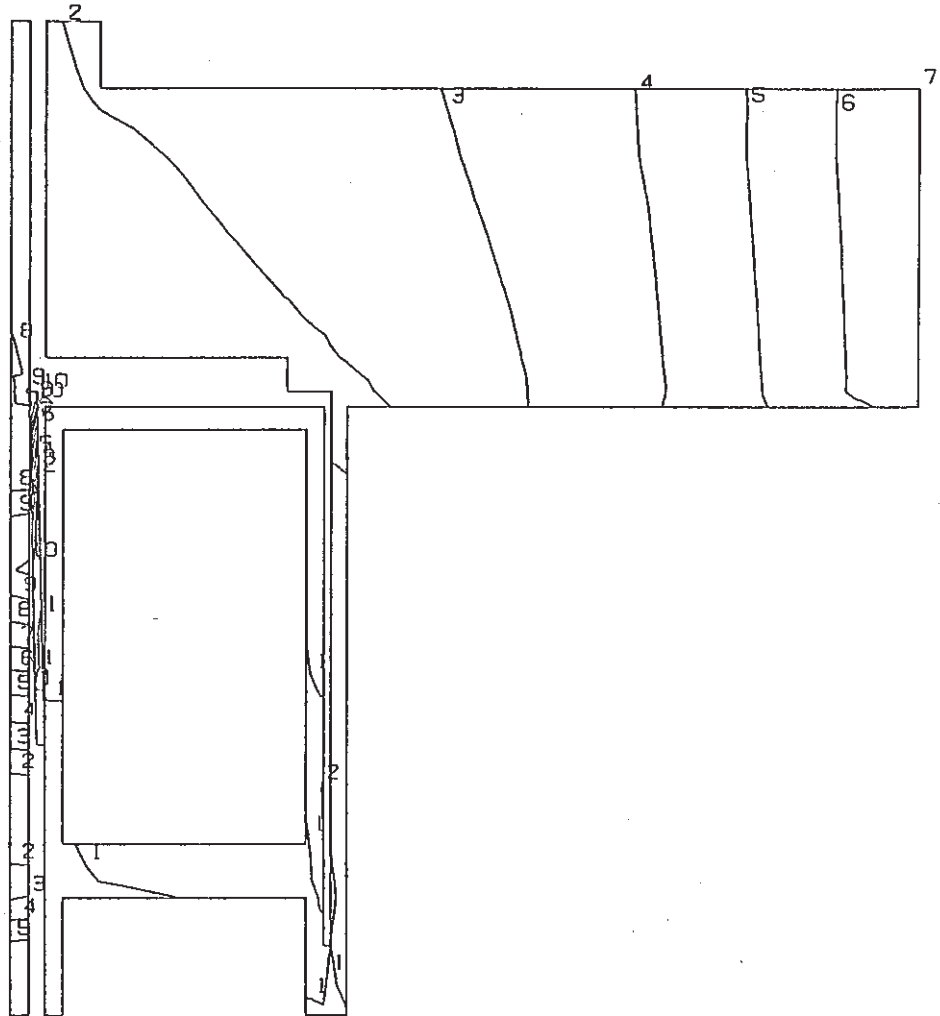


Fig. 33 Comparison of the two cases through FLUSH and 1-dim. calculation

VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES [N/m²]

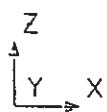
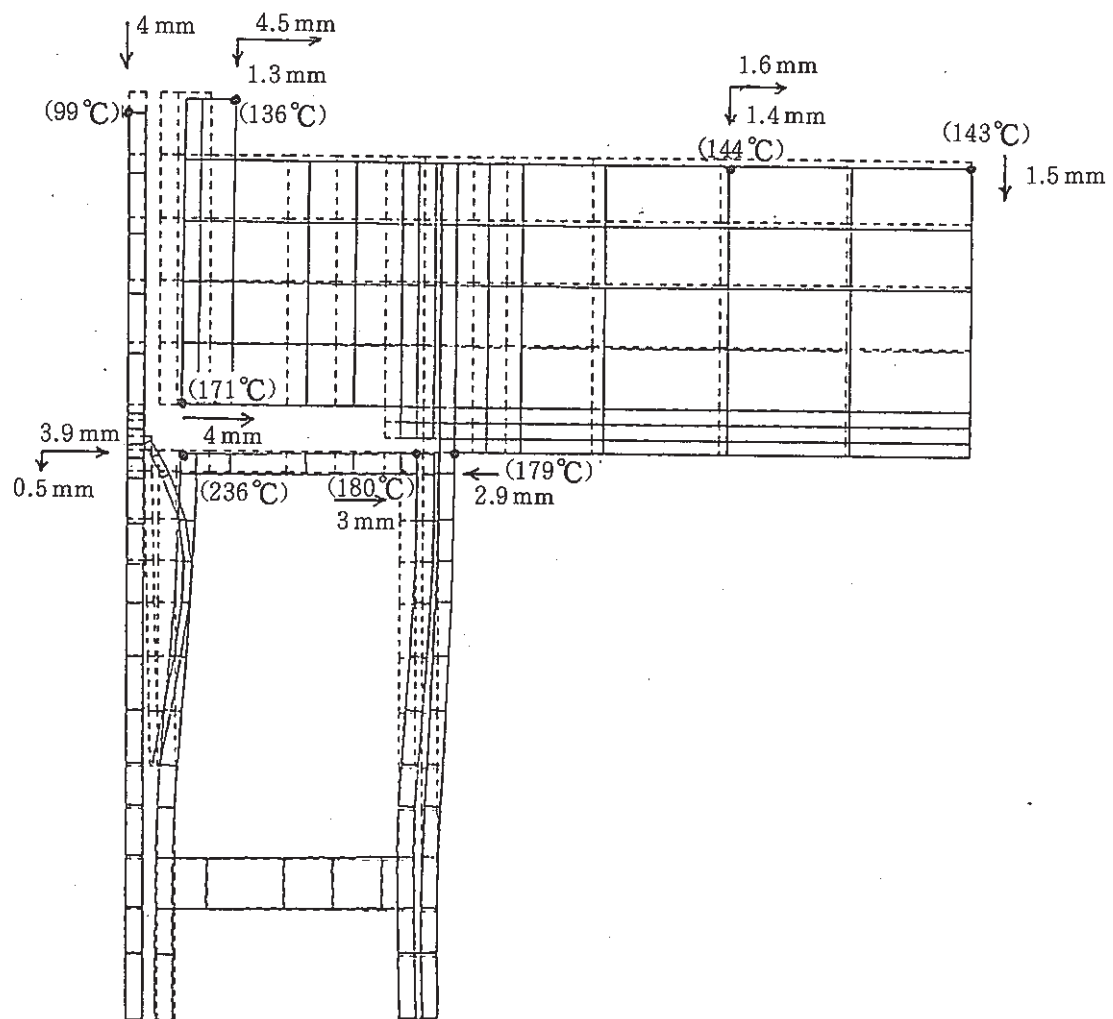
- 1 3399999
- 2 9100001
- 3 1.480+07
- 4 2.050+07
- 5 2.620+07
- 6 3.190+07
- 7 3.760+07
- 8 4.330+07
- 9 4.900+07
- 10 5.470+07



GEOM. SCALE  0.50000

Fig. 34 SNR300 upper closure system (THETA-19, Sodium Temp. 420°C)

DEFORMED SHAPE



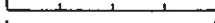
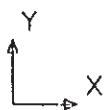
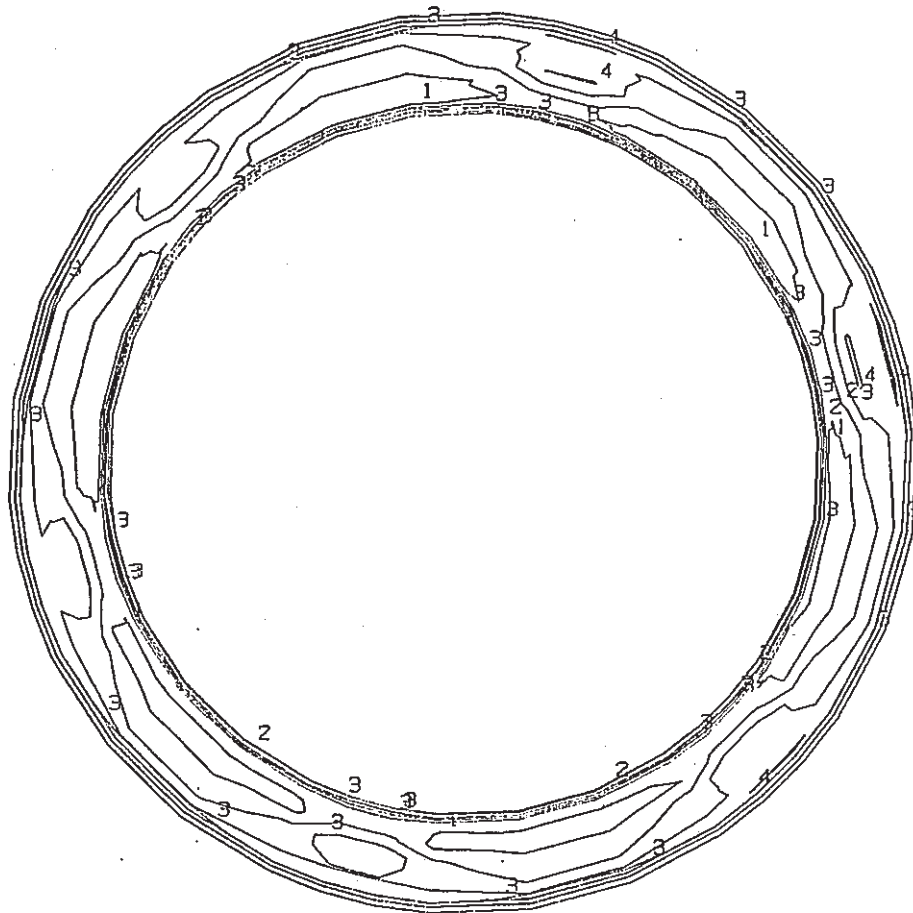
DISP. SCALE  4.00-02
 GEOM. SCALE  0.50000

Fig. 35 SNR300 upper closure system (THETA-19, Sodium Temp. 420°C)

VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES [N/m²]

1	1599999.
2	3000000.
3	4400000.
4	5800000.
5	7200000.
6	8600000.
7	1.000+07
8	1.140+07
9	1.280+07
10	1.420+07



GEOM. SCALE  1.50000

Fig. 36 SNR300 upper closure system (ZM-4, Sodium Temp. 420°C)

DEFORMED SHAPE

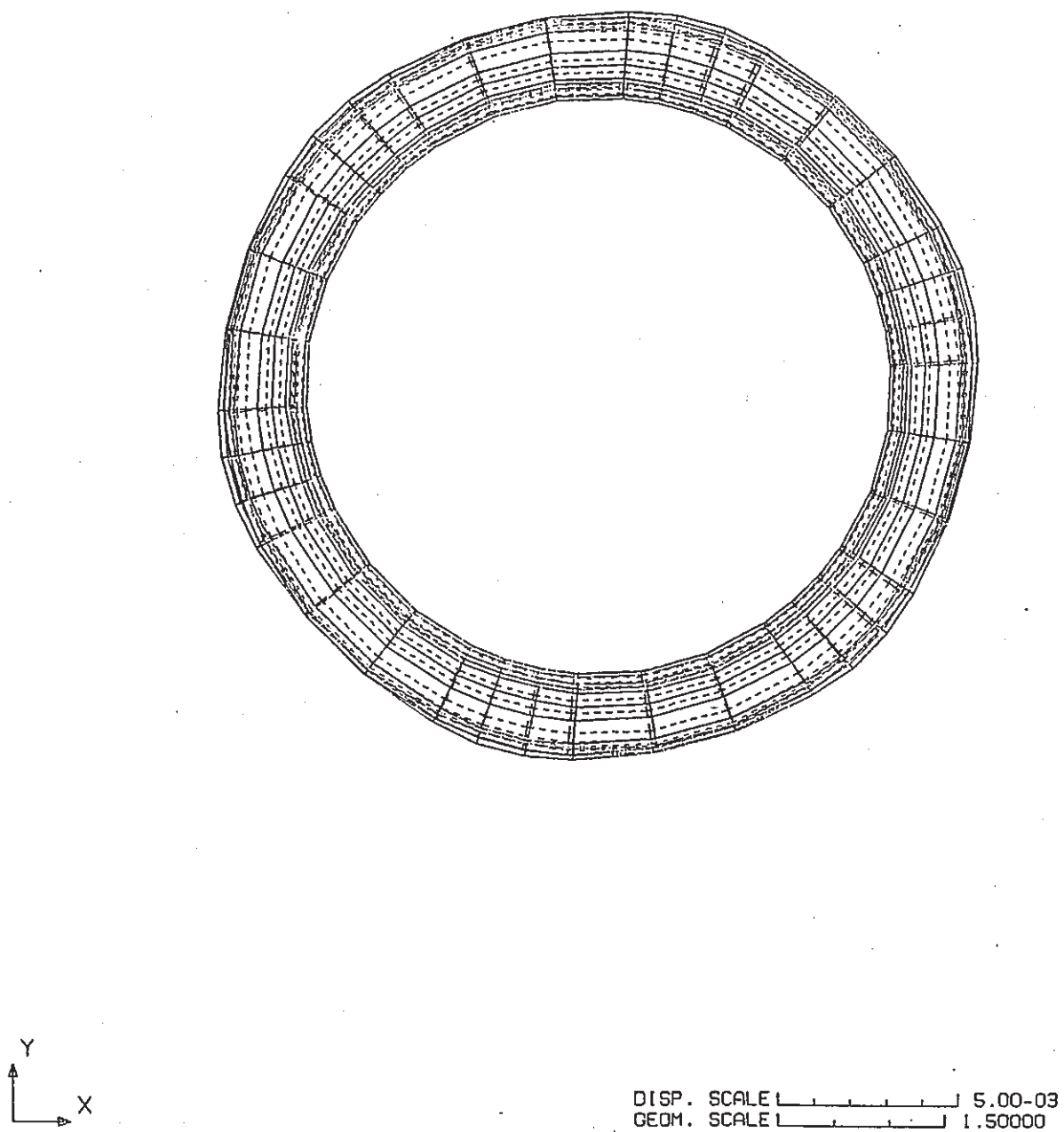
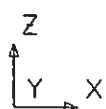
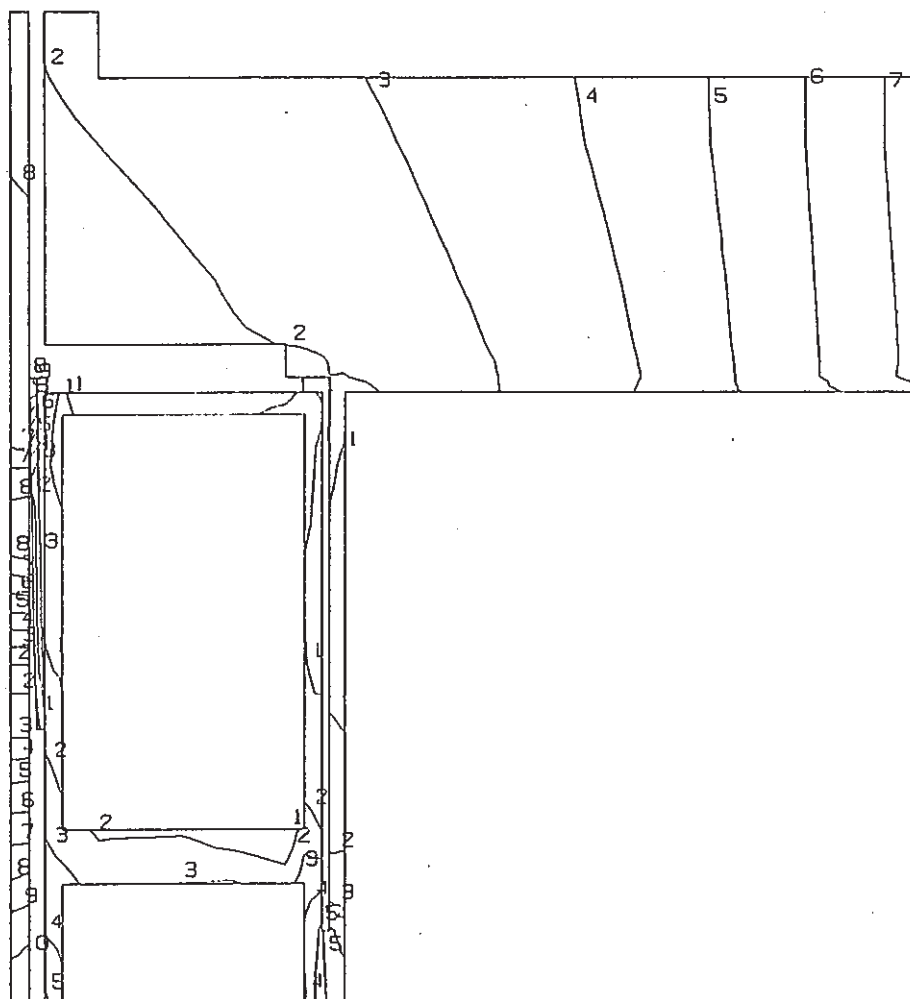


Fig. 37 SNR300 upper closure system (ZM-4, Sodium Temp. 420°C)

VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES [N/m²]

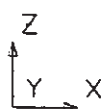
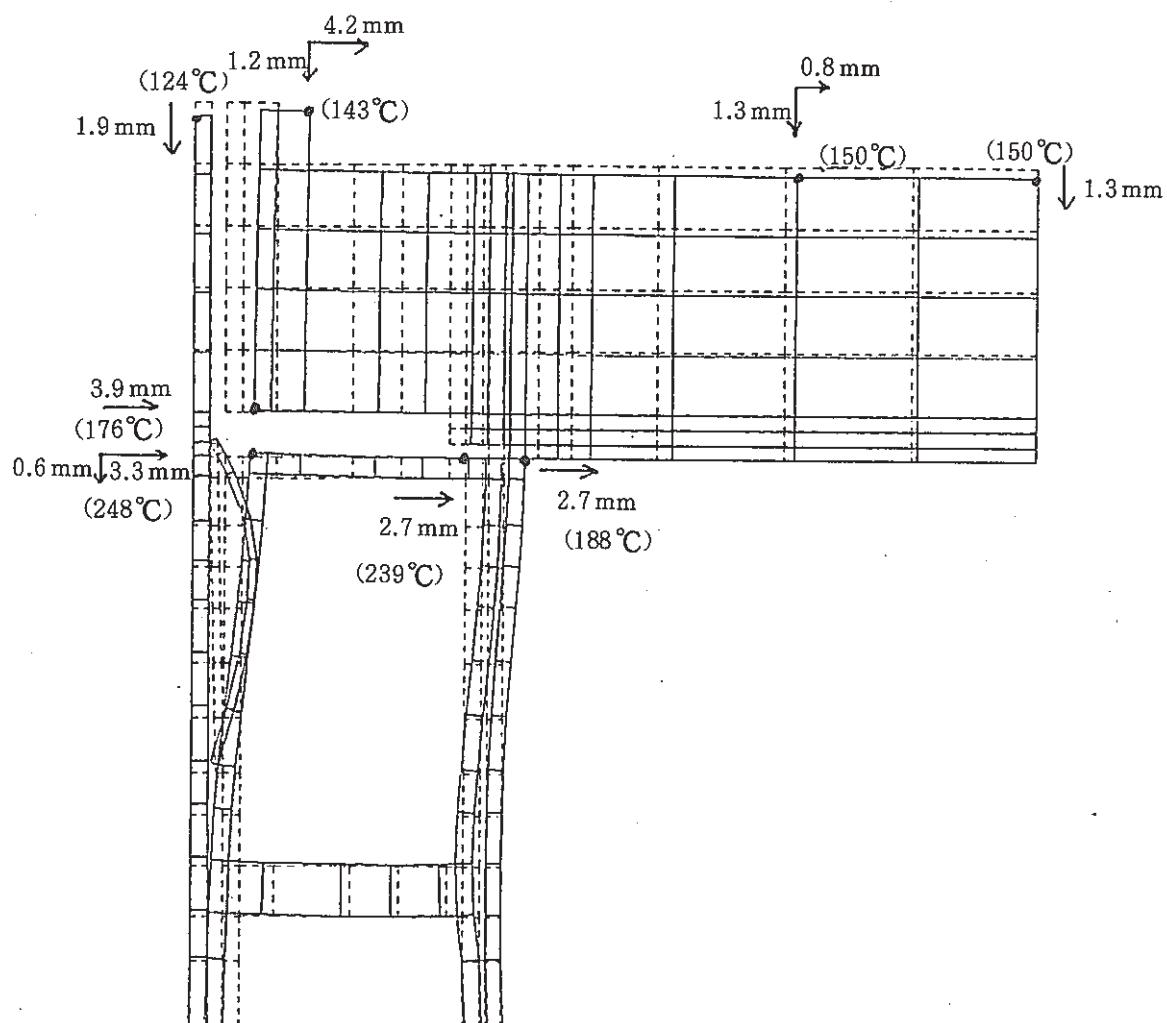
- 1 2399999.
- 2 7500000.
- 3 1.260+07
- 4 1.770+07
- 5 2.280+07
- 6 2.790+07
- 7 3.300+07
- 8 3.810+07
- 9 4.320+07
- 10 4.830+07



GEOM. SCALE  0.50000

Fig. 38 SNR300 upper closure system (THETA-19, Sodium Temp. 556°C)

DEFORMED SHAPE



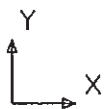
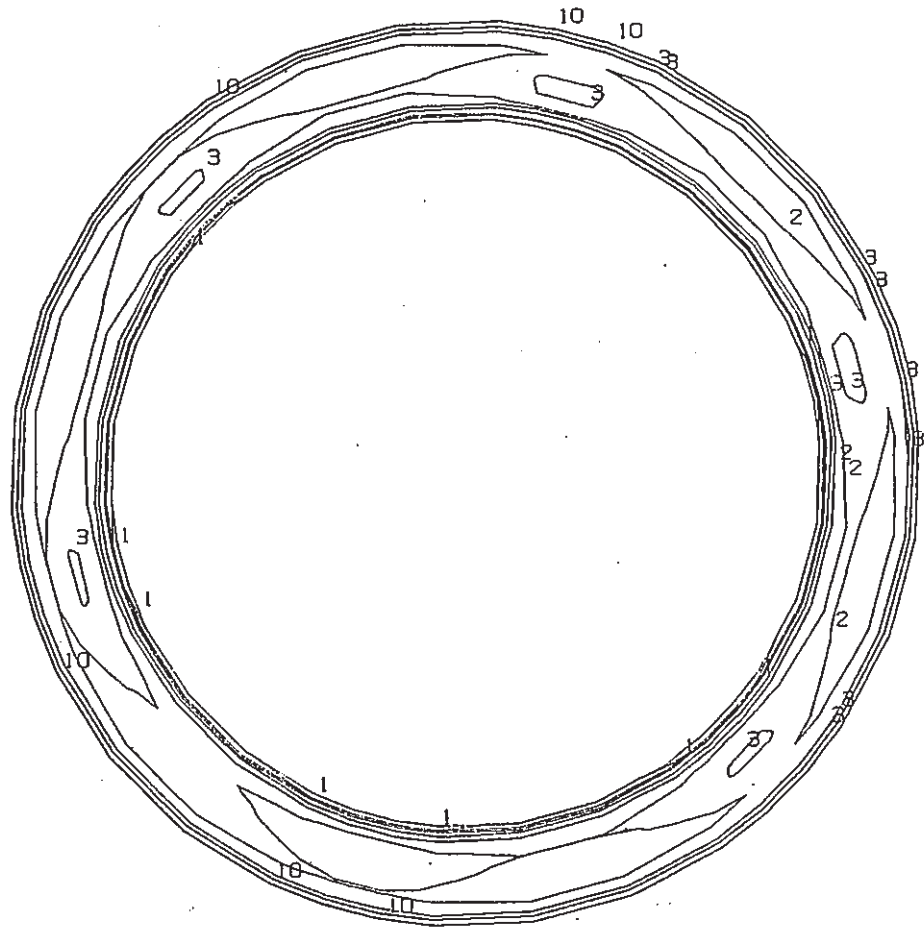
DISP. SCALE 3.00-02
 GEOM. SCALE 0.5000

Fig. 39 SNR300 upper closure system (THETA-19, Sodium Temp. 556°C)

VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES [N/m²]

- 1 8200000.
- 2 1.160+07
- 3 1.500+07
- 4 1.840+07
- 5 2.180+07
- 6 2.520+07
- 7 2.860+07
- 8 3.200+07
- 9 3.540+07
- 10 3.880+07



GEOM. SCALE 1.50000

Fig. 40 SNR300 upper closure system (ZM-4, Sodium Temp. 556°C)

DEFORMED SHAPE

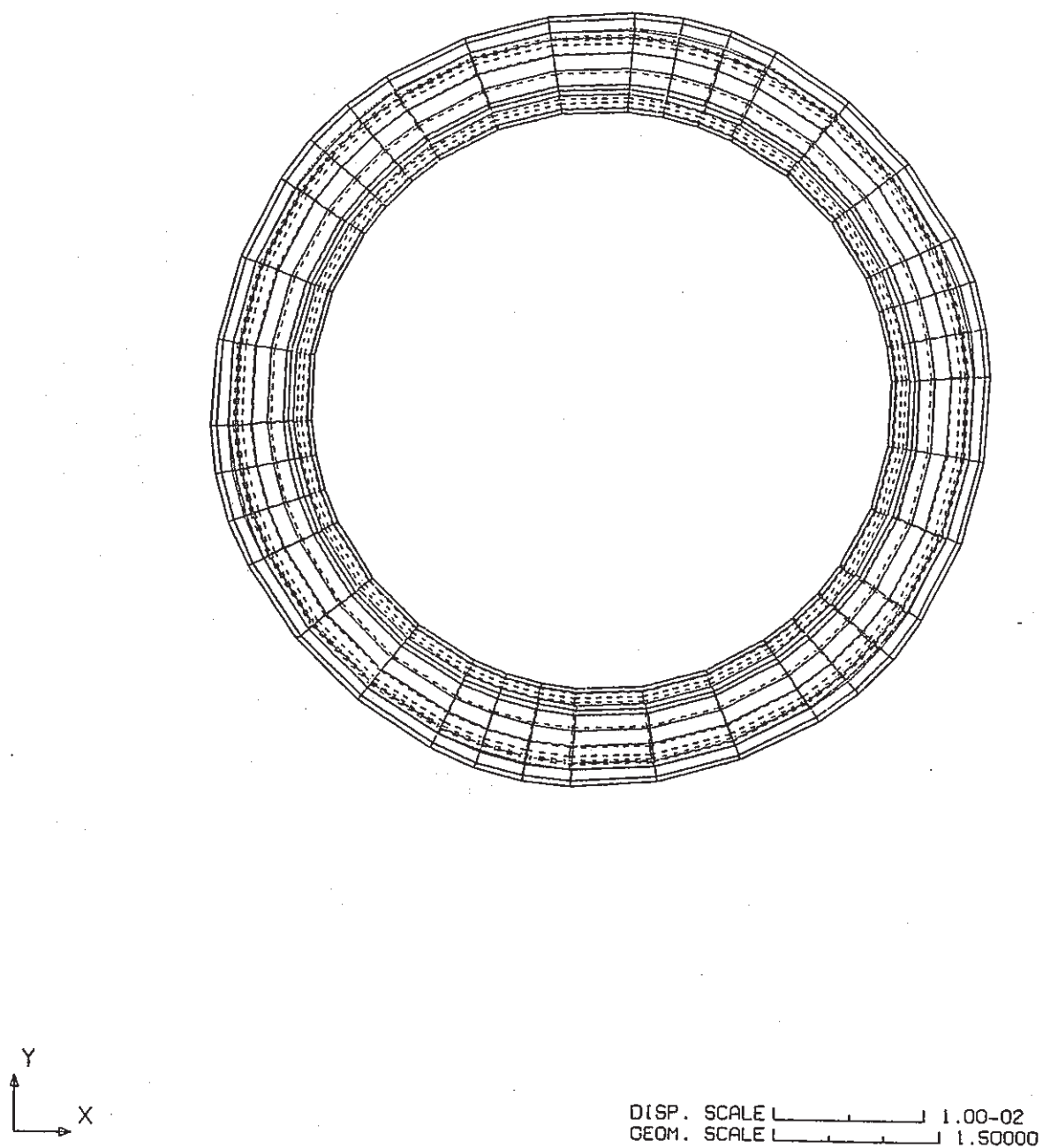
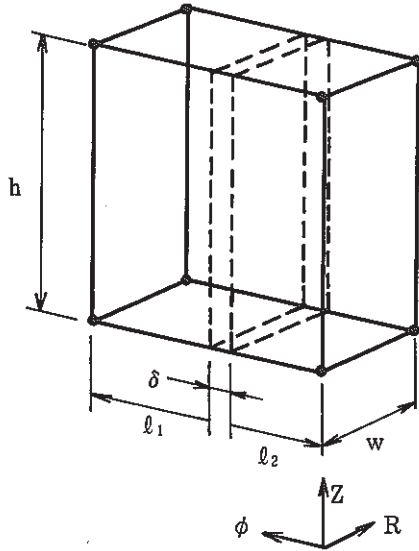


Fig. 41 SNR300 upper closure system (ZM-4, Sodium Temp. 556°C)

Appendix A Shielding Plate の等価熱伝導率 (Fig. 9 参照)

(1) Arガスギャップがストレートな場合



フェライトの熱伝導率 λ_F
 Arガスの熱伝導率 λ_{Ar}
 X方向に伝わる熱量 q_x
 (X:R, ϕ , Z)

i) r 方向の等価熱伝導率

$$\begin{aligned} q_r &= -\lambda_r(l_1 + l_2 + \delta)h\Delta T/w \\ &= -h(\lambda_F l_1 + \lambda_{Ar} \delta + \lambda_F l_2) \Delta T/w \\ \therefore \lambda_r &= [\lambda_F(l_1 + l_2) + \lambda_{Ar} \delta] / (l_1 + l_2 + \delta) \end{aligned}$$

Fig. A-1

ii) ϕ 方向の熱伝導率

$$\begin{aligned} q_\phi &= -\lambda_\phi wh\Delta T / (l_1 + l_2 + \delta) \\ &= -\lambda_\phi wh\Delta T_1 / l_1 = -\lambda_{Ar} wh\Delta T_{Ar} / \delta = -\lambda_F wh\Delta T_2 / l_2 \\ \Delta T &= \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_{Ar} \\ \therefore 1/\lambda_\phi &= [(l_1 + l_2)/\lambda_F + \delta/\lambda_{Ar}] / (l_1 + l_2 + \delta) \end{aligned}$$

iii) Z 方向の熱伝導率

$$\begin{aligned} q_z &= -\lambda_z(l_1 + l_2 + \delta)w\Delta T/h \\ &= -(\lambda_F l_1 w \Delta T/h + \lambda_{Ar} \delta w \Delta T/h + \lambda_F l_2 w \Delta T/h) \\ \therefore \lambda_z &= [\lambda_F(l_1 + l_2) + \lambda_{Ar} \delta] / (l_1 + l_2 + \delta) \end{aligned}$$

(2) Arガスギャップが“鍵状”となっている場合

(1)のストレーナの場合の応用である。

Fig. A-2 のように< 1 >, < 2 >の2つの部分に分けて計算する。

(1)の結果から, ($i = 1, 2$ として,)

$$\lambda_r^{<i>} = \{ \lambda_F(l_1^{<i>} + l_2^{<i>}) + \lambda_{Ar} \delta^{<i>} \} / (l_1^{<i>} + l_2^{<i>} + \delta^{<i>})$$

$$1/\lambda^{<i>} = \{ (l_1^{<i>} + l_2^{<i>})/\lambda_F + \delta^{<i>}/\lambda_{Ar} \} / (l_1^{<i>} + l_2^{<i>} + \delta^{<i>})$$

$$\lambda_z = \{ \lambda_F(l_1^{<i>} + l_2^{<i>}) + \lambda_{Ar} \delta^{<i>} \} / (l_1^{<i>} + l_2^{<i>} + \delta^{<i>})$$

となる。

従って,

i) R, 及び ϕ 方向:

$$\lambda_x = \Sigma_j (\lambda_x^{<j>} h^{<j>}) / \Sigma_j h^{<j>}$$

(X=R, ϕ)

ii) Z方向:

$$1/\lambda_z = \Sigma_j (h^{<j>} / \lambda_z^{<j>}) / \Sigma_j h^{<j>}$$

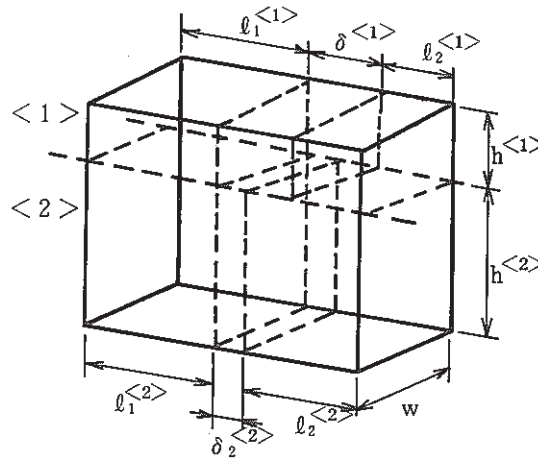


Fig. A-2

(3) Arガスギャップが円弧の場合

i) 円弧によりセルが分割されている場合

Fig. A-3のように簡略化する。即ち、 $\phi-Z$ 方面のフェライトの面積が等しくなるように、それぞれ、 l_1, l_2, δ を求める。その後、 λ_R, λ_z を(1)と同じ方法で計算する。

ii) 上記 i) 以外の場合

Fig. A-4のように、円弧に接する面で2分割する。

<1>の領域は、全てフェライトであるから、

$$\lambda_R^{<1>} = \lambda_\phi^{<1>} = \lambda_z^{<1>} = \lambda_F$$

<2>の領域は、上記(3) i) と同じ方法で求める。

その後、(2)と同じ方法で計算する。

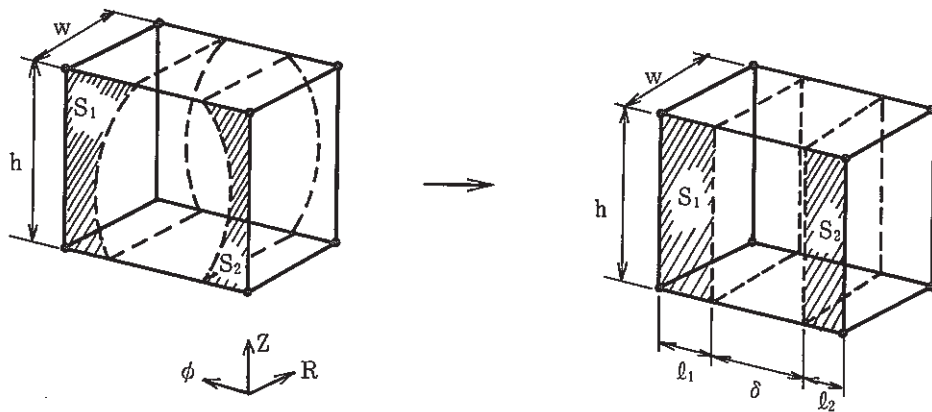


Fig. A-3

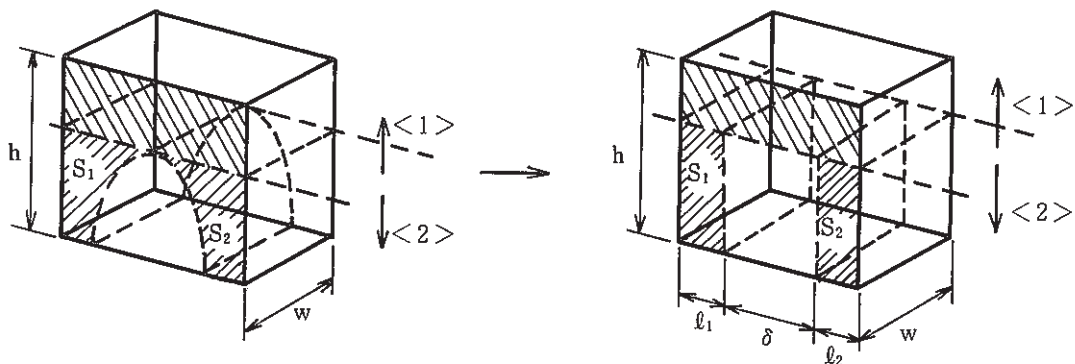
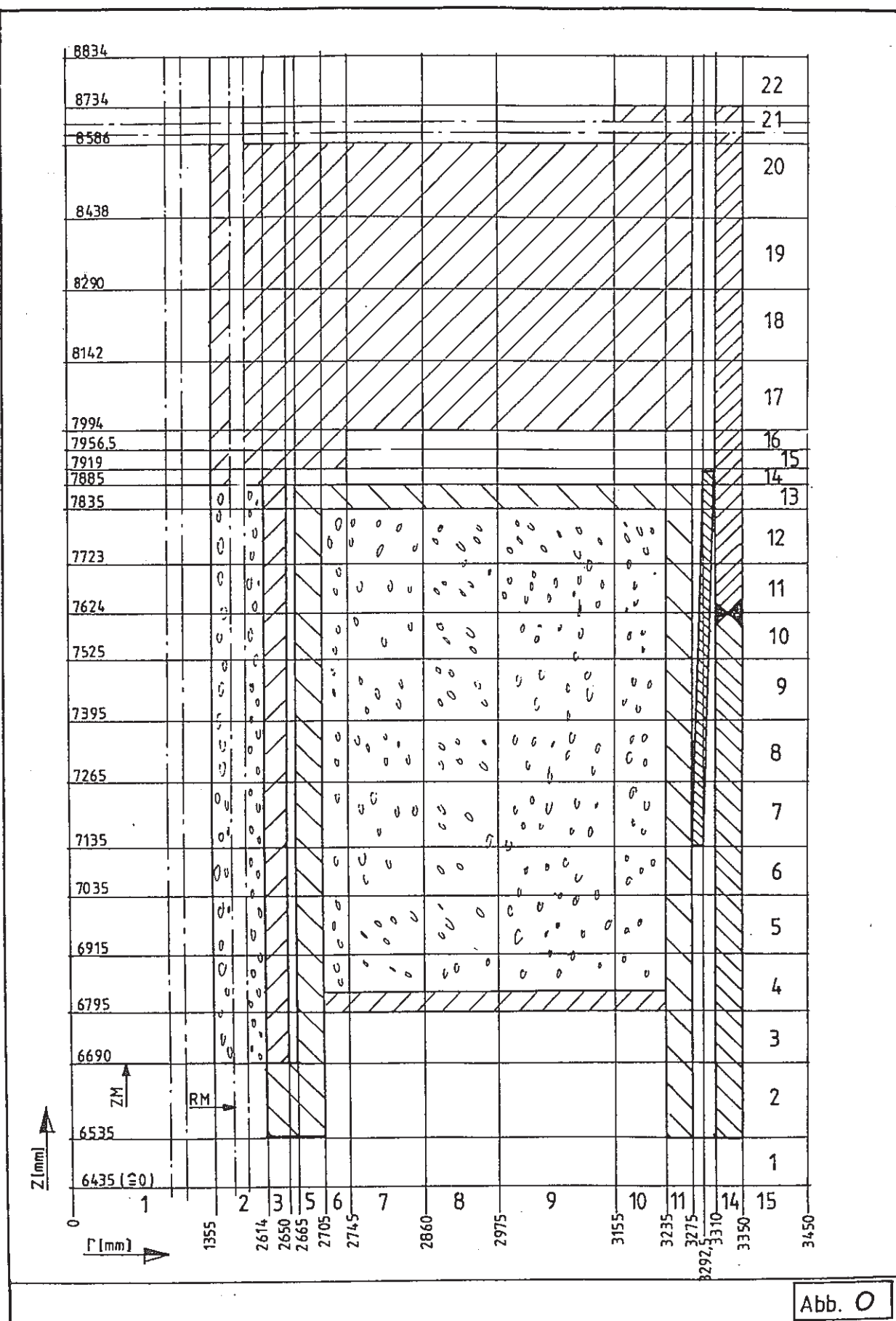


Fig. A-4

Appendix B

Interatom社より提供された解析条件



(0/1)

Abbo. 0 : Mesh sizes in r, z, φ - direction.

a) radial meshes (RM)

RM	1	2	3	4	5	6	7
Δr [m]	1.355	1.259	0.036	0.015	0.04	0.04	0.115
r [mm]	1355	2614	2650	2665	2705	2745	2860

RM	8	9	10	11	12	13	14
Δr [m]	0.115	0.18	0.08	0.04	0.0175	0.0175	0.04
r [mm]	2975	3155	3235	3275	3292.5	3310	3350

RM 15 : $\Delta r = 0.1 \text{ m}$; $r = 3450 \text{ mm}$

b) meshes in z - (axial) direction (ZM)

ZM	1	2	3	4	5	6	7
Δz [m]	0.1	0.155	0.105	0.12	0.12	0.1	0.13
z [mm]	6535 ± 100	6690	6795	6915	7035	7135	7265

ZM	8	9	10	11	12	13	14
Δz [m]	0.13	0.13	0.099	0.099	0.112	0.05	0.034
z [mm]	7395	7525	7624	7723	7835	7885	7919

ZM	15	16	17	18	19	20	21
Δz [m]	0.0375	0.0375	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148
z [mm]	7956.5	7994	8142	8290	8438	8586	8734

ZM 22 : $\Delta z = 0.1 \text{ m}$; $z = 8834 \text{ mm}$

(0/2)

c) meshes in φ -(azimuthal) direction (φ M)

φ M	1 - 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12	13 - 15	16 - 18	19 - 21
$\Delta\varphi$ [deg.]	7.	13.	7.	13.	7.	13.	7.
φ [deg.]	21.	60.	81.	120.	141.	180.	201.

φ M	22 - 24	25 - 27	28 - 30	31 - 33	34 - 36
$\Delta\varphi$ [deg.]	13.	7.	13.	7.	13.
φ [deg.]	240.	261.	300.	321.	360.

Abb. 1

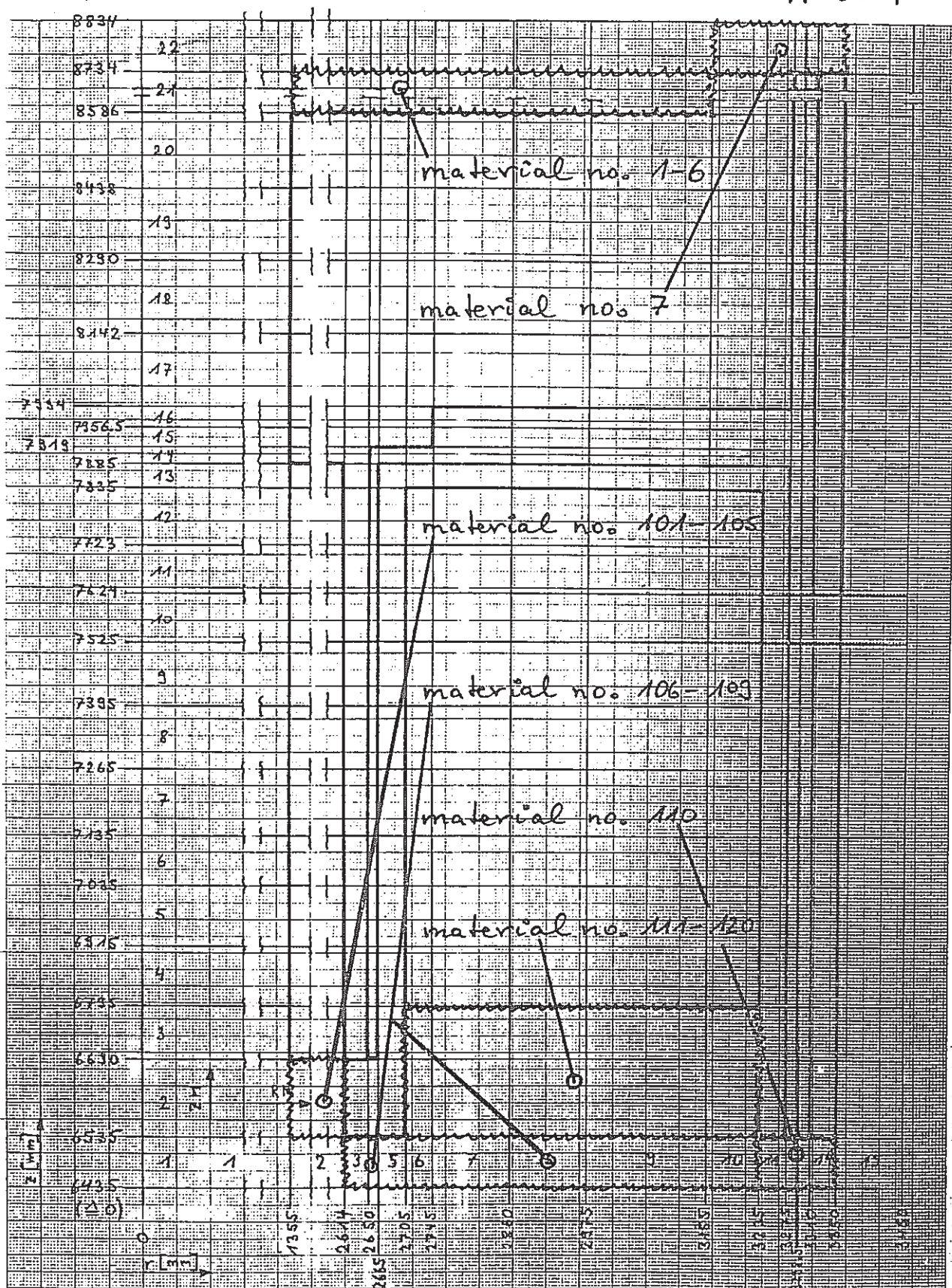


Abb. 1: Surrounding materials / z-directiona) r, z, φ - mesh and corresponding material no.material no. 1-6

RM 2-9 / ZM 21-22

φ M	1-9	10	11-15	16	17-21	22	23-27
mat.	1	2	3	2	1	2	3

φ M	28	29	30	31-36
mat.	4	5	6	1

material no. 7RM 10-14 / ZM 22 / φ M 1-36material no. 101-105

RM 2 / ZM 2

φ M	1-3	4-6	7-12	13-18	19-21	22-30	31-33	34-36
mat.	101	103	104	101	102	103	105	101

material no. 106-108ZM 1 / φ M 1-36

RM	3-5	6	10
mat.	106	107	108

(1/2)

RM 7 / ZM 1

PM	2, 8, 14, 20, 26, 32	remaining
mat.	109	107

RM 8-9 / ZM 1

PM	2, 8, 14, 20, 26, 32	remaining
mat.	109	108

material no. 110

RM 11-14 / ZM 1 / PM 1-36

material no. 111-120

RM 6 / ZM 2 / PM 1-36	-	no. 111
" / ZM 3 / "	-	no. 112
RM 10 / ZM 2 / "	-	no. 113
" / ZM 3 / "	-	no. 120

RM 7

PM	2, 8, 14, 20, 26, 32	11, 23, 29, 35	remaining
mat. (ZM 2)	117	115	111
mat. (ZM 3)	118	116	112

RM 8

PM	2, 8, 14, 20, 26, 32	11, 23, 29, 35	remaining
mat. (ZM 2)	117	115	113
mat. (ZM 3)	118	116	114

RM 9

PM	2, 8, 14, 20, 26, 32	remaining
mat. (ZM 2)	117	113
mat. (ZM 3)	118	114

b) material propertiesheat transfer coefficient in r-z-direction α_r, α_z [W/m²]effective radiation coefficient in r-z-direction $\varepsilon''_r, \varepsilon''_z$ default - value : $\varepsilon'' = 0$ material no. 1-7
($\alpha_{r,z}$ inclusive radiation)

$$t_{\text{sodium}} = 420^\circ\text{C}$$

mat.	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha_{r,z}$	15.0	9.1	6.0	8.6	10.0	11.7	18.3

$$t_{\text{sodium}} = 556^\circ\text{C}$$

mat.	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha_{r,z}$	16.7	10.1	6.7	9.6	11.1	13.0	18.4

material no. 101-105

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_r = 4.8 - 2.7 * 10^{-3} * \checkmark \\ \alpha_z = 5.2 - 2.7 * 10^{-3} * \checkmark \end{array} \right\} \text{no. 101}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_r = 4.9 - 2.3 * 10^{-3} * \checkmark \\ \alpha_z = 5.4 - 2.3 * 10^{-3} * \checkmark \end{array} \right\} \text{no. 102}$$

(114)

$$d_r = 5.1 - 2.1 * 10^{-3} * \nu$$

$$d_z = 5.7 - 2.1 * 10^{-3} * \nu$$

} no. 103

$$d_r = 5.0 - 2.1 * 10^{-3} * \nu$$

$$d_z = 5.5 - 2.1 * 10^{-3} * \nu$$

} no. 104

$$d_r = 4.8 - 2.4 * 10^{-3} * \nu$$

$$d_z = 5.3 - 2.4 * 10^{-3} * \nu$$

} no. 105

$$\epsilon''_{r,z} = 2.1 * 10^{-3}$$

- no. 101-105

material no. 106-109

$$d_z = 0.387 - 9.56 * 10^{-5} * \nu$$

- no. 106

$$d_z = 0.394 - 1.18 * 10^{-4} * \nu$$

- no. 107

$$d_z = 0.401 - 1.4 * 10^{-4} * \nu$$

- no. 108

$$d_z = 1.71 - 1.18 * 10^{-4} * \nu$$

- no. 109

$$\epsilon''_z = 2.32 * 10^{-3}$$

- no. 106-109

material no. 110

$$t_{\text{sodium}} = 420^\circ \text{C} \rightarrow d_z = 38.$$

$$t_{\text{sodium}} = 556^\circ \text{C} \rightarrow d_z = 49.$$

material no. 111-120

heat conductivity in r, z, φ - direction $\lambda_r, \lambda_z, \lambda_\varphi$
[W / m K]

$$\lambda_r = \lambda_\varphi = 0.754 + 2.51 * 10^{-2} * \vartheta \quad - \text{no. 111-120}$$

$$\lambda_z = 4.53 - 6.8 * 10^{-3} * \vartheta \quad - \text{no. 111}$$

$$\lambda_z = 4.33 - 5.73 * 10^{-3} * \vartheta \quad - \text{no. 112}$$

$$\lambda_z = 16.3 - 2.61 * 10^{-2} * \vartheta \quad - \text{no. 113}$$

$$\lambda_z = 10.3 - 1.11 * 10^{-2} * \vartheta \quad - \text{no. 114}$$

$$\lambda_z = 17.9 - 2.48 * 10^{-2} * \vartheta \quad - \text{no. 115}$$

$$\lambda_z = 10.6 - 1.72 * 10^{-2} * \vartheta \quad - \text{no. 116}$$

$$\lambda_z = 23.3 - 1.64 * 10^{-2} * \vartheta \quad - \text{no. 117}$$

$$\lambda_z = 12.6 + 1.31 * 10^{-3} * \vartheta \quad - \text{no. 118}$$

$$\lambda_z = 22.9 - 3.69 * 10^{-2} * \vartheta \quad - \text{no. 119}$$

$$\lambda_z = 12.1 - 1.14 * 10^{-2} * \vartheta \quad - \text{no. 120}$$

heat transfer coefficient and effective radiation
coefficient between RM 10 and RM 11 (ZM 2, 3)

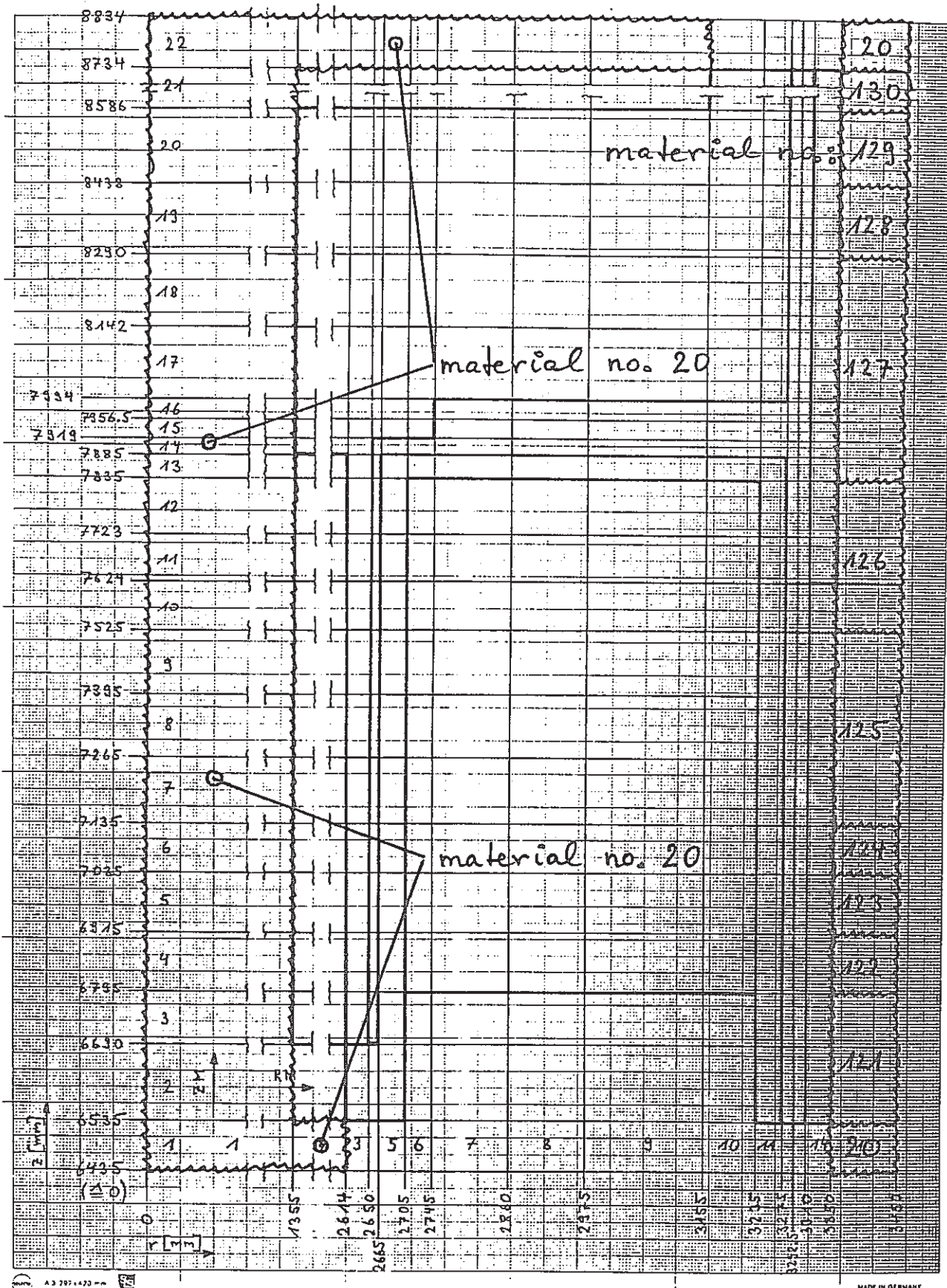
$\alpha_r, \varepsilon''_r$

$$\alpha_r = 1.52 + 2.58 * 10^{-3} * \vartheta$$

$$\varepsilon''_r = 0.2$$

} no. 119, 120

Abb. 2



(2/1)

Abb. 2 : Adiabatic and surrounding materials /
/ r - direction

a) r, z, φ - mesh and corresponding material no.

material no. 20

RM 1 / ZM 1-22 / φ M 1-36

RM 2 / ZM 1 / φ M 1-36

RM 2-9 / ZM 22 / φ M 1-36

material no. 20, 121-130

RM 15 / φ M 1-36

ZM	1	2-3	4	5	6	7-9	10-12
mat.	20	121	122	123	124	125	126

ZM	13-18	19	20	21	22
mat.	127	128	129	130	20

b) material properties

material no. 20

adiabatic material

material no. 121-130

heat transfer coefficient in r-direction α_r [W/m²K]
 temperature ϑ in [°C]

(2/2)

$$\alpha_r = 3676. + 2.76 * \nu \quad - \quad \text{no. 121}$$

$$\alpha_r = 5720. + 4.28 * \nu \quad - \quad \text{no. 122}$$

$$\alpha_r = 5456. + 4.08 * \nu \quad - \quad \text{no. 123}$$

$$\alpha_r = 5516. + 4.14 * \nu \quad - \quad \text{no. 124}$$

$$\alpha_r = 5880. + 4.4 * \nu \quad - \quad \text{no. 125}$$

$$\alpha_r = 2427. - 1.29 * \nu \quad - \quad \text{no. 126}$$

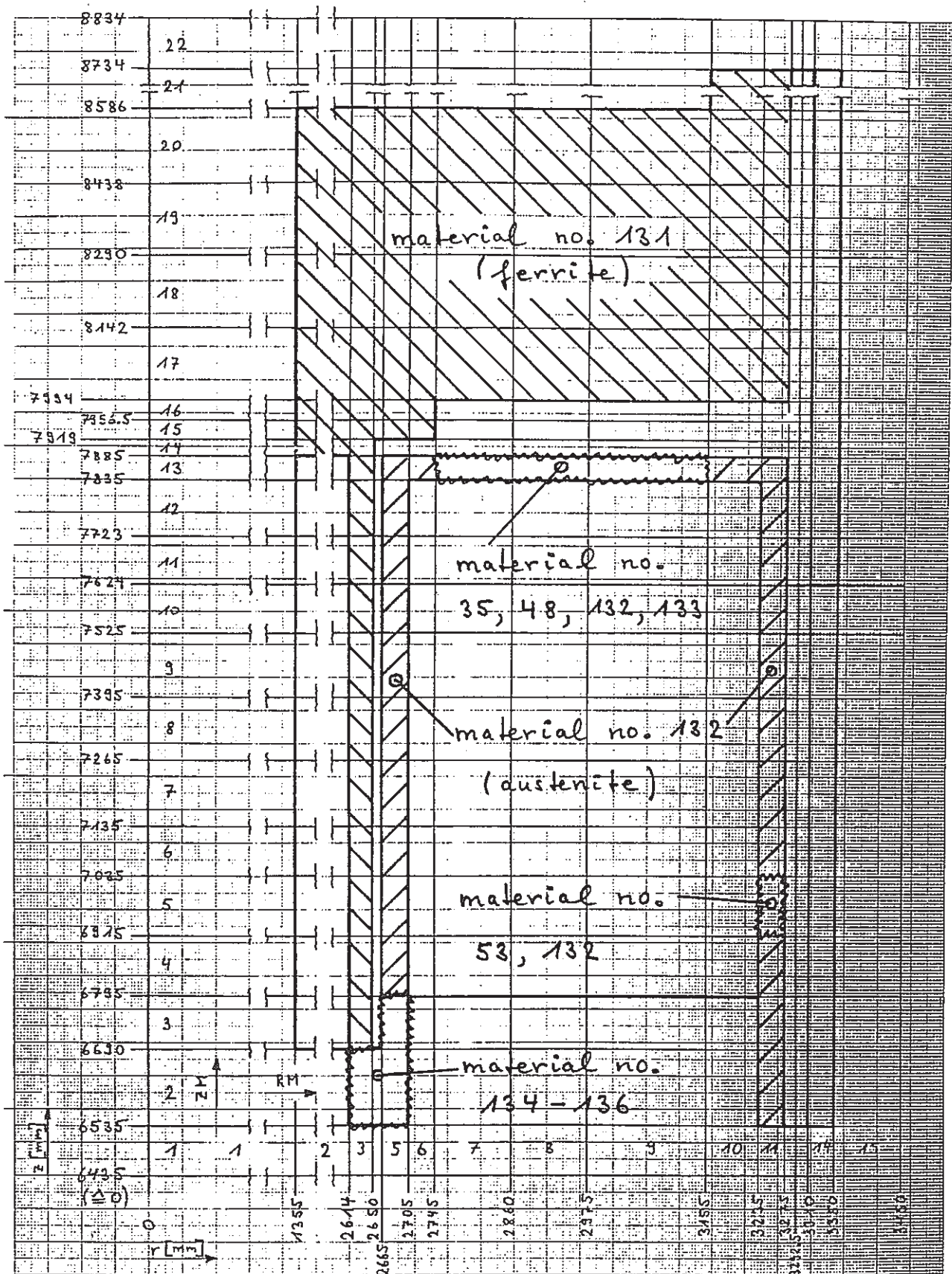
$$\alpha_r = 1680. - 0.89 * \nu \quad - \quad \text{no. 127}$$

$$\alpha_r = 10942. - 5.81 * \nu \quad - \quad \text{no. 128}$$

$$\alpha_r = 21840. - 11.6 * \nu \quad - \quad \text{no. 129}$$

$$\alpha_r = 8661 - 3.41 * \nu \quad - \quad \text{no. 130}$$

Abb. 3



(3/1)

Abb. 3 : Pure and effective ferrite and austenite materials

a) r, z, φ - mesh and corresponding material no.

material no. 131

RM 2 / ZM 14-20 / φ M 1-36

RM 3 / ZM 3-20 / φ M 1-36

RM 4-6 / ZM 15-20 / φ M 1-36

RM 7-9 / ZM 17-20 / φ M 1-36

RM 10-11 / ZM 17-21 / φ M 1-36

material no. 132

RM 5 / ZM 4-13 / φ M 1-36

RM 6 / ZM 13 / φ M 1-36

RM 10 / ZM 13 / φ M 1-36

RM 11 / ZM 2-4 / φ M 1-36

RM 11 / ZM 6-13 / φ M 1-36

material no. 35, 48, 132, 133

RM 7-8 / ZM 13

φ M	1	2	3-7	8	9-10	11	12-13	14
mat.	132	133	132	133	132	35	132	133

φ M	15-19	20	21-22	23	24-25	26	27-28
mat.	132	133	132	48	132	133	132

PM	29	30-31	32	33-34	35	36
mat.	35	132	133	132	35	132

material no. 53, 132

RM 11 / ZM 5

PM 4, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 34 — no. 53

PM remaining — no. 132

material no. 134-136

RM 3-4 / ZM 2 / PM 1-36 — no. 134

RM 5 / ZM 2 / PM 1-36 — no. 135

RM 5 / ZM 3 / PM 1-36 — no. 136

b) material properties

heat conductivity in r, z, φ -direction $\lambda_r, \lambda_z, \lambda_\varphi$ [W/mK]

default-values : $\lambda = 10^{30}$

material no. 131 (ferrite)

$$\lambda_r = \lambda_z = \lambda_\varphi = 54.6 - 2.9 * 10^{-2} * \vartheta$$

material no. 132 (austenite)

$$\lambda_r = \lambda_z = \lambda_\varphi = 14.7 + 1.1 * 10^{-2} * \vartheta$$

material no. 35, 48, 133

$$\lambda_r = 8.87 + 2.186 * 10^{-2} * \vartheta$$

$$\lambda_z = 11.78 + 8.82 * 10^{-3} * \vartheta$$

$$\lambda_\varphi = 10.31 + 2.7 * 10^{-2} * \vartheta$$

} no. 35

(3/3)

$$\begin{aligned}\lambda_r &= 3.08 + 3.268 * 10^{-2} * \nu \\ \lambda_z &= 8.86 + 6.64 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 0.174 + 3.378 * 10^{-2} * \nu\end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{no. 48}$$

$$\begin{aligned}\lambda_r &= 4.78 + 1.177 * 10^{-2} * \nu \\ \lambda_z &= 11.94 + 8.93 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 2.34 + 4.813 * 10^{-2} * \nu\end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{no. 133}$$
material no. 53

$$\begin{aligned}\lambda_r = \lambda_z &= 12.03 + 9 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 17.96 + 1.34 * 10^{-2} * \nu\end{aligned}$$

material no. 134-136

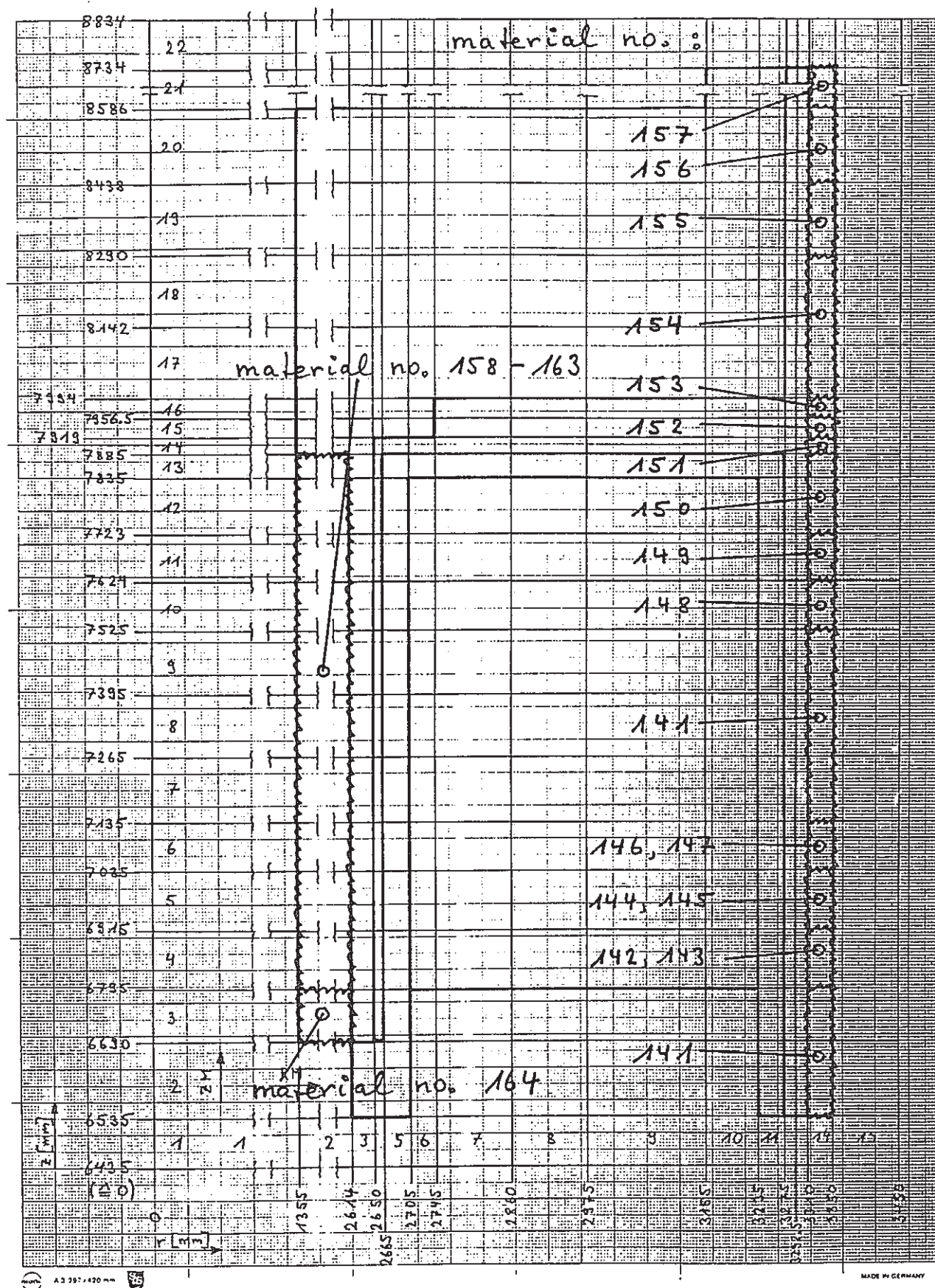
$$\begin{aligned}\lambda_r = \lambda_\varphi &= 9.01 + 6.74 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_z &= 23.98 + 1.79 * 10^{-2} * \nu\end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{no. 134, 135}$$

$$\lambda_r = \lambda_\varphi = \lambda_z = 14.7 + 1.1 * 10^{-2} * \nu \quad - \text{no. 136}$$

heat transfer coefficient and effective radiation
coefficient between RM5 and RM6 (ZM 2,3) $\alpha_r, \varepsilon''_r$

$$\begin{aligned}\alpha_r &= 2.47 + 4.19 * 10^{-3} * \nu \\ \varepsilon''_r &= 0.127\end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{no. 135, 136}$$

Abb. 4



(4/1)

Abb. 4 : Effective materials in radial mesh 2 and 14a) r, z, φ - mesh and corresponding material no.material no. 141, 148 - 157RM 14 / φ M 1-36

ZM	2-3, 7-9	10	11	12-13	14	15	16
mat.	141	148	149	150	151	152	153

ZM	17-18	19	20	21
mat.	154	155	156	157

material no. 141-147RM 14 / φ M 4, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 34

ZM	4	5	6
mat.	143	145	147

RM 14 / φ M remaining

ZM	4	5	6
mat.	142	144	146

material no. 158-163

RM 2 / ZM 4-13

φ M	1-3	4-6	7-15	16-18	19-21	22-24	25-27
mat.	158	159	160	159	158	161	162

φM	28 - 30	31 - 33	34 - 36
mat.	163	162	161

material no. 164

RM 2 / ZM 3 / φM 1-36

b) material properties

material no. 141 - 157

$$\lambda_r = \lambda_\varphi = \lambda_z = 14.7 + 1.1 * 10^{-2} * \nu - \text{no. 141, 142, 144, 146, 148}$$

$$\lambda_r = 14.54 + 1.09 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 14.88 + 1.11 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 14.9 + 1.11 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 143

$$\lambda_r = \lambda_z = 12.07 + 9.03 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 17.9 + 1.34 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 145

$$\lambda_r = 14.5 + 1.09 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 14.91 + 1.12 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 14.94 + 1.12 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 147

$$\lambda_r = 47.4 - 2.52 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 63.5 - 3.37 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 63.42 - 3.37 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 149

$$\lambda_r = 43.75 - 2.32 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 68.36 - 3.63 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 68.25 - 3.63 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 150

(4/3)

$$\lambda_r = 41.91 - 2.23 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 71.45 - 3.79 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 72.62 - 3.86 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 151

$$\lambda_r = 35.69 - 1.9 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 84.08 - 4.47 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 83.8 - 4.45 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 152

$$\lambda_r = 31.62 - 1.68 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 95.08 - 5.05 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 94.67 - 5.03 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 153

$$\lambda_r = 31.34 - 1.67 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 95.99 - 5.1 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 95.55 - 5.08 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 154

$$\lambda_r = 23.78 - 1.26 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 127.6 - 6.78 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 145.7 - 7.74 * 10^{-2} * \nu$$

} no. 155

$$\lambda_r = 14.88 - 0.79 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 208.1 - 0.1106 * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 204.8 - 0.1088 * \nu$$

} no. 156, 157

heat transfer coefficient and effective radiation

coefficient between RM 14 and RM 15 (ZM 2-21)

$\alpha_r, \varepsilon''_r$ (in addition to α_r , material no. 121-130)

$$\alpha_r = 2.8 + 4.58 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.09$$

} no. 141

$$\alpha_r = 2.725 + 4.46 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.088$$

} no. 142, 143

$$\alpha_r = 2.6 + 4.25 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.084$$

} no. 144, 145

$$\alpha_r = 2.63 + 4.25 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.085$$

} no. 146, 147

$$\alpha_r = 1.29 + 2.11 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.2$$

} no. 148

$$\alpha_r = 1.23 + 2.01 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.35$$

} no. 149

$$\alpha_r = 1.22 + 1.99 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.38$$

} no. 150-154

$$\alpha_r = 1.39 + 2.28 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.58$$

} no. 155

$$\alpha_r = 1.6 + 2.62 * 10^{-3} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.82$$

} no. 156

$$\alpha_r = 5.42 + 3.08 * 10^{-2} * \nu$$

$$\varepsilon''_r = 0.45$$

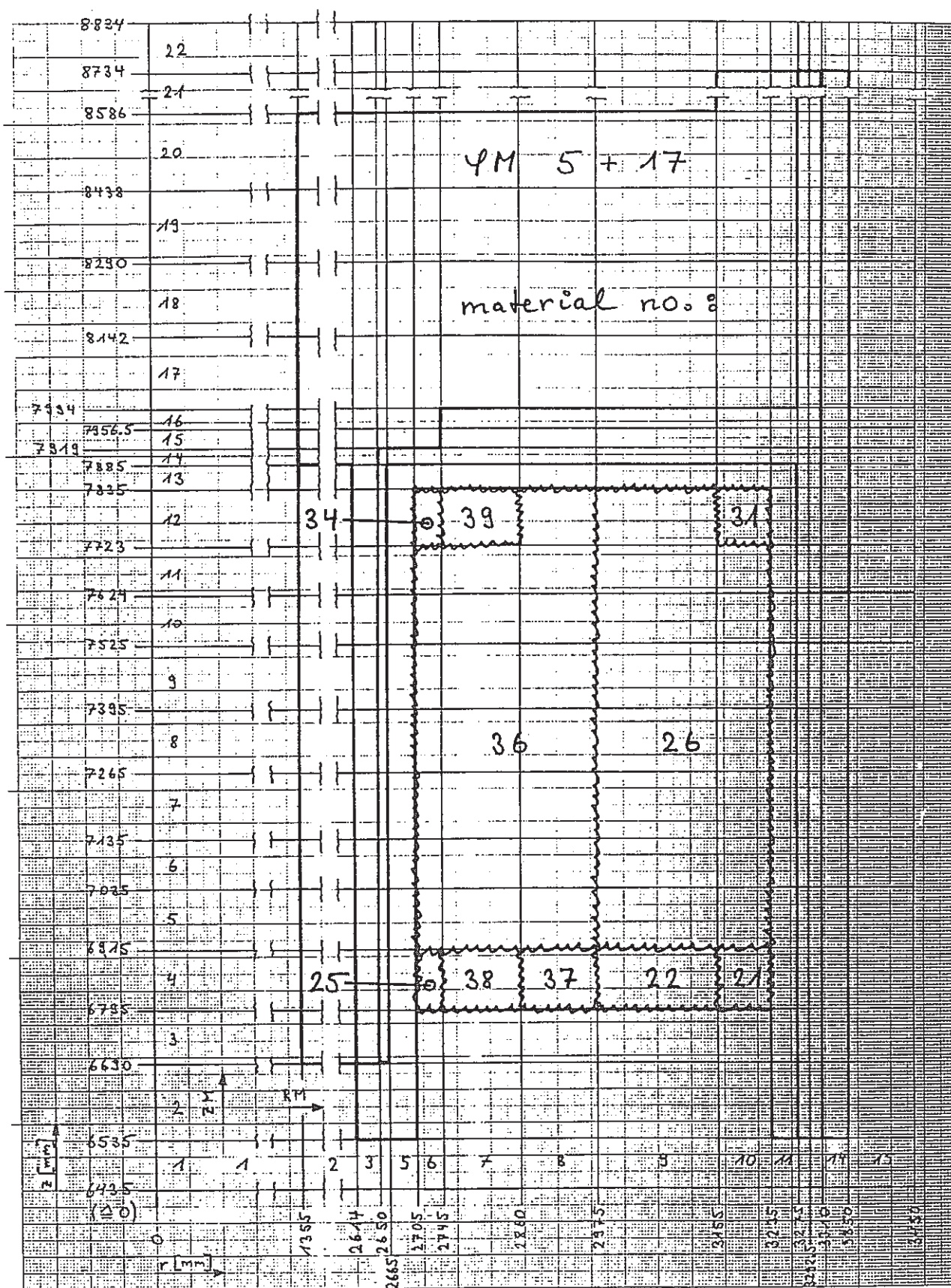
} no. 157

(4/5)

material no. 158 - 164

λ_{φ}	=	0.6	-	no. 158-164
λ_r	=	3.3		} no. 158
λ_z	=	7.2	- $3.0 * 10^{-3} *$ φ	
λ_r	=	3.2		} no. 159
λ_z	=	6.5	- $2.6 * 10^{-3} *$ φ	
λ_r	=	3.0		} no. 160
λ_z	=	5.8	- $2.2 * 10^{-3} *$ φ	
λ_r	=	2.1		} no. 161
λ_z	=	8.7	- $3.9 * 10^{-3} *$ φ	
λ_r	=	1.8		} no. 162
λ_z	=	8.8	- $4.0 * 10^{-3} *$ φ	
λ_r	=	2.5		} no. 163
λ_z	=	7.4	- $2.9 * 10^{-3} *$ φ	
λ_r	=	47.2	- $2.5 * 10^{-2} *$ φ	} no. 164
λ_z	=	28.6	- $1.35 * 10^{-2} *$ φ	
λ_{φ}	=	47.2	- $2.5 * 10^{-2} *$ φ	

Abb. 5



(5/1)

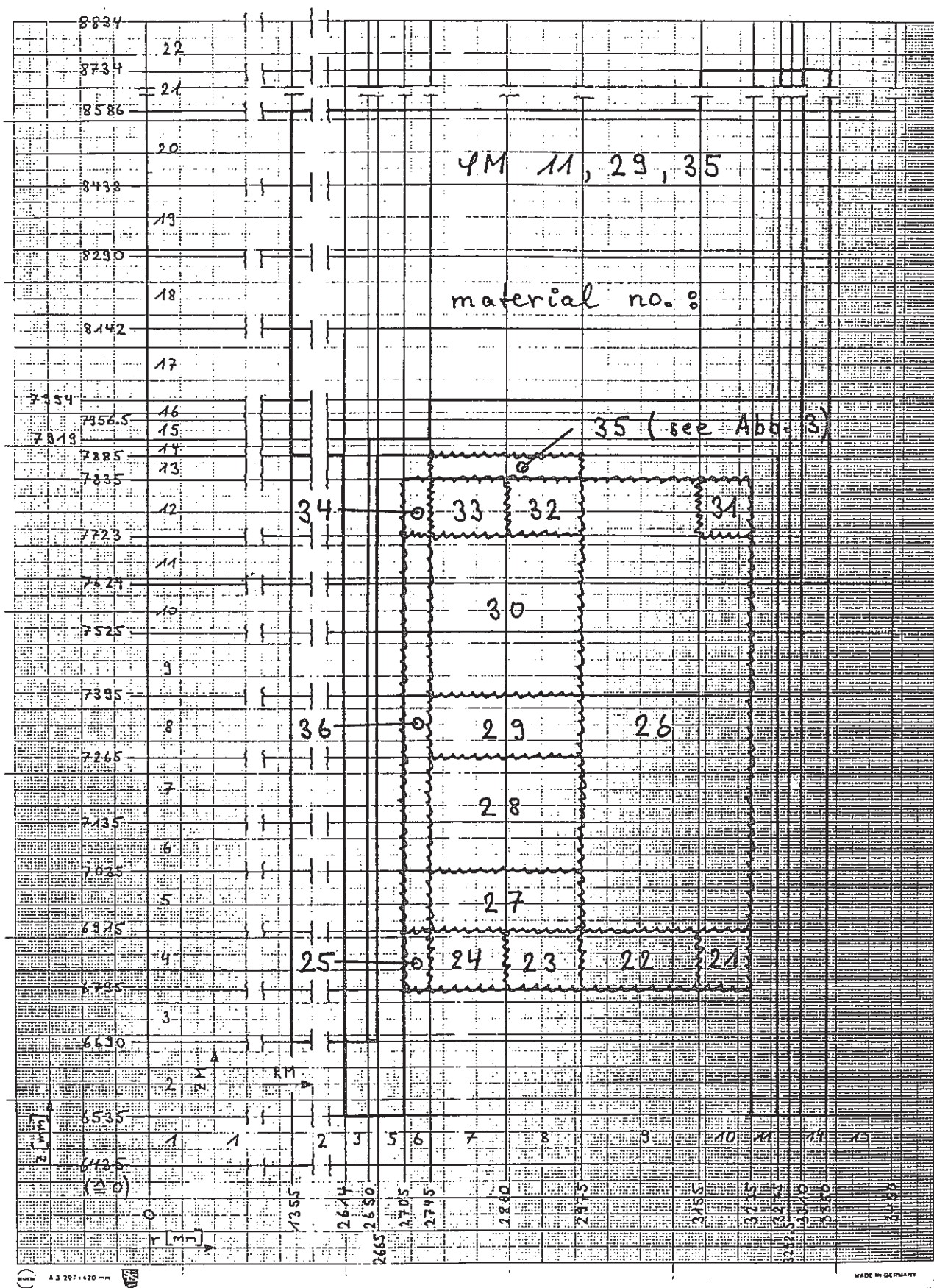
Abb. 5 : Other effective materials in ΨM 5, 17a) r, z, φ - mesh and corresponding material no. ΨM 5, 17

RM 6	/	ZM 4	-	no. 25
RM 7	/	"	-	no. 38
RM 8	/	"	-	no. 37
RM 9	/	"	-	no. 22
RM 10	/	"	-	no. 21
RM 6-8	/	ZM 5-11	-	no. 36
RM 9, 10	/	"	-	no. 26
RM 6	/	ZM 12	-	no. 34
RM 7	/	"	-	no. 39
RM 8	/	"	-	no. 36
RM 9	/	"	-	no. 26
RM 10	/	"	-	no. 31

b) material properties

see page (7/1)

Abb. 6



(6/1)

Abb. 6 : Other effective materials in $\Psi M 11, 29, 35$ a) r, z, φ - mesh and corresponding material no. $\Psi M 11, 29, 35$

RM 6	/	ZM 4	-	no. 25
RM 7	/	"	-	no. 24
RM 8	/	"	-	no. 23
RM 9	/	"	-	no. 22
RM 10	/	"	-	no. 21
RM 6	/	ZM 5-11	-	no. 36
RM 7-8	/	ZM 5	-	no. 27
RM 9-10	/	ZM 5-11	-	no. 26
RM 7-8	/	ZM 6-7	-	no. 28
"	/	ZM 8	-	no. 29
"	/	ZM 9-11	-	no. 30
RM 6	/	ZM 12	-	no. 34
RM 7	/	"	-	no. 33
RM 8	/	"	-	no. 32
RM 9	/	"	-	no. 26
RM 10	/	"	-	no. 31

b) material properties

see page (7/1)

Abb. 7: Other effective materials in $\Psi M 23$ a) r, z, φ -mesh and corresponding material no. $\Psi M 23$

RM 6	/	ZM 4	-	no. 25
RM 7	/	"	-	no. 41
RM 8	/	"	-	no. 40
RM 9	/	"	-	no. 22
RM 10	/	"	-	no. 21
RM 6	/	ZM 5-11	-	no. 36
RM 7-8	/	ZM 5	-	no. 42
RM 9-10	/	ZM 5-11	-	no. 26
RM 7-8	/	ZM 6-7	-	no. 43
"	/	ZM 8	-	no. 44
"	/	ZM 9-11	-	no. 45
RM 6	/	ZM 12	-	no. 34
RM 7	/	"	-	no. 47
RM 8	/	"	-	no. 46
RM 9	/	"	-	no. 26
RM 10	/	"	-	no. 31

b) material propertiesmaterial no. 21-47

$$\lambda_r = 5.27 + 4.29 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.718 + 1.28 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 5.13 + 4.19 * 10^{-3} * \nu$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_r \\ \lambda_z \\ \lambda_\varphi \end{array} \right\} \text{no. 21}$$

$\lambda_r = 5.53 + 4.47 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 22
$\lambda_z = 1.1 + 1.54 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 5.13 + 4.13 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r = 4.07 + 4.35 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 23
$\lambda_z = 2.53 + 2.46 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 0.99 + 2.56 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r = 3.85 + 4.25 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 24
$\lambda_z = 2.47 + 2.42 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 0.989 + 2.56 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r = 5.29 + 4.3 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 25
$\lambda_z = 0.504 + 1.14 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 5.12 + 4.18 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r = \lambda_z = 0.942 + 1.2 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 26
$\lambda_\varphi = 0.344 + 7.92 * 10^{-4} * \nu$		
$\lambda_r = 1.44 + 2.62 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 27
$\lambda_z = 2.45 + 2.29 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 0.374 + 9.99 * 10^{-4} * \nu$		
$\lambda_r = 1.52 + 2.76 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 28
$\lambda_z = 2.75 + 2.47 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 0.376 + 1.01 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r = 1.82 + 2.7 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 29
$\lambda_z = 2.18 + 2.09 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 0.395 + 1.0 * 10^{-3} * \nu$		

(7/3)

$$\lambda_r = 1.37 + 2.4 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 2.52 + 2.31 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.371 + 9.56 * 10^{-4} * v$$

} no. 30

$$\lambda_r = 0.663 + 1.0 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 0.563 + 9.41 * 10^{-4} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.34 + 7.82 * 10^{-4} * v$$

} no. 31

$$\lambda_r = 0.721 + 9.37 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 2.53 + 2.32 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.448 + 1.29 * 10^{-3} * v$$

} no. 32

$$\lambda_r = 0.602 + 1.204 * 10^{-2} * v$$

$$\lambda_z = 2.47 + 2.29 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.446 + 1.29 * 10^{-3} * v$$

} no. 33

$$\lambda_r = 0.716 + 1.04 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 0.349 + 8.01 * 10^{-4} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.346 + 7.97 * 10^{-4} * v$$

} no. 34

material no. 35 see page (3/2)

$$\lambda_r = \lambda_z = 0.999 + 1.24 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.346 + 7.95 * 10^{-4} * v$$

} no. 36

$$\lambda_r = 5.55 + 4.48 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 1.13 + 1.56 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 5.13 + 4.2 * 10^{-3} * v$$

} no. 37

$$\lambda_r = 5.34 + 4.39 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 1.1 + 1.54 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 5.13 + 4.2 * 10^{-3} * v$$

} no. 38

(7/4)

$\lambda_r =$	0.764	+	$1.13 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 39
$\lambda_z =$	0.95	+	$1.21 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi =$	0.345	+	$7.95 * 10^{-4} * \nu$		
$\lambda_r =$	2.65	+	$4.53 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 40
$\lambda_z =$	3.91	+	$3.35 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi =$	1.08	+	$2.72 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r =$	2.27	+	$5.19 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 41
$\lambda_z =$	3.86	+	$3.31 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi =$	1.02	+	$2.82 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r =$	1.93	+	$4.54 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 42
$\lambda_z =$	3.91	+	$3.34 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi =$	0.537	+	$1.54 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r =$	2.11	+	$4.97 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 43
$\lambda_z =$	4.51	+	$3.71 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi =$	0.233	+	$3.17 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r =$	2.68	+	$4.63 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 44
$\lambda_z =$	3.37	+	$2.94 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi =$	0.61	+	$1.61 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r =$	1.8	+	$4.04 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 45
$\lambda_z =$	4.04	+	$3.39 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi =$	0.503	+	$1.41 * 10^{-3} * \nu$		

(7/5)

$$\lambda_r = 0.967 + 2.303 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 4.07 + 3.41 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_{\varphi} = 0.835 + 3.38 * 10^{-3} * \nu$$

} no. 46

$$\lambda_r = 0.458 + 2.292 * 10^{-2} * \nu$$

$$\lambda_z = 4.01 + 3.38 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_{\varphi} = 0.824 + 3.37 * 10^{-3} * \nu$$

} no. 47

material no. 48 see page (3/3)

Abb. 8

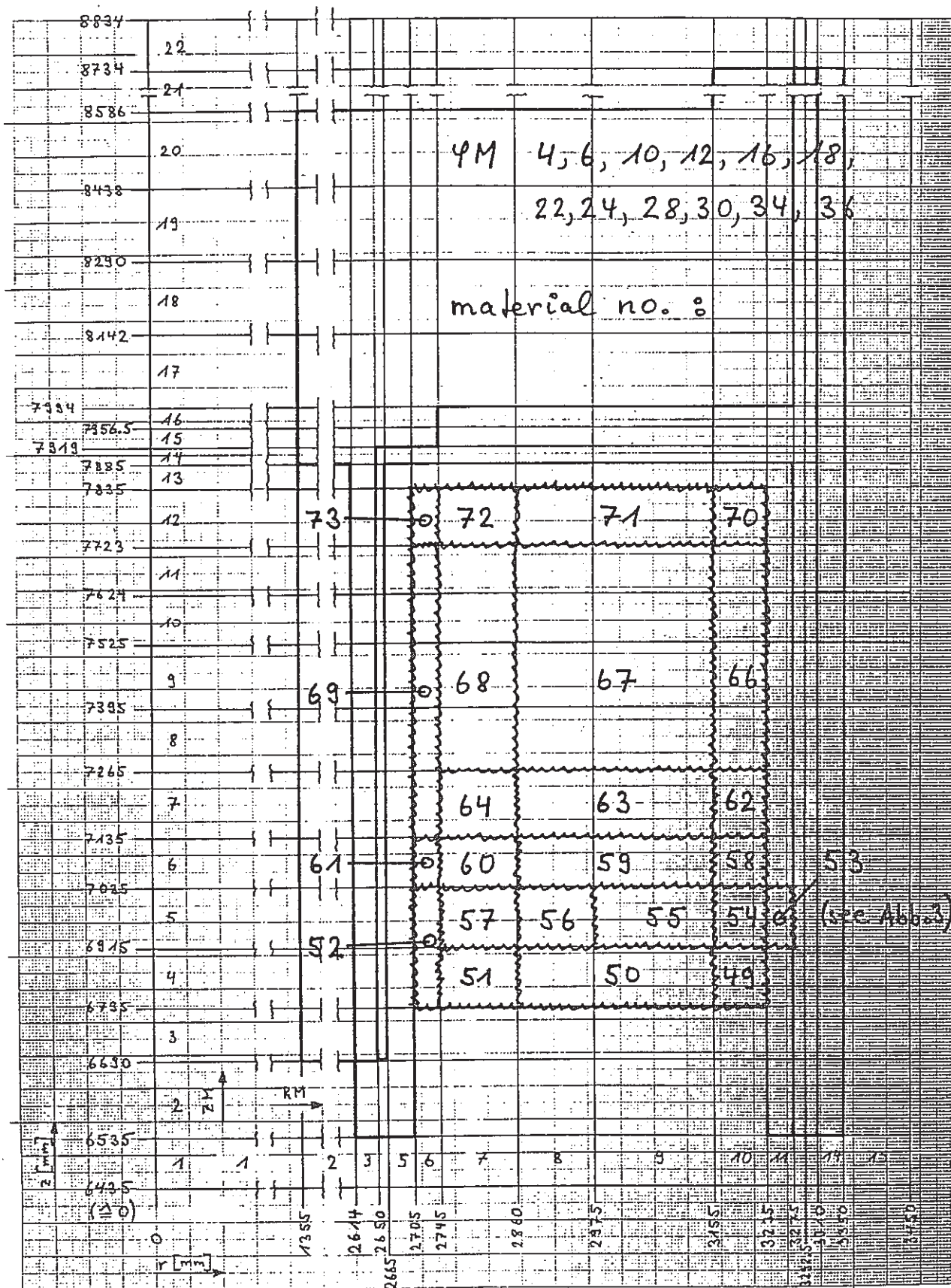


Abb. 8 : Other effective materials in φM 4, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 34, 36a) r, z, φ - mesh and corresponding material no. φM 4, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 34, 36

RM 6 / ZM 4-5 - no. 52

RM 7 / ZM 4 - no. 51

RM 8-9 / " - no. 50

RM 10 / " - no. 49

RM 7 / ZM 5 - no. 57

RM 8 / " - no. 56

RM 9 / " - no. 55

RM 10 / " - no. 54

RM 6 / ZM 6 - no. 61

RM 7 / " - no. 60

RM 8-9 / " - no. 59

RM 10 / " - no. 58

RM 6 / ZM 7-11 - no. 69

RM 7 / ZM 7 - no. 64

RM 8-9 / " - no. 63

RM 10 / " - no. 62

RM 7 / ZM 8-11 - no. 68

RM 8-9 / " - no. 67

RM 10 / " - no. 66

RM 6 / ZM 12 - no. 73

RM 7 / ZM 12 - no. 72
 RM 8-9 / " - no. 71
 RM 10 / " - no. 70

b) material properties

material no. 49-73

$\lambda_r = 5.31 + 4.14 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 49
$\lambda_z = 0.682 + 9.5 * 10^{-4} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 4.95 + 3.86 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r = 5.32 + 4.15 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 50
$\lambda_z = 0.439 + 7.37 * 10^{-4} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 4.94 + 3.82 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r = 5.34 + 4.17 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 51
$\lambda_z = 0.494 + 7.75 * 10^{-4} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 4.94 + 3.82 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_r = \lambda_z = 0.848 + 8.9 * 10^{-4} * \nu$	}	no. 52
$\lambda_\varphi = 0.057 + 2.34 * 10^{-4} * \nu$		
$\lambda_r = \lambda_z = 12.03 + 9.0 * 10^{-3} * \nu$	}	no. 53
$\lambda_\varphi = 17.96 + 1.34 * 10^{-2} * \nu$		
$\lambda_r = 0.357 + 5.61 * 10^{-4} * \nu$	}	no. 54
$\lambda_z = 1.84 + 1.63 * 10^{-3} * \nu$		
$\lambda_\varphi = 0.083 + 3.28 * 10^{-4} * \nu$		

(8/3)

$$\alpha_r = 0.447 + 1.78 * 10^{-3} * \nu$$

$$\alpha_z = 0.713 + 2.91 * 10^{-3} * \nu$$

$$\alpha_\varphi = 0.171 + 6.63 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 55

(material with constant temperature, see Abb. 10)

$$\lambda_r = \lambda_z = 0.363 + 5.37 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.057 + 2.24 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 56

$$\lambda_r = 0.372 + 5.45 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.413 + 5.73 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.056 + 2.28 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 57

$$\lambda_r = 1.28 + 1.24 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.604 + 7.53 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.155 + 4.53 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 58

$$\lambda_r = 1.28 + 1.21 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.36 + 5.44 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.139 + 4.0 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 59

$$\lambda_r = 1.29 + 1.22 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.415 + 5.84 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.14 + 4.01 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 60

$$\lambda_r = 1.74 + 1.55 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.82 + 1.14 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.145 + 4.14 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 61

(8/4)

$$\lambda_r = 0.367 + 8.16 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.702 + 1.03 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.339 + 7.8 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 62

$$\lambda_r = 0.346 + 7.72 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.33 + 7.61 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.33 + 7.61 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 63

$$\lambda_r = 0.349 + 7.76 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.389 + 8.03 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.332 + 7.64 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 64

material no. 65 is not specified

$$\lambda_r = 0.351 + 8.07 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.701 + 1.03 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.339 + 7.8 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 66

$$\lambda_r = \lambda_z = \lambda_\varphi = 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * \nu - \text{no. 67}$$

$$\lambda_r = 0.332 + 7.63 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.389 + 8.02 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.331 + 7.63 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 68

$$\lambda_r = \lambda_z = 1.03 + 1.26 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.346 + 7.97 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 69

$$\lambda_r = 0.355 + 8.11 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.363 + 8.26 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.339 + 7.79 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 70

(8/5)

$$\lambda_r = 0.612 + 9.61 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.341 + 7.85 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.349 + 7.75 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 71

$$\lambda_r = 0.505 + 9.14 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.344 + 7.91 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.338 + 7.77 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 72

$$\lambda_r = 0.781 + 1.08 * 10^{-3} * \nu$$

$$\lambda_z = 0.37 + 8.43 * 10^{-4} * \nu$$

$$\lambda_\varphi = 0.342 + 7.86 * 10^{-4} * \nu$$

} no. 73

Abb. 9

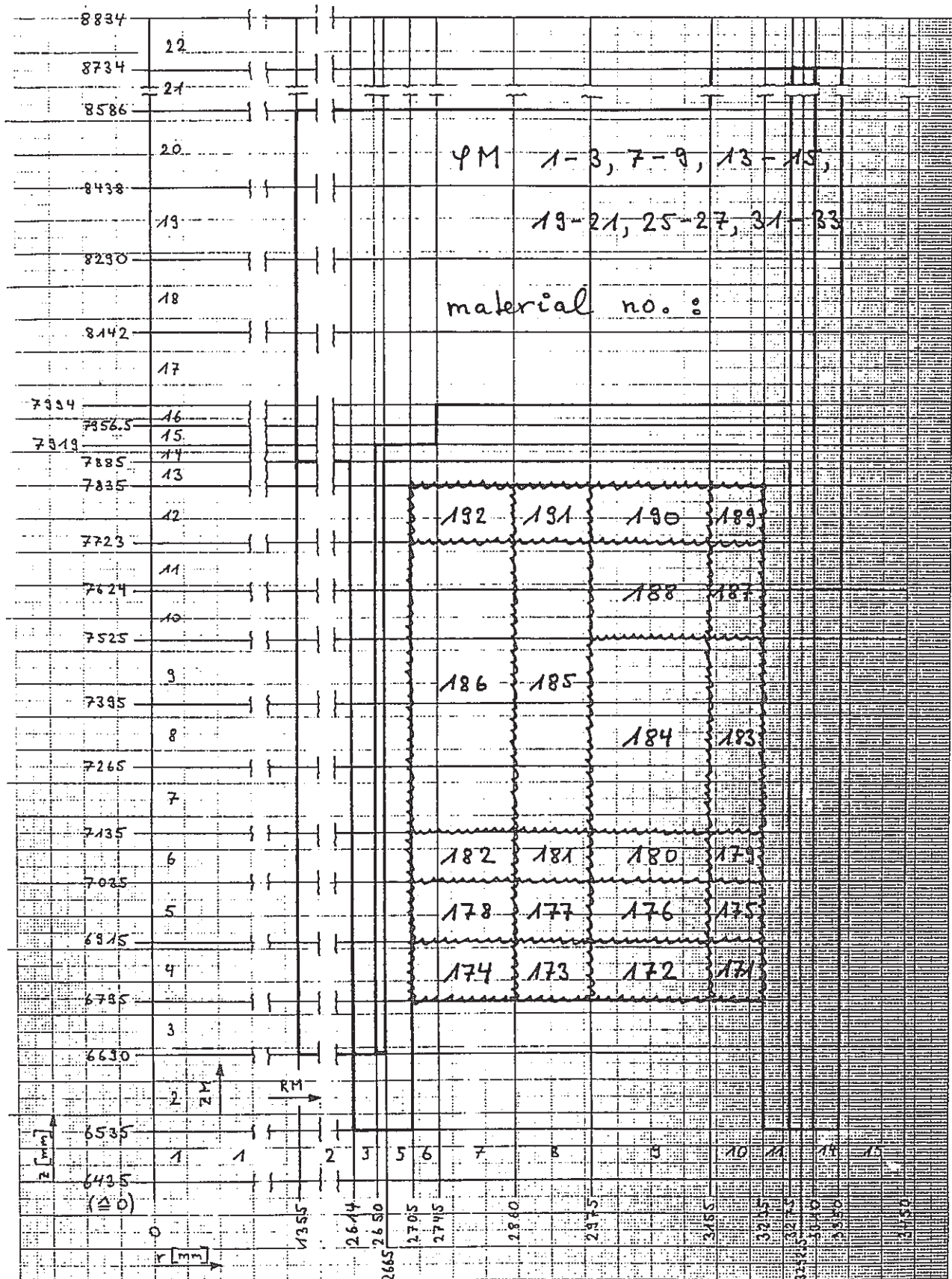


Abb. 9 : Other effective materials in φM
1-3, 7-9, 13-15, 19-21, 25-27, 31-33

a) r, z, φ - mesh and corresponding material no.

φM 1-3, 7-9, 13-15, 19-21, 25-27, 31-33

RM 6-7	/	ZM 4	-	no. 174
RM 8	/	"	-	no. 173
RM 9	/	"	-	no. 172
RM 10	/	"	-	no. 171
RM 6-7	/	ZM 5	-	no. 178
RM 8	/	"	-	no. 177
RM 9	/	"	-	no. 176
RM 10	/	"	-	no. 175
RM 6-7	/	ZM 6	-	no. 182
RM 8	/	"	-	no. 181
RM 9	/	"	-	no. 180
RM 10	/	"	-	no. 179
RM 6-7	/	ZM 7-11	-	no. 186
RM 8	/	"	-	no. 185
RM 9	/	ZM 7-9	-	no. 184
RM 10	/	"	-	no. 183
RM 9	/	ZM 10-11	-	no. 188
RM 10	/	"	-	no. 187
RM 6-7	/	ZM 12	-	no. 192
RM 8	/	"	-	no. 191
RM 9	/	"	-	no. 190
RM 10	/	"	-	no. 189

b) material propertiesmaterial no. 171 - 192

$$\lambda_r = 3.95 + 3.1 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

$$\lambda_z = 1.78 + 1.65 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

$$\lambda_\varphi = 4.92 + 3.71 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

} no. 171

$$\lambda_r = 3.95 + 3.05 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

$$\lambda_z = 1.24 + 1.24 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

$$\lambda_\varphi = 1.18 + 1.22 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

} no. 172

$$\lambda_r = 3.95 + 3.05 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

$$\lambda_z = 1.09 + 1.13 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

$$\lambda_\varphi = 0.122 + 5.11 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

} no. 173

$$\lambda_r = 4.1 + 3.2 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

$$\lambda_z = 1.11 + 1.17 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

$$\lambda_\varphi = 2.75 + 2.2 \cdot 10^{-3} * \checkmark$$

} no. 174

$$\lambda_r = 0.62 + 5.9 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

$$\lambda_z = 0.9 + 8.4 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

$$\lambda_\varphi = 0.037 + 1.58 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

} no. 175

$$\lambda_r = 0.271 + 4.04 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

$$\lambda_z = 0.629 + 6.45 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

$$\lambda_\varphi = 0.037 + 1.58 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

} no. 176

$$\lambda_r = 0.173 + 3.51 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

$$\lambda_z = 0.552 + 5.9 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

$$\lambda_\varphi = 0.037 + 1.58 \cdot 10^{-4} * \checkmark$$

} no. 177

9/3

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= \lambda_\varphi = 0.037 + 1.58 * 10^{-4} * \nu \\ \lambda_z &= 0.552 + 5.9 * 10^{-4} * \nu \end{aligned} \right\} \text{no. 178}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= 3.54 + 2.83 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_z &= 0.9 + 8.4 * 10^{-4} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 1.26 + 1.07 * 10^{-3} * \nu \end{aligned} \right\} \text{no. 179}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= 3.31 + 2.71 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_z &= 0.666 + 6.53 * 10^{-4} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 1.26 + 1.07 * 10^{-3} * \nu \end{aligned} \right\} \text{no. 180}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= 3.25 + 2.68 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_z &= 0.6 + 6.0 * 10^{-4} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 1.26 + 1.07 * 10^{-3} * \nu \end{aligned} \right\} \text{no. 181}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= 3.15 + 2.54 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_z &= 0.05 + 2.1 * 10^{-4} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 1.26 + 1.07 * 10^{-3} * \nu \end{aligned} \right\} \text{no. 182}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= 0.443 + 8.78 * 10^{-4} * \nu \\ \lambda_z &= 1.15 + 1.25 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * \nu \end{aligned} \right\} \text{no. 183}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= 0.813 + 1.11 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_z &= 1.024 + 1.24 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * \nu \end{aligned} \right\} \text{no. 184}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= 0.917 + 1.18 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_z &= 0.989 + 1.23 * 10^{-3} * \nu \\ \lambda_\varphi &= 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * \nu \end{aligned} \right\} \text{no. 185}$$

(9/4)

$$\lambda_r = 0.463 + 8.82 * 10^{-4} * v$$

$$\lambda_z = 1.25 + 1.42 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * v$$

} no. 186

$$\lambda_r = 0.765 + 1.1 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 1.4 + 1.53 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.36 + 8.0 * 10^{-4} * v$$

} no. 187

$$\lambda_r = 0.884 + 1.16 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 1.08 + 1.3 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.35 + 7.8 * 10^{-4} * v$$

} no. 188

$$\lambda_r = 0.414 + 8.36 * 10^{-4} * v$$

$$\lambda_z = 1.58 + 1.8 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * v$$

} no. 189

$$\lambda_r = 0.782 + 1.08 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 1.95 + 2.07 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * v$$

} no. 190

$$\lambda_r = 0.886 + 1.15 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_z = 2.05 + 2.14 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * v$$

} no. 191

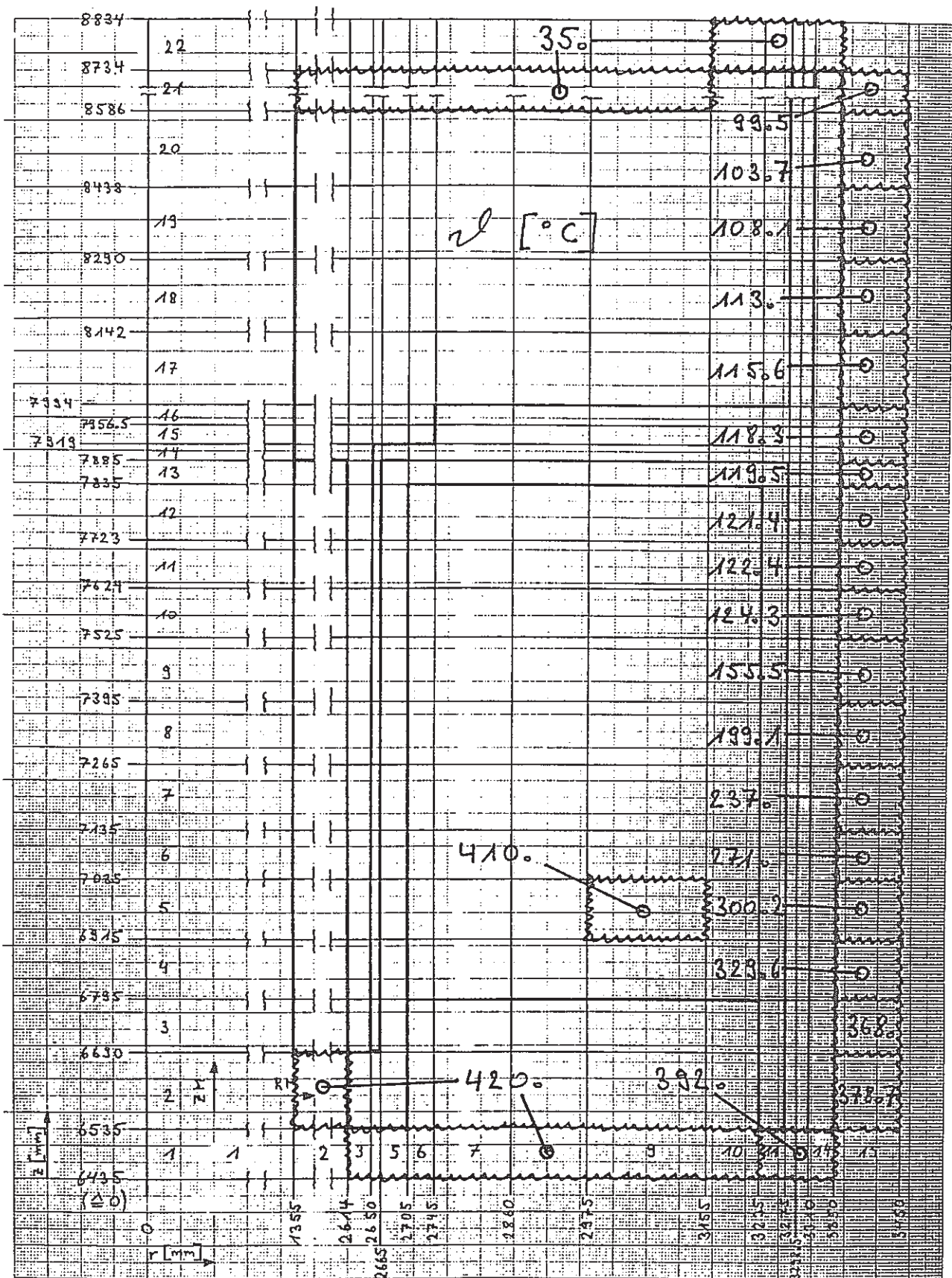
$$\lambda_r = 0.433 + 8.67 * 10^{-4} * v$$

$$\lambda_z = 1.68 + 1.88 * 10^{-3} * v$$

$$\lambda_\varphi = 0.33 + 7.6 * 10^{-4} * v$$

} no. 192

Abb. 10



(10/1)

Abb. 10 : Surrounding constant temperaturesa) Abb. 10/1 : Sodium temperature 420 °CPM 1-36

RM 2	/	ZM 2	-	t = 420 °C
RM 3-10	/	ZM 1	-	t = 420 °C
RM 11-14	/	"	-	t = 392 °C
RM 2-9	/	ZM 21	-	t = 35 °C
RM 10-14	/	ZM 22	-	t = 35 °C

RM 15 / PM 1-36

ZM	2	3	4	5	6	7	8
t [°C]	378.7	368.	329.6	300.2	271.	237.	199.1

ZM	9	10	11	12	13	14-16	17
t [°C]	155.5	124.3	122.4	121.4	119.5	118.3	115.6

ZM	18	19	20	21
t [°C]	113.	108.1	103.7	99.5

RM 9 / ZM 5

PM 4, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 34, 36

- t = 410 °C

(10/3)

b) Abb. 10/2 : Sodium temperature 556 °CPM 1-36

RM 2	/	ZM 2	-	t = 556 °C
RM 3-10	/	ZM 1	-	t = 556 °C
RM 11-14	/	"	-	t = 529 °C
RM 2-9	/	ZM 21	-	t = 35 °C
RM 10-14	/	ZM 22	-	t = 35 °C

RM 15 / PM 1-36

ZM	2	3	4	5	6	7	8
t [°C]	459.2	437.1	408.	381.3	349.5	309.5	262.6

ZM	9	10	11	12	13	14-16	17
t [°C]	206.9	165.9	163.1	161.5	158.2	156.	151.6

ZM	18	19	20	21
t [°C]	147.2	140.1	134.1	125.9

RM 9 / ZM 5

PM 4, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 34, 36

- t = 540 °C

Abb. 10/2

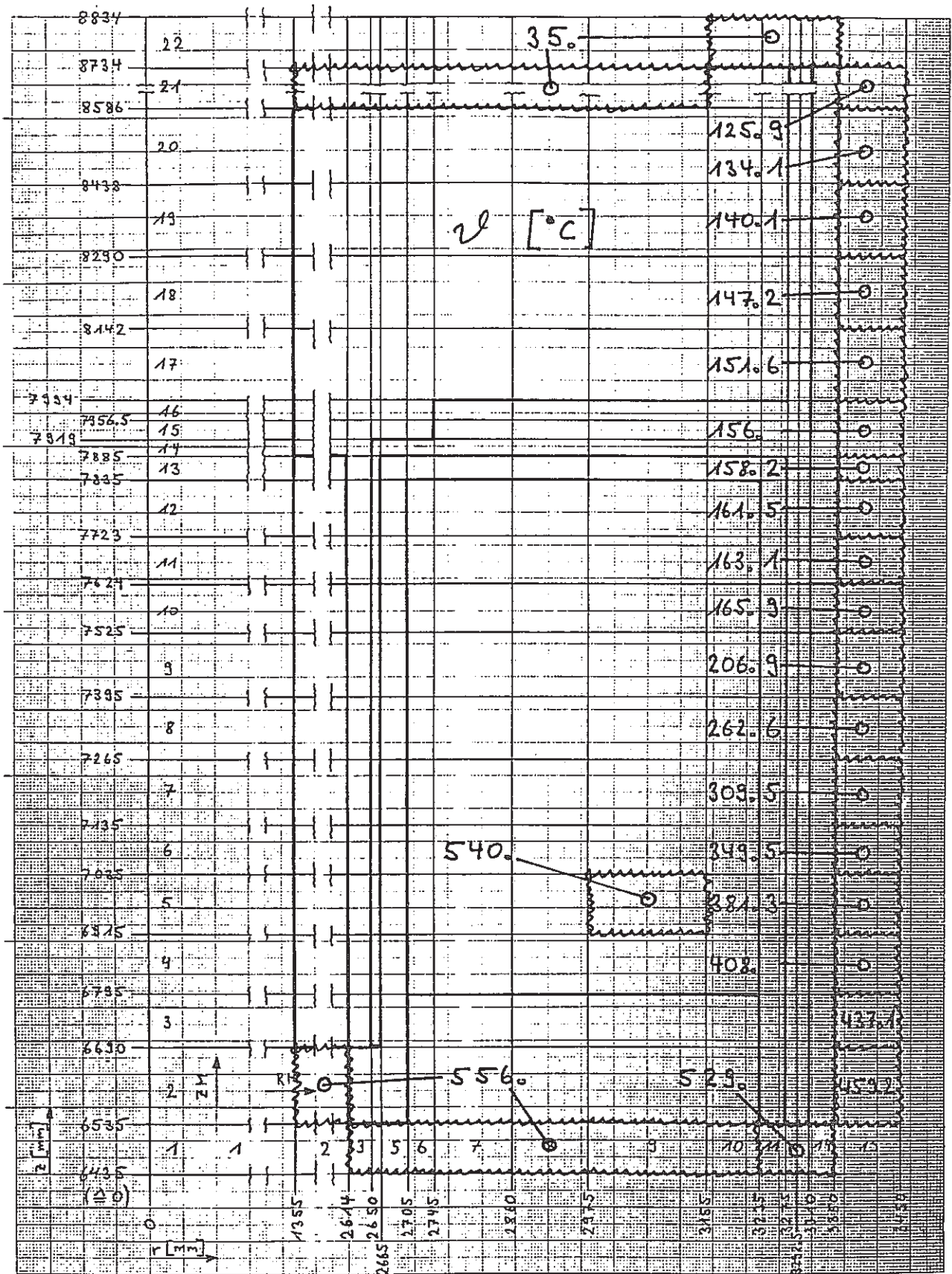


Abb. 11

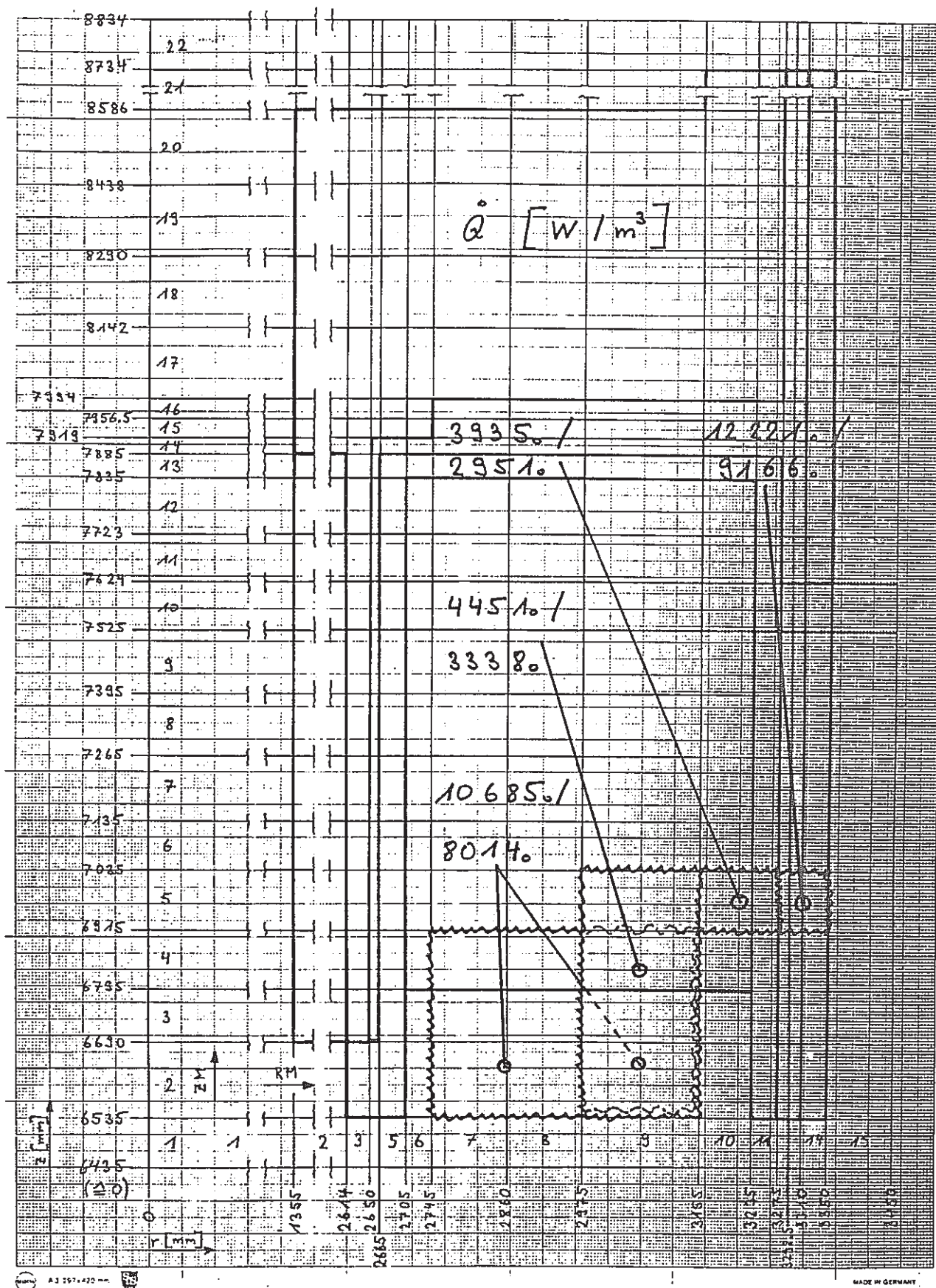


Abb. 11 : Heat source distribution

Volumetric heat source $\dot{Q}$ [W/m³]

RM 7-9 / ZM 2-4

PM 2, 8, 14, 20, 26, 32

$$t_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{Q} = 10\,685.$$

$$t_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{Q} = 8\,014.$$

RM 9 / ZM 2-5

PM 1, 3, 7, 9, 13, 15, 19, 21, 25, 27, 31, 33

$$t_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{Q} = 4\,451.$$

$$t_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{Q} = 3\,338.$$

RM 10-11 / ZM 5

PM 4, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 34, 36

$$t_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{Q} = 3\,935.$$

$$t_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{Q} = 2\,951.$$

RM 12-13 (fluid meshes), 14 / ZM 5

PM 4, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 28, 30, 34, 36

$$t_{\text{sodium}} = 556^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{Q} = 12\,221.$$

$$t_{\text{sodium}} = 420^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{Q} = 9\,166.$$

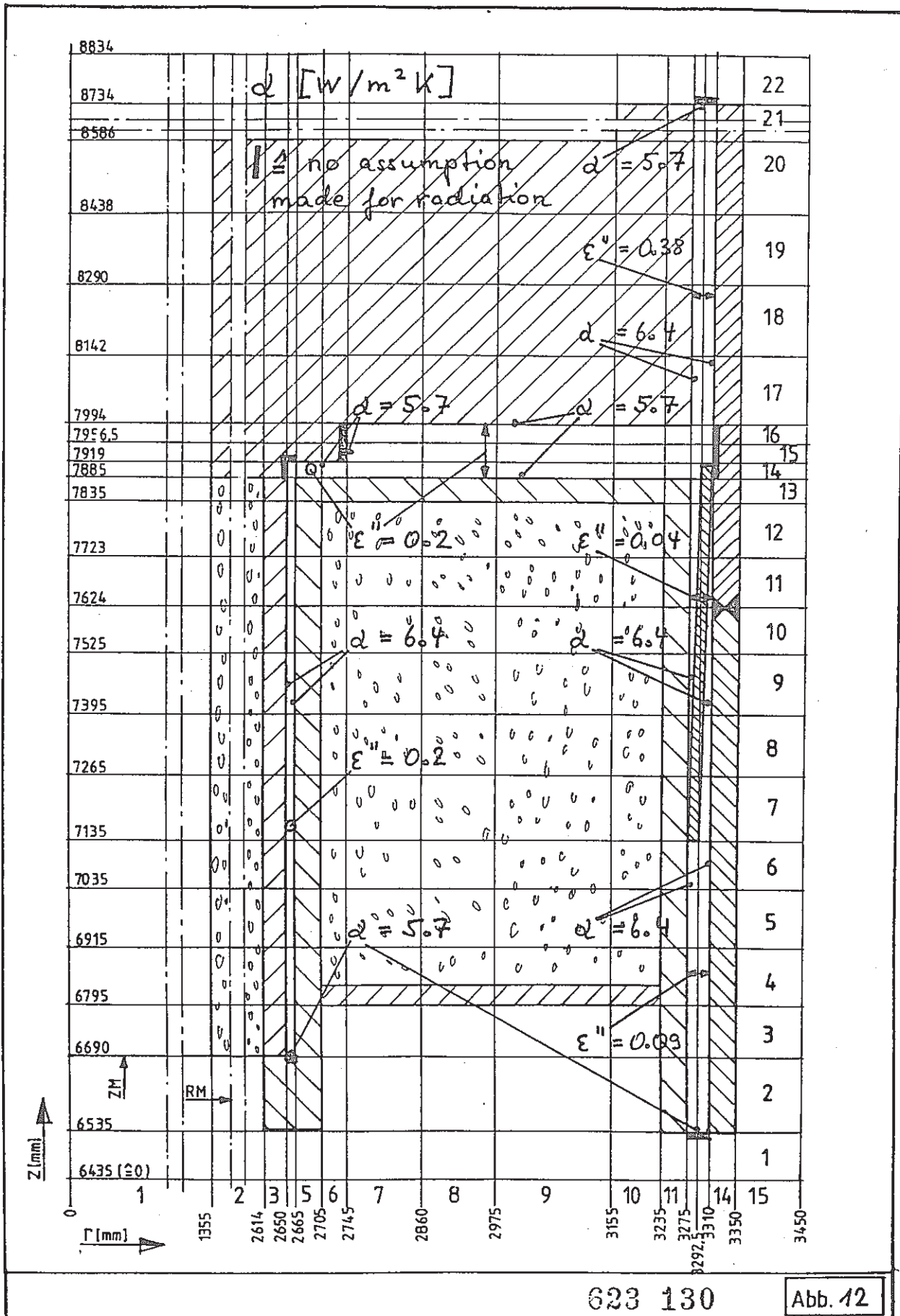


Abb. 12 : Fluid meshes, radiation and heat transfer coefficients inside the gaps

a) fluid meshes

PM 1-36

RM 4 / ZM 3-13

RM 4-11 / ZM 14

RM 7-11 / ZM 15-16

RM 12-13 / ZM 2-21

b) effective radiation coefficients

PM 1-36

RM 3 to 5 / ZM 3-13 - $\varepsilon'' = 0.2$

ZM 13 to 15 / RM 5-6 - $\varepsilon'' = 0.2$

ZM 13 to 17 / RM 7-11 - $\varepsilon'' = 0.2$

RM 11 to 14 / ZM 2-6 - $\varepsilon'' = 0.09$

" / ZM 7-13 - $\varepsilon'' = 0.04$

" / ZM 17-21 - $\varepsilon'' = 0.38$

c) constant heat transfer coefficients

see Abb. 12 (PM 1-36)

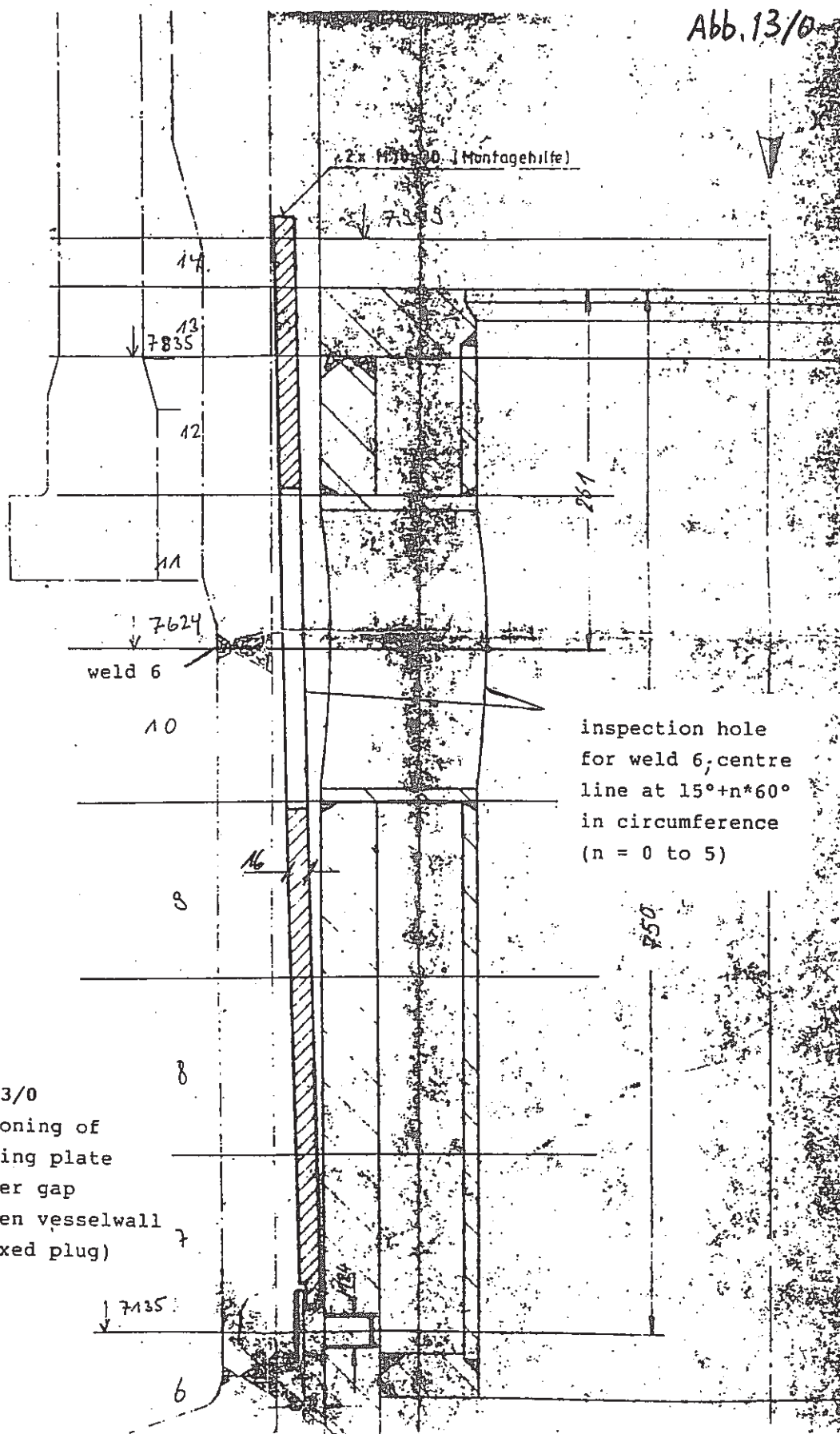
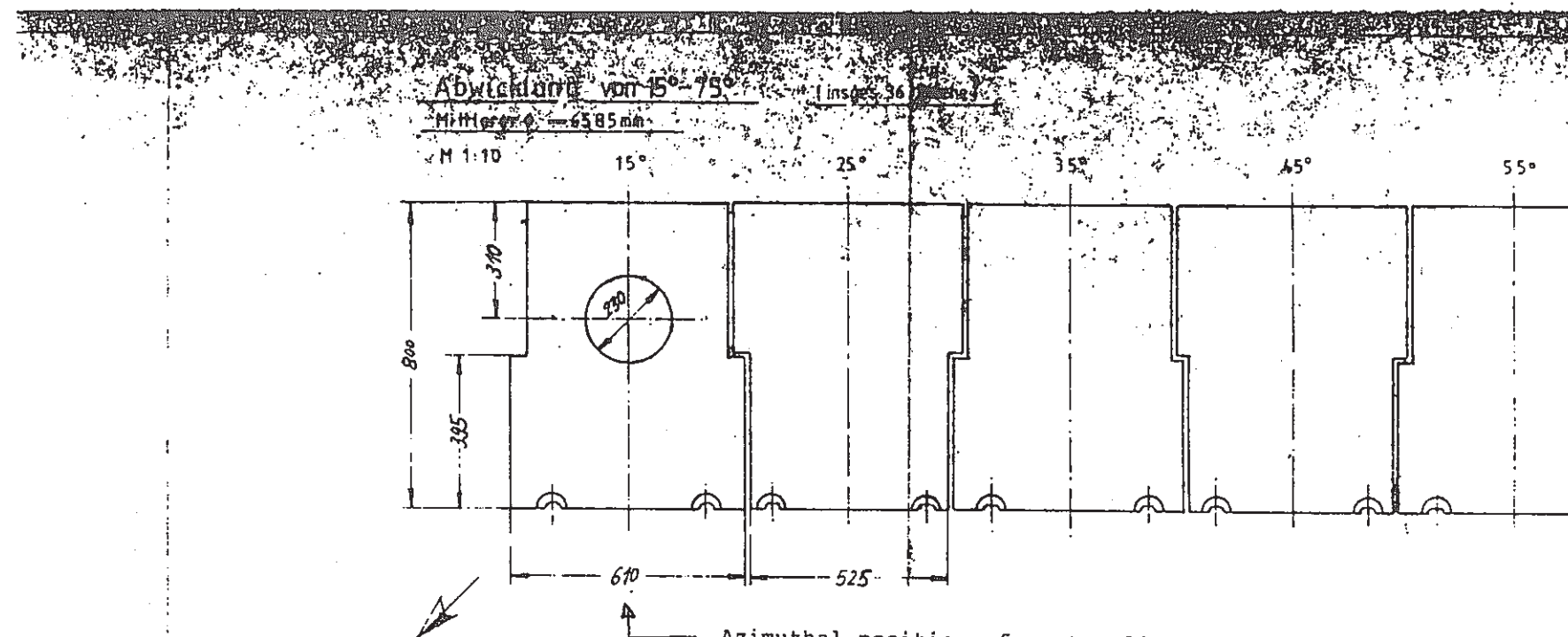
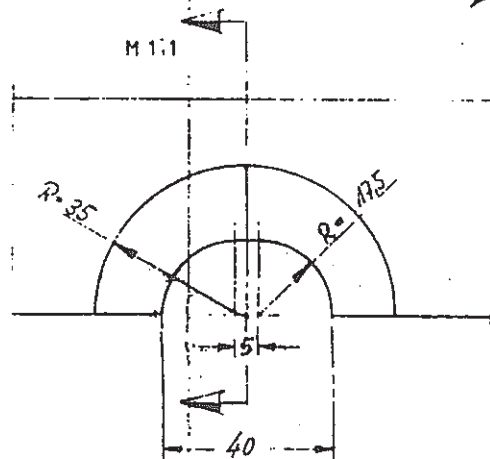


Fig. 13/0
Positioning of
shielding plate
in outer gap
(between vessel wall
and fixed plug)

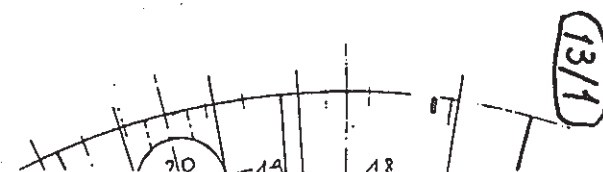


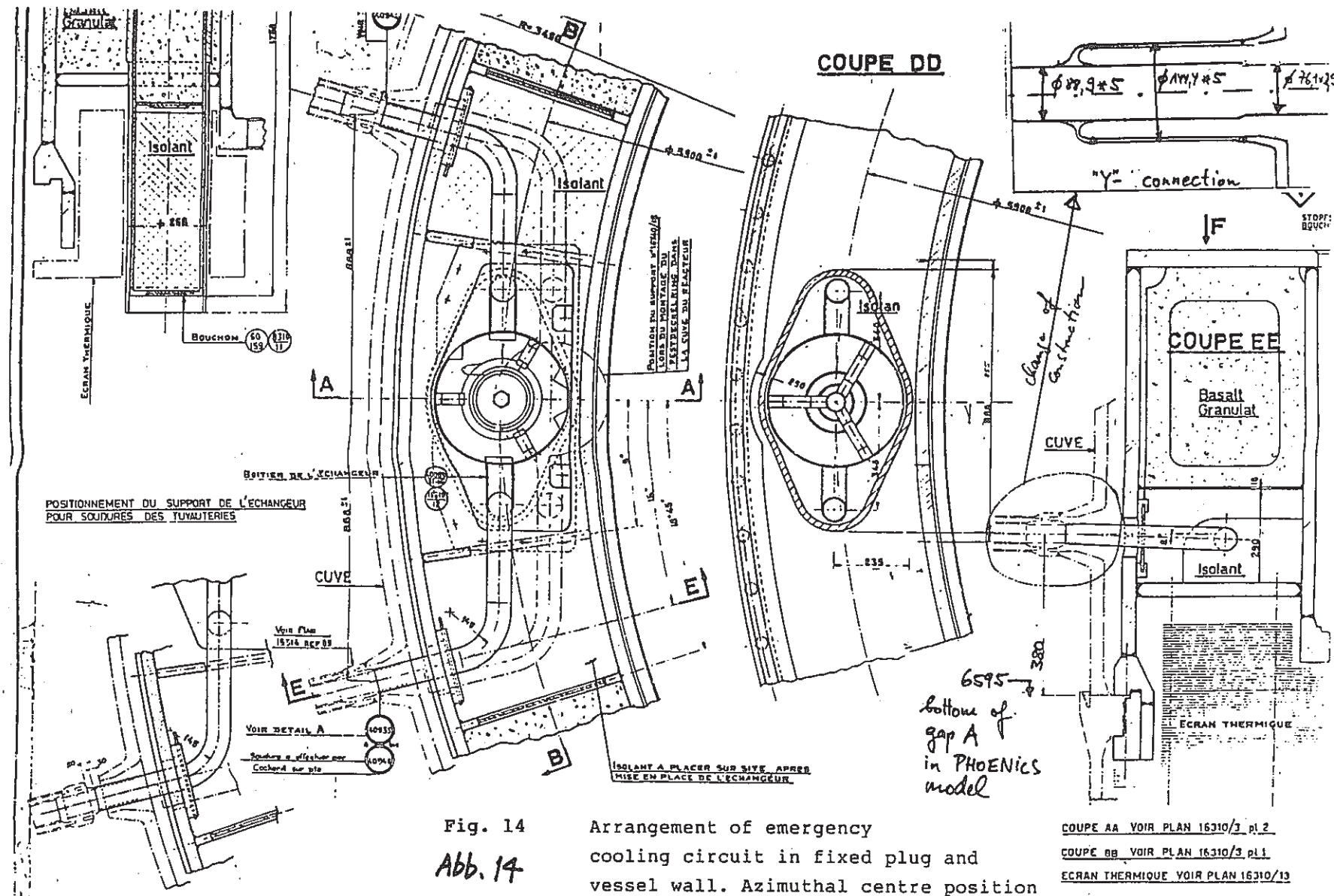
Azimuthal position of centre line of
emergency cooling chambers
 $15^\circ + n \cdot 60^\circ$ ($n = 0$ to 5) corresponds
to centre of $\phi M = 2 + n \cdot 6$

Fig. 13/1 Circumferential arrangement of shielding plates,
36 plates, vertical gap between plates $7,15$ mm



Ansicht „X“ (ohne RT)
M.1:20





14/1

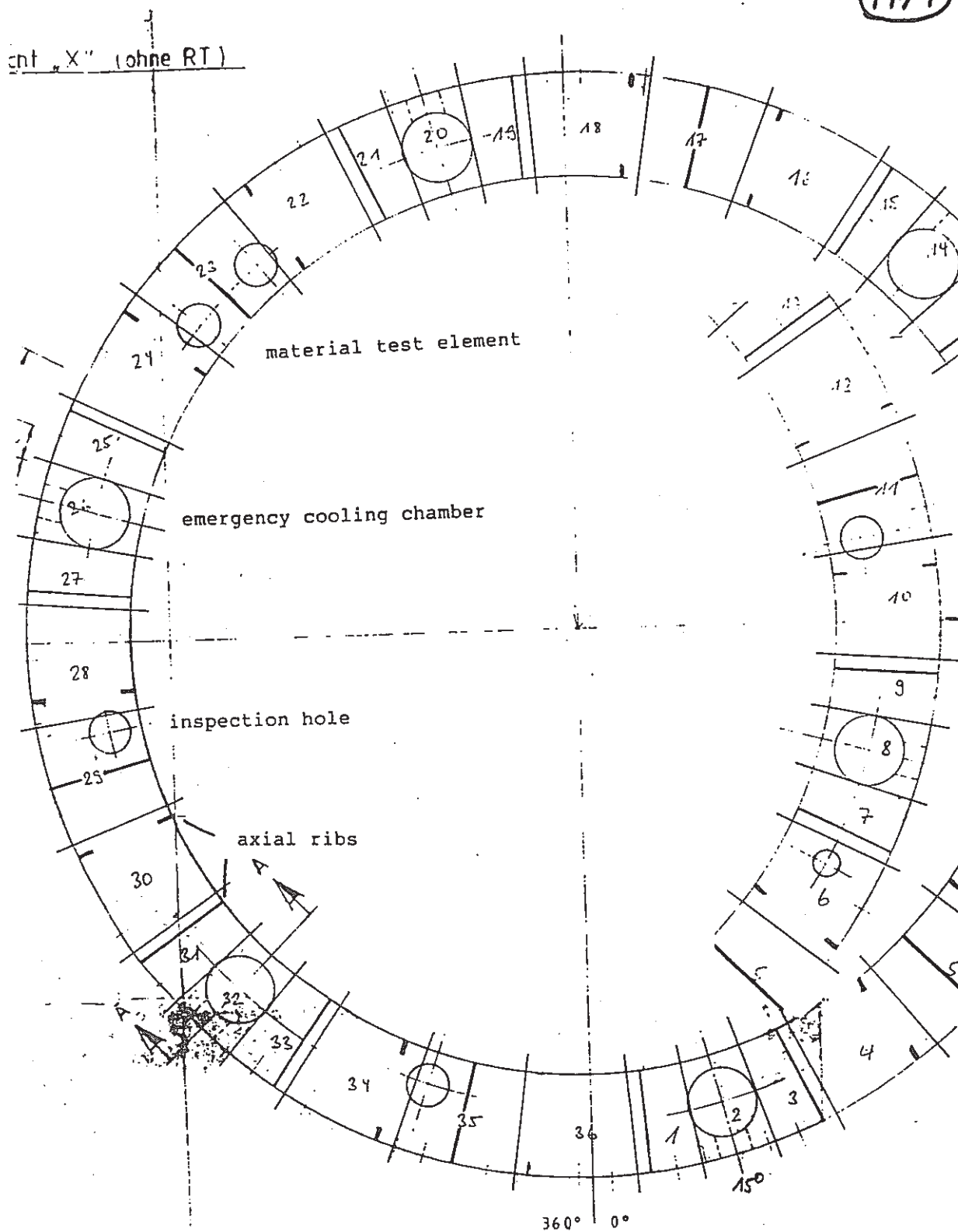


Fig. 14/1 Azimuthal arrangement of emergency cooling chambers and corresponding grid