PNC TN941 80-54

高速実験炉「常陽」75MW性能試験報告書

「常陽」ペデスタル部温度分布解析

１９８０年３月

動力炉・核燃料開発事業団

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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be abbressed to: Technology Management Section, O-arai Engneering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

PNC TN941 80-54
1980 年 3 月

高速実験炉「常陽」75MW性能試験報告書
「常陽」ペデスタル部温度分布解析

鈴木利明*，山本 寿**
永井文夫***，杢屋 憲司***，長谷川清***
北爪光幸****，堀江淳之介****，半田 博****

要 旨

本報告書は，高速実験炉「常陽」の原子炉容器ペデスタル部の放射線照射による発熱分布を計算し，これまでに得られた運転データを基に各種出力運転時における温度分布計算を実施した結果をまとめたものである。

計算結果の概要は下記の通りである。

(1) 放射線照射によるペデスタル部の発熱量は約 140kcal/h でペデスタル部温度上昇に与える寄与は小さい。

(2) 各種出力運転時のペデスタル温度は，内周上面の原子炉容器フランジとの取合部が高温，外周下面が低温領域となる傾向を示す。

(3) ペデスタル部温度は，ペデスタル部冷却条件（冷却ガス温度・ガス量）による影響を受け易い。

---

* 大洗工学センタ 高速実験炉部 原子炉第２課
** 同 技術課
*** (株)日立製作所 日立工場
**** 日立エンジニアリング(株)

PNC TN941 80-54

March, 1980

JOYO 75MWt START-UP TEST REPORT

Temperature Distribution Analysis in the Pedestal Structure of JOYO

Toshiaki Suzuki*, Hisashi Yamamoto**

Fumio Nagai***, Kenji Mokuya***, Kiyoshi Hasegawa***

Mitsuyuki Kitazume****, Junnosuke Horie****, Hiroshi Handa****

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the temperature distribution in the pedestal structure of JOYO which support the reactor vessel.

The approach in this work has two steps.

The first step is to estimate the heat generation rate induced by irradiation in the reactor.

The second step is to culculate the temperature distribution by using the estimated heat generation rate and the boundary condition which have been sampled from operating data of JOYO.

The summary of the results are as follows ;

(1) The amount of the heat generation rate in the pedestal structure by irradiation is about 140kcal/hr.

(2) The temperature at upper inner surface of the pedestal structure interfaced with reactor vessel flange is higher than at lower outer part of the pedestal structure.

(3) The temperature distribution in the pedestal structure is more

influenced by cooling condition rather than by heat generation rate.

---

* Maintenance Section, Experimental Fast Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Reactor Technology Section, same as above.

*** Hitachi Works, Hitachi Ltd.

**** Hitachi Engineering Ltd.

図　リ　ス　ト

図 2-1　炉体断面図 ---- 4

図 2-2　コンクリート遮蔽体冷却系による冷却フロー ---- 5

図 2-3　炉周囲遮蔽体冷却 N_2 ガス流量分布 ---- 6

図 3-1　炉容器ペデスタル部 ---- 14

図 3-2　Comparison Map ---- 15

図 3-3　Comparison Map ---- 16

図 3-4　Comparison Map ---- 17

図 3-5　Comparison Map ---- 18

図 3-6　Step 2 と Step 4 の中性子束，γ線束の比 ---- 19

図 3-7　ペデスタル発熱計算モデル ---- 36

図 3-8　ペデスタル部メッシュ分割図 ---- 38

図 4-1　ペデスタル部メッシュ分割図 ---- 45

図 4-2　ペデスタル部発熱分布（発熱量：計算値，断熱） ---- 47

図 4-3　〃　（発熱量：計算値の 2 倍，断熱） ---- 48

図 4-4　〃　（発熱量：計算値の 5 倍，断熱） ---- 49

図 4-5　〃　（発熱量：計算値の10倍，断熱） ---- 50

図 4-6　〃　（発熱量：計算値，冷却有） ---- 51

図 4-7　〃　（発熱量：計算値の 2 倍，冷却有） ---- 52

図 4-8　〃　（発熱量：計算値の 5 倍，冷却有） ---- 53

図 4-9　〃　（発熱量：計算値の10倍，冷却有） ---- 54

図 4-10　炉周囲遮蔽体全体温度分布計算モデル ---- 59

図 4-11　温度分布計算用メッシュ分割図 ---- 60

図 4-12　コン遮系冷却パス各部の冷却材流量 ---- 64

図 4-13　炉周囲遮蔽体各部の温度　計算値抜粋　（0MW） ---- 66

図 4-14　〃　（25MW） ---- 67

図 4-15　〃　（50MW） ---- 68

図 4-16　〃　（75MW） ---- 69

図 4-17　炉周囲遮蔽体各部の温度　計算値抜粋　（100MWケース１）----------70
図 4-18　〃　（100MWケース２）----------71
図 4-19　「常陽」ペデスタル部温度分布計算結果　原子炉出力　0MW時----------72
図 4-20　〃　〃　25MW時----------73
図 4-21　〃　〃　50MW時----------74
図 4-22　〃　〃　75MW時----------75
図 4-23　〃　〃　100MW時ケース(1)----------76
図 4-24　〃　〃　100MW時ケース(2)----------77
図 4-25　100MW時ペデスタル冷却ガス温度を変えた場合の温度計算結果----------78
図 4-26　100MW時ペデスタル冷却部熱伝達率を変えた場合の温度計算結果----------79
図 4-27　炉周囲遮蔽体各部の温度　0MW----------80
図 4-28　〃　25MW----------81
図 4-29　〃　50MW----------82
図 4-30　〃　75MW----------83
図Ⅴ－1　ピットまわり雰囲気温度設定条件----------100
図Ⅴ－2　炉容器カバーガス層の設定温度----------101

表　リ　ス　ト

表 3-1　MAC-31群，JOYO-21群　構造 ---- 20

表 3-2　JOYO＋MAC 112群 ---- 21

表 3-3　熱群の重み因子 ---- 12

表 3-4　γ線の吸収断面積 ---- 24

表 3-5　γ線のエネルギー放出割合 ---- 25

表 3-6　^{24}Na のγ線源強度（100MWt） ---- 25

表 3-7　常陽遮蔽体系，各領域組成表（その1～その3） ---- 29

表 3-8　混合領域の混合比 ---- 32

表 3-9　選択した物質およびその組成 ---- 33

表 3-10　原子の対応関係 ---- 28

表 3-11　SPAN入力用物質組成 ---- 34

表 3-12　全中性子束による発熱分布 ---- 39

表 3-13　全γ線（^{24}Na 以外）による発熱分布 ---- 40

表 3-14　^{24}Na からのγ線による発熱分布 ---- 41

表 3-15　全発熱分布 ---- 42

表 4-1　全発熱分布 ---- 46

表 4-2　各種材料の熱伝導率 ---- 56

表 4-3　表面ノードに対する伝熱モデル ---- 61

表 4-4　冷却パス各部の伝熱モデル ---- 62

表 4-5　境界ノードの設定温度 ---- 63

表 4-6　ペデスタル部まわりの計算結果と運転データの比較 ---- 86

表 4-7　温度分布計算結果に基づく各部除熱量 ---- 87

表Ⅲ－1　各種計算式による熱伝達率計算結果 ---- 95

表Ⅲ－2　SKS運転データによる安全容器外面の熱伝達率 ---- 96

目　　次

1. まえがき ---- 1

2. 「常陽」炉体まわりの構成 ---- 2

3. ペデスタル部発熱分布計算 ---- 7

3.1 概　　要 ---- 7

3.2 計算方法 ---- 7

3.2.1 中性子およびγ線のエネルギー吸収による発熱量計算 ---- 7

3.2.2 ナトリウムの誘導放射能による発熱量計算 ---- 25

3.3 計算結果 ---- 37

4. ペデスタル部温度分布計算 ---- 43

4.1 概　　要 ---- 43

4.2 予備計算 ---- 43

4.3 ペデスタル部温度分布計算 ---- 55

4.3.1 計算モデル ---- 55

4.3.2 伝熱モデル ---- 56

4.3.3 計算結果 ---- 65

4.3.4 計算結果について ---- 65

5. コンクリート温度に対する調査結果 ---- 88

6. 参考資料 ---- 89

7. あとがき ---- 103

1. まえがき

1. まえがき

本報告書は，動力炉・核燃料開発事業団が実施した高速実験炉「常陽」の原子炉出力75MW迄の出力上昇試験によって得られた各種運転データを基に，原子炉容器ペデスタル部の放射線照射による発熱分布計算と原子炉出力50MW，75MWおよび100MW時におけるペデスタル部温度分布計算を実施した結果を報告するものである。

2. 「常陽」炉体まわりの構成

2. 「常陽」炉体まわりの構成

「常陽」の炉体断面図を図 2-1に示す。

図2-1に示す通り，炉心レベルでは半径方向に，原子炉容器・同保温材・黒鉛遮蔽体・安全容器・炭素鋼遮蔽体及び炉容器ピット室側壁コンクリート等が配置されており，上部は原子炉容器と回転プラグ等の重量を支持するペデスタル構造物が設置されている。

炉体まわりの熱負荷の中，炉心部で発生する熱はその殆んどが1次冷却材ナトリウムによって除熱・輸送されるが1部は原子炉容器保温材や回転プラグを通して周囲に放散する。更に，炉体まわりの構造物中には，炉心からの中性子やγ線及び1次冷却材ナトリウムの誘導放射能による内部発熱が生じる。

上述の放散熱や内部発熱は，回転プラグ部を除いて，コンクリート遮蔽体冷却系によって除熱される。

コンクリート遮蔽体冷却系による冷却フローを図2-2に示す。図2-2に示す如く，コンクリート遮蔽体冷却系は，炉容器ピット部冷却系とペデスタル部冷却系に大別できる。

炉容器ピット部冷却系は，冷却用N_2 ガスをピット下部から導入し安全容器とピット壁間に流して除熱し，循環用ブロワおよび冷却器を経てピット下部に戻すものである。

ペデスタル部冷却系は，ピット入口より分岐後，ブースタブロワで加圧し，ペデスタル部内面に設置された冷却パス部に冷却用N_2 ガスを導入・除熱し，炉容器ピット部冷却系出口に合流させるものである。

炉容器ピット部冷却系のピット内における冷却N_2 ガスは，ピット下部中央から導入された後，炭素鋼遮蔽体とライニング間の放射状の等断面流路を半径方向にピット最外周部に至り，90°方向を変えて側壁部に入る。

炭素鋼遮蔽体の側部は，軸方向5分割，周方向4分割，合計20個のパネルから構成されている。各パネル間は熱膨張を吸収するためにギャップが設けられており，この部分はスライド可能なシール構造となっている。このためピット側壁部に流入した冷却用N_2 ガスは炭素鋼遮蔽体とライニング間を流れると共に，1部が前記パネルのシール部間隙から炭素鋼遮蔽体と安全容器間のアニュラス部へ漏れ込む。

上記の流量分布を図2-3に示す。（詳細は常陽(II)－5409 を参照下さい）

回転プラグ部は，機器冷却系の冷却N_2 ガスが回転プラグ上板下面の冷却パスに導入さ

れ原子炉容器上方向の熱を除熱する。更に，上述の各冷却系で除去し得ない熱は，炉上部ピット室を始め，炉容器ピット室を囲む各部屋雰囲気中に放散され，格納容器内雰囲気調整系によって除熱される。

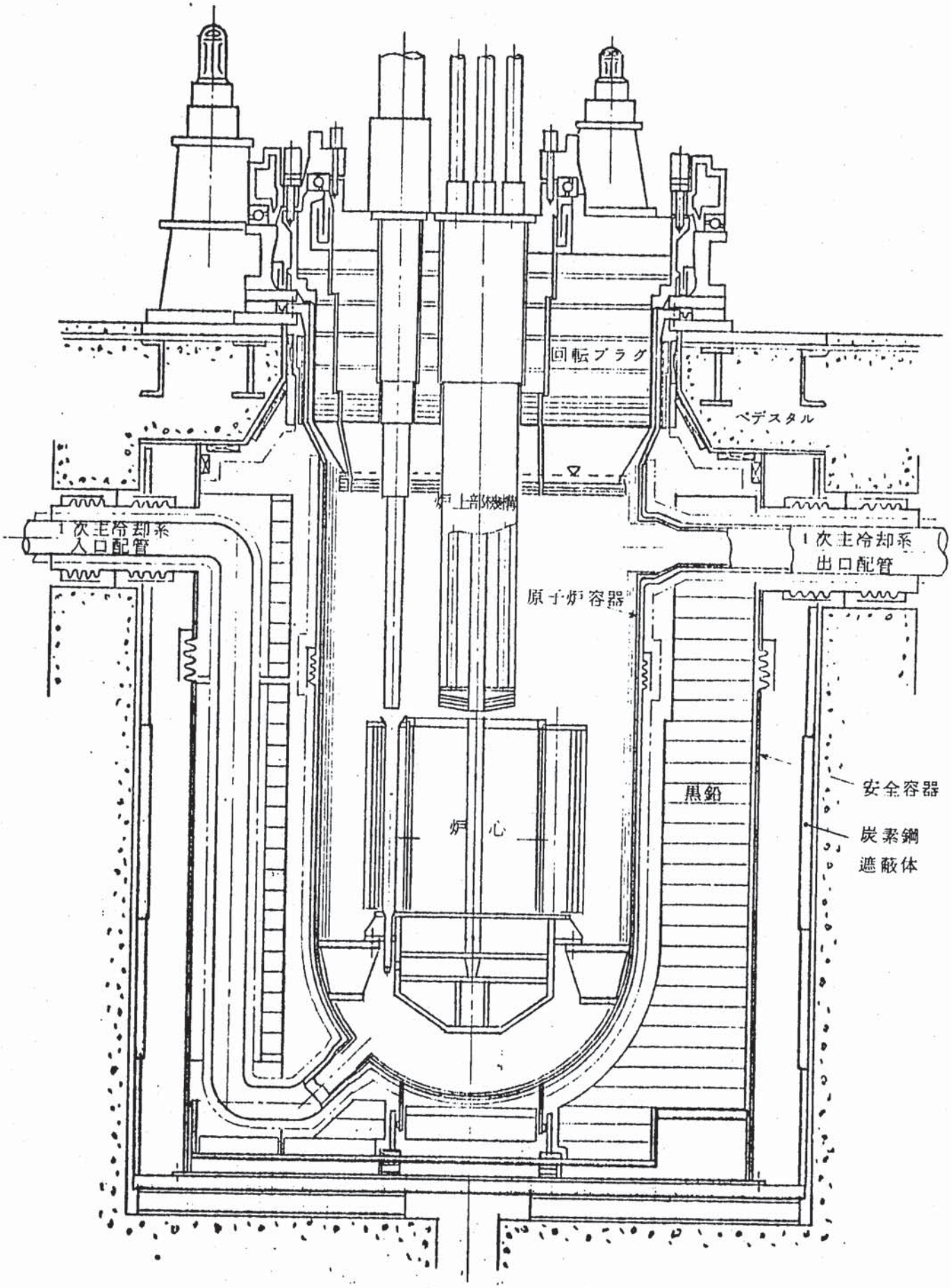

回転プラグ
ペデスタル
炉上部機構
1次主冷却系
入口配管
1次主冷却系
出口配管
原子炉容器
黒鉛
炉心
安全容器
炭素鋼
遮蔽体

図 2-1　炉体断面図

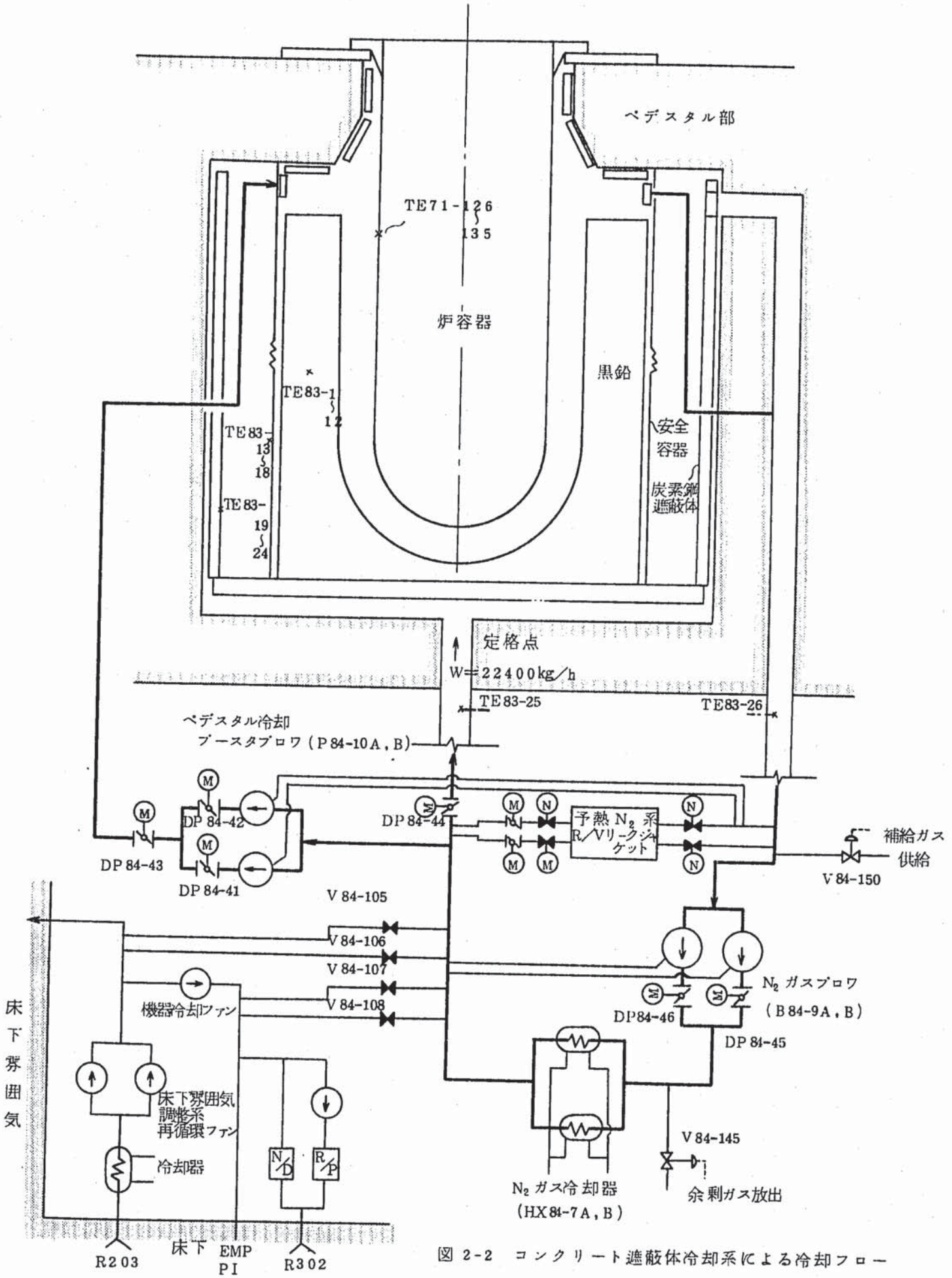
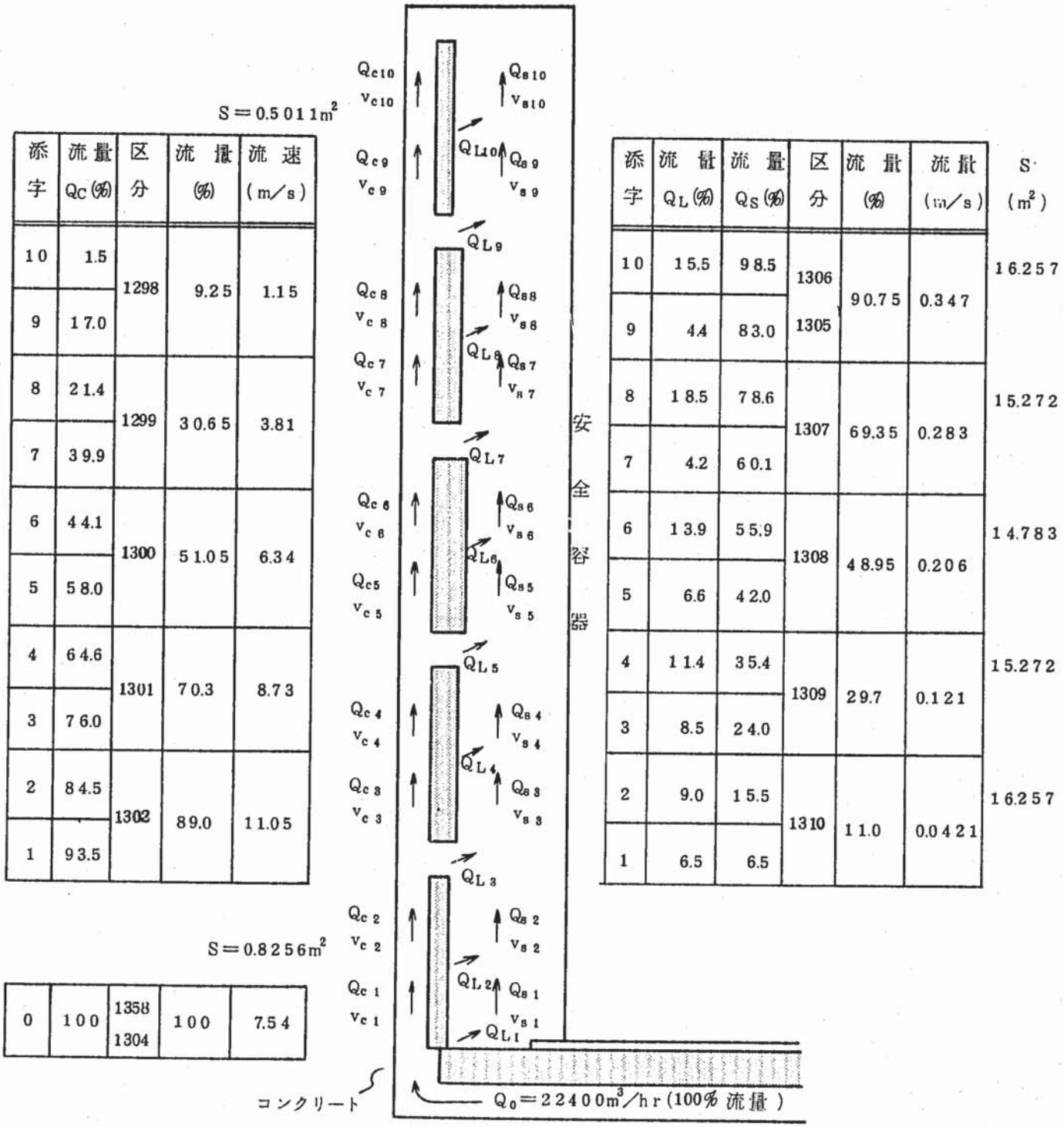


図 2-2　コンクリート遮蔽体冷却系による冷却フロー



添字	流量 Q_C(%)	区分	流量(%)	流速(m/s)
10	1.5	1298	9.25	1.15
9	17.0			
8	21.4	1299	30.65	3.81
7	39.9			
6	44.1	1300	51.05	6.34
5	58.0			
4	64.6	1301	70.3	8.73
3	76.0			
2	84.5	1302	89.0	11.05
1	93.5			
0	100	1358 1304	100	7.54

添字	流量 Q_L(%)	流量 Q_S(%)	区分	流量(%)	流量(m/s)	S (m²)
10	15.5	98.5	1306	90.75	0.347	16.257
9	44	83.0	1305			
8	18.5	78.6	1307	69.35	0.283	15.272
7	4.2	60.1				
6	13.9	55.9	1308	48.95	0.206	14.783
5	6.6	42.0				
4	11.4	35.4	1309	29.7	0.121	15.272
3	8.5	24.0				
2	9.0	15.5	1310	11.0	0.0421	16.257
1	6.5	6.5				

図 2-3　炉周囲遮蔽体冷却 N_2 ガス流量分布

3. ペデスタル部発熱分布計算

3. ペデスタル部発熱分布計算

3.1 概　　要

ペデスタル部の熱負荷としては，原子炉容器から放散し各種構造物を介して流入するものと，炉心からの中性子および1次γ線や放射化ナトリウムからのγ線により構造物中に生じる熱の2種類に大別される。

本章では，後者の発熱量を動燃団で実施した，「常陽」炉体まわり遮蔽解析のSTEP2（全体系一括計算）およびSTEP4（ペデスタル付近詳細計算）による中性子束分布，γ線束分布計算結果等を使用して計算した結果について述べる。

3.2 計算方法

3.2.1 中性子およびγ線のエネルギー吸収による発熱量計算

(1) 発熱量計算の基本式

(a) 中性子エネルギー吸収による発熱量

$$H_n(\vec{r}) = C_0 \sum_{g=1}^{G} \triangle E_g \Sigma_s^g(\vec{r}) \phi_n^g(\vec{r}) \qquad (1)$$

但し，

$H_n(\vec{r})$：発熱量（watt/cc）

$C_0 = 1.602 \times 10^{-13}$

$\triangle E_g$：エネルギー損失（MeV）

Σ_s^g：散乱断面積（cm^{-1}）

ϕ_n^g：群中性子束（$n/cm^2 \cdot sec$）

コンクリートについては$\triangle E_g \Sigma_s^g$はつぎのように与えられる。

$$\triangle E_g \Sigma_s^g = \sum_{i=1}^{I} \triangle E_{g\cdot i} N_i \sigma_{s\cdot i}^g$$

$$\triangle E_{g\cdot i} = \bar{E}_g \frac{2A_i}{(A_i+1)^2}(1-\bar{\mu}_{g\cdot i})$$

i：コンクリートの構成成分核種を表わす

$\triangle E_{g\cdot i}$：核種iによるエネルギー損失（MeV）

A_i：原子数

$\bar{\mu}_{g\cdot i}$ ：散乱角の余弦の平均

N_i ：原子数密度（n/cm³）

$\sigma^g_{s\cdot i}$ ：微視的散乱断面積（barn）

(b) γ線のエネルギー吸収による発熱量

$$H_{gam}(\vec{r}) = C_0 \sum_{g'=1}^{G'} \bar{E}_{g'},\ \mu_{e\cdot g'}\,\phi_{g'}(\vec{r}) \tag{2}$$

但し，

$H_{gam}(\vec{r})$：発熱量（watt/cc）

$\bar{E}_{g'}$ ：g′群平均エネルギー（MeV）

$\mu_{e\cdot g'}$ ：γ線エネルギー吸収係数（cm^{-1}）

$\phi_{g'}(\vec{r})$ ：γ線束（γ/cm^2・sec）

(c) 全発熱量

$$H(\vec{r}) = H_n(\vec{r}) + H_{gam}(\vec{r}) \tag{3}$$

(1)，(2)式を同じ形で表す。

$$H(\vec{r}) = C_0 \sum_{g=1}^{G+G'} \bar{E}_g\,\sigma_h^g\,\phi_g(\vec{r})$$

$$\sigma_h^g = \begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{I} \frac{2A_i}{(A_i+1)^2}(1-\bar{\mu}_{g\cdot i})\,N_i\,\sigma^g_{s\cdot i} & \text{for } g \in G \\ \mu_{e\cdot g} = \displaystyle\sum_{i=1}^{I} N_i\,\sigma^g_{a\cdot i} & \text{for } g \in G' \end{cases} \tag{4}$$

(2) 発熱計算に必要な定数の決定

前記(3)式を計算するのにつぎのデータが必要である。

(イ) 群束

(ロ) 平均エネルギー

(ハ) 発熱断面積，σ^g_h

(ニ) コンクリート組成

これらの量の決め方を以下に示す。

(a) 群　束

炉体廻り遮蔽解析でのペデスタル部を図3-1に示す。V_4 はStep 4で取り扱われているペデスタル部であり，V_2 は残りの領域である。V_4 での群束としてStep 4の結果を使う。V_2 での群束はStep 2の結果を補正して使う。補正の参考とする資料は図3-2から図3-5までの高速群，中速群，熱群中性子および全γ線束についてのStep 2とStep 4 の結果の比較図である。図3-2の高速群についてみると図3-2の $j \geqq 32$ ではStep 2とStep 4の中性子束の比は j が同一の径方向については一定である。図3-2の $1 \leqq j \leqq 31$ では比は指数関数的に減少している（図3-6）。V_4 から外側へ出た V_2 の部分でもこの傾向が続いているとすると V_2 においての補正因子がわかる。但し指数関数的な減少によって，補正した群束が元の群束より小さくなることはないとする。このため補正因子が1以下になったときは1で置き換える。V_4 の下部についても，Step 2とStep 4の結果の比が指数関数的に減少するものとして補正因子を決めることにする。中速，熱群中性子束，全γ線束についても同様にして V_2 の群束を決める。以上をまとめるとつぎのようになる。

(i，j) メッシュ点でのStep 2，Step 4および本計算で用いる群束をそれぞれ，

$$\phi_g^{(2)}(i,j)\ ,\ \phi_g^{(4)}(i,j)\ ,\ \phi_g(i,j)$$

とする。

(i)　高速群（1～5群）

- $98 \leqq i \leqq 124\ ,\ 124 \leqq j \leqq 158$

$$\phi_g(i,j) = \phi_g^{(4)}(i,j)$$

- $125 \leqq i \leqq 150\ ,\ 154 \leqq j \leqq 158$

$$\phi_g(i,j) = \frac{\phi_g^{(4)}(124,j)}{\phi_g^{(2)}(124,j)}\,\phi_g^{(2)}(i,j)$$

- $125 \leqq i \leqq 150\ ,\ 124 \leqq j \leqq 153$

$$\phi_g(i,j) = \frac{\phi_g^{(4)}(124,j)}{\phi_g^{(2)}(124,j)}\,e^{-0.02(R_i - R_{124})}\,\phi_g^{(2)}(i,j)$$

○ 107≦i≦150 , 118≦j≦123

$$\psi_g(i,j)=\frac{\phi_g^{(4)}(i,124)}{\phi_g^{(2)}(i,124)}e^{-0.019|Z_j-Z_{124}|}\phi_g^{(2)}(i,j)$$

R_i , Z_j は径方向についてのiメッシュ，軸方向についてのjメッシュの座標位置を意味する。

(ii) 中速群（6～20群）

○ 98≦i≦124 , 124≦j≦158

$$\psi_g(i,j)=\phi_g^{(4)}(i,j)$$

○ 125≦i≦150 , 139≦j≦158

$$\psi_g(i,j)=\frac{\phi_g^{(4)}(124,j)}{\phi_g^{(2)}(124,j)}\phi^{(2)}(i,j)$$

○ 107≦i≦124 , 118≦j≦123

$$\psi_g(i,j)=1.26\,\phi_g^{(2)}(i,j)$$

○ 125≦i≦150 , 118≦j≦138

$$\psi_g(i,j)=\frac{\phi_g^{(4)}(124,j)}{\phi_g^{(2)}(124,j)}e^{-0.054(R_i-R_{124})}\phi_g^{(2)}(i,j)$$

(iii) 熱群（21群）

○ 98≦i≦124 , 124≦j≦158

$$\psi_g(i,j)=\phi_g^{(4)}(i,j)$$

○ 125≦i≦150 , 139≦j≦158

$$\psi_g(i,j)=\frac{\phi_g^{(4)}(124,j)}{\phi_g^{(2)}(124,j)}\phi_g^{(2)}(i,j)$$

○ 107≦i≦124 , 118≦j≦123

$$\psi_g(i,j)=\phi_g^{(2)}(i,j)$$

○ 125≦i≦150 , 118≦j≦138

$$\psi_g(i,j)=\frac{\phi_g^{(4)}(124,j)}{\phi_g^{(2)}(124,j)}e^{-0.047(R_i-R_{124})}\phi_g^{(2)}(i,j)$$

(V) γ線束（22～28群）

- $98 \leqq i \leqq 124$, $124 \leqq j \leqq 158$

$$\psi_g(i,j) = \phi_g^{(4)}(i,j)$$

- $107 \leqq i \leqq 124$, $118 \leqq j \leqq 123$

$$\psi_g(i,j) = \phi_g^{(2)}(i,j)$$

- $125 \leqq i \leqq 150$, $118 \leqq j \leqq 158$

$$\psi_g(i,j) = \frac{\phi_g^{(4)}(124,j)}{\phi_g^{(2)}(124,j)} \phi^{(2)}(i,j)$$

(b) 平均エネルギー：$\bar{E}_g$

120群のスペクトルを用いて28群の各群の平均エネルギーを計算する。

120群および28群の群のインデックスをそれぞれ i , g とすると

$$\bar{E}_g = \frac{\int_{\triangle E_g} E\,\phi(E)\,dE}{\int_{\triangle E_g} \phi(E)\,dE} = \frac{\sum_{i \in g} \int_{\triangle E_i} E\,\phi(E)\,dE}{\sum_{i \in g} \int_{\triangle E_i} \phi(E)\,dE}$$

$\triangle E_i$ の範囲で $\phi(E)$ は一定とすると，この範囲では

$$\phi(E) = \frac{\phi_i}{\triangle E_i}$$

従って，

$$\bar{E}_g = \frac{\sum_{i \in g} \bar{E}_i \phi_i}{\sum_{i \in g} \phi_i} \quad , \quad \bar{E}_i = \frac{E_i^{upper} + E_i^{lower}}{2}$$

(c) 発熱断面積：σ_h^g

(4)式の発熱断面積を計算するには，中性子については $\sigma_{s\cdot i}^g$ と $\bar{\mu}_{g\cdot i}$, γ線については $\mu_{e\cdot g}$ が必要となる。

中性子の散乱は全ての核種について重心系で等方的とする。従って $\bar{\mu}_{g\cdot i} = 0$。

弾性散乱断面積 $\sigma_{s\cdot i}^g$ をMAC-コードのライブラリを使って決める。MAC-コードのエネルギーの組み分けは表3-1に示すように31群であり，JOYO 21群と異なる。また31群のエネルギー組はJOYO 100群のエネルギー境界と一致しない組もある。そこでJOYO 100群とMAC 31群を合わせて表3-2に示すような112

群のエネルギー範囲を考える。112群のスペクトルをJOYO 100群のエネルギー範囲がMAC-31群のエネルギー境界と一致する群では100群中の群束を，JOYO 100群のある群がMAC-31群のあるエネルギー境界で分割されるときはエネルギー幅を重みとして新しく群束を作る。MAC-31群のσ_sはそのエネルギー範囲では一定として表3-2に示す112群の最初の111群についてσ_sを決める。そのσ_s^iとϕ_iを使ってJOYO 21群のσ_s^gを決める。

例えば，

$$\sigma_s^1\ (\mathrm{JOYO}) = \frac{\sum_{i=1}^{9} \sigma_i(\mathrm{MAC})\phi_i + \sigma_{10}\phi_{10}}{\sum_{i=1}^{10} \phi_i}$$

$$\sigma_s^7\ (\mathrm{JOYO}) = \frac{\sigma_6(\phi_{36}+0.52\phi_{37}) + \sigma_7\left(0.48\phi_{37} + \sum_{i=38}^{40} \phi_i\right)}{\sum_{i=36}^{40} \phi_i}$$

0.414eV以下の熱中性子についてはJOYO 21群では21番目の群だけが対応するがMAC-31群では26～31番目の群が熱中性子群である。この5群を1群に縮約するのにMaxwell分布を使う。

$$\phi_M(E)\,dE = AE\exp\left(-\frac{E}{kT}\right)dE$$

を使って各群の重み因子を求める。結果はつぎのようになる。

表3-3　熱群の重み因子

群	Energy Range		Weight W_i
1	0.414	0.2775	0.0002
2	0.2775	0.1860	0.0059
3	0.1860	0.1247	0.0407
4	0.1247	0.07595	0.1620
5	0.07595	0.0	0.7912

$k = 8.617\times10^{-5}$ eV/°K

T＝300°Kを用いた。

上の表の各群に対応する散乱断面積をσ_{26}～σ_{31}としてJOYO 21群の熱群の弾性散乱断面積σ_s^{21}(JOYO)を

$$\sigma_s^{21}(\mathrm{JOYO}) = \sum_{i=26}^{31} W_i \sigma_i$$

で与える。

つぎにγ線の$\sigma_{s,i}^{g}$をコンクリートの成分について表3-4に示す。NBS-583 の値である。

(d) コンクリート組成

コンクリート組成は，炉体廻り遮蔽解析の値を用いる。

コンクリート中原子数密度

H	4.988E-3
C	2.352E-4
O	3.263E-2
Na	5.069E-4
K	2.157E-4
Si	1.332E-2
Ca	2.175E-3
Fe	1.963E-2

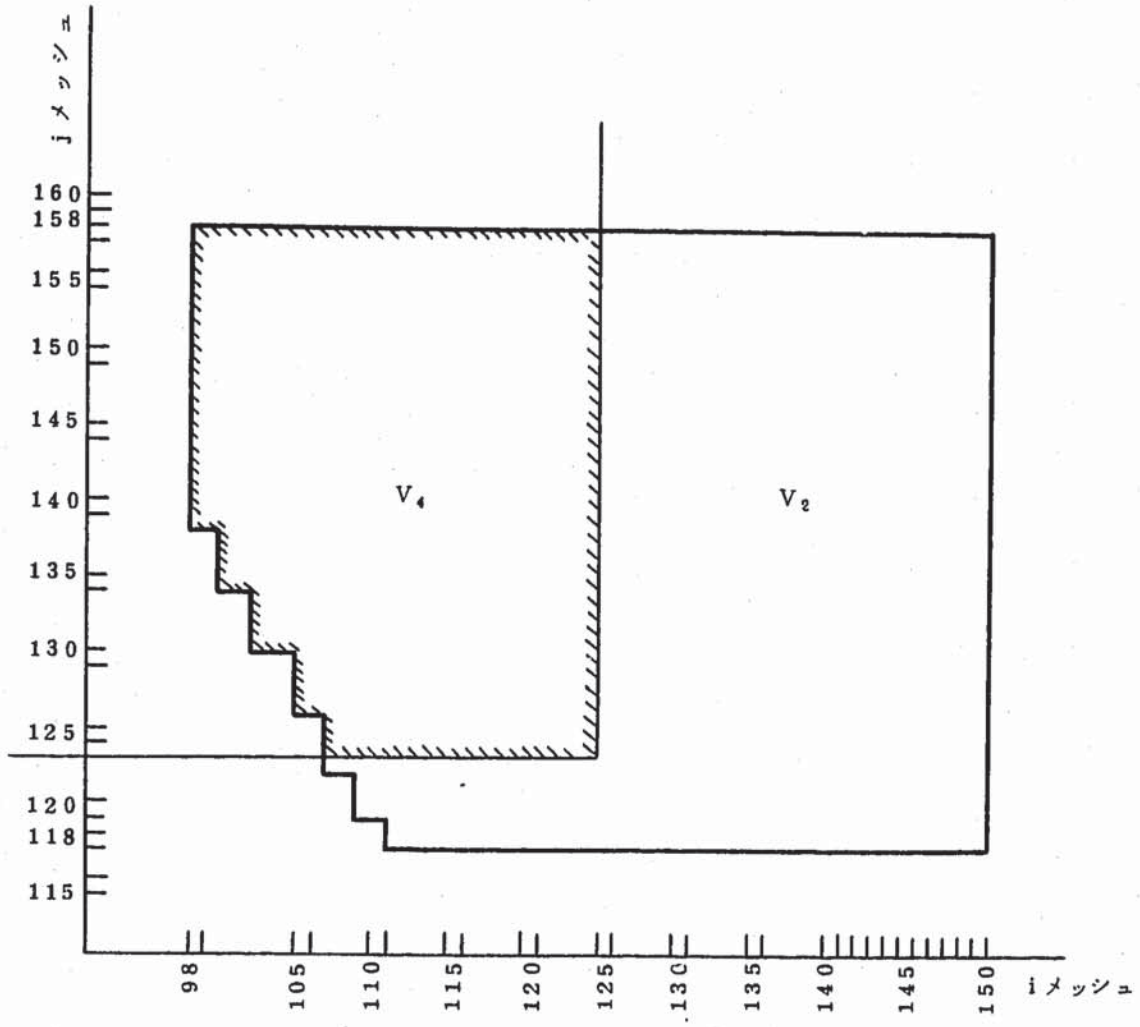


図 3-1　炉容器ペデスタル部

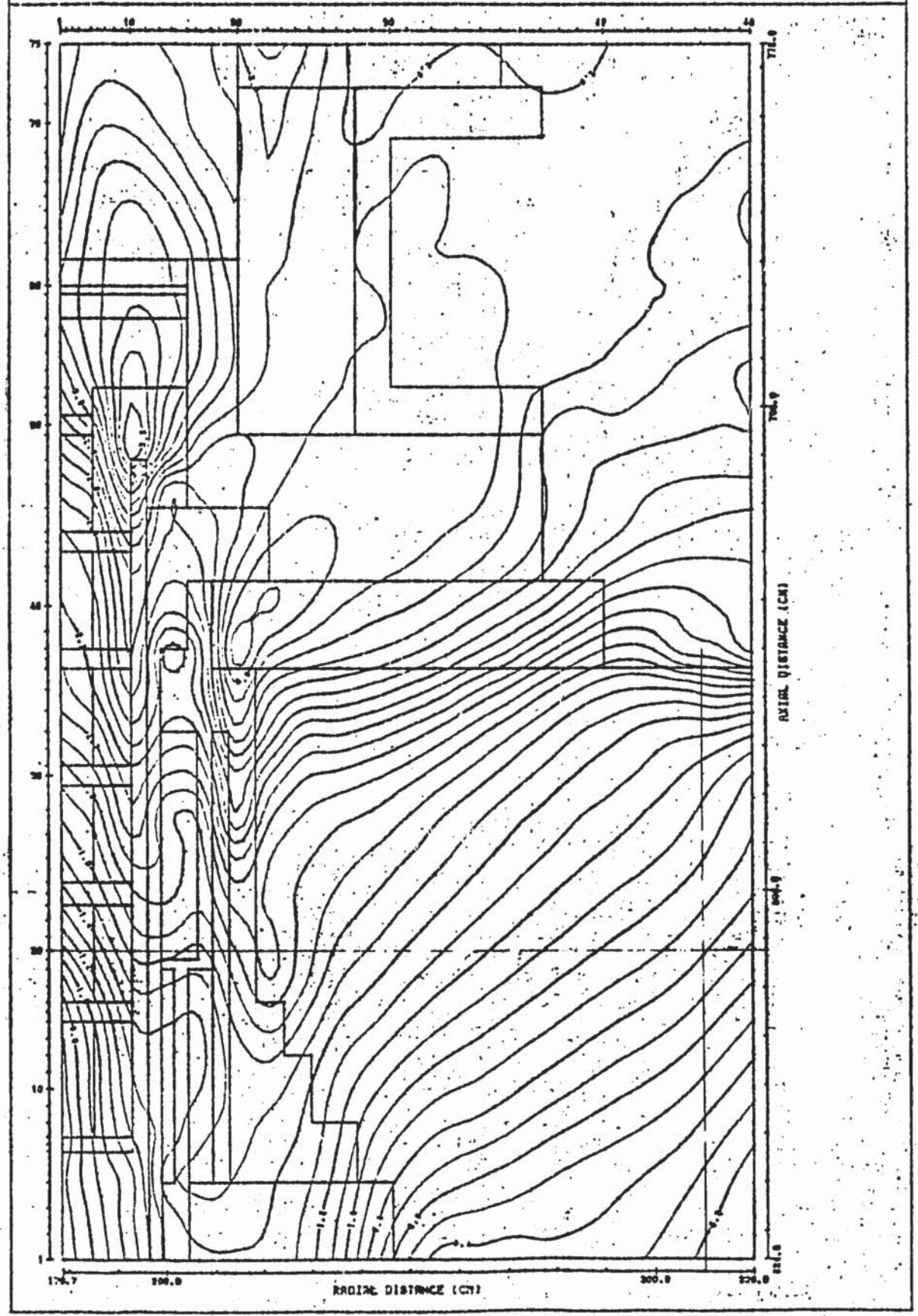
図 3-2

COMPARISON MAP: LOG10(STEP4(P3.S120)/STEP2(P1.S30))

X-INPUT PITCH = 3 X-MATRIX SIZE = 20
Y-INPUT PITCH = 3 Y-MATRIX SIZE = 30

FAST NEUTRON FLUX(N/CM**2.SEC)

RUN DATE : 78-09-18
RUN TIME : 22.33.20



3-3

COMPARISON MAP: LOG10(STEP4(P3.S120)/STEP2(P1.S30))

X-INPUT PITCH = 3 X-MATRIX SIZE = 20
Y-INPUT PITCH = 3 Y-MATRIX SIZE = 30

INTER. NEUTRON FLUX(N/CM**2.3EC)

RUN DATE : 78-09-18
RUN TIME : 22.34.08

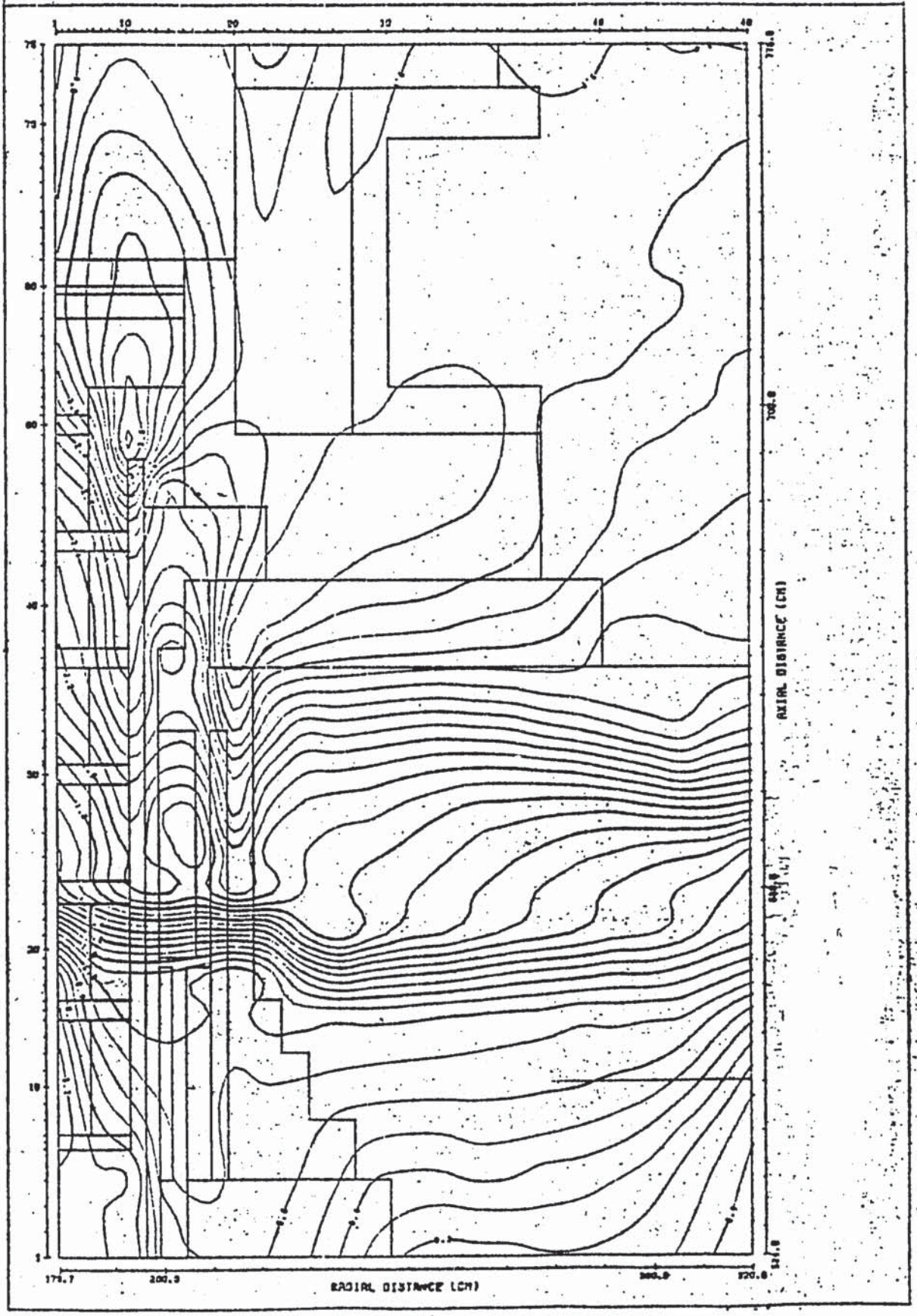


図 3-4

COMPARISON MAP; LOG10(STEP4(P3.S120)/STEP2(P1.S30))

X-INPUT PITCH = 3 X-MATRIX SIZE = 20
Y-INPUT PITCH = 3 Y-MATRIX SIZE = 30

THERMAL NEUTRON FLUX(N/CM**2.SEC)

RUN DATE : 78-03-18
RUN TIME : 22.35.02

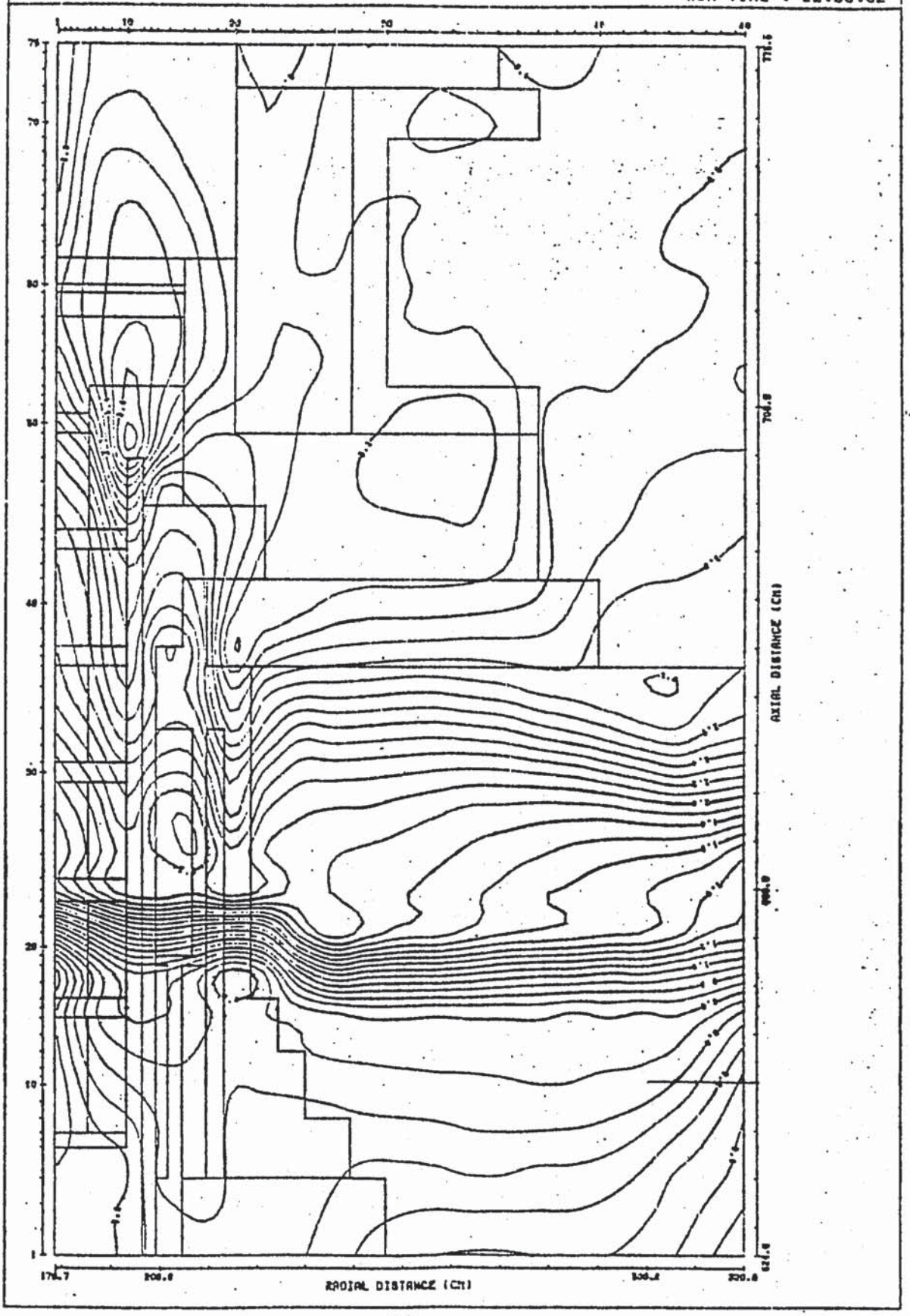


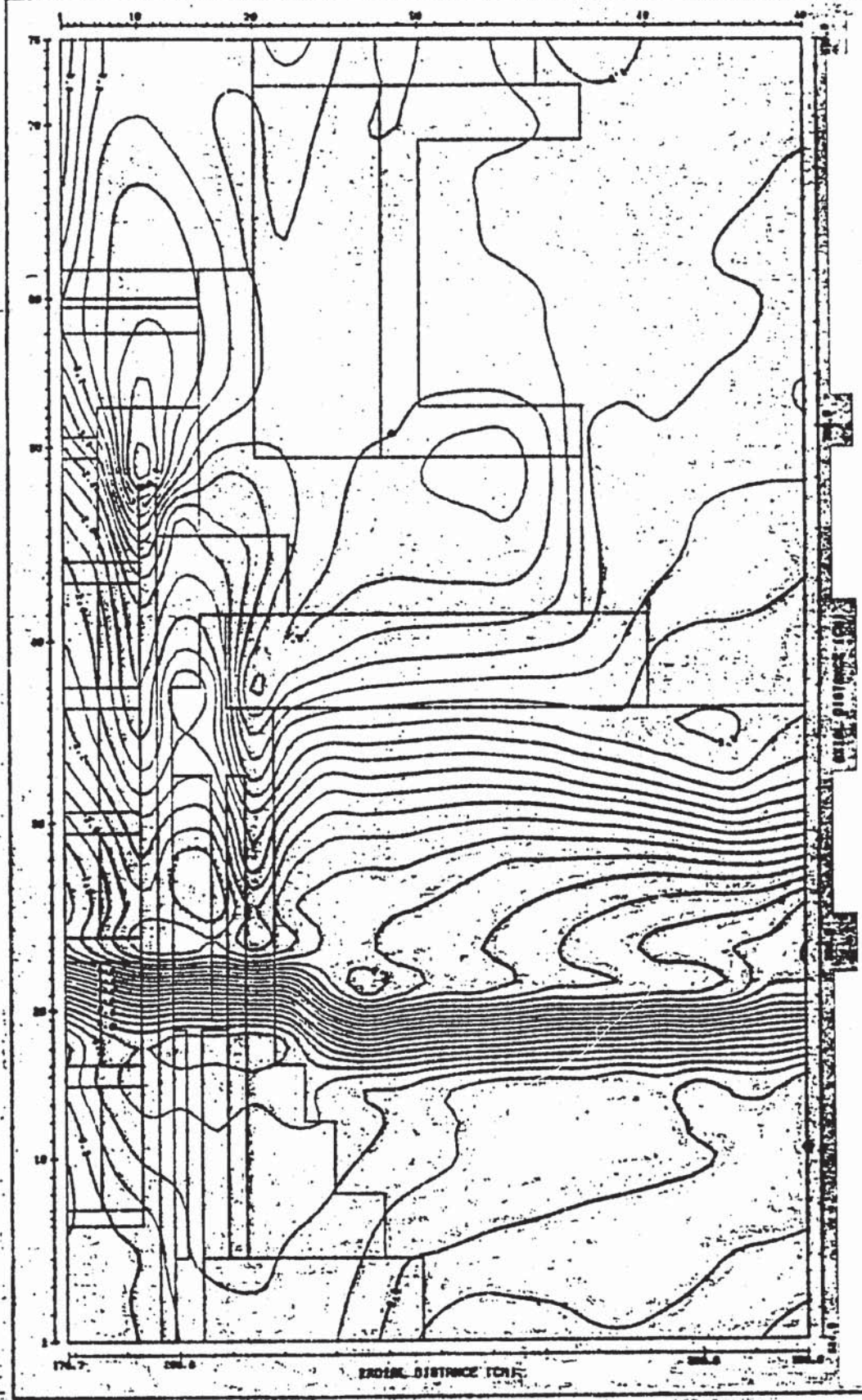
図 3-5

COMPARISON MAP; LOG10(STEP4(P3.S120)/STEP2(P1.S30))

X-INPUT PITCH = 3　　X-MATRIX SIZE = 20.
Y-INPUT PITCH = 3　　Y-MATRIX SIZE = 30

TOTAL GAMMA FLUX(N/CM**2.SEC)

RUN DATE = 78-09-18
RUN TIME = 22.35.50



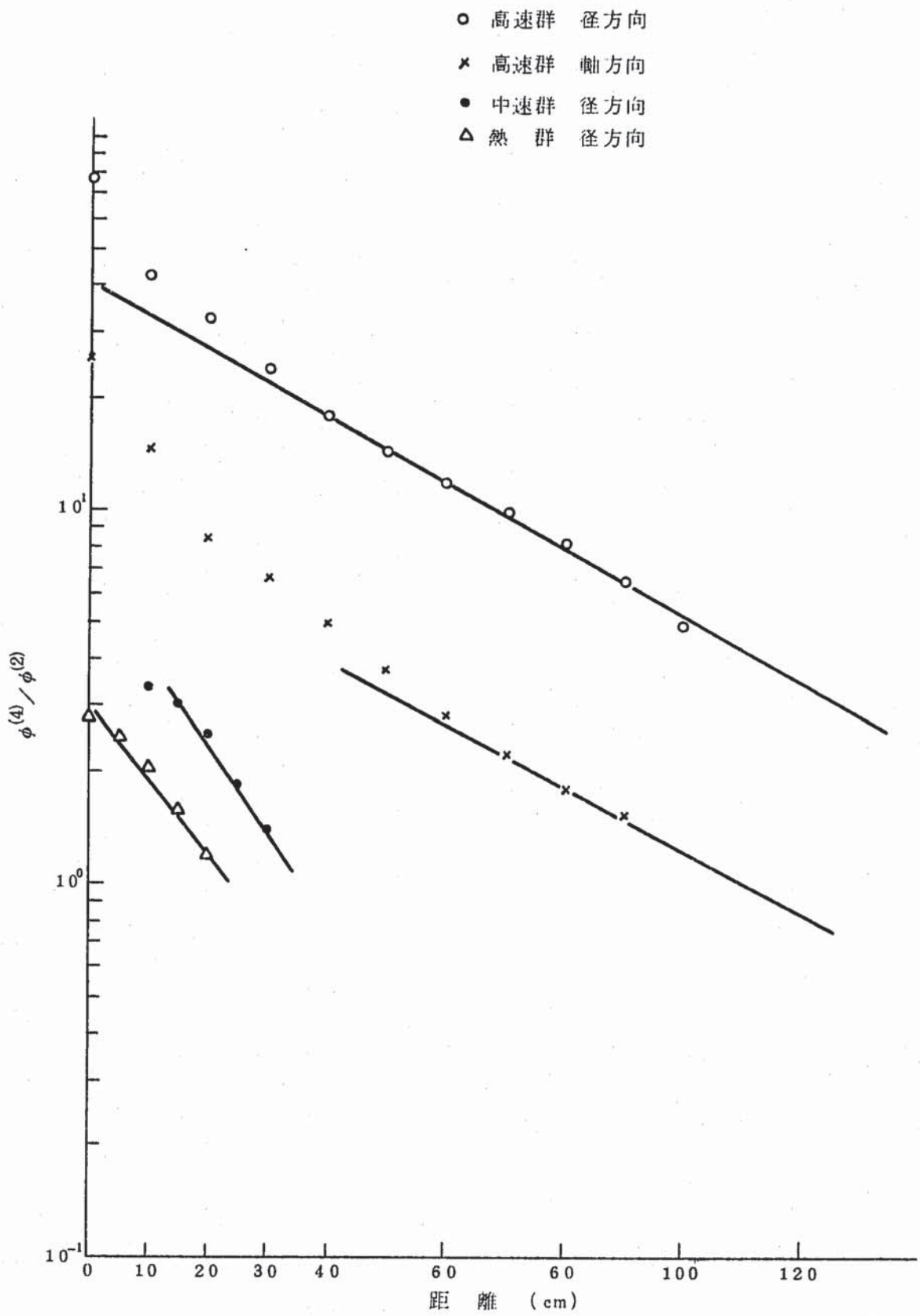


図 3-6　Step 2 と Step 4 の中性子束，γ線束の比

表 3-1　MAC-31 群，JOYO-21 群構造

	Energy Range			
	MAC-31 群		JOYO-21 群	
1	1.000E7	6.065E6	1.492E7	5.448E6
2	6.065E6	3.679E6	5.448E6	3.329E6
3	3.679E6	2.231E6	3.329E6	2.019E6
4	2.231E6	1.353E6	2.019E6	1.225E6
5	1.353E6	8.208E5	1.225E6	7.427E5
6	8.208E5	3.876E5	7.427E5	4.505E5
7	3.876E5	1.830E5	4.505E5	2.732E5
8	1.830E5	6.733E4	2.732E5	1.657E5
9	6.733E4	2.600E4	1.657E5	6.738E4
10	2.600E4	2.000E4	6.738E4	2.478E4
11	2.000E4	9.118E3	2.478E4	9.119E3
12	9.118E3	3.355E3	9.119E3	3.355E3
13	3.355E3	1.234E3	3.355E3	1.234E3
14	1.234E3	4.540E2	1.234E3	4.540E2
15	4.540E2	3.199E2	4.540E2	1.670E2
16	3.199E2	2.255E2	1.670E2	4.785E1
17	2.255E2	1.120E2	4.785E1	1.371E1
18	1.120E2	6.147E1	1.371E1	3.928E0
19	6.147E1	3.374E1	3.928E0	1.125E0
20	3.374E1	1.515E1	1.125E0	4.140E−1
21	1.515E1	1.016E1	4.140E−1	1.000E−3
22	1.016E1	4.565E0		
23	4.565E0	1.375E0		
24	1.375E0	9.214E−1		
25	9.214E−1	6.716E−1		
26	6.716E−1	4.140E−1		
27	4.140E−1	2.775E−1		
28	2.775E−1	1.860E−1		
29	1.860E−1	1.247E−1		
30	1.247E−1	7.595E−2		
31	7.595E−2	0.0		

表 3-2　JOYO+MAC 112群

Group	Energy Range		ϕ_l	σ_s^l	g
1	1.492E7	1.350E7	ϕ_1		
2	1.350E7	1.221E7	ϕ_2		
3	1.221E7	1.105E7	ϕ_3		
4	1.105E7	1.000E7	ϕ_4		
5	1.000E7	9.048E6	ϕ_5	σ_1	
6	9.048E6	8.187E6	ϕ_6		1
7	8.187E6	7.408E6	ϕ_7		
8	7.408E6	6.703E6	ϕ_8		
9	6.703E6	6.065E6	ϕ_9		
10	6.065E6	5.488E6	ϕ_{10}		
11	5.488E6	4.966E6	ϕ_{11}		
12	4.966E6	4.493E6	ϕ_{12}	σ_2	
13	4.493E6	4.066E6	ϕ_{13}		2
14	4.066E6	3.679E6	ϕ_{14}		
15	3.679E6	3.329E6	ϕ_{15}		
16	3.329E6	3.012E6	ϕ_{16}		
17	3.012E6	2.725E6	ϕ_{17}	σ_3	
18	2.725E6	2.466E6	ϕ_{18}		3
19	2.466E6	2.231E6	ϕ_{19}		
20	2.231E6	2.019E6	ϕ_{20}		
21	2.019E6	1.827E6	ϕ_{21}		
22	1.827E6	1.653E6	ϕ_{22}	σ_4	
23	1.653E6	1.496E6	ϕ_{23}		4
24	1.496E6	1.353E6	ϕ_{24}		
25	1.353E6	1.225E6	ϕ_{25}		
26	1.225E6	1.108E6	ϕ_{26}		
27	1.108E6	1.003E6	ϕ_{27}	σ_5	
28	1.003E6	9.072E5	ϕ_{28}		5
29	9.072E5	8.209E5	ϕ_{29}		
30	8.209E5	7.427E5	ϕ_{30}		
31	7.427E5	6.721E5	ϕ_{31}		
32	6.721E5	6.068E5	ϕ_{32}		
33	6.068E5	5.502E5	ϕ_{33}	σ_6	6
34	5.502E5	4.979E5	ϕ_{34}		
35	4.979E5	4.505E5	ϕ_{35}		
36	4.505E5	4.076E5	ϕ_{36}		
37	4.076E5	3.876E5	$0.52\phi_{37}$		
38	3.876E5	3.688E5	$0.48\phi_{37}$		7

表 3-2（続き）

Group	Energy Range		ϕ_i
39	3.688E5	3.337E5	ϕ_{38}
40	3.337E5	3.020E5	ϕ_{39}
41	3.020E5	2.732E5	ϕ_{40}
42	2.732E5	2.472E5	ϕ_{41}
43	2.472E5	2.237E5	ϕ_{42}
44	2.237E5	2.024E5	ϕ_{43}
45	2.024E5	1.832E5	ϕ_{44}
46	1.832E5	1.657E5	ϕ_{45}
47	1.657E5	1.500E5	ϕ_{46}
48	1.500E5	1.357E5	ϕ_{47}
49	1.357E5	1.228E5	ϕ_{48}
50	1.228E5	1.111E5	ϕ_{49}
51	1.111E5	8.662E4	ϕ_{50}
52	8.662E4	6.738E4	ϕ_{51}
53	6.738E4	5.248E4	ϕ_{52}
54	5.248E4	4.087E4	ϕ_{53}
55	4.087E4	3.183E4	ϕ_{54}
56	3.183E4	2.600E4	$0.83\phi_{55}$
57	2.600E4	2.479E4	$0.17\phi_{55}$
58	2.479E4	2.000E4	$0.87\phi_{56}$
59	2.000E4	1.931E4	$0.13\phi_{56}$
60	1.931E4	1.503E4	ϕ_{57}
61	1.503E4	1.171E4	ϕ_{58}
62	1.171E4	9.119E3	ϕ_{59}
63	9.119E3	7.102E3	ϕ_{60}
64	7.102E3	5.531E3	ϕ_{61}
65	5.531E3	4.307E3	ϕ_{62}
66	4.307E3	3.355E3	ϕ_{63}
67	3.355E3	2.613E3	ϕ_{64}
68	2.613E3	2.035E3	ϕ_{65}
69	2.035E3	1.585E3	ϕ_{66}
70	1.585E3	1.234E3	ϕ_{67}
71	1.234E3	9.611E2	ϕ_{68}
72	9.611E2	7.485E2	ϕ_{69}
73	7.485E2	5.830E2	ϕ_{70}
74	5.830E2	4.540E2	ϕ_{71}
75	4.540E2	3.536E2	ϕ_{72}
76	3.536E2	3.199E2	$0.43\phi_{73}$
77	3.199E2	2.754E2	$0.57\phi_{73}$
78	2.754E2	2.255E2	$0.82\phi_{74}$

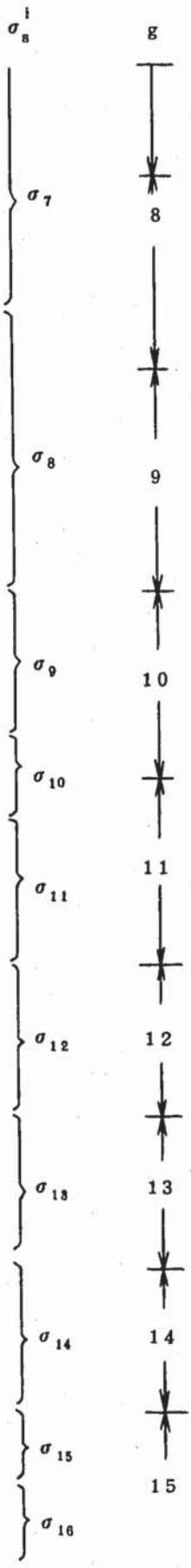


表 3-2 (続き)

Group	Energy Range		ϕ_i	σ_s^l	g
79	2.255E2	2.145E2	$0.18\phi_{74}$		
80	2.145E2	1.670E2	ϕ_{75}	σ_{17}	
81	1.670E2	1.301E2	ϕ_{76}		
82	1.301E2	1.120E2	$0.63\phi_{77}$		16
83	1.120E2	1.013E2	$0.37\phi_{77}$		
84	1.013E2	7.889E1	ϕ_{78}	σ_{18}	
85	7.889E1	6.144E1	ϕ_{79}		
86	6.144E1	4.785E1	ϕ_{80}	σ_{19}	
87	4.785E1	3.727E1	ϕ_{81}		
88	3.727E1	3.374E1	$0.43\phi_{82}$		
89	3.374E1	2.902E1	$0.57\phi_{82}$		17
90	2.902E1	2.260E1	ϕ_{83}	σ_{20}	
91	2.260E1	1.760E1	ϕ_{84}		
92	1.760E1	1.515E1	$0.63\phi_{85}$		
93	1.515E1	1.371E1	$0.37\phi_{85}$	σ_{21}	
94	1.371E1	1.068E1	ϕ_{86}		
95	1.068E1	8.315E0	ϕ_{87}	σ_{22}	18
96	8.315E0	6.476E0	ϕ_{88}		
97	6.476E0	5.044E0	ϕ_{89}		
98	5.044E0	4.565E0	$0.43\phi_{90}$		
99	4.565E0	3.928E0	$0.57\phi_{90}$		
100	3.928E0	3.059E0	ϕ_{91}		
101	3.059E0	2.382E0	ϕ_{92}		
102	2.382E0	1.855E0	ϕ_{93}	σ_{23}	19
103	1.855E0	1.445E0	ϕ_{94}		
104	1.445E0	1.375E0	$0.22\phi_{95}$		
105	1.375E0	1.125E0	$0.78\phi_{95}$	σ_{24}	
106	1.125E0	9.214E−1	$0.82\phi_{96}$		
107	9.214E−1	8.764E−1	$0.18\phi_{96}$	σ_{25}	
108	8.764E−1	6.826E−1	ϕ_{97}		20
109	6.826E−1	6.716E−1	$0.07\phi_{98}$		
110	6.716E−1	5.316E−1	$0.93\phi_{98}$	σ_{26}	
111	5.316E−1	4.140E−1	ϕ_{99}		
112	4.140E−1	1.000E−3	ϕ_{100}		21

表3-4　γ線の吸収断面積（barn）

MeV	H	C	O	Na	K	Si	Ca	Fe
0.1	0.0679	0.431	0.622	1.11	5.92	2.07	7.45	20.9
0.2	0.0890	0.530	0.720	1.01	2.20	1.36	2.54	4.50
0.5	0.0979	0.590	0.792	1.08	1.97	1.38	2.02	2.73
0.8	0.0949	0.558	0.770	1.05	1.83	1.34	1.93	2.54
1.0	0.0929	0.560	0.730	1.02	1.77	1.30	1.86	2.46
1.5	0.0847	0.510	0.680	0.943	1.64	1.20	1.72	2.19
2.0	0.0779	0.472	0.632	0.870	1.55	1.13	1.63	2.14
2.5	0.0692	0.441	0.592	0.824	1.49	1.07	1.56	2.10
3.0	0.0667	0.417	0.563	0.790	1.44	1.03	1.53	2.08
3.5	0.0617	0.397	0.537	0.763	1.42	1.00	1.50	2.07
4.0	0.0590	0.379	0.518	0.740	1.40	0.984	1.49	2.07
4.5	0.0559	0.365	0.502	0.725	1.40	0.956	1.48	2.08
5.0	0.0530	0.355	0.486	0.710	1.39	0.951	1.48	2.09
5.5	0.0507	0.345	0.473	0.687	1.38	0.932	1.48	2.11
6.0	0.0485	0.335	0.465	0.683	1.38	0.923	1.49	2.13
6.5	0.0469	0.327	0.454	0.672	1.39	0.923	1.50	2.16
7.0	0.0452	0.319	0.446	0.668	1.39	0.918	1.50	2.18
7.5	0.0435	0.313	0.438	0.664	1.40	0.914	1.50	2.21
8.0	0.0420	0.309	0.433	0.656	1.40	0.914	1.50	2.22
8.5	0.0408	0.303	0.430	0.656	1.41	0.909	1.51	2.24
9.0	0.0400	0.297	0.425	0.649	1.43	0.904	1.52	2.27
9.5	0.0387	0.293	0.422	0.649	1.46	0.900	1.53	2.29
10.0	0.0375	0.289	0.420	0.645	1.48	0.895	1.54	2.31

3.2.2 冷却材誘導放射能から発生するγ線による発熱量計算

(1) 使用コード

点減衰核積分コード SPAN

(2) γ線源強度

冷却材誘導放射能から発生するγ線源強度は，下記実測値を基に算出する。

^{24}Na 6mCi/g (50MWt)

出力50MWtから100MWtへの放射化量の変換は，放射化量が出力に比例するものとして行ない，単位体積当りの線源強度への変換は250℃におけるナトリウムの密度0.892g/cm^3(これは「常陽」炉体廻り遮蔽解析の条件と同じである)を使用する。以上の変換により，100MWt時の単位体積当りの^{24}Naの線源強度は以下の通りとなる。

^{24}Na 10.7mCi/cm^3 (100MWt)

上記線源強度からγ線源強度への変換は，表3-5に示すγ線のエネルギー，放出割合[1]を基に行なう。

表3-5 γ線のエネルギー，放出割合

核種	エネルギー(MeV)	放出割合(%)
^{24}Na	4.239	0.00072
	3.8672	0.006
	2.871	0.00028
	2.75414	99.936
	1.36853	100.0

以上のデータより算出した，^{24}Naの100MWt時のγ線源強度を表3-6に示す。また，実際の計算に使用する代表エネルギーも同表に示す。

表3-6 ^{24}Naのγ線源強度(100MWt)

放出エネルギー (MeV)	γ線源強度 (γ/cm^3・s)	代表エネルギー (MeV)
4.239	2.9×10^{3}	4.5
3.8672	2.4×10^{4}	4.0
2.871	1.1×10^{3}	2.75
2.75414	4.0×10^{8}	2.75
1.36853	4.0×10^{8}	1.5

(3) 評価モデル

評価モデルは，基本的には「炉陽」炉体廻り遮蔽解析のモデルに準拠するが，SPAN コードの制約上，計算結果に大きな影響を与えないよう考慮して以下のモデルの変更あるいは省略を行なった。

作成したモデルを図 3-7に示す。

モデルの変更，省略

(a) 径方向の炉心から外側中性子遮蔽まで，軸方向の炉心から炉心上部機構までの領域を1領域とし，その物質組成を SUS-304とした。

(b) 制御棒上部および炉心上部機構側を炉容器横熱遮蔽と同じ組成とした。

(c) 炭素鋼ライニングを炭素鋼と同じ組成とした。

(d) 回転プラグの多重層を図 3-7に示すように簡略化し，第1層目の熱遮蔽（SUS ウール）を SUS-304とした。

(4) 物質組成

まず，「常陽」炉体廻り遮蔽解析で使用した１９の基本物質の組成を表 3-7に，その他の混合領域の混合比を表 3-8に示す。

SPAN コードでは，１０種類の物質しか入力出来ないので，表 3-7～８の物質のうち表 3-9に示す１０種類の物質を計算に使用する。その物質選択の規準は，炉心より上部でしかも比較的炉容器よりの冷却材領域から，ペデスタル部を直視した場合に透過する領域（モデル図より判断）を極力採用することとする。

また，SPAN コードでは1物質当りの原子の種類の数が１０種類に限定されていること，内蔵している原子の種類も表 3-9に示す原子をすべてカバーしている訳ではないので，次のような考え方で SPAN で扱えるよう物質組成を調整した。

SPAN に内蔵されているのは限られた原子のデータである。したがって，内蔵されていない原子は内蔵されている原子のデータを代用せざるを得ない制約がある。そこで，実際の原子が与える線吸収係数が代用原子で表わした線吸収係数と等しくなるように，インプット（すなわち数密度）を調整する。具体的には以下の式より求める。

実際の物質が与える線吸収係数 μ_0^{ℓ} は

$$\mu_0^{\ell} = \mu_0^{m} \cdot \rho_0 = \mu_0^{m} \cdot \frac{N_0 M_0}{A} \qquad (5)$$

代用物質が与える線吸収係数 μ_s^{ℓ} は

$$\mu_s^{\ell} = \mu_s^{m} \cdot \rho_s = \mu_s^{m} \cdot \frac{N_s M_s}{A} \tag{6}$$

$\mu_0^{\ell} = \mu_s^{\ell}$ として

$$\mu_0^{m} \cdot \frac{N_0 M_0}{A} = \mu_s^{m} \cdot \frac{N_s M_s}{A} \tag{7}$$

$$N_s = \frac{\mu_0^{m}}{\mu_s^{m}} \cdot \frac{M_0}{M_s} \cdot N_0 \qquad (\text{記号の意味は下記}) \tag{8}$$

ここで，μ_0^{m}/μ_s^{m} は線源のエネルギスペクトルを考慮して（表 3-6参照）2.5MeV の値[2]を便宜的に使用する。

- オリジナル（実際の原子）のパラメータ

  μ_0^{ℓ} ：線吸収係数（cm^{-1}）

  $= \mu_0^{m} \cdot \rho_0$

  μ_0^{m} ：質量吸収係数（cm^2/g）（全）

  ρ_0 ：密度（g/cm^3）

  $= N_0 \cdot M_0 / A$

  N_0 ：原子数密度（$atoms/cm^3$）

  M_0 ：原子質量（$g/mole$）

  A ：アボガドロ数（$atoms/mole$）

- 代用原子のパラメータ

  μ_s^{ℓ} ：線吸収係数

  $= \mu_s^{m} \cdot \rho_s$

  μ_s^{m} ：質量吸収係数（cm^2/g）（全）

  ρ_s ：密度（g/cm^3）

  N_s ：原子数密度（$atoms/cm^3$）

  M_s ：原子質量（$g/mole$）

代用原子の選択は，2.5MeVにおける線吸収係数[2]が実際の原子のそれと最も近い原子とする。具体的には表 3-10 に示す関係となる。

表 3-10　原子の対応関係

実際の原子	代用原子
B	Aℓ
Na	C
K	C
Si	Aℓ
Ca	C
Mn	Cr
Co	Ni

以上の考えにより補正した物質組成を表3-11に示す。

なお，Voidは内蔵データをそのまま使用し，数密度は0.0とする。

表3-7「常陽」遮蔽体系各領域組成表（その1）

($\times 10^{24}$ atom/cm^3)

核種	(1) 炉心	(2) 径ブランケット	(3) 軸ブランケット	(4) 反射体	(5) 軸方向反射体	制御棒領域 (6)（引抜）	制御棒領域 (7)（挿入）
B-10							2.0617-2
B-11							1.6876-3
C							5.5760-3
O	1.6536-2	2.1976-2	1.6413-2				
Na	9.3484-3	7.5482-3	9.3484-3	4.5606-3	9.3484-3	2.1372-2	1.3040-2
Cr	3.2672-3	2.8421-3	3.2672-3	1.3428-2	3.2672-3	1.3277-3	3.4360-3
Fe	1.1896-2	1.0348-2	1.1896-2	4.7903-2	1.1896-2	4.8343-3	1.2511-2
Ni	2.0935-3	1.8212-3	2.0935-3	6.1892-3	2.0935-3	8.5077-4	2.2018-3
Mo	2.3539-4	2.0477-4	2.3539-4		2.3539-4	9.5659-5	2.4757-4
U-235	1.5799-3	2.2149-5	1.6653-5				
U-238	5.2253-3	1.0913-2	8.2049-3				
Pu-239	1.1133-3						
Pu-240	2.8066-4						
Pu-241	3.6950-5						
Pu-242	7.9605-6						

表 3-7「常陽」遮蔽体系各領域組成表（その２）

（$\times 10^{24}$ atom/cm^3）

核種	(8) 普通コンクリート	(9) 重コンクリート	(10) 黒鉛遮蔽体	(11) 炭素鋼	(12) SUS27(SUS304)	(13) ナトリウム（250℃）	(14) N_2
H	6.513-3	4.988-3					
^{10}B			8.423-8				
^{11}B			3.614-7				
C	3.039-4	2.352-4	8.007-2	9.459-4	3.124-4		
O	4.216-2	3.263-2					
Na	6.549-4	5.069-4				2.338-2	
K	2.787-4	2.157-4					
Si	1.721-2	1.332-2		4.497-4	1.775-3		
Ca	2.810-3	2.175-3					
Cr					1.714-2		
Mn				6.894-4	1.708-3		
Fe	6.233-4	1.963-2	3.451-6	8.365-2	5.679-2		
Co					1.990-4		
Ni					7.991-3		
Mo							
N							2.69-5

表 3-7「常陽」遮蔽体系各領域組成表（その３）

（$\times 10^{24}$ atom/cm^3）

核　種	(15) SUS32（SUS316）	(16) ボロン入鋼板	(17) 断　熱　材	(18) SUSウール（SUS304, 13 %）	(19)粉末黒鉛（50%黒鉛）		
H			1.043-2				
^{10}B		1.195-4			8.423-8		
^{11}B		5.282-4			1.807-7		
C	2.409-4	1.138-4		4.061-5	4.004-2		
O			2.345-2				
Na							
K							
Si	8.748-4	4.993-4	5.213-3	2.308-4			
Ca							
Cr	1.532-2			2.228-3			
Mn	1.429-3	8.098-4		2.220-4			
Fe	5.672-2	8.229-2		7.383-3	1.726-6		
Co	2.044-5			2.587-5			
Ni	1.075-2			1.039-3			
Mo	1.195-3						
Mg			7.892-3				

表 3-8　混合領域の混合比

No.	基本物質 / 領域名	Na	SUS304 ×1.036	SUS316	炭素鋼	SUS ウール	黒　鉛	断熱材	備　考
1	内側中性子遮蔽	0.2009	0.7991						
2	燃料貯蔵ラック	0.798	0.202						
3	外側中性子遮蔽	0.2613	0.7387						
4	熱遮蔽板	0.4017	0.5983						
5	炉容器外側保温材		0.04						
6	炭素鋼ライニング				0.4290				
7	ガスプレナム及び押えバネ	0.3986		0.271					
8	端　栓　部	0.4445		0.5554					
9	素　管　部	0.9121		0.0879					
10	ハンドリングヘッド部	0.6753		0.3247					
11	炉心上部機構（フィンガー部）	0.7408		0.2592					
12	炉心上部機構（熱遮蔽板）	0.375		0.625					
13	ディッププレート	0.20	0.80						
14	回転プラグ SUS ウール部		0.1261		0.1176	0.7563			
15	回転プラグ中の黒鉛（第1～第5）						0.9756		
16	ペデスタル下部保温材							0.08333	
17	炉心上部機構（円筒 Na 中）	0.4466	0.5533						
18	炉心上部機構（円筒 Ar ガス中）		0.5533						

表 3-9　選択した物質およびその組成

核種	① ナトリウム	②炉容器横 熱遮蔽	③ SUS304	④ void	⑤炉容器 保温材	⑥ 黒　鉛	⑦ 炭素鋼	⑧ 重コン	⑨ ディッププレート	⑩ペデスタル 下部断熱材
H								4.988-3		8.691-4
^{10}B						8.423-8				
^{11}B						3.614-7				
C		1.934-4	3.124-4		1.295-5	8.007-2	9.459-4	2.352-4	2.589-4	
O								3.263-2		1.954-3
Na	2.338-2	9.392-3						5.069-4	4.676-3	
K								2.157-4		
Si		1.100-3	1.775-3		7.356-5		4.497-4	1.332-2	1.471-3	4.344-4
Ca								2.175-3		
Cr		1.062-2	1.714-2		7.103-4				1.421-2	
Mn		1.059-3	1.708-3				6.894-4		1.416-3	
Fe		3.520-2	5.679-2		7.708-5		8.365-2	1.963-2	4.707-2	
Co		1.233-4	1.990-4		8.247-6				1.649-4	
Ni		4.953-3	7.991-3		3.311-4				6.623-3	
Mg										
N										

表 3-11　SPAN入力用物質組成

機種	① ナトリウム	②炉容器横 熱遮蔽	③ SUS304	④ void	⑤炉容器 保温材	⑥ 黒　鉛	⑦ 炭素鋼	⑧ 重コン	⑨ ディッププレート	⑩ペデスタル 下部断熱材
H								4.988-3		8.691-4
C	4.328-2	1.758-2	3.124-4		1.295-5	8.007-2	9.459-4	9.313-3	8.914-3	
O								3.263-2		1.954-3
Aℓ		1.192-3	1.924-3		7.974-5	1.671-7	4.874-4	1.444-2	1.595-3	4.709-4
Cr		1.173-2	1.894-2		7.103-4		7.246-4		1.570-2	
Fe		3.520-2	5.679-2		7.708-5		8.365-2	1.963-2	4.707-2	
Ni		5.071-3	8.182-3		3.390-4				6.781-3	

参 考 文 献

1) Table of Isotope 7th-edition

2) 原子炉遮蔽計算コードに関する研究：日本原子力船研究協会

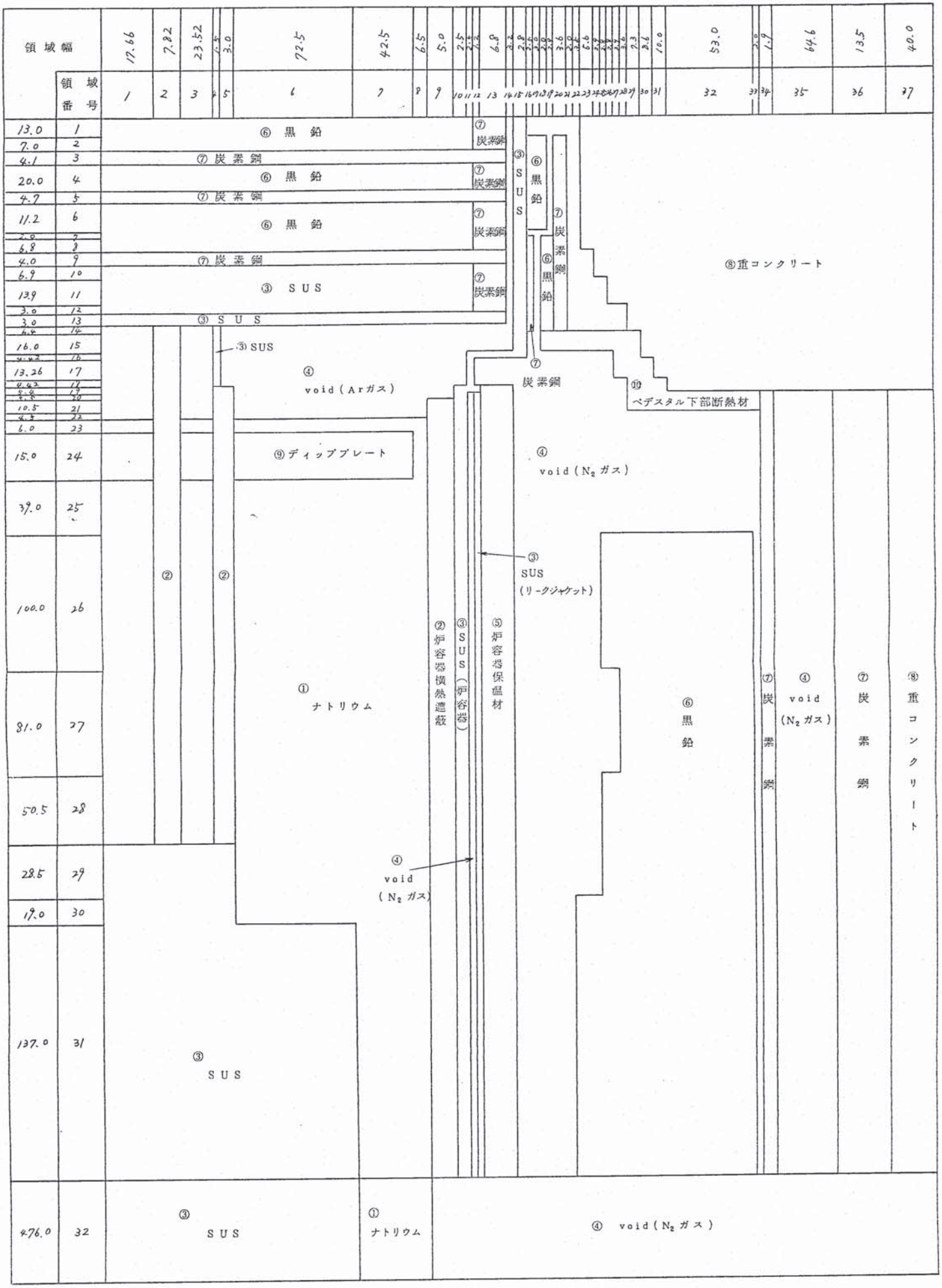


図 3-7　ペデスタル発熱計算モデル

3.3　「常陽」ペデスタル発熱分布計算結果

表 3-12～表 3-15 に，「常陽」ペデスタルにおける，放射線の寄与別およびそれらの合計の発熱分布を示す。

値は 100MWt時のものであり，温度計算用モデルのメッシュ№（各表の( )内の数字）に対応する体積平均値である。（図 3-8 参照）

単位は（kcal/hour・cc）である。

表 3-12 全中性子による発熱分布

表 3-13 全γ線（^{24}Na から以外）による発熱分布

表 3-14 ^{24}Na からのγ線による発熱分布

表 3-15 全発熱分布

なお，75MWt および 50MWt時の結果については，発熱分布が出力に比例するものとして，75MWtは 0.75，50MWt は 0.5 をそれぞれ上表の値に乗じた値とする。

また，各出力時のナトリウム密度の違いによる^{24}Naの単位体積当りの線源強度の誤差は，100MWt（500℃）でたかだか7%程度である。（ナトリウム密度：250℃→0.89，500℃→0.83）一方，^{24}Na の実測値に既に±20%程度の誤差があること，また表3と表4を比べると分かるように，全発熱分布に対する^{24}Na からのγ線の寄与は約 10% 程度であること等々により，^{24}Na の密度の違いによる線源強度の誤差は特に考慮しないものとする。したがって，出力の較正は出力のみ考慮するものとする。

更に，本計算結果は「常陽」MK-I 炉心を対象として実施した，「常陽」炉体まわり遮蔽解析結果を基に算出したものである。「常陽」は近い将来 MK-II 炉心への移行が予定されているが MK-II 炉心による詳細な遮蔽解析結果は，現段階では得られていない。解析結果が得られた時点で MK-I 炉心による解析結果との間に大きな相違がある場合は本計算結果の見直しが必要である。

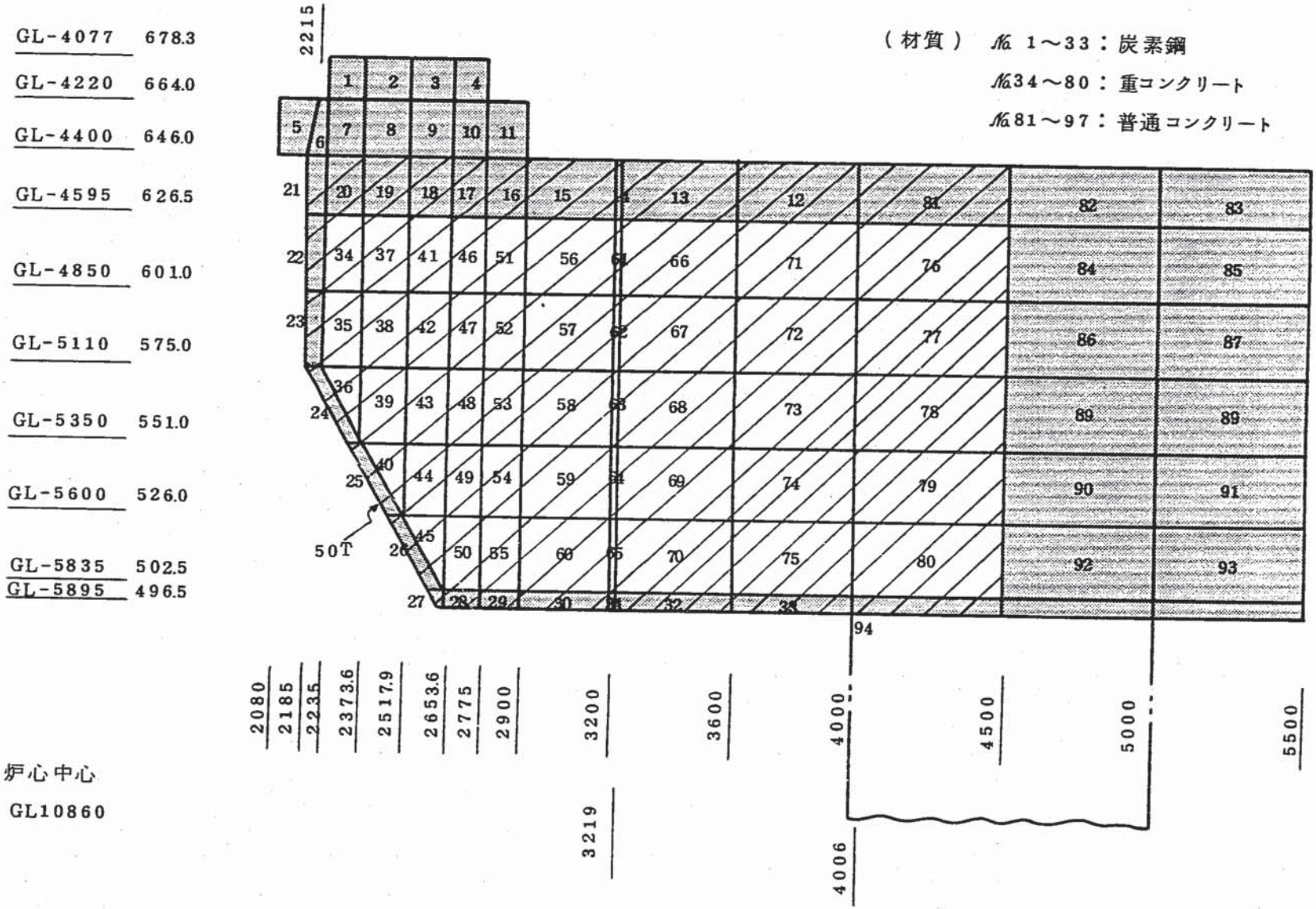


図 3-8　ペデスタル部メッシュ分割図

表 3-12　全中性子による発熱分布

***** AVERAGE HEAT GENERATION BY WEIGHTING FACTOR OF VOLUME *****

UNIT OF HEAT GENERATION (KCAL/HOUR.CC)

(21)	(20)	(19)	(18)	(17)	(16)	(15)	(14)	(13)	(12)	(81)
5.0E-09	1.1E-09	1.4E-10	2.1E-11	7.6E-12	2.0E-12	6.4E-12	2.7E-13	3.9E-13	2.0E-13	2.0E-13
(22)	(34)	(37)	(41)	(46)	(51)	(56)	(61)	(66)	(71)	(76)
5.4E-09	9.6E-10	9.1E-11	1.4E-11	2.2E-12	4.7E-13	5.8E-14	6.4E-15	2.6E-15	1.2E-15	6.4E-16
(23)	(35)	(38)	(42)	(47)	(52)	(57)	(62)	(67)	(72)	(77)
2.0E-09	8.8E-09	9.3E-10	1.3E-10	1.9E-11	2.1E-12	2.6E-13	1.4E-14	4.4E-15	9.1E-16	2.3E-16
(24)	(36)	(39)	(43)	(48)	(53)	(58)	(63)	(68)	(73)	(78)
7.1E-08	3.4E-08	1.1E-08	1.2E-09	1.2E-10	1.5E-11	1.0E-12	8.0E-14	3.6E-14	1.6E-14	4.0E-15
(C)	(25)	(40)	(44)	(49)	(54)	(59)	(64)	(69)	(74)	(79)
~~0.0~~	4.3E-08	2.9E-08	5.3E-09	4.7E-10	6.4E-11	8.6E-12	3.2E-12	1.6E-12	1.1E-12	1.8E-13
(C)	(C)	(26)	(45)	(50)	(55)	(60)	(65)	(70)	(75)	(80)
~~0.0~~	~~0.0~~	1.5E-08	7.9E-09	2.2E-09	6.6E-10	4.2E-10	2.4E-10	1.4E-10	1.2E-10	7.8E-12
(C)	(C)	(C)	(C)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)	(95)
~~0.0~~	~~0.0~~	~~0.0~~	~~0.0~~	6.9E-09	4.3E-09	3.3E-09	1.7E-09	1.3E-09	1.1E-09	3.8E-11

表3-13　全γ線（^{24}Naから以外）による発熱分布

***** AVERAGE HEAT GENERATION BY WEIGHTING FACTOR OF VOLUME *****

UNIT OF HEAT GENERATION (KCAL/HOUR.CC)

(21)	(20)	(19)	(18)	(17)	(16)	(15)	(14)	(13)	(12)	(81)
2.6E-06	9.4E-07	2.2E-07	5.7E-08	1.6E-08	5.4E-09	1.1E-09	2.5E-10	7.7E-11	9.5E-12	3.3E-12
(22)	(34)	(37)	(41)	(46)	(51)	(56)	(61)	(66)	(71)	(76)
4.5E-06	2.0E-06	5.9E-07	1.8E-07	5.6E-08	1.9E-08	3.8E-09	8.3E-10	2.7E-10	5.1E-11	1.9E-11
(23)	(35)	(38)	(42)	(47)	(52)	(57)	(62)	(67)	(72)	(77)
1.1E-05	1.1E-05	3.5E-06	1.0E-06	2.9E-07	8.8E-08	1.6E-08	3.6E-09	1.5E-09	4.8E-10	1.5E-10
(24)	(36)	(39)	(43)	(48)	(53)	(58)	(63)	(68)	(73)	(78)
4.5E-05	3.2E-05	1.8E-05	4.8E-06	1.2E-06	3.3E-07	6.2E-08	1.9E-08	1.1E-08	4.9E-09	1.1E-09
(C)	(25)	(40)	(44)	(49)	(54)	(59)	(64)	(69)	(74)	(79)
~~3.3~~	4.6E-05	3.8E-05	1.5E-05	3.9E-06	1.3E-06	3.8E-07	2.1E-07	1.3E-07	6.2E-08	8.0E-09
(C)	(C)	(26)	(45)	(50)	(55)	(60)	(65)	(70)	(75)	(80)
~~3.3~~	~~3.3~~	3.9E-05	2.8E-05	1.3E-05	6.5E-06	4.2E-06	2.8E-06	1.6E-06	8.8E-07	5.2E-08
(C)	(C)	(C)	(C)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)	(95)
~~3.3~~	~~3.3~~	~~3.3~~	~~3.3~~	2.7E-05	2.6E-05	1.6E-05	9.8E-06	6.1E-06	3.7E-06	1.1E-07

表 3-14 ^{24}Na からの γ 線による発熱分布

***** AVERAGE HEAT GENERATION BY WEIGHTING FACTOR OF VOLUME *****

UNIT OF HEAT GENERATION (KCAL/HOUR.CC)

(21)	(20)	(19)	(18)	(17)	(16)	(15)	(14)	(13)	(12)	(81)	
1.7E-11	1.2E-11	1.0E-11	1.1E-11	7.5E-12	3.6E-12	9.2E-13	2.7E-13	7.8E-14	2.6E-15	7.1E-17	
(22)	(34)	(37)	(41)	(46)	(51)	(56)	(61)	(66)	(71)	(76)	
8.5E-10	5.5E-10	3.3E-10	2.3E-10	1.3E-10	5.9E-11	1.8E-11	3.0E-12	7.2E-13	2.3E-14	9.2E-16	
(23)	(35)	(38)	(42)	(47)	(52)	(57)	(62)	(67)	(72)	(77)	
1.4E-06	3.4E-08	1.9E-08	8.4E-09	3.5E-09	1.4E-09	2.5E-10	4.0E-11	8.7E-12	3.0E-13	2.4E-14	
(24)	(36)	(39)	(43)	(48)	(53)	(58)	(63)	(68)	(73)	(78)	
1.0E-06	5.2E-07	4.7E-07	2.1E-07	6.5E-08	1.6E-08	2.2E-09	2.4E-10	6.0E-11	5.6E-12	7.2E-13	
(C)	(25)	(40)	(44)	(49)	(54)	(59)	(64)	(69)	(74)	(79)	
~~0.0~~	5.4E-06	4.6E-06	1.9E-06	4.0E-07	8.7E-08	1.1E-08	2.5E-09	1.3E-09	2.8E-10	7.3E-11	
(C)	(C)	(26)	(45)	(50)	(55)	(60)	(65)	(70)	(75)	(80)	
~~0.0~~	~~0.0~~	5.3E-06	3.6E-06	1.6E-06	5.7E-07	2.2E-07	1.6E-07	1.0E-07	4.2E-08	2.5E-09	
(C)	(C)	(C)	(C)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)	(95)	
~~0.0~~	~~0.0~~	~~0.0~~	~~0.0~~	3.7E-06	2.4E-06	2.0E-06	1.8E-06	1.1E-06	6.1E-07	1.3E-08	

表 3-15　全発熱分布

***** AVERAGE HEAT GENERATION BY WEIGHTING FACTOR OF VOLUME *****

UNIT OF HEAT GENERATION (KCAL/HOUR.CC)

(21)	(20)	(19)	(18)	(17)	(16)	(15)	(14)	(13)	(12)	(81)
2.6E-06	9.5E-07	2.2E-07	5.7E-08	1.6E-08	5.4E-09	1.1E-09	2.5E-10	7.7E-11	9.8E-12	3.5E-12
(22)	(34)	(37)	(41)	(46)	(51)	(56)	(61)	(66)	(71)	(76)
4.5E-06	2.0E-06	5.9E-07	1.8E-07	5.6E-08	1.9E-08	3.8E-09	8.3E-10	2.7E-10	5.1E-11	1.9E-11
(23)	(35)	(38)	(42)	(47)	(52)	(57)	(62)	(67)	(72)	(77)
1.2E-05	1.1E-05	3.5E-06	1.0E-06	2.9E-07	9.0E-08	1.6E-08	3.6E-09	1.5E-09	4.8E-10	1.5E-10
(24)	(36)	(39)	(43)	(48)	(53)	(58)	(63)	(68)	(73)	(78)
4.6E-05	3.2E-05	1.8E-05	5.0E-06	1.2E-06	3.5E-07	6.5E-08	2.0E-08	1.1E-08	4.9E-09	1.2E-09
(C)	(25)	(40)	(44)	(49)	(54)	(59)	(64)	(69)	(74)	(79)
[illegible]	5.1E-05	4.3E-05	1.7E-05	4.3E-06	1.4E-06	3.9E-07	2.1E-07	1.3E-07	6.3E-08	8.1E-09
(C)	(C)	(26)	(45)	(50)	(55)	(60)	(65)	(70)	(75)	(80)
[illegible]	[illegible]	4.4E-05	3.2E-05	1.5E-05	7.1E-06	4.4E-06	2.9E-06	1.7E-06	9.2E-07	5.4E-08
(C)	(C)	(C)	(C)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)	(95)
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	3.1E-05	2.2E-05	1.8E-05	1.1E-05	7.2E-06	4.3E-06	1.2E-07

4. ペデスタル部温度分布計算

4. ペデスタル部温度分布計算

4.1 概要

ペデスタル部発熱分布計算結果と原子炉容器などからの入熱を考慮し，「常陽」各運転時におけるペデスタル部の温度分布を求める。

計算は下記項目について実施する。

(1) ペデスタル部のコンクリート温度を支配する要因がペデスタル部の内部発熱によるものか，あるいは，周囲からの入熱によるものかの目安を得るための予備計算

(2) ペデスタル部の内部発熱と周囲からの入熱を考慮し，更に「常陽」の運転によって得られた各種データを使用しての，原子炉出力50，75及び100MW運転におけるペデスタル部の温度分布計算

(3) ペデスタル部の温度に対する感度を検討するため，コンクリート遮蔽体冷却系のプロセス量を変化させた場合のペデスタル部の温度分布計算

上記(2)～(3)項に関しては，ペデスタル部まわりの各種境界条件の設定作業が複雑となるため，ペデスタル部を含む「常陽」炉体まわりを一括してモデル化し，温度分布を求めた。

4.2 予備計算

4.2.1 計算内容及び計算条件

ペデスタル部のコンクリート温度を支配する要因がペデスタル部の内部発熱によるものか，あるいは周囲からの入熱によるものかの目安を得るために下記項目について計算を行う。

(1) 計算内容

(a) 下記の2つの場合について検討する。

(i) ペデスタル内面を断熱条件とする場合

(ii) ペデスタル内面の冷却効果を考慮する場合

(b) 次に示す計算条件のもとに計算する。

(イ) 計算は図4－1に示す領域で行う。境界条件は，(i)の場合P部は自然放熱とし，他はすべて断熱条件とする。(ii)の場合にはA，B，C部に冷却条件を入れて計算する。

(ロ) ガンマ発熱分布は第3章の結果を用いる。なお，データの存在しない部分は

外挿値とする。

(ハ) 上記(イ)，(ロ)を 100MW時のガンマ発熱分布を用いた場合について行い，更に発熱量を2倍，5倍及び10倍にした場合についても検討する。

(2) 計算条件

(a) 温度分布計算モデルは図4－1に示すごとく構造を単純化した軸対称二次元モデルとする。

(b) ペデスタル構造物中の鉄骨構造物（放射状梁及び環状梁），各種貫通孔及び上部に設置されている各種構造物等は無視する。

(c) 温度分布計算は，2次元及び軸対象な3次元物体の温度分布を求めるために作られたIBM－3033用計算コードによる。

(d) 各種伝熱条件及び雰囲気温度条件は各ケース共に同一数値を使用する。

4.2.2 計算結果

上記に基づいてペデスタル部の温度分布を計算した結果は下記の通りである。

(1)	内部発熱量：計算値	ペデスタル内面	断熱	図4－2
(2)	〃 ： 〃 の2倍	〃		図4－3
(3)	〃 ： 〃 の5倍	〃		図4－4
(4)	〃 ： 〃 の10倍	〃		図4－5
(5)	〃 ：計算値	ペデスタル内面	冷却	図4－6
(6)	〃 ： 〃 の2倍	〃		図4－7
(7)	〃 ： 〃 の5倍	〃		図4－8
(8)	〃 ： 〃 の10倍	〃		図4－9

4.2.3 計算結果について

ペデスタル部温度の予備計算の結果から下記に示すことが判明した。

(1) 前章の発熱分布計算の結果より得られる，ペデスタル部全体の発熱量は，計算値で約140kcal/hである。

(2) ペデスタル上面の雰囲気温度を36.6℃とし，ソールプレート外周面で自然放散（熱伝達率α = 2.0kcal/m² h℃）し，他は断熱条件とした場合，内部発熱によるペデスタル内の最大温度上昇は下記の通りである。（図4-2~5参照）

図４－１　ペデスタル部メッシュ分割図

（材質）　№12～33：炭素鋼
№34～80：重コンクリート
№31～97：普通コンクリート

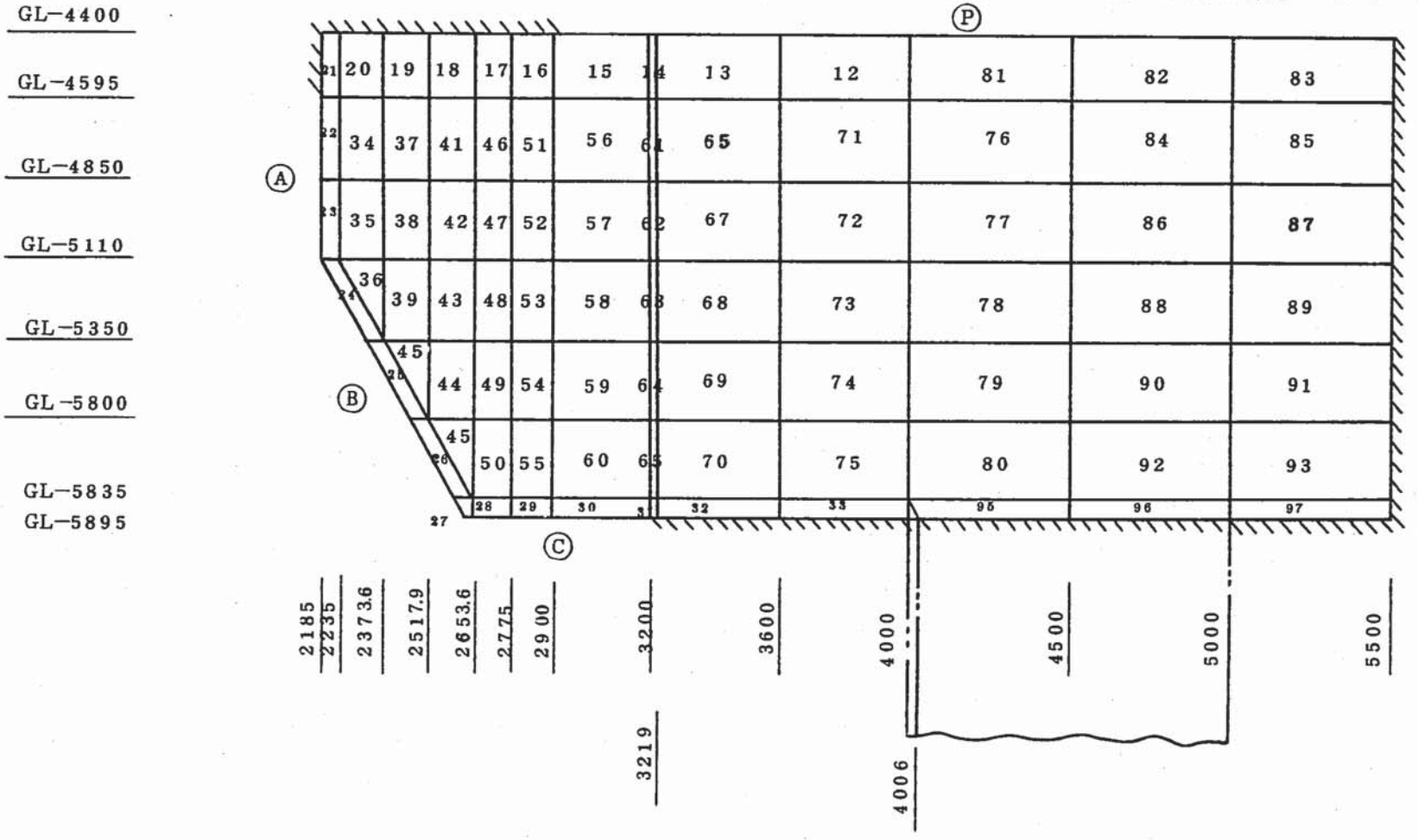


表 4−1　全発熱分布

***** AVERAGE HEAT GENERATION BY REACTING FACTOR OF CORE *****

UNIT OF HEAT GENERATION (KCAL/HOUR.CC)

(21)	(20)	(19)	(18)	(17)	(16)	(15)	(14)	(13)	(12)	(81)
2.6E-06	9.5E-07	2.2E-07	5.7E-08	1.6E-08	5.4E-09	1.1E-09	2.5E-10	7.7E-11	9.8E-12	3.5E-12
(22)	(34)	(37)	(41)	(46)	(51)	(56)	(61)	(66)	(71)	(76)
4.5E-06	2.0E-06	5.9E-07	1.8E-07	5.6E-08	1.9E-08	3.8E-09	8.3E-10	2.7E-10	5.1E-11	1.9E-11
(23)	(35)	(38)	(42)	(47)	(52)	(57)	(62)	(67)	(72)	(77)
1.2E-05	1.1E-05	3.5E-06	1.0E-06	2.9E-07	9.0E-08	1.6E-08	3.6E-09	1.5E-09	4.8E-10	1.5E-10
(24)	(36)	(39)	(43)	(48)	(53)	(58)	(63)	(68)	(73)	(78)
4.6E-05	3.2E-05	1.8E-05	5.0E-06	1.2E-06	3.5E-07	6.5E-08	2.0E-08	1.1E-08	4.9E-09	1.2E-09
( )	(25)	(40)	(44)	(49)	(54)	(59)	(64)	(69)	(74)	(79)
———	5.1E-05	4.3E-05	1.7E-05	4.3E-06	1.4E-06	3.9E-07	2.1E-07	1.3E-07	6.3E-08	8.1E-09
( )	( )	(26)	(45)	(50)	(55)	(60)	(65)	(70)	(75)	(80)
———	———	4.4E-05	3.2E-05	1.5E-05	7.1E-06	4.4E-06	2.9E-06	1.7E-06	9.2E-07	5.4E-08
( )	( )	( )	( )	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)	(95)
———	———	———	———	3.1E-05	2.2E-05	1.8E-05	1.1E-05	7.2E-06	4.3E-06	1.2E-07

図 4-2　ペデスタル部温度分布（発熱量：計算値，断熱）

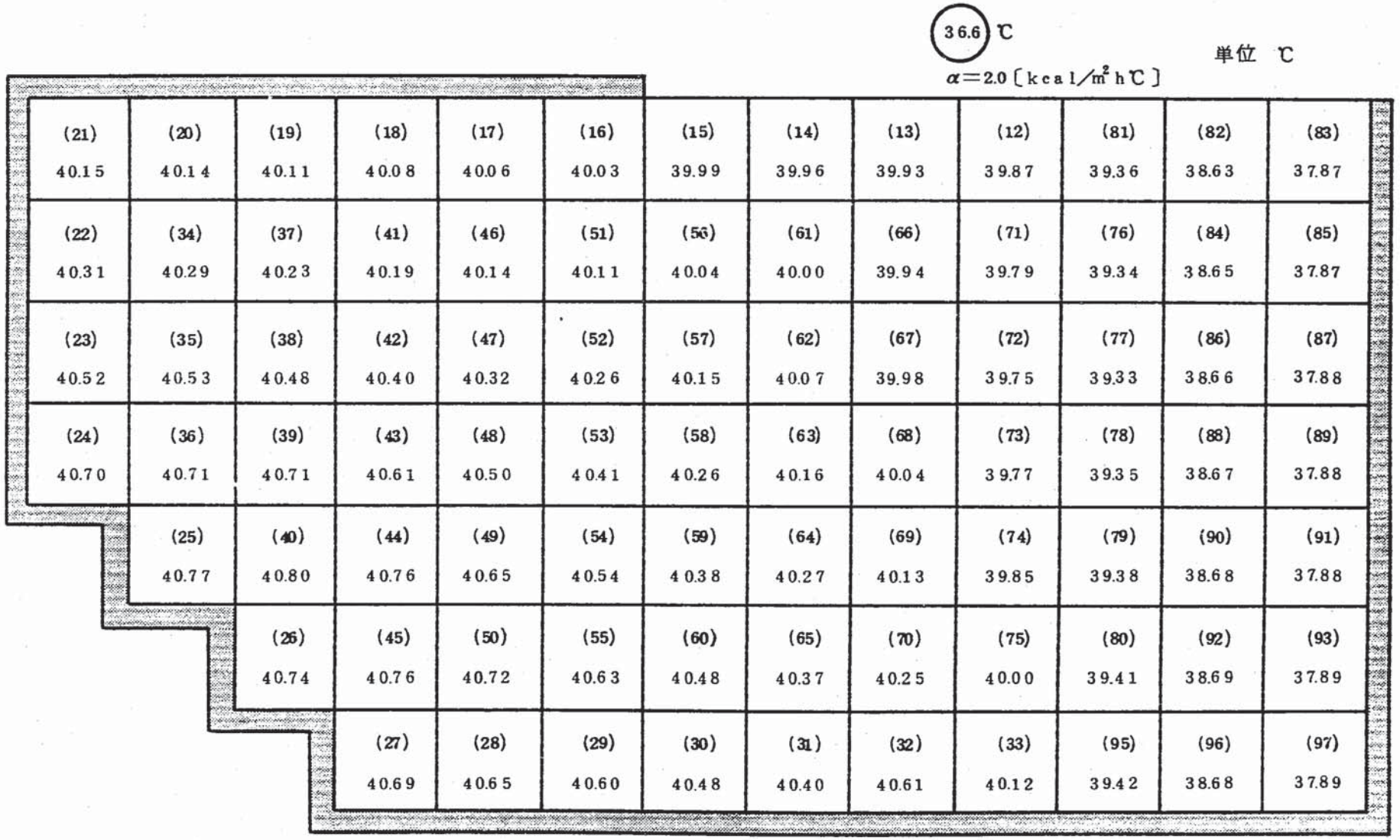


図 4-3　ペデスタル部温度分布（発熱量：計算値 × 2倍，断熱）

(36.6) ℃

単位　℃

$\alpha = 2.0$〔kcal/m² h℃〕

(21) 45.33	(20) 45.30	(19) 45.24	(18) 45.18	(17) 45.12	(16) 45.07	(15) 44.97	(14) 44.90	(13) 44.82	(12) 44.67	(81) 43.38	(82) 41.57	(83) 39.71
(22) 45.65	(34) 45.59	(37) 45.49	(41) 45.39	(46) 45.29	(51) 45.21	(56) 45.06	(61) 44.95	(66) 44.81	(71) 44.45	(76) 43.32	(84) 41.62	(85) 39.72
(23) 46.06	(35) 46.08	(38) 45.08	(42) 45.96	(47) 45.80	(52) 45.64	(57) 45.50	(62) 45.26	(67) 45.08	(72) 44.85	(77) 44.31	(86) 41.65	(87) 39.73
(24) 46.41	(36) 46.44	(39) 46.43	(43) 46.21	(48) 45.99	(53) 45.79	(58) 45.47	(63) 45.25	(68) 44.97	(73) 44.34	(78) 43.32	(88) 41.66	(89) 39.74
	(25) 46.54	(40) 46.59	(44) 46.51	(49) 46.28	(54) 46.05	(59) 45.69	(64) 45.45	(69) 45.15	(74) 44.50	(79) 43.37	(90) 41.68	(91) 39.74
		(26) 46.47	(45) 46.50	(50) 46.41	(55) 46.22	(60) 45.89	(65) 45.66	(70) 45.37	(75) 44.81	(80) 43.44	(92) 41.69	(93) 39.75
			(27) 46.35	(28) 46.28	(29) 46.15	(30) 45.90	(31) 45.70	(32) 45.46	(33) 45.08	(95) 43.46	(96) 41.68	(97) 39.75

図 4-4　ペデスタル部温度分布（発熱量：計算値× 5 倍，断熱）

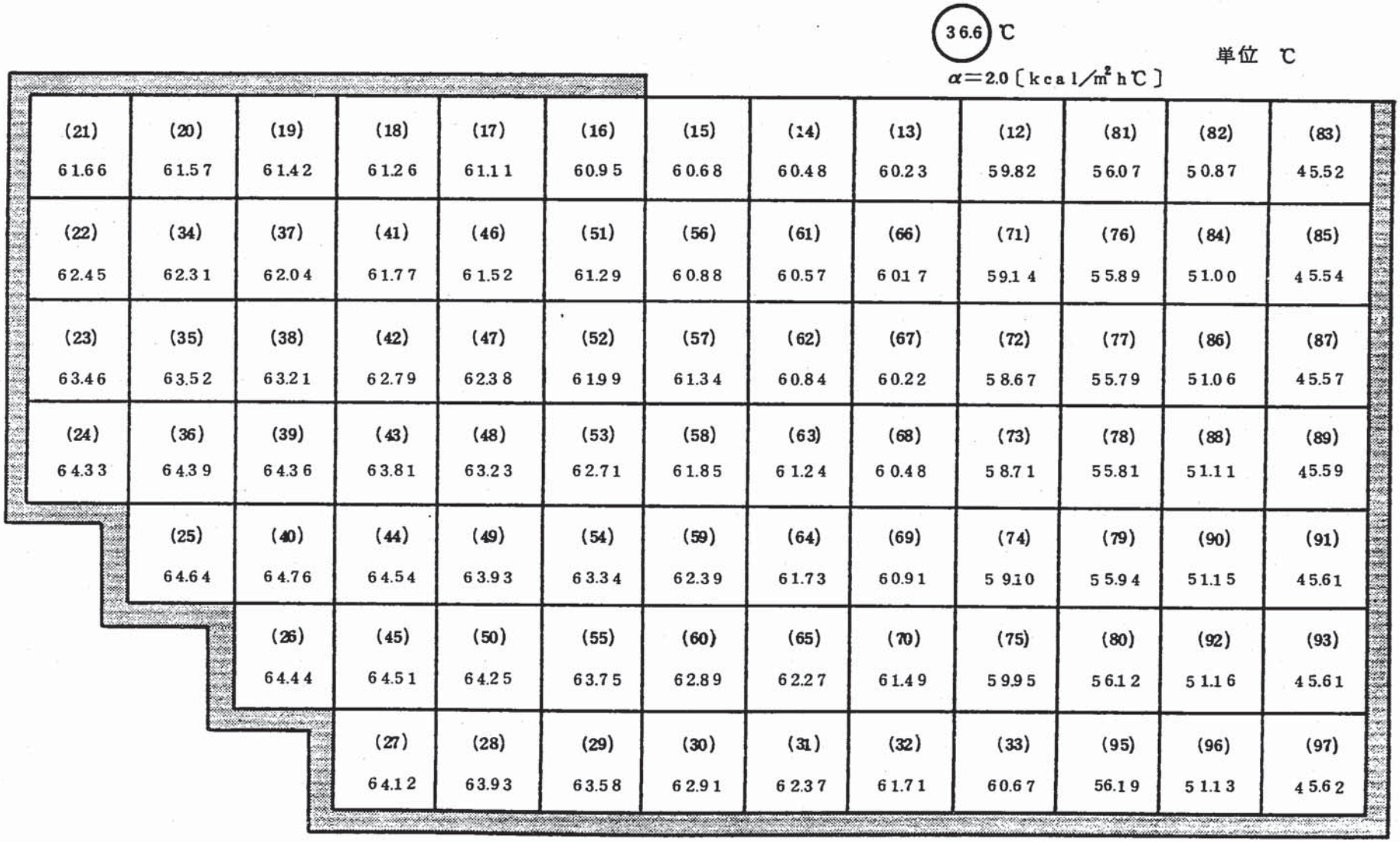


図 4-5　ペデスタル部温度分布（発熱量：計算値×１０倍，断熱）

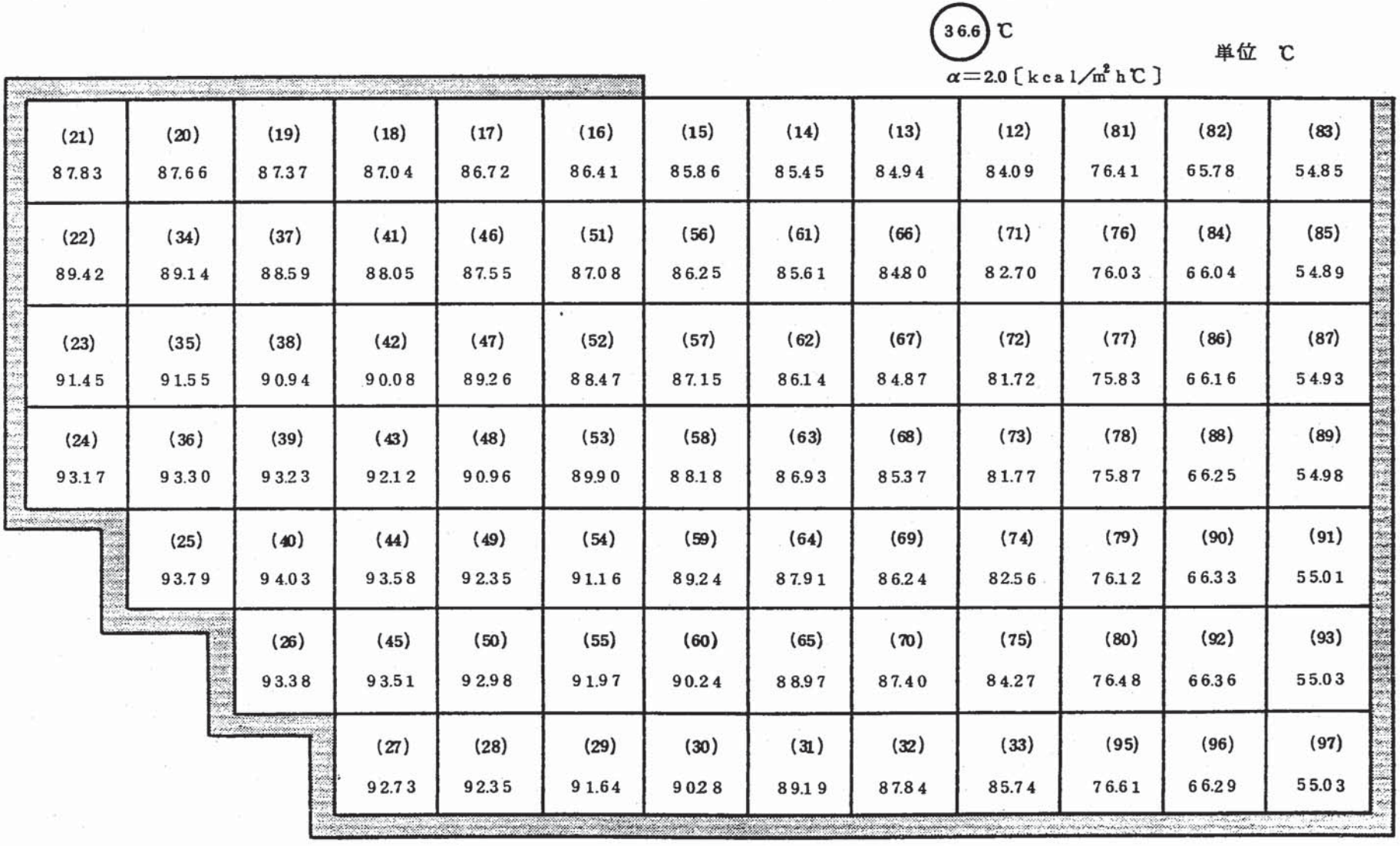
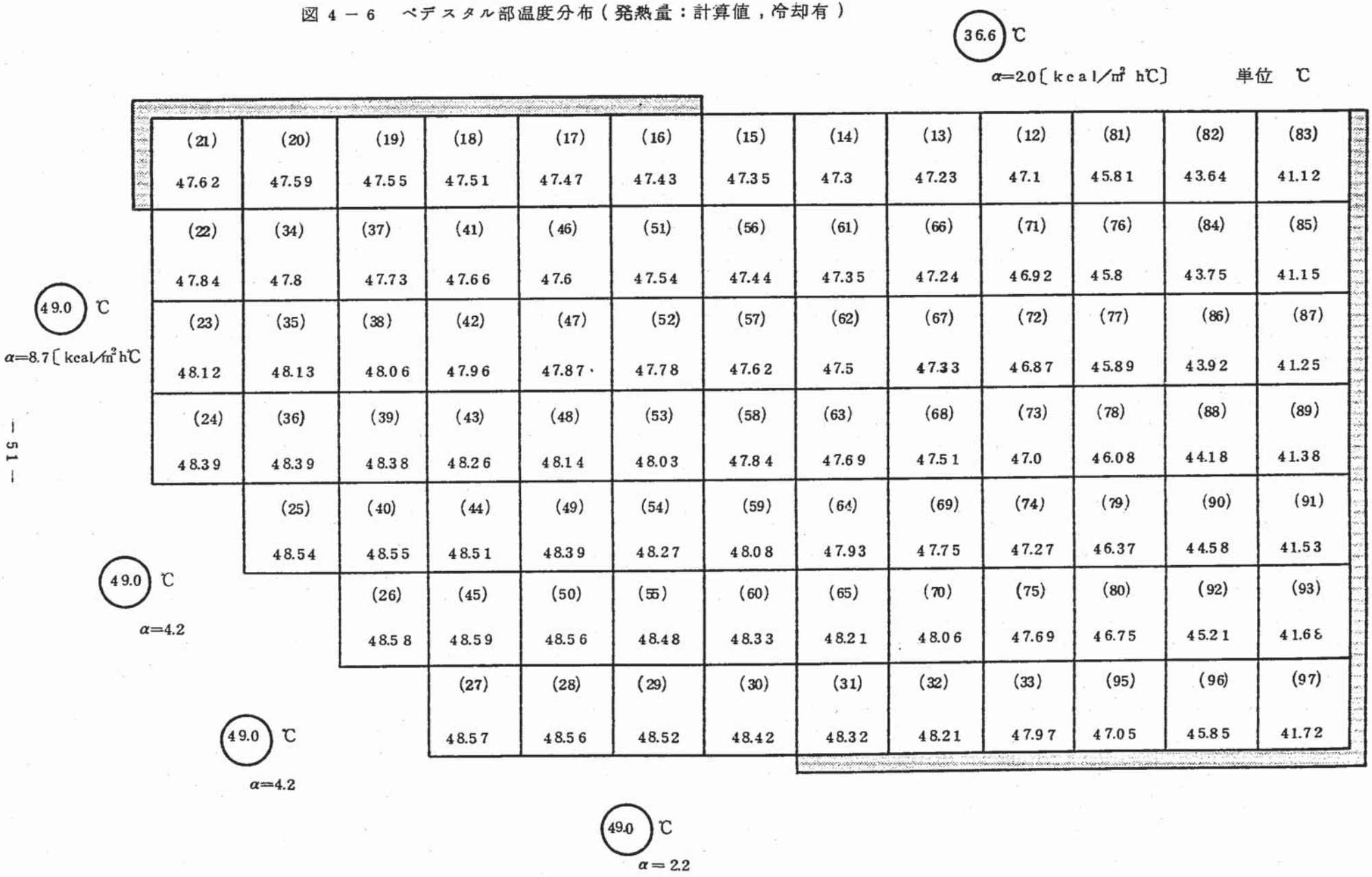


図 4 － 6　ペデスタル部温度分布（発熱量：計算値，冷却有）



(21) 47.62	(20) 47.59	(19) 47.55	(18) 47.51	(17) 47.47	(16) 47.43	(15) 47.35	(14) 47.3	(13) 47.23	(12) 47.1	(81) 45.81	(82) 43.64	(83) 41.12
(22) 47.84	(34) 47.8	(37) 47.73	(41) 47.66	(46) 47.6	(51) 47.54	(56) 47.44	(61) 47.35	(66) 47.24	(71) 46.92	(76) 45.8	(84) 43.75	(85) 41.15
(23) 48.12	(35) 48.13	(38) 48.06	(42) 47.96	(47) 47.87	(52) 47.78	(57) 47.62	(62) 47.5	(67) 47.33	(72) 46.87	(77) 45.89	(86) 43.92	(87) 41.25
(24) 48.39	(36) 48.39	(39) 48.38	(43) 48.26	(48) 48.14	(53) 48.03	(58) 47.84	(63) 47.69	(68) 47.51	(73) 47.0	(78) 46.08	(88) 44.18	(89) 41.38
	(25) 48.54	(40) 48.55	(44) 48.51	(49) 48.39	(54) 48.27	(59) 48.08	(64) 47.93	(69) 47.75	(74) 47.27	(79) 46.37	(90) 44.58	(91) 41.53
		(26) 48.58	(45) 48.59	(50) 48.56	(55) 48.48	(60) 48.33	(65) 48.21	(70) 48.06	(75) 47.69	(80) 46.75	(92) 45.21	(93) 41.66
			(27) 48.57	(28) 48.56	(29) 48.52	(30) 48.42	(31) 48.32	(32) 48.21	(33) 47.97	(95) 47.05	(96) 45.85	(97) 41.72

図４－７　ペデスタル部温度分布（発熱量：計算値×２倍，冷却有）

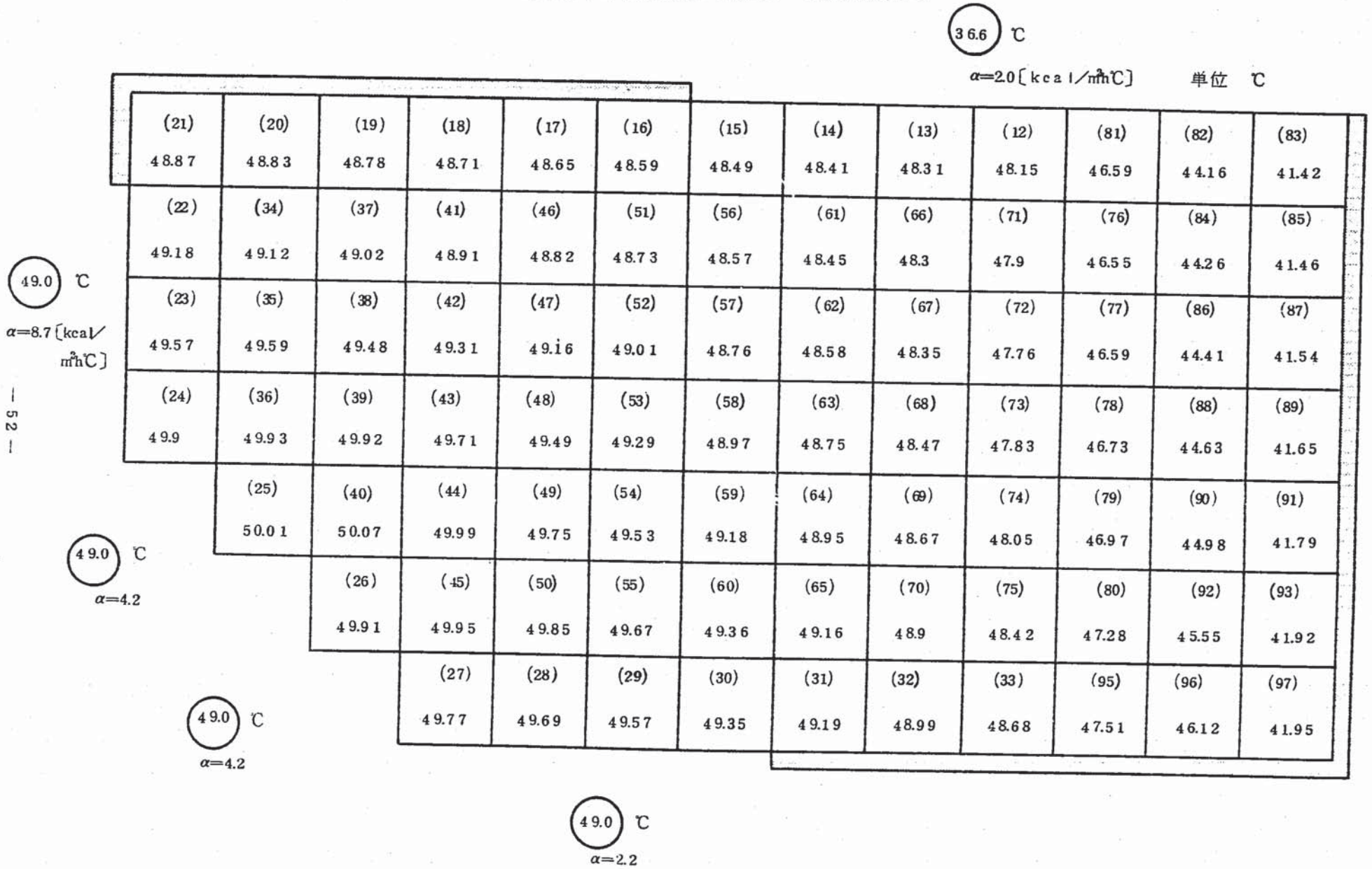
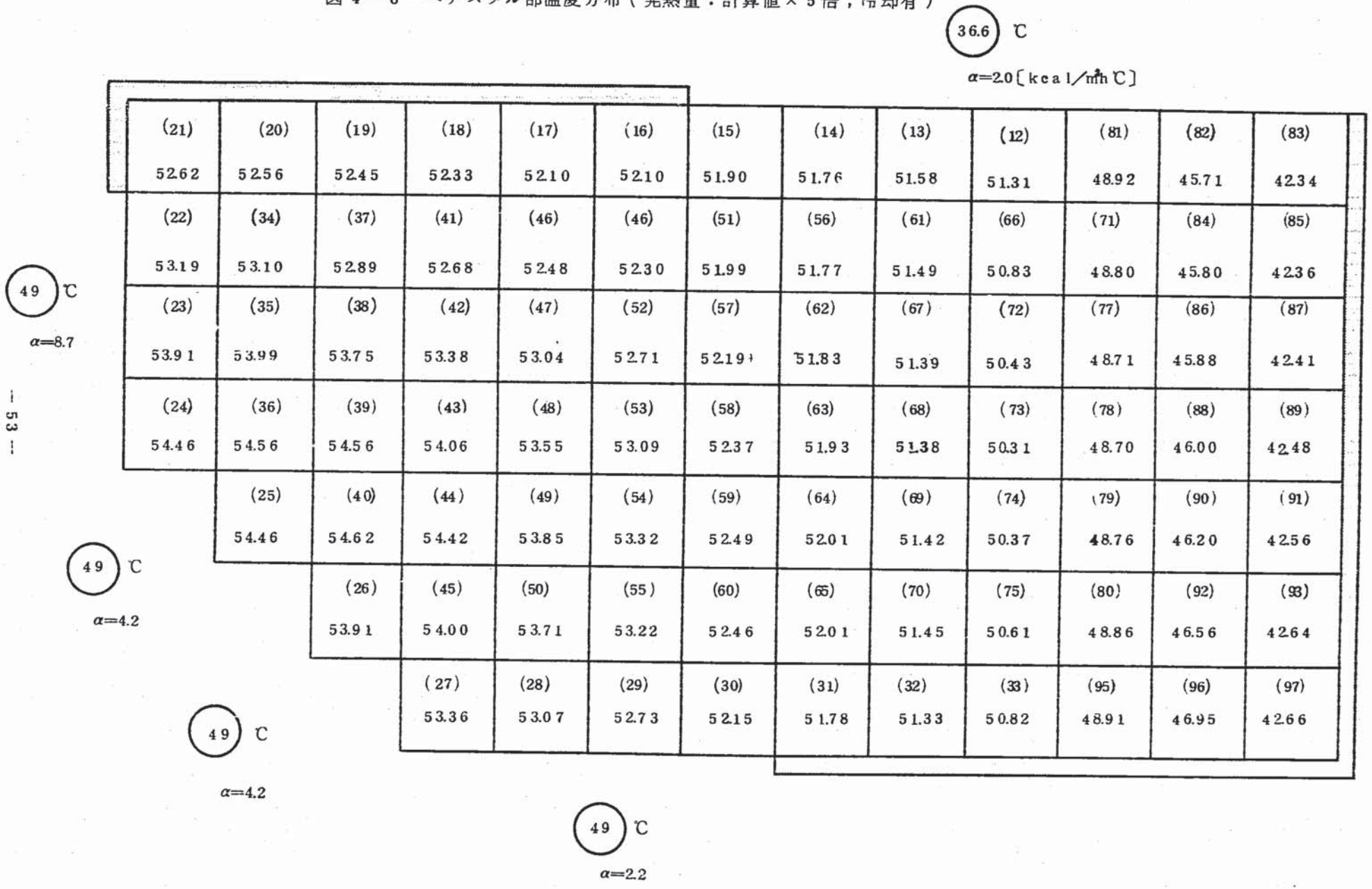
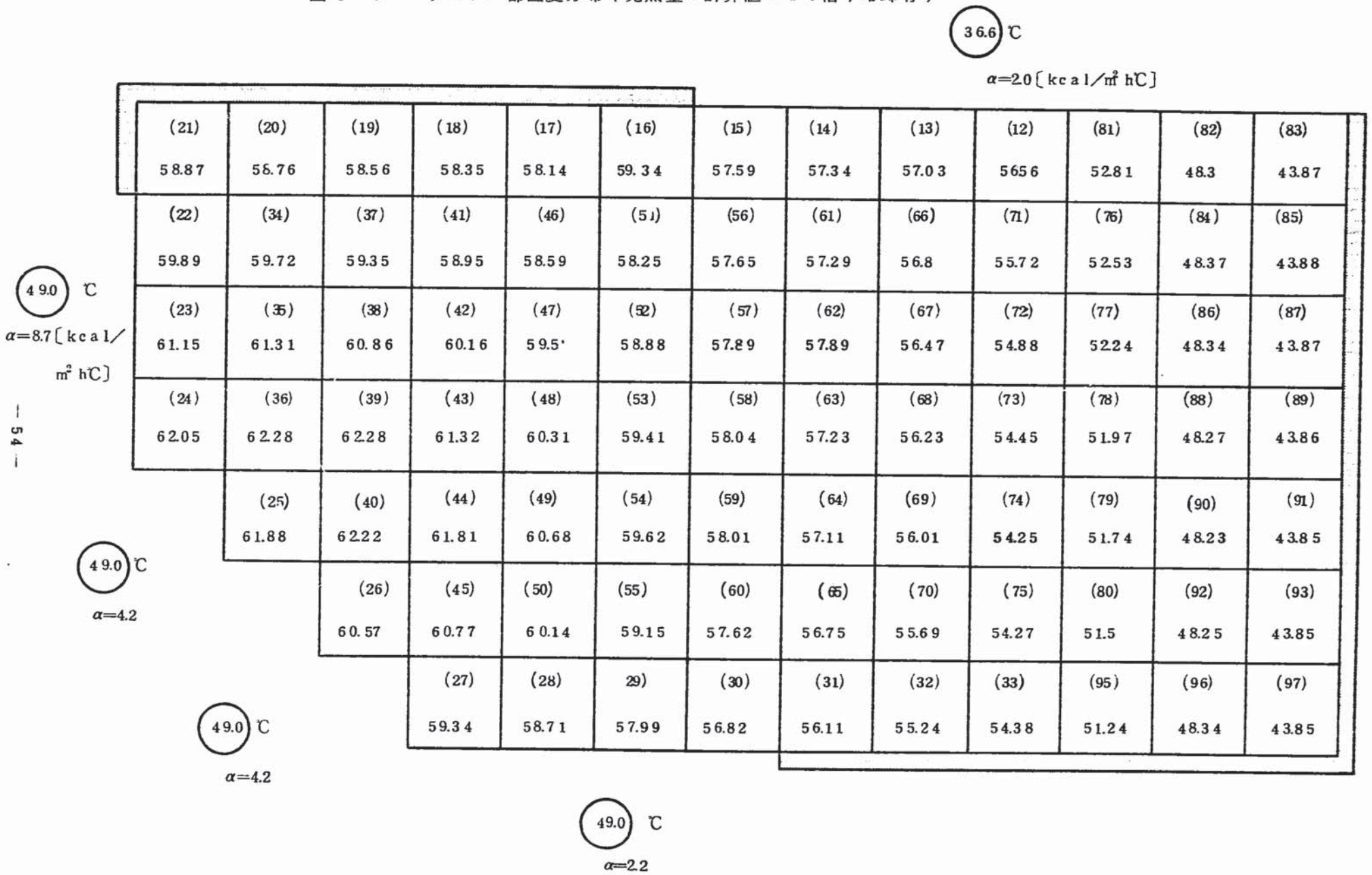


図 4 － 8　ペデスタル部温度分布（発熱量：計算値×5倍，冷却有）



(21) 52.62	(20) 52.56	(19) 52.45	(18) 52.33	(17) 52.10	(16) 52.10	(15) 51.90	(14) 51.76	(13) 51.58	(12) 51.31	(81) 48.92	(82) 45.71	(83) 42.34
(22) 53.19	(34) 53.10	(37) 52.89	(41) 52.68	(46) 52.48	(46) 52.30	(51) 51.99	(56) 51.77	(61) 51.49	(66) 50.83	(71) 48.80	(84) 45.80	(85) 42.36
(23) 53.91	(35) 53.99	(38) 53.75	(42) 53.38	(47) 53.04	(52) 52.71	(57) 52.19	(62) 51.83	(67) 51.39	(72) 50.43	(77) 48.71	(86) 45.88	(87) 42.41
(24) 54.46	(36) 54.56	(39) 54.56	(43) 54.06	(48) 53.55	(53) 53.09	(58) 52.37	(63) 51.93	(68) 51.38	(73) 50.31	(78) 48.70	(88) 46.00	(89) 42.48
	(25) 54.46	(40) 54.62	(44) 54.42	(49) 53.85	(54) 53.32	(59) 52.49	(64) 52.01	(69) 51.42	(74) 50.37	(79) 48.76	(90) 46.20	(91) 42.56
		(26) 53.91	(45) 54.00	(50) 53.71	(55) 53.22	(60) 52.46	(65) 52.01	(70) 51.45	(75) 50.61	(80) 48.86	(92) 46.56	(93) 42.64
			(27) 53.36	(28) 53.07	(29) 52.73	(30) 52.15	(31) 51.78	(32) 51.33	(33) 50.82	(95) 48.91	(96) 46.95	(97) 42.66

図 4 － 9　ペデスタル部温度分布（発熱量：計算値 × 1 0倍，冷却有）



発熱量：計算値	温度上昇	4.2℃
〃 ： 〃 の2倍	〃	9.99℃
〃 ： 〃 の5倍	〃	28.16℃
〃 ： 〃 の10倍	〃	57.43℃

(3) ペデスタル内面の伝熱条件として，雰囲気温度49℃との間に強制冷却を考慮した場合には，上記数値は下記の如くなる。（図4－6～9参照）

発熱量：計算値	温度上昇	11.99℃
〃 ： 〃 の2倍	〃	13.47℃
〃 ： 〃 の5倍	〃	18.02℃
〃 ： 〃 の10倍	〃	25.68℃

(4) 発熱量が計算値とした場合は，内部発熱による温度上昇は，たかだか5℃であり，ペデスタル部のコンクリート温度を支配する要因とは考えられない。

しかし，計算値の5倍あるいは10倍となると内部発熱による温度上昇は約30℃及び約60℃と大きくペデスタル部のコンクリート温度を支配する大きな要因となる。

(5) ペデスタル部内面雰囲気との間の伝熱を考慮した場合には，内面の雰囲気温度の影響が大きく，更に，強制冷却をした場合には，その冷却効果により内部発熱が大きくてもペデスタル部の温度上昇を低く抑えることが可能である。

4.3 ペデスタル部温度分布計算

4.3.1 計算モデル

(1) 軸対称3次元モデルとする。そこで以下に示すような実機構造の非対称性は無視するものとする。

(a) 主冷却系配管を含む各種配管の配置による非対称性

(b) 建家構造及び回転プラグの非対称性

(c) ペデスタルと回転プラグの上部に配置される各種機器・構造物

(d) 上記(a)～(c)を除く全ての非対称性

(2) 原子炉容器熱遮蔽板，保温パネル，回転プラグ，炉上部機構は充実体として扱う。

(3) ペデスタル部コンクリート内の鉄骨構造物は無視し，均一な重コンクリートとする。

(4) ペデスタル部冷却ダクトについては，冷却効果を境界条件において取扱い，ダクト部材の存在は無視する。

(5) 原子炉運転中の熱出力レベルは，炉容器内部の液体ナトリウム温度でおきかえ，炉心構造物の存在は無視する。

上記(1)～(5)の仮定のもとに炉周囲遮蔽体全体温度分布計算用モデルを図4−10の如く設定し，図4−11に示すメッシュ分割をした。ペデスタル部のみの計算モデルとしなかったのは，ペデスタル部まわりの各種条件が複雑で，単独に取り出した場合には，境界条件の設定が困難となるためである。

4.3.2 伝熱モデル

伝熱計算モデルは熱伝導，強制対流，輻射，及び強制対流と輻射の組合せの4種類について考慮するものとする。

(1) 熱伝導

炉周囲遮蔽体に使用されている材料の熱伝導率としては下表に定める値を用いる。なお，熱伝導率の温度依存性については考慮しないものとする。

表4－2 各種材料の熱伝導率

	λ（kcal/mh℃）	主な使用部位
ステンレス	14.0	炉容器，炉容器熱遮蔽板，リークジャケット炉上部機構他
炭素鋼	46.0	安全容器，炭素鋼遮蔽体，ペデスタル部，回転プラグ，炉容器ピットライニング他
黒　鉛	57.5	黒鉛遮蔽体，炉容器下部遮蔽体，ペデスタル部遮蔽体
普通コンクリート	1.30	炉容器ピット，ペデスタル部
重コンクリート	2.45	ペデスタル部
保温材	0.60	ペデスタル部
熱遮蔽板	3.7	回転プラグ
炭素鋼＋黒鉛	0.33	回転プラグ

原子炉容器保温パネルの熱伝導率は，温度，通過熱流量，厚さを考慮して，充実体とした場合の等価な値を使用する。

黒鉛の熱伝導率はブロック間の接触熱抗抵を考慮し約$\frac{1}{2}$の値を使用した。

(2) 強制対流及び熱輻射

炉間囲遮蔽体構造物の表面での伝熱機構としては，液体ナトリウム，アルゴンガス窒素ガスによる強制対流と，対面間の熱輻射を考慮する。各表面ノードに対して適用する伝熱モデルと物性値をその表面ノードが接する境界ノード（図4−10参照）についてまとめたものが表4－3である。表中α（kcal/m² h℃）は強制対流による熱伝達率を，Cは熱輻射による輻射率を表わし，── は該当する欄の伝熱を考慮しないことを表わす。境界温度の設定方法に記されている文字A，B，Cは夫々次の様な意味を表わす。

A：境界条件として与える。

B：冷却材除熱量から算定する。

C：周囲の壁温の重みつき平均とする。

コン遮系冷却パス及びペデスタル部冷却パスの伝熱モデル及び物性値を表4－4に示す。

境界ノードの設定温度を表4－5に示す。

(3) コン遮系冷却ガス温度の計算方法

炭素鋼遮蔽体，側部遮蔽体は，軸方向5分割，円周方向4分割の計20ケより構成され，パネル合せ目に設置されているシール板と遮蔽体本体間にGAPがあるためにこの部分より安全容器，炭素鋼遮蔽体間のアニュラス部へのリーク流が存在する。資料№常陽(III)−5409に基づきコン遮系冷却パス各部の冷却材流量及びリーク流量を図4−11のように仮定する。本計算においては，軸方向及び円周方向からのリーク流量を各段について一括して軸方向からのリーク流量として取扱うことにした。

コン遮系冷却パス各部における冷却材温度は，周囲表面の伝熱量と流体のエンタルピ上昇との一致から決定することができる。また，炭素鋼遮蔽体～安全容器間のアニュラス流とリーク流の合流後の流体温度は混合前後のエンタルピ平衡から求める。

(4) 断熱条件

軸対称モデルの中心軸上及び中心軸から5.5m離れた位置における伝熱条件としては，断熱条件を適用するものとする。計算モデルでハッチングが施された部分（////）は断熱であることを意味する。

(5) 発熱分布

(a) ペデスタル部発熱分布

前章（第3章）で得られた計算値を使用する。

(b) ペデスタル部を除く炉周囲遮蔽体の発熱分布

黒鉛遮蔽体・安全容器・炭素鋼遮蔽体及びピットコンクリート等を含む炉周囲遮蔽体の発熱分布については，「常陽」工認計算の結果を準用するものとした。ただし，「常陽」工認の遮蔽計算は除去拡散理論に基づく1次元計算コードを使用しているが，その後，動燃団にて輸送理論のSn近似に基づく2次元計算コードによる2種類の遮蔽計算を実施しており，本温度分布計算においては，これらの結果と温度分布計算の試計算の結果をふまえ，発熱量として上述の「常陽」工認計算結果の$\frac{1}{5}$を採用することとした。

(c) 部分負荷時の発熱量

部分負荷時の発熱量は上記(a)，(b)共に出力に比例するものとした。

(d) 全発熱量

(イ) ペデスタル部　約140kcal／hr

(ロ) ペデスタル部を除く炉周囲遮蔽体

111100×0.2 ＝約22220kcal／hr

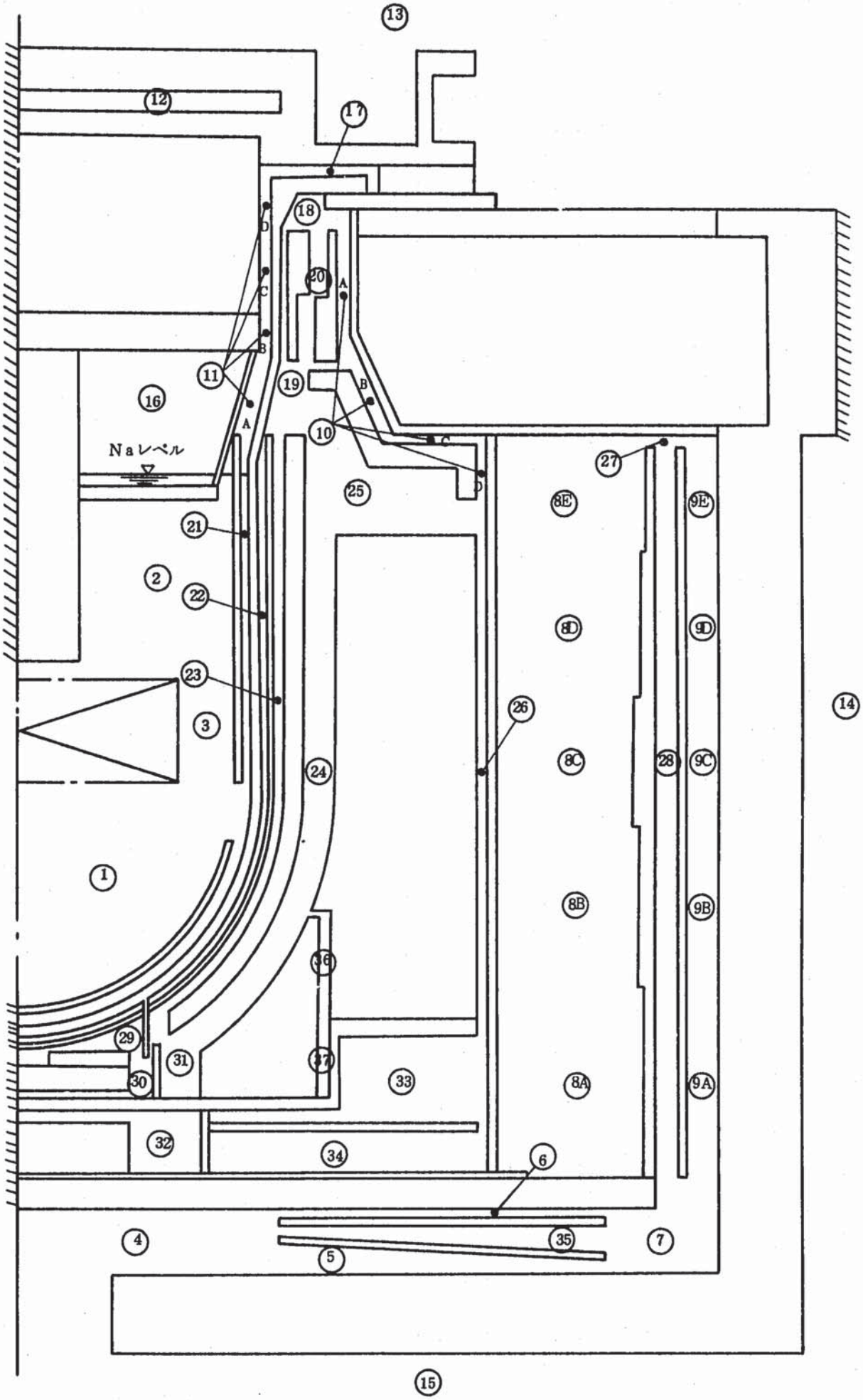


図 4−10　炉周囲遮蔽体全体温度分布計算モデル

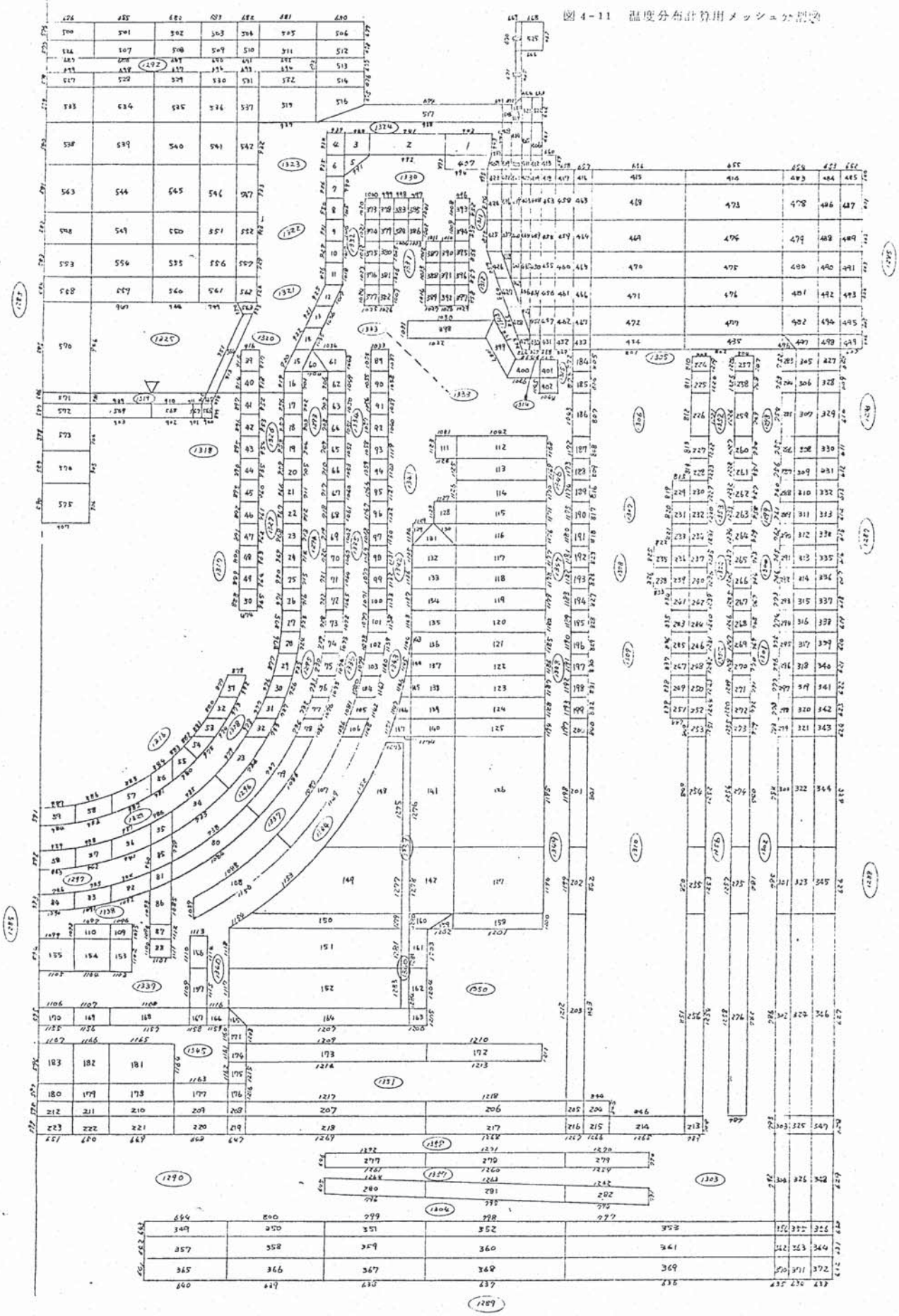


図 4-11　温度分布計算用メッシュ分割図

表４－３　表面ノードに対する伝熱モデル

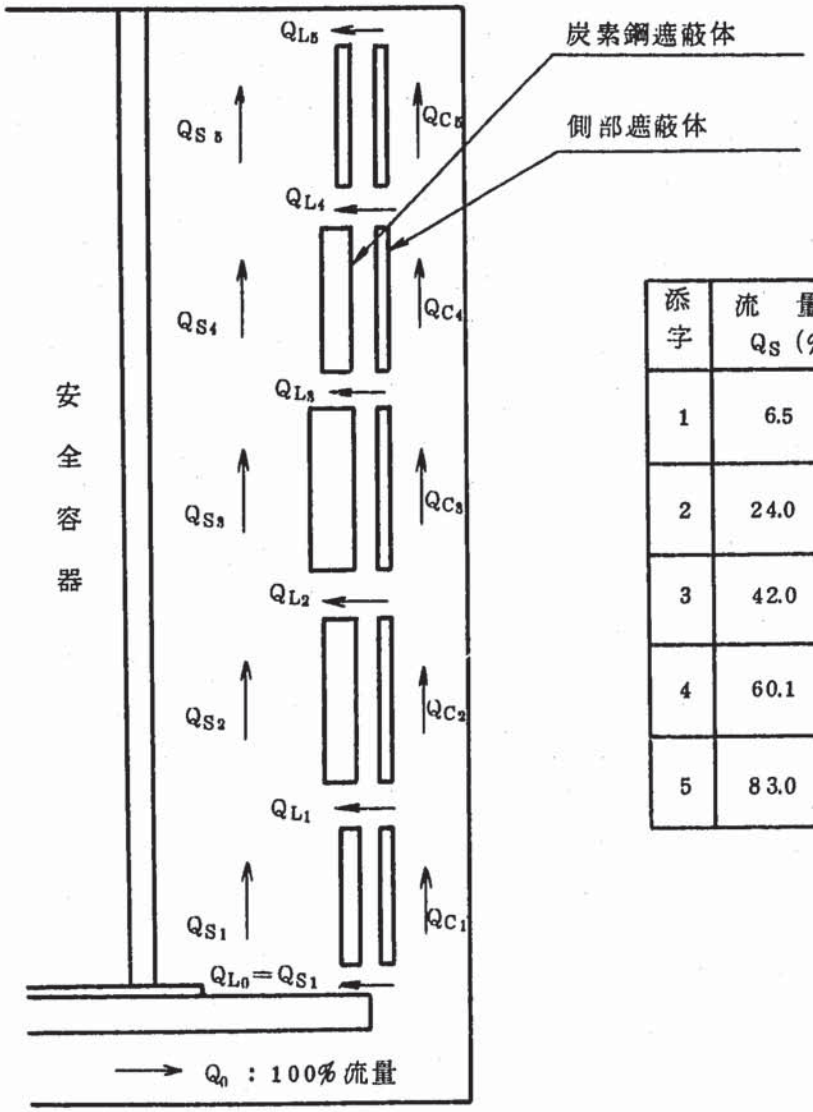
境界ノード№	強制対流 α	熱輻射 C	境界温度設定方法	境界ノード№	強制対流 α	熱輻射 C	境界温度設定方法
1	1500	—	A	20	—	0.65	C
2	1500	—	A	21	400	—	C
3	1500	—	A	22	—	0.38～0.1	C
4	35	—	A	23	—	0.38～0.2	C
5	30	0.9	B	24	—	1.5～0.8	C
6	30	0.9	B	25	5.0	—	C
7	25	—	B	26	—	1.5	C
11	3.0	0.29	A	27	2.0	—	A
12	0 ～5.0	—	A	28	—	0.65	C
13	2.0	—	A	29	—	0.20	C
14	2.7	—	A	30	5.0	0.77	C
15	0.8	—	A	31	5.0	0.77	C
16	3.0	—	C	32	—	0.75	C
17	5.0	—	C	33	5.0	0.90	C
18	5.0	—	C	34	5.0	0.90	C
19	—	0.38	C	35	—	0.90	C
				36	—	0.67	C
				37	—	0.77	C

表 4 － 4　冷却パス各部の伝熱モデル

境界ノード№	強制対流 α	熱輻射 C	境界温度設定方法
8 A	4.64	0.7	B
8 B	3.96	0.7	B
8 C	5.49	0.7	B
8 D	3.97	0.7	B
8 E	2.45	0.7	B
9 A	21.9	0.9	B
9 B	18.2	0.9	B
9 C	14.1	0.9	B
9 D	9.4	0.9	B
9 E	6.0	0.9	B
10A	7.77	1.3	A
10B	7.65	1.32	A
10C	3.39	2.09	A
10D	6.0	1.62	A

表４－５　境界ノード設定温度

境界ノード名	停止時	25MW	50MW	75MW	100MW	
					ケース(1)	ケース(2)
1	254	370.0	370.0	370.0	370.0	同左
2	254	402.5	435.0	467.5	500.0	同左
3	254	386.3	402.5	418.8	435.0	同左
4	27.0	32.0	29.0	25.0	35.0	25.0
10(A~D)	43.0	55.0	51.0	49.0	59.0	49.0
11A	247.8	346.0	365.0	390.0	412.0	同左
11B	222.4	316.0	337.0	358.5	378.0	同左
11C	191.0	284.5	305.0	326.5	346.0	同左
11D	171.5	256.0	272.0	294.0	311.0	同左
12	31.65	25.1	30.6	30.6	30.6	同左
13	31.1	37.7	36.6	36.6	36.6	同左
14	36~33.8	44.8~40	45~40.2	58~46	58~48	同左
15	32.6	32.8	32.7	32.7	32.7	同左



添字	流量 Q_S (%)	流量 Q_C (%)	リーク量 Q_L (%)
1	6.5	93.5	17.5
2	24.0	76.0	18.0
3	42.0	58.0	18.1
4	60.1	39.9	22.9
5	83.0	17.0	17.0

図 4−12　コン遮系冷却パス部の冷却材流量

4.3.3　計算結果

4.3.1及び4.3.2で述べた計算モデル・伝熱モデルに基づいて，各種運転状態におけるペデスタル部の温度分布を求めた。計算結果は下記に示す通りである。なお各種運転状態に対応する運転データについても添付する。

	計算結果抜粋	計算結果詳細	運転データ
(1) 炉停止時	図 4−13	図 4−19	図 4−27
(2) 25MW運転状態	図 4−14	図 4−20	図 4−28
(3) 50MW 〃	図 4−15	図 4−21	図 4−29
(4) 75MW 〃	図 4−16	図 4−22	図 4−30
(5) 100MW 〃 ケース(1)	図 4−17	図 4−23	
(6) 100MW 〃 〃 (2)	図 4−18	図 4−24	
(7) 100MW 〃 〃 (3)		図 4−25	
(8) 100MW 〃 〃 (4)		図 4−26	

上記100MW運転状態4ケースの計算条件の相違は下記の通りである。

ケース(1)：コン廻系ピット入口ガス温度を35℃とした。

ケース(2)：コン廻系ピット入口ガス温度を25℃とした。

ケース(3)：ケース(1)のペデスタル冷却パス部の設定温度59℃を10℃下げ49℃とした。

ケース(4)：ケース(1)のペデスタル冷却パス部の熱伝達率を約1.74倍（風量換算で約2倍）とした。

4.3.4　計算結果について

(1)　計算値と運転データとの対応について

ペデスタル部まわりの計測点設置位置について本計算結果と運転データを対比した結果を表4−6に示す。同表の結果にみられるごとく，ペデスタル部温度を計算するにあたってのペデスタル部まわりの構造物温度は，計算値と実測値が比較的良い一致を示している。

ペデスタル部温度については，計算値が実測値の低い側に近い結果となっている。

(2)　ペデスタル部温度分布について

何れの計算結果からも，ペデスタル部の温度分布は，ペデスタル上面内周の原子炉

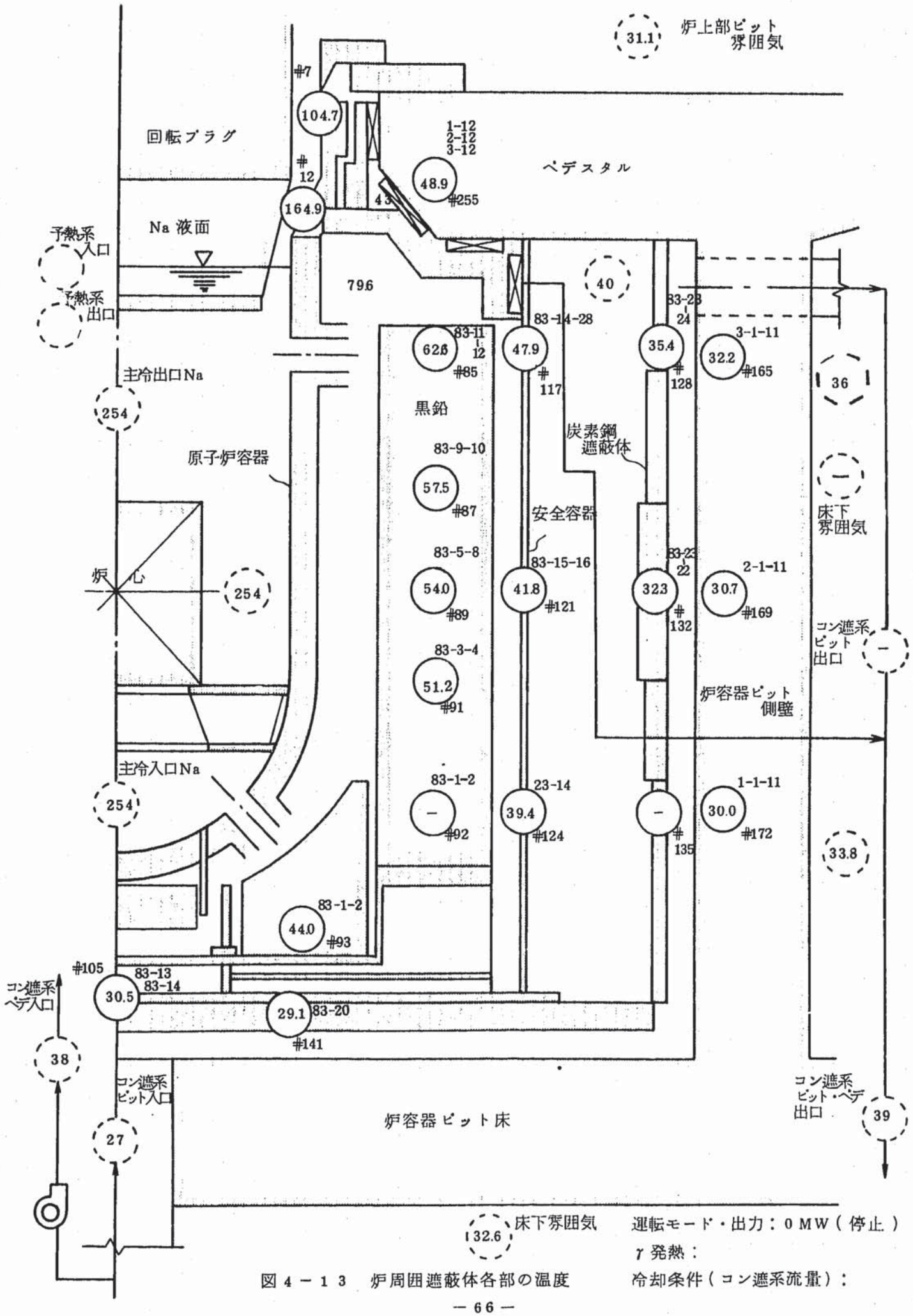
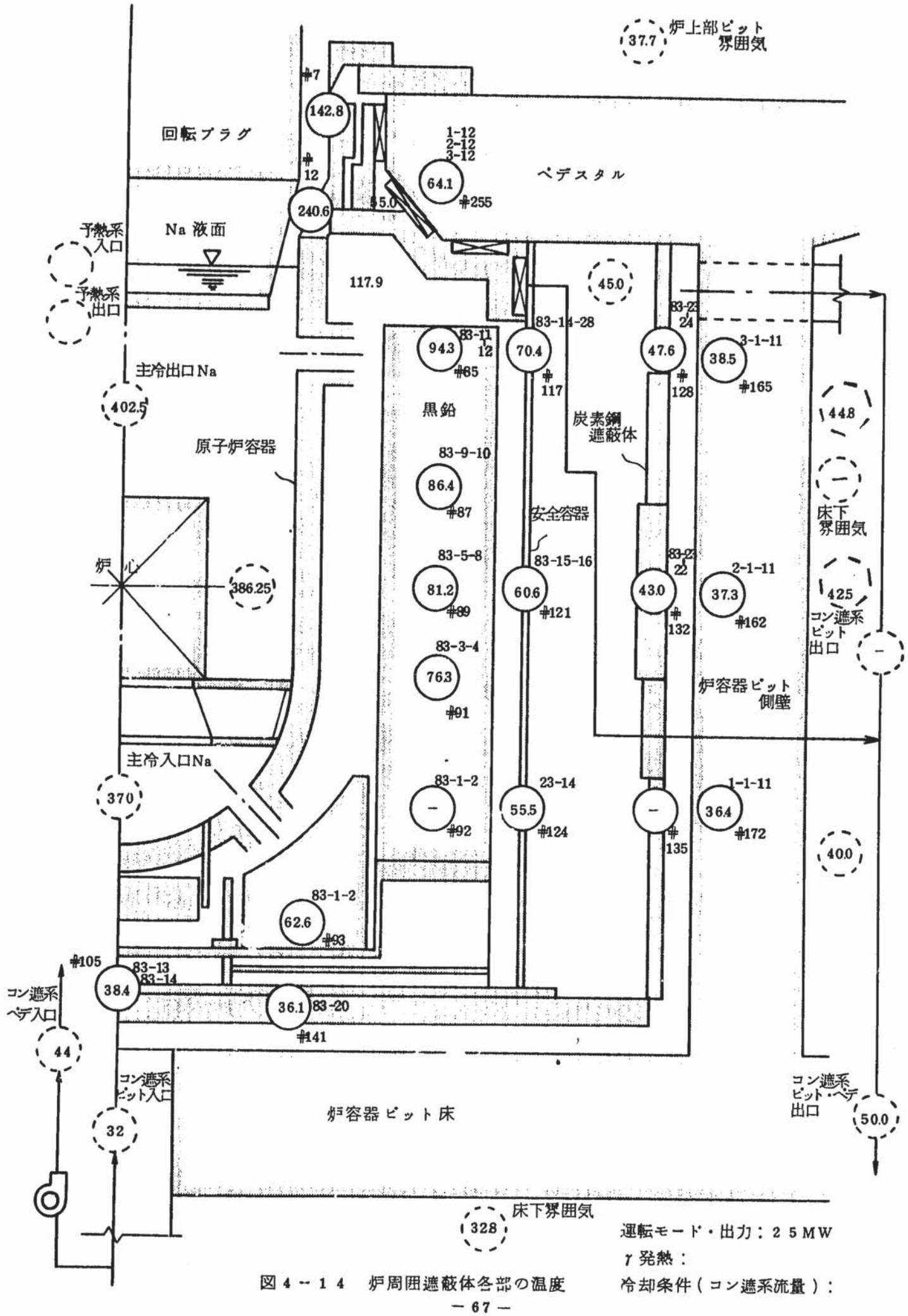


図 4 － 1 3　炉周囲遮蔽体各部の温度

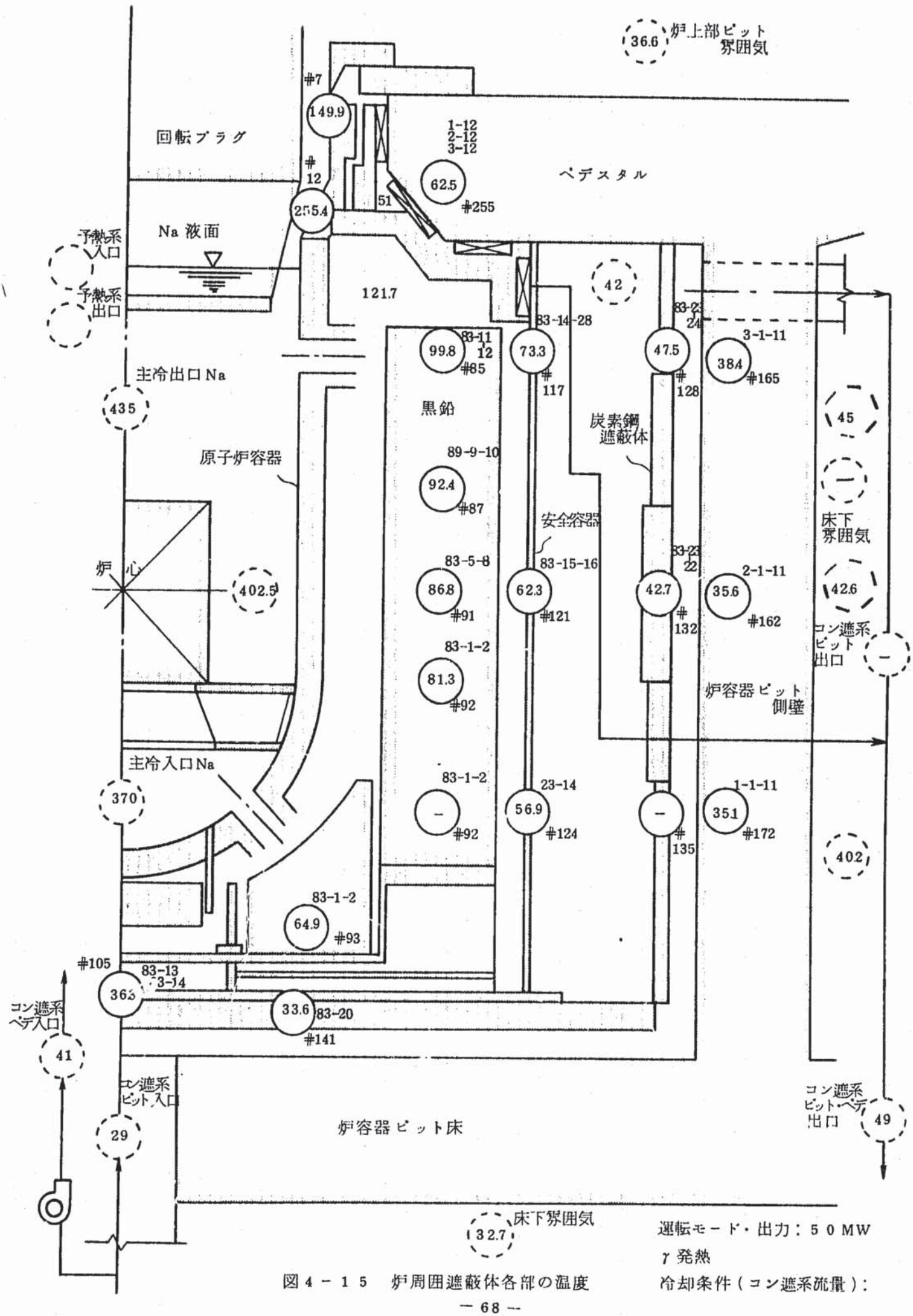


運転モード・出力：２５ＭＷ

γ発熱：

冷却条件（コン遮系流量）：

図４－１４　炉周囲遮蔽体各部の温度

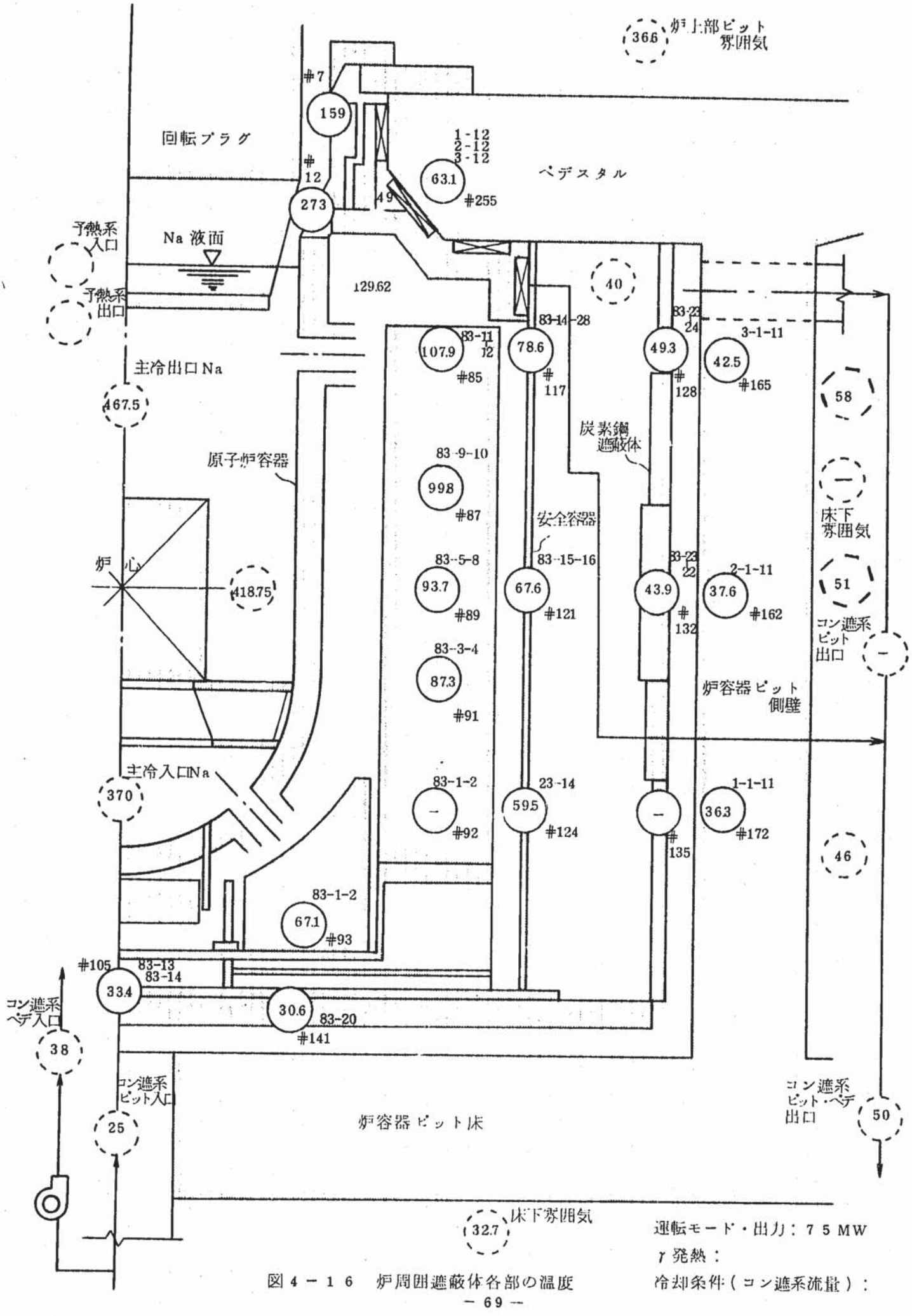


運転モード・出力：５０ＭＷ

γ発熱

冷却条件（コン遮系流量）：

図４－１５　炉周囲遮蔽体各部の温度

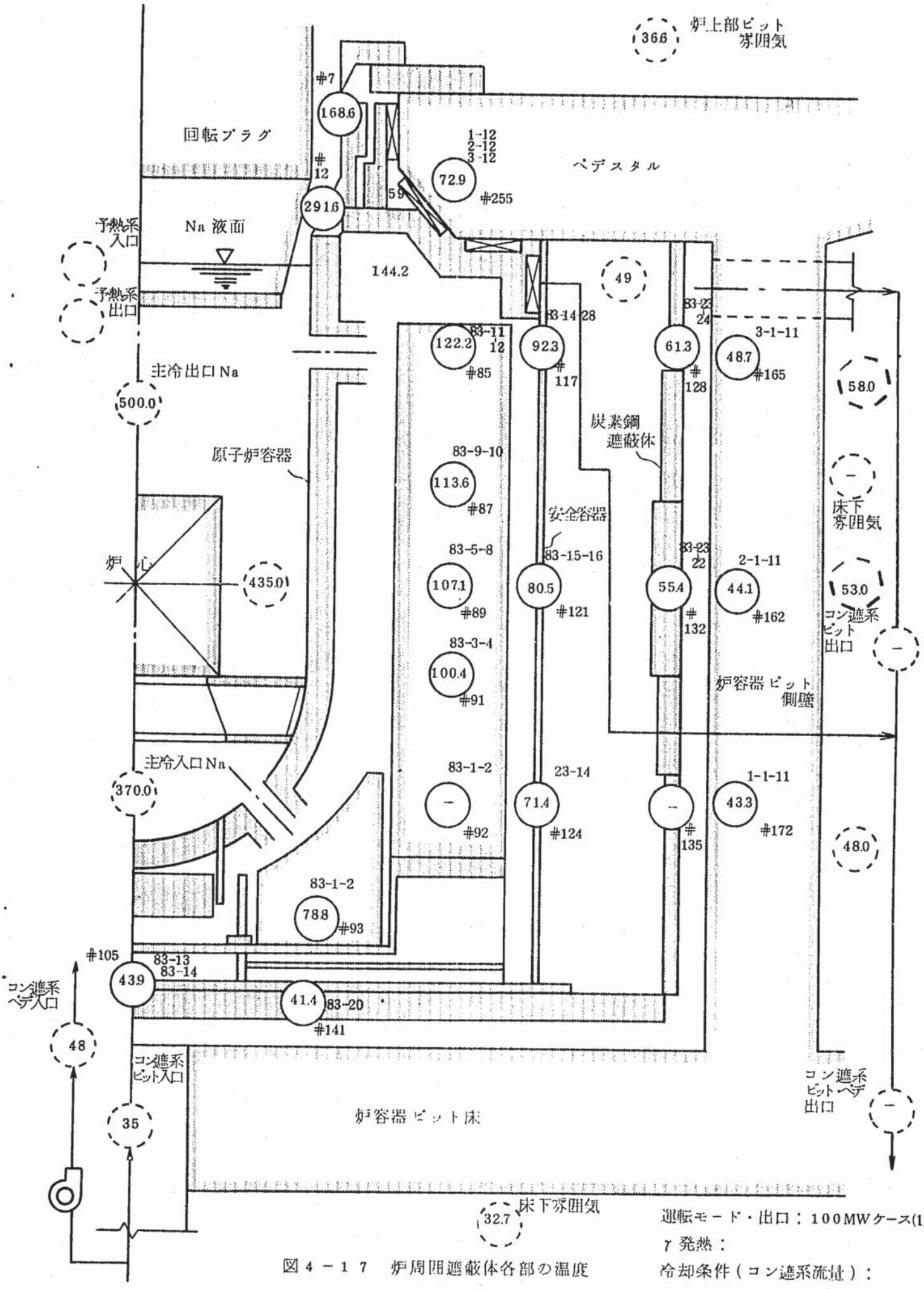


運転モード・出力：７５ＭＷ

γ発熱：

冷却条件（コン遮系流量）：

図４－１６　炉周囲遮蔽体各部の温度



運転モード・出口：100MWケース(1)

γ発熱：

冷却条件（コン遮系流量）：

図４－１７　炉周囲遮蔽体各部の温度

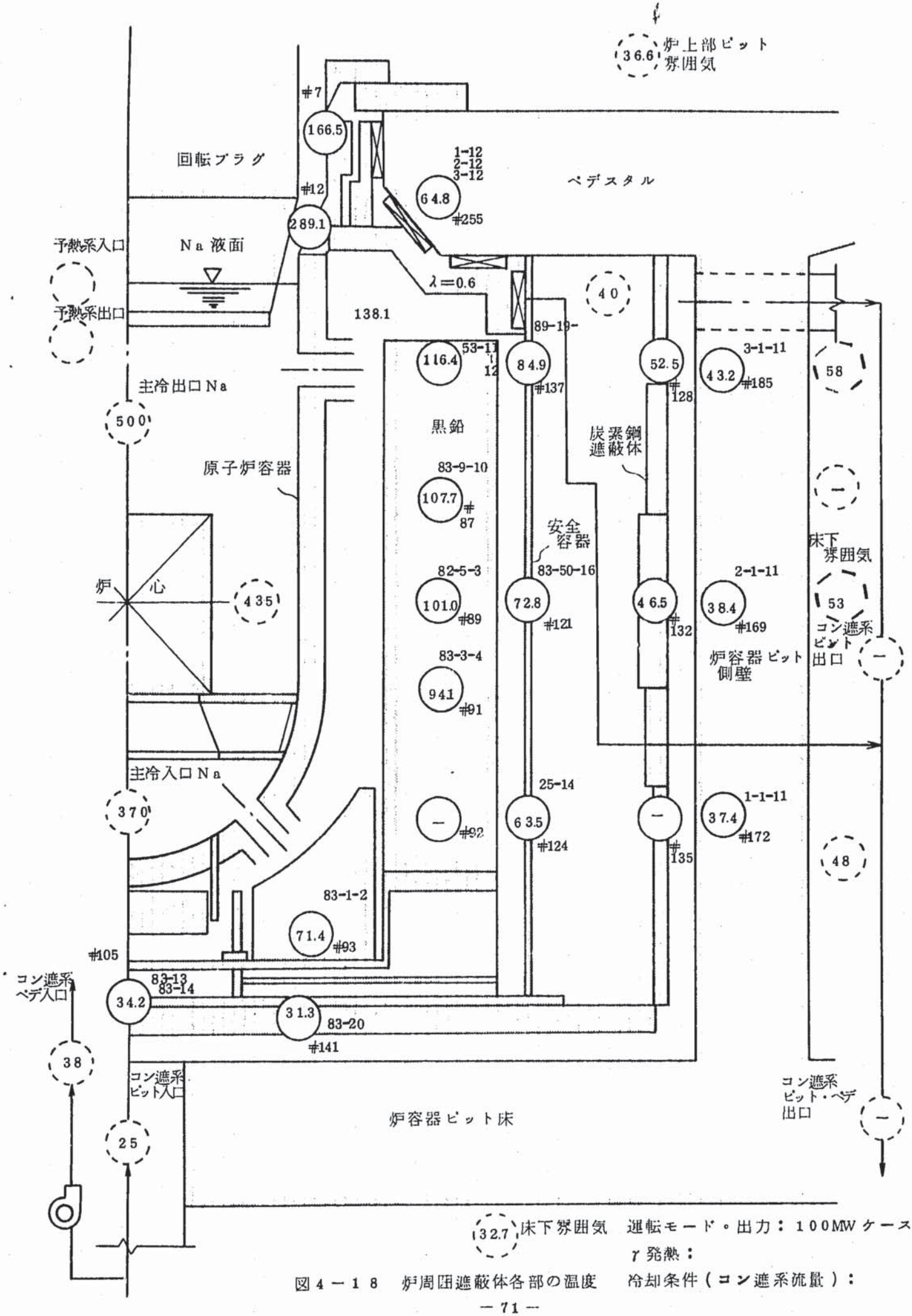


図4－18　炉周囲遮蔽体各部の温度

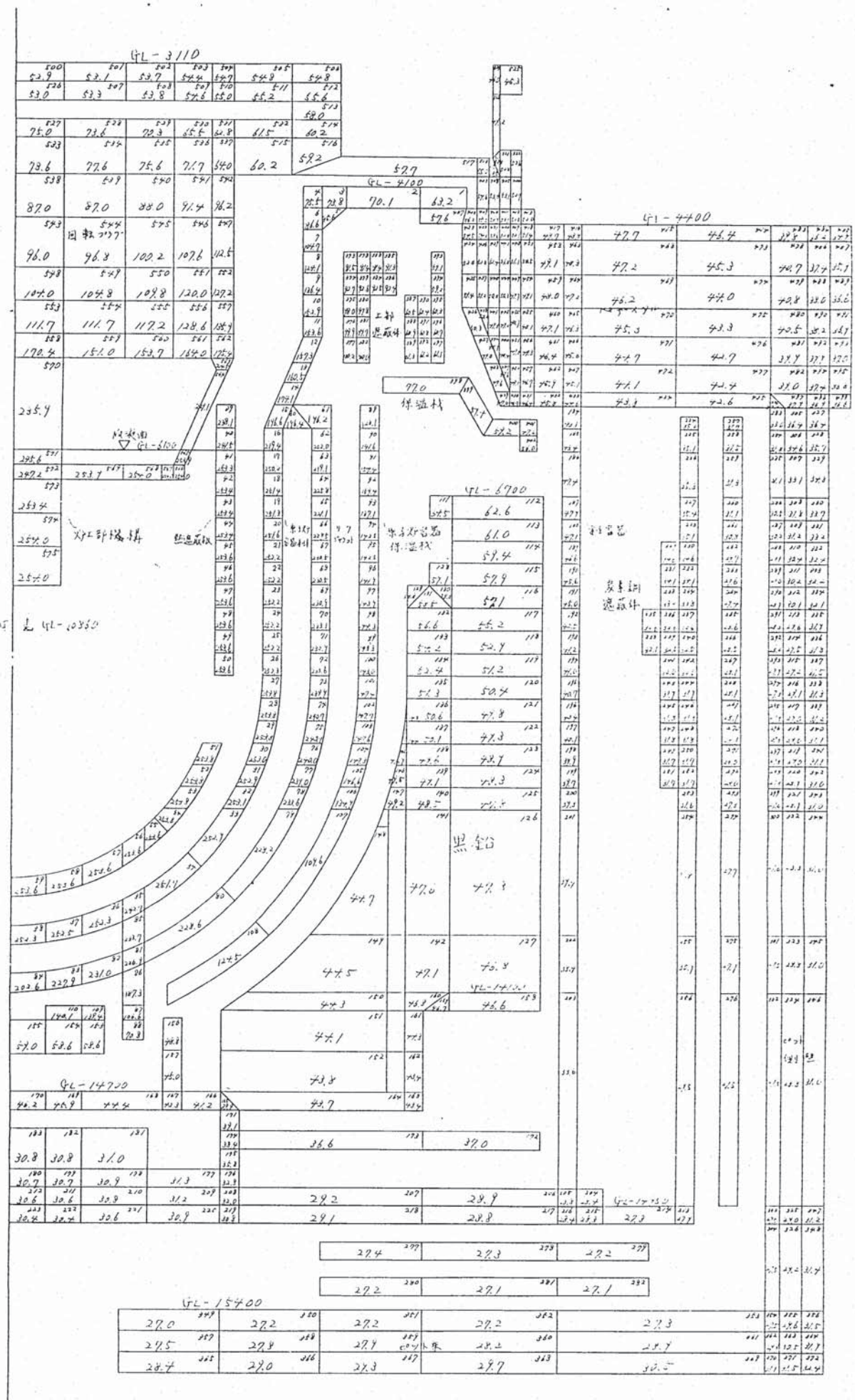


図 4-19　「常陽」ペデスタル部温度分布計算結果原子炉出力　0 MW時

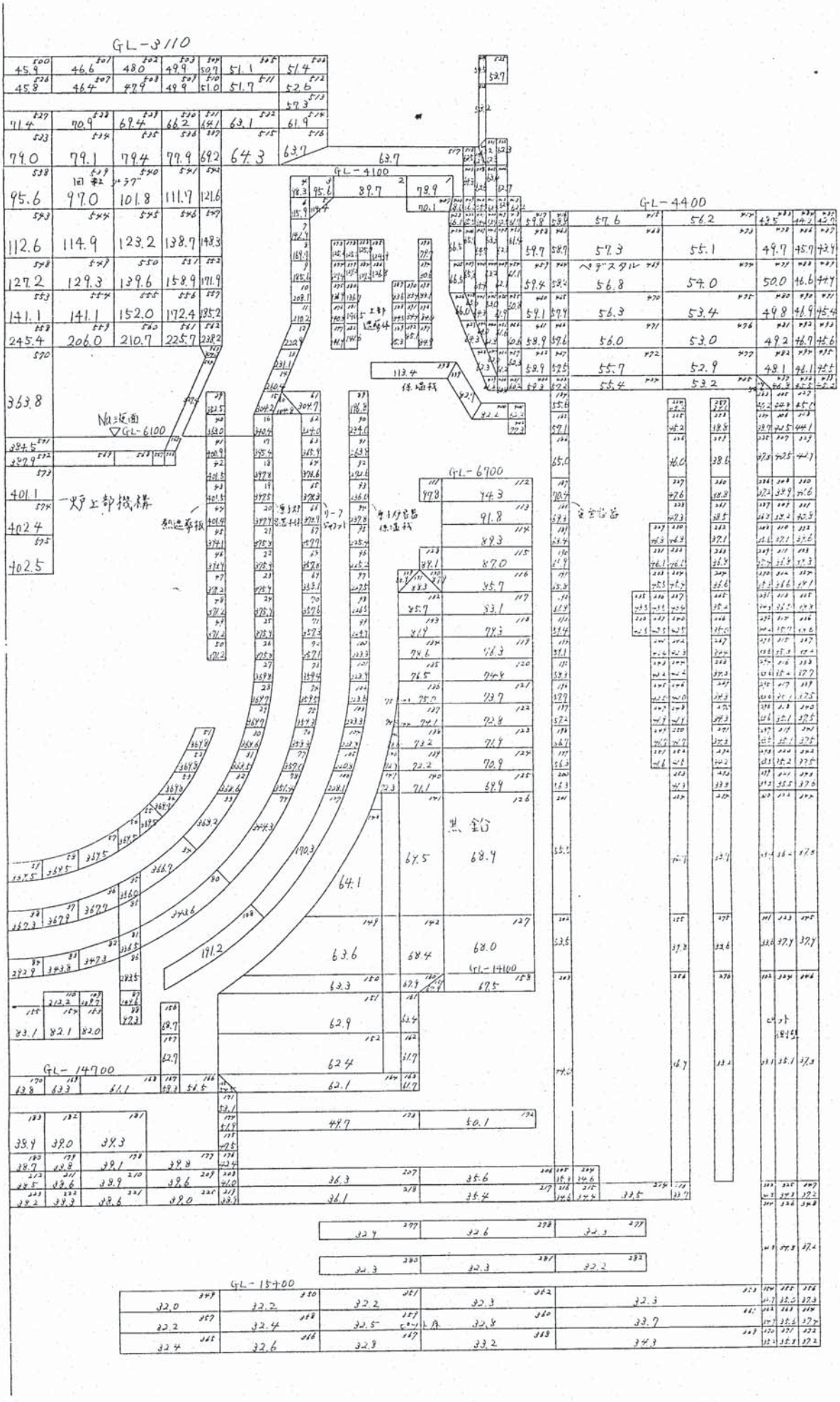


図 4-20　「常陽」ペデスタル部温度分布計算結果原子炉出力 25 MW時

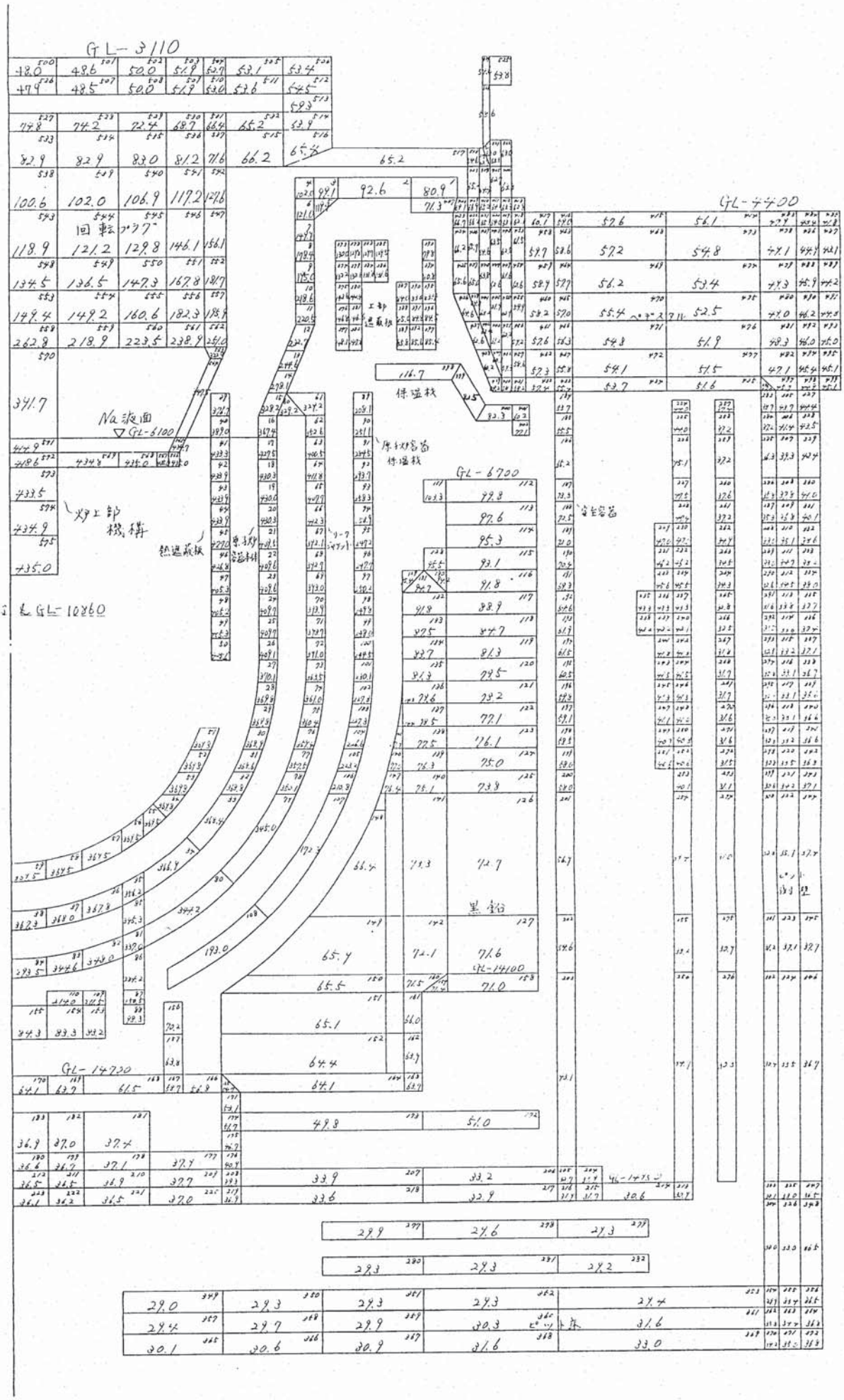


図 4-21　「常陽」ペデスタル部温度分布計算結果原子炉出力 50 MW時

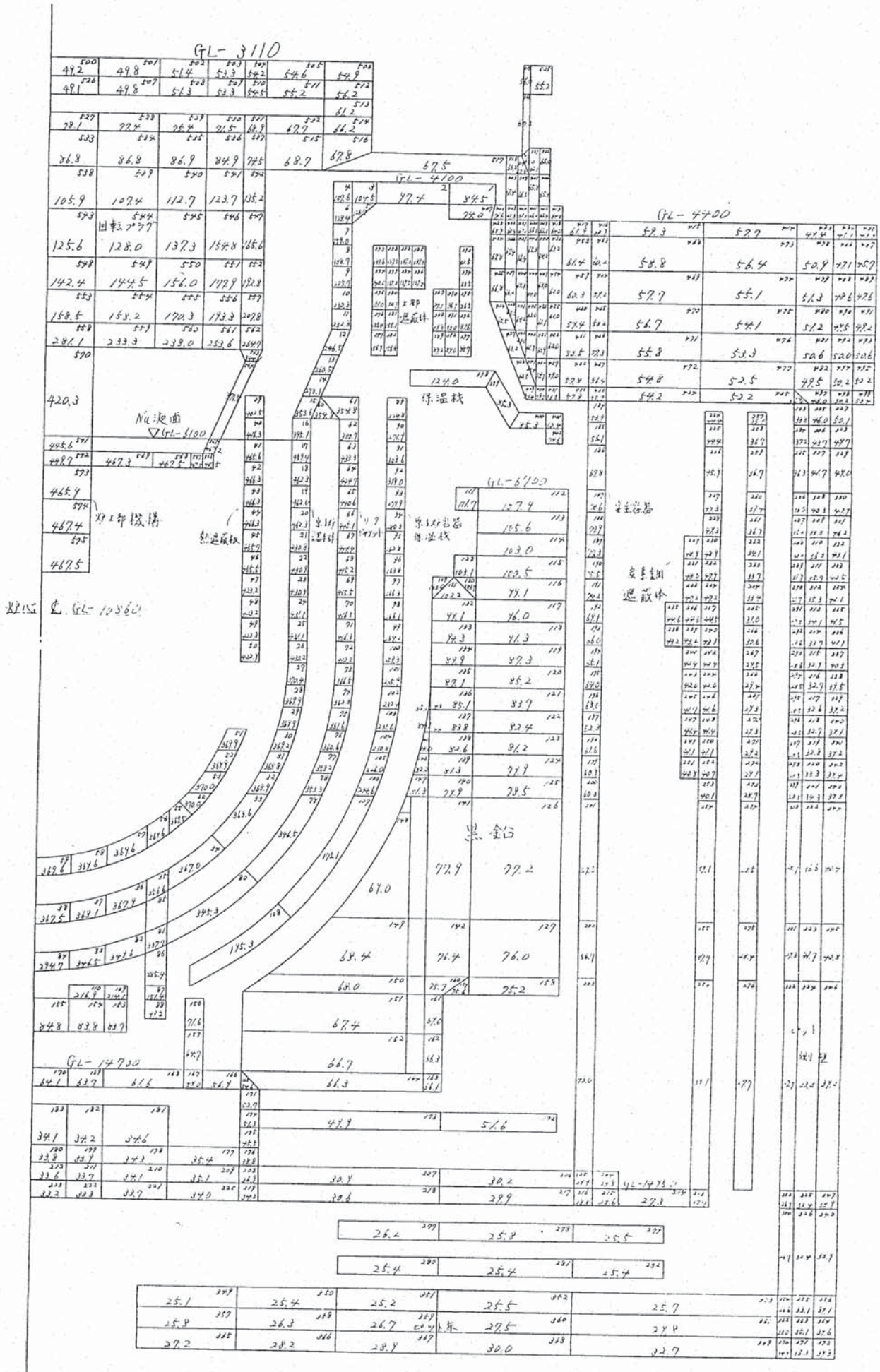


図 4-22　「常陽」ペデスタル部温度分布計算結果原子炉出力 75 MW時

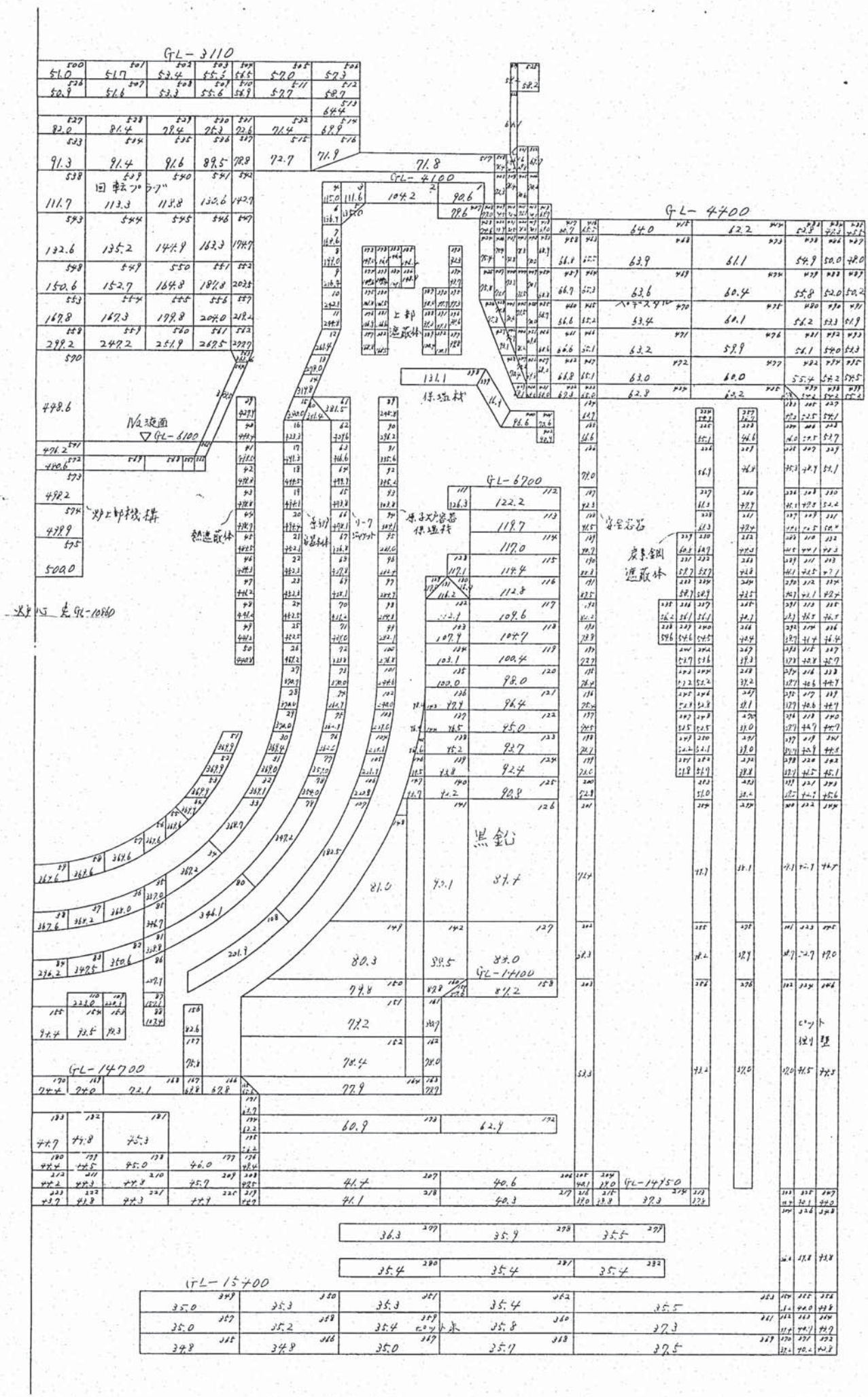


図 4-23　「常陽」ペデスタル温度分布計算結果原子炉出力　100MW時　ケース(1)

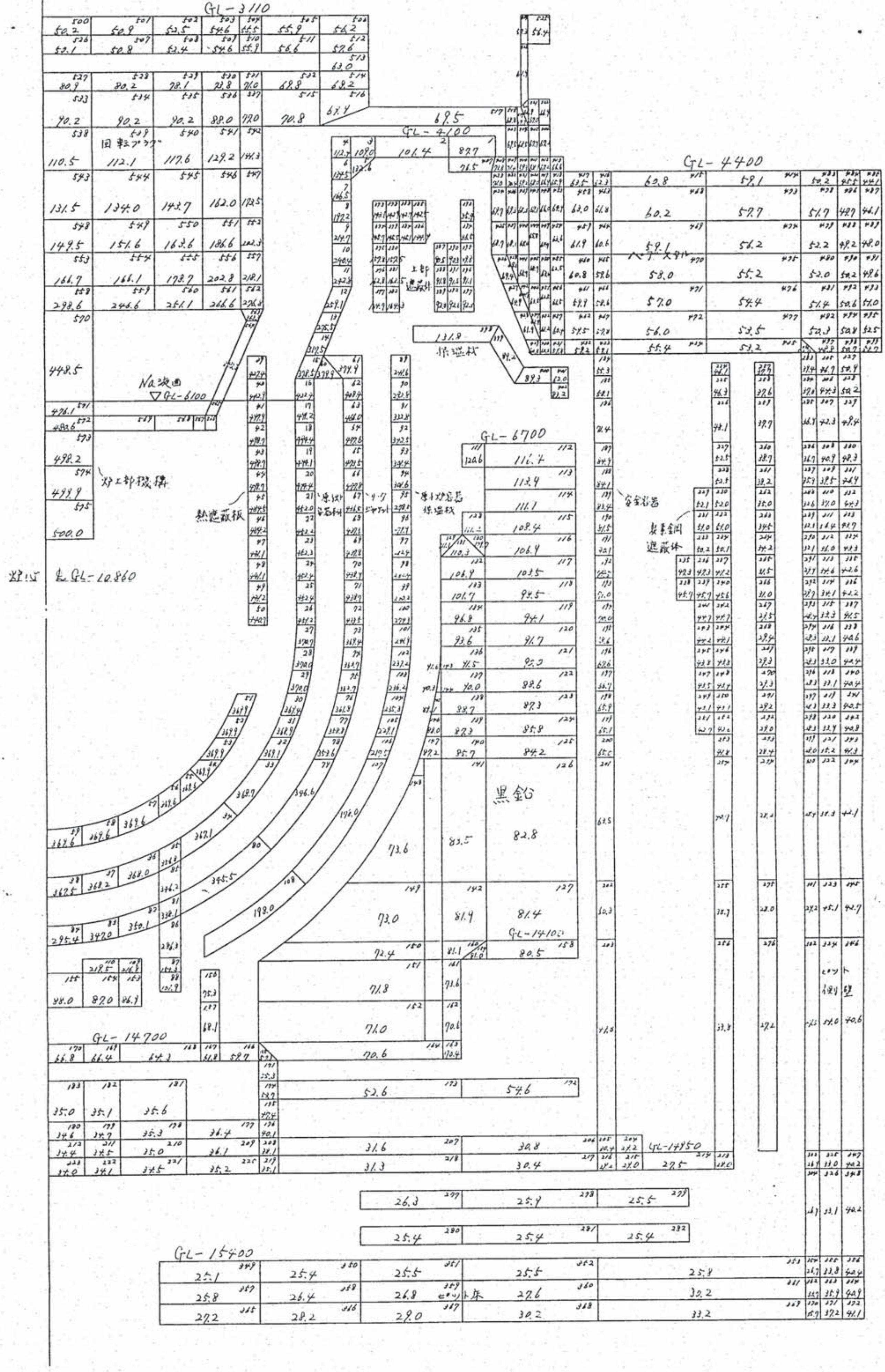


図 4-24 「常陽」ペデスタル温度分布計算結果原子炉出力 100MW時 (T_{gi} = 25℃) ケース(2)

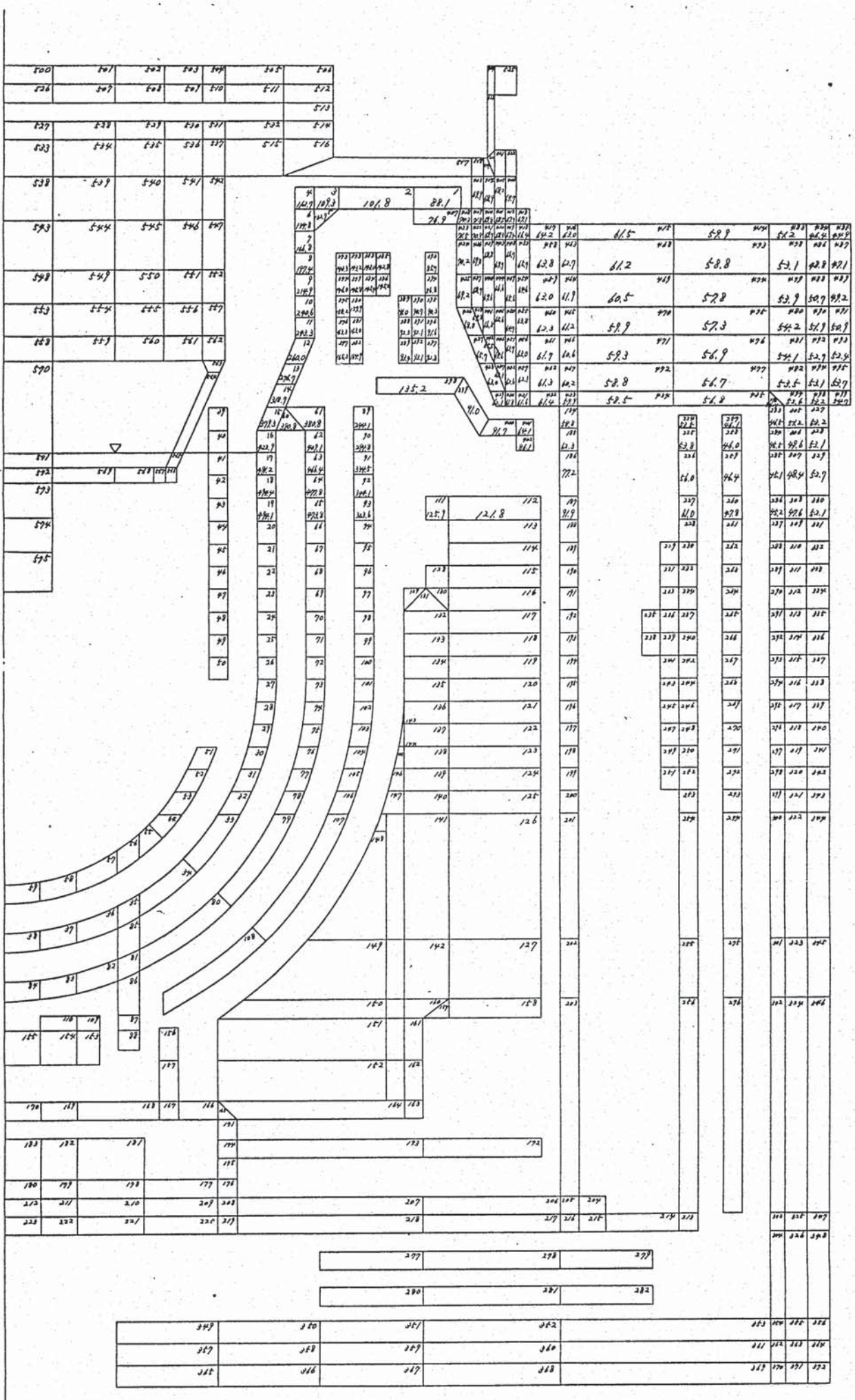


図４－２５　１００ＭＷ時ペデスタル冷却ガス温度を変えた場合の温度分布計算結果

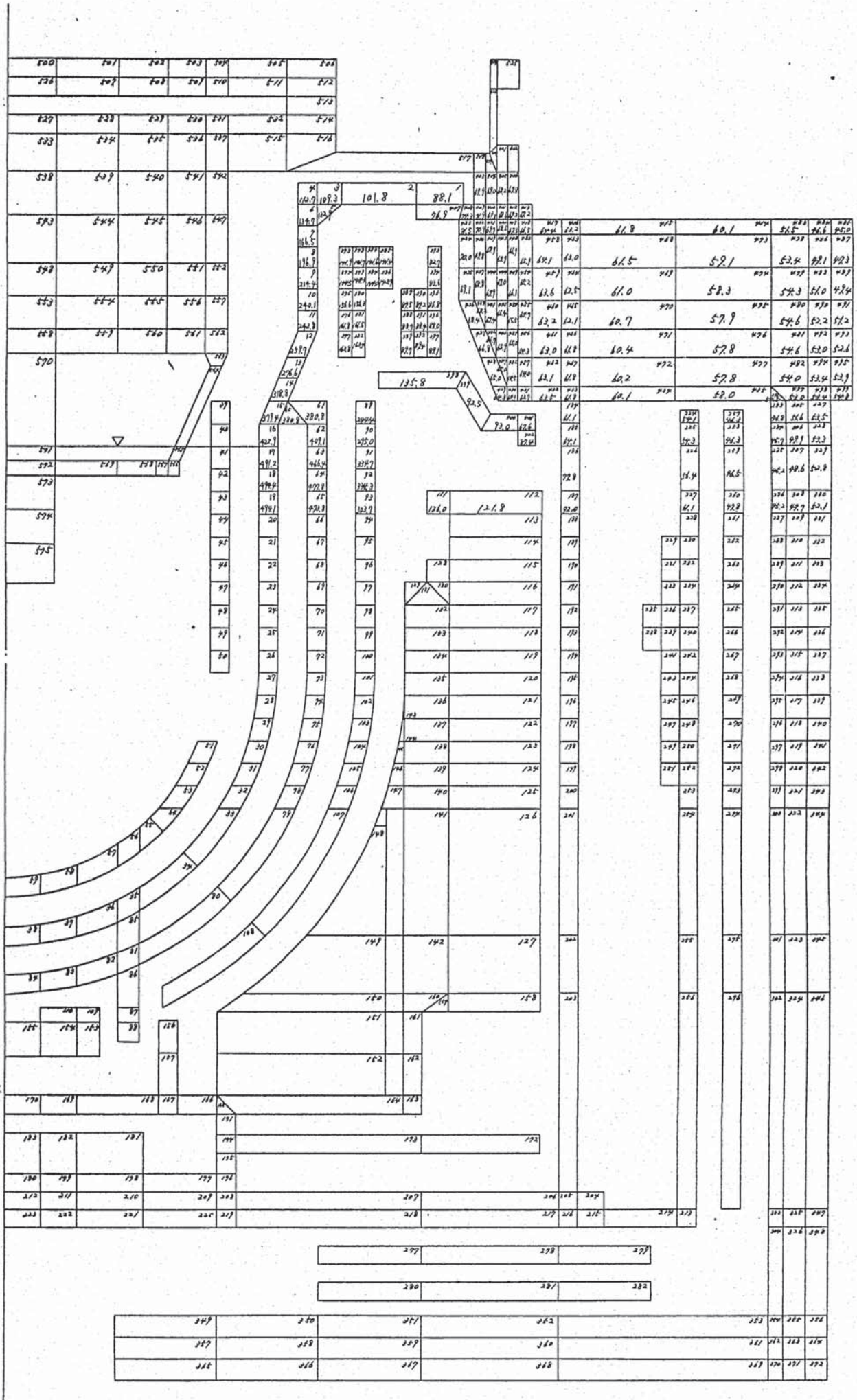


図４－２６　１００ＭＷ時ペデスタル冷却パス部の熱伝達率を変えた場合の温度分布計算結果

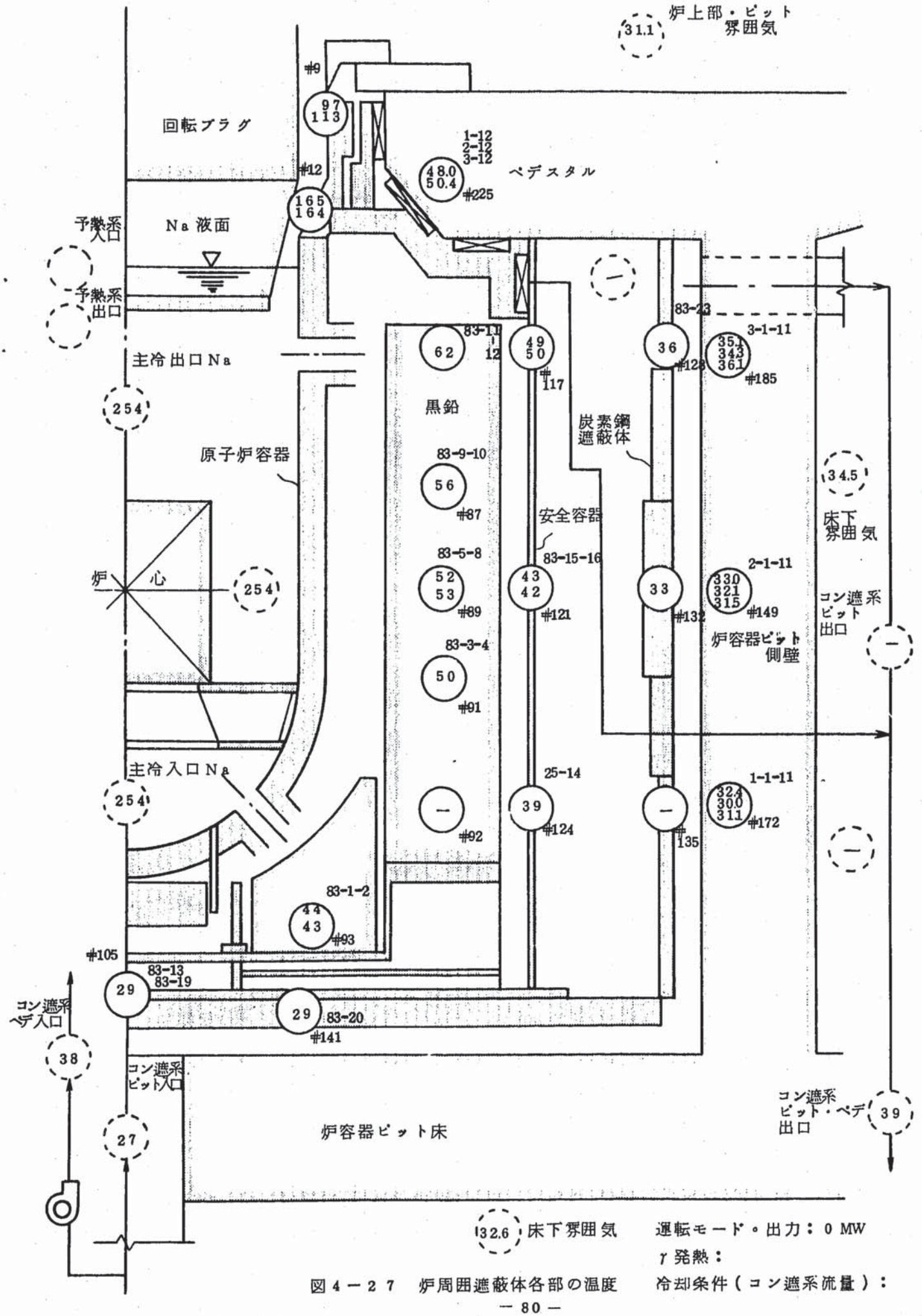
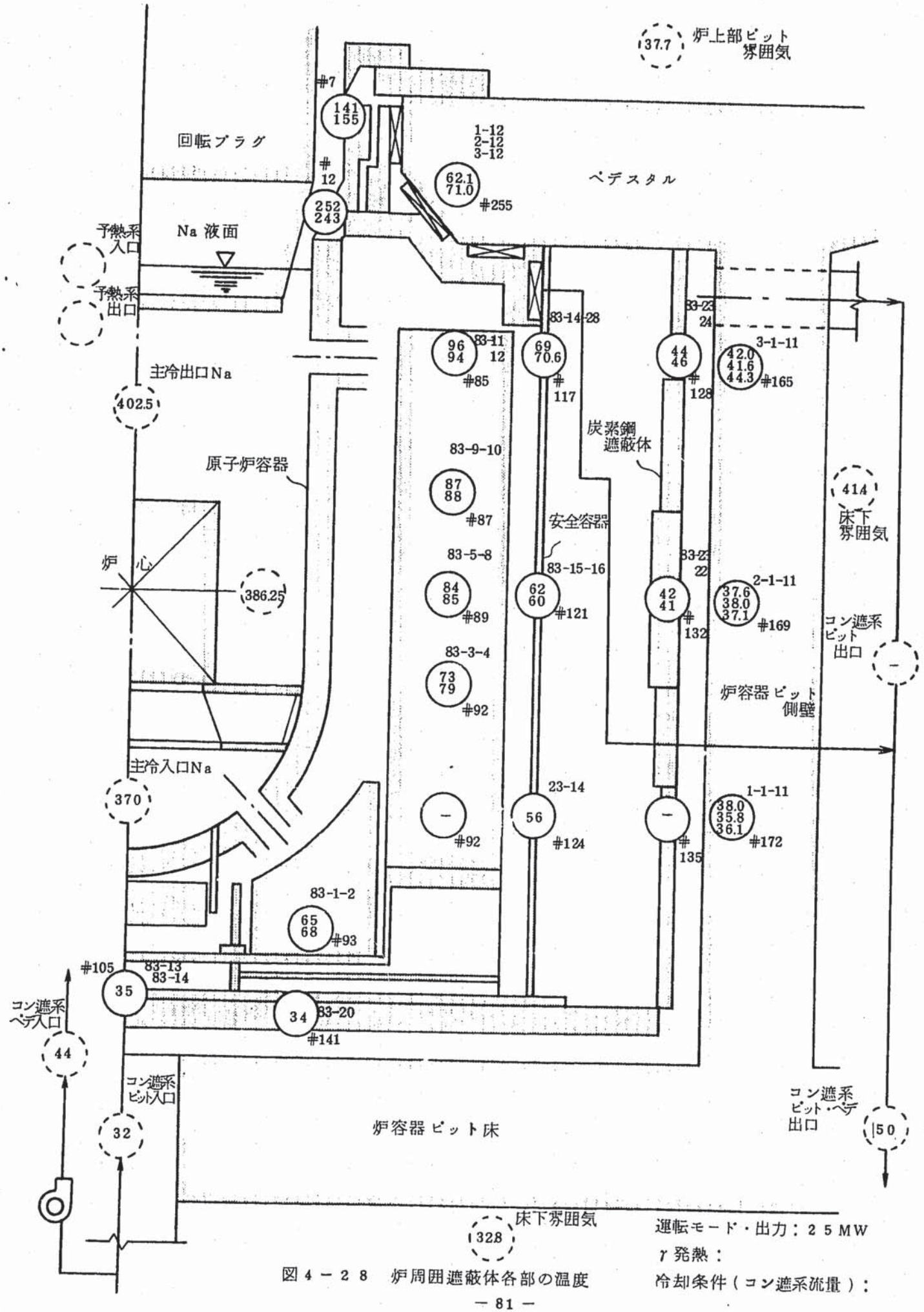


図4－27　炉周囲遮蔽体各部の温度



運転モード・出力：２５ＭＷ

γ発熱：

冷却条件（コン遮系流量）：

図４－２８　炉周囲遮蔽体各部の温度

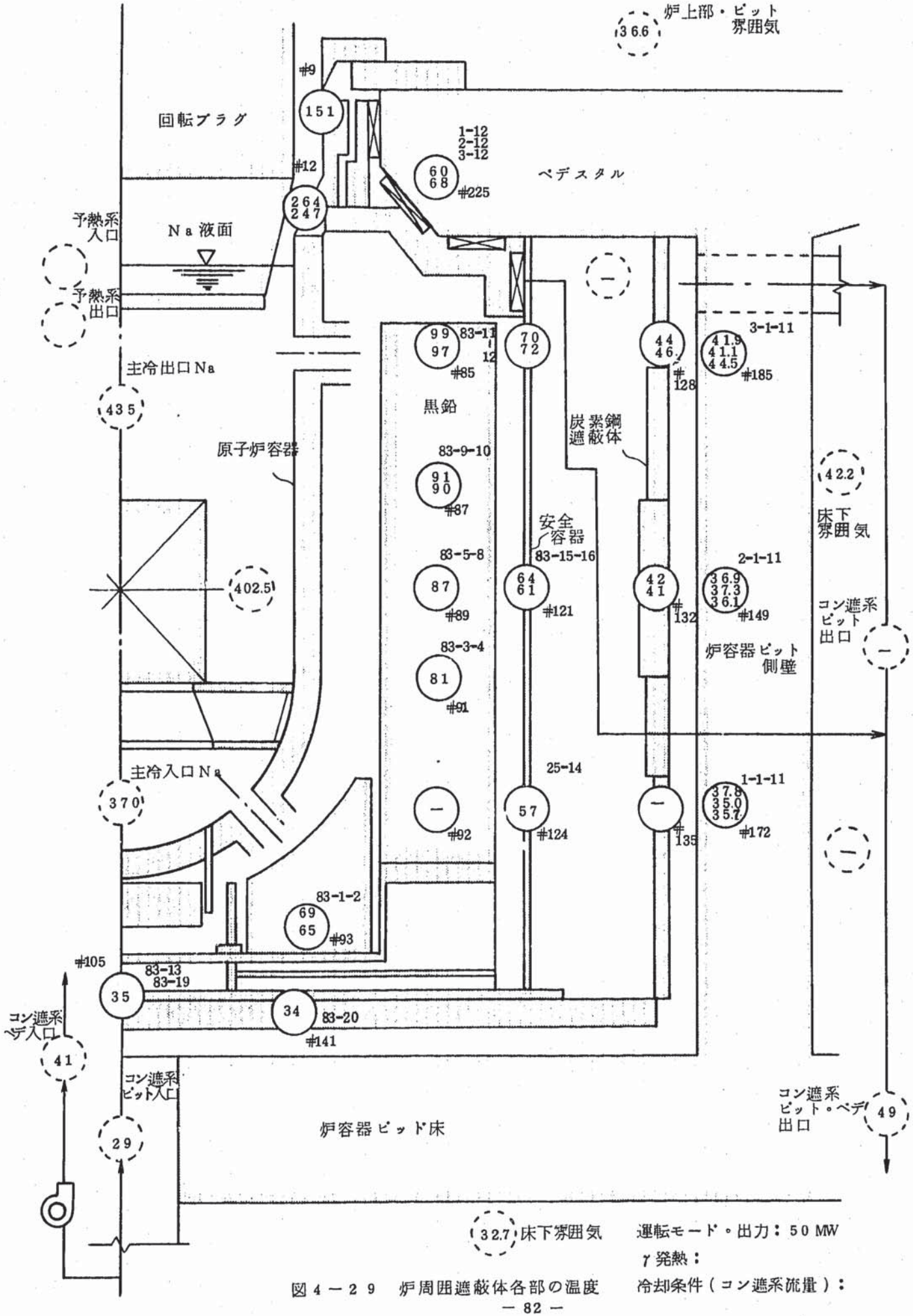


図4－29　炉周囲遮蔽体各部の温度

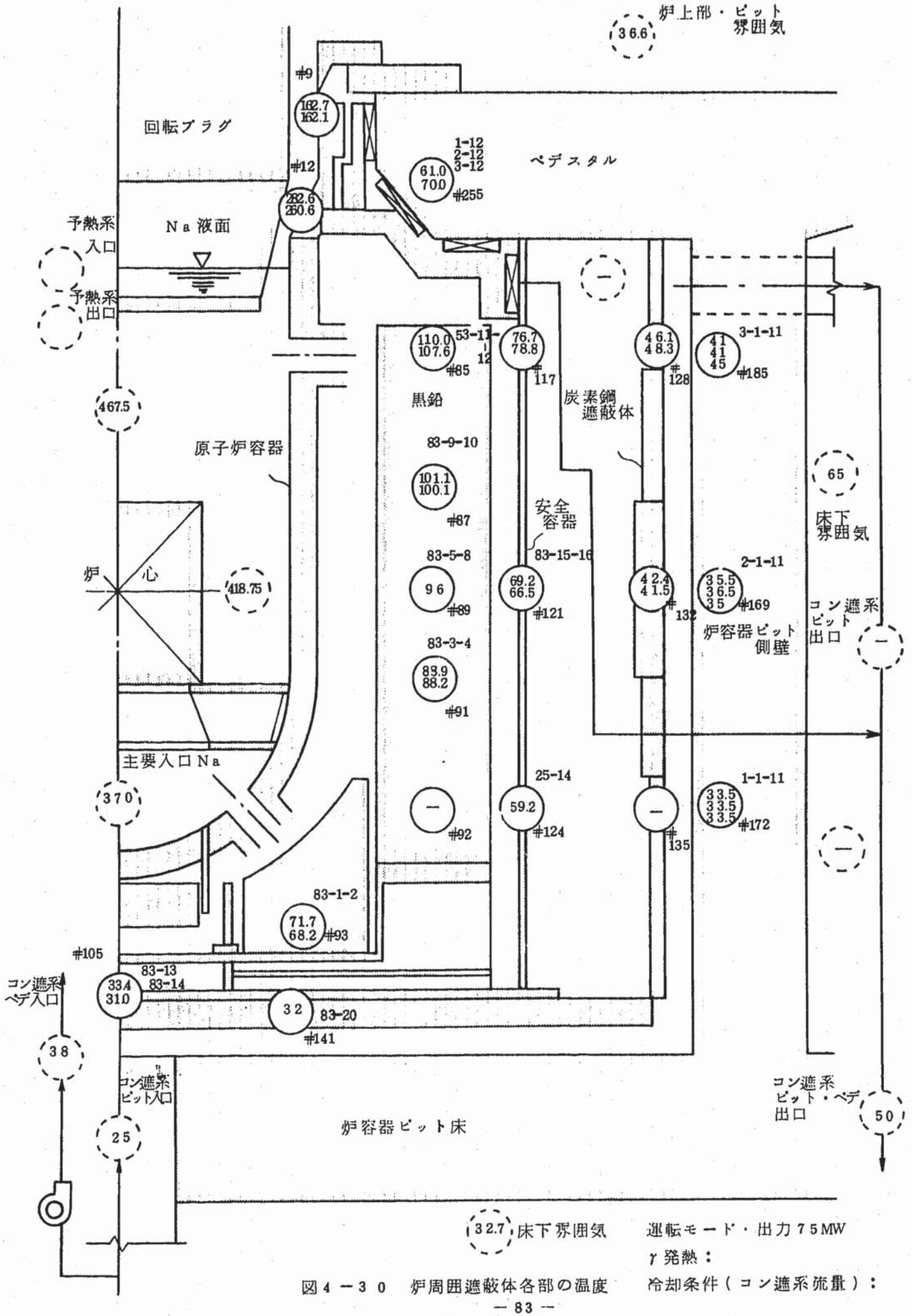


図4－30　炉周囲遮蔽体各部の温度

容器フランジとの取合部分が最高温度を示し，ペデスタル部外周下面が低温領域となっている。

上記からペデスタル部の熱流は，原子炉容器フランジとの取合面や安全容器内ペデスタル内面より流入した後，炉上部ピット室への放散はあるが，安全容器と炭素鋼遮蔽体間のアニュラス部へ流れ，コンクリート遮蔽体冷却系で冷却されることがわかる。

安全容器より外方のペデスタル部温度は上部より下部の温度が低い結果を示している。

(3) ペデスタル部温度について

ペデスタル部温度は，安全容器内のペデスタル部まわり構造物の温度依存が比較的少ない。即ち，安全容器内ペデスタル部内面は，保温や遮蔽体等熱抗抵の大きなものでおおわれており，更に，コンクリート遮蔽体冷却系による冷却があるために原子炉出力の相違等によるペデスタル部まわり構造物に温度変化が生じてもこれが緩和されるためである。

上記に対して，ペデスタル冷却条件は，ペデスタル部温度を大きく支配する。ペデスタル冷却条件の中，冷却ガス温度と伝熱条件（熱伝達率）の相違の影響を100MW出力時について計算した結果からは，冷却ガス温度を10℃低下させた場合と冷却ガス風量を約2倍とした場合，同様の効果があることが判明した。

(4) 計算結果に基づく各部の除熱量

温度分布計算結果から得られる各部の除熱量を纒めた結果を表4－7に示す。

(5) 「常陽」工認計算結果との比較

炉周囲遮蔽体の工認計算結果と本計算結果と比較すると炉周囲遮蔽体の温度に大きな相違がある。この主要原因は下記に示す通りである。

(1) 内部発熱量の相違

工認計算：111,100 kcal/h（100MW時）

本計算　：22,220　〃　（　〃　）

(2) 各部伝熱条件の相違

(a) 黒鉛遮蔽体と安全容器間の輻射による修正形態係数

工認計算　0.6

本計算　1.5

上記の他工認計算では全て0.6を採用しているのに対し，本計算では各部の条件に応じて設定した。

(b) 安全容器と炭素鋼遮蔽体の伝熱モデルの相違

工認では輻射による伝熱のみを考慮したのに対し，本計算では強制対流による冷却条件を入れている。これは炭素鋼遮蔽体シール部からアニュラス部への漏れ込みが存在することが判明したことによる。

表４－６　ペデスタル部まわりの計算結果と運転データの比較

No.	項目		ペデスタル部 A点	炉容器フランジ下部 B点	炉容器コーン部 C点	黒鉛　上部 D点	安全容器上部 E点	炭素鋼遮蔽体上部 F点	コン遮系ガス温度 ピット入口／ペデ入口／ペデ部
1	0 MW	計算値	48.9	104.7	164.9	62.6	47.9	35.4	27／38／43
		実測値	48～50.4	97～113	165～164	62	49～50	36	
		差	0.9～-1.5	7.7～-8.3	-0.1～0.9	0.6	-1.1～-2.1	-0.6	
2	25MW	計算値	64.1	142.8	240.6	94.3	70.4	47.6	32／44／55
		実測値	22.1～71.0	141～155	252～243	96～94	69～70.6	44～46	
		差	2～-6.9	1.8～-12.2	-11.4～-2.4	-1.7～0.3	1.4～-0.2	3.6～1.6	
3	50MW	計算値	62.5	149.9	255.4	99.8	73.3	47.5	29／41／51
		実測値	60～68	151	264～247	99～97	70～72	44～46	
		差	2.5～-5.5	-1.1	-8.6～-8.4	0.8～2.8	3.3～1.3	3.5～1.5	
4	75 MW	計算値	63.1	159	273	107.9	78.6	49.3	25／38／49
		実測値	61～70	162.7～162.1	282.6～260.6	110～107.6	76.7～78.8	46.1～48.3	
		差	2.1～-6.9	-3.7～-3.1	-9.6～-12.4	2.1～0.3	1.9～-0.2	3.2～1.0	

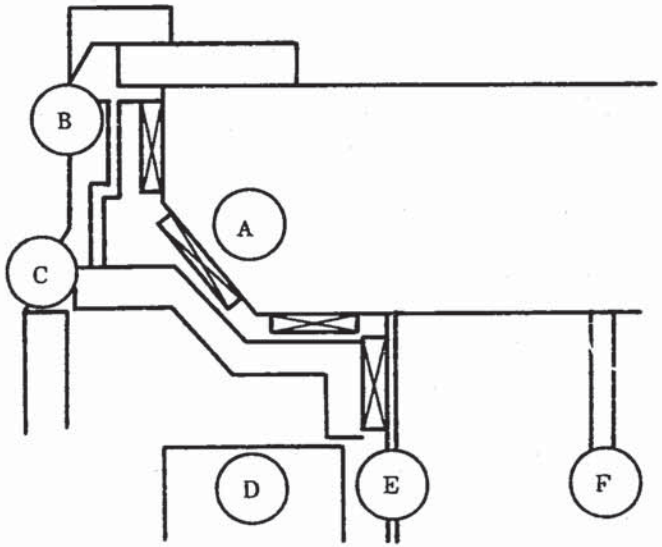


表４－７　温度分布計算結果に基づく各部除熱量

（単位：kcal/h）

No.	項　目	① ペデスタル部	② ピット内バス	③ 床下雰囲気	④ 炉上部ピット	①＋②		
1	0 MW	3,750	19,541	1,584	4,459	23,291		
2	25MW	5,884	40,024	1,705	4,483	45,908		
3	50MW	7,222	47,728	2,380	4,888	54,950		
4	75MW	8,703	57,939	5,341	5,368	66,642		
5	100MWケース(1)	8,739	62,085	2,731	6,346	70,824		
6	100MWケース(2)	9,684	65,437	5,476	5,720	75,121		

5. コンクリート温度に対する調査結果

5. コンクリート温度に対する調査結果

コンクリート温度に対しては，構造強度及び遮蔽機能を損なわないように配慮する必要がある。このため，普通コンクリートに対しては，「常陽」の場合下記の設計基準が設定されて建設された。

(1) 温度　　70℃以下

(2) 温度勾配　　0.8℃/cm以下

上記に対し「もんじゆ」では下記の如く計画されている。

(1) 温度

通常時　一般部70℃以下（局部的にやむを得ない場所については93℃以下）

事故時　一般部175℃以下（局部的にやむを得ない場所については協議して決定する）

(2) 温度勾配　0.8℃/cm以下

「常陽」ペデスタル部は普通コンクリートではなく重コンクリートが使用されているが重コンクリートに対しての制限条件は特に設定されておらず普通コンクリートの制限条件を準用する形になっている。

普通コンクリート及び重コンクリートを問わず，高温域で使用する場合に問題となるのは，コンクリート中の水分の減少と亀裂発生であると思われる。この問題に関しては，現状の調査範囲では，明確な制約条件を見出せなかった。

前章の計算結果から100MW時コンクリート遮蔽体冷却系のピット入口ガス温度が35℃の場合，ペデスタル内周部で70℃を越える部分が出るが温度勾配としては0.8℃/cm以下であり「もんじゆ」ベースの設計基準を採用するとすれば（局部的には93℃を許容）その制約条件内には十分入ると思われる。但し，ペデスタル部の温度は，極力，低い状態で運転することが望ましく，ペデスタル冷却パス入口ガス温度を下げたり冷却ガス量を増やすことなどは，このために非常に有効であると考えられる。

6. 参 考 資 料

6. 参考資料

温度分布計算に使用した伝熱条件及び境界温度条件の設定根拠についての検討結果を以降に添付する。

Ⅰ　輻射面の修正形態係数

Ⅱ　黒鉛遮蔽体と安全容器間の伝熱について

Ⅲ　安全容器と炭素鋼遮蔽体間の伝熱について

Ⅳ　ペデスタル冷却部の伝熱条件について

Ⅴ　境界ノード温度の設定について

Ⅵ　黒鉛ブロック間接触熱抵抗について

Ⅰ　輻射面の修正形態係数

$$F=\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1}$$　｛但し，同心円筒の場合は $F=\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{A_2}{A_1}\left(\frac{1}{\varepsilon_2}-1\right)}$ ｝

$\varepsilon_1 : \varepsilon_2$　輻射率　SUS 0.44　炭素鋼（塗装）0.95　コンクリート 0.8

黒鉛 0.8　〃　（錆）　0.79

平行平板の下記物体の組合せによるFの値は下記の通りである。

SUS －SUS	0.28
SUS －黒鉛	0.4
SUS－炭素鋼（塗装）	0.43
炭素鋼（塗装）－炭素鋼（塗装）	0.90
〃　（〃）－〃　（錆）	0.76
〃　（錆）　－〃　（〃）	0.65
黒鉛－黒鉛	0.67
〃 －炭素鋼（塗装）	0.77
コンクリート－炭素鋼（錆）	0.66

温度分布計算に際しては上記結果を参考に下記を考慮して設定した。

輻射による伝熱のみを計算条件としている箇所では自然対流による効果や垂直面・水平面等の相違，計算結果と運転データとの対応により比較的良い一致となるように調整修正を行った。

Ⅱ　黒鉛遮蔽体と安全容器間の伝熱について

(1)　黒鉛遮蔽体と安全容器間のSKS運転データによる熱流量

放散熱量計算値ベースの炉周囲遮蔽体の熱負荷の中，原子炉容器及び1次系配管からの放散熱量の90%が黒鉛遮蔽体と安全容器間の安全容器側面部より放散されるとすればその熱流量は下記の通りとなる。

2/26 データベース	15962×0.9=14365	kcal/h
4/15 〃	11069×0.9= 9962	〃
5/6 〃	17175×0.9=15458	〃
6/25 〃	16006×0.9=14405	〃

(2)　輻射伝熱モデルとする場合の修正形態係数(F)

(a)　黒鉛～安全容器間伝熱を輻射モデルとした場合の熱量Qは

$$Q=F\times 4.88\left\{\left(\frac{273+T_G}{100}\right)^4-\left(\frac{273+T_S}{100}\right)^4\right\}\times S=F\times A\times S$$ で求められる。

但し，T_G：黒鉛温度(℃)　T_S：安全容器温度(℃)　S：面積(m^2)

(b)　SKS時データから安全容器及び黒鉛の軸方向3段の上式A項の平均値を求め，S＝150(m^2)として修正形態係数Fを求めれば下記の通りとなる。

	A の平均値	Q	F
2/26 データベース	66.04	14365	1.45
4/15 〃	54.33	9962	1.22
5/6 〃	61.77	15458	1.67
6/25 〃	60.2	14405	1.60

上記よりFの平均値$\overline{F}$を求めれば$\overline{F}=1.458\simeq 1.5$である。

(c)　修正形態係数Fの算出式は下記の通りである。（同心円筒の場合）

$$F=\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_1}-1\right)}$$

但し，ε_1	黒鉛の輻射率	0.8
ε_2	安全容器の輻射率	0.95
A_1	黒鉛の外表面積∝半径	318 cm
A_2	安全容器の内表面積∝半径	320 cm

上記よりFを求めればF＝0.768である。

(d) 前記(b)項及び(c)項に示す如く修正形態係数は計算値に対し実測値は約2倍である。

(3) 密閉流体層を通過する伝熱機械工学便覧 11−28(108)式

$$\alpha_{1,2} = \frac{\lambda_f \quad c}{x \quad (L/x)^{1/9}} \left[\left(\frac{\beta g x^3 (t_1 - t_2)}{\nu^2} \right) \left(\frac{\nu}{a} \right) \right]_f^n$$

$\alpha_{1.2}$	：熱伝導率（kcal/m² h℃）	
λ_f	：流体の熱伝導率	0.024
x	：垂直平面の間隔（m）	0.02
L	：空隙の長さ（m）	0.6
β	：流体の体膨張係数(1/℃)	1/273
g	：重力の加速度（m/s²）	9.8
ν	：流体の動粘性係数（m²/s）	0.185×10^{-4}
a	：流体の温度伝導率（m²/s）	0.262×10^{-4}
t_1 , t_2	：対向する表面温度（℃）	52−42
c , n	：係数	

$$\alpha_{1,2} = \underbrace{\frac{0.024\times0.2}{0.02\,(0.6/0.02)^{1/9}}}_{0.1645} \underbrace{\left[\left(\frac{1/273\times9.8\times0.02^3(52-42)}{(0.185\times10^{-4})^2} \right) \left(\frac{0.185\times10^{-4}}{0.262\times10^{-4}} \right) \right]^{1/4}}_{8,773 \;\leftarrow\; 5,925\times10^3}$$

$$= 1.44 \quad \text{kcal/m}^2\,\text{h℃}$$

(4) 密閉流体層内の自然対流熱伝達と輻射熱伝達との比較

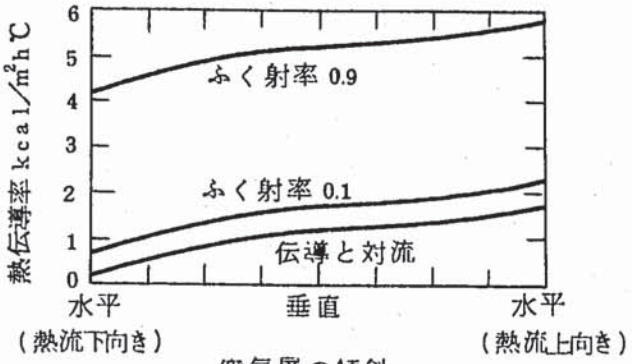
伝熱工学資料中の記述部分を次頁に添付する。

伝熱工学資料	密閉流体層内の自然対流熱伝達	基礎－B－e

1. 記　号

D	：m	空気層の厚さ
L	：m	空気層の一辺の長さ（垂直空気層では高さ）
q	：kcal/m²h	対流と伝導により平行面の単位面積を単位時間に通過する熱量
Δt	：℃	平行2面間または内外円筒面の温度差
q′	：kcal/mh	単位長さの円筒面で単位時間に伝達される熱量（輻射による伝熱量を除く）
d_1	：m	内円筒の外径
d_2	：m	外円筒の内径
λ	：kcal/mh℃	流体の熱伝導率
ν	：m²/h	動粘性係数
a	：m²/h	温度伝導率
P_r	：	プラントル数 $P_r = \nu / a$
β	：1/℃	流体の膨張係数
g	：m/h²	重力加速度 $g = 1.27 \times 10^3$ m/h²

物質定数は両面の平均温度に対する値を用いる。

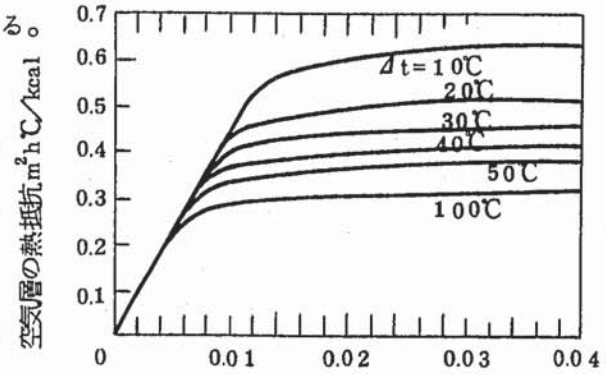


空気層の傾斜
層の厚さ 10cm，2面の温度差 11℃，
層の長さ 2.4m

第1図　平行2面間の密閉空気層の熱移動

2. 平行2面間の密閉空気層

平行な2面の一方から他方へ伝達される熱量は，輻射，伝導及び対流によるものである。層の厚さは輻射伝熱量には通常ほとんど関係しない。層の厚さがうすいときは対流はほとんど問題にならず，輻射と伝導のみで熱が伝えられるが，層の厚さが大きくなるに従って対流が盛んになり，層の形状，水平との傾き，熱の流れる向きなどが伝熱量に影響する。第1図は，2面間の温度差 Δt=11℃，層の長さL ＝ 2.4m，厚さD＝ 0.1 m　空気層において，輻射による伝熱量と，伝導と対流による伝熱量との割合及び層の位置と熱流の向きの影響を図示したものである。



第2図　水平密閉空気層の熱抗抵・ただし輻射を除く
（熱流上向き）

第2図[1]は下部から加熱された水平密閉空気層の対流と伝導による熱抗抵を層の厚さD及び2面間の温度差Δtに対して図示したもので，熱抗抵は温度差が小さいほど，厚さが大きいほど大きく，また厚さが増して層内に対流が起るとほとんど厚さに無関係となる。

$Nu = qD/\lambda\Delta t$ ， $Cr = \beta D^3 \Delta t/\nu^2$ とおけば，

水平層で熱が下面から上面に向い流れる場合の実験式[2]として次式がある。

$$Nu = 0.195 Gr^{1/4} \qquad (4\times10^5 > Gr > 10^4) \qquad (1)$$

$$Nu = 0.068 Gr^{1/3} \qquad (Gr > 4\times10^5) \qquad (2)$$

垂直層では次の実験式[3]がある。

$$Nu = 0.18 Gr^{1/4} (L/D)^{-1/9} \qquad (2\times10^5 > Gr > 2\times10^4 \ L/D > 3) \qquad (3)$$

$$Nu = 0.065 Gr^{1/9} (L/D)^{-1/9} \qquad (1.1\times10^7 > Gr > 2\times10^5 \ L/D > 3) \qquad (4)$$

1) 菅原菅雄，岐美格：機械学会論文集，19巻 80号 (昭28)，p.12.

2)3) M. Jakob : Trans. ASME., 68 (1946), p.189

注) 第1図の「伝導と対流」は(2)式及び(3)式から計算したものである。

(5) 黒鉛温度52℃安全容器温度42℃とした場合の検討

(a) 計算値ベース

輻射伝熱と自然対流による伝熱を考えその熱伝達率を求める。

$$\alpha_{RAD} = 0.768\times4.88\times\left\{\left(\frac{273+52}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+42}{100}\right)^4\right\}/(52-42) = 4.91 \ (kcal/m^2 h℃)$$

$\alpha nat = 1.44$ (kcal/m²h℃) 前記(3)項

$\alpha_{RAD} + \alpha nat = 6.35$ (kcal/m² h℃) (前記(4)項数値に近い)

(b) 実測値ベース

$$\alpha_{RAD} = 1.5\times4.88\times\left\{\left(\frac{273+52}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+42}{100}\right)^4\right\}/(52-42) = 9.60 \ (kcal/m^2 h℃)$$

(c) 計算値と実測値の比較

$9.6/6.35 = 1.51$

上記の通り輻射と自然対流を考慮した熱伝達率の計算値と比較しても実測値は約50%大きい。

(6) 計算値と実測値との相違について

前項までの通り黒鉛と安全容器間の伝熱条件に関しては輻射伝熱モデルとした場合と輻射＋自然対流伝熱モデルとした場合には夫々実測値が計算値に対し2倍，1.5倍と高い数値を示している。この相違は熱流が全て黒鉛を通して安全容器に伝えられる事を前提にしているのに対し実機においては1次系諸配管や炉容器上部からの放散熱量が黒鉛層を介することなく安全容器に伝えられる構造となっていることや黒鉛遮蔽体の支持ピン及び固定用リブの存在があるためと考えられる。

Ⅲ 安全容器と炭素鋼遮蔽体の伝熱について

（主として冷却ガスによる除熱機能）

(1) 熱伝達率の計算式

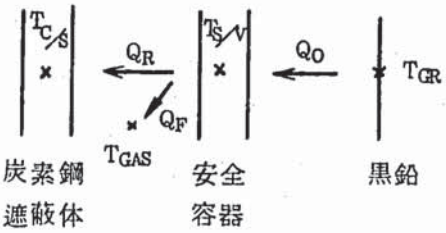
この部分の冷却ガス流速は数 cm/s～ 10m/s 程度迄その範囲が広い。熱伝達率計算式も平板，円管及び2重管に対し自然対流及び強制対流（層流・乱流）についての各種の計算式がある。

(2) 熱伝達率計算例

SKS 運転条件（但し，温度条件は 76-2-26 データ・コン遮系流量は 75-12-22 ベースとした）での各計算式における熱伝達率計算結果を表Ⅲ－1に示す。計算式による計算結果の相違が大きいのが特徴である。

(3) SKS 運転データによる安全容器外面の熱伝達率の推定

右図の如く黒鉛から安全容器に伝わる熱（Q_O）が冷却ガスにより除熱される（Q_F）と同時に炭素鋼遮蔽体に輻射により伝わる（Q_R）ものと仮定



$Q_O = Q_F + Q_R$ とし且つ

$$Q_O = 1.5 \times 4.88 \left\{ \left(\frac{273+T_{GR}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+T_{S/V}}{100} \right)^4 \right\} \quad (kcal/m^2h)$$

$$Q_F = \alpha \left(T_{S/V} - T_{GAS} \right) \quad (kcal/m^2h)$$

$$Q_R = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)} \; 4.88 \left\{ \left(\frac{273+T_{S/V}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+T_{C/S}}{100} \right)^4 \right\} \quad (kcal/m^2h)$$

表 Ⅲ－1　各種計算式による熱伝達率計算結果

単位　kcal/m²hℂ

		流速 m/s	流量 kg/h kg/m².h	平板モデル 層流	平板モデル 乱流	平板モデル 自然対流	円管モデル 層流	円管モデル 乱流	2重管モデル 層流	2重管モデル 乱流
安全容器⟆炭素鋼遮蔽体	上部	0.363	23798 0.407	0.663	1.44		0.910　3.26	1.27	6.19	0.0299
	中上	0.296	18186 0.331	0.599	1.22		0.832　3.26	1.08	5.48	0.0254
	中央	0.216	12837 0.241	0.512	0.948	3.15	0.740　3.25	0.838	4.69	0.0197
	中下	0.127	7789 0.142	0.392	0.620		0.627　3.25	0.549	3.74	0.0129
	下部	0.0441	2885 0.0493	0.231	0.266		0.450　3.24	0.236	2.39	0.0055
炭素鋼遮蔽体⟆ライニング	上部	1.20	2426 1.34	1.21	3.74		14.1	6.66		6.80
	中上	3.98	8038 4.46	2.20	9.75		21.0	17.43		17.79
	中央	6.63	13387 7.42		14.7			26.2		26.73
	中下	9.13	18435 10.22		19.0			33.84		34.54
	下部	11.56	23339 12.94		22.9			40.87		42.66
底部		7.89	26224 8.82		19.9			32.3		
		m³/h 23439	kg/h 26224							
γ: 1.129 kg/m³　λ: 0.02275 kcal/mhℂ C_p: 0.2405 kcal/kgℂ　a: 0.233×10⁻⁴ m²/s η: 1.905×10⁻⁶ kgs/m²　P_r: 0.71 ν: 0.1655×10⁻⁴ m²/s				$\frac{0.664\lambda}{\ell}(\frac{u_0\ell}{\nu})^{0.5}(\frac{\nu}{a})^{1/3}$ (49)式	$\frac{0.037\lambda}{\ell}(\frac{u_0\ell}{\nu})^{0.8}(\frac{\nu}{a})^{1/3}$ (55)式	$\frac{0.13\lambda}{H}[\frac{H^3g\beta(t_w-t_0)}{\nu^2}\frac{\nu}{a}]^{1/3}$ (63)式	$\frac{1.75\lambda}{\alpha}(\frac{wC_p}{\lambda L})^{1/3}$ (77)式 $\frac{1.75\lambda F_1^3}{a}\sqrt{\frac{wC_p}{\lambda L}+0.0722[\frac{d}{L}G_yP_r]^{0.84}F_2}$ (80)式	$\frac{0.023\lambda}{d}(\frac{Gd}{g\eta})^{0.8}(\frac{\nu}{a})^{0.4}$ (81)式	$\frac{\lambda}{d_2-d_1}(\frac{d_2}{d_1})^{0.8}(\frac{wC_p}{\lambda L})^{0.45}\times\{\frac{\beta\Delta t(d_2-d_1)^3g}{\nu^2}\}^{0.05}$ (95)式	$\frac{0.023C_pG'}{\{\frac{(d_2-d_1)G}{g\eta}\}^{0.2}(\frac{\nu}{a})^{1/3}(\frac{\eta_w}{\eta_b})^{0.14}}$ (96)式

表Ⅲ－2　SKS 運転データによる安全容器外面の熱伝達率

		各部温度				熱流量 kcal/m²h		$Q_O - Q_R$	$T_{S/V} - T_{GAS}$	$\alpha = \frac{Q_O - Q_R}{T_{S/V} - T_{GAS}}$
		T_{GR}(℃)	$T_{S/V}$(℃)	$T_{C/S}$(℃)	T_{GAS}(℃)	Q_O	Q_R			
安全容器上部 GL-7200	2/26データ	59.5	47	36	31.4	127	60.9	66.1	15.6	4.24
	4/15データ	57	46.5	39	35.2	105.3	42.0	63.3	11.3	5.60
	5/6 データ	63	51.5	40	36.1	121.3	66.3	55.0	15.4	3.57
	6/25データ	60	47.5	38.5	33.2	127.7	50.6	77.1	14.3	5.39
	$\bar{\alpha}$									4.70
安全容器中上 GL-9300	2/26データ	54	44	35	30.9	97.8	48.9	48.9	13.1	3.73
	4/15データ	53.5	45	38.5	34.9	83.3	36.1	47.2	10.1	4.67
	5/6 データ	58.5	48.5	39.5	35.6	101.9	51.0	50.9	12.9	3.95
	6/25データ	54	45.5	38.5	32.7	83.7	39.0	39.0	12.8	3.49
	$\bar{\alpha}$									3.96
安全容器中央部 GL-10860	2/26データ	52	41	34	30.2	105.1	37.3	67.8	10.8	6.28
	4/15データ	52	43.5	38	34.5	82.1	30.2	51.9	9.0	5.77
	5/6 データ	55.5	45.5	39	35.0	99.2	36.3	62.9	10.5	5.99
	6/25データ	52	43	38	32.0	86.8	27.4	59.4	11.0	5.4
	$\bar{\alpha}$									5.86
安全容器下部 GL-13750	2/26データ	47	40	33	28.7	65.0	36.9	28.1	11.3	2.49
	4/15データ	49	43	37	33.5	57.0	32.8	24.2	9.5	2.55
	5/6 データ	50	44	38	33.7	57.6	33.1	24.5	10.3	2.38
	6/25データ	48	42	37	30.7	56.5	27.2	29.3	11.3	2.59
	$\bar{\alpha}$									2.50

但し，$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.95$　　$A_1 \propto 6.438$　　$A_2 \propto 7.764$

としてαを求めた結果を表Ⅲ－2に示す。

(4)　計算値と実測値の比較

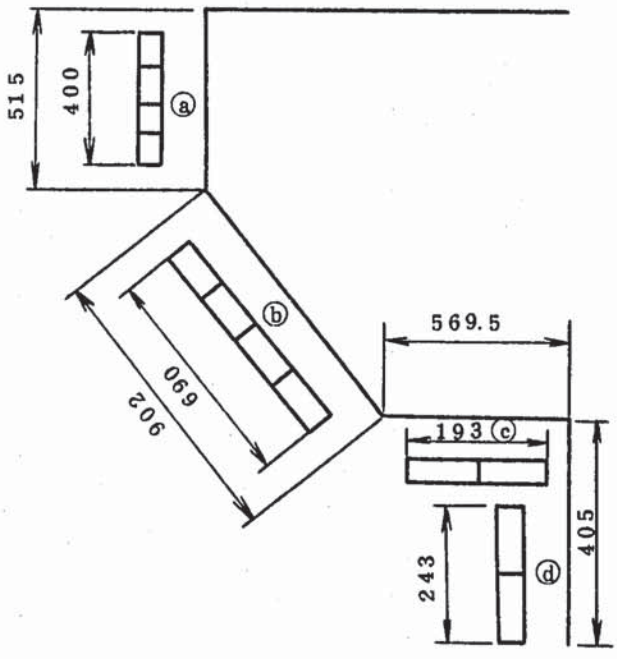
SKS運転データに基づく検討結果は2重管層流モデルにより計算した結果と比較的良い一致を示す。下記に両者の結果を示す。

	2重管層流モデル計算値	転運データによる検討
安全容器上部	6.19	4.70
〃　中上	5.48	3.96
〃　中央部	4.69	5.86
〃　中下	3.74	－
〃　下部	2.39	2.50

上記において運転データによる検討結果中，安全容器中央部の数値が大きいがこれは安全容器～炭素鋼遮蔽体間各種構造物（Ex,ペデスタル冷却出入口配管，炭素鋼遮蔽体パネル間のシール構造etc）により流路が狭くなっていることに起因すると考えられる。

Ⅳ　ペデスタル冷却部の伝熱条件について

ペデスタル冷却パス部は右図の如く構成されている。温度分布計算に当っては右図の冷却パスダクトを省略したモデルを採用し，強制対流による冷却と対面間の輻射の双方を考えた伝熱モデルとしている。冷却ダクト内ガス流速は風量を5000m³/hとした場合約17m/sであり熱伝達率として約35kcal/m²h℃となるがこれを20kcal/m²h℃とし下記の通りダクトの有無の効果を入れ伝熱条件を設定した。



$\alpha a = 20 \times 0.4 / 0.515 \times 1/2^{*} = 7.77$

$$C = \frac{0.4 \times 0.9/3 + (0.515 - 0.4) \times 0.9}{0.515} \times 3^{**} = 1.30$$

$\alpha b = 20 \times 0.69 / 0.902 \times 1/2 = 7.65$

$$C = \frac{0.69 \times 0.9/3 + (0.902 - 0.69) \times 0.9}{0.902} \times 3 = 1.32$$

$\alpha c = 20 \times 0.193 / 0.5695 \times 1/2 = 3.39$

$$C = \frac{0.193 \times 0.9/3 + (0.5695 - 0.193) \times 0.9}{0.5695} \times 3 = 2.09$$

$\alpha d = 20 \times 0.243 / 0.405 \times 1/2 = 6.0$

$$C = \frac{0.243 \times 0.9/3 + (0.405 - 0.243) \times 0.9}{0.405} \times 3 = 1.62$$

$\alpha = 20 \times \ell / L \times 1/2$

ℓ ：ダクト巾

L ：対応するペデスタル長

$$C = \frac{\ell \times \frac{F}{3} + (L - \ell) \times F}{L} \times 3$$

F ：修正形態係数

* ダクト内をガスが流れていることで冷却効果の減少をみたもの

** 温度計算の過程で生じた係数

V 境界ノード温度の設定について

(1) 炉内ナトリウム温度

(a) ホットプレナム温度 ③ 運転データ（主冷出口温度）

(b) コールドプレナム温度 ① 〃 （主冷入口温度）

(c) 炉心外周 ② (a)(b)の平均温度

(2) コン遮系ガス温度

(a) ピット入口温度 ④ 運転データ

(b) ペデ冷却パス ⑩(A~D) ペデ冷却パス入口温度に＋α

＋αは炉停止時5℃ 炉運転時 約10℃

(3) 回転プラグ冷却パス部 ⑫ 運転データ（但し50MW以上は同じ）

(4) 雰囲気温度

(a) 炉上部ピット雰囲気 ⑬ 運転データ（但し50MW以上は同じ）

(b) 炉容器ピット外周 〃 ⑭ 50MW迄は運転データを中央部とし上下に多少の温度差をとった。75MWは動燃用殿より受領したサーモラベル測定結果を参考とした。(図V−1参照)

100MWは75MWより多少高めに設定

(c) 炉容器ピット下面 〃 ⑮ 運転データ（但し50MW以上は同じ）

(5) 原子炉容器上部のカバーガス空間 (11A)～(11D)

各種運転条件における伝熱条件を固定し（$\alpha = 3$ kcal/m²hℂ　F＝0.29）当初図Ⅴ－2に示す実線の通り設定し計算結果と炉壁温度の運転データが比較的良い一致を示す迄調整したもの。調整結果は図Ⅴ－2に示す破線の通りである。

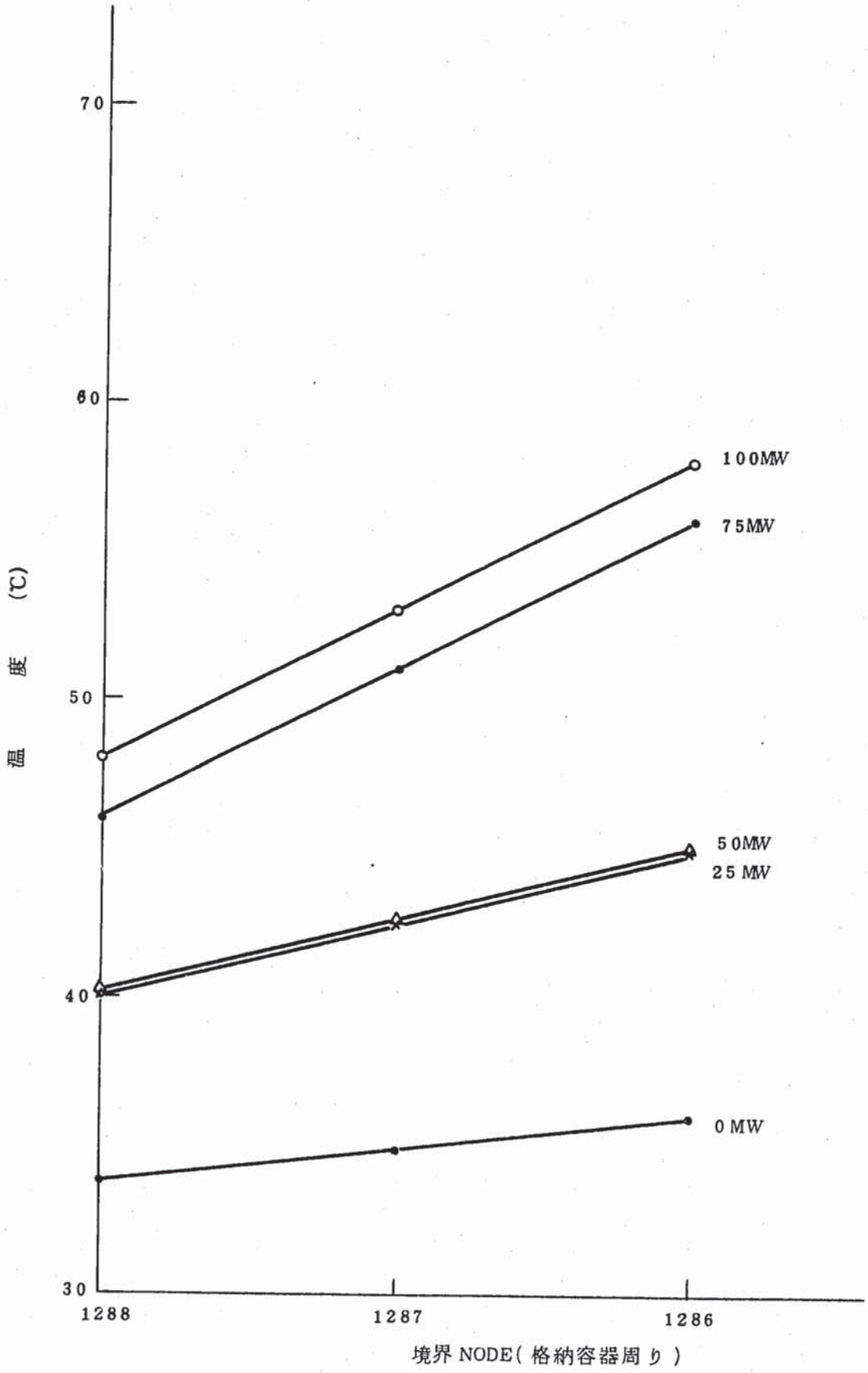
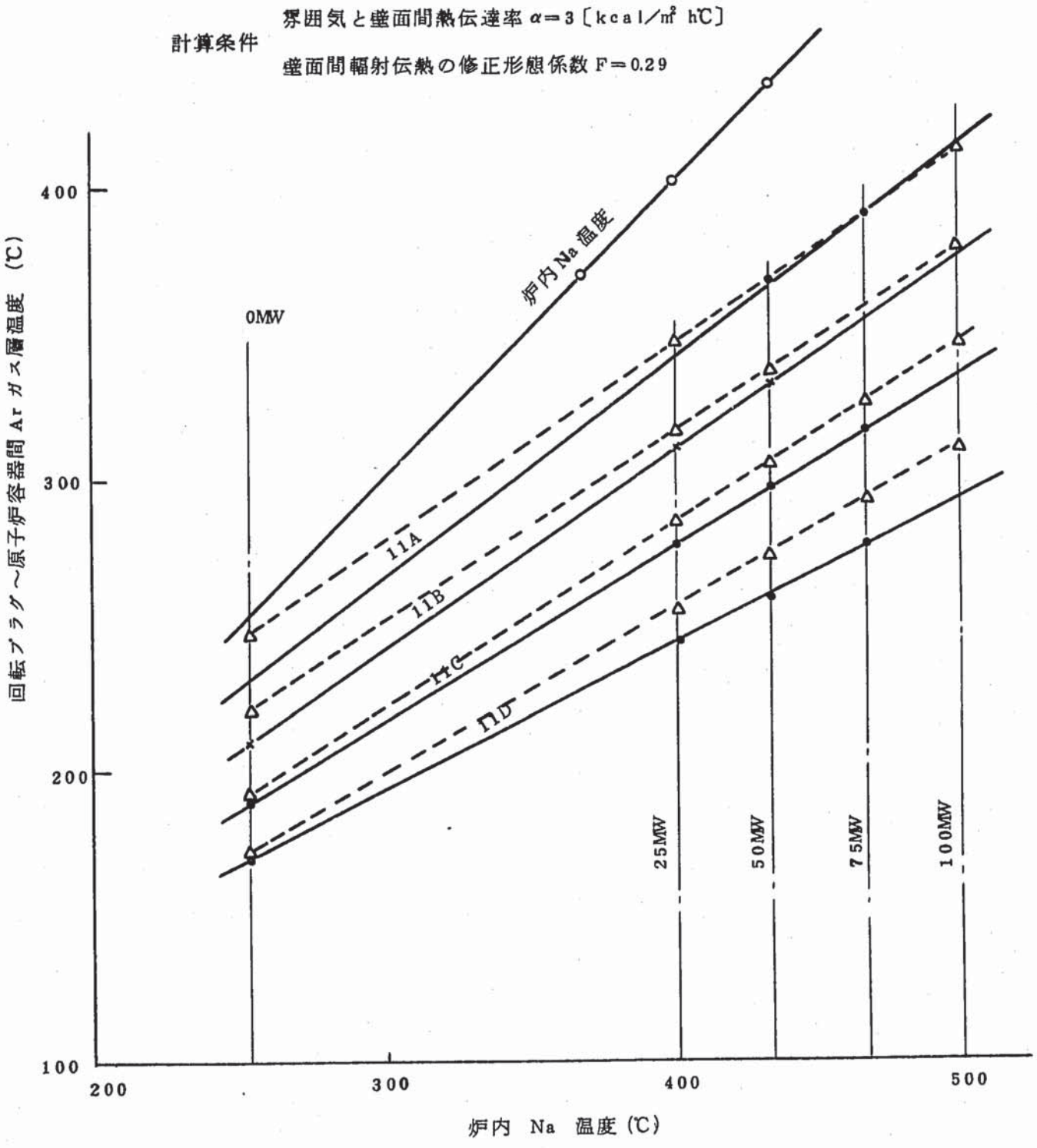


図 V －1　ピットまわり雰囲気温度設定条件



図Ⅴ－2　炉容器カバーガス層の設定温度

Ⅵ　黒鉛ブロック間接触熱抵抗〔伝熱工学資料　P103 (8)式〕

$$h_c = \left\{ \frac{1}{2\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_0}} - \frac{\lambda_f}{2\delta} \right\} \frac{P}{H} + \frac{\lambda_f}{2\delta}$$

δ ：接触面のあらさ（m）　25×10^{-6} 以下

λ ：接触固体の熱伝導率（kcal/mh℃）　115

h_0 ：直接々触点における熱コンダクタンス（kcal/m² h℃）　5×10^{6}

λ_f ：接触面スキマに介在する物質の熱伝導率（kcal/mh℃）　0.024

P ：接触面押付圧力（kg/mm²）　0.63×10^{-2}

H ：接触固体のかたさ（kg/mm²）　300

$$h_c = \left\{ \frac{1}{2\times\frac{25\times10^{-6}}{115} + \frac{1}{5\times10^{6}}} - \frac{0.024}{2\times25\times10^{-6}} \right\} \frac{0.63\times10^{-2}}{300} + \frac{0.024}{2\times25\times10^{-6}}$$

$$= 33.0 + 480 = 513 \approx 500 \ \text{kcal/m}^2\,\text{h℃}$$

上記より黒鉛ブロック間等価熱伝導率（λ_{eq}）は黒鉛ブロック厚１ｍ（但し，ブロック厚200mm×５段）を考慮すれば

$$\lambda_{eq} = \frac{1}{\left\{\frac{0.2}{115} + \frac{1}{500}\right\}5} = 53.5 \ \text{kcal/mh℃}$$

上記より温度計算においては黒鉛の熱伝導率 λ として

115/2＝57.5 kcal/mh℃

を使用した。

7. あ と が き

7. あとがき

炉容器まわりのペデスタル部コンクリートには温度計が3点設置されており，50MW出力上昇試験および75MW 出力上昇試験においては，その中の1点がコンクリートの温度維持基準である70℃付近まで上昇した。

本解析は，これまでの出力上昇試験で得られた運転データをもとに，100MW運転時のペデスタルコンクリート温度を予測するために行なったものである。

ペデスタル部の温度上昇は，放射線照射により材料中に生じる発熱と原子炉容器からの伝熱が主要因と考えられるが，解析の結果では前者による発熱量が全体で140kcal/hと少なく，原子炉容器からの伝熱による入熱が支配的であることが明らかになった。

ペデスタル部全体の温度分布は，100MWにおいて冷却用窒素ガス温度を25℃とした場合，原子炉容器側で63～70℃，反原子炉容器側で45～55℃となっており，原子炉容器側が高く，反原子炉容器側に向って一様に低くなる傾向を示している。

温度計測点は，原子炉容器にきわめて近い部分に設置されており，温度分布の結果からみると，ほぼ高温部分を計測しているといえる。

また，コンクリートの温度は冷却用窒素ガスの温度あるいは流量を変えることにより制御可能であることが明らかになった。

これは今後の原子炉運転時にコンクリート温度を基準以下に保つ上で大いに役立つものである。