

分 置

SJ 199-79-03

配 布 限 定

本資料は 年 月 日付で登録区分、  
変更する。  
2001. 6. 20  
[技術情報室]

# ガラス固化体の熱的挙動解析モデルの開発研究

## 成 果 報 告 書

昭和54年2月

(株) 芙蓉情報センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

# ガラス固化体の熱的挙動解析モデルの開発研究成果報告書\*

中川克也\*\* 大島 務\*\* 小高秀一\*\*

石井義兼\*\*



ガラス固化体の熱的挙動における伝熱条件をみたす試算式を検討してモデル化を行い、熱的挙動解析コードシステムを開発した。

本コードでは、発熱量計算においてア線遮蔽などを考慮し、熱伝導計算において材料のもつ非線形性を含めた解析ができる。

本コードを用いて、実物大のモデルによる計算を行い、ガラス固化体の長期に亘る熱的挙動を明らかにした。また、クラック、ボイドなどによる温度分布への影響について検討を行った。さらに、冷却方法について空冷、水冷の条件の計算を行いその影響を検討した。

---

\* 本報告書は、株式会社芙蓉情報センターが、動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

\*\* 科学計算部

Report on the Development of Thermal Behavior

Analysis Model of Vitrified High Level Liquid Wastes\*

Katsuya Nakagawa \*\*, Tsutomu Oshima \*\*,

Shuichi Kodaka \*\*, and Yoshikane Ishii \*\*

Abstract



The formulae representing the heat transfer conditions of the thermal behavior of vitrified high level liquid wastes have been examined to develop, in consequence, the thermal behavior analysis code system.

In this code system, the  $\gamma$ -ray shielding is taken in to consideration in the calculation of heat generation rate, and the analysis involving the non-linearity of the materials can also be made in the calculation of heat transfer.

The calculation on the actual-size model by using the code system has clarified the long-range thermal behavior of vitrified high level liquid wastes. The influence of cracks or voids on the temperature distribution has been also investigated. In addition, cooling methods and their effects have been studied by calculating the conditions of air-and water-cooling.

---

\* Work performed by Fuyo Data Processing & Systems Development Ltd.

under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

\*\* Scientific Application Division.

# 目 次

ページ

1. 開発研究概要	
1.1 開発研究の目的	1
1.2 開発研究内容と手順	1
2 ガラス固化体の熱的挙動解析コード	
2.1 コードのシステム構成	5
2.2 コードの理論	7
2.2.1 発熱コード	7
2.2.2 热伝導コード	15
2.2.3 热応力コード	18
2.3 コードの内容と特徴	20
2.3.1 発熱コード	20
2.3.2 热伝導コード	24
2.3.3 热応力コード	27
2.3.4 温度変化に伴う物性定数の変動	29
3 ガラス固化体について	
3.1 ガラス固化体について	31
3.2 物性値について	32
3.3 境界条件等について	43
4 試計算	
4.1 試計算ケースと計算条件	47
4.2 発熱量計算結果	76
4.2.1 ORIGEN計算結果	76
4.2.2 ORHLW計算結果	87
4.2.3 SHIELD計算結果	98
4.3 热伝導計算結果	111
4.3.1 基本ケースの計算結果	111
4.3.2 境界条件の検討計算結果	132
4.3.3 クラックが入ったときの热伝導への影響	151
4.3.4 ポイドが入ったときの热伝導への影響	169
4.4 热応力計算	181

5. まとめ	
5.1 結果の要約	189
5.2 今後の展望と検討課題	190
おわりに	192
REFERENCES	193
付 錄 (熱伝導方程式の有限要素法による離散化)	197

## 1. 開 発 研 究 概 要

## 1. 開発研究概要

### 1.1 開発研究の目的

使用済燃料の再処理工程から発生する高レベル放射性廃液（HLLW）は、より安全性の高い、管理の容易なガラス固化体に変換された後、貯蔵あるいは処分することとされている。

ガラス固化体は  $1050^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$  で溶融されたガラスを金属封入容器に注入後、徐冷しながら作られる。このガラス固化体作成時には、キャップの溶接検査、および除染が行われ、そのとき、ガラス固化体外部から温度変化が加えられる。その後の工学貯蔵中、または処分中においては、ガラス固化体は安定した外部環境下におかれるが、内蔵する放射性核種は長時間にわたり崩壊を続ける。それに伴う発熱により、ガラスの健全性および放射性物質の包蔵性に対して悪影響が予想される。これらの影響下において、ガラスとしての健全性を保ち放射性物質の包蔵性を損わないように管理するためには、あらゆる条件に対するガラス固化体の熱的挙動を明らかにする必要がある。

ところで、このような長期間にわたる熱的挙動、あるいは放射線放出を伴う現象を実験により解明するのは容易でない。そこで、この現象を解明するにはある程度シミュレーション・モデルにたよらざるを得ない。

このような点から本研究では、ガラス固化体の熱的挙動を解析するための計算モデルを開発することを目的とする。

### 1.2 開発研究内容と手順

高放射性廃棄物のガラス固化体は、廃棄物を含んだガラスとステンレスのキャニスターとからなっており、本研究は、ガラスの解析を中心としたモデルの開発を行う。また、開発モデルの適用範囲は、高放射性廃棄物の処理過程の工学貯蔵時および、永久貯蔵時の熱的挙動解析である（図1.1参照）。なお、本年度はプログラム開発の初年度に当たるため、まず一貫したシステムを作成することを第一義の目標においた。

ガラス固化体の熱的挙動は、ガラスに内蔵される放射性核種の崩壊エネルギーによる発熱と、その発生熱が、ガラス固化体内部から冷却材へと伝わる伝熱とに分けられる。

本開発研究は、まず、上記のガラス固化体の熱的挙動現象の伝熱条件を勘案し、この条件を満たす伝熱計算式を調べる。また、モデル化に際して必要な項目を調査し、モデルで使用するデータを収集する。これらより、ガラス固化体熱的挙動モデルを設定し、プログラム化する。最後に試計算を行い、ガラス固化体の長期に亘る熱的挙動を検討する。この開発研究の手順を図1.2に示す。

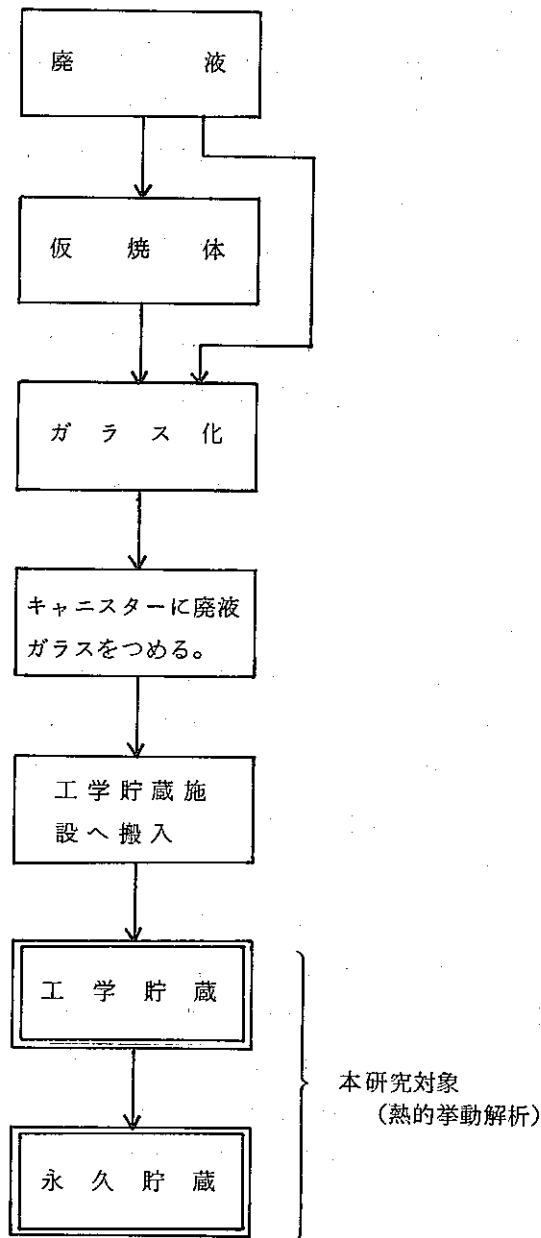


図 1.1 高放射性廃棄物の処理過程

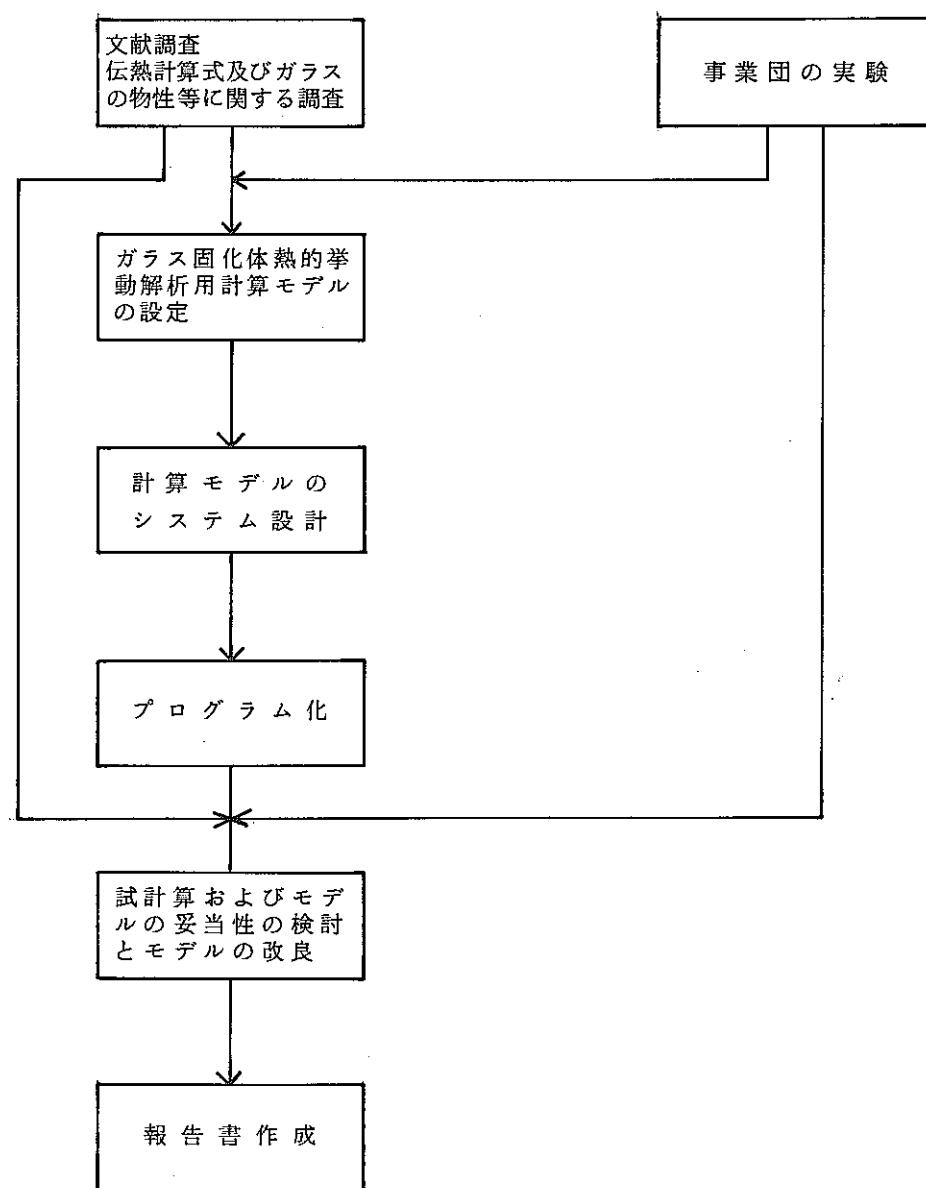


図 1.2 開発研究の手順

## **2. ガラス固化体の熱的挙動解析コード**

## 2. ガラス固化体の熱的挙動解析コード

### 2.1 コードのシステム構成

本年度開発したコードは高放射性核種の崩壊エネルギーによる発熱量を算出する発熱コードと、その発生熱の伝熱過程を計算する熱伝導計算コード、およびその温度分布から熱応力を計算する熱応力コードとからなる。

このように本年度開発したコードのシステム構成は図 2.1 に示すとおりである。

このシステム構成の中で発熱コードはさらに細分化し、ORIGENコード、ORHLLWコード、およびSHIELDコードからなる。

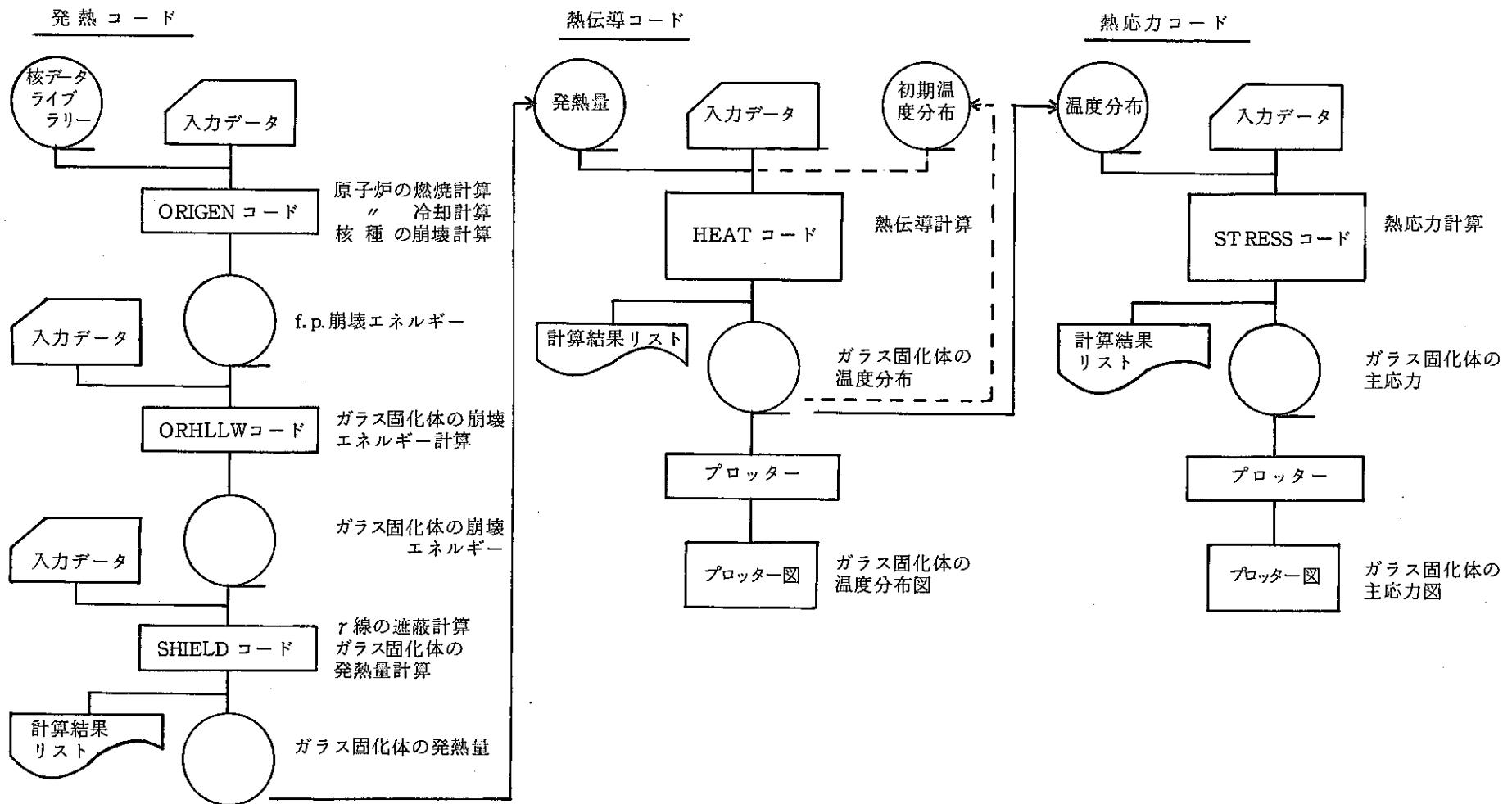


図 2.1 ガラス固化体熱的挙動解析コード・システム・フロー

## 2.2 コードの理論

### 2.2.1 発熱コード

本コードでは図2.2に示すように、ガラス固化体内部に蓄積されるエネルギーをその発熱量として計算する。すなわち、発熱量は高放射性物質の崩壊エネルギーから外部へ透過する $\gamma$ 線エネルギーを除いて算出する。

発熱コードには、既存のORIGEN<sup>a)</sup>コードを組み込み、原子炉の燃焼・冷却・核種の崩壊を計算し、f.P.の崩壊熱および $\gamma$ 線スペクトルを算出する。この他に、発熱コードにはこのf.P.の崩壊熱などを用いてガラス固化体の崩壊熱および $\gamma$ 線スペクトルを計算するORHLLWコードとガラス固化体外部へ透過する $\gamma$ 線の遮蔽計算を行い発熱量を求めるSHIELDコードとが含まれている。理論説明はORHLLWコードとSHIELDコードについて行う。

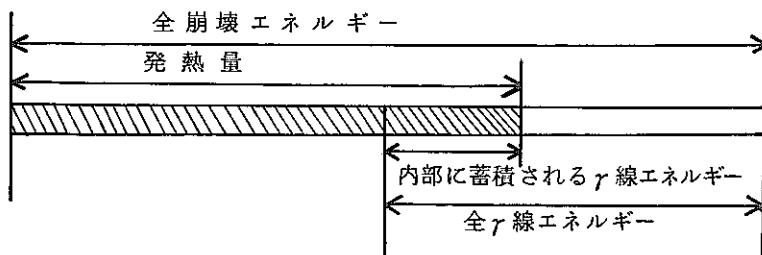


図2.2  $\gamma$ 線エネルギーと発熱量

#### (1) ORHLLWコード

これは、ORIGEN計算結果を用いて高放射性廃液、仮焼体、およびガラス固化体についてその組成、熱出力および $\gamma$ 線スペクトルを求めるコードである。このとき、廃棄物処理中の混入物、再処理腐蝕生成物、中性子毒物、および処理中の添加物の情報をカード入力により考慮する。

この計算式を以下に示す。

##### (i) 高放射性廃液の組成、熱出力、および $\gamma$ 線スペクトルの計算

$$\{ \alpha_i \}_{LIQ} = \frac{1}{CLIQ} \times \{ \alpha_i \}_{f.p.} + \alpha$$

$$T_{LIQ} = \frac{1}{CLIQ} \times T_{f.p.}$$

$$\gamma_{LIQ} = \frac{1}{CLIQ} \times \gamma_{f.p.}$$

##### (ii) 仮焼体の組成、熱出力、および $\gamma$ 線スペクトルの計算

$$\{ \alpha_i \ }_{CAL} = \frac{1}{CCAL} \times \{ \alpha_i \ }_{LIQ} + \alpha$$

$$T_{CAL} = \frac{1}{CCAL} \times T_{LIQ}$$

$$\gamma_{CAL} = \frac{1}{CCAL} \times \gamma_{LIQ}$$

(iii) ガラス固化体の熱出力および $\gamma$ 線スペクトルの計算

$$T_{GL} = CWT \times T_{CAL}$$

$$\gamma_{GL} = CWT \times \gamma_{CAL}$$

但し

$\{a_i\}_{f.p.}$  : 1 MTの燃料より発生する f.p. の組成

$T_{f.p.}$  : " の熱出力

$\gamma_{f.p.}$  : " の $\gamma$ 線スペクトル

CLIQ : 1 MTの燃料からの高放射性廃液発生量

$\{a_i\}_{Liq}$  : 高放射性廃液の組成

$T_{Liq}$  : " の熱出力

$\gamma_{Liq}$  : " の $\gamma$ 線スペクトル

CCAL : 仮焼体の重量対高放射性廃液発生量

$\{a_i\}_{CAL}$  : 仮焼体の組成

$T_{CAL}$  : " の熱出力

$\gamma_{CAL}$  : " の $\gamma$ 線スペクトル

CWT : ガラス固化体の仮焼体含有量

$T_{GL}$  : ガラス固化体の熱出力

$\gamma_{GL}$  : " の $\gamma$ 線スペクトル

$\alpha$  : 混入物等

## (2) SHIELD コード

このコードはガラス固化体中に発生する $\gamma$ 線の遮蔽計算とガラス固化体の発熱量計算をする。

放射線遮蔽計算では、荷電粒子である $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、陽子などは、遮蔽体中で容易に吸収されるため考慮しない。非荷電粒子である $\gamma$ 線は、f.p.からの発生量が多く、透過量も大きいので考慮する。 $\gamma$ 線の遮蔽計算は、放射線の指數減衰法則、および放射線源の幾何学的形状を考慮して行う(式2.1)。この遮蔽計算で用いるガラスの固化体の形状は、単純化し、円柱体として取り扱う。また、 $\gamma$ 線の線源強度はガラス固化体内一定であるとする。

着目点P(X, Y)における $\gamma$ 線の強度 $\phi(X, Y)$ は次式で与えられる。<sup>(2)</sup>

$$\phi(X, Y) = \int_E \int_V \frac{S_0(E, V) B(E, b) e^{-b}}{4 \pi (\rho(V))^2} \times dV dE \quad (2.1)$$

$b = \sum_{i=1}^N \mu_i t_i$  : 減衰距離

$\phi(X, Y)$  : 着目点P(X, Y)における $\gamma$ 線の強さ

$S_0(E, V)$  :  $\gamma$ 線の線源強度

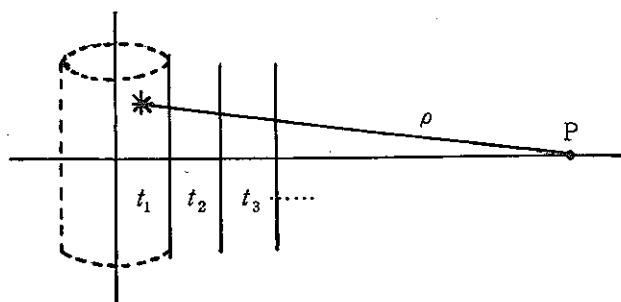
$B(E, b)$  : ビルド・アップ係数

$\mu_i$  : 遮蔽体 i の減衰係数

$t_i$  : " を通る傾斜距離

$\rho$  : 線源から着目点までの距離

N : 遮蔽体の個数

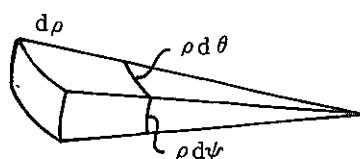


(i) 円柱状の線源からの $\gamma$ 線量の解析的な表式

円柱状の線源から着目点P(X, Y)への $\gamma$ 線の強さを求める式を、つぎの2つの場合に分けて算出する。

- a. 着目点P(X, Y)が放射線源の円柱の側面にあるときの $\gamma$ 線強度を求める場合。
- b. 着目点P(X, Y)が放射線源外部の円柱の上側または下側にあるときの $\gamma$ 線強度を求める場合。

aの場合について以下で説明を行い、bの場合も同様である。



(2.1) 式において各エネルギー順位ごとに算出するものとし、容積は極座標( $\theta, \psi, \rho$ )で表わすとつぎの式になる。  
 $dV = \rho^2 \cos \psi d\theta d\psi d\rho$   
 $\rho$  : 着目点からの距離

のことから(2.1)式は各エネルギー順位ごとでは、つぎの式になる。

$$\phi(X, Y)_e = \frac{1}{4\pi} \int d\theta \int d\psi \int S_0 \times B(b) e^{-b} \cos \psi d\rho \quad (2.2)$$

以下において、エネルギー順位を固定し、 $\gamma$ 線強度( $\phi(X, Y)$ )を求める。

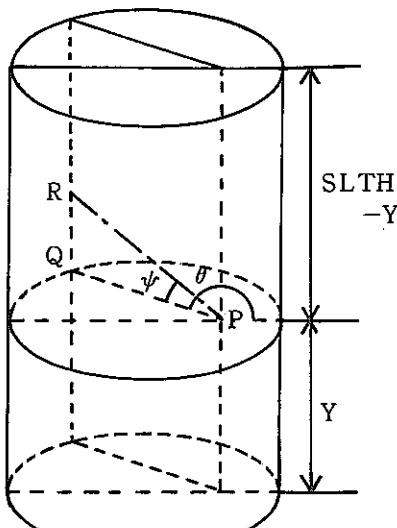


図 2.3

着目点Pから、境界点Rまでの距離を求める。

$$PR = L \times \sec \psi$$

$$\text{但し } L = PQ$$

PQは図2.4より次式で与えられる。

$$PQ = \sqrt{R^2 - (X \sin \theta)^2} - X \cos \theta$$

この距離を用いて、着目点Pにおける $\gamma$ 線の線源強度を求める。この $\gamma$ 線強度は、外輪部から点Pを通り内部に入る $\gamma$ 線(図2.6の $r_2$ )の全体の $\gamma$ 線強度( $\phi_{a1}$ )と、逆に内部から点P

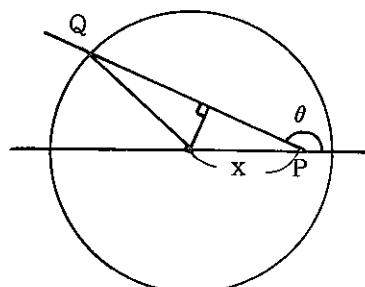


図 2.4

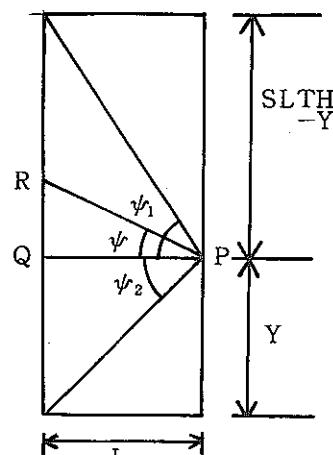


図 2.5

を通り外部へ透過する $\gamma$ 線強度（図2.6の $r_1$ ）の全体の $\gamma$ 線強度（ $\phi_{a_2}$ ）との和として表わされる。

$$\phi_a(X, Y) = \phi_{a_1}(X, Y) + \phi_{a_2}(X, Y) \quad (2.3)$$

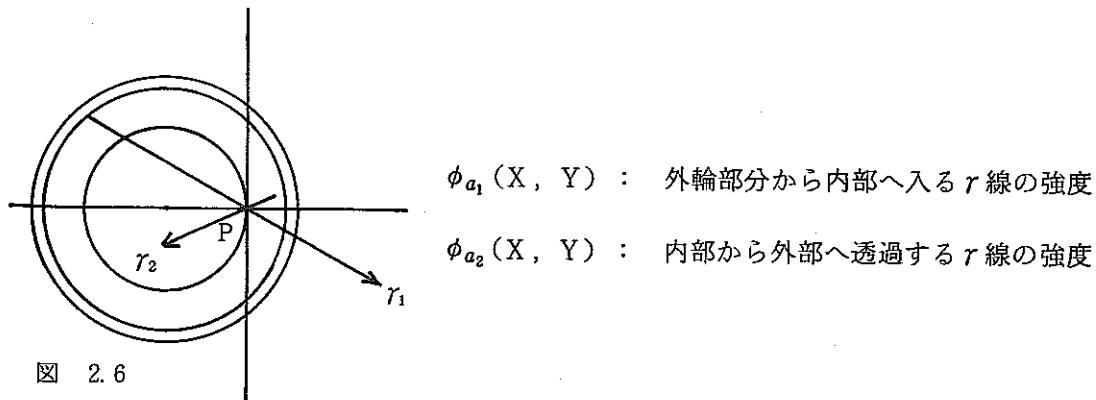


図 2.6

$\phi_{a_1}, \phi_{a_2}$  の式はつきのとおりである。

$$\begin{aligned} \phi_{a_1}(X, Y) = & \frac{2}{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \left[ \int_0^{\psi_1} d\psi \int_0^{R_1} B(\mu_1, \rho) \times S_v \times e^{-\mu_1 \rho} d\rho \right. \\ & + \int_0^{\psi_2} d\psi \int_0^{R_2} B(\mu_1, \rho) \times S_v \times e^{-\mu_1 \rho} d\rho \\ & + \int_{\psi_1}^{\frac{\pi}{2}} d\psi \int_0^{R_3} B(\mu_1, \rho) \times S_v \times e^{-\mu_1 \rho} d\rho \\ & \left. + \int_{\psi_2}^{\frac{\pi}{2}} d\psi \int_0^{R_4} B(\mu_1, \rho) \times S_v \times e^{-\mu_1 \rho} d\rho \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \phi_{a_2}(X, Y) = & \frac{2}{4\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} d\theta \left[ \int_0^{\psi_1} d\psi \int_0^{R_1} B(\mu_1, \rho) \times S_v \times e^{-\mu_1 \rho} d\rho \right. \\ & + \int_0^{\psi_2} d\psi \int_0^{R_2} B(\mu_1, \rho) \times S_v \times e^{-\mu_1 \rho} d\rho \\ & + \int_{\psi_1}^{\frac{\pi}{2}} d\psi \int_0^{R_3} B(\mu_1, \rho) \times S_v \times e^{-\mu_1 \rho} d\rho \\ & \left. + \int_{\psi_2}^{\frac{\pi}{2}} d\psi \int_0^{R_4} B(\mu_1, \rho) \times S_v \times e^{-\mu_1 \rho} d\rho \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

但し

$$\begin{aligned} L &= \sqrt{R^2 - (X \sin \theta)^2} - X \cos \theta \\ R_1 &= L \times \sec \psi \quad 0 \leq \psi \leq \psi_1 \quad \psi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{SLTH - Y}{L} \right) \\ R_2 &= L \times \sec \psi \quad 0 \leq \psi \leq \psi_2 \quad \psi_2 = \tan^{-1} \left( \frac{Y}{L} \right) \\ R_3 &= (SLTH - Y) \times \csc \psi \quad \psi_1 \leq \psi \leq -\frac{\pi}{2} \\ R_4 &= Y \times \csc \psi \quad \psi_2 \leq \psi \leq -\frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

## (ii) 減衰係数

減衰係数、ビルド・アップ係数の設定は、既存のISOSHLDコードを参照した。

減衰係数は、単位密度当りの材質 (materials of unit density [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]) で与えられる。この減衰係数より、遮蔽体の減衰係数 ( $1/\text{cm}$ ) は、材質の密度 ( $d_j$ ) を用いてつきの式で与えられる。

$$\mu = \sum_j d_j \mu_j \quad (2.6)$$

$j$  : 物体を構成する材質を表わすインデックス

$d_j$  : 遮蔽体の  $j$  種の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\mu_j$  : " の減衰係数 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

減衰係数が与えられないエネルギー順位については、エネルギーおよび、減衰係数共に対数を取り、補間した。

## (iii) ビルド・アップ係数

ビルド・アップ係数は Taylor 型近似で与える。

$$B = A e^{-\alpha_1 b_1} + (1-A) e^{-\alpha_2 b_2} \quad (2.7)$$

$A, \alpha_1, \alpha_2$  : 係数

$b_1$  : 減衰距離

係数  $A, \alpha_1, \alpha_2$  は 16 光子エネルギーに対して与える。また、この係数はつきの 6 つの材質に対して与え、他の物質に対しては EAN (effective atomic number) を用いて線型補間して与えられる。

### 材質

水 (Water)

アルミニウム (Aluminum)

鉄 (Iron)

すず (Tin)

タングステン (Tungsten)

鉛 (Lead)

$$EAN = \frac{\sum_j \frac{d_j Z_j}{A_j}}{\sum_j \frac{d_j}{A_j}}$$

$Z_j$  : atomic number of species  $j$  in the shield

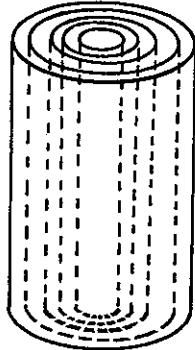
$A_j$  : atomic weight of "

$d_j$  : density of "

## (iv) 発熱量計算

高放射性廃棄物の崩壊計算で求めた崩壊エネルギーを  $\gamma$  線エネルギーとそれ以外のエネルギーとに分ける。 $\gamma$  線のエネルギーは、遮蔽計算によりガラス固化体内部に蓄積して発熱に費やされ

るエネルギーと外部へ透過するエネルギーとに分ける。ガラス固化体の発熱量は $r$ 線以外の崩壊エネルギーによる発熱量と $r$ 線による発熱量との和として求める。



この発熱量計算はガラス固化体を中心の円柱とその回りの円環ブロック（左図）に分けて行う。その各ブロックごとに遮蔽計算により各ブロックに入り出する $r$ 線エネルギー（ $ES_{OUT}^i, ES_{IN}^i, EU_{OUT}^i, EB_{OUT}^i$ 等）を算出し、各ブロックごとのエネルギー収支により発熱量を算出する（図2.7参照）。このときブロック内の発熱量は一様と考える。

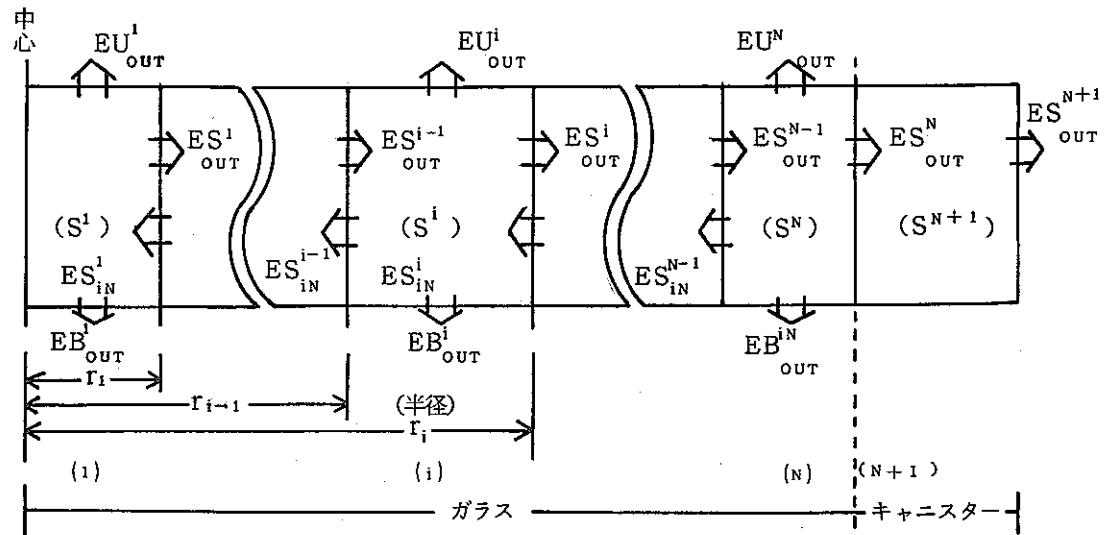


図2.7 ガラス固化体のエネルギーの収支

〔発熱量の算出式〕

$i = 1$  のとき

$$Q_i^T = \frac{1}{\pi \times r_i^2 \times SLTH} \times \left[ (ES_{IN}^1 - ES_{OUT}^1) - (EU_{OUT}^1 + EB_{OUT}^1) + Q_1 \right] \quad (2.8)$$

$2 \leq i \leq N$  のとき

$$Q_i^T = \frac{1}{\pi \times (r_i^2 - r_{i-1}^2) \times SLTH} \left[ (ES_{IN}^i - ES_{OUT}^i) - (ES_{IN}^{i-1} - ES_{OUT}^{i-1}) - \left\{ (EU_{OUT}^i + EB_{OUT}^i) - (EU_{OUT}^{i-1} + EB_{OUT}^{i-1}) \right\} + Q_i \right] \quad (2.9)$$

$i = N + 1$  のとき

$$Q_{N+1}^T = \frac{1}{\pi \times (r_{N+1}^2 - r_N^2) \times SLTH} \left[ -ES_{OUT}^{N+1} + ES_{OUT}^N - \left\{ (EU_{OUT}^{N+1} + EB_{OUT}^{N+1}) - (EU_{OUT}^N + EB_{OUT}^N) \right\} \right] \quad (2.10)$$

但し、

- $ES_{in}^i$  : 半径  $r_i$  の円柱膜を通り側面から内部へ入る  $\gamma$  線強度  
 $ES_{out}^i$  : " 外部へ透過する  $\gamma$  線強度  
 $EU_{out}^i$  : 半径  $r_i$  の円柱膜の上側から外部へ透過する  $\gamma$  線強度  
 $EB_{out}^i$  : " の下側から "  
 $Q_i$  : 円環  $S_i$  の内部で発生する崩壊熱量  
 $Q_i^T$  : " で発生する熱量

## 2.2.2 熱伝導コード

熱伝導コードはガラス固化体が円柱状であり、材質も均質であるため軸対称で行う。その基礎方程式を(1)に示す。

### (1) 基礎方程式

[軸対称熱伝導方程式]

$$\rho c r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} (K_r r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z r \frac{\partial T}{\partial z}) + r F \quad (2.11)$$

[r方向1次元の式]

$$\rho c r A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} (K_r r A \frac{\partial T}{\partial r}) + r A F \quad (2.12)$$

[z方向1次元の式]

$$\rho c r A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K_z r A \frac{\partial T}{\partial z}) + r A F$$

[ℓ方向(任意)の一次元の式]

$$\rho c r A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \ell} (K_\ell r A \frac{\partial T}{\partial \ell}) + r A F \quad (2.14)$$

境界条件

$$T = \hat{T} \quad \text{on } S_1 \quad (2.15)$$

$$K_r r \frac{\partial T}{\partial r} n_r + K_z r \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \hat{T}_n \quad \text{on } S_2 \quad (2.16)$$

$$K_r r \frac{\partial T}{\partial r} n_r + K_z r \frac{\partial T}{\partial z} n_z = r E_c (T - \hat{T}_o) + r E_n (T - \hat{T}_o)^{h+1} + r E_r (T^4 - \hat{T}_o^4) \quad \text{on } S_3 \quad (2.17)$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = S \quad : \quad \text{全境界}$$

(2.15)～(2.17)の境界条件は(2.11)に対するものである。(2.12), (2.13), (2.14)に対しても同様の境界条件式を課すことができるが、ここでは省略する。

$\rho$  : ガラス固化体の密度 ( $g/cm^3$ )

$c$  : 単位質量当りの比熱 ( $cal/g\ deg$ )

$K_r$  : r方向熱伝導係数 ( $cal/cm \times deg \times sec$ )

$K_z$  : z " " ( " " )

$F$  : 発熱量 ( $r, z$ の関数) ( $cal/cm \cdot sec$ )

$T$  : 温度 ( $^\circ C$ )

$\hat{T}$  :  $S_1$ 上の温度 ( $^\circ C$ )

$\hat{T}_n$  :  $S_2$ 上からの熱流束 ( $cal/cm \cdot sec$ )

$\hat{T}_o$  : 空気または水の温度 ( $^\circ C$ )

$E_c$  : 強制対流の係数

$E_n$  : 自然対流の係数

$h$  : 冷却材による係数 (水の場合  $h = \frac{1}{4}$ , 空気の場合  $h = \frac{1}{3}$ )

$E_r$  : 輻射係数

$n_r$  : 境界上の単位法線ベクトルの  $r$  成分

$n_z$  : " " " z "

$t$  : 時間 (sec)

$A$  : 一次元要素の幅 (cm)

以上の式は  $\theta = 1$  ラジアンについてのものである。

一次元の式 (2.12)、(2.13)、(2.14) は、  
クラック内の伝熱および薄いステンレス容器や  
保護缶のモデル化に使用できる。境界条件の(2.  
17) 式の右辺は空気または水との接触面のモ  
デル化に使われる。

基礎式の解析には複雑な形状の対象物や境界  
条件の処理が簡単である有限要素法を用いて離  
散化する。

その離散式を整理するとつぎのとおりである。

$$[CS] \{\dot{T}\} + [CD] \{T\} = \{F\} \quad (2.18)$$

但し、 $[CS]$  : 熱容量に関するマトリックス

$[CD]$  : 熱伝導に関するマトリックス

$\{F\}$  : 発熱に関するベクトル

## (2) 時間積分法について

非定常熱伝導計算の時間積分法 ( $\{\dot{T}\}$  項の扱い方) としては、MARC-CDC<sup>(7)</sup>が Crank -  
Nicholson 法、HEATRAN<sup>(5)</sup>と TAC - 2D<sup>(6)</sup>が Euler 法、NASTRAN<sup>(4)</sup>と THETA - 2D<sup>(10)</sup>が  $\beta$  法  
を用いている。

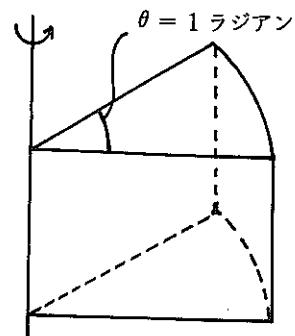
本コードにおいてはつぎの取り扱いをする。

$$\{\dot{T}\} = (\{T\}^{n+1} - \{T\}^n) / \Delta T \quad (2.19)$$

$$\{T\} = \theta \times \{T\}^{n+1} + (1 - \theta) \times \{T\}^n \quad (2.20)$$

但し、 $0 \leq \theta \leq 1$

(2.19)、(2.20) 式は (2.18) 式の  $\{T\}$ 、 $\{\dot{T}\}$  を右辺の形のものに入れかえることを意  
味する。この取り扱いによると、 $\theta = 1$  のとき完全後退差分、 $\theta = 0$  のとき完全前進差分となる。  
 $\theta = \frac{1}{2}$  のときは Crank - Nikolson 法である。このように  $\theta$  の値で時間に関する取り扱い方法を  
使いわけることができる。



(3) 材料のもつ非線型性について

ガラス固化体の材料物性値および境界条件が温度依存性をもつため、熱伝導方程式は非線型となる。このため、つぎの反復計算過程を導入して非線型を処理する。

- ① 物性値を  $T^N$  で評価し、設定する。
- ②  $T_2^{N+1}$  を求め、 $T_1^{N+1} = T_2^{N+1}$  とおく。
- ③ 物性値を  $\frac{1}{2} (T^N + T_1^{N+1})$  で評価し、設定する。
- ④  $T_2^{N+1}$  を求める。
- ⑤  $T_1^{N+1}$  と  $T_2^{N+1}$  が収束すれば  $T_1^{N+1} = T_2^{N+1}$  とおき、つぎの時刻の処理へ進む。
- ⑥ 収束しなければ  $T_1^{N+1} = T_2^{N+1}$  において③から以下をくり返す。

ここで

$T^N$  : 前の時刻の温度

$T^{N+1}$  : 求める時刻の温度

$T_1^{N+1}$  : 反復計算途中の前回の温度

$T_2^{N+1}$  : 反復計算途中の求める温度

### 2.2.3 热応力コード

热応力コードは定常解析とし、ガラス固化体を軸対称弾性体として取り扱う。これは、変位の時間的变化が非常に小さいので、加速度に比例する慣性力が無視できるからである。

#### (1) 基礎式

軸対称弾性体の基礎式は、次のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z} (r \sigma_{zz}) - \sigma_{\eta\eta} + r R_r = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z} (r \sigma_{zz}) + r R_z = 0 \quad (2.22)$$

ここで  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{rz}$ ,  $\sigma_{\eta\eta}$  は応力テンソルである。

$R_r$ ,  $R_z$  は  $r$  方向および  $z$  方向の物体力である。応力テンソルは以下のようになる。

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu) \epsilon_{rr} + \nu (\epsilon_{\eta\eta} + \epsilon_{zz}) \right\} \quad (2.23)$$

$$\sigma_{\eta\eta} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu) \epsilon_{\eta\eta} + \nu (\epsilon_{zz} + \epsilon_{rr}) \right\} \quad (2.24)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu) \epsilon_{zz} + \nu (\epsilon_{rr} + \epsilon_{\eta\eta}) \right\} \quad (2.25)$$

$$\sigma_{rz} = G \epsilon_{rz} \quad (2.26)$$

上式において  $\epsilon_{rr}$ ,  $\epsilon_{\eta\eta}$ ,  $\epsilon_{zz}$ ,  $\epsilon_{rz}$  は歪テンソルである。E,  $\nu$ , G は、それぞれヤング率、ポアソン比、剛性率である。

歪は

$$\epsilon_{rr}' = \epsilon_{rr}' - \epsilon_{rr}^0 \quad (2.27)$$

$$\epsilon_{\eta\eta}' = \epsilon_{\eta\eta}' - \epsilon_{\eta\eta}^0 \quad (2.28)$$

$$\epsilon_{zz}' = \epsilon_{zz}' - \epsilon_{zz}^0 \quad (2.29)$$

$$\epsilon_{rz}' = \epsilon_{rz}' - \epsilon_{rz}^0 \quad (2.30)$$

ここで

$$\begin{aligned} \epsilon_{rr}' &= \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \epsilon_{\eta\eta}' = \frac{u}{r}, \quad \epsilon_{zz}' = \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \epsilon_{rz}' &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \end{aligned} \quad (2.31)$$

である。また、

$$\epsilon_{rr}^0 = \epsilon_{\eta\eta}^0 = \epsilon_{zz}^0 = \alpha (T - \theta), \quad \epsilon_{rz}^0 = 0 \quad (2.32)$$

は、初期歪である。T は温度分布、 $\theta$  は初期歪のないときの温度である。u, w は  $r$ ,  $z$  方向の変位である。 $\alpha$  は線膨張係数である。

なお座標  $\eta$  は図 2.8 のとおりである。

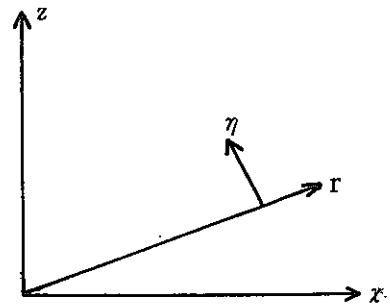


図 2.8

境界条件は、次式のとおりである。

(i) 自由境界

$$\sigma_{rr} \frac{dz}{ds} - \sigma_{rz} \frac{dr}{ds} - \hat{R}_r = 0 \quad (2.33)$$

$$\sigma_{rz} \frac{dz}{ds} - \sigma_{zz} \frac{dr}{ds} - \hat{R}_z = 0 \quad (2.34)$$

ここで、 $s$  は上式の条件の与えられた境界に沿った方向である。 $\hat{R}_r$ ,  $\hat{R}_z$  は、 $r$ ,  $z$  方向の表面力である。

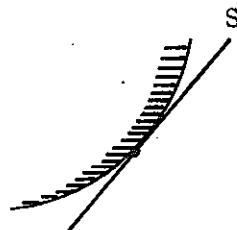
(ii) 固定境界

$$u = \bar{u}, w = \bar{w} \quad (2.35)$$

$\bar{u}$ ,  $\bar{w}$  は  $r$ ,  $z$  方向の強制変位である。

(iii) 滑動境界

右図において構造物は  $S$  方向には自由であるが、 $S$  に直角方向には動けない。



## 2.3 コードの内容と特徴

### 2.3.1 発熱コード

ORIGENコード、ORHLLWコードおよびSHIELDコードの順に説明する。このうち、ORIGENコードについてはその概要と特徴を述べ、詳細は文献 ORNL-4628 を参照とする。

#### (1) ORIGEN コード

ORIGENは、種々の問題についての消滅コードの一つであり、任意の関連で多くの同位体について、放射性物質の生成および崩壊の方程式を解くものである。このコードは、定係数の連立線型常微分方程式の大きな体系を解くのに matrix exponential 法を使用する。この手法の一般的性質として、複雑な崩壊および変形スキームの取扱いを可能にする。

このORIGENコードは、核データの広範囲のライブラリをもち、それには半減期、崩壊スキーム、中性子吸収断面積、核分裂収量、崩壊エネルギー、多群光子放出データを含んでいる。

ORIGENは、軽水炉、液体金属冷却高速増殖炉、溶融塩炉、核分裂生成物などの放射能の計算に使用してきた。また、matrix exponential法の進歩により、非同次系の方程式が解けるようになり、ORIGENが、再処理プラント、廃棄物処理作業、およびその周辺においての放射能の蓄積の計算に使用されている。

ガラス固化体の発熱量計算では、このORIGENコードを使用して、原子炉の燃焼、冷却および f.p. の崩壊計算を行い、f.p. の核種の存在量崩壊熱量、および  $\gamma$  線スペクトルを計算し、その結果を M/T 出力して、ORHLLW コードへと引き継ぐ。

#### (2) ORHLLWコードとSHIELD コードの内容

##### (i) ORHLLW コード

ORHLLW コードについて図 2.9 のフローに従って説明する。

###### ① データの入力

おもなカード入力データは、廃液処理において取り徐かれる核種の情報、および混入物・制御材・添加物の情報である。

###### ② 磁気テープ入力

ORIGEN計算結果である f.p. およびアクチノイドの核種量、熱出力および  $\gamma$  線スペクトルを磁気テープより入力する。

###### ③ 高放射性廃液の組成、熱出力および $\gamma$ 線スペクトルを計算する。

###### ④ 仮焼体の計算

仮焼体の組成、熱出力および  $\gamma$  線スペクトルを計算する。

###### ⑤ ガラス固化体の計算

ガラス固化体の熱出力および  $\gamma$  線スペクトルを仮焼体の割合によって計算する。

###### ⑥ 計算結果の出力

以上の結果をリストに出力する。また、ガラス固化体の熱出力および  $\gamma$  線スペクトルを磁気テープへ出力して、SHIELDコードへと引き継ぐ。

## (ii) SHIELD コード

SHIELDコードについて図2.10のフローに従って説明する。

### ① データ入力

おもなカード入力データは減衰係数、ビルド・アップ係数、ガラス固化体の構成元素と材料の単位体積当たりの重量、およびブロック分割の情報である。

### ② 減衰係数のセット

構成元素および材料体積当たりの重量よりガラス固化体の減衰係数を求める。

### ③ ビルド・アップ係数のセット

ガラス固化体の元素構成よりEAN（P 12 参照）を計算し、線型補間によりビルド・アップ係数を求める。

### ④ 磁気テープ入力

磁気テープよりガラス固化体の崩壊熱および $\gamma$ 線スペクトルを入力する。

### ⑤ ガラス固化体側面の遮蔽計算

放射線源であるガラス固化体の形状（円柱体）を考慮して減衰係数、ビルド・アップ係数を用いてガラス固化体側面より外部へ透過する $\gamma$ 線エネルギーを数値積分により求める。

### ⑥ ガラス固化体上下面の遮蔽計算

⑤と同様にガラス固化体の上下面より外部へ透過する $\gamma$ 線エネルギーを数値積分で求める。

### ⑦ 発熱量計算

ガラス固化体の $\gamma$ 線遮蔽計算結果を用いて発熱量計算を行う。

### ⑧ 計算結果の出力

ガラス固化体の発熱量をリストと磁気テープに出力して熱伝導計算へ引き継ぐ。

## (3) 発熱コードの特徴

- ① ORIGENコードを組み込み原子炉の燃焼、冷却およびf.p.の崩壊計算から高放射性廃液・仮焼体・ガラス固化体の発熱量算出までガラス固化体の発熱コードは一貫したコードとなっている。
- ②  $\gamma$ 線の遮蔽計算を行い、発熱量計算において外部へ透過する $\gamma$ 線エネルギーを除いている。
- ③ 高放射性廃棄物のガラス固化処理中の混入物、再処理腐蝕生成物、中性子毒物、および処理中の添加物を考慮できる。
- ④ 遮蔽計算においてガラス固化体を円柱体として放射線源の幾何学的形状を考慮する。また、ガラス固化体を円環状にブロック化して均一発熱だけでなくブロックごとの発熱量が計算できる。

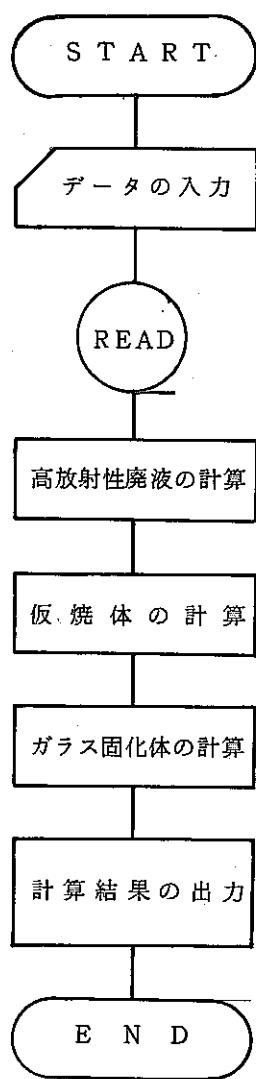


図2.9 ORHLLW コード・フロー

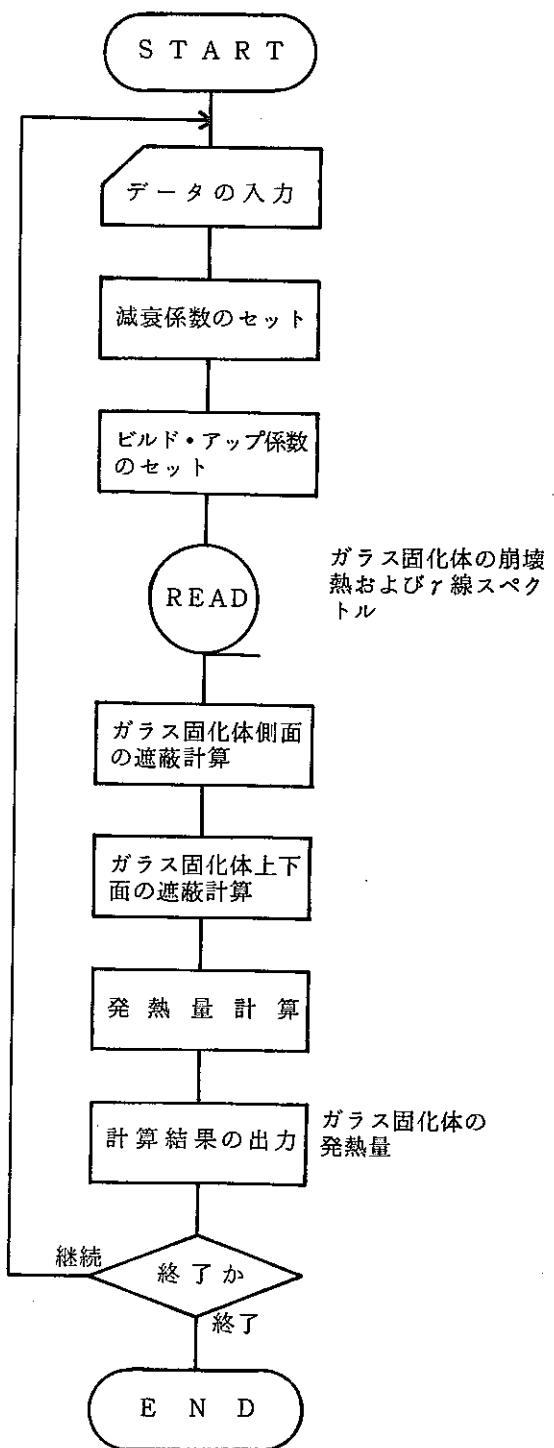


図 2.10 SHIELD コード・フロー

### 2.3.2 热伝導コード

热伝導コードの内容と特徴を(1)と(2)に示し、その計算を行うときのガラス固化体の要素分割とその取り扱い方法を(3)に示す。

#### (1) コードの内容

热伝導コードは図2.11のフローに従い進められる。このフローの中で主なものについて説明する。

##### ① データの入力

主なカード入力データはラン・コントロールデータ、ガラス固化体の構造データ（節点座標データ、要素データ）、各種の物性値、および境界条件データである。

##### ② 連立方程式解法用インデックスの作成

ガラス固化体の構造データより、離散化した熱伝導式を解くときの大型行列を処理するための前準備として、行列の消去順番を示すインデックスを作成する。

##### ③ 热伝導方程式の離散式より連立一次方程式の作成

前の時刻の温度を用いて物性値を設定し、熱伝導方程式の離散式より連立一次方程式を構築する。②で作成したインデックスに従いマトリックスの前進消去を行う。

##### ④ 連立一次方程式の解法

③で作成した連立一次方程式を②で作成したインデックスに従い後退代入しながら解く。

##### ⑤ 解の収束判定

求めた解の温度と前回求めた温度との差を計算し、解の収束判定を行う。

#### (2) コードの特徴

① ガラス固化体材料の温度依存性および発熱量の時間変化に対応できる。即ち密度、熱容量、熱伝導係数などの物性値データは温度変化を考慮できる。また、発熱量、固定温度および強制熱流束データは時間変化を考慮できる。

② 材料の温度依存性に伴う熱伝導式の非線型に対しては、反復計算を行ない処理をしている。

③ 離散化した熱伝導式を解くときの大型行列の処理は直接解法のウェーブ・フロント法を用いているため計算速度が早い。

④ 有限要素法を用いているため、二次元要素（三角形、四角形）と一次元要素との結合が容易にできるため、一次元要素による輻射および対流の組み込みが容易である。

⑤ 計算結果の温度分布はプロッターにより図示できる。

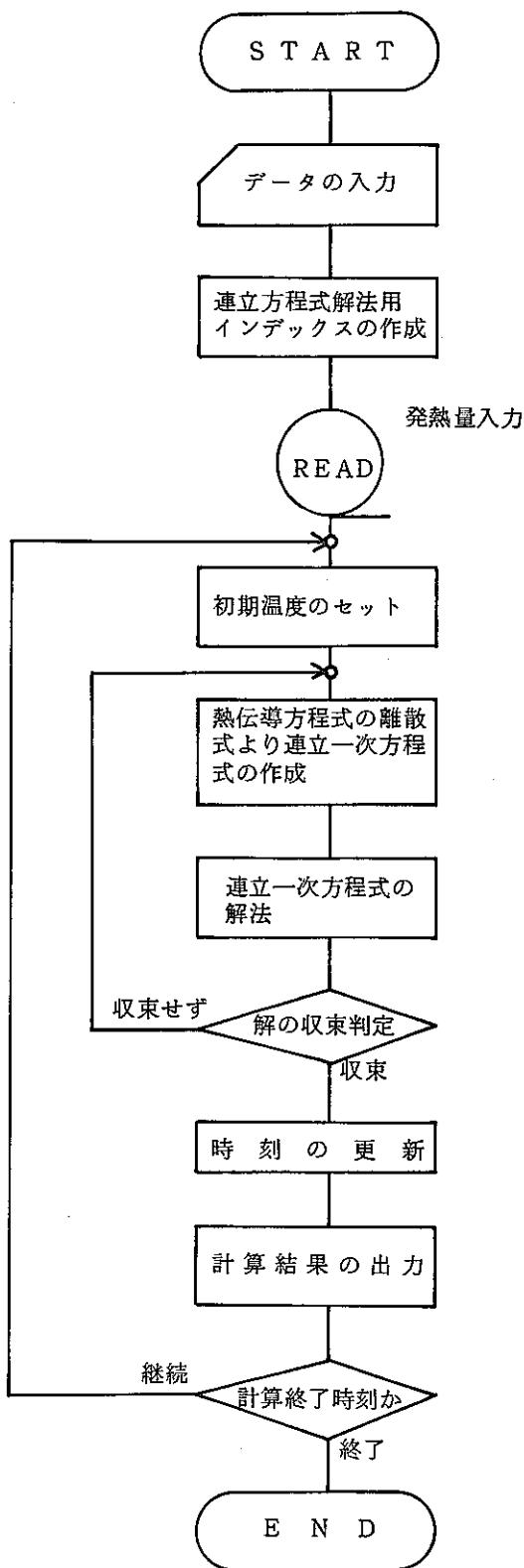


図 2.11 热伝導コード・フロー

(3) ガラス固化体の要素分割

ガラス固化体を図 2.12 のように要素分割してコードで使用する 4 種類の要素を説明する。

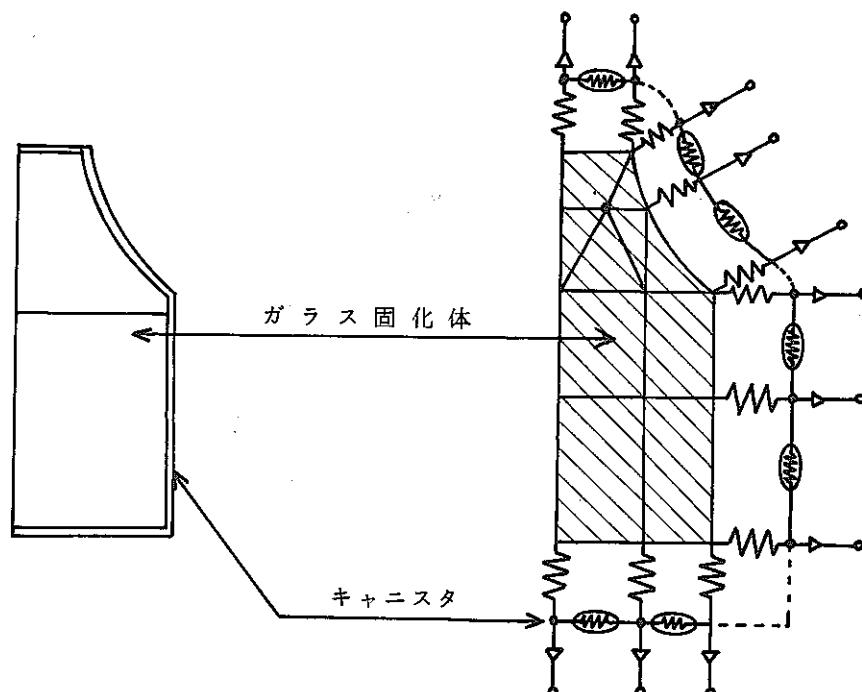


図 2.12 要素分割の一例

① は、二次元方程式 (2.11) を適用する要素で三角形要素と四角形要素を表わしている。

② は、式(2.12)、式(2.13)、式(2.14)の一次元方程式を適用する要素である。a, b 節点が水平方向なら r 方向一次元の式 (2.12)、もし a, b 節点が垂直ならば Z 方向一次元の式 (2.13) である。一般的な方向をむいているときは、(2.14) 式である。

③ は、a node と b node に次式

$$q_{ab} = re (T_a - T_b) \text{ 但し } e: \text{熱伝達係数}$$

を適用したものである。 $q_{ab}$  は a node から b node へ向かう熱流速である。この式はこの熱流速が  $T_a$  と  $T_b$  の差に比例することを示している。

④ は、境界条件を処理することを意味する。空気または、水との接触面のモデル化には (2.17) 式が適用できる。

以上の①～④で述べた要素が有限要素法ではどのように接続されていても同一のコードで処理できる。

### 2.3.3 热応力コード

#### (1) コードの内容

热応力コードは図2.13のフローに従い進められる。このフローの中で主なものについて説明する。

##### ① データの入力

主なカード入力データはラン・コントロールデータ、ガラス固化体の構造データ、各種の物性値、強制変位、および荷重データである。

##### ② 热応力の解析対象領域の決定

転位点温度より固相、液相の判定を行い、固相を热応力の解析対象領域として設定する。

##### ③ 連立方程式用インデックスの作成

ガラス固化体の構造データより、離散式を解くときの大型行列を処理する消去順番を示すインデックスを作成する。

##### ④ 热応力方程式の離散式より連立一次方程式の作成

計算時の温度を用いて物性値を設定し、热応力方程式の離散式より連立一次方程式を構築する。このとき③で作成したインデックスに従いマトリックスの前進消去も行う。

##### ⑤ 連立一次方程式の解法

③で作成した連立一次方程式を②で作成したインデックスに従い後退代入しながら解く。

##### ⑥ 変位より応力を求める。

④で求めた各節点の変位より各要素の応力および主応力を求める。

#### (2) コードの特徴

① ガラス固化体材料の温度依存性に対処できる。即ち、ヤング率、ポアソン比、線膨張係数などの物性値は温度変化データを与えられる。

② 離散化した熱応力式を解くときの大型行列の処理は直接解法のウェーブ・フロント法を用いているため計算速度が速い。

③ コードで転位温度により液相、固相の判定をして、固相の部分の熱応力計算を行っている。

④ 計算結果の変位図、主応力図はプロッターにより図示できる。

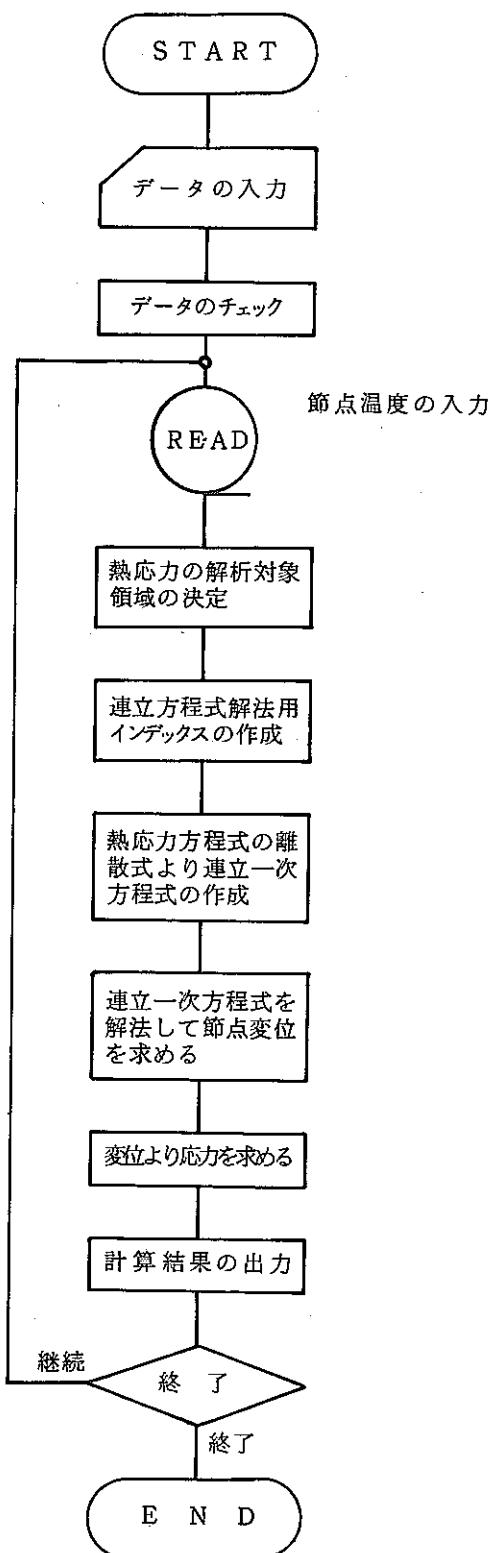


図 2.13 热応力コード・フロー

### 2.3.4 温度変化に伴なう物性定数の変動

熱伝導コードおよび熱応力コードを通して、温度変化に伴なう物性定数の変動は、すべてデータで与える。たとえば、物理量  $\phi$  は図 2.14 のような変化を示したとする。

このとき、次のデータを準備する。

(温 度)	(物理量)
$T = T_1$	$\phi = \phi_1$
$T_2$	$\phi_2$
$\vdots$	$\vdots$
$T_N$	$\phi_N$
$T_{N+1}$	$\phi_{N+1}$

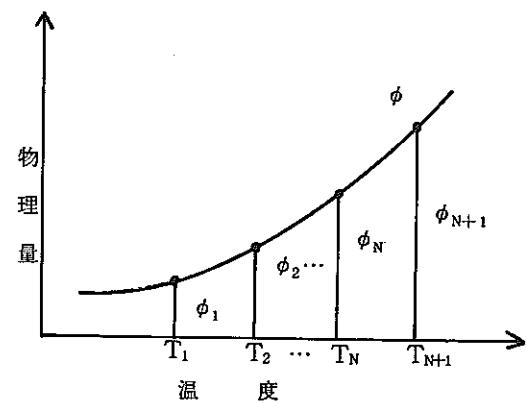


図 2.14 物理量の温度変化

もし温度  $T'$  が  $T_N \leq T' \leq T_{N+1}$  のときには、 $T = T'$  のときの  $\phi$  の値  $\phi'$  は  $T_N$  と  $T_{N+1}$  のときの値  $\phi_N$ ,  $\phi_{N+1}$  から線形補間で求める。

温度変化する物性定数のデータは、すべて、この様な離散化されたデータテーブルとして与える。このデータは、カード入力、またはテープ入力となる。

### **3. ガラス固化体について**

### 3. ガラス固化体について

#### 3.1 ガラス固化体について

本研究で使用するガラスは、 $B_2O_3$  を 10<sup>WT</sup> % 程度含むボロシリケイトガラスである。その組成は、 $SiO_2$ 、 $B_2O_3$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$ 、 $ZnO$  等である。組成比は国化技術開発各國でまちまちである。また廃棄物含有量はいずれも 30<sup>WT</sup> % 程度までである。

ここではガラス組成の例として、動燃<sup>\*</sup> Battelle (米国) で考えられているガラスの組成を表 3.1 に示す。

(\*注) 動力炉・核燃料開発事業団

表 3.1 高レベル廃棄物固化用ガラスの組成とその性質

出所：原子力工業（1978）24, 7, p 73 および BNWL - 2252

成 分	動燃案ガラス	Battelle 72 - 68	76 - 68	76 - 183	76 - 375
$SiO_2$	45.33	27.3 <sup>WT</sup> %	40.0	35.5	35.0
$B_2O_3$	14.45	11.1	9.5	9.5	13.0
$Na_2O$	1.03	4.0	7.5	8.0	5.0
$K_2O$	2.06	4.0		2.0	4.0
$ZnO$	2.06	21.3	5.0		5.0
$CaO$	2.06	1.5	2.0	2.0	2.0
$MgO$		1.5	.....	.....	.....
$SrO$		1.5	.....	.....	.....
$BaO$		1.5	.....	.....	.....
$TiO_2$		.....	3.0	6.0	3.0
$Al_2O_3$	3.51	.....	.....	1.0	.....
$CuO$		.....	.....	3.0	.....
$Li_2O$	3.09	.....	.....	.....	.....
Waste	26.63	26.3	33.0	33.0	33.0
性質					
密 度 ( $g/cm^3$ )	2.75	3.4	3.0	3.1	3.1
線膨張係数 ( $10^{-7}/^{\circ}C$ )	98	79 (30~33°C) 100 (330~500°C)	90 (30~400°C)	93 (30~400°C)	
比 熱 ( $cal/g^{\circ}C$ )		0.16~0.185			
転 移 点 (°C)	490	512	513		

### 3.2 物性値について

熱的挙動解析モデルで使用するガラスの物性項目は表3.2のとおりである。このうち剛性率Gは関係式  $E = 2G(1-\nu)$  より、E、 $\nu$ を用いて算出できる

表3.2 热的挙動解析モデルで使用するガラスの物性項目

物理項目	記号	単位
密度	$\rho$	$g/cm^3$
比熱	C	$cal/g \cdot ^\circ C$
熱伝導係数	K	$cal/cm \cdot ^\circ C \cdot sec$
線膨張係数	$\alpha$	$1/\text{ }^\circ C$
ヤング率	E	$kg/mm^2$
ポアソン比	$\nu$	無次元
剛性率	G	$kg/mm^2$
破壊強度	$T\nu$	$kg/mm^2$

ガラスの物性値は、その組成、温度、熱履歴によりかなりの変動がある。また、ポアソン比、破壊強度、あるいは各物性値の温度変化、熱履歴について記載してある文献は少ない。ガラスの物性値を知る方法として、加成律による算出法があるが、これはボロシリケイトガラス、特に本研究で用いるWasteを含むボロシリケイトガラスについての加成性係数の資料は少ない。

このように、本研究で用いるガラスの物性値を文献により調査することは難かしいが、現在までに調査した結果を各物性項目ごとに以下に述べる。また、そのまとめを表3.3に示す。

なお、以下で“動燃案ガラスと類似組成ガラス”とあるのは、文献調査したガラスのうちで、そのガラス成分の中で、特に  $SiO_2$ 、 $B_2O_3$ 、Waste の含有量が、表3.1に示す動燃案ガラスと類似しているガラスを示す。

表 3.3 ガラスの物性値の既存文献による調査結果

物性項目	物性値の範囲	温度による物性値の変化	備考
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.64 ~ 3.1 (g/cm <sup>3</sup> ) (動燃案ガラスと類似組成ガラス)	$1/\rho_t = \{1 + \beta(t - t_0)\}/\rho_0$ $\beta$ : 体積膨張率	• Waste, ZnOなど重い成分の影響が大きい
比熱 (cal/g°C)	0.16 ~ 0.238 (cal/g°C) (ボロシリケイトガラス)	SharpとGintherの式 $C_t = (0.00146at^2 + 2at + C_0)/(0.00146t + 1)^2$ 適用範囲 0 ~ 1300°C	
熱伝導係数 (cal/cm·sec·°C)	$2.46 \times 10^{-3}$ ~ $2.60 \times 10^{-3}$ (cal/cm·sec·°C) (動燃案ガラスと類似組成ガラス)	• 温度上昇に伴い増加する	
線膨張係数 (1/°C)	$0.79 \times 10^{-5}$ ~ $1.1 \times 10^{-5}$ (1/°C) (動燃案ガラスと類似組成ガラス)	• 除冷ガラスの場合は転移点 $T_g$ まで変化なし	
ヤング率 (kg/mm <sup>2</sup> )	7984 ~ 8464 (kg/mm <sup>2</sup> ) (HLW用ガラス: 大工試)	• ガラスの種類により温度依存性は大きく異なる	
ポアソン比	0.20 (動燃案ガラスと類似組成ガラスの加成律よりの試算値)	• ボロシリケイトガラスについての資料は見出しえていない	• 石英ガラス等では温度上昇によって増加する。
破壊張度 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ: 6.76, 8.16 (kg/mm <sup>2</sup> ) 圧縮強さ: 91.6, 96.3 (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> を少し含むガラス)	• 温度上昇とともに減少する	

### 3.2.1 密 度

動燃案ガラスと類似組成ガラスの密度の値を表3.4に示す。表3.4によると密度の値は2.64～3.1 g/cm<sup>3</sup>の範囲にある。表3.4で Battelle における値（そのガラスの組成は表3.1に示す）が大きくなっているのは、ZnO、TiO<sub>2</sub>、Waste など、重い成分の比率が大きいためである。

密度の温度による変化は膨張係数を用いて次式で表わされる。

$$\frac{1}{\rho_t} = \frac{1}{\rho_0} \{ 1 + \beta (t - t_0) \}$$

$\rho_t$  : 温度  $t$  における密度

$\rho_0$  : 温度  $t_0$  における密度

$\beta$  : 体積膨張係数 ( $\beta = 3\alpha$ )

$\alpha$  : 線膨張係数

表3.4 文献による密度の値（その1）

出 所 (文献番号)	動 燃 (1)	* <sup>1</sup> 大工試 (2)	大工試 (3)	大工試 (3)	大工試 (4)	大工試 (4)
密度 組成 (g/g)	2.75	2.695	2.64	2.87	2.74	2.73
SiO <sub>2</sub>	45.33 <sup>wt%</sup>	35	36.0	43.5	40.8	46.0
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.45	15	15.8	19.1	15.3	12.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.51	10	7.2	8.7	5.3	6.1
Na <sub>2</sub> O	1.03	25	14.4		4.8	2.9
K <sub>2</sub> O	2.06		9.4			3.0
Li <sub>2</sub> O	3.09				5.4	2.8
CaO	2.06	5	12.9	15.7	5.1	
ZnO	2.06					27.2
Waste	26.63				23.3	
その他		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		

(注) \* 1 大工試：大阪工業試験場

文献による密度の値（その2）

出 所 (文献番号)	* <sup>1</sup> 原 研 (5)	Battelle (6)	Battelle (6)	Battelle (6)	* <sup>2</sup> K F K (7)
組成 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	3.0	3.1	3.1	2.74
SiO <sub>2</sub>	44.2	40.0	35.5	35.0	39.6
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.8	9.5	9.5	13.0	10.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			1.0		1.1
Na <sub>2</sub> O	10.1	7.5	8.0	5.0	21.6
K <sub>2</sub> O			2.0	4.0	
Li <sub>2</sub> O					
CaO		2.0	2.0	2.0	2.2
ZnO	22.8			5.0	
Waste		33.0	33.0	33.0	16.6
その他		TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub> , CuO		TiO <sub>2</sub>

注 \*<sup>1</sup> 原 研：日本原子力研究所

\*<sup>2</sup> K F K : Kernforschungszentrum Karlsruhe

### 3.2.2 比 熱

動熱案ガラスと類似組成のガラスの比熱は今まで見出していない。そこで表 3.5 に今まで調べた比熱の値を示す。いずれのガラスも廃棄物固化用のガラスであるが、ZnO、Waste の含

表 3.5 文献による比熱の値

出 所 (文献番号)	大 工 試 (11)	Battelle (6)	Battelle (8)	Battelle (9)	Battelle (10)
組成 比熱 cal/ g·°C	0.21 ~ 0.22	0.16 ~ 0.185	0.17 ~ 0.19	0.202	0.238
Si O <sub>2</sub>	64.3 ~ 81.4	27.3	組成不明	28.7	22.4
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.8 ~ 15.0	11.1		11.3	25.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.6 ~ 14.0				
Na <sub>2</sub> O	3.5 ~ 6.6	4.0		4.1	3.5
K <sub>2</sub> O		4.0		4.1	3.5
Li <sub>2</sub> O					
Ca O		1.5		1.5	1.2
Zn O		21.3		21.7	10.6
Waste		26.3		25	30
その他		MgO, SrO		MgO, SrO	MgO, SrO

有量が動熱案ガラスとかなり異なっている。表 3.5 によると比熱は 0.16 ~ 0.238 (cal / g°C) の範囲にある。

比熱の温度変化は Sharp と Ginther の実験式

$$C_t = \frac{0.00146 at^2 + 2 at + Co}{(0.00146 t + 1)^2} \quad (\text{文献 } 12)$$

が知られている。上式の適用温度範囲は 0 ~ 1300°C であり、係数 a、Co は表 3.6 に示す値に各成分の重量比を乗じた値の和である。

表 3.6 平均比熱計算用因子 (Sharp および Ginther)

成 分 酸 化 物	a-因子	c <sub>o</sub> -因子
SiO <sub>2</sub>	0.000468	0.1657
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.000453	0.1765
CaO	0.000410	0.1709
MgO	0.000514	0.2142
Na <sub>2</sub> O	0.000829	0.2229
K <sub>2</sub> O	0.000335	0.2019
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.000635	0.198
SO <sub>3</sub>	0.00083	0.189

文献12

### 3.2.3 热伝導係数

動燃案ガラスと類似組成ガラスの熱伝導係数を表 3.7 に示す。表 3.7 によると熱伝導係数の値は  $2.46 \times 10^{-3} \sim 2.60 \times 10^{-3}$  (cal / sec · cm · °C) である。

熱伝導係数の温度による変化は図 3.1 のようである。図 3.1 にみるように熱伝導係数は温度上昇とともに大きくなる。

表 3.7 文献による熱伝導係数の値

出 所 (文献番号)	大 工 試 (4)				
熱伝導係数 組成 cal/sec cm°C	2.48	2.51	2.51	2.46	2.60
Si O <sub>2</sub>	38.1	40.8	43.1	46.0	59.3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.3	15.3	11.2	12.0	9.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.0	5.3	13.6	6.1	5.3
Na <sub>2</sub> O	4.5	4.8	2.7	2.9	1.4
K <sub>2</sub> O					
Li <sub>2</sub> O	5.0	5.4	2.8	3.0	
CaO	4.8	5.1	2.6	2.8	
ZnO					
Waste	21.3	23.3	23.9	27.2	23.3
その他の					

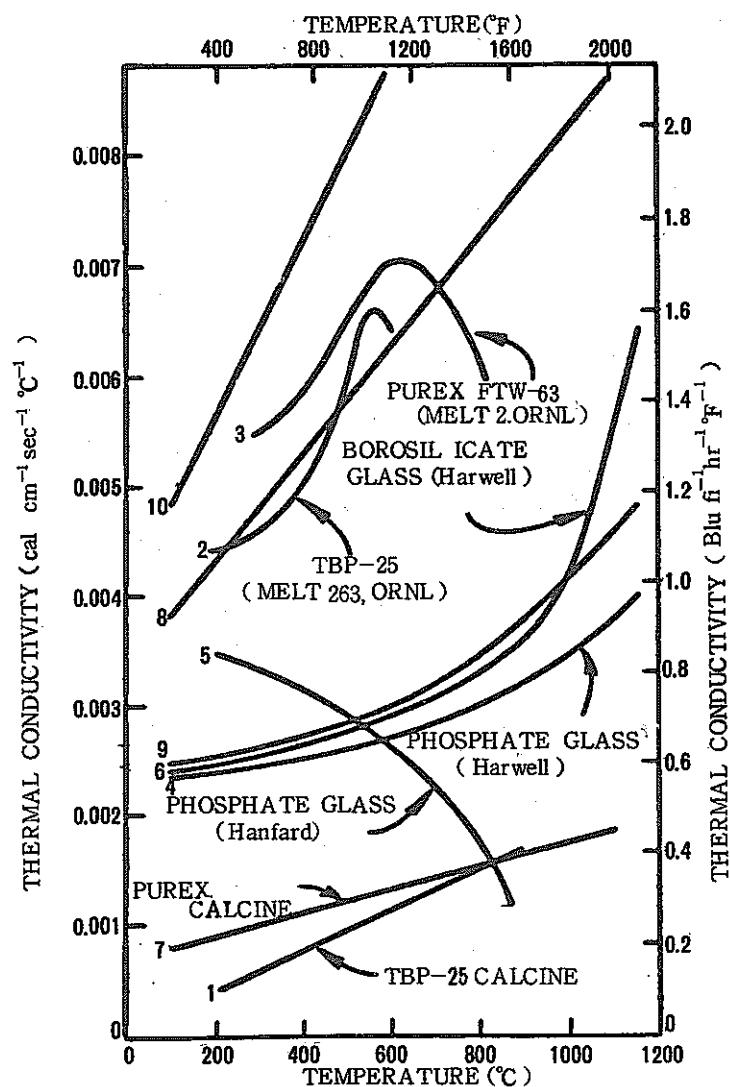


図 3.1. Thermal Conductivities of Various Glasses, Calcines, and Dispersions as a Function of Temperature. (1. TBP-25 calcine;<sup>32</sup> 2. TBP-25 melt;<sup>32</sup> 3. FTW-63 Purex melt;<sup>32</sup> 4. Harwell phosphate glass;<sup>33</sup> 5. Hanford phosphate glass;<sup>34</sup> 6. Harwell mix 293 borosilicate glass;<sup>33</sup> 7. Purex calcine;<sup>32</sup> 8. values used in this report for "TBP-25/Purex" phosphate glass; 9. used in test calculations; 10. a hypothetical dispersion; — measured value for a dispersion.<sup>31</sup>)

文献13

### 3.2.4 热膨胀係数

動燃素ガラスと類似組成ガラスの热膨胀係数の値を表3.8に示す。表3.8によると热膨胀係数の値は  $0.79 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-5}$  ( $1/{}^{\circ}\text{C}$ ) である。

热膨胀係数の温度による変化を図3.2に示す。ただし図3.2において各温度における傾きがその温度における热膨胀係数を示す。

一般にガラスの热膨胀係数はその热履歴により異なるが、徐冷ガラスの場合は転移点  $T_g$  までは大きな変化はない(図3.3参照)。

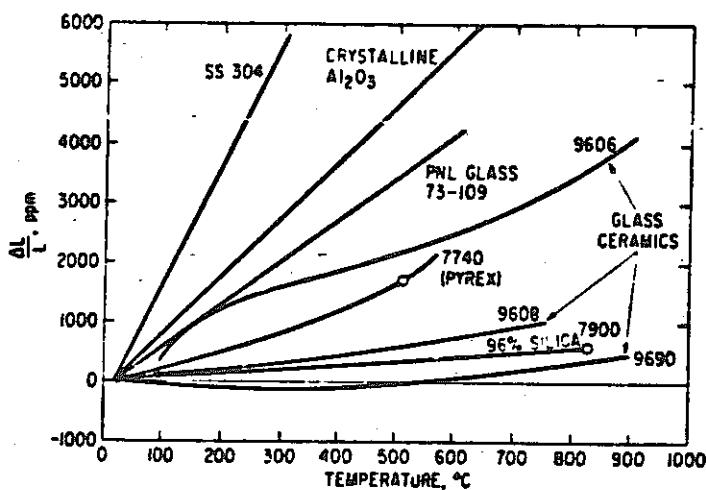


図3.2 热膨胀係数の温度依存性

文献(14)

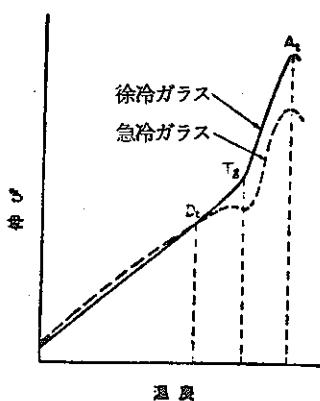


図3.3 ガラスの热膨胀特性曲線

文献(12)

表 3.8 文献による熱膨張係数の値

出 所 (文献番号)	動 燃 (1)	大工試 (1)	大工試 (4)	Battelle (6)	Battelle (6)	Battelle (6)
熱膨張係数 (1/C) 組成	$0.98 \times 10^{-5}$	$0.93 \times 10^{-5}$	$0.97 \times 10^{-5}$	$0.79 \times 10^{-5}$ (30~330°C)	$1.0 \times 1.0^{-5}$ (330~500°C)	$0.9 \times 10^{-5}$ (30~400°C)
SiO <sub>2</sub>	45.33	53.6	46.0	27.3	27.3	40.0
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.45	19.5	12.0	11.1	11.1	9.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.51	18.2	6.1			
Na <sub>2</sub> O	1.03	8.6	2.9	4.0	4.0	7.5
K <sub>2</sub> O	2.06			4.0	4.0	
Li <sub>2</sub> O	3.09		3.0			
CaO	2.06		2.8	1.5	1.5	2.0
ZnO	2.06			21.3	21.3	5.0
Waste	26.63		27.2	26.3	26.3	33.0
その他				MgO, SrO	MgO, SrO	TiO

出 所 (文献番号)	Battelle (6)	* <sup>1</sup> H M I (15)
熱膨張係数 (1/C) 組成	$0.93 \times 10^{-5}$ (30~400°C)	$0.9 \sim 1.1 \times 10^{-5}$
SiO <sub>2</sub>	35.5	32 ~ 44
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.5	5 ~ 8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	10 ~ 17
Na <sub>2</sub> O	8.0	2 ~ 6
K <sub>2</sub> O	2.0	
Li <sub>2</sub> O		0 ~ 2
CaO	2.0	6 ~ 10
ZnO		4 ~ 6
Waste	33.0	
その他	TiO, CuO	BaO, TiO

(注) \* 1 HMI: Hahn - Meitner - Institut

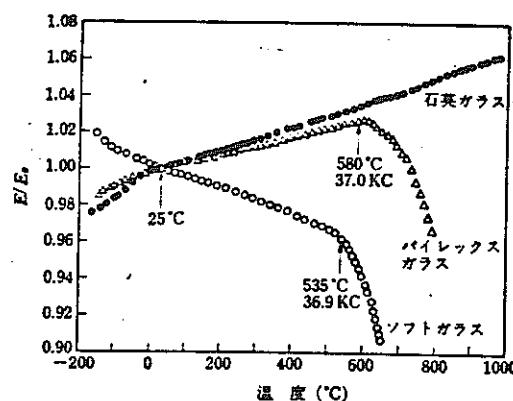
### 3.2.5 ヤング率

本研究用のガラスのヤング率は大阪工業試験所で、4種のガラスについて測定している（表3.9参照）。

表3.9 文献によるヤング率の値

出 所 (文献番号)	大 工 試 (4)	大 工 試 (4)	大 工 試 (4)	大 工 試 (4)
ヤング率 (kg/mm <sup>2</sup> ) 組成	8464	7984	8148	8127
SiO <sub>2</sub>	38.1	40.8	43.1	46.0
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.3	15.3	11.2	12.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.0	5.3	13.6	6.1
Na <sub>2</sub> O	4.5	4.8	2.7	2.9
K <sub>2</sub> O				
Li <sub>2</sub> O	5.0	5.4	2.8	3.0
CaO	4.8	5.1	2.6	2.8
ZnO				
Waste	21.3	23.3	23.9	27.2
その他				

ヤング率の温度による変化は、パイラックスガラス、ソフトガラス、石英ガラスについて図3.4に示す。



パイラックスガラス SiO<sub>2</sub> 80.6, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 11.9, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.0, Na<sub>2</sub>O 4.4, 他 1.1.  
ソフトガラス SiO<sub>2</sub> 69, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3, Na<sub>2</sub>O 14, K<sub>2</sub>O 5, CaO 8.

図3.4 ヤング率の温度依存性

(25°C基準) 文献(16)

### 3.2.6 ポアソン比

本研究のガラスのポアソン比を示す文献は、現在まで見出していないので、加成律より試算してみた。加成律は次式で示され、加成性係数は表 3.10 に示す。

$$\nu = \sum_i p_i \mu_i$$

$\nu$  : ポアソン

$p_i$ : 各成分の重量百分率

$\mu_i$ : 加成性係数

表 3.10 ポアソン比を計算するための係数  $\mu_i$

酸化物	係数	酸化物	係数
$P_2O_5$	0.002147	MgO	0.002600
$SiO_2$	0.001533	ZnO	0.003460
$B_2O_3$	0.002840	PbO	0.002760
$Al_2O_3$	0.001750	BaO	0.003550
$Mn_2O_3$	0.002500	Na <sub>2</sub> O	0.004310
$CaO$	0.004163	K <sub>2</sub> O	0.003969

文献 (17)

Waste の酸化物に対する加成性係数がないため Waste を除いたガラスを対象とする。このときのガラスの組成を [ $SiO_2$  : 66 wt%、 $B_2O_3$  : 21%、 $Al_2O_3$  : 5%、 $Na_2O$  : 2%、 $K_2O$  : 3%、 $CaO$  : 3%] とすると、ポアソン比は 0.20 となる。

ポアソン比の温度による変化は、パイレックスガラス、石英ガラス、バイコールガラスについて図 3.5 に示す。

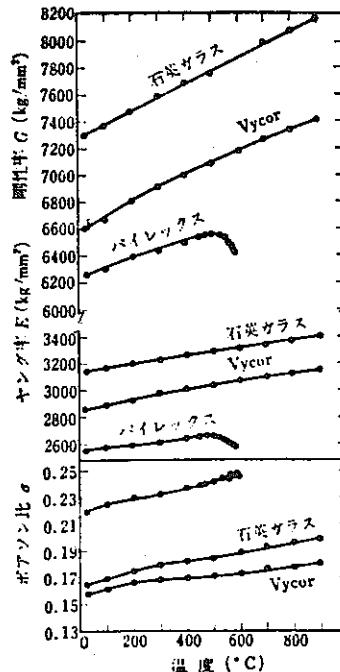


図 3.5 石英ガラス、Vycor ガラスおよびパイレックスガラスの弾性係数の温度依存性

文献 (16)

### 3.2.7 破壊強度

本研究用のガラスの破壊強度を示す文献は現在まで見出していない。そこで表3.11より動燃案ガラスの組成に近い組成のガラスとして、ガラス番号7,9を選ぶと次のようになる。

圧縮強さ : 96.3, 91.6 kg / mm<sup>2</sup> (実験値)

引張強さ : 8.16, 6.76 " (実験値)

破壊強度の温度による変化については図3.6に示すように複雑である。

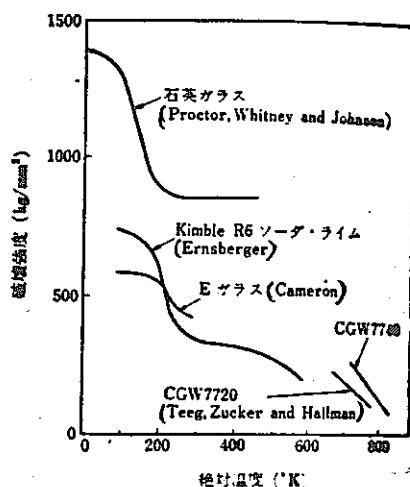


図3.6 破壊強度の温度依存性 文献(16)

表3.11 圧縮強さと引張強さの実験値と計算値（ヴィンケルマンとショットに基づく）の比較

ガラス番号	ガラスの組成, wt %											破壊強さ, kg / mm <sup>2</sup>				
												圧縮		引張		
	As <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	BaO	ZnO	PbO	Na <sub>2</sub> O	実験値	計算値	実験値	計算値	
1	-	20.0	--	-	-	-	-	-	80.0	-	-	60.6	63.0	3.53	3.80	
2	0.2	-	69.1	18.0	-	-	-	4.7	-	-	8.0	-	81.2	87.9	5.76	5.79
3	0.25	70.6	-	-	-	-	-	-	12.0	-	17.0	-	97.8	95.7	8.51	8.53
4	-	73.8	-	3.5	0.2	-	7.0	-	5.0	-	10.5	-	112.9	105.2	8.35	9.19
5	0.3	67.9	-	1.0	0.1	-	-	-	5.8	8.1	16.8	-	99.0	102.3	6.79	7.38
6	0.2	41.0	-	-	0.1	-	-	-	-	51.7	-	7.0	84.3	75.7	5.39	5.16
7	-	70.2	12.0	4.5	-	3.0	-	-	-	-	10.3	-	96.3	-	8.16	7.56
8	0.2	54.8	-	-	-	-	-	-	17.0	-	-	28.2	73.9	79.2	8.32	7.79
9	0.4	64.6	2.7	-	0.1	-	-	10.2	2.0	-	5.0	15.0	91.6	90.7	6.76	7.06

文献(17)

### 3.3 境界条件等について

#### 3.3.1 境界条件について

熱伝導計算におけるキャニスタ外側の境界条件としては、輻射、空気の自然対流、及び水の自然対流による伝熱方法を考えた。

輻射によって伝わる単位面積あたりの熱量は、

$$q = Er (T^4 - T_0^4) \quad (Kcal / sec \cdot m^2)$$

$$\text{ただし } Er = \sigma \epsilon$$

である。ここで  $Er$  は輻射の定数、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $\sigma = 4.88 \times 10^{-8} / 3600 Kcal / m^2 \cdot sec \cdot K^4$ )、 $\epsilon$  はキャニスタ表面の輻射率、 $T$  はキャニスタの表面温度（絶対温度）、 $T_0$  はキャニスタの周囲の空気または水の温度（絶対温度）である。

空気の自然対流によって伝わる単位面積あたりの熱量は、

$$q = Enair (T - T_0)^{4/3} \quad (Kcal/sec \cdot m^2)$$

である。ここで  $Enair$  は定数である。

水の自然対流によって伝わる単位面積あたりの熱量は、

$$q = Enwater (T - T_0)^{5/4} \quad (Kcal/sec \cdot m^2)$$

である。ここで  $Enwater$  は定数である。

上記の定数  $Er$ 、 $Enair$ 、 $Enwater$  は文献によると表 3.12 のように与えられる。表 3.12 で  $Enair$  の値は両文献とも一致している。 $Enwater$  の値は DP ST-76-125-1 では  $Enwater = 5.0 \times 10^{-4} (Kcal / m^2 \cdot sec \cdot C^{5/4})$  であるが、これは空気の  $Enair$  と同じオーダーであり水が伝える熱量としては少ないと思われる。このため今回の計算で使用する定数は、水冷では  $Enwater = 2.763 \times 10^{-2} (Kcal / m^2 \cdot sec \cdot C^{5/4})$  (ICP 1090) が、空冷では  $Enair = 3.136 \times 10^{-4} (Kcal / sec \cdot m^2 \cdot C^{4/3})$  (BNWL-2252) が適当と思われる。

表 3.12 文献による伝熱の定数

	文 献 名	定 数 値
輻射による伝熱定数	B N W L - 2 2 5 2	$Er = 0.833 \times 10^{-11} (\text{BTU/hr} \cdot \text{in}^2 \cdot {}^\circ\text{F}^4)$ $= 9.49 \times 10^{-12} (\text{Kcal/sec} \cdot m^2 \cdot {}^\circ\text{K}^4)$ $(\varepsilon = 0.7)$
	D P S T - 7 6 - 1 2 5 - 1	$Er = 0.722 \times 10^{-12} (\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot {}^\circ\text{K}^4)$ $= 7.22 \times 10^{-12} (\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{sec} \cdot {}^\circ\text{K}^4)$
空気の自然対流定数	B N W L - 2 2 5 2	$En_{air} = 1.319 \times 10^{-3} (\text{BTU/hr} \cdot \text{in}^2 \cdot {}^\circ\text{F}^{4/3})$ $= 3.136 \times 10^{-4} (\text{Kcal/sec} \cdot m^2 \cdot {}^\circ\text{C}^{4/3})$
	I C P 1 0 9 0	$En_{air} = 1.31 (\text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}^{4/3})$ $= 3.13 \times 10^{-4} (\text{Kcal/sec} \cdot m^2 \cdot {}^\circ\text{C}^{4/3})$
水の自然対流定数	I C P 1 0 9 0	$En_{water} = 128 / L^{1/4} (\text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}^{5/4})$ $\quad \quad \quad Li \text{ シリンダ長 (m)}$ $= 2.763 \times 10^{-2} (\text{Kcal/sec} \cdot m^2 \cdot {}^\circ\text{C}^{5/4})$ $\quad \quad \quad (L = 1.5 \text{ mとした})$
	D P S T - 7 6 - 1 2 5 - 1	$En_{water} = 5.0 \times 10^{-5} (\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot {}^\circ\text{K}^{5/4})$ $= 5.0 \times 10^{-4} (\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{sec} \cdot {}^\circ\text{C}^{5/4})$

### 3.3.2 ポイドについて

ガラス固化体中のポイドの径、及び分布は Battelle (BNWL-2252) によると図3.7のようである。それによると気孔径は40~171 μm、気孔率は0.04~22.0%であり、固化体上部に気孔が多い事がわかる。

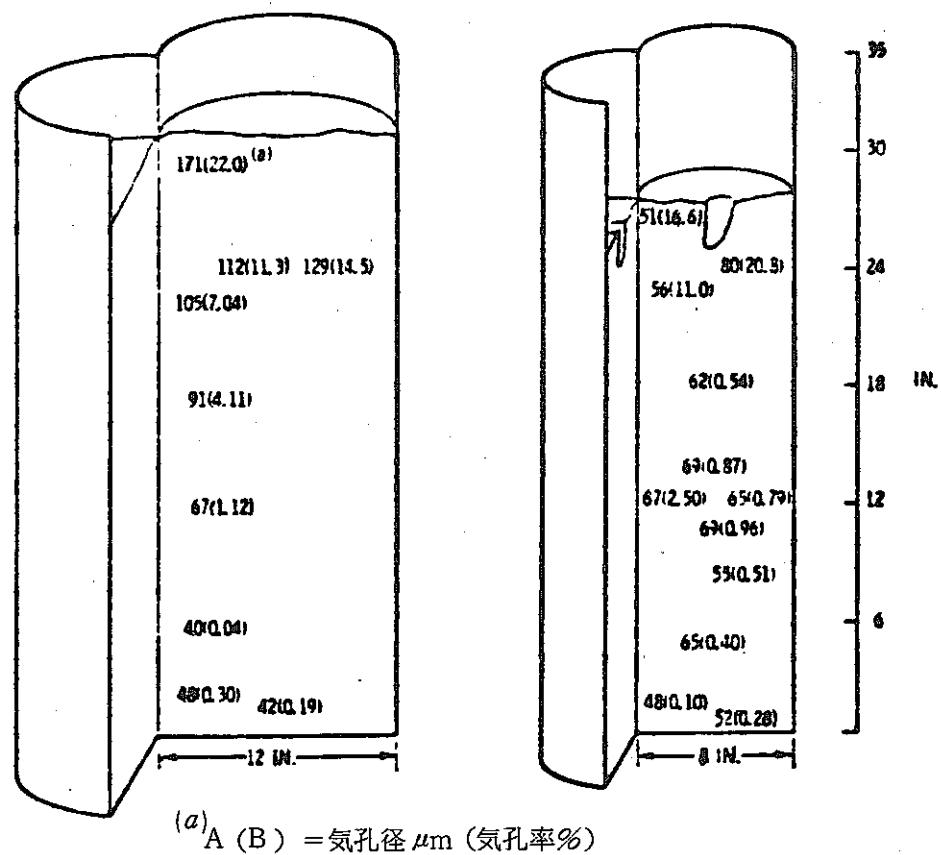


図3.7 ポイドの分布

出所 BNWL-2252

### 3.3.3 クラックについて

Battelle (BNWL-2252) では固化体に模擬クラックを入れて熱伝導への影響を調べている。それによると、クラックのすき間は 5 mil (= 0.125 mm) で、クラック間の伝熱は輻射だけであるとしている。結果は直径12インチ (30.48 cm) フィン付き空冷キャニスターで、クラックにより、 $12^{\circ}\text{C}$  温度差ができる、中心温度は  $6^{\circ}\text{C}$  上昇している（図 3.8 参照）。

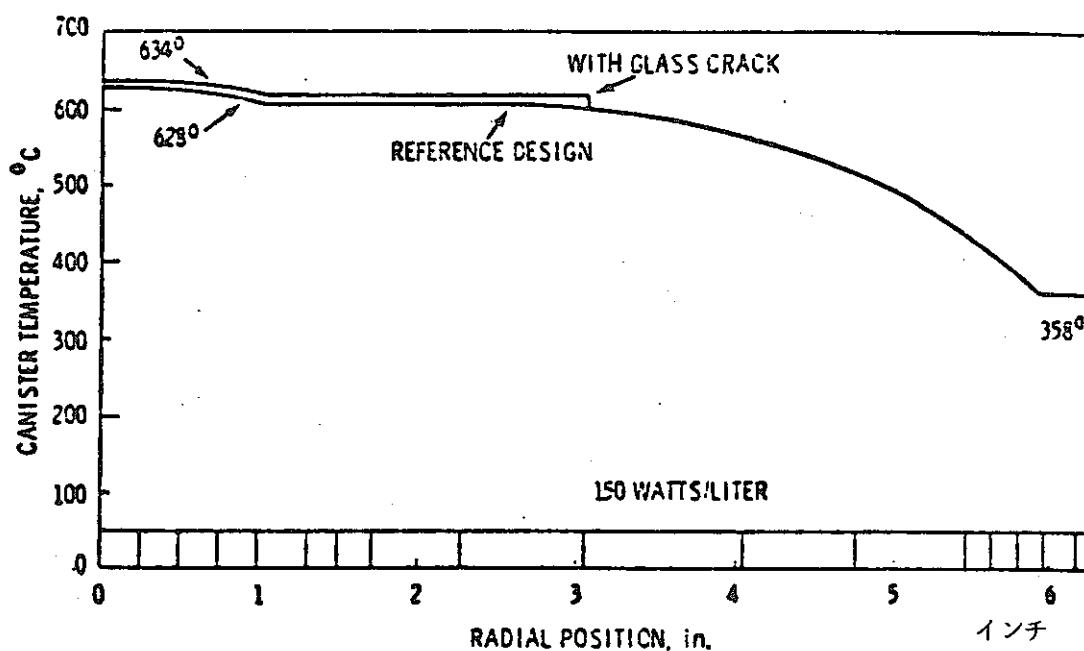


図 3.8 クラックの影響  
直径12インチ (30.48 cm)、フィン付きキャニスター、空冷

## 4. 試 計 算

## 4. 試計算

### 4.1 試計算ケースと計算条件

本年度は、プログラム開発を主眼としているため、シミュレーションについては試計算の範囲に留め、シミュレーションで使用する物性値の感度解析等は、今後の問題として残した。

ガラス固化体の形状は、図4.1に示すとおり、内半径15cm キャニスタ 厚さ 0.4cm (A)、内半径15cm キャニスタ 厚さ 0.6cm (B)、内半径20cm キャニスタ 厚さ 1.0cm (C) の3ケースを設定した。また、高放射性廃棄物 (Waste) 含有率については、15%、20%、25%、30%の4ケースを設定した。

ガラス固化体の形状およびWaste 含有率により計算モデルは設定されるのでつきのように記号化して表わす。

A-30 : Aは形状を表わし、30はWaste 含有率を表わす。

試計算は、図4.2に示す計算フローに従って行った。基本ケースでは長期に亘る熱伝導等の基本的な熱伝導計算を行い、その他に、ガラス固化体の熱的挙動現象のうちで、クラックを含むガラスの熱伝導計算、ボイドを含むガラスの熱伝導計算、および境界条件の検討計算（水冷、空冷）を行った。基本ケースは、基本ケース1と基本ケース2とに分かれている。

基本ケース1は、つきの文献値 (BNWL-2252 (Battelle)) の境界条件を用いて行った。この文献値の自然対流係数は、高さ方向について平均化した一定値である。高さを考慮した自然対流係数については今後の課題である。

$$\text{輻射} \quad Er = 9.49 \times 10^{-12} \text{Kcal/sec m}^2 \text{K}^4$$

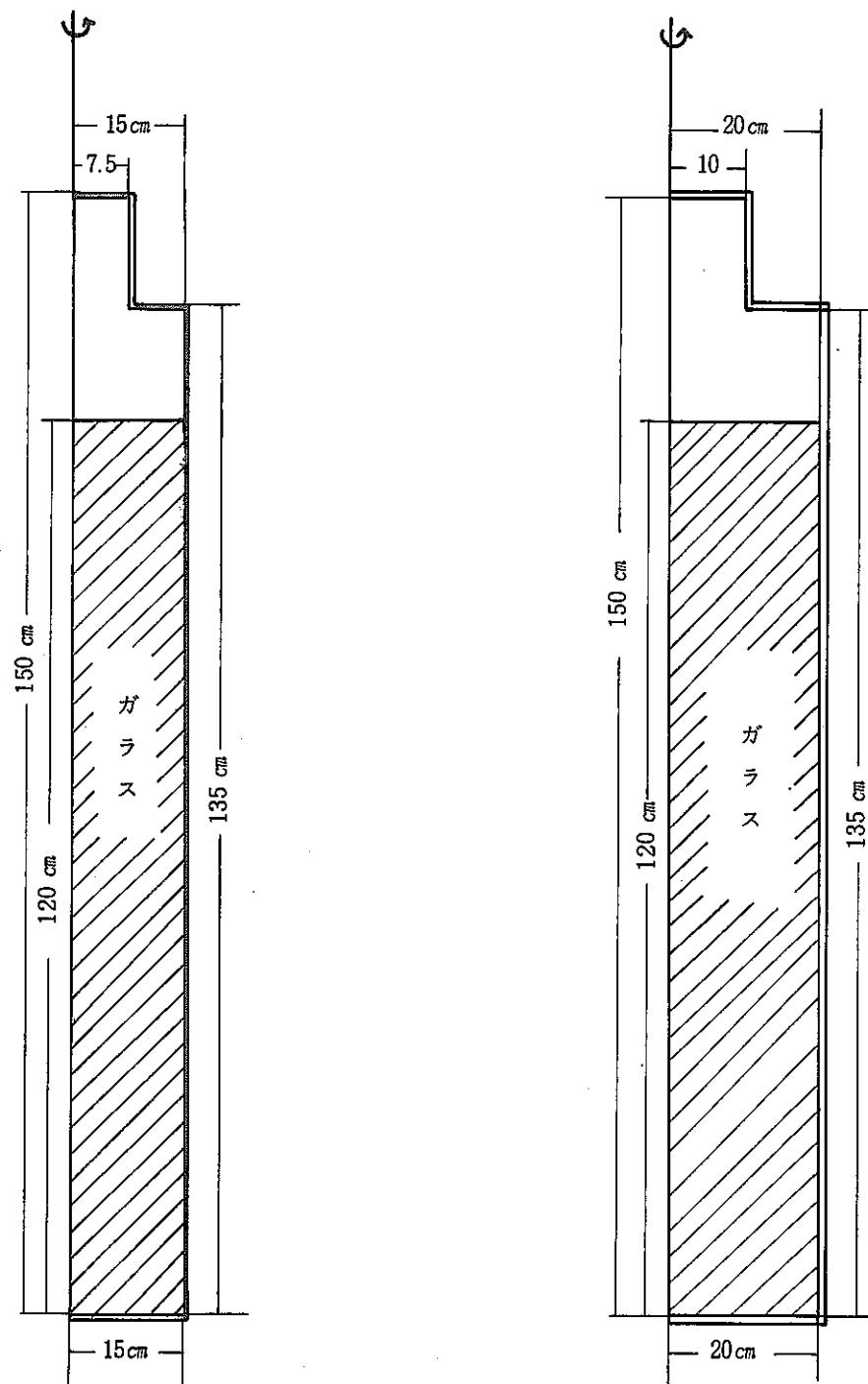
$$\text{空気の自然対流} \quad En = 3.136 \times 10^{-4} \text{Kcal/sec m}^2 \text{K}^{4/3}$$

その計算ケースは、上記の形状および Waste 含有率について、形状ではCを、Waste 含有率では30%を中心に表4.1に示す6ケースである。

基本ケース2は、境界条件を実験結果と計算結果とが一致するように設定して計算した。

実験結果 半径15cmのガラス固化体はガラス注入後10時間で、側面温度は150～160°Cとなる。

その計算ケースは Waste 含有率を30%に固定して表4.1に示す4ケースである。



A, B ケース

キャニスターの厚さ

A 0.4 cm

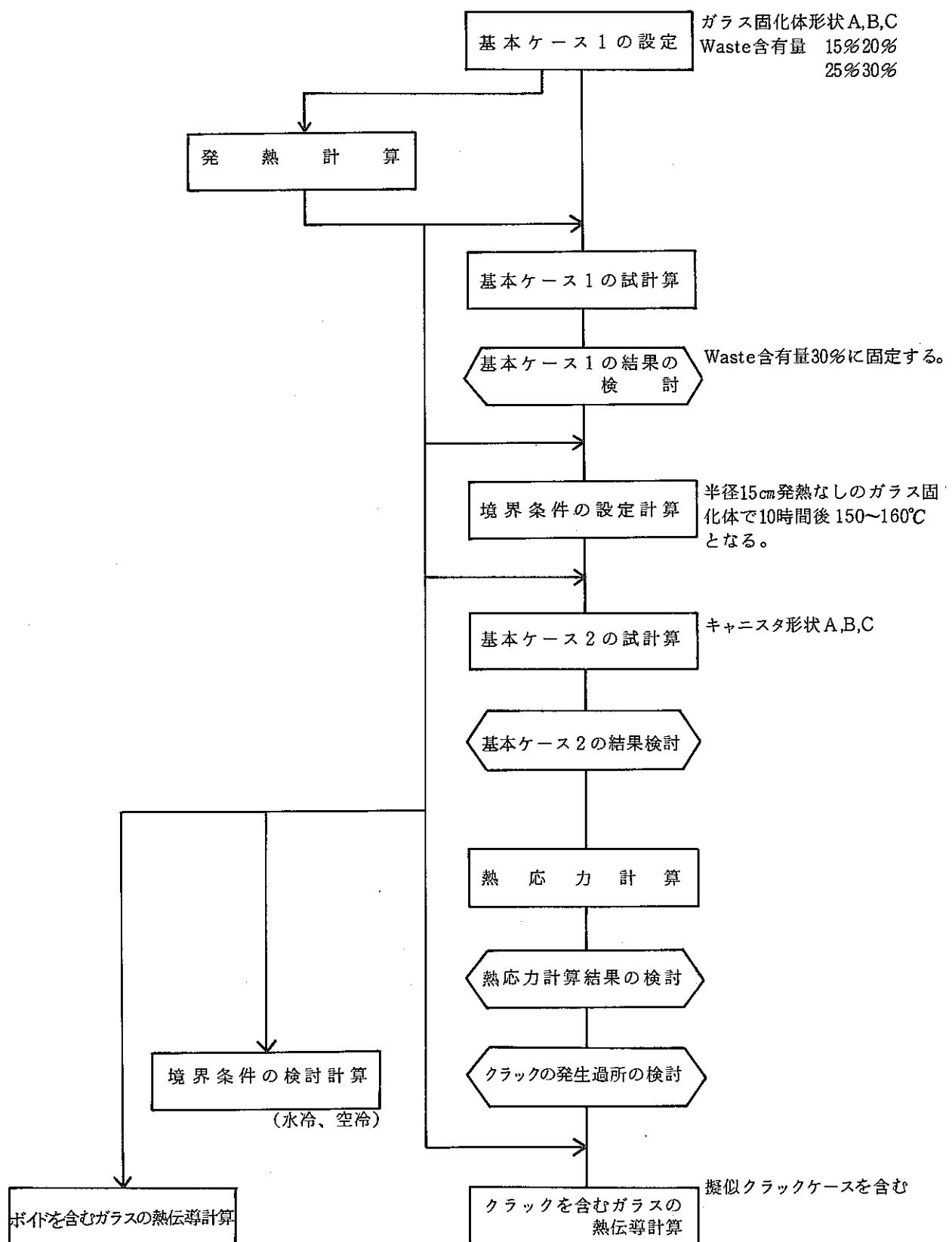
B 0.6 cm

C ケース

キャニスターの厚さ

C 1.0 cm

図 4.1 試計算のガラス固化体の形状



#### 4.1.1 試計算ケース一覧

試計算ケースの一覧表を表 4.1 に示す。

表 4.1 試計算ケース一覧

ケースの種類	ケース名	計算期間	境界条件 <sup>*1</sup>	備考
基本ケース1	A - 30	ガラス注入後3日	$Er = 9.49 \times 10^{-12}$ (空気) $En = 3.136 \times 10^{-4}$	境界条件は文献値を用いる
	B - 30	3 日	"	
	C - 30	50 年	"	
	C - 25	3 日	"	
	C - 20	3 日	"	
	C - 15	3 日	"	
基本ケース2	A - 30	50 年	$Er = 2.0 \times 10^{-12}$ $En = 3.136 \times 10^{-4}$	これ以後のケースは境界条件について再検討した数値を設定
	B - 30	3 日	"	
	C - 30	50 年	"	
	B - 0	3 日	"	
境界	A - 30(水冷)	50 年	$Er = 2.0 \times 10^{-12}$ (水冷) $En = 2.763 \times 10^{-2}$	
	C - 30 ("")	50 年	"	
ボイド	C - 30 - V1	50 年	$Er = 2.0 \times 10^{-12}$ $En = 3.136 \times 10^{-4}$	$\epsilon = 0.1\%$ , $d = 100\mu\text{m}$
	C - 30 - V2	3 日	"	$\epsilon = 1\%$ , $d = 100\mu\text{m}$
	C - 30 - V3	50 年	"	$\epsilon = 10\%$ , $d = 100\mu\text{m}$
	C - 30 - V4	3 日	"	$\epsilon = 1\%$ , $d = 1\text{mm}$
	C - 30 - V5	3 日	"	$\epsilon = 10\%$ , $d = 1\text{mm}$
クラック	C - 30 - CR1	50 年	$Er = 2.0 \times 10^{-12}$ $En = 3.136 \times 10^{-4}$	(クラックの入れ方)(伝熱方法) 30cmクラック, 辐射のみ
	C - 30 - CR2	50 年	"	" , 辐射と空気
	C - 30 - CR3	50 年	"	" "
	C - 30 - CR4	22 時	"	30cmクラック, ガラスの2割減
	C - 30 - CR5	50 年	"	20cm " , 辐射のみ
	C - 30 - CR6	50 年	"	10cm " , "
	C - 30 - CR7	50 年	"	上下クラック, 辐射と空気
	C - 30 - CR8	10 日	"	r 方向 " , "
	A - 30 - CR9	3 日	"	30cm " , "

(注1) Er は輻射係数, En は自然対流係数である。

(注2) 10時間後にクラックを入れる

#### 4.1.2 計算条件

##### (1) 構造図

試計算を行うときのガラス固化体の構造図を図4.3に示した。ここではCのみを示したがA、Bについても節点数、要素数、およびメッシュの区切り方は同様である。

##### (2) 発熱計算の計算条件

###### (i) 高放射性核種の崩壊計算条件 (ORIGENコード)

高放射性核種の崩壊計算条件は表4.3に示す。

###### (ii) 発熱量計算条件 (ORHLLWコード、SHIELDコード)

発熱量計算条件は、表4.4に示す。このとき、ガラスの組成はWaste含有量により異なる。  
WasteのFission Productの成分はORIGEN計算結果(表4.27)を参照とする。

##### (3) 热伝導計算条件

基本ケースの热伝導計算条件を表4.9に示す。物性値のうち、密度、ガラスの転移点温度は、表4.2に示す。

表4.2 ガラスの密度と転移点温度

項目 Waste 含 有 率 (%)	ガラスの密度 図4.4 参照	ガラスの転移点温度 500 °C
15	図4.4 参照	500 °C
20	図4.5 参照	495 °C
25	図4.6 参照	490.5 °C
30	図4.7 参照	473 °C

ボイドを含むガラス固化体の熱伝導計算およびクラックを含むガラス固化体の熱伝導計算で用いる計算条件については、後述とする(p.151, p.169参照)。

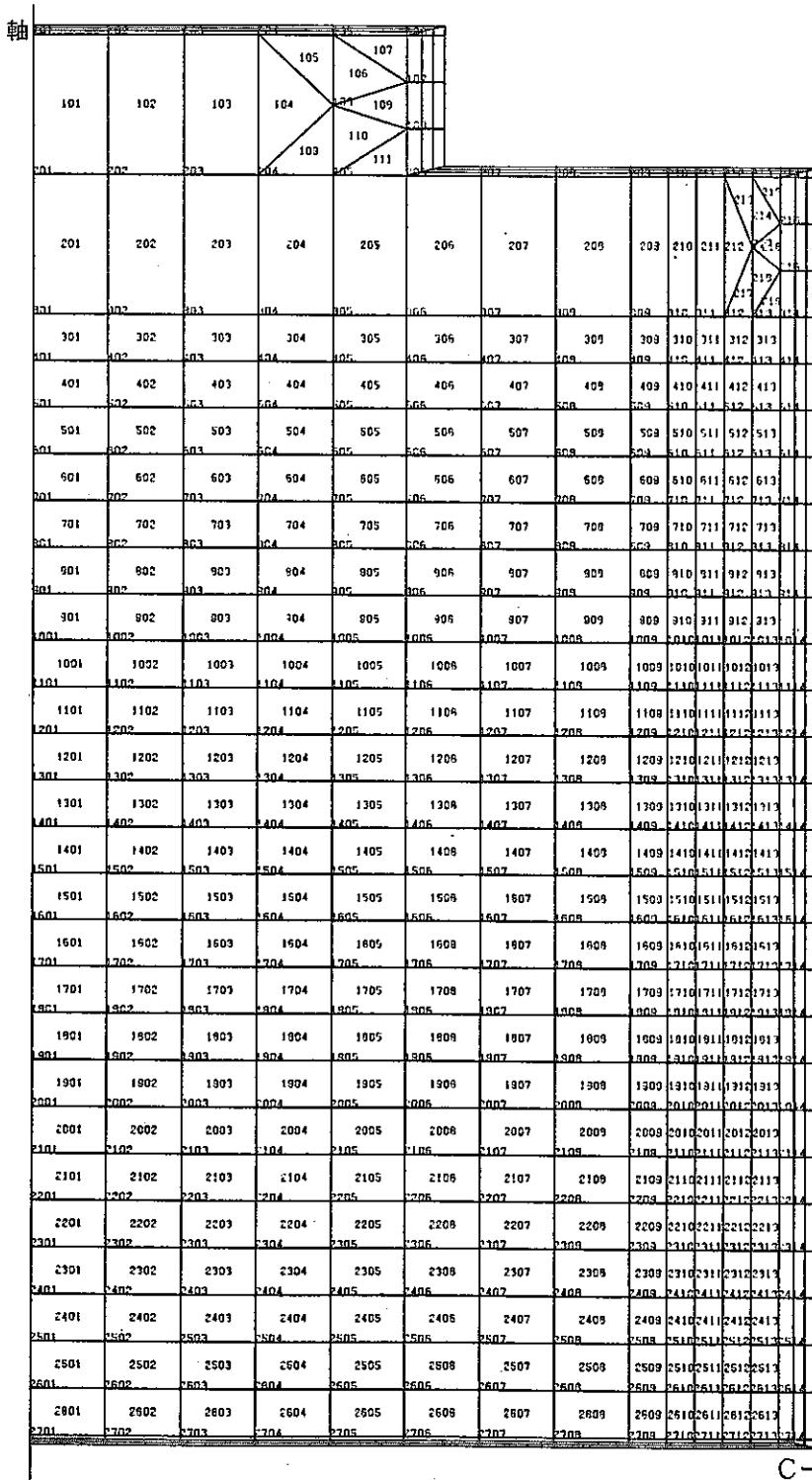
##### (4) 境界条件の検討

内半径15cmガラス固化体の側面温度が10時間後に、150～160°Cになる実測値があるため、これにあうように境界条件を検討した。

境界条件は、空気の自然対流による熱伝達と輻射による熱伝達とを用いているが、今回は輻射係数を変えて検討した。輻射係数  $Er = 9.49 \times 10^{-12}, 5.17 \times 10^{-12}, 1.8 \times 10^{-12}$  の3ケースについて熱伝導計算をして輻射係数と側面温度との関係図(図4.13)を作り  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$  を設定した。

##### (5) 热応力計算条件

热応力計算条件を表4.10に示す。



(注) キニスタの要素番号、節点番号は煩雑となるため略す。

C-ケース

図 4.3 ガラス固化体の構造図（要素分割図）

表 4.3 高放射性核種の崩壊計算条件(ORIGENコード)

	項 目	設 定 額
炉 の タ イ プ		L W R
炉 の 定 数	Therm	0.632
	Res	0.333
	Fast	2.0
Burn up 計 算	Power	35 MW/MT
	Burn up time	800 日
	燃料組成 (U 235 : 4 <sup>WT%</sup> )	
	U 235	170.21276 ( $\text{\AA}$ -atom) 40.0 kg
	U 238	4033.6134 ( $\text{\AA}$ -atom) 960.0 kg
Cooling 計 算	Decay time	180 日
回 収 計 算	回 収 率 (%)	${}_1\text{H} = 90.0$ ${}_{53}\text{I} = 90.0$ ${}^3\text{He} = {}^{35}\text{Br} = 100$ ${}^{36}\text{Kr} = {}^{54}\text{Xe} = 100$ ${}^{92}\text{U} = 99.9$ , ${}^{93}\text{Np} = 0.0$ ${}^{94}\text{Pu} = 99.7$ , ${}^{95}\text{Am} = {}^{96}\text{Cm} = 0.0$
Waste volume		500 $\ell$ / MT

表 4.4 発熱量計算条件

	項 目	設 定 図
廃 液 計 算	回収残渣のうち無視する元素  硝 酸 濃 度  NaNO <sub>3</sub> 混入量  再処理腐蝕生成物  中 性 子 毒	<sup>30</sup> Zn, <sup>31</sup> Ga, <sup>81</sup> Tl, <sup>82</sup> Pb <sup>83</sup> Bi, <sup>84</sup> Po, <sup>85</sup> At, <sup>88</sup> Rm <sup>87</sup> Fr, <sup>88</sup> Ra, <sup>89</sup> Ac, <sup>90</sup> Th <sup>91</sup> Pa, <sup>97</sup> Bk, <sup>98</sup> Cf, <sup>99</sup> Es 2 N 485 (mol/MT) Fe: 2.28 g / l Cr: 0.38 g / l Ni: 0.30 g / l <sup>5</sup> B, <sup>64</sup> Gd 添加なし
ガラス固化時		Cooling time 後 5 年
添加アルミの有無	アルミナ	0.125 mol/l
ガラス固化体中の Waste 酸化物の量		15, 20, 25, 30 wt%
遮 蔽 計 算	減 衰 係 数 ビルド・アップ係数 ガラスの組成 f. p酸化物の組成 メタルの組成	表 4.5 参照 表 4.6 参照 表 4.7 参照 表 4.8 参照 表 4.9 参照

表 4.5 減衰係数 (その1)

## G. SHIELDING MATERIALS

TABLE 51.12. Calculated Gamma-Ray Mass-Absorption Coefficients of the Elements\*

At. no., Z	Element <sup>a</sup>	Symbol <sup>a</sup>	At. wt., A	Gamma-ray mass-absorption coefficient, $\mu/\rho$ , cm <sup>2</sup> /g			
				0.5 Mev	1 Mev	2 Mev	3 Mev
1 <sup>b</sup>	Hydrogen	H	1.008	0.173	0.126	0.0878	0.0693
2	Helium	He	4.003	0.0874	0.0625	0.0425	0.0337
3	Lithium	Li	6.940	0.0758	0.0540	0.0360	0.0288
4 <sup>b</sup>	Beryllium	Be	9.02	0.0772	0.0564	0.0394	0.0313
5	Boron	B	10.82	0.0809	0.0587	0.0437	0.0323
6 <sup>b</sup>	Carbon	C	12.01	0.0870	0.0635	0.0443	0.0356
7 <sup>b</sup>	Nitrogen	N	14.008	0.0870	0.0636	0.0443	0.0357
8 <sup>b</sup>	Oxygen	O	16.0000	0.0871	0.0636	0.0444	0.0359
9	Fluorine	F	19.0000	0.0826	0.0600	0.0421	0.0342
10	Neon	Ne	20.183	0.0867	0.0627	0.0443	0.0357
11 <sup>b</sup>	Sodium	Na	22.997	0.0835	0.0608	0.0427	0.0348
12	Magnesium	Mg	24.32	0.0863	0.0625	0.0440	0.0362
13 <sup>b</sup>	Aluminum	Al	26.97	0.0844	0.0614	0.0431	0.0353
14 <sup>b</sup>	Silicon	Si	28.06	0.0873	0.0635	0.0448	0.0367
15	Phosphorus	P	30.98	0.0854	0.0617	0.0434	0.0358
16	Sulfur	S	32.066	0.0879	0.0636	0.0448	0.0368
17	Chlorine	Cl	35.457	0.0846	0.0611	0.0430	0.0357
18 <sup>b</sup>	Argon	A	39.944	0.0795	0.0574	0.0406	0.0336
19	Potassium	K	39.096	0.0859	0.0620	0.0437	0.0366
20 <sup>b</sup>	Calcium	Ca	40.08	0.0885	0.0637	0.0451	0.0378
21	Scandium	Sc	45.10	0.0826	0.0593	0.0418	0.0350
22	Titanium	Ti	47.90	0.0818	0.0588	0.0413	0.0347
23	Vanadium	V	50.95	0.0805	0.0577	0.0406	0.0342
24	Chromium	Cr	52.01	0.0827	0.0589	0.0417	0.0351
25	Manganese	Mn	54.93	0.0817	0.0583	0.0411	0.0348
26 <sup>b</sup>	Iron	Fe	55.85	0.0840	0.0598	0.0422	0.0359
27	Cobalt	Co	58.94	0.0828	0.0598	0.0416	0.0353
28	Nickel	Ni	58.99	0.0866	0.0613	0.0434	0.0369
29 <sup>b</sup>	Copper	Cu	63.54	0.0834	0.0588	0.0416	0.0356
30	Zinc	Zn	65.38	0.0841	0.0585	0.0418	0.0357
31	Gallium	Ga	69.72	0.0820	0.0575	0.0406	0.0349
32	Germanium	Ge	72.60	0.0820	0.0572	0.0403	0.0347
33	Arsenic	As	74.91	0.0824	0.0573	0.0403	0.0350
34	Selenium	Se	78.96	0.0811	0.0561	0.0395	0.0343
35	Bromine	Br	79.016	0.0830	0.0572	0.0402	0.0350
36	Krypton	Kr	83.70	0.0817	0.0563	0.0397	0.0346
37	Rubidium	Rb	85.48	0.0835	0.0567	0.0400	0.0349
38	Strontium	Sr	87.63	0.0842	0.0569	0.0402	0.0351
39	Yttrium	Yt	88.92	0.0859	0.0577	0.0408	0.0358
40	Zirconium	Zr	91.22	0.0864	0.0578	0.0409	0.0360
41	Columbium	Cb	92.91	0.0864	0.0584	0.0414	0.0363
42 <sup>b</sup>	Molybdenum	Mo	95.95	0.0879	0.0581	0.0412	0.0362
43	Masurium	Ma	—	—	—	—	—
44	Ruthenium	Ru	101.7	0.0883	0.0577	0.0410	0.0361
45	Rhodium	Rh	102.91	0.0902	0.0584	0.0415	0.0367
46	Palladium	Pd	106.7	0.0901	0.0577	0.0410	0.0363
47	Silver	Ag	107.88	0.0920	0.0586	0.0418	0.0369
48	Cadmium	Cd	112.41	0.0912	0.0576	0.0409	0.0363
49	Indium	In	114.76	0.0913	0.0578	0.0411	0.0364
50 <sup>b</sup>	Tin	Sn	118.70	0.0923	0.0573	0.0407	0.0361
51	Antimony	Sb	121.76	0.0928	0.0573	0.0406	0.0361
52	Tellurium	Te	127.61	0.0915	0.0560	0.0396	0.0354
53 <sup>b</sup>	Iodine	I	126.92	0.0954	0.0579	0.0408	0.0364
54	Xeon	Xe	131.3	0.0954	0.0571	0.0402	0.0361
55	Cesium	Cs	132.91	0.0978	0.0578	0.0406	0.0367
56	Barium	Ba	137.36	0.0978	0.0572	0.0402	0.0363
57	Lanthanum	La	138.92	0.100	0.0581	0.0406	0.0368
58	Cerium	Ce	140.13	0.103	0.0591	0.0411	0.0373
59	Praseodymium	Pr	140.92	0.106	0.0601	0.0417	0.0380
60	Neodymium	Nd	144.27	0.107	0.0601	0.0416	0.0379
61	Promethium	Pm	~146	0.109	0.0607	0.0419	0.0385
62	Samarium	Sm	150.43	0.110	0.0606	0.0415	0.0382
63	Europium	Eu	152	0.112	0.0613	0.0420	0.0387
64	Gadolinium	Gd	156.9	0.113	0.0608	0.0416	0.0383
65	Terbium	Tb	159.2	0.115	0.0613	0.0417	0.0386
66	Dysprosium	Dy	162.46	0.116	0.0616	0.0417	0.0386
67	Holmium	Ho	164.94	0.118	0.0620	0.0419	0.0388
68	Erbium	Er	167.2	0.120	0.0626	0.0422	0.0391
69	Thulium	Tm	169.4	0.122	0.0632	0.0424	0.0394

減衰係数 (その2)

51. PROPERTIES OF SHIELDING MATERIALS

TABLE 51.12. (*Continued*)

At. no., Z	Element	Symbol	At. wt., A	Gamma-ray mass-absorption coefficient, $\mu/\rho$ , cm <sup>2</sup> /g				
				0.5 Mev	1 Mev	2 Mev	3 Mev	6 Mev
70	Ytterbium	Yb	173.04	0.123	0.0633	0.0423	0.0303	0.0415
71	Lutetium	Lu	174.99	0.125	0.0641	0.0427	0.0306	0.0420
72	Hafnium	Hf	178.6	0.126	0.0643	0.0427	0.0306	0.0420
73	Tantalum	Ta	180.88	0.128	0.0650	0.0430	0.0309	0.0424
74 <sup>b</sup>	Tungsten	W	183.92	0.131	0.0655	0.0432	0.0400	0.0418
75	Rhenium	Re	186.31	0.134	0.0662	0.0436	0.0402	0.0429
76	Osmium	Os	190.2	0.136	0.0663	0.0436	0.0402	0.0420
77	Iridium	Ir	193.1	0.138	0.0670	0.0437	0.0403	0.0431
78 <sup>b</sup>	Platinum	Pt	195.23	0.135	0.0676	0.0444	0.0407	0.0427
79	Gold	Au	197.2	0.145	0.0687	0.0449	0.0409	0.0440
80	Mercury	Hg	200.61	0.147	0.0692	0.0451	0.0411	0.0441
81	Thallium	Tl	204.39	0.149	0.0695	0.0452	0.0410	0.0442
82 <sup>b</sup>	Lead	Pb	207.21	0.152	0.0703	0.0458	0.0413	0.0436
83	Bismuth	Bi	209	0.156	0.0714	0.0461	0.0417	0.0449
84	Polonium	Po	~210	0.160	0.0728	0.0468	0.0420	0.0458
85	Astatine	At	~221	0.157	0.0709	0.0454	0.0409	0.0442
86	Radon	Rn	222	0.161	0.0723	0.0462	0.0415	0.0449
87	Francium	Fr	~224	0.164	0.0735	0.0467	0.0419	0.0453
88	Radium	Ra	226.05	0.168	0.0746	0.0473	0.0423	0.0458
89	Actinium	Ac	~227	0.173	0.0760	0.0479	0.0429	0.0465
90	Thorium	Tb	232.12	0.175	0.0762	0.0477	0.0428	0.0463
91	Protactinium	Pa	231	0.183	0.0784	0.0489	0.0443	0.0475
92 <sup>b</sup>	Uranium	U	238.07	0.176	0.0779	0.0483	0.0435	0.0455

\* Compiled from Ref. 10a.

<sup>a</sup> Names and symbols of elements listed in accordance with International Atomic Weights of 1952.

<sup>b</sup> G. W. Grodstein<sup>11</sup>, all other values are interpolated by M. K. Hullings<sup>12</sup>.

出所 Reactor Hand Book 2 ed  
Vol I G. Shielding materials.

表 4.6 ビルドアップ係数

エネルギー (Mev)	Water			Aluminum			Iron			Tin			Tungsten			Lead		
	A	$\alpha_1$	$\alpha_2$	A	$\alpha_1$	$\alpha_2$	A	$\alpha_1$	$\alpha_2$	A	$\alpha_1$	$\alpha_2$	A	$\alpha_1$	$\alpha_2$	A	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0.15	24	-0.14	0.0	9.0	-0.15	0.00	11.2	-0.099	0.0	4.8	-0.088	0.1	3.6	-0.00	0.06	1.0	-0.01	0.37
0.25	24	-0.14	0.0	9.0	-0.15	0.00	10.8	-0.097	0.001	4.7	-0.086	0.105	3.6	-0.008	0.07	1.2	-0.015	0.37
0.35	24	-0.14	0.0	9.0	-0.15	0.00	10.7	-0.097	0.004	4.7	-0.085	0.11	3.5	-0.01	0.08	1.3	-0.02	0.35
0.475	24	-0.14	0.0	9.0	-0.15	0.00	10.2	-0.095	0.009	4.65	-0.084	0.114	3.5	-0.02	0.10	1.5	-0.03	0.29
0.65	19	-0.122	0.0	9.0	-0.15	0.00	9.5	-0.092	0.016	4.6	-0.082	0.12	3.44	-0.028	0.12	1.7	-0.03	0.25
0.825	14.9	-0.114	0.0	8.2	-0.12	0.025	9.1	-0.09	0.022	4.55	-0.081	0.125	3.4	-0.035	0.13	2.5	-0.04	0.20
1.0	11.0	-0.104	0.03	8.0	-0.11	0.044	8.6	-0.088	0.028	4.5	-0.08	0.13	3.3	-0.042	0.146	2.9	-0.04	0.17
1.225	8.9	-0.095	0.06	7.3	-0.10	0.055	8.0	-0.081	0.034	4.4	-0.079	0.134	3.18	-0.05	0.164	2.6	-0.05	0.15
1.475	7.8	-0.088	0.074	6.4	-0.091	0.075	7.5	-0.080	0.039	4.3	-0.078	0.139	3.05	-0.058	0.18	2.65	-0.055	0.13
1.7	8.2	-0.082	0.083	5.95	-0.087	0.084	7.1	-0.077	0.044	4.1	-0.078	0.141	2.95	-0.063	0.184	2.65	-0.06	0.12
1.9	7.8	-0.078	0.088	5.65	-0.084	0.09	6.7	-0.075	0.048	4.05	-0.079	0.142	2.93	-0.068	0.187	2.6	-0.07	0.11
2.1	7.4	-0.074	0.094	5.3	-0.081	0.096	6.5	-0.073	0.05	3.95	-0.08	0.141	2.88	-0.07	0.187	2.55	-0.075	0.10
2.3	7.0	-0.070	0.097	5.15	-0.079	0.101	6.1	-0.072	0.054	3.8	-0.082	0.14	2.84	-0.074	0.184	2.5	-0.08	0.09
2.5	6.7	-0.068	0.102	4.95	-0.077	0.106	5.8	-0.072	0.056	3.65	-0.084	0.137	2.8	-0.076	0.176	2.35	-0.08	0.08
2.7	6.5	-0.065	0.104	4.75	-0.076	0.11	5.5	-0.072	0.059	3.5	-0.086	0.135	2.78	-0.08	0.166	2.3	-0.085	0.075
3.0	6.2	-0.062	0.108	4.5	-0.074	0.115	5.0	-0.072	0.062	3.3	-0.09	0.13	2.70	-0.086	0.135	2.1	-0.095	0.07

注)  $A_1 = A$ ,  $A_2 = 1 - A$  とおくときビルドアップ係数は  
 $B = A_1 \exp(-\alpha_1 b) + A_2 \exp(-\alpha_2 b)$   
 で与えられる。b は減衰距離である。

出所 BNWL-236

表 4.7 ガラス固化体組成（添加アルミを含む）

(単位 重量%)

Waste 含有料 酸化物	30 %	25 %	20 %	15 %	
S <sub>i</sub> O <sub>2</sub>	43.0	45.59	48.04	50.76	
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.0	14.84	15.76	16.53	
L <sub>i2</sub> O	3.0	3.18	3.38	3.54	
Na <sub>2</sub> O	1.0	2.53	4.06	5.59	
K <sub>2</sub> O	2.0	2.12	2.25	2.36	
Ca O	2.0	2.12	2.25	2.36	
Zn O	2.0	2.12	2.25	2.36	
W A S T E	Na <sub>2</sub> O f.p. oxides	9.18 20.82	7.65 17.35	6.12 13.88	4.59 10.41
添加物	Aℓ <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.0	2.5	2.0	1.5

注 ガラス組成は、Na<sub>2</sub>O含有率を固化体全体として（10.18%）で変化しないようにし、他のガラス成分は比例的に増減する。

表 4.8 キャニスタ\* の組成

成 分	重 量 比 (WT %)	密 度 (kg / m³)
Fe	71.238	5551.806
C	0.061	4.758
Si	0.62	48.36
Mn	1.40	109.2
P	0.030	2.34
S	0.002	0.156
Ni	8.53	665.34
Cr	18.18	1418.04

(注) キャニスタの材料はSUS 304 である。

表 4.9 热伝導計算条件

	項 目	設 定 値
ガラスの物性値	密 度	図 4.4 ~ 図 4.7 参照
	比 热	図 4.8 参照
	热 伝 导 係 数	図 4.9 参照
キャニスターの物性値	密 度	$7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	比 热	$0.11 \text{ Kcal/kg°C}$
	热 伝 导 係 数	$3.89 \times 10^{-3} \text{ Kcal/msec°C}$
その他の物性値	空気の自然対流による 熱伝達係数	$3.136 \times 10^{-4}$ $\text{Kcal/sec m}^2 \text{ °K}^{4/3}$
	冷却材による係数	$1/3$
	水の自然対流による 熱伝達係数	$2.763 \times 10^{-2}$ $\text{Kcal/sec m}^2 \text{ °K}^{5/4}$
	冷却材による係数	$1/4$
	輻射による熱伝達 基本ケース 1	$9.49 \times 10^{-12} \text{ Kcal/m}^2 \text{ sec} \text{ °K}^4$
	基本ケース 2	$2.00 \times 10^{-12} \text{ "}$
	空気の物性値	図 4.10, 4.11, 4.12 参照
初期温度	ガラス	800 °C
	キャニスター	500 °C
	ガラス上部空気	800 °C
冷却材温度	空 気	21.0 °C
	水	21.0 °C

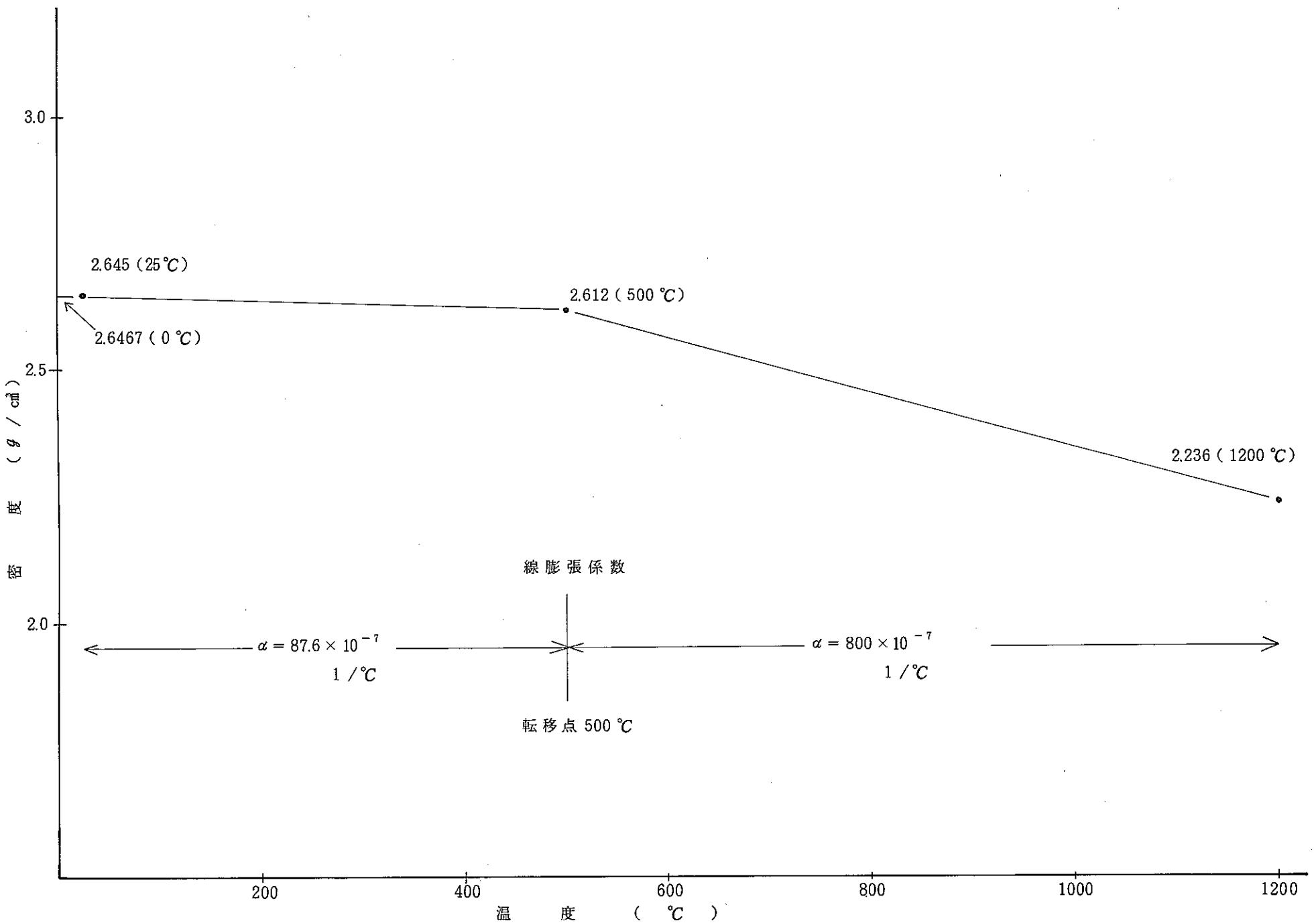


図 4.4 ガラス固化体の密度 ( $\text{g} / \text{cm}^3$ ) 15% Waste

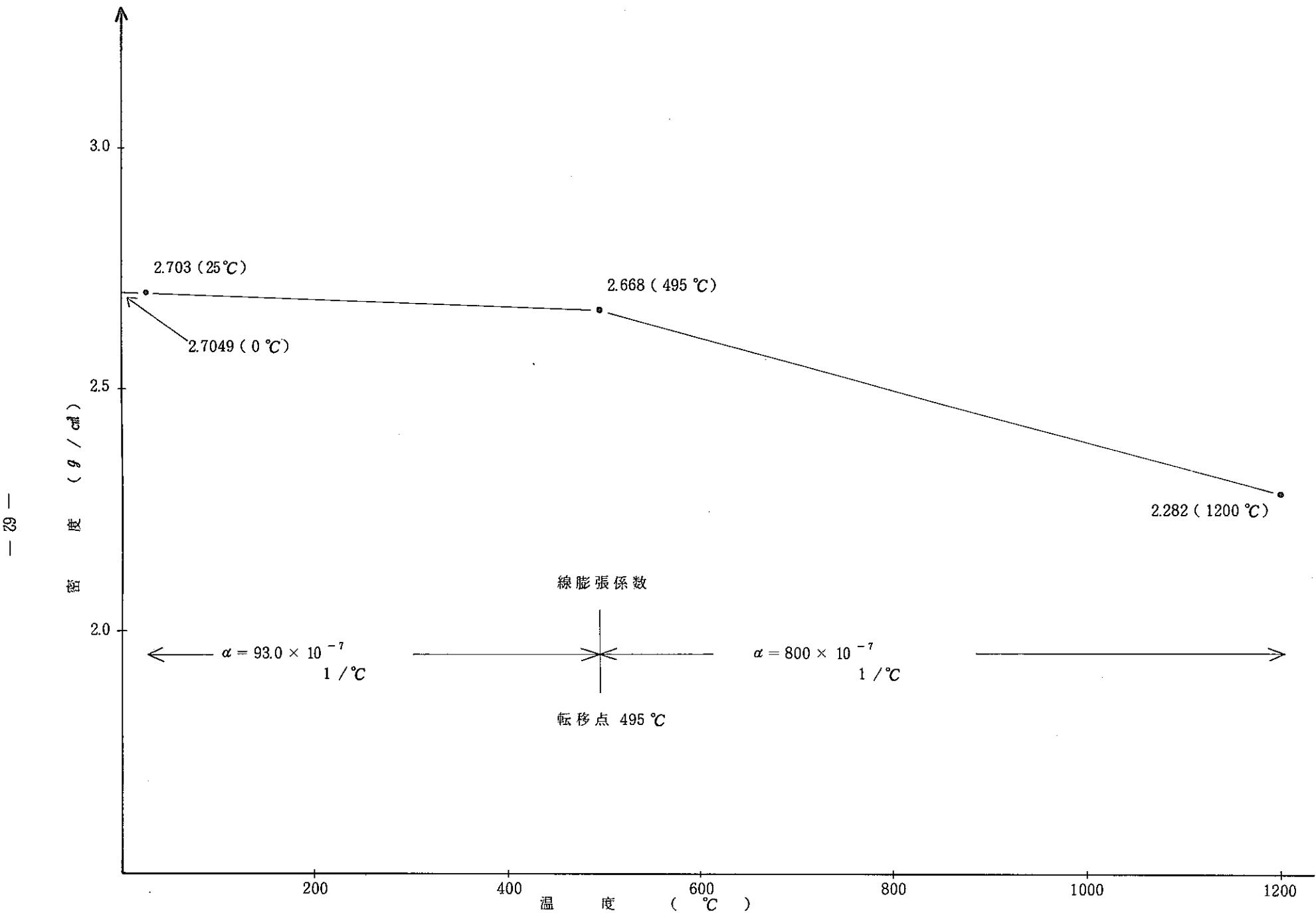


図 4.5 ガラス固化体の密度 (g / cm<sup>3</sup>) 20% Waste

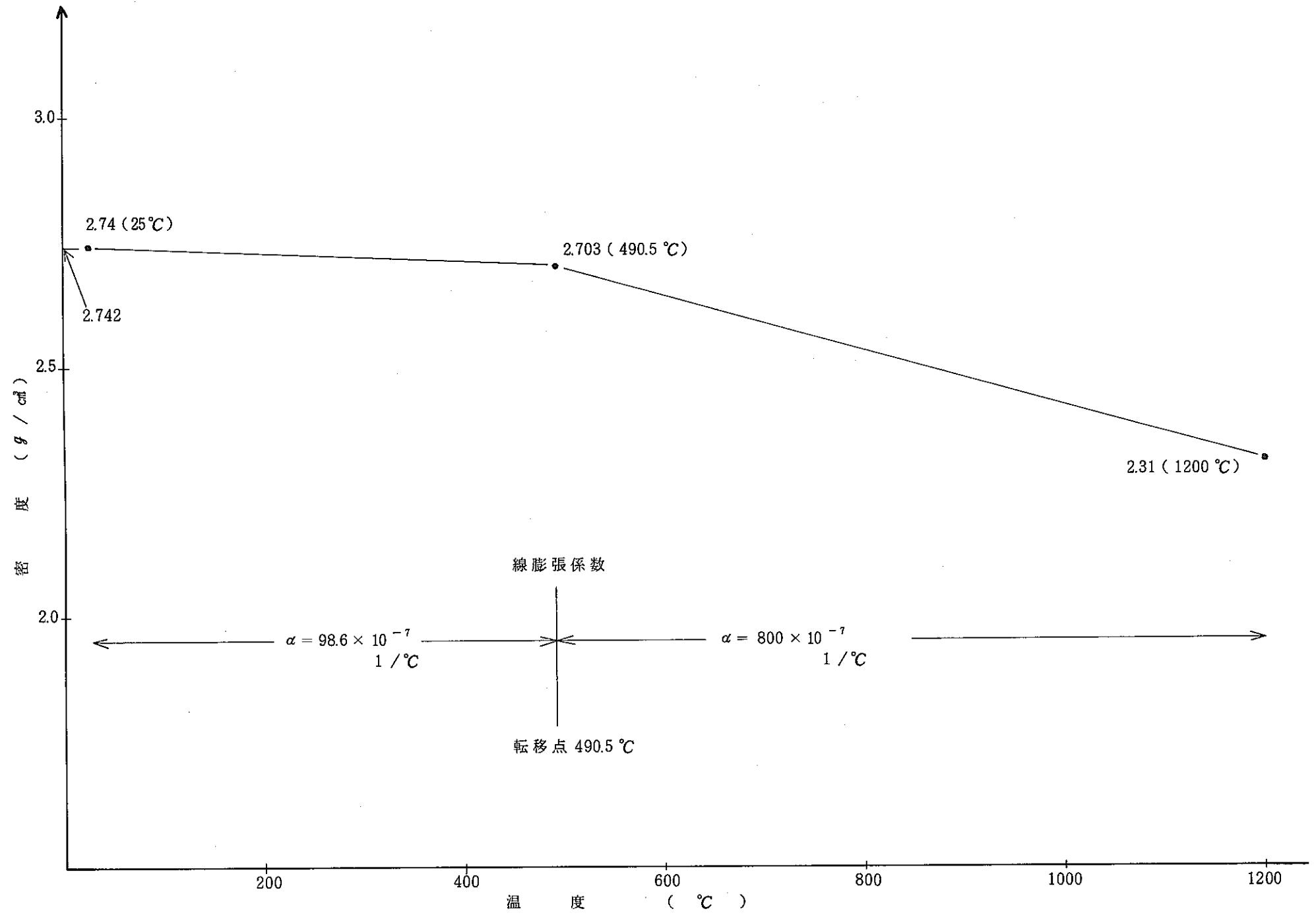


図 4.6 ガラス固化体の密度 (g / cm<sup>3</sup>) 25% Waste

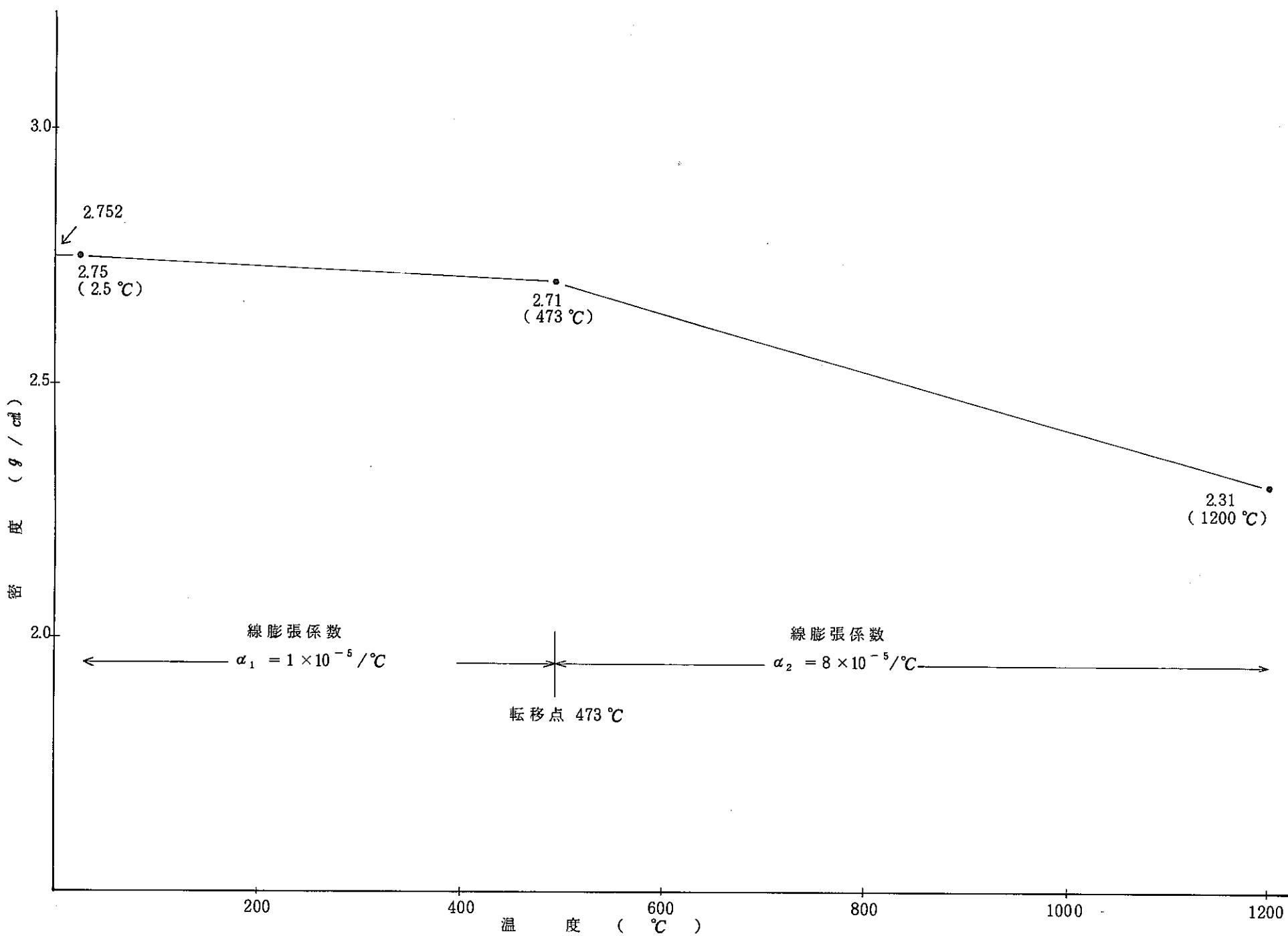


図 4.7 ガラス固化体の密度 ( $g / \text{cm}^3$ ) 30% Waste

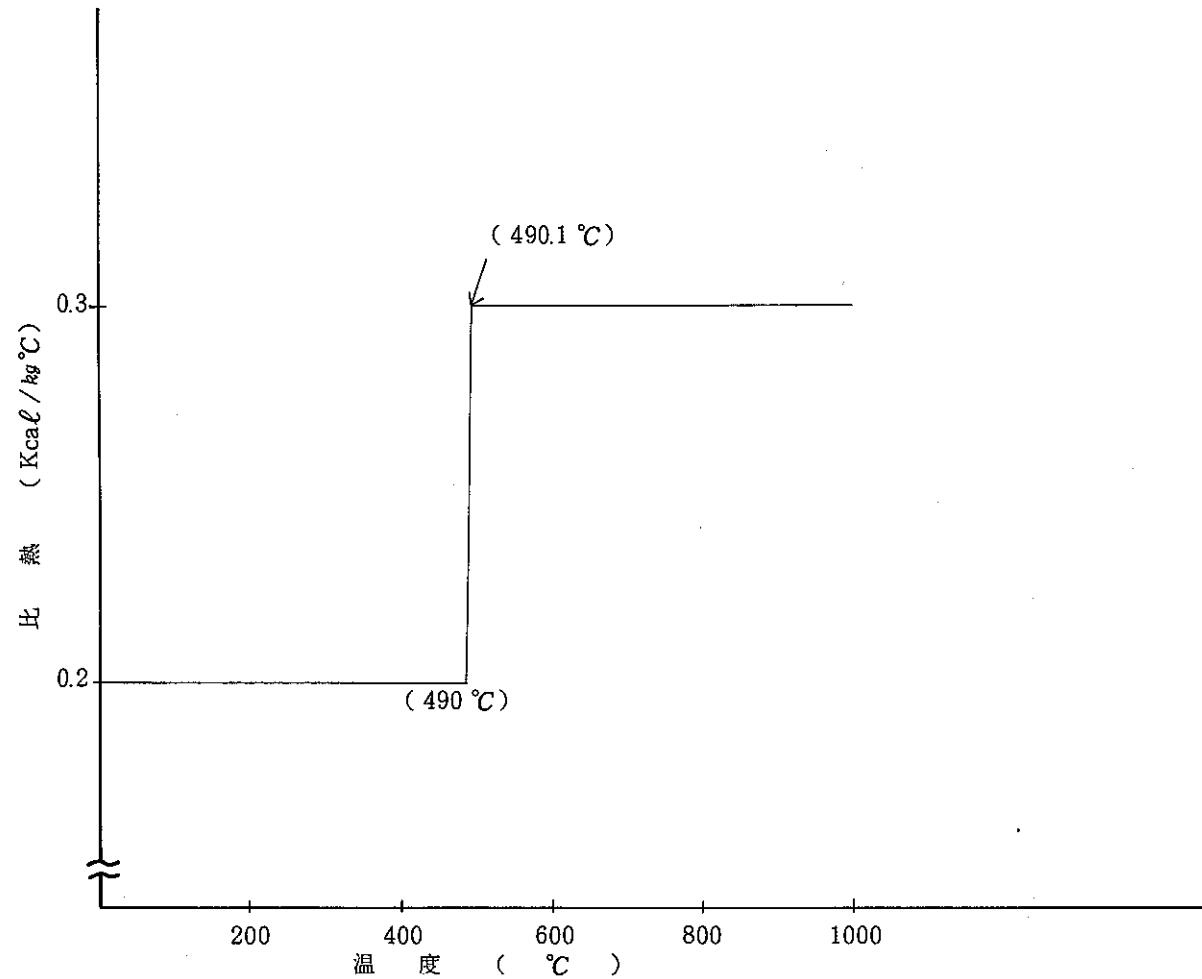


図 4.8 比 熱

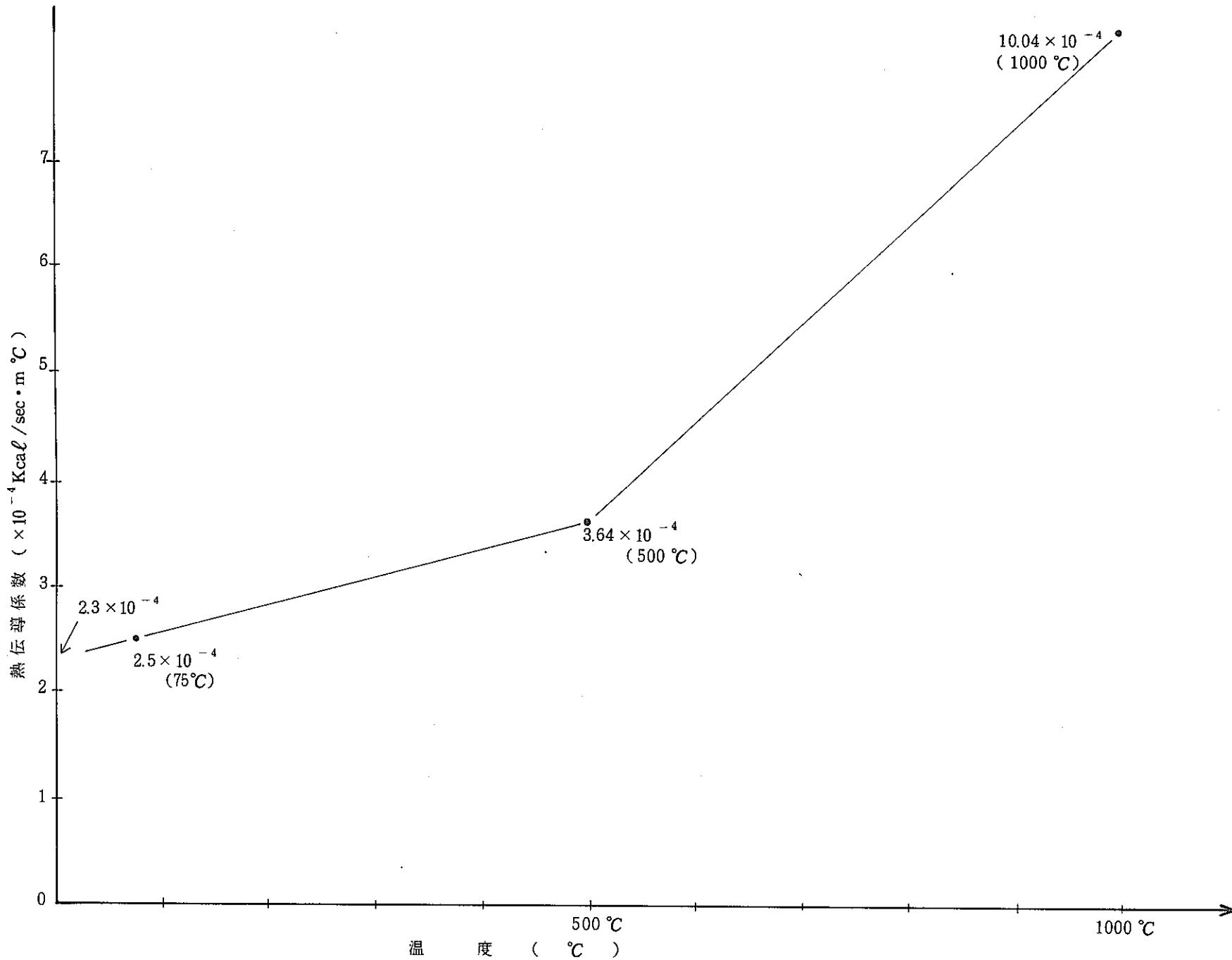


図 4.9 ガラス固化体の熱伝導係数

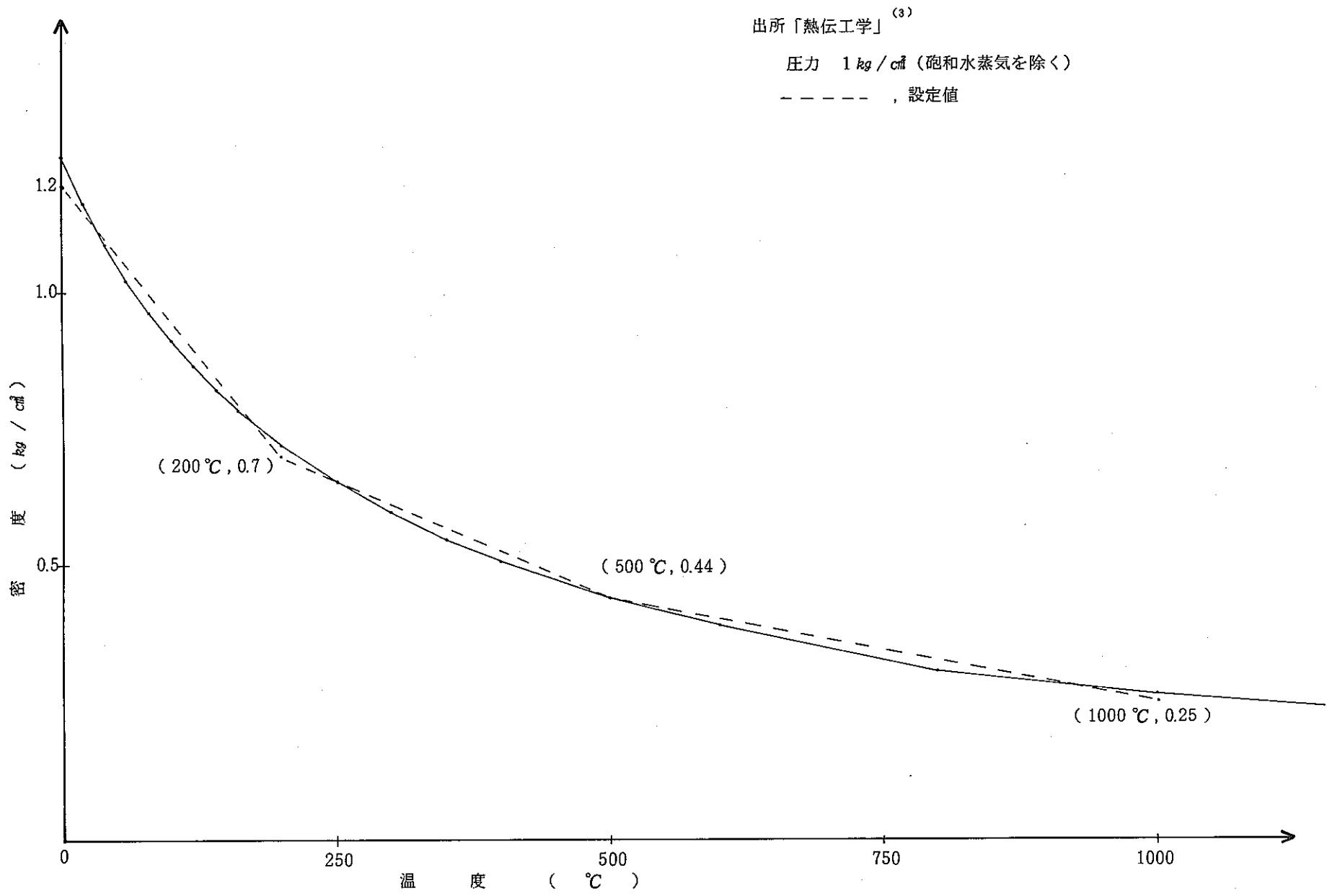


図 4.10 空気の密度

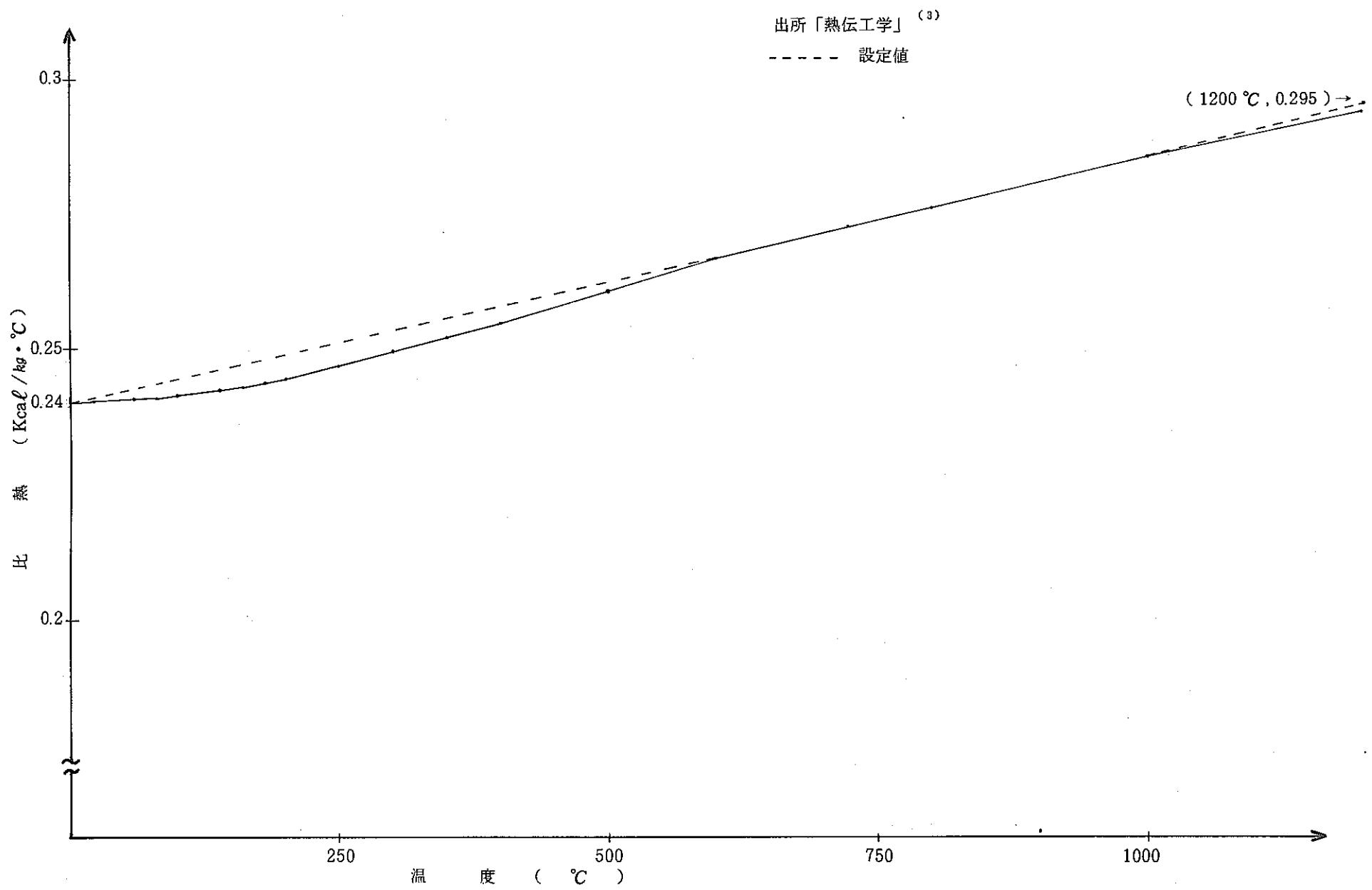


図 4.11 空気の比熱

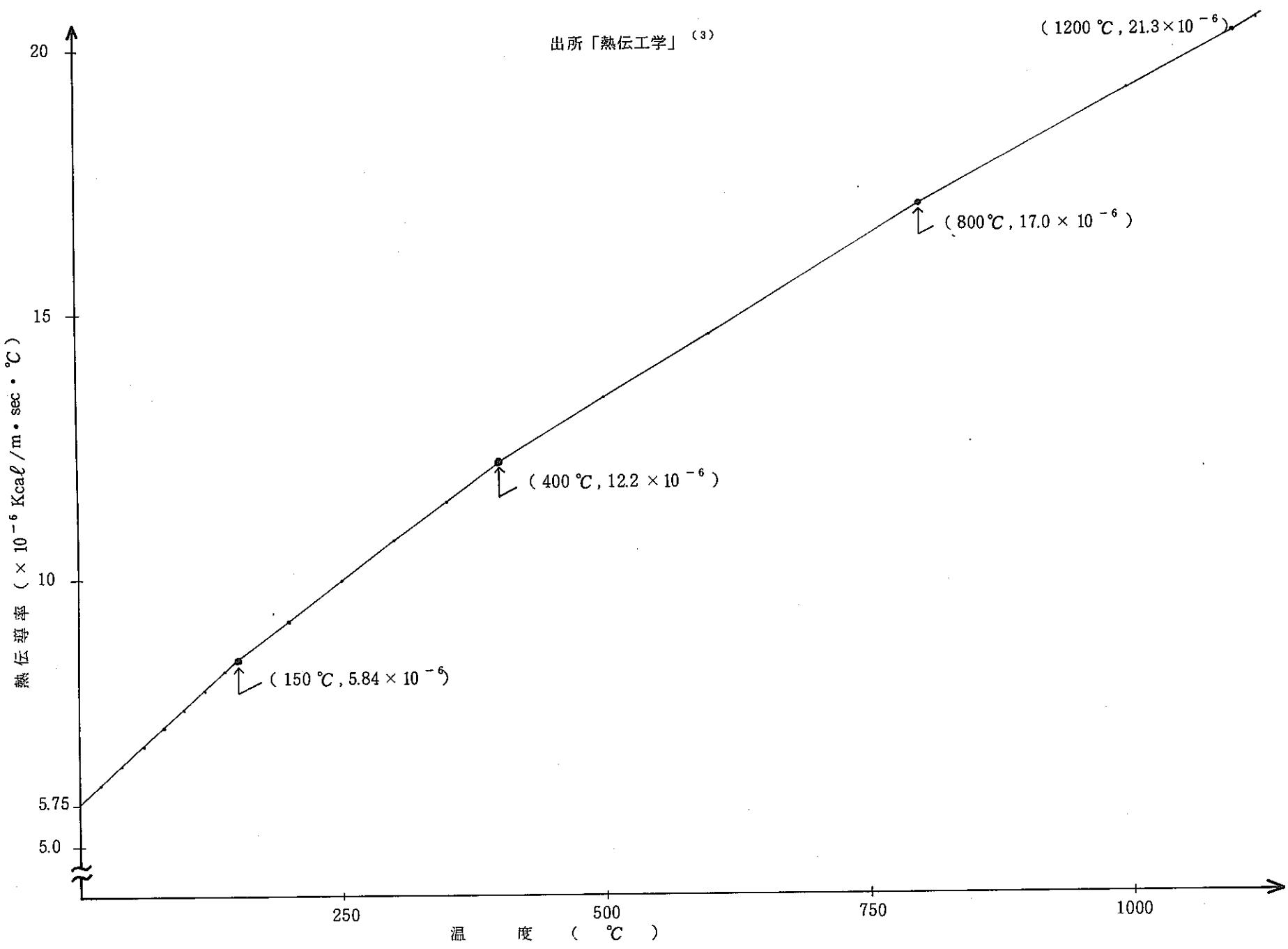


図 4.12 空気の熱伝導係数

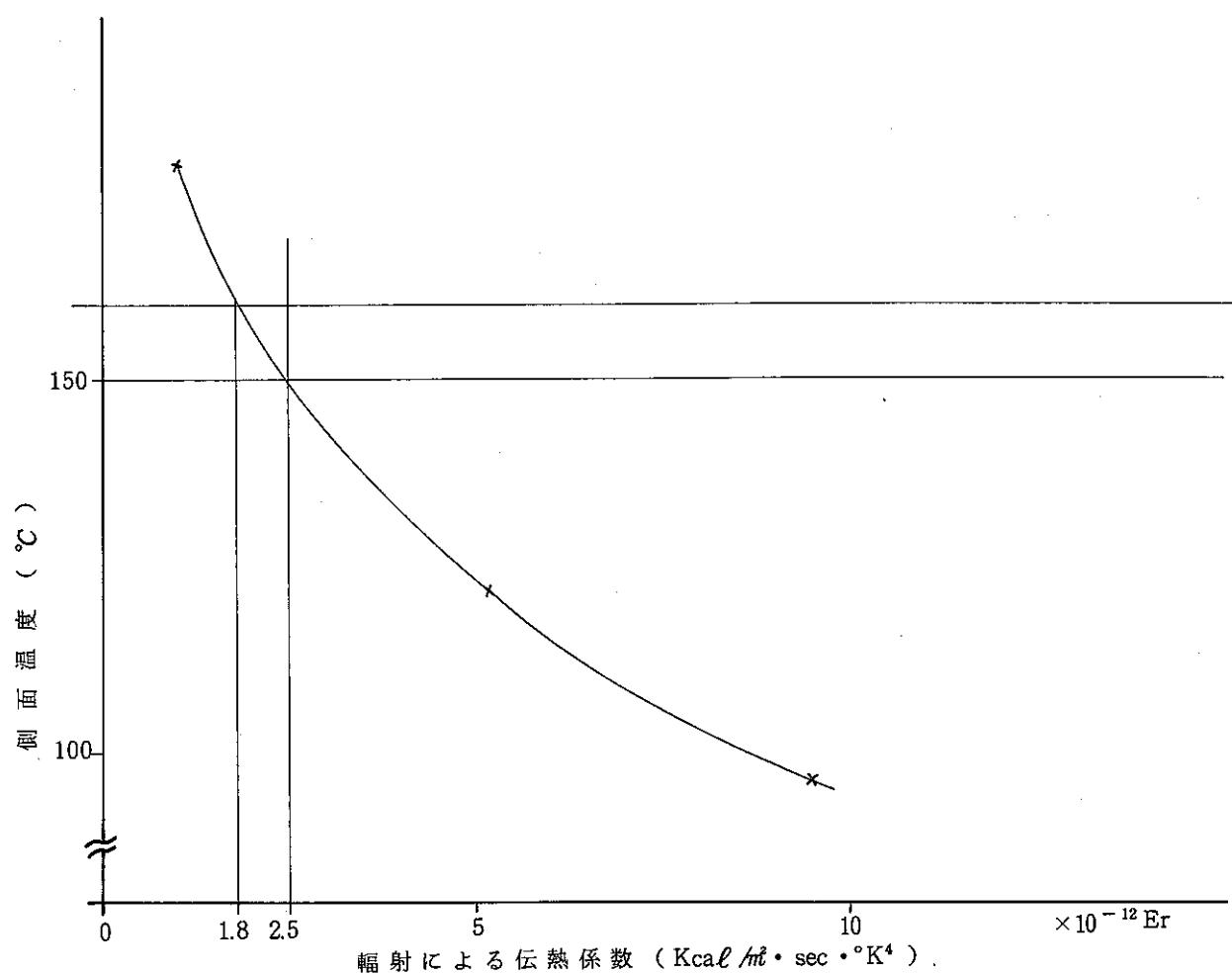


図 4.13 輻射による伝熱係数とガラス固化体側面温度との関係

(溶解ガラスをキャニスターに注入後10時間)

半径 15cm ガラス固化体

表 4.10 热応力計算条件

	項 目	設 定 値
ガラスの物性値	ヤング率	図 4.15 参照
	線膨張係数	Waste 30% の場合 $1.0 \times 10^{-5} / ^\circ C$ (常温～転移点) $8.0 \times 10^{-6} / ^\circ C$ (転移点以上)
	ポアソン比	図 4.14 参照
	初期歪なしの温度	転移点温度 ( $473^\circ C$ )
	引張破壊強度	$6.76 kg / mm^2$
	圧縮破壊強度	$91.6 kg / mm^2$
キャニスターの物性値	ヤング率	図 4.16 参照
	線膨張係数	図 4.17 参照
	ポアソン比	0.3
	初期歪なしの温度	ガラスの転移点温度と同じと仮定した。 $(473^\circ C)$

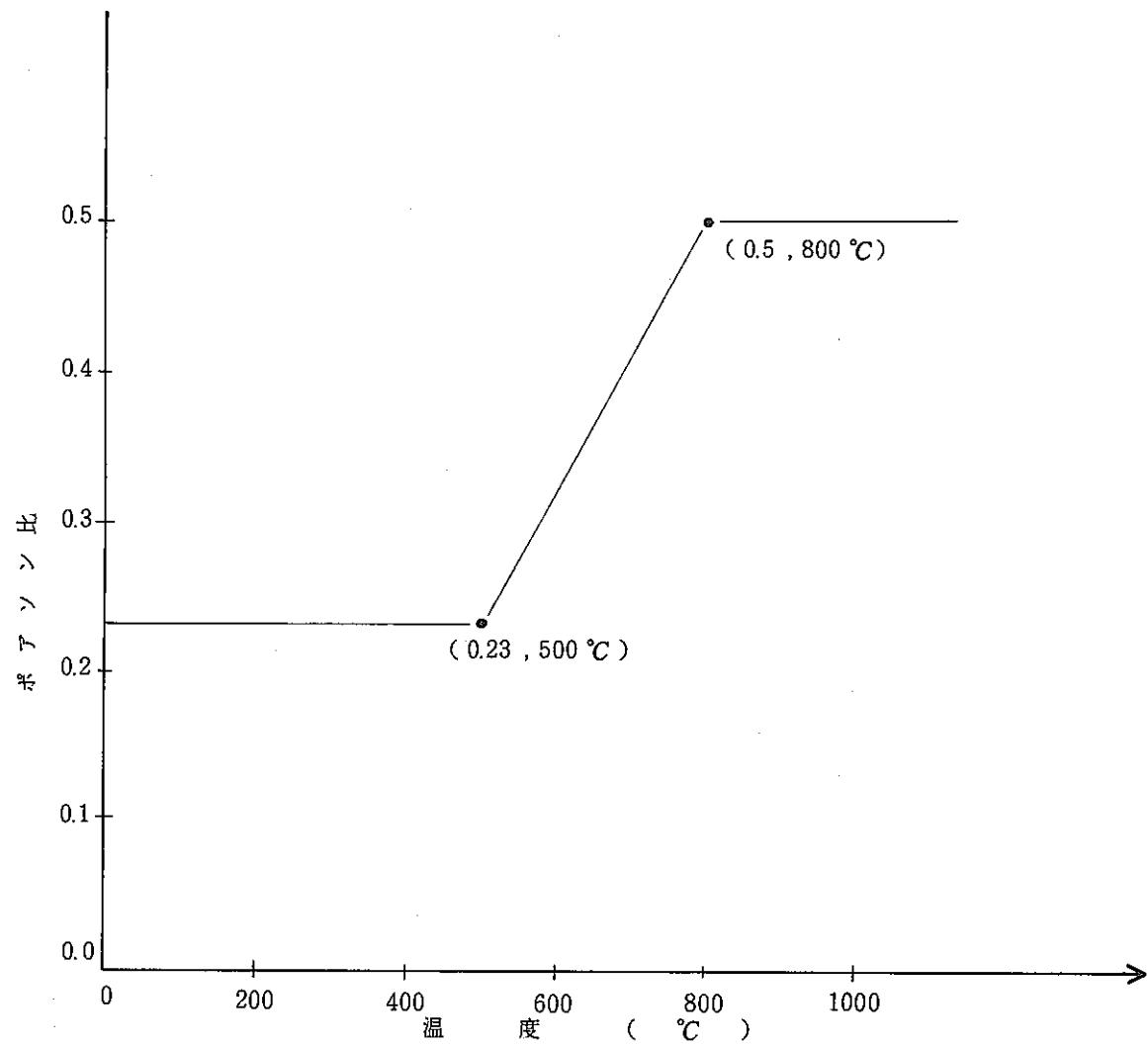


図 4.14 ガラスのポアソン比

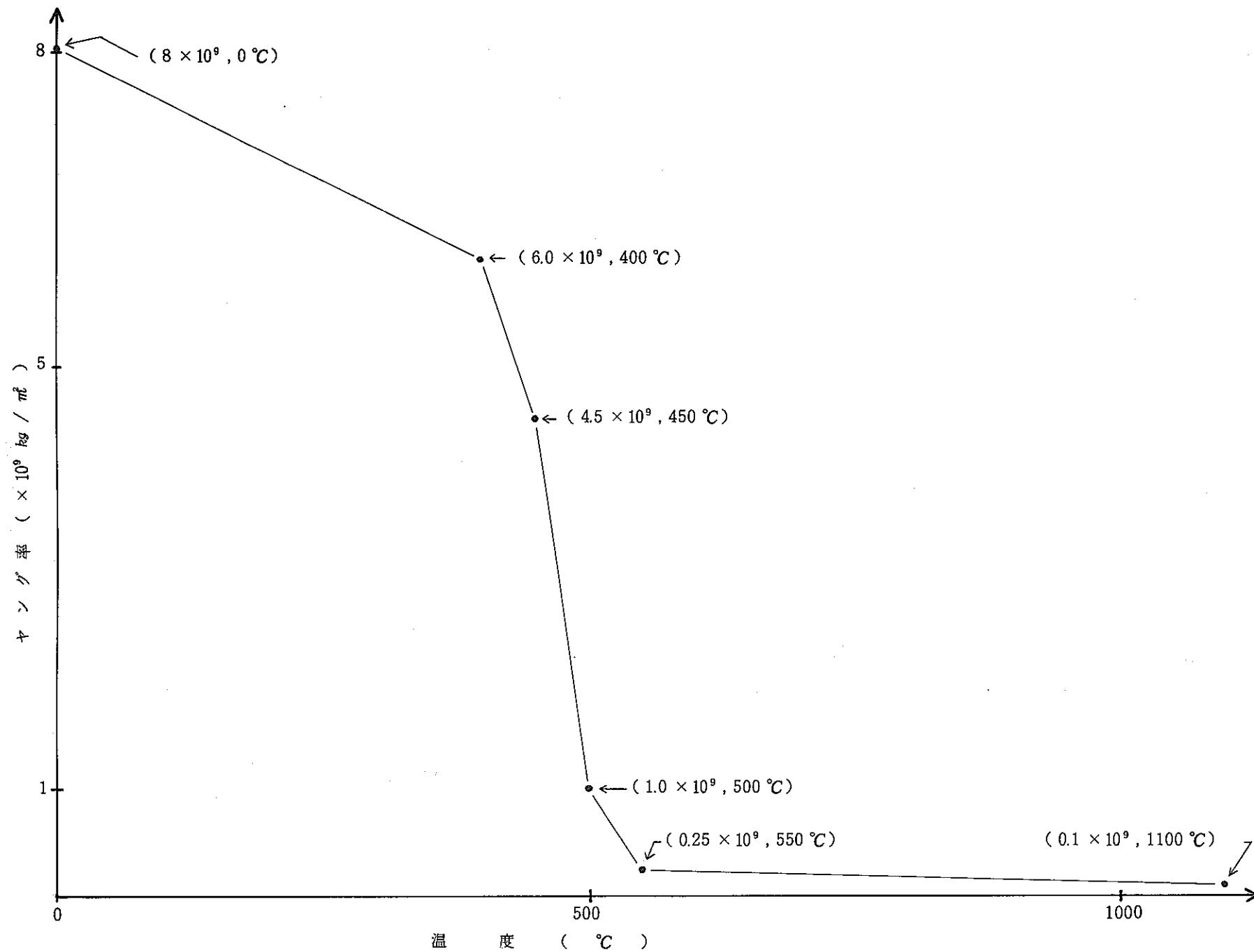


図 4.15 ガラスのヤング率

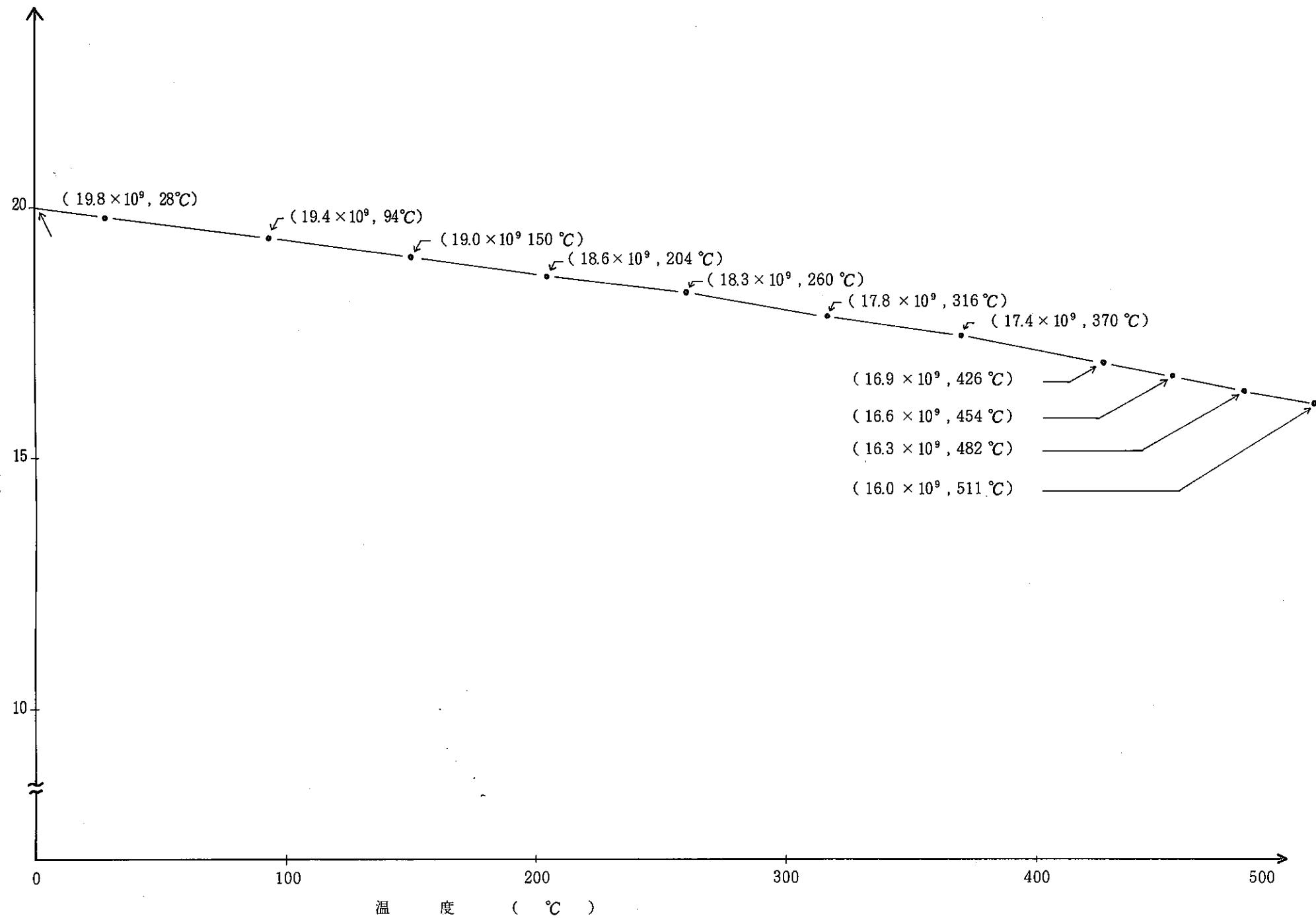


図 4.16 S U S 3 0 4 のヤング率

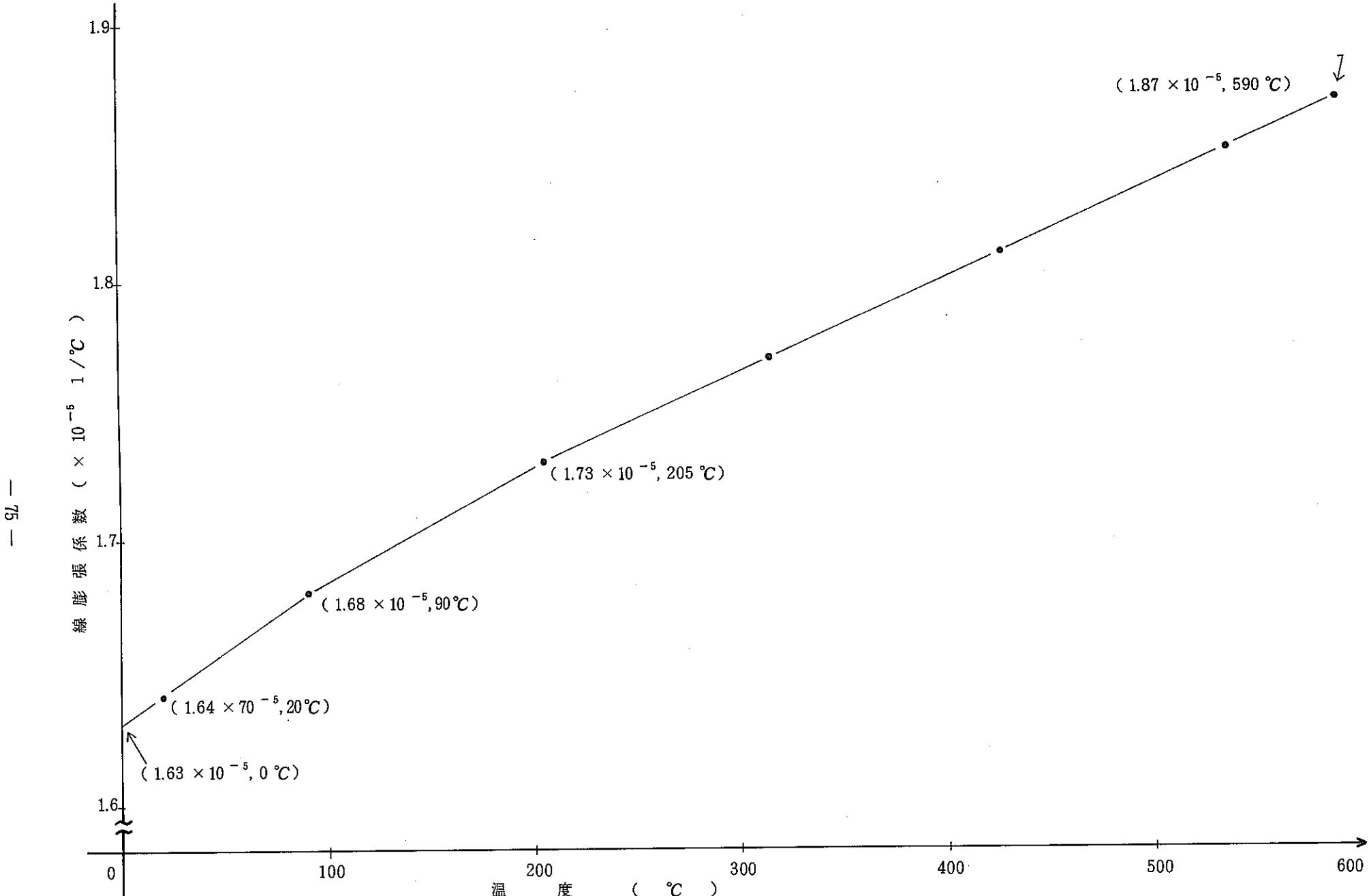


図 4.17 S U S 3 0 4 の平均線膨張係数

## 4.2 発熱計算結果

### 4.2.1 ORIGEN 計算結果

ORIGENコードを用いて、LWR型原子炉の800日の燃焼計算、180日の冷却計算およびその後、10万年の崩壊計算を行った。

その結果のうち、崩壊計算結果で発熱計算に関する核種（アクチノイドおよびその娘核種と核分裂生成物）の存在量、それらの熱出力、および  $\gamma$  Power を表4.11～4.18に示す。これらの結果のうち、熱出力と  $\gamma$  Power との経年変化を図4.18に、また、熱出力におけるf.p. とアクチノイドの割合を図4.19にまとめた。

これらをみると、熱出力と  $\gamma$  Power はともに指數減衰している。熱出力の構成をみると、200年頃までは、f.p. の熱出力が卓越するが、200年以降では、アクチノイドの熱出力が卓越するようになる。また、 $\gamma$  Power をみると、f.p. の  $\gamma$  Power は、熱出力の2割～4割を占るが、アクチノイドの  $\gamma$  Power は、ほぼ一定で、1000年位まで、 $2.75 \times 10^{-2} \sim 2.50 \times 10^{-2}$  とその割合は大変小さい。このようなf.p. および、アクチノイドの熱出力の合成を行うこと、崩壊開始当初、 $\gamma$  Power は、熱出力の3分の1位であるが、熱出力の主流がf.p. からアクチノイドへ変わる200年すぎから、急に  $\gamma$  Power は小さくなり、500年頃には、熱出力の40分の1位になる。

表 4.11 アクチノイドおよびその娘核種の存核量 [g-atom /MT]

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT CONCENTRATION, GRAM ATOMS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y
HE	0.00E-40	0.00E-40	7.63E-03	1.17E-02	1.41E-02	1.64E-02	1.95E-02	2.41E-02	2.81E-02	3.49E-02	4.04E-02	4.50E-02
TL	0.00E-40	2.70E-15	1.89E-15	9.52E-16	5.13E-16	3.11E-16	1.94E-16	1.52E-16	1.47E-16	1.45E-16	1.41E-16	1.36E-16
PB	0.00E-40	4.94E-10	1.24E-09	2.12E-09	2.58E-09	2.83E-09	3.06E-09	3.30E-09	3.51E-09	3.91E-09	4.28E-09	4.62E-09
BI	0.00E-40	1.83E-13	1.51E-13	1.26E-13	1.30E-13	1.52E-13	2.07E-13	3.55E-13	5.86E-13	1.40E-12	2.85E-12	5.16E-12
PO	0.00E-40	6.61E-18	6.34E-18	1.19E-17	2.47E-17	4.42E-17	8.57E-17	2.05E-16	3.71E-16	9.39E-16	1.98E-15	3.71E-15
AT	0.00E-40	1.75E-23	1.83E-23	1.97E-23	2.23E-23	2.63E-23	3.46E-23	5.48E-23	8.26E-23	1.61E-22	2.71E-22	4.11E-22
RN	0.00E-40	2.26E-15	1.58E-15	7.96E-16	4.29E-16	2.60E-16	1.64E-16	1.36E-16	1.43E-16	1.82E-16	2.51E-16	3.60E-16
FR	0.00E-40	3.48E-19	4.64E-19	6.85E-19	9.04E-19	1.12E-18	1.45E-18	2.01E-18	2.58E-18	3.79E-18	5.14E-18	6.68E-18
RA	0.00E-40	1.29E-11	9.30E-12	5.32E-12	3.72E-12	3.25E-12	3.52E-12	5.03E-12	7.32E-12	1.45E-11	2.63E-11	4.41E-11
AC	0.00E-40	7.03E-12	1.11E-11	1.87E-11	2.59E-11	3.27E-11	4.21E-11	5.59E-11	6.76E-11	8.63E-11	9.99E-11	1.10E-10
TH	0.00E-40	1.11E-06	1.05E-06	1.05E-06	1.05E-06	1.06E-06	1.06E-06	1.08E-06	1.10E-06	1.15E-06	1.22E-06	1.30E-06
PA	0.00E-40	2.58E-07	2.58E-07	2.59E-07	2.59E-07	2.59E-07	2.59E-07	2.60E-07	2.60E-07	2.61E-07	2.61E-07	2.61E-07
U	4.20E+03	4.04E+00	4.04E+00	4.04E+00	4.04E+00	4.04E+00	4.04E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00
NP	0.00E-40	1.60E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.61E+00
PU	0.00E-40	9.68E-02	1.04E-01	1.06E-01	1.07E-01	1.08E-01	1.10E-01	1.11E-01	1.13E-01	1.15E-01	1.17E-01	1.18E-01
AM	0.00E-40	2.51E-01	2.51E-01	2.51E-01	2.52E-01	2.52E-01	2.52E-01	2.52E-01	2.52E-01	2.51E-01	2.49E-01	2.48E-01
CM	0.00E-40	3.63E-02	2.90E-02	2.54E-02	2.36E-02	2.20E-02	1.97E-02	1.66E-02	1.39E-02	9.98E-03	7.27E-03	5.42E-03
BK	0.00E-40	2.47E-10	1.10E-10	2.20E-11	4.38E-12	8.74E-13	7.78E-14	1.38E-15	2.45E-17	7.72E-21	5.91E-24	3.48E-24
CF	0.00E-40	2.33E-10	3.65E-10	4.46E-10	4.56E-10	4.54E-10	4.47E-10	4.36E-10	4.27E-10	4.12E-10	4.01E-10	3.91E-10
ES	0.00E-40	1.29E-16	9.29E-22	2.31E-32	0.00E-40							
TOTALS	4.20E+03	6.02E+00	6.03E+00	6.04E+00	6.04E+00	6.04E+00	6.04E+00	6.05E+00	6.05E+00	6.06E+00	6.06E+00	6.07E+00

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT CONCENTRATION, GRAM ATOMS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	100. Y	200. Y	300. Y	400. Y	500. Y	1000. Y	3000. Y	5000. Y	10000. Y	100000. Y
HE	0.00E-40	4.50E-02	6.10E-02	8.30E-02	1.01E-01	1.15F-01	1.28E-01	1.70E-01	2.29E-01	2.59E-01	3.19E-01	6.75E-01
TL	0.00E-40	1.36E-16	1.11E-16	8.08E-17	7.01E-17	6.76E-17	6.86E-17	8.62E-17	2.25E-16	4.54E-16	1.33E-15	2.80E-14
PB	0.00E-40	4.62E-09	5.98E-09	7.62E-09	8.66E-09	9.62E-09	1.08E-08	2.42E-08	3.61E-07	1.42E-06	8.07E-06	9.06E-04
BI	0.00E-40	5.16E-12	3.68E-11	2.85E-10	9.55E-10	2.26E-09	4.40E-09	3.51E-08	9.21E-07	4.11E-06	2.96E-05	9.29E-03
PO	0.00E-40	3.71E-15	3.16E-14	2.75E-13	9.01E-13	1.99E-12	3.58E-12	2.01E-11	1.71E-10	3.95E-10	1.04E-09	8.23E-09
AT	0.00E-40	4.11E-22	1.57E-21	6.21E-21	1.39E-20	2.47E-20	3.86E-20	1.53E-19	1.32E-18	3.49E-18	1.21E-17	2.81E-16
RN	0.00E-40	3.60E-16	1.77E-15	1.11E-14	3.21E-14	6.63E-14	1.14E-13	5.56E-13	4.74E-12	1.09E-11	2.87E-11	2.28E-10
FR	0.00E-40	6.68E-18	1.77E-17	5.97E-17	1.29E-16	2.26E-16	3.51E-16	1.39E-15	1.19E-14	3.14E-14	1.09E-13	2.53E-12
RA	0.00E-40	4.41E-11	2.64E-10	1.70E-09	4.91E-09	1.01E-08	1.75E-08	8.51E-08	7.25E-07	1.67E-06	4.38E-06	3.49E-05
AC	0.00E-40	1.10E-10	1.32E-10	1.41E-10	1.45E-10	1.49E-10	1.53E-10	1.76E-10	2.84E-10	4.22E-10	8.70E-10	1.36E-08
TH	0.00E-40	1.30E-06	1.92E-06	3.88E-06	6.39E-06	9.21E-06	1.22E-05	2.82E-05	9.78E-05	1.74E-04	3.82E-04	3.95E-03
PA	0.00E-40	2.61E-07	2.65E-07	2.71E-07	2.77E-07	2.83E-07	2.89E-07	3.18E-07	4.34E-07	5.53E-07	8.77E-07	9.12E-06
U	4.20E+03	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.05E+00	4.12E+00	4.34E+00
NP	0.00E-40	1.61E+00	1.61E+00	1.63E+00	1.65E+00	1.66E+00	1.67E+00	1.70E+00	1.72E+00	1.72E+00	1.72E+00	1.67E+00
PU	0.00E-40	1.18E-01	1.19E-01	1.18E-01	1.17E-01	1.17E-01	1.17E-01	1.19E-01	1.25E-01	1.29E-01	1.32E-01	1.65E-02
AM	0.00E-40	2.48E-01	2.38E-01	2.20E-01	2.05E-01	1.91E-01	1.80E-01	1.42E-01	9.73E-02	8.03E-02	5.10E-02	1.47E-05
CM	0.00E-40	5.42E-03	2.04E-03	1.45E-03	1.42E-03	1.41E-03	1.40E-03	1.33E-03	1.12E-03	9.41E-04	6.10E-04	1.28E-06
BK	0.00E-40	3.48E-24	3.47E-24	3.46E-24	3.44E-24	3.43E-24	3.42E-24	3.35E-24	3.09E-24	2.86E-24	2.34E-24	6.49E-26
CF	0.00E-40	3.91E-10	3.53E-10	2.91E-10	2.41E-10	2.00E-10	1.66E-10	6.62E-11	3.16E-12	4.62E-13	9.36E-15	2.31E-21
TOTALS	4.20E+03	6.07E+00	6.08E+00	6.11E+00	6.12E+00	6.14E+00	6.15E+00	6.19E+00	6.25E+00	6.28E+00	6.34E+00	6.72E+00

表 4.12 核分裂生成物の存在量 [g - atom / MT] (その1)

## REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2 SEC

ELEMENT CONCENTRATION, GRAM ATOMS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y
H	0.00E-40	1.90E-03	1.80E-03	1.60E-03	1.43E-03	1.28E-03	1.08E-03	8.16E-04	6.15E-04	3.50E-04	1.99E-04	1.13E-04
GE	0.00E-40	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03	4.03E-03
AS	0.00E-40	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04	9.68E-04
SE	0.00E-40	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01	5.68E-01
BR	0.00E-40	0.00E-40	6.80E-07	2.04E-06	3.40E-06	4.76E-06	6.80E-06	1.02E-05	1.36E-05	2.04E-05	2.72E-05	3.40E-05
RB	0.00E-40	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00	3.57E+00
SR	0.00E-40	9.36E+00	9.18E+00	8.92E+00	8.67E+00	8.43E+00	8.09E+00	7.57E+00	7.12E+00	6.37E+00	5.78E+00	5.32E+00
Y	0.00E-40	4.91E+00	4.88E+00									
ZR	0.00E-40	3.49E+01	3.50E+01	3.53E+01	3.55E+01	3.58E+01	3.61E+01	3.66E+01	3.71E+01	3.78E+01	3.84E+01	3.89E+01
NB	0.00E-40	1.27E-01	2.95E-03	1.63E-05	2.17E-05	2.82E-05	3.81E-05	5.44E-05	7.08E-05	1.04E-04	1.36E-04	1.69E-04
MO	0.00E-40	3.00E+01	3.03E+01									
TC	0.00E-40	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00	7.32E+00
RU	0.00E-40	1.76E+01	1.71E+01	1.68E+01	1.67E+01							
RH	0.00E-40	3.38E+00	3.40E+00									
PD	0.00E-40	7.85E+00	8.28E+00	8.59E+00	8.67E+00	8.69E+00	8.70E+00	8.70E+00	8.70E+00	8.70E+00	8.70E+00	8.70E+00
AG	0.00E-40	3.85E-01	3.83E-01	3.83E-01	3.82E-01							
CD	0.00E-40	4.36E-01	4.38E-01									
IN	0.00E-40	9.90E-03	9.92E-03	9.93E-03	9.95E-03	9.96E-03	9.98E-03	1.00E-02	1.00E-02	1.01E-02	1.01E-02	1.01E-02
SN	0.00E-40	3.05E-01	3.02E-01	3.01E-01								
SB	0.00E-40	1.03E-01	9.61E-02	8.28E-02	7.47E-02	6.98E-02	6.58E-02	6.34E-02	6.27E-02	6.25E-02	6.25E-02	6.25E-02
TE	0.00E-40	3.51E+00	3.51E+00	3.52E+00	3.53E+00	3.54E+00						
I	0.00E-40	1.68E-01	1.72E-01									
XE	0.00E-40	8.00E-40	7.02E-09	1.88E-08	3.06E-08	4.23E-08	6.00E-08	8.94E-08	1.19E-07	1.78E-07	2.36E-07	2.95E-07
CS	0.00E-40	1.74E+01	1.69E+01	1.63E+01	1.58E+01	1.55E+01	1.50E+01	1.43E+01	1.37E+01	1.27E+01	1.19E+01	1.13E+01
BA	0.00E-40	8.19E+00	8.61E+00	9.23E+00	9.70E+00	1.01E+01	1.06E+01	1.12E+01	1.18E+01	1.28E+01	1.36E+01	1.42E+01
LA	0.00E-40	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00	7.88E+00
CE	0.00E-40	1.69E+01	1.59E+01	1.53E+01	1.52E+01	1.52F+01	1.52E+01	1.52E+01	1.52E+01	1.52E+01	1.52E+01	1.52E+01
PR	0.00E-40	7.42E+00	7.43E+00									
ND	0.00E-40	2.29E+01	2.39E+01	2.45E+01	2.46E+01							
PM	0.00E-40	8.20E-01	6.29E-01	3.71E-01	2.18E-01	1.29E-01	5.81E-02	1.55E-02	4.13E-03	2.93E-04	2.08E-05	1.47E-06
SM	0.00E-40	4.55E+00	4.74E+00	4.99E+00	5.14E+00	5.23E+00	5.29E+00	5.32E+00	5.32E+00	5.31E+00	5.29E+00	5.28E+00
EU	0.00E-40	8.43E-01	8.30E-01	8.12E-01	7.99E-01	7.90E-01	7.78E-01	7.64E-01	7.55E-01	7.46E-01	7.45E-01	7.49E-01
GD	0.00E-40	3.53E-01	3.68E-01	3.90E-01	4.08E-01	4.22E-01	4.40E-01	4.64E-01	4.83E-01	5.11E-01	5.29E-01	5.40E-01
TB	0.00E-40	7.61E-03	7.54E-03									
DY	0.00E-40	3.86E-03	3.93E-03									
HO	0.00E-40	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04	2.53E-04
ER	0.00E-40	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05	6.76E-05
TOTALS	0.00E-40	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02	2.12E+02

表 4.13 核分裂生成物の存在量 [ g - atom / MT ] (その 2)

表 4.14 アクチノイドおよびその娘核種の熱出力 [Watt / MT]

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT THERMAL POWER, WATTS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y
TL	0.00E-40	3.81E-06	2.67E-06	1.34E-06	7.11E-07	4.21E-07	2.51E-07	1.84E-07	1.71E-07	1.58E-07	1.45E-07	1.32E-07
PB	0.00E-40	6.52E-07	4.57E-07	2.29E-07	1.23E-07	7.36E-08	4.49E-08	3.41E-08	3.25E-08	3.11E-08	2.95E-08	2.80E-08
BI	0.00E-40	7.90E-06	5.53E-06	2.78E-06	1.49E-06	8.90E-07	5.42E-07	4.12E-07	3.92E-07	3.74E-07	3.54E-07	3.34E-07
PO	0.00E-40	3.40E-05	2.38E-05	1.19E-05	6.36E-06	3.77E-06	2.25E-06	1.66E-06	1.55E-06	1.43E-06	1.32E-06	1.22E-06
AT	0.00E-40	2.59E-10	2.70E-10	2.91E-10	3.30E-10	3.89E-10	5.12E-10	8.10E-10	1.22E-09	2.38E-09	4.00E-09	6.07E-09
RN	0.00E-40	1.72E-05	1.21E-05	6.05E-06	3.23E-06	1.92E-06	1.15E-06	8.57E-07	8.05E-07	7.51E-07	6.98E-07	6.47E-07
FR	0.00E-40	2.34E-10	2.46E-10	2.68E-10	3.07E-10	3.63E-10	4.77E-10	7.49E-11	1.12E-09	2.16E-09	3.60E-09	5.45E-09
RA	0.00E-40	1.56E-05	1.09E-05	5.46E-06	2.91E-06	1.73E-06	1.04E-06	7.72E-07	7.24E-07	6.75E-07	6.27E-07	5.81E-07
AC	0.00E-40	2.71E-10	3.14E-10	3.94E-10	4.87E-10	5.91E-10	7.71E-10	1.13E-09	1.56E-09	2.67E-09	4.11E-09	5.89E-09
TH	0.00E-40	1.51E-04	1.05E-05	5.34E-06	2.92E-06	1.79E-06	1.13E-06	8.81E-07	8.38E-07	7.99E-07	7.62E-07	7.29E-07
PA	0.00E-40	1.98E-03	3.62E-04	3.62E-04	3.62E-04	3.62E-04	3.62E-04	3.63E-04	3.63E-04	3.64E-04	3.64E-04	3.64E-04
U	1.05E-05	1.86E-05	2.25E-05	2.80E-05	3.38E-05	3.95E-05	4.78E-05	6.14E-05	7.45E-05	9.96E-05	1.23E-04	1.45E-04
NP	0.00E-40	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02
PU	0.00E-40	2.28E-01	1.07E+00	1.28E+00	1.27E+00	1.26E+00	1.24E+00	1.20E+00	1.16E+00	1.10E+00	1.03E+00	9.74E-01
AM	0.00E-40	3.61E+00	3.61E+00	3.62E+00	3.63E+00	3.64E+00	3.64E+00	3.64E+00	3.64E+00	3.62E+00	3.59E+00	3.54E+00
CM	0.00E-40	2.57E+02	6.84E+01	1.89E+01	1.55E+01	1.43E+01	1.28E+01	1.06E+01	8.74E+00	5.99E+00	4.12E+00	2.84E+00
BK	0.00E-40	2.56E-08	1.14E-08	2.28E-09	4.54E-10	9.05E-11	8.06E-12	1.43E-13	2.57E-15	3.11E-17	3.02E-17	3.02E-17
CF	0.00E-40	1.22E-07	1.09E-07	8.73E-08	7.14E-08	6.04E-08	4.96E-08	3.93E-08	3.31E-08	2.55E-08	2.11E-08	1.84E-08
ES	0.00E-40	3.26E-11	2.34E-16	5.83E-27	0.00E-40							
TOTALS	1.05E-02	2.61E+02	7.31E+01	2.38E+01	2.04E+01	1.92E+01	1.76E+01	1.54E+01	1.36E+01	1.07E+01	8.76E+00	7.38E+00

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT THERMAL POWER, WATTS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	100. Y	200. Y	300. Y	400. Y	500. Y	1000. Y	3000. Y	5000. Y	10000. Y	100000. Y
TL	0.00E-40	1.32E-07	8.51E-08	3.77E-08	2.04E-08	1.49E-08	1.41E-08	2.81E-08	1.80E-07	4.59E-07	1.56E-06	3.60E-05
PB	0.00E-40	2.80E-08	2.15E-08	1.64E-08	1.83E-08	2.46E-08	3.40E-08	1.19E-07	9.53E-07	2.36E-06	7.37E-06	1.34E-04
BI	0.00E-40	3.34E-07	2.52E-07	1.72E-07	1.65E-07	1.95E-07	2.48E-07	7.58E-07	5.72E-06	1.40E-05	4.28E-05	7.42E-04
PO	0.00E-40	1.22E-06	8.28E-07	5.15E-07	5.62E-07	8.15E-07	1.21E-06	4.91E-06	4.12E-05	1.02E-04	3.19E-04	5.70E-03
AT	0.00E-40	6.07E-09	2.32E-08	9.17E-08	2.06E-07	3.65E-07	5.70E-07	2.27E-06	1.96E-05	5.15E-05	1.79E-04	4.16E-03
RN	0.00E-40	6.47E-07	4.44E-07	2.42E-07	1.84E-07	1.93E-07	2.37E-07	7.35E-07	5.45E-06	1.24E-05	3.23E-05	2.58E-04
FR	0.00E-40	5.45E-09	2.07E-08	8.15E-08	1.83E-07	3.24E-07	5.06E-07	2.01E-06	1.74E-05	4.57E-05	1.59E-04	3.69E-03
RA	0.00E-40	5.81E-07	3.97E-07	2.15E-07	1.64E-07	1.73E-07	2.14E-07	6.73E-07	5.04E-06	1.16E-05	3.09E-05	2.89E-04
AC	0.00E-40	5.89E-09	2.01E-08	7.63E-08	1.70E-07	3.00E-07	4.68E-07	1.86E-06	1.60E-05	4.22E-05	1.47E-04	3.40E-03
TH	0.00E-40	7.29E-07	6.38E-07	7.38E-07	1.05E-06	1.48E-06	1.98E-06	5.08E-06	2.51E-05	5.56E-05	1.65E-04	3.22E-03
PA	0.00E-40	3.64E-04	3.66E-04	3.70E-04	3.73E-04	3.76E-04	3.78E-04	3.86E-04	3.91E-04	3.91E-04	3.83E-04	3.83E-04
U	1.05E-02	1.45E-04	2.37E-04	3.50E-04	4.10E-04	4.43E-04	4.63E-04	5.01E-04	5.75E-04	6.46E-04	8.18E-04	3.26E-03
NP	0.00E-40	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.58E-02	1.56E-02	1.45E-02	1.35E-02	1.17E-02	8.21E-03
PU	0.00E-40	9.74E-01	7.26E-01	4.24E-01	2.74E-01	1.97E-01	1.56E-01	1.09E-01	9.84E-02	9.24E-02	7.97E-02	6.63E-03
AM	0.00E-40	3.54E+00	3.31E+00	2.85E+00	2.46E+00	2.12E+00	1.84E+00	9.30E-01	1.95E-01	1.39E-01	8.79E-02	2.55E-05
CM	0.00E-40	2.84E+00	4.94E-01	6.59E-02	3.69E-02	2.39E-02	1.59E-02	3.33E-03	1.59E-03	1.33E-03	8.54E-04	4.24E-07
BK	0.00E-40	3.02E-17	3.02E-17	3.01E-17	2.99E-17	2.98E-17	2.97E-17	2.91E-17	2.69E-17	2.48E-17	2.03E-17	5.64E-19
CF	0.00E-40	1.84E-08	1.38E-08	1.12E-08	9.22E-09	7.59E-09	6.26E-09	2.40E-09	7.33E-11	7.12E-12	1.33E-13	2.35E-18
TOTALS	1.05E-02	7.38E+00	4.54E+00	3.35E+00	2.70E+00	2.36E+00	2.02E+00	1.06E+00	3.11E-01	2.48E-01	1.82E-01	4.01E-02

表 4.15 核分裂生成物の熱出力 [ Watt / MT ] (その1)

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2 SEC

ELEMENT THERMAL POWER, WATTS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y
H	0.00E-40	1.96E-03	1.86E-03	1.66E-03	1.48E-03	1.32E-03	1.12E-03	8.44E-04	6.37E-04	3.62E-04	2.06E-04	1.17E-04
SE	0.00E-40	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04
RB	0.00E-40	2.59E-03	1.53E-08	1.19E-08								
SR	0.00E-40	4.16E+02	9.44E+01	8.75E+01	8.33E+01	7.93E+01	7.36E+01	6.51E+01	5.75E+01	4.49E+01	3.51E+01	2.74E+01
Y	0.00E-40	9.99E+02	4.21E+02	3.93E+02	3.74E+02	3.56E+02	3.31E+02	2.92E+02	2.59E+02	2.02E+02	1.58E+02	1.23E+02
ZR	0.00E-40	1.27E+03	2.59E+01	1.09E-02	2.05E-04	2.00E-04						
NB	0.00E-40	2.28E+03	5.29E+01	2.15E-02	9.49E-05	1.07E-04	1.34E-04	1.72E-04	2.01E-04	2.40E-04	2.64E-04	2.79E-04
TC	0.00E-40	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03	8.35E-03
RU	0.00E-40	1.99E+02	9.27E+00	2.26E+00	5.68E-01	1.43E-01	1.80E-02	5.73E-04	1.82E-05	1.85E-08	1.89E-11	1.89E-14
RH	0.00E-40	3.19E+03	1.59E+03	4.00E+02	1.01E+02	2.53E+01	3.20E+00	1.02E-01	3.22E-03	3.28E-06	3.35E-09	3.38E-12
PD	0.00E-40	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06
AG	0.00E-40	2.24E+01	8.24E+00	1.11E+00	1.51E-01	2.03E-02	1.01E-03	6.78E-06	4.55E-08	2.05E-12	9.26E-17	4.80E-21
CD	0.00E-40	1.11E-01	6.33E-03	5.47E-03	4.95E-03	4.48E-03	3.87E-03	3.02E-03	2.36E-03	1.44E-03	8.75E-04	5.33E-04
IN	0.00E-40	2.35E-04	1.48E-06	5.93E-11	2.37E-15	9.46E-20	2.39E-26	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
SN	0.00E-40	1.13E+01	1.49E+00	2.67E-02	9.30E-04	4.36E-04	4.20E-04	4.20E-04	4.20E-04	4.20E-04	4.20E-04	4.20E-04
SB	0.00E-40	2.41E+01	1.83E+01	1.10E+01	6.56E+00	3.93E+00	1.82E+00	5.10E-01	1.47E-01	1.83E-02	8.46E-03	7.70E-03
TE	0.00E-40	2.16E+01	4.26E+00	1.93E+00	1.15E+00	6.89E-01	3.19E-01	8.83E-02	2.45E-02	1.88E-03	1.44E-04	1.10E-05
I	0.00E-40	6.63E-05	2.00E-06									
XE	0.00E-40	0.00E-40	2.95E-16	0.00E-40								
CS	0.00E-40	1.69E+03	1.24E+03	6.96E+02	4.16E+02	2.70E+02	1.70E+02	1.14E+02	9.51E+01	7.41E+01	5.88E+01	4.66E+01
BA	0.00E-40	3.33E+02	3.25E+02	3.10E+02	2.96E+02	2.83E+02	2.64E+02	2.35E+02	2.10E+02	1.66E+02	1.32E+02	1.05E+02
LA	0.00E-40	2.05E+00	5.26E-09	3.46E-26	0.00E-40							
CE	0.00E-40	7.36E+02	2.73E+02	4.58E+01	7.71E+00	1.30E+00	8.93E-02	1.04E-03	1.20E-05	1.61E-09	2.17E-13	2.91E-17
PR	0.00E-40	6.30E+03	2.58E+03	4.34E+02	7.30E+01	1.23E+01	8.46E-01	9.81E-03	1.14E-04	1.53E-08	2.05E-12	2.76E-16
ND	0.00E-40	2.91E-02	3.61E-12	0.00E-40								
PM	0.00E-40	8.79E+01	4.44E+01	2.61E+01	1.54E+01	9.05E+00	4.09E+00	1.09E+01	2.90E-01	2.06E-02	1.46E-03	1.04E-04
SM	0.00E-40	2.04E+00	2.02E+00	1.99E+00	1.96E+00	1.93E+00	1.07E+03	1.07E+03	1.74E+00	1.61E+00	1.48E+00	1.37E+00
EU	0.00E-40	3.85E+01	3.56E+01	3.15E+01	2.84E+01	2.58E+01	2.25E+01	1.81E+01	1.46E+01	9.43E+00	6.11E+00	3.96E+00
GD	0.00E-40	1.62E-02	5.68E-03	7.00E-04	8.64E-05	1.07E-05	4.62E-07	2.47E-09	1.32E-11	3.77E-16	1.08E-20	3.09E-25
TB	0.00E-40	1.18E+00	3.52E-02	3.13E-05	2.79E-08	2.49E-11	6.61E-16	1.57E-23	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
HO	0.00E-40	2.22E-06	2.22E-06	2.22E-06	2.21E-06	2.21E-06	2.21E-06	2.20E-06	2.20E-06	2.18E-06	2.17E-06	2.16E-06
TOTALS	0.00E-40	1.76E+04	6.73E+03	2.44E+03	1.41E+03	1.07E+03	8.73E+02	7.29E+02	6.37E+02	4.98E+02	3.91E+02	3.08E+02

表 4.16 核分裂生成物の熱出力 (Watt/MT) (その2)

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT THERMAL POWER, WATTS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	100. Y	200. Y	300. Y	400. Y	500. Y	1000. Y	3000. Y	5000. Y	10000. Y	100000. Y
H	0.00E-40	1.17E-04	7.01E-06	2.51E-08	8.94E-11	3.19E-13	1.14E-15	6.58E-28	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
SE	0.00E-40	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.32E-04	1.32E-04	1.29E-04	1.26E-04	1.20E-04	4.58E-05
RB	0.00E-40	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08	1.19E-08
SR	0.00E-40	2.74E+01	7.99E+00	6.78E-01	5.75E-02	4.88E-03	4.14E-04	1.82E-09	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
Y	0.00E-40	1.23E+02	3.59E+01	3.05E+00	2.59E-01	2.19E-02	1.86E-03	8.18E-09	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
ZR	0.00E-40	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	1.99E-04	1.91E-04	
NB	0.00E-40	2.79E-04	2.99E-04	3.00E-04	3.00E-04	3.00E-04	3.00E-04	3.00E-04	3.00E-04	2.99E-04	2.87E-04	
TC	0.00E-40	8.35E-03	8.35E-03	8.34E-03	8.34E-03	8.34E-03	8.33E-03	8.32E-03	8.27E-03	8.21E-03	8.08E-03	6.02E-03
RH	0.00E-40	3.38E-12	3.50E-27	0.00E-40								
PD	0.00E-40	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.93E-06	5.92E-06	5.87E-06	
CD	0.00E-40	5.33E-04	4.49E-05	3.17E-07	2.24E-09	1.59E-11	1.12E-13	1.99E-24	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
SN	0.00E-40	4.20E-04	4.20E-04	4.19E-04	4.19E-04	4.19E-04	4.18E-04	4.17E-04	4.11E-04	4.05E-04	3.92E-04	2.10E-04
SB	0.00E-40	7.70E-03	7.64E-03	7.63E-03	7.62E-03	7.62E-03	7.61E-03	7.59E-03	7.48E-03	7.38E-03	7.13E-03	3.82E-03
TE	0.00E-40	1.10E-05	2.94E-11	2.08E-22	0.00E-40							
I	0.00E-40	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-06	1.99E-06
CS	0.00E-40	4.66E+01	1.47E+01	1.46E+00	1.45E-01	1.45E-02	1.54E-03	1.17E-04	1.17E-04	1.17E-04	1.16E-04	1.14E-04
BA	0.00E-40	1.05E+02	3.30E+01	3.27E+00	3.25E-01	3.22E-02	3.19E-03	3.07E-08	2.61E-28	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
PM	0.00E-40	1.04E-04	1.86E-10	6.02E-22	0.00E-40							
SM	0.00E-40	1.37E+00	9.19E-01	4.14E-01	1.87E-01	8.42E-02	3.80E-02	7.06E-04	8.48E-11	1.02E-17	0.00E-40	0.00E-40
EU	0.00E-40	3.96E+00	4.53E-01	5.95E-03	7.81E-05	1.03E-06	1.35E-08	9.26E-18	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
HO	0.00E-40	2.16E-06	2.10E-06	1.98E-06	1.87E-06	1.76E-06	1.66E-06	1.25E-06	3.93E-07	1.24E-07	6.88E-09	0.00E-40
TOTALS	0.00E-40	3.08E+02	9.30E+01	8.89E+00	9.89E-01	1.75E-01	6.20E-02	1.78E-02	1.69E-02	1.67E-02	1.63E-02	1.07E-02

表 4.17 アクチノイドおよびその娘核種の  $\gamma$  Power [Watt /MT]

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT GAMMA POWER, WATTS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y
TL	0.00E-40	3.24E-06	2.27E-06	1.13E-06	6.04E-07	3.57E-07	2.11E-07	1.54E-07	1.43E-07	1.30E-07	1.19E-07	1.08E-07
PB	0.00E-40	3.31E-07	2.31E-07	1.16E-07	6.18E-08	3.66E-08	2.18E-08	1.61E-08	1.50E-08	1.39E-08	1.28E-08	1.18E-08
BI	0.00E-40	8.29E-07	5.80E-07	2.90E-07	1.54E-07	9.12E-08	5.41E-08	3.95E-08	3.66E-08	3.35E-08	3.06E-08	2.80E-08
PO	0.00E-40	1.44E-14	2.43E-14	4.12E-14	5.70E-14	7.19E-14	9.25E-14	1.23E-13	1.49E-13	1.89E-13	2.19E-13	2.41E-13
FR	0.00E-40	2.29E-14	3.60E-14	6.10E-14	8.45E-14	1.07E-13	1.37E-13	1.82E-13	2.20E-13	2.81E-13	3.25E-13	3.58E-13
RA	0.00E-40	3.02E-11	5.09E-11	8.63E-11	1.20E-10	1.51E-10	1.94E-10	2.57E-10	3.12E-10	3.97E-10	4.60E-10	5.06E-10
AC	0.00E-40	3.29E-14	6.38E-14	1.17E-13	1.60E-13	1.95E-13	2.36E-13	2.82E-13	3.10E-13	3.37E-13	3.48E-13	3.53E-13
TH	0.00E-40	3.41E-11	5.60E-11	9.49E-11	1.31E-10	1.66E-10	2.13E-10	2.83E-10	3.42E-10	4.37E-10	5.06E-10	5.56E-10
PA	0.00E-40	2.63E-04	2.39E-04	2.40E-04	2.40E-04							
U	0.00E-40	7.28E-08	2.07E-07	1.89E-07	1.72E-07	1.56E-07	1.36E-07	1.07E-07	8.48E-08	5.34E-08	3.39E-08	2.20E-08
NP	0.00E-40	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.84E-03	1.84E-03
PU	0.00E-40	1.31E-15	4.37E-13									
AM	0.00E-40	2.52E-02	2.52E-02	2.52E-02	2.52E-02	2.52E-02	2.52E-02	2.52E-02	2.52E-02	2.51E-02	2.51E-02	2.51E-02
CM	0.00E-40	2.62E-04	2.56E-04	2.46E-04	2.36E-04	2.26E-04	2.13E-04	1.92E-04	1.74E-04	1.42E-04	1.16E-04	9.59E-05
BK	0.00E-40	5.12E-12	2.29E-12	4.56E-13	9.08E-14	1.81E-14	1.63E-15	4.71E-17	1.90E-17	1.85E-17	1.85E-17	1.85E-17
CF	0.00E-40	3.89E-10	6.67E-10	8.41E-10	8.69E-10	8.69E-10	8.59E-10	8.43E-10	8.29E-10	8.05E-10	7.85E-10	7.67E-10
TOTALS	0.00E-40	2.76E-02	2.75E-02	2.75E-02	2.75E-02	2.75E-02	2.75E-02	2.74E-02	2.74E-02	2.73E-02	2.73E-02	2.73E-02

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT GAMMA POWER, WATTS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	100. Y	200. Y	300. Y	400. Y	500. Y	1000. Y	3000. Y	5000. Y	10000. Y	100000. Y
TL	0.00E-40	1.08E-07	6.67E-08	2.60E-08	1.10E-08	6.01E-09	5.01E-09	1.42E-08	1.23E-07	3.23E-07	1.12E-06	2.60E-05
PB	0.00E-40	1.18E-08	7.77E-09	3.97E-09	3.15E-09	3.79E-09	5.30E-09	2.11E-08	1.72E-07	3.94E-07	1.03E-06	8.20E-06
BI	0.00E-40	2.80E-08	1.90E-08	1.56E-08	2.52E-08	4.43E-08	7.16E-08	3.16E-07	2.71E-06	6.63E-06	2.00E-05	3.24E-04
PO	0.00E-40	2.41E-13	2.90E-13	3.08E-13	3.17E-13	3.25E-13	3.38E-13	3.77E-13	5.44E-13	7.19E-13	1.19E-12	1.32E-11
FR	0.00E-40	3.58E-13	4.30E-13	4.58E-13	4.71E-13	4.83E-13	4.95E-13	5.60E-13	8.08E-13	1.07E-12	1.77E-12	1.96E-11
RA	0.00E-40	5.06E-10	6.08E-10	6.47E-10	6.65E-10	6.82E-10	6.99E-10	7.91E-10	1.14E-09	1.51E-09	2.50E-09	2.77E-08
AC	0.00E-40	3.53E-13	3.65E-13	3.88E-13	4.09E-13	4.31E-13	4.53E-13	5.71E-13	1.15E-12	1.87E-12	4.14E-12	6.50E-11
TH	0.00E-40	5.56E-10	6.68E-10	7.11E-10	7.31E-10	7.50E-10	7.68E-10	8.69E-10	1.25E-09	1.66E-09	2.75E-09	3.05E-08
PA	0.00E-40	2.40E-04	2.41E-04	2.44E-04	2.46E-04	2.48E-04	2.49E-04	2.54E-04	2.58E-04	2.58E-04	2.57E-04	2.50E-04
U	0.00E-40	2.20E-08	5.30E-09	6.81E-09	1.02E-08	1.36E-08	1.71E-08	3.46E-08	1.05E-07	1.76E-07	3.50E-07	2.87E-06
NP	0.00E-40	1.84E-03	1.83E-03	1.82E-03	1.80E-03	1.78E-03	1.77E-03	1.69E-03	1.41E-03	1.18E-03	7.48E-04	2.15E-07
PU	0.00E-40	4.37E-13	4.37E-13	4.37E-13	4.37E-13	4.37E-13	4.37E-13	4.37E-13	4.37E-13	4.37E-13	4.37E-13	4.35E-13
AM	0.00E-40	2.51E-02	2.50E-02	2.47E-02	2.45E-02	2.43E-02	2.41E-02	2.30E-02	1.92E-02	1.60E-02	1.02E-02	2.92E-06
CM	0.00E-40	9.59E-05	3.98E-05	1.43E-05	1.13E-05	1.09E-05	1.08E-05	1.03E-05	8.68E-06	7.32E-06	4.78E-06	2.47E-09
BK	0.00E-40	1.85E-17	1.84E-17	1.84E-17	1.83E-17	1.82E-17	1.81E-17	1.78E-17	1.64E-17	1.52E-17	1.24E-17	3.45E-19
CF	0.00E-40	7.67E-10	6.92E-10	5.68E-10	4.67E-10	3.84E-10	3.16E-10	1.19E-10	2.75E-12	1.47E-13	2.19E-15	2.82E-21
TOTALS	0.00E-40	2.73E-02	2.71E-02	2.68E-02	2.66E-02	2.63E-02	2.61E-02	2.50E-02	2.09E-02	1.75E-02	1.12E-02	6.15E-04

表 4.18 核分裂生成物の  $\gamma$  Power [Watt / MT]

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2 SEC

ELEMENT GAMMA POWER, WATTS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y
RB	0.00E-40	3.09E-04	4.07E-10	7.06E-22	0.00E-40							
SR	0.00E-40	5.65E-01	5.52E-01	5.25E-01	5.00E-01	4.76E-01	4.42E-01	3.90E-01	3.45E-01	2.70E-01	2.11E-01	1.65E-01
Y	0.00E-40	1.57E+01	1.20E+01	1.14E+01	1.09E+01	1.03E+01	9.59E+00	8.48E+00	7.50E+00	5.86E+00	4.58E+00	3.58E+00
ZR	0.00E-40	1.05E+03	2.13E+01	8.80E-03	3.64E-06	1.50E-09	1.27E-14	4.40E-23	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
NB	0.00E-40	2.16E+03	5.00E+01	2.03E-02	8.38E-06	3.47E-09	2.92E-14	1.01E-22	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
RU	0.00E-40	1.60E+02	2.67E-01	7.46E-07	2.09E-12	5.83E-18	2.72E-26	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
RH	0.00E-40	6.21E+02	3.05E+02	7.68E+01	1.93E+01	4.86E+00	6.14E-01	1.95E-02	6.19E-04	6.29E-07	6.44E-10	6.50E-13
AG	0.00E-40	2.05E+01	7.52E+00	1.02E+00	1.37E-01	1.86E-02	9.22E-04	6.19E-06	4.16E-08	1.87E-12	8.44E-17	4.12E-21
CD	0.00E-40	5.26E-03	2.06E-05	5.47E-06	4.95E-06	4.48E-06	3.87E-06	3.02E-06	2.36E-06	1.44E-06	8.75E-07	5.33E-07
IN	0.00E-40	5.69E-07	3.60E-09	1.44E-13	5.74E-18	2.29E-22	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
SN	0.00E-40	4.10E-01	5.54E-02	1.37E-03	2.59E-04	2.17E-04	2.13E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.12E-04
SB	0.00E-40	1.53E+01	1.15E+01	6.88E+00	4.12E+00	2.47E+00	1.15E+00	3.21E-01	9.32E-02	1.24E-02	6.24E-03	5.76E-03
TE	0.00E-40	3.02E+00	1.61E+00	9.62E-01	5.76E-01	3.44E-01	1.59E-01	4.42E-02	1.22E-02	9.38E-04	7.20E-05	5.52E-06
I	0.00E-40	4.43E-05	6.83E-07									
XE	0.00E-40	0.00E-40	1.48E-16	0.00E-40								
CS	0.00E-40	1.37E+03	9.79E+02	4.99E+02	2.54E+02	1.30E+02	4.79E+01	9.74E+00	2.61E+00	8.68E-01	6.48E-01	5.13E-01
BA	0.00E-40	3.33E+02	3.25E+02	3.10E+02	2.96E+02	2.83E+02	2.64E+02	2.35E+02	2.10E+02	1.66E+02	1.32E+02	1.05E+02
LA	0.00E-40	1.60E+00	4.12E-09	2.71E-26	0.00E-40							
CE	0.00E-40	1.44E+02	5.92E+01	9.95E+00	1.67E+00	2.81E-01	1.94E-02	2.25E-04	2.60E-06	3.50E-10	4.70E-14	6.31E-18
PR	0.00E-40	3.91E+02	1.60E+02	2.69E+01	4.53E+00	7.61E-01	5.25E-02	6.08E-04	7.05E-06	9.47E-10	1.27E-13	1.71E-17
ND	0.00E-40	5.13E-03	6.36E-13	0.00E-40								
PM	0.00E-40	2.70E+01	2.42E-01	1.04E-01	6.15E-02	3.62E-02	1.64E-02	4.36E-03	1.16E-03	8.24E-05	5.85E-06	4.15E-07
SM	0.00E-40	2.04E-03	2.02E-03	1.99E-03	1.96E-03	1.93E-03	1.88E-03	1.81E-03	1.74E-03	1.61E-03	1.48E-03	1.37E-03
EU	0.00E-40	2.85E+01	2.70E+01	2.48E+01	2.27E+01	2.08E+01	1.83E+01	1.47E+01	1.19E+01	7.69E+00	4.98E+00	3.23E+00
TB	0.00E-40	9.69E-01	2.89E-02	2.58E-05	2.30E-08	2.04E-11	5.44E-16	1.29E-23	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
HO	0.00E-40	2.19E-06	2.19E-06	2.19E-06	2.19E-06	2.18E-06	2.18E-06	2.17E-06	2.16E-06	2.14E-06	2.13E-06	2.13E-06
TOTALS	0.00E-40	6.34E+03	1.96E+03	9.68E+02	6.15E+02	4.53E+02	3.42E+02	2.69E+02	2.32E+02	1.81E+02	1.42E+02	1.12E+02

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2 SEC

ELEMENT GAMMA POWER, WATTS  
BASIS = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	100. Y	200. Y	300. Y	400. Y	500. Y	1000. Y	3000. Y	5000. Y	10000. Y	100000. Y
SR	0.00E-40	1.65E-01	4.80E-02	4.07E-03	3.45E-04	2.93E-05	2.49E-06	1.09E-11	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
Y	0.00E-40	3.58E+00	1.04E+00	8.84E-02	7.50E-03	6.36E-04	5.40E-05	2.37E-10	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
RH	0.00E-40	6.50E-13	6.73E-28	0.00E-40								
CD	0.00E-40	5.33E-07	4.49E-07	3.17E-10	2.24E-12	1.59E-14	1.12E-16	1.99E-27	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
SN	0.00E-40	2.12E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.11E-04	2.08E-04	2.05E-04	1.98E-04	1.06E-04
SB	0.00E-40	5.76E-03	5.72E-03	5.72E-03	5.72E-03	5.71E-03	5.71E-03	5.69E-03	5.61E-03	5.53E-03	5.34E-03	2.86E-03
TE	0.00E-40	5.52E-06	1.47E-11	1.04E-22	0.00E-40							
I	0.00E-40	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07	6.83E-07
CS	0.00E-40	5.13E-01	1.62E-01	1.60E-02	1.59E-03	1.58E-04	1.56E-05	1.50E-10	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
BA	0.00E-40	1.05E+02	3.30E+01	3.27E+00	3.25E-01	3.22E-02	3.19E-03	3.07E-08	2.61E-28	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
PM	0.00E-40	4.15E-07	7.45E-13	2.41E-24	0.00E-40							
SM	0.00E-40	1.37E-03	9.19E-04	4.14E-04	1.87E-04	8.42E-05	3.80E-05	7.06E-07	8.48E-14	1.02E-20	0.00E-40	0.00E-40
EU	0.00E-40	3.23E+00	3.70E-01	4.86E-03	6.38E-05	8.38E-07	1.10E-08	4.30E-18	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
HO	0.00E-40	2.13E-06	2.07E-06	1.95E-06	1.84E-06	1.74E-06	1.64E-06	1.23E-06	3.88E-07	1.22E-07	6.80E-09	0.00E-40
TOTALS	0.00E-40	1.12E+02	3.46E+01	3.39E+00	3.40E-01	3.90E-02	9.23E-03	5.90E-03	5.82E-03	5.74E-03	2.97E-03	

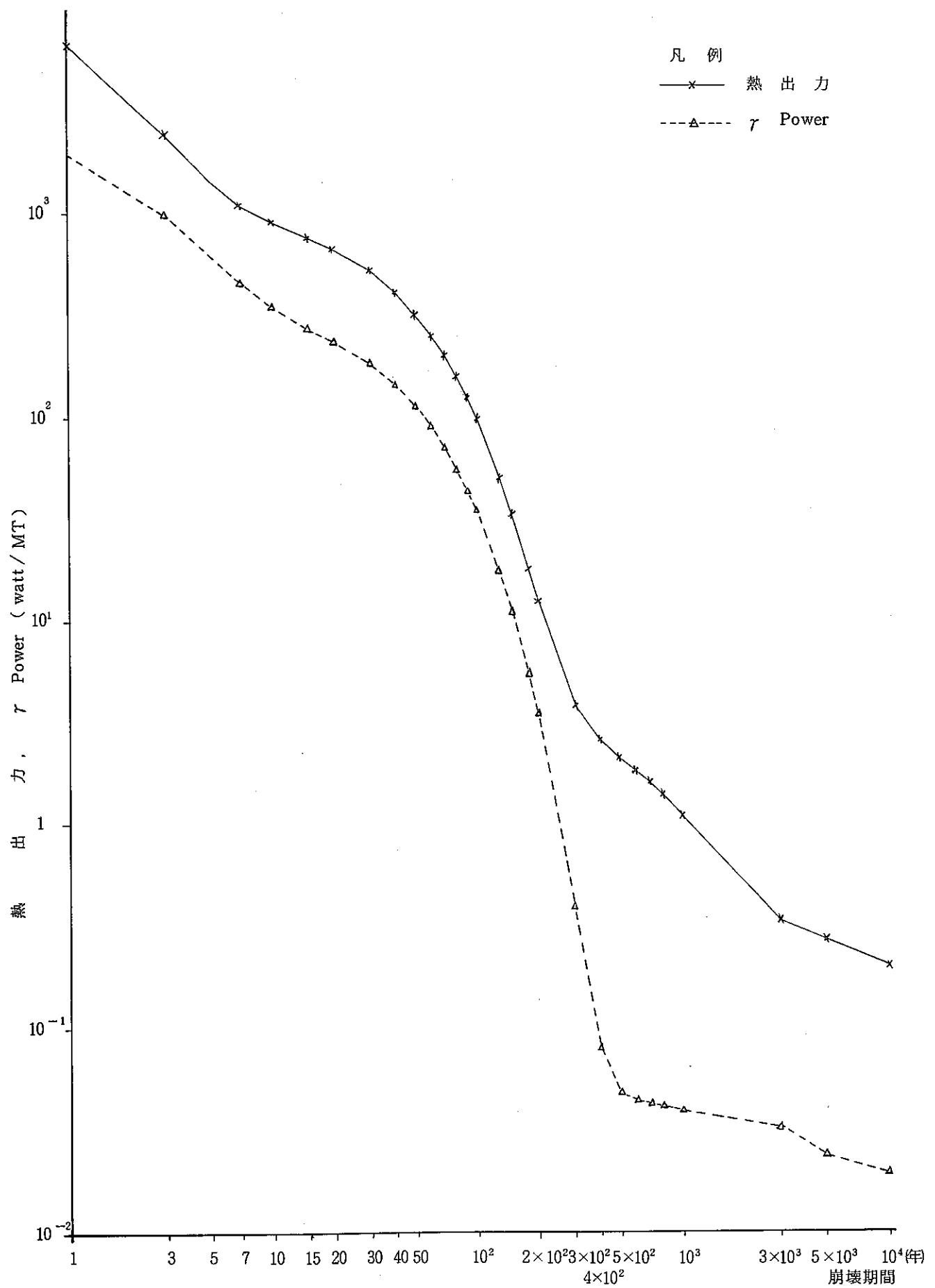


図 4.18 ORIGEN 計算結果 (熱出力,  $\gamma$  Power )

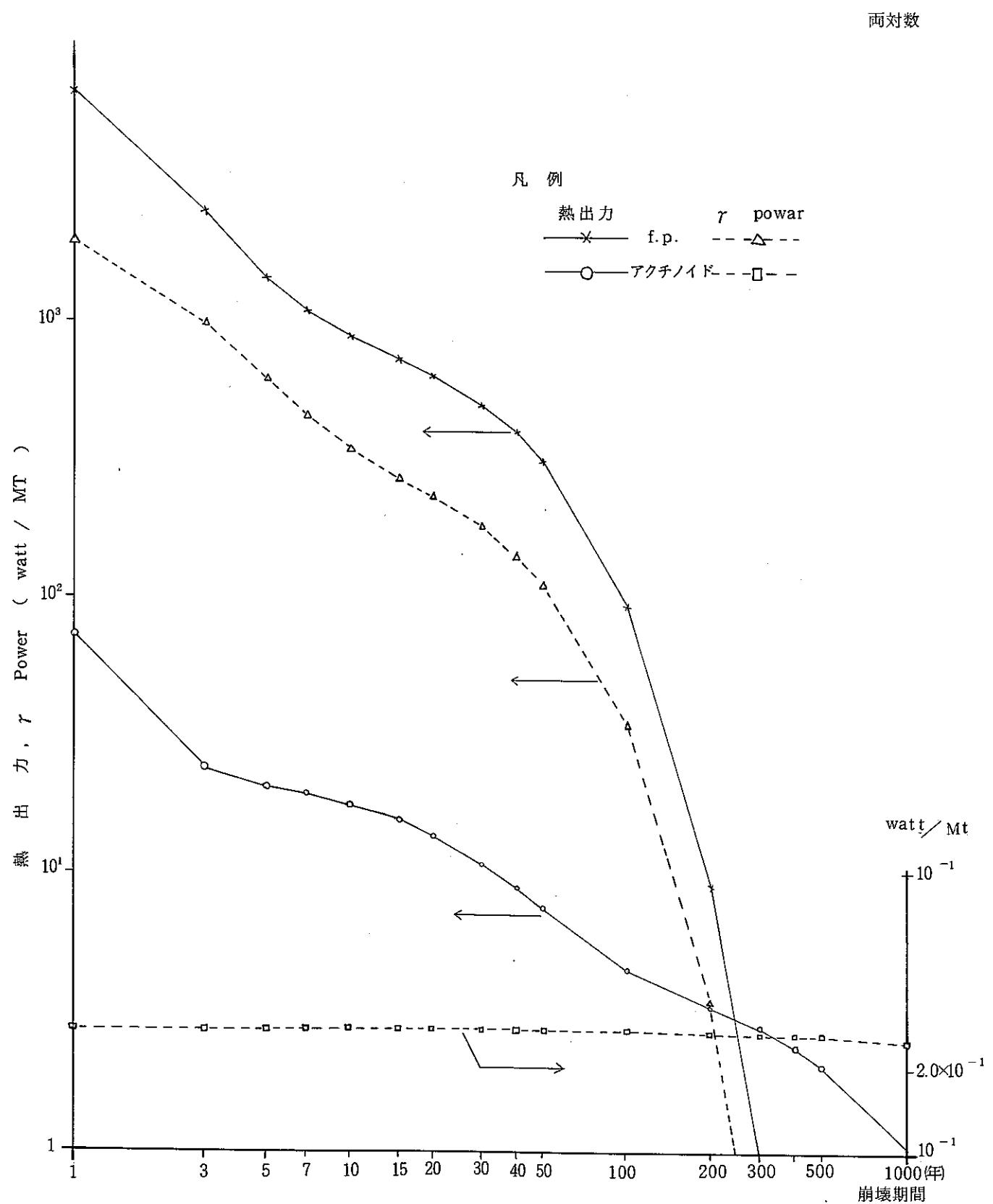


図 4.19 热出力におけるf.p.とアクチノイドの割合

#### 4.2.2 ORHLLW の計算結果

ORHLLW 計算結果の高放射性廃液の熱出力および  $\gamma$  Power を表 4.19～表 4.22 に、仮焼体の熱出力および  $\gamma$  Power を表 4.23～表 4.26 に示す。また、ガラス固化体から放射される  $\gamma$  線スペクトルを図 4.20 に示すと共に、ガラス固化体に含まれる f.p. 成分を表 4.27 に、その重量比で示す。

ガラス固化体作成時の高放射性廃液の熱出力は  $2.85 \text{ watt}/\ell$  で、 $\gamma$  Power は、 $1.23 \text{ watt}/\ell$  である。 $\gamma$  Power の割合は熱出力の 43% である。仮焼体の熱出力は、 $2.57 \times 10^{-2} \text{ watt}/\text{g-calcine}$  である。

ガラス固化体から放射される  $\gamma$  線スペクトル図をみると  $0.3 \text{ MeV}$  から  $2.0 \text{ MeV}$  のエネルギーを持つ  $\gamma$  線が卓越する。また  $0.2 \text{ MeV}$  以下のエネルギーを持つ  $\gamma$  線の光子数は、100 年位まで、ほとんど変わらないが、 $0.2 \text{ MeV}$  以上のエネルギーでは、エネルギーが高くなるほど  $\gamma$  線の光子数の減少は大きい。

表 4.19 高放射性廃液の熱出力 [ Watt / ℓ ]

(その1)

## REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE ~ WASTE DECAY TIMES

POWER 35.0 MW/MT , BURNUP 27999.8 MWD/MT , FLUX 2.87E+13 N/CM2-SEC

RECOVERY	H 90.00%	HF 100.00%	BR 100.00%	KR 100.00%	I 90.00%	XF 100.00%
	U 99.90%	NP 0.00%	PU 99.70%	AM 0.00%	CHL 0.00%	
WASTE VOLUME	500.00 (LITER/MT)					

## THERMAL POWER OF HIGH LEVEL LIQUID WASTE (WATT/LITTER)

		CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y	
12	92	IJ	2.09E-05	3.71E-08	4.49E-08	5.61E-08	6.76E-08	7.90E-08	9.57E-08	1.23E-07	1.49E-07	1.99E-07	2.46E-07	2.91E-07
13	93	NP	0.00E-40	3.16E-05										
14	94	PU	0.00E-40	4.57E-04	2.14E-03	2.55E-03	2.54E-03	2.51E-03	2.47E-03	2.41E-03	2.33E-03	2.20E-03	2.07E-03	1.95E-03
15	95	AM	0.00E-40	7.22E-03	7.23E-03	7.24E-03	7.26E-03	7.27E-03	7.28E-03	7.29E-03	7.28E-03	7.24E-03	7.17E-03	7.09E-03
16	96	CH	0.00E-40	5.14E-01	1.37E-01	3.78E-02	3.10E-02	2.84E-02	2.55E-02	2.11E-02	1.75E-02	1.20E-02	8.24E-03	5.69E-03
1	1	H	0.00E-40	3.93E-06	3.71E-06	3.32E-06	2.96E-06	2.65E-06	2.24E-06	1.69E-06	1.27E-06	7.25E-07	4.12E-07	2.35E-07
2	34	SE	0.00E-40	2.66E-07										
3	37	RR	0.00E-40	5.19E-06	3.06E-11	2.38E-11								
4	38	SR	0.00E-40	8.31E-01	1.89E-01	1.75E-01	1.67E-01	1.59E-01	1.47E-01	1.30E-01	1.15E-01	8.99E-02	7.02E-02	5.49E-02
5	39	Y	0.00E-40	2.00E+00	8.42E-01	7.86E-01	7.49E-01	7.13E-01	6.62E-01	5.85E-01	5.17E-01	4.04E-01	3.16E-01	2.47E-01
6	40	ZR	0.00E-40	2.55E+00	5.18E-02	2.18E-05	4.09E-07	4.00E-07						
7	41	NR	0.00E-40	4.57E+00	1.06E-01	4.30E-05	1.90E-07	2.14E-07	2.68E-07	3.43E-07	4.01E-07	4.81E-07	5.29E-07	5.57E-07
8	43	TC	0.00E-40	1.67E-05										
9	44	RU	0.00E-40	3.98E-01	1.85E-02	4.51E-03	1.14E-03	2.86E-04	3.61E-05	1.15E-06	3.64E-08	3.70E-11	3.78E-14	3.78E-17
10	45	RH	0.00E-40	6.39E+00	3.18E+00	8.00E-01	2.01E-01	5.06E-02	6.39E-03	2.03E-04	6.45E-06	6.55E-09	6.71E-12	6.77E-15
11	46	PD	0.00E-40	1.19E-08										
12	47	AG	0.00E-40	4.49E-02	1.65E-02	2.23E-03	3.01E-04	4.07E-05	2.02E-06	1.34E-08	9.11E-11	4.10E-15	1.85E-19	9.60E-24
13	48	CO	0.00E-40	2.23E-04	1.27E-05	1.09E-05	9.90E-04	8.97E-06	7.73E-06	6.04E-06	4.71E-06	2.87E-06	1.75E-06	1.07E-06
14	49	IN	0.00E-40	4.69E-07	2.97E-09	1.19E-13	4.73E-18	1.89E-22	4.78E-29	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
15	50	SN	0.00E-40	2.25E-02	2.98E-03	5.34E-05	1.86E-06	8.72E-07	8.41E-07	8.40E-07	8.40E-07	8.40E-07	8.40E-07	8.40E-07
16	51	SR	0.00E-40	4.83E-02	3.66E-02	2.19E-02	1.31E-02	7.86E-03	3.64E-03	1.02E-03	2.94E-04	3.66E-05	1.69E-05	1.54E-05
17	52	TE	0.00E-40	4.31E-02	8.53E-03	3.87E-03	2.30E-03	1.32E-03	6.38E-04	1.77E-04	4.89E-05	3.75E-06	2.88E-07	2.21E-08
18	53	I	0.00E-40	1.33E-07	3.99E-09									
20	55	CS	0.00E-40	3.37E+00	2.48E+00	1.39E+00	2.31E-01	5.40E-01	3.40E-01	2.29E-01	1.90E-01	1.48E-01	1.18E-01	9.33E-02
21	56	BA	0.00E-40	6.66E-01	6.50E-01	6.21E-01	5.93E-01	5.66E-01	5.28E-01	4.71E-01	4.19E-01	3.33E-01	2.64E-01	2.10E-01
22	57	LA	0.00E-40	4.10E-03	1.05E-11	6.93E-29	0.00E-40							
23	58	CF	0.00E-40	1.47E+00	5.45E-01	9.17E-02	1.54E-02	2.59E-03	1.79E-04	2.07E-06	2.40E-08	3.22E-12	4.33E-16	5.82E-20
24	59	PR	0.00E-40	1.26E+01	5.17E+00	8.48E-01	1.46E-01	2.45E-02	1.69E-03	1.96E-05	2.27E-07	3.05E-11	4.10E-15	5.51E-19
25	60	ND	0.00E-40	5.82E-05	7.23E-15	0.00E-40								
26	61	PM	0.00E-40	1.76E-01	8.87E-02	5.22E-02	3.07E-02	1.81E-02	8.19E-03	2.18E-03	5.81E-04	4.12E-05	2.92E-06	2.07E-07
27	62	SM	0.00E-40	4.08E-03	4.05E-03	3.98E-03	3.92E-03	3.86E-03	3.77E-03	3.62E-03	3.48E-03	3.21E-03	2.97E-03	2.74E-03
28	63	EII	0.00E-40	7.70E-02	7.11E-02	6.31E-02	5.68E-02	5.16E-02	4.51E-02	3.62E-02	2.91E-02	1.89E-02	1.22E-02	7.92E-03
29	64	GN	0.00E-40	3.23E-05	1.14E-05	1.40E-06	1.73E-07	2.13E-08	9.24E-10	4.94E-12	2.64E-14	7.55E-19	2.16E-23	6.17E-28
30	65	TR	0.00E-40	2.36E-03	7.04E-05	6.27E-08	5.58E-11	4.97E-14	1.32E-18	3.13E-26	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
31	67	HO	0.00E-40	4.44E-09	4.44E-09	4.43E-09	4.42E-09	4.42E-09	4.42E-09	4.42E-09	4.39E-09	4.37E-09	4.34E-09	4.32E-09
1	1	H	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	11	NA	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
1	26	FE	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	28	NT	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
3	24	CR	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
1	64	GD	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	5	B	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
		TOTAL	2.09E-05	3.58E+01	1.36E+01	4.93E+00	2.85E+00	2.18E+00	1.78E+00	1.49E+00	1.30E+00	1.02E+00	8.00E-01	6.30E-01

表4.20 高放射性廃液の熱出力 [ Watt /  $\ell$  ]

(その2)

## REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE = WASTE DECAY TIMES

POWER 35.0 MW/MT , BURNUP 27999.8 MWD/MT , FLUX 2.87E+13 N/CM2-SEC

RECOVERY	H 90.00%	HF 100.00%	RR 100.00%	KR 100.00%	I 90.00%	XF 100.00%
	U 99.90%	NP 0.00%	PU 99.70%	AM 0.00%	CM 0.00%	
WASTE VOLUME	500.00 (LITER/MT)					

## THERMAL POWER OF HIGH LEVEL LIQUID WASTE (WATT/LITTER)

CHARGE DISCHARGE 100. Y 200. Y 300. Y 400. Y 500. Y 1000. Y 3000. Y 5000. Y 10000. Y 100000. Y

12	92	U	2.09E-05	2.91E-07	4.73E-07	6.99E-07	8.20E-07	8.87E-07	9.27E-07	1.00E-06	1.15E-06	1.29E-06	1.64E-06	6.51E-06
13	93	NP	0.00E-40	3.16E-05	3.17E-05	3.17E-05	3.17E-05	3.17E-05	3.17E-05	3.13E-05	2.91E-05	2.71E-05	2.34E-05	1.64E-05
14	94	PU	0.00E-40	1.95E-03	1.45E-03	8.49E-04	5.47E-04	3.93E-04	3.12E-04	2.17E-04	1.97E-04	1.85E-04	1.59E-04	1.33E-05
15	95	AM	0.00E-40	7.09E-03	6.61E-03	5.69E-03	4.91E-03	4.24E-03	3.67E-03	3.18E-03	3.01E-04	2.79E-04	1.76E-04	5.09E-08
16	96	CM	0.00E-40	5.69E-03	9.88E-04	1.32E-04	7.37E-05	4.79E-05	3.18E-05	6.67E-06	3.19E-06	2.66E-06	1.71E-06	8.48E-10
2	34	SE	0.00E-40	2.66E-07	2.66E-07	2.66E-07	2.65E-07	2.65E-07	2.65E-07	2.63E-07	2.58E-07	2.52E-07	2.39E-07	9.17E-08
3	37	RR	0.00E-40	2.38E-11										
4	38	SR	0.00E-40	5.49E-02	1.60E-02	1.36E-03	1.15E-04	9.74E-06	8.28E-07	5.64E-12	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
5	39	Y	0.00E-40	2.47E-01	7.18E-02	6.10E-03	5.17E-04	4.39E-05	3.72E-06	1.64E-11	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
6	40	ZR	0.00E-40	4.00E-07	3.99E-07	3.82E-07								
7	41	NB	0.00E-40	5.57E-07	5.97E-07	6.01E-07	6.01E-07	6.01E-07	6.01E-07	6.01E-07	6.00E-07	5.99E-07	5.98E-07	5.74E-07
8	43	TC	0.00E-40	1.67E-05	1.67E-05	1.67E-05	1.67E-05	1.67E-05	1.66E-05	1.65E-05	1.64E-05	1.62E-05	1.20E-05	
9	45	RH	0.00E-40	6.77E-15	7.01E-30	0.00E-40								
10	46	PD	0.00E-40	1.19E-08	1.17E-08									
11	48	CD	0.00E-40	1.07E-06	8.97E-08	6.35E-10	4.49E-12	3.18E-14	2.25E-16	3.97E-27	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
12	50	SN	0.00E-40	8.40E-07	8.39E-07	8.38E-07	8.38E-07	8.37E-07	8.37E-07	8.34E-07	8.22E-07	8.11E-07	7.83E-07	4.20E-07
13	51	SR	0.00E-40	1.54E-05	1.53E-05	1.53E-05	1.52E-05	1.52E-05	1.52E-05	1.52E-05	1.50E-05	1.48E-05	1.43E-05	7.64E-06
14	52	TE	0.00E-40	2.21E-08	5.88E-14	4.16E-25	0.00E-40							
16	55	CS	0.00E-40	9.33E-02	2.94E-02	2.91E-03	2.89E-04	2.89E-05	3.08E-06	2.33E-07	2.33E-07	2.33E-07	2.33E-07	2.28E-07
17	56	BA	0.00E-40	2.10E-01	6.60E-02	6.55E-03	6.49E-04	6.44E-05	6.39E-06	6.13E-11	5.21E-31	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
18	61	PM	0.00E-40	2.07E-07	3.73E-13	1.20E-24	0.00E-40							
19	62	SM	0.00E-40	2.74E-03	1.84E-03	8.29E-04	7.74E-04	1.6E-04	7.59E-05	1.41E-06	1.70E-13	2.03E-20	0.00E-40	0.00E-40
20	63	EU	0.00E-40	7.92E-03	9.07E-04	1.19E-05	1.56E-07	2.05E-09	2.69E-11	1.05E-20	0.00E-40	0.00E-40	0.01E-40	0.00E-40
21	67	HO	0.00E-40	4.32E-09	4.19E-09	3.96E-09	3.73E-09	3.53E-09	3.33E-09	2.49E-09	7.85E-10	2.47E-10	1.38E-11	0.00E-40
1	1	H	0.00E-40											
2	11	NA	0.00E-40											
1	26	FE	0.00E-40											
2	28	NI	0.00E-40											
3	24	CR	0.00E-40											
1	64	GD	0.00E-40											
2	5	B	0.00E-40											
TOTAL			2.09E-05	6.30E-01	1.95E-01	2.45E-02	7.54E-03	5.06E-03	4.17E-03	2.15E-03	6.55E-04	5.28E-04	3.95E-04	5.76E-05

表 4. 21 高放射性廃液の $\gamma$  Power(Watt /  $\ell$ )

(その1)

## REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE + WASTE DECAY TIMES

POWER 35.0 MW/MT → BURNUP 27999.8 MWD/MT → FLUX 2.87E+13 N/CM2-SEC

RECOVERY	H	90.00%	HF	100.00%	RR	100.00%	KR	100.00%	I	90.00%	XE	100.00%
	U	99.90%	NP	0.00%	PU	99.70%	AM	0.00%	CM	0.00%		
WASTE VOLUME	500.00 (LITER/MT)											

## GAMMA POWER OF HIGH LEVEL LIQUID WASTE (ATT/LITTER)

		CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y
10	92	U	0.00E-40	1.46E-10	4.15E-10	3.77E-10	3.43E-10	3.12E-10	2.71E-10	2.14E-10	1.70E-10	1.67E-10	6.79E-11 4.40E-11
11	93	Np	0.00E-40	3.70E-06	3.69E-06	3.69E-06	3.69E-06 3.68E-06						
12	94	PU	0.00E-40	2.62E-18	8.74E-16 8.74E-16								
13	95	AM	0.00E-40	5.04E-05	5.03E-05	5.03E-05	5.02E-05 5.02E-05						
14	96	CM	0.00E-40	5.23E-07	5.12E-07	4.92E-07	4.72E-07	4.53E-07	4.26E-07	3.84E-07	3.47E-07	2.84E-07	2.33E-07 1.92E-07
1	37	Rb	0.00E-40	6.17E-07	8.13E-13	1.41E-24	3.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
2	38	SR	0.00E-40	1.13E-03	1.10E-03	1.05E-03	9.99E-04	9.51E-04	8.83E-04	7.81E-04	6.90E-04	5.39E-04	4.21E-04 3.29E-04
3	39	Y	0.00E-40	3.15E-02	2.41E-02	2.28E-02	2.17E-02	2.07E-02	1.92E-02	1.77E-02	1.50E-02	1.17E-02	9.15E-03 7.15E-03
4	40	Zr	0.00E-40	2.09E+00	4.25E-02	1.76E-05	7.28E-09	3.01E-12	2.53E-12	1.81E-26	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
5	41	NR	0.00E-40	4.32E+00	9.99E-02	4.05E-05	1.68E-08	6.97E-12	5.83E-17	2.03E-25	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
6	44	Ru	0.00E-40	3.19E-01	5.34E-04	1.49E-09	4.17E-15	1.17E-20	5.45E-29	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
7	45	RH	0.00E-40	1.24E+00	6.10E-01	1.54E-01	3.86E-02	9.72E-03	1.23E-03	3.90E-05	1.24E-06	1.26E-09	1.29E-12 1.30E-15
8	47	Ag	0.00E-40	4.09E-02	1.50E-02	2.03E-03	2.75E-04	3.71E-05	1.84E-06	1.24E-08	8.31E-11	3.74E-15	1.69E-19 8.24E-24
9	48	CD	0.00E-40	1.05E-05	4.12E-08	1.09E-08	9.90E-09	8.97E-09	7.73E-09	6.04E-09	4.71E-09	2.87E-09	1.75E-09 1.07E-09
10	49	IN	0.00E-40	1.14E-09	7.19E-12	2.87E-16	1.15E-20	4.59E-25	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
11	50	SN	0.00E-40	8.20E-04	1.11E-04	2.74E-06	5.18E-07	4.33E-07	4.25E-07	4.25E-07	4.25E-07	4.25E-07	4.25E-07 4.25E-07
12	51	SB	0.00E-40	3.05E-02	2.30E-02	1.38E-02	8.24E-03	4.93E-03	2.29E-03	6.43E-04	1.86E-04	2.49E-05	1.25E-05 1.15E-05
13	52	Tf	0.00E-40	6.03E-03	3.22E-03	1.92E-03	1.15E-03	6.86E-04	3.19E-04	8.83E-05	2.45E-05	1.88E-06	1.44E-07 1.10E-08
14	53	I	0.00E-40	8.86E-08	1.37E-09 1.37E-09								
16	55	CS	0.00E-40	2.75E+00	1.96E+00	9.97E-01	5.08E-01	2.60E-01	9.58E-02	1.95E-02	5.22E-03	1.74E-03	1.30E-03 1.03E-03
17	56	BA	0.00E-40	6.66E-01	6.50E-01	6.21E-01	5.93E-01	5.66E-01	5.28E-01	4.77E-01	4.19E-01	3.33E-01	2.64E-01 2.10E-01
18	57	LA	0.00E-40	3.21E-03	8.24E-12	5.43E-29	3.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
19	58	CF	0.00E-40	2.89E-01	1.18E-01	1.99E-02	3.35E-03	5.62E-04	3.88E-05	4.49E-07	5.21E-09	7.00E-13	9.41E-17 1.26E-20
20	59	PR	0.00E-40	7.81E-01	3.20E-01	5.38E-02	9.05E-03	1.52E-03	1.05E-04	1.22E-06	1.41E-08	1.89E-12	2.54E-16 3.42E-20
21	60	ND	0.00E-40	1.03E-05	1.27E-15	0.00E-40 0.00E-40							
22	61	PM	0.00E-40	5.40E-02	4.84E-04	2.09E-04	1.23E-04	7.24E-05	3.27E-05	8.72E-06	2.32E-06	1.65E-07	1.17E-08 8.30E-10
23	62	SM	0.00E-40	4.08E-06	4.05E-06	3.98E-06	3.92E-06	3.86E-06	3.77E-06	3.62E-06	3.48E-06	3.21E-06	2.97E-06 2.74E-06
24	63	EU	0.00E-40	5.70E-02	5.41E-02	4.96E-02	4.54E-02	4.17E-02	3.66E-02	2.95E-02	2.37E-02	1.54E-02	9.97E-03 6.46E-03
25	65	TR	0.00E-40	1.94E-03	5.78E-05	5.15E-08	4.59E-11	4.09E-14	1.09E-18	2.57E-26	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
26	67	HO	0.00E-40	4.39E-09	4.39E-09	4.38E-09	4.38E-09	4.37E-09	4.36E-09	4.35E-09	4.34E-09	4.31E-09	4.29E-09 4.26E-09
1	1	H	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
2	11	NA	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
1	26	FE	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
2	28	NI	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
3	24	CR	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
1	64	GD	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40
2	5	B	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40 0.00E-40

TOTAL 0.00E-40 1.27E+01 3.92E+00 1.94E+00 1.23E+00 9.07E-01 6.85E-01 5.38E-01 4.64E-01 3.62E-01 2.85E-01 2.25E-01

表 4.22 高放射性廃液の  $\tau$  Power [ Watt /  $\ell$  ]

(その2)

## REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER 35.0 MW/MT , BURNUP 27999.8 MWD/MT , FLUX 2.87E+13 N/CM2-SFC

RECOVERY	H 90.00%	HE 100.00%	BR 100.00%	KR 100.00%	I 90.00%	XE 100.00%
	U 99.90%	NP 0.00%	PU 99.70%	AM 0.00%	CM 0.00%	
WASTE VOLUME	500.00 (LITTER/MT)					

## GAMMA POWER OF HIGH LEVEL LIQUID WASTE (WATT/LITTER)

			CHARGE	DISCHARGE	100. Y	200. Y	300. Y	400. Y	500. Y	1000. Y	3000. Y	5000. Y	10000. Y	100000. Y
10	92	IJ	0.00E-40	4.40E-11	1.06E-11	1.36E-11	2.04E-11	2.73E-11	3.42E-11	6.91E-11	2.11E-10	3.52E-10	6.99E-10	5.75E-09
11	93	NP	0.00E-40	3.68E-06	3.67E-06	3.63E-06	3.60E-06	3.57E-06	3.54E-06	3.38E-06	2.82E-06	2.35E-06	1.54E-06	4.29E-10
12	94	PU	0.00E-40	8.74E-16	8.74E-16	8.74E-16	8.74E-16	8.74E-16	8.74E-16	8.74E-16	8.74E-16	8.74E-16	8.74E-16	8.70E-16
13	95	AM	0.00E-40	5.02E-05	4.99E-05	4.95E-05	4.90E-05	4.86E-05	4.82E-05	4.60E-05	3.84E-05	3.20E-05	2.04E-05	5.85E-09
14	96	CM	0.00E-40	1.92E-07	7.97E-08	2.87E-08	2.27E-08	2.18E-08	2.15E-08	2.06E-08	1.74E-08	1.46E-08	9.56E-09	4.95E-12
1	38	SR	0.00E-40	3.29E-04	9.59E-05	8.14E-06	6.90E-07	5.86E-08	4.97E-09	2.18E-14	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	39	Y	0.00E-40	7.15E-03	2.08E-03	1.77E-04	1.50E-05	1.27E-06	1.08E-07	4.75E-13	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
3	45	RH	0.00E-40	1.30E-15	1.35E-30	0.00E-40								
4	48	CD	0.00E-40	1.07E-09	8.97E-11	6.35E-13	4.49E-15	3.18E-17	2.25E-19	3.97E-30	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
5	50	SN	0.00E-40	4.25E-07	4.25E-07	4.24E-07	4.24E-07	4.24E-07	4.23E-07	4.22E-07	4.16E-07	4.10E-07	3.96E-07	2.12E-07
6	51	SB	0.00E-40	1.15E-05	1.14E-05	1.14E-05	1.14E-05	1.14E-05	1.14E-05	1.14E-05	1.12E-05	1.11E-05	1.07E-05	5.78E-06
7	52	TE	0.00E-40	1.10E-08	2.94E-14	2.08E-25	0.00E-40							
9	55	CS	0.00E-40	1.03E-03	3.23E-04	3.21E-05	3.18E-06	3.15E-07	3.13E-08	3.00E-13	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
10	56	RA	0.00E-40	2.10E-01	6.60E-02	6.55E-03	6.49E-04	6.44E-05	6.39E-06	6.13E-11	5.21E-31	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
11	61	PM	0.00E-40	8.30E-10	1.49E-15	4.82E-27	0.00E-40							
12	62	SM	0.00E-40	2.74E-06	1.84E-06	8.29E-07	3.74E-07	1.68E-07	7.59E-08	1.41E-09	1.70E-16	2.03E-23	0.00E-40	0.00E-40
13	63	EJ	0.00E-40	6.46E-03	7.40E-04	9.72E-06	1.28E-07	1.68E-09	2.20E-11	8.61E-21	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
14	67	HO	0.00E-40	4.26E-09	4.14E-09	3.91E-09	3.69E-09	3.49E-09	3.29E-09	2.46E-09	7.76E-10	2.44E-10	1.36E-11	0.00E-40
1	1	H	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	11	NA	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
1	26	FE	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	28	NI	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
3	24	CR	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
1	64	GD	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	5	B	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
TOTAL			0.00E-40	2.25E-01	6.93E-02	6.84E-03	7.33E-04	1.30E-04	7.02E-05	6.12E-05	5.29E-05	4.59E-05	3.30E-05	5.95E-06

表 4.23 仮焼体の熱出力 [ Watt / g - calcine ] (その1)

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE + WASTE DECAY TIMES

POWER 35.0 MW/MT , BURNUP 27949.8 MWD/MT , FLUX 2.87E+13 N/CM2-SEC

RECOVERY H 90.00% HF 100.00% RR 100.00% KR 100.00% I 90.00% XE 100.00%  
U 99.90% NP 0.00% PU 99.70% AM 0.00% CM 0.00%  
WASTE VOLUME 500.00 (LITER/MT)

THERMAL POWER OF CALCINED HIGH LEVEL LIQUID WASTE ( WATT/GRAM-CALCINE )

	CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y	
12	92 U 03	8.71E-09	3.34E-10	4.04E-10	5.05E-10	6.09E-10	7.11E-10	8.61E-10	1.11E-09	1.34E-09	1.79E-09	2.22E-09	2.61E-09
13	93NP 02	0.00E-40	2.85E-07	2.85E-07	2.85E-07	2.85E-07	2.85E-07	2.84E-07	2.84E-07	2.84E-07	2.84E-07	2.84E-07	2.84E-07
14	94PU 02	0.00E-40	4.11E-06	1.93E-05	2.30E-05	2.29E-05	2.26E-05	2.22E-05	2.16E-05	2.10E-05	1.97E-05	1.86E-05	1.75E-05
15	95AM203	0.00E-40	6.50E-05	6.51E-05	6.52E-05	6.53E-05	6.54E-05	6.55E-05	6.56E-05	6.55E-05	6.51E-05	6.45E-05	6.37E-05
16	96CH203	0.00E-40	4.63E-03	1.23E-03	3.40E-04	2.79E-04	2.57E-04	2.30E-04	1.91E-04	1.57E-04	1.08E-04	7.41E-05	5.11E-05
2	34SE 02	0.00E-40	2.40E-09	2.39E-09	2.39E-09	2.39E-09	2.39E-09						
3	37R820	0.00E-40	4.67E-08	2.75E-13	2.14E-13								
4	38SR 0	0.00E-40	7.49E-03	1.70E-03	1.58E-03	1.50E-03	1.43E-03	1.32E-03	1.17E-03	1.03E-03	8.08E-04	6.31E-04	4.93E-04
5	39 Y203	0.00E-40	1.80E-02	7.58E-03	7.08E-03	6.74E-03	6.41E-03	5.95E-03	5.26E-03	4.65E-03	3.63E-03	2.84E-03	2.22E-03
6	40ZR 02	0.00E-40	2.29E-02	4.66E-04	1.96E-07	3.68E-09	3.60E-09						
7	41NB205	0.00E-40	4.11E-02	9.52E-04	3.87E-07	1.71E-09	1.92E-09	2.42E-09	3.09E-09	3.61E-09	4.32E-09	4.75E-09	5.01E-09
8	43TC207	0.00E-40	1.50E-07										
9	44RU 02	0.00E-40	3.58E-03	1.67E-04	4.06E-05	1.02E-05	2.57E-06	3.24E-07	1.03E-08	3.27E-10	3.32E-13	3.41E-16	3.40E-19
10	45RH203	0.00E-40	5.75E-02	2.86E-02	7.20E-03	1.81E-03	4.54E-04	5.75E-05	1.83E-06	5.80E-08	5.69E-11	6.03E-14	6.08E-17
11	46PD 0	0.00E-40	1.07E-10										
12	47AG20	0.00E-40	4.04E-04	1.48E-04	2.01E-05	2.71E-04	3.66E-07	1.82E-08	1.22E-10	8.19E-13	3.69E-17	1.66E-21	8.62E-26
13	48CD 0	0.00E-40	2.00E-06	1.14E-07	9.84E-08	8.91E-08	8.07E-08	6.96E-08	5.43E-08	4.24E-08	2.53E-08	1.57E-08	9.59E-09
14	49IN20	0.00E-40	4.22E-09	2.67E-11	1.07E-15	4.26E-20	1.70E-24	4.30E-31	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
15	50SN 02	0.00E-40	2.03E-04	2.68E-05	4.81E-07	7.67E-08	7.85E-09	7.57E-09	7.56E-09	7.55E-09	7.55E-09	7.55E-09	7.55E-09
16	51SB203	0.00E-40	4.35E-04	3.30E-04	1.97E-04	1.18E-04	7.07E-05	3.28E-05	9.18E-06	2.64E-06	3.29E-07	1.52E-07	1.38E-07
17	52TE 02	0.00E-40	3.88E-04	7.68E-05	3.48E-05	2.07E-05	1.24E-05	5.74E-06	1.59E-06	4.40E-07	3.38E-08	2.59E-09	1.99E-10
20	55CS20	0.00E-40	3.04E-02	2.24E-02	1.25E-02	7.48E-03	4.86E-03	3.06E-03	2.06E-03	1.71E-03	1.33E-03	1.06E-03	8.38E-04
21	56BA 0	0.00E-40	6.00E-03	5.85E-03	5.59E-03	5.33E-03	5.09E-03	4.75E-03	4.23E-03	3.77E-03	2.99E-03	2.37E-03	1.88E-03
22	57LA203	0.00E-40	3.69E-05	9.47E-14	6.24E-31	3.00E-40	0.00E-40						
23	58CE203	0.00E-40	1.32E-02	4.91E-03	8.25E-04	1.39E-04	2.33E-05	1.61E-06	1.86E-08	2.16E-10	2.90E-14	3.89E-18	5.23E-22
24	59PR203	0.00E-40	1.13E-01	4.65E-02	7.82E-03	1.31E-03	2.21E-04	1.52E-05	1.76E-07	2.04E-09	2.75E-13	3.69E-17	4.95E-21
25	60ND203	0.00E-40	5.24E-07	6.51E-17	0.00E-40								
26	61PM203	0.00E-40	1.58E-03	7.99E-04	4.70E-04	2.77E-04	1.67E-04	7.37E-05	1.96E-05	5.22E-06	3.71E-07	2.63E-08	1.86E-09
27	62SM203	0.00E-40	3.67E-05	3.64E-05	3.59E-05	3.53E-05	3.47E-05	3.39E-05	3.26E-05	3.13E-05	2.89E-05	2.67E-05	2.46E-05
28	63EU203	0.00E-40	6.93E-04	6.40E-04	5.68E-04	5.12E-04	4.65E-04	4.06E-04	3.26E-04	2.62E-04	1.70E-04	1.10E-04	7.12E-05
29	64GD203	0.00E-40	2.91E-07	1.02E-07	1.26E-08	1.56E-09	1.92E-10	8.31E-12	4.44E-14	2.38E-16	6.79E-21	1.94E-25	5.54E-30
30	65TB203	0.00E-40	2.12E-05	6.34E-07	5.64E-10	5.03E-13	4.48E-16	1.19E-20	2.82E-28	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
31	67H0203	0.00E-40	4.00E-11	4.00E-11	3.99E-11	3.99E-11	3.98E-11	3.97E-11	3.96E-11	3.95E-11	3.92E-11	3.91E-11	3.88E-11
1	1 H	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	11 NA	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
1	26 FE	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	28 NI	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
3	24 CR	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
1	64 GD	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
2	5 R	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40

TOTAL 8.71E-09 3.22E-01 1.22E-01 4.44E-02 2.57E-02 1.96E-02 1.60E-02 1.34E-02 1.17E-02 9.16E-03 7.19E-03 5.66E-03

表 4.24 仮焼体の熱出力 [ Watt / g - calcine ] (その2)

REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER 35.0 MW/MT , BIURMUP 27999.8 MWD/MT , FLUX 2.87E+13 N/CM2-SEC

RECOVERY	H 90.00%	HE 100.00%	BR 100.00%	KR 100.00%	I 90.00%	XE 100.00%
	U 99.90%	NP 0.00%	PU 99.70%	AM 0.00%	CH 0.00%	
WASTE VOLUME	500.00 (LITER/"T)					

THERMAL POWER OF CALCINED HIGH LEVEL LIQUID WASTE ( WATT/GRAM-CALCINE )

CHARGE DISCHARGE 100. Y 200. Y 300. Y 400. Y 500. Y 1000. Y 3000. Y 5000. Y 10000. Y 100000. Y

12	92 U 03	8.71E-09	2.61E-09	4.25E-09	6.28E-09	7.36E-09	7.96E-09	8.32E-09	9.01E-09	1.03E-08	1.16E-08	1.47E-08	5.85E-08
13	93NP 02	0.00E-40	2.84E-07										
14	94PU 02	0.00E-40	1.75E-05	1.30E-05	7.62E-06	4.91E-06	3.53E-06	2.81E-06	1.95E-06	1.77E-06	1.66E-06	1.43E-06	1.19E-07
15	95AM203	0.00E-40	6.37E-05	5.94E-05	5.11E-05	4.41E-05	3.81E-05	3.30E-05	1.67E-05	3.51E-06	2.50E-06	1.58E-06	4.58E-10
16	96CM203	0.00E-40	5.11E-05	8.87E-06	1.18E-06	6.62E-07	4.30E-07	2.85E-07	5.98E-08	2.86E-08	2.39E-08	1.53E-08	7.62E-12
2	34SE 02	0.00E-40	2.39E-09										
3	37RB20	0.00E-40	2.13E-13										
4	38SR 0	0.00E-40	4.93E-04	1.44E-04	1.22E-05	1.03E-06	8.77E-08	7.44E-09	3.27E-14	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
5	39 Y203	0.00E-40	2.22E-03	6.45E-04	5.47E-05	4.64E-06	3.94E-07	3.34E-08	1.47E-13	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
6	40ZR 02	0.00E-40	3.60E-09	3.60E-09	3.60E-09	3.60E-09	3.60E-09	3.60E-09	3.59E-09	3.59E-09	3.59E-09	3.59E-09	3.44E-09
7	41NB205	0.00E-40	5.01E-09	5.36E-09	5.39E-09	5.15E-09							
8	43TC207	0.00E-40	1.50E-07	1.50E-07	1.50E-07	1.50E-07	1.50E-07	1.50E-07	1.49E-07	1.48E-07	1.48E-07	1.45E-07	1.08E-07
9	45RH203	0.00E-40	6.08E-17	6.29E-32	0.00E-40								
10	46PD 0	0.00E-40	1.07E-10	1.06E-10	1.06E-10	1.06E-10	1.06E-10						
11	48CD 0	0.00E-40	9.59E-09	8.06E-10	5.70E-12	4.03E-14	2.85E-16	2.02E-18	3.57E-29	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
12	50SN 02	0.00E-40	7.55E-09	7.54E-09	7.53E-09	7.52E-09	7.52E-09	7.51E-09	7.49E-09	7.38E-09	7.28E-09	7.03E-09	3.77E-09
13	51SB203	0.00E-40	1.38E-07	1.37E-07	1.37E-07	1.37E-07	1.37E-07	1.37E-07	1.36E-07	1.34E-07	1.33E-07	1.28E-07	6.87E-08
14	52TE 02	0.00E-40	1.99E-10	5.28E-16	3.73E-27	0.00E-40							
16	55CS20	0.00E-40	8.38E-04	2.64E-04	2.62E-05	2.60E-06	2.60E-07	2.76E-08	2.10E-09	2.09E-09	2.09E-09	2.09E-09	2.05E-09
17	56BA 0	0.00E-40	1.88E-03	5.93E-04	5.88E-05	5.83E-06	5.78E-07	5.74E-08	5.51E-13	4.68E-33	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
18	61PM203	0.00E-40	1.86E-09	3.35E-15	1.08E-26	0.00E-40							
19	62SM203	0.00E-40	2.46E-05	1.65F-05	7.44E-06	3.35E-06	1.51E-06	6.82E-07	1.27E-08	1.52E-15	1.83E-22	0.00E-40	0.00E-40
20	63EU203	0.00E-40	7.12E-05	8.14E-06	1.07E-07	1.40E-09	1.84E-11	2.42E-13	9.45E-23	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
21	67HO203	0.00E-40	3.88E-11	3.77E-11	3.55E-11	3.35E-11	3.17E-11	2.99E-11	2.24E-11	7.05E-12	2.22E-12	1.24E-13	0.00E-40
1	1 H	0.00E-40											
2	11 NA	0.00E-40											
1	26 FR	0.00E-40											
2	28 NI	0.00E-40											
3	24 CR	0.00E-40											
1	64 GD	0.00E-40											
2	5 B	0.00E-40											
	TOTAL	8.71E-09	5.66E-03	1.75E-03	2.20E-04	6.77E-05	4.55E-05	3.75E-05	1.93E-05	5.88E-06	4.74E-06	3.54E-06	5.18E-07

表 4.25 仮焼体の  $\gamma$  Power [ watt / g-calcine ]

(その1)

## REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER 35.0 MW/MT , BURNUP 27999.8 MWD/MT , FLUX 2.87E+13 N/CM<sup>2</sup>-SEC

RECOVERY	H	90.00%	HF	100.00%	RR	100.00%	KR	100.00%	I	90.00%	XE	100.00%
	II	99.90%	NP	0.00%	PU	99.70%	AM	0.00%	CM	0.00%		
		500.00 (LITER/MT)										

## GAMMA POWER OF CALCINED HIGH LEVEL LIQUID WASTE ( WATT /GRAM-CALCINE )

	CHARGE	DISCHARGE	1. Y	3. Y	5. Y	7. Y	10. Y	15. Y	20. Y	30. Y	40. Y	50. Y		
10	92 U	0.00E-40	1.31E-12	3.73E-12	3.40E-12	3.09E-12	2.81E-12	2.44E-12	1.93E-12	1.53E-12	9.60E-13	6.11E-13	3.95E-13	
11	93NP	0.00E-40	3.33E-08	3.33E-08	3.33E-08	3.33E-08	3.33E-08	3.32E-08	3.32E-08	3.32E-08	3.32E-08	3.31E-08	3.31E-08	
12	94PU	0.00E-40	2.36E-20	7.87E-18	7.87E-18	7.87E-18	7.86E-18	7.86E-18	7.86E-18	7.86E-18	7.86E-18	7.85E-18	7.85E-18	
13	95AM203	0.00E-40	4.54E-07	4.54E-07	4.54E-07	4.53E-07	4.53E-07	4.53E-07	4.53E-07	4.53E-07	4.52E-07	4.51E-07	4.51E-07	
14	96CM203	0.00E-40	4.71E-09	4.61E-09	4.43E-09	4.25E-09	4.07E-09	3.83E-09	3.64E-09	3.42E-09	2.55E-09	2.09E-09	1.72E-09	
1	37RB20	0.00E-40	5.56E-09	7.32E-15	1.27E-26	2.00E-40	0.00E-40							
2	38SR	0	0.00E-40	1.02E-05	9.93E-06	9.45E-06	9.00E-06	8.56E-06	7.95E-06	7.03E-06	6.21E-06	4.85E-06	3.79E-06	2.96E-06
3	39 Y203	0.00E-40	2.83E-04	2.17E-04	2.05E-04	1.95E-04	1.86E-04	1.73E-04	1.53E-04	1.35E-04	1.05E-04	8.24E-05	6.43E-05	
4	40ZR	02	0.00E-40	1.88E-02	3.83E-04	1.58E-07	6.55E-11	2.71E-14	2.28E-19	7.92E-28	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
5	41NB205	0.00E-40	3.89E-02	9.00E-04	3.65E-07	1.51E-10	6.24E-14	5.25E-19	1.83E-27	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40		
6	44RU	02	0.00E-40	2.87E-03	4.80E-06	1.34E-11	3.75E-17	1.05E-22	4.90E-31	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40		
7	45RH203	0.00E-40	1.12E-02	5.49E-03	1.38E-03	3.48E-04	8.75E-05	1.10E-05	3.51E-07	1.11E-08	1.13E-11	1.16E-14	1.17E-17	
8	47AG20	0.00E-40	3.69E-04	1.35E-04	1.83E-05	2.47E-06	3.34E-07	1.66E-08	1.11E-10	7.48E-13	3.37E-17	1.52E-21	7.40E-26	
9	48CD	0	0.00E-40	9.46E-08	3.71E-10	9.84E-11	8.91E-11	8.07E-11	6.96E-11	5.43E-11	4.24E-11	2.58E-11	1.57E-11	9.59E-12
10	49IN20	0.00E-40	1.02E-11	6.48E-14	2.59E-18	1.03E-22	4.13E-27	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40		
11	50SN	02	0.00E-40	7.39E-06	9.97E-07	2.47E-08	4.66E-09	3.90E-09	3.83E-09	3.82E-09	3.82E-09	3.82E-09	3.82E-09	
12	51SB203	0.00E-40	2.75E-04	2.07E-04	1.24E-04	7.42E-05	4.44E-05	2.06E-05	5.78E-06	1.68E-06	2.24E-07	1.12E-07	1.04E-07	
13	52TE	02	0.00E-40	5.43E-05	2.90E-05	1.73E-05	1.04E-05	6.20E-06	2.87E-06	7.94E-07	2.20E-07	1.69E-08	1.29E-09	9.93E-11
16	55CS20	0.00E-40	2.47E-02	1.76E-02	8.98E-03	4.58E-03	2.34E-03	8.62E-04	1.75E-04	4.70E-05	1.56E-05	1.17E-05	9.22E-06	
17	568A	0	0.00E-40	5.99E-03	5.85E-03	5.59E-03	5.33E-03	5.09E-03	4.75E-03	4.23E-03	3.77E-03	2.99E-03	2.37E-03	1.88E-03
18	57LA203	0.00E-40	2.89E-05	7.42E-14	4.88E-31	0.00E-40								
19	58CE203	0.00E-40	2.60E-03	1.07E-03	1.79E-04	3.01E-05	5.06E-06	3.49E-07	4.04E-09	4.69E-11	6.29E-15	8.45E-19	1.13E-22	
20	59PR203	0.00E-40	7.03E-03	2.88E-03	4.85E-04	8.15E-05	1.37E-05	9.44E-07	1.00E-08	1.27E-10	1.70E-14	2.29E-18	3.07E-22	
21	60ND203	0.00E-40	9.23E-08	1.14E-17	0.00E-40									
22	61PM203	0.00E-40	4.86E-04	4.35E-06	1.88E-06	1.11E-06	6.52E-07	2.95E-07	7.85E-08	2.09E-08	1.48E-09	1.05E-10	7.46E-12	
23	62SM203	0.00E-40	3.67E-08	3.64E-08	3.59E-08	3.53E-08	3.47E-08	3.39E-08	3.26E-08	3.13E-08	2.89E-08	2.67E-08	2.46E-08	
24	63EU203	0.00E-40	5.13E-04	4.87E-04	4.46E-04	4.09E-04	3.75E-04	3.29E-04	2.65E-04	2.13E-04	1.38E-04	8.96E-05	5.81E-05	
25	65TB203	0.00E-40	1.74E-05	5.21E-07	4.64E-10	4.13E-13	3.68E-16	9.78E-21	2.32E-28	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
26	67HO203	0.00E-40	3.95E-11	3.95E-11	3.94E-11	3.94E-11	3.93E-11	3.93E-11	3.91E-11	3.90E-11	3.88E-11	3.85E-11	3.83E-11	
1	1 H	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
2	11 NA	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
1	26 FF	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
2	28 NT	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
3	24 CR	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
1	64 GD	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
2	5 B	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
	TOTAL		0.00E-40	1.14E-01	3.53E-02	1.74E-02	1.11E-02	8.16E-03	6.16E-03	4.84E-03	4.17E-03	3.26E-03	2.56E-03	2.02E-03

表 4.26 仮焼体の  $\gamma$  Power [ Watt / g - calcine ]

(その2)

## REFERENCE LWR EQUILIBRIUM FUEL CYCLE - WASTE DECAY TIMES

POWER 35.0 MW/MT , BURNUP 27999.8 MWD/MT , FLUX 2.87E+13 N/CM2-SEC

RECOVERY	H 90.00%	HE 100.00%	BR 100.00%	KR 100.00%	I 90.00%	XE 100.00%
	U 99.90%	NP 0.00%	PU 99.70%	AM 0.00%	CM 0.00%	
WASTE VOLUME	500.00 (LITER/MT)					

## GAMMA POWER OF CALCINED HIGH LEVEL LIQUID WASTE ( WATT /GRAM-CALCINE )

CHARGE DISCHARGE 100. Y 200. Y 300. Y 400. Y 500. Y 1000. Y 3000. Y 5000. Y 10000. Y 100000. Y

10	92 U 03	0.00E-40	3.95E-13	9.53E-14	1.22E-13	1.83E-13	2.45E-13	3.07E-13	6.21E-13	1.89E-12	3.16E-12	6.28E-12	5.17E-11
11	93NP 02	0.00E-40	3.31E-08	3.29E-08	3.26E-08	3.23E-08	3.20E-08	3.19E-08	3.03E-08	2.53E-08	2.11E-08	1.34E-08	3.86E-12
12	94PU 02	0.00E-40	7.85E-18	7.84E-18	7.84E-18	7.82E-18							
13	95AM203	0.00E-40	4.51E-07	4.49E-07	4.44E-07	4.40E-07	4.34E-07	4.33E-07	4.13E-07	3.45E-07	2.88E-07	1.83E-07	5.26E-11
14	96CM203	0.00E-40	1.72E-09	7.16E-10	2.57E-10	2.03E-10	1.94E-10	1.85E-10	1.56E-10	1.31E-10	8.58E-11	4.44E-14	
1	38SR 0	0.00E-40	2.96E-06	8.61E-07	7.31E-08	6.20E-09	5.26E-10	4.46E-11	1.96E-16	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
2	39 Y203	0.00E-40	6.43E-05	1.87E-05	1.59E-06	1.35E-07	1.14E-08	9.69E-10	4.26E-15	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
3	45RH203	0.00E-40	1.17E-17	1.21E-32	0.00E-40								
4	48CD 0	0.00E-40	9.59E-12	8.06E-13	5.70E-15	4.03E-17	2.85E-19	2.02E-21	3.57E-32	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
5	50SN 02	0.00E-40	3.82E-09	3.81E-09	3.81E-09	3.81E-09	3.80E-09	3.79E-09	3.74E-09	3.68E-09	3.56E-09	3.19E-09	
6	51SB203	0.00E-40	1.04E-07	1.03E-07	1.03E-07	1.03E-07	1.02E-07	1.02E-07	1.02E-07	1.01E-07	9.93E-08	9.60E-08	5.15E-08
7	52TE 02	0.00E-40	9.93E-11	2.64E-16	1.87E-27	0.00E-40							
9	55CS20	0.00E-40	9.22E-06	2.90E-06	2.88E-07	2.86E-08	2.83E-09	2.81E-10	2.70E-15	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
10	56BA 0	0.00E-40	1.88E-03	5.93E-04	5.88E-05	5.83E-04	5.78E-07	5.74E-08	5.51E-13	4.68E-33	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40
11	61PM203	0.00E-40	7.46E-12	1.34E-17	4.32E-29	0.00E-40							
12	62SM203	0.00E-40	2.46E-08	1.65E-08	7.44E-09	3.39E-09	1.51E-09	6.82E-10	1.27E-11	1.52E-18	1.83E-25	0.00E-40	0.00E-40
13	63EU203	0.00E-40	5.81E-05	6.65E-06	8.73E-08	1.15E-09	1.50E-11	1.98E-13	7.72E-23	0.00E-40	0.00E-40	0.00E-40	
14	67Ho203	0.00E-40	3.83E-11	3.72E-11	3.51E-11	3.31E-11	3.13E-11	2.95E-11	2.21E-11	6.96E-12	2.19E-12	1.22E-13	0.00E-40
1	1 H	0.00E-40											
2	11 NA	0.00E-40											
1	26 FE	0.00E-40											
2	28 NI	0.00E-40											
3	24 CR	0.00E-40											
1	64 GD	0.00E-40											
2	5 B	0.00E-40											

TOTAL 0.00E-40 2.02E-03 6.22E-04 6.14E-05 6.58E-06 1.17E-06 6.30E-07 5.50E-07 4.75E-07 4.12E-07 2.96E-07 5.35E-08

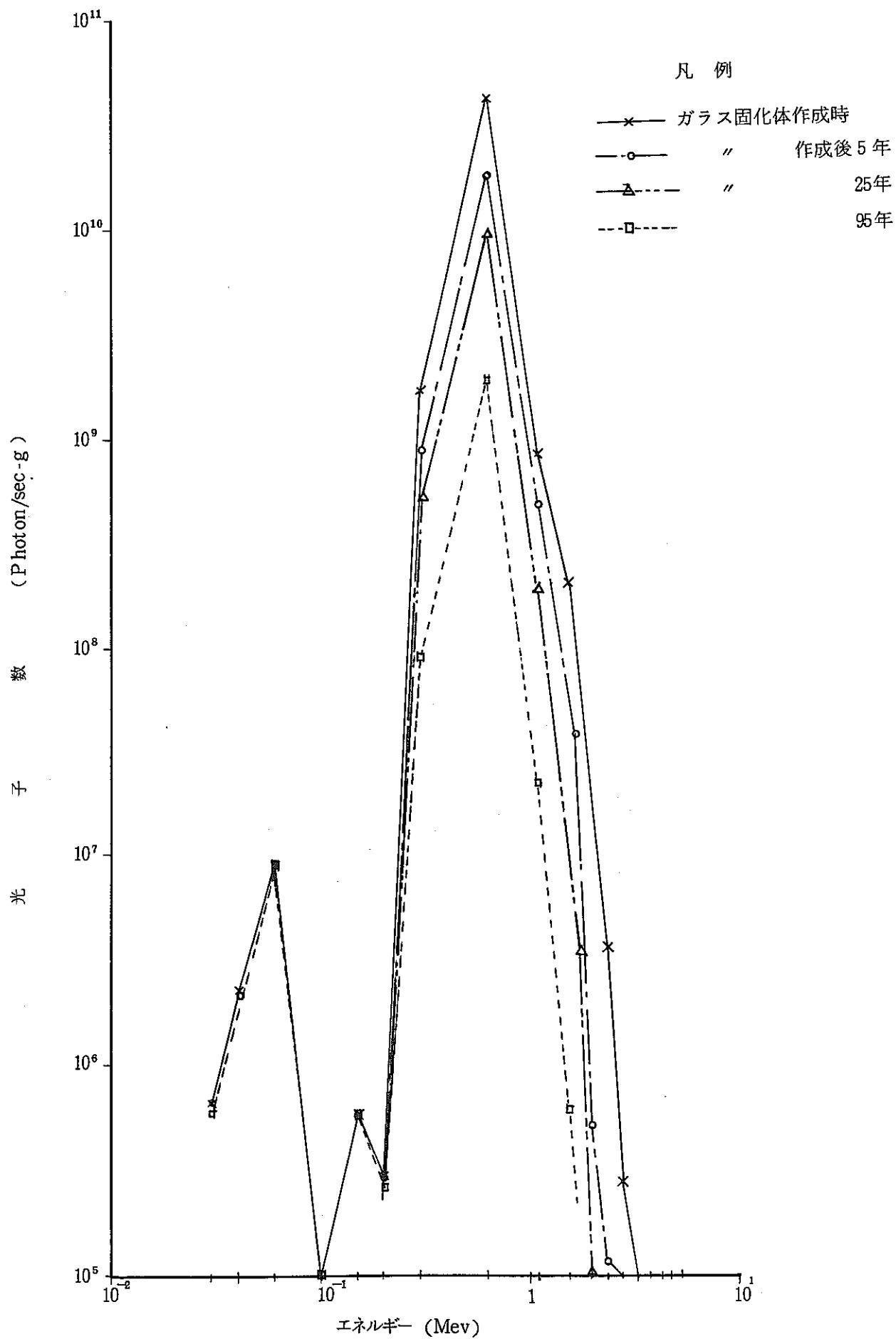


図 4.20 ガラス固化体から放射される  $\gamma$  線スペクトル

表 4.27 ガラス固化体に含まれるf.p. 成分表（重量比）

\*\*\* F.P. COMPONENT ( WT RATIO ) \*\*\*\*  
TIME = 5.00000E+00年

ATOMIC NO.	COMPONENT ( WT RATIO )
11	2.007286E-01
13	6.071731E-02
16	2.466271E-01
24	3.463380E-03
26	2.010859E-02
28	2.695136E-03
32	5.477529E-06
33	1.306529E-06
34	8.287659E-04
37	5.555754E-03
38	1.390800E-02
39	7.812802E-03
40	5.962619E-02
41	3.633467E-08
42	5.315639E-02
43	1.305121E-02
44	3.074864E-02
45	6.306257E-03
46	1.653865E-02
47	7.505114E-04
48	8.803430E-04
49	2.059559E-05
50	6.634996E-04
51	1.647306E-04
52	8.234184E-03
55	3.850642E-02
56	2.400025E-02
57	1.971181E-02
58	3.854924E-02
59	1.886521E-02
60	6.418245E-02
61	5.777368E-04
62	1.383079E-02
63	2.204299E-03
64	1.144746E-03
65	2.157495E-05
66	1.142566E-05
67	7.518984E-07
68	2.022078E-07
92	1.732588E-02
93	6.810705E-03
94	4.630777E-04
95	1.096244E-03
96	1.037184E-04

#### 4.2.3 SHIELD 計算結果

##### (1) 発熱計算結果

ガラス固化体の発熱量計算結果を、A-30、B-30、C-30、C-25、C-20、C-15の6ケースについて表4.28～表4.33に示す。この表のBLOCK No 1, 2, 3は、ガラス固化体の中心部、外側部、およびキャニスター部に対応している。

また、各ケースの発熱量を比較するため、ガラス固化体作成時の発生熱を図4.21に示す。発生熱の大小は、主に、Waste含有率により異なるが、ガラス固化体の半径（A、BとCモデル）の違いでは、あまり大きくは変わらない。また、キャニスターからの発熱量は、厚さが増すと単位容積当りの平均発熱量は減少するが（A、Bモデル）、キャニスター全体の発熱量は増える。

ガラス固化体の発熱量の時間変化は、C-30ケースについてみると、図4.22に示すとおりである。これによると、発熱量の時間変化は緩やかで、ガラス固化体作成時には、4.6～5.1 Kcal/m<sup>3</sup>・secであった発熱量が45年後には、1.0～1.1 Kcal/m<sup>3</sup>・secと、ほぼ直線的に減少して、当初の5分の1の発熱量になる。また、キャニスターの発熱量は、200年すぎ頃から急激に減少しているが、これはPowerの減少と対応している。（図4.18参照）。

表 4.28 ガラス固化体の発熱量

モデルA (Waste 30%含有) 単位Kcal/m<sup>3</sup>·sec

崩壊期間 (年)	Block No. ガラス 固化体作成後 (sec)			
		1	2	3
5.0	0.000E+00	4.827E+00	4.359E+00	4.580E+00
7.0	6.314E+07	3.706E+00	3.361E+00	3.373E+00
10.0	1.578E+08	3.068E+00	2.807E+00	2.551E+00
15.0	3.156E+08	2.584E+00	2.379E+00	2.008E+00
20.0	4.734E+08	2.264E+00	2.087E+00	1.734E+00
30.0	7.890E+08	1.772E+00	1.634E+00	1.355E+00
40.0	1.105E+09	1.392E+00	1.283E+00	1.067E+00
50.0	1.420E+09	1.096E+00	1.010E+00	8.419E-01
100.0	2.998E+09	3.397E-01	3.130E-01	2.604E-01
200.0	6.154E+09	4.374E-02	4.110E-02	2.588E-02
300.0	9.310E+09	1.427E-02	1.397E-02	2.938E-03
400.0	1.247E+10	9.793E-03	9.729E-03	6.563E-04
500.0	1.562E+10	8.089E-03	8.050E-03	4.148E-04
1000.0	3.140E+10	4.152E-03	4.120E-03	3.316E-04
3000.0	9.452E+10	1.241E-03	1.216E-03	2.546E-04
5000.0	1.576E+11	9.987E-04	9.776E-04	2.180E-04
10 <sup>4</sup>	3.154E+11	7.472E-04	7.323E-04	1.530E-04
10 <sup>5</sup>	3.156E+12	1.089E-04	1.066E-04	2.299E-05

表 4.29 ガラス固化体の発熱量

モデルB (Waste 30%含有) 単位Kcal/m<sup>3</sup>·sec

崩壊期間 (年)	Block No. ガラス 固化体作成後 (sec)			
		1	2	3
5.0	0.000E+00	4.827E+00	4.359E+00	3.732E+00
7.0	6.314E+07	3.706E+00	3.361E+00	2.749E+00
10.0	1.578E+08	3.068E+00	2.807E+00	2.078E+00
15.0	3.156E+08	2.584E+00	2.379E+00	1.636E+00
20.0	4.734E+08	2.264E+00	2.087E+00	1.412E+00
30.0	7.890E+08	1.772E+00	1.634E+00	1.103E+00
40.0	1.105E+09	1.392E+00	1.283E+00	8.690E-01
50.0	1.420E+09	1.096E+00	1.010E+00	6.855E-01
100.0	2.998E+09	3.397E-01	3.130E-01	2.120E-01
200.0	6.154E+09	4.374E-02	4.110E-02	2.106E-02
300.0	9.310E+09	1.427E-02	1.397E-02	2.381E-03
400.0	1.247E+10	9.793E-03	9.729E-03	5.246E-04
500.0	1.562E+10	8.089E-03	8.050E-03	3.288E-04
1000.0	3.140E+10	4.152E-03	4.120E-03	2.639E-04
3000.0	9.452E+10	1.241E-03	1.216E-03	2.040E-04
5000.0	1.576E+11	9.987E-04	9.776E-04	1.748E-04
10 <sup>4</sup>	3.154E+11	7.472E-04	7.323E-04	1.228E-04
10 <sup>5</sup>	3.156E+12	1.089E-04	1.066E-04	1.867E-05

表 4.30 ガラス固化体の発熱量

モデルC (Waste 15%含有) 単位Kcal/m<sup>3</sup>·sec

崩壊期間 (年)	ガラス 固化体作成後	Block No.		
		1	2	3
5.0	0.000E+40	2.433E+00	2.175E+00	1.604E+00
7.0	6.314E+07	1.865E+00	1.675E+00	1.181E+00
10.0	1.578E+08	1.538E+00	1.394E+00	8.930E-01
15.0	3.156E+08	1.292E+00	1.179E+00	7.027E-01
20.0	4.734E+08	1.132E+00	1.034E+00	6.064E-01
30.0	7.890E+08	8.854E-01	8.091E-01	4.736E-01
40.0	1.105E+09	6.957E-01	6.357E-01	3.728E-01
50.0	1.420E+09	5.476E-01	5.002E-01	2.940E-01
100.0	2.998E+09	1.697E-01	1.551E-01	9.087E-02
200.0	6.154E+09	2.168E-02	2.022E-02	9.024E-03
300.0	9.310E+09	6.942E-03	6.779E-03	1.020E-03
400.0	1.247E+10	4.732E-03	4.697E-03	2.246E-04
500.0	1.562E+10	3.905E-03	3.884E-03	1.409E-04
1000.0	3.140E+10	2.007E-03	1.990E-03	1.134E-04
3000.0	9.452E+10	6.031E-04	5.895E-04	8.789E-05
5000.0	1.576E+11	4.857E-04	4.741E-04	7.530E-05
10 <sup>4</sup>	3.154E+11	3.632E-04	3.550E-04	5.289E-05
10 <sup>5</sup>	3.156E+12	5.300E-05	5.172E-05	8.012E-06

表 4.31 ガラス固化体の発熱量

モデルC (Waste 20%含有) 単位Kcal/m<sup>3</sup>·sec

崩壊期間 (年)	ガラス 固化体作成後	Block No.		
		1	2	3
5.0	0.000E+40	3.317E+00	2.966E+00	2.129E+00
7.0	6.314E+07	2.542E+00	2.283E+00	1.568E+00
10.0	1.578E+08	2.096E+00	1.900E+00	1.185E+00
15.0	3.156E+08	1.760E+00	1.606E+00	9.326E-01
20.0	4.734E+08	1.542E+00	1.409E+00	8.049E-01
30.0	7.890E+08	1.206E+00	1.102E+00	6.286E-01
40.0	1.105E+09	9.478E-01	8.661E-01	4.949E-01
50.0	1.420E+09	7.460E-01	6.815E-01	3.903E-01
100.0	2.998E+09	2.312E-01	2.112E-01	1.206E-01
200.0	6.154E+09	2.951E-02	2.753E-02	1.198E-02
300.0	9.310E+09	9.438E-03	9.216E-03	1.352E-03
400.0	1.247E+10	6.429E-03	6.382E-03	2.958E-04
500.0	1.562E+10	5.306E-03	5.277E-03	1.848E-04
1000.0	3.140E+10	2.727E-03	2.704E-03	1.490E-04
3000.0	9.452E+10	8.199E-04	8.016E-04	1.157E-04
5000.0	1.576E+11	6.604E-04	6.446E-04	9.919E-05
10 <sup>4</sup>	3.154E+11	4.938E-04	4.827E-04	6.971E-05
10 <sup>5</sup>	3.156E+12	7.206E-05	7.031E-05	1.062E-05

表 4.32 ガラス固化体の発熱量

モデルC (Waste 25%含有) 単位Kcal/m<sup>3</sup>·sec

崩壊期間 (年)	Block No. ガラス 固化体作成後			
		1	2	3
5.0	0.000E-40	4.219E+00	3.773E+00	2.646E+00
7.0	6.314E+07	3.233E+00	2.904E+00	1.949E+00
10.0	1.578E+08	2.665E+00	2.416E+00	1.473E+00
15.0	3.156E+08	2.238E+00	2.042E+00	1.159E+00
20.0	4.734E+08	1.960E+00	1.791E+00	1.000E+00
30.0	7.890E+08	1.533E+00	1.402E+00	7.811E-01
40.0	1.105E+09	1.205E+00	1.101E+00	6.150E-01
50.0	1.420E+09	9.484E-01	8.666E-01	4.850E-01
100.0	2.998E+09	2.939E-01	2.686E-01	1.499E-01
200.0	6.154E+09	3.750E-02	3.499E-02	1.489E-02
300.0	9.310E+09	1.198E-02	1.170E-02	1.677E-03
400.0	1.247E+10	8.158E-03	8.098E-03	3.646E-04
500.0	1.562E+10	6.732E-03	6.695E-03	2.269E-04
1000.0	3.140E+10	3.460E-03	3.431E-03	1.832E-04
3000.0	9.452E+10	1.041E-03	1.018E-03	1.426E-04
5000.0	1.576E+11	8.383E-04	8.184E-04	1.223E-04
10 <sup>4</sup>	3.154E+11	6.268E-04	6.127E-04	8.599E-05
10 <sup>5</sup>	3.156E+12	9.146E-05	8.925E-05	1.318E-05

表 4.33 ガラス固化体の発熱量

モデルC (Waste 30%含有) 単位Kcal/m<sup>3</sup>·sec

崩壊期間 (年)	Block No. ガラス 固化体作成後			
		1	2	3
5.0	0.000E-40	5.086E+00	4.551E+00	3.145E+00
7.0	6.314E+07	3.897E+00	3.502E+00	2.317E+00
10.0	1.578E+08	3.212E+00	2.914E+00	1.751E+00
15.0	3.156E+08	2.697E+00	2.463E+00	1.378E+00
20.0	4.734E+08	2.362E+00	2.160E+00	1.189E+00
30.0	7.890E+08	1.848E+00	1.690E+00	9.285E-01
40.0	1.105E+09	1.452E+00	1.328E+00	7.311E-01
50.0	1.420E+09	1.143E+00	1.045E+00	5.766E-01
100.0	2.998E+09	3.543E-01	3.238E-01	1.782E-01
200.0	6.154E+09	4.519E-02	4.217E-02	1.770E-02
300.0	9.310E+09	1.443E-02	1.409E-02	1.990E-03
400.0	1.247E+10	9.826E-03	9.754E-03	4.297E-04
500.0	1.562E+10	8.108E-03	8.065E-03	2.663E-04
1000.0	3.140E+10	4.168E-03	4.133E-03	2.153E-04
3000.0	9.452E+10	1.254E-03	1.226E-03	1.680E-04
5000.0	1.576E+11	1.010E-03	9.861E-04	1.441E-04
10 <sup>4</sup>	3.154E+11	7.551E-04	7.383E-04	1.014E-04
10 <sup>5</sup>	3.156E+12	1.102E-04	1.075E-04	1.565E-05

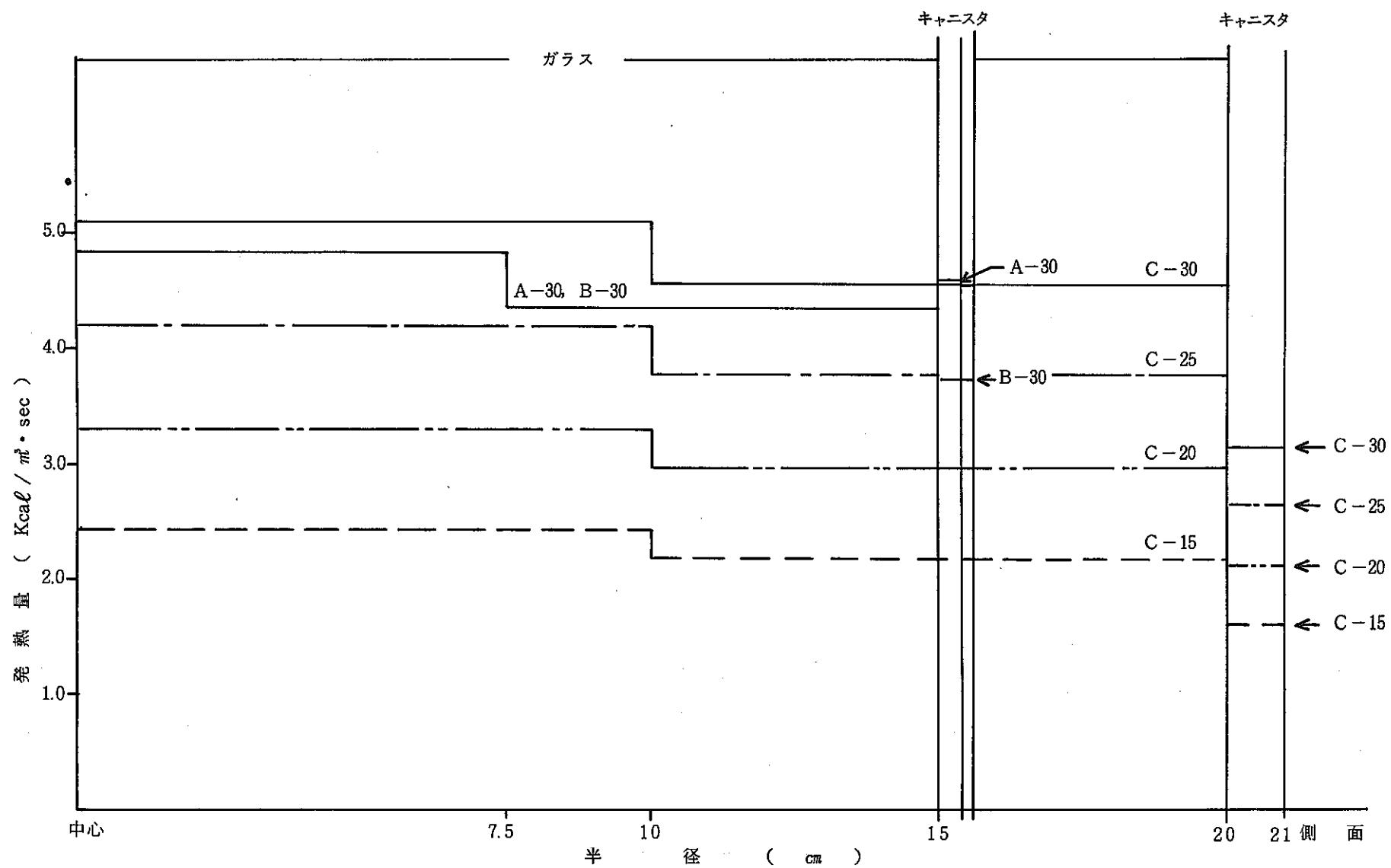
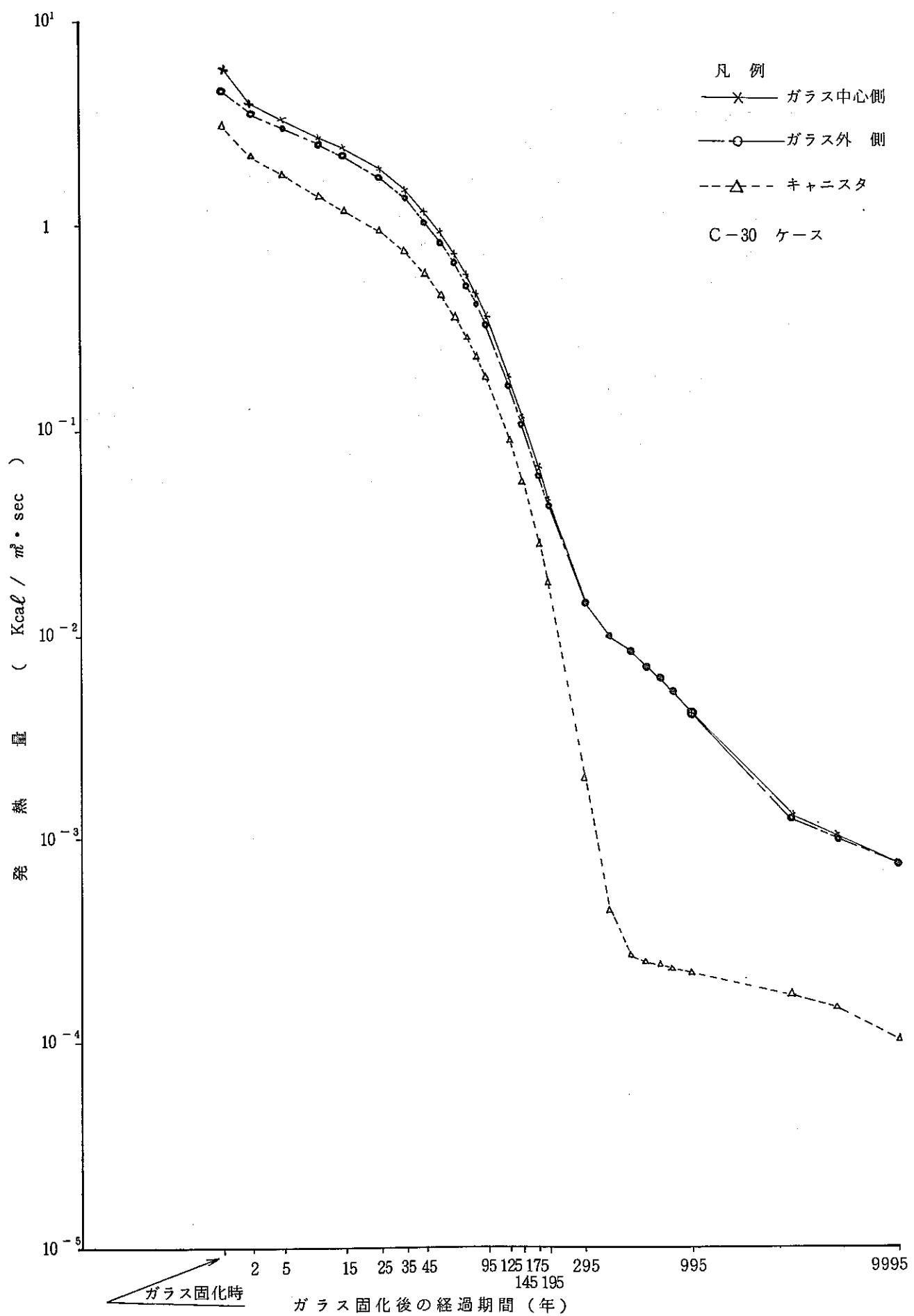


図 4.21 ガラス固化体の発熱量の比較 (ガラス固化体作成時の発生熱)



## (2) ガラス固化体から透過する $\gamma$ 線エネルギー

ガラスからキャニスターへ透過する $\gamma$ 線エネルギーと、キャニスターから外部へ透過するエネルギーとをA-30, B-30, C-30の3ケースについて求めて表4.34～表4.36に示す。

半径15cmのガラス(A-30, B-30)から、キャニスターへ透過する $\gamma$ 線エネルギーは、 $9.23 \times 10^{-2} \text{Kcal/sec} \cdot \text{本}$ で崩壊熱との割合は、20%弱である。また、半径20cmのガラス(C-30)からキャニスターへ透過する $\gamma$ 線エネルギーは、 $1.33 \times 10^{-1} \text{Kcal/sec} \cdot \text{本}$ で崩壊熱との割合は、16%である。一方、キャニスターから外部へ透過する $\gamma$ 線エネルギーは、A-30, B-30, C-30の順にみると、 $7.0 \times 10^{-2} \text{Kcal/sec} \cdot \text{本}$ 、 $6.5 \times 10^{-2} \text{Kcal/sec} \cdot \text{本}$ 、 $8.0 \times 10^{-2} \text{Kcal/sec} \cdot \text{本}$ である。また、崩壊熱との割合は、15%、14%、10%である。このように、ガラスからキャニスターへ透過する $\gamma$ 線エネルギーは、半径20cmのガラス固化体の方が大きいが、崩壊熱との割合でみると逆である。また、キャニスターに残る $\gamma$ 線エネルギーは、A-30, B-30, C-30の順で求めると、 $2.23 \times 10^{-2}$ 、 $2.74 \times 10^{-2}$ 、 $5.29 \times 10^{-2} \text{Kcal/sec} \cdot \text{本}$ となる。キャニスターに入る $\gamma$ 線エネルギーとの割合は、それぞれ24%、30%、40%であり、キャニスターの厚さと対応している。

表 4.34 透過  $\gamma$  線エネルギー (A - 30)

単価Kcal/sec・本

崩壊期間 年	崩壊熱エネルギー	ガラス固化体からの透過 $\gamma$ 線		キャニスターからの透過 $\gamma$ 線	
		エネルギー	*割合	エネルギー	*割合
5.0	$4.72 \times 10^{-1}$	$9.23 \times 10^{-2}$	19.6 %	$7.00 \times 10^{-2}$	14.8 %
10.0	$2.95 \times 10^{-1}$	$5.12 \times 10^{-2}$	17.4	$3.87 \times 10^{-2}$	13.1
50.0	$1.04 \times 10^{-1}$	$1.67 \times 10^{-2}$	16.0	$1.26 \times 10^{-2}$	12.1
100.0	$3.23 \times 10^{-2}$	$5.20 \times 10^{-3}$	16.1	$3.94 \times 10^{-3}$	12.2
200.0	$4.06 \times 10^{-3}$	$5.15 \times 10^{-4}$	12.7	$3.89 \times 10^{-4}$	9.6
500.0	$6.91 \times 10^{-4}$	$7.33 \times 10^{-6}$	1.1	$5.31 \times 10^{-6}$	0.8
$10^3$	$3.56 \times 10^{-4}$	$5.93 \times 10^{-6}$	1.7	$4.32 \times 10^{-6}$	1.2
$5 \times 10^3$	$8.75 \times 10^{-5}$	$4.12 \times 10^{-6}$	4.7	$3.05 \times 10^{-6}$	3.5
$10^4$	$6.52 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-6}$	4.2	$2.02 \times 10^{-6}$	3.1
$10^5$	$9.53 \times 10^{-6}$	$4.38 \times 10^{-7}$	4.6	$3.26 \times 10^{-7}$	3.4

注1. ガラス固化体は5年間の崩壊期間後に作成される。

注2. (\*) 割合 = (透過  $\gamma$  線エネルギー / 崩壊熱) × 100.0

表 4.35 透過  $\gamma$  線エネルギー (B - 30)

単位Kcal/sec・本

崩壊期間 年	崩壊熱エネルギー	ガラス固化体からの透過 $\gamma$ 線		キャニスタからの透過 $\gamma$ 線	
		エネルギー	割合	エネルギー	割合
5.0	$4.72 \times 10^{-1}$	$9.23 \times 10^{-2}$	19.6%	$6.49 \times 10^{-2}$	13.7%
10.0	$2.95 \times 10^{-1}$	$5.12 \times 10^{-2}$	17.4%	$3.59 \times 10^{-2}$	12.2%
50.0	$1.04 \times 10^{-1}$	$1.67 \times 10^{-2}$	16.0%	$1.17 \times 10^{-2}$	11.2%
100.0	$3.23 \times 10^{-2}$	$5.20 \times 10^{-3}$	16.1%	$3.65 \times 10^{-3}$	11.3%
200.0	$4.06 \times 10^{-3}$	$5.15 \times 10^{-4}$	12.7%	$3.60 \times 10^{-4}$	8.9%
500.0	$6.91 \times 10^{-4}$	$7.33 \times 10^{-6}$	1.1%	$4.91 \times 10^{-6}$	0.7%
$10^3$	$3.56 \times 10^{-4}$	$5.93 \times 10^{-6}$	1.7%	$3.99 \times 10^{-6}$	1.1%
$5 \times 10^3$	$8.75 \times 10^{-5}$	$4.12 \times 10^{-6}$	4.7%	$2.83 \times 10^{-6}$	3.2%
$10^4$	$6.52 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-6}$	4.2%	$1.86 \times 10^{-6}$	2.9%
$10^5$	$9.53 \times 10^{-6}$	$4.38 \times 10^{-7}$	4.6%	$3.01 \times 10^{-7}$	3.2%

表 4.36 透過  $\tau$  線エネルギー (C - 30)

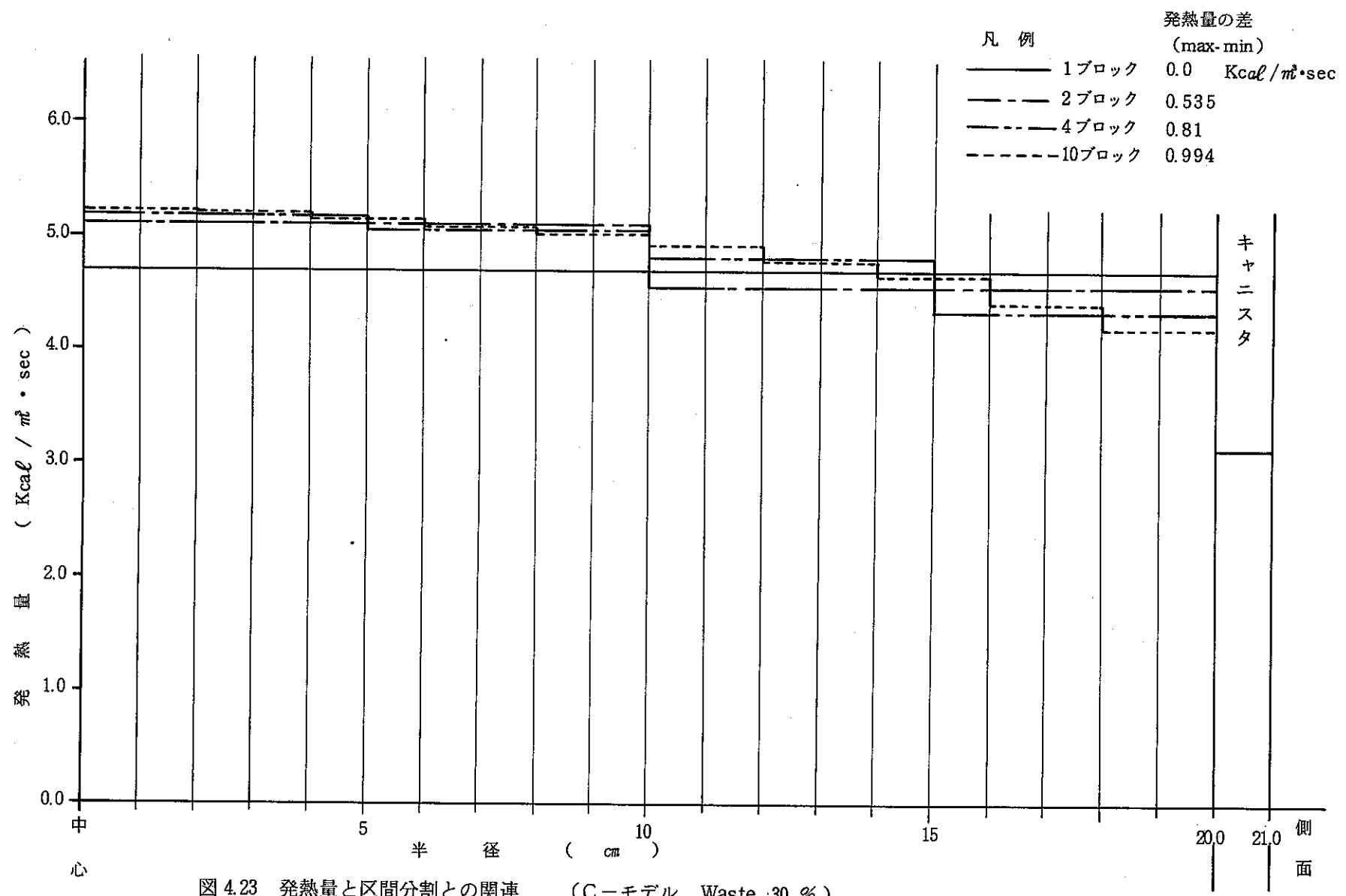
単位Kcal/sec・本

崩壊期間	崩壊熱エネルギー	ガラス固化体からの透過 $\tau$ 線		キャニスターからの透過 $\tau$ 線	
		エネルギー	割合	エネルギー	割合
年 5.0	$8.39 \times 10^{-1}$	$1.33 \times 10^{-1}$	15.8%	$8.01 \times 10^{-2}$	9.5%
10.0	$5.24 \times 10^{-1}$	$7.34 \times 10^{-2}$	14.0	$4.41 \times 10^{-2}$	8.4
50.0	$1.85 \times 10^{-1}$	$2.40 \times 10^{-2}$	12.9	$1.43 \times 10^{-2}$	7.7
100.0	$5.75 \times 10^{-2}$	$7.48 \times 10^{-3}$	13.0	$4.50 \times 10^{-3}$	7.8
200.0	$7.21 \times 10^{-3}$	$7.39 \times 10^{-4}$	10.2	$4.43 \times 10^{-4}$	6.1
500.0	$1.23 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-5}$	0.9	$6.15 \times 10^{-6}$	0.5
$10^3$	$6.33 \times 10^{-4}$	$8.47 \times 10^{-6}$	1.3	$4.87 \times 10^{-6}$	0.8
$5 \times 10^3$	$1.56 \times 10^{-4}$	$5.93 \times 10^{-6}$	3.8	$3.52 \times 10^{-6}$	2.3
$10^4$	$1.16 \times 10^{-4}$	$3.94 \times 10^{-6}$	3.4	$2.25 \times 10^{-6}$	1.9
$10^5$	$1.69 \times 10^{-5}$	$6.28 \times 10^{-7}$	3.7	$3.66 \times 10^{-7}$	2.2

### (3) ブロック分割のちがいによる発熱量への影響

ア 線の遮蔽計算を行うときの、ガラス固化体のブロック分割のちがいによる発熱量、および、温度分布への影響をみるために、1, 2, 4, 10のブロックの4ケースについて、C-30モデルで、検討を行った。発熱量と区間分割との関連を図4.23に示す。また、この発熱量のうち2ブロックと10ブロック分割による発熱量を用いた熱伝導計算結果として、 $r$  方向断面の温度変化を、図4.24に示す。

発熱量についてみると、1ブロックと2ブロックの分割との間では、大きな差がみられるが、それ以上の2ブロック、4ブロック、10ブロックとの間では、外側のガラス部分で発熱量の勾配が多少大きくなる程度である。また、温度の $r$  方向断面変化をみると、2ブロックと、10ブロックでは、ほとんど差はみられない。これらより、発熱量計算ではガラス部分を2ブロックに分けて行う。



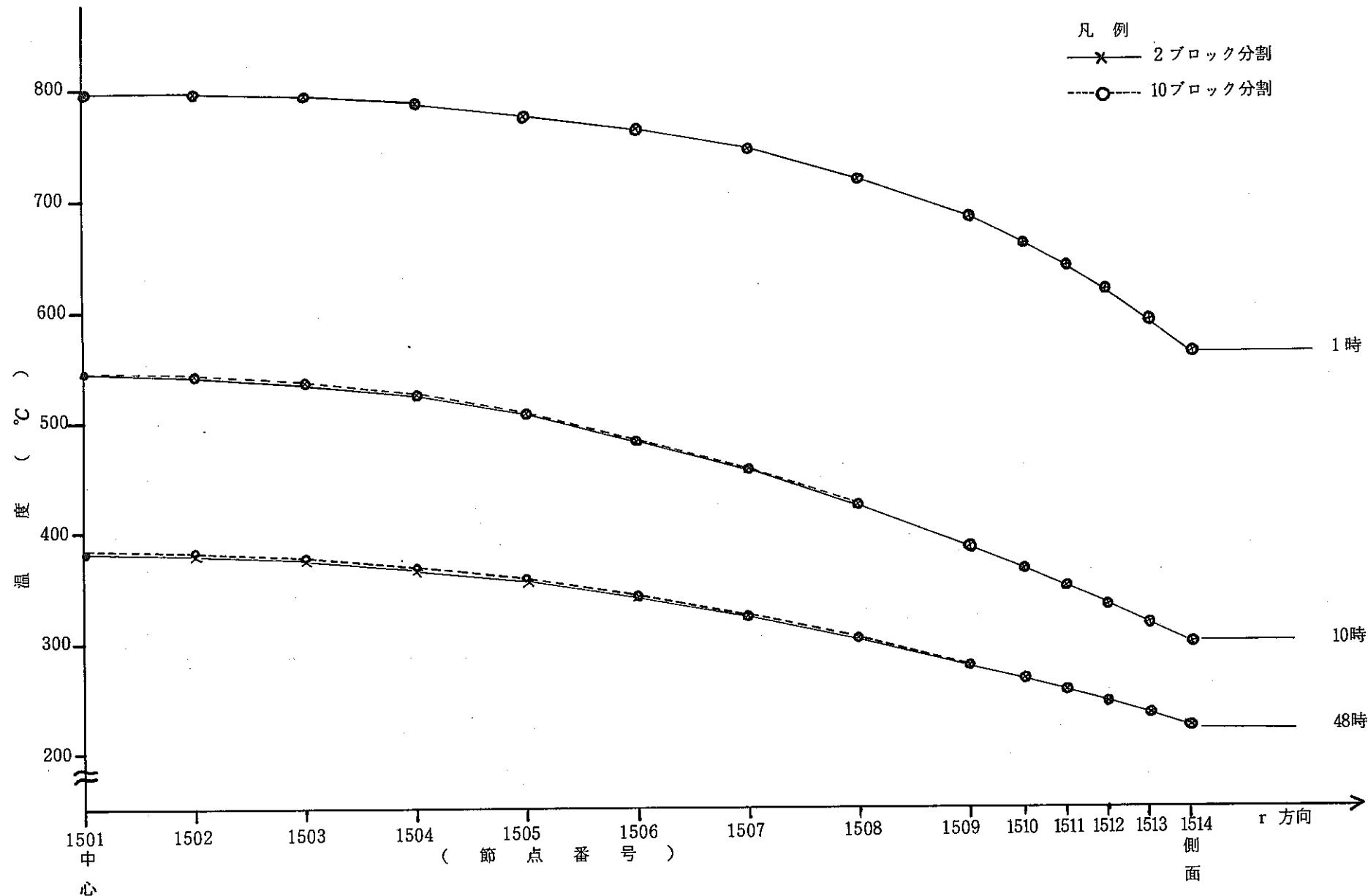


図 4.24 温度の  $r$  方向断面変化図 (発熱計算におけるブロック分割の温度分布への影響)

## 4.3 热伝導計算結果

### 4.3.1 基本ケースの計算結果

基本ケースの計算結果は、境界条件について、実験結果と整合するように検討した基本ケース2を中心に示す。

#### (1) 基本ケース1

基本ケース1の計算結果の一例として、C-30の2日目の温度分布を図4.25に示す。ガラス固化体のWaste含有率による温度への影響をみるため、15%、20%、25%、30%のWaste含有率の4ケースの温度時間変化と $\gamma$ 方向断面変化を図4.26と図4.27とに示す。またWaste含有率と中心温度、側面温度および温度差との関連をみるため、相関図を作成した（図4.28）。これによると、Waste含有率の増加にしたがって温度も、ほぼ比例して上がる。

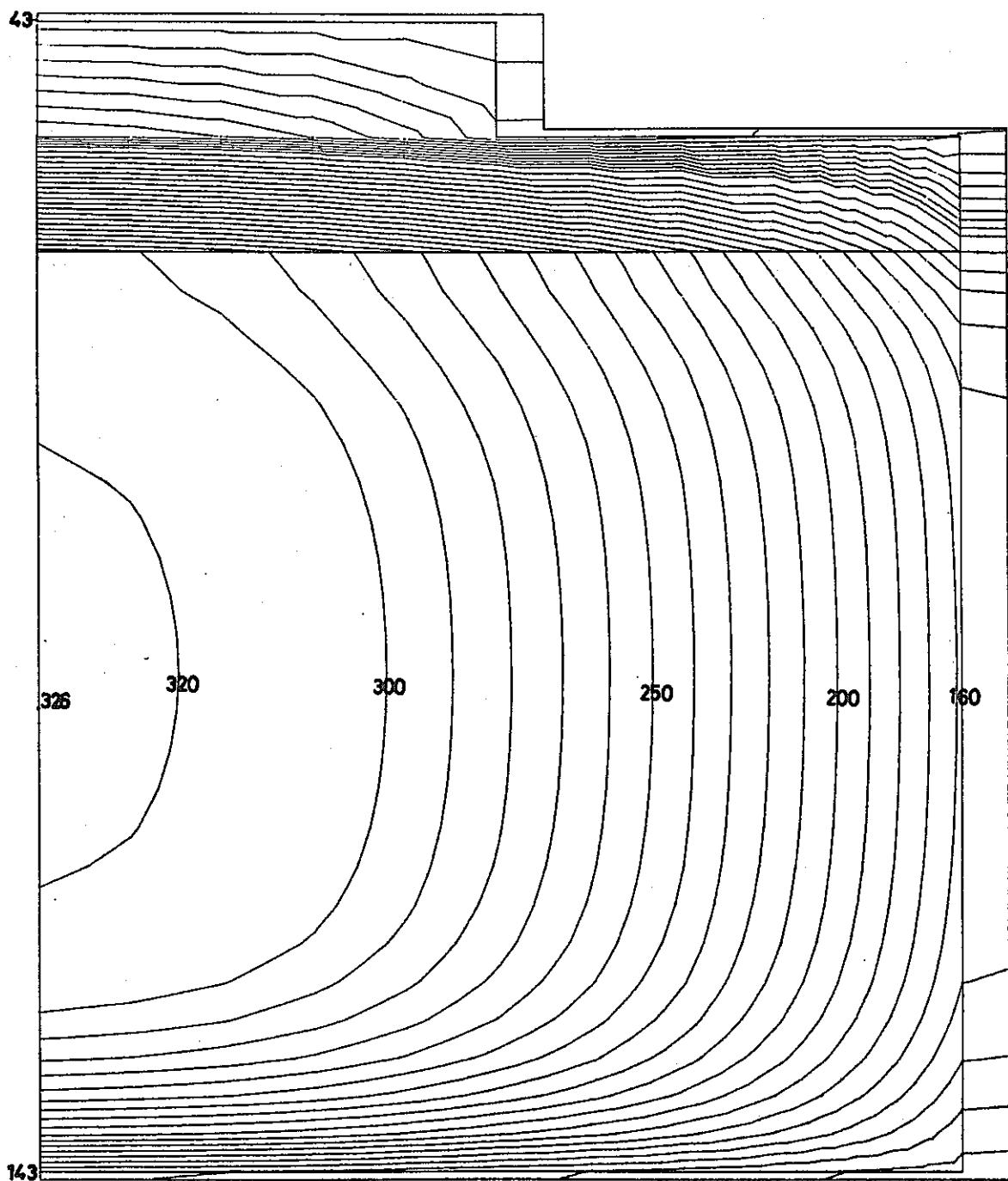


図 4.25 溫度分布図

モデル C-30 (空冷  $Er = 9.49 \times 10^{-12}$ ) 2日後

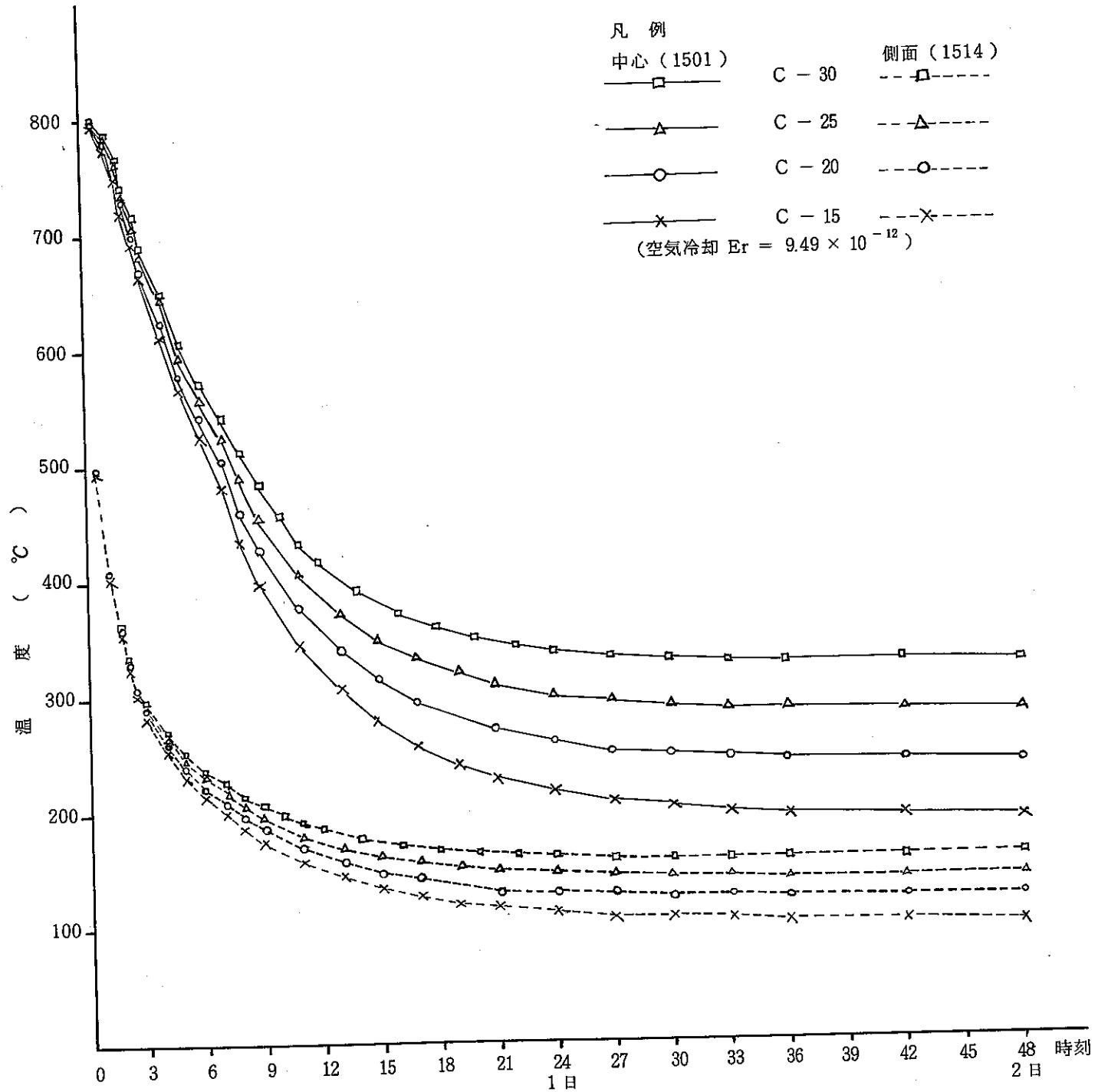


図 4.26 Waste 含有量のちがいによる温度変化の比較

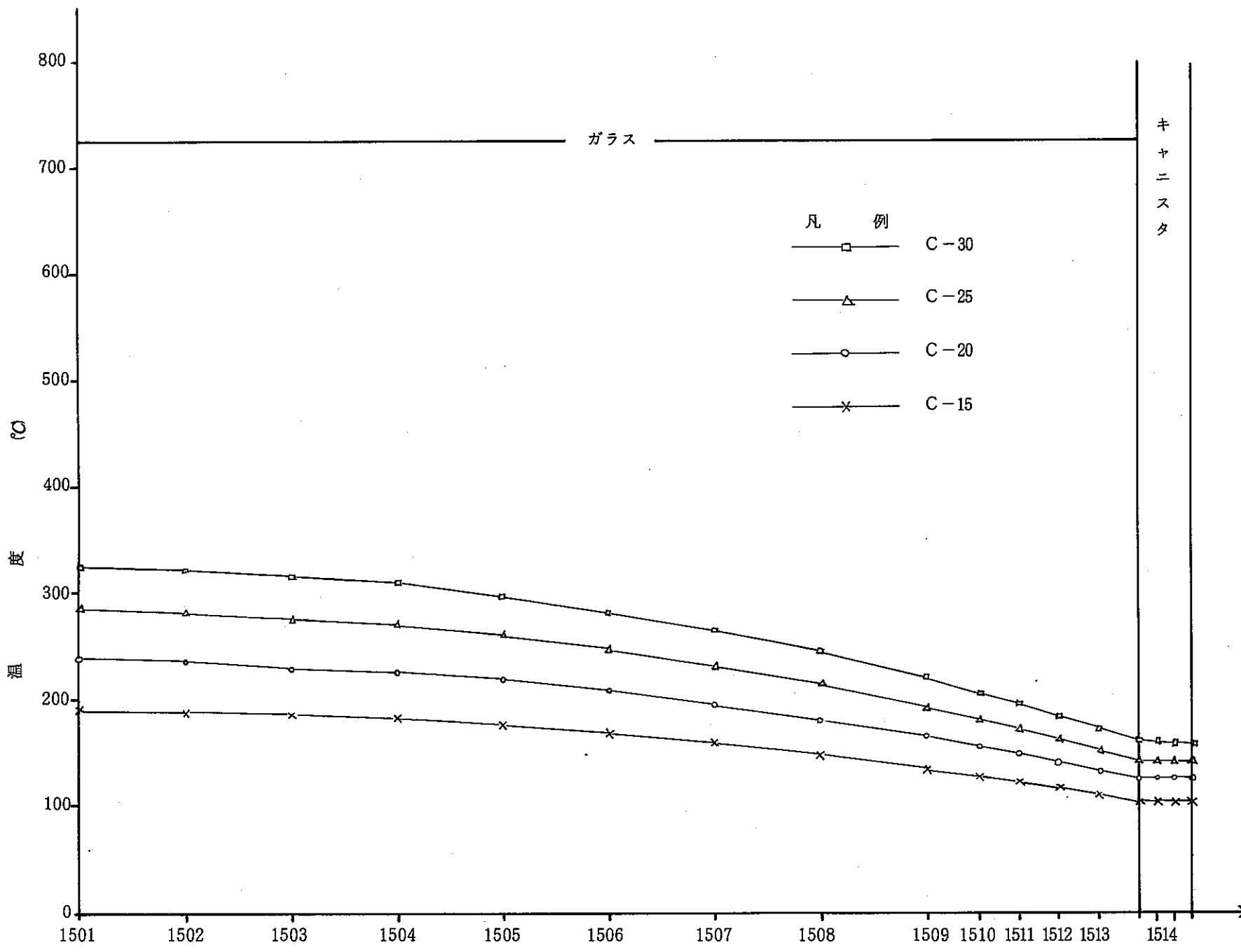


図 4.27  $r$  方向断面の温度変化図 (48時間目)

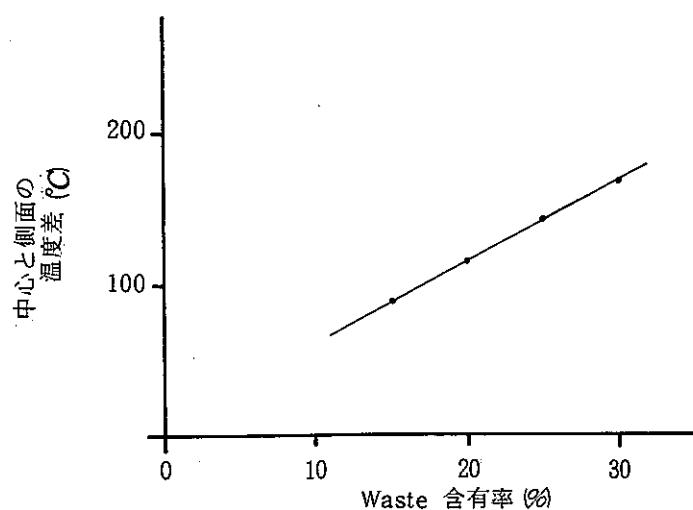
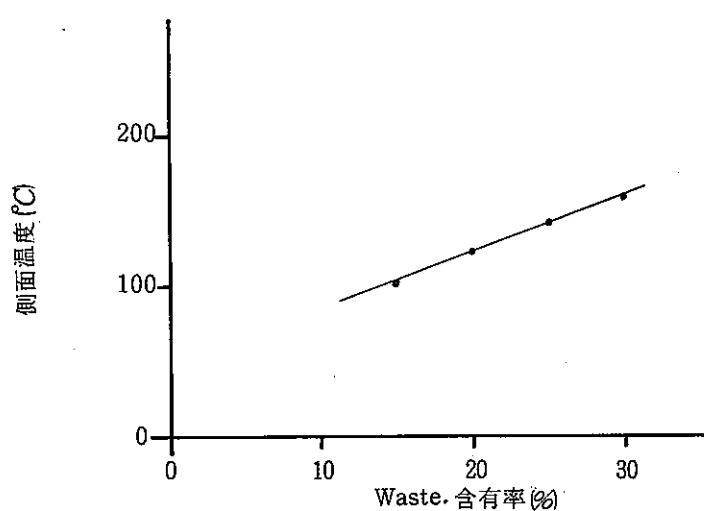
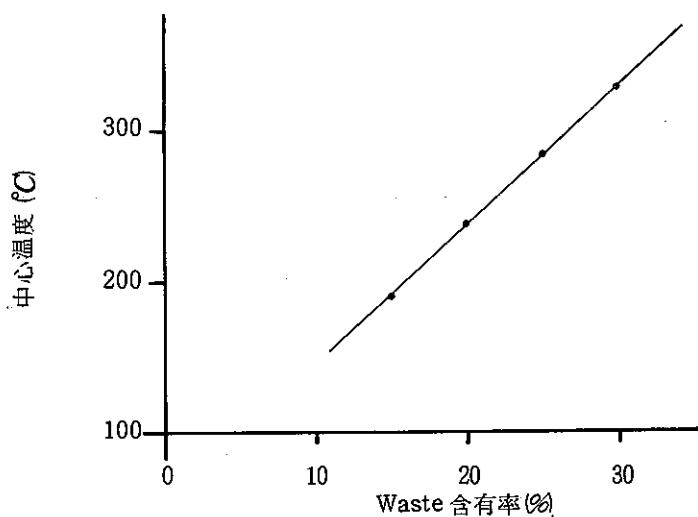


図 4.28 Waste 含有率と中心温度、側面温度および温度差との相関（2 日後）

表 4.37 Waste 含有率変化による温度勾配変化

単位 ℃

時刻測点		ケース C - 15	C - 20	C - 25	C - 30
6 時間	中 心 (1501)	$5.26247 \times 10^2$	$5.43030 \times 10^2$	$5.57777 \times 10^2$	$5.73684 \times 10^2$
	側 面 (1514)	$2.17537 \times 10^2$	$2.25620 \times 10^2$	$2.33068 \times 10^2$	$2.41128 \times 10^2$
	差	3 0 8 . 7 1	3 1 7 . 4 1	3 2 4 . 7 0 9	3 3 2 . 5 5 6
11時間	中 心 (1501)	$3.45624 \times 10^2$	$3.76510 \times 10^2$	$4.06939 \times 10^2$	$4.34573 \times 10^2$
	側 面 (1514)	$1.58936 \times 10^2$	$1.71361 \times 10^2$	$1.83278 \times 10^2$	$1.94395 \times 10^2$
	差	1 8 6 . 6 8 8	2 0 5 . 1 4 9	2 2 3 . 6 6 1	2 4 0 . 1 7 8
24時間	中 心 (1501)	$2.17143 \times 10^2$	$2.59757 \times 10^2$	$3.01090 \times 10^2$	$3.38508 \times 10^2$
	側 面 (1514)	$1.12655 \times 10^2$	$1.30649 \times 10^2$	$1.47570 \times 10^2$	$1.62634 \times 10^2$
	差	1 0 4 . 4 8 8	1 2 9 . 1 0 8	1 5 3 . 5 2	1 7 5 . 8 7 4
2 日 (48 <sup>h</sup> )	中 心 (1501)	$1.91143 \times 10^2$	$2.38959 \times 10^2$	$2.84361 \times 10^2$	$3.25436 \times 10^2$
	側 面 (1514)	$1.02793 \times 10^2$	$1.23112 \times 10^2$	$1.41723 \times 10^2$	$1.58131 \times 10^2$
	差	8 8 . 3 5	1 1 5 . 8 4 7	1 4 2 . 6 3 8	1 6 7 . 3 0 5
3 日 (72 <sup>h</sup> )	中 心 (1501)	$1.89547 \times 10^2$	$2.37883 \times 10^2$	$2.83607 \times 10^2$	$3.24944 \times 10^2$
	側 面 (1514)	$1.02196 \times 10^2$	$1.22715 \times 10^2$	$1.41455 \times 10^2$	$1.57990 \times 10^2$
	差	8 7 . 3 5 1	1 1 5 . 1 6 8	1 4 2 . 1 5 2	1 6 6 . 9 5 4

## (2) 基本ケース 2

### (i) 発熱がないケース

B モデル（半径15cm）で発熱がない場合の10時間後の計算結果を図4.29に示す。この結果は、ガラス固化体中央部外側で154°Cになっており、実測結果150～160°Cの範囲に入っている。また、その時間変化図（図4.30）をみると、2日後には、中心および外側温度がともにほぼ室温になっている。

### (ii) 30% Waste による発熱を含むケース

基本ケース2のA-30、B-30、C-30の3ケースについて温度分布図を図4.31～4.39に時間変化図を短期、長期に分けて図4.40～4.42に示す。また、ガラス固化体中心部をr方向（半径）に切ったときの断面の温度変化を図4.43、4.44に示す。このうち、A-30とB-30との計算結果は、温度分布図、および時間変化図をみると、ほとんど変わらない。このように、A（0.4cm）、B（0.6cm）の両ケースのキャニスターの厚さのちがいによる温度分布への影響はほとんどない。このため、今後、ガラス固化体形状は、A、C両ケースについて行う。

温度分布図をみると、A-30では、2日後、中心で約270°C、側面中央部で約180°Cとなる。50年後では、中心で93°C、側面中央部で約70°Cとなる。C-30をみると、10時間後では、転移点温度（TG）が、ガラスの中心から10cm離れた所に現われ、中心部はまだ液体となっている。2日後では、中心が約380°C、側面中央部で約220°Cとなり、ガラス全部が固化している。1年後の結果は、発熱量の減少が小さいため、ほとんど2日目の結果と変わらない。50年後では、中心で約120°C、側面中央部で約80°Cとなる。また、温度分布パターンをみると時間を経るに従って、等温センター線は丸みを増していく。これは、ガラス固化体の温度が高いときは、熱流速が半径方向に向いているが、温度が低くなるに従って、それまで卓越していた側面からぬける熱量が、上下面からぬける熱量より大きく減少するので、熱流束が上下方向を向いていくためである。

短期の温度変化をみると、A-30ケースでは、1.5日位で中心温度が約270°C、外側温度が約180°Cになり、ほぼ定常に達し、ガラス注入時の初期温度の影響がなくなる。C-30ケースでは、2日位で、ほぼ定常に達し、中心温度が約380°C、外側温度が約220°Cになる。

50年後までの長期の温度変化をみると、A-30およびC-30両ケース共に、発熱量の減少に伴って緩やかに、中心および側面温度が下っていく。このように、温度の時間変化は緩やかであり、また、ガラス固化体の発熱量は、数年単位で緩やかに変化するため、各計算時刻では、発熱量と境界から外部へ逃げる熱量とがほぼつりあっている。すなわち、これはガラス固化体の蓄熱量の時間変化（ $\rho C \partial T / \partial t$ ）が少ないと示し、各時刻ごとの発熱量と温度とが対応している、（図4.42参照）。

長期の経時変化で、2年目の温度が低く計算されているが、これは発熱量の補間方法に問題があるためと思われる。即ち、発熱量は、計算開始時、2年目、5年目と数年単位で計算し、その間の時刻は線型補間をして求めている。この方法では、補間値が大きめに評価される。また、各時刻の温度分布は発熱量と対応しているので、補間値を用いる時刻では温度が高目に計算され、計算値を用いる時刻の温度は経時にみると低くなる。

### (iii) ガラス固化体の半径のちがいによる温度分布

ガラス固化体の半径のちがいによる温度への影響をみるため、A-30とC-30との温度時間変化を図4.40、4.42に並記した。A-30の中心温度の減少速度は、C-30のそれよりも大きく、中心温度が転移点温度より低くなるのは、A-30では約7時間後、C-30では約14時間後である。両者共に、ほぼ定常に達する2日後では、中心温度は約110°C、側面温度は約40°CほどA-30よりC-30の方が高い。この温度差は年を経るに従って、発熱量の減少と共に縮まる。また中心と側面との温度差をみると、2日後ではA-30で91°C、C-30で160°Cと、半径が大きい方が温度差も大きく、年を経るに従って温度差が小さくなる。だが、中心から外側へ向っての温度勾配をみると、ほぼ両者は一致している（図4.43、4.44参照）。

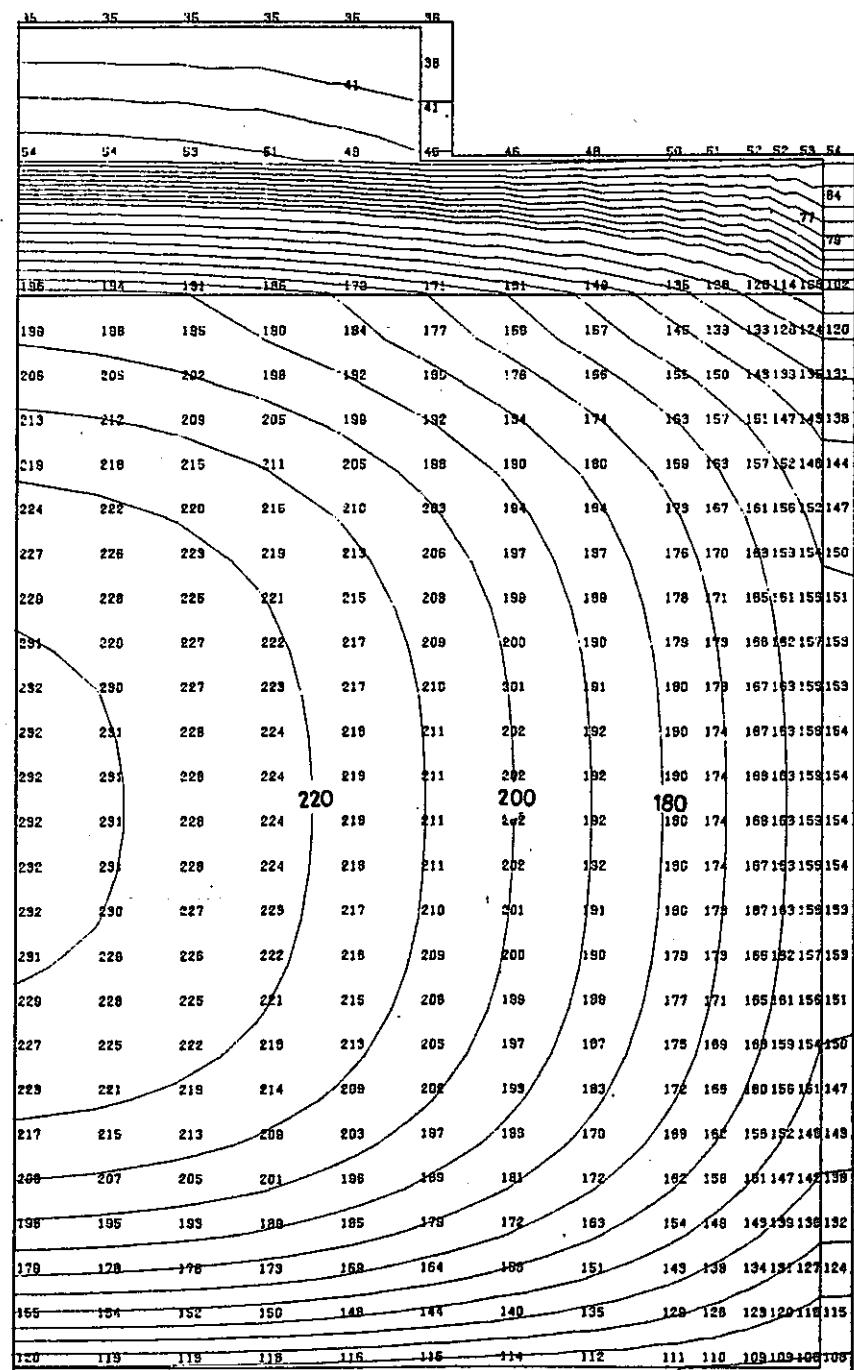


図 4.29 温度分布図

モデル B - 0 (空冷  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ ) 10時間後

凡　例

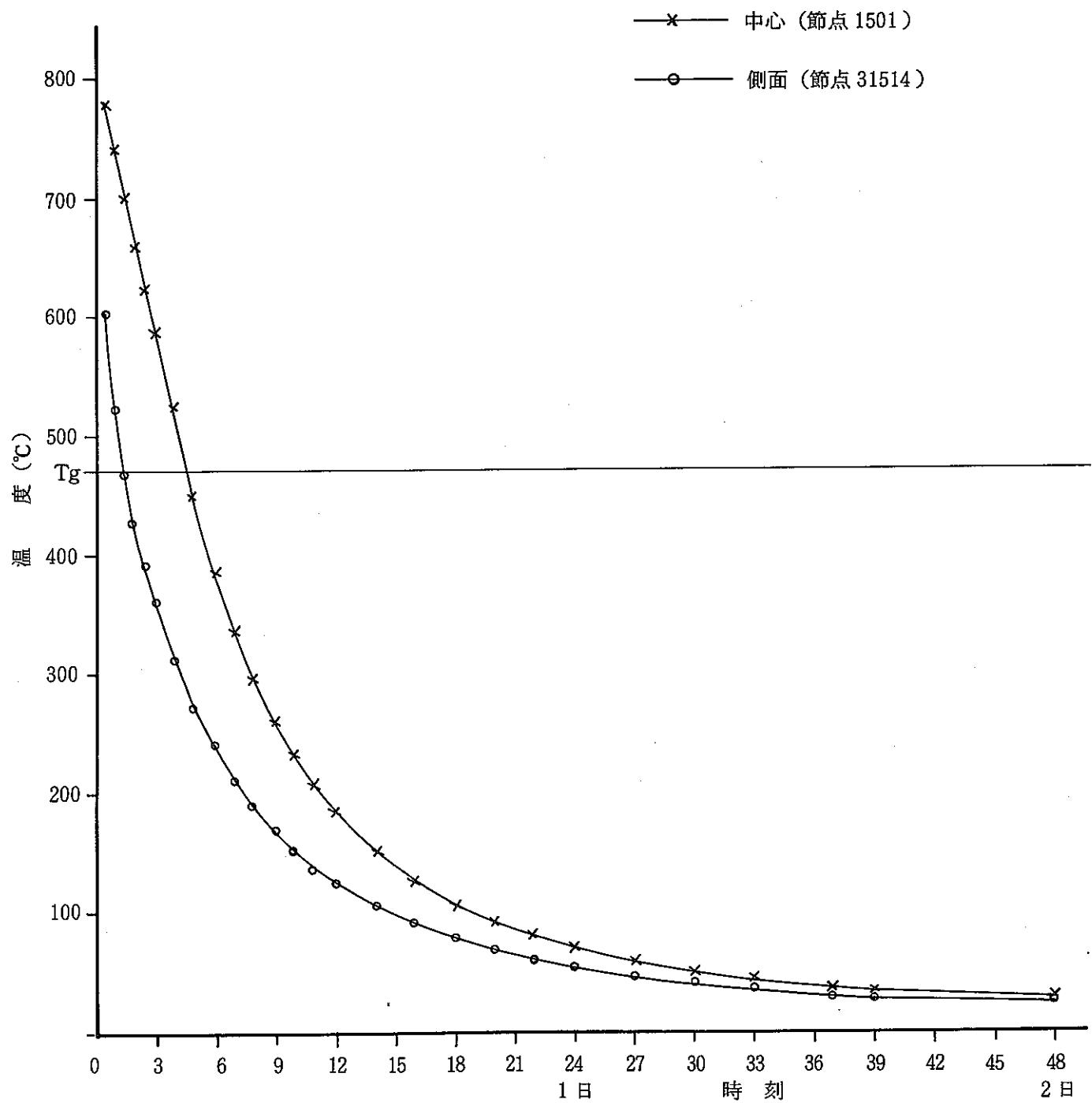
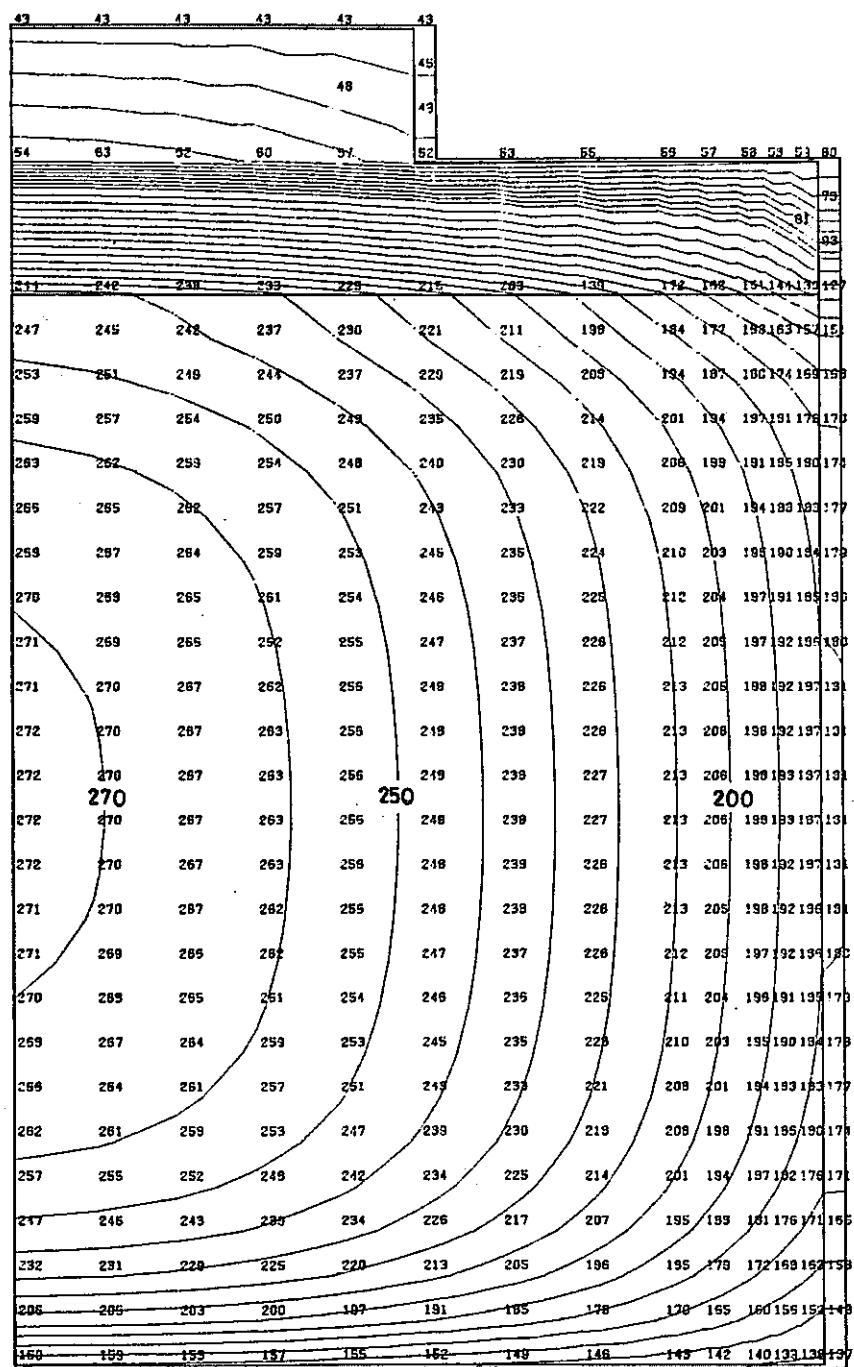


図 4.30 ガラス固化体（中心，側面）の温度の時間変化  
モデルB-0-0（半径15cmガラス固化体）



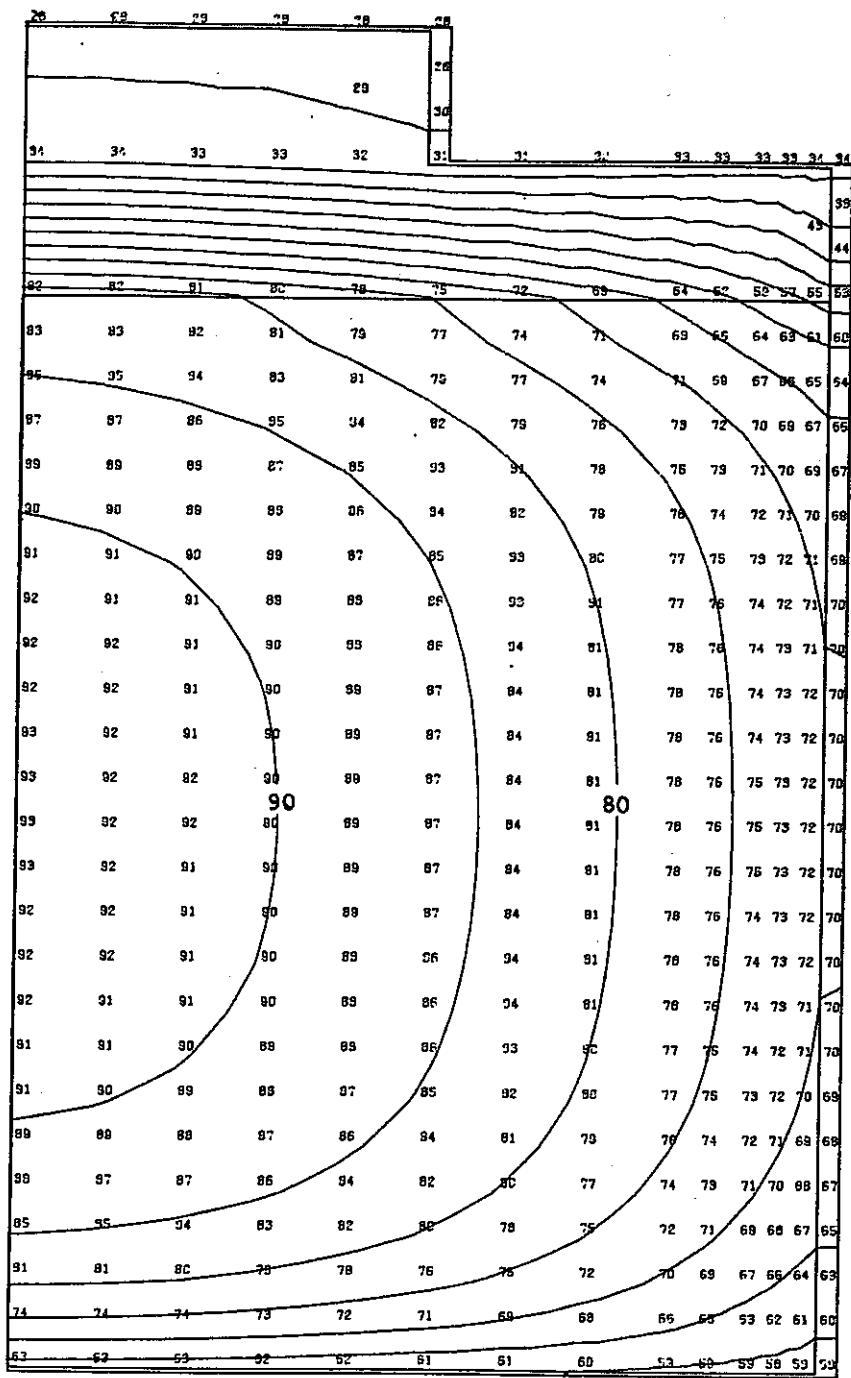


図 4.32 溫度分布図

モデル A-30 (空冷 =  $2.0 \times 10^{-12}$ ) 50年後

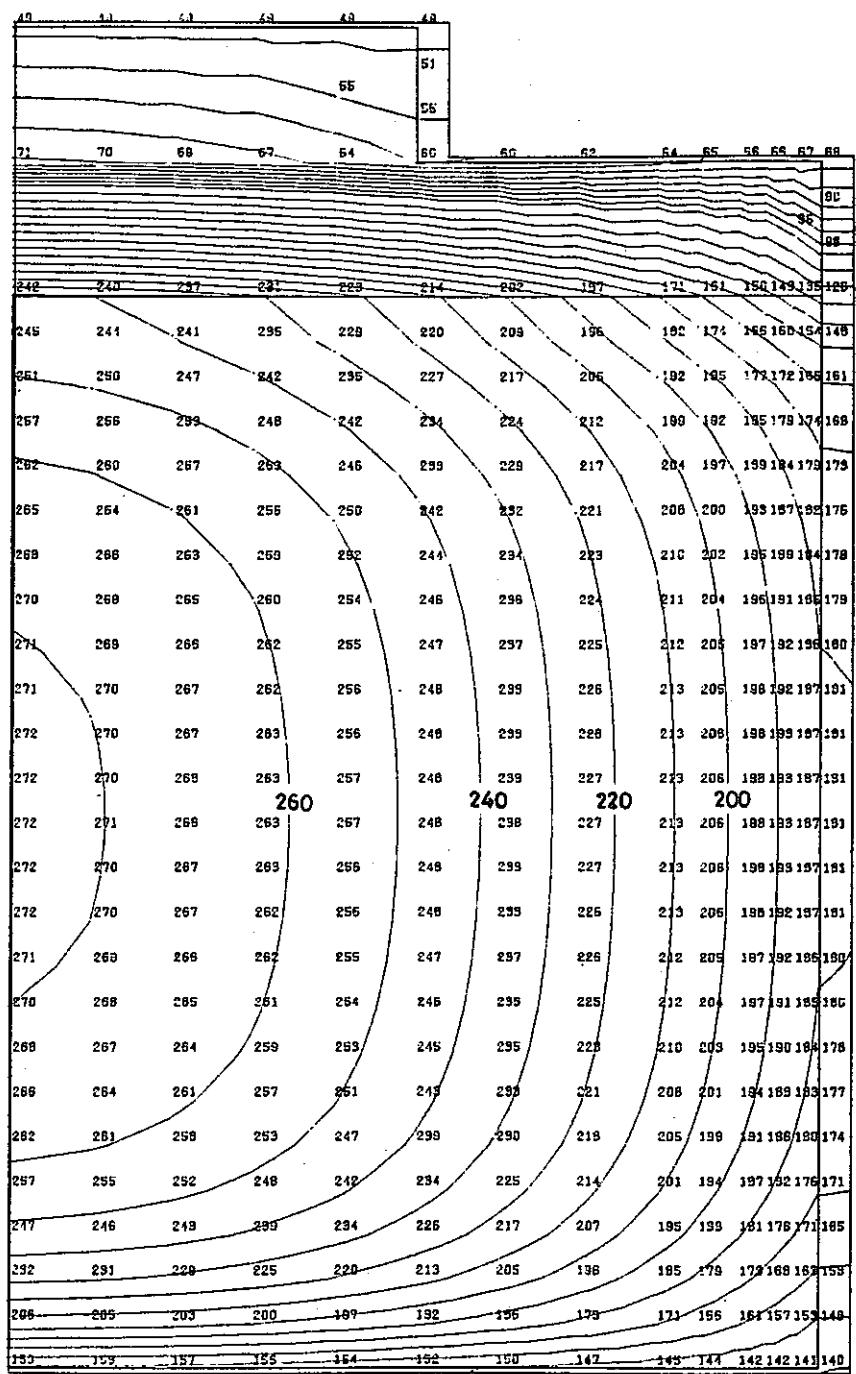


図 4.33 溫度分布

モデル B-30 (空冷  $E\tau = 2.0 \times 10^{-12}$ ) 2日後

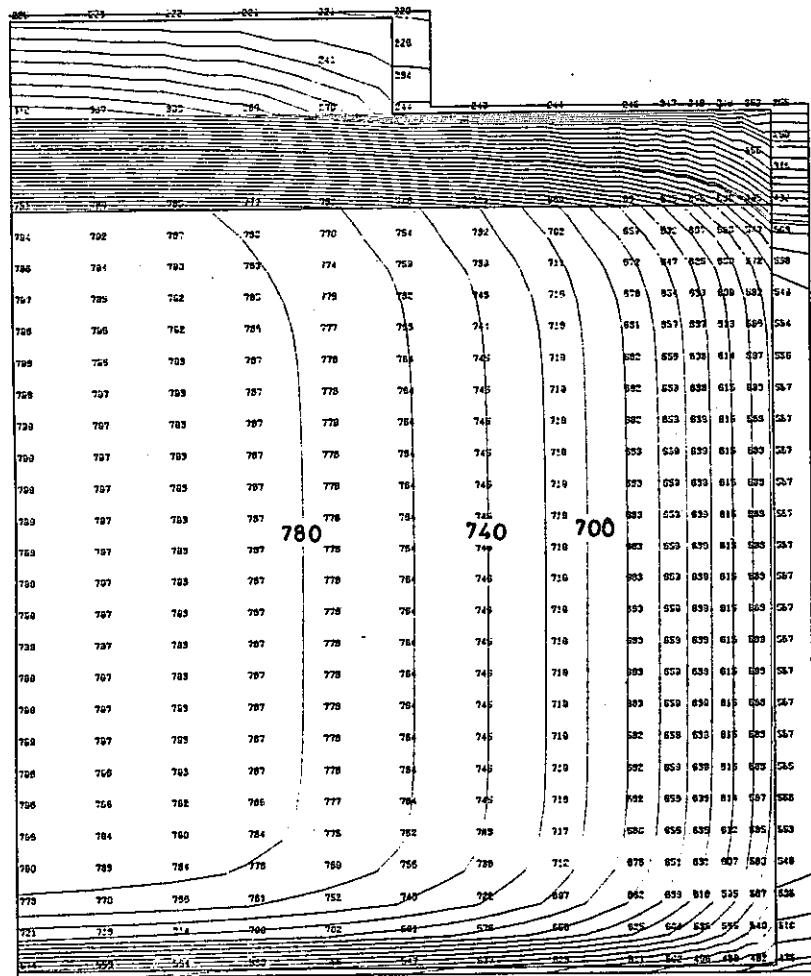


図 4.34 温度分布図

モデル C-30 (空冷  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ ) 1 時間後

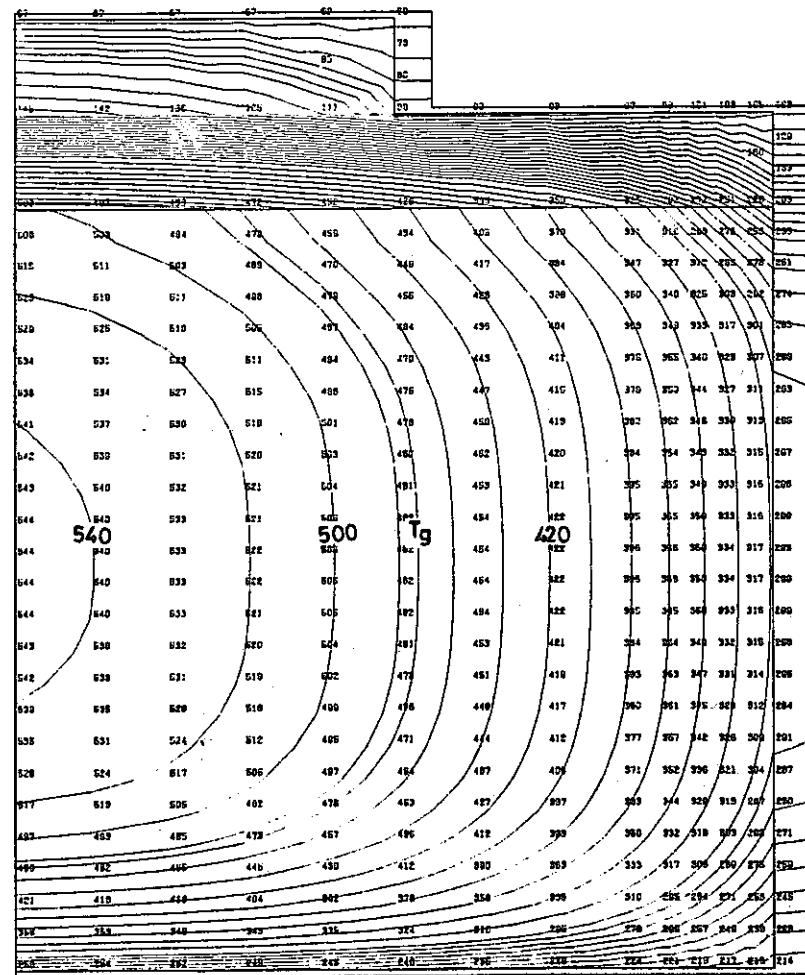


図 4.35 温度分布図

モデル C-30 (空冷  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ ) 10時間後

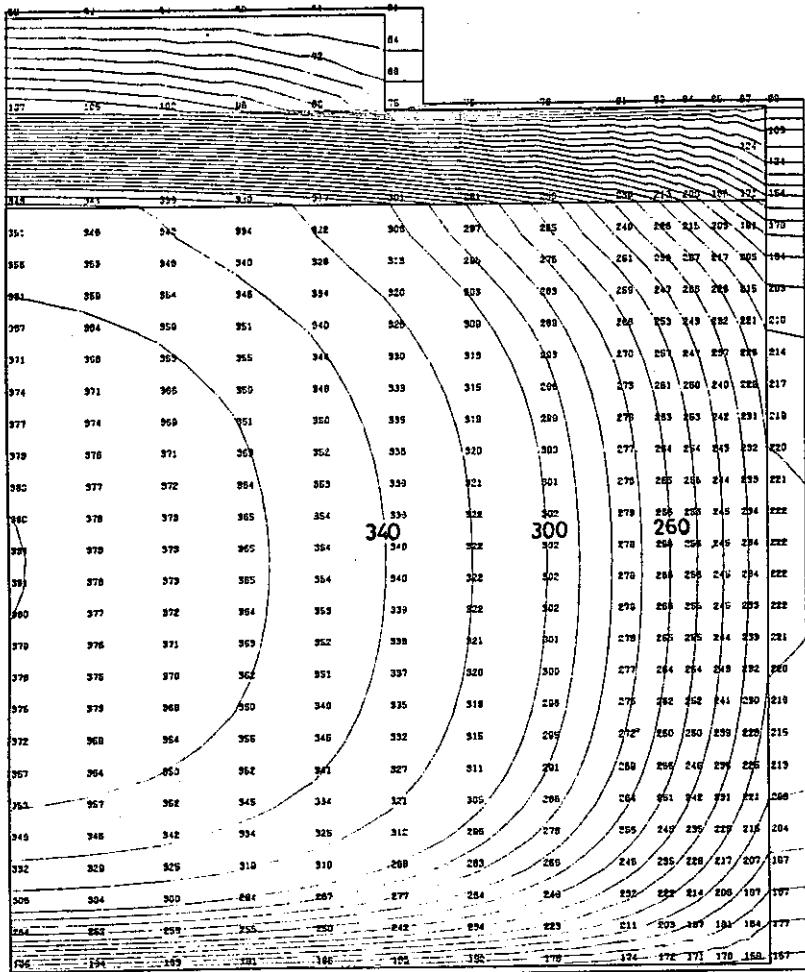


図 4.36 温度分布図

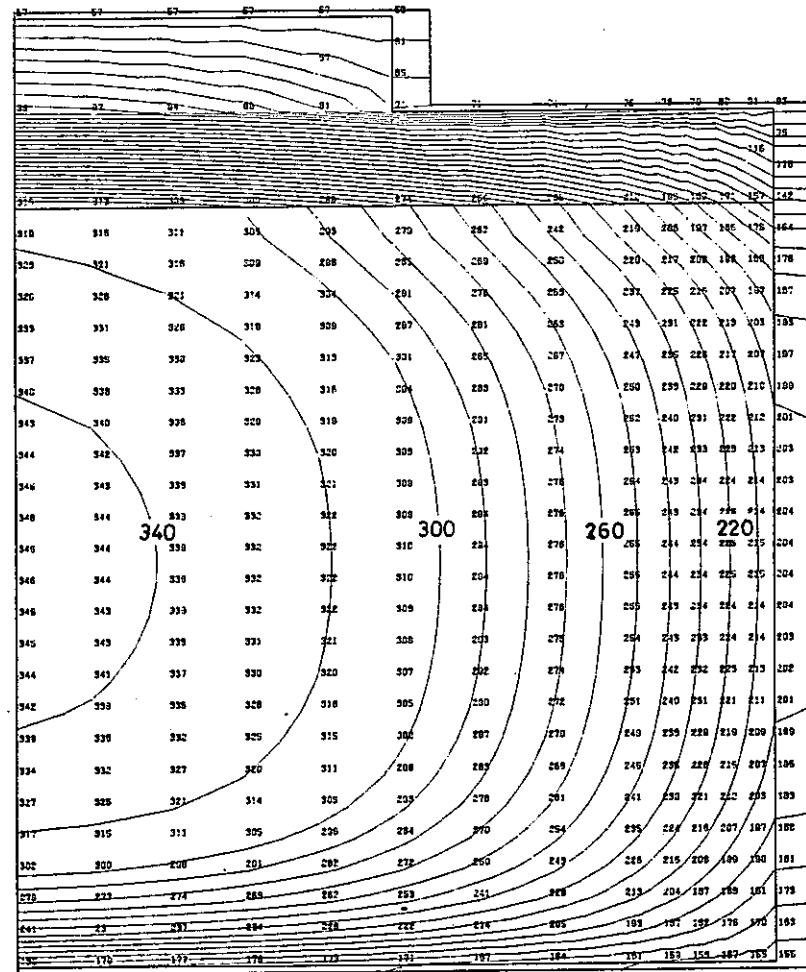
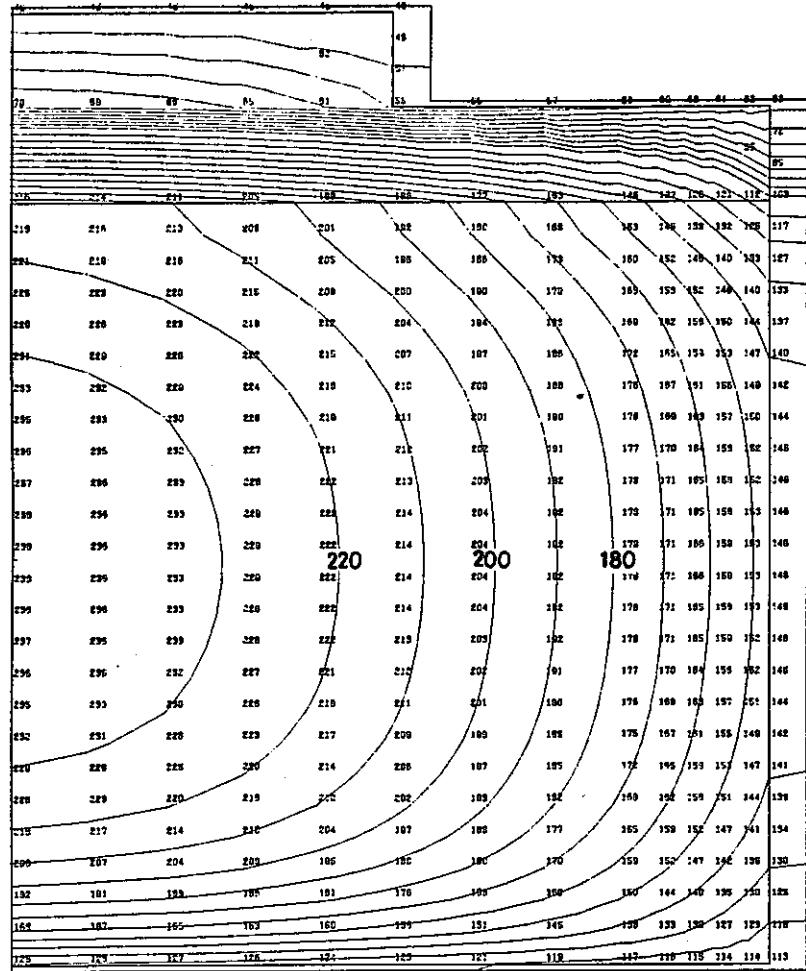
モデル C-30 (空冷  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ ) 2 日後

図 4.37 温度分布図

モデル C-30 (空冷  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ ) 1 年後



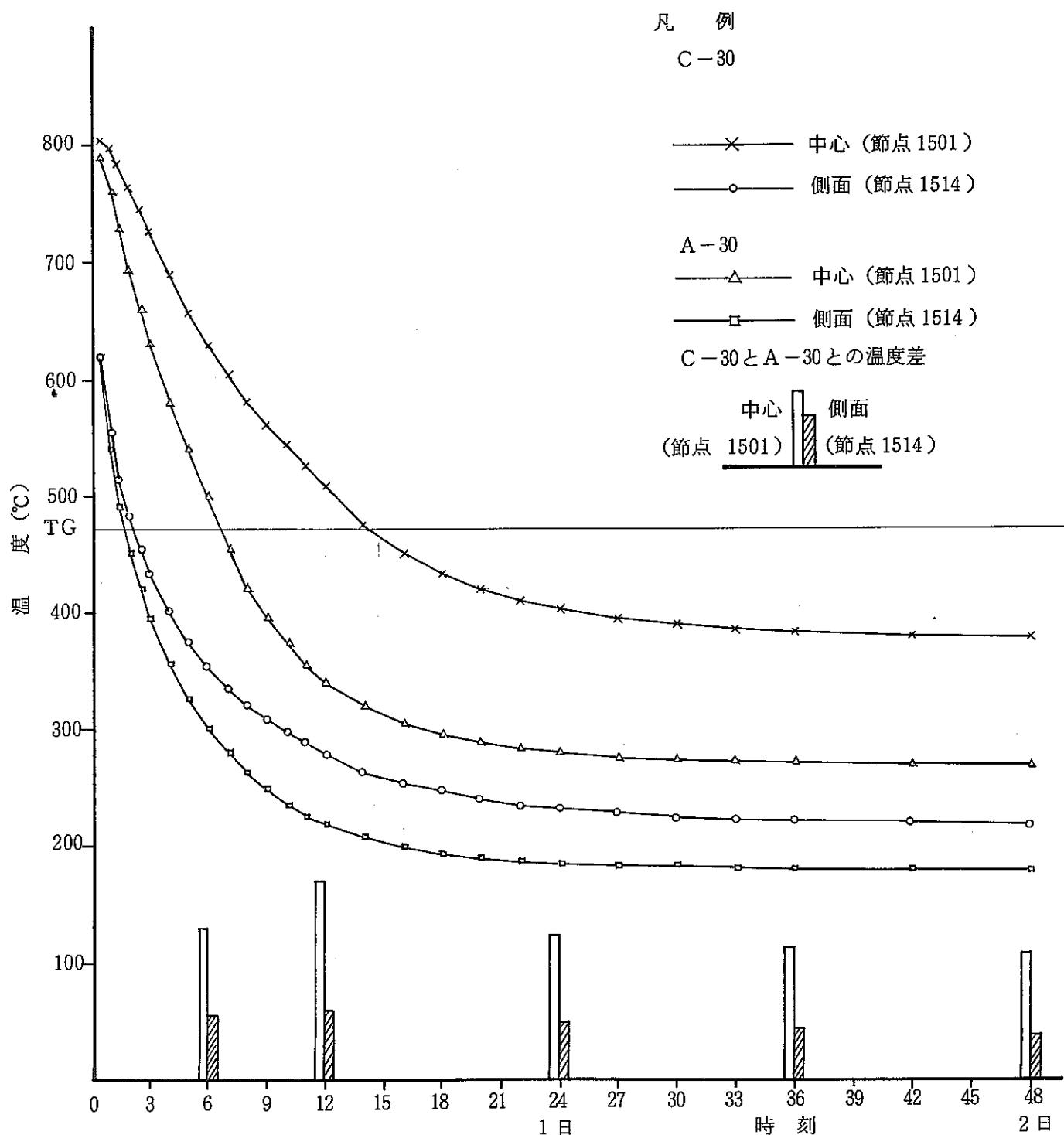


図 4.40 ガラス固化体 (中心, 側面) の温度の時間変化  
(空気冷却  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ )

凡 例

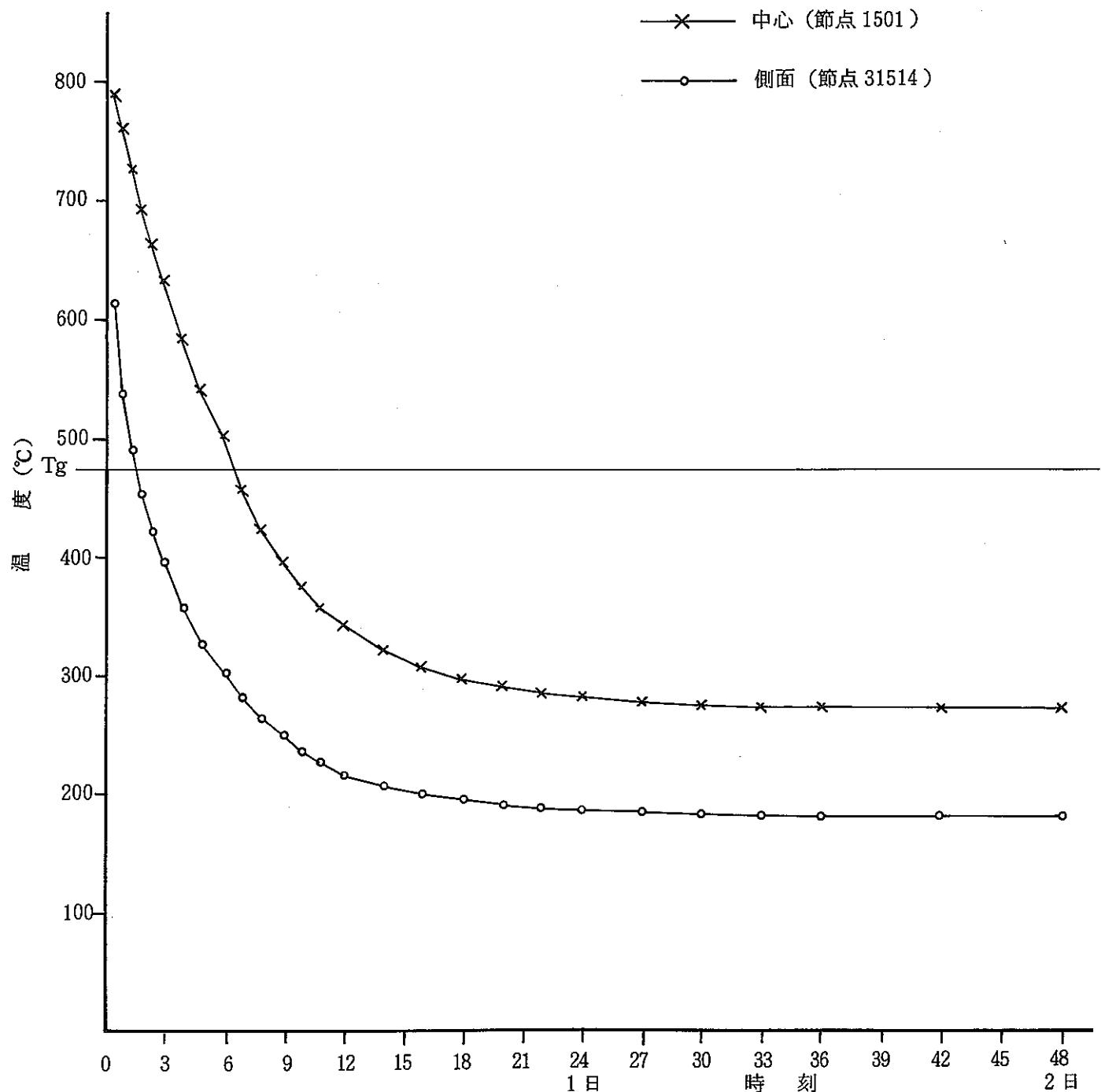


図 4.41 ガラス固化体（中心，側面）の温度の時間変化  
モデル B-30（半径15cmガラス固化体）

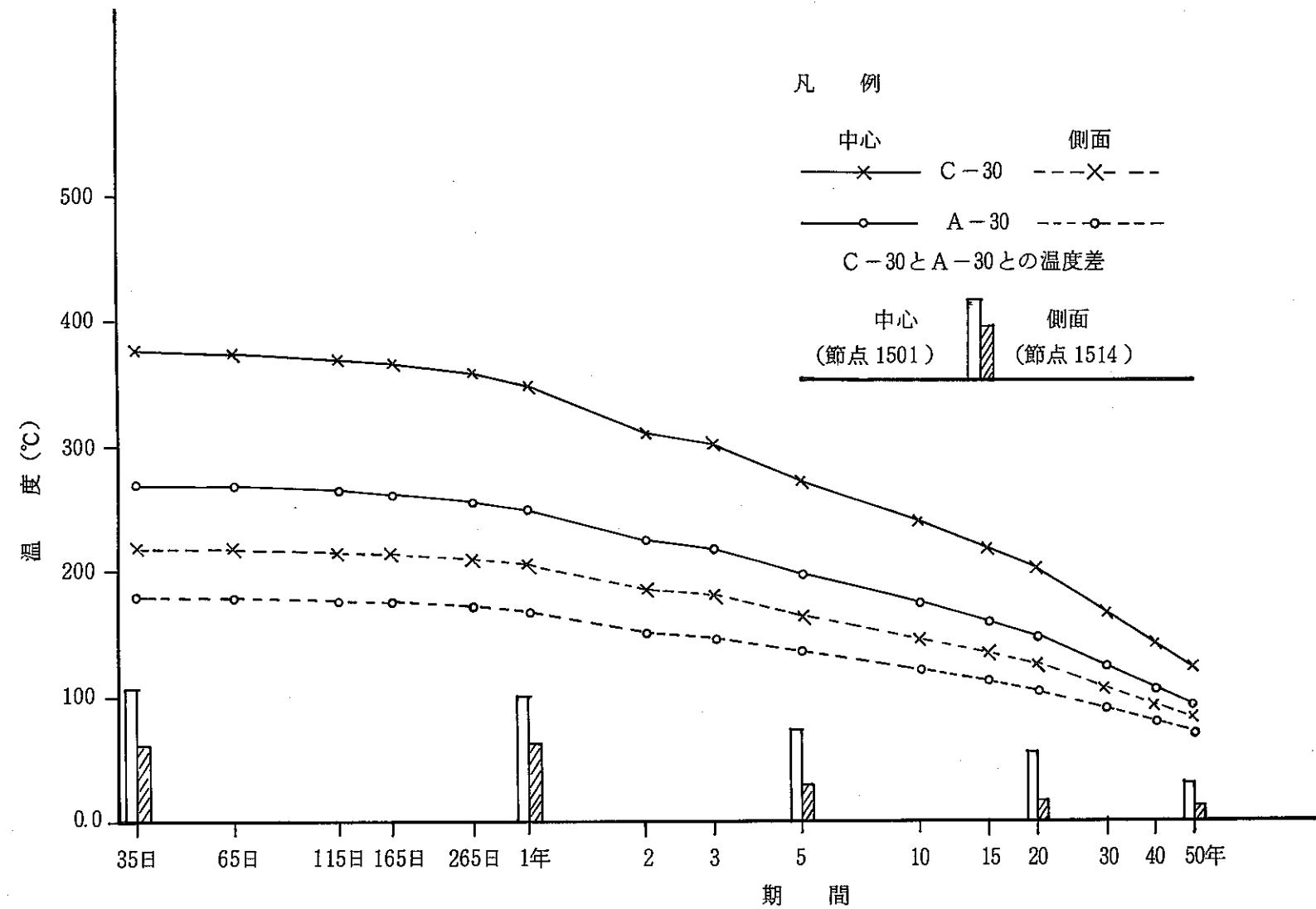


図 4.42 長期の温度変化図（空気冷却  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ ）

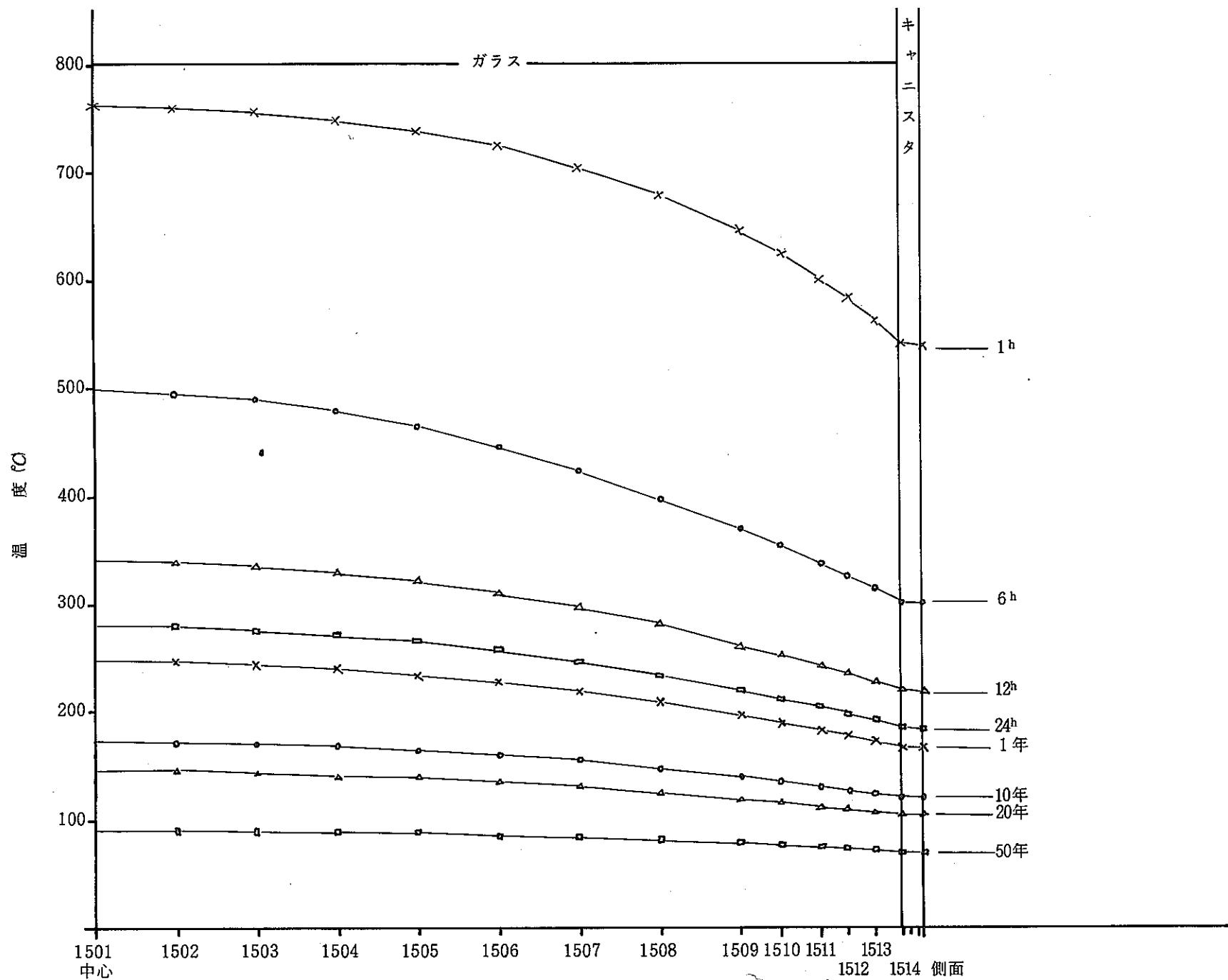


図 4.43 r 方向断面の温度変化図 (A-30 空気冷却  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ )

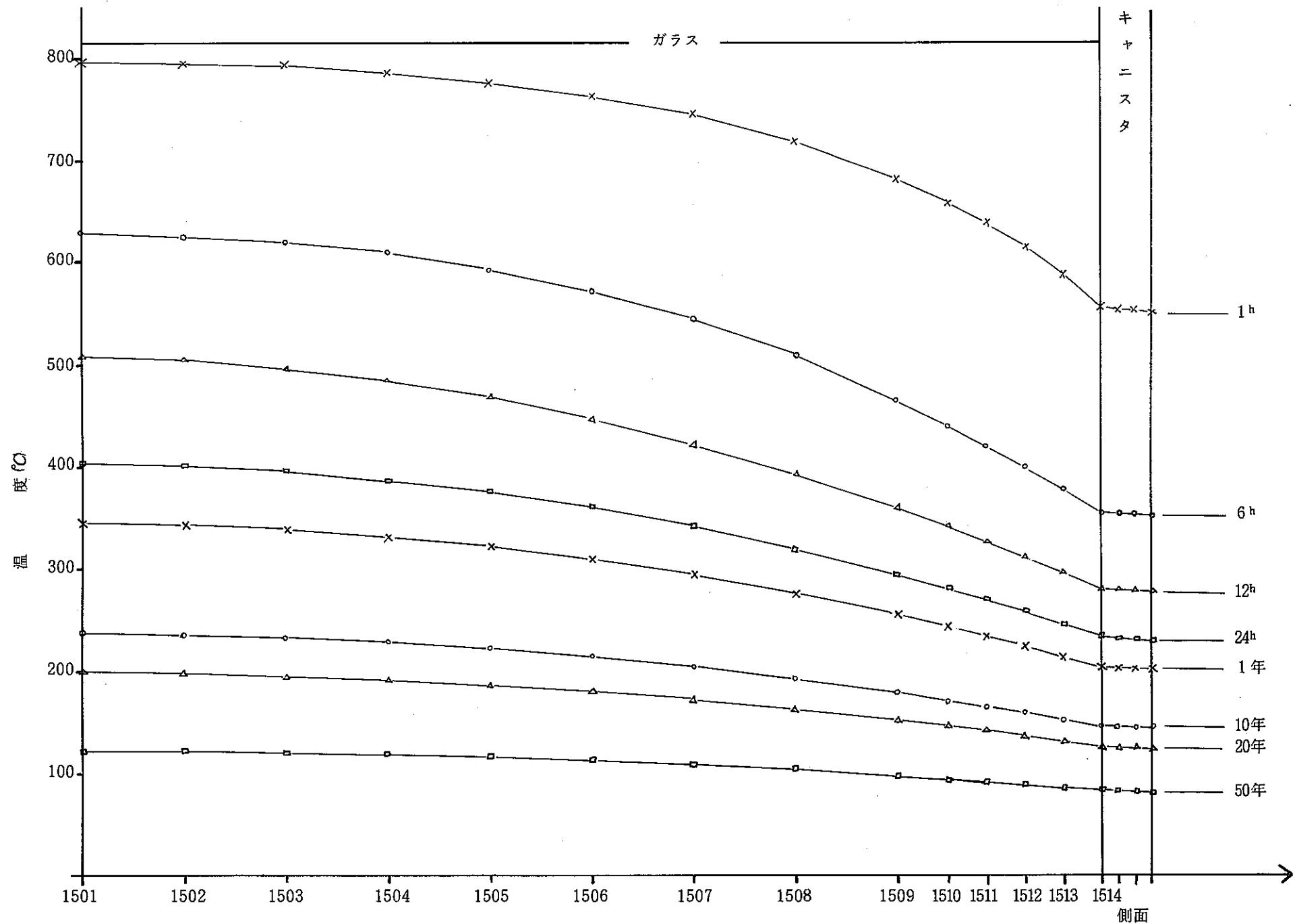


図 4.44 r 方向断面の温度変化図 (C-30 空気冷却  $Er = 2.0 \times E-12$ )

#### 4.3.2 境界条件の検討計算結果

熱伝導計算において計算開始直後の定常に達するまでの2日間位を除くと他の各時刻の計算結果は、準定常になっているため、各時刻の温度分布は発生熱量と境界から外部へ逃げる熱量とのつりあいで決まる。このため、熱伝導計算において、境界条件のちがいによる温度分布への影響は大きいと考えられる。この境界条件の感度解析は、今後への課題として、ここでは、空冷の場合はC-30モデルを用いて輻射定数を  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ ,  $9.49 \times 10^{-12} \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{sec}^\circ\text{K}^4$  の2ケースを比較した。また、空冷と水冷とを比較するため、A-30、C-30について水冷計算を行い比較した。

##### (1) 輻射定数

輻射定数  $Er = 9.49 \times 10^{-12} \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{sec}^\circ\text{K}^4$  の熱伝導計算結果を図4.45、4.46に示す。短期および長期の温度変化を比較するため輻射定数  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$ ,  $Er = 9.49 \times 10^{-12}$  の両ケースの結果を図4.47、4.48に並記した。また、 $r$  方向断面変化についても図4.49に示した。

温度分布図をみると輻射定数が小さい  $Er = 2.0 \times 10^{-12}$  の方が  $Er = 9.49 \times 10^{-12}$  よりも温度は高く、等温線は、丸みをおびている（図4.31～4.39、図4.45、4.46）。

温度の時間変化をみると、中心および側面温度は輻射定数のちがいにより2日後で60°C前後、1年後で55°C前後、50年後で20°C前後の差を生じる（図4.47、4.48）。だが、 $r$  方向の温度勾配をみると輻射定数によるちがいは少ない（図4.49参照）。

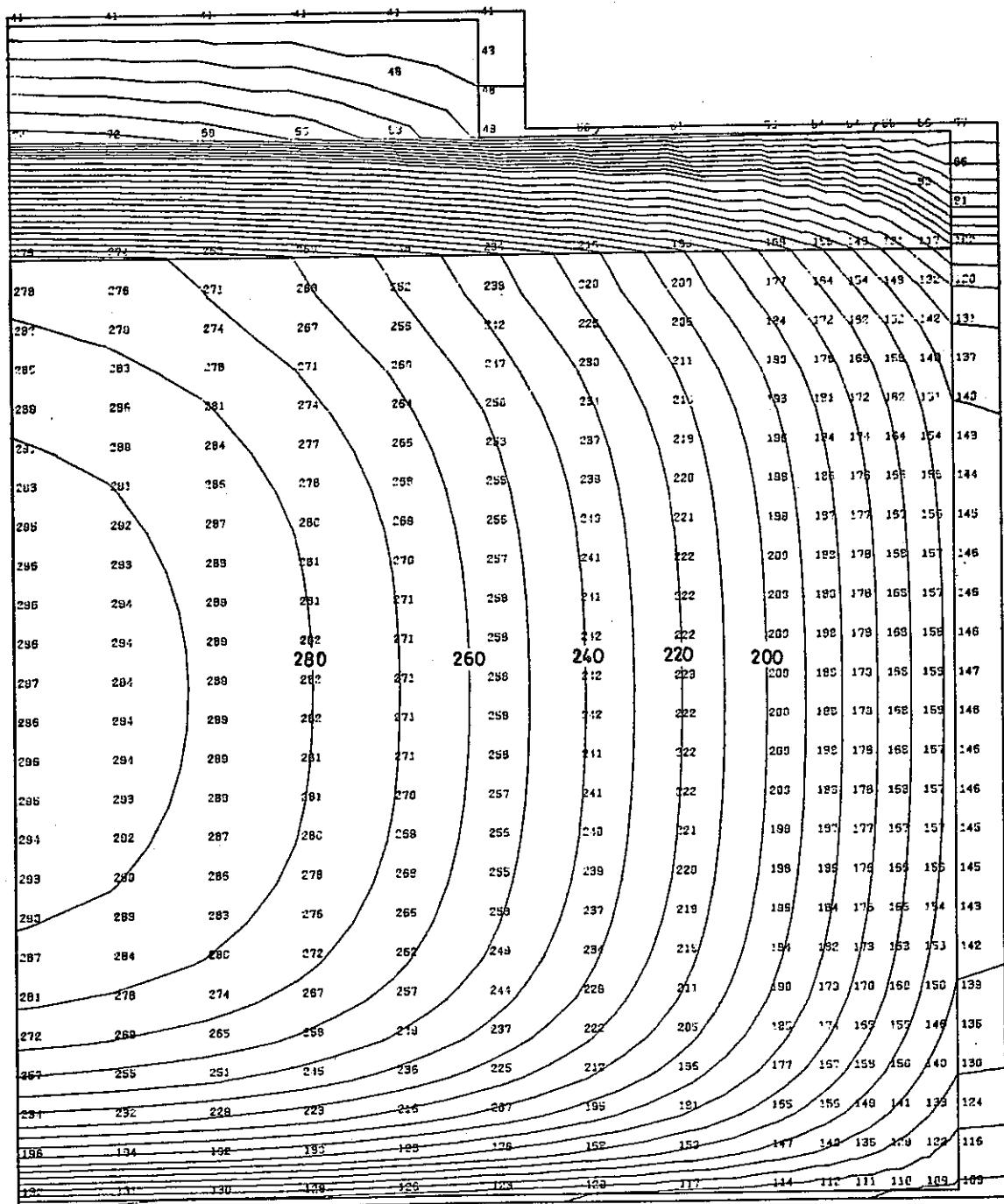


図 4.45 温度分布図

モデル C-30 (空冷  $Er = 9.49 \times 10^{-12}$ ) 1年後

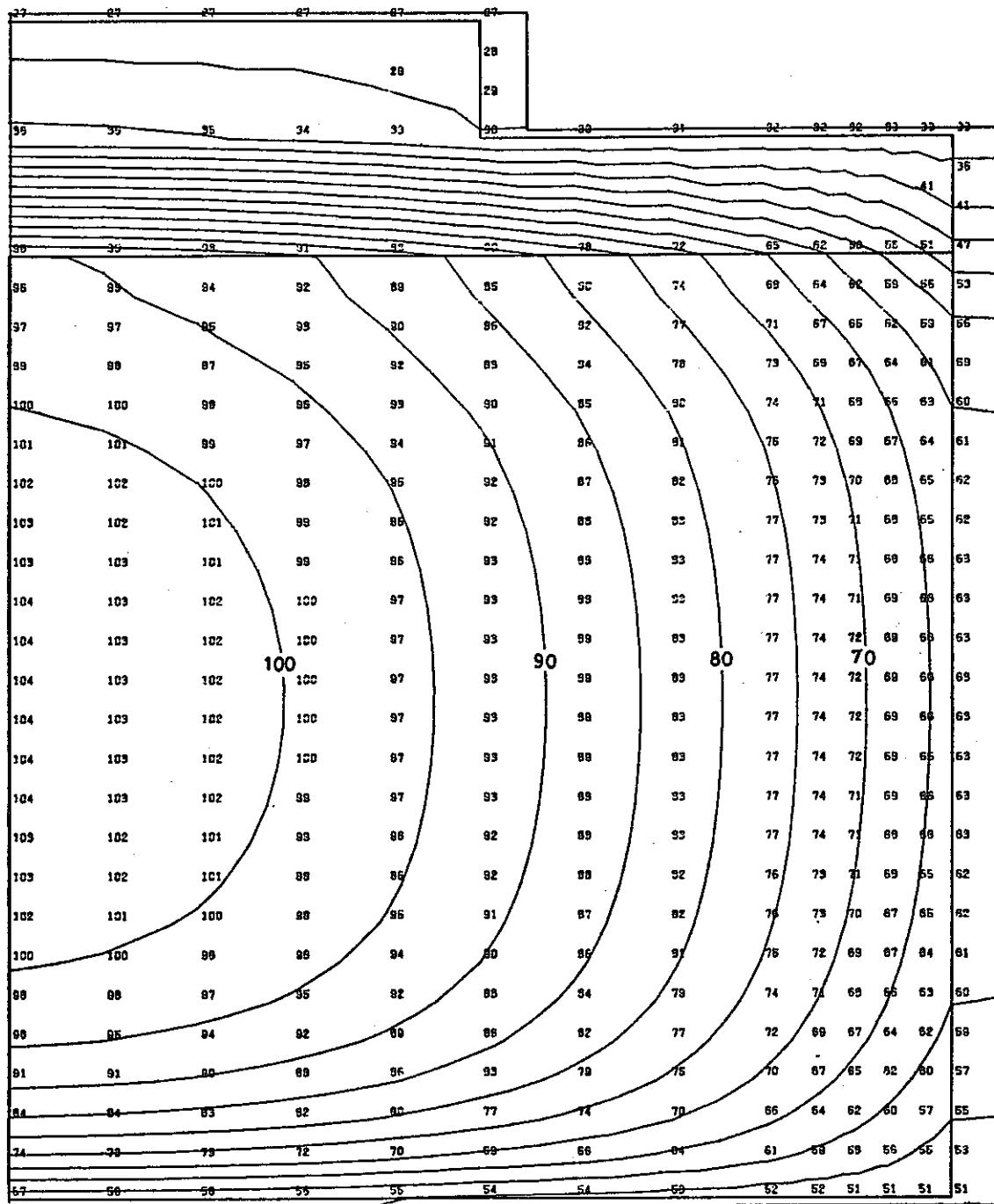


図 4.46 溫度分布図

モデル C-30 (空冷  $Er = 9.49 \times 10^{-12}$ ) 50年後

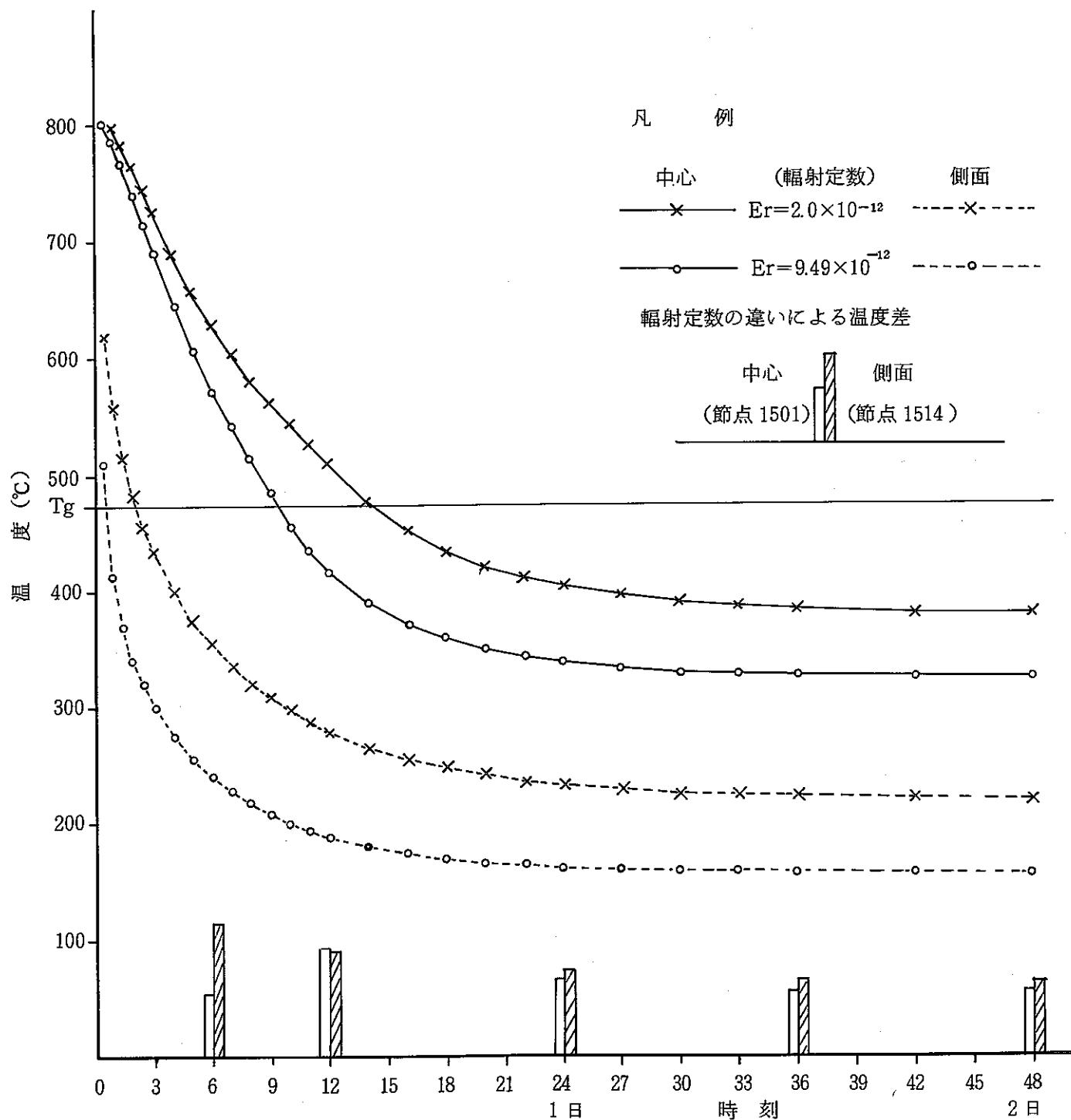


図 4.47 輻射定数のちがいによる温度変化の比較  
(C-30 モデル)

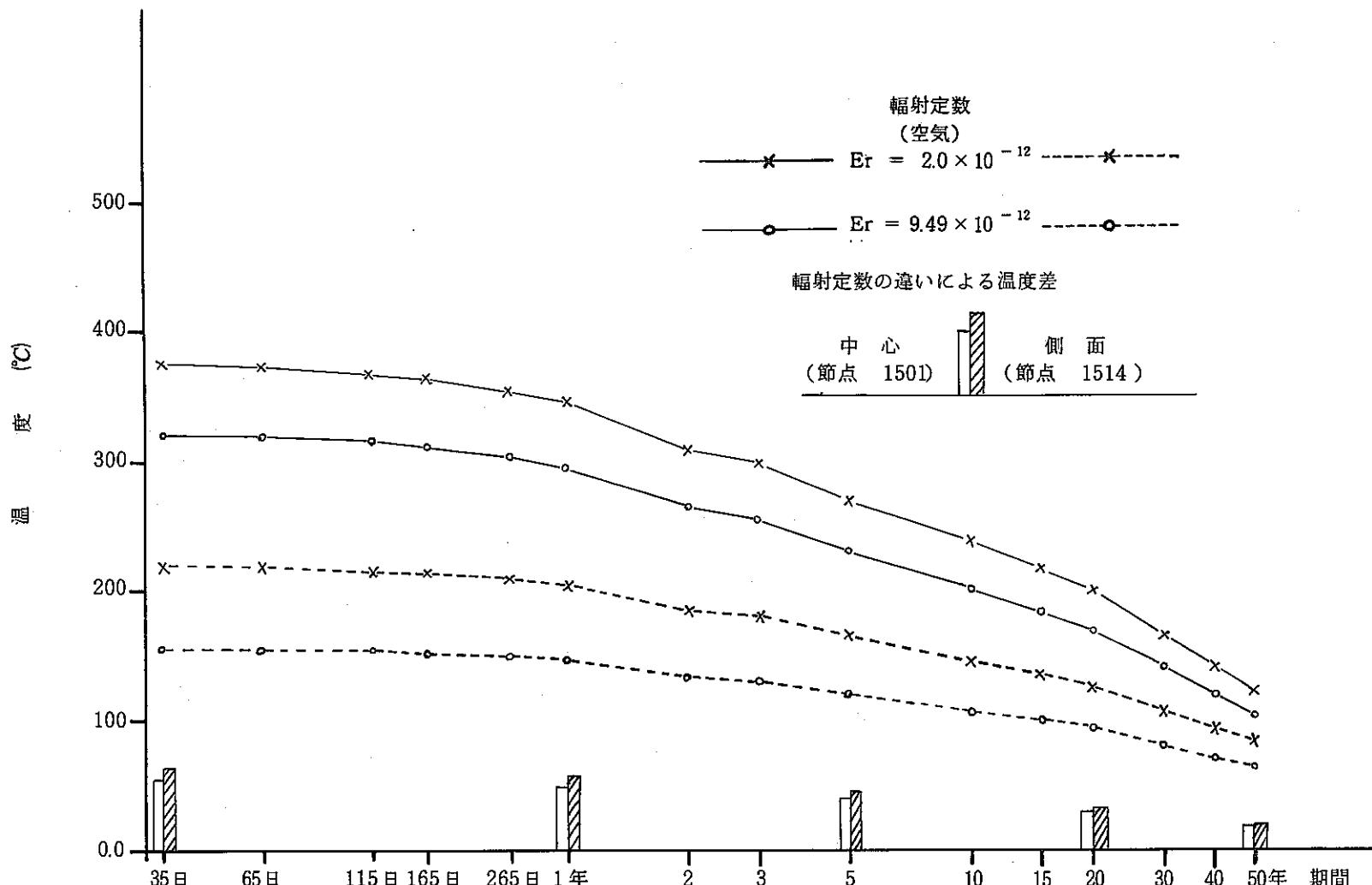


図 4.48 長期の温度変化 (C-30モデル)

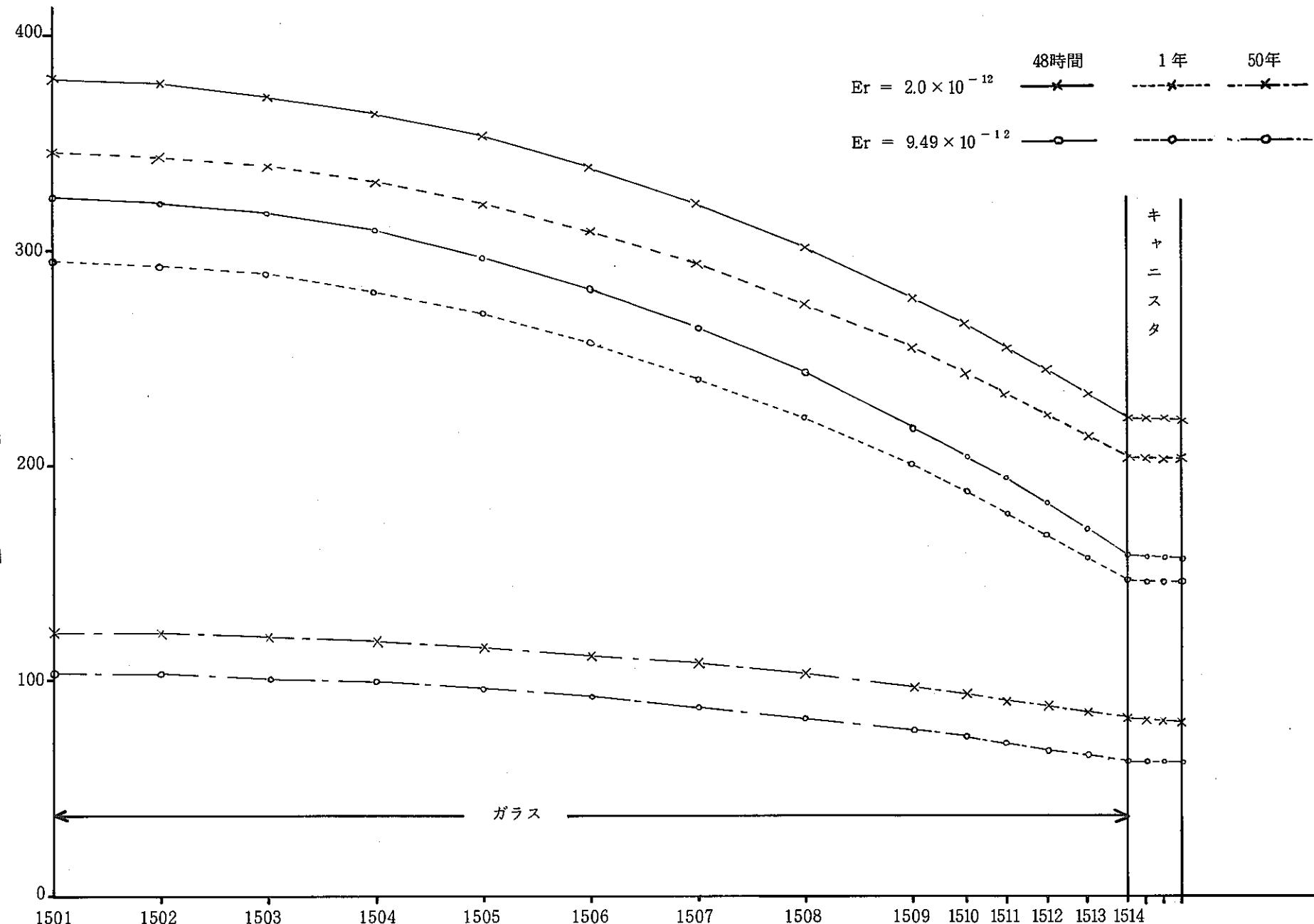


図 4.49  $r$  方向断面変化 (C-30 モデル)

## (2) 空気冷却と水冷却

水冷による温度分布を図4.50～4.55に示す。空冷と水冷による温度の時間変化を短期、長期に分けて図4.56～4.59に示す。また、 $r$ 方向断面変化を図4.60、4.61に示す。

温度分布をみると等温線が空冷の計算結果では時刻を経るに従って丸みを増して行くのに対し、水冷計算では、時刻に関係なく、キャニスターと平行になっている。

水冷と空冷によるガラス固化体の中心および側面の温度比較を表4.38に示す。このように、水冷の中心温度は、A-30では空冷の半分位、C-30では6割位となり、水冷のガラス固化体全体の温度は空冷に比べてかなり低くなる。ガラス固化体の外側温度をみると、空冷では2日後が181°C(A-30)、221°C(C-30)と200°C前後もあるのに、水冷では境界温度の低下が早く、A-30、C-30の両ケースとも、2日後には21～31°Cとなり、冷却材の温度(21°C)とほぼ同じになる(図4.50、図4.53参照)。

温度の時間変化をみるとA-30、C-30両ケースともに側面温度がガラス注入後、数時間後には水冷ではほぼ一定となるのに対して、空冷ではC-30ケースで220°Cから80°Cへと、A-30ケースで180°Cから70°Cへと緩やかに下がる。ガラス注入後の2、3時間の温度変化は水冷では大きく、中心と側面とでは、300～500°Cの差を生じる(図4.56～図4.59参照)。

ガラス固化体の $r$ 方向断面(節点番号1501～1514)の温度変化をみると、水冷による計算結果は境界温度が低くなるため、空冷ケースより温度勾配が多少大きくなる。だが時間が経つと、ガラス固化体の温度が低くなるため、空冷と水冷との両ケースの温度勾配の差はそれほど大きくはない(図4.60、4.61参照)。

表4.38 水冷と空冷による中心および側面温度の比較

時刻	A - 30				C - 30				(単位 °C)	
	中 心		側 面		中 心		側 面			
	空 冷	水 冷	空 冷	水 冷	空 冷	水 冷	空 冷	水 冷		
2 日	272	134	181	28	381	219	221	31		
1 年	249	122	167	28	346	198	203	30		
10 年	174	84	121	25	238	132	146	27		
50 年	93	47	70	23	123	67	83	24		

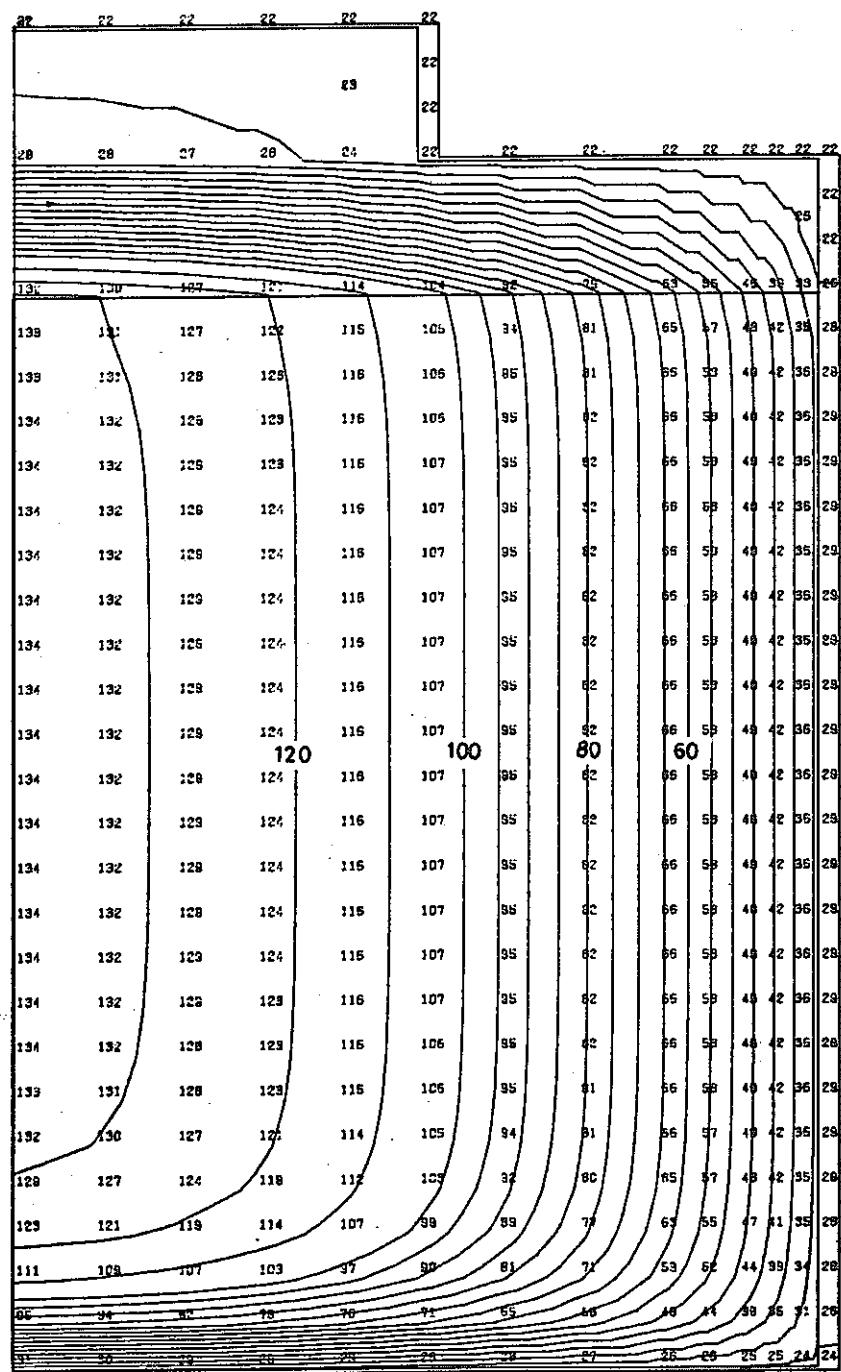


図 4.50 温度分布図

モデル A-30 (水冷) 2日後

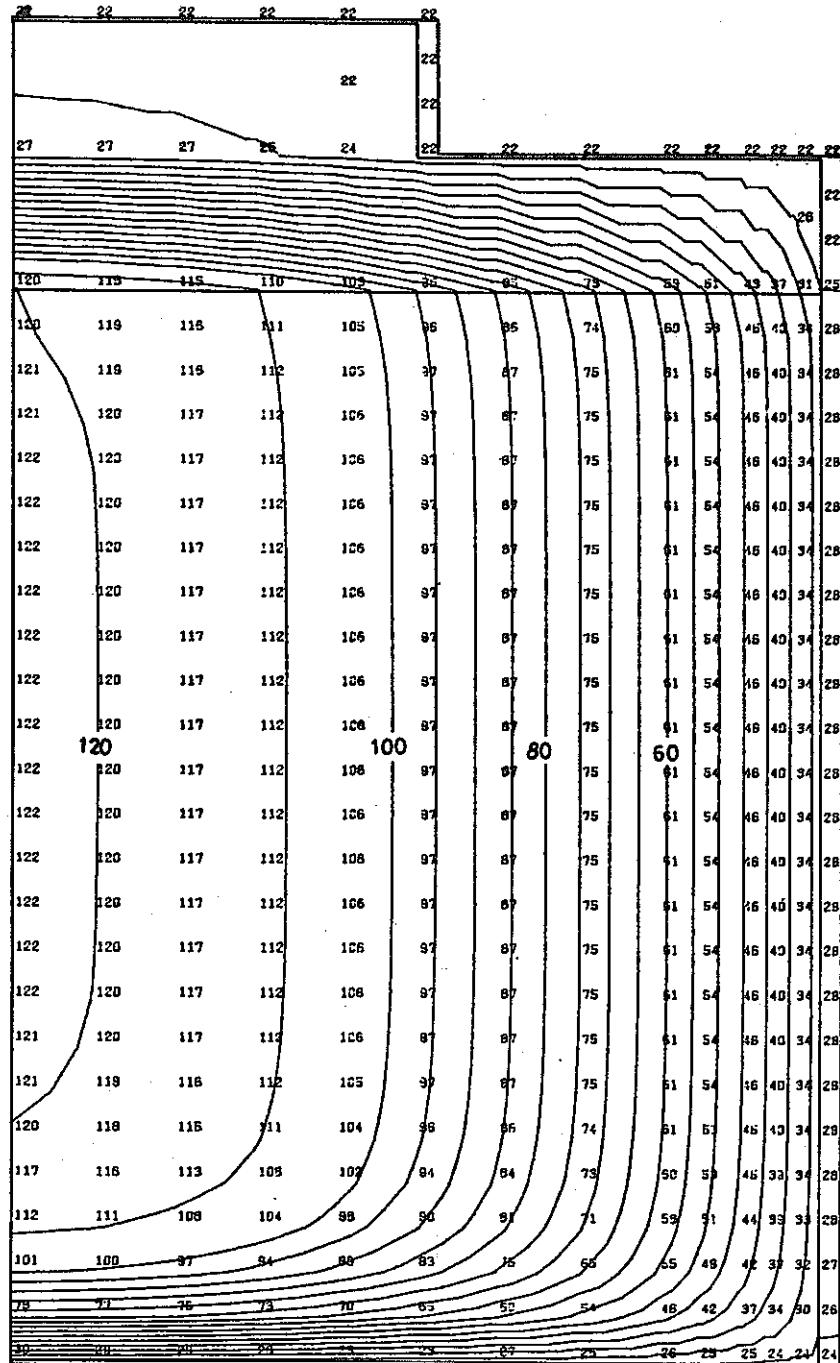


図 4.51 温度分布図

モデル A-30 (水冷) 1年後

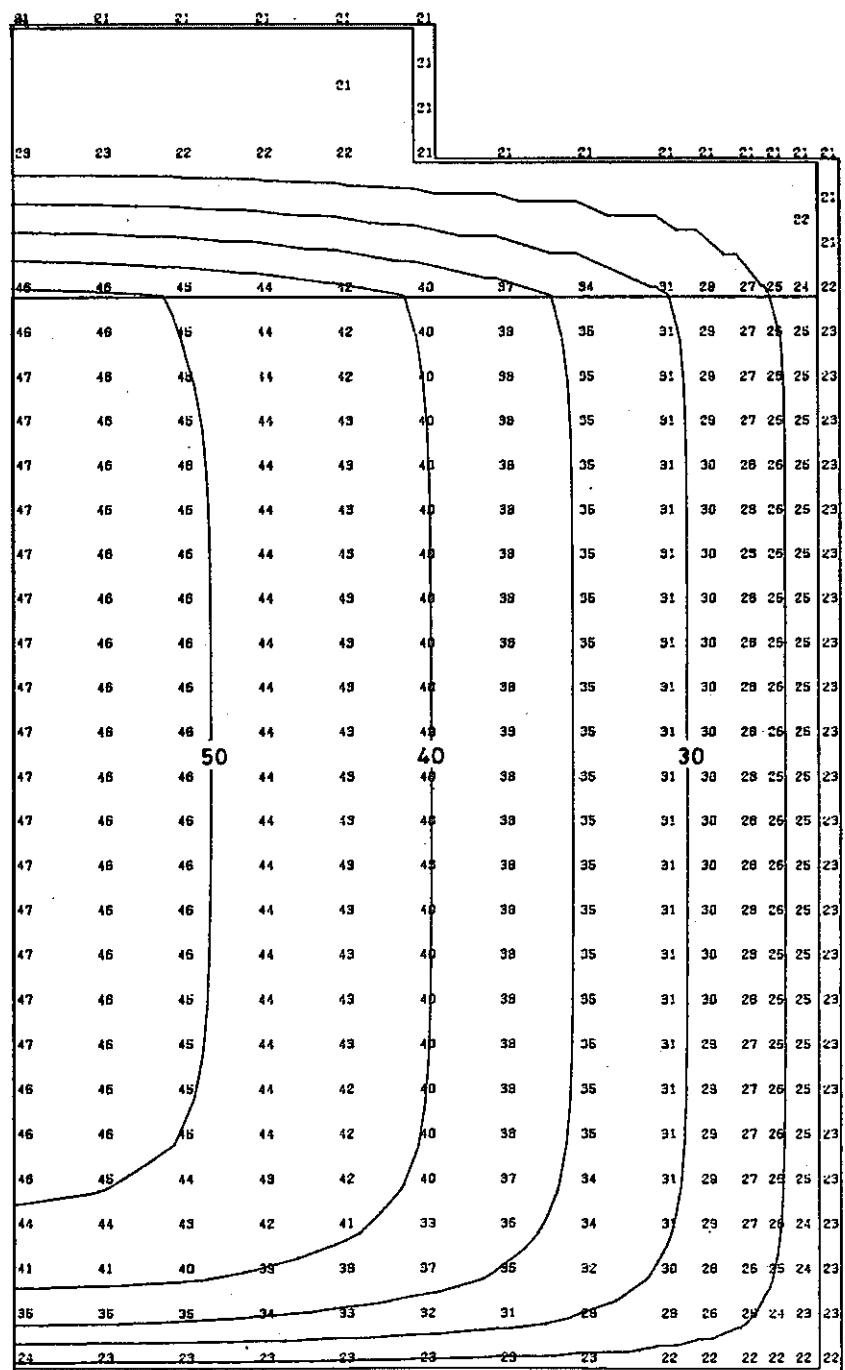


図 4.52 温度分布図

モデル A-30 (水冷) 50年後

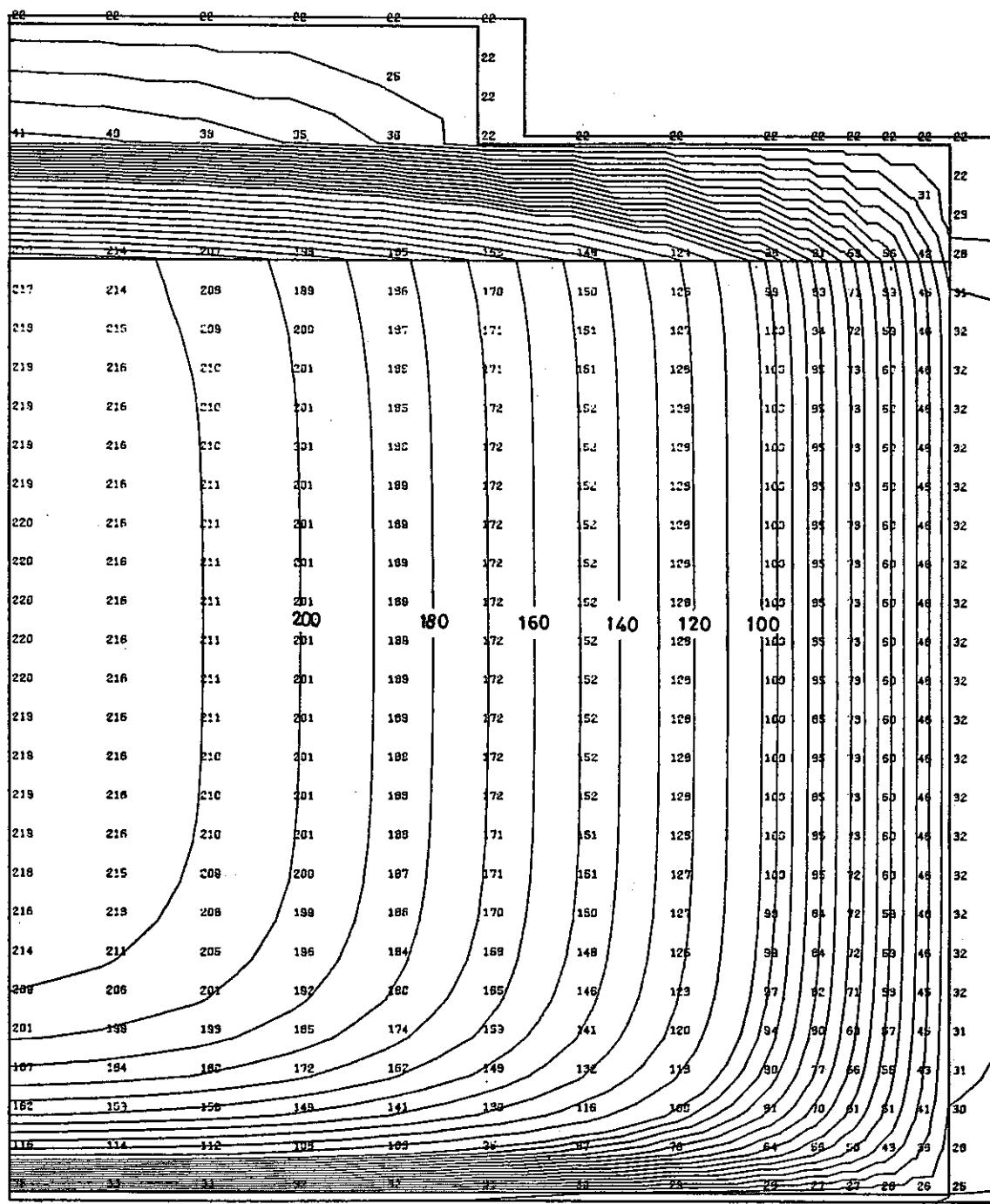


図 4.53 溫度分布図

モデル C-30 (水冷) 2 日後

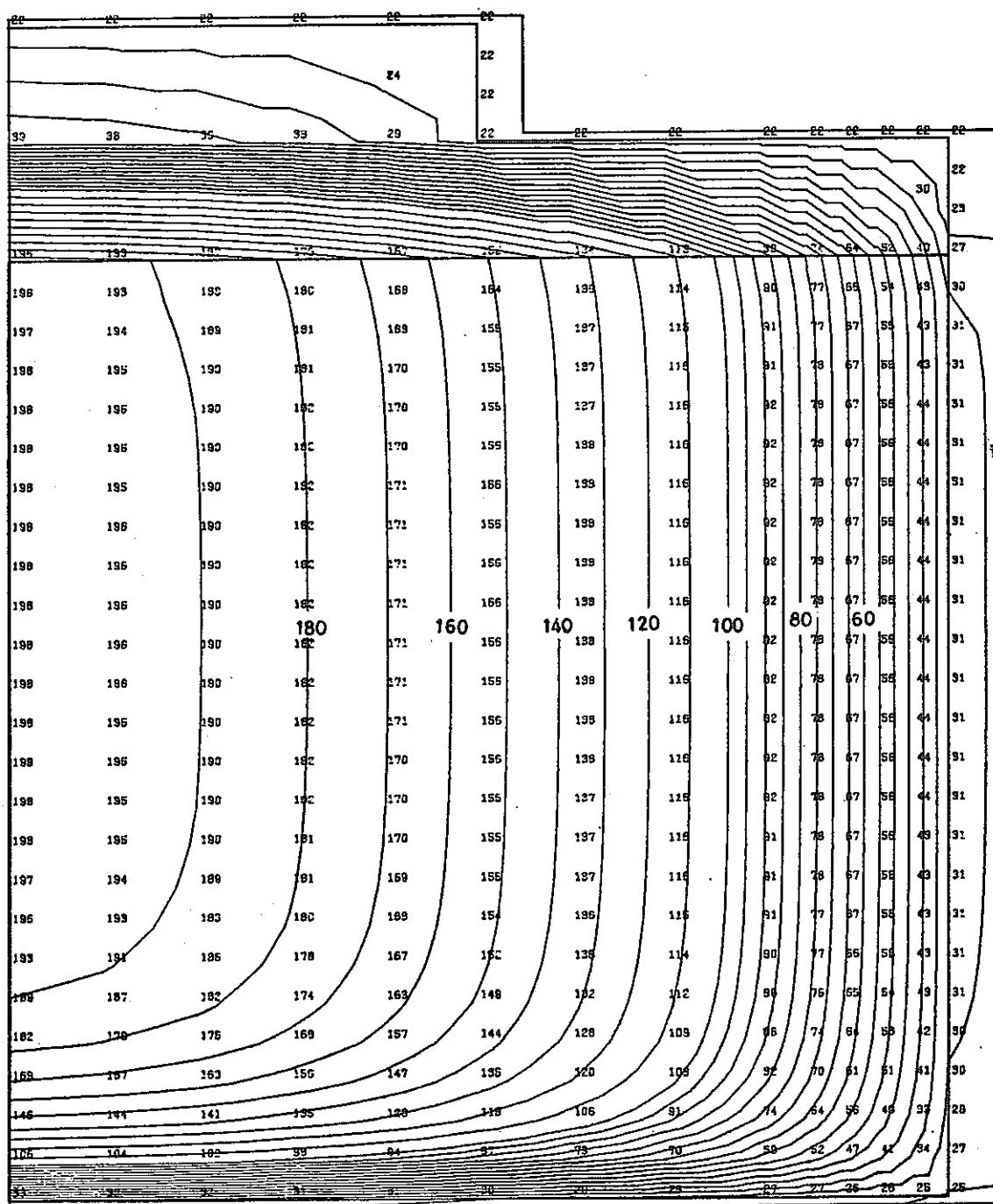


図 4.54 溫度分布図

モデル C-30 (水冷) 1年後

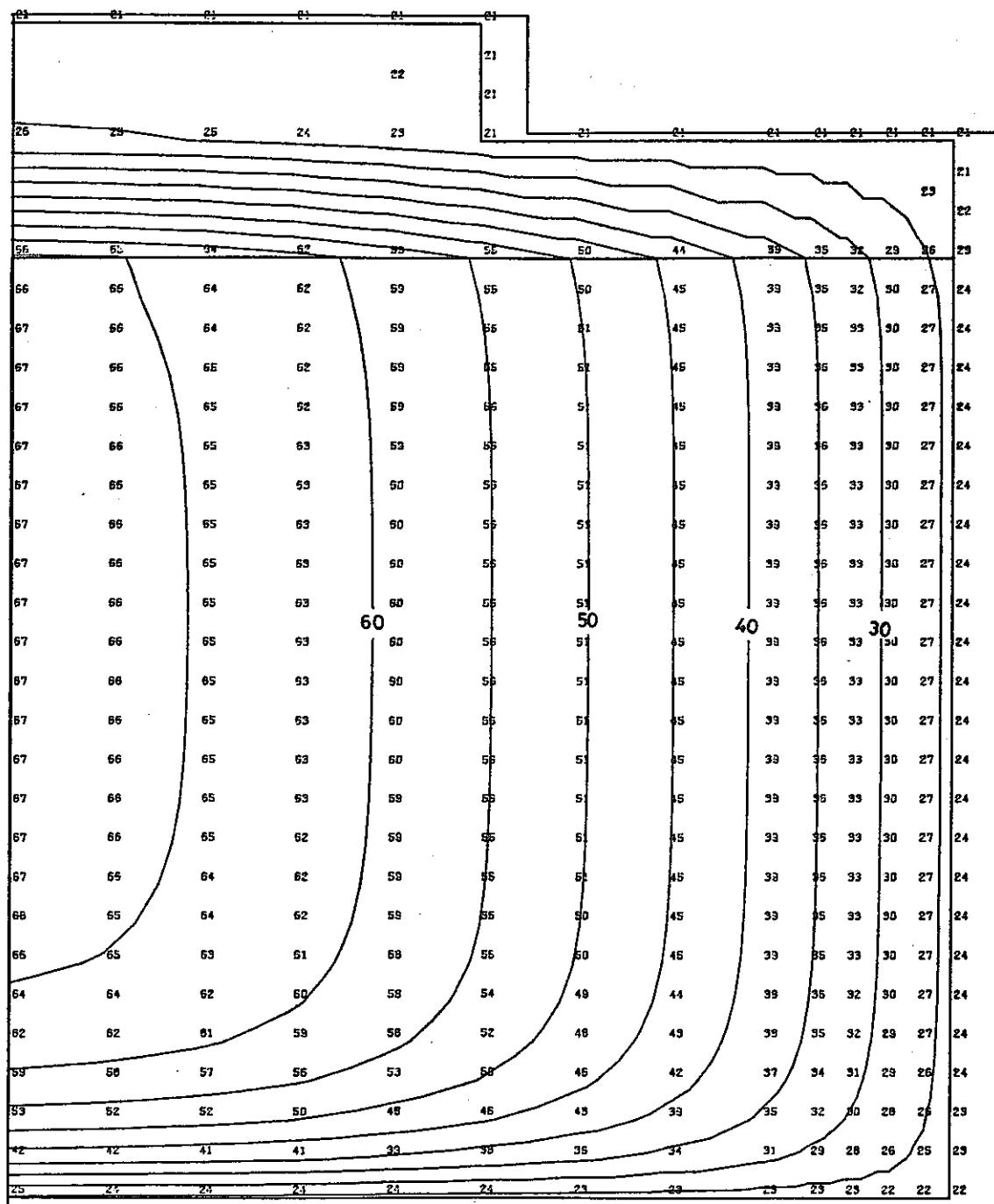


図 4.55 溫度分布図

モデル C-30 (水冷) 50年後

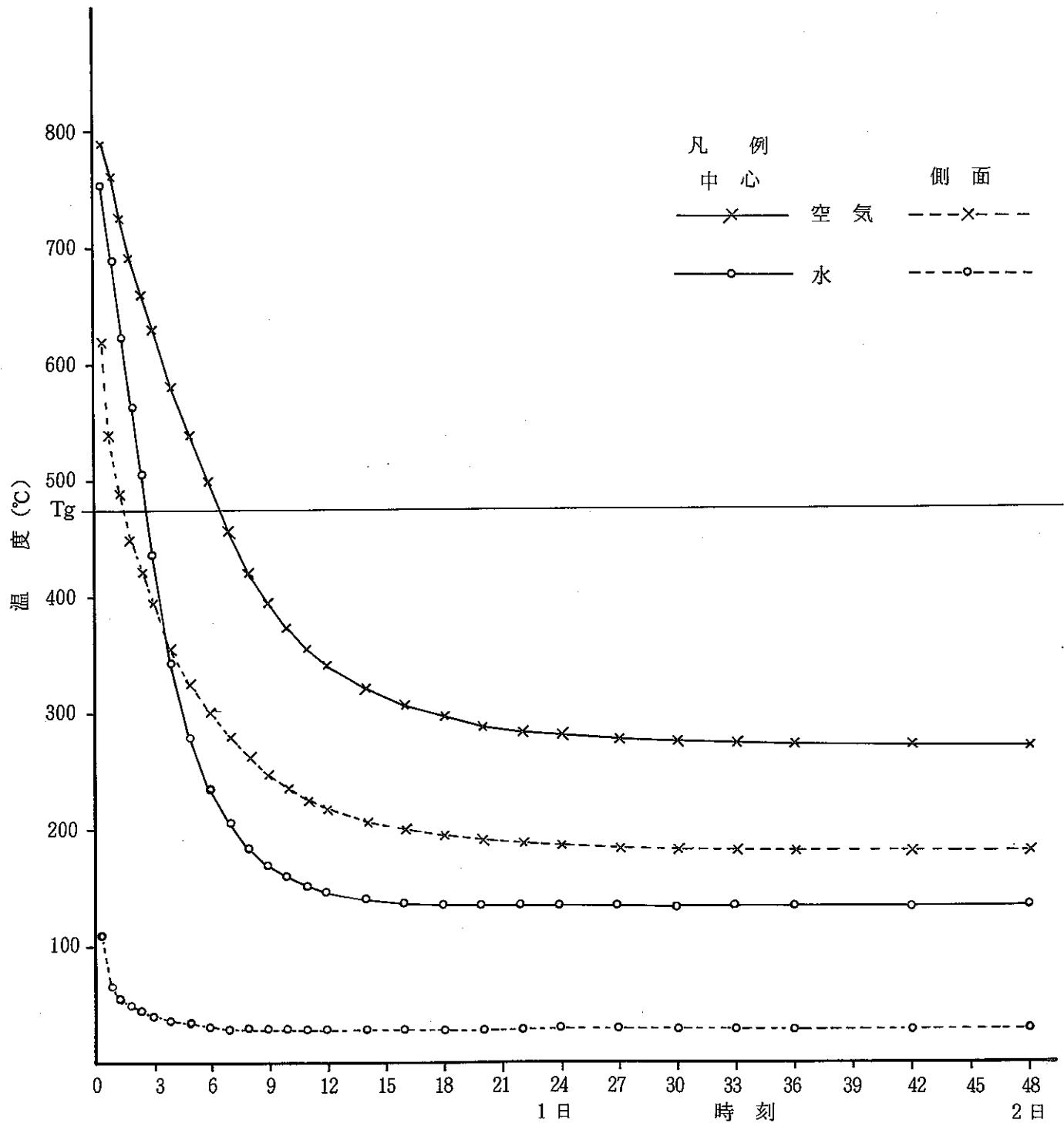


図 4.56 空冷と水冷とのちがいによる温度変化の比較 (A-30 モデル)

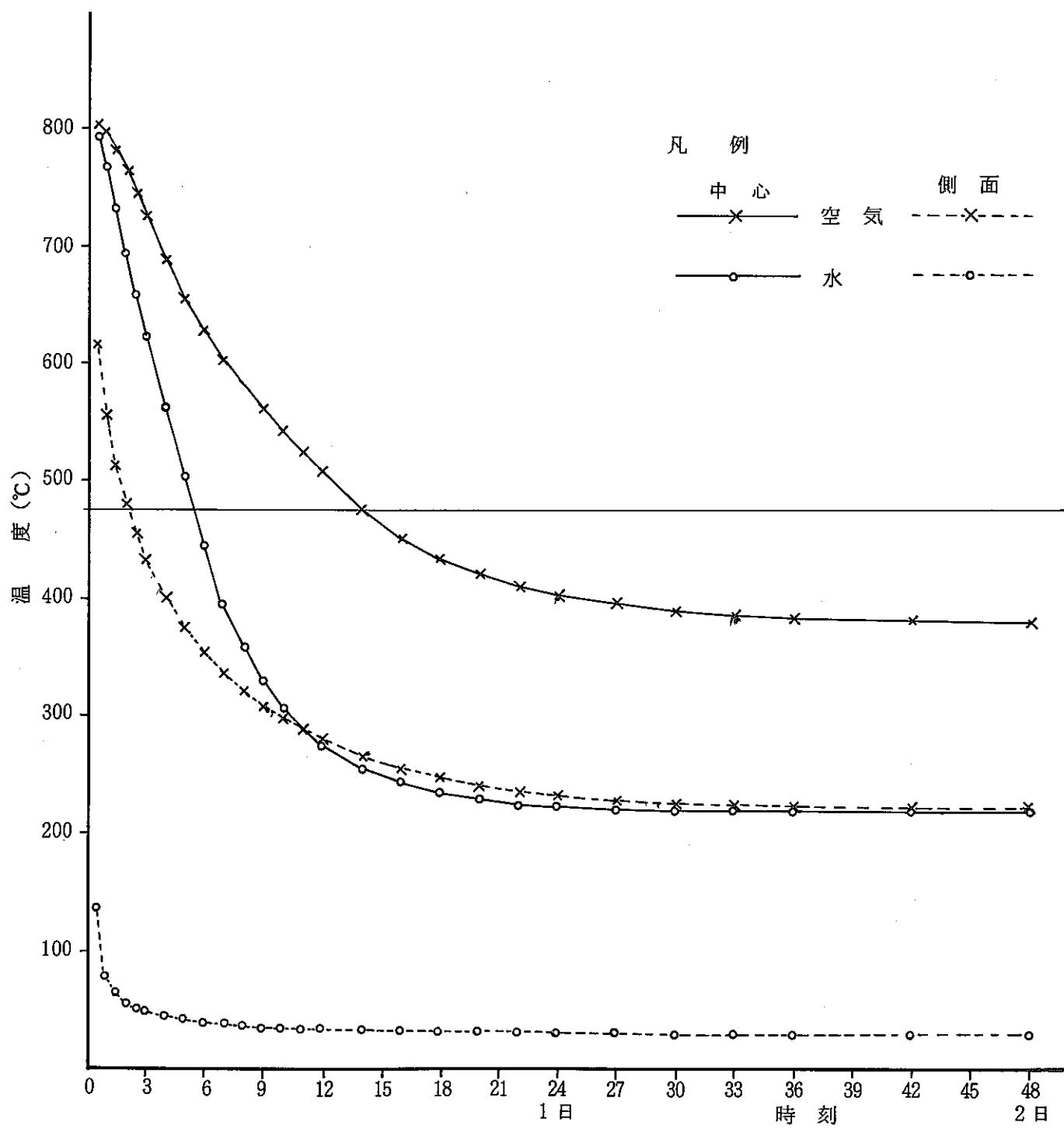


図 4.57 空冷と水冷のちがいによる温度変化の比較 (C-30モデル)

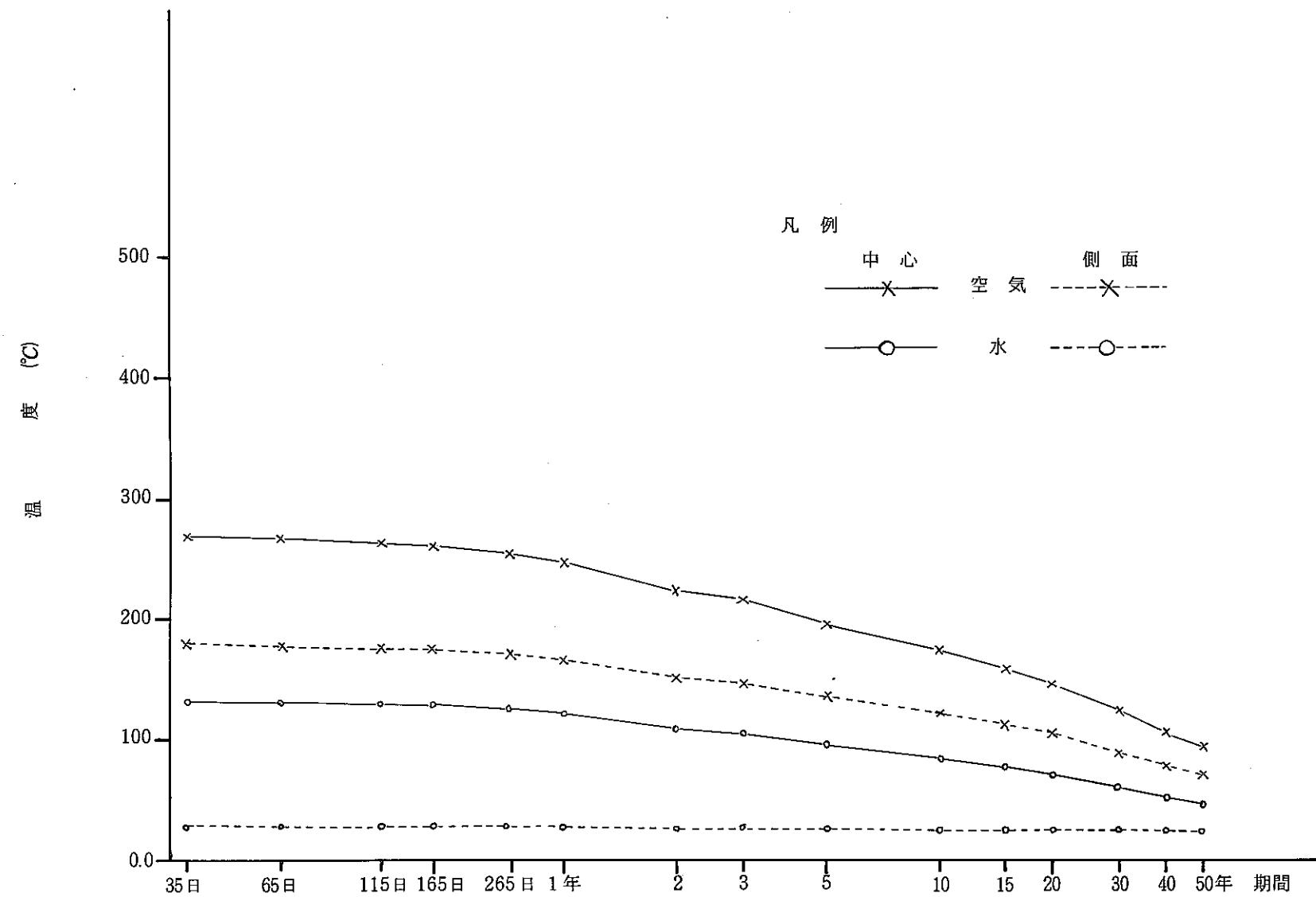


図 4.58 長期の温度変化 (A-30 モデル)

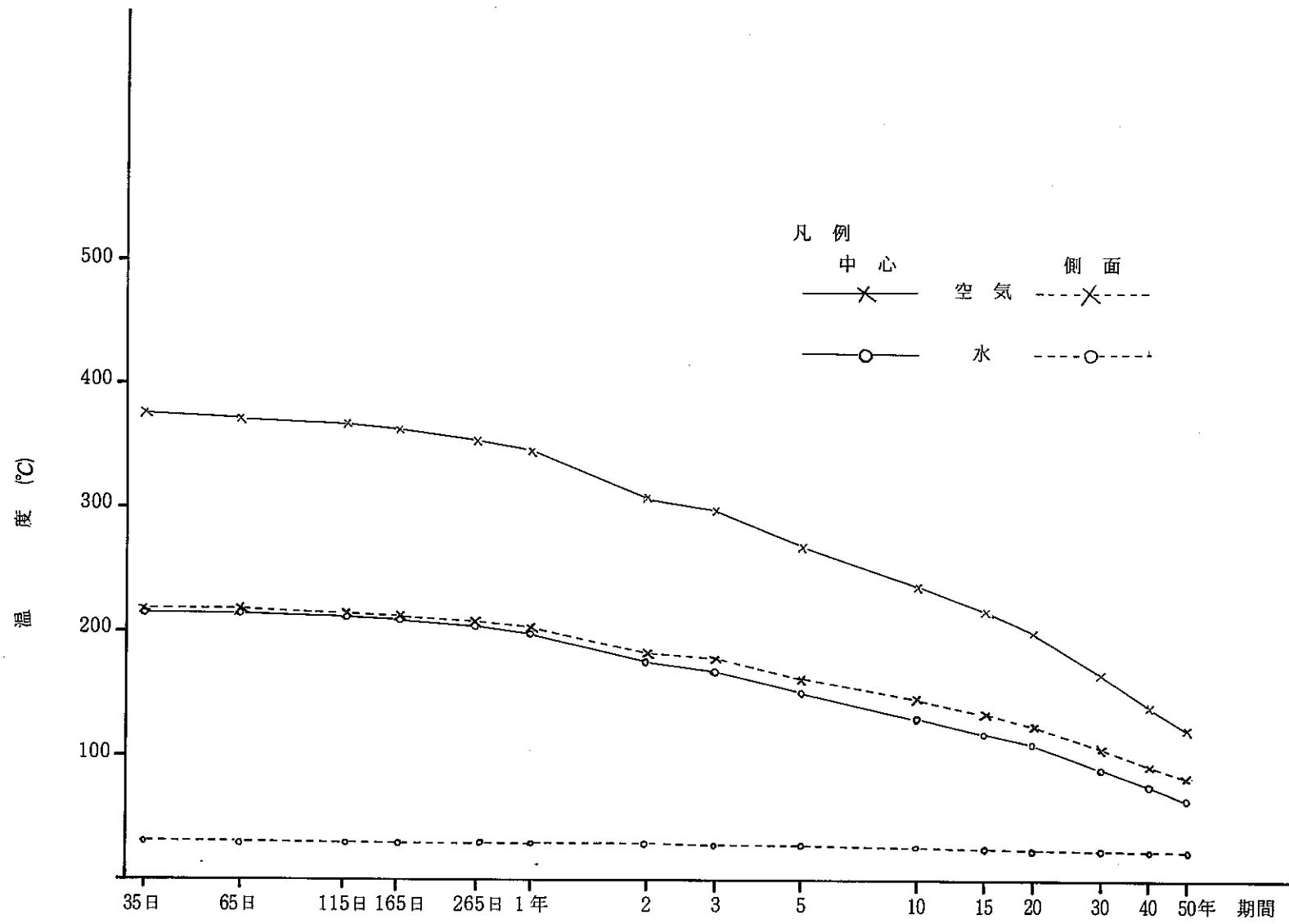
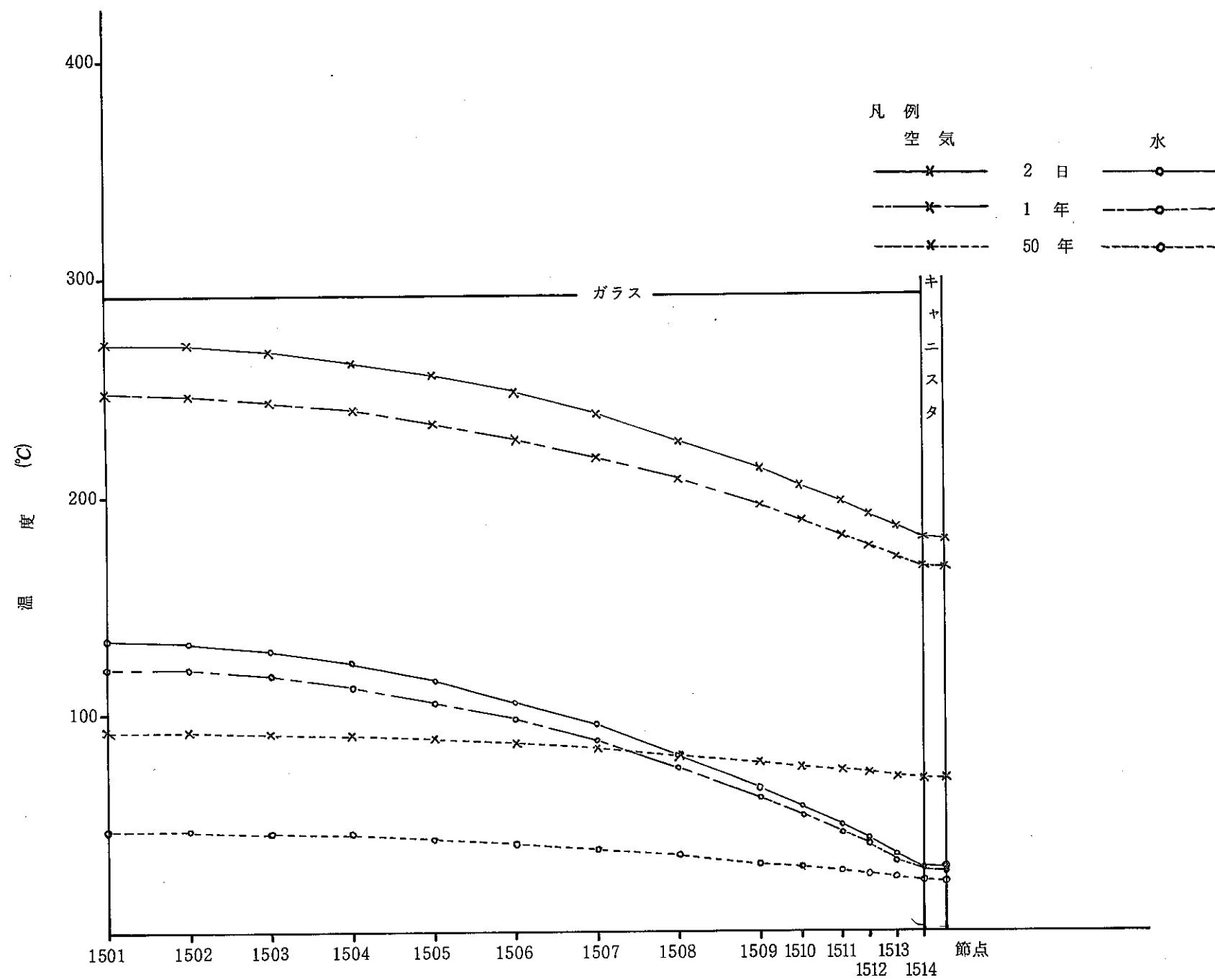


図 4.59 長期の温度変化 (C-30 モデル)



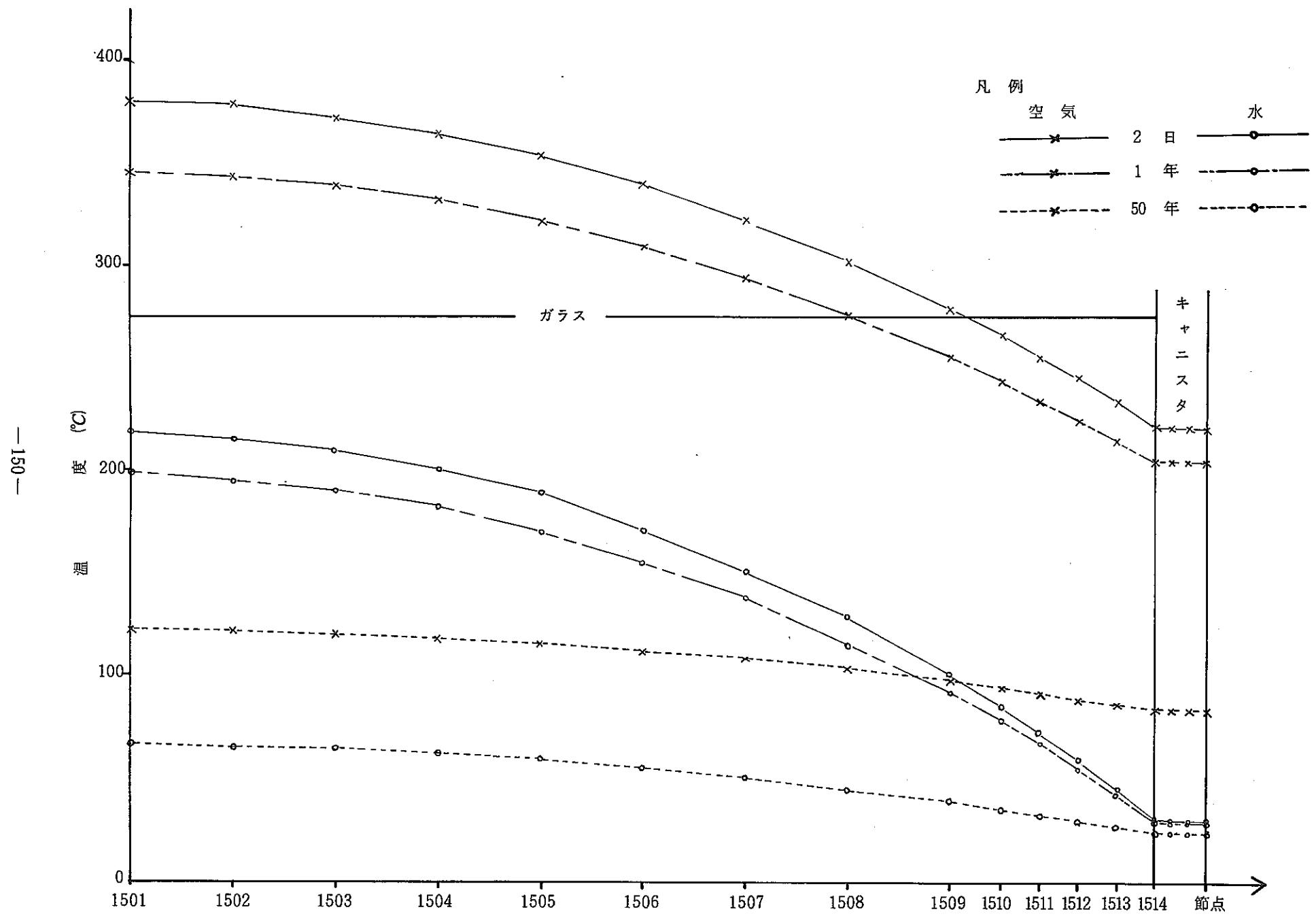


図 4.61 r 方向断面変化 (C-30 モデル)

#### 4.3.3 クラックが入ったときの熱伝導への影響

ここでは、ガラスにクラックが入った場合に、そのクラックによって熱伝導計算にどのような影響が現われるかを調べた。

##### (1) クラックの取り扱い方法

クラックの発生場所としては、(1)ガラス固化体の実験で、実際にクラックが入り易い場所、(2)熱応力計算結果により張力の大きな場所、(3)熱伝導への影響が大きいガラス固化体中央部、を設定した。

クラック内の伝熱方法としては、次の3通りを設定した。

(1)輻射のみ；これはクラックにすきまがあり、そのすき間が真空になっていて輻射だけで伝熱される場合である（伝熱量が一番少ないケース）。

(2)輻射と空気；これはクラックのすき間が気体で満たされている場合であり、気体の熱伝導と輻射とが加味されて伝熱される場合である。今回はその気体として空気を想定した。

(3)接触；これはクラックの両面が接触している場合である。この場合の伝熱方法は、クラックのすき間がガラスの2割減の熱伝導係数をもつとして取り扱い、クラックの接触熱抵抗を考慮した。

クラックの幅については、伝熱方法が輻射のみの場合は関係ないが、その他の場合はクラックの幅を0.125 mmとしている文献(Battelle, BNWL-2252)を参考にして、クラックの幅を全て0.1 mmとした。クラックの幅が熱伝導計算におよぼす影響については今後の課題である。

クラックを入れる時刻については、溶融部分が残っているとクラックが発生しやすいので、その間の時刻を設定した。C-30ケースでは12時間後、A-30ケースでは6時間後とした。ただし、クラック発生時刻のちがいを見るため、C-30ケースで10時間後についても計算した。

輻射による熱伝達については次のとおりである。クラック間を輻射によって伝わる単位面積あたりの熱量は、次式で与えられる（「伝熱工学」p. 343）。

$$q = \frac{1}{\frac{2}{\epsilon} - 1} \times \sigma (T_a^4 - T_b^4) \times \frac{1}{3600} \text{ (kcal/m}^2\text{-sec)}$$

ここで  $T_a$ ,  $T_b$  はクラックの両面の温度（絶対温度）である。 $\epsilon$  はガラスの輻射率、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $\sigma = 4.88 \times 10^{-8} \text{ kcal/m}^2\text{-hr}^0\text{K}^4$ ) である。固化体用のガラスは黒いので、今回の計算では、輻射率  $\epsilon = 1$  とした。上式で  $\epsilon = 1$  とすると、輻射による伝熱量は

$$q = 1.36 \times 10^{-11} (T_a^4 - T_b^4) \text{ (kcal/m}^2\text{-sec)}$$

となる。

##### (2) 計算ケース

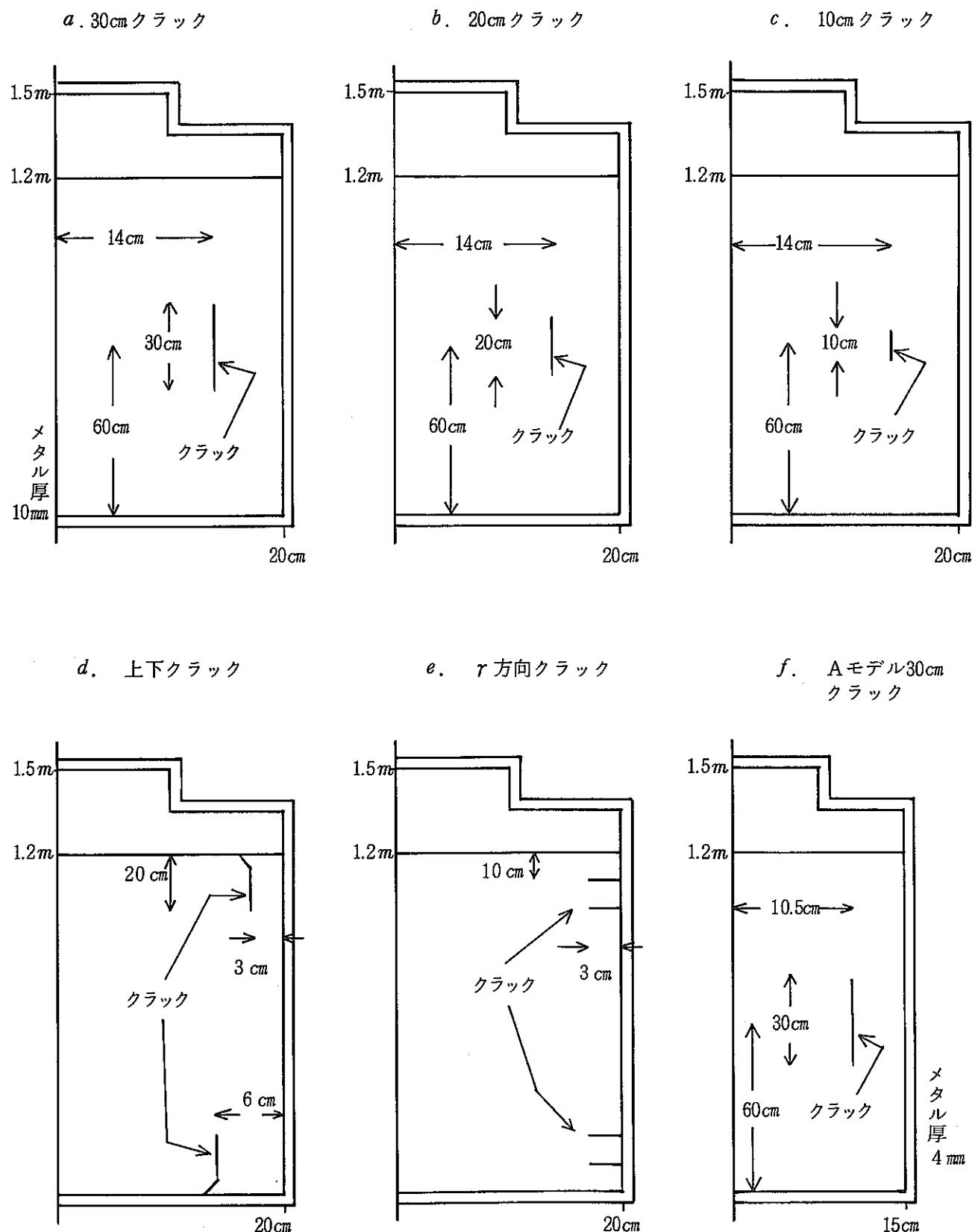
クラックを入れた場合の熱伝導計算ケースは表4.39のとおりである。ここでモデル  $a \sim f$  は図4.62に示すように、クラックを入れる場所を示している。ここで  $a \sim e$  はC-30モデルを、 $f$  はA-30モデルを対象としている。またこのうち  $d$  は実際のガラス固化体に起り得るクラックを想定し、 $e$  は応力計算結果より、張力の大きな場所を設定した。

表 4.39 クラックを入れた熱伝導計算ケース

モデル *a.* ~ *f.* は図 4.62 に示すようにクラックを入れた場所をあらわしている。

伝熱方法 モデル	輻射のみ	輻射と空気	接觸 (ガラスの 2割減) (の熱伝導率)
<i>a.</i>	◦ 50年まで計算 (ケース名; C-30-CR1)	(イ) 50年まで計算 (C-30-CR2) (ロ) 時刻10hrでクラックを入れ、50年まで計算(C-30-CR3)	◦ 22時間まで 計算 (C-30-CR4)
<i>b.</i>	◦ 50年まで計算 (C-30-CR5)		
<i>c.</i>	◦ 50年まで計算 (C-30-CR6)		
<i>d.</i>		◦ 50年まで計算 (C-30-CR7)	
<i>e.</i>	◦ 10日まで計算 (C-30-CR8)		
<i>f.</i>		◦ 3日まで計算 (A-30-CR9)	

図 4.62 クラックを入れた場所



### (3) 計算結果

#### (1) $r$ 方向クラックについて

応力計算結果によると、ガラス固化体周辺部で  $z$  方向にひっばり応力が働く（4.4 熱応力計算参照）。そこで図 4.63 のようなクラックが考えられる。

ここで固化体中心部の  $r$  方向クラックは、その向きが、熱流束の向きと同じである事から、クラックの熱伝導モデルに及ぼす影響は少ないと考えられる。そこで  $r$  方向クラックとしては、図 4.62 のモデル e のようにクラックが熱流束を切る上下それぞれ 2ヶ所にクラックを入れて、熱伝導計算を行なった。伝熱方法は輻射のみである。

計算結果として、温度分布を図 4.64 に示す。

時刻は 24 時である。図で見るとおり、クラックの影響は少ない。

また、固化体中心部の  $r$  方向断面の温度を表 4.40 に示す。表 4.40 のとおり、その影響は小さい。この計算では伝熱方法が輻射のみで、伝熱量が最も少ない場合である。このとき、これだけの影響しか出でていないので、他の伝熱方法ではより影響が少ないと思われる。

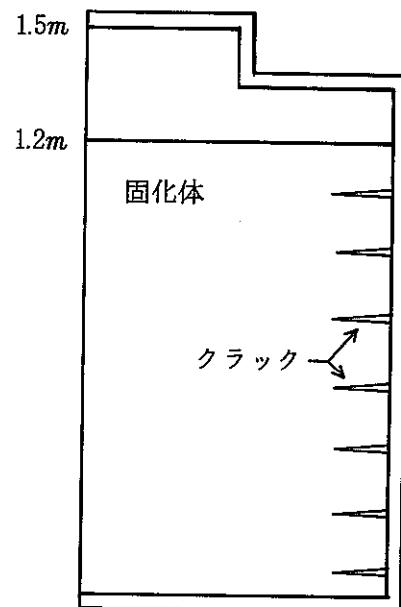
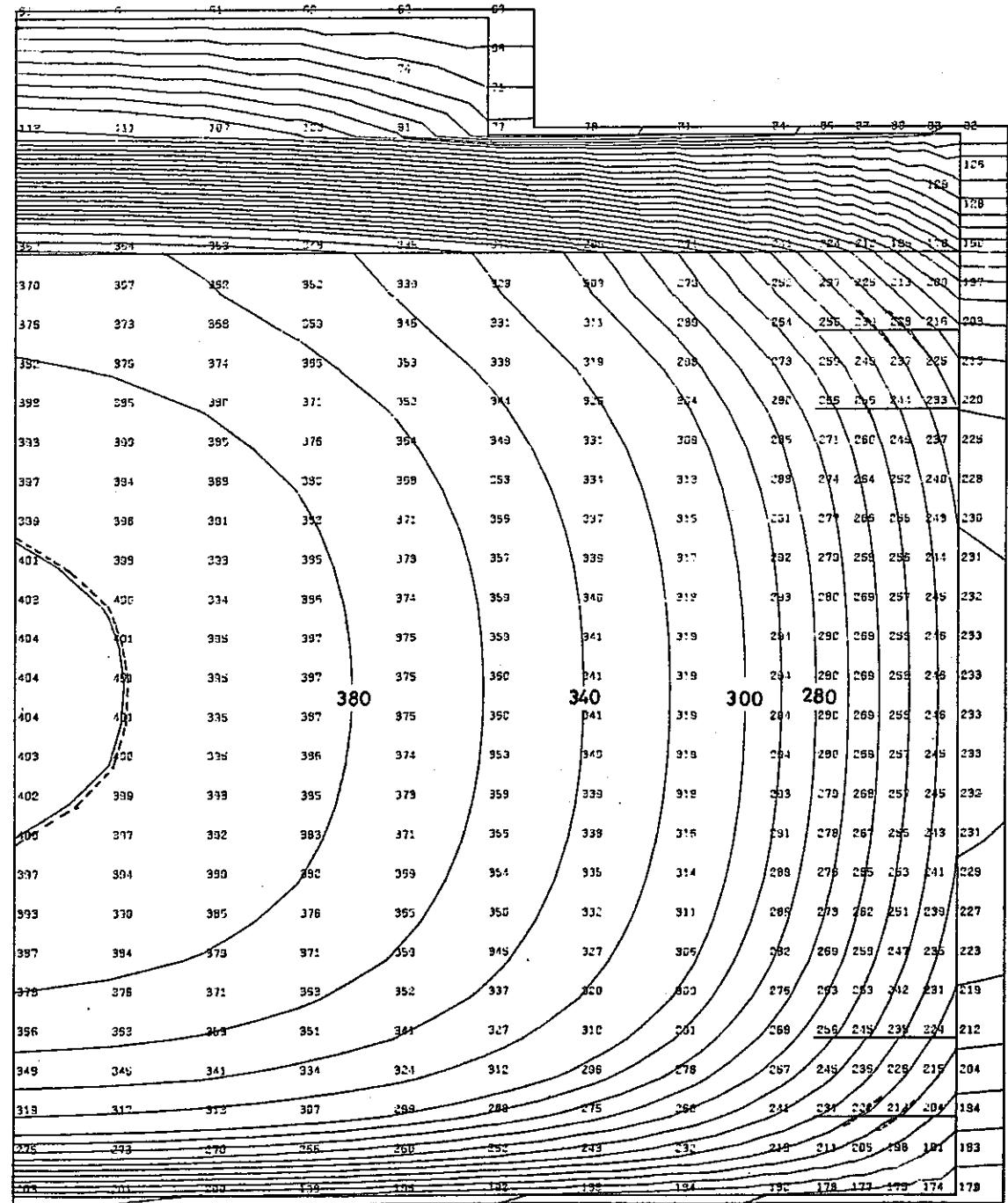


図 4.63  $r$  方向のクラック

表 4.40  $r$  方向クラックの影響（クラック間は輻射のみの伝熱）

節点番号	時刻		時刻	
	年 日 24時	$r$ 方向クラック (輻射のみ)	年 日 72時	$r$ 方向クラック (輻射のみ)
195 1501.	4.03923E+02	4.03619E+02	3.79207E+02	3.79221E+02
196 1502.	4.00981E+02	4.00679E+02	3.76499E+02	3.76513E+02
197 1503.	3.95586E+02	3.95290E+02	3.71529E+02	3.71543E+02
198 1504.	3.87017E+02	3.86729E+02	3.63628E+02	3.63641E+02
199 1505.	3.75118E+02	3.74840E+02	3.52645E+02	3.52658E+02
200 1506.	3.59774E+02	3.59310E+02	3.38463E+02	3.38475E+02
201 1507.	3.41186E+02	3.40938E+02	3.21283E+02	3.21295E+02
202 1508.	3.19458E+02	3.19229E+02	3.01207E+02	3.01213E+02
203 1509.	2.94375E+02	2.94166E+02	2.78007E+02	2.78213E+02
204 1510.	2.80531E+02	2.80333E+02	2.65188E+02	2.65199E+02
205 1511.	2.69543E+02	2.69354E+02	2.55003E+02	2.55013E+02
206 1512.	2.58017E+02	2.57837E+02	2.44310E+02	2.44320E+02
207 1513.	2.45938E+02	2.45767E+02	2.33093E+02	2.33102E+02
208 1514.	2.33288E+02	2.33126E+02	2.21334E+02	2.21342E+02
482 31514.	2.31982E+02	2.31821E+02	2.20136E+02	2.20144E+02
483 21514.	2.32376E+02	2.32214E+02	2.20496E+02	2.20505E+02
484 11514.	2.32769E+02	2.32616E+02	2.20856E+02	2.20864E+02



モデルC-30, r.方向クラック 時刻 1日  
 ———; クラックを入れた場合  
 - - - -; クラックなしの場合

図 4.64 温度分布図

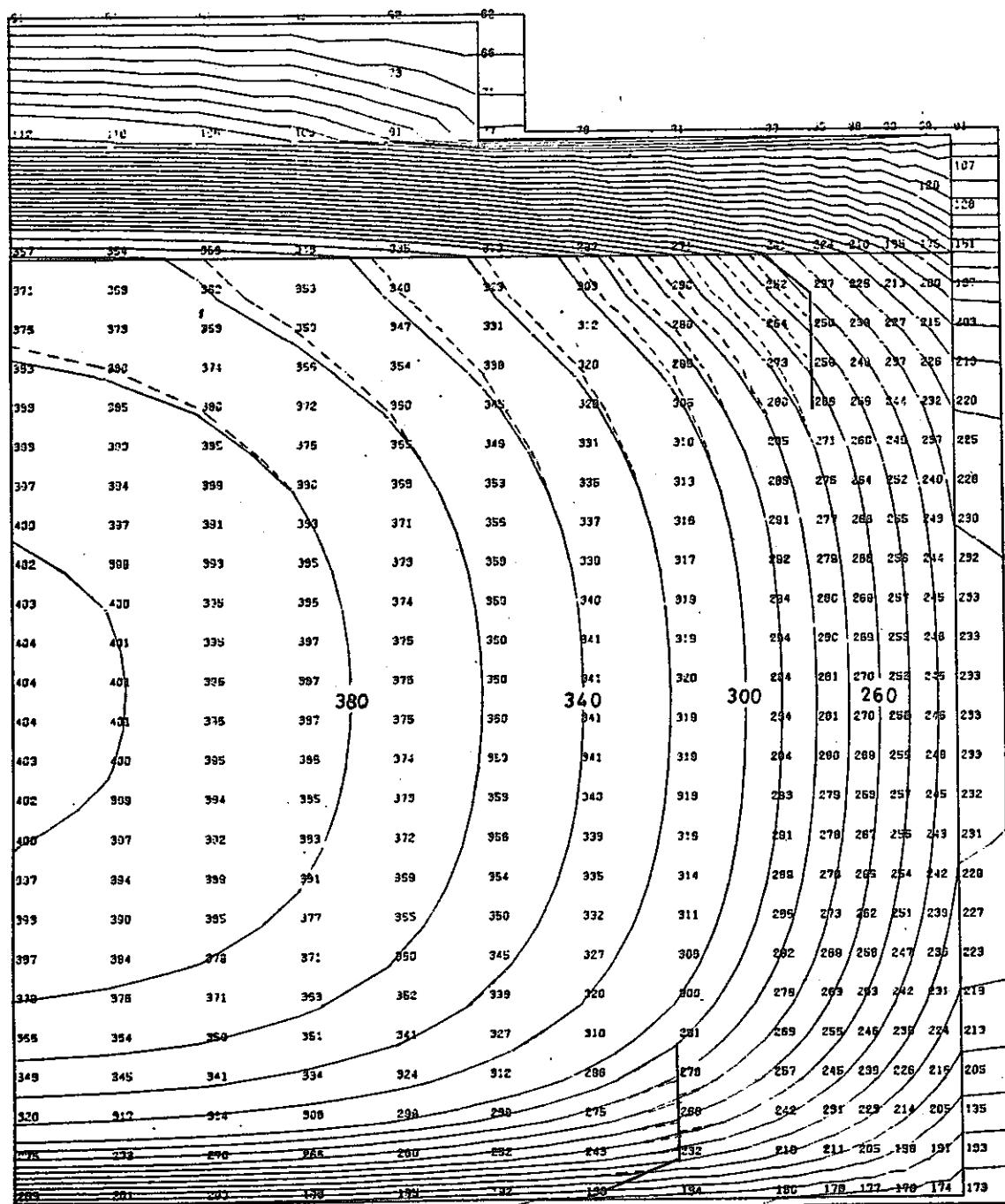
(口) 上下クラックについて

ガラス固化体の実験者の意見によると、図4.62のモデルdのように固化体の上下にクラックが入る事が予想されるとの事である。そこでガラスの上下にクラックを入れ、その影響を調べた。伝熱方法は輻射と空気である。

計算結果を図4.65、図4.66に示す。図4.65、図4.66で見るように、上方のクラックではクラックのある場所近くで、少し温度分布のずれが見られる。1年後にはクラックによる温度段差は、クラックのある場所での温度約200°Cに対して5.3°Cである。

下方のクラックでは影響はほとんどない。これは熱がキャニスターを通って伝わるためと思われる。

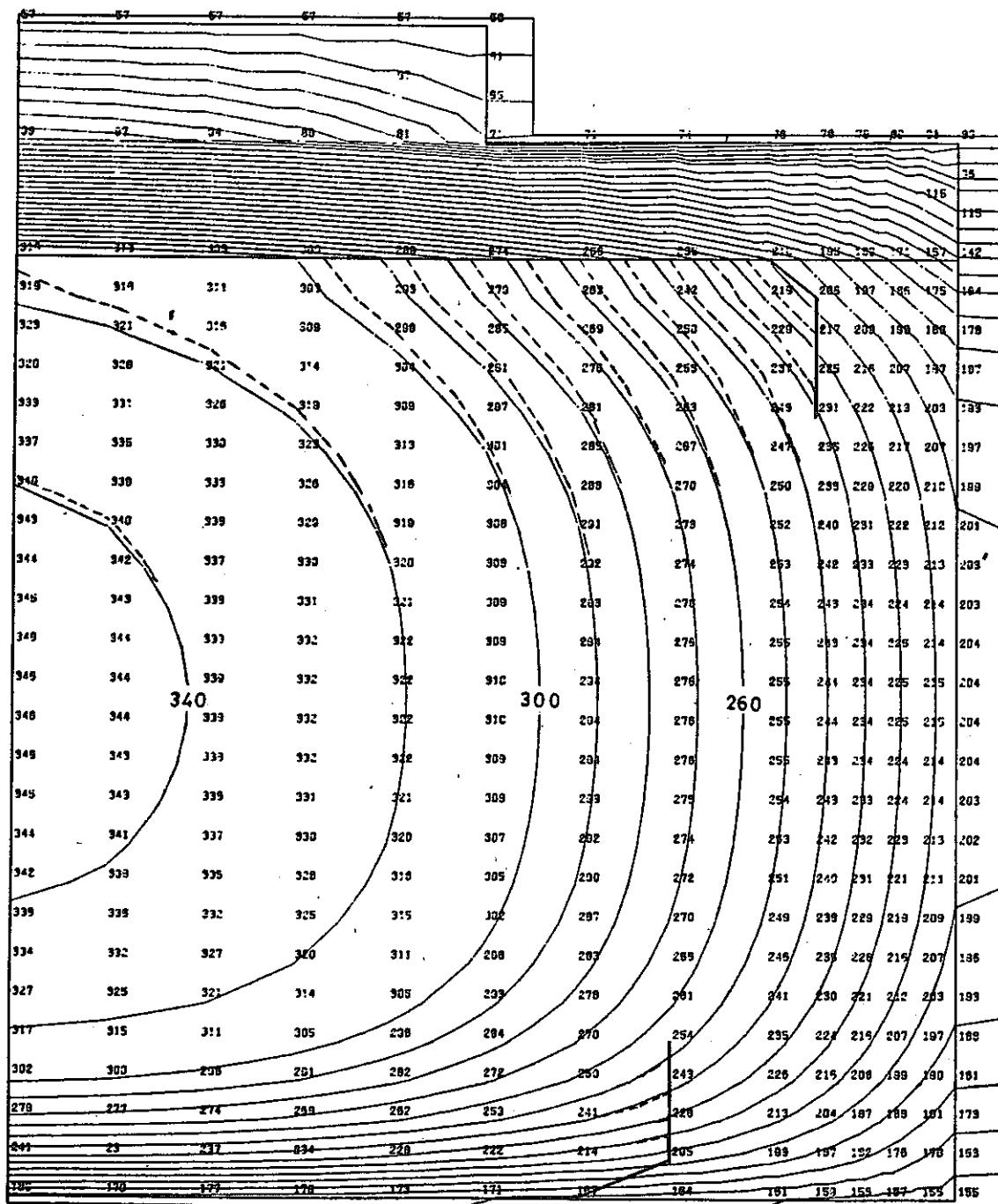
またガラス固化体中央部のr方向の温度を、クラックがないケースとクラックを含むケースについて表4.41に示す。表4.41をみると、クラックによる温度変化は少ない。



モデルC-30, 時刻 1日

——— ; クラックなし  
- - - - ; クラックが入った場合

図 4.65 温度分布図



モデルC-30, 時刻 1年

——; クラックなし

- - - - ; クラックが入った場合

図 4.66 温度分布図

表 4.41 上下クラックの影響

節点番号	時刻 年 日 24時		時刻 年 日 72時	
	クラックなし	上下クラック (輻射+空気)	クラックなし	上下クラック (輻射+空気)
195 1501.	4.03923E+02	4.03630E+02	3.79207E+02	3.79272E+02
196 1502.	4.00981E+02	4.00691E+02	3.76499E+02	3.76563E+02
197 1503.	3.95586E+02	3.95301E+02	3.71529E+02	3.71592E+02
198 1504.	3.87017E+02	3.86740E+02	3.63628E+02	3.63689E+02
199 1505.	3.75118E+02	3.74851E+02	3.52644E+02	3.52704E+02
200 1506.	3.59774E+02	3.59520E+02	3.38463E+02	3.38518E+02
201 1507.	3.41186E+02	3.40949E+02	3.21283E+02	3.21335E+02
202 1508.	3.19458E+02	3.19240E+02	3.01207E+02	3.01254E+02
203 1509.	2.94375E+02	2.94176E+02	2.78007E+02	2.78249E+02
204 1510.	2.80531E+02	2.80344E+02	2.65188E+02	2.65226E+02
205 1511.	2.69543E+02	2.69364E+02	2.55003E+02	2.55039E+02
206 1512.	2.58017E+02	2.57247E+02	2.44310E+02	2.44344E+02
207 1513.	2.45938E+02	2.45777E+02	2.33093E+02	2.33124E+02
208 1514.	2.33288E+02	2.33137E+02	2.21334E+02	2.21362E+02
482 31514.	2.31982E+02	2.31832E+02	2.20136E+02	2.20163E+02
483 21514.	2.32376E+02	2.32225E+02	2.20496E+02	2.20524E+02
484 11514.	2.32768E+02	2.32617E+02	2.20856E+02	2.20884E+02

節点番号	時刻 年 日 時		時刻 50年 日 時	
	クラックなし	上下クラック (輻射+空気)	クラックなし	上下クラック (輻射+空気)
195 1501.	3.46337E+02	3.46395E+02	1.22988E+02	1.22976E+02
196 1502.	3.43888E+02	3.43246E+02	1.22282E+02	1.22270E+02
197 1503.	3.39397E+02	3.39453E+02	1.20991E+02	1.20978E+02
198 1504.	3.32258E+02	3.32313E+02	1.18946E+02	1.18933E+02
199 1505.	3.22340E+02	3.22393E+02	1.16117E+02	1.16103E+02
200 1506.	3.09540E+02	3.09511E+02	1.12489E+02	1.12474E+02
201 1507.	2.94045E+02	2.94093E+02	1.08117E+02	1.08101E+02
202 1508.	2.75948E+02	2.75993E+02	1.03037E+02	1.0320E+02
203 1509.	2.55055E+02	2.55097E+02	9.72219E+01	9.72232E+01
204 1510.	2.43521E+02	2.43562E+02	9.40370E+01	9.40177E+01
205 1511.	2.34364E+02	2.34404E+02	9.15223E+01	9.15025E+01
206 1512.	2.24757E+02	2.24795E+02	8.88974E+01	8.88771E+01
207 1513.	2.14684E+02	2.14721E+02	8.61610E+01	8.61404E+01
208 1514.	2.04132E+02	2.04168E+02	8.33115E+01	8.32907E+01
482 31514.	2.03072E+02	2.03108E+02	8.30612E+01	8.30405E+01
483 21514.	2.03391E+02	2.03427E+02	8.31358E+01	8.31151E+01
484 11514.	2.03709E+02	2.03745E+02	8.32108E+01	8.31900E+01

④ クラック間の伝熱方法の違いについて、

クラック間の伝熱方法については、前述の3ケース（P 151）について計算し、比較してみた。モデルはいずれも a. モデル（ガラス固化体内半径20cm, キャニスタの厚さ1cm, Waste 含有量30%, 30cmクラック）である。またクラックを入れた時刻は12時間後である。

計算結果として、図4.67に温度分布を、図4.68にr方向断面温度を示す。またクラックによる温度変化を表4.42に示す。ここで、ガラスの2割減の熱伝導率の伝熱の場合については、その温度はクラックが入らない場合と比べて、どの場所でも1°C以下の変化しかなかったので省略した。

表4.42をみると、クラック内の伝熱が輻射のみの場合は、クラック発生に伴う温度上昇が、その付近では約23°C（3日～1年）と1割近くになる。また中心温度も約17°C（3日～1年）上昇し、影響が少しだる。輻射と空気の場合はクラックによる温度上昇は、その付近でも2.4°C（3日～1年）と比較的小さい。また、いずれの場合もキャニスタ外側の温度は、あまりクラックの影響をうけない。

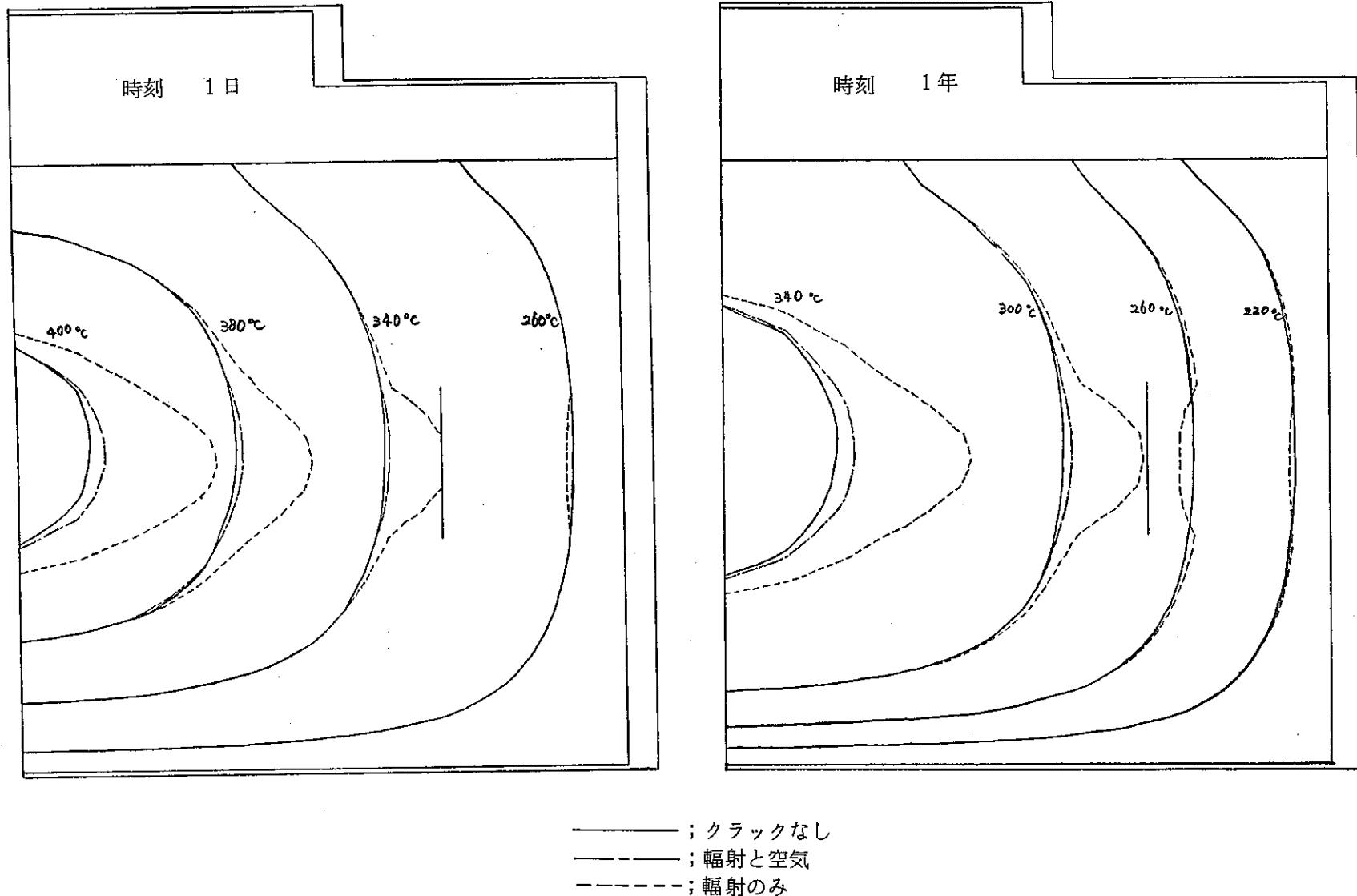


図 4.67 溫度分布図、クラック間の伝熱方法の違い

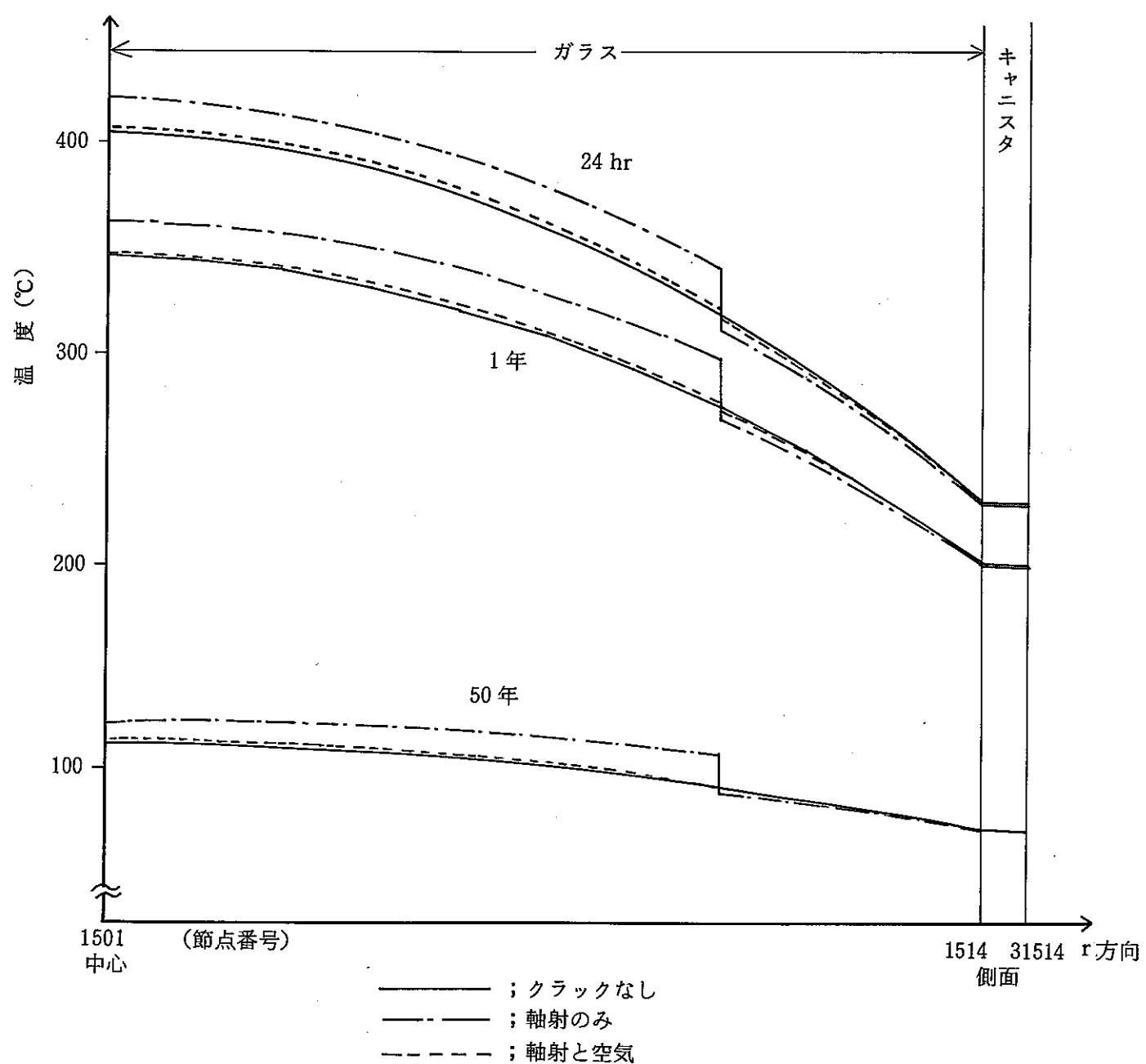


図 4.68 クラック間の伝熱方法の違い  
による  $r$  方向断面温度

表 4.42 クラックによる温度の変化

	クラック間 の伝熱方法	時刻 節点 番号	24 時	72 時	1 年	10 年	50 年
			1 日	3 日			
クラックなしの 場合の温度		(注) 1501	403.9	379.2	346.3	238.0	123.0
		1508	319.5	301.2	276.0	192.4	103.0
		31514	232.0	220.1	203.1	145.5	83.1
クラックを入れた 場合の温度変化	輻射のみ	1501	+ 15.0	+ 16.8	+ 16.6	+ 15.1	+ 10.8
		1508	+ 22.0	+ 23.2	+ 23.0	+ 20.5	+ 14.4
		31514	- 2.6	- 2.0	- 1.9	- 1.8	- 1.2
	輻射と空気	1501	+ 1.4	+ 1.8	+ 1.6	+ 1.3	+ 0.7
		1508	+ 2.2	+ 2.4	+ 2.3	+ 1.8	+ 0.9
		31514	- 0.4	- 0.2	- 0.2	- 0.2	- 0.1

(注) 節点 1501 は固化体中心, 1508 はクラックを入れる場所,  
31514 はキャニスター外側を示す。

## (二) クラックの長さによる違いについて

クラックの長さが温度分布にどのような影響をおよぼすかを見るために、モデル  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , (30cm, 20cm, 10cmのクラック)について調べた。クラック内の伝熱方法は、輻射のみとした。

計算結果として、温度分布図を図4.69に示す。図4.69のとおり、クラックが長いと、その影響はガラス固化体中に広くおよんでいる。だが、10cmクラックでは影響が小さい。また、 $r$  方向の温度変化を図4.70に示す。30cmクラックでは、温度の段差が大きく、クラックから中心に向って20°C前後高くなる。クラックの長さに比例してその温度段差が小さくなる。いずれの場合もキャニスター外側の温度変化は少ない。

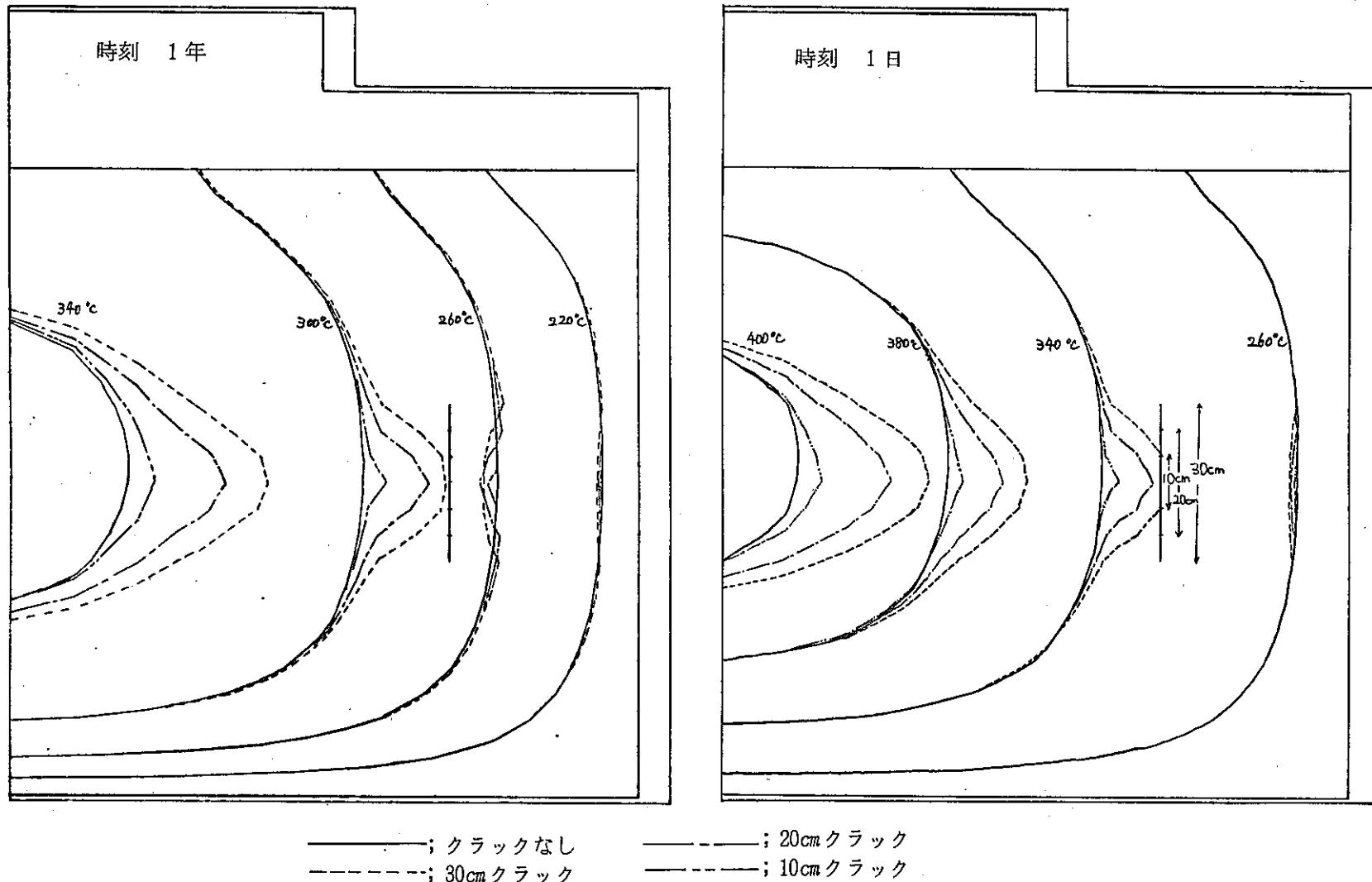


図 4.69 溫度分布図 クラックの長さによる溫度分布の違い

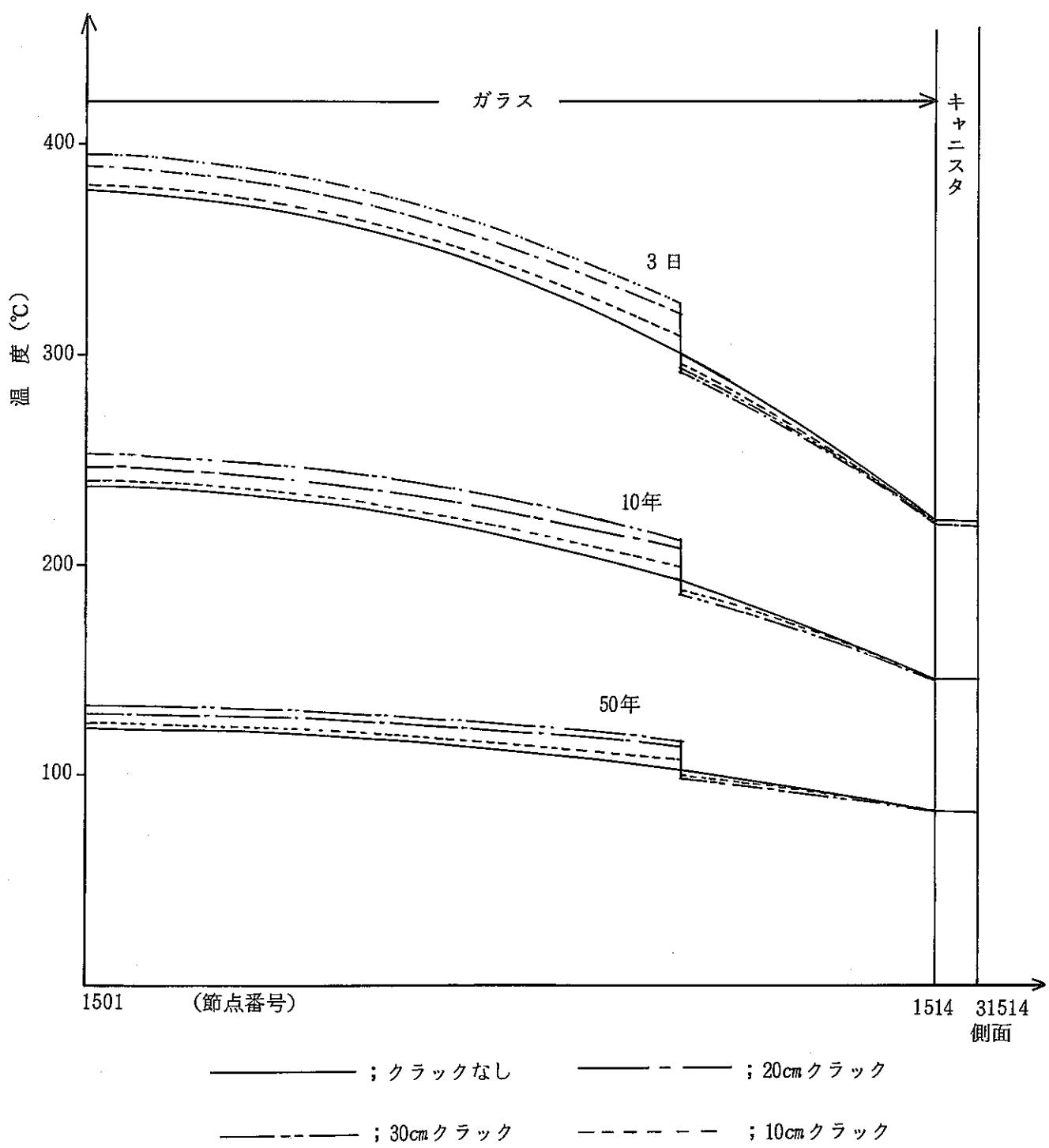


図 4.70 クラックの長さの違いによる  
r 方向断面温度

(b) クラックを入れる時刻について

クラックを入れる時刻により、その後の熱伝導計算の結果がどのように変ってくるか調べるために、モデルa. (30cmクラック)について、クラックを入れる時刻を10時間後と、12時間後の場合について比較した。伝熱方法はいずれも輻射と空気である。

計算結果は、表4.43のとおりである。表4.43によると、クラックを入れる時刻が、10時間と12時間の場合で、両者の差はわずかである。

表4.43 クラックを入れる時刻の違い

節点番号	年 時刻 日 13時		年 時刻 日 24時	
	12 hr で クラックを入れた	10 hr で クラックを入れた	12 hr で クラックを入れた	10 hr で クラックを入れた
195 1501.	4.93107E+02	4.93802E+02	4.05319E+02	4.05365E+02
196 1502.	4.88935E+02	4.89544E+02	4.02399E+02	4.02445E+02
197 1503.	4.80961E+02	4.81692E+02	3.97052E+02	3.97097E+02
198 1504.	4.69091E+02	4.69844E+02	3.88561E+02	3.88604E+02
199 1505.	4.53390E+02	4.54148E+02	3.76773E+02	3.76815E+02
200 1506.	4.33693E+02	4.34411E+02	3.61575E+02	3.61614E+02
201 1507.	4.10214E+02	4.10800E+02	3.43168E+02	3.43205E+02
202 1508.	3.83118E+02	3.83402E+02	3.21651E+02	3.21685E+02
629 91508.	3.79533E+02	3.79765E+02	3.18440E+02	3.18475E+02
203 1509.	3.48505E+02	3.48432E+02	2.93635E+02	2.93668E+02
204 1510.	3.31290E+02	3.31146E+02	2.79869E+02	2.79900E+02
205 1511.	3.17643E+02	3.17469E+02	2.68936E+02	2.68966E+02
206 1512.	3.03352E+02	3.03162E+02	2.57464E+02	2.57493E+02
207 1513.	2.88404E+02	2.88211E+02	2.45437E+02	2.45465E+02
208 1514.	2.72786E+02	2.72600E+02	2.32837E+02	2.32863E+02
482 31514.	2.71107E+02	2.70922E+02	2.31536E+02	2.31562E+02
483 21514.	2.71614E+02	2.71429E+02	2.31928E+02	2.31954E+02
484 11514.	2.72118E+02	2.71933E+02	2.32319E+02	2.32345E+02

(～) 半径15cmのガラス固化体にクラックを入れた場合について

半径15cmのガラス固化体にクラックを入れた場合の熱伝導計算は、モデルA（半径15cm、キャニスター厚0.4cm）について行った。クラック間の伝熱方法は輻射と空気、クラックの長さは30cmである（モデルf.）。

計算結果は、表444に示すとおりである。表444のとおり、クラックによる温度変化は少ない。

表444 モデルAにクラックを入れた場合

（6時間目にクラックを入れた）

節点番号	時刻		年 日 7時		時刻		年 日 24時	
	モデルA クラックなし	モデルA (輻射と空気)	モデルA クラックなし	モデルA (輻射と空気)	モデルA クラックなし	モデルA (輻射と空気)	モデルA クラックなし	モデルA (輻射と空気)
195 1501.	4.56245E+02	4.57007E+02	2.81232E+02	2.82223E+02				
196 1502.	4.53036E+02	4.53834E+02	2.79571E+02	2.81173E+02				
197 1503.	4.47155E+02	4.48026E+02	2.76523E+02	2.78151E+02				
198 1504.	4.37859E+02	4.38851E+02	2.71688E+02	2.73359E+02				
199 1505.	4.25075E+02	4.26248E+02	2.64990E+02	2.66719E+02				
200 1506.	4.08838E+02	4.10272E+02	2.56380E+02	2.58184E+02				
201 1507.	3.89353E+02	3.91151E+02	2.45985E+02	2.47378E+02				
202 1508.	3.66765E+02	3.69061E+02	2.33885E+02	2.35576E+02				
629 91508.		3.65139E+02					2.33002E+02	
203 1509.	3.41063E+02	3.40055E+02	2.19993E+02	2.19263E+02				
204 1510.	3.27067E+02	3.26229E+02	2.12364E+02	2.11664E+02				
205 1511.	3.12287E+02	3.11588E+02	2.04254E+02	2.03580E+02				
206 1512.	3.02001E+02	3.01780E+02	1.98576E+02	1.97919E+02				
207 1513.	2.91364E+02	2.90312E+02	1.92675E+02	1.92033E+02				
208 1514.	2.80378E+02	2.79885E+02	1.86549E+02	1.85919E+02				
482 21514.	2.79663E+02	2.79174E+02	1.86184E+02	1.85555E+02				
483 21514.	2.79897E+02	2.79407E+02	1.86303E+02	1.85674E+02				
484 11514.	2.80129E+02	2.79638E+02	1.86422E+02	1.85793E+02				

#### 4.3.4. ポイドが入ったときの熱伝導への影響

ガラス固化体中にポイドが入る事により、その熱伝導係数、密度など、ガラスの物性値が変化する。それに従って、ガラス固化体の熱的挙動に影響が出るが、今回はこれらの物性値のうち、熱的挙動に最も大きく影響を及ぼすと思われる熱伝導係数のみを下記の方法によって、固化体中で一様に変化させて、その影響を調べた。

##### (1) ポイドによる熱伝導係数の変化

ポイドによるガラス固化体の熱伝導係数の変化は、木村（木村允、化学工学、22, p.384, 1958）の式に依った。木村は、小さい気泡を含むガラスや合成樹脂などの断熱材の熱伝導係数を、気泡を充填層とみなして、理論的に導いている。木村の式は、気孔径を考慮し、気孔中は気体の熱伝導と輻射によって熱が伝わるとしている。今回の計算では、気孔中の気体は空気とした。

木村の式（化学工学、22, p.384, 1958）

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_s} = \frac{1-C}{1/(1/\{(1-D)(\lambda_s/\lambda_f)\}+h_r d/\lambda_s)+D} + C$$

ここで

$$C = (1-\epsilon)^{1.3}$$

$$D = 0.56 (1-\epsilon)^{1.5}$$

$$h_r = 0.195 / 3600 [(t+273)/100]^3$$

$\lambda_e$  ; 気孔を含む物質の熱伝導係数 (kcal/m.sec °C)

$\lambda_s$  ; 固体の熱伝導係数

$\lambda_f$  ; 空気の "

$\epsilon$  ; 気孔率 (%) / 100

$d$  ; 气孔径

$t$  ; 温度 °C

温度  $t = 500$  °C のときの気孔率  $\epsilon$  の変化に対する  $\lambda_e/\lambda_s$  の値を図 4.71 に示す。気孔径 1 mm と 100 μm では  $\lambda_e/\lambda_s$  の値の違いは小さい。気孔率が、0 ~ 1%までは、 $\lambda_e/\lambda_s \approx 1$  である。気孔率が 10%になると、 $\lambda_e/\lambda_s \approx 0.9$  になる。

なお気孔を含む物質の熱伝導係数については、木村の式の他に、Eucken, Russell, Loeb, Kinsky の式（「断熱工学」）について検討した。その結果、つきの理由により木村の式によって熱伝導係数を決めた。

(I) Loeb の式以外は、気孔径および気孔内の輻射による熱伝達を考慮していない。

(II) いずれの式も  $\lambda_e/\lambda_s$  の値は木村の式と同様である（図 4.71 参照）。

(III) これらの式のうちでは、木村の式が最新である。

ポイドが入った場合のガラス固化体 (30% Waste を含む) の熱伝導係数の値を表 4.45 に示す。それによると、気孔率が 0.1% と 1% では、気孔径が 1 μm, 1 mm の場合共に RATIO ( $\lambda_e/\lambda_s$ ) は、ほとんど 1 である。気孔率が 10% の場合は、気孔径が 1 μm, 1 mm の場合共に RATIO は 0.878 ~ 0.889 である。気孔率 10%, 气孔径 100 μm のポイドが入ったガラス固化体の熱伝導係数の値を図 4.72 に示す。

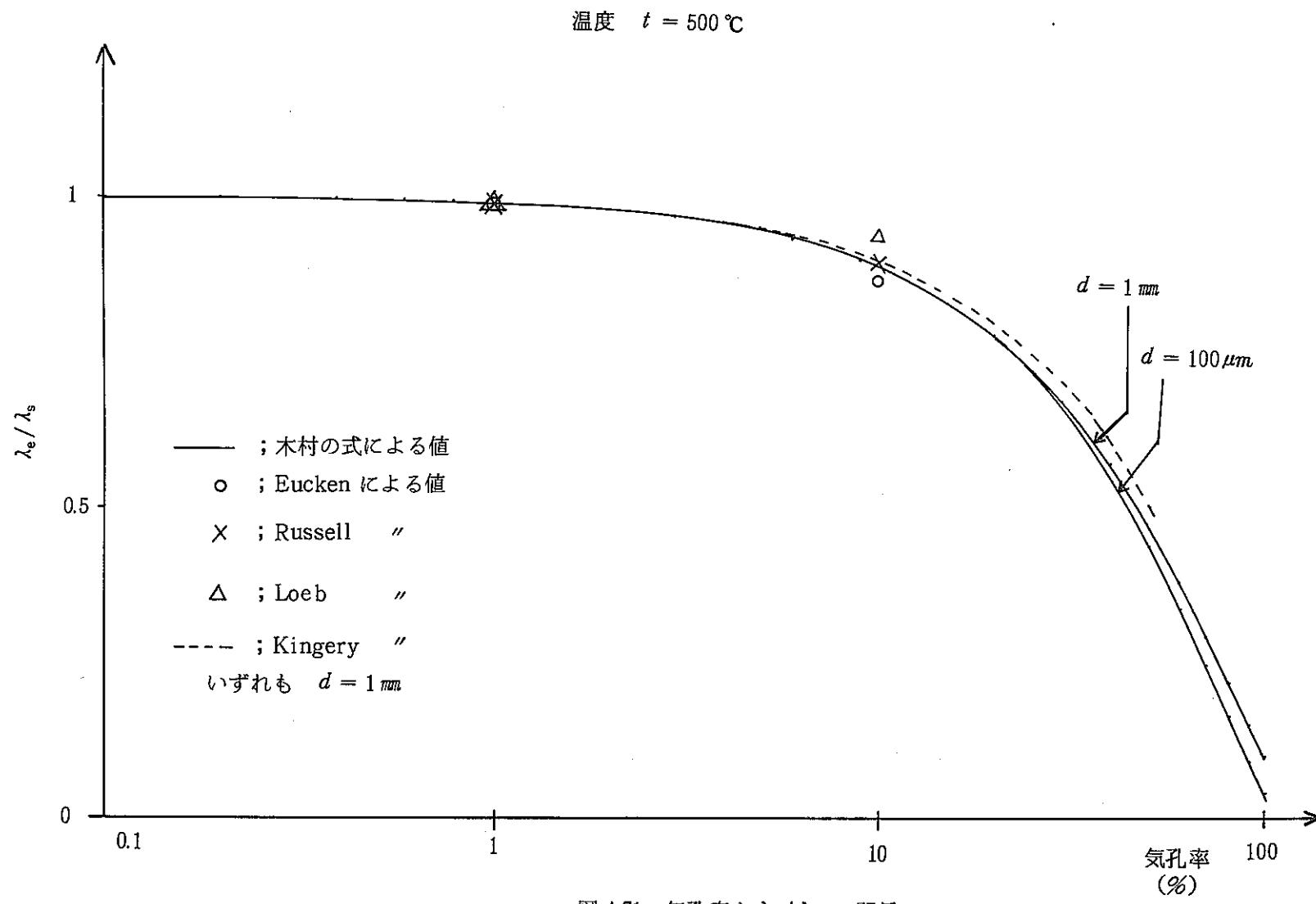


図 4.71 気孔率と  $\lambda_e / \lambda_s$  の関係

表 4.45 ポイドが入った場合の固化体の熱伝導係数

KS: ポイドが入らない固化体の熱伝導係数

KP: ポイドを含む固化体 " (kcal/sec.m. °C)

KA: 空気の熱伝導係数(「伝熱工学」による)

RATIO:  $\lambda_e / \lambda_s$  $\epsilon$ : 気孔率

d: 気孔径

温 度 (°C)	KS	KA	$\epsilon = 0.1\%$	$d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$	$d = 100\mu m$
0.000E+00	2.300E-04	5.750E-06	2.297E-04	9.988E-01	2.272E-04	9.877E-01
1.000E+02	2.570E-04	7.550E-06	2.567E-04	9.988E-01	2.539E-04	9.879E-01
2.000E+02	2.840E-04	9.200E-06	2.837E-04	9.988E-01	2.806E-04	9.879E-01
3.000E+02	3.100E-04	1.073E-05	3.096E-04	9.988E-01	3.063E-04	9.880E-01
4.000E+02	3.370E-04	1.220E-05	3.366E-04	9.988E-01	3.330E-04	9.881E-01
5.000E+02	3.640E-04	1.341E-05	3.636E-04	9.988E-01	3.597E-04	9.881E-01
6.000E+02	4.920E-04	1.461E-05	4.914E-04	9.988E-01	4.861E-04	9.879E-01
7.000E+02	6.200E-04	1.582E-05	6.192E-04	9.988E-01	6.125E-04	9.878E-01
8.000E+02	7.480E-04	1.700E-05	7.471E-04	9.988E-01	7.389E-04	9.878E-01
9.000E+02	8.760E-04	1.810E-05	8.749E-04	9.988E-01	8.652E-04	9.877E-01
1.000E+03	1.004E-03	1.917E-05	1.003E-03	9.988E-01	9.916E-04	9.877E-01
温度 (°C)	$\epsilon = 10\%$	$d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$	$d = 1 mm$	$\epsilon = 10\%$	$d = 1 mm$
	KP	RATIO	KP	RATIO	KP	RATIO
0.000E+00	2.020E-04	8.781E-01	2.272E-04	9.878E-01	2.021E-04	8.786E-01
1.000E+02	2.259E-04	8.791E-01	2.539E-04	9.880E-01	2.262E-04	8.803E-01
2.000E+02	2.499E-04	8.800E-01	2.806E-04	9.882E-01	2.505E-04	8.821E-01
3.000E+02	2.730E-04	8.806E-01	3.064E-04	9.884E-01	2.741E-04	8.841E-01
4.000E+02	2.970E-04	8.812E-01	3.332E-04	9.886E-01	2.987E-04	8.863E-01
5.000E+02	3.209E-04	8.816E-01	3.599E-04	9.888E-01	3.235E-04	8.887E-01
6.000E+02	4.329E-04	8.800E-01	4.864E-04	9.887E-01	4.367E-04	8.877E-01
7.000E+02	5.450E-04	8.791E-01	6.130E-04	9.887E-01	5.503E-04	8.876E-01
8.000E+02	6.572E-04	8.786E-01	7.396E-04	9.887E-01	6.642E-04	8.880E-01
9.000E+02	7.693E-04	8.782E-01	8.662E-04	9.888E-01	7.785E-04	8.887E-01
1.000E+03	8.815E-04	8.780E-01	9.928E-04	9.889E-01	8.932E-04	8.897E-01

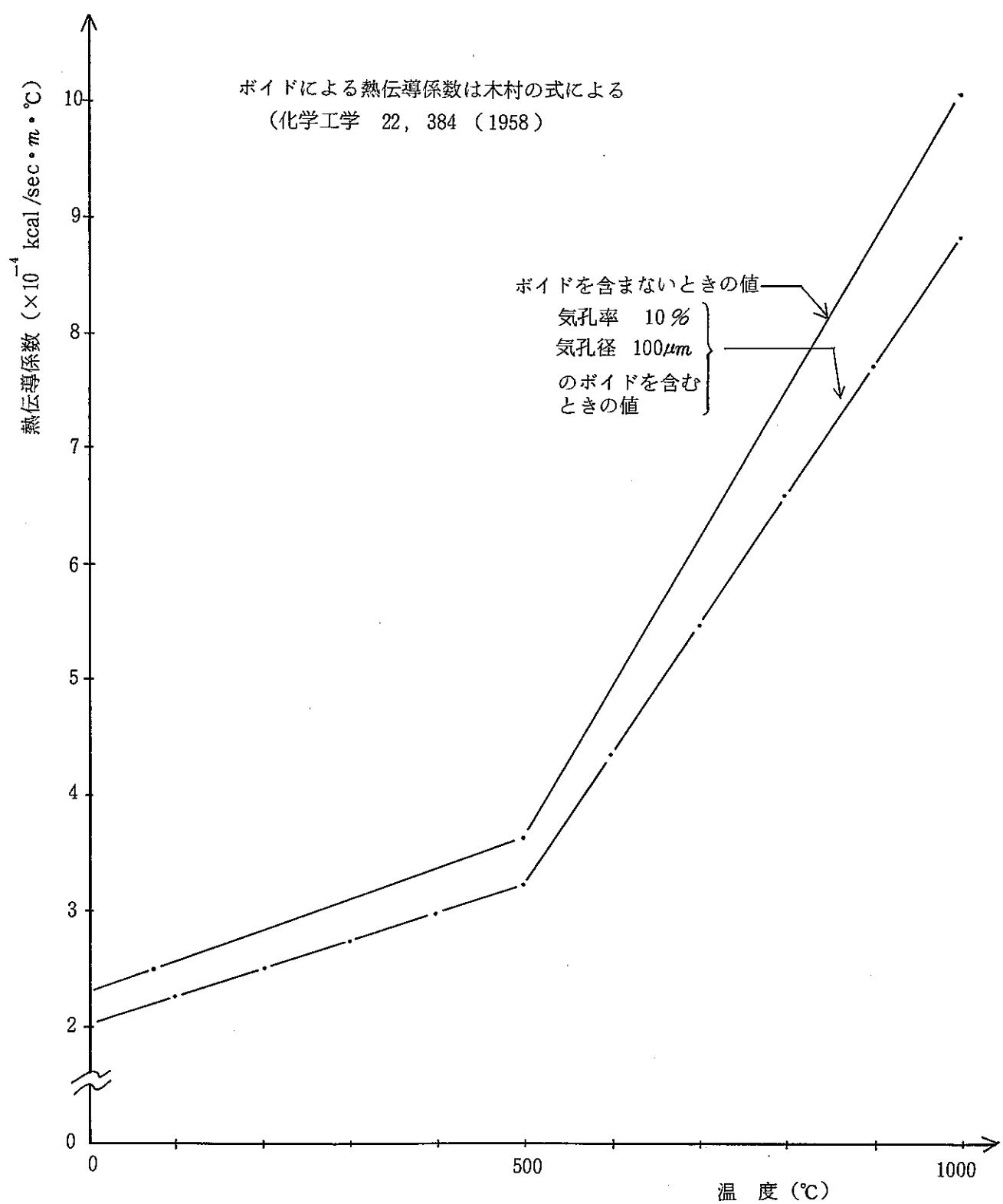


図 4.72 ボイドが入った場合のガラス固化体の熱伝導係数

## (2) 計算ケース

表 4.46 計算ケース

ケース番号	気孔率，気孔径	計算時間
C-30-V 1	0.1%， 100 $\mu m$	50年まで計算した
" V 2	1 %, 100 $\mu m$	3日 "
" V 3	10 %, 100 $\mu m$	50年 "
" V 4	1 %, 1 mm	3日 "
" V 5	10 %, 1 mm	3日 "

ボイドの熱伝導への影響を調べるために、表 4.46 のように 5 ケースについて計算した。C-30-V 2, C-30-V 4 については、ボイドの影響が小さいので、計算時間を 3 日までとした。C-30-V 5 については、C-30-V 3 と熱伝導率がほとんど同じであり、その結果も同様であるため、計算時間を 3 日までとした。また、熱伝導計算の境界条件は基本ケース 2 と同一とした。

## (3) 計算結果

計算結果は表 4.47 のとおりである。また、ボイドが入らない場合との温度差、すなわち（ボイドが入った場合の温度） - （ボイドなしの場合の温度）、を固化体の断面でみると、図 4.73 のようになる。図 4.73 によると、気孔率 0.1%，及び 1% の場合は、いずれも影響はきわめて小さく、中心で、約 2  $^{\circ}C$  の温度上昇を見るだけである。気孔率 10% の場合は、いずれも中心で約 20  $^{\circ}C$  温度が上昇する。キャニスター外側では、どの場合もほとんど温度変化はない。

このように、気孔率 0.1%，1% の場合は、熱伝導計算への影響が非常に小さいので、気孔率 10%，気孔径 100  $\mu m$  の場合について、その影響を調べた。

$\epsilon = 10\%$ ,  $d = 100 \mu m$  のボイドが入った場合の固化体中心温度の変化を図 4.74 に示す。1 年ぐらいいまでは、約 20  $^{\circ}C$  温度が上昇するが、50 年経つと、温度差は次第に小さくなる。

図 4.75 に  $\epsilon = 10\%$ ,  $d = 100 \mu m$  のボイドが入った場合の温度分布を、3 時、12 時、24 時、1 年、50 年について示す。また、時刻 10 時についての温度分布を図 4.76 に示す。

表 4.47  $\tau$  方向温度 (その 1)

年  
時刻 3  
日  
72 時

節点番号	C-30 ボイドなし	$\epsilon = 0.1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 10\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 1 mm$	$\epsilon = 10\%$ $d = 1 mm$
195 1501.	3.79207E+02	3.79444E+02	3.81102E+02	3.99477E+02	3.81046E+02	3.98786E+02
196 1502.	3.76499E+02	3.76731E+02	3.78363E+02	3.96448E+02	3.78309E+02	3.95772E+02
197 1503.	3.71529E+02	3.71752E+02	3.73336E+02	3.90287E+02	3.73285E+02	3.90240E+02
198 1504.	3.63628E+02	3.63836E+02	3.65345E+02	3.82039E+02	3.65296E+02	3.81437E+02
199 1505.	3.52645E+02	3.52831E+02	3.54234E+02	3.69729E+02	3.54190E+02	3.69187E+02
200 1506.	3.38463E+02	3.38619E+02	3.39884E+02	3.53812E+02	3.39846E+02	3.53345E+02
201 1507.	3.21283E+02	3.21401E+02	3.22497E+02	3.34500E+02	3.22465E+02	3.34120E+02
202 1508.	3.01207E+02	3.01276E+02	3.02173E+02	3.11884E+02	3.02146E+02	3.11599E+02
203 1509.	2.78007E+02	2.78023E+02	2.78684E+02	2.85685E+02	2.78664E+02	2.85501E+02
204 1510.	2.65188E+02	2.65180E+02	2.65709E+02	2.71185E+02	2.65690E+02	2.71053E+02
205 1511.	2.55003E+02	2.54980E+02	2.55402E+02	2.59653E+02	2.55385E+02	2.59561E+02
206 1512.	2.44310E+02	2.44275E+02	2.44583E+02	2.47533E+02	2.44567E+02	2.47481E+02
207 1513.	2.33093E+02	2.33048E+02	2.33236E+02	2.34807E+02	2.33220E+02	2.34794E+02
208 1514.	2.21334E+02	2.21282E+02	2.21343E+02	2.21450E+02	2.21328E+02	2.21476E+02
482 31514.	2.20136E+02	2.20084E+02	2.20144E+02	2.20250E+02	2.20129E+02	2.20276E+02
483 21514.	2.20496E+02	2.20444E+02	2.20505E+02	2.20615E+02	2.20490E+02	2.20637E+02
484 11514.	2.20856E+02	2.20804E+02	2.20864E+02	2.20971E+02	2.20849E+02	2.20997E+02

1 年  
時刻  
日  
時

節点番号	C-30 ボイドなし	$\epsilon = 0.1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 10\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 1 mm$	$\epsilon = 10\%$ $d = 1 mm$
195 1501.	3.46337E+02	3.46513E+02			3.64665E+02	
196 1502.	3.43888E+02	3.44060E+02			3.61923E+02	
197 1503.	3.39397E+02	3.39559E+02			3.56891E+02	
198 1504.	3.32258E+02	3.32406E+02			3.48888E+02	
199 1505.	3.22340E+02	3.22467E+02			3.37760E+02	
200 1506.	3.09540E+02	3.09640E+02			3.23380E+02	
201 1507.	2.94045E+02	2.94108E+02			3.05945E+02	
202 1508.	2.75948E+02	2.75973E+02			2.85542E+02	
203 1509.	2.55055E+02	2.55049E+02			2.61948E+02	
204 1510.	2.43521E+02	2.43503E+02			2.48905E+02	
205 1511.	2.34364E+02	2.34339E+02			2.38538E+02	
206 1512.	2.24757E+02	2.24726E+02			2.27651E+02	
207 1513.	2.14684E+02	2.14652E+02			2.16227E+02	
208 1514.	2.04132E+02	2.04103E+02			2.04247E+02	
482 31514.	2.03072E+02	2.03044E+02			2.03167E+02	
483 21514.	2.03391E+02	2.03362E+02			2.03506E+02	
484 11514.	2.03709E+02	2.03680E+02			2.03824E+02	

## r 方向温度 (その 2)

10年  
時刻  
日  
時

節点番号	C-30 ボイドなし	$\epsilon = 0.1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 1mm$	$\epsilon = 10\%$ $d = 1mm$
195 1501.	2.38008E+02	2.38011E+02				
196 1502.	2.36412E+02	2.36414E+02				
197 1503.	2.33488E+02	2.33487E+02				
198 1504.	2.28246E+02	2.28241E+02				
199 1505.	2.22408E+02	2.22399E+02				
200 1506.	2.14121E+02	2.14108E+02				
201 1507.	2.04090E+02	2.04075E+02				
202 1508.	1.92372E+02	1.92360E+02				
203 1509.	1.78870E+02	1.78865E+02				
204 1510.	1.71435E+02	1.71433E+02				
205 1511.	1.65543E+02	1.65543E+02				
206 1512.	1.59372E+02	1.59375E+02				
207 1513.	1.52917E+02	1.52922E+02				
208 1514.	1.46171E+02	1.46176E+02				
482 31514.	1.45532E+02	1.45537E+02				
483 21514.	1.45723E+02	1.45729E+02				
484 11514.	1.45915E+02	1.45920E+02				

50年  
時刻  
日  
時

節点番号	C-30 ボイドなし	$\epsilon = 0.1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 10\%$ $d = 100\mu m$	$\epsilon = 1\%$ $d = 1mm$	$\epsilon = 10\%$ $d = 1mm$
195 1501.	1.22988E+02	1.22974E+02				
196 1502.	1.22282E+02	1.22269E+02				
197 1503.	1.20991E+02	1.20978E+02				
198 1504.	1.18946E+02	1.18933E+02				
199 1505.	1.16117E+02	1.16105E+02				
200 1506.	1.12489E+02	1.12478E+02				
201 1507.	1.08117E+02	1.08106E+02				
202 1508.	1.03037E+02	1.03026E+02				
203 1509.	9.72219E+01	9.72114E+01				
204 1510.	9.40370E+01	9.40267E+01				
205 1511.	9.15223E+01	9.15118E+01				
206 1512.	8.88974E+01	8.88868E+01				
207 1513.	8.61610E+01	8.61504E+01				
208 1514.	8.33115E+01	8.33099E+01				
482 31514.	8.30612E+01	8.30507E+01				
483 21514.	8.31358E+01	8.31253E+01				
484 11514.	8.32108E+01	8.32003E+01				

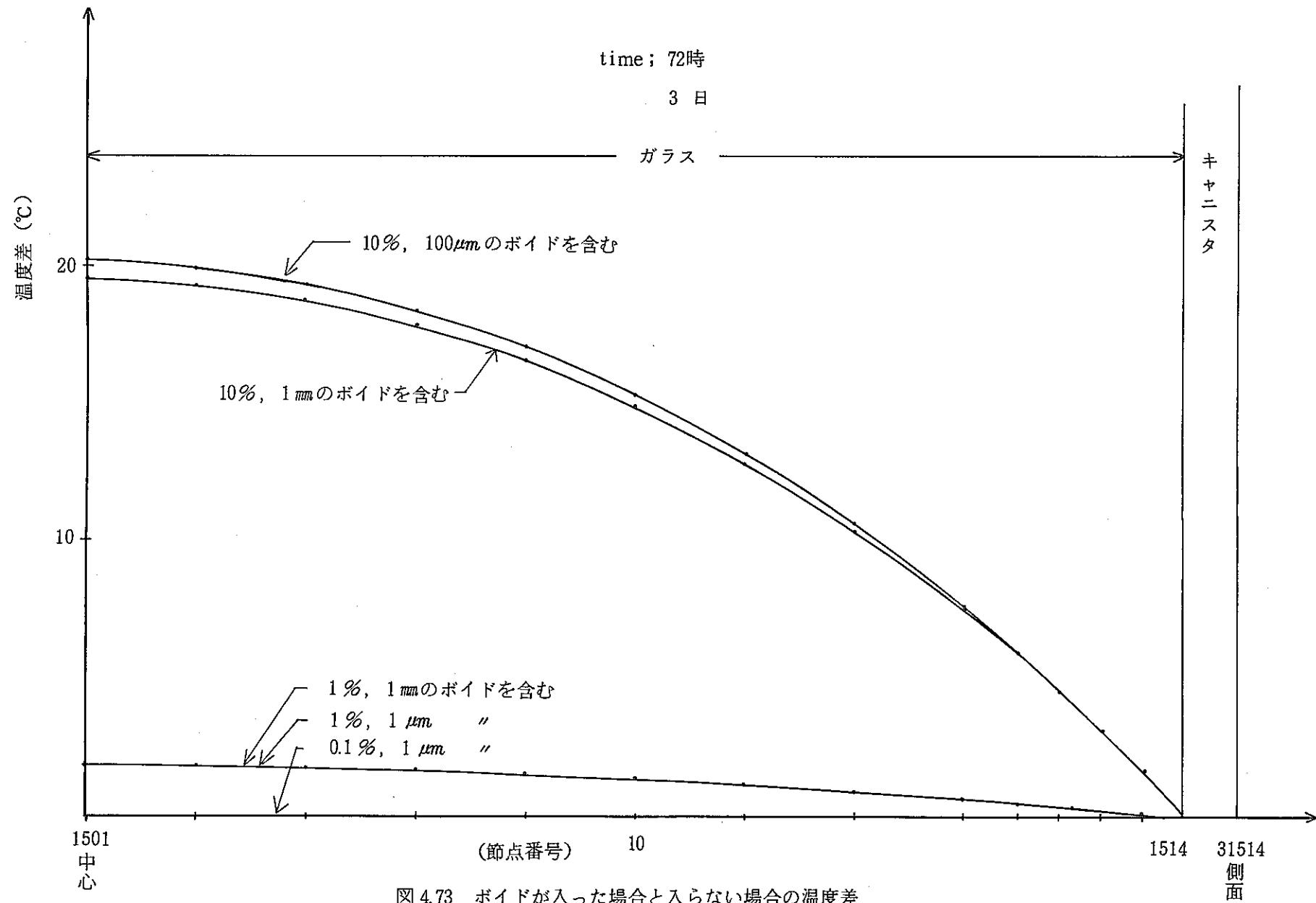


図 4.73 ボイドが入った場合と入らない場合の温度差

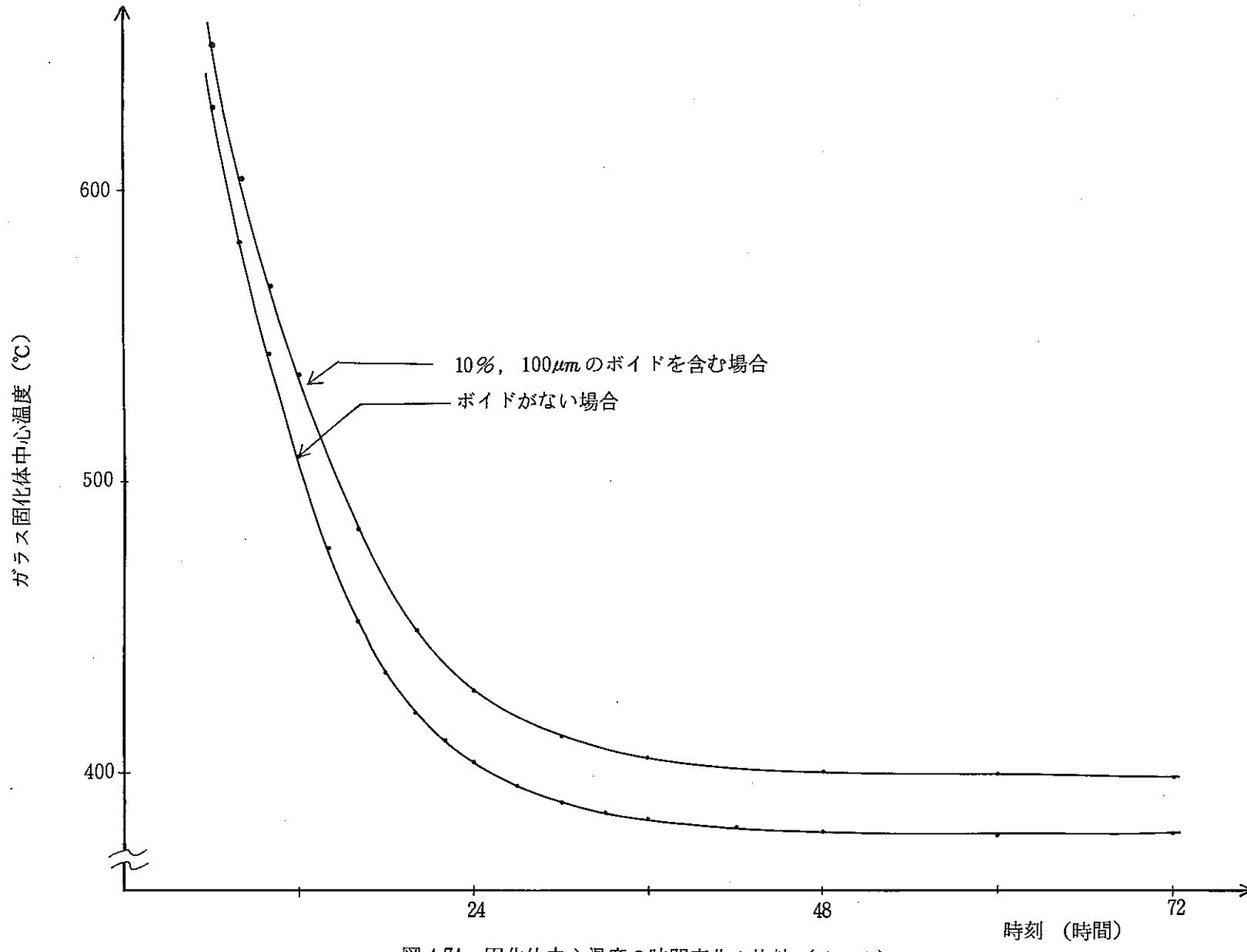
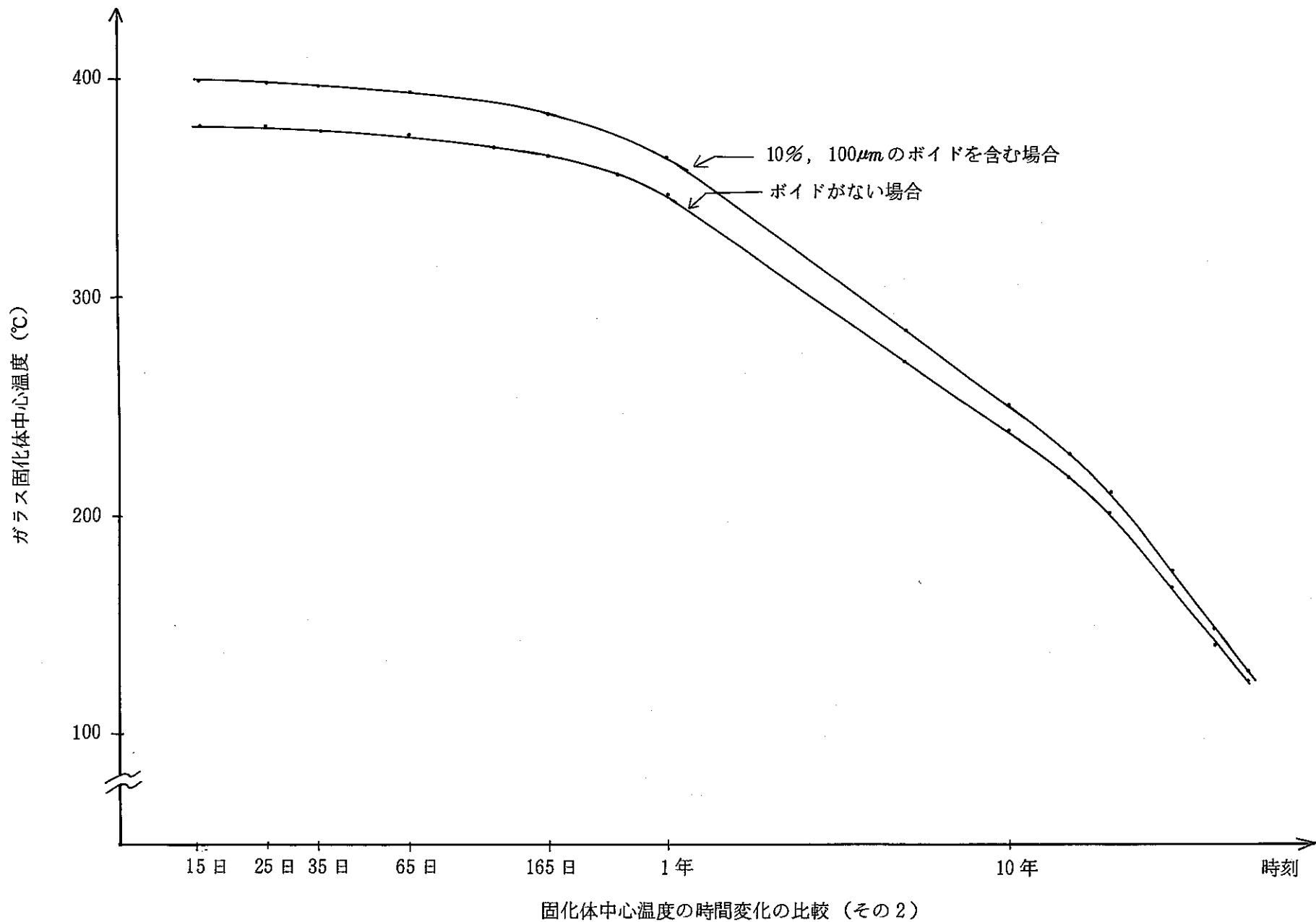


図 4.74 固化体中心温度の時間変化の比較 (その 1)



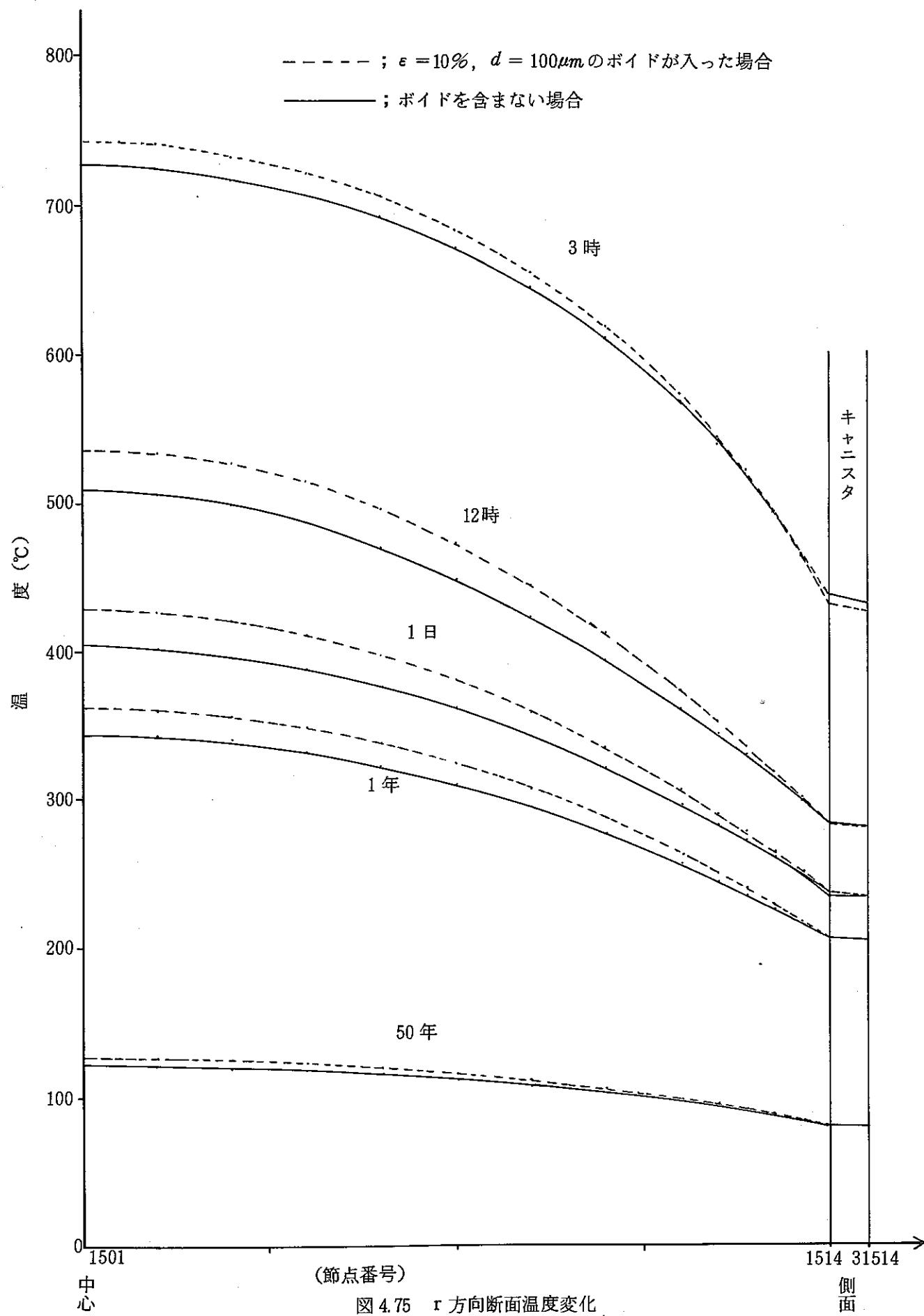
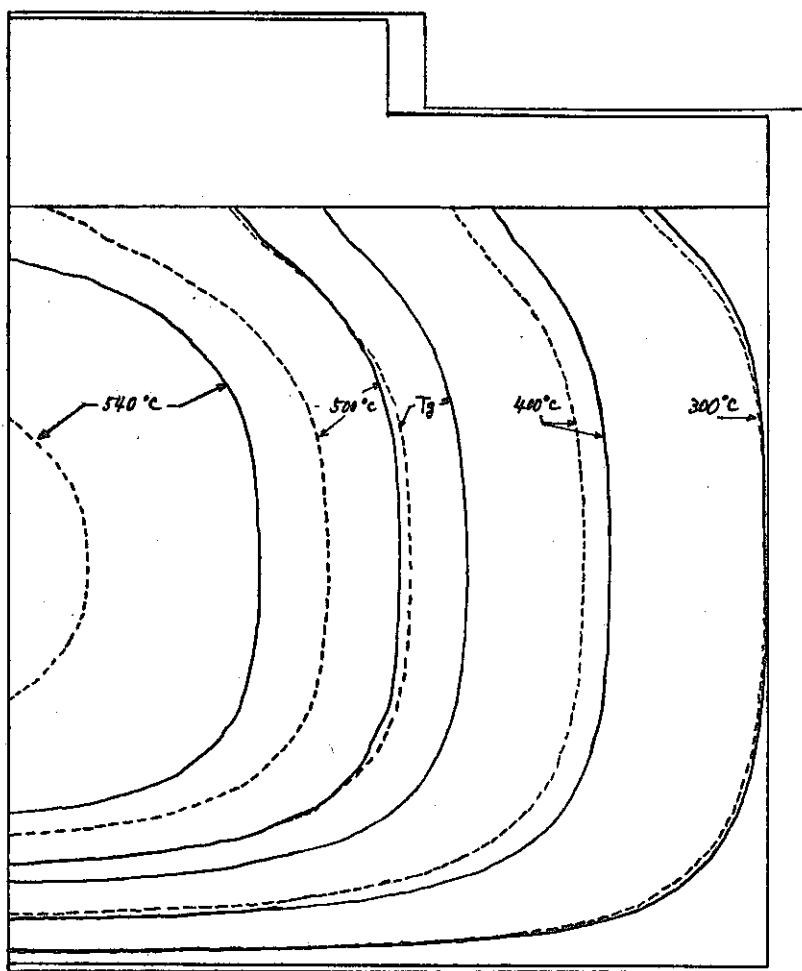


図 4.75  $r$  方向断面温度変化



- - - ; ボイドが入った場合  
 - - - ; ボイドなし  
 気孔率； 10%  
 気孔径；  $100\mu m$   
 時 刻； 10時  
 モデル； C-30  
 $T_g = 473^{\circ}C$

図 4.76 ボイドが入った場合の温度分布

#### 4.4 熱応力計算

ガラス固化体は冷却中、その温度分布にともなって応力が発生する。ここではガラス固化体の熱応力分布を調べた。

##### 4.4.1 計算条件

(1) 熱応力計算に必要な物性値は、ガラスとキャニスタについてそれぞれヤング率、ポアソン比、線膨張係数、転移点温度、初期歪0の温度、およびガラスの破壊強度である。それらの値については表4.10に示す。

##### (2) 計算ケース

熱応力計算は熱伝導計算における基本ケース2の温度分布を使って行なった。使用したモデルは、C-30である。熱応力計算において、ガラスとキャニスタとの接合部の状態については、両者が完全に結合しているのか、離れていて互いにすべるのか、あるいは部分的に結合しているのかは不明である。このため、完全に結合しているケースと、すべるケースについて熱応力計算を行なった。

すべるケースのモデル化は次のようにする。ガラスとキャニスタの接合部分において、節点を $a$ （ガラス）と $b$ （キャニスタ）とに分けて、両者をバネで結ぶ。バネは $r$ 方向と $z$ 方向に与えられるが、今回は $z$ 方向にのみすべり効果を入れるために、 $r$ 方向は節点共有として、 $z$ 方向にのみバネ定数0のバネを与えた。したがって応力計算の結果、ガラスとキャニスタが互いに $z$ 方向に自由にすべる事が可能である。

計算時刻は2つの場合とも24時間とし、図4.77にその時刻の温度分布図を示す。

##### 4.4.2 計算結果

熱応力計算結果として、ガラスとキャニスタが結合している場合の応力図を図4.78、図4.79、図4.80に示す。ここで応力は各要素に働く2つの主応力を示す。図4.79にみるように、ガラス固化体中央部では2つの主応力はそれぞれ $r$ 方向、 $z$ 方向を向いている。

またガラス固化体中央部の $r$ 方向断面での $r$ 方向、 $z$ 方向、 $\theta$ 方向の垂直応力 $\sigma_{rr}$ 、 $\sigma_{zz}$ 、 $\sigma_{\theta\theta}$ を、結合ケースとすべりケースについて図4.81に示す。図4.81にみるように、 $\sigma_{zz}$ は両ケース共に内側では圧縮で、外側にいくにしたがって圧縮が小さくなり、結合ケースではキャニスタとの結合部で引張応力となる。すべりのケースでは $\sigma_{zz}$ はガラスの中心から約15cmのところで引張応力となり、キャニスタとの接合部で大きな引張応力となる。この部分にクラックが入ることが考えられる。

結合ケースでは、すべりのケースに比べてキャニスタによってガラスが $z$ 方向に圧縮力をうける。このため結合ケースでの $\sigma_{zz}$ はすべりのケースの $\sigma_{zz}$ に比べて、全体的に圧縮力が大きい。しかしガラス固化体中心から外側に向けての $\sigma_{zz}$ の変動傾向は同じである。また $\sigma_{rr}$ 、 $\sigma_{\theta\theta}$ についても、中心から外側に向けての変動傾向は両ケースとも同じであるが、結合ケースの方が圧縮力が大きい。

このように結合ケースでは、すべりケースに比べて、ガラスはキャニスタによる $z$ 方向の圧縮により、ガラスの中心から側面まで全般的にしめつけられて、圧縮力が大きくなっている。

ガラス固化体の上部および下部の応力図（図4.78、図4.80参照）をみると、主応力は圧縮力であり、ガラスの角で大きな圧縮力になっている。またその方向はいずれも中心を向いている。これは次のように考えられる。ガラスおよびキャニスタの側面部は、上下の温度に比べて中心部の温度が高いため、外側に湾曲している。さらにキャニスタの熱膨張率はガラスのそれより大きいため、全体的にはガラスをおしつけるが、ガラスよりキャニスタの方がより湾曲しようとする。そのためガラスをおしつける力は、ガラスの上下の角に集中して、ガラスを中心に向っておし込む形となり、上記のような応力

が発生すると思われる。このことは、すべりのケースについてはもっと複雑であると思われる。

以上のように、ガラスとキャニスターの接合部の挙動は複雑であり、この取り扱いについては今後の課題である。

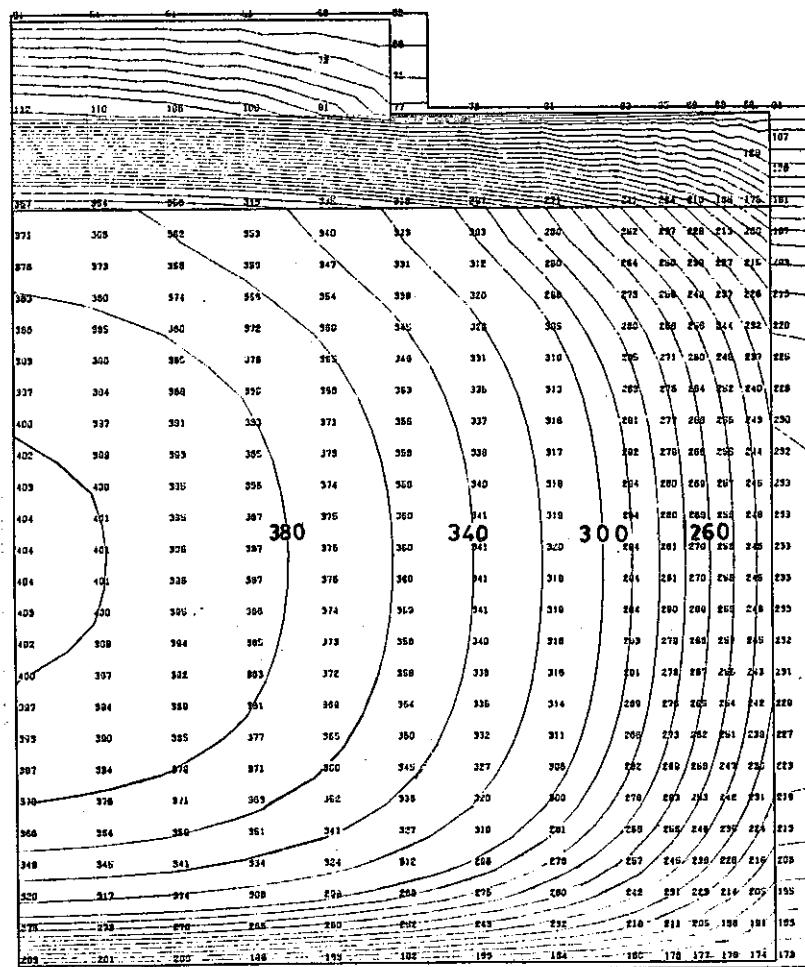


図 4.77 応力計算した時刻の温度

分布図, モデルC-30, 時刻24時

- ・縮尺；r, z 方向 1/1
- ・矢印は要素の重心に働く 2 つの主応力を示す。
- ↔は引張り応力を示し、その長さは応力の大きさ( $5.98 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$ が 2 cm に相当する)を示す。

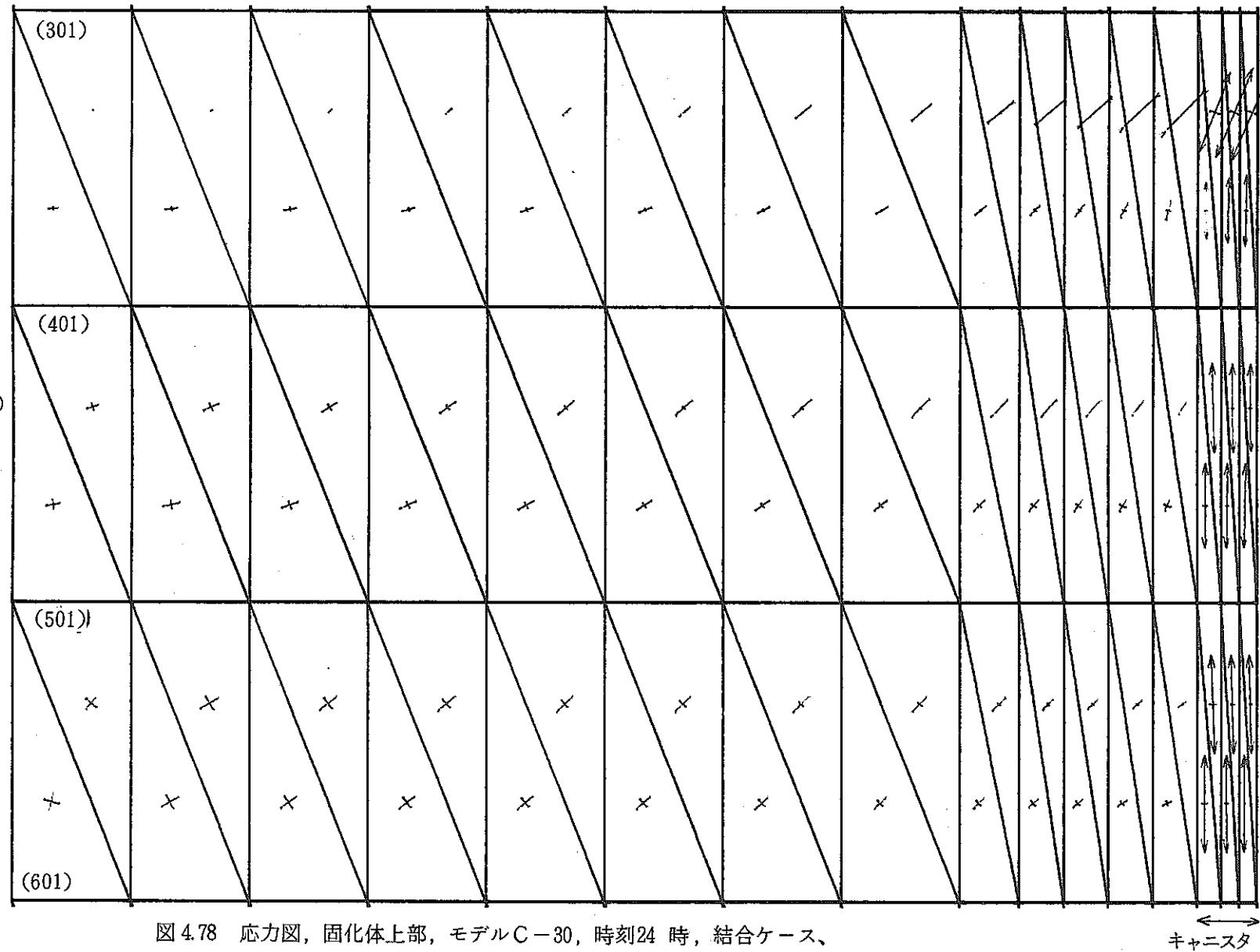
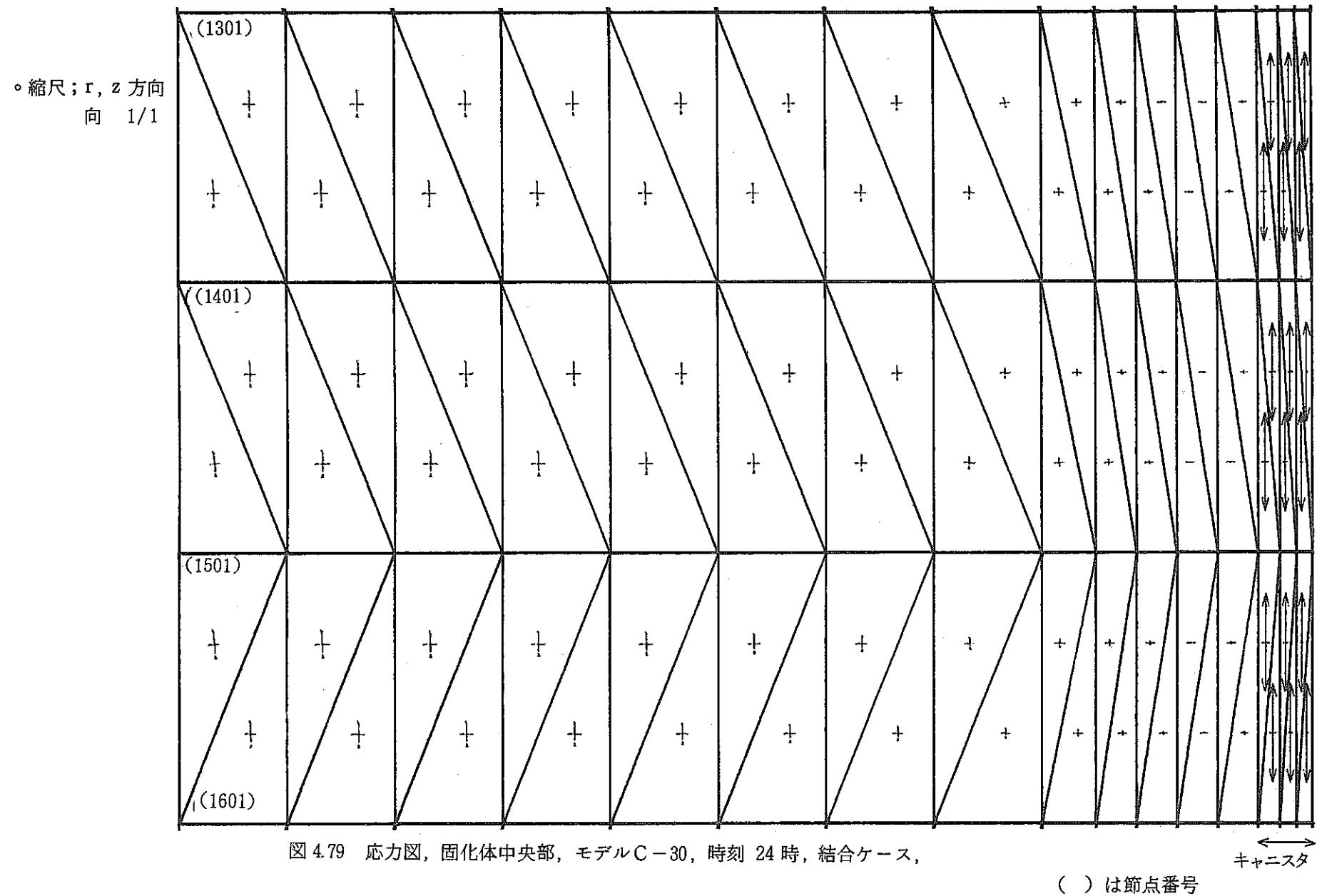


図 4.78 応力図、固化体上部、モデル C-30、時刻 24 時、結合ケース、

( ) は節点番号



・縮尺;  $r, z$  方  
向  $1/1$

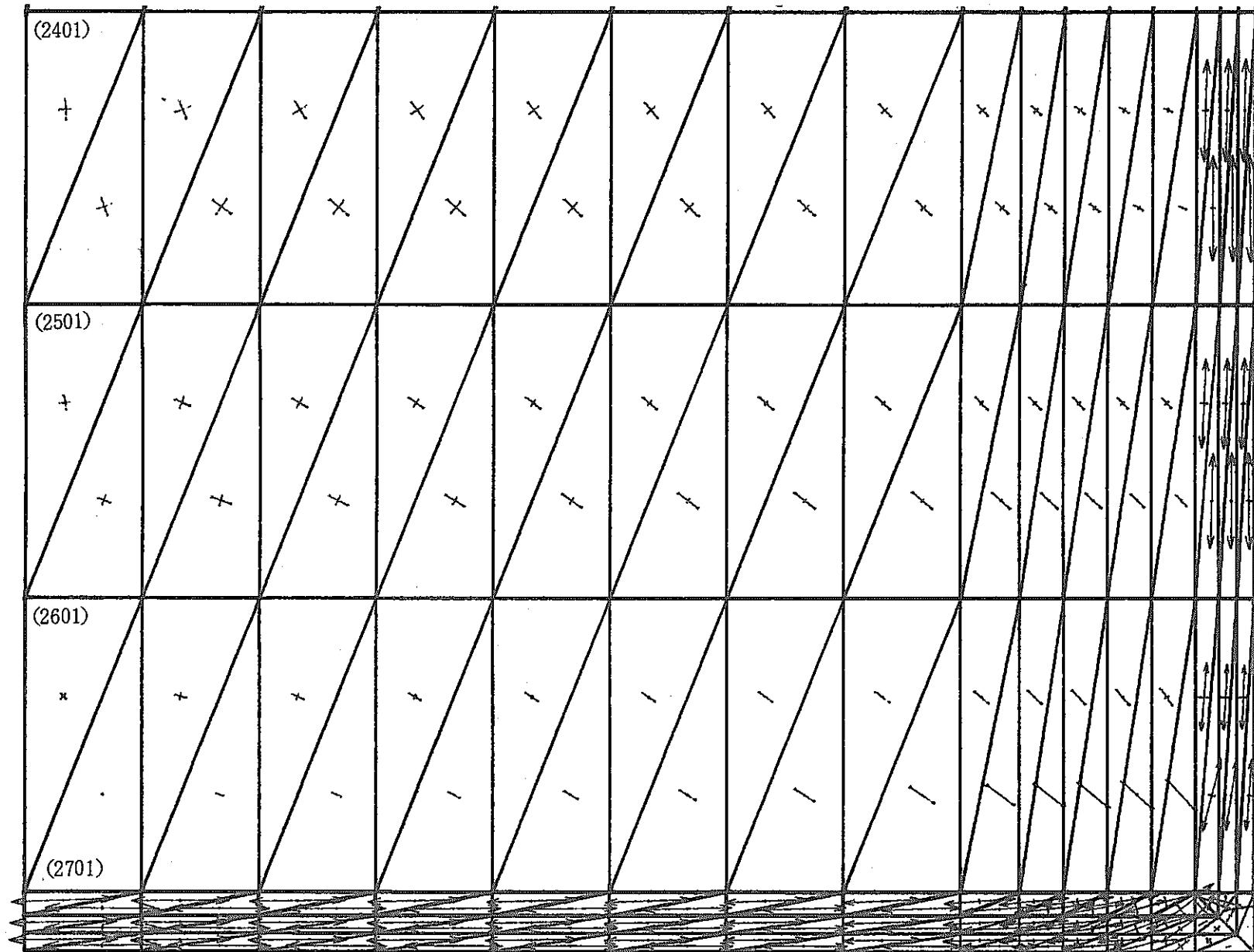


図 4.80 応力図, 固化体底部, モデル C-30, 時刻 24 時, 結合ケース,

( ) は節点番号

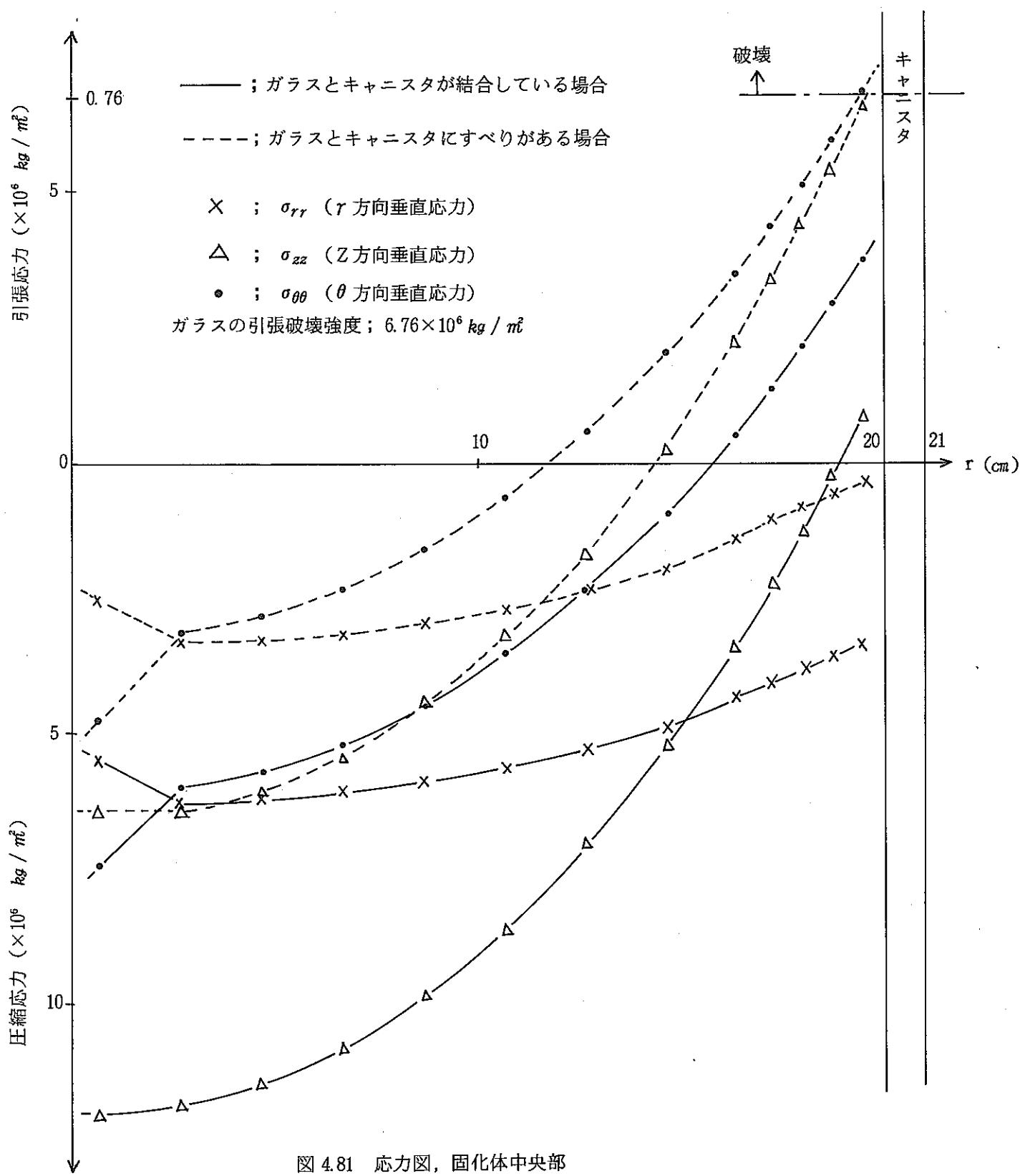


図 4.81 応力図、固化体中央部

## 5. まとめ

## 5. まとめ

### 5.1 結果の要約

#### (1) ガラス固化体の熱的挙動解析コード（2章）

ガラス固化体の熱的挙動における伝熱条件をみたす計算式を検討してモデル化を行ない熱的挙動解析コードを開発した。このコードはつきの3つのサブ・コードからなる。

発熱コード • 热伝導コード • 热応力コード

このコードの特徴はつきのとおりである。

① ガラス固化体の発熱計算から最終的な熱伝導計算まで連続的に行なえる一貫したシステムとなっている。

〔発熱コード〕

② ORIGEN コードを組み込み f.p. の崩壊計算が行なえ、高放射性廃棄物の発熱量および $\gamma$ 線スペクトルが求められる。

③  $\gamma$ 線の遮蔽計算を行なうことにより外部へ透過する $\gamma$ 線エネルギーを発熱量から除外している。

〔熱伝導コード〕

④ ガラス固化体材料の温度依存性および発熱量の時間変化に対処している。

⑤ 材料および境界条件の温度依存性に伴う熱伝導式の非線型に対しては反復計算を行ない処理をしている。

⑥ 有限要素法を用いているため、2次元要素と1次元要素との結合が容易に出来る。このため、1次元要素による輻射および対流の組み込みが容易に出来る。

〔熱応力コード〕

⑦ ガラス固化体材料のヤング率、ポアソン比、線膨張係数等の物性値は温度変化データを与えられる。

⑧ 離散化した熱応力式を解くときの大型行列の処理は直接解法のウェーブ・フロント法を用いるため計算速度が速い。

#### (2) ガラス固化体について（3章）

ガラスの物性値はその組成、温度および熱履歴によりかなり変動があり、特に高放射性廃棄物を構成する重金属元素の影響は大きい。ガラス物性値の既存文献による調査結果はまとめて表3.3（P. 参照）に示す。だが、これはあくまでも一つの目安で、実験による物性値があるときは、それを使用した。

#### (3) 試計算（4章）

〔発熱計算〕

ガラス固化体作成時の発熱量はA-30モデルでは、ガラス部分で4.8, 4.4 kcal/m<sup>3</sup>sec, キャニスター部分で4.6 kcal/m<sup>3</sup>•secである。C-30モデルではガラス部分で5.1, 4.6 kcal/m<sup>3</sup>•sec キャニスター部分で3.1 kcal/m<sup>3</sup>•secである。

ガラス固化体から外部へ透過する $\gamma$ 線エネルギーは、ガラス固化体作成時において、核種の崩壊エネルギーの14.8% (A-30), 13.7% (B-30), および9.5% (C-30) である。

### [熱伝導計算]

ガラス固化体の実験結果を参考にして、境界条件（輻射定数  $E_r = 2.0 \times 10^{-12}$ ）を設定して行なった。

計算開始後（ガラス注入後）2日間で初期温度の影響がほとんどなくなり、C-30では2日後に中心で約380°C、側面中央部で約220°Cとなり、50年後には中心で123°C、側面中央部で83°Cとなる（図4.34～4.39）。

C-30で輻射定数を変えると（ $E_r = 9.49 \times 10^{-12}$ ），50年後では、中心で104°C、側面中央部で63°Cであり、 $E_r = 2.0 \times 10^{-12}$ の場合より約20°C低下する（図4.46）。

冷却材が水の場合は、C-30で50年後には中心で67°C、側面中央部で24°Cとなる（図4.55）。

ガラス固化体中央部に模擬的に熱流束を断つように30cmクラックを入れた場合は、クラック内の熱伝達を輻射のみとするとクラック付近で約23°C（3日～1年）と一割近く上昇するが、クラック内の気体（空気を想定した）の熱伝導を加味すると2.4°C（3日～1年）と温度変化は小さい（図4.68）。このように、断片的なクラックではその影響はそれほど大きくないが、ガラス固化体を上から下まで走る連続的なクラックについては今後の課題である。

ガラス固化体中のボイドによる温度への影響は、木村の式を用いて熱伝導係数を一様に変化させて調べた。熱伝導係数は、気孔率が0.1%，1%ではほとんど変わらないが、10%では1割強減少する。この場合、中心温度が約20°C上昇（3日～1年）するが側面温度は変わらない（図4.75）。

### [熱応力計算]

熱応力計算はC-30モデルで1日目の温度分布を用いてガラスとキャニスターが結合している場合とz方向にすべる場合について行なった。結合している場合はすべりの場合よりも全体的に圧縮力が大きくなっている（図4.81）。

## 5.2 今後の展望の検討課題

今年度（昭和53年度）は高放射性核種による発熱から最終的な熱伝導までのガラス固化体の熱的挙動を解析する一貫したコード・システムを作成することを目標に開発研究を進めて来た。一貫したコード・システムは完成し、これによる試計算を進めるに従って問題点が明らかになって来た。

以下に本年度の研究で残った問題点および今後の研究の展望を箇条書きにする。

### [発熱コード]

- 発熱計算は原子炉の燃焼計算からでなく、ガラス固化体作成時のWasteに含まれる放射性核種の崩壊計算から始められるようにする。
- キャニスター外部に逃げるγ線のエネルギー・スペクトルを求める。

### [熱伝導コード]

- 現在、くり返し計算で対処している物性値および境界条件の非線型性の収束方法について改良を行なう。
- 現在は発熱量を線型補間しているが、発熱量の減少と対応した対数補間を行なうように改良する。
- コードで使用する物性値、境界条件、ボイドの含有率、およびクラックの発生場所と規模をえて検討する感度解析を行なう。このとき、感度解析の評価基準は実験におくべきであり、そのため実験と対応して感度解析を進める必要がある。

〔熱応力コード〕

- ガラス固化体の熱応力はガラスが溶融から固化するまでの段階の熱履歴に大きく関連している。このため、弾性計算による静的解析では対処出来ないため、温度分布の履歴を追うモデルに改良する必要がある。この場合、非線型計算による問題が出てくる可能性が考えられる。
- キャニスタのメタル部分はたいへん薄いため計算費用と計算精度の上で限界に来ており、普通の三角形要素より精度の高い高次要素を導入して改良する必要がある。
- ガラスとキャニスタの接合部分についていろいろと不明な点が多いため検討する必要がある。

### おわりに

本年度の開発目標であるガラス固化体の熱的挙動解析コードの一貫したシステムを作成した。また、コードで使用するガラス固化体の物性値および境界条件データについて収集・整理した。開発したコードを用いて、3種類〔A（半径15cm, キャニスタ厚さ0.4cm), B（半径15cm, キャニスタ厚さ0.6cm), C（半径20cm, キャニスタ厚さ1.0cm)〕のガラス固化体について、長期に亘る温度変化、クラックまたはボイドによる温度への影響をみる試計算を行ない初期の目的を達した。

なお、本研究の作業を進めるにあたり、多大なご指導を賜わりました動力炉・核燃料開発事業団東海事業所 角田、永木、荻野、佐々木、虎田、小原光学硝子製造所 小森田の諸氏に、ここに厚く感謝する次第であります。

## REFERENCES

### 2 章

- (1) M. J. Bell  
ORIGEN—The ORNL Isotope Generation and Depletion Code  
ORNL— 4628
- (2) R. L. Engel etc.  
ISOSHLD—A Computer Code for General Purpose Isotope Shielding Analysis  
BNWL— 236
- (3) S. S. Clark and J. F. Petersen.  
TAC 2D A General Purpose Two-Dimensional Heat Transfer Computer  
Code, Mathematical Formulations and Programmer's Guide  
AEC Research and Development Report GA- 9262
- (4) Richard H. MacNeal  
The NASTRAN Theoretical Manual (Level 15.0)  
NASA SP 221(01) Dec. 1972
- (5) W. D. Collier  
HEATRAN, A Finite Element Code for Heat Transfer Problems  
TRG—Report—1807 (R) 1969
- (6) 藤野 勉  
熱伝導と熱応力  
コンピューターによる構造工学講座II—4—B 日本鋼構造協会編 pp. 227~230
- (7) G. Comini, S. Del Guide, et al.  
Finite Element Solution of Nonlinear Heat Conduction Problems with Special  
Reference to Phase Change  
Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 8, 1974
- (8) 内田秀雄  
大学演習 伝熱工学  
裳華房 PP. 326~370
- (9) 信原, 坂井, 吉村  
有限要素法のプログラムデザイン  
コンピューターによる構造工学講座II—2—B 日本鋼構造協会編 PP. 133~138
- (10) 長渡甲太郎, 多喜川昇  
有限要素法による非線型熱伝導プログラム  
FAPIG № 86 1977-8
- (11) O. C. Zienkiewicz  
The Finite Element Method In Engineering Science  
McGraw-Hill 1971

- (12) S. Timosenko and J. N. Goodier  
Theory of Elasticity  
2nd ed., Mc Graw Hill 1951
- (13) Y. C. ファン, 大橋義夫・村上澄男・神谷紀生共訳  
固体の力学 / 理論  
培風館

### 3 章

- (1) 寺井良平, 原 重雄  
放射性高レベル廃液固化用ガラス材料の化学的耐久性 (第一報)  
大工試季報 v, 25, n. 3
- (2) 井本貴道, 寺井良平  
放射性高レベル廃液固化用ガラス材料の化学的耐久性 (第二報)  
大工試季報 v, 27, n. 2
- (3) 寺井良平, 上阪英治  
高レベル放射性廃液処理用低融ホウケイ酸塩ガラスの高温における揮発  
UDC 621.039.73, 666.11.07
- (4) 寺井良平, 江口清久  
高レベル廃液固化処理用ガラスの性能比較試験 (I)  
日本原子力学会 昭和52年秋の分科会予稿集 (第Ⅱ分冊) P.128
- (5) 馬場恒孝, 田代晋吾  
高レベル廃棄物ガラス固化体の安全性試験電子線照射による耐放射線性試験  
日本原子力会 昭和52年秋の分科会予稿集 (第Ⅱ分冊) P.129
- (6) J. E. Mendel etc.  
Annual report on the characteristics of high-level waste glasses  
BNWL-2252 UC-70
- (7) K. Scheffler, U. Riege  
Investigations on the long-term radiation stability of borosilicate glasses against  
Alpha-Emitters  
Kernforschungszentrum Karlsruhe KFK 2422 PWA 108176
- (8) J. L. McElroy  
The expected behavior of HLW in storage  
BNWL-SA-5581
- (9) J. E. Mendel etc.  
Thermal and radiation effects on borosilicate glasses  
BNWL-SA-5534

10. F.P. Roberts etc.

Radiation effects in solidified high level waste part I. Stored energy  
BNWL - 1944

(11) 寺井良平, 堀 誠克

レーザー・フラッシュ法による硼珪酸塩ガラスの熱伝導率の測定  
窯業協会誌 85(3) 1977 (大工試)

(12) 成瀬 省

ガラス工学  
共立出版株式会社

(13) W. Davis Jr etc.

Maximum temperature rise in cylinder containing intermediate-level and high  
level solidified radioactive wastes

ORNL - 4361

(14) W. J. Mecham etc.

An. analysis of factors influencing the reliability of retrievable storage canisters  
for containment of solid

ANL - 76 - 82

(15) A.K. De' B. Lusckscheiter etc.

Fission products in glasses part II. Development of glass ceramics  
HMI - B 218

(16) 作花済夫 他

ガラスハンドブック  
朝倉書店

(17) エム・ア・マトヴェエフ 他

ガラス化工便覧, 計算とデーター  
日ソ通信社

(18) 角田直己

模擬廃液による実規模ガラス固化  
原子力工業 Vol. 24 No. 7 p. 73

#### 4 章

##### (1) G. Shielding Materials

Reactor Hand Book 2ed VoL I. INTERSCIENCE

##### (2) Shielding

Reactor Hand Book 2ed VoL III PARTB INTERSCIENCE

##### (3) 内田秀雄

大学演習 伝熱工学

裳華房

##### (4) 杉山幸男・長坂克巳

断熱工学

楳書店

##### (5) R.L. Engel etc.

ISOSHLD-A Computer code for general purpose isotope shielding analysis

BNWL-236

##### (6) 木村 允

気泡を含む物質の熱伝導度

化学工学 VoL 22, № 6, P. 384

##### (7) H.W. Russell

Principle of heat flow in porous insulators

J Am. Ceram. Soc. Vol 18, № 1 P.1

##### (8) 角田直巳, 佐々木憲明

高放射性廃液固化研究報告 (IV)

N 841-77-39 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所

##### (9) 角田直巳

高レベル放射性廃液の固化

セラミック Vol. 12, № 11 ( 1977 ), P. 913

## 付 錄

熱伝導方程式の有限要素法による離散化

熱伝導方程式の離散化を有限要素法（FEM）を用いて行なう。

### (1) 2次元の式の離散式

2.2.2より軸対称熱伝導方程式はつきのとおりである。

$$\rho c r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( K_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r F \quad (A \cdot 1)$$

上式で熱容量、熱伝導係数および発熱量をつきのようにおきなおす。

$$\rho c r = C_\rho$$

$$K_r r = \lambda_r$$

$$K_z r = \lambda_z$$

$$r F = G$$

このようにおくと基礎式は次式となり、この式で離散化を行なう。

$$C_\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G \quad (A \cdot 2)$$

(A・2) 式を Tensor 記号を用いて記す。

$$C_\rho \dot{T} = (\lambda_i T_{,i})_{,i} + G \quad (A \cdot 3)$$

ここで、 $i$  は  $r, z$  を表わす。同一項に同じインデックスが表われるときには、そのインデックスについて和をとるとする（総和規約）。カンマのあととのインデックスは微分をあらわす。

たとえば

$$(\lambda_i T_{,i})_{,i} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

となる。

(A・3) 式を FEM で離散化するときの変分原理を導出する。FEM の離散化において、ガラーキン法を使用するならば、変分原理も汎関数の概念も必要としない。最終的に得られる解式は、変分原理から導出されるものも、ガラーキン法によるものも、まったく同じものとなる。

(A・3) 式に  $T$  の任意の変分  $T^*$  をかけて領域  $V$  について積分する。

$$\int_V C_\rho \dot{T} T^* dV = \int_V (\lambda_i T_{,i})_{,i} T^* dV + \int_V GT^* dV$$

上式の右辺第1項を部分積分するとつきの式になる。

$$\int_V C_\rho \dot{T} T^* dV + \int_V \lambda_i T_{,i} T_{,i} dV = \int_s T^* \lambda_i T_{,i} n_i ds + \int_V T^* G dV \quad (A \cdot 4)$$

ここで  $\int_s (\dots) ds$  は領域  $V$  の境界  $s$  における周辺積分である。 $n_i$  は  $s$  上の単位法線ベクトル  $i$  成分である。

(A・4) 式が変分原理であり、これは力学における仮想仕事の原理に対応する式である。

1つの要素(図A・1)に着目して、形状関数 $\Phi_\alpha$  ( $\alpha = a, b, c$ )を次式で定義する。

$$\begin{aligned}\Phi_\alpha &= (\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c) \\ &= (1, r, z) \begin{pmatrix} 1 & r_a & z_a \\ 1 & r_b & z_b \\ 1 & r_c & z_c \end{pmatrix}^{-1}\end{aligned}\quad (A \cdot 5)$$

$\alpha$ は $a, b, c$  node を表わす。

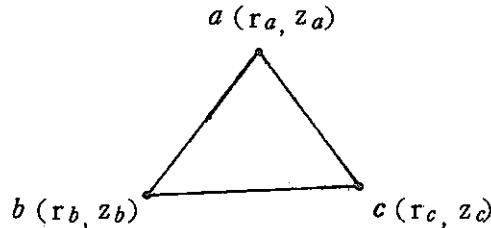


図 A・1

$T^*$ と $T$ を $\Phi_\alpha$ により

$$T^* = \sum_{\alpha=a, b, c} \Phi_\alpha T_\alpha^* = \Phi_\alpha T_\alpha^* \quad (\text{総和規約}) \quad (A \cdot 6)$$

$$T = \sum_{\beta=a, b, c} \Phi_\beta T_\beta = \Phi_\beta T_\beta \quad (\text{"")}) \quad (A \cdot 7)$$

と展開する。ここでは $T_\alpha^*$ は $\alpha$  node における $T^*$ の値である。 $T_\beta$ も同様である。

(A・4) 式を図A・1の要素に適用し (A・6), (A・7) 式を代入する。

ここで $T_\alpha^*$ が任意の値をとることを考慮すると、次の解式が得られる。

$$\begin{aligned}& \left[ \int_v C_\rho \Phi_\alpha \Phi_\beta dV \right] \dot{T}_\beta + \left[ \int_v \lambda_i \Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta,i} dV \right] T_\beta \\ &= \int_v \Phi_\alpha G dV + \int_s \Phi_\alpha \lambda_i T_i n_i dS\end{aligned}\quad (A \cdot 8)$$

上式において $\dot{T}_\beta = \partial T_\beta / \partial t$ を離散化すれば、最終的な解式を得る。 $\dot{T}_\beta$ の離散化で最も簡単なものは、後退差分を使用する方法である。ほかにも、 $\dot{T}_\beta$ が $t$ の線形関数で与えられるとして離散化する方法、また、Predictor-Corrector 法など、実際に多くの方法がある。

本コードにおいてこの時間項の取り扱いは次のとおりとする。

$$\dot{T}_\beta = (T_\beta^{n+1} - T_\beta^n) / \Delta t \quad (A \cdot 9)$$

$$T_\beta = \theta T_\beta^{n+1} + (1-\theta) T_\beta^n \quad 0 \leq \theta \leq 1 \quad (A \cdot 10)$$

(A・10) 式は (A・8) 式の $T_\beta$ を右辺の形のものに入れかえることを意味し (A・8) 式は次式となる。

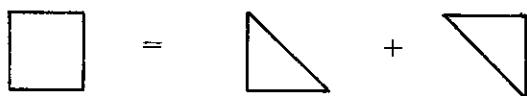
$$\begin{aligned}& \frac{1}{\Delta t} \left[ \int_v C_\rho \Phi_\alpha \Phi_\beta dV \right] T_\beta^{n+1} + \theta \left[ \int_v \lambda_i \Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta,i} dV \right] T_\beta^{n+1} \\ &= \int_v \Phi_\alpha G dV + (\theta-1) \left[ \int_v \lambda_i \Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta,i} dV \right] T_\beta^n \\ &+ \int_s \Phi_\alpha \lambda_i T_i n_i dS + \frac{1}{\Delta t} \left[ \int_v C_\rho \Phi_\alpha \Phi_\beta dV \right] T_\beta^n\end{aligned}\quad (A \cdot 11)$$

こうすると、 $\theta = 1$  のとき完全後退差分、 $\theta = 0$  のとき完全前進差分となる。 $\theta = \frac{1}{2}$  のときは、Crank-Nicolson 法である。この様に  $\theta$  の値（入力データ）で方法を使いわけることが出来る。

(A・11) 式は 1 つの要素について作成された式である。これを全ての要素について作成し、要素合成をおこなうことにより、解析領域全体を支配する全体方程式が作成される。

この全体方程式を解くことにより、全 node における  $T_\beta^{n+1}$  が計算される。

4 角要素は、次のように作成する。



## (2) 一次元の式の離散化

節 2.2.2 の (2.14) 式の離散化については、まったく同じように行ななえれば良い。

任意方向の 1 次元の式はつぎのとおりである。

$$A\rho c r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \ell} \left( A K_\ell r \frac{\partial T}{\partial \ell} \right) + r A F \quad (A \cdot 12)$$

まず、つぎのようにおきなおす。

$$A\rho c r = C_\rho$$

$$A K_\ell r = \lambda$$

$$r A F = G$$

これを基礎式に代入すると、つぎの式になる。

$$C_\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \ell} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \ell} \right) + G \quad (A \cdot 13)$$

上式に  $T$  の変分  $T^*$  をかけて積分する。

$$\int_0^L C_\rho \dot{T} T^* d\ell = \int_0^L \frac{\partial}{\partial \ell} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \ell} \right) T^* d\ell + \int_0^L G T^* d\ell$$

ここで、 $L$  は要素の長さである。

右辺第二項を部分積分するとつぎの式になる。

$$\begin{aligned} & \int_0^L C_\rho \dot{T} T^* d\ell + \int_0^L \lambda \frac{\partial T}{\partial \ell} \cdot \frac{\partial T^*}{\partial \ell} d\ell \\ &= \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial \ell} T^* \right]_0^L + \int_0^L G T^* d\ell \end{aligned} \quad (A \cdot 14)$$

1 つの要素に着目し、形状関数を次式で定義する。

$$\Phi_\alpha = (1, \ell) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & L \end{pmatrix}^{-1} \quad a \text{ node は } \ell = 0, \quad b \text{ node は } \ell = L \text{ をとる。}$$

ここで、 $\alpha$  は、 $a, b$  を表わす。

$T^*$  と  $T$  を  $T^* = \sum_{\alpha=a, b} \Phi_\alpha T_\alpha^*$ ,  $T = \sum_{\beta=a, b} \Phi_\beta T_\beta$  と展開し、(A・14) に代入する。このとき  $T_\alpha^*$  が任意であることより、次式を得る。

$$\left[ \int_0^L C_\rho \phi_\alpha \phi_\beta d\ell \right] \dot{T}_\beta + \left[ \int_0^L \lambda \phi_{\alpha,\ell} \phi_{\beta,\ell} d\ell \right] T_\beta \\ = \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial \ell} \phi_\alpha \right]_0^L + \left[ \int_0^L G \phi_\alpha d\ell \right] \quad (A \cdot 15)$$

上式において、 $\dot{T}_\beta$ を(A・9)のように展開し、 $T_\beta$ を(A・10)のように取り扱えば(A・11)に対応する式を得る。

節2・2・2のr方向一次元の式(2・12)、z方向一次元の式(2・13)についてもまったく同様である。

### (3) 境界条件の処理

境界条件の温度固定以外の条件式はつきのとおりである。

$$q_{ab} = \widehat{T}_n \quad on \quad S_2 \quad (A \cdot 16)$$

$$q_{ab} = r E_c (T - \widehat{T}_o) + r E_n (T - \widehat{T}_o)^{1+h} + r E_r (T^4 - \widehat{T}_o^4) \\ on \quad S_3, \quad (A \cdot 17)$$

ここで(A・17)式の各項をつきのようにおきなおす。

$$e_r = E_r \times \frac{T^4 - \widehat{T}_o^4}{T - \widehat{T}_o}$$

$$e_n = E_n \times (T - \widehat{T}_o)^h$$

$$e_c = E_c + e_n + e_r$$

このようにおくと(A・17)式はつきの式となる。

$$q_{ab} = r e_c (T - \widehat{T}_o)$$

境界条件の処理について述べる。上式を(A・11)式の $\int \phi_\alpha \lambda_i T_{i,i} n_i ds$ につきの式を代入することにより処理される。

$$\lambda_i T_{i,i} n_i = \widehat{T}_n, \quad \lambda_i T_{i,i} n_i = r e_c (T - \widehat{T}_o)$$

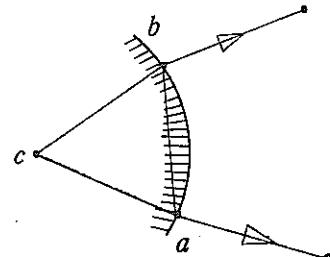
このとき輻射の項は、つきの式になる。

$$Q_r \equiv \int_s \phi_\alpha r e_r (T - \widehat{T}_o) ds$$

三角形a b c要素が、右図のようになっているとき、この式の積分は、ab, bc, caの周辺になるが他の要素との合成を行なうとbc, ca, 上で、零になるので積分はab上に限定してよい。また、 $a=c$ のときは、ab上で $\phi_c=0$ となるので $\alpha$ はaとbに限ってよい。

rをa, b節点の $r_a, r_b$ の平均rでおきかえ $e_r$ を何らかの方法で評価し、要素内一定として

$$T = \phi_a T_a + \phi_b T_b = \phi_\beta T_\beta \text{ とおけば、上式はつきの式となる。}$$



$$\begin{aligned} Q_r &= \int_s \Phi_\alpha \bar{e}_r (\Phi_\beta T_\beta - \widehat{T}_o) ds \\ &= \bar{e}_r \left\{ \left[ \int_s \Phi_\alpha \Phi_\beta ds \right] T_\beta - \left[ \int_s \Phi_\alpha \widehat{T}_o ds \right] \right\} \end{aligned} \quad (A \cdot 18)$$

この式の  $\alpha, \beta$  は  $a, b$  ( $c$  は含まない) である。上記の (A · 18) 式の  $T_\beta$  を  $(n+1)$  ステップの値  $T_\beta^{n+1}$  とすれば (A · 11) 式の左辺の  $T_\beta^{n+1}$  と同格にあつかわなければならない。したがって (A · 18) 式の  $T_\beta$  は (A · 11) 式においては左辺に移項して取り扱う。

$e_r$  は、その内部に温度変数を含んでいるから、本来は積分の外へ出せないし、さらに  $T$  についての非線形方程式である。

$$e_r = E_r \times (T + \widehat{T}_o) (T^2 - \widehat{T}_o^2) \quad (A \cdot 19)$$

この  $e_r$  の評価はつぎのように行なう。(A · 19) 式の  $T$  を時刻  $n$  ステップの  $T^n$  として、各節点で評価する。すなわち、 $a$  節点ならば  $T_a^n$  により  $e_r$  は次式のようになる。

$$e_r = E_r \times ((T_a^n) + \widehat{T}_o) ((T_a^n)^2 - \widehat{T}_o^2)$$

このようにして非線形方程式を線型化する。

この他の境界条件(例えば  $e_n$  など) も同様に扱える。

以上のように非線形方程式を線型化して行なう誤差を修正するため反復計算を行なう。

(節 2.2.2 (3) 参照)