

本資料は 01年 6月 20日付けで登録区分、  
変更する。

[技術情報室]

# 高レベル廃棄物の貯蔵時における 伝熱流動解析手法の開発〔Ⅲ〕

## 概 要 報 告 書

(昭和 58 年度)

1984年10月

(株) 芙蓉情報センター

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに

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)



## 高レベル廃棄物の貯蔵時における伝熱流動解析手法の開発〔Ⅲ〕\*

大島 務\*\* 石井 義兼\*\*  
小玉 祥生\*\* 成沢 知子\*\*

### 要 旨

本開発業務は、高レベル廃棄物の貯蔵時における冷却特性を把握するための伝熱特性解析手法を開発する事である。本作業は昭和56年度に着手した。昭和56年度は、現象の把握と基礎モデルを作成した。昭和57年度は分岐合流圧損係数等の諸係数、諸式について検討し冷却システム試験データと比較した。

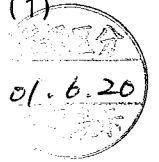
本年度は、定常時、過渡時、閉サイクル時、保管庫収納時について、本手法による計算結果と冷却システム試験データと比較検討した。この結果、試験結果とよい一致を得て、本解析手法の妥当性が示された。

次に本解析手法を用いて、実機保管庫について、プレナム高さ、ピット配列、定常時、キャニスター収納パターン、異常時と再通風時についての解析を行った。定常時については、発熱量と風量を与えたときに各部の温度を示す簡便式を得た。これにより高レベル廃棄物の保管時の熱的特性データを得た。さらに廃熱有効利用時の解析と長期貯蔵時の解析を行った。新形状ガラス固化体について崩壊計算、発熱計算および、ガラス注入時から保管時、貯蔵時の伝熱計算を行った。

---

\* 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。

\*\* 科学技術部



## The Development of the Fluid Heat Transfer Analysis Method of High Level Radioactive Wastes in Storage [III]\*

Tsutomu Oshima\*\*, Yoshikane Ishii\*\*,  
Akio Kodama\*\*, and Tomoko Narusawa\*\*

### Abstract

Our research, which started in 1981, aimed at developing the fluid heat transfer analysis method to grasp the cooling characteristics of the high level radioactive wastes in Storage. In 1981, our efforts were centered on investigating the phenomena and developing a practical engineering model. In 1982, analysis and review were made of the pressure loss coefficients and equations by comparing with the Cooling System Test data.

This year, the computation results of the developed method were compared with the Cooling System Test data in stationary and transient state, closed cycle and in containing in a Custody facility. Good agreement with the data shows the validity of present analysis method.

Using the present analysis method, the analysis were made of Plenum high, Pit configuration, Stationary State, Canister containment pattern, abnormalous state and re-ventilation of the Custody facility. The handy formulas which show the temperature of the parts in giving the heat generation rate and the ventilation amount, are obtained. These analyses give the heat characteristic data in the Custody of high level radioactive waste. The further analysis of the utilization of waste heat and long term storage are performed. The decay calculation, the heat generation calculation, and the heat transfer calculation of Custody and Storage from pouring glass of New Shaped vitrified high level liquid wastes are made.

---

\*Work performed by Fuyo Data Processing & Systems Development Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

\*\*Scientific Application Division.

## 1. まえがき

使用済燃料の再処理工程より発生する高レベル廃液は、包蔵性にすぐれ管理が容易なガラス固化体にし、貯蔵される。ガラス固化体の貯蔵にあたっては、ガラス固化体の発熱にもとづく伝熱流動等の解析手法を確立する必要がある。

本開発研究の目的は、高レベル廃棄物の貯蔵時における冷却特性を把握するための伝熱流動解析手法を開発する事である。本研究開発業務は、昭和56年度に着手し、昨年度までの実施によって、高レベル廃棄物の貯蔵時伝熱流動解析コードを作成した。また冷却システム試験データとの突き合わせにより、その検証を行ってきた。

本年度は、はじめに解析コードの評価、検討を行う。昨年度までに開発した解析コードを改良し、冷却システム試験との比較により伝熱式等について検討する。比較項目としては、定常解析、過渡特性解析、閉サイクル時の解析、保管庫の解析である。これらにより解析コードの評価・検討を行う。

次に解析コードを用いて保管庫の伝熱特性解析を行う。解析項目としては、プレナム高さの解析、ピット配列の解析、定常状態の解析、キャニスター収納パターンの解析、異常時と再通風時の解析である。

また、解析コードを用いて廃熱有効利用時の解析と岩盤内長期貯蔵施設の伝熱特性解析を行う。さらに新形状ガラス固化体について、発熱計算を行い、ガラス注入時から貯蔵時までの一連の熱的計算を行う。このときのデータは東海事業所の計算機へ移管する。

## 2. 解析コードの検討

ガラス固化体の貯蔵時伝熱流動計算コード（FLOSTコード）を用いて冷却システム試験と同条件の計算を行い、計算結果と試験データを比較して、コードの性能を検討する。検討項目としては、定常解析、過渡解析、閉サイクル時の解析、保管庫用試験の解析である。またこれに伴いコードの機能を改良した。

### 2.1 解析コードの改良

ガラス固化体の貯蔵時伝熱流動計算コード（FLOSTコード）について、いくつかの改良を行った。改良点は、(イ) 流れ場の方程式の非線形性の収束法、(ロ) 計算速度向上のためのデータ構造の改良、(ハ) 分岐要素の組み込み、(ニ) ピット部のモデル化の改良、(ホ) ピット内流れの助走区間効果の組み込み等である。

### 2.2 定常時の解析

ここでは、定常状態の冷却システム試験と同条件の計算を行い、試験データと計算結果を比較した。図 2.2.1 に示すように計算結果は試験データとよく一致した。このときにピット内の伝熱式として Dittus & Boelter の式を用いた。

PNC-SJ 199 84-20

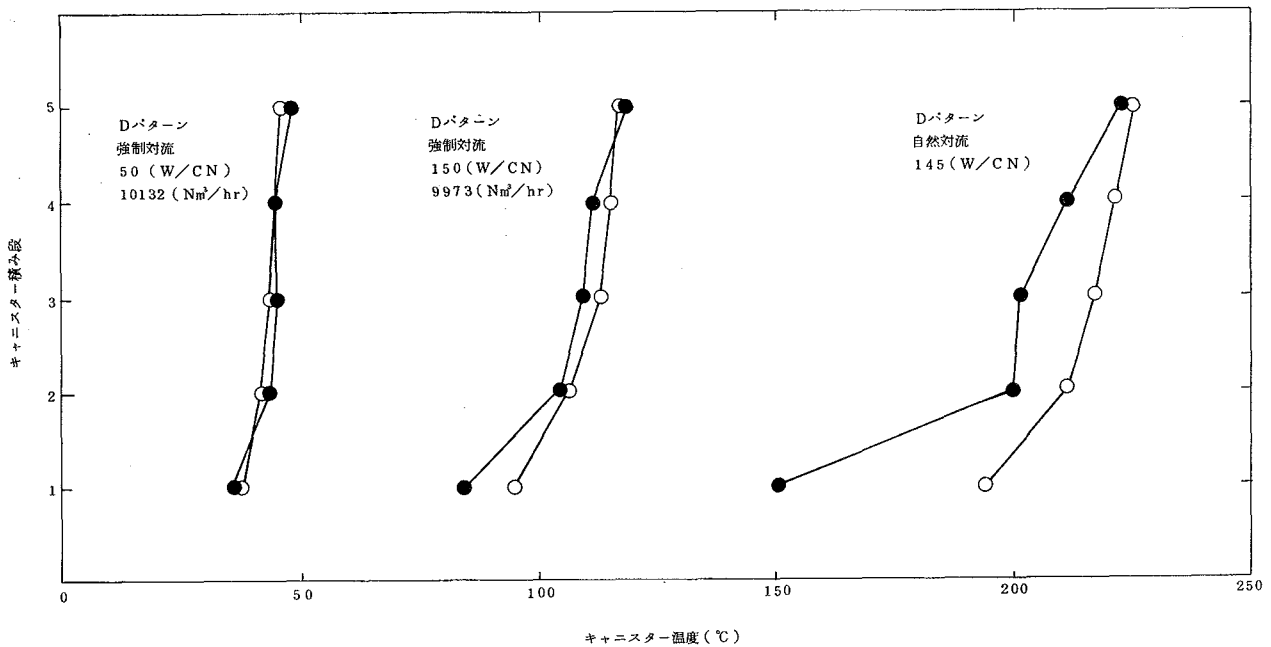


図 2.2.1 定常時の温度分布

### 2.3 過渡特性解析

図 2.3.1 と図 2.3.2 に強制対流時から自然対流時および自然対流時から強制体流時に移行する過渡解析結果を示す。図 2.3.1 と図 2.3.2 に示すように計算結果は試験値とよく一致している。

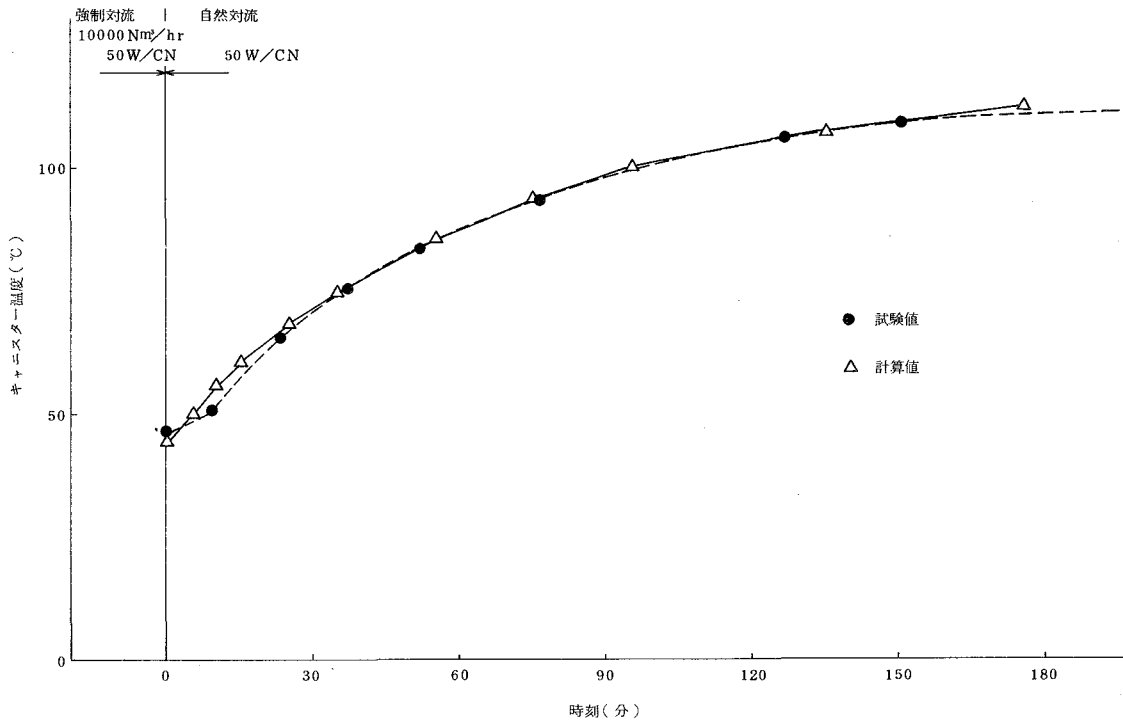


図 2.3.1 過渡解析

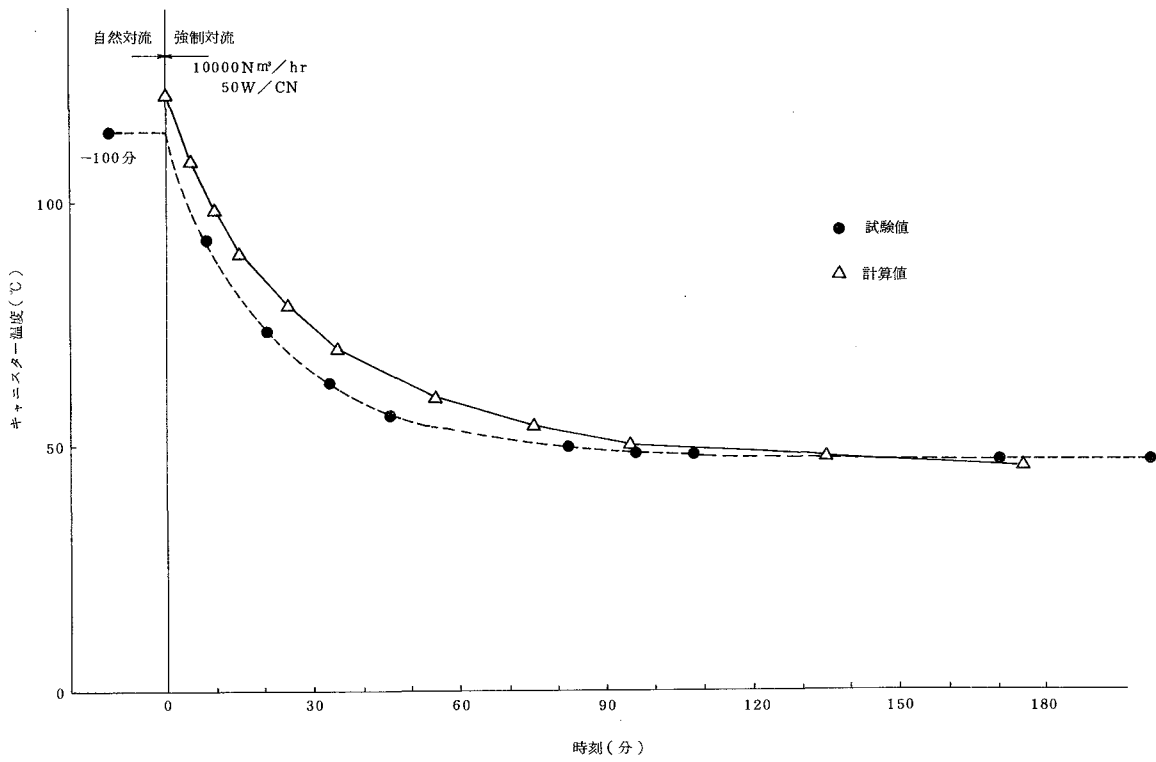


図 2.3.2 過渡解析

FLOSTコードでは過渡状態の計算方法は次のようにしている。ガラス固化体等の固体部分の温度変化に比べて、空気の流れの変化の方が一般に非常に速いと考えられる。そこで過渡時は温度場は非定常方程式を解いているが、この各時刻で流れ場は平衡状態になっていると考えて定常方程式を解いている。自然対流の場合は温度場を解く各時刻で、浮力と圧損が釣り合うように収束計算を行っている。このような計算法は狭隘路冷却コード(CRESTコード)でも用いており、よい結果を得ている。

## 2.4 閉サイクル時の解析

高レベル廃棄物の冷却空気を循環させ、熱交換器により、廃熱を回収する事が考えられている。冷却システム試験において、閉サイクル系の装置を用いて、このときの伝熱特性試験を行っている。ここでは、FLOSTコードにより冷却システム試験と同様の計算を行い、試験値と比較した。

空気冷却器の熱伝達係数等は文献を参考にして次のように設定した。

空気冷却器の熱伝達係数(水と空気の間)

$$\alpha = 0.022 \text{ (Kcal/sec} \cdot \text{°C} \cdot \text{m}^2) \quad (2.4.1)$$

空気冷却器の圧損係数

$$\zeta = 4.98 \quad (2.4.2)$$

空気冷却器付近の放熱の熱伝達係数

$$\alpha = 1.68 \times 10^{-4} (T - T_0)^{0.25} \text{ (Kcal/sec} \cdot \text{°C} \cdot \text{m}^2) \quad (2.4.3)$$

図 2.4.1 に計算結果を示す。図 2.4.1 に示すように計算値と試験値では 10 (%) 程度の違

PNC-SJ 199 84-20

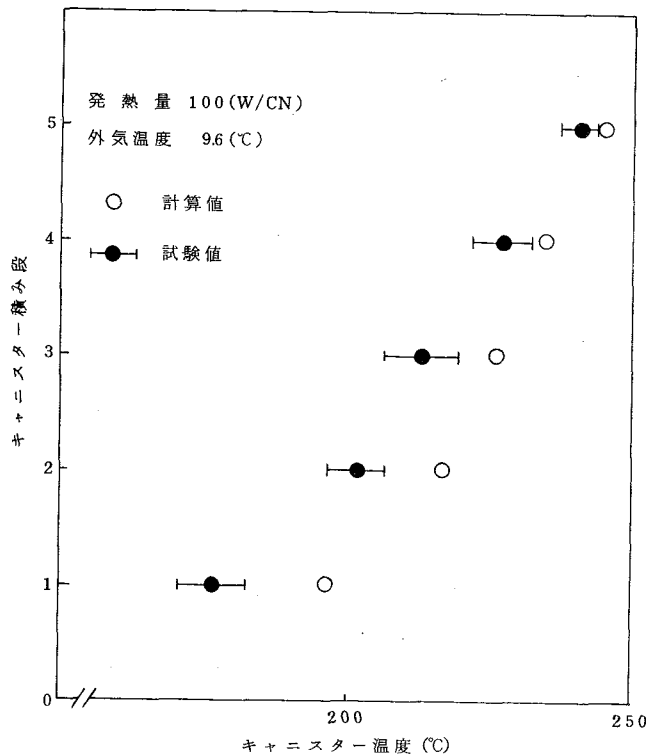


図 2.4.1 閉サイクル時の解析



いが見られる。これは空気冷却器付近の放熱の算定の誤差と考えられる。温度の傾向としてはよく一致していると考えられる。

## 2.5 保管庫の解析

ここでは保管庫を模擬した冷却システム試験と同条件の計算を行い、保管庫の熱的特性を調べる。

### 2.5.1 圧損係数について

保管庫用のピットの最下段キャニスター底面に支持板が取り付けられている（図 2.5.1 参照）。実ピットの場合はキャニスター底面にあるので空気の流れへの影響は少ないと考えられる。空ピットの場合はこの支持板がオリフィスになり空ピットへの空気流入を防いでいる。ここではこの支持板の圧損係数を文献より算出し、ピット内の圧損について検討した。

文献調査により管内の速度で圧損を表わしたときの圧損係数は次のようになった。

$$\zeta_R \begin{cases} = 0.36 & (\text{冷却システム試験}) \\ = 1.346 & (\text{実機保管庫}) \end{cases} \quad (2.5.1)$$

またピット内の圧損係数は Fanning の式を用いた。

$$\lambda = 0.014 + 1.056 R_e^{-0.42} \quad (2.5.2)$$

この結果ピット内の圧力損失は表 2.5.1 のようになる。

PNC-SJ 199 84-20

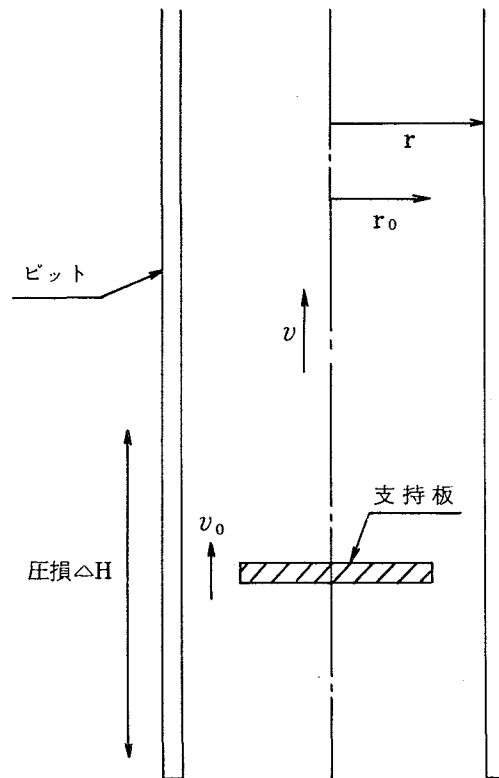


図 2.5.1 空ピット下部の模式図

表 2.5.1 ではレイノズル数 10000 のときの圧損係数を用いる。また 2.5.2 章で示すように冷却システム試験データとの比較によりオリフィスの圧損係数は  $\zeta_R = 0.7$  が妥当であると考えられるのでそのときの値を ( ) 内に示した。

表 2.5.1 に示すように冷却システム試験の場合は  $\zeta_R = 0.34$  とすると実ピットの圧損係数は 0.98 となり空ピットの場合の 0.55 と比べておよそ倍になっている。 $\zeta_R = 0.7$  とすると実ピットの方が 0.78 となり実ピットの方がおよそ 25% 大きくなっている。実機保管庫用ピットの場合は実ピットの圧損係数の方が空ピットの圧損係数と比べておよそ 2 倍大きい。実際にはオリフィスの圧損係数は文献から得た値 ( $\zeta_R = 1.346$ ) より大きいと予想される。しかし空ピットの圧損係数を小さめに設定しておけば、実ピットの流量は少なめに評価され温度は高めの値を得る。このように安全側を考えて、実機ピットのオリフィスの圧損係数は  $\zeta_R = 1.346$  とする。

PNC-SJ 199 84-20

表 2.5.1 実ピットと空ピットの圧力損失

単位 (kg/m<sup>2</sup>)

ピットの種類 圧 損	実機保管庫用ピット		冷却システム試験ピット	
	実ピット	空ピット	実ピット	空ピット
キャニスター部分	2.25	—	0.80	—
キャニスターがない部分	0.01	0.05	0.05	0.33
キャニスターの上下部分	0.74	—	0.13	—
オリフィス部分	—	1.54	—	0.22 (0.45)
計	3.00	1.59	0.98	0.55 (0.78)

(注1) Fanning の式は  $Re = 10000$  のときの値  $\lambda = 0.036$  を用いた。

(注2) ( ) 内はオリフィスの圧損係数を 0.7 とした場合。

## 2.5.2 風量分配

ここでは冷却システム試験データとそれと同条件での FLOST コードによる計算結果のうち風量分配について比較する。

図 2.5.2 に全て実ピットの場合の計算結果を示す。図 2.5.2 に示すように、入気側のピットの流量が少なく、排気側のピットの流量が多いという並流型の特徴がよくでていいる。11 番ピットの流量が試験では小さくなっているが、計算値は試験値と比べてかなりよく一致していると考えられる。

図 2.5.2 には示していないが、ピット内の圧損が大きくなると、風量分配はもっと均一になった。これは、流量の不均一の原因が、ピットの分岐合流圧損の影響であるため、ピット内の圧損が大きくなればその影響が小さくなり、流量は均一になるためである。図 2.5.2 では圧損係数として Fanning の式 ( ( 2.5.2 ) 式参照 ) を用いているが、計算値と試験値の流量比の傾きがほぼ一致する事から Fanning の式を用いるのが妥当であると考えられる。

図 2.5.3 には全て空ピットの場合の計算結果を示す。空ピットの場合はピットの支持板がオリフィスの役割を果たす。この圧損係数 $\zeta$ は不明であるが、2.5章に示したとおり、文献による値を用いると $\zeta$ は0.34になる。そこでここではこの値をパラメータにして計算した。 $\zeta$ の値が大きいと、ピットの分岐合流圧損の影響が小さくなり、流量は不均一になる。図 2.5.3 に示すように計算でもこの傾向がでていいる。図 2.5.3 では $\zeta = 0.7$ の場合の計算値が試験値とよく一致している事がわかる。文献による値は $\zeta = 0.34$ であるので図 2.5.3 の場合はそのおよそ倍の値になっている。これは支持板のガイドの影響と流れの乱れによると考えられる。

図 2.5.3 に示すように $\zeta = 0.7$ の場合の計算値と試験値がよく一致する事がわかる。

図 2.5.4 には8列目まで空ピットがある場合の計算結果を示す。この場合も $\zeta$ の値をパラメータにして計算した。図 2.5.4 に示すようにこの場合も $\zeta = 0.7$ にした計算結果が試験値とよく一致する。

以上のように管壁圧損係数としてはFanningの式、空ピットのオリフィスの圧損係数は0.7を用いると風量分配特性は試験値とよく一致することがわかった。

PNC-SJ 199 84-20

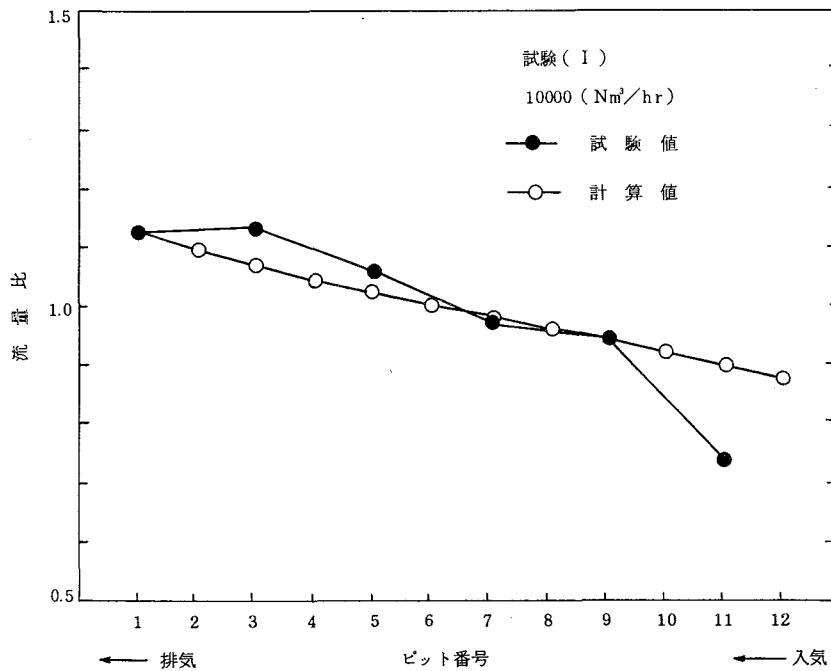


図 2.5.2 風量分配

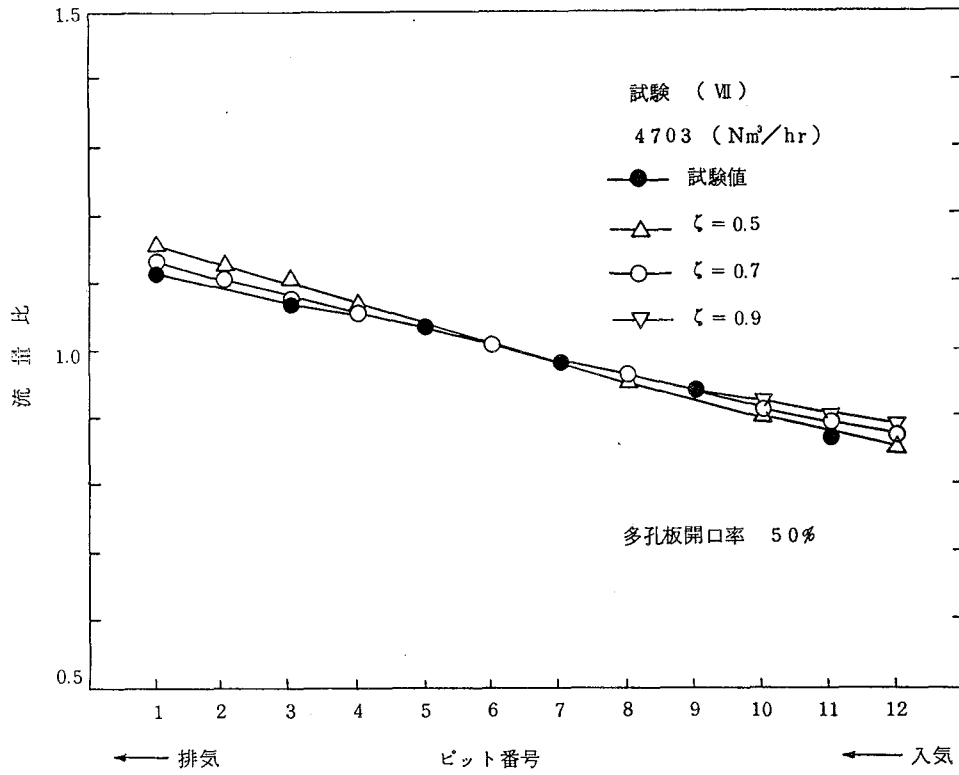
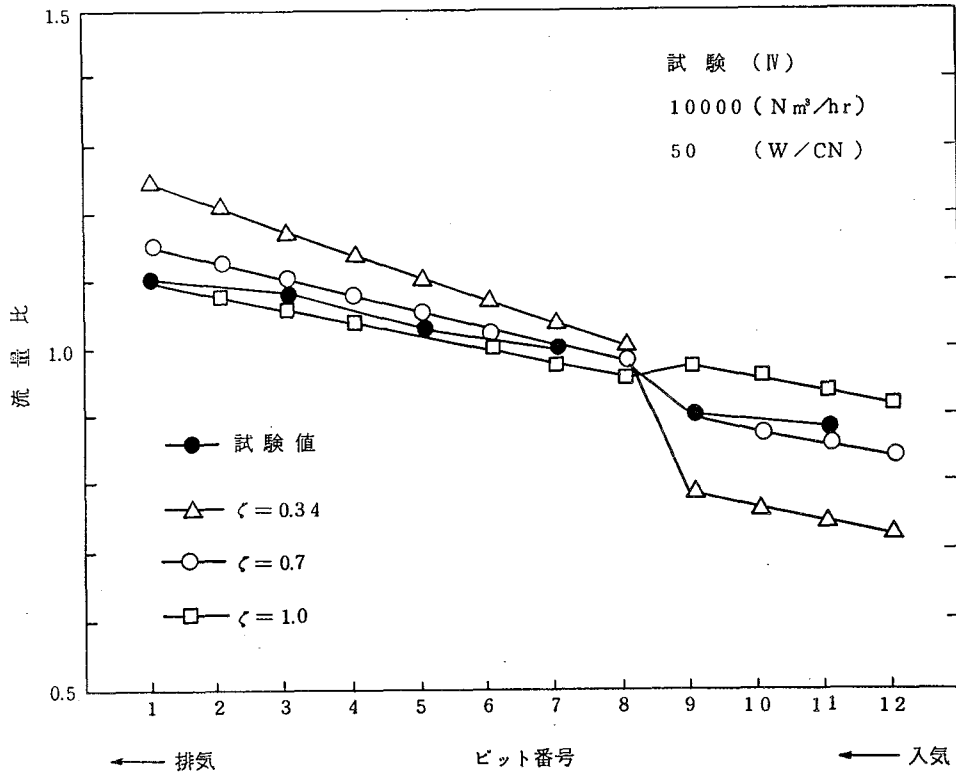


図 2.5.3 流量分配



2.5.4 流量分配

### 2.5.3 温度分布

全て実ピットの場合の計算結果を図2.5.5に示す。図2.5.5に示すように温度分布は、計算値と試験値はよく一致していると考えられる。図2.5.5の場合は発熱量が大きく、風量が小さくて温度が高くなる場所では計算値の方が高めになっている。図2.5.5に示すように温度のバラつき程度も、計算値と試験値では最大5℃程度の違いはあるがほぼ同様になっている。

4行8列に発熱ピットがあり、他は空ピットとなっている場合の計算結果を図2.5.6に示す。図2.5.6に示すように、計算値の方が試験値よりもやや低めの値になっているが、最大値をみるとおよそ10℃以下の差である。

### 2.6 解析コードの評価

本解析コードは高レベル廃棄物の貯蔵時における冷却特性を解析する目的で、ガラス固化体の熱伝導解析コードと狭隘路冷却コードの成果を踏まえて昭和56年度より開発してきた。

前年度までに、ピット内の伝熱式、圧損式、分岐合流圧損係数、キャニスター輻射率、各種物性値等について検討評価してきた。今年度は、ピット内の伝熱式と圧損式について再評価し、さらに助走区間の考慮等のコードの改良を行った。このコードを用いて冷却システム試験と比較した。比較は、定常時、過渡時、閉サイクル時について行った。また保管庫を模擬した冷却システム試験との比較を行った。その結果、定常時、過渡時、閉サイクル時には解析と試験値はよく一致した。また保管庫の解析では発熱ピットが多いときには試験値とよい一致をみた。発熱ピットが少ないときは試験値より多少低めの温度になる。

本解析コードは基礎式としては、3次元熱伝導方程式と全圧の式を用いている。また熱と流れについては各種係数、式を用いているが、これらは全て無次元数を用いており、実機の施設に適用できると考えられる。

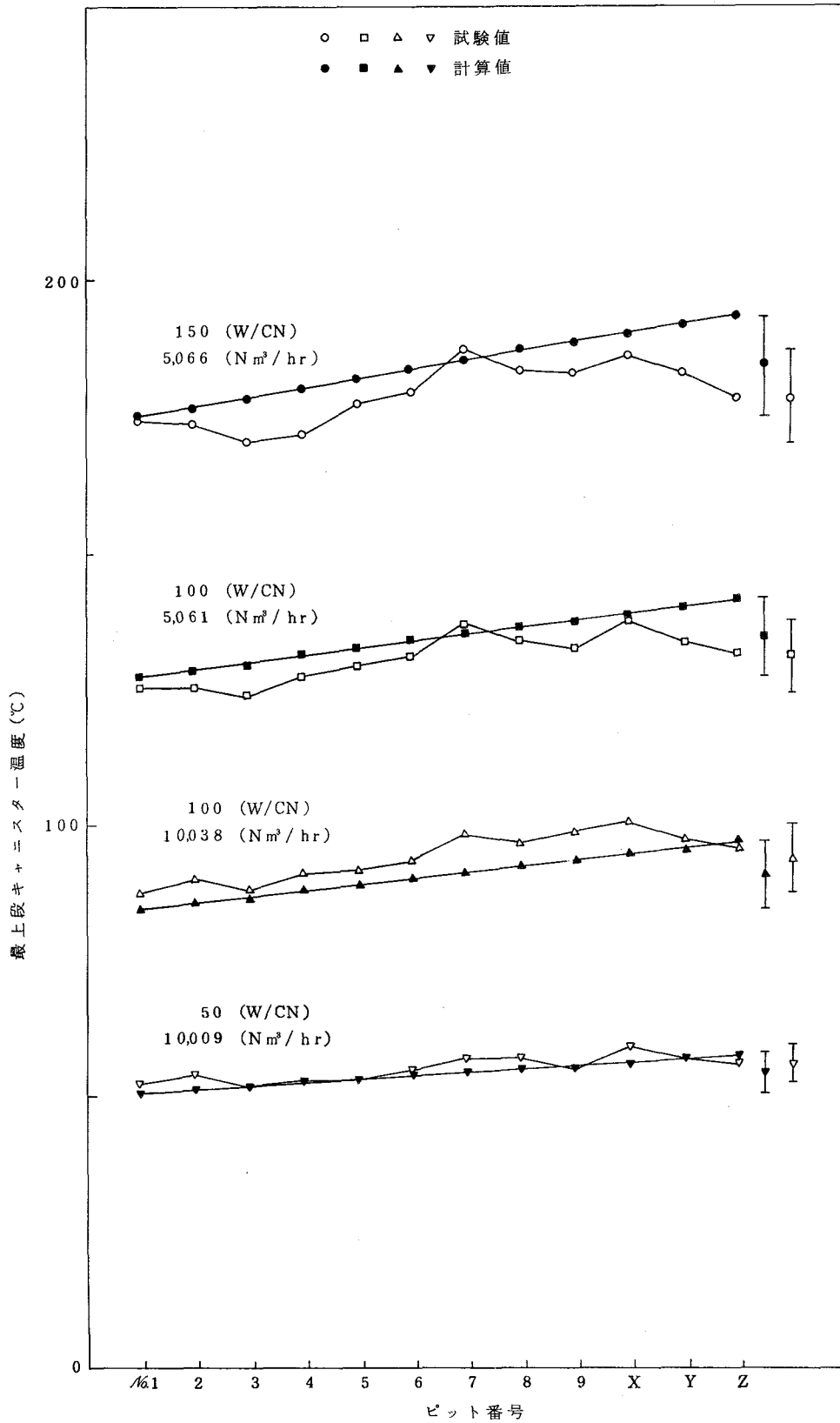


図 2.5.5 温度分布

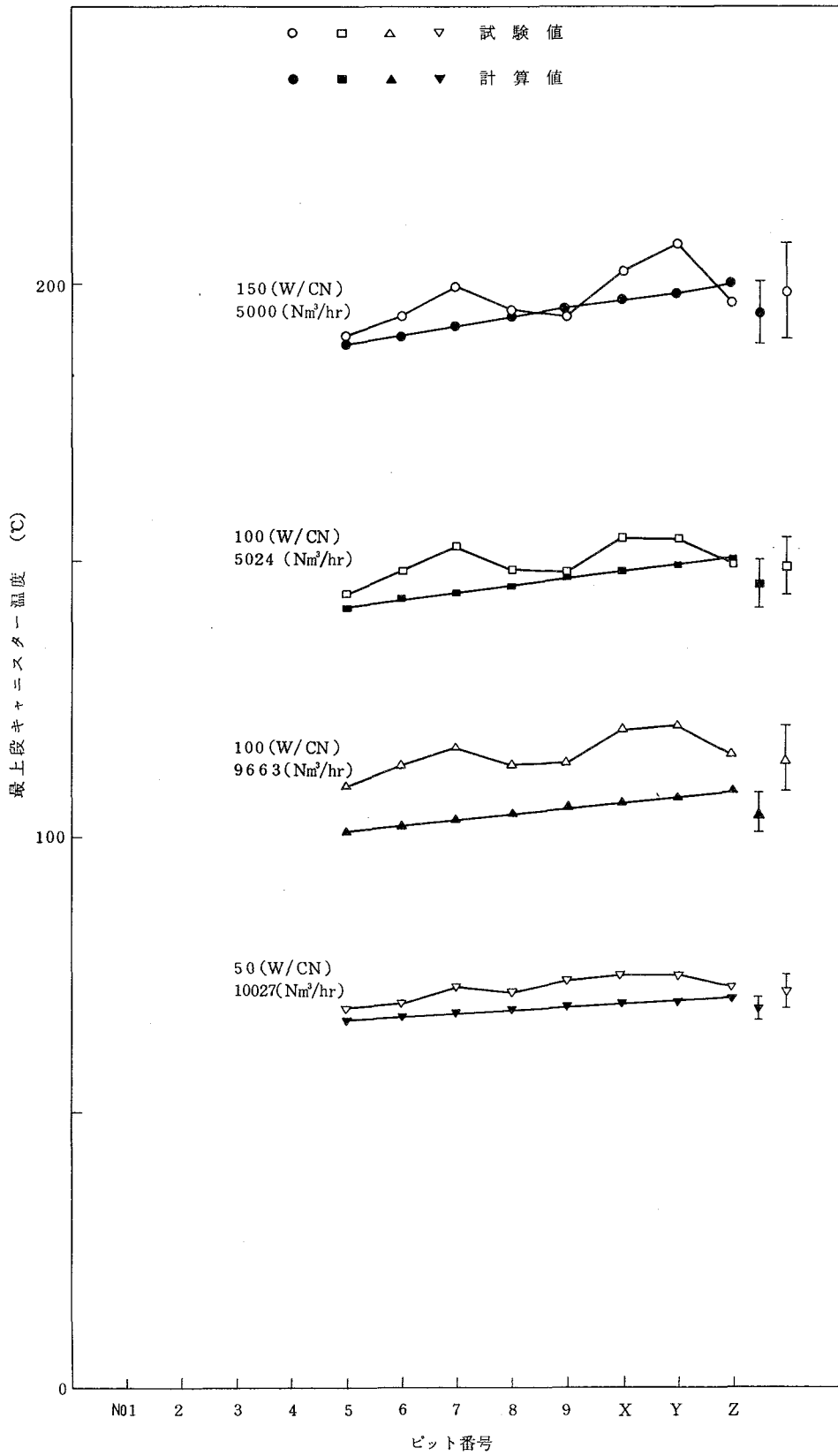


図 2.5.6 温度分布

### 3. 保管庫の伝熱特性解析

ここでは高レベル廃液ガラス固化体を保管庫に収納したときの伝熱特性を解析する。解析は、FLOSTコードおよび流体解析コードSOLAを用いて行い。解析項目としては、プレナム高さの影響、ピット配列の解析、キャニスター収納パターンの解析、および異常時と再通風時の過渡解析である。

#### 3.1 保管庫の概要と計算条件

保管庫の概要を図3.1.1に示す。またキャニスターの形状を図3.1.2に示す。発熱量は固化体作成時として1.44 (KW/本)としたブローの風量は36,355 (Nm<sup>3</sup>/hr・基)とし通常ブローは2基稼動とした。

#### 3.2 プレナム高さの解析

上部プレナムと下部プレナムの高さをそれぞれ独立に変化させたときの風量分配への影響について調べた。

図3.2.1に計算結果を示す。図3.2.1に示すように上部プレナムがおよそ1.5 (m)以下、下部プレナムがおよそ1.0 (m)以下では風量比は最大値と最小値ともに10 (%)以内である。プレナム高さがこれより低くなると風量は急激に不均一になる。

PNC-SJ 199 84-20

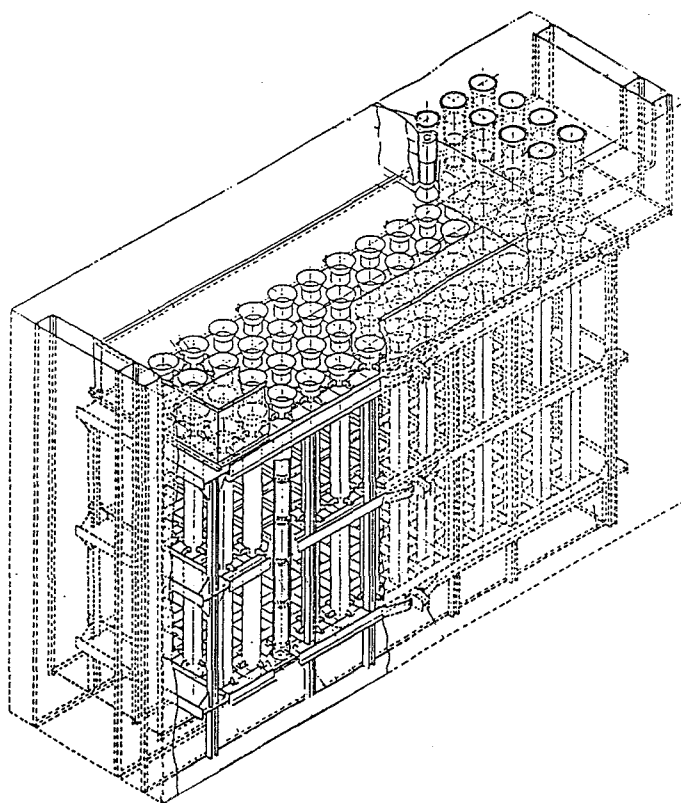


図3.1.1 保管庫の概要 (動燃殿資料による)



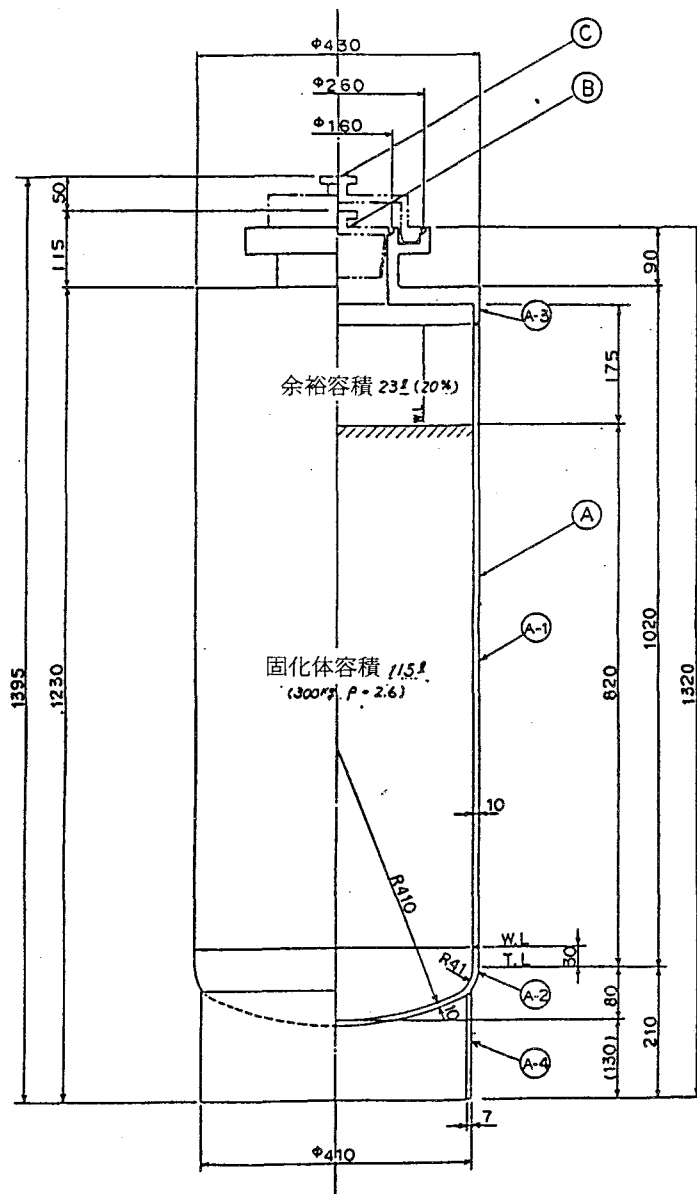


図 3.1.2 キャニスター形状図 (動燃殿資料による)

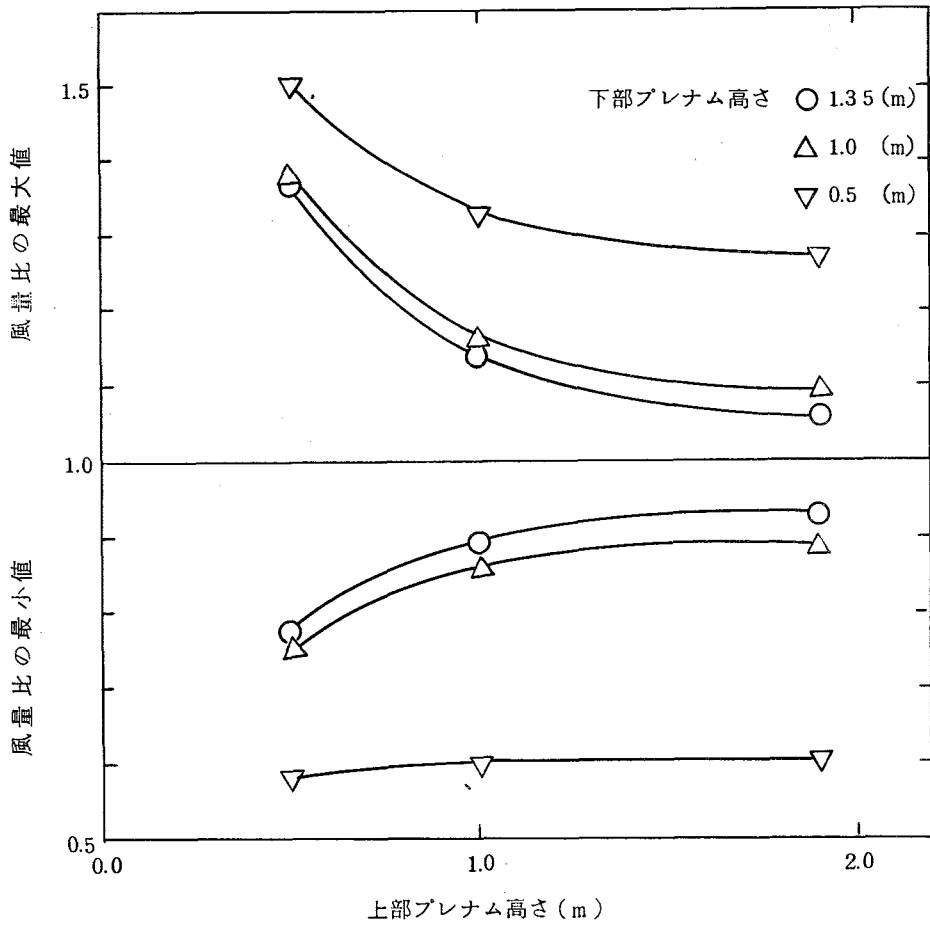


図 3.2.1 保管庫のプレナム高さの影響

### 3.3 流体解析コードによるピット配列の解析

保管庫の下部プレナムの空気入口部は開いており、空気は一様に流入するが、上部プレナムの空気出口は流路が狭くなっている。このためピット配列（1列、3列、4列）の違いによる影響として上部プレナム空気の流れの解析が必要となる。そこで流体解析コード「SOLA」を用いて上部プレナムの流体解析を行う。「SOLA」は2次元解析コードであるため、上部プレナムをモデル化して、2次元面について解析を行った。

#### 3.3.1 ピット出口の影響

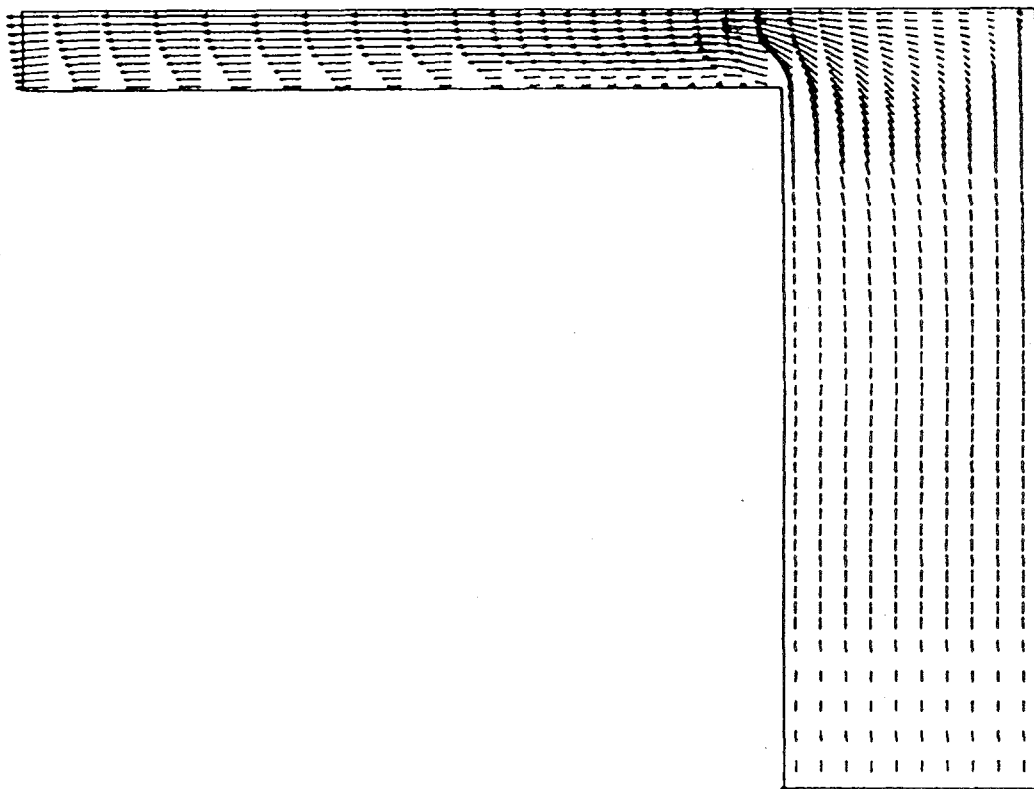
ピット出口はガイドが付いている。そこでこの影響をみるために、上部プレナム出口付近を横から見た断面を考慮してSOLAにより流れの様子を調べた。ガイドはそのままの形では取り扱いにくいので、ピット出口に矩形の障害物を置く事によりモデル化した。

図 3.3.1 にガイドがある場合とない場合についての計算結果を示す。風量は10,000 Nm<sup>3</sup>/hr)である。計算点数はガイドがない場合が750点、ガイドがある場合は1,075

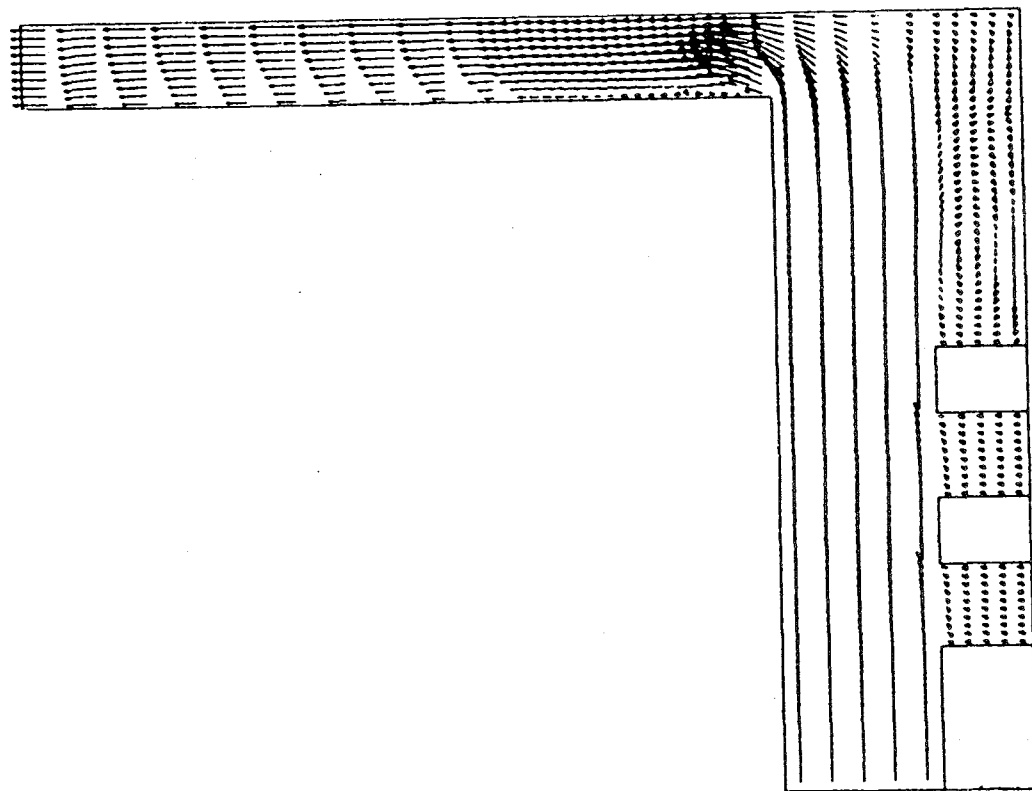
点である。ガイドがない場合は流れの様子は全体になめらかであり、上方の排気口の曲がり部で空気の流れは一様ではなくなる。一方ガイドがある場合はガイドの後方でうずができています。またガイドがあるため、プレナムの断面積が実質的に小さくなっていて、排気口の曲がり部での様子が、ガイドがない場合に比べてやや違っています。実際にはガイドは3次元的な円錐形状をしているため、空気の大部分はガイドがない部分を流れる事が予想される。このためプレナム断面積が実質的に小さくなる事は考えにくい。以上よりガイドがあるために、上部プレナムの流れの様子が変わる事は少ないと考えられる。

### 3.3.2 上部プレナム部の流れ

排気ダクトを前方から見た2次元断面について、4列ピットの場合について調べた。流量は4列ピットの場合が $10,000 \text{ (Nm}^3/\text{hr)}$ 、 $20,000 \text{ (Nm}^3/\text{hr)}$ 、3列ピットの場合が $7,500 \text{ (Nm}^3/\text{hr)}$ 、 $15,000 \text{ (Nm}^3/\text{hr)}$ であるが流れの様子はいずれの場合も同様であった。図3.3.2に流速分布図を示す。図3.3.2に示すように流路の中方向の流路分布は4列ピットの場合も、3列ピットの場合もほとんど一様である。これは排気ダクトが、流路が狭くなる場所までおよそ7mと長いので、排気ダクトが狭くなることの影響が、排気ダクト入口までは及んでいないと考えられる。このことから、4列ピットの場合も、3列ピットの場合も、流量は列方向に均一になっていると考えられる。



(ガイドがない場合)



(ガイドがある場合)

図 3.3.1 保管庫上部プレナム出口付近の流れ

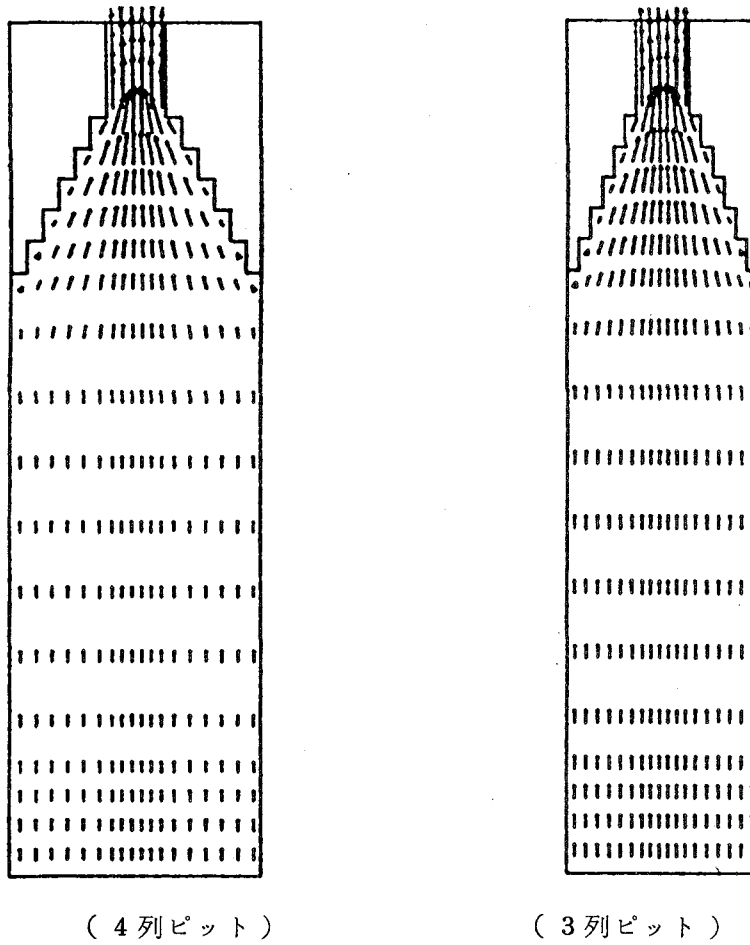


図 3. 3. 2 保管庫上部プレナム出口付近の流れ

### 3.4 定常状態伝熱解析

ここでは保管庫にガラス固化体を収納したときの定常状態の伝熱特性を調べた。

図 3. 4. 1 に風量と発熱量を変化させたときのガラス固化体各部位の温度を示してある。図 3. 4. 1 で示しているのは最高温度固化体であり、これは最も流量が小さく最も温度が高いピットの最上段固化体である。

最小自乗法により各部位の温度を示す簡便式を得た。

(ガラス温度)

$$T_{Gmax} - T_0 = 3.83 \times 10^3 W^{0.875} M^{-0.303} \quad (3.4.1)$$

$$T_{Gmin} - T_0 = 1.69 \times 10^3 W^{0.902} M^{-0.239} \quad (3.4.2)$$

(キャニスター温度)

$$T_{Cmax} - T_0 = 5.76 \times 10^4 W^{0.879} M^{-0.633} \quad (3.4.3)$$

$$T_{Cmin} - T_0 = 3.31 \times 10^4 W^{0.914} M^{-0.613} \quad (3.4.4)$$

(ピット温度)

$$T_{P \max} - T_0 = 3.40 \times 10^6 W^{1.08} M^{-1.11} \quad (3.4.5)$$

$$T_{P \min} - T_0 = 1.72 \times 10^7 W^{1.18} M^{-1.38} \quad (3.4.6)$$

(空気温度)

$$T_{A \max} - T_0 = 6.06 \times 10^5 W^{0.987} M^{-0.976} \quad (3.4.7)$$

$$T_{A \min} - T_0 = 6.85 \times 10^5 W^{0.998} M^{-0.992} \quad (3.4.8)$$

ここで

$T_{G \max}$  : 最高温度固化体のガラス最高温度 (°C)

$T_{G \min}$  : 最低温度固化体のガラス最高温度 (°C)

$T_{C \max}$  : 最高温度固化体のキャニスター温度 (°C)

$T_{C \min}$  : 最低温度固化体のキャニスター温度 (°C)

$T_{P \max}$  : 最高温度固化体のピット温度 (°C)

$T_{P \min}$  : 最低温度固化体のピット温度 (°C)

$T_{A \max}$  : 最高温度ピットの空気出口温度 (°C)

$T_{A \min}$  : 最低温度ピットの空気出口温度 (°C)

$T_0$  : 外気温度 (計算は 30°C で行った)

$W$  : 発熱量 (KW/CN)

$M$  : 風量 ( $Nm^3/hr$ )

ただしフロア 1 基は 36,355 ( $Nm^3/hr$ ) であり 2 基では 72,710 ( $Nm^3/hr$ ) である。

図 3.4.1 には上記の簡便式の値を破線で示した。また計算では外気温度を 30°C に設定したが、外気温度が変化したときはその分だけ各部の温度が変化すると考えられる。

つぎに本解析コード (FLOST コード) と狭隘路冷却コード (CREST コード) の比較をする。狭隘路冷却コードは 1 つのピットについての解析コードであり、昭和 55 年度より開発し、昭和 56 年度に完成したコードである。1 つのピット内のガラス固化体を有限要素法により離散化し、ガラス固化体の温度分布を把握できる。

一方本解析コードは貯蔵施設全体を取り扱うため、ピット内をモデル化し、1 つのガラス固化体に対して 1 組の計算点のみで代表している。さらにガラス中心の温度はガラス固化体を無限長円柱であると仮定して計算を行っている。そこでここではこのモデル化の妥当性を検討する。

発熱量 1.44 (KW/CN) 風量はフロア 2 基 (72,710  $Nm^3/hr$ )、発熱ピットは 4 行 13 列の場合について調べる。この場合本解析コードの計算結果によると最小風量ピットの風量比は 0.929961 であり風量は 1300.3 ( $Nm^3/hr$ ) (0.4519 Kg/sec) であった。そこでこの風量を狭隘路冷却コードの入力データとして計算した。狭隘路冷却コードの計算結果として温度分布図を、図 3.4.2 に高さ方向の温度分布図を図 3.4.3 に示す。

両コードによる計算結果は常に本解析コードの方が少し高めの温度になっている。ガラス中心では最大 6°C ほど本解析コードの方が高くなっている。これは本解析コードではガラス固化体を無限長円柱であるとしているので固化体の上部下部方向への熱の逃げが考慮されていないためである。

以下により、本解析コードによる計算では、固化体を詳細に計算した結果よりも常に少しだけ高め温度を得る事になる。

図 3.4.2 に示すようにガラス固化体の温度分布は、固化体の中央部付近で最高温度になり、等温度線はほぼ円状になっている。また図 3.4.3 に示すように、各部の高さ方向温度分布は、各段ともほぼ同様な分布をしており、上段になるほど高温になっている。またキャニスターの下部まで温度が少し高くなっているところがある。これは固化体下部の熱がキャニスター底面のステンレス部分を伝わって外部に逃げるため、キャニスター下部のスカート部が少し高温になると考えられる。

PNC-SJ 199 84-20

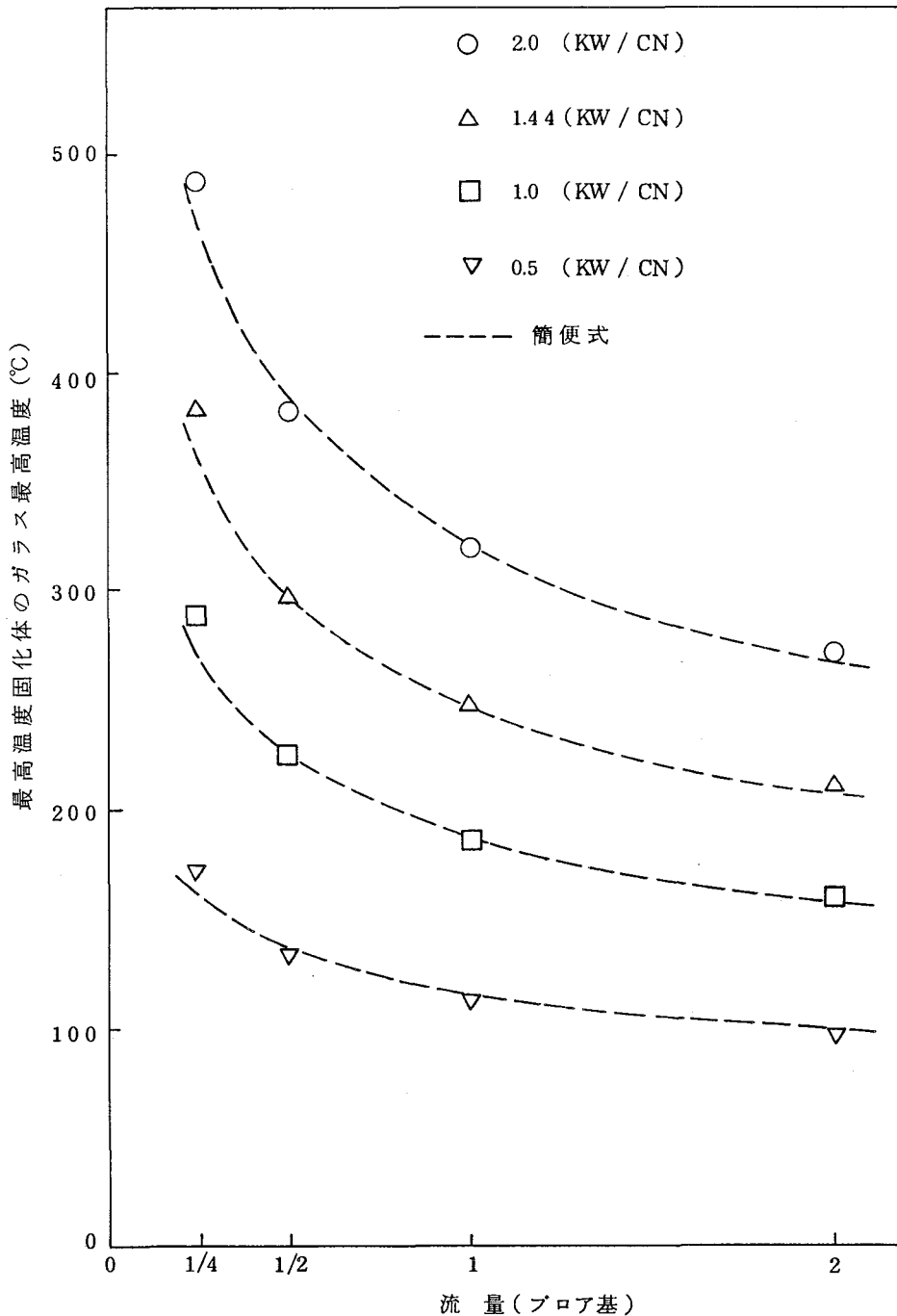
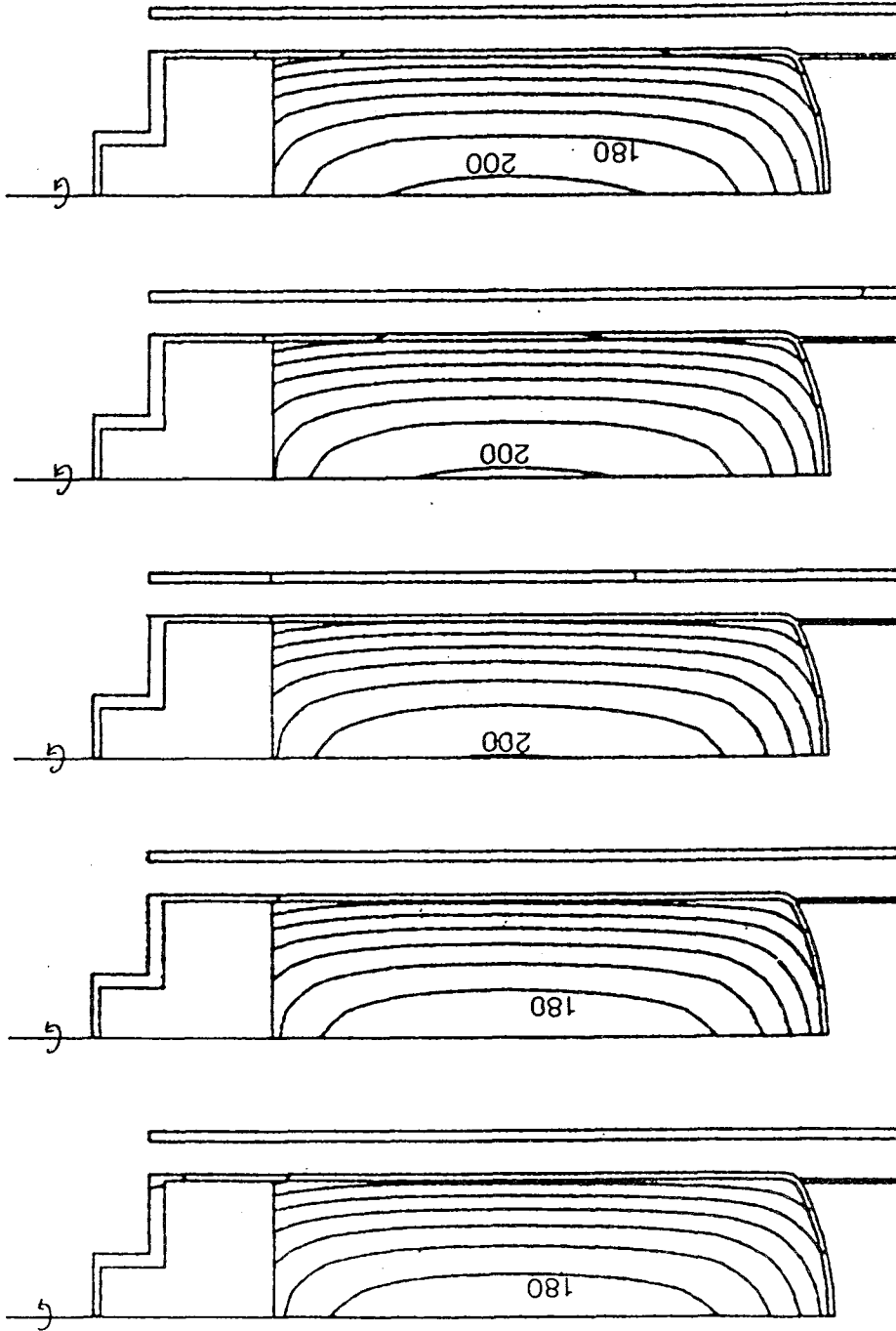


図 3.4.1 最高温度固化体のガラス最高温度



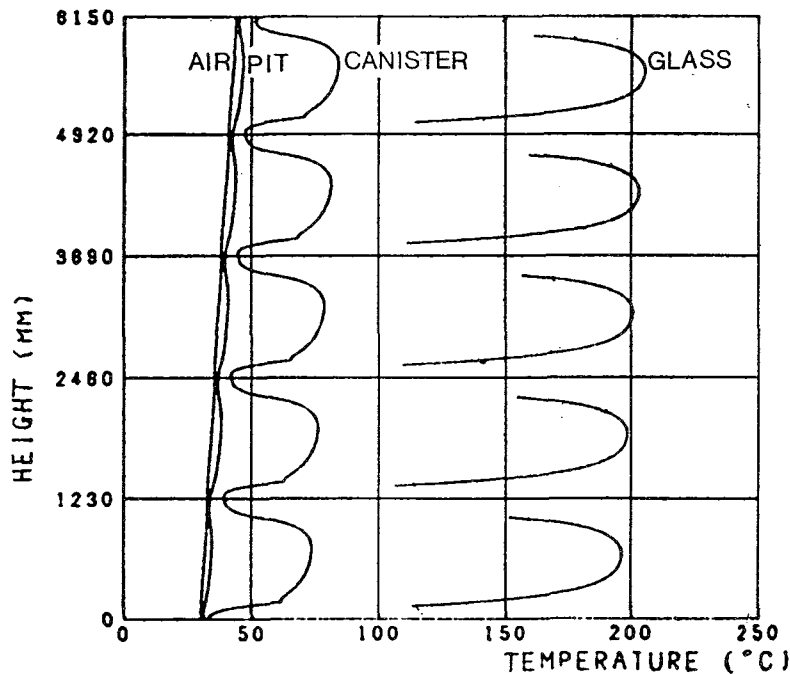
(最上段)

(最下段)

1.44 (KW/CN)、プロア2基

図 3.4.2 保管庫のガラス固化体温度分布 (狭陰路冷却コードによる)





1.44 (kW/CN)、フロア2基

図 3.4.3 保管庫のガラス固化体温度分布  
(狭隘路冷却コードによる)

### 3.5 キャニスター収納パターンの解析

ここではキャニスター収納時の解析としてキャニスターの収納状態による冷却特性を調べる。

図 3.5.1 に排気側の 4 行 4 列が空ピットの場合の風量分配を示す。図 3.5.1 に示すように空ピットのオリフィスの圧損係数を 1.346 とすると空ピットの方の風量比は 1.17 ~ 1.22 となり実ピットの風量比 0.86 ~ 0.95 と比べて大きくなる。圧損係数を大きくすると空ピットの風量比はしだいに小さくなる。2.5 章で示したように空ピットのオリフィスの圧損係数は文献から得た値のおよそ 2 倍であった事と考えると、空ピットへの風量比は実ピットと同程度であると考えられる。図 3.5.2 に示したように入気側の風量が少ないので、図 3.5.2 では入気側の温度が高くなっている。図 3.5.2 に示すように圧損係数が 1.346 のときに最高温度キャニスターのガラス中心温度はおよそ 214.5 °C になる。圧損係数を変えた場合でも温度はそれほど変化しない事がわかる。また図 3.4.1 に示したように全て実ピットの場合にはガラス中心温度はおよそ 210.0 °C になり、この場合と大きな違いは見られない。

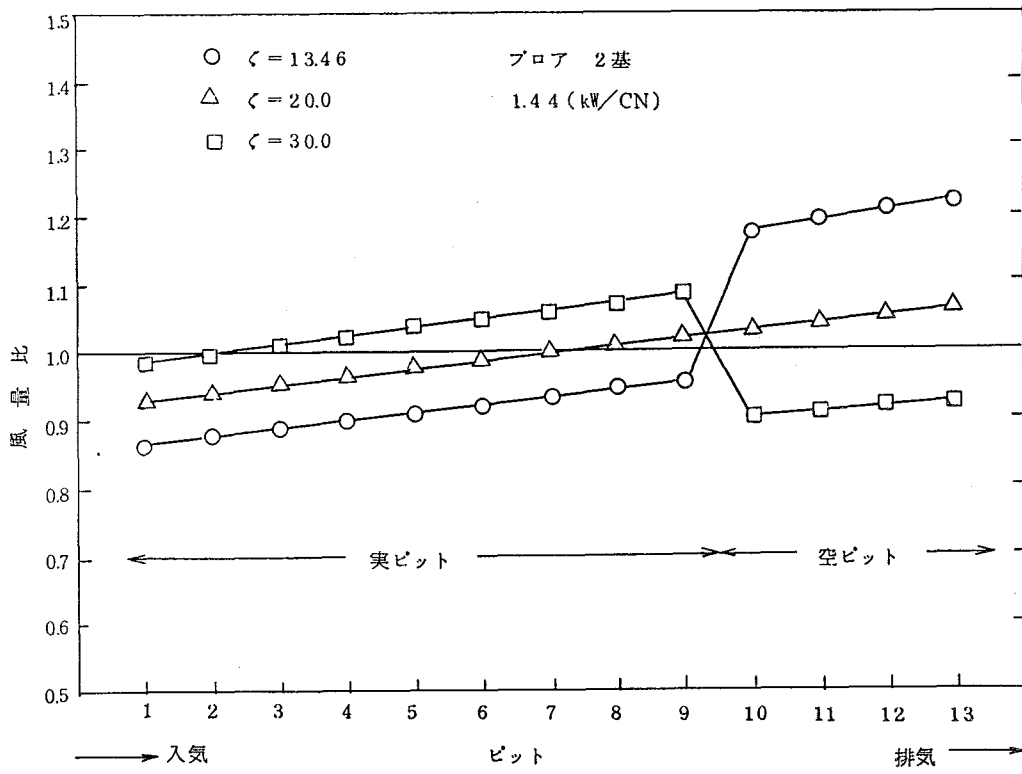


図 3.5.1 風量分布 ( ケース II )

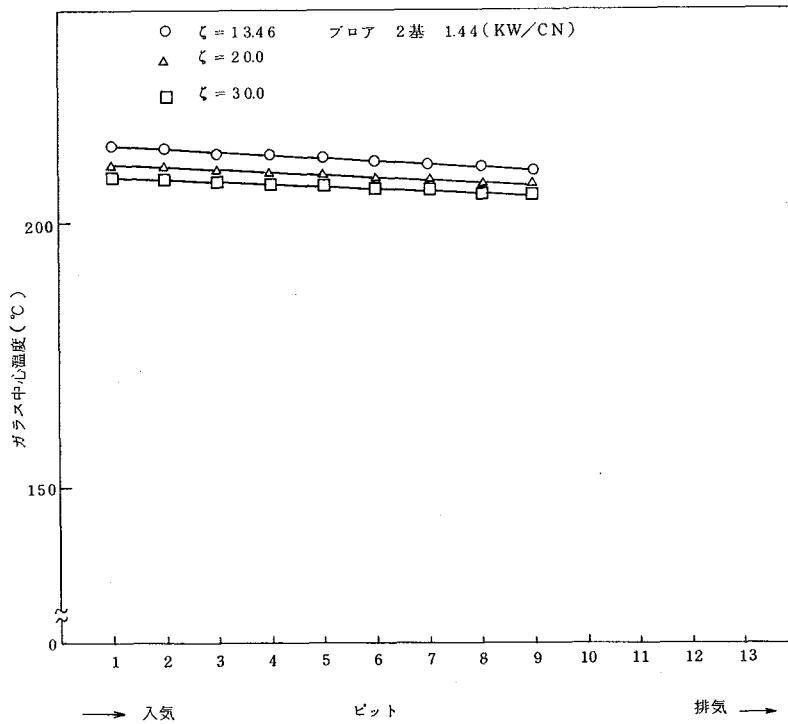


図 3.5.2 温度分布 ( ケース II )

### 3.6 異常時と再通風時の解析

ここでは、保管庫において通風が停止したり、通風量が少なくなったときのいわゆる異常時と通風が再び正常になったときの再通風時の熱的特性を調べる。

計算ケースとして、次のようなケースを想定した。プロアが2基稼動している状態を正常時とし、異常時としては、プロアが停止して空気が完全に止まっている場合、プロアの能力がおちてプロアの4分の1基分の風量がある低風量時、および、プロアが停止してそのすきまから空気が流れる自然空冷時とした。

また再通風時としては、異常時から、プロア2基同時に復旧した場合と1基ずつ復旧した場合を考えた。

#### (1) プロア停止時と再通風時

プロアが2基稼動の正常運転時から、プロアが停止し、空気が完全に止った場合の異常時とその後プロアが復旧した場合の計算結果を図3.6.1に示す。図3.6.1は最も高温の固化体として、最も風量が少ないピットの最上段固化体を示す。

図3.6.1に示すようにプロア停止直後は、キャニスターの温度はすぐに上昇し始めおよそ4時間後にはほぼ直線的に温度は上昇する。これに対してガラス中心温度はプロア停止後ゆるやかに温度が上昇しおよそ4時間後にはほぼ直線的に温度は上昇する。このようにガラス中心の温度の上昇がゆるやかなのは、ガラスの熱容量のためであると考えられる。

図3.6.1では、プロア停止後およそ27時間でガラス中心温度は450(°C)になる。ガラスの許容温度はおよそ450(°C)であるので、計算ではここでプロアを再稼動させた。

図3.6.1に示すように2基同時に再稼動した場合と、1基ずつ再稼動させた場合について計算した。プロアを再稼動させると、キャニスター温度は直ぐ低下するが、ガラス中心温度は再稼動後もおよそ1時間ほど上昇し続け、その後ゆっくり温度が下がってくる。これはプロア停止時と同様にガラスの熱容量のためと考えられる。

図3.6.1に示すように2基同時に再稼動した場合にはガラス中心とキャニスターの温度差は再稼動後およそ5時間後最高185(°C)になる。一方、1基だけ再稼動した場合の温度差はおよそ7時間後に最高150(°C)になる。プロア2基稼動時の定常時はおよそ116(°C)であるので、再稼動時にはいずれも定常時より温度差が大きくなる。ガラスの熱応力を考えるとガラス中心とキャニスターの温度差は小さい方がよいので、再稼動時はプロアを1基ずつ再稼動した方がよいと考えられる。

2基同時に再稼動する場合と1基だけ再稼動するのではガラス中心とキャニスターの温度差は異なるが、温度の降下の様子は同様である。どちらも再稼動後およそ30時間程度で定常状態になっている。また図3.6.1には初め1基稼動し、およそ10時間後に2基稼動の温度降下状態に移行している場合も示してある。

以上のようにプロアが停止して空気が完全に止まるといふ仮想上の最悪の場合には、プロア停止後およそ27時間で、ガラス中心は許容温度に達する。また、プロアを再稼動する事によりおよそ30時間で正常状態に達する。なお、この場合再稼動の様子については仮定は用いていないので、どのような状態からの再稼動でもおよそ30時間で正常状態に達する

と考えられる。

(2) 低風量時と再通風時

ブロアの故障により通風量が少なくなったことを想定した低風量時とその後の再通風時の過渡解析結果を図 3.6.2 に示す。低風量時の風量としてここではブロア 4 分の 1 基分の風量を仮定した。図 3.6.2 は最も高温の固化体として最小風量ピットの最上段固化体を示す。

図 3.6.2 に示すように低風量時の場合はおよそ 5.7 時間後に定常状態に達する。その後ブロア 2 基によって冷却すると再稼動後およそ 3.0 時間後には正常状態に復旧する。

(3) 自然空冷時と再通風時

ブロアが 2 基稼動している正常運転時から、ブロアが停止して、自然対流によって空気が流れる自然空冷時とその後の再通風時の過渡解析を行う。

自然対流の計算条件としては保管庫の下部プレナムを基準として高さ 3.0 m、900 φ 円型ダクトをプレナム入口と出口側に設けている。ダクトの圧損係数としては、通常運転時のブロア 2 基稼動時のレイノルズ数がおよそ  $2 \times 10^6$  であり、これに Fanning の式を適用して 0.016 とした。また HEPA フィルターはつけていない。

正常運転時から自然空冷時になり、その後再通風する過渡時の計算結果を図 3.6.3 に示す。

図 3.6.3 は最も高温の固化体として最小風量ピットの最上段固化体の温度変化を示す。図 3.6.3 に示すようにガラス中心温度は自然空冷に移行してからおよそ 3.0 時間後にほぼ定常状態になり、このときの温度はおよそ 290 (°C) である。これは図 3.6.2 に示したブロア 1/4 基分の流量があるときの温度よりも低くなっている。自然空冷時の風量はおよそ 19,000 (Nm<sup>3</sup>/hr) であり、これはおよそブロア 1/2 基分に相当する。このように自然対流時にはブロア 1/4 基分よりも多い風量となっている。

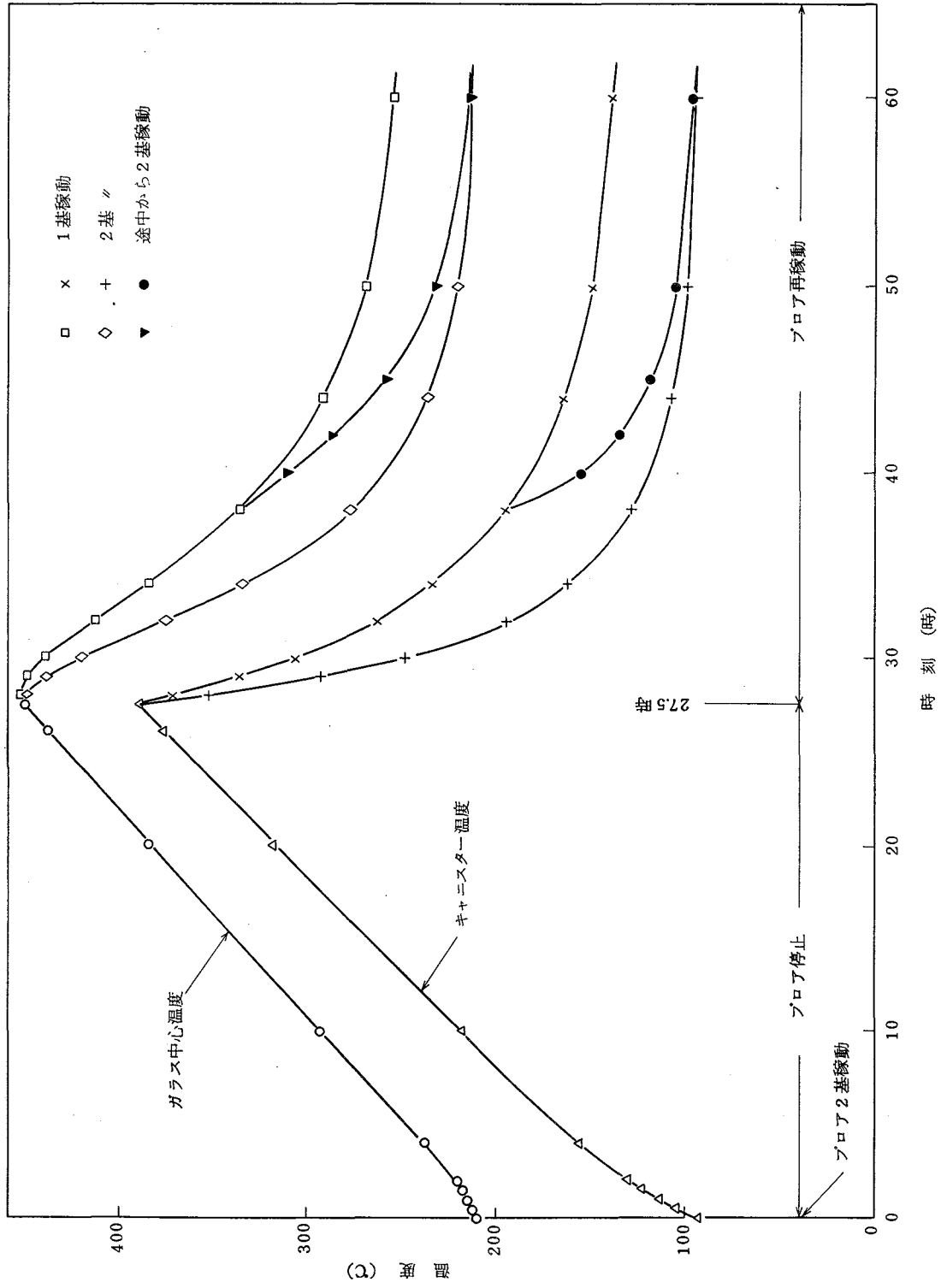


図 3.6.1 異常時と再通風時 (高温固化体)

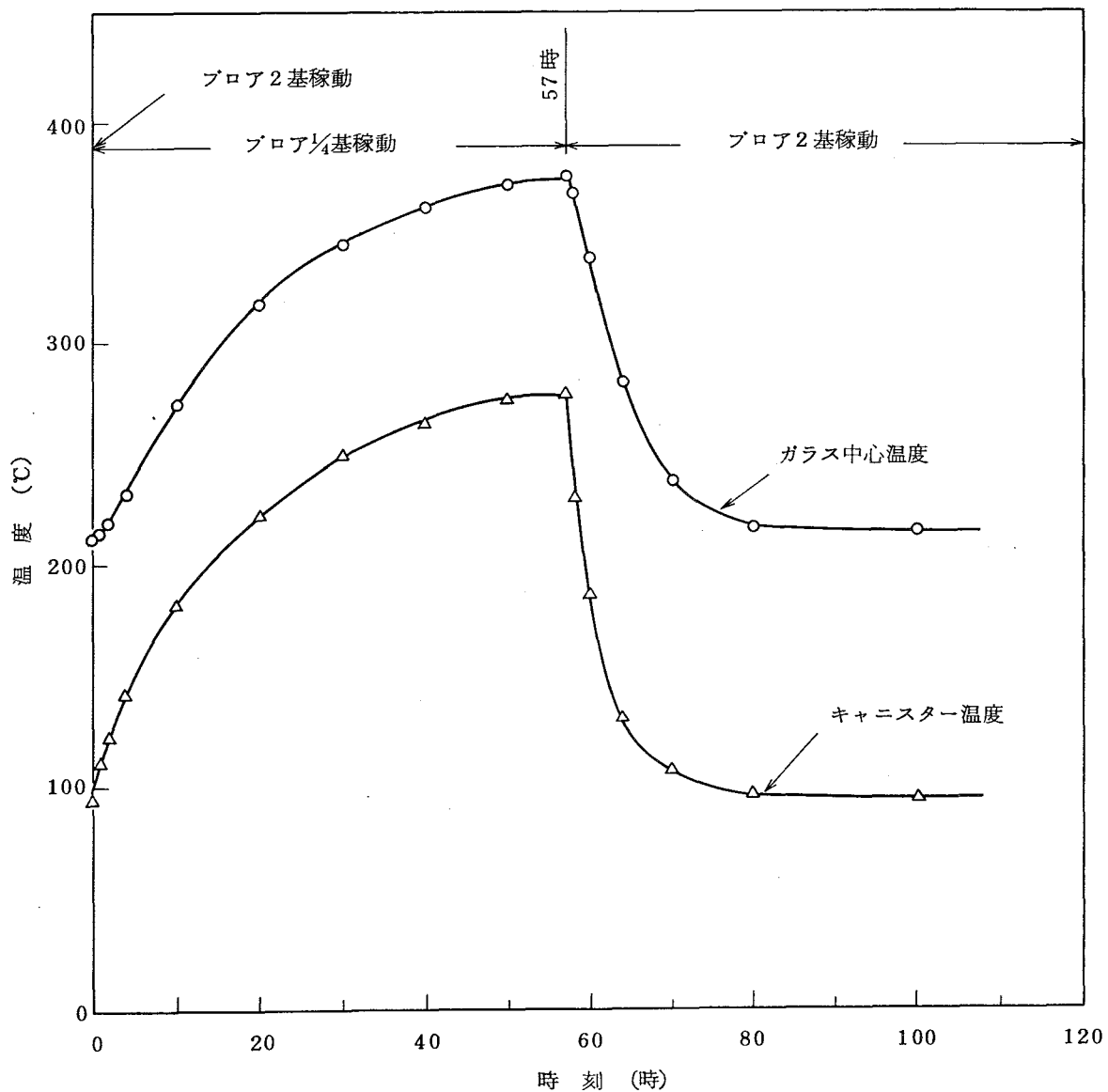


図 3.6.2 異常時と再通風時 (高温固化体)

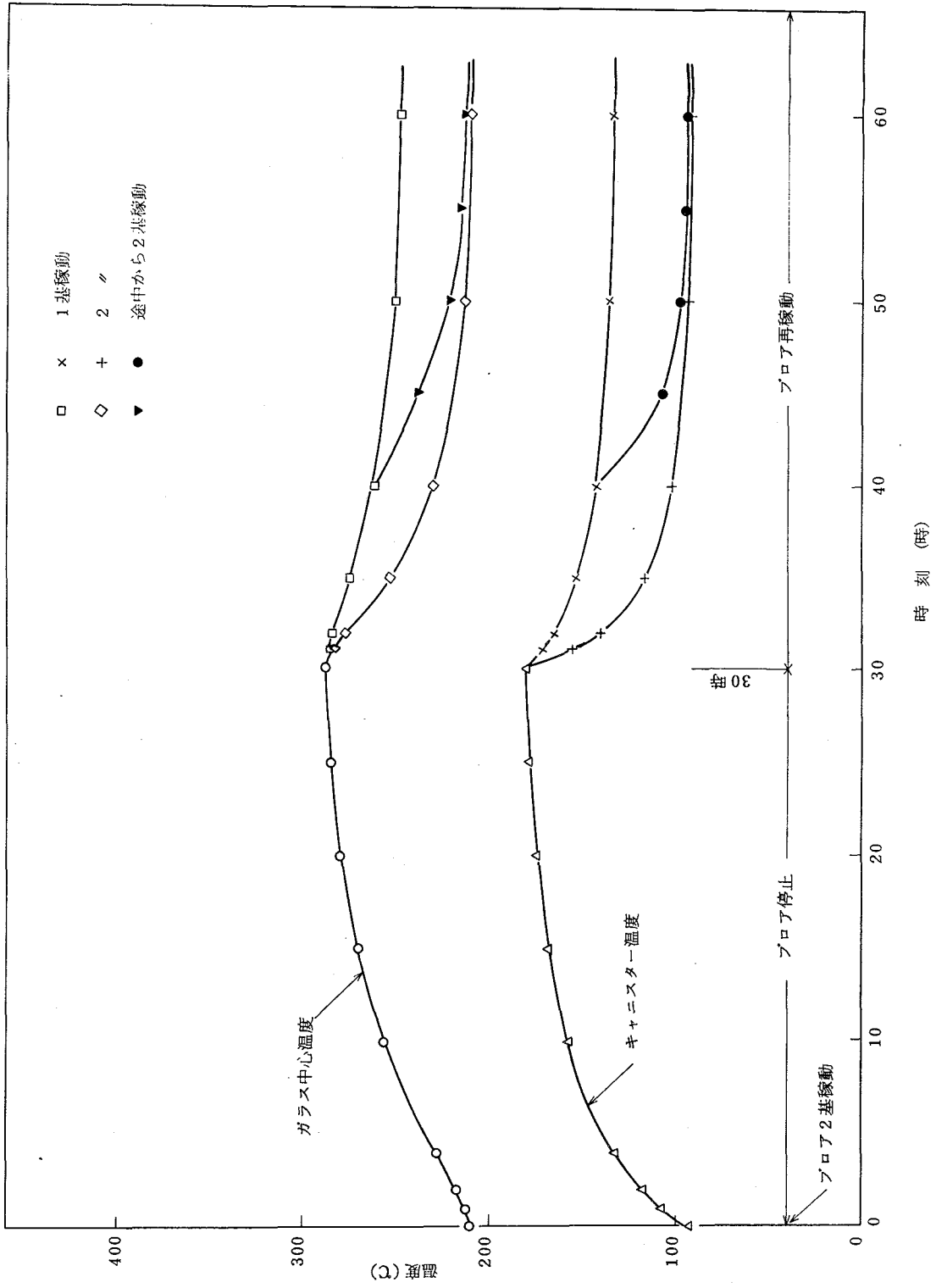


図 3.6.3 異常時（自然空冷時）と再通風時（高温固化体）

#### 4. 廃熱有効利用時における伝熱特性解析

保管庫においては、固化体から発生する熱を有効に利用する事が考えられている。熱の回収は熱交換器によって行い、1行13列のピットを閉サイクル空冷する。ここではFLOSTコードを用いてこのときの保管庫の伝熱特性を解析した。

図4.1に示すように各部の温度は熱伝達率の増加とともに下がる。熱伝達率が0.5以下になると急に温度は高くなり0.1の場合はガラス温度はおよそ、400℃となる。熱伝達率が1.0の場合はガラス温度はおよそ230℃となる。このときプレナム出口の空気温度は図4.1に示すようにおよそ67℃となっている。

図4.2に過渡解析結果を示す。

PNC-SJ 199 84-20

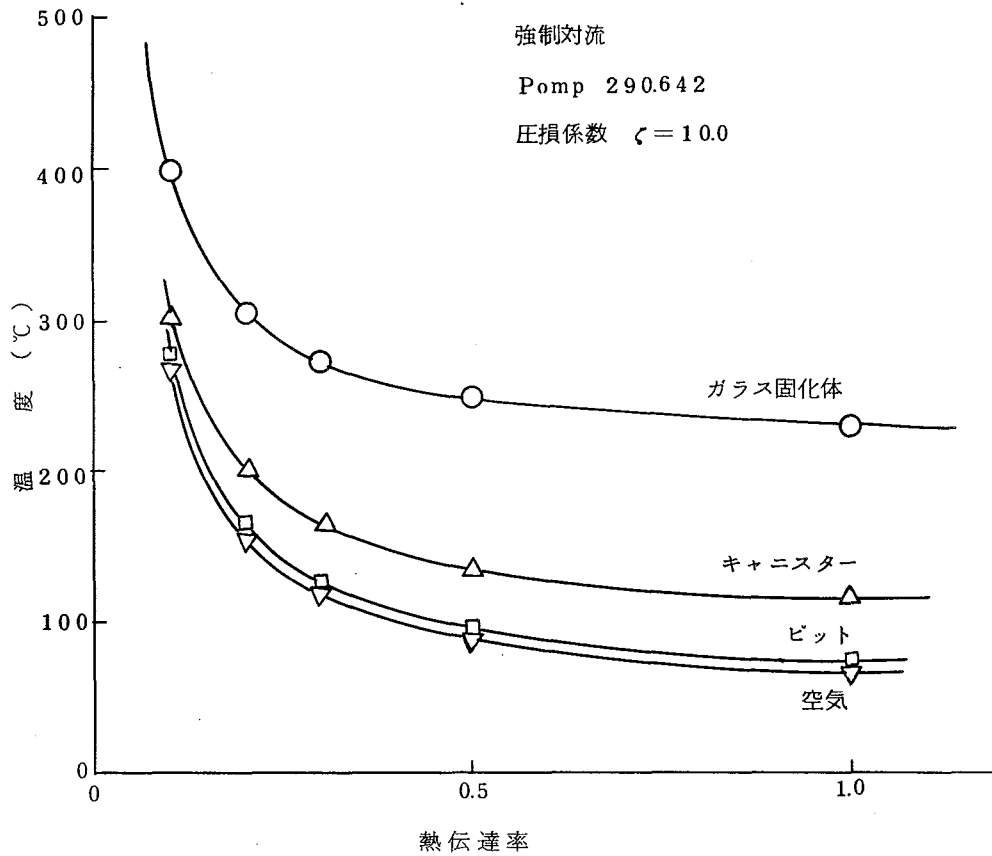


図 4.1 各 部 の 温 度



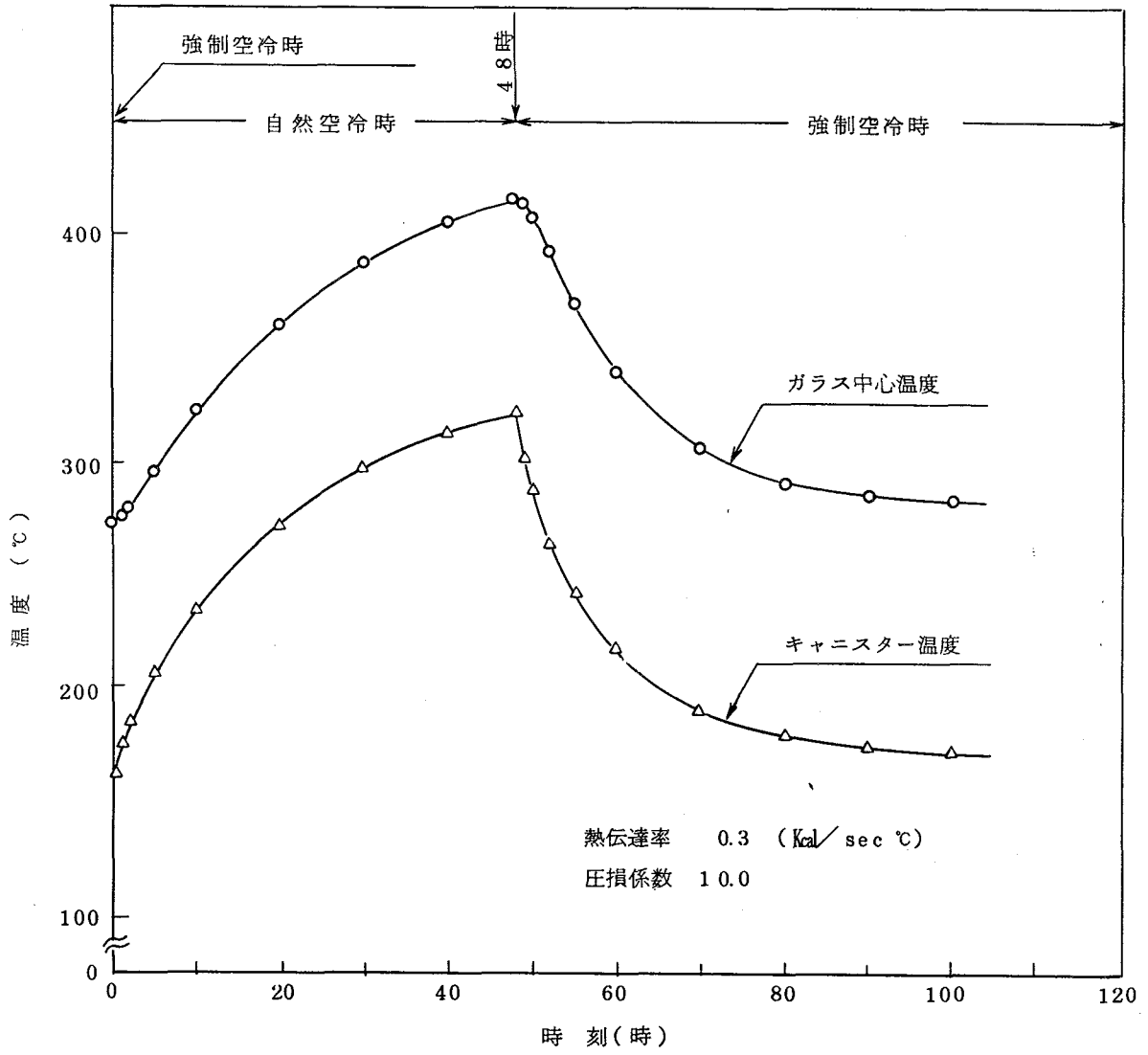


図 4.2 過 渡 解 析

## 5. 岩盤内長期貯蔵施設の伝熱特性解析

ここでは「ガラス固化体の貯蔵時伝熱流動計算コード(FLOSTコード)」を用いて、岩盤内長期貯蔵施設の伝熱特性についての計算を行った。施設の概要を図5.1に示す。

ここでは外気の変動、日変化は考えずに固化体作成後10年たってから30℃の岩盤内貯蔵施設に固化体を貯蔵した場合の計算をした。ここで、岩盤への伝熱は排気用立坑部のみとして、ピット部から岩盤への伝熱は無視した。立坑は100m、入気温度は30℃とした。

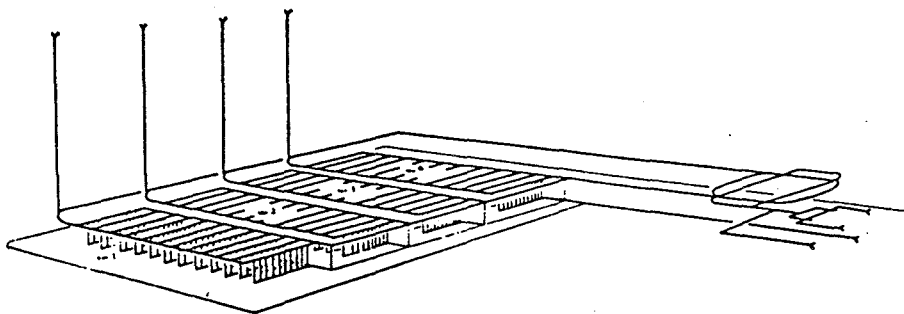
このときの固化体の温度を図5.2に示す。また岩盤の温度を図5.3に示す。

立坑体あたりの空気の流量は貯蔵した時点ではおよそ193(kg/sec)(555,000(Nm<sup>3</sup>/hr))であり、時間とともに減少していく。しかし発熱量も減少するため、図5.2に示すようにガラス固化体の温度も減少する。

図5.3に示すように立坑付近の岩盤温度は立坑からの距離に比例して、最高温度になる時期が遅く、かつ温度が低くなっている。これは岩盤中での熱の伝わり方が遅いため岩盤中での温度が最高になるころには固化体の発熱量が小さくなり再び温度が下がっていくためと考えられる。

図5.4に発熱量と温度の関係を示す。

PNC-SJ 199 84-20



(動燃殿資料による)

図5.1 施設レイアウト

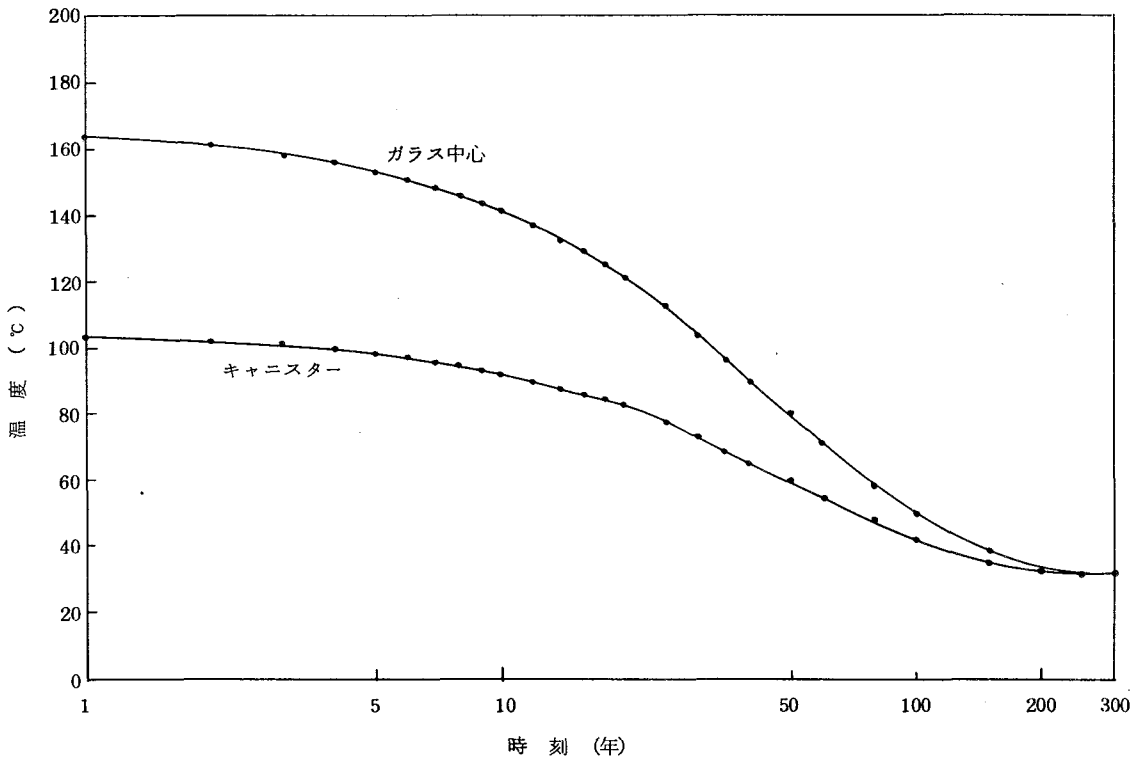


図 5.2 ガラス中心・キャニスターの温度変化

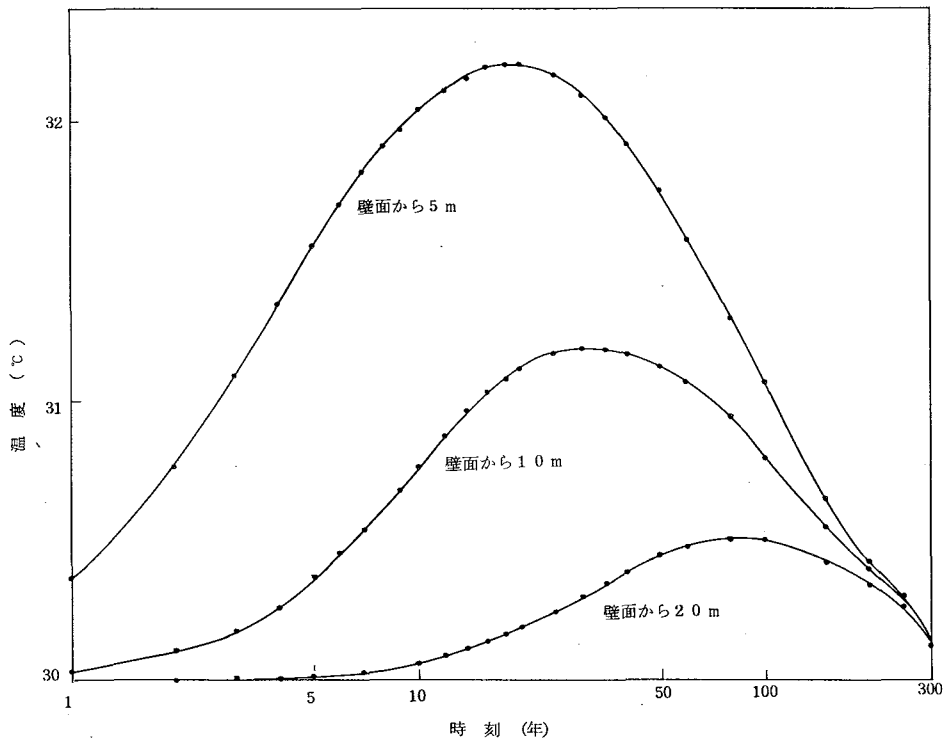


図 5.3 排気用立抗部分の温度変化

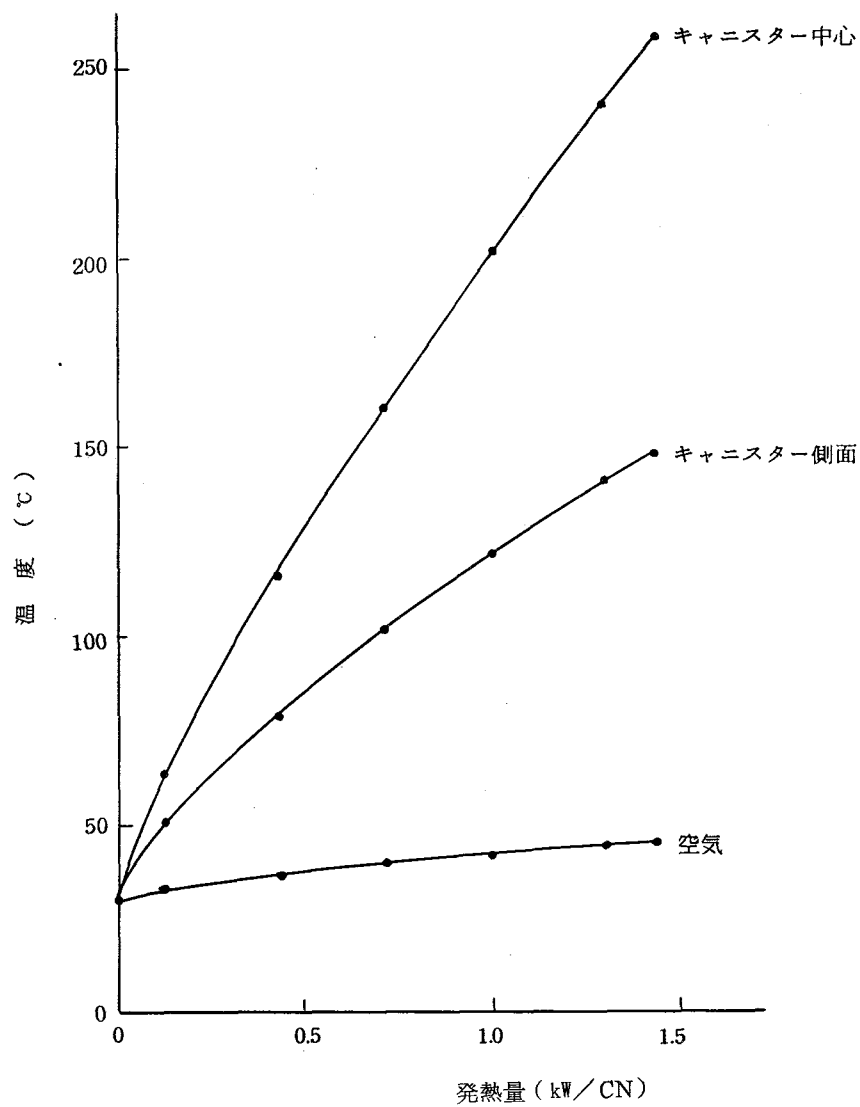


図5.4 定常発熱時の温度

## 6. 新形状固化体の伝熱特性解析

ここでは、新形状固化体の発熱量を求めるORIGEN計算と、その発熱量を用いた大気放冷時の伝熱特性解析を行った。

ガラス固化体一本当りの発熱量を図6.1に示す。また固化体一本当りのActivityと $\gamma$ 線表面線量を図6.2と図6.3に示す。

大気放冷時の伝熱計算は、まず、ガラス注入時の実験結果との比較計算から行った。ガラス注入量は300kg、注入ガラス平均温度1,030℃、注入時間124分である。図6.4にガラス注入計算結果の温度分布図を示す。

ガラス注入計算結果の注入完了時の温度分布を引き継いで短期温度変化の非定常計算を行った。つぎに、長期の温度変化計算として、各時刻の発熱量を用いた定常計算を行った。

図6.5にガラス注入時から保管庫に格納したときまでの温度変化を示す。保管庫に格納したときの条件としては、4行13列5段積みピット配置で、フロア2基(72,710(Nm<sup>3</sup>/hr))の風量で強制空冷している。このときの最高温度固化体と最低温度固化体について、それぞれガラス中心温度とキャニスター温度を示している。

---

(注\*) 大気放冷時とは、風がない室内で自然対流熱伝達とまわりへの熱輻射を考慮した伝熱環境を言う。

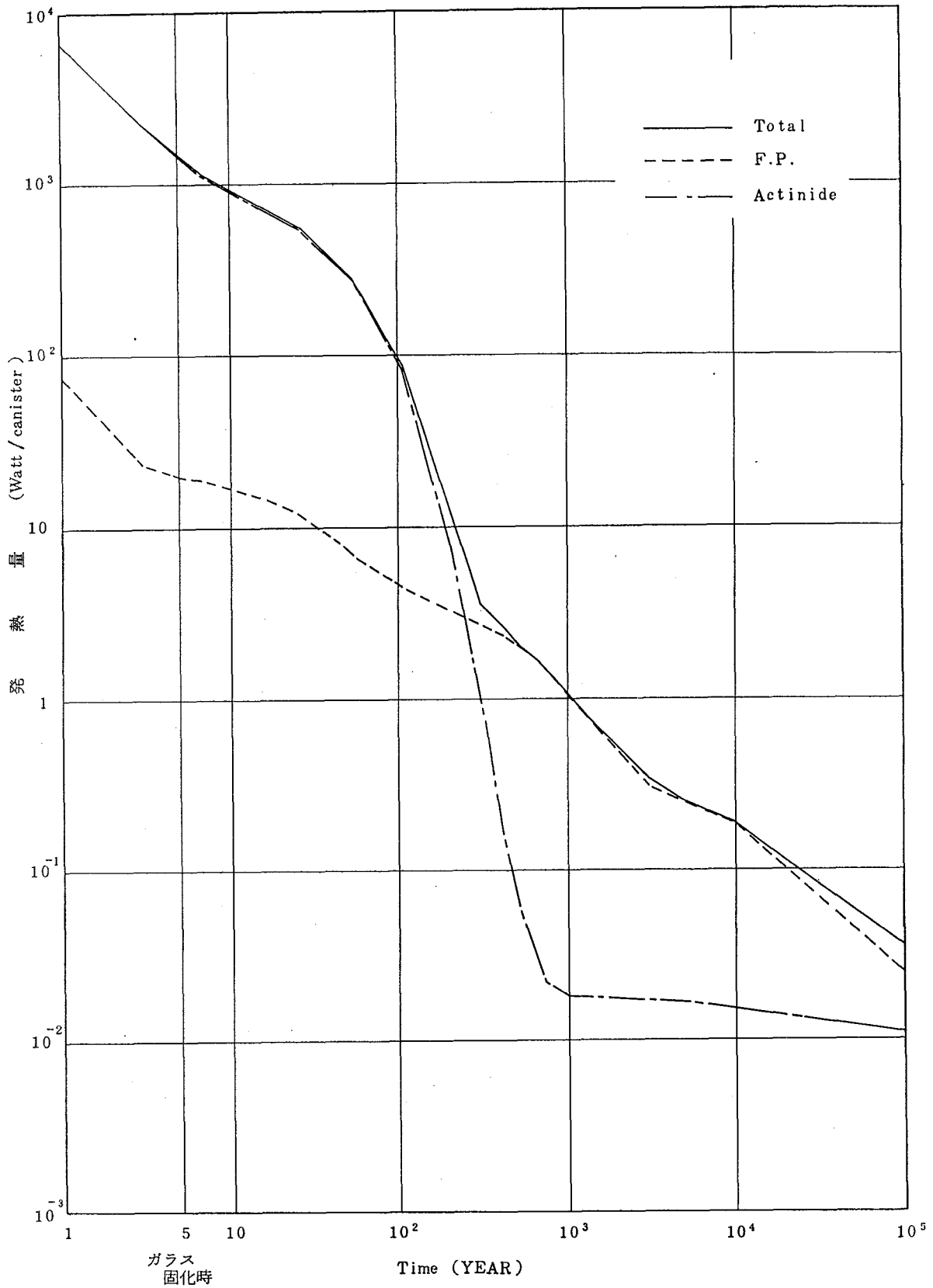


図 6.1 ガラス固化体一本当りの発熱量 (Watt / Canister)

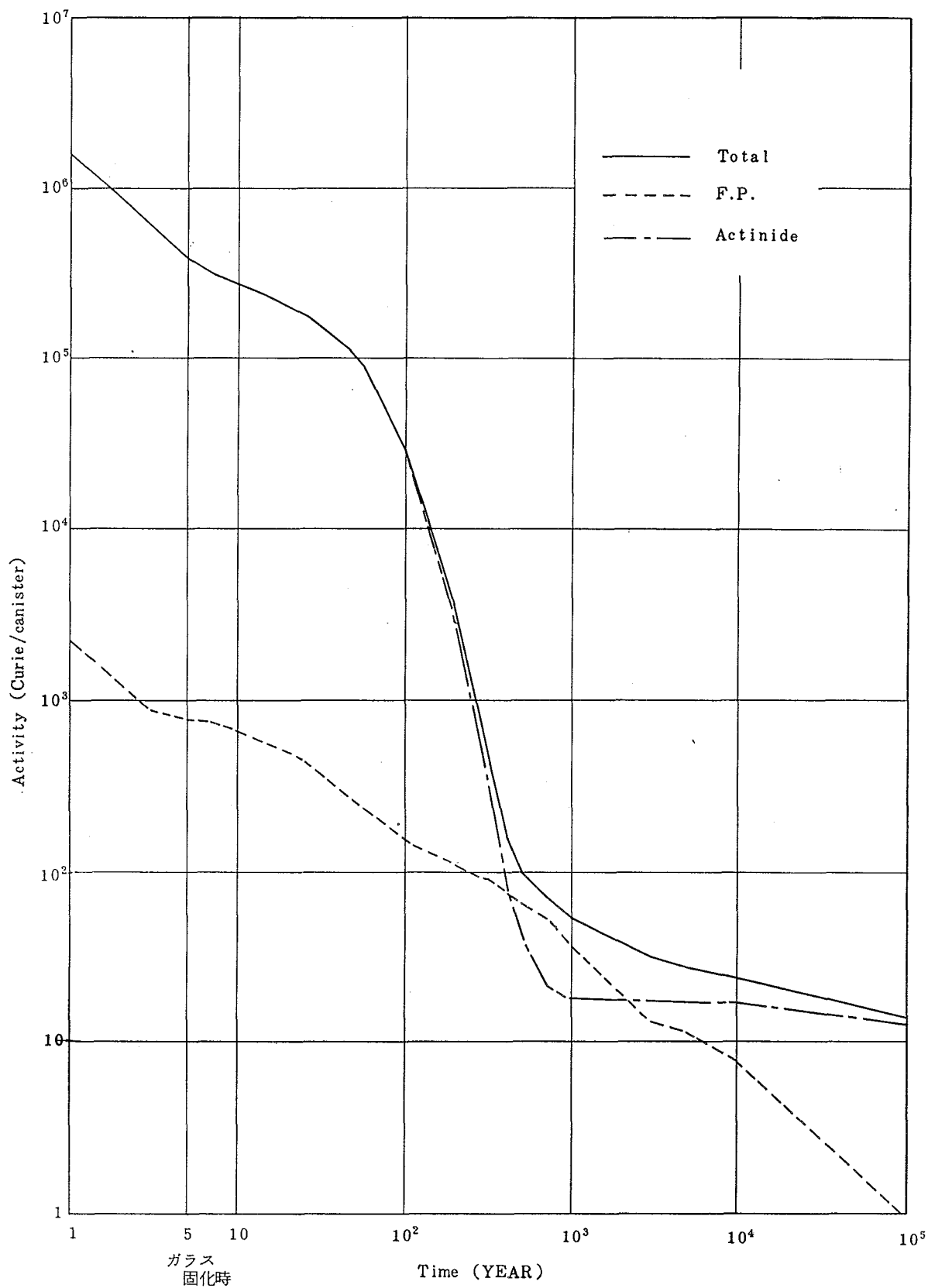


図 6.2 ガラス固化体一本当りの Activity (Curie / Canister)

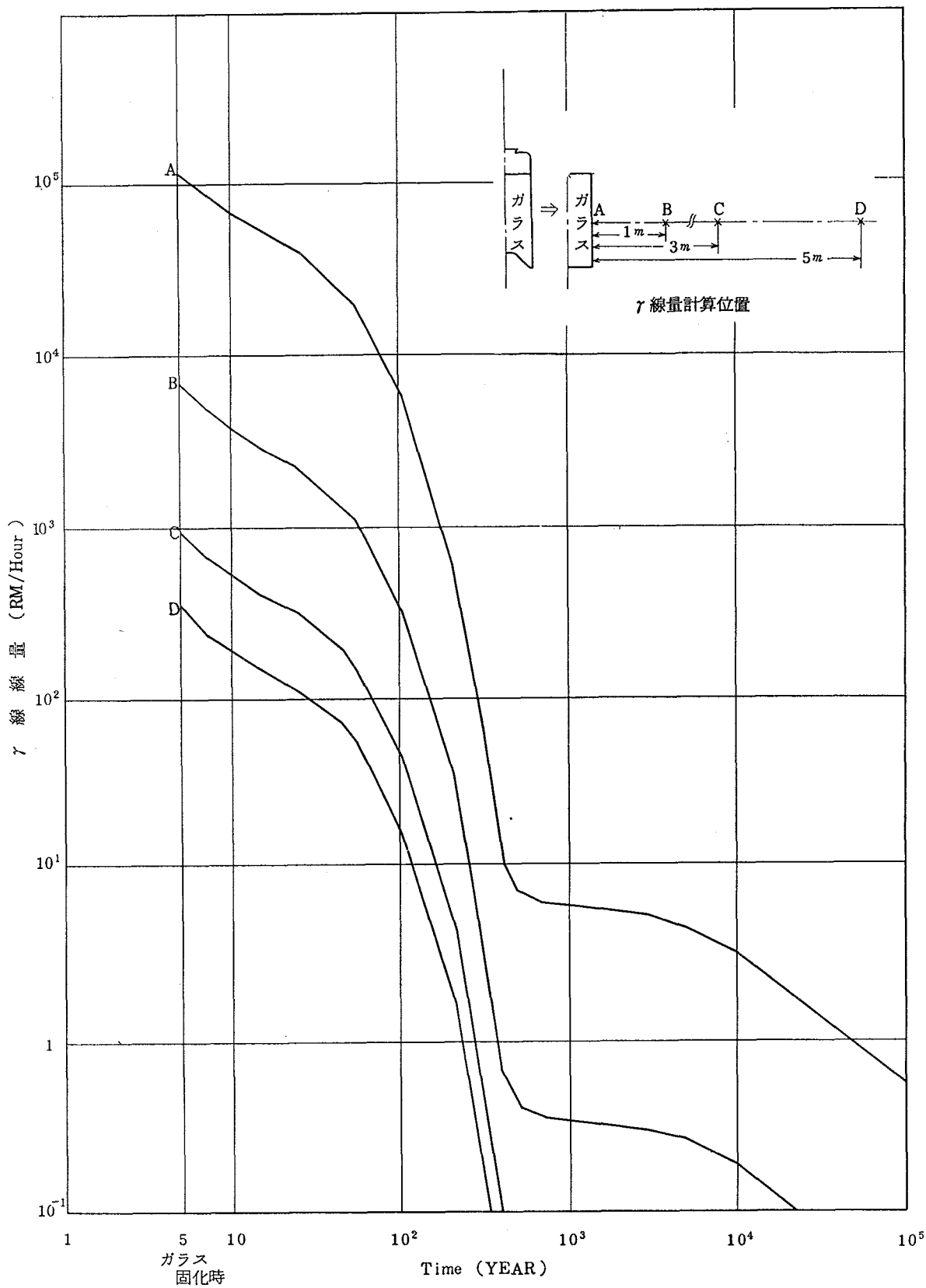


図 6.3  $\gamma$  線表面線量



PNC-SJ 199 84-20

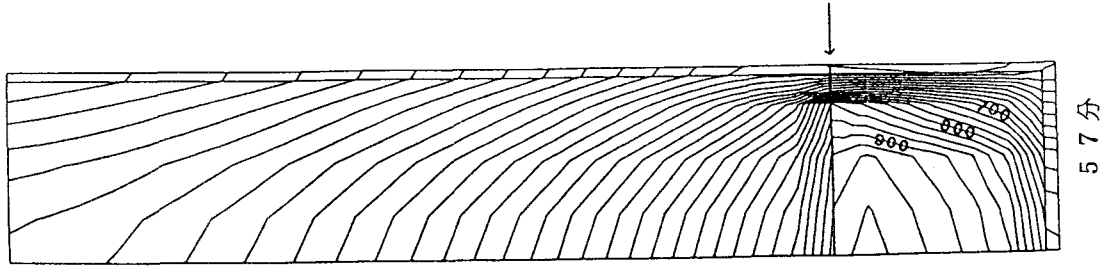
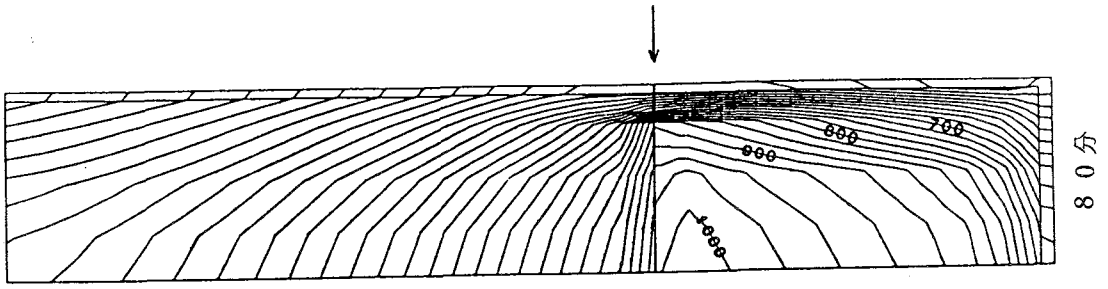
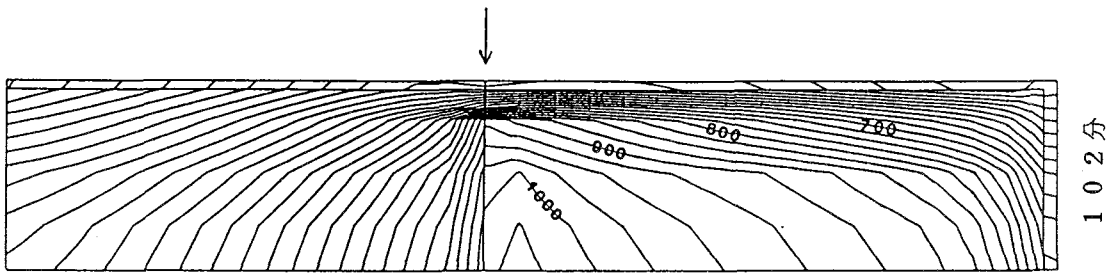
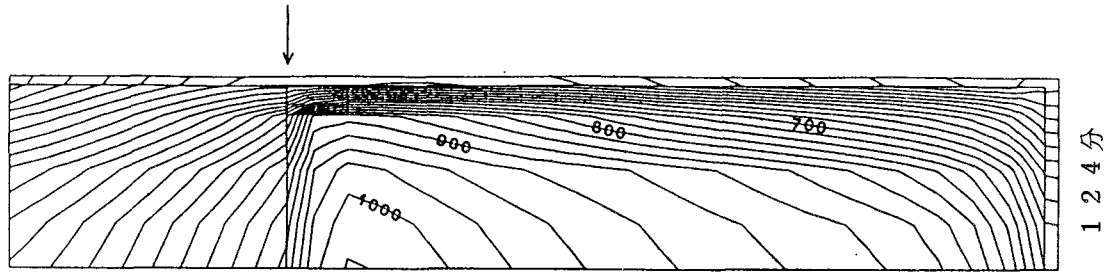


図6.4 ガラス注入計算結果(注入中)

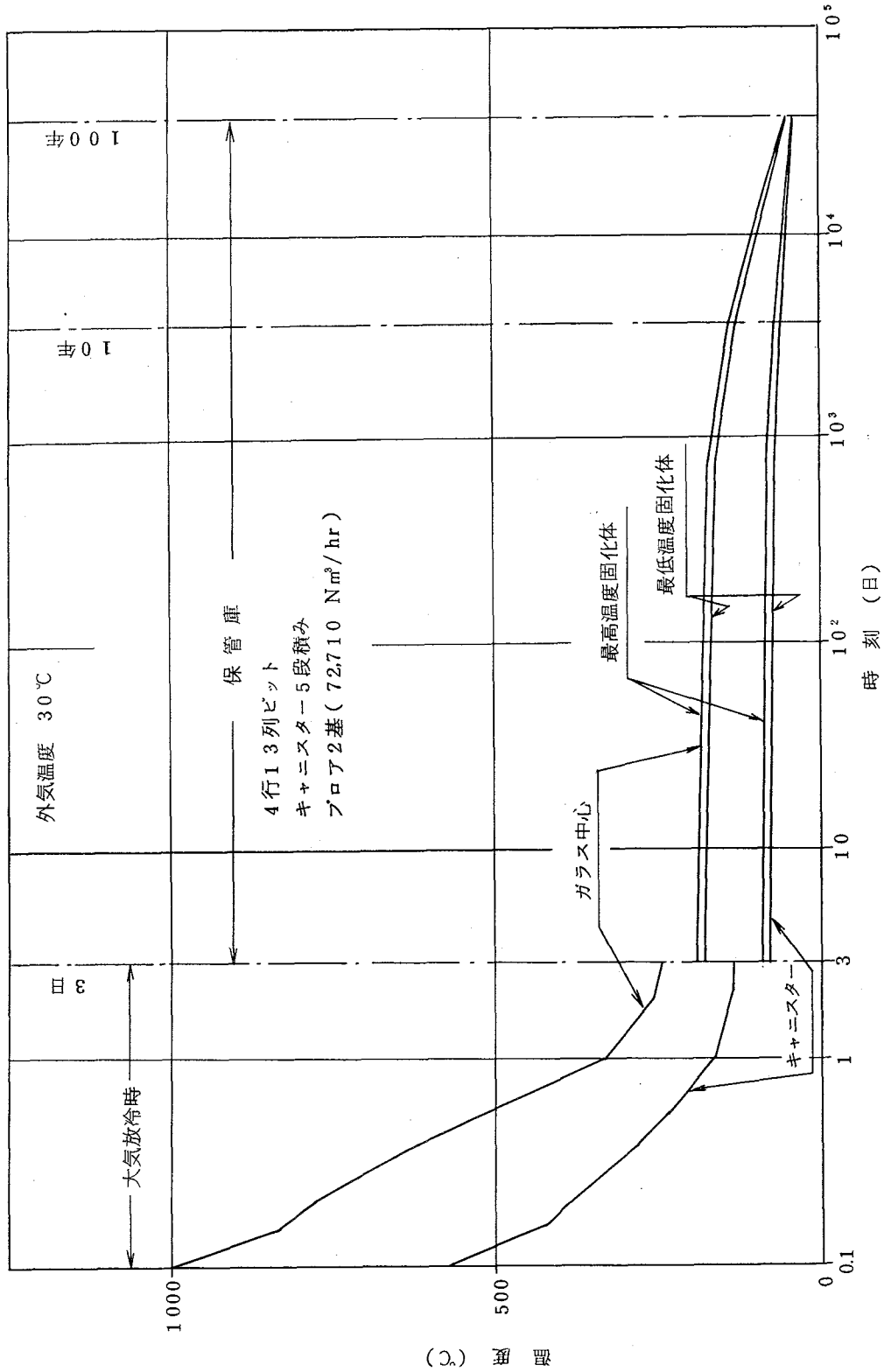


図 6.5 ガラス中心及びキャニスター-外壁部の長期温度変化

## 参 考 文 献

- (1) 大島務他：高レベル廃棄物の貯蔵時における伝熱流動解析手法の開発、S J 1 9 9 8 2 - 0 2、1 9 8 2
- (2) 大島務他：高レベル廃棄物の貯蔵時における伝熱流動解析手法の開発(II)、S J 1 9 9 8 3 - 0 8(2)、1 9 8 3
- (3) 大島務他：ガラス固化体の熱的挙動解析モデルの開発、S J 1 9 9 8 2 - 0 8、1 9 8 2
- (4) 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会編：管路・ダクトの流体抵抗、社団法人 日本機械学会、1 9 7 8
- (5) 伝熱工学資料改訂第3版、社団法人 日本機械学会、1 9 7 5
- (6) Assessment of a Numerical Technique for Thermal Analyses about Waste Canister Arrey.
- (7) 地熱調査ハンドブック (社)日本地熱学会
- (8) 岩の工学的性質と設計・施行への応用 土質学会
- (9) J.S.Ritchie, J.S.Busch et al: Thermal Criteria for Theminal Storage of Spent Nuchear Fuel Assemblies in Bedded Salt, Nuclear Engineering and Design, 1 9 8 1
- (10) 湯原浩三 監修：地熱開発総合ハンドブック
- (11) M.K.Atenhofen : Waste Package heat-transfer Analysis Model development and Temperature estimate for Waste package in a Repository. Located in Basalt, KE/PB and Rockwell, 1 9 8 0
- (12) 尾花英朗：熱交換器設計ハンドブック、工学図書 1 9 8 0
- (13) 熱交換器、化学工学協会、丸善 1 9 6 9
- (14) 井上宇市編：ダクト設計施工便覧、丸善 1 9 8 0
- (15) C.W.Hirt, B.D.Nichols. and N.C.Romelo : SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flow, Los Almos Scientific Laboratory Report LA-5 8 5 2
- (16) M. J. Bell : ORIGEN The ORNL Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-4 6 2 8
- (17) 甲藤好郎：伝熱概論、養賢堂 1 9 7 2