

JAERI-Research

99-054



JP9950603



高温工学試験研究炉における 1 次上部
遮へい体用材料中の水分量検討

1999 年 9 月

角田淳弥・沢 和弘・茂木春義・板橋秀治・北見俊幸
坏 陽一・瀧田安浩*・川口 徹*・守屋正裕*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

高温工学試験研究炉における1次上部遮へい体用材料中の水分量検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

角田 淳弥・沢 和弘・茂木 春義・板橋 秀治⁺・北見 俊幸⁺

坪 陽一⁺・湊田 安浩^{*}・川口 徹^{*}・守屋 正裕^{*}

(1999年8月5日受理)

高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR)の1次上部遮へい体は、鉄枠中に遮へい体であるコンクリート(グラウト)を封入したものである。1次上部遮へい体の主な機能は、燃料取扱フロア、スタンドパイプ室の線量当量率が遮へい区分の制限値を満足するように炉心からの中性子およびガンマ線を減衰させることである。温度が上昇した場合に特に重要になるもののひとつに、中性子遮へいに大きな影響を与えるコンクリート中の水の含有量(含水量)がある。そこでコンクリート温度と含水量の関係を把握するために、炉外試験を行った。本試験結果に基づき、コンクリートからの水の散逸挙動のモデルを作成した。そのモデルを1次上部遮へい体に適用した結果、1次上部遮へい体の温度が110℃以下であれば、遮へい評価に用いている含水量が保持されるという結論を得た。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

⁺建設部

^{*}株式会社大林組

Investigation of Water Content in Primary Upper Shield
of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)

Junya SUMITA, Kazuhiro SAWA, Haruyoshi MOGI,
Shuuji ITAHASHI⁺, Toshiyuki KITAMI⁺, Youichi AKUTU⁺,
Yasuhiro FUCHITA^{*}, Toru KAWAGUCHI^{*} and Masahiro MORIYA^{*}

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 5, 1999)

A primary upper shield of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) is composed of concrete (grout) which is packed into iron frames. The main function of the primary upper shield is to attenuate neutron and gamma ray from the core, that leads to satisfy dose equivalent rate limit of operating floor and stand-pipe room. Water content in the concrete is one of the most important things because it strongly affects neutron-shielding ability. Then, we carried out out-of-pile experiments to investigate relationship between temperature and water content in the concrete. Based on the experimental results, a hydrolysis-diffusion model was developed to investigate water release behavior from the concrete. The model showed that water content used for shielding design in the primary upper shield of the HTTR will be maintained if temperature during operating life is under 110°C.

Keywords: HTTR, Shielding, Primary Upper Shield, Concrete, Temperature,
Water Content, Model

⁺Department of Construction

^{*}Obayashi Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験	5
2.1 乾燥単位容積重量試験	5
2.2 強熱減量試験	5
3. 試験結果	8
3.1 乾燥単位容積重量試験	8
3.2 強熱減量試験	8
4. 考察	21
4.1 モデルの作成	21
4.2 1次上部遮へい体へのモデルの適用	25
5. 結論	37
謝辞	37
参考文献	38
付録 強熱減量予備試験	39

Contents

1. Introduction	1
2. Tests	5
2.1 Unit Weight Measurement	5
2.2 Fixed Water Measurement	5
3. Results	8
3.1 Unit Weight Measurement	8
3.2 Fixed Water Measurement	8
4. Discussions	21
4.1 Model	21
4.2 Application of the Model	25
5. Conclusions	37
Acknowledgments	37
References	38
Appendix Pre-test Result for Fixed Water Measurement	39

1. はじめに

高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR)は、原子炉熱出力 30MW、原子炉出口ヘリウムガス温度 950℃の高温ガス炉であり、高温ガス炉の技術基盤の確立、高度化および先端的基礎研究のための試験研究に供される。HTTR の原子炉格納容器内には、主に炉心からの放射線遮へいのため、Figure1.1 に示すように 1 次遮へい体を設置している。また、原子炉格納容器上部の構造を Figure1.2 に示す。炉心を内蔵している原子炉圧力容器は原子炉格納容器内の圧力容器室にあり、圧力容器上鏡からは制御棒駆動装置を内蔵するスタンドパイプや照射用スタンドパイプ等が 31 本突き出した構造となっている。原子炉格納容器上部は、格納容器が非対称な形状であることおよび上部にスタンドパイプ室があるため、ギャップ、オフセット等が存在する複雑な遮へい構造をしている。スタンドパイプ室の上部には、放射線業務従事者が立ち入る燃料取扱フロアの遮へいとして、炭素鋼、ポリエチレンおよび鉛等からなる 2 次遮へい体(上部生体遮へい体)がある⁽¹⁾。

原子炉圧力容器室の上部は厚さ約 1m の 1 次上部遮へい体により中性子およびガンマ線を遮へいしている。1 次上部遮へい体にはスタンドパイプが貫通しているので、ここからのストリーミングを防ぐためにスタンドパイプの内部には、黒鉛と炭素鋼の遮へい材を詰めている⁽²⁾。スタンドパイプ室は炭素鋼と普通コンクリート製の 1 次側部遮へい体により側部を囲まれている。HTTR の 1 次上部遮へい体は、鉄枠中に遮へい体であるコンクリート(グラウト)を封入したものである。

普通コンクリートは、セメント、水、細骨材、粗骨材および混和材料を構成材料とし、これらを練混ぜまたはその他の方法によって一体化したものである⁽³⁾。一方、グラウトは空隙目地、ひび割れなどの細かい隙間に充填するために、主に注入材料として用いられるもので、打設時の流動性がよく、普通コンクリートと比較して粗骨材を含まないものである。1 次上部遮へい体に用いたグラウトは、普通コンクリートに比べて水セメント比(コンクリートに含まれるセメントペースト中の水とセメントとの重量比)が低い。普通コンクリートの水セメント比は、一般に約 40%~60%程度であるが、1 次上部遮へい体に用いたグラウトでは約 37%であり、水セメント比はコンクリートの強度、耐久性および水密性等に影響を及ぼす。また、このグラウトには、細骨材として FeO や Fe₃O₄ が入っているのも特徴である。

1 次上部遮へい体の主な機能は、燃料取扱フロア、スタンドパイプ室の線量当量率が遮へい区分を満足するように炉心からの中性子およびガンマ線を遮へいすることである。1 次上部遮へい体の温度は、原子炉運転中に炉室およびスタンドパイプからの入熱で上昇する⁽⁴⁾。一方、1 次上部遮へい体の中性子遮へい機能はコンクリート(グラウト)中の水分含有量(含水量)

に大きく影響されるため⁽⁵⁾、1次上部遮へい体の下面には、炉容器冷却設備(Vessel Cooling System:VCS)の冷却パネル(VCSパネル)を設け、遮へい体温度を88℃以下(設計温度)に保持することにしている。

HTTRの遮へい評価に当たっては、グラウトの密度を2.1g/cm³、含水率3.71wt%(水素の原子数密度で約8at%、水素重量比で約0.4wt%)とし、含水量として78kg/m³を用いている。この値は、一般的なコンクリートに対して用いられるもので、コンクリート温度が88℃を超えなければ、充分余裕のある値と考えられている⁽⁶⁾。1次上部遮へい体に用いたグラウトの温度と含水量との関係を確認するための試験を、1次上部遮へい体に用いたグラウトと同じ材質および調合条件のグラウトを用いて実施した。また、この試験結果を基に温度に対する水の散逸挙動をモデル化した。その結果、1次上部遮へい体の温度が110℃以下であれば遮へい評価に用いている含水量を保持することを確認した。

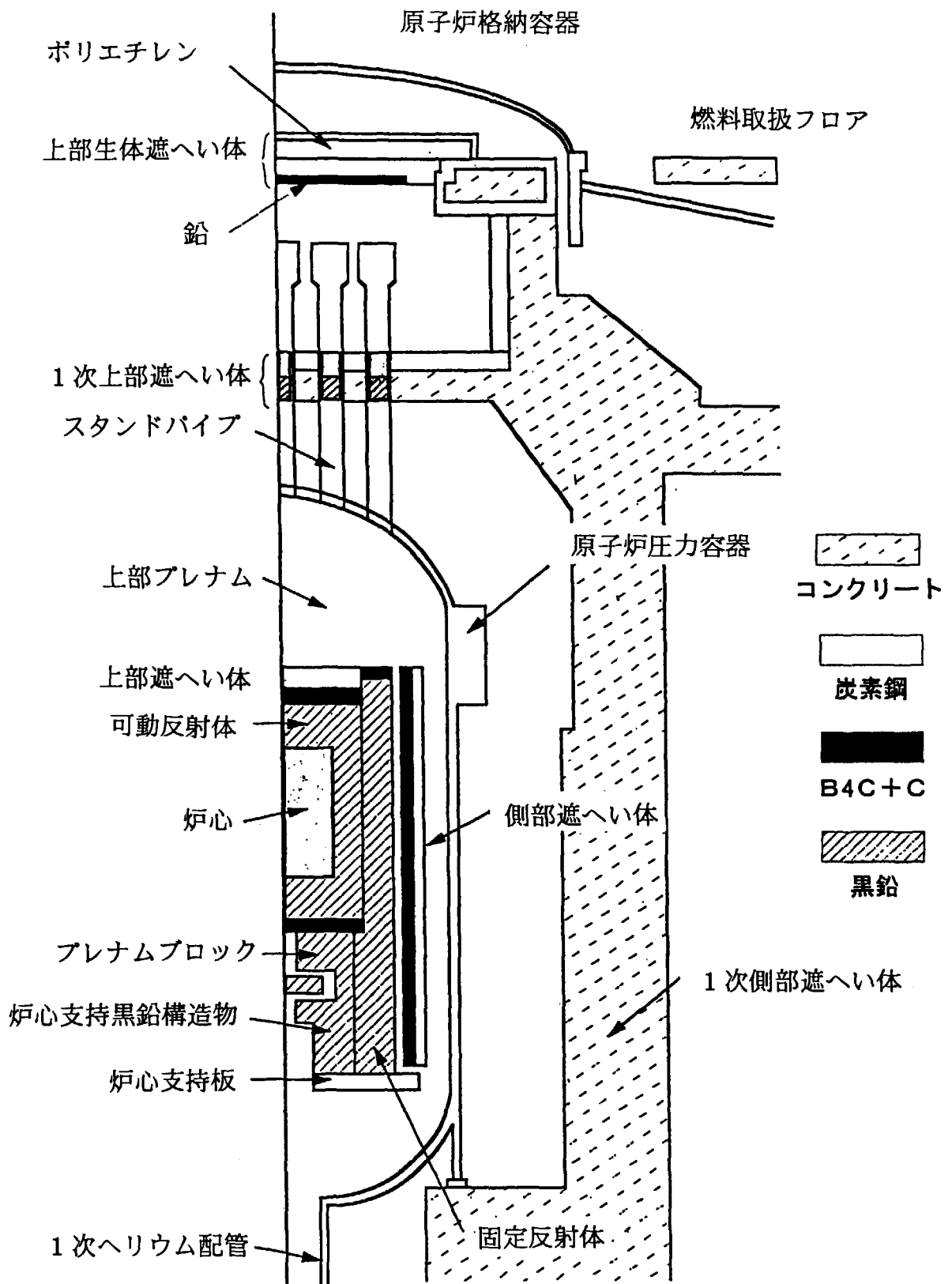


Fig. 1.1 Reactor shielding structures.

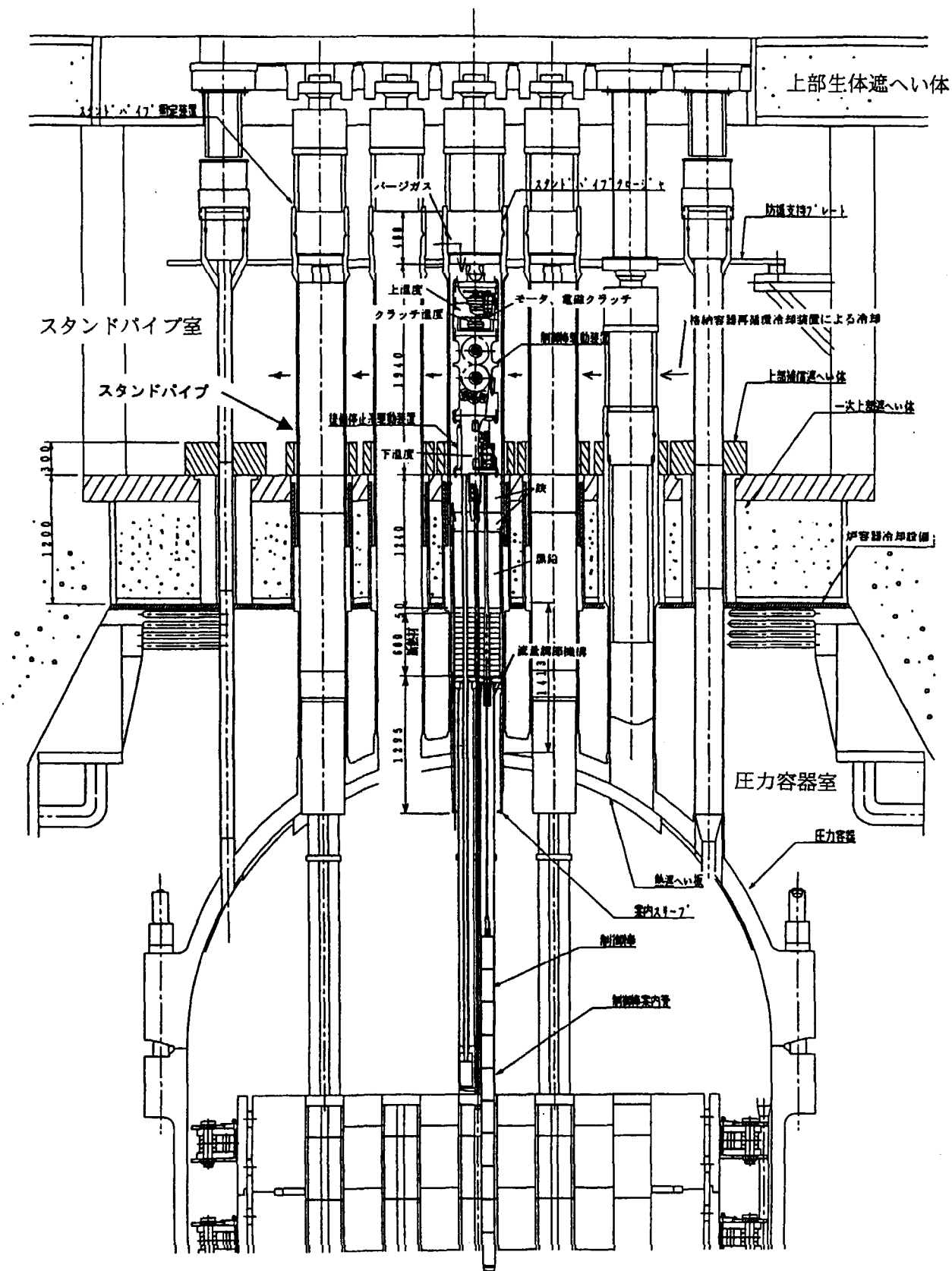


Fig. 1.2 Structure of upper RPV(Reactor Pressure Vessel)

2. 試験

炉外試験として、乾燥単位容積重量試験および強熱減量試験を実施した。まず、グラウト供試体の含水量の乾燥温度依存性および時間依存性を評価するために、ある温度で供試体の重量が一定となるまで乾燥させる乾燥単位容積重量試験を行った。乾燥単位容積重量試験後、重量が一定となった供試体には、化学結合による強い結合によって保持されている水、例えば、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等が残っている。そこで、この強い結合によって保持されている水の量を、各温度ごとに測定するために強熱減量試験を行った。また、グラウト試料の組成を確認するため、試験前後で X 線回折分析も行った。

グラウト材として、HTTR の 1 次上部遮蔽体に使用したものと同一ノンシュリンクグラウトプレミックス[NS-GP]を用いた。Table2.1 に使用したグラウトの調合条件を示す。供試体は、円柱形で直径 100mm×高さ 200mm(100φ 試料)および直径 150mm×高さ 300mm(150φ 試料)の 2 種類とした。練り上がったグラウトは、成形後材齢 28 日まで適当な温度と湿度を保つと同時に、有害な作用から保護するいわゆる標準養生を行った。

2.1 乾燥単位容積重量試験⁽⁷⁾

標準養生を終了した供試体の重量を大気中で測定した後、供試体を水中につけ供試体の水中重量を測定し、空中重量と水中重量の差を水の温度に応じた比重で除した値を供試体の容積とした。容積を測定後、水中から取り出した供試体を $65 \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $90 \pm 5^\circ\text{C}$ 、 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 、 $140 \pm 5^\circ\text{C}$ および $175 \pm 5^\circ\text{C}$ に保った乾燥炉中で、100φ および 150φ それぞれ 3 本ずつの供試体が一定重量になるまで乾燥を続けた。一定重量であるか否かの判断は、参考文献(7)の JASS 5N T-601 に準じ、供試体の重量変化が 2 日で 1g 以下になった時を乾燥状態とし、その重量を 0.5g まで測定した。試験条件を Table2.2 に示す。

2.2 強熱減量試験

各温度における乾燥単位容積重量試験後の供試体を粉碎、縮分し 0.1mm 以下に粉碎した試料 20~50g を用いて強熱減量試験を行い、(2-1)式にしたがって結合水量を求めた。この時の強熱条件は、付録に示すような予備試験を行い強熱温度 700°C 、強熱時間 30 分とした。試料の粉碎・縮分の手順を、Figure2.1 に示す。またこの際、加熱による脱水のメカニズムを考察するために熱分析を実施した。

$$\text{強熱結合水量}(\text{kg}/\text{m}^3) = \{(W_T - W_0) / W_T\} \times \rho_T \quad (2.1)$$

W_T : 温度 T における恒量加熱重量(g)

W_0 : 温度 700°C における強熱重量(g)

ρ_T : 温度 T における乾燥単位容積重量(kg/m^3)

Table2.1 Preparation condition
of samples

練り上がり温度 °C	Jロート流下時間 秒	グラウト kg	水 litres
10以上25以下	8±2	25	3.65±0.15

Table2.2 Conditions of Unit Weight Measurement

Temperature(°C)	Number of samples	
	100 φ	150 φ
65±3	3	3
90±5	3	3
110±5	3	3
140±5	3	3
175±5	3	3

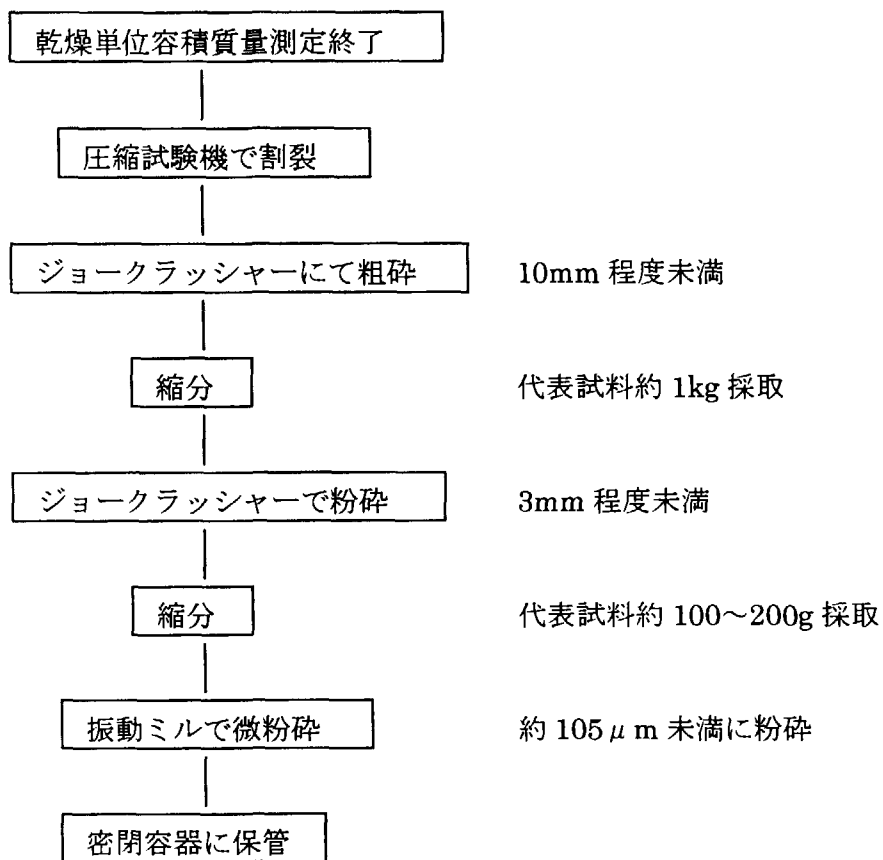


Fig.2.1 Flow diagram of preparing fixed water measurement test

3. 試験結果

3.1 乾燥単位容積重量試験

乾燥質量を供試体容積で除した値を乾燥単位容積重量とした。Figure3.1～3.5 に、各温度における 100φ および 150φ の乾燥単位容積重量の乾燥日数依存性を示す。乾燥温度の違いを反映して、各温度ごとに乾燥単位容積重量の整定値が異なった。100φ と 150φ では、整定するまでの時間は異なるが、各温度について乾燥単位容積重量の整定先はほぼ同じであり、Figure3.1～3.5 の曲線から推定する限りでは、最終的な水の散逸量に大きな差はないと考えられる。

また、Figure3.6 に水中養生前であるグラウト粉体の X 線回折分析の結果を、Figure3.7 に 175°C-150φ の条件で乾燥したグラウト粉体の X 線回折分析の結果を示す。Figure3.7 から Katoite($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$) および Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$) の回折ピークが確認できた。乾燥後のコンクリートには、このように化学的に結合をしている水(水素)が存在する。これらの水は比較的強く結合していると考えられる。グラウト中には、 Fe_3O_4 と FeO が存在していることが確認できた。これらの酸化鉄は、高温になると次式のような酸化反応をする可能性がある。

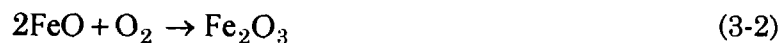
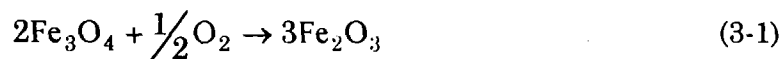


Figure3.7 より、乾燥後のグラウト中に Fe_2O_3 は検出されていない。したがって、(3-1) および (3-2) 式のような酸化反応は本試験中には進んでおらず、酸化による質量増加の誤差はないと考えられる。

3.2 強熱減量試験

乾燥期間が終了した供試体を粉砕、縮分し、0.1mm 以下に粉砕した試料 20～50g を用いて強熱減量試験により、(3-3) 式によって結合水量を求めた。Figure3.8 に、乾燥温度による結合水量の変化を表した。

$$\text{強熱結合水量(kg/m}^3\text{)} = \{(W_T - W_0) / W_T\} \times \rho_T \quad (3-3)$$

ここで、

W_T : 温度 T における恒量加熱重量(g)

W_0 : 温度 700°C における強熱重量(g)

ρ_T : 温度 T における乾燥単位容積重量(kg/m³)

これより、乾燥温度 110°C 以下で遮蔽設計条件 78kg/m³ 以上を満たすことがわかり、110°C ~ 140°C の間にしきい値があることがわかる。

各温度および各径ごとに母平均の区間推定を、信頼率 95% で JIS の規格に準拠して行った結果を Figure 3.9 に示す^⑧。110°C 以下であれば下限限界でも、遮蔽設計条件 78kg/m³ を満足することが分かる。

強熱減量試験で得られた TG 曲線を Figure 3.10 および Figure 3.11 に示した。TG 曲線は、物質を連続的に加熱している間の化学変化等によって生じる重量変化を連続的に測定するものであり、縦軸は重量の相対値(%)、横軸は温度(°C)である。乾燥温度の異なる試料について分析データを比較すると、それぞれの乾燥温度付近までは、加熱乾燥によって減少しないことが分かる。これは乾燥単位容積重量試験中に、移動できる水、すなわち物理的吸着水等の弱い結合水がすでに除かれたためである。加熱温度が大きくなるにしたがって約 450°C まではほぼ直線的に減少し、450°C からは急激に減少する。450°C 付近での ΔTG は乾燥温度ごとに差はなく、どれもほぼ同じであり、強い結合によって保持されている Ca(OH)₂ 等の結合水が失われたためであると考えられる^④。さらに 600°C 付近で質量が減少する。これはセメント中の化合物の分解反応が生じたことにより、水の遊離が起こったためと考えられる^⑨。また 700°C を超えたあたりから次第に質量は増加するが、これは乾燥単位容積重量試験で生じなかった FeO および Fe₃O₄ の酸化が 700°C を超えて発生したことが原因と考えられる(詳細を付録に示す)。

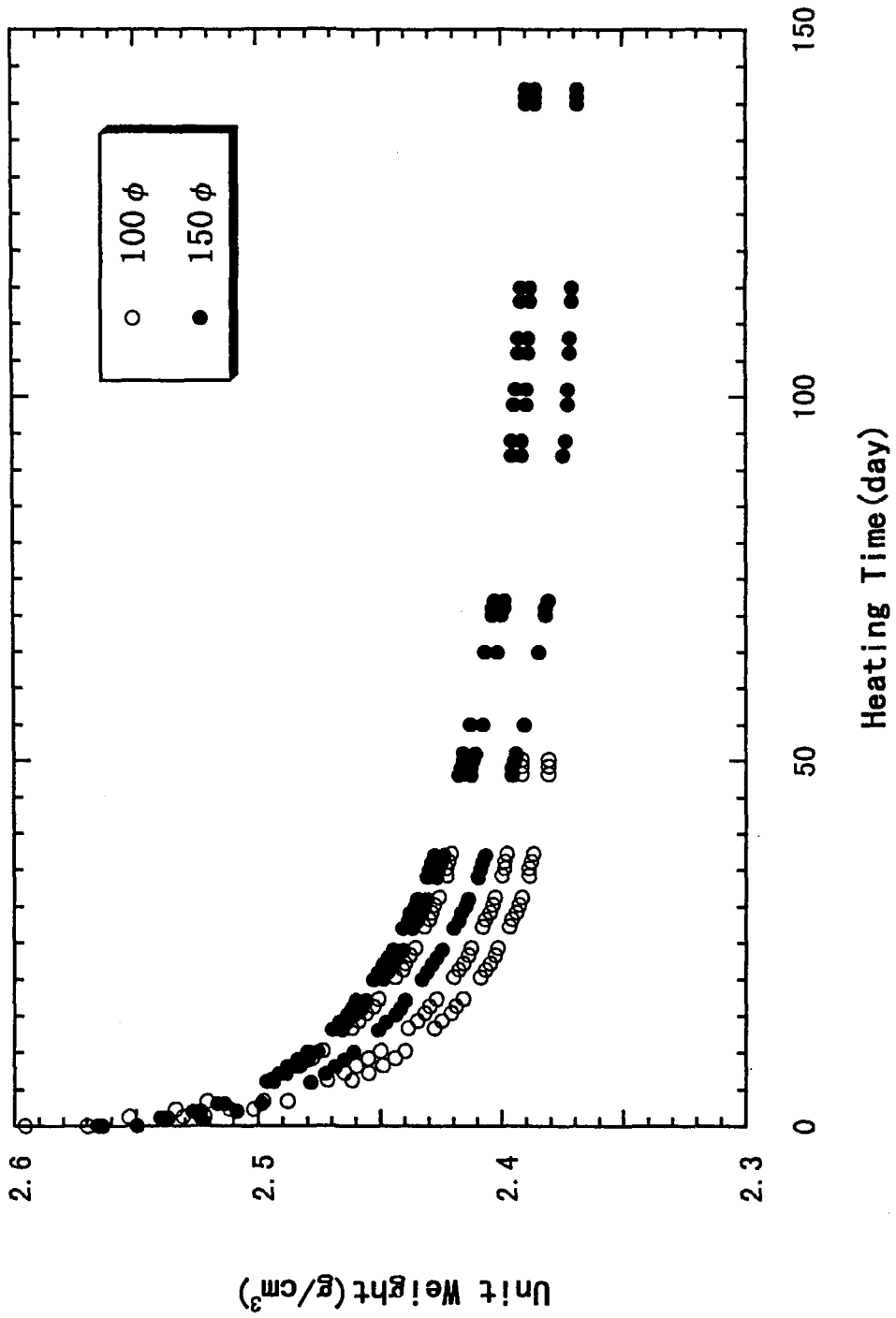


Fig. 3.1 Unit weight transient in 65°C heating test.

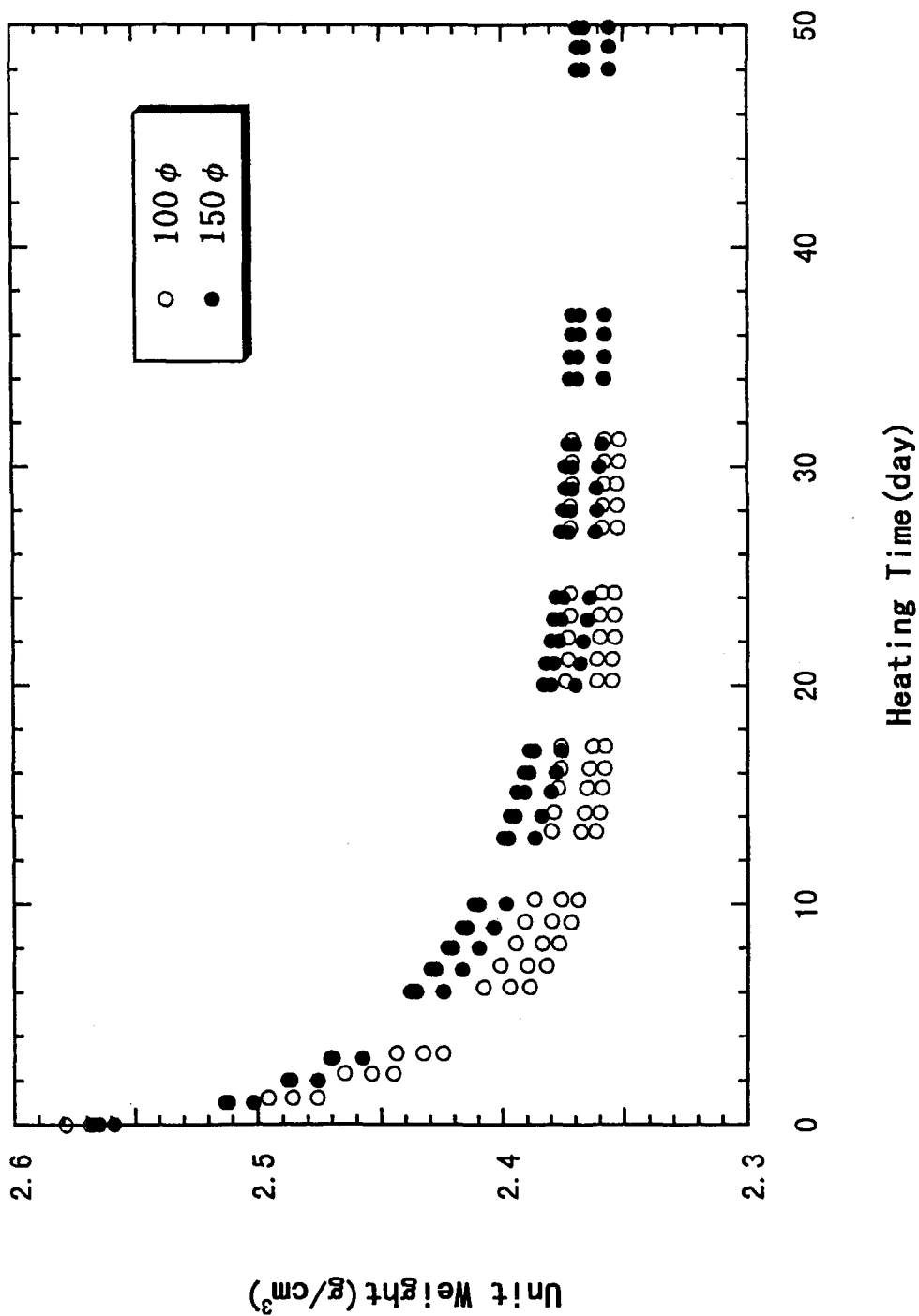


Fig. 3.2 Unit weight transient in 90°C heating test.

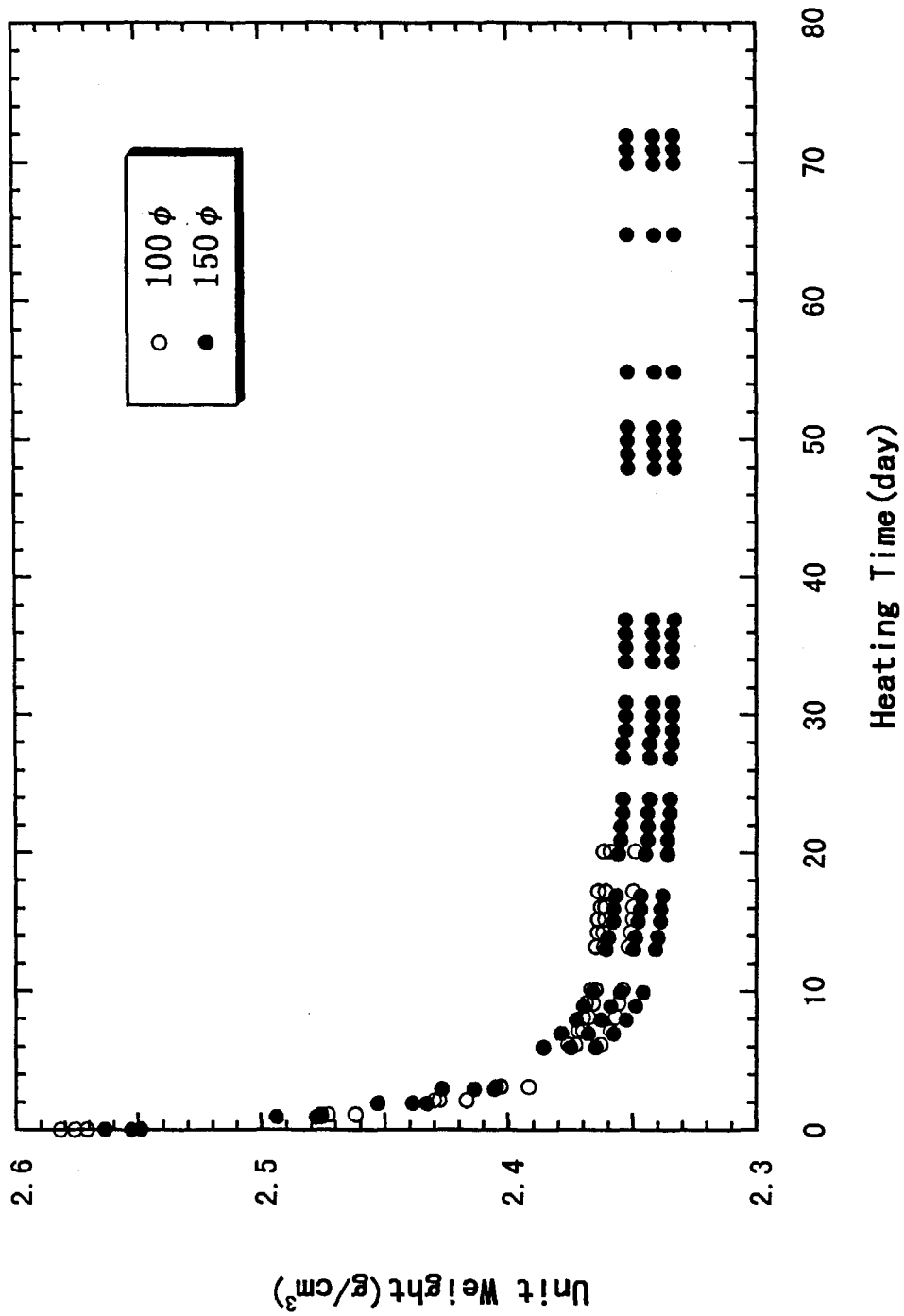


Fig. 3.3 Unit weight transient in 110°C heating test.

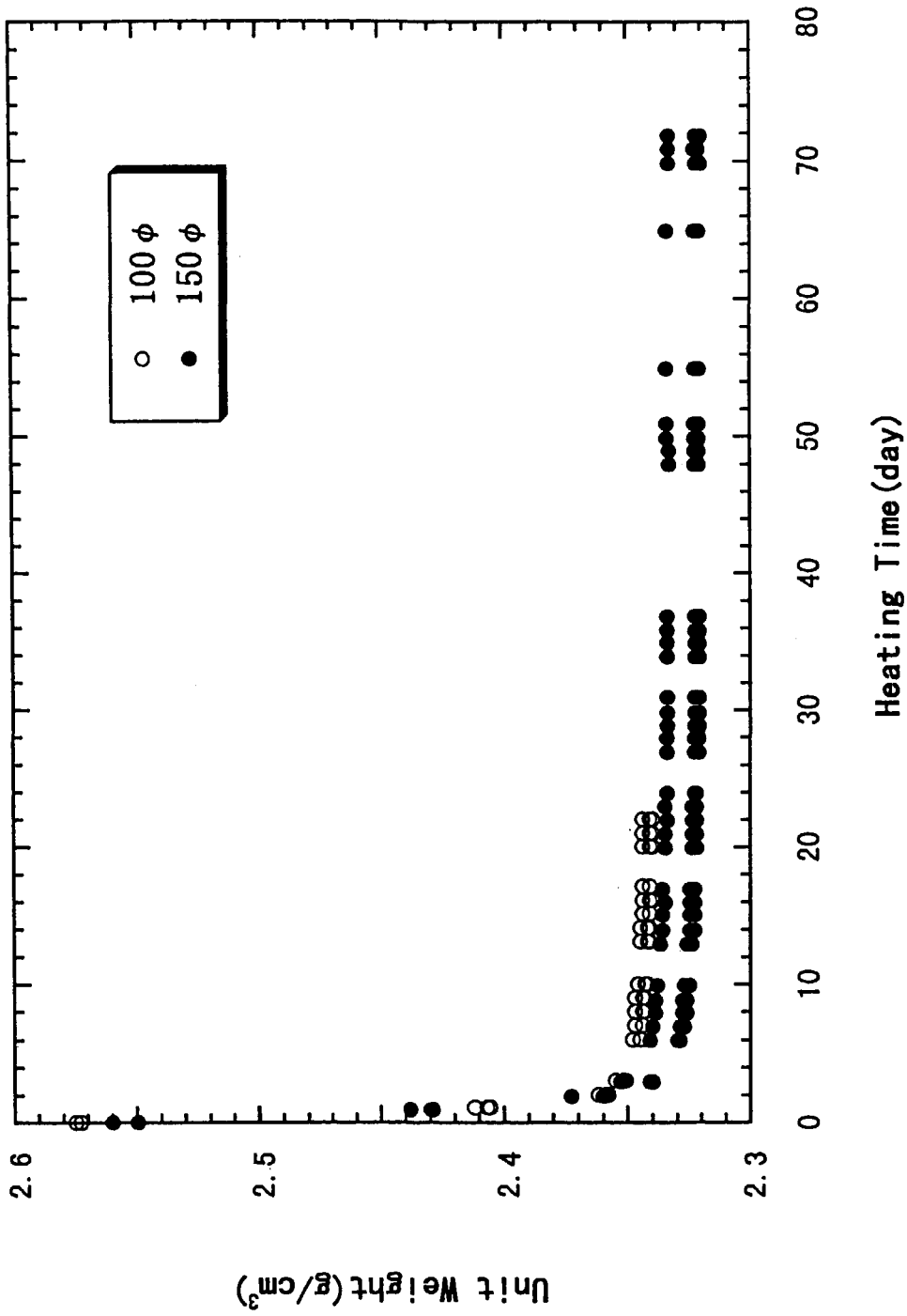


Fig. 3.4 Unit weight transient in 140°C heating test.

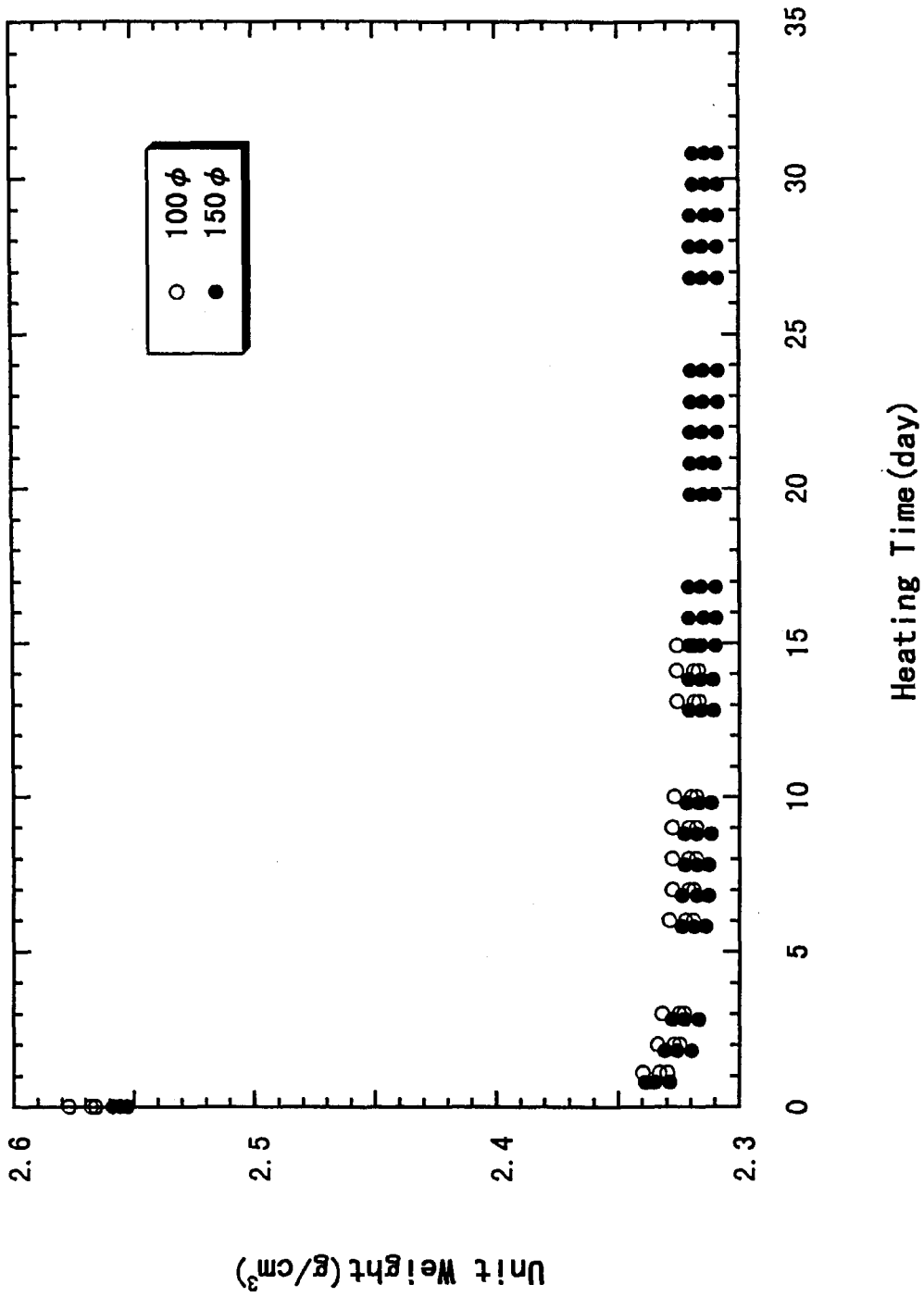


Fig. 3.5 Unit weight transient in 175°C heating test.

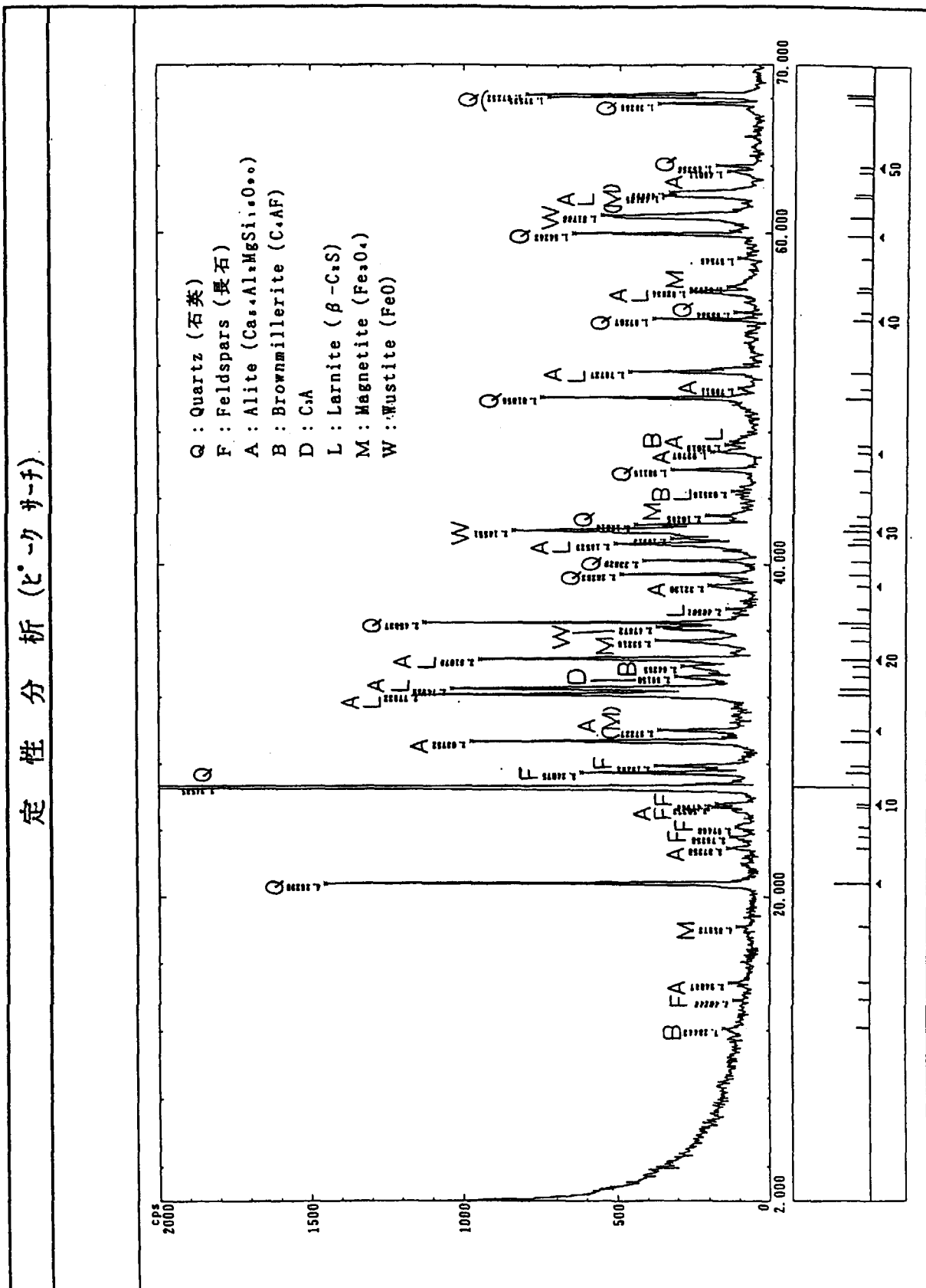


Fig.3.6 X-ray diffraction analysis before curing sample

定性分析 (ピークサーチ)

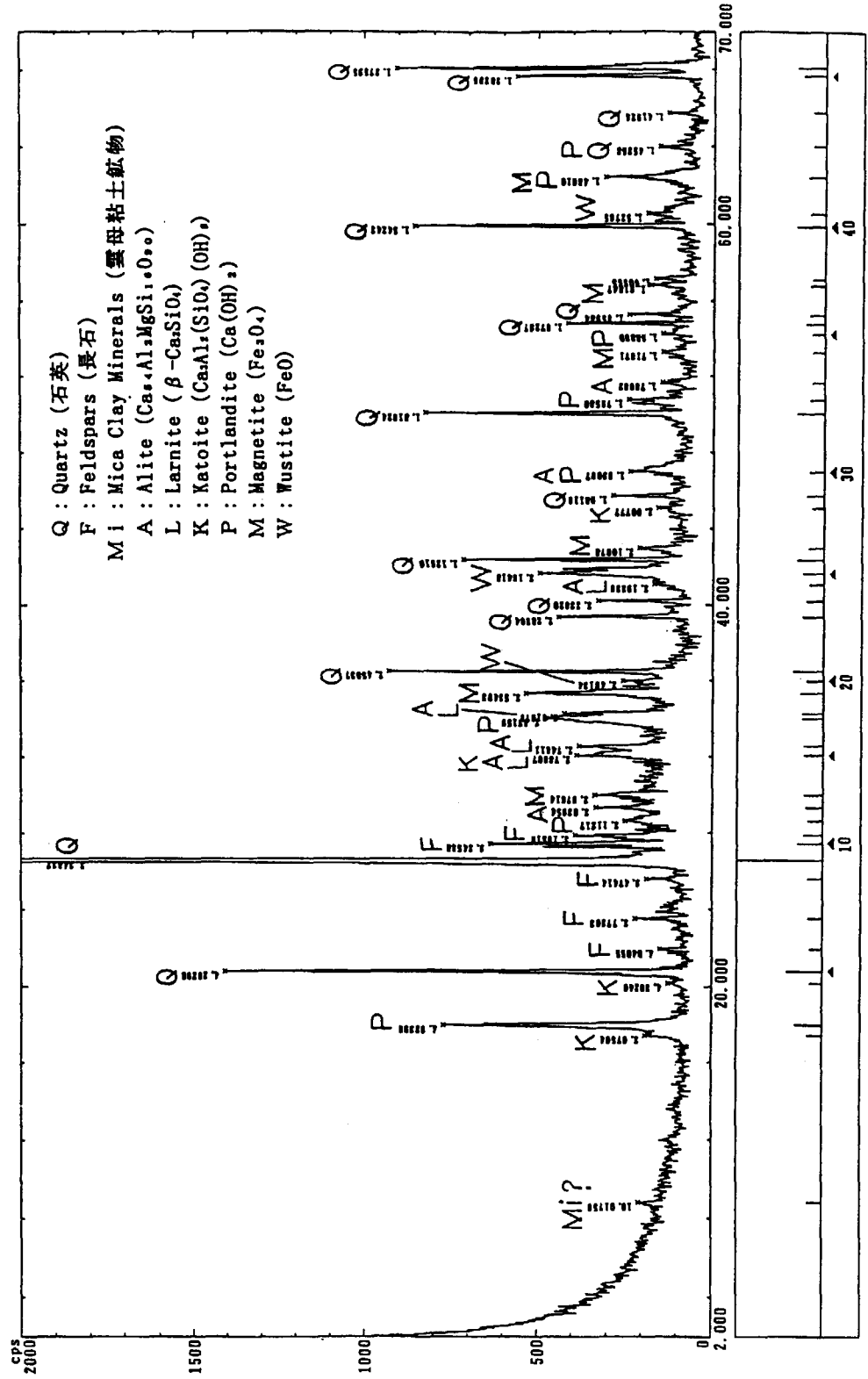


Fig.3.7 X-ray diffraction analysis of 175°C-150 φ grout-powder

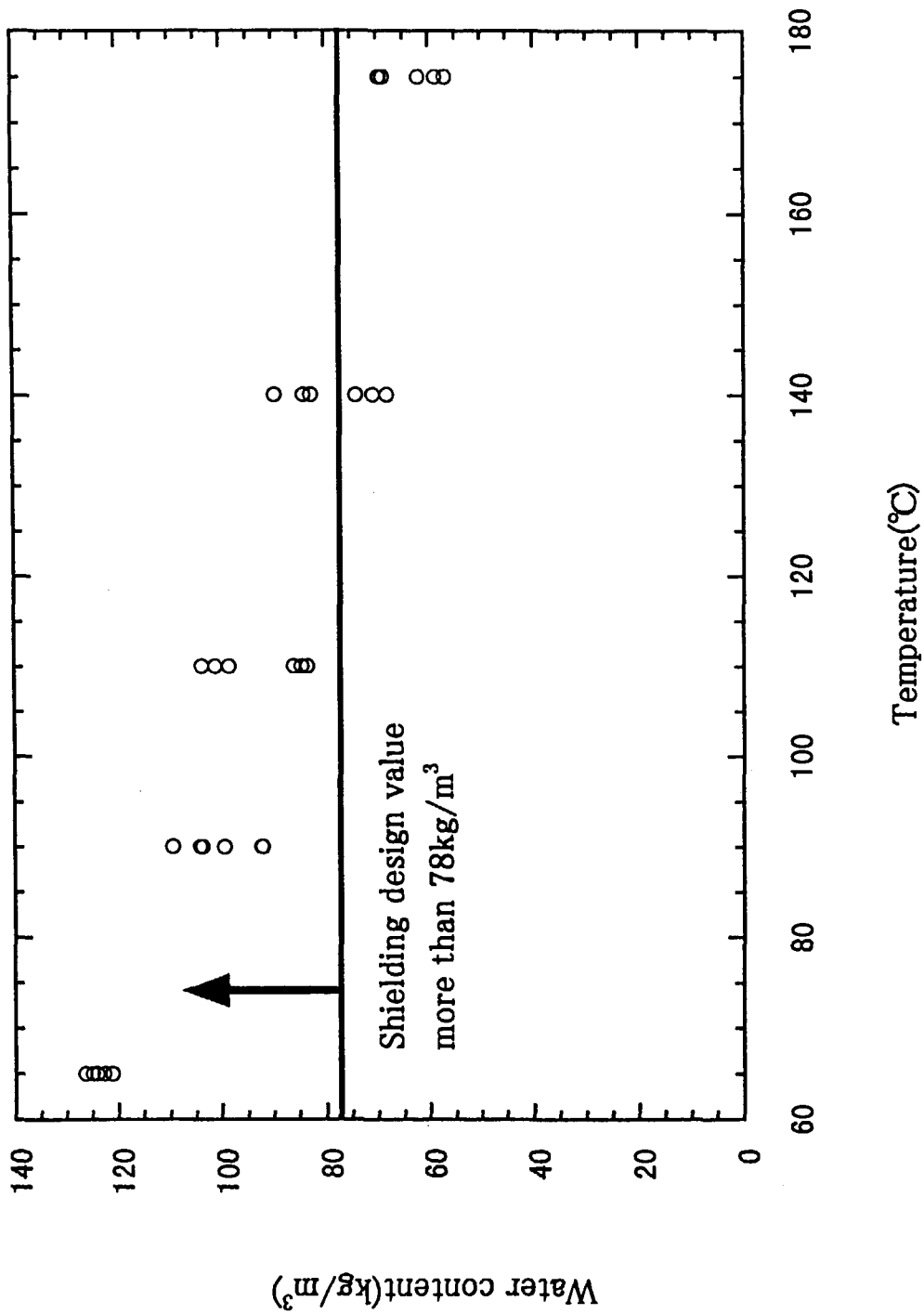


Fig. 3.8 Measured water content as a function of heated temperature.

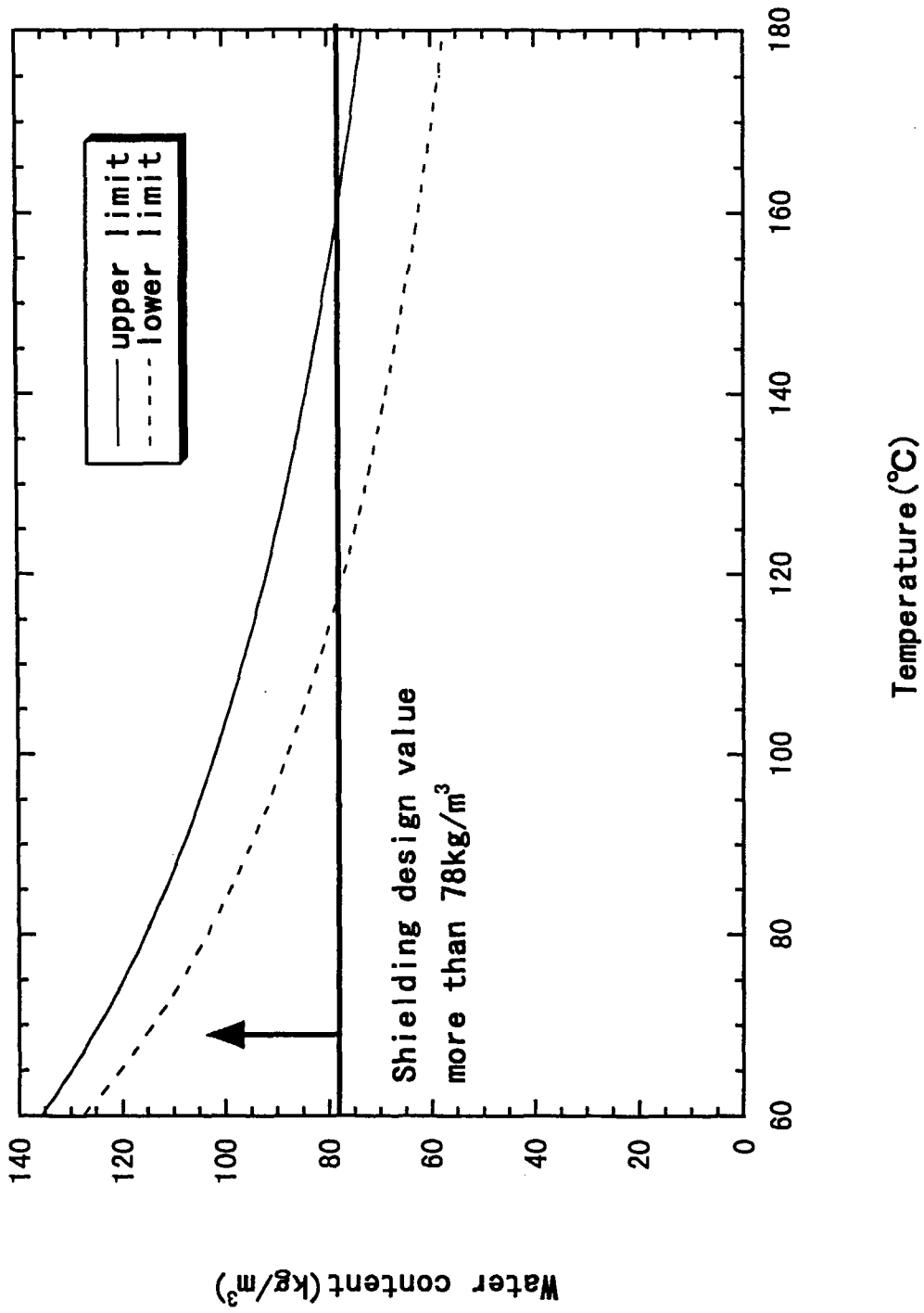


Fig. 3.9 Confidence limits of measured water content

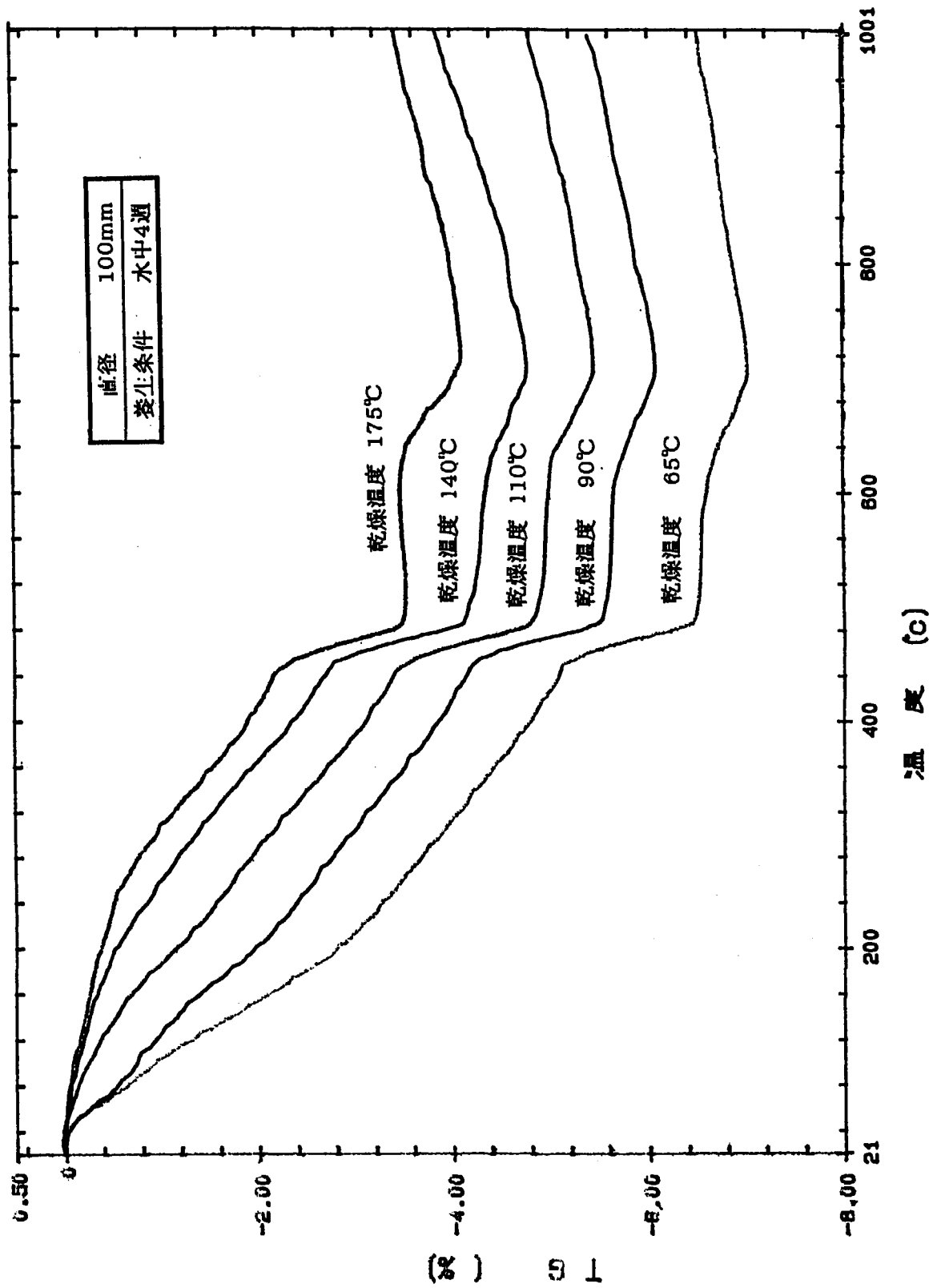


Fig. 3.10 Weight loss during fixed-water measurement.

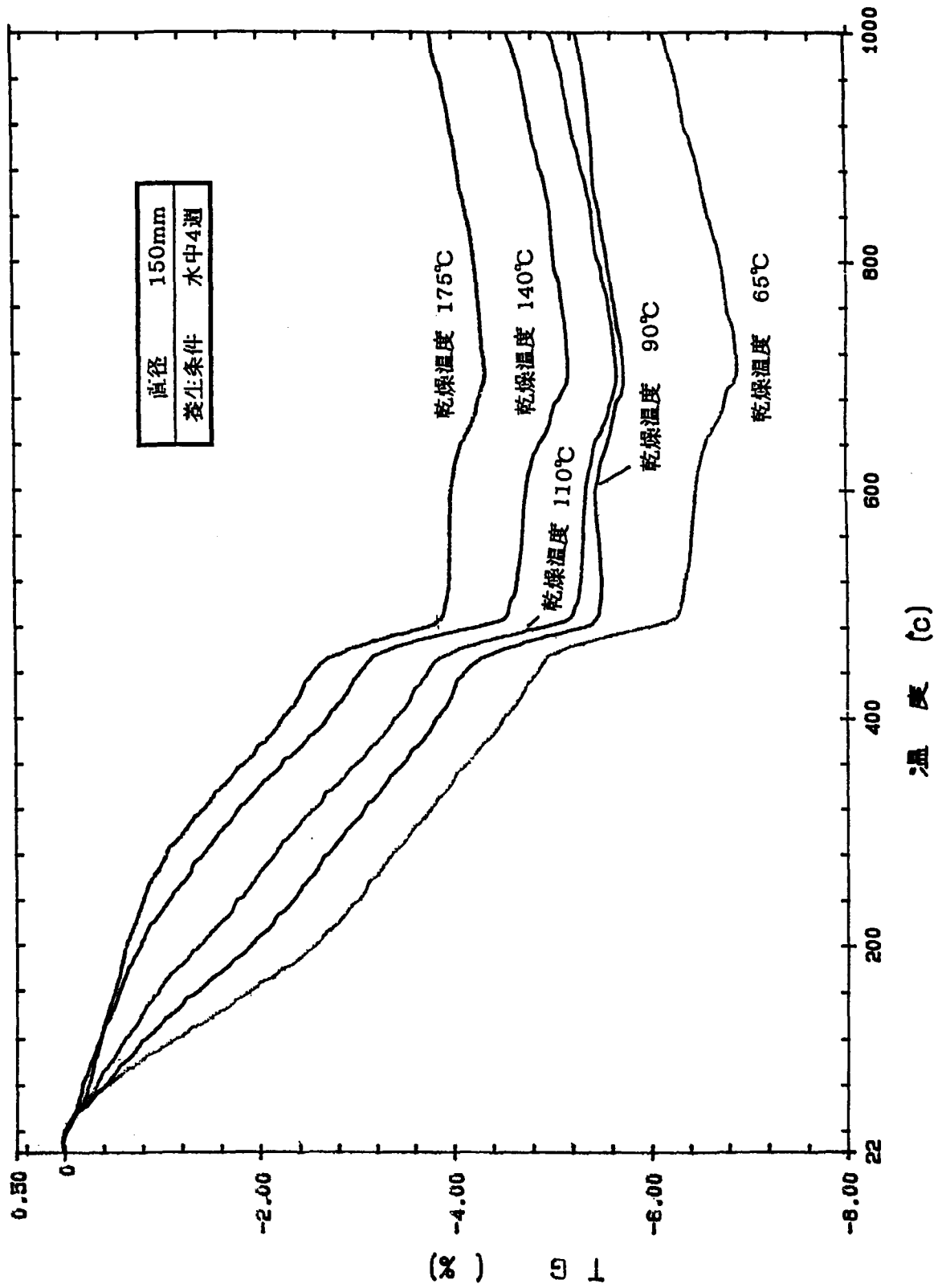


Fig. 3.11 Weight loss during fixed-water measurement.

4. 考察

4.1 モデルの作成

コンクリート中に存在する水は、様々な形で存在する。文字通り水分子がセメントの各化合物に直接付加し、水和化合物の特定部分を形成する化学結合水、水和したセメント中に種々の強さで保持されている自由水、その他種々の形で保持されているゲル水がある⁽⁵⁾。自由水は、毛管に保持され、固相の表面力は及ばない。一方、ゲル粒子の表面力によって保持されている水は吸着水と呼ばれ、そのうち結晶におけるある層と層の表面間に存在するものは、層間水とか沸石型の水と呼ばれている。格子水は、結晶水のうちで格子の主な構成要素と化学的に結合していない水である。これら弱い水和水、自由水、ゲル水、化学的および物理的吸着水等の切れる挙動について細かく分けてモデル化することによって正確なモデルが考えられる。しかしここでは乾燥温度が 200°C以下と比較的低く、ゲルの崩壊による脱水および化学吸着による水の解放等は起こらないと考え⁽⁹⁾、約 700°C以下で(4-1)式のように 2 つの成分に分けてモデル化した。

$$\text{全水量}(W_{am}) = \text{化学的結合水}(W_c) + \text{物理的結合水}(W_h) \quad (4-1)$$

化学的結合水: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等

物理的結合水: 弱い水和水、自由水、ゲル水、化学的および物理的吸着水等を含む

ある加熱温度で結合が切れた化学的結合水と物理的結合水の和を移動できる水の量 W_l とし、(4-2)式のように表す。

$$W_l = f_c(T) \times W_c + f_h(T) \times W_h \quad (4-2)$$

$f_c(T)$: 化学的結合水が切れる確率

$f_h(T)$: 物理的結合水が切れる確率

化学的結合水の量 W_c および物理的結合水の量 W_h はコンクリートの作り方、すなわち骨材の種類や量、水セメント比および養生条件等によって決まると考えられ、 W_c および W_h の量は供試体ごとに差はなく一定であるとした。

次に(4-2)式における、 W_c 、 W_h 、 f_c および f_h を実験結果に基づき決定する。全結合水量(乾燥

脱水量+強熱脱水量)は、前述のように W_c および W_h の値が供試体ごとに差はないと考えたので、全 30 点の平均を取った。実験による W_c の測定は実際に行っていないため、熱分析データ (Fig.3.10 および Fig.3.11) に基づき、 W_c を算出した。すなわち、TG 曲線より Ca(OH)_2 の脱水量、 W_c はいずれの乾燥温度および大きさにおいても乾燥質量の約 1.4% 前後であることから、この分を結合水量に換算し、約 30kg/m^3 を得た。また W_h は全結合水量から W_c を引くことによって求め、 W_l は(4-3)式にしたがって求めた。Table4.1 に決定した各パラメータを示す。

$$\text{移動できる水の量 } W_l(\text{kg/m}^3) = \{ (W_{T1} - W_{T2}) / W_{T1} \} \times \rho_{T1} \quad (4-3)$$

W_{T1} : 乾燥前における恒量加熱重量(g)

W_{T2} : 乾燥後における強熱重量(g)

ρ_{T1} : 乾燥前における乾燥単位容積重量(kg/m^3)

熱分析データから強熱温度 450°C 付近で質量が急激に減少することから、

$$f_c(T) = \begin{cases} 0 & T \leq 450^\circ\text{C} \\ 1 & T \geq 450^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4-4)$$

とした。また(4-2)式から

$$f_h(T) = \frac{W_l}{W_h} - \frac{W_c}{W_h} f_c(T) \quad (4-5)$$

450°C 以下では $f_c(T)=0$ なので(4-5)式は、

$$f_h(T) = \frac{W_l}{W_h} \quad (4-6)$$

となる。Fig.4.1 に $f_h(T)$ の温度依存性を示す。Fig.4.1 より乾燥温度が大きくなるにつれて、 $f_h(T)$ が大きくなることがわかる。乾燥単位重量試験を実施したこの温度領域($65^\circ\text{C} \sim 175^\circ\text{C}$)では、ゲルの崩壊による脱水および化学吸着による水の解放等は起こらないと考えられる⁽⁹⁾。従って、温度による移動できる水の量の違いは、様々の大きさのポアに物理的にとらえられた水の放出量によって決まり、乾燥温度が大きいほどより小さなポアから水が放出される。

次に、結合が切れた水の放出挙動は、拡散で記述できるものと考え、簡単化のために次の無限円筒体系の拡散方程式を用いてモデル化を行った⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (4-7)$$

C : 供試体中の水の密度(kg/m³)

D : 供試体中の水の拡散係数(m²/s)

r : 空間座標軸(m)

t : 時間座標軸(s)

(4-7)式を、初期条件 $C(r, 0) = C_0$ 、境界条件 $C(a, t) = 0$ で解くと、次の解析値を得る。ただし、 C_0 は $t=0$ における供試体中の水の初期密度(kg/m³)、 a は供試体の半径(m)である。

$$C(r, t) = \frac{2C_0}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-D \alpha_n^2 t) \frac{J_0(r \alpha_n)}{J_1^2(a \alpha_n)} \int_0^a r J_0(r \alpha_n) dr \quad (4-8)$$

J_0 : 0 次のベッセル関数

J_1 : 1 次のベッセル関数

α_n : $J_0(z)$ の零点

時刻 t における境界の流速 J (kg/s)は、

$$\begin{aligned} J(t) &= -2\pi r D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=a} \\ &= 4\pi D C_0 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-D \alpha_n^2 t) \frac{\int_0^a r J_0(r \alpha_n) dr}{J_1(a \alpha_n)} \end{aligned} \quad (4-9)$$

となる。任意時刻 t までの積分放出量 R (kg)は、(4-9)式を時間に対して積分して求める。

$$\begin{aligned}
 R(t) &= \int_0^t J(t) dt \\
 &= 4\pi C_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_0^a r J_0(r\alpha_n) dr}{\alpha_n^2 J_1(a\alpha_n)} \{1 - \exp(-D\alpha_n^2 t)\} \quad (4-10)
 \end{aligned}$$

100φ、150φ についての実験値と拡散モデルによる乾燥単位容積重量の乾燥日数依存性を Fig.4.2～Fig.4.6 に示した。ここで乾燥単位容積重量は、化学的結合水 W_c 、物理的結合水 W_h およびそれ以外の成分 W_o (コンクリート中のセメント) の和から、(4-2)式で表した移動できる水の量に放出率 $FR(t)$ を乗じたものを減ずることによって(4-11)式のように表されるとした。

$$\begin{aligned}
 W_a &= W_o + W_c + W_h - FR(f_c W_c + f_h W_h) \\
 &= W_o + (1 - FR \cdot f_c) W_c + (1 - FR \cdot f_h) W_h \quad (4-11) \\
 W_a &: \text{単位乾燥容積重量(g/cm}^3\text{)} \\
 W_o &: \text{他成分容積重量(g/cm}^3\text{)} \\
 &\quad (\text{コンクリート中のセメント})
 \end{aligned}$$

$FR(t)$ は、積分放出割合を表す時間の関数で、 $t=0$ の時 $FR=0$ 、 $t=\infty$ の時 $FR=1$ であり(4-12)式で表される。

$$FR(t) = \frac{R(t)}{\pi a^2 C_0} \quad (4-12)$$

計算においては Fig.4.2～Fig.4.6 に示すように、乾燥単位容積重量の経時変化を再現するように拡散係数を定めた。拡散係数は、実験で得られた値をプロットした曲線に近くなるように定めた。ここで求めた拡散係数 D を一般的な次式で整理した結果を Fig.4.7 に示す。

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (4-13)$$

- D_0 : 頻度因子(m²/s)
- Q : 拡散の活性化エネルギー(J/mol)
- R : 気体定数(J/K/mol)
- T : 熱力学的温度(K)

Fig.4.7 より乾燥温度 90°C と 110°C の間に変曲点があることがわかり、2 成分に分けて考えることができる。乾燥温度が 100°C 以下の時、水の蒸発は供試体の表面からのみと考えられる。すなわち、供試体内部の水や弱い結合が切れた水は、供試体表面まで拡散によって移動し蒸発すると考えられる。一方乾燥温度が 100°C を超えると相変化が起こり、その結果供試体の内部からも蒸発していると考えられる。グラウト中の拡散係数として乾燥温度 90°C 以下では頻度因子 $D_0=21.1(\text{m}^2/\text{s})$ 、活性化エネルギー $Q=65.7(\text{kJ}/\text{mol})$ 、乾燥温度 110°C 以上では頻度因子 $D_0=2.1 \times 10^{-4}(\text{m}^2/\text{s})$ 、活性化エネルギー $Q=30.4(\text{kJ}/\text{mol})$ を得た。

拡散係数は温度の関数であり、Fig.4.2～Fig.4.6 より、65°C～175°C までの拡散係数を $1.5 \times 10^{-9} \sim 5.5 \times 10^{-8}(\text{m}^2/\text{s})$ と仮定した時、実験値をプロットした曲線と最も近くなった。文献(12)では、飽和したコンクリート中における水の拡散係数を常温(27°C)で $D=2.9 \times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$ としている。Fig.4.7 より得られる、 $T=300\text{K}$ でのグラウト中の拡散係数は $D=7.8 \times 10^{-11}(\text{m}^2/\text{s})$ であり、文献値と比較してやや小さくなった。以上のことから、結合が切れ自由に移動できるようになった水の放出機構は、拡散放出であることおよび普通コンクリート中とグラウト中の水の拡散係数はグラウトの方が小さくなるが、大きくは異なることが分かった。

4.2 1次上部遮へい体へのモデルの適用

実際に HTTR の 1 次上部遮へい体において、グラウトからの水の放出挙動を、ここで求めたモデルを用いて検討した。HTTR 1 次上部遮へい体の構造は、Fig.1.2 に示したように、スタンドパイプが貫通している部分がある。そこで、スタンドパイプの穴を考慮して、最も温度が上昇すると考えられる N1 周りの 1 次上部遮へい体の表面積 $S=2.3 \pi(\text{m}^2)$ 、体積 $V=1.6 \times 10^{-1} \pi(\text{m}^3)$ とし、

$$\frac{S}{V} = \frac{S_1}{V_1} \quad (4-14)$$

となるような半径 r_1 、高さ h_1 の円柱を仮定する。

$$\frac{S_1}{V_1} = \frac{2\pi r_1^2 + 2\pi r_1 h_1}{\pi r_1^2 h_1} = \frac{2r_1(r_1 + h_1)}{r_1^2 h_1} \quad (4-15)$$

拡散によって放出される水は、径方向から放出されると仮定し、 $h_1 \gg r_1$ とすると、

$$\frac{S_1}{V_1} = \frac{2}{r_1} \quad (4-16)$$

となる。(4-16)式より、

$$r_1 = \frac{2V}{S} \quad (4-17)$$

となる。(4-17)式を満たす円柱を仮定し、(4-7)式を前述と同様に解く。

$$\begin{aligned} J(t) &= -SD \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=a} \\ &= \frac{2C_0SD}{r_1} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-D\alpha_n^2 t) \frac{\int_0^a r J_0(r\alpha_n) dr}{J_1(r_1\alpha_n)} \end{aligned} \quad (4-18)$$

結果は、(4-19)式のようにになる。

$$R(t) = \frac{2C_0S}{r_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_0^a r J_0(r\alpha_n) dr}{\alpha_n^2 J_1(r_1\alpha_n)} \{1 - \exp(-D\alpha_n^2 t)\} \quad (4-19)$$

各乾燥温度について、乾燥単位容積質量の変化を Fig.4.8 に示す。また Fig.4.9 に、縦軸を 1 次上部遮へい体に残っている水、すなわち残存水量としたものを示す。Fig.4.9 より、65°C では恒量するまでに 100 日以上要し、90°C では 20 日程度、それ以上の温度では 10 日以下となっている。また、65°C、90°C および 110°C において、恒量後の含水量は遮蔽設計条件 78kg/m³ 以上を上回り、140°C および 175°C では遮へい設計条件を下回る。

Table 4.1 Parameters determined from test result.

Temperature(°C)	65°C	90°C	110°C	140°C	175°C
Unit Weight(g/cm ³)	2.39	2.36	2.35	2.33	2.31
Total water content(g/cm ³)	0.31				
W_c (g/cm ³)	0.033				
W_h (g/cm ³)	0.27				
W_f (g/cm ³)	0.18	0.20	0.22	0.23	0.25
W_o (g/cm ³)	2.26				
$f_u(T)$	0.65	0.74	0.79	0.84	0.90

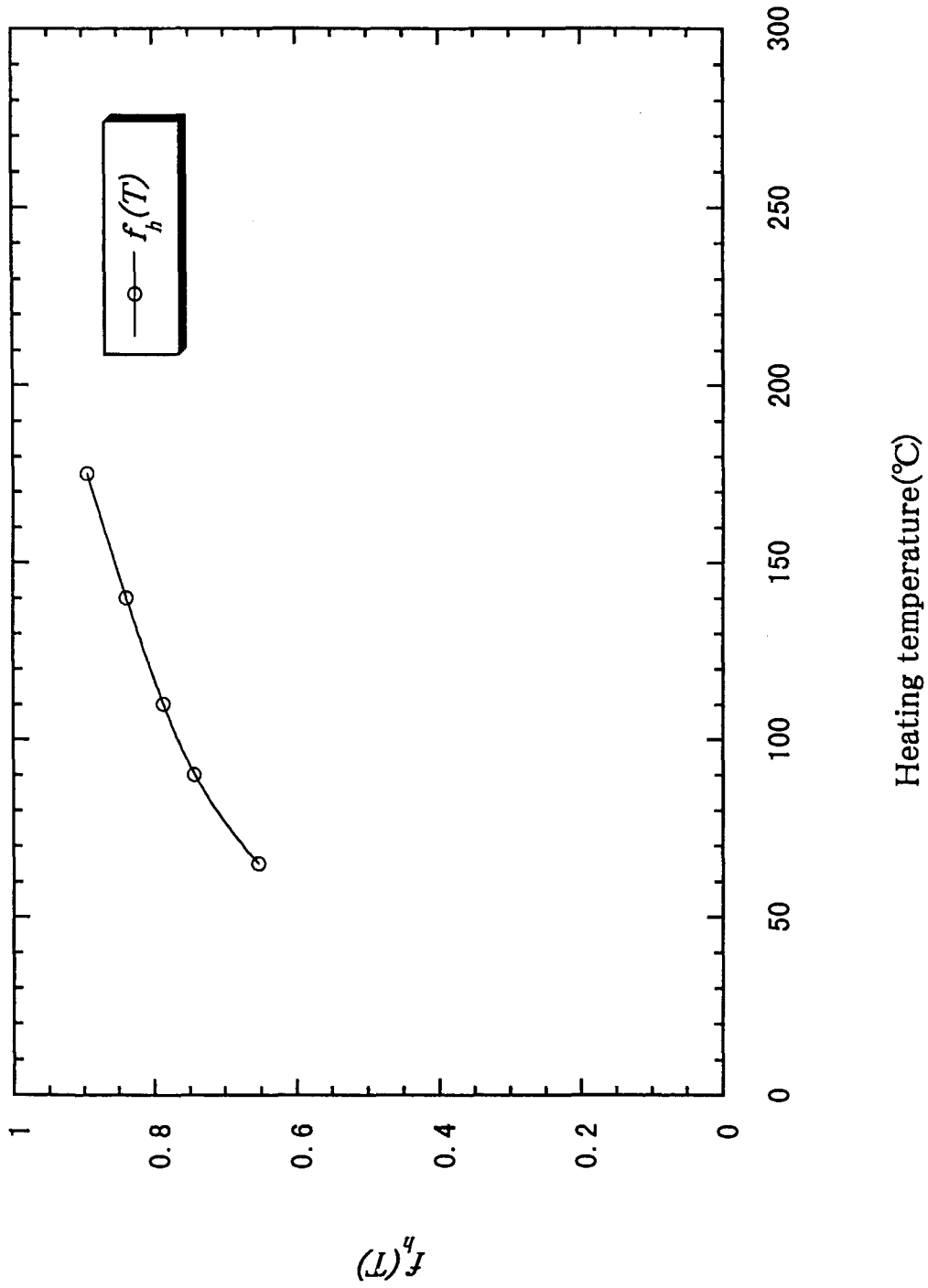


Fig. 4.1 Dehydride probability as a function of temperature.

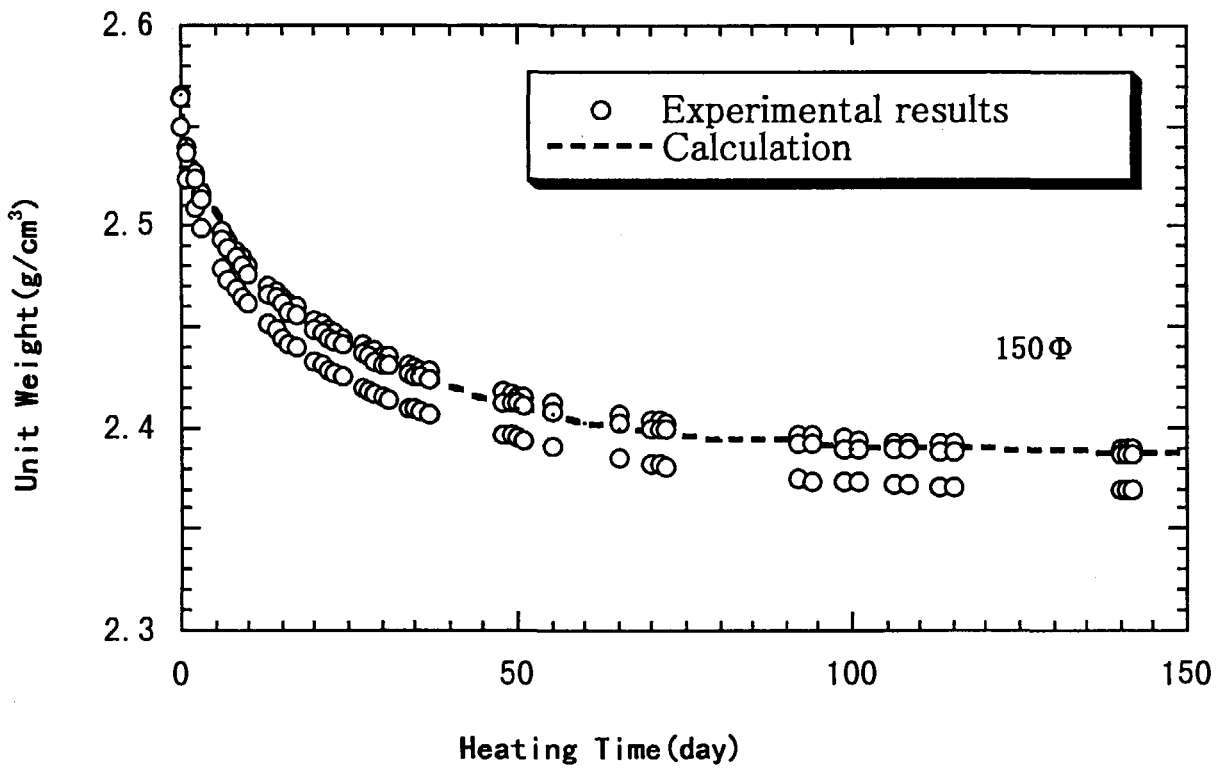
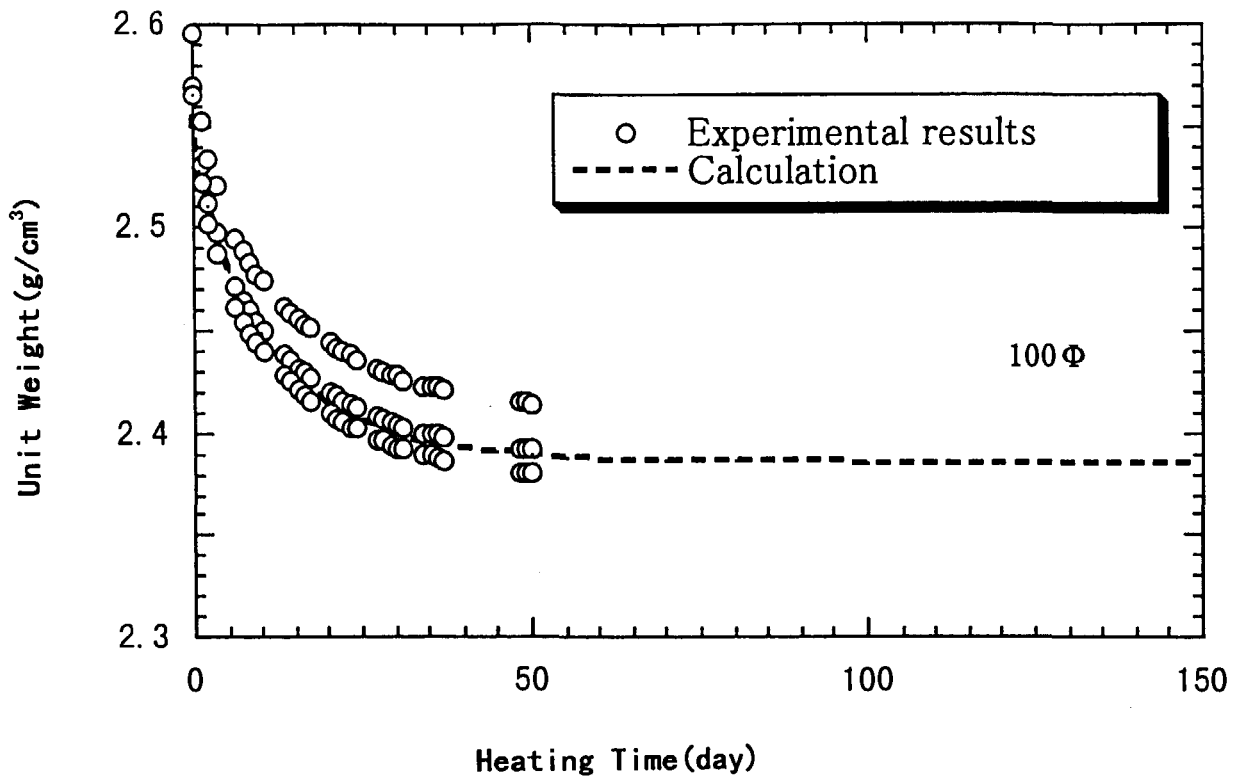


Fig. 4.2 Comparison of measured and calculated unit weight in 65°C

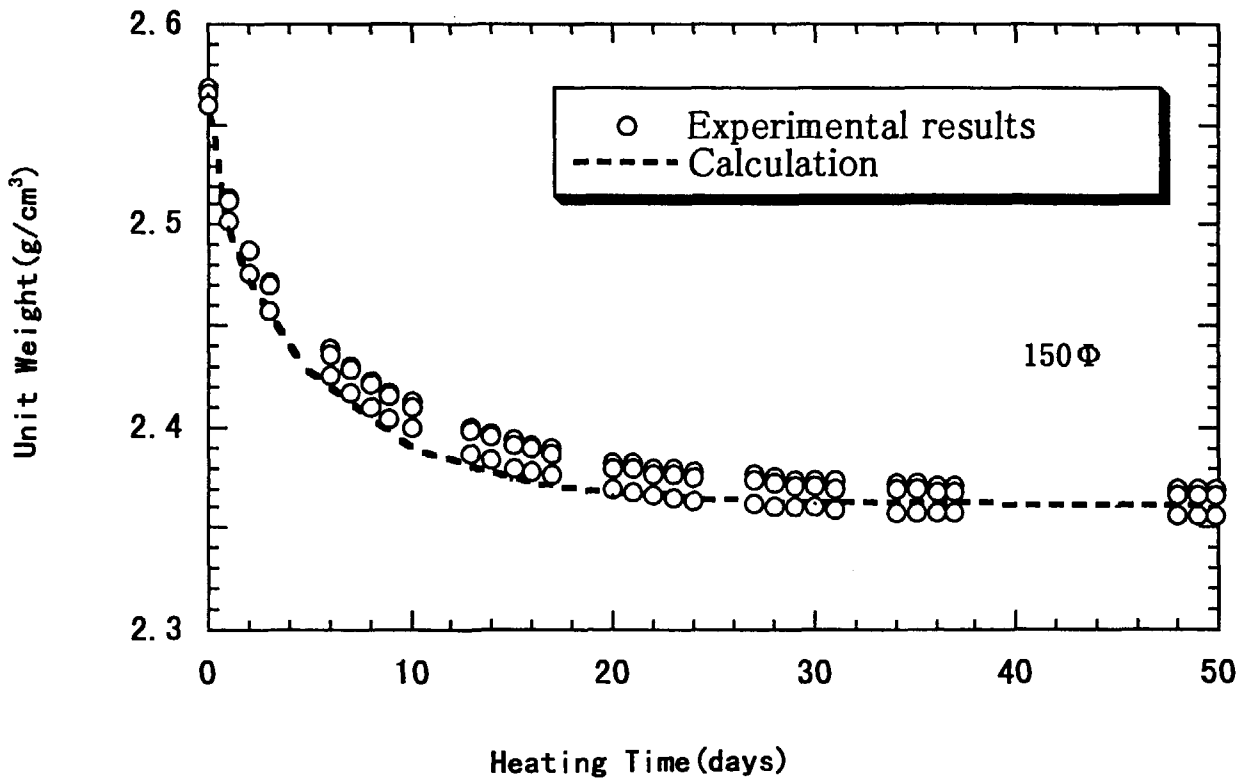
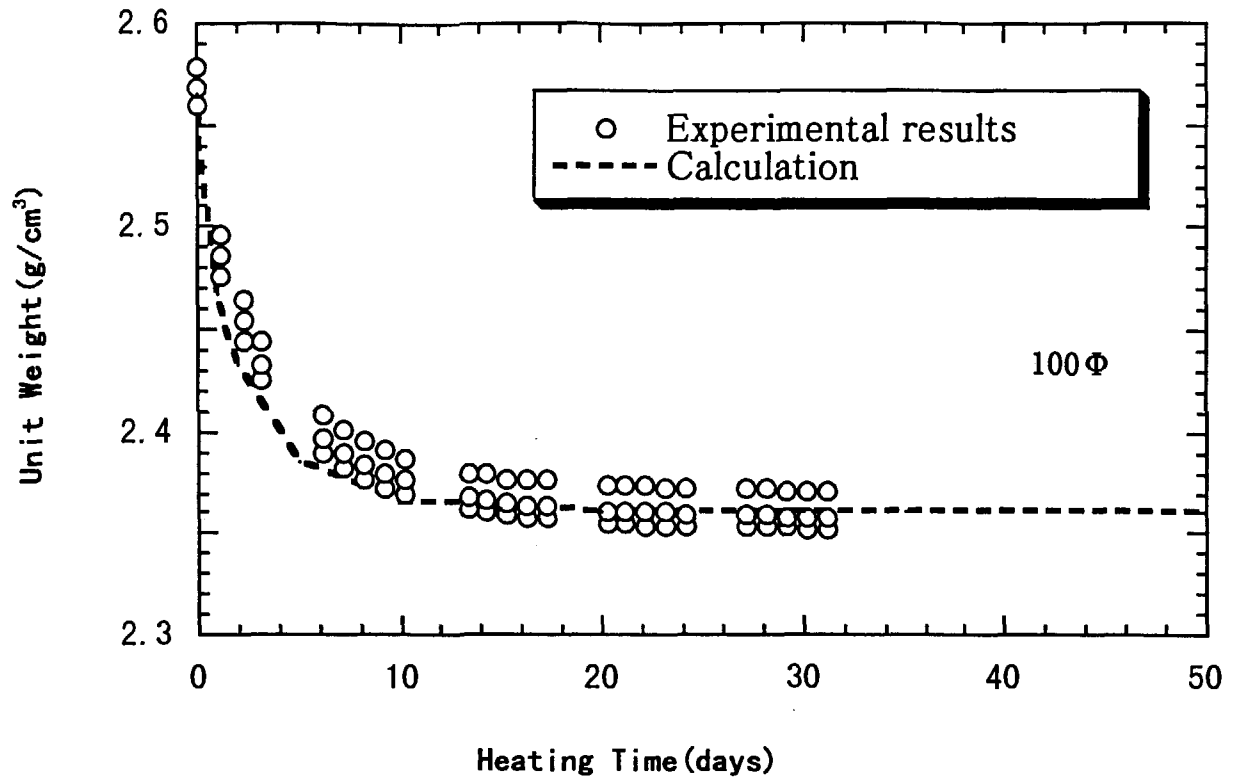


Fig. 4.3 Comparison of measured and calculated unit weight in 90°C

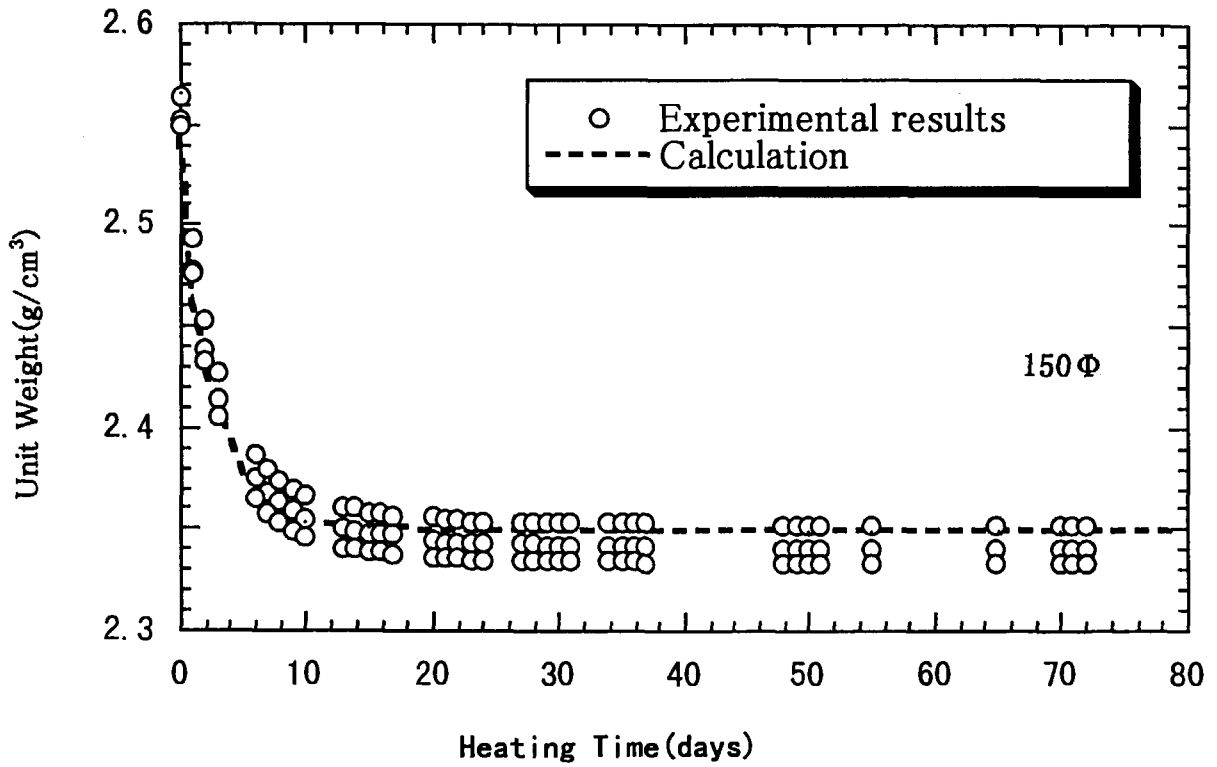
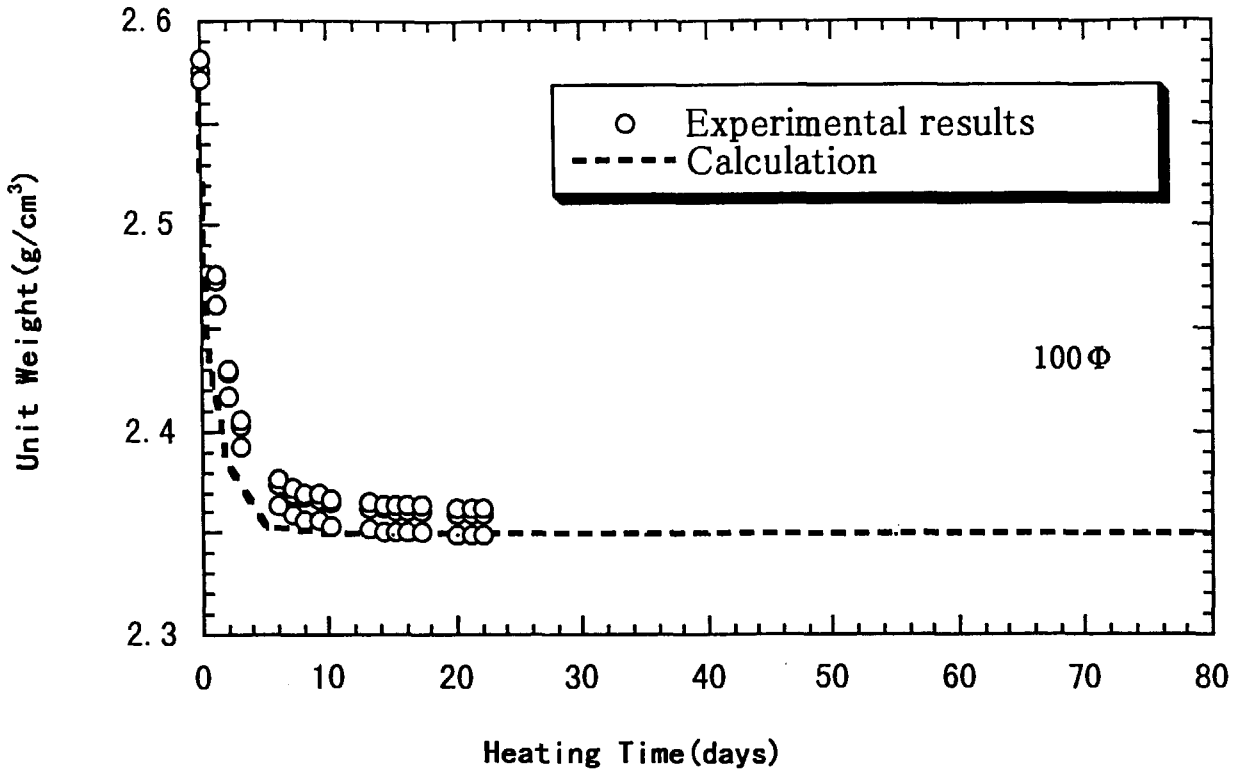


Fig. 4.4 Comparison of measured and calculated unit weight in 110°C

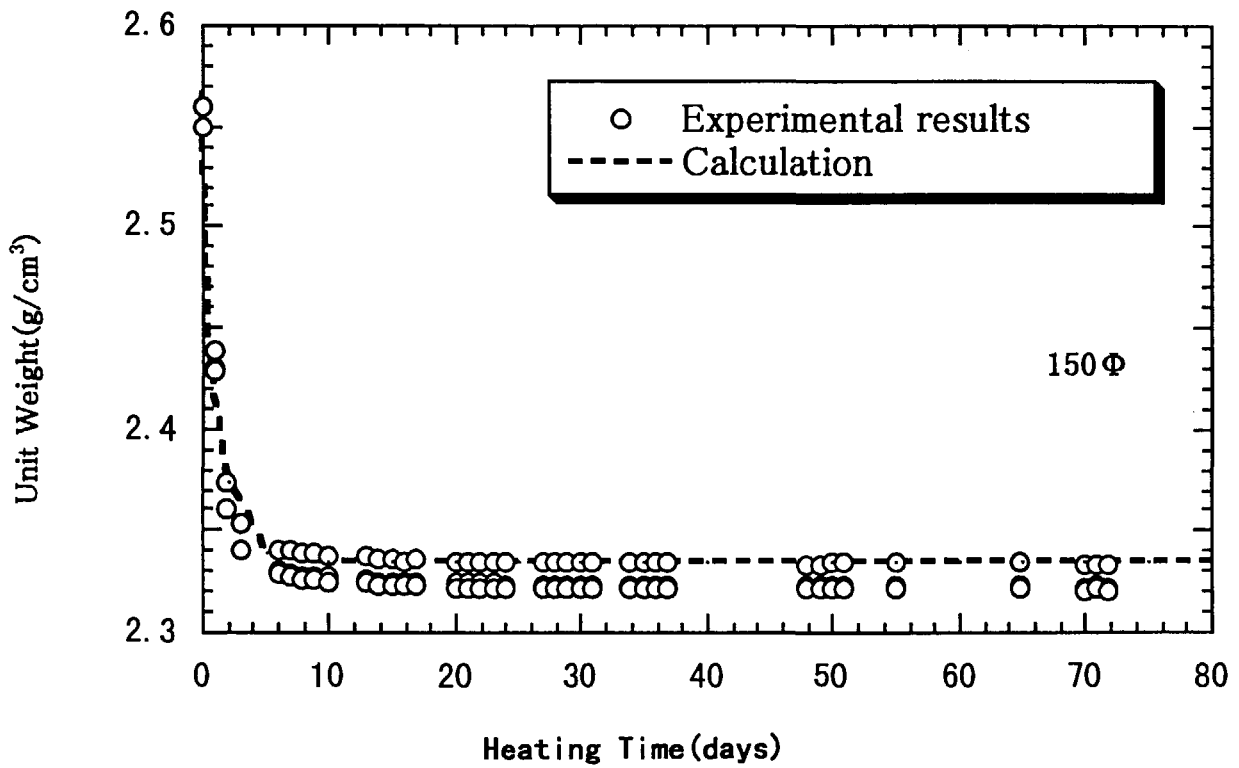
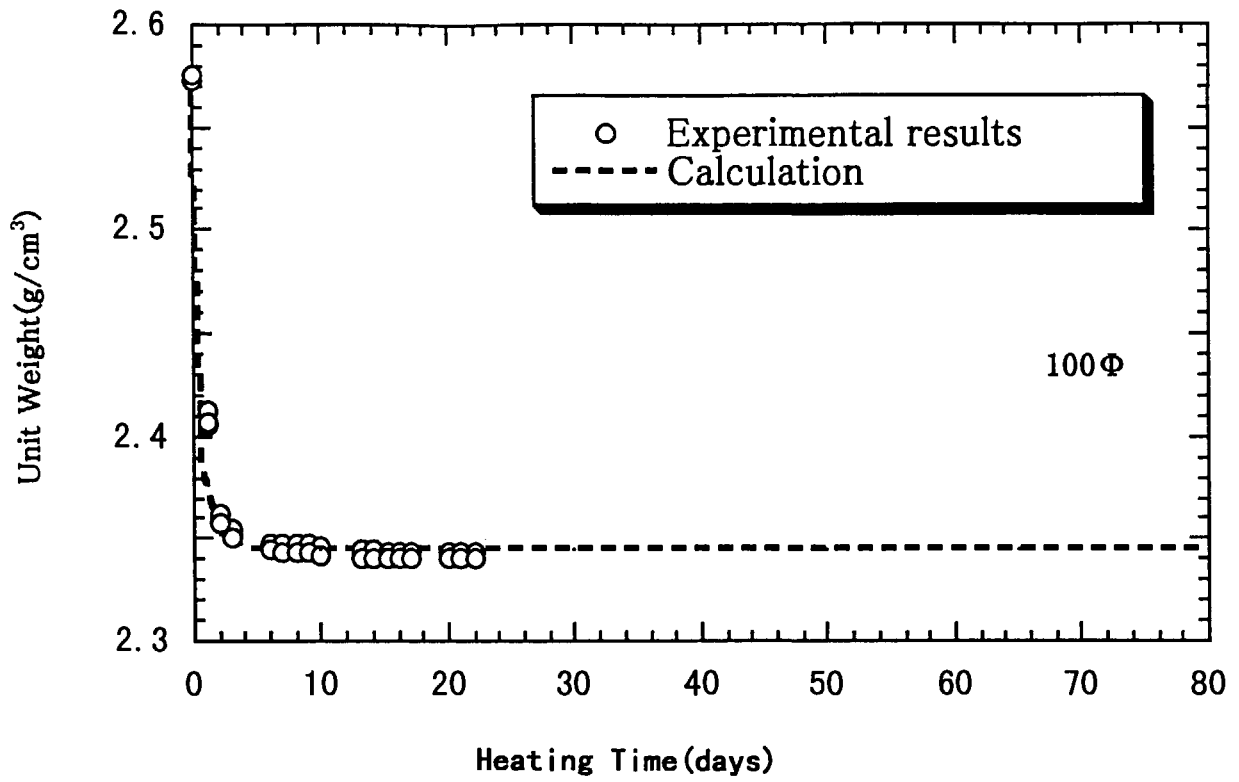


Fig. 4.5 Comparison of measured and calculated unit weight in 140°C

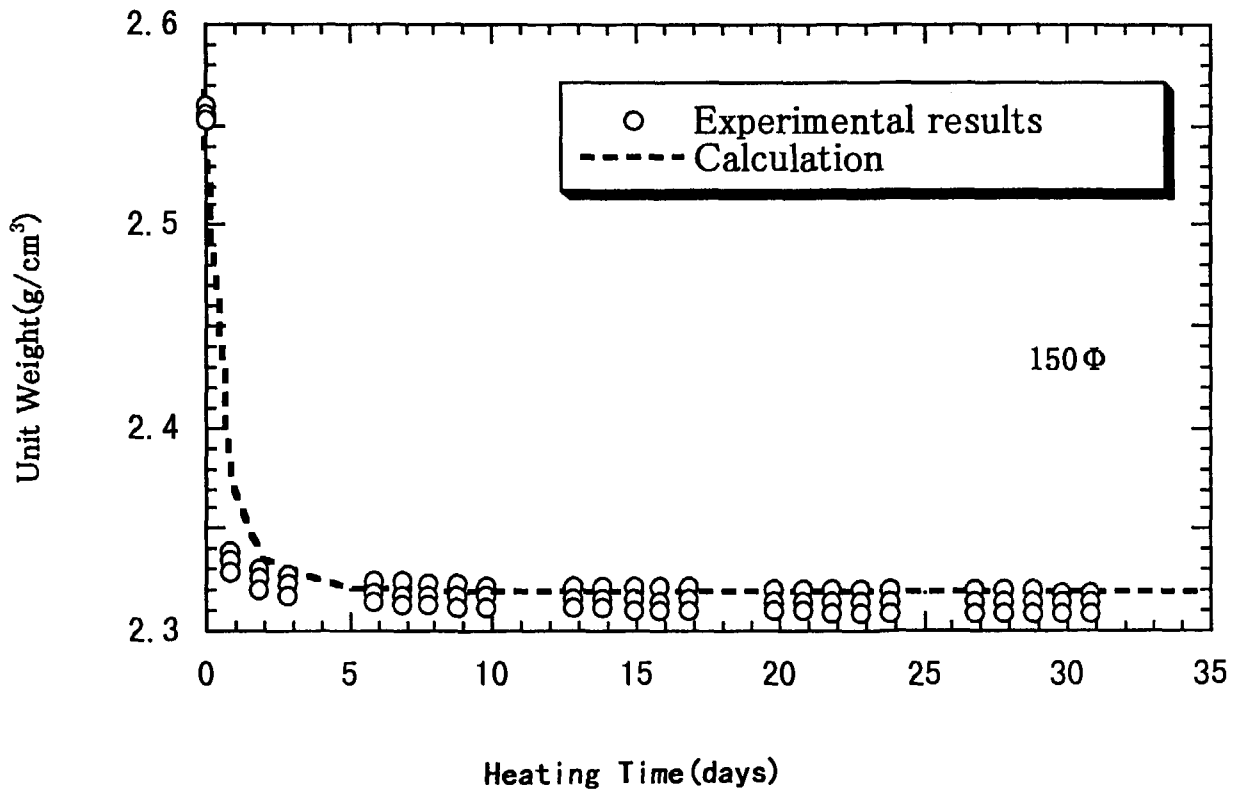
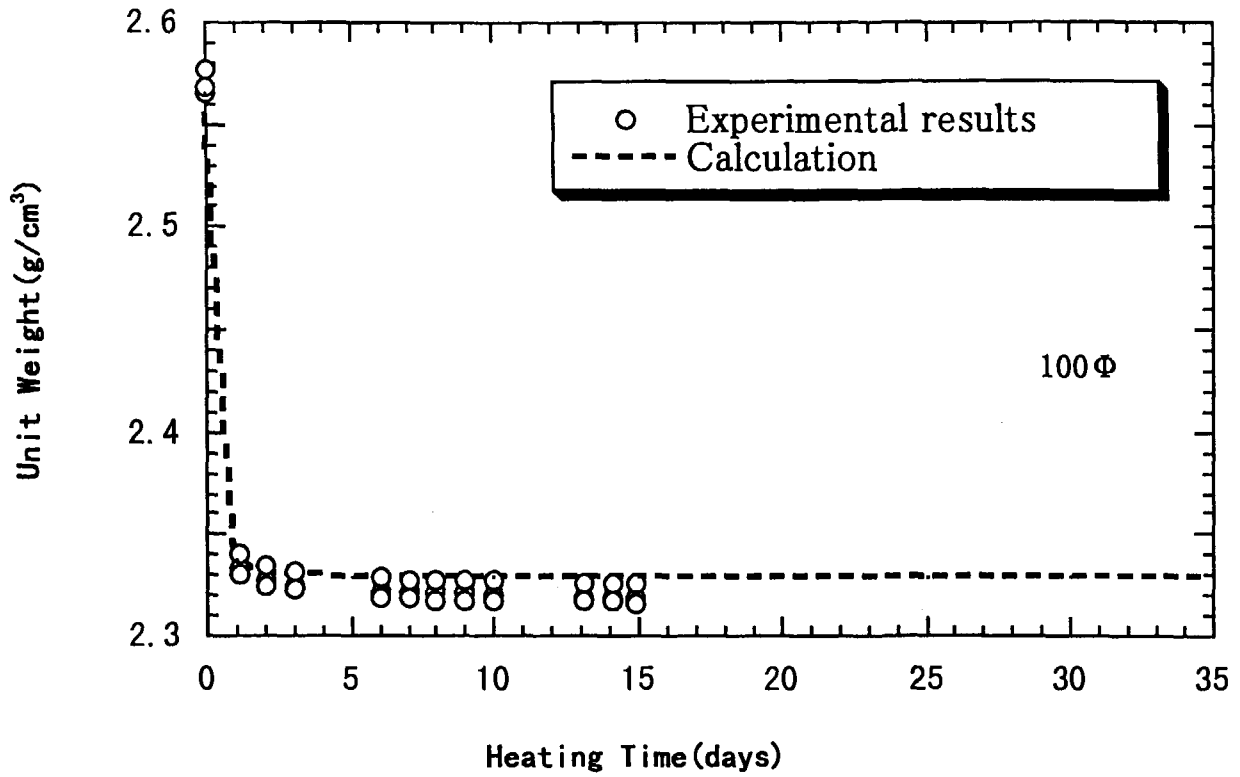


Fig. 4.6 Comparison of measured and calculated unit weight in 175°C

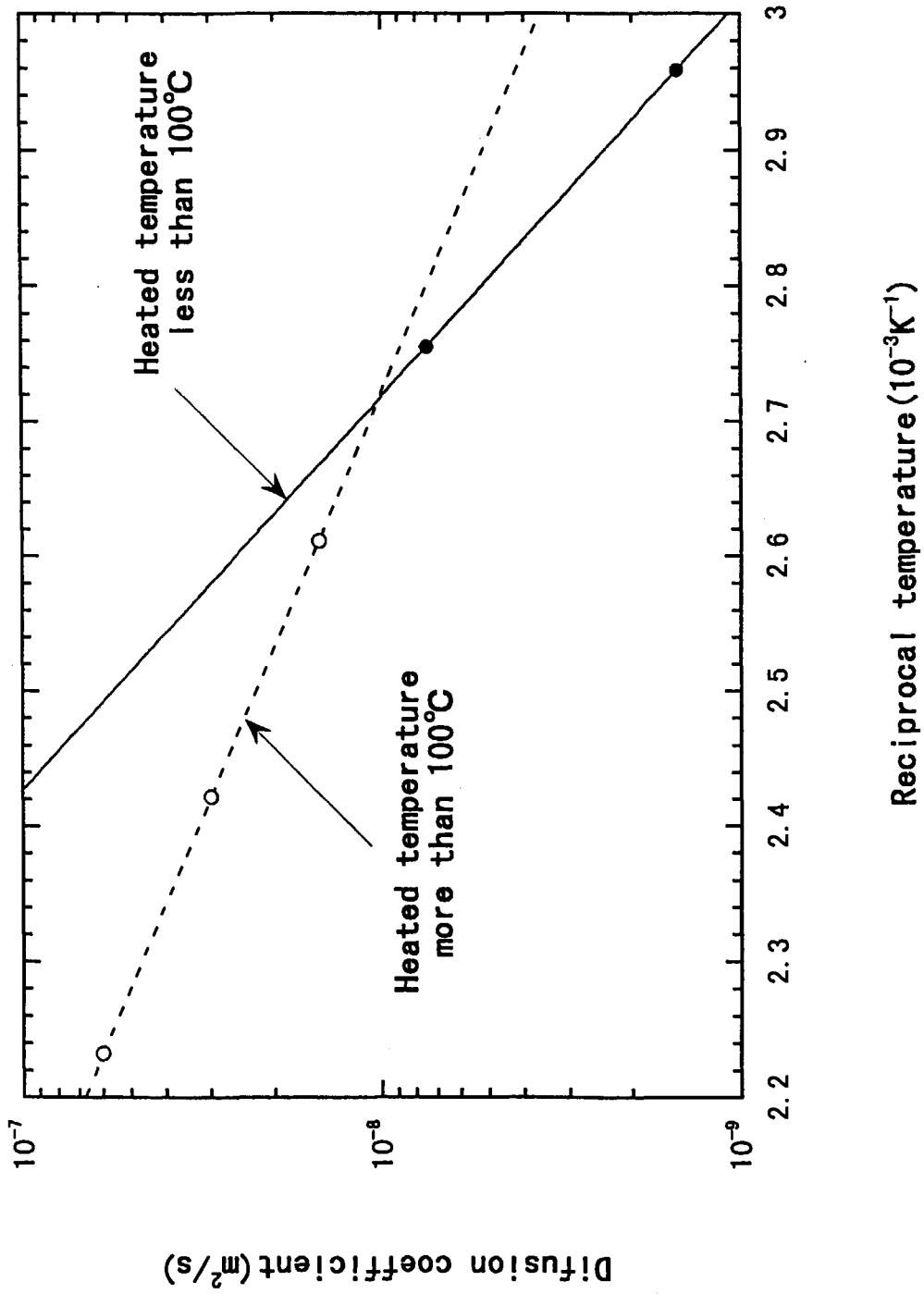


Fig.4.7 Diffusion coefficient of water in grout

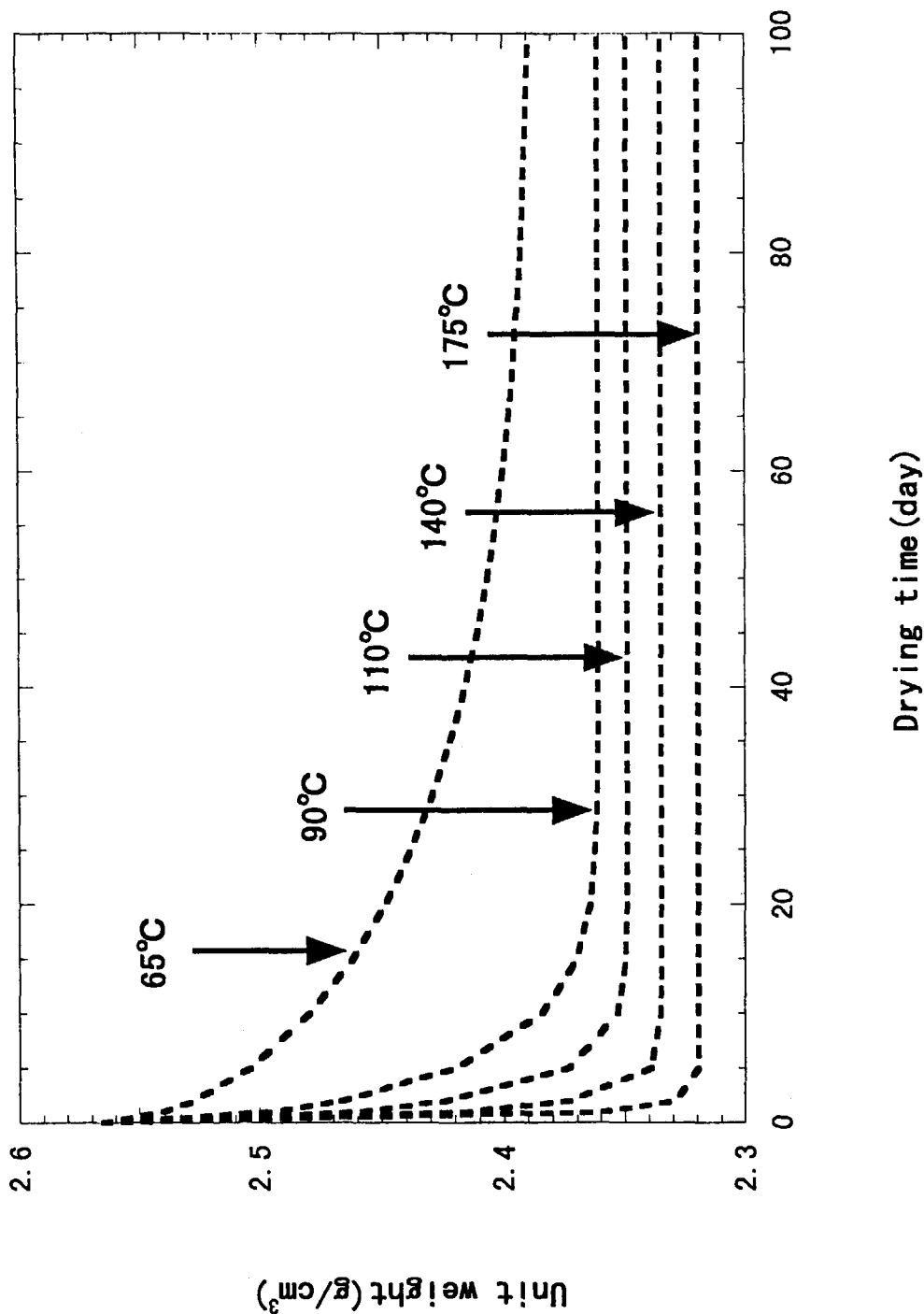


Fig. 4.8 Predicted unit weight in the primary upper shield of the HTTR

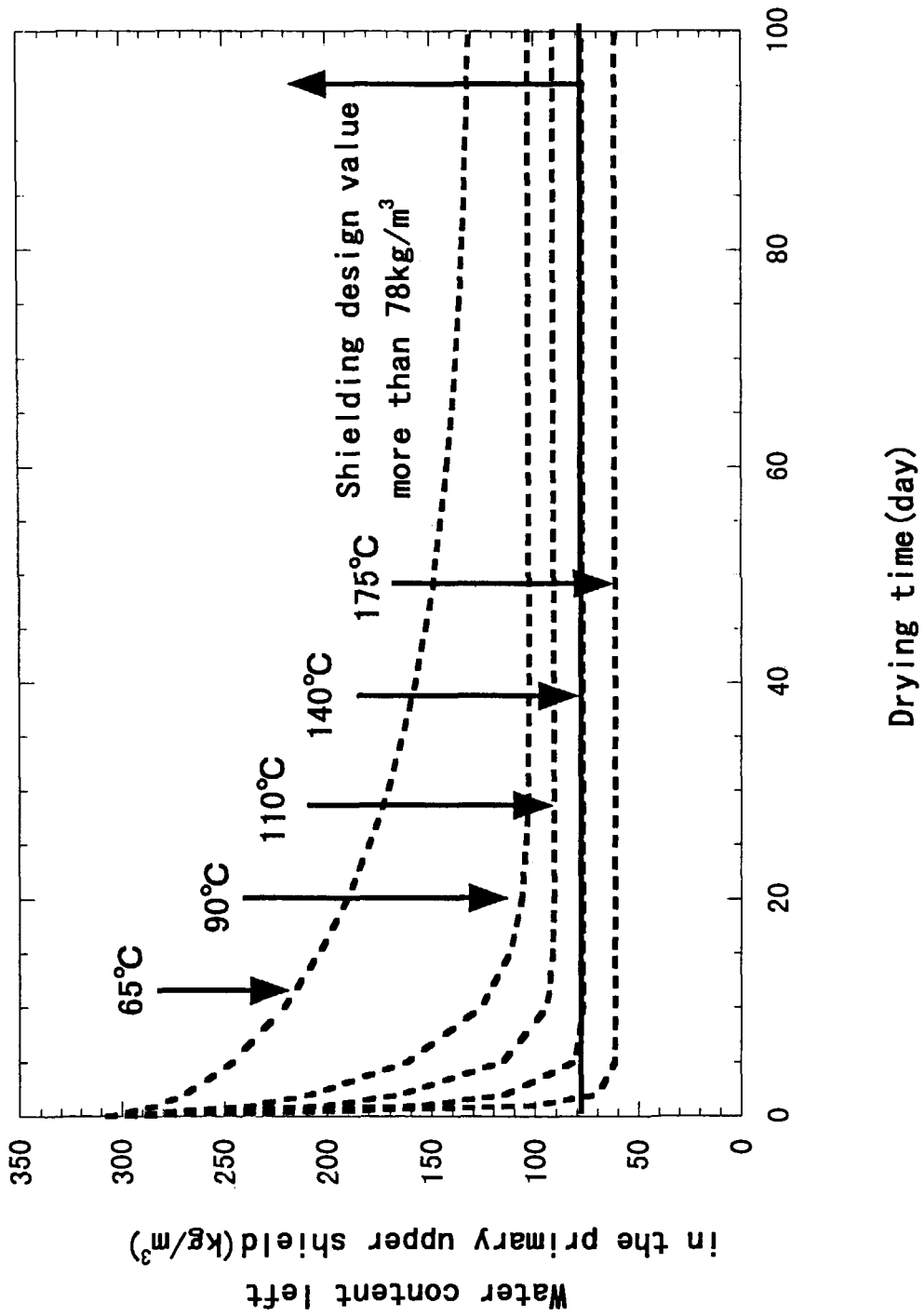


Fig. 4.9 Predicted water content in the primary upper shield of the HTTR

5. 結論

HTTRの遮へい評価に用いているコンクリート(グラウト)中の含水量、 78kg/m^3 を満足する条件を求める試験を実施した。また、試験結果に基づき水の散逸挙動をモデル化した。その結果、以下のような結論を得た。

- ①遮へい性能確認試験の結果、遮へい設計条件に用いている含水量(78kg/m^3)は、 110°C ～ 140°C 以下の温度であれば確保される。また信頼率95%では、 110°C 以下であれば遮へい設計条件を満足する。
- ②結合が切れ、自由に移動できるようになった水の放出挙動を拡散によりモデル化し、実験データから拡散係数を求めた。コンクリート中とグラウト中の拡散係数は、大きく異なることが分かった。
- ③HTTRの1次上部遮へい体にモデルを適用するとHTTRの運転期間中(20年)の間に、 65°C では恒量後に約 130kg/m^3 の水分が1次上部遮へい体中に保持される。また 90°C および 110°C の場合、恒量後の含水量は、遮へい条件 78kg/m^3 を上回り、 140°C および 175°C では、恒量後の含水量は遮へい条件を下回る。

謝辞

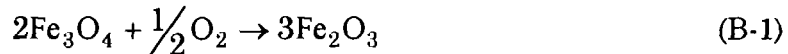
本検討を行うに当たり、御指導御助言を頂いた田中利幸高温工学試験研究炉開発部長、国富一彦技術開発室長、橘幸雄氏をはじめとする高温工学試験研究炉開発部の皆様および鈴木偉之建設部長に感謝致します。また試験に当たって協力を得た(株)大林組の関係各位に感謝致します。

参考文献

- (1) S.Saito, T.Tanaka, Y.Sudo, O.Baba, et. al, "Design of High Temperature Engineering Test Reactor", JAERI-1332(1994).
- (2) Isao Murata, et. al, "Reactor Shielding Design of the High Temperature Engineering Test Reactor -Analysis of Radiation Streaming through the Standpipes by Monte Carlo Code MCNP-", 8th International Conference on Radiation Shielding(1994).
- (3) 第4版「土木工学ハンドブック」I, 土木学会編(1989).
- (4) 橘幸男他, "高温工学試験研究炉の1次上部遮へい体の温度防止対策-追加昇温防止対策および確認試験結果について", JAERI-Tech 98-027(1998).
- (5) A.M.Neville, "Properties of Concrete", 後藤幸正、尾坂芳夫監訳、技報堂出版(1979).
- (6) 西内達雄、他, "110°Cまでの高温下に3年間さらされたコンクリートの力学特性", 電力中央研究所報告, U90034(1990).
- (7) JASS 5NT-601 "コンクリートの乾燥単位容積重量試験方法", (1975).
- (8) JIS ハンドブック "品質管理", 日本規格協会(1978).
- (9) U.シュナイダー, "コンクリートの熱的性質", 森永繁監訳, 山崎庸行・林章二訳, 技報堂出版(1983).
- (10) Zdenek P. Bazant, et al., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete", Materials and Structures, Paris, France, Vol.5 (1972).
- (11) J.Krank "The Mathematics of Diffusion", Clarendon Press Oxford (1975).
- (12) Zdenek P. Bazant, et al., "Creep and Shrinkage in Reactor Containment Shells", Journal of the Structural Division, Oct. (1975).

付録 強熱減量予備試験

グラウトに存在すると確認できる Fe_3O_4 と FeO は、高温になると次式のような酸化反応を
すると予想され、質量が増加して結合水量分析の誤差原因になると考えられる。



また、強熱時間の不足によって結合水の脱水が妨げられ、強熱時間が過剰になると Fe_3O_4 と
 FeO の酸化による質量増加によって結合水量分析の誤差原因になる。

そこで、強熱減量試験で測定を行う結合水量の測定精度を高めるために、適切な強熱温度
および強熱時間を決定するための予備試験を行った。

1. 強熱温度検討試験

○方法

グラウトの微粉末を試料として熱分析を行い、室温～1000℃までの加熱時間に対する質
量変化を測定した。

○結果

Fig.A.1 に熱分析の結果を示す。約 700℃までは TG 曲線が下降し、質量の減少、すなわ
ちグラウト粉体から水が抜けていることを示している。一方約 700℃を超えると TG 曲線
が上昇し、質量が増加している。これは上述の通り、 Fe_3O_4 および FeO の酸化による質量
増加であると考えられる。700℃以下でも Fe_3O_4 および FeO の酸化による質量増加現象が
発生している可能性も考えられるが、700℃以下ではそれを上回る脱水減量が測定されてい
る。また、700℃以上でも脱水されることもありえるが、それ以上に Fe_3O_4 および FeO の
酸化による質量増加の影響が大きくなる。以上の点を勘案し、強熱温度を約 700℃とした。

B.2 強熱時間検討試験

○方法

実際に強熱減量試験で使用する装置・器具を用いて、グラウト粉体の試料を加熱時間
700℃、加熱時間 30 分、60 分および 120 分において、グラウト粉体の質量を測定し、強

熱減量率を算出した。

○結果

結果を TableA.1 に示す。30 分加熱は 60 分および 120 分加熱と比較して、強熱減量率が大きくなっている。また、結合水量は、30 分と 60 分では差があるのに対し、60 分と 120 分ではほとんど差がない。すなわち、60 分以上では加熱時間が長過ぎ Fe_3O_4 および FeO の酸化による質量増加による誤差が大きくなっていると判断できる。したがって、強熱時間は 30 分とした。

TableA.1 Fixed water as a function of heating period.

強熱減量率(%)			結合水量(kg/m^3)		
700°C 30分	700°C 60分	700°C 120分	700°C 30分	700°C 60分	700°C 120分
3.69	3.62	3.60	86.0	80.7	80.3
3.70	3.62	3.61	86.2	80.5	80.5
3.69	3.66	3.62	86.0	81.6	80.7

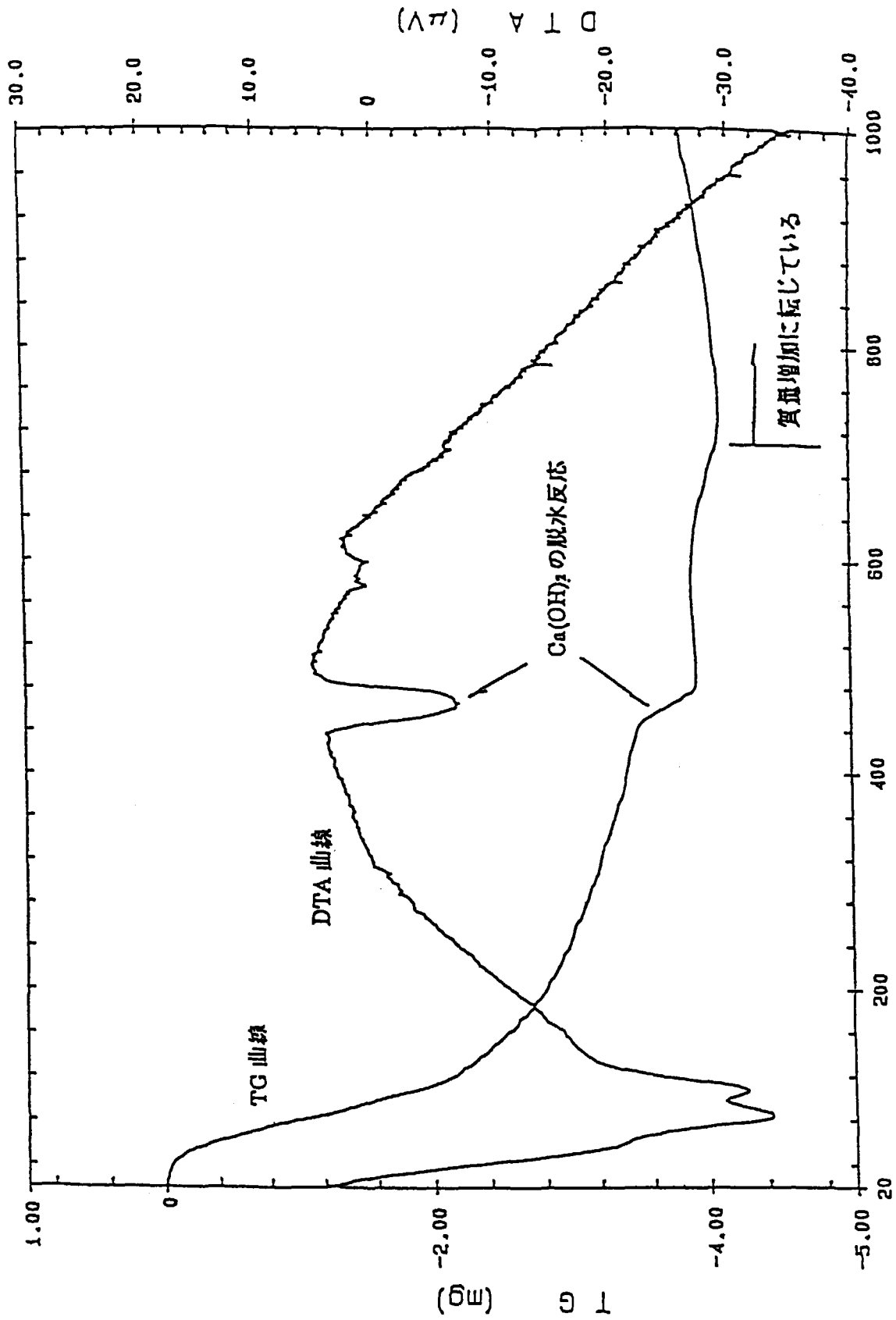


Fig. A.1 Thermal analysis data in the pre-test for fixed water measurement.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
 動粘度 1 m²/s = 10⁶ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15 °C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

