

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 6.

[技術情報室]

ATR 実証炉用ジルカロイ - 2 被覆管の外圧変形試験

1991年4月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

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

本資料は電源開発(株)より動力炉・核燃料開発事業団が受託した「平成2年度新型
転換炉技術確証試験(VI)」の一部作業に関する社内用資料である。

本資料は「社外秘」であり、社外への開示、公表を禁ずる。但し、電源開発(株)が
承認した場合は除く。

A T R 実証炉用ジルカロイ-2 被覆管の外圧変形試験



芳賀 哲也* , 小幡 真一** , 山口 俊弘*
 上村勝一郎* , 長井修一朗* , 馬上 康***
 佐藤 克也*** , 平岡 健一*** , 大宮 秀基***

要 旨

A T R 実証炉の冷却材喪失事故時における燃料被覆管の外圧変形挙動評価に必要なデータを取得するため、温度、圧力、時間、初期楕円度の有無及び模擬ペレットの封入状態をパラメータとした炉外での外圧変形試験を行った。尚、本試験は電源開発株式会社との受託契約に基づき、新型転換炉技術確証試験の一部として平成2年度に実施したものである。

本試験において求めた主な結果は以下のとおりである。

- (1) A T R 実証炉用被覆管の0.2%、0.5%、1.0%及び2.0%の変形量に対応する応力とLMPの関係の曲線を求めた。また、Life Fraction と変形量の関係の曲線を求めた。
- (2) 被覆管に作用する応力とLMPの関係及びLife Fraction と変形量の関係について、A T R 実証炉用被覆管とBWR用被覆管(文献値)を比較した。この結果、材料の違いによる差が認められた。
- (3) 下降管完全両端破断(破断ループ)及び下降管中小破断の解析結果を包絡する条件、外圧70 kg/cm²、到達温度640℃、外圧保持時間20秒及び外圧50 kg/cm²、到達温度650℃、外圧保持時間130秒で得られた変形量は、LMP/LF法による変形量の予測値と、予測精度の範囲内で一致した。
- (4) 被覆管に170 μmの楕円度が発生した場合の下降管完全両端破断(破断ループ)の解析結果を包絡する条件(外圧70 kg/cm²、到達温度640℃、外圧保持時間20秒)で3本中1本が座屈した。
- (5) 被覆管にA T R 実証炉の模擬ペレットを封入した試験片及びペレット間を25mm空けた試験片をそれぞれ5本ずつ座屈させた結果、リークは1本も認められなかった。

以上の結果は、電源開発株式会社が行うA T R 実証炉冷却材喪失事故時の安全評価に使用される。

* 核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室

** 核燃料サイクル技術開発部プルトニウム燃料開発室

*** 検査開発株式会社

目 次

1. 試験目的	1
2. 試験方法	2
2.2.1 試験装置	2
2.2 供試材	2
2.3 試験片	3
2.3.1 標準管試験片	3
2.3.2 偏平管試験片	3
2.3.3 模擬ペレット入り標準管試験片	3
2.4 試験条件	3
2.4.1 標準管試験条件	3
2.4.2 偏平管試験条件	4
2.4.3 模擬ペレット入り標準管試験条件	5
2.5 試験手順	5
2.5.1 標準管試験手順	6
2.5.2 偏平管試験手順	7
2.5.3 模擬ペレット入り標準管試験手順	7
2.6 測定精度	7
3. 試験結果	9
3.1 標準管試験結果	9
3.2 偏平管試験結果	13
3.3 模擬ペレット入り標準管試験結果	14
4. 考察	15
4.1 本試験と関連文献との比較	15
4.2 応力-LMP曲線と座屈データの関係	15
4.3 模擬ペレット入り標準管試験結果について	15
5. まとめ	17
6. 参考文献	18

表 リ ス ト

表2.2-1	供試材の機械的性質	19
表2.2-2	供試材の化学成分分析値	20
表2.4.1-1	パラメータ試験条件	21
表2.4.1-2	LMP/LF法妥当性確認試験条件	22
表2.4.2-1	定常試験条件	22
表2.4.2-2	過渡試験条件	23
表2.4.3-1	模擬ペレット入り標準管試験条件	24
表2.6-1	試験片温度測定精度	25
表2.6-2	試験片外圧測定精度	25
表3.1-1	試験片温度分布の再現性確認試験結果	26
表3.1-2	変形量の再現性確認試験結果	26
表3.1-3	パラメータ試験結果	27
表3.1-4	LMP/LF法妥当性確認試験結果	28
表3.2-1	定常試験結果	29
表3.2-2	過渡試験結果	30
表3.2-3	過渡試験結果(熱処理前後の比較)	31
表3.3-1	模擬ペレット入り標準管試験結果	31
表4.1-1	供試材の機械的特性の比較	32

図 リ ス ト

図2.1-1	外圧変形試験装置概略	33
図2.3.1-1	標準管試験片形状	34
図2.3.2-1	偏平管試験片形状	35
図2.3.3-1	模擬ペレット形状	36
図2.3.3-2	模擬ペレット入り標準管試験片形状	37
図3.1-1	変形量の再現性確認試験結果	38
図3.1-2	外圧 30 kg/cm ² における変形量と保持時間の関係	39
図3.1-3	外圧 40 kg/cm ² における変形量と保持時間の関係	41
図3.1-4	外圧 50 kg/cm ² における変形量と保持時間の関係	43
図3.1-5	外圧 60 kg/cm ² における変形量と保持時間の関係	45
図3.1-6	外圧 70 kg/cm ² における変形量と保持時間の関係	47
図3.1-7	外圧 80 kg/cm ² における変形量と保持時間の関係	49
図3.1-8	応力とLMPの関係	51
13.1-9	変形量のバラツキを考慮した応力とLMPの関係	52
図3.1-10	Life Fraction と変形量の関係	53
図3.3-1	試験後被覆管表面の形状測定結果(PAA130-13)	54
図3.3-2	試験後被覆管表面の形状測定結果(PAA132-11)	55
図3.3-3	試験後被覆管表面の形状測定結果(PAA130-10)	56
図3.3-4	試験後被覆管表面の形状測定結果(PAA132-12)	57
図3.3-5	試験後被覆管表面の形状測定結果(PAA130-12)	58
図4.1-1	応力とLMPの関係(文献(2)との比較)	59
図4.1-2	Life Fraction と変形量の関係(文献(2)との比較)	60
図4.2-1	応力-LMP曲線と座屈データの関係	61

写 真 リ ス ト

写真3.3-1 模擬ペレット入り標準管試験片の試験後外観	62
------------------------------------	----

[付 録]

外圧変形試験における試験片温度分布の改善法検討結果 63

1. 試験目的

A T R実証炉では、冷却材喪失事故（L O C A）が発生した直後に、燃料ピンは原子炉圧力が定格運転圧力程度で被覆管表面の冷却材がドライアウトし、燃料被覆管温度が急昇する事象が考えられる。この時、燃料被覆管は外圧によって変形することが予想される。

本試験は、温度、圧力、時間、初期楕円度の有無及び模擬ペレットの封入状態をパラメータとし、L O C A時を模擬した外圧変形試験を行って、A T R実証炉のL O C A時における燃料被覆管の外圧変形挙動評価に必要なデータを取得するために実施したものである。

2. 試験方法

2.1 試験装置

試験装置の概略を図2.1-1に示す。試験装置は大きく分けて、試験片をセットして外圧により変形させるための圧力容器、圧力容器を固定するとともに容器蓋の開閉機構を有する架台、試験片内部と圧力容器内部をガス置換するための真空排気装置、試験片内及び圧力容器内にアルゴンガス圧力を負荷するための圧力制御装置、試験片の昇温に必要な電力を供給するための電力供給装置、試験片の温度を制御するための温度制御装置、試験片内及び圧力容器内圧力と試験片表面温度を測定記録する圧力、温度指示計及び記録計で構成される。

試験片は、圧力容器内の上部電極及び下部電極の間にセットされ、直接通電方式によって加熱される。圧力容器と電極はガラス入りテフロン製スリーブで、ガス配管と電極はダイフロン製スリーブ及びガスケットでそれぞれ絶縁されている。

試験片温度は、被覆管中央5.0mm間の外表面軸方向3点にスポット溶接で取り付けられた白金・白金ロジウム熱電対（以下「R熱電対」と略す）で測定し、温度制御は中央部のR熱電対を用いて行う。

真空排気系は、配管をガス加圧系と共有し、試験開始前に試験片内部と圧力容器内部を真空ポンプで真空排気する。

加圧系は真空排気後の試験片内部と圧力容器内部にボンベからアルゴンガスを減圧して供給し、試験圧力を負荷する。

圧力、温度指示計及び記録計は、圧力変換器を介して測定する圧力容器内及び試験片内圧力とR熱電対で測定する試験片温度3点を表示するとともに記録紙に記録する。

2.2 供試材

試験に用いた被覆管は、ATR実証炉用ジルカロイ-2被覆管（以下「被覆管」と略す）である。供試材の機械的性質を表2.2-1に、また、化学成分を表2.2-2に示す。

被覆管の公称寸法は、以下のとおりである。

外 径	14.50 mm
内 径	12.70 mm
最小肉厚	0.82 mm
長 さ	4,120 mm

2.3 試験片

試験片は、試験の目的に合わせて標準管試験片、偏平管試験片及び模擬ペレット入り標準管試験片の3種類の試験片を用いた。

2.3.1 標準管試験片

標準管試験片は、被覆管を長さ300mmに切断し、その両端に圧力封入端栓及び圧力導入端栓をそれぞれTIG溶接した試験片である。

標準管試験片の形状を図2.3.1-1に示す。

2.3.2 偏平管試験片

偏平管試験片は、標準管試験片の被覆管部をプレス加工した後、プレス加工時の残留応力を除去するために、500℃、約10分の熱処理を行って、燃料ピンの燃焼中に生じる楕円度を模擬した目標200 μ mの楕円度を付けた試験片である。

偏平管試験片の形状を図2.3.2-1に示す。

2.3.3 模擬ペレット入り標準管試験片

模擬ペレット入り標準管試験片は、標準管試験片の被覆管部にATR実証炉の模擬ペレットを封入したベースモデル試験片と、燃料ピンの燃焼中に発生するペレット間ギャップを模擬して、ペレット間を被覆管部の中央で25mm空けた欠損モデル試験片である。

模擬ペレットの形状を図2.3.3-1に、また、模擬ペレット入り標準管試験片の形状を図2.3.3-2に示す。

2.4 試験条件

試験は、温度、圧力、時間、初期楕円度の有無及び模擬ペレットの封入状態をパラメータとし、ATR実証炉のLOCA時における燃料被覆管の外圧変形挙動評価に必要なデータを取得するため、予備試験、パラメータ試験、LMP/LF法妥当性確認試験、偏平管を用いた定常試験及び過渡試験、並びに模擬ペレット入り標準管試験の6種類とした。

それぞれの試験条件を次に示す。

2.4.1 標準管試験条件

(1) 予備試験条件

(a) 試験片温度分布の再現性確認試験条件

試験片温度分布のバラツキの原因として考えられるガスの対流を防ぐ方法として、最も効果的な方法であった「試験片の表面が均一に包まれるようにセラミックス製

のアミ状チューブで包み、その外側からガラスウールと半割したセラミックチューブで包み、さらにセラミックチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込んだ状態」を採用し、試験条件 800℃、大気圧～50 kg/cm²と 600℃、50 kg/cm²～80 kg/cm²で試験片の温度分布の再現性を確認した。軸方向温度分布の測定は同一条件で5回、周方向温度分布の測定は同一条件で2回の繰り返しとした。測定位置は、軸方向については試験片中央50 mm間の2.5 mm間隔3点とし、周方向については試験片中央の120°間隔3点とした。

なお、試験片温度分布の改善法検討の詳細については、付録に示す。

(b) 変形量の再現性確認試験条件

同一外圧、温度、保持時間条件での変形量の再現性を確認するため、試験条件の組合せは高温、低圧条件及び低温、高圧条件でそれぞれ低歪及び高歪が発生すると予想される四通りとした。温度735℃、圧力30 kg/cm²の場合の保持時間は5秒と6.5秒、温度615℃、圧力80 kg/cm²の場合の保持時間は5秒と9.0秒の四通りで、一通り当たり5回の繰り返しを行った。

(2) パラメータ試験条件

外圧、温度及び保持時間をパラメータとして被覆管の変形量をLarson Miller parameter (以下、LMPと略す)法で整理し、被覆管の所定変形量に対応する応力とLMPとの関係を求めるため、外圧を30 kg/cm²から80 kg/cm²まで10 kg/cm²おきに、温度を590℃から740℃まで20℃おきに、それぞれの外圧、温度条件の組み合わせで0.2%から2.0%程度の変形量が発生すると予想される保持時間を選定した。

試験条件を表2.4.1-1に示す。

(3) LMP/LF法妥当性確認試験条件

外圧を一定として、過渡温度変化条件での試験結果の変形量とLMP/LF法で予測した変形量を比較してLMP/LF法の妥当性を確認するため、下降管完全両端破断(破断ループ)及び下降管中小破断の解析結果を包絡する条件とした。

試験条件を表2.4.1-2に示す。

2.4.2 偏平管試験条件

(1) 定常試験条件

燃料ピンの燃焼中に発生する楕円度を模擬し、目標200 μmの楕円度の付いた被覆管のLOCA時の座屈の発生の有無を確認するため、下降管完全両端破断(非破断ループ)及び再循環ポンプ軸固着の解析結果を包絡する条件とした。

試験条件を表2.4.2-1に示す。

(2) 過渡試験条件

燃料ピンの燃焼中に発生する楕円度を模擬し、目標 $200\mu\text{m}$ の楕円度の付いた被覆管のLOCA時の座屈の発生の有無を確認するため、下降管完全両端破断（破断ループ）の解析結果を包絡する条件とした。

試験条件を表2.4.2-2に示す。

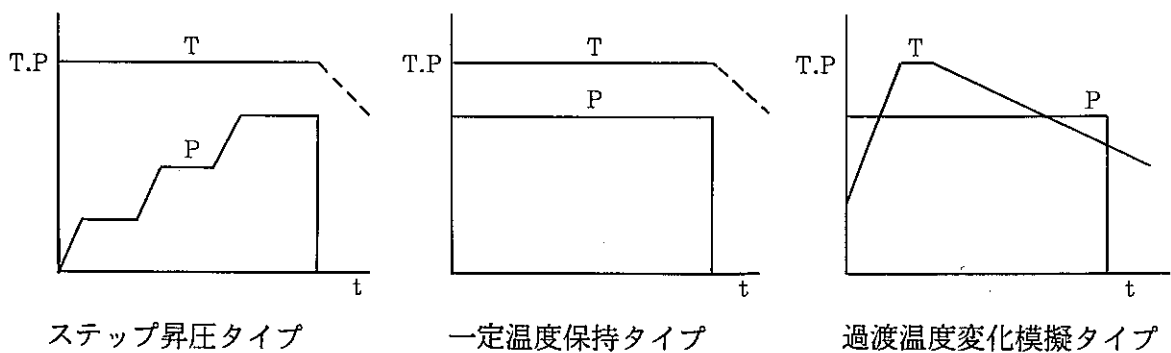
2.4.3 模擬ペレット入り標準管試験条件

被覆管にATR実証炉の模擬ペレットを封入した状態（ベースモデル）と、燃料ピンの燃焼中に発生するペレット間ギャップを模擬して、ペレット間を被覆管部の中央で 25mm 空けた状態（欠損モデル）で座屈させ、被覆管のリークの有無を確認するため、Olsen⁽¹⁾ 実験結果を参考にして、外圧 $80\text{kg}/\text{cm}^2$ 、温度 700°C 、保持時間 1000 秒と外圧 $80\text{kg}/\text{cm}^2$ 、温度 800°C 、保持時間 20 秒の2条件とした。

試験条件を表2.4.3-1に示す。

2.5 試験手順

試験は、試験の目的に合わせて下図に示すように、一定温度保持状態で圧力（内、外圧）を段階的に昇圧するステップ昇圧タイプと、一定温度保持開始時に外圧を瞬間的に負荷し、所定時間経過時に外圧を瞬間的にゼロとする一定温度保持タイプと、所定の初期温度から昇温開始時に外圧を瞬間的に負荷し、所定の温度に到達した後に降温し、所定時間経過時に外圧を瞬間的にゼロとする過渡温度変化模擬タイプの3種類の方法で行った。



尚、標準管試験の試験片温度分布再現性確認試験はステップ昇温タイプで、標準管試験の変形量再現性確認試験とパラメータ試験、偏平管試験の定常試験及び模擬ペレット入り標準管試験は一定温度保持タイプで、また、標準管試験のLMP/LF法妥当性確認試験及び偏平管試験の過渡試験は過渡温度変化模擬タイプで試験を行った。

それぞれの試験の手順は以下のとおりである。

2.5.1 標準管試験手順

(1) 予備試験手順

(a) 試験片温度分布の再現性確認試験手順

- ① 試験片の被覆管部中央50mm間の外表面軸方向3点にR熱電対をスポット溶接で取り付ける。
- ② 試験片を圧力容器内の上部及び下部電極間にセットする。
- ③ 試験片内部及び圧力容器内部を真空排気する。
- ④ 圧力、温度指示計及び記録計の電源を入れ、圧力及び温度の計測を開始する。
- ⑤ 試験片内部及び圧力容器内部にアルゴンガスを導入し、試験片内外圧力差がゼロ（均等圧）の状態初期圧力まで加圧する。
- ⑥ 試験片内外圧力差がゼロのまま試験片を直接通電方式で試験温度まで加熱する。
- ⑦ 試験片が試験温度に到達したところでブロー弁を操作し、加熱によって上昇した圧力を試験圧力に再調整する。
- ⑧ 試験片内外圧力差がゼロ（均等圧）の状態段階的に所定の試験圧力まで加圧して、圧力ごとの試験片温度を計測する。
- ⑨ 試験片降温後に試験片内圧力と圧力容器内圧力を開放して試験を終了する。

(b) 変形量の再現性確認試験

- ① 試験片の被覆管部の中央100mm間の外径を周方向22.5°間隔8方向、軸方向5mm間隔21箇所、合計168箇所をマイクロメータで測定する。
- ② 2.5.1の(1)の(a)の①から④の手順と同じ。
- ③ 試験片内部及び圧力容器内部にアルゴンガスを導入し、試験片内外圧力差がゼロ（均等圧）の状態試験圧力まで加圧する。
- ④ 2.5.1の(1)の(a)の⑥から⑦の手順と同じ
- ⑤ 試験片内圧のみを急速に開放して試験片に外圧を負荷するとともに、時間の計測を開始する。
- ⑥ 試験時間経過と同時に試験片内圧を急速に負荷し、試験片内外圧力差をゼロにもどして試験を終了する。
- ⑦ 試験片降温後に試験片内圧力と圧力容器内圧力を開放して試験片を取り出し、試験前と同じ位置の外径測定を行い変形量を求める。

(2) パラメータ試験手順

- ① 2.5.1の(1)の(b)の①から⑦の手順と同じ。

(3) LMP/LF法妥当性確認試験手順

- ① 2.5.1の(1)の(b)の①から③の手順と同じ。
- ② 試験片内外圧力差がゼロのまま試験片を直接通電方式で所定の初期温度まで加熱

する。

- ③ 試験片が所定の初期温度に到達したところでブロー弁を操作し、加熱によって上昇した圧力を試験圧力に再調整する。
- ④ 所定の昇温速度で試験片を加熱すると同時に試験片内圧のみを急速に開放して試験片に外圧を負荷し、時間の計測を開始する。
- ⑤ 試験片温度が所定の到達温度に達したところで降温速度を設定し、試験片を降温度する。
- ⑥ 2.5.1の(1)の(b)の⑥から⑦の手順と同じ。

2.5.2 偏平管試験手順

(1) 定常試験手順

- ① 試験片の被覆管部の中央100mm間の長径と短径について、軸方向5mm間隔21箇所合計42箇所をマイクロメータで測定する。
- ② 2.5.1の(1)の(b)の②から⑥の手順と同じ。
- ③ 試験片降温後に試験片内圧力と圧力容器内圧力を開放して試験片を取り出し、試験片の座屈の有無を確認する。

(2) 過渡試験手順

- ① 試験片の被覆管部の中央100mm間の長径と短径について、軸方向5mm間隔21箇所合計42箇所をマイクロメータで測定する。
- ② 2.5.1の(1)の(b)の②から③の手順と同じ。
- ③ 2.5.1の(3)の②から⑤の手順と同じ。
- ④ 試験時間経過と同時に試験片内圧を急速に負荷し、試験片内外圧力差をゼロにもどして試験を終了する。
- ⑤ 試験片降温後に試験片内圧力と圧力容器内圧力を開放して試験片を取り出し、試験片の座屈の有無を確認する。

2.5.3 模擬ペレット入り標準管試験手順

- ① 2.5.1の(1)の(b)の②から⑥の手順と同じ。
- ② 試験片降温後に試験片内圧力と圧力容器内圧力を開放して試験片を取り出し、ヘリウムリーク試験を行って、リークの有無を確認する。

2.6 測定精度

(1) 試験片温度測定精度

温度測定に関しては基準となる発熱体がないため、補償導線から指示計までの精度を

測定し、熱電対自体の精度はJ I S規格の許容誤差を用いた。

温度測定精度は、基準電圧発生器を用いて補償導線端子から200℃おきに熱起電力相当の直流電圧を入力する方法とし、0～1000℃までの範囲で測定した。

測定結果を表2.6-1に示す。

測定値の最大誤差は、標準温度が200℃の時の+4℃であり、熱電対自体の精度(J I S規格の許容誤差)と合わせると+5.5℃である。但し、本試験条件の範囲である400℃から800℃の場合の測定誤差は0℃であり、熱電対自体の精度と合わせると、最大誤差は±2.0である。

(2) 試験片外圧測定精度

外圧測定精度は、圧力計検定用の基準重錘圧力計に圧力変換器を取り付け、20 kg/cm²おきに基準圧力を負荷して0～100 kg/cm²までの範囲で測定した。尚、測定は、0～100 kg/cm²の負荷方向と、100～0 kg/cm²の除荷方向の両方向で行った。

測定結果を表2.6-2に示す。

測定誤差は、負荷方向、除荷方向とも、基準圧力に対して0 kg/cm²である。

(3) 試験片外径測定精度

外径測定精度は、標準管試験のパラメータ試験後試料の変形量を求めた位置をマイクロメータで繰り返し測定し、その差を測定誤差とした。

測定誤差は、試験片の変形量が1.0%未満の場合8 μm、1.0%から2.0%未満の場合12 μm、2.0%以上の場合28 μmであった。

3. 試験結果

3.1 標準管試験結果

(1) 予備試験結果

(a) 試験片温度分布の再現性確認試験結果

試験片温度分布の測定結果を表3.1-1に示す。

測定結果は、高温、低圧条件の軸方向温度分布の最大温度差が10℃で、周方向温度分布の最大温度差は9℃であり、低温、高圧条件の軸方向温度分布の最大温度差が10℃で、周方向温度分布の最大温度差は6℃であった。

以上のように、本試験における試験片中央50mm間の温度分布は軸方向及び周方向ともに10℃以内の温度差であった。

(b) 変形量の再現性確認試験結果

試験結果を表3.1-2及び図3.1-1に示す。

変形量の再現性は高温、低圧条件にバラツキが大きく見られ、また、高歪領域でバラツキが最も大きくなっている。最もバラツキの大きい高温、低圧条件の高歪領域での変形量 ϵ の対数の 2σ をとると、すべてのデータが包絡される。この平均値 $\pm 2\sigma$ の値は、変形量の対数の平均値に対応する変形量の+138%、-59%に当たる。

(2) パラメータ試験結果

パラメータ試験における試験片温度及び変形量についてのデータ棄却基準を、3.1の(1)の予備試験の結果をもとに以下のとおり定義した。

パラメータ	測定方法	棄却基準
温度	・試験片中央部50mm間の25mm間隔にR熱電対3対をスポット溶接して測定する。	・試験温度に対して、測定温度が $\pm 6^\circ\text{C}$ 以上は棄却する。
変形量	・試験片中央100mm間について、周方向 22.5° 間隔8点、軸方向5mm間隔21点をマイクロメータで測定し、最大変形量は偏平方向の変形量を対象とする。	・最大変形量が試験片中央50mm間以外に発生した場合は棄却する。

尚、試験片の最大変形量は、1人の測定者が同じマイクロメータを用いて、試験前後の同じ位置の周方向22.5°間隔8方向、軸方向5mm間隔21箇所、合計168箇所の外径測定を行い、試験前後の外径変化が最も大きい測定箇所について、次の式から求めた。

$$\text{変形量 (\%)} = \frac{(\text{試験後外径} - \text{試験前外径})}{\text{試験前外径}} \times 100$$

パラメータ試験では、標準管試験片を用いて、外圧、温度及び保持時間をパラメータとした試験を行い、測定した変形量をLMP法で整理し、さらにLife Fraction と変形量の関係で整理した。

パラメータ試験結果を表3.1-3に、また、各外圧、温度条件ごとの変形量と保持時間の関係を図3.1-2から図3.1-7に示す。図中には、各一定温度ごとの変形量と保持時間の関係の曲線を実線で示し、3.1の(1)の予備試験で得られた変形量のバラツキを包絡する+2σを実線に対して点線で示した。

いずれの外圧、温度条件とも1.0%の変形量を越えるあたりから急激に変形が進行する傾向にあり、同一外圧、温度条件ごとに求めた変形量と保持時間の関係を示す曲線(実線)よりも短時間側で座屈した結果もある。

また、外圧30kg/cm²から80kg/cm²のいずれの条件とも、同一保持時間では、温度が高いほど変形量は大きくなる傾向にある。変形量が小さい領域では、この傾向が逆転する場合もあるが、3.1の(1)の予備試験で得られた変形量のバラツキの範囲である。

測定データをLMP法で整理して、所定変形量に対応する応力とLMPとの関係を図3.1-8に示す。尚、LMP及び応力は次式から求めた。

$$LMP = T (\log t + C)$$

T : 絶対温度 (K)

t : 所定変形量の発生時間 (h)

C : 定数 (20を用いた)

$$\sigma = P (D_o + D_i) / 4 t$$

σ : 初期円周方向応力 (kg/mm²) , P : 圧力 (kg/cm²)

D_o : 外径公称値, D_i : 内径公称値, t : 肉厚公称値

応力とLMPの関係は、図3.1-2から図3.1-7に示す、各外圧、温度条件ごとに求め

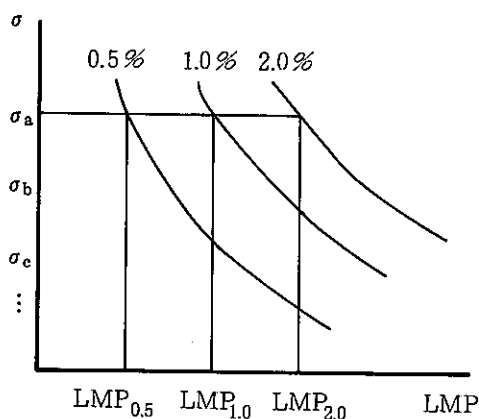
た保持時間と変形量の関係の曲線（実線）から求めたものであり、0.2%、0.5%、1.0%及び2.0%の変形量に対応する応力とLMPの関係の曲線が得られた。尚、0.04%から0.1%の変形量に対応する応力とLMPの関係は、図3.1-2から図3.1-7に示す、各外圧、温度条件ごとに求めた保持時間と変形量の関係の外挿値から求めた。

変形量のバラツキを考慮した場合、図3.1-2から図3.1-7に示す、変形量と保持時間の関係は、変形量のバラツキを包絡する+2σの曲線（点線）となる。この+2σの曲線を用いてLMPを求めると、図3.1-9に示す0.5%、1.0%及び2.0%の変形量に対応する応力とLMPの関係の曲線が得られる。

図3.1-8に示す所定変形量に対応する応力とLMPの関係の曲線について、2.0%の変形量に対応するLMP（LMP-応力相関から各応力に対して決定したLMP）を基準にして求めたLife Fraction と変形量の関係を図3.1-10に示す。

尚、Life Fraction は以下の要領で求めた。

(a) LMP-応力曲線から任意の応力の所定変形量に対応するLMP値を求める。



(b) LMPの式から(a)で求めたLMP値の時間を求める。

$$LMP = T (\log t + C) \longrightarrow t = 10 \left(\frac{LMP}{T} - C \right)$$

LMP_{0.5} → t_{0.5} T : 試験温度 (絶対温度)

LMP_{1.0} → t_{1.0} C : 定数 (20を用いた)

LMP_{2.0} → t_{2.0}

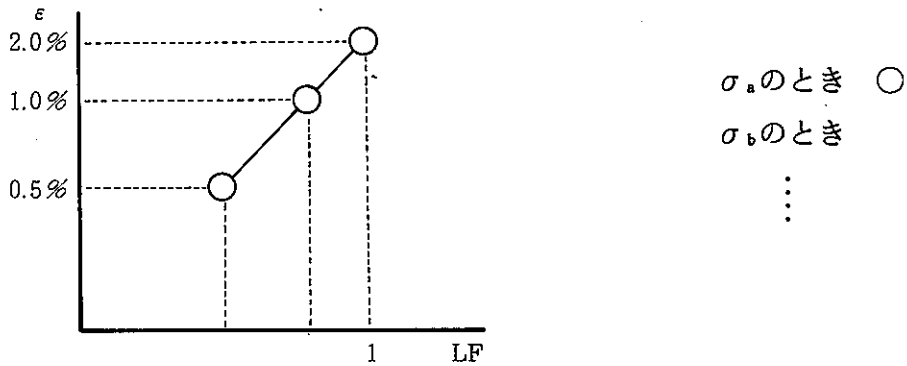
(c) LFの式を用いて(b)で求めた時間 t から LF を求める。

$$LF_k = \int_0^{t_k} \frac{1}{t^*} dt = \frac{t_k}{t^*} \quad LF = 1 \text{ が } 2.0\% \text{ のとき } t^* = t_{2.0}$$

t_k : 経過時間

t^* : 所定変形量の発生時間

(d) (a)から(c)の方法で求めた所定変形量に対応する LF の関係を作図する。

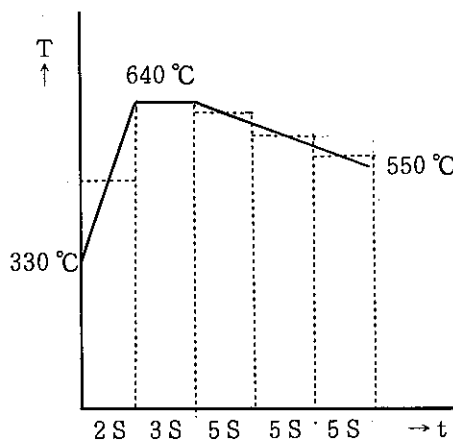


Life Fraction と変形量の関係は、バラツキがあるものの一つの曲線で表すことができる。

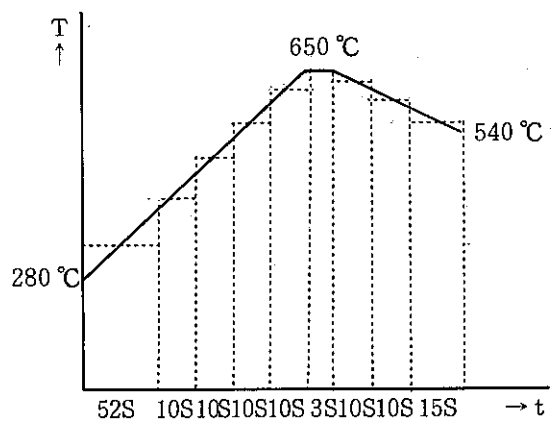
(3) LMP/LF法妥当性確認試験

LMP/LF法による変形量の予測の妥当性を確認するため、下降管完全両端破断（破断ループ）及び下降管中小破断の解析結果を包絡する条件で試験を行い、試験結果の変形量とLMP/LF法で予測した変形量を比較した。

試験結果を表3.1-4に示す。また、下降管完全両端破断（破断ループ）及び下降管中小破断の解析結果を包絡する条件の変形量を予測した試験結果の温度履歴の分割を下図に示す。尚、変形量の予測値は、下図に示す分割ごとのLMPの値から図3.1-8を用いて求めた変形量を積算した値である。



下降管完全両端破断



下降管中小破断

下降管完全両端破断（破断ループ）の解析結果を包絡する条件の試験結果の変形量はLMP/LF法で予測した変形量0.32%に対して0.23%と0.18%であり、下降管中小破断の解析結果を包絡する条件の試験結果の変形量はLMP/LF法で予測した変形量0.45%に対して0.36%と0.30%であり、どちらの条件も試験結果の変形量はLMP/LF法で予測した変形量に比べて小さい変形量であった。試験結果の変形量とLMP/LF法で予測した変形量の差は、3.1の(1)の予備試験で得られた変形量のバラツキを包絡する $\pm 2\sigma$ の範囲であり、LMP/LF法による変形量の予測精度の範囲であった。

3.2 偏平管試験結果

燃料ピンの燃焼中に発生する楕円度を模擬して、被覆管に165 μm から218 μm の楕円度を付けた試験片を用いて、下降管完全両端破断の非破断ループ及び再循環ポンプ軸固着の解析結果を包絡する条件での定常試験と下降管完全両端破断の破断ループの解析結果を包絡する条件での過渡試験を行い、被覆管の座屈発生の有無を確認した。尚、楕円度の定義は以下のとおりである。

$$\text{楕円度}(\mu\text{m}) = \text{長径}(\mu\text{m}) - \text{短径}(\mu\text{m}) \quad (\text{同一円周上})$$

(1) 定常試験

試験結果を表3.2-1に示す。

下降管完全両端破断（非破断ループ）の解析結果を包絡する条件の外圧80 kg/cm^2 、温度500 $^{\circ}\text{C}$ 、保持時間20秒では初期楕円度が最も大きい214 μm でも座屈の発生は見られず、試験後楕円度は244 μm であり、公称外径値に対して1.21%の変形量であった。

再循環ポンプ軸固着の解析結果を包絡する条件の外圧75 kg/cm^2 、温度550 $^{\circ}\text{C}$ 保持時間20秒では、初期楕円度が最も大きい218 μm でも座屈の発生は見られず、試験後楕円度は278 μm であり、公称外径値に対して1.39%の変形量であった。

(2) 過渡試験

試験結果を表3.2-2に示す。

下降管完全両端破断（破断ループ）の解析結果を包絡する条件の外圧70 kg/cm^2 、到達温度640 $^{\circ}\text{C}$ 、外圧保持時間20秒では、被覆管の初期楕円度が165 μm と174 μm で試験後楕円度は854 μm と944 μm であり、座屈の発生は見られず、試験後の最小短径は表3.2-3に示すように、13.969 mm と13.938 mm であり、公称外径値に対して3.66%と3.88%の変形量であった。

また、扁平管試験片は、プレス加工にて橢円度を付けた後、熱処理を行って残留応力を除去した後の橢円度を初期橢円度としているが、表3.2-3に示すように熱処理を行わずに実施した試験結果で、今回、座屈に至らなかった試験片と熱処理前の橢円度がほぼ同じ（即ち、熱処理による橢円度の変動が同じであれば熱処理後の橢円度も同じ）試験片で座屈した結果もあった。

以上のように、被覆管の初期橢円度が $170\mu\text{m}$ の場合、下降管完全両端破断の破断ループを包絡する条件の外圧 $70\text{kg}/\text{cm}^2$ 、到達温度 640°C 、外圧保持時間 20 秒で3本中1本が座屈した。

3.3 模擬ペレット入り標準管試験結果

実証炉の模擬ペレットを被覆管全域に封入した状態のベースモデル試験片と燃料ピンの燃焼中に発生する軸方向ペレットギャップを模擬して、ペレット間を被覆管部の中央で 2.5mm 空けた状態にした欠損モデル試験片を用いて、被覆管が座屈する条件で試験を行い、被覆管にリークが無いことを確認した。

試験結果を表3.3-1に示す。

ベースモデル試験片の被覆管は、図3.3-1から図3.3-5に示す形状測定結果のとおり、模擬ペレット間のチャンファ部にくい込む状態まで座屈した。また、欠損モデル試験片の模擬ペレット間の 2.5mm は、写真3.3-1に示すように被覆管が2面接触の状態まで座屈した。

すべての試験後試料についてヘリウムリーク試験を行い、被覆管のリークの有無を確認した結果、本試験条件の10試料にリークは認められなかった。

4. 考 察

4.1 本試験と関連文献との比較

本試験の結果と、本試験と同様の試験を実施している荒井ら⁽²⁾の結果を比較した。

(1) 応力とLMPの関係の比較

所定変形量に対応する応力とLMPの関係について、パラメータ試験結果と文献(2)の結果を比較して図4.1-1に示す。また、パラメータ試験に用いた供試材と文献(2)の供試材の機械的特性を比較して表4.1-1に示す。尚、文献(2)の供試材の機械的特性は製管メーカーの実績値を用いた。

0.5%、1.0%及び2.0%の変形量に対応する応力とLMPの関係はパラメータ試験結果と文献(2)の結果を比較すると低温領域では同じ変形量が発生する応力の差が大きく、高温領域では、その差が小さくなっている。この要因としては、供試材の違いが考えられる。即ち、低温領域では応力除去材と完全焼鈍材の機械的特性の差が現れ、高温になるにしたがって応力除去材のanneal効果によりその差が小さくなるものと考えられる。

(2) Life Fraction と変形量の関係の比較

1.0%の変形量に対応するLMPを基準にして求めたLife Fraction と変形量の関係について、パラメータ試験結果と文献(2)の結果を比較して図4.1-2に示す。

Life Fraction と変形量の関係は、同一変形量のと看文献(2)の結果に比べてパラメータ試験結果の方がLife Fraction の値が大きいのは、表4.1-1にあるように文献(2)の被覆管よりもパラメータ試験の被覆管の方が破損伸びが小さいことと対応している。

4.2 応力-LMP曲線と座屈データの関係

パラメータ試験結果から求めた所定変形量に対応する応力-LMP曲線と座屈データの関係を図4.2-1に示す。

応力-LMP曲線と座屈データの関係は、応力が高くなるほど変形量が小さい領域でも座屈が発生しており、偏平管試験の過渡試験の条件である外圧70 kg/cm² (応力5.8 kg/mm²) の場合、1.0%の変形量を越えるあたりで座屈している結果もある。このことから、偏平管試験のうち下降管完全両端破断(破断ループ)の解析結果を包絡する条件で実施した過渡試験結果の3.66%と3.88%の変形量は座屈の寸前であると考えられる。

4.3 模擬ペレット入り標準管試験結果について

模擬ペレット入り標準管試験において、ベースモデル及び欠損モデル試験片を用いて被覆管を座屈させた結果では、リークの発生は認められなかった。しかしながら、軽水炉に

において、過去に外圧クリープによる燃料ピンの偏平化が生じ、座屈して破損に至った⁽³⁾という事例があったことを考えれば、模擬ペレット入り標準管試験結果の数少ないデータをもとに、いかなる条件においてもリークは発生しないと断言することはできないであろう。

5. ま と め

A T R実証炉の冷却材喪失事故時における燃料被覆管の外圧変形挙動評価に必要なデータを取得するため、温度、圧力、時間、初期楕円度の有無及び模擬ペレットの封入状態をパラメータとした外圧変形試験を実施し、以下の結果を得た。

- (1) A T R実証炉用被覆管の0.2%、0.5%、1.0%及び2.0%の変形量に対応する応力とLMPの関係の曲線を求めた。また、Life Fraction と変形量の関係の曲線を求めた。
 - (2) 被覆管に作用する応力とLMPの関係及びLife Fraction と変形量の関係について、A T R実証炉用被覆管とBWR用被覆管（文献値）を比較した。この結果、材料の違いによる差が認められた。
 - (3) 下降管完全両端破断（破断ループ）及び下降管中小破断の解析結果を包絡する条件、外圧70 kg/cm²、到達温度640℃、外圧保持時間20秒及び外圧50 kg/cm²、到達温度650℃、外圧保持時間130秒で得られた変形量は、LMP/LF法による変形量の予測値と、予測精度の範囲内で一致した。
 - (4) 被覆管に170 μmの楕円度が発生した場合の下降管完全両端破断（破断ループ）の解析結果を包絡する条件（外圧70 kg/cm²、到達温度640℃、外圧保持時間20秒）で3本中1本が座屈した。
 - (5) 被覆管にA T R実証炉の模擬ペレットを封入した試験片及びペレット間を25mm空けた試験片をそれぞれ5本ずつ座屈させた結果、リークは1本も認められなかった。
- 以上の結果は、電源開発株式会社が行う、A T R実証炉冷却喪失事故時の安全評価に使用される。

6. 参考文献

- (1) Charles S. Olsen : Zircaloy Cladding Collapse Under Off-Normal Temperature
And Pressure Conditions (1978)
- (2) 荒井 真次, 他 : 過渡温度変化条件におけるジルカロイ-2 燃料被覆管の変形予測
(株)東芝総合研究所
日本原子力学会誌 Vol.29, No.7, PP642~650 (1987)
- (3) 三島 良績, 他 : 軽水炉燃料のふるまい, (財)原子力安全協会 (平成2年7月)

表2.2-1 供試材の機械的性質

項 目		試 験 条 件	規 格 値	検 査 結 果 (2 試 料 / ロ ッ ト)	
引 張 試 験	引張強さ(kg/mm ²)	常 温	≧ 49	62.6	62.9
	耐 力 (kg/mm ²)		≧ 42	47.2	47.4
	伸 び (%)		≧ 20	28	27
	引張強さ(kg/mm ²)	343 °C	≧ 29	36.8	38.2
	耐 力 (kg/mm ²)		≧ 23	27.0	28.4
	伸 び (%)		≧ 20	32	30
内 圧 破 裂 試 験	破裂圧力(kg/cm ²)	Open end	≧ 600	880	880
	周伸び (%)		≧ 20	29.7	30.6

表2.2-2 供試材の化学成分分析値

項 目		規 格 値	分 析 値		
			T ^{*1}	M ^{*2}	B ^{*3}
合 金 元 素 (%)	Sn	1.20-1.70	1.46	1.44	1.53
	Fe	0.07-0.20	0.16	0.15	0.17
	Cr	0.05-0.15	0.11	0.11	0.12
	Ni	0.03-0.08	0.05	0.05	0.05
	Fe+Cr+Ni	0.18-0.38	0.32	0.31	0.35
不 純 物 元 素 (ppm)	Al	≤75	39	39	39
	B	≤0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	Cd	≤0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	C	≤270	70	74	71
	Co	≤20	<10	<10	<10
	Cu	≤50	<10	<10	<10
	Hf	≤100	54	55	54
	Mn	≤50	<10	<10	<10
	Si	≤120	<30	<30	<30
	Ti	≤50	<10	<10	<10
	W	≤100	<30	<30	<30
	U	≤3.5	<0.5	<0.5	<0.5
	Pb	報 告	<20	<20	<20
	Cl	報 告	<10	<10	<10
	Ca	報 告	<10	<10	<10
Mo	報 告	<10	<10	<10	
Mg	報 告	<10	<10	<10	

*1は使用鑄塊の頭部

*2は使用鑄塊の中央部

*3は使用鑄塊の底部

表2.4.1-1 パラメータ試験条件

圧力 (kg/cm ²)	温度 (°C)	保持時間 (sec)									
30	740	5	20	90	130	150	170				
	720	5	20	70	140	210					
	700	5	25	120	240	360	480				
40	720	5	30	80	90						
	700	15	55	80	105	155					
	680	40	100	190	280	370					
50	690	10	45	85							
	670	10	60	120	180	195					
	650	10	85	160	235	310					
60	670	5	35	65							
	650	5	30	80	160	180	210				
	630	10	35	95	180	340					
70	650	5	20	45	55	60	65	70	75	80	
	630	10	40	75	110	120					
	610	15	40	75	135	190	270				
80	630	5	25	45							
	610	20	60	105	120	145	160				
	590	20	70	125	210	220	240	250	255	265	

表2.4.1-2 LMP/LF法妥当性確認試験条件(目標)

	外圧 (kg/cm ²)	初期温度 (°C)	到達温度 (°C)	昇温速度 (°C/sec)	温度保持 時間(sec)	降温速度 (°C/sec)	外圧保持 時間(sec)	試験数
*1 a	70	330	640	155	3	≤10	20	2
*2 b	50	280	650	4	3	≤6	130	2

*1：下降管完全両端破断（破断ループ）の解析結果を包絡する条件。

*2：下降管中小破断の解析結果を包絡する条件。

表2.4.2-1 定常試験条件

	外圧 (kg/cm ²)	温度 (°C)	保持時間 (sec)	試験数	初期楕円度 (μm)
*1 a	80	500	20	4	200 (目標)
*2 b	75	550	20	4	

*1：下降管完全両端破断（非破断ループ）の解析結果を包絡する条件。

*2：再循環ポンプ軸固着の析結果を包絡する条件。

表2.4.2-2 過渡試験条件 (目標)

	外圧 (kg/cm ²)	初期温度 (°C)	到達温度 (°C)	昇温速度 (°C/sec)	温度保持時間 (sec)	降温速度 (°C/sec)	外圧保持時間 (sec)	試験数	初期橢円度 (μm)
*	70	330	640	155	3	≤10	20	2	200 (目標)

* : 下降管完全両端破断 (破断ループ) の解析結果を包絡する条件。

表2.4.3-1 模擬ペレット入標準管試験条件

模擬ペレットの 封入状態	外圧 (kg/cm ²)	温度 (°C)	保持時間 (sec)	試験数	初期楕円度 の有無
ベースモデル	80	700	1000	2	無
		800	20	3	
欠損モデル	80	700	1000	2	
		800	20	3	

表2.6-1 試験片温度測定精度

単位 (°C)

標準温度	測定値	測定誤差	*熱電対自体の誤差 (JIS規格の 許容誤差)	TOTAL 誤差
0	0	0	±1.5	±1.5
200	204	+4	±1.5	+5.5
400	400	0	±1.5	±1.5
600	600	0	±1.5	±1.5
800	800	0	±2.0	±2.0
1000	1001	+1	±2.5	+3.5

*JIS C-1602による。

表2.6-2 試験片外圧測定精度

単位 (kg/cm²)

	基準圧力	測定値	測定誤差
負荷方向 ↓ 除荷方向 ↓	0	0	0
	20	20	0
	40	40	0
	60	60	0
	80	80	0
	100	100	0
	80	80	0
	60	60	0
	40	40	0
	20	20	0
0	0	0	

表3.1-1 試験片温度分布の再現性確認試験結果

	最大温度差 °C						
	軸方向					周方向	
高温, 低圧条件	5	10	5	9	10	9	6
低温, 高圧条件	6	6	5	10	3	6	3

表3.1-2 変形量の再現性確認試験結果

圧力 (kg/cm ²)	温度 (°C)	保持時間 (sec)	最大変形量 (%)
30	735	5	0.45
			0.28
			0.37
			0.50
			0.67
		65	1.90
			0.77
			0.60
			0.92
			1.08
80	615	5	0.21
			0.17
			0.13
			0.17
			0.24
		90	1.83
			2.08
			1.34
			1.75
			1.34

表3. 1-3 パラメータ試験結果

圧力 (kg/cm ²)	温度 (°C)	保持時間 (sec)		〔 〕内は変形量 (%)						
30	740	5 [0.59]	20 [0.68]	90 [1.04]	130 [1.07]	150 [1.69]	170 [2.12]			
	720	5 [0.40]	20 [0.50]	70 [1.00]	140 [1.20]	210 [2.06]				
	700	5 [0.37]	25 [0.24]	120 [0.33]	240 [0.71]	360 [3.02]	480 [3.30]			
40	720	5 [0.26]	30 [0.69]	80 [3.83]	90 [*]					
	700	15 [0.19]	55 [0.27]	80 [1.15]	105 [2.26]	155 [2.03]				
	680	40 [0.24]	100 [0.38]	190 [1.20]	280 [0.86]	370 [3.38]				
50	690	10 [0.40]	45 [1.05]	85 [2.96]						
	670	10 [0.15]	60 [0.44]	120 [0.89]	180 [3.99]	195 [*]				
	650	10 [0.21]	85 [0.31]	160 [0.53]	235 [0.82]	310 [2.53]				
60	670	5 [0.18]	35 [0.61]	65 [2.72]						
	650	5 [0.26]	30 [0.53]	80 [1.11]	160 [1.08]	160 [1.31]	160 [*]	180 [1.31]	180 [*]	210 [4.41]
	630	10 [0.06]	35 [0.30]	95 [0.48]	180 [1.33]	340 [2.67]				
70	650	5 [0.08]	20 [0.37]	45 [1.51]	55 [2.01]	55 [*]	60 [*]	65 [1.15]	65 [*]	70 [1.68]
	630	70 [*]	70 [*]	75 [1.56]	80 [1.74]					
	610	10 [0.21]	40 [0.52]	75 [0.84]	110 [3.12]	110 [*]	120 [*]			
80	630	5 [0.19]	25 [0.28]	45 [2.10]						
	610	20 [0.32]	60 [0.57]	105 [*]	120 [1.52]	145 [1.20]	160 [3.02]			
	590	20 [0.09]	70 [0.35]	125 [0.50]	210 [1.15]	210 [*]	220 [*]	240 [0.69]	240 [0.86]	240 [1.08]
		250 [1.32]	255 [*]	265 [4.39]						

* : 座屈

表3.1-4 LMP/LF法妥当性確認試験結果

	外圧 (kg/cm ²)	初期温度 (°C)	到達温度 (°C)	昇温速度 (°C/sec)	温度保持時間 (sec)	降温速度 (°C/sec)	外圧保持時間 (sec)	推定変形量 (%)	実測変形量 (%)	試験片No.
a	70	330	640	155	3	≤10	20	0.32	0.23	PAA136-8
									0.18	PAA136-6
b	50	280	650	4	3	≤6	130	0.45	0.36	PAA135-10
									0.30	PAA136-5

* : a は下降管完全両端破断（破断ループ）， b は下降管中小破断の解析結果を包絡する条件。

表3.2-1 定常試験結果

	外圧 (kg/cm ²)	温度 (°C)	保持時間 (sec)	初期橢円度 (μm)	試験後橢円度 (μm)	変形量 (%)	試験片No.
*1	80	500	20	211	224	1.18	PAA134-2
a				214	244	1.21	PAA134-4
				185	201	1.03	PAA134-5
				174	184	0.99	PAA133-13
*2	75	550	20	200	233	1.22	PAA133-10
b				218	278	1.39	PAA133-12
				174	250	1.21	PAA133-6
				191	243	1.17	PAA134-3

*1 : 下降管完全両端破断（非破断ループ）の解析結果を包絡する条件。

*2 : 再循環ポンプ軸固着の解析結果を包絡する条件。

表3.2-2 過渡試験結果

	外圧 (kg/cm ²)	初期温度 (°C)	到達温度 (°C)	昇温速度 (°C/sec)	温度保持時間 (sec)	降温速度 (°C/sec)	外圧保持時間 (sec)	初期楕円度 (μm)	試験後楕円度 (μm)	試験片No.
*	70	330	640	155	3	≤10	20	165	854	PAA133-8
								174	944	PAA134-9

* : 下降管完全両端破断（破断ループ）の解析結果を包絡する条件。

表3.2-3 過渡試験結果（熱処理前後の比較）

試験片No.	熱処理前楕円度 (μm)	熱処理後楕円度 (μm)	試験後楕円度 (μm)	試験後最少 短径 (mm)	公称外径 (mm)	変形量 (%)
PAA133-8	208	165	854	13.969	14.50	3.66
PAA134-9	240	174	944	13.938	14.50	3.88
PAA133-7	209	—	—	—	14.50	—

* PAA133-7は座屈

表3.3-1 模擬ペレット入り標準管試験結果

模擬ペレット の封入状態	外圧 (kg/cm^2)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	保持時間 (sec)	座屈形態	リーク の有無	試験片No.
ベースモデル	80	700	1000	* Waisting	無	PAA130-13
				Waisting	無	PAA132-11
		800	20	Waisting	無	PAA130-10
				Waisting	無	PAA132-12
				Waisting	無	PAA130-12
欠損モデル	80	700	1000	写真3.3-1参照	無	PAA132-2
				写真3.3-1参照	無	PAA132-4
		800	20	写真3.3-1参照	無	PAA132-1
				写真3.3-1参照	無	PAA132-7
				写真3.3-1参照	無	PAA132-8

*Waisting : 模擬ペレット間のチャンファ部にくい込んでいる状態

表4.1-1 供試材の機械的特性の比較

項目		BWR用ジルカロイ-2 被覆管（完全焼鈍材）		実証炉用ジルカロイ-2 被覆管（応力除去材）		
		最終焼鈍条件 580°C前後×3hr		最終焼鈍条件 515°C×2hr		
		規格	*1 S社製品	規格	*2 S社製品	
常温 引張性質	引張強さ (kg/mm ²)	≥ 48.9	56	≥ 49	62.9	
	耐力 (0.2%) (kg/mm ²)	≥ 33.5	38	≥ 42	47.4	
	伸び (%)	≥ 30	36	≥ 20	27	
高温 引張性質	343 °C	引張強さ (kg/mm ²)	≥ 23.4	28	≥ 29	38.2
		耐力 (0.2%) (kg/mm ²)	≥ 11.0	15	≥ 23	28.4
		伸び (%)	≥ 30	43	≥ 20	30
内圧 バースト	バースト圧力 (kg/cm ²)	≥ 670	820	≥ 600	880	
	円周方向伸び (%)	≥ 20	40	≥ 20	30.6	

*1 : 住友金属工業(株)発行の小冊子「ジルコニウムおよびジルコニウム合金」から引用。

*2 : 本試験の供試材ミルシート値。

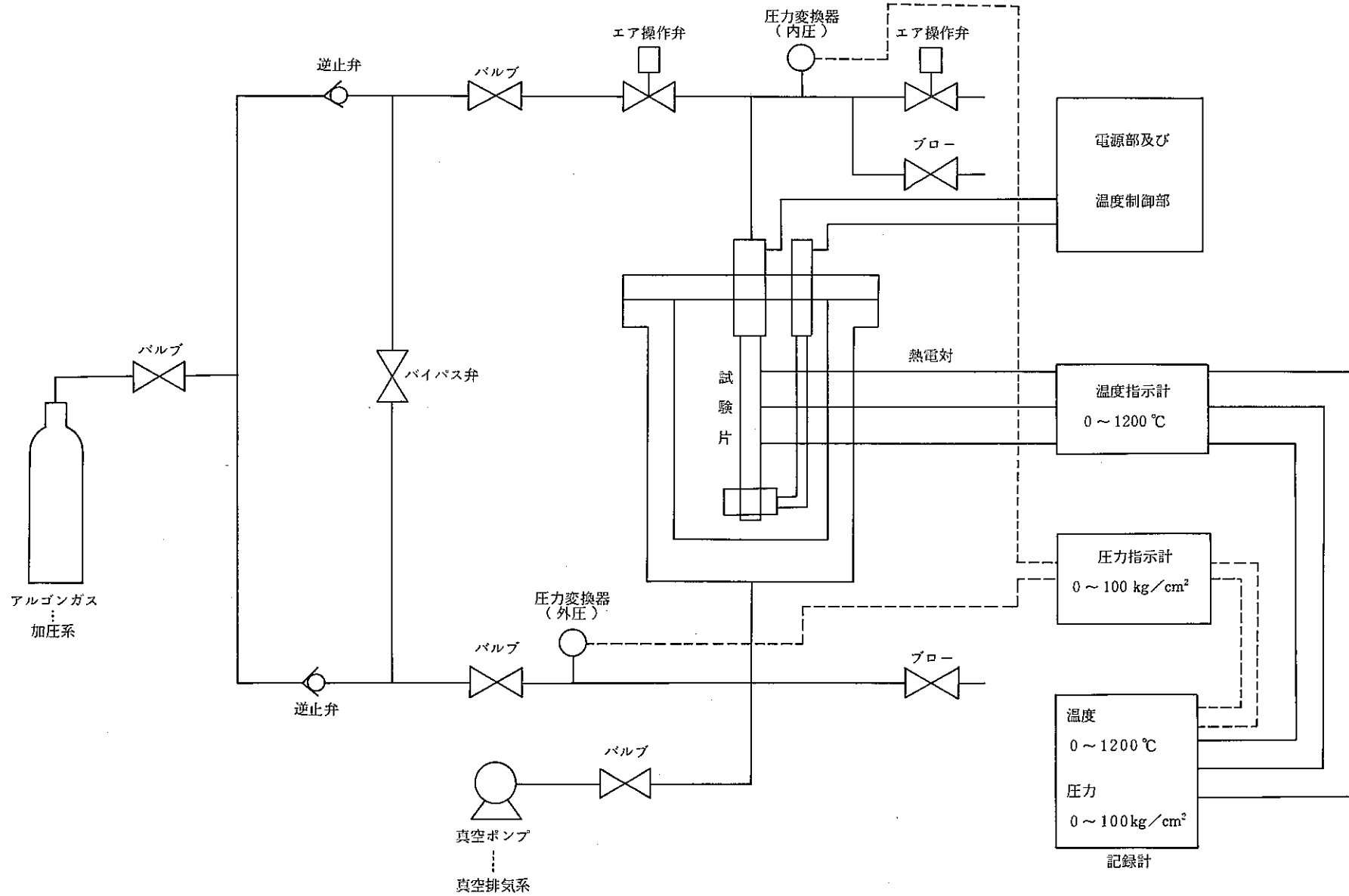


図 2.1 - 1 外圧変形試験装置概略図

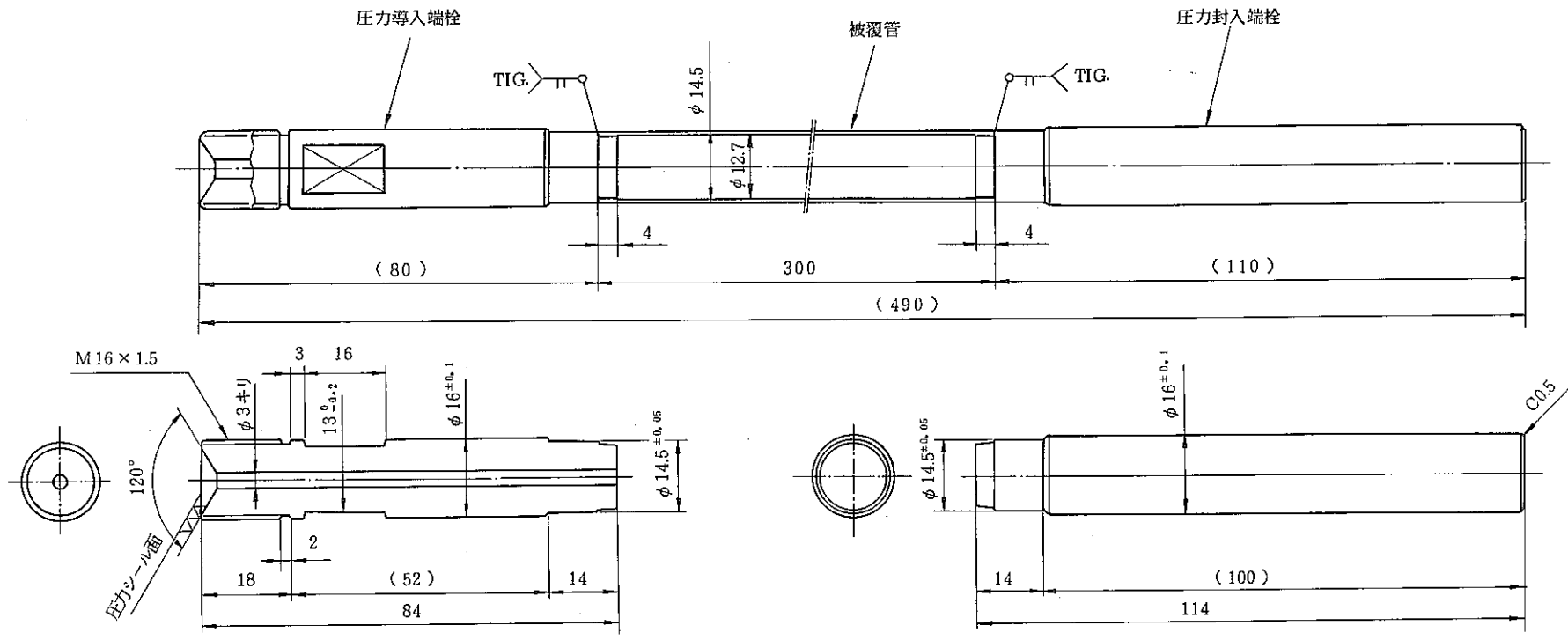


図 2.3.1 - 1 標準管試験片形状

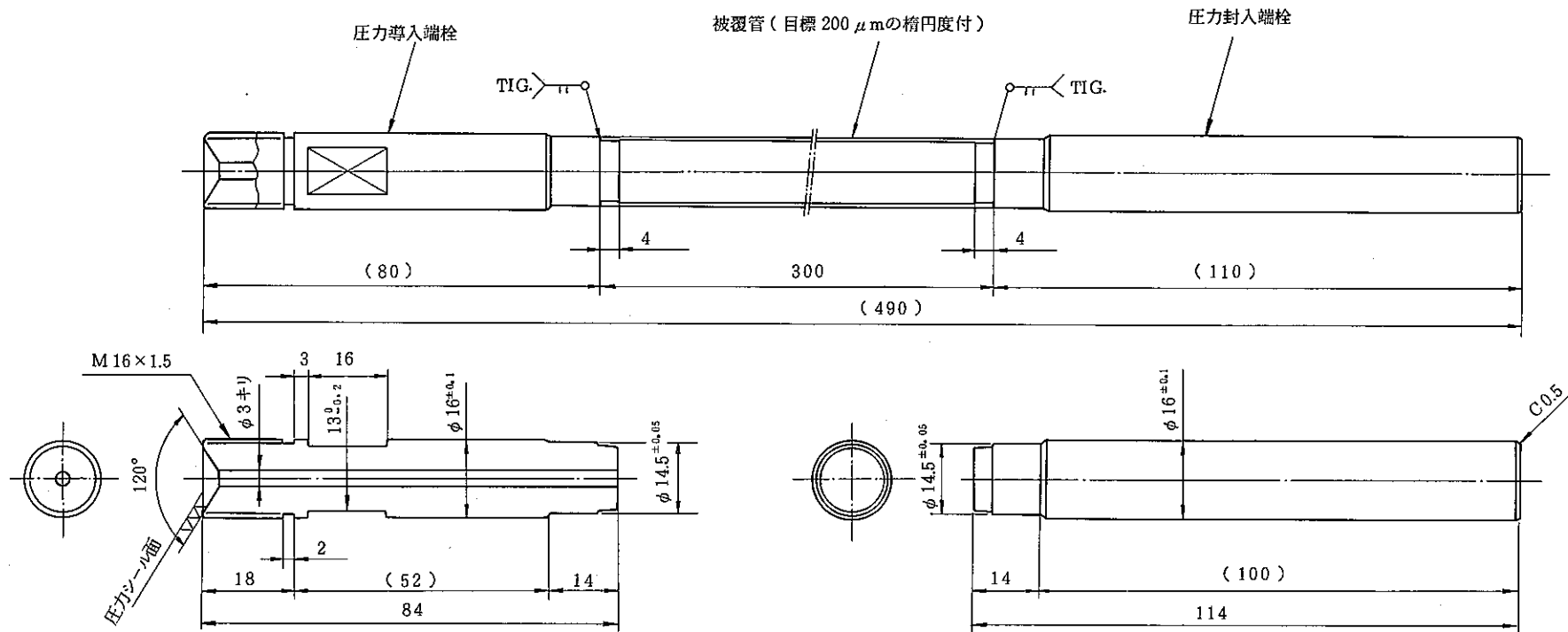


図 2.3.2 - 1 偏平管試験片形状

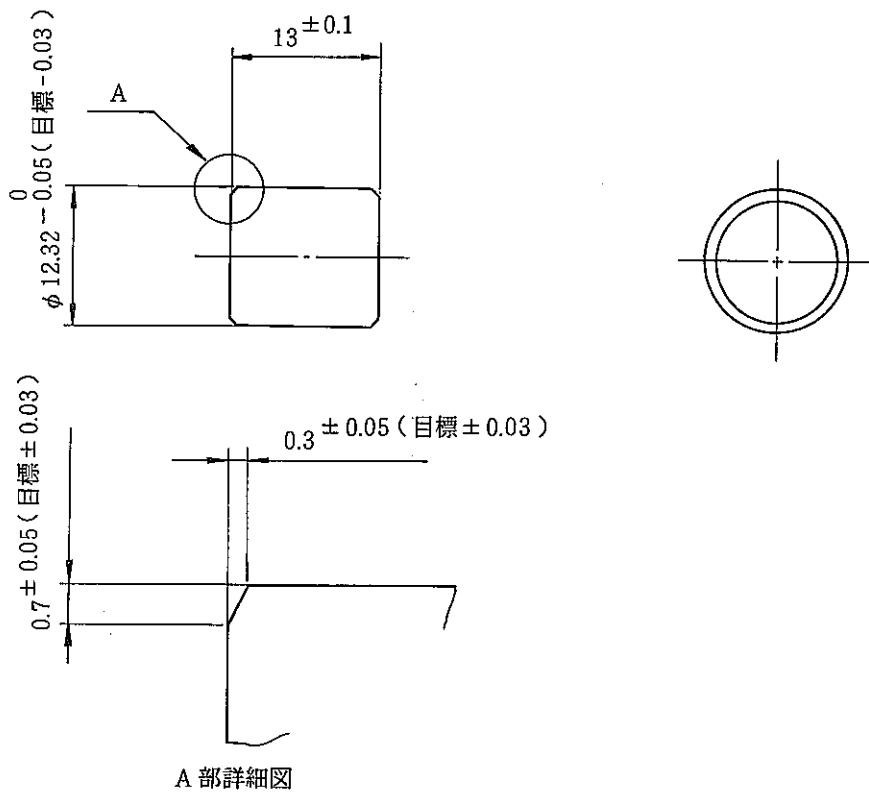


図 2.3.3 - 1 模擬ペレット形状

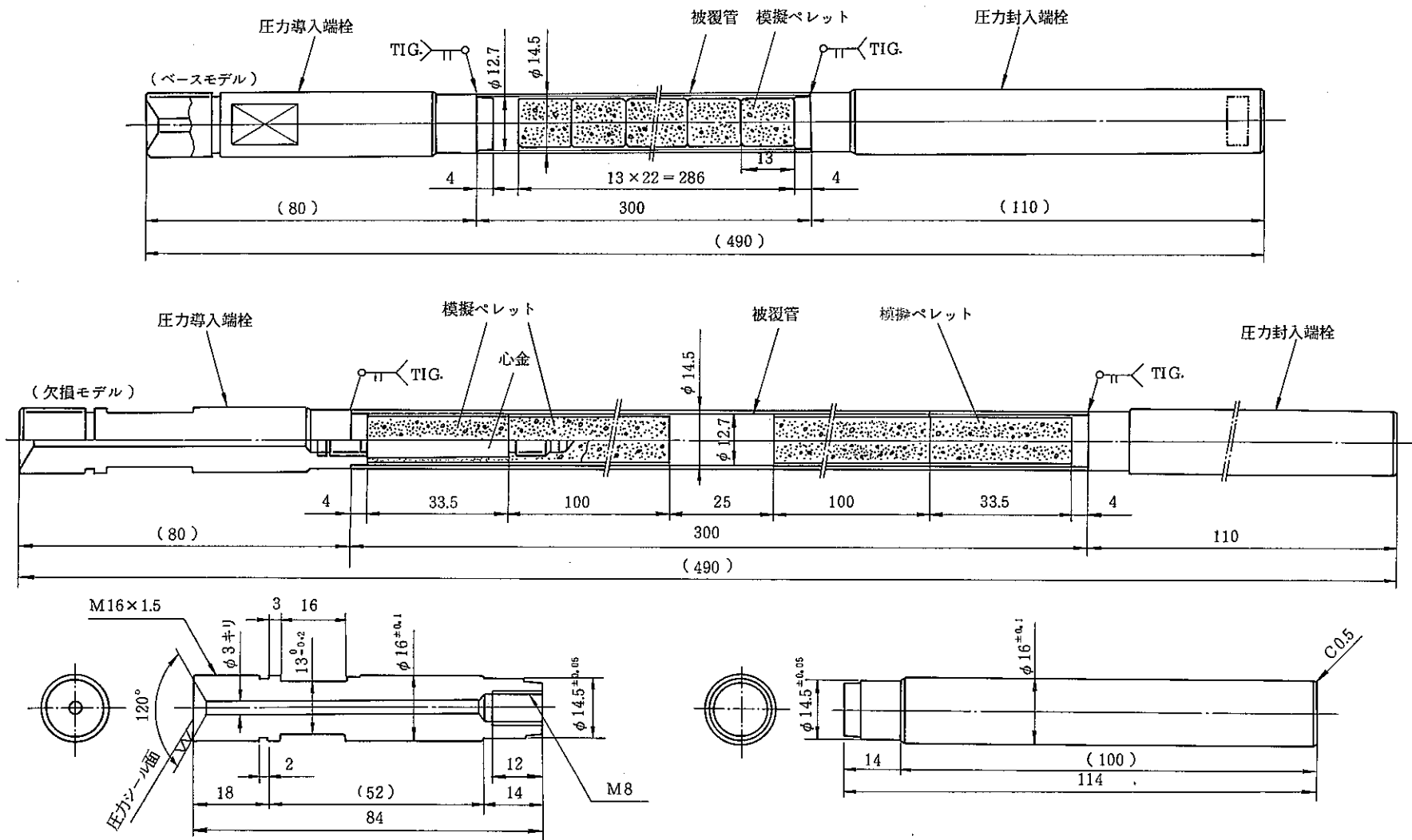


図 2.3.3 - 2 模擬ペレット入り標準管試験片形状

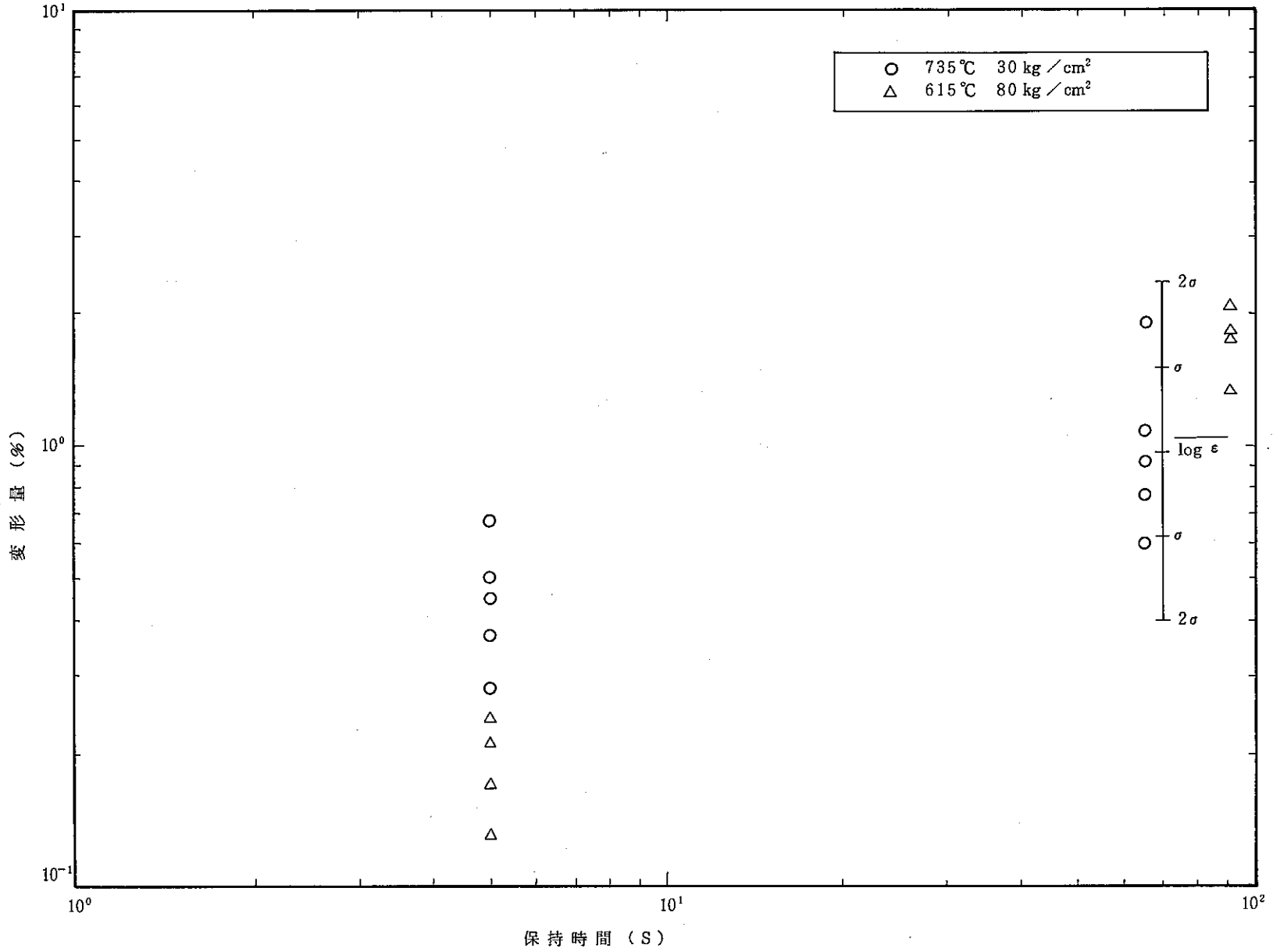


図 3.1 - 1 変形量の再現性確認試験結果

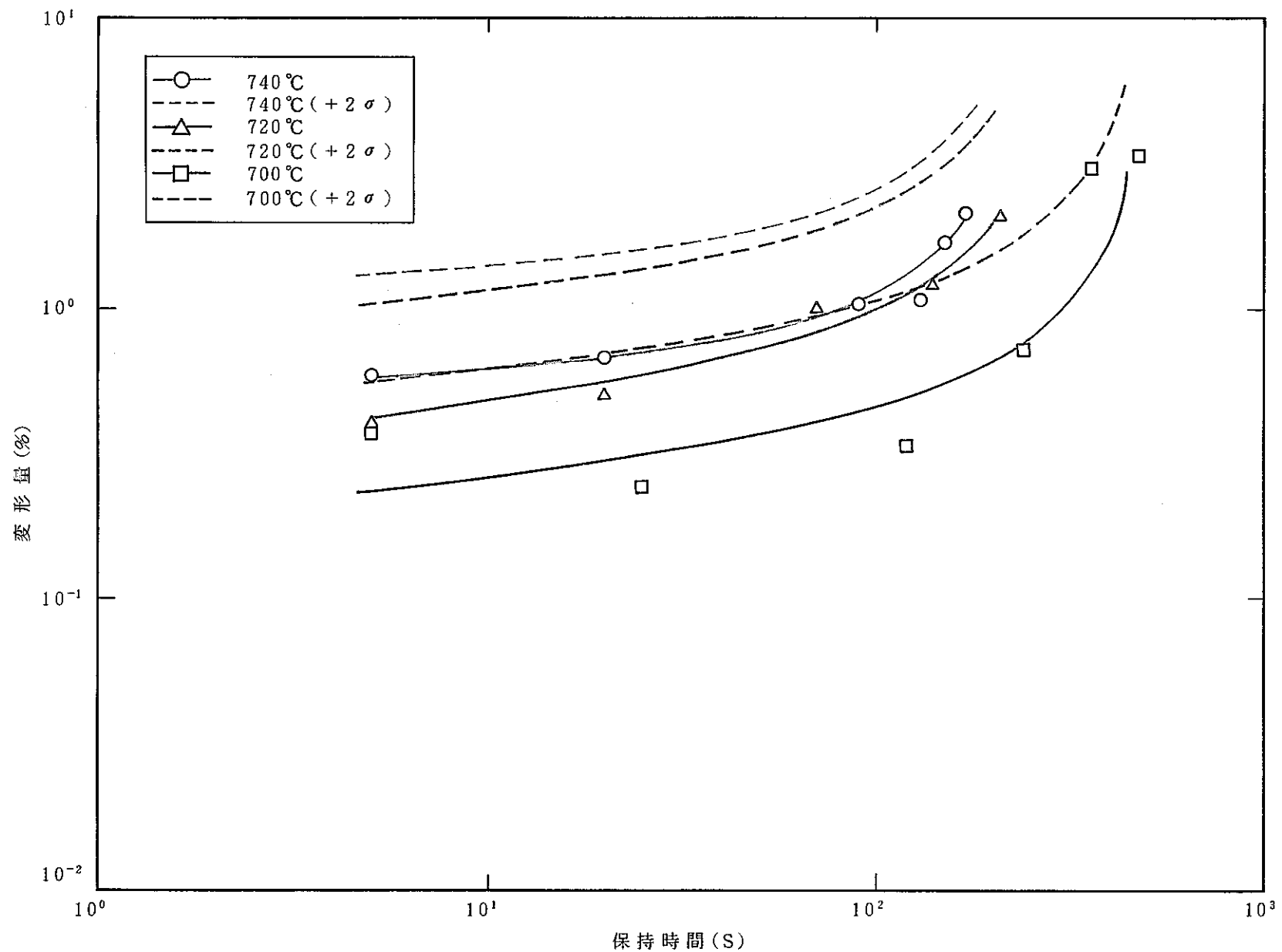


図 3.1 - 2 外圧 30 kg/cm² における変形量と保持時間の関係

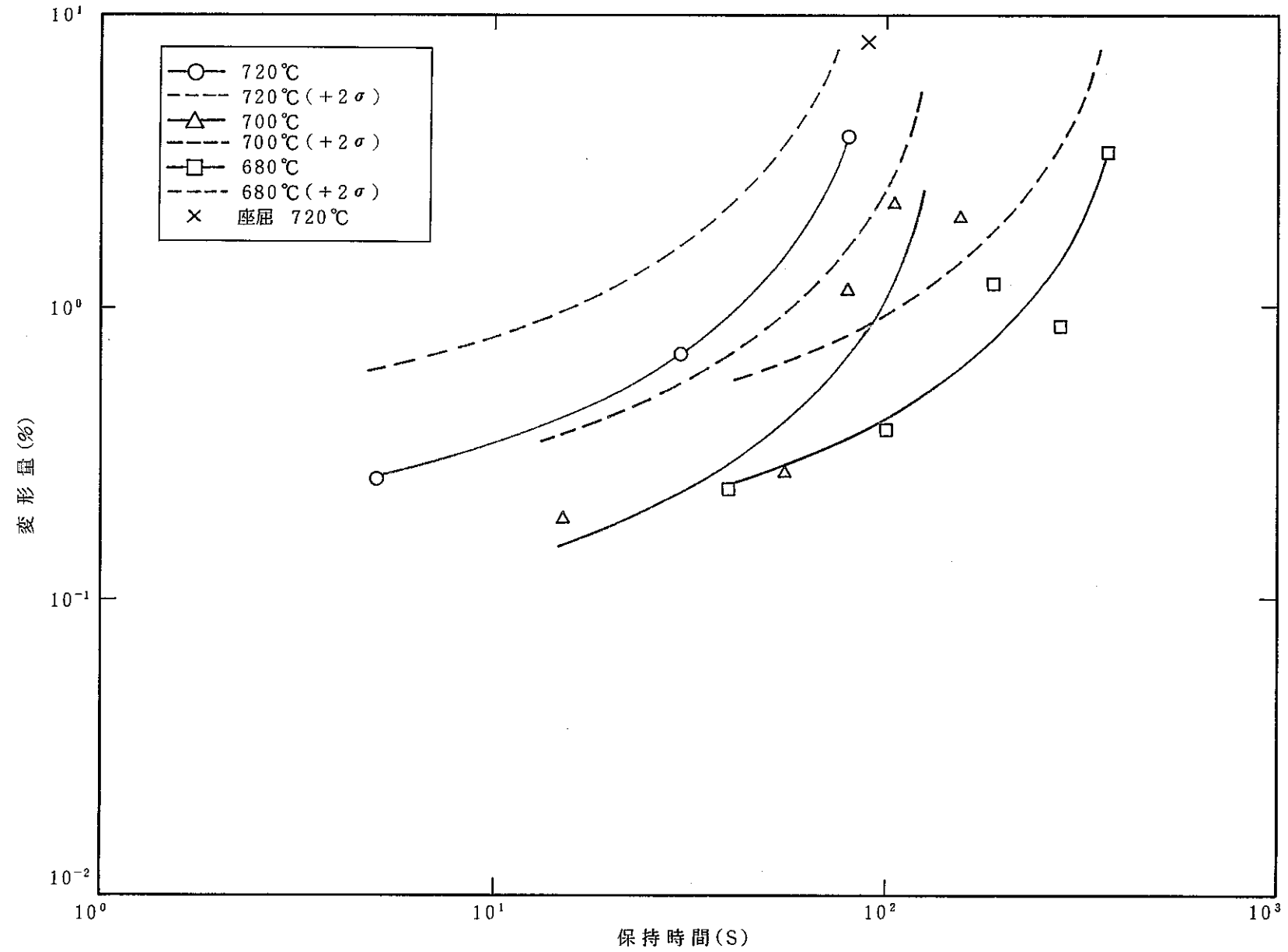


図 3.1 - 3 外圧 40 kg/cm² における変形量と保持時間の関係

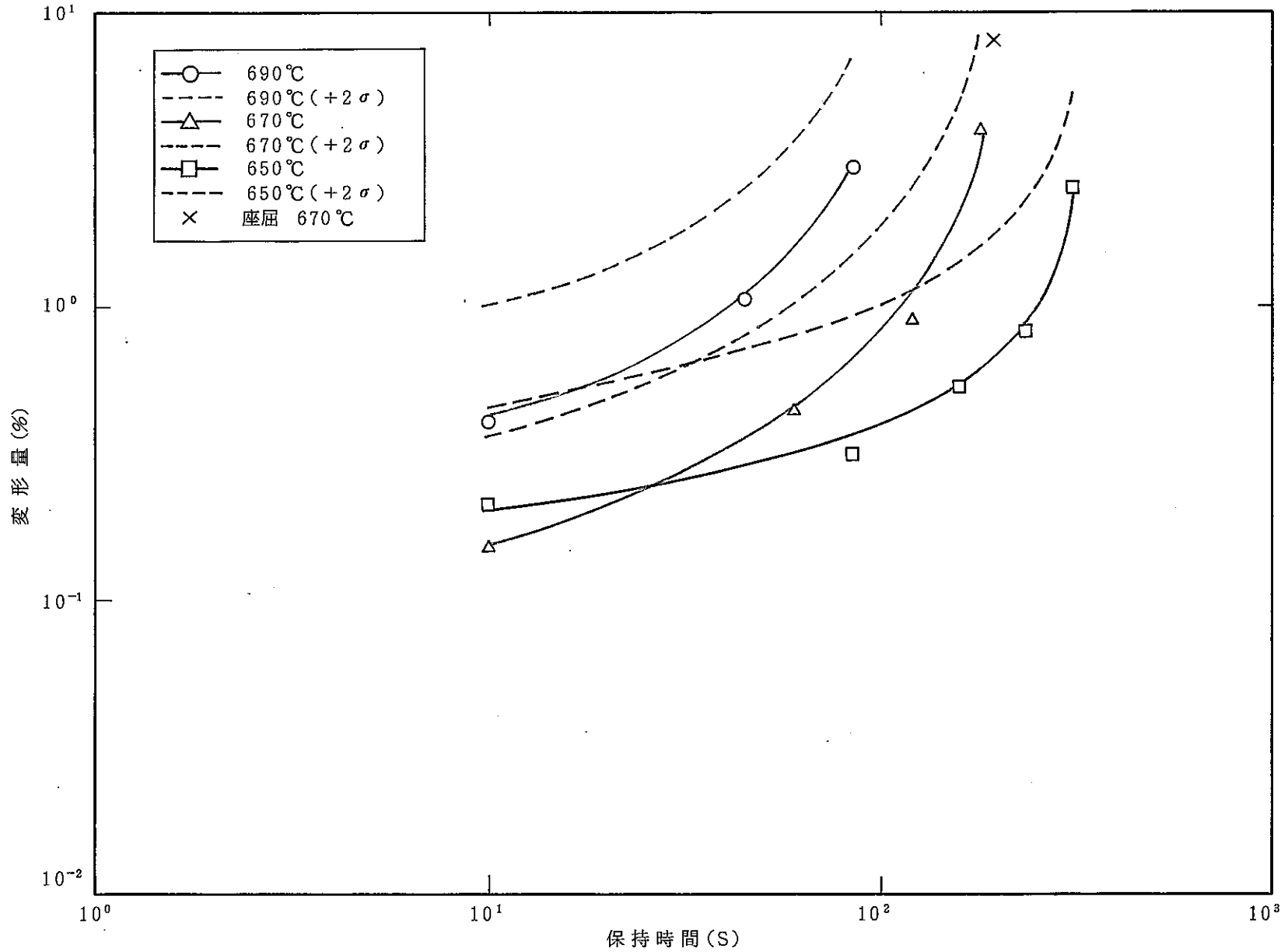


図 3.1-4 外圧 50 kg/cm² における変形量と保持時間の関係

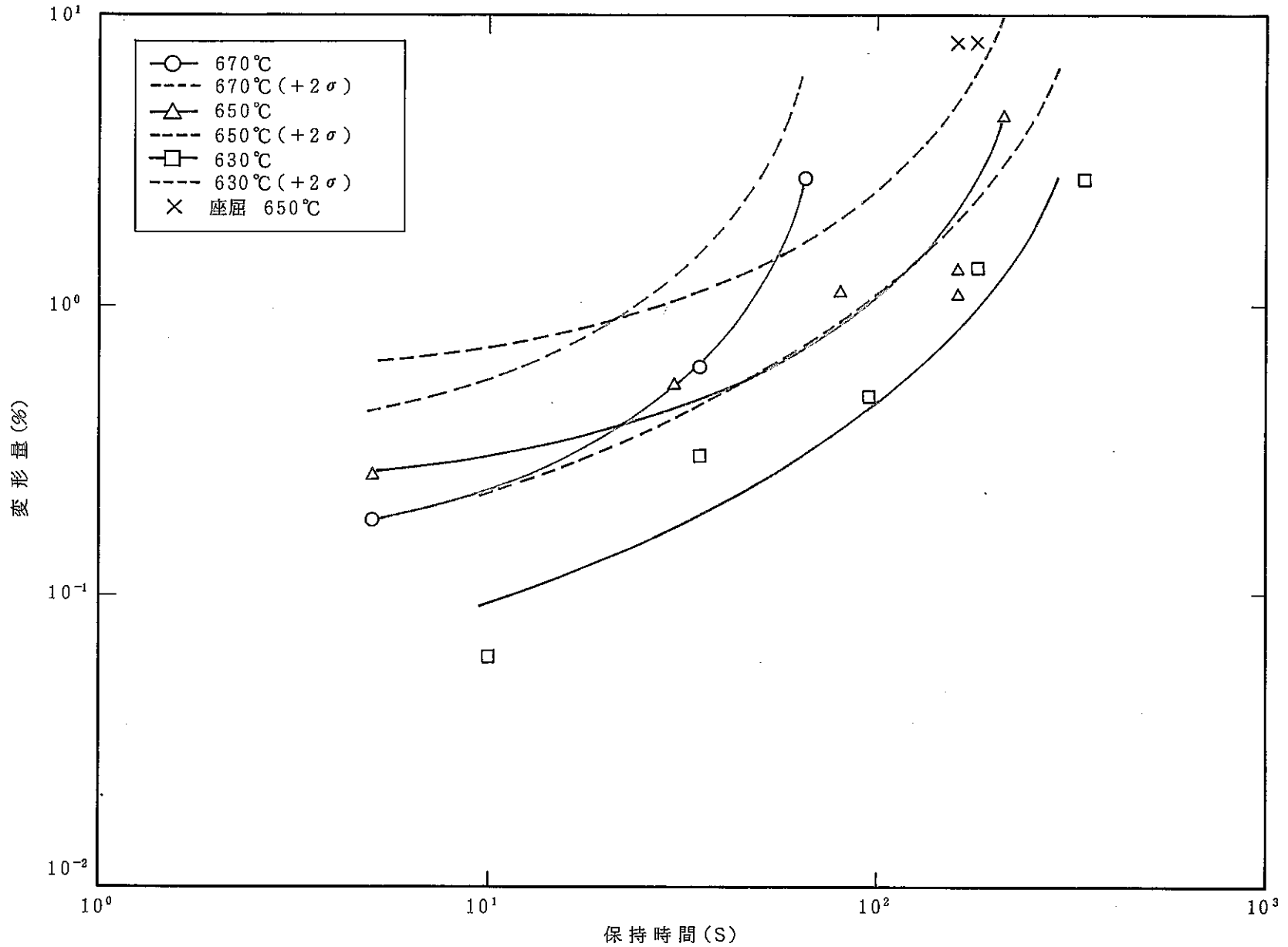


図 3.1 - 5 外圧 60 kg/cm² における変形量と保持時間の関係

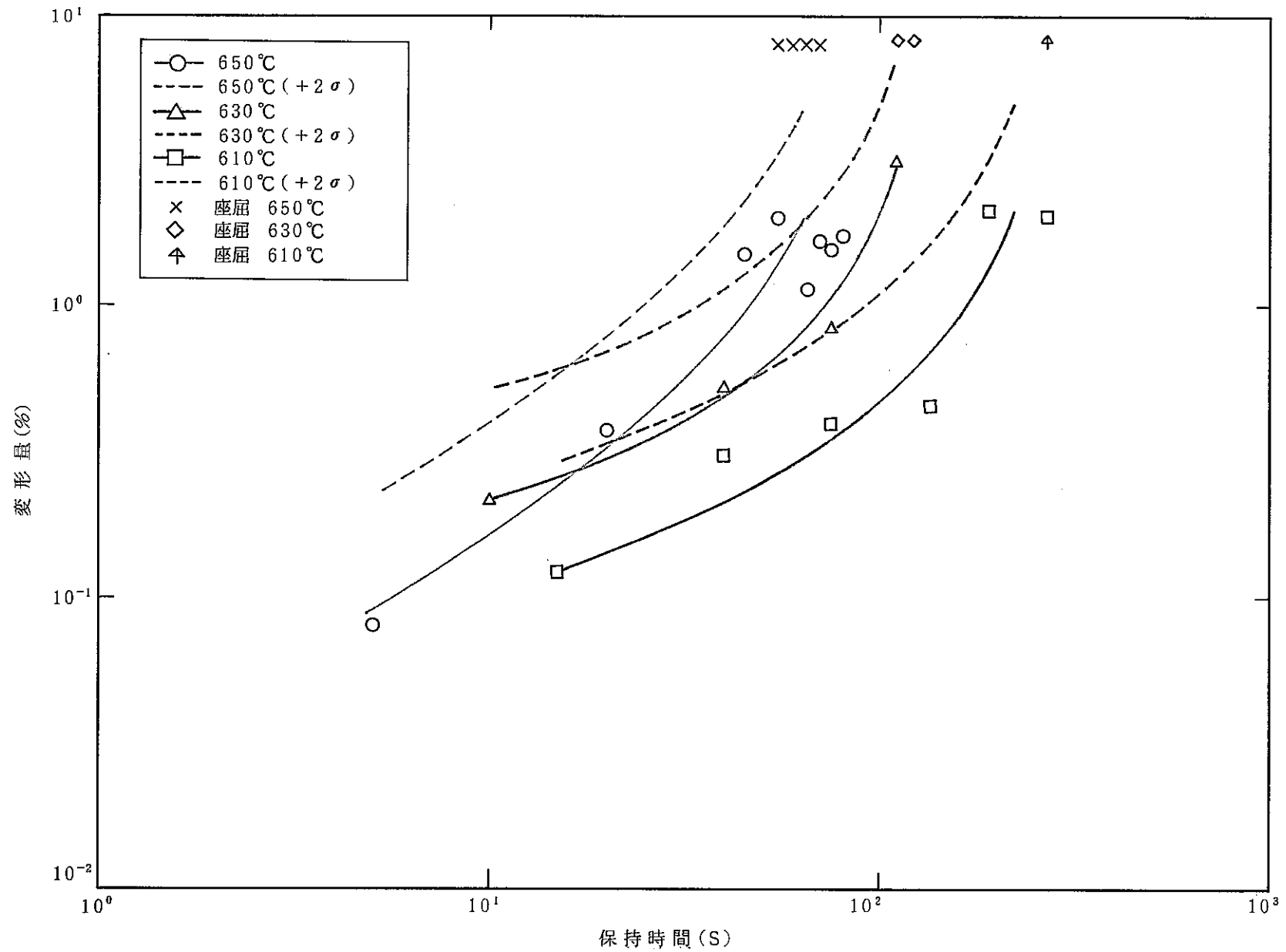


図 3.1-6 外圧 70 kg/cm² における変形量と保持時間の関係

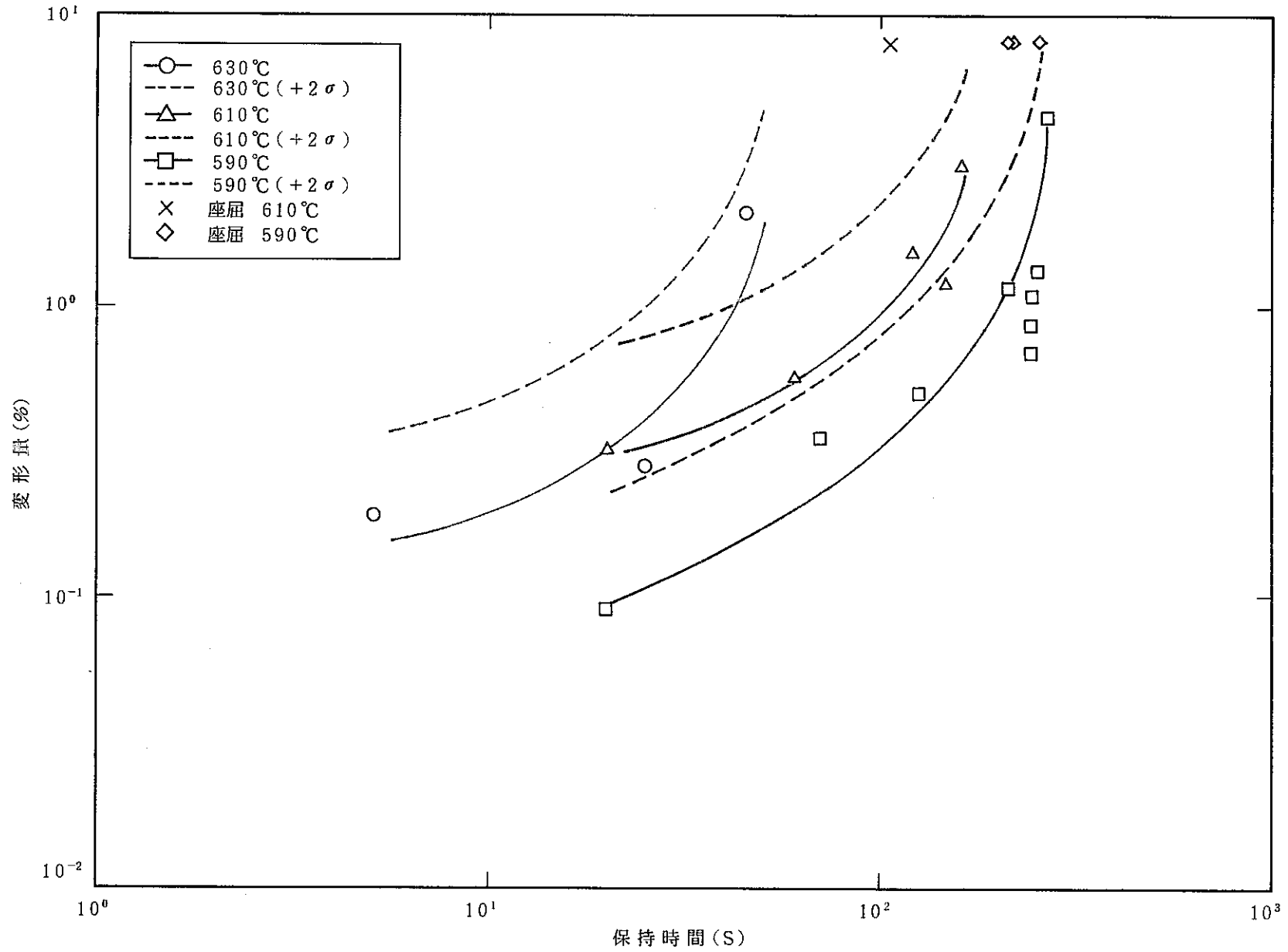


図 3.1 - 7 外圧 80 kg/cm² における変形量と保持時間の関係

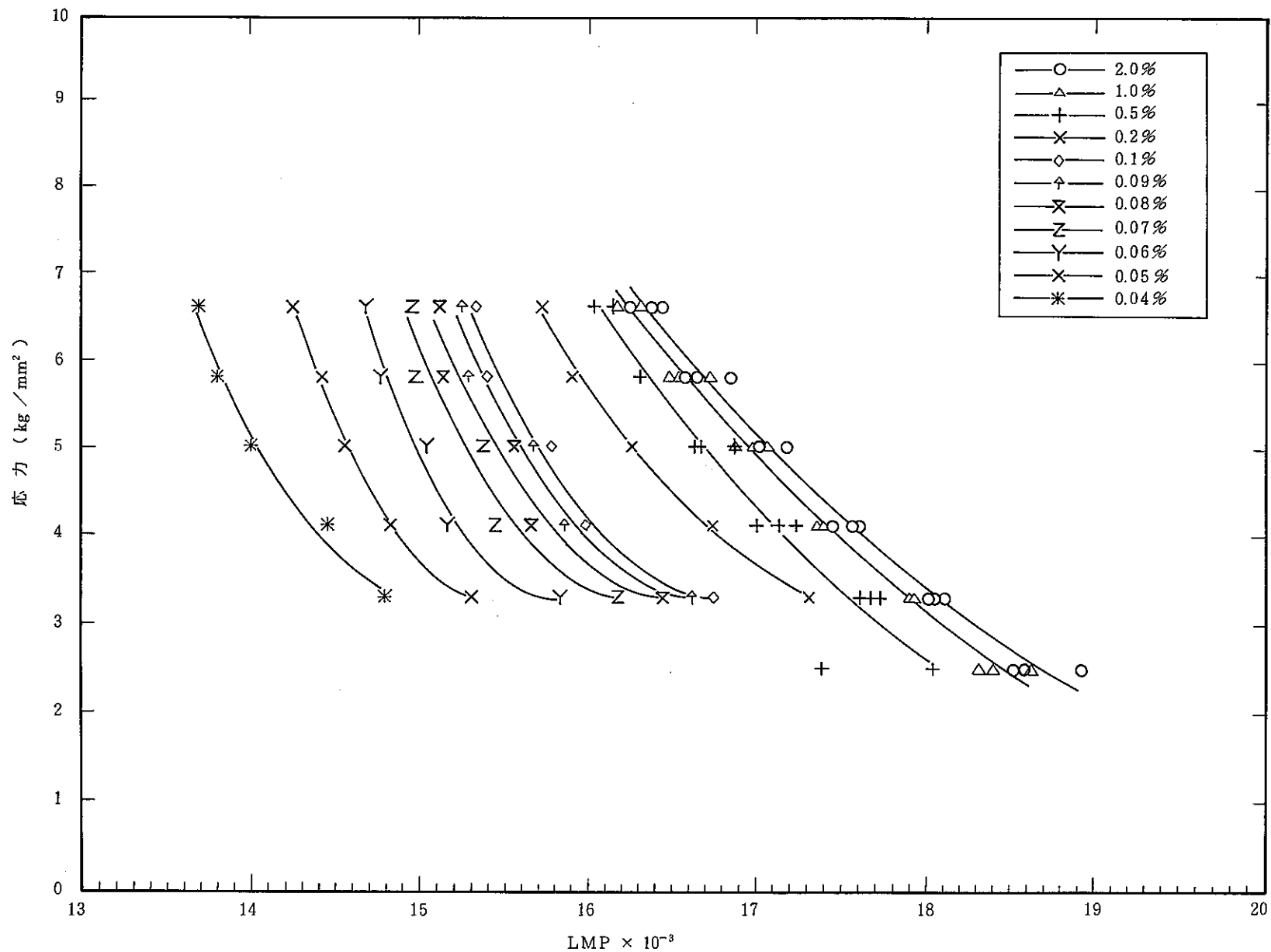


図 3.1 - 8 応力と LMP の関係

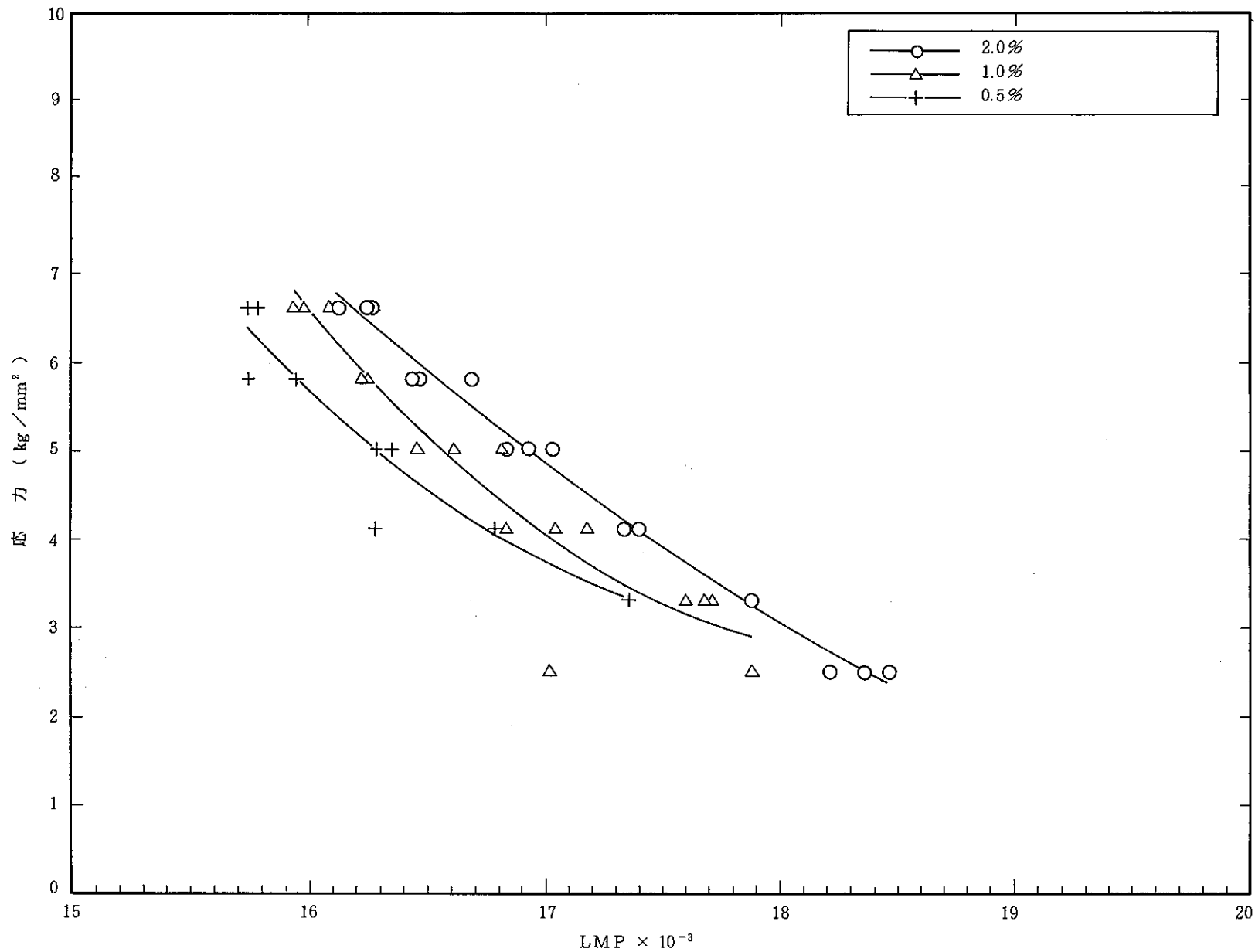


図 3.1 - 9 変形量のバラツキを考慮した応力とLMPの関係

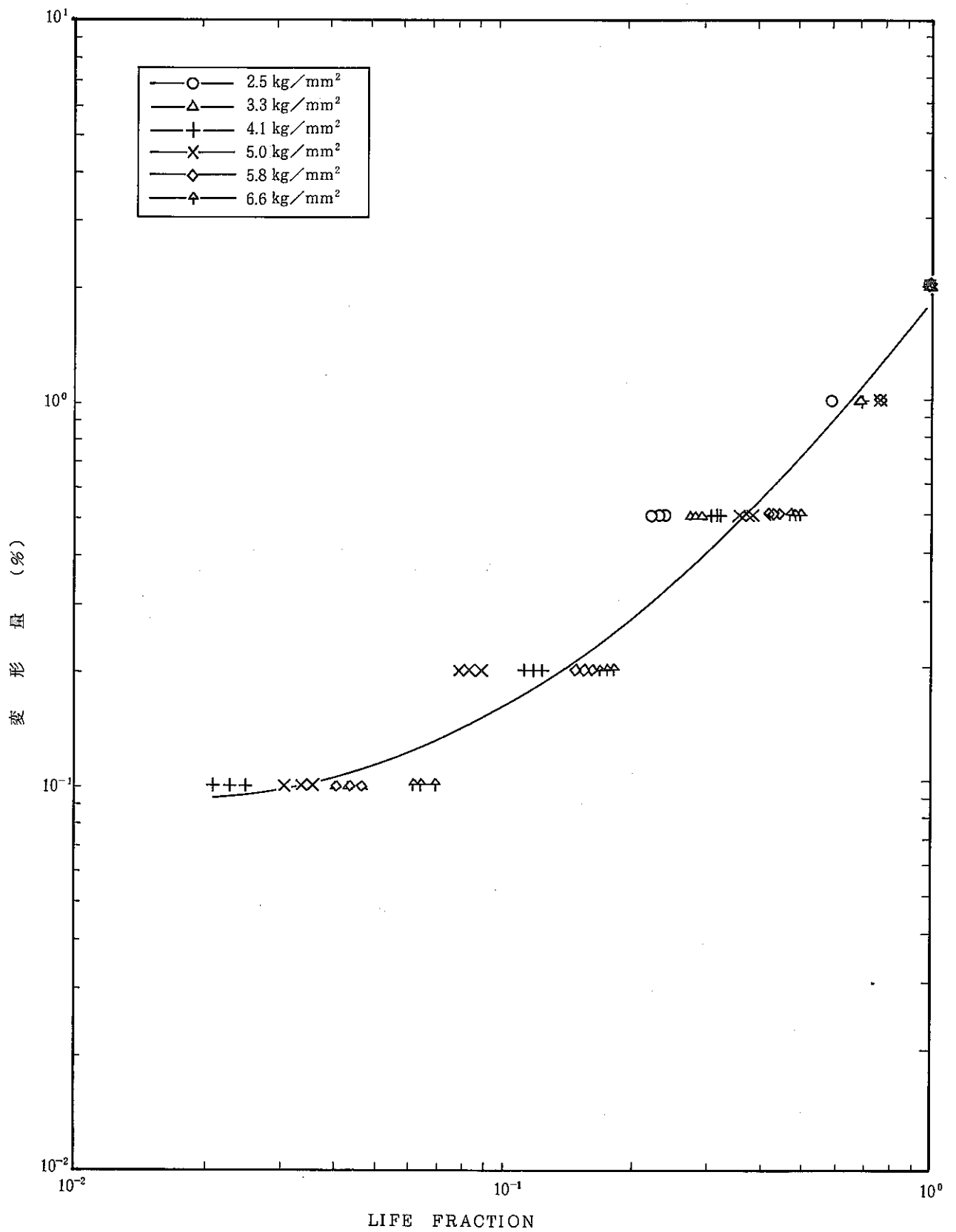


図3.1-10 Life Fraction と変形量の関係

PAA 130 - 13

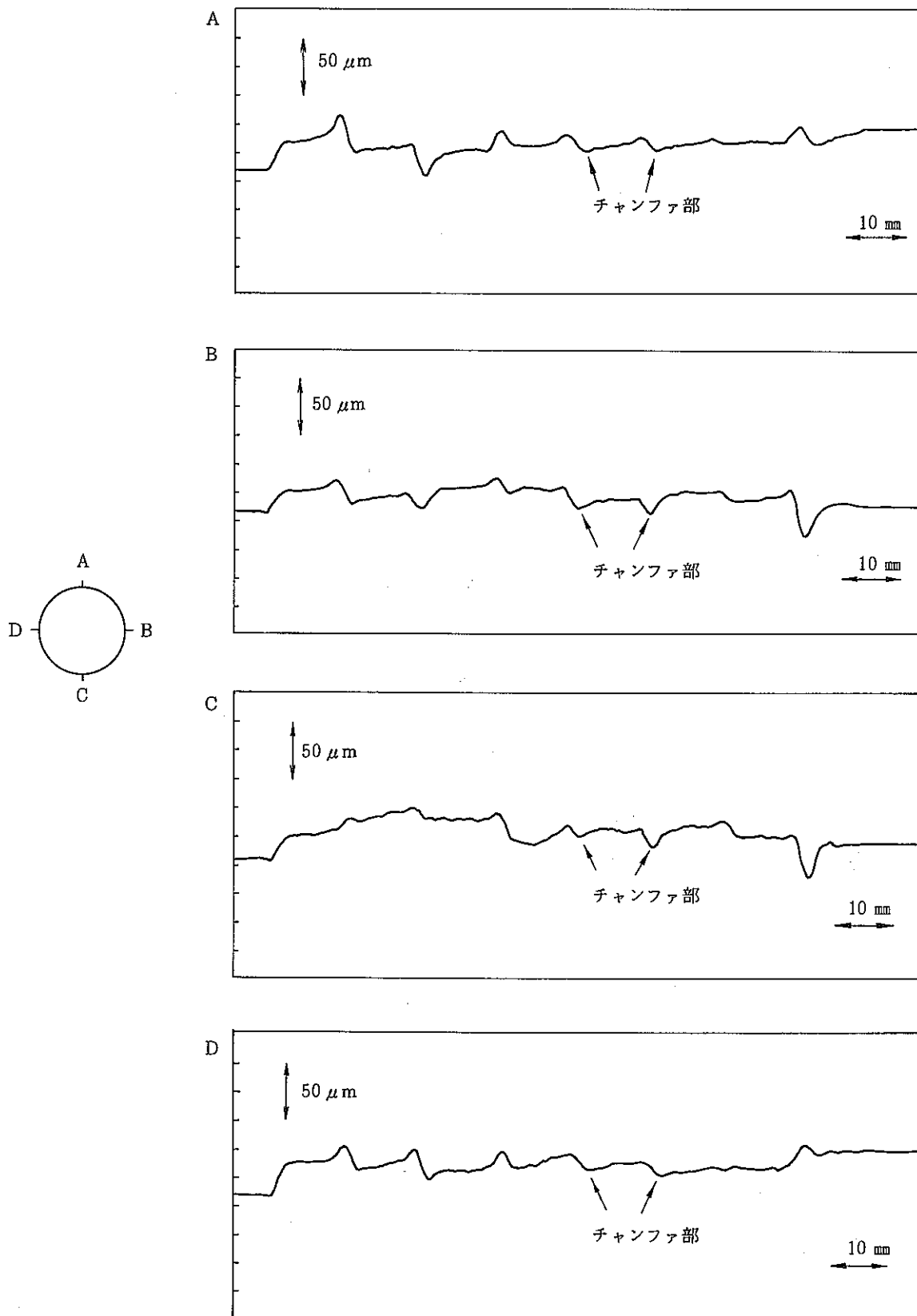


図 3.3 - 1 試験後被覆管表面の形状測定結果

PAA132-11

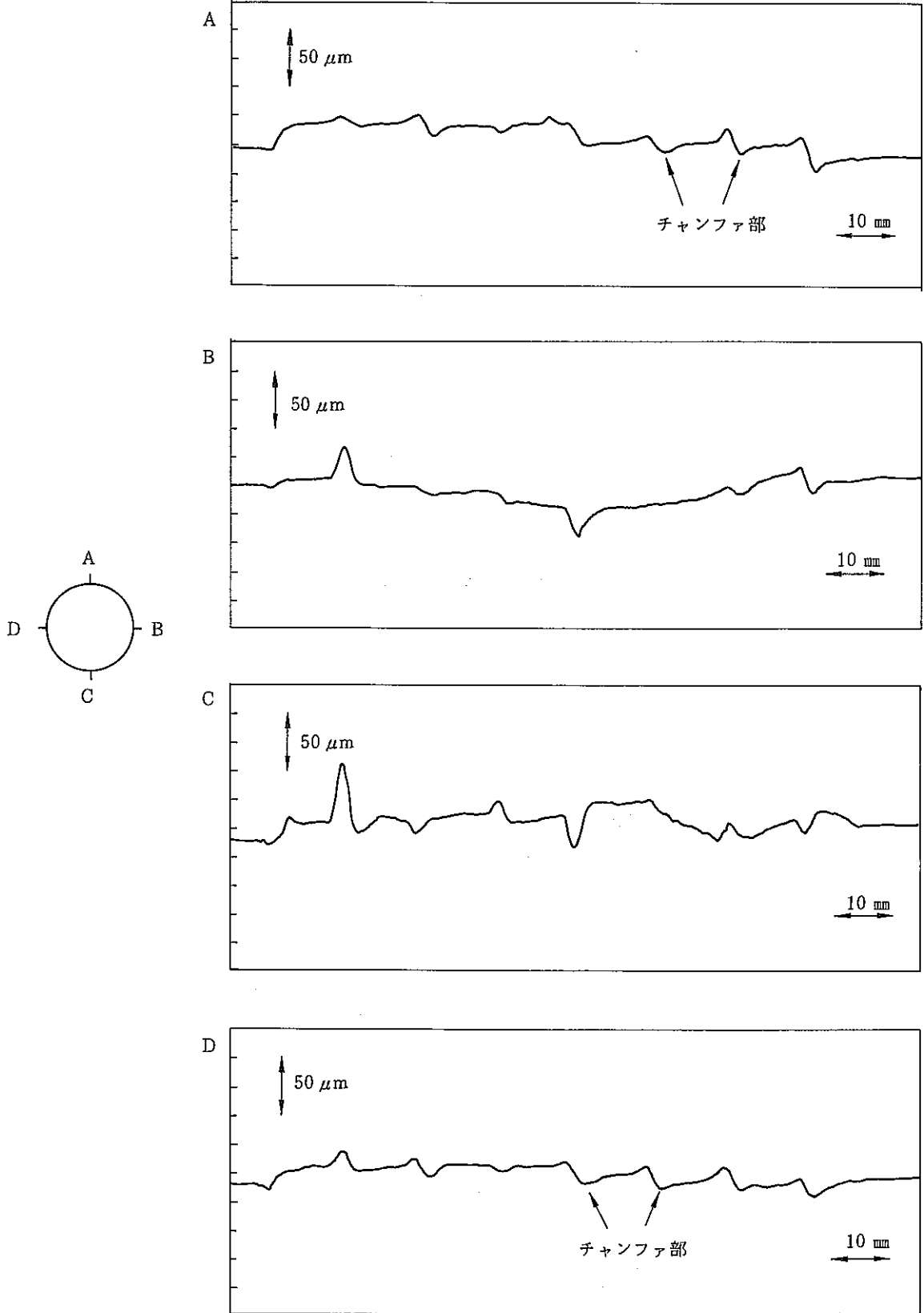


図 3.3 - 2 試験後被覆管表面の形状測定結果

PAA130-10

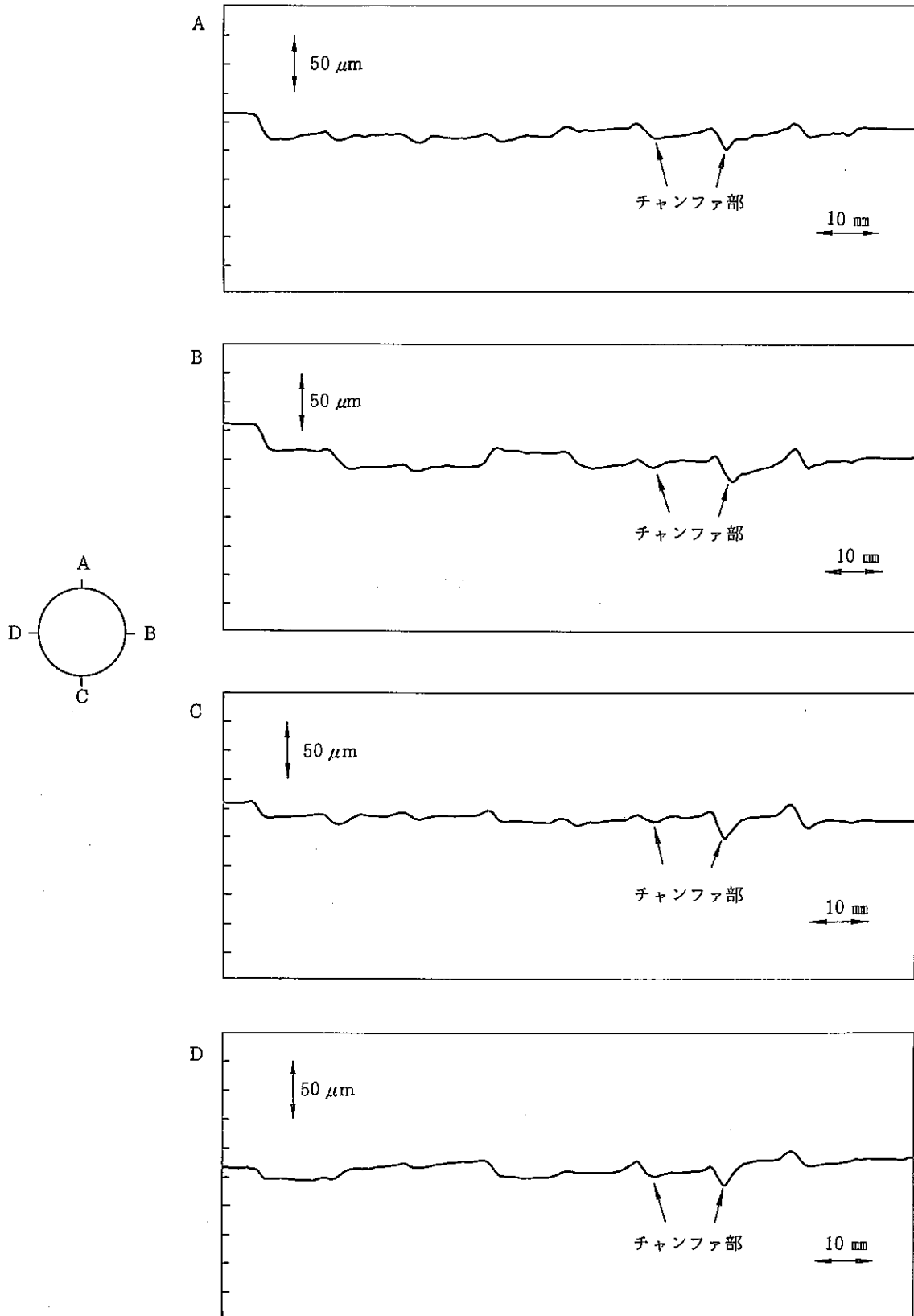


図 3.3 - 3 試験後被覆管表面の形状測定結果

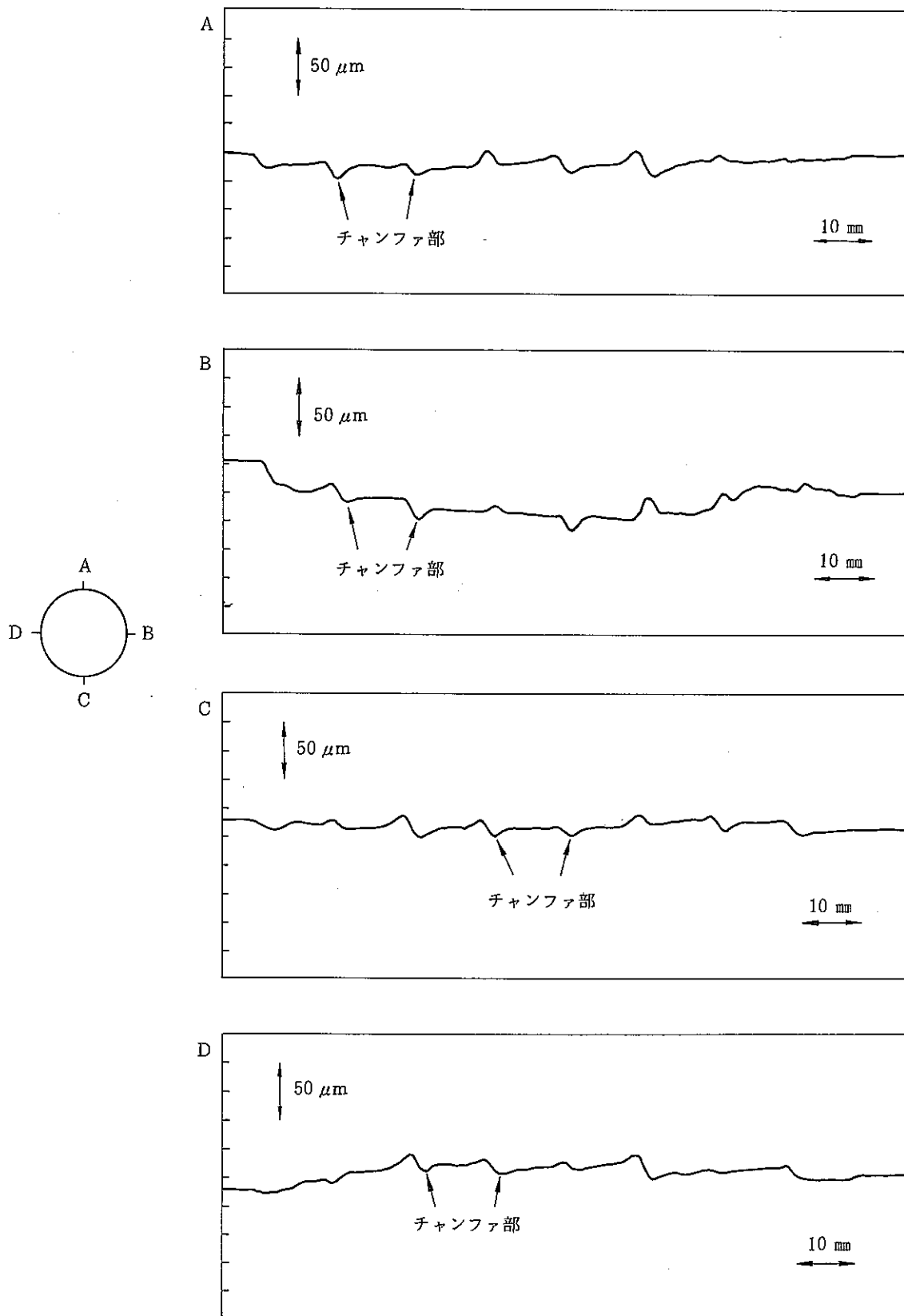


図 3.3 - 4 試験後被覆管表面の形状測定結果

PAA 130-12

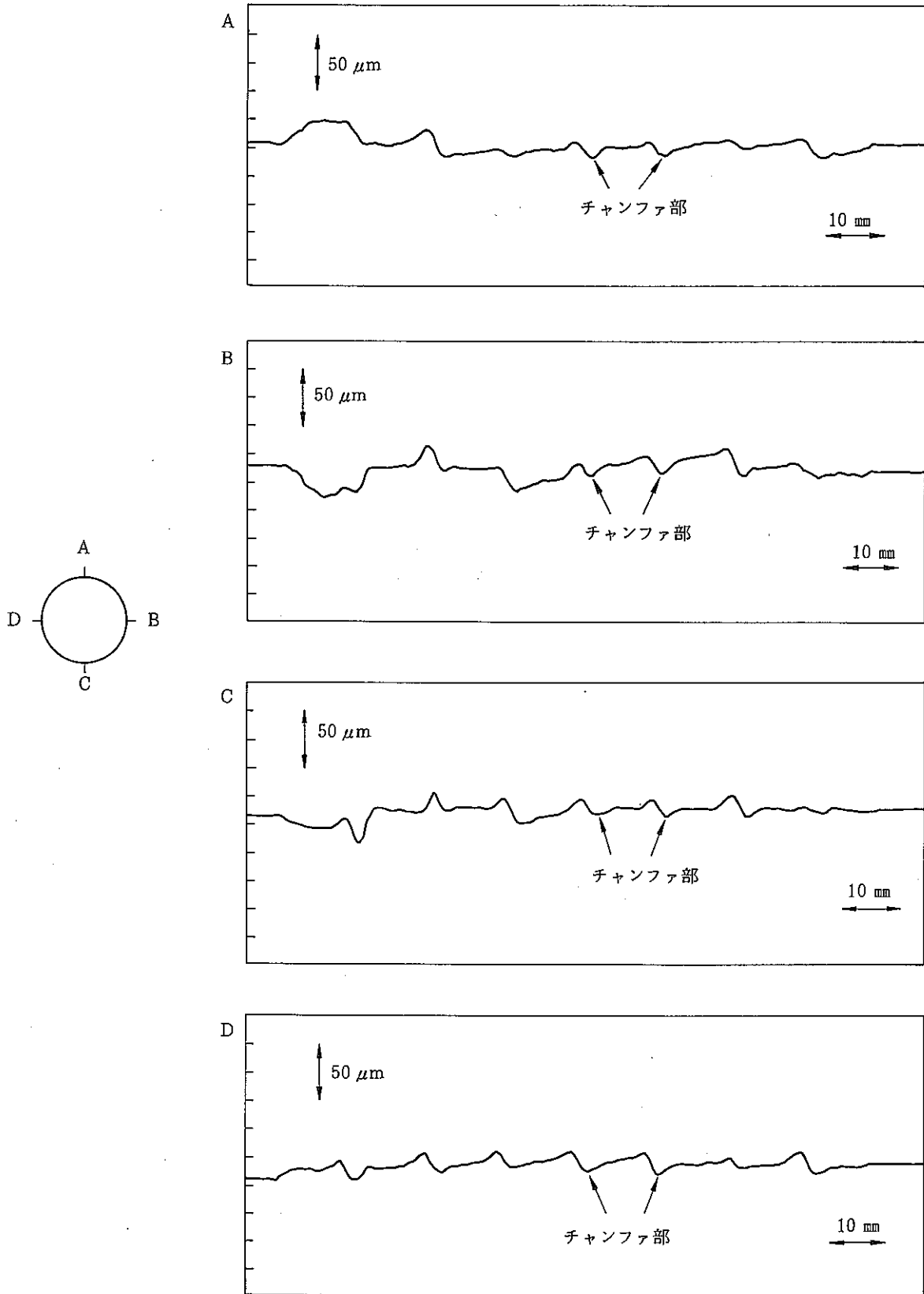


図 3.3 - 5 試験後被覆管表面の形状測定結果

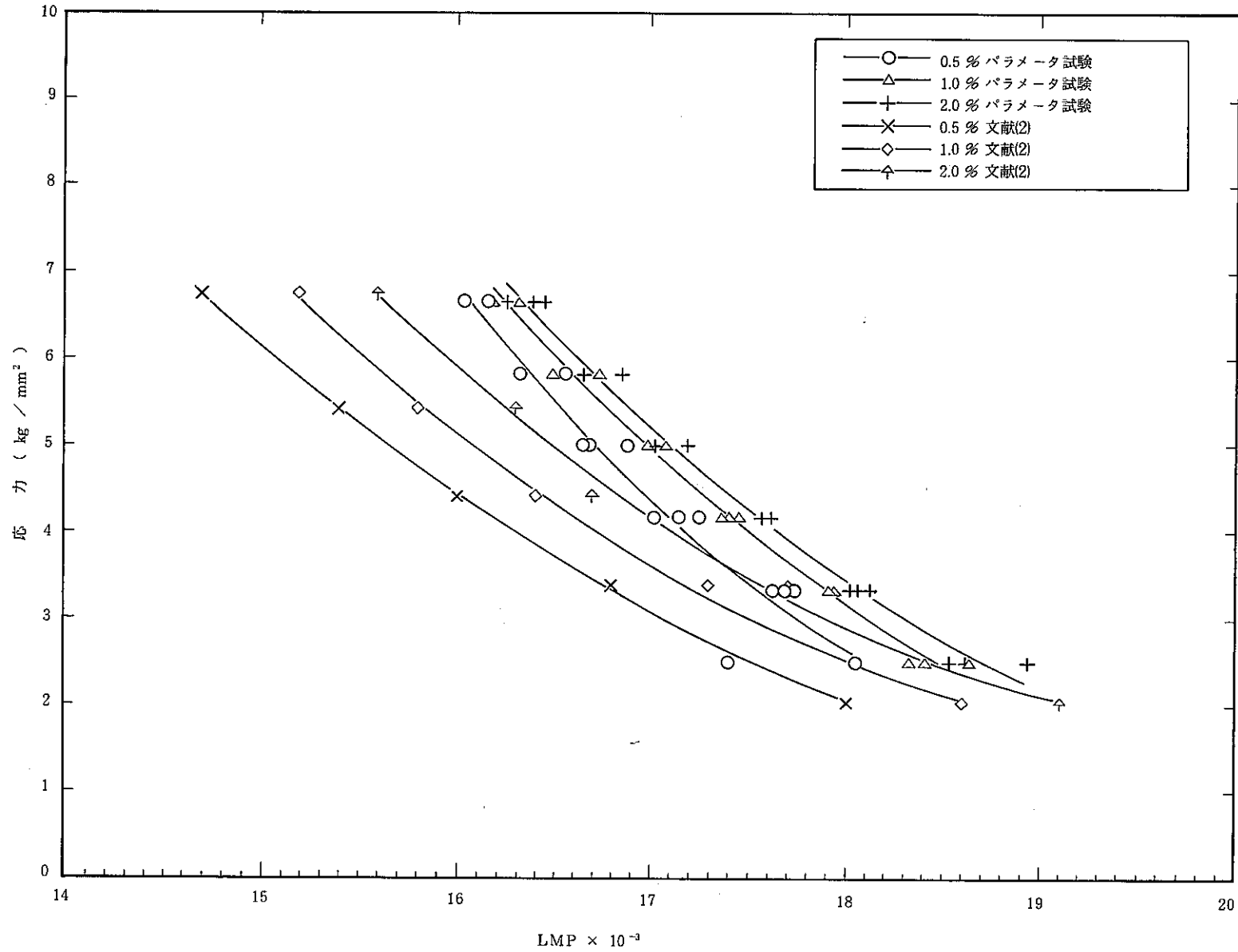


図 4.1 - 1 応力と LMP の関係 (文献(2)との比較)

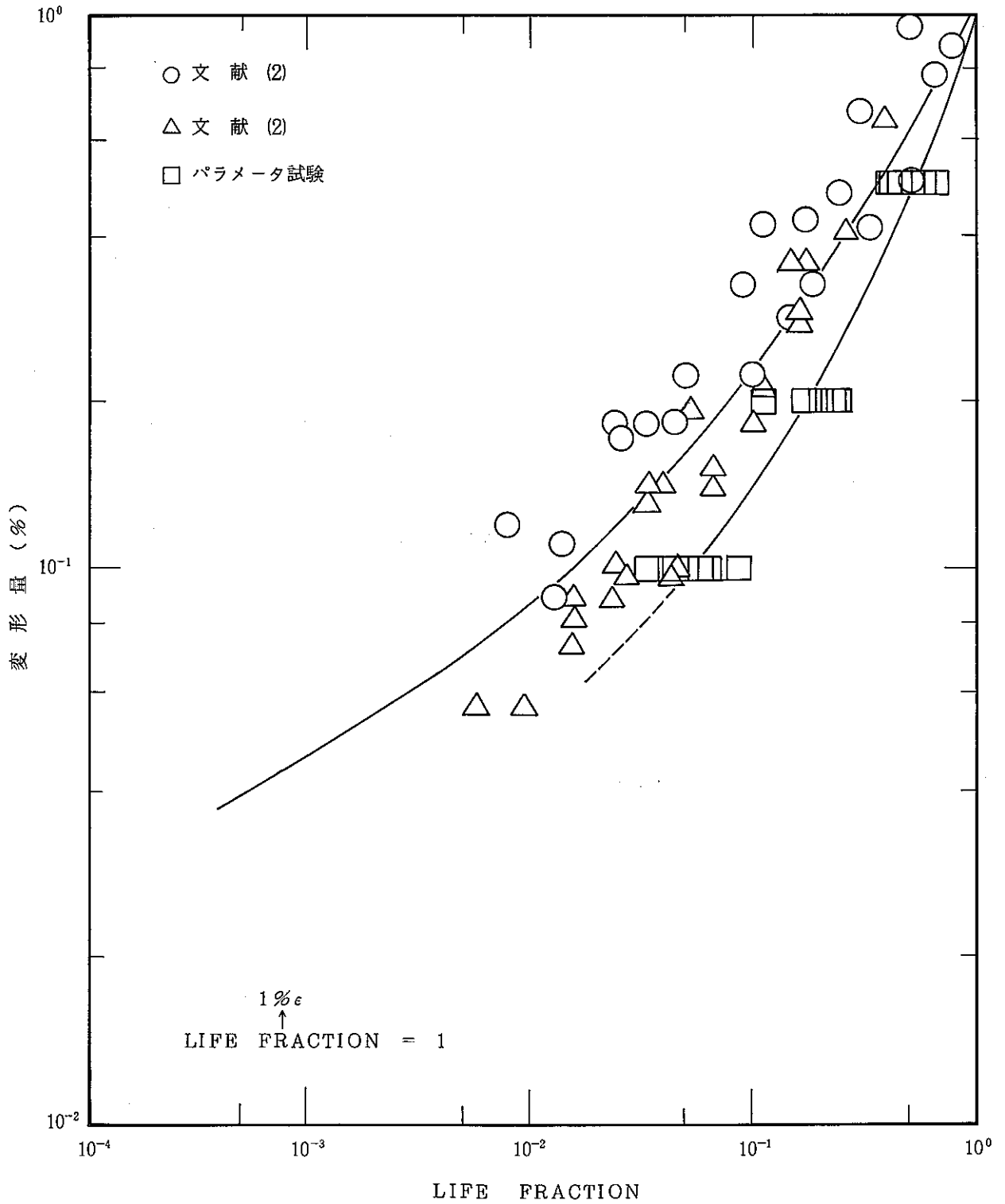


図 4.1 - 2 Life Fraction と変形量の関係 (文献(2)との比較)

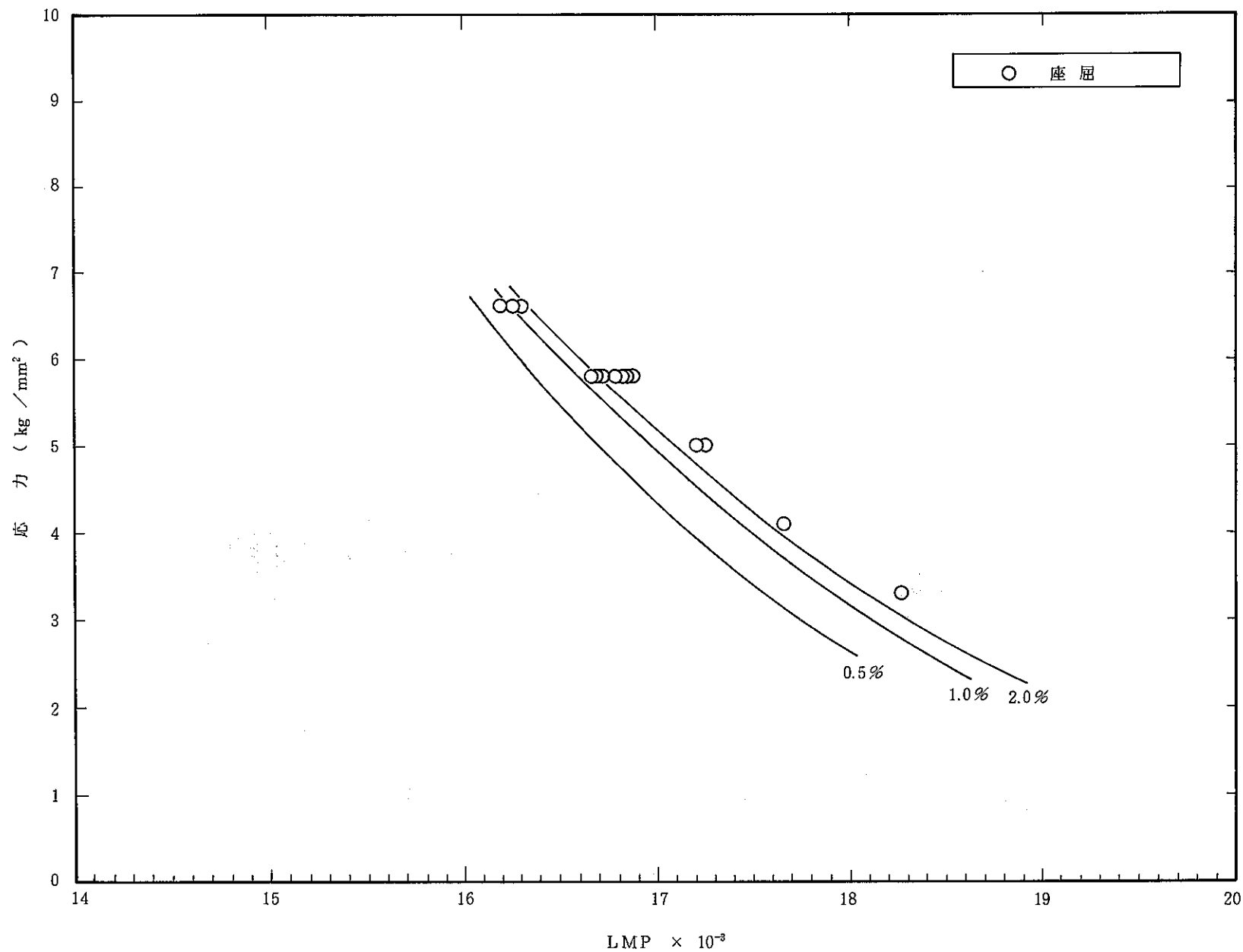


図 4.2 - 1 応力 - LMP 曲線と座屈データの関係

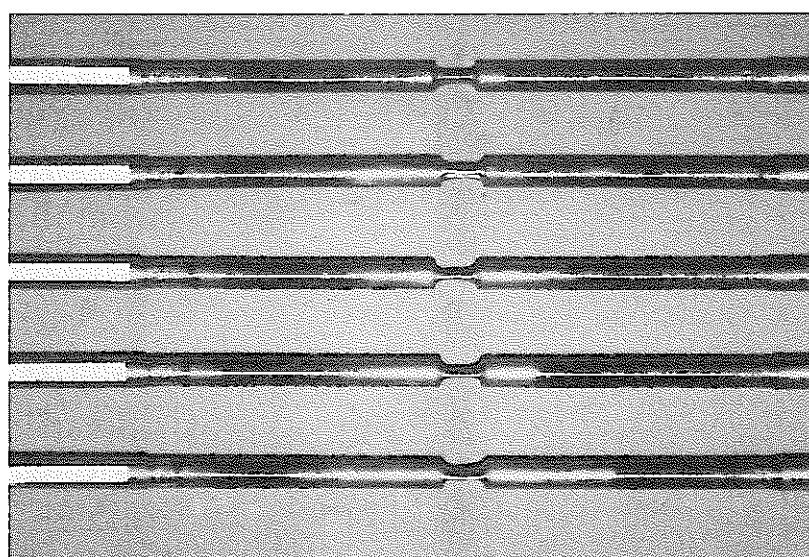
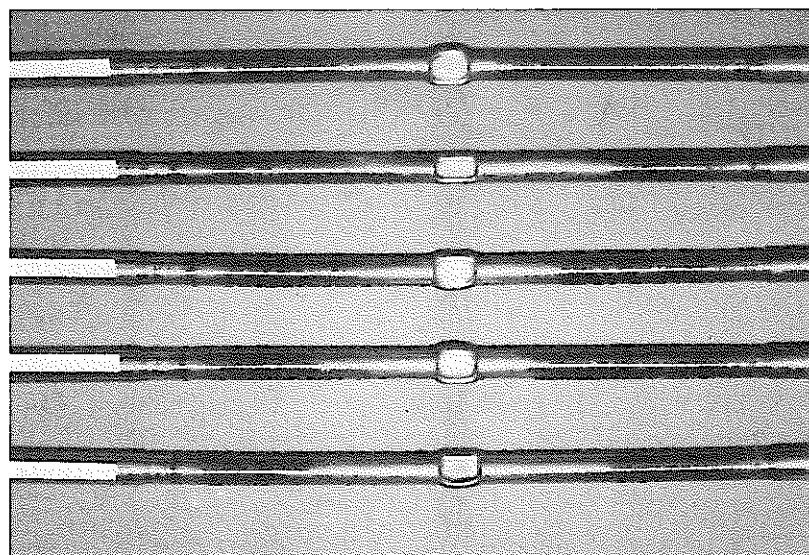


写真3.7.3-1 模擬ペレット入り標準管試験片の試験後外観

付 録

外圧変形試験における試験片温度分布の改善法検討結果

外圧変形試験における試験片温度分布の改善法検討結果

1. 目的

A T R実証炉燃料被覆管の外圧変形試験において、LMP整理法を用いたL F法による変形量予測の材料データを取得するためには、試験条件を相当良く抑える必要があり、特に試験片温度分布については、ある一定の長さの中で温度差を小さくすることが必要である。しかしながら、外圧変形試験装置における試験片温度分布は温度差が大きく再現性もないため、試験片の一定の長さの中を再現性良く一定の小さな温度差内にすることを目的として、試験片温度分布の改善方法の検討を実施した。

2. 現状確認

現状の温度分布を確認するため、従来から実施している、試験片にアスベストを1枚巻いた状態での軸方向（熱電対50mm間隔3点）及び周方向（熱電対120°間隔3点）の温度分布測定を2試料ずつ実施した。設定温度は780℃、圧力は大気圧～50kg/cm²までの10kg/cm²間隔とし、温度制御は試験片中央の熱電対とした。

温度分布測定結果を図-1～4に示す。

測定結果は軸方向、周方向ともに、大気圧で既に温度差があり、圧力が高くなるほどその差は大きくなる傾向にある。また、試験片によってその差は異なり再現性がない。

この原因としては、容器内のガスの対流による影響を防ぐために試験片に巻いたアスベストの断熱による影響、試験片温度測定のために試験片に溶着する熱電対の溶着具合の影響、及び熱電対を容器内から容器外に引き出すために容器蓋に取り付けた、熱電対端子の容器内外の温度差の影響が考えられるため、それぞれの要因についてその影響を確認した。

3. 要因解析

(1) 断熱の影響

試験片温度分布に与える断熱の影響を確認するため、試験片に巻くアスベストを2枚巻、1枚巻及び巻かない3種類の状態と、アスベストよりも断熱効果があると考えられるガラスウールを、半割したセラミックチューブに詰め込み、試験片を包み込んだ状態で軸方向（熱電対50mm間隔3点）の温度分布を測定した。設定温度は780℃、圧力は大気圧～50kg/cm²までの10kg/cm²間隔とし、温度制御は試験片中央の熱電対とした。

アスベストを2枚巻、1枚巻、及び巻かない状態での温度分布測定結果を図-5に、ガラスウールで包み込んだ状態での温度分布測定結果を図-6に示す。

アスベストを2枚巻, 1枚巻, 及び巻かない状態での測定結果は, 3種類とも大気圧で既に温度差があり, 圧力が高くなるほどその差は大きくなる傾向にある。また, アスベストを多く巻いた方が温度差は小さくなる傾向にある。

ガラスウールで包み込んだ状態での測定結果は, 大気圧で14℃の温度差があるものの, アスベストを巻いた状態よりもその差は小さく, 試験片中央が最高温度となり, 上下が同程度の温度差を示している。また, 圧力が高くなるにつれて温度差が大きくなる傾向もほとんど見られないが, 30 kg/mm²から下部の温度が上昇している。

この結果から, 試験片温度分布には断熱が影響すると言える。

(2) 熱電対の溶着具合による影響の確認

試験片温度分布のバラツキに与える熱電対の溶着具合による影響を確認するため, 試験片と同材質のジルカロイ-2被覆管50mmに, 熱電対を5mm間隔に溶着したものを溶着者を変えて2試料作成し, 疲労試験機の恒温槽で約300℃に加熱して, 温度のバラツキを確認するとともに溶着者の違いによる影響も確認した。また, 外圧変形試験装置での高温状態での溶着具合による影響を確認するため, 熱電対が同一温度を測定するように試験片中央の軸方向1mm間隔以内に熱電対を3点溶着し, 大気圧状態で200℃~800℃まで加熱して温度のバラツキを確認した。さらに, 高温, 高圧状態での溶着具合による影響を確認するため, 熱電対が同一温度を測定するように試験片中央の軸方向および周方向の1mm隔以内に熱電対を3点溶着し, 温度のバラツキを確認した。軸方向については温度を780℃, 圧力を大気圧~50 kg/mm²までの10 kg/mm²間隔とし, 周方向については温度を800℃, 圧力を大気圧~50 kg/mm²までの10 kg/mm²間隔とした。尚, 外圧変形試験装置での温度分布測定は, 試験片をガラスウールで包み込んだ状態で行った。

恒温槽で約300℃に加熱した温度分布測定結果を図-7に, 外圧変形試験装置の大気圧状態で加熱した温度分布測定結果を図-8に, また, 圧力負荷状態での軸方向及び周方向の温度分布測定結果を図-9及び図-10に示す。

恒温槽で約300℃に加熱した測定結果は, 2試料とも熱電対3点が同じ温度を示しており, 溶着者の違いによる影響もない。外圧変形試験装置の大気圧で加熱した測定結果は, 熱電対3点間の温度差が200℃で3℃, 800℃では8℃と若干ではあるが温度が高くなるほど温度のバラツキが大きくなる傾向にある。圧力負荷状態での軸方向の測定結果は, 熱電対3点間の温度差が780℃, 大気圧で8℃あるが, 圧力が高くなっても温度の変動はほとんどみられない。圧力負荷状態での周方向の測定結果は, 熱電対3点間の温度差が800℃, 大気圧で2℃と小さく, 最大差でも3℃で圧力が高くなっても温度の変動はほとんど見られない。

外圧変形試験装置での周方向1mm間隔以内に溶着した熱電対3点間の温度差は, 圧力

負荷状態の800℃で3℃と小さいのに対して、軸方向1mm間隔以内に溶着した熱電対3点間の温度差は、大気圧及び圧力負荷状態とも800℃程度で8℃と大きくなっている。これは、熱電対を軸方向1mm間隔以内に溶着した場合に熱電対の碍子が重なり合い、溶着部とガラスウールの上に空間ができてしまい、溶着部の断熱が完全にされていないためと考えられる。

これらを総括すると、試験片温度分布のバラツキに与える熱電対の溶着具合による影響は、疲労試験機の恒温槽での測定結果と外圧変形試験装置での圧力負荷状態の周方向の測定結果から、ほとんどないと言える。

(3) 熱電対端子の圧力容器内外の温度差による影響の確認

試験片温度分布のバラツキに与える熱電対端子の圧力容器内外の温度差による影響を確認するため、制御用熱電対から容器内で短絡させた熱電対端子を介して温度を3点測定し、温度に差があるかどうかを確認した。設定温度は200℃～800℃までの100℃間隔とし、圧力は大気圧とした。尚、試験片は、ガラスウールで包み込んだ状態で行った。

温度分布測定結果を図-11に示す。

3対の熱電対端子間に温度差は、200℃～600℃までは1℃であり、700℃以上では差がない。したがって、試験片温度分布のバラツキに与える熱電対端子の圧力容器内外の温度差の影響はないと言える。

以上の結果から、試験片温度分布のバラツキには、断熱の影響が最も大きいと判断できるため、断熱方法の改善策を検討した。

4. 改善策検討

試験片温度分布のバラツキを小さくするための断熱方法の改善策としては、

- ① 試験片を包み込むための半割したセラミックチューブに詰め込むガラスウールを密にする。
- ② 試験片を均一に包めるように半割したセラミックチューブに詰めるガラスウールを成形体にする。
- ③ 試験片を均一に包めるようにセラミック製の阿米状チューブで包み、さらに、半割したセラミックチューブにガラスウールを詰め込んで試験片を包み込む。
- ④ 試験片を均一に包めるようにセラミック製の阿米状チューブで包み、さらに、半割したセラミックチューブにガラスウールを詰め込んで試験片を包み込み、セラミックチューブの隙間からガラスウールを詰め込む。
- ⑤ 試験片を均一に包めるようにセラミック製の阿米状チューブで包み、さらに、半割したセラミックチューブに詰めるガラスウールを成形体にする。

- ⑥ 試験片を均一に包めるようにセラミックス製の阿米状チューブで包み、その外側を石英管で覆う。

の6つの方法が考えられるため、それぞれの方法で軸方向温度分布を測定して温度のバラツキを確認した。

温度の測定点は、①～③の方法については均熱長の確認も行うために、試験片中央に溶着した制御用熱電対を中心とした2.5 mm間隔の5点とし、④～⑥の方法については、試験片中央に溶着した制御用熱電対を中心とした2.5 mm間隔の3点とした。但し、外圧変形試験装置の温度計測は3点であるため、①～③の方法については、制御用熱電対を固定して制御用熱電対からの距離を2.5 mm間隔と5.0 mm間隔の2回に分けて測定した。設定温度は800℃、圧力は大気圧～5.0 kg/cm²までの1.0 kg/cm²間隔とした。以下に改善策の詳細と温度分布の測定結果を示す。

- ① 半割したセラミックスチューブにガラスウールを密に詰め込み、試験片の被覆管部が完全に包み込まれた状態で温度分布を測定した。

温度分布測定結果を図-12に示す。

熱電対2.5 mm間隔の温度差は、大気圧で5℃、5.0 kg/cm²では8℃と若干ではあるが、圧力が高いほど温度差が大きくなる傾向にある。また、軸方向温度分布は下部が最高温度となり、上部と中央部が同程度の温度となっている。

熱電対5.0 mm間隔の温度差は、大気圧で1.8℃、5.0 kg/cm²では2.7℃と圧力が高いほど温度差が大きくなる傾向にある。また、軸方向温度分布は2.0 kg/cm²までは中央部が最高温度となり、3.0 kg/cm²からは下部が最高温度となっており、上部が最低温度となっている。

- ② 半割したセラミックスチューブを型にして、ガラスウールが密であり、試験片を均一に包めるようなガラスウールの成形体を作り、試験片とガラスウールの成形体との間に熱電対碍子によって空間ができないようにガラスウールを薄く挟み、ガラスウールの成形体の外側から半割したセラミックスチューブで押さえ込んだ状態で温度分布を測定した。

温度分布測定結果を図-13に示す。

熱電対2.5 mm間隔の最大温度差は7℃で、熱電対5.0 mm間隔の最大温度差は2.7℃であり、どちらも圧力の影響による温度差の変動はみられない。また、軸方向温度分布は、熱電対2.5 mm間隔、5.0 mm間隔とも中央部が最高温度となっており、下部、上部の順に温度が低くなっている。

- ③ 試験片表面が均一に包まれるようにセラミックス製の阿米状チューブで包み、その外側からガラスウールと半割したセラミックスチューブで包み込んだ状態で温度分布を測定した。尚、熱電対は、セラミックス製阿米状チューブの阿米目の隙間から試験片に溶

着して、試験片とセラミックス製アミ状チューブとの間に空間ができないようにした。
温度分布測定結果を図-14に示す。

熱電対25mm間隔の最大温度差は6℃で、熱電対50mm間隔の最大温度差は1.8℃であり、どちらも圧力の影響による温度差の変動はみられない。また、軸方向温度分布は、熱電対25mm間隔、50mm間隔とも中央部が最高温度となっており、上部と下部が同程度の温度となっている。

- ④ 試験片表面が均一に包まれるようにセラミックス製のアミ状チューブで包み、その外側からガラスウールと半割したセラミックスチューブで包み、さらにセラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込んだ状態で温度分布を測定した。尚、熱電対は、セラミックス製アミ状チューブのアミ目の隙間から試験片に溶着して、試験片とセラミックス製アミ状チューブとの間に空間ができないようにした。

温度分布測定結果を図-15に示す。

熱電対25mm間隔の最大温度差は、大気圧で5℃、50kg/mm²では2℃と若干ではあるが、圧力が高くなるほど温度差が小さくなる傾向にある。また、軸方向温度分布は、50kg/mm²で中央部と下部が同一温度で最高温度となっているが、それ以外では、中央部が最高温度となり、下部、上部の順に温度が低くなっている。

- ⑤ 試験片表面が均一に包まれるようにセラミックス製のアミ状チューブで包み、その外側からガラスウールの成形体と半割したセラミックスチューブで包み込んだ状態で温度分布を測定した。尚、熱電対は、セラミックス製アミ状チューブのアミ目の隙間から試験片に溶着して、試験片とセラミックス製アミ状チューブとの間に空間ができないようにした。また、セラミックス製アミ状チューブとガラスウールの成形体との間に熱電対碍子によって空間ができないように、ガラスウールを薄く挟んだ状態とした。

温度分布測定結果を図-16に示す。

熱電対25mm間隔の温度差は、大気圧で1℃、50kg/mm²では1.7℃となっており、圧力が高くなるほど温度差が大きくなる傾向にある。また、軸方向温度分布は、下部が最高温度となっており、中央部、上部の順に温度が低くなっている。

- ⑥ 試験片表面が均一に包まれるようにセラミックス製のアミ状チューブで包み、その外側を石英管で被い、石英管の内部にはガラスウールの詰め方の影響をなくすために、ガラスウールを詰めない状態で温度分布を測定した。尚、熱電対は、セラミックス製アミ状チューブのアミ目の隙間から試験片に溶着して、試験片とセラミックス製アミ状チューブとの間に空間ができないようにした。また、試験片外面と石英管内面との距離は、均一になるようにした。

温度分布測定結果を図-17に示す。

熱電対25mm間隔の温度差は、大気圧で1.5℃、50kg/mm²では3.2℃となっており、

圧力が高くなるほど温度差が大きくなる傾向にある。また、軸方向温度分布は、上部が最高温度となっており、中央部、下部の順に温度が低くなっている。

以上の結果を総括すると、試験片温度分布のバラツキを改善するための断熱方法は、試験片中央部が最高温度となり、測定点3点間の温度差が小さく、また、圧力が高くなるほど温度差が大きくなる傾向がない方法である。③の「試験片をセラミックス製アミ状チューブで包み、その外側からガラスウールと半割したセラミックスチューブで包み込む」方法と、④の「試験片をセラミックス製アミ状チューブで包み、その外側からガラスウールと半割したセラミックスチューブで包み、さらにセラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込む」方法が効果的であると判断できる。また、試験片の均熱長については、断熱方法として効果的な③の方法でも、熱電対50mm間隔では最大温度差が18℃と大きいと、熱電対25mm間隔が妥当と考えられる。

5. 改善策による温度分布の再現性確認

試験片温度分布のバラツキに対して効果的な2つの断熱方法については、ガラスウールの詰め方が温度分布に影響すると考えられるため、それぞれの方法での温度分布測定の都度、ガラスウールを詰め替えて繰り返し測定し、再現性を確認した。設定条件は、試験計画の条件を包絡するように、高温、低圧条件（800℃、大気圧～50kg/mm²）と低温、高圧条件（600℃、50kg/mm²～80kg/mm²）として、それぞれ軸方向5回、周方向2回の繰り返しとした。尚、測定点は、軸方向については25mm間隔3点とし、周方向については制御用熱電対以外の2点のうちの1点をセラミックスチューブの半割してある部分の隙間に溶着して、120°間隔3点とした。

(1) 高温、低圧条件の再現性確認

- ① セラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込む方法での軸方向温度分布の測定結果を図-18～22に、また、周方向温度分布の測定結果を図-23、24に示す。

軸方向温度分布は、最大温度差が10℃であり、若干ではあるが圧力が高くなるほど下部の温度が高くなる傾向が見られる。また、試験片中央部が最高温度となる確率は、5試料中3試料で60%であり、中央部が最高温度とならない場合の中央部と最高温度との差は5℃である。

周方向温度分布は、最大温度差が9℃であり、セラミックスチューブの半割してある部分の隙間に溶着した熱電対が最低温度となっており、制御用熱電対ともう一方の熱電対が同程度の温度となる傾向にある。

- ② セラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込まない方法での軸方向温度分布の測定結果を図-25～29に、また、周方向温度分布の測

定結果を図-30, 31に示す。

軸方向温度分布は、最大温度差が8℃であり、圧力が高くなるほど下部の温度が高くなる傾向にある。また、試験片中央部が最高温度となる確率は、5試料中2試料で40%であり、中央部が最高温度とならない場合の中央部と最高温度との差は5℃である。

周方向温度分布は、最大温度差が9℃であり、セラミックスチューブの半割してある部分の隙間に溶着した熱電対が最低温度となっており、制御用熱電対ともう一方の熱電対が同程度の温度となる傾向にある。

(2) 低温、高圧条件の再現性確認

- ① セラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込む方法での軸方向温度分布の測定結果を図-32~36に、また、周方向温度分布の測定結果を図-37, 38に示す。

軸方向温度分布は、最大温度差が10℃であり、若干ではあるが圧力が高くなるほど下部の温度が高くなる傾向が見られる。また、試験片の最高温度は中央部ではないが、中央部と最高温度との最大差は5℃である。

周方向温度分布は、最大温度差が6℃であり、セラミックスチューブの半割してある部分の隙間に溶着した熱電対が最低温度となっており、制御用熱電対ともう一方の熱電対が同程度の温度となる傾向にある。

- ② セラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込まない方法での軸方向温度分布の測定結果を図-39~43に、また、周方向温度分布の測定結果を図-44に示す。

軸方向温度分布は、最大温度差が100℃であり、圧力が高くなるほど温度差が大きくなる傾向にある。また、試験片の最高温度は中央部ではなく、上部もしくは下部となっている。

周方向温度分布は、最大温度差が88℃であり、圧力が高くなるほど温度差が大きくなる傾向にある。

以上の結果から、セラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込む方法では、高温、低圧条件及び低温、高圧条件ともに軸方向及び周方向の最高温度差が10℃以内であるのに対して、セラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込まない方法では、低温、高圧条件において、軸方向及び周方向ともに温度分布が極端に悪くなっていることから、外圧変形試験における試験片温度分布の改善策としての断熱方法は、セラミックスチューブの半割してある部分の隙間からガラスウールを詰め込む方法が最適であると言える。

6. まとめ

A T R実証炉燃料被覆管の外圧変形試験における試験片温度分布の改善法検討結果についてまとめると以下のとおりである。

- ① 試験片の均熱長は、熱電対3点を25mm間隔とした50mmが妥当である。
- ② 試験片温度分布の改善策としての試験片表面の断熱方法は、試験片をセラミックス製の阿米状チューブで包み、その外側をガラスウールと半割したセラミックスチューブで包み、さらにセラミックスチューブの半割してある部分からガラスウールを詰め込む方法が最適である。
- ③ 上記②の方法によって、試験片中央50mm間の温度分布は、軸方向及び周方向ともに温度差が10℃以内となった。

PAA 104-4

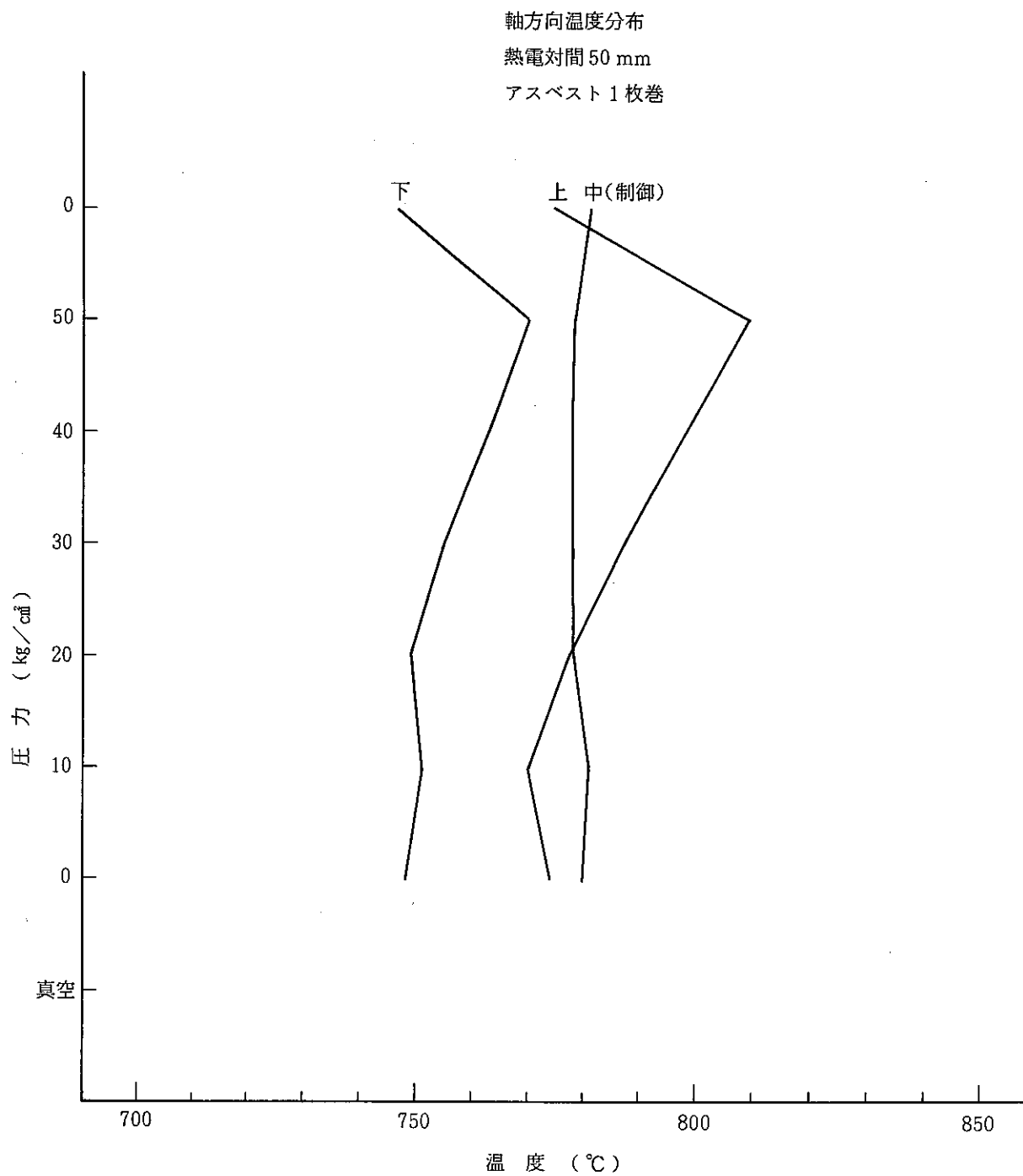


図-1 温度分布測定結果

PAA 103 - 7

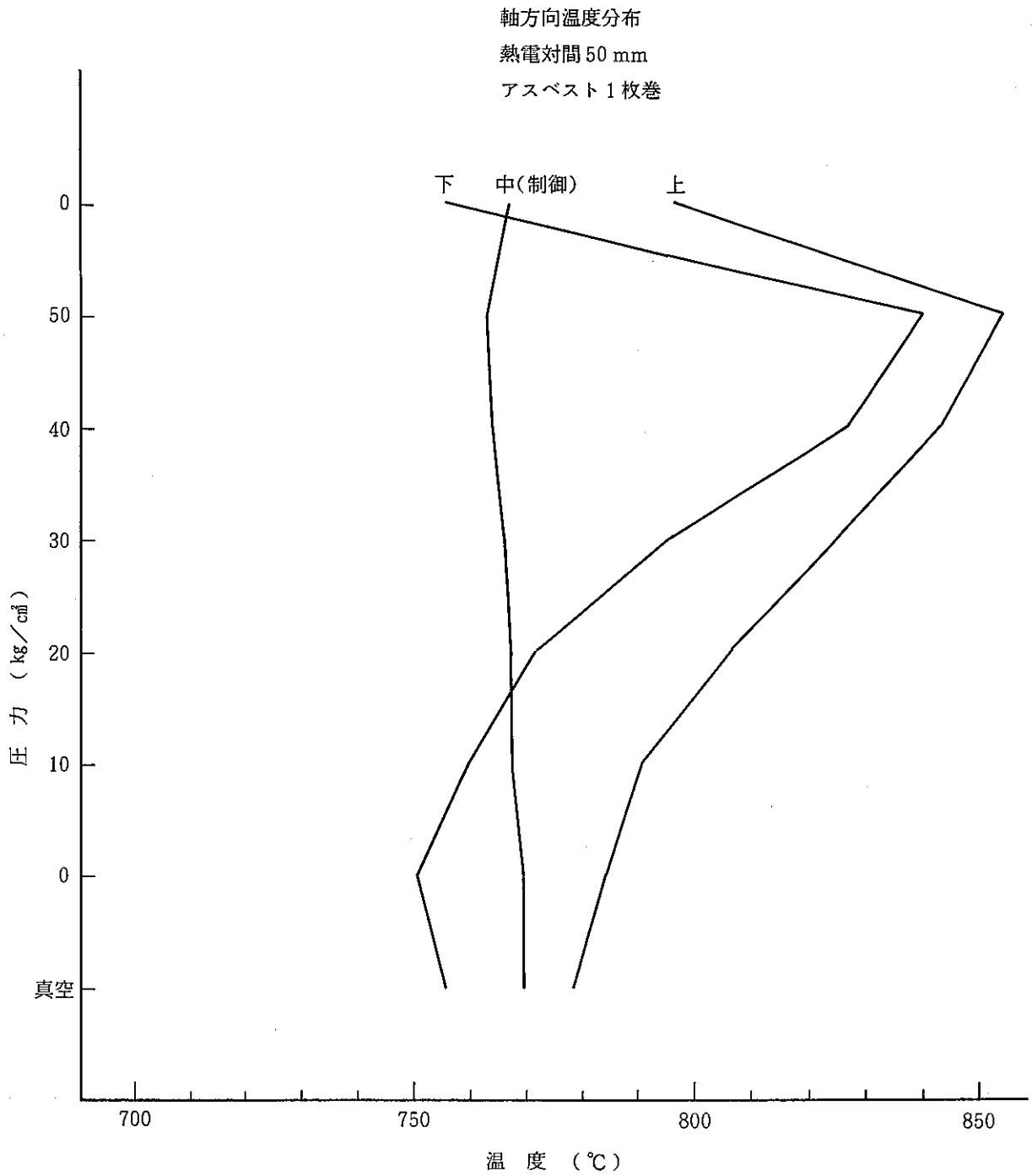


図-2 温度分布測定結果

PAA 103 - 8

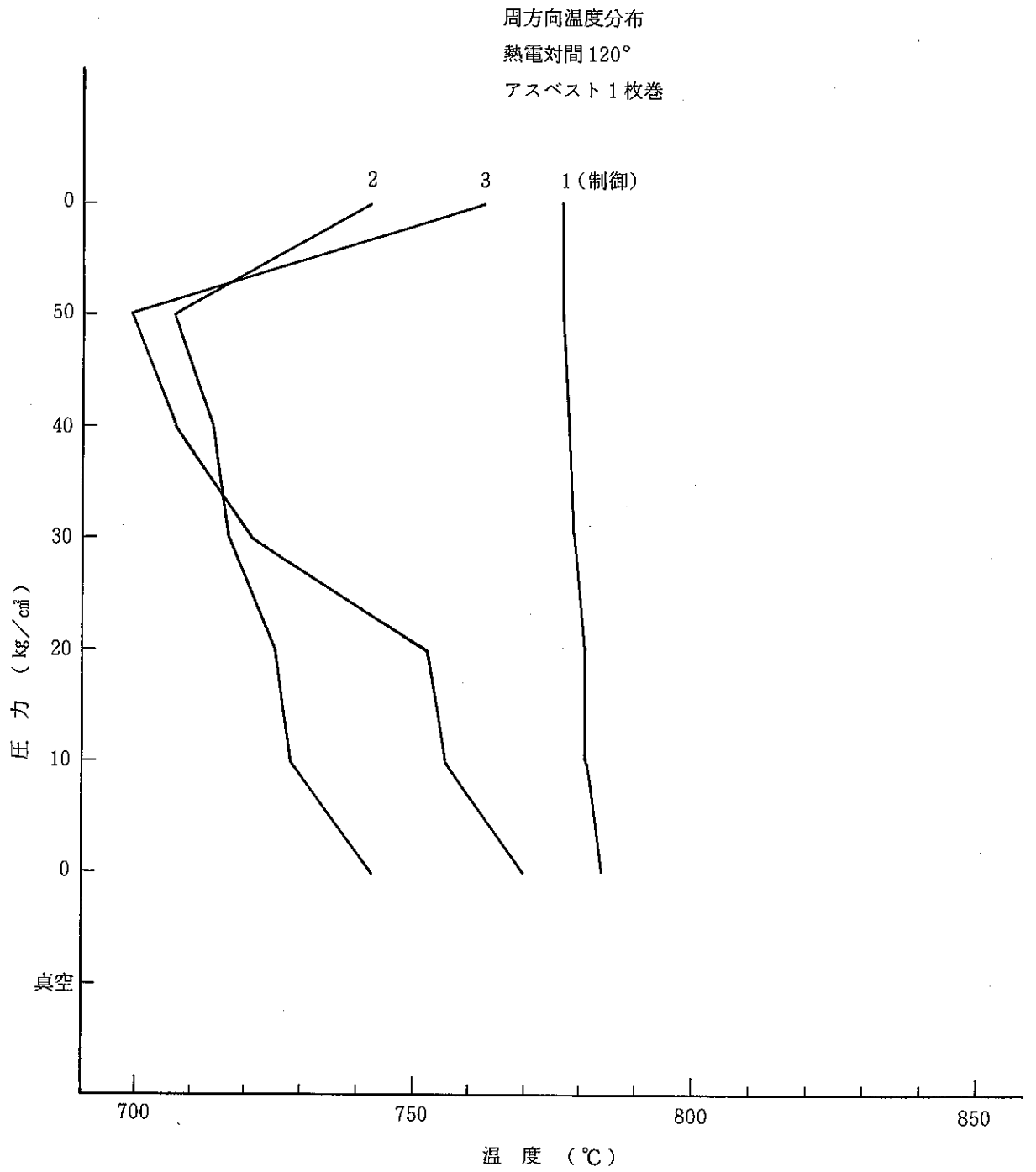


図-3 温度分布測定結果

PAA 103 - 6

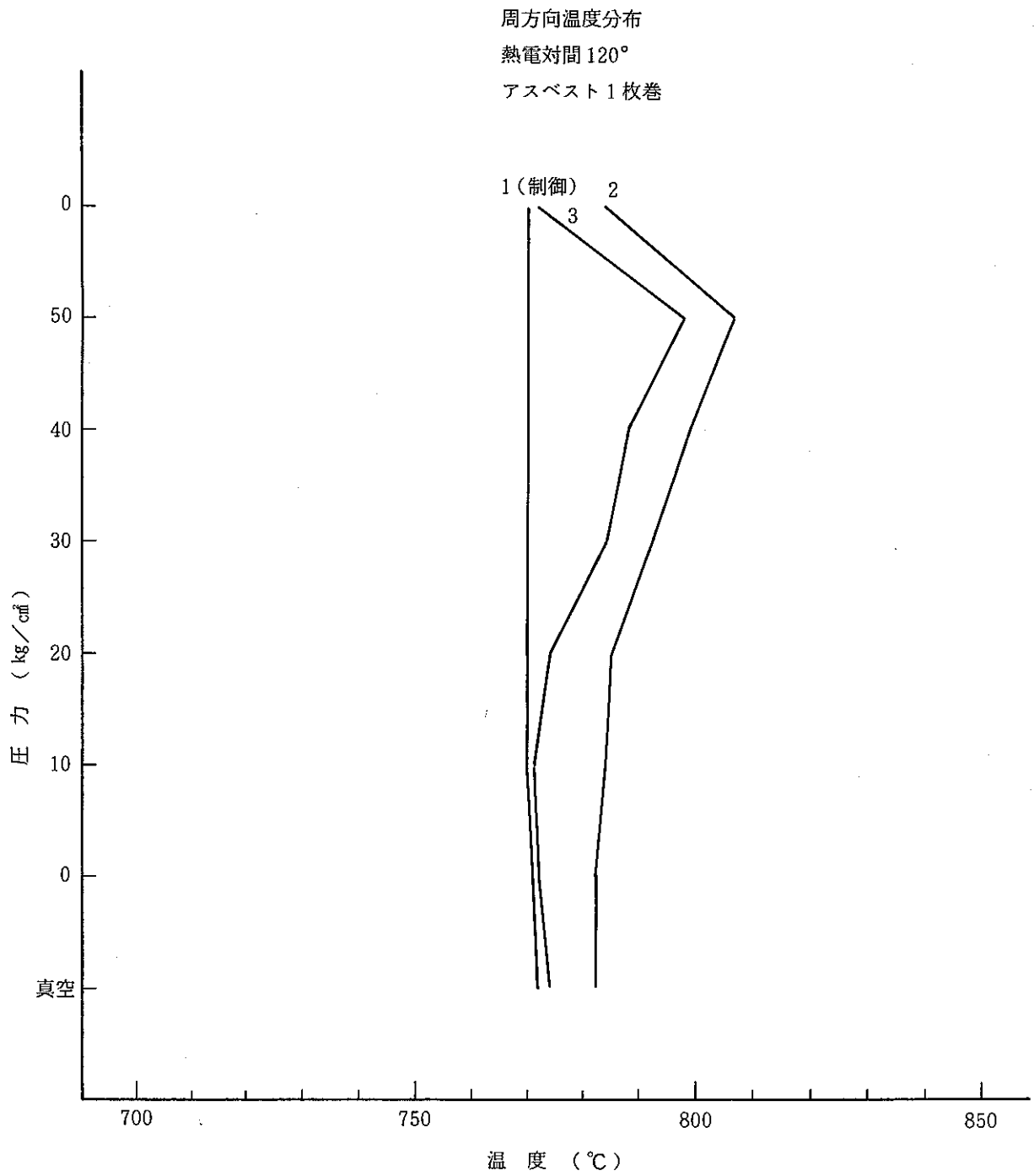


図-4 温度分布測定結果

PAA 103 - 5

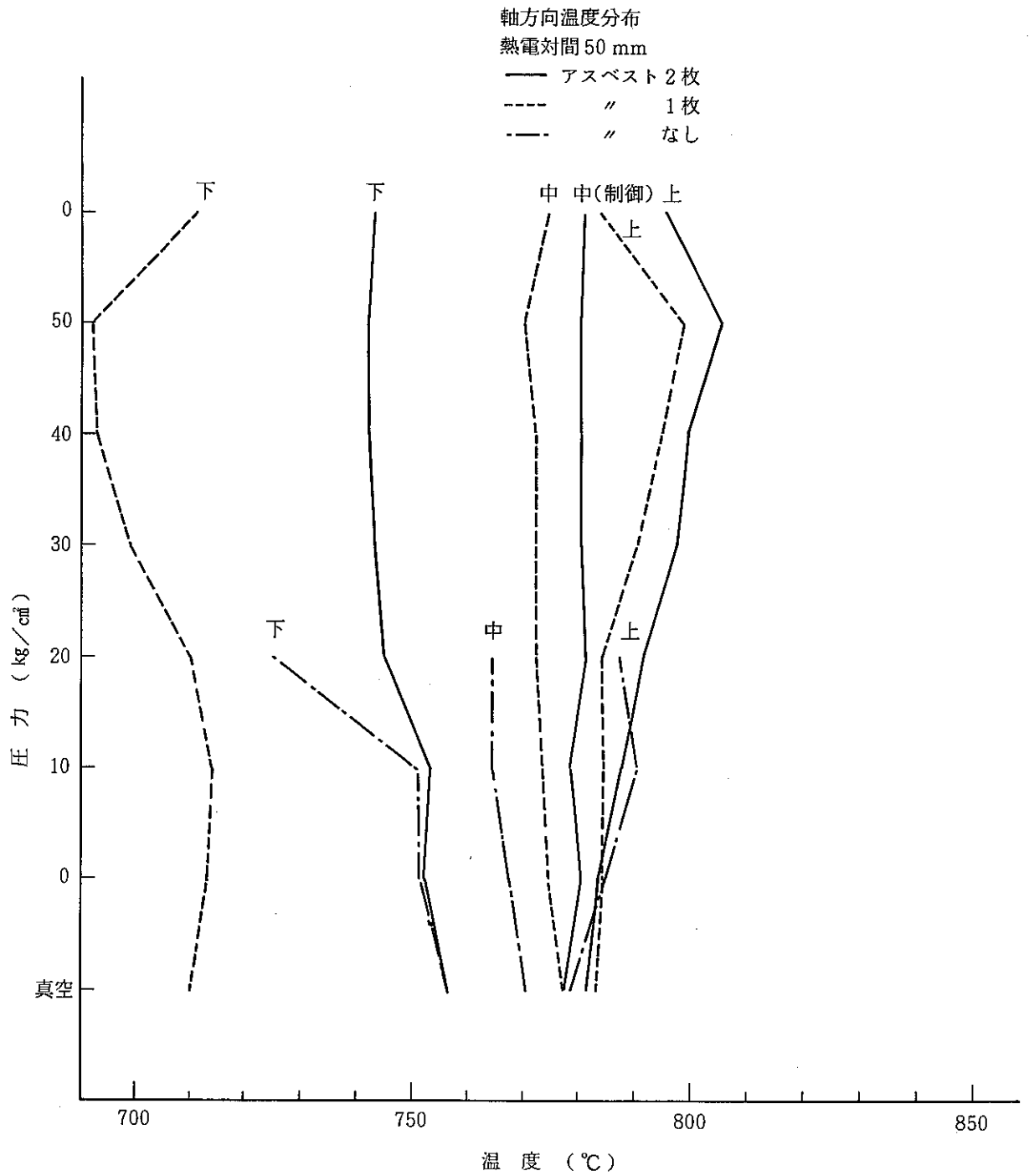


図-5 温度分布測定結果

PAA 111 - 12

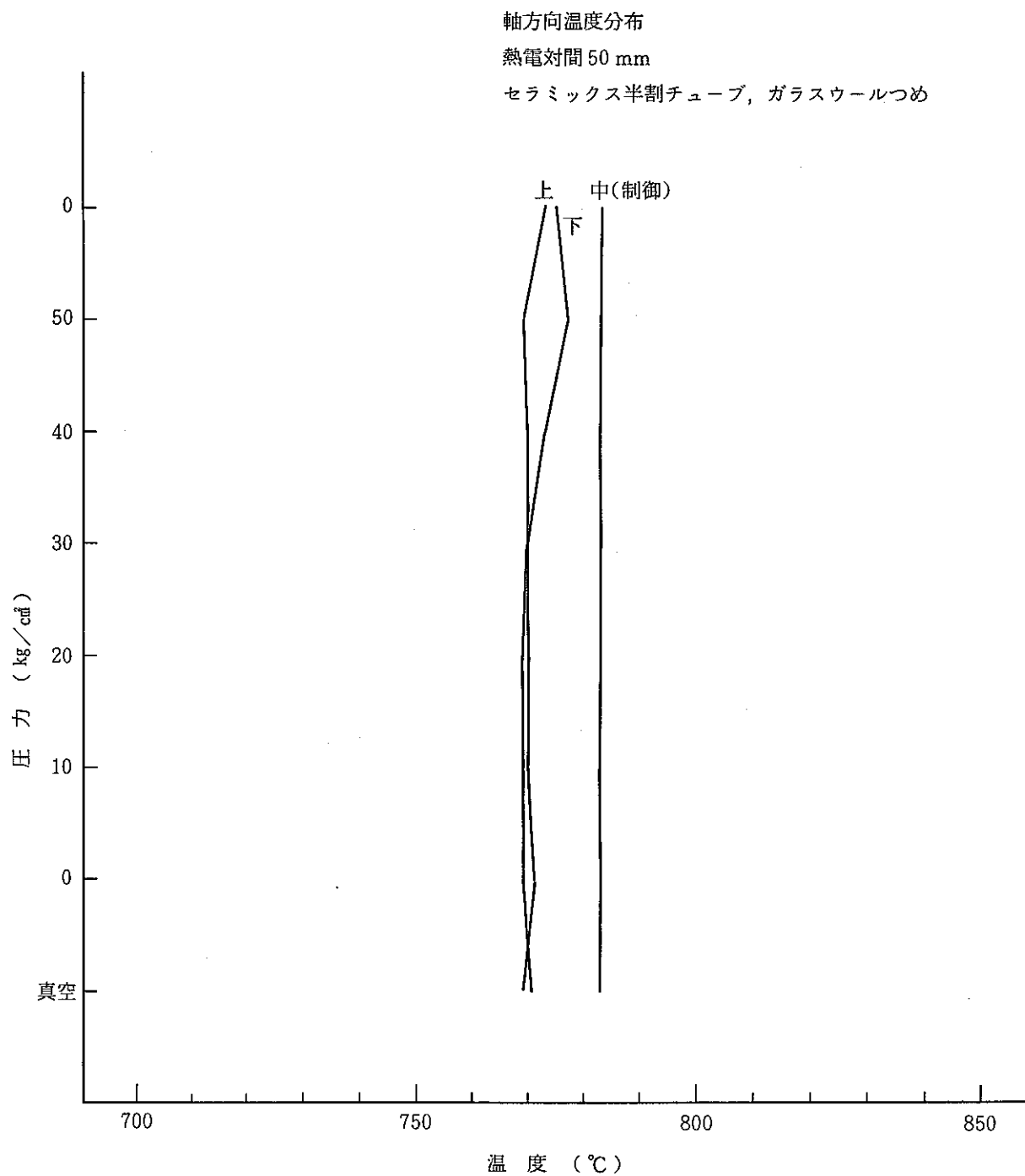


図-6 温度分布測定結果

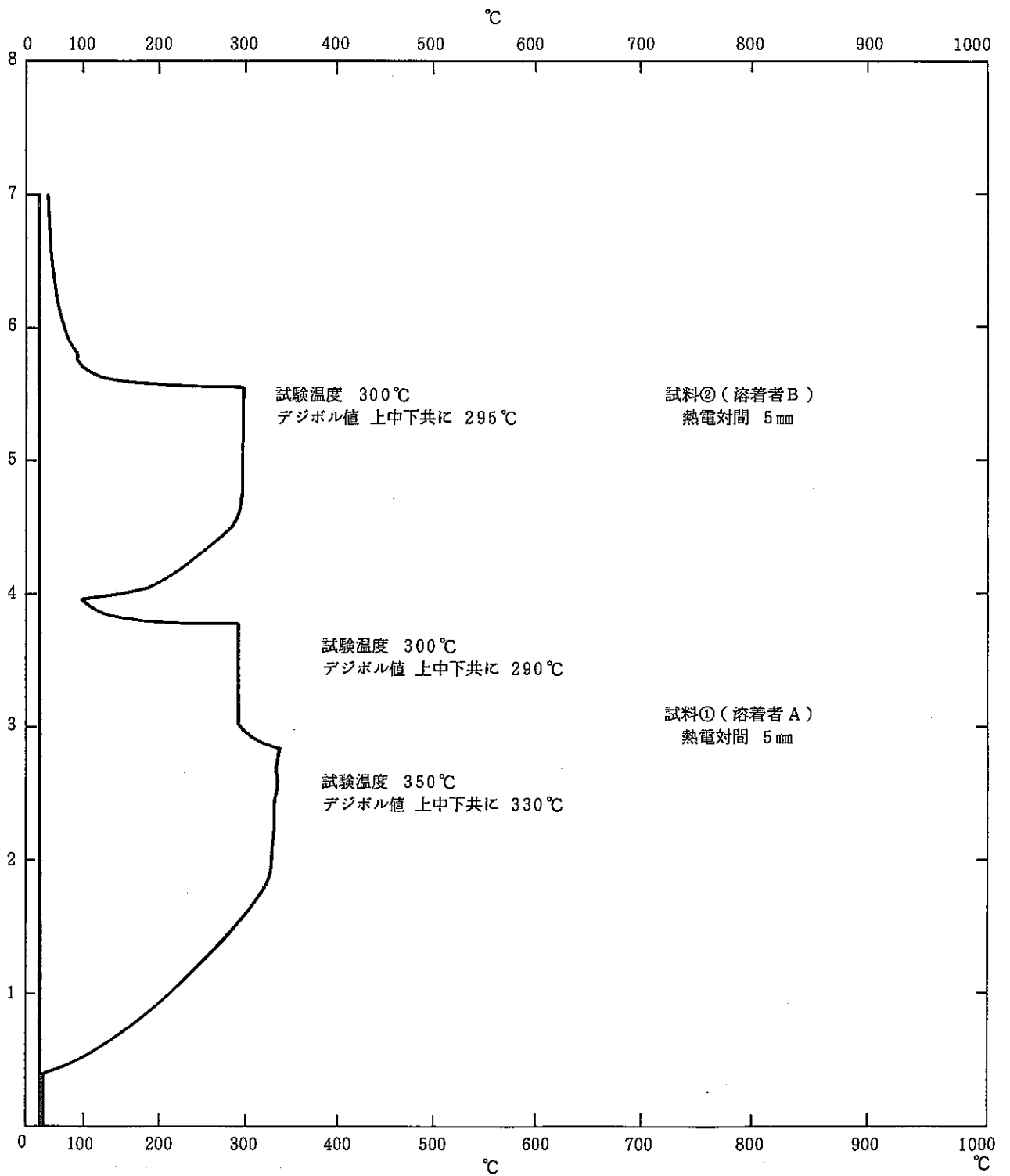


図-7 温度分布測定結果

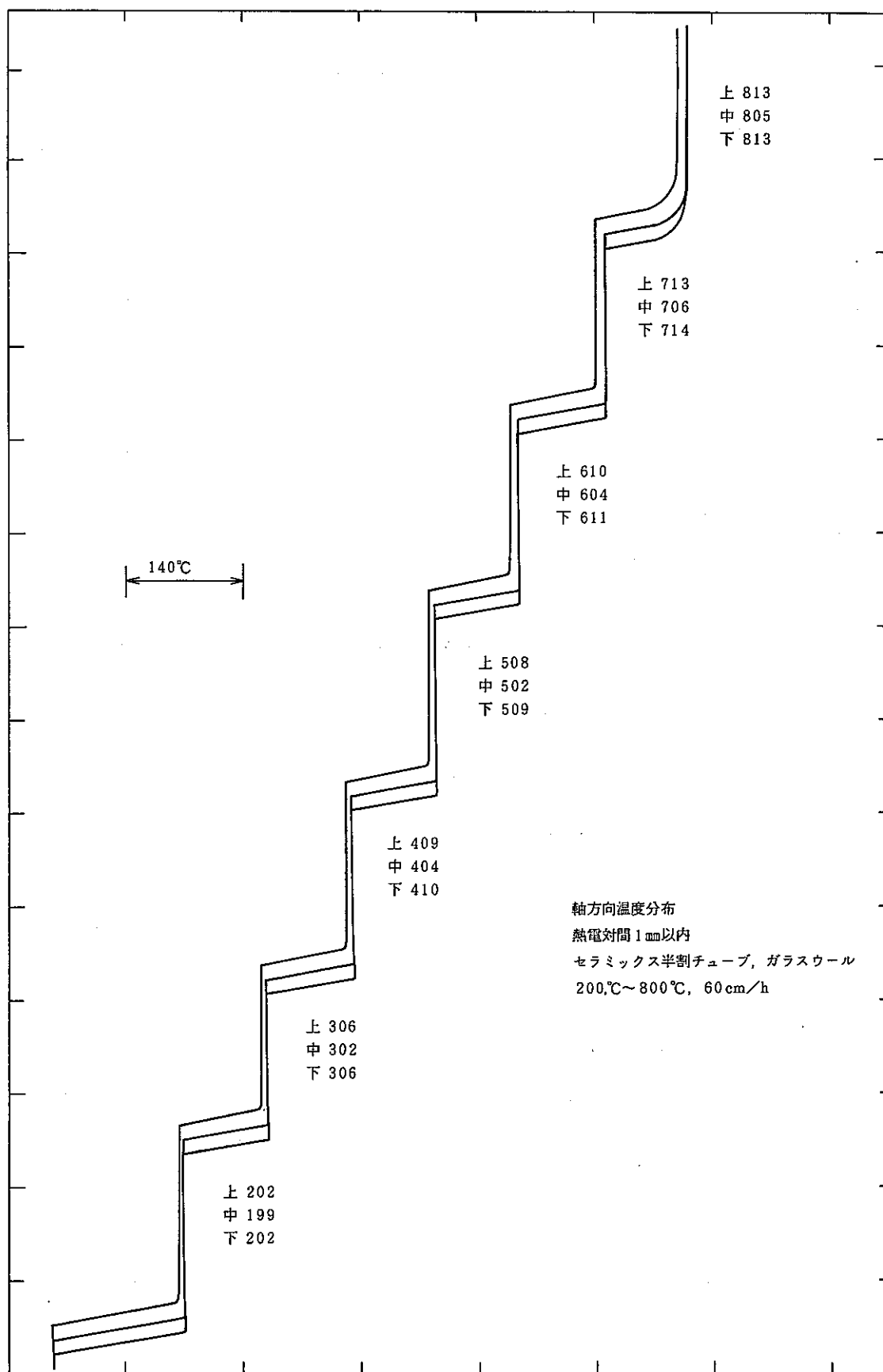


図-8 温度分布測定結果

PAA 111 - 13

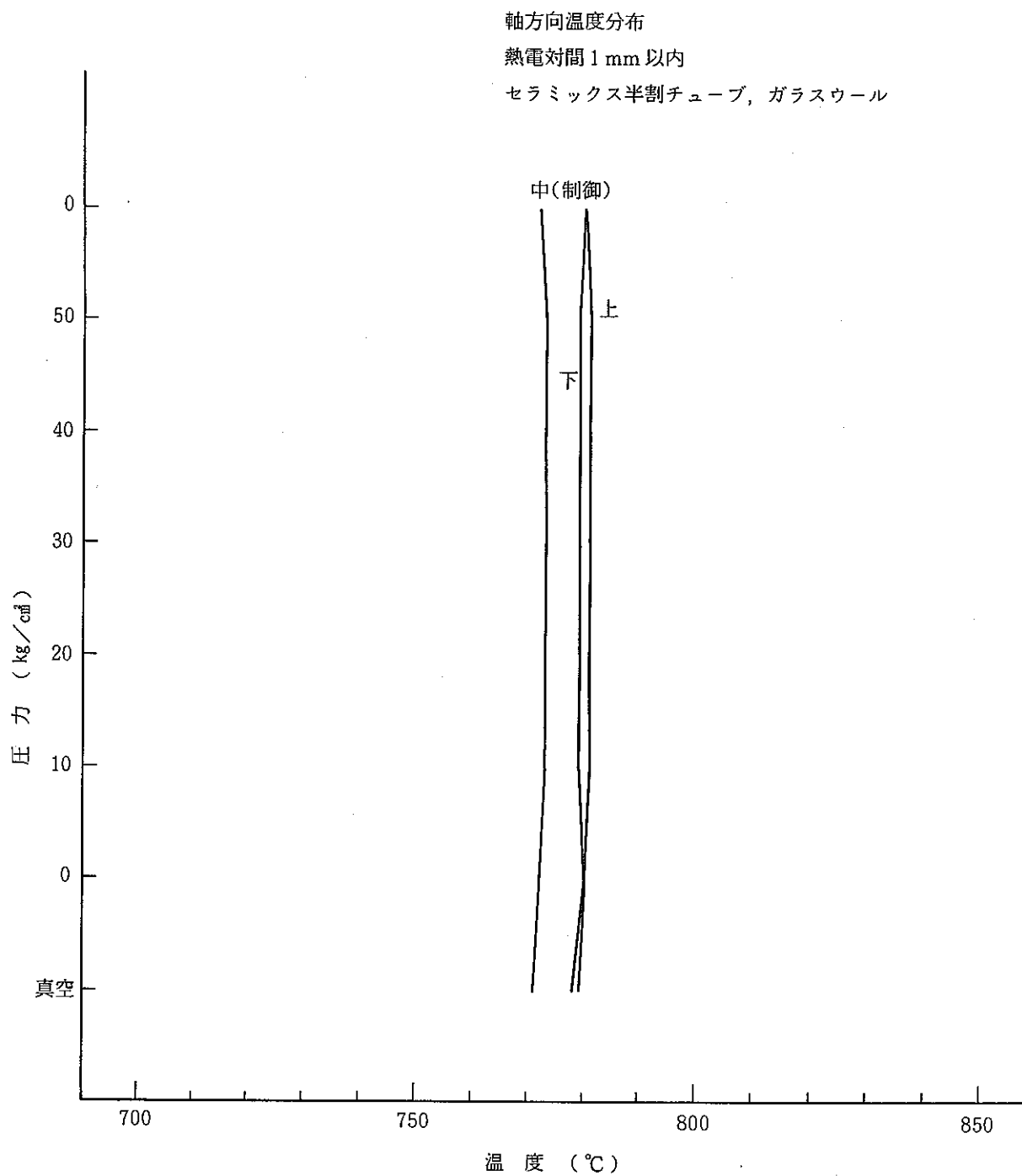


図-9 温度分布測定結果

PAA 111 - 12

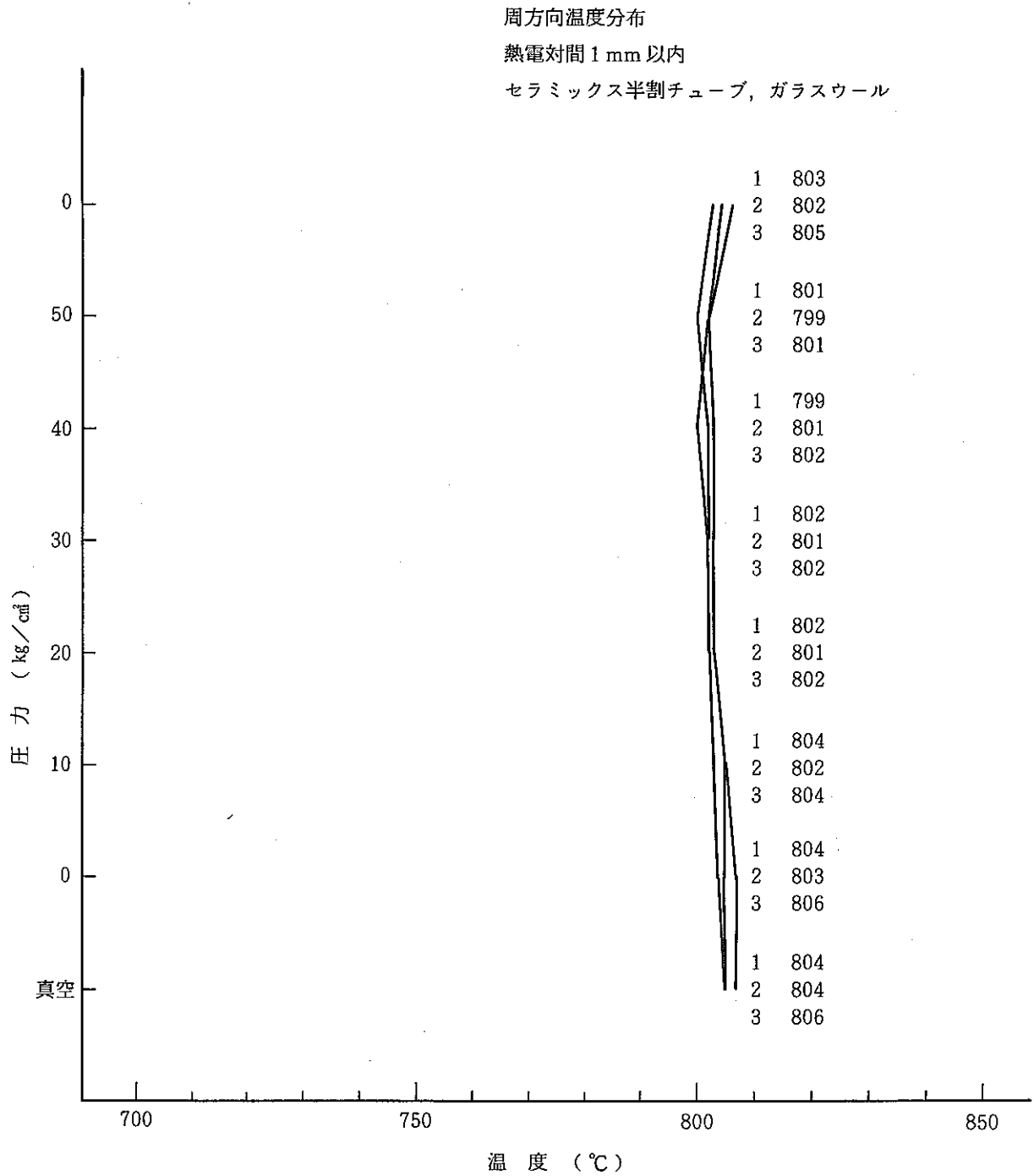


図-10 温度分布測定結果

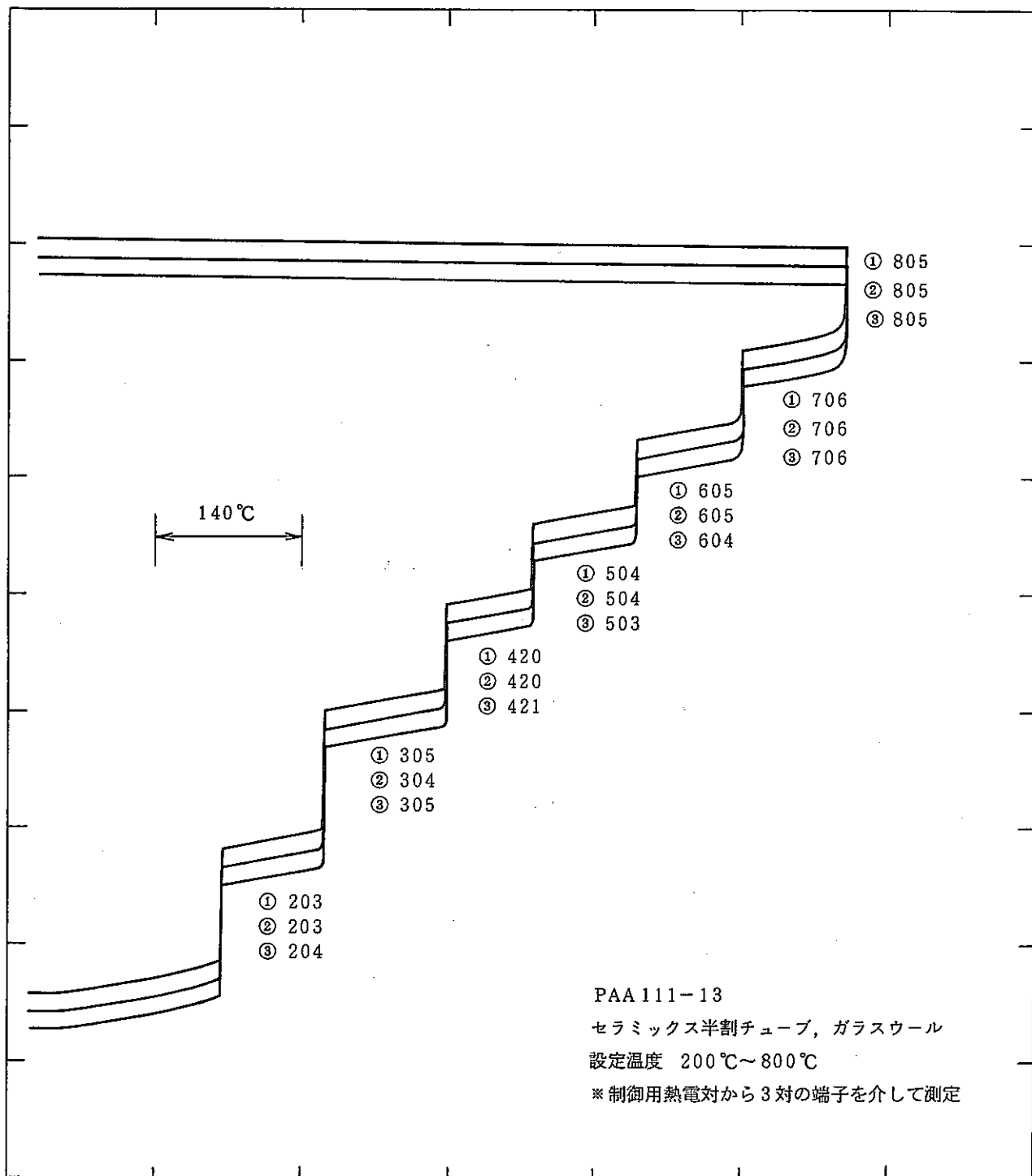


図- 11 温度分布測定結果

PAA 111 - 12

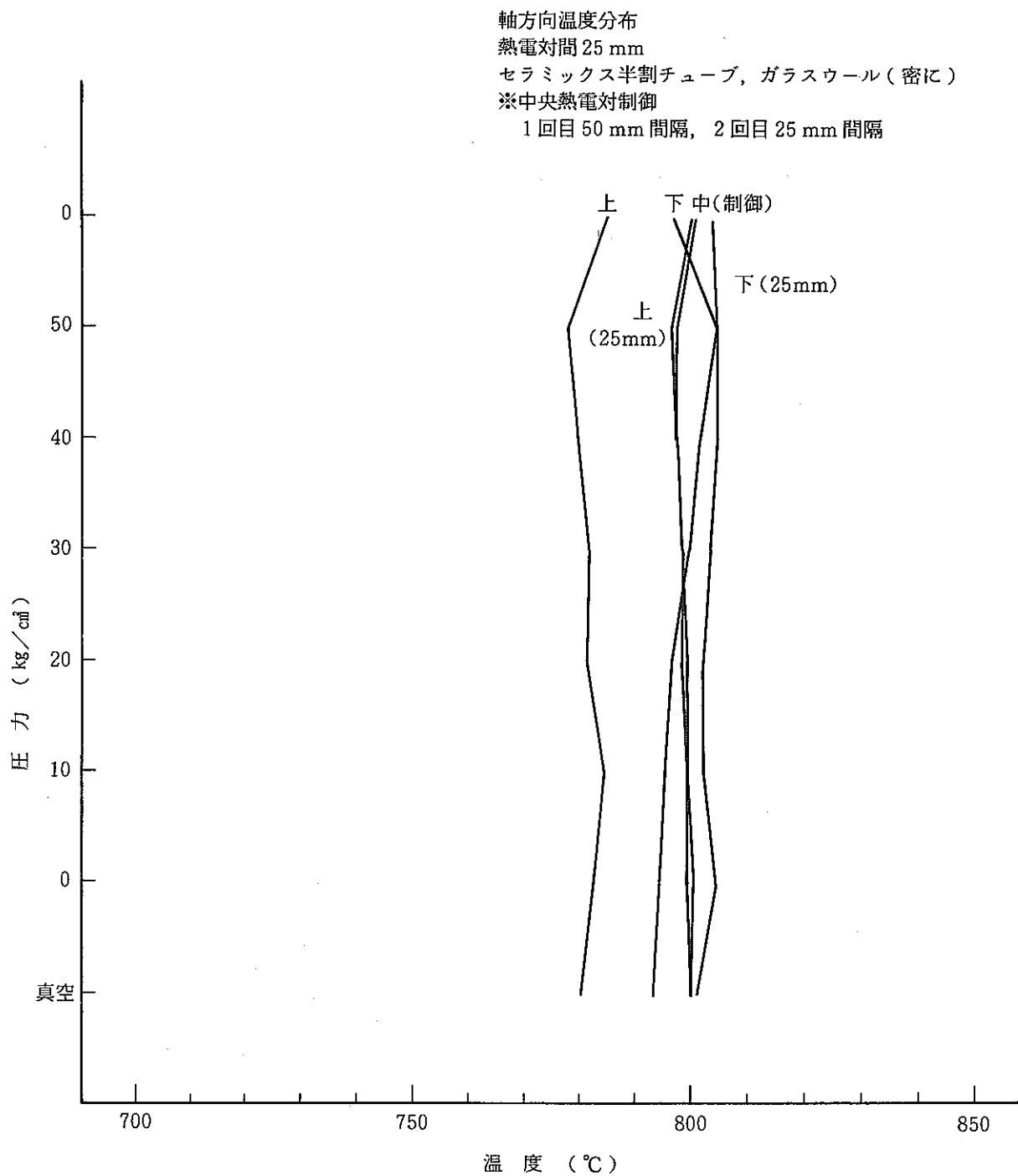


図-12 温度分布測定結果

PAA 120 - 2

軸方向温度分布
 熱電対間 25 mm
 セラミックス半割チューブ, 成形ガラスウール
 ※中央熱電対制御
 1回目 50 mm 間隔, 2回目 25 mm 間隔

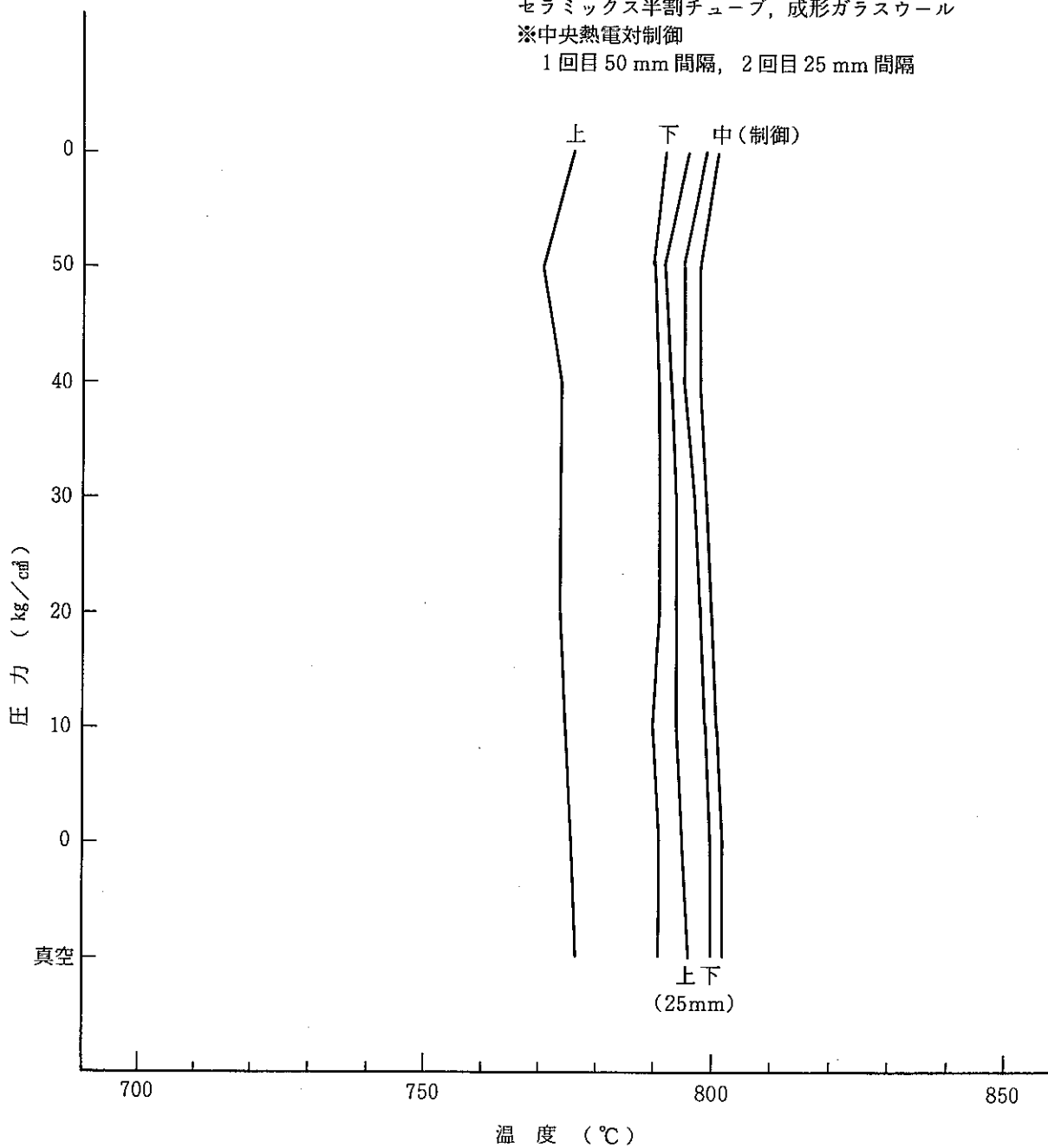


図-13 温度分布測定結果

PAA 120 - 2

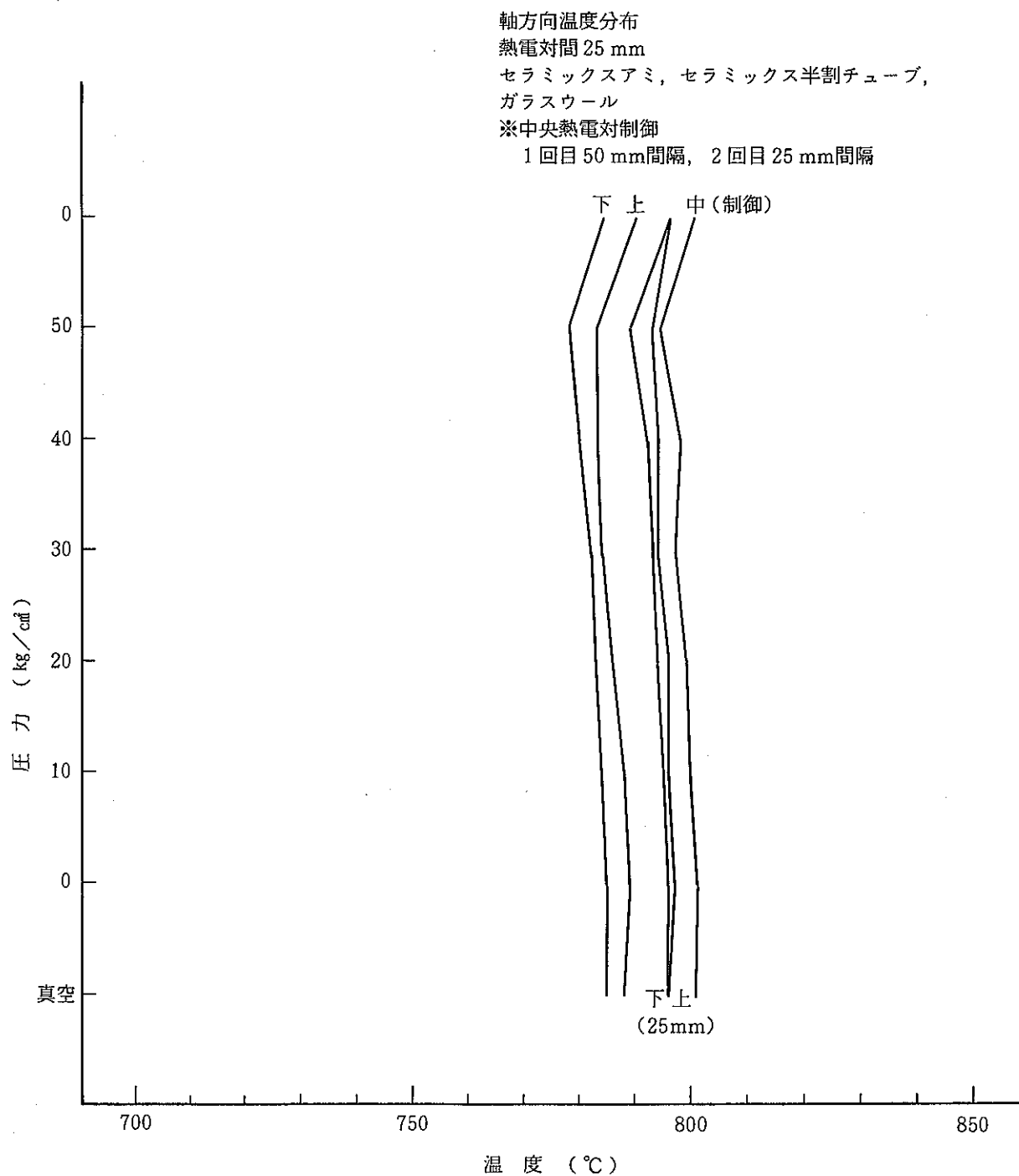


図-14 温度分布測定結果

PAA 121 - 3

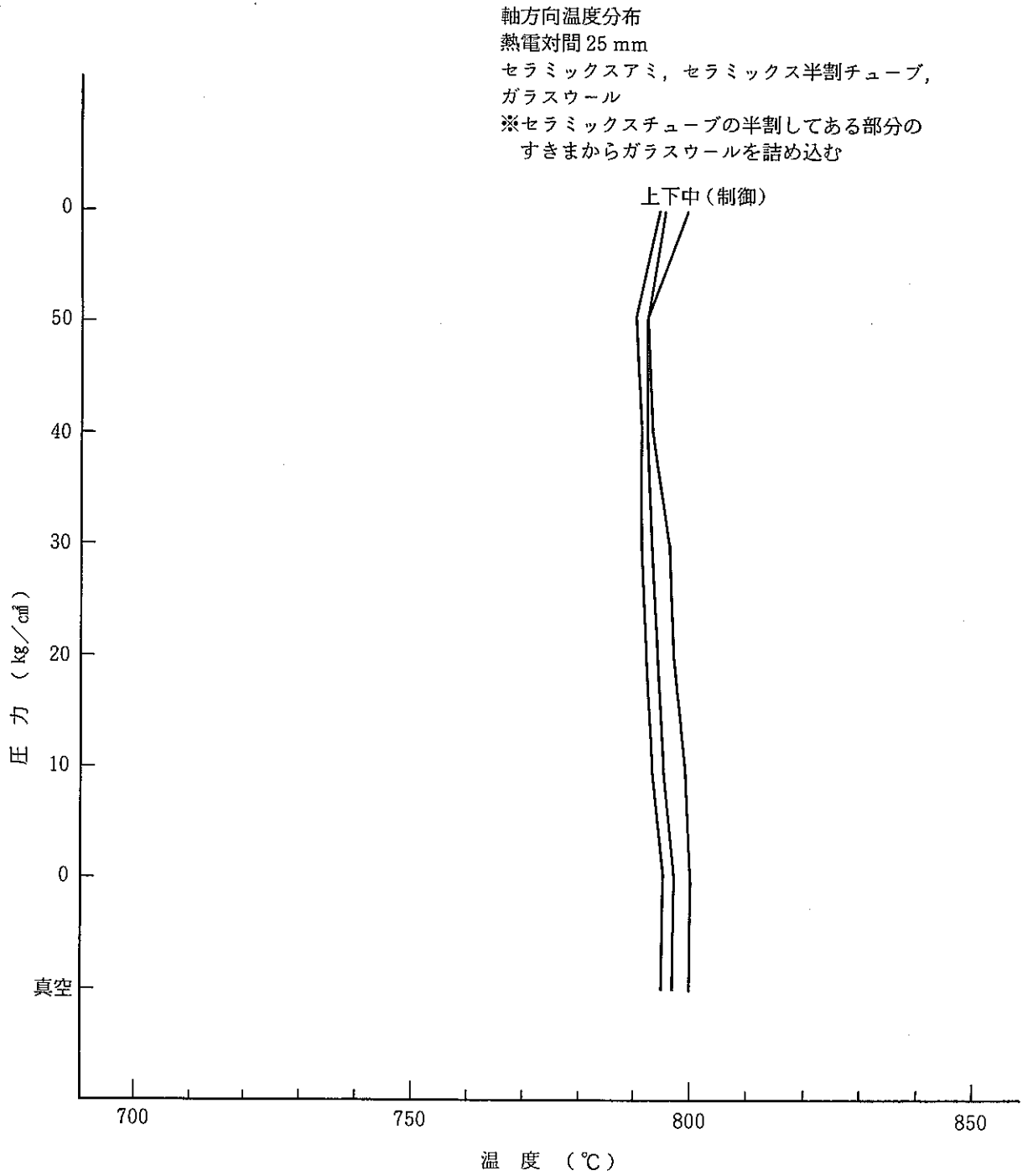


図-15 温度分布測定結果

PAA 107 - 8

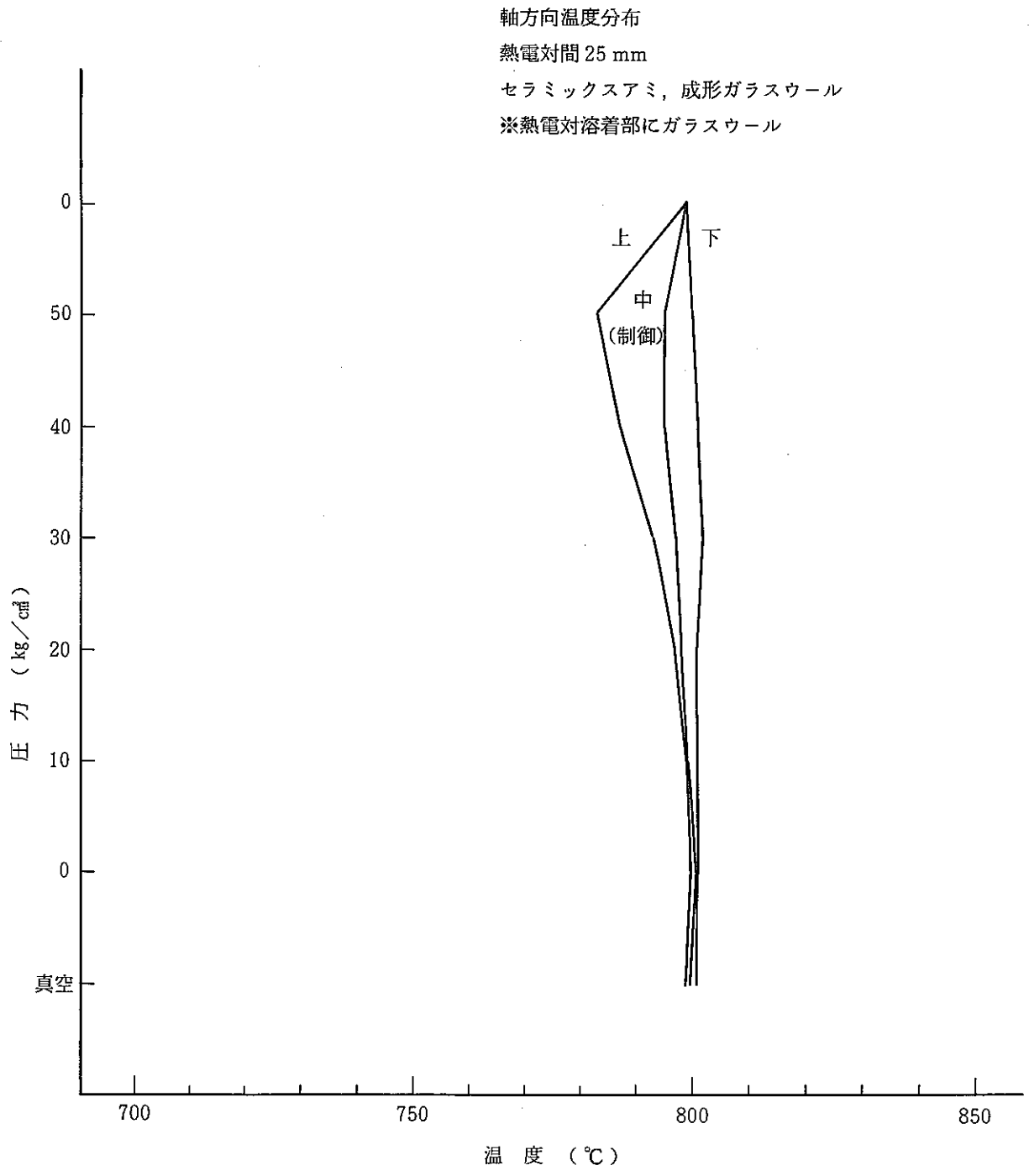


図-16 温度分布測定結果

PAA 121 - 11

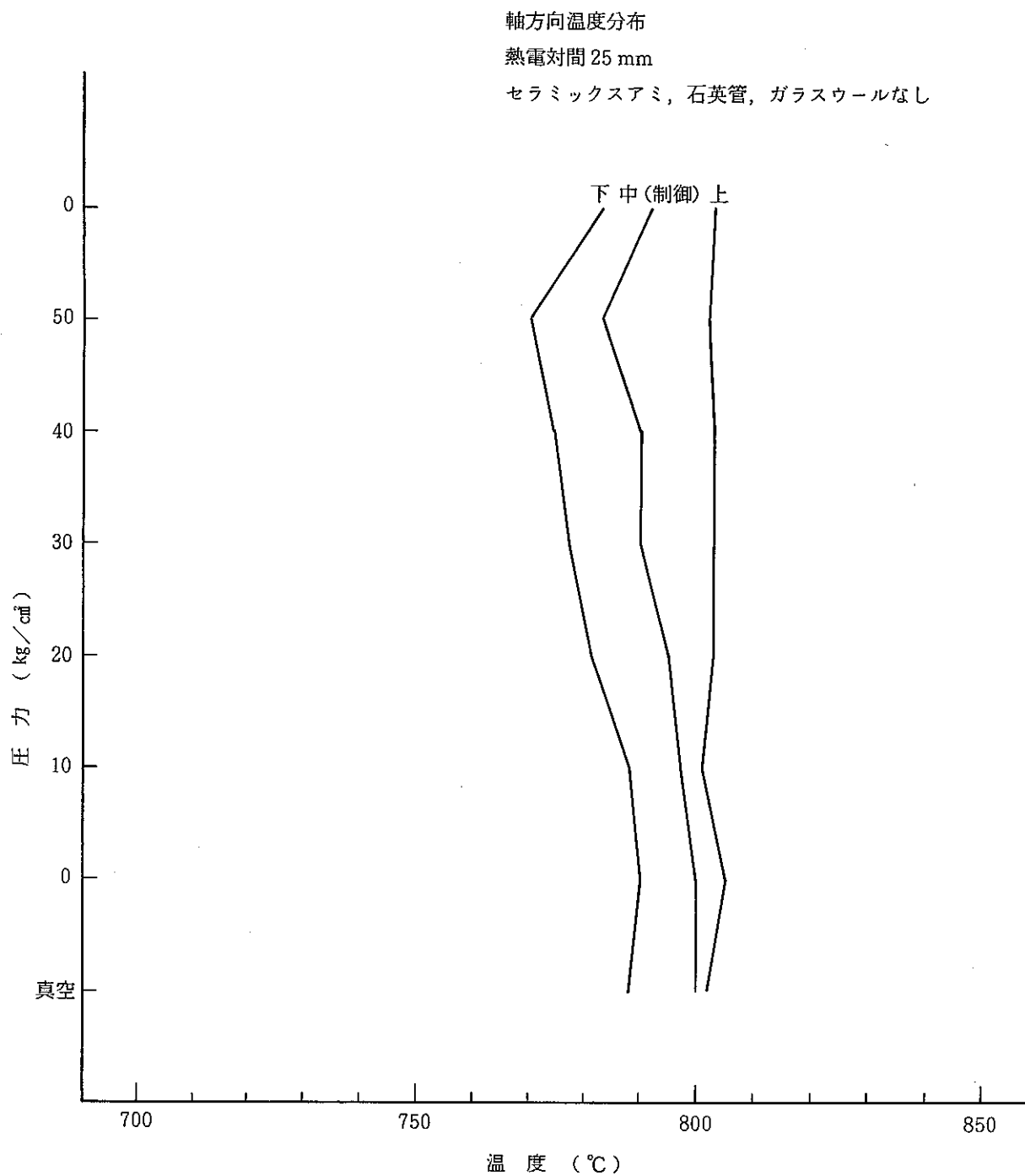


図-17 温度分布測定結果

PAA 129 - 7

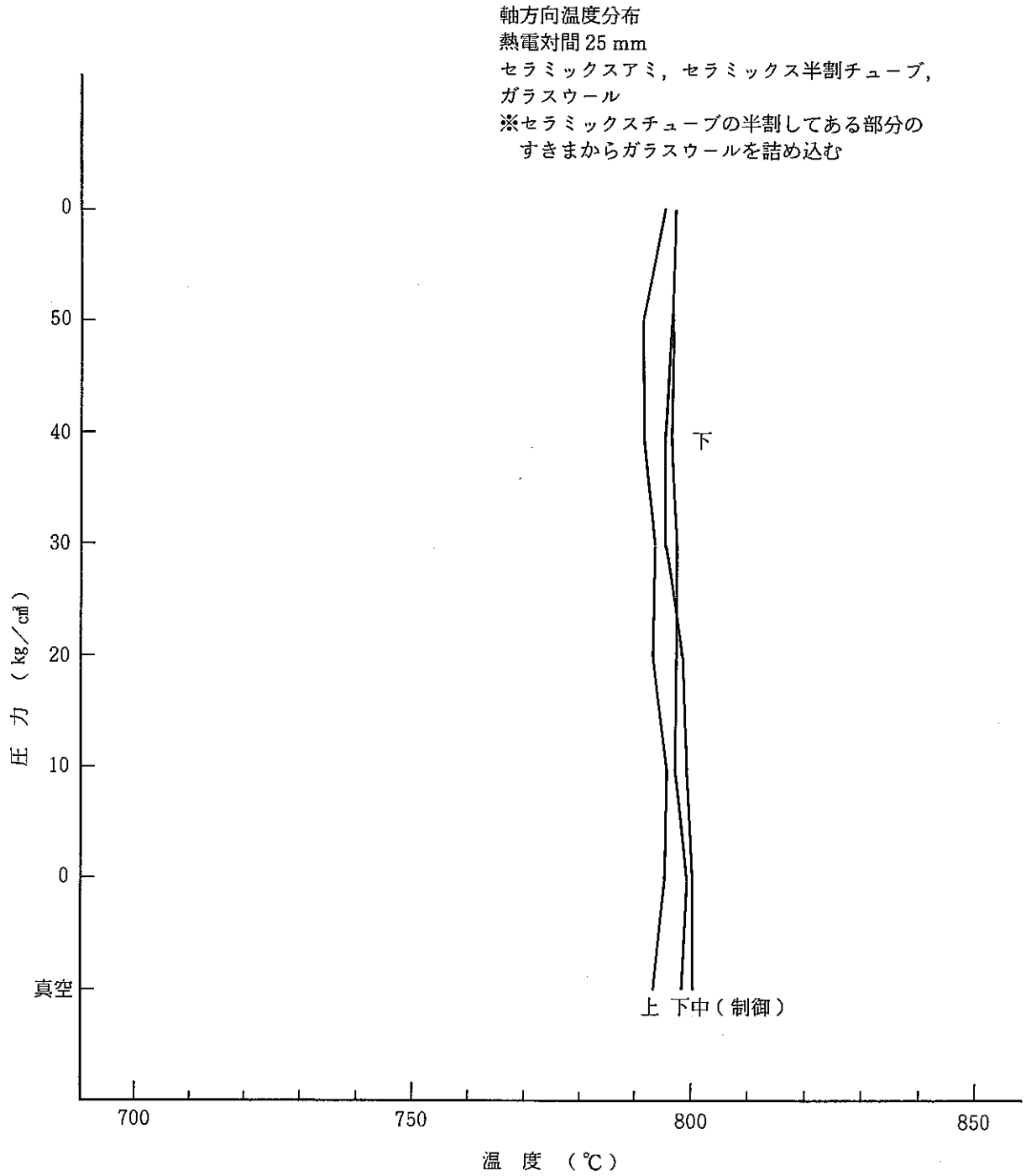


図-18 温度分布測定結果

PAA 129 - 7

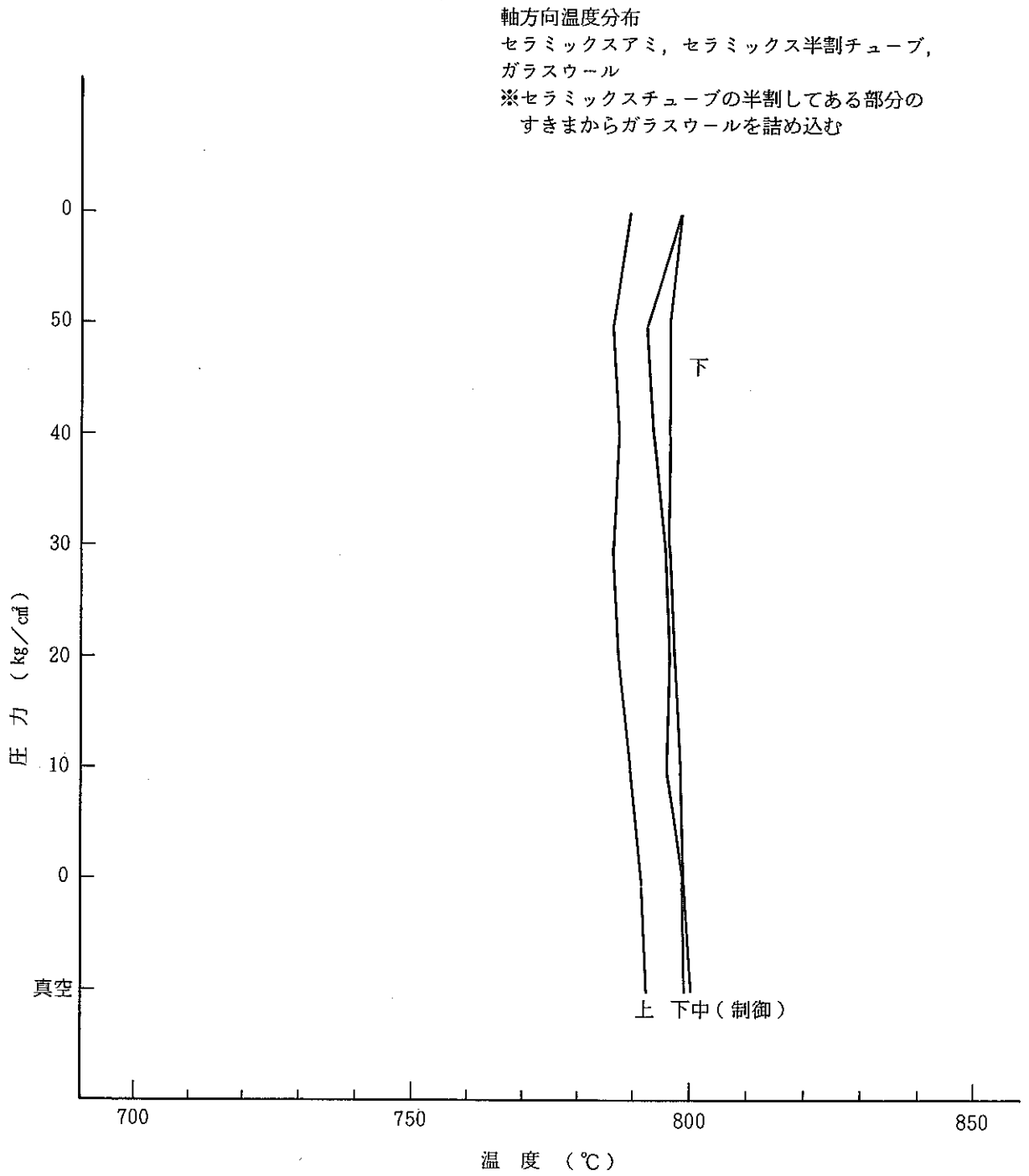


図-19 温度分布測定結果

PAA 129 - 7

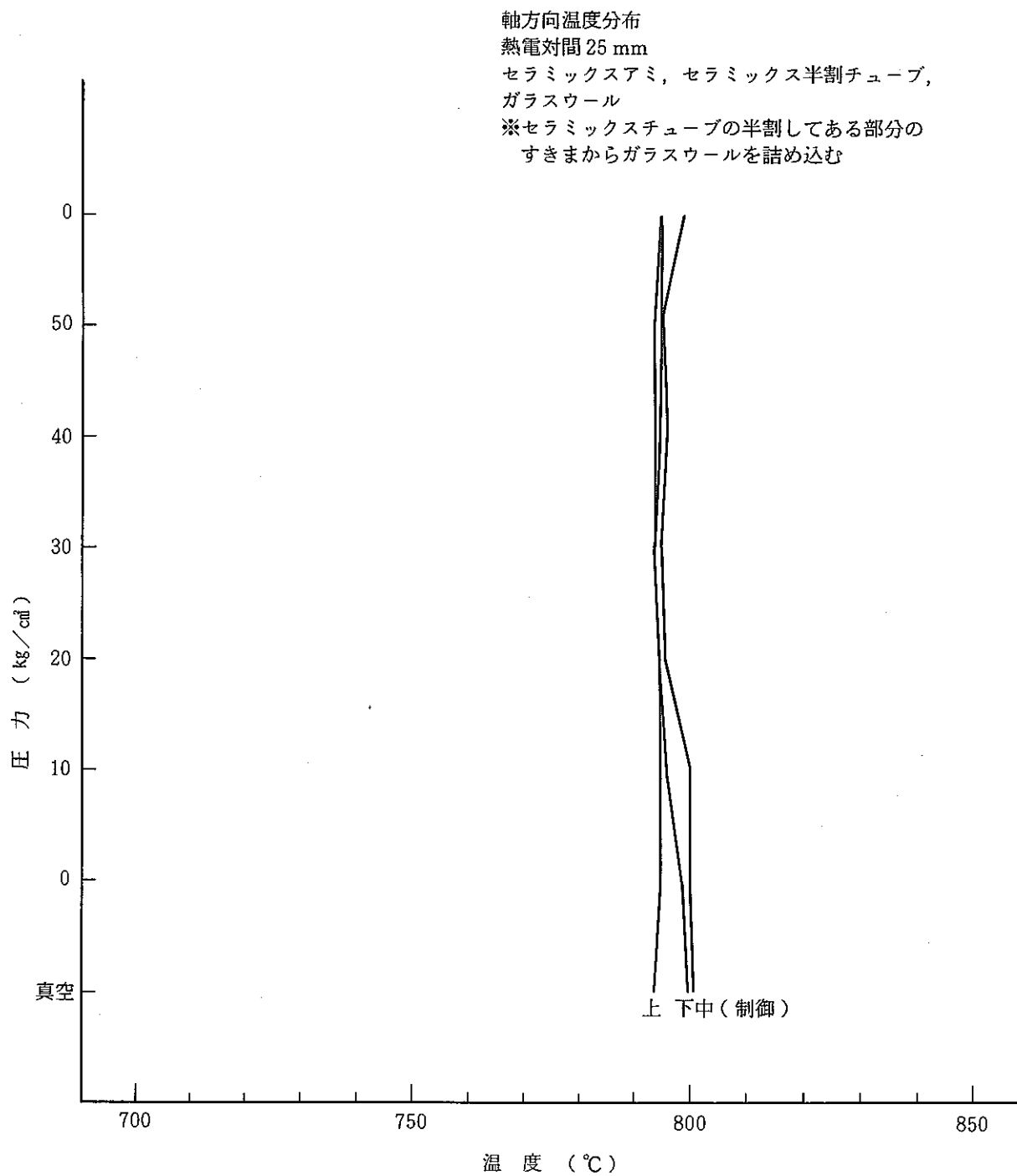


図-20 温度分布測定結果

PAA 121 - 3

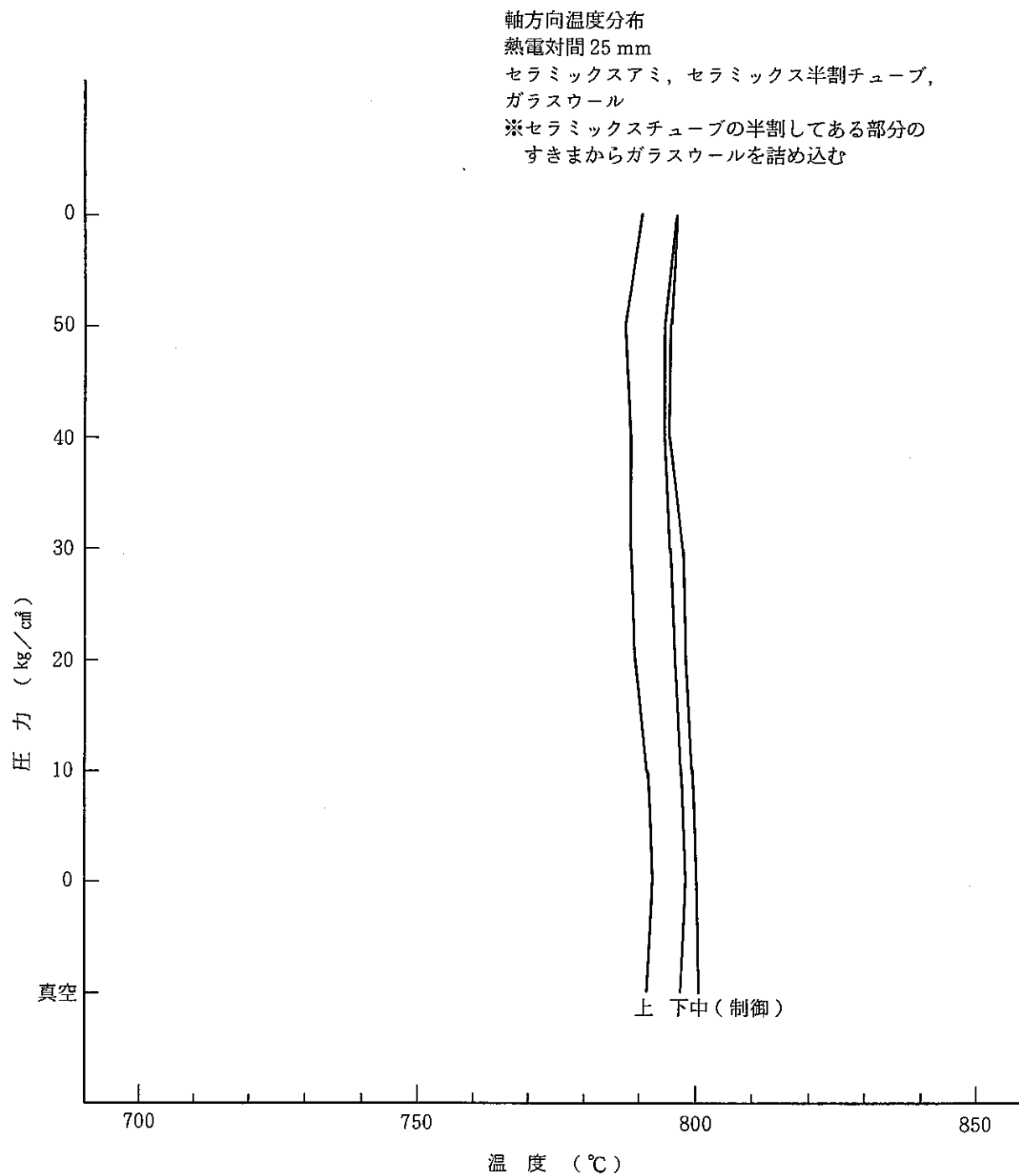


図-21 温度分布測定結果

PAA 121 - 3

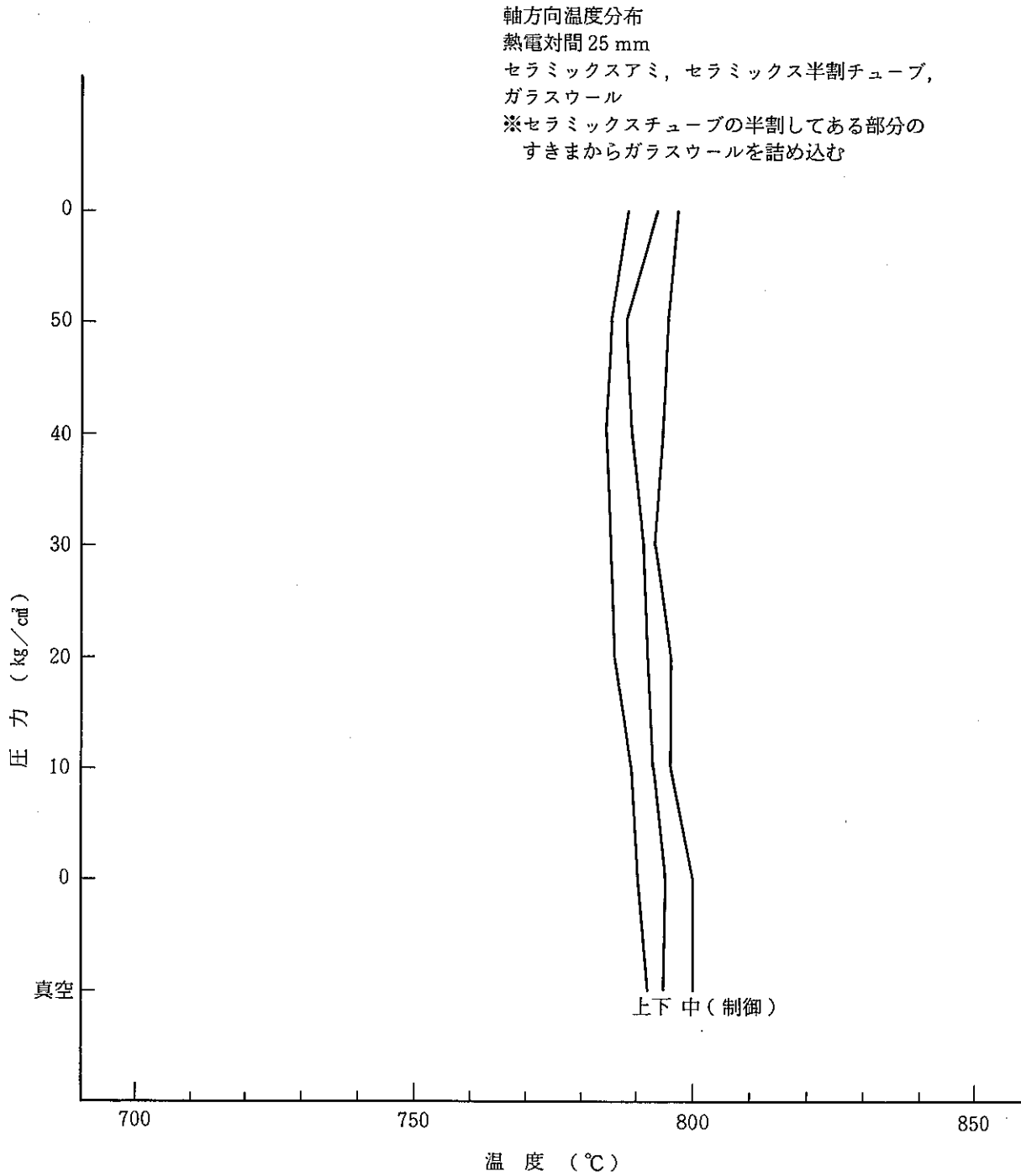


図-22 温度分布測定結果

PAA 123 - 1

周方向温度分布
熱電対間 120°
セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール
※セラミックスチューブの半割してある部分の
すきまにガラスウールを詰め込む

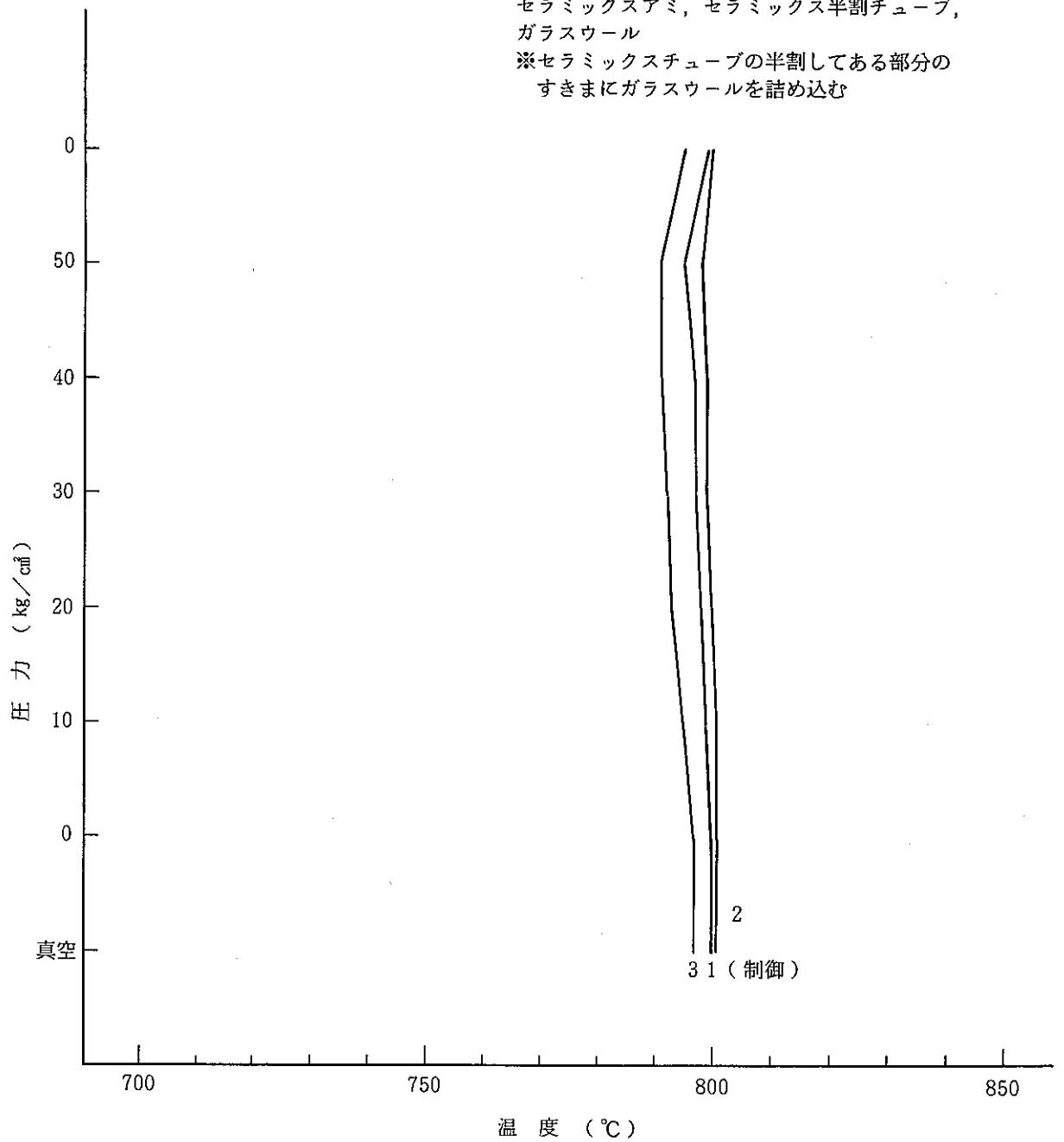


図-23 温度分布測定結果

PAA 123 - 1

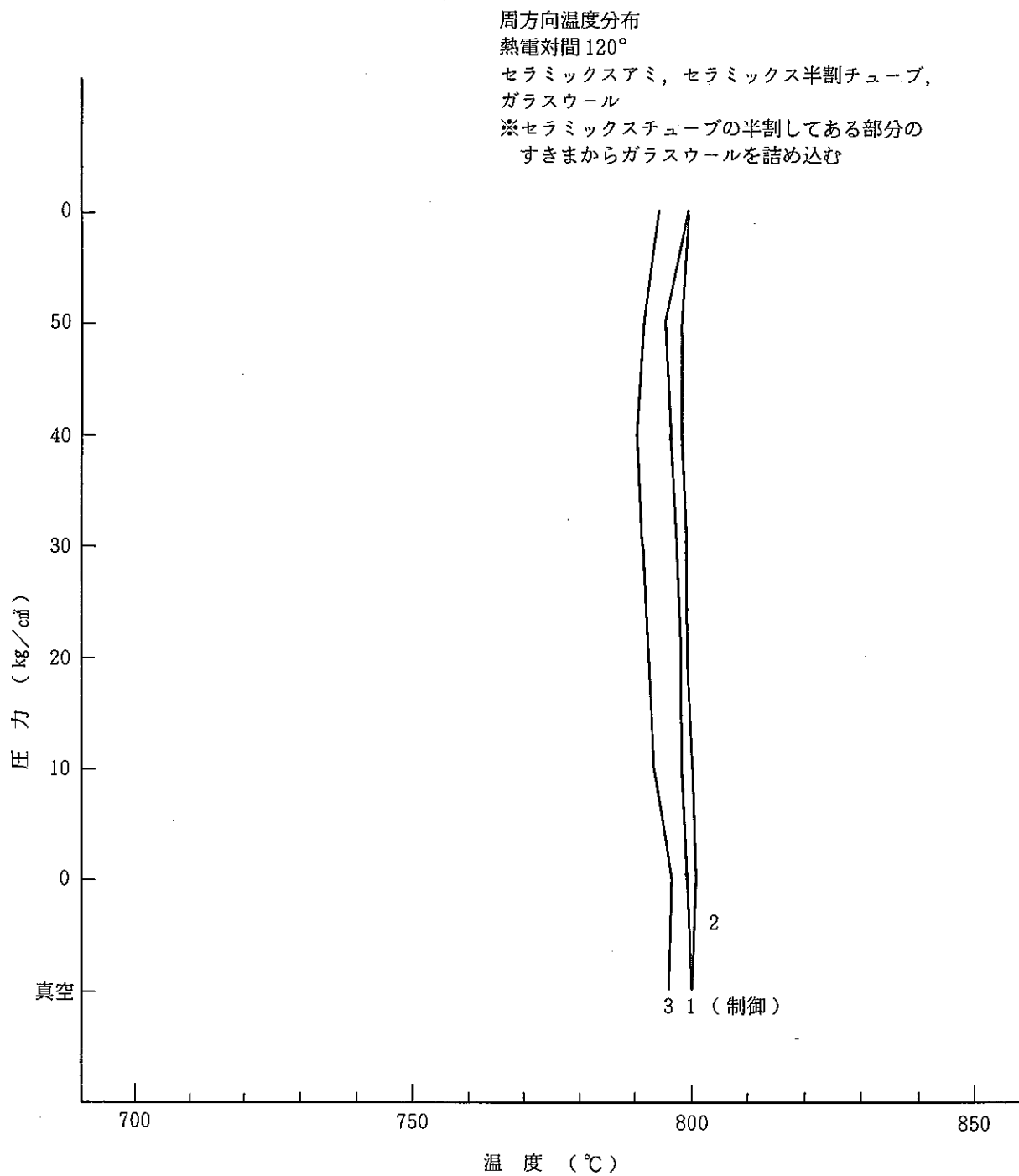


図-24 温度分布測定結果

PAA 122 - 2

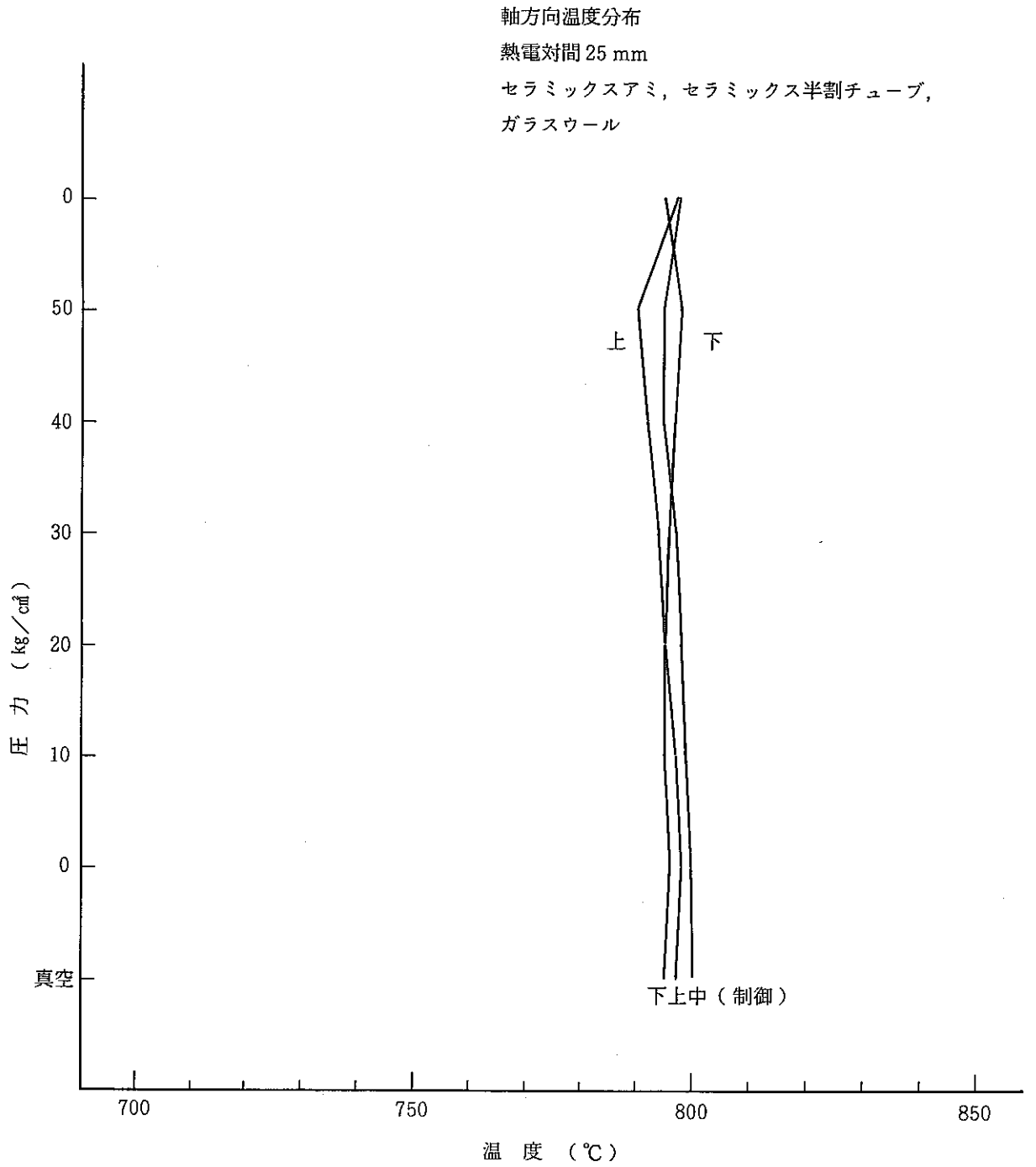


図-25 温度分布測定結果

PAA122 - 2

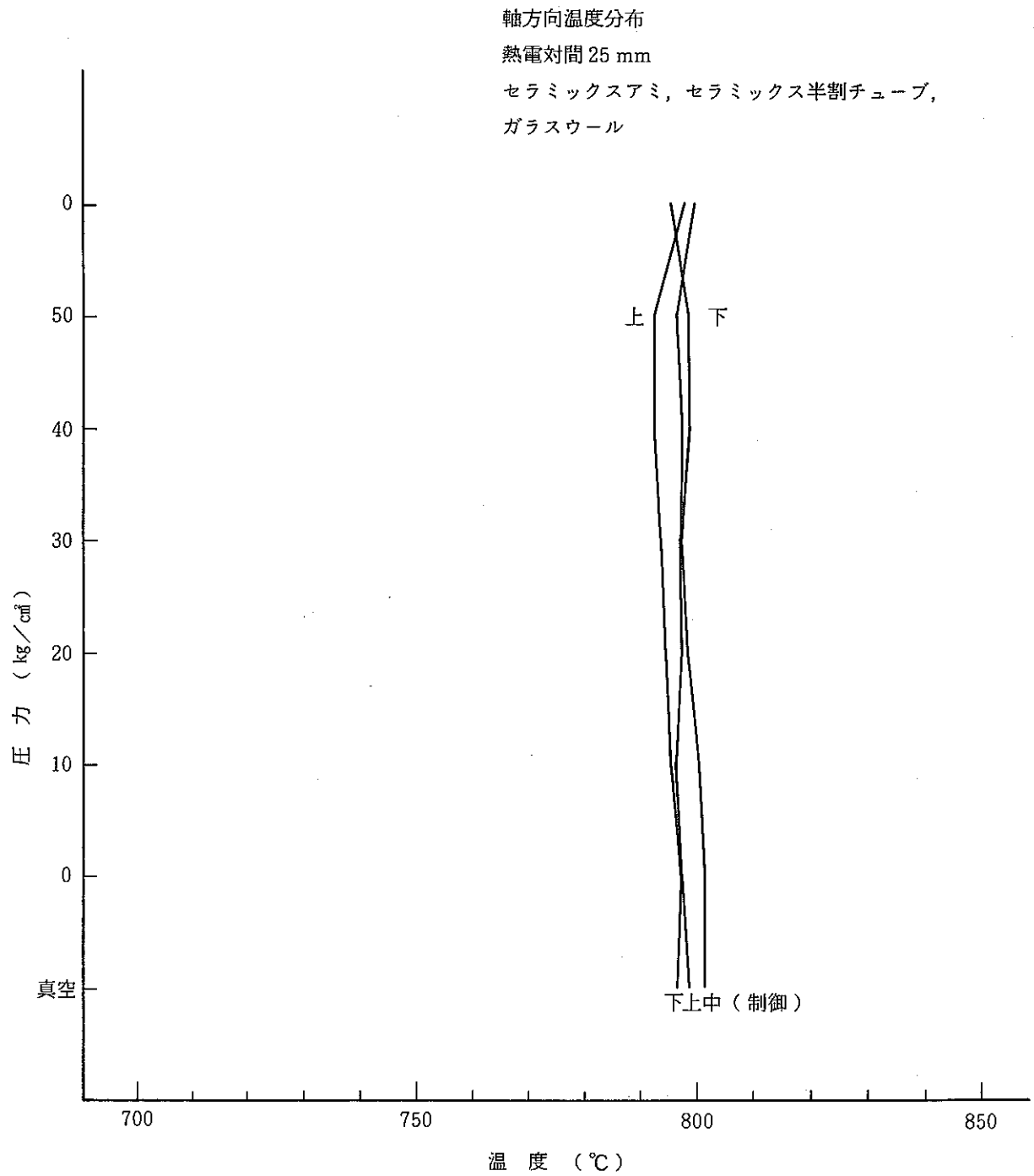


図-26 温度分布測定結果

PAA 122 - 3

軸方向温度分布

熱電対間 25 mm

セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール

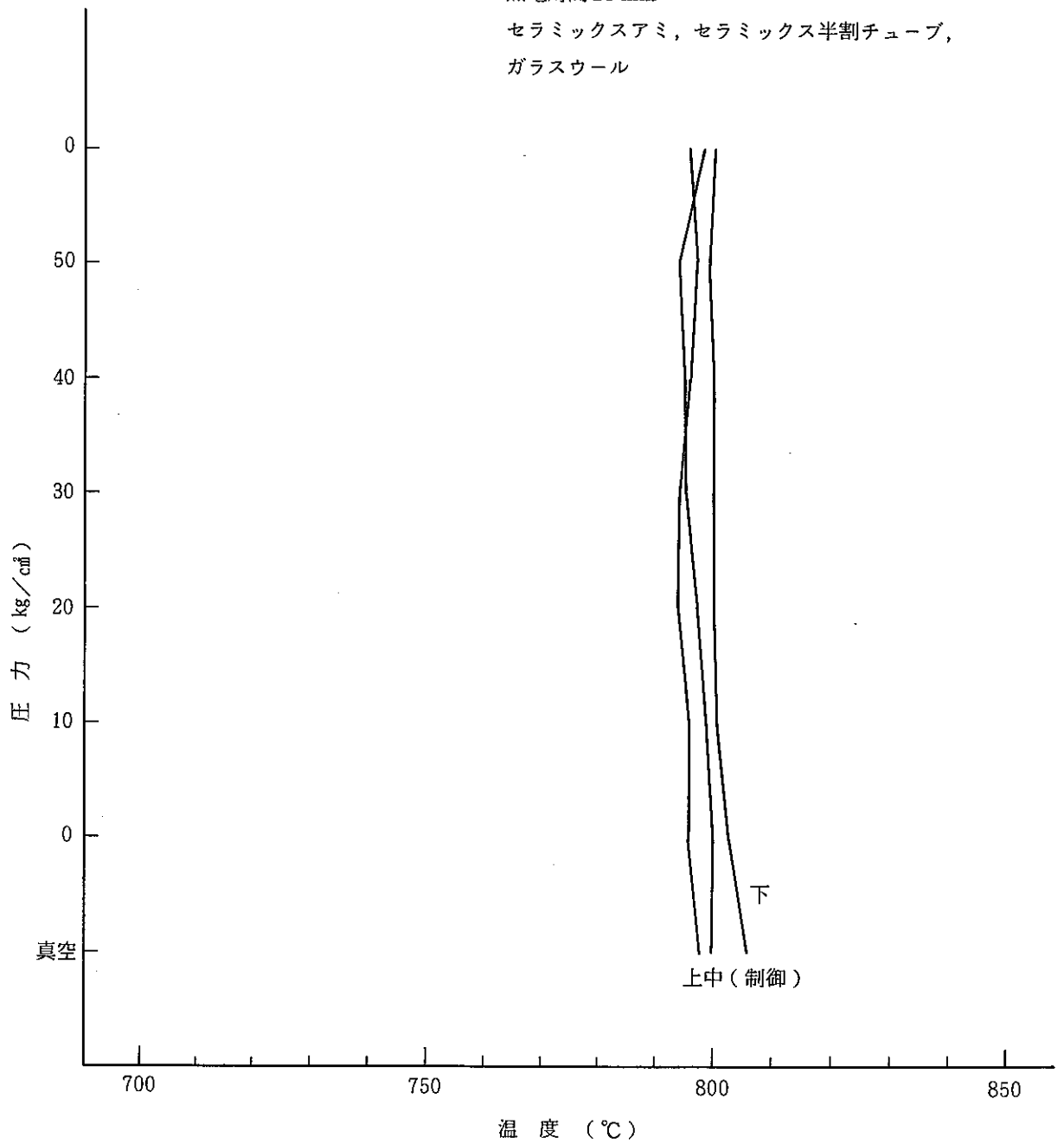


図- 27 温度分布測定結果

PAA 122 - 3

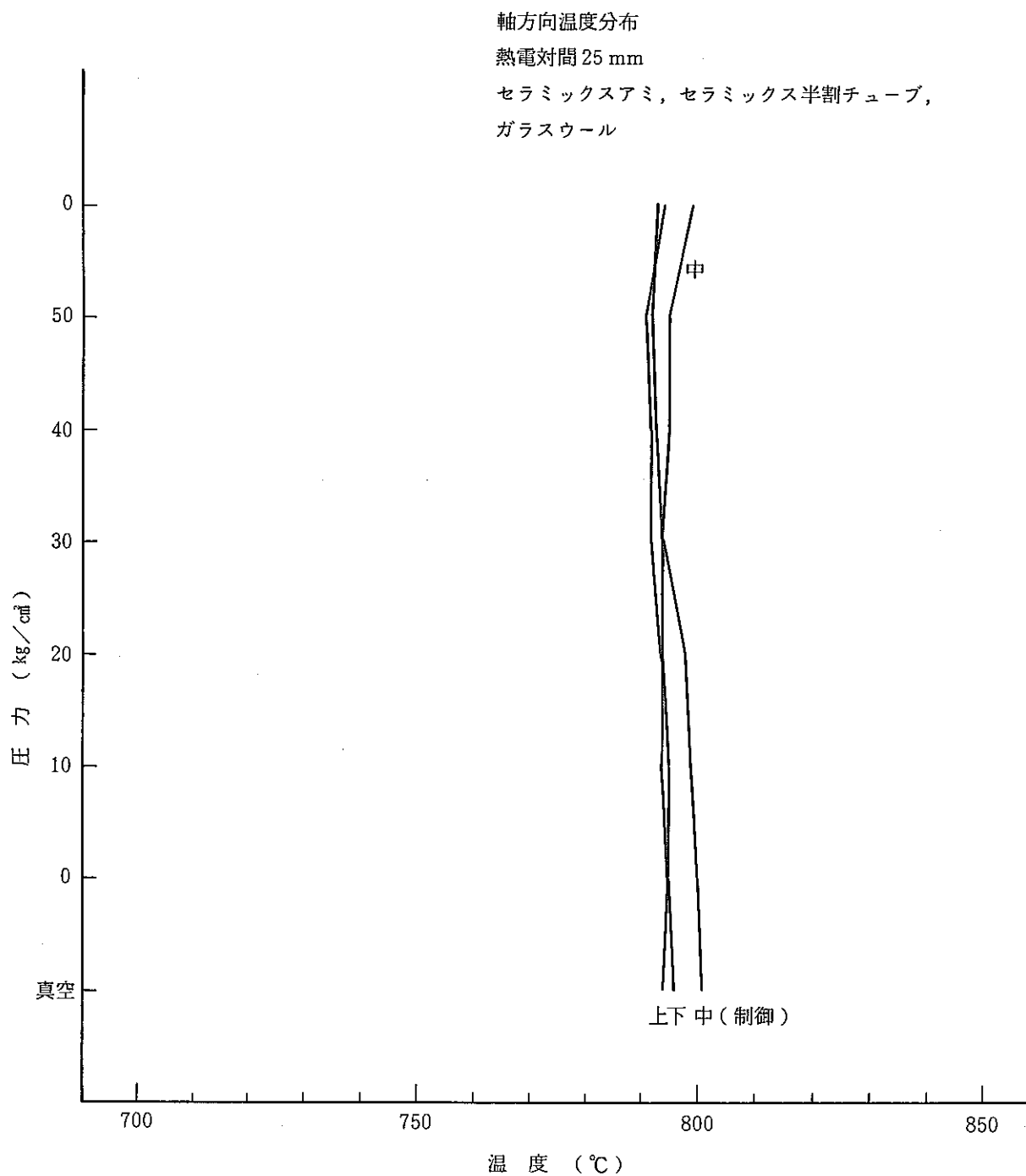


図- 28 温度分布測定結果

PAA 122 - 4

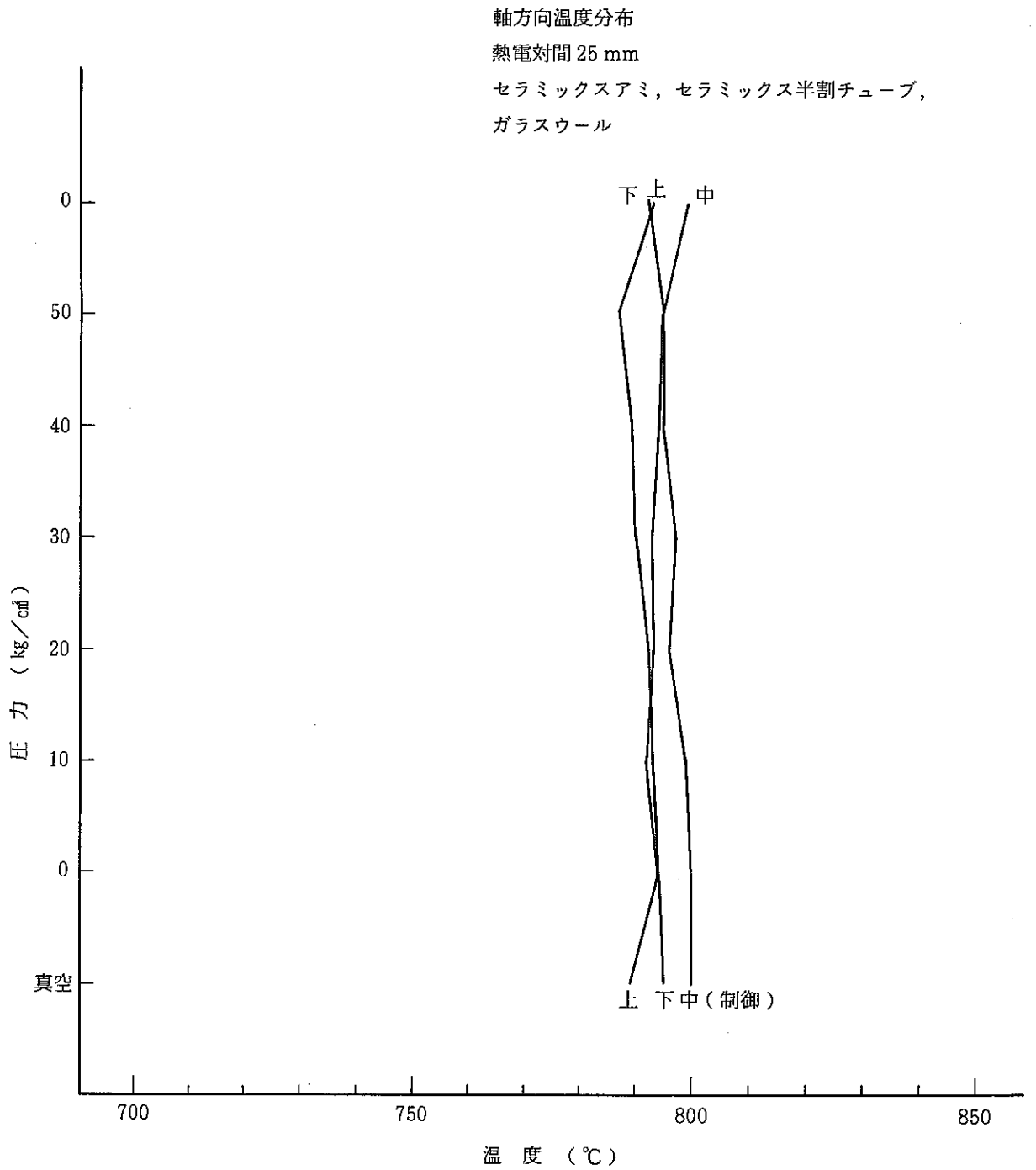


図-29 温度分布測定結果

PAA 122 - 6

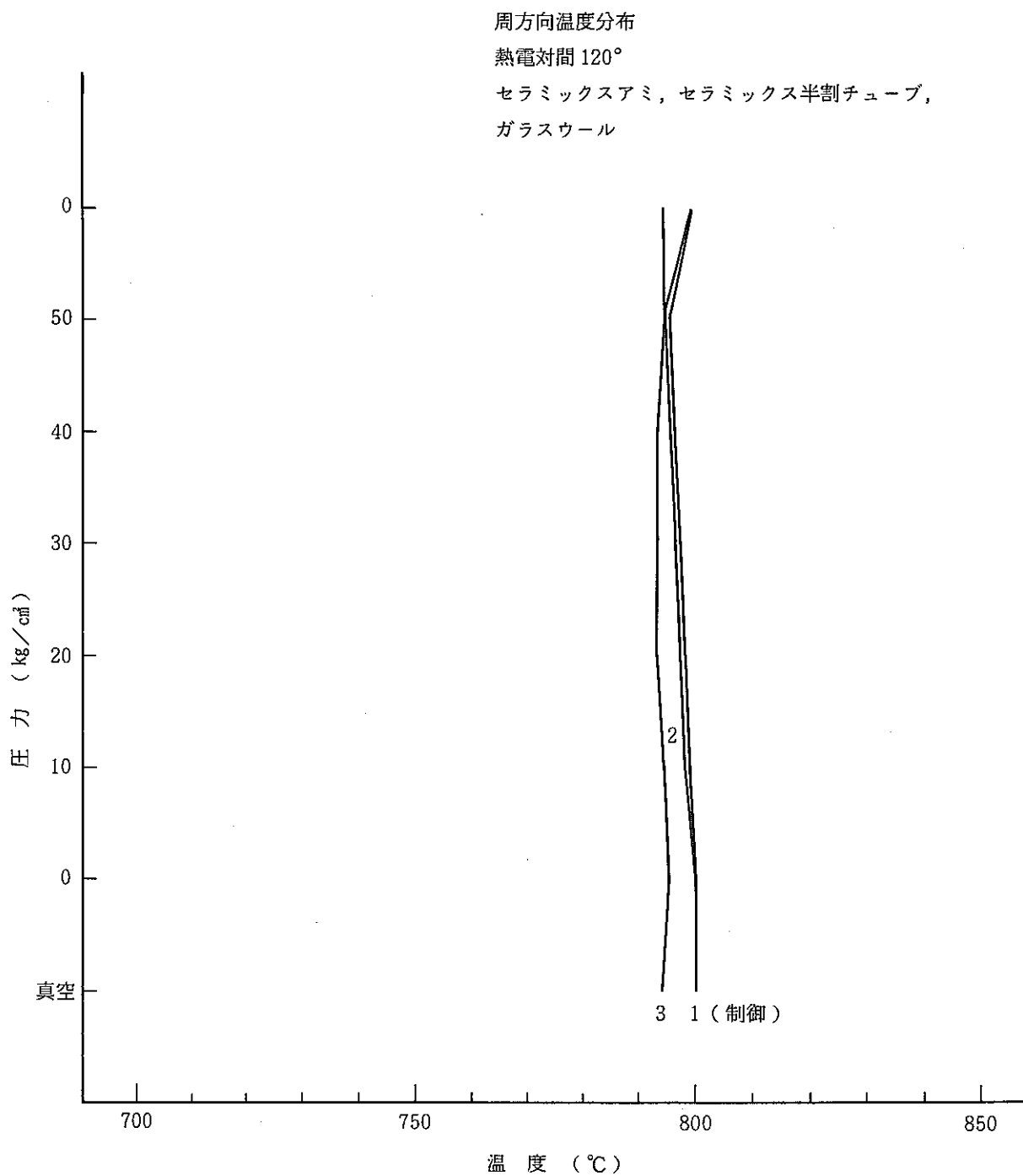


図-30 温度分布測定結果

PAA 122 - 7

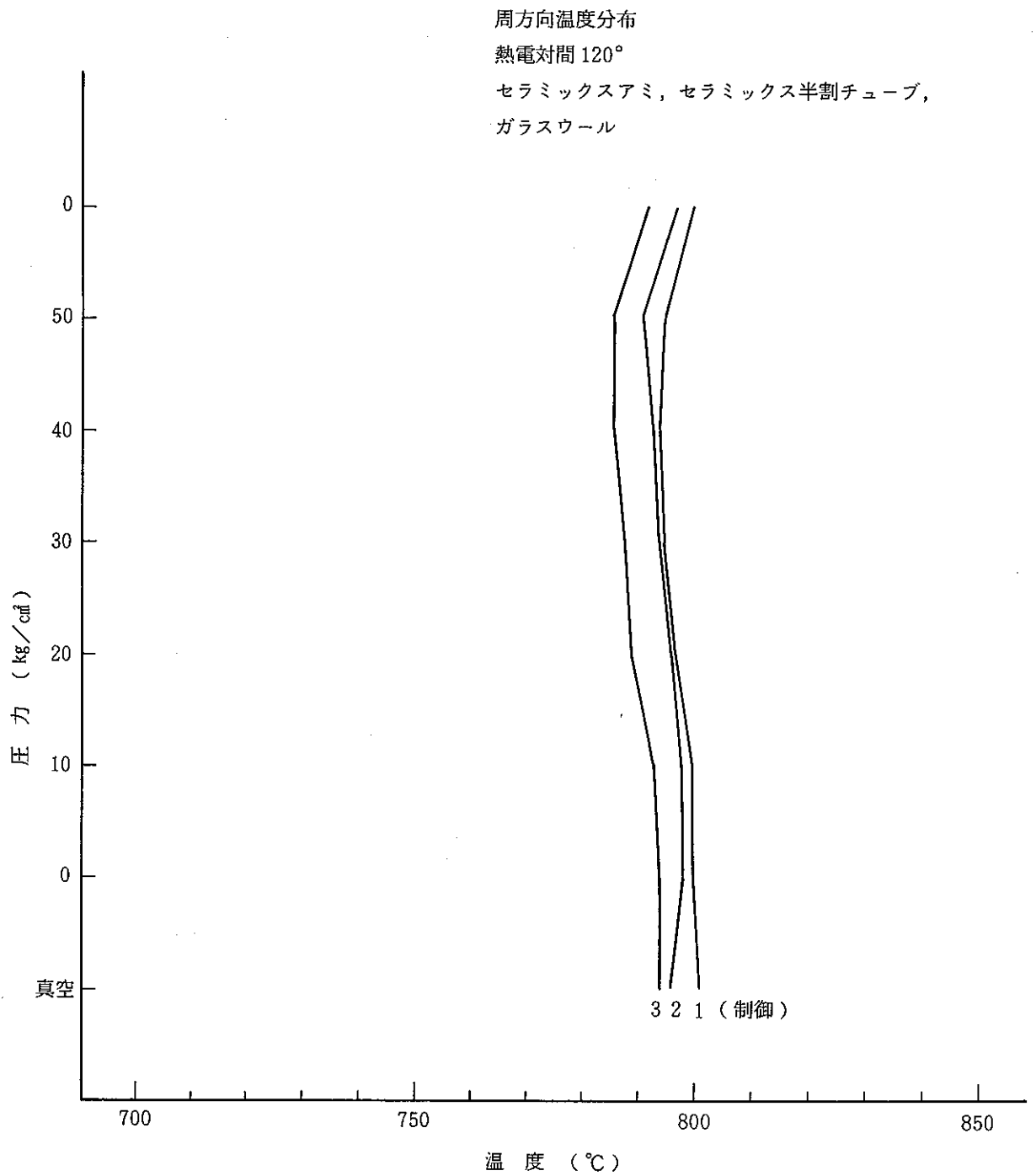


図-31 温度分布測定結果

PAA 122-12

軸方向温度分布
 熱電対間 25 mm
 セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
 ガラスウール
 ※セラミックスチューブの半割してある部分の
 すきまからガラスウールを詰め込む

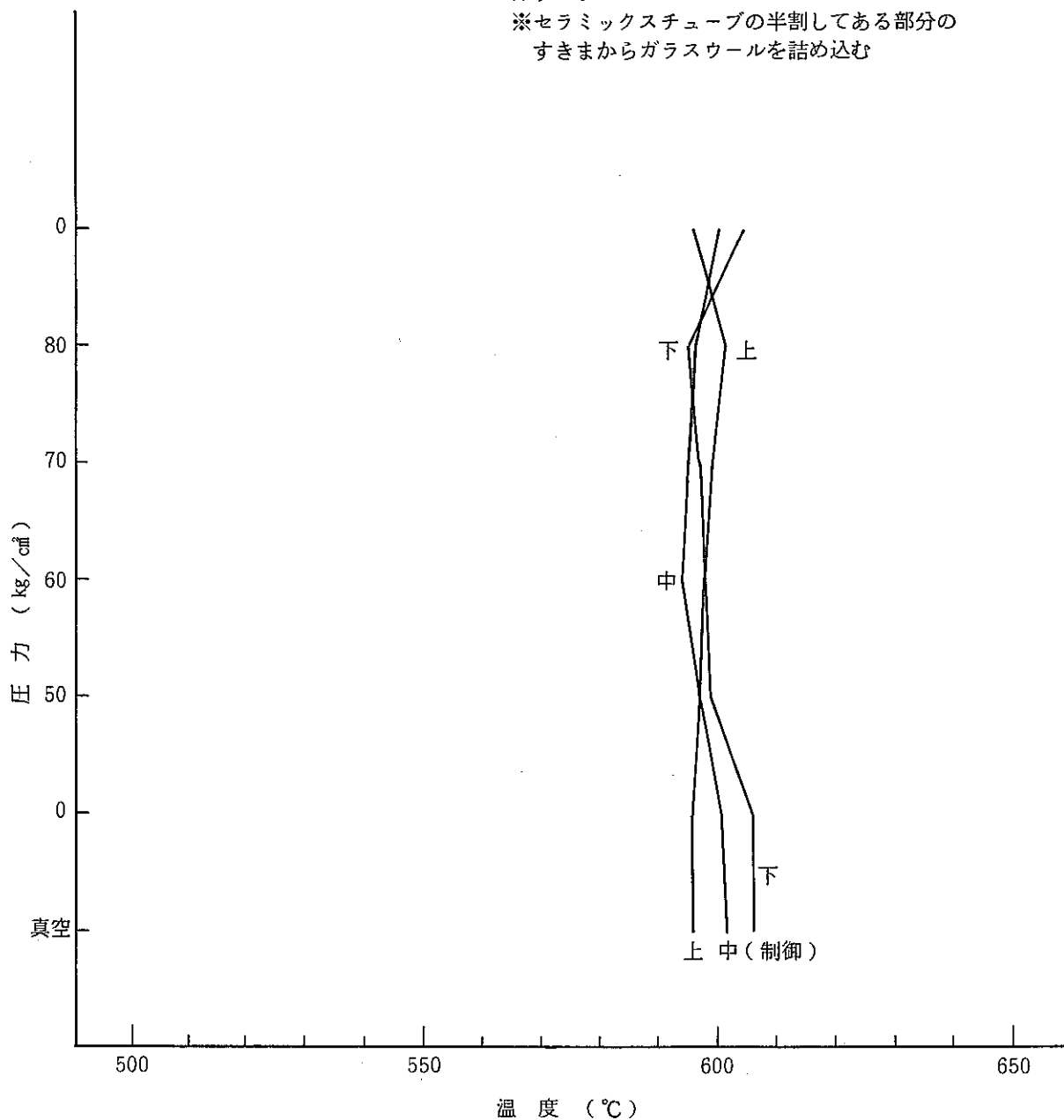


図-32 温度分布測定結果

PAA 122 - 12

軸方向温度分布
 熱電対間 25 mm
 セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
 ガラスウール
 ※セラミックスチューブの半割してある部分の
 すきまからガラスウールを詰め込む。

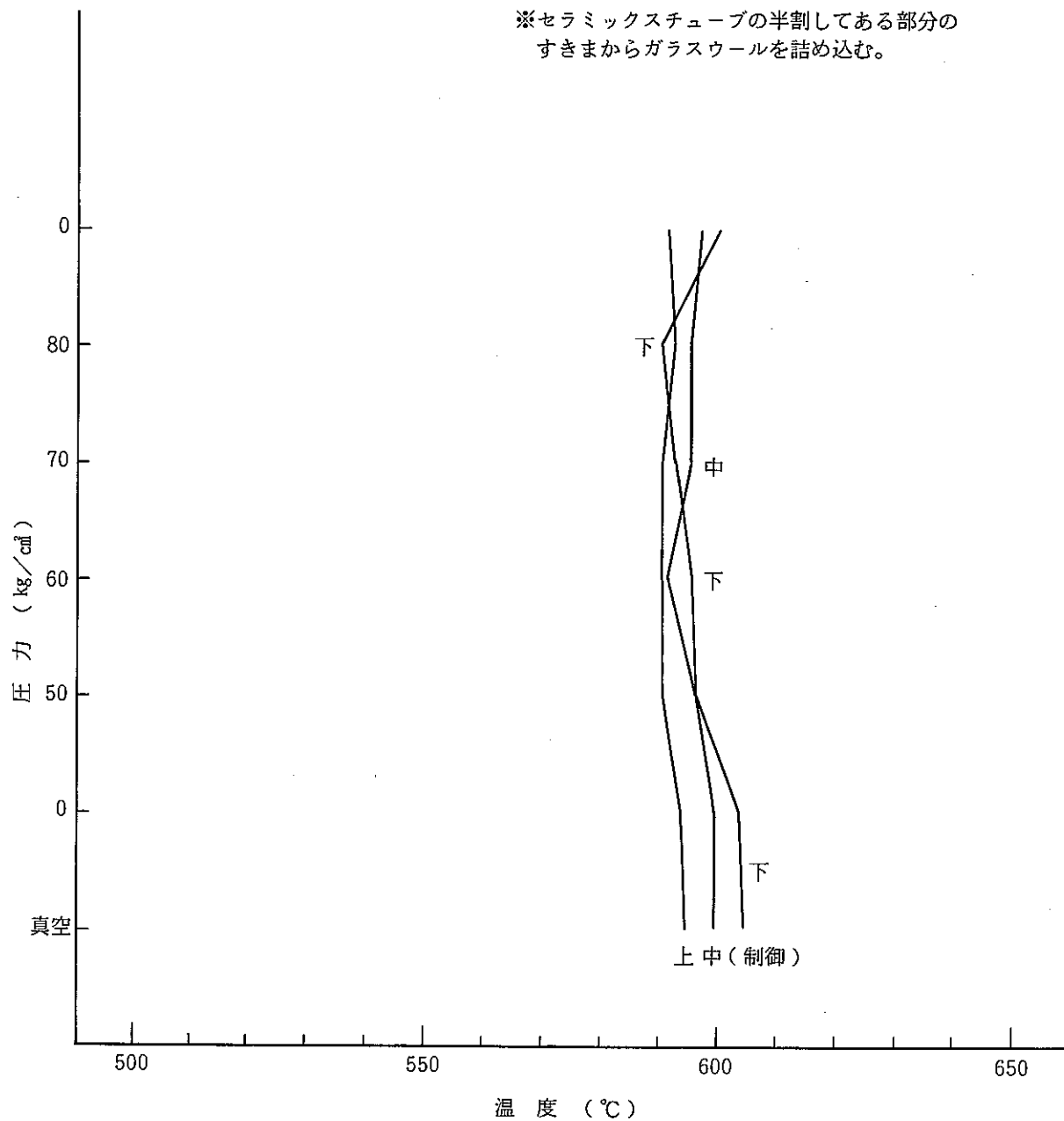


図-33 温度分布測定結果

PAA 122 - 12

軸方向温度分布
 熱電対間 25 mm
 セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
 ガラスウール
 ※セラミックスチューブの半割してある部分
 すきまからガラスウールを詰め込む。

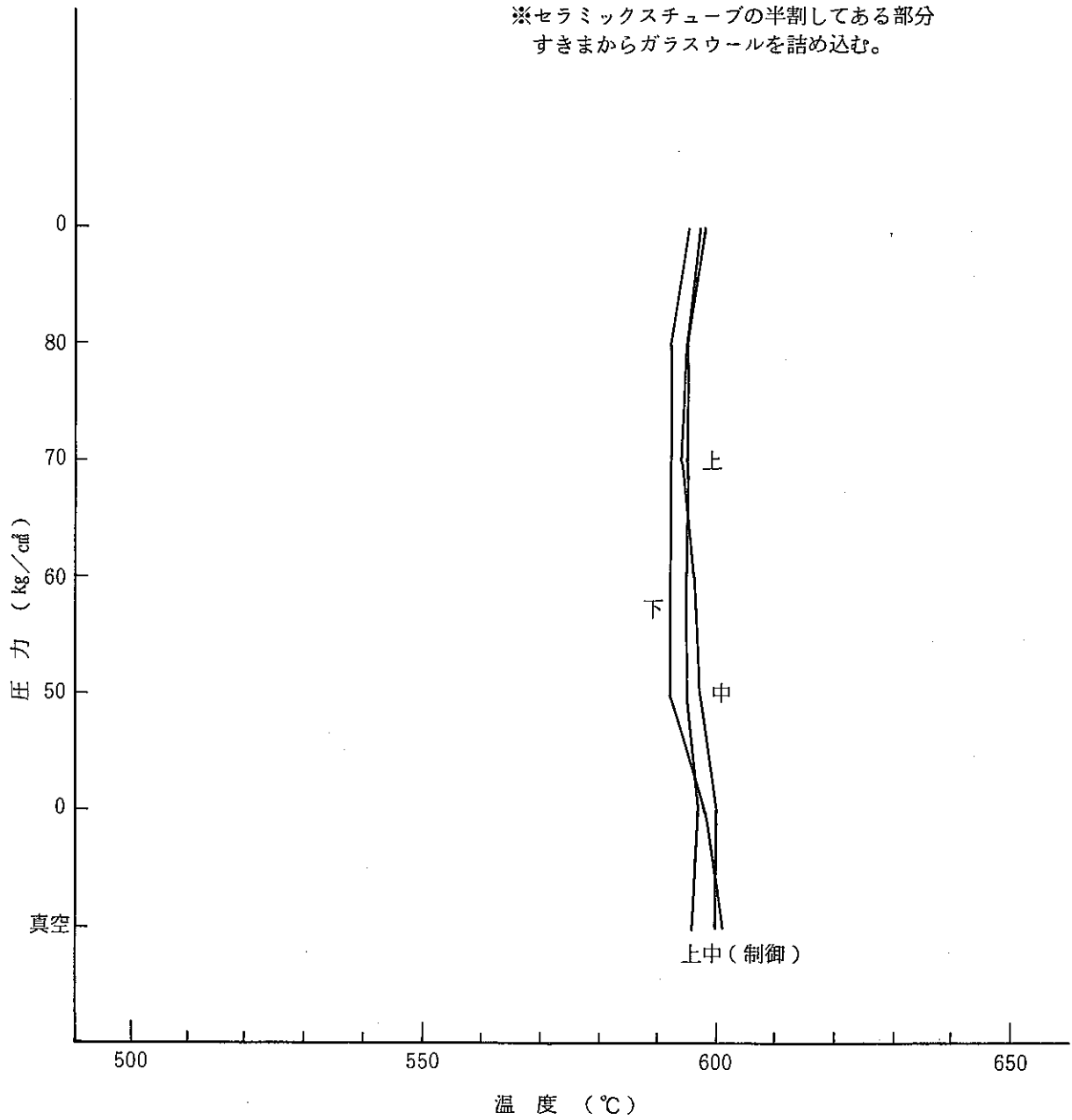


図-34 温度分布測定結果

PAA 122 - 11

軸方向温度分布
熱電対間 25 mm
セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール
※セラミックスチューブの半割してある部分の
すきまからガラスウールを詰め込む。

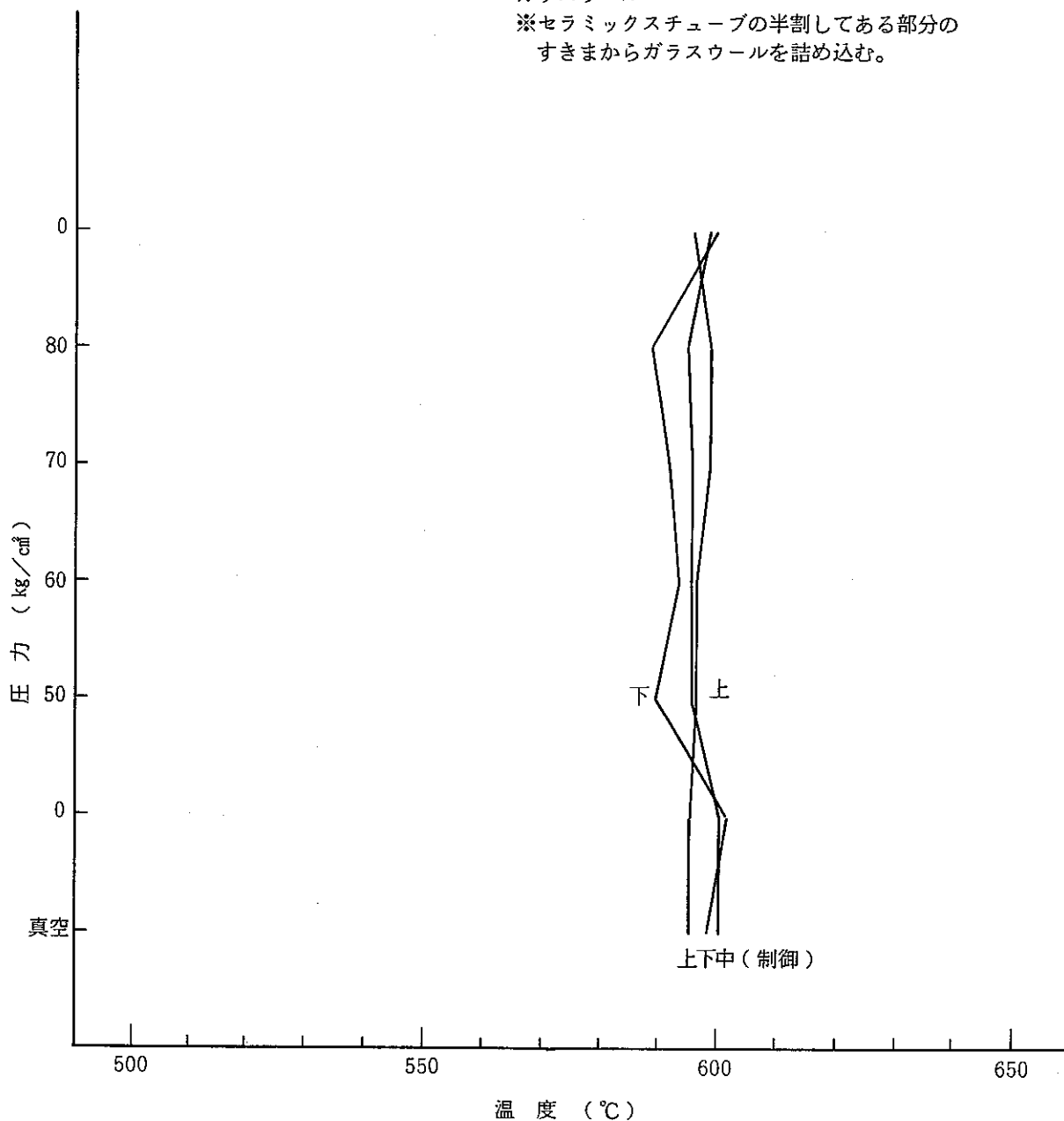


図-35 温度分布測定結果

PAA 122 - 5

軸方向温度分布
 熱電対間 25 mm
 セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
 カプセルウール
 ※セラミックスチューブの半割してある部分の
 すきまからガラスウールを詰め込む

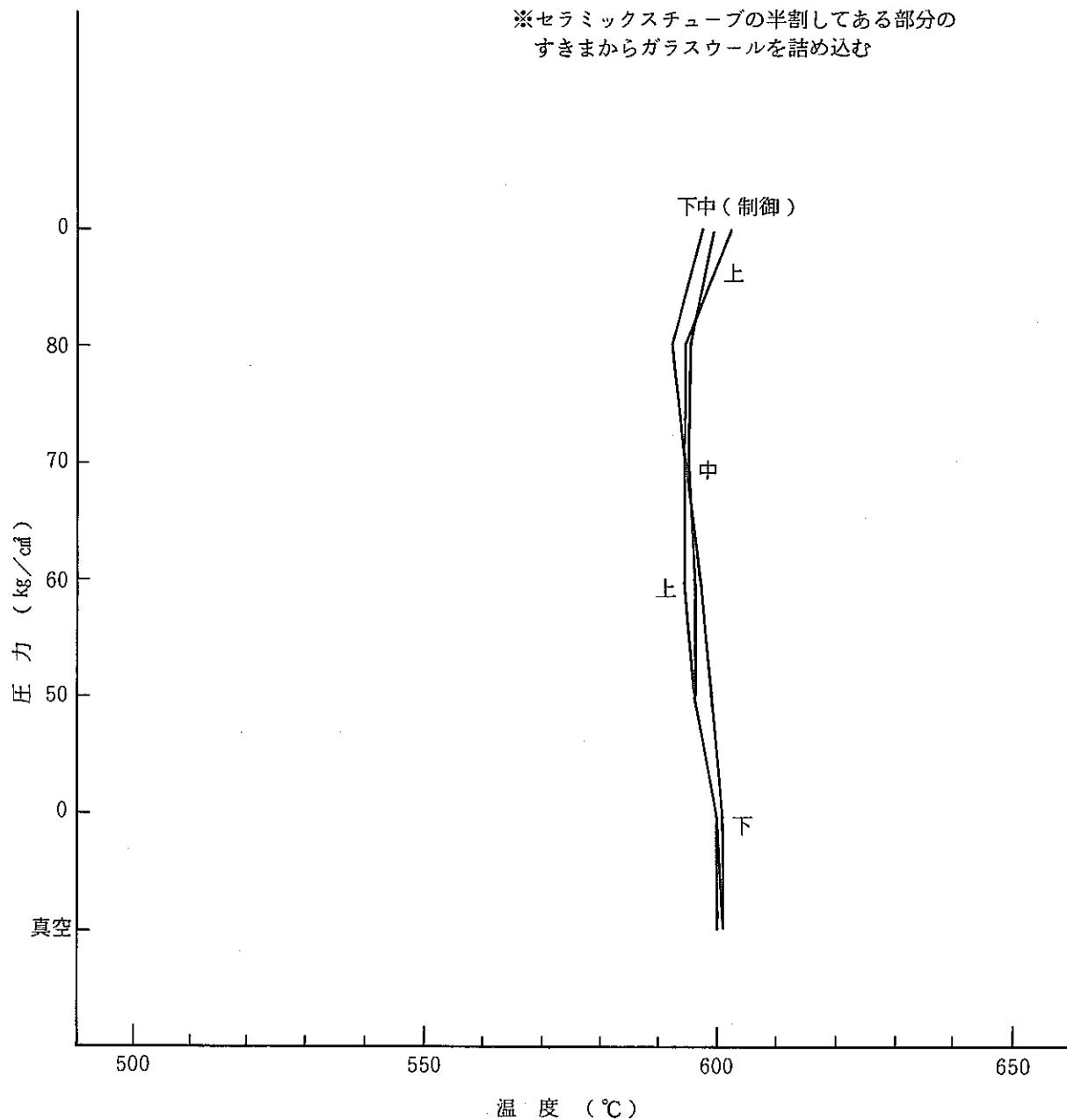


図-36 温度分布測定結果

PAA 122 - 13

周方向温度分布
熱電対間 120°
セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール
※セラミックスチューブの半割してある部分の
すきまからガラスウールを詰め込む

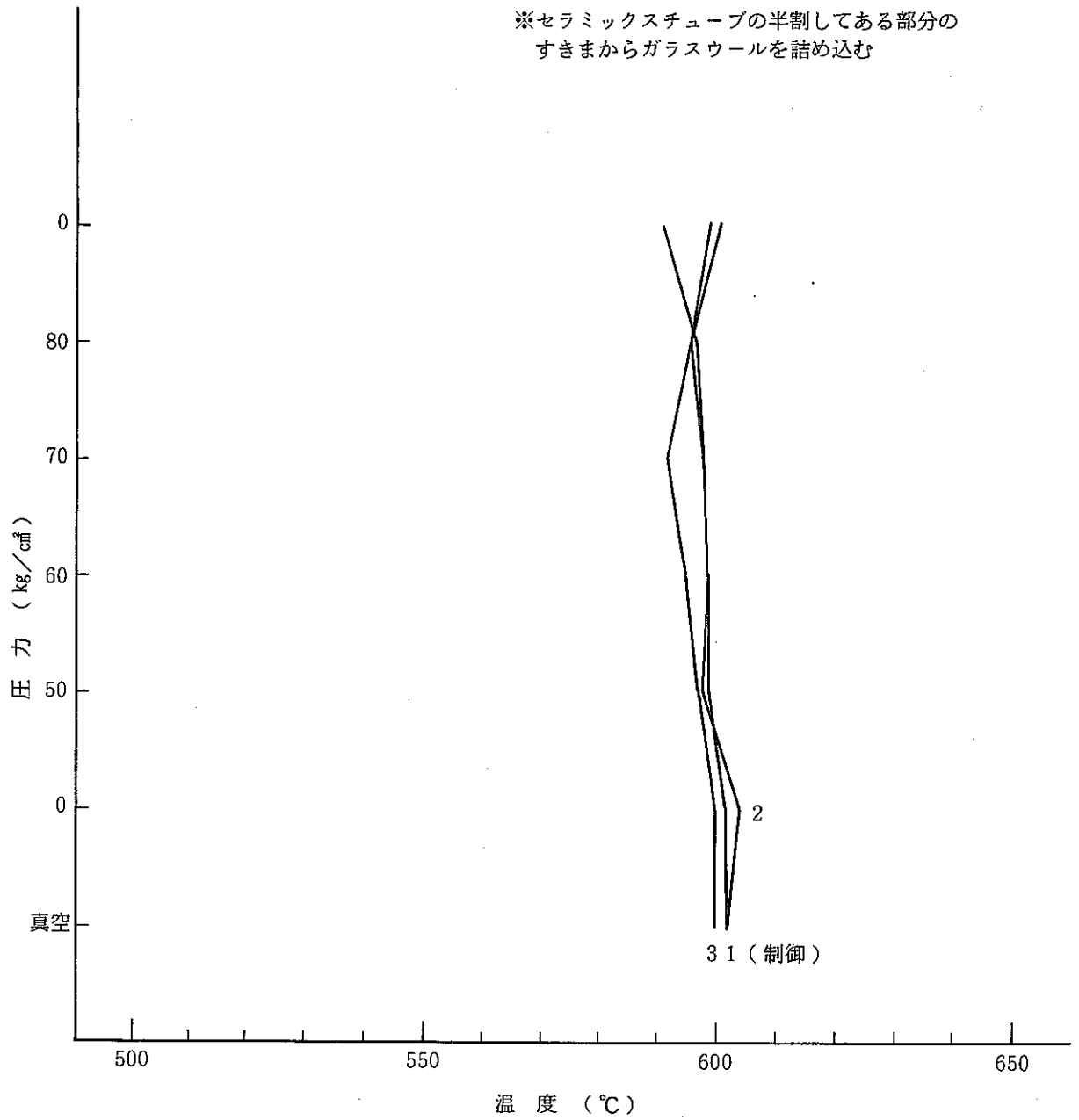


図-37 温度分布測定結果

PAA 122 - 13

周方向温度分布
熱電対間 120°
セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール
※セラミックスチューブの半割してある部分の
すきまからガラスウールを詰め込む。

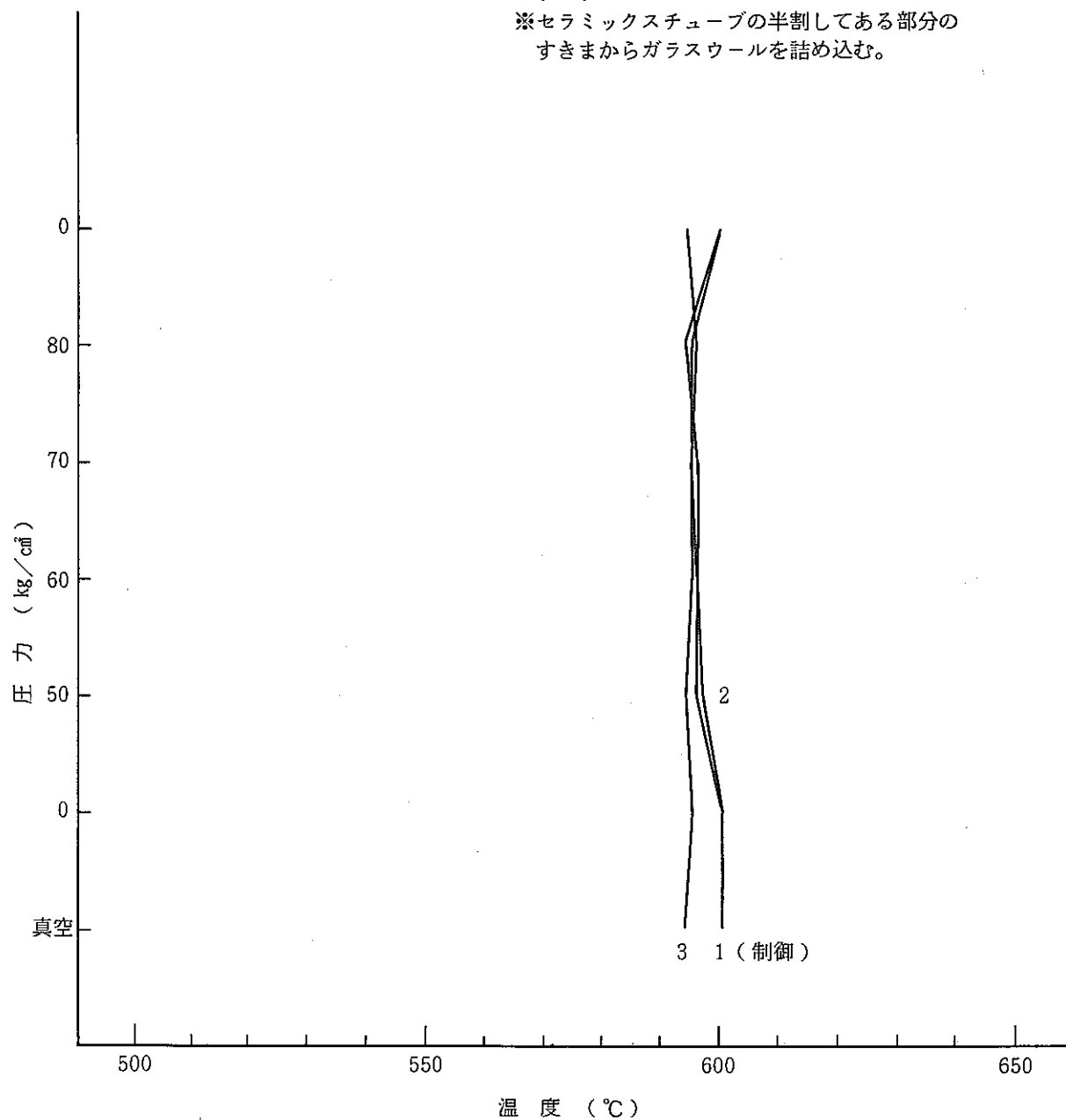


図-38 温度分布測定結果

PAA 122 - 8

軸方向温度分布

熱電対間 25 mm

セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール

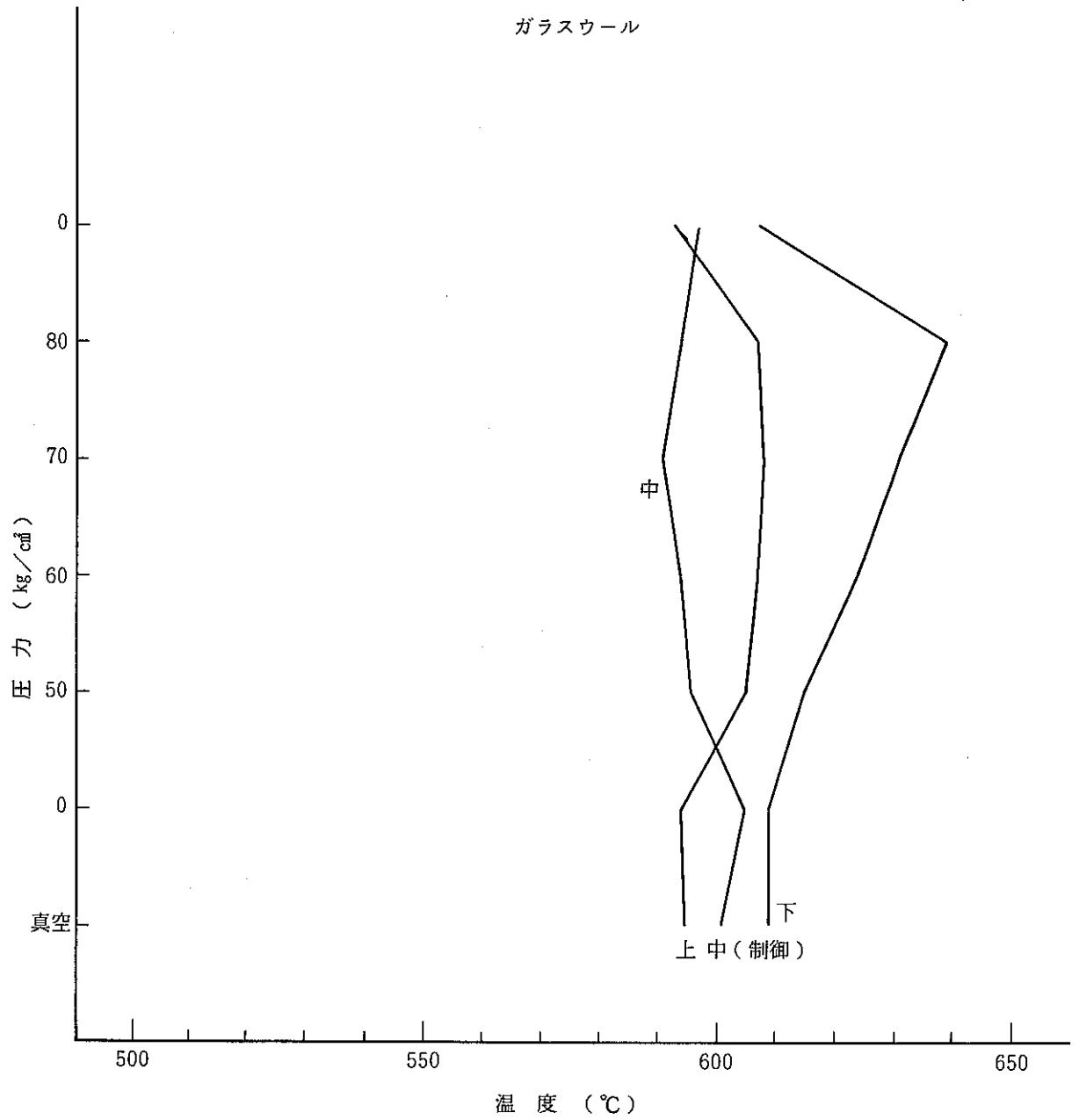


図-39 温度分布測定結果

PAA 122 - 11

軸方向温度分布
熱電対間 25 mm
セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール

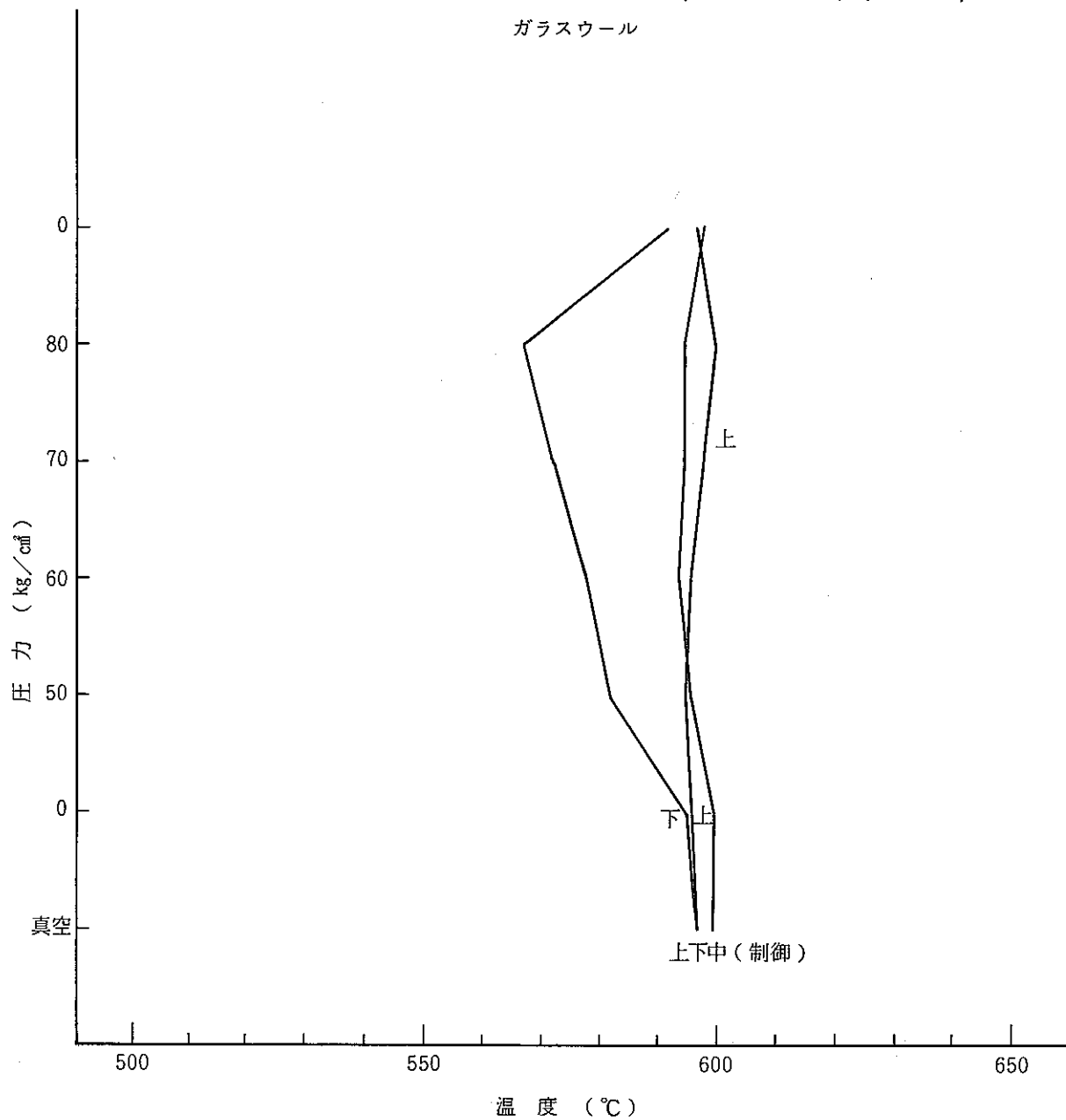


図-40 温度分布測定結果

PAA 122 - 8

軸方向温度分布
熱電対間 25 mm
セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール

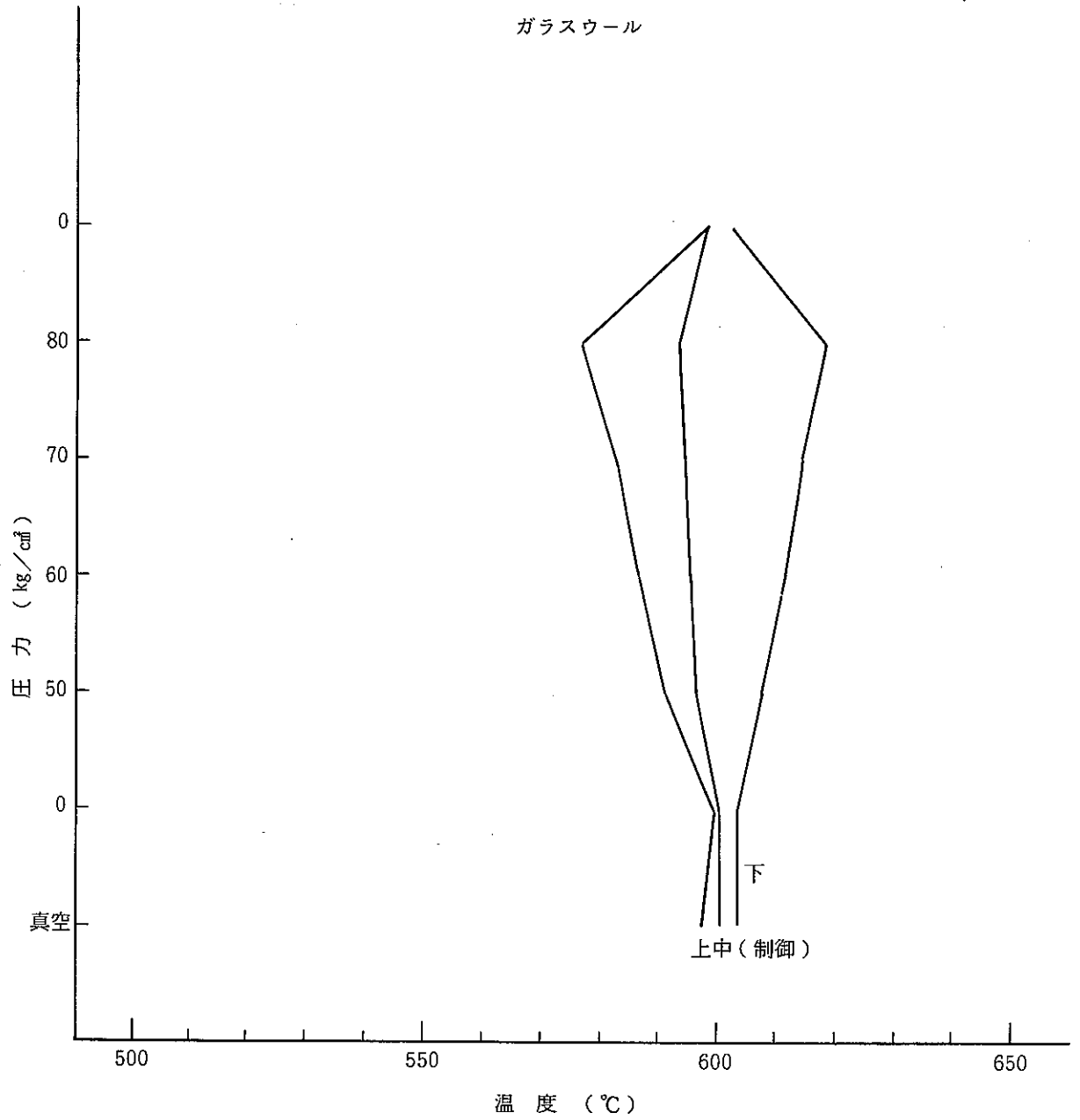


図- 41 温度分布測定結果

PAA 122 - 4

軸方向温度分布

熱電対間 25 mm

セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール

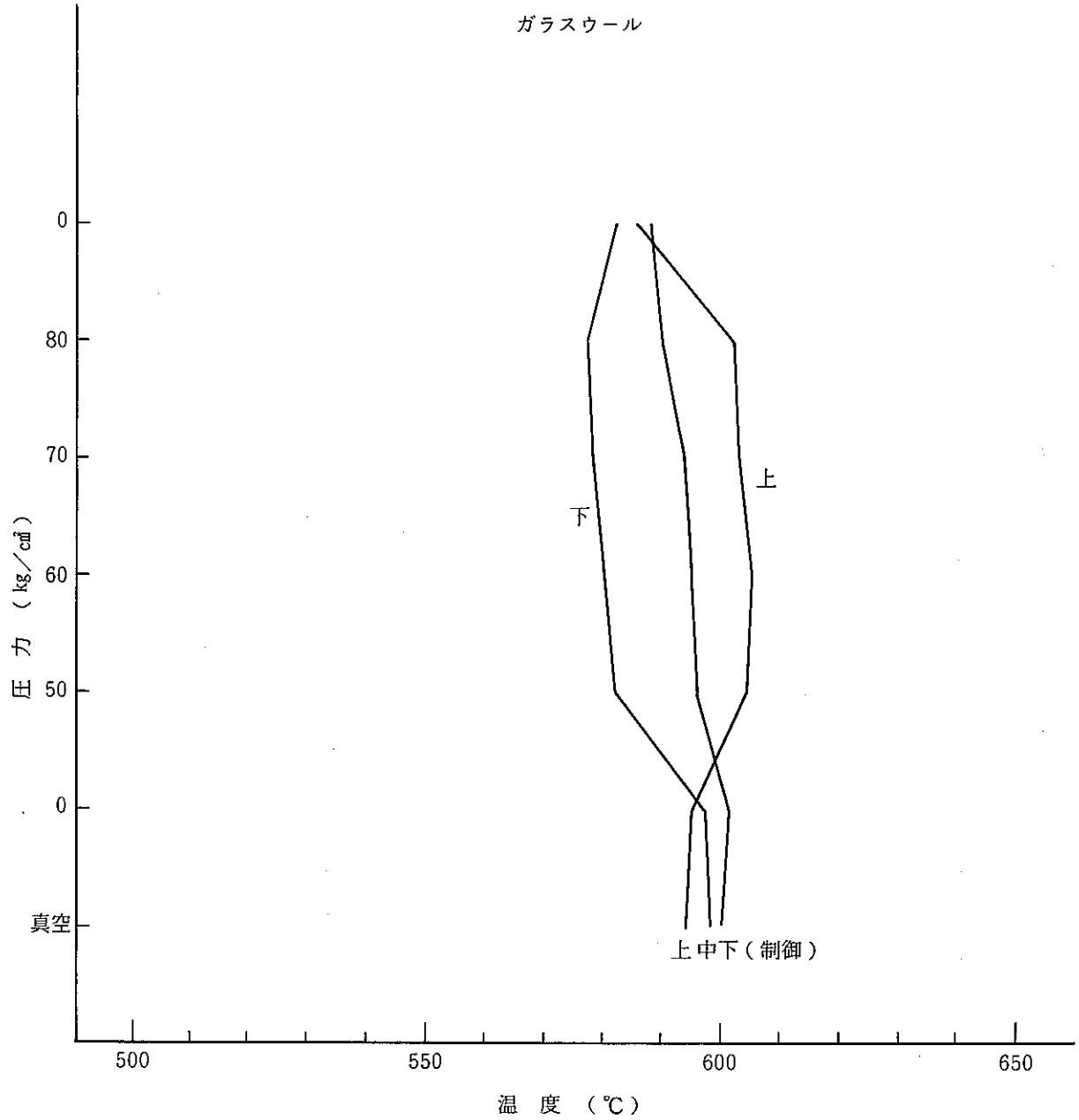


図-42 温度分布測定結果

PAA 122 - 5

軸方向温度分布
熱電対間 25 mm
セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
ガラスウール

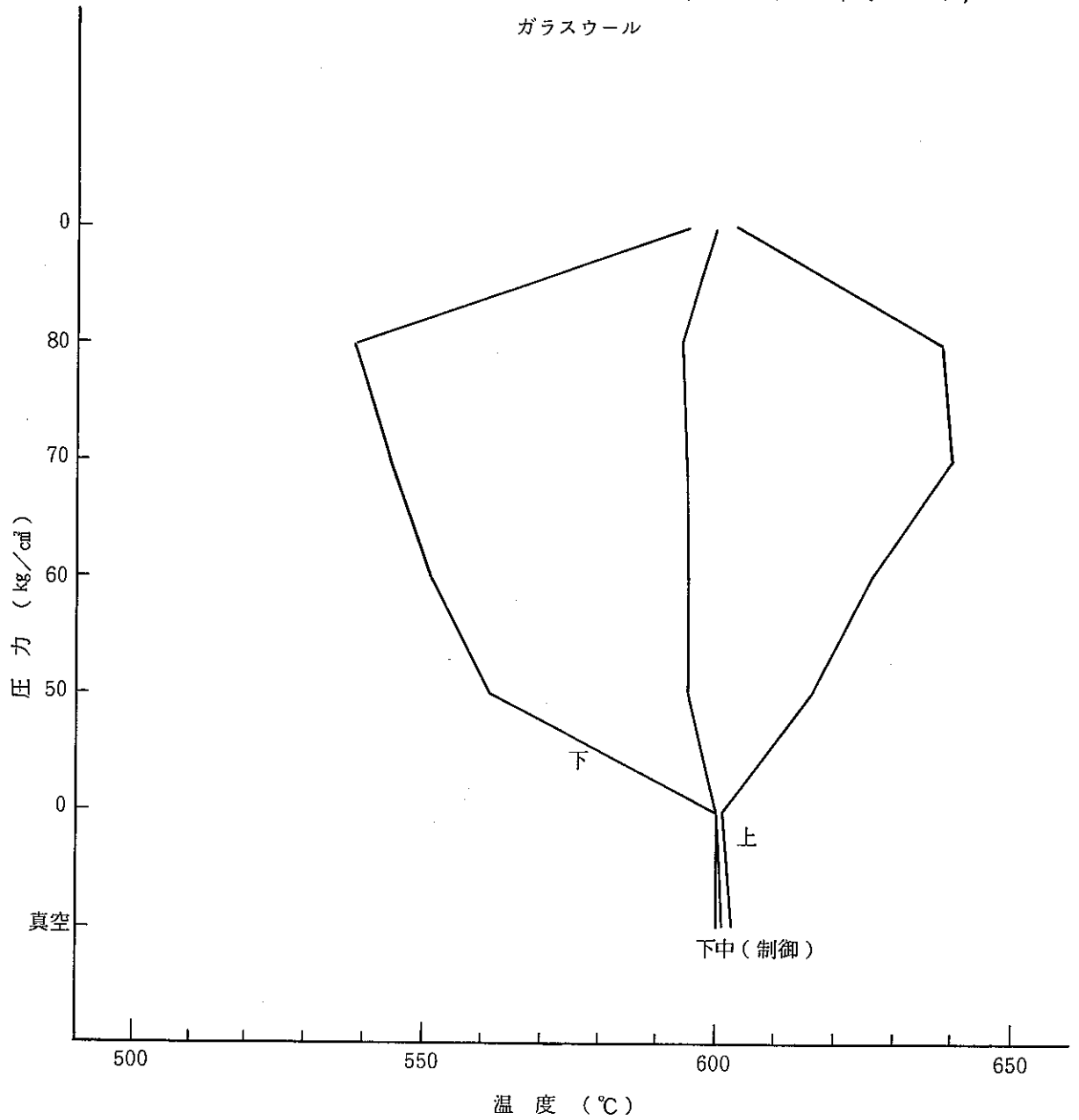


図-43 温度分布測定結果

PAA 122 - 5

周方向温度分布
 熱電対間 120°
 セラミックスアミ, セラミックス半割チューブ,
 ガラスウール

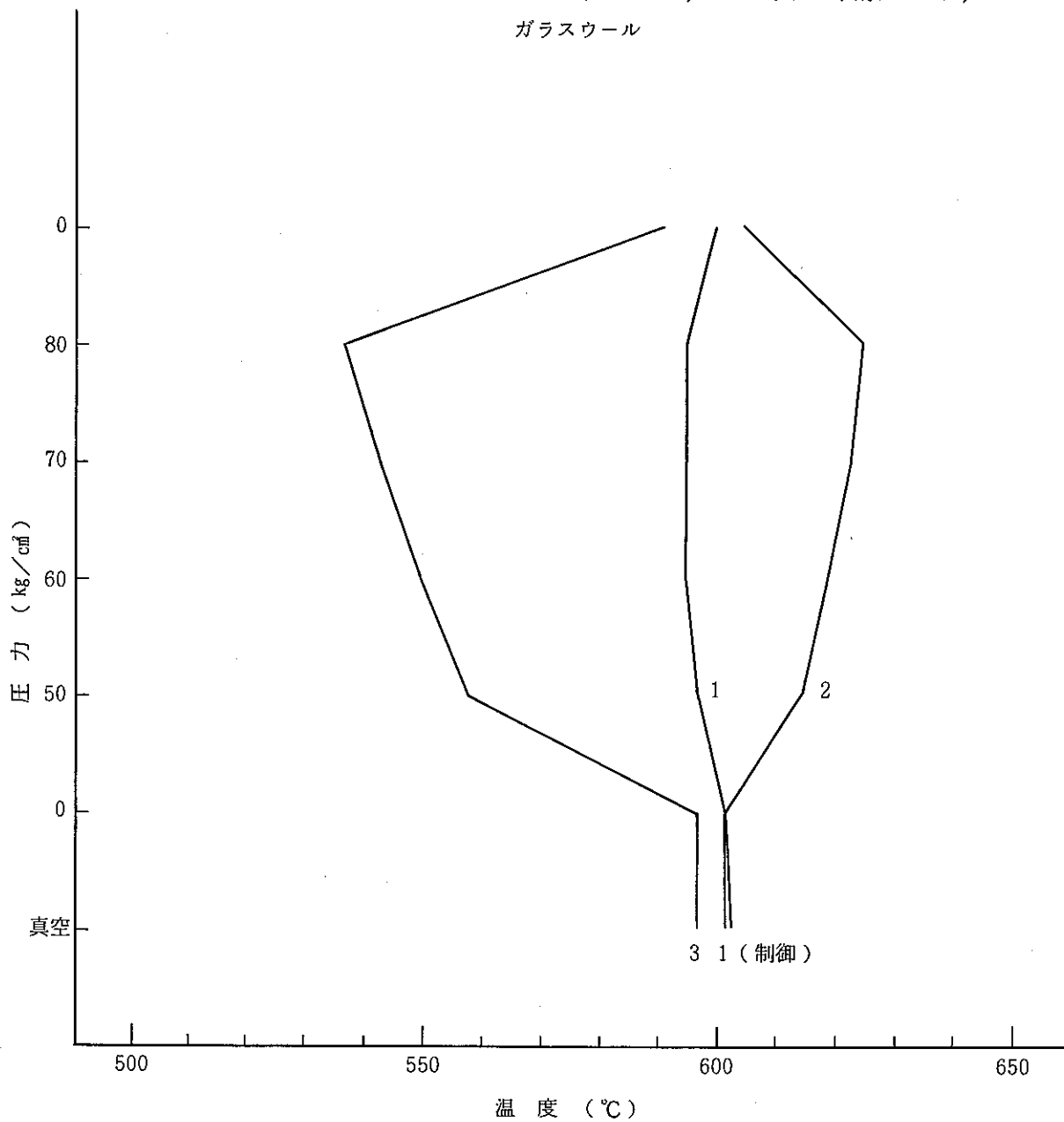


図-44 温度分布測定結果