

「もんじゅ」ナトリウムボンド型制御要素実機条件模擬試験(I)

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2004年3月

三菱重工業株式会社

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。
したがって、その利用は限られた範囲をとしており、その取扱には十分な注意を払って
ください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別
の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 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

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

This is the confidential document of the Japan Nuclear Cycle Development Institute.
Special permission is required to use this document.

Inquires 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

「もんじゅ」ナトリウムボンド型制御要素実機条件模擬試験(I)*1

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

加藤潤悟*2、田中昌子*2、碇本岩男*2、玉木光男*3、小川伸太*4

要　　旨

本報告書は、「もんじゅ」次世代長寿命制御棒として有望視されているダブルポーラスプラグナトリウムボンド型制御棒を対象として実施した2重C型シュラウド管の吸収材保持に関する予備試験、2重C型シュラウド管の応力解析及びナトリウムボンド型制御要素の長期水中保管試験結果をまとめたものである。

C型シュラウド管の下部構造を設定する目的で、吸収材保持に関する予備試験では、シュラウド管と吸収材との機械的相互作用（Absorber Shroud Mechanical Interaction : ASMI）を模擬して2重C型シュラウド管の吸収材保持機能を確認し、応力解析では、シュラウド管下部端栓と吸収材下端位置をパラメータとして、適切な位置を定めた。

また、長期水中保管試験では、ナトリウムが残存した制御要素試験体を用いて、長期に亘る水中保管で問題が生じないことを確認した。

本試験で得られた成果は以下の通りである。

- (1) ASMI予備試験により、2重C型シュラウド管下部端栓を外側嵌合型にすれば、粉末状態の吸収材を想定しても、吸収材がシュラウド管外に流出することなく、保持機能が確保できることを確認した。
- (2) シュラウド管の応力解析により、シュラウド管下部（外側嵌合）端栓からASMIが発生する吸収体下端までの距離を40mm以上とすれば構造健全性を満足し、50mm

*1 本報告書は、三菱重工業株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号：1502A01387

核燃料サイクル開発機構担当部課室：敦賀本部 国際技術センター 炉心技術開発グループ

*2 三菱重工業株式会社 神戸造船所 原子力機器設計部

*3 三菱重工業株式会社 技術本部 高砂研究所

*4 ニュークリア・デベロップメント株式会社 燃料・炉心研究部

以上とすればシュラウド管の発生応力は弾性範囲内であることが判った。これより実機では上記寸法を50mm以上とすることで、構造健全性を確保できる見通しを得た。

- (3) 長期水中保管試験により、ナトリウムボンド型制御棒集合体（制御要素）をナトリウム洗浄設備で洗浄した際、制御要素内のナトリウムが残留した状態で水プールに保管しても、ナトリウムが徐々に反応するだけで温度上昇、水素発生共に僅かであり、安全上の問題が生じないことを確認した。
- (4) これら(1)～(3)の成果により、今までに実施してきた研究成果と合わせ、長寿命制御棒の開発課題は殆ど解決され、技術的成立性は見通せたので、今後は開発段階から実機製作に向けた実証、基本設計段階に達したと言えよう。

Tests of a sodium bonded type control element of "Monju" with the actual conditions -- part 1^{*1}

Jungo Katoh^{*2}, Masako Tanaka^{*2}, Iwao Ikarimoto^{*2}, Mitsuo Tamaki^{*3}, and Shinta Ogawa^{*4}

Abstract

This report provides a summary of the following three experimental and analytical results conducted on the sodium bonded double porous-plug type control element : the pretest of retention of the absorber in the double C-type shroud tube (the ASMI test); the stress analysis of the double C-type shroud tube; and the long-term submersion test of the sodium bonded type control element.

The objective of the ASMI test and the stress analysis is to define the shroud tube's bottom structure. First, simulating the absorber shroud mechanical interaction (ASMI), we checked the function of absorber holding of the double C-type shroud tube. Second, we conducted the stress analysis, changing the distance between the end plug of the tube and the bottom end of the absorber, to determine proper position of the absorber.

In addition, we conducted the long-term submersion test of the control element on which sodium residues had been left, and confirmed that no trouble occurred even though the element was submerged for a long time.

The results of the above tests and analysis are as follows :

- (1) On the conditions that the end plug of the shroud tube was fitted from outside of the double C-type shroud tube was double-layered, we checked through the ASMI test that no absorber leaked and the holding property was secured even though the absorber be powdery.
- (2) The stress analysis showed that the structural integrity was satisfied when the distance between the end plug of the tube and the bottom end of the absorber was 40mm or longer, and that the

*1 Work performed by Mitsubishi Heavy Industries,Ltd. under the contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.
Contract Number : 1502A01387
JNC Liaison : JNC Tsuruga Head Office, International Cooperation and Technology Development Center, Core Development Group

*2 Nuclear Plant Component Designing Dept. Kobe Shipyard & Machinery Works Mitsubishi Heavy Industries,Ltd.

*3 Takasago Research & Development Center Mitsubishi Heavy Industries,Ltd.

*4 Nuclear Fuel And Core Research & Development Dept. Nuclear Development Corporation

stress in the shroud tube was within the elastic range when the distance was 50mm or longer.

From these results, we could assure the structure integrity of 50mm distance case.

- (3) The result of the long-term submersion test showed that no trouble occurred when the sodium bonded type control rod assembly (control element) is stored under water with sodium residues after cleaning in the sodium cleansing facility, the temperature increase and the generation of the hydrogen were small, since the sodium reacted slowly with water.
- (4) From the results (1) to (3), and the results of our previous research , the R&D items associated with the long-life control rod have been almost resolved and this type of control rod is technically feasible. It can therefore be said that the design phase is now from the early development to the actual manufacturing stage.

目 次

	頁
1. 概要	1
2. ASMI 予備試験	2
2.1 概要	2
2.2 試験方法	2
2.3 試験結果	5
2.4 評価	6
3. シュラウド管応力評価	18
3.1 概要	18
3.2 解析条件	18
3.3 解析結果	20
3.4 評価	21
4. 長期水中保管試験	56
4.1 概要	56
4.2 試験方法	56
4.3 試験結果	59
4.4 評価	59
5. まとめ	71
6. 参考文献	72
付録 長寿命制御棒構造図	付-1

表リスト

	頁
表 3-1 SUS316 20% CW 材の熱膨張率	22
表 3-2 SUS316 20% CW 材の弾塑性応力ひずみ関係式	23
表 3-3 SUS316 20% CW 材のスエリング式	24
表 3-4 SUS316 20% CW 材の照射クリープひずみ式	25
表 3-5 評価に用いる中性子束 (0.1MeV 以上)	26

図リスト

	頁
図 2-1 ASMI 予備試験体	7
図 2-2 ASMI 予備試験用拡管治具	8
図 2-3 ASMI 予備試験装置	9
図 2-4 シュラウド管の歪み分布（内側嵌合型）	10
図 2-5 内側嵌合型でのシュラウド管拡管状況	11
図 2-6 シュラウド管の歪み分布（外側嵌合型）	12
図 2-7 シュラウド管の歪み分布（外側嵌合型限界拡管）	13
図 3-1 シュラウド管の押し広げによる軸方向の変形と軸方向曲げ応力の発生部位	27
図 3-2 ペレットの変形量	27
図 3-3 SUS316 20% CW 材の弾塑性応力ひずみ関係 (T=420°C)	28
図 3-4 解析モデル	29
図 3-5(1/4) 軸方向応力分布	30
図 3-5(2/4) 軸方向応力分布	31
図 3-5(3/4) 軸方向応力分布	32
図 3-5(4/4) 軸方向応力分布	33
図 3-6(1/4) 相当応力分布 (Mises)	34
図 3-6(2/4) 相当応力分布 (Mises)	35
図 3-6(3/4) 相当応力分布 (Mises)	36
図 3-6(4/4) 相当応力分布 (Mises)	37
図 3-7(1/2) 相当塑性ひずみ分布	38
図 3-7(2/2) 相当塑性ひずみ分布	39
図 3-8(1/4) 相当クリープひずみ分布	40
図 3-8(2/4) 相当クリープひずみ分布	41
図 3-8(3/4) 相当クリープひずみ分布	42
図 3-8(4/4) 相当クリープひずみ分布	43
図 3-9(1/2) スリット部の変化	44

図 3-9(2/2)	スリット部の変化	45
図 3-10(1/4)	ペレット下端部での応力及びひずみ分布 (4cycle 末期)	46
図 3-10(2/4)	ペレット下端部での応力及びひずみ分布 (4cycle 末期)	47
図 3-10(3/4)	ペレット下端部での応力及びひずみ分布 (4cycle 末期)	48
図 3-10(4/4)	ペレット下端部での応力及びひずみ分布 (4cycle 末期)	49
図 3-11(1/4)	ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみ履歴	50
図 3-11(2/4)	ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみ履歴	51
図 3-11(3/4)	ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみ履歴	52
図 3-11(4/4)	ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみ履歴	53
図 3-12	ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみとパラメータ L の関係	54
図 3-13	下部スリーブの応力評価モデル	55
図 4-1	水中保管試験体	61
図 4-2	水中保管試験装置	62
図 4-3	水中保管試験装置 系統図	63
図 4-4	水素ガス発生頻度の推移	64
図 4-5	試験体内外の温度推移	65
図 4-6	ナトリウム反応量の推移	66
図 4-7	水素ガス発生のピーク前後での試験体内外温度挙動	67

写真リスト

	頁
写真 2-1 拡管治具外観	14
写真 2-2 A S M I 予備試験装置外観	15
写真 2-3 拡管時の外観（内側嵌合型試験体下部）	16
写真 2-4 限界拡管時の外観（外側嵌合型端栓）	17
写真 4-1 水中保管試験体	68
写真 4-2 水中保管試験装置外観	69
写真 4-3 水素ガス放出状況	70

1. 概要

ナトリウムボンド型制御棒は構造検討⁽¹⁾、熱流動評価⁽²⁾、水流動試験⁽³⁾、シュラウド管等の試作試験^{(4),(5),(6)}により使用中の基本機能が確認されて「もんじゅ」次世代長寿命型制御棒の第一候補と目されており、実機への適用に向けての課題は、使用済み制御棒の洗浄・保管処理方法及び、リロケーション抑制のための2重C型シュラウド管の吸収材保持機能の確認に絞られてきている。

「もんじゅ」の現状設備では、使用済制御棒はナトリウム洗浄設備において温潤ガス洗浄及び脱塩水洗浄を行い缶詰缶に密封し水中プールに貯蔵される。ナトリウムボンド型制御棒では、制御要素の下部ポーラスプラグから、ボンドナトリウムのドレンが期待されるものの、B₄Cペレットの欠片による下部ポーラスプラグの目詰まり等によって、要素内にボンドナトリウムが残留する可能性が否定できない。従って、実機への適用にあたっては、「もんじゅ」の洗浄設備での洗浄方法を模擬した試験を実施し、その洗浄性・安全性を確認しておく必要があり、昨年度の試験⁽⁷⁾により成立性を確認した。

本年度は、もう一つの課題である吸収材保持機能の確認に向け、2重C型シュラウド管の下部構造を定める目的で、ASMI (Absorber Shroud Mechanical Interaction) 予備試験と、ASMI時のシュラウド管応力評価を実施する。また、仮に何らかの理由でピン内のナトリウムがドレンされず、残留したとすれば、使用済み制御棒を水中保管する場合には、廃棄物処理の観点より保管中にピン内ナトリウムの穏やかな反応が進み、ナトリウムが除去されることが望ましい。このことから、「もんじゅ」水プールでの長期保管を模擬した長期水中試験を実施し、安全性を確認すると共に保管方法の成立性を評価する。

2. ASM I 予備試験

2.1 概要

長寿命型制御棒では、制御棒寿命因子である吸収材 (B_4C ペレット) スエリングによるACMI (Absorber Clad Mechanical Interaction) を防止するため、 B_4C ペレットと被覆管との初期ギャップを大きく取る必要がある。しかし、 B_4C ペレットは燃焼初期でもペレット内温度分布により割れが生じることが知られており、ギャップの効果を維持するには、この割れによってペレットの小片（欠片）が被覆管とのギャップに入り込むこと（リロケーション）を防止する必要がある。

リロケーションを抑制するには B_4C ペレットの周囲にシュラウド管を設置することが有効であるが、シュラウド管構造が単なる円筒の場合には B_4C ペレットのスエリングによって長寿命制御棒の供用期間中にシュラウド管はASM I (Absorber shroud Mechanical Interaction) によって破損してしまうことになる。

このため、4サイクル以上の寿命を確保するには、供用期間中にシュラウド管によるリロケーション抑制（吸収材保持）機能が担保されている必要があり、ASM Iでも破損することなく構造健全性を確保できるC型（スリット付き）シュラウド管の採用を計画している。

C型シュラウド管はスリットが設けてあるので、このスリットから吸収材が流出しないように、スリット位置を 180° ずらした2重のC型シュラウド管構造とする計画になっているが、ASM Iによりスリットが開いた（スリット幅が拡がった）状態でも吸収材を保持できることを確認しておく必要がある。またシュラウド管下端より B_4C ペレット欠片が流出するのを防止する観点からシュラウド管下部構造（シュラウド管下部端栓）を定める必要もあり、2001年度に試作⁽⁶⁾したシュラウド管を用いてASM Iを簡易的に模擬した条件でのASM I 予備試験を実施した。

2.2 試験方法

ASM I 予備試験では、試験体シュラウド管内に拡管治具を設置して、これを拡管させることで B_4C ペレットのスエリング膨張を模擬し、2重C型シュラウド管に所定の周方向歪みを発生させる。またシュラウド管内には B_4C ペレット欠片を模擬した同等硬度の粒子（チタン酸バリウム ($BaTiO_3$) 破碎粒子）を充填しておき、その流出状況を観察した。

(1) 試験体

下部端栓の形状が異なる2種類の試験体を準備した（図2-1参照）。各試験体について以下に記す。

a. 内側嵌合型試験体

内側嵌合型試験体では下部端栓は2重C型シュラウド管内管と嵌合する。下部端栓の外径は2重C型シュラウド管外管の外径と同じ $\phi 13.6\text{mm}$ とした。

下部端栓の嵌合部直径は試験に使用した2重C型シュラウド管内管の内径（実測値）に合わせて $\phi 12.3\text{mm}$ とし、嵌合部長さは組立性を考慮し 10mm とした。

下部端栓のシュラウド管への差し込み長さは 40mm とした。これは後述する外側嵌合型試験体のB₄Cペレットスペーサ全長と同じ条件となるように配慮したものである。 40mm の差し込み長を有するため、組立性を考慮し、差し込み部先端の 20mm までは直径を $\phi 12.2\text{mm}$ とし、嵌合部直径よりも小さめとした。

2重C型シュラウド管の全長は、試験では下端部のみを模擬すれば良いこと、および全長が短い方が小さな力で所定量の拡管を行えることから、 125mm とした。

b. 外側嵌合型試験体

外側嵌合型試験体では下部端栓は2重C型シュラウド管外管と嵌合する。そのため下部端栓の外径は2重C型シュラウド管外管直径よりも大きい $\phi 15.0\text{mm}$ とした。（尚、実機では下部端栓の外径を $\phi 14.8\text{mm}$ 以下とすることで、被覆管との隙間を 0.35mm 以上とし、ナトリウムドレン性を確保できる見通しである。）

下部端栓の嵌合部直径は試験に使用した2重C型シュラウド管外管の外径（実測値）に合わせて $\phi 13.64\text{mm}$ とし、嵌合部長さは組立性を考慮し 10mm とした。

外側嵌合型試験体では下部端栓とB₄Cペレットスペーサを組み合わせて使用する。B₄Cペレットスペーサは最下端のB₄Cペレットがスエリング膨張した時に拡管したシュラウド管と下部端栓の嵌合部に作用する拘束力を緩和することを目的としている。B₄Cペレットスペーサの全長は上記の目的を勘案して暫定的に 40mm とし、直径は2重C型シュラウド管内管の内径よりも若干小さい $\phi 12.2\text{mm}$ とした。

（実機B₄Cペレットスペーサの全長は、今回試験で製作したものの全長 40mm と拡管治具の円錐座2（図2-2参照）の高さ約 10mm を合わせた 50mm 以上となる。）

2重C型シュラウド管の全長は内側嵌合型試験体と同じ 125mm とした。

c. 試験体の主要目

- ・数　　量：内側嵌合型、外側嵌合型で各 1 式
- ・全　　長：155 mm
- ・外側シュラウド管：外径 ϕ 13.6 mm／内径 ϕ 13.0 mm
- ・内側シュラウド管：外径 ϕ 12.9 mm／内径 ϕ 12.3 mm
- ・下部端栓：内側嵌合型、外側嵌合型
- ・主要材質：SUS304
- ・充填粒子：チタン酸バリウム ($BaTiO_3$) 破碎粒子 粒径 $300 \mu m$ 以下
- ・構　　造：図 2-1

(2) 試験装置

試験では拡管治具で B_4C ペレットのスエリング膨張を模擬した 2 重 C 型 シュラウド管の周方向歪みを発生させる。拡管治具を図 2-2 に、またその外観を写真 2-1 に示す。 B_4C ペレットに見立てた 3 個の分割ピースを上下から円錐座 1 と円錐座 2 で挟み込む構造で、分割ピースと円錐座 1、2 はテープ面越しに接触しているため、円錐座 1、2 に圧縮荷重を加えることで分割ピースを外側へ均等に押し出せるようになっている。シュラウド管に発生させる周方向歪みは円錐座 1 と円錐座 2 の相対距離によって調整できる。

試験装置全体を図 2-3 に、またその外観を写真 2-2 に示す。試験体内部に拡管治具を設置し、円錐座 1 の上方に圧縮荷重を加えるための押し棒を挿入し、両締めバイスに次の順序で挟み込む。

a. 内側嵌合型試験体の場合

(上) 押し棒－円錐座 1－分割ピース－円錐座 2－下部端栓 (下)

b. 外側嵌合型試験体の場合

(上) 押し棒－円錐座 1－分割ピース－円錐座 2－ B_4C ペレットスペーサー－下部端栓 (下)

試験時には両締めバイスで拡管治具に圧縮荷重を加えてシュラウド管を拡管させ、各部の周方向歪みをノギスで計測するとともに、下部端栓とシュラウド管の嵌合部から B_4C を模擬したチタン酸バリウム粒子が流出しないか目視にて観察した。

試験装置の主要目を以下に示す。

- ・数　　量：1基
- ・全　　長：約550mm
- ・主要材料：炭素鋼（S45C、FC250）
- ・周方向歪み発生量：最大10%
- ・構　　造：図2-3

2.3 試験結果

(1) 内側嵌合型と外側嵌合型の比較試験

内側嵌合型と外側嵌合型の試験結果を以下に示す。試験では最大周方向歪みが10%以上となるように拡管操作を行った。

a. 内側嵌合型

内側嵌合型では拡管によりシュラウド管内管と下部端栓の間に隙間が生じ、チタン酸バリウムの粒子が流出した。拡管時の下部端栓とシュラウド管の嵌合部外観を写真2-3に示す。シュラウド管外管が下部端栓外径よりも膨らんでおり、下部端栓の左側に白いチタン酸バリウムの粒子が落下しているのが分かる。この時の周方向歪みの分布を図2-4に示す。拡管操作によってシュラウド管下端の最外径は平均して $\phi 14.42\text{mm}$ 、周方向に5.7%の歪みが発生している。図2-4ではシュラウド管の上方へ行くほど周方向歪みが大きくなっているが、これは拡管治具が軸方向均一に拡張せず、主に拡管治具の上側（全長125mmのシュラウド管の中央より上）で拡張したためと考えられる（図2-5参照）。従って、実機の場合には下部端栓嵌合部側で最も大きな周方向歪みが発生すると予想される。

b. 外側嵌合型

外側嵌合型ではシュラウド管外径が下部端栓により拘束されるため、拡管時にも嵌合部に隙間は生じず、チタン酸バリウムの流出は観察されなかった。

拡管時の周方向歪みの分布を図2-6に示す。シュラウド管下端の外径が拘束されているために、拡管によってシュラウド管上端の周方向歪みが最も大きい。実機ではシュラウド管全長が約1000mmとなるため、今回の試験体のように上端で周方向歪みが最大となることはなく、ASM1発生位置と上端との間で極大になる部位が現れると予想される。

(2) 外側嵌合型での限界試験

最大周方向歪み 10%の条件では外側嵌合型でチタン酸バリウム粒子の流出がないことを確認した。これを踏まえて、外側嵌合型での限界拡管試験を行い、拡管治具で可能な最大限の周方向歪みを発生させた。拡管時の試験体外観を写真 2-4 に、周方向歪みの分布を図 2-7 に示す。限界拡管によりシュラウド管上端は甚だしく変形し、外管のスリット部から内管が飛び出しそうな状態になったものの、チタン酸バリウム粒子の流出は下部端栓嵌合部からもスリット部からも生じなかつた。

2.4 評価

内側嵌合型ではASM1によってシュラウド管下端で拡管が生じ、その結果シュラウド管内管と下部端栓の間に隙間が生じて B_4C ペレット欠片が流出する可能性があることが確認された。一方、外側嵌合型では実機では生じ得ない極端な拡管状況を想定しても、シュラウド管下端が下部端栓により拘束されるため、 B_4C ペレット欠片が流出しないとの見通しを得た。

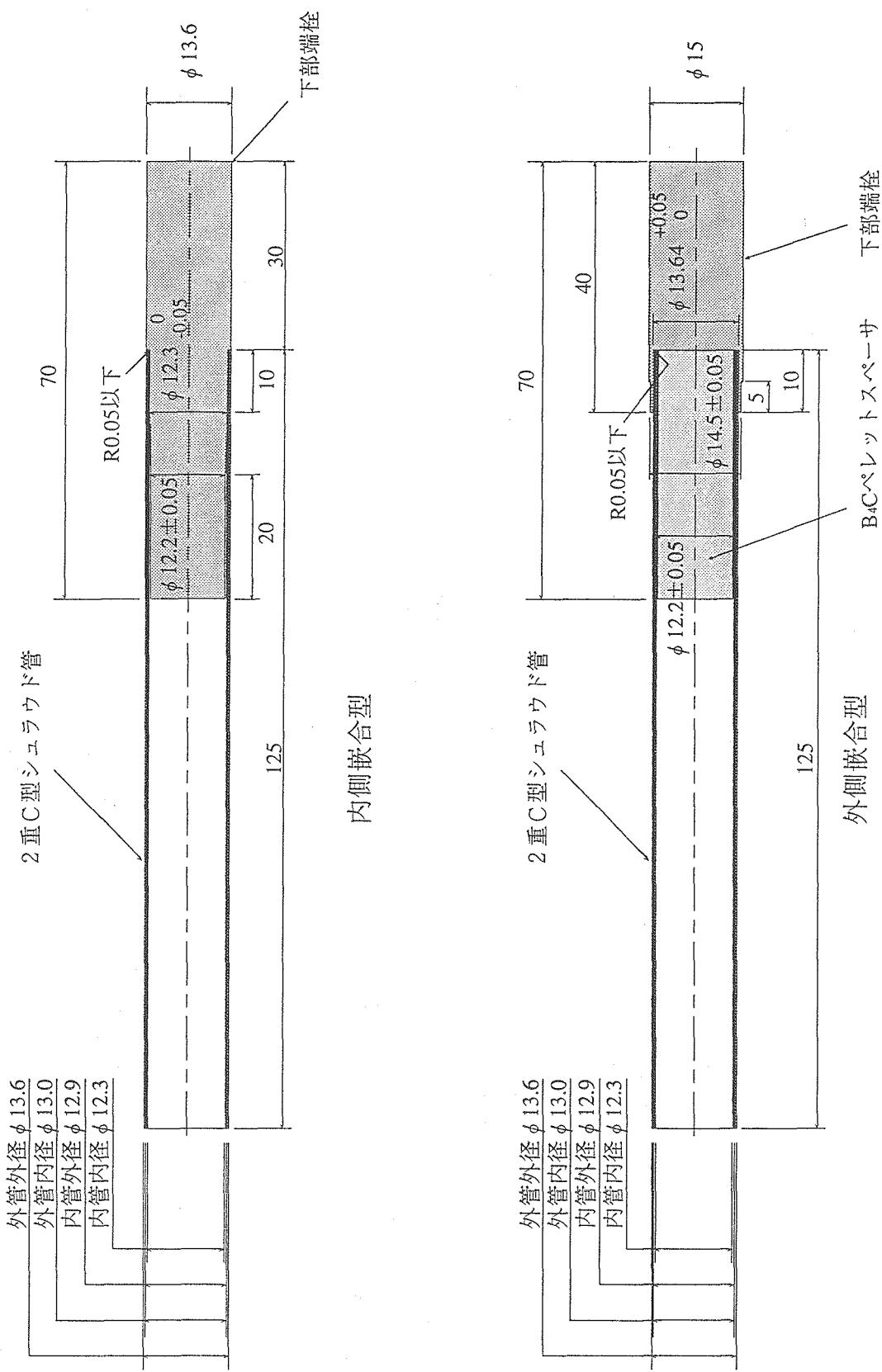


図2-1 ASM1予備試験体

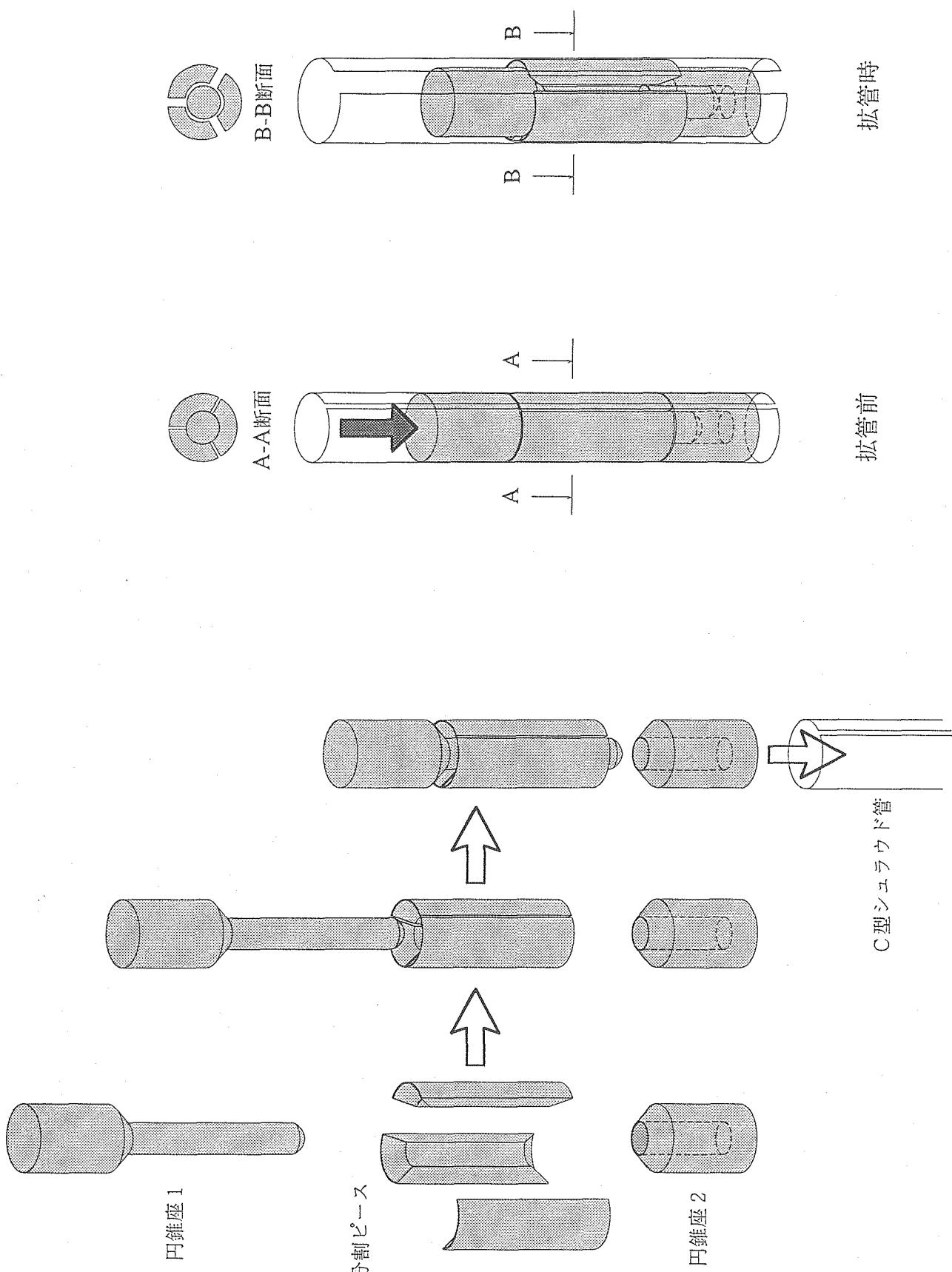
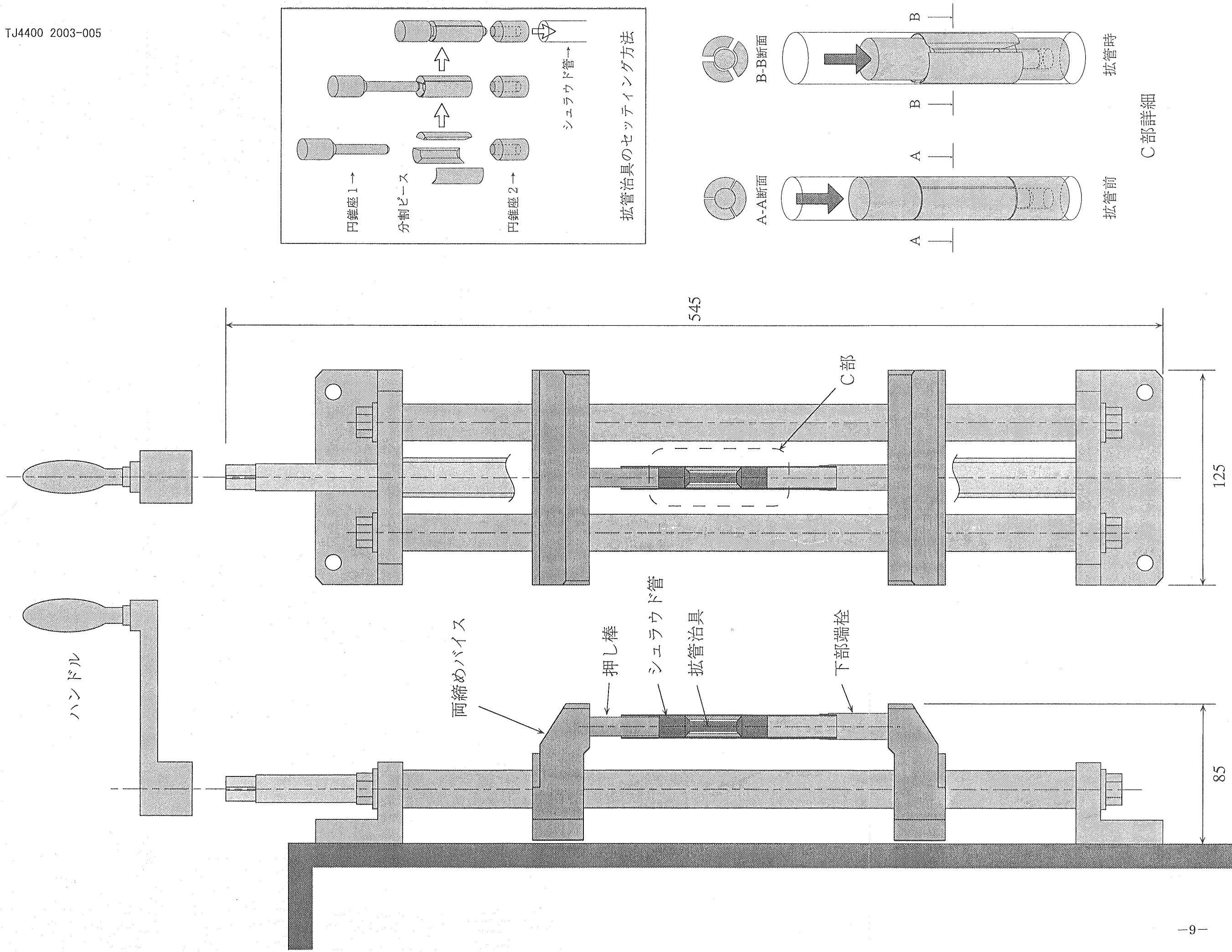


図2-2 A S M I 予備試験用 拔管治具



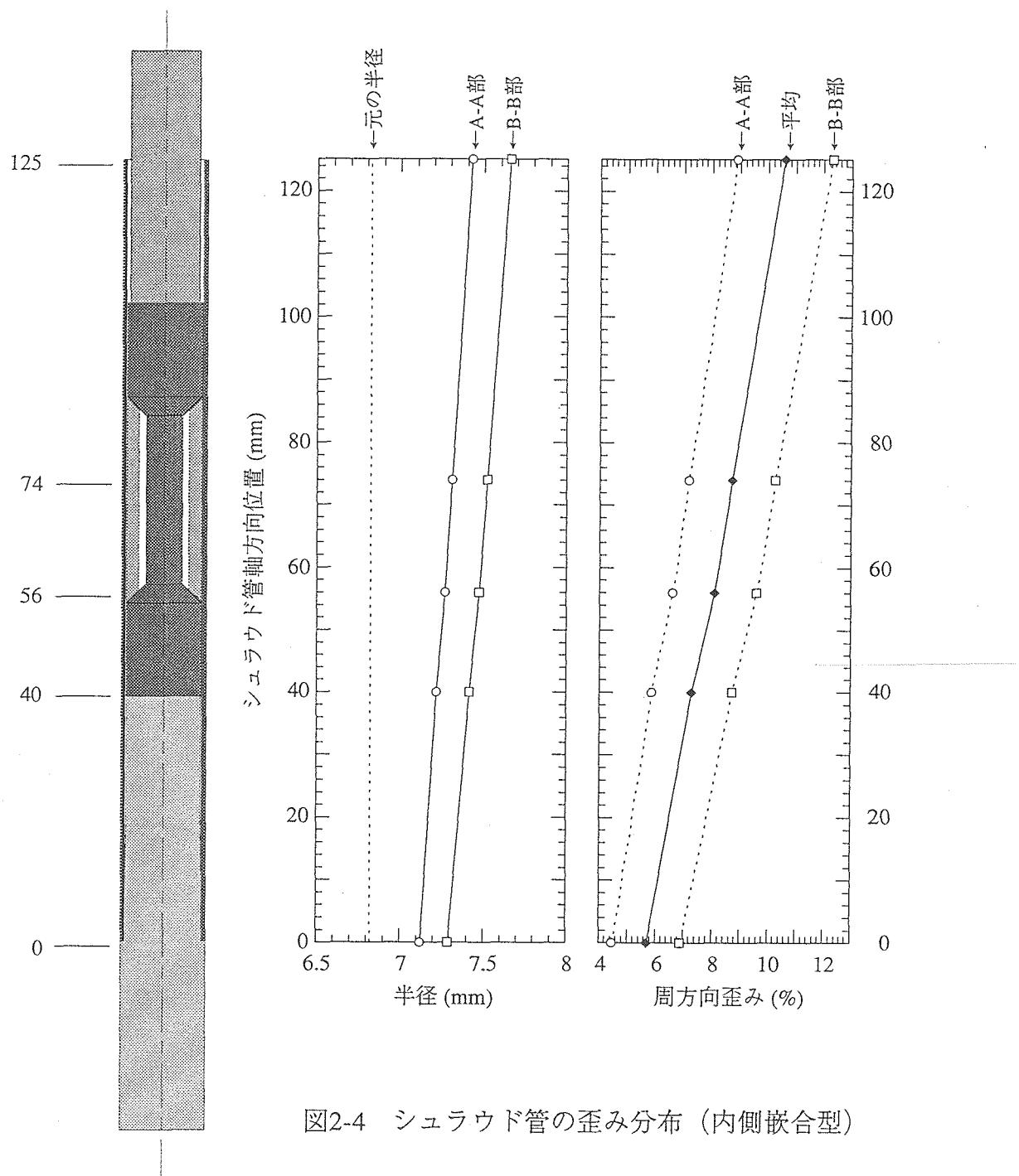


図2-4 シュラウド管の歪み分布（内側嵌合型）

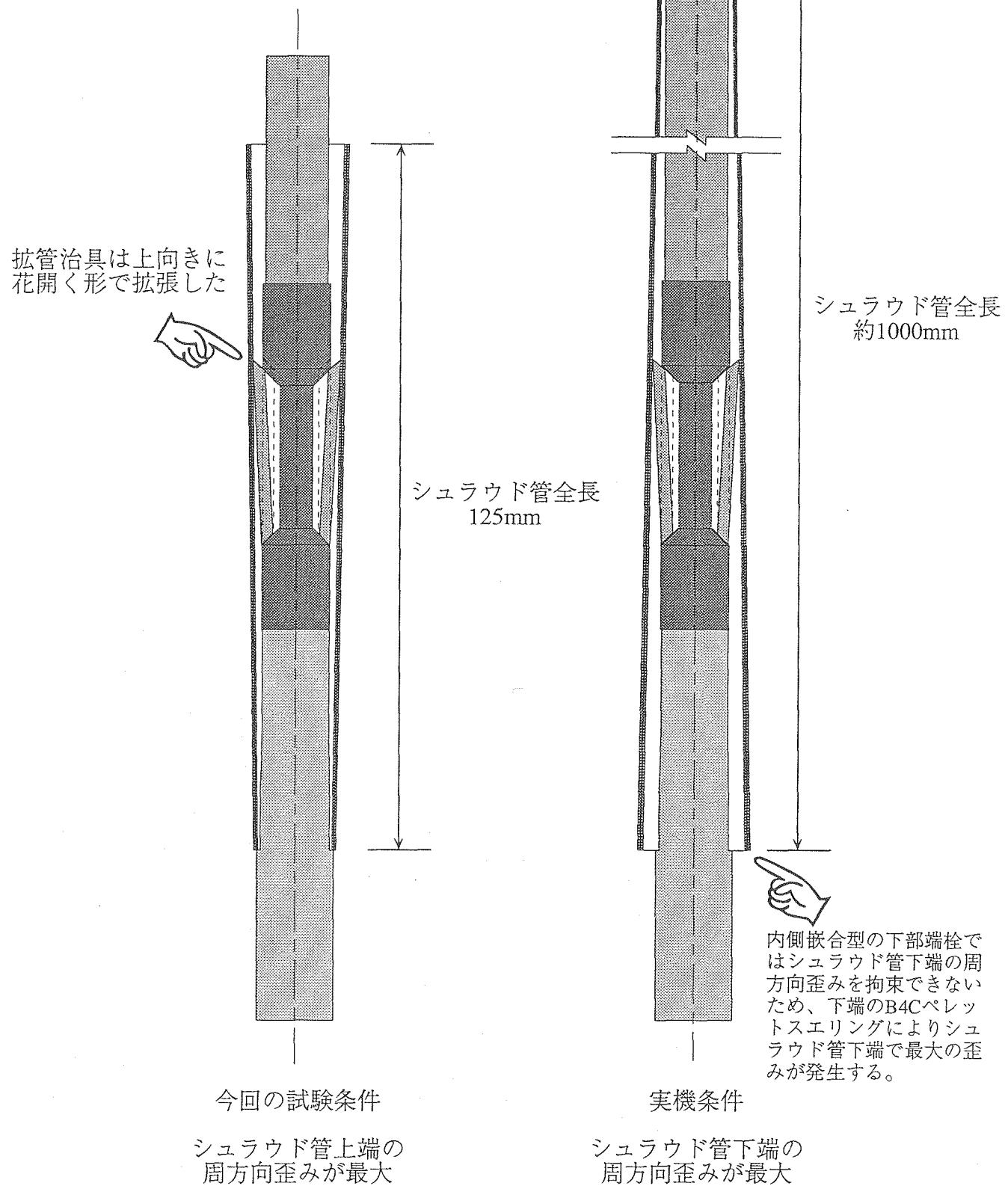


図2-5 内側嵌合型でのシュラウド管拡管状況

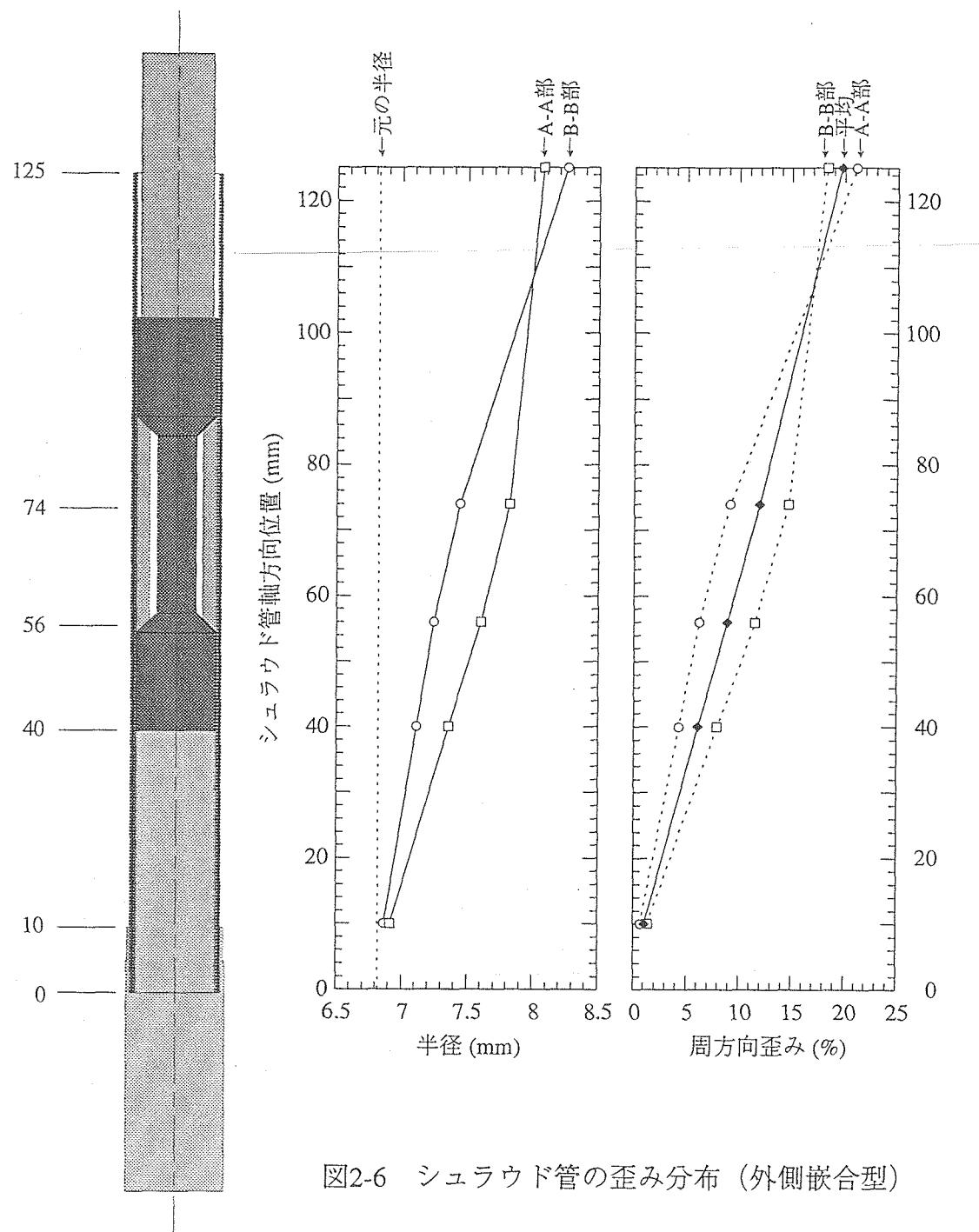


図2-6 シュラウド管の歪み分布（外側嵌合型）

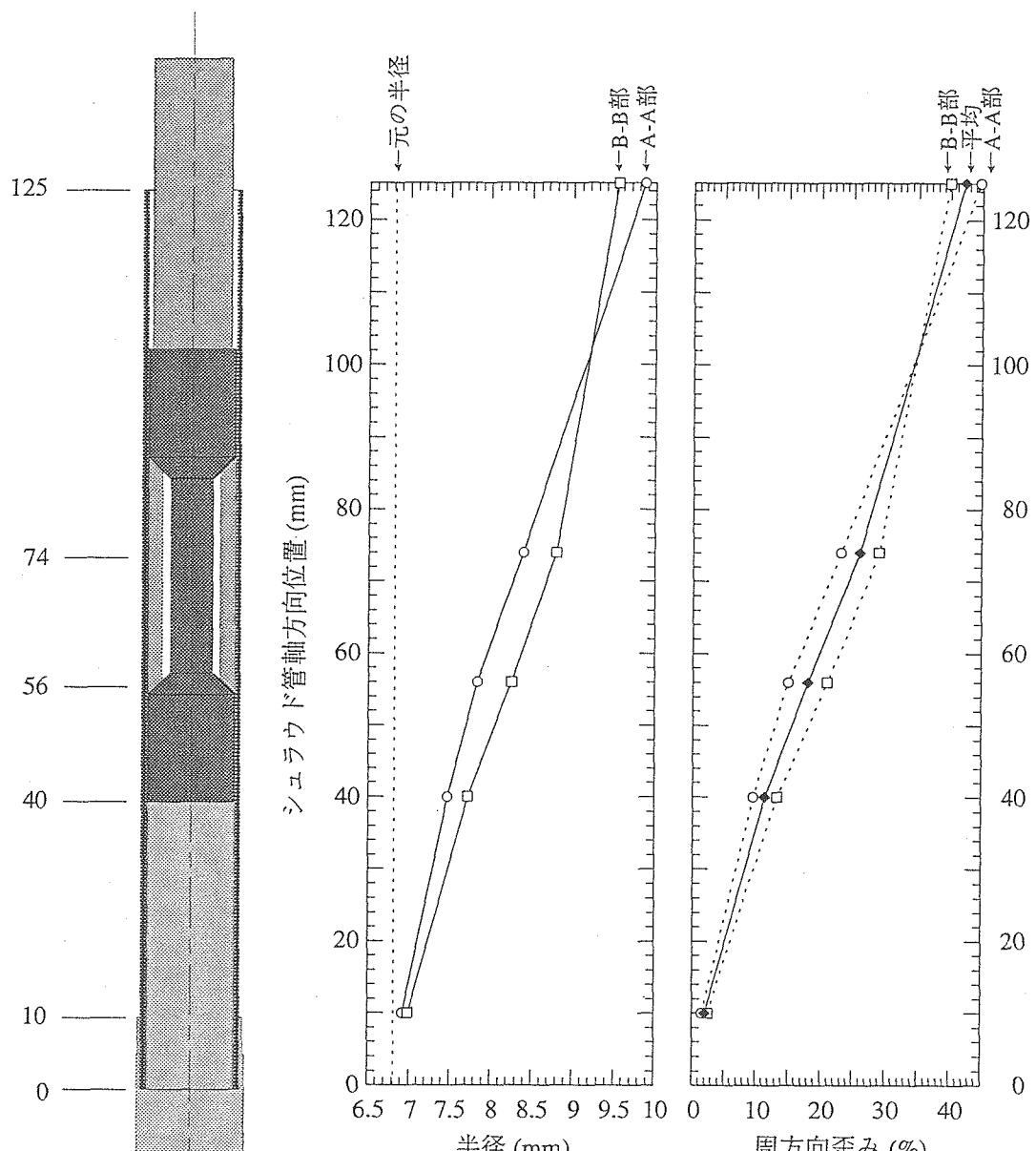
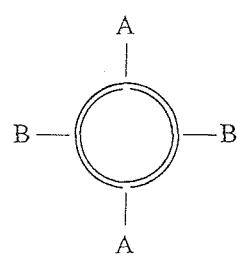
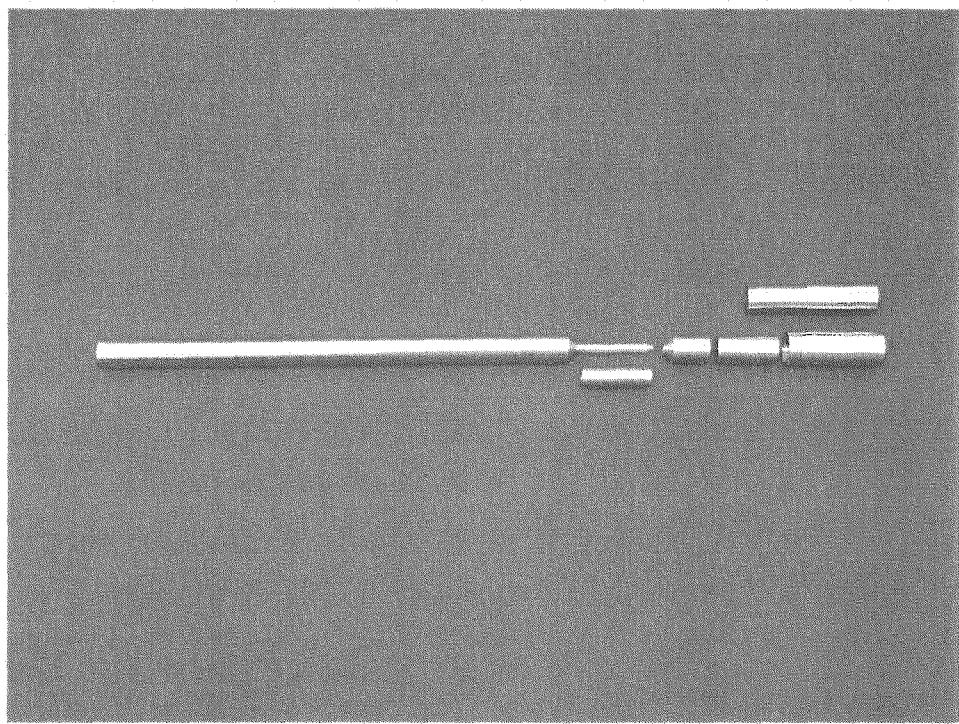
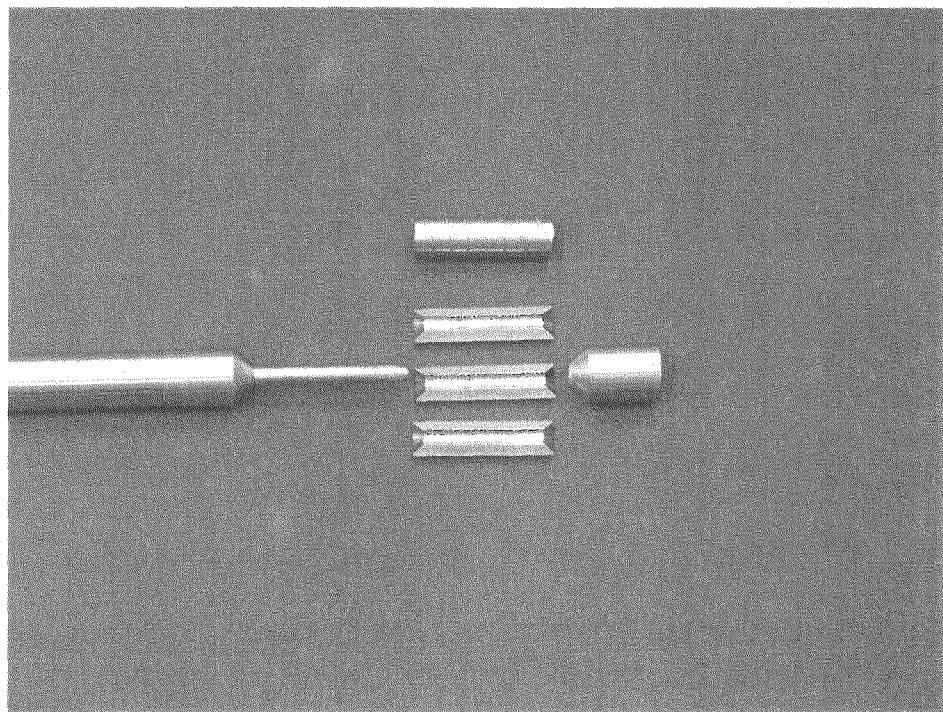


図2-7 シュラウド管の歪み分布（外側嵌合型 限界拡管）





拡管治具外観



拡管部 詳細

写真 2-1 拡管治具外観

供試体

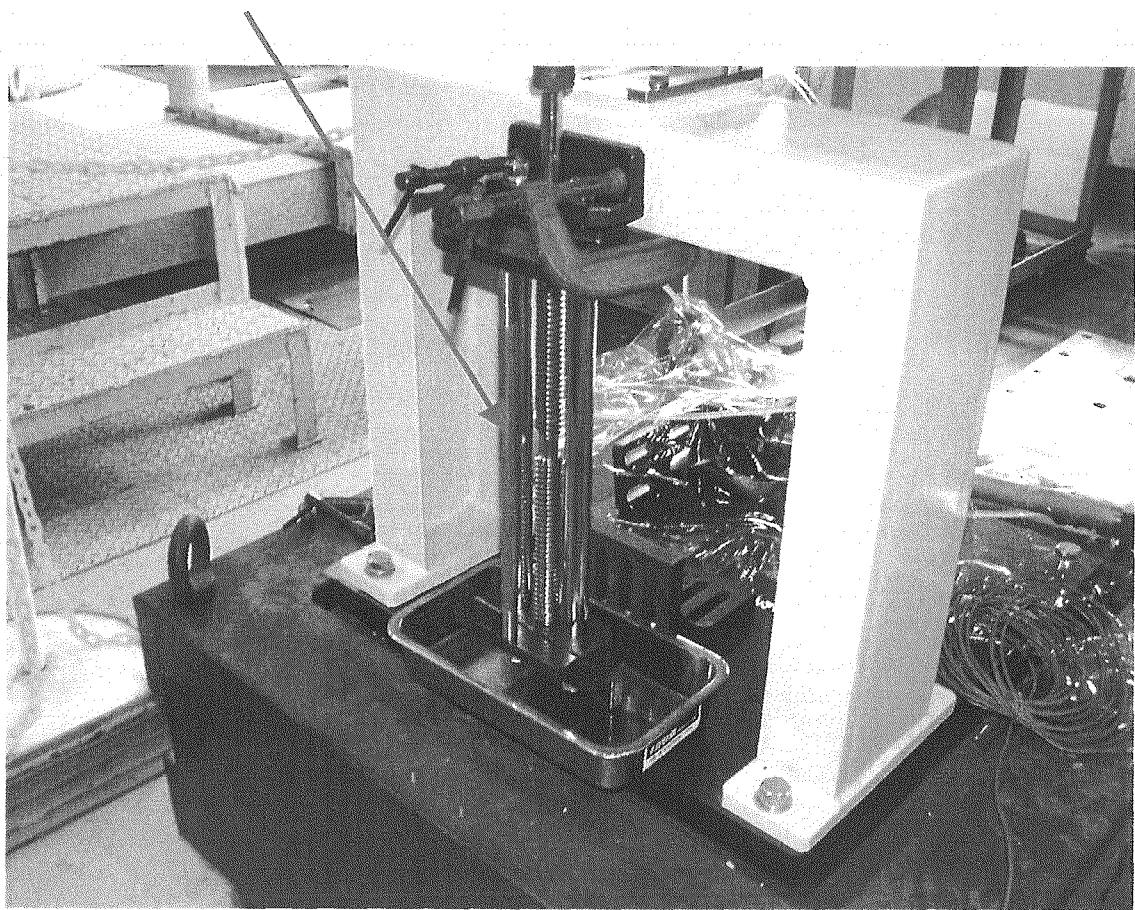


写真 2-2 ASMI 予備試験装置外観

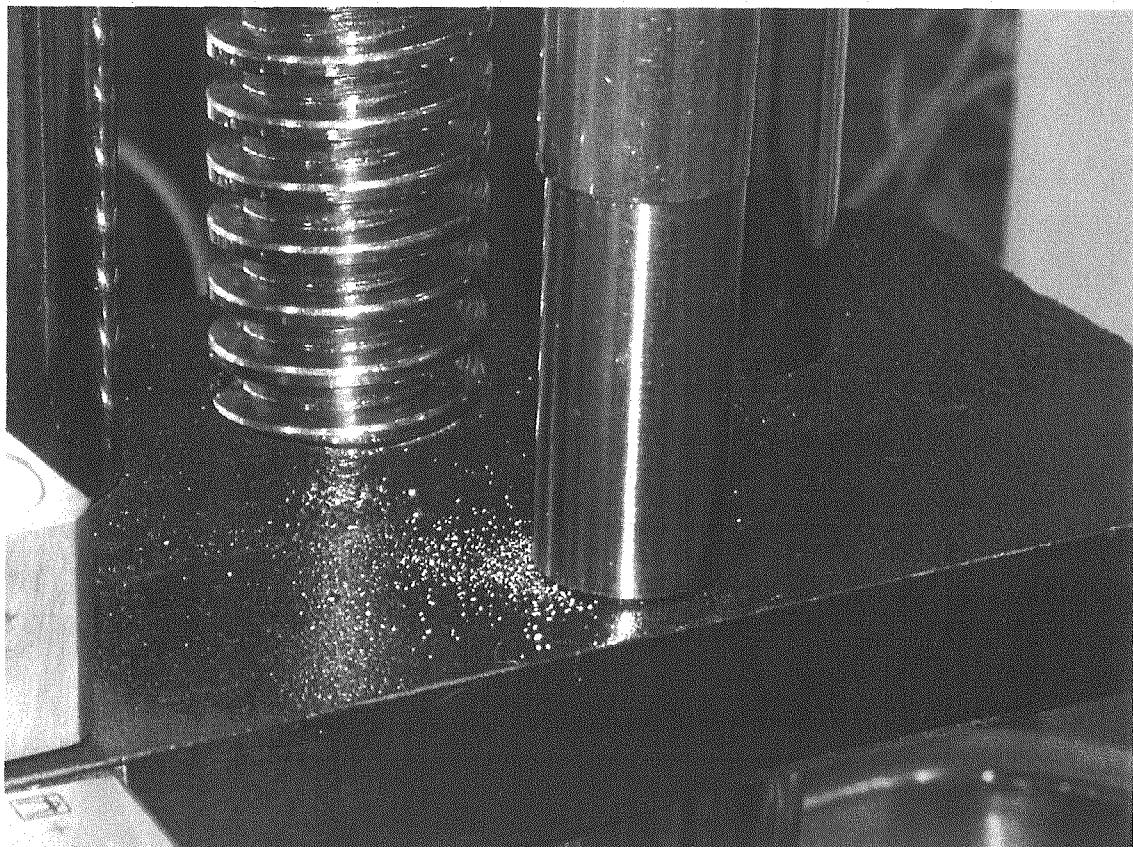


写真 2-3 拡管時の外観（内側嵌合型試験体下部）

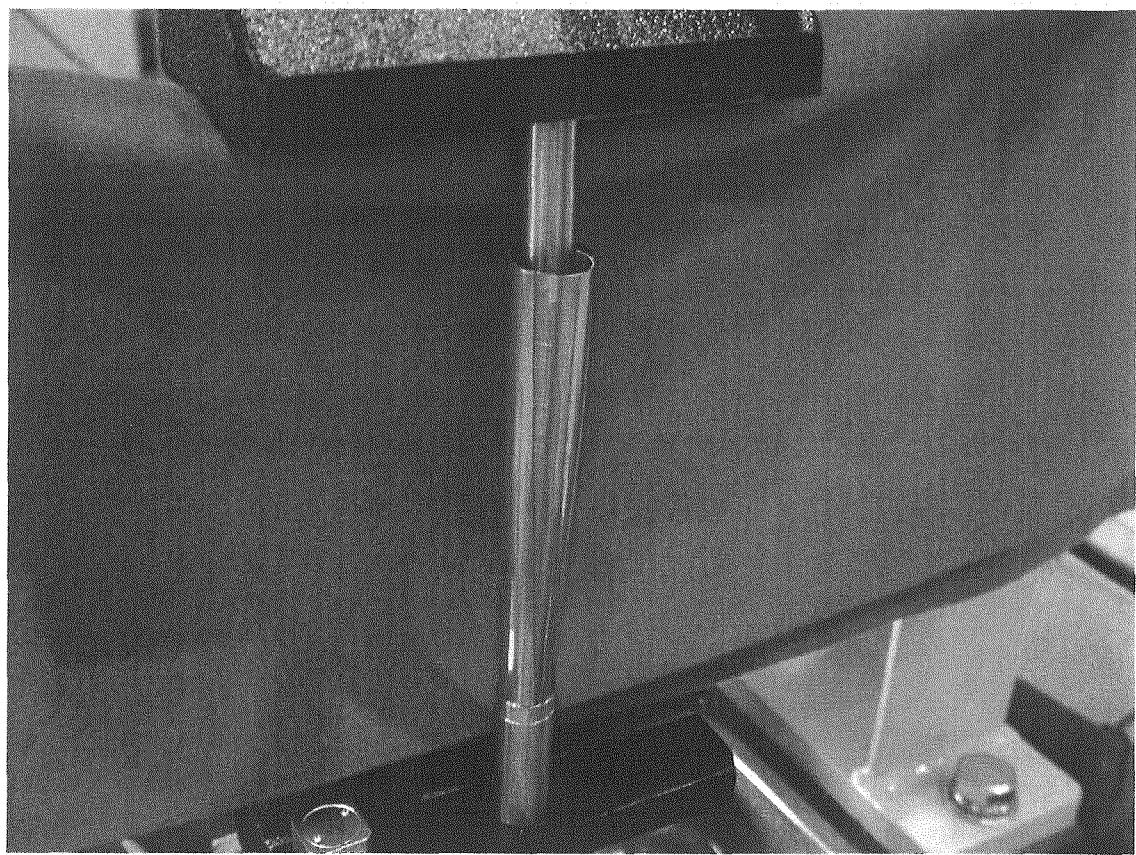


写真 2-4 限界拡管時の外観（外側嵌合型端栓）

3. シュラウド管応力評価

3.1 概要

もんじゅ制御棒のC型シュラウド管は、制御要素内に収納されるB₄Cペレットの熱膨張並びにスウェーリングによって径方向の強制変位が負荷される。この変位に対して、寿命期間中（148日×4サイクル）の構造健全性が確保されるシュラウド管の拘束位置（シュラウド管下部端栓とペレット下端との距離）を求める。

3.2 解析条件

(1) 解析の目的

ペレットのスウェーリングによる体積膨張で、シュラウド管は径方向の強制変位を受けることになる。究極的には、図3-1に示すようにペレットと被覆管に挟まれるまで変形が進行し、下部スリープにおける径方向の変位拘束と相まって、ペレットの下端に大きな曲げ変形が加わることとなる。この曲げ変形による応力は、図3-1に示すペレット下端から支持点までの長さLが小さいほど大きくなることは自明で、シュラウド管の健全性が確保できる長さLを設定することが本解析の目的である。

(2) 荷重条件

ペレットは燃焼と共にスウェーリングにより体積膨張し、その寿命末期（4サイクル運転）にはシュラウド管内径が約10%程度膨張するが、本解析では図3-1に示すシュラウド管下端の曲げ変形を保守側に評価するため、「寿命末期においてシュラウド管が被覆管と接触する」と仮定した。ペレット径の実際の変形履歴と本解析の条件を図3-2に比較する

(3) 物性値

シュラウド管材料はSUS316 20% CW材である。物性値を以下に示す。

- ・熱膨張率 : 表3-1
- ・弾塑性応力ひずみ関係 : 表3-2
- ・スウェーリング式 : 表3-3
- ・照射クリープひずみ式 : 表3-4

解析では、保守側に構造材（下部スリープ）のスウェーリングは無視した。また、物性値は420°Cで代表させる。SUS316 20% CW材の420°Cでの応力ひずみ関係を図3-3に示す。

(4) 許容値の想定

もんじゅの制御棒設計基準によれば炉心構成要素の塑性ひずみは 0.3%に抑えれば良いが、シュラウド管がペレットの保持機能（シュラウド管がばねとして働きペレットを保持する機能）を確保しなければならない。このためには、発生応力を弾性範囲に抑えておくことが望ましい。そこで、本評価ではシュラウドに発生する応力を弾性範囲に抑えることを成立の目安とする。

(5) 解析モデル

解析コードは FINAS Ver.16.0 を使用し、弾塑性クリープ解析を実施する。解析モデルを図 3-4 に示す。解析は、内側 C 型シュラウド管のペレット下端部より 920mm の位置から下部端栓に接合される部位までを 3 次元ソリッド要素によりモデル化した。シュラウド管の形状を以下にまとめる。

<内側シュラウド管形状>

外 径 : 12.9mm

内 径 : 12.3mm

板 厚 : 0.3mm

スリット巾 : 0.5mm (半割モデル上では片側 0.25mm)

(6) 境界条件

寿命末期においてシュラウド管が被覆管と接触すると仮定する。そこで、ペレット外径を 12.2mm (製造時) から 14.4mm (寿命末期) に線形に増加させる。ここでは、実際には 10%程度であるペレットの体積膨張を被覆管と接触すると仮定した保守的な想定をしていることから、被覆管のスウェーリング変形は考慮しない。最終的にはシュラウド管がペレットと被覆管に挟まれた真円状態となるので、接触以前の強制変位も径方向に均一に負荷する。解析では照射クリープによる応力緩和を考慮するが、保守側にスウェーリング項 (表 3-4 の右辺第 3 項) は無視する。照射クリープの評価に用いる中性子照射条件を表 3-5 に示す。本解析は図 3-1 に示すペレット下端におけるシュラウド管の折れ曲りによる応力に対する健全性評価が目的であるため、この応力を大きく評価するようにペレット下端からペレット 1 個分 (25mm) の高さの範囲に強制変位を与える。ペレット下端から拘束部までの長さ L は、25mm、40mm、50mm、75mm の 4 ケースをパラメータとした。

3.3 解析結果

解析結果として、以下を整理した。

- ・寿命末期時点での変形及び軸方向応力分布 (σ_Z) : 図 3-5
- ・寿命末期時点での変形及び相当応力分布 (Mises) : 図 3-6
- ・寿命末期時点での変形及び相当塑性ひずみ分布 (ϵ_p) : 図 3-7
- ・寿命末期時点での変形及び相当クリープひずみ分布 (ϵ_c) : 図 3-8
- ・シュラウド管、スリット部の開口変位 (δ_X) : 図 3-9
- ・寿命末期時点でのペレット下端部の応力強さ及びひずみ分布 : 図 3-10
- ・ペレット下端部での応力強さ及びひずみ履歴 : 図 3-11
- ・応力強さ及びひずみとパラメータ L の関係 : 図 3-12

最大応力（ひずみ）はペレット下端部のスリット側に生じる。これは各ケースにおいて共通である。この最大応力は、当然ながらペレット下端から支持点までの長さ L が短いほど大きくなる。図 3-12 より、ペレット下端から支持点までの長さ L が 50mm より大きければシュラウド管の応力は弾性範囲に抑えられるが、これよりも短くなると塑性ひずみが発生する。40mm の場合では塑性ひずみは 0.1%程度に収まるが、これよりも短くなると急激に塑性ひずみが大きくなる。

ペレット下端から支持点までの長さが 50mm の場合、シュラウド管端部に発生する径方向の半力は合計で 2.9kgf である。この荷重をベースに図 3-1 に示す下部スリーブの応力を求める。

下部スリーブの寸法は、内径 13.6mm、外径 14.5mm、板厚 0.45mm、高さ 10mm である。上記に示した 2.9kgf は内側シュラウドだけの径方向の半力であるため、外側と合わせて 5.8kgf が下部スリットに負荷される。この荷重が図 3-13 のように負荷する場合を想定しそれぞれの荷重に対する応力を求める。

内圧型荷重

$$\sigma_m = \frac{pr_i}{t} = \frac{5.8}{\pi \times 13.6 \times 10} \frac{13.6}{2 \times 0.45} = 0.2 \text{ kg/mm}^2$$

せん断荷重（有効せん断面積を断面積の 0.5 倍とする）

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{5.8 \times 2}{\pi \times \left(13.6 + \frac{0.45}{2} \right) \times 0.45} = 0.59 \text{ kg/mm}^2$$

モーメント

$$\sigma_b = \frac{M}{z} = \frac{5.8 \times 10}{\pi \times \left(\frac{13.6 + 0.45}{2} \right)^2 \times 0.45} = 0.83 \text{ kg/mm}^2$$

上述のように下部スリープに発生する応力は非常に小さく健全性上問題ないと判断され、シラウドの位置決め機能は満足される。

3.4 評価

ペレット下端から支持点までの長さ L は 50mm とすることにより、シラウド管に発生する応力は弾性範囲内に收まり寿命期間中のシラウド管の健全性が確保できる。また、シラウド管が膨張することで生じる下部スリープの応力は十分に小さく、健全性を満足できる。従って、4 サイクルの寿命期間中シラウド管の保持機能が損なわれることはない。

表 3-1 SUS316 20% CW 材の熱膨張率

熱膨張率	
$\alpha_0 = 14.8778 + 1.6999 \times 10^{-2} T - 1.4541 \times 10^{-5} T^2 + 4.5929 \times 10^{-9} T^3$	
$\alpha_m = 15.0113 + 0.8726 \times 10^{-2} T - 0.5872 \times 10^{-5} T^2 + 0.1931 \times 10^{-8} T^3$	
α_0	: 瞬間熱膨張係数 (10^{-6} mm/mm/°C)
α_m	: 平均熱膨張係数 (10^{-6} mm/mm/°C)
T	: 溫度 (°C)

表 3-2 SUS316 20% CW 材の弾塑性応力ひずみ関係式

SUS316 20% CW 材 弾塑性応力ひずみ関係式	
$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$	
$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^{\frac{1}{m}}$	
$\sigma_p = 0.667 \sigma_y$	
$\sigma_y = 75.759 - 0.12904 T + 8.2778 \times 10^{-4} T^2 - 3.3136 \times 10^{-6} T^3$	
$+ 7.2493 \times 10^{-9} T^4 - 8.0280 \times 10^{-12} T^5 + 3.3576 \times 10^{-15} T^6$	
(ただし、 $-30 = T = 40$ °C については $\sigma_y = 73.9$ kg/mm ²)	
$K = 3.23640 \sigma_y$	
$m = 0.37083$	
ここで、	
ε_e	: 弹性ひずみ (mm/mm)
ε_p	: 塑性ひずみ (mm/mm)
T	: 温度 (°C)
σ_p	: 比例限応力 (kg/mm ²)
σ_y	: 0.2%耐力 (kg/mm ²)
<u>適用範囲</u>	
温度	: -30~700 °C
最大ひずみ	: $\varepsilon_p = 0.01$ (mm/mm)

表 3-3 SUS316 20% CW 材のスエリング式

SUS316 20% CW 材 スエリング式	
$\frac{\Delta V}{V} = R \left[\phi t + \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \frac{1 + \exp [\alpha(\tau - \phi t)]}{1 + \exp (\alpha \tau)} \right\} \right]$	
$R = \exp (0.0419 + 1.498\beta + 0.122\beta^2 - 0.322\beta^3 - 0.441\beta^4)$	
$\beta = \frac{T - 500}{100}$	
$\alpha = 0.75$	
$\tau = 14$	
ここで、	
$\frac{\Delta V}{V}$: スエリング (Vol.%)
ϕt	: 中性子照射量 (10^{22} n/cm^2 , $E > 0.1 \text{ MeV}$)
T	: 温度($^\circ\text{C}$)
R	: 定常スエリング速度 (%/ 10^{22} n/cm^2)
τ	: 潜伏期間 (10^{22} n/cm^2)
<u>適用範囲</u>	
温度	: $350 \sim 850$ ($^\circ\text{C}$)
最大ひずみ	: $0 \sim 2.3 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)

表 3-4 SUS316 20% CW 材の照射クリープひずみ式

SUS316 20% CW 材 照射クリープひずみ式	
$\varepsilon = B_0 \cdot \phi_t \cdot \sigma + K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.3} + D \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma$	
<u>上限式</u>	<u>下限式</u>
$B_0 = 4.80 \times 10^{-5}$	$B_0 = 2.00 \times 10^{-5}$
$K = 11.1 \times 10^{-2} \exp\left(-\frac{21880}{T}\right)$	$K = 4.51 \times 10^{-2} \exp\left(-\frac{21880}{T}\right)$
$D = 0.110$	$D = 0.063$
<u>使用単位</u>	
ε	: 照射クリープひずみ (mm/mm)
σ	: 相当応力 (kgf/mm ²)
ϕt	: 中性子照射量 (10^{26} n/m ² , E>0.1MeV)
t	: 照射時間 (h)
T	: 温度 (K)
B_0	: 照射クリープ係数 (10^{26} n/m ²) ⁻¹ · (kgf/mm ²) ⁻¹
K	: 熱クリープ係数 (h ^{-1.9} (kgf/mm ²) ^{-2.3})
D	: スエリング係数 (kgf/mm ²) ⁻¹
ε_s	: スエリングひずみ
<u>適用範囲</u>	
温度	: 400~800°C
応力	: 0~15 kgf/mm ²
照射量	: 0~ 40×10^{26} n/m ² , E > 0.1 MeV
照射時間	: t_R^* 以下 (t_R^* は炉内クリープ破断時間)

表 3-5 評価に用いる中性子束 (0.1MeV 以上)

時期	1Cycle:初期	2Cycle:初期	3Cycle:初期	4Cycle:初期	4Cycle:末期
中性子束 (n/cm ² ·sec)	4.03×10^{15}	4.08×10^{15}	4.13×10^{15}	4.18×10^{15}	4.22×10^{15}

不確かさ幅 : ±10%

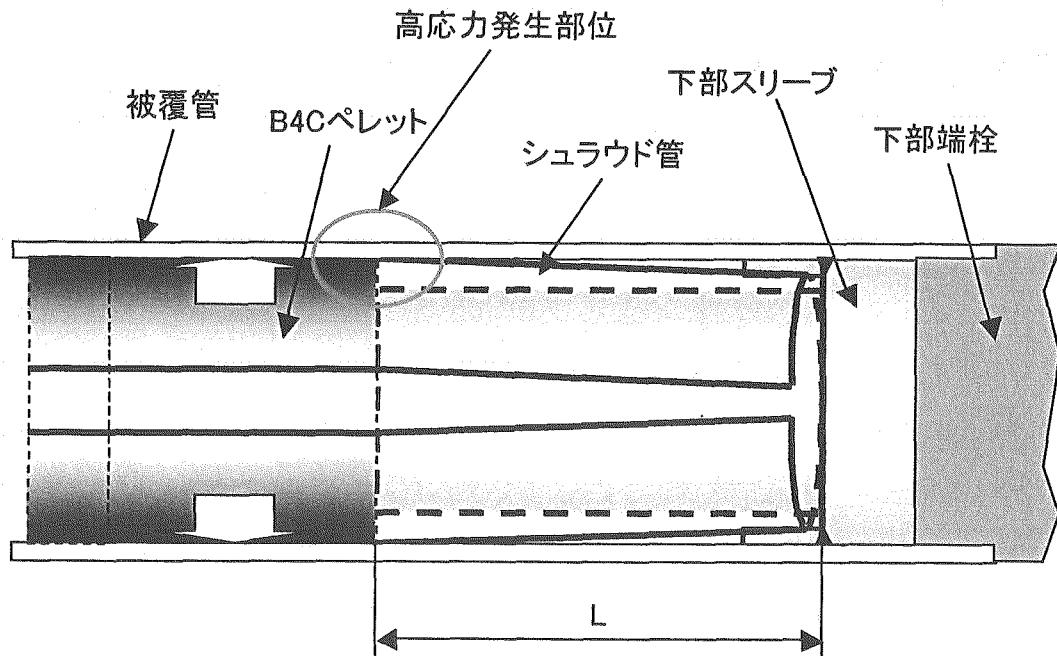


図 3-1 シュラウド管の押し広げによる軸方向の変形と軸方向曲げ応力の発生部位

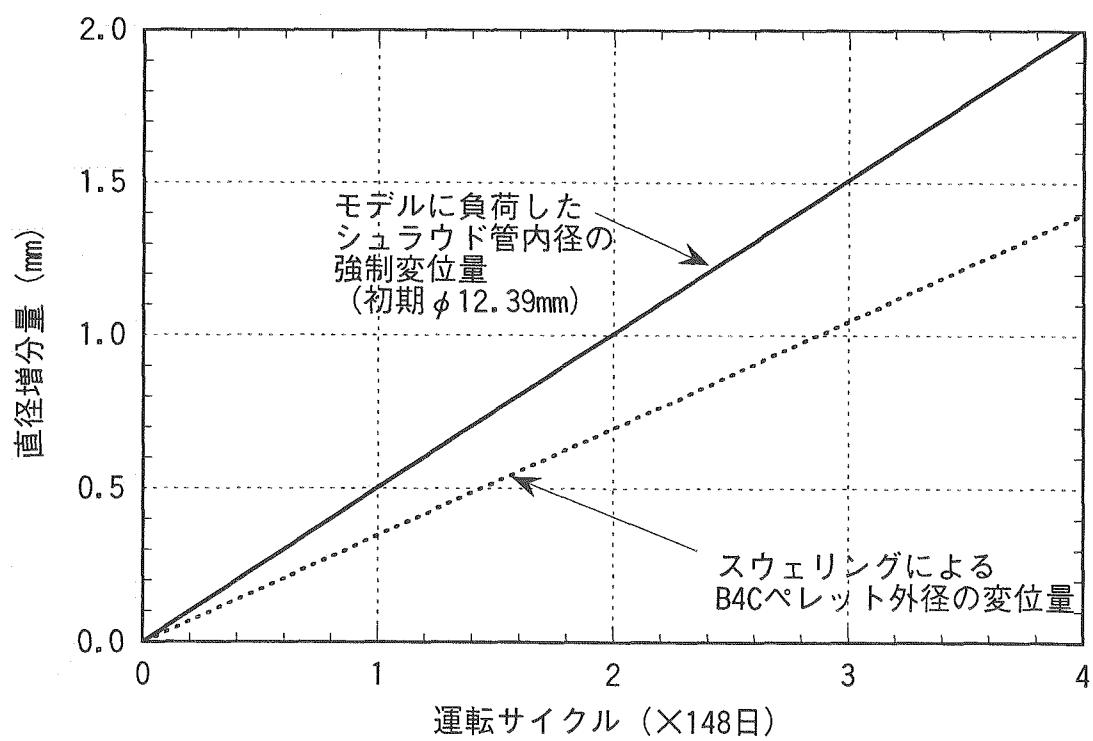


図 3-2 ペレットの変形量

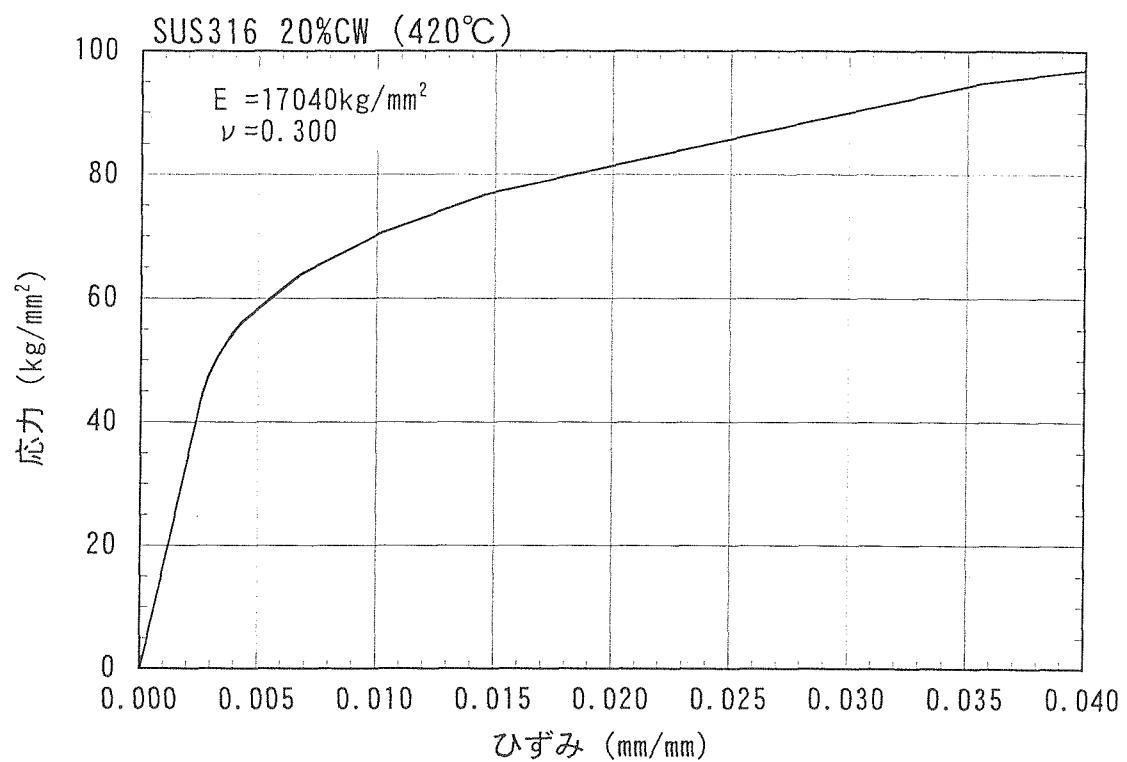


図 3-3 SUS316 20% CW 材の弾塑性応力ひずみ関係 (T=420°C)

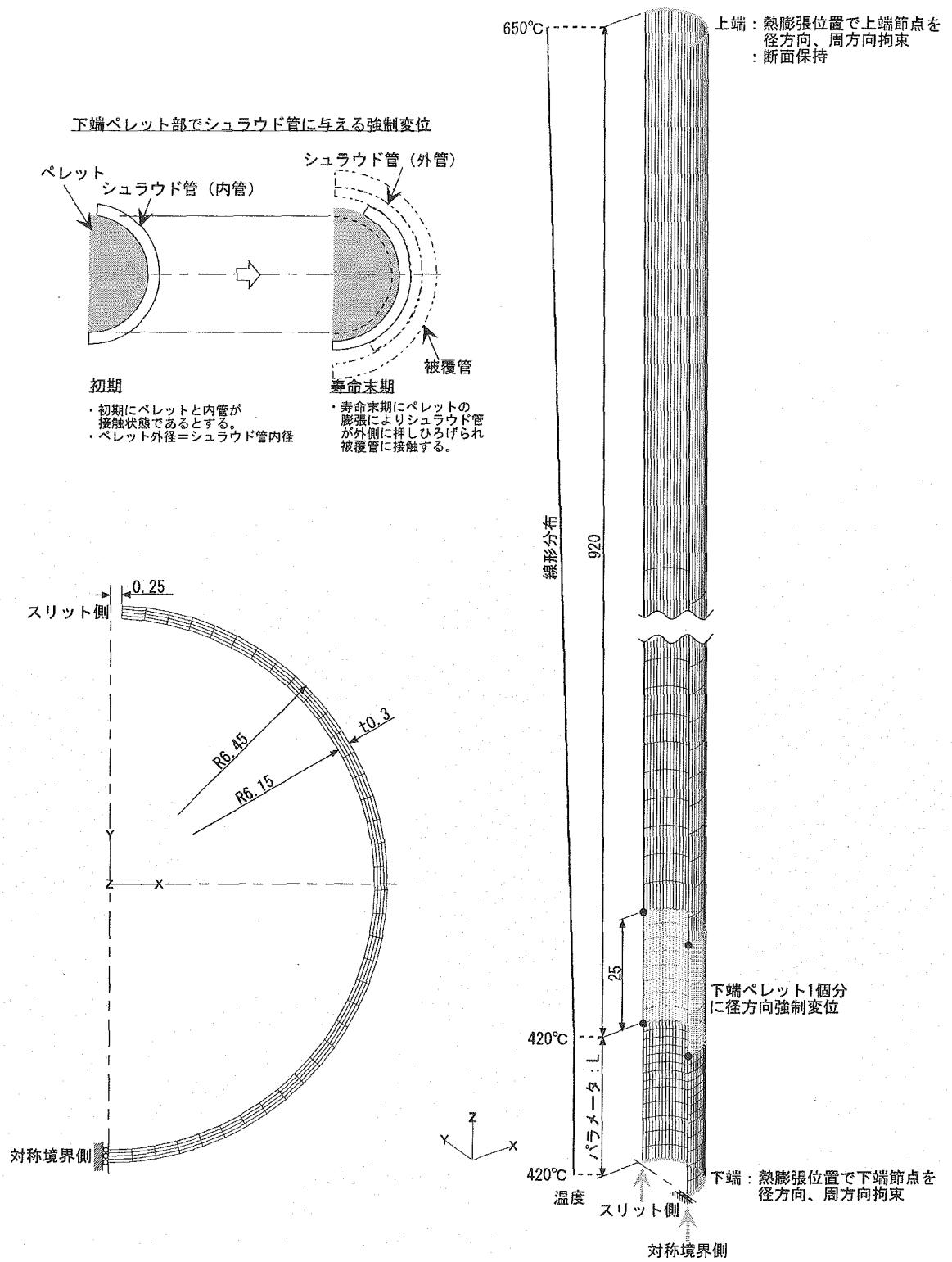
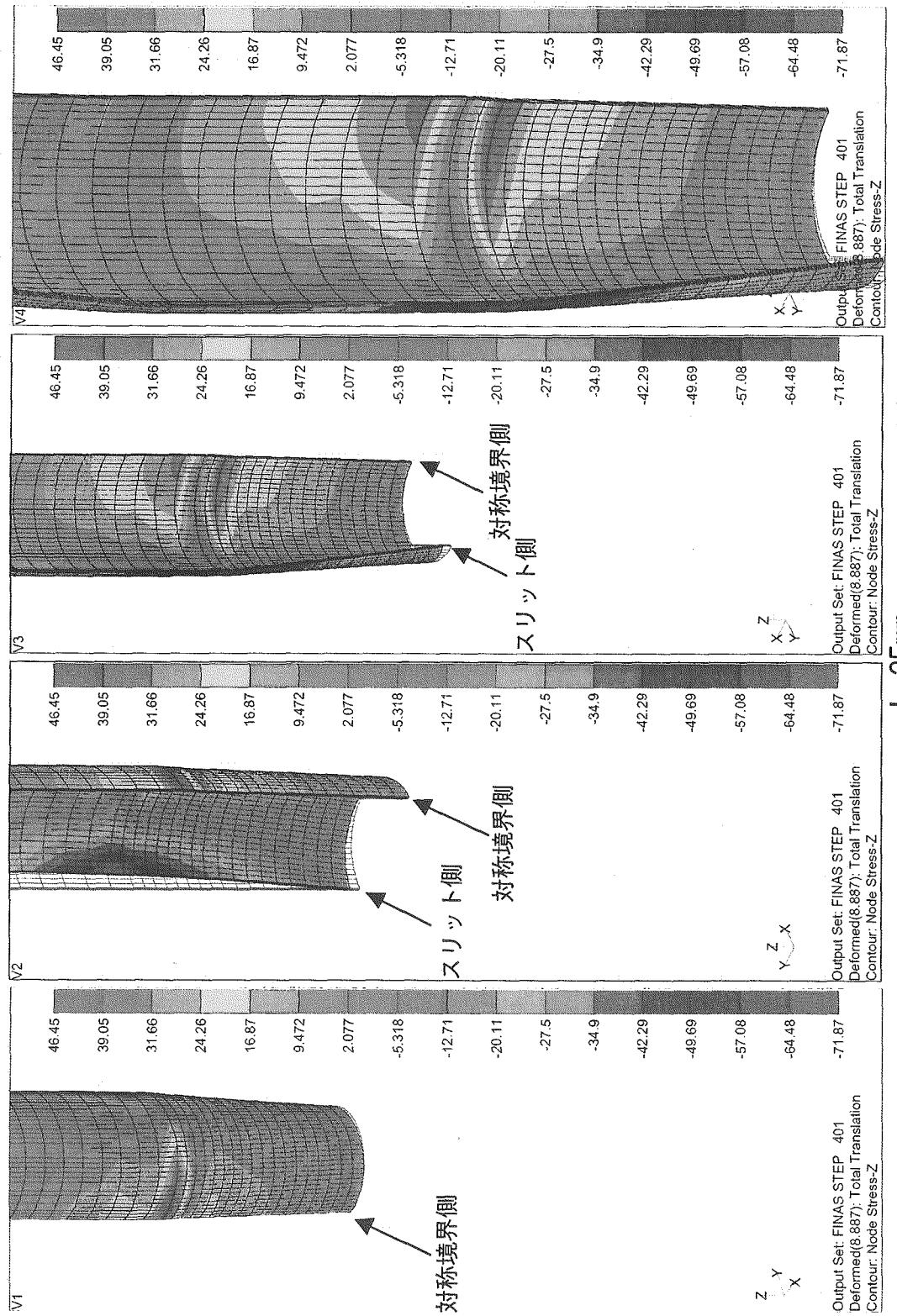
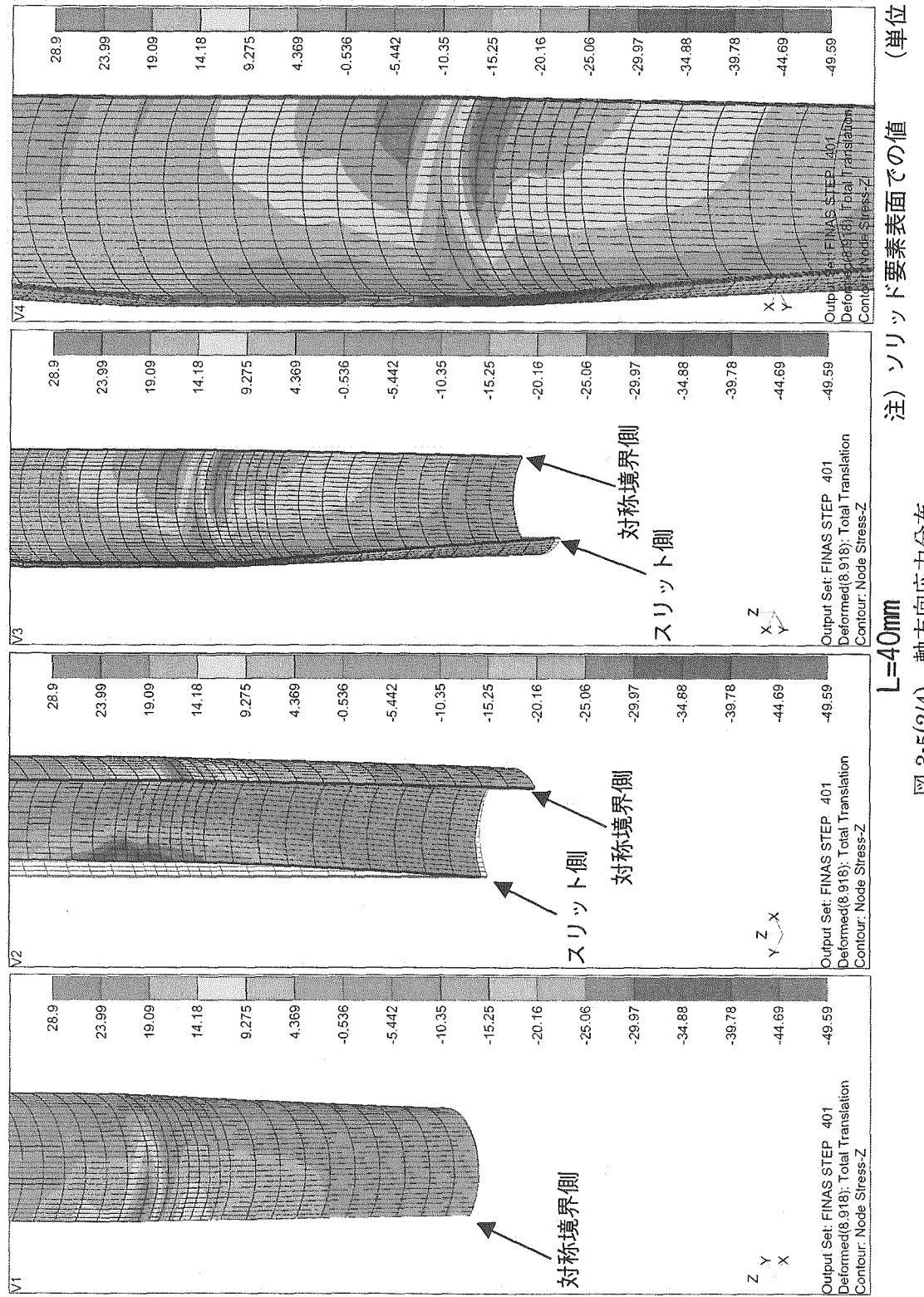


図 3-4 解析モデル

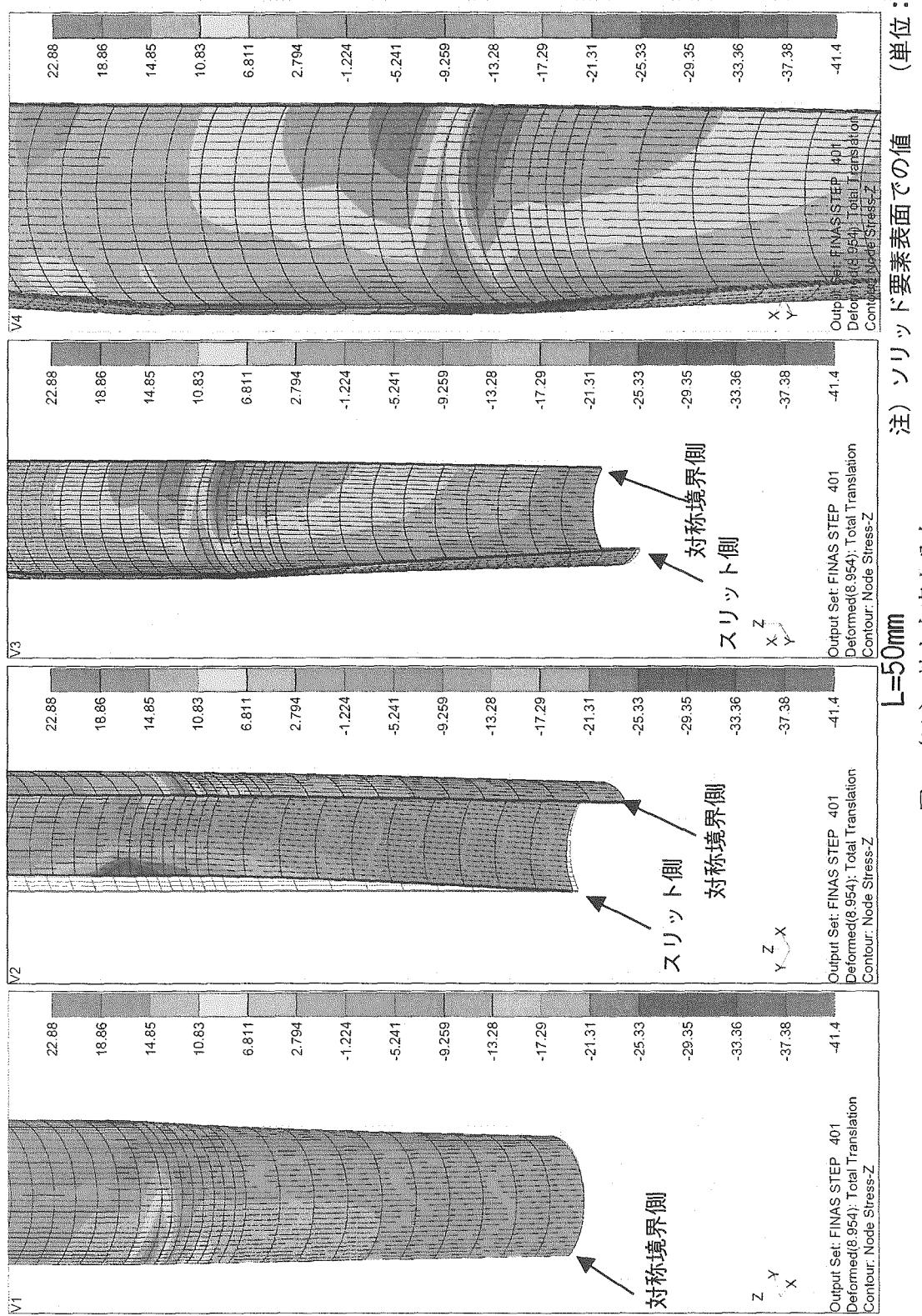


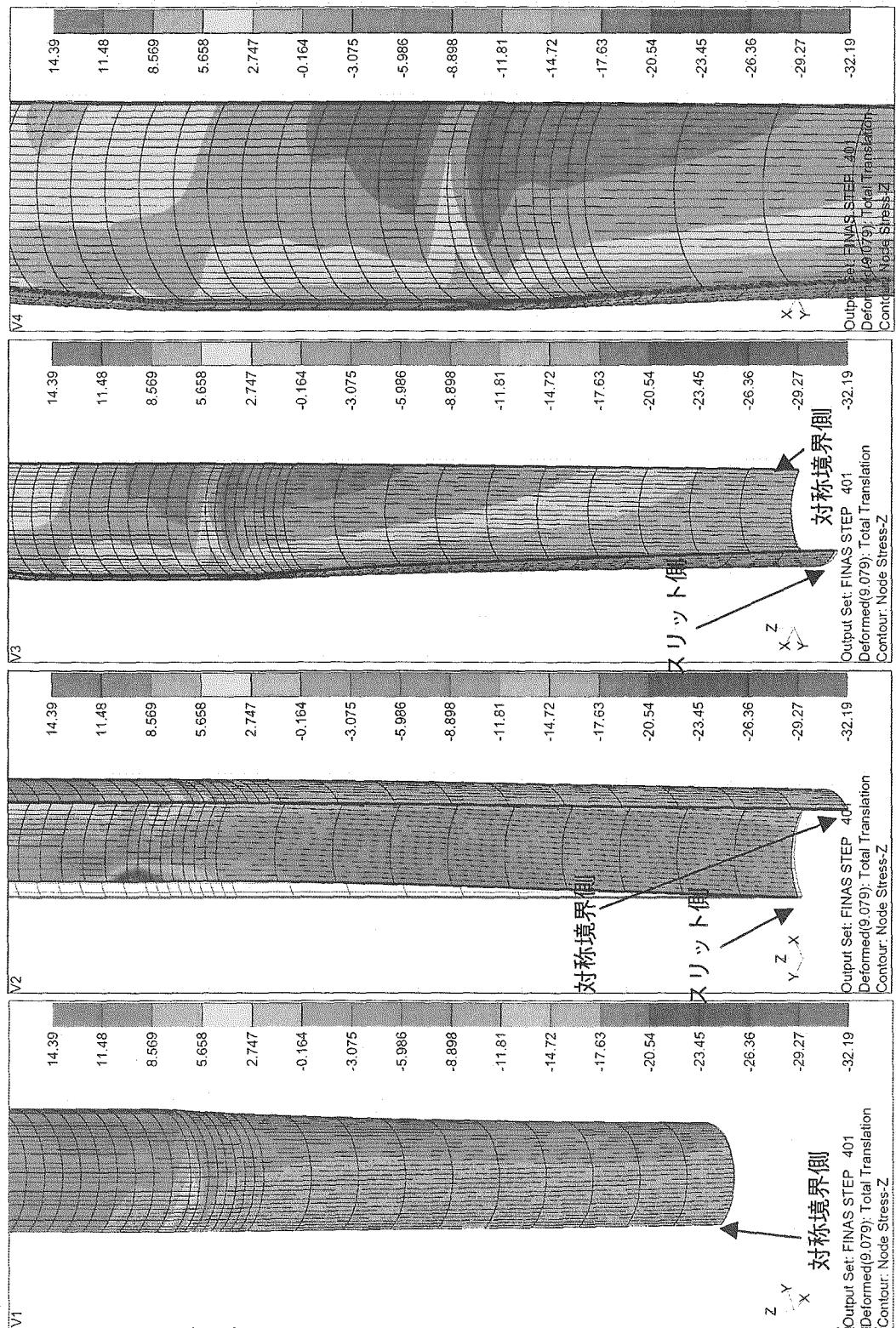
注) ソリッド要素表面での値 (単位: kg/mm^2)
 $L=25\text{mm}$ 軸方向応力分布



注) ソリッド要素表面での値 (単位: kg/mm²)

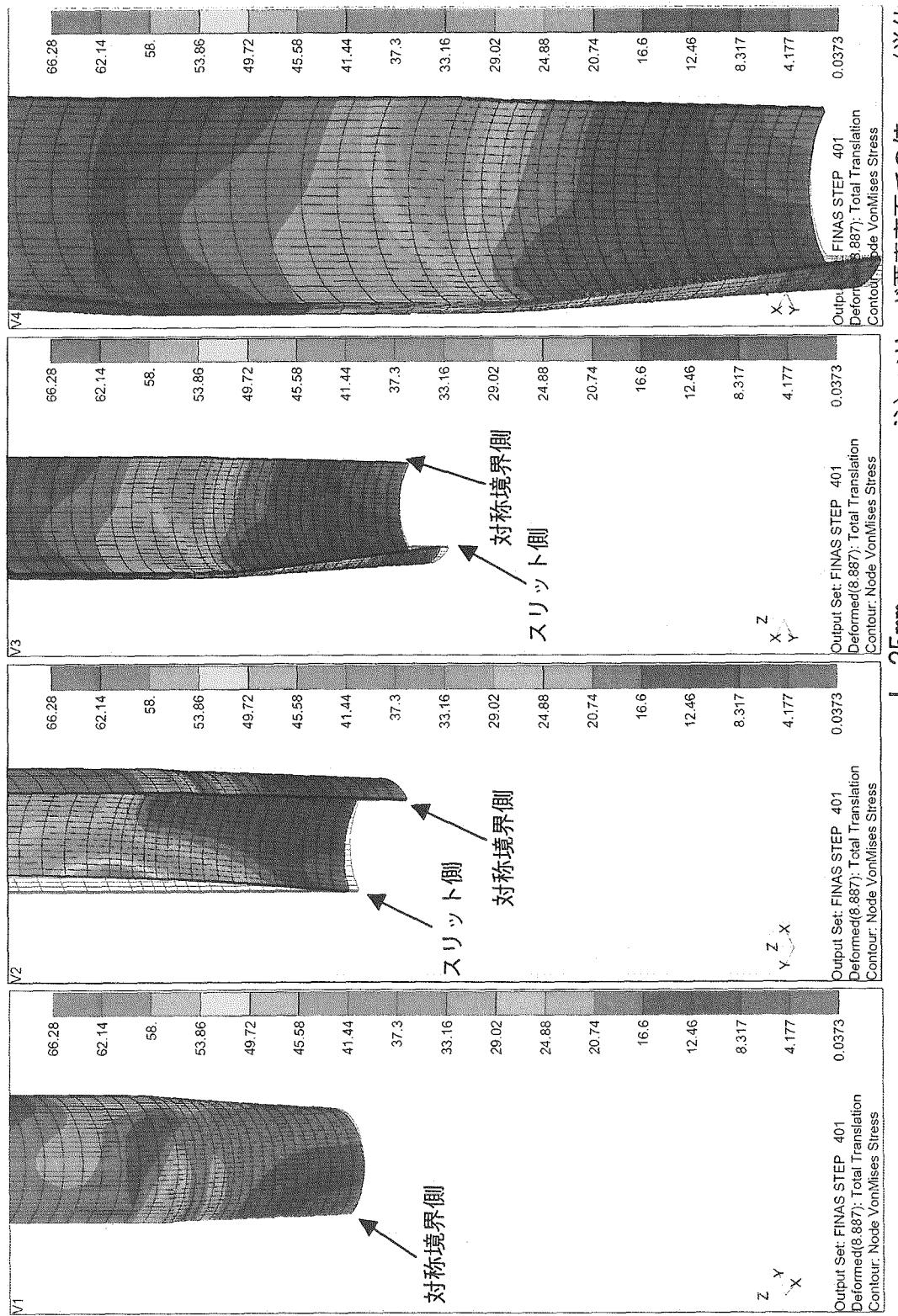
图 3-5(2/4) 轴方向应力分布
L=40mm





注) ソリッド要素表面での値 (単位: kg/mm²)

图 3-5(4/4) 轴向应力分布
 $L=75\text{mm}$



L=25mm 相当応力分布 (Mises)
図 3-6(1/4)

注) ソリッド要素表面での値 (単位: kg/mm²)

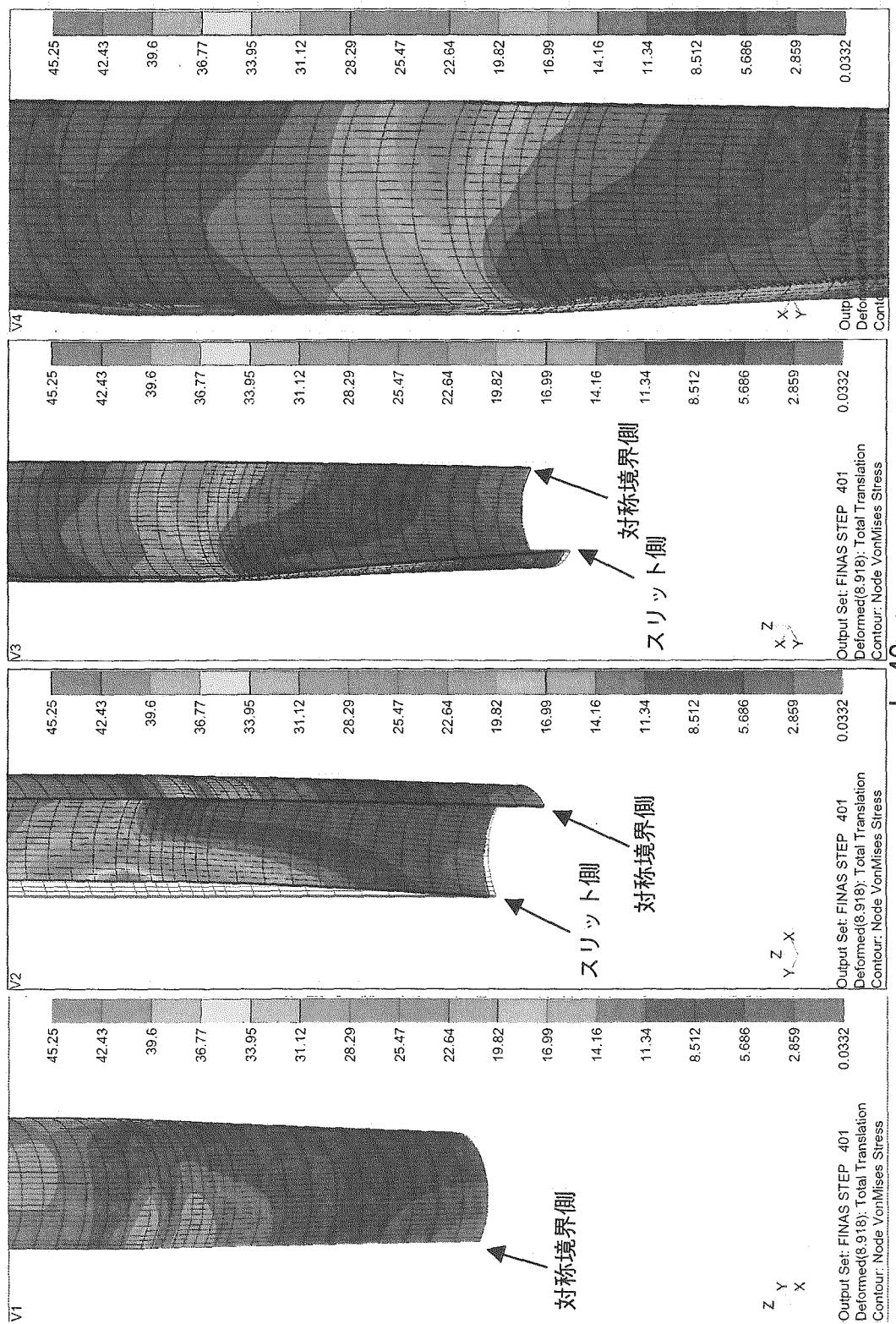
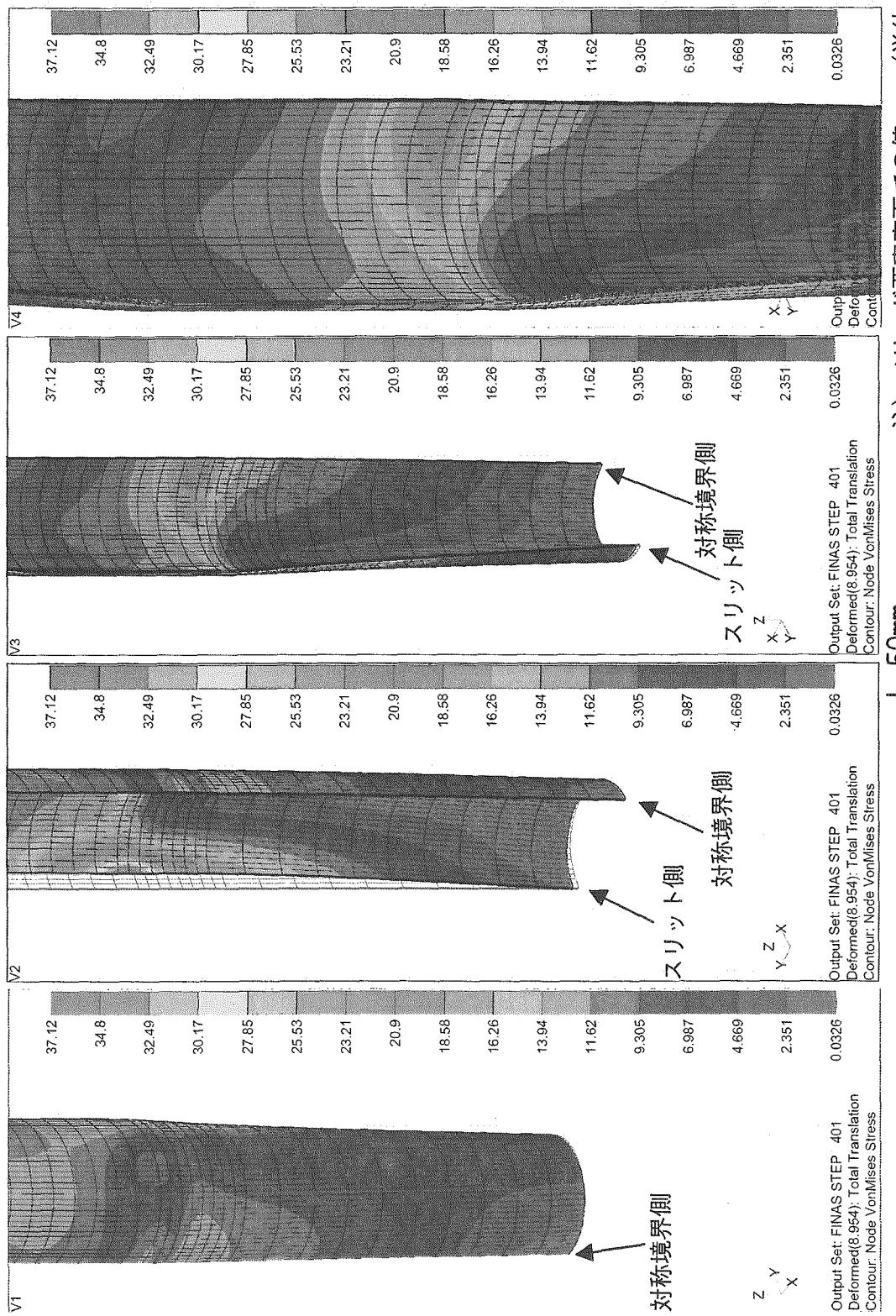
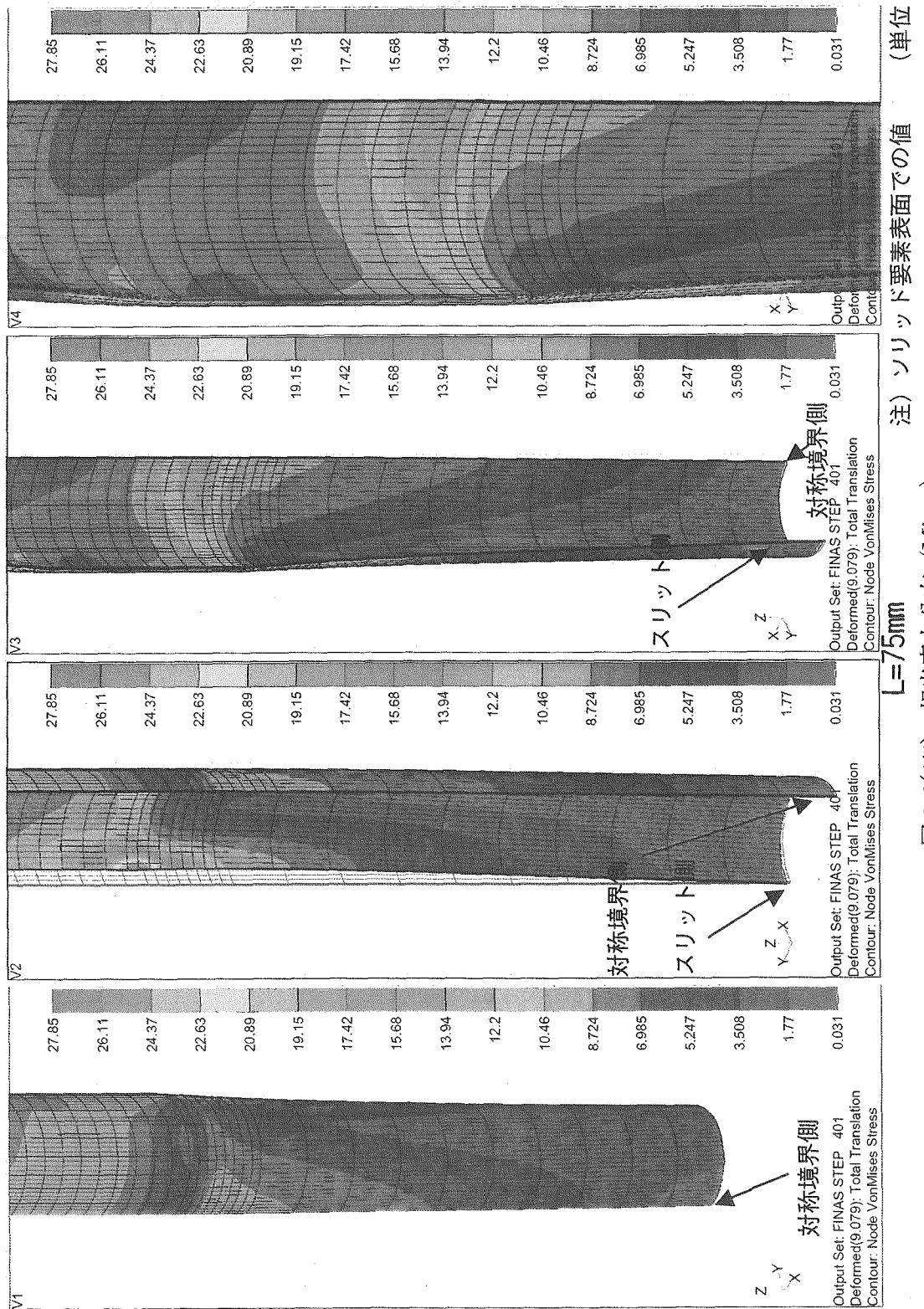


図 3-6(2/4) 相当応力分布 (Mises)
L=40mm



注) ソリッド要素表面での値 (単位: kg/mm²)
L=50mm 相当応力分布 (Mises)



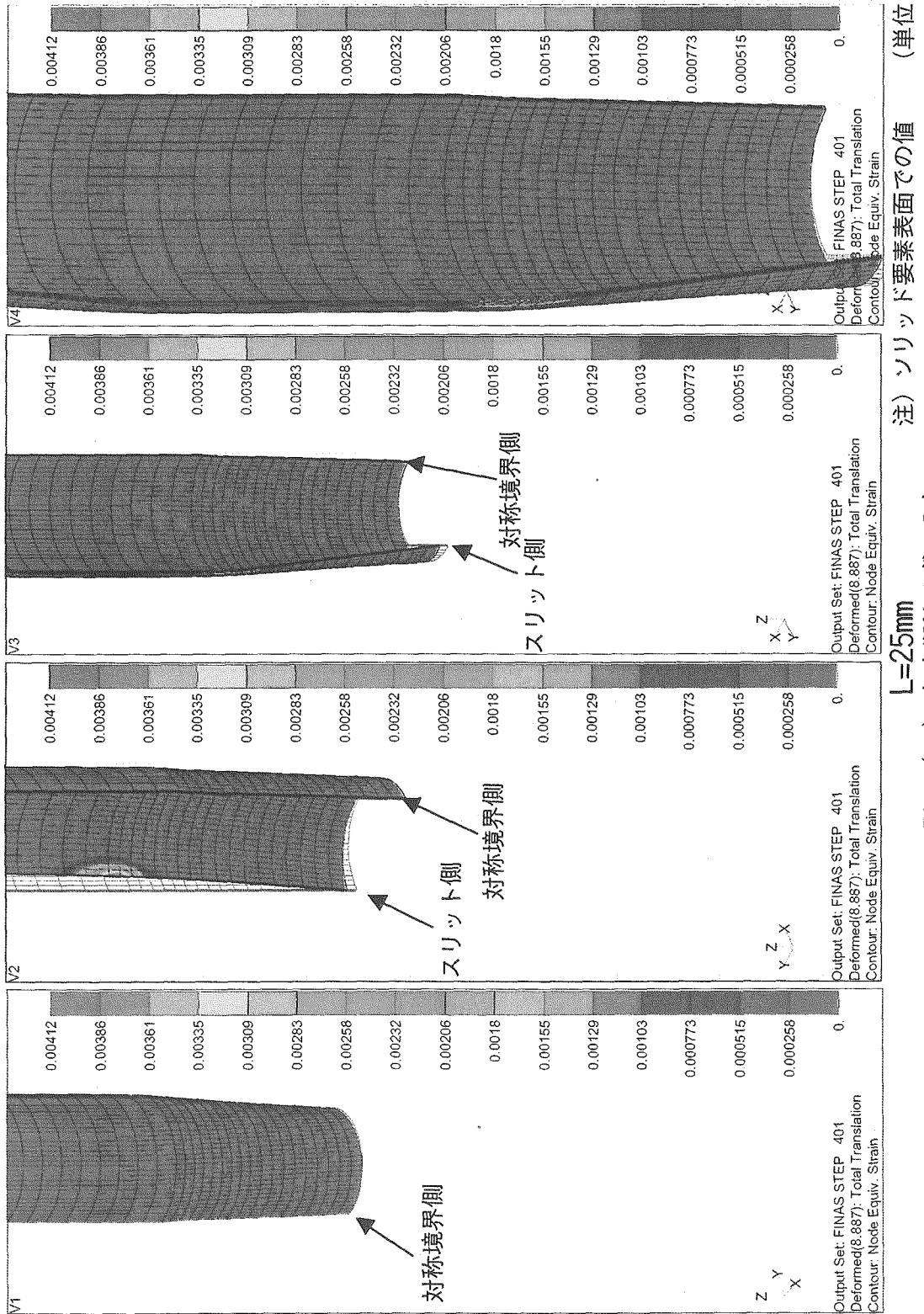
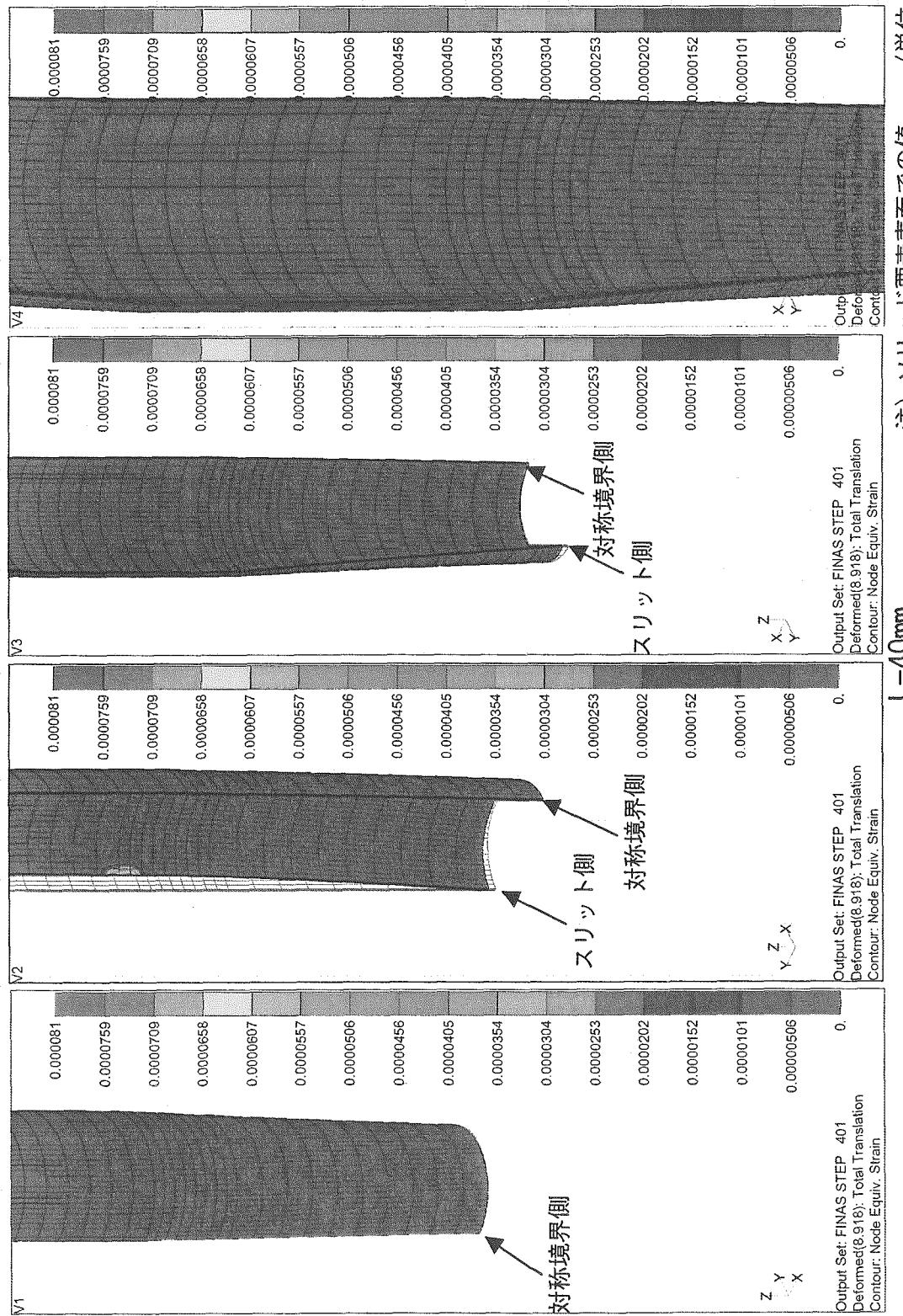


図 3-7(1/2) 相当塑性ひずみ分布



卷之三

図 3-7(2/2) 相当塑性ひずみ分布

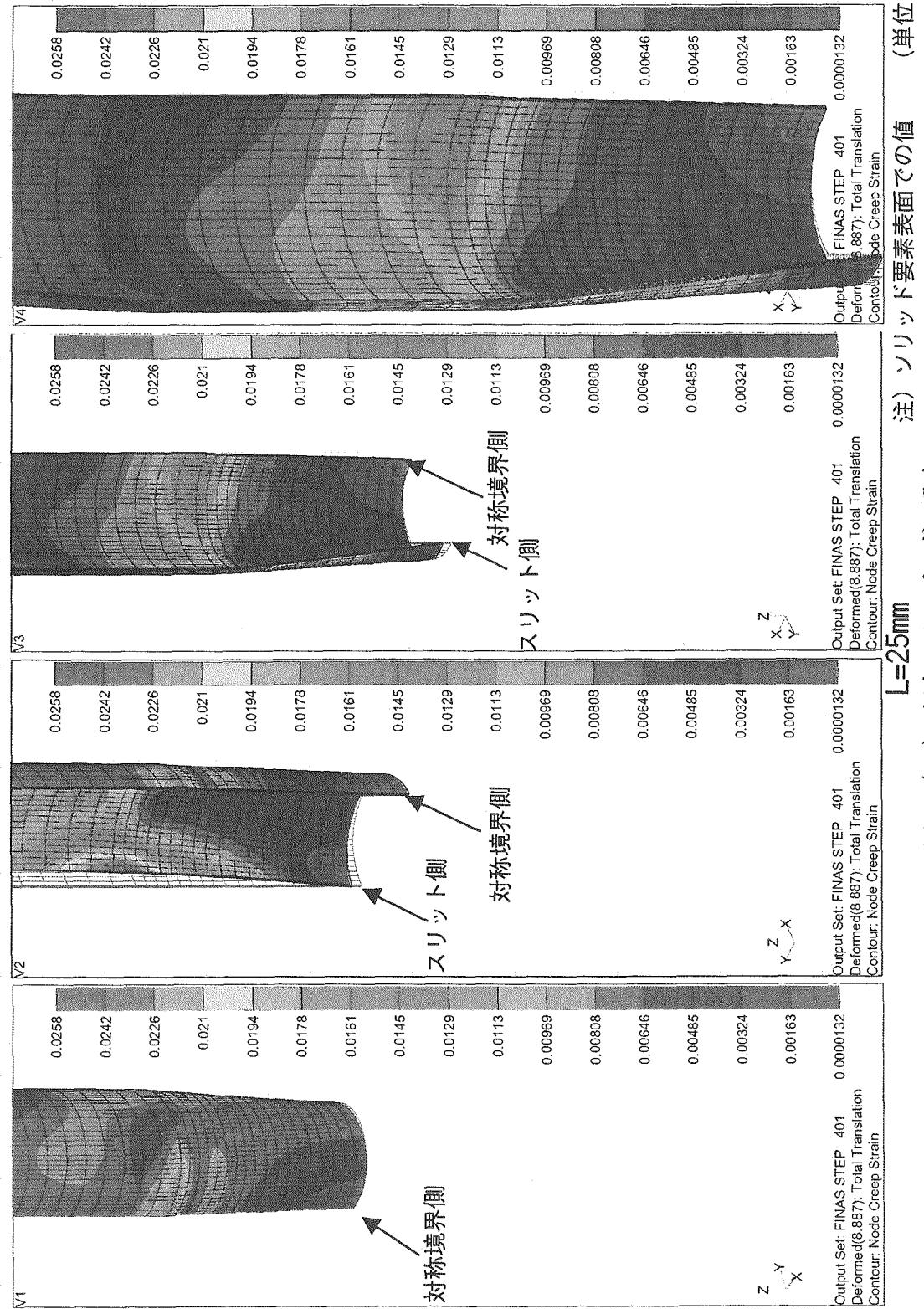


図 3-8(1/4) 相当クリープひずみ分布

注) ソリッド要素表面での値 (単位: kg/mm²)

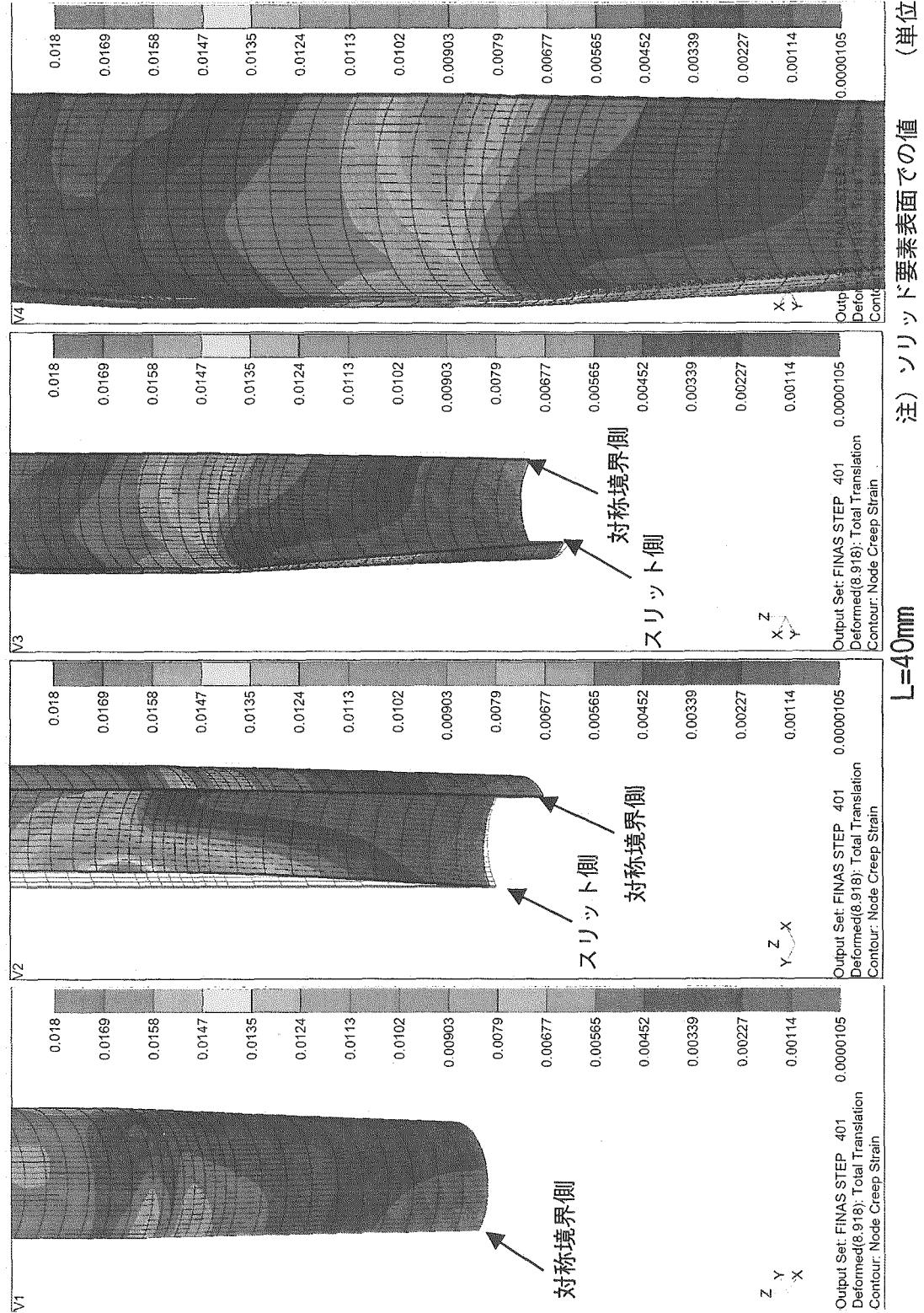
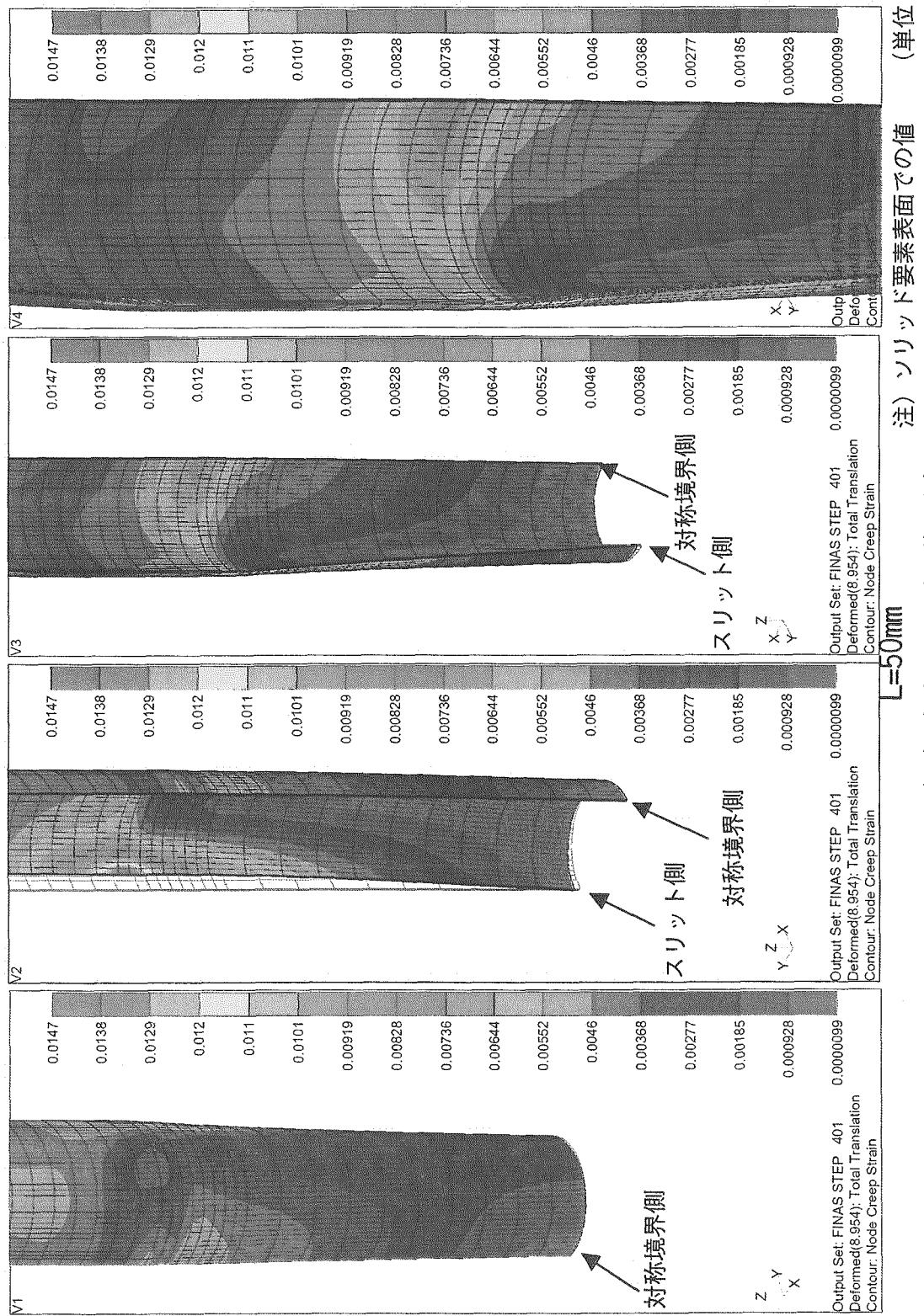


図 3-8(2/4) 相当クリープひずみ分布

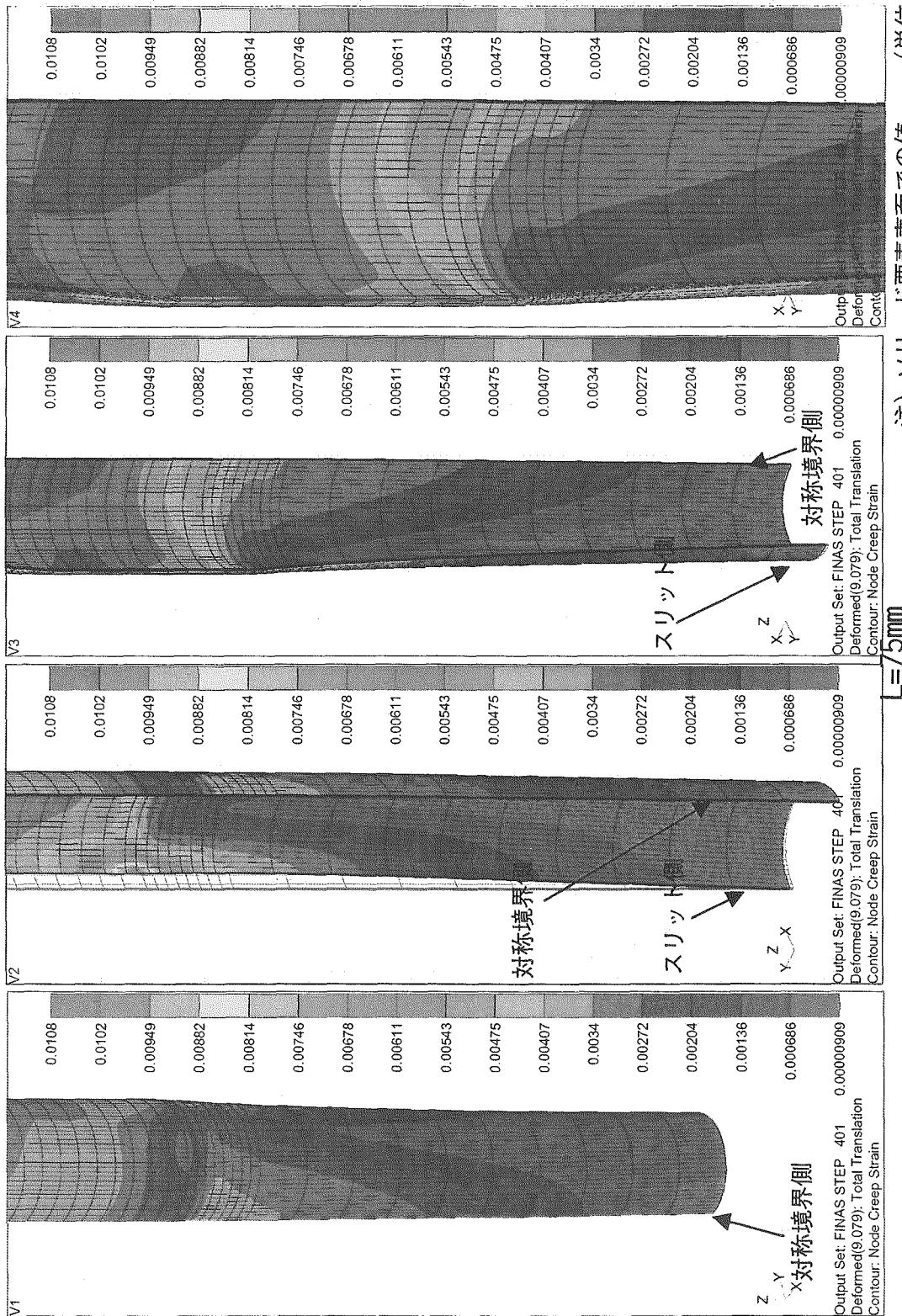
注) ソリッド要素表面での値 (単位: kg/mm²)

$$L=40\text{mm}$$



卷之三

図 3-8(3/4) 相当ケリープひづみ分布



注) ソリッド要素表面での値 (単位: kg/mm²)

図 3-8(4/4) 相当クリープひずみ分布

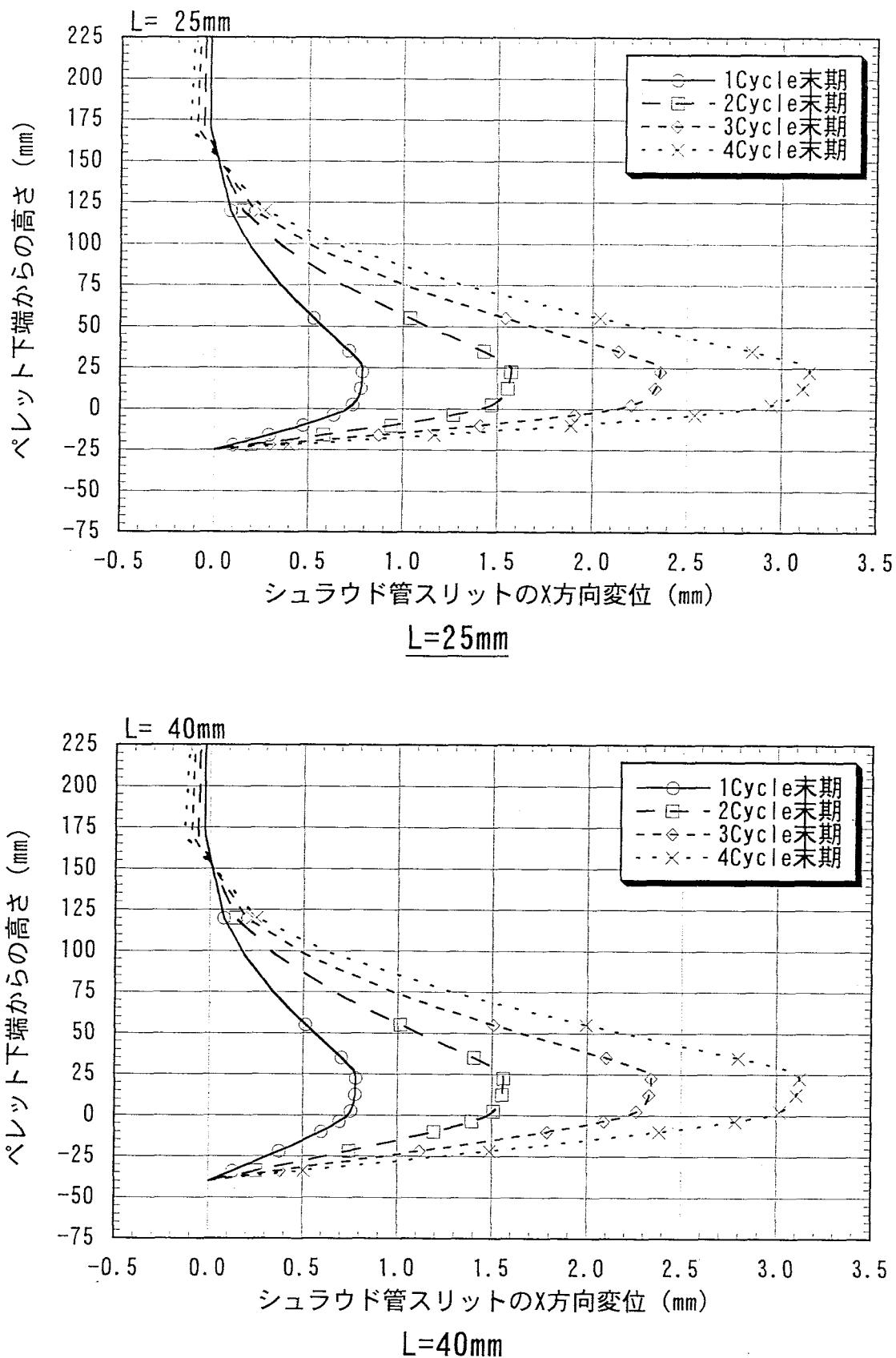


図 3-9(1/2) スリット部の変位

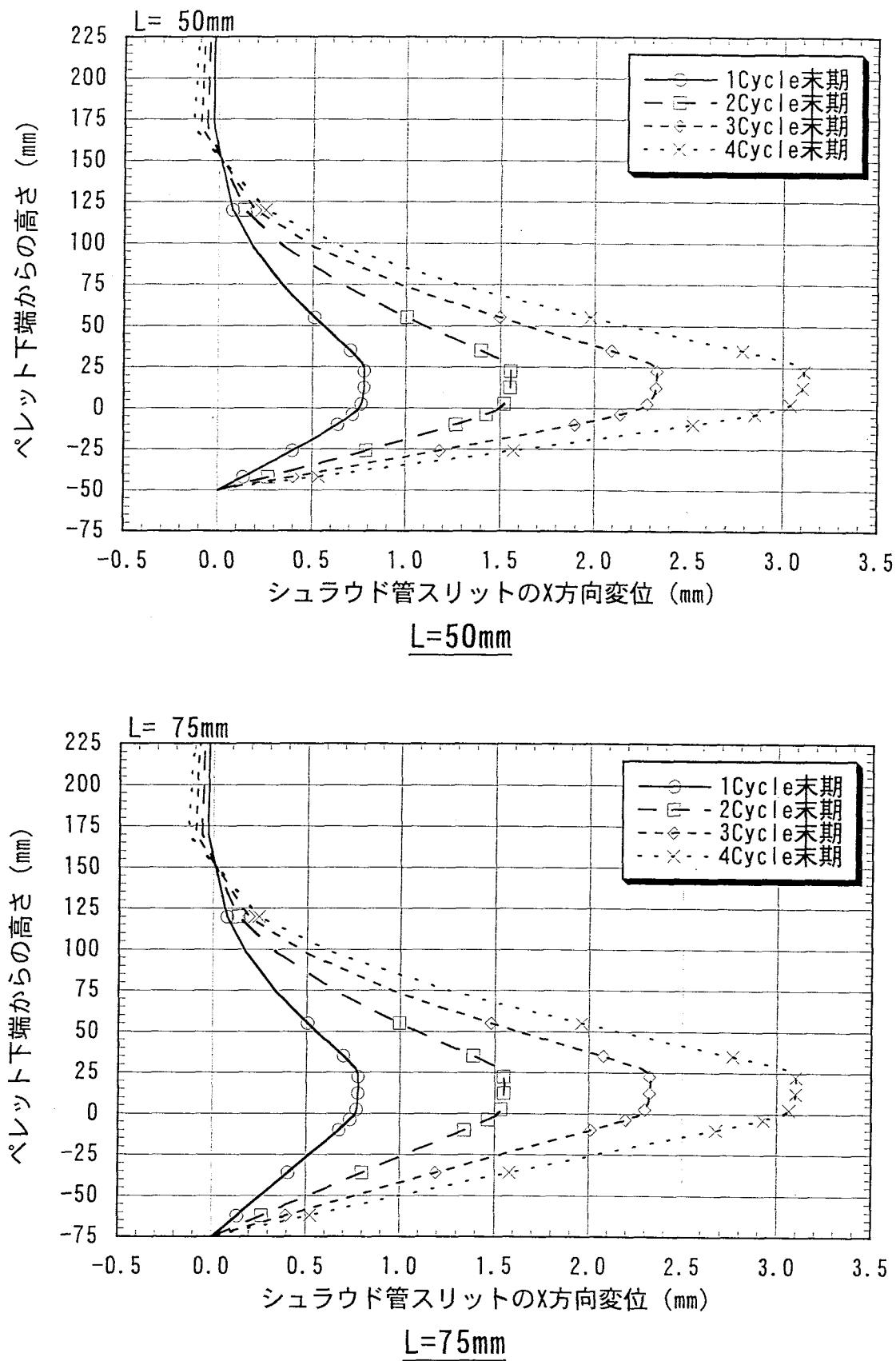


図 3-9(2/2) スリット部の変位

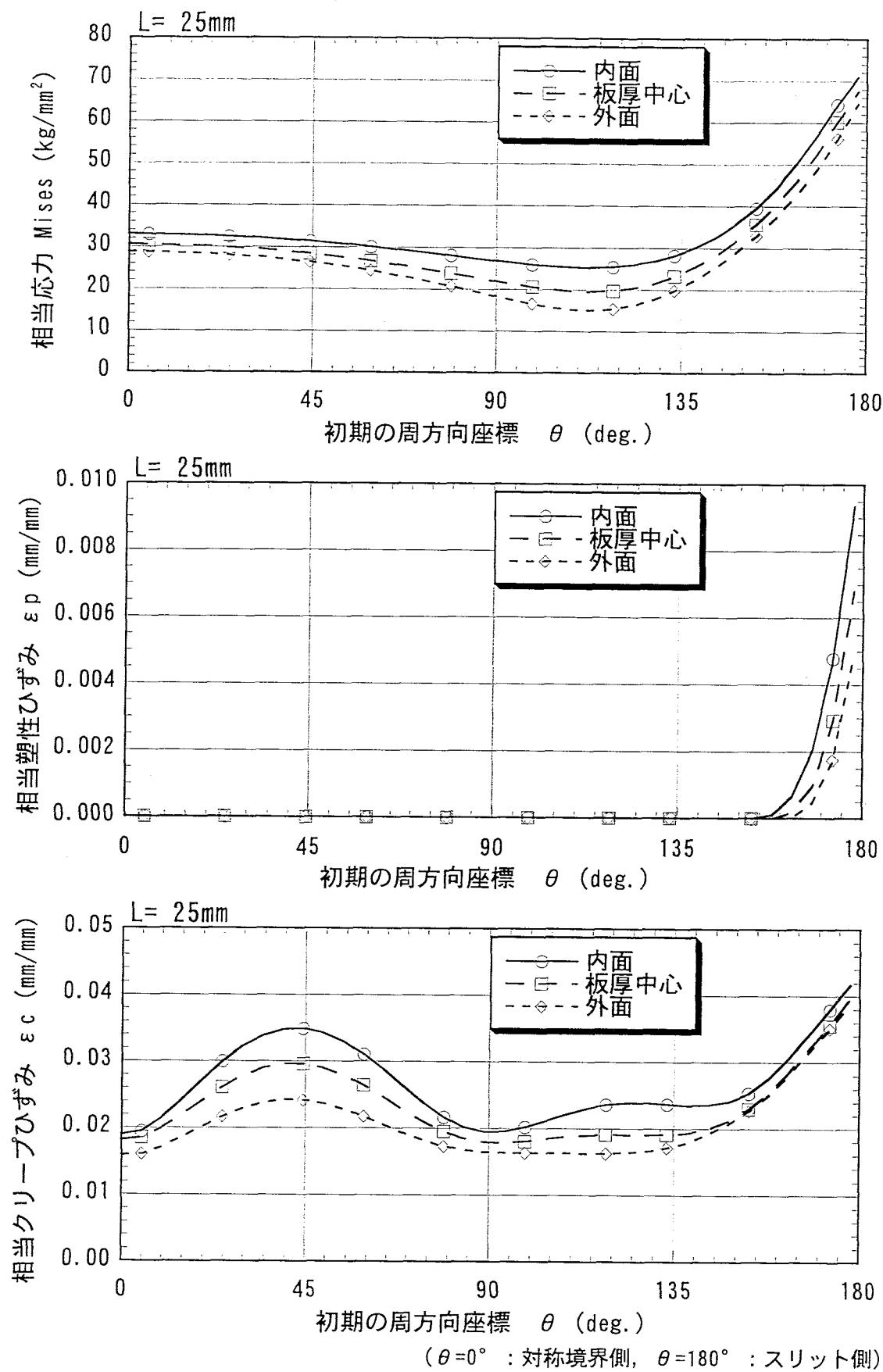
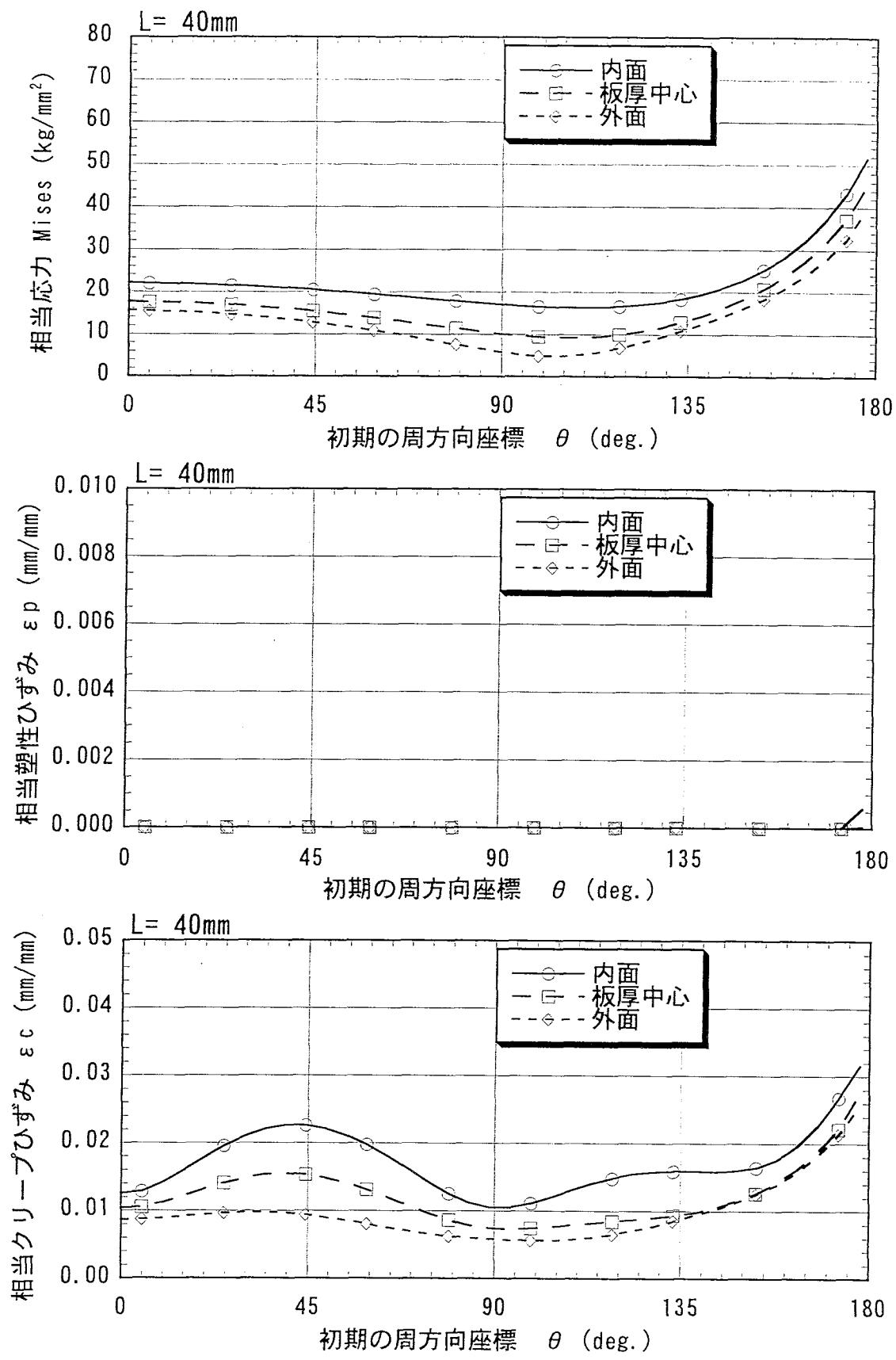


図 3-10(1/4) ペレット下端部での応力及びひずみ分布(4Cycle 末期)



($\theta=0^\circ$: 対称境界側, $\theta=180^\circ$: スリット側)

L=40mm

図 3-10(2/4) ペレット下端部での応力及びひずみ分布(4Cycle 末期)

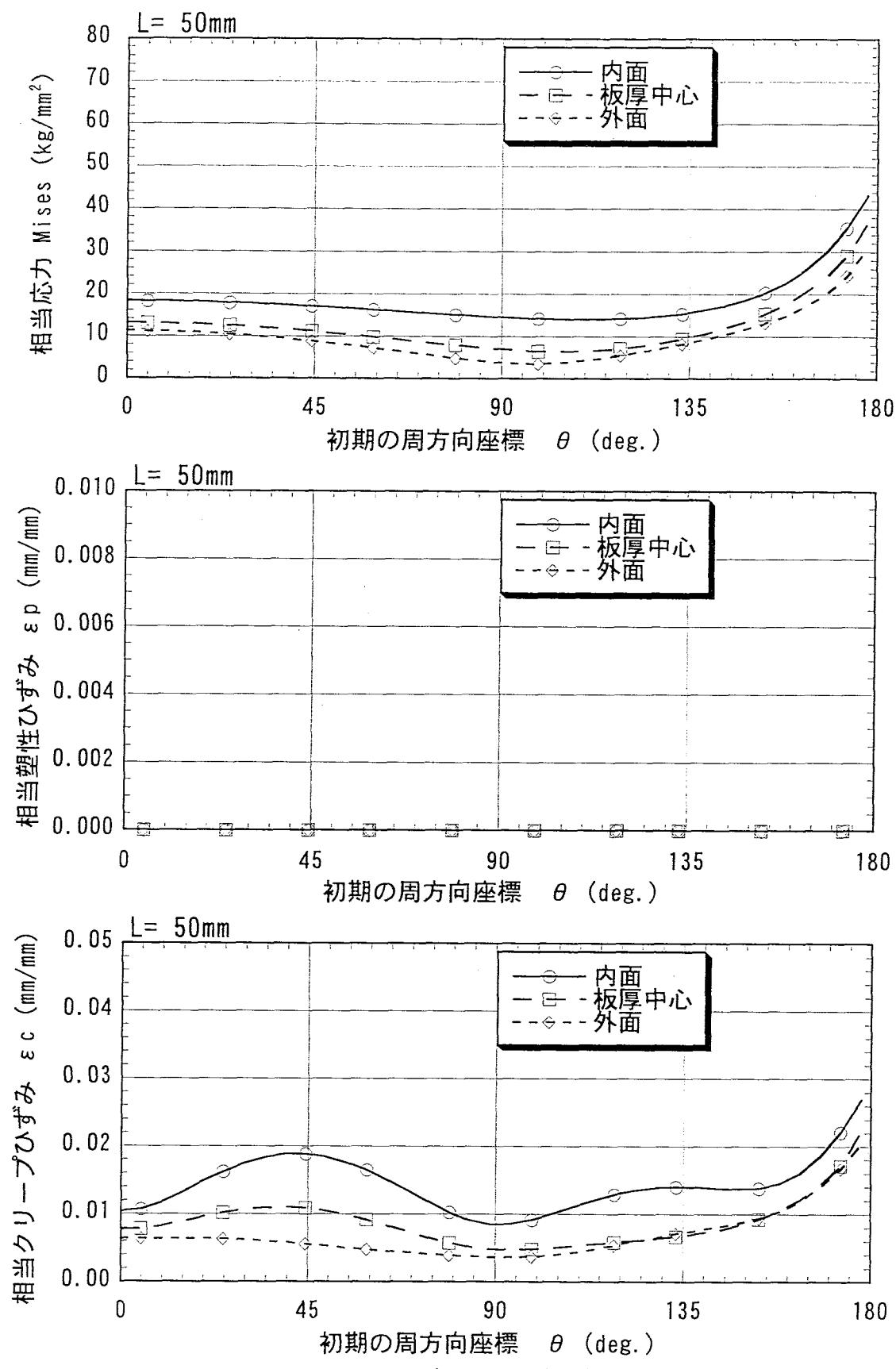


図 3-10(3/4) ペレット下端部での応力及びひずみ分布(4Cycle 末期)

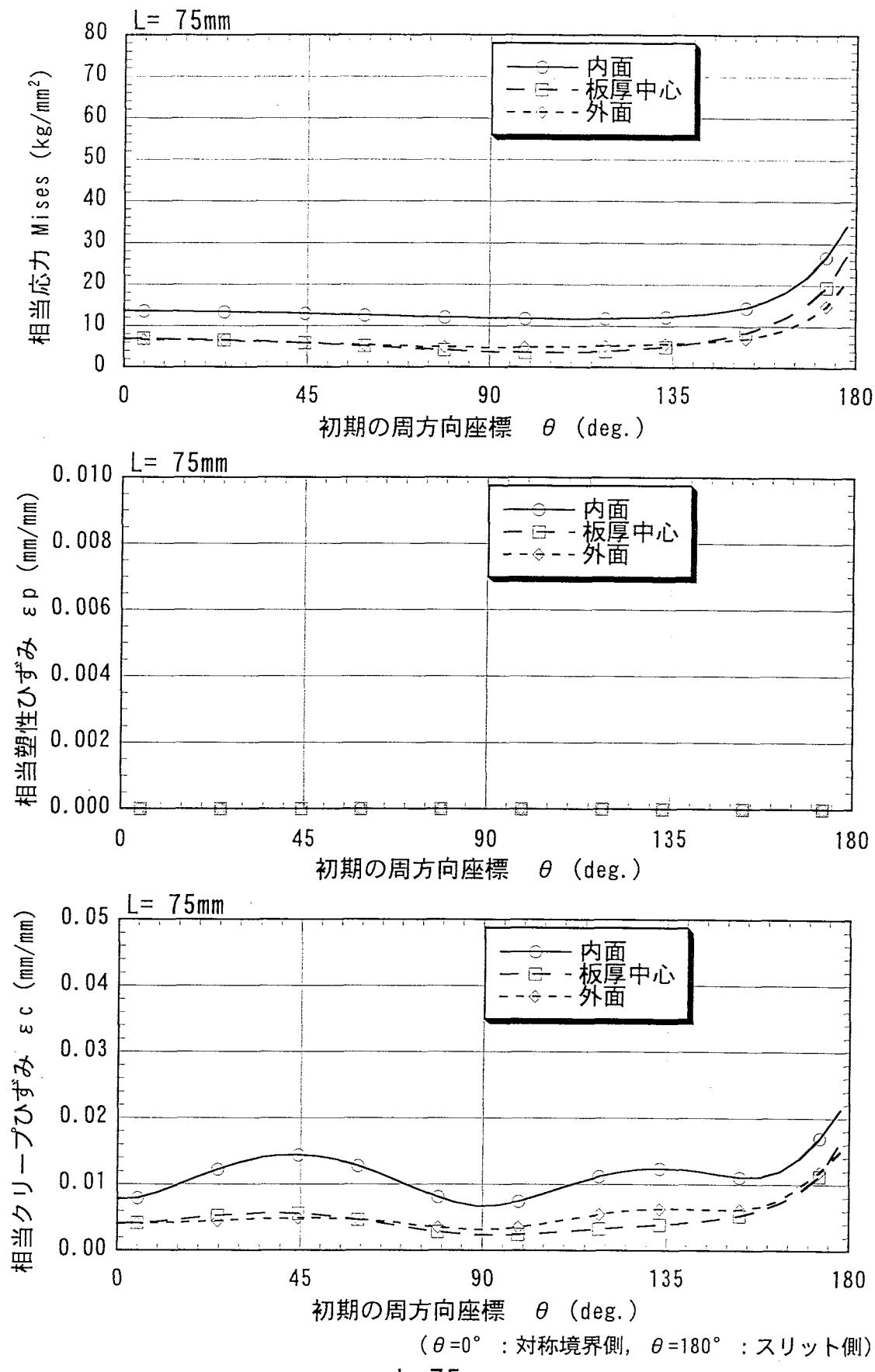


図 3-10(4/4) ペレット下端部での応力及びひずみ分布(4Cycle 末期)

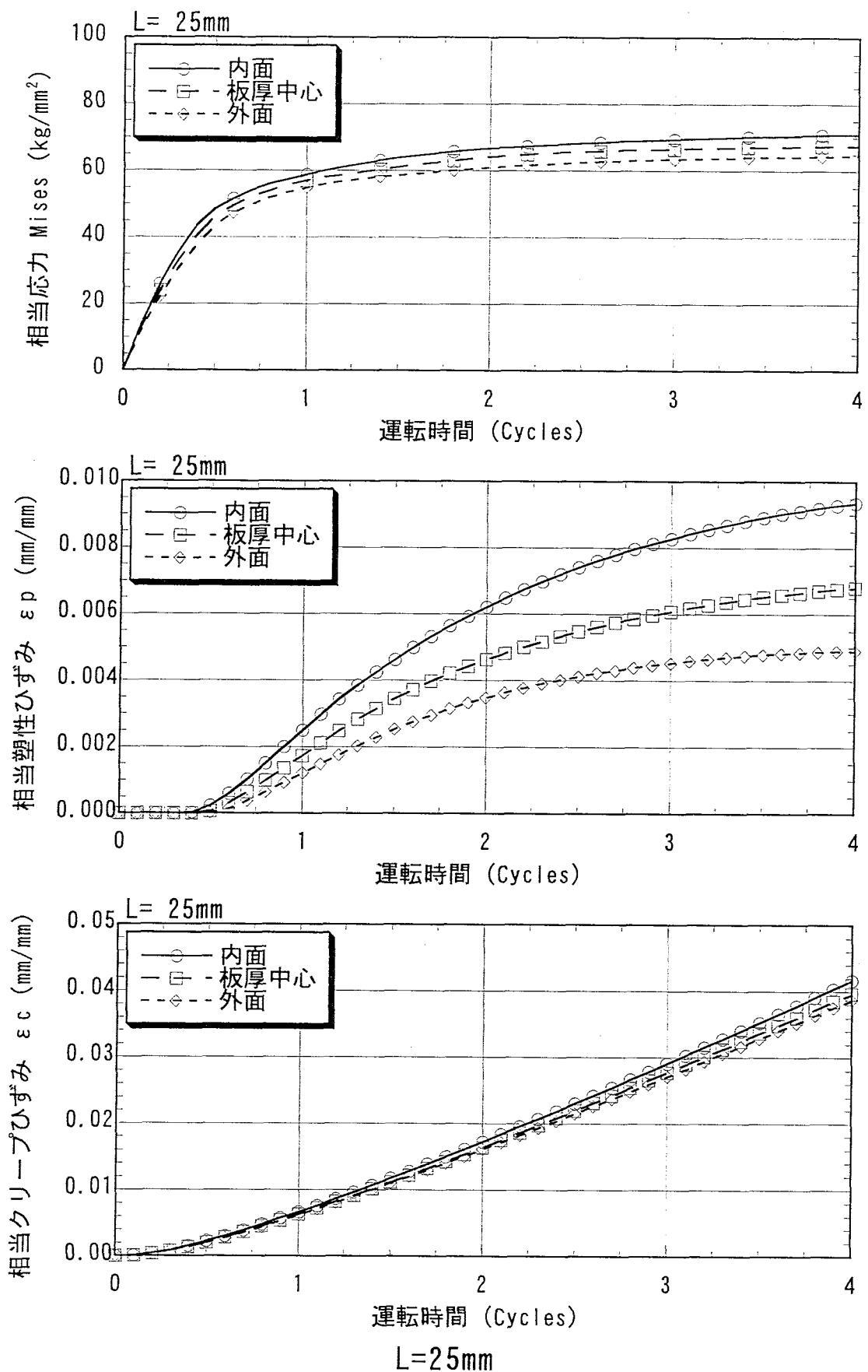


図 3-11(1/4) ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみ履歴

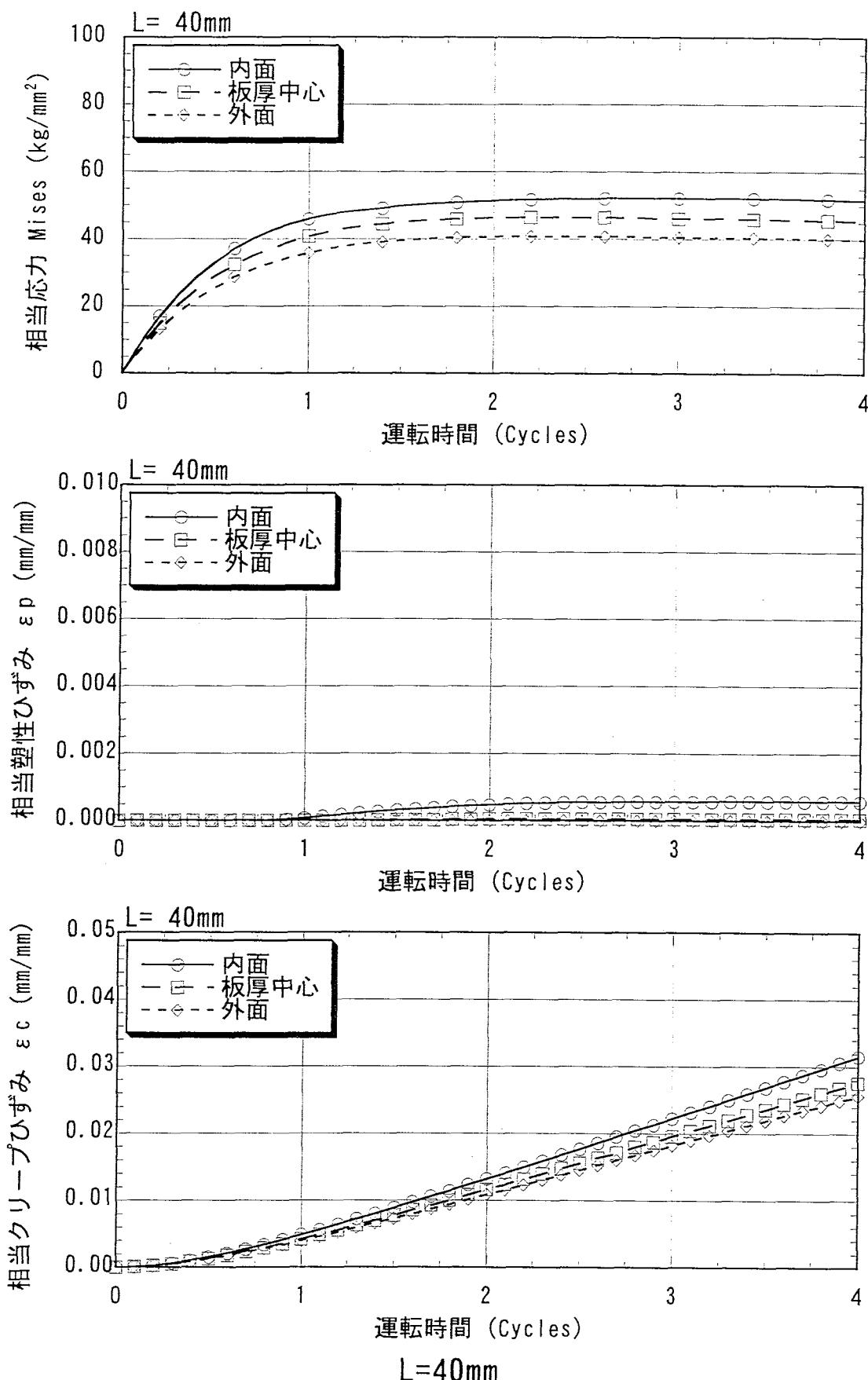


図 3-11(2/4) ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみ履歴

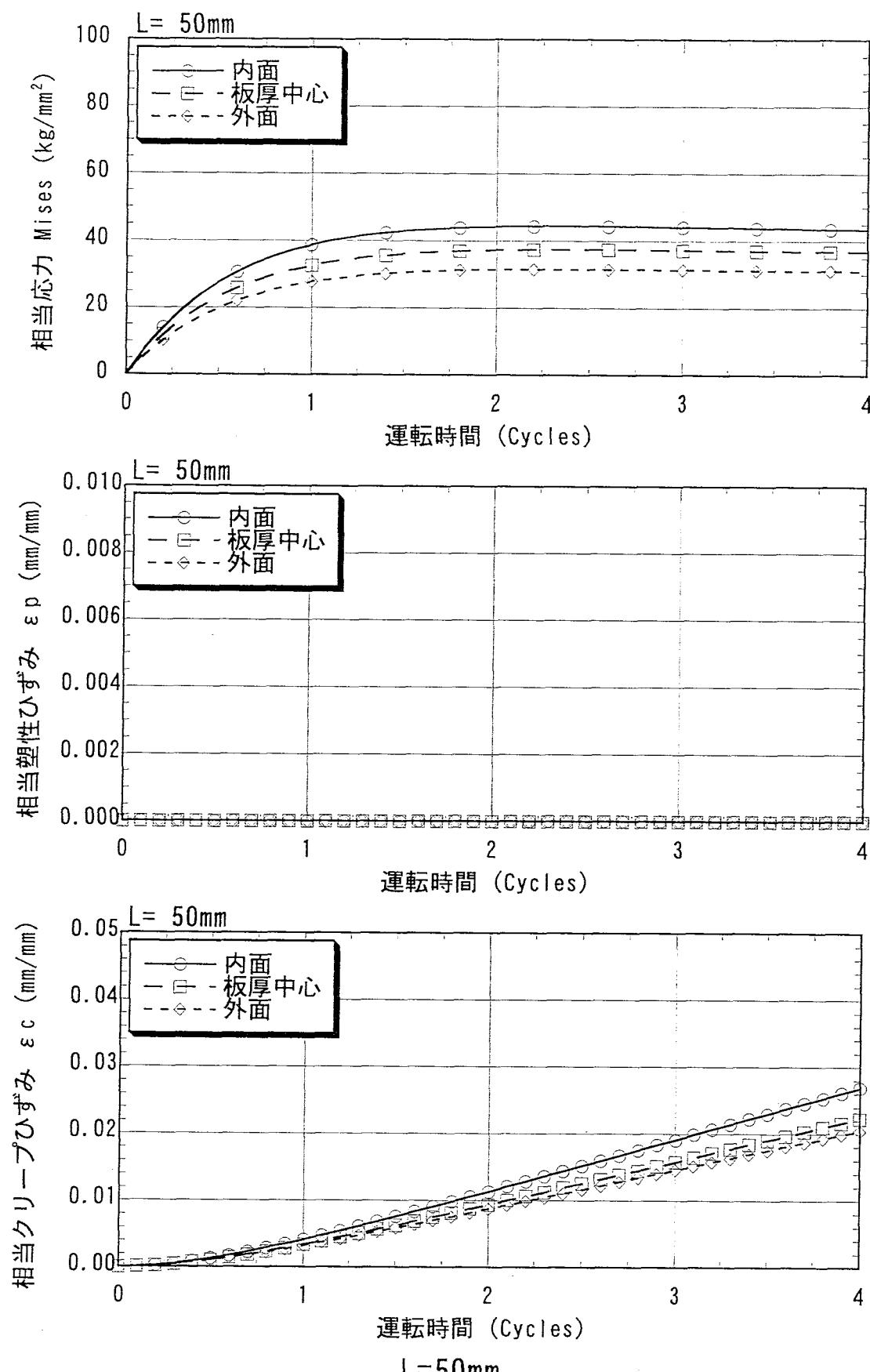


図 3-11(3/4) ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみ履歴

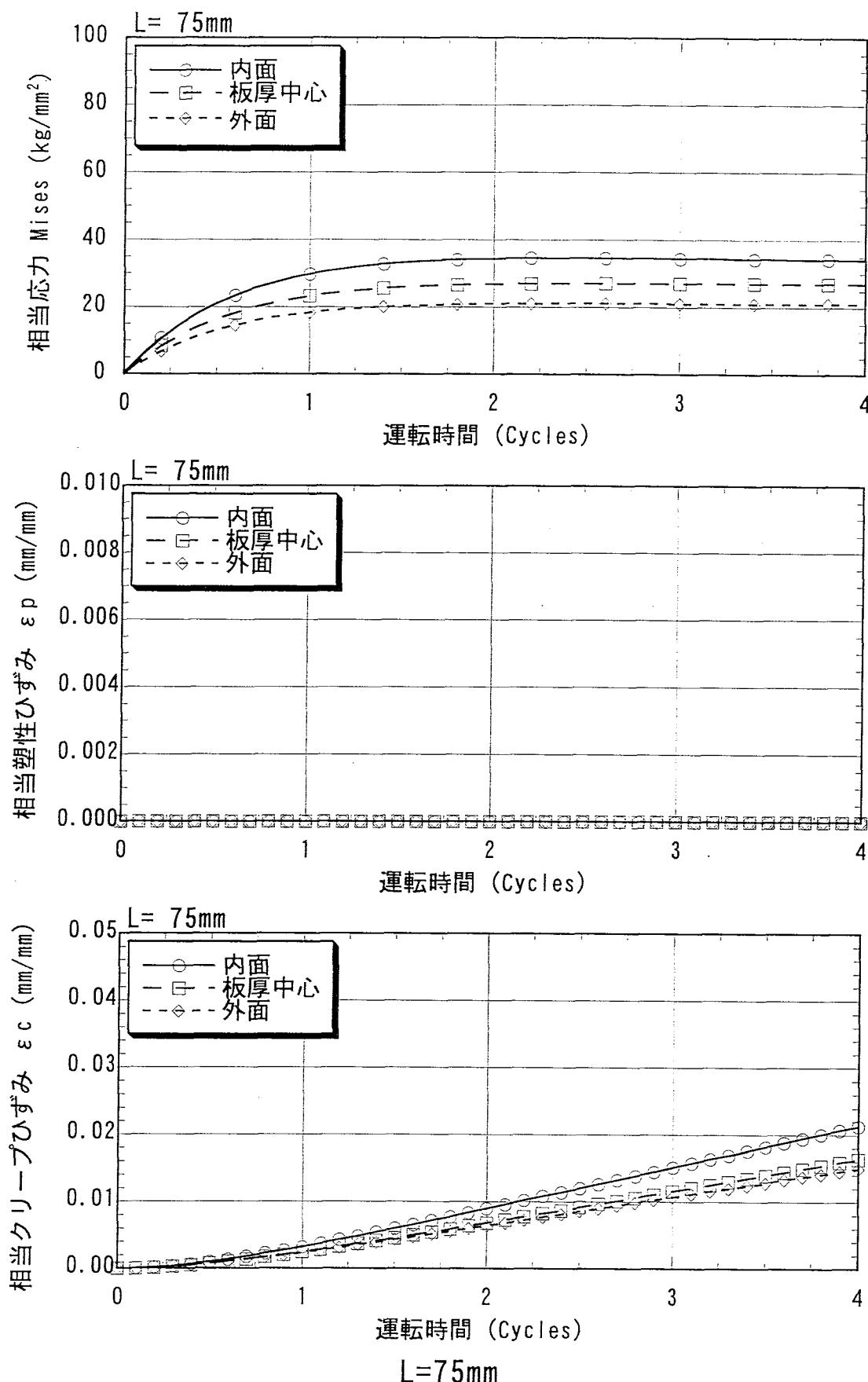
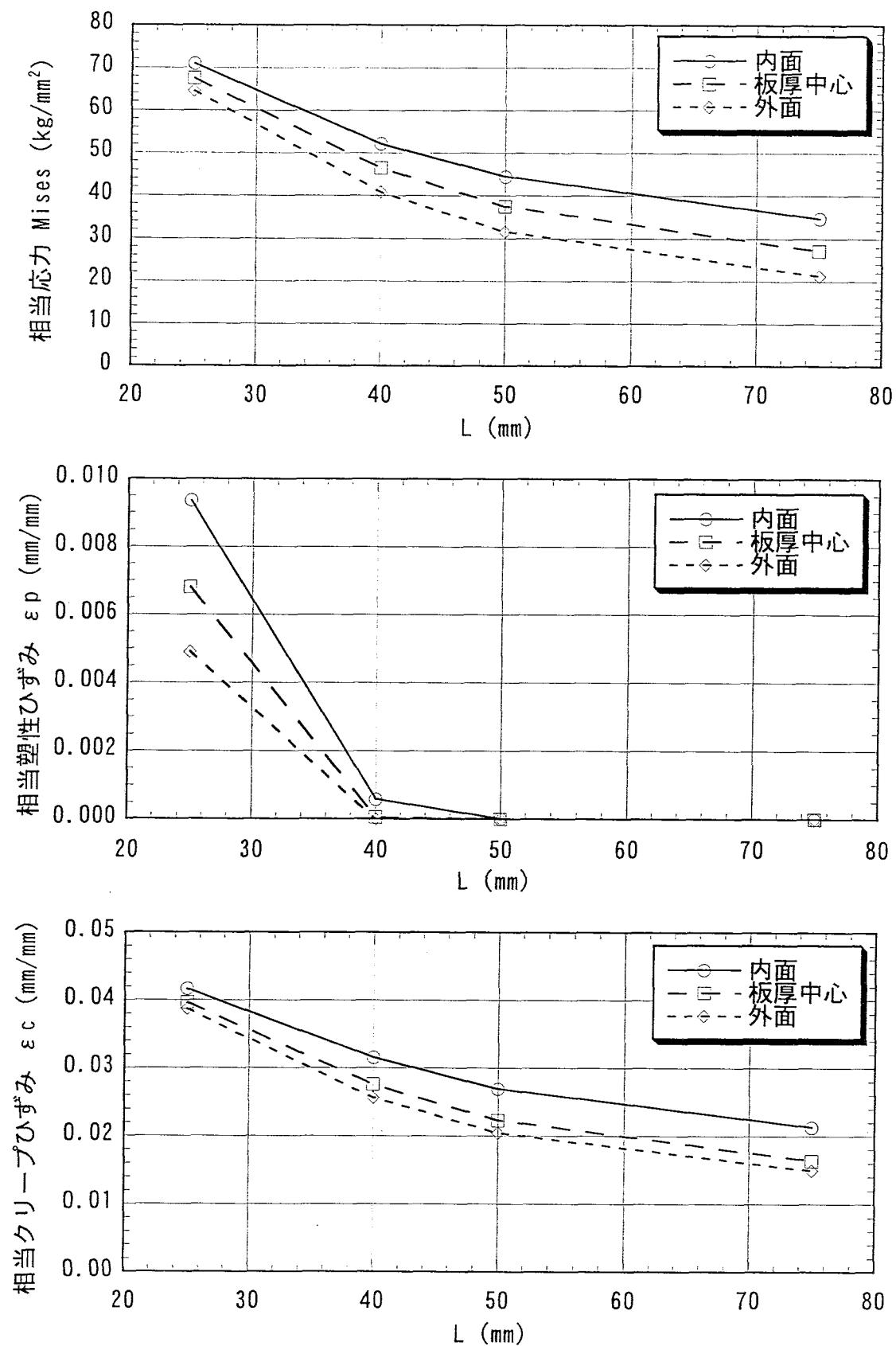


図 3-11(4/4) ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみ履歴

図 3-12 ペレット下端部のスリット部での応力及びひずみとパラメータ L の関係

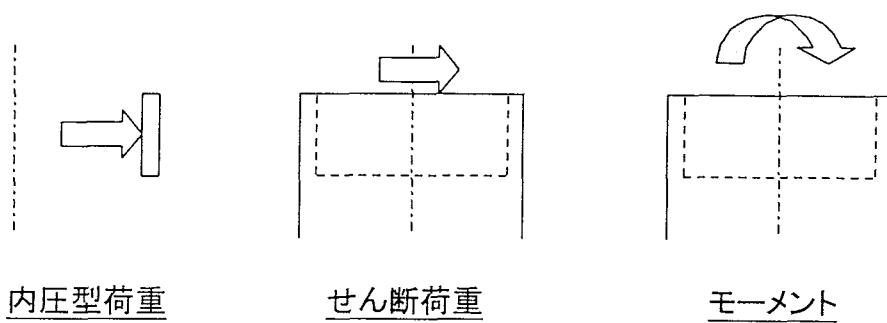


図 3-13 下部スリープの応力評価モデル

4. 長期水中保管試験

4.1 概要

使用済みナトリウムボンド型制御棒のナトリウムドレン時において、下部ポーラスプラグに目詰まりが生じたと想定した場合、制御棒要素内には約 20g のナトリウムが残留する。

2002年度に実施した「もんじゅ」ナトリウムボンド型制御棒要素洗浄試験では上部端栓のベントホールから水が浸入することによって、ナトリウムー水反応が始まり、洗浄がゆっくりと進むことがガラス製の予備洗浄試験体により確認されている。また下部ポーラスプラグが目詰まりした状態を模擬した模擬要素試験体Bを用いた洗浄試験では、「もんじゅ」ナトリウム洗浄設備と同等の洗浄条件すべての残留ナトリウムを洗浄することはできないことが確認されている。

実機では洗浄設備による蒸気洗浄後、缶詰缶に収納して水プールに貯蔵することとしているため、長期間の水プール保管中に制御棒要素内に残留しているナトリウムによる過大なナトリウムー水反応が生じないことを確認する必要がある。

そこで内部にナトリウムが残留している試験体を長期間水中に浸漬し、残留ナトリウムの反応状況を観察した。

4.2 試験方法

水中保管用チャンバに試験体を装荷し、チャンバ内を純水で満たす。チャンバ上部に設置した水素濃度計によりナトリウムー水反応による水素濃度の過大な上昇がないか監視するとともに、チャンバに設置したのぞき窓を通して、試験体の上部端栓ベントホールから放出される水素ガス気泡をビデオカメラにより観察・収録した。

また試験体内外に設置した熱電対によりナトリウムー水反応による過大な温度上昇がないか計測・監視した。

(1) 試験体

水中保管試験体は、「もんじゅ」に適用するナトリウムボンド型制御棒要素をナトリウム充填性・ドレン性・洗浄性の観点から模擬したものであり、被覆管内部にはペレットを内包するシュラウド管を模擬したダミーシュラウド管を設置している（ダミーシュラウド管と被覆管の間隙は「もんじゅ」高燃焼度炉心4サイクル末期における寸法とした）。試験体の概要を図4-1に、試験体外観を写真4-1に示す。

水中保管試験体は下部ポーラスプラグを持たない構造とし、使用済みナトリウムボンド型制御棒のナトリウムドレン時において、下部ポーラスプラグに目詰まりが生じたと想定し、制御棒要素内にナトリウムが残留した状態を模擬したものである。

水中保管試験体は水中保管試験前にナトリウムを充填し、内部が所定のレベルまでナトリウムで満たされたことを確認後、「もんじゅ」洗浄設備を模擬した洗浄装置で実機と同等の条件（下記参照）で洗浄している。

・蒸気洗浄条件

蒸気温度：135°C

蒸気流量：約 5kg/h

試験体予熱温度：約 70°C

洗浄時間：約 50 分

雰囲気：アルゴンガス

更に下記条件による純水循環洗浄で洗浄している。

・純水循環洗浄

純水温度：室温

純水流量：約 20ℓ/min

試験体予熱温度：室温（予熱なし）

洗浄時間：約 15 分 × 2 回、1 回目と 2 回目の間で純水交換

雰囲気：アルゴンガス

その後、下記条件で水中に短期間浸漬している。

・水中保管

純水温度：室温（ただしポンプ起動中は水温上昇あり）

純水流量：約 0～5ℓ/min

試験体予熱温度：室温（予熱なし）

保管時間：110 時間

雰囲気：窒素ガス

これらの予備的な洗浄によって、試験体内部の数 g 程度のナトリウムと試験体表面に付着したナトリウムが洗浄されているが、内部には 20g 程度のナトリウムが残留している。

試験体の主要目を以下に示す。

- ・数　　量：1体
- ・全　　長：1210mm
- ・被覆管内径：15.7mm（実機寸法は15.5mm）
- ・ダミーシュラウド管外径：14.8mm（実機寸法は4サイクル末期で14.6mm）
- ・上部ポーラスプラグ気孔径：上部200 μm （下部はなし）
- ・主要材料：SUS304
- ・計装品　：熱電対（試験体外側4本、試験体内部11本）
- ・構　　造：図4-1
- ・残留ナトリウム量：約20g

(2) 試験装置

試験装置を図4-2および写真4-2に示す。試験装置のループ構成を図4-3に示す。

外気の流入を防ぐため、排気ノズル側には逆止弁を設けている。水中保管試験時には純水をチャンバへ下から流し込み一定レベルに到達させる（循環はしない）。純水をカバーするのはアルゴンガスであり、ナトリウムー水反応により発生した水素が容器内に過剰に蓄積されないように定期的に排気した。

試験体内部で生じたナトリウムー水反応を検出するために排気系には水素ガス濃度計を設置している。また反応によって発生した熱は試験体内部に設置している熱電対によっても検出される。

チャンバにはガラス窓を設け、試験体外観の変化をビデオカメラで観察できるようにした。特にビデオカメラでは上部端栓のベントホールから放出される水素ガス気泡を観察することで、水中保管中の緩慢なナトリウムー水反応状況を定量的に評価した（水素ガス濃度計は計測精度の観点から、過大なナトリウムー水反応が生じた場合の監視用と位置付けた）。

試験装置の主要目を以下に示す。

- ・数　　量：1基
- ・全　　長：約2000mm
- ・試験容器内径：約200mm
- ・主要材質：SUS304
- ・純水温度：室温（循環なし）
- ・カバーガス：窒素ガス（循環なし。1週間毎に水素ガス濃度を測定後置換）

- ・計装品：熱電対、水素ガス濃度計
- ・構造：図 4-2
- ・系統：図 4-3

4.3 試験結果

約 4500 時間の水中保管を行ったが、試験中に安全上問題となるナトリウムー水反応による水素ガス濃度の上昇や温度上昇は生じなかった。

上部端栓のベントホールから放出された水素ガス気泡の観察結果より算出した水素ガス発生頻度の推移を図 4-4 に示す（水素ガスの放出状況を写真 4-3 に示す）。

試験開始から 120～170 時間後に、水素ガス発生頻度のピークが現れている。その後、気泡の発生頻度は極端に減少した。

試験体及び試験体周囲の温度の推移を図 4-5 に示す。

発生水素ガス量のピークが見られる 120～170 時間の範囲では有意な温度上昇は観察されていない。また試験全体を通してほぼ外気温に連動して変動していることが判る。

4.4 評価

(1) 水中保管試験中のナトリウム反応量

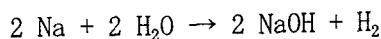
本試験で反応したナトリウム量を水素ガス放出量より評価した。

1 粒の気泡の体積は気泡が通過する流通孔の径 $\phi 5\text{mm}$ より 65.4mm^3 と想定される。

従って気泡体積が常温・常圧下のものと近似し、理想気体（1 モル当たり $22.4\ell = 2.24 \times 10^7\text{mm}^3$ ）として考えると、気泡 1 粒あたりモル数は、

$$65.4 \div 2.24 \times 10^7 = 2.92 \times 10^{-6}\text{mol}$$

と計算される。ナトリウムー水反応は



となるので、2mol のナトリウムが水と反応すると水素 1mol が発生するため、気泡の総量からナトリウム反応量を推定できる。（ただし、150 時間以降では気泡の直径が 2.5mm 程度に減少しているため、150 時間以前では気泡 1 粒あたり $2.92 \times 10^{-6}\text{mol}$ 、150 時間以降は気泡 1 粒あたり $0.37 \times 10^{-6}\text{mol}$ として換算した。）

気泡の発生に伴うナトリウム反応量の推移を図 4-6 に示す。試験期間中に約 4.55g

のナトリウムが反応したと推定される。また 120～170 時間の発生水素ガス量のピークが現れた期間に、23%に相当する約 4.5g が反応したと推定される。

(2) 水中保管時の温度挙動について

発生水素ガス量のピークが見られる 120～170 時間前後の試験体各部の温度推移を図 4-7 に示す。各部の温度はチャンバ内の気温に連動し、24 時間周期で変動しているが、ナトリウム一水反応によると思われる有意な温度上昇は生じなかった。

尚、図 4-7において B-7 の計測温度と他の計測温度（B-10）との差が 80 時間以降から徐々に大きくなり、220 時間付近で再び小さくなっている。80 時間以降から差が大きくなったのは、ナトリウム一水反応によって生じた水素ガス気泡が試験体下部に蓄積されて B-7 熱電対が水素ガス雰囲気となり、周囲との熱伝導が低下したためと考えられる。また 220 時間付近で差が小さくなったのは、B-7 周囲の水素ガス気泡が上部端栓ベントホールから試験体外部へ放出されて、B-7 周囲が水と置換されて周囲との熱伝導が復帰したためであると考えられる。

(3) 長期水中保管試験による安全性評価の妥当性について

120～170 時間の約 50 時間の間に 23%に相当する約 4.5g のナトリウムが反応したことから、一旦ナトリウム一水反応が始まるある程度のナトリウムが消費されるまで反応が継続されると考えられる。これは 2002 年度の「もんじゅ」ナトリウムボンド型制御棒要素洗浄試験⁽⁷⁾におけるガラス製の予備試験体の観察結果から示唆されるように、ナトリウム一水反応によって発生した水素ガスが放出過程でナトリウム周囲の水酸化ナトリウム溶液を攪拌し、新たな水を巻き込んで反応を継続させることによるものと判断される。即ち、今回の試験では試験期間中に上記のナトリウム一水反応の継続的なサイクルが観察されていることから、長期保管の安全性を評価する上で欠かせないイベントが含まれていると考えられる。

従って、本試験中に安全上問題となるような事象が生じなかつたことから、実機においても長期水中保管時に過大なナトリウム一水反応はないと判断される（水とともに缶詰缶へ使用済み制御棒を保管する場合は発生水素ガスが缶詰缶に蓄積されるため、その処置に配慮する必要がある）。また通常の制御棒要素は下部端栓ベントホールよりボンドナトリウムがドレンされるが、万ードレンできなかつた場合でも水中保管中に安全上問題が起きることはないと判断される。

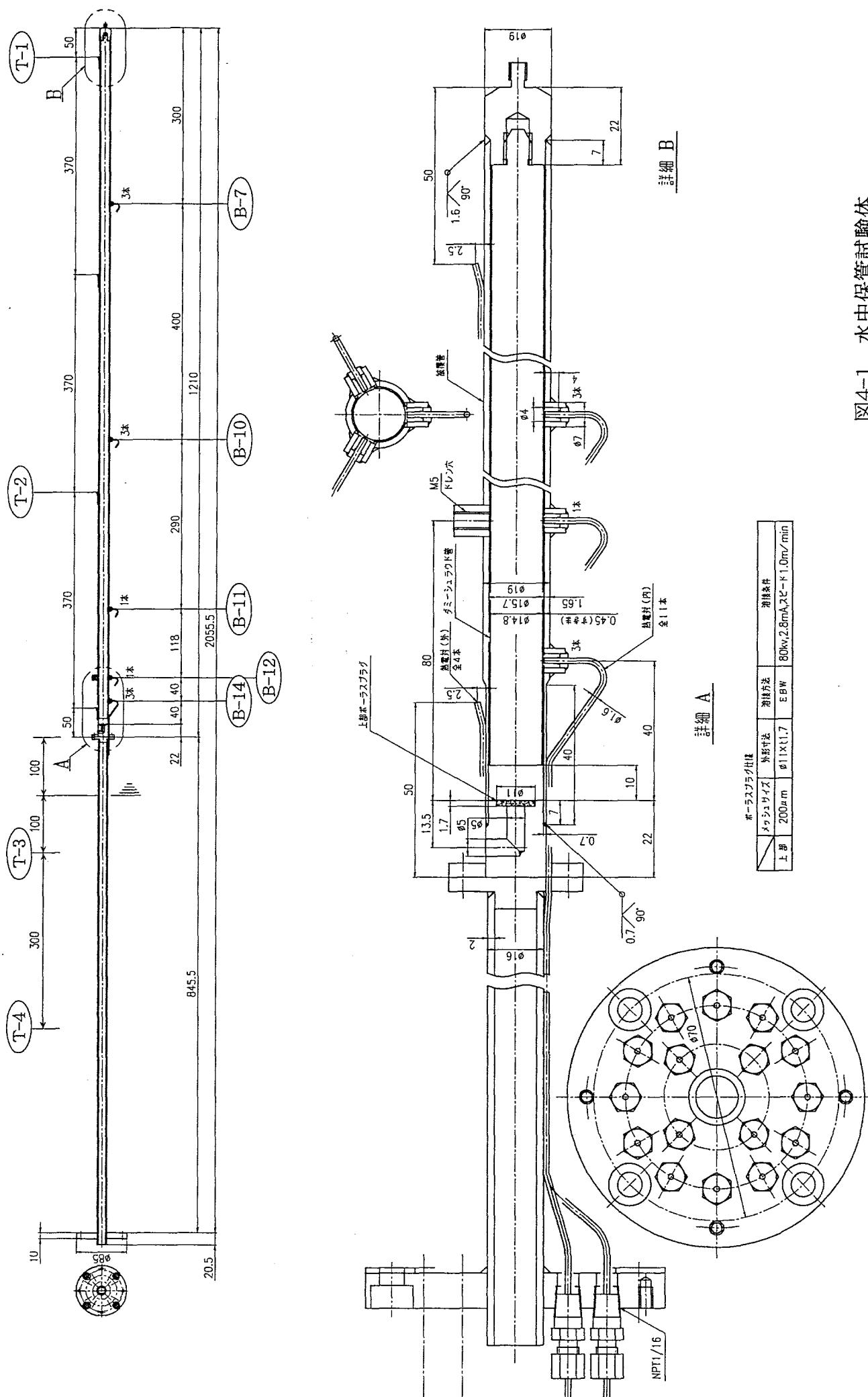


図4-1 水中保管試験体

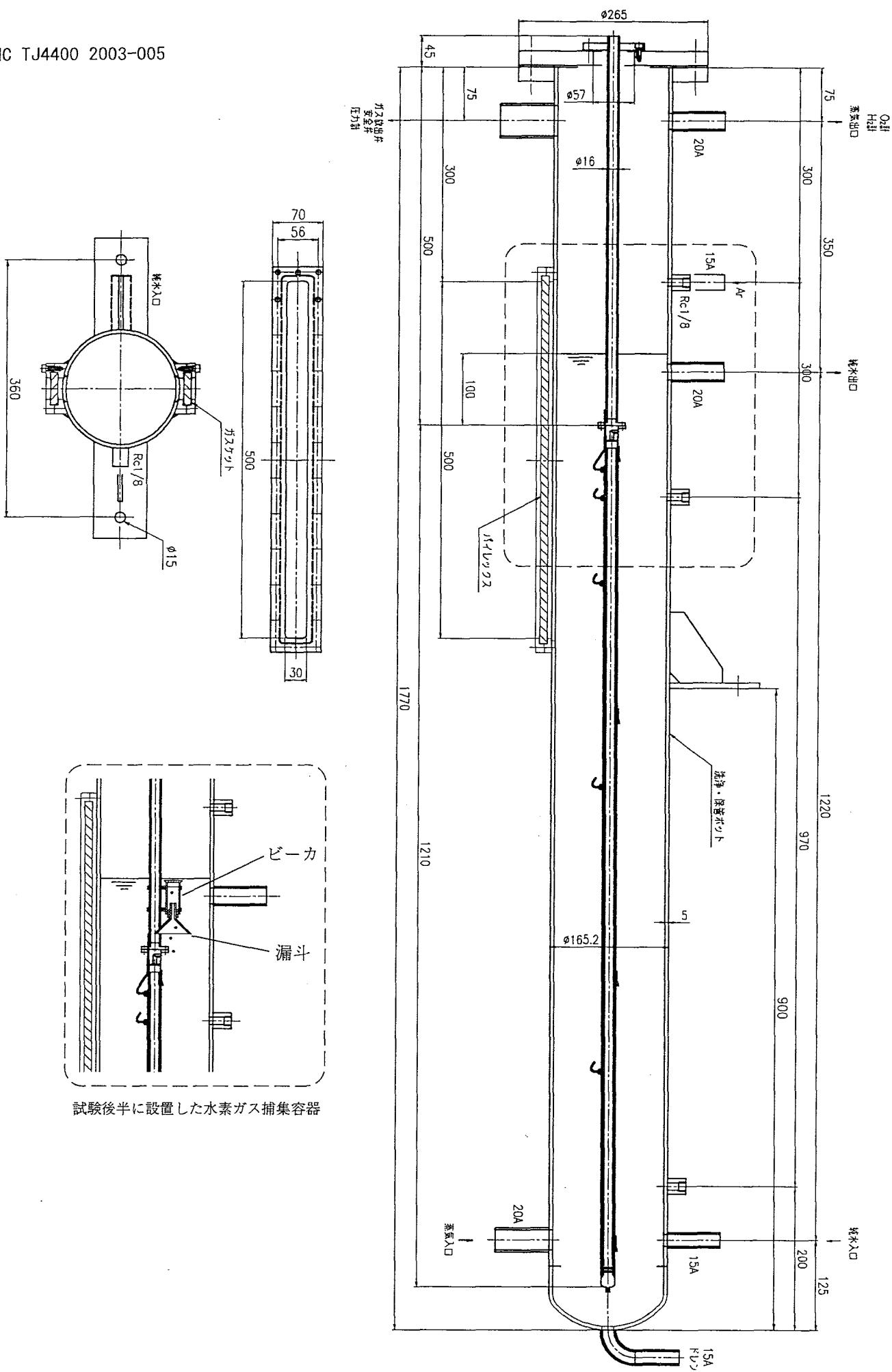


図4-2 水中保管試験装置

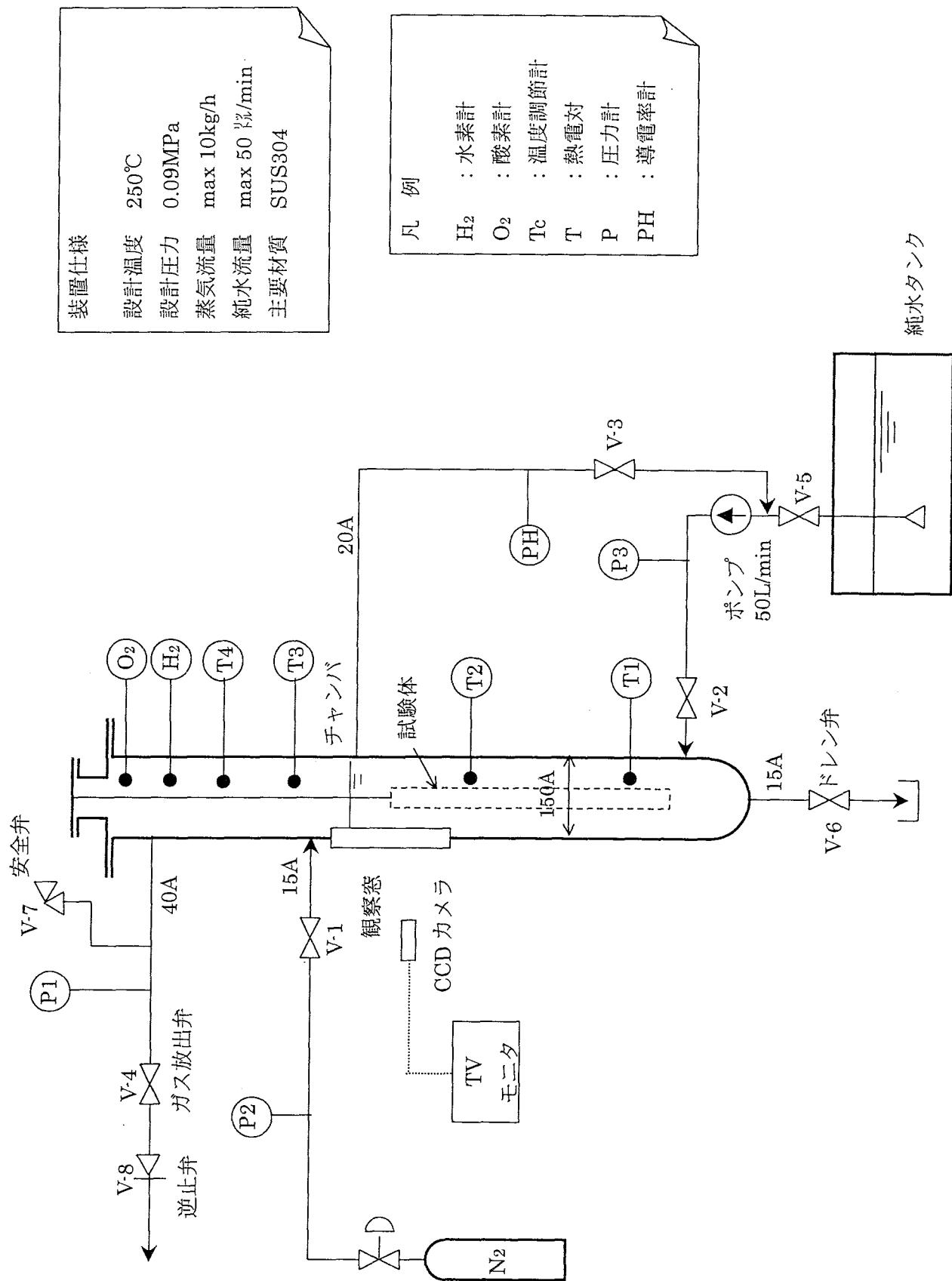


図 4-3 水中保管試験装置 統一

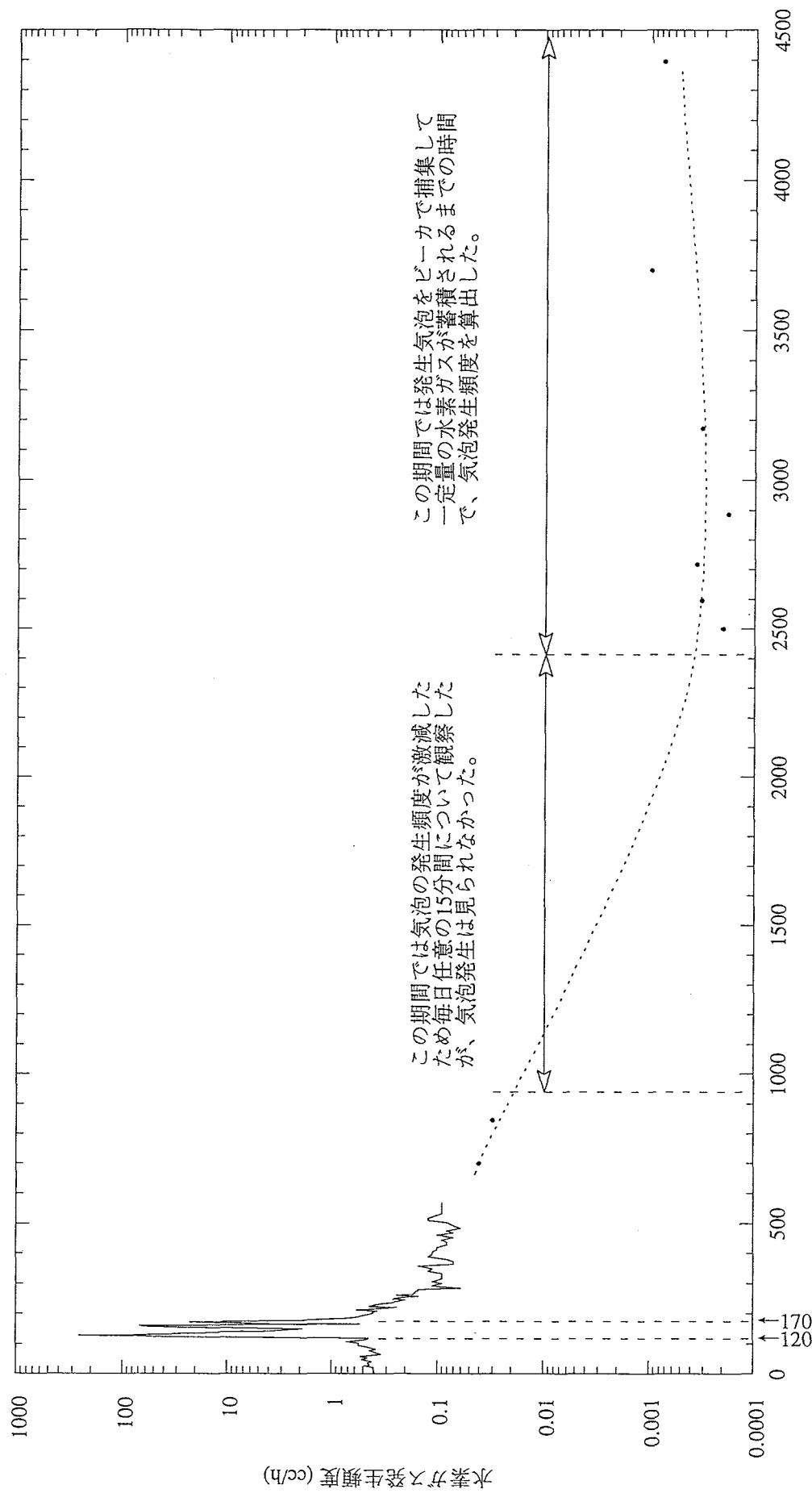


図4-4 水素ガス発生頻度の推移

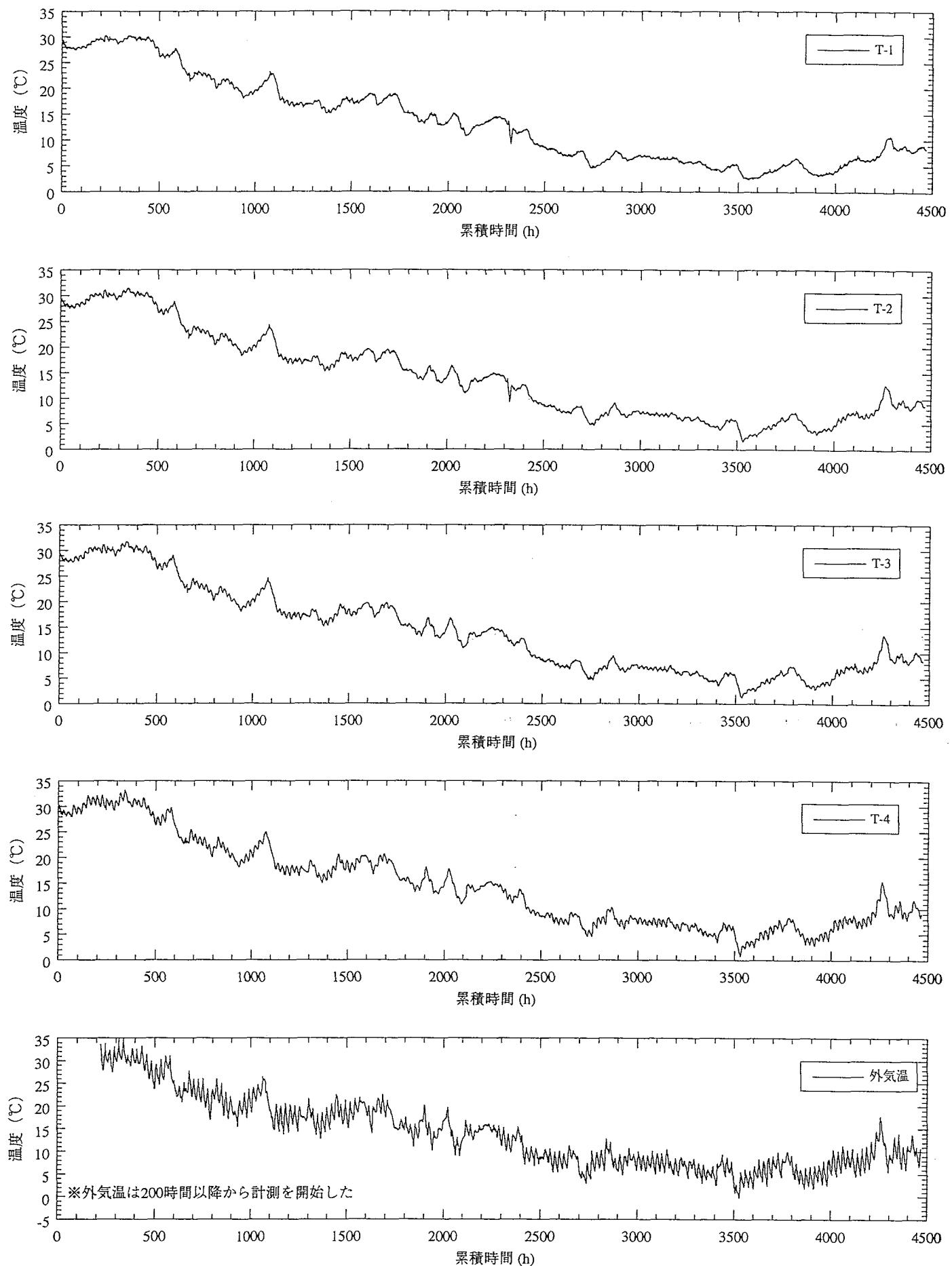


図4-5 試験体内外の温度推移

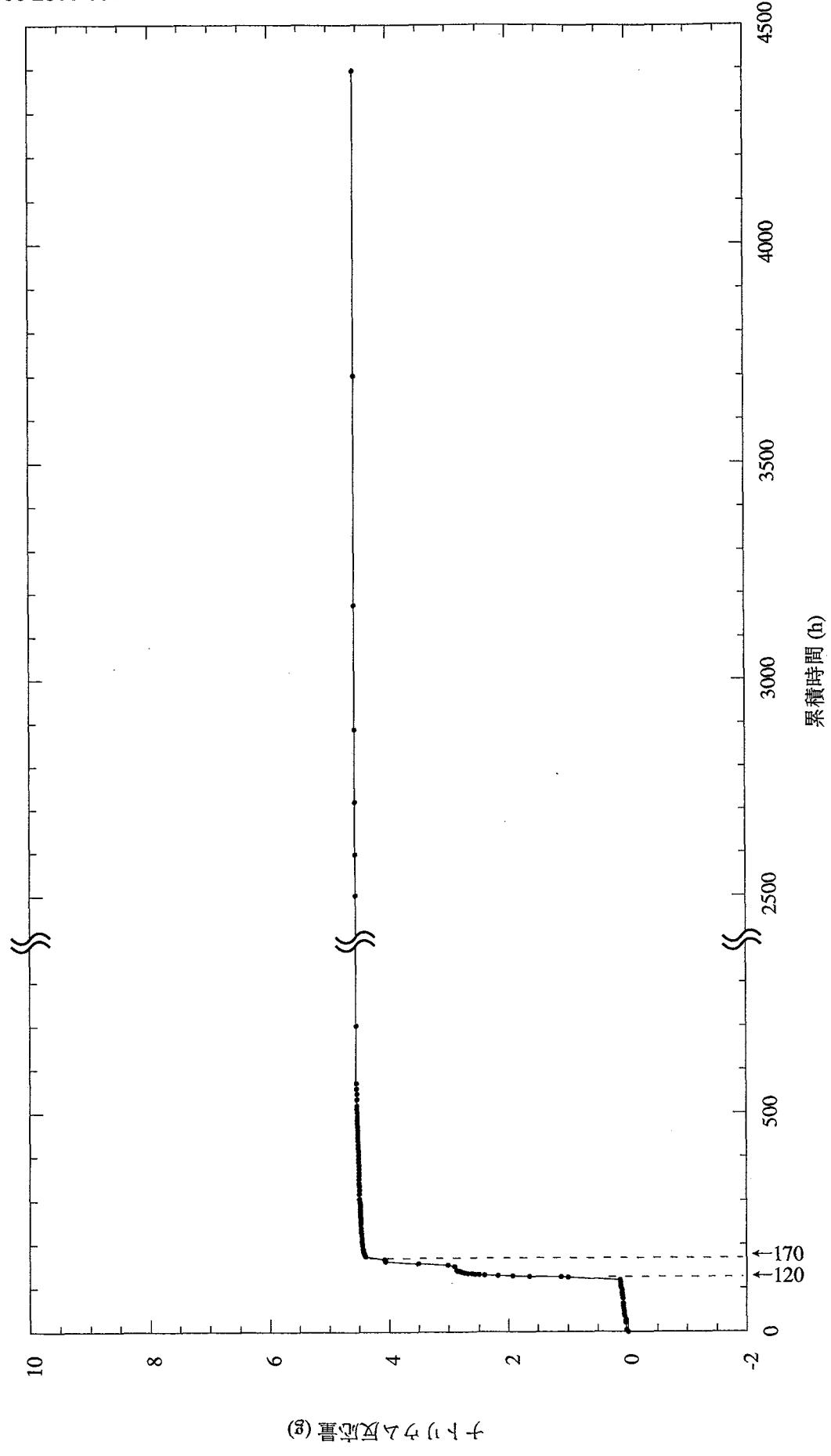


図4-6 ナトリウム反応量の推移

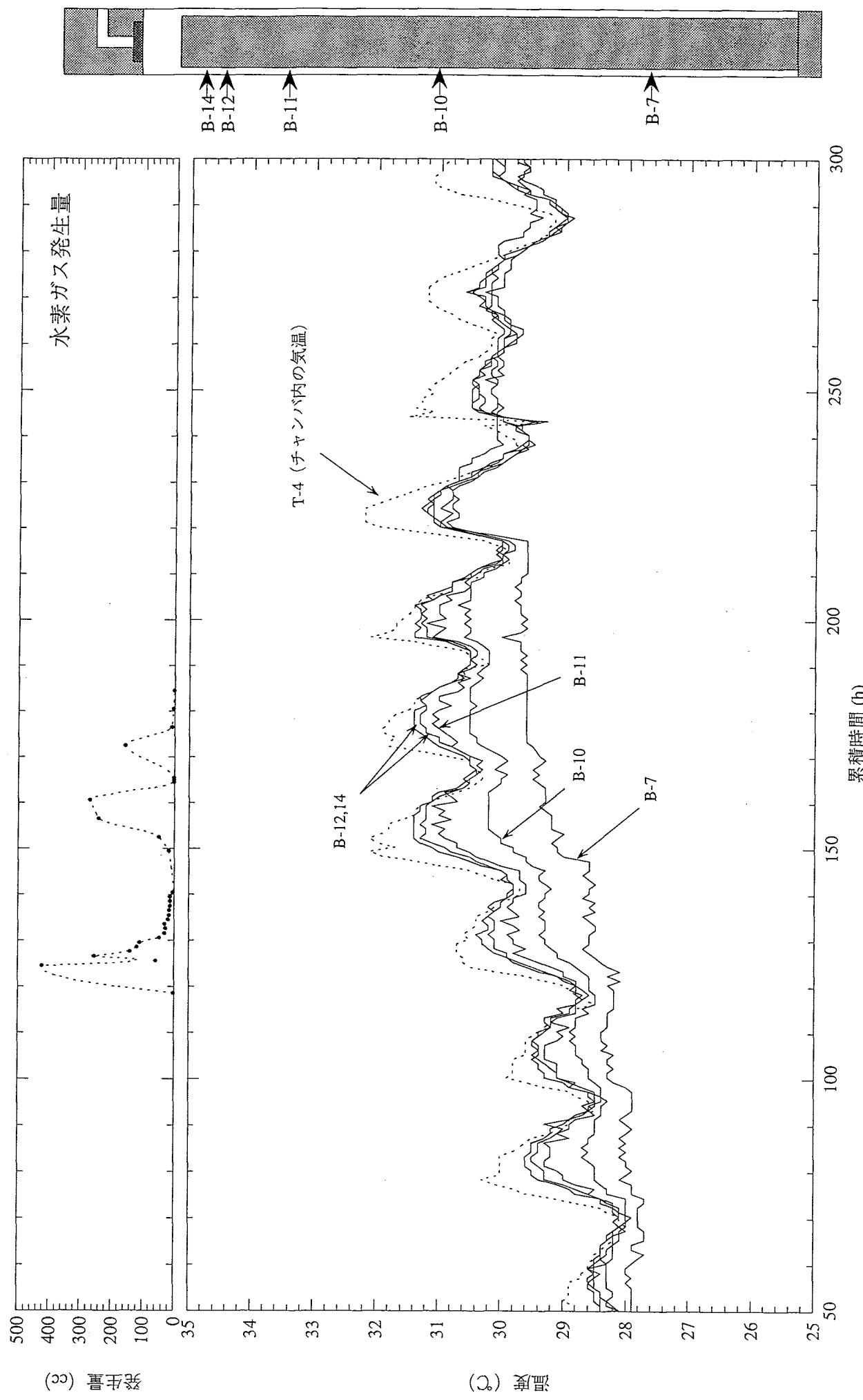


図4-7 水素ガス発生のピーク前後での試験体内温度挙動

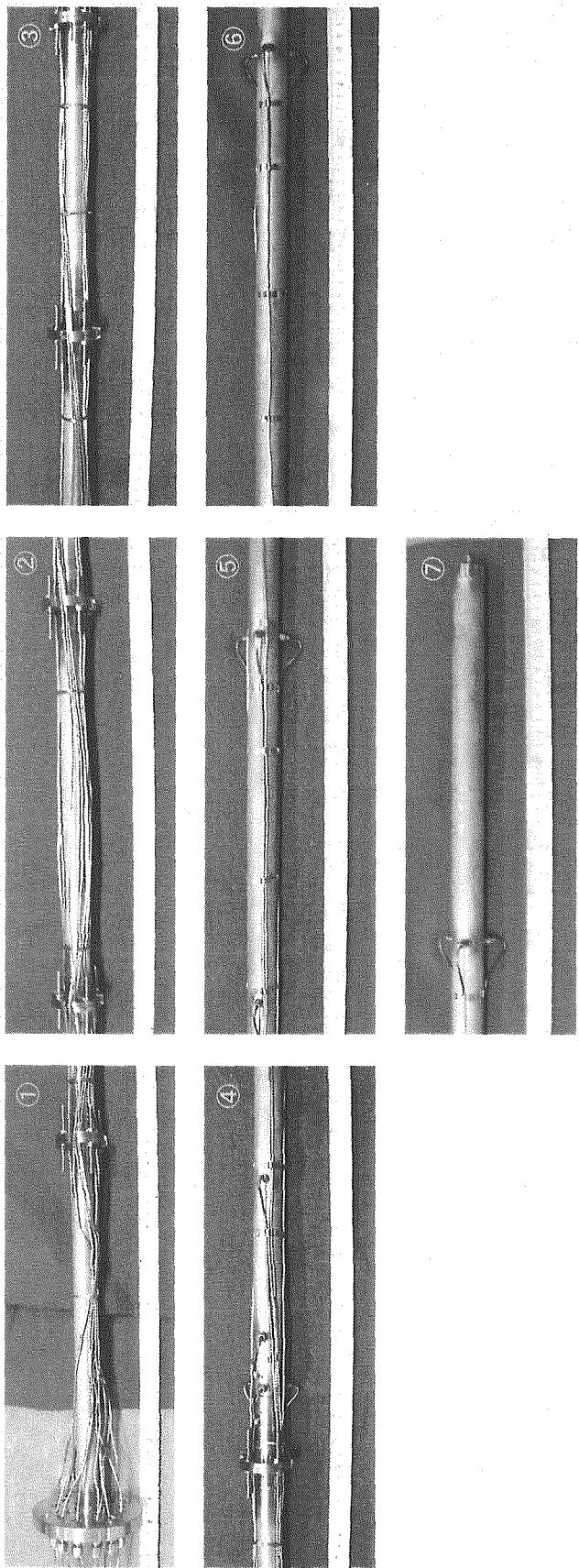
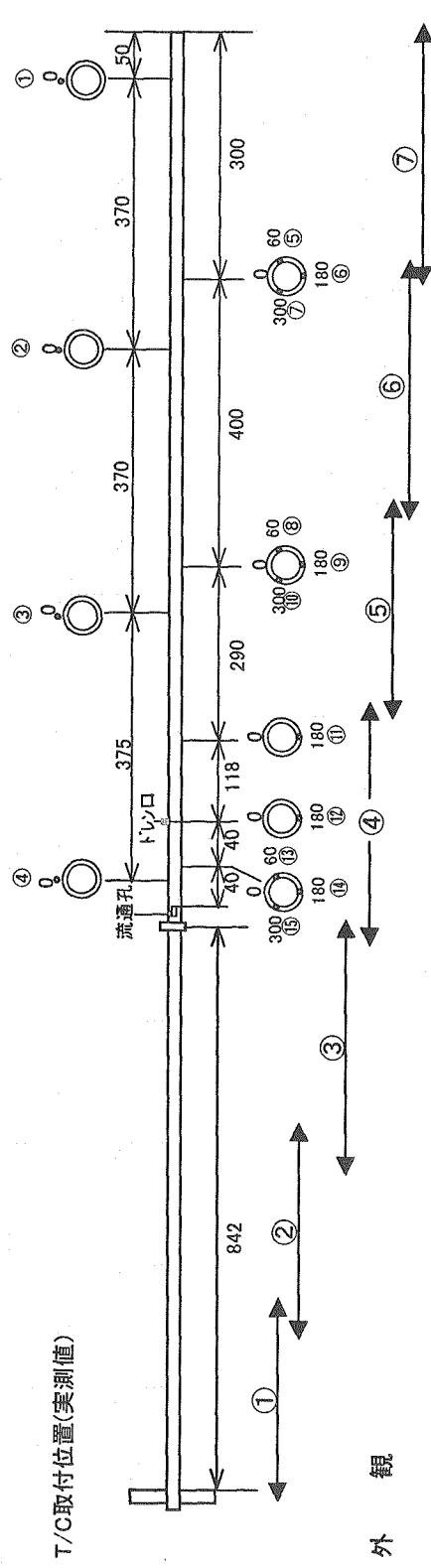


写真4-1 水中保管試験体

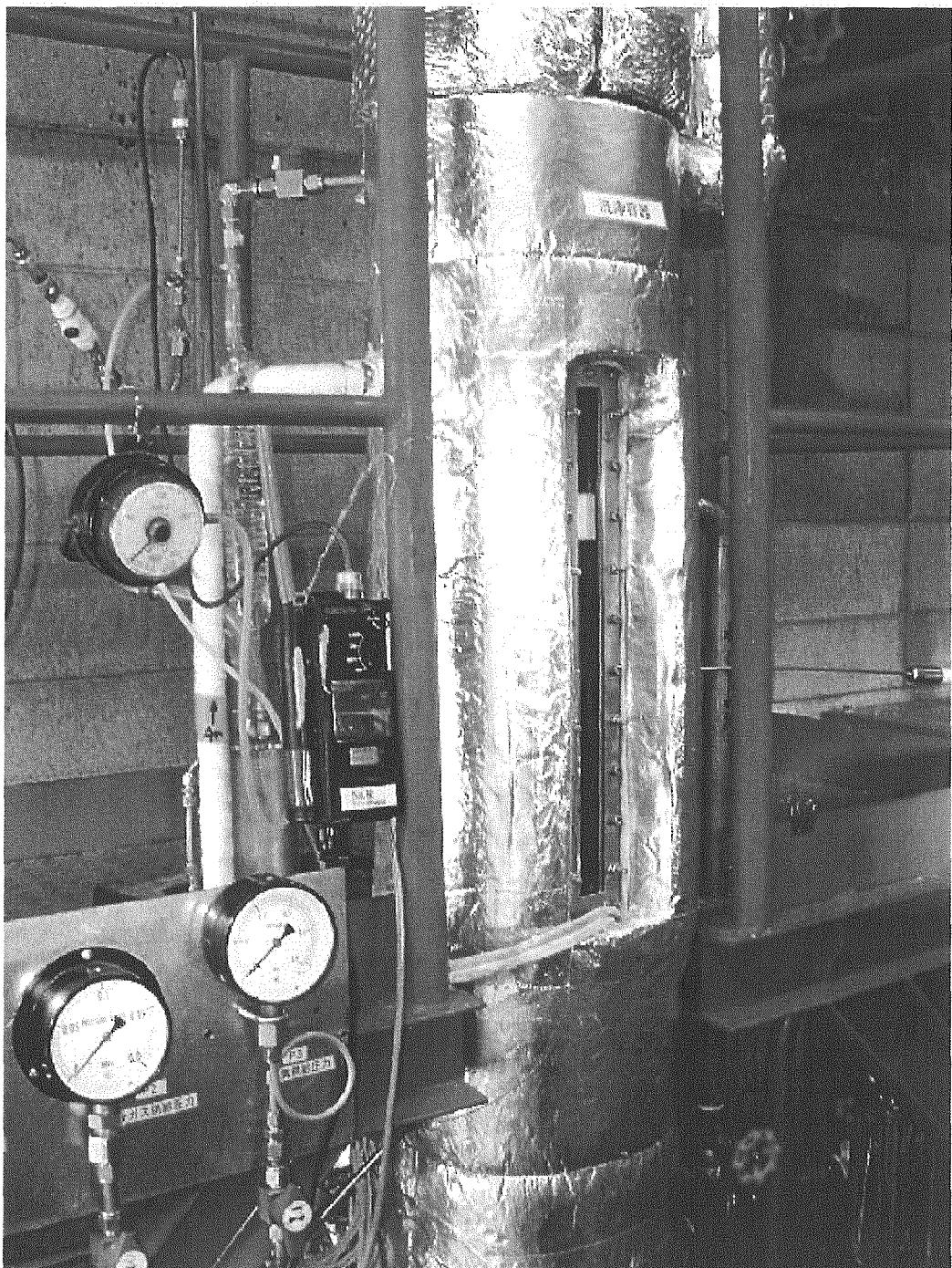


写真 4-2 水中保管試験装置外観

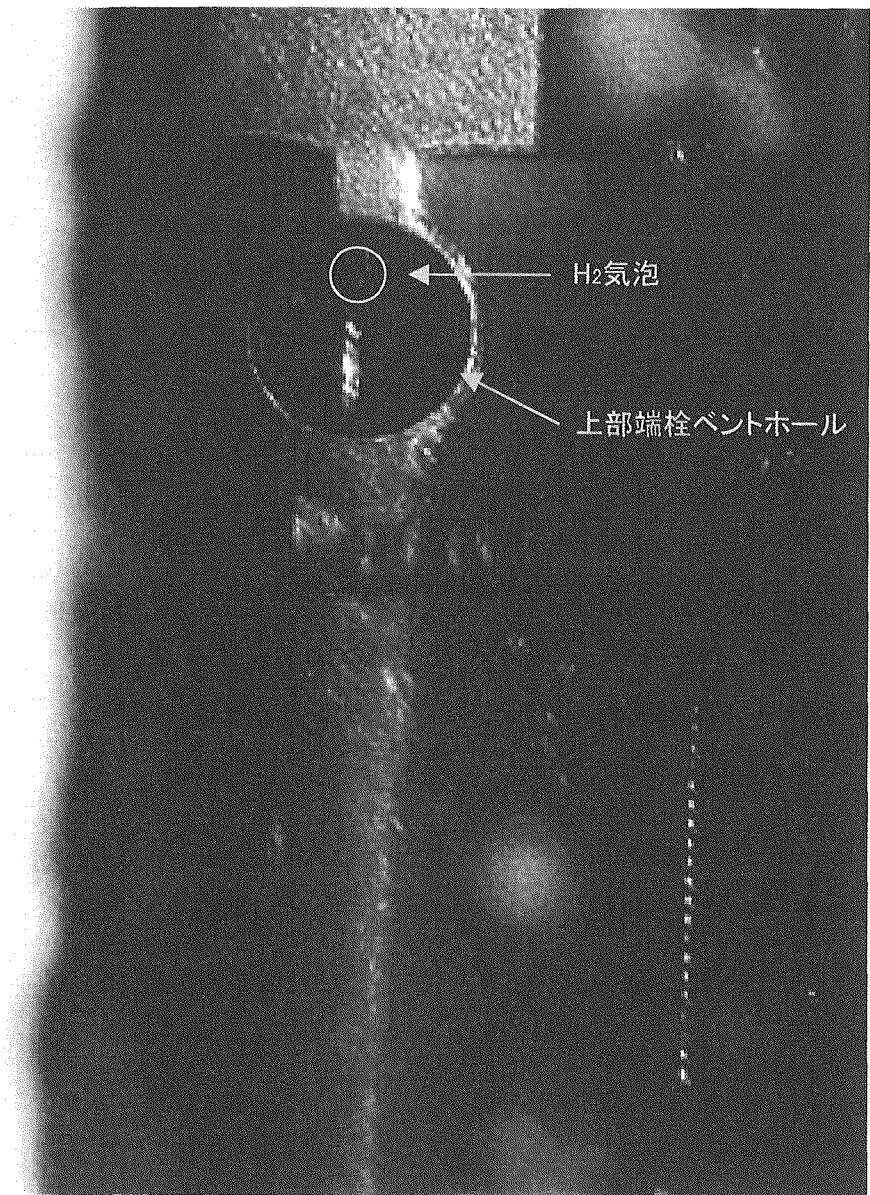


写真4-3 水素ガス放出状況

5. まとめ

「もんじゅ」次世代長寿命制御棒として有望視されているダブルポーラスプラグナトリウムボンド型制御棒を対象として、C型シュラウド管の吸収体保持に関する予備試験、C型シュラウド管の応力解析及び長期水中保持試験を実施した。

C型シュラウド管の下部構造を設定する目的で、吸収材保持に関する予備試験では、シュラウド管と吸収材との機械的相互作用（Absorber Shroud Mechanical Interaction : ASMI）を模擬して2重管C型シュラウド管の吸収材保持機能を確認し、応力解析では、シュラウド管下部端栓と吸収材下端位置をパラメータとして、適切な位置を定めた。

また、長期水中保管試験では、ナトリウムが残存した制御要素試験体を用いて、長期に亘る水中保管で問題が生じないことを確認した。

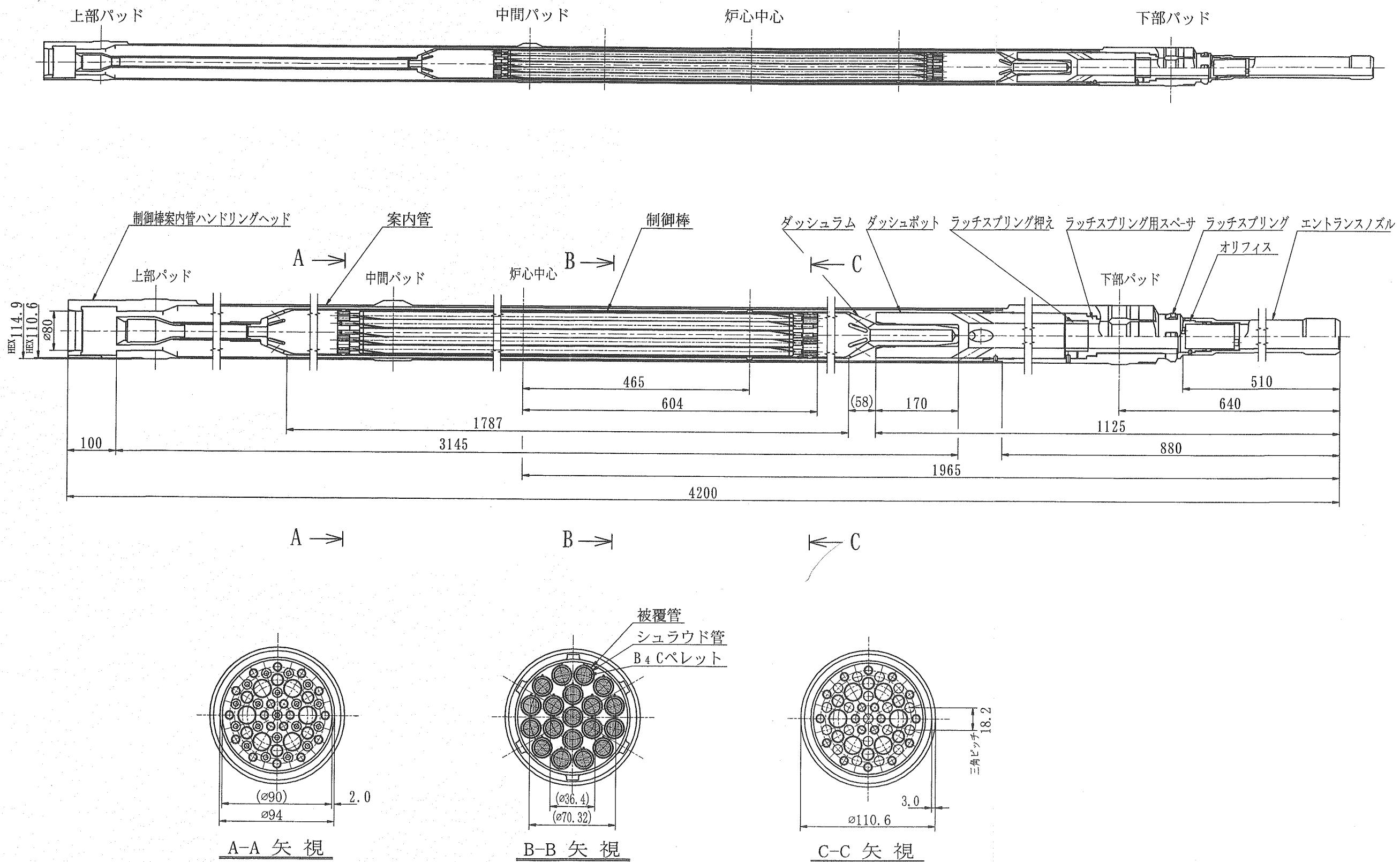
本試験で得られた成果は以下の通りである。

- (1) ASMI予備試験により、シュラウド管下部端栓を外部嵌合型にして、C型シュラウド管を2重にすれば、粉末状態の吸収材を想定しても、吸収材がシュラウド管外に流出することなく、保持機能が確保できることを確認した。
- (2) シュラウド管の応力解析により、シュラウド管下部（外側嵌合）端栓からASMIが発生する吸収体下端までの距離を40mm以上とすれば構造健全性は満足し、50mm以上とすればシュラウド管の発生応力は弾性範囲内であることが分かり、実機では50mmを採用することとした。
- (3) 長期水中保管試験により、ナトリウムボンド型制御棒集合体（制御要素）をナトリウム洗浄設備で洗浄した際、制御要素内のナトリウムが残留した状態で水プールに保管しても、ナトリウムが徐々に反応するだけで温度上昇、水素発生共に僅かであり、問題が生じないことを確認した。
- (4) これら(1)～(3)の成果により、今までに実施してきた研究成果と合わせ、長寿命制御棒の開発課題は全て解決でき、技術的成立性は見通せたので、今後は開発段階から実機製作に向けた実証、基本設計段階に移行ができる。

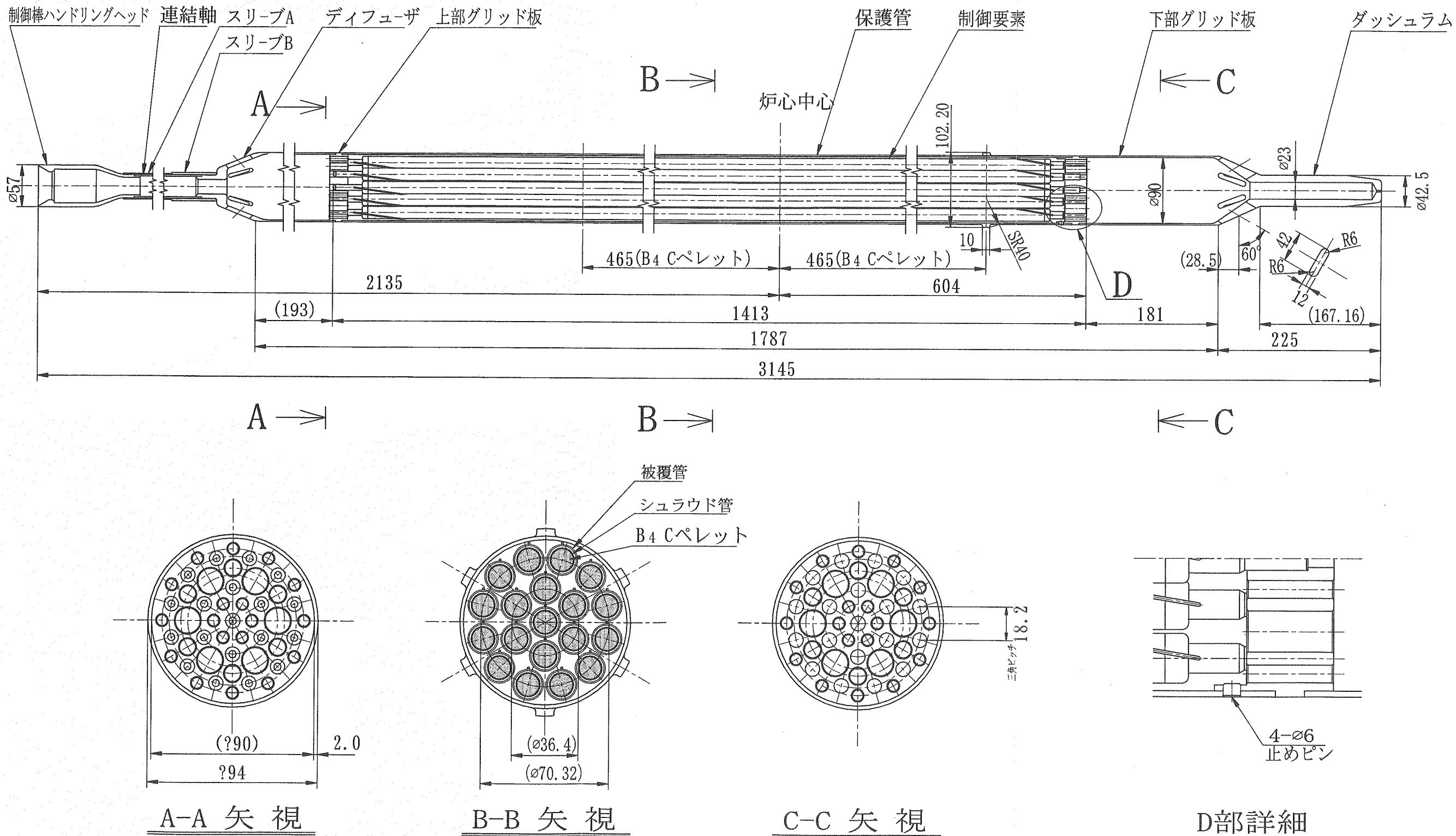
6. 参考文献

- (1) 町田,貝瀬,碇本,田中「『もんじゅ』制御棒の高度化設計」新型炉技術開発株式会社、
1998年3月
- (2) 町田,碇本,田中「『もんじゅ』制御棒の高度化設計(Ⅲ)」新型炉技術開発株式会社、
2000年3月
- (3) 笠原,碇本,田中,大木,小川「『もんじゅ』長寿命制御棒用オリフィス水流動試験」新
型炉技術開発株式会社、JNC ZJ2410 2001-022、2002年3月
- (4) 町田,貝瀬,碇本,田中「『もんじゅ』制御棒の高度化設計(Ⅱ)」新型炉技術開発株式会
社、1999年3月
- (5) 佐々木,碇本,田中,谷本「『もんじゅ』制御棒の高度化設計(Ⅳ)」新型炉技術開発株式
会社、2001年3月
- (6) 碇本,加藤,奥田,溝口「『もんじゅ』制御棒用シュラウド管試作試験」三菱重工業株
式会社、JNC TJ4440 2001-004、2002年3月
- (7) 加藤,田中,碇本,中村,玉木「『もんじゅ』ナトリウムボンド型制御要素洗浄試験」三
菱重工業株式会社、JNC ZJ4440 2003-004、1998年3月

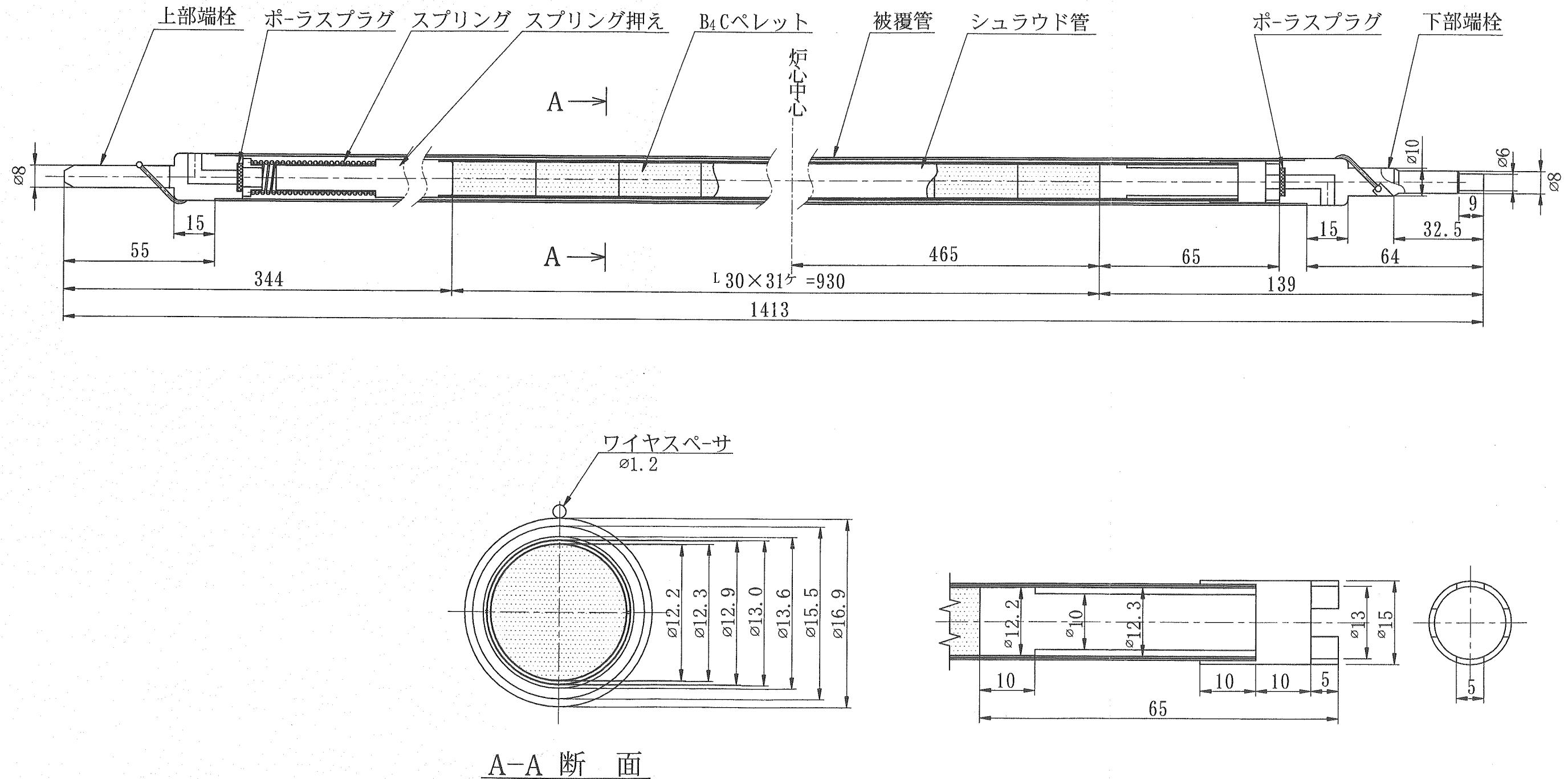
付録 長寿命制御棒構造図



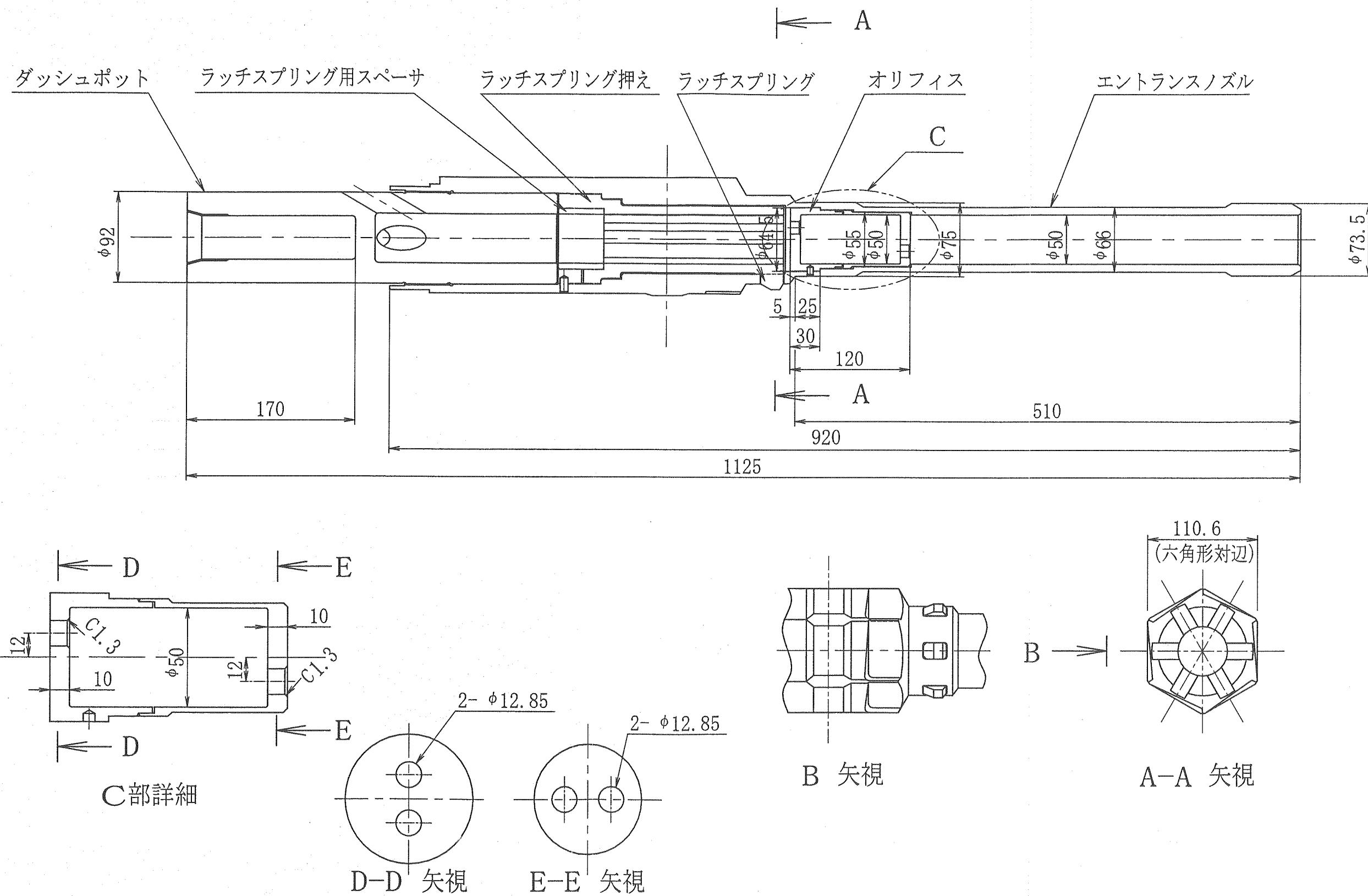
付図 1 制御棒集合体組立図



付図2 制御棒組立図

A-A 断面

付図3 制御要素組立図



付図4 エントランスノズル組立図