

「もんじゅ」ナトリウムボンド型制御棒要素試験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2002年3月

株式会社 日立製作所

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

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

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

「もんじゅ」ナトリウムボンド型制御棒要素試験
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

原田清¹, 安部英昭²

松下雄一¹, 李典燦¹

綿引直久²

要旨

本報告書は、「もんじゅ」次世代長寿命型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要素のナトリウム中試験結果をまとめたものである。

本試験では、上下ポーラスプラグナトリウムボンド型制御要素の模擬試験体を製作し、ナトリウム中試験を実施して、実機使用条件下でのナトリウム充填性、要素上部ガスプレナムの形成、ナトリウムドレン性及び NaOH 洗浄性を確認し、以下の成果を得た。

(1) 制御棒を EVST へ装荷時のナトリウム充填性

EVST への制御棒挿入速度を模擬した約 6m/min にて、190℃のナトリウム中へ試験体を挿入した結果、要素内の全空間にナトリウムが充填されることを確認した。

(2) 制御棒要素内に発生するヘリウムガスによる上部ガスプレナムの形成

620℃および 190℃のナトリウム中へ浸漬した試験体内にヘリウムガスの注入を行い、偏差 10%以内でガスプレナムが形成できることを確認した。また、形成されたガスプレナムにヘリウムガスをさらに注入しても、ガスプレナム長さはほぼ一定に保持されることを確認した。

(3) 制御棒を EVST から引抜いた時の制御棒要素からのナトリウムドレン性

EVST からの制御棒引抜き速度を模擬した約 6m/min にて、試験体を 190℃のナトリウム中から引抜いた結果、試験体内にナトリウムが残留することなく、十分にドレンできることを確認した。

(4) 制御棒要素内残留ナトリウムの NaOH 水溶液洗浄性

ナトリウムと NaOH 水溶液の反応はマイルドであったが、制御要素内にナトリウムが充満状態で残留している場合においては、NaOH 水溶液の積極的な循環が起きず、十分な洗浄ができなかった。

本報告書は、(株)日立製作所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：1302-A-01365

核燃料サイクル開発機構担当課：国際技術センター 炉心技術開発 Gr

※1) 株式会社 日立製作所 原子力事業部

※2) 株式会社 日立製作所 電力・電機開発研究所

Kiyoshi Harada¹, Hideaki Abe²,
Yuichi Matsusita¹, Chunchan Lee¹,
Naohisa Watahiki²

Components Inspection of Monju, A Sodium Bonded Type Control Rod

Abstract

This Report addresses a result of a sodium test conducted on components of a Double Poral Filter Sodium Bonded Type Control Rod that is expected to be a next generation, long life Control Rod.

Upper and lower Poral Filter Sodium Bonded Type Control Rod components were mocked up to conduct a sodium test. During the test, sodium chargeability, formation of Gas Plenum at the upper part of the components, sodium drain-ability and NaOH clean-ability were recognized under actual plant condition. The following are results obtained:

(1) Sodium Chargeability at Control Rod Insertion to EVST

Sodium was charged into the components when the mocked-up was inserted in sodium of 190°C, with insertion speed of 6m/min which is an actual insertion speed to EVST.

(2) Formation of Upper Gas Plenum by Helium Gas generated in Control Rod Components

Gas Plenum formation within deviation of 9%v was confirmed by releasing helium gas into the mocked-up which is immersed in sodium of 620°C and 190°C. Length of Gas Plenum is confirmed to be retained in certain length even if helium gas is further released into formed Gas Plenum.

(3) Sodium Drain-ability of Control Rod Components when Drawing from EVST

Drain-ability was confirmed to be sufficient and no sodium residue was found in the mocked-up when the mocked-up was drawn out from sodium of 190°C, with drawing speed of 6m/min which is an actual drawing speed from EVST.

(4) Clean-ability of NaOH Solution against Sodium Residue in Control Rod Components

Sodium and NaOH solution reacted calmly, however, clean-ability was not sufficient. When Sodium fully remained in Control Rod Components, it made circulation of NaOH solution not enough.

This work was performed by Hitachi, Ltd under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract Number 1302-A-01365

※1 Third Design Sec. Nuclear Equipment Design Dept. Hitachi, Ltd

※2 Power & Industrial Systems R&D Laboratory. Hitachi, Ltd

目次

1. 緒言	1
2. 模擬制御要素試験体の製作	2
2.1 制御棒要素の基本仕様	2
2.2 制御棒要素の設計	2
2.3 試験体の製作	6
3. ナトリウム中試験	8
3.1 試験目的	8
3.2 試験方法	8
3.2.1 試験装置	8
3.2.2 試験条件	9
3.2.3 X線評価方法	12
3.3 試験結果	14
3.3.1 試験体 No.1	14
3.3.2 試験体 No.3	16
3.3.3 試験体 No.4	19
3.3.4 試験体 No.2	21
3.4 試験結果の検討	24
3.4.1 ナトリウムの充填性	24
3.4.2 ガスプレナムの形成	25
3.4.3 ナトリウムのドレン性	27
3.4.4 残留ナトリウムの洗浄性	30
4. 結言	32
5. 謝辞	33
6. 参考文献	34

表リスト

表 2. 1-1 「もんじゅ」制御棒要素（粗調整棒）の設計パラメータ比較	35
表 3. 2. 2-1 試験体 No. 1 試験実績工程表	49
表 3. 2. 2-2 試験体 No. 3 試験実績工程表	50
表 3. 2. 2-3 試験体 No. 4 試験実績工程表	51
表 3. 2. 2-4 試験体 No. 2 試験実績工程表	52
表 3. 2. 2-5 試験条件一覧表	53

図リスト

図 2. 2. 1-1	ダブルポーラスプラグ型ナトリウムボンド制御棒要素	36
図 2. 2. 1-2	ダブルポーラスプラグ型制御棒要素の毛細管モデル	36
図 2. 2. 3-1	下部プラグ気孔径の成立範囲	37
図 2. 2. 3-2	気孔径の成立範囲／上部プラグ相互作用	38
図 2. 2. 4-1	ガスプレナム成立範囲	39
図 2. 2. 4-2	Na ボンド制御棒要素 実機構造計画図	40
図 2. 3-1	Na ボンド制御棒要素 試験体 A 構造図	41
図 2. 3-2	Na ボンド制御棒要素 試験体 B 構造図	42
図 3. 2. 1-1	ナトリウムボンド型制御棒要素試験装置の全体図	43
図 3. 2. 1-2	試験容器と制御棒要素模擬試験体構造	44
図 3. 2. 1-3	洗浄容器の構造	45
図 3. 2. 1-4	X線透過撮影の模式図	46
図 3. 2. 2-1	試験体 No. 1 X線撮影位置図	56
図 3. 2. 2-2	試験体 No. 3 X線撮影位置図	57
図 3. 2. 2-3	試験体 No. 4 X線撮影位置図	58
図 3. 2. 2-4	試験体 No. 2 X線撮影位置図	59
図 3. 2. 2. 3-1	ドレン性確認試験フロー	60
図 3. 2. 2. 4-1	洗浄性確認試験フロー	61
図 3. 2. 3-1	Na ボンド制御棒要素 予備試験体構造図	62
図 3. 2. 3-2	予備試験体 X線撮影位置図	63
図 3. 2. 3. 1-1	試験体内濃度評価法説明図（予備試験結果）	64
図 3. 2. 3. 2-1	差分濃度評価法説明図（予備試験結果）	65
図 3. 3. 1-1	ガスプレナム状態（No. 1, Na190℃, 充填後）	66
図 3. 3. 1-2	ガスプレナム状態（No. 1, Na650℃, He1 後）	67
図 3. 3. 1-3	ガスプレナム状態（No. 1, Na650℃, He2 後）	68
図 3. 3. 1-4	ガスプレナム状態（No. 1, 引抜後）	69
図 3. 3. 1-5	X線撮影データ評価結果（No. 1, Na190℃, 充填後）	70
図 3. 3. 1-6	X線撮影データ評価結果（No. 1, Na190℃, 充填後）	71
図 3. 3. 1-7	X線撮影データ評価結果（No. 1, Na190℃, 充填後）	72
図 3. 3. 1-8	X線撮影データ評価結果（No. 1, Na650℃, He1 後）	73

図 3. 3. 1-9	X線撮影データ評価結果 (No. 1, Na650℃, He2 後)	74
図 3. 3. 1-10	試験体 No. 1 (A r → 190℃ N a 中挿入)	75
図 3. 3. 1-11	試験体 No. 1 (N a 650℃-H e 注入 1 セット目)	76
図 3. 3. 1-12	試験体 No. 1 (N a 650℃-H e 注入 2 セット目)	77
図 3. 3. 1-13	試験体 No. 1 (190℃ N a 中 → A r 引抜)	78
図 3. 3. 2-1	ガスプレナム状態 (No. 3, Na190℃, 充填後)	80
図 3. 3. 2-2	ガスプレナム状態 (No. 3, Na650℃, He1 後)	81
図 3. 3. 2-3	ガスプレナム状態 (No. 3, Na650℃, He2 後)	82
図 3. 3. 2-4	ガスプレナム状態 (No. 3, Na190℃, He1 後)	83
図 3. 3. 2-5	ガスプレナム状態 (No. 3, 引抜後)	84
図 3. 3. 2-6	X線撮影データ評価結果 (No. 3, Na190℃, 充填後)	85
図 3. 3. 2-7	X線撮影データ評価結果 (No. 3, Na650℃, He1 後)	86
図 3. 3. 2-8	X線撮影データ評価結果 (No. 3, Na650℃, He2 後)	87
図 3. 3. 2-9	X線撮影データ評価結果 (No. 3, Na190℃, He1 後)	88
図 3. 3. 2-10	試験体 No. 3 (A r → 190℃ N a 中挿入)	89
図 3. 3. 2-11	試験体 No. 3 (N a 650℃-H e 注入 1 セット目)	90
図 3. 3. 2-12	試験体 No. 3 (N a 650℃-H e 注入 2 セット目)	91
図 3. 3. 2-13	試験体 No. 3 (N a 190℃-H e 注入 1 セット目)	92
図 3. 3. 2-14	試験体 No. 3 (190℃ N a 中 → A r 引抜)	93
図 3. 3. 3-1	ガスプレナム状態 (No. 4, Na190℃, 充填後)	95
図 3. 3. 3-2	ガスプレナム状態 (No. 4, Na650℃, He1 後)	96
図 3. 3. 3-3	ガスプレナム状態 (No. 4, Na650℃, He2 後)	97
図 3. 3. 3-4	ガスプレナム状態 (No. 4, Na190℃, He1 後)	98
図 3. 3. 3-5	ガスプレナム状態 (No. 4, 引抜後)	99
図 3. 3. 3-6	X線撮影データ評価結果 (No. 4, Na190℃, 充填後)	100
図 3. 3. 3-7	X線撮影データ評価結果 (No. 4, Na650℃, He1 後)	101
図 3. 3. 3-8	X線撮影データ評価結果 (No. 4, Na650℃, He2 後)	102
図 3. 3. 3-9	X線撮影データ評価結果 (No. 4, Na190℃, He1 後)	103
図 3. 3. 3-10	試験体 No. 4 (A r → 190℃ N a 中挿入)	104
図 3. 3. 3-11	試験体 No. 4 (N a 650℃-H e 注入 1 セット目)	105
図 3. 3. 3-12	試験体 No. 4 (N a 650℃-H e 注入 2 セット目)	106
図 3. 3. 3-13	試験体 No. 4 (N a 190℃-H e 注入 1 セット目)	107

図 3. 3. 3-14	試験体 No. 4 (190℃Na 中→Ar 引抜)	108
図 3. 3. 4-1	ガスプレナム状態 (No. 2, Na190℃, 充填後)	109
図 3. 3. 4-2	ガスプレナム状態 (No. 2, Na650℃, He1 後)	110
図 3. 3. 4-3	ガスプレナム状態 (No. 2, Na190℃, サイリッパ)	111
図 3. 3. 4-4	ガスプレナム状態 (No. 2, Na650℃, サイリッパ)	112
図 3. 3. 4-5	ガスプレナム状態 (No. 2, Na650℃, He2 後)	113
図 3. 3. 4-6	ガスプレナム状態 (No. 2, Na190℃, He1 後)	114
図 3. 3. 4-7	ガスプレナム状態 (No. 2, 引抜後)	115
図 3. 3. 4-8	X線撮影データ評価結果 (No. 2, Na190℃, 充填後)	116
図 3. 3. 4-9	X線撮影データ評価結果 (No. 2, Na650℃, He1 後)	117
図 3. 3. 4-10	X線撮影データ評価結果 (No. 2, Na190℃, サイリッパ)	118
図 3. 3. 4-11	X線撮影データ評価結果 (No. 2, Na650℃, サイリッパ)	119
図 3. 3. 4-12	X線撮影データ評価結果 (No. 2, Na650℃, He2 後)	120
図 3. 3. 4-13	X線撮影データ評価結果 (No. 2, Na190℃, He1 後)	121
図 3. 3. 4-14	試験体 No. 2 (Ar→190℃Na 中挿入)	122
図 3. 3. 4-15	試験体 No. 2 (Na650℃-He 注入 1 セット目)	123
図 3. 3. 4-16	試験体 No. 2 (Na650⇒190℃降温, サイリッパ)	124
図 3. 3. 4-17	試験体 No. 2 (Na190⇒650℃昇温, サイリッパ)	125
図 3. 3. 4-18	試験体 No. 2 (Na650℃-He 注入 2 セット目)	126
図 3. 3. 4-19	試験体 No. 2 (Na190℃-He 注入 1 セット目)	127
図 3. 3. 4-20	試験体 No. 2 (190℃Na 中→Ar 引抜)	128
図 3. 4. 1-1	ナトリウム充填操作時の各試験体状態	130
図 3. 4. 2-1	ガスプレナム長さ 計算結果と実測値の比較	131
図 3. 4. 2-2	冷却材流量と圧損等価長さの関係	132
図 3. 4. 3-1	ポーラスプラグによるNaの透過性検証実験の概要	133
図 3. 4. 3-2	ナトリウムドレンのメカニズム (推定)	134
図 3. 4. 4-1	NaOH洗浄ができないメカニズム (推定)	135

写真リスト

写真 3. 2. 1-1	試験装置外観		47
写真 3. 2. 1-2	X線撮影装置外観		48
写真 3. 3. 1-1	アルコール／水洗浄前	試験体分解調査（試験体 No. 1）	 79
写真 3. 3. 2-1	アルコール／水洗浄前	試験体分解調査（試験体 No. 3）	 94
写真 3. 3. 4-1	NaOH水洗浄後	試験体分解調査（試験体 No. 2）	 129

1. 緒言

「もんじゅ」次世代長寿命型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概念は、ポーラスプラグ単体等の各要素試験により、その成立性の確証が得られつつある。これらの成果を踏まえ、更に実機を模擬した制御棒要素としての試験を実施し、機器としての成立性を確認する必要がある。

本試験では、ダブルポーラスプラグナトリウムボンド型制御要素の模擬体を製作し、ナトリウム中での模擬試験を実施して、実機使用条件下でのナトリウム充填性、要素上部ガスプレナムの形成、引抜き時ナトリウムドレン性及び洗浄性を確認した。

2. 模擬制御棒要素試験体の製作

2.1 制御棒要素の基本仕様

制御棒要素の仕様については、表 2. 1-1 に示す「もんじゅ」制御棒要素の長寿命設計（暫定目標）パラメータを基に決定した。

2.2 制御棒要素の設計

2.2.1 ダブルポーラスプラグ制御棒要素の概念

ダブルポーラスプラグ型ナトリウムボンド制御要素は、下部充填方式に相当し、上下にポーラスプラグを有する。下部プラグは制御棒装荷時に炉のナトリウムをピン内に導入し、ナトリウムボンドを形成する目的、上部プラグは運転時に ^{10}B から生成されるヘリウムガスをピン外に放出する目的で設置される。また、これらのプラグは B_4C ペレットから発生する可能性のあるペレットの欠片や、溶存炭素濃度の高いボンドナトリウムのピン外への放出を抑制する役割を果たす。

図 2. 2. 1-1 にダブルポーラスプラグ型ナトリウムボンド制御要素の概要構成、図 2. 2. 1-2 に高温流動ナトリウム中におけるナトリウムボンド型制御要素の毛細管モデルを示す。なお、本モデルでは、下部ポーラスプラグにナトリウムが充填され、上部ポーラスプラグはナトリウムに濡れた状態であるものとする。

図 2. 2. 1-2 (a) において、冷却材流量の圧損 ΔP_f を考慮すると

$$P_1 = P_0 - \Delta P_f - \rho \cdot g \cdot L \quad (2-1)$$

ガスプレナム部の圧力は

$$P_{He} = P_0 - \rho \cdot g \cdot (L - h) \quad (2-2)$$

また、ガスプレナム部の圧力は保持差圧 ΔP_b を用いて、次式のように表される。

$$P_{He} = P_1 + \Delta P_b \quad (2-3)$$

これより

$$\rho \cdot g \cdot h = \Delta P_b - \Delta P_f \quad (2-4)$$

図 2. 2. 1-2 (b) の上部ポーラスプラグにおける毛細管モデルより

$$\rho \cdot g \cdot h = \Delta P_b - \Delta P_f = \left(\frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{d} \right) - \Delta P_f \quad (2-5)$$

これは、冷却材流量が減少するにつれ冷却材圧損 ΔP_f が減り、ガスプレナム長さが増加することを表している。ここで冷却材流量が 0 の場合、 $\Delta P_f = 0$ となり、次式が成立する。

$$\Delta P_b = \rho \cdot g \cdot h = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{d} \quad (2-6)$$

このように保持差圧 ΔP_b 、ガスプレナム長さ h は、表面張力 σ とメッシュ気孔径 d で決定される。

ここで、 ΔP_b ：保持差圧、 ΔP_l ：冷却材圧損、 h ：ガスプレナム長さ、 d ：メッシュ気孔径、 L ：ピン長さ、 ρ ：冷却材密度、 σ ：冷却材表面張力、 θ ：冷却材とポーラスプラグの接触角度、 g ：重力加速度 である。

なお透過圧とは、下部ポーラスプラグからの低温ナトリウム充填時に、ナトリウムが濡れてない状態で、ポーラスプラグからナトリウムが流入する際の表面張力に相当する。

2.2.2 選定条件

(1) 下部ポーラスプラグ気孔径

下部ポーラスプラグは、ナトリウム充填時に、下部からピン内にナトリウムが自然充填できる範囲で、フィルターの役割を果たすよう気孔径は小さいほうが良い。放出粒子の許容最大値を、もんじゅ 1 次系ナトリウム中の最小狭隘部である、ポンプ軸受けの片側ギャップ $300 \mu\text{m}$ に余裕をみて $150 \mu\text{m}$ とし、下部ポーラスプラグ気孔径の選定条件を $150 \mu\text{m}$ 以下と設定した。

(2) 上部ポーラスプラグ気孔径

上部ポーラスプラグは、ピン内で生成するガスを放出するとともに、毛細管現象によるガスの保持差圧によってピン内に適切な長さのガスプレナムを形成し、ナトリウムボンドの流出を防止できるものを選定した。但し、定常状態においてはガスプレナムが形成されるため、上部ポーラスプラグからのペレットの欠片や、溶存炭素濃度の高いボンドナトリウムのピン外への流出はないと考えられるが、万一の流出に備え、上部ポーラスプラグ気孔径の選定条件を、もんじゅ 1 次系ナトリウム中の最小狭隘部である $300 \mu\text{m}$ 以下と設定した。

(3) 上下プラグ間距離

上下プラグ間距離が長いほど、下部ポーラスプラグからの充填が容易となり、かつガスプレナム長さの許容範囲が大きくなるため、ダブルポーラスプラグ型の成立性は良くなる傾向となる。一方、炉の小型化に向けては、制御棒の短尺化を図る必要があり、成立する範囲内でできる限り短くする必要がある。但し、 B_4C ペレットの長さが 800mm であり、ペレット上にガスプレナムが出来ることを考慮すると、最小長さは 1000mm 程度と考

えられる。上下プラグ間距離の選定条件は、現状実機の制御棒要素の長さ (=ピン長さ) (FCR=1742mm, CCR=1755mm, BCR=1755mm) に、上下端栓で 160mm 程度は必要であることを考慮し、最大でも 1580mm 以下とする。よって、上下プラグ間距離は 1000mm 以上 1580mm 以下と設定した。

2.2.3 具体的検討

(1) 下部ポーラスプラグ気孔径

自然充填の条件は少なくともプラグの透過圧が上下プラグ間のナトリウムヘッド以下にあることである。この条件で、EVST のナトリウム温度である 200℃における下部プラグ気孔径の成立範囲を算出した結果を図 2.2.3-1 に示す。これによると、充填のための基本的な条件は、下部プラグ気孔径 80 μm 以上、ピン長さ 1700mm 以下で成立する。ピン長さをできるだけ短くし、下部プラグ気孔径をなるべく小さくすることを考慮し検討すると、下部プラグ気孔径 120 μm 、ピン長さ 1200mm 以上の条件が妥当であると考えられる。これにより、下部プラグ気孔径は 120 μm を採用した。

なお、ピン長さ=上下プラグ間距離+130mm (上下端栓分) の関係であるため、上下プラグ間距離は 1070mm 以上となる。

(2) 上部ポーラスプラグ気孔径

運転中にガスブレナムを形成するためには、冷却材圧力損失より大きな保持差圧ができるように気孔径を選定する必要があるが、一方では、気孔径が小さすぎて (保持差圧が大きくなりすぎて) ガスブレナムが成長しすぎ、ボンドナトリウムの液面が B_4C ペレットの上端以下にならないように選定する必要がある。冷却材流量 1.2kg/s、下部プラグ気孔径 120 μm でのガスブレナム成立範囲を図 2.2.3-2 に示す。これによると、上部プラグ 150 μm ~ 200 μm 付近の成立範囲が広いが、出来るだけ上下プラグ間距離を短くすることを考慮し、上下プラグ間距離 1200mm 以上で成立する気孔径 200 μm を採用した。

(3) 上下プラグ間距離

上項より、上下プラグ間距離は 1200mm 以上となるが、EVST の液面誤差 $\pm 25\text{mm}$ 、EVTM の支持精度・EVST 内のナトリウム液面変動等の不確定誤差 50mm を考慮し、上下プラグ間距離は 1275mm を採用する。

2.2.4 成立性評価

上項で採用した、下部プラグ気孔径 120 μm 、上部プラグ気孔径 200 μm 、上下プラグ間距離 1275mm でガスブレナムが成立できる範囲を、実機冷却材流量・温度条件にて算出し

た結果を図 2.2.4-1 に示す。ガスプレナム長さは、(2-5) 式から保持差圧 ΔP_b と各冷却材流量における圧損を求めて算出している。冷却材流量の増大に伴い、ガスプレナム長さは減少する。標準偏差 (sigma) は、JNC 殿が要素試験結果から評価した値を用い、表面張力は 5.48%、接触角 12.5%、気泡径 15.0%を採用し、3sigma を明記した。図中には今回、製作する試験体のピンプレナム長さ 450mm (ペレット上端と上部ポーラスプラグ間の距離) と許容プレナム長さを示す。ガスプレナムの成立範囲は、許容プレナム長さ以下で、かつガスプレナムが消失 (長さ 0mm) しないことであるため、冷却材流量 0 ~ 1.3kg/s の範囲で成立することになる。

また、冷却材流量がない状態でのガスプレナム長さを簡易計算すると、ナトリウム温度 190℃時では、

$$\begin{aligned} h_{190^\circ\text{C}} &= \left(\frac{4 \cdot \sigma}{de \cdot \rho \cdot g} \right) \times 10^6 \quad (2-7) \\ &= \left(\frac{4 \times 191}{243 \times 906 \times 9.80665} \right) \times 10^6 \\ &= 353(\text{mm}) \end{aligned}$$

ここで σ : 190℃Na の表面張力 = 191(mN/m)

de : 等価直径 = 243(μm)

ρ : 190℃Na の密度 = 906(kg/m³)

g : 重力加速度 = 9.80665(m/s²)

353mm となり、ナトリウム温度 650℃時には、

$$\begin{aligned} h_{190^\circ\text{C}} &= \left(\frac{4 \cdot \sigma}{de \cdot \rho \cdot g} \right) \times 10^6 \quad (2-8) \\ &= \left(\frac{4 \times 143}{243 \times 796 \times 9.80665} \right) \times 10^6 \\ &= 302(\text{mm}) \end{aligned}$$

ここで σ : 650℃Na の表面張力 = 143(mN/m)

de : 等価直径 = 243(μm)

ρ : 650℃Na の密度 = 796(kg/m³)

g : 重力加速度 = 9.80665(m/s²)

302mm となり、ガスプレナムとして成立することを確認した。なお、計算の詳細については添付資料-1 に示す。図 2.2.4-2 に上記検討結果を踏まえた、実機「もんじゅ」ナトリウムボンド型制御棒要素構造計画図を示す。

2.3 試験体の製作

試験体は、上記で設計した要素構造を模擬し、シュラウド管－被覆管内径ギャップ、上下ポーラスプラグ気孔径、プラグ間距離および要素長さを考慮して合計4体製作した。

試験体 A (No. 1、2) は制御棒要素内のナトリウム充填性、ガスプレナムの形成を確認するための試験体とし、被覆管内には何も設けないタイプとする。試験体 B (No. 3、4) は被覆管の中にステンレス鋼柱を設置し、寿命末期を想定したシュラウド管外径－被覆管内径ギャップを模擬するタイプとする。いずれの試験体についても実機運転時に ^{10}B から生成されるヘリウムガスを模擬するため、要素外部からヘリウムガスを注入できるように配管を設けた構造とする。また、試験体内部にナトリウムが充填されるのを確認するため、シース熱電対の先端を削りだした液面計を取り付けた。さらに、試験体内には、X線撮影時のナトリウム液面を計測する目印となる、液位計測用ロッドを設置した。図 2.3-1、2.3-2 に試験体 A、B の構造図をそれぞれ示す。

下表に各試験体の基本仕様比較を示す。

表 各試験体の基本仕様

種類	No.	上部プラグ 公称気孔径 (μm)	下部プラグ 公称気孔径 (μm)	直径ギャップ (mm)	プラグ間距離 (mm)	
試験体 A	1	200	120	—	1275	
	2					
試験体 B	3			0.7*		
	4					

ポーラスプラグは、SUS316 の細線を格子状に並べ重ね合わせた金網タイプを使用し、上部及び下部ポーラスプラグの公称気孔径は、それぞれ 200 及び 120 μm とした。下表にポーラスプラグの仕様を示す。

表 ポーラスプラグ仕様

公称 気孔径 (μm)	外径 (mm)	厚さ (mm)	メッシュ構成 (線数/インチ) × 層数	メッシュ線径 (mm) × 層数	材質	製造 メーカー
200 (上部)	$\phi 11$	1.66	60×6	0.18×6	SUS316	(株) 富士 フィルター工業
120 (下部)			60×3+120+60×3	0.18×3+0.08+0.18×3		(株) 日本精線

ポーラスプラグは電子ビーム全周溶接を使用し、下表の溶接条件により取付けた。

表 溶接条件

公称気孔径 (μm)	溶接方法	電圧 (kV)	電流 (mA)	溶接速度 (m/min)	EBW 直径 (mm)
200 (上部)	EBW 全周溶接	80 (設定値)	2.8 (実測値)	1.0 (手動)	$\phi 12.7$
120 (下部)			5.0 (実測値)		

寿命末期のギャップ 0.7mm は、 B_4C 及びシュラウド管のスエリング率を、それぞれ 10%、6%と想定し、下記のように算出した。

*：寿命末期直径ギャップ最小値 (B_4C 10%スエリング、シュラウド管 6%スエリング考慮)

被覆管内径－ (B_4C ペレット外径 $\times 1.1$)－ (4 $\times$ 内外シュラウド管肉厚 $\times 1.06$)

$= 15.47 - (12.2 \times 1.1) - (4 \times 0.325 \times 1.06)$

$\approx 0.7\text{mm}$

尚、制御要素製作公差は下記の如く設定した。() 内数値は、製作寸法を表す。

項目	外径	内径	肉厚
被覆管	(16.9 $\pm$ 0.05)	15.47 (15.5+0.07/-0.03)	(0.7)
外側シュラウド管	(13.6)	(13.0)	0.325 (0.3 $\pm$ 0.025)
内側シュラウド管	(12.9)	(12.3)	0.325 (0.3 $\pm$ 0.025)
B_4C ペレット	12.2 (12.2+0/-0.05)	—	—

3. ナトリウム中試験

3.1 試験目的

本試験は、ダブルポーラスプラグナトリウムボンド型制御棒（以下、ナトリウムボンド型制御棒）要素に関し、制御棒要素試験体を用いたナトリウム試験によって以下の機能を確認し、「もんじゅ」長寿命制御棒の開発に資することを目的とする。

- (1) 制御棒の EVST 装荷時のナトリウム充填性
- (2) 制御棒要素内に発生するヘリウムによる上部ガスプレナムの形成
- (3) 制御棒を EVST から引抜いた時の制御棒要素からのナトリウムドレン性
- (4) 引抜き後の制御棒要素内残留ナトリウム洗浄性

3.2 試験方法

3.2.1 試験装置

図 3.2.1-1 に試験装置の全体構造、図 3.2.1-2 に試験容器と試験体構造、図 3.2.1-3 に洗浄容器構造、図 3.2.1-4 に X 線撮影模式図、写真 3.2.1-1 に試験装置外観、写真 3.2.1-2 に X 線照射装置外観を示す。試験装置はナトリウム試験容器、膨張タンク、試験体を挿入および引抜くための駆動装置、カバーガスのアルゴンガスライン、試験体内へのヘリウム注入を模擬するためのヘリウムガスライン、試験体内のナトリウム液面を判別するための可搬式 X 線照射装置および NaOH 洗浄装置で構成される。

試験容器と試験体の取合いはフランジ構造とし、試験体が上下駆動でき、かつアルゴンガスを密閉するためウイelsonシールを用いた。本試験ではナトリウム液面を同定するために X 線撮影するが、X 線を透過しやすくするため、試験容器の肉厚を 1.2mm の薄肉構造とした。

膨張タンクは、試験容器の温度変化や試験体挿入・引抜きによって引き起こされるナトリウム液面の変動を抑制するために設けたもので、試験容器と配管で連結する構造となっている。今回の試験では、120 μ m の微小な気孔径を有するポーラスプラグを使用するが、ナトリウム不純物の析出によるポーラスプラグの閉塞を避けるため、コールドトラップを膨張タンク下部に設けた。コールドトラップは、SUS メッシュと冷却ブローからなる。なお試験中には、コールドトラップ温度を約 120℃に保持しナトリウム中酸素濃度を 1ppm 程度とした。

上下駆動機構は、試験体上部から吊るしたワイヤーを手巻きウインチにより駆動させるもので、手巻きウインチ部にはフォトセンサーを設け、移動速度を記録するようにし

た。

ヘリウムガスラインは、実機における B_4C ペレットからのヘリウムガスの放出を模擬するために設けたもので、微小流量のヘリウムを注入するため、マスフローコントローラを取り付けた。

可搬式 X 線照射装置は、試験体内部のナトリウム液面を観察するためのもので、X 線照射装置、イメージングプレート、鉛遮蔽板、X 線デジタル画像処理装置等からなる。イメージングプレートは、試験体を透過した X 線を検出・画像化するもので、デジタル画像処理装置により画像処理をその場で実施することができる。

NaOH 洗浄容器は、実機燃料洗浄槽と同様に試験体を起立した状態で浸漬できる構造とし、NaOH-Na 反応による反応熱を除去する目的で、放熱フィン、冷却ブローを設けた。

3.2.2 試験条件

ナトリウムボンド型制御棒要素の実機条件下での性能を確認するため、試験体を製作し、ナトリウム充填性、要素上部ガスプレナムの形成、引き抜き時のナトリウムドレン性、および洗浄性の下記確認試験を実施する。表 3.2.2-1~3.2.2-4 に各試験体の実績工程表、表 3.2.2-5 に試験条件一覧表、図 3.2.2-1~3.2.2-4 に X 線撮影位置図を示す。

3.2.2.1 充填性確認試験

制御棒の EVST 装荷時のナトリウム充填性を確認するものである。

試験体を徐々にナトリウム中に挿入し、ナトリウム充填性を確認する。ナトリウム中への挿入速度は「もんじゅ」EVST への制御棒挿入速度を模擬して約 6m/min とし、上下プラグの相互作用（下部プラグからナトリウムが透過する前に、ナトリウム中へ上部プラグが浸漬した場合に発生する作用）も含めて充填性を確認する。充填性能上ナトリウム温度は低温側のほど表面張力が大きく保守的となるので、試験温度は「もんじゅ」総合機能試験時の低温側の温度を参考とし約 190℃とする。

ナトリウム充填性の確認は可搬式 X 線デジタル画像処理装置を用いて、試験体上下プラグ間を数枚に分割して撮影し、試験体中のナトリウム液面を X 線透過像分析により判別する。

なお、最初に実施する試験（試験体 No. 1）において、試験体の挿入終了時にナトリウムの流入が見られないときは、ナトリウムの温度を上昇させることによりナトリウムを充填させることとする。それ以降の試験では、上部プラグがナトリウムに浸かる前に、試験体の挿入を停止し、ナトリウムを充填させてから上部プラグをナトリウム液面下に

沈降させる。

3.2.2.2 運転時模擬試験

通常運転中の B_4C からのヘリウム発生に伴い上部ガスプレナムが確保されることを確認するものである。ナトリウム充填後、600～650℃まで昇温した後、試験体中にヘリウムガスを注入する。その後、上部プレナムにガス空間が確保されるかどうかを確認する。その後、試験体 No. 2, 3, 4 においては、ナトリウムを 190℃降温した後、再度ヘリウムガスを注入し、上部プレナムにガス空間が確保されるかどうかを確認する。ガス空間の確認は充填性確認と同様に可搬式X線デジタル画像処理装置を用いて行う。尚、実機で行われるサイクリックな昇降温に対する影響の有無を確認するために、試験体 No. 2 においてはサイクリック試験（190℃→600～650℃（ヘリウム注入、撮影）→190℃（撮影）→600～650℃（撮影）→600～650℃（ヘリウム注入、撮影）→190℃（ヘリウム注入、撮影））を行う。

3.2.2.3 ドレン性確認試験

EVST 内から制御棒引き抜き時のナトリウムドレン性を確認するものである。試験は一定速度引き抜きの場合と、途中で停止する場合の2パターン実施する。ドレン後、試験体を冷却した後、試験体内の液面確認を可搬式X線デジタル画像処理装置により行う。尚、試験体 No. 3, 4 はギャップ部に液面がある場合が予測されるため、X線撮影での判別は不可能であると考えられるが念のため撮影を行う。

試験体 No. 1, 4 については、X線撮影後、試験体を解体し、アルコール、次に水にナトリウムを溶出させる。これを化学分析することにより、要素内に残留するナトリウム量を同定する。ドレン性確認試験のフローを図 3.2.2.3-1 に示す。

(a) 一定速度引抜試験

試験は試験体 No. 1, 3 にて実施する。引き抜き速度は、EVTM グリッパによる EVST からの制御棒引き抜き速度を模擬して約 6m/min とする。この際、ナトリウム温度は約 190℃とする。

(b) 途中停止試験

試験は試験体 No. 2, 4 にて実施する。引抜速度は、下部プラグが液面下約 100mm 程度までは約 6m/min とし、この位置で一定時間（最大約 1 時間）保持する。その他の条件は上記 (a) と同一とする。尚、本途中停止は試験体 No. 1, 3 の一定速度引抜試験において、十分にドレンされた場合は実施しない。

3.2.2.4 洗浄性確認試験

引抜き後の要素内残留ナトリウムの洗浄性を確認するものである。試験は試験体 No. 2, 4 にて実施する。現状実機では、燃料洗浄設備により湿潤ガス洗浄と脱塩水循環洗浄の組み合わせにより洗浄を行っている。しかし、ナトリウムボンド型の制御棒要素内には多くのナトリウムが残留していると想定されるため、本試験においては実機洗浄方法に従わず、水よりも反応が穏やかなアルカリ水 (NaOH 水溶液) を使用した、NaOH 洗浄を実施する。本試験により、水溶液中に浸漬した制御棒要素の洗浄特性を確認するものである。この際は、所定の濃度の NaOH 水溶液に試験ポットより引抜いた試験体を浸漬し、水素の発生が目視により認められなくなるまでこの状態を維持する。水素の発生が目視により認められなくなったら、NaOH 水溶液中から取り出し、NaOH 水溶液中に反応したナトリウム量を化学分析により同定する。

次に、試験体を解体し、さらにアルコール、次に水にナトリウムを溶出させ化学分析によりナトリウム量を同定する。NaOH 水溶液、解体後の洗浄にて得られたナトリウム溶出液の化学分析により得られたナトリウム量より、ナトリウムの洗浄性を確認するとともに、ドレン性も併せて確認する。図 3.2.2.4-1 に洗浄性確認試験フローを示す。

3.2.3 X線評価方法

制御棒要素内に形成されるガスプレナムの把握には、可搬式X線デジタル画像処理装置を用いたX線写真撮影を行い目視にてガス/ナトリウム境界を見分けるものとするが、目視にて判断がつきにくい可能性が考えられることから、予備試験を実施して、濃度データによる評価を行い、高精度の判定をすることにした。X線撮影の条件は、エネルギー200keV、電流5mA、照射時間30sである。以下、予備試験で実施確認し、本試験に適用した二つのデータ評価方法を述べる。図3.2.3-1に予備試験体構造図、図3.2.3-2にX線撮影位置図を示す。

3.2.3.1 試験体内濃度評価

本評価方法は、濃度データの絶対値を用いる方法で、撮影画像データより、試験体内のX軸の1ラインをY軸方向全ラインにおいて濃度値を数値化(0~256色)し、その傾向によりガスとナトリウムの境界を評価する。X軸方向の取る位置は撮影画像毎に若干のずれが生じるため、試験体内の液位計測用ロッドと試験体被覆管肉厚部に干渉しないラインを各画像毎に適宜決めていくものとする。ヒーターなどの干渉物がかかってくる箇所においては評価対象外とする。また、撮影画像の識別度を上げるため、X線照射口に取り付けてある狭小視野治具の影響で、画像の上下端100~200ライン程度のデータが不確かな場合はその値は評価対象としないものとする。

図3.2.3.1-1に試験体内濃度評価方法の説明図(予備試験結果)を示す。予備試験の結果より、狭小視野治具による端部効果が見られるものの、ガス/ナトリウム境界は判定可能であることを確認した。

3.2.3.2 差分濃度評価

本評価方法は、試験体内と周囲の試験容器内における濃度データの相対値を用いる方法で、撮影画像データより、試験体内及び試験容器内(試験体外)の各X軸1ラインをY軸方向全ラインにおいて濃度を数値化(0~256色)し、次式により濃度諧調値を算出して、得られた値によってガス/ナトリウムの判別評価を行う。

$$\text{濃度諧調値} = \text{試験体内濃度値} - \text{試験容器内濃度値}$$

本方法は、ナトリウムが常時入っている試験容器内を基準とし、X軸に同ラインの試験体内濃度値を補正する方法であるため、X線の特性や撮影毎のばらつき、干渉物などの影響で曲線となったデータを補正できる特徴がある。今回の撮影画像を人の眼で評価する場合、試験体内の濃度が急に変わる液位で評価する方法と、基準となる濃度を見つけ

それと見比べて評価する方法がありその両方を合わせた評価法である。内部管 X 軸方向位置は撮影画像毎に若干のずれが生じるため、試験体内の液位計測用ロッドと試験体被覆管肉厚部にかからないラインを各画像毎に決め、そこから X 軸に一定のラインだけシフトして試験容器内データとする。但し、干渉物が多い場合はシフトする量を適宜変更する。ヒーターなどの干渉物がかかってくるデータは評価対象としないものとする。また、ヒーターの巻き方がスパイラル状のため、試験体内濃度評価より液位の誤差幅は大きいことがある。撮影画像の識別度を上げるため、X 線照射口に取付けてある狭小視野治具の影響で、画像の上下端 100～200 ライン程度のデータが不確かな場合はその値は評価対象としないものとする。

図 3.2.3.2-1 に差分濃度評価方法の説明図（予備試験結果）を示す。予備試験の結果より、狭小視野治具による端部効果はなくなったため、試験体内濃度評価方法より若干ガス/ナトリウム境界が判定しやすいことを確認した。

これら 2 つの予備試験の結果から本試験の評価には、撮影範囲にガス/ナトリウム境界がある場合には、精度をあげるため、試験体内濃度評価法および差分濃度評価法の 2 つの評価法を使用して境界を見分けるものとする。また、試験体内の撮影範囲全てがナトリウムまたはガスの場合には、差分濃度評価法を用いてガス/ナトリウムを判別するものとし、濃度諧調値が 5 以上でナトリウム、5 未満ではガスと判別することとする。

3.3 試験結果

3.3.1 試験体 No.1 試験結果

図 3.3.1-1～3.3.1-4 に X 線撮影結果、図 3.3.1-5～3.3.1-9 にガス/ナトリウム境界判定結果、図 3.3.1-10～3.3.1-13 に計測データ、写真 3.3.1-1 に試験体分解調査結果を示す。

3.3.1.1 充填性確認試験について

温度 190℃ のナトリウム中へ、「もんじゅ」EVST への制御棒挿入速度を模擬した約 6m/min で試験体を挿入した結果を以下に示す。なお、ナトリウムが充填されたことを確認したため、試験計画にあるナトリウムの昇温操作は行っていない。

試験体の上部プラグがナトリウム中へ浸漬する直前に、上部プラグ-415mm 位置に取付けてある液面計が作動した。このことから、上下プラグの相互作用（下部プラグからナトリウムが透過する前に、ナトリウム中へ上部プラグが浸漬した場合に発生する作用）が発生しないことを確認した。

試験体挿入後の X 線撮影の結果、X 線撮影部位に保温材が被ってしまう範囲においては、保温材が悪影響し、ガス/ナトリウム境界の判別が困難であった。但し、以下の推定理由により、試験体内全範囲において、ナトリウムが充填できているものと推察する。なお、試験体 No.1 終了後、X 線撮影を適確に行うために保温材を改造し、ガス/ナトリウム境界の判別を容易にした。

- (1) JNC 殿基礎試験時²⁾の知見より、上部プラグがぬれない状態では保持圧は発生しないこと、および下記 (2) (3) の理由により、試験体内はナトリウムで満たされていたと推察する。
- (2) 試験体をナトリウム中に浸漬中、上部プラグ-415mm に取付けてある液面計が作動したことからナトリウムは上部プラグ-415mm 以上まで充填された。
- (3) X 線撮影においては、試験体内のガス/ナトリウムの液層が判別できなかった。その後、実施した X 線確認試験において、流通配管の保温材が悪影響し、上部プラグ下端～200 mm の範囲ではガス/ナトリウム境界が判別できないことを確認した。これより試験体 No.1 の試験においてはガス/ナトリウムの境界が上部プラグ下端～200 mm の範囲に入ってしまったために写らなかったと推察されるが、アルコール/水洗浄時の分解の際に、ヘリウム導入管スペーサ部にナトリウムが詰まっていたことから上部プラグ下端近傍まではナトリウムが充填されていたことを確認した。

3.3.1.2 運転時模擬試験について

温度 620℃のナトリウム中へヘリウムガスを約 5mL/min で注入した結果を以下に示す。

ヘリウム注入後のガスプレナム長さは約 232mm（ヘリウム注入 1 セット後）、約 215mm（ヘリウム注入 2 セット後）であった。また、ガスプレナム形成後にヘリウムを注入してもヘリウム導入管内（ガスプレナム内）の圧力変動は殆どなかった。

3.3.1.3 ドレン性確認試験について

温度 190℃のナトリウム中から、「もんじゅ」EVST からの制御棒引抜き速度を模擬した約 6m/min で試験体を引抜いた結果を以下に示す。

引抜き後の X 線撮影の結果、試験体内にナトリウムの残留はなかった。念のため、アルコール/水洗浄前に試験体を分解し、残留ナトリウム調査を実施したが、下部プラグの下部に若干の残留があったものの、試験体内にはナトリウムの残留は殆どなく、良好にドレンされていた。なお、ヘリウム導入管スペーサ部にはナトリウムが残留していた。

試験体をアルコール/水で洗浄後、溶液を分析した結果、ドレン後に試験体内に残留したナトリウム量は約 3g であった。なお、この量の殆どがヘリウム導入管内に残留したナトリウム量(3g 程度)であり、試験体内にはナトリウムの残留はなかったと考えられる。

3.3.2 試験体 No. 3 試験結果

図 3.3.2-1～3.3.2-5 に X 線撮影結果、図 3.3.2-6～3.3.2-9 にガス/ナトリウム境界判定結果、図 3.3.2-10～3.3.2-14 に計測データ、写真 3.3.2-1 に試験体分解調査結果を示す。

3.3.2.1 充填性確認試験について

温度 190℃のナトリウム中へ、「もんじゅ」EVST への制御棒挿入速度を模擬した約 6m/min で試験体を挿入した結果を以下に示す。

試験体の上部プラグがナトリウム中へ浸漬した後に、上部プラグ-415mm 位置に取付けてある液面計が作動した。このことから、模擬ベレットのギャップ部の影響により、ギャップがない試験体に比べ、充填速度が低下することを確認した。なお、上下プラグの相互作用（下部プラグからナトリウムが透過する前に、ナトリウム中へ上部プラグが浸漬した場合に発生する作用）発生の有無は不明である。

試験体挿入後の X 線撮影の結果、試験体内にガス/ナトリウム境界はなく、差分濃度階調値もナトリウム充填の値（5 以上）を示したことから、試験体内がナトリウムで充填していることを確認した。

よって、この条件により、ナトリウムが問題なく充填できることを確認した。また、上部プラグがナトリウム中へ浸漬した後に、試験体内にガス空間があったにも係わらず、試験体挿入後にはガス空間が消滅し、ナトリウムで満たされていたことから、上部プラグには保持圧が発生せず、ガスが上部プラグより放出したものと推定される。

3.3.2.2 運転時模擬試験について

温度 620℃および 190℃のナトリウム中へヘリウムガスを約 2mL/min で注入した結果を以下に示す。

(1) He 注入量とガス圧の関係

図 3.3.2-11 に示す温度 620℃の場合、He 注入開始①直後から He 注入終了③まで、試験体内部圧力が上昇する。この間の途中②から、圧力上昇率が減少する傾向がある。これは、①～②の間は、He 導入管内にナトリウム液面が存在しているため、その液面を He が押し下げているためである。He 導入管内にナトリウム液面がなくなり、全て He が充填されると、ナトリウムで充填されている試験体内部への He 注入が開始され、上部ボラスプラグ部の直下からガスプレナムが形成される。③～④で、一旦 He 注入を中止すると試験体内部圧力は保持されるが、④～⑤の He 注入により、圧力が上昇しガスプレナム

が成長する。⑤において、圧力が減少するが、これは上部ポーラスプラグより He が放出された瞬間であり、その後、He 注入を続行しても He 放出が連続して発生し、圧力は一定に保持される。この一定圧力をここでは保持圧と呼ぶ。なお、He 注入時、試験容器内カバーガス空間が非常に大きいため、He 放出の影響を受けずに、カバーガス圧はほぼ一定を保持している。

同様な現象は、図 3.3.2-13 に示す温度 190℃でも観察できる。この場合、連続して He 注入を行っている間、圧力は増加し、①～②では、He 導入管内のナトリウム液面を He が押し下げ、②～③では、上部ポーラスプラグ部の直下からガスブレンラムが形成されている。

(2) X線撮影データによるナトリウム液面評価

He 注入終了後に実施した X 線撮影の結果、ナトリウム 620℃でのヘリウム注入後のガスブレンラム長さは、約 233mm (1 回目)、約 216mm (2 回目) であった。試験体 No.1 のガスブレンラム長さとはほぼ同じ長さであった。また、190℃でのヘリウム注入後のガスブレンラム長さは、約 295mm であった。

3.3.2.3 ドレン性確認試験について

温度 190℃のナトリウム中から、「もんじゅ」EVST からの制御棒引抜き速度を模擬した約 6m/min で試験体を引抜いた結果を以下に示す。

X 線撮影の結果、試験体内にナトリウムの残留はなかった（模擬ペレット 0.35mm 隙間部については判別不能）。念のため、アルコール/水洗浄前に試験体を分解し、残留ナトリウム調査を実施したが、下部プラグ上 30mm 程度および下部φ8 流通孔はナトリウムが残留していたものの、模擬ペレット上方には残留はなく、内表面に薄っすら付着している程度であった。また、模擬ペレット直径 0.7mm ギャップ部は片当たりしており、広隙間側にはナトリウムの残留は見られなかったものの、狭隙間側は片当たり部にナトリウムの接着が見られた。試験体 No. 1 と同様に、ヘリウム導入管スペーサ部にはナトリウムが残留していた。なお、試験体をナトリウム中から約 6m/min で引抜途中に、試験体摺動部へのナトリウムベーパーの付着により、引抜き途中で 10 s 程度停止、その後、引抜速度が約 2m/min に低下した。このことから、模擬ペレットがあっても、一時停止引抜きにて、目的どおりにドレンできることを確認した。

試験体をアルコール/水で洗浄後、溶液を分析した結果、ドレン後に試験体内に残留したナトリウム量は約 8.0g であった。なお、この量の殆どがヘリウム導入管内（3g 程度）・下部プラグ上 20mm（2g 程度）・下部φ8 流通孔（1g 程度）の 3 箇所に残留したナトリウム量であり、試験体内およびギャップ部に残留したナトリウム量は、2g 程度であったと考えられる。

3.3.3 試験体 No. 4 試験結果

図 3.3.3-1～3.3.3-5 に X 線撮影結果、図 3.3.3-6～3.3.3-9 にガス/ナトリウム境界判定結果、図 3.3.3-10～3.3.3-14 に計測データを示す。

3.3.3.1 充填性確認試験について

温度 190℃ のナトリウム中へ、「もんじゅ」EVST への制御棒挿入速度を模擬した約 6m/min で試験体を挿入した結果を以下に示す。

試験体の上部プラグがナトリウム中へ浸漬した後に、上部プラグ-415mm 位置に取付けてある液面計が作動した。このことから、模擬ペレットのギャップ部の影響により、ギャップがない試験体に比べ、充填速度が低下することを確認した。なお、上下プラグの相互作用（下部プラグからナトリウムが透過する前に、ナトリウム中へ上部プラグが浸漬した場合に発生する作用）発生の有無は不明である。

試験体挿入後の X 線撮影の結果、試験体内にガス/ナトリウム境界はなく、差分濃度譜調値もナトリウム充填の値（5 以上）を示したことから、試験体内がナトリウムで充填していることを確認した。

よって、この条件により、ナトリウムが問題なく充填できることを確認した。また、上部プラグがナトリウム中へ浸漬した後に、試験体内にガス空間があったにも係わらず、試験体挿入後にはガス空間が消滅し、ナトリウムで満たされていたことから、上部プラグには保持圧が発生せず、ガスが上部プラグより放出したものと推定される。

3.3.3.2 運転時模擬試験について

温度 620℃ および 190℃ のナトリウム中へヘリウムガスを約 2mL/min で注入した結果を以下に示す。

ナトリウム 620℃ でのヘリウム注入後のガスプレナム長さは、約 240mm（1 回目）、約 240mm（2 回目）であった。注入 1 回目、2 回目ともガスプレナム長さはほぼ同じ結果となった。また、ナトリウム 190℃ でのヘリウム注入後のガスプレナム長さは、約 284mm であった。また、ガスプレナム形成後にヘリウムを注入してもヘリウム導入管内（ガスプレナム内）の圧力変動は殆どなかった。

3.3.3.3 ドレン性確認試験について

温度 190℃のナトリウム中から、「もんじゅ」EVST からの制御棒引抜き速度を模擬した約 6m/min で試験体を引抜いた結果を以下に示す。

X線撮影の結果、試験体上下プラグ間内にはナトリウムの残留はなかった（模擬ペレット 0.35mm 隙間部については判別不能）。但し、下部φ8 流通孔途中までナトリウムが残留していた。この条件においては、模擬ペレットがあっても一定速度引抜きにて、ドレンできることを確認した。（模擬ペレット 0.35mm 隙間部の残留は不明）

3.3.3.4 洗浄性確認試験について

30%NaOH 水溶液内に試験体を浸漬させ、試験体内に残留したナトリウムを洗浄した結果を以下に示す。

ナトリウムと NaOH の反応はマイルドであった（試験体内に残留したナトリウム量は、内表面に薄っすら付着していた程度であったことも影響）。但し、NaOH 洗浄後、試験体を分解し内部調査を実施した結果、下部流通孔部に残留したナトリウムは洗浄できたものの、模擬ペレット直径 0.7mm ギャップ部およびヘリウム導入管内にはナトリウムが残留しており、NaOH 洗浄ではギャップ部の洗浄をすることができなかった。

試験体を NaOH で洗浄後、溶液を分析した結果、NaOH にて洗浄できた量は、同定範囲外であり計測できなかった。今回使用した NaOH 水溶液中のナトリウム量は、約 1.5kg であり、濃度分析値（中和滴定法による）の誤差が 0.03wt%程度あるので、誤差は±5g 程度となってしまったため、今回のような微量なナトリウム量は分析できなかった（計画時は 80～240g のナトリウム残留を想定）。

その後、試験体をアルコール/水で洗浄し、溶液を分析した結果、NaOH 洗浄にて洗浄できなかったナトリウム量は約 5.5g であった。

NaOH 水溶液中ナトリウム量の分析ができなかったため、ドレン後に試験体内に残留したナトリウムの総量は同定できなかったが、NaOH 水溶液中のナトリウム量分析精度は±5g 程度であるため、ナトリウム総量は 6～11g 程度と推定される（NaOH 洗浄前の X 線撮影および目視観察の結果から、ナトリウムの残留個所は、ヘリウム導入管内（3g 程度）・下部φ8 流通孔（1g 程度）であるため、ギャップ部に残留したナトリウム量は 2～7g 程度と推定される）。

よって、NaOH 水溶液による洗浄後の残留ナトリウム量は 5.5g であることから、ギャップ部に残留したナトリウムを殆ど洗浄できなかったと推定される。

3.3.4 試験体 No. 2 試験結果

図 3.3.4-1～3.3.4-7 に X 線撮影結果、図 3.3.4-8～3.3.4-13 にガス/ナトリウム境界判定結果、図 3.3.4-14～3.3.4-20 に計測データを示す。写真 3.3.4-1 に NaOH 洗浄後の試験体分解調査結果を示す。

3.3.4.1 充填性確認試験について

温度 190℃のナトリウム中へ、「もんじゅ」EVST への制御棒挿入速度を模擬した約 6m/min で試験体を挿入した結果を以下に示す。

試験体の上部プラグがナトリウム中へ浸漬する前に、上部プラグ-415mm 位置に取付けてある液面計が作動した。このことから、模擬ペレットのギャップ部がある試験体に比べ、充填速度が早いことを確認した。また、上下プラグの相互作用（下部プラグからナトリウムが透過する前に、ナトリウム中へ上部プラグが浸漬した場合に発生する作用）が発生しないことを確認した。

試験体挿入後の X 線撮影の結果、試験体内にガス/ナトリウム境界はなく、差分濃度譜調値もナトリウム充填の値（5 以上）を示したことから、試験体内がナトリウムで充填していることを確認した。

よって、この条件により、ナトリウムが問題なく充填できることを確認した。

3.3.4.2 運転時模擬試験について

温度 620℃および 190℃のナトリウム中へヘリウムガスを約 2mL/min で注入した結果を以下に示す。

ナトリウム 620℃でのヘリウム注入後のガスプレナム長さは、約 228mm（1 回目）、約 235mm（2 回目）であった。また、ナトリウム 190℃でのヘリウム注入後のガスプレナム長さは、約 275mm であった。また、ガスプレナム形成後にヘリウムを注入してもヘリウム導入管内（ガスプレナム内）の圧力変動は殆どなかった。

3.3.4.3 サイクリック試験について

ナトリウム 620℃でヘリウム注入を行い、ガスプレナムを形成後、190℃へ降温→620℃へ昇温と、温度サイクリックを経験した際のガスプレナム状態を確認した結果を以下に示す。

ナトリウム 620℃でガスプレナム長さ約 228mm の状態から、190℃へ降温した後のガスプレナムは、上部プラグ直下の約 15mm の長さとなった。原因は、ナトリウム降温に伴い、ヘリウム導入管温度が低下し、ヘリウム導入管にガスが吸い込まれてしまったもの

と推察する。

その後、620℃へ昇温した後のガスプレナム長さは約 122mm であり、降温前の長さ約 228mm に再生しなかった。原因は、190℃の状態を 3 日間保持したことにより、系統からの微小リーク (1×10^{-4} mL/s 程度) が蓄積し、20mL 程度のヘリウムガスがリークしたためと推察される。

なお、実機においては、ナトリウム温度低下に伴い、上部プラグの保持圧が大きくなるため、温度低下によりガスプレナムが縮小するものの、上部プラグからの噴出しは発生しないものと推察される。また、その後の昇温により、ガスプレナムが元の長さに再生するものと推察される。

3.3.4.4 ドレン性確認試験について

本試験体においては、試験体 No. 1, 3, 4 において十分にドレンできたことを踏まえ、ドレン性の確認をすることを止め、NaOH 洗浄性確認のために意図的に試験体内にナトリウムを残留させた。試験体内にナトリウムを残留させるために、試験体がナトリウム中に浸漬した状態でナトリウム温度を融点付近の 100℃前後に設定し、さらにカバーガス空間の温度を 50℃程度にした状態で試験体をカバーガス空間に引抜いた。残留状況は X 線撮影により行い、下部プラグから約 180mm (約 34mL) 間にナトリウムが充満していることを確認した。

3.3.4.5 洗浄性確認試験について

30%NaOH 水溶液中に試験体を浸漬させ、試験体内に残留したナトリウムを洗浄した結果を以下に示す。

- (1) 試験体を NaOH 水溶液中に浸漬させた後、NaOH-ナトリウム反応による水素が発生したものの、反応は数分で止まった。
- (2) その後、約 1 時間観察を継続したが、変化はなかった。(遠隔カメラによる確認の結果、新たな気泡は発生せず、反応は確認できなかった)
- (3) 一旦、NaOH 水溶液をドレンし、試験体をアルゴンガス中に保管。
- (4) JNC 殿と協議の上、再度 NaOH 水溶液中に挿入。
- (5) その後、実機燃料洗浄槽の制御要素上部までのナトリウムヘッド圧分を模擬するために、10 秒間程度カバーガスに約 0.01MPa の加圧をしたところ、NaOH-Na 反応による水素が活発に発生したが、3 分程度で反応は収まった。

(6) その後、約 1 時間観察を継続したが、変化はなかった。(遠隔カメラによる確認の結果、新たな気泡は発生せず、反応は確認できなかった)

その後、NaOH 水溶液中から試験体を引抜き、試験体を解体し内部調査を実施した。上部プラグから残留ナトリウム頂部までは良好に洗浄されていたものの、残留ナトリウム頂部上にはジェル状の NaOH 水和物が蓄積され、残留ナトリウムは殆ど洗浄できなかった。また、試験体内側の下部プラグ付近およびヘリウム導入管部は殆ど洗浄ができなかった。

試験体を NaOH で洗浄後、溶液を分析した結果、NaOH にて洗浄できた量は、同定範囲外であり計測できなかった。なお、残留ナトリウムの頂部に残留したジェル状の NaOH 水和物を分析した結果、含有ナトリウム量は 3.7g であった。

その後、試験体をアルコール/水で洗浄し、溶液を分析した結果、NaOH 洗浄にて洗浄できなかったナトリウム量は 31.2g であった。

NaOH 水溶液中ナトリウム量の分析ができなかったため、ドレン後に試験体内に残留したナトリウムの総量は同定できなかったが、NaOH 水溶液中のナトリウム量分析精度は±5g 程度であるため、ナトリウム総量は 35～40g 程度と推定される (X 線撮影の結果および目視確認の結果から、ナトリウムの残留個所は、試験体内 (33g 程度) および、ヘリウム導入管内 (3g 程度) の総量 36g 程度であり、オーダー的に一致する)。

よって、NaOH 水溶液による洗浄後の残留ナトリウム量は 34.9g であることから、残留ナトリウムを殆ど洗浄できなかったものと推定される。

3.4 試験結果の検討

3.4.1 ナトリウムの充填性

「もんじゅ」EVST への制御棒挿入速度を模擬した約 6m/min にて、190℃のナトリウム中へ試験体を浸漬後、各試験体内がナトリウムで充填されていたことから、目的どおりに充填できることを確認した。また、試験体 No. 3, 4 においては、模擬ペレットを設置し、実機条件よりも厳しい寿命末期を模擬した直径 0.7mm ギャップとしたにも係らず充填できたことから、実機においても目的どおりに充填できる見通しを得た。

なお、上部プラグ-415mm 位置に取付けてある液面計は、試験体 No. 1, 2 (模擬ペレットなし) では上部プラグ浸漬前に、試験体 No. 3, 4 (模擬ペレットあり) では上部プラグ浸漬後に作動した。図 3.4.1-1 に液面計作動時の各試験体位置を示す。

このことから、模擬ペレットがある試験体のほうが、ナトリウム充填速度が遅いことを確認した。また、上下プラグの相互作用 (下部プラグからナトリウムが透過する前に、ナトリウム中へ上部プラグが浸漬した場合に発生する作用) については、模擬ペレットがない試験体では発生せず、模擬ペレットがある試験体では発生の有無を確認できなかった。また、模擬ペレットがある試験体については、上部プラグがナトリウム中へ浸漬した後に、試験体内にガス空間があったにも係わらず、試験体挿入後にはガス空間が消滅し、ナトリウムで満たされていたことから、上部プラグには保持圧が発生せず、ガスが上部プラグより放出できるものと推察される。

上部プラグでは、図 2.2.1-2 (b) に示す、表面張力が、ナトリウムに濡れてない状態では上向きに作用するため、保持圧が発生しないものと推定する。また、ナトリウム温度 190℃での下部プラグ 120 μ m 透過圧相当分のナトリウムヘッド h を算出すると、

$$\begin{aligned} h_{190^{\circ}\text{C}} &= \left(\frac{4 \cdot \sigma}{de \cdot \rho \cdot g} \right) \times 10^6 \quad (3-1) \\ &= \left(\frac{4 \times 191}{132 \times 906 \times 9.80665} \right) \times 10^6 \\ &= 651(\text{mm}) \end{aligned}$$

ここで σ : 190℃Naの表面張力 = 191(mN/m)

de : 等価直径 = 132(μ m)

ρ : 190℃Naの密度 = 906(kg/m³)

g : 重力加速度 = 9.80665(m/s²)

651mmであり、本試験体の上下プラグ間距離は 1275mm であるため 2 倍程度の裕度があり、良好に充填できたものとする。

3.4.2 ガスプレナムの形成

実機運転時に ^{10}B から生成されるヘリウムガスの発生を模擬し、ナトリウム温度約 620°C において試験体内（上部プラグ $200\mu\text{m}$ 金属金網メッシュ）にヘリウムガスを注入した結果、各試験体ともに、透過圧を超えた後にガスが上部プラグより放出され、軸方向長さ平均 230mm のガスプレナムが形成されることを確認した。また、形成された後のガスプレナム圧力（保持圧と呼ぶ）は一定に保たれ、ヘリウムガスを再度注入しても、ほぼ変化はなかった。また試験体 No. 2, 3, 4 については、ナトリウム温度約 620°C を経験した後の約 190°C においても同様のヘリウムガス注入をおこない、平均 286mm のガスプレナムが形成されることを確認した。また、模擬ペレットの有無によるガスプレナムの長さ、形成挙動の違いがないことを確認した。下表に、毛細管モデルによる計算値と各試験体で形成されたガスプレナム長さを示す。また、図 3.4.2-1 にガスプレナムとナトリウム温度の関係を示す。

表 各試験体におけるガスプレナム長さ

種類	No.	模擬ペレット	ガスプレナム長さh (mm)	
			620℃	190℃
毛細管モデル による計算値		メッシュの等価直径	305	354
		JNC 殿実効気孔径	256	297
試験体 A	1	無し	232/215	—
	2		228/235	275
試験体 B	3	有り (直径ギャップ 0.7mm)	233/216	295
	4		240/240	284
		平均	230	286

JNC 殿が実施した基礎試験結果より、気孔径 $200\mu\text{m}$ の実効気孔径は $290\mu\text{m}$ であった。
この実効気孔径を用いてガスプレナム長さ h を算出すると、ナトリウム温度 620°C (試験実測温度) 時では、

$$\begin{aligned} h_{620^\circ\text{C}} &= \left(\frac{4 \cdot \sigma}{de \cdot \rho \cdot g} \right) \times 10^6 \quad (3-2) \\ &= \left(\frac{4 \times 146}{290 \times 803 \times 9.80665} \right) \times 10^6 \\ &= 256(\text{mm}) \end{aligned}$$

ここで σ : 620°C Na の表面張力 = $146(\text{mN/m})$

de : 実効気孔径 = $290(\mu\text{m})$

ρ : 620°C Na の密度 = $803(\text{kg/m}^3)$

g : 重力加速度 = $9.80665(\text{m/s}^2)$

256mm となり、ナトリウム温度 190°C 時には、

$$\begin{aligned} h_{190^\circ\text{C}} &= \left(\frac{4 \cdot \sigma}{de \cdot \rho \cdot g} \right) \times 10^6 \quad (3-3) \\ &= \left(\frac{4 \times 191}{290 \times 906 \times 9.80665} \right) \times 10^6 \\ &= 297(\text{mm}) \end{aligned}$$

ここで σ : 190°C Na の表面張力 = $191(\text{mN/m})$

de : 実効気孔径 = $290(\mu\text{m})$

ρ : 190°C Na の密度 = $906(\text{kg/m}^3)$

g : 重力加速度 = $9.80665(\text{m/s}^2)$

297mm となり、本試験の各温度での平均値 230mm と 286mm と比較すると、 620°C では約 10% 減少、 190°C においては約 4% 減少し、どちらの場合においても計算値よりも若干短くなる傾向を示した。詳細計算は添付資料-4 に示す。なお、試験においては、実機の B_4C からのヘリウム放出量約 0.01mL/min に比べ、約 2mL/min と多い注入を行ったが、注入により保持圧の変動は殆どなかったことから、実機放出量においても同様にガスプレナムは保持されるものと推察する。また、実機においては、冷却材流量の圧損が生じるため、本試験よりもガスプレナム長さが減少するものと考えられるが、ナトリウム温度 620°C での平均ガスプレナム長さは 230mm 程度であるため、冷却材流量が約 1.5kg/s 以下であればガスプレナムが崩壊せずに、ガスプレナムが成立できる見通しを得た。図 3.4.2-2 に冷却材流量と圧損等価長さの関係を示す。

3.4.3 ナトリウムのドレン性

「もんじゅ」EVST からの制御棒引抜き速度を模擬した約 6m/min で試験体を引抜いた結果、試験体内に存在したほぼ全てのナトリウムがドレンできた。

なお別途、図 3.4.3-1 に示す、ポーラスプラグの透過性検証実験を行い、一度濡れた後のプラグには透過圧が生じず、プラグの上に残留したナトリウムがドレンされることを確認している。但し、濡れ特性上、表面張力によってプラグのメッシュ部に膜状のナトリウムが残留するものと推定する。

試験体内のナトリウムがドレンするメカニズムは下記と推察される。図 3.4.3-2 にメカニズムの模式図を示す。

- ①ナトリウム浸漬中の試験体内ナトリウムは、上部プラグの上（流通孔部）、試験体内上下プラグ間部（ガスプレナム有り）、下部プラグの下（流通孔部）に存在した。
（図中 (a), (i)）
- ②試験体の引抜き直後は、試験体内圧力がカバーガス圧力に比べ高いため、ガスプレナムを形成したまま引抜かれる。（図中 (b), (j)）
- ③試験容器内ナトリウム液面位置と試験体内液面が同レベルとなると、試験体内圧力とカバーガス圧力がほぼ同圧（上部プラグの上に残留したナトリウムヘッド分異なる）となり、上部プラグの上に残留したナトリウムが試験体内に侵入する。ナトリウムは瞬時に侵入するが、上部プラグのメッシュ部に膜状に残留する。（図中 (c) ~ (d), (k) ~ (l)）
- ④上部プラグのメッシュ部に膜状に残留したナトリウムの表面張力分（3kPa 程度）のナトリウムヘッド h が試験容器液面上方に引抜かれる。（図中 (e), (m)）
- ⑤ナトリウムヘッドが表面張力分（3kPa 程度）を越えた直後に、膜状に残留したナトリウムが破れ始め、それと同時に下部プラグからナトリウムがドレンされる（膜は破壊と再生を繰り返し、間欠的にガスを吸込み、試験体内圧力を一定に保つ）。（図中 (f), (n)）
- ⑥さらに引抜き、下部プラグがナトリウム中から引抜かれた後に、バランスが崩れ、膜の破壊が促進して試験体内圧力とカバーガス圧力が同圧となり、下部プラグからナトリウムがドレンされる。（図中 (g), (o)）
- ⑦試験体 No. 1（模擬ペレットなし）については、試験体内のほぼ全てのナトリウムがドレンされる。（図中 (h)）

⑥試験体 No. 3, 4 (模擬ペレットあり) については、試験体内圧力とカバーガス圧力が同圧となった後、模擬ペレット部 (直径ギャップ 0.7mm) の流路圧損により、ナトリウムがゆっくりとドレンし、模擬ペレットの片側 (片当たり位置)、および下部流通孔部にナトリウムが残留した。(図中 (p))

なお、本試験条件においては、試験体内に存在したほぼ全てのナトリウムがドレンされたが、実機条件下においては、ペレットの欠片による下部プラグの目詰まり、スエリングによるペレット・シュラウド管間隔 (本試験では寿命末期を想定した直径ギャップ 0.7mm にて実施) の狭小化が発生し、ドレンを妨げることが想定される。従って、実機においては本試験よりもボンドナトリウムが多く残留するものと推定される。

また、本試験においては試験体の引上げに伴い、ヘリウム導入管部の影響でガスプレナム温度が低下して、圧力が低下しドレン性は良くなった可能性がある。そのため、ヘリウム導入管を設けたことによる、ドレン性への温度効果及び体積効果について以下、検討する。

まず、温度効果について検討する。実験時の引上げに伴い、ヘリウム導入管部 (約 100mL) の温度が室温 20℃ (293 K) になり、要素内空間 (100mL、ペレット分体積除く) はナトリウム容器内の上部ガス空間に保持されるため、190℃ (463 K) に保持されたとする。これよりガスプレナム平均温度は 105℃ ($= (20 + 190) / 2$) になると仮定する。

実験でのガスプレナムの初期温度 T_0 、圧力 P_0 として、全空間が、190℃から 105℃に冷却されたとすると

$$P_0 / (273 + T_0) = P_1 / (273 + T_0 - 85) \quad (3-4)$$

実機でのガス空間温度はナトリウム温度と同程度と考えられ、ガスプレナム温度は約 190℃ (463 K) に保持されたと考える。初期温度 T_0 、圧力 P_0 として

$$P_0 / (273 + T_0) = P_2 / (273 + T_0) \quad (3-5)$$

上記の式 (3-5) (3-6) より

$$P_1 / (273 + T_0 - 85) = P_2 / (273 + T_0) \quad (3-6)$$

これより実機でのガスプレナム圧力 P_2 は次のようになる。

$$P_2 = (5/4)P_1 \quad (3-7)$$

次に体積効果について検討する。実験ではHe導入管(約100mL)を設けたため、実機よりも圧力変化は減少する。実験において、ガスプレナム体積が約60mLであり、ペレットを除く要素内全空間が約100mLである。初期体積 V_0 、圧力 P_0 として、上部ポーラスプラグのナトリウム膜が破れる直前の圧力を P_1 として、要素内の全ナトリウムはドレンされ、要素内空間はガスで満たされているものとする。このとき

$$P_0 \times (100 + 60) = P_1 \times (100 + 60 + 40) \quad (3-8)$$

実機では

$$P_0 \times 60 = P_2 \times (60 + 40) \quad (3-9)$$

上記の両式より

$$P_1 \times (200/160) = P_2 \times (100/60) \quad (3-10)$$

これより実機でのガスプレナム圧力 P_2 は次のようになる。

$$P_2 = (3/4)P_1 \quad (3-11)$$

以上のように 温度及び体積効果を考慮すると、実機のガスプレナム空間の圧力 P_2 は実験での圧力 P_1 を用いて

$$\begin{aligned} P_2 &= (5/4) \times (3/4)P_1 \\ &= (15/16)P_1 \end{aligned} \quad (3-12)$$

以上のように、実機の圧力は実験の圧力よりも低下する傾向にあり、ドレン性がよい。温度効果に関する上記の仮定では、ヘリウム導入管の温度を室温まで低下するという仮定を設けているが、ドレン時に室温まで低下することではなく、この場合(3-12)式の係数は小さくなり、よりドレンしやすい結果となる。なお、体積効果に関する仮定で、要素内空間はガスで満たされているものとしたが、要素内にナトリウムが残留している場合には、(3-11)式の係数が増加し、ドレンしにくい方向に作用するもの、係数は1以下である。

3.4.4 残留ナトリウムの洗浄性

試験体に残留しているナトリウム量が、内表面に薄っすらと残留していた程度である場合には、ナトリウムと NaOH の反応はマイルドで上下プラグ流通孔部は良好な洗浄ができたものの、模擬ペレット直径 0.7mm ギャップ部に残留したナトリウムは洗浄することができなかった。また、試験体内に充満した状態でナトリウムが残留した場合にはほとんど洗浄できないことを確認した。下表に各試験体の洗浄結果を示す。

表 各試験体における洗浄量

種類	No.	模擬ペレット	洗浄量		試験体内 総残留量
			NaOH 水溶液	水/アルコール	
試験体 A	1	無し	—	3g	3g
	2 ¹⁾		計測範囲外 (NaOH 水和物中 Na 量 3.7g)	31.2g	35～40g 程度 ²⁾
試験体 B	3	有り (直径ギャップ 0.7mm)	—	8g	8g
	4		計測範囲外	5.5g	6～11g 程度 ³⁾

注記

- 1) 意図的に試験体内にナトリウムを残留させた結果である。
- 2) NaOH 水溶液中のナトリウム量分析精度は±5g 程度であるため、
0～5 (測定範囲外) +3.7+31.2=35～40g 程度とした。
- 3) NaOH 水溶液中のナトリウム量分析精度は±5g 程度であるため、
0～5 (測定範囲外) +5.5=6～11g 程度とした。

充満した状態のナトリウムが洗浄できないメカニズムは下記と推察する。図 3.4.4-1 にメカニズムの模式図を示す。

- (1) 上部プラグから試験体内部に流入した NaOH 水溶液が、残留したナトリウムの頂部に達し反応が始まるが、反応することにより、NaOH 水溶液中の溶存ナトリウム量が増え飽和濃度に達し、ジェル状の NaOH 水和物となり、残存ナトリウムの頂部に蓄積し、新たな NaOH 水溶液との接触を遮断するため、上部からの反応はあるところで停止する。
- (2) 反応により発生した水素ガスが、上部プラグ部で NaOH 水溶液のヘッド圧とバランスし、試験体内にガスプレナムを形成し、新たな NaOH 水溶液の供給を遮断する。

- (3) 下部プラグ付近で NaOH とナトリウムが反応し、試験体内部に残留したナトリウムの下端に水素ガスがたまり、ガス層を形成してしまうことで、NaOH 水溶液と残留ナトリウムとの接触を遮断する。

以上の推察により、上部および下部からの洗浄は進展しないものと推察され、制御要素を NaOH 水溶液に浸漬させただけでは、ほとんど洗浄ができないものとする。実機においても、ペレットの欠片等の影響で制御要素内はナトリウムで充満しているものと推察され、NaOH 水溶液洗浄はできないものとする。但し、洗浄槽カバースペースの圧力操作、NaOH 水溶液の強制対流等を利用すれば、洗浄できる可能性はあると考え、今後、検討が必要である。

4. 結言

上下ポーラスプラグナトリウムボンド型制御要素の模擬試験体を製作し、ナトリウム中試験を実施して、実機使用条件下でのナトリウム充填性、要素上部ガスプレナムの形成、ナトリウムドレン性及び NaOH 洗浄性を確認し、以下の成果を得た。

(1) 制御棒を EVST へ装荷時のナトリウム充填性

EVST への制御棒挿入速度を模擬した約 6m/min にて、190℃のナトリウム中へ試験体を挿入した結果、要素内の全空間にナトリウムが充填されることを確認した。

(2) 制御棒要素内に発生するヘリウムガスによる上部ガスプレナムの形成

620℃および 190℃のナトリウム中へ浸漬した試験体内にヘリウムガスの注入を行い、偏差 10%以内でガスプレナムが形成できることを確認した。また、形成されたガスプレナムにヘリウムガスをさらに注入しても、ガスプレナム長さはほぼ一定に保持されることを確認した。

(3) 制御棒を EVST から引抜いた時の制御棒要素からのナトリウムドレン性

EVST からの制御棒引抜き速度を模擬した約 6m/min にて、試験体を 190℃のナトリウム中から引抜いた結果、試験体内にナトリウムが残留することなく、十分にドレンできることを確認した。

(4) 制御棒要素内残留ナトリウムの NaOH 水溶液洗浄性

ナトリウムと NaOH 水溶液の反応はマイルドであったが、制御要素内にナトリウムが充填状態で残留している場合においては、NaOH 水溶液の積極的な循環が起きず、十分な洗浄ができなかった。

5. 謝辞

本作業の遂行にあたっては、核燃料サイクル開発機構殿 国際技術センター 柴原格氏
および関係者の皆様方から多大な御指導、ご協力を頂いたことに深く感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) 竹内則彦、碓本岩男、柴原格、もんじゅ長寿命制御棒の開発 (1) ナトリウムボンド・ポーラスプラグ型制御要素概念の検討、日本原子力学会 2001 年秋の大会 (2201)
- 2) 吉田英一、柴原格、もんじゅ長寿命制御棒の開発 (3) ポーラスプラグの特性、日本原子力学会 2001 年秋の大会 (2001)
- 3) 曾我知則、飛田公一、三次岳志、宮川俊一、常陽Naボンド型制御棒の開発、サイクル機構技報 No8 (2000)
- 4) R. L. Eichelberger : AI-AEC-12685、(1968)
- 5) J. H. Goldman、J. Nucl. Mat.、126 (1984)
- 6) J. P. Stone、High Temperature Properties of Sodium、AD622、NRL Report (1965)

表2.1-1 「もんじゅ」制御棒要素(粗調整棒)の設計パラメータ比較

	現設計	長寿命設計 (暫定目標)
使用寿命 要素のタイプ	1 サイクル (1 2 3 日) Heボンドガス封入型	<u>4 サイクル (5 9 2 日)</u> <u>Naボンドガス放出型 / シュラウド付き</u>
中性子吸収量 ($\times 10^{20}$ cap/cc)	40	<u>~200</u>
保護管内冷却材流量 (kg/s)	3.4	<u>~1.2</u>
被覆管最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)	470	<u>~660</u>
ペレット最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)	1480	<u>~1000</u>
要素の長さ	1755	<u>~1200</u>
吸収体の長さ	800	800
被覆管： 外径 / 内径 / 肉厚	16.9 / 12.9 / 2	16.9 / 15.5 / <u>0.7</u>
シュラウド管： 外径 / 内径	なし	13.6 / 13.0 & 12.9 / 12.3 (2重)
B ₄ Cペレット：外径	12.2	12.2
ギャップ幅	0.35	<u>~1.0</u>
¹⁰ B 濃縮度 (wt.%)	40	<u>44</u>
ペレット密度 (%TD)	95	95

寸法単位：mm

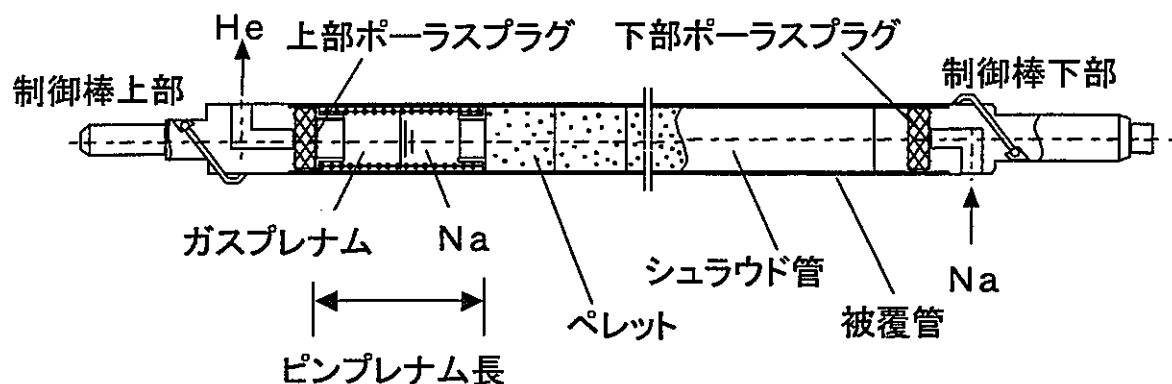
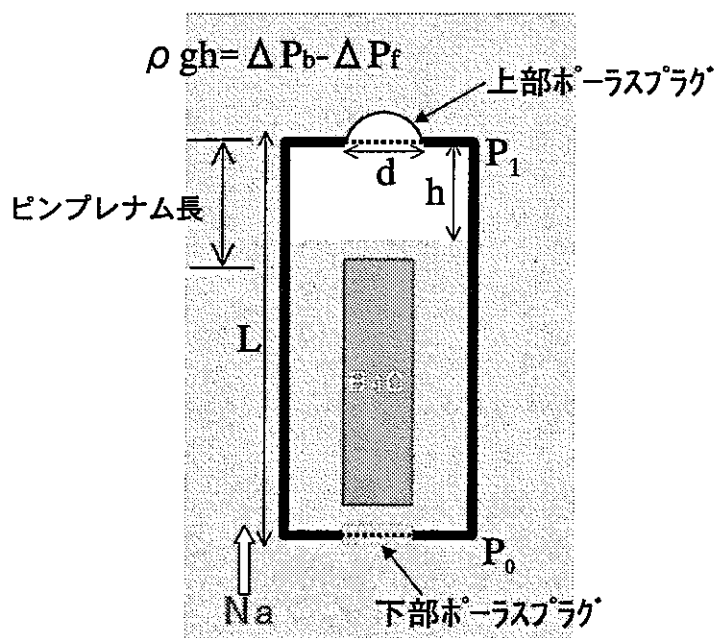
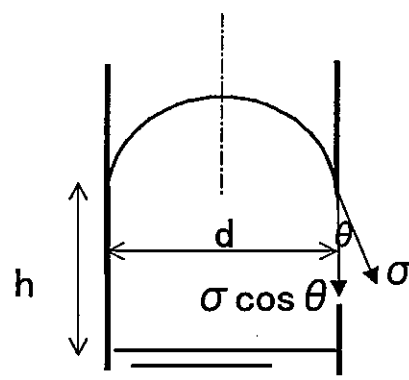


図 2. 2. 1-1 ダブルポータスプラグ型ナトリウムボンド制御要素
(JNC 殿資料¹⁾ より引用)



(a) ダブルポータスプラグ型制御要素模式図



(b) 上部ポータスプラグ部の毛細管力

図 2. 2. 1-2 ダブルポータスプラグ型制御要素の毛細管モデル
(JNC 殿資料²⁾ より引用)

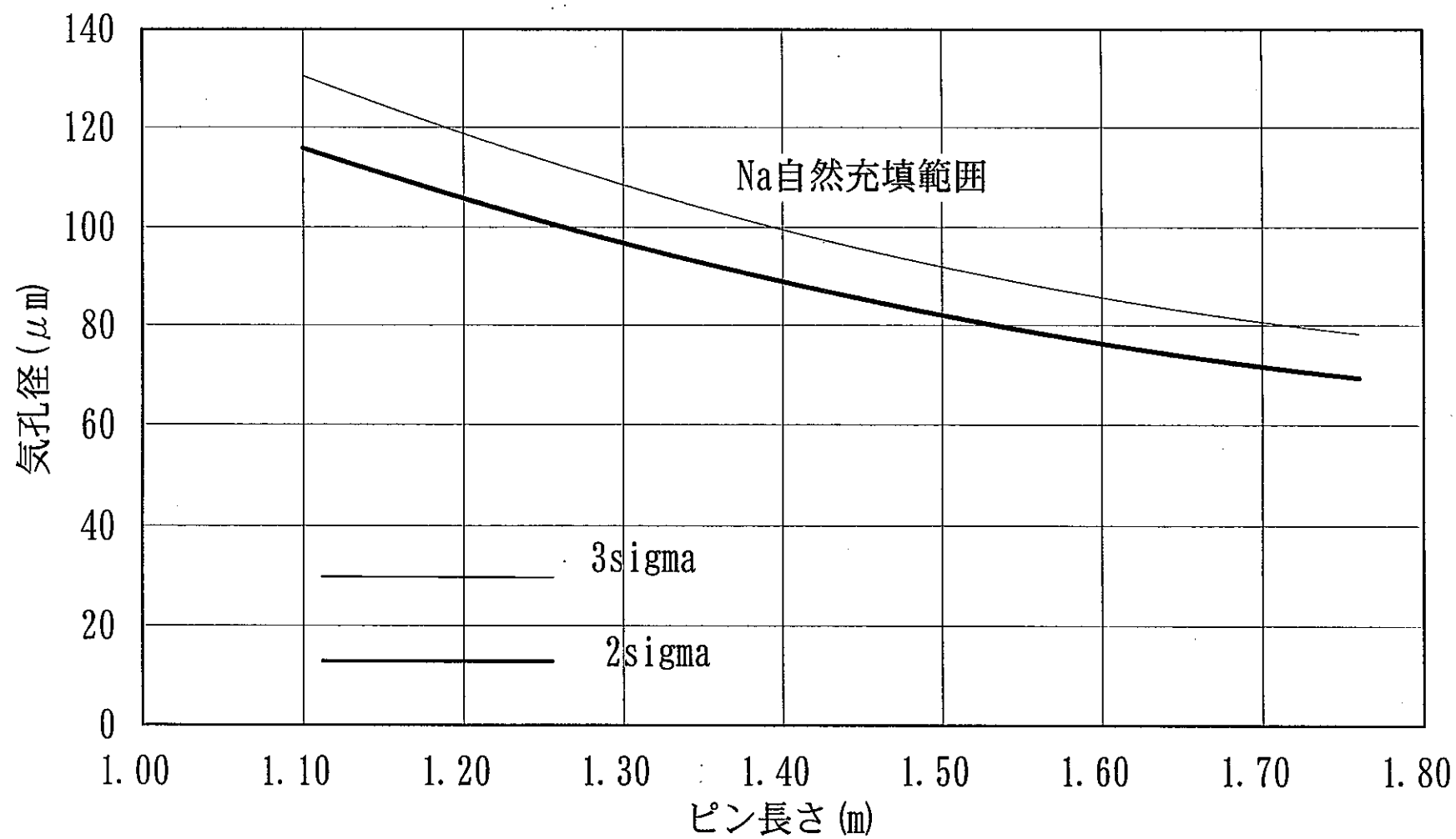


図2. 2. 3-1 下部プラグ気孔径の成立範囲

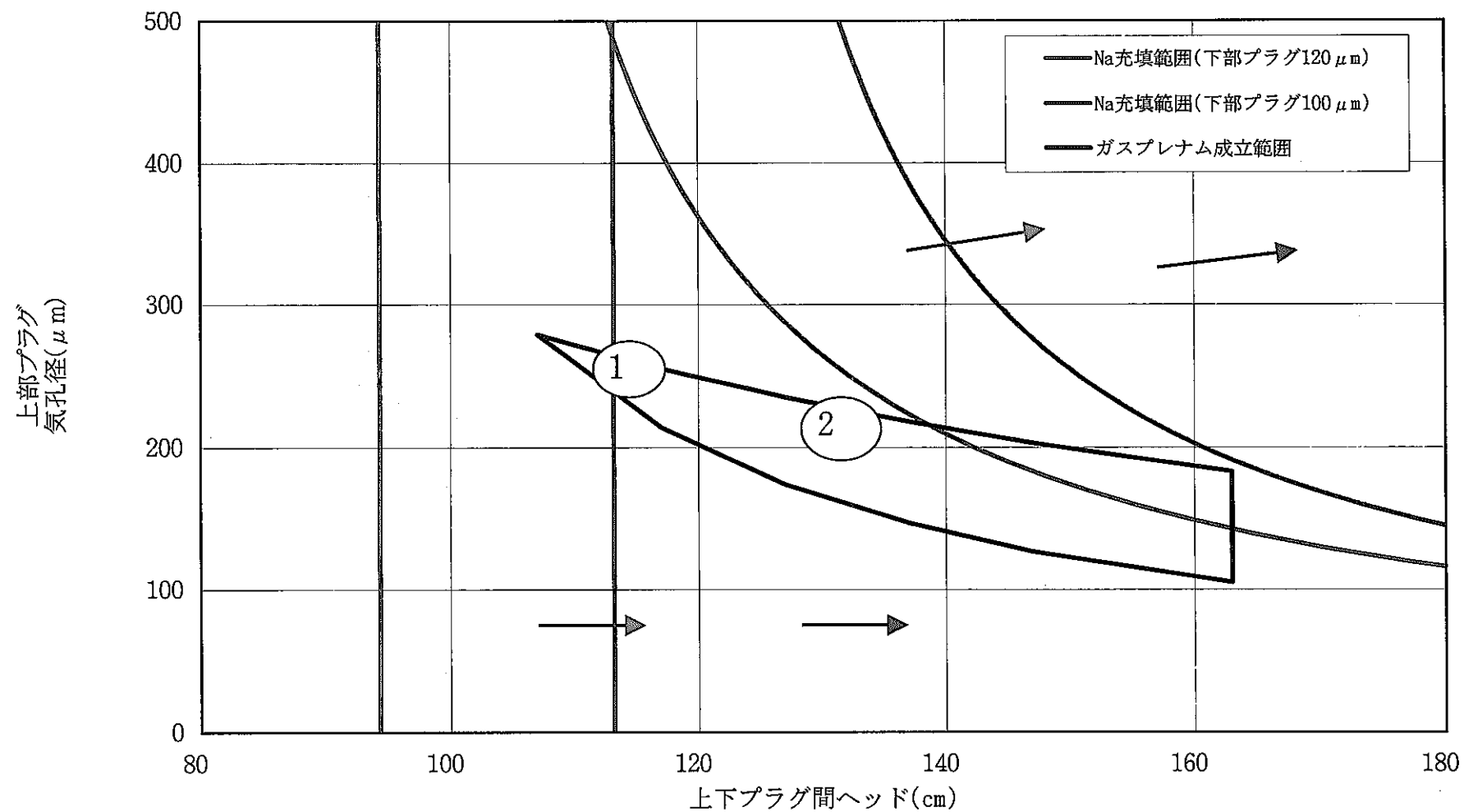


図2.2.3-2 気孔径の成立範囲/上下プラグ相互作用(at200°C)
冷却材流量1.2kg/s

3 sigma

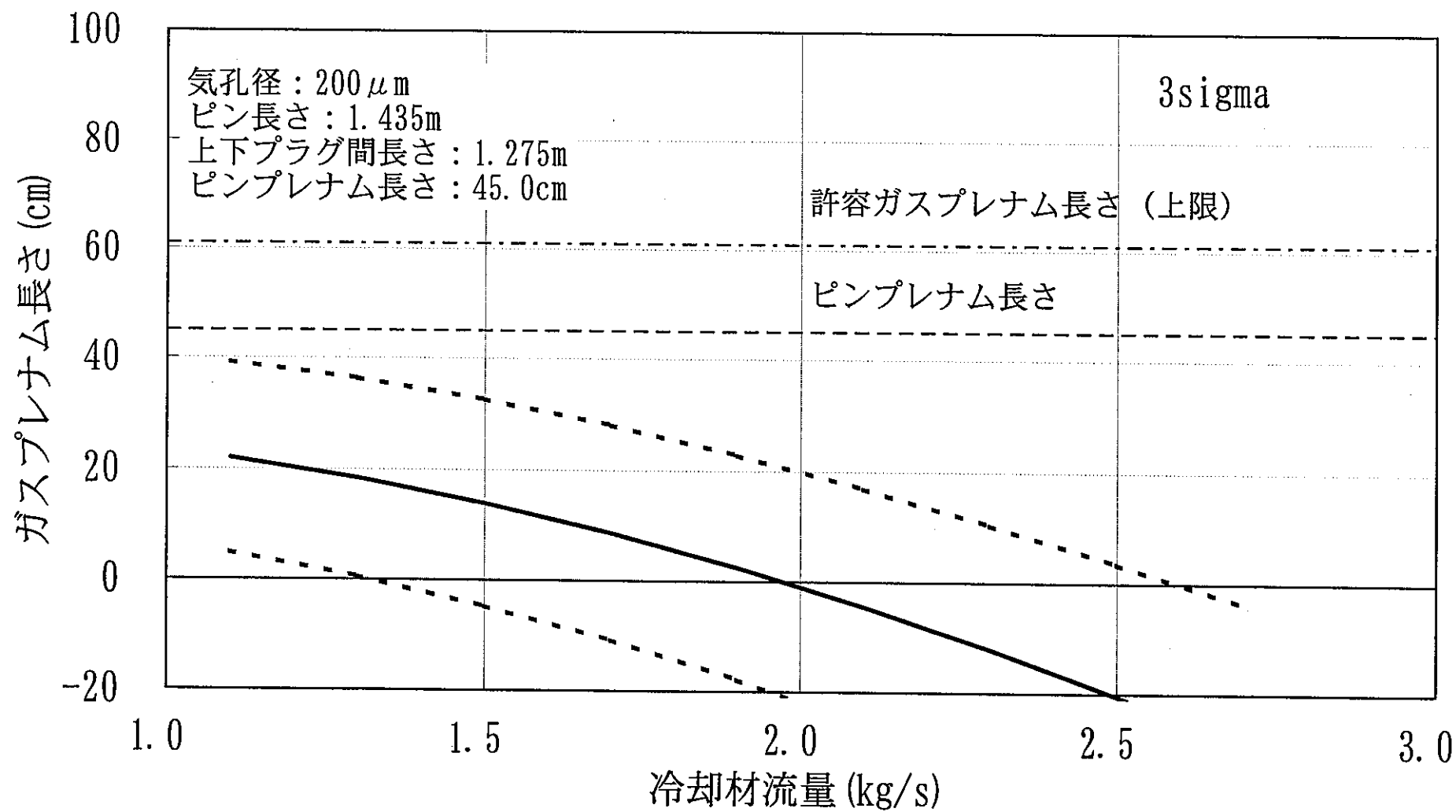
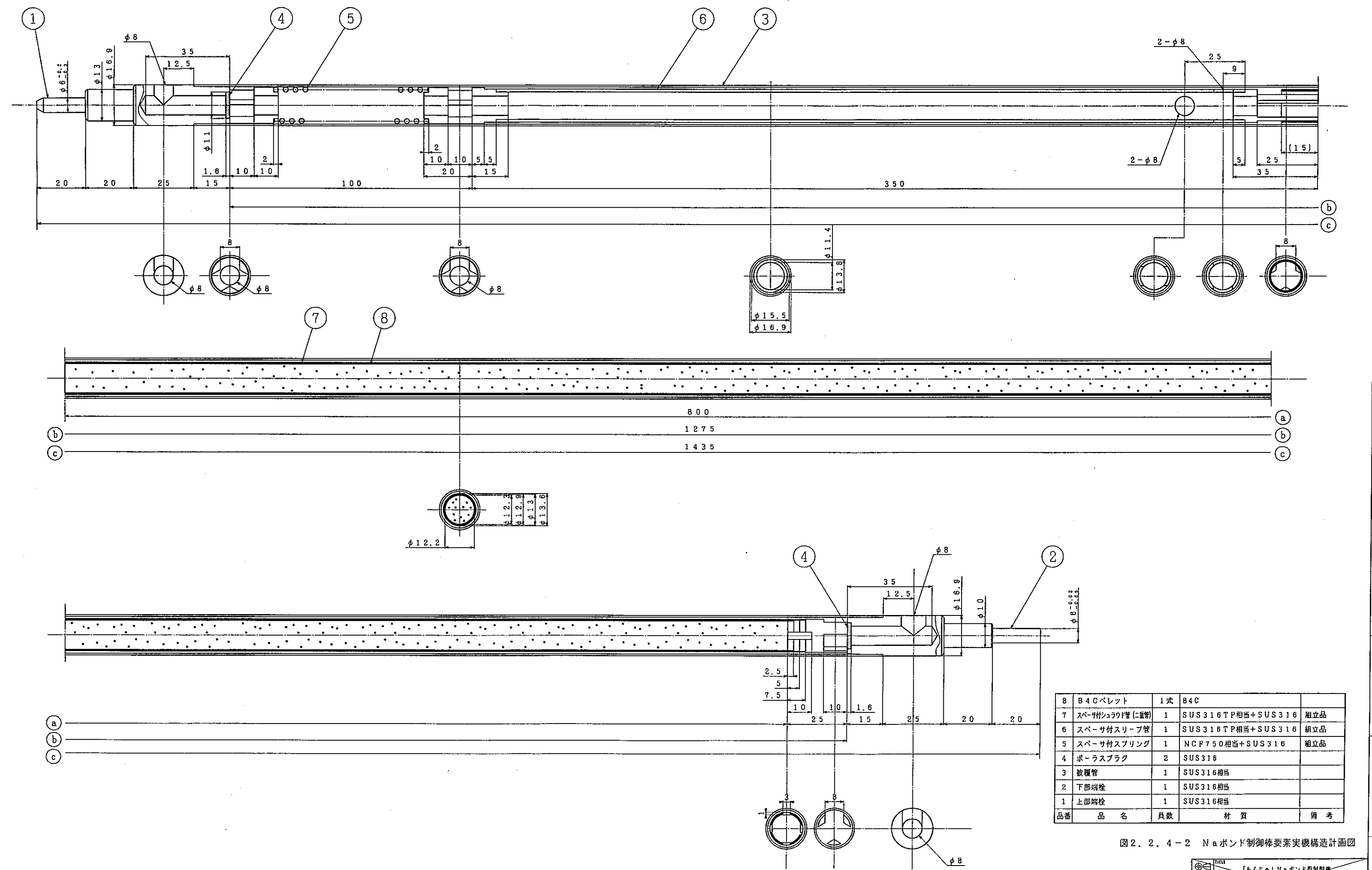


図2. 2. 4-1 ガスプレナム成立性範囲

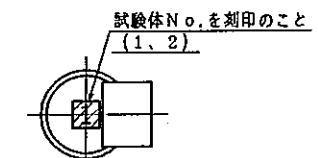
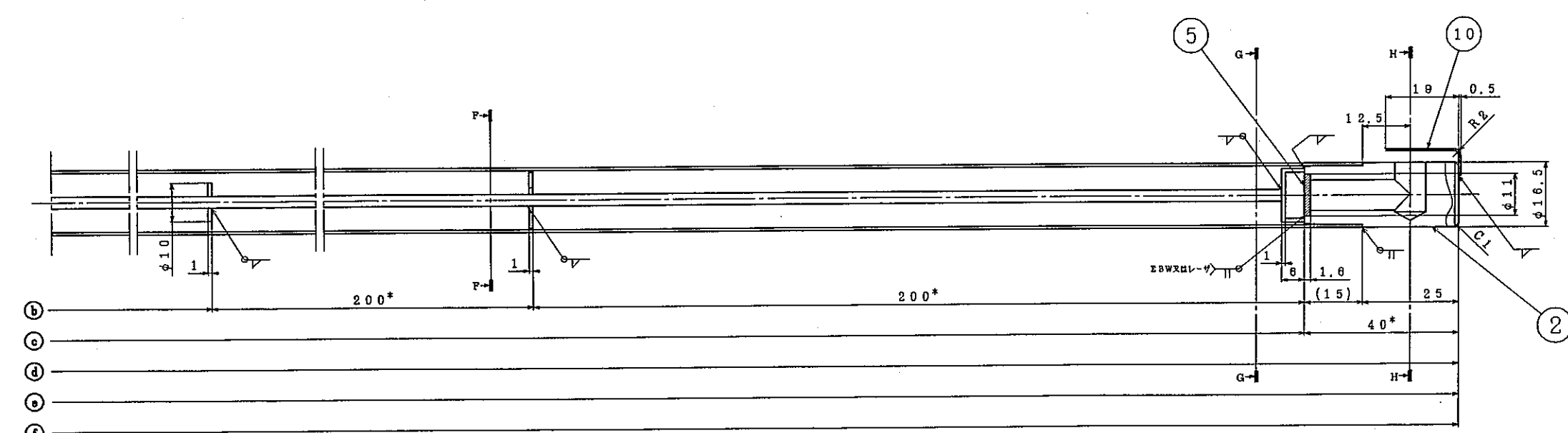
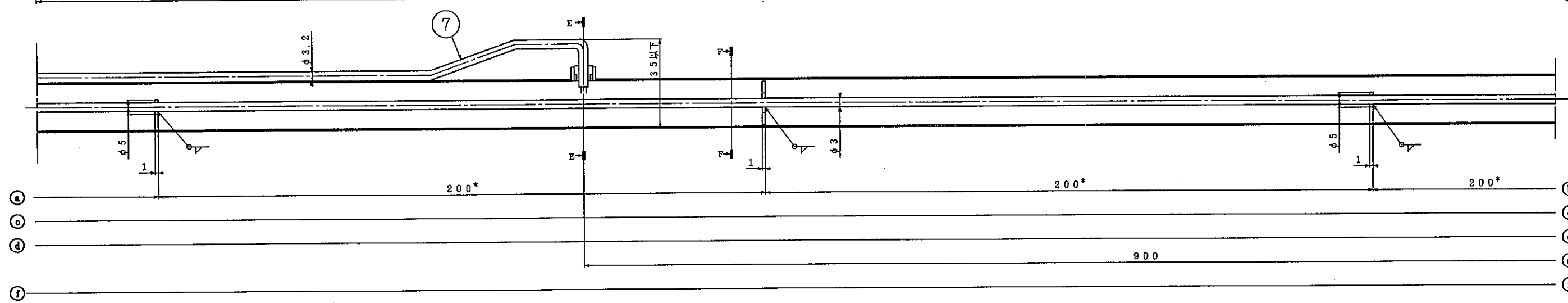
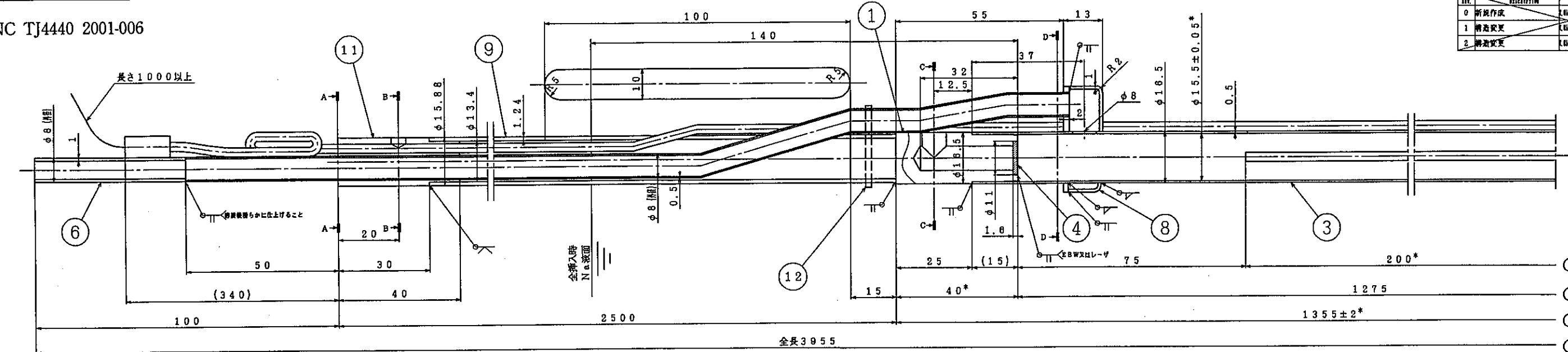
REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHK.
0	新機作成			



8	B4Cベレット	1式	B4C	
7	スペーサ付シャウド管(2重)	1	SUS316TP相当+SUS316	組立品
6	スペーサ付スリーブ管	1	SUS316TP相当+SUS316	組立品
5	スペーサ付スプリング	1	NCF750相当+SUS316	組立品
4	ボラスプラグ	2	SUS316	
3	被覆管	1	SUS316相当	
2	下部端栓	1	SUS316相当	
1	上部端栓	1	SUS316相当	
品番	品名	数量	材質	備考

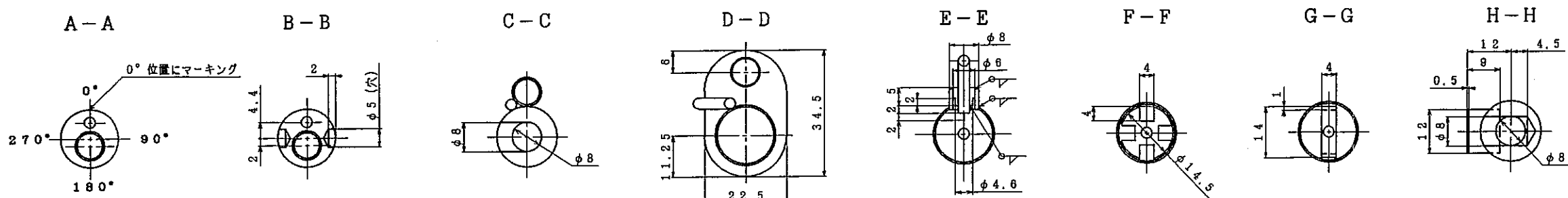
図 2. 2. 4-2 Naボンド制御棒要素実機構造計画図

REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHK.	APP.	DATE
0	新製作成	2001/01/11	Y. HIRAI	Y. HIRAI	Y. HIRAI	2001/01/11
1	構造変更	2001/02/14	Y. HIRAI	Y. HIRAI	Y. HIRAI	2001/02/14
2	構造変更	2001/03/14	Y. HIRAI	Y. HIRAI	Y. HIRAI	2001/03/14



品番	品名	数量	材質	備考
12	固定用バンド	-	SUS304	
11	閉止栓	1	SUS304 (真鍮部: 銀ロウ付け)	
10	防護板	1	SUS304	
9	支持パイプ	1	SUS304	
8	H ₂ 導入管スペーサ	1	SUS304	
7	被覆材	1	SUS304あるいはSUS316	
6	H ₂ 導入管	1	SUS304	
5	下部ボラスプラグ	1	SUS316 (公称粒度120 μ m)	
4	上部ボラスプラグ	1	SUS316 (公称粒度200 μ m)	
3	被覆管	1	SUS316	
2	下部端栓	1	SUS304	
1	上部端栓	1	SUS304	

図 2.3-1 Naボンド制御棒要素試験体A構造図



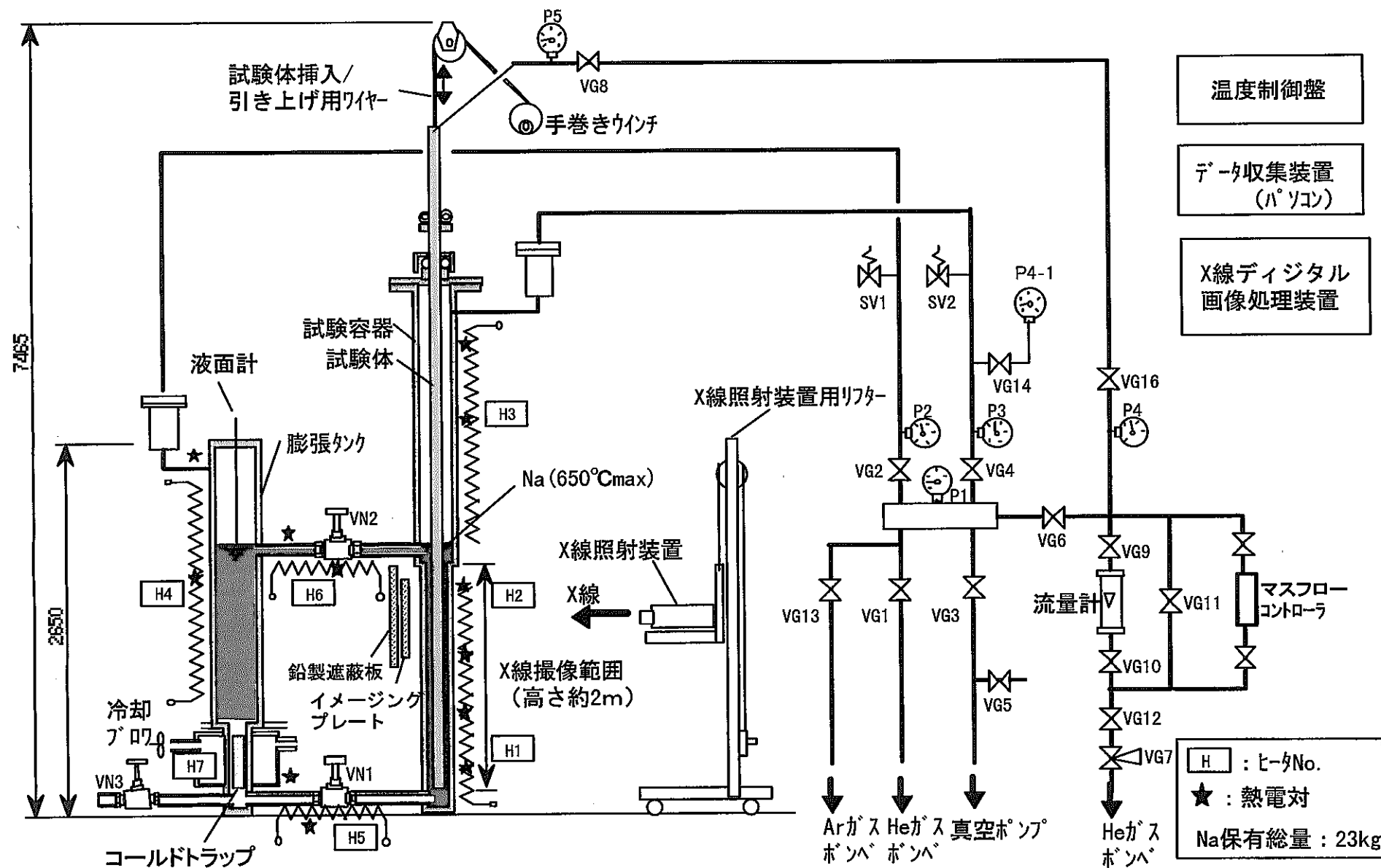


図 3.2.1-1 ナトリウムボンド型制御棒要素試験装置の全体図

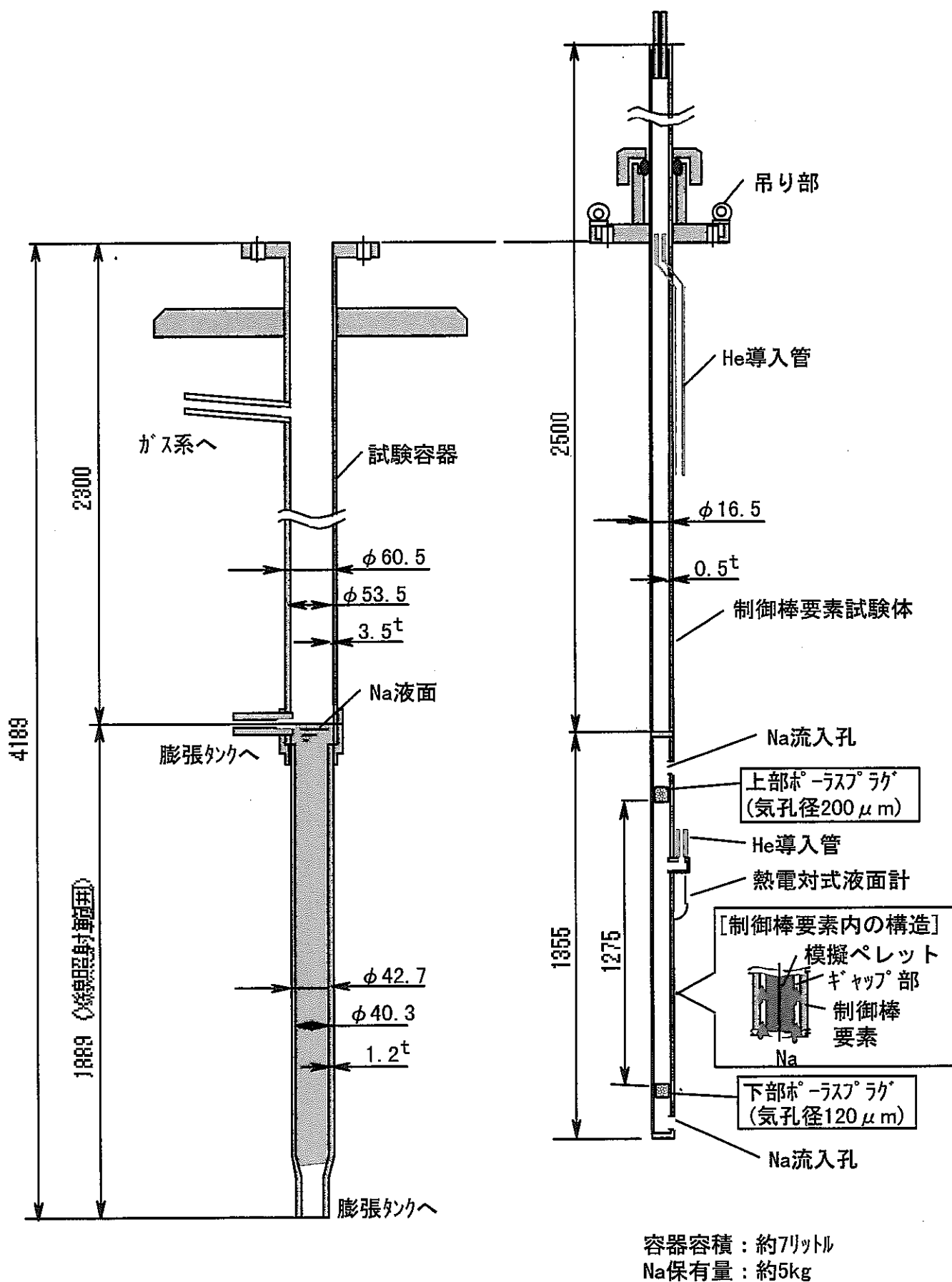
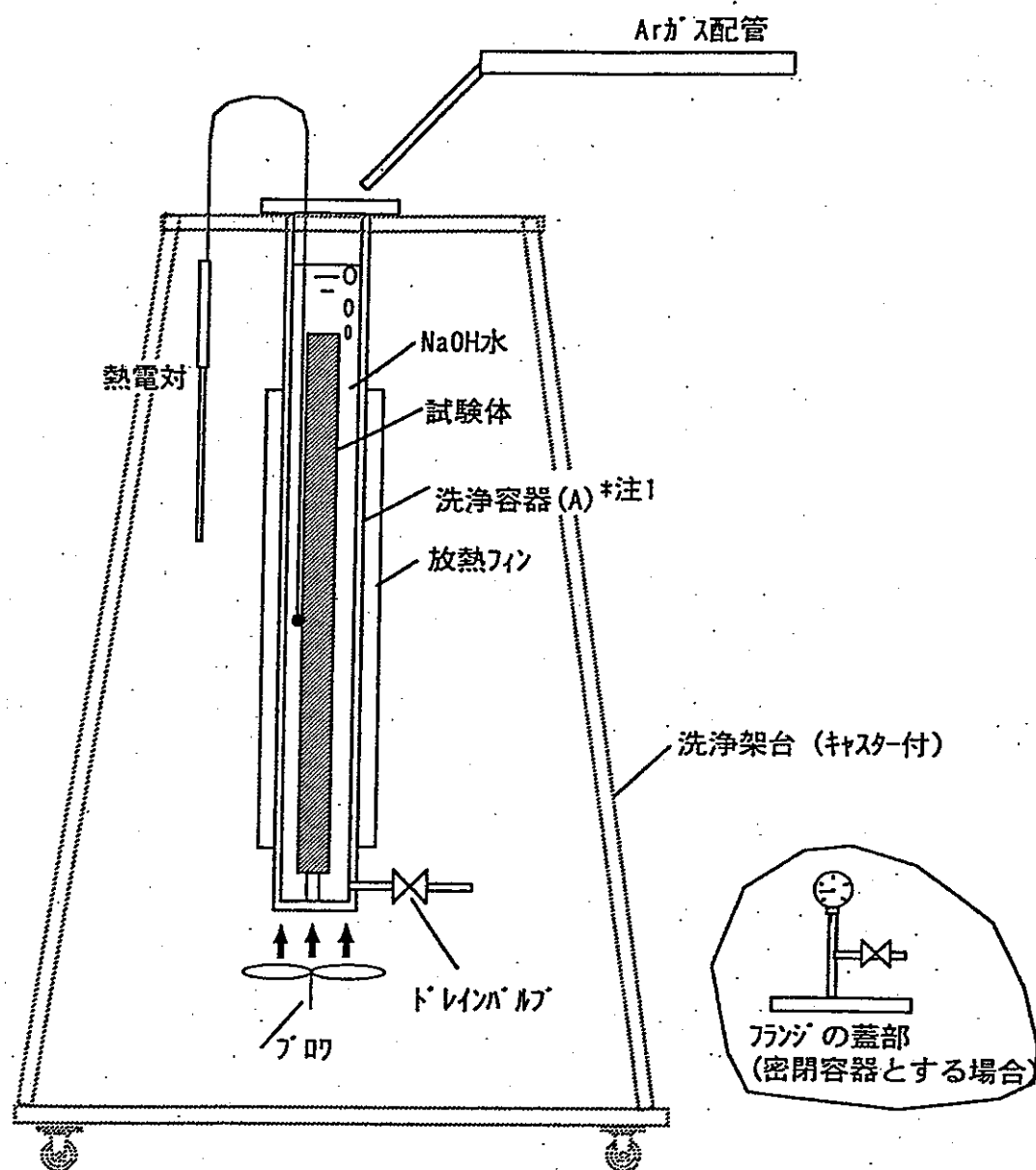


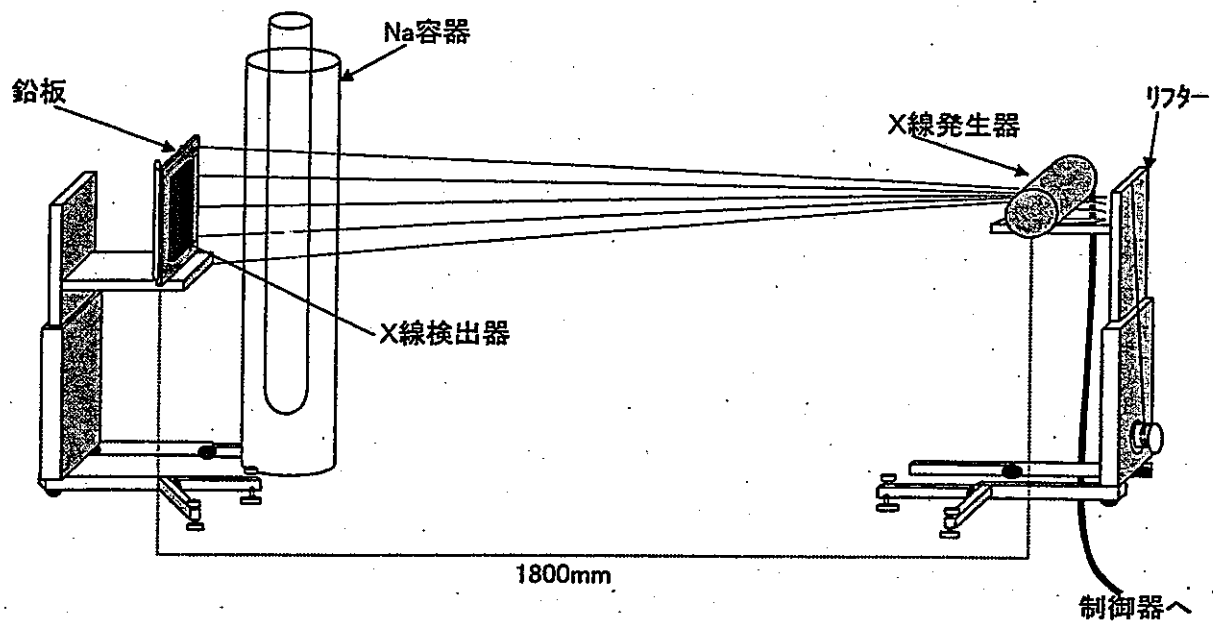
図 3. 2. 1-2 試験容器と制御棒要素模擬試験体構造



*注1：洗浄容器(B)はエタノールまたは水用

図3. 2. 1-3 洗浄容器の構造

撮影配置



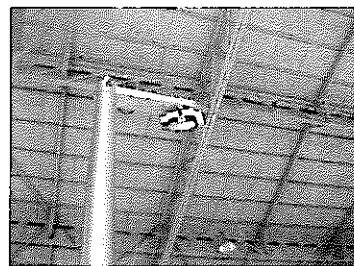
装置寸法

- | | |
|-----------|--|
| ① X線発生器寸法 | 300mm × 300mm × 800mm |
| ② X線検出器寸法 | IP: 330mm × 280mm II: W540mm D610mm H450mm |
| ③ リフター寸法 | W500mm D800mm H1650mm (荷揚げ長さ 400mm~2800mm) |
| ④ 鉛板寸法 | 500mm × 500mm 厚み5mm |

図3. 2. 1-4 X線透視撮影の模式図



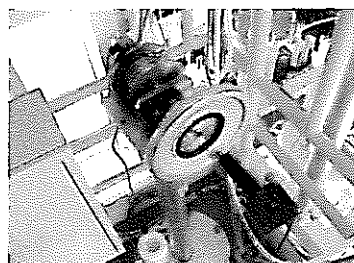
Heガスユニット



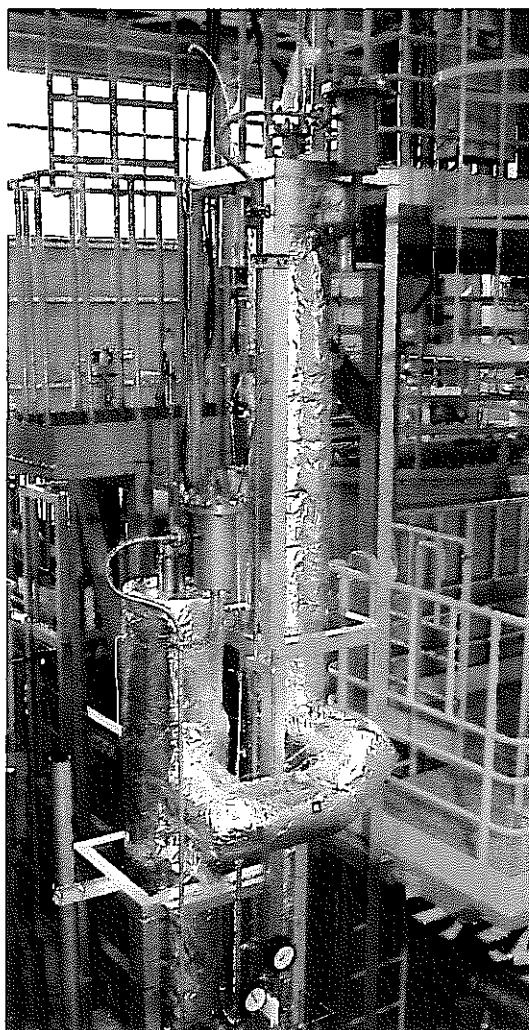
定滑車



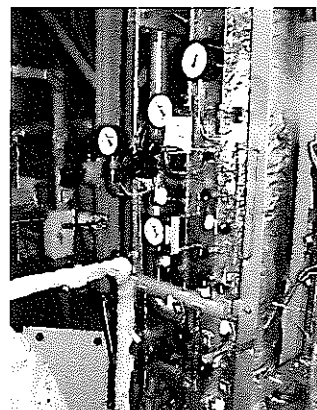
試験容器シール部



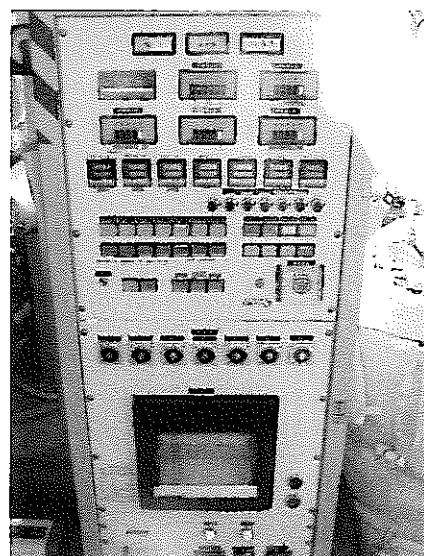
手巻きウインチ



試験容器、膨張タンク



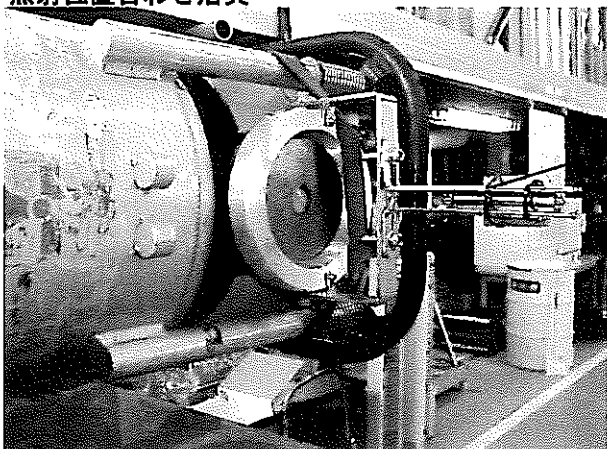
ガス系



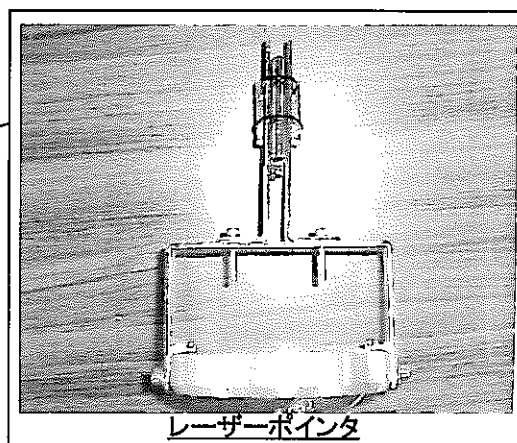
制御盤

写真3.2.1-1 試験装置外観

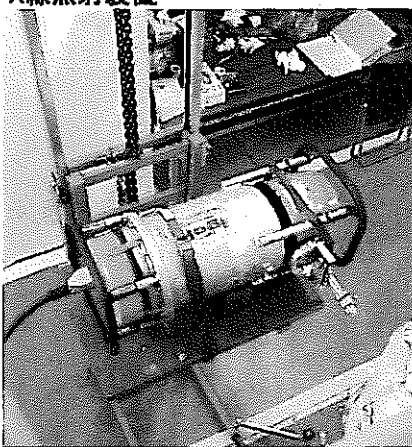
照射位置合わせ治具



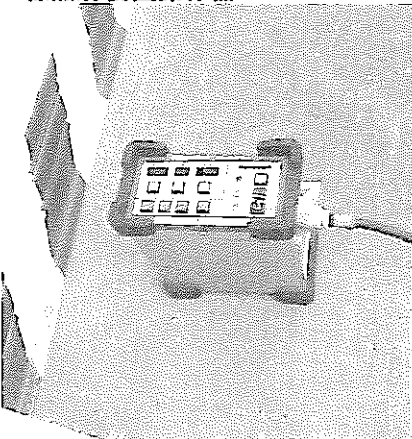
X線照射装置



レーザーポインタ



X線照射装置操作器



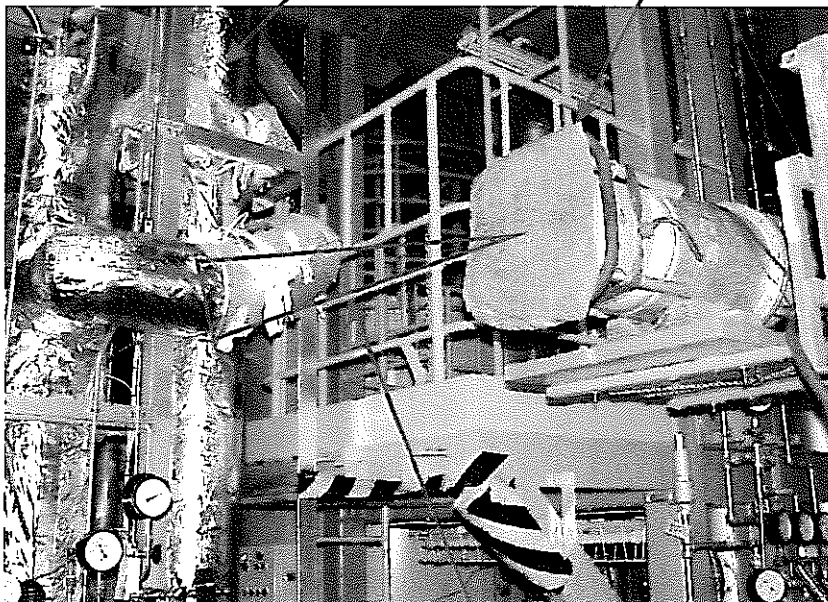
X線検出器



X線撮影状況

試験容器

X線照射装置



X線

鉛板

X線検出器

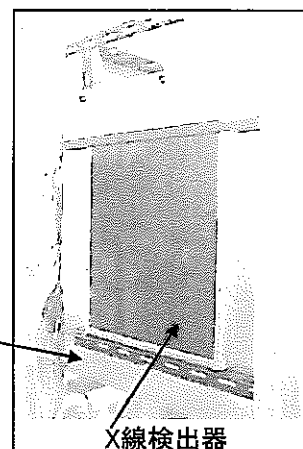


写真3. 2. 1-2 X線撮影装置外観

表3.2.2-1 もんじゅNaボンド型制御棒要素試験 試験体No.1 (Aタイプ:模擬ペレットなし) 実績工程表

No.	項目	条件	日数	述べ日数																																								備考						
				1																								2								3				4								5		
				日	時	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	23	12	13	14	15	9	10	11	12	13	14	15		16	17	18	19	20	AM
1	ナトリウム温度	650℃ 190℃ (容器外壁60℃)																																																
2	試験体位置 (移動速度: 約6m/min)	大気中 (装置外) Arガス中 Na中 (液面下部「ラ」+100mm) Na中 (液面上部「ラ」-100mm) Na中 (全挿入)																																																
3	Heガス流量 (流量: 5mL/min)	5mL/min, 1min注入 →30s停止 0																																										Heガス5mL/min, 1min注入 →30s停止を圧力が降下 するまで繰り返す						
4	試験装置内カバーガス圧 (圧力: ~30×10³Pa)	~30×10³Pa 調整圧																																																
5	X線撮影 (立入制限)	あり なし																																																
6	閉止栓取付け、外表面洗浄、 支持パイプ切断	あり なし																																																
7	NaOH溶出 (洗浄性確認)	あり なし																																																
8	7#1-A/水溶出 (ドレイン性確認)	あり なし																																																

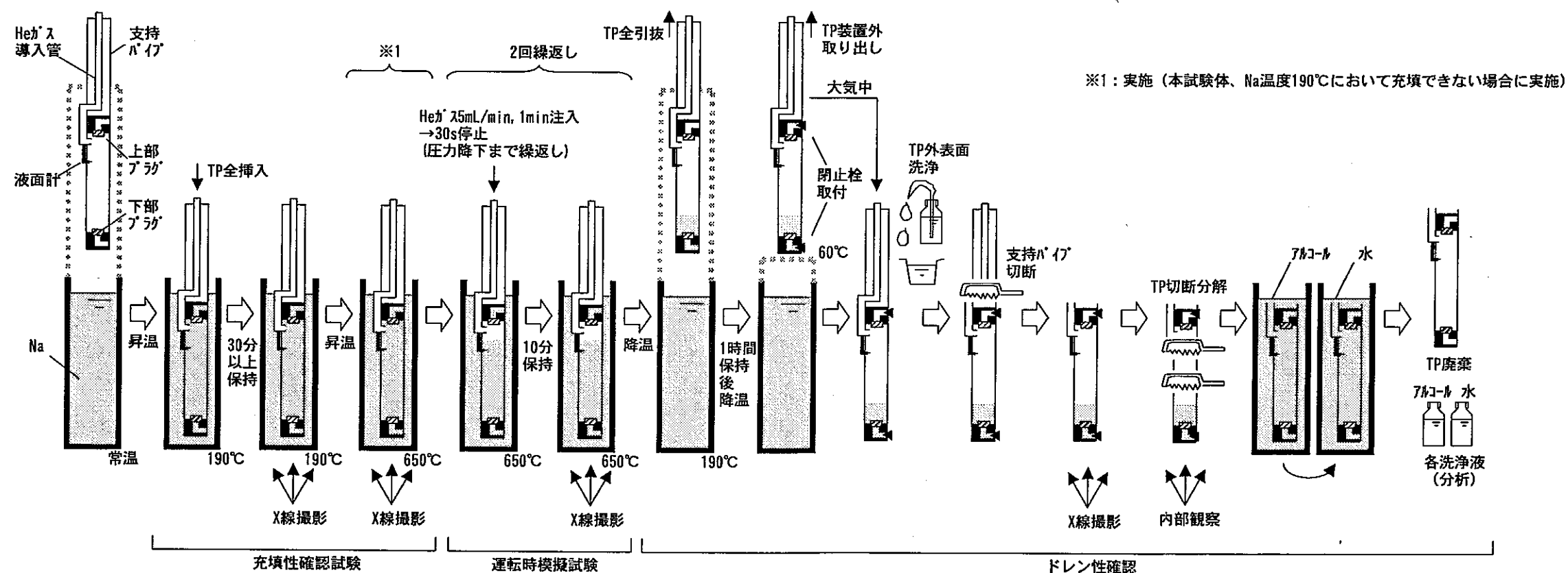


表3.2.2-2 もんじゅNaボンド型制御棒要素試験 試験体No.3 (Bタイプ:模擬ペレットあり) 実績工程表

No.	項目	条件	述べ日数																																									備考			
			1							2							3							4							5																
			日	時	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	16	17	18	19	20	21	9	10	11	12	13	14	15		16	17	18
1	ナトリウム温度	650℃ 400℃ 190℃ (容器外壁60℃)																																													
2	試験体位置 (移動速度: 約6m/min)	大気中 (装置外) Arガス中 Na中 (液面下部7"ラジ +100mm) Na中 (液面上部7"ラジ -100mm) Na中 (全挿入)																																													
3	Heガス流量 (流量: 5mL/min)	2mL/min, 連続注入 →5min停止 0																																										Heガスを2mL/min, 連続注入 →5min停止を圧力が降 するまで繰り返す			
4	試験装置内カバーガス圧 (圧力: ~30×10 ³ Pa)	~30×10 ³ Pa 調整圧																																													
5	X線撮影 (立入制限)	あり なし																																													
6	閉止栓取付け、外表面洗浄、 支持パイプ切断	あり なし																																													
7	NaOH溶出 (洗浄性確認)	あり なし																																													
8	アルコール/水溶出 (ドレイン性確認)	あり なし																																													

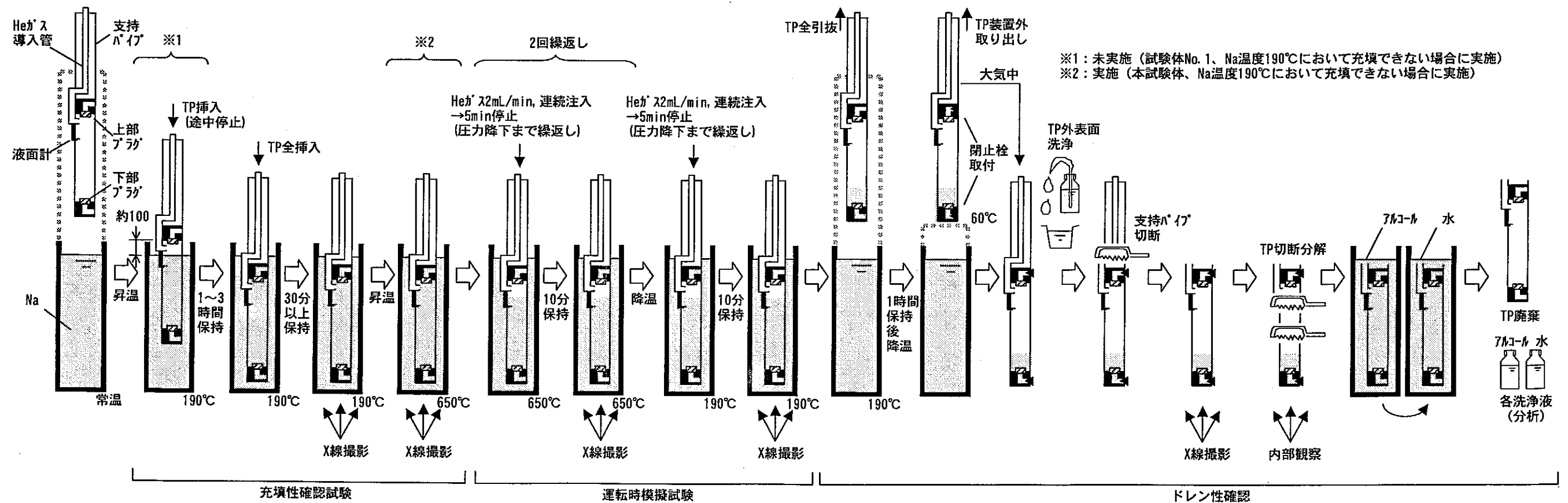


表3.2.2-3 もんじゅNaボンド型制御棒要素試験 試験体No.4 (Bタイプ:模擬ペレットあり) 実績工程表

No.	項目	条件	日数	延べ日数																																																備考					
				日 時	1												2												3												4												5		6		
					9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	18	19	20	21	22	23	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	AM	PM		AM	PM			
1	ナトリウム温度	650℃ 400℃ 190℃ (容器外壁60℃)																																																							
2	試験体位置 (移動速度：約6m/min)	大気中 (装置外) Arガス中 Na中 (液面下部ブ'ラ' +100mm) Na中 (液面上部ブ'ラ' -100mm) Na中 (全挿入)																																																							
3	Heガス流量 (流量：5mL/min)	2mL/min, 連続注入 →5min停止 0																																																		Heガ' 2mL/min, 連続注入 →5min停止を圧力が降下 するまで繰り返す					
4	試験装置内カバーガス圧 (圧力：～30×10³Pa)	～30×10³Pa 調整圧																																																							
5	X線撮影 (立入制限)	あり なし																																																							
6	閉止栓取付け、外表面洗浄、 支持パイプ切断	あり なし																																																							
7	NaOH溶出 (洗浄性確認)	あり なし																																																							
8	アルコール/水溶出 (ドレイン性確認)	あり なし																																																							

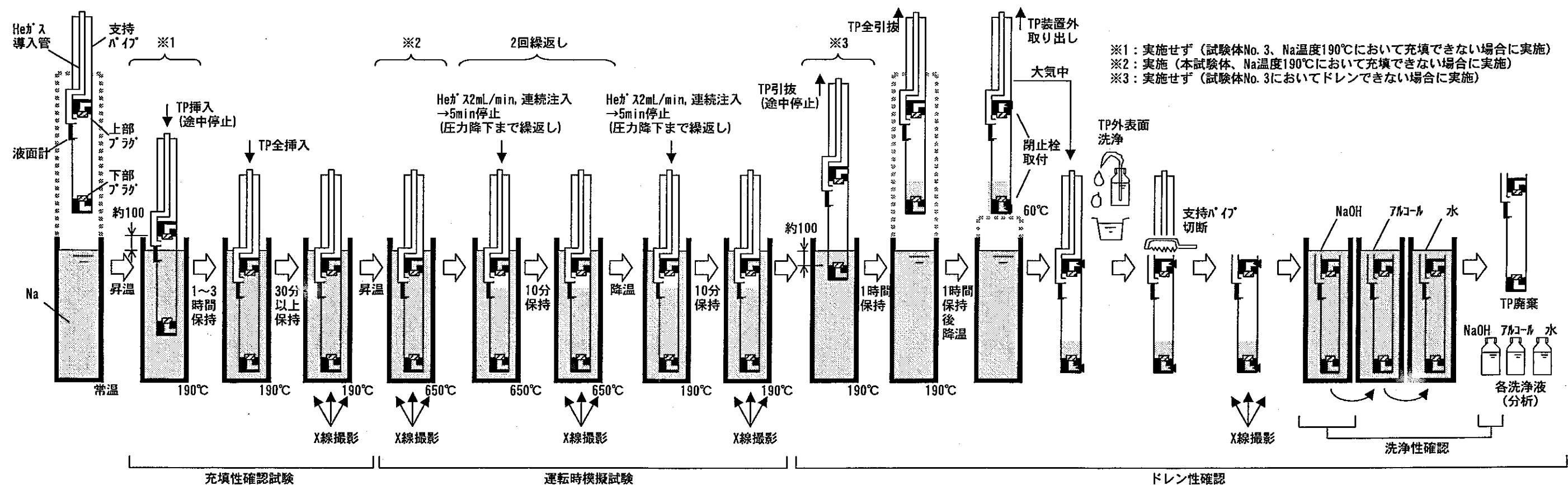
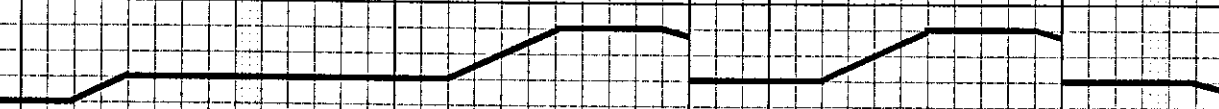
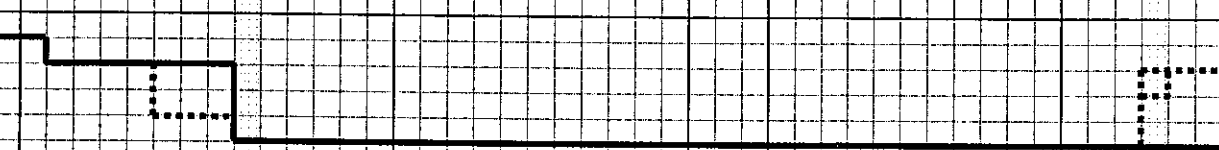
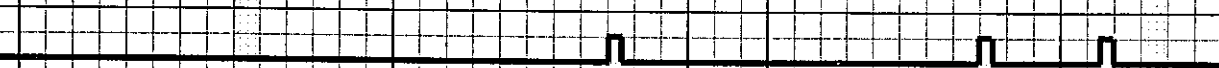
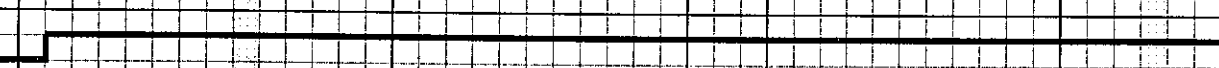
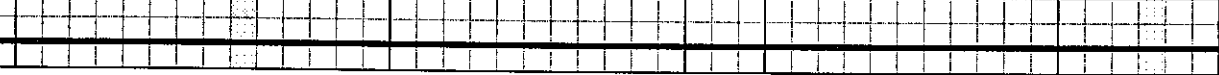


表3.2.2-4 もんじゅNaボンド型制御棒要素試験 試験体No.2 (Aタイプ:模擬ペレットなし) (サイクル試験あり) 実績工程表

No.	項目	条件	日数	延べ日数																																																																																備考																																
				1																								2																								3												4												5												6																				7				8				
				日	時	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	17	18	19	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	16	17	18	19	20	21	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	AM	PM	AM	PM																																																		
時	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	17	18	19	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	16	17	18	19	20	21	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	AM	PM	AM	PM																																																							
1	ナトリウム温度	650℃ 400℃ 190℃ (容器外壁60℃)																																																																																																																		
2	試験体位置 (移動速度：約6m/min)	大気中(装置外) Arガス中 Na中(液面下部ブラシ+100mm) Na中(液面上部ブラシ-100mm) Na中(全挿入)																																																																																																																		
3	Heガス流量 (流量：5mL/min)	2mL/min, 連続注入 →5min停止 0																																																																																		Heガス2mL/min, 連続注入 →5min停止を圧力が低下 するまで繰り返す																																
4	試験装置内カバーガス圧 (圧力：～30×10³Pa)	～30×10³Pa 調整圧																																																																																																																		
5	X線撮影(立入制限)	あり なし																																																																																																																		
6	閉止栓取付け、外表面洗浄、 支持パイプ切断	あり なし																																																																																																																		
7	NaOH溶出 (洗浄性確認)	あり なし																																																																																																																		
8	7#コーキング/水溶出 (ドレイン性確認)	あり なし																																																																																																																		

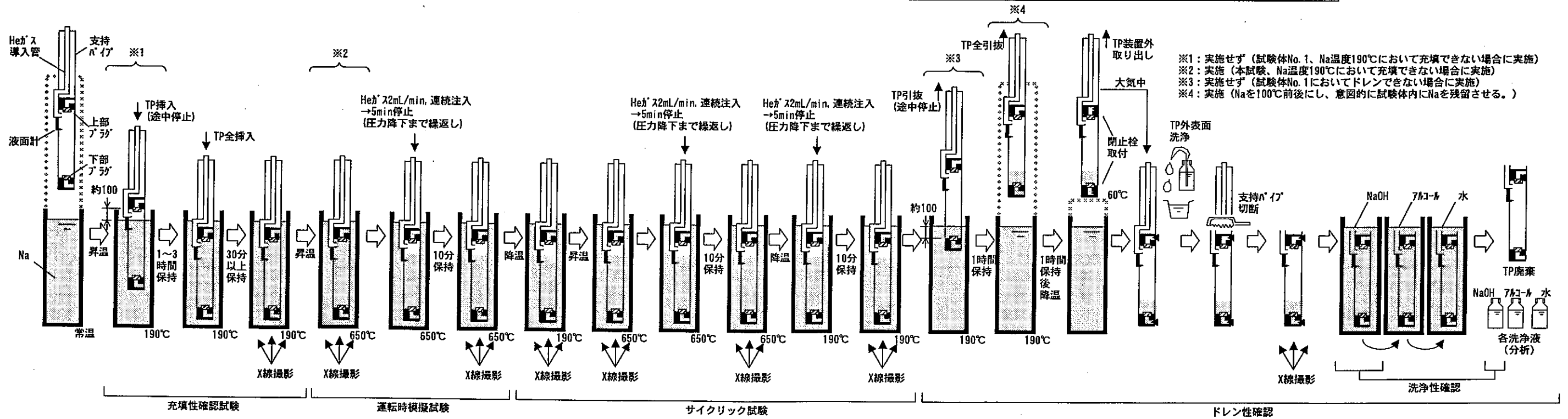


表3. 2. 2-5 (1/3) もんじゅNaボンド制御棒試験 試験条件一覧表

No.	項 目	試験条件	実機条件(想定)	選定理由
1	Na温度 (通常運転時)	600～650℃ (650℃目標)	600～650℃	実機通常運転温度である600～650℃とする。
2	Na温度 (充填・ドレン時)	約190℃	約200℃	実機EVSTナトリウム温度は200℃であるが、充填性能上ナトリウム温度は低温側のほうが表面張力が大きく保守的となるので、試験温度は「もんじゅ」総合機能試験時の低温側の温度とし約190℃とする。
3	Na昇降温速度	なりゆき (約15℃/h～)	約15℃/h	もんじゅのNa昇降温速度は、約15℃/hであるが、速度を上げることは濡れが遅くなる方向であり、問題ないと考えられるため、試験では速度を上げ、なりゆき(約15℃/h～)とする。
4	制御棒EVSTへの挿入速度	約6m/min	約6m/min	ナトリウム中への挿入速度は「もんじゅ」EVSTへの制御棒挿入速度を模擬して約6m/minとする。
5	制御棒炉内からの引抜速度	約6m/min	約6m/min	引き抜き速度は、EVTMグリップによるEVSTからの制御棒引き抜き速度を模擬して約6m/minとする。
6	B4CからのHeガス放出量	約5mL/min, 1min注入 ↓ 30s停止 ↓ 繰返し	約0.01mL/s	本試験においては、Heガスをガスプレナムに直接注入させるため、Heガスの流量は、ガスプレナム長さを伸ばし続けない(上部プラグからのHeガス放出流量以下)程度の流量とする。さらに、上部プラグからの初吹出し圧力のオーバーシュートを出来るだけ小さくするため、Heガスを約5mL/min, 1min注入→30s停止し、ガスプレナムの圧力降下(保持圧まで降下)するまで繰返すこととする。

表3. 2. 2-5 (2/3) もんじゅNaボンド制御棒試験 試験条件一覧表

No.	項 目	試験条件	実機条件(想定)	選定理由
7	試験装置内カバーガス圧 (挿入・引抜き操作時)	大気圧～微正圧	3.0～8.0kPa (EVST内)	理論上、充填及びドレン時において、外圧の影響を受けない。 そのため、試験体挿入及び引抜き操作時の装置設計上、大気圧～微正圧とする。
8	試験装置内カバーガス圧 (ナトリウム中全浸漬時)	～30kPa	0.155MPa (炉内)	理論上、試験体内のガスパレナムは定常状態において、外圧の影響を受けない。 本試験において、試験体内へ形成されるガスパレナム保持圧は2.0～3.0kPa程度と考えられるため、出来る限り同程度の圧力とし、圧力計測範囲(0～50kPa)との兼ね合いから左記とする。
9	下部プラグ公称粒度	120 μ m	120 μ m	自然充填の条件は少なくともプラグの透過圧が上下プラグ間のナトリウムヘッド以下にあることである。この条件で、EVSTのナトリウム温度である200℃における下部プラグ気孔径の成立範囲を算出した結果を図8(JNC殿報告書より引用)に示す。下部プラグ気孔径をできるだけ小さく、かつピン長さを短くすることを考慮し検討すると、充填のための基本的な条件は、下部プラグ気孔径120 μ m、ピン長さ1200mm以上で満足することを確認した。これにより、下部プラグ気孔径は120 μ mを採用する。
10	上部プラグ公称粒度	200 μ m	200 μ m	ガスパレナムの形成するためには、冷却材圧力損失より大きな保持差圧がでるように気孔径を選定する必要があるが、一方では、気孔径が小さすぎて(保持差圧が大きくなりすぎて)ガスパレナムが成長しすぎ、ボンドナトリウムの液面がB ₄ Cペレットの上端以下にならないように選定する必要がある。冷却材流量1.2kg/s、下部プラグ気孔径120 μ mでのガスパレナム成立範囲を図9*(JNC殿報告書より引用)に示す。これにより、ガスパレナムは、上部プラグ気孔径200 μ m、上下プラグ間距離1200mm以上で成立することが確認できる。よって、上部プラグ気孔径は200 μ mを採用する。
11	上下プラグ間距離	約1275mm	約1275mm	上項より、上下プラグ間距離は1200mm以上となるが、EVSTの液面誤差±25mm、EVTMの支持精度・EVST内のナトリウム液面揺動等の不確定誤差50mmを考慮し、上下プラグ間距離は1275mmを採用する。
12	被覆管内径-シュラウド管外径 直径ギャップ幅	約0.7mm	約1.9mm(充填初期) 約0.7mm(寿命末期)	*:寿命末期直径ギャップ最小値(B ₄ C10%スエリング、シュラウド管6%スエリング考慮) 被覆管内径-B ₄ Cペレット外径×1.1-4×内外シュラウド管肉厚×1.06 =(15.5+0.07/-0.03)-(12.2+0/-0.05)×1.1-4×(0.3±0.025×1.06) =15.47-12.2×1.1-4×0.325×1.06 =0.672 → 0.7mm

表3. 2. 2-5 (3/3) もんじゅNaボンド制御棒試験 試験条件一覧表

No.	項 目	試験条件	実機条件(想定)	選定理由
13	予想ガスプレナム長さ (通常運転時)	約300mm (ナトリウム流量なし)	約200mm (※上部200 μ m、下部120 μ m、プラグ間1275mm、保護管内冷却材流量1.2kg/s時)	実機においては、保護管内を流れる冷却材の圧損の影響で、ガスプレナムが押しつぶされるため、短くなると推察される。流量の圧損の影響なのでかなり誤差(変動)があると推察される。また、上下駆動時及びスクラム時には相対的に冷却材流量が変化するため、ガスプレナム長さが変化すると推察される。
14	洗浄方法	NaOH水溶液洗浄	湿潤ガス+脱塩水循環洗浄	現状実機では、湿潤ガス洗浄と脱塩水循環洗浄の組み合わせにより洗浄を行っている。しかしながら、ナトリウムボンド型である試験体内にはかなりのナトリウムが残留するものと考えられ、試験体を実機ルーチンに従い、湿潤ガス洗浄、脱塩水循環洗浄の組み合わせにて洗浄するのは、激しい H_2 発生反応が予想され危険である。したがって、ナトリウムボンド型制御棒では前述のルーチンに従わず、 $Na-H_2O$ 反応の穏やかなアルカリ水洗浄方法が1候補となっているため、この洗浄方法を適用する。
15	NaOH水溶液量	約16L以下	約16L(但し脱塩水)	実機の燃料洗浄槽(脱塩水)を流用するものと仮定すると、制御要素1本当りのNaOH水溶液量は約16Lとなる。 根拠: $0.31m^3$ (実機燃料洗浄槽内の脱塩水容量) $\div$ 19本(制御棒集合体1本あたりの制御要素数) $\approx 0.016m^3 = 16L$
16	保護管内冷却材流量	なし	~1.2kg/s	保護管内の冷却材流量は、流れによる圧損でガスプレナムの形成に影響を与える(流量が大きいほど、圧損は大きくなり、ガスプレナムは短くなる。)が、本試験においては、JNC殿との契約取り決めにより、今回は流量はなしとし、別途、圧損計算等により評価をするものとする。
17	スクラム動作	なし	あり	スクラム時の冷却材の相対流速は大きく、保守的に定常状態を仮定するとガスプレナムが破壊され放出が起きるが、実際にはスクラム時間が0.7s以下であるので、放出が起きる以前に流動が停止する。(JNC柴原殿「もんじゅ長寿命制御棒開発の現状」より抜粋) よって、本試験においてはスクラム動作を実施しないものとする。

試験体No. 1

液面計 ⑨L 3 (NsL+80) ⑨L 2 (NsL+20)

REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHKD.	DATE
0	新機作成				

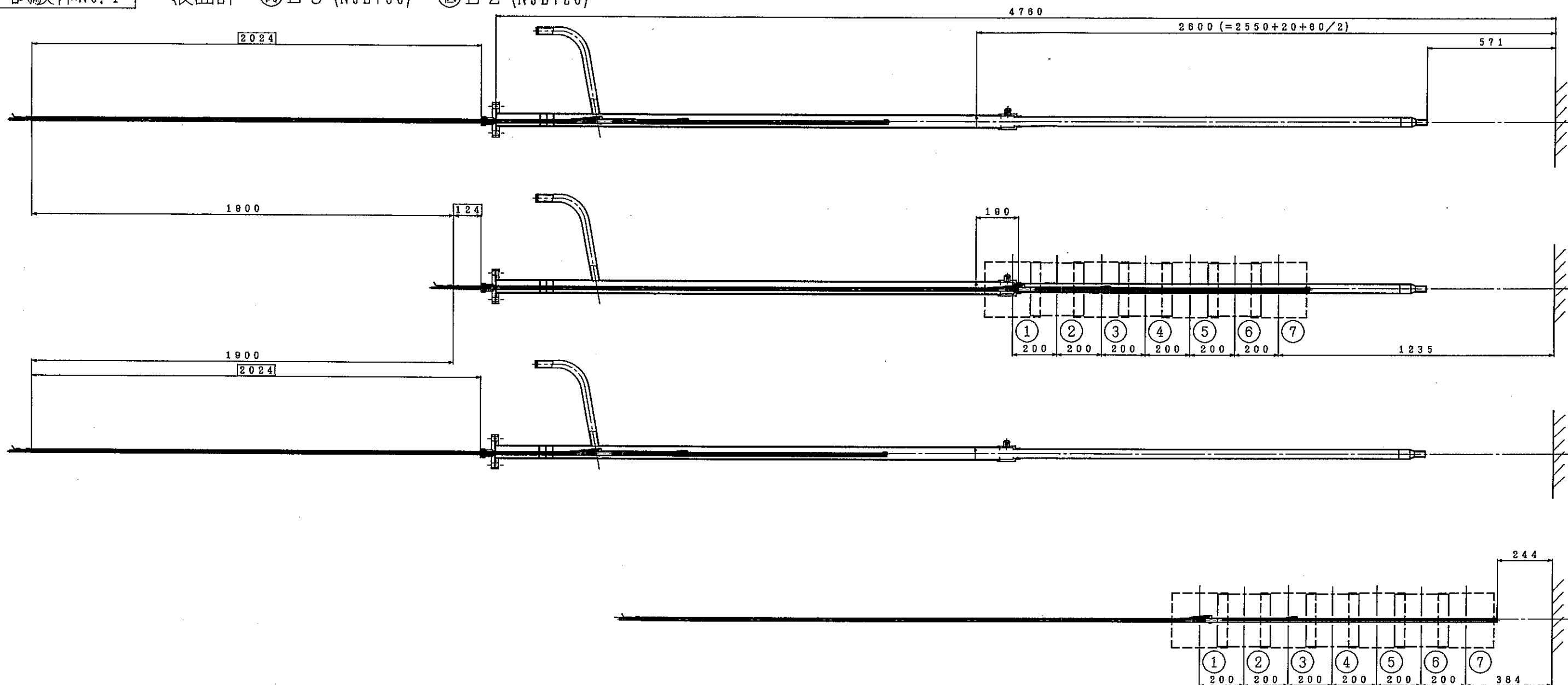


図 3. 2. 2-1 試験体No. 1 X線撮影位置図

試験体No. 1 試験体No. 1 試験体No. 1	310PB 310PB 310PB	W W W
----------------------------------	-------------------------	-------------

試験体No. 3

液面計 ⑨L 3 (NsL+80) ⑨L 2 (NsL+20)

REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHK.
0	新設作成			

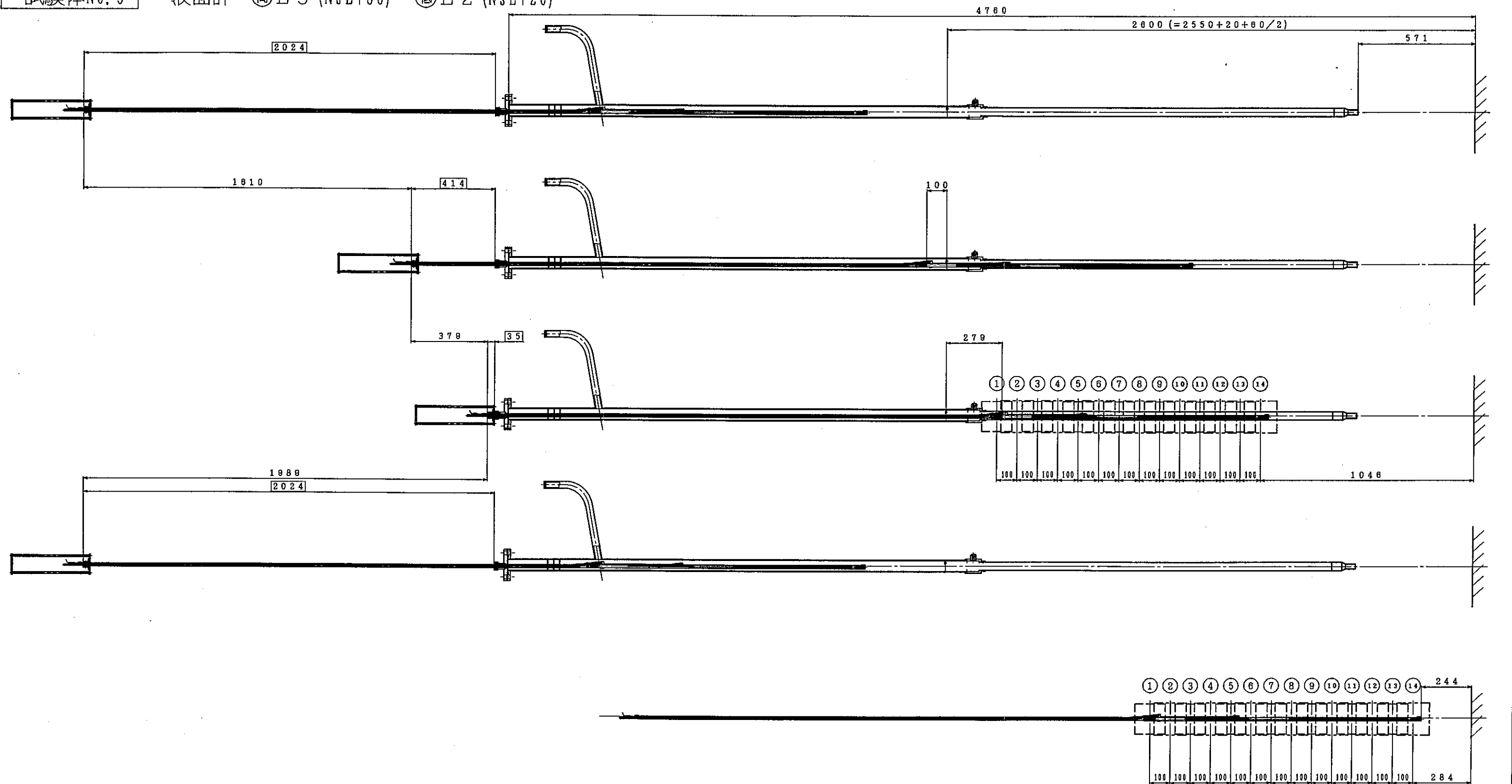


図3.2.2-2 試験体No. 3 X線撮影位置図

「もんじゅ」Naボンド型制鋼板素試験 試験体No. 3 試験手順	310PB	W
-------------------------------------	-------	---

液面計 ⑨L 3 (NsL+80) ⑩L 2 (NsL+20)

 SCALE 1 : 0.0	TITLE 「もんじゅ」Naボンド型制御棒要素試験 試験体 No. 1 試験手順	
	Hltachi Ltd. Tokyo Japan	310PB - 1/3/74-V02-21 10

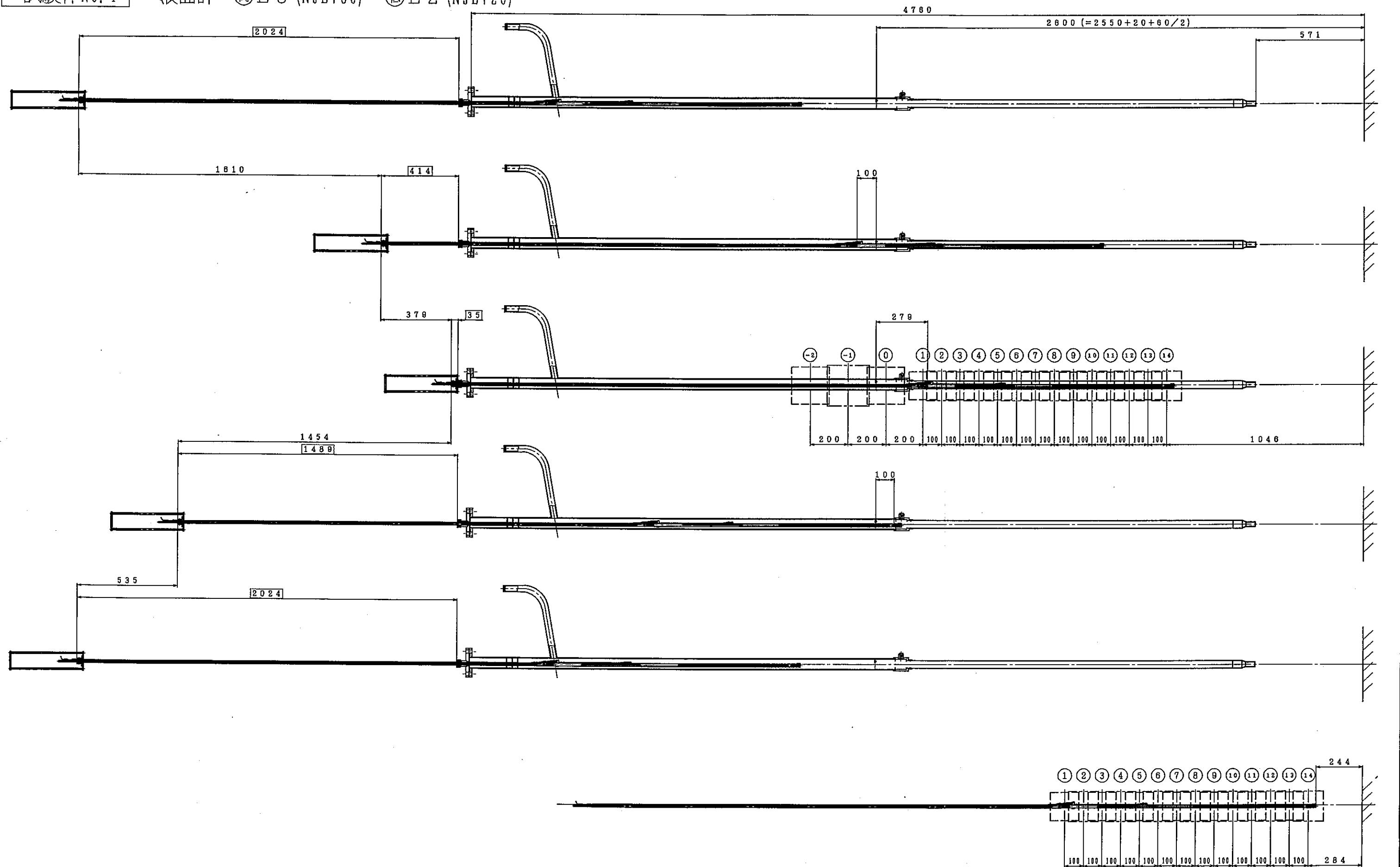


図3. 2. 2-3 試験体No. 4 X線撮影位置図

液面計 ①高 L 3 (NsL+80) ②低 L 2 (NsL+20)

ATTENTION				
REV.	DESCRIPTION	REV.	DATE	APPR. DATA
0	新規作成			

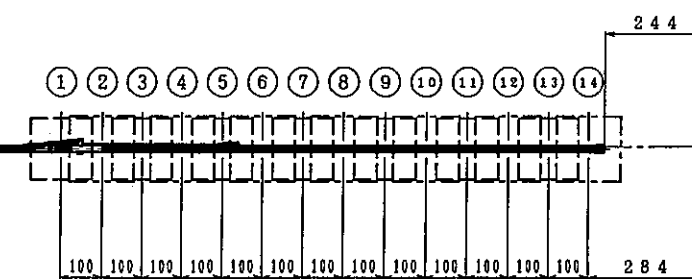
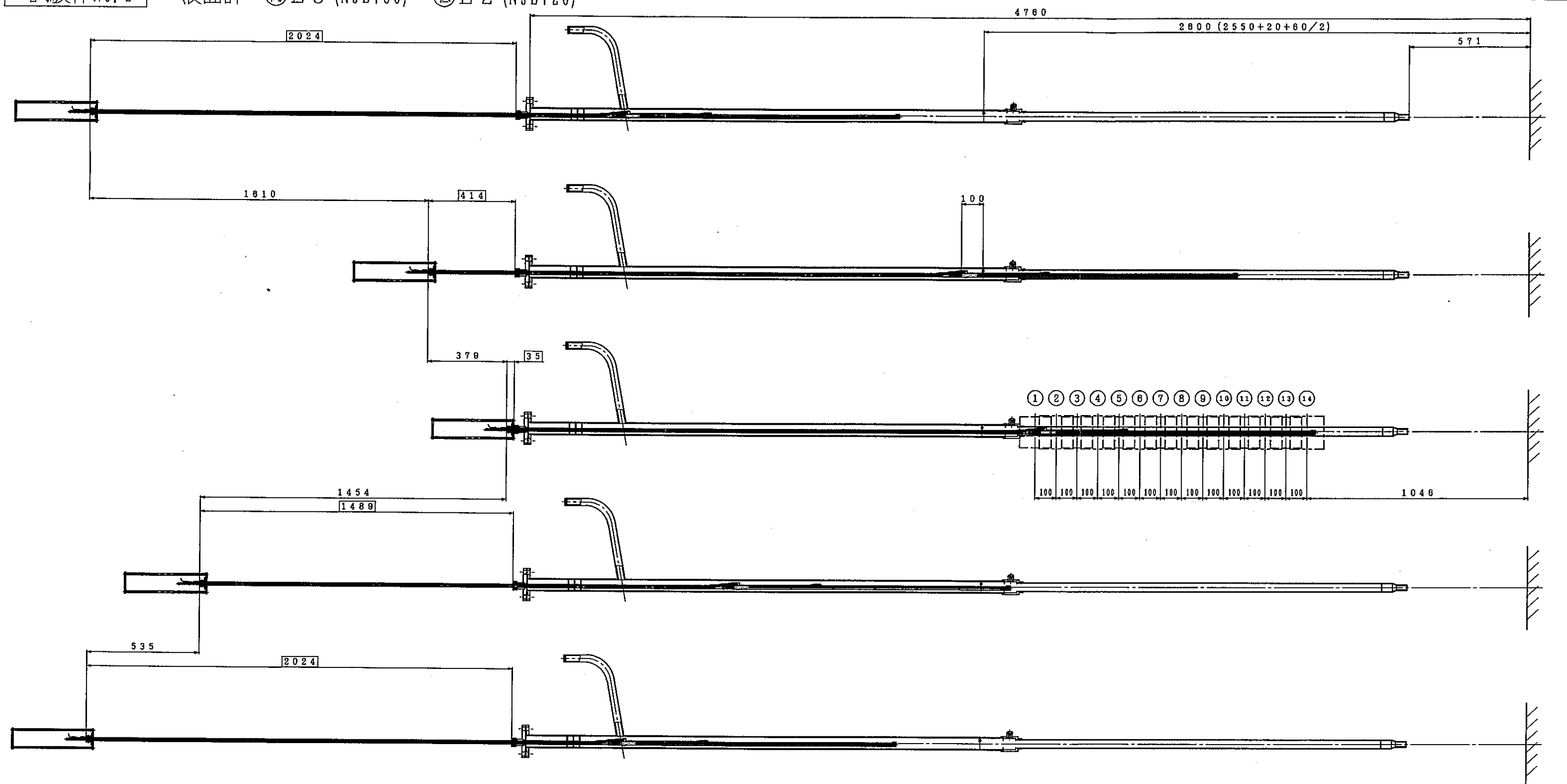


図3. 2. 2-4 試験体No. 2 X線撮影位置図

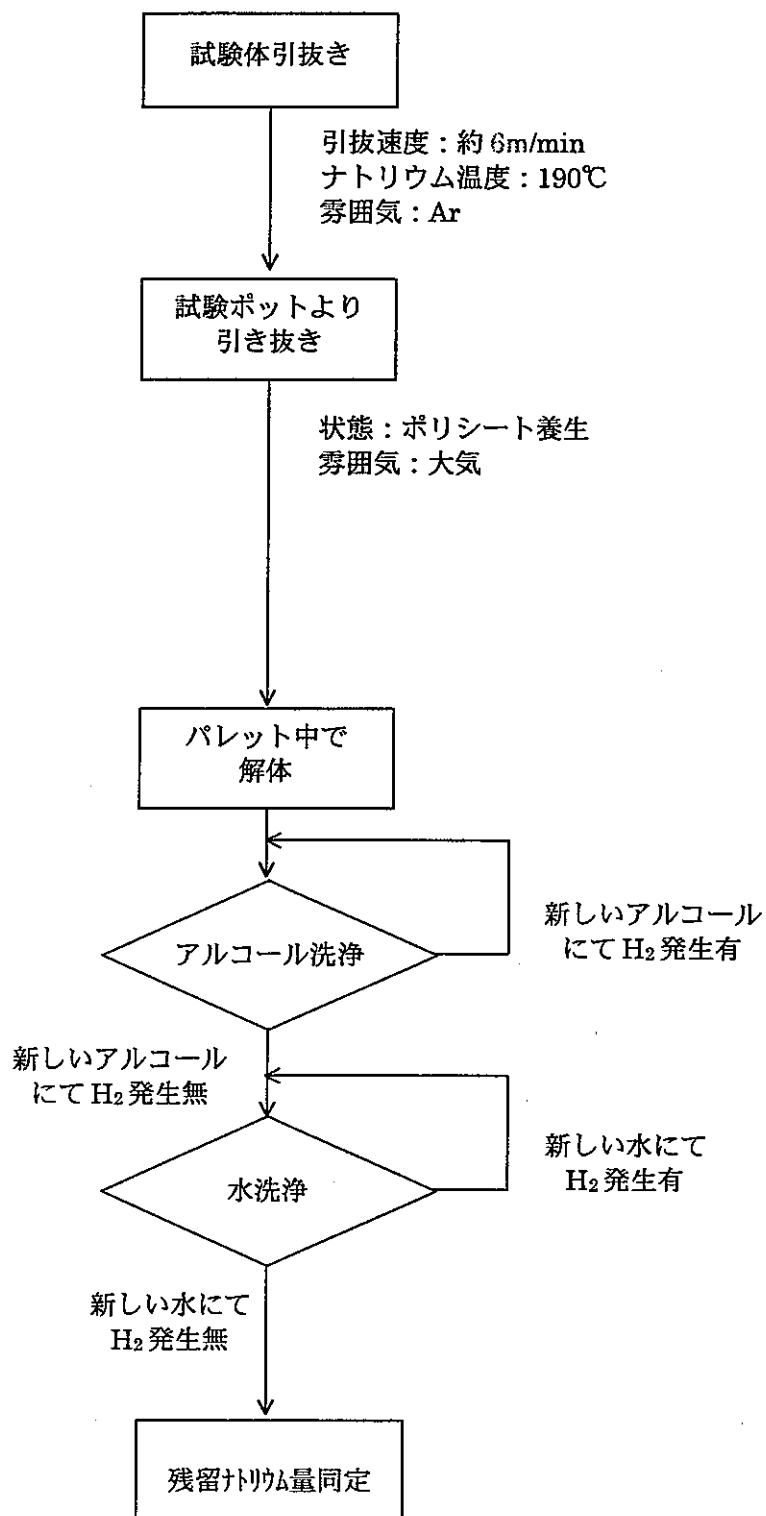


図 3.2.2.3-1 ドレン性確認試験フロー

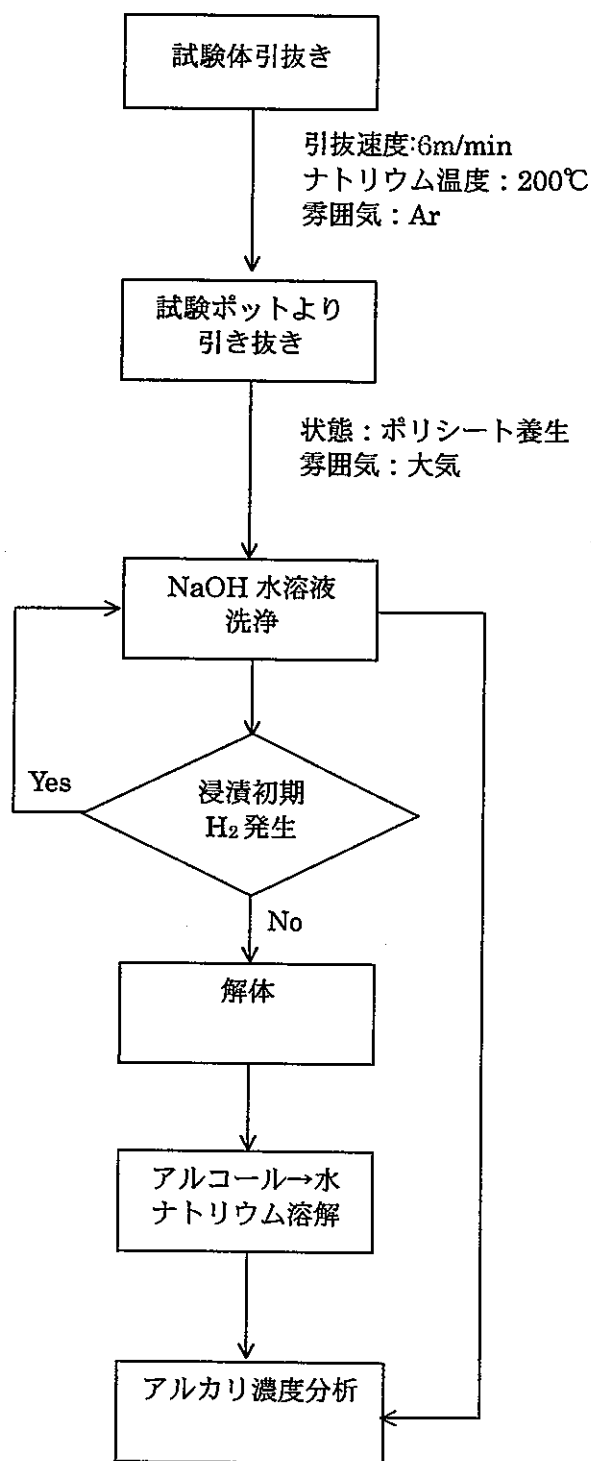
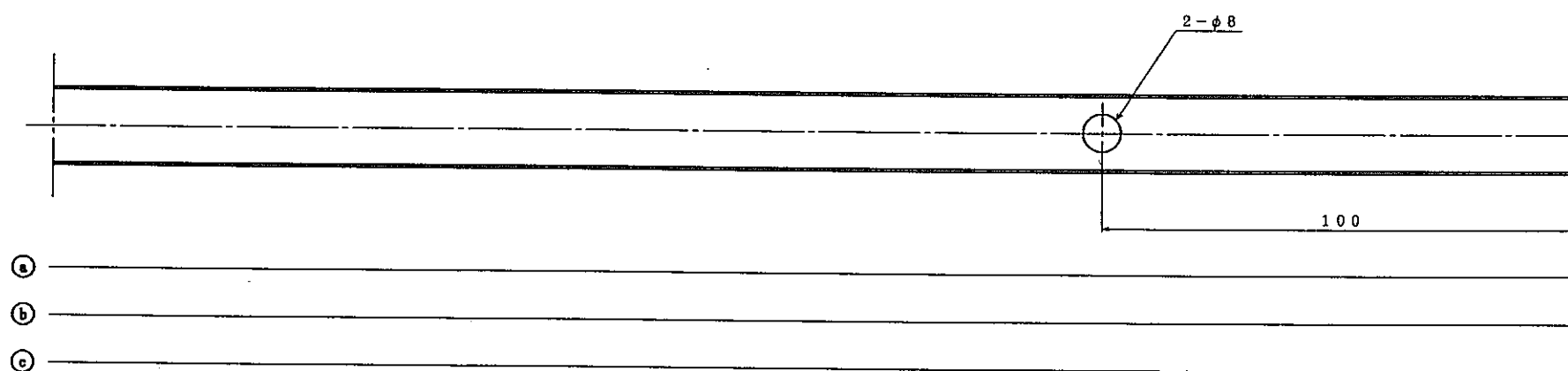
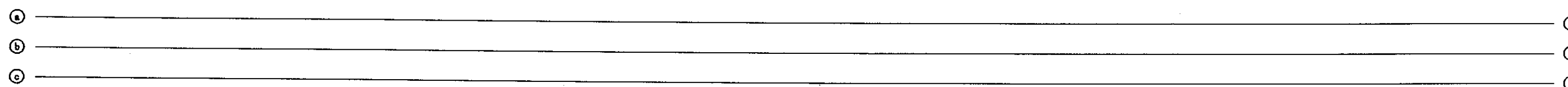
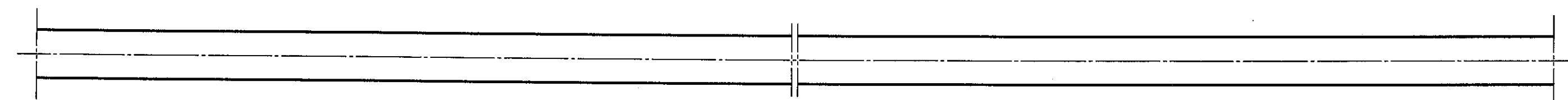
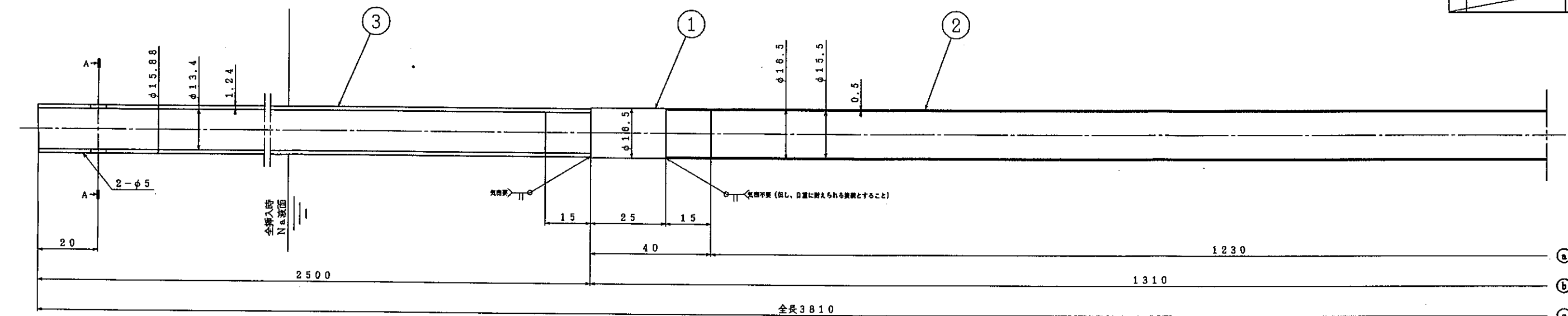


図 3.2.2.4-1 洗浄性確認試験フロー

REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHK.	APP.
0	新規作成				



3	支持パイプ	1	SUS304	
2	被覆管	1	SUS304	
1	上部端栓	1	SUS304	
品番	品名	員数	材質	備考

図3.2.3-1 Naボンド制御棒要素予備試験体構造図

「もんじゅ」Naボンド制御棒要素予備試験体D-2断面図	Hitachi, Ltd. Tokyo, Japan	310PB22-657	0
-----------------------------	-------------------------------	-------------	---

予備試験体

液面計 ③ L 3 (NsL+80) ④ L 2 (NsL+20)

REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHK.	APP.
0	新規作成				

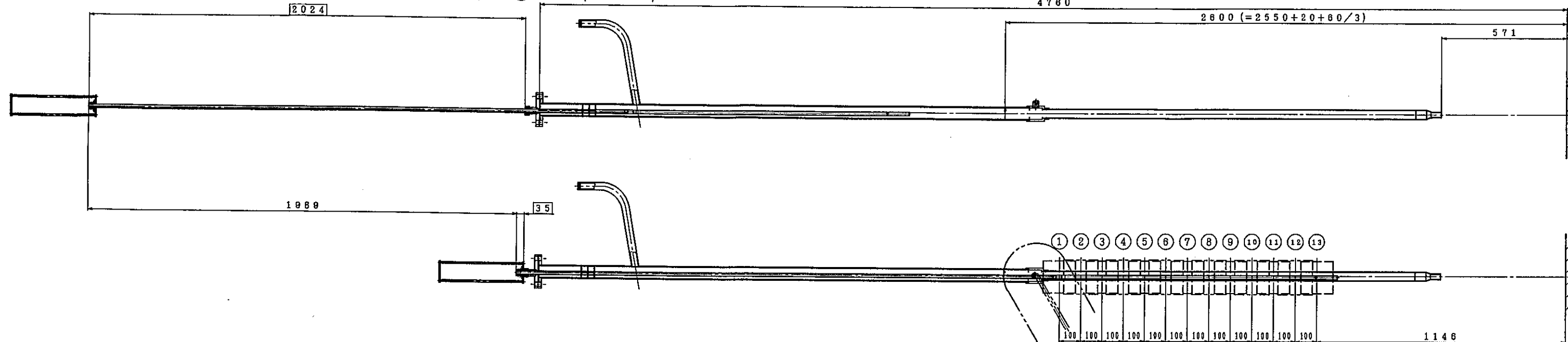
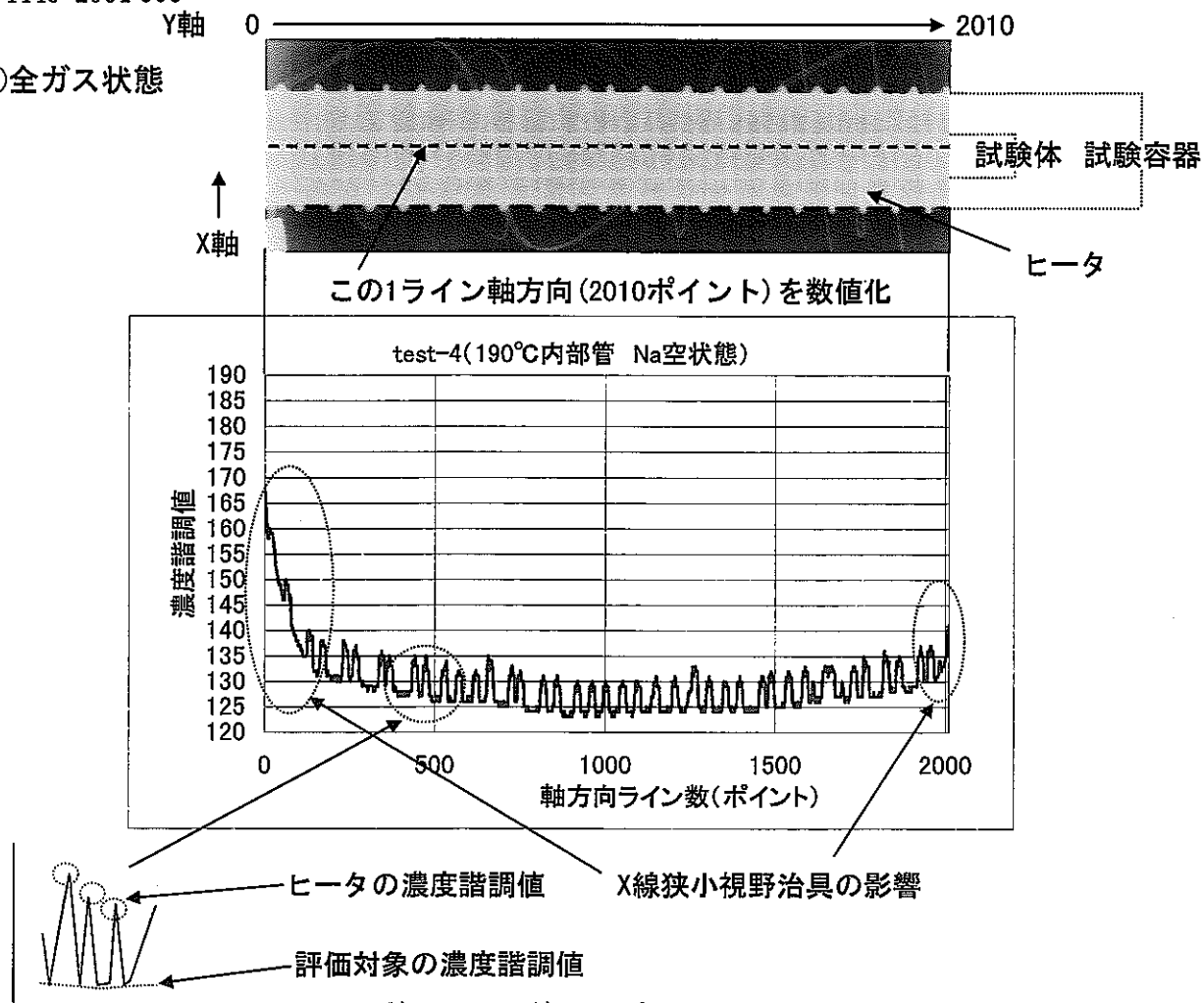


図 3. 2. 3-2 予備試験体 X線撮影位置図

「もんじゃ」Nsボンド型創製実証実験 試験体 No. 7 試験手順		17133
DATE 2001.8.8	HITACHI LTD. Tokyo Japan	310PB -
REV. No.	2	2

①全ガス状態



②ガス/Na状態

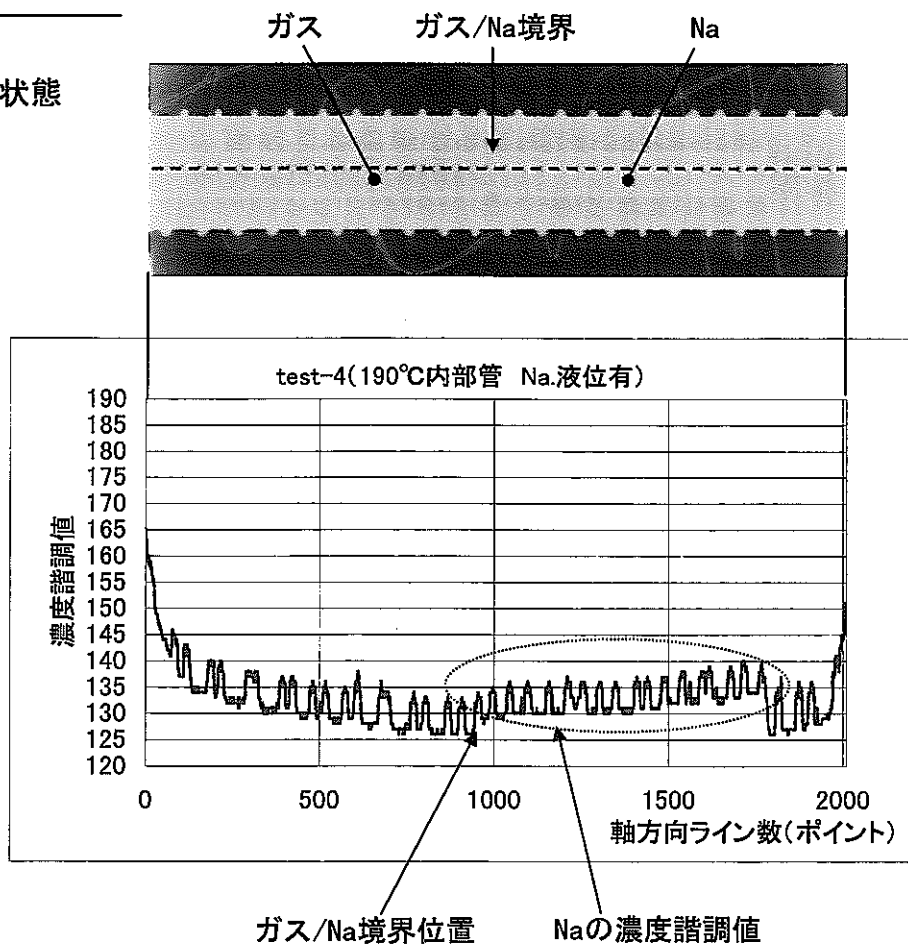
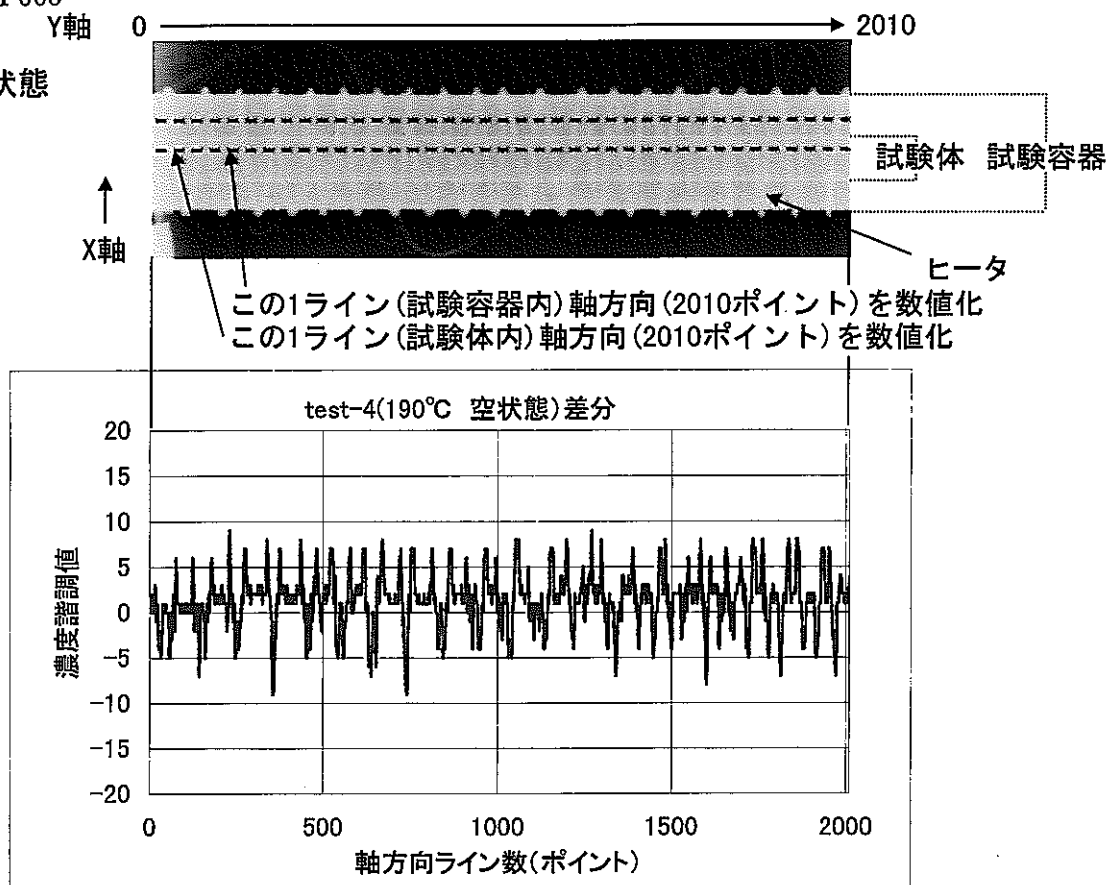


図3. 2. 3. 1-1 試験体内濃度評価法説明図 (予備試験結果)

①全ガス状態



②ガス/Na状態

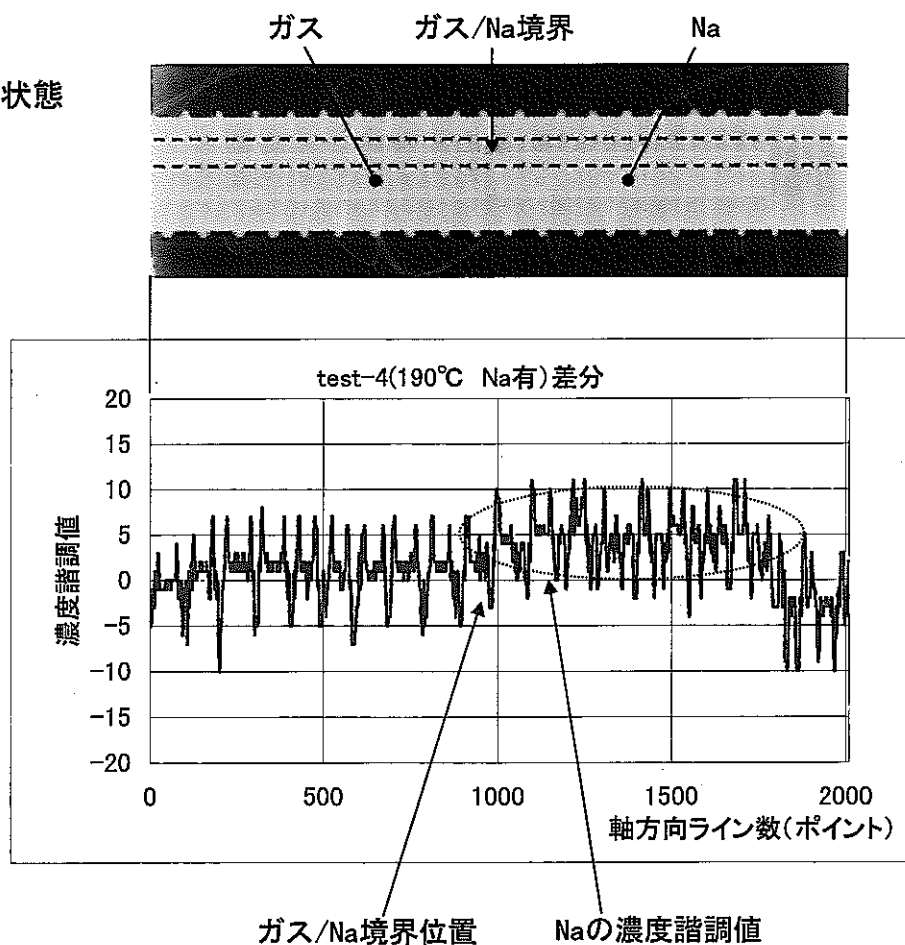


図3. 2. 3. 2-1 差分濃度評価法説明図 (予備試験結果)

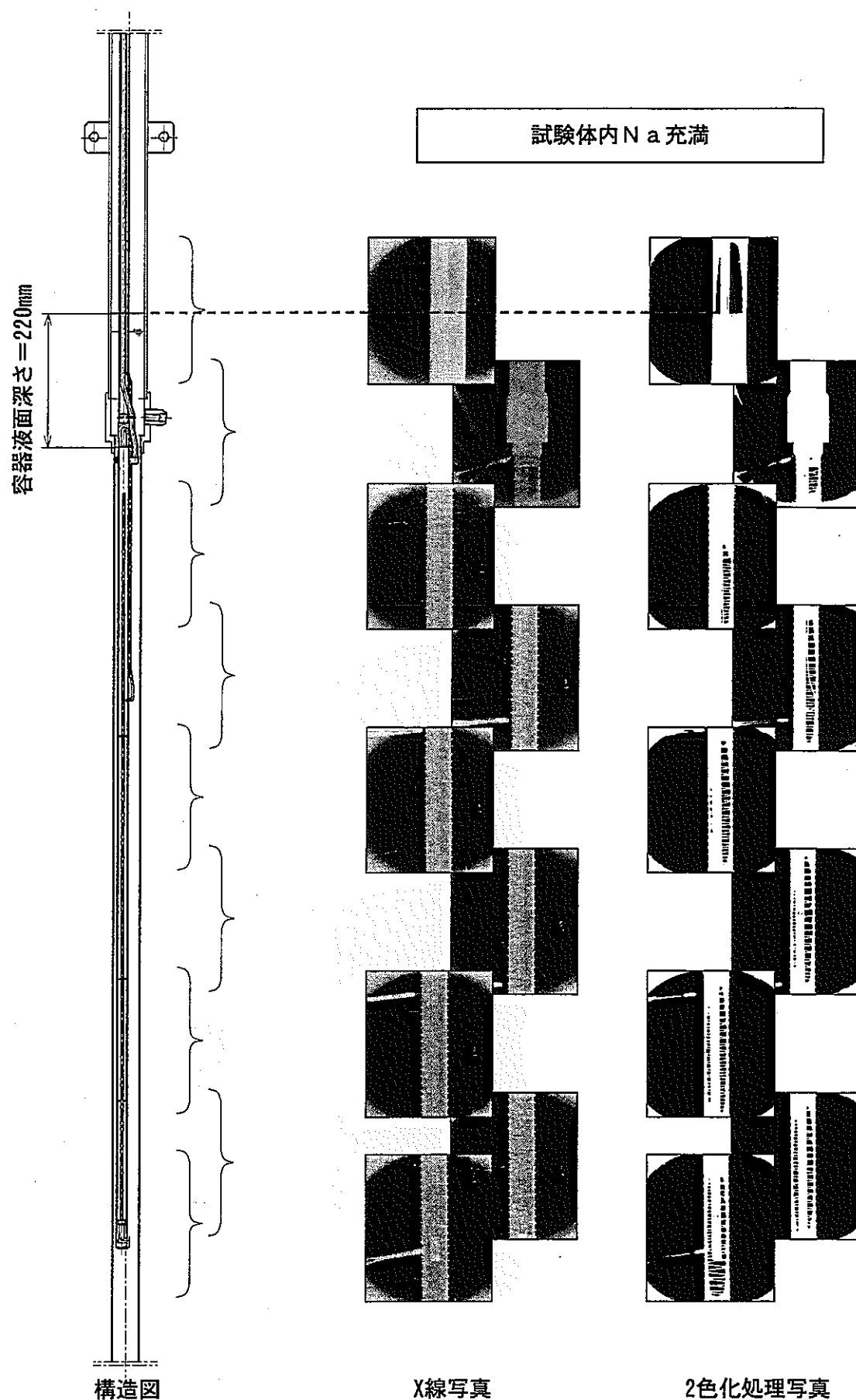


図3.3.1-1 試験体内ガスパレナム状態（試験体No. 1, Na190℃, 充填後）

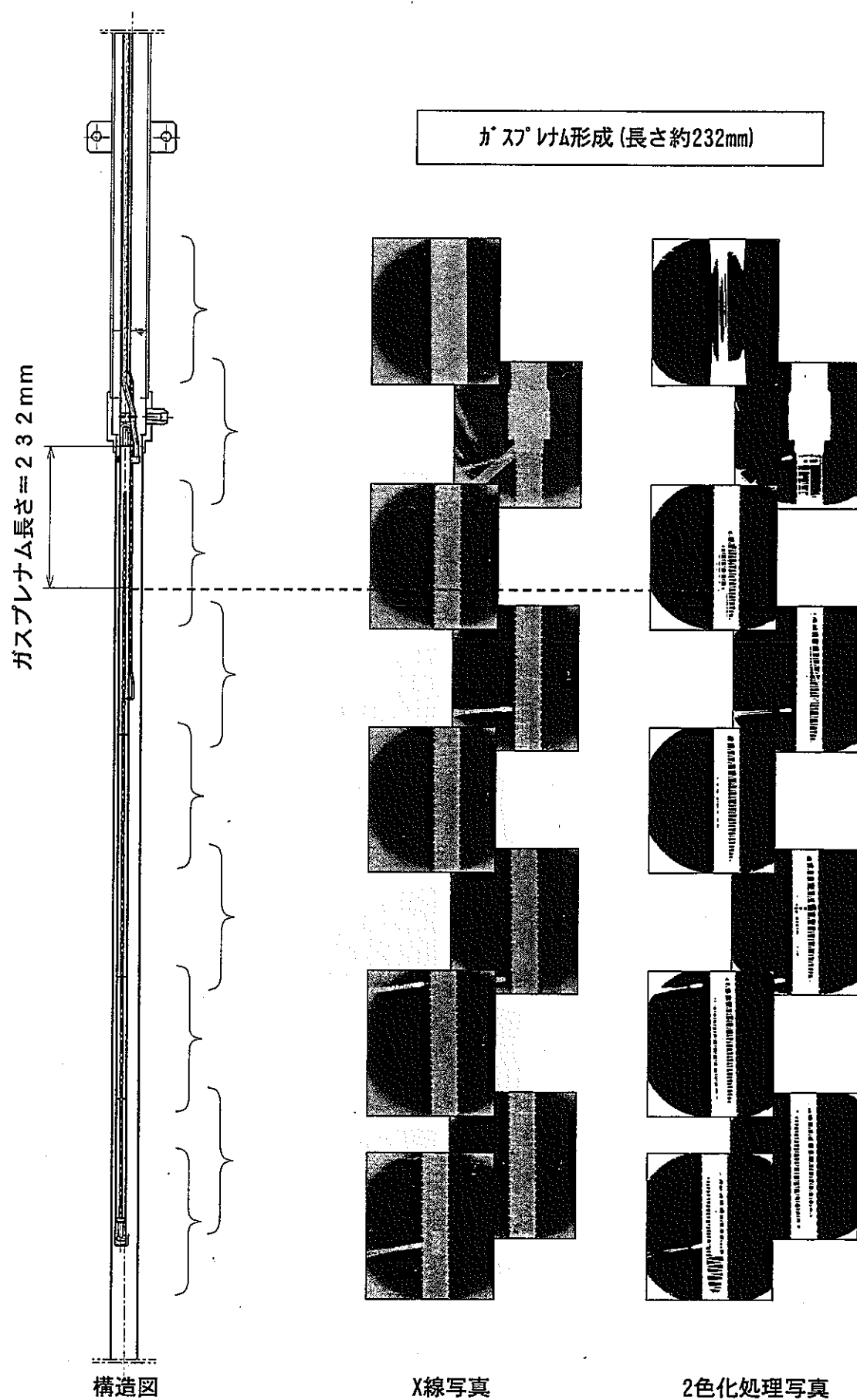


図3. 3. 1-2 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 1, Na650°C, He1セツト注入後)

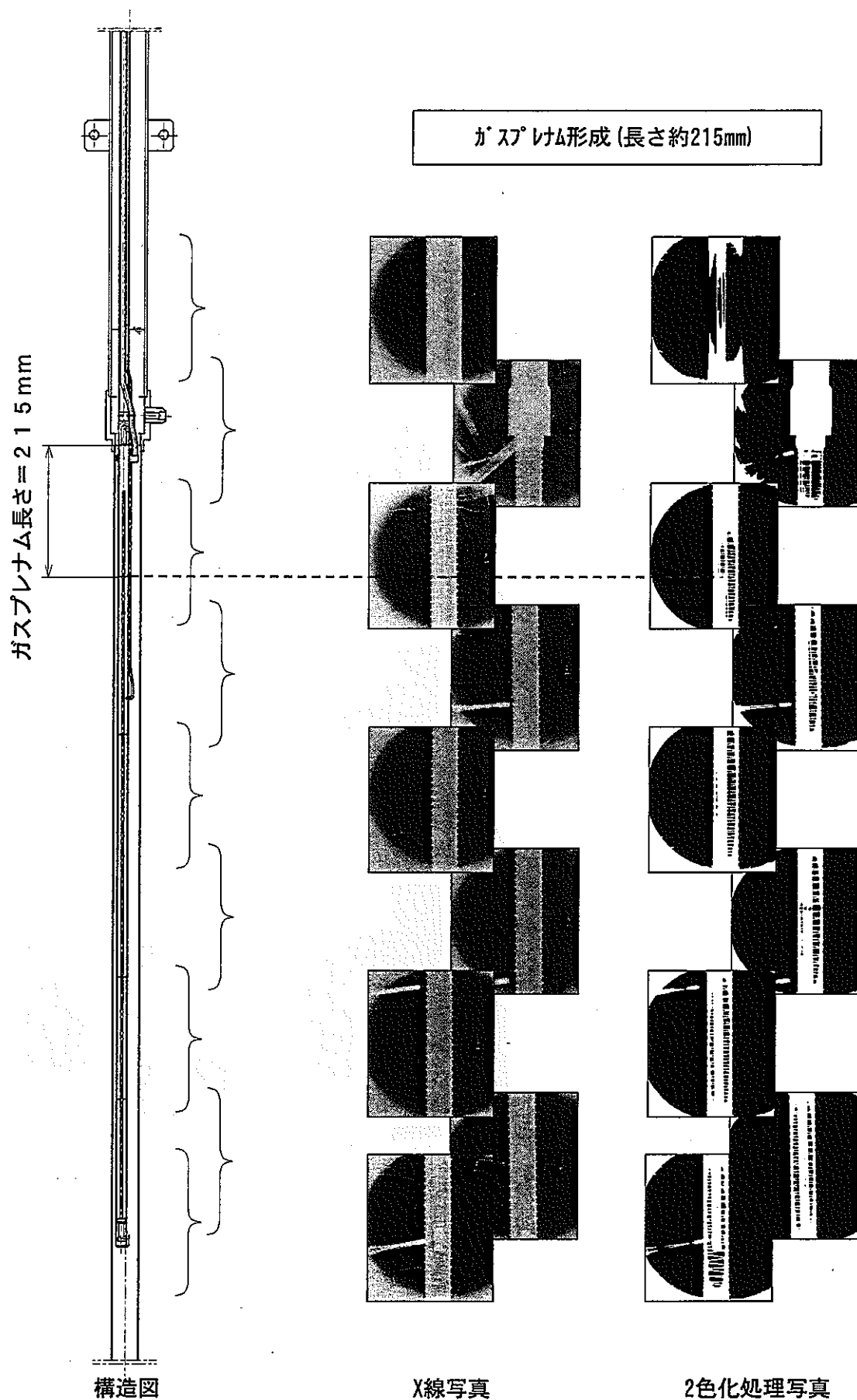
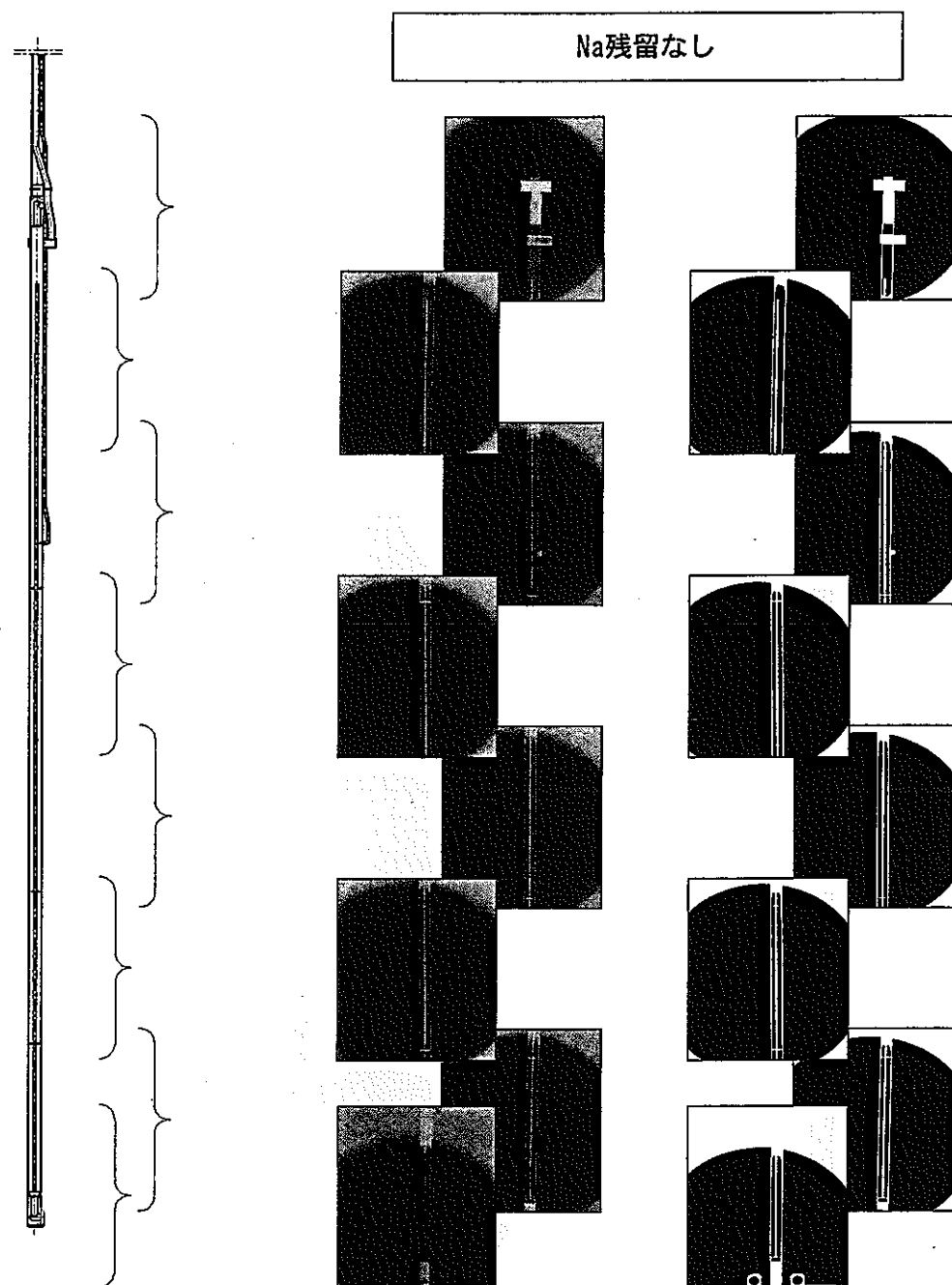


図3. 3. 1-3 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 1, Na650℃, He2セット注入後)



構造図

X線写真

2色化处理写真

図3. 3. 1-4 試験体内ガスプレナム状態（試験体No. 1, 引抜後）

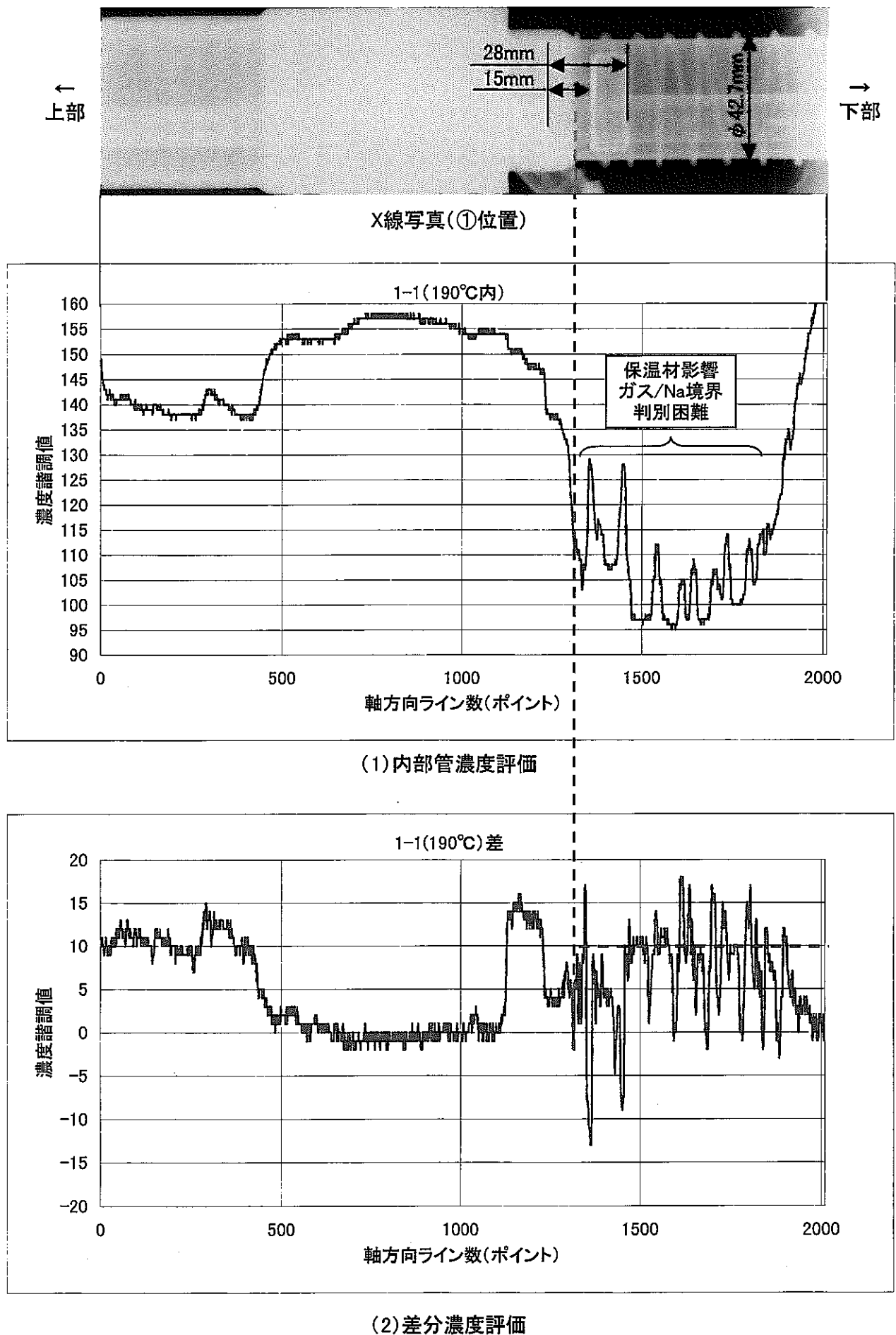
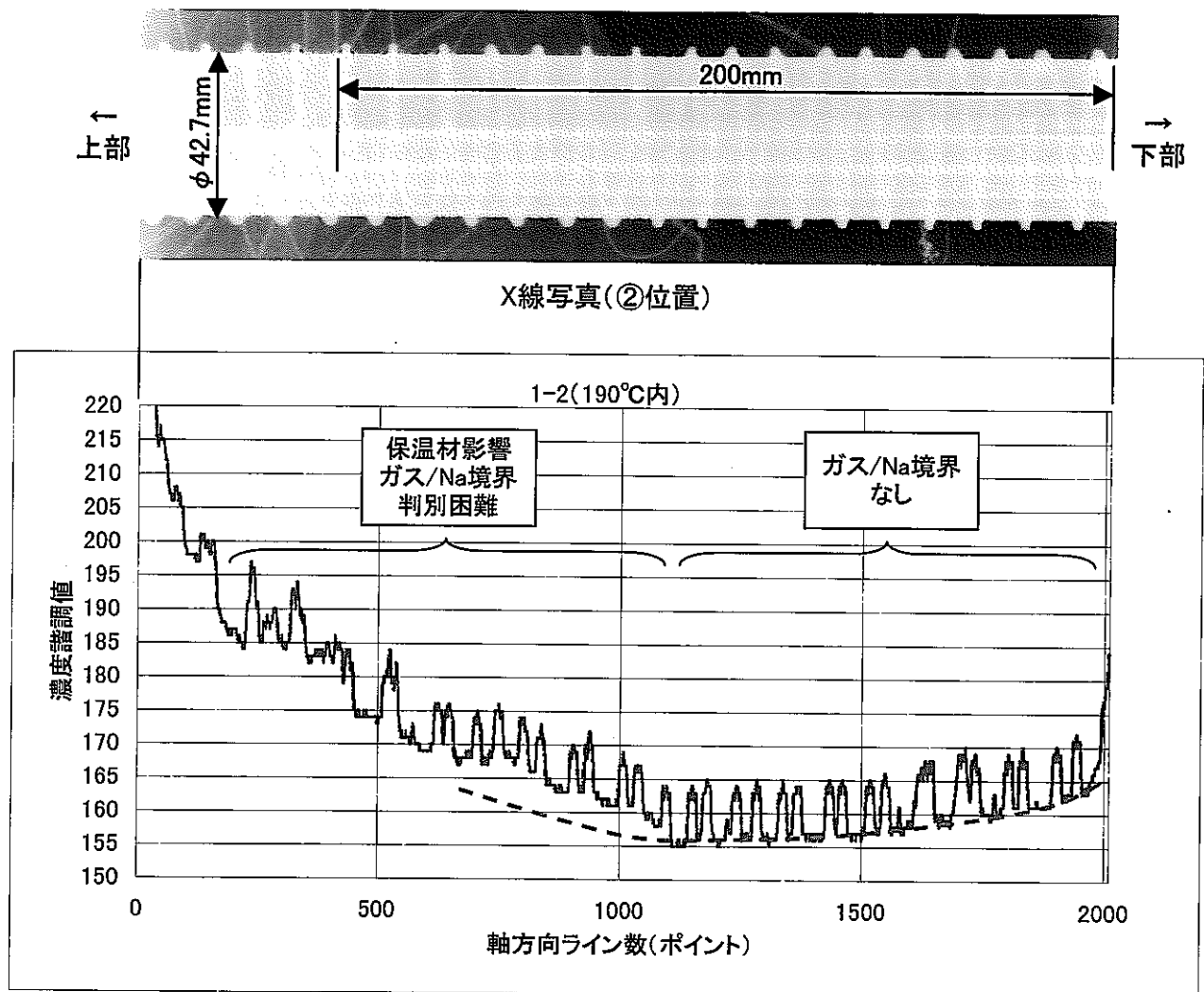
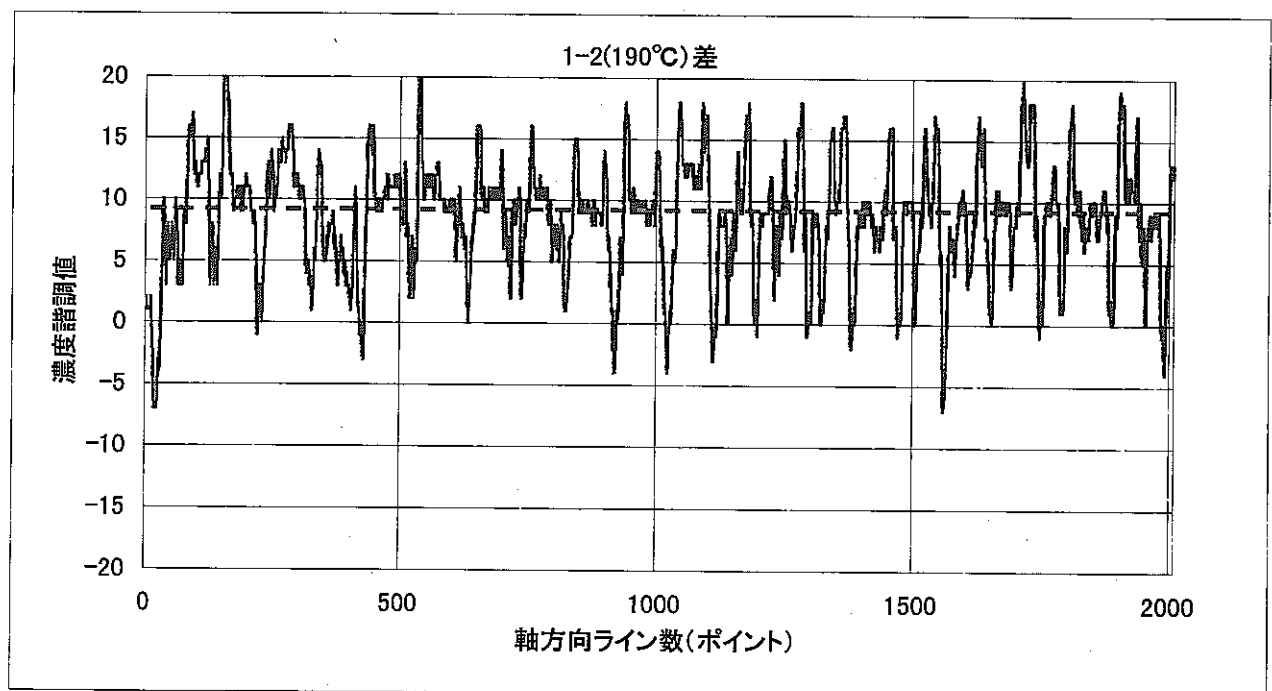


図3.3.1-5 X線撮影データ評価結果(試験体No.1, Na190°C, 充填後)

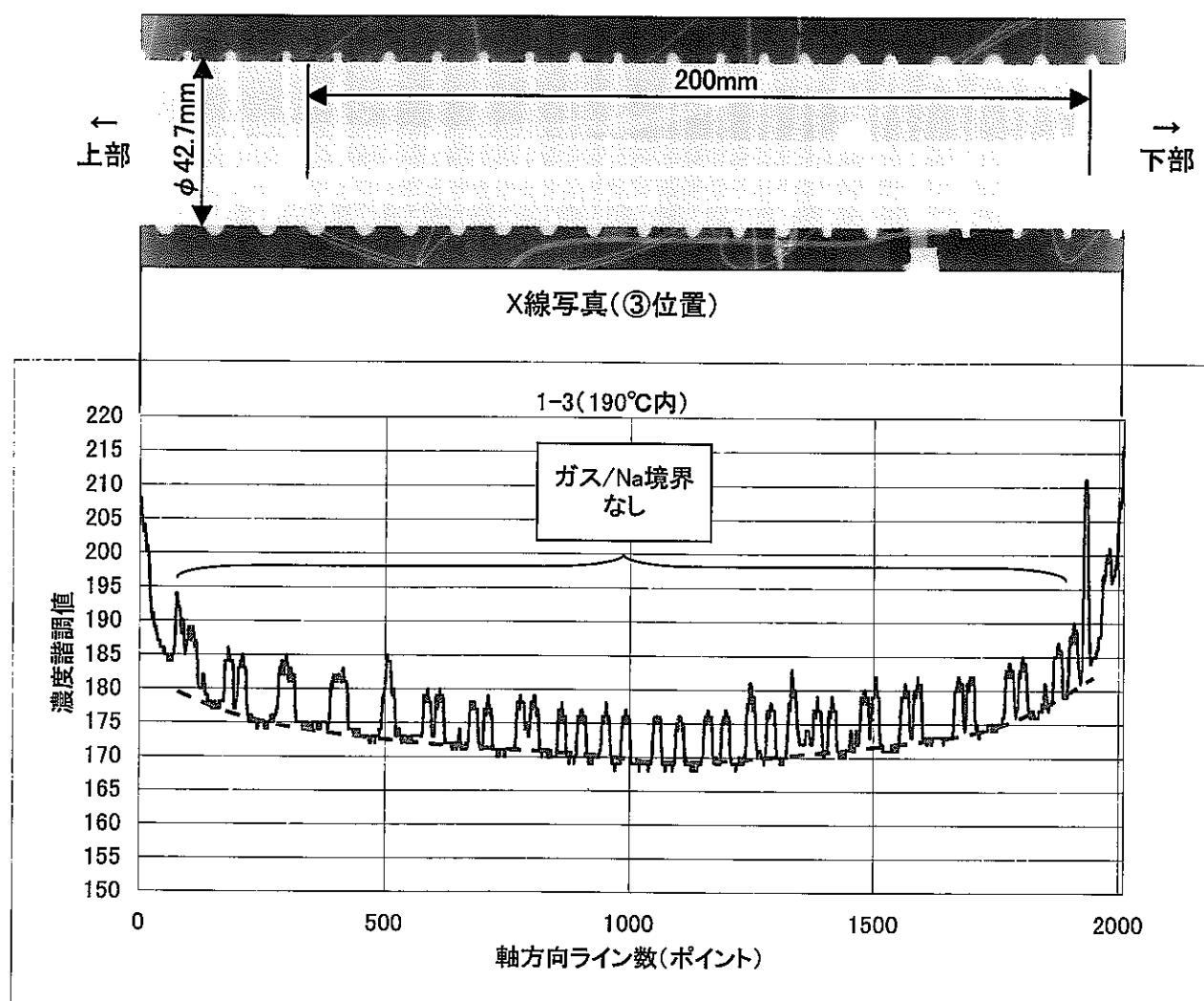


(1) 内部管濃度評価

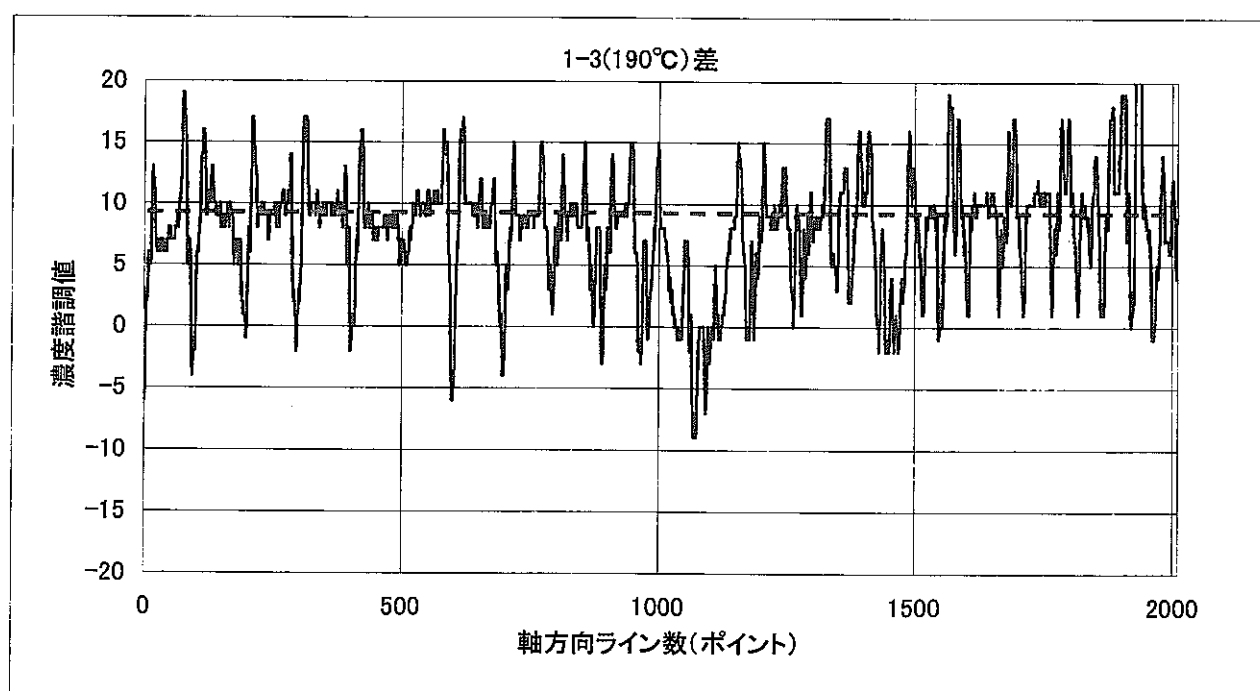


(2) 差分濃度評価

図3.3.1-6 X線撮影データ評価結果(試験体No.1, Na190°C, 充填後)

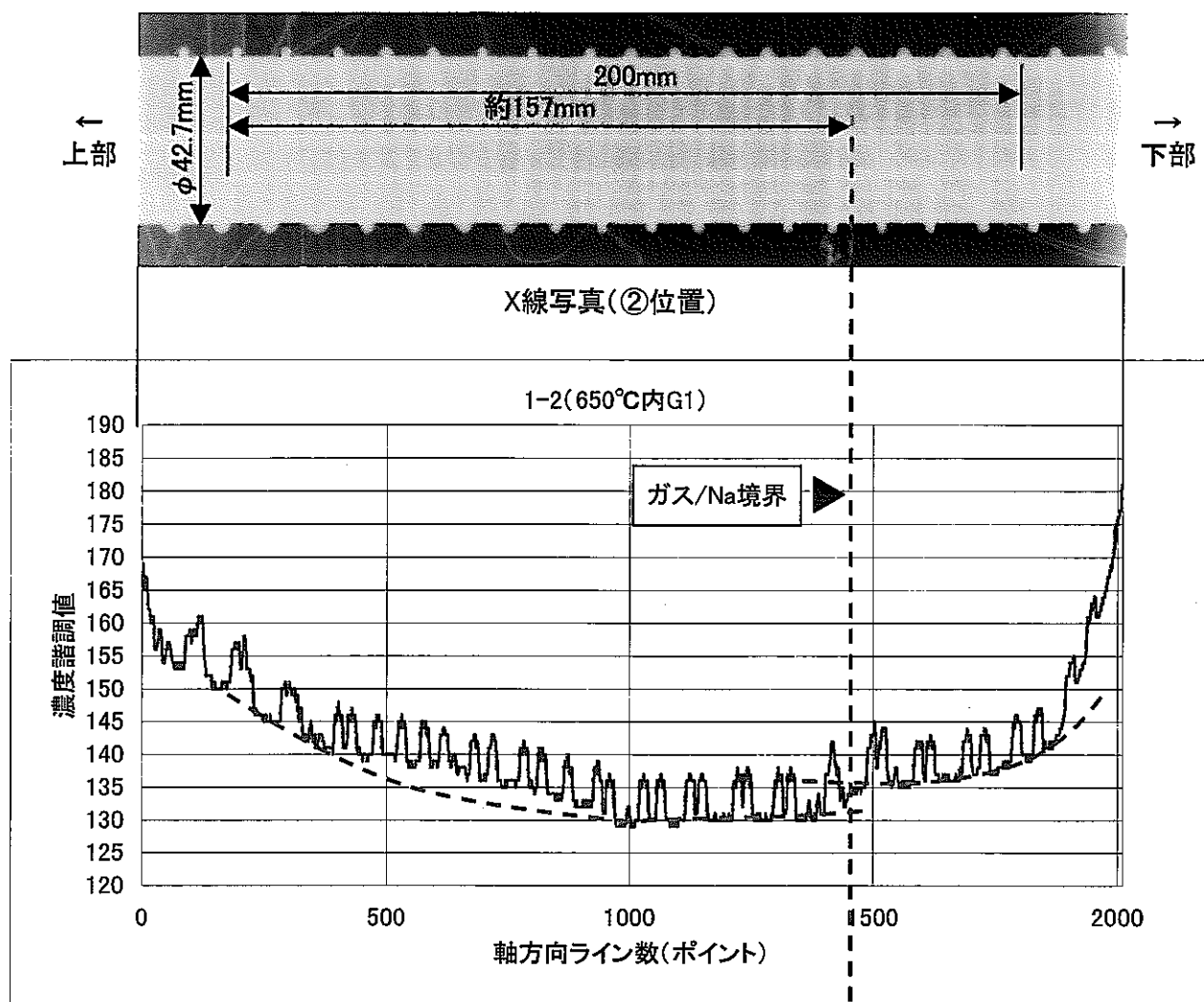


(1)内部管濃度評価

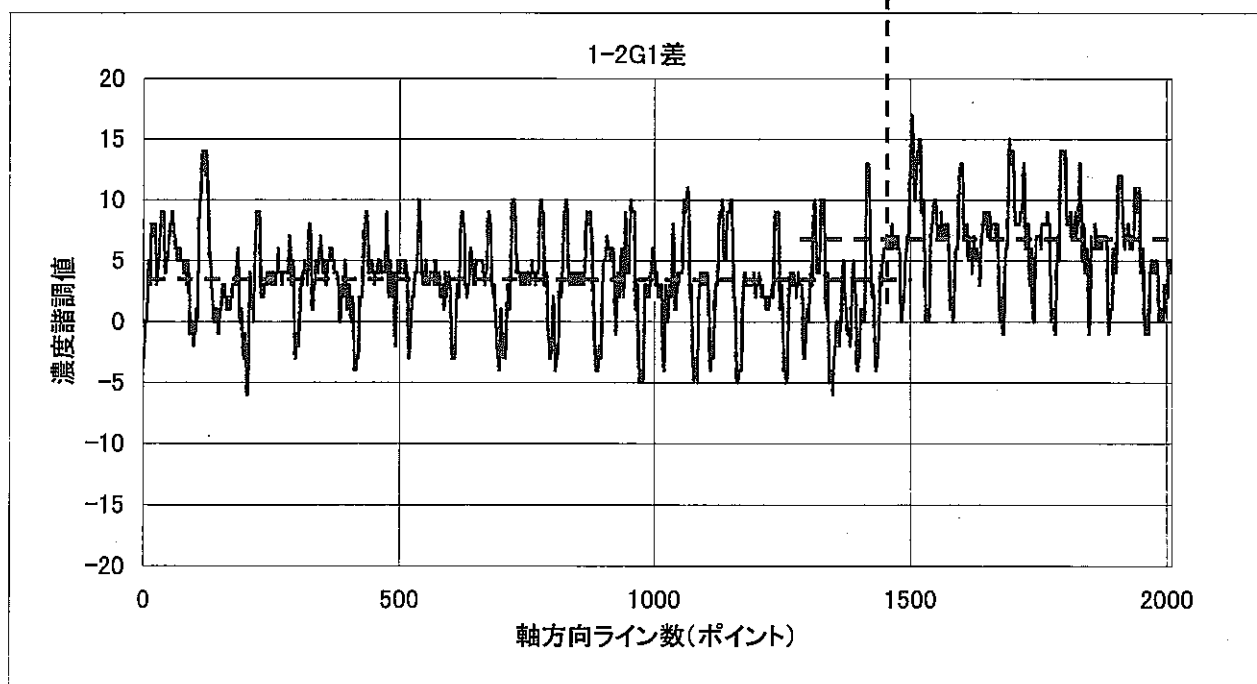


(2)差分濃度評価

図3.3.1-7 X線撮影データ評価結果(試験体No.1, Na190°C, 充填後)

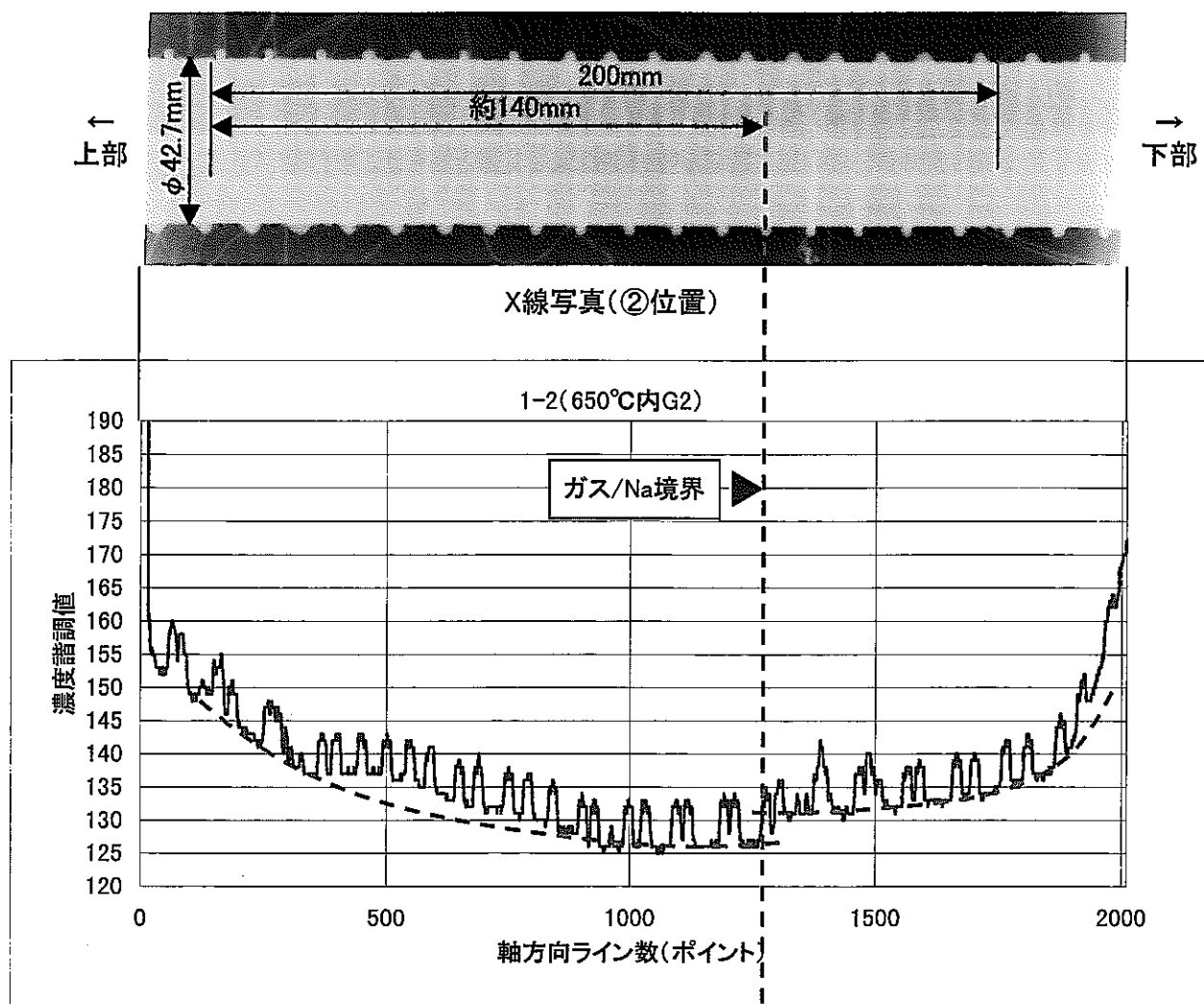


(1) 内部管濃度評価

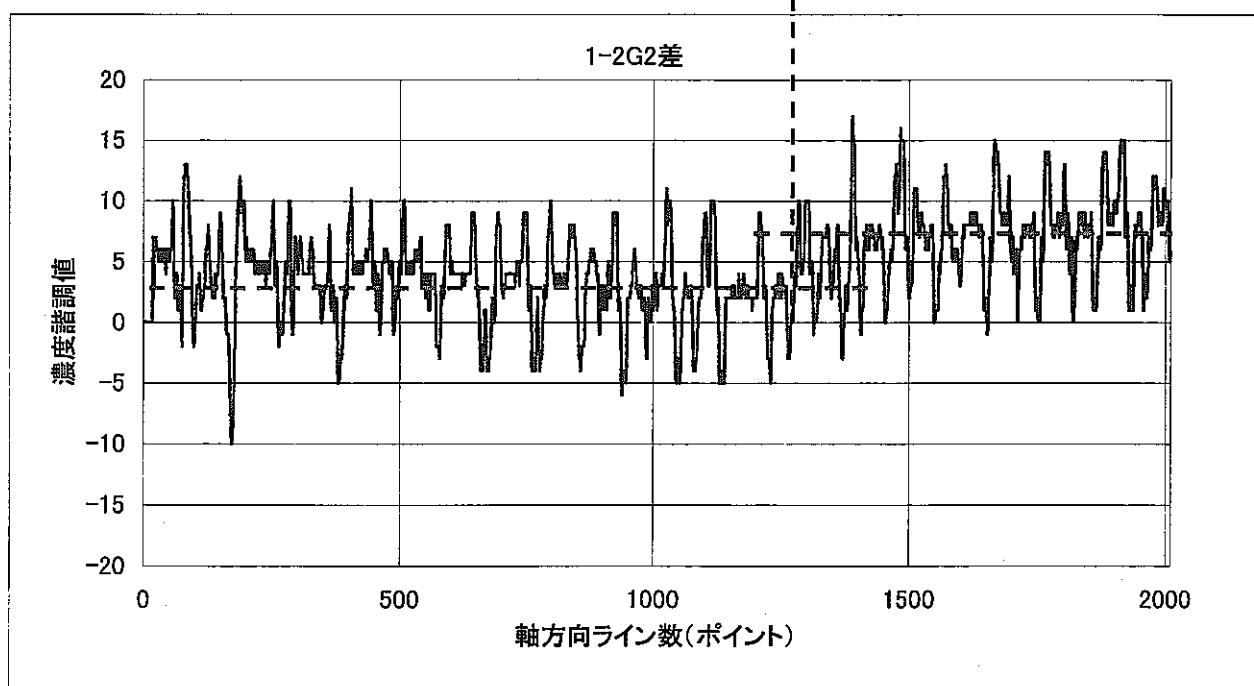


(2) 差分濃度評価

図3.3.1-8 X線撮影データ評価結果(試験体No.1、650°C、He1セット注入後)

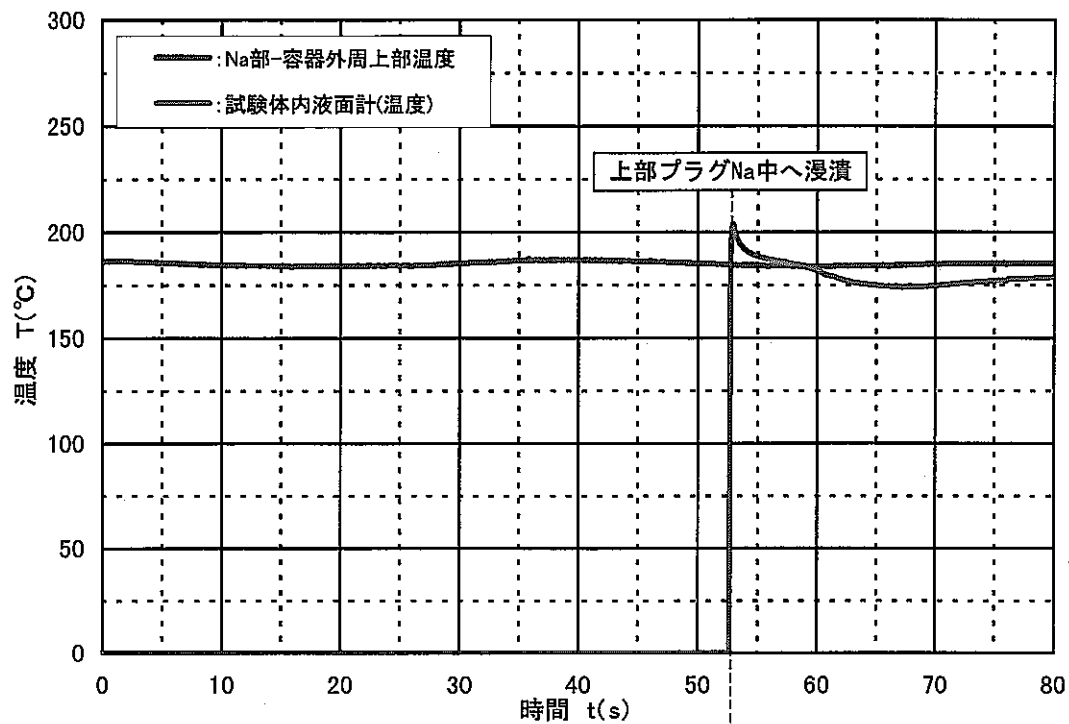


(1) 内部管濃度評価

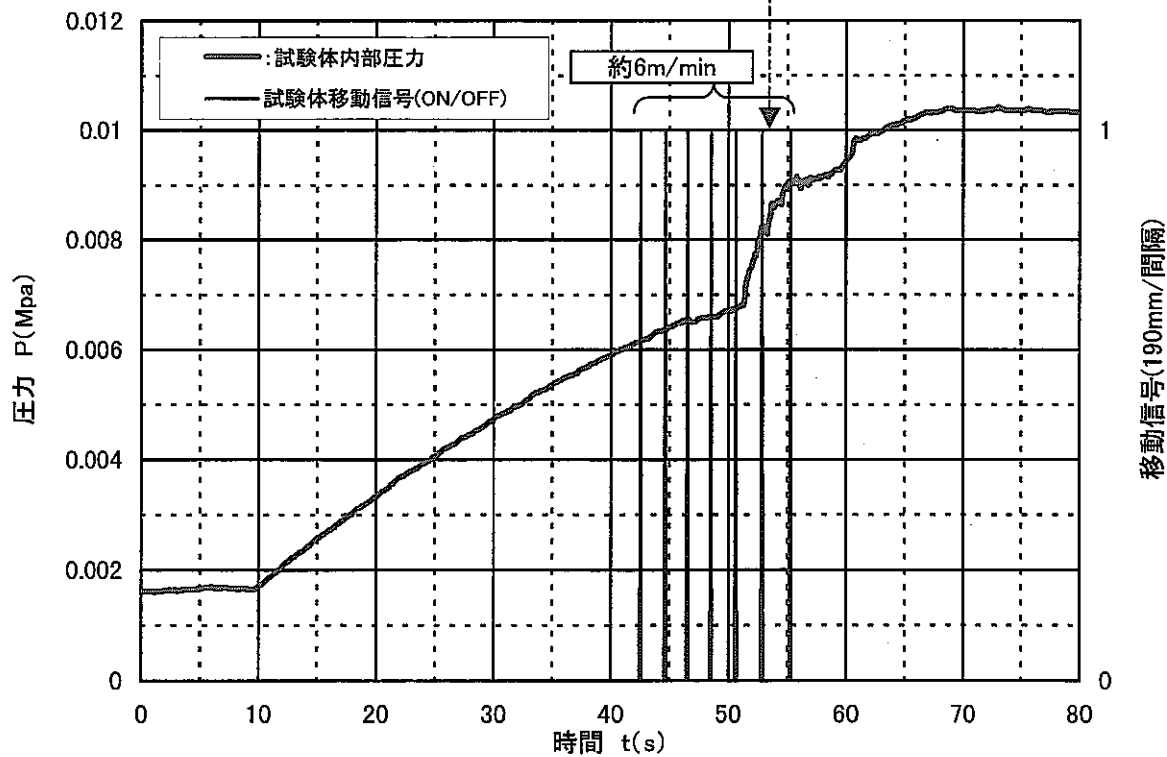


(2) 差分濃度評価

図3.3.1-9 X線撮影データ評価結果(試験体No.1、650°C、He2セット注入後)

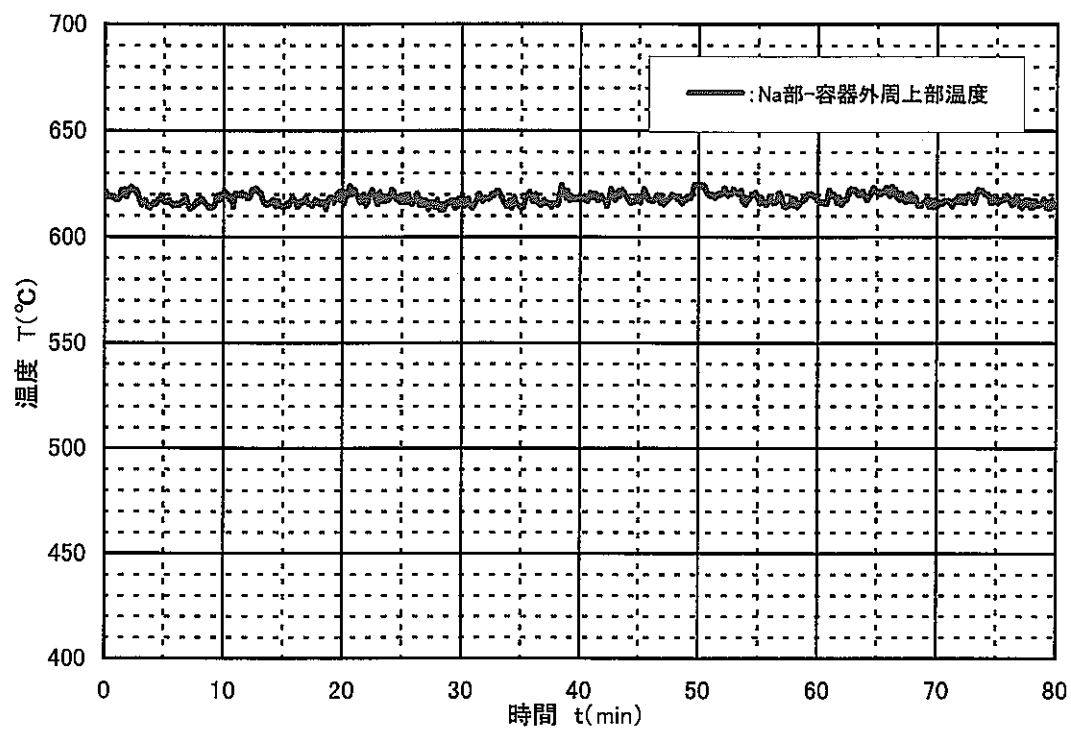


(a) Na温度および液面計信号(温度)

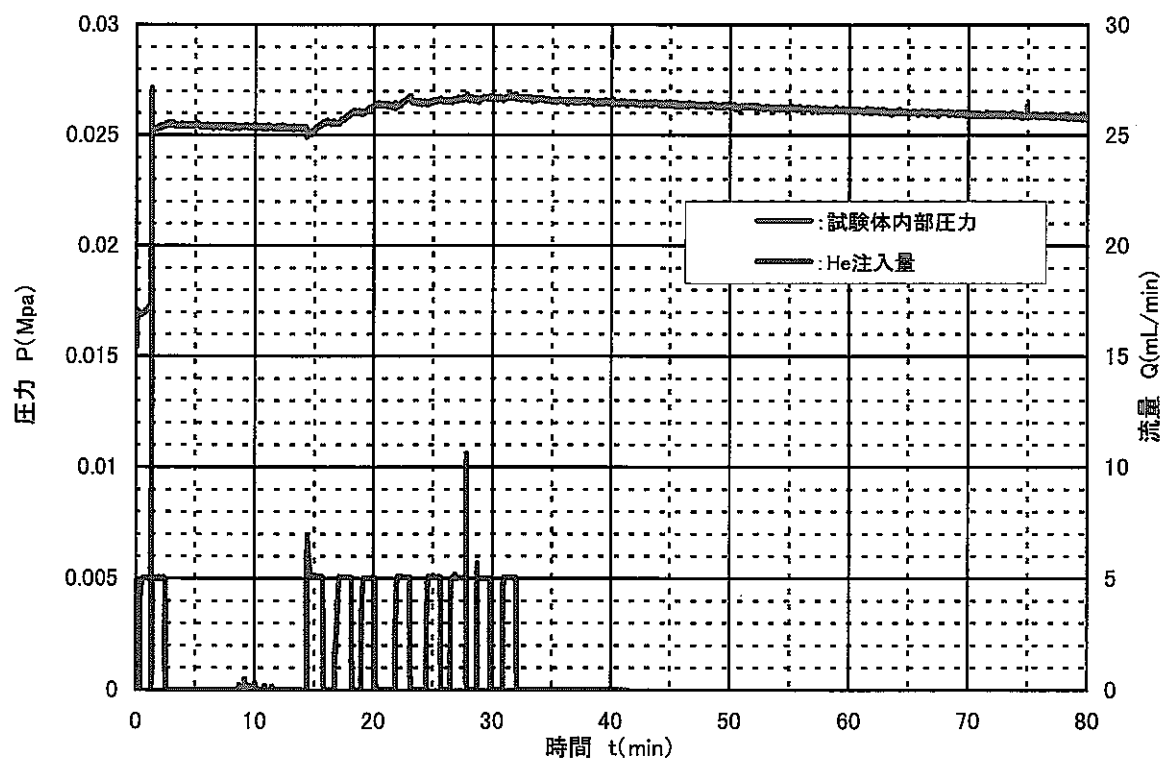


(b) 試験体圧力および挿入移動信号

図3.3.1-10 試験体No.1 (Ar $\rightarrow$ 190 $^{\circ}$ CNa中挿入)

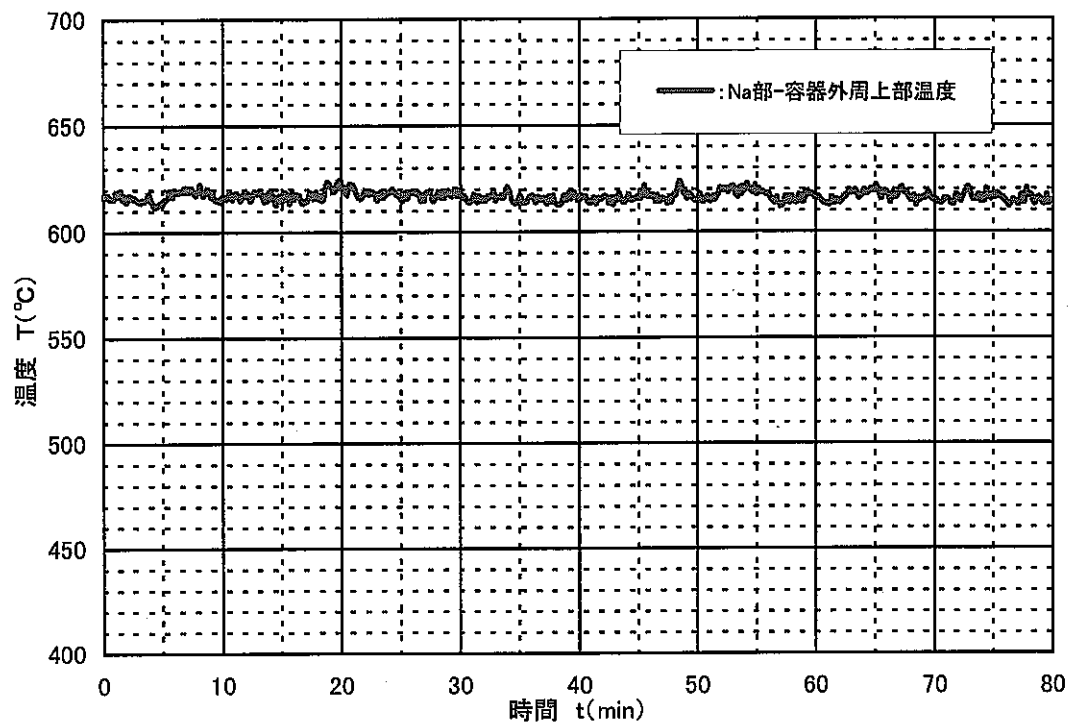


(a) Na温度

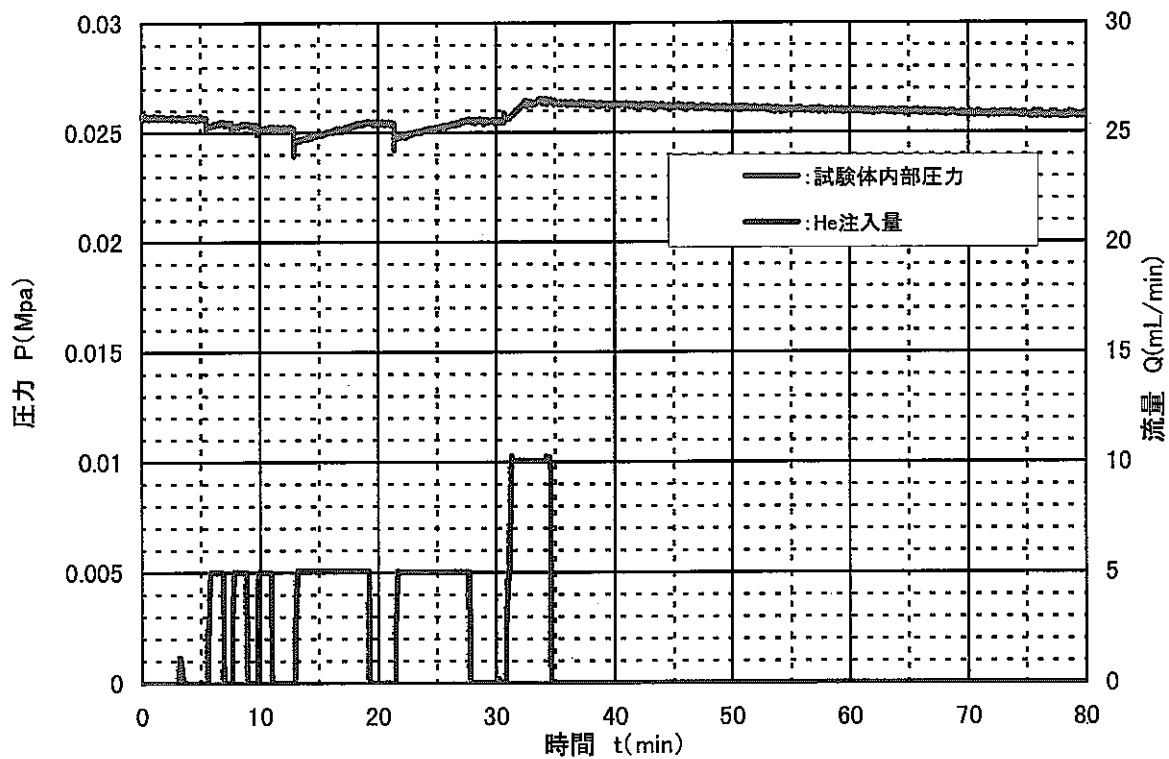


(b) 試験体圧力およびHe注入量

図3.3.1-11 試験体No.1 (Na650°C-He注入1セット目)

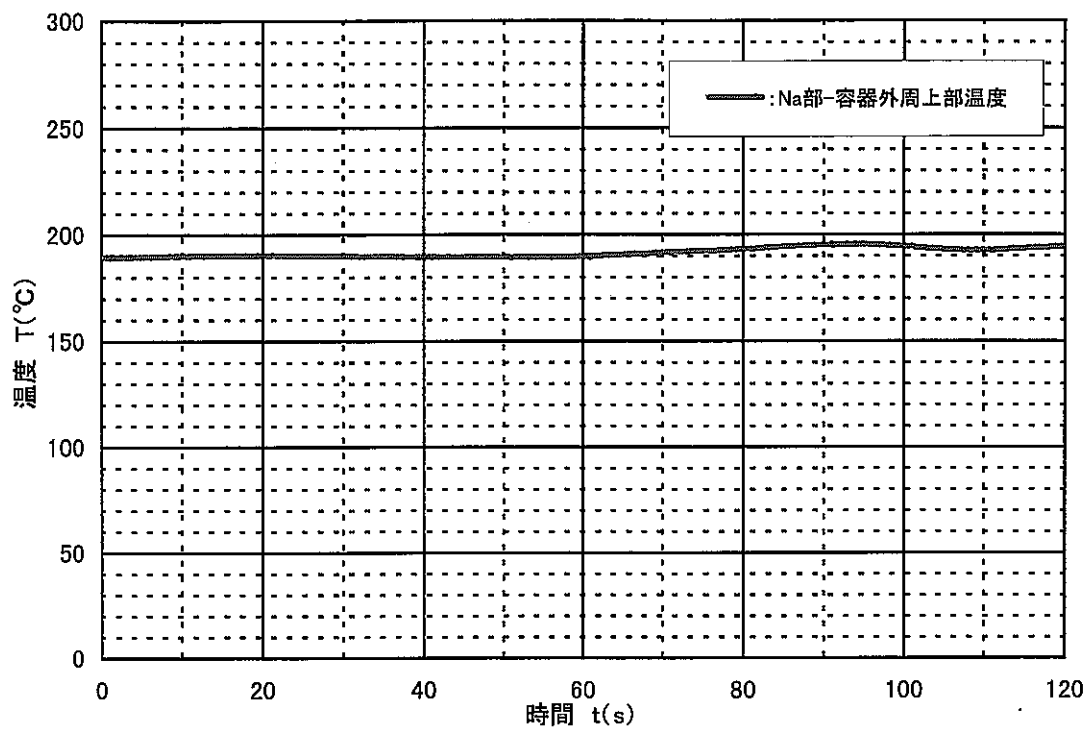


(a) Na温度

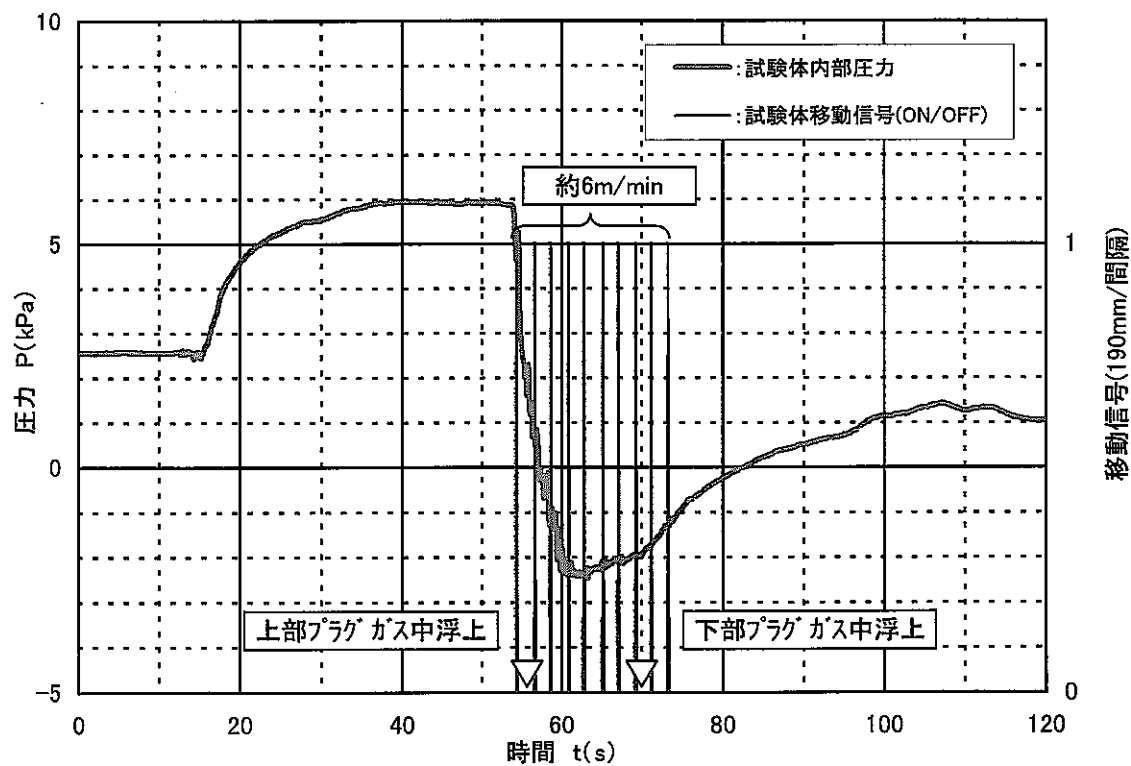


(b) 試験体圧力およびHe注入量

図3.3.1-12 試験体No.1 (Na650°C-He注入2セット目)

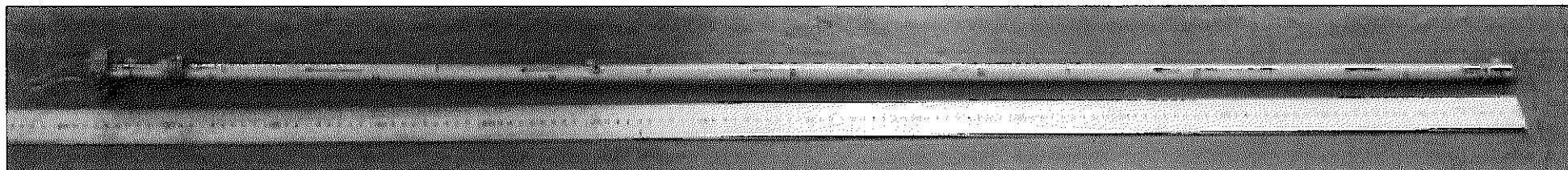


(a) Na温度

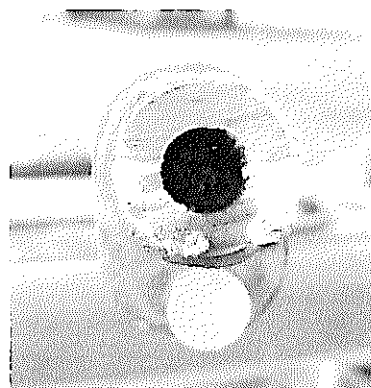


(b) 試験体圧力および引抜移動信号

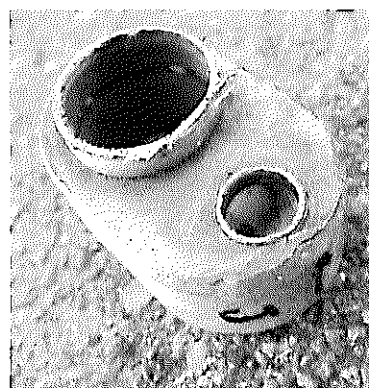
図3.3.1-13 試験体No.1(190°CNa中→Ar引抜)



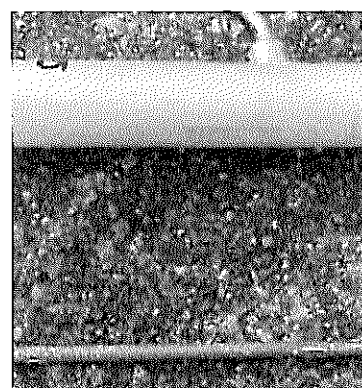
試験体全体



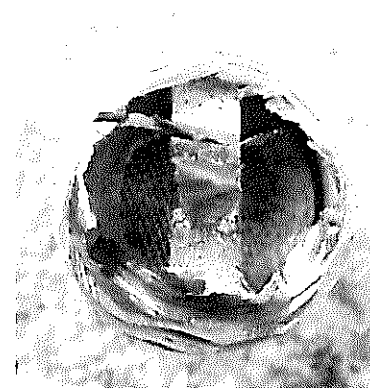
上部プラグ（上視）



He導入管スペーサ（上視）



液面計付近（中軸）



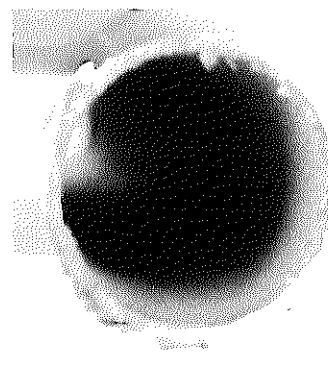
下部プラグ（上視）



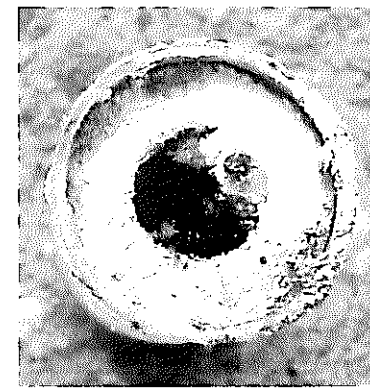
上部プラグ（下視）



He導入管スペーサ（下視）



液面計付近（内面）



下部プラグ（下視）

写真3.3.1-1 アルコール/水洗浄前 試験体分解調査（試験体No. 1）

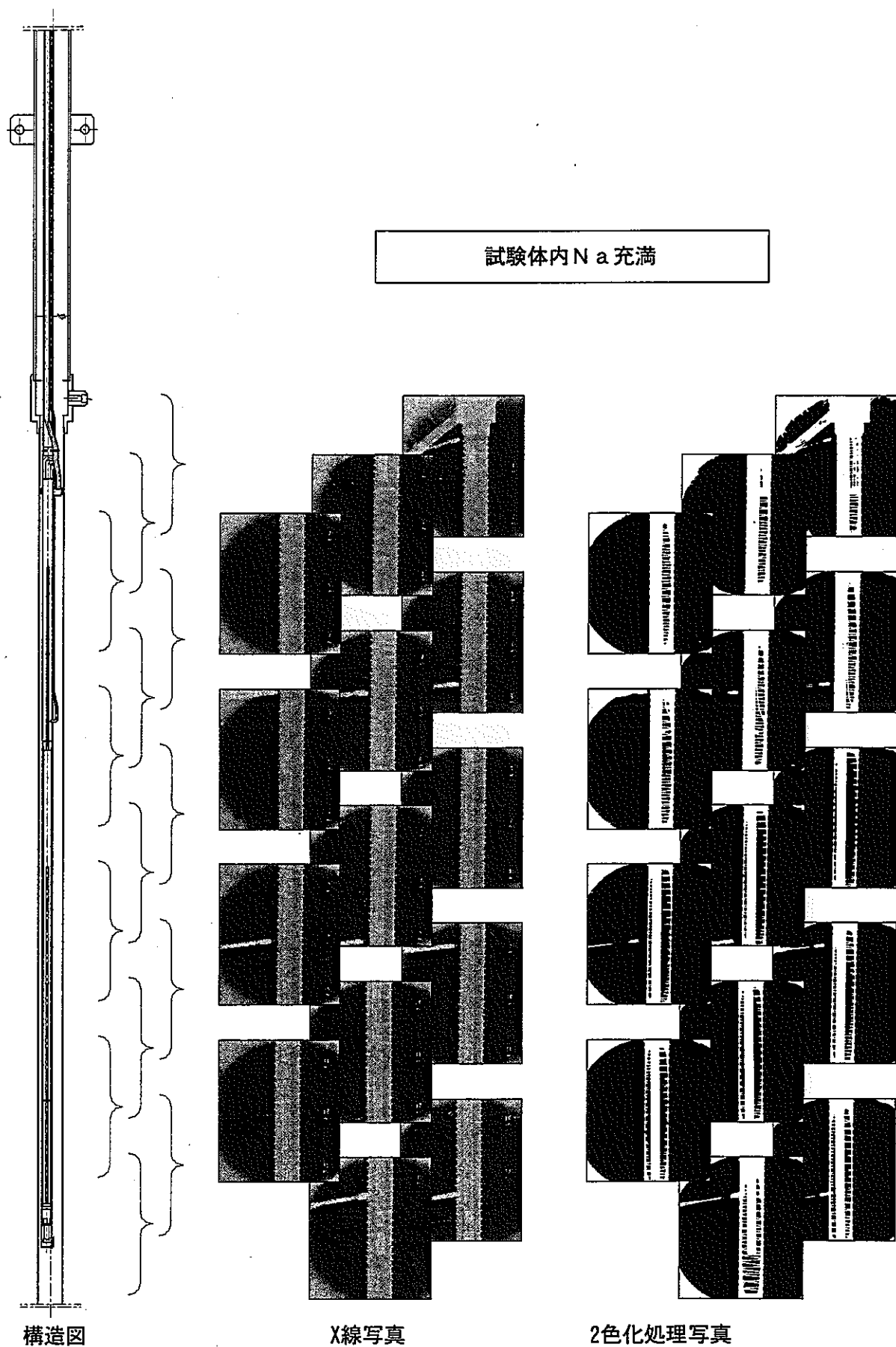


図3.3.2-1 試験体内ガスプレナム状態（試験体No. 3, Na190℃, 充填後）

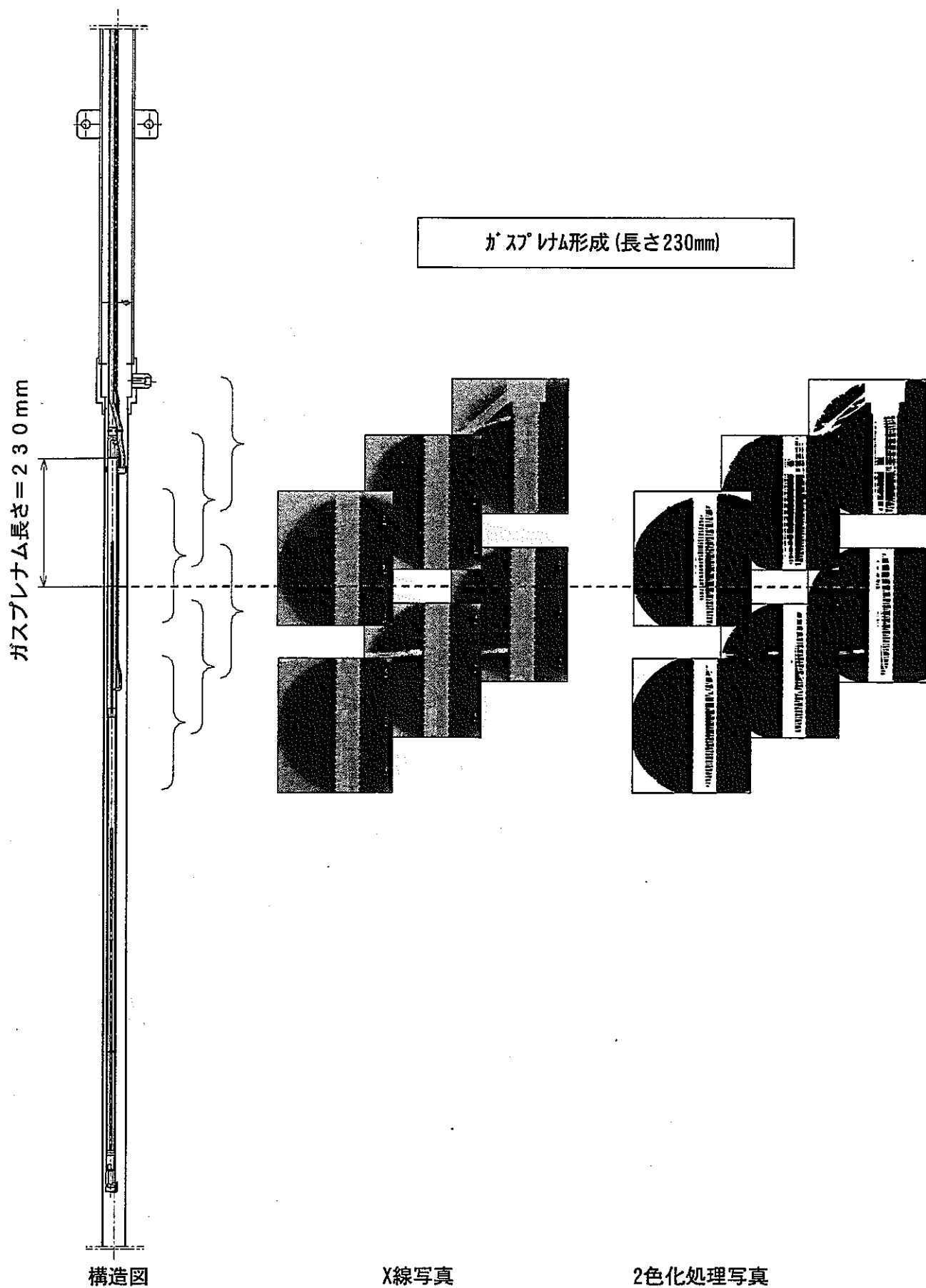


図3.3.2-2 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 3, Na650°C, He1セット注入後)

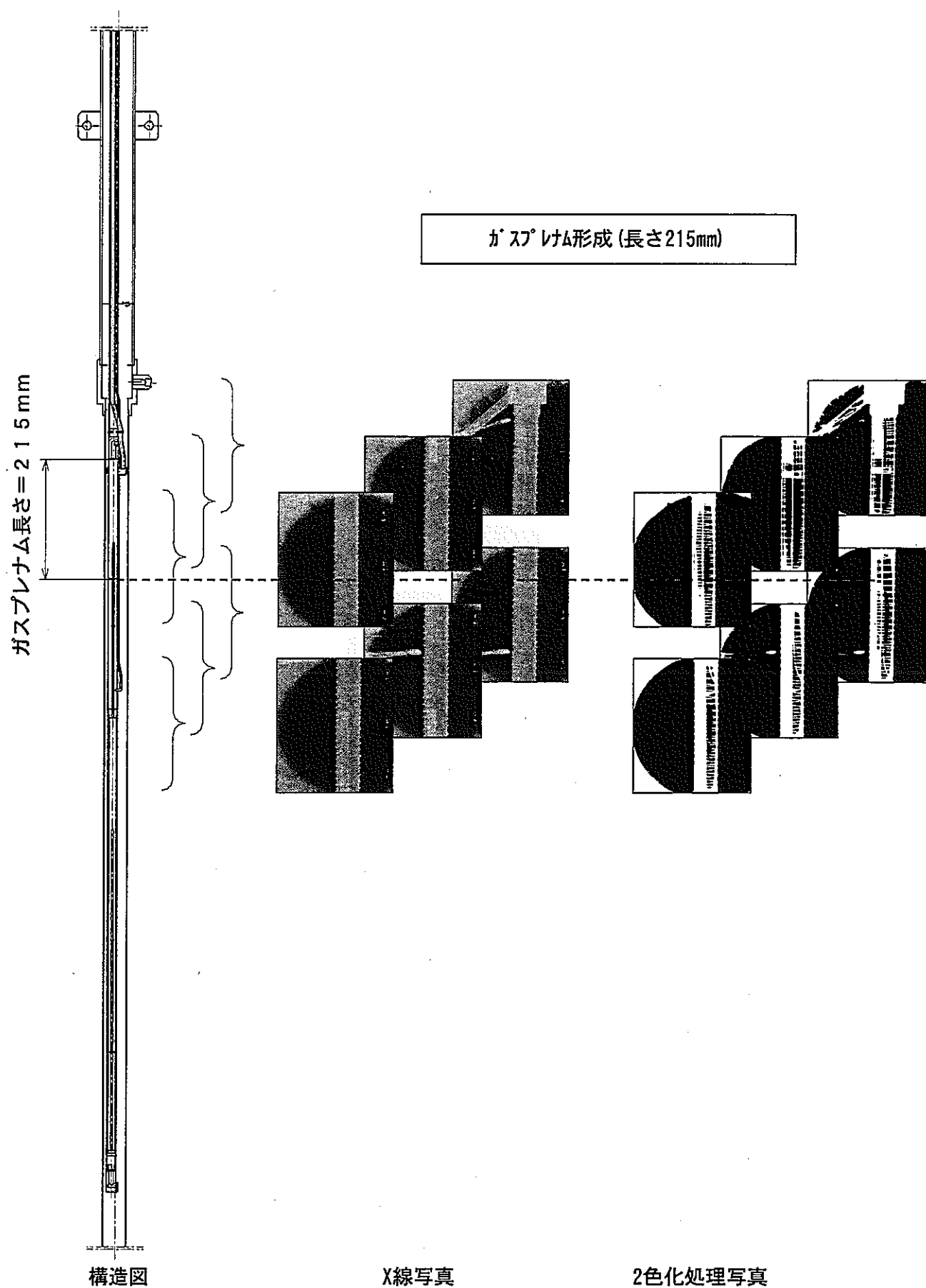


図3. 3. 2-3 試験体内ガスブレナム状態 (試験体No. 3, Na650°C, He2セット注入後)

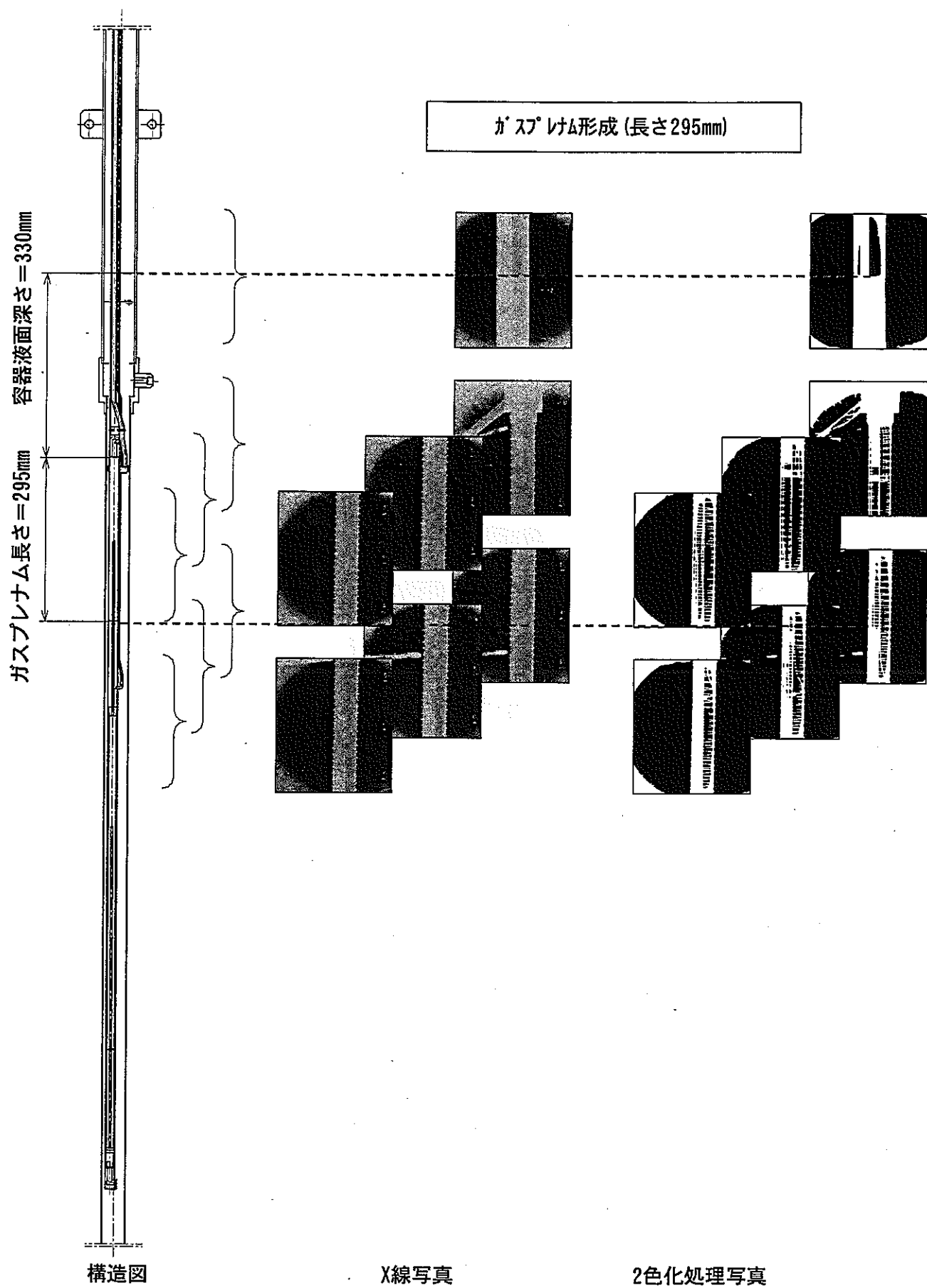
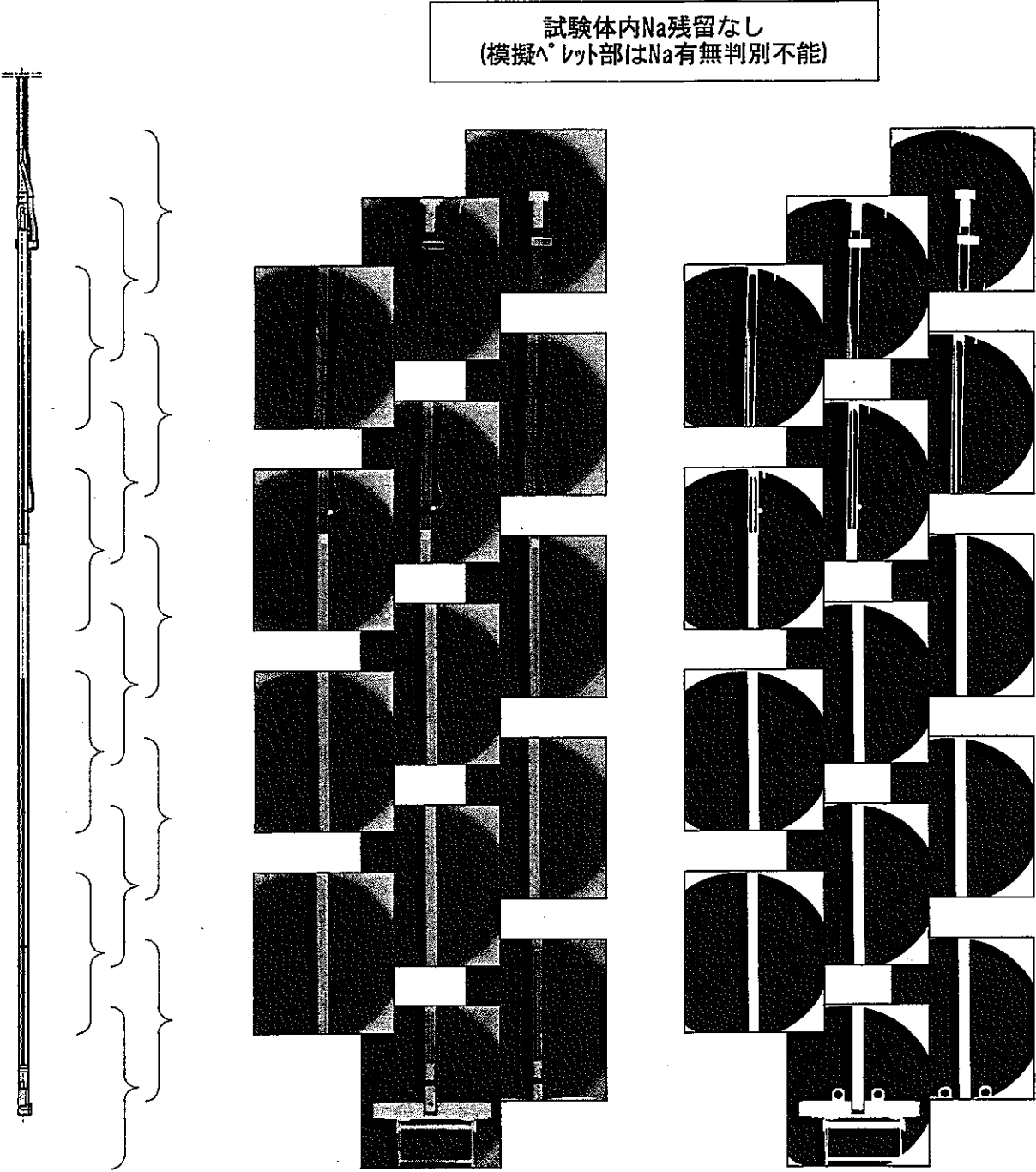


図3. 3. 2-4 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 3, Na190℃, He1セット注入後)

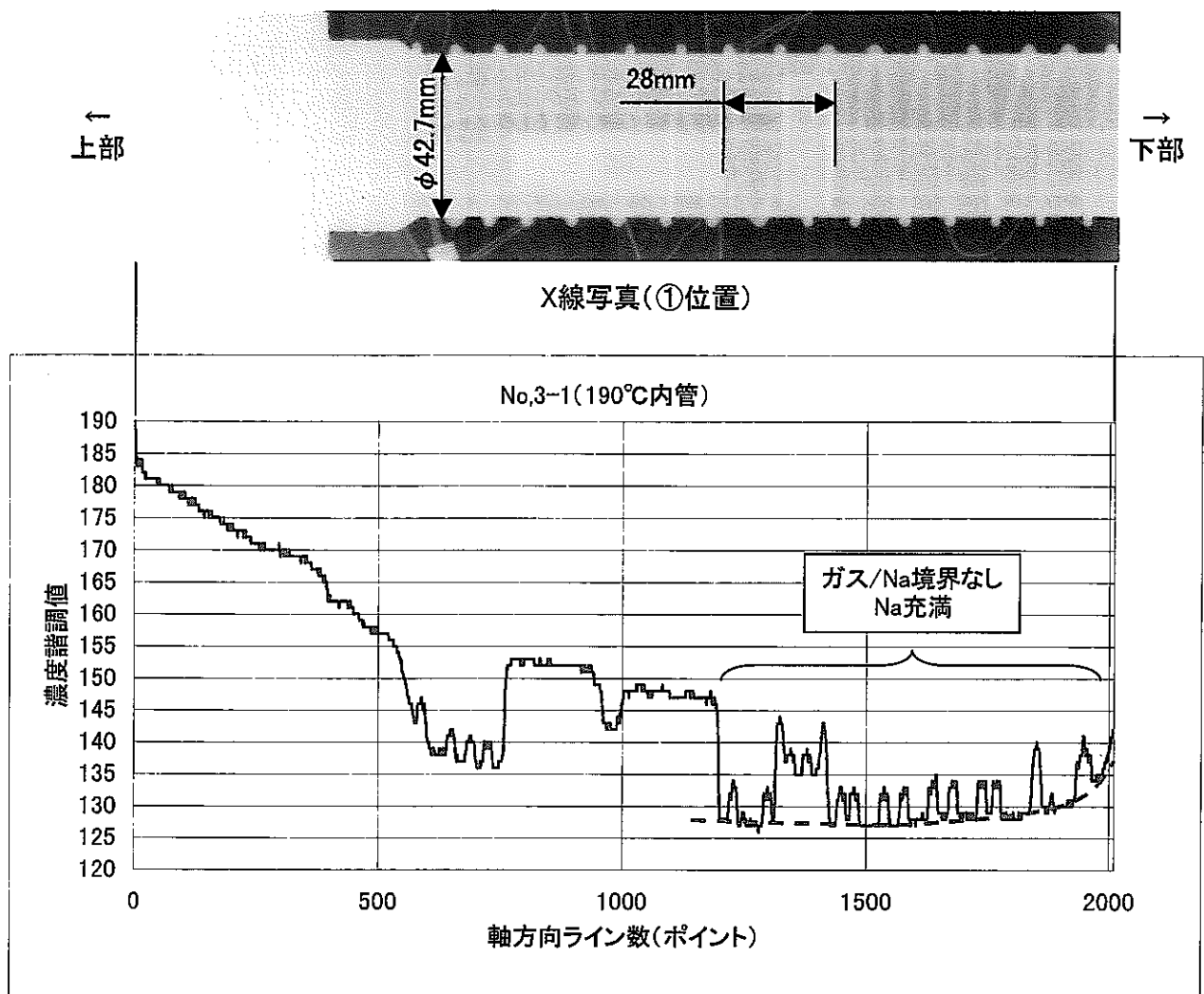


構造図

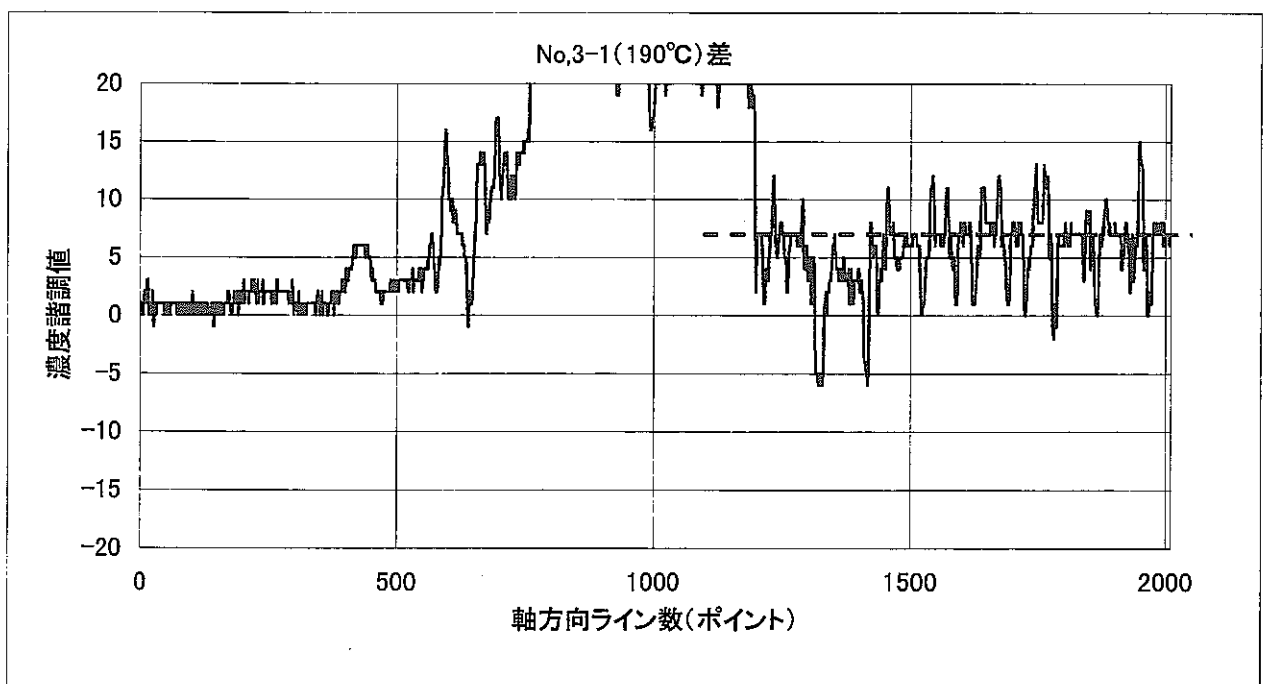
X線写真

2色化处理写真

図3. 3. 2-5 試験体内ガスプレナム状態（試験体No. 3, 引抜後）

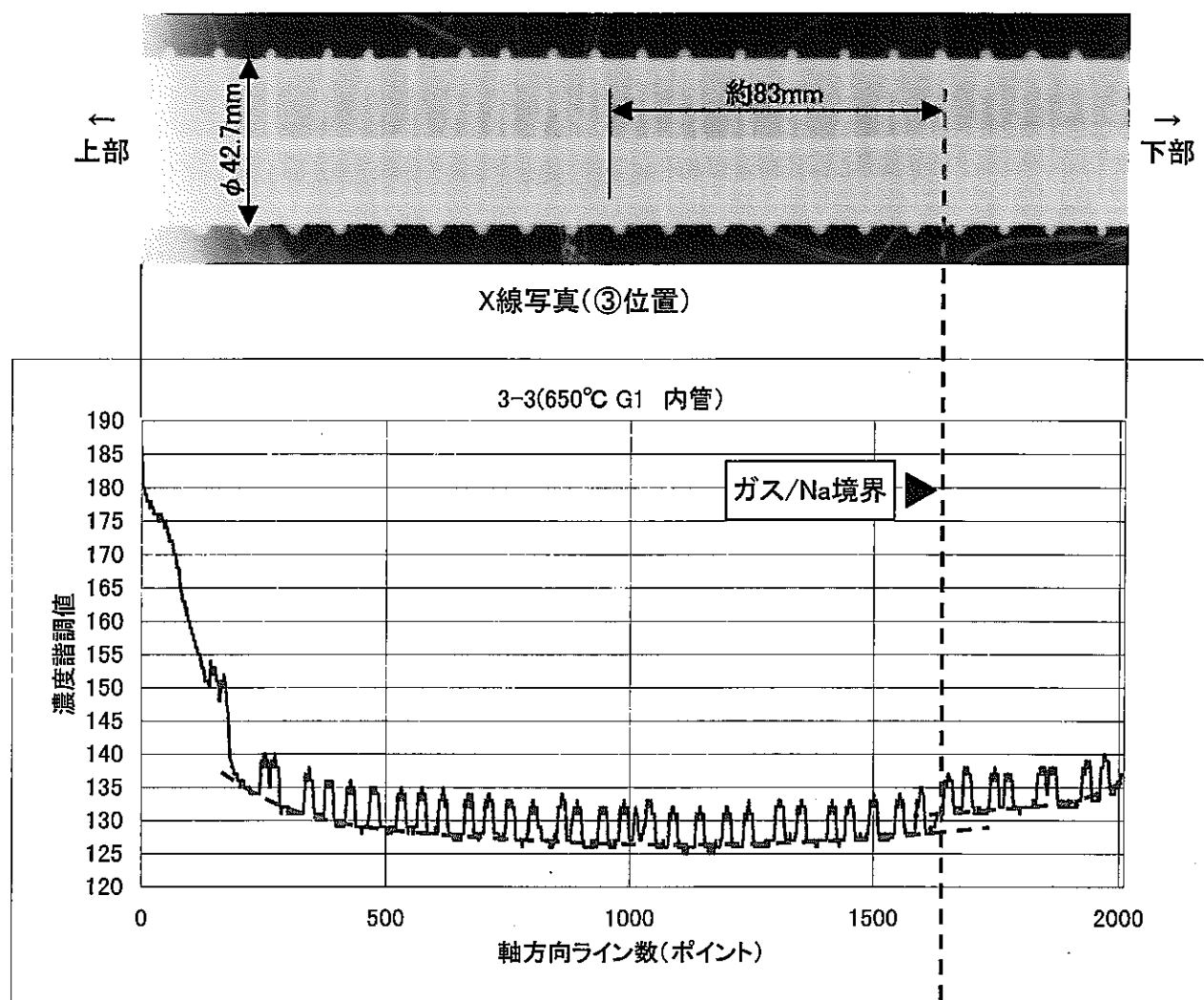


(1)内部管濃度評価

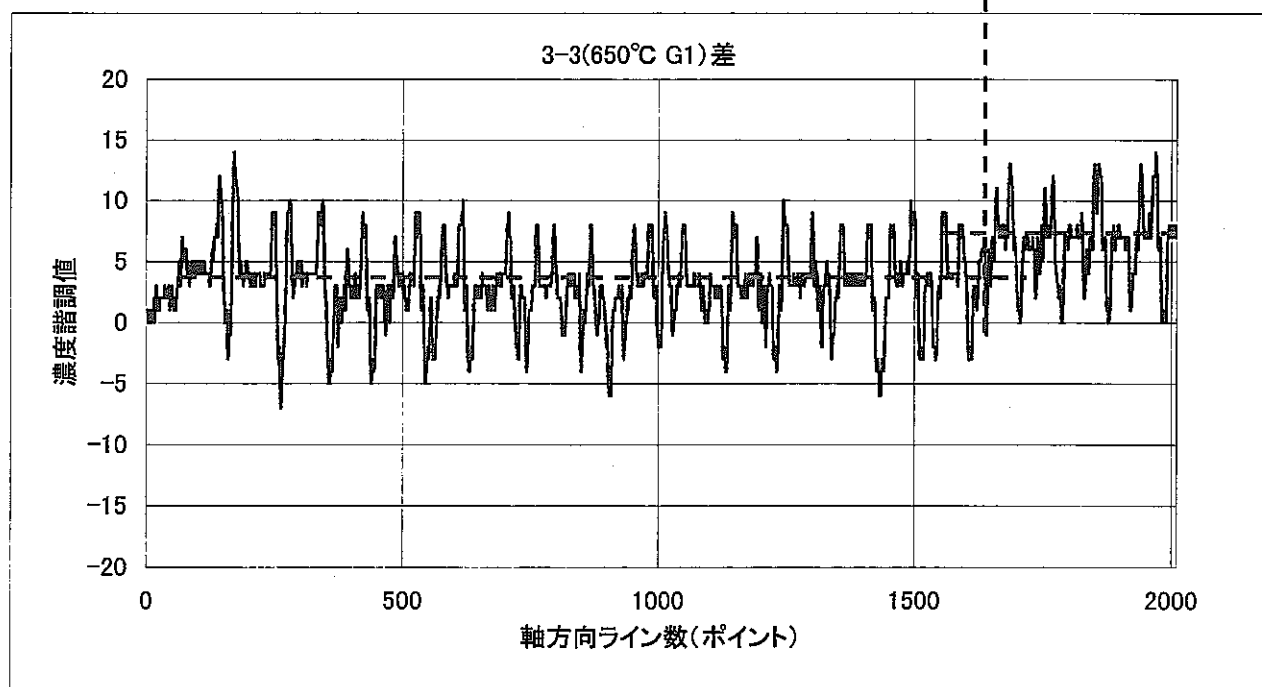


(2)差分濃度評価

図3.3.2-6 X線撮影データ評価結果(試験体No.3, Na190°C, Na充填後)



(1)内部管濃度評価



(2)差分濃度評価

図3.3.2-7 X線撮影データ評価結果(試験体No.3, Na650°C, He1セット注入後)

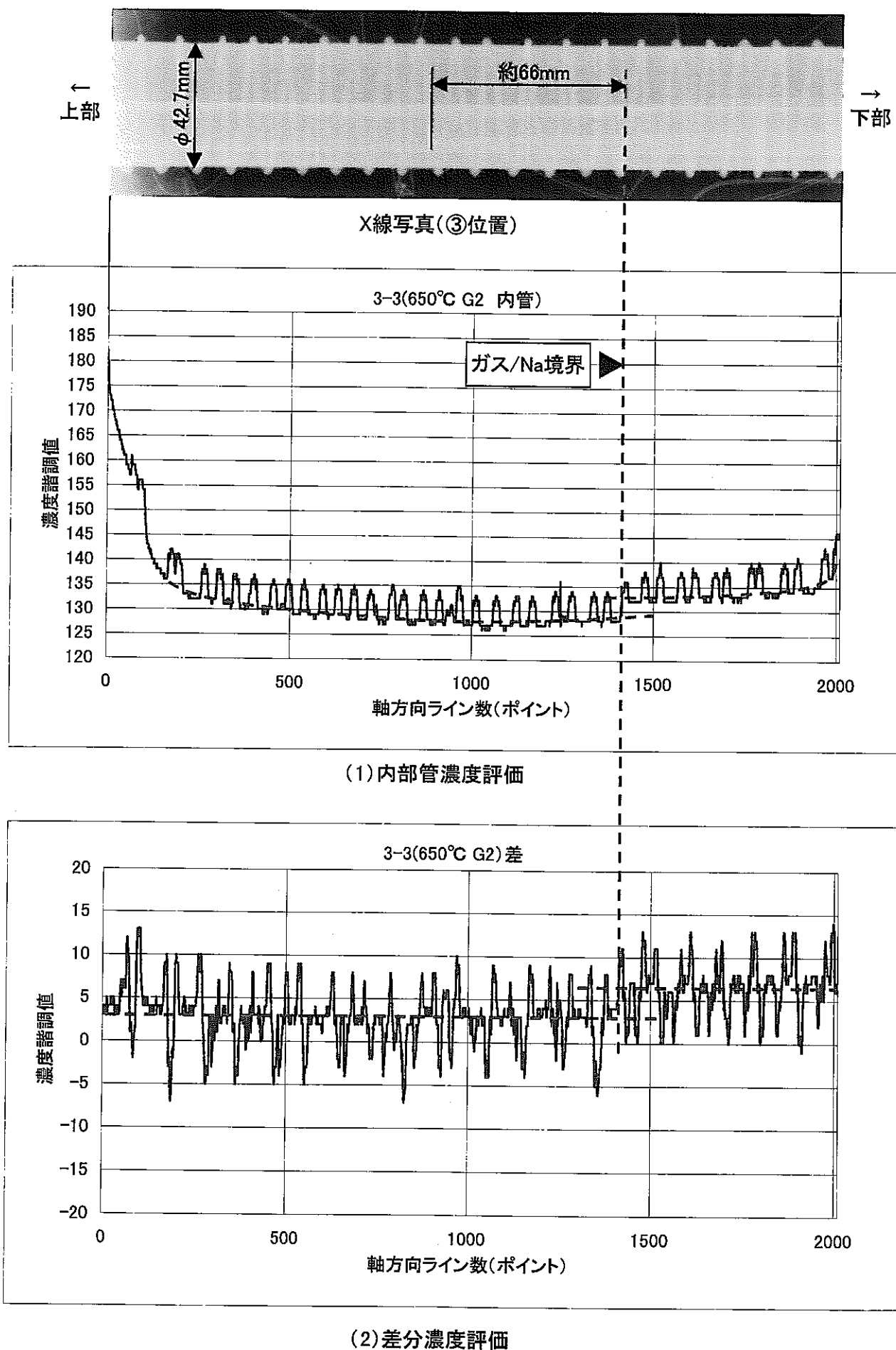
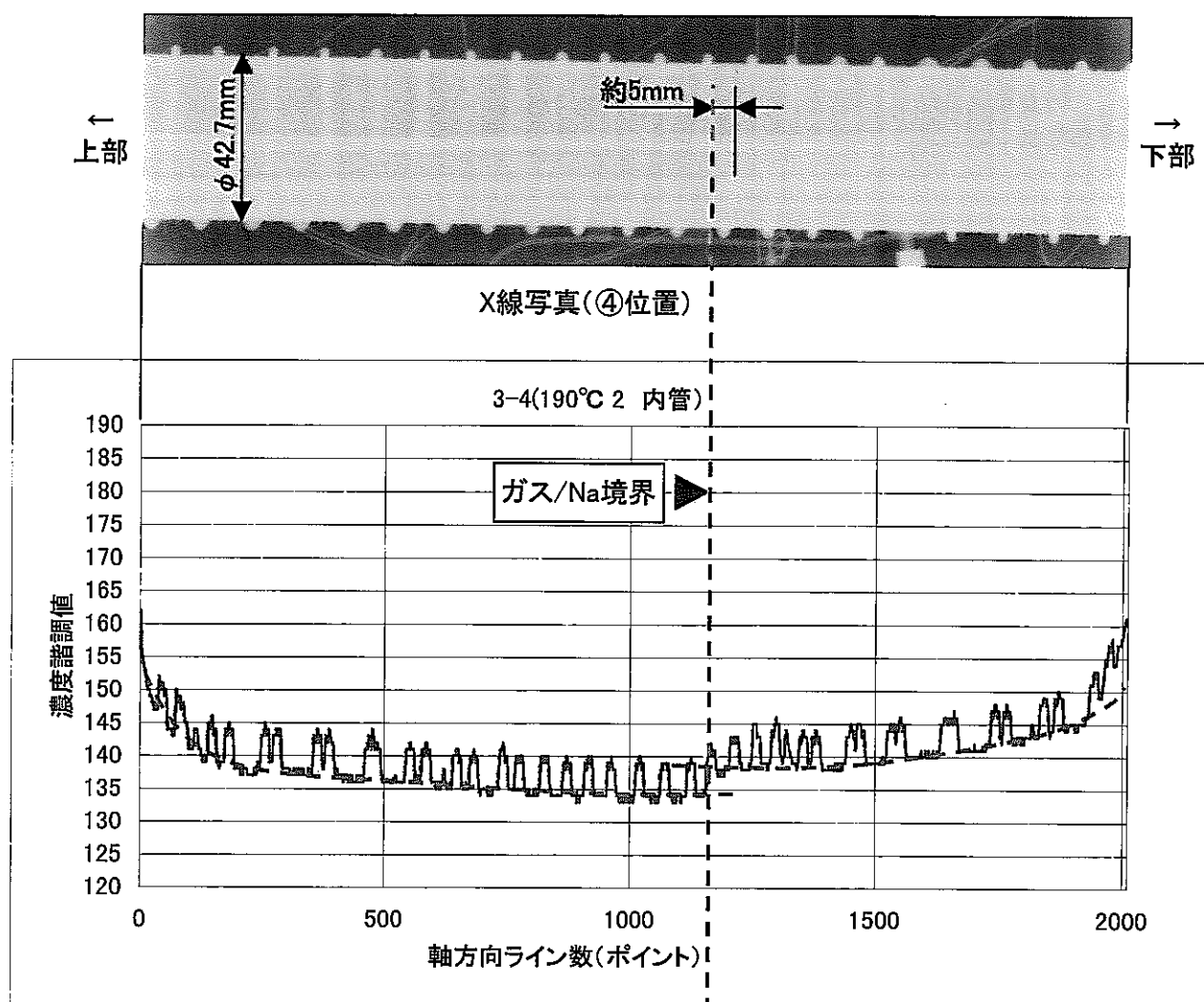
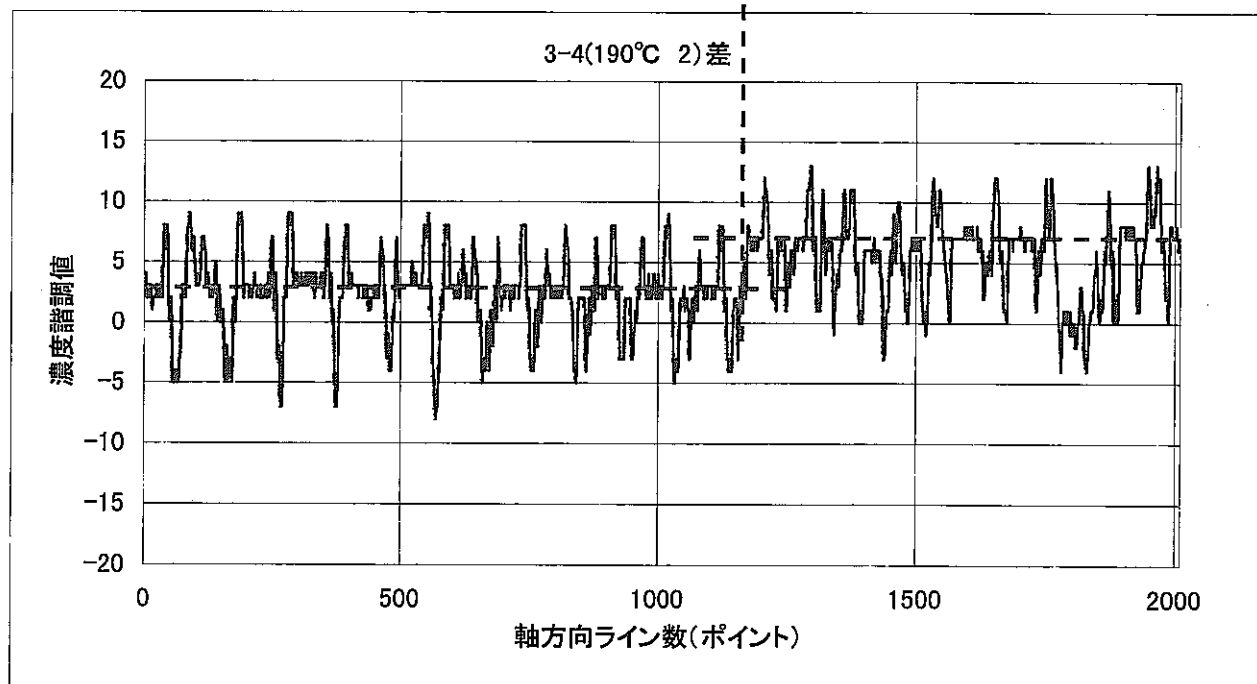


図3.3.2-8 X線撮影データ評価結果(試験体No.3, Na650°C, He2セット注入後)

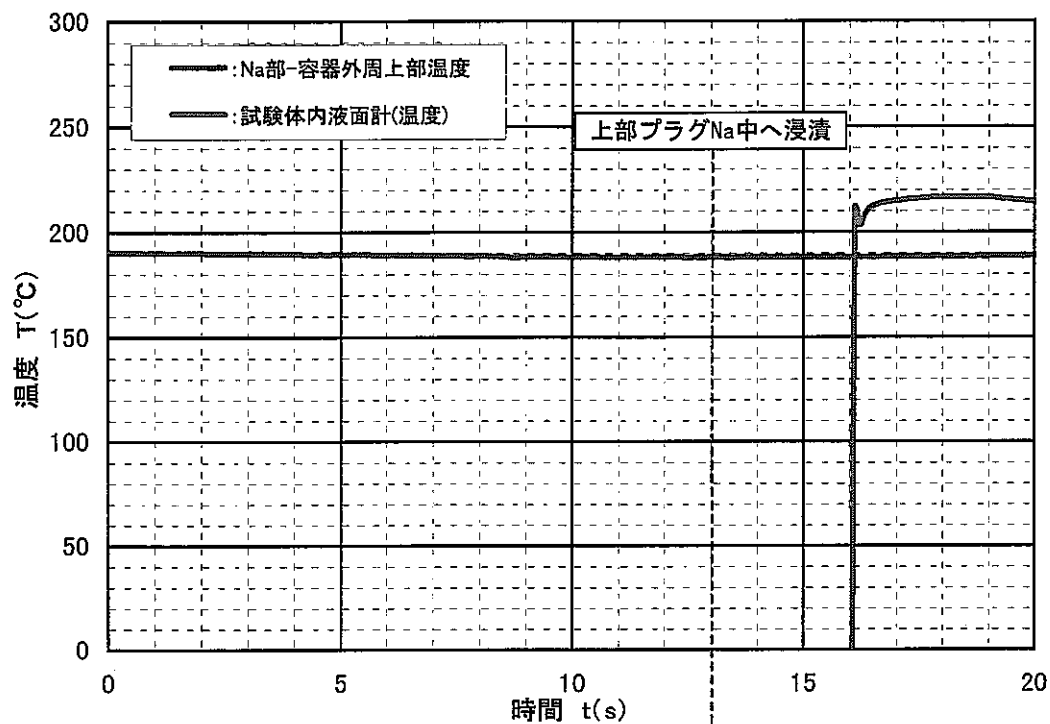


(1) 内部管濃度評価

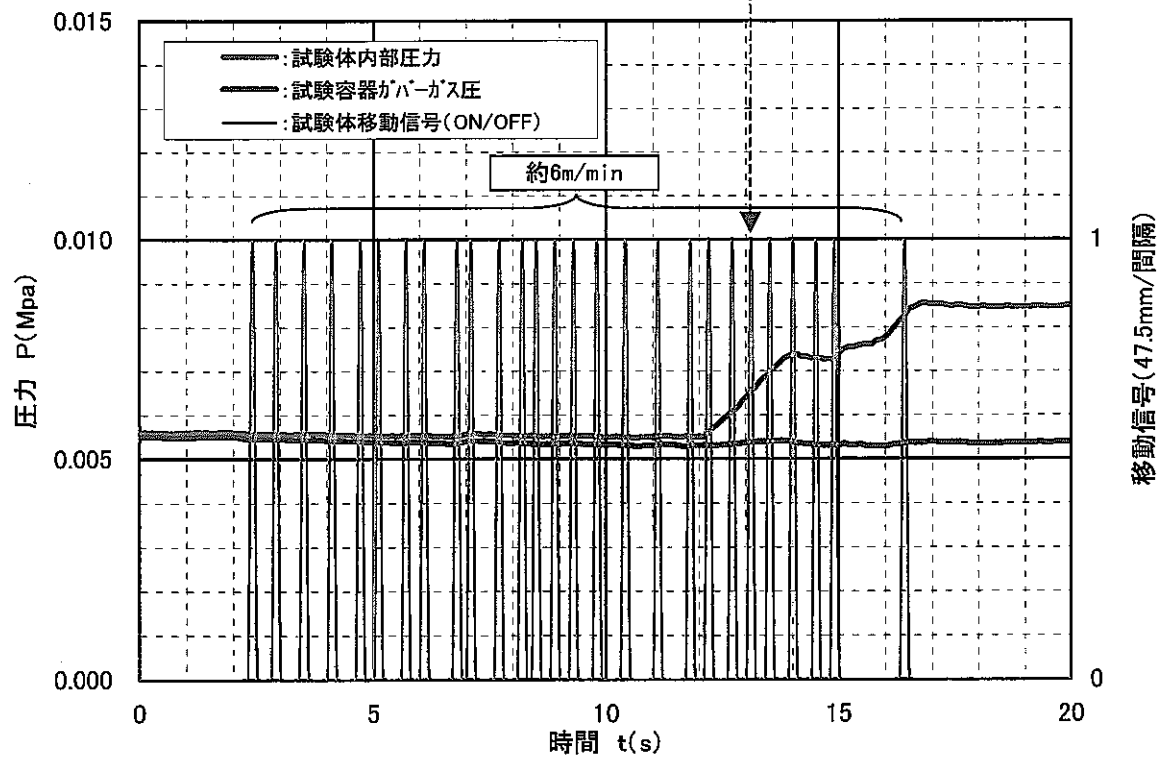


(2) 差分濃度評価

図3.3.2-9 X線撮影データ評価結果(試験体No.3, Na190°C, He1セット注入後)

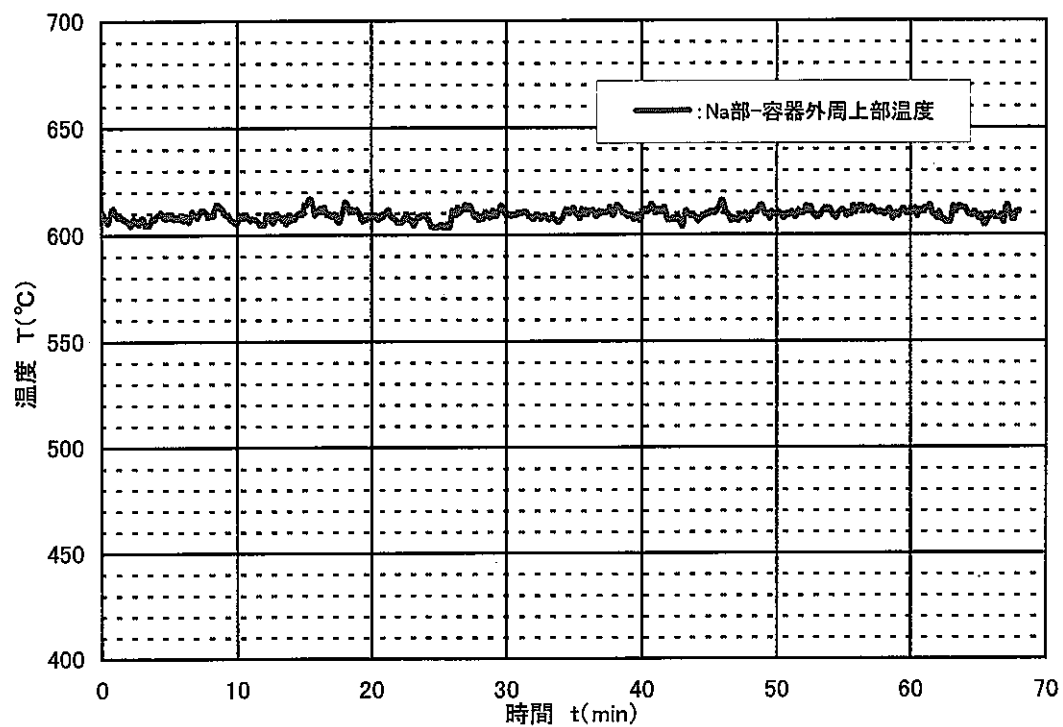


(a) Na温度および液面計信号(温度)

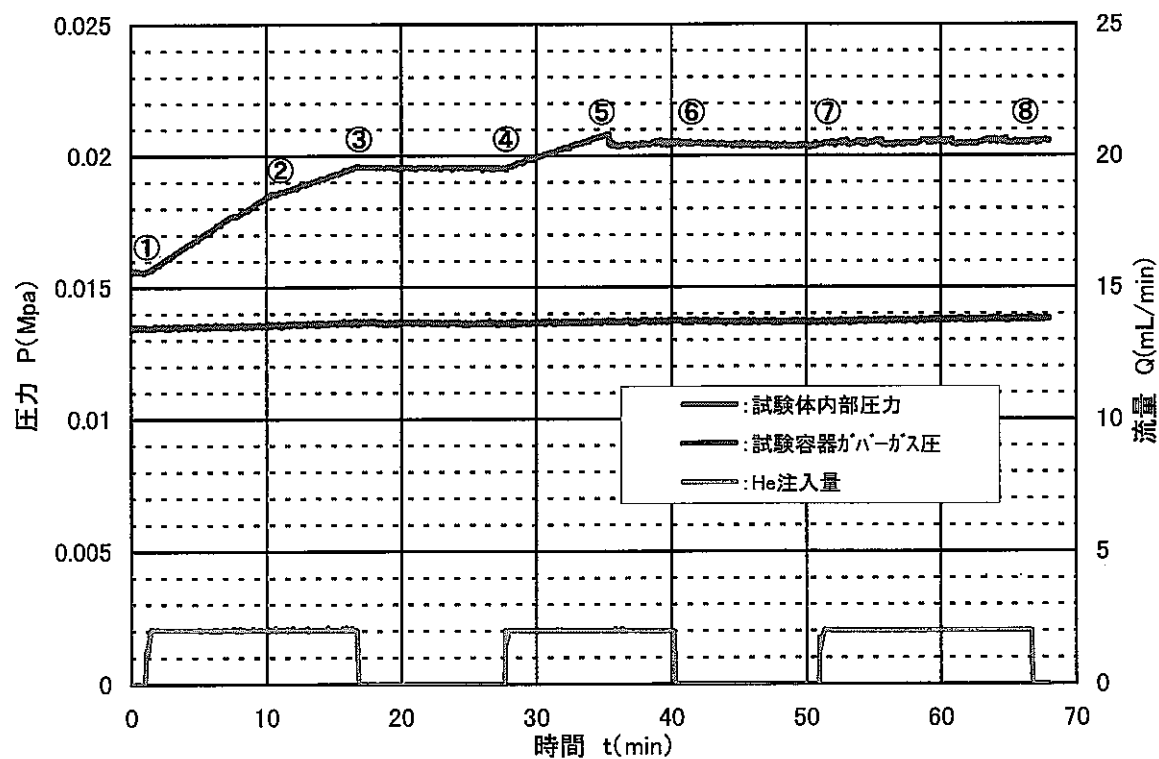


(b) 試験容器、試験体圧力および挿入移動信号

図3.3.2-10 試験体No.3(Ar→190°CNa中挿入)

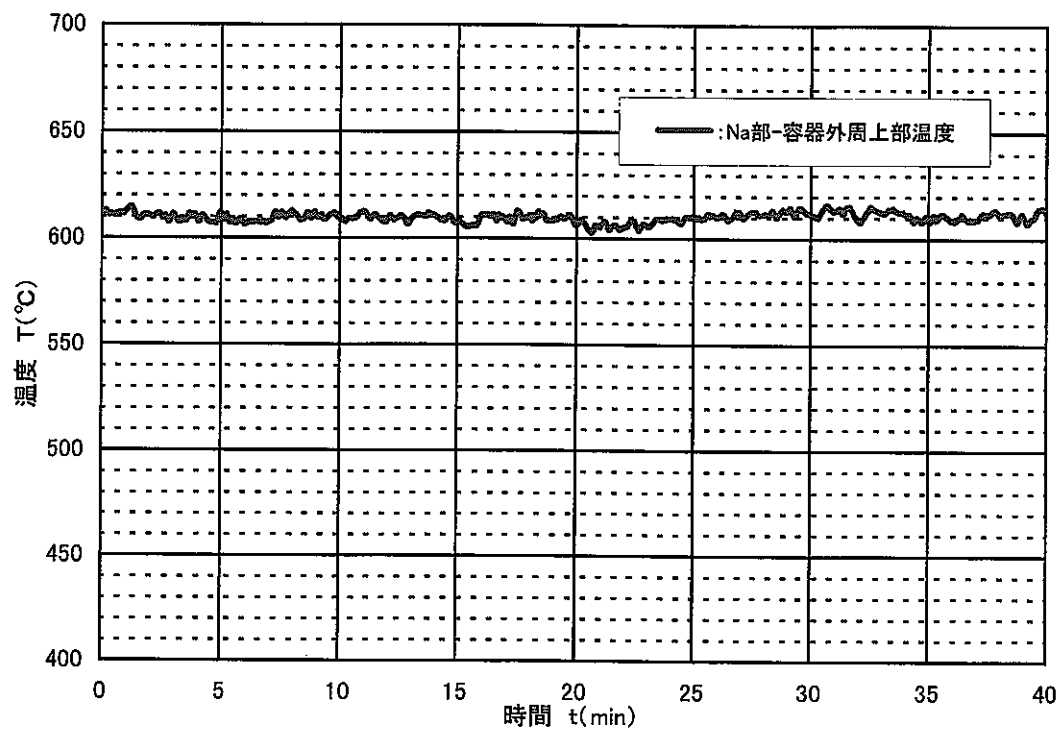


(a) Na温度

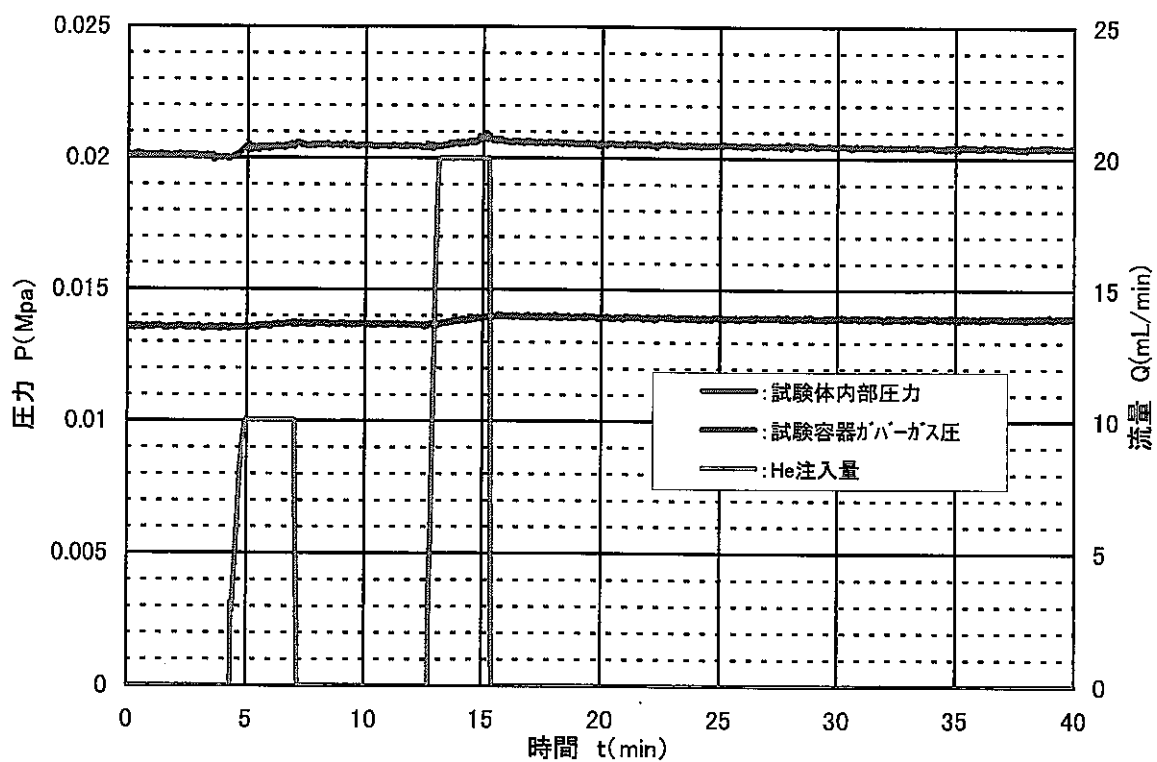


(b) 試験容器、試験体圧力およびHe注入量

図3.3.2-11 試験体No.3(Na650°C-He注入1セット目)

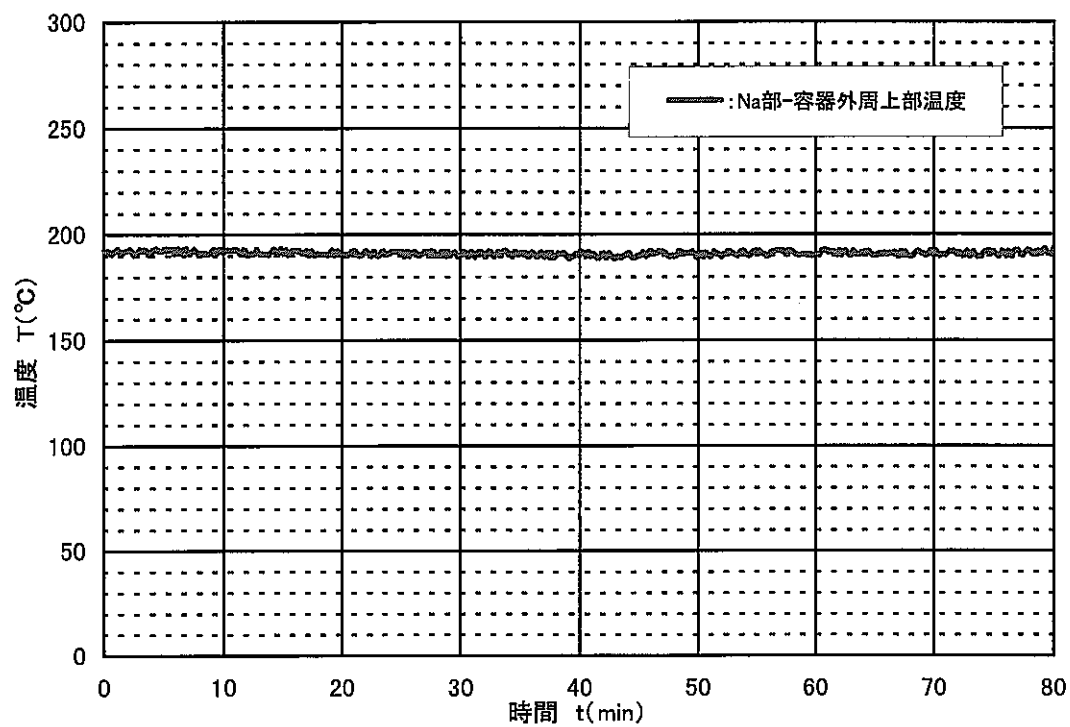


(a) Na温度

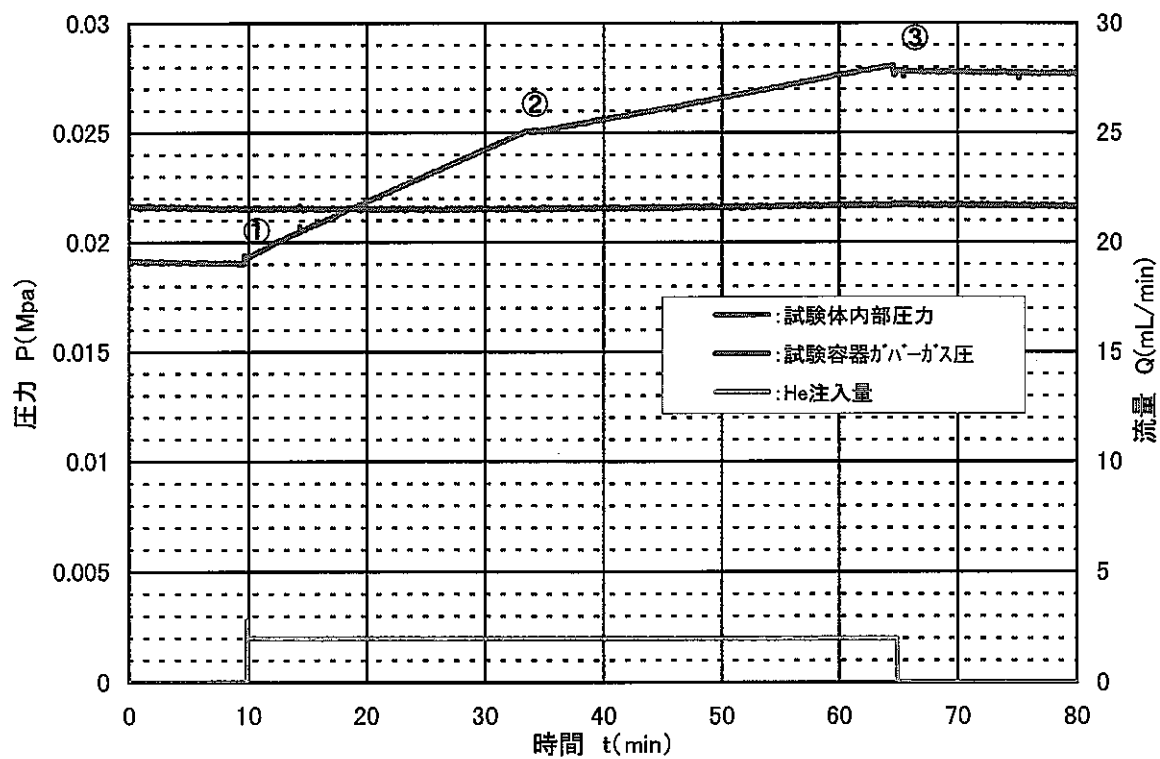


(b) 試験容器、試験体圧力およびHe注入量

図3.3.2-12 試験体No.3 (Na650°C-He注入2セット目)

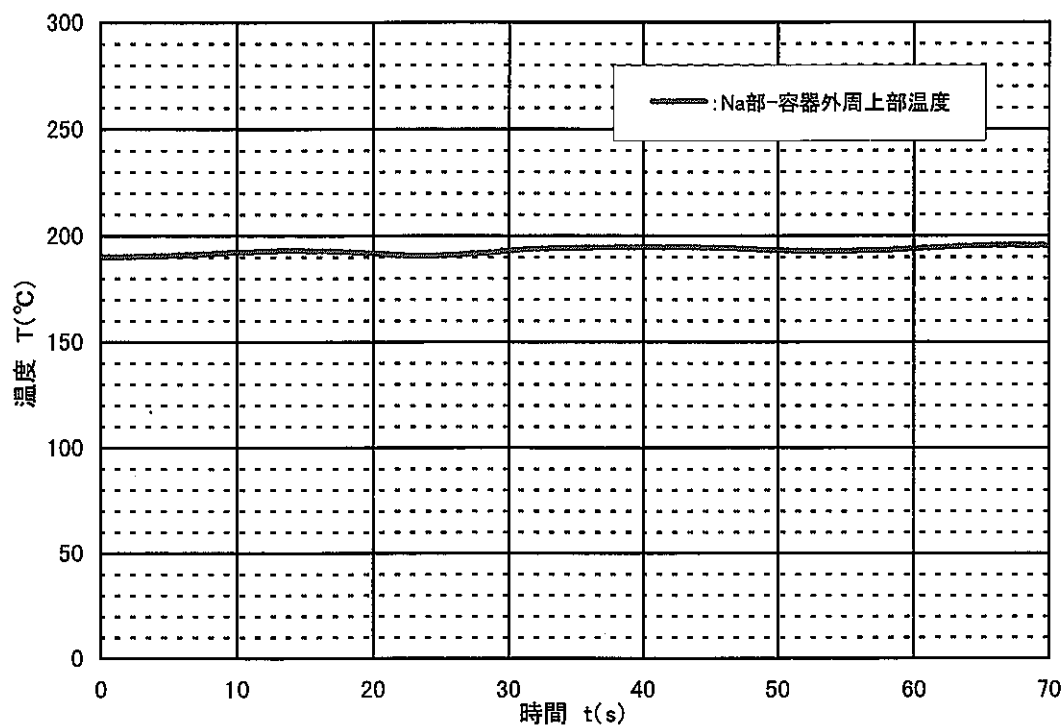


(a) Na温度

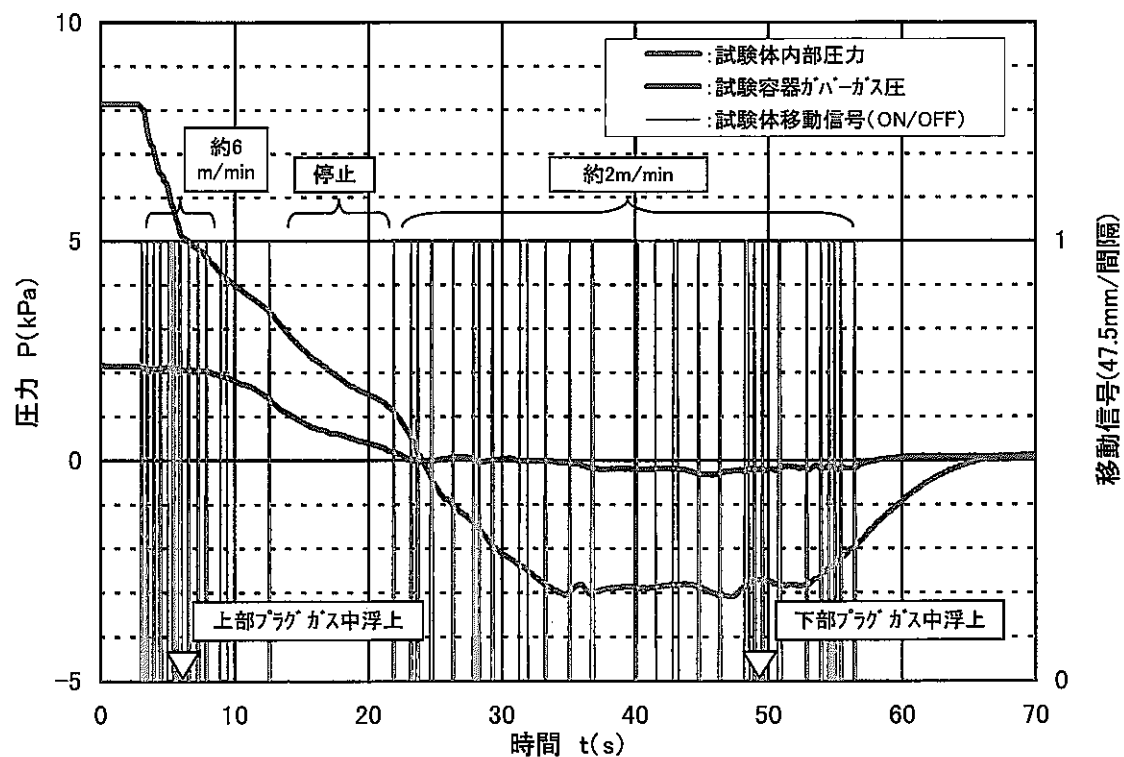


(b) 試験容器、試験体圧力およびHe注入量

図3.3.2-13 試験体No.3(Na190°C-He注入1セット目)

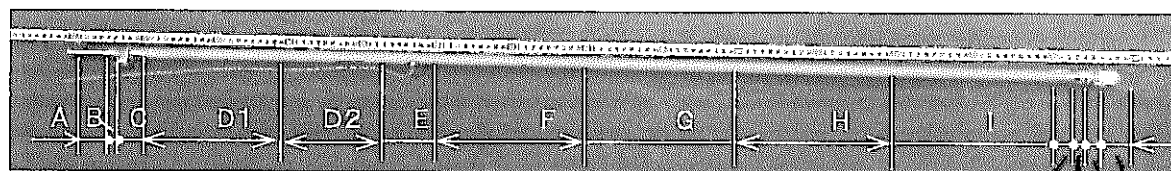


(a) Na温度



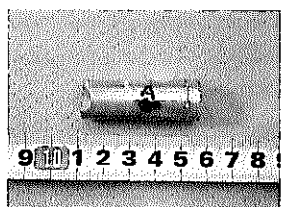
(b) 試験容器、試験体圧力および引抜移動信号

図3.3.2-14 試験体No.3(190°CNa中→Ar引抜)

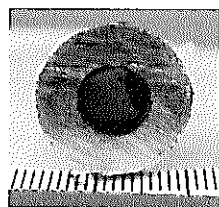


試験体全体

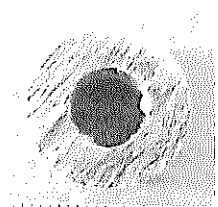
19 110 J K
スペーサ内Naあり



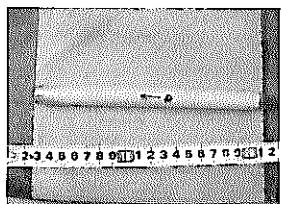
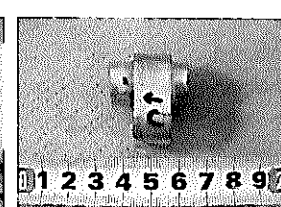
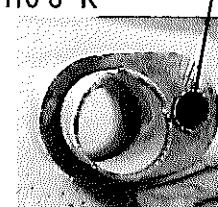
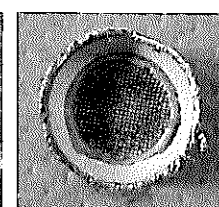
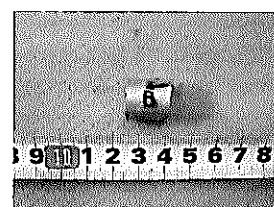
(A) φ8導入孔



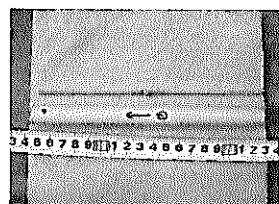
(B) 上部プラク



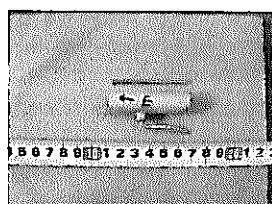
(C) He導入管スペーサ



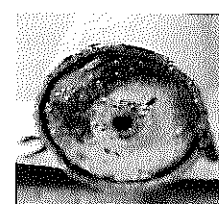
(D1) ガスプレナム上



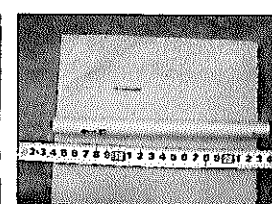
(D2) ガスプレナム下



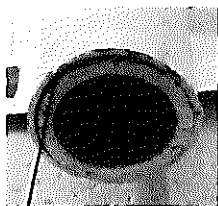
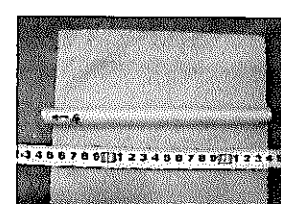
(E) 液面計付近



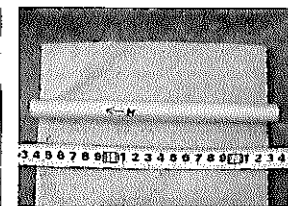
(F) 模擬プレート上端



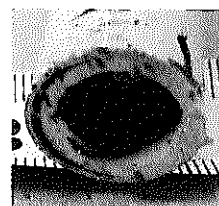
隙間Naあり (G) 模擬プレート上



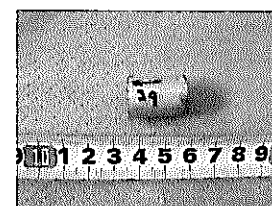
(H) 模擬プレート中



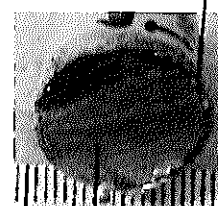
(I) 模擬プレート下



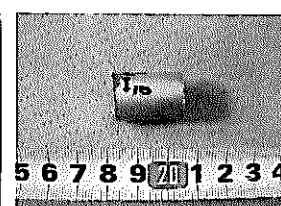
(19) 模擬プレート下



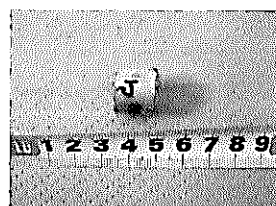
(110) 模擬プレート下部端栓



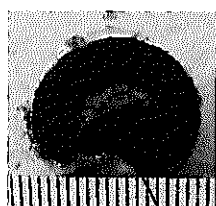
端栓断面



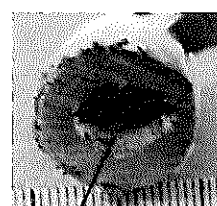
(K) φ8導入孔



(J) 下部プラク



Na



Na

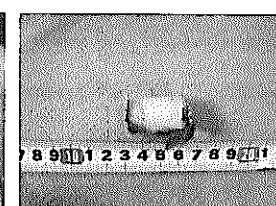


写真3.3.2-1 アルコール/水洗浄前 試験体分解調査 (試験体No. 3)

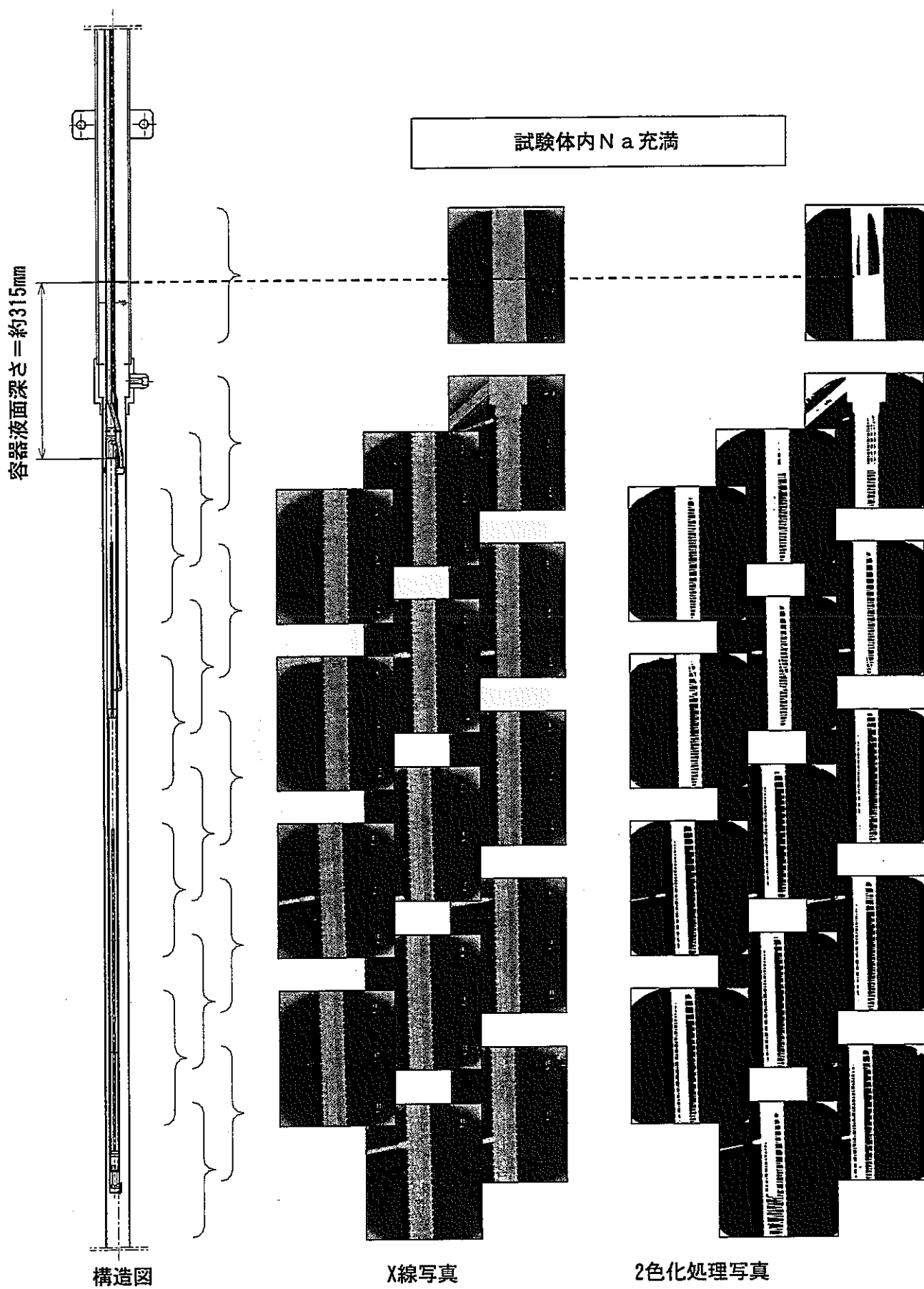


図3.3.3-1 試験体内ガスパレナム状態 (試験体No. 4, Na190°C, 充填後)

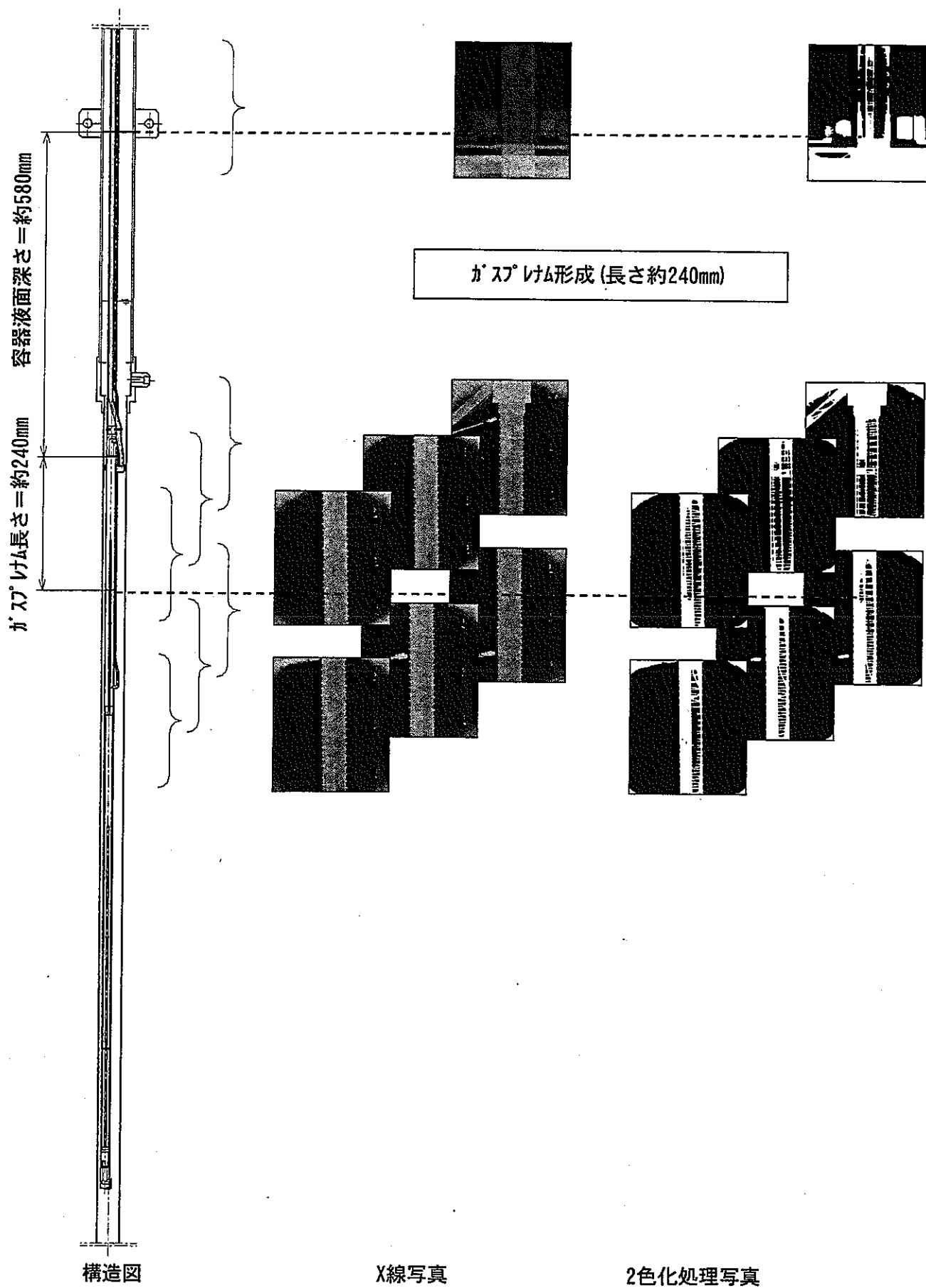


図3. 3. 3-2 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 4, Na650°C, He1セツト注入後)

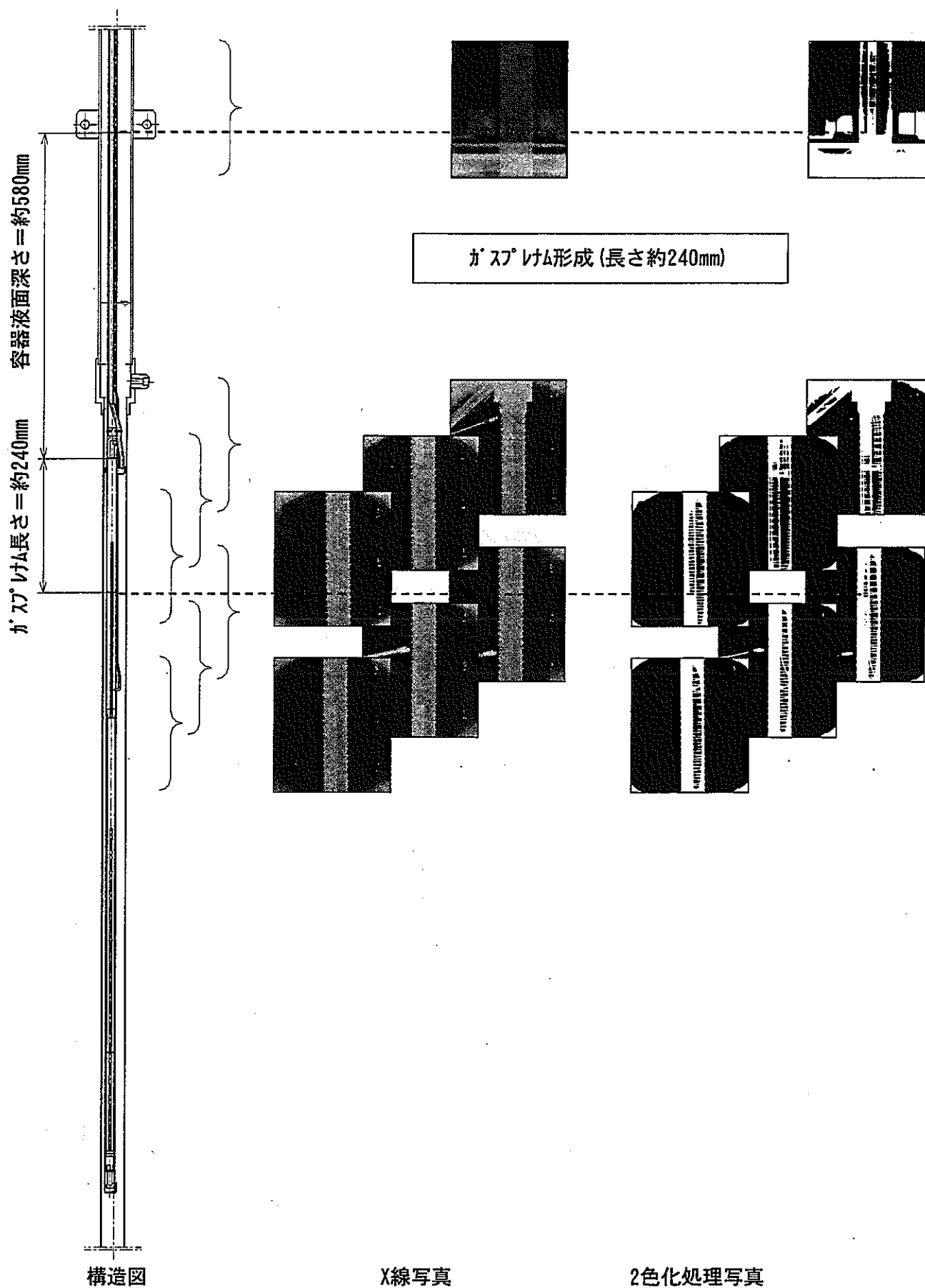


図3. 3. 3-3 試験体内ガスブレナム状態 (試験体No. 4, Na650°C, He2セット注入後)

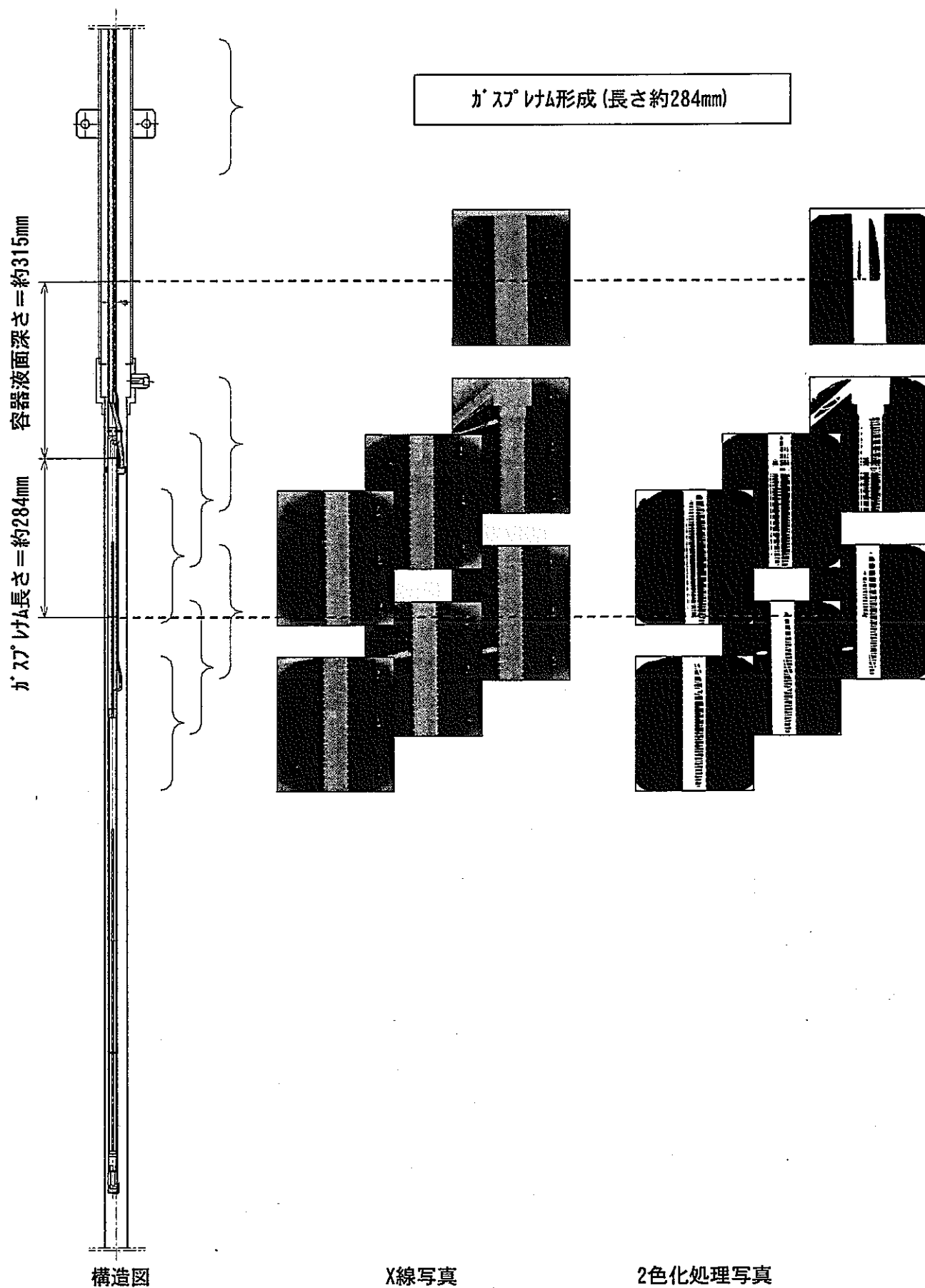
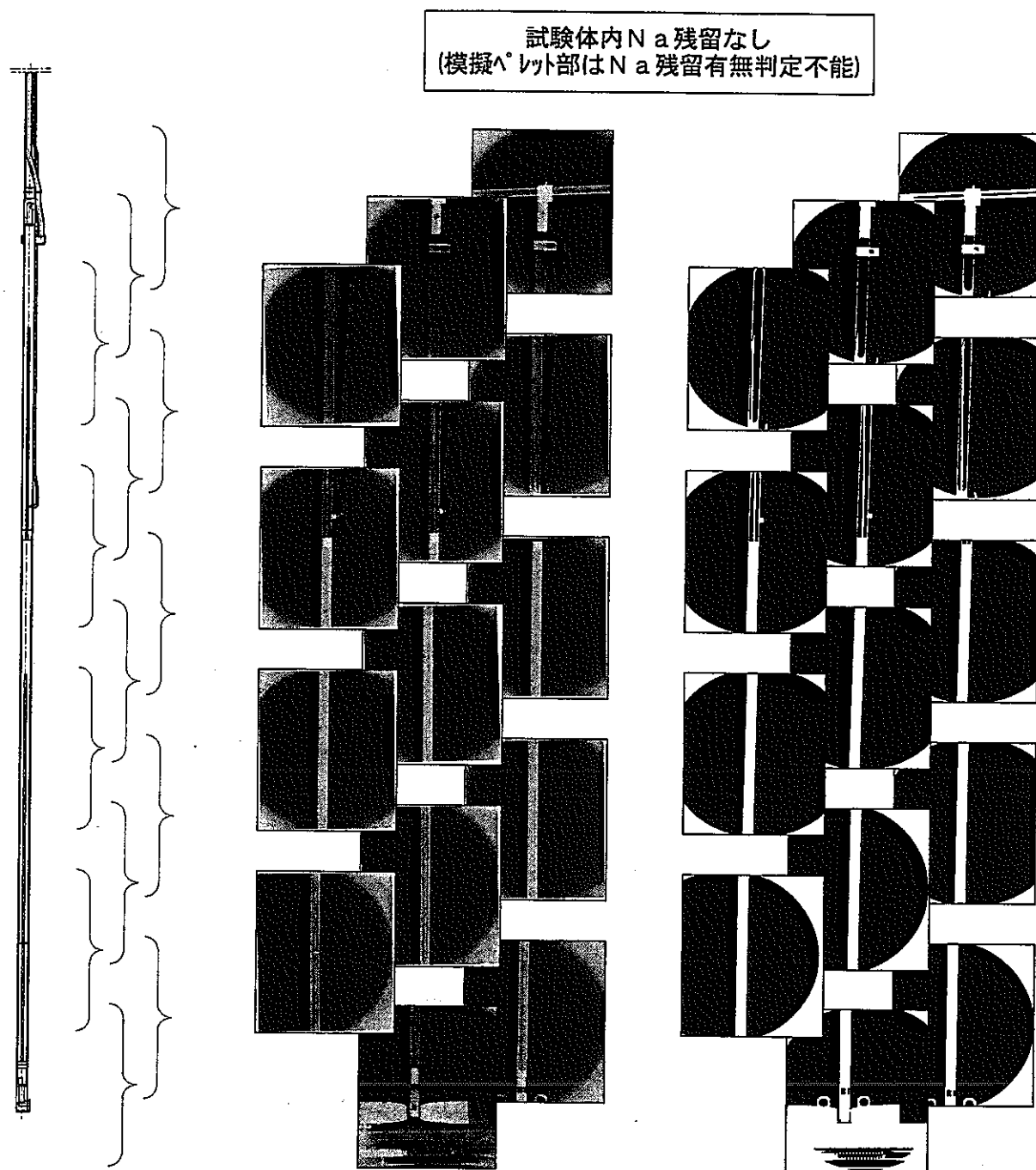


図3. 3. 3-4 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 4, Na190℃, He1セツト注入後)

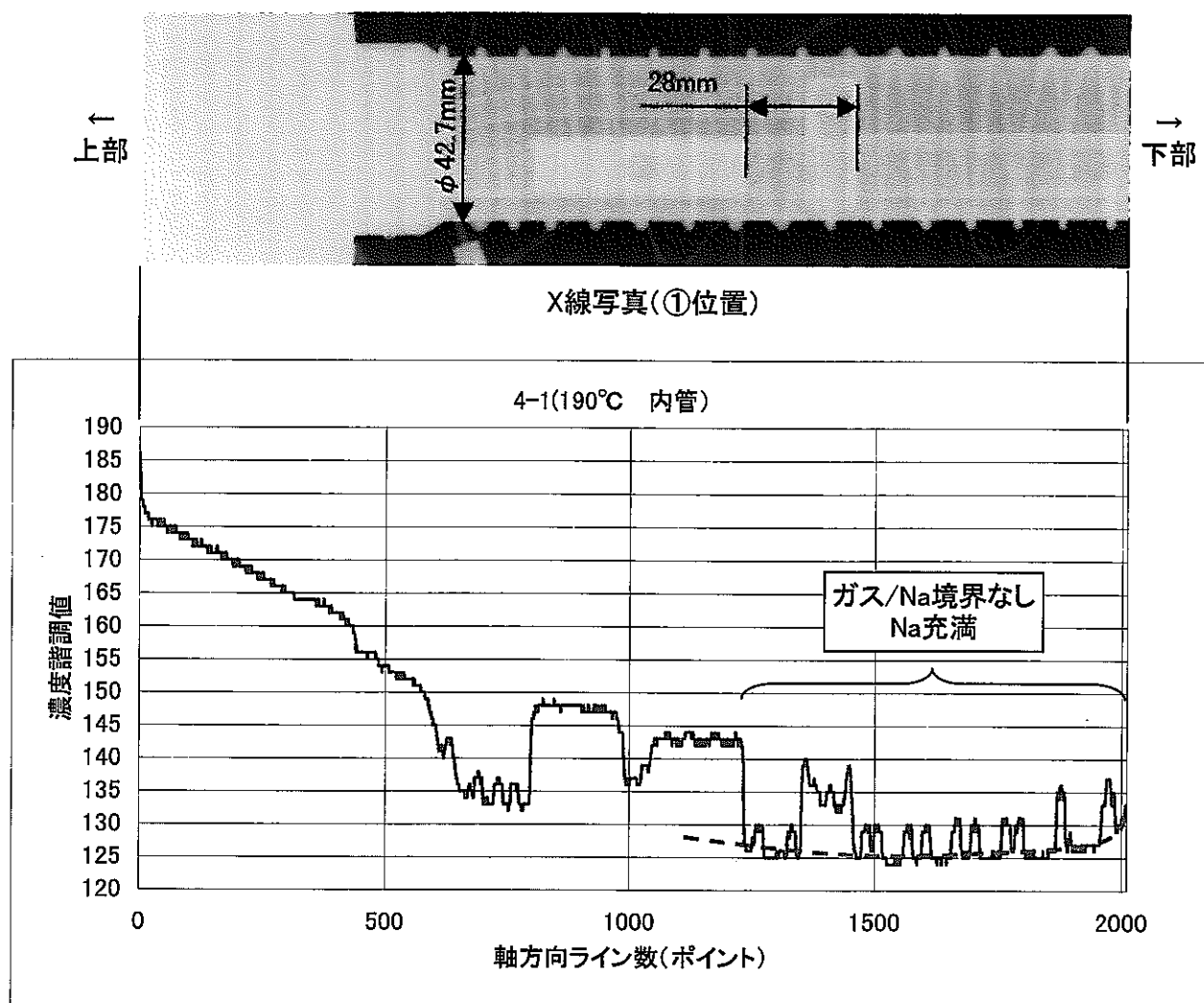


構造図

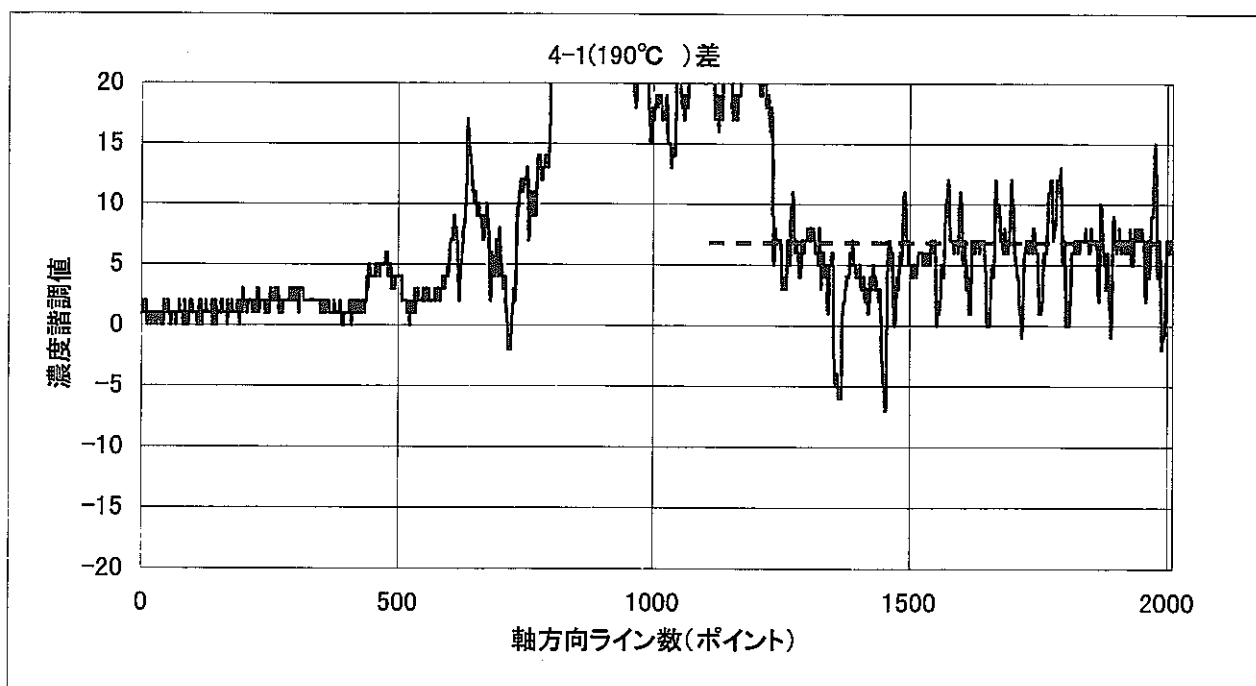
X線写真

2色化处理写真

図3. 3. 3-5 試験体内ガスプレナム状態（試験体No. 4, 引抜後）



(1) 内部管濃度評価



(2) 差分濃度評価

図3.3.3-6 X線撮影データ評価結果(試験体No.4, Na190°C, Na充填後)

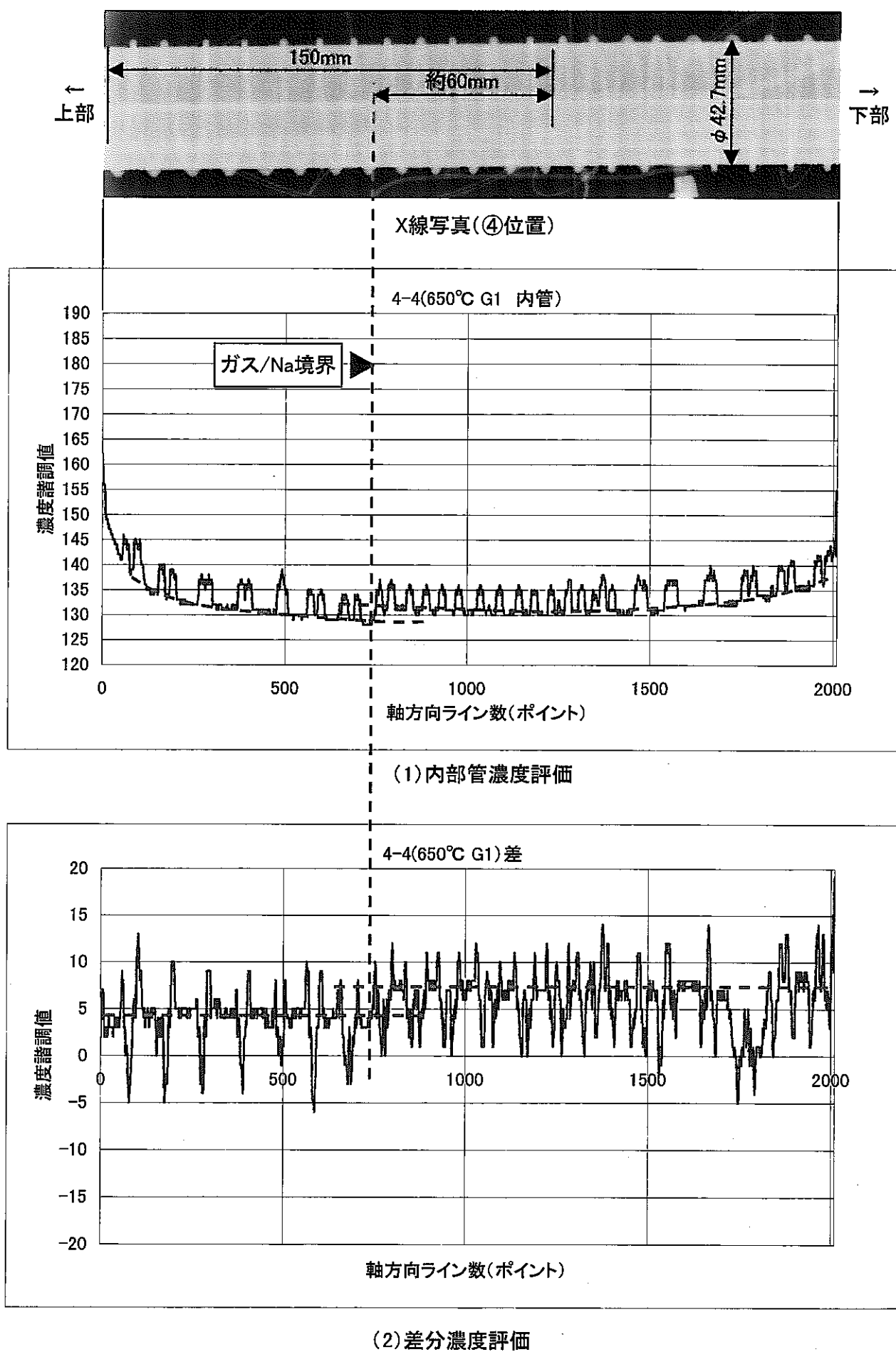


図3.3.3-7 X線撮影データ評価結果(試験体No.4, Na650°C, He1セット注入後)

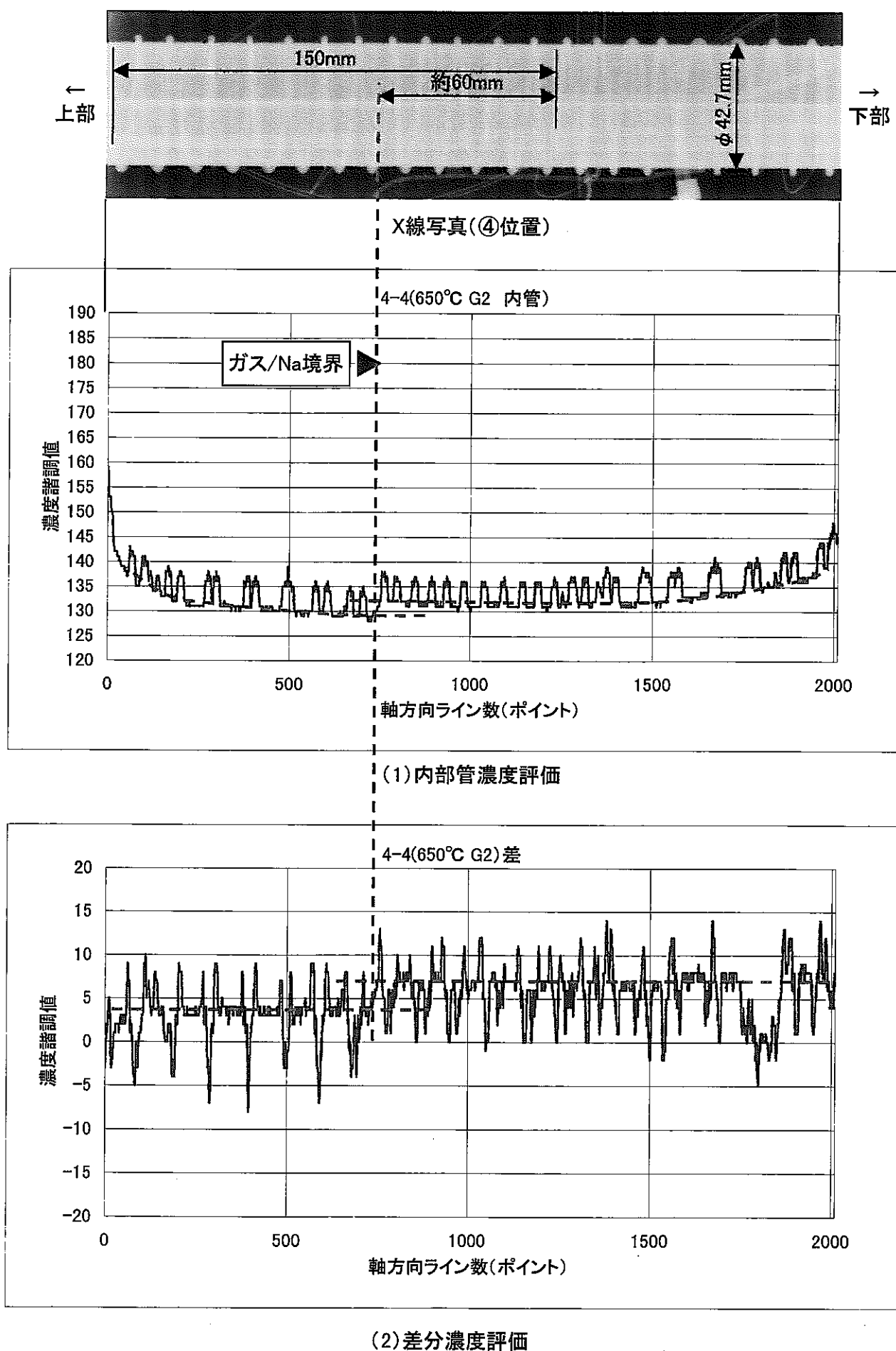


図3.3.3-8 X線撮影データ評価結果(試験体No.4, Na650°C, He2セット注入後)

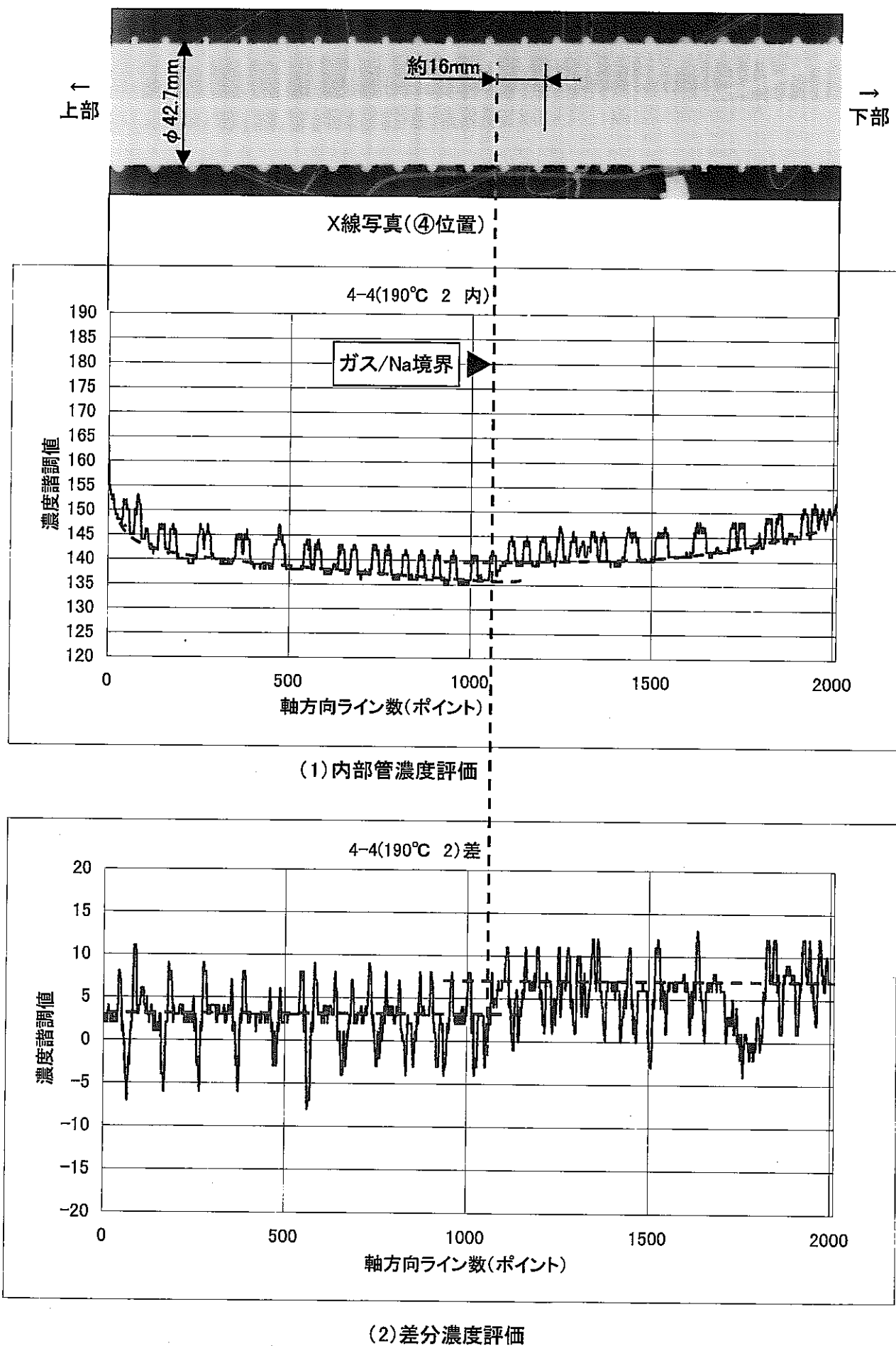
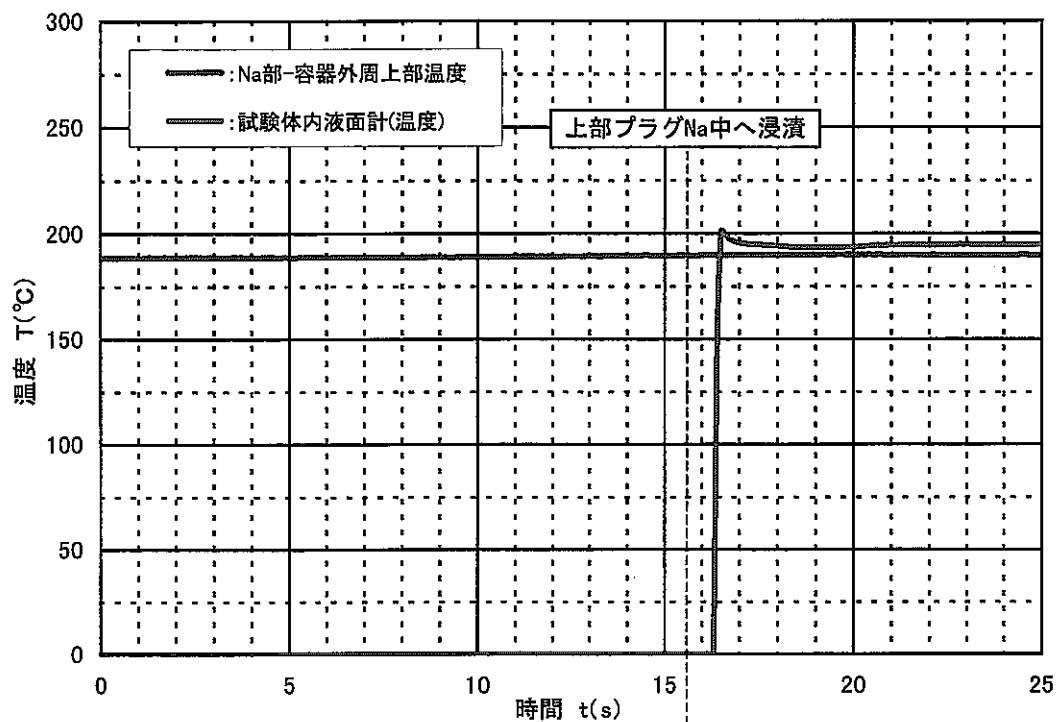
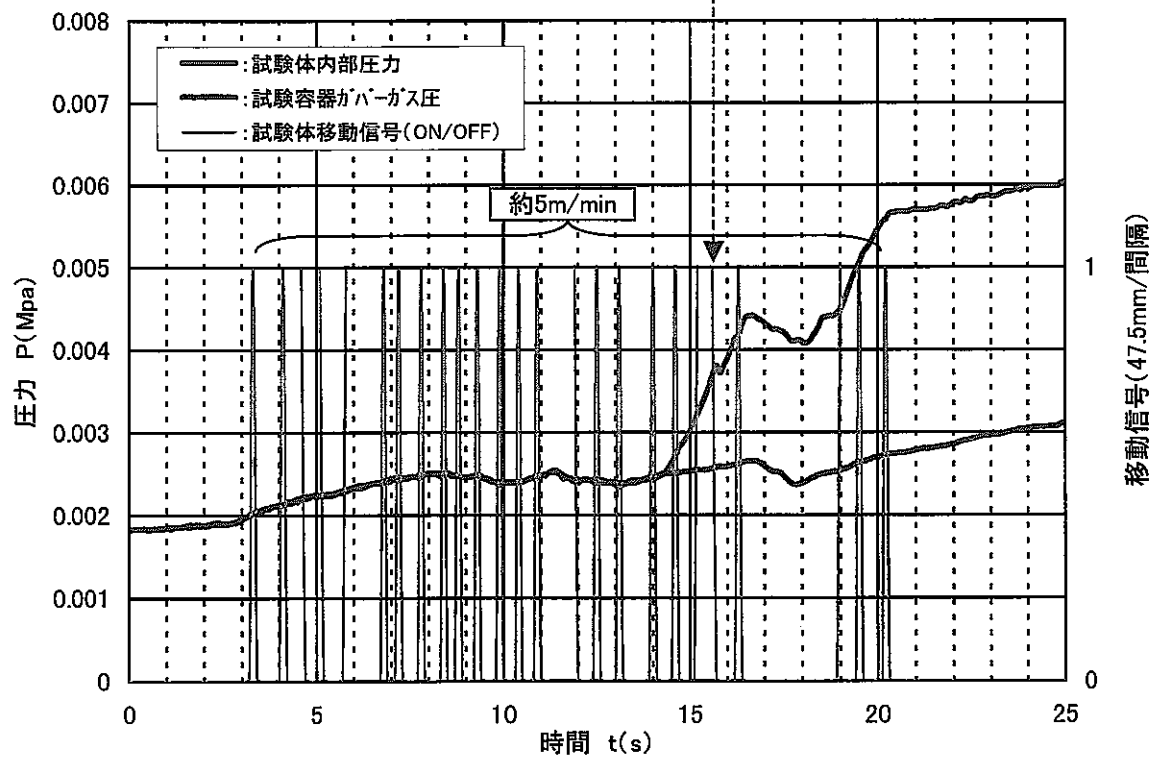


図3.3.3-9 X線撮影データ評価結果(試験体No.4, Na190°C, He1セット注入後)

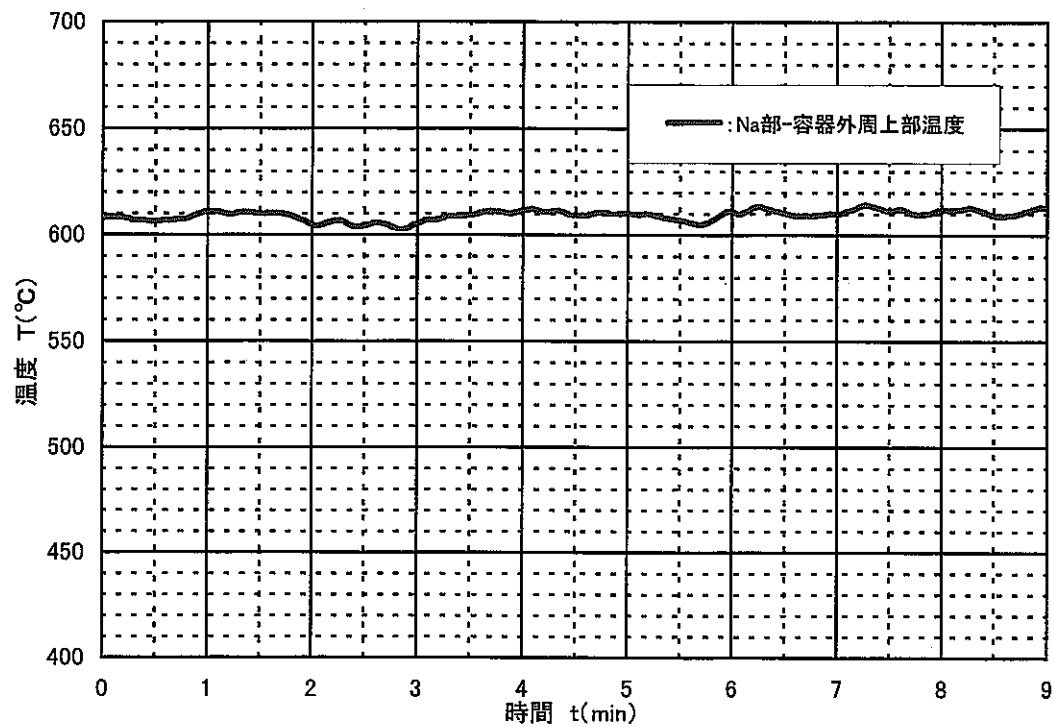


(a) Na温度および液面計信号(温度)

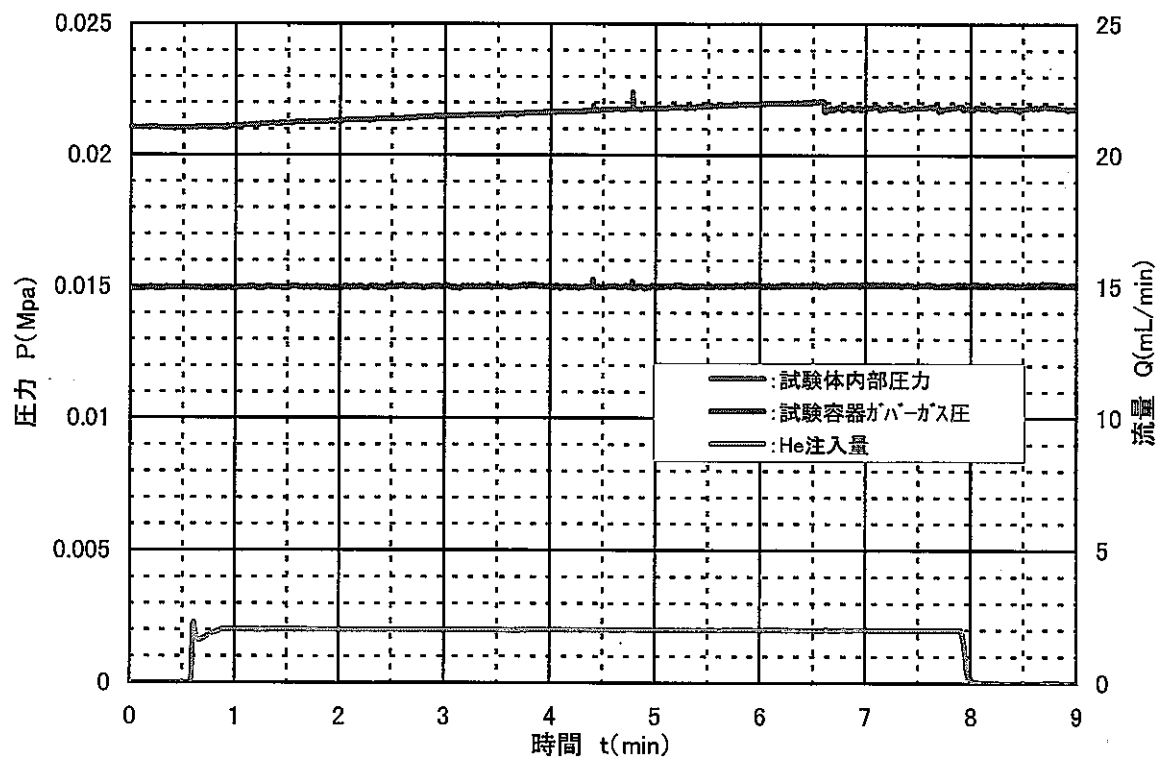


(b) 試験容器、試験体圧力および挿入移動信号

図3.3.3-10 試験体No.4(Ar $\rightarrow$ 190 $^{\circ}$ CNa中挿入)

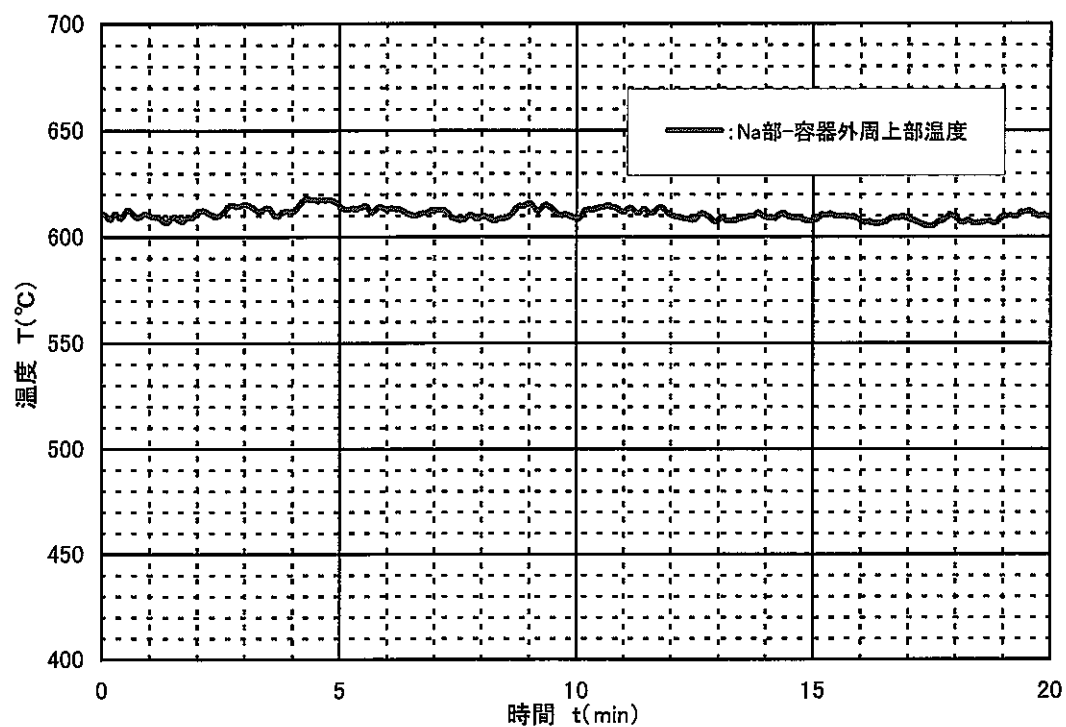


(a) Na温度

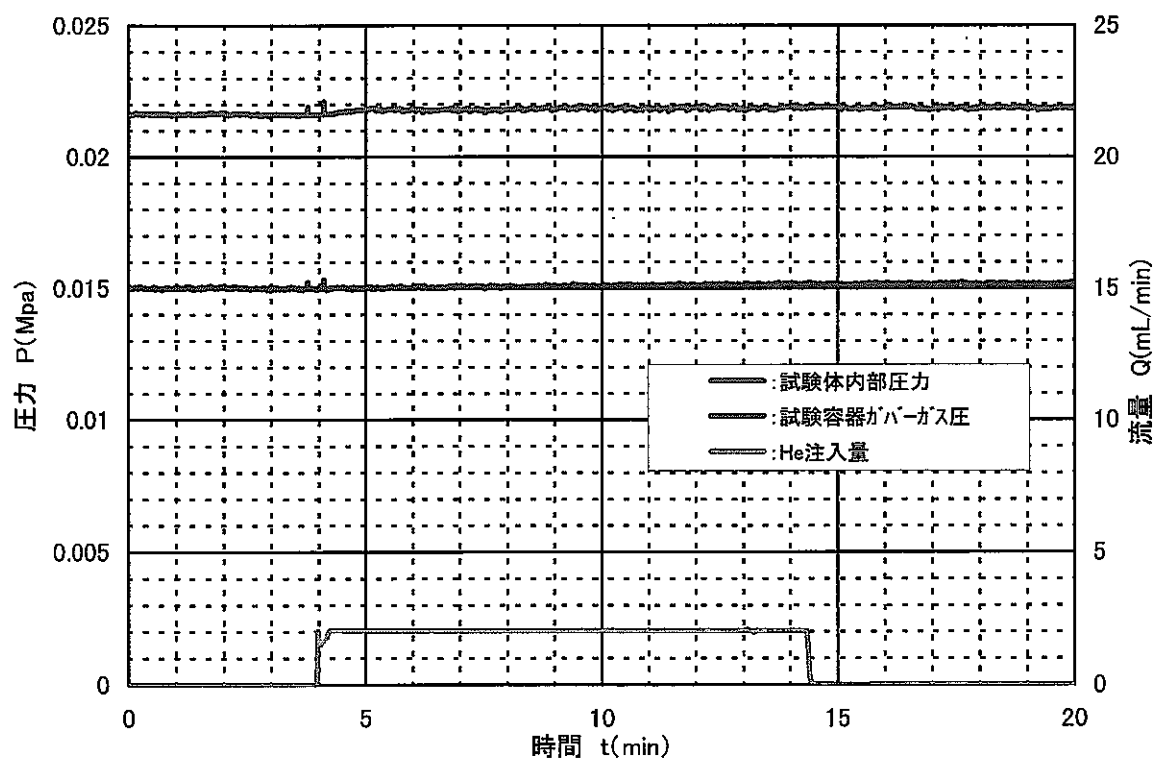


(b) 試験容器、試験体圧力およびHe注入量

図3.3.3-11 試験体No.4(Na650 $^{\circ}\text{C}$ -He注入1セット目)

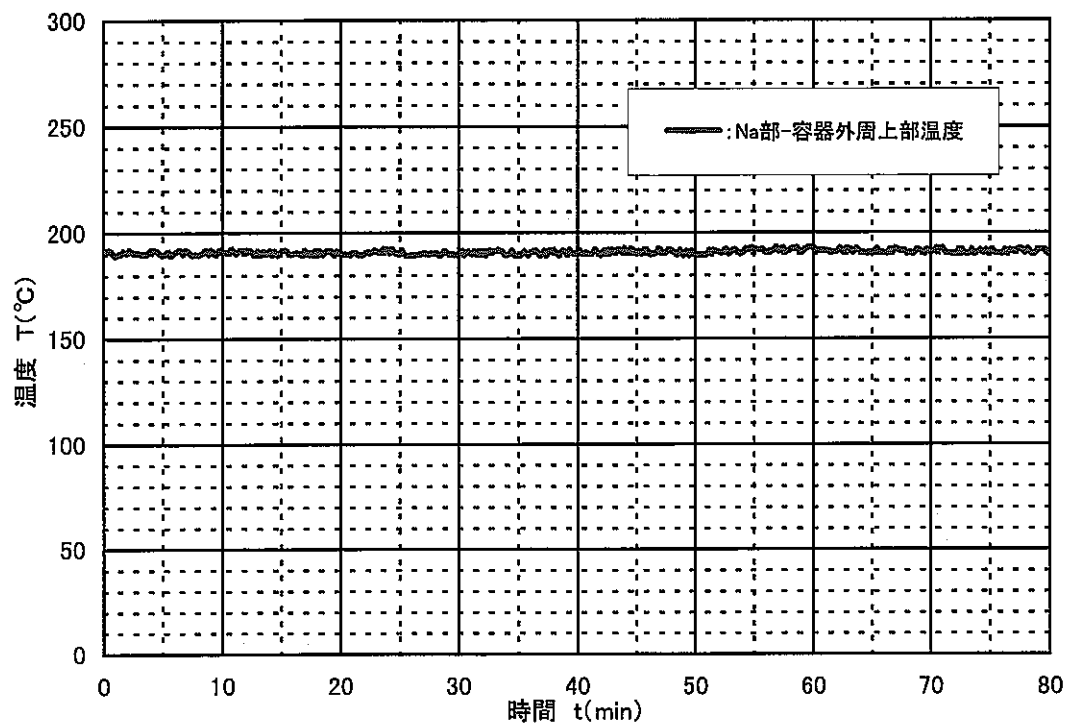


(a) Na温度

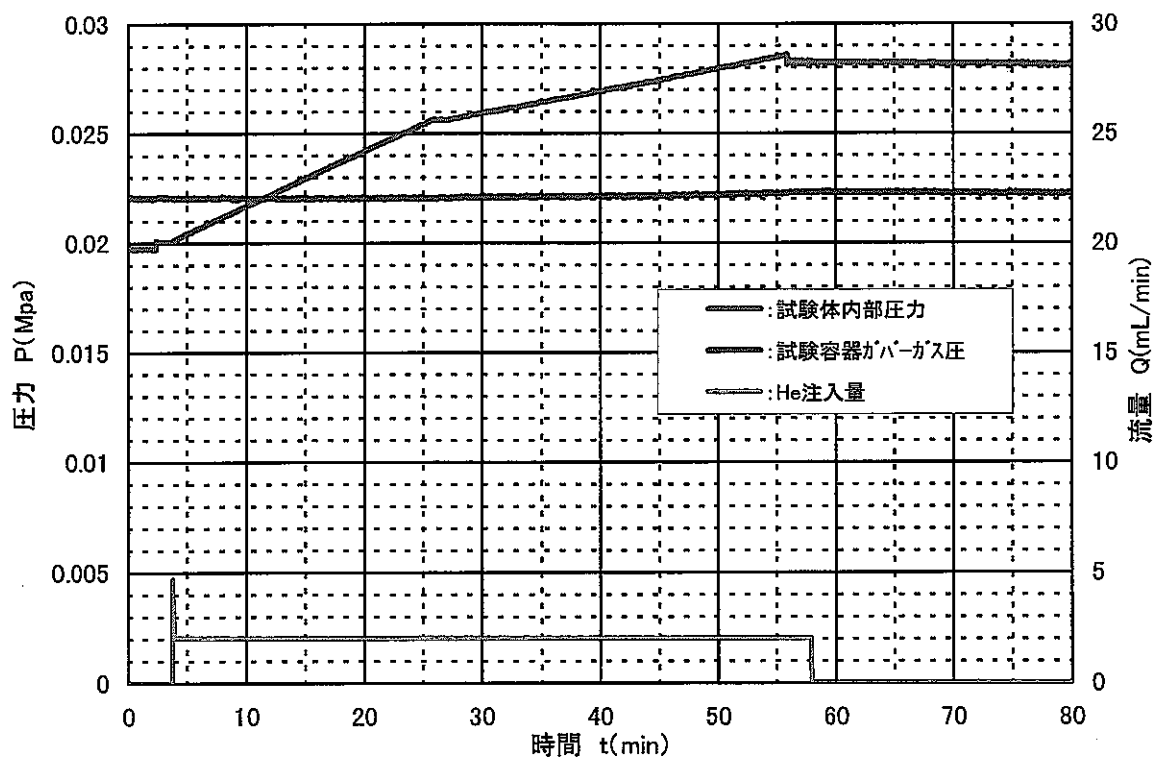


(b) 試験容器、試験体圧力およびHe注入量

図3.3.3-12 試験体No.4 (Na650°C-He注入2セット目)

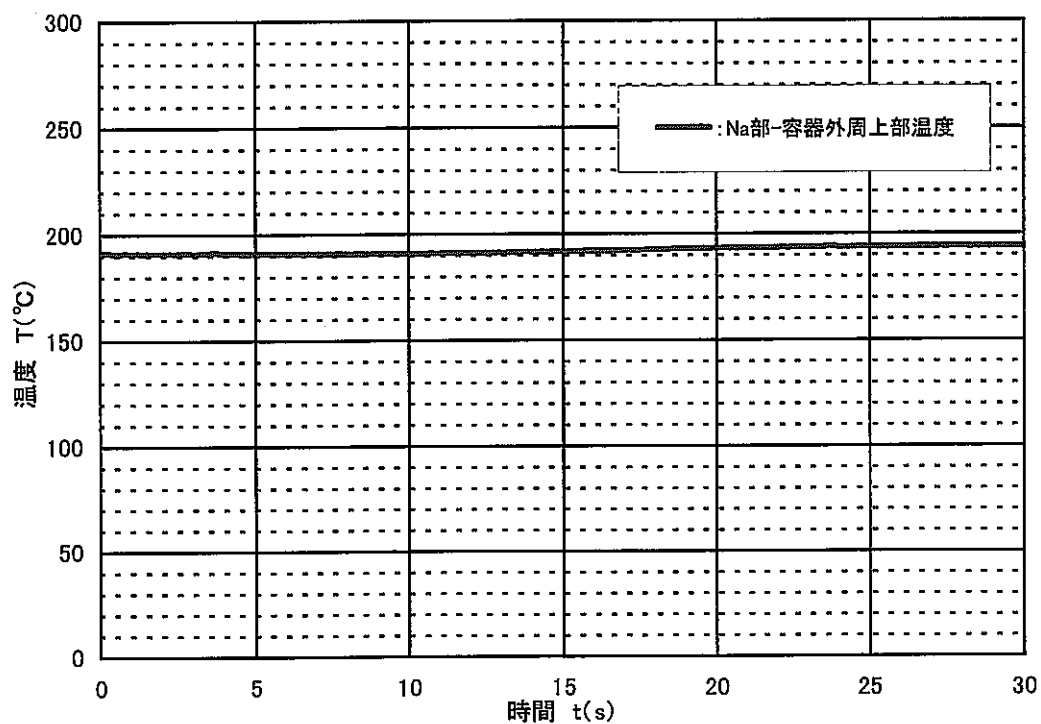


(a) Na温度

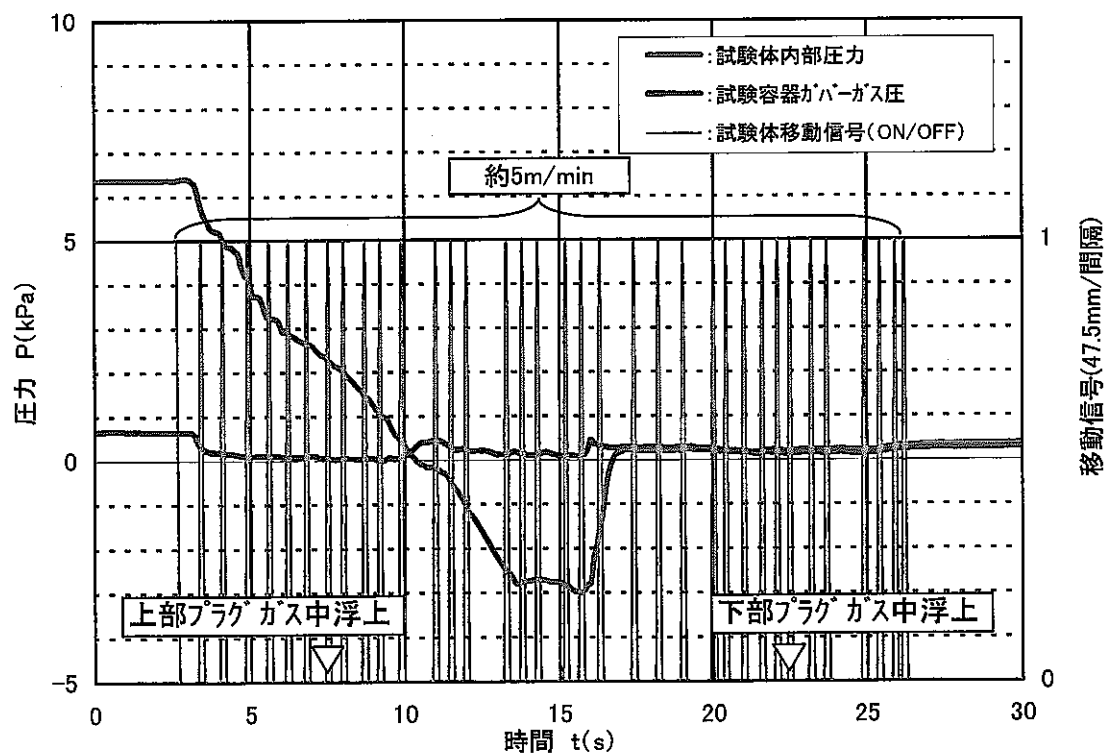


(b) 試験容器、試験体圧力およびHe注入量

図3.3.3-13 試験体No.4(Na190°C-He注入1セット目)



(a) Na温度



(b) 試験容器、試験体圧力および引抜移動信号

図3.3.3-14 試験体No.4(190°CNa→Ar引抜)

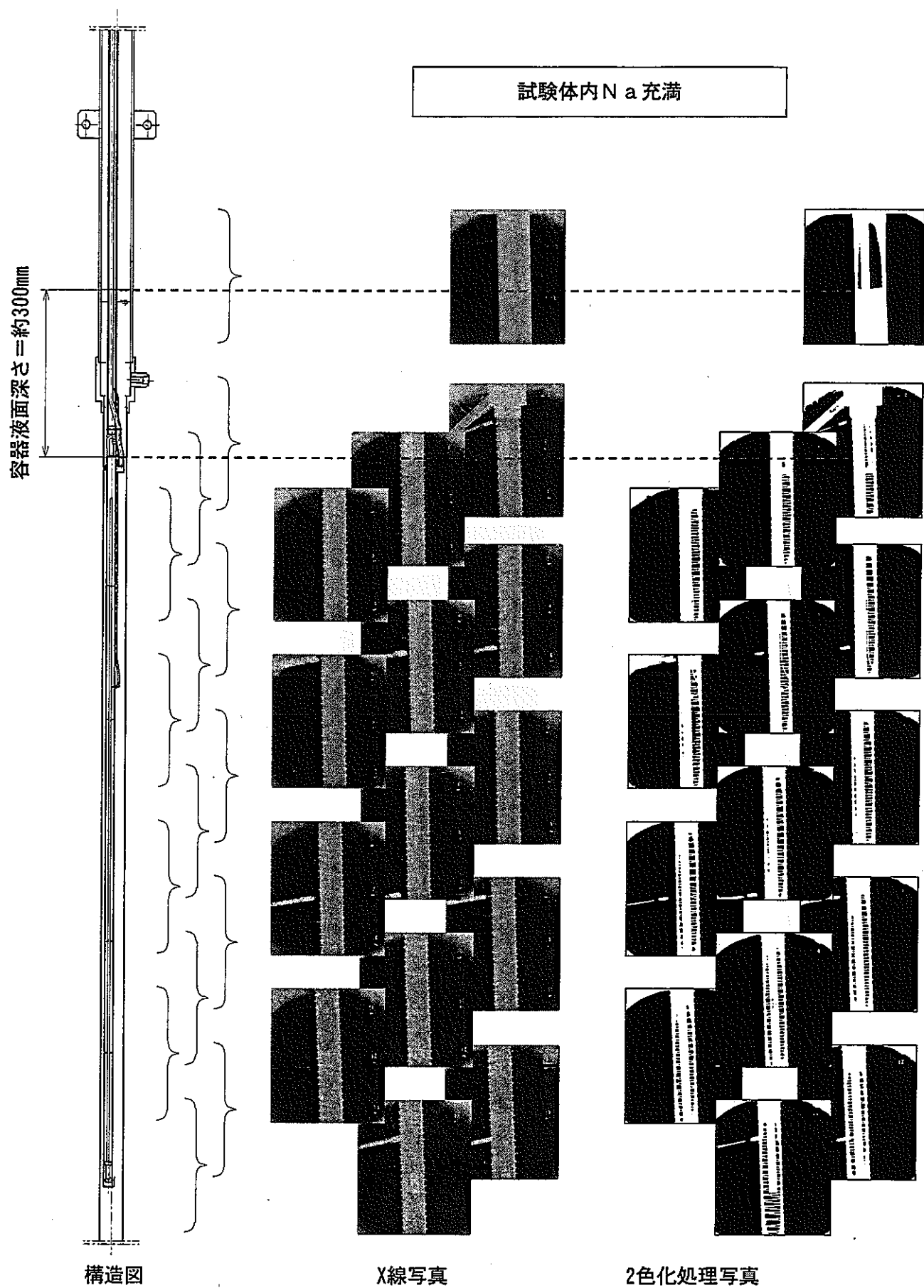


図3.3.4-1 試験体内ガスプレナム状態（試験体No. 2, Na190℃, 充填後）

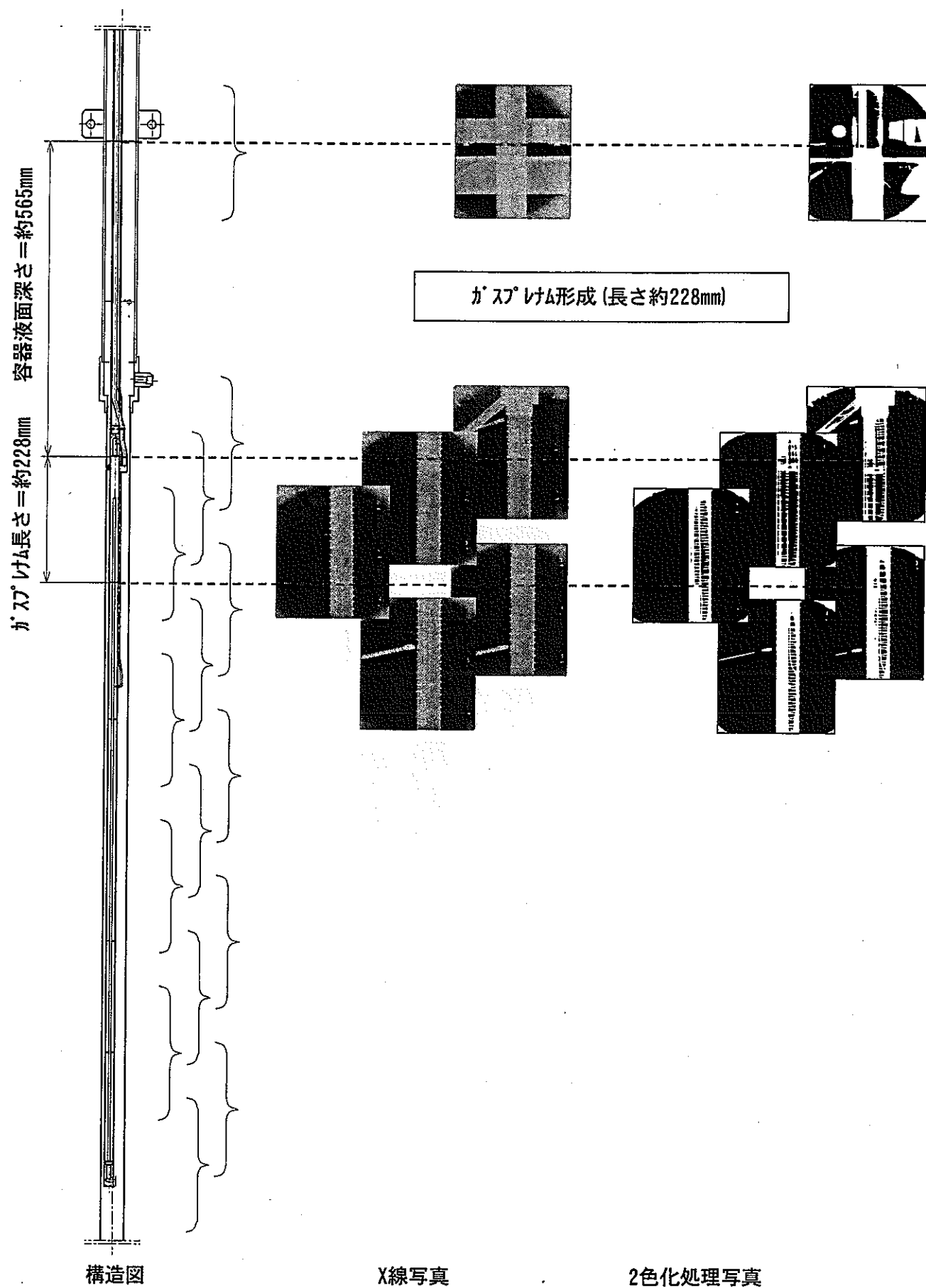


図3.3.4-2 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 2, Na650°C, He1セツ注入後)

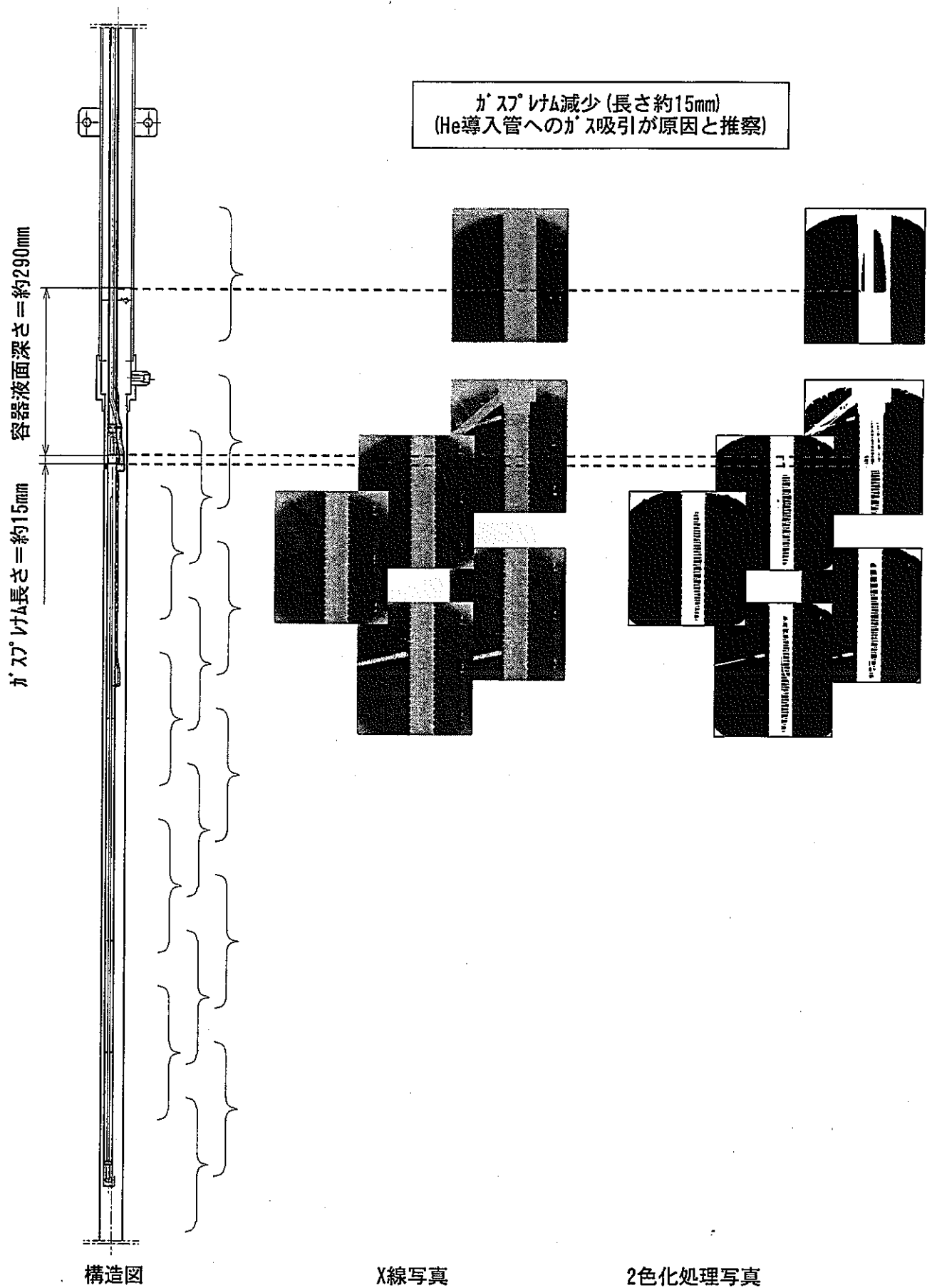


図3. 3. 4-3 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 2, Na190℃, サイクリック)

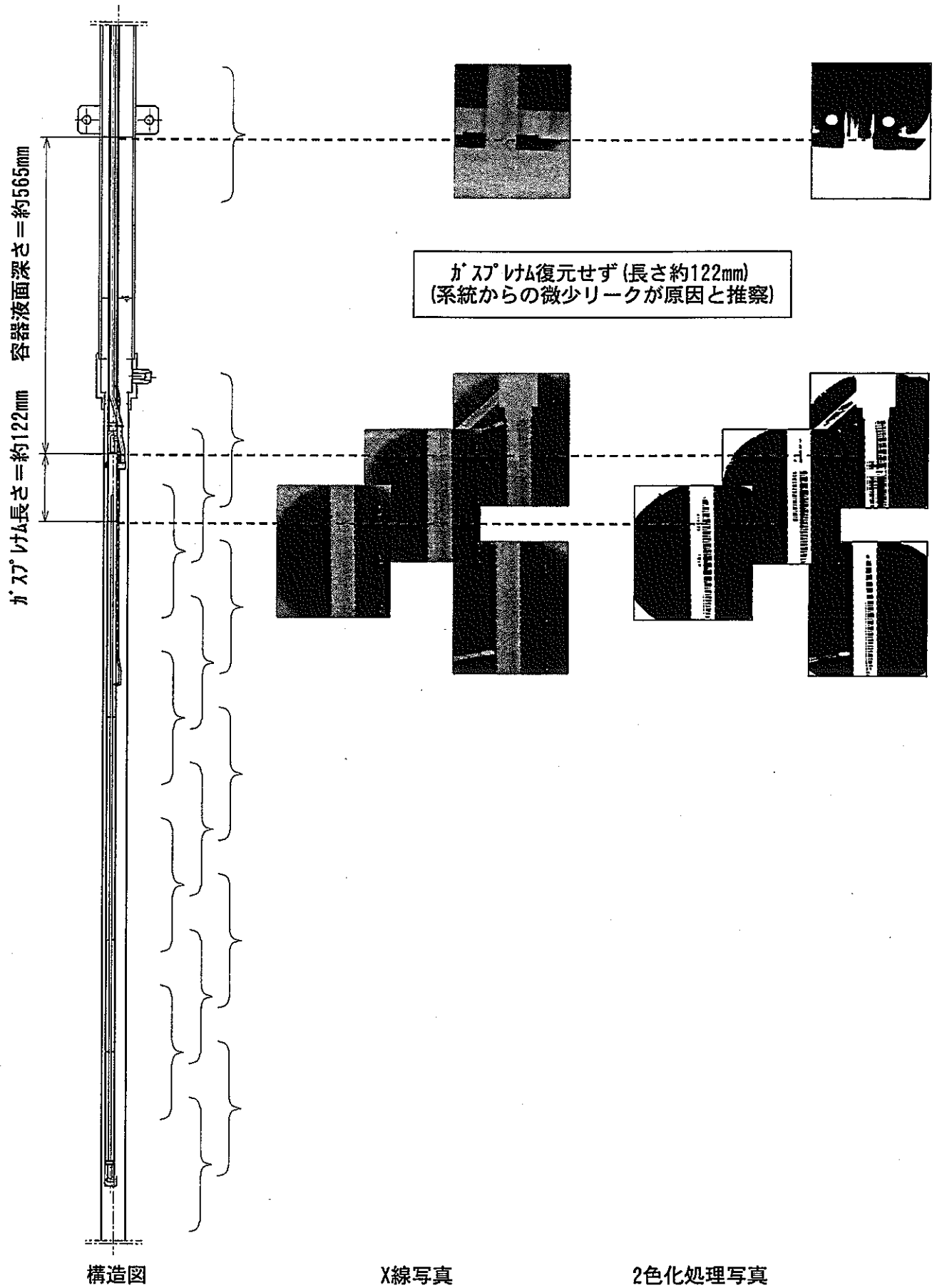


図3.3.4-4 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 2, Na650℃, サイクリック)

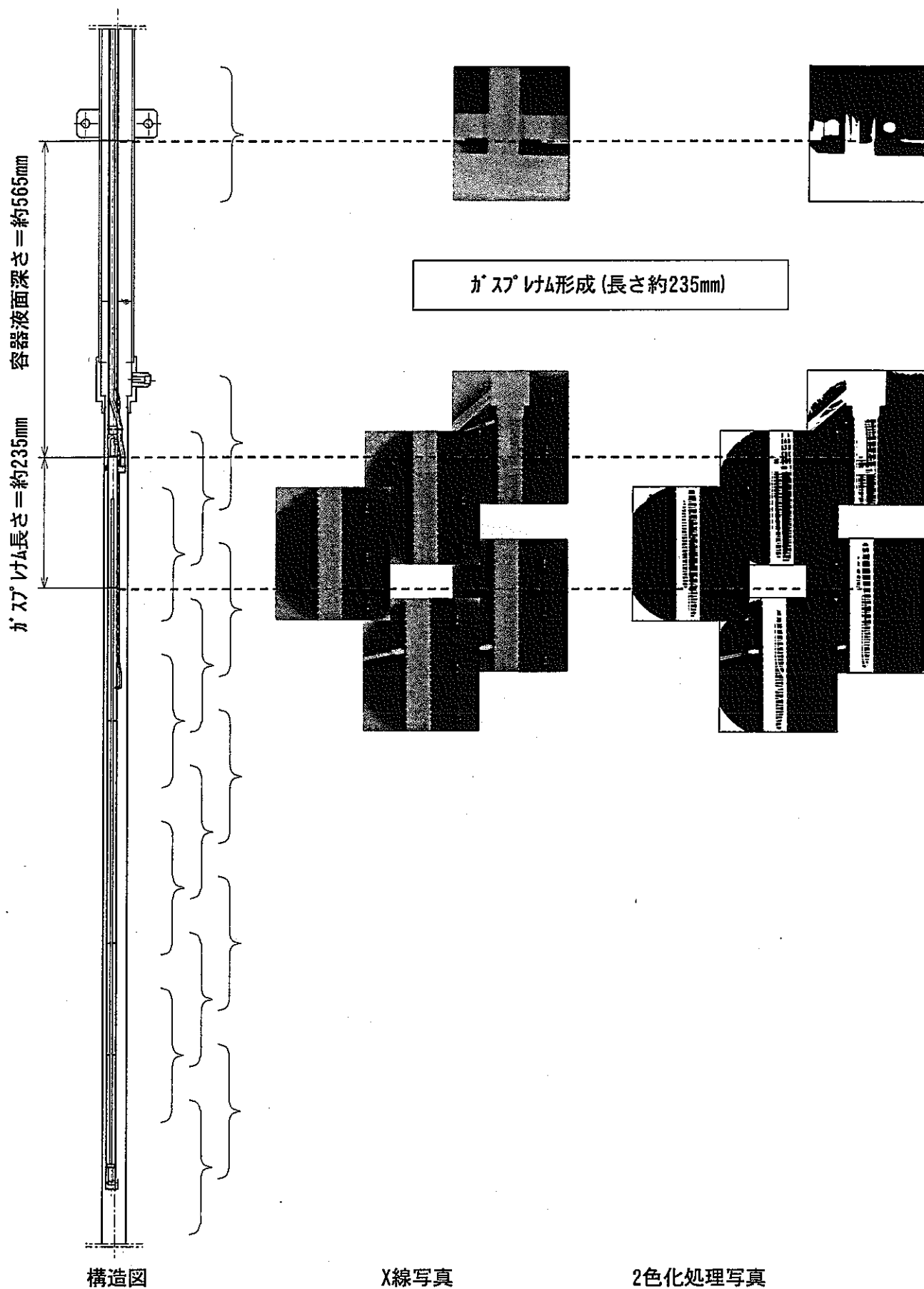


図3. 3. 4-5 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 2, Na650℃, He2セット注入後)

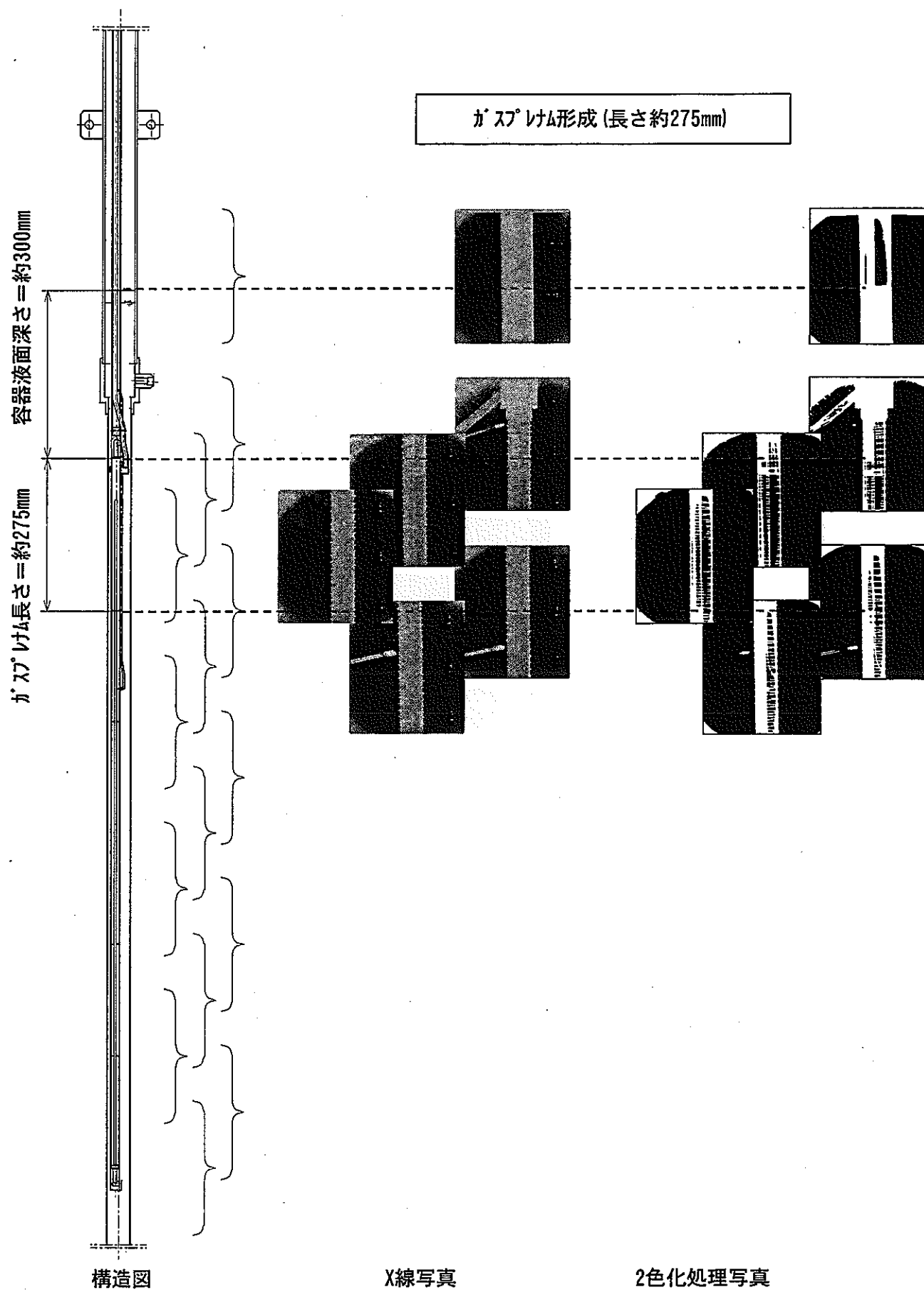
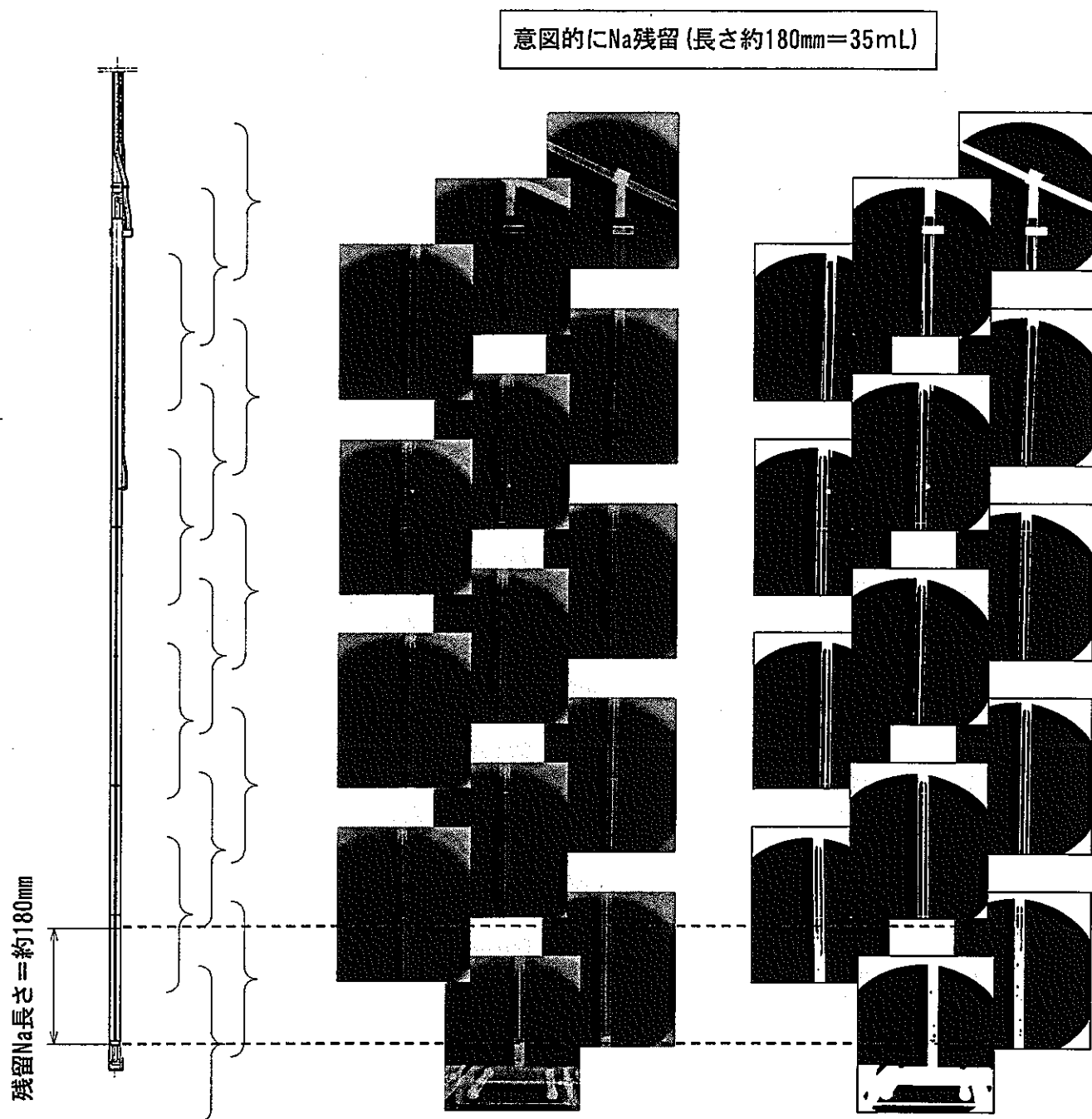


図3. 3. 4-6 試験体内ガスブレナム状態 (試験体No. 2, Na190°C, He1セツト注入後)

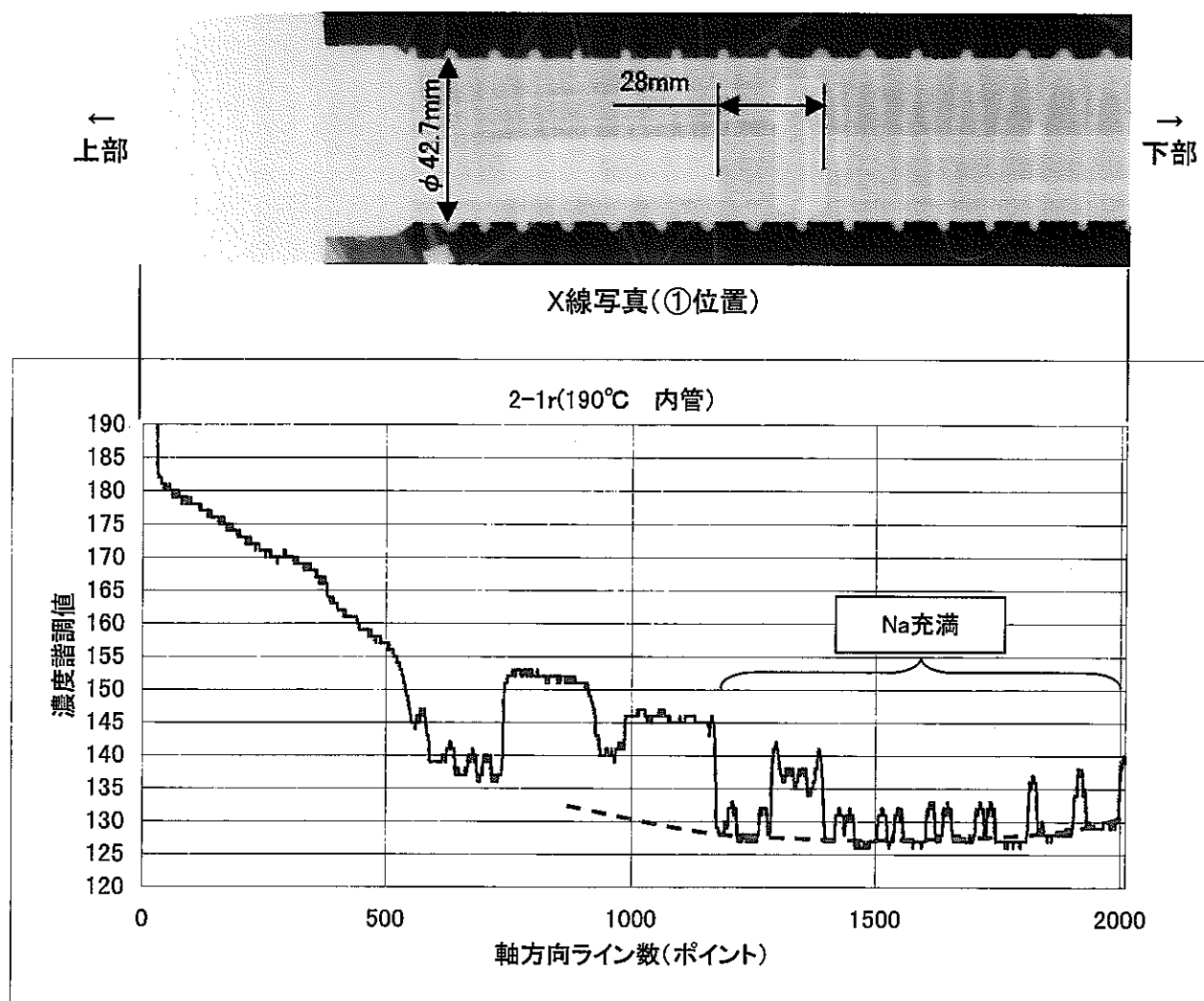


構造図

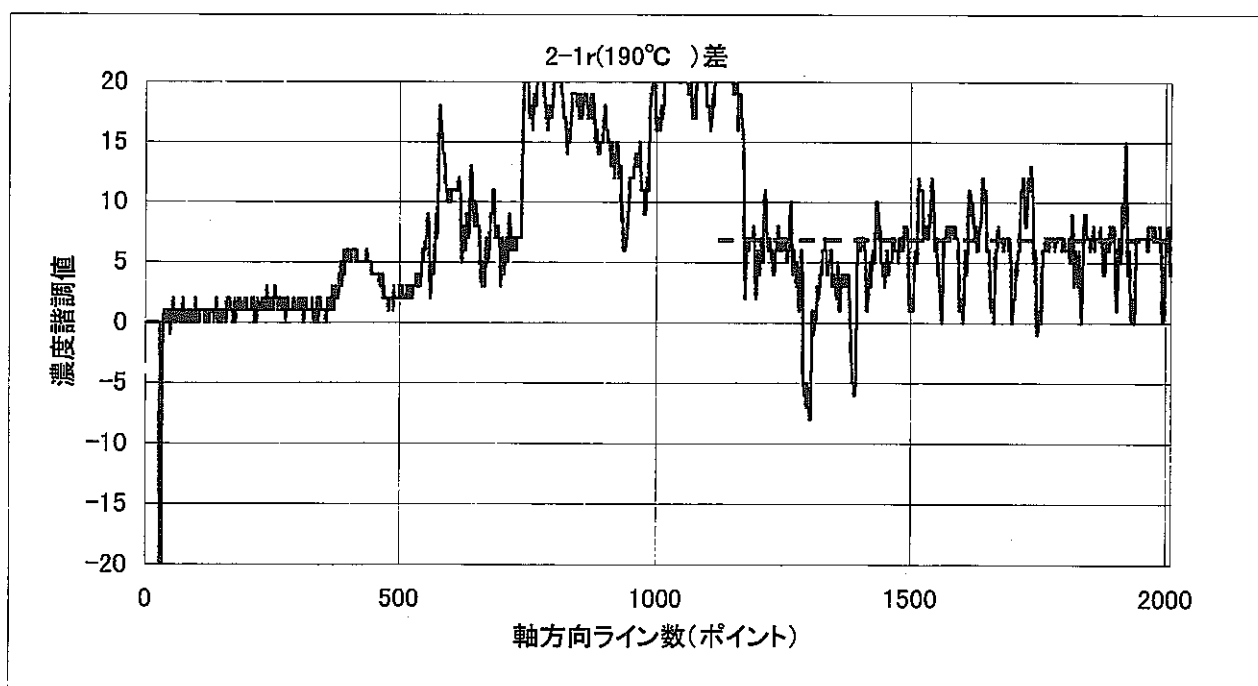
X線写真

2色化处理写真

図3. 3. 4-7 試験体内ガスプレナム状態 (試験体No. 2, 引抜後)

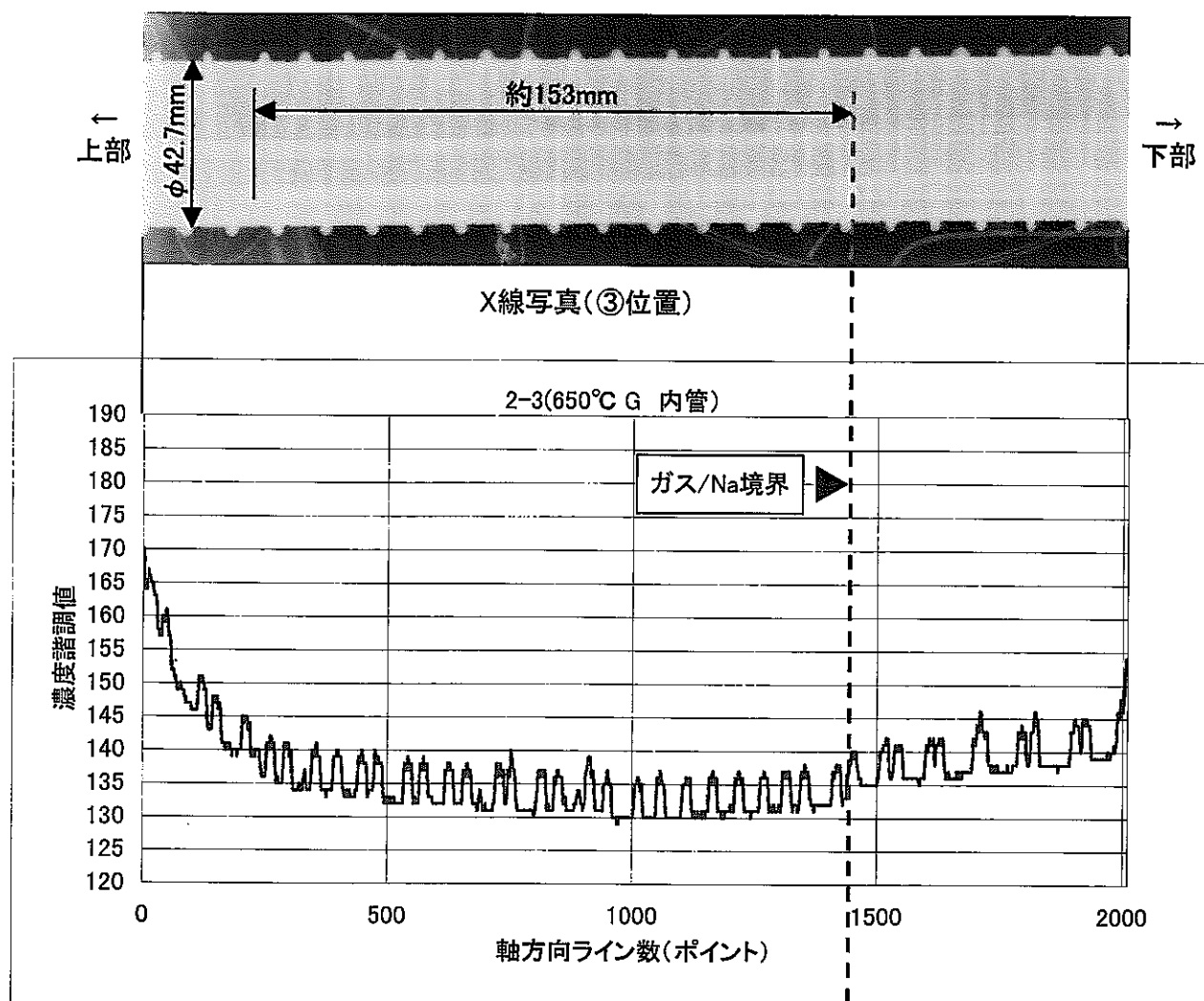


(1) 内部管濃度評価

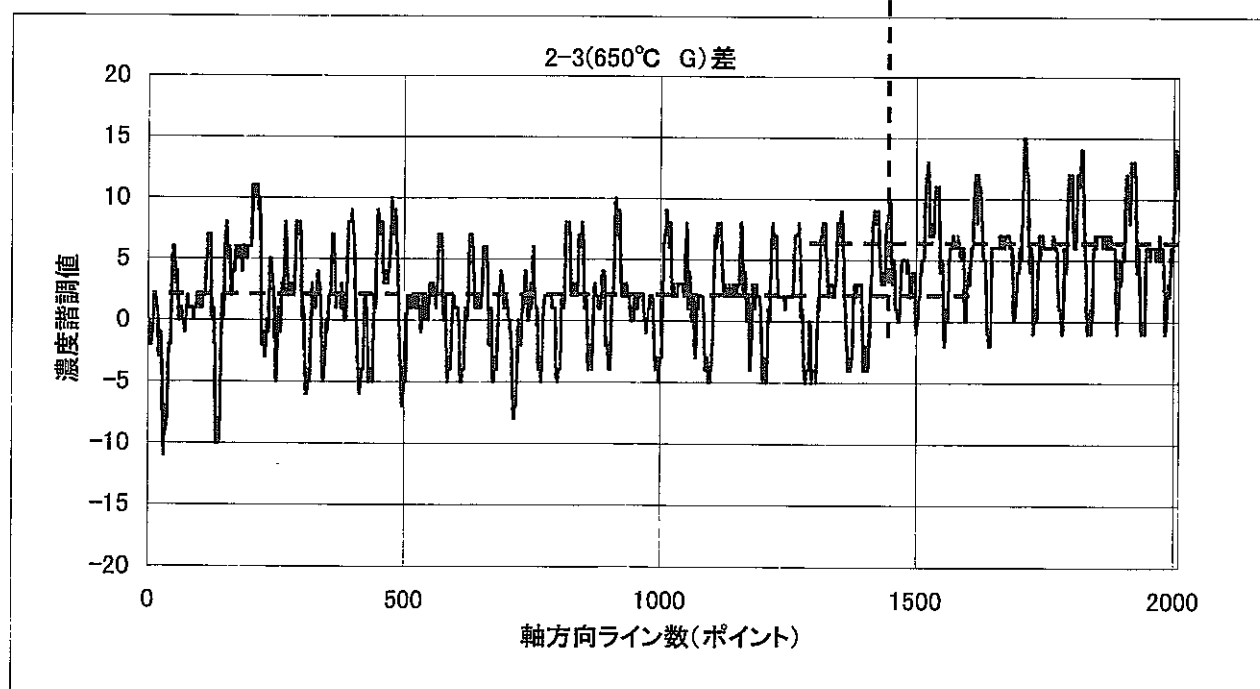


(2) 差分濃度評価

図3.3.4-8 X線撮影データ評価結果(試験体No.2, Na190°C, Na充填後)

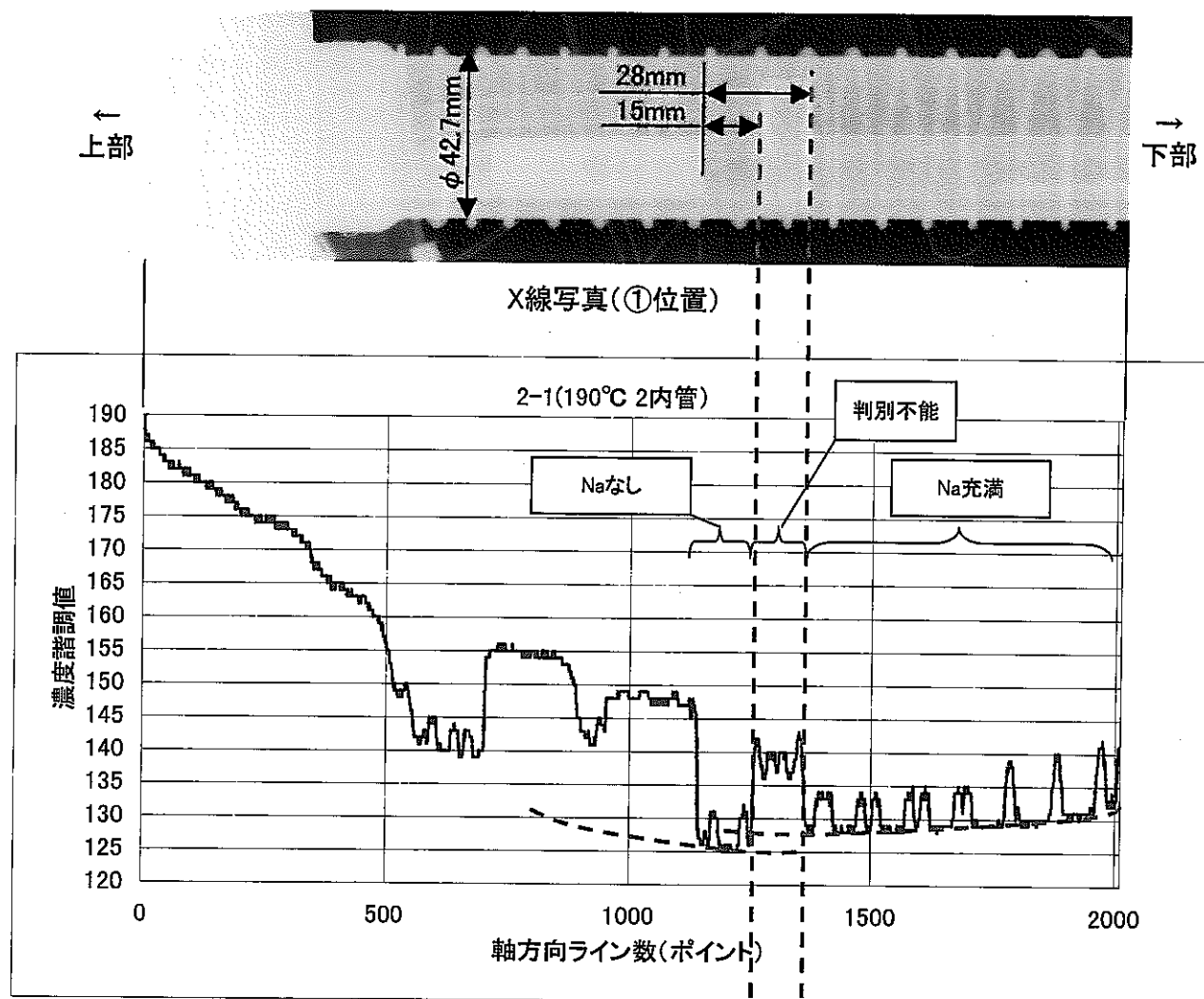


(1) 内部管濃度評価

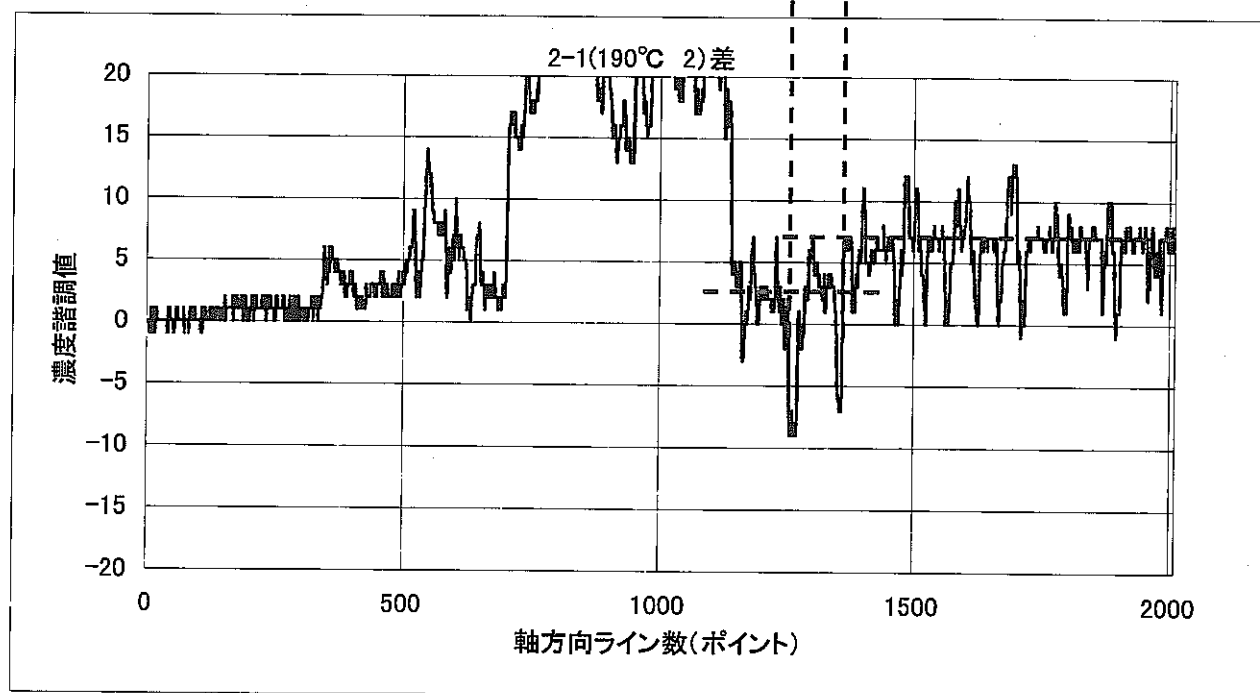


(2) 差分濃度評価

図3.3.4-9 X線撮影データ評価結果(試験体No.2, Na650°C, He1セット注入後)



(1) 内部管濃度評価



(2) 差分濃度評価

図3.3.4-10 X線撮影データ評価結果(試験体No.2, Na190°C, サイクリック)

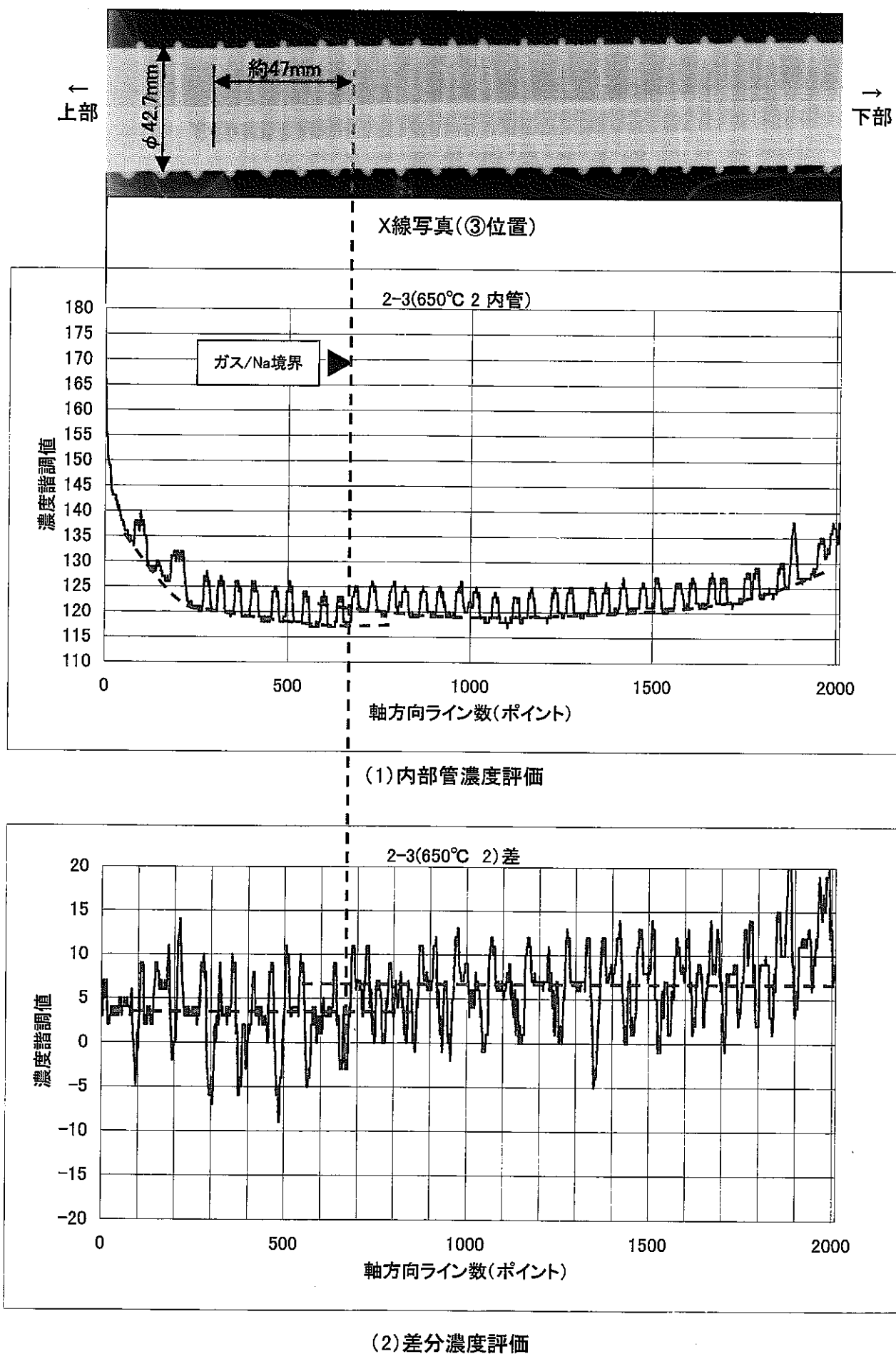


図3.3.4-11 X線撮影データ評価結果(試験体No.2, Na650°C, サイクリック)

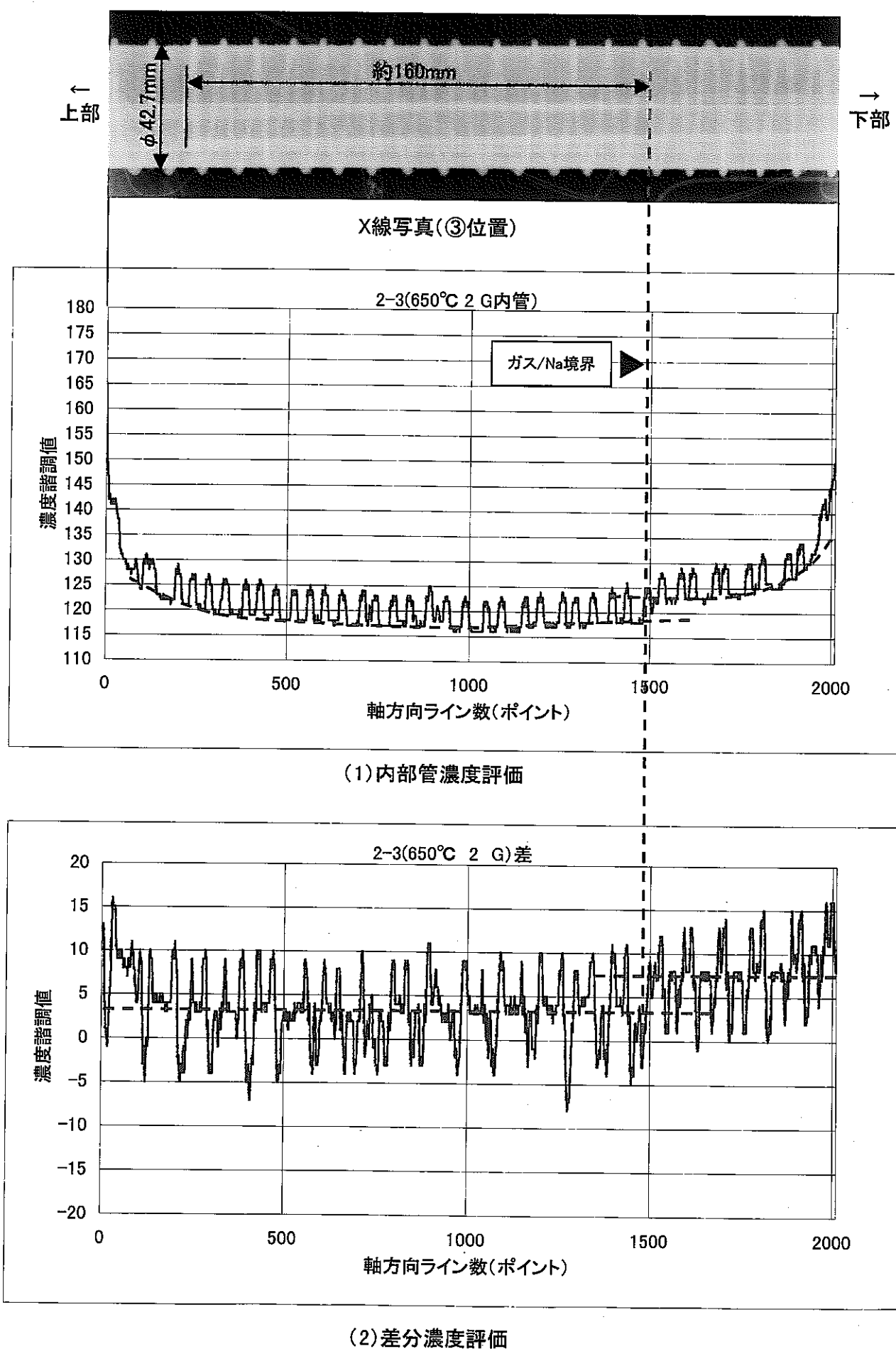


図3.3.4-12 X線撮影データ評価結果(試験体No.2, Na650°C, He2セット注入後)

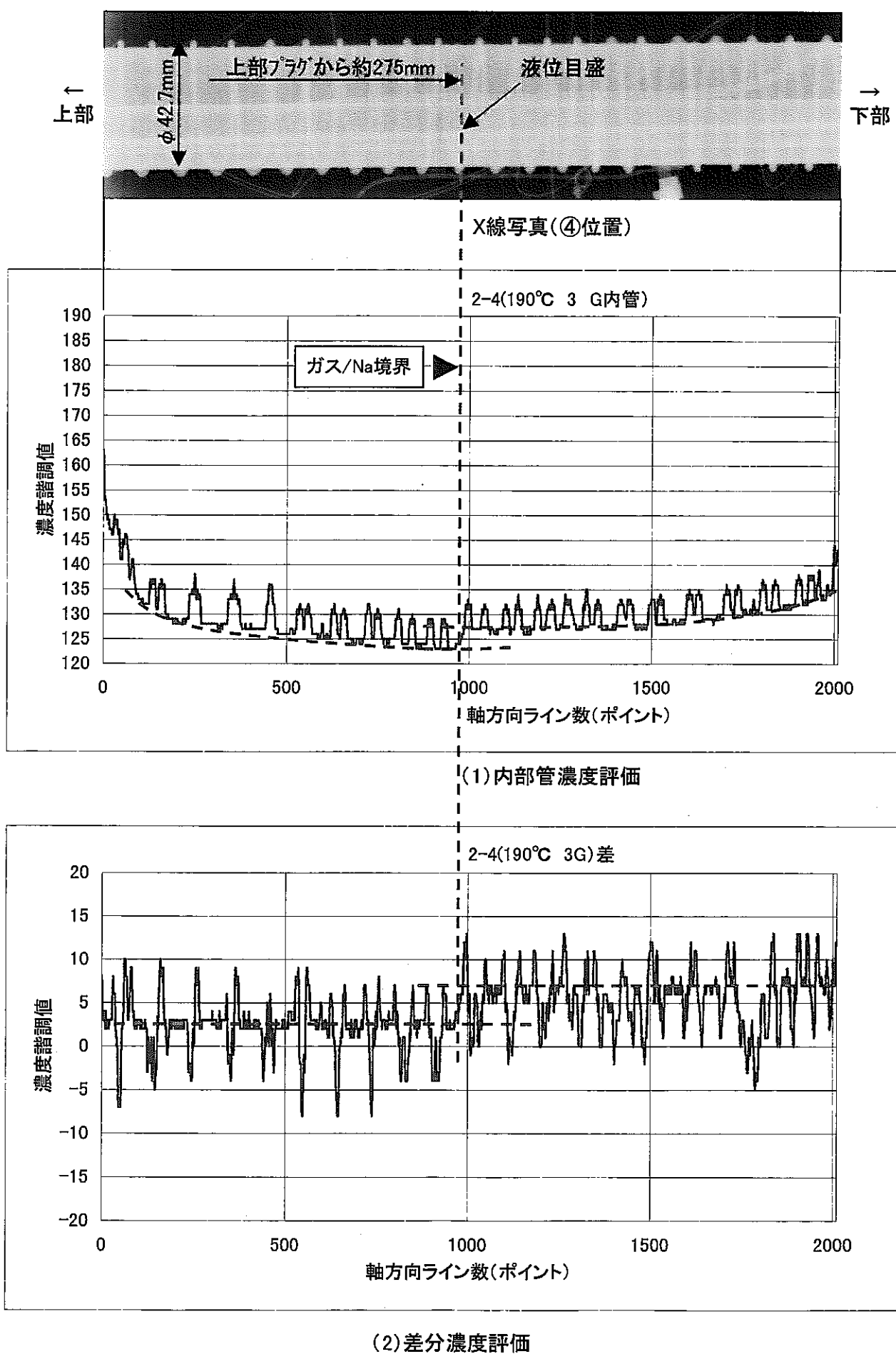
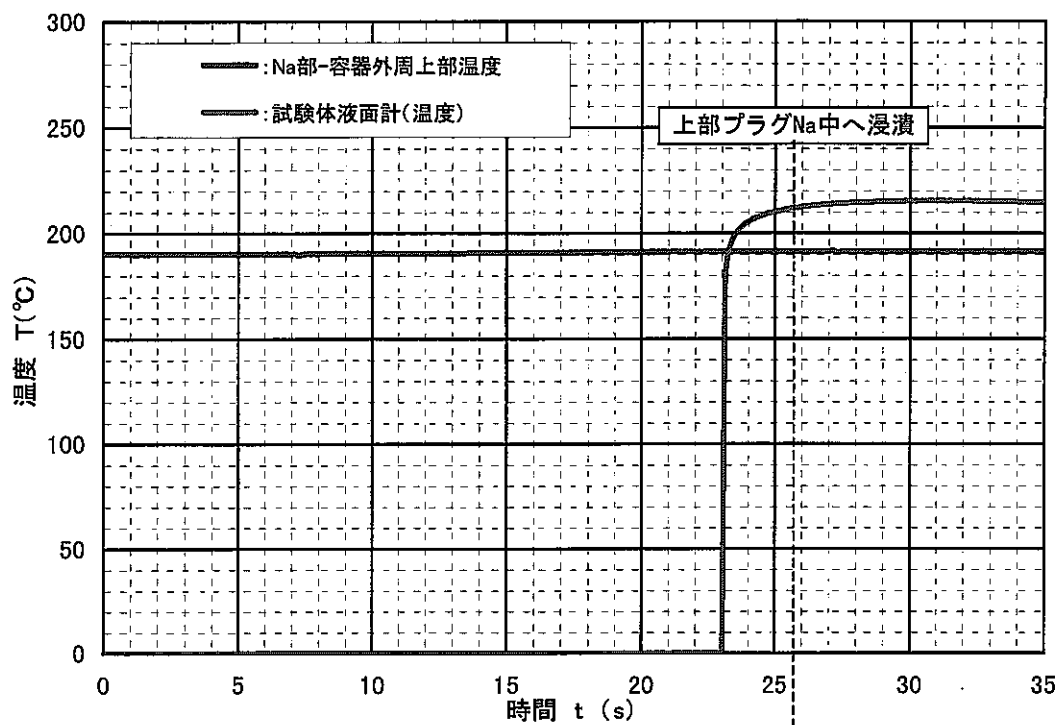
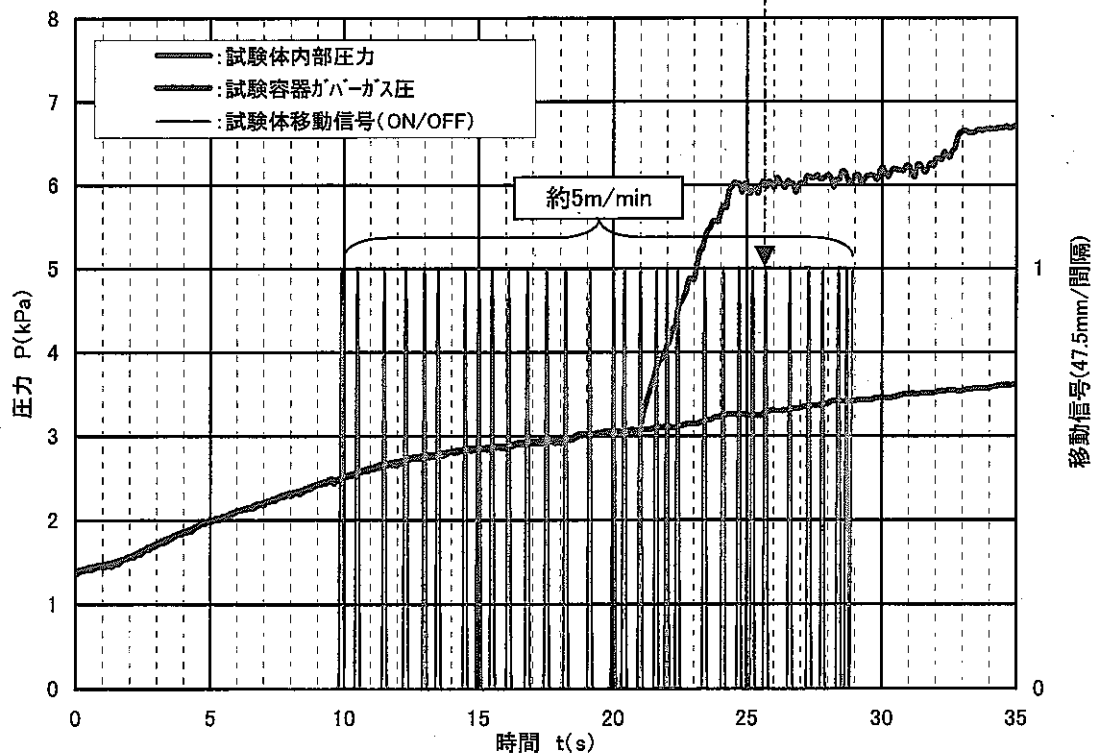


図3.3.4-13 X線撮影データ評価結果(試験体No.2, Na190°C, He1セット注入後)

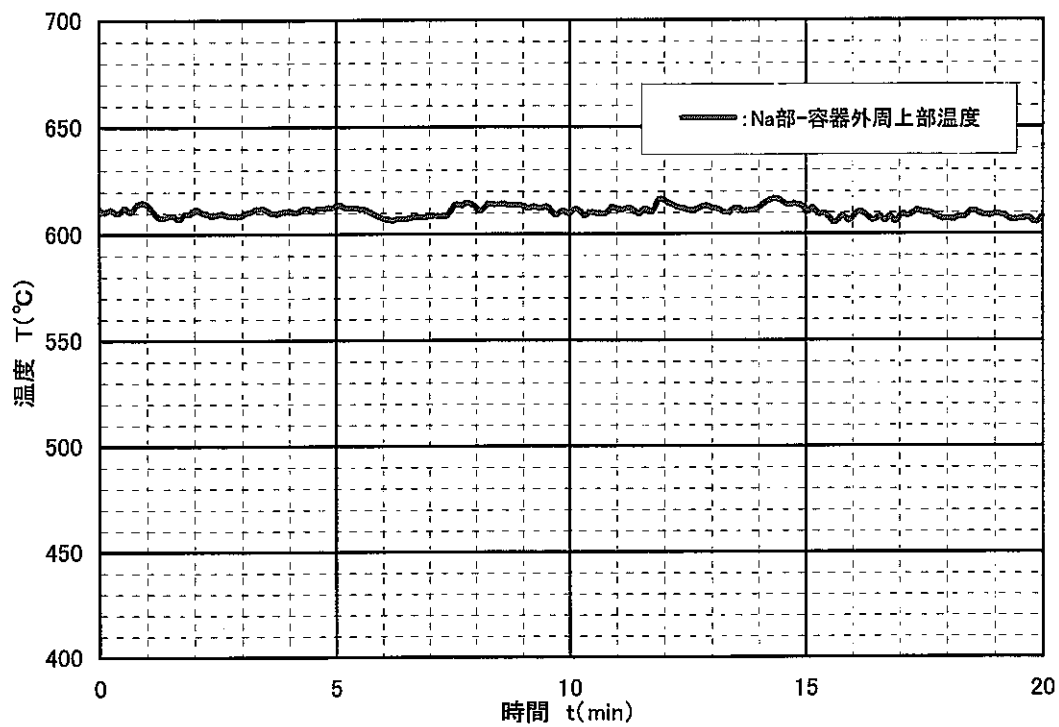


(a) Na温度および液面計信号(温度)

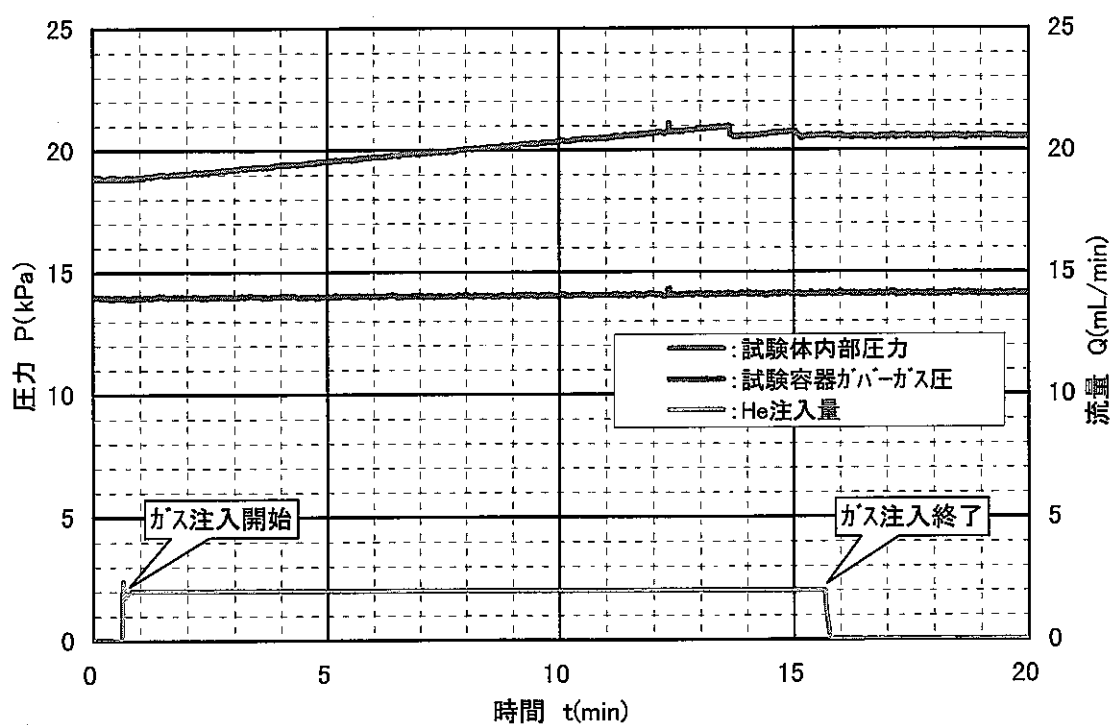


(b) 試験容器、試験体圧力および挿入移動信号

図3.3.4-14 試験体No.2(Ar $\rightarrow$ 190 $^{\circ}$ CNa中挿入)

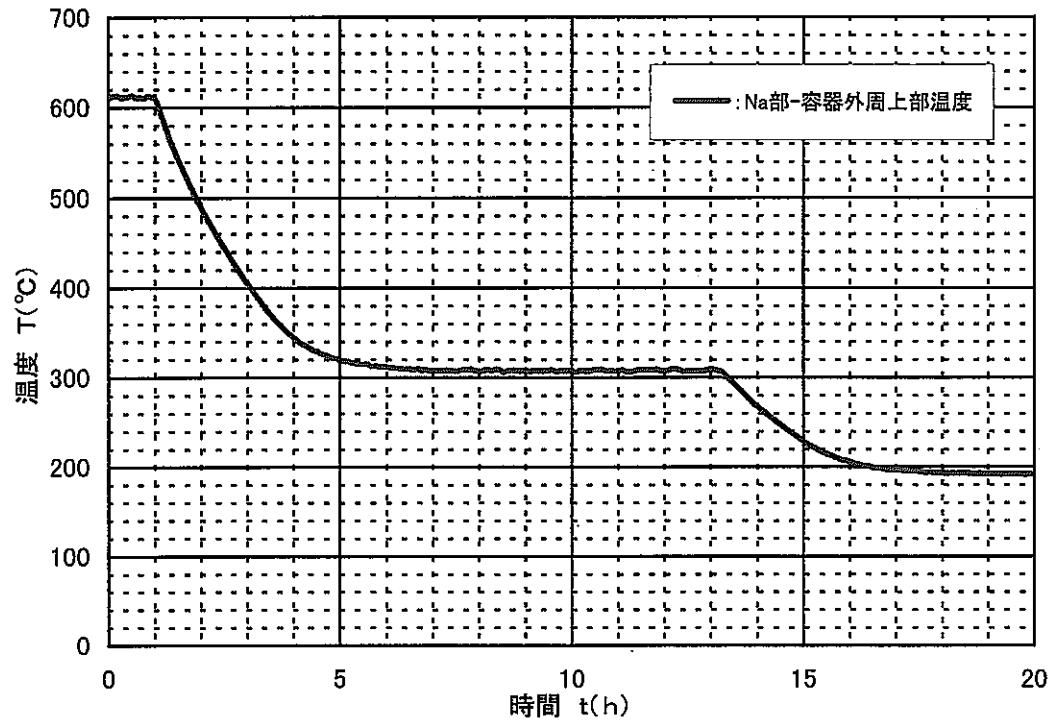


(a) Na温度

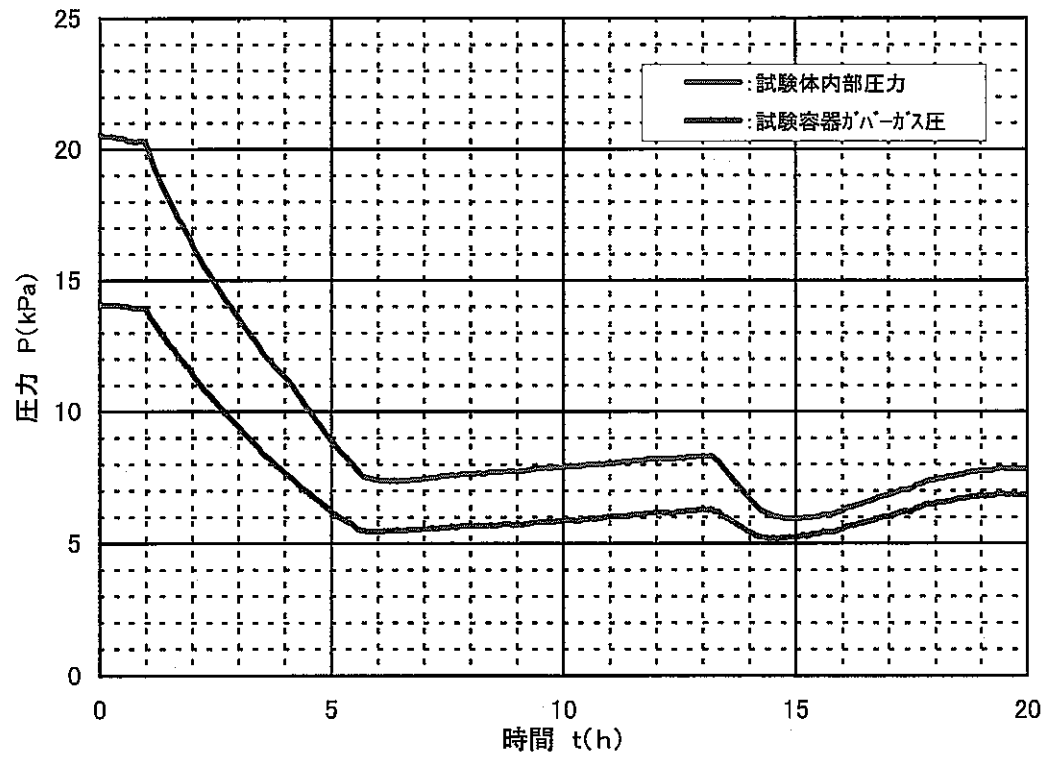


(b) 試験容器、試験体圧力およびHe注入量

図3.3.4-15 試験体No.2 (Na650°C-He注入1セット目)

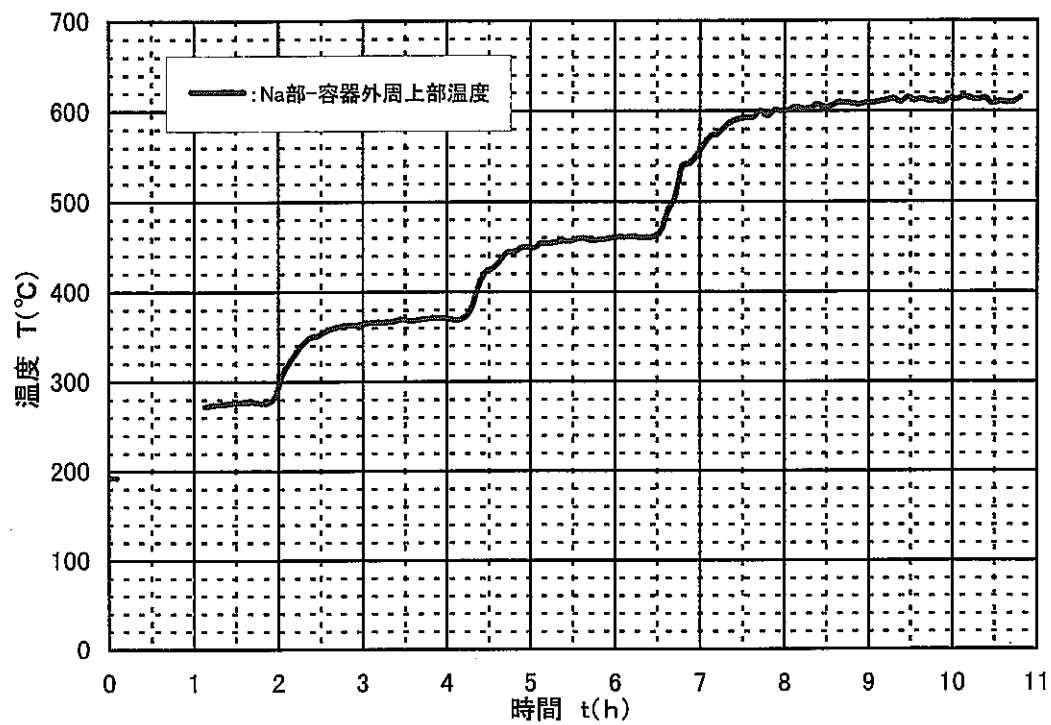


(a) Na温度

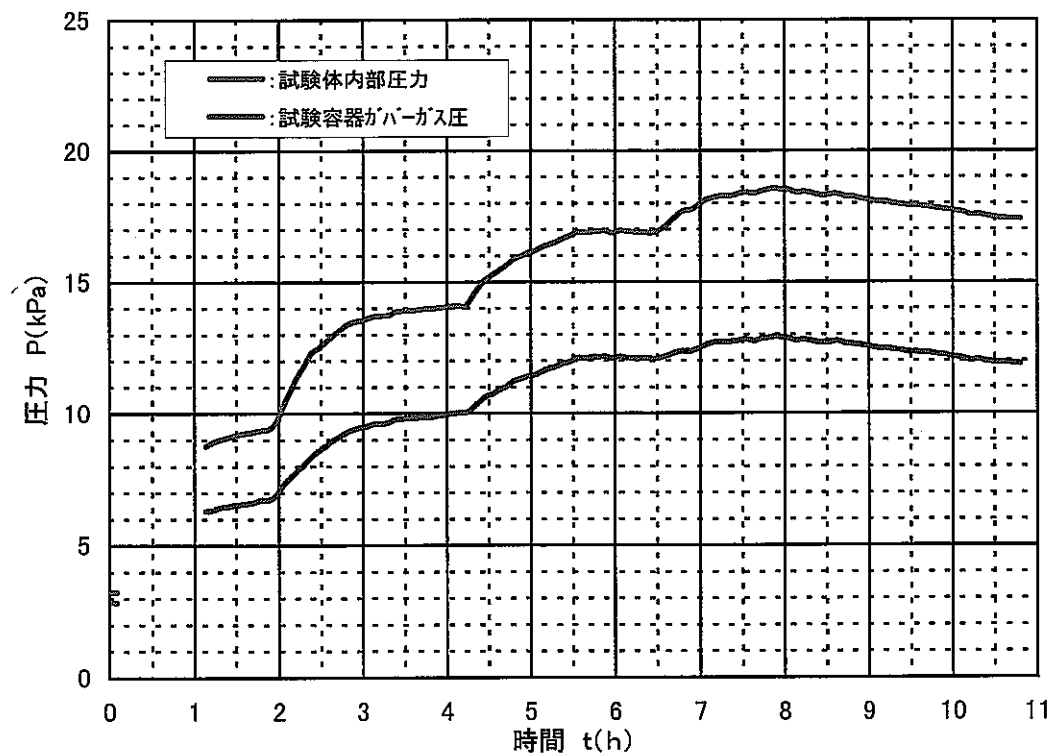


(b) 試験容器および試験体圧力

図3.3.4-16 試験体No.2(Na650 $\Rightarrow$ 190 $^{\circ}\text{C}$ 降温, サイクリック)

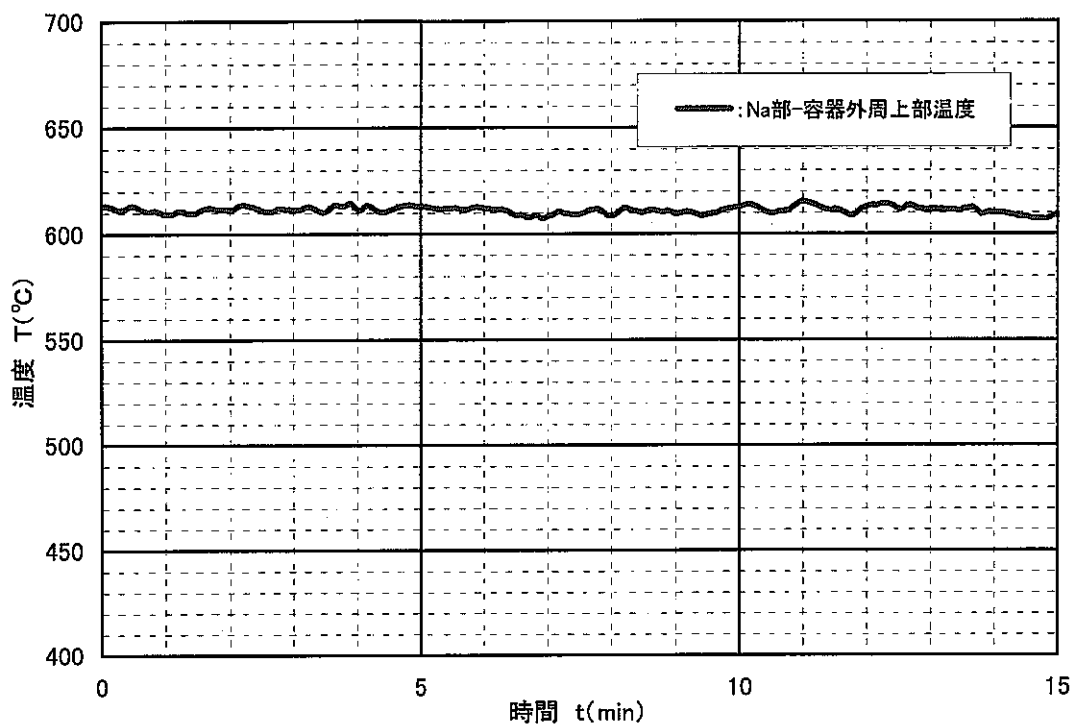


(a) Na温度

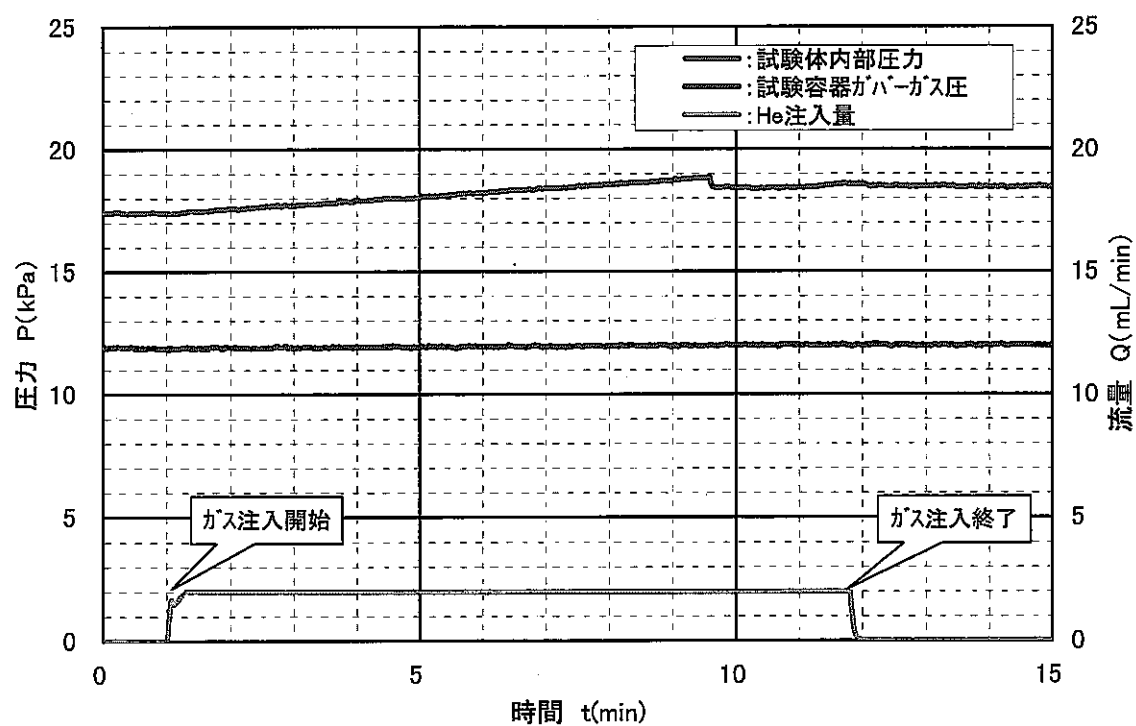


(b) 試験容器および試験体圧力

図3.3.4-17 試験体No.2(Na190 $\Rightarrow$ 650 $^{\circ}\text{C}$ 昇温, サイクリック)



(a) Na温度



(b) 試験容器、試験体圧力およびHe注入量

図3.3.4-18 試験体No.2 (Na650 $^{\circ}\text{C}$ -He注入2セット目)

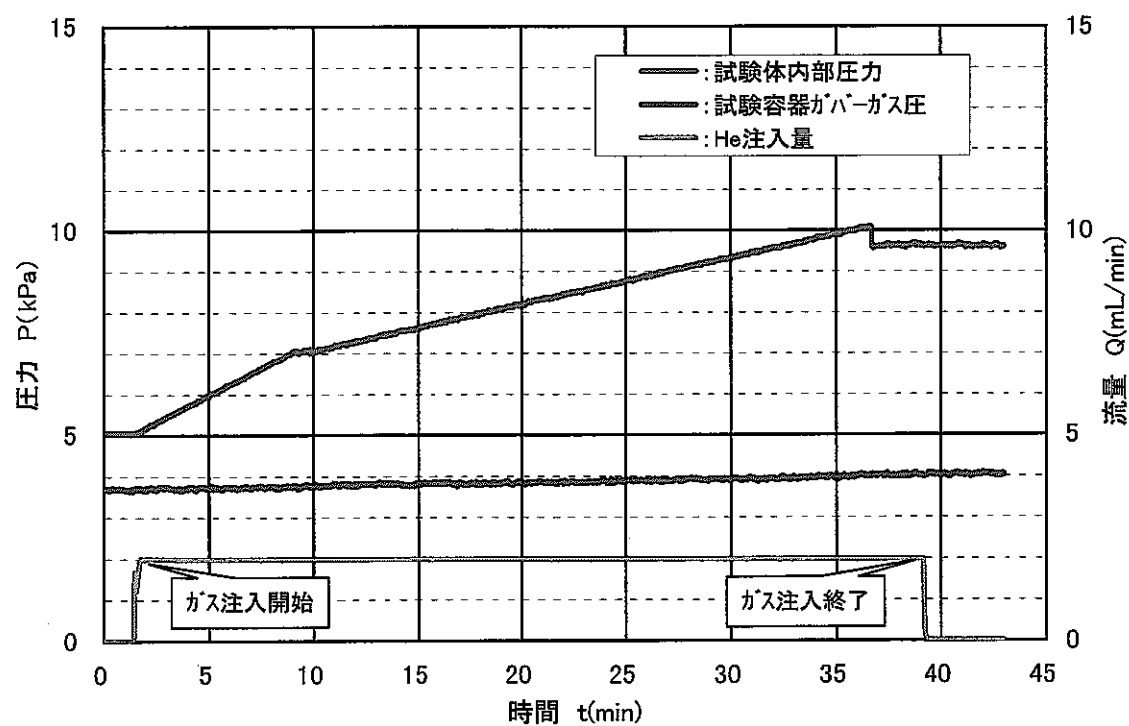
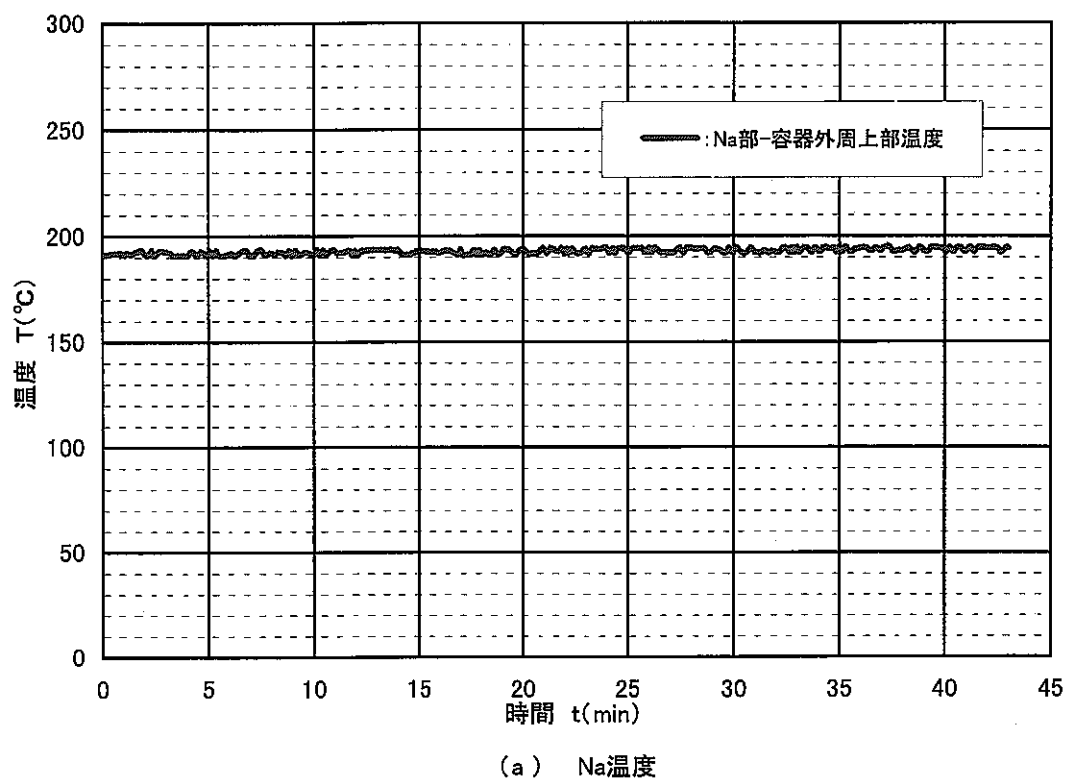
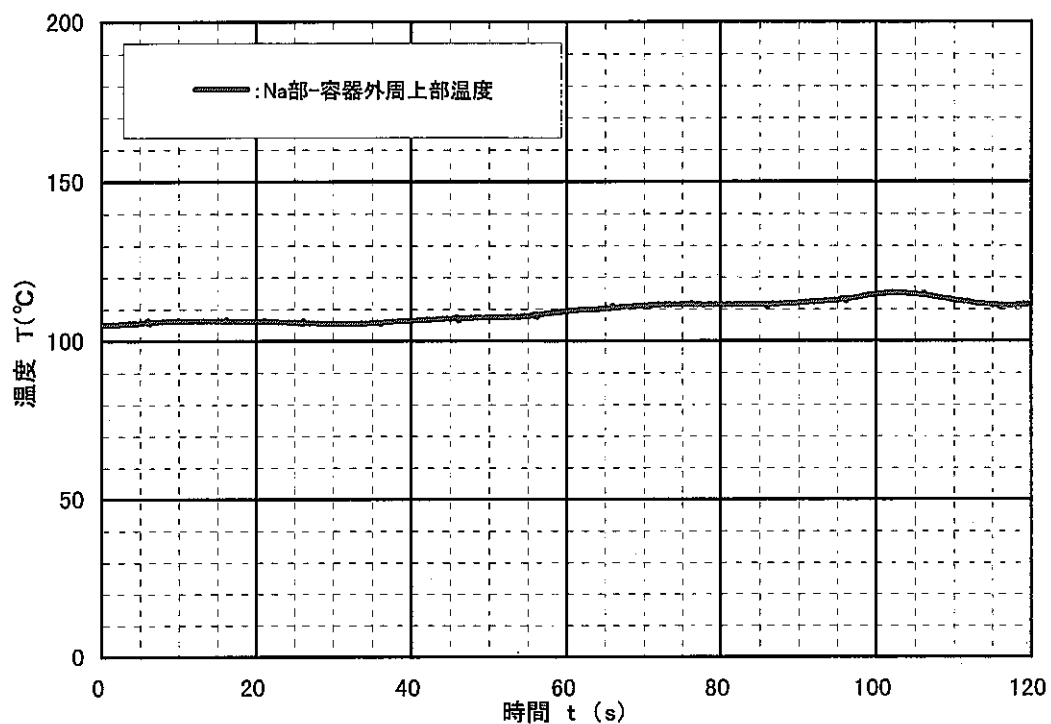
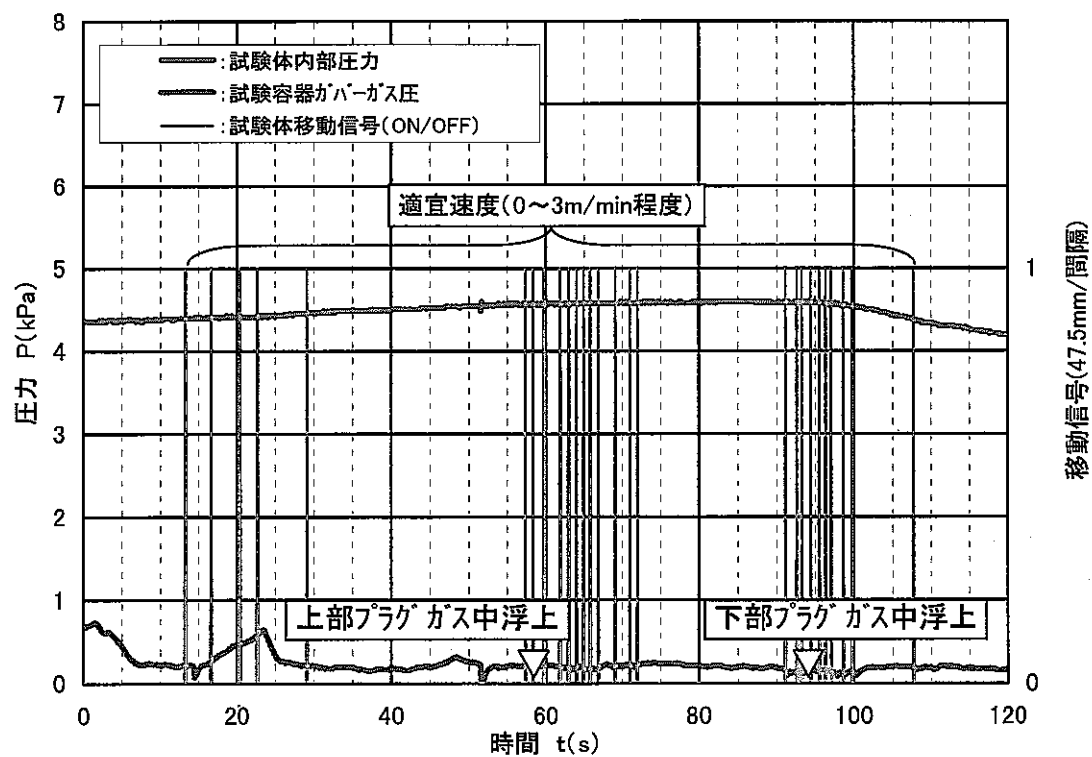


図3.3.4-19 試験体No.2(Na190°C-He注入1セット目)

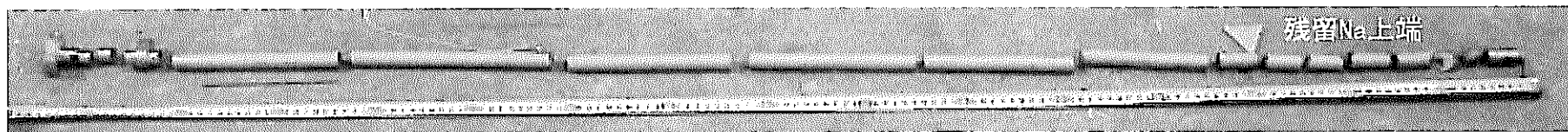


(a) Na温度

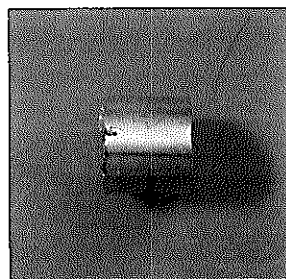


(b) 試験容器、試験体圧力および挿入移動信号

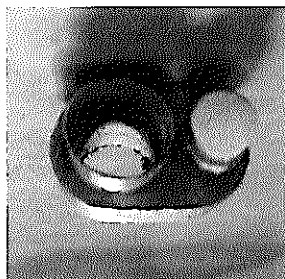
図3.3.4-20 試験体No.2(190°CNa→Ar引抜)



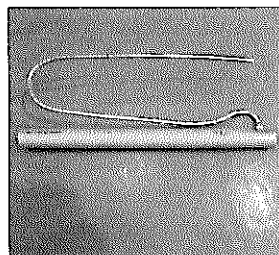
試験体全体



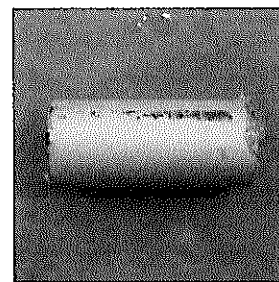
上部プラグ (側視)



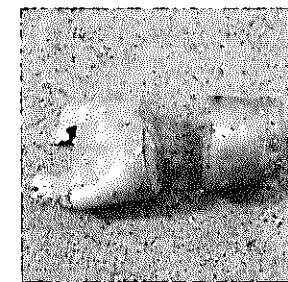
He導入管スッパ



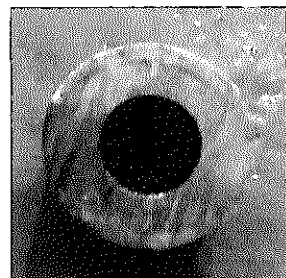
液面計付近 (側視)



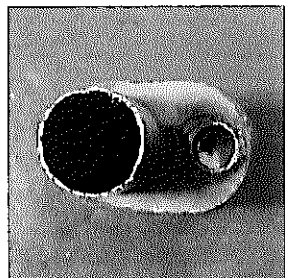
残留Na付近 (側視)



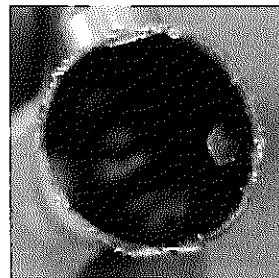
下部プラグ (側視)



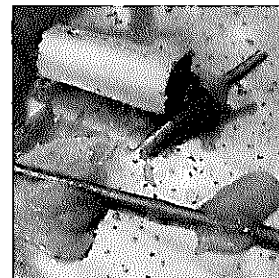
上部プラグ (上視)



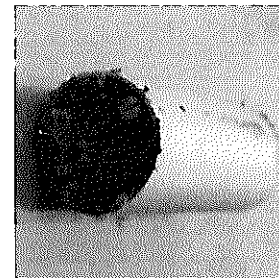
He導入管スッパ



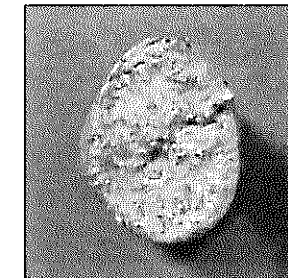
液面計付近 (内部)



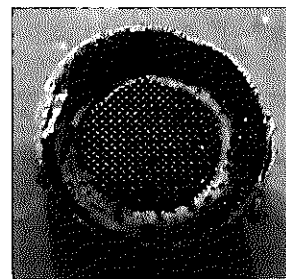
残留Na上水和物



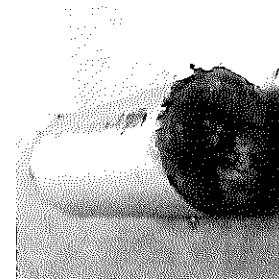
残留Na上端



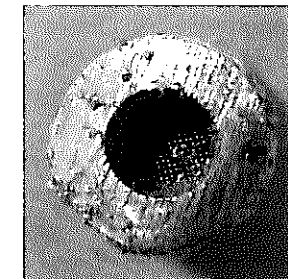
下部プラグ (上視)



上部プラグ (下視)



残留Na断面



下部プラグ (下視)

写真3.3.4-1 NaOH洗浄後 試験体分解調査 (試験体No. 2)

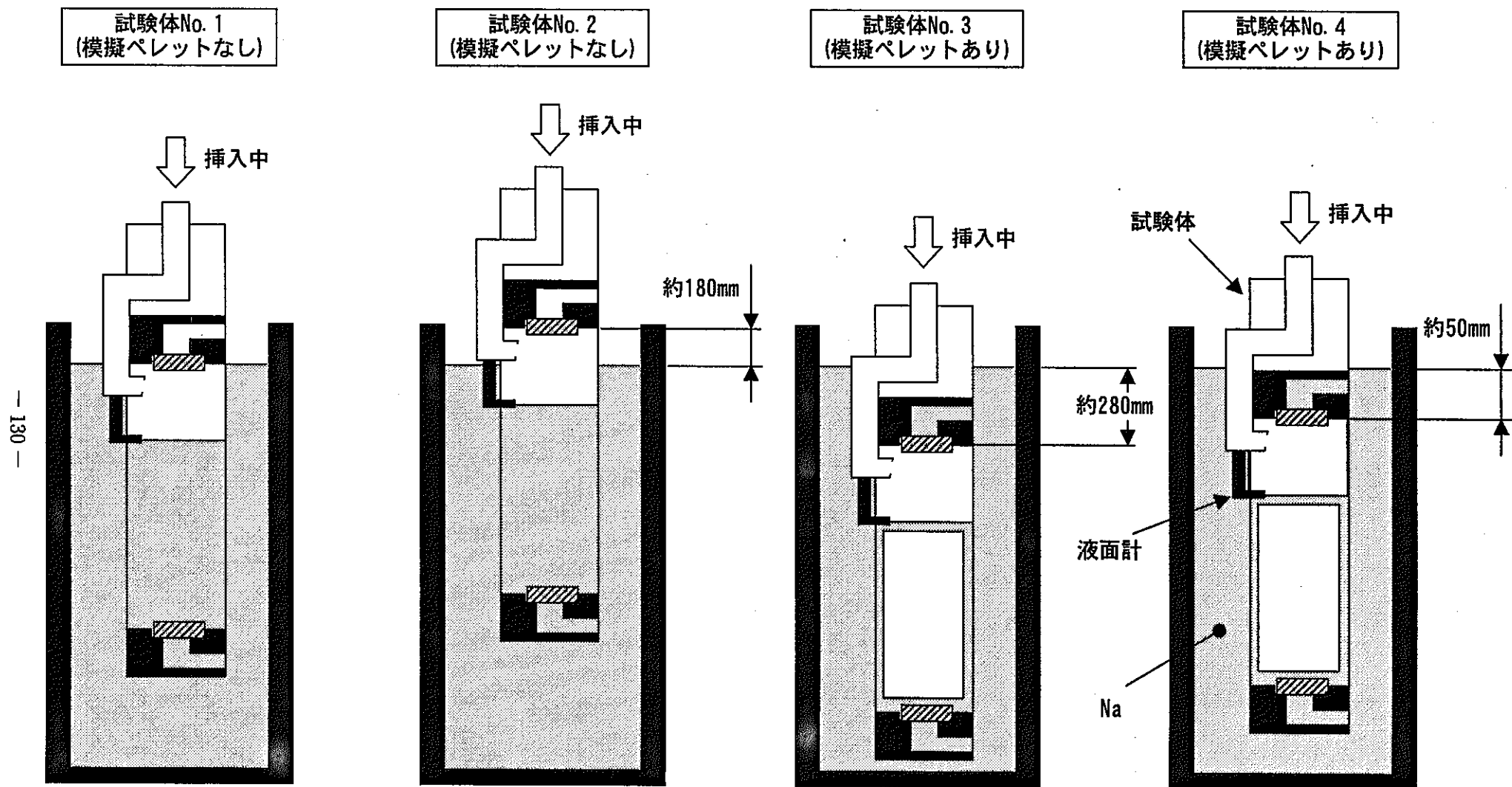


図3. 4. 1-1 ナトリウム充填操作時の各試験体状態（挿入操作中、液面計作動時状態）

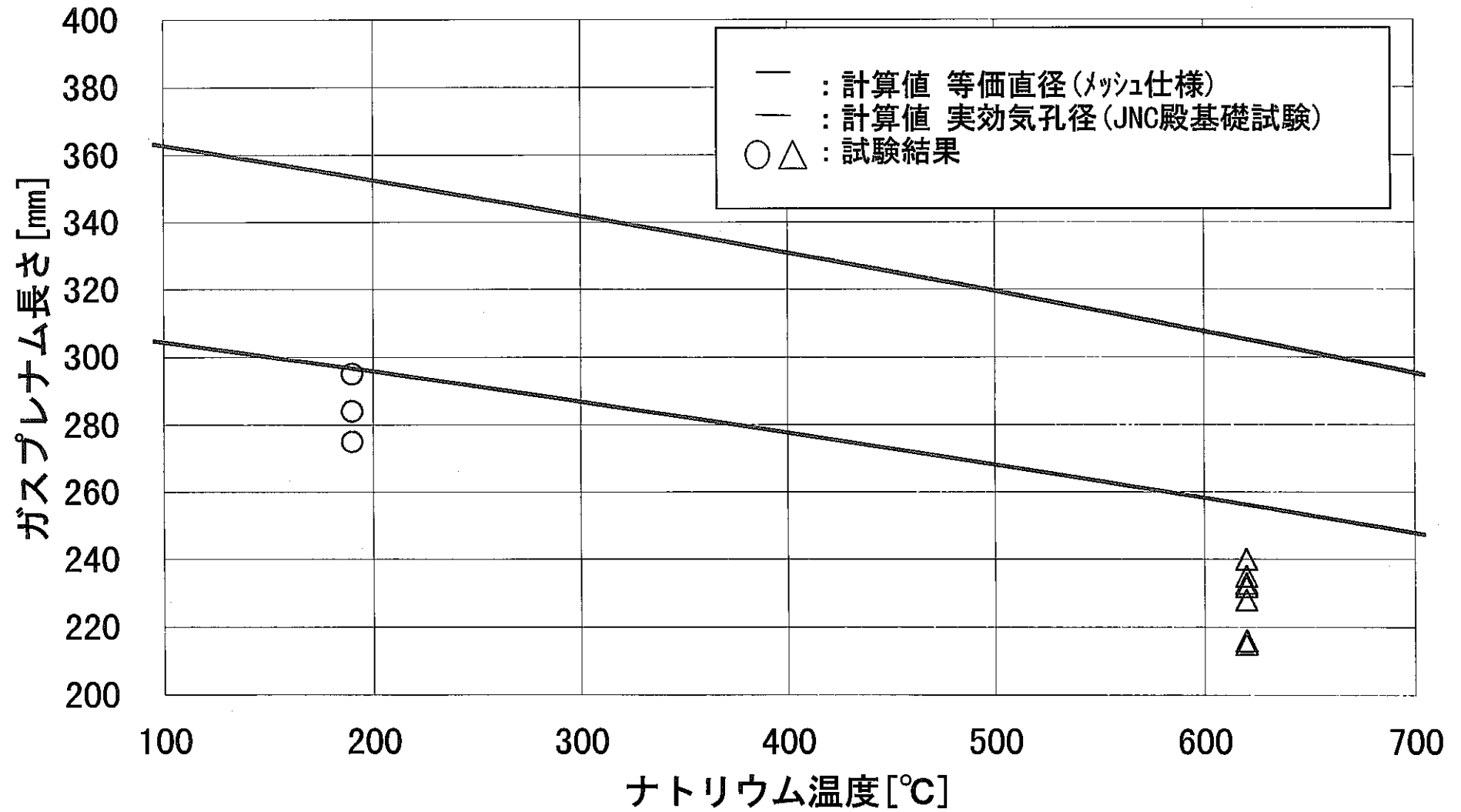


図3. 4. 2-1 ガスプレナム長さ 計算値と実測値の比較

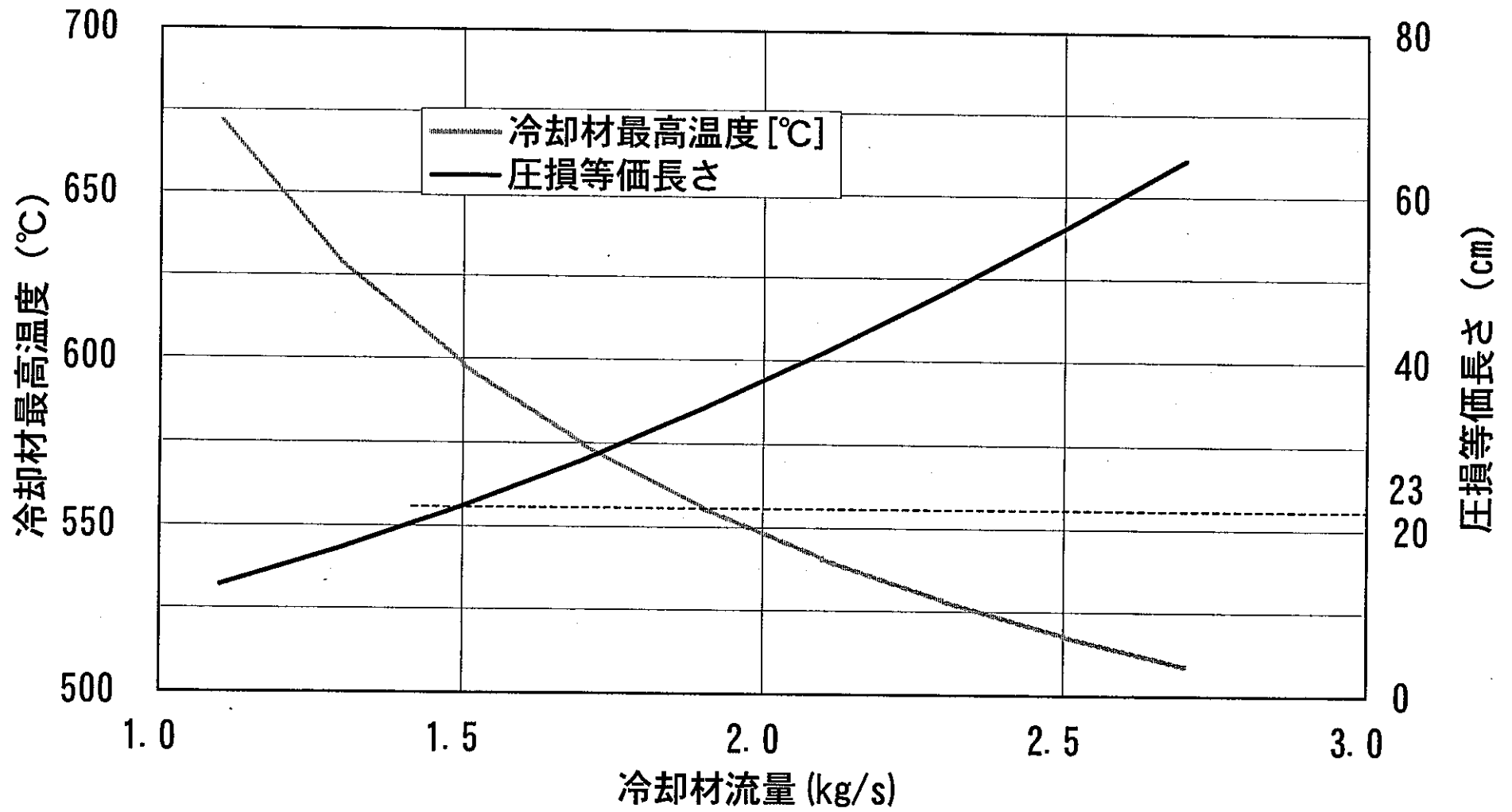


図3. 4. 2-2 冷却材流量と圧損等価長さの関係

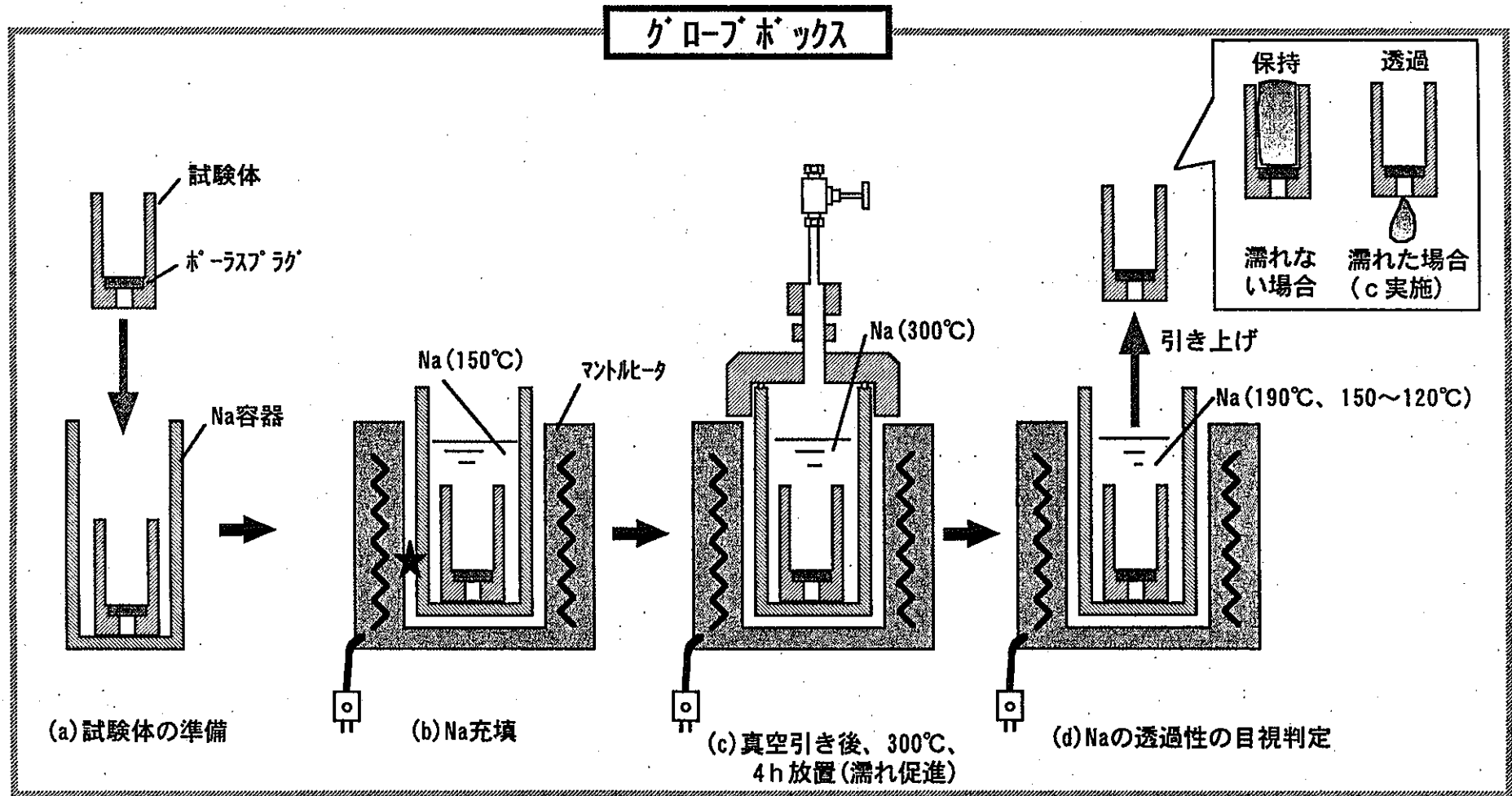


図3. 4. 3-1 ポーラスプラグによるNaの透過性検証実験の概要

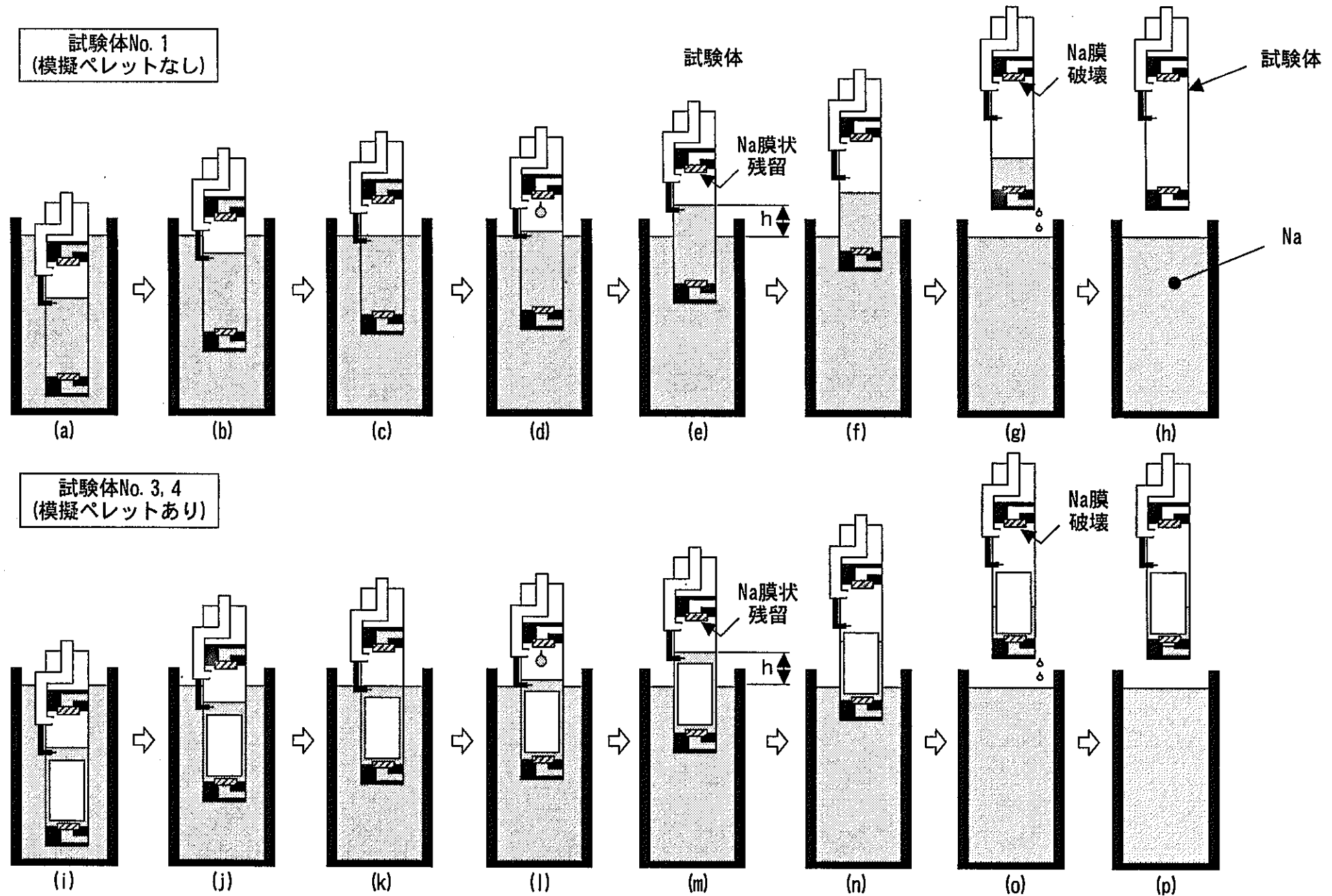


図3. 4. 3-2 ナトリウムドレンのメカニズム (推定)

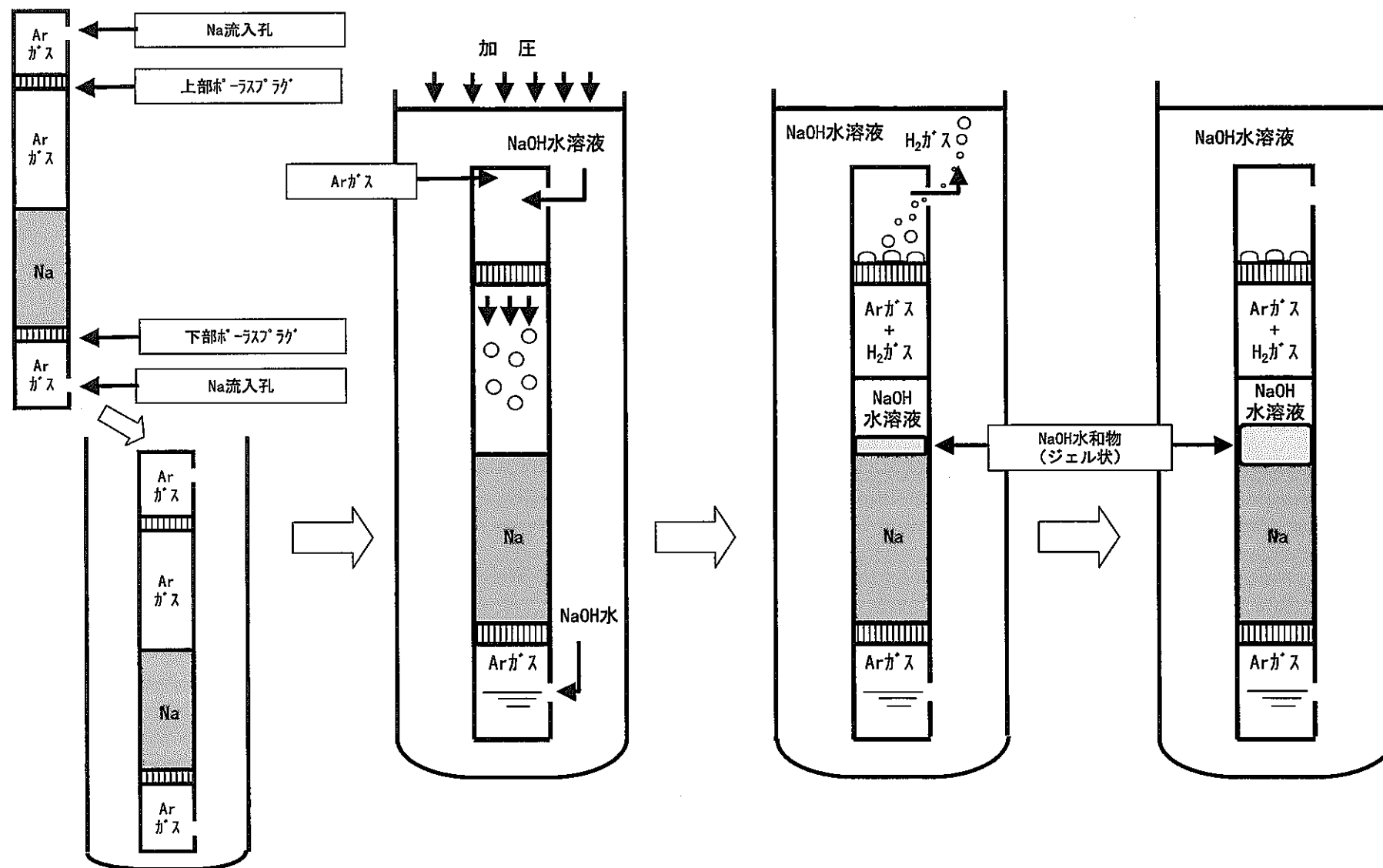


図3. 4. 4-1 NaOH洗浄ができないメカニズム (推定)

上部プラグの Na 透過圧およびガスプレナム長さ

1. 使用計算式

①ナトリウムの表面張力 (J.H.Goldman)

$$\sigma = 240.70 \left(1 - \frac{t + 273}{2509.5} \right)^{1.1320}$$

σ : 表面張力(mN/m)、 t : 温度($^{\circ}C$)

②ナトリウムの密度 (J.P.Stone et al)

$$\rho = 950.1 - 0.22976t - 1.460 \times 10^{-5}t^2 + 5.638 \times 10^{-9}t^3$$

ρ : 密度(kg/m^3)、 t : 温度($98^{\circ}C < t < 1371^{\circ}C$)

③等価直径

$$de = \left(\frac{25.4mm - \text{メッシュ} \times \text{線径}mm}{\text{メッシュ}} \right) \times 10^3$$

de : 等価直径(μm)

④Na 等価圧

$$P = \left(\frac{4 \cdot \sigma}{de} \right) \times 10^3$$

P : Na透過圧(Pa)、 σ : 表面張力(mN/m)、 de : 等価直径(μm)

⑤ガスプレナム長さ

$$h = \left(\frac{4 \cdot \sigma}{de \cdot \rho \cdot g} \right) \times 10^6$$

h : ガスプレナム長さ(mm)、 σ : 表面張力(mN/m)、 de : 等価直径(μm)

ρ : 密度(kg/m^3)、 g : 重力加速度($9.80665m/s^2$)

⑥上部ポーラスプラグ仕様

公称粒度 200 μm 、メッシュ 60、線径 0.18mm

2. 理論計算

2.1 Na 温度 190℃時

上記使用式より算出し、190℃時の表面張力、密度は下記の値となる。

$$\sigma_{190^{\circ}\text{C}} = 240.70 \left(1 - \frac{190 + 273}{2509.5} \right)^{1.1320} = 191 (\text{mN} / \text{m})$$

$$\rho_{190^{\circ}\text{C}} = 950.1 - 0.22976 \times 190 - 1.460 \times 10^{-5} \times 190^2 + 5.638 \times 10^{-9} \times 190^3 = 906 (\text{kg} / \text{m}^3)$$

また、等価直径は使用する上部ポーラスプラグの仕様を式に代入し、下記の値となる。

$$de = \left(\frac{25.4\text{mm} - 60 \times 0.18\text{mm}}{60} \right) \times 10^3 = 243 (\mu\text{m})$$

よって、これらを代入すると、Na 等価圧は、

$$P_{190^{\circ}\text{C}} = \left(\frac{4 \times 191}{243} \right) \times 10^3 = 3.14 \times 10^3 (\text{Pa})$$

となり、ガスプレナム長さは、

$$h_{190^{\circ}\text{C}} = \left(\frac{4 \times 191}{243 \times 906 \times 9.80665} \right) \times 10^6 = 354 (\text{mm})$$

となる。

2.2 Na 温度 650℃時

上記使用式より算出し、190℃時の表面張力、密度は下記の値となる。

$$\sigma_{650^{\circ}\text{C}} = 240.70 \left(1 - \frac{650 + 273}{2509.5} \right)^{1.1320} = 143 (\text{mN} / \text{m})$$

$$\rho_{650^{\circ}\text{C}} = 950.1 - 0.22976 \times 650 - 1.460 \times 10^{-5} \times 650^2 + 5.638 \times 10^{-9} \times 650^3 = 796 (\text{kg} / \text{m}^3)$$

また、等価直径は使用する上部ポーラスプラグの仕様を式に代入し、下記の値となる。

$$de = \left(\frac{25.4\text{mm} - 60 \times 0.18\text{mm}}{60} \right) \times 10^3 = 243 (\mu\text{m})$$

よって、これらを代入すると、Na 等価圧は、

$$P_{650^{\circ}\text{C}} = \left(\frac{4 \times 143}{243} \right) \times 10^3 = 2.35 \times 10^3 (\text{Pa})$$

となり、ガスプレナム長さは、

$$h_{650^{\circ}\text{C}} = \left(\frac{4 \times 143}{243 \times 796 \times 9.80665} \right) \times 10^6 = 302 (\text{mm})$$

となる。

3. JNC 殿基礎試験結果を反映した理論計算

3.1 Na 温度 190℃時

上記使用式より算出し、190℃時の表面張力、密度は下記の値となる。

$$\sigma_{190^\circ\text{C}} = 240.70 \left(1 - \frac{190 + 273}{2509.5} \right)^{1.1320} = 191 (\text{mN} / \text{m})$$

$$\rho_{190^\circ\text{C}} = 950.1 - 0.22976 \times 190 - 1.460 \times 10^{-5} \times 190^2 + 5.638 \times 10^{-9} \times 190^3 = 906 (\text{kg} / \text{m}^3)$$

また、等価直径は JNC 殿基礎試験結果より、下記の値とする。

$$de = 290 (\mu\text{m})$$

よって、これらを代入すると、Na 等価圧は、

$$P_{190^\circ\text{C}} = \left(\frac{4 \times 191}{296} \right) \times 10^3 = 2.63 \times 10^3 (\text{Pa})$$

となり、ガスプレナム長さは、

$$h_{190^\circ\text{C}} = \left(\frac{4 \times 191}{290 \times 906 \times 9.80665} \right) \times 10^6 = 297 (\text{mm})$$

となる。

3.2 Na 温度 620℃時（試験実測値）

上記使用式より算出し、620℃時の表面張力、密度は下記の値となる。

$$\sigma_{620^\circ\text{C}} = 240.70 \left(1 - \frac{620 + 273}{2509.5} \right)^{1.1320} = 146 (\text{mN} / \text{m})$$

$$\rho_{620^\circ\text{C}} = 950.1 - 0.22976 \times 620 - 1.460 \times 10^{-5} \times 620^2 + 5.638 \times 10^{-9} \times 620^3 = 803 (\text{kg} / \text{m}^3)$$

また、等価直径は JNC 殿基礎試験結果より、下記の値とする。

$$de = 290 (\mu\text{m})$$

よって、これらを代入すると、Na 等価圧は、

$$P_{620^\circ\text{C}} = \left(\frac{4 \times 146}{290} \right) \times 10^3 = 2.01 \times 10^3 (\text{Pa})$$

となり、ガスプレナム長さは、

$$h_{620^\circ\text{C}} = \left(\frac{4 \times 146}{290 \times 803 \times 9.80665} \right) \times 10^6 = 256 (\text{mm})$$

となる。