

鉛ビスマス中のナトリウム中移行挙動予備試験

(研究報告)

2003年6月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division ,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2003

鉛ビスマスのナトリウム中移行挙動予備試験
(研究報告)

斉藤淳一*、高井俊秀*、佐川憲彦*、大野修司*、浜田広次*、宮原信哉*

要旨

高速炉実用化戦略調査研究（フェーズⅠ）では、鉛ビスマスを中間熱媒体として利用する二次系簡素化概念が一つの候補として選定されている。本研究では実用化戦略調査研究（フェーズⅡ）で鉛ビスマスのナトリウム中移行挙動を実験により明らかにすることを目的とする。二次系簡素化の成立性を評価するための基礎データを取得する。400℃で液体ナトリウム中に液体の鉛ビスマスを滴下する試験を2回実施している。以下の結果が得られている。

- (1) L1-1 試験および L1-2 試験後の ICP による分析結果から、ナトリウム中の鉛濃度はビスマス濃度よりも高くなっている。ナトリウム中の鉛の溶解量はビスマスのそれよりも多いことを示している。これらの結果は従来の溶解度の測定結果と一致する。また、残渣中にはビスマスが最も多く含まれていることがわかった。
- (2) ナトリウム中に鉛ビスマスが滴下するとナトリウム液温は上昇する。装置の各部の温度変化から算出した総発熱量は、L1-2 試験で 137 kJ/mol-LBE である。これらの反応熱はリーク検出に適用できる可能性がある。
- (3) L1-1 試験および L1-2 試験後、ナトリウム中に黒い粒状固形物（反応生成物）が観察された。サンプリングフィンガー内の反応生成物を観察した結果、反応生成物は上部で 5~10 μm 程度の微細な粒状である。下部では 50~100 μm 程度の大きさである。
- (4) EDX による成分分析の結果、反応生成物の主な構成元素はナトリウムとビスマスである。XRD により BiNa₃ 金属間化合物の回折ピークが検出されている。主要な反応生成物は BiNa₃ といえる。XRD により Pb₄Na₁₅ の回折ピークも検出されている。しかしながら、SEM において Pb₄Na₁₅ は観察できていない。

さらに、これらの試験および分析結果より、鉛ビスマスのナトリウム中への移行挙動モデルを提案する。

*大洗工学センター 要素技術開発部 熱化学安全試験グループ

Lead-Bismuth Transfer Behavior Preliminary Test in Liquid Sodium
(Research Document)

Jun-ichi SAITO*, Toshihide TAKAI*, Norihiko SAGAWA*, Shuji OHNO*,
Hirotosugu HAMADA*, Shinya MIYAHARA*

Abstract

The simplified secondary sodium cooling system utilized lead-bismuth eutectic as an intermediate coolant has been selected one of candidate system for the "Feasibility Studies on Commercialized Fast Reactor System (Phase I)". The purpose of this study for the "FS (Phase II)" is to understand transfer behavior of lead-bismuth in liquid sodium by experiment. From the experimental results the fundamental data are obtained for the feasibility evaluation of the simplified secondary sodium cooling system. Twice experiments which trickles liquid lead-bismuth into liquid sodium are carried out at 400°C. Following results are obtained.

- (1) From the ICP analyses of L1-1 and L1-2 test, the lead concentration of sodium is higher than the bismuth concentration. This shows that the amount of dissolution of lead into liquid sodium was larger than that of bismuth. This result agrees with data of the previous solubility data in Pb-Na and Bi-Na binary system in sodium. The solid black particles observed in sodium contain a large amount of bismuth.
- (2) Temperature of liquid sodium rises when the drops of liquid lead-bismuth are added into liquid sodium. The total heating value calculated using temperature rises observed at several parts in equipment is 137 kJ/mol-LBE on L1-2 test. This heat of reaction is promising for leak detection of lead-bismuth into sodium.
- (3) Many black solid products are observed in sodium taken from L1-1 and L1-2 test apparatus. The reaction products taken from upper location in a sampling finger are very fine and the size was 5 ~ 10µm. Those from lower location increase in size and the size was 50 ~ 100µm.
- (4) The EDX and XRD analyses show that the reaction products consisted of sodium and bismuth, and the diffraction peaks of an intermetallic compound BiNa₃ are detected, indicating that the principal reaction product is BiNa₃ compound. The diffraction peaks of Pb₄Na₁₅ compound are also detected by XRD. However they are not observed by SEM.

Based on the experimental and analyses results, transfer behavior model of lead-bismuth in liquid sodium is proposed.

*Thermochemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, OEC

目 次

要旨	
Abstract	
図表リスト	
1. 緒言.....	1
2. 試験方法および分析方法.....	2
2. 1 試験装置.....	2
2. 1. 1 試験容器.....	2
2. 1. 2 鉛ビスマス液滴生成部.....	2
2. 1. 3 ナトリウムチャージ・ドレインポット.....	2
2. 1. 4 ガス供給系.....	2
2. 1. 5 温度および圧力.....	3
2. 2 試験条件.....	3
2. 2. 1 指針.....	3
2. 2. 2 試験条件.....	3
2. 3 試験後の分析方法.....	4
2. 3. 1 目的.....	4
2. 3. 2 分析方法および試料作製.....	4
3. 試験および分析結果.....	6
3. 1 L1-1 試験.....	6
3. 1. 1 温度および圧力変化.....	6
3. 1. 2 ICP による分析結果.....	6
3. 2 L1-2 試験.....	7
3. 2. 1 温度および圧力変化.....	7
3. 2. 2 EDX による分析結果.....	8
3. 2. 3 XRD による分析結果.....	9
3. 2. 4 ICP による分析結果.....	10
4. 考察.....	11
4. 1 ナトリウムと鉛ビスマスの反応熱 (L1-2 試験)	11
4. 2 ナトリウムと鉛ビスマスの反応熱 (L1-1 試験)	12
4. 3 反応生成物の化学形態.....	13
4. 4 移行挙動のモデリング.....	14
4. 5 ナトリウム-鉛-ビスマス 3 元系金属間化合物の生成.....	15
4. 6 反応生成物の容積について.....	15
5. 結言.....	17
謝辞.....	18
参考文献.....	19
付録.....	76

図表リスト

図 2-1	鉛ビスマスのナトリウム中移行挙動試験装置フローシート (L1-1 試験).....	2 0
図 2-2	試験容器概略図.....	2 1
図 2-3	鉛ビスマス熔融容器概略図.....	2 2
図 2-4	液滴生成・加熱装置概略図.....	2 3
図 2-5 (a)	サンプリングフィンガーの温度計測位置 (L1-2 試験).....	2 4
図 2-5 (b)	試験容器の温度計測位置 (L1-2 試験).....	2 5
図 2-6	分析対象の部位と分析方法.....	2 6
図 2-7	サンプリングフィンガーからの分析サンプル作製方法 (L1-1 試験).....	2 8
図 2-8	サンプリングフィンガーからの分析サンプル作製方法 (L1-2 試験).....	2 9
図 2-9	分析試料の切り出し方法 (EDX, XRD)	3 0
図 3-1	試験時の各部の温度、圧力履歴 (L1-1 試験).....	3 1
図 3-2	L1-1 試験の各部位から回収したナトリウム中の各元素の存在割合.....	3 3
図 3-3	サンプリングフィンガー部 中心部 水溶液の分析結果.....	3 7
図 3-4	サンプリングフィンガー部 周辺部 水溶液の分析結果.....	3 8
図 3-5	サンプリングフィンガー部 全体 (中心部+周辺部) 水溶液の分析結果.....	3 9
図 3-6	サンプリングフィンガー部 中心部 残渣の分析結果 (L1-1 試験).....	4 3
図 3-7	サンプリングフィンガー部 周辺部 残渣の分析結果 (L1-1 試験).....	4 4
図 3-8	サンプリングフィンガー部 全体 (中心部+周辺部) 残渣の分析結果 (L1-1 試験).....	4 5
図 3-9 (a)	試験時の各部の温度、圧力履歴 (L1-2 試験) (1)	4 6
図 3-9 (b)	試験時の各部の温度、圧力履歴 (L1-2 試験) (2)	4 7
図 3-10 (a)	サンプリングフィンガー上部 (セクション No. 9) の中心部の反応生成物..	4 8
図 3-10 (b)	サンプリングフィンガー上部 (セクション No. 9) の中心部の面分析結果 (反応生成物).....	4 8
図 3-11 (a)	サンプリングフィンガー中部 (セクション No. 5) の中心部の面分析結果 (反応生成物).....	4 9
図 3-11 (b)	サンプリングフィンガー中部 (セクション No. 5) の中心部の面分析結果 (ナトリウム面).....	4 9
図 3-12 (a)	サンプリングフィンガー下部 (セクション No. 1) の中心部の面分析結果 (反応生成物).....	5 0
図 3-12 (b)	サンプリングフィンガー下部 (セクション No. 1) の中心部の面分析結果 (反応生成物).....	5 0
図 3-13	サンプリングフィンガー下部 (セクション No. 1) の周辺部の面分析結果 (反応生成物).....	5 1
図 3-14	サンプリングフィンガー上部 (セクション No. 9) の中心部の XRD 結果.....	5 2
図 3-15	サンプリングフィンガー中部 (セクション No. 5) の中心部の XRD 結果.....	5 3
図 3-16	サンプリングフィンガー下部 (セクション No. 1) の中心部の XRD 結果.....	5 4
図 3-17	サンプリングフィンガー下部 (セクション No. 1) の周辺部の XRD 結果.....	5 5

図 3-18	L1-2 試験の各部位から回収したナトリウム中の各元素の存在割合.....	5 7
図 3-19	サンプリングフィンガー部 中心部 水溶液の分析結果 (L1-2 試験).....	6 0
図 3-20	サンプリングフィンガー部 周辺部 水溶液の分析結果 (L1-2 試験).....	6 1
図 3-21	サンプリングフィンガー部 全体 (中心部+周辺部) 水溶液の分析結果 (L1-2 試験).....	6 2
図 3-22	サンプリングフィンガー部 中心部 残渣の分析結果 (L1-2 試験).....	6 5
図 3-23	サンプリングフィンガー部 周辺部 残渣の分析結果 (L1-2 試験).....	6 6
図 3-24	サンプリングフィンガー部 全体 (中心部+周辺部) 残渣の分析結果 (L1-2 試験).....	6 7
図 4-1	発熱量計算のために代表させた各ナトリウム温度測定用熱電対の温度影響範囲.....	6 8
図 4-2	発熱量計算のために代表させた各ナトリウム温度測定用熱電対の温度影響範囲.....	6 9
図 4-3	発熱量計算のために代表させた各試験容器胴温度測定用熱電対の温度影響範囲.....	7 0
図 4-4	ナトリウム-ビスマス 2 元系状態図.....	7 3
図 4-5	ナトリウム中の鉛およびビスマスの溶解度.....	7 4
図 4-6	ナトリウム-鉛 2 元系状態図.....	7 5
表 2-1	高周波プラズマ発光分光分析装置の測定条件.....	2 7
表 2-2	X 線回折の測定条件.....	2 7
表 3-1	試験装置の各部位から回収したナトリウム中の各元素の含有量および存在割合 (L1-1 試験).....	3 2
表 3-2	サンプリングフィンガー中心部のナトリウムの分析結果 (L1-1 試験).....	3 5
表 3-3	サンプリングフィンガー周辺部のナトリウムの分析結果 (L1-1 試験).....	3 5
表 3-4	サンプリングフィンガー中心部+周辺部のナトリウムの分析結果 (L1-1 試験).....	3 6
表 3-5	サンプリングフィンガー中心部の残渣の分析結果 (L1-1 試験).....	4 1
表 3-6	サンプリングフィンガー周辺部の残渣の分析結果 (L1-1 試験).....	4 1
表 3-7	サンプリングフィンガー中心部+周辺部の残渣の分析結果 (L1-1 試験).....	4 2
表 3-8	試験装置の各部位から回収したナトリウム中の各元素の含有量および存在割合 (L1-2 試験).....	5 6
表 3-9	サンプリングフィンガー中心部のナトリウムの分析結果 (L1-2 試験).....	5 8
表 3-10	サンプリングフィンガー周辺部のナトリウムの分析結果 (L1-2 試験).....	5 8
表 3-11	サンプリングフィンガー中心部+周辺部のナトリウムの分析結果 (L1-2 試験).....	5 9
表 3-12	サンプリングフィンガー 中心部の残渣の分析結果 (L1-2 試験).....	6 3
表 3-13	サンプリングフィンガー 周辺部の残渣の分析結果 (L1-2 試験).....	6 3
表 3-14	サンプリングフィンガー 全体での残渣の分析結果 (L1-2 試験).....	6 4
表 4-1	最大温度差から算出したサンプリングフィンガー内の発熱量 (L1-2 試験).....	7 1
表 4-2	最大温度差から算出した試験容器内の発熱量 (ナトリウム温度を基に算出) (L1-2 試	

験)	7 1
表 4-3 最大温度差から算出した試験容器内の発熱量 (外壁温度を基に算出) (L1-2 試験)	7 1
表 4-4 最大温度差から算出したサンプリングフィンガー内の発熱量 (L1-1 試験)	7 2
表 4-5 最大温度差から算出した試験容器内の発熱量 (外壁温度を基に算出) (L1-1 試験)	7 2
写真 3-1 サンプリングフィンガーから回収したナトリウム試料中の黒い粒 (L1-1 試験).....	3 4
写真 3-2 サンプリングフィンガー内のナトリウムを水蒸気分解したときの残渣の状態 (L1-1 試験)	4 0

1. 緒言

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（フェーズⅠ）で検討および評価されたナトリウム炉の二次系簡素化概念の候補として、鉛ビスマス熱媒体チューブ・三重管型蒸気発生器および鉛ビスマス熱媒体プール・伝熱管分離設置型蒸気発生器が選定されている¹⁾。それらが選定されたのは鉛ビスマスの伝熱特性、構造材料との良好な共存性（耐食性）、ナトリウムや水と激しく反応しないなど漏えい対策を含めた伝熱管破損対応の容易さなどの観点からである。

これらの設計では伝熱管の破損により鉛ビスマスが一次系冷却材中に漏えいすることが想定事象として考えられる。そのため、鉛ビスマスが一次系ナトリウム中に漏えいした場合の挙動およびその影響について把握しておくことが安全上、重要である。具体的にはナトリウム中に混入した鉛ビスマスの炉心特性（核特性、冷却性能）に対する影響、一次冷却系統（配管、ポンプ、弁等）に対する影響、漏えい検出方法、鉛ビスマスが混入したナトリウムの純化方法（復旧方法）等が設計上の課題となる。しかしながら、ナトリウム中の鉛ビスマスの移行挙動を調査した研究は少ない。これまでにナトリウム中に漏えいした鉛ビスマスは反応せず、下方に堆積する可能性があるとの報告¹⁾があるが、ナトリウム中への鉛ビスマスの移行挙動は十分に解明されているとはいえない。

そこで、高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（フェーズⅡ）の一環として、ナトリウム中における鉛ビスマスの移行挙動（固体生成物の生成、溶解、堆積、流動）を実験的に確認することを目的に研究を開始している。本研究の実施においては、鉛ビスマスの取扱いに関する各種実験技術を開発し、鉛ビスマスを中間熱媒体として利用する二次系簡素化型プラントの成立性評価のための基礎データを取得する必要がある。

今回報告する試験は、移行挙動を調査する最初の段階として位置づけ、静止状態のナトリウムコラム上部より液体の鉛ビスマスを滴下し、移行挙動についての基礎的データを得ることに重点を置いている。そして、試験中の装置各部の温度計測や試験後のナトリウムや生成物の分析を行い、以下の点に着目して観測する。

- (1) 鉛ビスマスのナトリウム中への溶解量
- (2) 鉛ビスマスとナトリウムとの反応生成物
- (3) 鉛ビスマスとナトリウムの発熱量（反応熱）

さらに、これらの試験および分析結果より、鉛ビスマスのナトリウムへの移行挙動モデルと反応生成物による体積膨張について考察する。

2. 試験方法および分析方法

鉛ビスマスのナトリウム中移行挙動試験は2回実施した。以下、1回目を「L1-1試験」、2回目を「L1-2試験」という。

2. 1 試験装置

L1-1試験で使用した装置の概略図を図2-1に示す。今回、実施した2回の試験の装置の構成は同一とした。

試験装置は主に試験容器、鉛ビスマス液滴生成部、ナトリウムチャージ・ドレインポットおよびガス供給部より構成した。

本試験は高温ナトリウム中に鉛ビスマスを滴下させて移行挙動を調べる試験であり、これまで鉛ビスマスを扱った経験がないため、安全上の観点から試験装置を高速炉安全第5試験室の既設 SOLFA-2 試験容器内部に設置した。

以下に試験装置各部について説明する。

2. 1. 1 試験容器

図2-2には試験容器の概略図を示す。本試験容器は試験中、液体ナトリウムで満たされており、その中に液滴状の鉛ビスマスを滴下した。試験容器の本体はステンレス鋼 (SUS304) の2B配管 (外径 60.5mm、厚さ 2.8mm)、長さ 530mm で内容積は約 2200cm³とした。下部には滴下した後の鉛ビスマスを採取するための外径 12mm、内径 10mm、長さ 130mm のサンプリングフィンガーを設置した。また、上部の正面から 90° 方向に鉛ビスマス滴下後、サンプリングフィンガー内に堆積した鉛ビスマスと試験容器内のナトリウムを分離するための閉止栓落下装置を設置した。これはサンプリングフィンガー内の鉛ビスマスと試験容器内のナトリウムとの二次的な反応 (移行) を避けるためである。

2. 1. 2 鉛ビスマス液滴生成部

溶融している鉛ビスマスを滴下する液滴生成部は鉛ビスマス溶融容器と液滴加熱装置より構成した。図2-3には鉛ビスマス溶融容器の概略図と図2-4には液滴生成加熱装置の概略図を示す。鉛ビスマスは溶融容器において 200℃程度に加熱され液体となる。そして、液滴生成・加熱装置に送られ、試験温度まで加熱され、液滴生成ノズルを通過することにより微小液滴が生成される。鉛ビスマスの液滴生成については生成挙動確認試験を事前に実施している。

2. 1. 3 ナトリウムチャージ・ドレインポット

ナトリウムチャージ・ドレインポットは、試験前に試験容器内にナトリウムを充填するためと、試験後に試験容器内のナトリウムをドレインするために設置した。ポットの内容積は約 2400cm³である。

2. 1. 4 ガス供給系

(1) 鉛ビスマス溶融容器不活性化ライン

本ラインはアルゴンガスにより試験中に鉛ビスマス溶融容器内を不活性雰囲気にするために設置した。

(2) ノズル不活性化ライン

ヘリウムガスにより試験開始前に鉛ビスマスの液滴生成ノズル内部が酸化されるのを防ぐために本ラインは設置した。

(3) 試験容器不活性化ライン

ヘリウムガスにより試験容器内を不活性ガス雰囲気にして、①ナトリウムの燃焼、②液滴観察用窓へのナトリウムミストの付着、③鉛ビスマス液滴の酸化、それぞれを防止するために本ラインは設置した。

(4) ナトリウムカバーガスライン

本ラインはアルゴンガスによりナトリウムチャージ・ドレインポットのナトリウム容器内を不活性ガス雰囲気にするとともに、各容器間のナトリウム移送時の圧力を調整するために設置した。

2. 1. 5 温度および圧力

試験容器および鉛ビスマス液滴生成部の温度制御と鉛ビスマスとナトリウムが接触した際に生じる温度変化を測定するために、試験装置の各部に熱電対を設置した。図 2-1 には L1-1 試験で設置した熱電対の位置を示す。

熱電対を鉛ビスマス供給部に 6 箇所、試験容器に 4 箇所、ナトリウムチャージ・ドレイン系に 4 箇所、防液堤内に 2 箇所の計 16 箇所設置した。尚、TC06, TC07, TC08, TE09 は全て壁面に設置した。

L1-2 試験ではこれに加え、サンプリングフィンガーと試験容器内部の温度変化を詳細に調査するため、熱電対を増設し温度計測を行った。図 2-5 (a) および (b) には増設した熱電対の位置を示す。TE20 から TE37 の合計 18 本の熱電対を増設した。

試験時に観察窓に過大な圧力をかけないようにするとともに、排気ラインの閉塞の有無を確認するため、試験容器不活性化ラインの途中に電子式圧力伝送器を設置し圧力を監視した。

2. 2 試験条件

2. 2. 1 指針

試験条件はプラント設計側からの鉛ビスマス漏えい時の漏えい量などの情報を基に設定した。今回、実施した L1-1 試験および L1-2 試験の試験条件は同一とした。

鉛ビスマス熱媒体プール・伝熱管分離設置型蒸気発生器においてナトリウム伝熱管の破損を想定した場合、ナトリウム中の鉛ビスマスの濃度は伝熱管の破損状況によって大きく異なる。本試験では最も過酷な条件である漏えい量が多い伝熱管下端でギロチン破断の発生を想定する。鉛ビスマスが一次系ナトリウム中に混入した場合、伝熱管内だけでなく一次系ナトリウムの全量が混合する対象となるため、ナトリウム中の鉛ビスマスの濃度は約 0.72wt. % になる。

今回の実験における鉛ビスマスの漏えい量は 0.72 wt. % を一つの目安として、その 5 倍の 3.6 wt. % の鉛ビスマスがナトリウム中に混入した場合を設定した。ナトリウムおよび鉛ビスマスの温度は概念検討時の鉛ビスマス漏えい温度の 400℃ とした。

2. 2. 2 試験条件

今回の試験条件は以下のように設定した。

- (1) ナトリウム温度：400℃
- (2) 鉛ビスマス温度：400℃
- (3) ナトリウム量：1.1kg
- (4) 滴下鉛ビスマス量：40g（ナトリウム中に鉛ビスマス濃度は約 3.5wt. %）
- (5) 鉛ビスマス液滴径：約 1～2mm（使用ノズル：内径φ4.35mm、φ0.5mm のオリフィス付）
- (6) 試験容器雰囲気：ヘリウム雰囲気
- (7) 試験時の予熱制御方法：PID による自動制御（L1-1 試験）

入力固定定温運転（L1-2 試験）

温度制御方法は L1-1 試験と L1-2 試験で異なった制御方法を採用した。その理由は後述するが、L1-1 試験において鉛ビスマス滴下終了後、ナトリウムドレイン中に試験容器下部とサンプリングフィンガー下部の温度が上昇する現象が起きた。この現象の発生原因を解明するために、L1-2 試験では出力固定方式の制御方法を採用した。

2. 3 試験後の分析方法

2. 3. 1 採用した分析装置

鉛ビスマスのナトリウム中移行挙動を明らかにするためにはナトリウム中の鉛やビスマスの分布状態、溶解量を知ることが必要である。そこで、試験後のナトリウム中の鉛およびビスマスの含有量の分析を行った。分析には高周波プラズマ発光分光分析装置（Inductively Coupled Plasma Spectrometer: ICP）を用いた。ICP による分析を採用した理由は本試験で主要な元素であるナトリウム、鉛、ビスマスを同時に分析が可能で低濃度でも定量性が良好なこと、さらに、これまでナトリウムの定量分析の実績があることである。

また、鉛ビスマスとナトリウムが反応した際に生じる反応生成物の形態や成分を知ることにも重要である。そこで、L1-2 試験のサンプリングフィンガー内のナトリウム中の反応生成物を走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscopy: SEM）およびエネルギー分散型 X 線分析装置（Energy Dispersive X-ray spectrometer: EDX）により、その形状、大きさ、分散状態などの観察と成分分析を行った。また、反応生成物の同定のために X 線回折（X-Ray Diffractometer: XRD）を行った。図 2-6 には分析を行ったナトリウムの部位と分析方法を示す。

2. 3. 2 分析方法および試料作製

(1) 高周波プラズマ発光分光分析（ICP）

分析にはパーキンエルマ製 OPTIMA300 を用いた。測定条件は表 2-1 に示す。

試験容器内のナトリウム（試験終了後はナトリウムチャージ・ドレインポット内）の分析試料作製は、次の手順で行った。大気中でナトリウムに純水をスプレーし表面から徐々に潮解させた。そのときの水溶液を全量回収し、そのうちの一部（100cc）を採取して分析のためのサンプルとした。潮解現象を利用してサンプルを作製した理由は、ナトリウムと水との反応熱による温度上昇を抑えるためである。同様に試験容器内のレデューサー部のナトリウムについても潮解により水溶液化し、分析試料を作製した。

図2-7にはL1-1試験のサンプリングフィンガーを切断してから、分析用サンプルを作製するまでの工程を示す。サンプリングフィンガー内のナトリウムを詳細に分析するため、サンプリングフィンガーを一定の大きさ（厚さ10mm）に切断し、それを一つのセクションとして、その中の元素分析を行った。切断後のセクションは内部のナトリウムを押し出し、中心部（ナトリウム）と周辺部（切断片）を分けて、アスピレータで排気するデシケーター中で水蒸気分解し、水溶液化し分析用サンプルとした。水蒸気分解後、水溶液化できなかった残渣は、王水（濃塩酸と濃硝酸の約3：1の混合液）を用いた酸処理により溶解し分析に供した。

図2-8にはL1-2試験のサンプリングフィンガーからの試料作製の工程を示す。L1-2試験では最初にEDXおよびXRD用試料を作製するため、切り出した後、水蒸気分解、水溶液と残渣の分離を行いL1-1試験と同様に分析用サンプルとした。

(2) エネルギー分散型X線分析（EDX）およびX線回折（XRD）

EDXによる分析は日立製作所製のS-510型SEMを用いて、表面の生成物の形状および分布状態を観察した。その後、堀場製作所製、EMAX5770型EDXを用いて電子顕微鏡で観察した位置で面分析を実施した。面分析の元素は酸素(O)、ナトリウム(Na)、鉛(Pb)、ビスマス(Bi)を主な元素とした。また、X線回折には株式会社リガク製RAD-Bシステム、データ処理システムには株式会社マック・サイエンス製XPRESSを用いた。試料調整は試料と酸素との反応を抑制するため、不活性ガス充填グローブボックス内で行い、真空ホルダーに試料を充填してX線回折に供した。X線発生および回折条件は表2-2に示す。

図2-9にはEDXおよびXRD用試料の作製方法の概略を示す。EDXおよびXRDはL1-2試験のサンプリングフィンガー内ナトリウムのみ実施した。セクションNo.1, 5, 9よりEDX用およびXRD用に試料を切り出した。各セクション内では半径方向に反応生成物の分布状態に変化があることが予想されるため、試料はセクションの中心部と周辺側に近い部分の2箇所から採取した。

3. 試験および分析結果

3. 1 L1-1 試験

L1-1 試験は試験中の温度および圧力を計測し、試験後にはナトリウムおよびナトリウム中の反応生成物について ICP 分析により成分を調べている。それらの結果について、以下に述べる。

3. 1. 1 温度および圧力変化

図 3-1 には L1-1 試験時の各部の温度、圧力の経時変化を示す。この図から以下のことがわかる。

- 1) 鉛ビスマスの液滴生成ノズル部 (TE05) の温度が試験開始後、最大で 3℃程度低下している。そして、この温度低下は約 40 秒で元の設定温度に戻っている。
- 2) 試験容器中段部の外壁温度 (TC07) が試験開始直後 (鉛ビスマス滴下後)、約 15℃上昇している。その後、徐々に温度は低下している。
- 3) サンプリングフィンガー底部 (TE09) の温度が鉛ビスマス滴下直後に上昇している。その後、温度は降下しているが鉛ビスマス滴下終了後 (試験開始 8 分後) に上昇している。さらに、11 分後に急激な温度上昇が計測されている。
- 4) 試験容器下部 (TC08) の温度が試験開始後から徐々に上昇している。また、試験開始約 11 分後、制御温度より約 7℃低下している。その後、14 分まで温度上昇が計測されている。

3. 1. 2 ICP による分析結果

(1) 試験装置各部におけるナトリウム中の各元素の比較

表 3-1 および図 3-2 には試験装置の各部から回収したナトリウムに含有される元素の含有量と割合を示す。ここで、サンプリングフィンガーの値は詳細に分析した結果からサンプリングフィンガー全体の値として計算して求めたものである。この表および図より、試験容器のナトリウム中には鉛およびビスマスの含有量はそれぞれ 0.6wt.%、0.01wt.%となっている。また、レデューサー部のナトリウム中には鉛およびビスマスの含有量はそれぞれ 1.0wt.%および 0.05wt.%となっている。さらに、サンプリングフィンガーのナトリウム中には鉛が 1.8wt.%、ビスマスが 0.03wt.%の含有量となっている。

これらのことから、本試験のナトリウム中における鉛およびビスマスの含有量は試験容器が最も少なく、次にレデューサー部、サンプリングフィンガーの順番になっていることがわかる。特に鉛濃度は試験装置の下方ほど高くなっていることがわかる。また、いずれの部位においても鉛の存在割合 (wt.%) はビスマスのそれよりも大きい。

サンプリングフィンガーの残渣の分析結果より残渣中にはビスマス (76.4wt.%) と鉛 (23.3wt.%) の存在割合が多く、ナトリウム (0.3wt.%) の存在割合は極端に少ないことがわかる。表中に示した試験容器とレデューサー部の残渣の分析結果はろ過した残渣の中から無作為に残渣を取り出し、それを EDX により分析した結果である。試験容器とレデューサー部は残渣の量が多く、処理できないため EDX による分析を試みた。したがって、この値が残渣の成分を代表しているものとはいえないので、分析結果は参考値として括弧で示した。

(2) サンプリングフィンガー部のナトリウム

写真3-1にはサンプリングフィンガーから採取されたナトリウムを示す。ナトリウム中には黒い固形物が肉眼でも観察される。

表3-2～表3-4にはサンプリングフィンガー部（中心部、周辺部および全体）のナトリウムの詳細な分析結果を示す。また、図3-3～図3-5にはそれらを棒グラフ化したものを示す。これらの結果より、ナトリウム中に含まれる鉛およびビスマスの量は、それぞれ最大で5.3wt.%(0.6at.%)および0.18wt.%(0.02at.%)である。また、鉛の含有量はビスマスのそれに比べて大きいことがわかる。つまり、ナトリウム中に鉛は多く存在することを示している。

(3) サンプリングフィンガー部の残渣

写真3-2にはサンプリングフィンガー内のナトリウムを水蒸気分解したときの残渣を示す。水蒸気分解により黒い固形物で残渣が回収された。この残渣を酸処理し ICP により分析を行った。

サンプリングフィンガー部（中心部、周辺部及び全体）の残渣の分析結果を表3-5～表3-7に示す。これらの結果を棒グラフ化したものを図3-6～図3-8に示す。これらの結果より、残渣中には中心部、周辺部ともナトリウムが0.7wt.%(5.9at.%)以下と鉛とビスマスに比べて極端に少ないことがわかる。鉛とビスマスを比較するとビスマスの方が中心部、周辺部とも多く含まれている。その存在割合は中心部の方が高い。つまり、残渣はビスマスが主な成分であることがわかる。

図3-6より中心部の鉛とビスマスの濃度の差が大きいことがわかる。逆に図3-7から周辺部は鉛とビスマス濃度差が小さいことがわかる。また、中心部および周辺部とも鉛とビスマスの濃度が相反関係にあることが興味深い結果として得られている。つまり、鉛濃度の高いときはビスマス濃度が低く、鉛濃度が低いときはビスマス濃度が高い。

セクション位置による濃度変化の傾向は周辺部と中心部で異なっているが、全体（周辺部+中心部）の濃度変化の傾向は中心部の変化に一致している。

3. 2 L1-2 試験

L1-2 試験では試験中の温度および圧力を計測し、試験後にはEDX および XRD によりナトリウムおよび反応生成物の分析、同定を行っている。また、ICP 分析によりナトリウムおよびナトリウム中の反応生成物の成分を調べている。それらの結果を以下に述べる。

3. 2. 1 温度および圧力変化

図3-9(a)および(b)にはL1-2試験時の各部の温度、圧力の経時変化を示す。この図から以下のことがわかる。

- 1) 試験開始直後、試験容器内のナトリウム液面から約30mm および約150mm 下の部分(TE33, TE34)で温度が数℃低下している。
- 2) 試験開始直後に試験容器内のナトリウム液面から約270mm、390mm、510mm 下(TE35, TE36 および TE37)では温度が最大で20℃程度上昇している。
- 3) サンプリングフィンガーの壁面(TE20～TE32)でも同様の温度変化の傾向が得られ、試験開始直後に最高で18℃程度上昇している。

- 4) 試験容器壁面 (TC08) は試験開始直後から温度上昇が計測されている。
- 5) 試験容器中段部分 (TC07) は試験開始直後から温度上昇が計測されているが、上昇の程度が緩やかで、ナトリウムドレイン直後まで上昇傾向である。
- 6) L1-1 試験で測定された試験容器下部 (TC08) とサンプリングフィンガー下部 (TC09) のナトリウムドレイン中における温度の再上昇は観測されていない。

3. 2. 2 EDX による分析結果

サンプリングフィンガーの上、中、下部 (セクション No. 1, 5, 9) の中心部分について EDX による分析を行った。下部 (セクション No. 1) については中心部分に加えて周辺部の分析も行った。

サンプリングフィンガーの分析結果について以下に説明する。

(1) サンプリングフィンガー上部 (セクション No. 9) の中心部

図 3-10 (a) にはナトリウム中の反応生成物を示す。サイズが $5\mu\text{m}$ 程度の粒状の反応生成物が多く観察できる。小さな反応生成物がいくつか集まっている様子もみられる。図 3-10 (b) には反応生成物とその周辺ナトリウムの EDX による元素分布を示す。この結果、反応生成物にはビスマスが多く分布し、ナトリウムも一緒に分布している。鉛は反応生成物中にほとんど分布していない。酸素は全面的に分布しているため、試料作製中および分析装置に装着する際に付着したものと考えられる。定量分析の結果からも Na (91.1at.%) と Bi (8.9at.%) が主成分であり、鉛はほとんど含まれていない。今回の面分析は反応生成物が小さいため、生成物の周囲や下地のナトリウムも含めた分析となる。そのため、反応生成物中の実際のナトリウム量よりも多くのナトリウムを検出する可能性がある。

(2) サンプリングフィンガー中部 (セクション No. 5) の中心部

図 3-11 (a) にはナトリウム中の反応生成物と元素分布を示す。反応生成物のサイズはばらつきはあるが $10\mu\text{m}$ 程度で上部 (セクション No. 9) と比較して大きいものが観察された。EDX による生成物およびその周辺の元素分布から、反応生成物にはビスマスが多く分布し、鉛はほとんど分布していない。定量分析の結果からも Na (92.7at.%) と Bi (7.3at.%) が主成分で Pb はほとんど含まれていない。この反応生成物は上部の生成物と同様のものといえる。

また、反応生成物のないナトリウム部分の面分析を行った。分析した面の SEM 観察結果を図 3-11 (b) に示す。この部分の定量分析の結果、Na (99.5at.%)、Pb (0.5at.%) で Bi はほとんど含まれていないことがわかる。

(3) サンプリングフィンガー下部 (セクション No. 1) の中心部

図 3-12 (a) にはナトリウム中の反応生成物と元素分布を示す。反応生成物は $25\mu\text{m}$ ~ $50\mu\text{m}$ 程度の大きなものが観察できる。反応生成物は小さなものが凝集して形成している様子が観察できる。EDX による反応生成物およびその周辺の元素分布より、上部、中部と同様に反応生成物はビスマスが主に分布しており、鉛はほとんど分布していない。定量分析の結果、Na (94.4at.%) と Bi (5.3at.%) が主成分で Pb (0.2at.%) はほとんど含まれていない。若干、上部、中部よりは含まれている傾向がみられるが全体からみると微量である。また、比較的大きな反応生成物の定量分析の結果を図 3-12 (b) に示す。図中の矢印で示した反応生成物を分析した。その結果、Na (90.8at.%)、Bi (9.2at.%) であることがわかる。これは反応生成物の主成

分はナトリウムとビスマスであることを示している。

また、反応生成物のないナトリウム部分の面の定量分析を行った結果、Na (89.3at.%)、Pb (10.4at.%)、Bi (0.3at.%) となっており、ナトリウム中には鉛が多く含まれていることがわかる。

(4) サンプルングフィンガー下部 (セクション No. 1) の周辺部

図3-13にはナトリウム中の反応生成物を示す。反応生成物は50 μm 以上の大きなものが非常に多く観察された。中心部と同様に小さなものが凝集して形成されている。定量分析の結果、反応生成物の成分としては中心部と同様にNa (97.6at.%)とBi (2.2at.%)が主成分で、鉛 (0.3at.%)はほとんど含まれていない。

(5) SEMによる反応生成物の観察結果とEDXによる分析結果のまとめ

- ・ 反応生成物にはビスマスとナトリウムが含まれており、鉛はほとんど含まれていない。この結果はICPによる残渣の分析結果の鉛よりビスマスがより多く含まれている点で一致している。
- ・ ナトリウム中には主に鉛が含まれており、ビスマスはほとんど含まれていない。この結果はICPによるナトリウム (水溶液) の分析結果でもビスマスよりも鉛が多く含まれている結果と一致している。
- ・ 反応生成物の大きさはサンプルングフィンガーの下の方ほど大きい。ただし、一つの粒が大きいのではなく、小さなサイズの粒が集まって大きくなっている。

3. 2. 3 XRDによる分析結果

図3-14~図3-17にはサンプルングフィンガーのナトリウム中の反応生成物についてXRDによる分析結果を示す。

(1) サンプルングフィンガー上部 (セクション No. 9) の中心部

XRDによる回折結果を図3-14に示す。この結果より、ナトリウムの回折ピークが最も強く検出されている。ナトリウムの回折ピーク以外に BiNa_3 と $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ の回折ピークも検出されている。また、水酸化ナトリウム NaOH の弱い回折ピークもいくつか検出されている。回折角度 (2θ) が 67° より高角度側に同定できない回折ピークがいくつか存在している。

(2) サンプルングフィンガー中部 (セクション No. 5) の中心部

XRDによる回折結果を図3-15に示す。この結果より、ナトリウムの回折ピークが強く検出されている。また、サンプルングフィンガー上部と同様に BiNa_3 と $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ の回折ピークも多く検出されている。水酸化ナトリウム NaOH の回折ピークもいくつか検出されている。回折角度 (2θ) が 65° 付近より高角度側に同定できない回折ピークが存在している。

(3) サンプルングフィンガー下部 (セクション No. 1) の中心部

XRDによる回折結果を図3-16に示す。この結果より、この試料においては水酸化ナトリウムの回折ピークが強く検出されていることがわかる。その次にナトリウムと反応生成物の BiNa_3 と $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ の回折ピークが検出されている。

(4) サンプルングフィンガー下部 (セクション No. 1) の周辺部

XRDによる回折結果を図3-17に示す。この結果より、ナトリウムの回折ピークが強く検出されている。また、水酸化ナトリウム NaOH のピークも強く検出されている。さらに、 BiNa_3

と Pb_4Na_{15} の回折ピークも多く検出されている。水酸化ナトリウム $NaOH$ の回折ピークもいくつか検出されている。回折角度 (2θ) が 70° 付近から高角度側に同定できない回折ピークが存在している。

(5) XRD による分析結果のまとめ

- すべての試料からナトリウム、水酸化ナトリウム $NaOH$ 、 $BiNa_3$ および Pb_4Na_{15} のピークが検出されている。
- セクション No. 5 の試料を除き、ピークの強度は Na が最も強く、次に $BiNa_3$ と Pb_4Na_{15} のピークが検出されている。
- すべての試料において水酸化ナトリウム ($NaOH$) のピークが検出されたのは、試料のナトリウム表面が酸素と水分に反応し潮解したためと考えられる。
- サンプルフィンガーの位置による $BiNa_3$ 、 Pb_4Na_{15} のピークが強度の違いは見られていない。
- すべての試料において、高角度側に同定できない弱いピークが検出されている。

3. 2. 4 ICP による分析結果

(1) 試験装置各部におけるナトリウム中の各元素の比較

表 3-8 および図 3-18 には試験装置各部から回収したナトリウム中の鉛、ビスマスの含有量と存在割合を示す。L1-1 試験では試験装置、レデューサー部とも水溶液と残渣で分けて分析したが、L1-2 試験では一緒に分析を行った。

試験容器、レデューサー部とも鉛が 0.6wt.%、0.3wt.% とビスマスよりも多く含まれている。L1-1 試験と比較すると試験容器における鉛とビスマスの存在割合に大きな違いはないが、レデューサー部には違いがある。L1-2 試験の方が鉛の存在割合が小さく、ビスマスのそれは大きくなっている。

(2) サンプルフィンガー部のナトリウム

表 3-9～表 3-11 および図 3-19～図 3-21 にはサンプルフィンガー内のセクション No. 1, 5, 9 のナトリウムの分析結果を示す。ビスマスの存在割合は 0.03wt.%～0.04wt.% と中心部、周辺部さらにサンプルフィンガーの位置により大きな違いはない。それに対して、鉛の存在割合は中心部の方が周辺部に比べて 0.6wt.%～1.7wt.% と高いことがわかる。また、ナトリウム中にはビスマスより鉛の方が多く含まれていることもわかる。

L1-1 試験と比較すると鉛濃度の方がビスマス濃度に比べて高いことは一致している。

(3) サンプルフィンガー部の残渣

表 3-12～表 3-14 および図 3-22～図 3-24 にはサンプルフィンガー内のセクション No. 1, 5, 9 の残渣の分析結果を示す。これらの結果より、残渣中にはビスマスが最も多く含まれていることがわかる。また、ナトリウムと鉛の存在割合はサンプルフィンガーの位置により大きく変化している。

L1-1 試験の分析結果と比較すると、いずれの試験とも残渣中にはビスマスが最も多く含まれている点で一致している。L1-2 試験の方が残渣中にナトリウムが多く含まれていた。この点は L1-1 試験と大きく異なっている。

4. 考察

4. 1 ナトリウムと鉛ビスマスの反応熱 (L1-2 試験)

ナトリウム中に鉛ビスマスが移行した時にナトリウム温度が上昇し発熱が生じることが 2 回の試験により明らかになった。本試験では試験容器およびサンプリングフィンガー各部の温度を測定している。そこで、この計測結果よりナトリウムと鉛ビスマスの反応熱を考察する。特に L1-2 試験では詳細に温度測定を行っている。そこで、最初に L1-2 試験の測定結果について解析する。

試験中に生じる発熱には二つの原因が考えられる。一つはナトリウムと鉛ビスマスが反応生成物を形成する際の反応熱、もう一つは鉛およびビスマスがナトリウム中に溶解する際の溶解熱である。今回の実験ではそれらの区別はできないため、単純にナトリウムと鉛ビスマスの反応による発熱量として考えた。

(1) サンプリングフィンガー部の発熱量

試験時のサンプリングフィンガーの温度測定結果より、発熱量を算出する。

L1-2 試験の試験開始時のナトリウム液中およびサンプリングフィンガー壁面に設置した熱電対 (TE20~TE37) の初期温度と試験時の最高 (最低) 到達温度の差から最大温度差を求める。さらに、各部の熱容量 (各セクションの位置と熱電対の設置位置の関係を図 4-1 に示す) と最大温度差から鉛ビスマスとナトリウムの反応時の発熱量を算出する。

各部の熱容量より全体の発熱量を求める。尚、各部の熱容量の詳細な計算は付録に示す。

$$\text{発熱量} = \sum (\text{各セクションの熱容量}) \times (\text{最大温度差}) \dots \dots \dots (1)$$

計算結果を表 4-1 に示す。この表よりサンプリングフィンガー内の総発熱量は 440J と算出された。

(2) 試験容器部の発熱量 (ナトリウム液温を基に算出)

試験容器内のナトリウム液温の変化からナトリウムおよび試験容器胴の熱容量を計算する。図 4-2 には熱電対の位置とその温度影響範囲を示す。なお、本計算ではナトリウム液面より上の試験容器胴の熱容量は無視し、試験容器はナトリウムと同温であると仮定した。

試験容器胴各部の熱容量と各部の最大温度差より、試験容器内における発熱量を計算する。

$$\text{発熱量} = \sum (\text{各試験容器胴の熱容量}) \times (\text{最大温度差}) \dots \dots \dots (2)$$

計算結果を表 4-2 に示す。この表より試験容器胴内の総発熱量は 22033J と算出された。

(3) 試験容器部の発熱量 (試験容器外壁温度を基に算出)

試験容器外壁温度の変化からナトリウムおよび試験容器胴の熱容量を計算する。図 4-3 には熱電対の位置とその温度影響範囲を示す。なお、本計算ではナトリウム液面より上の試験容器胴の熱容量は無視し、試験容器はナトリウムと同温であると仮定した。

試験容器胴各部の熱容量と各部の最大温度差より、試験容器内における発熱量を計算する。

$$\text{発熱量} = \Sigma (\text{各試験容器胴の熱容量}) \times (\text{最大温度差}) \dots \dots \dots (3)$$

計算結果を表4-3に示す。この表より試験容器胴内の総発熱量は20340 Jと算出された。

(3)では試験容器の外壁の温度を基に発熱量を算出した。(2)ではナトリウム液温を直接、測定した結果を用いて発熱量を算出した。その結果はおおよそ10%の差であることがわかった。ナトリウム液温を直接、測定した方がロスは少なく発熱の正確な値を示していると考えられる。そこで、試験時における総発熱量の算出には発熱部分に近い温度を計測している試験容器内のナトリウム液温を基に算出した熱量を利用することとした。

(4) 試験時における総発熱量

サンプリングフィンガー部および試験容器部の発熱量の計算結果を基に試験時における総発熱量を計算する。

$$\begin{aligned} \text{総発熱量} &= \text{サンプリングフィンガー部の発熱量} + \text{試験容器部の発熱量} \\ &= 440 + 22033 \text{ J} \\ &= 22473 \text{ J} \approx 22.5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

以上の結果から、鉛ビスマスとナトリウムの反応による総発熱量は約22.5 kJであることがわかった。

さらに、L1-2試験では34.1gの鉛ビスマスをナトリウム中に滴下している。試験条件では鉛ビスマスは40gであるが、試験後、鉛ビスマスが溶融容器本体下部に残存しているのが確認された。その残存量が5.9gであったため、滴下された鉛ビスマスは34.1gである。そこで、滴下した鉛ビスマスがすべてナトリウムと反応したとして、鉛ビスマスの1g当たりの発熱量を計算すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{発熱量 (鉛ビスマス 1g 当たり)} &= 22473 / 34.1 \\ &= 659.0 \text{ J/g-LBE} \end{aligned}$$

また、滴下した鉛ビスマスをモルで換算すると1mol=208.2gであるので、1mol当たりの発熱量は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{発熱量 (鉛ビスマス 1mol 当たり)} &= 22473 / (34.1/208.2) \\ &= 137.2 \text{ kJ/mol-LBE} \end{aligned}$$

4. 2 ナトリウムと鉛ビスマスの反応熱 (L1-1 試験)

L1-1試験においてもL1-2試験と同様に最大温度差から総発熱量を算出する。L1-1試験ではナトリウムドレイン中に試験容器下部(TC08)およびサンプリングフィンガー下部(TE09)で温度上昇が計測された。この理由として、当初、ナトリウムと鉛ビスマスが反応して生成した反応生成物が二次的な反応を起こしたのではないかと予測された。しかし、温度保持に出

力固定方式を採用した L1-2 試験では温度の上昇が計測されなかった。このことから、L1-1 試験では温度保持を PID 制御で行っているため、閉止栓落下による温度低下を抑制するため、ヒーター出力が自動的に制御（昇温）されたことが温度上昇の原因と考えられる。このように L1-1 試験では正確な反応熱が計測できているか不確かな部分もあるが、参考までに発熱量を求めてみる。L1-1 試験の最大温度差はナトリウムドレイン前までに計測された値を用いて計算した。最大温度差からサンプリングフィンガーと試験容器内の発熱量を算出した結果を表 4-4 と表 4-5 に示す。計算方法は L1-2 試験と同様である。この表より L1-1 試験におけるナトリウムと鉛ビスマスの総発熱量は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{総発熱量} &= \text{サンプリングフィンガー部の発熱量} + \text{試験容器部の発熱量} \\ &= 308 + 34485 \text{ J} \\ &= 34793 \text{ J} \approx 34.8 \text{ kJ} \end{aligned}$$

以上の結果から、L1-1 試験における鉛ビスマスとナトリウムの反応による総発熱量は約 34.8 kJ であることがわかった。L1-2 試験と比較すると約 1.6 倍である。L1-1 試験における温度測定は熱電対の数が少ないことから大まかな計算になっていると考えられる。そのことから、L1-1 試験と L1-2 試験の発熱量は概ね近い値が得られていると考えられる。

さらに、L1-1 試験では 40g の鉛ビスマスをナトリウム中に滴下している。滴下した鉛ビスマスがすべてナトリウムと反応したとして、鉛ビスマスの 1g 当たりの発熱量を計算すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{発熱量 (鉛ビスマス 1g 当たり)} &= 34793 / 34.1 \\ &= 869.8 \text{ J/g-LBE} \end{aligned}$$

また、滴下した鉛ビスマスをモルで換算すると 1mol=208.2g であるので、1mol 当たりの発熱量は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{発熱量 (鉛ビスマス 1mol 当たり)} &= 34793 / (34.1/208.2) \\ &= 181.1 \text{ kJ/mol-LBE} \end{aligned}$$

4. 3 反応生成物の化学形態

L1-2 試験後の EDX および XRD による分析結果より鉛ビスマスとナトリウムの反応による生成物について考察する。

EDX による分析結果から、観察されたほとんどの反応生成物にはナトリウムとビスマスが含まれていた。鉛はほとんど含まれていなかった。そこで、反応生成物はナトリウム-ビスマス 2 元系金属間化合物と予想される。ナトリウム-ビスマス 2 元系状態図を図 4-4²⁾ に示す。この図よりナトリウム-ビスマス系には BiNa₃、BiNa の 2 つの金属間化合物がある。

一方、XRD の結果よりナトリウムの回折ピークの他に BiNa₃ の回折ピークも検出された。このピークはナトリウムのピークの次に強い強度で得られている。そのため、絶対量も多いと考えられる。

以上の分析結果から、ナトリウムと鉛ビスマスが反応して生じる主要な反応生成物は BiNa₃ であると考えられる。

一般的に融点の高い化合物は高温でも強く結合しているため熱的に安定である。つまり、高融点の金属間化合物ほど生成しやすいと考えるのが一般的である。ただし、成分の条件もあるので、今回の試験の場合、ナトリウムが豊富にある条件で融点の高い金属間化合物を考える必要がある。状態図から BiNa_3 は融点が 845°C と高く、ナトリウムリッチの金属間化合物である。これらのことから BiNa_3 は最も生成しやすいと推測できる。

また、XRD の結果より、 $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ のピークも BiNa_3 と同様に検出された。ピークの強度は BiNa_3 と同程度と考えられる。しかしながら、SEM 観察および EDX の分析結果では粒子として $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ を検出できなかった。EDX の分析結果では反応生成物のないナトリウムの面において鉛が多く検出された。これらのことから、 $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ はナトリウム中に微細に分散する状態で存在している可能性がある。

反応生成物に関する考察は今回の試験条件での結果から推論したものであり、試験温度や鉛ビスマスの滴下（漏えい）条件によって、反応生成物の形状や成分は変化する可能性がある。

4. 4 移行挙動のモデリング

これまでの分析結果および基礎データを基にナトリウム中での鉛ビスマスの移行挙動モデルを以下のようにモデリングすることができる。

前提条件となる試験条件は以下の通りである。

鉛ビスマス量（濃度）：3.6wt.%（鉛：1.6wt.%、ビスマス：2.0wt.%）

試験温度： 400°C

- ① ナトリウム中に鉛ビスマスが滴下される。（試験開始）
- ② ナトリウム中で鉛ビスマスは液体のためそれぞれがナトリウムと反応または溶解する。
- ③ 図4-5³⁾のナトリウム中の鉛とビスマスの溶解度と温度の関係から、 400°C における鉛およびビスマスの溶解度はそれぞれ、100wt.%、0.47wt.%である。このことから、鉛はナトリウム中に溶解するが、ビスマスは溶解しないことが考えられる。つまり、ナトリウム中に溶解しきれないビスマスが存在する。
- ④ ナトリウムと鉛ビスマスが反応し発熱を生じる。この原因としては2つのことが考えられる。一つは鉛およびビスマスがナトリウム中に溶解する際に発生する溶解熱、もう一つはビスマスがナトリウムと反応生成物を形成する際の反応熱である。
- ⑤ ナトリウム中のビスマスはナトリウムとの金属間化合物 BiNa_3 （反応生成物）を生成する。
- ⑥ 生成する反応生成物は最初、微細（サンプリングフィンガーの上部で観察された $5\mu\text{m}$ 程度またはそれ以下）であると考えられる。その後、反応生成物どうして凝集し、サイズが大きくなり沈下する。サイズの大きくなった反応生成物はサンプリングフィンガーの下部に堆積する。
- ⑦ 試験終了後のサンプリングフィンガーの冷却中にナトリウム温度が低下し、ナトリウム中の鉛の溶解度が低下したときに、Na-Pb系の金属間化合物が晶出すると考えられる。冷却中に生成するため、Na-Pb系金属間化合物の生成量は少ないと考えられる。特に急

冷されるほど、その量は少なくなるといえる。

以上が試験結果および分析結果から想定されるナトリウム中の鉛ビスマスの移行挙動モデルである。この②から⑤は溶解が先に起こるのか、反応が生じ反応生成物が溶解するのかは、本試験からでは判断できない。

いずれにしても、この考察から試験温度でナトリウム中の鉛の溶解度が十分である場合は、反応生成物はナトリウム-ビスマスの2元系金属間化合物（特に BiNa_3 ）を想定していればよいと考えられる。ただし、ナトリウム温度が 250°C 以下になった場合はナトリウム中の鉛の溶解度も低下するため、ナトリウム-鉛の反応生成物の晶出を考慮する必要があると思われる。そのとき生成する金属間化合物としては図4-6²⁾に示すナトリウム-鉛2元系状態図より、 $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ 、 Pb_2Na_5 、 Pb_4Na_9 、 PbNa が候補として考えられる。それぞれの融点は大きな差 ($403^\circ\text{C}\sim 372^\circ\text{C}$) がないため、熱的な安定性はほぼ同程度と考えられる。そこで、成分を考えるとナトリウムリッチの $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ が最も生成しやすいと考えられる。ただし、鉛ビスマスがナトリウム中に漏えいした後もナトリウムの温度が 400°C で一定に保たれるのであれば、ナトリウム-鉛2元系金属間化合物の融点近辺のため、その存在は難しいと考えられる。

4. 5 ナトリウム-鉛-ビスマス3元系金属間化合物の生成

本試験の結果から、ナトリウム-ビスマスの2元系の反応生成物が主に検出された。ここではナトリウム-鉛-ビスマス3元系金属間化合物が反応生成物として生成する可能性について考える。4.4の移行挙動モデルより 400°C で鉛ビスマスが3.6wt.%の試験条件ではナトリウム-鉛2元系金属間化合物の生成は難しいと考えられる。つまり、平衡状態で考えた場合、鉛はナトリウムの溶解度範囲内であるため晶出しない。ナトリウム-鉛2元系金属間化合物が生成しない条件下では3元系金属間化合物の生成は難しいと考えられる。

3元系金属間化合物が生成する条件として以下のことが考えられる。

- ・ 試験温度が低い場合（ナトリウム中における鉛の溶解度が低い場合）
- ・ ナトリウム中の溶解度を超える鉛（ビスマス）量が滴下された場合

これらの条件のもとでナトリウム-鉛-ビスマス3元系金属間化合物が生成する可能性があると考えられる。

例えば、ループ内に比べて温度が極端に低下するプラント内のコールドトラップなどの部位または漏えいした鉛ビスマスが多量に停留する部位において生成する可能性が考えられる。

4. 6 反応生成物の容積

4.4の考察より主要な反応生成物は BiNa_3 が考えられると述べた。そこで、滴下された鉛ビスマスのビスマスがすべて BiNa_3 を生成したと考えた場合の比体積計算する。 BiNa_3 の密度は $3.7\text{g}/\text{cm}^3$ と報告されている⁴⁾ ので、その値を用いて計算する。

試験で滴下された鉛ビスマスの重量を40gとして BiNa_3 の体積を計算すると 7.9cm^3 となる。試験のサンプリングフィンガー一部は内径10mm、長さ140mmであるため、体積は 11cm^3 となる。 BiNa_3 が生成・凝集・沈降し、サンプリングフィンガー内に密に詰まった場合はすべて収まる。

しかしながら、SEM 観察の結果からもわかるように、反応生成物は微細でナトリウムと混合状態であるため、反応生成物はサンプリングフィンガーに沈降するだけでなく、試験容器内にも滞留（浮遊）すると考えられる。

5. 結言

実用化戦略調査研究（フェーズⅡ）におけるナトリウム中における鉛ビスマスの移行挙動を実験的に確認することを目的として、各種実験技術を開発し、鉛ビスマスを中間熱媒体として利用する二次系簡素化型プラントの成立性評価のための基礎データを取得した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) L1-1 試験およびL1-2 試験後のナトリウムの ICP による分析結果から、ナトリウム中の鉛濃度はビスマス濃度よりも高くなっている。つまり、ナトリウム中の溶解量は鉛の方がビスマスよりも多いことがわかる。これらは従来のナトリウム-鉛およびナトリウム-ビスマス 2 元系の溶解度の測定結果と一致する。また、残渣中にはビスマスがナトリウムや鉛に比べ多く含まれている。
- (2) ナトリウム中に鉛ビスマスが滴下されるとナトリウム液温は上昇する。装置の各部の温度上昇から算出した総発熱量は、L1-2 試験で 137 kJ/mol-LBE であった。この温度上昇の原因として、鉛ビスマスとナトリウムの反応生成物の形成による反応熱および鉛、ビスマスがナトリウム中に溶解する際に生じる溶解熱が考えられる。これらの反応熱はリーク検出に応用できる可能性がある。
- (3) L1-1 試験およびL1-2 試験後、ナトリウム中に黒い固形物（反応生成物）が観察される。サンプリングフィンガー内の反応生成物を観察した結果、上部で 5~10 μm 程度の微細な粒状であるが、下部では 50~100 μm 程度の大きさである。
- (4) EDX および XRD による成分分析の結果、反応生成物の主な構成元素はナトリウムとビスマスであり、 BiNa_3 の金属間化合物である可能性が高い。XRD により $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ の回折ピークも検出されるが、SEM によっては $\text{Pb}_4\text{Na}_{15}$ は観察されない。
- (5) 今回の実験結果を基に鉛ビスマスのナトリウム中移行挙動モデルを考案した。

謝辞

今回の試験および分析を実施するにおいて、多大なるご助力をいただいた東興機械株式会社の鈴木和右氏、樋田和彦氏、深作和男氏、吉田高広氏および常陽産業株式会社の加藤一憲氏に心より感謝します。

参考文献

- 1) 堀 徹、川崎信史、笠井重夫、此村 守、“ナトリウム冷却炉の二次系簡素化概念に関する研究－平成 12～13 年度の研究成果のまとめ－”、JNC TY9400 2002-018,(2002).
- 2) T.B.Massalski et al. : Binary Alloy Phase Diagram 2nd. Edition, ASM, Ohio, p.762, p.773, p.2722 (1990).
- 3) H.U.Borgstedt and Cherian K. Mathews: Applied Chemistry of Alkali Metals, Plenum Press, New York, p.180 (1987).
- 4) P.Villars and L.D.Calvert: Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases, vols.1-3, ASM, Ohio, p.925 (1985).

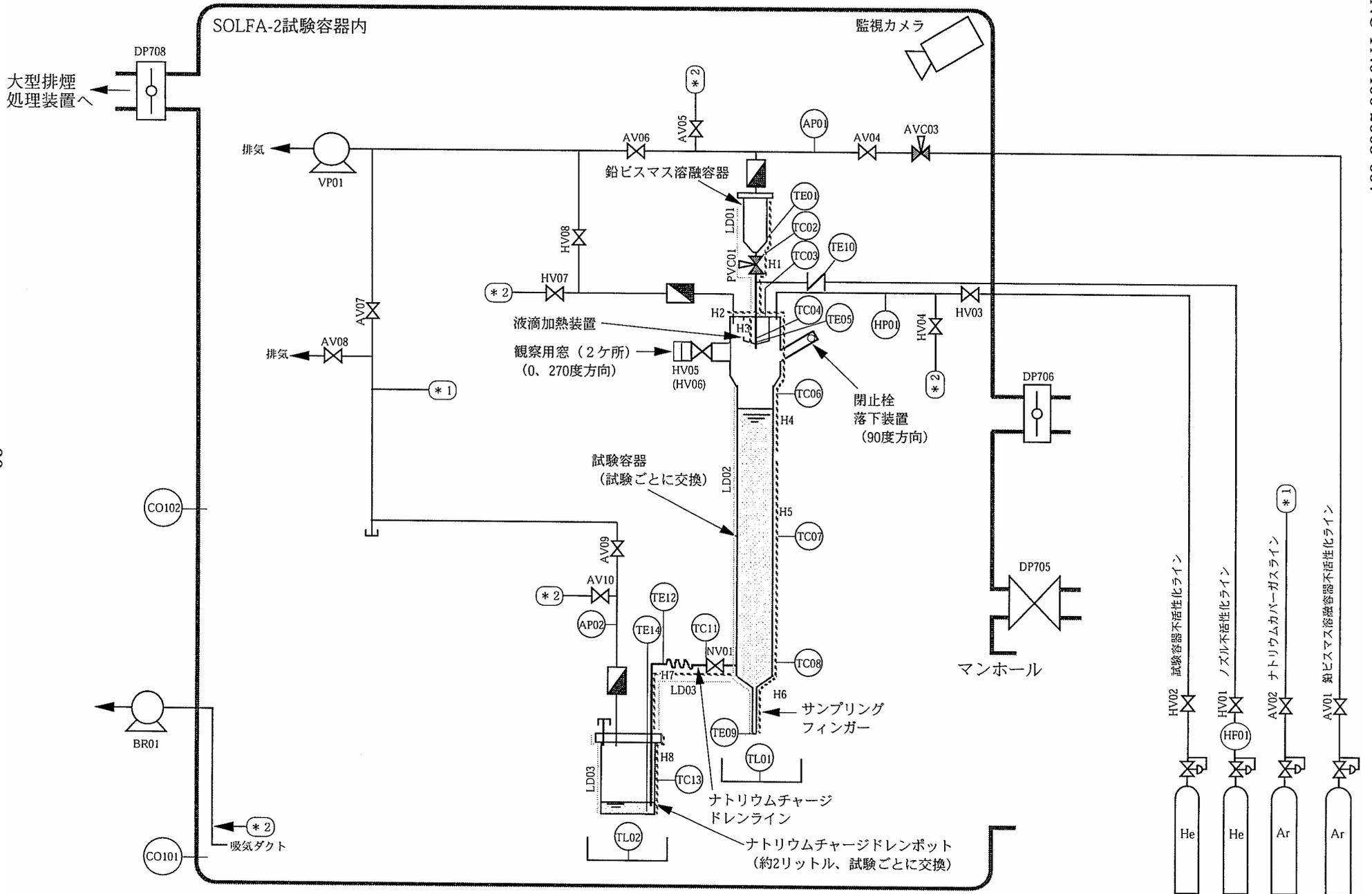


図2-1 鉛ビスマスのナトリウム中移行挙動試験装置フローシート (L1-1試験)

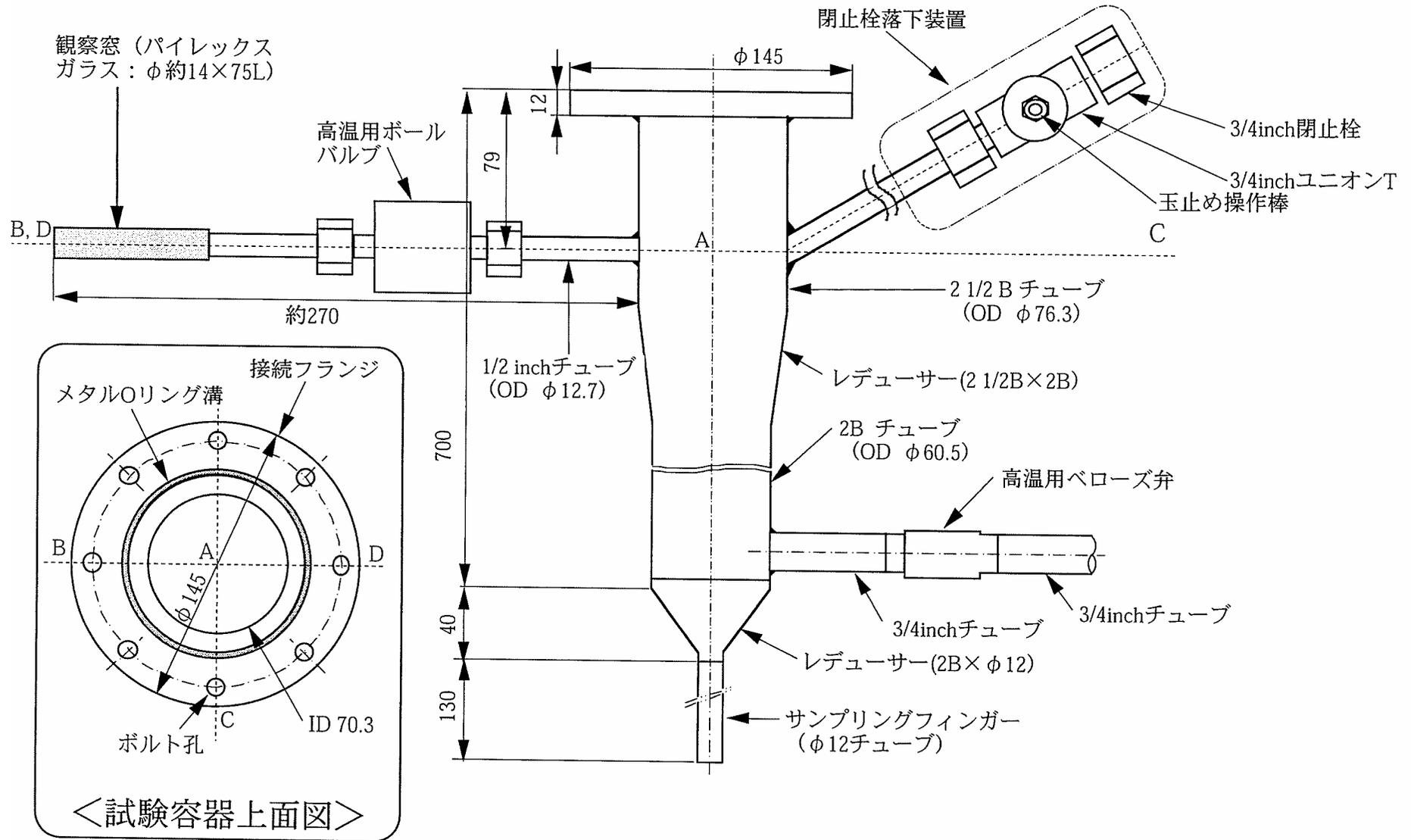


図 2 - 2 試験容器概略図

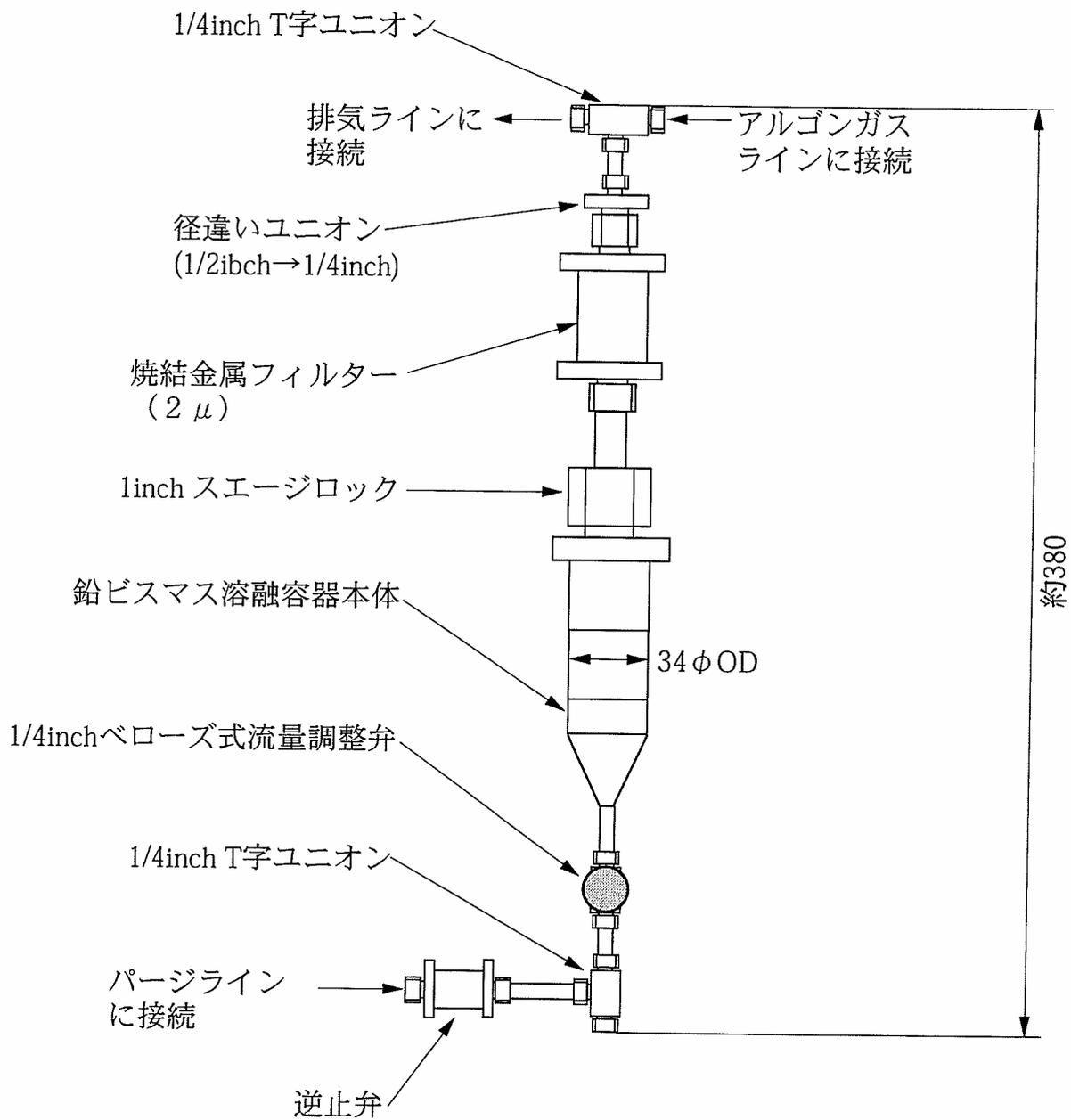


図 2 - 3 鉛ビスマス溶融容器概略図

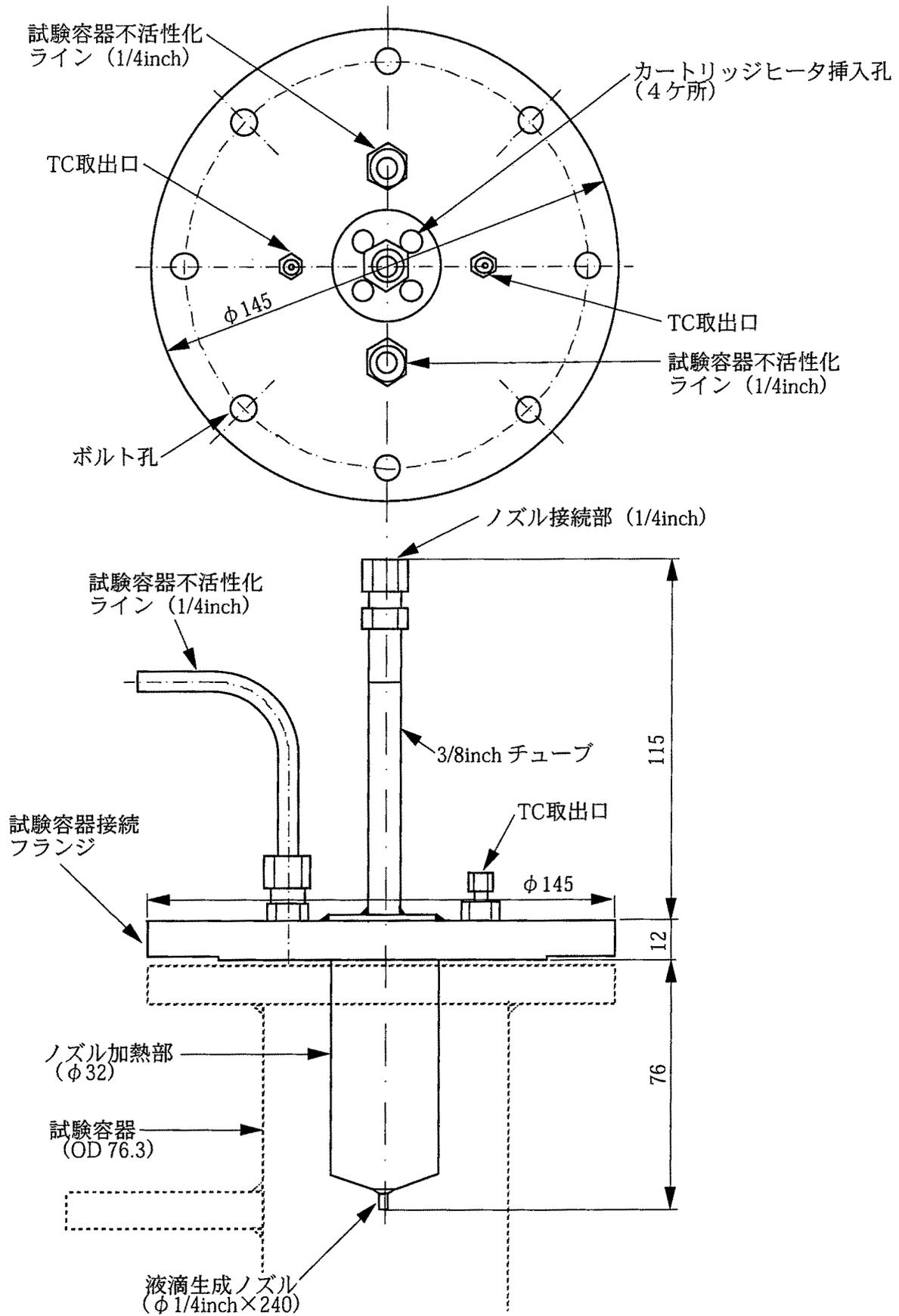


図 2 - 4 液滴生成・加熱装置概略図

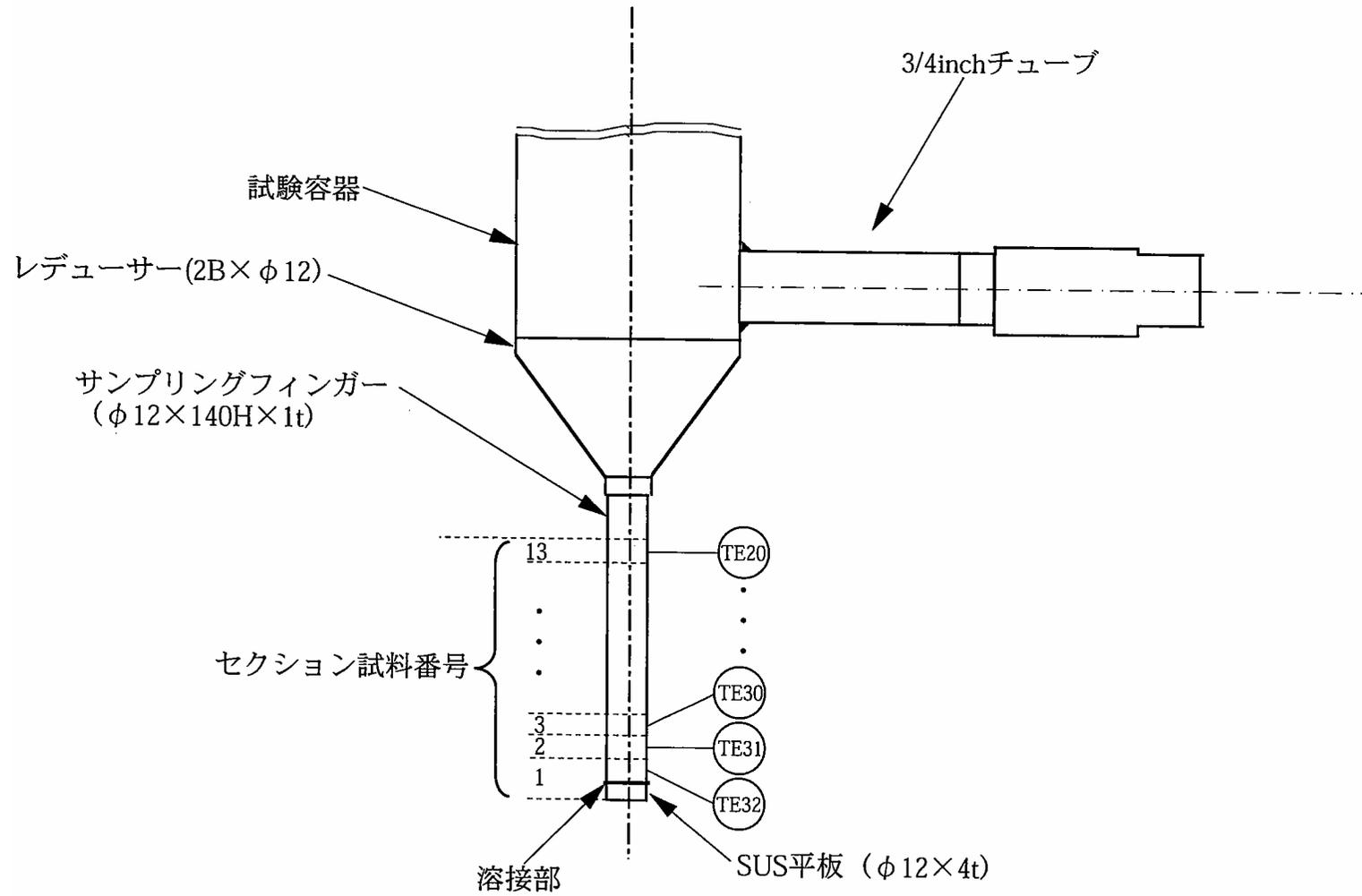


図 2 - 5 (a) サンプリングフィンガーの温度計測位置 (L1-2試験)

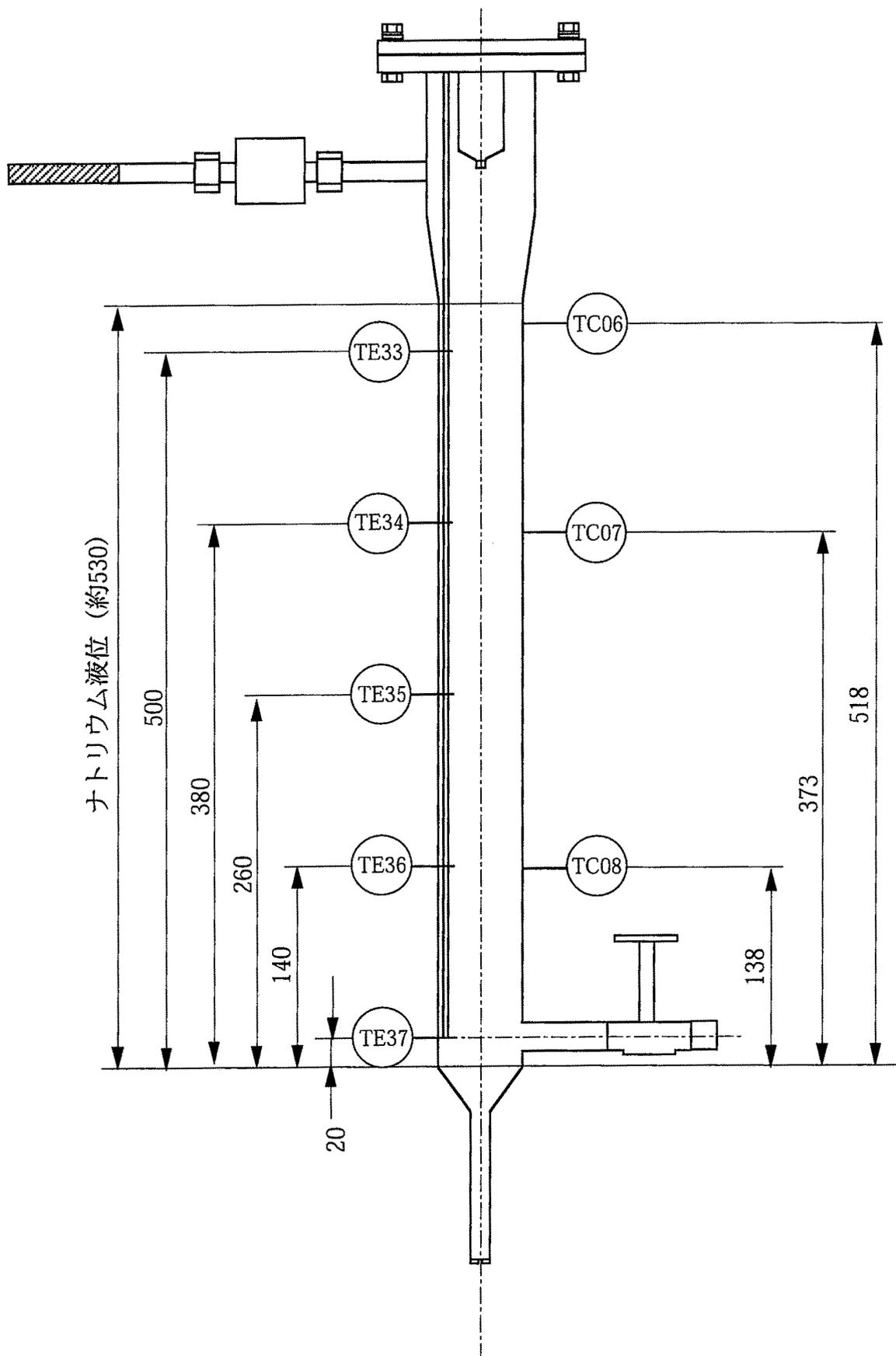


図 2 - 5 (b) 試験容器の温度計測位置

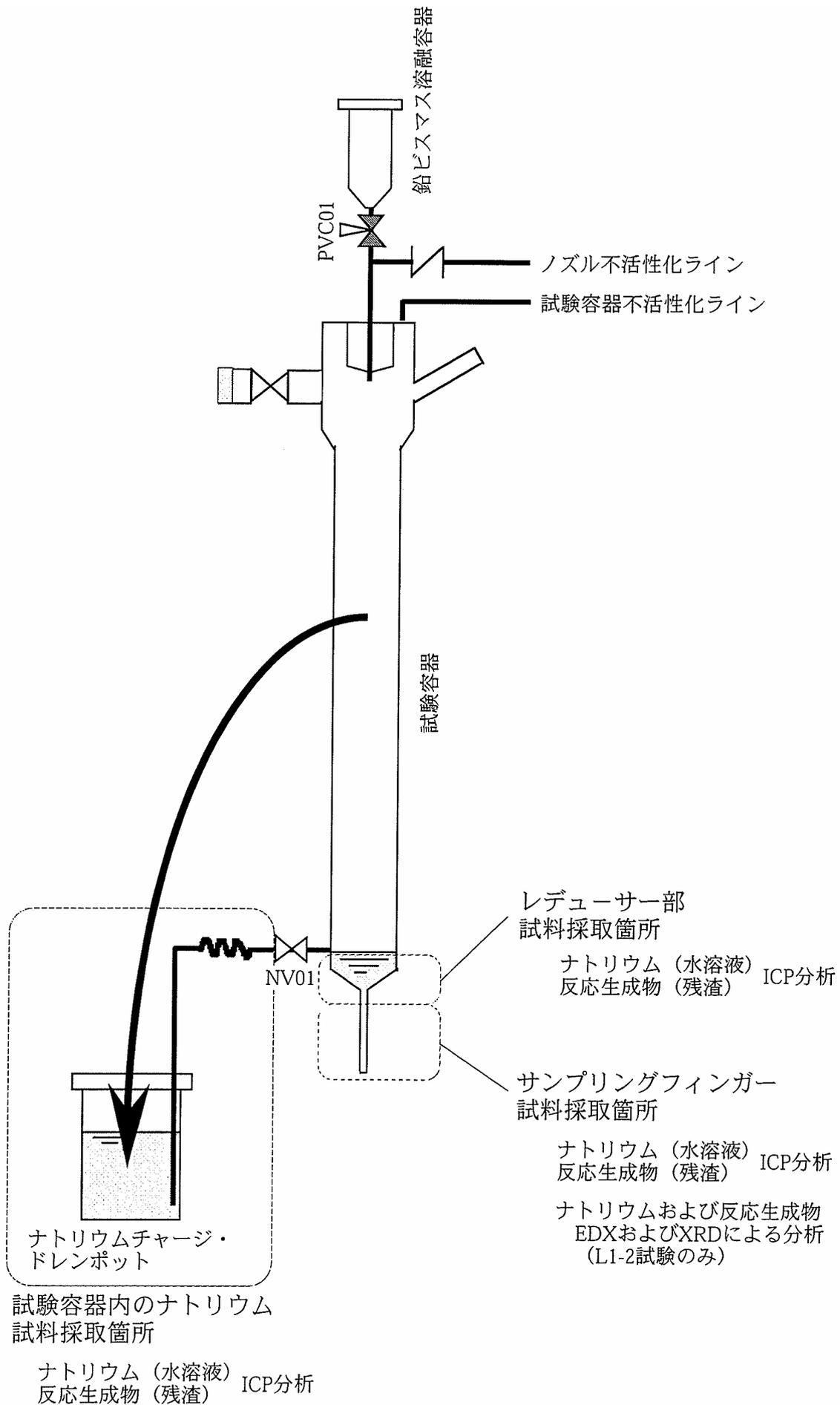


図 2 - 6 分析対象の部位と分析方法

表 2-1 高周波プラズマ発光分光分析装置の測定条件

測定波長	Na: 589.592nm
	Pb: 220.353nm
	Bi: 223.061nm
分析モード	定量
測定モード	検量線法
走査モード	積分法
積分時間	200ms

表 2-2 X線回折の測定条件

X線発生条件		X線回折条件	
線源	Cu	データ測定範囲	10° ~90°
波長	1.54056Å	スキャン軸	2θ / θ
ゴニオメータ	横型ゴニオメータ	サンプリング間隔	0.02°
管電圧	40 kV	スキャン速度	2° /min.
管電流	35mA	発散スリット	1.00°
		散乱スリット	1.00°
		受光スリット	0.15mm

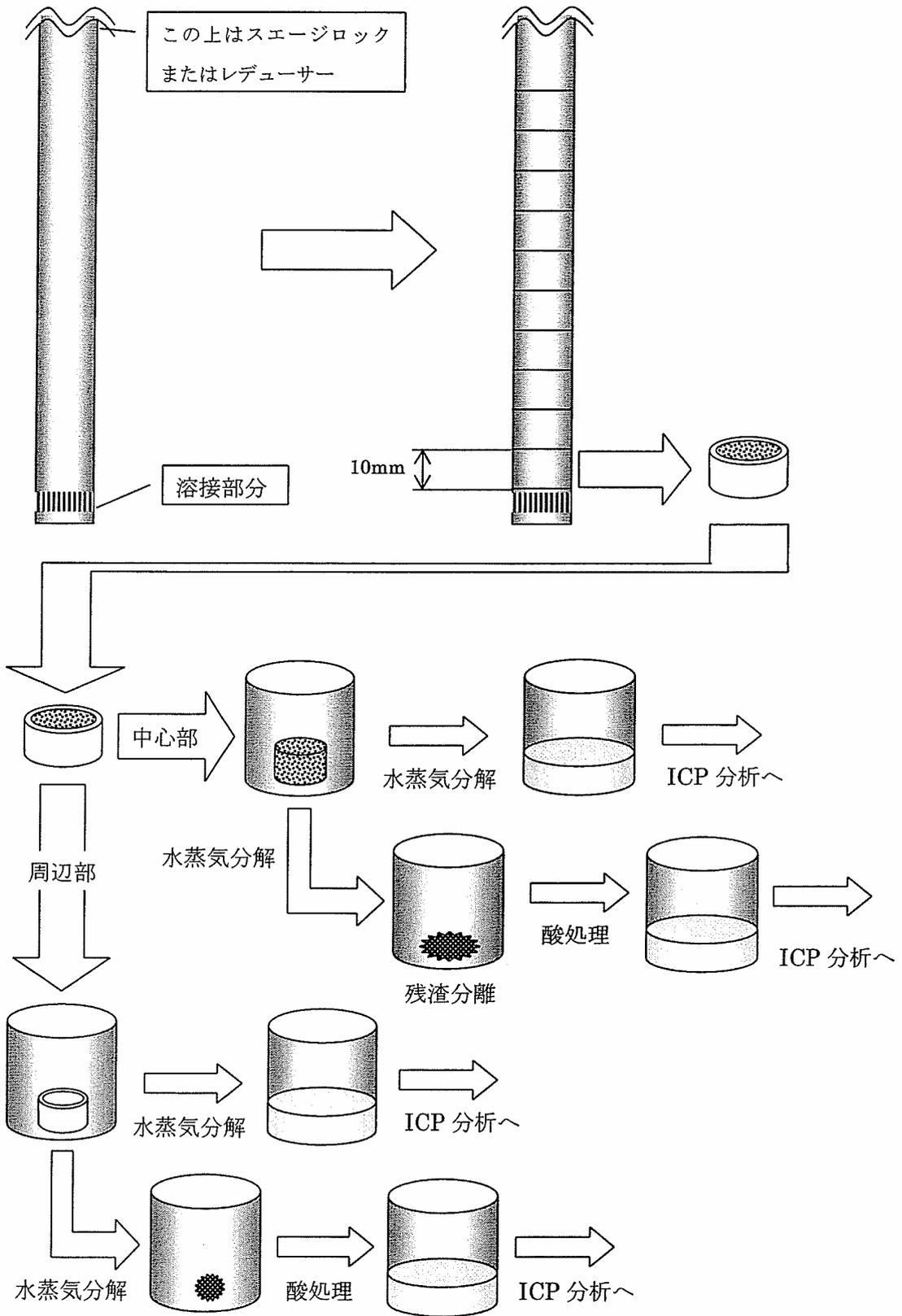


図 2-7 サンプルリングフィンガーからの分析サンプル作製方法
(L1-1 試験)

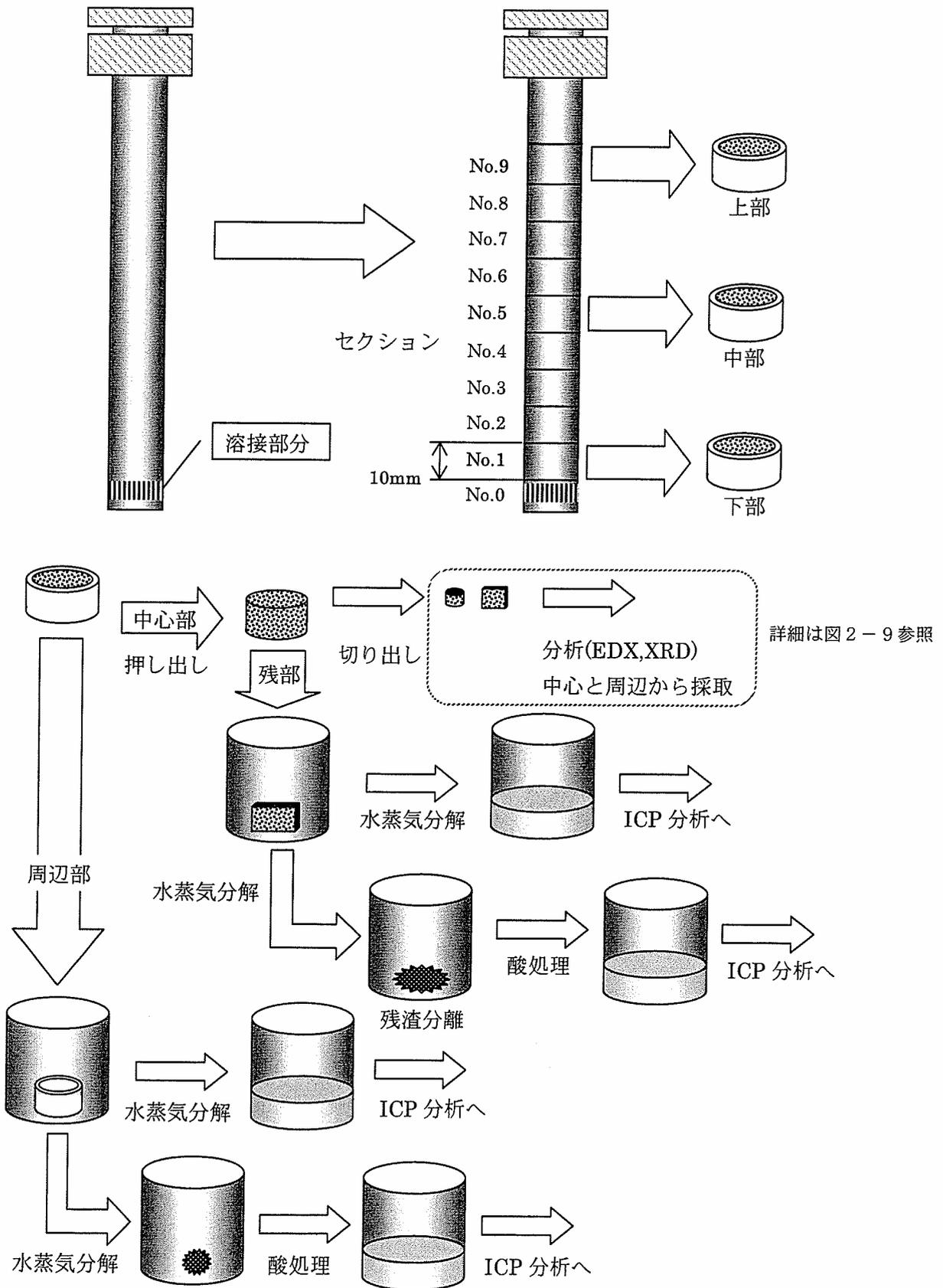


図2-8 サンプリングフィンガーからの分析サンプル作製方法 (L1-2 試験)

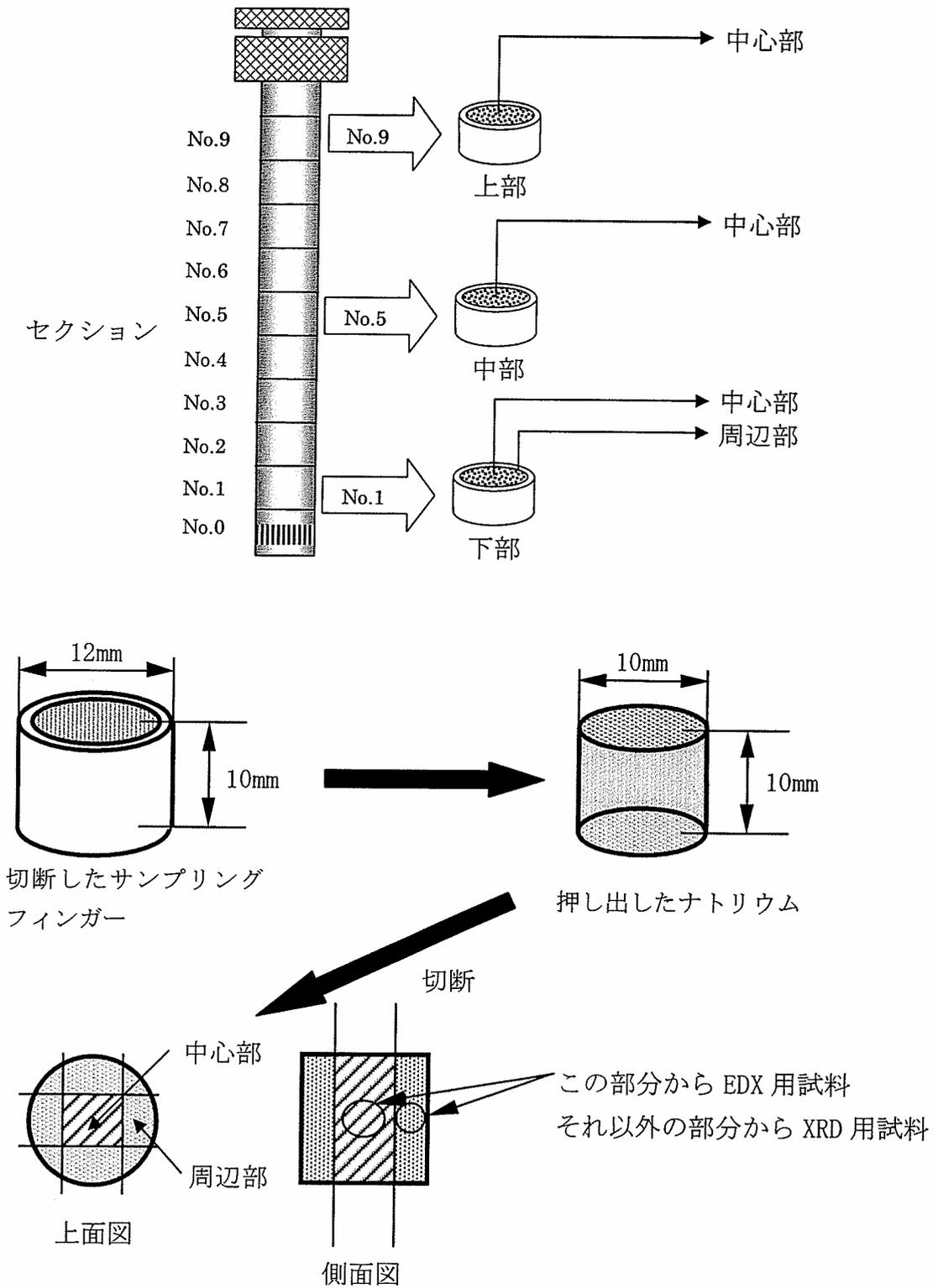


図 2 - 9 分析試料の切り出し方法 (EDX, XRD)

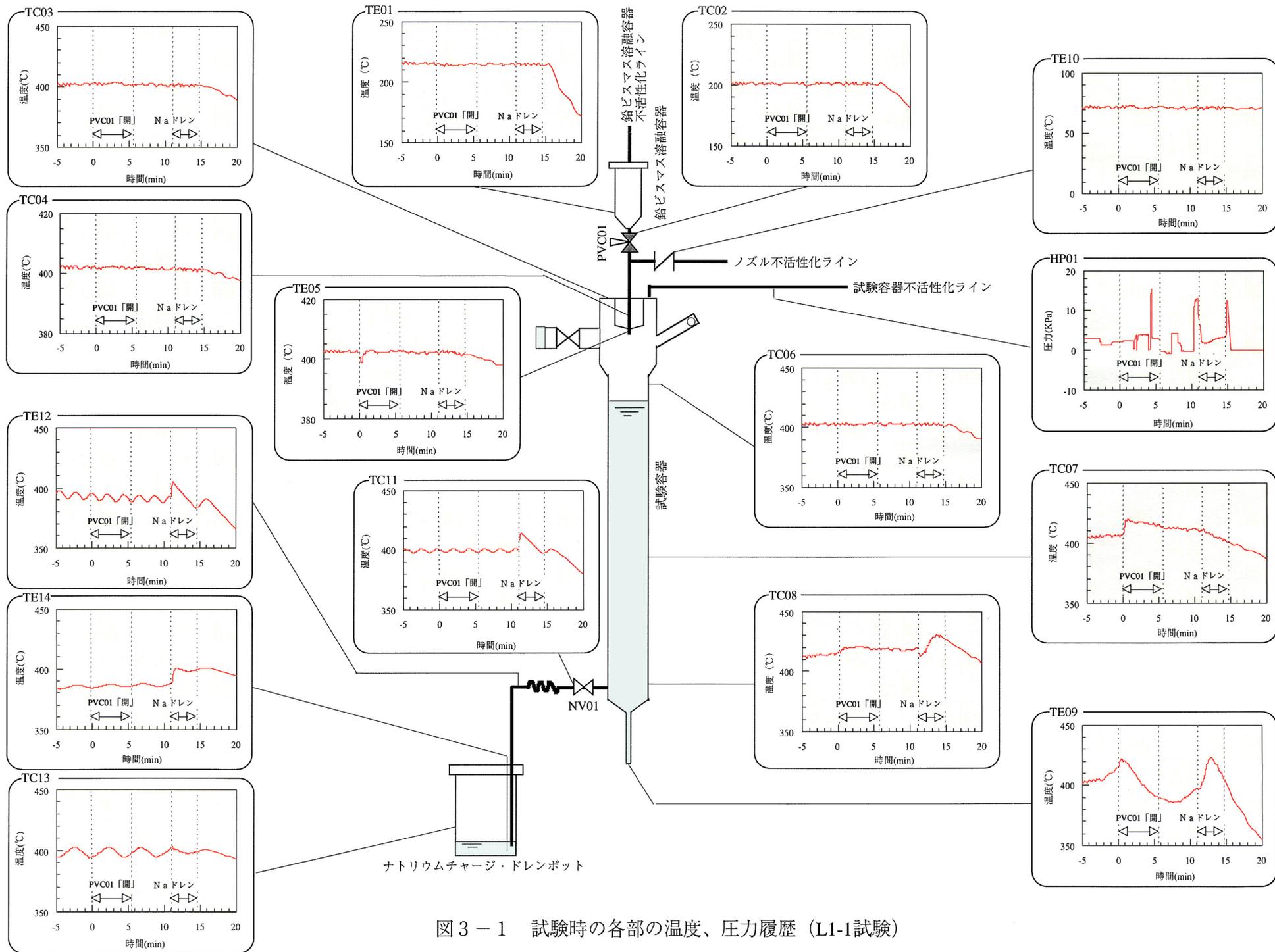


図3-1 試験時の各部の温度、圧力履歴 (L1-1試験)

表3-1 試験装置の各部位から回収したナトリウム中の各元素の含有量および存在割合 (L1-1試験)

元素名		試験容器	レデューサー部	サンプリング フィンガー	小計		
水溶液	ナトリウム (Na)	重量(mg)	915300	46349	6367	968016	
		wt. %	99.4	98.9	98.2	99.33	
		at. %	99.93	99.88	99.80	99.93	
	鉛 (Pb)	重量(mg)	5852	475	114	6441	
		wt. %	0.6	1.0	1.8	0.66	
		at. %	0.07	0.11	0.20	0.07	
	ビスマス (Bi)	重量(mg)	87	24	2	113	
		wt. %	0.01	0.05	0.03	0.01	
		at. %	0.001	0.006	0.003	0.001	
	全重量	(mg)	921239	46848	6483	974570	
	残渣	ナトリウム (Na)	重量(mg)			9	
			wt. %	(50.76) ^{*1}	(3.11) ^{*2}	0.3	
at. %			(53.06) ^{*1}	(22.20) ^{*2}	2.34		
鉛 (Pb)		重量(mg)			797		
		wt. %	(3.30) ^{*1}	(8.25) ^{*2}	23.3		
		at. %	(0.38) ^{*1}	(6.53) ^{*2}	22.99		
ビスマス (Bi)		重量(mg)			2611		
		wt. %	(3.37) ^{*1}	(87.88) ^{*2}	76.41		
		at. %	(3.39) ^{*1}	(68.95) ^{*2}	74.67		
全重量		(mg)			3417		

*1 試料量が多いため、EDXにより代表点を分析。他にAl 0.43wt.%(0.39at.)、Si 0.25wt.%(0.21at.)、Cr 0.75wt.%(0.35at.)、Fe 13.92wt.%(5.99at.)、Ni 0.48wt.%(1.53at.)を含有。

*2 試料量が多いため、EDXにより代表点を分析。他にCr 0.48wt.%(1.53at.)、Fe 0.27wt.%(0.79at.)を含有。

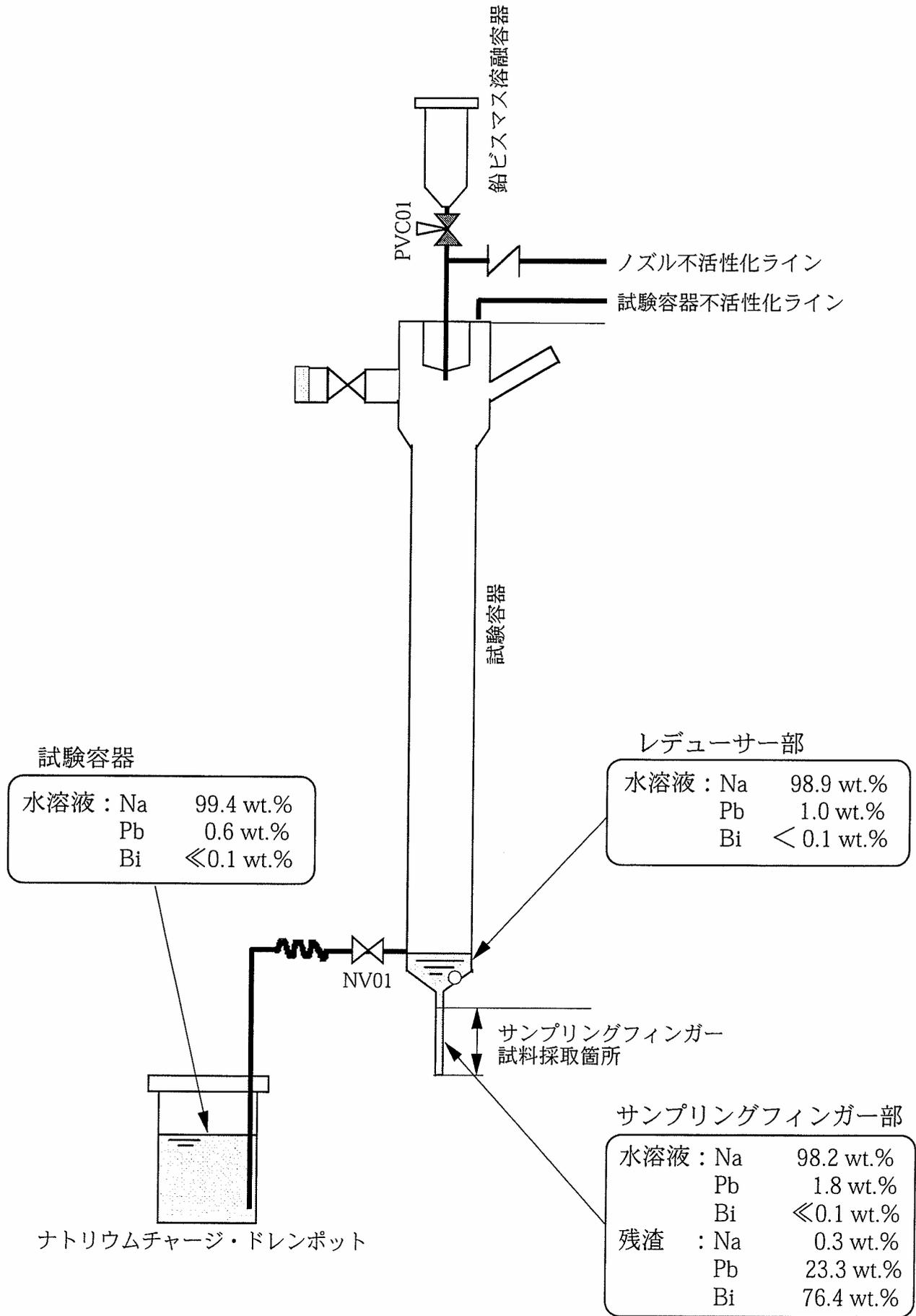


図3-2 L1-1試験の各部位から回収したナトリウム中の各元素の存在割合



写真3-1 サンプルングフィンガーから回収したナトリウム試料中の黒い粒
(L1-1 試験)

表3-2 サンプルフィンガー中心部のナトリウム分析結果 (L1-1試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb
PE01-0C	mg/l			
	l			
	mg			
	wt. %			
	at. %			
PE01-1C	mg/l	6373	3.5	84.8
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	637.3	0.35	8.5
	wt. %	98.6	0.05	1.3
	at. %	99.8	0.006	0.1
PE01-2C	mg/l	5219	1.4	238
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	521.9	0.14	23.8
	wt. %	95.6	0.03	4.4
	at. %	99.5	0.003	0.5
PE01-3C	mg/l	5303	0.6	295
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	530.3	0.06	29.5
	wt. %	94.7	0.01	5.3
	at. %	99.4	0.001	0.6
PE01-4C	mg/l	5618	1.8	172
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	561.8	0.18	17.2
	wt. %	97.0	0.03	3.0
	at. %	99.7	0.004	0.3
PE01-5C	mg/l	4858	2.1	20.2
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	485.8	0.21	2.0
	wt. %	99.5	0.04	0.4
	at. %	99.9	0.005	0.0
PE01-6C	mg/l	5350	0.5	19.2
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	535.0	0.05	1.9
	wt. %	99.6	0.01	0.4
	at. %	100.0	0.001	0.0
PE01-7C	mg/l	4895	0.6	37.5
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	489.5	0.06	3.8
	wt. %	99.2	0.01	0.8
	at. %	99.9	0.001	0.1
PE01-8C	mg/l	5475	1.7	18.6
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	547.5	0.17	1.9
	wt. %	99.6	0.03	0.3
	at. %	100.0	0.003	0.0
PE01-9C	mg/l	5285	0.3	44.1
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	528.5	0.03	4.4
	wt. %	99.2	0.01	0.8
	at. %	99.9	0.001	0.1

表3-3 サンプルフィンガー周辺部のナトリウム分析結果 (L1-1試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb
PE01-0P	mg/l	755	0.3	10.2
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	75.5	0.03	1.0
	wt. %	98.6	0.04	1.3
	at. %	99.8	0.004	0.1
PE01-1P	mg/l	1632	2.9	18.6
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	163.2	0.29	1.9
	wt. %	98.7	0.18	1.1
	at. %	99.9	0.020	0.1
PE01-2P	mg/l	1578	0.3	17.8
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	157.8	0.03	1.8
	wt. %	98.9	0.02	1.1
	at. %	99.9	0.002	0.1
PE01-3P	mg/l	1754	3.2	25.7
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	175.4	0.32	2.6
	wt. %	98.4	0.18	1.4
	at. %	99.8	0.020	0.2
PE01-4P	mg/l	1796	0.3	22.4
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	179.6	0.03	2.2
	wt. %	98.8	0.02	1.2
	at. %	99.9	0.002	0.1
PE01-5P	mg/l	1735	0.6	13.1
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	173.5	0.06	1.3
	wt. %	99.2	0.03	0.7
	at. %	99.9	0.004	0.1
PE01-6P	mg/l	1372	0.3	7.4
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	137.2	0.03	0.7
	wt. %	99.4	0.02	0.5
	at. %	99.9	0.002	0.1
PE01-7P	mg/l	1445	0.4	26.4
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	144.5	0.04	2.6
	wt. %	98.2	0.03	1.8
	at. %	99.8	0.003	0.2
PE01-8P	mg/l	1581	0.5	30.1
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	158.1	0.05	3.0
	wt. %	98.1	0.03	1.9
	at. %	99.8	0.003	0.2
PE01-9P	mg/l	1646	0.8	35.1
	l	0.1	0.1	0.1
	mg	164.6	0.08	3.5
	wt. %	97.9	0.05	2.1
	at. %	99.8	0.005	0.2

表 3-4 サンプルリングフィンガー中心部+周辺部の
ナトリウムの分析結果

試料名	単位	Na	Bi	Pb
PE01-0				
	mg	75.5	0.03	1.0
	wt. %	98.6	0.04	1.3
	at. %	99.8	0.004	0.1
PE01-1				
	mg	800.5	0.64	10.3
	wt. %	98.6	0.08	1.3
	at. %	99.8	0.009	0.1
PE01-2				
	mg	679.7	0.17	25.6
	wt. %	96.3	0.02	3.6
	at. %	99.6	0.003	0.4
PE01-3				
	mg	705.7	0.38	32.1
	wt. %	95.6	0.05	4.3
	at. %	99.5	0.006	0.5
PE01-4				
	mg	741.4	0.21	19.4
	wt. %	97.4	0.03	2.6
	at. %	99.7	0.003	0.3
PE01-5				
	mg	659.3	0.27	3.3
	wt. %	99.5	0.04	0.5
	at. %	99.9	0.005	0.1
PE01-6				
	mg	672.2	0.08	2.7
	wt. %	99.6	0.01	0.4
	at. %	100.0	0.001	0.0
PE01-7				
	mg	634.0	0.10	6.4
	wt. %	99.0	0.02	1.0
	at. %	99.9	0.002	0.1
PE01-8				
	mg	705.6	0.22	4.9
	wt. %	99.3	0.03	0.7
	at. %	99.9	0.003	0.1
PE01-9				
	mg	693.1	0.11	7.9
	wt. %	98.9	0.02	1.1
	at. %	99.9	0.002	0.1

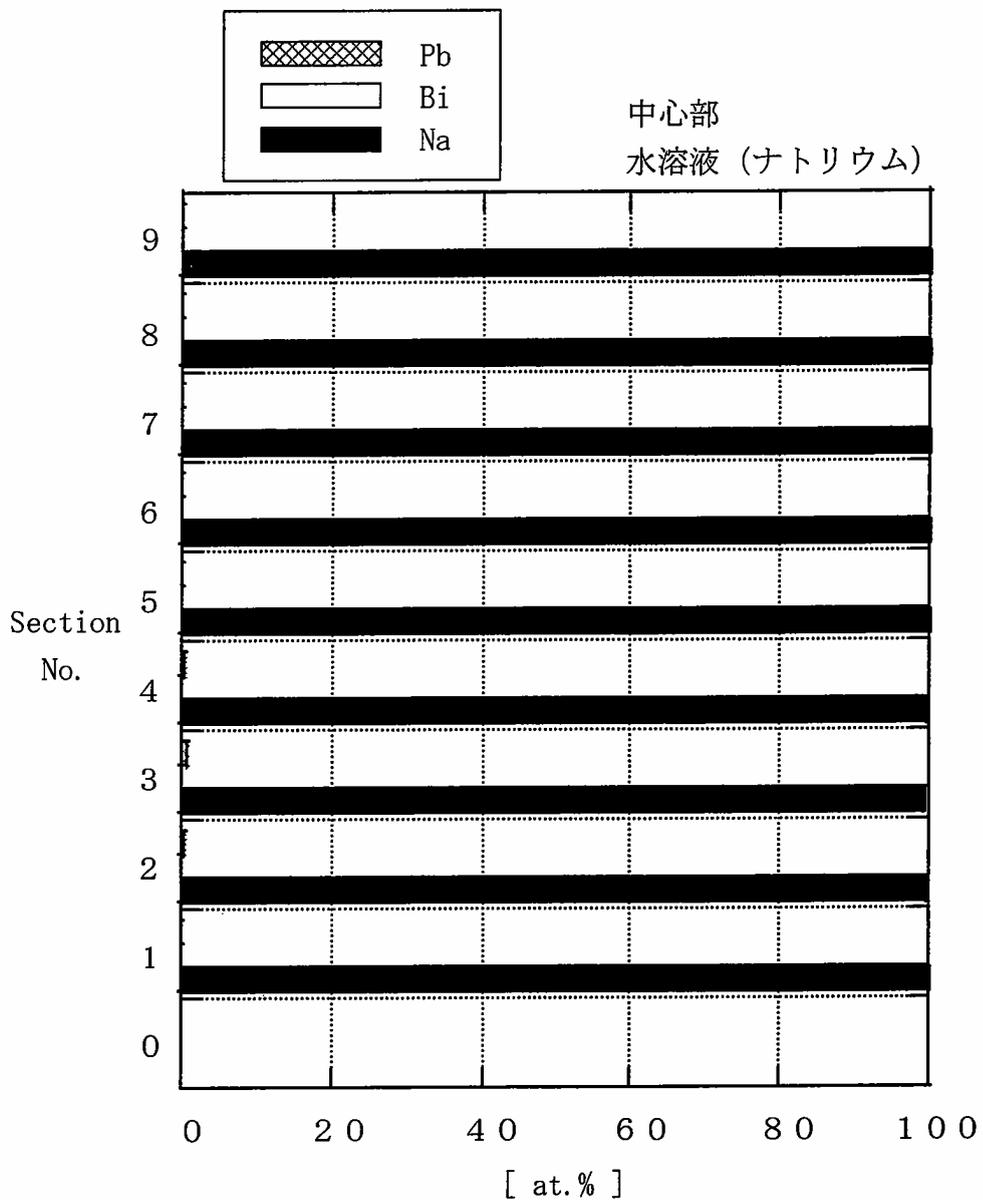


図3-3 サンプルングフィンガー部 中心部 水溶液の分析結果

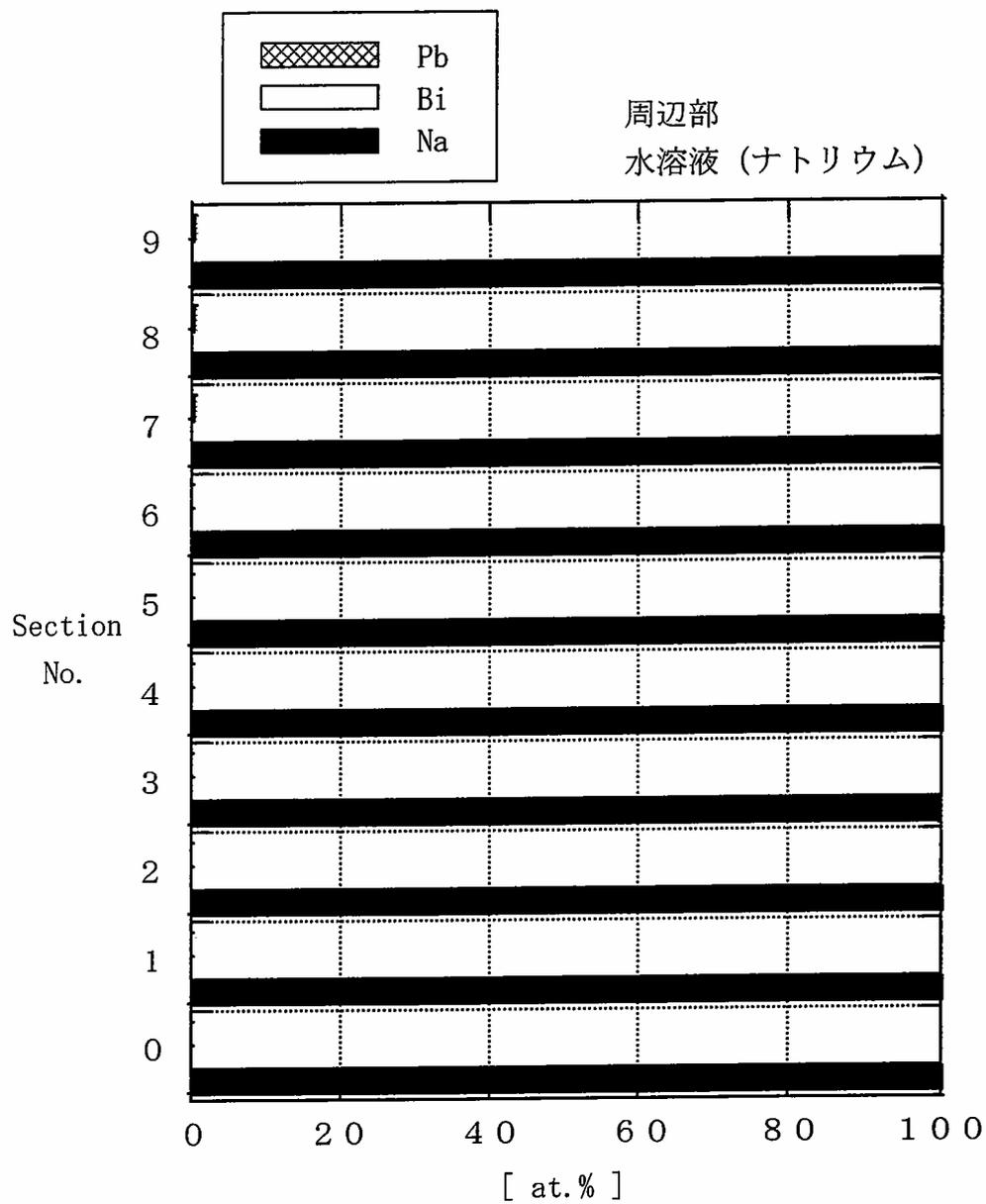


図3-4 サンプルングフィンガー部 周辺部 水溶液の分析結果

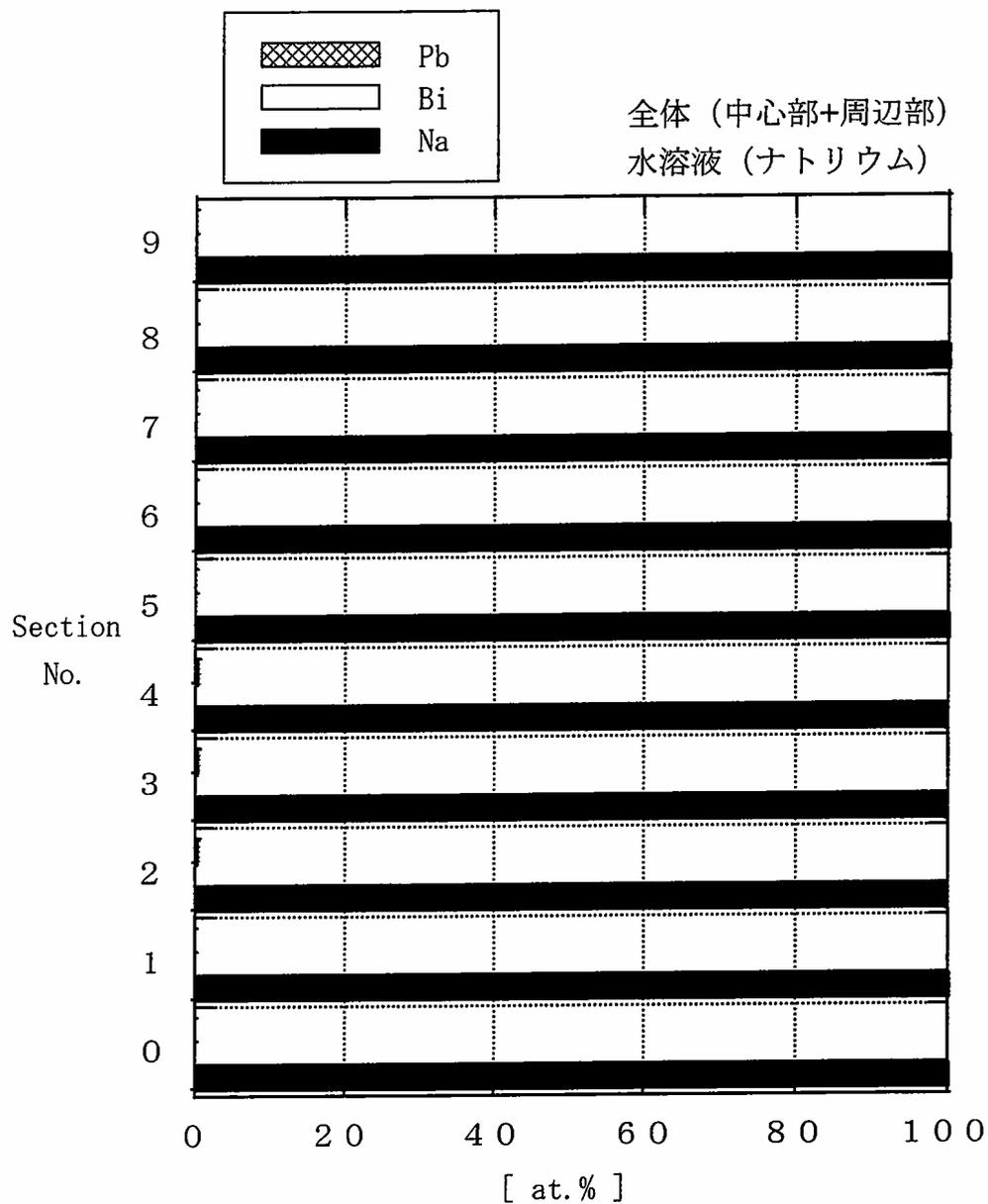


図3-5 サンプリングフィンガー部 全体 (中心部+周辺部)
水溶液の分析結果



写真3-2 サンプリングフィンガー内のナトリウムを水蒸気分解したときの残渣の状態(L1-1 試験)

表3-5 サンプルングフィンガー 中心部の残渣の分析結果
(L1-1試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb	Total
PE01-0CS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-1CS	絶対量(mg)	0.6868	294.2	99.84	394.7268
	wt%	0.17	74.53	25.29	100.00
	at%	1.56	73.34	25.10	100.00
PE01-2CS	絶対量(mg)	0.508	249.4	45.69	295.598
	wt%	0.17	84.37	15.46	100.00
	at%	1.54	83.11	15.36	100.00
PE01-3CS	絶対量(mg)	0.4444	223.5	36.21	260.1544
	wt%	0.17	85.91	13.92	100.00
	at%	1.53	84.64	13.83	100.00
PE01-4CS	絶対量(mg)	0.5579	258.1	60.8	319.4579
	wt%	0.17	80.79	19.03	100.00
	at%	1.56	79.54	18.90	100.00
PE01-5CS	絶対量(mg)	0.636	219	73.31	292.946
	wt%	0.22	74.76	25.03	100.00
	at%	1.94	73.31	24.75	100.00
PE01-6CS	絶対量(mg)	0.9253	270.4	78.69	350.0153
	wt%	0.26	77.25	22.48	100.00
	at%	2.35	75.49	22.16	100.00
PE01-7CS	絶対量(mg)	0.9152	248	64.67	313.5852
	wt%	0.29	79.09	20.62	100.00
	at%	2.59	77.13	20.29	100.00
PE01-8CS	絶対量(mg)	1.046	277.5	79.75	358.296
	wt%	0.29	77.45	22.26	100.00
	at%	2.59	75.52	21.89	100.00
PE01-9CS	絶対量(mg)	2.045	251.9	68.75	322.695
	wt%	0.63	78.06	21.30	100.00
	at%	5.47	74.13	20.40	100.00

表3-6 サンプルングフィンガー 周辺部の残渣の分析結果
(L1-1試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb	Total
PE01-0PS	絶対量(mg)	0.23135	21.305	12.21	33.74635
	wt%	0.69	63.13	36.18	100.00
	at%	5.89	59.64	34.47	100.00
PE01-1PS	絶対量(mg)	0.1727	34.24	30.725	65.1377
	wt%	0.27	52.57	47.17	100.00
	at%	2.35	51.26	46.39	100.00
PE01-2PS	絶対量(mg)	0.14355	33.245	20.8	54.18855
	wt%	0.26	61.35	38.38	100.00
	at%	2.35	59.87	37.78	100.00
PE01-3PS	絶対量(mg)	0.12115	36.46	23.625	60.20615
	wt%	0.20	60.56	39.24	100.00
	at%	1.79	59.39	38.81	100.00
PE01-4PS	絶対量(mg)	0.29475	38.535	23	61.82975
	wt%	0.48	62.32	37.20	100.00
	at%	4.16	59.83	36.01	100.00
PE01-5PS	絶対量(mg)	0.13435	29.08	26.43	55.64435
	wt%	0.24	52.26	47.50	100.00
	at%	2.14	51.05	46.80	100.00
PE01-6PS	絶対量(mg)	0.1549	32.47	19.59	52.2149
	wt%	0.30	62.19	37.52	100.00
	at%	2.63	60.54	36.84	100.00
PE01-7PS	絶対量(mg)	0.1372	33.485	17.315	50.9372
	wt%	0.27	65.74	33.99	100.00
	at%	2.39	64.15	33.46	100.00
PE01-8PS	絶対量(mg)	0.0812	27.085	19.205	46.3712
	wt%	0.18	58.41	41.42	100.00
	at%	1.56	57.39	41.04	100.00
PE01-9PS	絶対量(mg)	0.1536	32.53	19.01	51.6936
	wt%	0.30	62.93	36.77	100.00
	at%	2.63	61.26	36.11	100.00

表 3-7 サンプルングフィンガー 全体での残渣の分析結果
(L1-1試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb	Total
PE01-0	絶対量(mg)	0.23135	21.305	12.21	33.74635
	wt%	0.69	63.13	36.18	100.00
	at%	5.89	59.64	34.47	100.00
PE01-1	絶対量(mg)	0.8595	328.44	130.565	459.8645
	wt%	0.19	71.42	28.39	100.00
	at%	1.67	70.19	28.14	100.00
PE01-2	絶対量(mg)	0.65155	282.645	66.49	349.78655
	wt%	0.19	80.80	19.01	100.00
	at%	1.67	79.48	18.86	100.00
PE01-3	絶対量(mg)	0.56555	259.96	59.835	320.36055
	wt%	0.18	81.15	18.68	100.00
	at%	1.58	79.88	18.54	100.00
PE01-4	絶対量(mg)	0.85265	296.635	83.8	381.28765
	wt%	0.22	77.80	21.98	100.00
	at%	1.99	76.27	21.73	100.00
PE01-5	絶対量(mg)	0.77035	248.08	99.74	348.59035
	wt%	0.22	71.17	28.61	100.00
	at%	1.97	69.75	28.28	100.00
PE01-6	絶対量(mg)	1.0802	302.87	98.28	402.2302
	wt%	0.27	75.30	24.43	100.00
	at%	2.38	73.55	24.07	100.00
PE01-7	絶対量(mg)	1.0524	281.485	81.985	364.5224
	wt%	0.29	77.22	22.49	100.00
	at%	2.56	75.32	22.12	100.00
PE01-8	絶対量(mg)	1.1272	304.585	98.955	404.6672
	wt%	0.28	75.27	24.45	100.00
	at%	2.47	73.46	24.07	100.00
PE01-9	絶対量(mg)	2.1986	284.43	87.76	374.3886
	wt%	0.59	75.97	23.44	100.00
	at%	5.09	72.39	22.53	100.00

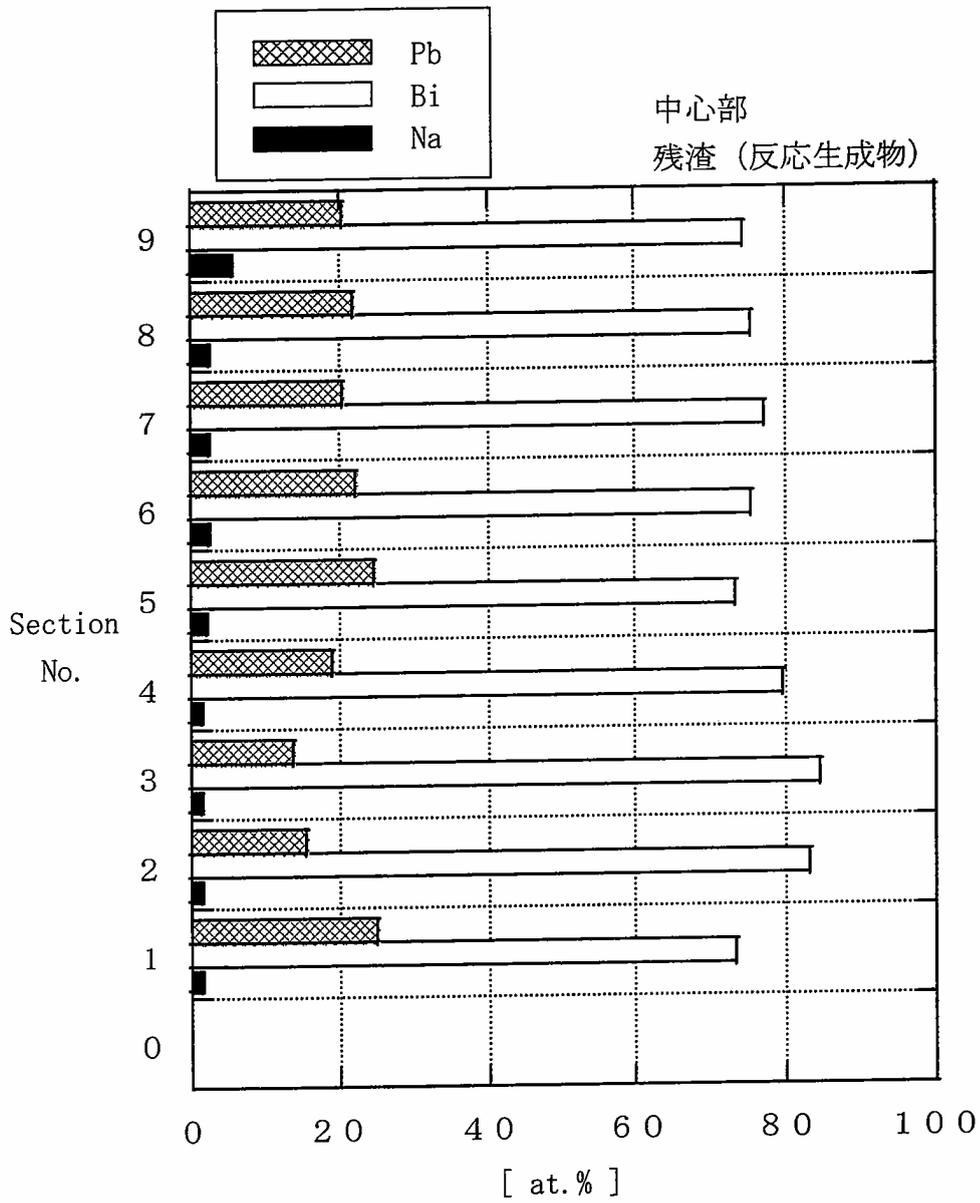


図3-6 サンプルフィンガー部 中心部 残渣の分析結果 (L1-1 試験)

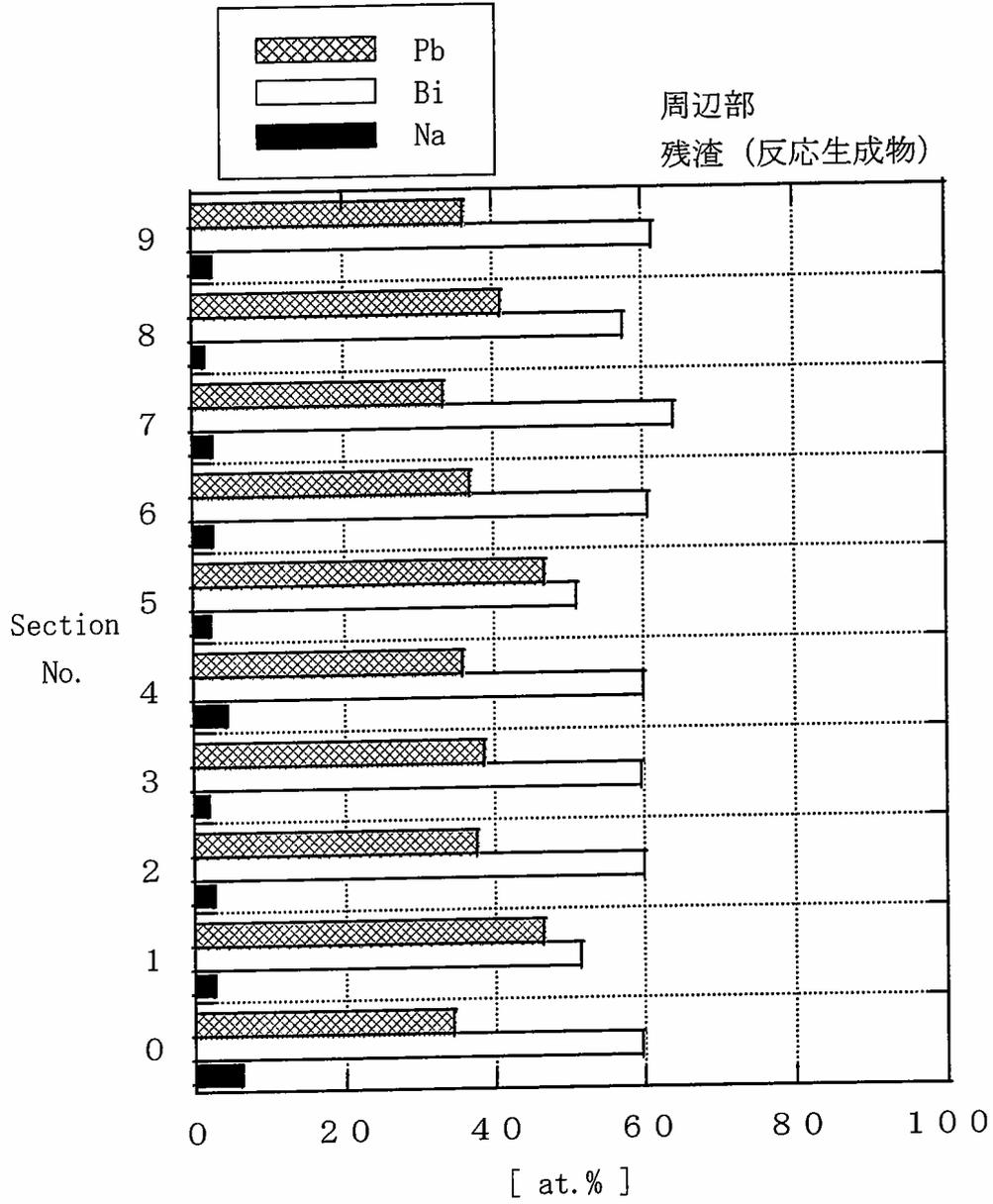


図3-7 サンプルングフィンガー部 周辺部 残渣の分析結果 (L1-1 試験)

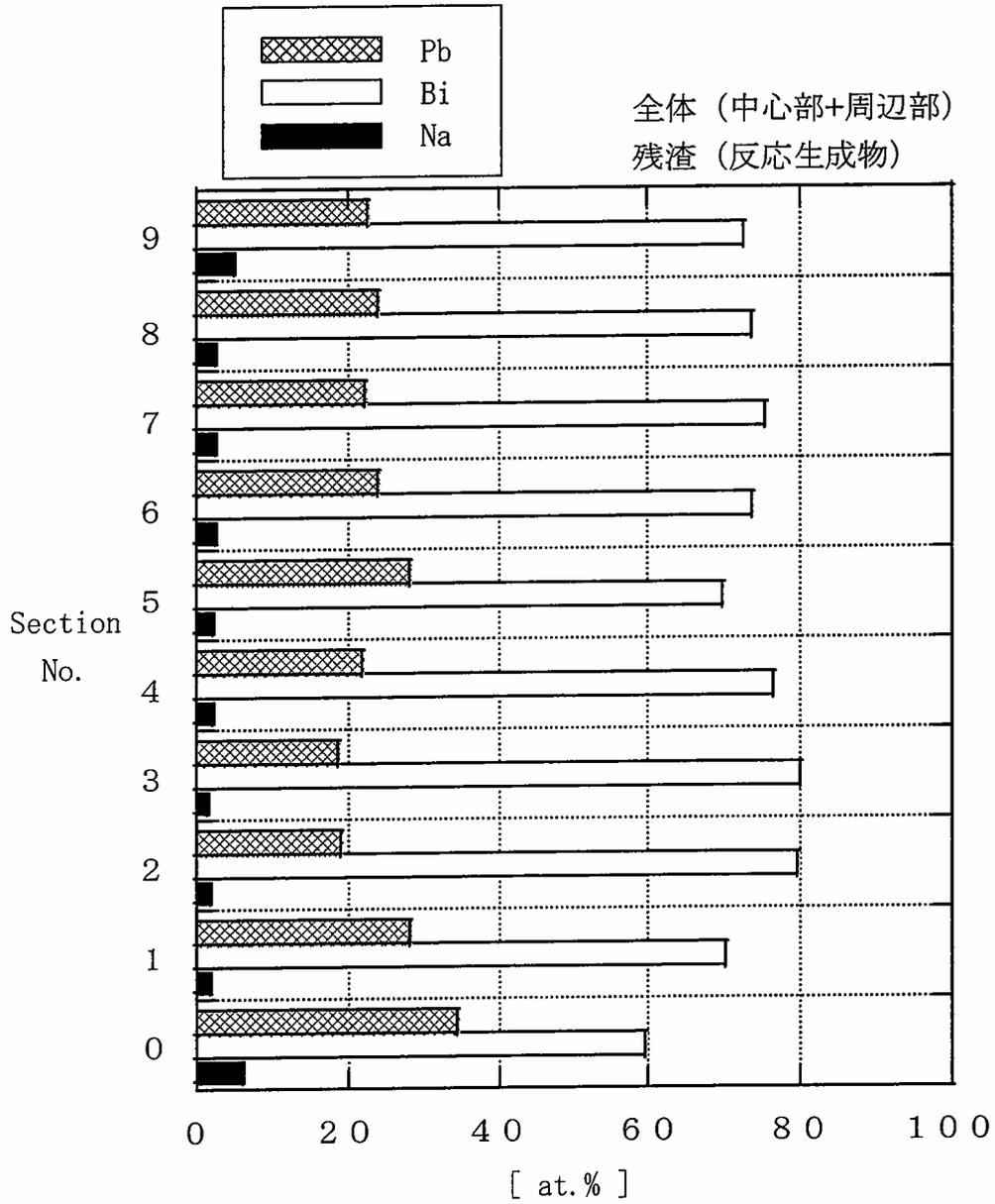


図3-8 サンプルフィンガー部 全体 (中心部+周辺部) 残渣の分析結果(L1-1 試験)

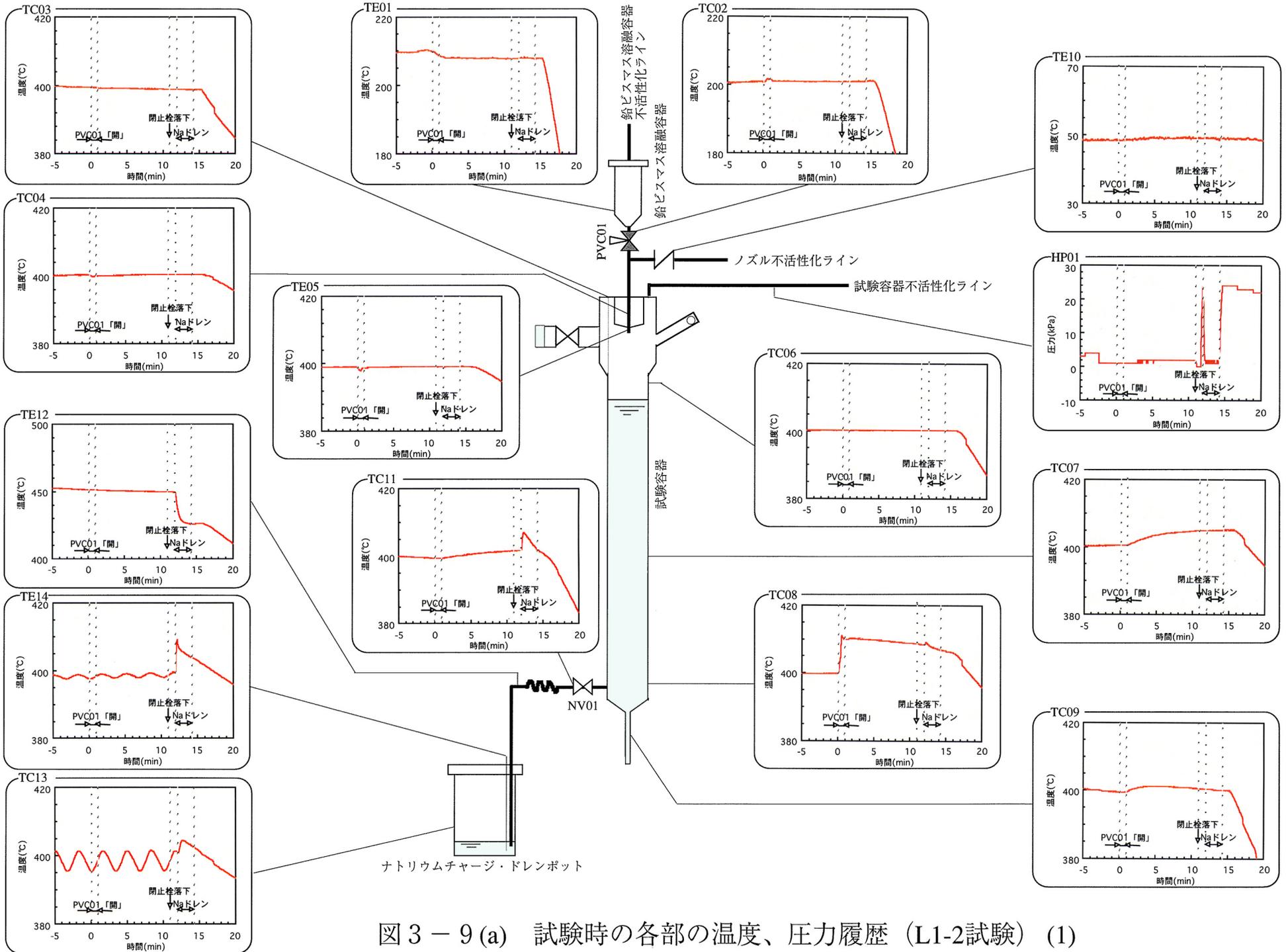


図 3-9(a) 試験時の各部の温度、圧力履歴 (L1-2試験) (1)

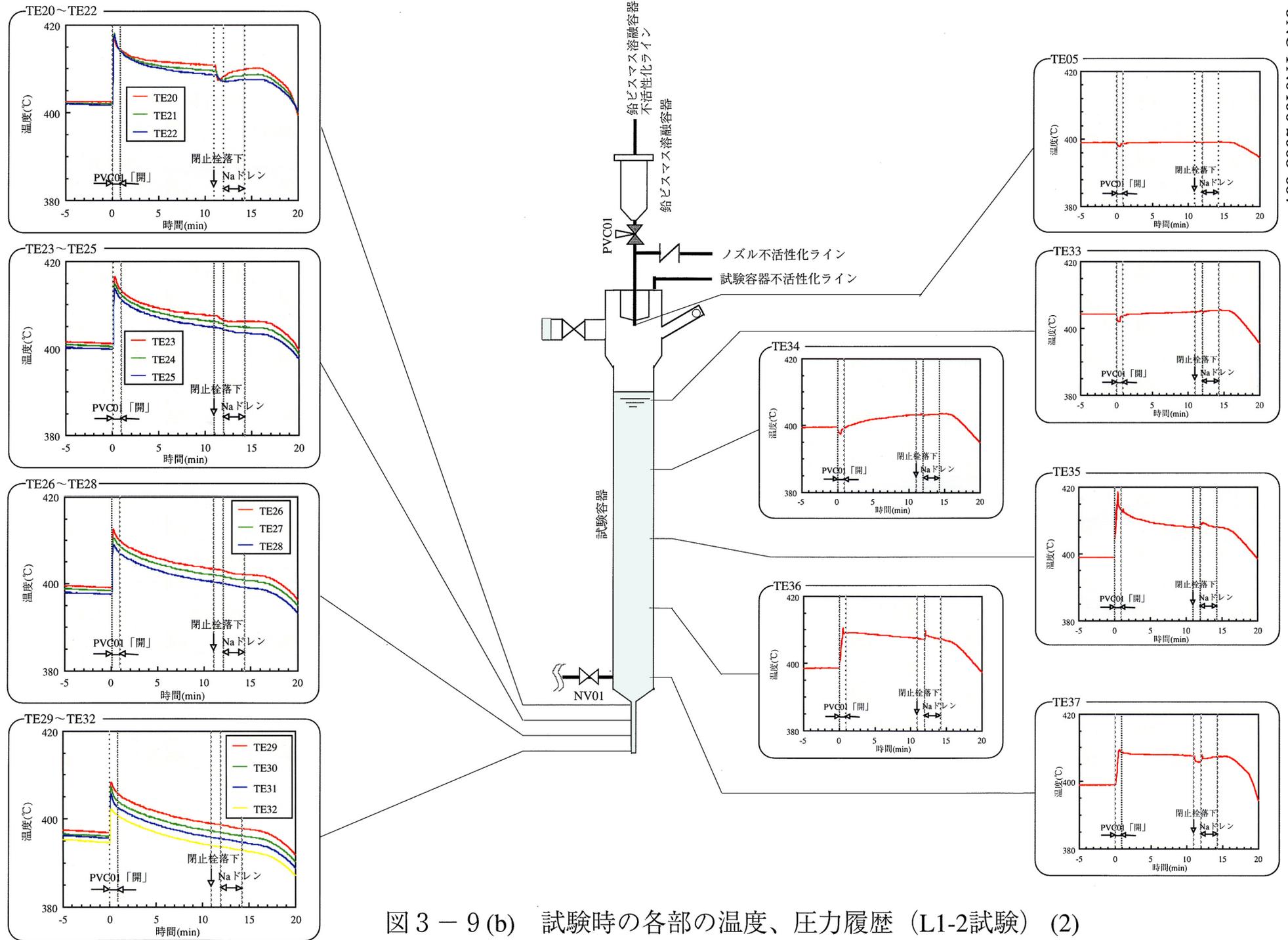


図3-9(b) 試験時の各部の温度、圧力履歴 (L1-2試験) (2)

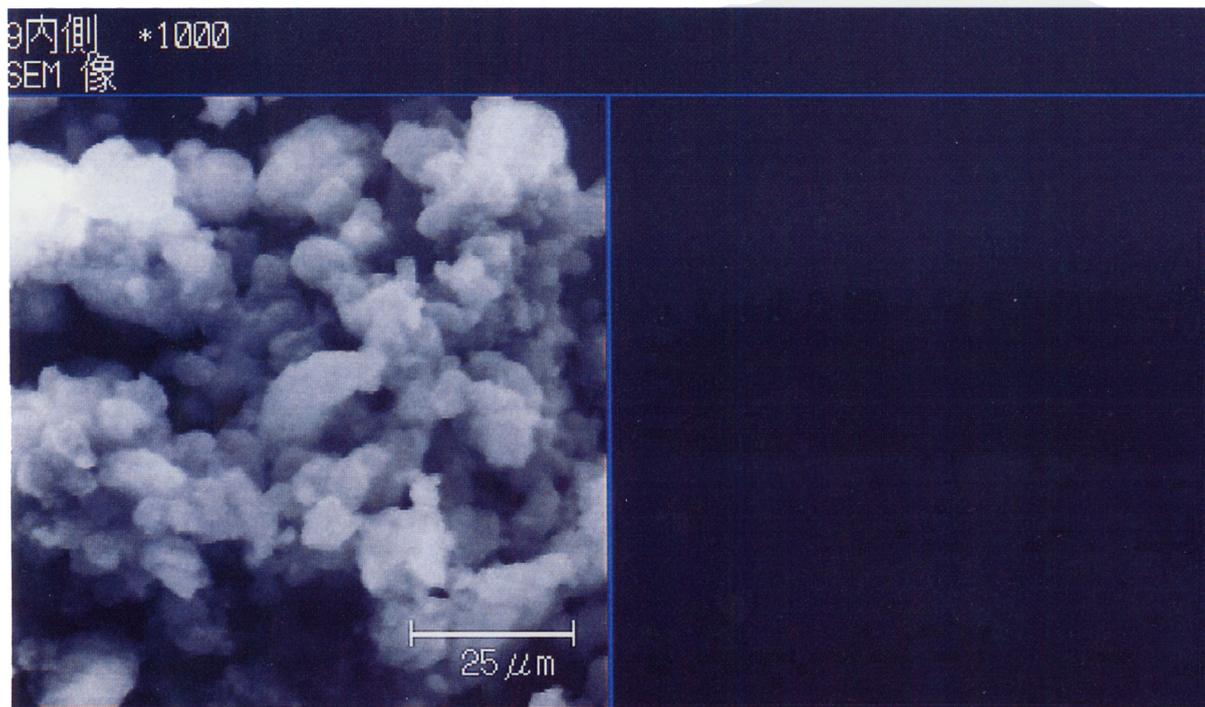


図3-10(a) サンプリングフィンガー上部 (セクションNo.9) の中心部の
反応生成物

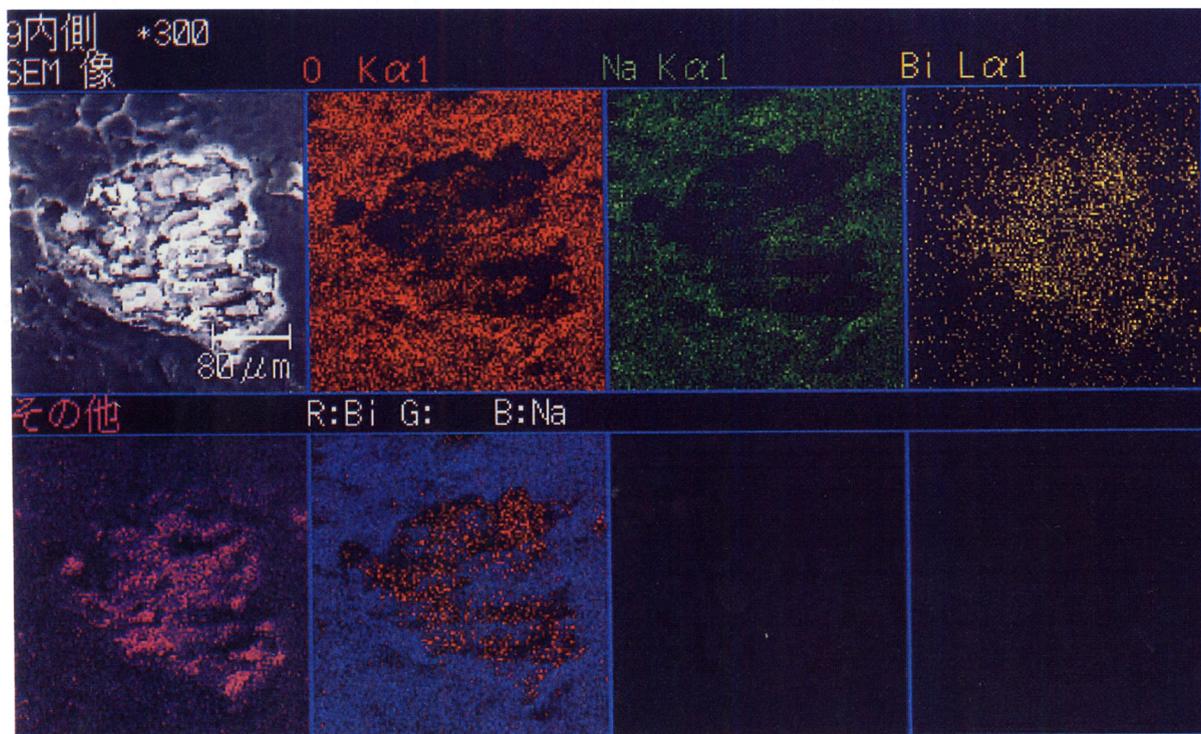


図3-10(b) サンプリングフィンガー上部 (セクションNo.9) の中心部の
面分析結果 (反応生成物)

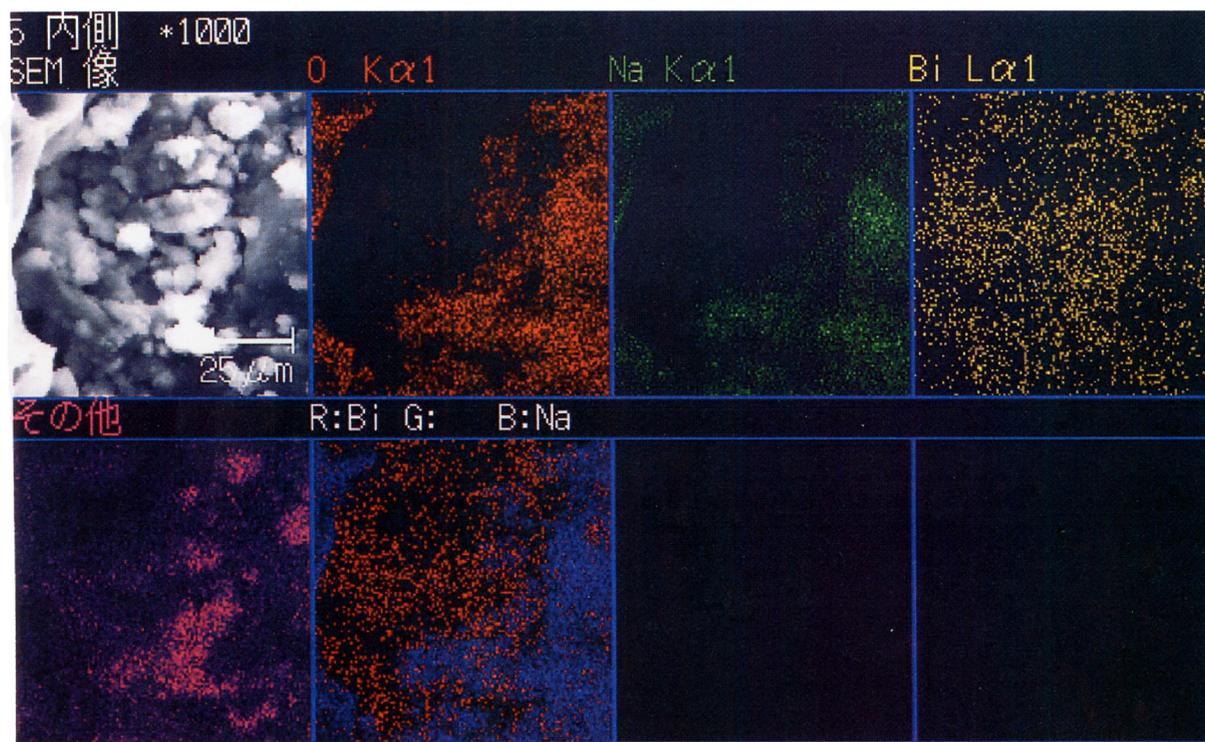


図3-11(a) サンプルングフィンガー中部（セクションNo.5）の中心部の面分析結果（反応生成物）

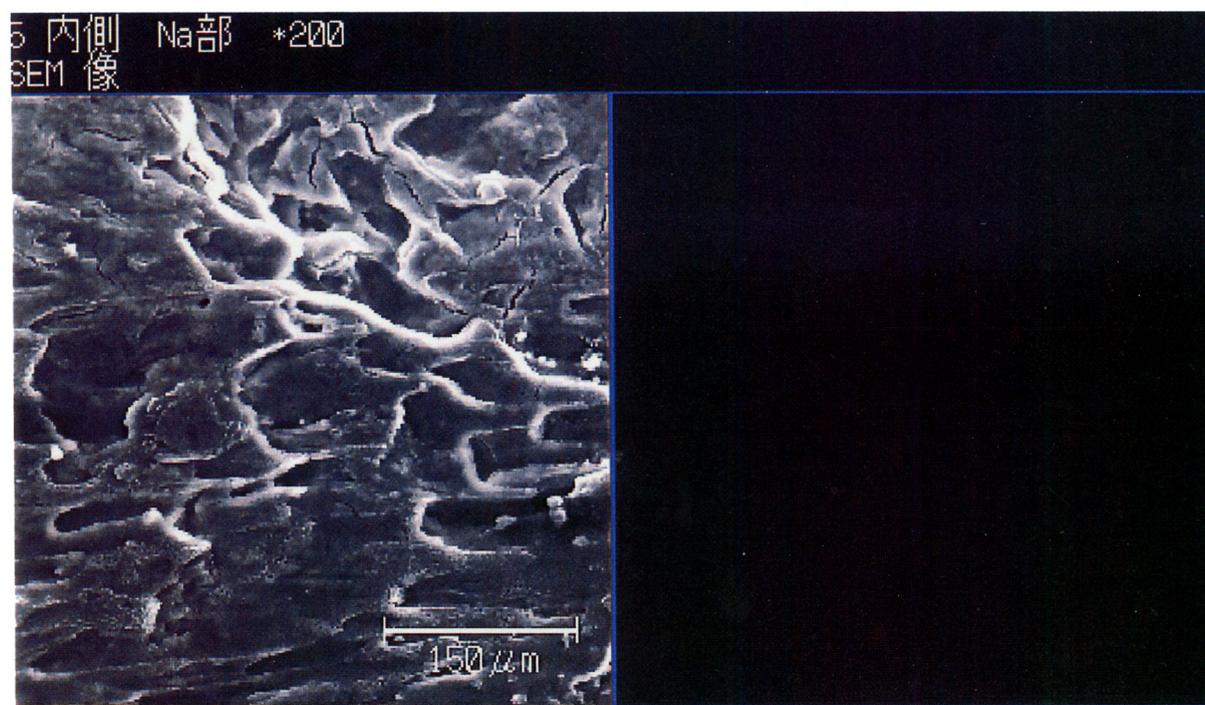


図3-11(b) サンプルングフィンガー中部（セクション号No.5）の中心部の面分析結果（ナトリウムの面）

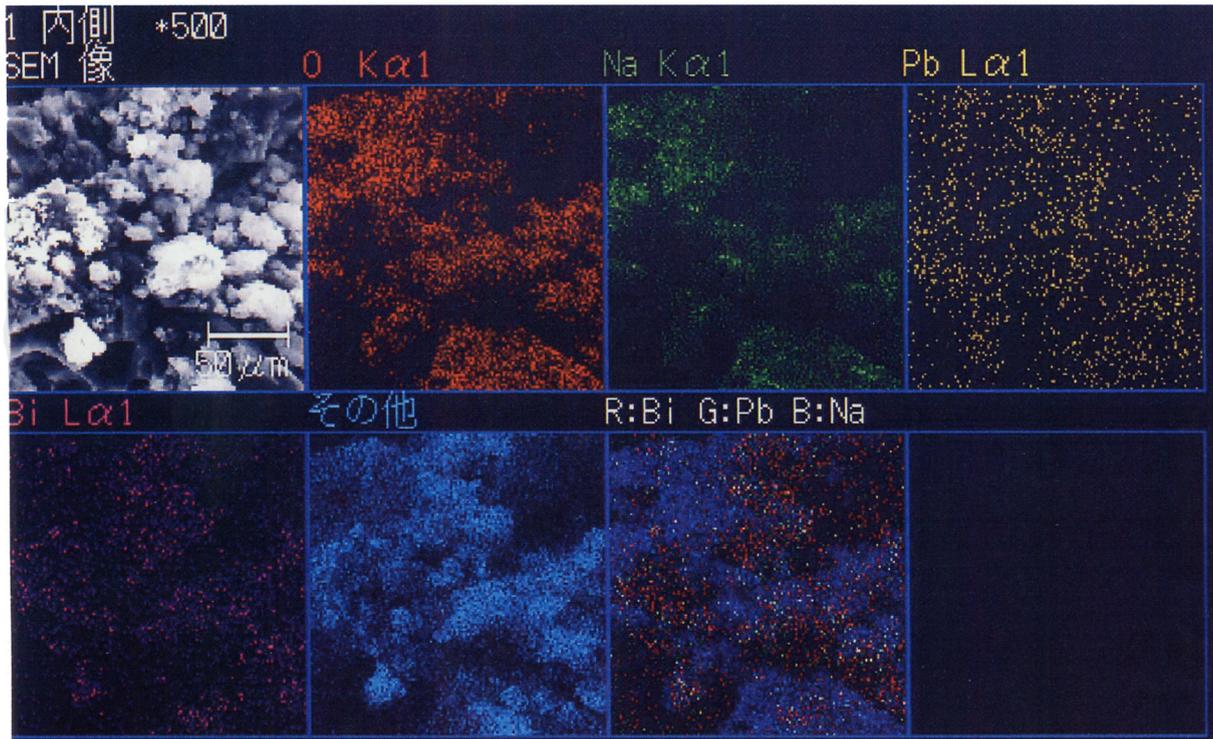


図3-12(a) サンプリングフィンガー下部 (セクションNo.1) の中心部の面分析結果 (反応生成物)



図3-12(b) サンプリングフィンガー下部 (セクションNo.1) の中心部の面分析結果 (反応生成物)

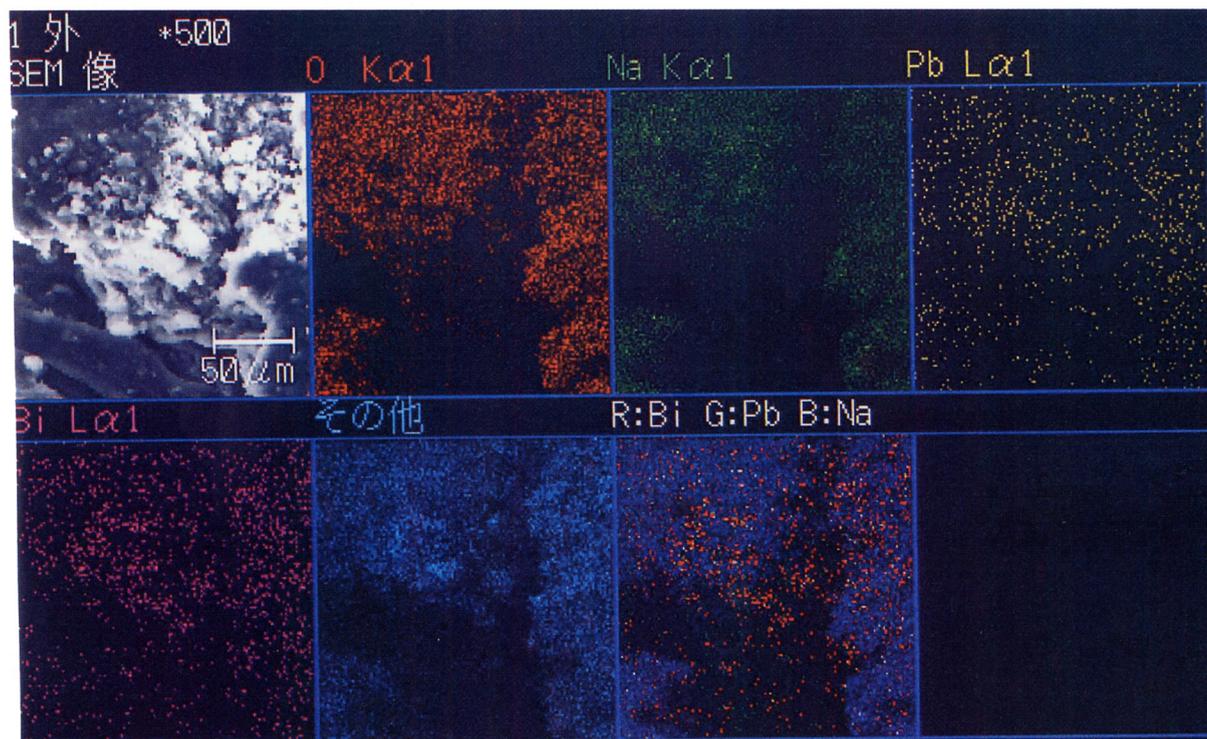


図3-13 サンプルングフィンガー下部 (セクション No. 1) の周辺部の面分析結果 (反応生成物)

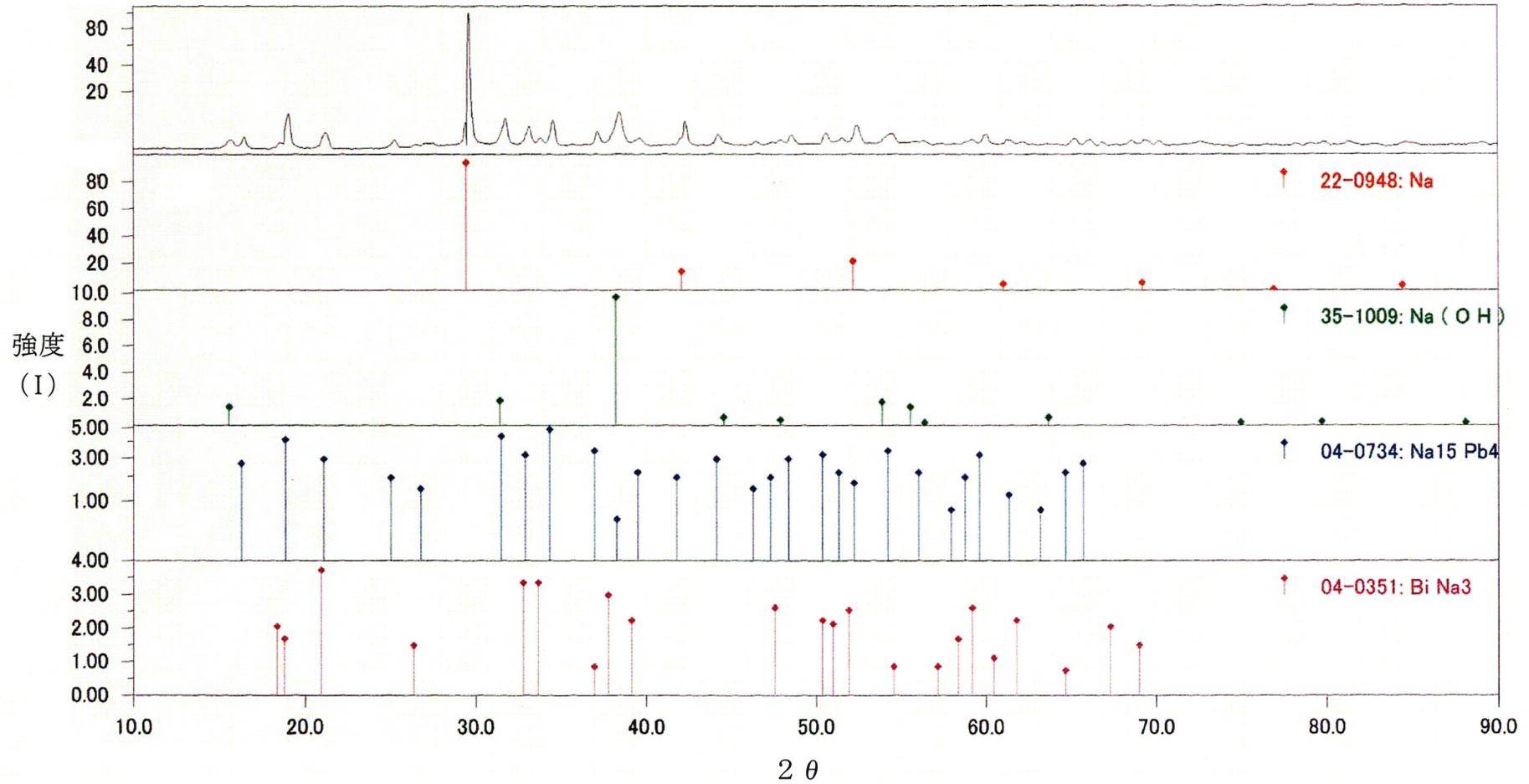


図3-14 サンプリングフィンガー上部 (セクションNo.9) 中心部のXRD結果

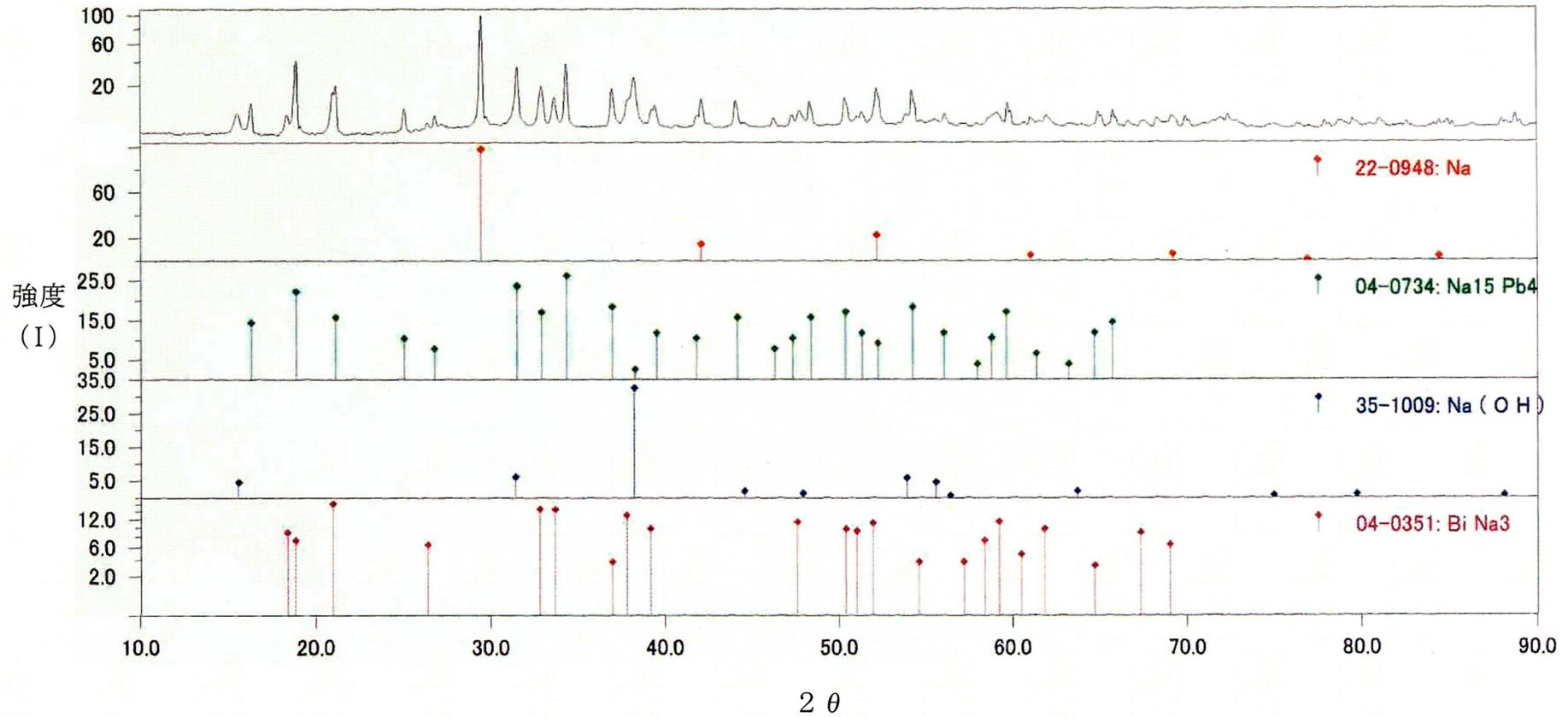


図3-15 サンプリングフィンガー中部 (セクションNo.5) 中心部の XRD 結果

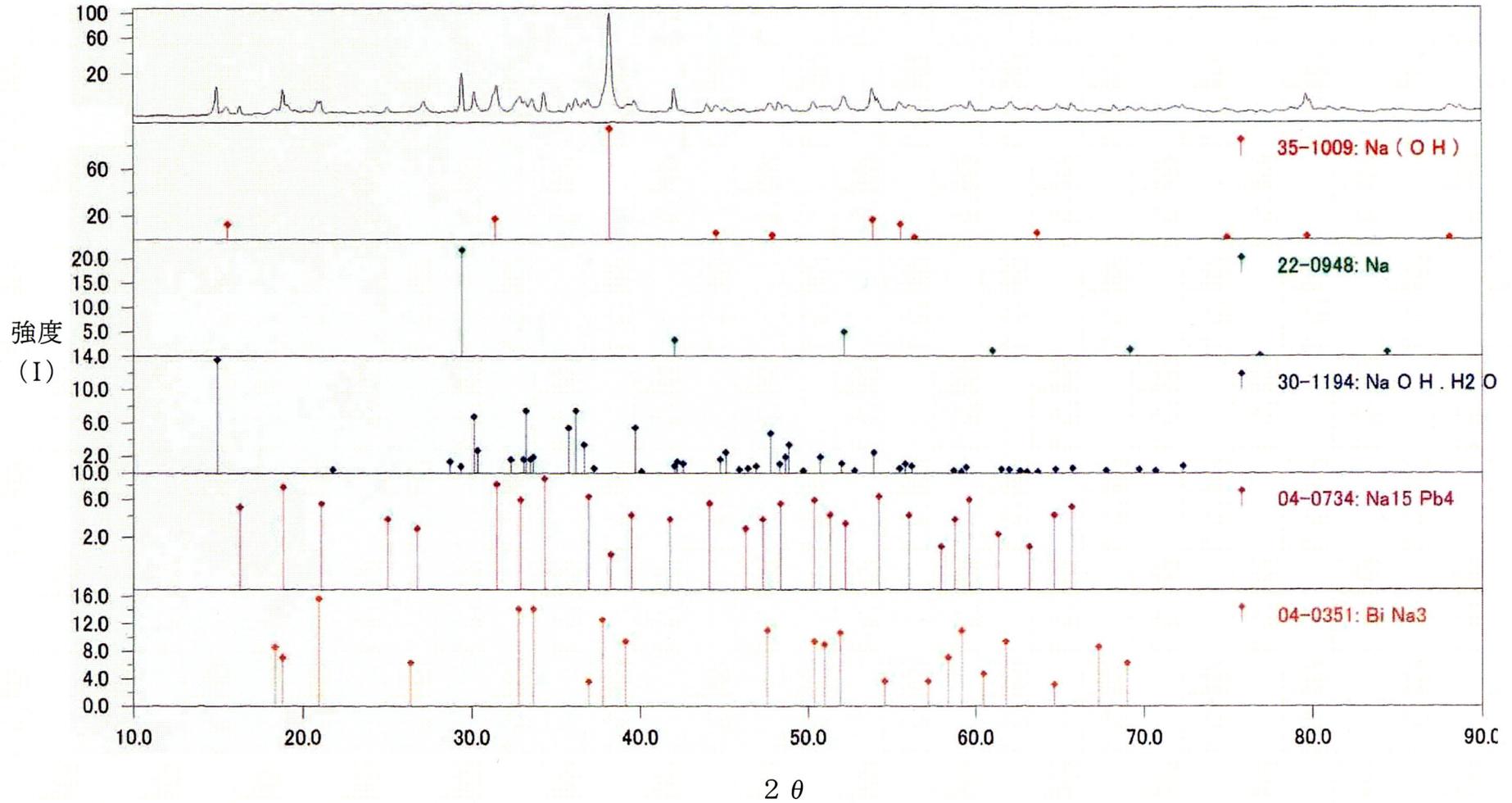


図3-16 サンプルフィンガー下部 (セクションNo.1) 中心部のXRD結果

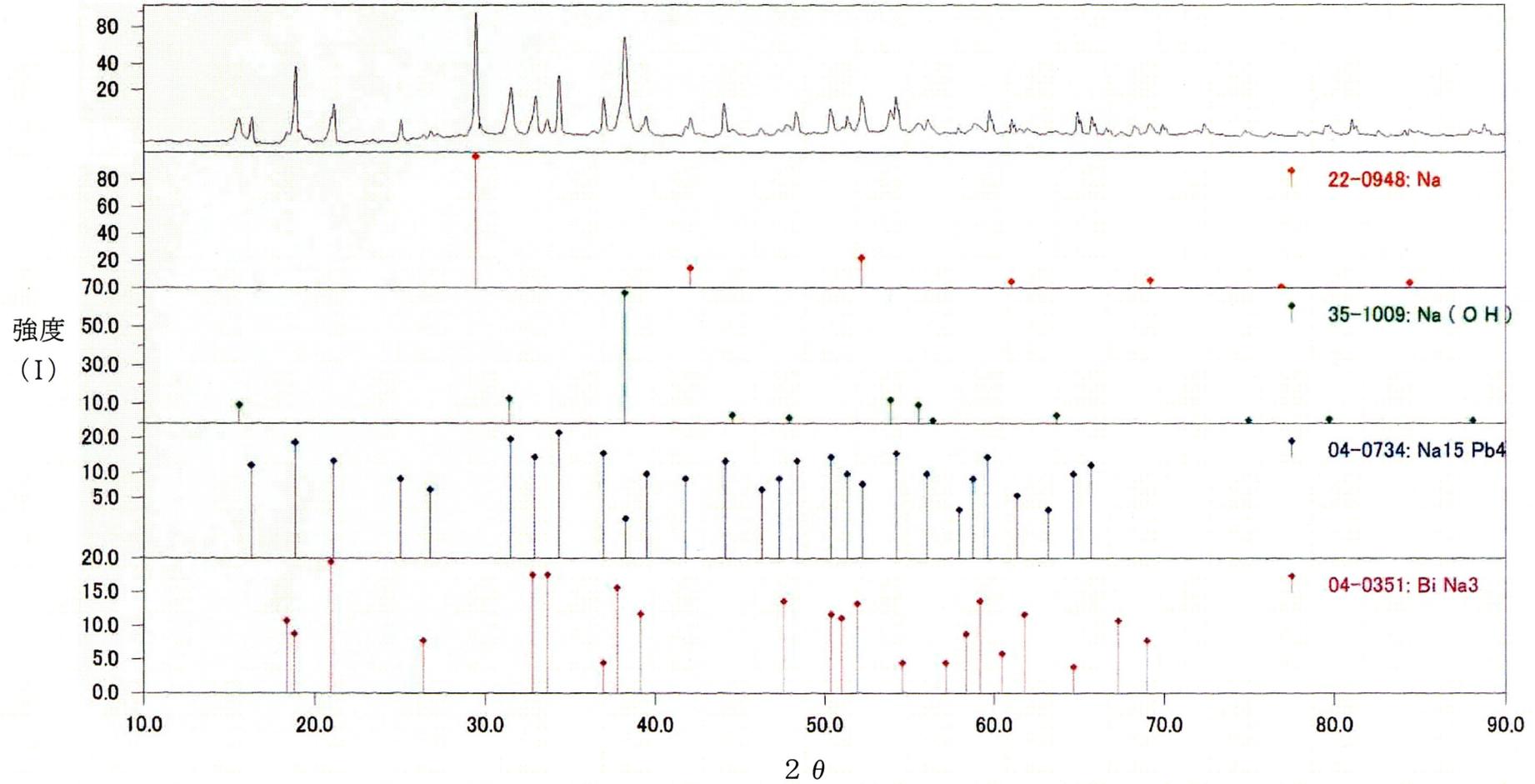


図3-17 サンプリングフィンガー下部 (セクションNo.1) の周辺部のXRD結果

表 3-8 試験装置の各部位から回収したナトリウム中の各元素の含有量および存在割合 (L1-2試験)

元素名		試験容器	レデューサー部	サンプリング フィンガー	
水溶液 + 残渣	ナトリウム (Na)	重量(mg)	1038926.8	531921.1	セクションごとの 水溶液と残渣を分離した 個別計算を参照 (表3-9～表3-14)
		wt. %	99.3	99.5	
		at. %	99.93	99.88	
	鉛 (Pb)	重量(mg)	6723.06	1749.15	
		wt. %	0.6	0.3	
		at. %	0.07	0.11	
	ビスマス (Bi)	重量(mg)	421.765	920.92	
		wt. %	0.04	0.17	
		at. %	0.001	0.006	
	全重量		(mg)	1046071.625	

表 3-9 サンプルフィンガー中心部の
ナトリウムの分析結果 (L1-2試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb
PE01-0C	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-1C	mg/l	1424	0.4	9.0
	1	0.1	0.1	0.1
	mg	142.4	0.04	0.9
	wt. %	99.3	0.03	0.6
	at. %	99.9	0.003	0.1
PE01-2C	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-3C	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-4C	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-5C	mg/l	1496	0.4	15.2
	1	0.1	0.1	0.1
	mg	149.6	0.04	1.5
	wt. %	99.0	0.03	1.0
	at. %	99.9	0.003	0.1
PE01-6C	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-7C	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-8C	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-9C	mg/l	1629	0.4	28.0
	1	0.1	0.1	0.1
	mg	162.9	0.04	2.8
	wt. %	98.3	0.02	1.7
	at. %	99.8	0.003	0.2

表 3-10 サンプルフィンガー周辺部の
の
ナトリウムの分析結果 (L1-2試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb
PE01-0P	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-1P	mg/l	1305	0.4	2.4
	1	0.1	0.1	0.1
	mg	130.5	0.04	0.2
	wt. %	99.8	0.03	0.2
	at. %	100.0	0.003	0.0
PE01-2P	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-3P	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-4P	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-5P	mg/l	1128	0.4	0.7
	1	0.1	0.1	0.1
	mg	112.8	0.04	0.1
	wt. %	99.9	0.04	0.1
	at. %	100.0	0.004	0.0
PE01-6P	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-7P	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-8P	mg/l			
	1			
	mg			
	wt. % at. %			
PE01-9P	mg/l	1361	0.4	6.0
	1	0.1	0.1	0.1
	mg	136.1	0.04	0.6
	wt. %	99.5	0.03	0.4
	at. %	99.9	0.003	0.0

表3-11 サンプルフィンガー中心部+周辺部の
ナトリウムの分析結果 (L1-2試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb
PE01-0	mg			
	wt. %			
	at. %			
PE01-1	mg	272.9	0.08	1.1
	wt. %	99.6	0.03	0.4
	at. %	100.0	0.003	0.0
PE01-2	mg			
	wt. %			
	at. %			
PE01-3	mg			
	wt. %			
	at. %			
PE01-4	mg			
	wt. %			
	at. %			
PE01-5	mg	262.4	0.08	1.6
	wt. %	99.4	0.03	0.6
	at. %	99.9	0.003	0.1
PE01-6	mg			
	wt. %			
	at. %			
PE01-7	mg			
	wt. %			
	at. %			
PE01-8	mg			
	wt. %			
	at. %			
PE01-9	mg	299.0	0.08	3.4
	wt. %	98.8	0.03	1.1
	at. %	99.9	0.003	0.1

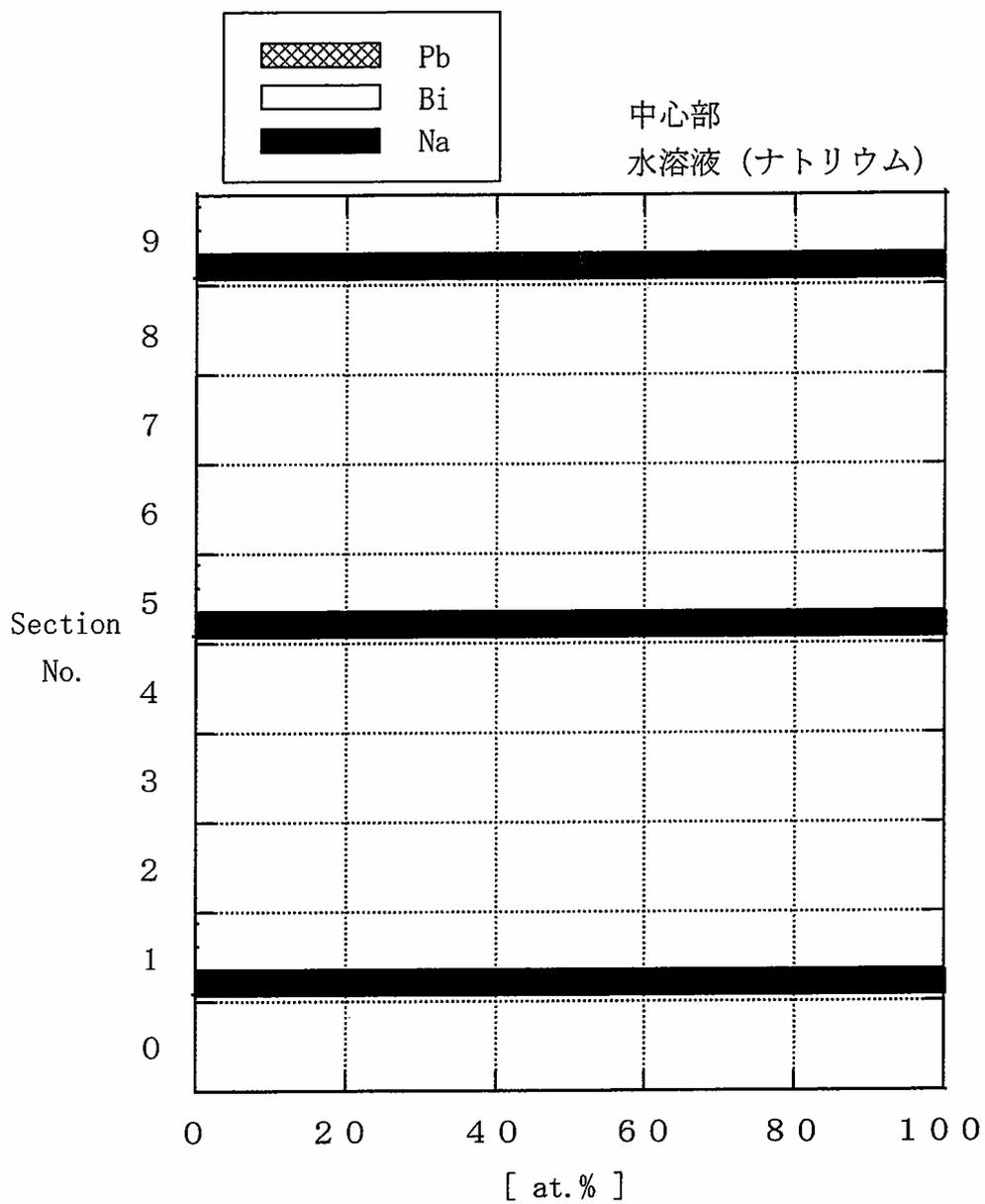


図3-19 サンプルフィンガー部 中心部 水溶液の分析結果 (L1-2 試験)

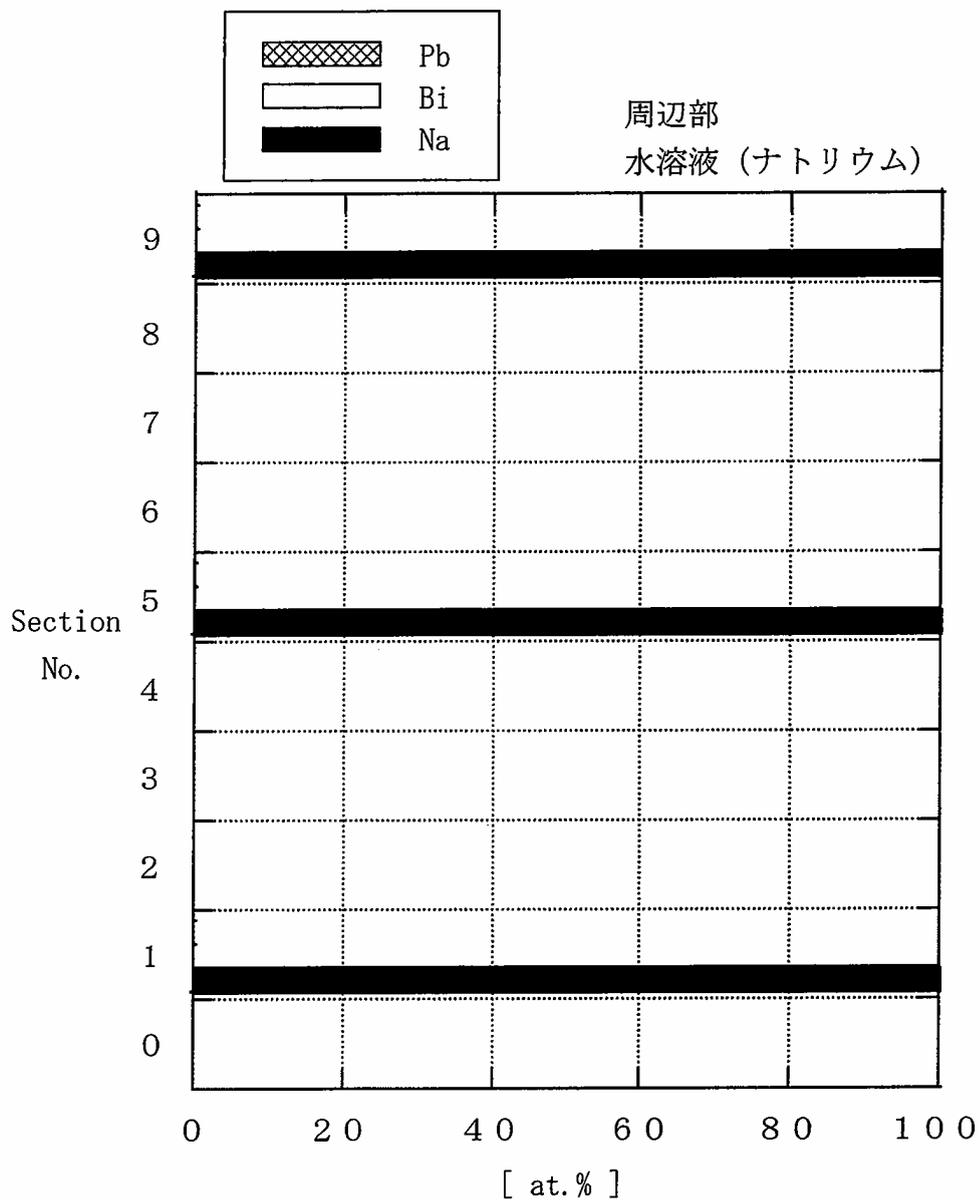


図3-20 サンプルングフィンガー部 周辺部 水溶液の分析結果 (L1-2 試験)

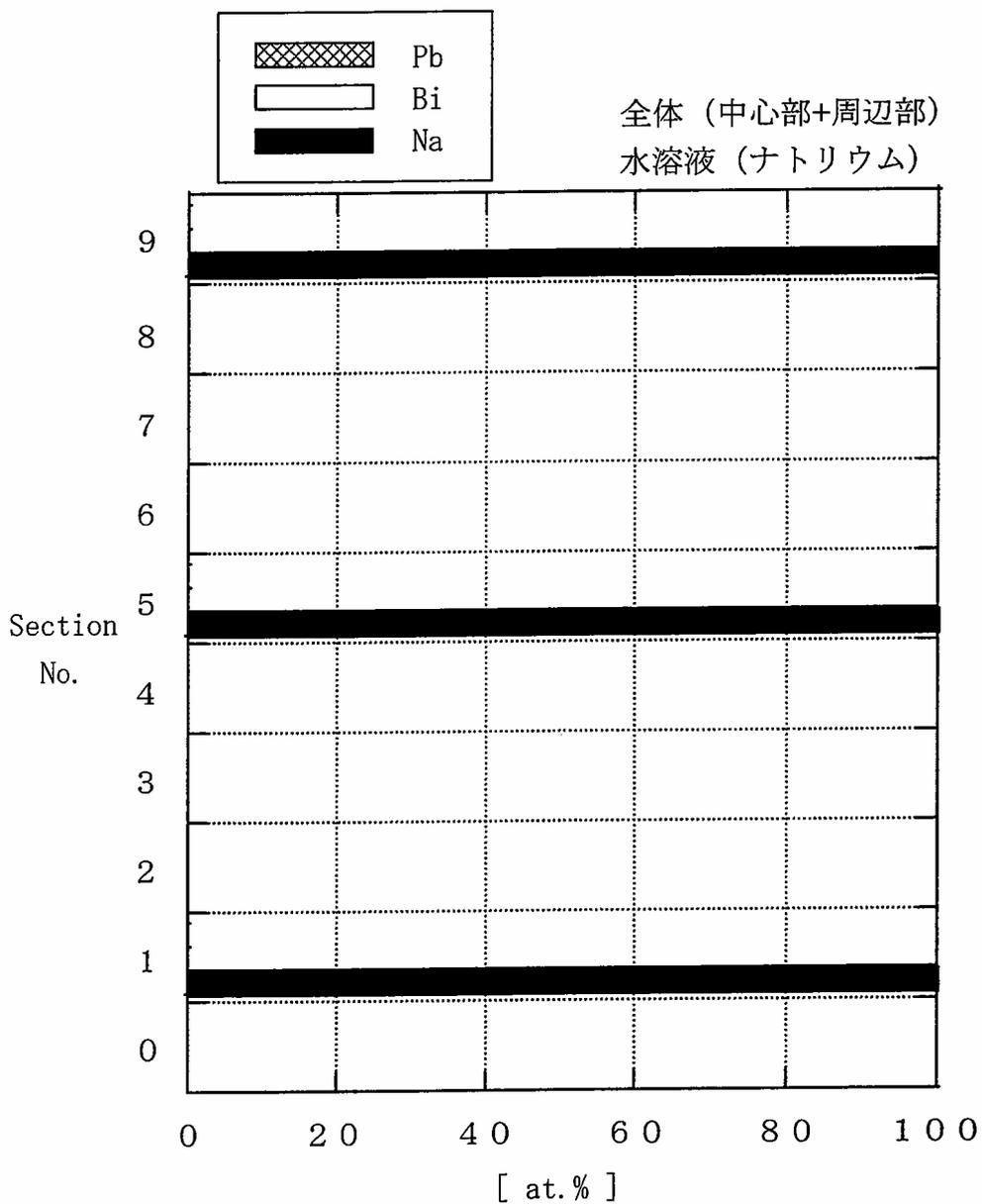


図3-21 サンプルリングフィンガー部 全体（中心部+周辺部）
水溶液の分析結果（L1-2 試験）

表3-12 サンプリングフィンガー 中心部の残渣の分析結果
(L1-2試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb	Total
PE01-0CS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-1CS	絶対量(mg)	7.1	92.7	22.7	122.5
	wt%	5.80	75.67	18.53	100.00
	at%	35.83	51.46	12.71	100.00
PE01-2CS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-3CS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-4CS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-5CS	絶対量(mg)	1.2	89.9	19.4	110.5
	wt%	1.09	81.36	17.56	100.00
	at%	9.06	74.68	16.25	100.00
PE01-6CS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-7CS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-8CS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-9CS	絶対量(mg)	3.5	73.1	20.7	97.3
	wt%	3.60	75.13	21.27	100.00
	at%	25.29	58.11	16.60	100.00

表3-13 サンプリングフィンガー 周辺部の残渣の分析結果
(L1-2試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb	Total
PE01-0PS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-1PS	絶対量(mg)	2.6	23.6	21.2	47.4
	wt%	5.49	49.79	44.73	100.00
	at%	34.44	34.39	31.16	100.00
PE01-2PS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-3PS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-4PS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-5PS	絶対量(mg)	17.4	28.4	19.2	65
	wt%	26.77	43.69	29.54	100.00
	at%	76.81	13.79	9.40	100.00
PE01-6PS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-7PS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-8PS	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-9PS	絶対量(mg)	2	23.2	20.2	45.4
	wt%	4.41	51.10	44.49	100.00
	at%	29.44	37.57	32.99	100.00

表3-14 サンプリングフィンガー 全体での残渣の分析結果
(L1-2試験)

試料名	単位	Na	Bi	Pb	Total
PE01-0	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-1	絶対量(mg)	9.7	116.3	43.9	169.9
	wt%	5.71	68.45	25.84	100.00
	at%	35.45	46.75	17.80	100.00
PE01-2	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-3	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-4	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-5	絶対量(mg)	18.6	118.3	38.6	175.5
	wt%	10.60	67.41	21.99	100.00
	at%	51.82	36.25	11.93	100.00
PE01-6	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-7	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-8	絶対量(mg)				
	wt%				
	at%				
PE01-9	絶対量(mg)	5.5	96.3	40.9	142.7
	wt%	3.85	67.48	28.66	100.00
	at%	26.66	51.35	22.00	100.00

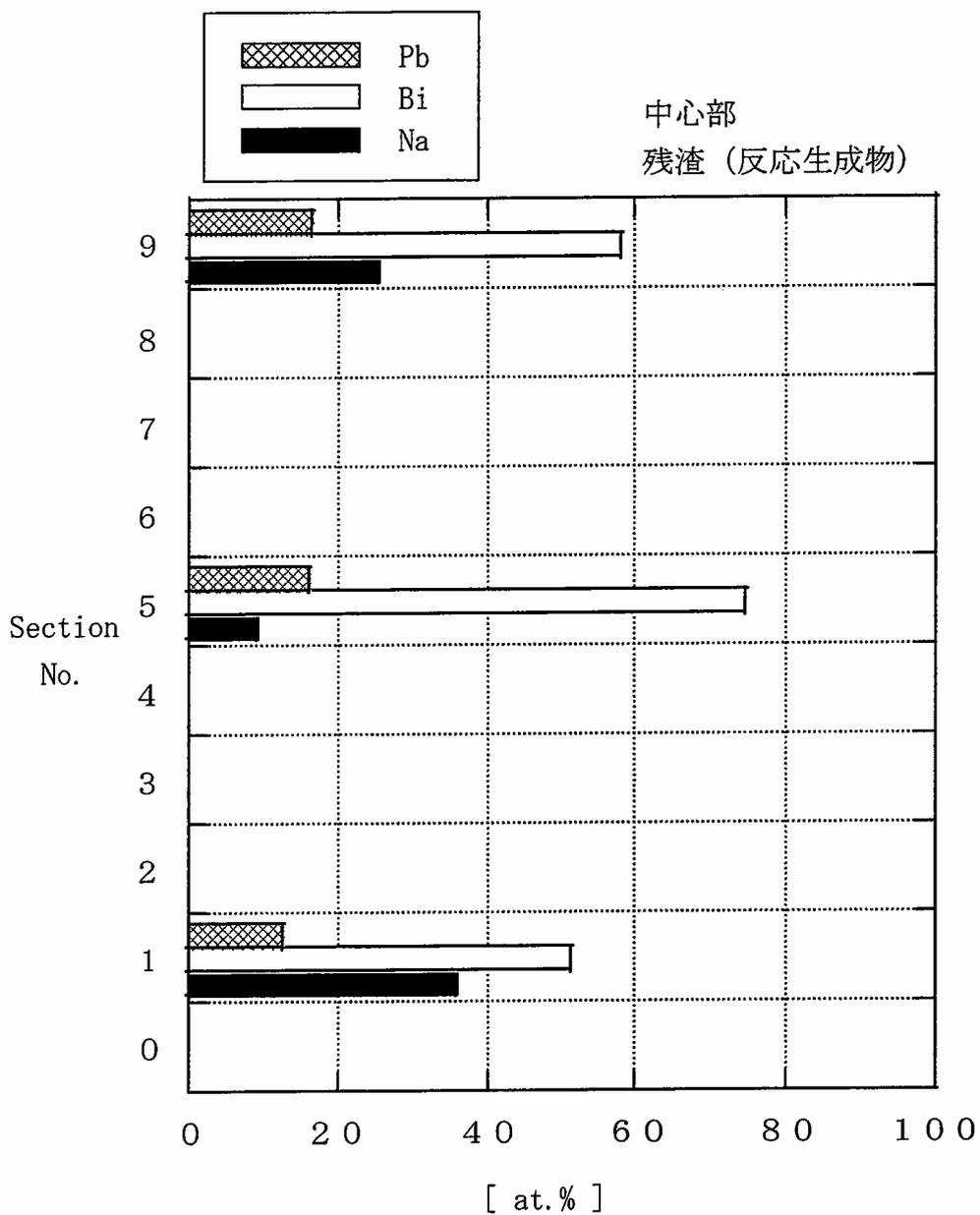


図3-22 サンプルリングフィンガー部 中心部 残渣の分析結果 (L1-2 試験)

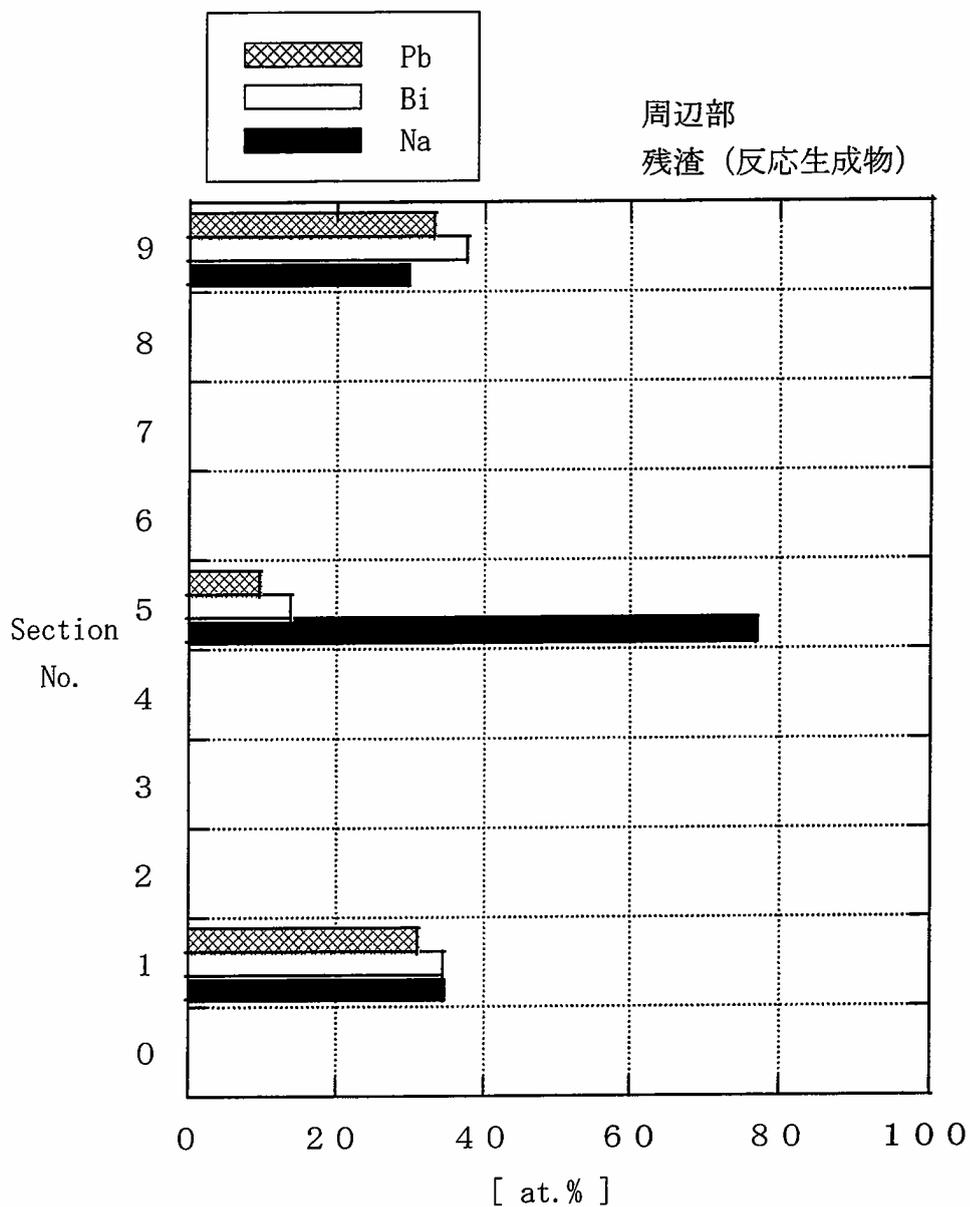


図3-23 サンプルフィンガー部 周辺部 残渣の分析結果 (L1-2 試験)

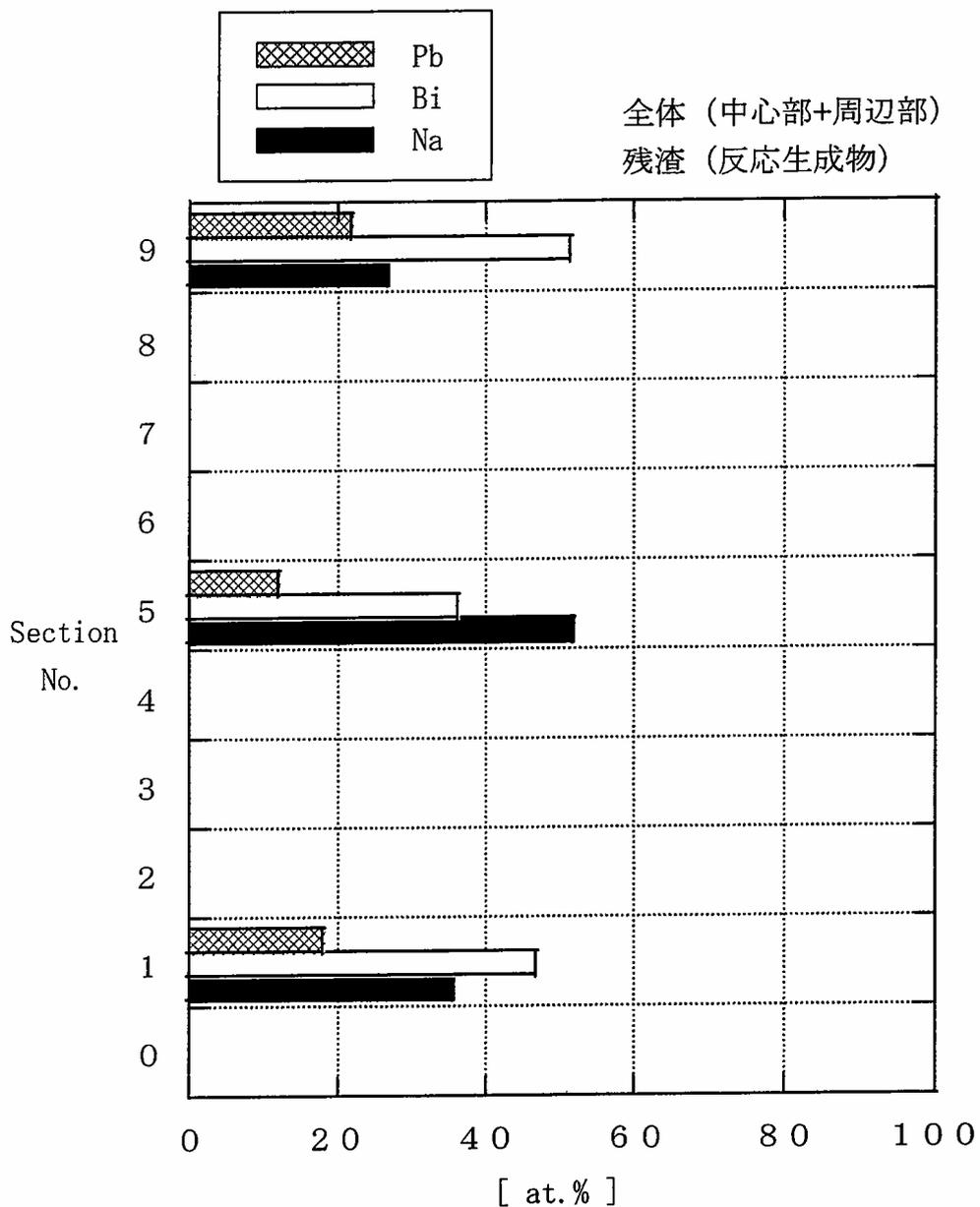


図3-24 サンプルフィンガー部 全体 (中心部+周辺部) 残渣の分析結果 (L1-2 試験)

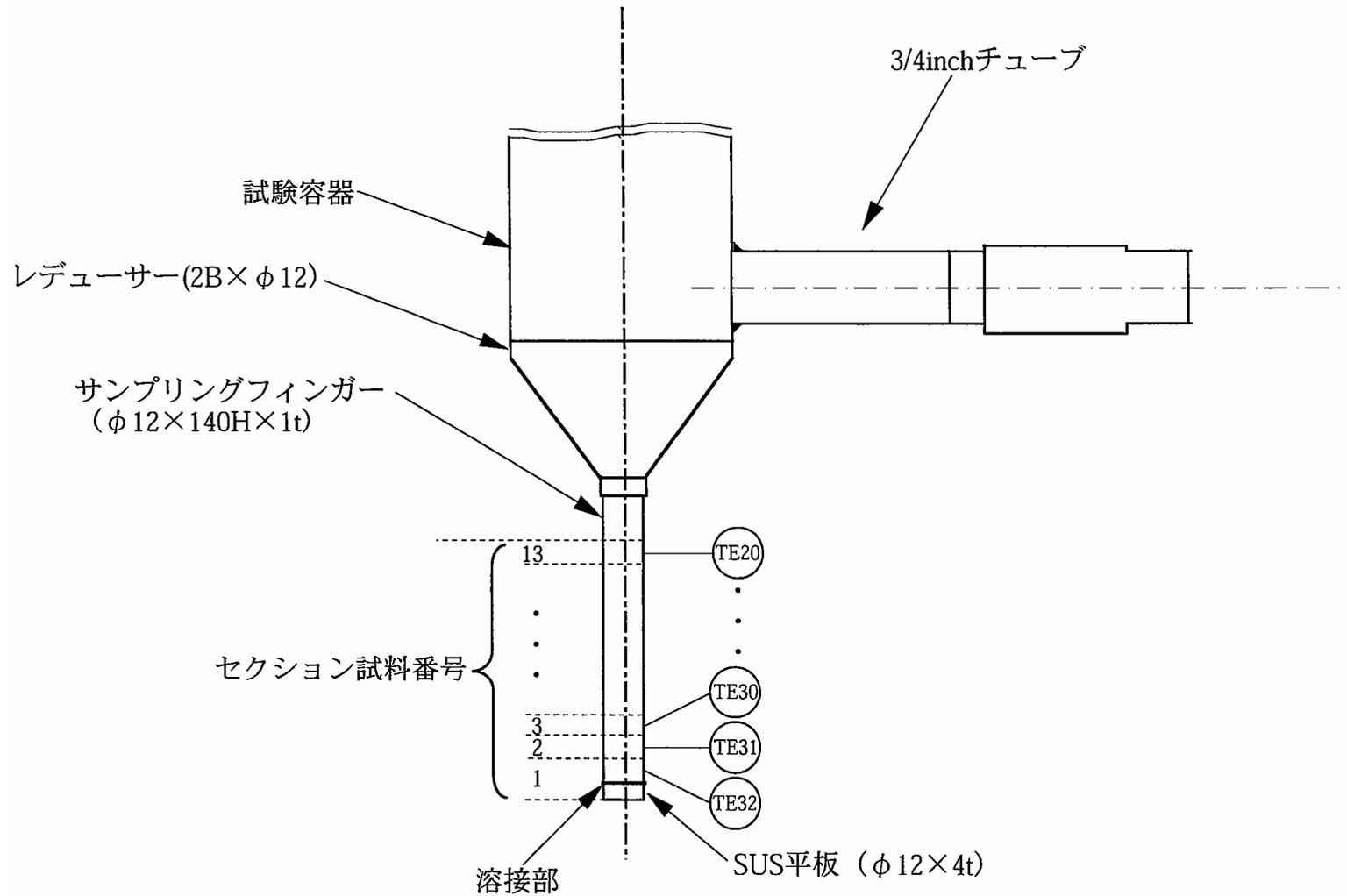


図4-1 発熱量計算のために代表させた各ナトリウム温度測定用熱電対の温度影響範囲

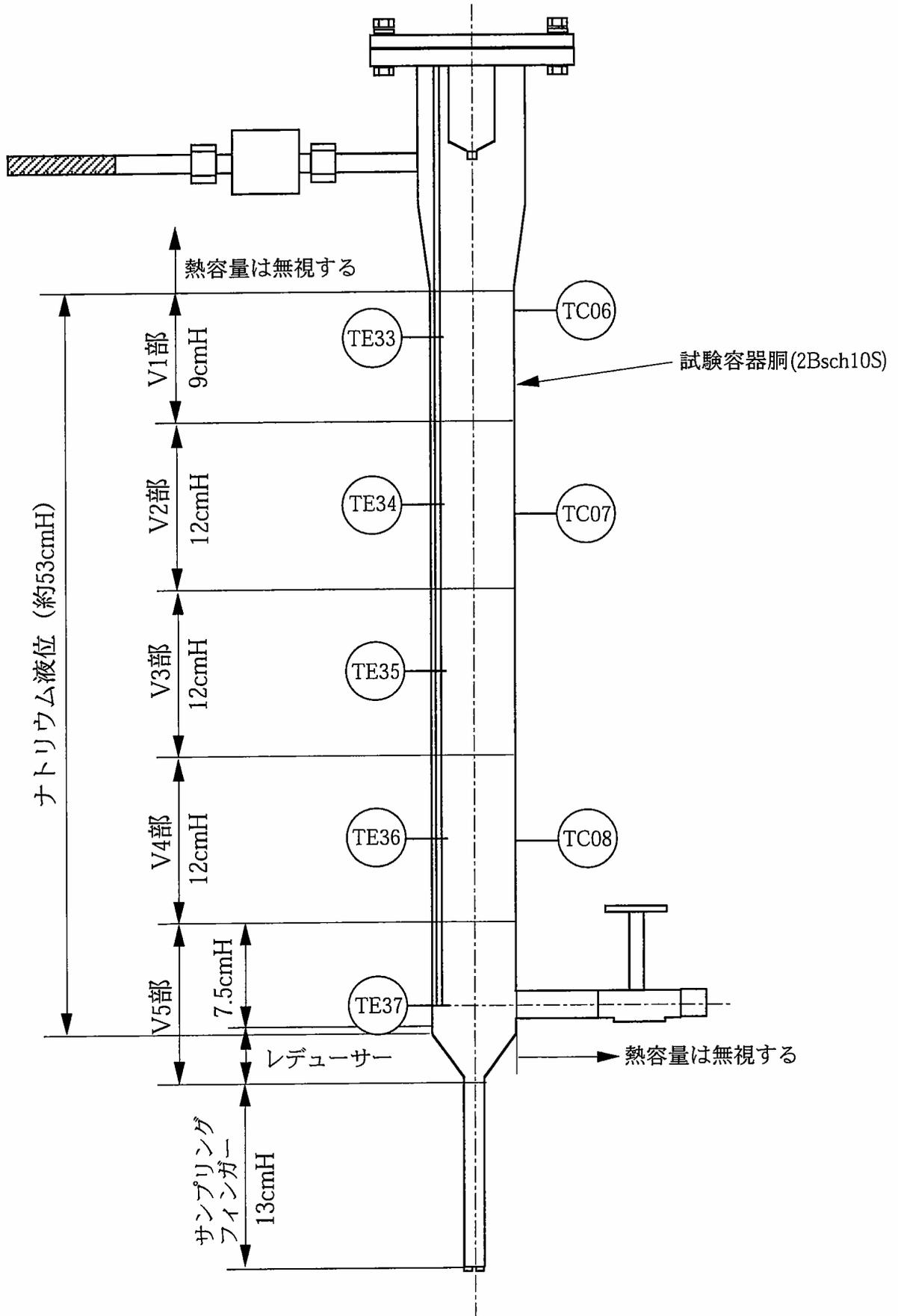


図4-2 発熱量計算のために代表させた各ナトリウム温度測定用熱電対の温度影響範囲

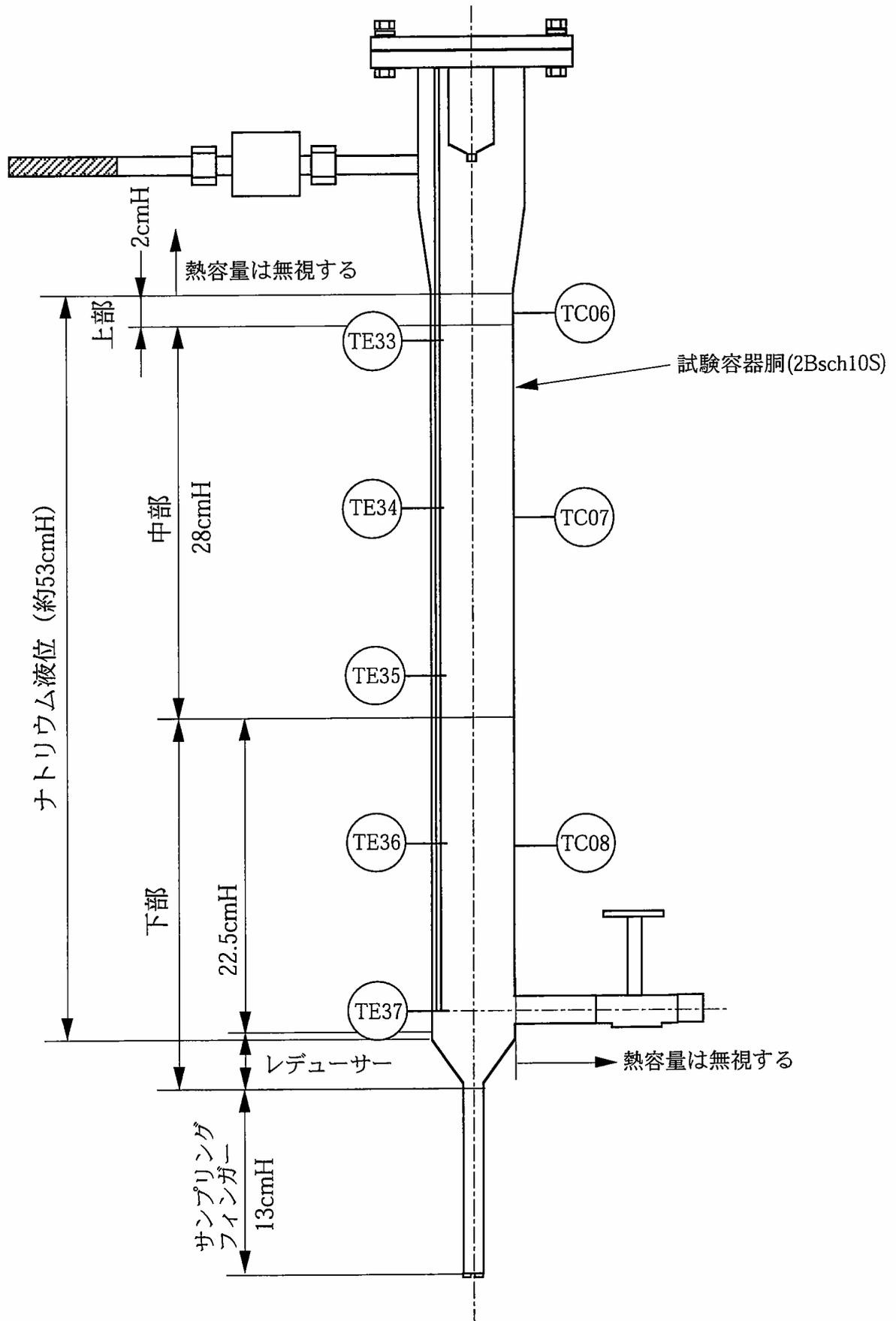


図4-3 発熱量計算のために代表させた各試験容器胴温度測定用熱電対の温度影響範囲

表 4-1 最大温度差から算出したサンプリングフィンガー内の発熱量
(L1-2試験)

Tag No.	熱容量(J/K)	最大温度差(°C)	発熱量(J)
TE20	2.53	14.3	36.18
TE21	2.53	16.1	40.73
TE22	2.53	16.1	40.73
TE23	2.53	15.4	38.96
TE24	2.53	14.4	36.43
TE25	2.53	13.9	35.17
TE26	2.53	13.4	33.90
TE27	2.53	12.2	30.87
TE28	2.53	11.4	28.84
TE29	2.53	11.4	28.84
TE30	2.53	11.2	28.34
TE31	2.53	10.0	25.30
TE32	4.70	7.6	35.72
総発熱量	35.06		440.01

表 4-2 最大温度差から算出した試験容器内の発熱量
(ナトリウム温度を基に算出) (L1-2試験)

Tag No.	熱容量(J/K)	最大温度差(°C)	発熱量(J)
TE33	458.4	-2.3	-1054.3
TE34	611.3	-2.2	-1344.9
TE35	611.3	19.5	11920.4
TE36	611.3	11.9	7274.5
TE37	489.5	10.7	5237.7
総発熱量			22033.3

表 4-3 最大温度差から算出した試験容器内の発熱量
(外壁温度を基に算出) (L1-2試験)

Tag No.	熱容量(J/K)	最大温度差(°C)	発熱量(J)
TC06	101.9	0.1	10.2
TC07	1426.2	4.3	6132.7
TC08	1279.1	11.1	14198.0
総発熱量			20340.9

表 4-4 最大温度差から算出したサンプリングフィンガー内の発熱量
(L1-1試験)

Tag No.	熱容量(J/K)	最大温度差(°C)	発熱量(J)
TC09	35.06	8.8	308.5
総発熱量			308.5

表 4-5 最大温度差から算出した試験容器内の発熱量
(外壁温度を基に算出) (L1-1試験)

Tag No.	熱容量(J/K)	最大温度差(°C)	発熱量(J)
TC06	101.9	1.3	132.5
TC07	1426.2	11.8	16829.2
TC08	1279.1	13.7	17523.7
総発熱量			34485.3

Bi-Na Phase Diagram

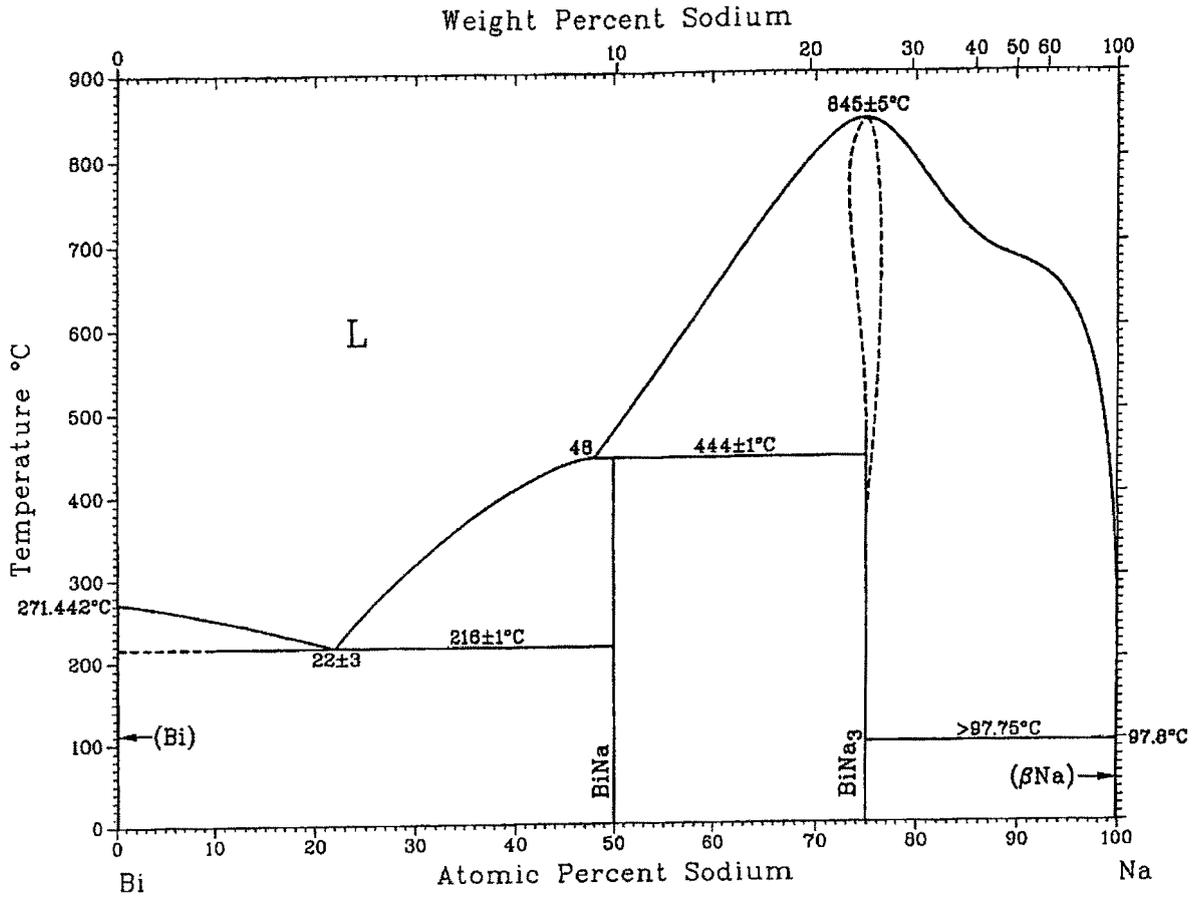


図4-4 ナトリウム-ビスマス2元系状態図

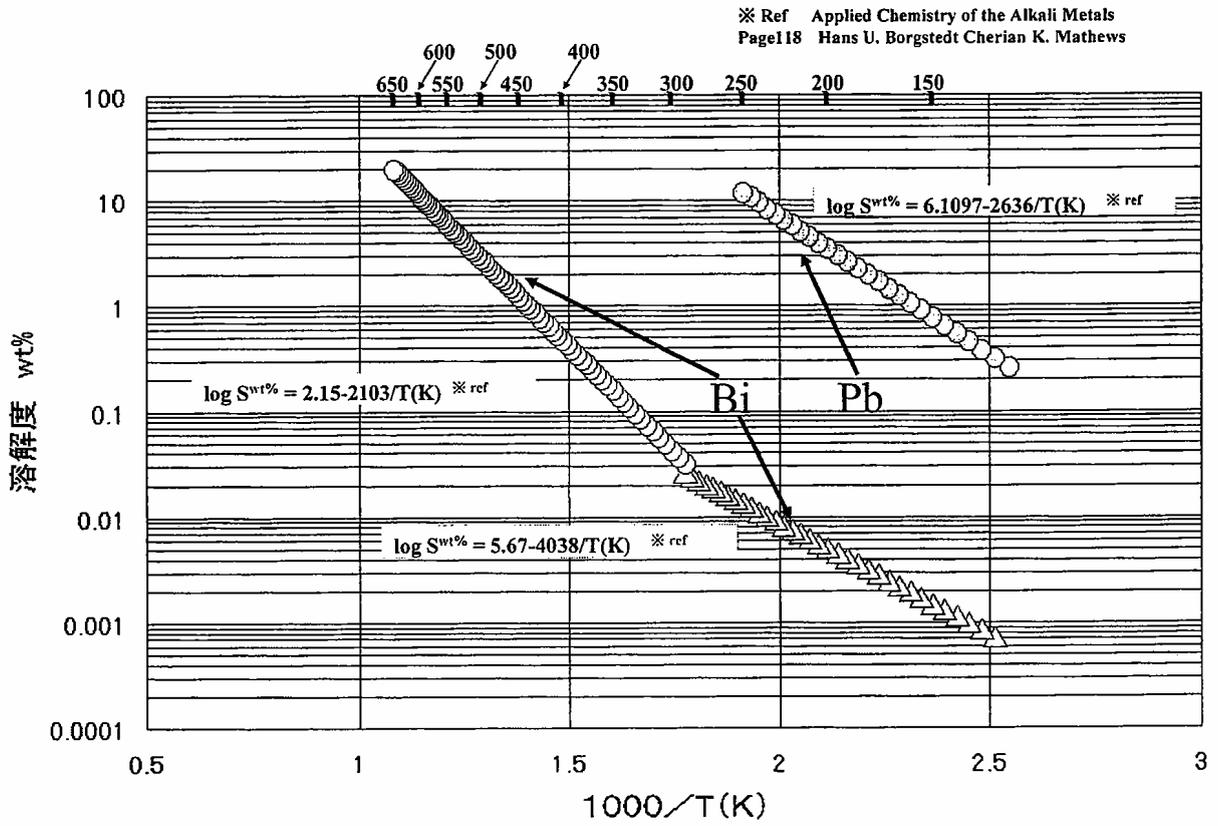


図4-5 ナトリウム中の鉛およびビスマスの溶解度

Pb-Na Phase Diagram

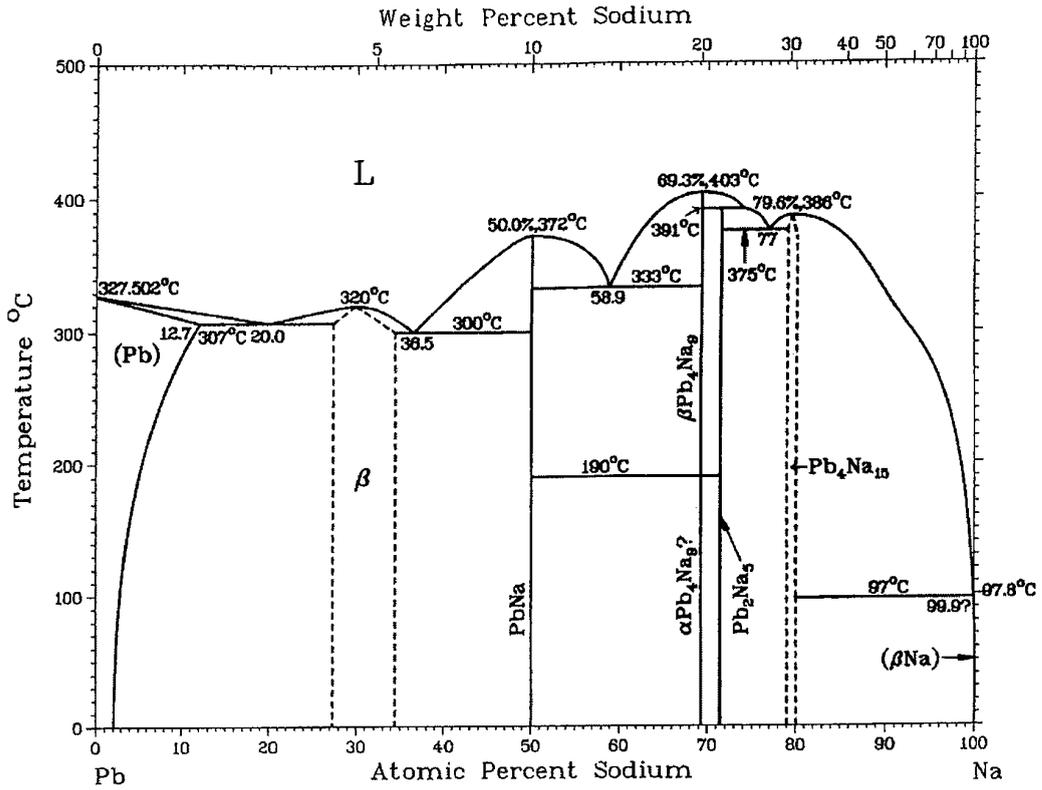


図 4-6 ナトリウム-鉛 2 元系状態図

付録

サンプリングフィンガーおよび試験容器内の発熱量を計算する際の各部の熱量量について算出する。尚、本計算に使用するステンレス鋼およびナトリウムの物性値は以下の通りである。

	ステンレス鋼	ナトリウム
密度 (g/cm ³)	7.73	0.86
比熱 (J/g K)	0.62	1.29

1. サンプリングフィンガー各部の熱容量

(1) セクション(1) (L1-2 試験の考察で使用)

ステンレス管の重量：

$$\begin{aligned}
 W_{SUS} &= V_{SUS} * \rho_{SUS} \\
 &= ((1.2/2)^2 * \pi * 0.4 + ((1.2/2)^2 - (1.0/2)^2) * \pi * 1.0) * 7.73 \\
 &= 6.17 \text{ g}
 \end{aligned}$$

ナトリウムの重量：

$$\begin{aligned}
 W_{Na} &= V_{Na} * \rho_{Na} \\
 &= (1.0/2)^2 * \pi * 1.0 * 0.86 \\
 &= 0.68 \text{ g}
 \end{aligned}$$

セクション(1)の熱容量：

$$\begin{aligned}
 Q_{SF1} &= W_{SUS} * C_{SUS} + W_{Na} * C_{Na} \\
 &= 6.17 * 0.62 + 0.68 * 1.29 \\
 &= 4.70 \text{ J/K}
 \end{aligned}$$

(2) セクション(2)～(13) (L1-2 試験の考察で使用)

ステンレス管の重量：

$$\begin{aligned}
 W_{SUS} &= V_{SUS} * \rho_{SUS} \\
 &= ((1.2/2)^2 - (1.0/2)^2) * \pi * 1.0 * 7.73 \\
 &= 2.67 \text{ g}
 \end{aligned}$$

ナトリウムの重量：

$$\begin{aligned}
 W_{Na} &= V_{Na} * \rho_{Na} \\
 &= (1.0/2)^2 * \pi * 1.0 * 0.86 \\
 &= 0.68 \text{ g}
 \end{aligned}$$

セクション(2)～(13)の熱容量：

$$\begin{aligned}
 Q_{SF2-13} &= W_{SUS} * C_{SUS} + W_{Na} * C_{Na} \\
 &= 2.67 * 0.62 + 0.68 * 1.29 \\
 &= 2.53 \text{ J/K}
 \end{aligned}$$

(3) サンプリングフィンガー全体の熱容量 (L1-1 試験の考察で使用)

$$\begin{aligned} Q_{SF} &= Q_{SF1} + Q_{SF2-13} * 12 \\ &= 4.70 + 2.53 * 12 \\ &= 35.06 \text{ J/K} \end{aligned}$$

2. 試験容器各部の熱容量 (ナトリウム液温より算出)

ナトリウム液温度を基に試験容器内の熱容量を算出する。この本計算ではナトリウム液面より上の試験容器胴の熱容量は無視し、試験容器 (ステンレス鋼) はナトリウムと同温であると仮定する。なお、本試験で用いている 2Bsch10s 配管の重量は 39.8g/cm とする。

(1) 試験容器胴 (V1)

ステンレス管の重量:

$$\begin{aligned} W_{SUS} &= W_{SUS} (\text{g/cm}) * h (\text{cm}) \\ &= 39.8 * 9 \\ &= 358.2 \text{ g} \end{aligned}$$

ナトリウムの重量:

$$\begin{aligned} W_{Na} &= V_{Na} * \rho_{Na} \\ &= (5.49/2)^2 * \pi * 9 * 0.86 \\ &= 183.2 \text{ g} \end{aligned}$$

試験容器胴 (V1) の熱容量:

$$\begin{aligned} Q_{TV1} &= W_{SUS} * C_{SUS} + W_{Na} * C_{Na} \\ &= 358.2 * 0.62 + 183.2 * 1.29 \\ &= 458.4 \text{ J/K} \end{aligned}$$

(2) 試験容器胴 (V2~V4)

ステンレス管の重量:

$$\begin{aligned} W_{SUS} &= W_{SUS} (\text{g/cm}) * h (\text{cm}) \\ &= 39.8 * 12 \\ &= 477.6 \text{ g} \end{aligned}$$

ナトリウムの重量:

$$\begin{aligned} W_{Na} &= V_{Na} * \rho_{Na} \\ &= (5.49/2)^2 * \pi * 12 * 0.86 \\ &= 244.3 \text{ g} \end{aligned}$$

試験容器胴 (V2~V4) の熱容量:

$$\begin{aligned} Q_{TV2-4} &= W_{SUS} * C_{SUS} + W_{Na} * C_{Na} \\ &= 477.6 * 0.62 + 244.3 * 1.29 \\ &= 611.3 \text{ J/K} \end{aligned}$$

(3) 試験容器胴 (V5)

この部分にはレデューサ部が含まれている。ステンレス鋼の重量は簡略化のため、実測値である 110 g を計算に採用した。また、ナトリウム重量は高さ 3.5 cm の円錐として計算する。

ステンレス管の重量：

$$\begin{aligned} W_{\text{SUS}} &= W_{\text{SUS}} (\text{g/cm}) * h (\text{cm}) + W_{\text{R}} + W_{\text{tube}} \\ &= 39.8 * 7.5 + 110 + ((1.2/2)^2 - (1.0/2)^2) * \pi * 5 * 7.73 \\ &= 421.9 \text{ g} \end{aligned}$$

ナトリウムの重量：

$$\begin{aligned} W_{\text{Na}} &= V_{\text{Na}} * \rho_{\text{Na}} \\ &= ((5.49/2)^2 * \pi * 7.5 + (5.49/2)^2 * \pi * 3.5 * 1/3 + (1.0/2)^2 * \pi * 0.5) * 0.86 \\ &= 176.7 \text{ g} \end{aligned}$$

試験容器胴 (V5) の熱容量：

$$\begin{aligned} Q_{\text{TV5}} &= W_{\text{SUS}} * C_{\text{SUS}} + W_{\text{Na}} * C_{\text{Na}} \\ &= 421.9 * 0.62 + 176.7 * 1.29 \\ &= 489.5 \text{ J/K} \end{aligned}$$

3. 試験容器各部の熱容量 (試験容器壁面温度より算出)

ここでは試験容器の壁面温度を基に試験容器内の熱容量を算出する。この本計算ではナトリウム液面より上の試験容器胴の熱容量は無視し、試験容器 (ステンレス鋼) はナトリウムと同温であると仮定する。なお、本試験で用いている 2Bsch10s 配管の重量は 39.8g/cm とする。

(1) 試験容器胴 (上部)

ステンレス管の重量：

$$\begin{aligned} W_{\text{SUS}} &= W_{\text{SUS}} (\text{g/cm}) * h (\text{cm}) \\ &= 39.8 * 2 \\ &= 79.6 \text{ g} \end{aligned}$$

ナトリウムの重量：

$$\begin{aligned} W_{\text{Na}} &= V_{\text{Na}} * \rho_{\text{Na}} \\ &= (5.49/2)^2 * \pi * 2 * 0.86 \\ &= 40.7 \text{ g} \end{aligned}$$

試験容器胴 (上部) の熱容量：

$$\begin{aligned} Q_{\text{TVP}} &= W_{\text{SUS}} * C_{\text{SUS}} + W_{\text{Na}} * C_{\text{Na}} \\ &= 79.6 * 0.62 + 40.7 * 1.29 \\ &= 101.9 \text{ J/K} \end{aligned}$$

(2) 試験容器胴 (中部)

ステンレス管の重量：

$$\begin{aligned} W_{\text{SUS}} &= W_{\text{SUS}} (\text{g/cm}) * h (\text{cm}) \\ &= 39.8 * 28 \end{aligned}$$

$$= 1114.4 \text{ g}$$

ナトリウムの重量：

$$\begin{aligned} W_{\text{Na}} &= V_{\text{Na}} * \rho_{\text{Na}} \\ &= (5.49/2)^2 * \pi * 28 * 0.86 \\ &= 570.0 \text{ g} \end{aligned}$$

試験容器胴（中部）の熱容量：

$$\begin{aligned} Q_{\text{TVM}} &= W_{\text{SUS}} * C_{\text{SUS}} + W_{\text{Na}} * C_{\text{Na}} \\ &= 1114.4 * 0.62 + 570.0 * 1.29 \\ &= 1426.2 \text{ J/K} \end{aligned}$$

(3) 試験容器胴（下部）

ステンレス管の重量：

$$\begin{aligned} W_{\text{SUS}} &= W_{\text{SUS}} (\text{g/cm}) * h (\text{cm}) + W_{\text{R}} + W_{\text{tube}} \\ &= 39.8 * 23 + 110 + ((1.2/2)^2 - (1.0/2)^2) * \pi * 5 * 7.73 \\ &= 1038.8 \text{ g} \end{aligned}$$

ナトリウムの重量：

$$\begin{aligned} W_{\text{Na}} &= V_{\text{Na}} * \rho_{\text{Na}} \\ &= ((5.49/2)^2 * \pi * 23 + (5.49/2)^2 * \pi * 3.5 * 1/3 + (1.0/2)^2 * \pi * 0.5) * 0.86 \\ &= 492.3 \text{ g} \end{aligned}$$

試験容器胴（下部）の熱容量：

$$\begin{aligned} Q_{\text{TVN}} &= W_{\text{SUS}} * C_{\text{SUS}} + W_{\text{Na}} * C_{\text{Na}} \\ &= 1038.8 * 0.62 + 492.3 * 1.29 \\ &= 1279.1 \text{ J/K} \end{aligned}$$

以上のサンプリングフィンガーおよび試験容器の熱容量の計算結果を用いて、発熱量を計算する。