



## 「もんじゅう」事故と原因究明の現状

広井 博 鳥居達男 井上和彦 松丸 隆 舟田敏雄  
 一宮正和\* 和田雄作\*<sup>2</sup> 森下正樹\*<sup>2</sup> 山口 彰\*<sup>2</sup> 田辺裕美\*<sup>3</sup>  
 三宅 収\*<sup>3</sup> 青砥紀身\*<sup>3</sup> 家田芳明\*<sup>4</sup>

高速増殖炉もんじゅう建設所  
 大洗工学センター

\* システム開発推進部, \*<sup>2</sup> 基盤技術開発部, \*<sup>3</sup> 安全工学部  
 \*<sup>4</sup> 企画部

資料番号: 99-1

### Analysis of the Monju's Sodium Leak Accident and Investigation of the Cause

Hiroshi Hiroi Tatsuo Torii Kazuhiko Inoue Takashi Matsumaru  
 Toshio Funada Masakazu Ichimiya\* Yusaku Wada\*<sup>2</sup> Masaki Morita\*<sup>2</sup>  
 Akira Yamaguchi\*<sup>2</sup> Hironori Tanabe\*<sup>3</sup> Osamu Miyake\*<sup>3</sup> Kazumi Aoto\*<sup>3</sup>  
 Yoshiaki Ieda\*<sup>4</sup>

(Monju Construction Office)

\* System Engineering Division, O-arai Engineering Center  
 \*<sup>2</sup> Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center  
 \*<sup>3</sup> Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center  
 \*<sup>4</sup> Policy Planning Division, Head Office)

平成7年12月8日に発生した、「もんじゅう」の2次主冷却系ナトリウム漏洩事故について、プラントの運転経緯、運転パラメータ等の分析ならびに漏洩ナトリウムによる機器の損傷状況、ナトリウムエアロゾルの拡散状況等の調査に基づき、事故時の運転操作を分析評価した。

事故原因の調査については、破損した温度計さやの流体力による振動メカニズムの研究を進め、さやと流体の連成振動解析により振動特性を定量的に評価するとともに、高サイクル疲労によるき裂の発生と進展を実際の運転履歴に沿って解析し、時間的な現象推移を破面調査結果との対応関係の中で明らかにした。また、ナトリウム漏洩燃焼実験を行い、漏洩速度や漏洩形態、ナトリウムの燃焼挙動や機器構造物への影響などを把握した。

### 1. はじめに

高速増殖炉原型炉もんじゅう（以下「もんじゅう」という）は、平成3年5月に機器の据付けを完了して試運転を開始し、炉心燃料集合体の装荷を経て平成6年4月に初臨界を達成した。その後、起動試験では平成7年8月に初送電を行い、順調に出力試験を開始したが平成7年12月8日に2次ナトリウムの漏洩事故が発生した。

このナトリウム漏洩事故に関し、動燃事業団は本社、もんじゅう建設所および大洗工学センターを中心に全社体制で原因究明作業を進めている。本報告は、これまで評価・検討を行った事故時のプラント状態の分析、漏洩原因である破損メカニズムおよび漏洩ナトリウムの挙動等について原因究明の現状を技術的観点から取りまとめを行った結果である。

### 2. 事故の概要

#### 2.1 事故時の状況

「もんじゅう」では40%出力試験の一環として平成7年12月9日に予定していたプラントトリップ試験のため、原子炉の出力を上昇中であったが、12月8日19時47分、原子炉出力約43%（電気出力約40%）の状態において中央制御盤の「中間熱交換器C 2次側出口 Na 温度高」警報が発報し、6秒後に火災検知器が発報した。引き続き1分12秒後に「2次主冷却系 Na 漏洩」警報も発報した。このため2次主冷却系配管室（C）（A-446室）の扉を開け室内を確認したところ、もやっている程度の煙の発生を確認した。しかし、オーバフロータンクナトリウム液位等に有意な変化が認められないことから、ナトリウム漏洩規模を小規模漏洩

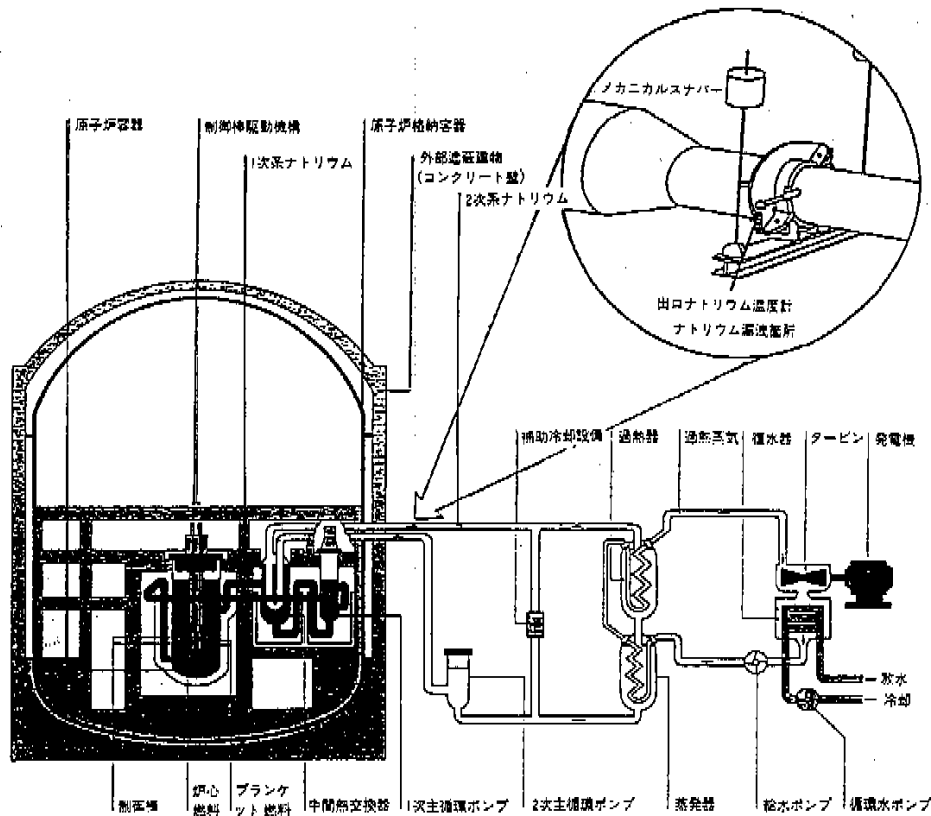


図2-1 「もんじゅ」の概略系統およびナトリウム漏洩箇所的位置

と判断し、異常時運転手順書「2次主冷却系のナトリウム漏洩」にしたがい原子炉を通常停止することとし、20時00分に原子炉の出力を降下させるため、制御棒挿入操作を開始した。

「もんじゅ」の概略系統およびナトリウム漏洩箇所の位置を図2-1に示す。

20時50分頃、火災検知器の警報が急増したのを確認するとともに、再度、当該配管室(C)を確認したところ白煙の増加が認められたため、原子炉手動トリップを決定し、21時15分に発電機解列を行い21時20分に原子炉を手動トリップした。原子炉停止後は、補助冷却設備により炉心の崩壊熱除去運転が行われ原子炉は低温停止状態に移行した。また、漏洩ナトリウム量を抑制するため、22時55分に2次主冷却系Cループの配管部のナトリウムドレン操作を開始し、12月9日0時15分に完了した。

ナトリウムドレンにより、蒸発器内のナトリウムレベルは「低低」となり当該配管室(C)および蒸気発生器室(C)の給気ファン、排気ファン

の自動停止、および給気、排気の各隔離バンプの自動閉止を23時13分に確認した。

## 2.2 事故後の確認状況

12月9日2時頃、16時頃およびそれ以降、配管室(C)に入室し調査した結果、中間熱交換器2次主冷却系出口配管の温度検出器端子部近傍およびその周辺にナトリウム漏洩に伴う堆積物が見られた。また、温度検出器取付け部直下の保温材の外装板が一部損傷するとともに、温度計フレキシブル管が損傷し切断されていた。さらにその直下の換気ダクトおよびグレーチング(点検用足場)には欠損部(穴)が生じ床面には漏洩したナトリウムが約3mの半円形で高さ30cm程度の固まりとなって堆積するとともに、部屋の床面、壁等にはナトリウム漏洩に伴う白っぽい粉末(ナトリウム化合物のエアロゾル)が付着していた。他の原子炉補助建物内の各室(蒸気発生器室(C)、過熱器室(C)、ポンプ室(C)等、図2-2参照)にもナトリウム化合物のエアロゾルが拡散していた。

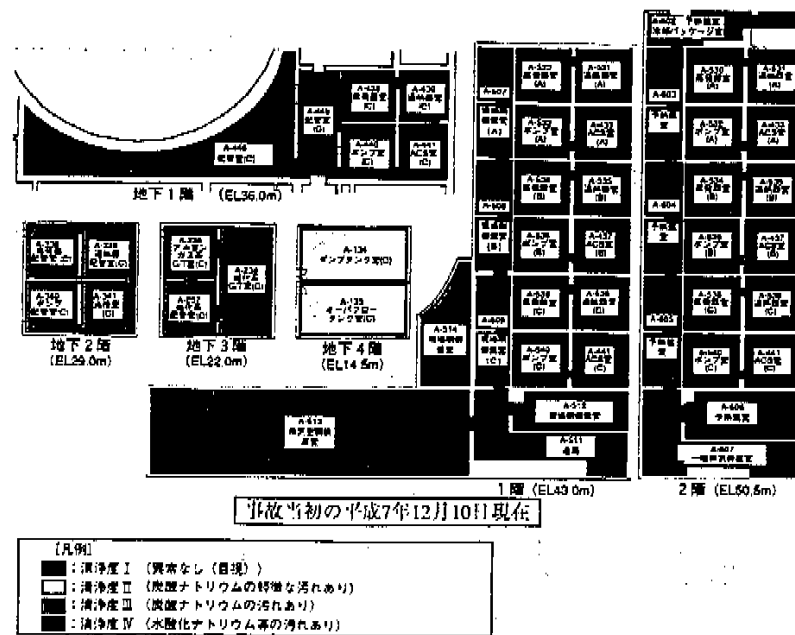


図 2-2 二次ナトリウム漏洩に関する清浄度区分

2.3 その後の事故処理の状況

12月13日から飛散したナトリウム化合物の回収・清掃を実施し、平成8年7月1日に建物内各部屋（床、壁、天井、機器外表面、盤外表面、図2の各室）の清掃作業を終了した。

回収・清掃作業で回収されたナトリウム化合物の総量は約823kgであり、上記の各室ごとのサンプリングの分析結果から得られたナトリウム濃度を考慮した金属ナトリウム換算結果から回収ナトリウムは約410kg相当と推定された。なお、各室の機器、盤内部等については、健全性調査を実施するとともに清掃作業を継続している。

2.4 環境への影響

漏洩したナトリウムによる環境への影響調査のため、排気口網部に付着したエアロゾルをサンプリング分析した結果、炭酸ナトリウムおよび炭酸水素ナトリウムであった。これらの物質の性質を考慮すると漏洩ナトリウムの一部が建物外に放出したものの、環境への影響はなかったと判断した。

モニタリングポスト、モニタリングステーションおよび原子炉補助建屋内の2次系の放射線モニタの指示値は通常の変動の範囲内であった。また、敷地内外の環境監視設備等で採取した空気中浮遊

じん、ガス状ヨウ素、雨水・ちり、陸水、陸土、松葉、海水、海底土、海産食品、海産生物の放射線量および空気中水分(除湿水)、降下物等のトリチウムについて分析した結果、測定値は平常時における実測値の範囲内であり、放射性物質の環境への影響は認められなかった。

3. 2次系ナトリウム漏洩時のプラント状態

3.1 プラント運転状態の推移

今回の事故に係わるプラントの運転経緯、運転操作の分析等を行った。

(1) プラントの運転経緯

2次主冷却系ナトリウム漏洩事故時のプラント運転経緯およびプラントパラメータの挙動(図3-1参照)についての調査結果は以下のとおりである。

1) ナトリウム漏洩発生前

(原子炉出力上昇時)

「もんじゅ」(定格電気出力28万kW)は、電気出力40%での性能試験の一環として12月9日に実施を予定していたプラントトリップ試験のため、平成7年12月6日22時00分に原子炉を起動し、12月8日16時30分に発電機を併入して、原子炉出力約45%に向けて出力上昇を行っていた。

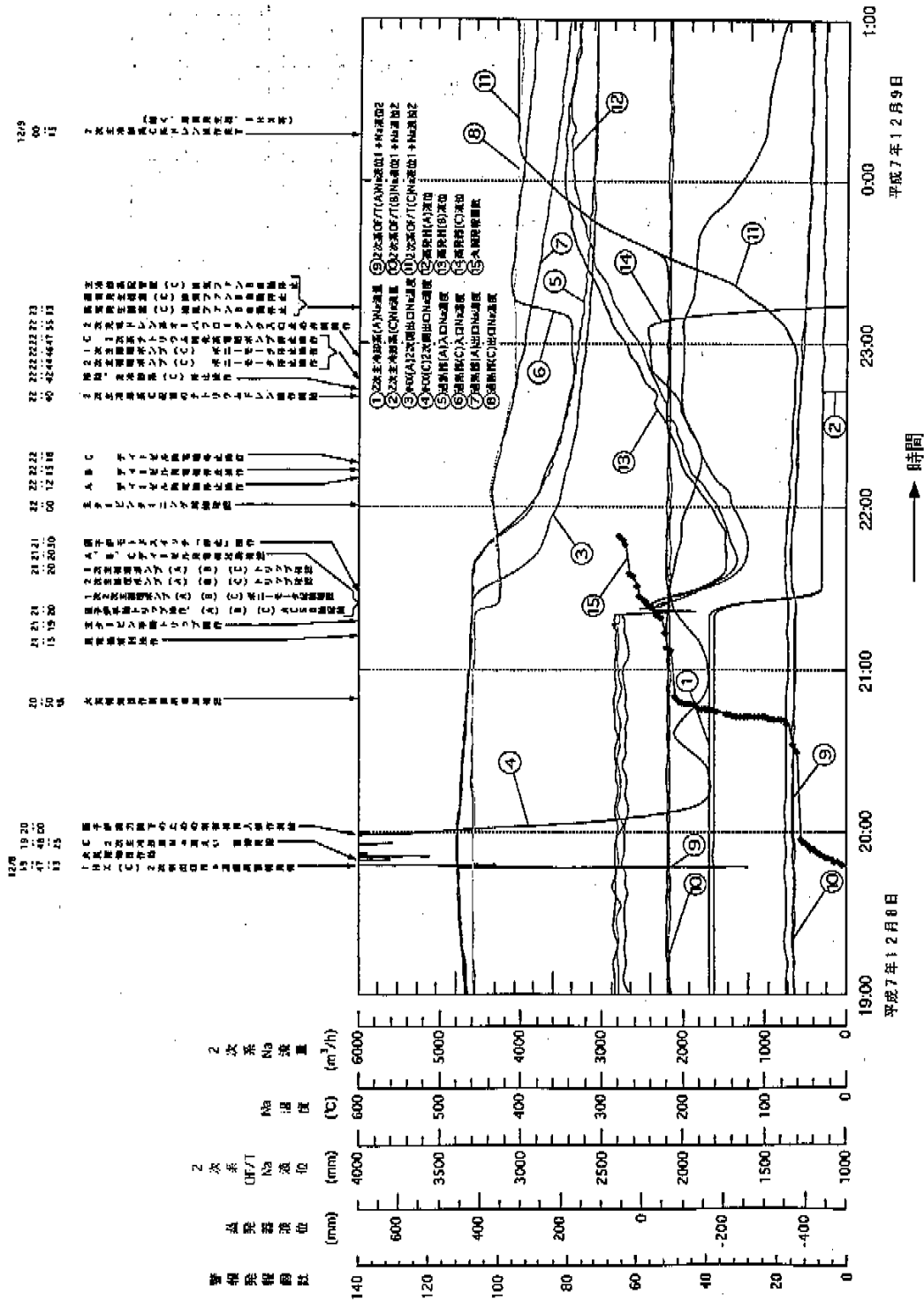


図 3-1 運転記録 (1/2)



事故発生前の12月8日19時47分直前の主要プラントパラメータは以下に示すとおりである。

原子炉出力	約43%
電気出力	約112MWe
原子炉出口ナトリウム温度	約480℃
原子炉入口ナトリウム温度	約360℃
中間熱交換器2次側出口ナトリウム温度	約480℃
中間熱交換器2次側入口ナトリウム温度	約285℃
1次系ナトリウム流量	約48%
2次系ナトリウム流量	約39%
主蒸気温度	約475℃
主蒸気圧力	約120kg/cm <sup>2</sup>
給水温度	約193℃
給水流量	約40%

2) 事故発生から原子炉出力低下まで

- ① 19時47分、原子炉出力約43%（電気出力約40%）の状態において、「中間熱交換器・C2次側出口Na温度高」警報が発報（事故発生）し、6秒後に火災検知器警報が発報した。引き続き1分12秒後に「C2次主冷却系Na漏洩」警報が発報した。

警報の発報後、原子炉出力上昇操作を中断し、原子炉出力を約43%に保持した。

- ② 運転員は、ナトリウム漏洩警報の発報箇所、蒸発器ナトリウム液位、オーバフロータンクナトリウム液位および火災検知器の警報発報状況を確認して当直長に報告した。
- ③ 当直長は、運転員に現場確認を指示した。
- ④ 現場へ向かった運転員は、2次主冷却系配管室（C）（原子炉補助建物A-446室）に行き、配管室の扉を開けて、もやっている程度の煙の発生を確認した。一方、現場に向かった他の運転員は、ナトリウム漏洩検出器盤が設置されている現場制御盤室（原子炉補助建物A-512室）に行き、ナトリウム漏洩検出器のうち、C-HD-3（原子炉補助建物A-445、446室 ホットレグ配管）、C-HD-11（原子炉補助建物A-445、446室 コールドレグ配管）の指示が振り切れて警報が発報していることを確認した。
- ⑤ 現場から戻った運転員からの報告を受けた当直長は、異常時運転手順書「2次主冷却系のナトリウム漏洩」に従って、蒸発器ナトリウム液位およびオーバフロータンクナトリウム液位の有意な変化が認められないことか

ら、漏洩規模を小規模漏洩と判断した。

当直長は、プラント第一課長に状況を報告し、プラントを通常停止する旨の了解を得て、運転員に原子炉の出力降下操作を指示した。

- ⑥ プラントパラメータのうち、ナトリウム漏洩箇所である中間熱交換器（C）2次側出口ナトリウム温度計の指示値は、「中間熱交換器・C2次側出口Na温度高」警報が発報する約1分30秒前にわずかに温度低下し、その後、瞬時に約480℃から200℃以下まで低下した。その後、再び元の温度である約480℃近傍まで復帰して、同温度近傍を上下した後、600℃に振り切れ、約10分間継続した。（この間、数回にわたり600℃以下に一時的に戻っている）この間、オーバフロータンク（C）ナトリウム液位および蒸発器（C）ナトリウム液位の低下は認められず、その他のプラントパラメータの挙動についても異常は認められなかった。

- 3) 原子炉出力低下から原子炉手動トリップまで
- ① 20時00分、運転員はプラントの通常停止操作を実施するため、中央監視盤において制御棒挿入操作を開始した。

運転員はプラント通常停止操作中も蒸発器ナトリウム液位およびオーバフロータンクナトリウム液位の監視を継続した。

- ② 運転員は火災報知盤の監視を連続的に行っていたが、20時頃から約30分間火災検知器の新たな警報の発報がなくなったこと、また、オーバフロータンクのナトリウム液位等のプロセス量に変化がなかったことから漏洩が拡大していないと考え、出力降下中は同盤の監視が断続的になった。
- ③ 20時50分頃、運転員が新たな火災検知器の作動がプリントアウトしているのに気付き、当直長に報告した。当直長は、運転員に配管室の状況およびナトリウム漏洩検出器盤の2回目の確認を行うように指示した。現場に向かった運転員は、配管室の扉を少し開け、白煙の増加を確認した。また、現場のナトリウム漏洩検出器で、C-HD-3およびC-HD-11以外の複数の検出器の指示値も増加していることを確認した。
- ④ 21時00分頃、現場から戻った運転員は当直長に現場の状況を報告した。これを受けて原子炉主任技術者、プラント第一課長および当直長は、オーバフロータンク（C）ナトリウム液位および蒸発器（C）ナトリウム液位に

有意な変化が認められなかったが、火災検知器警報の増加、配管室の白煙の増加および新たなナトリウム漏洩検出器の指示値の増加の状況をもってナトリウムの漏洩規模の拡大が懸念されると判断して、21時10分頃原子炉手動トリップを決定した。

- ⑤ この間のプラントの各パラメータは、中間熱交換器 (C) 2次側出口ナトリウム温度を除いて、原子炉出力低下時の動きとなっており、異常は認められなかった。

中間熱交換器 (C) 2次側ナトリウム出口温度計の指示値は、600°Cに振り切れた状態の後低下し、約150°Cから約210°Cの範囲を上下した。また、オーバフロータンク (C) ナトリウム液位および蒸発器 (C) ナトリウム液位は、原子炉出力低下に伴うナトリウム温度の変化による緩やかな低下はあるものの、A、Bループと同様に推移した。

- 4) 原子炉手動トリップから2次主冷却系Cループナトリウムドレン開始まで

① 運転員は、21時15分に発電機を解列し、21時19分にタービン手動トリップ、21時20分に原子炉手動トリップ操作を行い、崩壊熱除去運転に移行した。

② 原子炉停止前のオーバフロータンク (C) ナトリウム液位に有意な変化がなかったため、1次・2次冷却設備運転手順書「2次ナトリウム充填ドレン系」の緊急ドレンに従って、ドレン対象のナトリウムの最高温度である過熱器 (C) 出口ナトリウム温度が約450°Cから約400°Cになるまで、補助冷却設備で崩壊熱除去運転を継続した。

③ この間のプラントパラメータの挙動は、中間熱交換器 (C) 2次側出口ナトリウム温度を除いて、原子炉手動トリップによる過渡的な変化、また各種インターロックによる動作や操作に見合った動きをしたものであり、異常は認められなかった。

中間熱交換器 (C) 2次側出口ナトリウム温度計の指示値は、約170°Cから約210°Cの範囲を推移していた。

- 5) 2次主冷却系Cループナトリウムドレン開始より終了まで

① 22時40分に、運転員は過熱器 (C) 出口ナトリウム温度が約400°Cであることを確認し、22時55分に2次主冷却系 (C) 配管部のドレンを開始した。

② 蒸気発生器室換気装置 (C) は、A系が原

子炉出力低下中の21時15分に蒸気発生器室内の室温低下 (15°C以下) に伴い自動停止し、B系の1台運転に移行した。B系は、ドレン操作に伴う「蒸発器ナトリウム液位低低」の自動停止信号により、23時13分に自動停止した。

③ プラントの各パラメータの挙動については、ナトリウムドレンによる2次系オーバフロータンク (C) および蒸発器 (C) ナトリウム液位の変化を含め、異常は認められなかった。

過熱器 (C) 入口ナトリウム温度の変化は、2次主冷却系 (C) のドレン操作に伴い、過熱器内部の高温のナトリウムが流れ込んできた影響で一時的に上昇し、ドレン終了後に自然放熱によりゆっくりと低下したものである。

中間熱交換器 (C) 2次側出口ナトリウム温度計の指示値は、ドレン開始時の約200°Cから徐々に室温近くまで低下した。

- (2) ナトリウム漏洩時の運転操作の分析

ナトリウム漏洩時の運転操作は、異常時運転手順書「2次主冷却系のナトリウム漏洩」に従って行った。

ナトリウム漏洩時の運転操作内容を、漏洩の確認、漏洩規模の判断、漏洩拡大の判断、漏洩量の抑制、漏洩の影響の緩和およびその他の観点から分析した結果は以下のとおりである。

#### 1) 分析結果

##### ① 漏洩の確認

(a) ナトリウム漏洩検出器の記録計が現場盤にあり、中央制御室ではその指示値を確認できないことから、漏洩の状態変化を早期に把握することができなかった。

(b) 運転員は、最初の火災検知器警報発報時にベルの鳴動を確認するとともに、CRT画面で発報場所の確認を行った。その後、非常に大きなベル音が連続して鳴動するため、運転操作の妨げになるとしてベルの停止操作を行った。

しかし、新たに異なる場所で火災検知器が作動した場合に再度ベルを鳴動させる機能となっていなかったため、火災検知器警報再発報の認知が遅れた。

##### ② 漏洩規模の判断

(a) 蒸発器およびオーバフロータンクのナトリウム液位の変化が認められなかったことから、漏洩規模を小規模漏洩と判断して原子炉

通常停止操作を行った。

ナトリウム漏洩の早期収束の観点から、煙（ナトリウムエアロゾル）が確認され、また火災検知器の警報が発報した時点で、中規模漏洩の手順に従い原子炉を手動トリップすべきであった。

(b)「白煙」の定義が曖昧であり、現場でのナトリウム漏洩の規模の把握が適切に行われなかった。

### ③ 漏洩拡大の判断

(a)ナトリウムの漏洩が確認され、原子炉の通常停止操作を行っている間、オーバーフロータンクのナトリウム液位等のプロセス量に変化がなかったことから漏洩が拡大していないと考え、火災報知盤の監視が断続的になった。

このため、その後の火災検知器の新たな作動が順次プリントアウトされたのに気付くまで、再度の現場確認が行われず、現場状況の変化の確認が遅れた。

(b)火災検知器の発報状況、ナトリウム漏洩検出器の指示値、および現場の状況等を連続的に監視することは、状態変化の早期発見に重要である。

今回の事故ではこれらを連続監視する必要があった。

### ④ 漏洩量の抑制

(a)原子炉手動トリップを決定した後、発電機解列操作およびタービン手動トリップを行った後に原子炉手動トリップを行ったため、原子炉停止を遅らせる結果となった。

(b)漏洩ループの停止およびドレン操作は、オーバーフロータンクの液位の有意な変化がなかったことから、2次充填ドレン系への熱過渡が緩和されるよう系統の温度低下を待って実施した。しかし、ナトリウム漏洩量の抑制の観点から、漏洩状況に応じて可能な限り早期にドレンするための設備および運転手順について改善すべき点があった。

### ⑤ 漏洩の影響の緩和

漏洩ループの換気装置の停止操作について、手順書「細目」では、中規模漏洩の場合、原子炉手動トリップに引き続いて、漏洩ループの補助冷却設備の停止およびナトリウムのドレンを行い、その後換気装置の手動停止を行うこととしているが、事故時はドレンに伴う「蒸発器液位低」信号により自動停止した。

ただし、ナトリウムエアロゾルの放出・拡散を抑制する観点から、漏洩状況に応じて可能な

限り早期に換気装置を停止する等、より具体的な設備および運転手順について改善すべき点があった。

### ⑥ その他

(a)ナトリウム漏洩発生後、当直長は手順書に従いプラント第一課長に速やかに連絡を行い、状況報告後通常停止操作を行う旨の了解を得た。

今後は、当直長が直ちに必要な措置を講ずることができるようにする必要がある。

(b)ナトリウムの漏洩と判断した時点で消防署に通報すべきであった。

(c)火災検知器の警報が発報した当該室の現場確認について、人身事故防止の観点からの「煙を確認した場合は入室するな」との当直長補佐の指示は適切であった。

(d)ナトリウム漏洩時の初期消火について、防護服、防護マスクおよび携帯用空気ボンベ等の消火支援器具が、構内の自衛消防隊の器材庫に一括保管（これら消火支援器具が自衛消防隊の器材であることによる）してあったため、直ちに使用できず安全確保のため、配管室への入室を行わなかった。

ナトリウム火災の消火は自然鎮火が基本であるが、消火器材による初期消火が有効な場合も考えられ、消火支援器具の充実を図る必要がある。

事故後、中央制御室をはじめ原子炉補助建物の各階2次系のナトリウム機器のある部室付近に消火支援器具計24セットを配置した。特に中央制御室付近に配置したものについては、初期対応の迅速性を配慮し、装着性および行動性を考慮した防護服とした。

### (3) 漏洩時対応の反省と教訓

1) 設計段階でのプラント運用の考え方について、異常時の早期収束の観点から改善すべき事項を整理した。

今後は、異常の早期収束の観点からナトリウム漏洩が確認できれば即時に原子炉を手動トリップするとともに、先行炉の経験も参考としてITVを含む中央制御室からの漏洩検知および監視機能の充実等、早期に漏洩量抑制および漏洩影響の緩和ができるよう設備および手順を改善する。

2) 異常時運転手順書の作成過程において、中・小規模のナトリウム漏洩の発生の際の判断基準や運転方法を具体的かつ詳細に定めようとする努力に不足があった。

今後、異常時運転手順書については、漏洩の確認、判断、漏洩量の抑制等の記載に関して、異常の早期収束という観点で運転操作が適切に行えるよう内容の充実、適切な用語の使用、表現の統一等を図るとともに、当直長が直ちに必要な措置を講じることができるよう見直す。

- 3) 従来の異常時対応の教育訓練は、シミュレータを中心とした中央制御室内の運転操作訓練が主体であった。また、設計の考え方についての教育が十分でなく、運転員の基本動作訓練についても、異常の早期収束の観点が徹底されていない面があった。

ナトリウム取り扱い訓練については、運転員全員を対象として1年に1回の訓練を義務づけた。また、教育訓練を通して得られた改善点を手順書に反映する方策を定めた。

今後、ナトリウム漏洩時対応に係る教育訓練は、プラントの実際の状況を前提に現場確認・操作の訓練を充実させる。また、設計の考え方についての教育、運転員の基本動作についての教育を充実させる。さらに、ナトリウム漏洩に関しては系統の理解に加えて漏洩ナトリウムの挙動、影響について深い理解が得られるような教育の実施を検討する。

### 3.2 漏洩ナトリウムの機器等への影響

#### (1) 漏洩ナトリウム量の評価

漏洩ナトリウム量について、下記の条件にてドレン時のオーバフロータンクナトリウム液面の挙動を分析して漏洩停止時刻を評価し、漏洩量約640kg±42kgとの結果を得た。

- ① 今回のナトリウム漏洩は、ホットレグ配管の折損温度計取付高さをナトリウム液位が下回った段階で停止する。
- ② オーバフロータンクのナトリウム液面計の指示値から計算したドレン速度の時間変化を検討し、漏洩停止時間を漏洩継続時間3時間40分に相当する23時27分と推定した。
- ③ 上記の漏洩停止時間については、1次元フローネットワークモデルによるドレン時の挙動解析結果から得られている23時27分49秒と良い一致を示した。
- ④ 温度計からの漏洩量は、ドレン開始前の524±38kg(漏洩速度178kg/hr一定)とドレン開始後の116±4kg(漏洩速度は上記漏洩速度に温度計部の圧力の経時変化を考慮)から640±42kgを得た。

- ⑤ 上記漏洩量の推定値については、水およびナトリウムの漏洩速度実験から求めた折損温度計部の圧力損失係数(流動抵抗)と、プラント動特性解析コードで計算した漏えい部ナトリウム圧力と漏洩継続時間から漏洩量を評価した結果の650±38kgと良い一致を示した。

#### (2) グレーチング・換気ダクト調査

破損温度計直下に配置され、漏洩ナトリウムにより損傷を受けたグレーチング、換気ダクトへの影響調査のため、漏洩部近傍のグレーチングと換気ダクトより試料を切り出し、金属組織観察等の調査を実施した。

##### 1) 損傷状況

###### ① グレーチング

ナトリウム漏洩箇所直下にあたるグレーチングは、最大幅約42cm、最大長さ約39cmの半楕円状の欠損部を生じていた。また、欠損部周りには高さ15cm程度のナトリウム化合物が堆積していた。

###### ② 換気ダクト

換気ダクト吸込口近傍には、幅約30cm、高さ約80cmの欠損部(穴)を生じていた。また、欠損部周りには高さ15cm程度のナトリウム化合物が堆積していた。

##### 2) 試料採取

金属片サンプルの採取にあたっては、地金に影響を与えない程度に残留付着物の除去を行った。なお、洗浄は、燃焼ナトリウムと金属の反応生成物の性状が必ずしも明らかではなく、洗浄時に溶解等の変化を受けることも考えられるため、サンプルの採取直後には行わず、できるだけ原形を保つこととした。

###### ① グレーチング

1月27日にナトリウム漏洩箇所直下のグレーチングから金属片サンプルを採取した。サンプルは、損傷部分を含む約1m×65cmのグレーチング部から行い、損傷部の格子から27サンプル、フレームから2サンプル、損傷部以外の格子から12サンプルの計41サンプルを採取した。

###### ② 換気ダクト

1月28日にナトリウム漏洩箇所直下の換気ダクトから金属片サンプルを採取した。サンプルは、ダクト本体から欠損部8サンプル、非欠損部2サンプルの計10サンプル、吸い込み口のルーバから欠損部23サンプル、非欠損部10サンプルの計33サンプルを採取した。

## ③ ナトリウム堆積物の不溶解性固形物

ナトリウム化合物中の固形物については、ダクトおよびグレーチング堆積物を採取した。このうち、付着ナトリウム化合物に対しては、ナトリウム分析装置を用いて分析し、引き続き水洗を行って不溶解性の固形物を分離している。

欠損部周辺から採取した金属材料と付着物の金属組織観察等を行った。主要な調査結果は以下のとおりであり、これらの結果から損傷は、鋼材とナトリウム酸化物の高温化学反応により、鋼材の融点より低い温度で進行したと推定される。

なお、高温化学反応の詳細については、今後さらに試験を行い、調査検討を進める予定である。

## 3) 調査結果

① 金属サンプルの加熱温度推定のため、いくつかの条件の熱履歴（加熱温度、保持時間、冷却速度）を与えた試験により標準試料を作成し、これと欠損部周辺の金属サンプルの金属断面組織とを光学顕微鏡観察で比較することにより、ナトリウム漏洩時の温度を以下のように推定した。

(a) グレーチング（炭素鋼板製）サンプルでの最高温度は、欠損量が大きく損傷の激しかった金属格子部で1000～1150℃と推定された。

(b) 換気ダクト（溶融亜鉛メッキ鋼板）サンプルでは、欠損部周辺の厚さは離れた位置の1/10以下に減少、ほぼ全面的に脱炭しているが、粒成長があまり進んでいなかった。加熱温度は金属断面組織と標準組織との対比により、800℃以下と推定された。

(c) ルーバ・グリル（アルミニウム合金製）は、残留部の先端にアルミニウムの溶融凝固組織が認められ、合金融点の650℃を超えたと推定された。

(d) ルーバ・シャッタ部（冷間圧延鋼板）は、1050～1200℃との推定が可能である。しかし、ルーバ・シャッタは炭素含有量が極く少ない材料で作られており、温度上昇の判定因子が少ないなどから、温度を明確にすることは困難であった。

② ルーバ・シャッタとグレーチング材炭素鋼板のサンプルについては、溶接トーチを用いてグレーチング材（素材）を加熱溶融させて作成した溶融凝固組織（テンドライト）の標準サンプルと、推定温度の最も高かったサンプルの金属断面組織を光学顕微鏡により比較観察した。その結果、テンドライト組織は認められず、炭素鋼板の融点（約1500℃）を超

えて溶融したことを示す痕跡は認められなかった。

③ グレーチングサンプルの断面形状測定結果によれば、母材金属は欠損部に近いほど、また上側ほど縦幅、肉厚とも減少していた。これは高温化学反応により、上端から減肉が進み欠損に到ったことを示すものと考えられる。

④ 付着物と金属界面調査として、化学組成分析、断面組織観察と電子プローブ微小部分分析法（EPMA）による元素濃度のマッピング分析、X線回折による鉱物相同定分析等の各種分析を行った。

付着物は、大半が炭酸ナトリウム（ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）で構成されているが、母材と接する部分では、マグネタイト（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）と推定されるバンド層やNa-Fe-O化合物と推定される鉱物相も認められた。

⑤ これらの調査結果により、NaとNa酸化物からなる高温融体が鋼板表面を流下するため、反応生成物である低融点の複合酸化物は鋼板表面より除去され次々と新表面が現れる洗い出し効果により、減肉が加速される機構が考えられる。

## (3) 電線管コンジット調査

## 1) 概要

温度計からのナトリウム漏洩状況を確認するため、温度計電線管コンジットを切断し、ナトリウム付着状況を調査した。

## 2) 損傷状況

温度計頭部と電線管コンジットの間にあったフレキシブルチューブの残り70cmが、電線管コンジット側に垂れ下がった状態で残っていた。

## 3) 試料採取

1月31日に、温度計ケーブル用コンジットおよび残ったフレキシブルチューブを長さ約1.5m切断した。

温度計ケーブル用コンジット内には、約21cm（コネクタ部より）の範囲で、ナトリウムが詰まっていた。

## (4) コンクリート調査

ナトリウム漏洩の発生したA-446室のコンクリート壁（厚さ160cm、内かぶり厚12cm）および漏洩部下部の床コンクリート（厚さ60cmにさらに約50cm増打ち）について調査を行った。

## 1) 調査内容および調査結果

## ① コンクリート表面付着物サンプリング

コンクリート壁のサンプリングに先立ち、コンクリート壁の表面付着物のサンプリングを実

施した。試料は、ナトリウム漏洩配管直下の壁面に残留するナトリウム化合物の中心付近の黄色部およびその周辺より、原則として10cm×10cmの範囲で3箇所採取した。

#### ② コンクリートサンプリング

試料は、コンクリート用ドリル（直径30mm）で穿孔し、穿孔深さ2cm分（表面部分は、1cm+1cmの2層とした）を1試料として、深度別に深さ6cmまで4層の粉末を採取した。

#### ③ 外観目視調査

コンクリート表面について、変色状況、ひび割れ発生状況、浮き発生状況等を目視、打診により調査するとともに、表面付着物についてもその分布、変色状況等について調査を行った。

コンクリート壁・床については、火害を受けた時に見られる爆裂現象はなく、表面の脆弱化をもたらすような変状は見られなかった。壁の一部に深さ1mm程度の黒灰色の変色が見られた。

漏洩部に近いコンクリート壁・床のひび割れの発生頻度や発生パターンは、他の部分と大差なくコンクリート打設時の乾燥収縮により発生したものと判断される。

打診調査においては、コンクリート壁では、付着物による表面変色部およびその下部に、他の部分とは異なる打音部位が4か所観察された。この部分のドリル孔の調査により、表面から約2cmの部分に剝離面と見られるひび割れが見られた。異音部の面積は全体で約0.5m<sup>2</sup>であり、コンクリート厚の表層部分に限られることから強度上の影響はないと考えられる。また、コンクリート床では異音部が1か所（面積約0.1m<sup>2</sup>）が観察されたが、表面部分に限られており、強度上の影響はない。

#### ④ 表面反発硬度調査

シュミットテストハンマーを使用してコンクリート壁・床漏洩近傍部の表面反発硬度を測定した結果、コンクリートの乾燥により硬度が若干増したものの、硬度が低下するほどの熱影響はなかったと考えられた。

#### ⑤ 表面付着物の分析

表面付着物ナトリウム化合物は、主成分がコンクリートに対する化学的侵食作用の弱いNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>やNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>・H<sub>2</sub>Oであった。表面の黒灰色の部分からは、微量の鉄が検出されたが、量が少なく化学形態の特定には至らなかった。

#### ⑥ コンクリートの化学的調査

コンクリート壁変色部のナトリウム化合物の

含有量は、当該部の深さ1cmまでの試料においては高いが、コンクリート中への浸透はごく表層部のみと推定している。

けい酸ナトリウム等コンクリートとナトリウムの化学反応生成物を示す物質は検出されなかった。このことから、漏洩初期のナトリウム液滴の飛散拡大時期を除けば、連続的にナトリウム液滴がコンクリート壁へ落下することはなかったと推定された。

コンクリート壁の受熱温度は、熱分析の結果から、壁：約400℃、床：約510℃、リッド下の壁：約570℃以下と推定された。

以上よりナトリウム漏洩部近傍のコンクリートは、表面部分がある程度の熱影響を受けたが、ナトリウムとコンクリートの反応生成物は検出されず、また構造耐力・遮蔽性能への影響はないものと判断された。

#### (5) 床ライナ・リッド調査

漏洩部下部の床ライナ（厚さ6mmの鋼板、S M41B鋼 JIS G3106、規格厚さ6±0.75mm）にナトリウム化合物が堆積し、熱影響や腐食を受けていると推定されたため、サンプルを採取し、外観観察、残留変形量測定、板厚測定、断面金属組織観察、機械強度測定等の調査を実施した。

以下に調査結果の詳細を示す。

① 床ライナには、熱膨張による残留変形が認められた。残留変形は、漏洩部直下近傍から山があり山の両側に谷がある。山の高さは最大34mm程度、谷の深さは最大18mm程度であった。堆積物除去後のライナ面には白く見える炭酸ナトリウム、黒いしみ状のものは潮解したナトリウムや酸化鉄と推定された。（図3-2参照）

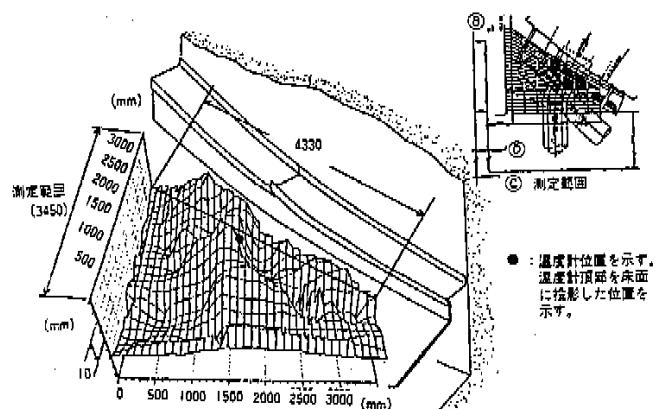


図3-2 床ライナ変形状況

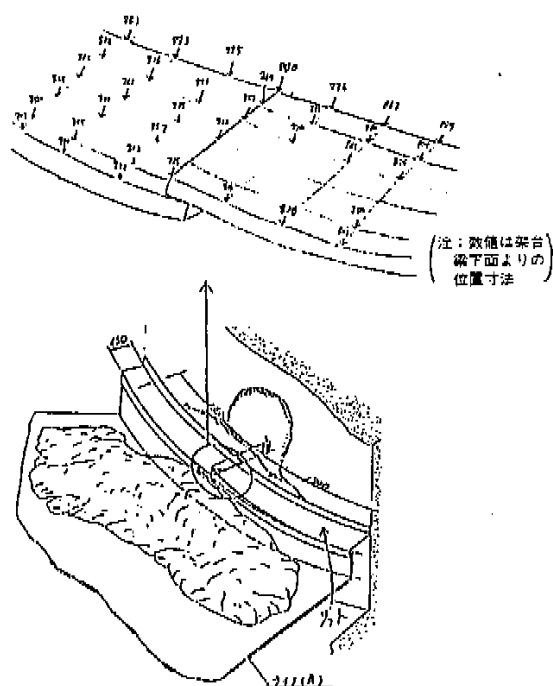
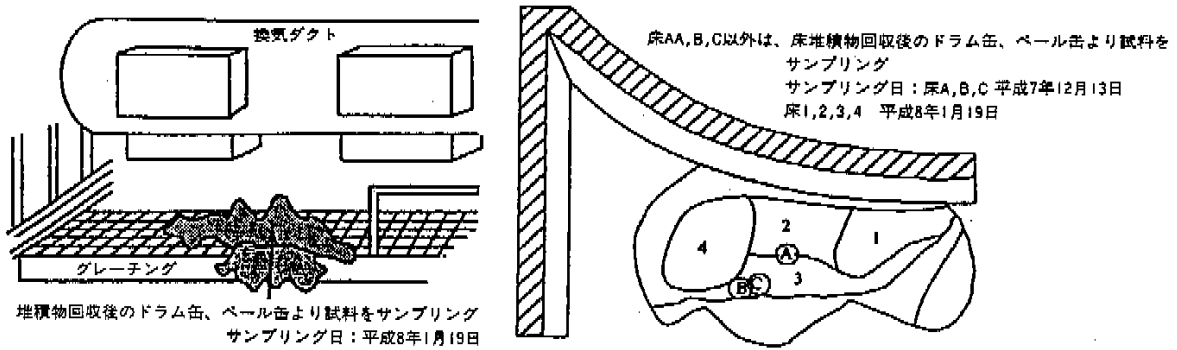


図 3-3 リッドの状況概念図

- ② コンクリート壁変色部に近いリッドの接合部は、リッド接合カバーの左側が浮き上がり、カバーとリッド接合用ビス 3 本が外れていた。カバーはリッドに対して約 30mm 浮き上がっていた。リッドおよびカバーの浮き上がりは、床ライナ立ち上がり部が補強板を押し上げた結果と考えられる。(図 3-3 参照)
- ③ 漏洩部近傍の変形部分の厚さ測定(約 500mm ピッチ)を実施したところ、ほとんどの場所で 6 mm 以上の板厚が計測されたが、漏洩部直下近傍で最小 4.7mm と局所的な板厚減少 (0.5~1.5mm 程度) が観察された。局所的な板厚減少の原因として、水酸化ナトリウムやナトリウム・鉄複合酸化物による腐食、塑性変形等が考えられるが、高温化学反応試験により原因を検討する計画である。
- ④ 床ライナの受けた温度を推定するため、サンプルとして切り出し、外観観察、断面金属組織観察、機械強度測定試験等の調査を実施した。調査したサンプルは、漏洩部近傍の 4 サンプルと漏洩箇所から離れた場所にある同一ロットの材料から製造された 2 サンプルである。
- ⑤ 漏洩部近傍から切り出したサンプルの表面塗装は堆積物とともに除去されたが、表面では塗装が残留しており変色が観察された。なお、床ライナの裏面塗装は、下塗りと上塗りの 2 段階の塗装が施されており、熱履歴試験結果では、500℃ 以上の温度では上塗り塗装は白色を呈して剥離しており、下塗りは黒色となっている。400℃ では上塗り塗装はやや紫色で剥離しており下塗りは紫色をしている。漏洩部直下に近い部分で上塗りが剥離し白色化しており、周辺に進むに従い紫色で剥離、茶褐色、変色なしと順次変化している。茶褐色の変色部は熱履歴試験で得られなかった外観であるが、温度は 400℃ 未満であったと考えられた。
- ⑥ 金属組織の変化に基づく最高到達温度を推定するために、切り出した遠方部サンプルの一部を用いて熱履歴試験を実施し、漏洩部近傍の金属組織と比較した。その結果、金属組織形態 (パーライトの粒状化形態および表面部の金属結晶の粗大化形態) の類似性から、床ライナの最高到達温度は 650~750℃ 前後と推定された。
- ⑦ 切り出したサンプルについて機械強度測定を実施した。引張試験の結果、降伏点、引張強さは遠方部に比べて低下しているが、いずれも規格値を満たしている。断面のビッカース硬さでは板厚全般にわたって若干低く、特に表面においてこの傾向が大きい。鋼は 700℃ 程度に加熱された後徐々に冷却すると軟化する。漏洩部の床ライナも類似の温度履歴を受けたものと推定された。
- 以上より床ライナに、変形や局所的板厚の減少が認められたが、床ライナを貫通する損傷はなく、漏洩ナトリウムとコンクリートの接触を防止する機能は保持されたものと判断された。
- (6) ナトリウム化合物の堆積拡散状況
- 配管より漏洩したナトリウム化合物の分析調査を実施した。配管室 (C) においてはナトリウム化合物の堆積物について、またその他の部屋等においては飛散したナトリウムエアロゾルについて分析調査した。
- 1) 配管室におけるナトリウム化合物の堆積物の調査
- 配管室漏洩部近傍に堆積したナトリウム化合物の堆積物より採取した試料の化学組成およびそこに含まれる金属成分、トリチウムについて分析を実施した。化学組成は化合物中に金属ナトリウムが含まれる割合および漏洩による酸



堆積物回収後のドラム缶、ペール缶より試料をサンプリング  
サンプリング日：平成8年1月19日

ナトリウム化合物分析結果

サンプリング試料No.	グレーチング			床							
	1	2	3	床A (深さ約 5cm)	床B (深さ約 10cm)	床C (深さ約 20cm)	床1	床2	床3	床4	
Na成分	金属ナトリウム (%)	5.3	7.4	5.9	0.3	0.2	0.4	1.2	1.4	2.4	0.6
	過酸化ナトリウム (%)	1.6	0.0	0.1	1.3	1.1	0.2	0	0.4	0	0.1
	酸化ナトリウム (%)	31.2	36.3	18.0	86.4	96.7	93.0	64.7	54.1	52.5	86.6
	水酸化ナトリウム (%)	43.6	19.7	48.6	8.0	0	0	0	0	3.9	1.0
	炭酸ナトリウム (%)	18.2	25.6	19.3	4.0	0	6.4	26.1	41.2	31.5	9.7
金属成分	鉄 ppm	$1.01 \times 10^2$	$2.34 \times 10^2$	$1.60 \times 10^2$	—	—	—	$3.75 \times 10^1$	$1.38 \times 10^2$	$9.18 \times 10^1$	$1.66 \times 10^2$
	アルミニウム ppm	$< 9.62 \times 10^1$	—	$6.42 \times 10^1$	—	—	—	$7.91 \times 10^1$	$2.03 \times 10^2$	$2.41 \times 10^2$	$1.51 \times 10^2$
	マグネシウム ppm	$2.11 \times 10^1$	—	$4.62 \times 10^1$	—	—	—	$3.89 \times 10^1$	$3.37 \times 10^1$	—	$2.33 \times 10^1$
	ニッケル ppm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	亜鉛 ppm	$6.92 \times 10^1$	$2.12 \times 10^2$	$1.53 \times 10^2$	—	—	—	$1.77 \times 10^1$	$1.27 \times 10^2$	$4.11 \times 10^1$	$7.13 \times 10^1$
	鉄 ppm	$1.95 \times 10^2$	$2.19 \times 10^2$	$2.95 \times 10^2$	—	—	—	$3.26 \times 10^1$	$9.51 \times 10^1$	$2.76 \times 10^2$	$1.26 \times 10^2$
	不純アルミニウム ppm	$3.55 \times 10^{-1}$	$8.20 \times 10^0$	$3.93 \times 10^0$	—	—	—	$2.20 \times 10^1$	$5.03 \times 10^0$	$1.20 \times 10^1$	$< 9.90 \times 10^{-1}$
	溶出マグネシウム ppm	$1.19 \times 10^1$	$2.95 \times 10^1$	$1.15 \times 10^1$	—	—	—	$3.37 \times 10^1$	$8.31 \times 10^0$	$9.14 \times 10^0$	$4.04 \times 10^1$
	不純ニッケル ppm	$1.20 \times 10^1$	$2.96 \times 10^1$	$1.67 \times 10^1$	—	—	—	$1.60 \times 10^1$	$5.46 \times 10^0$	$1.18 \times 10^1$	$6.45 \times 10^0$
	不純亜鉛 ppm	$8.56 \times 10^0$	$3.51 \times 10^1$	$2.84 \times 10^1$	—	—	—	$2.31 \times 10^1$	$2.82 \times 10^1$	$4.71 \times 10^1$	$5.36 \times 10^1$
	不純マンガン ppm	$4.11 \times 10^0$	$1.17 \times 10^1$	$1.72 \times 10^1$	—	—	—	$3.46 \times 10^1$	$5.93 \times 10^1$	$1.21 \times 10^2$	$1.96 \times 10^1$
	不純クロム ppm	$2.85 \times 10^{-1}$	—	$5.22 \times 10^0$	—	—	—	$9.60 \times 10^0$	—	$6.75 \times 10^0$	$4.81 \times 10^{-1}$

—は定量していない。  
ドラム缶、ペール缶よりサンプリングした試料は、堆積物回収時にドライアイス、ナトレックスを加えているため、炭酸ナトリウム成分が増大している。

図3-4 グレーチング、床ライナ上に堆積したナトリウム化合物の  
主なサンプリング位置と分析結果

素、湿分等との反応による化学形態の変化を調査するために分析を行った。また、トリチウムは堆積物中に含まれている量を調査するために測定した。

① ナトリウム化合物の堆積状況と分析結果

ナトリウム化合物は、端子ボックス周辺に約3 kg、配管サポート、ダクト、グレーチング破損部周辺に約95kg、床ライナ上に約210kg、合計約310kg（いずれも、金属ナトリウム換算値）堆積していた。

この内、グレーチングと床ライナ上の化合物の分析結果を、その採取位置とともに図3-4に

示す。

堆積物の主成分は、当初  $\text{Na}_2\text{O}$  であったが、大気との接触時間、回収状況等によって、化学形態が  $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  等に変化したと推定される。採取時までの試料と大気との接触履歴が明確でないため厳密な比較は難しいが、金属ナトリウム成分が、端子ボックス周辺の一部、ダクト外表面、グレーチングなど上部で若干増加する傾向が認められ、燃焼が下部ほど進んだことを示唆している。

鉄、アルミニウム、亜鉛等の金属成分とその検出位置は、その上流側の保温材、ダクト、グ

レーチング等の高温化学反応による欠損部の構成元素とその落下位置にはほぼ対応していた。また、欠損部は、原形を留めた状態では堆積物の中には発見されなかった。

床ライナ上の堆積物表面には、ライナの勾配等によって広がった形跡が認められ、また、その瓢箪型の輪郭は、ダクト破損後に落下したナトリウムが破損前に落下し堆積した化合物を押しつけた結果と推定された。

② トリチウムの分析結果

配管室漏洩部近傍の堆積物について、床ライナー上、グレーチング部等の各部位ごとに試料を採取した。分析結果は図3-5に示すように、温度計周りを除き約10Bq/g (Na化合物)であった。温度計周りについては局所的に10<sup>3</sup>Bq/g程度の高い値を示すところもあったが、これはナトリウム中に含まれていたトリチウムまたはナトリウム漏洩後に漏出したアルゴンガス中トリチウムが局所的に捕獲されることにより偏析が生じた可能性が考えられる。

2) 飛散ナトリウム化合物の調査

建屋内外に飛散したナトリウムエアロゾルについては、エアロゾルの飛散量および化学形態を調査するために、原則として100cm<sup>2</sup>の面積についてスミヤ法によりサンプリングし、ナトリウム付着密度および化学組成を測定、分析した。

エアロゾルの飛散量(付着密度)は、配管室(C)では漏洩箇所近傍床面で最大約10mg/cm<sup>2</sup>で

あり、漏洩部から離れるにしたがいその量は減少していた。また、その他の部屋では蒸発器室・過熱器室で1 mg/cm<sup>2</sup>を超えるところがあるものの、ほとんどが0.1mg/cm<sup>2</sup>以下であった。また、排気ガラリ壁面では10mg/cm<sup>2</sup>を超えるところもあった。(図3-6参照)

① 配管室内のエアロゾルの分布

漏洩箇所から遠ざかるにつれてエアロゾルの付着密度が低くなり、床面については入口近傍で漏洩箇所近傍の約1/2であった。また、壁および天井については一部の偏析部を除いて床上の1/100程度であった。

② 配管室と同階の隣接室の分布

配管室からの拡散経路に沿って各部屋で指数関数的に減少していた。

③ 配管室より上方階での分布

上方階に行くにしたがって付着量は減少しているが、7階の蒸発器室(538室)および過熱器室(539室)の付着量が比較的增加傾向を示した。

④ 配管室より下方階での分布

配管室から階下の付着量は、下方階へ行く程減少していた。

エアロゾルの化学組成については、分析の結果ほとんどが炭酸ナトリウムであり、残りは炭酸水素ナトリウム(重曹)であった。

トリチウムについては、図3-5に示すように配管室のエアロゾル(回収したペール缶内より採取)で検出限界未満から5.23Bq/g (Na化合物)であった。しかし、その他の部屋に飛散したエアロゾルについては漏洩直後に採取した試料にわずかに検出されたものの、その後エアロゾルが飛散した各部屋で採取した試料(16試料)についてはすべて検出限界未満であった。

換気ダクトから建屋外への放出口となった排気ガラリについては、検出限界と同程度であった。

3) 建物外への影響調査

建物屋上、給気ガラリフィルタの付着エアロゾルおよび土壌のサンプリング分析を行った。エアロゾルの外部への拡散経路として、建物屋上に設置された配管室排気ガラリ、機器室排気ガラリと補助冷却系排気筒がある。排出濃度の最も高かったと推定される配管室排気ガラリ吹き出し口金網には、金属ナトリウム換算で平均約90 g/m<sup>2</sup>のエアロゾルの付着(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、一部NaHCO<sub>3</sub>)が見られた。配管室排気ガラリ周辺の給気ガラリのフィルタ(塩害防止用：平型フィルタ)のサンプリング分析では、エアロゾルの付着と考えられるナトリウム化合物は、C系

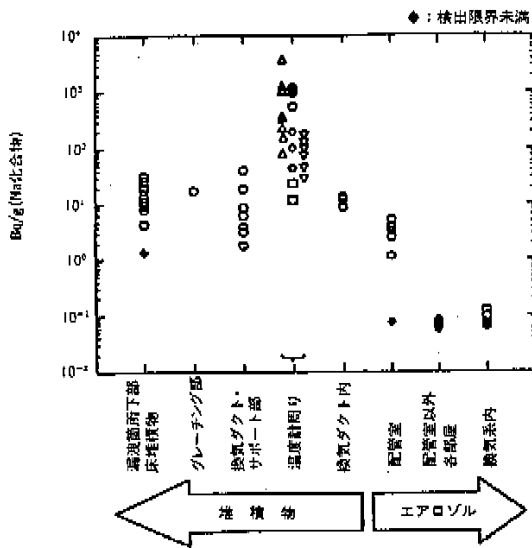


図3-5 ナトリウム化合物中のトリチウム濃度

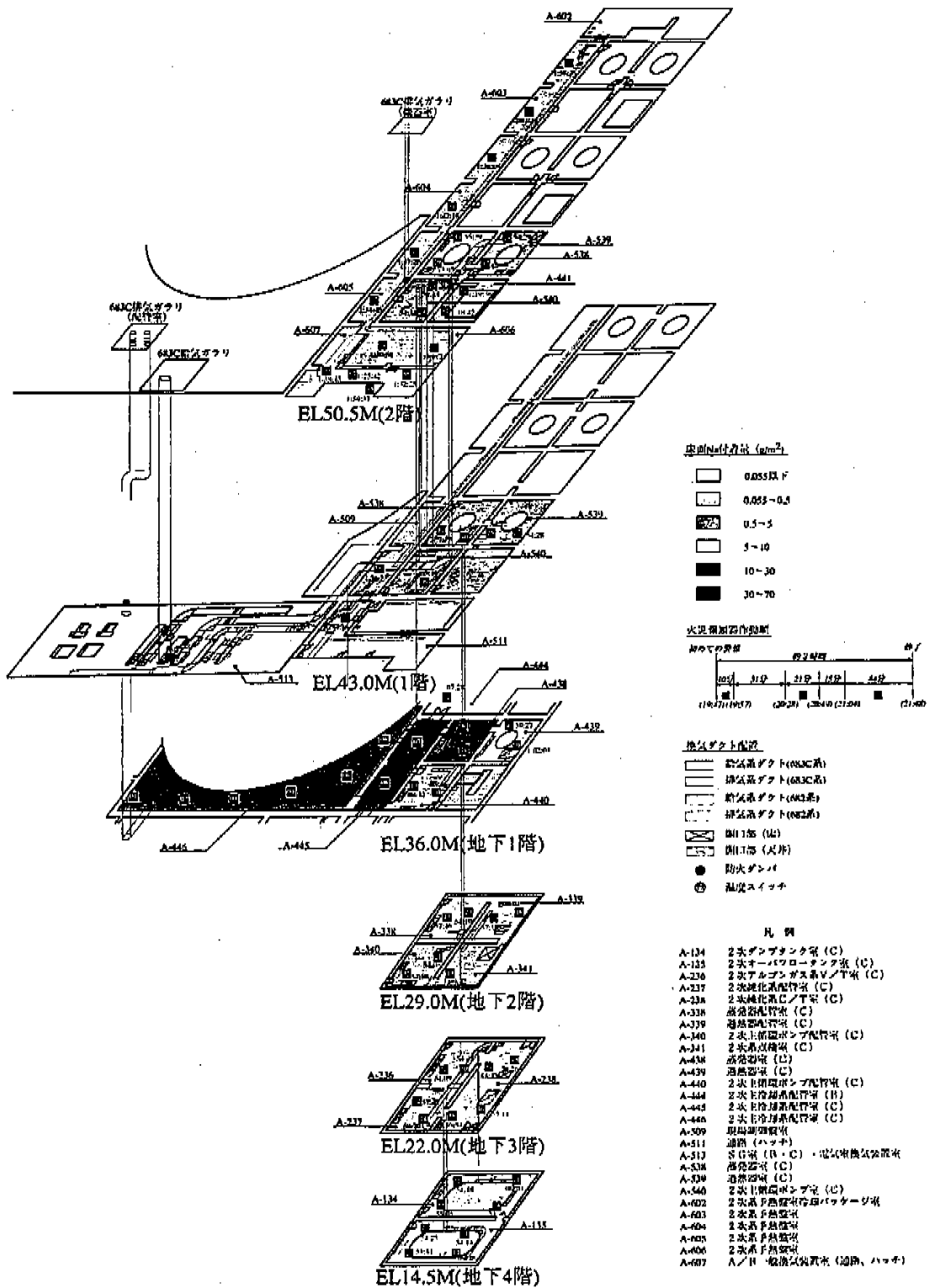


図3-6 サンプルによる床面 Na 付着量評価