

高速増殖原型炉もんじゅ
2次主冷却系ナトリウム漏えい事故について

原因調査結果のまとめ

平成9年2月

動力炉・核燃料開発事業団
高速増殖炉もんじゅ建設所

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。

〒107-0052 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Evaluation and patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Cooperation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団
(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Cooperation)
1997

は じ め に

平成7年12月8日高速増殖原型炉もんじゅで発生しました2次主冷却系ナトリウム漏えい事故につきましては、「もんじゅ」の安全確保の根幹に係わる重大な事故と認識し、これを厳粛に受け止めております。

事故発生後、原因究明に全社を挙げて取り組むとともに、調査状況につきましては節目節目に報告し公表してきました。昨年9月に取りまとめた報告書以降、当該温度計の破損した理由及びナトリウム漏えい燃焼実験で発生した床ライナの穴あき損傷の原因究明と「もんじゅ」事故との関係を中心として調査を進めて参りました。この度、これらの原因究明結果がまとまったことで、今回の事故原因の直接的な究明は終了したと考えており、これまでの原因調査のあらましを取りまとめました。

また、今回の事故に際して、通報連絡や事故情報の取扱いに適切さを欠いたことから、「安全に徹した動燃」「開かれた動燃」「地元重視の動燃」を目標に意識改革の徹底、危機管理体制の強化、情報公開の徹底、社会とのコミュニケーションの強化、地域対応の充実を目指し、全役職員が一丸となって自己改革運動を展開してまいります。

1. 「もんじゅ」2次主冷却系ナトリウム漏えい事故の技術的総括

今回の事故は、高速増殖炉特有のナトリウムが漏えいし、ナトリウム燃焼反応が生じたことにより漏えい部周辺の機器等が損傷するとともに、ナトリウム化合物が原子炉補助建物内に広く拡散し一部が建物外に放出されました。

- (1) これまでの調査により、ナトリウム漏えい原因や漏えいしたナトリウムの燃焼反応による影響調査等、今回の事故の直接的な原因や事故に伴う機器等への影響に関する原因究明は終了しました。
- (2) 原因調査の結果、今回の事故では原子炉の安全を確保する機能は維持され、周辺環境への放射能等による影響はなかったと評価しましたが、以下の点に問題があったと深く反省しています。
 - ① ナトリウムを内包する機器に対する認識が不十分で、温度計の設計・製作段階での管理にミスがあり、2次主冷却系の温度計が破損し、ナトリウムが室内に漏えいしたこと。
 - ② 事故発生後の運転操作において、事故を早期に収束させるといった観点から不十分な点があったこと。
 - ③ 「もんじゅ」事故での床ライナの温度及び原因調査として大洗工学センターで実施したナトリウム漏えい燃焼実験において床ライナに穴が開く損傷が発生したことを踏まえると、中小規模でのナトリウム漏えい燃焼挙動と、ナトリウム燃焼が構造物の健全性に及ぼす影響について検討・評価が不十分であったこと。
- (3) 今後は、今回の事故原因調査で明らかとなった反省点や課題を真摯に受け止め、「もんじゅ」の安全性を更に向上させるため安全総点検を確実に実施していくとともに、ナトリウム燃焼挙動の評価及びナトリウム漏えい対策を充実し、万全を期していきます。

2. 原因究明に係る調査結果の概要

(1) ナトリウム漏えい原因の調査

- ① 配管内を流れるナトリウムの流体力により、温度計さや細管部に振動が発生し、さや段付部に高サイクル疲労が生じて破断に至ったと判断しました。
- ② 温度計の設計・施工等の経緯を調査しました結果、ナトリウムを内包する機器としての認識が不十分であり、温度計の設計・製作段階での管理ミスがありました。また、流力振動に関する新知見の反映を怠りました。
- ③ 破損温度計は、温度計さやに挿入されている熱電対が段付部で曲がって挿入されていたことから、さやの振動減衰が小さく、当該温度計のみが破損したと判断しました。

(2) 漏えいナトリウムの燃焼影響調査

- ① 今回の事故において、原子炉の安全を確保する機能（炉心冷却能力の確保、隣接系統の崩壊熱除去機能）は確保されました。
- ② ナトリウム漏えい量は $640 \pm 42\text{kg}$ と評価しました。このうち約 410kg は建物内で回収し、建物外に排出されたナトリウム化合物による環境への影響はないことを確認しました。
- ③ 床ライナは燃焼熱により変形や一部に板厚減少が認められましたが、構造健全性は確保されました。床ライナの一部の減肉については、換気ダクトやグレーチングの損傷と同様に、ナトリウム・鉄（NaFe）複合酸化型腐食が支配的と判断しました。また、壁コンクリートには変色域があるものの、影響は表層部に止まっており、構造耐力及びびしゃへい性能上の問題はありませんでした。
- ④ ナトリウム化合物が付着した機器類の清掃、点検を行なった結果、機器類へのナトリウム化合物の影響はなく、構造・機能に問題のないことを確認しました。

(3) ナトリウム漏えい時の運転操作に関する調査

- ① 今回の事故時に行った運転操作について、ナトリウム漏えいを早期に収束させるとの観点から、設計段階でのプラント運用の考え方や運転手順書の記載内容、さらに教育訓練が不十分でありました。
- ② 対策として、ナトリウム漏えいが確認されれば、即時に原子炉を手動停止するとともに、今後漏えいの早期検知、早期収束及び拡大防止のための設備改善、手順書の改訂、教育訓練の充実を図ります。

(4) 大洗工学センターでのナトリウム漏えい燃焼実験II (穴あき損傷)

燃焼実験IIで床ライナに穴があいた原因は、燃焼実験を行った部屋が小さかったこと等から部屋の温度が高く、コンクリート部から多量の水分が発生したため、床ライナ上に堆積したナトリウム燃焼生成物に水酸化ナトリウム (NaOH) が生成され、これに溶け込んだ過酸化ナトリウムの影響で腐食速度の大きい溶融塩型腐食が生じたためと判断しました。この床ライナの腐食を起こす環境が燃焼実験IIと「もんじゅ」事故とは異なっていたと判断しました。

3. 安全総点検

- (1) 「もんじゅ」の安全性及び信頼性の向上を図り、「技術的信頼の確保」を目的として、原因調査の結果明らかとなった問題点、反省点を基に設備、手順書、教育訓練について安全総点検を実施していきます。
- (2) 安全総点検において摘出された改善事項については、改善方策を策定していきます。
- (3) 安全総点検の計画、実施状況及びその結果を、科学技術庁のもんじゅ安全性総点検チームに報告し、指摘事項を受け対応するとともに自治体等関係機関からの指摘に対処していきます。
- (4) ナトリウム技術、発電プラント技術及び品質保証等幅広い分野の専門家（アドバイザーグループ）の助言を受け、点検を実施しています。

ナトリウム漏えい事故各調査項目のポイント

	頁
1. 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の概要	7
2. 原因究明調査の進め方	11
3. ナトリウム漏えい原因の調査	14
4. ナトリウム漏えい燃焼・影響調査	18
5. ナトリウム漏えい時の運転操作に関する調査	22
6. 大洗工学センターでのナトリウム漏えい燃焼実験	23
7. 安全総点検	27
8. 安全性向上のための課題	28
9. 原因究明と安全総点検	30

1. 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の概要

(1) 事故発生前のプラント状況

事故発生前の「もんじゅ」は試運転中であり、電気出力約40%の状態でした。原子炉で発生した熱は1次系、2次系のナトリウムの伝わり、蒸気を作り発電を行います。今回のナトリウム漏えいは原子炉を通らない2次系で起きたもので、放射能による環境への影響はありませんでした。なお、1次系、2次系にはそれぞれA、B、C 3つのループ（循環回路）があり、事故はCループで起きたものです。

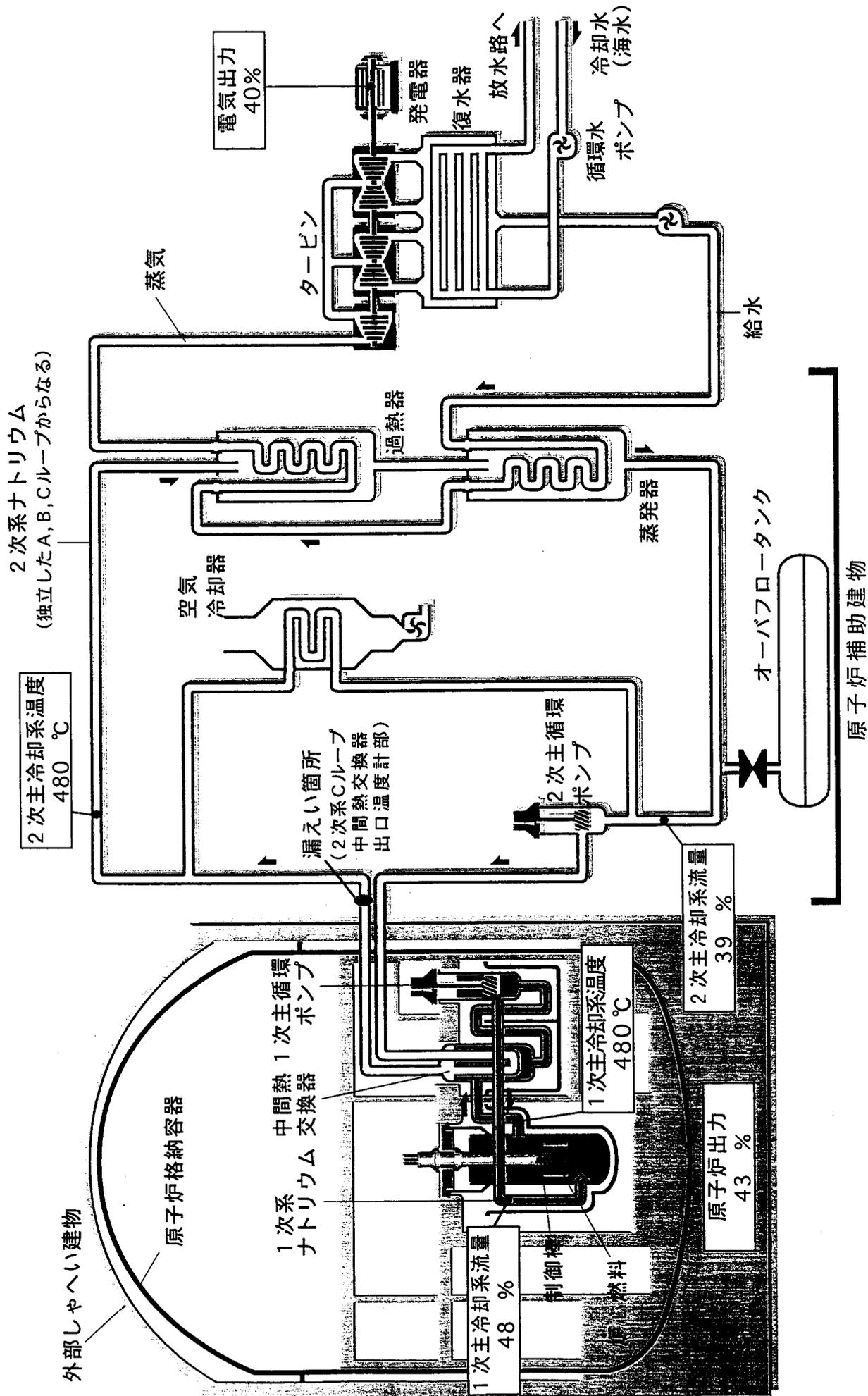
(2) ナトリウム漏えい事故の概要

平成7年12月8日19時47分、2次主冷却系配管室Cの火災検知器が発報し、現場確認により煙を確認したため、ナトリウムの漏えいと判断し、運転員は原子炉を通常の停止方法で止め始めましたが、この後、火災検知器の警報が増加したことから緊急停止（手動トリップ）で原子炉を止め、さらにナトリウムの抜き取り（ドレン）を行い、事故を終息させました。

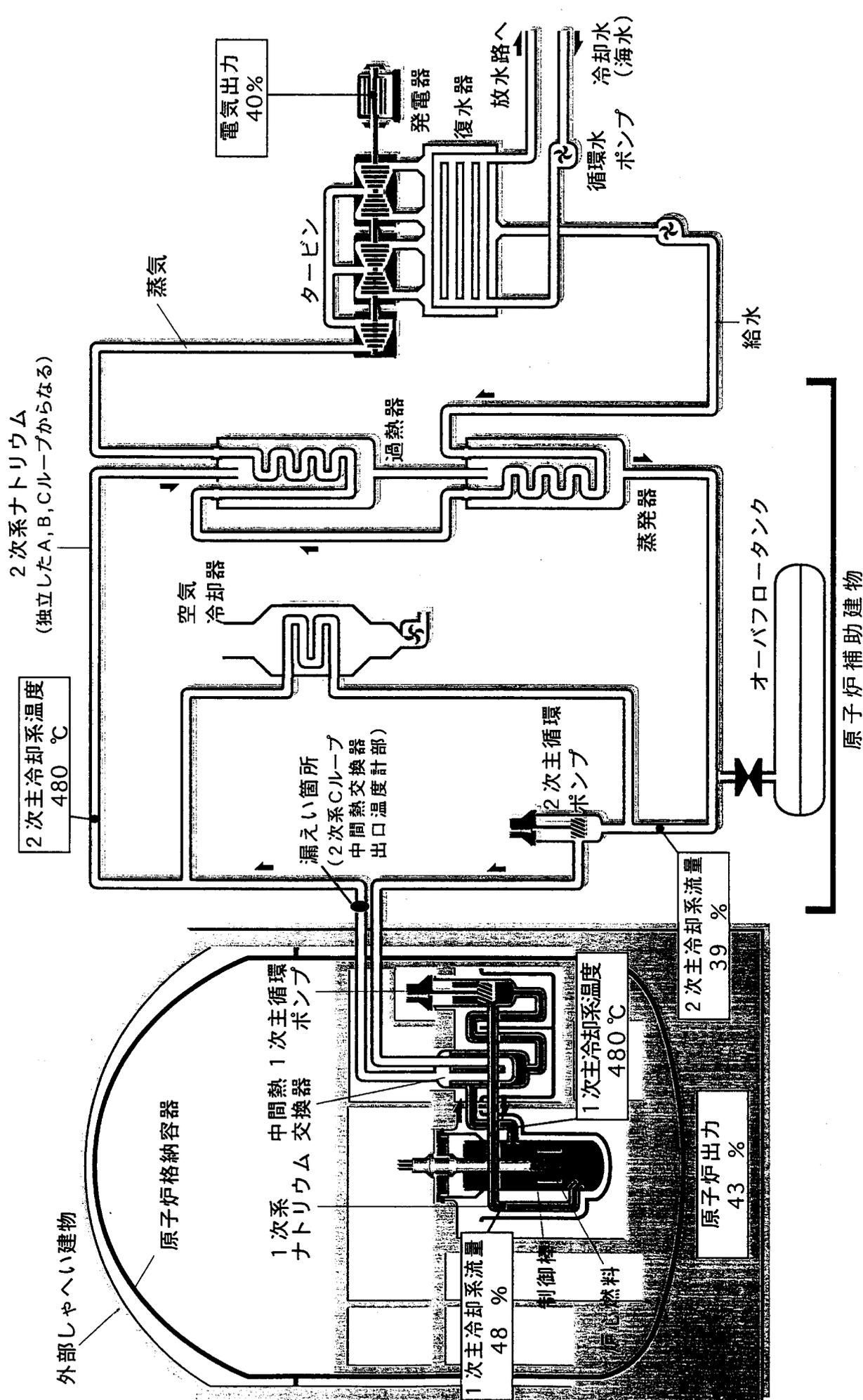
2次主冷却系配管室Cにある温度計から漏れたナトリウムは、ナトリウム配管の真下にある換気ダクト、足場（グレーチング）を破損させ、床ライナ上に堆積しました。

温度計は熱電対とさや管からできています。今回の事故では、このさや管のくびれた部分（段付部）から折れ、折れたさや管（ロストパーツ）はその後、過熱器で見し回収しました。

事故発生前のプラント状況



事故発生前のプラント状況

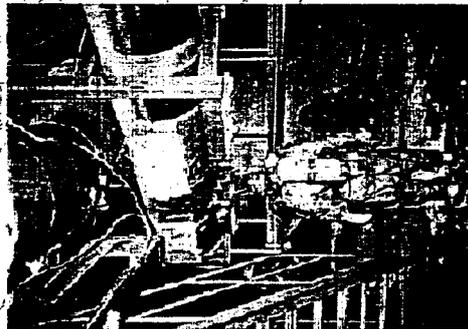
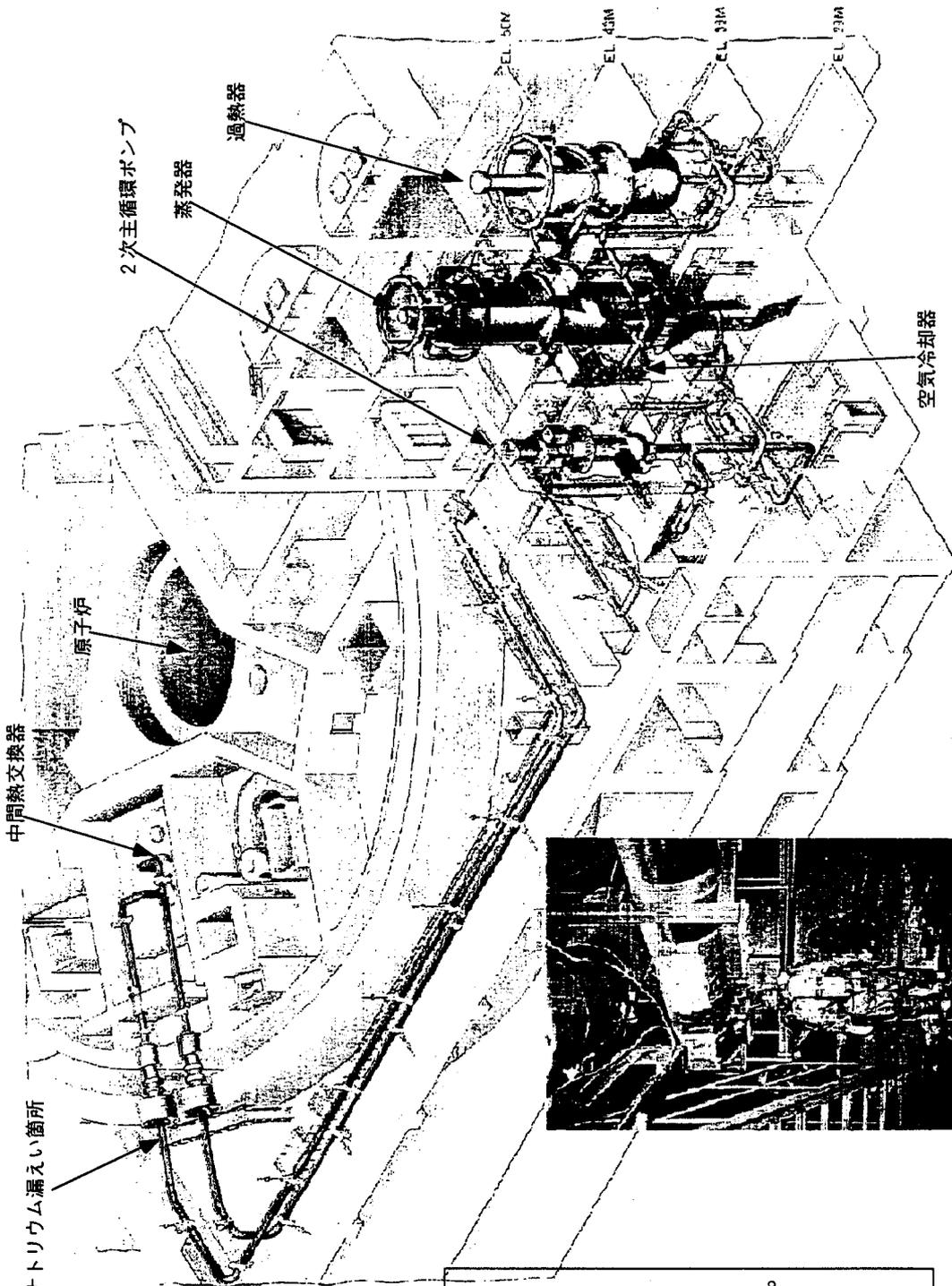


ナトリウム漏えい事故の概要(1/2)

2次主冷却系（Cループ）配管室 ナトリウム漏えい部の状況



温度計取付部近傍の状況



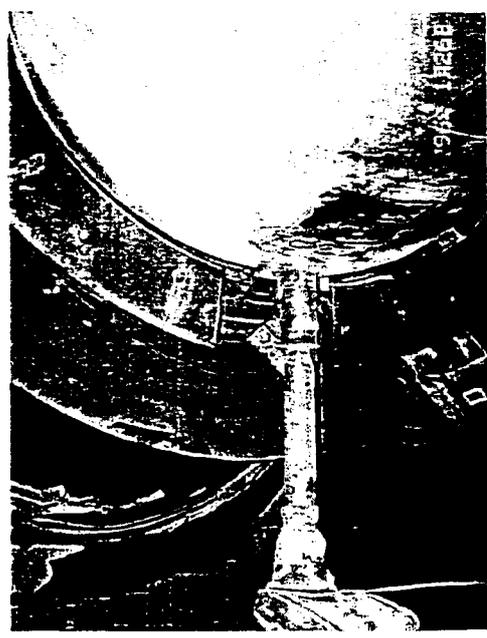
漏えい後の状況

事故の経緯

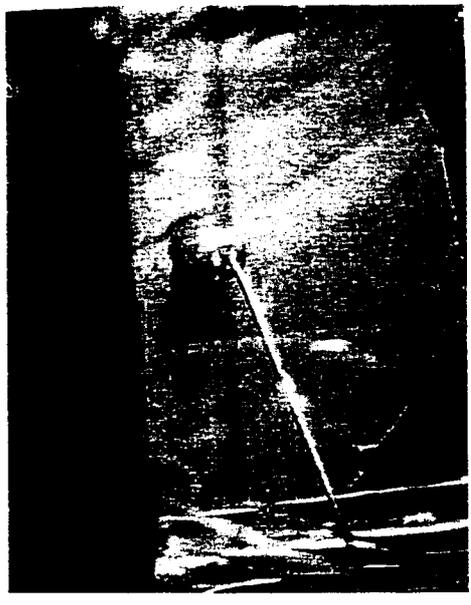
- 平成7年12月8日
- 19:47 事故発生。火災検知器発報。
 - 19:48 ナトリウム漏えい検出器発報。現場にて煙の発生を確認。
 - 20:00 小規模漏えいと判断し、通常停止操作開始。
 - 20:50 火災検知器の新たな発報（急増）と白煙の増加を確認。
 - 21:20 原子炉手動トリップ操作。
 - 22:55 Cループ配管部のドレン操作開始。
 - 23:13 SG室換気装置が自動停止。
- 平成7年12月9日
- 0:15 ナトリウム抜き取り完了。

火災検知器はCループの部屋を中心に66個発報

ナトリウム漏えい事故の概要 (2/2)



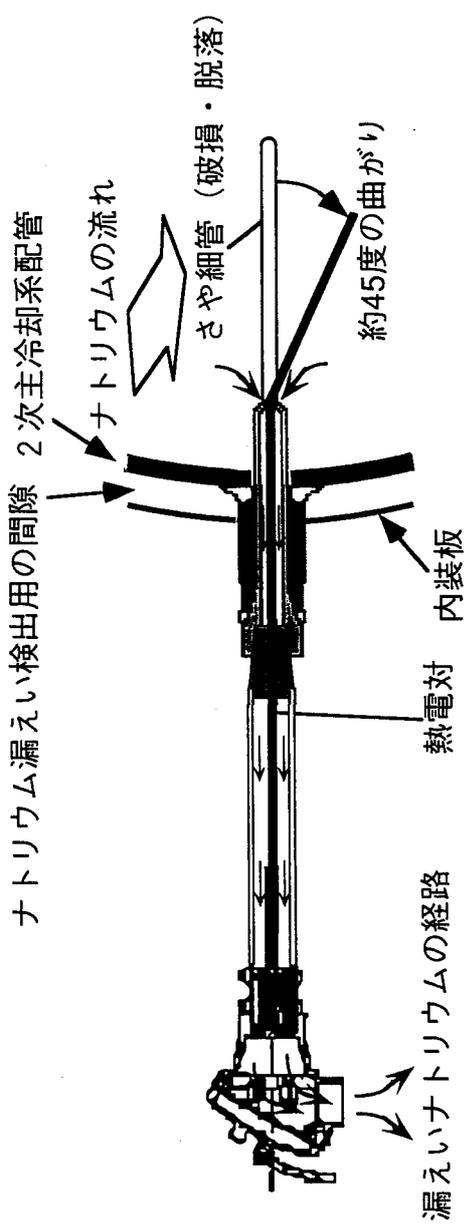
内装板取り外し後の温度計の状況



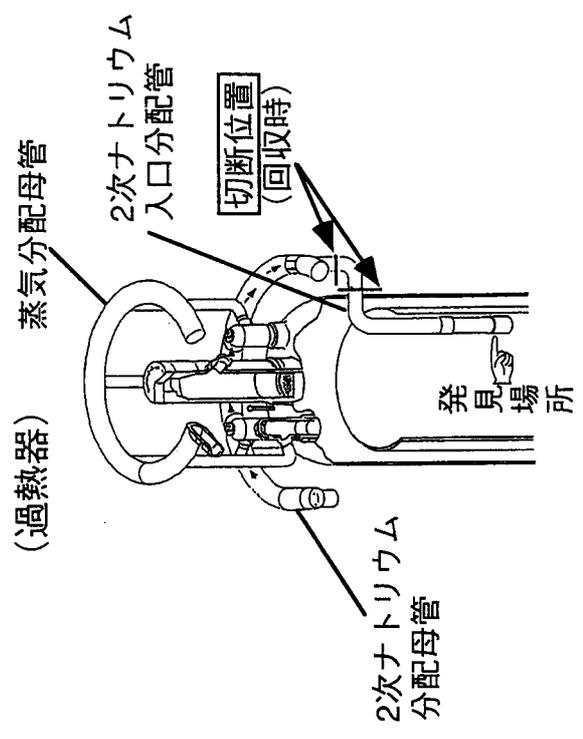
温度計熱電対の状況



折れたさや管回収作業

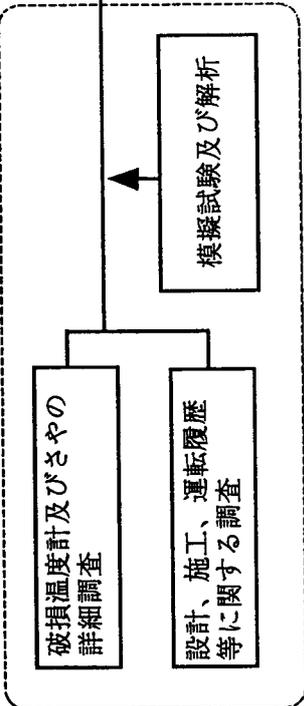


温度計取付部の断面図

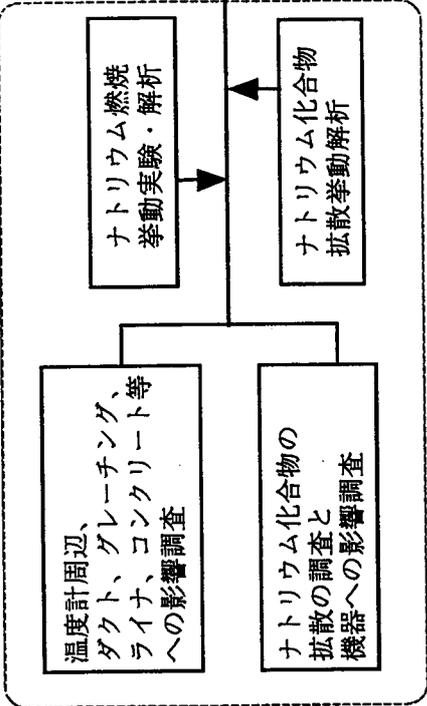


原因究明調査の作業の流れ

ナトリウム漏えいの原因調査 (温度計さや部等)



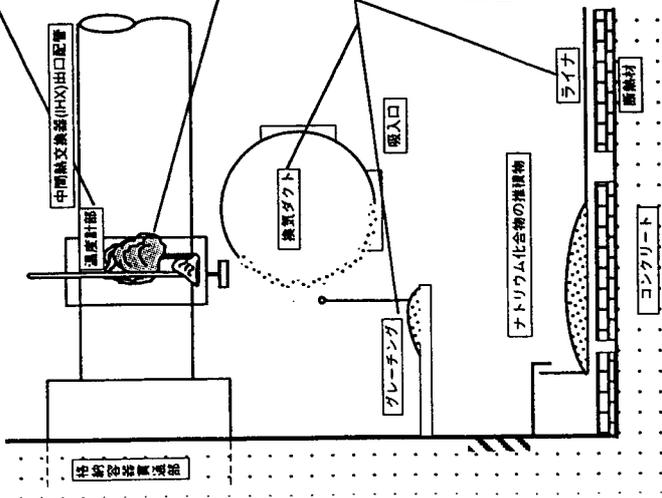
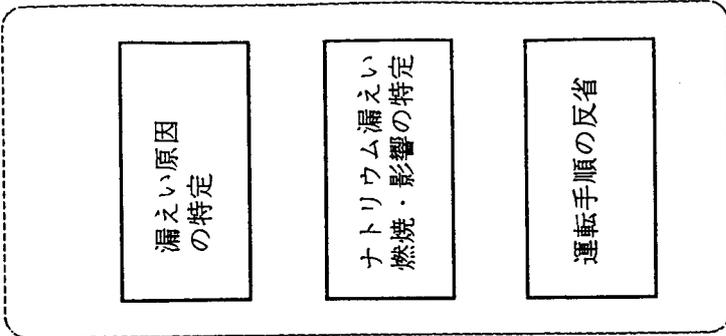
漏えいナトリウムの燃焼・影響に関する調査



漏えい時の運転操作等に関する調査



事故原因の総合評価



漏えい部付近の概略図

原因究明調査工程

平成7年 12月	平成8年 1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平成9年 1月	2月	3月
事故発生	科技庁 11タスク設置	科技庁 報告書	科技庁 報告書	科技庁 報告書	科技庁 報告書	科技庁 報告書			原子力安全委員会 報告書					科技庁 報告書	
8	19	24	26	28	24	24	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	第1報	第2報	第3報	発見	回収				第4報						
	安全協定に基づく報告														
	ナトリウム漏えい原因調査														
	▲8 ▲12 ▲28 ▲24 ▲ 温度計破損 破損温度計 破損温度計 破損温度計 確認 輸送 発見 回収														
	破損温度計及びびさやの調査 (金属材料技術研究所、日本原子力研究所での調査を含む)														
	設計、施工、運転履歴等に関する調査														
	模擬試験及び解析による調査														
	[温度計の個体差に関する調査]														
	漏えいナトリウムの燃焼・影響に関する調査														
	▲15 ▲28 ▲7 ▲ ナトリウム漏えい ナトリウム漏えい ナトリウム漏えい 速度・形態 速度・形態 速度・形態 確認試験Ⅰ 確認試験Ⅱ 燃焼実験Ⅰ 燃焼実験Ⅱ														
	ナトリウム燃焼拳動実験・解析														
	ナトリウム化合物拡散の調査及び拳動解析														
	[材料・堆積物の調査分析/高温化学反応要素試験等]														
	エリア清掃作業及び機器等影響調査														
	▲1 ▲7 ▲ エリア清掃終了 機器盤類の点検終了														
	A、Bループの温度計の調査・漏えい防止強化														
	科技庁安全性総点検チーム設置														
	安全総点検開始														
	安全総点検実施本部設置														
	安全総点検開始														

3. ナトリウム漏えい原因の調査

(1) 温度計の破損原因

温度計の破損は、配管内を流れるナトリウムによりさやや細管下流側に対称渦が発生し、これによる流体力でさやや細管部が振動し、さやや段付部で高サイクル疲労が生じ破損したものと判断しました。

(2) 温度計破損の背景

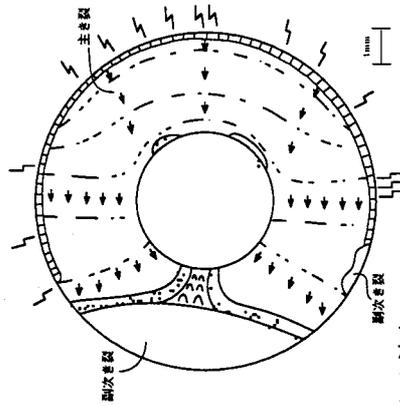
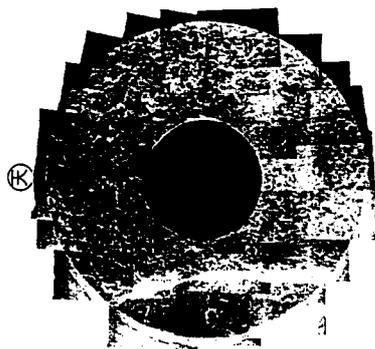
当該温度計は2次主冷却系配管の計装機器の一部として設計されており、流力振動に対する検討を含めて強度検討は実施され、ナトリウムを内包する機器との認識が不足しており、設計検討上の審査や製作段階での配慮が十分でなかった。特に、対称渦による流力振動については、追加された基準を反映すれば回避できたと反省しています。

(3) 温度計の個体差

温度計の水流動試験にて、さやや管の中にあいた熱電対が段付部近傍で曲がっている場合は、熱電対による振動抑制効果の小さや管の擦り傷が原因で曲が生じ、熱電対にはさやや管との温度計の熱電対による振動の擦り傷が原因で曲が生じた。同様の状態が破損した温度計の熱電対に確認されたため、当該温度計では熱電対が高サイクル疲労状態で挿入されたものと判断しました。

温度計の破損原因

- 金属材料技術研究所
- 日本原子力研究所
- 破損温度計の破面等の調査



ナトリウムの流れ

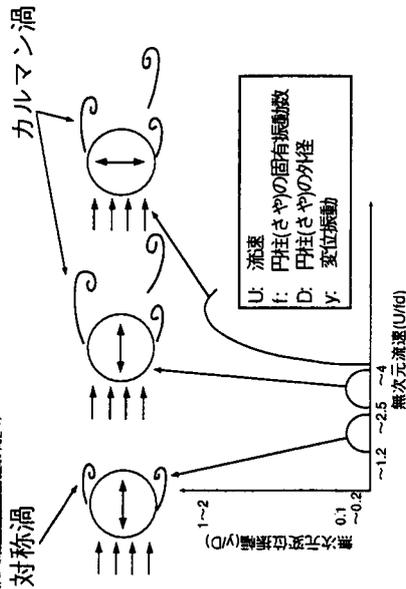
- ┌ : 段差位置
- ◀ : き裂進行方向
- - - : き裂前縁形状 (推定)

破面の様相の模式図説明

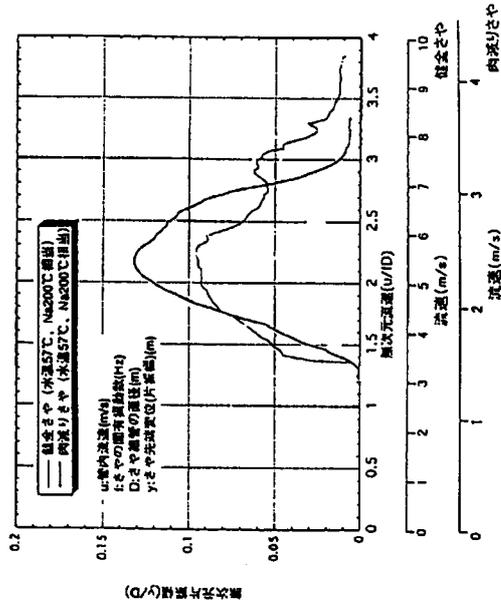
- 破面の電子顕微鏡による観察を実施
- ・主き裂の破面で次の4種類の領域が確認できた。
 - き裂発生・合体領域：複数個の疲労き裂の発生 [き裂発生領域]
 - 組織・結晶依存型破面領域 [き裂進展領域]
 - : SUS304で疲労き裂進展が遅いときの特徴
 - ストライエーション領域
 - : 疲労き裂進展が早いときの特徴
 - ディンプル領域：延性的破断の特徴 [破断領域]

動燃事業団

- 水中での流力振動試験等の模擬試験
- 振動特性、疲労、き裂進展等の解析
- 破損温度計以外の温度計の調査



注：図中の数値はおおよその目安であり、参考値



温度計さやの振動振幅と流速の関係

温度計破損の背景

温度計の設計経緯の調査

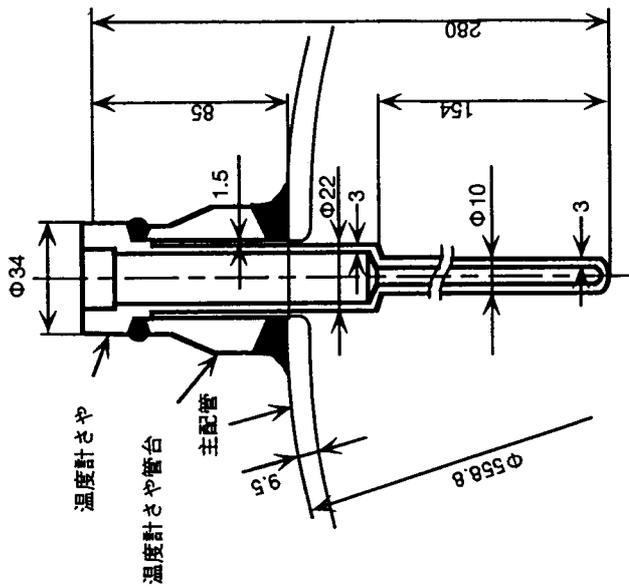
設計及び製作段階での 問題点

- ・ 計装機器の一部として設計し、
ナトリウム配管と同等の設計・
審査を行わず
- ・ 温度計さやの形状、構造強度
- ・ 製作段階での配慮
- ・ 流力振動に関する新知見の反映

反省点

- ・ 温度計に対してナトリウムを
内包する機器としての認識不足
- ・ カルマン渦による共振を回避する
ことを確認したが、対称渦による
流力振動は考慮せず
- ・ さや段付き部の丸み指定なし
- ・ 米国機械学会の追加された基準を
反映せず

2次主冷却系温度計さや等の構造

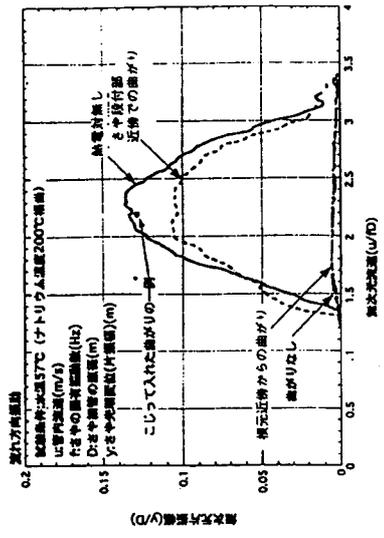
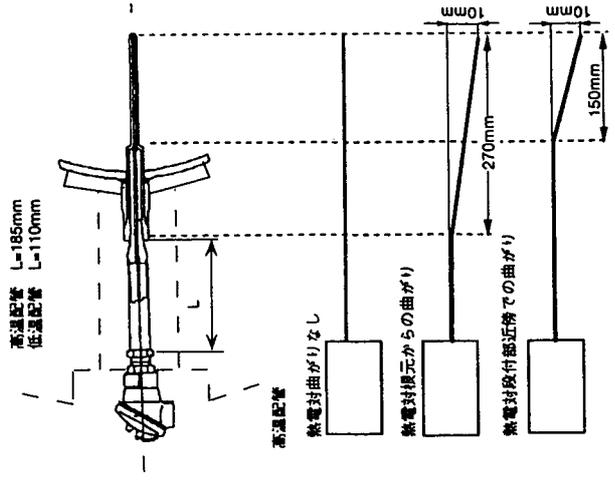
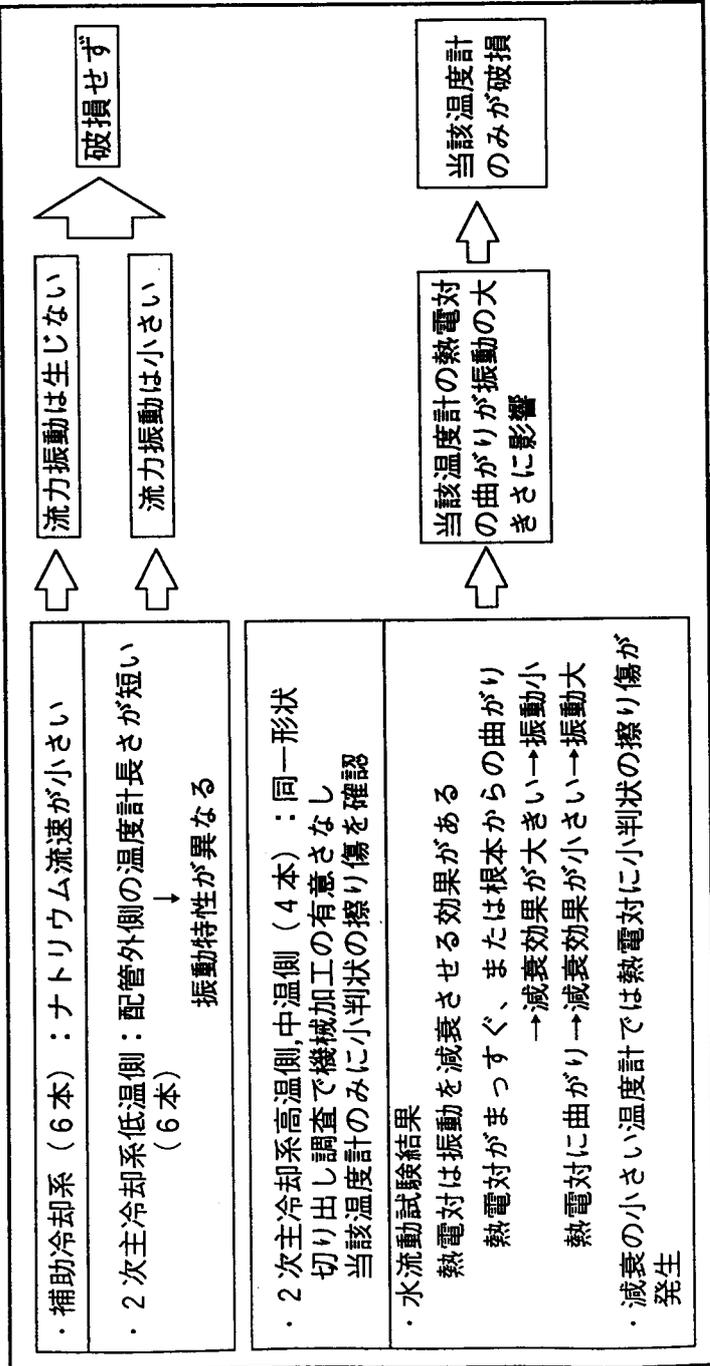


単位：mm

温度計の応答性向上のため次項目を重視

- ・ 熱電対細径化及びさやの薄肉化（応答性を高める）
- ・ 極力配管中心近傍の温度を測定（流体の代表温度の測定）
- ・ さやの軸方向温度勾配の抑制（計測精度の向上）

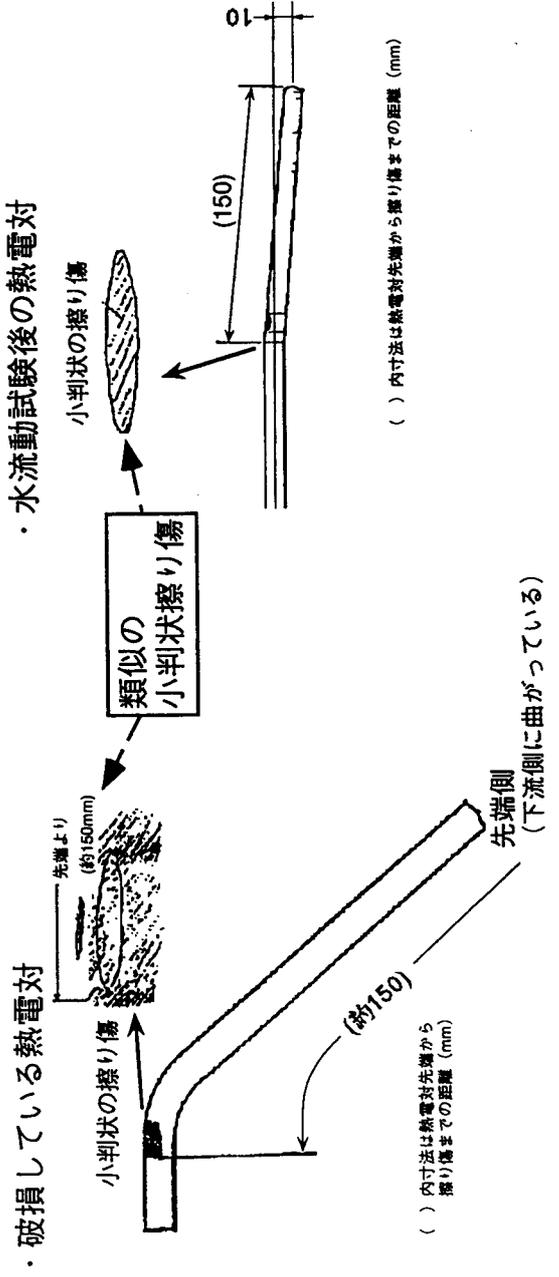
温度計の個体差



(注) この結果は記載条件に基づく試験結果の一例
* : 画像処理による測定値
他はさや後付部温度計応答に基づく測定値

熱電対の曲がり振動が振幅に及ぼす影響

水流動試験後の熱電対



4. ナトリウム漏えい・燃焼・影響調査

(1) ナトリウム漏えい・燃焼挙動及び漏えい部周辺機器への影響調査

ナトリウム漏えい燃焼実験の結果等から、漏えいナトリウムは温度計端子ボックスから電線管を伝わって液滴状に換気ダクトを経て床上に落下したことが分かりました。

換気ダクトとグレーチングには欠損が生じました。床ライナでは板厚減少が認められましたが、穴あき損傷等は発生しておらず、ライナ機能は保持されました。欠損及び板厚の減少は、試験等により燃焼中のナトリウムと鉄が高温で反応するNaFe 複合酸化型腐食が支配的であることが判明しました。漏えい部近傍のコンクリート壁表面が熱の影響を受けていましたが、コンクリートとナトリウムとの反応生成物は検出されおらず、構造強度、しゃへい性能への影響はないと判断しています。

(2) ナトリウム化合物（エアロゾル）拡散の影響

当該温度計部から漏えいしたナトリウム量については $640 \pm 42 \text{kg}$ と評価しています。建物内で約410kgのナトリウム（金属換算）を回収し、約230kgのナトリウムがエアロゾルとして建物外に放出したと推定しています。建物内エアロゾルの拡散範囲は、床面積で約 $5,580 \text{m}^2$ （原子炉補助建物の約10%）に至りました。放出されたエアロゾルは、空気中で急速に安定な炭酸ナトリウムや重曹へと変化し、塩分の自然環境濃度と同等レベルまで希釈されたものと推定しています。放出されたナトリウムに含まれるトリチウムについては、原子力発電施設からの平常放出実績より十分小さく、環境への影響はなかつたと判断しています。

(3) ナトリウム化合物（エアロゾル）の清掃及び機器への影響

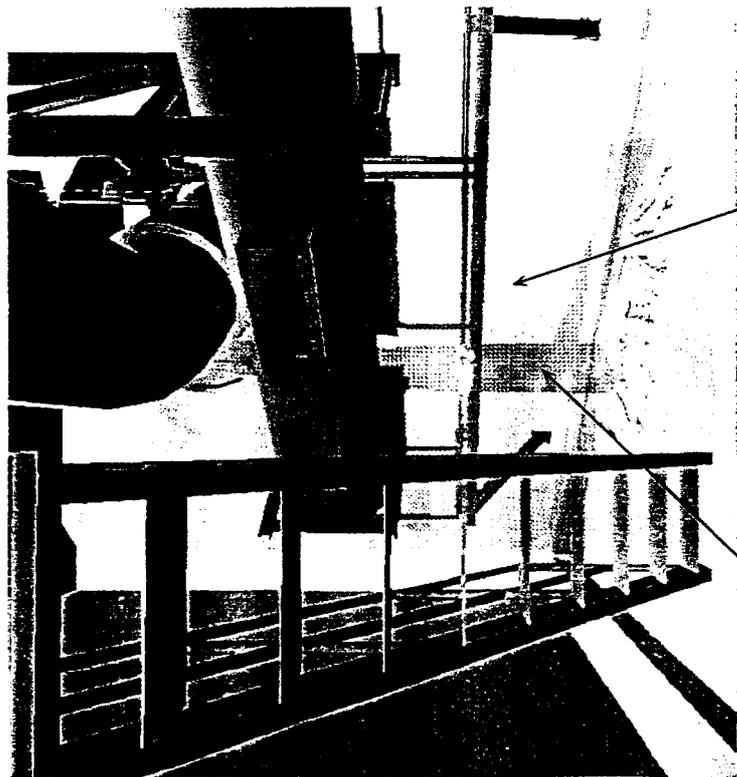
建物内に拡散したエアロゾルは床、壁に付着しましたが、はげや真空掃除機を用いて清掃し、平成8年7月1日からは平常の服装で作業や見学が可能となりました。

また、エアロゾルの付着した配管、機械、制御盤等については、全機器を対象に清掃を行うとともに、外観点検、電気点検を実施し、さらにモータ、配管支持装置等の代表的機器は分解点検を含む詳細点検を実施しました。これらの点検結果と構造物等の健全性確認試験結果とから、機器類へのナトリウム化合物の影響はなく、構造・機能に問題のないことを確認しました。

今後は、年次点検の中で設備の健全性が維持されていることを確認していきます。

ナトリウム漏えい・燃焼挙動及び漏えい部周辺機器への影響調査

ナトリウム漏えい燃焼挙動



材料の欠損をもたらす
液滴の落下範囲

燃焼熱の影響の及んだ範囲

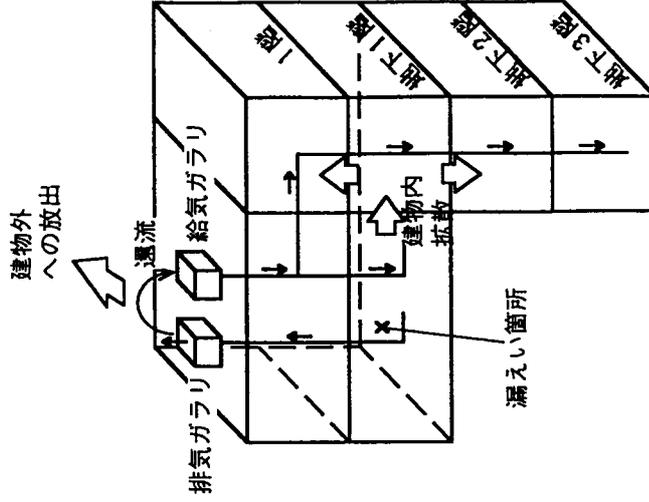
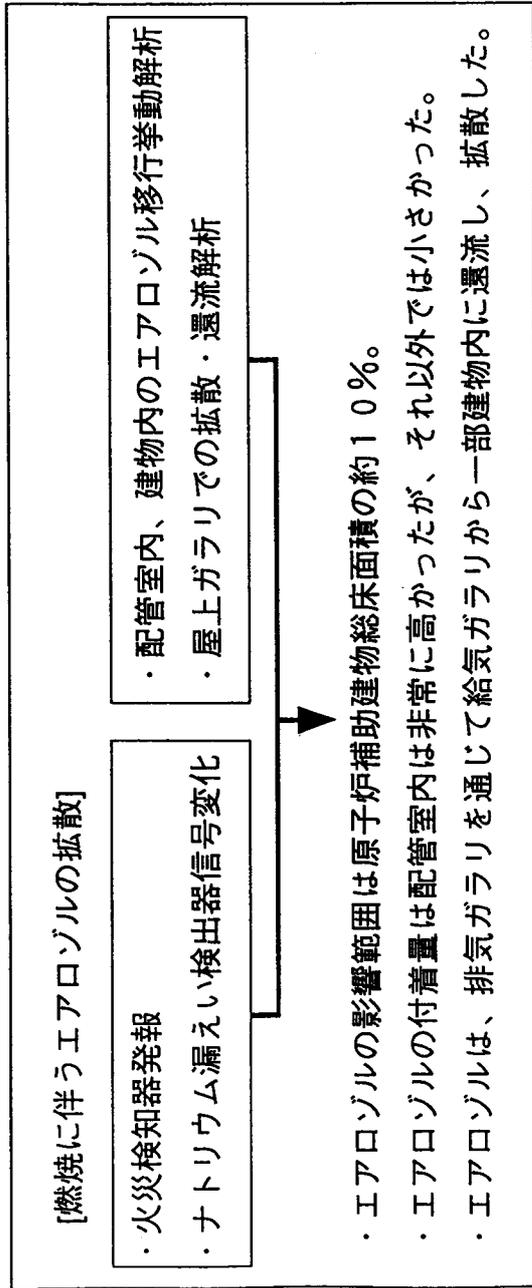
漏えい部周辺機器への影響

- ・換気ダクト、グレーチング
グレーチングの最高温度は1000～1150℃、
欠損の原因はNaFe複合酸化型腐食が支配的と
推定
- ・床ライナ
最高温度は650～750℃、燃焼熱による残留変形、
一部で板厚減少（約1.5mm）
NaFe複合酸化型腐食が支配的と推定
構造健全性は確保
- ・コンクリート
表層部は、熱影響等により変色
（ナトリウムとの反応生成物は確認されず。）
構造耐力、しゃへい性能上問題なし

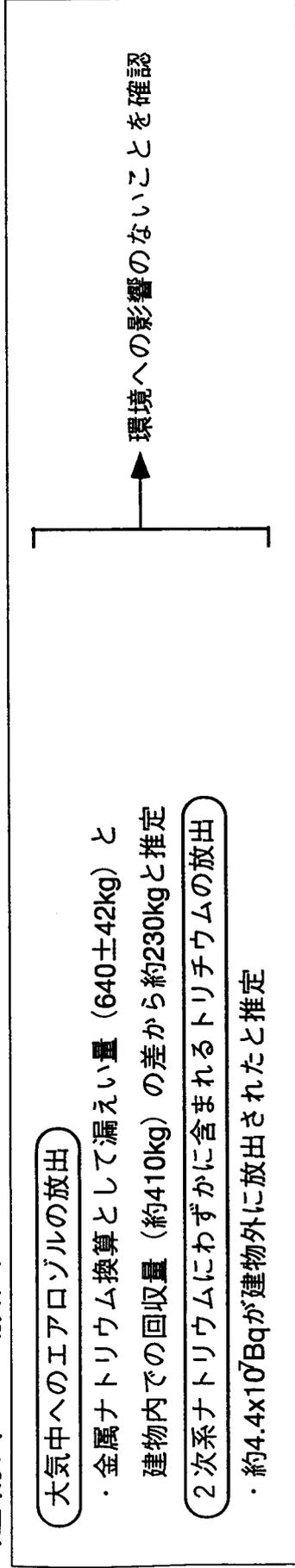
ナトリウム液滴の広がり及び熱影響範囲

ナトリウム化合物（エアロゾル）拡散の影響

建物内拡散



建物外への放出



ナトリウム化合物（エアロゾル）の清掃及び機器への影響

ナトリウム化合物が付着した床・壁の清掃

事故直後(平成7年12月9日撮影)



ナトリウム化合物は床・壁等に堆積する他、エアロゾルとして各部屋に広がりがり、床、壁等に付着

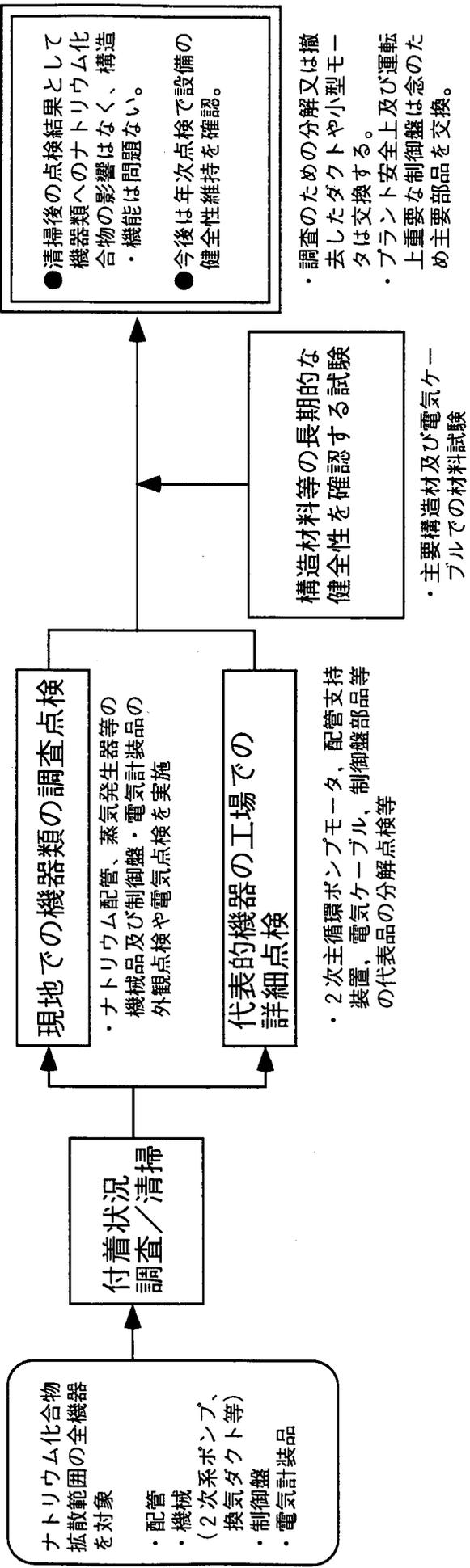
清掃
(はけ、真空掃除機、ふき取り用布等を用いて清掃)

現状



平成8年7月には清掃が完了し、現在では平常の服装で作業や見学が可能

ナトリウム化合物による機器類への影響調査



5. ナトリウム漏えい時の運転操作に関する調査

事故時の運転員の操作や運転手順書を詳細に分析調査しました。

今回の事故の反省点

プラント運用の問題

- ・小規模漏えい時は原子炉通常停止
- ・小規模漏えい時はナトリウム温度が400℃まで低下後ドレン
- ・小規模漏えい時は換気系運転継続

運転手順書の問題

- ・手順書で小・中規模漏えいの判断基準が不明瞭。
(火災検知器、白煙についての認識の不統一。)
- ・プラント停止はプラント第一課長の了解を得ることとなっている。
- ・漏えい確認後の現場を継続監視すべきとの記載なし。

運転員の操作の問題

- ・原子炉手動トリップ操作を決定したが、発電機解列、タービン停止を優先させた。

今後の改善策

- ナトリウム漏えいを確認した時点で即時に原子炉手動トリップ
- 早期に漏えい量を抑制し、漏えい影響の緩和ができるような設備・運転手順の改善
(ナトリウムドレン、換気系等)
- ナトリウム漏えい早期検知のための設備改善
- 異常時運転手順書について、先行炉の経験等を十分反映し、適切な判断・操作を行い、異常の早期収束が確実に見えるよう手順書を見直す。
- 設計の考え方及び異常の早期収束の観点からの基本動作の教育を充実
- 漏えいナトリウムの挙動・影響について現場に即した状況の変化が正しく把握できるような教育を実施

6. 大洗工学センターでのナトリウム漏えい燃焼実験

(1) 実験の概要及び実験結果

大洗工学センターで実寸大のナトリウム配管周辺機器を模擬した実験を実施し、ナトリウム漏えい速度・漏えい形態の確認及びナトリウム漏えい燃焼並びに、周辺機器の破損挙動の確認を行いました。

- ① ナトリウム漏えい速度・漏えい形態の確認実験……………「もんじゅ」での傾向と類似
- ② ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅰ……………「もんじゅ」とほぼ同様の状況再現
- ③ ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅱ……………床ライナナが破損、「もんじゅ」と異なる現象

(2) 床ライナ損傷に関するナトリウム漏えい燃焼実験Ⅱと「もんじゅ」事故の比較

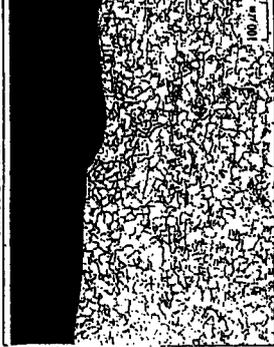
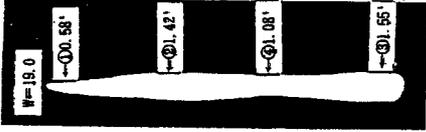
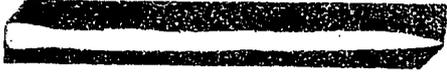
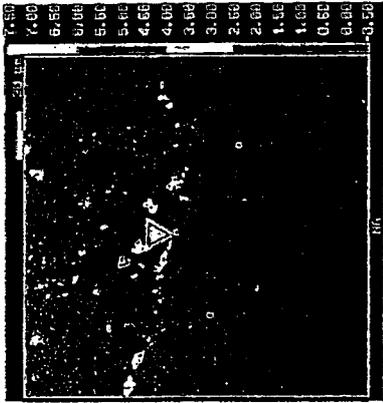
「もんじゅ」と「燃焼実験Ⅰ」では、鉄と酸化ナトリウム (Na_2O) が高温で反応する NaFe 複合酸化型腐食が生じており、また「燃焼実験Ⅱ」では、実験を行った部屋の容積が小さかったことから部屋の温度が高温になり、コンクリート部から多量の水分が出たため床ライナ上に堆積したナトリウム燃焼生成物として水酸化ナトリウム (NaOH) が生成され、これに溶け込んだ過酸化ナトリウムからの過酸化物イオンにより腐食速度の大きい溶融塩型腐食が生じ、「もんじゅ」と全く異なった腐食機構が作用していたことが判明しました。

実験の概要及び実験結果(1/2)

全体概要	実験結果
<p>ナトリウムによる漏えい速度・漏えい形態の確認実験 平成8年2月15日 (第1回) 平成8年3月28日 (第2回)</p> <p>○模擬範囲：温度計と外装板の一部 ○目的：・漏えい率の測定 ・温度計から流出する際の漏えい形態の確認</p>	<p>・漏えい率は実験条件では約53±2 g / 秒 ・温度計の熱電対信号推移は、「もんじゅ」での傾向と類似。</p>
<p>ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅰ (鋼鉄製セル内での漏えい燃焼実験) 平成8年4月8日</p> <p>○模擬範囲：温度計と配管保温構造、ダクト、グレーチング ○目的：・漏えい燃焼挙動及びエアロゾルの破損挙動の確認 ・燃焼による堆積物及びエアロゾル量の確認と化学組成の調査</p>	<p>・エアロゾルの付着による排気系の閉塞のため約1時間30分で実験終了。 ・漏えい初期のナトリウム落下・飛散挙動は、液滴状。 ・漏えい後の調査で、「もんじゅ」とほぼ同様の状況の再現。 1) グレーチングの損傷。Na-Fe複合酸化型腐食が支配的。 2) 白いナトリウム化合物(酸化物が主成分)の堆積。</p>
<p>ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅱ (コンクリートセル内での漏えい燃焼実験) 平成8年6月7日</p> <p>○模擬範囲：温度計と配管構造全体、支持金具、ダクト、グレーチング、ライナ構造、コンクリート ○目的：・漏えい部の構造や配置を模擬した試験体による総合的な事故現象の把握</p>	<p>・漏えい初期のナトリウム落下状況は液滴状、ダクトで跳ね返り広範囲に飛散。 ・ダクト温度は600℃～700℃で推移。 ・グレーチングの最高温度は1000℃程度。 ・床ライナ温度は800℃～850℃で推移。 (一時的に最高920℃、但しライナ損傷以前) ・漏えい後の調査で、「もんじゅ」と異なった現象の発生。 1) 床ライナに破損孔の発生。溶融塩型腐食が支配的。 2) 黒いナトリウム化合物(水酸化ナトリウムが主成分)が広く分布して堆積。 3) コンクリートより多量の水分発生。</p>

実験の概要及び実験結果(2/2)

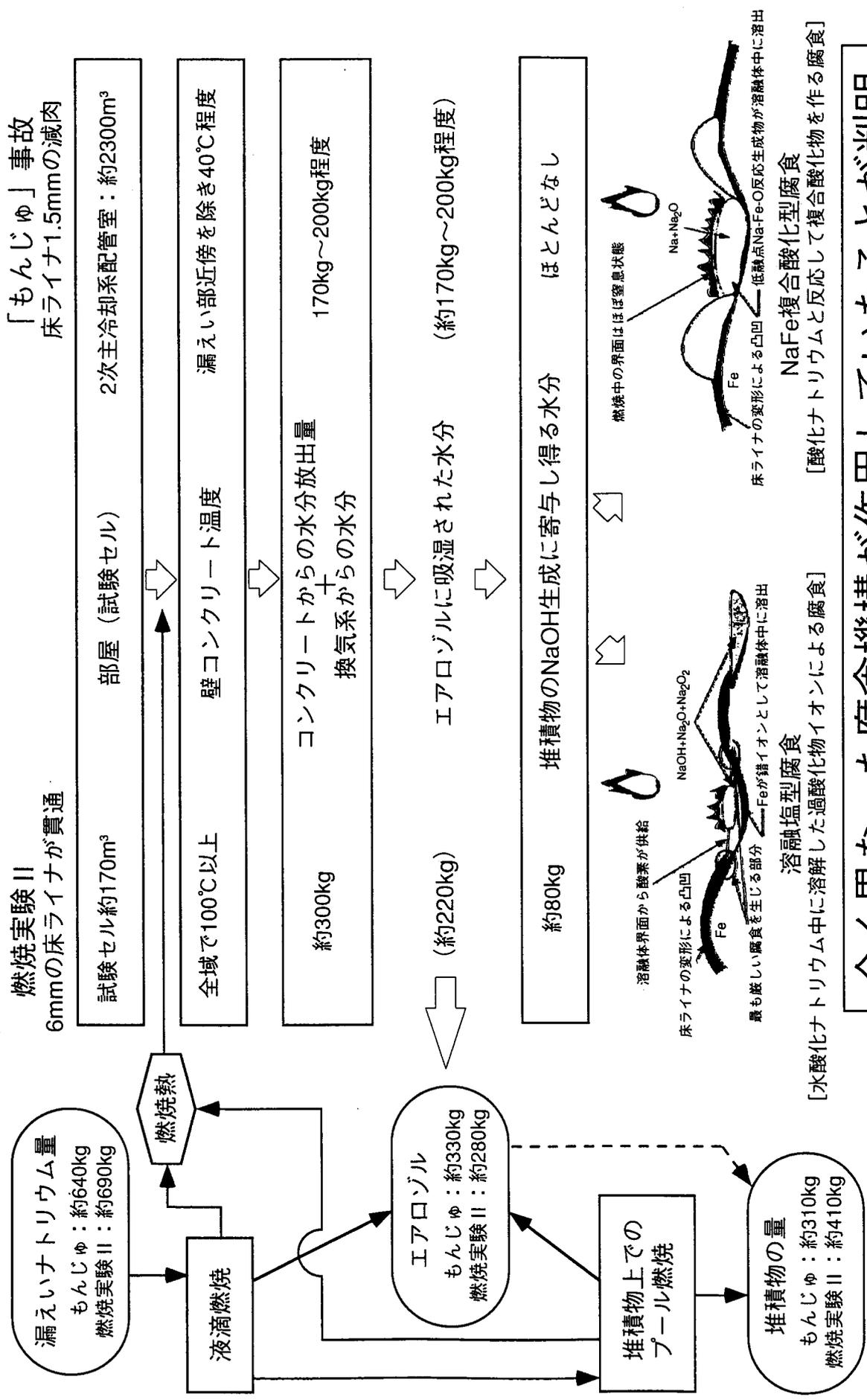
もんじゅ・燃焼実験Ⅰと燃焼実験Ⅱの材料分析結果

	床ライナ材料表面の腐食形態	グレーチング減肉の様相	床ライナ堆積物-材料界面のEPMA分析	X線解析
もんじゅ・燃焼実験Ⅰ	<p>もんじゅ</p>  <p>燃焼実験Ⅰ</p>  <p>選択的な腐食は認められず</p>	<p>もんじゅ</p>  <p>燃焼実験Ⅰ</p>  <p>上部から減肉した形状</p>	<p>ナトリウム</p>  <p>燃焼実験Ⅰで NaFe複合酸化相を検出</p>	<p>もんじゅ</p> <p>分析時期が遅く付着物の炭酸化がほぼ終わった頃実施したため、比較対象外</p> <p>燃焼実験Ⅰ ダクト、ダクト堆積物、グレーチング付着物から Na₄FeO₃検出</p>
燃焼実験Ⅱ	 <p>選択的な腐食が認められた</p>	 <p>下部で減肉した形状</p>	 <p>Fe-O相を検出</p>	<p>(1) 床堆積物中からα-Fe検出 (2) ダクト、床ライナの付着物からNaFeO₂検出。特に床ライナに接する堆積物からはNaFeO₂、Na₃Fe₅O₉等のNaFe複合酸化物検出。</p>

↑
一様な腐食・酸素ポテンシャル低
Na₂O 多量

↑
選択的な腐食・酸素ポテンシャル高
Na₂O 少量

床ライナ損傷に関するナトリウム漏えい燃焼実験IIと「もんじゅ」事故の比較



全く異なった腐食機構が作用していたことが判明

7. 安全総点検

安全総点検の項目

ナトリウム漏えい関連設備を中心とした点検

- ・ 流力振動に対する健全性点検
- ・ ナトリウム内包壁の健全性点検
- ・ 漏えい早期検出、拡大防止及び影響緩和に関する点検

「もんじゅ」設備の設計から運用に至るまでの点検

- ・ 「もんじゅ」の原子炉施設を点検範囲とし、設計思想に遡って設計における要求事項の整理
- ・ 先行例の事故・故障を含め最新の知見に基づき、詳細設計から運用に至るまで設計要求事項の適切な反映の点検
- ・ 問題点の摘出と改善点の策定

運転手順書等の点検

- ・ 原子炉施設保安規定及び関連手順書類について権限、指揮命令等の内容の適切性等の点検
- ・ 事故対策規定及び関連規則類について通報連絡等の明確化、円滑化等の点検
- ・ 運転手順書類の作成の基本的考え方及び全体構成等の点検並びに教育訓練内容の点検

研究開発成果、技術情報の反映の点検

- ・ 高速増殖炉に係る研究開発の成果、常陽の運転経験
- ・ 国内プラントの運転経験
- ・ 「もんじゅ」の試運転経験、技術情報等

品質保証体系・活動の点検

- ・ 設備の設計、製作等に係る品質保証活動
- ・ 運転手順書等作成・改訂に関する審査・承認の体制
- ・ 試運転時の運転体制
- ・ 教育訓練体系及び最新技術情報等の反映に係る実施体制

8. 安全性向上のための課題

安全審査における解析との比較

安全審査段階では最大規模のナトリウム漏えいを仮定して部屋内の圧力上昇に着目した解析評価を行っており、局所的に温度が著しく高くなった今回の漏えい事故とは異なる点がありました。

「もんじゅ」の原子炉設置許可申請書の「2次冷却材漏えい事故」での安全評価の流れ

炉心は損傷に至らず、十分冷却が可能

- 炉心冷却能力の確認
- 建物・構築物の健全性確認
 - ・室雰囲気の内圧、温度
 - ・床ライナ温度
 - ・コンクリート温度

周辺公衆への放射線被ばくを与えない

- 放射線被ばくのリスクを与えるような放射性物質が内包されていない。

「もんじゅ」事故

漏えい率、室雰囲気圧力変化等が小さかったため

- 除熱能力の低下に対して炉心冷却能力が確保された。
- 隣接システムの崩壊熱除去機能に対し系統分離が維持された。

○床ライナ温度が650～750℃。

局部的な板厚減少。

- 安全解析における評価結果と異なっていた。

安全性向上のための課題

- 中小規模でのナトリウム漏えい燃焼挙動の評価
- 腐食減肉を考慮した構造物の健全性

ナトリウム漏えい燃焼実験II

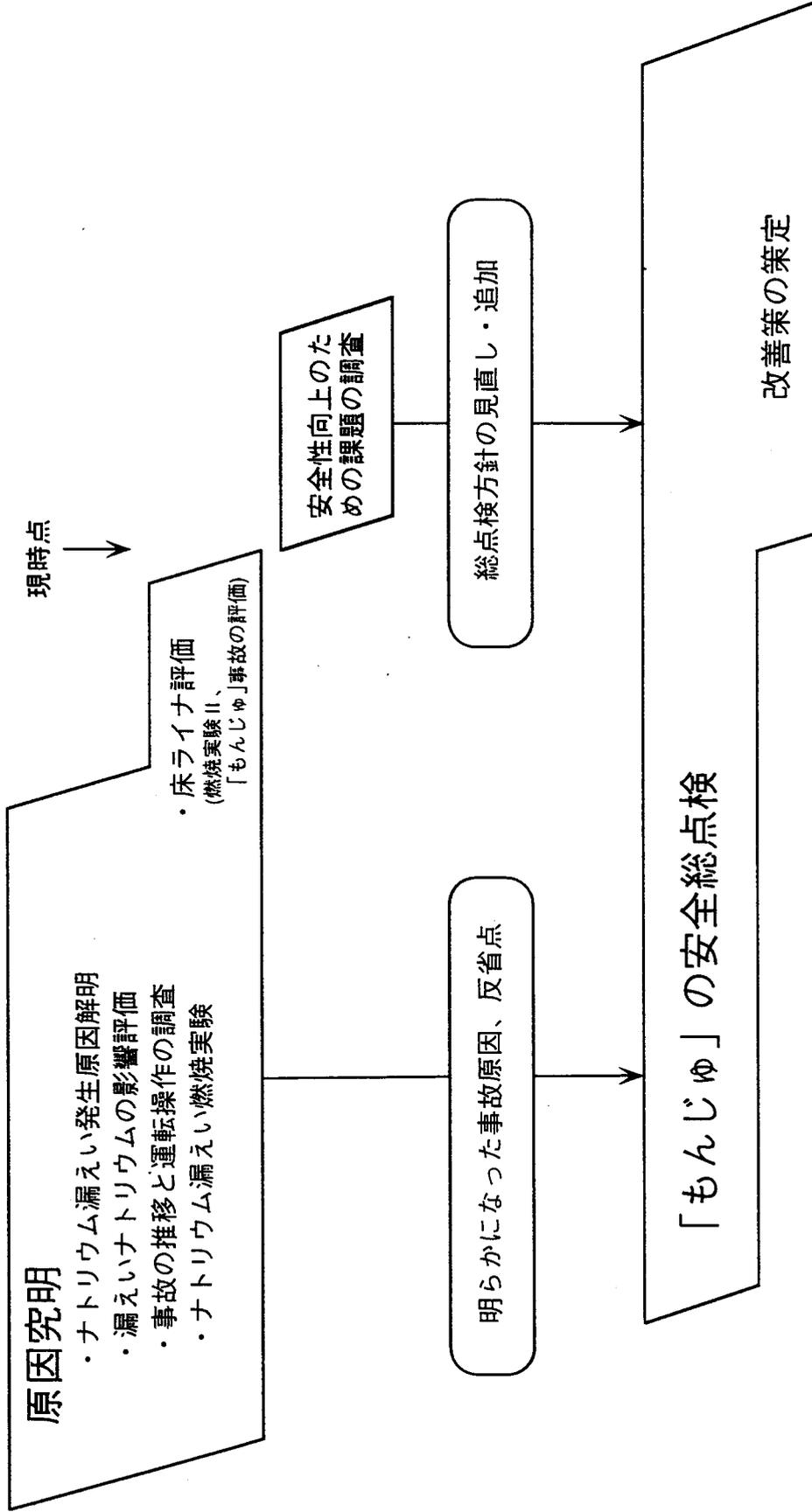
- 漏えい率等は「もんじゅ」事故と同じとしたが
- 床ライナに穴が開く損傷

今回の事故の反省と今後取り組むべき課題

温度計の破損	↑	2次系温度計については、流力振動を考慮したものに取替、ナトリウムを内包する機器の健全性について再評価
漏えい形態・漏えい量	↑	構造上考慮すべき漏えい形態・経路と漏えい規模を適切に設定し、漏えい検出と拡大防止に配慮した対策の検討
床ライナ	↑	中小規模でのナトリウム漏えい燃焼挙動を含めた評価・検討を踏まえた対応
原子炉停止	↑	漏えいの有無・確認方法の明確化及び即時手動トリップの確実な実施と、運転手順書での的的な記述
ナトリウムドレン	↑	早期にドレン等ができるよう設備・手順の改善
換気系停止	↑	漏えい状況に応じて速やかに換気系を停止できるように、設備、運転手順を改善
エアロゾル拡散	↑	エアロゾル拡散防止のための換気系等の設備、運転手順の改善
周辺機器への影響	↑	漏えいナトリウム飛散防止策等の対応

2次系ナトリウム漏えい事故

9. 原因究明と安全総点検



9. 原因究明と安全総点検

