

40%出力試験中における  
2次主冷却系ナトリウム漏えい事故について  
(第5報報告書)の概要

1997年3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 Reacter and Nuclear Fuel Developmemt  
Cooperation 9-13, 1-chome,Akasaka,Minato-ku,Tokyo 107, Japan

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

40%出力試験中における  
2次主冷却系ナトリウム漏えい事故について  
(第5報報告書)の概要

平成9年3月21日  
動力炉・核燃料開発事業団  
高速増殖炉もんじゅ建設所

昨年9月の報告以降、

- ①当該温度計のみが破損した原因に関する追加調査
- ②「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故（以下、「もんじゅ」事故と略す。）に伴うエアロゾル等の機器への影響
- ③「もんじゅ」事故における漏えい燃焼挙動及び床ライナ等への影響
- ④「もんじゅ」事故及びナトリウム漏えい燃焼実験で発生した床ライナの損傷原因等について調査を進めてきたが、これらの調査結果がまとまったので報告する。

「もんじゅ」事故の原因究明の調査作業の流れを図1に、原因究明調査の概要を下記に示す。

#### 第1編 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故に係る原因究明調査

##### 1. ナトリウム漏えい発生原因の調査

###### (1) 破損温度計の特殊性に関する検討

当該温度計がナトリウムの流れに伴う振動により、さや段付部において高サイクル疲労で破損したが、その原因是2次系温度計の設計が不適切であったためと判明しており、また他の2次系温度計に異常が認められなかったことから、温度計の流力振動に影響を与える因子等について検討し、熱電対の曲がりが影響しているとの推定をこれまでに報告した。

この破損温度計の特殊性についてさらに継続調査として、熱電対の曲がりによる減衰定数データの拡充、水流動試験での摺動痕パターンの整理、破損温度計の熱電対の3次元曲がり計測等を実施した。その結果、破損温度計では温度計さやに挿入されている熱電対がさや段付部で曲がった状態であったことから、さやの振動減衰が小さくなり、破損したものと判断した。

## 2. 「もんじゅ」事故に伴う機器等への影響調査

### (1) 破損温度計さや細管部（ロストパーツ）の影響評価

今回の事故では、温度計さや管が段付部から折れ、折れたさや細管（ロストパート）は、過熱器で発見し回収した。

回収されたロストパート外表面の傷の状態から衝突速度等を評価し、系統内機器との衝突箇所推定と影響評価を行い、各機器の健全性に対しては全く問題ないことを確認した。

### (2) ナトリウム化合物（エアロゾル）の機器への影響

エアロゾルの付着した配管、機械、制御盤等については、全機器を清掃し、外観点検、電気点検を実施した。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た。これら点検の結果と構造材料にエアロゾルを付着させて実施した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た。

## 3. 「もんじゅ」事故における漏えいナトリウム燃焼挙動

### 及び床ライナ等への影響調査

#### (1) ナトリウム燃焼・エアロゾル拡散解析（図2、3参照）

「もんじゅ」事故に関する燃焼挙動について、中小規模のナトリウム漏えい燃焼を評価できるよう改良した1次元燃焼解析コード（ASSCOPS）を用いて、床ライナ、コンクリート、配管室等の温度挙動等を解析した。これらの解析結果と事故後の調査結果と総合的に評価すると、燃焼の発熱による影響及び漏えいナトリウムによる構造物への影響は漏えい直下近傍に限定されていたことが分かった。

「もんじゅ」事故時の配管室内の気流・温度分布の挙動変化を3次元熱流体解析コード（FLOW-3D）により解析した結果、給気ダクトからの気流は床面上を漏えい部に向かい、燃焼発熱により上昇し、天井部では逆に隣室方向に戻る循環流（対流）を形成する等の気流の流れを明らかにした。

「もんじゅ」事故時に発生したエアロゾルの拡散に関して各部屋の濃度、付着密度についてエアロゾル挙動解析コード（MAPHY-AEROSOL）により、計算を実施し、原子炉補助建物内のエアロゾル付着分布を精度よく再現することができた。また、ナトリウム漏えい検出器の信号変化も再現できた。

#### (2) 漏えいナトリウムの床ライナ等への影響

換気ダクト、グレーチングの欠損及び床ライナの肉厚減少の機構として推定された高温化学反応に関する試験及びナトリウム漏えい燃焼実験結果との比較調査を実施し、「もんじゅ」事故での材料の損傷はナトリウム・鉄（NaFe）複合酸化型腐食によるものと判断した。

床ライナの残留変形の傾向について、汎用非線形構造解析システム（FINAS）による詳細解析を実施し、事故における変形が精度よく評価できた。

#### 4. 「もんじゅ」事故に係る原因究明のまとめ

「もんじゅ」事故に係る原因究明調査結果をこれまでに報告した内容を含めてまとめた。

### 第II編 ナトリウム漏えい燃焼実験等を踏まえた安全性向上のための課題

#### 1. 床ライナ等損傷機構の解明

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、ナトリウム漏えい燃焼及び周辺機器の破損挙動の確認を行った。その結果、ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅰ（以下、燃焼実験Ⅰと略す。）は「もんじゅ」事故の前半をほぼ再現し、一方、燃焼実験Ⅱは床ライナが破損し、「もんじゅ」事故と異なる現象となった。

堆積物の化学分析、床ライナ等の金属組織観察、元素分析、材料及び付着物のX線回析等を行い、「もんじゅ」事故と燃焼実験Ⅱの腐食環境及び減肉機構の違いを評価した。また、ナトリウム燃焼解析結果及び加熱されたコンクリートからの湿分放出量測定結果等から腐食環境の重要因素である水酸化ナトリウム（NaOH）生成量に影響する余剰湿分量を評価した。さらに、腐食機構の化学熱力学的な検討も行った。

これらの結果、「もんじゅ」事故と燃焼実験Ⅰでは、燃焼期間中において湿分の量は少なく、床ライナ上の堆積物は殆どが酸化ナトリウム（ $\text{Na}_2\text{O}$ ）であり、NaOHは極めて少なかったことから、 $\text{Na}_2\text{O}$ と床ライナ鋼板（Fe）が高温で反応するNaFe複合酸化型腐食が生じ、一様な腐食形態となったことが判明した。一方、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等から燃焼に伴い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発生した。この水分により、床ライナ上の堆積物（Na、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}_2$ ）中のNaOHの割合が増加し溶融体となり、これに溶け込んだ過酸化ナトリウム（ $\text{Na}_2\text{O}_2$ ）が過酸化物イオン（ $\text{O}_2^{2-}$ ）となって床ライナ鋼板（Fe）を腐食させる溶融塩型腐食が主となって発生し、選択的な腐食形態となったことが判明した。このように、「もんじゅ」事故と燃焼実験Ⅱでは全く異なった腐食機構が作用していたことが判明した。さらに実験によりNaFe複合酸化型腐食と溶融塩型腐食の腐食速度を求め、溶融塩型腐食では腐食速度が約5倍程度大きいことが判明した。（図4参照）

## 2. 安全性向上のための課題

2次系ナトリウム漏えいに対する防止設備対策の充実とプラント運用方法の具体化に際して、これら対策・対応等の有効性を確認するために、以下の課題に取り組んでいく。

### (1) ナトリウム漏えい燃焼挙動に関する課題

従来の最大破損規模の想定を中心としたナトリウム漏えい燃焼挙動に加えて、中小規模のナトリウム漏えい燃焼挙動に関する検討を充実する。また、ナトリウム燃焼生成物（エアロゾル、堆積物）の化学組成に注目した検討も充実していく必要がある。

### (2) 床ライナ等の健全性に関する課題

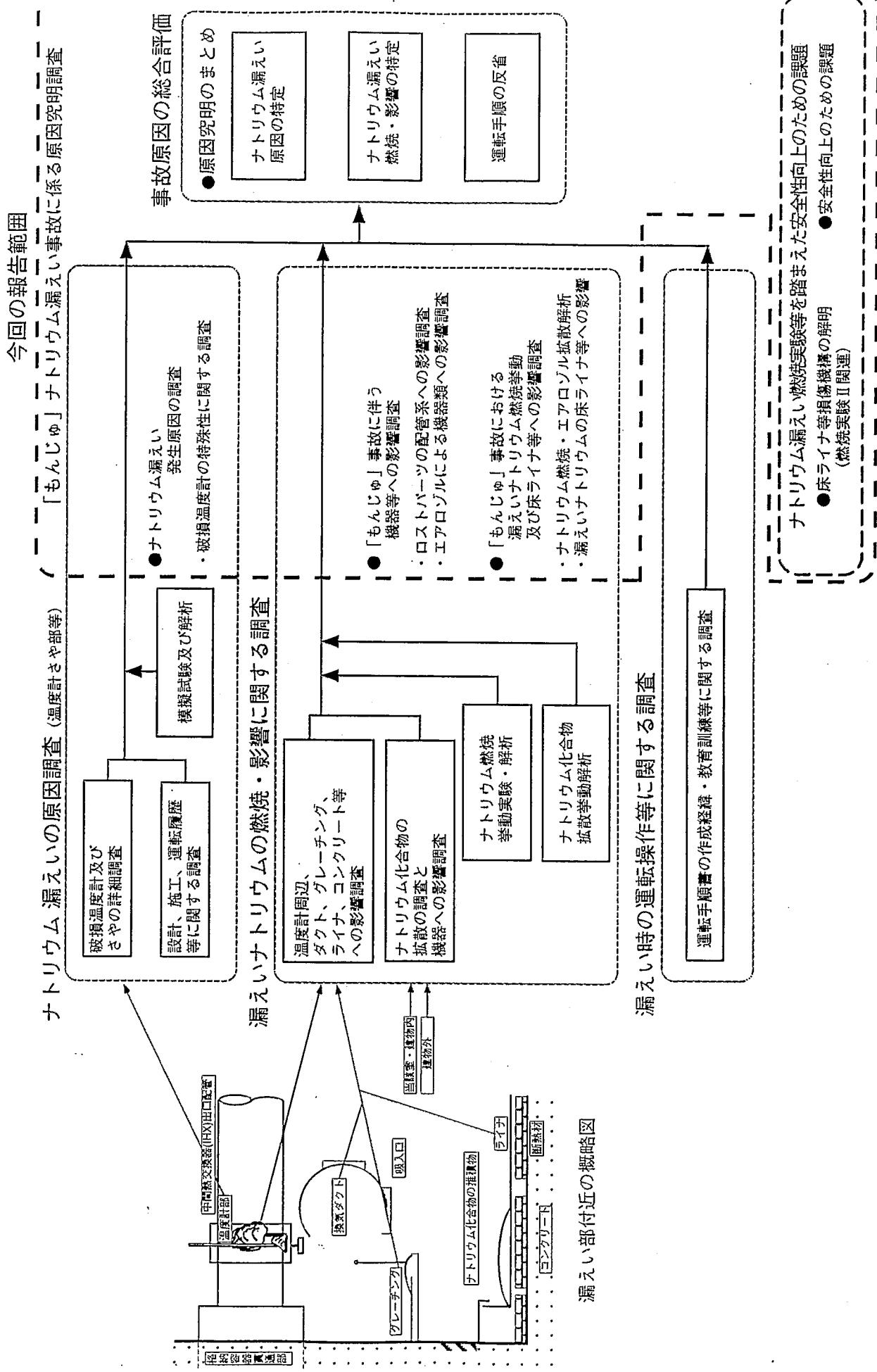
床ライナ全体の熱膨張に対する健全性確保だけでなく、中小漏えい時の局所的な床ライナ温度上昇に関する床ライナ健全性の検討、これに関連する材料データの取得・整備、ナトリウム燃焼生成物の腐食減肉に対する床ライナ等の健全性確保の判断基準を明確にしていく必要がある。

### (3) 安全評価に関する課題

従来の2次ナトリウム漏えい事故の安全評価は、室内雰囲気の温度上昇から生じる圧力上昇による建物・構造物の健全性喪失が系統分離機能への影響にとって最もクリティカルと考えられることから、ナトリウム漏えい規模を最大に想定し、最も圧力上昇が厳しくなる条件下で評価した。

今後、漏えい率、換気空調系の運転等を考慮し、床ライナ温度の上昇や腐食減肉挙動に着目し、床ライナ等の健全性が確保できることを確認する必要がある。

図1 原因究明調査の作業の流れ

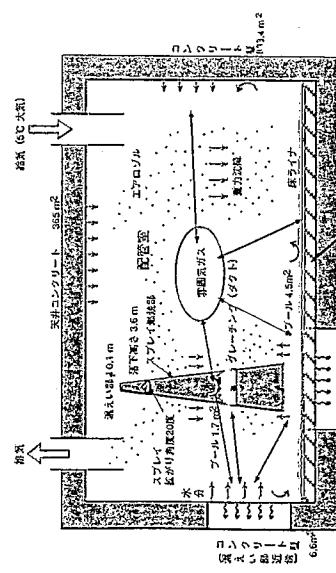


**ナトリウム燃焼拳動解析** (第 I 編4.1.1)

目的 : ナトリウム漏えい時のナトリウム燃焼拳動を把握し、構造材各部の温度等を評価する。

内容 : A-446室の2次主冷剤系ホース・ブレイク配管から床ライナまでのナトリウム漏下中ににおけるスプレイ燃焼配管から床ライナ及びグレードチャネル上でのブール燃焼時の各部燃度及び燃焼速度等を解析する。

解析コード: スプレイ・ブール燃焼解析コード ASSCOPPS



**ナトリウム燃焼拳動解析 解析モデル**

**床ライナの変形解析** (第 I 編4.2.2)

目的 : ナトリウム漏えい時の床ライナの変形拳動を把握する。

内容 : 漏えい部直下のナトリウム化合物が堆積した領域を中心にして、ASSCOPPSによる床ライナ温度の解析結果を入力条件として、ライナ支持構造物等の温度の時間変化とそれにともなう床ライナの変形拳動を解析する。

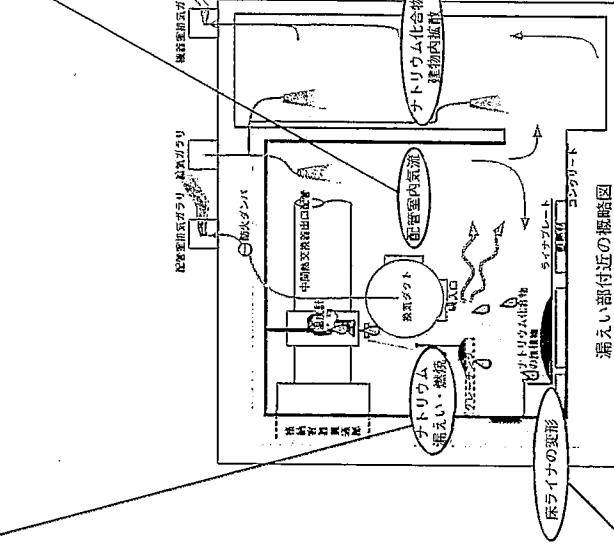
解析コード: 汎用非線形構造解析システム FINAS

**配管室気流解析** (第 I 編4.1.2)

目的 : 防火ダンバの閉止等換気系の運動状態の変化が、ナトリウムの燃焼拳動に及ぼす影響を明らかにする。

内容 : 配管室の燃焼にともなう氣流変化、温度変化、エアロゾル濃度変化を、換気系の運動状態の変化に応じて解析する。

使用コード: 3次元熱流体解析コード FLOW3D

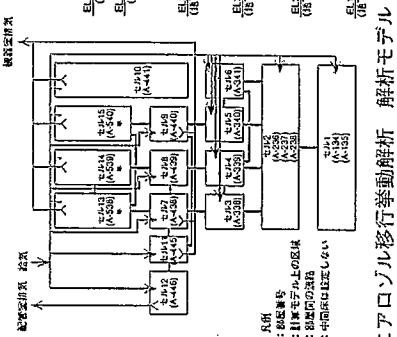


**配管室気流解析 解析メッシュ**  
**原子炉補助建物内のエアロゾル移行拳動解析 (第 I 編4.1.3)**

目的 : 換気系の運動状態の変化が、エアロゾル移行拳動に及ぼす影響を明らかにする。

内容 : ナトリウム漏えい時の補助建物内のエアロゾルの移行経路及び各部屋の漏度・沈降速度・付着量の時間的変化をエアロゾル拳動解析コードを用いて解析する。

解析コード: エアロゾル拳動解析コード MAPHY-AEROSOL



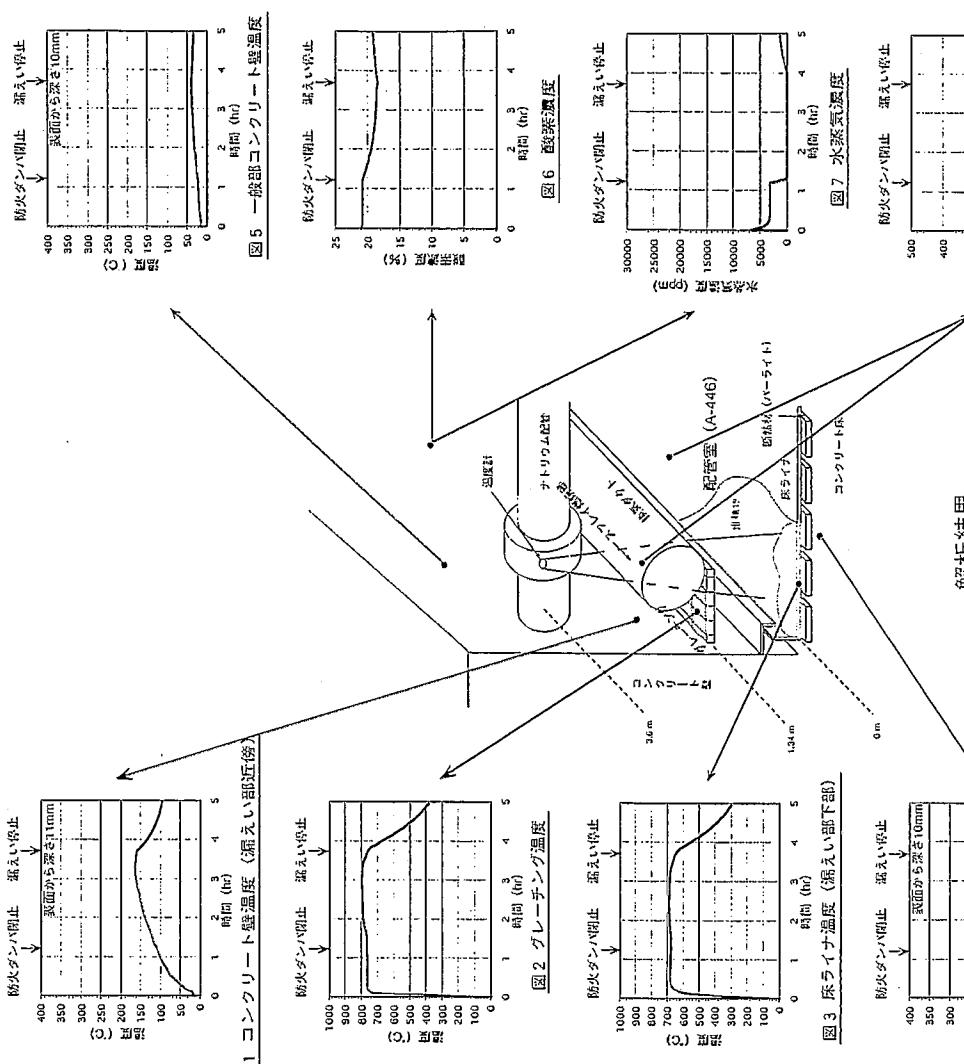
**図2 漏えいナトリウムの影響に係る解析の概要**

### 解析結果

- 漏えいナトリウムは、落下中に約20%、グレーチング等、床ライナ上で約80%が燃焼。
- 配管室全体及びスプレイ燃焼部の雰囲気（平均）温度の解析値は、それぞれ最高約70°C及び約110°C[図8]、液滴の火炎温度の解析値は1280°C～1600°C。雰囲気温度は、配管室の3次元気流解析による平均的温度とほぼ一致。
- 床ライナ及びグレーチングの平均温度の解析値は、それぞれ最高690°C及び800°Cであり[図2, 3]、金属組織鋼織による推定値（床ライナ650°C～750°C、グレーチング1000°C～1150°C）に比較すると、床ライナはほぼ一致。グレーチング温度の差異は、液滴付着によるナトリウム火炎の温度履歴が金属組織に局部的に残された結果と推定。

- コンクリート（表面から深さ約1mm）の平均温度（対象面積平均）の解析値は、床で最高140°C、漏えい部近傍の側壁で170°Cである[図1, 4, 5]、放出水分子は約10～40kg。コンクリート試料の熱分析による推定値は、床約200°C、壁400°C以下、放出水分子量約50kg。熱分析による推定値が大きいのは、対象面積の最も受熱が大きい所から採取した結果によるものと推定。
- 燃焼中の雰囲気の酸素濃度の低下は、殆んど生じない[図6]。これらは3次元の気流解析結果及び堆積物中の未燃焼金属ナトリウムが少い（0.2～2.4%）分析結果と一致。

- 燃焼中の雰囲気の水蒸気濃度は、極めて低いとする解析結果は[図7]、堆積物中のNaOH量は少く（表層部で約8%、中層、下層では検出限界以下）、配管室内付着エアロゾルの削除は事故直後入口部から始まるとする分析・調査結果と整合。



燃焼挙動、構造物の温度等の解析・評価結果は、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の分析・調査結果とほぼ一致。一点近似モデルの制約はあるものの、ASSCOPSの小規模ナトリウム漏えいに対する適用性を確認。

### 図3 漏えいナトリウムの影響評価（ナトリウム燃焼挙動解析）

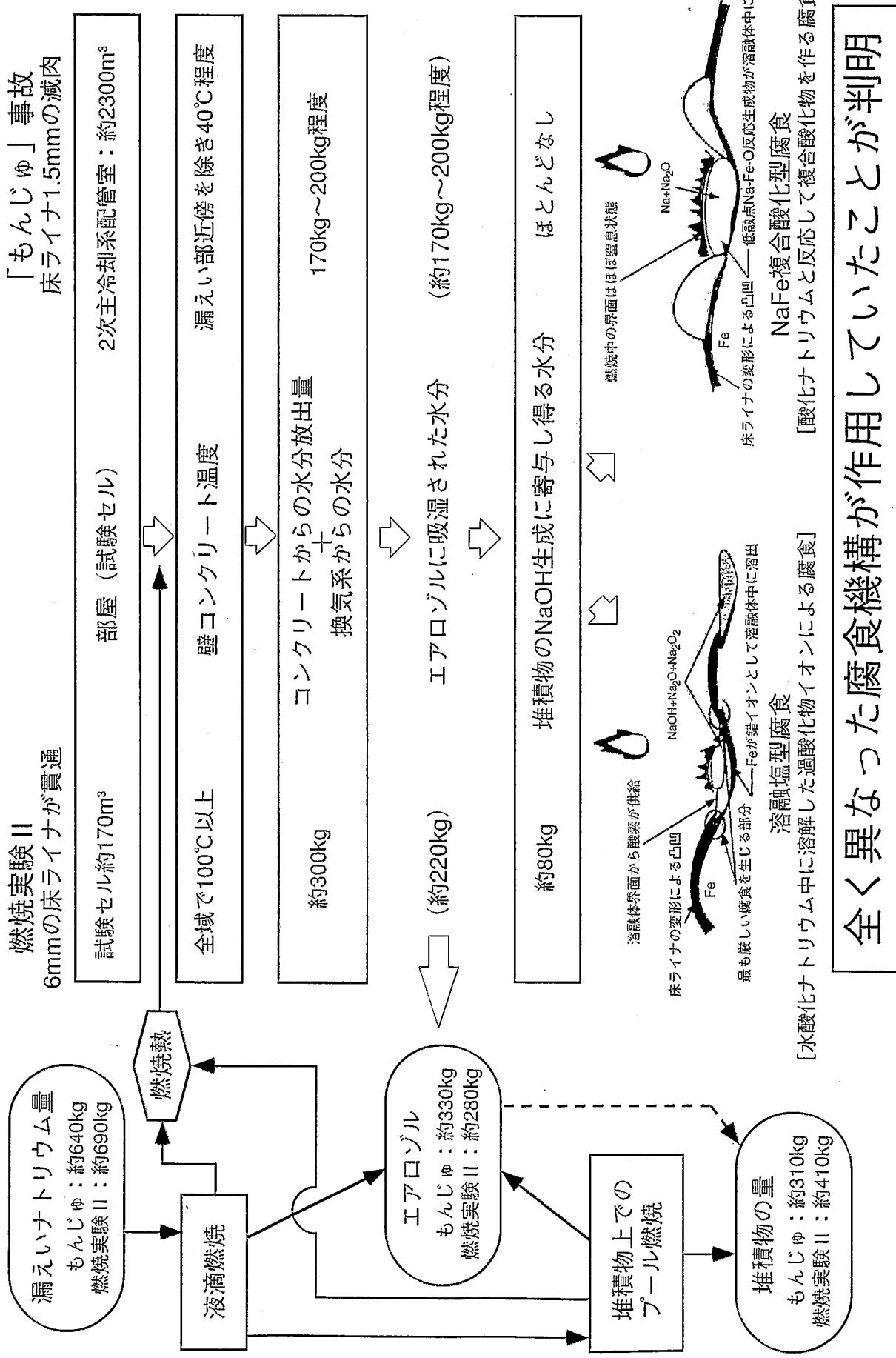


図4 床ライナ損傷に関するナトリウム漏えい燃焼実験IIと「もんじゅ」事故の比較

全く異なった腐食機構が作用していたことが判明