

であることから、固有振動数の違いによるものである。図4-21に示したように、き裂が停留する位置は温度に依存する。試験温度57°Cでは、固有振動数が200°Cよりも大きくなり、材料のき裂進展特性も異なるために、深さ5mmを超えて停留することになる。これは、解析でも確認することができる。

② 100%流量状態でのき裂停留後の進展と停留

上記のき裂停留位置(図4-17の○ラインに相当する位置)からは、40%流量条件ではき裂は停留したままであり進展しない。これは、解析結果と一致する。停留したき裂は、100%流量と40%流量の間の流量降下・上昇のスイープ試験で進展するが、図4-23に示すように、健全なきやの状態に比べて振動は小さくなっている。これは、試験その3でも確認されている。解析で推定した減衰挙動(変位応答線図が三角形から台形となる)が、水中疲労試験で確認されたことになる。

③ 40%流量状態でのき裂進展と破断

100%流量と40%流量の間の流量降下・上昇のスイープ試験を繰り返すと、40%流量でも振動するようになるがき裂進展までには至らない。これも、解析結果と一致する。

上流側からき裂が入った試験その1とその3の場合には、温度計きやが流れ方向に曲がるとき裂の開口変位が大きくなる。き裂進展により正味断面が減少すると剛性が低下し、流れ方向の定常的な抗力による塑性曲げ変形が生じやすくなり、これによりき裂の開口変位が大きくなり進展し始める。試験その1では、100%流量で折れ曲がり破断した。試験その3でも、100%流量で折れ曲がり始めたところで40%流量条件に切り換えたところ、40%流量状態でもき裂進展が生じて破断に至った。

試験その2では、き裂が下流側から進んだために、温度計きやが折れ曲がる方向はき裂を閉口させることになり、100%流量状態を続けてもき裂進展は生じなかった。

これらの試験から、上流側からき裂が入った場合には、き裂が深くなって剛性が下がると、定常的な抗力の影響で折れ曲がることがわかった。また、温度計きやが折れ曲がり始め、き裂の開口変位が大きくなれば、き裂進展は40%流量状態でも生じることが確認された。

4.3 まとめ

「もんじゅ」2次主冷却系ナトリウム漏洩事故の

原因究明の一環として、流力振動による温度計きやの破損の可能性について定量的に検討を実施した。検討の結果、当該温度計きや、対称渦放出を伴う抗力方向の流力振動による高サイクル疲労により破損したと推定される。また、運転履歴に基づく温度計きやのき裂発生・進展解析により、100%流量運転において発生・進展・停留したき裂が、40%流量運転で最終破断に至ったという破損過程の推定が得られた。推定した破損過程は、当該温度計きやの破面調査結果および水中疲労確認実験の結果とも整合していることが確認された。

5. 漏洩ナトリウムの挙動

「もんじゅ」2次系ナトリウム漏洩事故原因究明の一環として、漏洩ナトリウムやナトリウム化合物の挙動に関する調査を行った。これは、当該温度計からのナトリウムの漏洩速度や漏洩形態を明らかにするとともに、漏洩したナトリウムの燃焼が周囲の機器構造物(換気空調ダクト等)に与えた影響を評価する目的で実施したものである。

このため、ナトリウム漏洩を起こした温度計と同じ構造のモデルを製作し、まず水およびナトリウムを用いた実験により、漏洩速度等の確認を行った。さらにその後、実験装置内に模擬空調ダクト、作業用足場材のグレーチング、床ライナ等を事故現場と同様に配置してナトリウム漏洩燃焼実験を実施した。これらの試験の後、主な構造物について材料検査を行い、燃焼ナトリウムと機器構造物との反応について調べた。表5-1に各実験の条件を記す。

5.1 ナトリウムの燃焼挙動

(1) 水による漏洩速度・漏洩形態の確認実験

本実験は温度計ウェル細管段付部破損時におけるナトリウム漏洩速度および漏洩形態を水流動により確認したもので、「もんじゅ」当該温度計を模擬した試験体コネクタ部からの漏出水を計量して漏洩速度を求め、圧力損失係数を求めた。実験のナトリウムに関するレイノルズ数を包絡するため、広い範囲で圧力をパラメータとした。

ウェル細管段付部での最大流速ベースを基準とした温度計内管路全体の圧力損失係数とレイノルズ数の関係を図5-1に示す。同図には実験装置の異なる2つの水試験結果が示されているが、有意な差は見られない。この結果、実験で対象とするレイノルズ数の範囲では圧力損失係数は2.16でほぼ一定となり、さらにこの圧力損失係数を用いて「もんじゅ」当該部でのナトリウム漏洩速度を算

表5-1 各実験条件の比較

条件	もんじゅ	Naによる漏洩速度、漏洩形態の確認実験	ナトリウム漏洩燃焼実験-I	ナトリウム漏洩燃焼実験-II
装置	—	SOFT-1	調整容器 SOLFA-2	コンクリート矩形セル SOLFA-1
ナトリウム温度	約480°C*	478~483°C	482~479°C	481~477°C
漏洩時間	約3時間40分*	10分22秒	1時間31分	3時間42分
漏洩Na量	640±42kg*	31.8kg	241kg	690kg
漏洩速度	約50~40g/sec*	56±2g/sec	44g/sec	54~40g/sec
構築性	—	・温度計内部構造は厳密構築 ・下部構造物は無し	・温度計内部は簡略構造 ・ダクト、グレーチング等配置	・温度計内部は簡略構造 ・床、壁コンクリートも構築

* 取捨等の評価による推定値

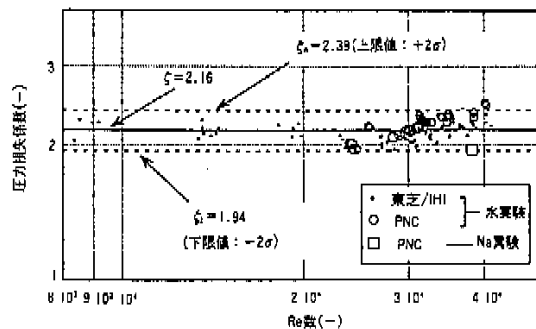


図5-1 Re数と圧力損失係数の関係

出した結果、約50g/secという値が得られた。

(2) ナトリウムによる漏洩速度・漏洩形態の確認実験

1) 実験目的

この実験では、「もんじゅ」の当該温度計と同じ構造・寸法の試験体を製作してナトリウムを漏洩させ、温度計からのナトリウム漏洩速度と漏洩形態の確認を行った。また、ナトリウム燃焼による温度計周辺の配管保温構造等への熱的影響や、温度計の信号履歴から温度計内部のナトリウム漏洩経路とその時間履歴についても合わせて明らかにすることとした。

2) 実験結果

第1回実験では漏洩速度が予想値より小さな値となったが、試験後の検討からナトリウム中の不純物等の影響で温度計内部の流路が狭まったものと推定された。このため、第2回実験で

は、ナトリウムの純度管理の改善を行った。これらの実験から以下の結果が明らかとなった。

ナトリウム加熱タンク内の液位計およびナトリウム供給配管に設置した電磁流量計の履歴を図5-2に示す。ナトリウム漏洩速度算出には液位計を用いた。前半の低流量は、信号線の被覆材等がナトリウムと反応して流路を塞ぎかけたため、後半の56g/secが漏洩速度として信頼性のある値と考えられる。さらにこの漏洩速度を「もんじゅ」条件に補正換算すると、53±2g/secであった。これにより、もんじゅ事故時のオーバーフロータンク液位変化等のプラントデータ、温度計内部の漏洩流路構造、および上記水試験結果に基づいて推定された漏洩速度である約50g/secの妥当性が確認できた。本ナトリウム実験から算出した圧力損失係数の値を図5-1の水試験の結果に重ね合わせると、両方の結果はデータのばらつきの範囲で一致することが分かる。

ビデオカメラによる観察によれば、ナトリウム漏洩形態は、初期のフレキシブル管が温度計端子部に接続されている段階では液滴の飛散が見られるものの、亜鉛合金製のふくろナットの破損によりフレキシブル管が端子部からはずれた(本実験では漏洩開始後17秒)後は、ナトリウムがフレキシブル管内外を伝って最下端部付近から連続的に滴下する形態が主流となることが分かった。

温度計の熱電対信号を図5-3に示すが、もんじゅの当該温度ときわめて良く似た挙動が得られ、ナトリウムの流出に従って温接点の位置が、温度計先端からコネクタ内の端子接続部、

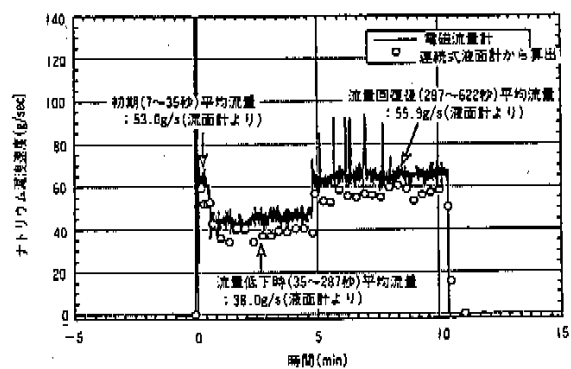
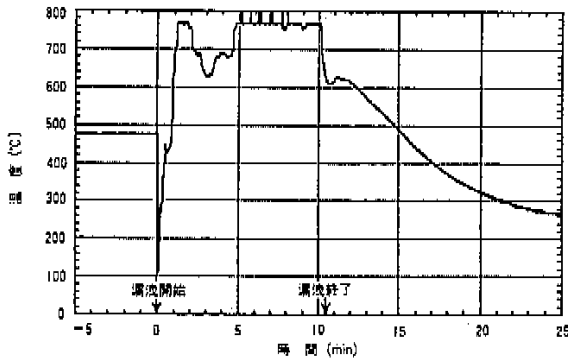
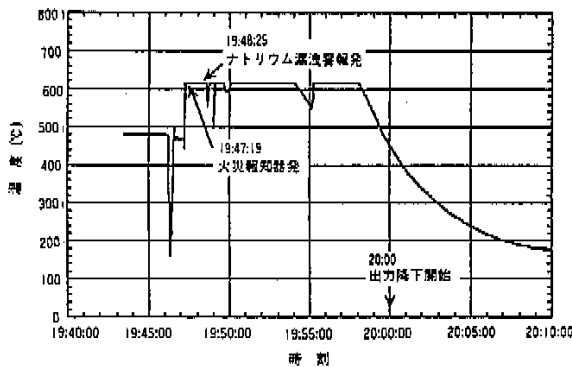


図5-2 ナトリウム漏洩速度(液面計および電磁流量計)



(a) 模擬温度計出力(ナトリウムによる漏洩速度、漏洩形態の確認実験)



(b) もんじゅ IHX 2次側出口(Cループ)ナトリウム温度計出力

図 5-3 当該温度計出力履歴の比較

さらにはフレキシブル管内の補償導線部と次第に移動していくことにより説明できることが確認できた。(オーバースケール部のカットされている最高温度が両者で異なるのは、データ収録上の処理の違いによるものである。)

(3) ナトリウム漏洩燃焼実験-I

(以下、実験-I)

1) 実験の目的

(1)と(2)で漏洩速度が確認できたことから、本実験では、漏洩ナトリウムが換気空調ダクト、グレーチングに落下して飛散する際のナトリウム漏洩燃焼挙動と換気空調ダクト、グレーチングの破損挙動、床ライナを模擬した受け皿の受ける影響、および堆積物やエアロゾルの生成量とその化学組成を明らかにすることを目的として実施した。実験装置は大規模ナトリウム漏洩燃焼試験施設の鋼製円筒容器 (SOLFA-2; 図 5-4 参照) を用いた。

2) 実験経過

実験では、「もんじゅ」温度計と周囲の保温構造を部分的に模擬した漏洩部試験体から、約 480°C のナトリウムを約 1 時間半(当初の計画では約 4 時間であったが、排煙処理装置内部へのエアロゾル付着による排気流量の低下が起こったため、実験を早めに終了)にわたって漏洩さ

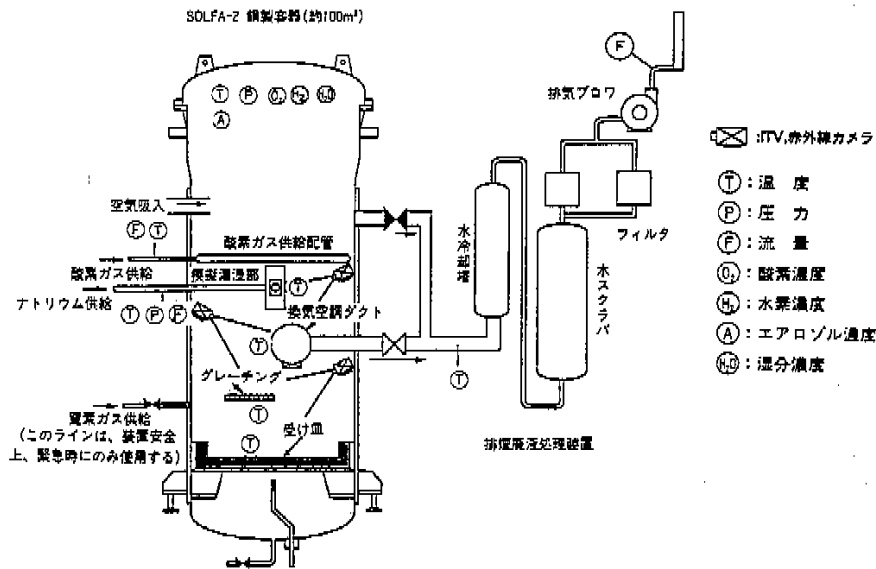


図 5-4 ナトリウム漏洩燃焼実験-I 用 SOLFA-2 装置

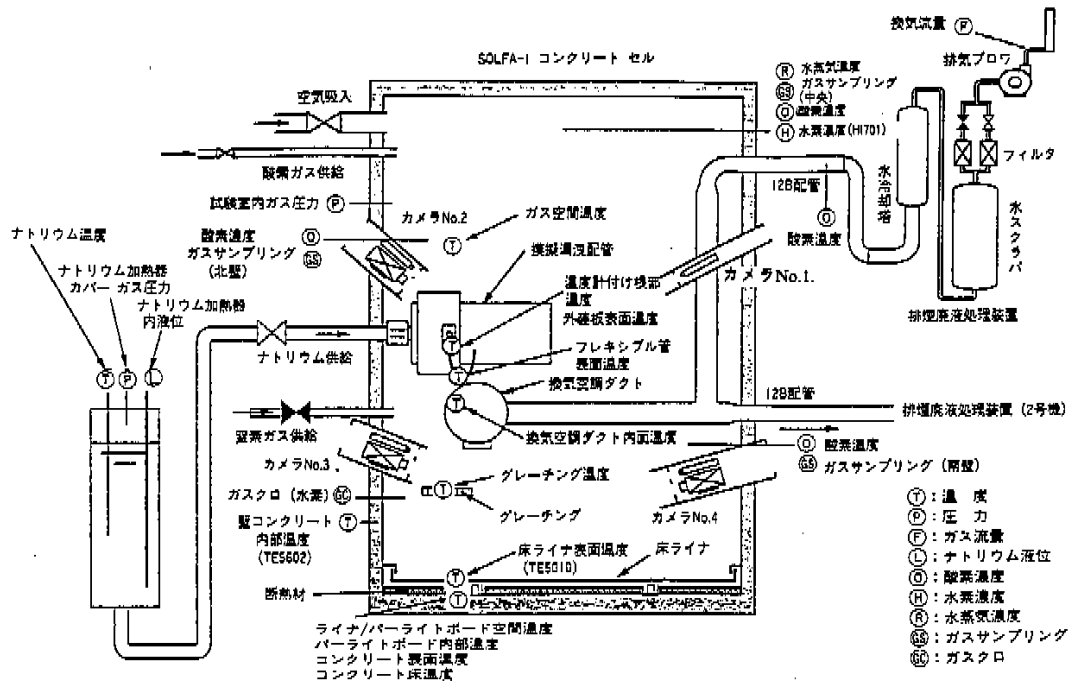


図 5-5 ナトリウム漏洩燃焼実験-II 用 SOLFA-1 装置

せた。平均漏洩速度は 44g/sec、総漏洩ナトリウム量は241kgであった。

3) 実験結果 (構造物の受けた影響に関しては「5.2 機器構造物との反応」に記述)

この実験から得られた主な結果は次のとおり。

CCD カメラと赤外線カメラの映像から、漏洩開始直後に見られたフレキシブル管からの流線状の飛散の後、フレキシブル管から滴下するナトリウムが、ダクトの上で跳ね返ってさらに広範囲の液滴状燃焼になる様子が観察された。

実験中換気空調ダクトの温度は、約 600℃～約700℃の範囲であった。グレーチングの温度は約650℃～約940℃の間を上下しながら推移し、約80分以降はゆっくりと下降した。

模擬漏洩部直下近傍の受け皿の温度は、実験開始後約10～20分で約700℃に達し、その後は約700℃～約800℃で推移した。

容器扉の開放後の観察で、漏洩点下部にナトリウム化合物が厚く堆積し、装置内部全体にエアロゾルが付着していることが認められた。実験装置各部から回収された堆積物およびエアロゾルの総量は約240kgで、うち約70%が受け皿上であった。ナトリウムエアロゾルの沈降物に付

着する部分の化学組成は過酸化ナトリウムが約45%～70%を占めていた。一方受け皿上の堆積物は酸化ナトリウムと過酸化ナトリウムが主成分だが、下部ほど酸化ナトリウムの割合が高い傾向が見られた。受け皿の堆積物の最下層などから、鉄とナトリウムの複合酸化物である Na₂FeO₄が検出された。

(4) ナトリウム漏洩燃焼実験-II

(以下、実験-II)

1) 実験目的

実験-IIは、実験-Iの項目にさらに床ライナや壁や床コンクリート構造物等周辺設備への影響確認を加えて、ナトリウム燃焼挙動の総合的な確認実験とした。このため、大規模ナトリウム漏洩燃焼試験施設内のコンクリート製矩形セル (SOLFA-1: 図 5-5 参照) 内に、実寸大の模擬漏洩配管、換気空調ダクト、グレーチング、および床ライナを「もんじゅ」と同様に配置した。また実験-Iにおいて途中で実験を終了する結果となったことから、排煙系内部の狭隙部を無くすなど閉塞対策を施して実施した。

2) 実験経過

実験では、温度計と保温構造を模擬した試験体から、約3時間42分にわたって約480℃のナト

リウムを漏洩させた。漏洩速度は54g/sec-40g/sec (事故時のプラント状態変化に応じた漏洩速度の低下を模擬するため、途中でナトリウム加熱器カバーガス圧力を低下させた)、総漏洩ナトリウム量は690kgであった。

3) 実験時の測定結果の概要

① 床ライナの状況

模擬漏洩部直下近傍のライナ裏面温度は、温度計により多少ばらつきがあるが、実験開始後約10分で約800℃に達し、その後800-920℃で推移した。しかし約3時間20分に急上昇し1000℃を超えた(図5-6参照)。床ライナ下部構造物内部の温度も、実験開始後約3時間20分に大きく上昇し約1000℃に達した。これらの床ライナ下側での1000℃を超える温度は、実験後当該箇所まで床ライナが破損していたことが確認されたことから、ナトリウムがライナ下部の湿分や断熱材等と反応した際の発熱によるものと考えられる。

② エアロゾル付着状況とナトリウム等の堆積状況

装置内部の目視観察結果から、装置内部の全

体にエアロゾルが付着している状況が確認されたが、「もんじゅ」や実験-Iと比較してエアロゾルの付着量は極めて少なく、また構造物に付着したエアロゾルも実験後12時間程度で潮解して減量していく様子がカメラ映像から観察された。

床ライナ上の堆積物は、「もんじゅ」や実験-Iの場合のように、漏洩点直下に白色のナトリウム化合物(主成分はNa₂O等)が盛り上がっていた状況とは明らかに異なっており、全体的に薄く広がっていた。また実験終了直後には液体状の黒色の化合物(実験後の分析からNaOHが主成分と考えられる)がライナ破損部周辺の広い範囲に観察されたが、黒色域は時間経過とともに縮小し、6時間程度でほとんどなくなった。また実験装置の扉を開放した後の観察では、全床ライナ面の約2/3の広い領域に最高約50mmの厚さのナトリウム化合物が堆積していることが分かった。

③ コンクリート温度

側部コンクリート壁温度(内面からの深さ15mm)は、実験開始後約25分で100℃まで上昇し、その後実験終了まで緩やかに上昇し最高約280℃に達した(図5-7参照)。漏洩点近傍のコンクリート床温度(上面からの深さ15mm)は、実験開始後約50分で100℃まで上昇し、その後緩やかな上昇が続いていたが、3時間20分頃から急上昇し、実験終了約10分後に最高温度490℃に達した。

④ 実験容器内の水素および水蒸気濃度変化

実験装置内の水素濃度変化は、図5-8に示すとおり、実験開始から約2時間30分までは0.02%以下であったが、約3時間20分に一時的に最高約0.17%まで上昇した。この水素濃度上昇はラ

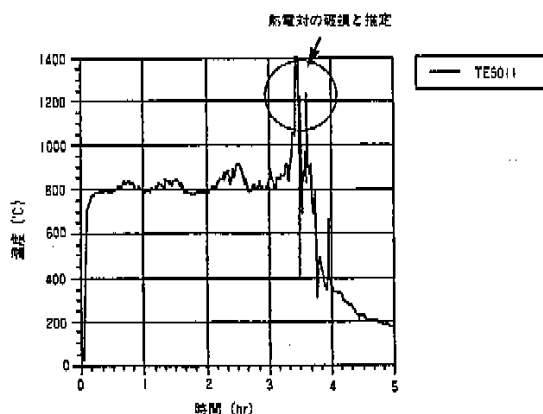
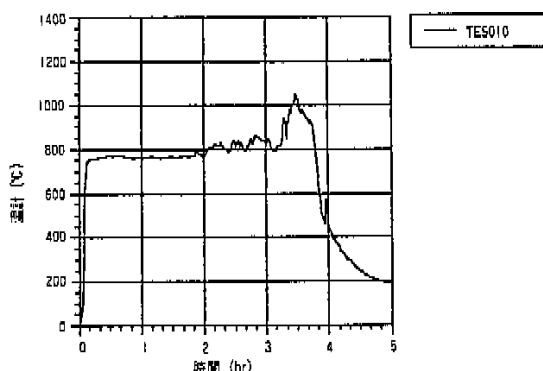


図5-6 床ライナ裏面温度(実験-II)

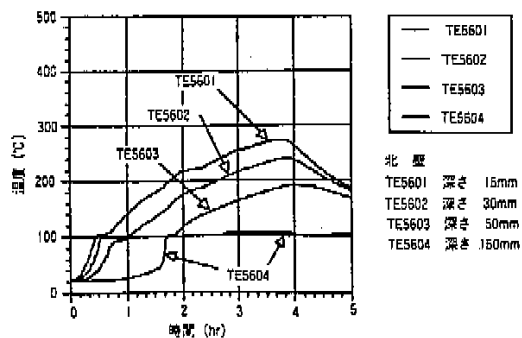


図5-7 壁コンクリート温度(実験-II)

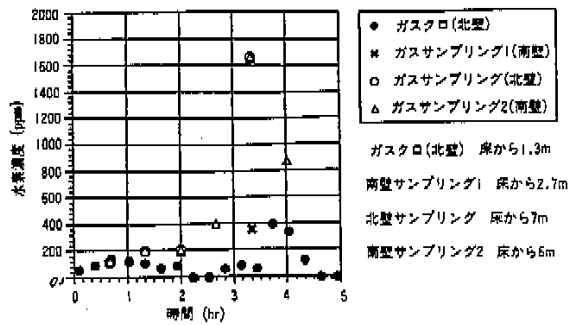


図 5-8 試験セル内水素濃度 (実験-II)

イナ損傷部から浸入したナトリウムとコンクリートからの湿分等との反応により発生した可能性が考えられる。ただし、0.17%程度の濃度では水素が蓄積して燃焼を起こすような状況ではなかった。

(5) ナトリウム漏洩燃焼解析^{1),2)}

1) ナトリウム漏洩燃焼実験-Iとの比較計算

実験-Iに対して、ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS を使用した事後評価を行った。ASSCOPSはナトリウムのスプレー燃焼およびプール燃焼の挙動、ならびに雰囲気温度等を1点近

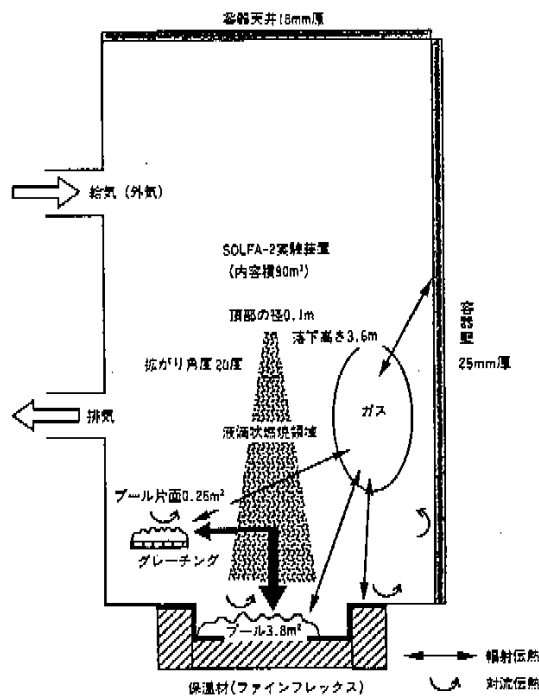


図 5-9 ナトリウム漏洩燃焼実験-Iの事後解析体系

似でモデル化する計算コードである。解析体系を図 5-9 に示す。これらの解析の結果、実験-I以前には不確かであった因子を以下のように設定することで、実験-Iでのナトリウム燃焼挙動とそれに伴う温度挙動を説明できることが示された。

- ① 落下ナトリウムの平均液滴径を4.6mmとする(落下中にナトリウムの約20%が燃焼する)。
 - ② 床と他の構造物へのナトリウム化合物の配分比を、およそ7:3とする(実験-Iの堆積物分析結果に基づき、本解析では75:25とした。「もんじゅ」事故現場の分析結果では68:32であり、ほぼ一致している)。
 - ③ 堆積物と雰囲気との接触面積(ナトリウム燃焼面積および雰囲気への除熱面積に相当)として、堆積物拡がり面積を1.6倍した値を用いる。
- 以上の計算条件を用いて実験-Iの推移を解析した結果を実験測定値と比較させて図 5-10 に示す。なお、実験データは対応する複数の測定値を細線で示す。

5.2 機器構造物との反応

現時点で、実験-IIの材料検査結果がまだ明らかになっていないことから、ここでは実験-Iの検査結果を中心に述べ、実験-IIについては観察結果に触れるに止める。実験-Iの各構造物のX線回折結果を表 5-2 に示した。また表中には、材料組織から推定した温度についても記載した。

(1) 空調ダクトおよびグレーチング

1) 空調ダクト

実験-Iでは、換気空調ダクト本体は損傷しておらず、また表面の亜鉛メッキ層が溶出した程度で有意な減肉も認められなかったが、ダクト下部吸い込み口のルーバグリルは左側がはずれて落下しかけている状態であった。実験-IのX線回折では、外表面にわずかながら Na-Fe-O 反応生成物が認められている。また、明らかに Na-Zn-O 反応物が認められた。

一方、実験-IIでは、北側壁(「もんじゅ」格納施設コンクリート遮蔽壁に相当)に面した側が半周以上にわたって開口していた。また、実験で模擬した4mのほぼ全長の外表面が赤く変色しており、「もんじゅ」での状況と比較すると開口部も変色域も実験-IIの方が大きかった。温度挙動から、空調ダクトの破損時期は1時間から2時間にかけてと発生したと考えられる。

2) グレーチング

実験-Iでは、「もんじゅ」で見られたような

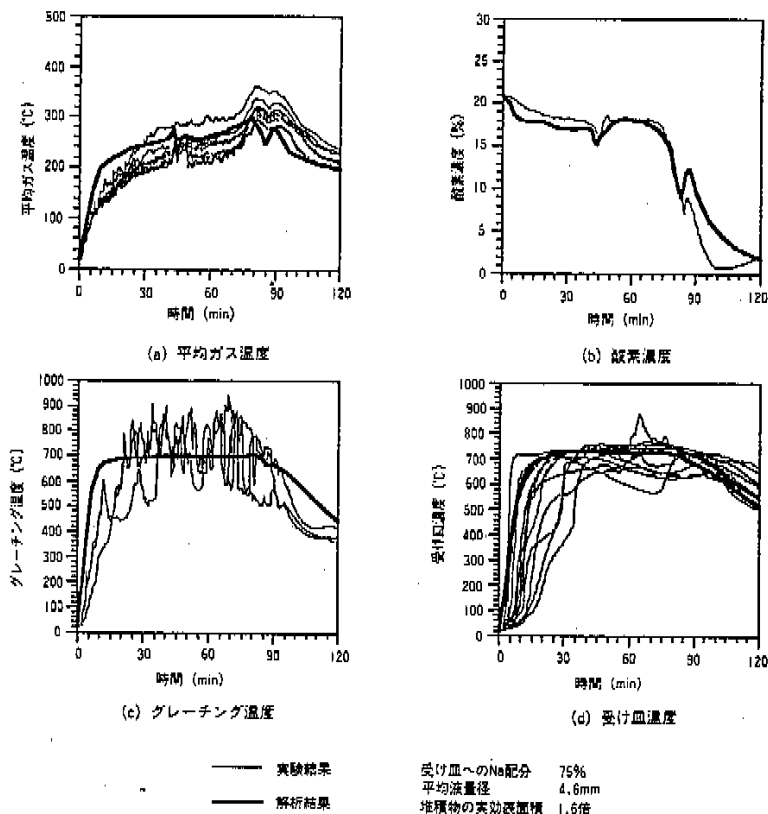


図 5-10 ナトリウム漏洩燃焼実験-I の事後解析結果

大きな欠損部は見られなかったが、堆積物を取り除いて観察すると、漏洩ナトリウムの落下流路に当たる箇所では1枚1枚のプレート材が減肉しており、局部的には欠損していることが認められた。このまま実験が継続すれば「もんじゅ」と同様の欠損が生じるという状況であった。実験-IのX線回折結果では、少なくとも2種類以上のNa-Fe-O反応生成物(Na_4FeO_3 、 Na_5FeO_3)が認められているが、その組成は「もんじゅ」材料分析の結果検出された NaFeO_2 や Na_2FeO_3 とは異なっていた。

一方、実験-IIでは、「もんじゅ」とほぼ同様の位置に広い欠損部が観察された。「もんじゅ」に比べると欠損部がグレーチングの長手方向に広がっているという違いが見られる。グレーチングの損傷開始は30分以降と推定される。

(2) コンクリート壁

コンクリート壁を模擬して行われたのは実験-IIのみである。漏洩部に最も近い実験セル北側コンクリート面(「もんじゅ」格納施設遮蔽壁に相当)に、「もんじゅ」よりも広い円状の変色域が観察された。

(3) 床ライナ

実験-Iでは、実験セル下部の受け皿に「もんじゅ」床ライナと同一材料(SM400B)で同じ板厚(6mm)の鋼板を使用したが、受け皿の下には直接断熱材を敷くなど下部構造は必ずしも実機構造とは一致していない。実験前後の受け皿の厚み測定結果から、模擬漏洩部直下を中心とした直径約1mの範囲で減肉が認められた。減肉量は最大約1mmであった。実験-Iの受け皿には、X線回折の結果グレーチングと同様明らかに2種類以上のNa-Fe-O反応生成物が認められている。

一方、実験-IIではライナの材料および板厚のほかライナ下部構造も実機構造を模擬した。実験-IIでは、実験後の堆積物を除去していない状態での目視観察により、模擬漏洩部直下近傍に大小6カ所の貫通孔が確認された。そのうち最も大きいものはほぼ漏洩点直下に当たる約22cm×28cmの穴である(その後堆積物を除去した状態で最も小さい貫通孔は、最大貫通孔の一部であることが判明)。

5.3 今後の予定

上述のとおり、実験-IIにおいて床ライナが破損

表5-2 ナトリウム漏洩燃焼試験-1における材料のX線分析結果一覧

試料採取部位	計測温度 (°C)	推定温度 (°C)	供試材	NaOH類**	Na ₂ O	Na ₂ O ₂	Na ₂ O ₂ +2H ₂ O	Na ₂ CO ₃ 類**	α-Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	FeO(OH)	NaFeO ₃ 類**	Na ₂ FeO ₄	Na ₂ FeO ₃	NaFeO ₂	Na ₂ FeO ₃	Na ₂ FeO ₄	Na ₂ FeO ₃	Na ₂ FeO ₄	ZnFe ₂ O ₄	Fe ₁₁ Zn ₁₀	Na ₂ ZnO ₄			
ダクト外板		<600	界面付着物類①	++	++			++			+			±		+								++			
			界面材料類①	++	++	±	++			++															++		
			表面付着物類②	++	++			±							+	±	+								++		
			界面材料類②	++	++			±			++					±									+		
ダクトルーバー	-	<500	界面付着物類①			+		++						±						+							
			界面付着物類②			+		++						±													
			界面材料類①																								
			界面材料類②												±												
グレーチング		PG6 表面700-900 裏面600-800	界面材料類					++	++			+															
			付着物表層①	++	+																						
			付着物内殻①	++	+																						
			付着物表層②	++	+																						
			付着物内殻②	++	+																						
			付着物内殻③	++	+																						
			板中央表層	++	+																						
			板中央内層	++	±																						
			界面付着物類	+	±			±		++			+	++		±											
			付着物算之層**		++								+	+													
受皿		表面750 裏面740	界面材料類**		+		±																				
			付着物表層	+	+			++																			
			付着物中間層																								
			付着物最下層	++	++	±																					

注) *1: NaOH, NaOH+H₂O
 *2: Na₂CO₃, Na₂CO₃+H₂O, Na₂CO₃+1.5H₂O, Na₂CO₃+3H₂O, Na₂CO₃+10H₂O
 *3: Fe₂O₃, Fe₃O₄+H₂O
 *4: NaFeO₃, NaFeO₂+H₂O
 *5: 炭酸類以外にCaCO₃および金属Naを検出
 *6: 炭酸類以外にZn(OH)₂を検出

する結果となった。「もんじゅ」事故室の当該床ライナは管干の減肉は見られたものの、開口、き裂等の損傷は生じていなかったことから、実験データの解析、評価や堆積物、床ライナ損傷部、コンクリート等の分析等を進め、実機条件と実験-IIの条件の違いの中で何が決定的な影響を与えたかを明らかにしていく予定である。

6. おわりに

動燃事業団は全社的に事故原因の究明に向け、本社、もんじゅ建設所および大洗工学センターを中心に原因究明作業を進め、本ナトリウム漏洩の原因は流力振動による高サイクル疲労により温度計さや管が破損したことによるものと判断した。また、漏洩ナトリウムの挙動については「もんじゅ」の現場状況に加え、大洗工学センターでのナトリウム漏洩試験を実施するなどして周辺の構造物等に及ぼす影響を確認している。

今後は、より詳細な試験等を通じて得られるナトリウム漏洩の挙動を基に、それらを詳細に分析評価し、設備および運転手法において万全の再発防止対策を実施することとしている。

4.1の参考文献

- 1) A. Yamaguchi; SPLASH Program for Three Dimensional Fluid Dynamics with Free Surface Boundaries,

Computational Mechanics, 18, pp12-23 (1996).

- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division I Appendix N, *Article N-1300 ASME*, (1995).
- 3) Roger King.; A Review of Vortex Shedding Research and Its Application, *Ocean Engng*, 4, pp141-172 (1977).
- 4) 機械工学便覧 A3編 力学・機械力学 (1986).

4.2.2の参考文献

- 1) 松岡、他：低合金鋼、ステンレス鋼、ニッケル合金、アルミニウム合金の疲労き裂伝ばの下限界特性とき裂開口挙動、論文 No. 85-0367A, 日本機械学会論文集 A, 52 473 (1986.1).
- 2) 竹内、他：中高温大気中における SB42鋼と SUS304鋼の下限界領域き裂伝ば特性、論文 No. 85-1090A, 日本機械学会論文集 A, 52 481 (1986.9).
- 3) 例えば、城野、破壊力学の疲労強度問題への応用、材料学会・最新の破壊力学とその応用に関する講習会(1988.10) p. 52 応力比の影響など。
- 4) H. Huthmann et al : Fatigue and Creep Crack Growth Behaviour of Steel X6CrNi1811 (Type 304SS) in Air and Flowing Sodium. *paper No. 350-3, IAEA IWGFR-49* (1983.10).
- 5) 矢川編、「破壊力学」第 I 編 4 章環境破壊-疲労破壊、培風館
- 6) 田中、他：切欠き底での微小疲労き裂の開口に及ぼす切欠き塑性変形の影響、論文 No. 85-1228A, 日本機械学会論文集 A, 52 480 (1986.8).

5.2の参考文献

- 1) O. Miyake, S. Miyahara, et.al.; "Sodium Pool Combustion Codes for Evaluation of Fast Breeder Reactor Safety," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 28 [2] p.107 (1991)
- 2) 大野修司、川田耕嗣、他："ナトリウム漏洩燃焼に関する研究" 動燃技報 92, p.18-31 (1994).

用語解説

プラントトリップ試験：プラントに何らかの異常（この試験ではタービントリップを模擬）が発生した時に原子炉トリップするなどプラントが安全に停止することを確認する試験

中間熱交換器：原子炉で発生した熱（1次主冷却材）を2次主冷却材に伝える熱交換器

補助冷却設備：原子炉の停止時に2次主冷却系とあいまって原子炉の崩壊熱を除去する設備

エアロゾル：微細な粒子を霧状に分散させた状態（ここではナトリウムの燃焼に伴って発生する酸化ナトリウムの白煙）

過熱器：過熱蒸気をタービンへ供給するため2次主冷却系のナトリウムとの熱交換器

炭酸ナトリウム：炭酸ソーダとも呼ばれる。水に溶解してアルカリ性を示し、クレンザーなどに用いられている。

炭酸水素ナトリウム：重曹とも呼ばれる。水溶液は微アルカリ性を示し、洗濯用石鹼などに使用されている。

トリチウム：水素の同位体で、空気中での飛程が約5mm程度の低エネルギーβ線を放出する。質量数3の放射性元素で半減期は12.3年

オーバフロータンク：2次主冷却系統の自由液面を持つ蒸発器や循環ポンプのナトリウム液位を一定に保つため、常にポンプによりナトリウムを汲み上げてオーバフローさせている。本タンクはこの汲み上げ、オーバフローするナトリウムを貯蔵するタンク

ナトリウム漏洩検出器：「もんじゅ」ではナトリウムの漏洩を検出する手段として種々の検出器を設置している。ここではナトリウムバウングリから漏洩するナトリウムを早期に検出するため配管と保温材内装板のアニュラス部のガスを常時サンプリングしてナトリウムエアロゾルを検出する検出器

ホットレグ配管：冷却材の温度が高い、低いで分類する名称で、ここでは1次冷却材と熱交換した後から蒸気発生器までの配管

コールドレグ配管：ホットレグ配管と同様で、ここでは水・蒸気系と熱交換した後から1次冷却材と熱交換するまでの配管

インタロック：機器の動作を自動で行うために電気信号等を組み合わせている仕組み

熱過渡：熱平衡の状態から別の熱平衡の状態へ移る過渡状態、ナトリウムは熱伝導性が良く比熱が小さいため、熱過渡において冷却材の温度は急激に変わり易い。このためナトリウムと接する構造材では表面での温度変化と内部での温度変化の差が大きくなり材料内の温度勾配による熱応力が大きくなる

ため構造健全性上、ナトリウムの温度変化幅や変化率を小さくすることが重要である。

金属組織観察：金属組織の構成を観察するため低倍率、高倍率の顕微鏡観察等

Na-O高温融体：ナトリウム塩が高温状態で溶融している状態

ルーバ：換気空調設備で換気量を調節するための装置

冷間圧延：金属を再結晶温度以下で圧延して、厚みを減らしたり、表面を硬化する方法で仕上がりがなめらかになり疲労強度が改善される。

溶融凝固組織（デンドライト）：結晶の成長や電着金属の形状の一つで、樹枝状に発達した結晶

電子プローブ極小部分分析法（EPMA）：分析化学の一技法で精密に焦点を合わせた電子線を用いて試料中の元素を励起し、特性X線スペクトル線を発生させる。

X線回折：物質特に結晶によってX線が散乱されること。

マグネタイト：磁性酸化鉄、黒色で水に極めて溶け難い。他の鉄の酸化物には認められない磁性を有する。

選択腐食：金属が液体媒質中で腐食されるとき金属成分中の腐食されやすい成分が液中に溶解して分離し、材質を低下させる金属の腐食現象

粒界腐食：結晶粒が集まっている境界部が腐食媒体によって腐食される金属の腐食現象

電線管コンジット：電線ケーブルを数本まとめて引き回すときに使用する経路

打診調査：音または振動感を引き出すために、ハンマーで表面を打撃したり、軽くこつこつとたたき調査
表面及硬度調査：標準球を標準高さから落として、その表面からはね返る高さを測定し、表面の硬度を測定する調査

リッド：床ライナの壁側には床ライナの熱膨張を吸収できる隙間を設けている。この隙間にナトリウムが入らないようにしている蓋

パーライト：炭素鋼に現れるフェライトとセメンタイトからなる層状組織、共析組成(0.8% C)にちかい鋼をオーステナイト状態から放冷あるいは徐冷するか、または727-550°Cの温度範囲で等温変態させると現れる。

降伏点：応力の増加なしにひずみが増加するときの最小応力

スマヤ法：遊離性の表面の汚れの測定に用い、一定の面積をろ紙片（または布切れなど）でこすりろ紙面に付着した物質を調査する方法

1次元フローネットワークモデル：配管や機器内部

のナトリウムの流れを1次元の流れとして模擬し、この流れに沿って配管や機器を接続(ネットワーク化)する。これにより流量、温度、圧力等を計算するモデル

ロックイン：流れの中に構造物(ここでは円柱)があるとき、円柱から放出される渦の発生振動数はほぼ一定で(流速/直径)に比例する。その比例定数をストローハル数と呼ぶ。ところが、円柱がその固有振動数で大きい振動を始めると、振動する円柱からの渦の放出はストローハル数に支配されることなく円柱の振動数に一致する。この現象をロックイン(引き込み現象)と呼ぶ。

境界層：物体の表面では流体が物体に付着する条件(流速が0となる)が満たされなければならない。ナトリウムや水などの粘性の小さい流れでは、表面のかなり近くまで粘性の無い流体のような非回転運動が実現されるが、表面に近い薄い層の中では急激に流速が減少して物体表面で0になる。粘性係数が小さいほどこの層の厚さは薄く、速度の勾配は大きくなる。この層をプラントル境界層と名付けた。境界層が物体表面からはく離すると、はく離点の下流には逆流が生じ、渦が放出される。

円柱後流渦：流れの中に円柱があるとき、流れは円柱の両側から削がれて渦を発生させる。これを総称して円柱後流渦と呼ぶ。円柱の両側の渦は交互に物体を離れて流されていき、特に二次元的な物体の下流には2列の渦が規則正しく非対称に並ぶことが知られている。これを特にカルマンの渦列という。

インライン振動：円柱系の減衰がきわめて小さく、流体の密度が大きいときに、ある流速の範囲で生じる流れ方向の振動をインライン振動と呼ぶ。流速を0からゆっくりと上昇させると、無次元流速が1.25から円柱は流れ方向の振動が卓越しだし、無次元流速が2程度で最大となる。無次元流速が2.5でインライン振動は一度小さくなり、流速を増加させると無次元流速で2.5から3.8において再び発生する。インライン振動の最大振幅は円柱直径の2割程度といわれている。

固有振動特性：ある構造物を自由に振動させたときに見られる振動数を固有振動数といい、振動の形状を振動モードという。多自由度系では二つ以上の固有振動特性(振動数とモード)が存在する。

減衰定数：振動系の要素またはその一部の運動に対する抵抗力によって失われるエネルギー消費を減衰と呼び、その大きさの程度を減衰定数によって表

す。

高サイクル疲労：振動などによって、大きな周波数で比較的小さな応力やひずみが繰り返されることで生じる疲労を指す。破損に至るまでの繰返し回数は、通常では 10^6 回を超えることが多い。

応力拡大係数範囲：系全体は弾性域にあり、き裂先端で小規模降伏が起こっている構造物において、き裂先端の特異な応力場の強さを表す応力拡大係数を、繰返し応力に対して適用する場合に用いる。き裂の形状や寸法、応力の大きさや方向などに依存する。

結晶・組織依存型破面：SUS304の高サイクル疲労による破面は、平坦で無特徴な結晶粒内貫通型破面(組織依存型)と、結晶粒に相当する特徴的な黒い平坦なへこみとなる結晶粒境界型破面(結晶依存型)が混在しており、これらを総称している。結晶依存型が顕著な程き裂はゆっくりと進んだことになる。

き裂停留：応力拡大係数範囲が、材料に依存する下限界値より小さいときに、き裂が進まない現象を指す。

ナトリウム化合物：ここではナトリウムと空気中の酸素、湿分等が反応して生成するもので、酸化ナトリウム、過酸化ナトリウム、水酸化ナトリウム、炭酸ナトリウムなど含まれるが、成分は雰囲気や燃焼の際の条件で異なる。

漏洩速度：ここでは、単位時間に漏洩するナトリウムの質量流量のこと

温接点：熱電対は異種金属が接触したところで発生する起電力を測定するもので、温接点とはその接触点のことを指すが、本来の温接点と計器との間でシースが破損するなどして異種金属の電気的な接触が生じるとそこが新たな温接点となる。

ナトリウム・エアロゾル：ナトリウムが燃焼する際に発生する煙のことで、ナトリウムの酸化物や過酸化物が固体の微粒子となって雰囲気中を浮遊している状態である。ナトリウム・エアロゾルは時間経過とともにやがて沈降し、雰囲気中の物体表面に堆積する。

排煙処理装置：大規模ナトリウム燃焼試験装置(SAPFIRE)にも設置されている設備のひとつで、ナトリウム・エアロゾルを含む空気を水洗浄した後、フィルタを通しナトリウム・エアロゾルを除去して大気に戻す。

水素燃焼：空気雰囲気では、水素濃度が燃焼下限とされる約4%を超えると、水素の燃焼が起こる。