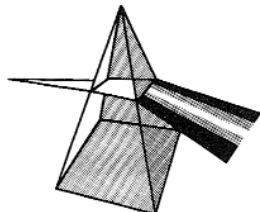


【技術報告】



高速増殖原型炉「もんじゅ」の ナトリウム漏洩対策

茂垣 勝巳 池田真輝典 中井 良大
伊藤 和元

敦賀本部 高速増殖炉もんじゅ建設所

資料番号：6-1

Sodium Leakage Countermeasures at Prototype FBR Monju

Katsumi MOGAKI Makinori IKEDA Ryodai NAKAI
Kazumoto ITO
Monju Construction Office, Tsuruga Head Office

高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故を、漏洩の早期検出、事故の拡大防止及び影響緩和の観点から分析を行い、その知見を反映して以下の設備改善策を策定した。

漏洩監視機能向上を目的として、総合漏洩監視システム及びセルモニタを設置する。

漏洩量の抑制を目的としてナトリウムドレン機能を強化しドレン時間を短縮する。

エアロゾルの拡散抑制及び燃焼抑制を目的として換気空調設備の設備改善を行う。

コンクリートからの水分放出抑制を目的として壁・天井に断熱材を敷設する。

漏洩ナトリウムの燃焼抑制及び再燃焼防止を目的として窒素ガス注入設備を設置する。

In the light of lessons learnt from the sodium leakage accident at MONJU, several problems which ought to be improved have been studied from the viewpoint of early detection, damage limitation and mitigation of the damage consequent to the accident. An improvement program for the plant has been prepared.

To help the operators detect sodium leakage more quickly, an integral leakage monitoring system and cell-monitors will be installed.

To reduce the drain time, the drain system will be modified.

To limit the spread of aerosol outside the building and to suppress the combustion of sodium, the ventilation system will be improved.

To reduce water release from the structural concrete, thermal insulation will be fitted to the walls and ceilings.

To suppress combustion of sodium spilled and to prevent re-ignition, a nitrogen gas extinguisher system will be installed.

キーワード

高速増殖炉、ナトリウム漏洩、漏洩対策、漏洩検出、換気空調設備、ドレン設備、窒素ガス注入設備
FBR, Sodium Leakage, Sodium Leakage Countermeasure, Leakage Detection, Ventilation System, Drain System, Nitrogen Gas Extinguisher System

1. はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下「もんじゅ」)は、平成3年5月に機器の据付けを完了、総合機能試験を経て試運転を開始した。平成6年4月に初臨界を達成し、平成7年8月には初送電を行った。その後、順調に出力試験を進めていたが、電気出力40%で試運転中、平成7年12月8日に2次主冷却系Cループでナトリウム漏洩事故が発生した。

ナトリウム漏洩事故後、事故原因の究明にとどまらずプラント全体にわたる安全総点検を実施

し、それらの知見を踏まえ、ナトリウム漏洩対策を検討した。本報告は、これまで検討を行ってきた設備の改善策をまとめたものである。

2. 2次ナトリウム漏洩に対する改善方針

2.1 2次ナトリウム漏洩に対する従来の基本的考え方

従来より「もんじゅ」は、ナトリウム漏洩事故を想定した設計がなされており、2次ナトリウム漏洩事故に対して、主冷却システムを3ループ独立に

構成し、ループ間は建物コンクリート壁で物理的に分離して、ナトリウム漏洩事故時においても健全ループによる崩壊熱除去運転に影響がないような設計にしている。また、設備面では以下のナトリウム漏洩対策を講じている。

ナトリウム漏洩の早期検出を目的としてナトリウム漏洩検出器や火災感知器等を設置
 ループごとにドレンが可能のようにシステムを構成
 大規模な漏洩時は自動で換気空調設備を停止
 漏洩ナトリウムは、連通管を介して最下部の貯留室に導き窒息消火

ナトリウムとコンクリートとの直接接触を防止するため、床には鋼製ライナを設置

ナトリウム機器の保温構造によって漏洩ナトリウムが上向きに飛散することを防止

2.2 2次ナトリウム漏洩に対する改善策の基本的考え方

従来よりナトリウム漏洩を想定した設計がなされていたが、今回のナトリウム漏洩事故を分析すると、次の反省点があげられる。

漏洩規模の判断基準が不明瞭であったため、漏洩後の事故終息のための対応が遅れ、影響範囲の拡大につながった。漏洩規模の判断基準を明確にするとともに、ナトリウム漏洩事故時には早期の事故終息対応が必要である。

機器に急激な温度変化を与えることを避けるため、原子炉トリップ後、系統温度の降下を待ってからドレン（系統内のナトリウムを抜取ること）を行ったことにより、漏洩が長時間継続

することとなった。系統温度の降下を待たず、緊急ドレンを行う方法を検討する必要がある。

漏洩時に換気空調設備の運転が継続されたために、ナトリウムエアロゾル（ナトリウムが空気中の酸素、湿分と反応して生成される微粒子）が再還流（漏洩発生系統の換気空調設備排気口より放出されたエアロゾルが近接する他系統の給気口へ流入）により、広い範囲にわたって拡散された。エアロゾル拡散抑制の面では、換気空調設備は早期に停止することが望ましい。

事故の原因究明の過程で、ナトリウム漏洩燃焼下で床ライナが腐食されるメカニズム（熔融塩型腐食機構）があることがわかった。ナトリウム漏洩対策では、ナトリウム化合物の腐食性を考慮しておく必要がある。

これらの反省点を踏まえ、ナトリウムの漏洩とナトリウム燃焼に対して積極的な対応を図るものとし、以下のような設備改善策を講じることとした。

ナトリウム漏洩を早期に検出し、換気空調設備を停止する。

ナトリウム漏洩を停止させるために速やかにナトリウムドレンを行う。

漏れたナトリウムの燃焼を抑制する機能を強化するために窒素ガスの注入を行う。

これらの設備改善策を講じることにより、ナトリウム漏洩事故における建物・構築物等の設計裕度が向上し、プラントとしての安全性、信頼性がさらに向上する。図1にナトリウム漏洩対策の考え方を示す。

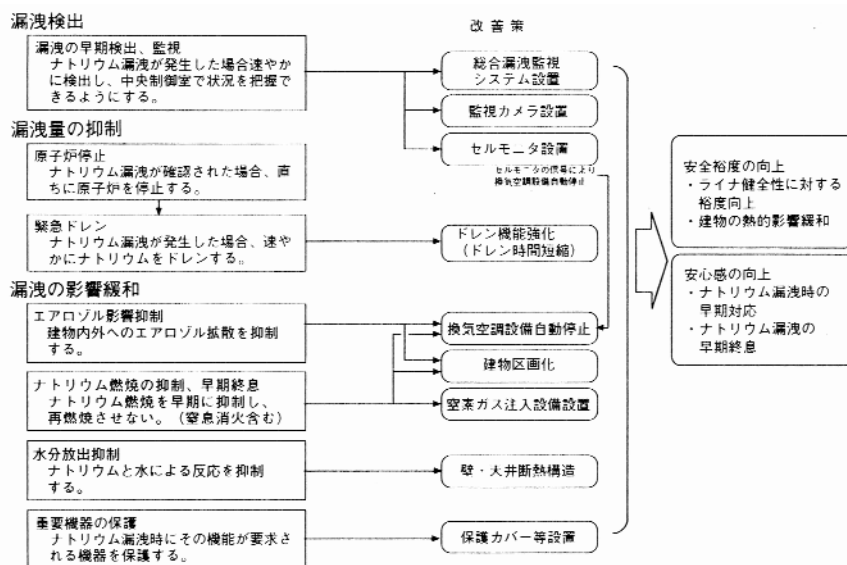


図1 ナトリウム漏洩対策の考え方

2.3 2次ナトリウム漏洩に対する改善策の概要

2次ナトリウム漏洩に対する設備改善策の全体概要を図2に示す。

ナトリウム漏洩の早期検出と運転員の支援

機器・配管等の保温構造外にナトリウム漏洩が及ぶ場合の漏洩検出機能を強化するため、セルモニタを設置する。セルモニタは、小規模漏洩に対する感度が高い煙感知器と、中規模漏洩以上で顕著となる室温上昇をとらえる熱感知器を組合わせた火災検出システムである。本設備は換気空調設備自動停止のインタロック信号を発信する設備とし、信頼性向上のため信号の多重化を図ったシステム構成とする。

参考：漏洩規模の区分けについて

大規模漏洩：2次主冷却系液位が低下し蒸発器液位低低のインターロック信号が発信される程度（目安値：10t/h程度以上）

中規模漏洩：オーバフロータンク液位等のプロセス量に変化がある程度（目安値：0.5t/h～10t/h程度）

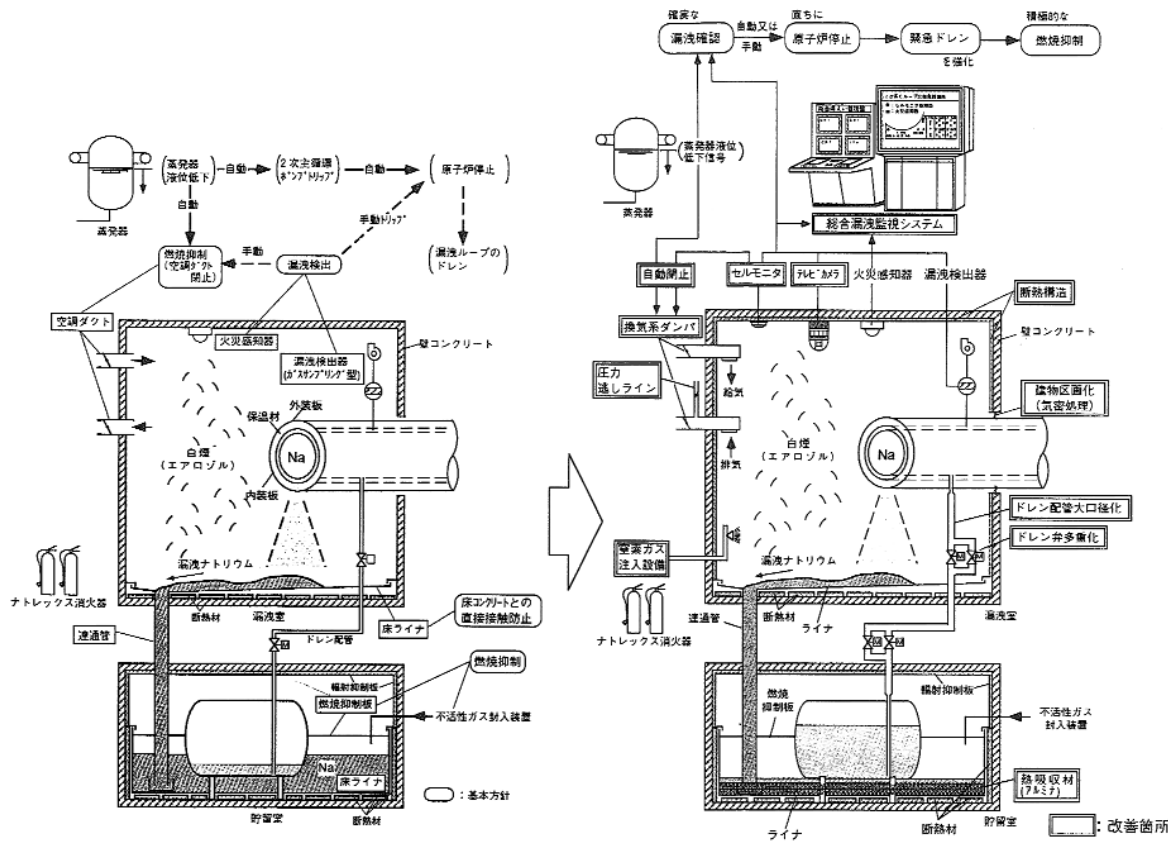
小規模漏洩：白煙の発生等、ナトリウム燃焼の

影響が室内雰囲気及ぶ程度（目安値：0.01t/h～0.5t/h程度）

また、運転員が事故現場の状況を正確かつ迅速に把握できるよう、ナトリウム機器が設置される室内にテレビカメラを設置する。さらに、中央制御室にはナトリウム漏洩に関するすべての情報（映像情報、セルモニタ情報、火災感知器情報、ナトリウム漏洩検出器情報、ナトリウム液位のプロセス情報等）を一括表示、監視できる総合漏洩監視システムを設置する。

換気空調設備の改善

換気空調設備は、現状においても大漏洩時には蒸発器液面計の「蒸発器液位低低」信号により自動停止する。この大漏洩時の自動停止機能をより確実なものとするため、現状2チャンネルの「蒸発器液位低低」信号で停止する論理回路（2/2のAND論理）を1チャンネルの信号でも停止する論理回路（1/2のOR論理）に変更する。さらに、中小漏洩時においても換気空調設備の停止を確実にするため、セルモニタの信号により自動停止するインタロックを追加する。これにより、ナトリウム漏洩事故時のナトリウム燃焼及びエアロゾ



2次ナトリウム漏洩に対する従来の概念

2次ナトリウム漏洩に対する設備改善の概念

図2 2次ナトリウム漏洩に対する設備改善の概要

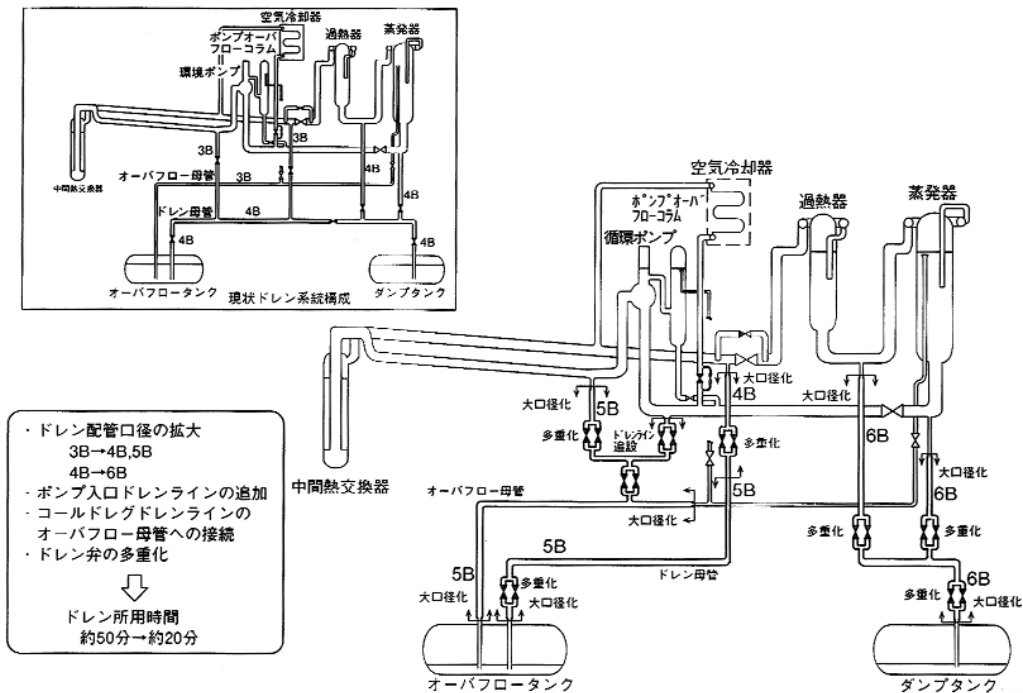


図3 2次系ドレン設備改善の概要

ル拡散を抑制する。

ナトリウムドレン機能の強化

事故の教訓から、ナトリウム漏洩時には原子炉を速やかに停止するとともに、系統の温度降下を待たずにドレンを開始する。さらに、ドレンに要する時間を短縮するため、図3に示すようにドレン設備の改善を行う。

ドレン時間を短縮するためには、ドレン配管を流れるナトリウムの圧力損失を低減することが効果的である。このため、図3に示すように2次主冷却系循環ポンプ入口側にドレンラインを追加するとともに、現状3～4インチのドレン配管を4～6インチに大口径化する。また、ドレン弁は、片方の弁が故障しても系統内のナトリウムが確実に抜けるよう（単一故障を想定）弁の多重化を行う。ドレン弁及びドレン弁の駆動ケーブルは、飛散ナトリウム及び漏洩時の雰囲気温度上昇から保護し、ナトリウム漏洩環境下にあっても確実にドレン弁が作動するようにする。

なお、原子炉トリップ後、系統の温度降下を待たずにドレンした場合、ドレン配管、ドレンタンク、中間熱交換器に急激な温度変化が加わり熱応力が発生するが、機器ごとに詳細な構造評価を行い、構造健全性は損われないことを確認している。

燃焼抑制機能の強化

ナトリウム漏洩事故後はナトリウム燃焼の積極

的な抑制及び再燃焼防止のため、窒素ガス注入設備を設け、漏洩区画内に窒素ガスの注入を行う。窒素ガス注入設備の概要を図4に示す。注入初期は区画内の酸素濃度を下げる必要があるため、高流量で窒素ガスを注入する。酸素濃度が下がった後は低酸素濃度を維持するため、外部から空気が入ってこない程度の低流量で窒素ガスを供給する。

また、ナトリウム燃焼抑制の効果向上のため、1ループ当り16～18室から構成される2次主冷却系エリアを区画化する。区画化を行うに当たっては、エアロゾル拡散抑制の観点からは各室ごとに区画を行うのが最良である。しかし、大型機器が床面を縦に貫通する部分の気密処理が難しいこと、漏洩時の過度の圧力上昇を避けるためには適度な容積が必要であること、現状の換気空調設備ダクトルートが機器配置上大幅に変更できないこと及び床ライナを共有している室については同一区画にまとめる必要があることなどを総合的に考慮すると、技術的には、3～6区画とすることが現実的に採用可能な区画と考えられる。さらに、工事物量の低減、他の設備改善策との整合性等を考慮すると3区画とすることが妥当と思われることから、現在3区画化する方向で詳細検討を進めている。区画化に伴い漏洩事故時の圧力上昇が予想されることから、これを抑制するため、圧力逃がし

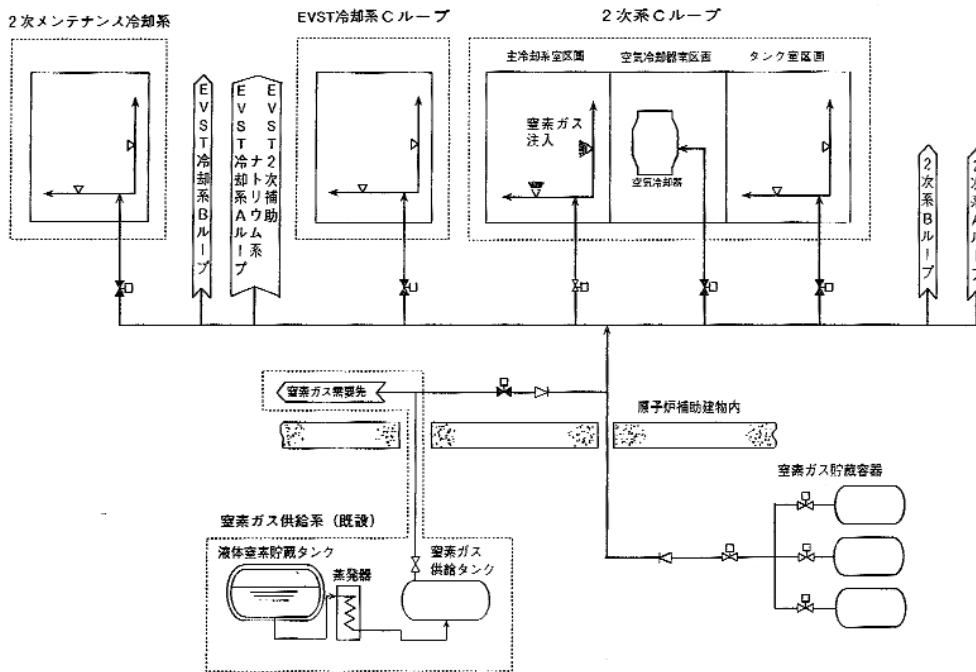


図4 窒素ガス注入設備の概要

	現 状	6区画化	4区画化	3区画化
系 統 機 成				
区 画 容 積	系統全体容積 約14,100m ³	主冷却系空室区画 約9,000m ³ ポンプ空室区画 約2,000m ³ 窒素貯蔵空室区画 約1,900m ³ 空気冷却器空室区画 約1,800m ³ 空気冷却器空室区画 約1,400m ³ タンク空室区画 約4,000m ³	配管室・ポンプ空室区画 約5,000m ³ 高気圧主冷却系空室区画 約3,700m ³ 空気冷却器空室区画 約1,400m ³ タンク空室区画 約4,000m ³	主冷却系空室区画 約9,000m ³ 空気冷却器空室区画 約1,400m ³ タンク空室区画 約3,700m ³

図5 建物内区画化の概要（Cループ）

ラインを設置する。また、大漏洩時には圧力開放ダンパを設置してこのダンパを利用して屋外へ圧力を逃がす。建物内区画化の概要を図5に示す。

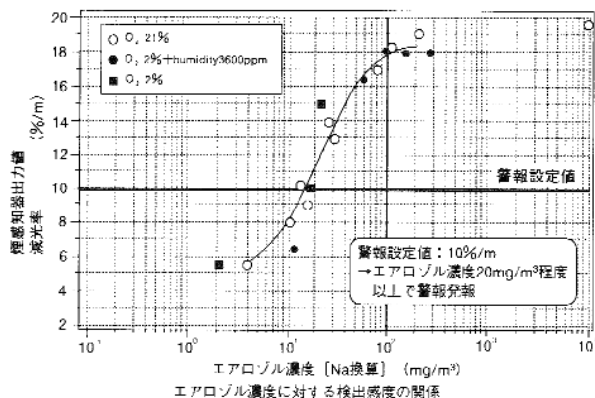
コンクリートからの水分放出抑制

ナトリウム漏洩事故時は、部屋の雰囲気温度が上昇する。これに伴い、壁・天井のコンクリート温度も上昇する。一方、コンクリートは100を超えると、コンクリート自体が保有している水分が急激に放出されるようになる。この水分はナトリウムと反応し水素が発生する。このため、必要に応じナトリウムを内包する配管・機器が設置された部屋の壁、天井に断熱構造を設け、コンクリ

ートの温度上昇を抑制し、コンクリートからの水分放出を抑制する。断熱構造の基本的な構造は、壁面及び天井面にアンカボルトを設置し、断熱材を挟んで鋼板で覆う構成とする。

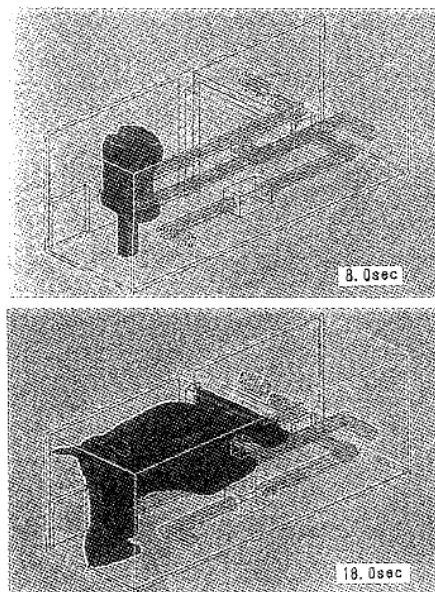
貯留室の対策

大漏洩時、事故室で漏れたナトリウムは床ライナの連通管を通じて、最下層の貯留室に貯留される。貯留室では、高温のナトリウムが大量に流入してくるため、比較的長い時間高温状態が続く。この貯留室の熱的影響を緩和するため、アルミナ製のヒートシンク材を貯留室に設置する。



光電式煙感知器は煙による光の遮られる割合(減光率)が警報設定値以上となった場合に警報を発報することから、エアロゾル濃度と減光率の関係を実験的に確認

検出器単体試験結果



●：エアロゾル濃度100mg/m³の範囲

- ・配管構造物が比較的多く、配置が複雑な部屋について実施したエアロゾル拡散解析例（換気空調設備を考慮）
- ・漏洩発生から8秒後と18秒後の解析例（漏洩率10kg/s）

エアロゾル拡散解析結果例

図6 セルモニタ検出性能

3. 改善策の効果

3.1 漏洩検知機能の向上

セルモニタ

セルモニタのうち、小規模漏洩の検出に有効な煙感知器(部屋の天井に設置する光電式煙感知器)の検出性能は、「検出器単体試験」及び「エアロゾル拡散解析」を実施し評価を行っている。検出器単体試験では、光電式煙感知器のナトリウムエアロゾルに対する単体感度試験を行い、減光率10%/mを警報設定値とした場合、エアロゾル濃度が20mg/m³程度であれば動作することを確認した。また、10kg/h(「もんじゅ」漏洩事故の約1/20に相当)のナトリウム漏洩に対しエアロゾル拡散解析を行い、おおよそ20~30秒程度で天井の一区画にエアロゾル濃度100mg/m³(検出感度の約5倍)が充満する結果を得ている。図6に検出器単体試験結果及びエアロゾル拡散解析結果を示す。

エアロゾルの検出に十分な濃度100mg/m³のエアロゾルが20~30秒で区画内に充満することから、エアロゾルが検出器に到達して警報が発報するまでの遅れ時間40秒^{注)}を考慮しても、1分強程度で、このような小規模のナトリウム漏洩を検出できることになる。セルモニタの設置によって、小規模の漏洩であっても早期に漏洩を検知できるようになる(目標:10kg/h以上の漏洩を2分以内

に検知)

(注):遅れ時間について 煙感知器による煙の検出は、煙感知器の検出部に煙が到達して行われる。煙が感知器に到達し、さらに、感知器の孔を煙が拡散して検出部に到達するまでには、最大40秒の時間を要するが、この時間を遅れ時間と呼んでいる。

ナトリウム漏洩監視機能の強化

総合漏洩監視システムの設置により、ナトリウム漏洩時に、中央制御室の運転員が事故現場状況をリアルタイムで明解に把握するために必要な情報(映像情報、セルモニタ情報、火災感知器情報、ナトリウム漏洩検出器情報、ナトリウム液位のプロセス情報等)が集約して表示される。これによって、今回の事故の教訓としてあがった以下の課題が解消されるとともに、運転員による事故現場の状況(漏洩の発生の有無、規模、場所、推移)把握が適確に行えるようになる。

事故などの教訓

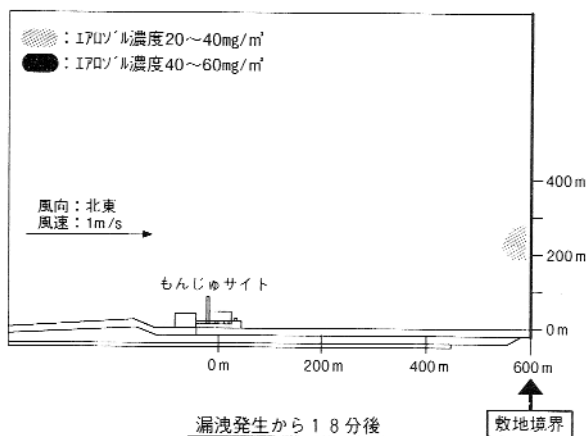
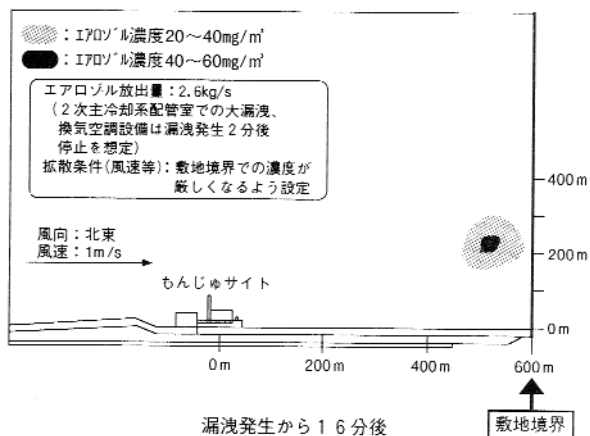
漏洩情報を確認するための制御盤が分散している。

火災感知盤に火災規模の拡大を報知する再鳴動機能がない。

中央制御室で当該室の状況把握、入室の是非の判断を行う遠隔監視手段がない。

3.2 換気空調設備の改善効果

漏洩事故時、換気空調設備の運転を早期に停止することによって、エアロゾルの建物外への拡散及び再循環による建物内へのエアロゾル拡散が抑制される。



敷地境界周辺のエアロゾル濃度分布 (側面表示)

図7 エアロゾル拡散解析結果

建物外へのエアロゾル拡散については、2次主冷却系配管室大漏洩時におけるエアロゾル濃度の3次元大気拡散解析を行い評価した結果、エアロゾル粒子は、建物背面にほとんど廻り込まずそのまま上昇するため、周辺地表面での影響は少ない。また、換気空調設備の運転が早期に停止されることから、高濃度のエアロゾルが連続して放出され続けることはなく、エアロゾルは一塊になって上空を移動するにとどまる。漏洩発生から約18分後には、図7に示すようにエアロゾルが敷地境界位置に達するが、地表面にはほとんどエアロゾルが到達しない。

なお、換気空調設備の誤停止は、雰囲気温度を上昇させ機器・電気計装品等への悪影響が懸念される。換気空調設備誤停止時の影響については、雰囲気温度上昇解析を実施し、誤信号で換気空調設備が停止した場合でも10分程度で復旧する運用とすれば、機器・電気計装品等への影響は回避できることを確認している。

3.3 ナトリウムドレン設備の改善効果

漏洩発生から漏洩停止までの漏洩継続時間は、漏洩発生からドレン開始までの時間と、ドレン開始からドレン完了までの時間の合計となる。設備改善後は、漏洩発生からドレン開始までの時間は、漏洩検知時間2分、漏洩の判断時間10分、原子炉トリップ操作時間1分、プラント状態確認及びドレン準備操作時間5分の合計18分となる。また、ドレン開始からドレン完了までの時間は20分(ドレン弁の1弁故障を想定すると22分)となる。したがって、漏洩継続時間は、トータルで約40分となる。

この条件下でライナ温度が最も高くなる小漏洩の場合のナトリウム燃焼解析結果を図8に示す。

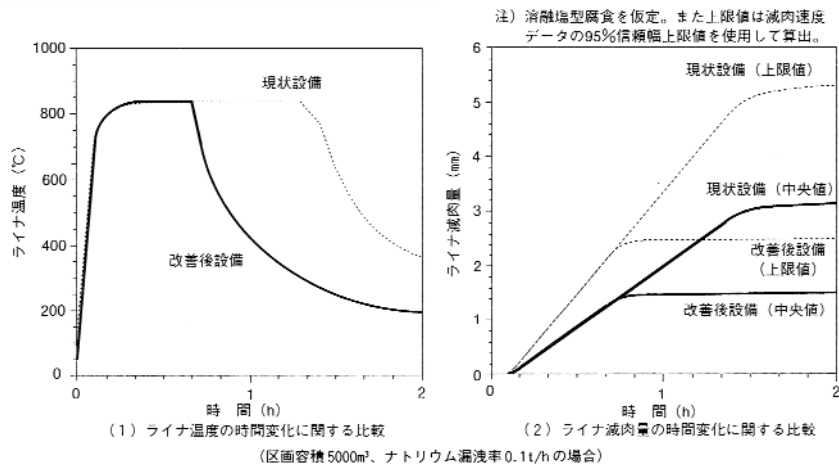


図8 ドレン設備の改善効果

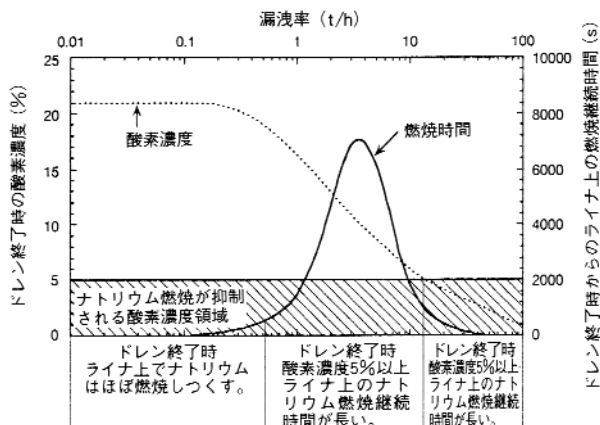


図9 漏洩規模とドレン終了時からのライナ上の燃焼継続時間及び酸素濃度の関係(区画容積5000m³)

ドレン時間の短縮により、漏洩継続時間が改善前に比較して約40分短くなることから、ライナの高温継続時間も短くなる(800以上の継続時間が約40分短縮)。その結果、ライナの腐食に対して最も厳しい腐食機構である熔融塩型腐食を仮定するなど、保守的・安全側に解析しても、ライナ(板厚6mm)の腐食減肉量は約1.5mm(上限値で約2.5mm)である。ドレン設備の改善によって、ライナの健全性は十分に確保される。

3.4 窒素ガス注入設備による燃焼抑制効果

漏洩規模とドレン終了時からのライナ上の燃焼継続時間及び酸素濃度との関係について整理した結果は、以下のとおりである(図9参照)。

- 0.01t/h ~ 0.5t/h程度(小規模漏洩)の場合
ドレン終了時にライナ上でナトリウムはほぼ燃焼しつくす。
- 0.5t/h ~ 10t/h程度(中規模漏洩)の場合
ドレン終了後もライナ上でナトリウムの燃焼がしばらく継続する。
- 10t/h ~ 100t/h程度(大規模漏洩)の場合
ドレン終了時点では自己窒息により酸素濃度は5%以下となりライナ上での燃焼継続時間は短い。しかし、未燃焼ナトリウムが床面に残る場合には、再燃焼に対する配慮が必要である。

したがって、小規模漏洩では、窒素ガス注入の効果は期待できないが、中大規模漏洩では、ナトリウム燃焼の抑制及び床ライナ上に残存したナトリウムの再燃焼防止が期待できる。

窒素ガス注入量をパラメータとしたナトリウム燃焼の解析結果では、区画容積5,000m³に対して10,000m³/h[Normal]の窒素ガスを15分程度注入

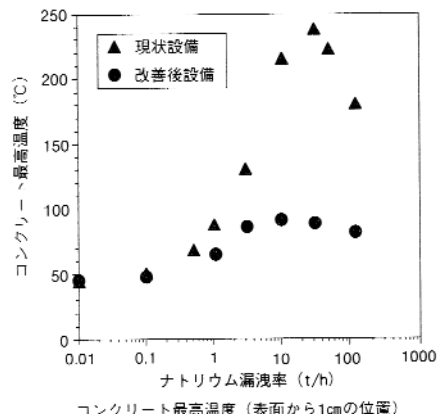


図10 壁・天井の断熱構造による効果

すれば、中規模漏洩に対して区画内の酸素濃度は5%以下(ナトリウム燃焼が抑制される酸素濃度)になる。窒素注入を行わない場合、図9に示したように、中規模漏洩時には、ドレン終了後もナトリウムの燃焼が最大2時間程度継続することがある。したがって、漏洩事故発生から燃焼終了までには、漏洩発生からドレン終了までの時間約40分が加わるので、約2時間半程度かかることになる。しかし、窒素注入を行った場合には、早期に酸素濃度が低下するので、事故発生から1時間程度で燃焼終了に至る計算となる。なお、漏洩規模、区画容積、窒素注入量等の条件により定量的評価値は異なることとなるが、中規模以上の漏洩事故に対し、事故の早期終息の観点から窒素ガス注入の効果は大きい。

3.5 区画化の効果

区画化により空間容積を低減することは窒素ガス注入効果を高めるだけでなく、大規模の漏洩時には短時間で酸素濃度が低下し、ライナ最高温度が低くなる。また、区画化による区画間の気密処理は、エアロゾル拡散を漏洩発生室区画に限定できるため、建物内のエアロゾル拡散抑制の上でも効果が期待できる。

3.6 壁・天井の断熱構造による効果

コンクリートは100以上になると水分を急激に放出するようになる。漏洩率をパラメータとした時のコンクリート最高温度(深さ1cm部)に関する解析結果を図10に示す。壁・天井への断熱材敷設は、漏洩規模が大きい場合でもコンクリートの温度上昇を抑制し、コンクリートの温度は100以下に留まる。この結果、コンクリートが

らの水分放出量が抑制され、ナトリウムと水による反応量が減り、反応熱の発生が抑制されるばかりでなく、床ライナの腐食にとって好ましくない水酸化ナトリウムの生成量及び爆燃上抑制すべき水素の発生量が減少する。

3.7 貯留室の改善効果

貯留室にヒートシンク材を設置することにより、貯留される漏洩ナトリウムの温度が下がるため、貯留室の熱的影響が緩和される。また、貯留室では上部室で漏洩したナトリウムが流入してくるため、金属ナトリウムだけでなく、酸化ナトリウム及び水酸化ナトリウムが含有されることも想定しておかなければならない。これらのうち、水酸化ナトリウムは金属ナトリウムと反応し水素を発生する。水素の発生は貯留ナトリウムの温度に依存するため、この水素発生も抑制される。

4. おわりに

「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故を教訓とし

て、ナトリウム漏洩の早期検出、拡大防止及び漏洩ナトリウムによる影響の緩和の観点から、「もんじゅ」施設の改善策を策定した。本報告では、2次冷却系を主にして、ナトリウム漏洩対策を説明したが、「もんじゅ」は、この他、2次メンテナンス冷却系、炉外燃料貯蔵設備冷却系といった空気雰囲気中に設置されたナトリウム設備が存在する。これらの系統に対しても、同様の改善方針で対策を講じる計画である。これらの改善策を講じることにより、ナトリウム漏洩事故に対する「もんじゅ」施設全体の安全裕度が向上する。

参考文献

- 1) 動燃事業団高速増殖炉もんじゅ建設所：「40%出力試験中における2次主冷却系ナトリウム漏洩事故について(第4報告書)」, (1996).
- 2) 動燃事業団高速増殖炉もんじゅ建設所：「40%出力試験中における2次主冷却系ナトリウム漏洩事故について(第6報告書)」, (1998).
- 3) 滝田雅美, 他：原子力学会「1998秋の大会」予稿集, E18~23, (1998).

