

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）

第8条（火災による損傷の防止）に係る説明書

2022年3月11日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
大洗研究所高速実験炉部

1. 要求事項の整理
2. 要求事項への適合性
  - 2.1 火災の防護に関する基本方針
  - 2.2 火災防護対象機器
  - 2.3 火災区域及び火災区画の設定
  - 2.4 火災の発生防止
  - 2.5 火災の感知及び消火
  - 2.6 火災の影響軽減
  - 2.7 個別の火災区域又は火災区画における留意事項
  - 2.8 火災の影響評価
  - 2.9 要求事項（試験炉設置許可基準規則第8条）への適合性説明

(別紙)

別紙1 : 火災防護対象機器の選定の考え方

別紙2 : ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼への対策

ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼への対策

## 目 次

1. ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼の特徴
2. ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼への対策
  - 2.1 基本方針
  - 2.2 ナトリウム漏えいの防止
  - 2.3 ナトリウム漏えいの検知及びナトリウム燃焼の感知
  - 2.4 ナトリウム燃焼の消火
  - 2.5 ナトリウム燃焼の影響軽減
  - 2.6 個別の火災区域又は火災区画における留意事項
  - 2.7 ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価

(別添)

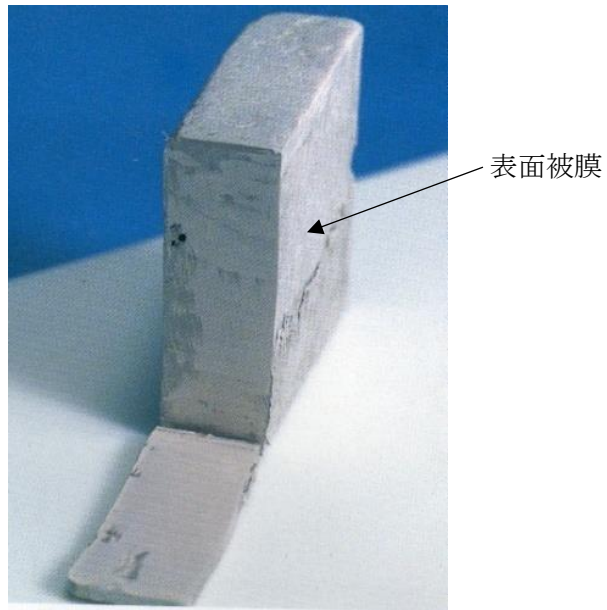
- 別添 1 : ナトリウム燃焼に係る要求事項及び対応概要
- 別添 2 : ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計
- 別添 3 : 冷却材のバウンダリの肉厚管理の考え方
- 別添 4 : ナトリウム漏えい検出器の構造等
- 別添 5 : 特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器の配置等
- 別添 6 : 1次冷却材漏えい時の対応
- 別添 7 : 2次冷却材漏えい時の対応
- 別添 8 : ナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止するための措置
- 別添 9 : ナトリウム燃焼環境下における材料腐食
- 別添 10 : 緊急ドレンの概要
- 別添 11 : 窒素ガス供給の概要
- 別添 12 : ナトリウム溜の概要
- 別添 13 : ナトリウムエアロゾルの拡散を防止するための措置
- 別添 14 : ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価

8条-別紙 2-1

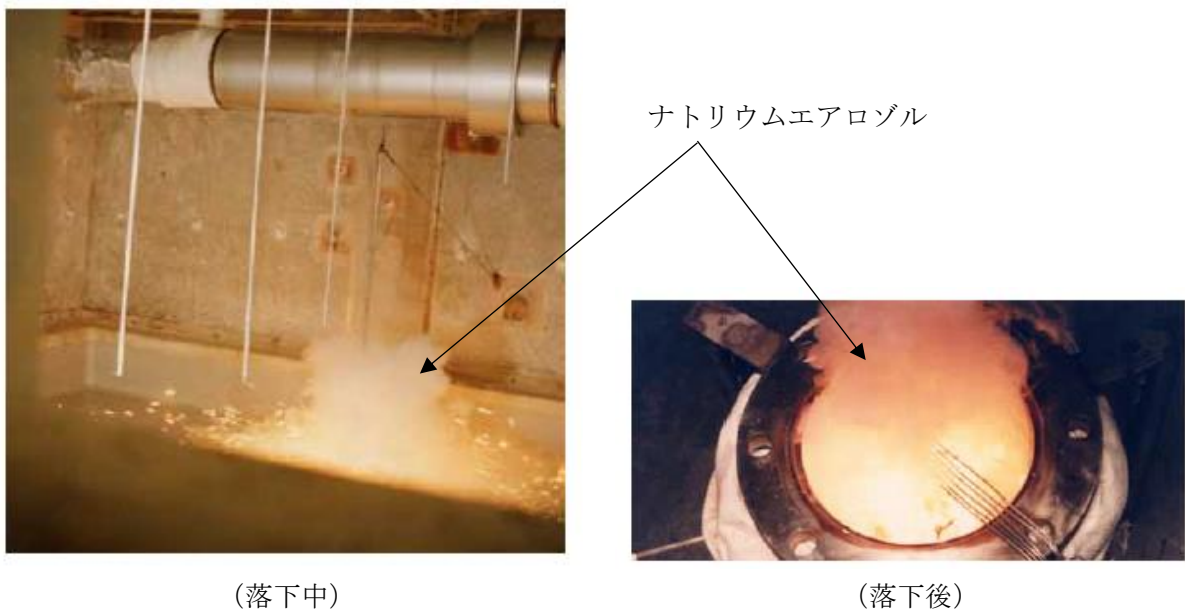
## 1. ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼の特徴

ナトリウム冷却型高速炉において、冷却材として使用するナトリウムは、化学的に活性であり、空気中の酸素や湿分、水、ハロゲン等と反応する。ナトリウムは、配管及び機器に内包された状態で使用されるが、万一、当該配管及び機器が破損し、ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウムの燃焼は、以下の特徴を有する。

- 固体状のナトリウム（融点：約 98℃）にあつては、通常、空気中の酸素や湿分と反応し、酸化ナトリウムや水酸化ナトリウム等からなる暗灰色の表面被膜を形成する（第 1.1 図参照）。当該被膜により、内部のナトリウムは、空気と隔離されるため、常温において、急激な反応が生じ、ナトリウムの発火・燃焼に至ることはない。ただし、当該被膜が除去される等の状況が発生した場合には、ナトリウムが反応、ナトリウムの温度が上昇し、発火する可能性がある（発火下限温度：約 115～125℃）。なお、ナトリウムの燃焼は、ナトリウムは沸点が高く、蒸発熱が大きく、燃焼熱が小さい等により油やアルコールの火災と異なり、火炎の高さが低い。
- ナトリウムは、基本的に高温の液体状態で使用されている。万一、配管等から当該ナトリウムが漏えいした場合、落下する過程で空気中の酸素や湿分と反応し、また、落下したナトリウムは、床面にプール状に拡がり、その表面で空気中の酸素や湿分と反応し、反応熱及び反応生成物の白煙（以下「ナトリウムエアロゾル」という。）が発生する（第 1.2 図参照）。なお、ナトリウムは、窒素と反応しないため、窒素雰囲気にあつては、反応熱及びナトリウムエアロゾルの発生を防止できる。
- 高温のナトリウムとコンクリートが接触すると、当該ナトリウムとコンクリート中の水分及び反応生成物とコンクリート成分の反応が生じるため、鋼製のライナ又は受樋によりナトリウムとコンクリートの接触を防止する必要がある。なお、当該ライナ等の設計にあつては、ナトリウム燃焼環境下において、鋼製材料の腐食が生じることを考慮する必要がある。
- ナトリウムは、空気、水やハロゲン等と反応（一般的な火災の消火に用いられる ABC 消火剤（主成分：リン酸アンモニウム等）とも反応）するため、ナトリウムの燃焼の消火には、特殊な化学消火剤（以下「特殊化学消火剤」という。）を用いる必要がある。
- ナトリウムが直接皮膚に接触すると組織内の水分と反応、水酸化ナトリウムを生成して、これによるアルカリ火傷を生じる。また、ナトリウムエアロゾルは、刺激臭を有し人体に有害である。このため、特殊化学消火剤を充填した可搬式消火器による消火活動等において、燃焼するナトリウムに接近する際には、防護具（防護服や携帯用空気ボンベ等）の着用が必要である。
- ナトリウムが燃焼した後に残る燃焼残渣は、表面に燃焼生成物を有し、内部に金属ナトリウムと燃焼生成物が混在した状態で存在する。表面の燃焼生成物を除去等した場合には、再着火・再燃焼に至る可能性がある。このため、燃焼残渣を処理する際には、当該温度が十分に低下していることを確認した上で、順次、特殊化学消火剤を散布する等により、再着火・再燃焼を防止・抑制する必要がある。



第 1.1 図 空気雰囲気中の固体状ナトリウム



(落下中)

(落下後)

(出典：ナトリウム技術読本 JNC TN9410 2005-011)

第 1.2 図 ナトリウム燃焼の様子

## 2. ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼への対策

### 2.1 基本方針

(別添1「ナトリウム燃焼に係る要求事項及び対応概要」参照)

原子炉施設において、ナトリウム漏えいが発生し、これを検知した場合には、運転員は、手動スクラムにより原子炉を停止するものとする。

原子炉施設は、想定されるナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼によっても、原子炉を停止でき、放射性物質の閉じ込め機能を維持できるように、また、停止状態にある場合は、引き続きその状態を維持できるように設計する。実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準（以下「火災防護基準」という。）に基づく火災防護対策を講じる火災防護対象機器について、ナトリウム漏えいの防止、ナトリウム漏えいの検知（及びナトリウム燃焼の感知）及びナトリウム燃焼の消火並びにナトリウム燃焼の影響軽減の三方策の措置を講じるものとする。

なお、添付書類10における設計基準事故として、「1次冷却材漏えい事故」及び「2次冷却材漏えい事故」を想定しており、所定の安全性を確保できることを確認している。

### 2.2 ナトリウム漏えいの防止

ナトリウムを内包する配管及び機器の設計にあっては、配管及び機器の破損によるナトリウム漏えいを防止するため、以下の対策を講じる。なお、1次冷却材を内包する配管及び機器にあっては、高温強度とナトリウム環境効果に対する適合性が良好なステンレス鋼を、2次冷却材を内包する配管及び機器にあっては、低合金鋼を使用する。

- (i) ナトリウムを内包する配管及び機器の設計、製作等は、関連する規格、基準に準拠するとともに、品質管理や工程管理を十分に行う。
- (ii) ナトリウムを内包する配管は、エルボを引き廻し、十分な撓性を備えたものとする。
- (iii) ナトリウムを内包する配管及び機器は、冷却材温度変化による熱応力、設計地震力等に十分耐えるように設計する。また、ナトリウムを内包する配管及び機器は、内包するナトリウムを固化することによりナトリウム漏えいの防止措置を講じるか、配管及び機器の破損に伴い想定される漏えい量が少ないものを除き、基準地震動による地震力に対して、ナトリウムが漏えいすることがないように設計する（別添2「ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計」参照）。このうち、2次冷却材ダンプタンクにあっては、2次冷却材の漏えいに伴う緊急ドレン後に長期間ナトリウムを保有するため、弾性設計用地震動による地震力に対して、おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えるように設計する。
- (iv) ナトリウムを内包する配管及び機器の腐食を防止するため、冷却材の純度を適切に管理するとともに、減肉に対する肉厚管理を適切に実施する（別添3「冷却材のバウンダリの肉厚管理の考え方」参照）。

### 2.3 ナトリウム漏えいの検知及びナトリウム燃焼の感知

#### 2.3.1 ナトリウム漏えいの検知

ナトリウム漏えいの検知には、ナトリウム漏えい検出器を用いる（別添4「ナトリウム漏えい検出器の構造等」参照）。原子炉冷却材バウンダリ及び冷却材バウンダリを構成する配管及び機

器（主冷却器及び補助冷却器を除く。）には、通電式のナトリウム漏えい検出器を用いる。主冷却器及び補助冷却器には、その構造に鑑み光学式のナトリウム漏えい検出器を用いる。ナトリウム漏えい検出器は、誤作動を防止する方策を講じるものとする。なお、原子炉冷却材バウンダリにあっては、二重構造を有し、ナトリウム漏えい検出器は、二重構造の間隙部に設置するため、原子炉冷却材バウンダリの破損に伴うナトリウムの漏えいは、当該ナトリウムが二重構造の外に漏えいすることなく検知される。

ナトリウム漏えい検出器が作動した場合には、中央制御室に警報を発し、かつ、ナトリウムが漏えいした場所を特定できるものとする。なお、2次冷却材を内包する配管及び機器を設置する場所（格納容器（床下）を除く。）には、監視用 ITV を設置し、中央制御室のモニタにより、その状況を確認できるものとする。これらの設備は、外部電源喪失時に、その機能を喪失することがないように、非常用電源設備より電源を供給する。

### 2.3.2 ナトリウム燃焼の感知

ナトリウム燃焼の感知は、ナトリウム漏えいの検知を起点とするものとし、ナトリウム漏えい検出器で兼用する。また、火災防護対象機器を設置する火災区域又は火災区画には、火災防護基準の火災感知設備に要求される事項に適合する火災感知器を設置する。

## 2.4 ナトリウム燃焼の消火

ナトリウム燃焼の消火には、特殊化学消火剤を使用する。原子炉施設には、特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器、防護服、防護マスクや携帯用空気ボンベ等を配備する（別添5「特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器等の配置等」参照）。特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器は、転倒防止措置を講じるものとする。また、定期的に、消火訓練を実施し、これらの資機材の使用に係る習熟度向上を図る。

特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器は、ナトリウムを保有する配管及び機器を設置するエリアに配備する。なお、原子炉の運転中、窒素雰囲気で維持する格納容器（床下）にあっては、当該雰囲気を空気雰囲気とした場合に、特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器を配備する。

### 2.4.1 自然現象に対する機能及び性能の維持

- (1) ナトリウム燃焼の消火に使用する特殊化学消火剤は、消火剤の性状により、凍結するおそれはなく、凍結防止対策を必要としない。
- (2) ナトリウム燃焼の消火に使用する特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器は、建物内に配置されるものであり、風水害に対して、その性能が著しく阻害されることはない。
- (3) ナトリウム燃焼の消火に使用する特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器は、屋外と連結する消火配管を有しないため、地盤変位対策を必要としない。

### 2.4.2 消火設備の破損、誤作動又は誤操作による影響

ナトリウム燃焼の消火に使用する特殊化学消火剤は、消火剤の性状により、その配置場所で破損した場合にあっては、機器等に影響を及ぼすことはない。また、ナトリウム燃焼の消火に使用



する特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器は、運転員等が手動で使用するものとし、誤作動又は誤操作を防止する。

## 2.5 ナトリウム燃焼の影響軽減

(別添6「1次冷却材漏えい時の対応」参照)

(別添7「2次冷却材漏えい時の対応」参照)

- (1) ナトリウムを保有する火災区域又は火災区画については、3時間以上の耐火能力を有する耐火壁（コンクリート壁厚さ：150mm以上）によって他の火災区域又は火災区画から分離する。火災の影響評価において設定した火災等価時間を1時間未満とする火災区域又は火災区画は、耐火壁、防火戸、防火ダンパ及び貫通部シール（不燃性パネル又は不燃性パテを使用）により、他の火災区域又は火災区画から分離する。耐火壁については、建設省告示1399号に、防火戸及び防火ダンパについては、建設省告示1369号に基づき、1時間以上の耐火時間を設定する。
- (2) 耐火能力を有する鋼製のライナ又は受樋を設置し、ナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止する（別添8「ナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止するための措置」参照）。床面に設置した鋼製のライナにあつては、堰を設け、漏えい拡散面積を抑制することで、ナトリウムと空気の接触面積を低減し、ナトリウム燃焼の影響を軽減する。鋼製のライナや受樋の設計にあつては、ナトリウム燃焼に伴い鋼製材料の腐食が生じることを考慮した厚さとする（別添9「ナトリウム燃焼環境下における材料腐食」参照）。
- (3) 原子炉冷却材バウンダリを構成し、1次冷却材を内包する配管及び機器は、二重構造とするとともに、当該間隙を窒素雰囲気で維持し、万一、1次冷却材が漏えいした場合にあつても、漏えいしたナトリウムを当該間隙で保持し、ナトリウム燃焼を抑制する。また、上記以外で1次冷却材を内包する配管及び機器並びに格納容器（床下）に設置する2次冷却材を内包する配管及び機器については、原子炉運転中、格納容器（床下）を窒素雰囲気で維持し、万一、当該冷却材が格納容器（床下）に漏えいした場合にあつても、漏えいしたナトリウムを格納容器（床下）で保持し、ナトリウム燃焼を抑制する。なお、ナトリウムが漏えいし、二重構造の間隙又は格納容器（床下）に保持される状態に至った場合、ナトリウム温度が空気中での発火点よりも低下した後か、ナトリウムをドレンした後でなければ、格納容器（床下）を空気雰囲気に置換しないものとする。
- (4) 2次冷却材を内包する配管及び機器（格納容器（床下）に設置するものを除く。）において、2次冷却材が漏えいした場合、漏えいの発生した系統内に残存するナトリウムを2次冷却材ダンプタンクに緊急ドレンし、ナトリウム漏えい量を低減する（別添10「緊急ドレンの概要」参照）。
- (5) 常時空気雰囲気であつて、かつ、ナトリウムと湿分等の反応により発生した水素が蓄積する可能性ある火災区域又は火災区画にあつては、当該火災区域又は火災区画に、窒素ガスを供給し、水素の濃度が燃焼限界濃度以下に抑制できるものとする（別添11「窒素ガス供給の概要」参照）。
- (6) 主冷却機建物においては、漏えいしたナトリウムを床ライナ又は受樋から連通管を介して、

ナトリウム溜に導く設計とし、漏えいしたナトリウムをナトリウム溜で保持する（別添 12「ナトリウム溜の概要」参照）。

- (7) 主冷却機建物及び原子炉附属建物においては、換気空調設備に防煙ダンパを設け、換気空調設備の停止及び防煙ダンパの閉止により、ナトリウムエアロゾルの拡散を防止する（別添 13「ナトリウムエアロゾルの拡散を防止するための措置」参照）。

## 2.6 個別の火災区域又は火災区画における留意事項

火災防護基準で参考としている「Regulatory Guide 1.189」に示される「ケーブル処理室」、「電気室」、「蓄電池室」、「ポンプ室」、「中央制御室」、「使用済燃料貯蔵設備、新燃料貯蔵設備」及び「放射性廃棄物処理設備及び放射性廃棄物貯蔵設備」に相当する火災区域又は火災区画にあっては、ナトリウムを内包する配管及び機器を設置しないことによりナトリウムエアロゾルの発生を防止するか、ナトリウムエアロゾルの拡散を防止する設計とする。

「ケーブル処理室」、「電気室」、「蓄電池室」、「中央制御室」、「使用済燃料貯蔵設備、新燃料貯蔵設備」及び「放射性廃棄物処理設備及び放射性廃棄物貯蔵設備」は、ナトリウムを内包する機器及び配管を設置しない火災区域又は火災区画に該当する。

1次主循環ポンプの原子炉冷却材バウンダリが設置されている火災区域又は火災区画は、「ポンプ室」の一部に相当する。当該原子炉冷却材バウンダリは、二重構造とするとともに、当該間隙を窒素雰囲気で維持し、万一、1次冷却材が漏えいした場合にあっては、漏えいしたナトリウムを当該間隙で保持し、ナトリウムエアロゾルの発生を防止するため、煙を排気する対策を必要としない。

2次主循環ポンプの冷却材バウンダリが設置されている火災区域又は火災区画は、「ポンプ室」の一部に相当する。ナトリウムエアロゾルは、人体に有害であることを踏まえ、当該火災区域又は火災区画には、換気空調設備に防煙ダンパを設け、換気空調設備の停止及び防煙ダンパの閉止により、ナトリウムエアロゾルの拡散を防止する措置を講じるものとし、煙を排気する対策の対象としない。なお、運転員等は、防護服、防護マスクや携帯用空気ボンベを着用することで、ナトリウムやナトリウムエアロゾルの人体への影響を防止した上で、ナトリウム燃焼の消火活動を行う。

## 2.7 ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価

ナトリウムが漏えいした場合のナトリウムの漏えい量及びナトリウム燃焼の影響を以下により評価する（別添 14「ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価」参照）。

- ・ 一系統の単一の配管の破損（他の系統及び機器は健全なものと仮定）を想定する。なお、二重構造を有する配管及び機器にあっては、内管の破損により漏えいしたナトリウムは外管により保持されることを踏まえて評価する。また、原子炉運転中、窒素雰囲気で維持する格納容器（床下）に位置するナトリウムを内包する配管及び機器が破損した場合にあっては、ナトリウム燃焼を抑制できるため、格納容器（床下）を空気置換した場合の影響を評価する。
- ・ 配管直径の 1/2 の長さと同配管肉厚の 1/2 の幅を有する貫通クラックからの漏えいを想定する。
- ・ ナトリウム漏えい量の評価に当たっては、漏えい停止機能（緊急ドレン）による漏えい停止までの漏えい継続時間を考慮する。

ナトリウム燃焼に係る要求事項及び対応概要
----------------------

ナトリウム燃焼に係る要求事項（令和 3 年 5 月 26 日 第 10 回原子力規制委員会 資料 2 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設「常陽」の新規制基準適合性審査の状況及び今後の審査方針案について）及び当該要求事項に対する対応の概要を第 1 表に示す。

第1表 ナトリウム燃焼に係る要求事項および対応概要

要求事項	対応概要
<p>(1) ナトリウム漏えいの防止</p> <p>ナトリウムを内包する配管及び機器については、耐震設計上の重要度分類Sクラス又は基準地震動による地震力によって破損を生じさせない設計であること。ここで「基準地震動による地震力によって破損を生じさせない設計」とは、耐震設計上の重要度分類B、Cクラスに分類される機器であっても、設計上の裕度を考慮することや設備の耐震補強等により、基準地震動による地震力に対して耐震性を有すると評価できるものをいう。</p>	<p>・ ナトリウムを内包する配管及び機器の設計にあつては、配管及び機器の破損によるナトリウム漏えいを防止するため、以下の対策を講じる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>＞ ナトリウムを内包する配管及び機器の設計、製作等は、関連する規格、基準に準拠するとともに、品質管理や工程管理を十分に行う。</li> <li>＞ ナトリウムを内包する配管は、エルボを引き廻し、十分な撓性を備えたものとする。</li> <li>＞ ナトリウムを内包する配管及び機器は、冷却材温度変化による熱応力、設計地震力等に十分耐えるように設計する。また、ナトリウムを内包する配管及び機器は、内包するナトリウムを固化することによりナトリウム漏えいの防止措置を講じるか、配管及び機器の破損に伴い想定される漏えい量が少ないものを除き、基準地震動による地震力に対して、ナトリウムが漏えいすることがないように設計する。このうち、2次冷却材タンクには長期間ナトリウムを保有するため、弾性設計用地震動緊急ドレン後に長期間ナトリウムを保有するため、弾性設計用地震動による地震力に対して、おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えるように設計する。</li> <li>＞ ナトリウムを内包する配管及び機器の腐食を防止するため、冷却材の純度を適切に管理するとともに、減肉に対する肉厚管理を適切に実施する。</li> </ul>
<p>(2) ナトリウム漏えいの検知</p> <p>ナトリウムを内包する配管及び機器の一系統における単一の機器の破損（他の系統及び機器は健全なものと仮定）を想定し、ナトリウムの漏えいを早期に検知できる検出器（以下「漏えい検出</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ナトリウム漏えいの検知には、ナトリウム漏えい検出器を用いる。原子炉冷却材バウンダリ及び冷却材バウンダリを構成する配管及び機器（主冷却器及び補助冷却器を除く。）には、通電式のナトリウム漏えい検出器を用いる。主冷却器及び補助冷却器には、その構造に鑑み、光学式のナトリウム</li> </ul>

<p>器)を設置すること。また、その設置に当たっては、以下を含めること。</p> <p>① 漏えい検出器の誤作動を防止するための方策を講じること。</p> <p>② 外部電源喪失時に機能を失わないように、電源を確保する設計であること。</p> <p>③ 中央制御室で必要な監視ができる設計であること。</p>	<p>漏えい検出器を用いる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>電極とシース保護管又はアースがナトリウムにより短絡されることを利用する通電式のナトリウム漏えい検出器は、二重構造の間隙や金属製シート等の中に検出素子を配置することにより金属片等の異物混入による誤作動の防止を図る。ナトリウム燃焼によって生じる白煙（ナトリウムエアロゾル）により光の透過率が減少することを利用する光学式のナトリウム漏えい検出器は、埃や電氣的ノイズ等に応答しないように留意した回路の構成とすることにより誤作動の防止を図る。また、万一、単一のナトリウム漏えい検出器が誤作動した場合にあっても、ナトリウム漏えいの判断は、同一エリアの火災感知器の作動、現場の確認、冷却材の液位低下により行うものとする。</li> <li>ナトリウム漏えいの検知に用いる設備は、外部電源喪失時に、その機能を喪失することがないように、非常用電源設備より電源を供給する。</li> <li>ナトリウム漏えい検出器が作動した場合には、中央制御室に警報を発生し、かつ、ナトリウムが漏えいした場所を特定できるものとする。なお、2次冷却材を内包する配管及び機器を設置する場所（格納容器（床下）を除く。）には、監視用 ITV を設置し、中央制御室のモニタにより、その状況を確認できるものとする。</li> </ul>
<p>(3) ナトリウム漏えい発生時の燃焼抑制</p> <p>ナトリウム漏えい発生時に、空気雰囲気でのナトリウム燃焼を抑制できる設計とすること。ここで、「ナトリウム燃焼を抑制する設計」とは、例えば、配管を二重構造にして漏えいしたナトリウムをその間隙に保持すること、ナトリウム漏えいが発生する区画を窒素雰囲気で維持する等の不活性化を行うこと、ナトリウム漏えいが発生した系統のナトリウムを緊急ドレンにより早期に排</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉冷却材バウンダリを構成し、1次冷却材を内包する配管及び機器は、二重構造とするとともに、当該間隙を窒素雰囲気で維持し、万一、1次冷却材が漏えいした場合にあっても、漏えいしたナトリウムを当該間隙で保持し、ナトリウム燃焼を抑制する。</li> <li>上記以外で1次冷却材を内包する配管及び機器並びに格納容器（床下）に設置する2次冷却材を内包する配管及び機器については、原子炉運転中、格納容器（床下）を窒素雰囲気で維持し、万一、当該冷却材が格納容器（床</li> </ul>

<p>出してナトリウム量の漏えい量を低減すること等の設計である。</p>	<p>下)に漏えいした場合であっても、漏えいしたナトリウムを格納容器(床下)で保持し、ナトリウム燃焼を抑制する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2次冷却材を内包する配管及び機器(格納容器(床下)に設置するものを除く。)において、2次冷却材が漏えいした場合、漏えいの発生した系統内のナトリウムを2次冷却材ダンプタンクへ緊急ドレンし、ナトリウム漏えい量を低減する。</li> </ul>
<p>(4) ナトリウム燃焼の感知</p> <p>ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼を早期に感知できる設計とすること。ここで、「ナトリウム燃焼を早期に感知できる設計」とは、火災防護対象機器(火災防護対象ケープルを含む。以下同じ。)を設置する火災区域又は火災区画において、「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」(平成25年6月19日原規技発第1306195号原子力規制委員会決定。以下「火災防護基準」という。)の「火災感知設備」に要求される事項に適合する感知設備を設置することをいう。その際、当該感知設備は、(2)の漏えい検出器と兼用しても差し支えない。</p> <p>また、火災防護対象機器を設置しない区画におけるナトリウム燃焼を早期に感知できるように、火災防護基準の「火災感知設備」を参考とした感知設備を設置すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ナトリウム燃焼感知は、ナトリウム漏えいの検知を起点とするものとし、ナトリウム漏えい検出器で兼用する。</li> <li>ナトリウム漏えい検出器は、以下により「火災防護基準」に適合する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>検出素子の配置(通電式)や回路の構成(光学式)により誤作動の防止を図ること。</li> <li>ナトリウム漏えい検出器が作動した場合には、中央制御室に警報を発生し、かつ、ナトリウムが漏えいした場所を特定することができること。</li> <li>外部電源喪失時に、その機能を喪失することがないように、非常用電源設備より電源を供給すること。</li> </ul> </li> <li>火災防護対象機器を設置する火災区域又は火災区画には、「火災防護基準」の「火災感知設備」に要求される事項に適合する感知設備として、一般火災に対応するための火災感知器を設置する(基本的に、光電アナログ式スポット型煙感知器及び熱アナログ式スポット型熱感知器を使用)。当該感知器の動作原理より、ナトリウム燃焼の感知にも適用できる。</li> </ul>
<p>(5) ナトリウム燃焼の消火</p> <p>ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼を早期に消火できる設計とすること。ここで、「ナトリウム燃焼を早期に消火できる設計」とは、火災防護基準の「消火設備」に要求される事項(ただし、「消火剤に水を使用する消火設備」は除く。)に適</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ナトリウム燃焼の消火には、特殊化学消火剤を使用する。原子炉施設には、特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器、防護服、防護マスクや携帯用空気ボンベ等を配備する。特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器は、転倒防止措置を講じるものとする。</li> <li>原子炉施設保安規定に基づき年1回以上、消火訓練を実施し、これらの資</li> </ul>

<p>合する設備を設置することをいう。また、要員による消火活動に期待する場合は、ナトリウム燃焼の特殊性を踏まえ、要員の安全確保に必要な防護服、防護マスク、携帯用空気ボンベ等必要な資機材の配備を行うこと。</p>	<p>機材の使用に係る習熟度向上を図る。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器は、ナトリウムを保有する配管及び機器を設置するエリアに配備し、十分な容量を備える。なお、原子炉運転中、窒素雰囲気で維持する格納容器（床下）にあっては、当該雰囲気を空気を雰囲気とした場合に、特殊化学消火剤を充填した可搬式消火器を配備する。</li> </ul>
<p>(6) ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価</p> <p>ナトリウムが漏えいした場合のナトリウムの漏えい量、及び漏えいしたナトリウム燃焼の影響を評価すること。評価に当たっては、以下によること。</p> <p>① 破損を想定する機器は、配管（容器の一部であって、配管形状のものを含む。以下同じ。）とする。また、破損の想定に当たっては、一系統における単一の機器の破損（他の系統及び機器は健全なものと仮定）を想定する。</p> <p>② 常陽の冷却材であるナトリウムは、低圧でサブグループ度が大きいいため、配管の破損想定は低エネルギー配管相当と考え、配管内径の 1/2 の長さで配管肉厚の 1/2 の幅を有する貫通クランクからの漏えいとする。</p> <p>③ 漏えいを検出する機能が設置され、自動又は手動操作によって、漏えいを停止させることができる場合は、漏えい停止機能を考慮することができる。この漏えい停止機能を期待する場合は、停止までの漏えい継続時間を考慮してナトリウム漏えい量を求める。</p> <p>④ 配管が二重構造である場合は、内管の損傷によるナトリウム漏えいを外管により保持する機能に期待することができる。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>以下によりナトリウムが漏えいした場合の漏えい量及び漏えいしたナトリウム燃焼の影響を評価する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; 一系統の単一の配管の破損（他の系統及び機器は健全なものと仮定）を想定する。なお、二重構造を有する配管及び機器にあっては、内管の破損により漏えいしたナトリウムは外管により保持されることを踏まえて評価する。また、原子炉運転中に窒素雰囲気で維持する格納容器（床下）に位置するナトリウムを内包する配管及び機器が破損した場合には、ナトリウム燃焼を抑制できるため、格納容器（床下）を空気に置換した場合の影響を評価する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; 配管直径の 1/2 の長さで配管肉厚の 1/2 の幅を有する貫通クランクからの漏えいを想定する。</li> <li>&gt; ナトリウム漏えい量の評価に当たっては、漏えい停止機能（緊急ドレイン）による漏えい停止までの漏えい継続時間を考慮する。</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

<p>⑤ ナトリウム漏えい区画が不活性ガス雰囲気である場合はナトリウムの燃焼を防止できるが、漏えいしたナトリウムの除去の際など、当該区画の不活性化環境を解除する場合も考慮し、ナトリウム燃焼の影響を評価する。</p>	
<p>(7) ナトリウム燃焼の影響軽減</p> <p>上記(6)で評価したナトリウム燃焼の影響を考慮し、火災防護対象機器を設置する火災区域又は火災区画内の火災及び隣接する火災区域又は火災区画におけるナトリウム燃焼の影響に対し、火災の影響を軽減するための措置を講じた設計であること。ここで、「火災の影響軽減のための措置を講じた設計」とは、火災防護基準の「火災の影響軽減」に要求される事項に適合する設計であることをいう。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉冷却材バウンダリを構成し、1次冷却材を内包する配管及び機器は、二重構造とするとともに、当該間隙を窒素雰囲気で維持し、万一、1次冷却材が漏えいした場合であっても、漏えいしたナトリウムを当該間隙で保持し、ナトリウム燃焼を抑制する。</li> <li>・ 上記以外で1次冷却材を内包する配管及び機器並びに格納容器(床下)に設置する2次冷却材を内包する配管及び機器については、原子炉運転中、格納容器(床下)を窒素雰囲気で維持し、万一、当該冷却材が格納容器(床下)に漏えいした場合であっても、漏えいしたナトリウムを格納容器(床下)で保持し、ナトリウム燃焼を抑制する。</li> <li>・ 2次冷却材を内包する配管及び機器において、2次冷却材が漏えいした場合、漏えいの発生した系統内のナトリウムを2次冷却材ダンプタンクへ緊急にドレンし、ナトリウム漏えい量を低減する。</li> <li>・ ナトリウムを保有する火災区域又は火災区画については、3時間以上の耐火能力を有する耐火壁(コンクリート壁厚さ:150mm以上)によって他の火災区域又は火災区画から分離する。火災の影響評価において設定した火災等価時間を1時間未満とする火災区域又は火災区画は、耐火壁、防火戸、防火ダンパ及び貫通部シール(不燃性パネル又は不燃性パテを使用)により、他の火災区域又は火災区画から分離する。耐火壁については建設省告示1399号に、防火戸及び防火ダンパについては建設省告示1369号に基づき、1時間以上の耐火時間を設定する。</li> <li>・ 床面に設置した鋼製のライノパについて、堰を設け、漏えい拡散面積を制限</li> </ul>



	<p>することで、ナトリウムと空気の接触面積を低減し、ナトリウム燃焼の影響を軽減する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主冷却機建物において、ナトリウムと湿分等の反応により発生した水素が蓄積する可能性がある火災区域又は火災区画にあっては、当該火災区域又は火災区画に、窒素ガスを供給し、水素の濃度が燃焼限界濃度以下に抑制できるものとする。</li> <li>・ 主冷却機建物においては、漏えいしたナトリウムを受樋又は床ライナから連通管を経由して、ナトリウム溜に導く設計とし、ナトリウム溜で漏えいしたナトリウムを保持する。また、防煙ダンパを設け、換気空調設備の停止及び防煙ダンパの閉止により、ナトリウムエアロゾルの拡散を防止する。</li> </ul>
<p>(8) ナトリウムと構造材との反応防止</p> <p>高温のナトリウムとコンクリートが接触すると、当該ナトリウムとコンクリート中の水分及び反応生成物とコンクリート成分の反応が生じるため、これを防止する設計とすること。ここで、「これを防止する設計」とは、例えば、コンクリート床面に鋼製のライナを敷設することや、配管周辺に受樋を設置することにより、ナトリウムとコンクリートの接触を防止すること等の設計であることを行う。その際、鋼製ライナや受樋の設計にあっては、ナトリウム燃焼に伴い鋼製材料の腐食が生じることを考慮した厚さと</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 耐火能力を有する鋼製のライナ又は受樋を設置し、ナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止する。</li> <li>・ 鋼製ライナや受樋の設計にあっては、ナトリウム燃焼に伴い鋼製材料の腐食が生じることを考慮した厚さとする。</li> </ul>

ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計
-----------------------

ナトリウムを内包する配管及び機器は、内包するナトリウムを固化することによりナトリウム漏えいの防止措置を講じるか、配管及び機器の破損に伴い想定される漏えい量が少ないものを除き、基準地震動による地震力に対して、ナトリウムが漏えいすることがないように設計する。このうち、2次冷却材ダンプタンクにあっては、2次冷却材の漏えいに伴う緊急ドレン後に長期間ナトリウムを保有するため、弾性設計用地震動による地震力に対して、おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えるように設計する。

耐震重要度分類Sクラス以外でナトリウムを内包する配管及び機器のうち、以下については、内包するナトリウムを固化することによりナトリウム漏えいの防止措置を講じる(①)か、配管及び機器の破損に伴い想定される漏えい量が少ない(②)ものに該当する。これらの耐震設計に係る概念図を第1図及び第2図に示す。

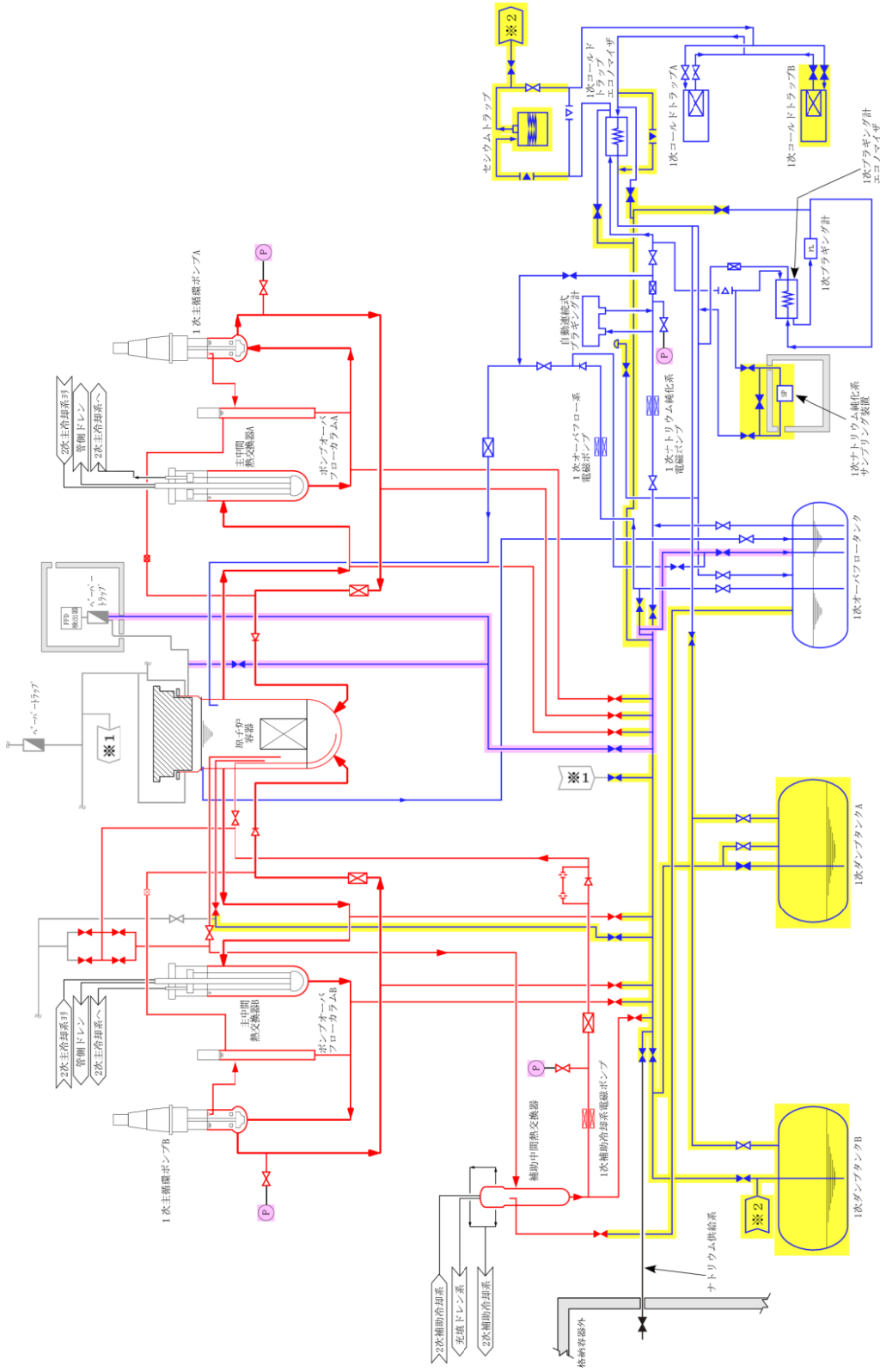
[①に該当するもの] 【】内：系統

- 1-1： サンプリングコイル、関連する配管及び弁【1次ナトリウム純化系】
- 1-2： コールドトラップ(B)、関連する配管及び弁【1次ナトリウム純化系】
- 1-3： セシウムトラップ、関連する配管及び弁【1次ナトリウム純化系】
- 1-4： コールドトラップエコノマイザのバイパス配管及び関連する弁【1次ナトリウム純化系】
- 1-5： 2-1を除く配管、容器及び関連する弁【1次ナトリウム充填・ドレン系】
- 1-6： サンプリングコイル(出入口弁及び出入口弁までの配管を含む。【2次ナトリウム純化系】

[②に該当するもの\*1] 【】内：系統

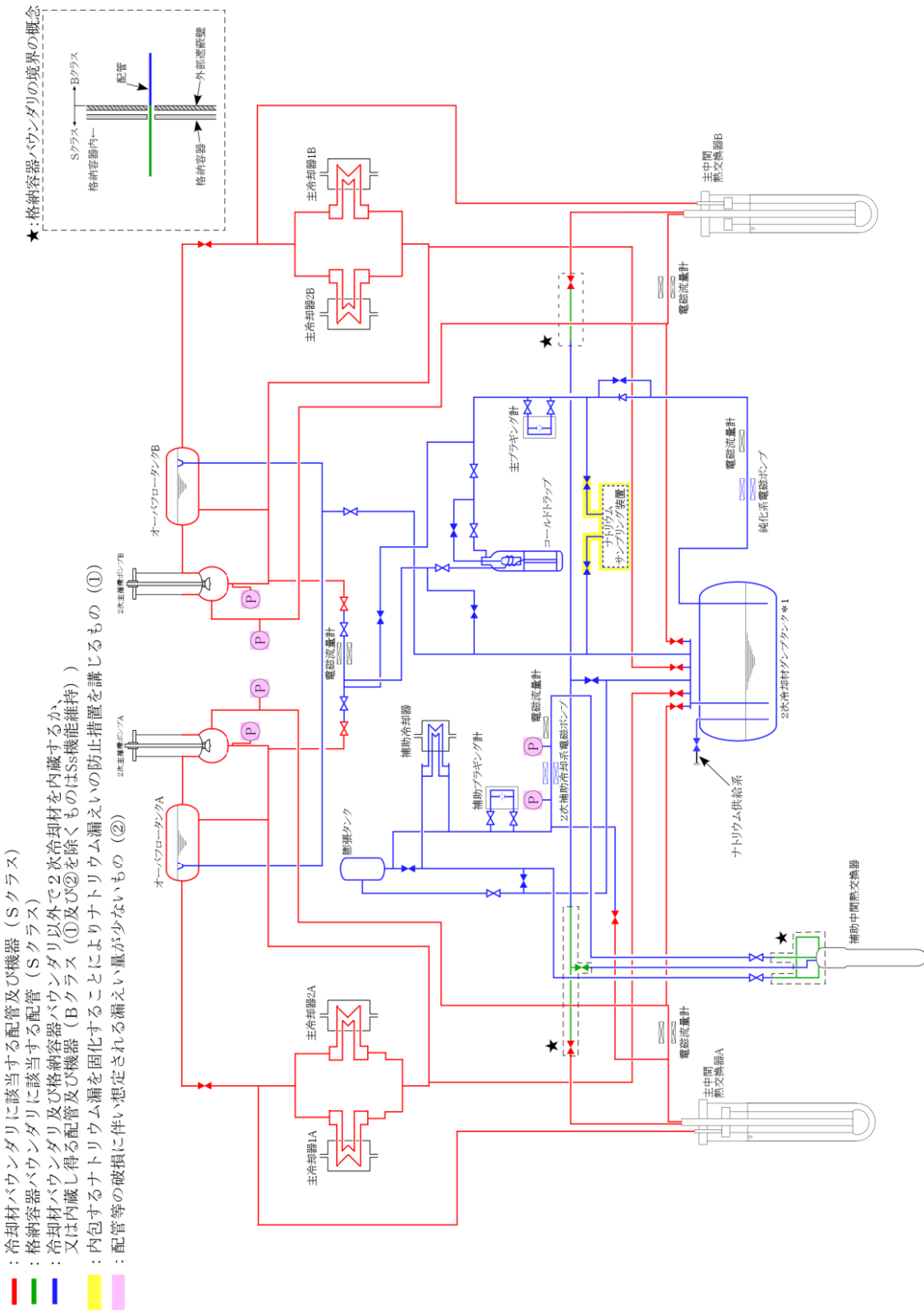
- 2-1： 燃料破損検出系(カバーガス法燃料破損検出設備)のベーパートラップからオーバフロータンク間の配管及び関連する弁【1次ナトリウム充填・ドレン系】
- 2-2： 圧力計の導圧管部【1次主冷却系／1次補助冷却系／1次ナトリウム純化系／2次主冷却系／2次補助冷却系】

\*1： 想定されるナトリウム漏えい量：～数 kg



- : 原子炉冷却材バウンダリに該当する配管及び機器 (Sクラス)
- : 原子炉冷却材バウンダリ以外で1次冷却材を内蔵するか、又は内蔵し得る配管及び機器 (Bクラス (①及び②を除くものはSs機能維持))
- : 内蔵するナトリウムを固化することによりナトリウム漏えいの防止措置を講じるもの (①)
- : 配管等の破損に伴い、想定される漏えい量が少ないもの (②)

第1図 ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計の概念図 (1次系)



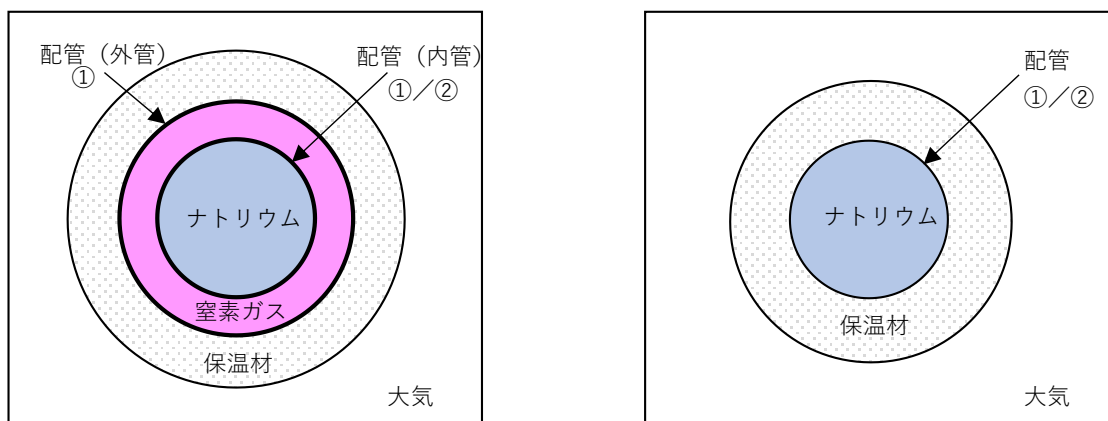
第2図 ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計の概念図 (2次系)

冷却材のバウンダリの肉厚管理の考え方

冷却材のバウンダリの減肉の要因には、「ナトリウム環境における腐食」、「流動による浸食（エロージョン）」及び「大気環境における腐食」がある（添付1参照）。これらのうち、冷却材のバウンダリの減肉の主要因は、「ナトリウム環境における腐食」であり、冷却材のバウンダリの肉厚は、以下により管理する。

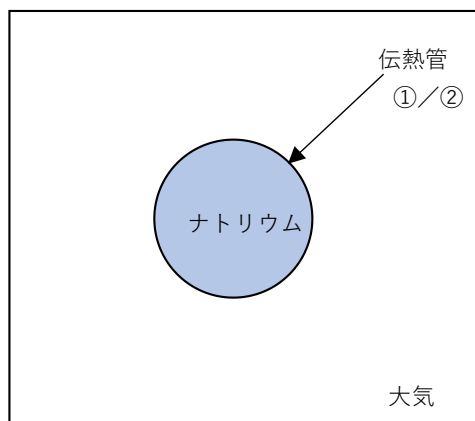
- ・ 腐食代の確保
- ・ ナトリウム中の溶存酸素濃度を十分に低く維持（腐食環境排除）

なお、1次冷却系にあつては、配管エルボの側面を代表点とし、外観を目視確認できる（添付2参照）。2次冷却系にあつては、主冷却器の伝熱管を代表点とし、外観を目視確認できる（添付3参照）。主冷却器の伝熱管にあつては、「大気環境における腐食」を考慮し、定期的に肉厚を測定している。



(a) 1次冷却系（二重構造部）

(b) 1次冷却系の一部及び2次冷却系



(c) 2次冷却系主冷却器の伝熱管

- ① 腐食代の確保： ナトリウムと配管の接触面、配管と大気の接触面（保温材の有無は考慮しない）及び伝熱管と大気の接触面が管理対象
- ② 腐食環境排除： ナトリウムと配管の接触面が管理対象

第1図 冷却材のバウンダリの環境の概念図と肉厚管理の対象部位

「ナトリウム環境における腐食」、「流動による浸食（エロージョン）」及び  
「大気環境における腐食」に起因する減肉に対する肉厚管理の考え方

## 1. ナトリウム環境における腐食

一般に液体金属中に固体材料を浸すと表面エネルギーが低下して成分元素が溶出し易くなる。また、元素の液体金属における溶解度は温度上昇に伴い大きくなることから、材料と液体金属との共存性を評価する上では対象元素の溶解度と温度が重要となる。ナトリウムのようなアルカリ系液体金属では、微量元素、特に酸素濃度が管理された環境は常に還元雰囲気となるため、水環境で見られる材料の直接的な酸化(腐食)は発生しない。しかし、酸素の存在により、主要な合金元素、鉄、ニッケルやクロムはナトリウムと複合酸化物を形成するため、酸素濃度上昇とともに見掛けの溶解度は増加する。

このため、ナトリウムを冷却材に用いるナトリウム冷却型高速炉では、軽水炉における水中の酸化膜形成やその剥離の繰り返しによる減肉の進行は発生し難く、系内の温度分布による質量移行が主要な腐食進行因子となる。質量移行は、ナトリウム中の溶存酸素濃度により加速されるが、「常陽」ではこれを抑制するため酸素濃度を十分に低く維持している（原子炉施設保安規定に定めるプラグイン温度に相当する酸素濃度 1次系：10ppm 以下、2次系：20ppm 以下）。

なお、設計及び工事の方法の認可申請では、設計温度における酸素濃度（1次系：15ppm、2次系：25ppm）での腐食速度に対する材料表面の変質層を腐食代として考慮した強度計算を行っており、運転管理において、これより十分に低い酸素濃度に管理しているため、設計時の腐食代を超えることはない。

## 2. 流動による腐食

流動ナトリウムによる浸食（エロージョン）には、流速、溶存酸素、溶存水素(pH)、純度、温度及び材質等が影響する。これらの因子による影響は、複雑に干渉するが、最終的には材料の保護膜となる酸化被膜( $Fe_3O_4$ )の形成と安定化、あるいは剥離挙動への関与に帰着する。

典型的な浸食発生が報告された米国サリー原子力発電所 2 号炉給水配管の場合、水質（溶存酸素、水素、及び温度）の劣化が安定な酸化被膜形成を阻害し、流路の不適切さもあって、高速乱流及び局部蒸気相（高温高速 2 相流）の発生が密着性を損なった酸化被膜を剥離させ、浸食を促したと報告されている。平成 16 年 8 月 9 日に関西電力美浜発電所 3 号機において発生した 2 次系配管破損事故の場合、配管の材質は炭素鋼 (SB42) で、配管破損は、偏流の発生しやすい復水流量を計測する流量計オリフィスの下流部で、浸食の発生しやすい温度の部位で発生したことが明らかにされている。なお、浸食は耐食性（耐酸化性）に劣る炭素鋼に多く発生することが明らかにされており、合金元素（クロム）の添加により著しく改善されることもわかっている。

ナトリウム冷却型高速炉の場合、溶存酸素は他の不純物元素と共に厳密に管理されており、環境は常に還元雰囲気にあることから、材料表面に酸化被膜は形成されない。そのため、表面保護層の形成は期待できない半面、脆化した酸化被膜の剥離による減肉も生じない環境にある。したがって、2 次冷却系の配管材であるクロムが添加されたクロムモリブデン鋼である STPA24 (2・1/4Cr-1Mo 鋼) で

は、水環境等で観察される腐食（酸化）とエロージョンの繰り返しによる減肉進行は発生し難い。「常陽」では、平成12年～15年に実施したMK-Ⅲ冷却系改造工事において、主冷却器出入口配管直管部（24箇所×4点）及び主中間熱交換器2次側出口配管エルボ部（4個×5箇所×4点）の肉厚測定を実施し、減肉していないことを確認している。なお、この時点での原子炉運転時間は約61,000時間、定格出力運転時間で約49,000時間であった。また、ナトリウム流量の測定には、電磁流量計を用いており、配管内部に軽水炉のような流量を測定するオリフィスは設置していない。

### 3. 大気環境における腐食

大気環境では、湿気、水（ $H_2O$ ）、塩素イオンが介在して、金属のプラスイオンと水や大気環境下で発生するマイナスイオンとの電位差によって腐食するが、大気中に含まれる海塩粒子が結晶して外面に付着し、その表面に酸化被膜（ $Fe_3O_4$ ）が形成され、最終的には材料の保護膜となる。この保護膜の剥離によって減肉が生じる。

二重構造を有する1次主冷却系や1次補助冷却系の配管（内管）と配管（外管）との間隙は、不活性ガスである窒素ガス雰囲気中で維持される。さらに、配管の外側には、予熱状態を維持するために保温材を敷設しており、配管及び機器は、基本的に停止中も約200℃に保温されるため、配管（内管）と配管（外管）の外表面に形成された酸化被膜が剥離する環境にない。また、1次冷却系の配管及び機器のナトリウムを内包する構造材は、SUS304（オーステナイト系ステンレス鋼（18Cr-8Ni系））であり、2次冷却系に用いられているクロムモリブデン鋼よりも耐食性に優れている。

2次主冷却系の配管及び機器のナトリウムを内包する構造材は、外面が金属製の内装板で覆われ、その上に保温材が設置された部分と、主冷却器の伝熱管のように流動を伴う空気と直接接触する部分がある。このうち、保温材が設置されている部分は、1次冷却系の配管及び機器と同様に、基本的に停止中も配管及び機器は約200℃に保温されるため、外表面に形成された酸化被膜が剥離する環境にない。これについては、MK-Ⅲ冷却系改造工事時において、当該部位の外観観察・肉厚測定により、有意な減肉がないことを確認している（「2次冷却系配管の肉厚測定結果」を参照）。一方、外面が直接空気に接触して減肉しやすく、肉厚が最も薄い（約2mm）配管である主冷却器の伝熱管については、その使用環境に鑑み、自主検査として、定期的に肉厚を測定し、その減肉を管理することで、必要肉厚（0.4mm）を確保できるものとしている。

### 【2次冷却系配管の肉厚測定結果】

MK-Ⅲ冷却系改造工事では、配管（2次冷却系の配管のうち、外面が金属製の内装板で覆われ、その上に保温材が設置された部分）について、24箇所×4点（合計96点）の肉厚の測定を実施した。以下に示すように、当該測定結果は、基準（JISにおける配管製作許容差（公称値±10%）の最小板厚）を上回る。

12B 配管：10.4～11.1mm ※ 基準：9.27mm

10B 配管：8.8～9.5mm ※ 基準：8.37mm

また、偏流が生じて流速が増加するエルボ部については、主中間熱交換器出入口配管の4箇所×20点（合計80点）を測定対象とした。以下に示すように、当該測定結果は、基準（JISにおけるエルボ製作許容差（公称値-12.5%以上）の最小板厚）を上回る。

12B エルボ：10.9～14.9mm ※ 基準：9.01mm

10B エルボ：9.5～12.8mm ※ 基準：8.14mm

なお、保温材が設置されている部分にあっては、原子炉運転時間約61,000時間の高温流動ナトリウム環境において、有意な減肉がなかったことから、「常陽」設計寿命期間中において、減肉条件が最も厳しい主冷却器の伝熱管を対象とした肉厚測定を実施する管理は妥当と判断できる。



主中間熱交換器入口配管エルボ（12B）



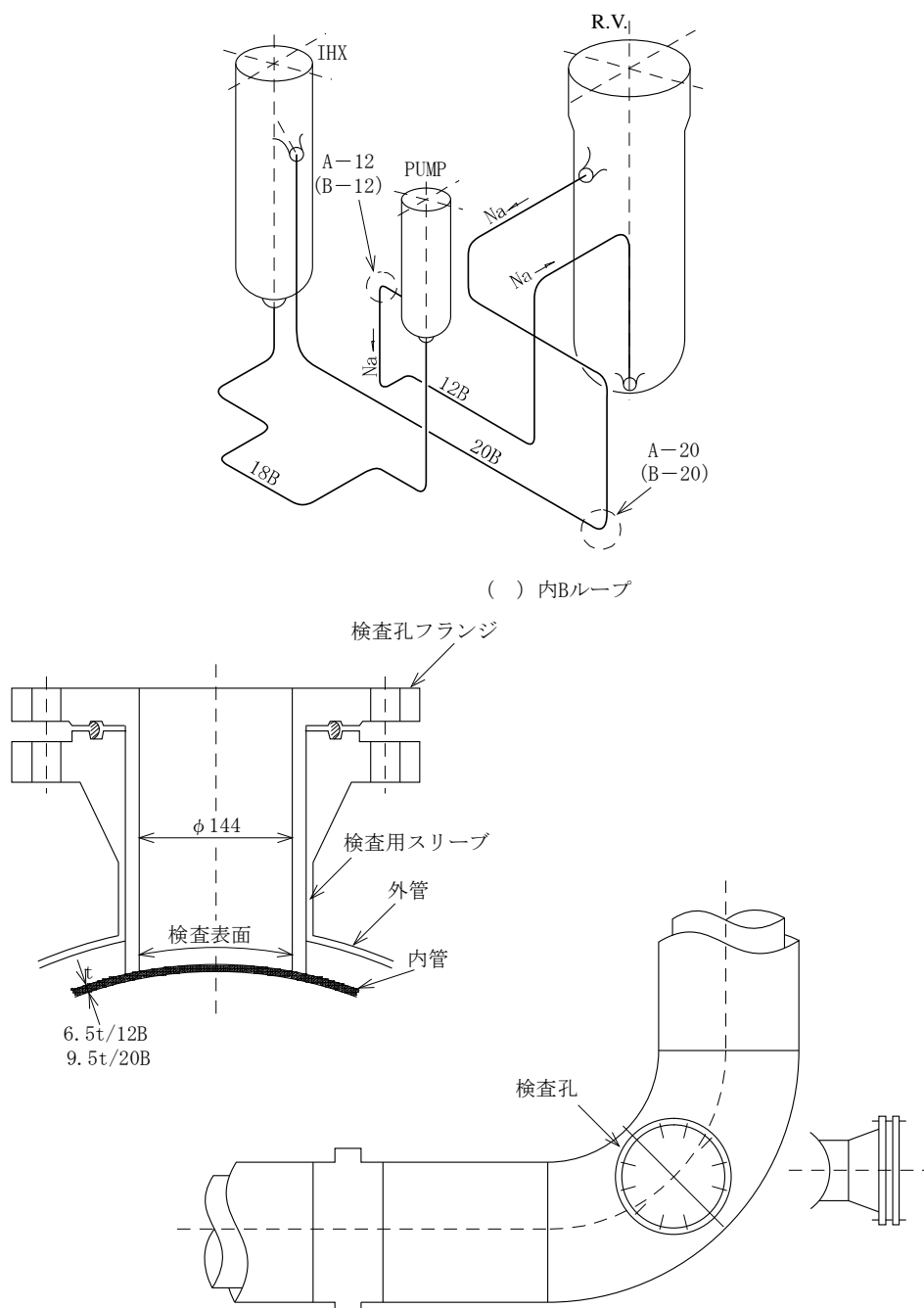
主中間熱交換器出口配管エルボ（12B）





1次冷却系の冷却材のバウンダリの外観確認

1次冷却系は、配管エルボの側面を代表点（ホットレグ：1点×2ループ、コールドレグ：1点×2ループ）とし、外観を目視確認できる。配管検査孔の構造を第1図に示す。定期検査ごとに、当該検査孔を用いて、配管表面にき裂、腐食、変形及びナトリウム漏れがないことを目視にて確認している（配管検査孔外観：第2図参照、配管表面写真：第3図参照）。



第1図 1次主冷却系配管検査孔の構造（検査用スリーブを取り付けた状態）

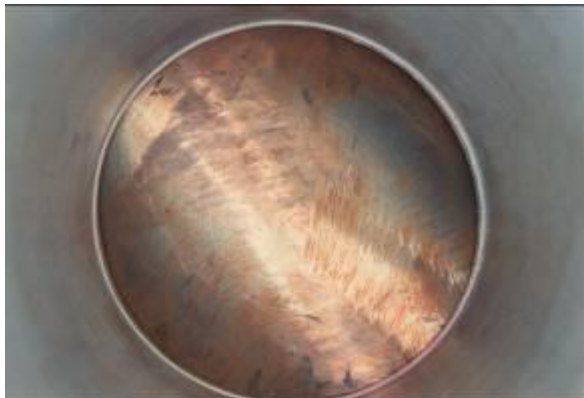


(通常時)



(検査時)

第2図 配管検査孔の外観 (一例)



昭和 55 年 12 月 1 日 (第 2 回施設定期検査)



平成 17 年 7 月 21 日 (第 14 回施設定期検査)

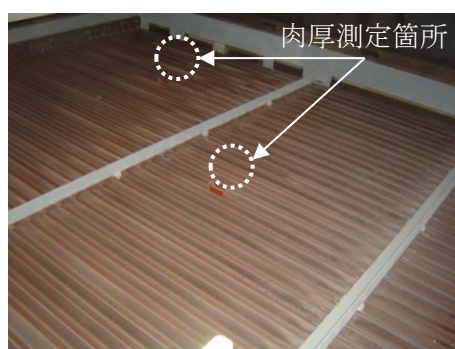
ホットレグ (例: Aループ)

コールドレグ (例: Aループ)

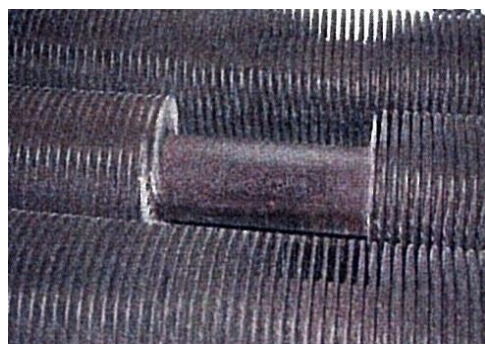
第3図 配管表面の写真 (一例)

## 2次冷却系の冷却材のバウンダリの外観確認

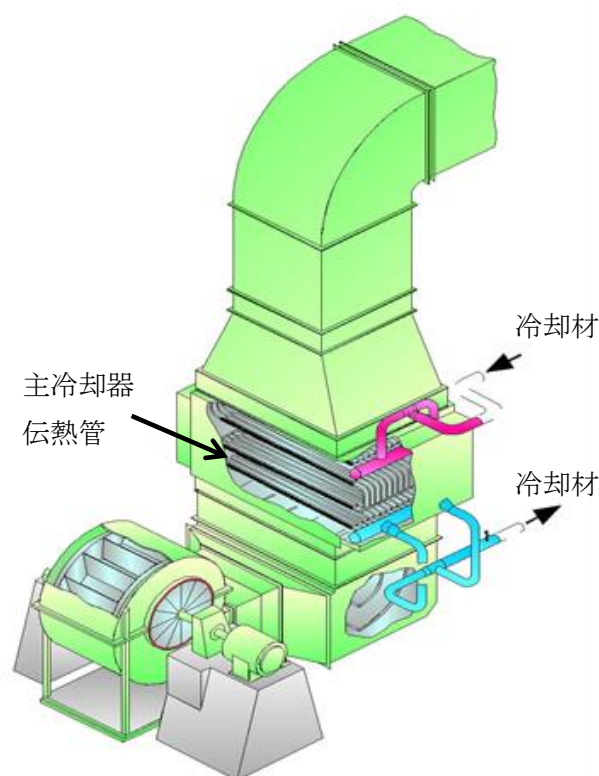
2次冷却系にあつては、主冷却器の伝熱管（第1図参照）を代表点とし、外観を目視確認できる。主冷却器の伝熱管にあつては、「大気環境における腐食」を考慮し、定期検査ごとに、肉厚測定を実施している。なお、MK-Ⅲ冷却系改造工事では、主冷却機を更新している。旧主冷却器の伝熱管の肉厚測定等において、大気環境における腐食が生じているものの、想定した腐食代を下回り、必要な肉厚を有することを確認している（第2図参照）。



(主冷却器伝熱管外観)



(肉厚測定箇所)



第1図 主冷却器伝熱管の構造概要



第2図 過去の主冷却器伝熱管の肉厚確認結果（一例）

ナトリウム漏えい検出器の構造等
-----------------

## 1. ナトリウム漏えい検出器の構造及び動作原理

## (1) 通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器

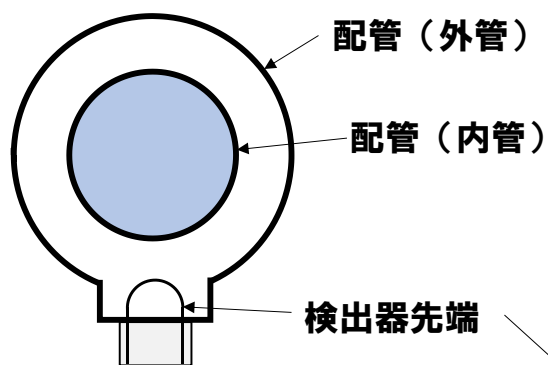
通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器は、検出器先端と電極シース保護管との間に直流電圧が印加されており、ナトリウム漏えいが生じて検出器に到達すると、電極とシース保護管がナトリウムによって短絡されることを利用したものである（第 1.1 図参照）。通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器は、1 次冷却系（216 点）と 2 次冷却系の一部（49 点）に適用する。

## (2) 通電式（リボン型）のナトリウム漏えい検出器

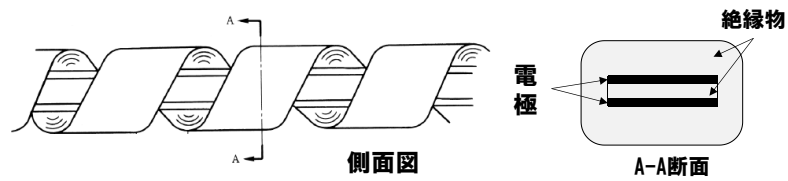
通電式（リボン型）のナトリウム漏えい検出器は、2 つの電極が絶縁物を間にして平行に配置されており、各電極とアースとの間に直流電圧が印加されており、ナトリウム漏えいが生じて検出器に到達すると、電極とアースが短絡されることを利用したものである（第 1.2 図参照）。通電式（リボン型）のナトリウム漏えい検出器は、2 次冷却系に適用（179 点）する。

## (3) 光学式のナトリウム漏えい検出器

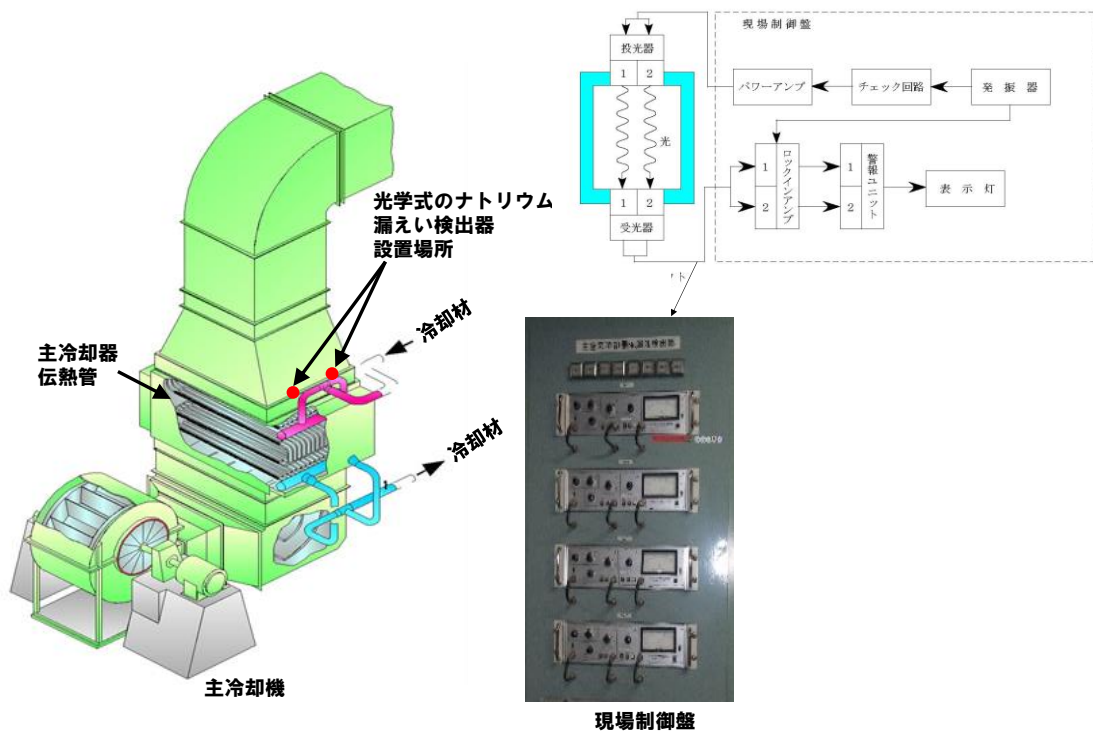
光学式のナトリウム漏えい検出器は、空気冷却器内で、ナトリウム漏えいが発生した場合に、ナトリウム燃焼によって生じる白煙（ナトリウムエアロゾル）により、光の透過率が減少することを利用したものである（第 1.3 図参照）。光学式のナトリウム漏えい検出器は、主冷却器（2 点×4 式）と補助冷却器（2 点×1 式）に適用する。



第 1.1 図 通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器の構造概要



第 1.2 図 通電式（リボン型）のナトリウム漏えい検出器の構造概要



第 1.3 図 光学式のナトリウム漏えい検出器の構造概要

## 2. ナトリウム漏えい検出器の配置

ナトリウム漏えい検出器は、ナトリウムを内包する配管及び機器の破損に伴うナトリウム漏えいを検知できるようにナトリウムを内包する配管及び機器の構造等を考慮して適切に配置する。ナトリウム漏えい検出器の配置を第 2.1 図から第 2.9 図に示す。

### (1) 1 次系：原子炉冷却材バウンダリ

原子炉冷却材バウンダリに該当する配管及び機器は、配管（内管）と配管（外管）で構成される二重構造を有する。当該構造を踏まえるとともに漏えいの可能性が相対的に高い配管のエルボ部の配置も考慮した上で、二重構造の間隙の水平部に通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器を配置する。また、構造上、漏えいの可能性が相対的に高いベローズ構造を有する弁のベローズ部にも通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器を配置する。第 2.10 図に原子炉冷却材バウンダリにおけるナトリウム漏えい検出器の配置の一例を示す。

### (2) 1 次系：原子炉冷却材バウンダリを除く。

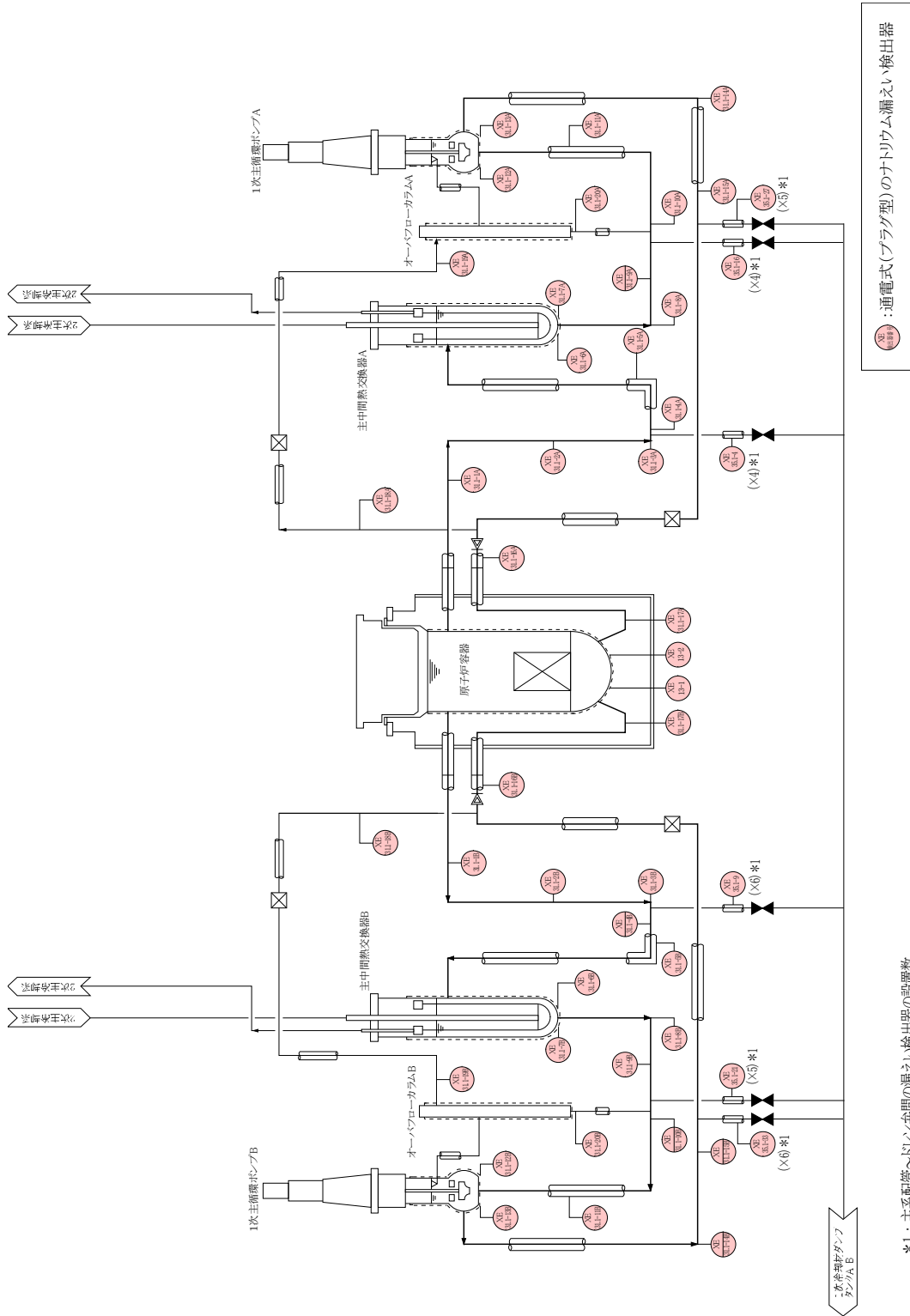
原子炉冷却材バウンダリを除き 1 次冷却材を内包する配管及び機器（容器、ポンプ及び弁）にあつては、配管部からの漏えいも検知できるように配管等の外側に金属製のシートを敷設し、金属製のシートの内側に通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器の検出部を設置する。

### (3) 2 次系：主冷却器及び補助冷却器を除く。

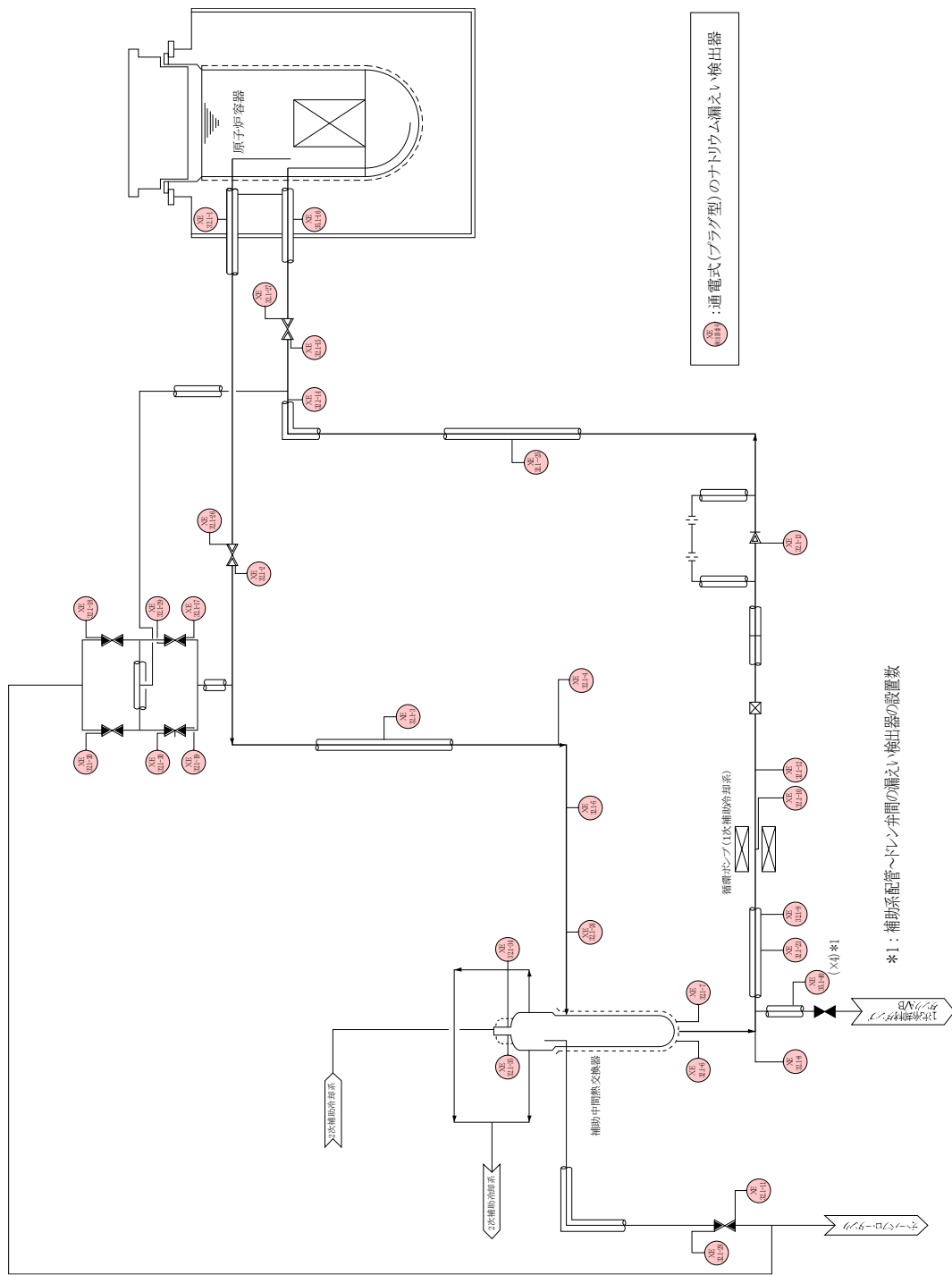
2 次冷却材を内包する配管及び機器（主冷却器及び補助冷却器を除く。）にあつては、漏えいの可能性が相対的に高い配管のエルボ部の配置も考慮した上で、適切な間隔で配管と金属製のシートの間に通電式（リボン型）のナトリウム漏えい検出器を配置する。また、構造上、漏えいの可能性が相対的に高いベローズ構造を有する弁のベローズ部には通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器を配置する。第 2.11 図に通電式（リボン型）のナトリウム漏えい検出器の設置の概念図を示す。

### (4) 2 次系：主冷却器及び補助冷却器

主冷却器及び補助冷却器の伝熱管は、その機能上、外気と直接接触する。当該構造に鑑み、主冷却器及び補助冷却器の出口ダクトに光学式のナトリウム漏えい検出器を配置する。

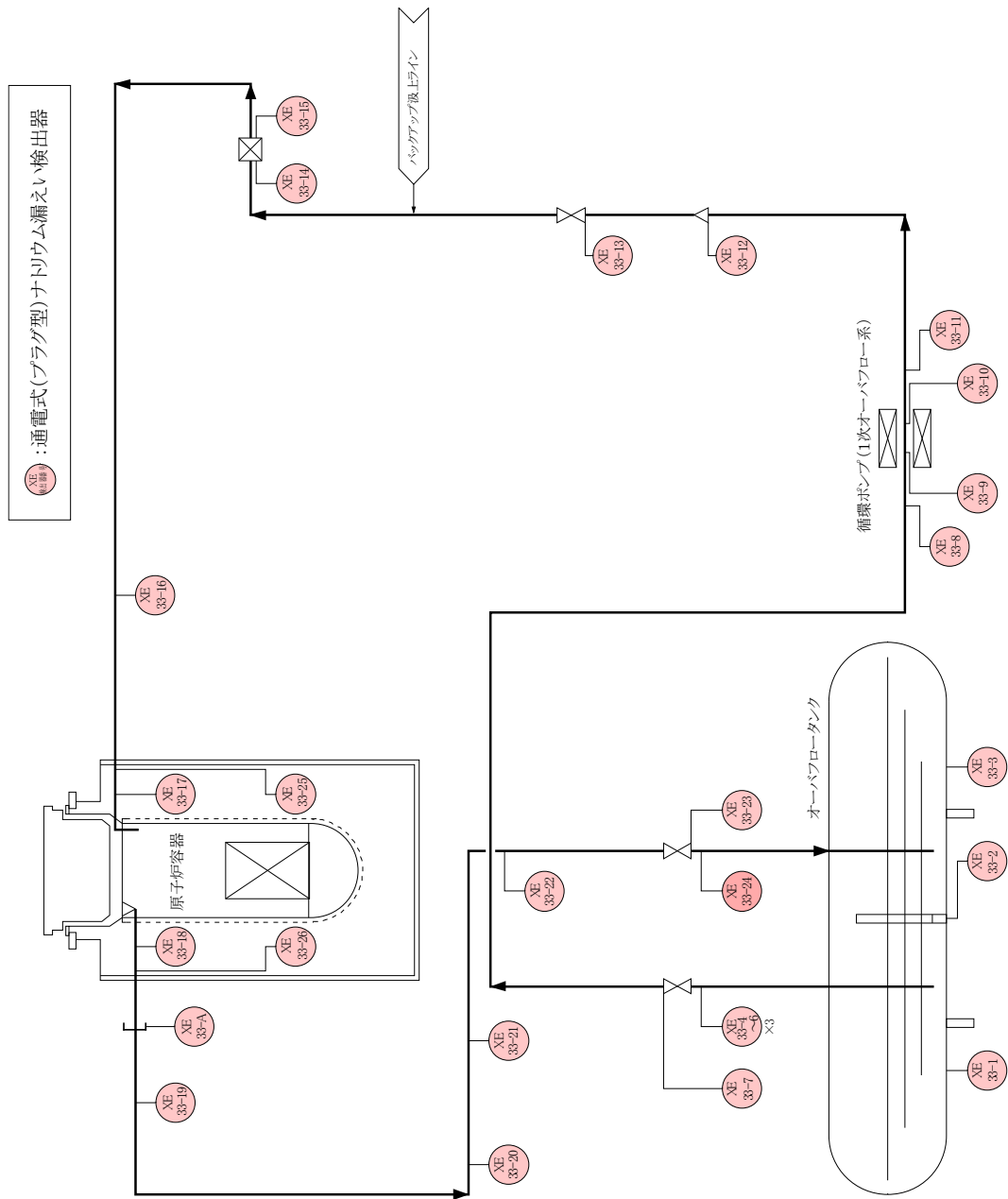


第 2.1 図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図（1次主冷却系）

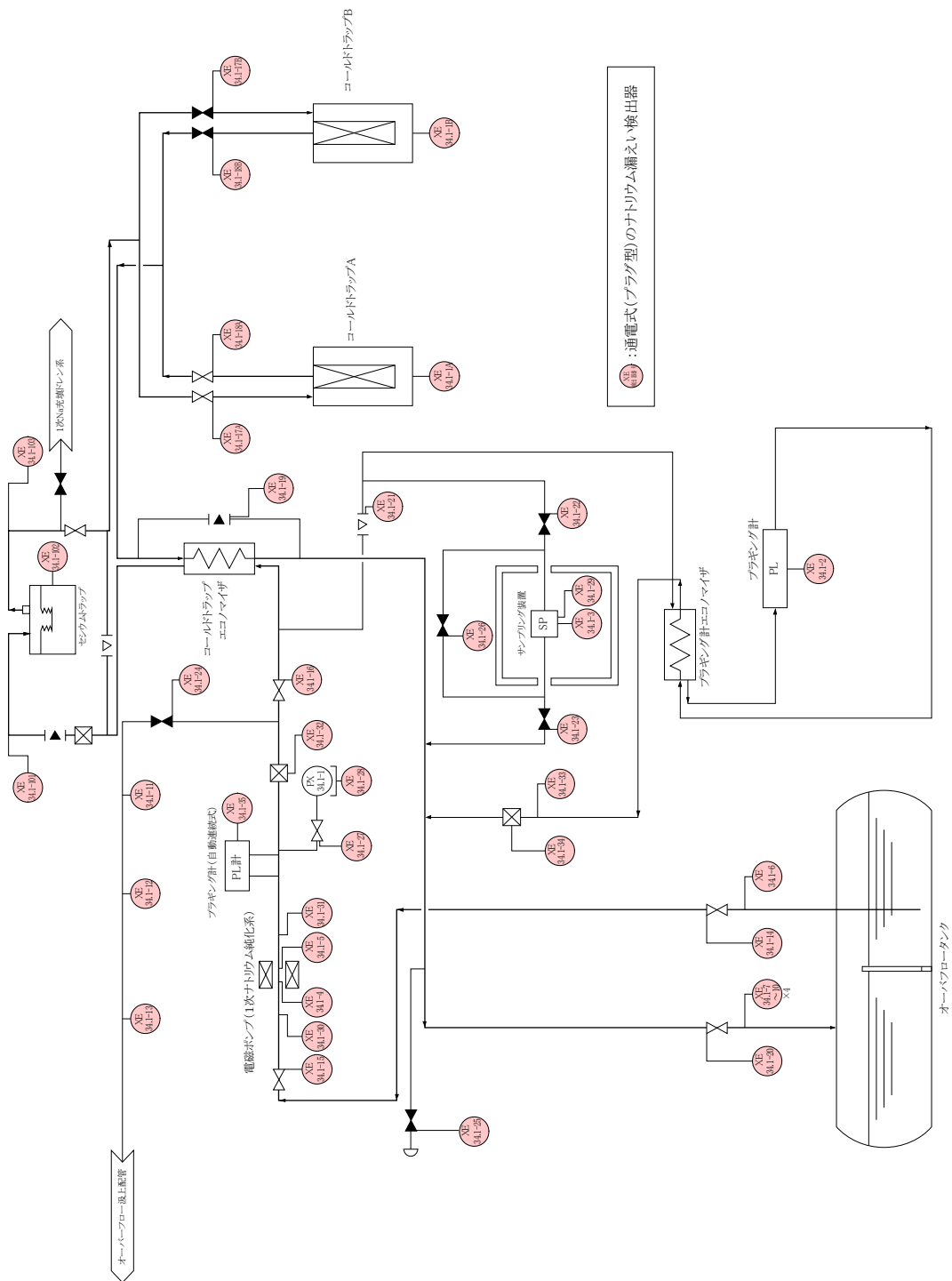


第 2.2 図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図 (1次補助冷却系)

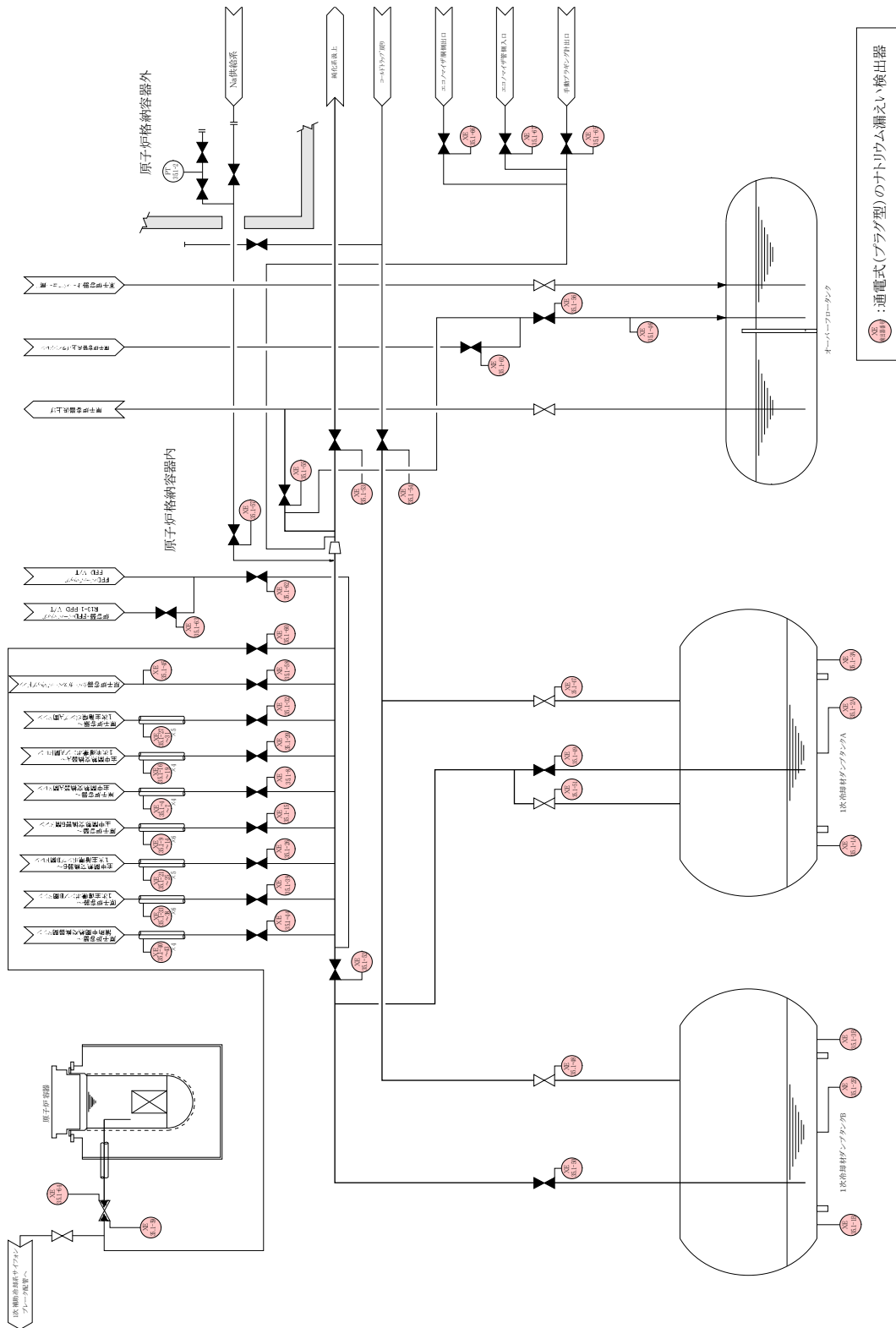




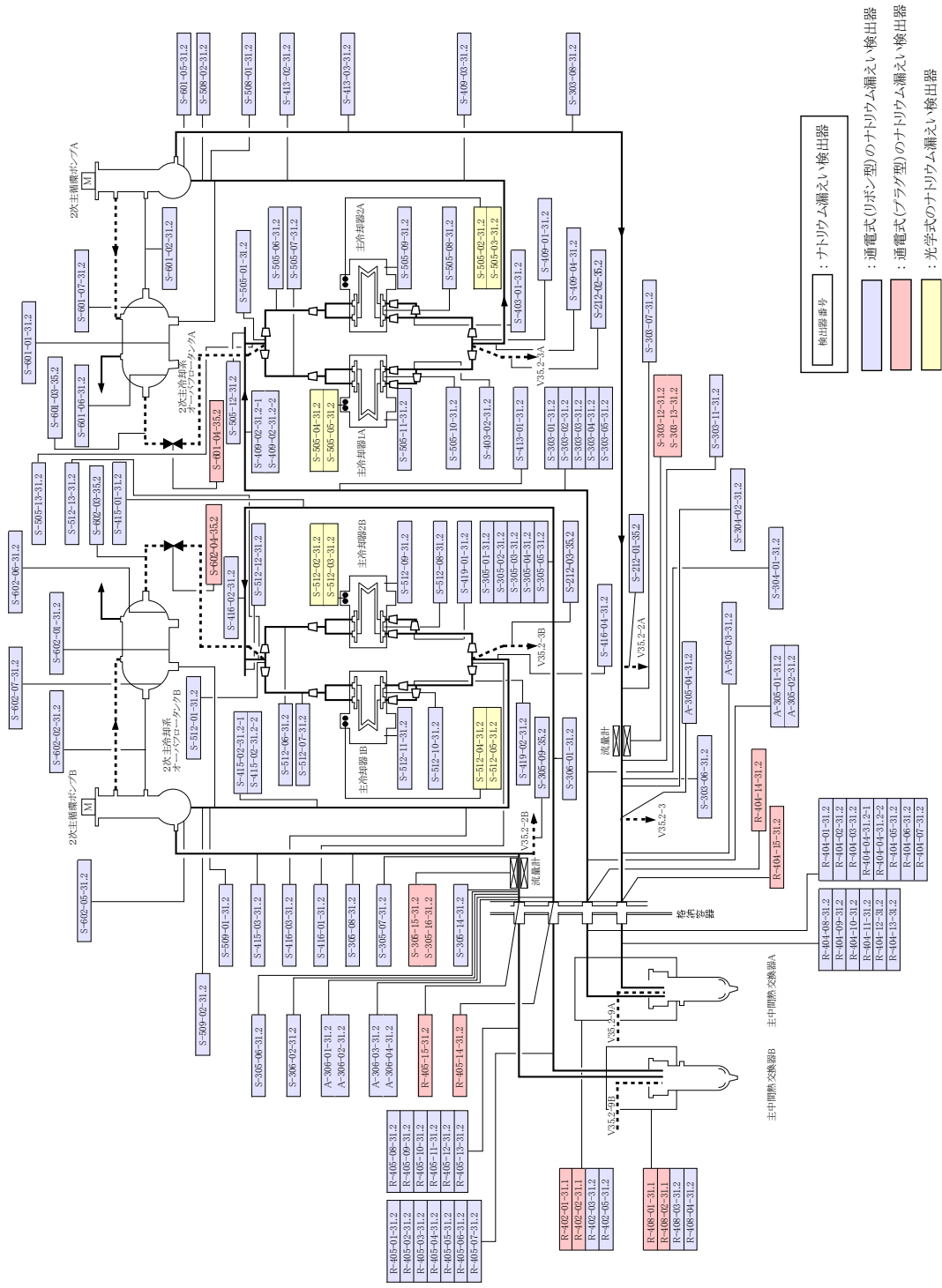
第 2.3 図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図 (1 次オーバーフロー系)



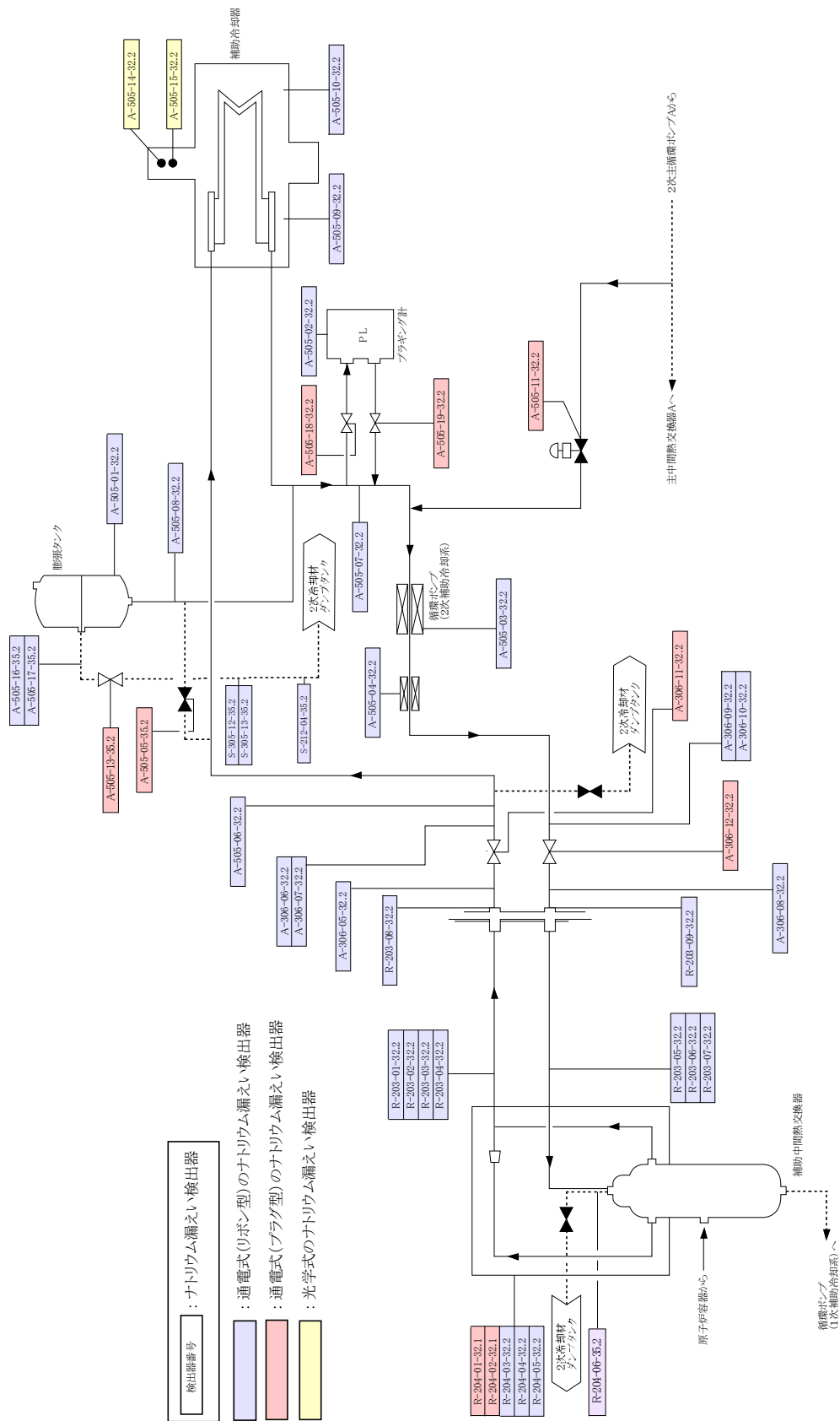
第2.4図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図（1次ナトリウム純化系）



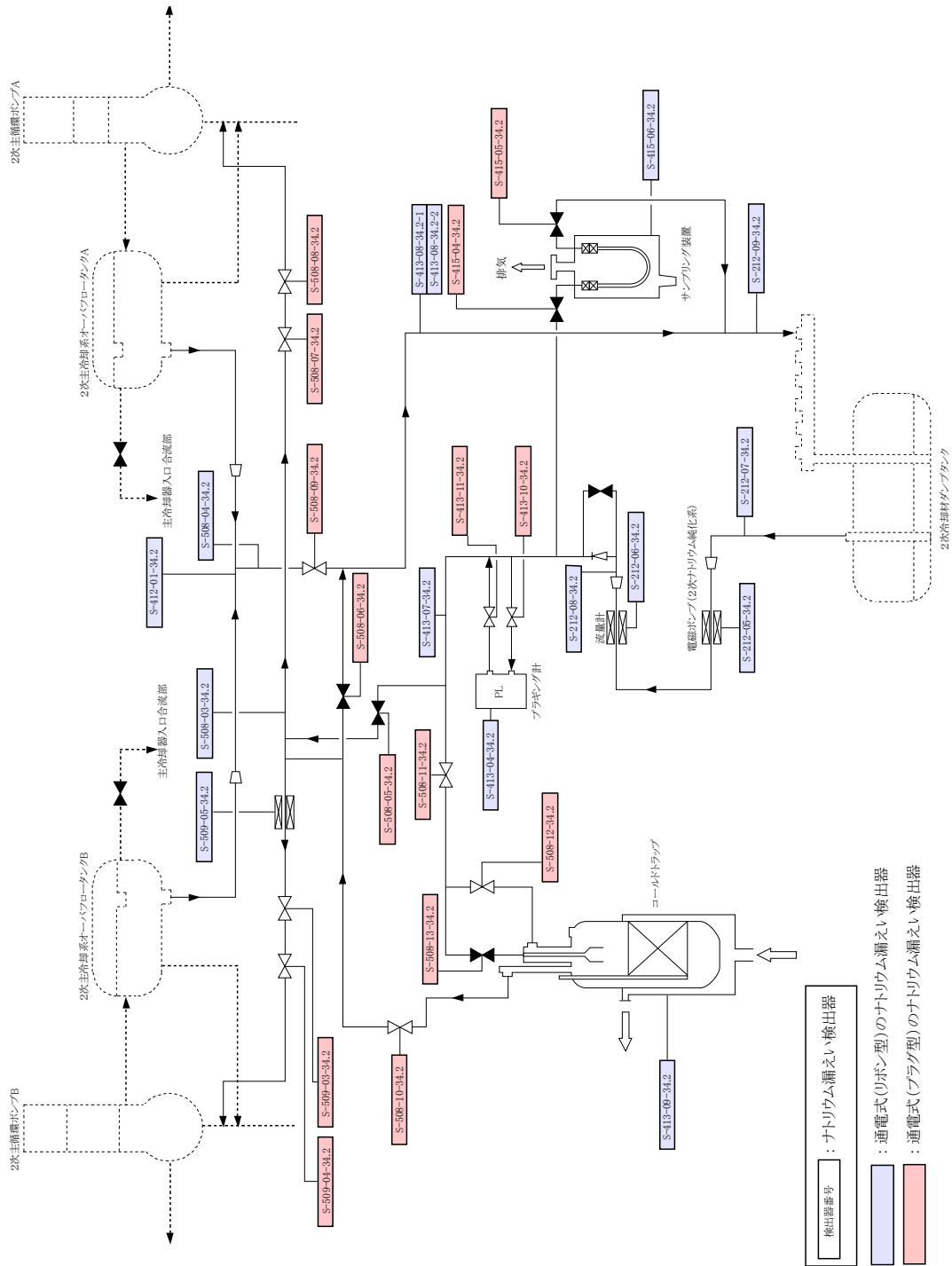
第 2.5 図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図（1 次ナトリウム充填・ドレン系）



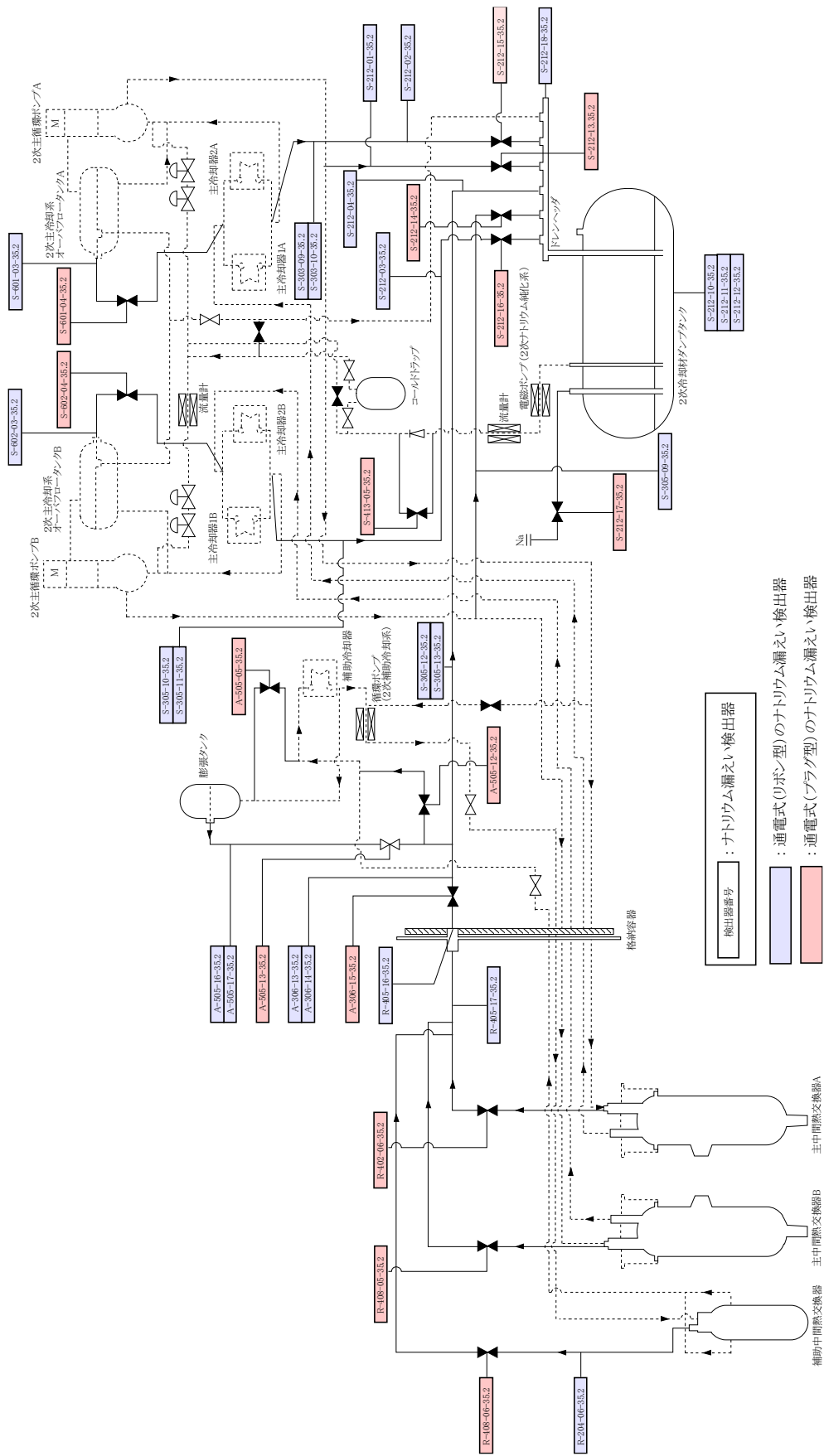
第 2.6 図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図（2次主冷却系）



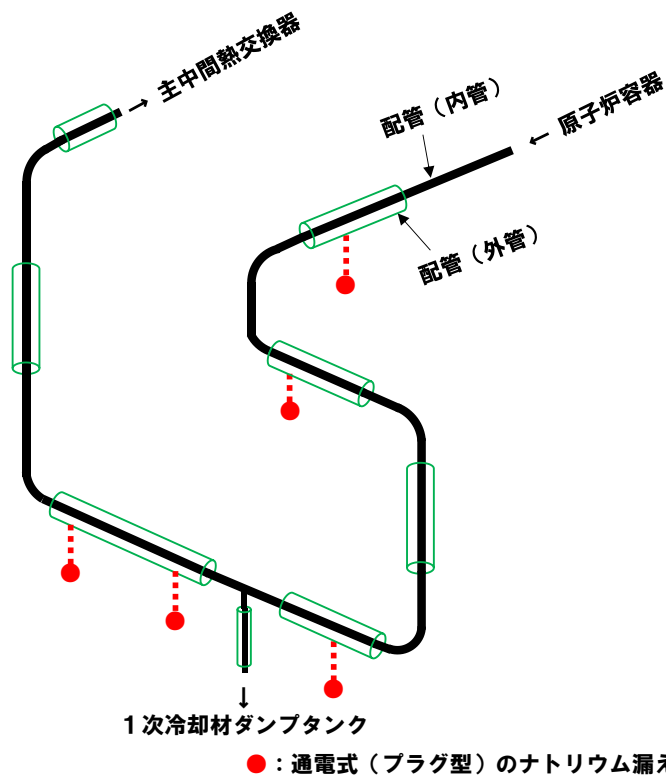
第 2.7 図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図 (2次補助冷却系)



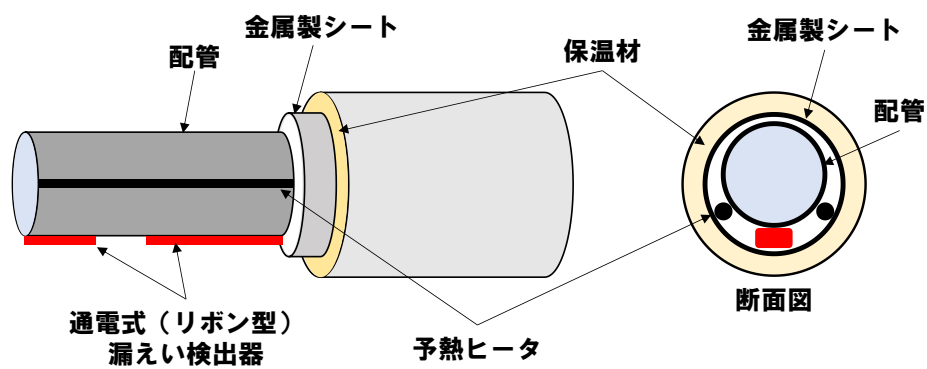
第 2.8 図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図（2次ナトリウム純化系）



第2.9 図 ナトリウム漏えい検出器の配置の概略図 (2次ナトリウム充填・ドレン系)



第 2.10 図 原子炉冷却材バウンダリにおける漏えい検出器の配置の一例  
(原子炉容器出口～主中間熱交換器入口)



第 2.11 図 通電式(リボン型)のナトリウム漏えい検出器の設置概念図



### 3. ナトリウム漏えい検出器に対する誤作動防止の方策

ナトリウム漏えい検出器の誤作動を防止するため、以下の方策を講じるものとする。なお、万一、単一のナトリウム漏えい検出器が誤作動した場合であっても、ナトリウム漏えいの判断は、同一エリアの火災感知器の作動、現場の確認又は冷却材の液位低下により行うものとする。

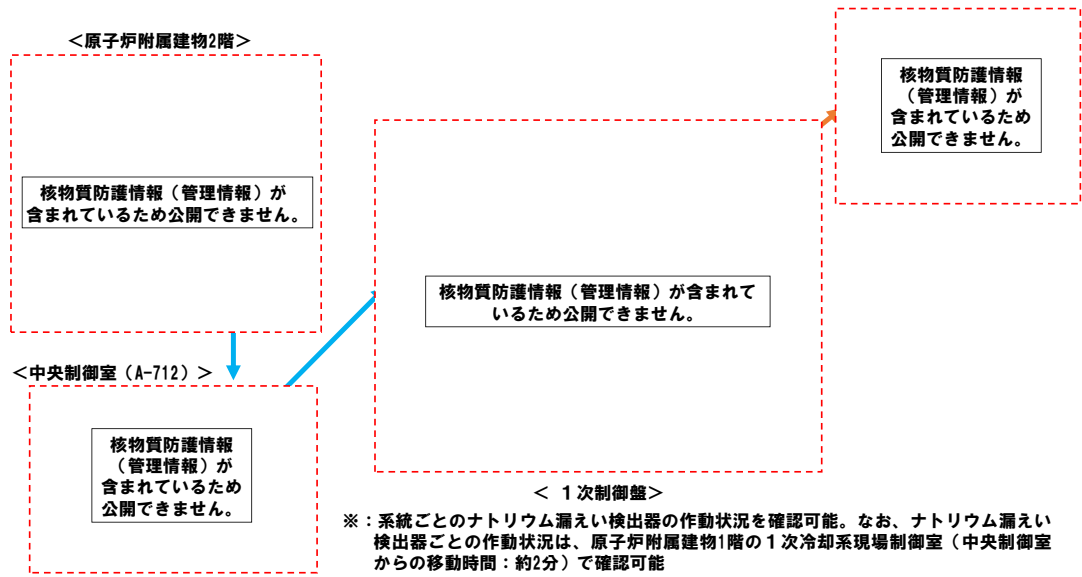
- ・ 電極とシース保護管又はアースがナトリウムにより短絡されることを利用する通電式のナトリウム漏えい検出器は、二重構造の間隙や金属製シート等の中に検出素子を配置することにより、金属片等の異物混入による誤作動の防止を図る。なお、施工時にあっても、洗浄等の管理を十分に実施している。
- ・ ナトリウム燃焼によって生じる白煙（ナトリウムエアロゾル）により光の透過率が減少することを利用する光学式のナトリウム漏えい検出器は、埃や電氣的ノイズ等に応答しないように留意した回路の構成とすることにより誤作動の防止を図る。

### 4. 中央制御室での監視

ナトリウム漏えい検出器の作動により、中央制御室に警報が発せられる。当該警報により、運転員は、中央制御室において、ナトリウム漏えいを検知できる。

1次冷却材の漏えいが発生した場合、中央制御室の「1次制御盤」において、警報の発生を確認した後、同盤により、ナトリウム漏えい検出器の作動した場所（系統）を確認できる（第4.1図参照）。また、ナトリウム漏えい検出器ごとの作動状況は、原子炉附属建物1階の1次冷却系現場制御室で確認できる（中央制御室から1次冷却系現場制御室への移動時間：約2分）。

2次冷却材の漏えいが発生した場合、中央制御室の「2次制御盤」において、警報の発生を確認した後、同室の「2次ナトリウム漏えい警報盤」に移動し、ナトリウム漏えい検出器の作動した場所（ブロック（基本的には部屋ごと））を確認できる。



第 4.1 図 中央制御室における 1 次冷却材漏えいの監視の概要



第 4.2 図 中央制御室における 2 次冷却材漏えいの監視の概要

特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器の配置等
------------------------

## 1. 特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器等の仕様

ナトリウムは、空気、水やハロゲン等と反応し、また、一般的に火災の消火に用いられる ABC 消火剤（主成分：リン酸アンモニウム等）とも反応するため、ナトリウム燃焼の消火には、炭酸ナトリウム、炭酸カリウム、炭酸リチウム等からなる特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器を用いる（第 1.1 図参照）。なお、これらの成分は、物理的・化学的に安定であり、特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器がその配置場所で破損した場合であっても、機器等に影響を及ぼすことはない。

ナトリウムが直接皮膚に接触すると組織内の水分と反応、水酸化ナトリウムを生成して、これによるアルカリ火傷を生じ、また、ナトリウムエアロゾルは、人体に有害であるため、特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器による消火等にあつては、防護具（防護服や携帯用空気ボンベ等）を用いる（第 1.2 図参照）。



第 1.1 図 特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器



第 1.2 図 防護具の一例

## 2. 特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器等の配置

特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器は、以下のとおり配置する。

- ・ ナトリウムを内包する配管及び機器を設置するエリアごとに 1～2 本程度を分散して配置する。ただし、原子炉運転中、窒素雰囲気で維持する格納容器（床下）にあつては、原子炉停止後、保守のために当該雰囲気を空気雰囲気とした場合に配備する。なお、原子炉停止後に保守のために格納容器（床下）を空気雰囲気に置換（窒素雰囲気から空気雰囲気に置換するまでに要する時間：約 5 時間）している際に漏えいが発生し、これを検知した場合にあつては、置換を停止するとともに、再度、窒素を供給して可能な限り、酸素濃度を低下させることによってナトリウム燃焼を抑制する。
- ・ 上記に加えて、ナトリウムを内包する配管及び機器を設置するエリアに至る経路（主冷却機建物及び原子炉附属建物）にも、特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器を配備し、必要に応じて、持参できるものとする。

### 3. 特殊化学消火剤の保有量

原子炉施設で保有する特殊化学消火剤の量は、一系統における単一の機器の破損を想定し、ナトリウムを内包する配管及び機器を設置するエリアの構造を踏まえて、十分な容量を備えるものとする。具体的には、ナトリウムを内包する配管及び機器を設置するエリアの床面積から 1 トン以上を保有するものとする。

### 4. 訓練

原子炉施設保安規定に基づき年 1 回以上、消火訓練を実施し、特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器等の使用に係る習熟度向上を図る（第 4.1 図参照）。当該訓練は、「試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則」の第 8 条に基づく緊急作業従事者に対する訓練として実施している。なお、下部規定において、対象者の範囲をナトリウム取扱作業者に広げ、ナトリウムを直接取り扱う全ての者に対しても実施している。



第 4.1 図 消火訓練の様子

## 1 次冷却材漏えい時の対応

格納容器（床下）において、1 次冷却材の漏えいが発生した場合の主な対応を以下に示す。

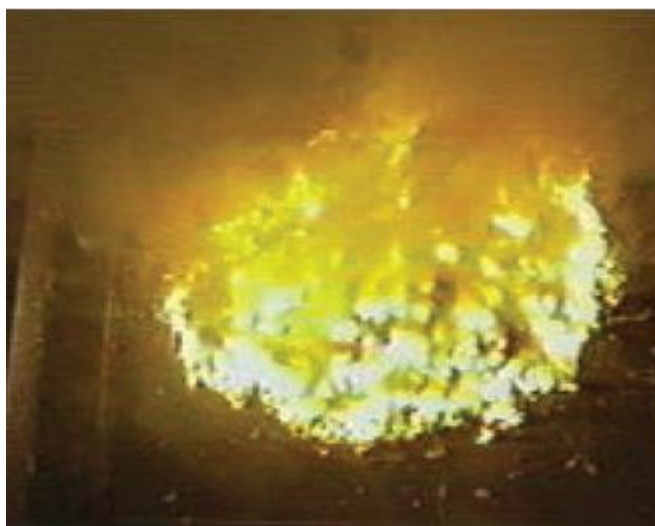
- ① 格納容器（床下）における 1 次冷却材の漏えいの発生を「ナトリウム漏えい警報の発報」を起点として、「オーバフロタンクタンクの有意な液面低下」又は「複数のナトリウム漏えい検出器の作動」により判断する。
- ② 1 次冷却材の漏えいが発生したと判断した場合、原子炉を手動スクラムにより停止（又は原子炉が自動停止したことを確認<sup>\*1</sup>）するとともに原子炉停止後の冷却系の状態を監視する。
- ③ 原子炉冷却材バウンダリ以外で 1 次冷却材を内包する配管及び機器の破損又は二重構造を有する原子炉冷却材バウンダリを構成し、1 次冷却材を内包する配管及び機器が破損し、かつ、当該二重構造の外管が破損した場合、格納容器（床下）にナトリウムが流出する。当該ナトリウムにより、格納容器内の温度、圧力又は線量率が原子炉保護系（アイソレーション）の作動設定値に達した場合、格納容器が自動で隔離されることを確認する。
- ④ 格納容器（床下）に保持されたナトリウムの温度は、構造物や雰囲気への熱移行に伴い低下する。ナトリウムの温度が十分に低下（発火点以下）したことを確認した後、漏えいしたナトリウムの回収作業<sup>\*2</sup>を実施する。当該作業は、漏えい量によって異なるが、基本的には以下のとおりである。なお、ナトリウム中の放射化物に起因する被ばくの管理を除けば、1 次冷却系と 2 次冷却系のナトリウムの取扱いに大きな差異はない。
  - (1) 格納容器（床下）に空気を徐々に導入し、窒素雰囲気から空気雰囲気に置換する。
  - (2) 格納容器（床下）を空気雰囲気に置換した後、防護具を装備した作業員は、金属製容器にナトリウムを回収し、密封して格納容器（床下）から搬出する。なお、当該作業にあっては、作業員の過度な被ばくを防止するため、時間・距離・遮蔽に係る適切な措置を講じる。また、特殊化学消火剤を配備し、ナトリウムと空気との反応が生じた場合の随時の消火活動に備える<sup>\*3</sup>。
  - (3) 回収したナトリウムは、メンテナンス建物に有するスチーム洗浄、水槽等から構成する脱金属ナトリウム設備【「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）第 23 条（保管廃棄施設）に係る説明資料」参照】により安定化し、当該廃液は、放射性液体廃棄物として処理する。

\*1：漏えい箇所が原子炉冷却材バウンダリである場合、「炉内ナトリウム液面低低」信号等により原子炉は自動停止する場合がある。

\*2：高温のナトリウムは、粘性が低く、漏えいしたナトリウムは、床面に拡がるため、その堆積高さは、1～2cm 程度（約 1,000kg（室温換算で 1m<sup>3</sup>に相当）の漏えいを想定）と推定できる。なお、MK-III 改造工事における 1 次主冷却系配管（内管）の切断部において、底部に残留していたナトリウム厚さ約 1.5～2cm を除去した実績がある。また、2 次冷却材ではあるが、「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故の際には、約 30cm の高さで床に堆積したナトリウムを回収した実績がある。

\*3：高温のナトリウムにあっては、表面の不活性被膜が取り除かれると、ナトリウムと空気の反応（発熱）に伴う温度上昇により、発火温度を超え、発火するおそれがある（第1図参照）。ナトリウムの回収作業にあっては、「当該ナトリウムの温度が十分に低下していること」を確認し、「ナトリウムを削り取り、ナトリウムと空気が反応する範囲を小さくして当該発熱に伴う温度上昇を抑制する（蓄熱を小さくする。）こと」で、ナトリウムの発火を防止する。

- ・ 室温（固体ナトリウム）では、不活性被膜が表面に形成されるため、急激な反応は生じない。
- ・ 高温では、表面に形成された不活性被膜が壊れやすくなり、空気中の酸素との反応が著しくなり、黄色の小さな炎を上げ、白煙を出して燃える（右写真参照）。



第1図 ナトリウム燃焼状態の一例

## 2次冷却材漏えい時の対応

原子炉附属建物又は主冷却機建物において、2次冷却材の漏えいが発生した場合の主な対応を以下に示す。

- ① 原子炉附属建物又は主冷却機建物における2次冷却材の漏えいの発生を「ナトリウム漏えい警報の発報」を起点とし、「火災感知器の作動」、「監視 ITV 等による白煙の確認」、「2次冷却材ダンプタンクの有意な液面低下」又は「複数のナトリウム漏えい検出器の作動」により判断する。
- ② 2次冷却材の漏えいが発生したと判断した場合、原子炉を手動スクラムにより停止（又は原子炉が自動停止したことを確認<sup>\*1</sup>）するとともに原子炉停止後の冷却系の状態を監視する。
- ③ 漏えいの発生したエリアの換気空調設備の停止及び当該換気空調設備の防煙ダンパの閉止を確認する。なお、2次冷却材中には、トリチウムが含まれる<sup>\*2</sup>が、当該対策により建物外に有意なナトリウムエアロゾルを放出することはなく、中央制御室の居住性に影響しない。
- ④ 漏えいの発生した系統内に残存する冷却材を2次冷却材ダンプタンクへ緊急ドレンする。
- ⑤ 漏えいの発生した部屋が2次系配管室及び2次系配管路である場合、窒素ガス供給設備から窒素ガスの供給を実施する。
- ⑥ 漏えいしたナトリウムの温度は、構造物や雰囲気への熱移行に伴い低下する。当該ナトリウムの温度が十分に低下（発火点以下）したことを確認した後、漏えいしたナトリウムの回収作業<sup>\*3</sup>を実施する。該作業は、漏えい量によって異なるが、基本的には以下のとおりである。
  - (1) 防護具を装備した作業員は、金属容器にナトリウムを回収し、密封して搬出する。また、特殊化学消火剤を配備し、ナトリウムと空気との反応が生じた場合の随時の消火活動に備える<sup>\*4</sup>。なお、2次冷却材には、トリチウムが含まれるが、防護具により内部被ばくは防止される。
  - (2) 回収したナトリウムは、メンテナンス建物に有するスチーム洗浄、水槽等から構成する脱金属ナトリウム設備【「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）第23条（保管廃棄施設）に係る説明資料」参照】により安定化し、当該廃液は、放射性液体廃棄物として処理する。

\*1：原子炉容器入口冷却材温度の上昇に伴う「原子炉容器入口冷却材温度高」信号等により原子炉は自動停止する場合がある。

\*2：MK-Ⅲ炉心の140MW運転中における2次冷却系ナトリウムに含まれるトリチウムは、約 $7 \times 10^2$  Bq/g<sub>Na</sub>（平成15年10月測定値）。

\*3：高温のナトリウムは、粘性が低く、漏えいしたナトリウムは、床面に拡がるため、その堆積高さは、1～2cm程度（約1,000kg（室温換算で1m<sup>3</sup>に相当）の漏えいを想定）と推定できる。なお、MK-Ⅲ改造工事における1次主冷却系配管（内管）の切断部において、底部に残留していたナトリウム厚さ約1.5～2cmを除去した実績がある。また、「もんじゅ」のナトリウム漏え

い事故の際には、約 30cm の高さで床に堆積したナトリウムを回収した実績がある。

- \*4：高温のナトリウムにあっては、表面の不活性被膜が取り除かれると、ナトリウムと空気の反応（発熱）に伴う温度上昇により、発火温度を超え、発火するおそれがある。ナトリウムの回収作業にあっては、「当該ナトリウムの温度が十分に低下していること」を確認し、「ナトリウムを削り取り、ナトリウムと空気が反応する範囲を小さくして当該発熱に伴う温度上昇を抑制する（蓄熱を小さくする。）こと」で、ナトリウムの発火を防止する。



ナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止するための措置

漏えいしたナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止するために鋼製のライナ又は受樋を設置する（第1図参照）。



床ライナ厚さ：6mm／ 受樋厚さ：3.2mm

第1図 鋼製のライナ又は受樋の一例

## ナトリウム燃焼環境下における材料腐食

## 1. 概要

ナトリウム燃焼環境下における金属材料（不燃性材料）の腐食は、ナトリウムが漏えい・燃焼し、当該材料の上にナトリウム化合物等を含んだ高温のプールが形成された場合に、そこで、材料中の鉄が酸化されること等により生じる。このため、ナトリウムが漏えいした場合に、ナトリウム化合物等を含んだ高温のプールが堆積する鋼製の床ライナ又は受樋にあつては、当該ナトリウム燃焼環境下における腐食を考慮し、ナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止する機能を喪失しないように設計する。

なお、ナトリウムの燃焼の特徴として、ナトリウムは沸点が高く、蒸発熱が大きく、燃焼熱が小さい等により、ナトリウム化合物等を含んだ高温のプールを形成する可能性がないものに対する火熱による影響は、通常の火災による影響に包絡される。例えば、同じ環境条件下において、燃焼ナトリウムの表面から 1m の高さでの温度は、100℃以下であり、一方、ガソリン火災の場合、表面から 2m の高さでの時間平均温度は、600℃以上である<sup>[1]</sup>。

## 2. ナトリウム燃焼環境下における腐食型式の想定

ナトリウム燃焼環境下における腐食については、NaFe 複合酸化型腐食及び溶融塩型腐食の 2 種類の腐食機構がある。NaFe 複合酸化型腐食は、漏えいしたナトリウムとそれが燃焼した際に生じる酸化ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) がライナ等の上で共存し、極低酸素環境が生じ、そこで、酸化ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) と鉄が反応して複合酸化物が形成され、ライナ等が高温になると複合酸化物が溶出して腐食が進行するものである（第 2.1 図参照）。溶融塩型腐食は、漏えいしたナトリウムが燃焼した際に生じる過酸化ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) と漏えいしたナトリウムと湿分が反応して生じる水酸化ナトリウム ( $\text{NaOH}$ ) の溶融プールがライナ等の上で形成され、過酸化ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) からの過酸化物イオンが強力な酸化材となり急速に腐食が進行するものである（第 2.2 図参照）。

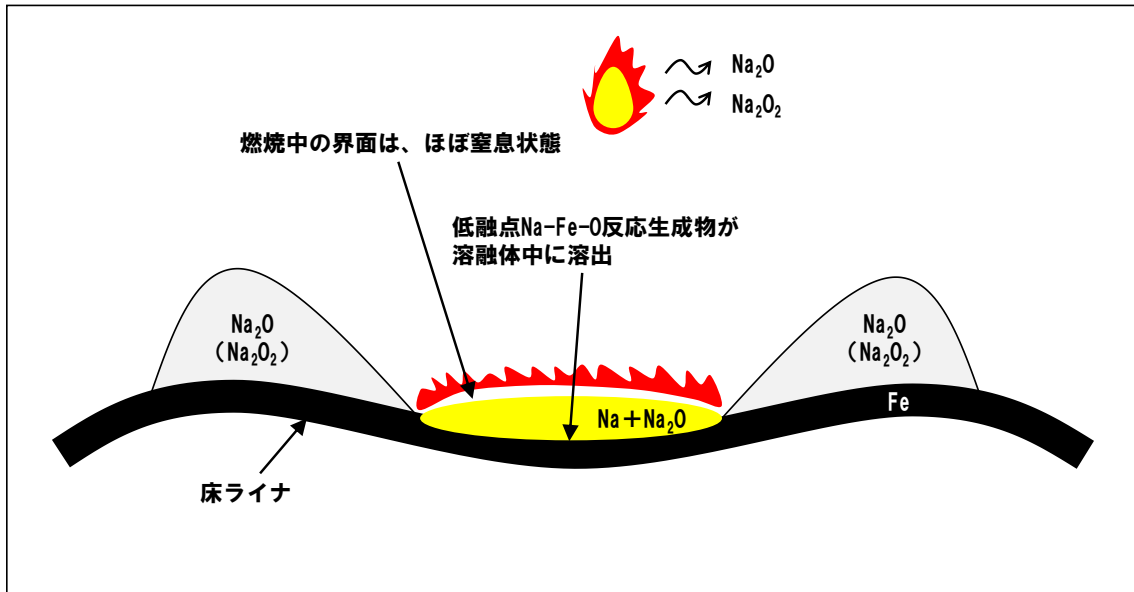
溶融塩型腐食については、「もんじゅ」の 2 次冷却材漏えい事故後にその原因究明のために実施された「ナトリウム漏えい燃焼実験-II<sup>[2]</sup>」のみで確認されたものである。当該燃焼実験では、燃焼の様子を観察するに当たって、カメラの視界を確保するため、カメラ用の管台からナトリウムプールに直接、多量の空気を吹き付け、また、当該燃焼実験は、コンクリートセル内での実験であり、コンクリートから水分が放出された\*1。このような特異な条件により、当該燃焼実験においては、溶融塩型腐食が発生したと考えられる。一方、「もんじゅ」の 2 次冷却材漏えい事故や当該燃焼実験の後に実施した高湿分条件（4.6～4.8%）を模擬したナトリウム漏えい燃焼実験<sup>[3]</sup>では、NaFe 複合酸化型腐食が支配的であり溶融塩型腐食の発生は確認されていない。

これらの知見を踏まえ、ライナ等の減肉量の評価に当たっては、NaFe 複合酸化型腐食を想定し、その腐食減肉速度式を適用する。

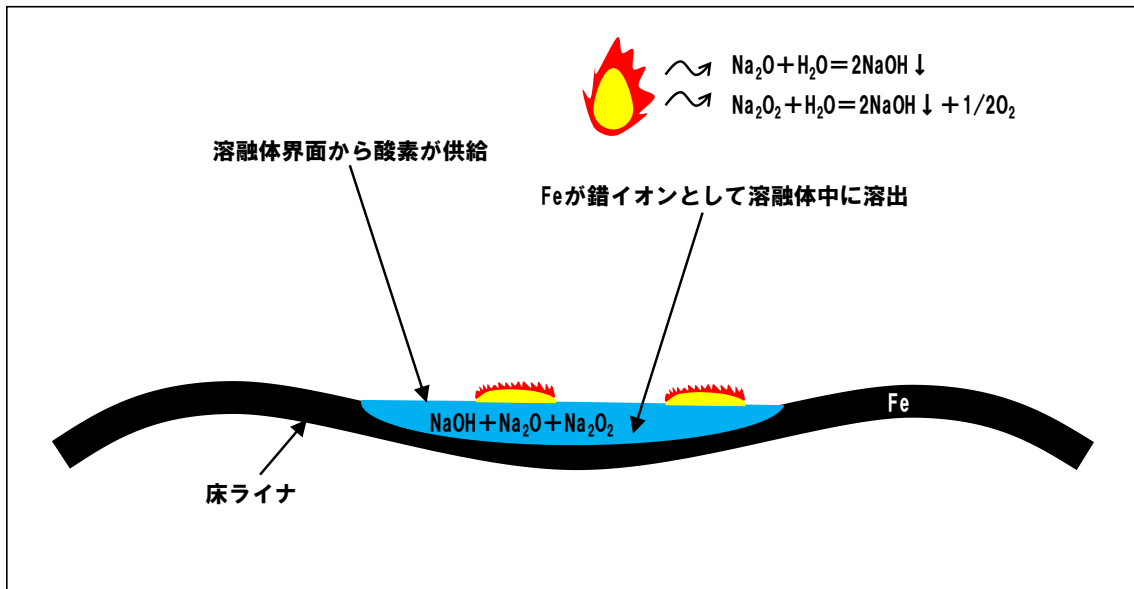
\*1: ナトリウム燃焼実験-IIにおける実験セル内の水蒸気濃度は、ナトリウム漏えい中で約 3.5%、漏えい停止直前で約 7%まで上昇したと推定

参考文献

- [1] Waltar, Alan E. / Todd, Donald R. / Tsvetkov, Pavel V. (編著) 高木 直行 (監訳) “高速スペクトル原子炉” イーアールシー出版, 2016年11月
- [2] “ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの水分移行挙動の評価”, JNC TN9400 2000-030
- [3] “小規模漏えいを対象としたナトリウムプール燃焼実験-Run-F7-4及びRun-F8-2-”, JNC TN9400 2003-067



第 2.1 図 NaFe 複合酸化型腐食の概念図

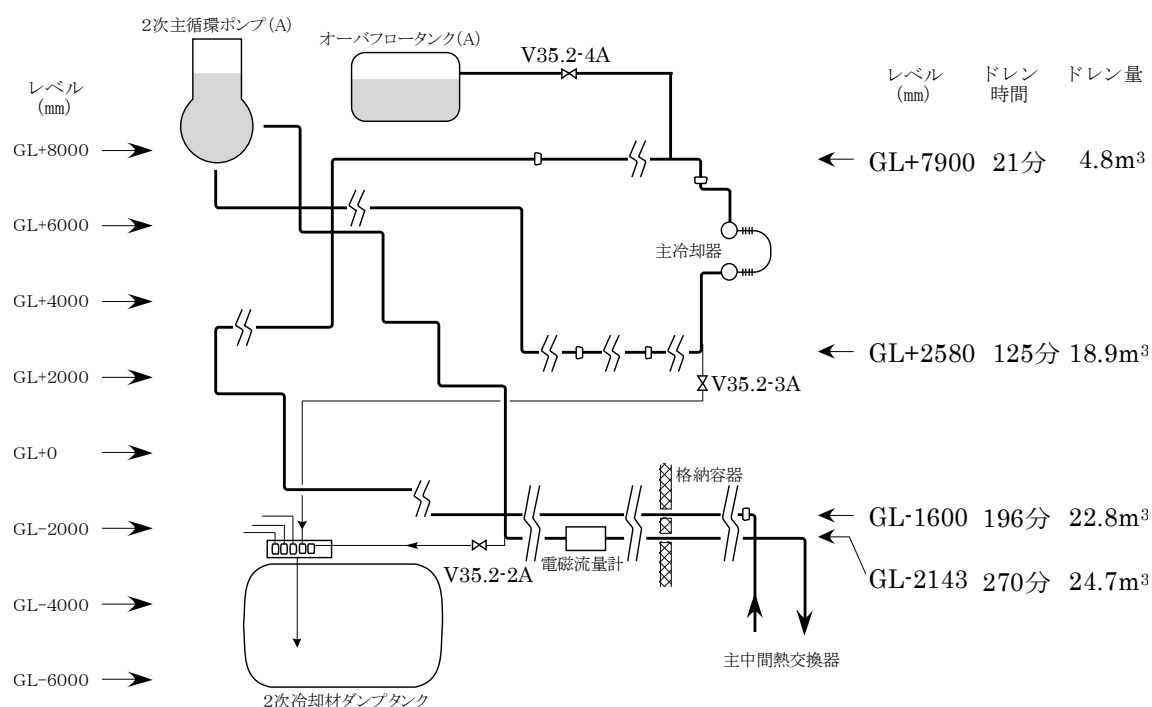


第 2.2 図 溶融塩型腐食の概念図

## 緊急ドレンの概要

## 1. 概要

2次冷却材の漏えいが発生し、これを検知した場合、ナトリウム漏えい量を低減するため、運転員は、漏えいの発生した系統内に残存するナトリウムを2次冷却材ダンプタンクへ緊急ドレンする(ナトリウム漏えいが、高い位置に配置する配管又は機器が発生した場合には、短時間で漏えいの継続を防止可能)。当該緊急ドレンに要する時間は、必要とするドレンレベルによって異なるが、系統からほぼ全てのナトリウムをドレンする場合で約270分となる(第1.1図参照)。なお、配管及び機器の位置関係より、格納容器(床下)に配置する主中間熱交換器(及び近傍のドレン配管接続レベル以下の配管内)のナトリウムは、ドレンできずに系統内に残存するものの、空気雰囲気中へのナトリウム漏えい量の低減の観点からは、当該部に残存しても影響はない。



第1.1図 ドレンに要する時間(実績:2021年4月7日測定)

## 2. 操作

緊急ドレンは、漏えいの発生した系統のドレン弁(Aループ:V35.2-2A、3A/Bループ:V35.2-2B、3B)及びベント弁(Aループ:V35.2-4A/Bループ:V35.2-4B)を現場にて開けることにより行う。これらの弁は、フレキシブルシャフトにより延長することによって、ナトリウムを内包する配管及び機器から離れた位置で操作が可能であり、また、これらの弁の操作場所へのアクセスルートは多重化している(第2.1図参照)。当該操作は、2次冷却材の漏えいの判断や操作場所への移動時間を含めて、2次冷却材の漏えいが発生した後、30分以内で実施可能である。

核物質防護情報（管理情報）が含まれているため  
公開できません。

第 2.1 図 (a) ドレン弁等の操作場所へのアクセスルートの一例  
(中央制御室から原子炉附属建物 1 階を経由 (1/2))

8 条-別紙 2-別添 10-2

核物質防護情報（管理情報）が含まれているため  
公開できません。

第 2.1 図 (a) ドレン弁等の操作場所へのアクセスルートの一例  
(中央制御室から原子炉附属建物 1 階を経由 (2/2))

8 条-別紙 2-別添 10-3

核物質防護情報（管理情報）が含まれているため  
公開できません。

（原子炉附属建物屋上）

第 2.1 図 (b) ドレン弁等の操作場所へのアクセスルートの一例  
（中央制御室から原子炉附属建物屋上を經由（1/2））

8 条-別紙 2-別添 10-4

核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。

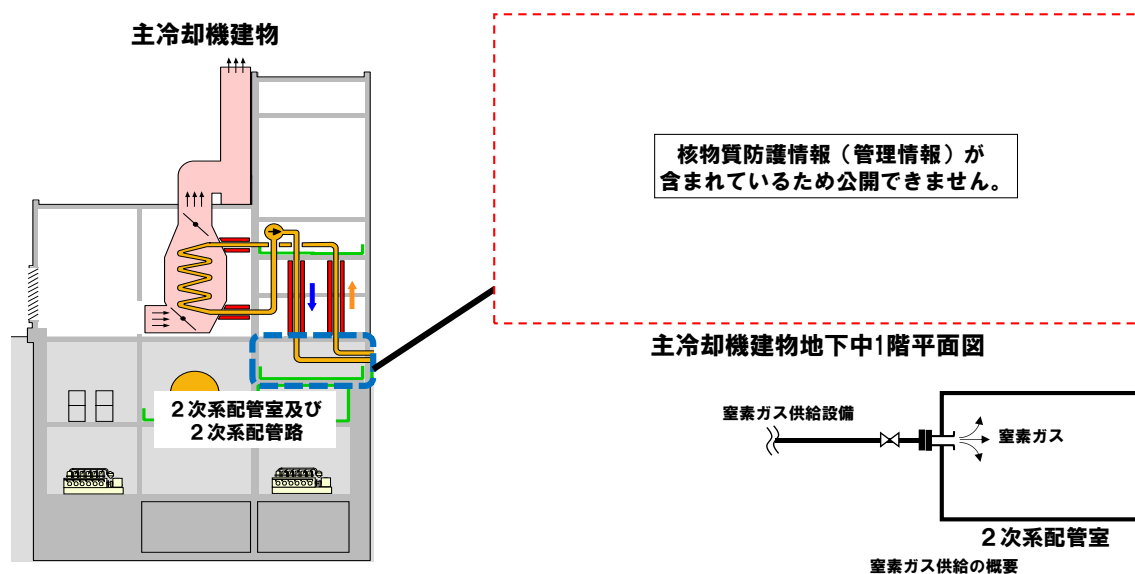
（主冷却機建物 4 階）

第 2.1 図 (b) ドレン弁等の操作場所へのアクセスルートの一例  
（中央制御室から原子炉附属建物屋上を経由（2/2））



窒素ガス供給の概要

ナトリウムと湿分等の反応により発生した水素が蓄積する可能性がある火災区域又は火災区画として、主冷却機建物地下中1階の2次系配管室及び2次系配管路を対象として、当該室で2次冷却材の漏えいが発生した場合、緊急ドレンによりナトリウム漏えい量を低減することに加えて、窒素ガスを供給することによってナトリウム燃焼の抑制を図ることにより水素の濃度が燃焼限界濃度以下に抑制できるものとする（第1図参照）。



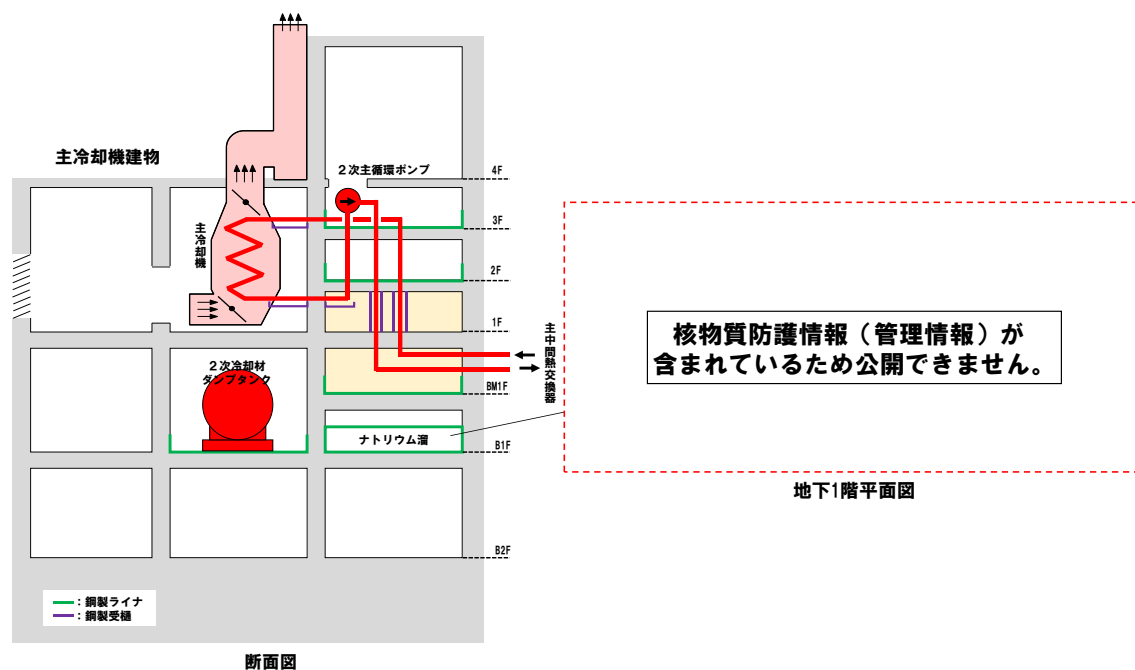
第1図 窒素ガス供給の概要

ナトリウム溜の概要

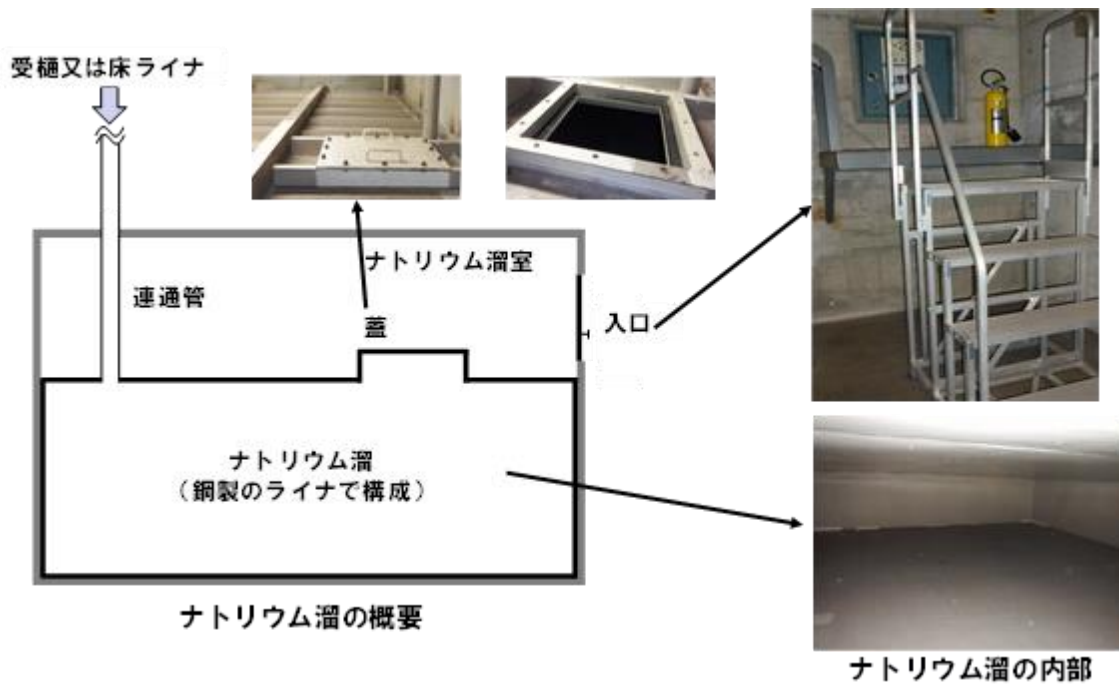
1. ナトリウム溜の構造

主冷却機建物において、床ライナ又は受樋上に漏えいしたナトリウムは、床ライナ又は受樋から連  
通管を介して、地下1階のナトリウム溜（第 1.1 図参照）に導き、漏えいしたナトリウムをナトリウ  
ム溜で保持することにより、ナトリウム燃焼の影響を軽減する。

ナトリウム溜は、7.27m×6.22m の床面積を有し、1.3m の高さまでナトリウムを保持できる（第 1.2  
図参照）。1 ループ当たりのナトリウムインベントリ（約 30m<sup>3</sup>）に対して、ナトリウム溜の容積は約  
58m<sup>3</sup>であり、ナトリウム溜で漏えいしたナトリウムを十分に保持できる。



第 1.1 図 ナトリウム溜の配置



第 1.2 図 ナトリウム溜の概念図

## 2. 受樋からの溢液

受樋の深さは、漏えいしたナトリウムが溢液しないものとする。貫通クラックからの漏えいを想定した場合（漏えい率：約 80t/h）における液深は約 50mm となることから、受樋の深さは当該液深よりも深いものとする（既設の受樋の深さ：約 450mm 以上）。

また、受樋の熱による変形について、受樋はMK-Ⅲの改造工事に伴い交換しており、当該受樋を対象に、保守的に 800℃の条件で変形評価を行い、漏えいしたナトリウムを保持できなくなるような変形は生じないことを確認している。なお、交換後の受樋は、側面高さを増しており、交換後の受樋においても、熱による変形によって、漏えいしたナトリウムを保持できなくなるようなことはない。

ナトリウムエアロゾルの拡散を防止するための措置
-------------------------

主冷却機建物及び原子炉附属建物においては、ナトリウム燃焼に伴い発生するナトリウムエアロゾルの拡散を防止するため、漏えいの発生したエリアの換気空調設備を停止するとともに、当該エリアの換気空調設備の防煙ダンパを閉止する（第1図参照）。これらは、火災感知器の作動に伴い自動で動作する。なお、自動で動作しない場合、一括操作盤にて手動により操作することも可能である。

また、防煙ダンパのナトリウムエアロゾルによる腐食について、ナトリウムが燃焼した場合の高温状態においても、ナトリウムエアロゾルによる腐食速度は、 $1 \times 10^{-3} \text{mm/h}$  程度であり、腐食により防煙ダンパが損傷することはない。なお、万一、腐食により防煙ダンパに微小な開口が生じたとしても、多量のナトリウムエアロゾルが流出することはない。



<換気空調設備・防煙ダンパ一括操作盤>



第1図 防煙ダンパ等の一例

## ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価

## 1. はじめに

ナトリウムが漏えいした場合のナトリウムの漏えい量及びナトリウム燃焼の影響を以下により評価する。

- ① 一系統の単一の配管の破損（他の系統及び機器は健全なものと仮定）を想定する。
- ② 二重構造を有する配管及び機器にあつては、内管の破損により漏えいしたナトリウムは外管により保持されることを踏まえて評価する。
- ③ 原子炉運転中に窒素雰囲気で維持する格納容器（床下）に位置するナトリウムを内包する配管及び機器が破損した場合にあつては、ナトリウム燃焼を抑制できるため、格納容器（床下）を空気置換した場合の影響を評価する。
- ④ 配管直径の 1/2 の長さと同配管肉厚の 1/2 の幅を有する貫通クラックからの漏えいを想定する。
- ⑤ ナトリウム漏えい量の評価に当たっては、漏えい停止機能（緊急ドレン）による漏えい停止までの漏えい継続時間を考慮する。

なお、上記②及び③については、設置許可基準規則の第 13 条（運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止）において、設計基準事故の一つとして想定した「1 次冷却材漏えい事故」の熱的影響評価において、格納容器（床下）を窒素雰囲気から空気雰囲気に置換した場合のナトリウム燃焼による影響を評価している【「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）第 13 条（運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止）に係る説明資料」参照】。このため、本資料では、空気雰囲気下での 2 次冷却材の漏えいを想定した場合の影響評価について示す。

## 2. 2 次冷却材漏えい時の燃焼影響評価

## 2.1 判断基準

2 次冷却材の漏えいが発生（一系統の単一の配管の破損を想定）した場合にあつても、適切なナトリウム燃焼の影響軽減の対策を講じることにより、ナトリウム燃焼による影響によって健全な系統の機能を喪失することがないこと（漏えいが発生した系統の機能は喪失するものとする。）を確認する。このことを判断する基準は、以下のとおりとする。

- (i) ナトリウム燃焼に伴い発生する水素が蓄積・燃焼に至らないこと（雰囲気中の水素濃度が 4%以下であること。）。
- (ii) ナトリウム燃焼に伴う鋼製材料の腐食により、ナトリウムと構造材（コンクリート）との反応を防止するためのライナ又は受樋が損傷し、ナトリウムと構造材（コンクリート）との反応が生じないこと。
- (iii) ナトリウム燃焼に伴う温度上昇により、構造材（コンクリート）が損傷せず（コンクリートの温度が 200℃を超えないこと【「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）第 6 条（外部からの衝撃による損傷の防止）に

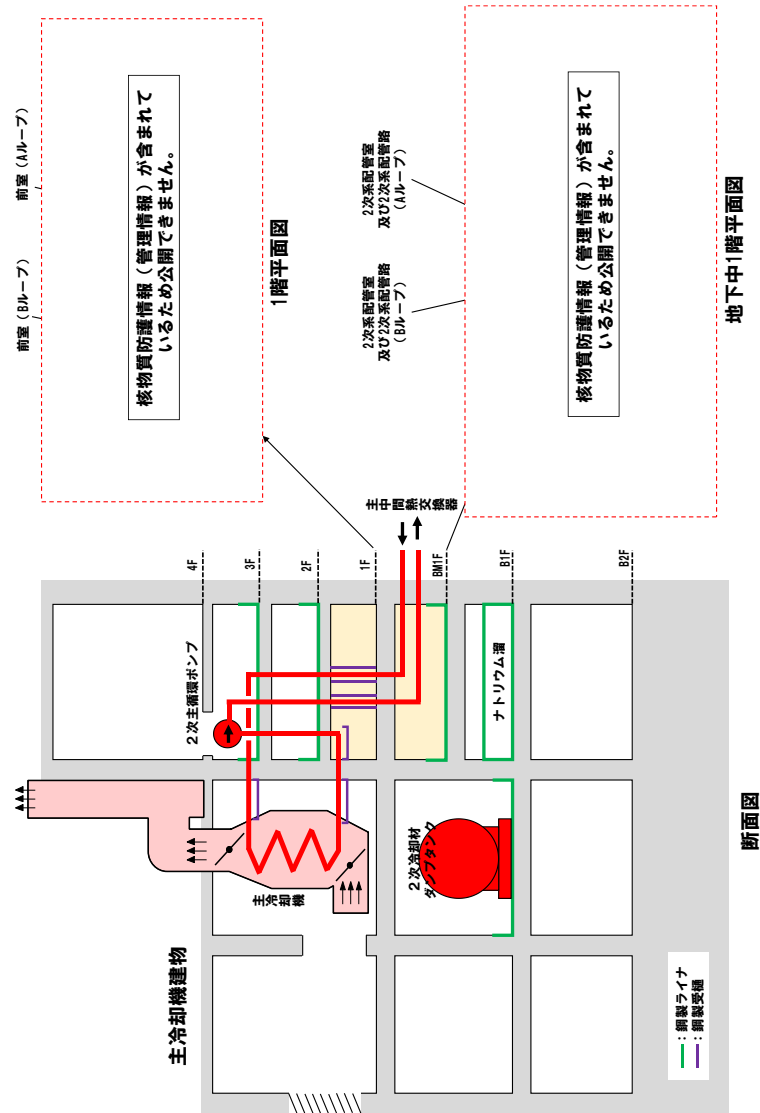
係る説明資料（その 2：耐外部火災設計）参照】。）、健全な系統に影響が伝播しないこと。

## 2.2 評価対象

2次冷却材漏えい時の燃焼影響評価は、以下を考慮して代表的な漏えい場所を対象に実施する。

- ・ 低所に位置する配管が破損した場合、漏えい停止機能（緊急ドレン）を考慮した場合であっても、漏えい時間が相対的に長くなること。
- ・ 漏えいした部屋の容積が小さい場合、ナトリウム燃焼に伴い発生する水素の濃度が、相対的に高くなること。
- ・ 配管破損の特徴として、配管エルボ部に代表される応力集中部における熱膨張応力や熱応力等による疲労（クリープ疲労）破損が、相対的に最も注意すべき破損様式となること。

上記及びナトリウムと構造材との反応の防止のために鋼製のライナ又は受樋を用いることを考慮し、「主冷却機建物の地下中1階の2次系配管室及び2次系配管路（以下「配管室」という。）」及び「主冷却機建物の1階の前室（以下「前室」という。）」において、2次冷却材の漏えいが発生した場合のナトリウム燃焼による影響を評価する（第2.2.1図参照）。



- 【前室】
- ・ 2次主冷却系の配管（エルボ部）を配置
  - ・ 受樋によりナトリウムと構造材の反応を防止
  - ・ 上記のうち、低所に位置するとともに、部屋の容積が小さい

- 【配管室】
- ・ 2次主冷却系の配管（エルボ部）を配置
  - ・ ライナによりナトリウムと構造材の反応を防止
  - ・ 上記のうち、低所に位置するとともに、部屋の容積が小さい

第 2.2.1 図 評価対象の概要

## 2.3 配管室における評価

### (1) 手順及び所要時間

配管室において、2次冷却材の漏えいが発生した場合の主な手順を以下に示す。また、第2.3.1表に手順及び所要時間を示す。

- ① 当直長は、ナトリウム漏えい検出器の作動、火災感知器の作動、監視 ITV により、配管室において、2次冷却材の漏えいが発生したと判断した場合、運転員に原子炉の手動スクラムの実施及び影響軽減のための対策の実施を指示する。
- ② 運転員（中央制御室）1名は、原子炉の手動スクラムを実施する。
- ③ 運転員（現場）1名は、火災感知器の作動により換気空調設備の停止及び防煙ダンパの閉止を確認する。
- ④ 運転員（現場）2名は、緊急ドレン操作を実施する。その後、窒素ガス供給設備から窒素ガスの供給を開始する。

### (2) 影響評価

#### a. 解析条件

計算コード SPHINCS により解析する。主な解析条件を以下に示す。

- ① 解析体系を第2.3.1図に示す。解析体系は、配管室、ナトリウム溜及び外気領域で模擬する。
- ② 漏えい箇所は、配管室内の低所に位置する2次主冷却系の配管とし、漏えい口の大きさが  $Dt/4$  ( $D$ : 配管直径、 $t$ : 配管厚さ) の貫通クラックからの漏えいを想定する (約  $820\text{mm}^2$ )。当該貫通クラックからの漏えい率は、原子炉を停止するまでは、2次主循環ポンプの吐出圧、ナトリウムの水頭圧及びカバーガスの圧力から求めた  $23.3\text{kg/s}$ 、原子炉を停止して以降は、ナトリウムの水頭圧及びカバーガスの圧力から求めた  $12.3\text{kg/s}$  とする。また、漏えい率が小さいと漏えい継続時間が長くなることを踏まえ、貫通クラックからの漏えいよりも小さい漏えい率の影響についても評価する。当該漏えい率は、 $0.003\text{kg/s}$  として漏えい中一定とする。
- ③ ナトリウムの燃焼形態として、スプレー燃焼及びプール燃焼を想定する。
- ④ 水素の発生については、雰囲気中及びコンクリートから放出される水分との反応を考慮する。
- ⑤ 床ライナ上に漏えいしたナトリウムは、厚さ  $1\text{cm}$  で堆積し、最大で  $40\text{m}^2$  まで広がるものとする。当該面積まで広がって以降は、連通管を介して、ナトリウム溜に移行するものとする。
- ⑥ 漏えいナトリウムの温度は、保守的な評価とするため、通常運転時の2次主冷却系のホットレグの温度  $440^\circ\text{C}$  で一定とする。
- ⑦ 雰囲気の初期組成は、全て空気雰囲気 (酸素濃度:  $21\text{vol}\%$ 、水蒸気濃度:  $5.8\text{vol}\%$ ) とする。
- ⑧ 雰囲気及び構造材の初期温度は、保守的な評価とするため、日の最高気温の観測結果 ( $38.4^\circ\text{C}$ ) より  $40^\circ\text{C}$  とする。



- ⑨ 換気空調設備が停止するまでの間は、当該設備による強制換気を考慮する。換気空調設備が停止して以降は、自然通気を考慮する。
- ⑩ 漏えい停止機能として、運転員による2次冷却材ダンプタンクへの緊急ドレンを考慮する。緊急ドレンは、運転員操作に要する時間を踏まえ、事象発生から30分後に開始する。
- ⑪ ナトリウム燃焼の抑制対策として、運転員による窒素ガスの供給を考慮する。窒素ガス供給は、運転員操作に要する時間を踏まえ、事象発生から35分後に開始する。

#### b. 解析結果

主要な解析結果を第2.3.2図から第2.3.6図に示す。

貫通クラックからの漏えいを想定した場合、緊急ドレンの開始までに貫通クラックより上方の冷却材が全て系統外に漏えいし、漏えいが約23分後に停止する。漏えい量は約17,000kgとなる。配管室及びナトリウム溜の水素濃度は、燃焼限界濃度を超えない(配管室にあっては、酸素濃度も燃焼限界濃度を下回る。)。配管室及びナトリウム溜のコンクリート温度は、200℃を超えない。また、ライナの腐食減肉量は、ライナの厚さを超えない。

小漏えいを想定した場合、漏えい停止機能(緊急ドレン)により、漏えいが約270分後に停止する。漏えい量は約50kgとなる。配管室及びナトリウム溜の水素濃度は、燃焼限界濃度を超えない。配管室及びナトリウム溜のコンクリート温度は、200℃を超えない。また、ライナの腐食減肉量は、ライナの厚さを超えない。

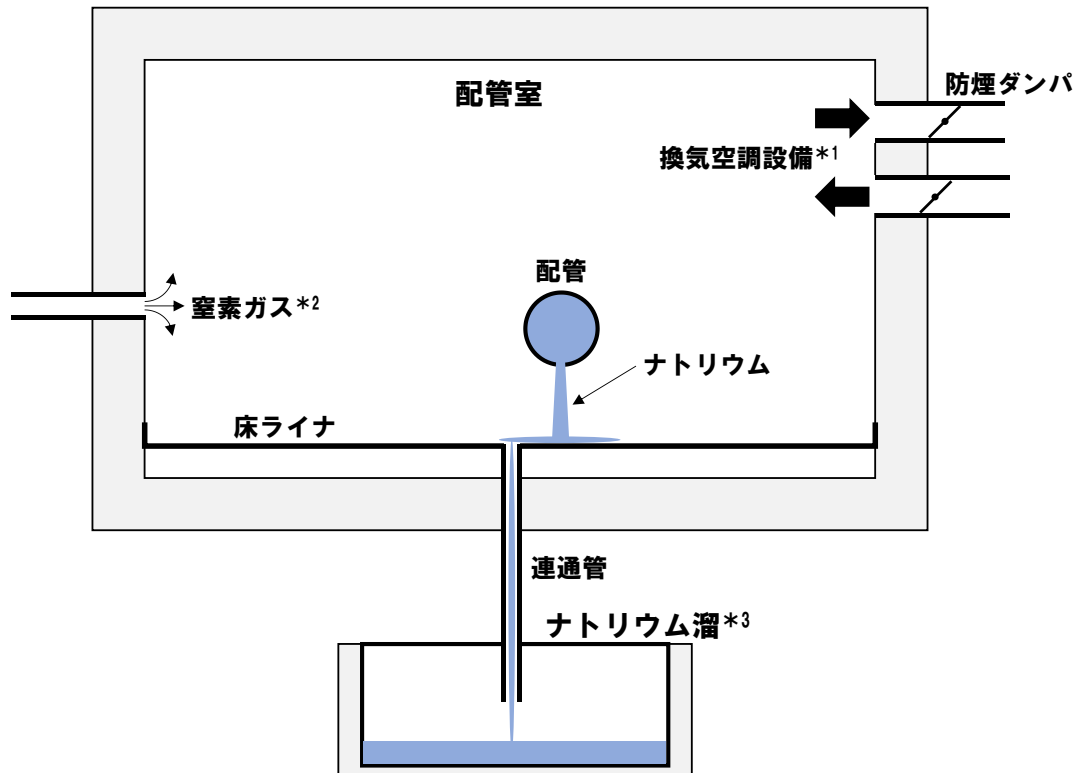
以上より、配管室で2次冷却材の漏えいが発生しても、水素が蓄積・燃焼に至ることはなく、腐食によりライナが損傷することはなく、また、構造材(コンクリート)が損傷することはなく、健全な系統に影響が伝播することはない。

第 2.3.1 表 配管室で 2 次冷却材の漏えいが発生した場合の主な手順及び所要時間

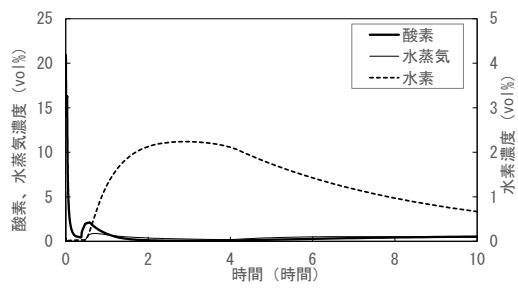
必要な要員と作業項目			経過時間 (分)												備考
手順の項目	要員 (名) (作業に必要な要員数)	手順の内容	5	10	15	20	25	30	35	120	180	240	300		
			▼2次冷却材漏えいの発生 ▼2次冷却材漏えい発生時の判断 ▼漏えいエリアの隔離の確認 ▼緊急ドレン開始 ▼窒素ガス供給開始												
	当直長 【中央制御室】	・運転操作指揮	[Gantt chart showing task duration from 0 to 300 minutes]												
状況判断	運転員A 【中央制御室】	1 ・ナトリウム漏えい警報発報確認 ・火災感知器の作動による確認 ・監視ITVによる確認	[Gantt chart showing task duration from 0 to 15 minutes]												・「ナトリウム漏えい警報」、「火災感知器の作動」、「監視ITV」により2次冷却材漏えいの発生を確認する。
原子炉停止	運転員A 【中央制御室】	1 ・原子炉手動スクラム	[Gantt chart showing task duration from 0 to 15 minutes]												・原子炉を手動スクラムにより停止する。
漏えいエリアの隔離	運転員D 【現場】	1 ・換気空調設備の停止、防煙ダンパの閉止の確認	[Gantt chart showing task duration from 0 to 15 minutes]												・漏えいエリアの換気空調設備の停止及び防煙ダンパの閉止を確認する。
緊急ドレン	運転員B、C 【現場】	2 ・2次冷却材ダンブタンクへ緊急ドレン	[Gantt chart showing task duration from 0 to 120 minutes]												・漏えいの発生した系統の冷却材を2次冷却材ダンブタンクに緊急ドレンする。
窒素ガス供給	運転員B、C 【現場】	2 ・窒素ガスの供給	[Gantt chart showing task duration from 0 to 120 minutes]												・窒素ガスの供給を実施する。
監視	運転員A、E 【中央制御室】	2 ・原子炉停止後の除熱確認	[Gantt chart showing task duration from 0 to 300 minutes]												・健全ループの1次主冷却系（ボーンモータ低速運転）の運転状況を確認するとともに、2次主冷却系（自然循環）及び主冷却機（自然通風）に異常等がないことを確認する。

外部領域

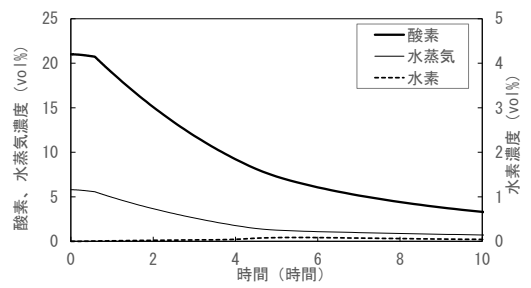
- \*1：換気空調設備が停止するまでの間は強制換気
- \*2：窒素ガス供給設備からの供給操作実施後に窒素ガスを供給
- \*3：床ライナ上に漏えいした冷却材のうち、床ライナから流出するナトリウムは、連通管を介してナトリウム溜に移行



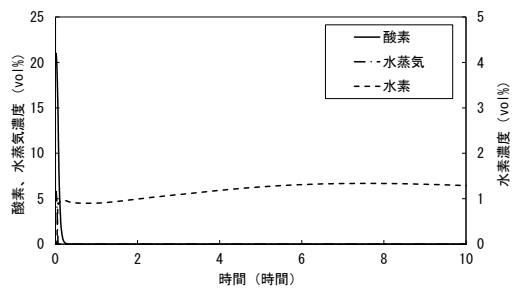
第 2.3.1 図 配管室における評価の解析体系の概念図



(配管室)

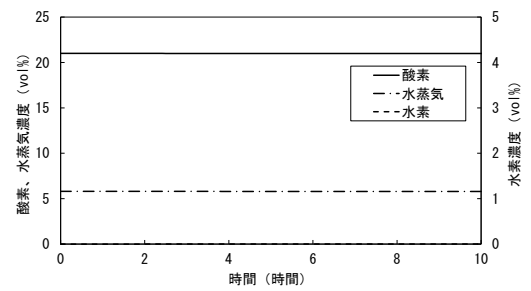


(配管室)



(ナトリウム溜)

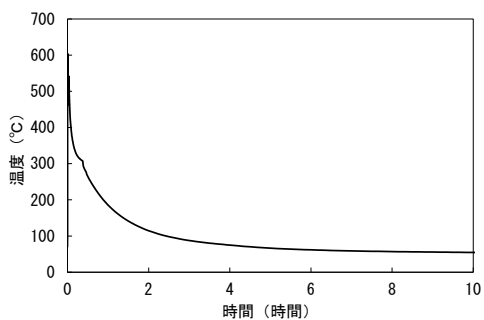
(a) 貫通クラック



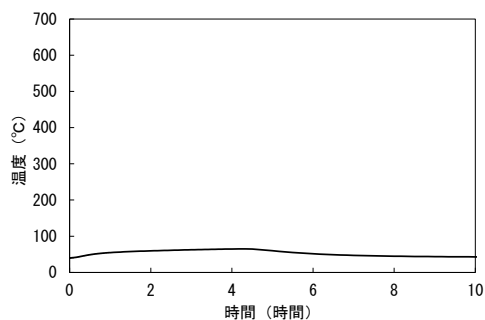
(ナトリウム溜)

(b) 小漏えい

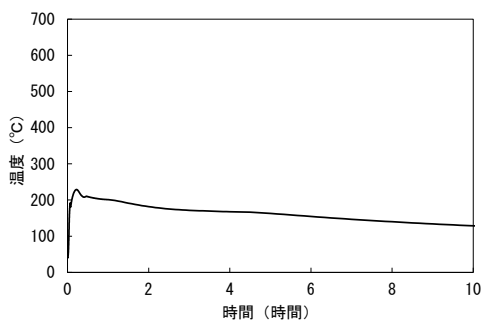
第 2.3.2 図 酸素、水蒸気及び水素濃度の時刻歴変化



(配管室)

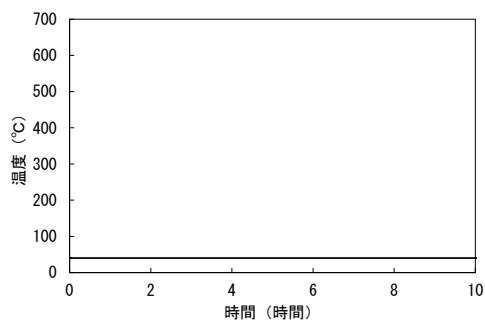


(配管室)



(ナトリウム溜)

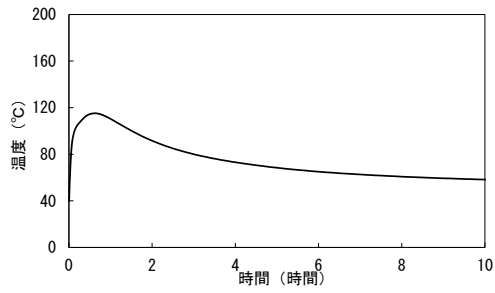
(a) 貫通クラック



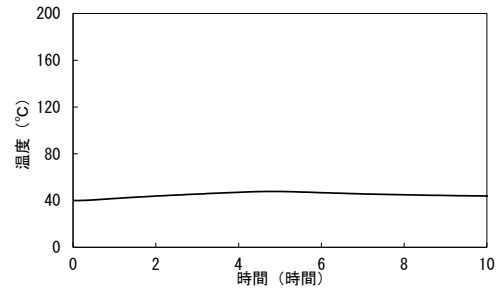
(ナトリウム溜)

(b) 小漏えい

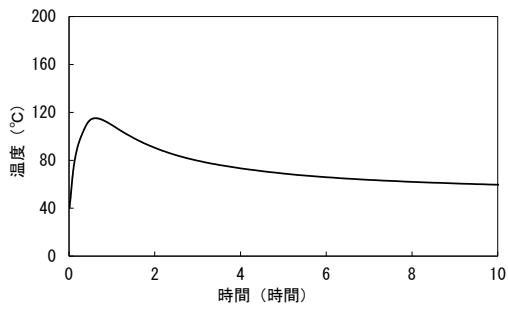
第 2.3.3 図 雰囲気温度の時刻歴変化



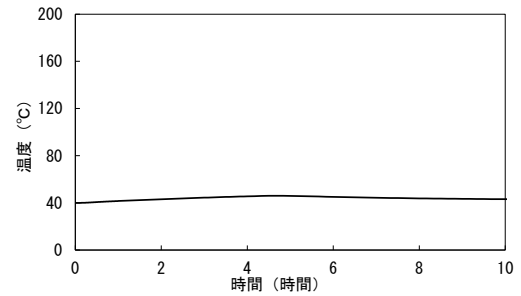
(配管室：壁)



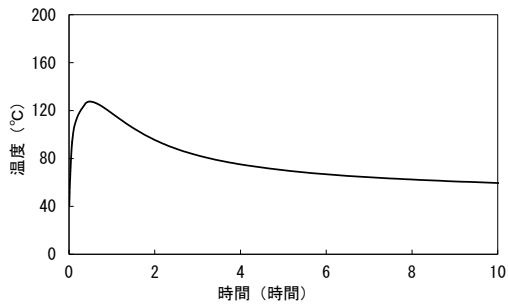
(配管室：壁)



(配管室：床)

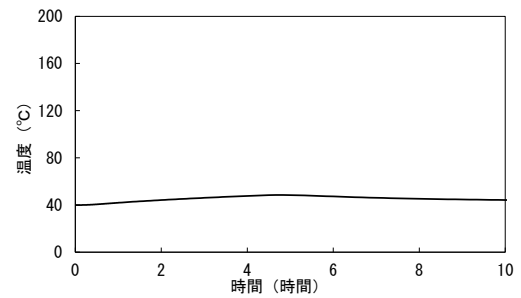


(配管室：床)



(配管室：天井)

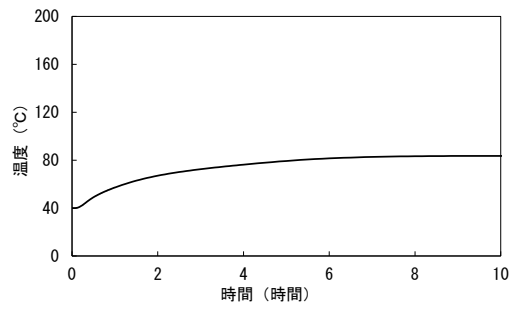
(a) 貫通クラック



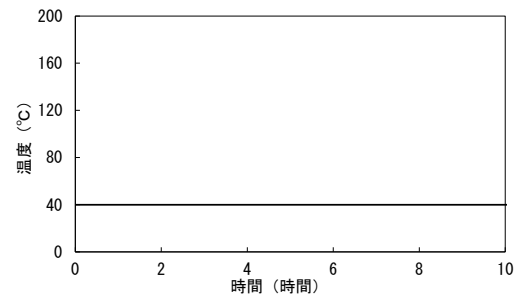
(配管室：天井)

(b) 小漏えい

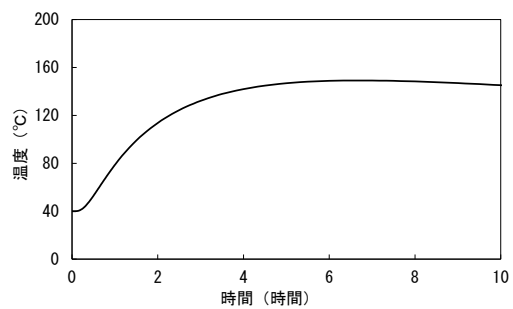
第 2.3.4 図 コンクリート温度の時刻歴変化 (1/2)



(ナトリウム溜：壁)

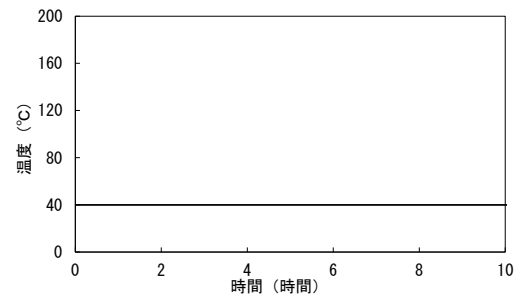


(ナトリウム溜：壁)



(ナトリウム溜：床)

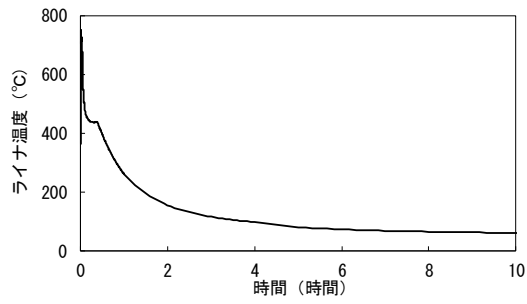
(a) 貫通クラック



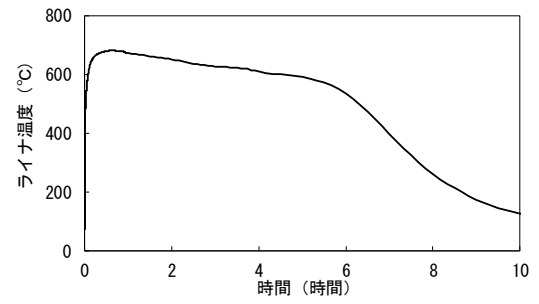
(ナトリウム溜：床)

(b) 小漏えい

第 2.3.4 図 コンクリート温度の時刻歴変化 (2/2)

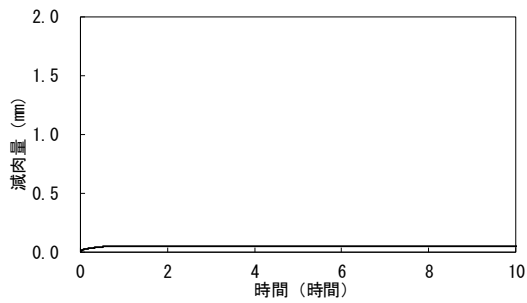


(配管室)  
(a) 貫通クラック

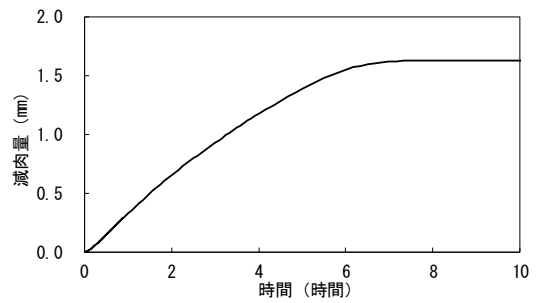


(配管室)  
(b) 小漏えい

第 2.3.5 図 ライナ温度の時刻歴変化



(配管室)  
(a) 貫通クラック



(配管室)  
(b) 小漏えい

第 2.3.6 図 ライナの腐食減肉量の時刻歴変化

## 2.4 前室における評価

### (1) 対策

前室において、2次冷却材の漏えいが発生した場合の主な手順を以下に示す。また、第2.4.1表に手順及び所要時間を示す。

- ① 当直長は、ナトリウム漏えい検出器の作動、火災感知器の作動、監視 ITV により、前室において、2次冷却材の漏えいが発生したと判断した場合、運転員に原子炉の手動スクラムの実施及び影響軽減のための対策の実施を指示する。
- ② 運転員（中央制御室）1名は、原子炉の手動スクラムを実施する。
- ③ 運転員（現場）1名は、火災感知器の作動により換気空調設備の停止及び防煙ダンパの閉止を確認する。
- ④ 運転員（現場）2名は、緊急ドレン操作を実施する。

### (2) 影響評価

#### a. 解析条件

計算コード SPHINCS により解析する。主な解析条件を以下に示す。

- ① 解析体系を第2.4.1図に示す。解析体系は、前室、ナトリウム溜及び外気領域で模擬する。
- ② 漏えい箇所は、配管室内の低所に位置する2次主冷却系の配管とし、漏えい口の大きさが  $Dt/4$  ( $D$ : 配管直径、 $t$ : 配管厚さ) の貫通クラックからの漏えいを想定する (約  $820\text{mm}^2$ )。当該貫通クラックからの漏えい率は、原子炉を停止するまでは、2次主循環ポンプの吐出圧、ナトリウムの水頭圧及びカバーガスの圧力から求めた  $22.2\text{kg/s}$ 、原子炉を停止して以降は、ナトリウムの水頭圧及びカバーガスの圧力から求めた  $9.99\text{kg/s}$  とする。また、漏えい率が小さいと漏えい継続時間が長くなることを踏まえ、貫通クラックからの漏えいよりも小さい漏えい率の影響についても評価する。当該漏えい率は、 $0.002\text{kg/s}$  として漏えい中一定とする。
- ③ ナトリウムの燃焼形態として、スプレー燃焼及びプール燃焼を想定する。
- ④ 水素の発生については、雰囲気中及びコンクリートから放出される水分との反応を考慮する。
- ⑤ 受樋上に漏えいしたナトリウムは、厚さ  $1\text{cm}$  で堆積し、最大で  $3\text{m}^2$  まで広がるものとする。当該面積まで拡がって以降は、連通管を介して、ナトリウム溜に移行するものとする。
- ⑥ 漏えいナトリウムの温度は、保守的な評価とするため、通常運転時の2次主冷却系のホットレグの温度  $440^\circ\text{C}$  で一定とする。
- ⑦ 雰囲気の初期組成は、全て空気雰囲気 (酸素濃度:  $21\text{vol}\%$ 、水蒸気濃度:  $5.8\text{vol}\%$ ) とする。
- ⑧ 雰囲気及び構造材の初期温度は、保守的な評価とするため、日の最高気温の観測結果 ( $38.4^\circ\text{C}$ ) より  $40^\circ\text{C}$  とする。
- ⑨ 換気空調設備が停止するまでの間は、当該設備による強制換気を考慮する。換気空調



設備が停止して以降は、自然通気を考慮する。

- ⑩ 漏えい停止機能として、運転員による2次冷却材ダンプタンクへの緊急ドレンを考慮する。緊急ドレンは、運転員操作に要する時間を踏まえ、事象発生から30分後に開始する。

#### b. 解析結果

主要な解析結果を第2.4.2図から第2.4.6図に示す。

貫通クラックからの漏えいを想定した場合、緊急ドレンの開始までに貫通クラックより上方の冷却材が全て系統外に漏えいし、漏えいが約19分後に停止する。漏えい量は約12,000kgとなる。前室及びナトリウム溜の水素濃度は、燃焼限界濃度を超えない。前室及びナトリウム溜のコンクリート温度は、200℃を超えない。また、受樋の腐食減肉量は、受樋の厚さを超えない。

小漏えいを想定した場合、漏えい停止機能（緊急ドレン）により、漏えいが約120分後に停止する。漏えい量は約15kgとなる。前室及びナトリウム溜の水素濃度は、燃焼限界濃度を超えない。前室及びナトリウム溜のコンクリート温度は、200℃を超えない。また、受樋の腐食減肉量は、受樋の厚さを超えない。

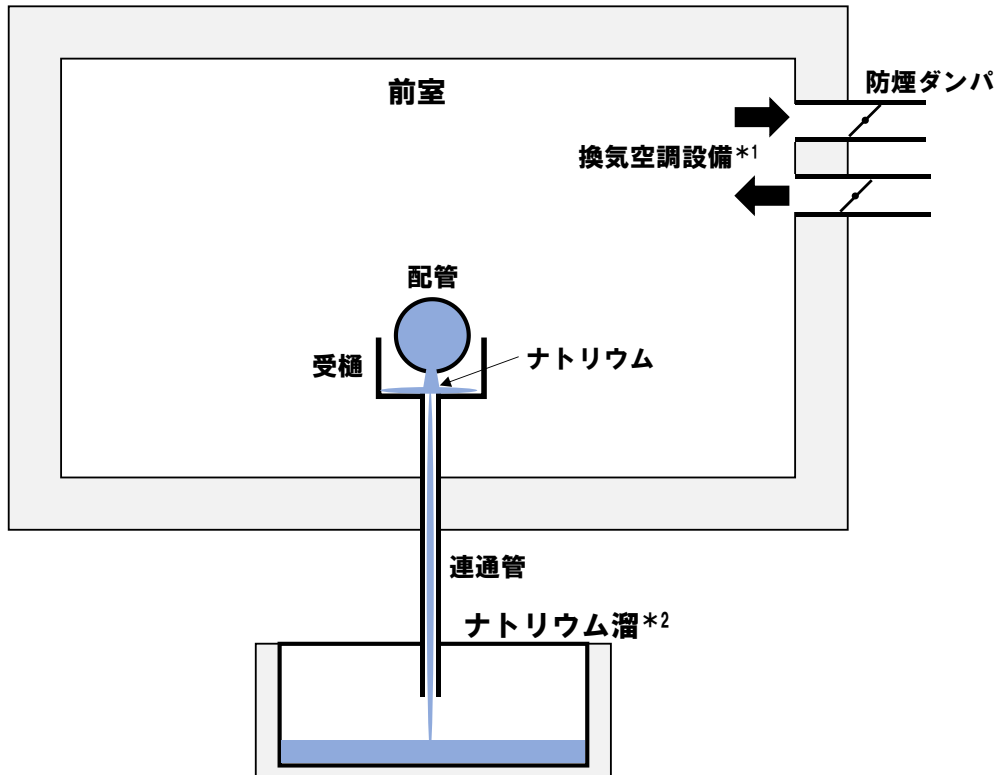
以上より、前室で2次冷却材の漏えいが発生しても、水素が蓄積・燃焼に至ることはなく、腐食により受樋が損傷することはない。また、構造材（コンクリート）が損傷することはない。健全な系統に影響が伝播することはない。

第 2. 4. 1 表 前室で 2 次冷却材の漏えいが発生した場合の主な手順及び所要時間

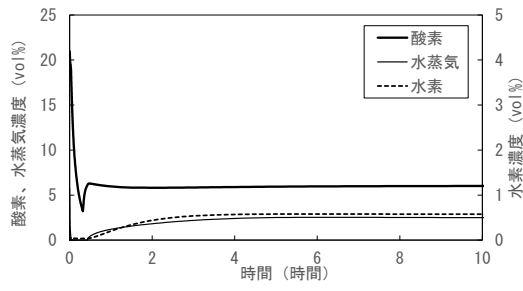
必要な要員と作業項目			経過時間 (分)																備考
手順の項目	要員 (名) (作業に必要な要員数)	手順の内容	5	10	15	20	25	30	35	60	120	180	240						
			▽2次冷却材漏えいの発生 ▽2次冷却材漏えい発生の判断 ▽漏えいエリアの隔離の確認  ▽緊急ドレン開始																
	当直長 【中央制御室】	・運転操作指揮	[Gantt bar from 0 to 240]																
状況判断	運転員A 【中央制御室】	1 ・ナトリウム漏えい警報発報確認 ・火災感知器の作動による確認 ・監視ITVによる確認	[Gantt bar from 0 to 240]																・「ナトリウム漏えい警報」、「火災感知器の作動」、「監視ITV」により2次冷却材漏えいの発生を確認する。
原子炉停止	運転員A 【中央制御室】	1 ・原子炉手動スクラム	[Gantt bar from 0 to 240]																・原子炉を手動スクラムにより停止する。
漏えいエリアの隔離	運転員D 【現場】	1 ・換気空調設備の停止、防煙ダンパの閉止の確認	[Gantt bar from 0 to 240]																・漏えいエリアの換気空調設備の停止及び防煙ダンパの閉止を確認する。
緊急ドレン	運転員B、C 【現場】	2 ・2次冷却材ダンプタンクへ緊急ドレン	[Gantt bar from 0 to 240]																・漏えいの発生した系統の冷却材を2次冷却材ダンプタンクに緊急ドレンする。
監視	運転員A、E 【中央制御室】	2 ・原子炉停止後の除熱確認	[Gantt bar from 0 to 240]																・健全ループの1次主冷却系（ボーンモータ低速運転）の運転状況を確認するとともに、2次主冷却系（自然循環）及び主冷却機（自然通風）に異常等がないことを確認する。

**外部領域**

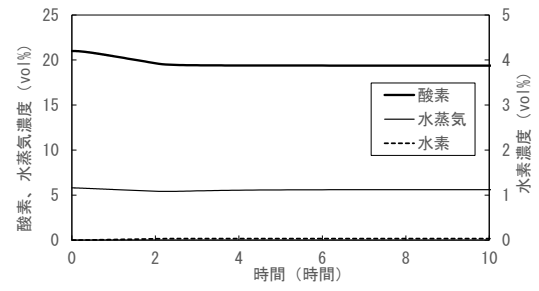
- \*1：換気空調設備が停止するまでの間は強制換気
- \*2：受樋上に漏えいした冷却材のうち、受樋から流出するナトリウムは、連通管を介してナトリウム溜に移行



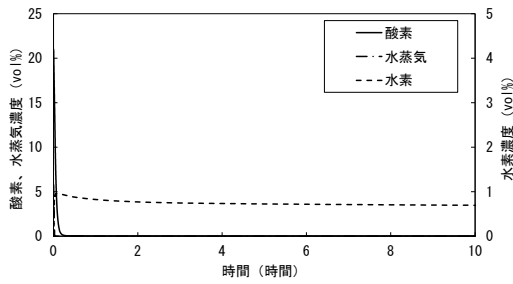
第 2. 4. 1 図 前室における評価の解析体系の概念図



(前室)

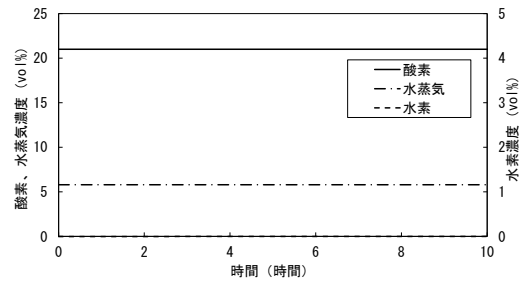


(前室)



(ナトリウム溜)

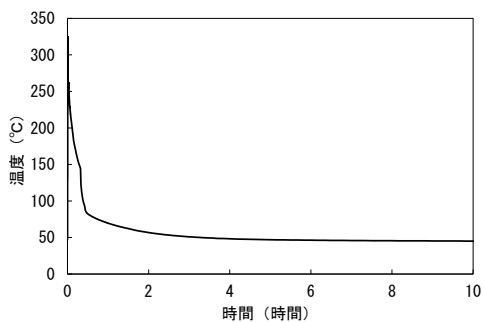
(a) 貫通クラック



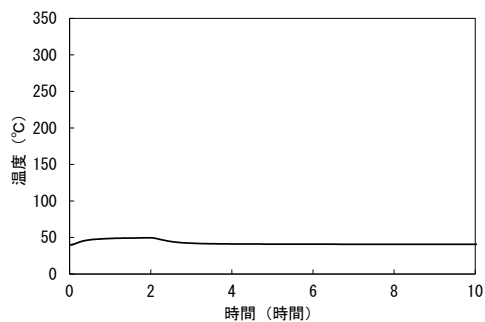
(ナトリウム溜)

(b) 小漏えい

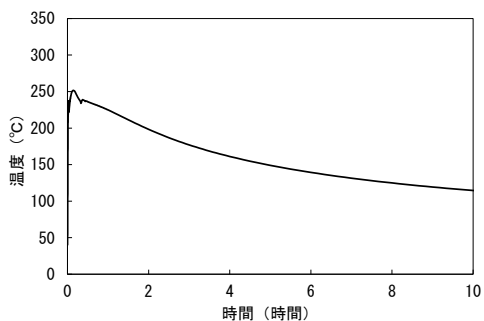
第 2.4.2 図 酸素、水蒸気及び水素濃度の時刻歴変化



(前室)

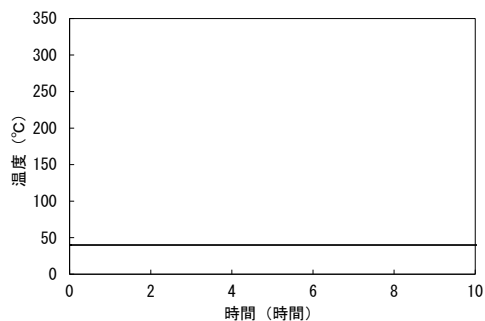


(前室)



(ナトリウム溜)

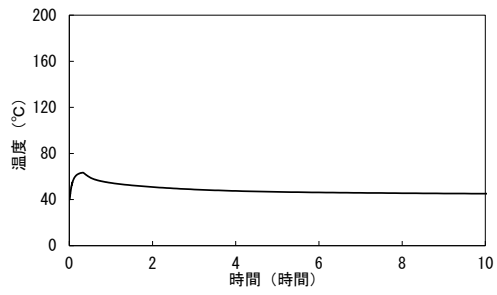
(a) 貫通クラック



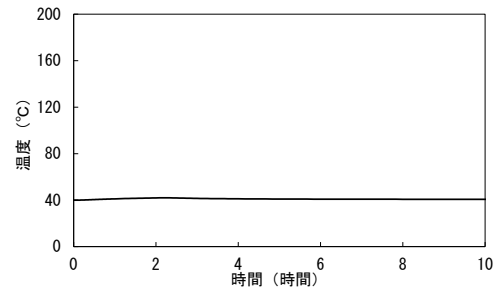
(ナトリウム溜)

(b) 小漏えい

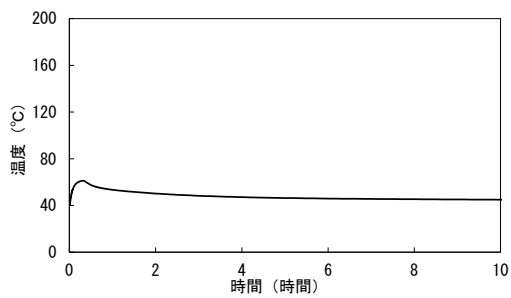
第 2.4.3 図 雰囲気温度の時刻歴変化



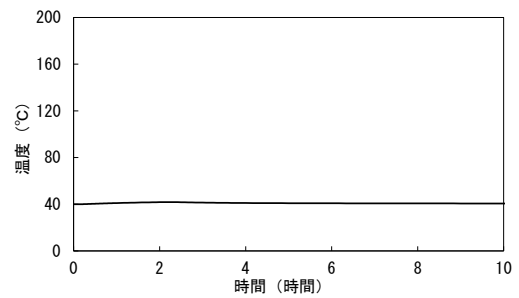
(前室：壁)



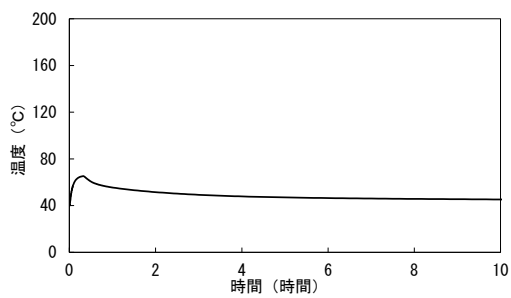
(前室：壁)



(前室：床)

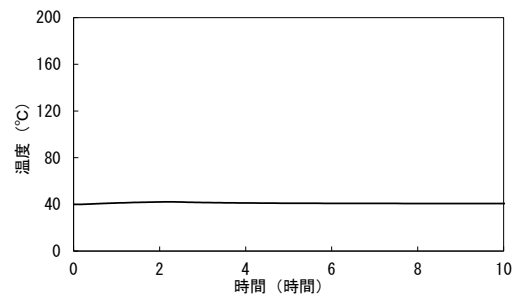


(前室：床)



(前室：天井)

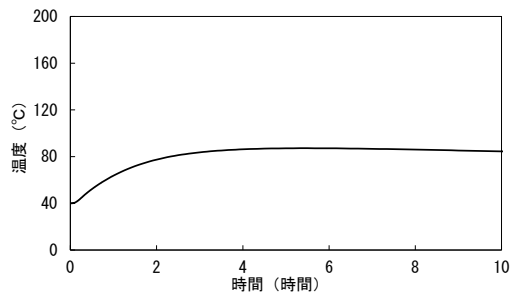
(a) 貫通クラック



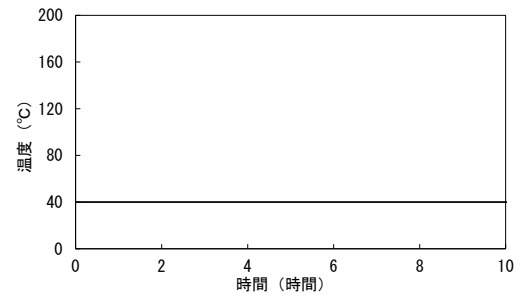
(前室：天井)

(b) 小漏えい

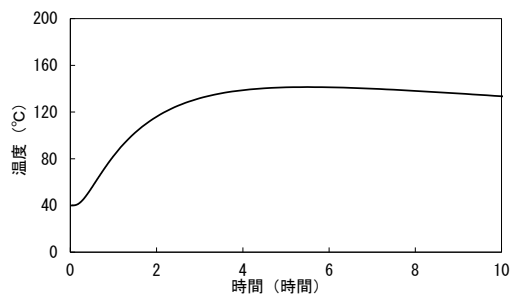
第 2.4.4 図 コンクリート温度の時刻歴変化 (1/2)



(ナトリウム溜：壁)

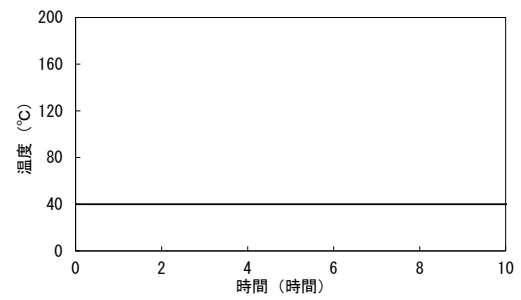


(ナトリウム溜：壁)



(ナトリウム溜：床)

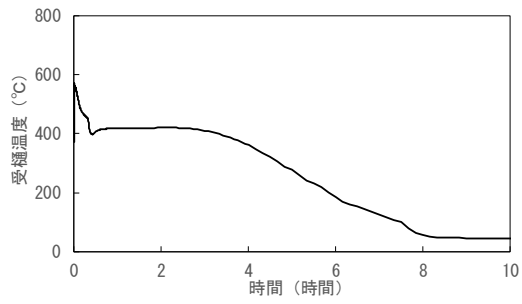
(a) 貫通クラック



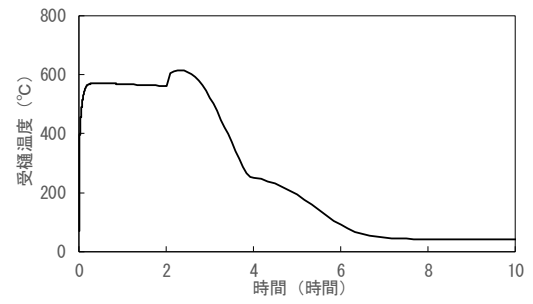
(ナトリウム溜：床)

(b) 小漏えい

第 2.4.4 図 コンクリート温度の時刻歴変化 (2/2)

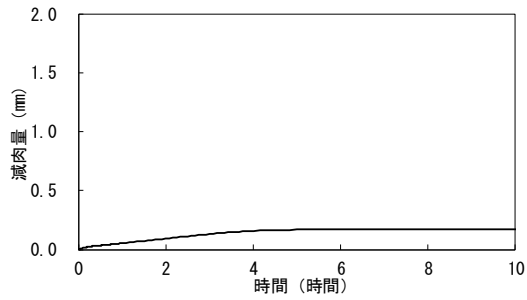


(前室)  
(a) 貫通クラック

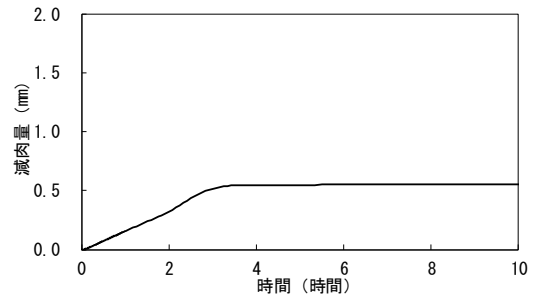


(前室)  
(b) 小漏えい

第 2.4.5 図 受樋温度の時刻歴変化



(前室)  
(a) 貫通クラック



(前室)  
(b) 小漏えい

第 2.4.6 図 受樋の腐食減肉量の時刻歴変化