



JY-117-1

第8条（火災による損傷の防止）に係る説明書

「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」

2022年2月18日

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部**

ナトリウム燃焼に対する基本的な考え方

ナトリウム燃焼に係る要求事項及び対応概要

ナトリウム燃焼の特徴

ナトリウム漏えいの防止 (①)

ナトリウム漏えいの検知 (②)

ナトリウム燃焼の感知 (②)

ナトリウム漏えい発生時の燃焼抑制 (③)

ナトリウム燃焼の消火 (②)

ナトリウム燃焼の影響軽減 (③)

ナトリウムと構造材との反応の防止 (③)

ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価

※：三方策との対応 (①：発生防止/②：感知及び消火/③：影響軽減)

- **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、運転員の手動スクラム操作により、原子炉を停止する。**
- **原子炉施設は、想定されるナトリウム漏えいによ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。**
- **一般火災における火災防護基準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。**

要求事項 ^[1]	対応概要
<p>（1）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>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 <ul style="list-style-type: none"> ＞ 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。 ＞ 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。 ＞ 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次冷却材ダンプタンクにあつては、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。 ＞ 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。
<p>（2）ナトリウム漏えいの検知 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> <ol style="list-style-type: none"> 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。 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。 ③ 中央制御室で必要な監視ができる設計であること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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、光学式の検出器を用いる。 ・ 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により光の透過率が減少することを利用する光学式の検出器は、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つても、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。 ・ 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。 ・ 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。

[1] 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

要求事項 [1]	対応概要
<p>(3) ナトリウム漏えい発生時の燃焼抑制 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できる設計」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出してナトリウムの漏えい量を低減すること等の設計である。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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。
<p>(4) ナトリウム燃焼の感知 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（火災防護対象ケーブルを含む。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。 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"> 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。 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"> 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。 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。 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。 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。

[1] 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

要求事項 ^[1]	対応概要
<p>（5）ナトリウム燃焼の消火 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>	<ul style="list-style-type: none">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。定期的に、装着訓練や消火訓練を実施し、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）にあつては、当該雰囲気を空気雰囲気とした場合に、特殊化学消火剤を充填した可搬式消火器を配備する。

要求事項 ^[1]	対応概要
<p>(6) 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は仮定）を想定する。</p> <p>② 常陽の冷却材であるナトリウムは、低圧でサブクール度が大きいいため、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の長さと同程度の配管肉厚の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> <p>⑤ ナトリウムの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>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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"> > 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は仮定）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の長さと同程度の配管肉厚の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。

[1] 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

要求事項 ^[1]	対応概要
<p>(7) ナトリウム燃焼の影響軽減 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"> ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。 ・ 床面に設置した鋼製のライナについて、堰を設け、漏えい拡散面積を制限することで、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。 ・ 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。 ・ 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經由して、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。

[1] 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

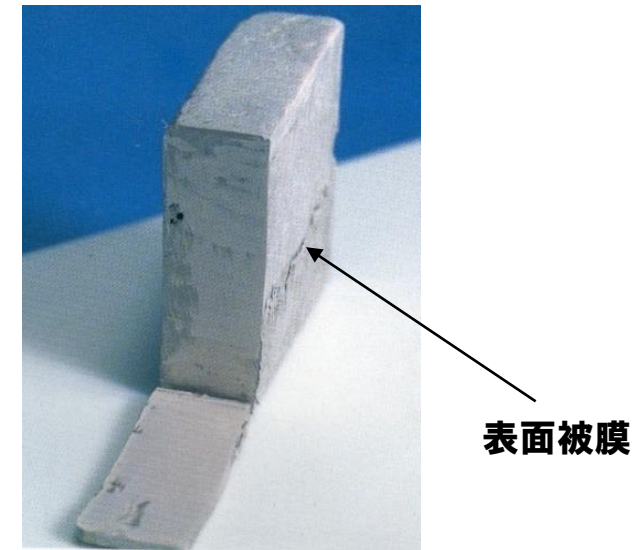
要求事項 [1]	対応概要
<p>(8) ナトリウムと構造材との反応防止 高温のナトリウムとコンクリートが接触すると、当該ナトリウムとコンクリート中の水分及び反応生成物とコンクリート成分の反応が生じるため、これを防止する設計とすること。ここで、「これを防止する設計」とは、例えば、コンクリート床面に鋼製のライナを敷設することや、配管周辺に受樋を設置することにより、ナトリウムとコンクリートの接触を防止すること等の設計であることをいう。その際、鋼製ライナや受樋の設計にあつては、ナトリウム燃焼に伴い鋼製材料の腐食が生じることを考慮した厚さとする。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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。 鋼製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。

[1] 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

ナトリウム燃焼の特徴 (1/2)

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・機器に内包された状態で使用されるが、万一、当該配管・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燃焼に係る特徴を示す。

(1) 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。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。なお、ナトリウム燃焼について、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油やアルコールの火災と異なり、火炎の高さが低い。

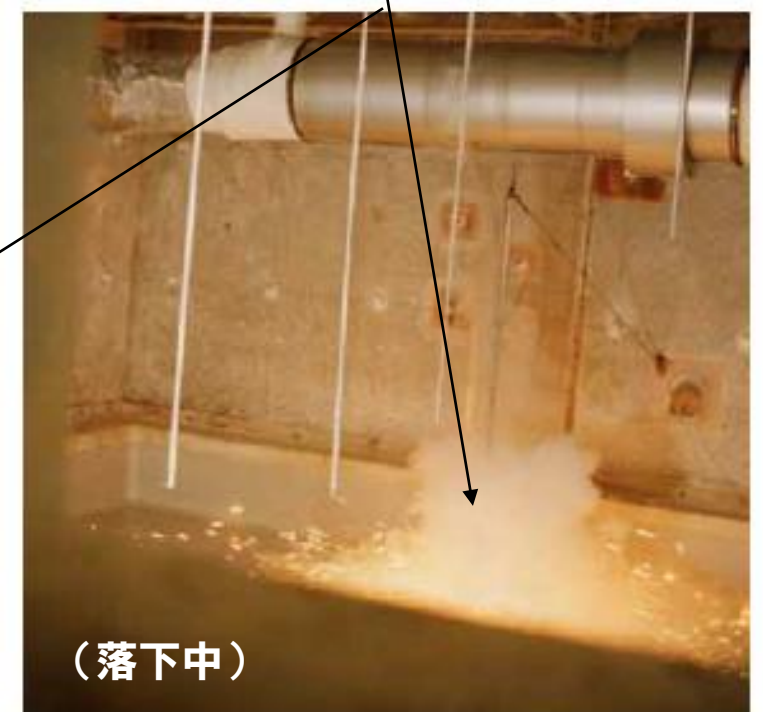
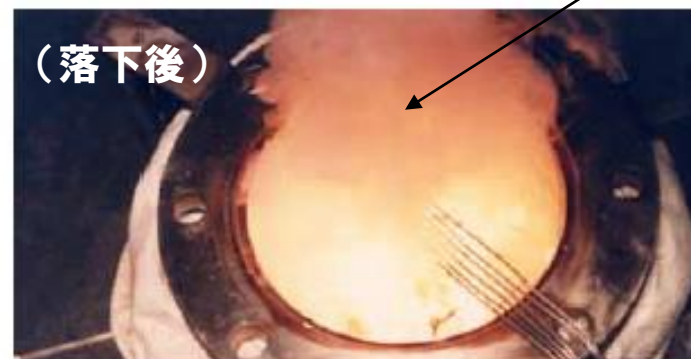


空気雰囲気中の固体状ナトリウム

(2) 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（ナトリウムエアロゾル）が発生する。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。

ナトリウムエアロゾル

(3) 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。



ナトリウム燃焼の様子

- (4) 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、ナトリウム燃焼の消火には、特殊な化学消火剤を用いる必要がある。
- (5) 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。



防護服・携帯用空気ボンベ



特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器



特殊化学消火剤を使用した消火の様子

- (6) 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。

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。なお、1次冷却材を内包する配管及び機器にあつては、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つては、低合金鋼を使用する。

- （1）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。
- （2）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。
- （3）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次冷却材ダンプタンクにあつては、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。
- （4）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。

ナトリウム漏えいの防止（2/7）

-ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計（1/3）-

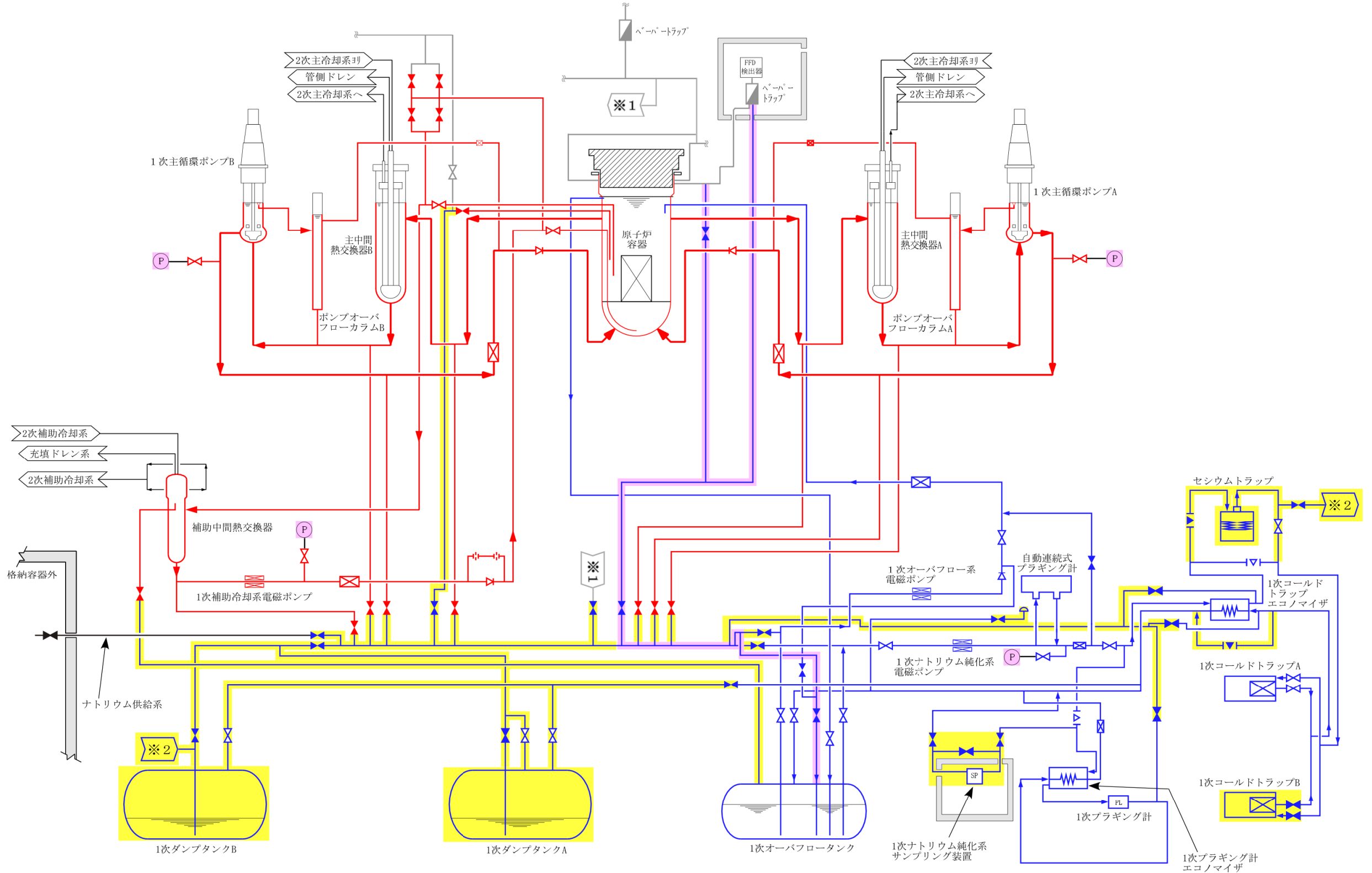
耐震重要度分類Sクラス以外でナトリウムを内包する配管及び機器のうち、以下については、内包するナトリウムを固化することによりナトリウム漏えいの防止措置を講じる（①）か、配管及び機器の破損に伴い想定される漏えい量が少ない（②）ものに該当する。

	系統	配管及び機器
①に該当するもの	1次ナトリウム純化系	サンプリングコイル、関連する配管及び弁【1-1】
		コールドトラップ（B）、関連する配管及び弁【1-2】
		セシウムトラップ、関連する配管及び弁【1-3】
		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【1-4】
	1次ナトリウム充填・ドレン系	下記【2-1】を除く配管、容器及び関連する弁【1-5】
②に該当するもの*1	2次ナトリウム純化系	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。）【1-6】
	1次ナトリウム充填・ドレン系	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【2-1】
	1次（2次）主冷却系/1次（2次）補助冷却系/1次ナトリウム純化系	圧力計の導圧管部【2-2】

*1 想定されるナトリウム漏えい量：～数kg

ナトリウム漏えいの防止 (3/7)

-ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計 (2/3) -



- : 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)

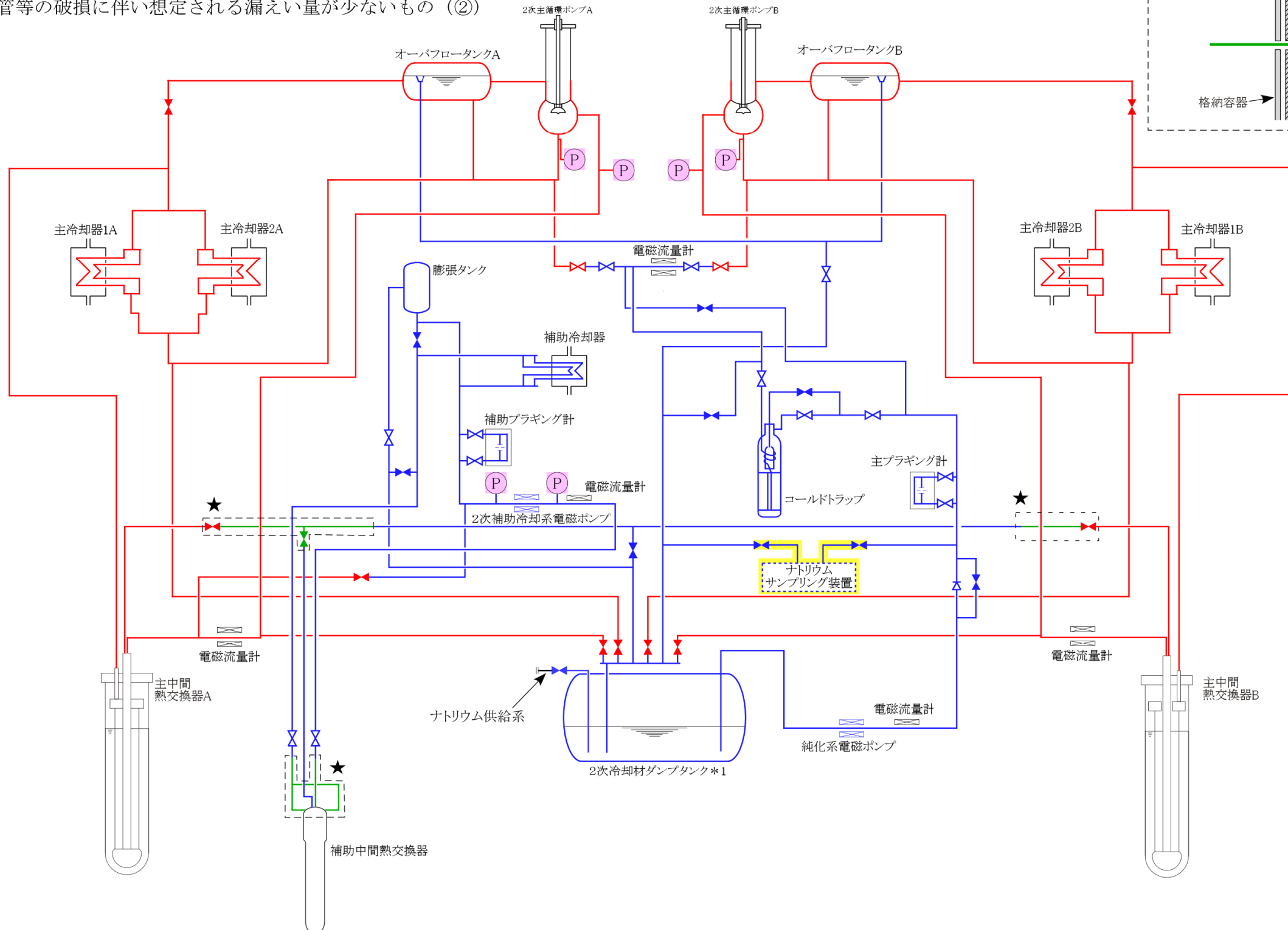
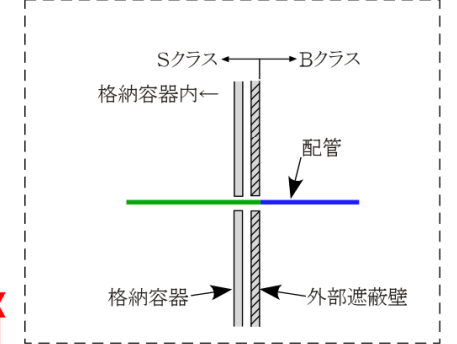
ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計の概念図 (1次系)

ナトリウム漏えいの防止 (4/7)

-ナトリウムを内包する配管及び機器の耐震設計 (3/3) -

- : 冷却材バウンダリに該当する配管及び機器 (Sクラス)
- : 格納容器バウンダリに該当する配管 (Sクラス)
- : 冷却材バウンダリ及び格納容器バウンダリ以外で2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))
- : 内包するナトリウム漏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)

★: 格納容器バウンダリの境界の概念



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)

ナトリウム漏えいの防止 (5/7)

-冷却材のバウンダリの肉厚管理の考え方 (1/3) -

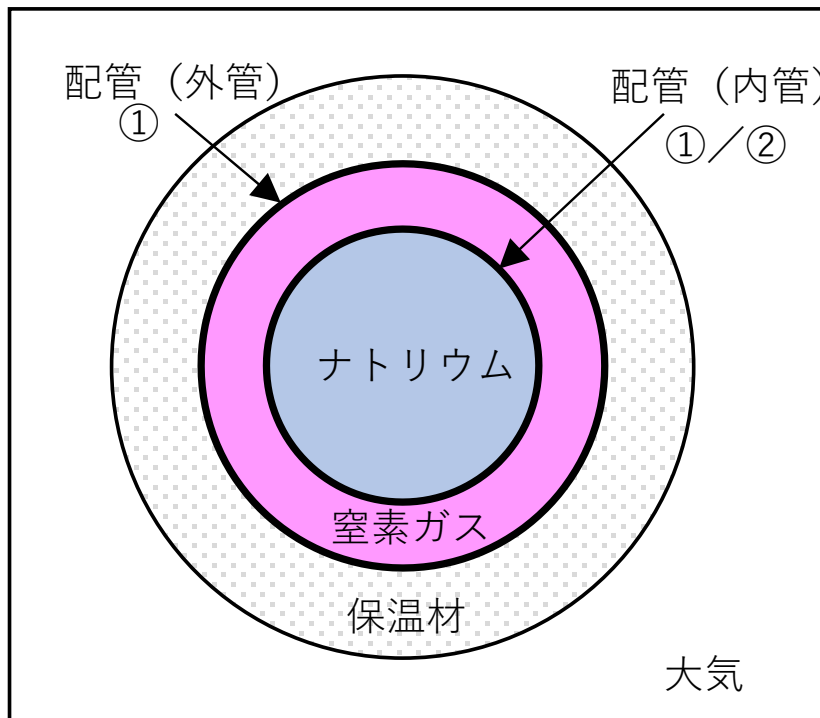
冷却材のバウンダリの減肉の要因には、「ナトリウム環境における腐食」、「流動による浸食（エロージョン）」及び「大気環境における腐食」がある。これらのうち、冷却材のバウンダリの減肉の主要因は、「ナトリウム環境における腐食」であり、冷却材のバウンダリの肉厚は、以下により管理する。

- ・ 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）*

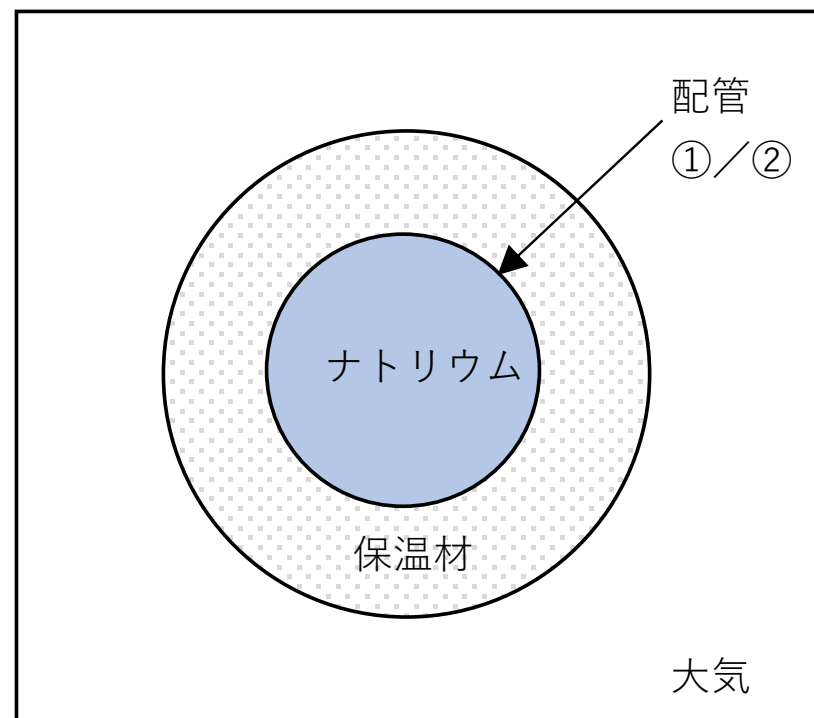
なお、1次冷却系にあつては、配管エルボの側面を代表点とし、2次冷却系にあつては、主冷却器の伝熱管を代表点とし、外観を目視確認できる（主冷却器の伝熱管にあつては、「大気環境における腐食」も考慮し、定期的に肉厚を測定）。

*：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、また、運転管理において、原子炉施設保安規定に定めるプラグング温度に相当する酸素濃度（1次系：10ppm以下、2次系：20ppm以下）で管理しているため、設計時の腐食代を超えることはない。

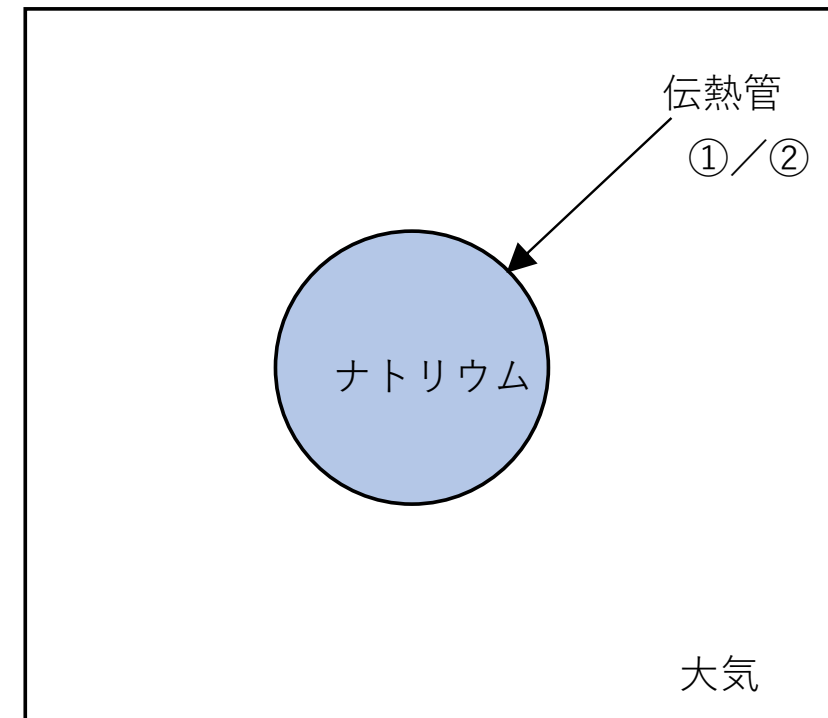
- ① 腐食代の確保（管理対象：ナトリウムと配管の接触面、配管と大気の接触面（保温材の有無は考慮しない）及び伝熱管と大気の接触面）
- ② 腐食環境排除（管理対象：ナトリウムと配管の接触面）



(a) 1次冷却系（二重管構造部）



(b) 1次冷却系の一部及び2次冷却系



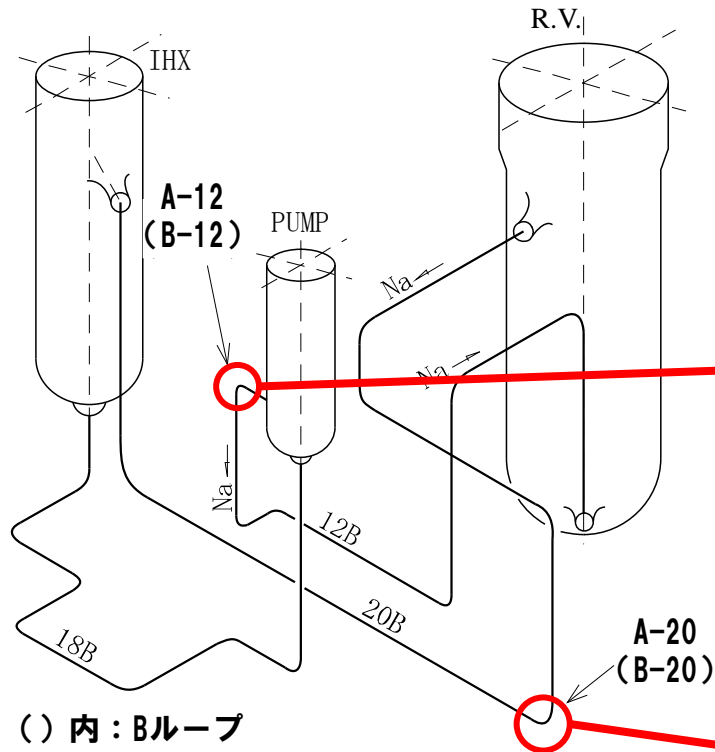
(c) 2次冷却系の主冷却器及び補助冷却器の伝熱管

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

ナトリウム漏えいの防止 (6/7) -冷却材バウンダリの肉厚管理の考え方 (2/3) -

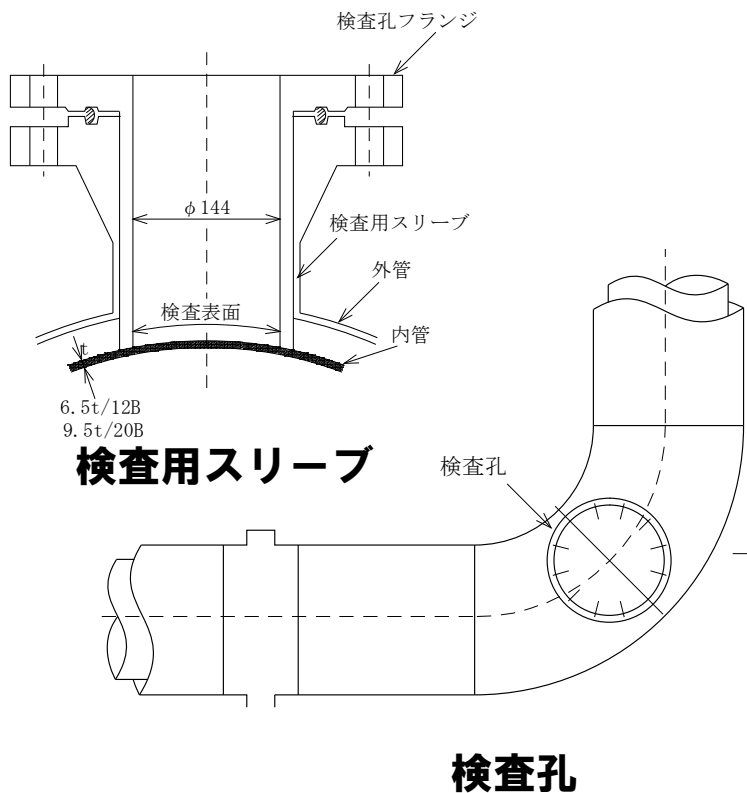
【1次冷却系の外観確認】

※：点検頻度：定期検査ごと



() 内：Bループ

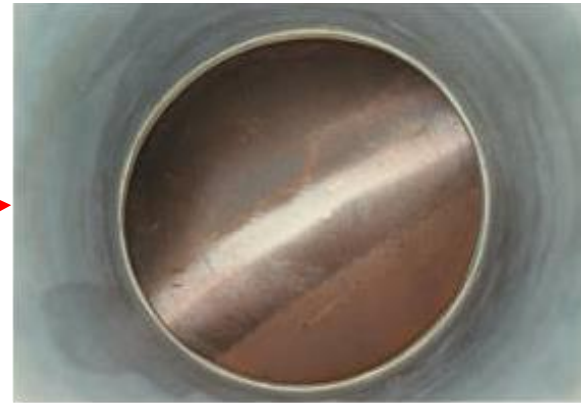
外観の確認箇所



検査用スリーブ

検査孔

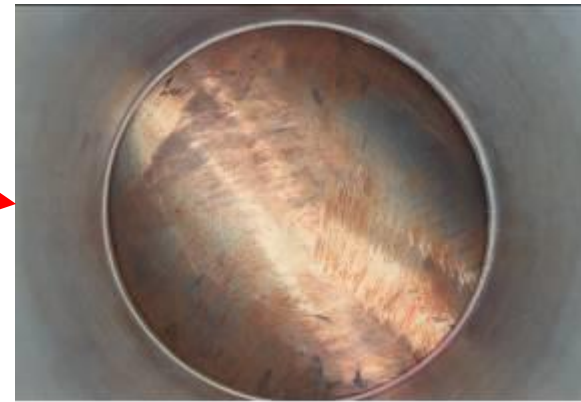
昭和55年12月1日
(第2回施設定期検査)



平成17年7月21日
(第14回施設定期検査)



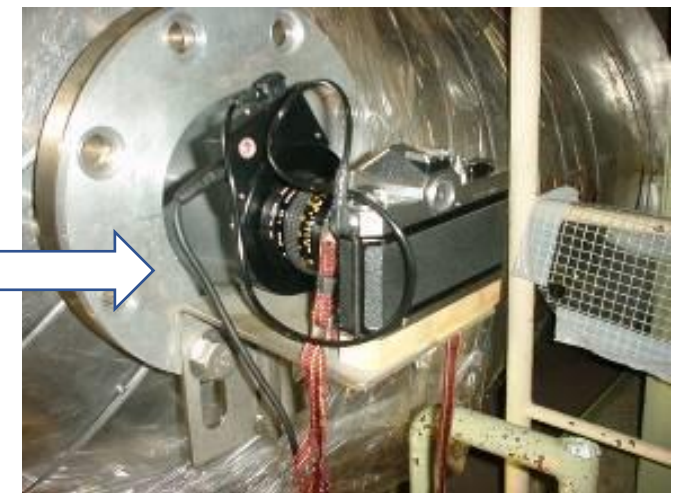
コールドレグ (例：Aループ (A-12))



ホットレグ (例：Aループ (A-20))



検査孔 (通常時)

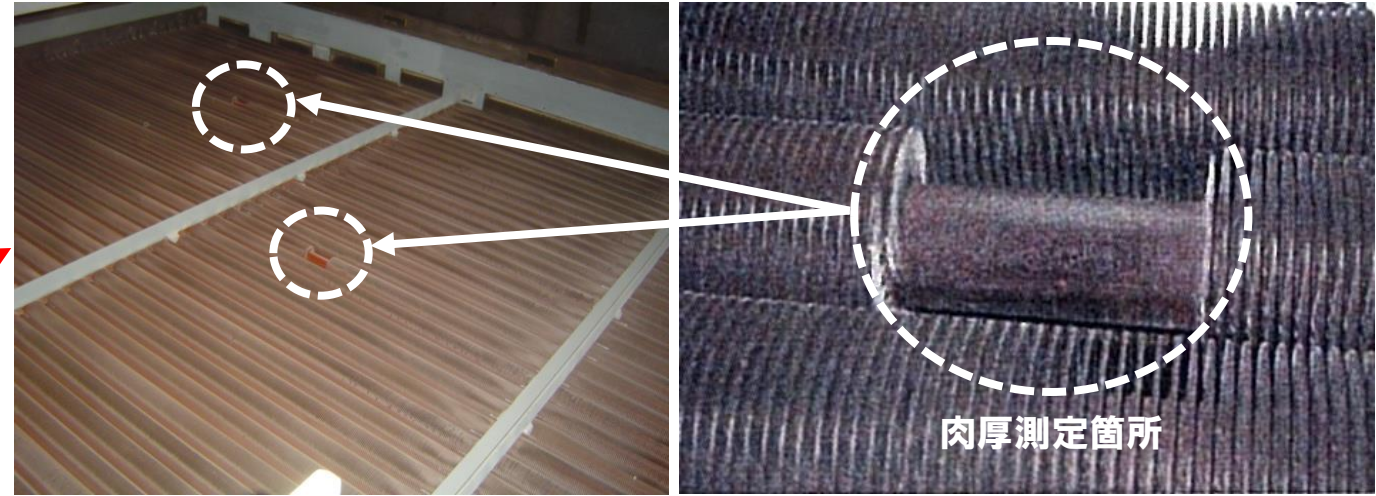
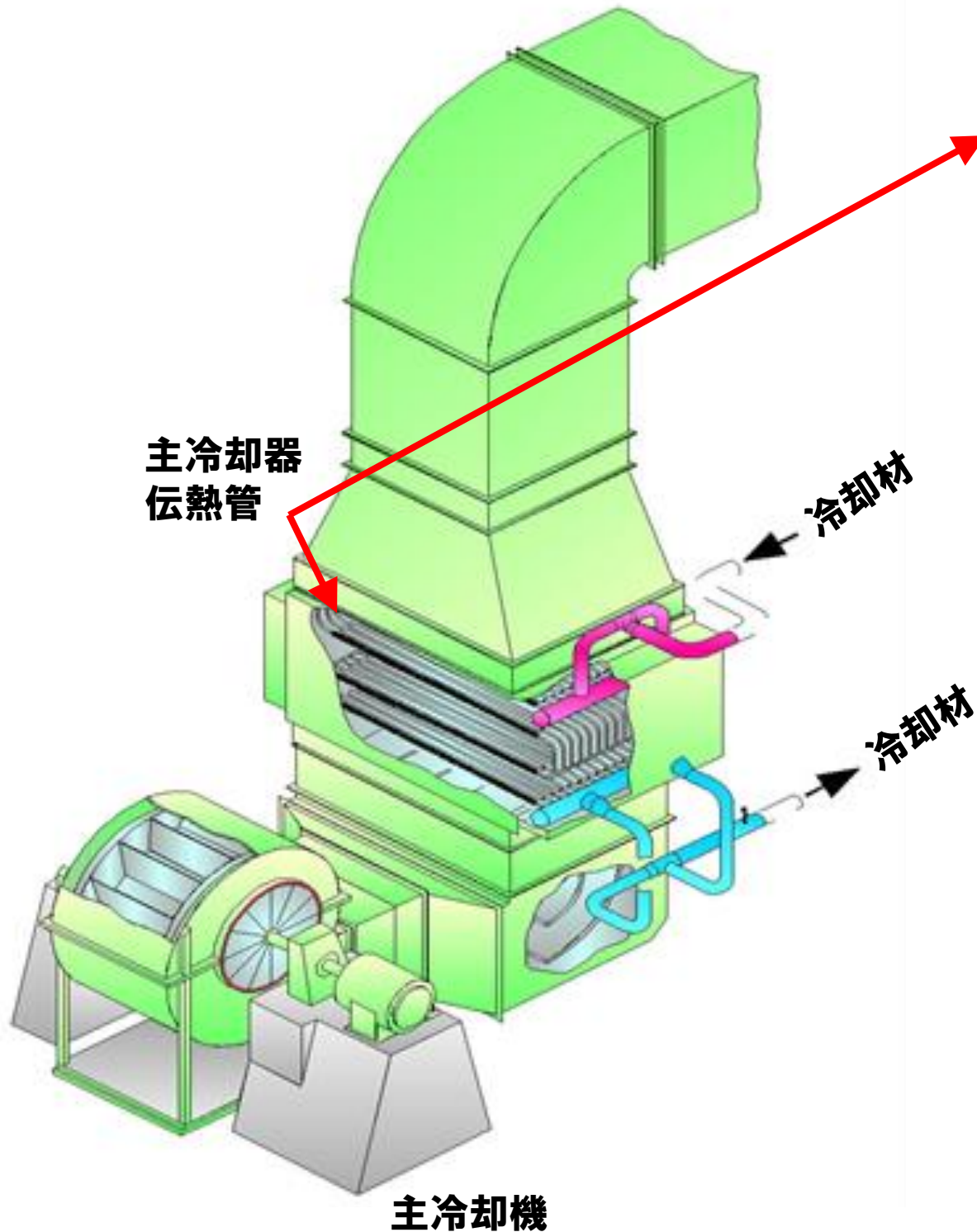


検査孔 (検査時)

ナトリウム漏えいの防止 (7/7) -冷却材バウンダリの肉厚管理の考え方 (3/3) -

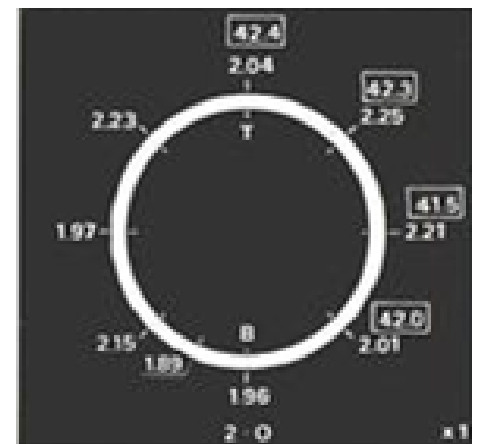
【2次冷却系の外観確認及び肉厚確認】

※：点検頻度：定期検査ごと



過去の主冷却器伝熱管の肉厚確認結果 (一例)

※ 想定した腐食代を下回り、必要な肉厚 (0.4mm以上) を有する。

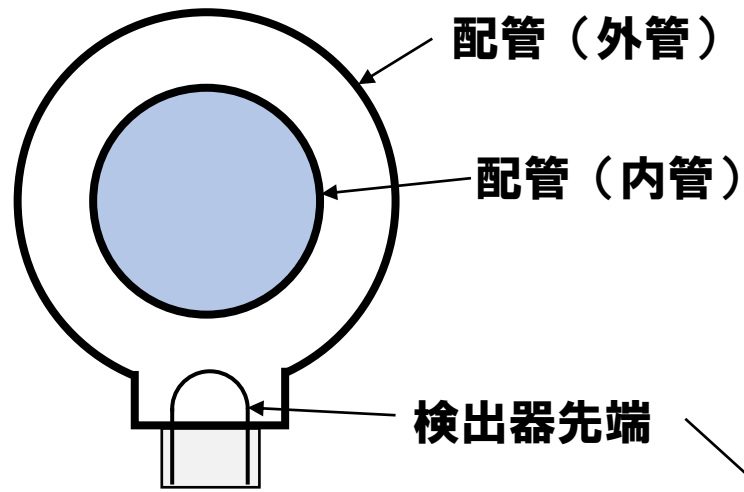


- ナトリウム漏えいの検知には、ナトリウム漏えい検出器を用いる。原子炉冷却材バウンダリ及び冷却材バウンダリを構成する配管及び機器（主冷却器及び補助冷却器を除く。）には、通電式の検出器を用いる。主冷却器及び補助冷却器には、その構造に鑑み、光学式の検出器を用いる。
- 電極とシース保護管又はアースがナトリウムにより短絡されることを利用する通電式の検出器は、二重構造の間隙や金属製シート等の中に検出素子を配置することにより金属片等の異物混入による誤作動の防止を図る。ナトリウム燃焼によって生じる白煙により光の透過率が減少することを利用する光学式の検出器は、埃や電氣的ノイズ等に応答しないように留意した回路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、冷却材の液位低下により行うものとする。なお、ナトリウム漏えい検出器により動作する水やガスを用いた自動消火設備は有していない。
- 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。
- 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。

ナトリウム漏えいの検知 (2/7)

-ナトリウム漏えい検出器の構造 (1/2) -

【通電式ナトリウム漏えい検出器（プラグ型）】



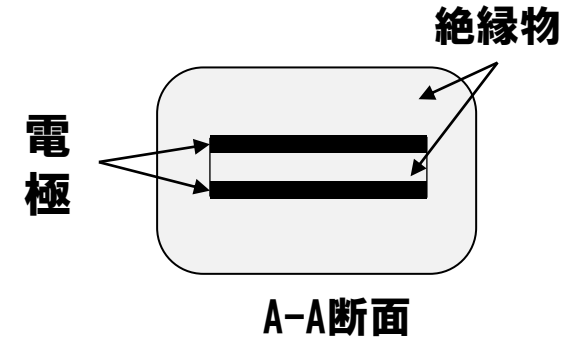
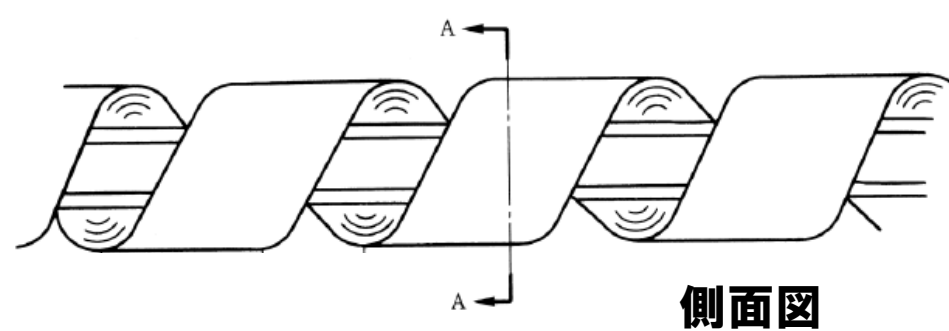
○ 動作原理

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。

○ 適用箇所

- ・ 1次冷却系
- ・ 2次冷却系の一部（弁ベローズ等）

【通電式ナトリウム漏えい検出器（リボン型）】



○ 動作原理

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、電極とアースがナトリウムによって短絡されることを利用。

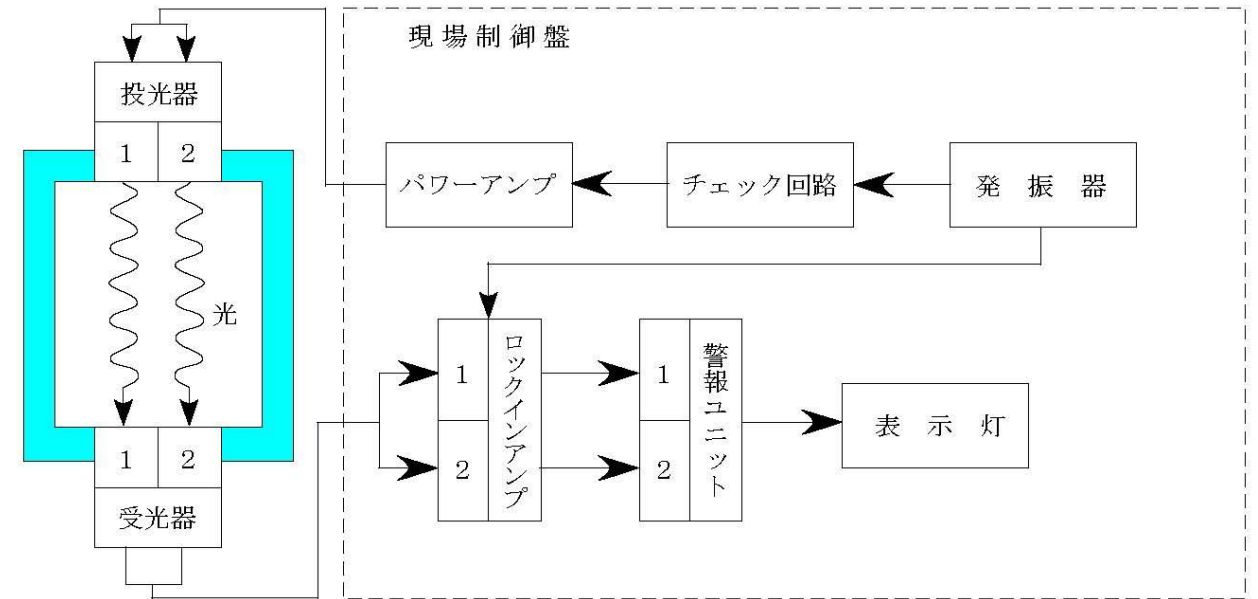
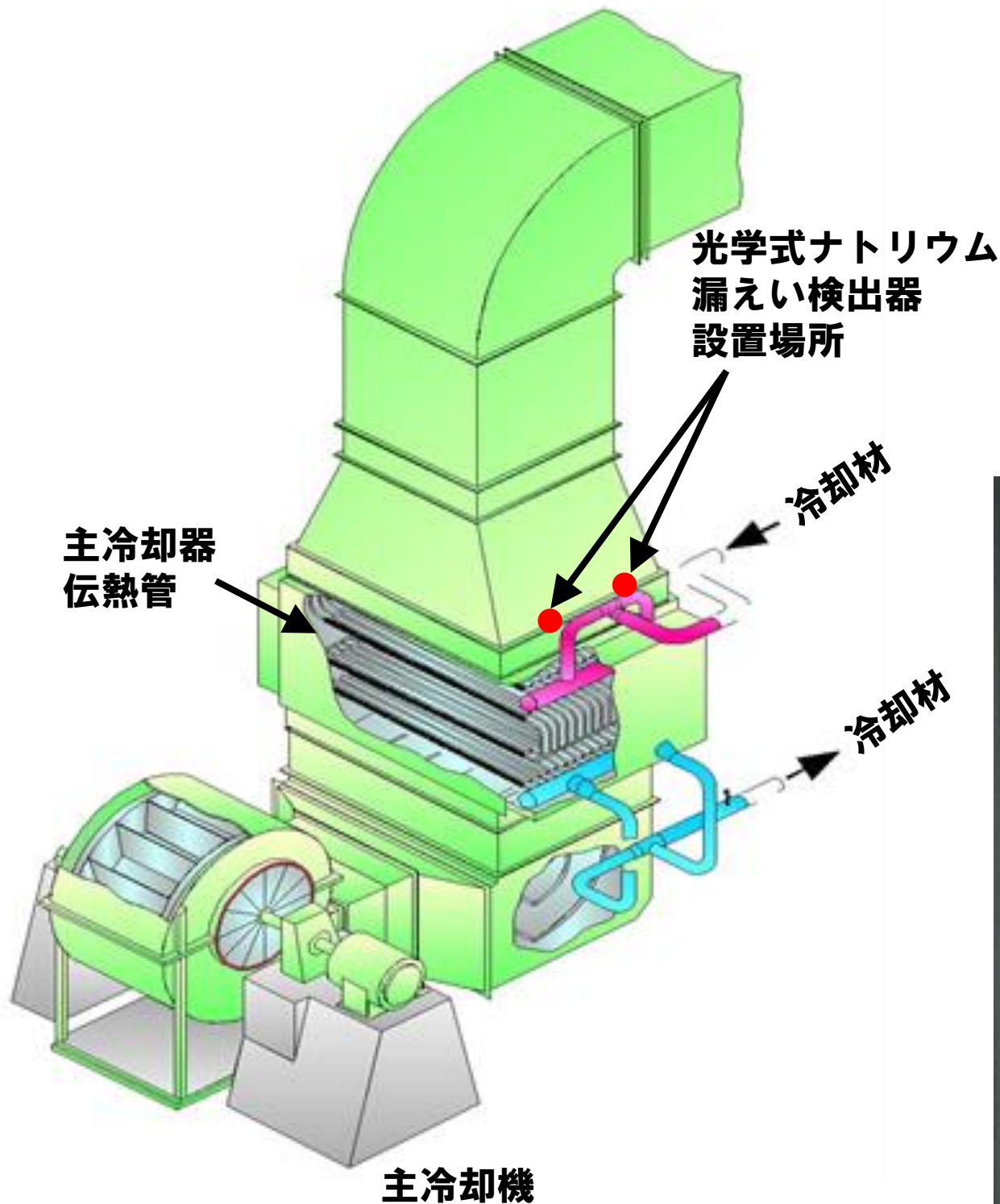
○ 適用箇所

- ・ 2次冷却系（配管）

ナトリウム漏えいの検知 (3/7)

-ナトリウム漏えい検出器の構造 (2/2) -

【光学式ナトリウム漏えい検出器】



現場制御盤

○ 動作原理

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等）により、光の透過率が減少することを利用。

○ 適用箇所

- ・主冷却器
- ・補助冷却器

ナトリウム漏えいの検知 (4/7)

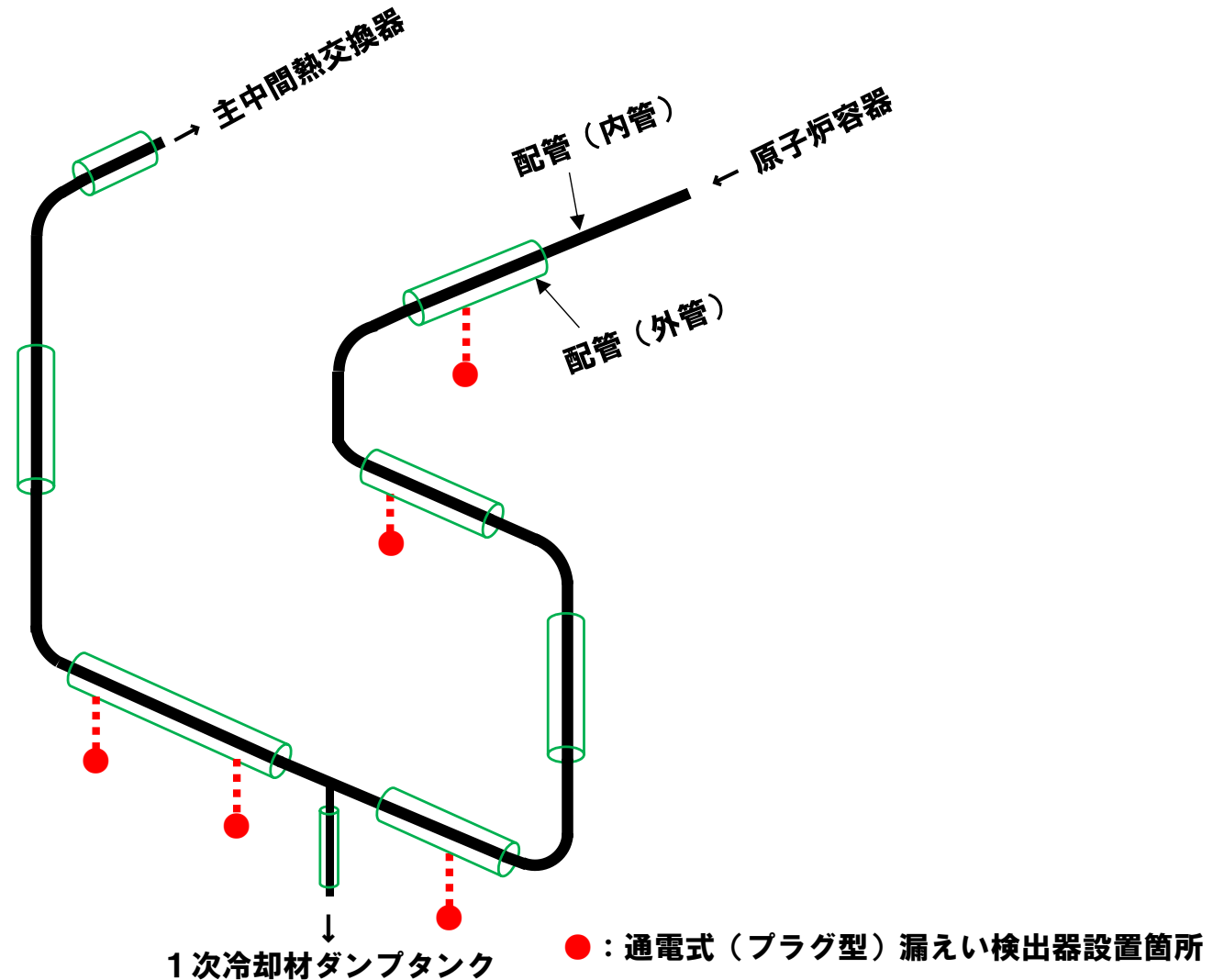
-ナトリウム漏えい検出器の配置 (1/2) -

【基本方針】

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。

【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。



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)

【1次系（原子炉冷却材バウンダリを除く。）】

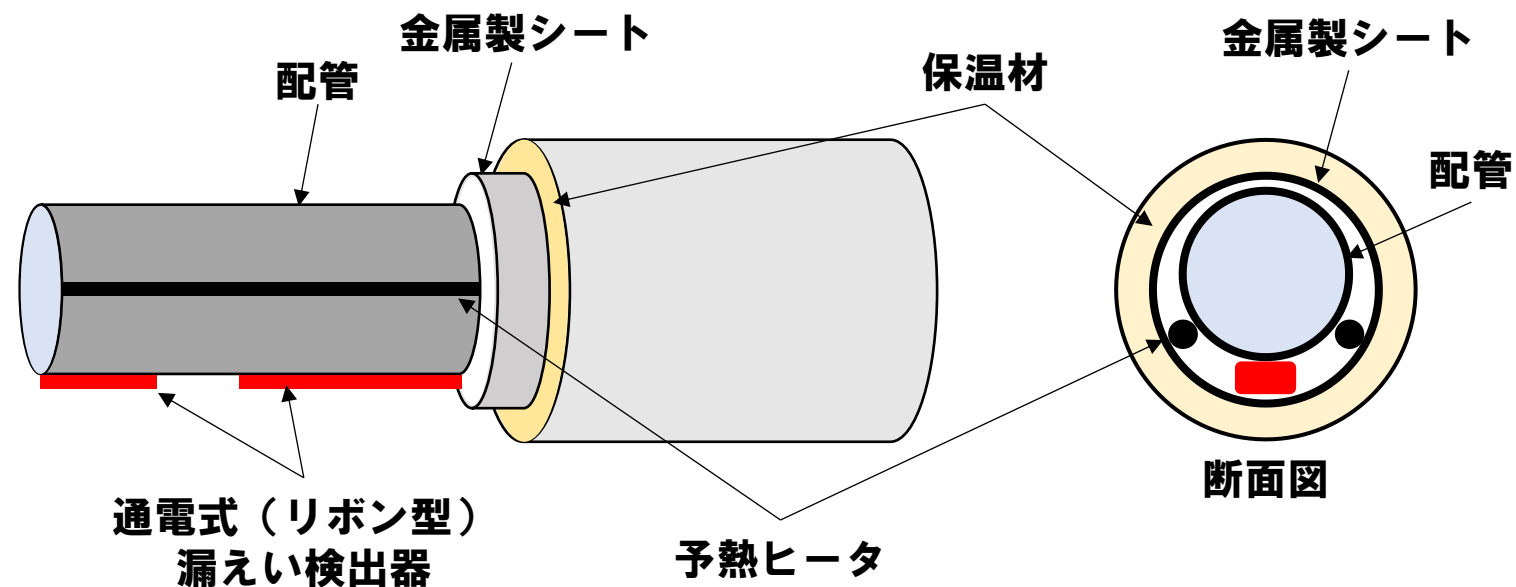
原子炉冷却材バウンダリを除き1次冷却材を内包する配管及び機器（容器、ポンプ及び弁）にあっては、配管部からの漏えいも検知できるように配管等の外側に金属製のシートを敷設し、金属製のシートの内側に通電式（プラグ型）のナトリウム漏えい検出器の検出部を設置する。

ナトリウム漏えいの検知 (5/7)

-ナトリウム漏えい検出器の配置 (2/2) -

【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との間に通電式（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。



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

【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。

ナトリウム漏えいの検知（6/7）

-中央制御室における監視（1/2）-

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次冷却系】

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。

<原子炉附属建物2階>

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。

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。

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。

<中央制御室（A-712）>

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。

<1次制御盤>

※：系統ごとのナトリウム漏えい検出器の作動状況を確認可能。なお、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（中央制御室からの移動時間：約2分）で確認可能

ナトリウム漏えいの検知 (7/7) -中央制御室における監視 (2/2) -

【2次冷却系】

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）を確認。

<原子炉附属建物2階>

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。

<2次ナトリウム漏えい警報盤>



※：ブロック（基本的には部屋）ごとのナトリウム漏えい検出器の作動状況を確認可能

<中央制御室 (A-712)>

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。

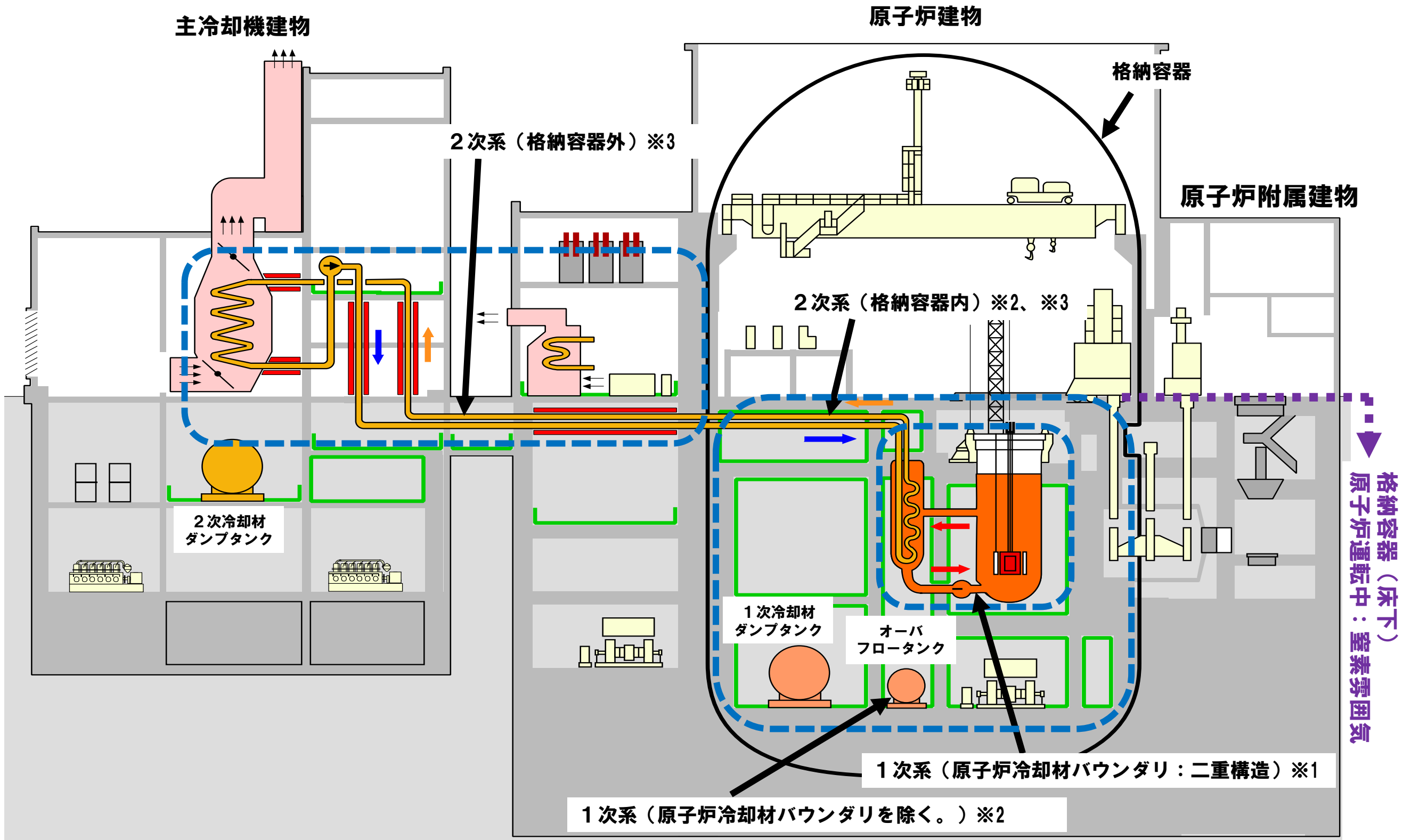
<2次制御盤>

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。

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。

- 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。
- 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。
 - 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。
 - 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。
 - 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。
- 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。【火災感知器の詳細については、一般火災における説明において提示】

- **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。**
- **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。**
- **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に緊急ドレンし、ナトリウム漏えい量を低減する。**



- ※1: 二重構造の間隙を窒素雰囲気で維持し、漏えいしたナトリウムを当該間隙で保持することによってナトリウム燃焼を抑制
- ※2: 原子炉運転中、格納容器 (床下) を窒素雰囲気で維持し、漏えいしたナトリウムを格納容器 (床下) で保持することによってナトリウム燃焼を抑制
- ※3: 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に緊急ドレンし、ナトリウム漏えい量を低減

- 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。
- 定期的に、装着訓練や消火訓練を実施し、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。



防護服・携帯用空気ボンベ



特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器



消火訓練の様子

ナトリウム燃焼の消火（2/2） -特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器等の配置等-

【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、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（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、当該雰囲気を空気雰囲気とした場合に配備）する。また、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、防護具（防護服、防護マスク及び携帯用空気ボンベ等）とともに、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。

【特殊化学消火剤を装填した可搬式消火器の破損による影響】

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にあっても、放出される消火剤（粉末）の成分は、物理的・化学的に安定な炭酸ナトリウム、炭酸カリウム、炭酸リチウム等の混合物であるため、機器等に影響を及ぼすことはない。

- 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。
- 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。
- 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。
- 床面に設置した鋼製のライナについて、堰を設け、漏えい拡散面積を制限することで、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。

-格納容器（床下）で冷却材の漏えいが発生した場合の対応-

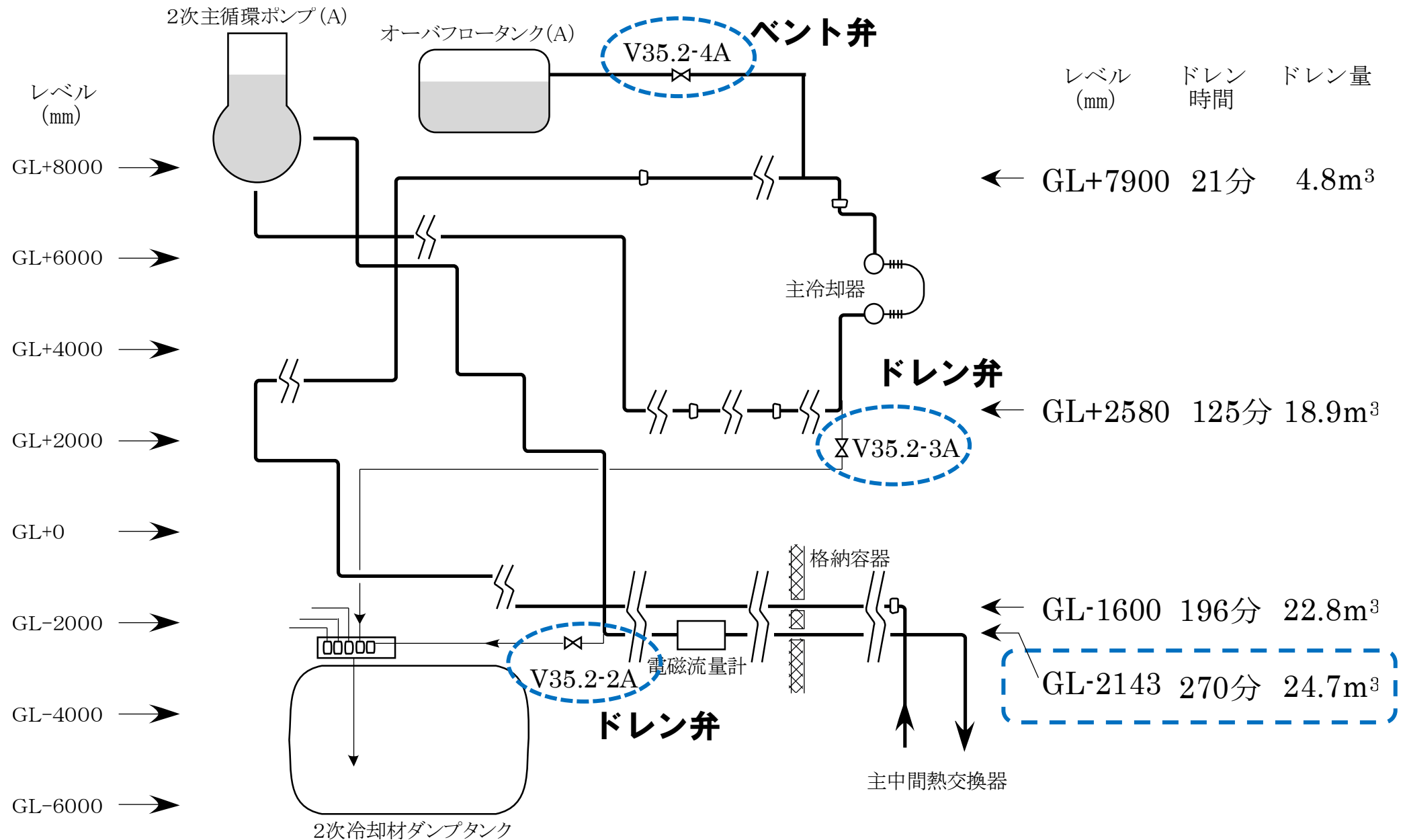
格納容器（床下）において、1次冷却材の漏えいが発生した場合の主な対応を以下に示す。

- 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」、「オーバフロータンクの有意な液面低下」、「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 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）するとともに原子炉停止後の冷却系の状態を監視する。
※ 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。
- ③ ナトリウムが格納容器（床下）に流出し、漏えいした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に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が構造物や雰囲気への熱移行により十分に低下（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を実施する。
 - (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) 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。
 - (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装置及び水槽等から構成する脱金属ナトリウム設備により安定化し、当該廃液は、放射性液体廃棄物として処理する。
※ 高温のナトリウムは、粘性が低く床面に拡がったナトリウムプールの厚みは1～2cm程度と推定できる。なお、MK-III改造工事における1次主冷却系の配管（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）を除去した実績を有する。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。
※ 高温のナトリウムにあっては、表面の不活性被膜が除去されると、ナトリウムと空気との反応（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。このため、ナトリウムの回収作業に当たっては、「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反応に伴う温度上昇を抑制（蓄熱を小さくする。）すること」で、ナトリウムの発火を防止する。

- 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。
- 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。
- 床面に設置した鋼製のライナについて、堰を設け、漏えい拡散面積を制限することで、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。
- 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。
- 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。

-2次冷却材ダンプタンクへの緊急ドレン-

2次冷却材の漏えいが発生し、これを検知した場合、運転員は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へ緊急ドレンしナトリウム漏えい量を低減する。



【2次冷却材のドレン実績（Aループ）：2021年4月7日】

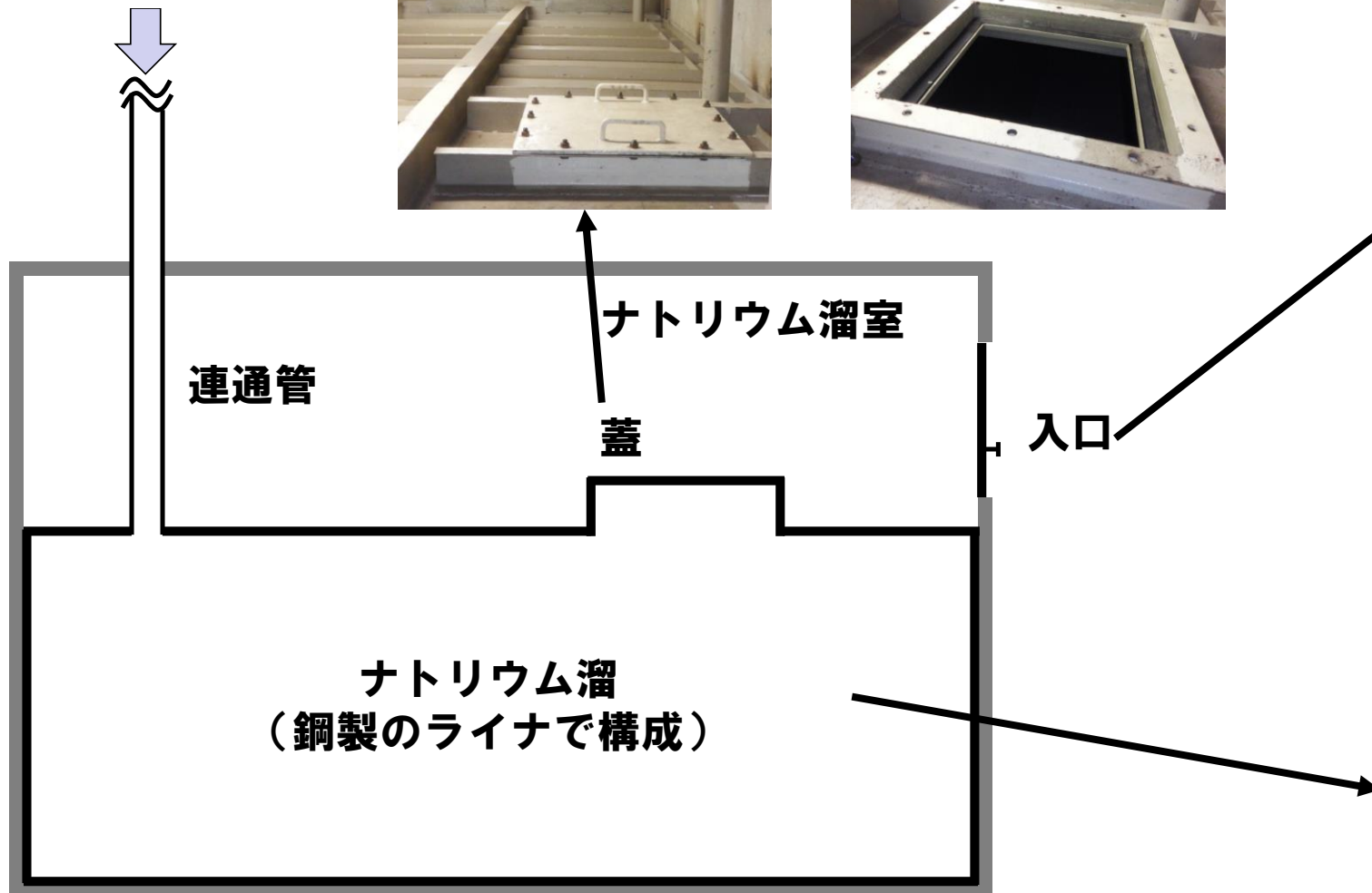
- ※ 2次冷却材ダンプタンクへの緊急ドレンは、現場にてベント弁及びドレン弁を手動で開けることにより実施する。
- ※ 2次冷却材の漏えいが発生した後、緊急ドレンは30分以内に実施可能（漏えいの判断や操作時間を含む。）であり、また、通常のドレンの際に系統内の冷却材を2次冷却材ダンプタンクにドレンするまでに要する時間は約270分である。
- ※ 上記より2次冷却材漏えいが発生した後、5時間以内で系統内の冷却材を2次冷却材ダンプタンクにドレンすることが可能である。

ナトリウム燃焼の影響軽減（5/8）：原子炉附属建物及び主冷却機建物

-ナトリウム溜における漏えいナトリウムの保持-

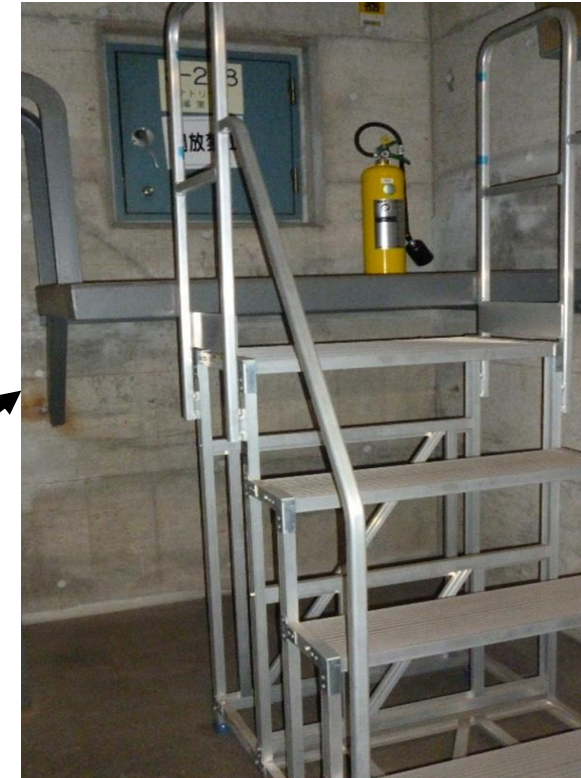
主冷却機建物において、床ライナ又は受樋上に漏えいしたナトリウムは、床ライナ又は受樋から連通管を介して、地下1階のナトリウム溜室内のナトリウム溜に導き、ナトリウム溜で保持することによりナトリウム燃焼の影響を軽減できるものとする。

受樋又は床ライナ



ナトリウム溜の概要

- ※ 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。
- ※ 1ループ当たりのナトリウムインベントリ（約30m³）に対して、ナトリウム溜の容積は約58m³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。
- ※ 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（ $Dt/4$ （ D ：配管直径、 t ：配管の厚さ））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となり、受樋の深さは当該液深よりも深いものとする。



ナトリウム溜の内部

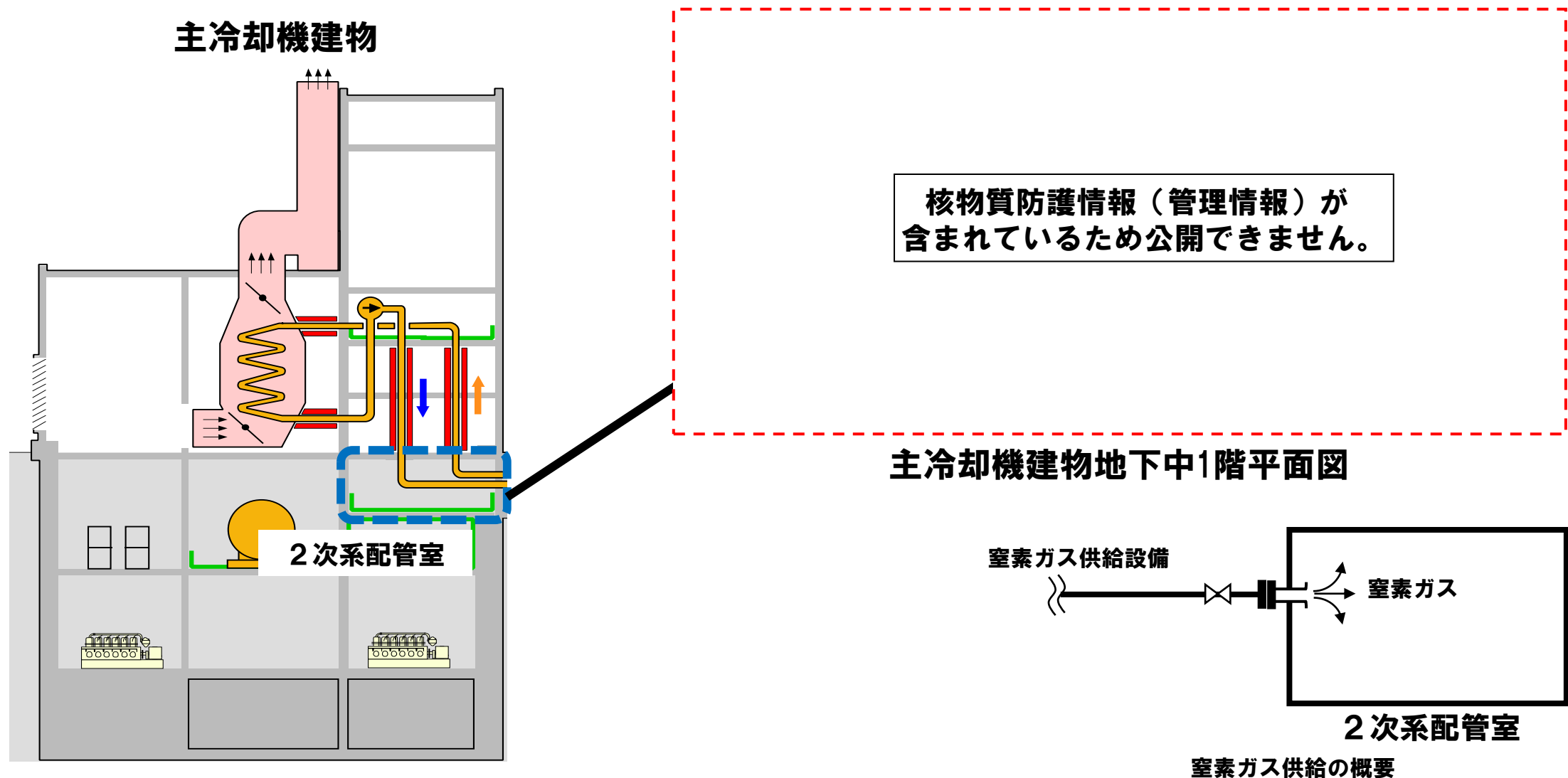
-主冷却機建物における窒素ガス供給-

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次系配管室を対象*1に、当該室で2次冷却材の漏えいが発生した場合、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。

*1：2次系配管室は、部屋の容積が小さく、また、主冷却機建物の低所に位置（緊急ドレンが完了するまでの時間が長い（漏えい時間が長い））するため、湿分等の反応により発生した水素が蓄積し、水素の濃度が燃焼限界濃度を超えるおそれがある。

【窒素ガス供給に係る手順】

2次系配管室で2次冷却材の漏えいが発生した場合、運転員は、2次冷却材ダンプタンクへの緊急ドレンを実施した後、窒素ガス供給設備から2次系配管室に窒素ガスの供給を開始する（2次冷却材の漏えいが発生した後、窒素ガス供給は35分以内に実施可能（漏えいの判断や操作時間を含む。））。

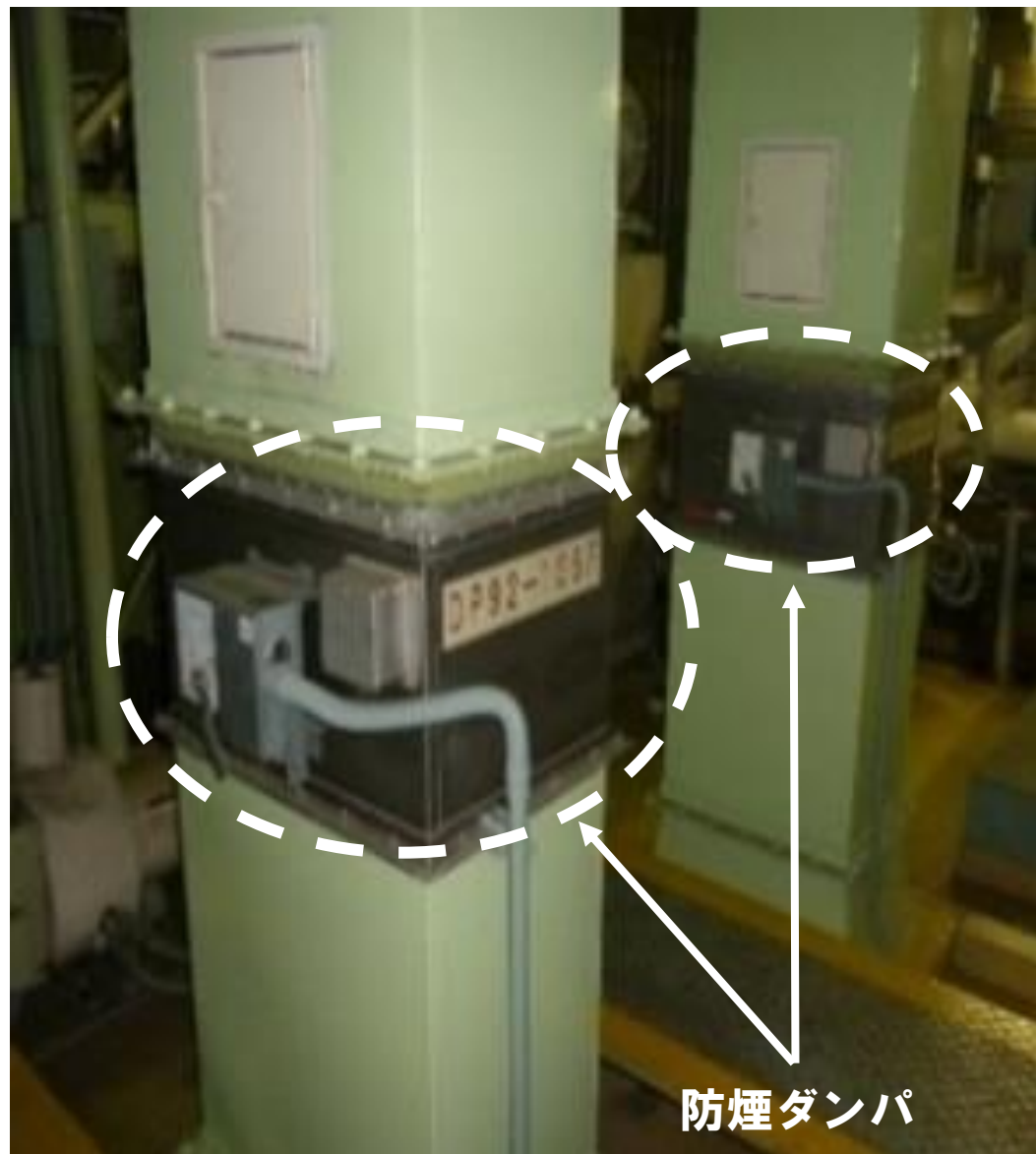


ナトリウム燃焼の影響軽減（7/8）：原子炉附属建物及び主冷却機建物 -ナトリウムエアロゾルの拡散を防止するための措置-

原子炉附属建物及び主冷却機建物においては、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*1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*1する。

*1：火災感知器の作動に伴い自動で動作（自動で動作しない場合、一括操作盤にて操作することも可能）

＜換気空調設備・防煙ダンパ一括操作盤＞



※ エリアごとに、換気空調設備及び防煙ダンパを管理

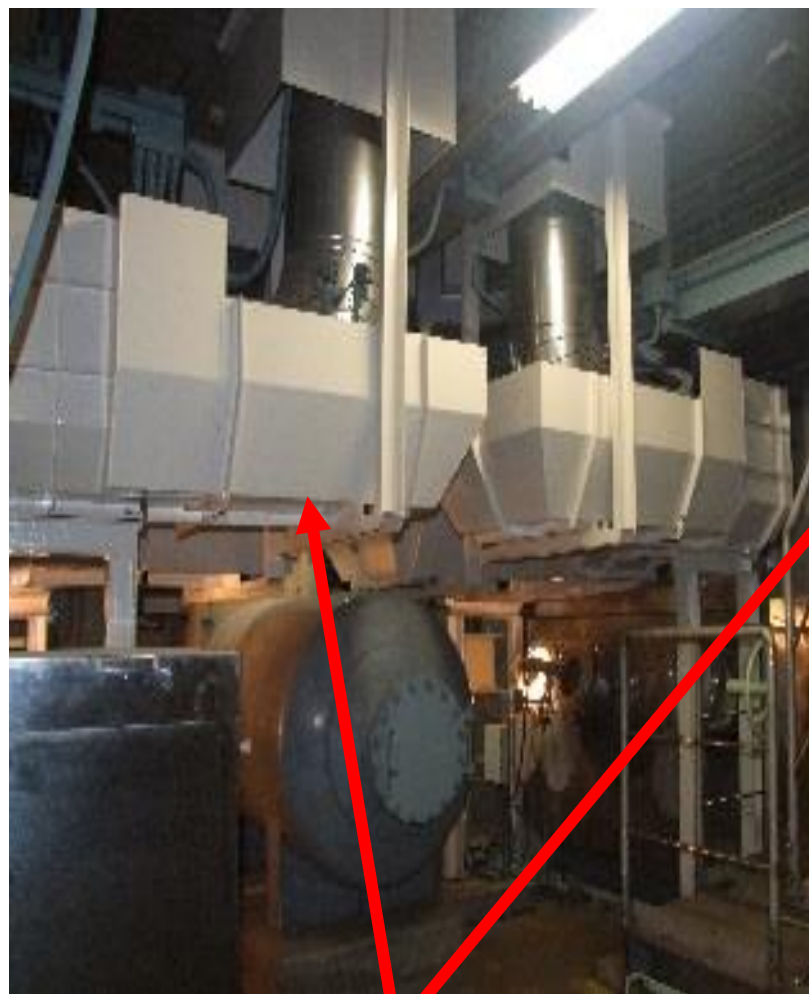
※ 防煙ダンパのナトリウムエアロゾルによる腐食の影響は小さい。ナトリウムが燃焼した場合の高温状態においても、ナトリウムエアロゾルによる腐食速度は、 $1 \times 10^{-3} \text{mm/hr}$ 程度である。

ナトリウム燃焼の影響軽減（8/8）：原子炉附属建物及び主冷却機建物 -原子炉附属建物又は主冷却機建物で2次冷却材が漏えいした場合の対応-

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」、「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」、「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）するとともに原子炉停止後の冷却系の状態を監視する。
※ 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可能性がある。
 - 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。
 - ④ 漏えいの発生した系統内の冷却材を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が十分に低下（発火点以下）したことを確認した後、ナトリウムの回収作業を実施する。
 - (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。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装置及び水槽等から構成する脱金属ナトリウム設備により安定化し、当該廃液は、放射性液体廃棄物として処理する。
- ※ MK-III炉心の140MW運転中における2次冷却材に含まれるトリチウム：約 7×10^2 Bq/g_{Na}（平成15年10月測定値）
- ※ 高温のナトリウムは、粘性が低く床面に拡がったナトリウムプールの厚みは1～2cm程度と推定できる。なお、MK-III改造工事における1次主冷却系の配管（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）を除去した実績を有する。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。
- ※ 高温のナトリウムにあっては、表面の不活性被膜が除去されると、ナトリウムと空気との反応（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。このため、ナトリウムの回収作業に当たっては、「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反応に伴う温度上昇を抑制（蓄熱を小さくする。）すること」で、ナトリウムの発火を防止する。

- 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。
- 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。



受樋（厚さ：3.2mm）



床ライナ（厚さ：6mm）

- ※ ナトリウム燃焼環境下における鋼製材料の腐食は、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、材料中の鉄の酸化等により生じる。
- ※ 鋼製のライナ及び受樋の腐食については、「ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価」において、腐食による減肉量を評価する。

- 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っては、内管の破損により漏えい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。
- 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。

⇒ 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、以下では、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。

ナトリウム漏えい時の燃焼影響評価（2/13）
-2次冷却材漏えい時の燃焼影響評価に係る判断基準-

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）した場合にあっても、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。）、健全な系統に影響が伝播しないこと。**

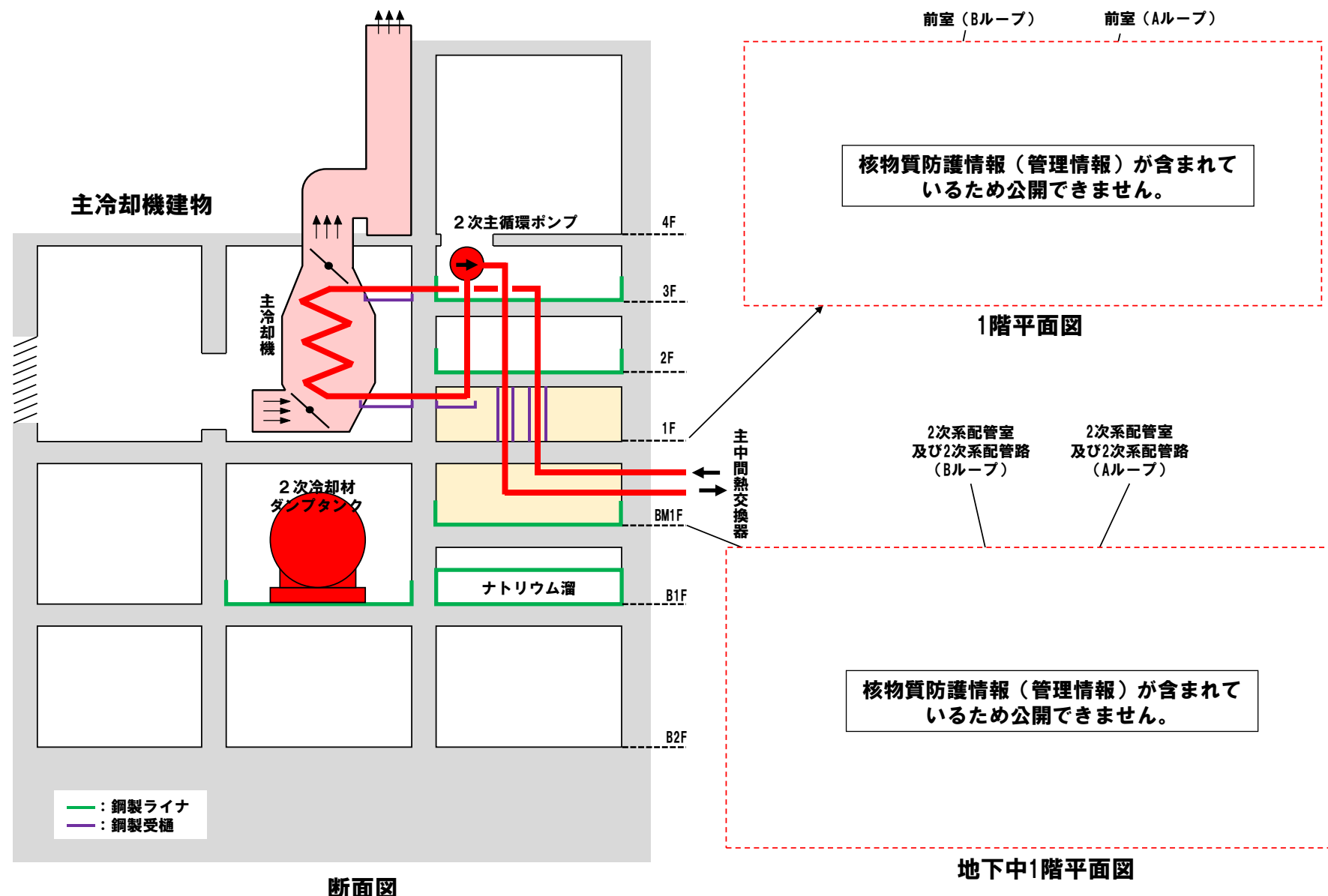
ナトリウム漏えい時の燃烧影響評価（3/13）

- 2次冷却材漏えい時の燃烧影響評価に係る代表的な漏えい場所 -

2次冷却材漏えい時の燃烧影響評価は、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、ナトリウム燃烧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」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烧による影響を評価する。



【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

-配管室における燃烧影響評価 (2/5) -

2. 計算コード

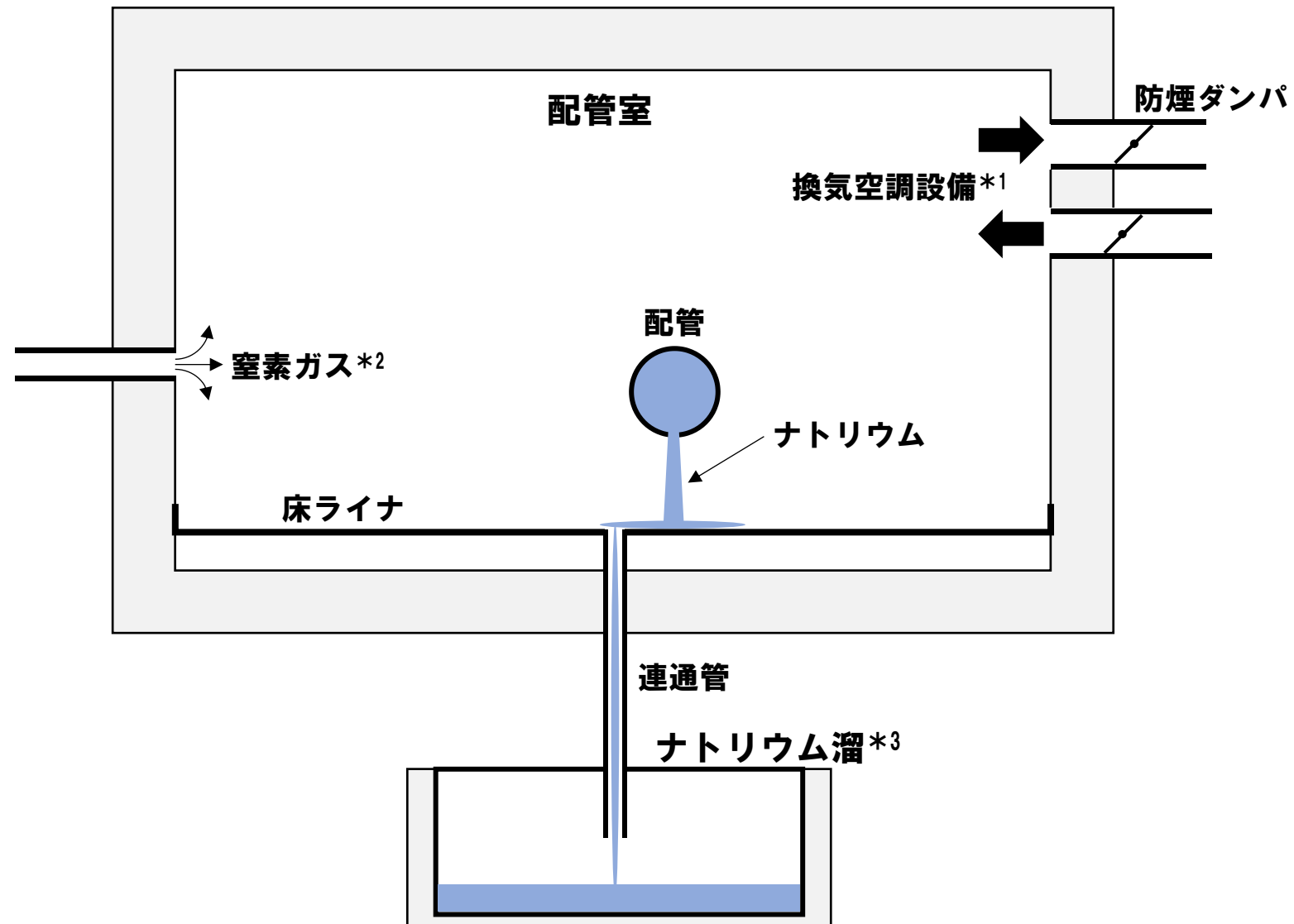
本燃烧影響評価には、計算コードSPHINCSを用いる。

3. 解析体系

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。

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



解析体系の概念図

-配管室における燃焼影響評価 (3/5) -

4. 主な解析条件

- ① 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820mm²)。また、漏えい率の小さい方が漏えい継続時間が長いことを踏まえ、上記の想定よりも小さい漏えい率の影響についても評価する。

	漏えい率 (kg/s) *1	
	～原子炉停止	原子炉停止～
貫通クラック	23.3	12.3
小漏えい	0.003 (漏えい中一定)	

*1: 貫通クラックを想定した場合にあっては、原子炉停止に伴う2次主循環ポンプの停止を考慮する。

- ② ナトリウムの燃焼形態として、スプレイ燃焼及びプール燃焼を想定する。
- ③ 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。
- ④ 床ライナ上に漏えいしたナトリウムは、連通管を介してナトリウム溜に移行するものとする。
- ⑤ 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℃) で一定とする。
- ⑥ 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、自然換気を考慮する。
- ⑦ 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*2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。)。
- ⑧ 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。)。

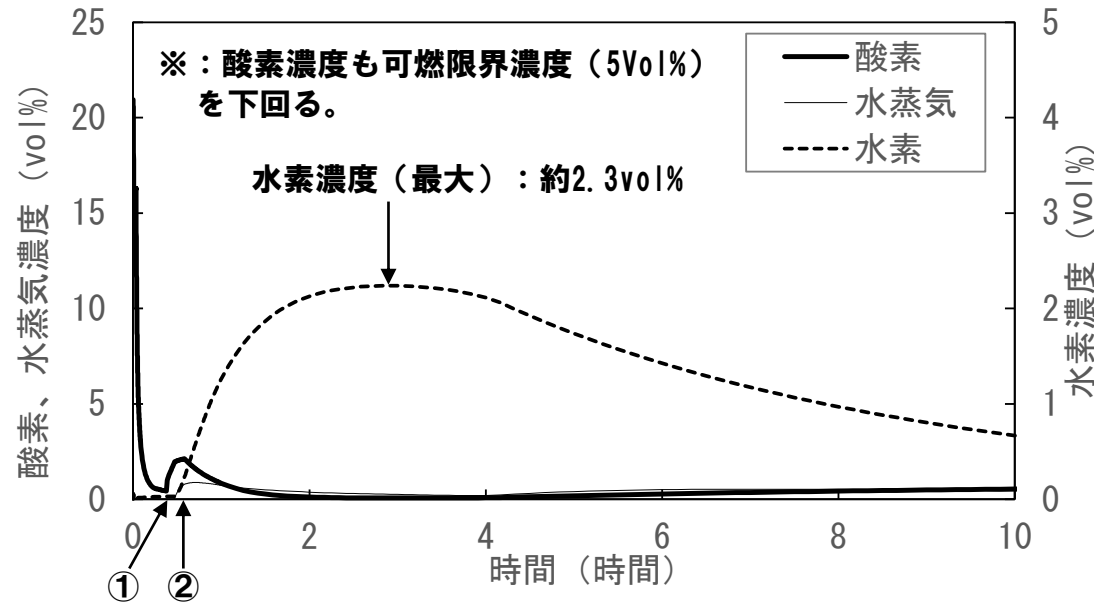
*2: 貫通クラックを想定した場合にあっては、緊急ドレンの開始までに貫通クラックより上方の冷却材が全て系統外に漏えいし、漏えいが停止する。

-配管室における燃烧影響評価 (4/5) -

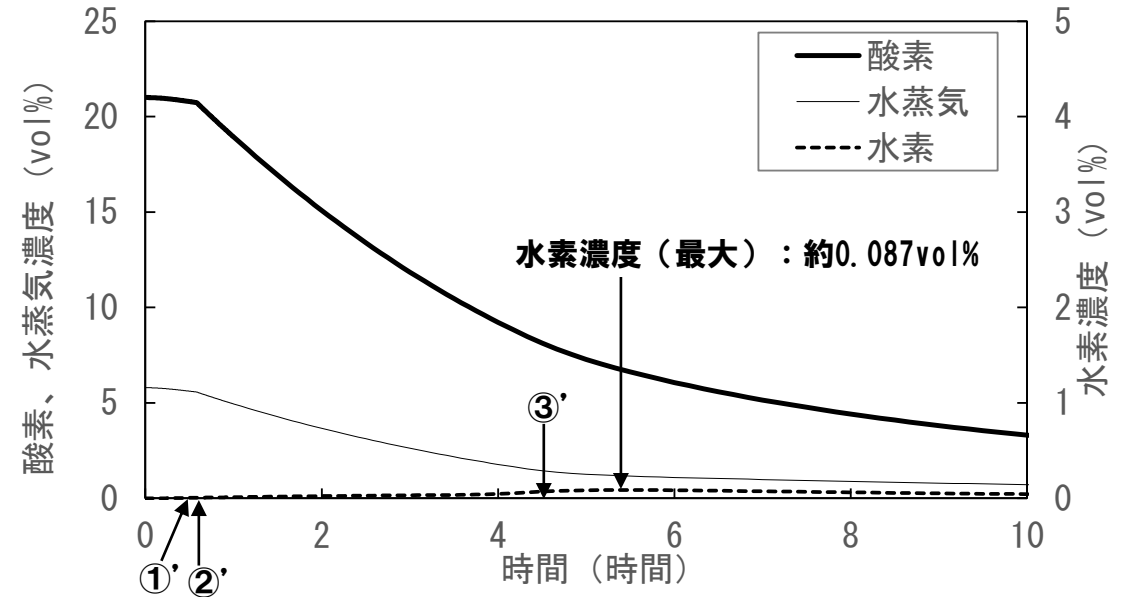
4. 主な解析結果 (1/2)

- ① 漏えいの停止：約23分後、漏えい量：約17,000kg
- ② 窒素ガス供給の開始：35分後

- ①' 緊急ドレンの開始：30分後
- ②' 窒素ガス供給の開始：35分後
- ③' 漏えいの停止：約270分後、漏えい量：約50kg

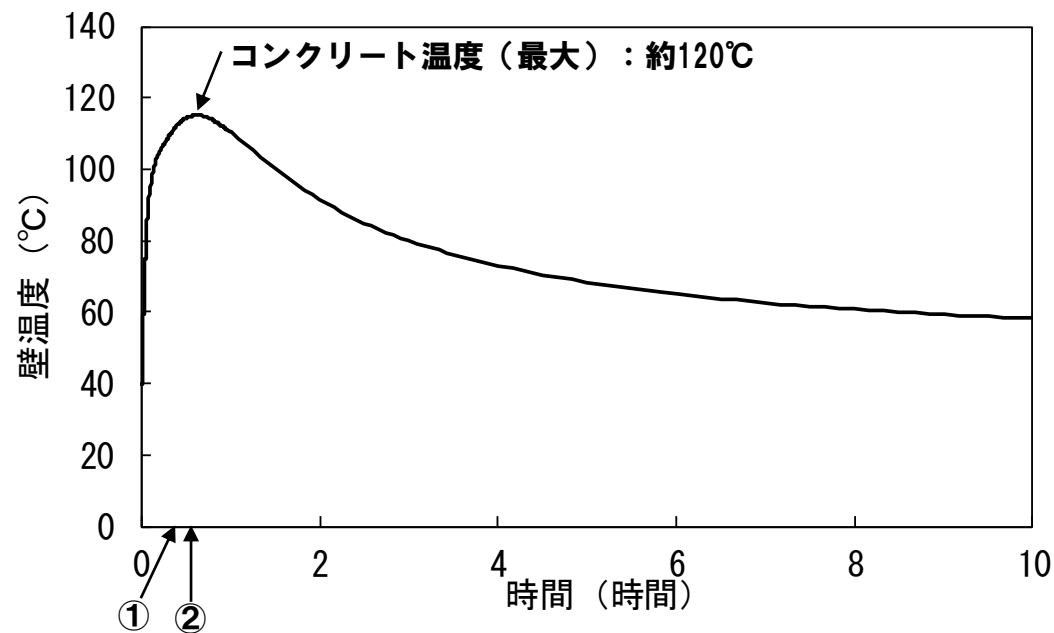


(a) 貫通クラック

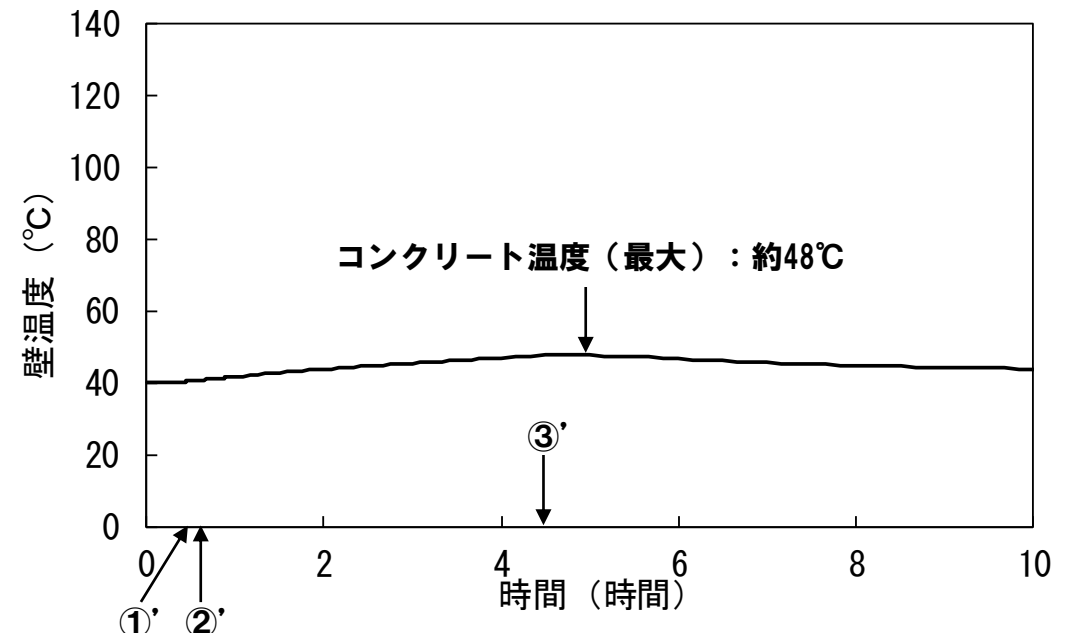


(b) 小漏えい

酸素、水蒸気及び水素濃度



(a) 貫通クラック



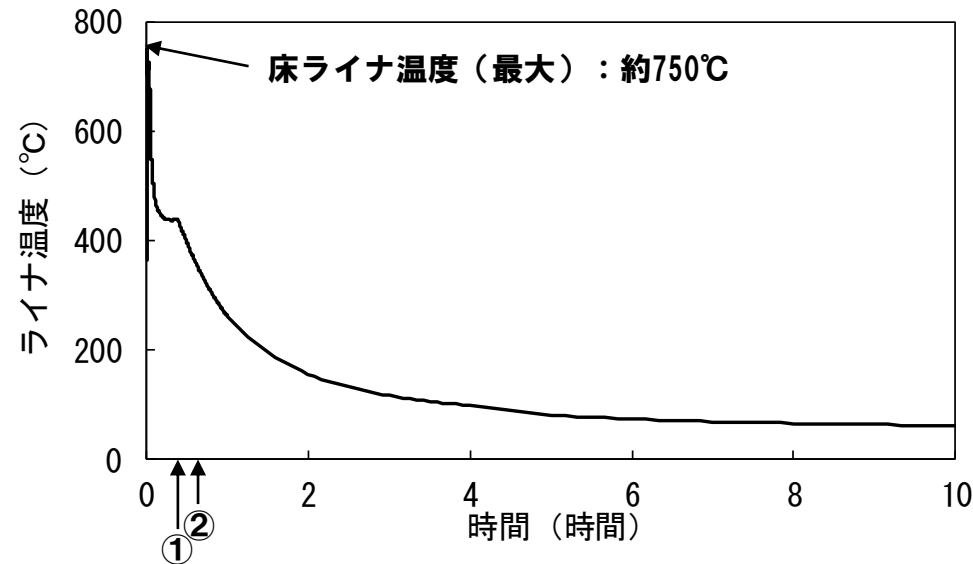
(b) 小漏えい

コンクリートの温度

-配管室における燃烧影響評価 (5/5) -

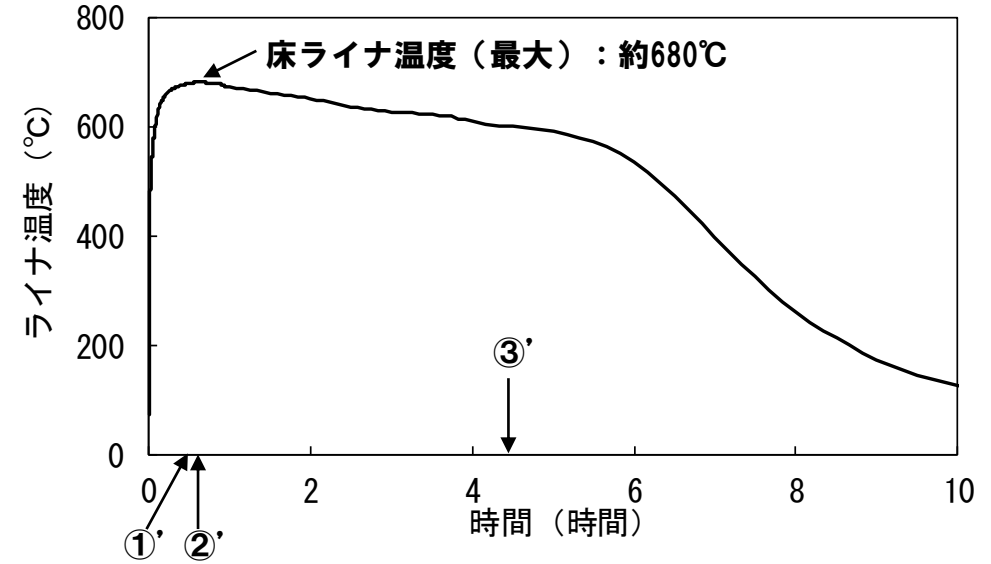
4. 主な解析結果 (2/2)

- ① 漏えいの停止：約23分後、漏えい量：約17,000kg
- ② 窒素ガス供給の開始：35分後



(a) 貫通クラック

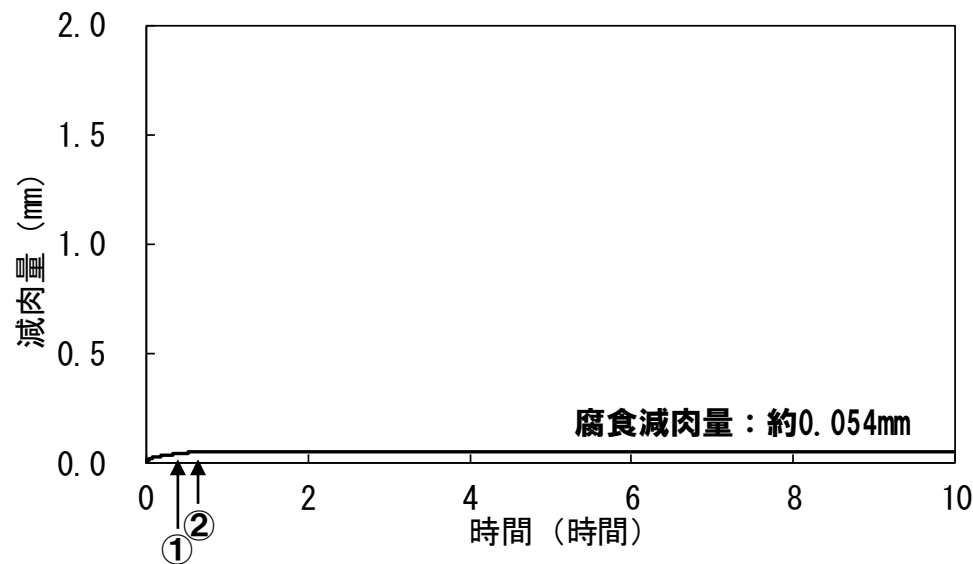
- ①' 緊急ドレンの開始：30分後
- ②' 窒素ガス供給の開始：35分後
- ③' 漏えいの停止：約270分後、漏えい量：約50kg



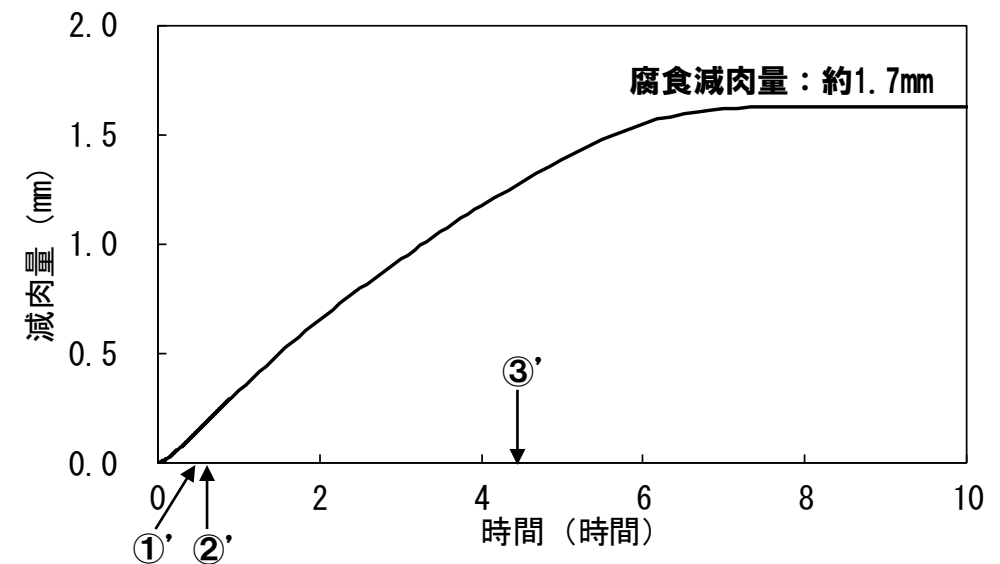
(b) 小漏えい

床ライナの温度

※：減肉量について、溶融塩型腐食は実機条件において発生することは考えられず、ここでは、NaFe複合酸化型腐食による減肉速度式を適用して評価



(a) 貫通クラック



(b) 小漏えい

床ライナ (厚さ：6mm) の腐食減肉量

影響評価の結果より、2次冷却材の漏えいが発生しても、水素が蓄積・燃烧に至ることはなく、腐食により床ライナが損傷することはなく、また、構造材（コンクリート）が損傷して健全な系統に影響が伝播することはない。したがって、配管室において、2次冷却材の漏えいが発生しても、ナトリウム燃烧により健全な系統の機能を喪失することはない。

-前室における燃烧影響評価 (2/5) -

2. 計算コード

本燃烧影響評価には、計算コードSPHINCSを用いる。

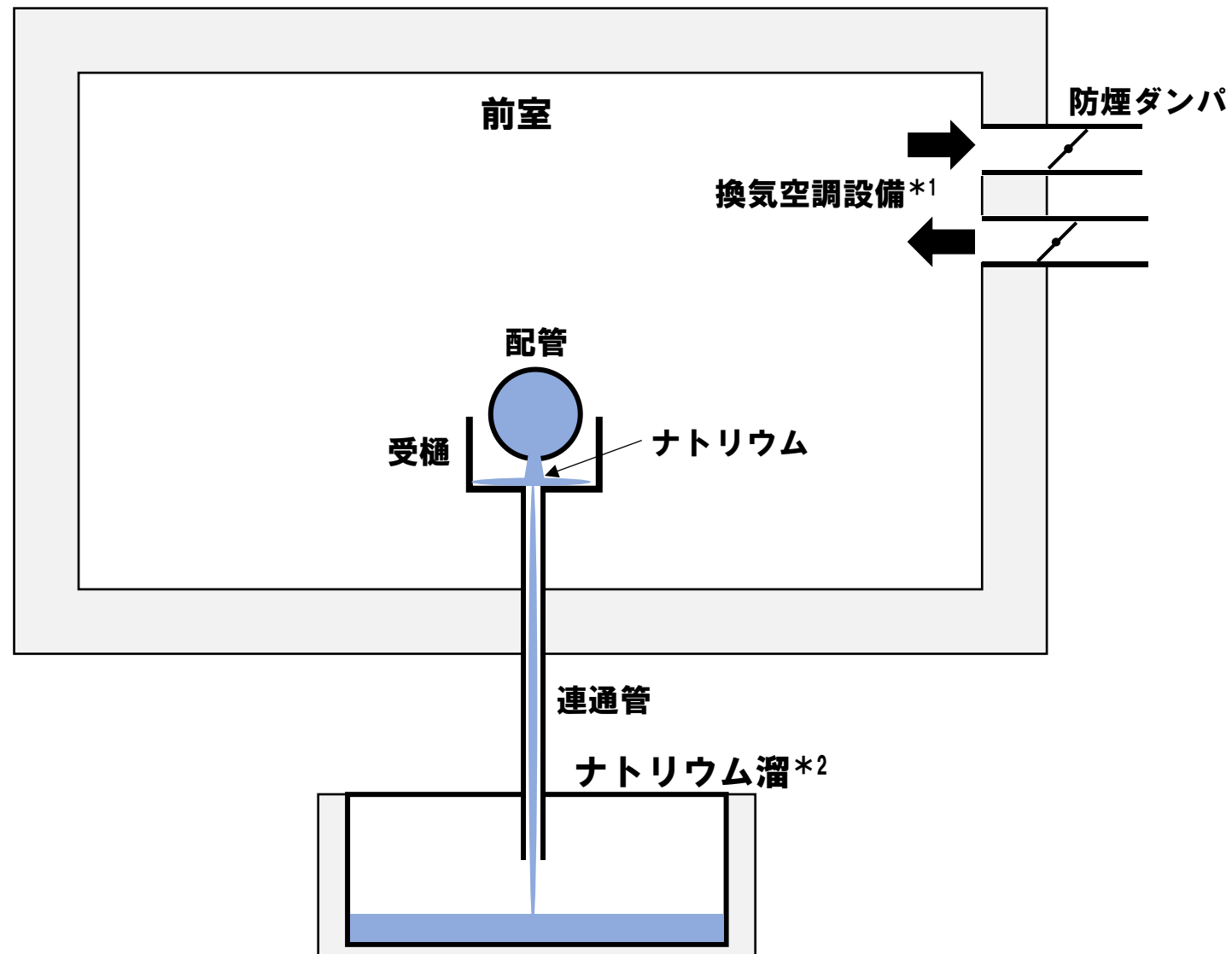
3. 解析体系

解析体系は、前室、ナトリウム溜及び外気領域で模擬する。

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



解析体系の概念図

-前室における燃焼影響評価 (3/5) -

4. 主な解析条件

- ① 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820mm²)。また、漏えい率の小さい方が漏えい継続時間が長いことを踏まえ、上記の想定よりも小さい漏えい率の影響についても評価する。

	漏えい率 (kg/s) *1	
	～原子炉停止	原子炉停止～
貫通クラック	22.2	9.99
小漏えい	0.002 (漏えい中一定)	

*1: 貫通クラックを想定した場合にあっては、原子炉停止に伴う2次主循環ポンプの停止を考慮する。

- ② ナトリウムの燃焼形態として、スプレイ燃焼及びプール燃焼を想定する。
- ③ 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。
- ④ 受樋上に漏えいしたナトリウムは、連通管を介してナトリウム溜に移行するものとする。
- ⑤ 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℃) で一定とする。
- ⑥ 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、自然換気を考慮する。
- ⑦ 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*2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。)。

*2: 貫通クラックを想定した場合にあっては、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、漏えいが停止する。

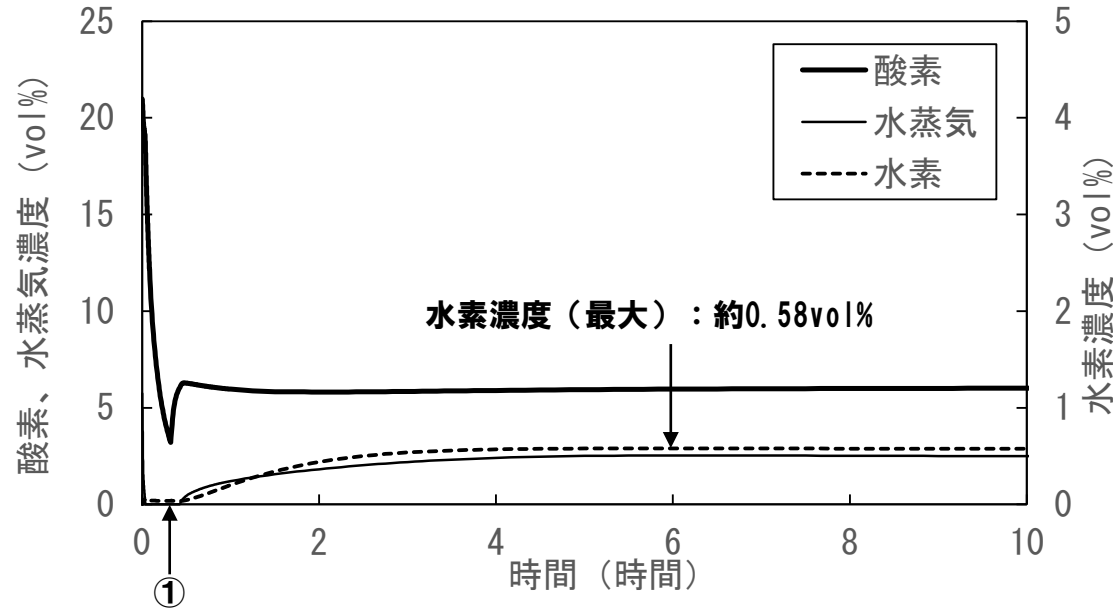
-前室における燃烧影響評価 (4/5) -

4. 主な解析結果 (1/2)

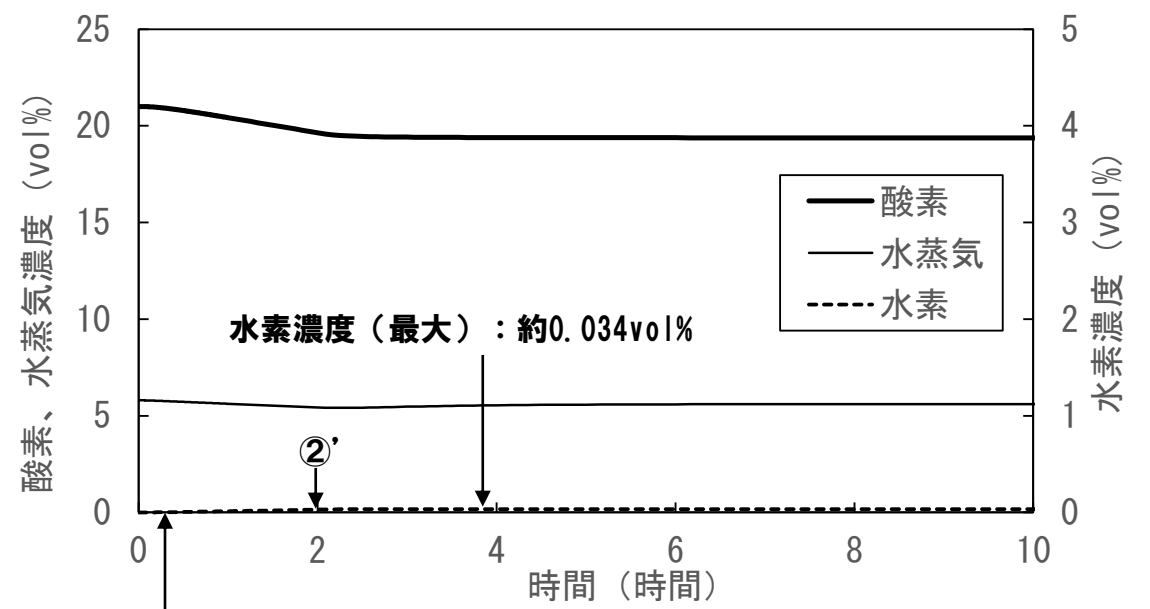
① 漏えいの停止：約19分後、漏えい量：約12,000kg

①' 緊急ドレンの開始：30分後

②' 漏えいの停止：約120分後、漏えい量：約15kg

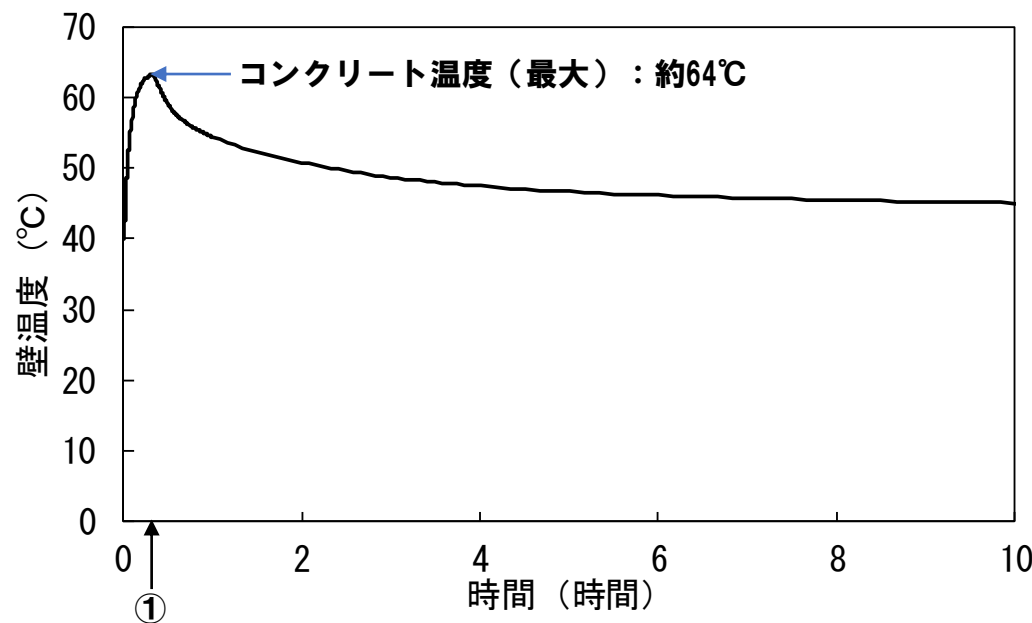


(a) 貫通クラック

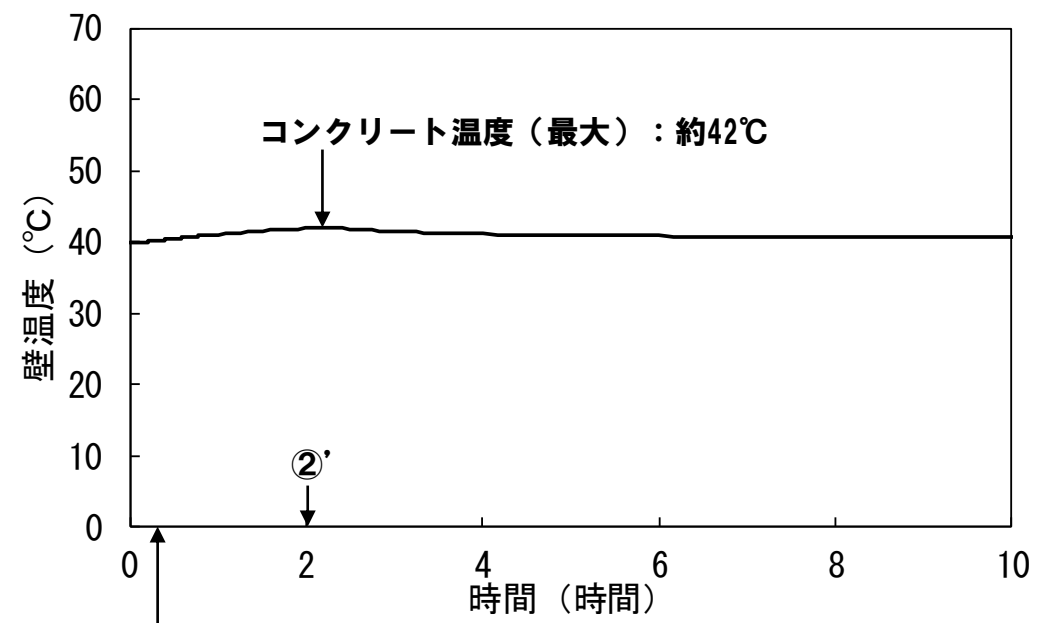


(b) 小漏えい

酸素、水蒸気及び水素濃度



(a) 貫通クラック



(b) 小漏えい

コンクリートの温度

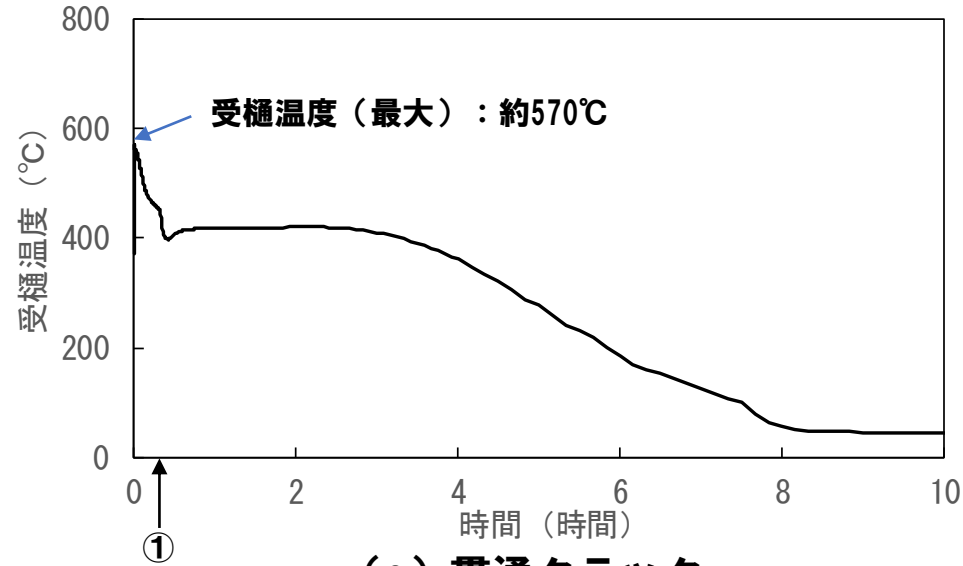
-前室における燃焼影響評価 (5/5) -

4. 主な解析結果 (2/2)

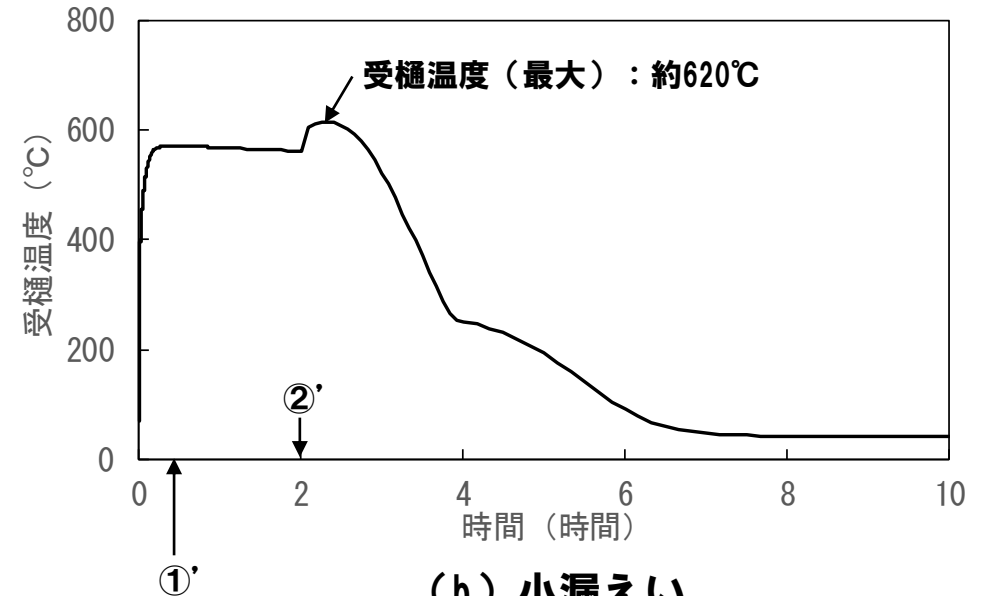
① 漏えいの停止：約19分後、漏えい量：約12,000kg

①' 緊急ドレンの開始：30分後

②' 漏えいの停止：約120分後、漏えい量：約15kg



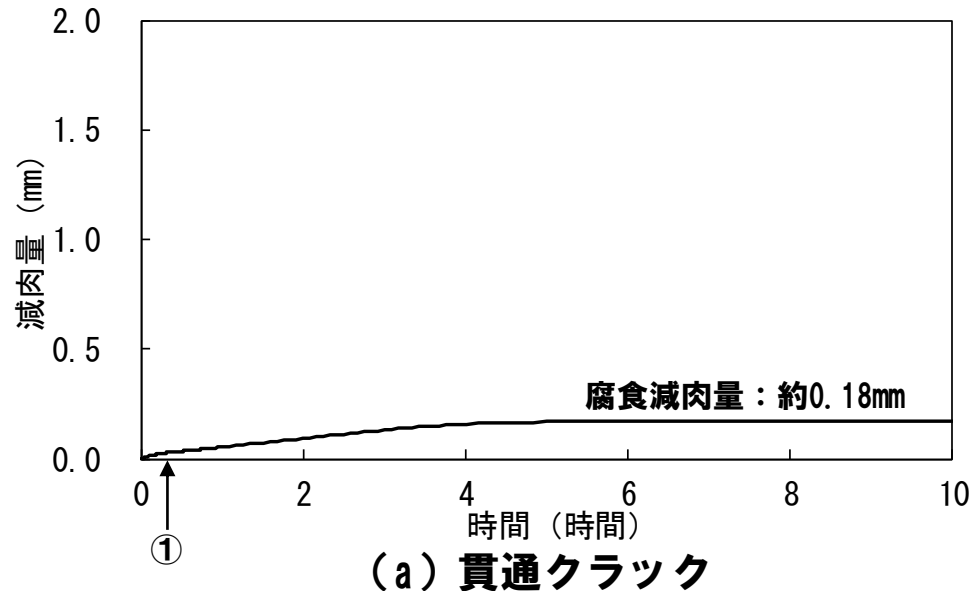
(a) 貫通クラック



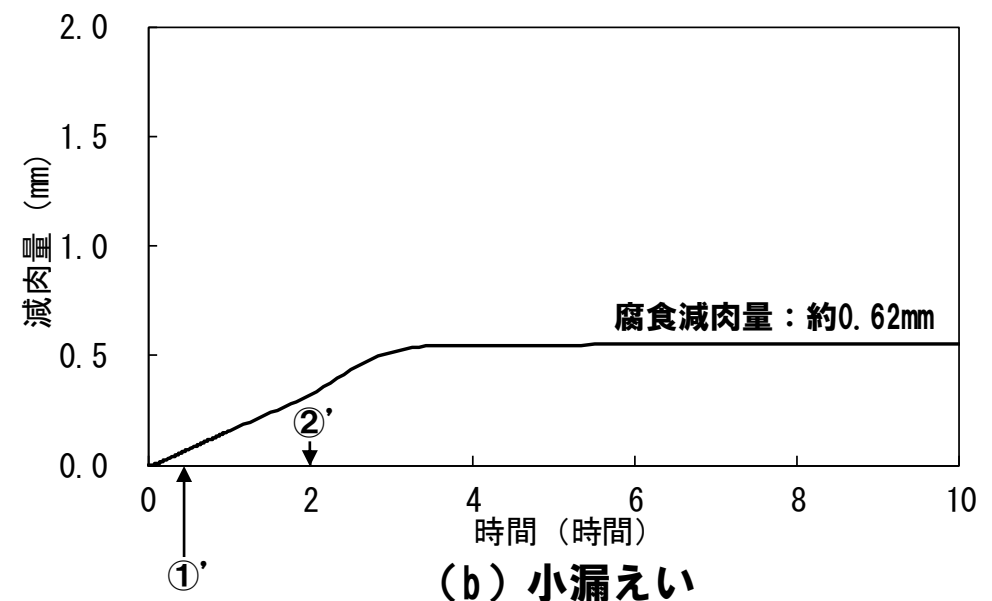
(b) 小漏えい

受樋の温度

※：減肉量について、熔融塩型腐食は実機条件において発生することは考えられず、ここでは、NaFe複合酸化型腐食による減肉速度式を適用して評価



(a) 貫通クラック



(b) 小漏えい

受樋 (厚さ : 3.2mm) の腐食減肉量

影響評価の結果より、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く、また、構造材（コンクリート）が損傷して健全なシステムに影響が伝播することはない。したがって、前室において、2次冷却材の漏えいが発生しても、ナトリウム燃焼により健全なシステムの機能を喪失することはない。