

高速増殖原型炉「もんじゅ」
2次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼解析()
(研究報告書)

2004年2月

核燃料サイクル開発機構
高速増殖炉もんじゅ建設所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122
ファックス：029-282-7980
電子メール：jperv@nc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184 Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

高速増殖原型炉「もんじゅ」
2次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼解析()
(研究報告書)

岡部 綾夫^{*1} , 大野 修司^{*2}
中井 良大^{*3} , 江橋 政明^{*4}

要 旨

高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏えい対策について設計の妥当性を確認する際の判断材料を得るため、ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS version 2.1 を使用し、2次主冷却系設備におけるナトリウム漏えい時の建物や床ライナへの影響解析(ナトリウム燃焼解析)を実施した。本報告書は、ナトリウム燃焼解析で得られた雰囲気圧力、床ライナ温度及び水素濃度等をまとめたものである。

主要な解析結果は以下のとおりである。

(1) 雰囲気圧力

圧力最高値 約 4.3 kPa [gage]

(2) 床ライナ温度

床ライナ最高温度 約 870

床ライナ最大減肉量 約 2.6 mm

(3) 水素濃度

水素濃度最高値 約 2 %

(4) 貯留室の床ライナ温度及び床コンクリート温度

床ライナ最高温度 約 400

床コンクリート最高温度 約 140

*1 高速増殖炉もんじゅ建設所 技術課

*2 大洗工学センター 要素技術開発部 熱化学安全試験グループ

*3 経営企画本部 FBR サイクル開発推進部 FBR サイクルシステム統合グループ

*4 高速増殖炉もんじゅ建設所 プラント第二課

Sodium Combustion Analysis ()
for the secondary heat transport system
of Prototype Fast Breeder Reactor MONJU

Ayao OKABE^{*1}, Shuji OHNO^{*2}
Ryodai NAKAI^{*3}, Masaaki EBASHI^{*4}

Abstract

Sodium combustion analyses were performed using ASSCOPS version 2.1 in order to obtain background data for evaluating the validity of the mitigation system against secondary sodium leak of MONJU.

The calculated results are summarized as follows.

- (1) Peak atmospheric pressure ~ 4.3 kPa [gage]
- (2) Peak floor liner temperature ~ 870
Maximum thinning of liner ~ 2.6 mm
- (3) Peak hydrogen concentration ~ 2%
- (4) Peak floor liner temperature in the spilt sodium storage cell ~ 400
Peak floor concrete temperature in the spilt sodium storage cell ~ 140

*1 Reactor and Systems Engineering Section, Monju Construction Office

*2 Thermochemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, OEC

*3 FBR Cycle System Integration Group, FBR Cycle System Development Office, Executive Office for the Policy Planning and Administration

*4 Maintenance Engineering Section, Monju Construction Office

目 次

| | |
|-----------------------------|---|
| 1 . 概 要 | 1 |
| 2 . 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件 | 2 |
| 3 . 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析結果 | 4 |
| 3 . 1 雰囲気圧力 | 4 |
| 3 . 2 床ライナ温度 | 4 |
| 3 . 3 水素濃度 | 5 |
| 3 . 4 貯留室の床ライナ温度及び床コンクリート温度 | 5 |
| 3 . 5 ナトリウム燃焼時の総発熱量 | 5 |
| 3 . 6 窒素ガスの注入による影響緩和への寄与 | 5 |
| 4 . 結 言 | 6 |
| 謝 辞 | 7 |
| 参考文献 | 8 |

図表リスト

第2章

| | | |
|------------|--|----|
| 表 2-1 | 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（共通項目） | 9 |
| 表 2-2 | 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（Cループ配管室 A446） | 10 |
| 表 2-3 | 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（Cループ蒸発器室 A438） | 11 |
| 表 2-4 | 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（Cループ過熱器室 A439） | 12 |
| 表 2-5 | 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件 （Bループ過熱器室 A435 の圧力に着目した解析） | 13 |
| 表 2-6 | 評価対象に応じて変更する解析条件 （2次主冷却系設備 流出・移送過程の解析） | 14 |
| 表 2-7 | 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（貯留後の解析） | 15 |
| 表 2-8 | 評価対象に応じて変更する解析条件（貯留後の解析） | 16 |
| 表 2-9 | ナトリウム漏えい継続時間（2次主冷却系設備） | 17 |
| 図 2-1 | 2次主冷却系設備ナトリウム燃焼解析におけるタイムチャート | 18 |
| 図 2-2 | 解析モデルの概要（2次主冷却系配管室の例） | 19 |
| 図 2-3（1/2） | 2次主冷却系設備Cループ区画例 | 20 |
| 図 2-3（2/2） | 2次主冷却系設備Cループ区画例（主冷却系室区画詳細図） | 21 |
| 図 2-4 | 断熱材敷設部と非敷設部及び架構のモデル化 （水素濃度に着目した解析にて使用） | 22 |
| 図 2-5 | 解析モデルの概要（貯留後の解析） | 23 |
| 図 2-6 | 漏えい規模の違いによるナトリウム燃焼の概念図の比較 | 24 |
| 図 2-7 | 溶融塩型腐食の減肉速度の温度依存性（NaOH + Na ₂ O ₂ 系環境） | 25 |
| 図 2-8 | NaFe 複合酸化型腐食の減肉速度の温度依存性（NaOH + Na ₂ O 環境） | 26 |

第3章

| | | |
|---------|--|----|
| 図 3.1-1 | 2次主冷却系設備 配管室（A446）における大漏えい （1/4Dt 破損）時の解析結果（圧力に着目した解析） | 27 |
| 図 3.1-2 | 2次主冷却系設備 蒸発器室（A438）における大漏えい （1/4Dt 破損）時の解析結果（圧力に着目した解析） | 28 |
| 図 3.1-3 | 2次主冷却系設備 過熱器室（A439）における大漏えい （1/4Dt 破損）時の解析結果（圧力に着目した解析） | 29 |
| 図 3.1-4 | 2次主冷却系設備 Bループ過熱器室（A435）における大漏えい （1/4Dt 破損）時の解析結果（圧力に着目した解析） | 30 |

| | | |
|---------|--|----|
| 図 3.2-1 | 2次主冷却系設備 配管室 (A446) における大漏えい (1/4Dt 破損) 時の解析結果 (ライナ温度に着目した解析) | 31 |
| 図 3.2-2 | 2次主冷却系設備 配管室 (A446) でのナトリウム漏えい時の 床ライナ温度 (ライナ温度に着目した解析) | 32 |
| 図 3.2-3 | 溶融塩型腐食を仮定した場合の床ライナ減肉量上限値 (配管室 A446) | 33 |
| 図 3.2-4 | 2次主冷却系設備 蒸発器室 (A438) における大漏えい (1/4Dt 破損) 時の解析結果 (ライナ温度に着目した解析) | 34 |
| 図 3.2-5 | 2次主冷却系設備 蒸発器室 (A438) でのナトリウム漏えい時の 床ライナ温度 (ライナ温度に着目した解析) | 35 |
| 図 3.2-6 | 溶融塩型腐食を仮定した場合の床ライナ減肉量上限値 (蒸発器室 A438) | 36 |
| 図 3.2-7 | 2次主冷却系設備 過熱器室 (A439) における大漏えい (1/4Dt 破損) 時の解析結果 (ライナ温度に着目した解析) | 37 |
| 図 3.2-8 | 2次主冷却系設備 過熱器室 (A439) でのナトリウム漏えい時の 床ライナ温度 (ライナ温度に着目した解析) | 38 |
| 図 3.2-9 | 溶融塩型腐食を仮定した場合の床ライナ減肉量上限値 (過熱器室 A439) | 39 |
| 図 3.3-1 | 水素濃度最高値 (配管室 A446) | 40 |
| 図 3.3-2 | 水素濃度最高値 (蒸発器室 A438) | 41 |
| 図 3.3-3 | 水素濃度最高値 (過熱器室 A439) | 42 |
| 図 3.4-1 | 2次ダンプタンク室に流入する漏えいナトリウムの熱容量の比較 | 43 |
| 図 3.4-2 | 2次ダンプタンク室への貯留後の解析結果 (ライナ温度に着目した解析) | 44 |
| 図 3.4-3 | 2次ダンプタンク室への貯留後の解析結果 (コンクリート温度に着目した解析) | 45 |
| 図 3.5-1 | 2次主冷却系設備 配管室 (A446) でのナトリウム漏えい時の ナトリウム燃焼による総発熱量 (ライナ温度に着目した解析) | 46 |
| 図 3.5-2 | 2次主冷却系設備 蒸発器室 (A438) でのナトリウム漏えい時の ナトリウム燃焼による総発熱量 (ライナ温度に着目した解析) | 47 |
| 図 3.5-3 | 2次主冷却系設備 過熱器室 (A439) でのナトリウム漏えい時の ナトリウム燃焼による総発熱量 (ライナ温度に着目した解析) | 48 |
| 図 3.6-1 | 配管室 (A446) 3t/h の漏えい時の窒素ガス注入による影響緩和 への寄与例 (漏えい開始 30 分後に注入を開始した場合) | 49 |

第1章 概要

高速増殖原型炉「もんじゅ」では、ナトリウム漏えいの早期検出、拡大防止及び漏えいナトリウムによる影響の緩和の観点から、改善策を講じることにより、空気雰囲気下でのナトリウム漏えい事故に対する「もんじゅ」の安全裕度を向上させることとしている[1]。

その設計の妥当性を確認する際の判断材料を得るため、2次主冷却系設備におけるナトリウム漏えい時の雰囲気圧力、床ライナ温度及び水素濃度等を解析した。解析には、ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS version 2.1[2]を使用した。

本報告書では、2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件を第2章に、ナトリウム燃焼解析結果を第3章に、結言を第4章にそれぞれ示す。

なお、本報告書は“高速増殖原型炉「もんじゅ」2次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼解析”(JNC TN2400 2000-006)[7]における配管室漏えい時の水素濃度評価に関して、架構の扱いに関する評価条件を詳細化のために追加すると共に、点検用歩廊、配管等のサポート用の鋼製の支持架構の熱容量を無視した場合の結果を追加して改訂したものである。

第2章 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件

2次主冷却系配管に関して想定し得る最大規模の漏えい（破損口面積が1/4Dt相当の漏えい）から、漏えいナトリウムが床ライナ上の局所に堆積して燃焼する小規模の漏えいまで、漏えい規模に関して広い範囲で影響を調べるために、ナトリウム漏えい率をパラメータとして解析を実施した。なお、漏えい開始30分後に窒素ガスを注入した場合の解析も行い、その影響緩和への寄与について調べた。

解析条件を表2-1から表2-9に、解析モデルの概要を図2-1から図2-6に示す。解析条件を要約すると以下ようになる。

漏えいナトリウムは、スプレー状（液滴状）に落下燃焼しつつ、漏えい箇所付近の床ライナの局所又は全面に溜まり、燃焼（プール燃焼）するものとする。この時の熱的影響を解析するために、燃焼室と連通室の二つのセルに分けてモデル化する（図2-2参照）。

- ・燃焼室：スプレー燃焼やプール燃焼の生じる部屋
- ・連通室：燃焼室に開口でつながる部屋

想定する漏えい発生室は次の四つの部屋を対象とする。

- ・Cループ 2次主冷却系配管室（A446）
- ・Cループ 蒸発器室（A438）
- ・Cループ 過熱器室（A439）

ナトリウム燃焼量に関して保守的な評価となるように最大の空間容積を有するCループを解析の対象として選定し、雰囲気圧力に着目した解析、及び床ライナ温度に着目した解析を行う。

- ・Bループ 過熱器室（A435）

最小の空間容積を有するBループについては、空間容積に対する漏えいナトリウムの量が相対的に大きくなるため、雰囲気圧力が厳しくなる可能性がある。したがって、雰囲気圧力に着目した解析を念のため行う。

水素濃度については、床ライナ温度に着目した解析に加え、さらに、コンクリートからの水分放出量を保守的に評価するために、断熱材の敷設割合を小さめに設定して解析を行う（表2-6、図2-4参照）。配管室には点検用歩廊、配管等のサポート用の鋼製の支持架構（以下、架構という。）が設置されており、その熱容量を考慮した場合と無視した場合の両者の解析を行う。架構の重量は、30tとして解析する。蒸発器室及び過熱器室には、架構は殆ど設置されていないため、架構の熱容量を無視した解析を行う。

漏えいナトリウムの貯留後の長時間の影響については、ナトリウムが貯留される2次ダンプタンク室（A134）の解析を行う。この貯留後の過程は、床コンクリート温度に着目した解析に加え、床ライナ温度に着目した解析も行う。

解析におけるタイムチャートは図2-1に示すとおりとする。ここで、換気系の停止時間はナトリウム漏えいの検知に要する時間に基づいて設定し、漏えい継続時間は、系統内のナ

トリウムを2次ダンプタンク及び2次オーバーフロータンクへ緊急ドレンすること並びに漏えいに伴って系統内ナトリウムが系統外へ流出することを考慮して設定した(表2-9参照)。

解析に必要なパラメータについては、ナトリウム燃焼実験による解析コードの検証[3]を参考にして設定した。

評価対象(雰囲気圧力、床ライナ温度、水素濃度、2次ダンプタンク室床コンクリート温度及び床ライナ温度)に応じて、換気空調系の停止時間や区画外との通気率などの解析条件を保守的に設定した(表2-6及び表2-8参照)。

小規模漏えいの解析については、発生しうる腐食機構のうちで最も厳しい腐食速度を示す溶融塩型腐食を仮定した場合の床ライナ減肉量を、解析で得られた床ライナ温度と図2-7に示す減肉速度[4]、[5]の99%信頼幅上限値から算出した。ただし、床ライナ温度が300以下の時間帯については、ライナ上の堆積物は溶融体とならないと考えられるため、図2-8に示すNaFe複合酸化型腐食[6]を仮定した。なお、床ライナ温度の評価において、小規模漏えいの解析では、ライナプレートのみ熱容量を考慮するものとしたが、床ライナ全面にプールが形成されるような大規模漏えいの解析では、ライナプレートを支持するライナフレームにも熱が伝わるため、その熱容量も考慮した。

貯留後の2次ダンプタンク室についての解析は図2-5の解析モデルを使用して行った。なお、この解析は、貯留部への流入熱量が最大となるよう蒸発器室での漏えいナトリウムが流入する場合を対象とした。

ナトリウム燃焼等による総発熱量(スプレー反応熱+プール反応熱+浮遊エアロゾルと水分の反応熱)を算出した。

第3章 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析結果

3.1 雰囲気圧力

2次主冷却系Cループの配管室(A446)、蒸発器室(A438)及び過熱器室(A439)でのナトリウム漏えいに関して、最大規模のナトリウム漏えい(1/4Dt破損)を想定した場合の雰囲気圧力の時間推移を図3.1-1から図3.1-3にそれぞれ示す。配管室(A446)での圧力最高値は約4.3 kPa[gage]、蒸発器室(A438)での圧力最高値は約3 kPa[gage]、過熱器室(A439)での圧力最高値は約3 kPa[gage]である。

2次主冷却系Bループの過熱器室(A435)でのナトリウム漏えいに関して、最大規模のナトリウム漏えい(1/4Dt破損)を想定した場合の雰囲気圧力の時間推移を図3.1-4に示す。過熱器室(A435)圧力最高値は約3 kPa[gage]である。

3.2 床ライナ温度

配管室(A446)でのナトリウム漏えいについて、最大規模の漏えい(1/4Dt破損)の場合の床ライナ最高温度は約630である(図3.2-1参照)。漏えい率をパラメータとした解析によれば、小規模漏えいの場合、ナトリウムが局所に堆積して燃焼し、床ライナ最高温度は約860となる(図3.2-2参照)。なお、溶融塩型腐食の発生を仮定した場合の床ライナ減肉量は最大でも約2.6mm(残存肉厚約3.4mm)である(図3.2-3参照)。

蒸発器室(A438)でのナトリウム漏えいについては、最大規模の漏えい(1/4Dt破損)の場合の床ライナ最高温度は約840である(図3.2-4参照)。小規模漏えいの場合、ナトリウムが局所に堆積して燃焼し、床ライナ最高温度は約870となる(図3.2-5参照)。なお、溶融塩型腐食の発生を仮定した場合の床ライナ減肉量は最大でも約2.6mm(残存肉厚約3.4mm)である(図3.2-6参照)。

過熱器室(A439)でのナトリウム漏えいについては、最大規模の漏えい(1/4Dt破損)の場合の床ライナ最高温度は約810である(図3.2-7参照)。小規模漏えいの場合、ナトリウムが局所に堆積して燃焼し、床ライナ最高温度は約860となる(図3.2-8参照)。なお、溶融塩型腐食の発生を仮定した場合の床ライナ減肉量は最大でも約2.6mm(残存肉厚約3.4mm)である(図3.2-9参照)。

なお、最大規模の漏えい(1/4Dt破損)の場合の床ライナ最高温度に関しては、雰囲気圧力に着目した解析とライナ温度に着目した解析は同じ結果を与える。

3.3 水素濃度

上記 3.2 の床ライナ温度に着目した解析結果によれば、水素濃度の最高値は図 3.3-1、図 3.3-2 及び図 3.3-3 に示すとおり 1 %未満である。同図には、コンクリートからの水分放出量に関してさらに保守性を考慮する観点から、断熱材の敷設割合を小さめに設定するなど、保守的に解析した結果も併記してある。保守的に解析しても、水素濃度最高値は約 2 %に留まる。

3.4 貯留室の床ライナ温度及び床コンクリート温度

2 次主冷却系 C ループの配管室 (A446)、蒸発器室 (A438) 及び過熱器室 (A439) でのナトリウム漏えいに関して、最大規模のナトリウム漏えい (1/40t 破損) を想定した場合の 2 次ダンプタンク室に流入する漏えいナトリウムの熱容量の比較を図 3.4-1 に示す。漏えいナトリウムの貯留後の熱的影響については、蒸発器室 (A438) で最大規模の漏えいを想定した場合に貯留部への流入熱量が最大となる。

この時の貯留室 (2 次ダンプタンク室) の床ライナ温度に着目した解析結果を図 3.4-2 に示す。貯留室の床ライナの最高温度は約 400 である。

また、床コンクリート温度に着目した解析によれば、貯留室の床コンクリートの最高温度は約 140、床ライナの最高温度は約 400 である (図 3.4-3 参照)。

3.5 ナトリウム燃焼時の総発熱量

ナトリウム燃焼等による総発熱量は、ナトリウムプールが床ライナ全面に広がる漏えい規模以上になると相対的に大きくなるので、10t/h 以上について評価を行った。配管室 (A446)、蒸発器室 (A438) 及び過熱器室 (A439) について、ナトリウム漏えい率とナトリウム燃焼等による総発熱量の関係を図 3.5.-1、図 3.5-2 及び図 3.5-3 に示す。総発熱量は配管室の場合が最大で、約 45,000 MJ である。

3.6 窒素ガスの注入による影響緩和への寄与

配管室 (A446) の 3t/h 漏えいについて、漏えい開始 30 分後から窒素ガスを注入した場合 (注入条件: 漏えい開始後 30 分で注入開始、注入開始後 45 分は 12500 m³/h [normal]、以降 15 時間は 3800 m³/h [normal]、混合率 0.9) の解析例を、窒素ガスを注入しない場合と比較して図 3.6-1 に示す。同図より、窒素ガスを注入することにより、漏えい開始から 30 分経過した以降の雰囲気温度や床ライナ温度等の降下速度を一層早められること、また、コンクリートからの水分放出量をほぼ半減できることが分かる。さらに、漏えい終了後の酸素濃度を大幅に低減 (5%以下) し、低酸素濃度に維持できることが分かる。

第4章 結 言

高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏えいに係る改善策を踏まえて、2次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼について、ASSCOPS version 2.1 による解析を実施した。

主要な解析結果は以下のとおりである。

(1) 雰囲気圧力

圧力最高値 約 4.3 kPa [gage]

(2) 床ライナ温度

床ライナ最高温度 約 870

床ライナ最大減肉量 約 2.6 mm

(3) 水素濃度

水素濃度最高値 約 2 %

(4) 貯留室の床ライナ温度及び床コンクリート温度

床ライナ最高温度 約 400

床コンクリート最高温度 約 140

ここに示した雰囲気圧力、床ライナ温度及び水素濃度等の解析結果は、ナトリウム漏えい時の建物、床ライナ、コンクリートの健全性を判断する際の材料として活用されるものである。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、御指導、御協力をいただきました方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 茂垣勝巳、他：高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩対策、
サイクル機構技報 No. 6、JNC TN1340 2000-001、pp.1-9 (2000.3)
- [2] 大野修司、他：ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version 2.1 使用説明書、
JNC TN9520 2000-001 (2000)
- [3] 大野修司、他：ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS の検証、
JNC TN9400 2000-106 (2000)
- [4] 吉田英一、他：溶融塩型腐食環境における炭素鋼の腐食速度評価、
原子力学会「2000 春の年会」予稿集、N30 (2000.3)
- [5] 吉田英一、他：ナトリウム化合物溶融環境中における炭素鋼の腐食特性評価
- 溶融塩型腐食環境 (NaOH-Na₂O₂系) の腐食速度評価式 - 、
JNC TN9400 2000-024 (1999)
- [6] 青砥紀身：大気中ナトリウム漏洩流下部における鉄系材料の腐食機構、
動燃技報 No. 103、PNC TN1340 97-003、pp.35-45 (1997)
- [7] 宮園敏光、他：高速増殖原型炉「もんじゅ」2次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼解析
JNC TN2400 2000-006 (2000)

表2-1 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（共通項目）

| | 解 析 条 件 |
|-----------------------|--|
| 漏えいナトリウム初期温度 | 507 |
| 部屋の初期酸素濃度 | 21 % |
| 部屋の初期湿度 | 3 wt. % (R . H . 80% at 35 を包絡) |
| スプレー燃焼条件 | 頂部直径 2 m、広がり角度 20 度の円錐台形状領域における液滴燃焼 質量平均液滴径 4.6 mm (ASSCOPSコードでは、対数正規分布の標準偏差を2.64として表面積平均径を求め、2.9mmの液滴径で計算する) |
| プール燃焼条件 (注) | 大漏えいでは、漏えいナトリウムは床ライナ上の全面に広がる。 プールが床ライナ全面に広がらないと判断される場合 (化学量論的に漏えいNa量 < 系内酸素量の場合) には、 プール面積 = $W(1-f) / R$ とする。 ただし、 W : Na 漏えい率 (kg/h) f : スプレー燃焼割合 R : 面積広がり相関 (= 25kg/m ² h) |
| ナトリウムと酸素の反応 | $Na_2O : Na_2O_2 = 60 : 40$ (酸素濃度 10% 以上)、 $100 : 0$ (酸素濃度 10% 未満) |
| プールからガスへの ふく射伝熱の係数 | 0.65 |
| ガスから壁への ふく射伝熱の係数 | 0.9 |
| コンクリートからの 水分放出条件 | もんじゅのコンクリートコアを加熱した水分放出測定試験及び水分放出詳細解析コードによる計算との比較結果をもとに、保守性を有するように、コンクリート温度と水分放出率の相関を作成 |
| ナトリウムと水分の反応 | $2Na + H_2O \rightarrow Na_2O + H_2$ (スプレーとプールに共通) |
| 水素の再結合割合 | 生成水素の90%が再結合、ただし酸素濃度5%未満では再結合なし (スプレーとプールに共通) |
| エアロゾル発生割合 | スプレー : 反応生成物の全量がエアロゾルとして生成 プール : 反応生成物の25%がエアロゾルとして生成 |
| エアロゾルと水分の反応 | 反応速度係数 * $1.0E-10 \text{ mol} \cdot H_2O / \text{個} / \text{s}$ 反応式は $Na_2O + H_2O \rightarrow 2NaOH$ 、 $Na_2O_2 + H_2O \rightarrow 2NaOH + 1/2O_2$ * 反応速度係数とは、ここでは、 $4 \times (\text{エアロゾル粒子の半径}) \times (\text{水蒸気拡散係数}) \times (\text{雰囲気ガス密度})$ をいう。 |
| 備考 | (注) ナトリウム燃焼の概念図については図2-6参照 |

表2-2 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（Cループ配管室A446）

| | 解 析 条 件 | |
|-----------|--|---|
| 漏えい場所 | A446（Cループ配管室） ホットレグ配管 | |
| 漏えい高さ | 保温材頂部から床までの距離 | |
| 燃焼室 | A446 + A445 + A440 | |
| 連通室 | 燃焼室に開口でつながる区画内の部屋 | |
| 部屋の空間容積 | 燃焼室 3248m ³ | 連通室 5088m ³ |
| 部屋の初期温度 | 燃焼室 50 | 連通室 55 |
| 漏えい規模 | 大漏えい ^(注1) | 中小漏えい ^(注2) |
| ナトリウム漏えい率 | 134 t/h 一定 (破損開口面積1/4Dt (15cm ²)相当) | パラメータ ^(注3) |
| プール燃焼面積 | 燃焼室 501m ² (厚さ 1cm) 連通室 プールなし | 燃焼室 漏えい率に応じて設定 ^(注4) 連通室 プールなし |

注1) 圧力着目、ライナ温度着目、水素着目で実施

注2) ライナ温度着目、水素着目で実施

注3) 漏えい率の範囲は、着目因子に応じて設定

注4) 表2-1参照

表2-3 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（Cループ蒸発器室A438）

| | | 解析条件 | |
|-----------|---|---------------------------------|--|
| 漏えい場所 | A438（Cループ蒸発器室） | | |
| 漏えい高さ | 天井から床までの距離（垂直配管） | | |
| 燃焼室 | A438 | | |
| 連通室 | 燃焼室に開口でつながる区画内の部屋 | | |
| 部屋の空間容積 | 燃焼室 352m ³ | 連通室 7984m ³ | |
| 部屋の初期温度 | 燃焼室 55 | 連通室 55 | |
| 漏えい規模 | 大漏えい（注1） | 中小漏えい（注2） | |
| ナトリウム漏えい率 | 129 t/h 一定 （破損開口面積1/4Dt（15cm ² ）相当） | パラメータ（注3） | |
| プール燃焼面積 | 燃焼室 46m ² （厚さ 1cm） 連通室 プールなし | 燃焼室 漏えい率に応じて設定（注4） 連通室 プールなし | |

注1）圧力着目、ライナ温度着目、水素着目で実施

注2）ライナ温度着目、水素着目で実施

注3）漏えい率の範囲は、着目因子に応じて設定

注4）表2-1参照

表2-4 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（Cループ過熱器室A439）

| 解 析 条 件 | | |
|-----------|---|---|
| 漏えい場所 | A439（Cループ過熱器室） | |
| 漏えい高さ | 天井から床までの距離（垂直配管） | |
| 燃焼室 | A439+A438 | |
| 連通室 | 燃焼室に開口でつながる区画内の部屋 | |
| 部屋の空間容積 | 燃焼室 691m ³ | 連通室 7645m ³ |
| 部屋の初期温度 | 燃焼室 55 | 連通室 55 |
| 漏えい規模 | 大漏えい ^(注1) | 中小漏えい ^(注2) |
| ナトリウム漏えい率 | 129 t/h 一定 (破損開口面積1/4Dt (15cm ²) 相当) | パラメータ ^(注3) |
| プール燃焼面積 | 燃焼室 99m ² (厚さ 1cm) 連通室 プールなし | 燃焼室 漏えい率に応じて設定 ^(注4) 連通室 プールなし |

注1) 圧力着目、ライナ温度着目、水素着目で実施

注2) ライナ温度着目、水素着目で実施

注3) 漏えい率の範囲は、着目因子に応じて設定

注4) 表2-1参照

表2-5 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件
(Bループ過熱器室A435の圧力に着目した解析)

| | 解 析 条 件 | |
|-----------|---|-------------------------|
| 漏えい場所 | A435 (Bループ過熱器室) | |
| 漏えい高さ | 天井から床までの距離 (垂直配管) | |
| 燃焼室 | A435+A434 | |
| 連通室 | 燃焼室に開口でつながる区画内の部屋 | |
| 部屋の空間容積 | 燃焼室 690 m ³ | 連通室 5413 m ³ |
| 部屋の初期温度 | 燃焼室 55 | 連通室 55 |
| 漏えい規模 | 大漏えい | |
| ナトリウム漏えい率 | 129 t/h 一定 (破損開口面積1/4Dt (15cm ²) 相当) | |
| プール燃焼面積 | 燃焼室 98 m ² (厚さ 1cm) | 連通室 プールなし |

表 2-6 評価対象に応じて変更する解析条件
(2次主冷却系設備 流出・移送過程の解析)

| 評価対象 | 雰囲気圧力 | 床ライナ温度 | 水素濃度 |
|--|---|---|--|
| 換気空調系の停止時刻 | 漏えい開始と同時 | 漏えい開始から 2 分後 | |
| 区画外との 通気率 m ³ /h (差圧が 1000Pa の場合 の通気流量) (ダンパを介した通気 率を除く) | 区画外への貫通部の 通気率として小さめ に設定した値を使用 瞬時停止 : 区画全体 4000 | 区画外への貫通部の 通気率として大きめ に設定した値を使用 換気中 : 区画全体 328000 停止後 : 区画全体 60000 | 区画外への貫通部の 通気率として小さめ に設定した値を使用 換気中 : 区画全体 272000 停止後 : 区画全体 4000 |
| ダンパを介した区画外 との通気率 m ³ /h (差圧が 1000Pa の場合 の通気流量) | (圧力逃がしライン 逆止ダンパ) 500Pa で開 区画全体 : 9000 (圧力開放ダンパ) 3000Pa で開 区画全体 : 200000 | (圧力逃がしライン 逆止ダンパ) 150Pa 以下で閉状態 区画全体 : 8000 150Pa で開 区画全体 : 30000 (圧力開放ダンパ) 3000Pa で開 区画全体 : 333000 | (圧力逃がしライン 逆止ダンパ) 500Pa で開 区画全体 : 9000 (圧力開放ダンパ) 3000Pa で開 区画全体 : 200000 |
| 床・壁・天井の断熱材 の取り扱い (注 1) | 断熱材が全面に敷設されていると設定して解析 (温度上昇を保守的に評価する観点から) | | 断熱材の敷設部と非敷 設部をそれぞれ独立に モデル化し、断熱材の敷 設割合を小さめに設定 して解析 (注 2) (コンクリートからの 水分放出量を保守的に 評価する観点から) |

(注 1) 壁・天井のコンクリートに厚さ 12.5mm の断熱材 (ファインフレックス相当) を敷設
床に厚さ 25mm の断熱材 (パーライトボード) を敷設

(注 2) 解析モデルは図 2-4 参照

表2-7 2次主冷却系設備のナトリウム燃焼解析条件（貯留後の解析）

| | 解 析 条 件 |
|----------------|--|
| 漏えい元 | 流入Naの顕熱が最大となる蒸発器室（A438）1/4Dt規模の漏えいを対象 |
| 貯留場所 | A134（Cループの2次ダンプタンク室） |
| ナトリウム(*1)の流入率 | 漏えい発生室の解析で計算されたナトリウム及びNaOHの排出流量とその温度を使用 （ただし、漏えいナトリウムの総熱容量が重要となるため、ナトリウム漏えい率の経時変化を考慮） |
| ナトリウム(*1)の流入温度 | |
| 燃焼室 | A134室の燃焼抑制板の下部領域 |
| 連通室 | 燃焼室に開口でつながる区画内の部屋 （A134室の燃焼抑制板の上部領域 + A135室 + A236室 + A237室 + A238室） |
| 部屋の空間容積 | 燃焼室 195m ³ (*2) 連通室 2869m ³ |
| プール燃焼面積 | 燃焼室 122m ² 連通室はプールなし |
| 部屋の初期温度 | 燃焼室 45 連通室 55 |
| 換気空調系の運用 | 漏えい開始2分後に停止 |
| 外気との間の通気条件(*3) | 換気中 区画全体 200000m ³ /h、換気停止 区画全体 40000m ³ /h |
| 備考 | (*1) NaOHを含む。 (*2) ナトリウム等の流入前の自由空間容積。 (*3) 外気との差圧が1000Paの場合の通気流量 |

表 2-8 評価対象に応じて変更する解析条件（貯留後の解析）

| 評価対象 | 貯留室床ライナ温度 | 貯留室床コンクリート温度 |
|--------------------|---|--|
| 床の断熱材の取り扱い （注1） | 断熱材が全面に敷設されていると設定して解析 （床ライナ温度を高め に評価する観点から） | 断熱材の敷設割合を小さめに設定した上で、さらにプールからコンクリートへの熱通過が等価となるよう、断熱材の熱伝導率を大きめの値にして解析 （床コンクリート温度を高め に評価する観点から） |

（注1）厚さ 65mmの断熱材（パーライトボード）を敷設

表 2-9 ナトリウム漏えい継続時間（2次主冷却系設備）

| C ループ配管室 | |
|-----------|-----------|
| Na 漏えい率 | 漏えい継続時間*1 |
| 134 t/h | 1900 s |
| 50 t/h | 2200 s |
| 30 t/h | 2400 s |
| 10 t/h 以下 | 2600 s |

| C ループ蒸発器室、過熱器室 | |
|----------------|-----------|
| Na 漏えい率 | 漏えい継続時間*1 |
| 129 t/h | 2000 s |
| 50 t/h | 2200 s |
| 30 t/h | 2400 s |
| 10 t/h 以下 | 2600 s |

| B ループ過熱器室 | |
|-----------|-----------|
| Na 漏えい率 | 漏えい継続時間*1 |
| 129 t/h | 2000 s |

*1) 系統内のナトリウムを緊急にドレンすること並びに漏えいに伴い系統外へ流出することを考慮して設定

- ※1：漏えい検出器が警報を出した後、ナトリウム漏えいであることを確認し、原子炉を停止すると判断するまでの時間
- ※2：原子炉手動停止スイッチを押す操作
- ※3：原子炉が停止し、崩壊熱除去のため補助冷却設備が起動し、安定に運転していることの確認、及びナトリウムをドレンするため、ドレンする系統のポンプモータや補助冷却設備を停止し、緊急ドレンを開始する操作

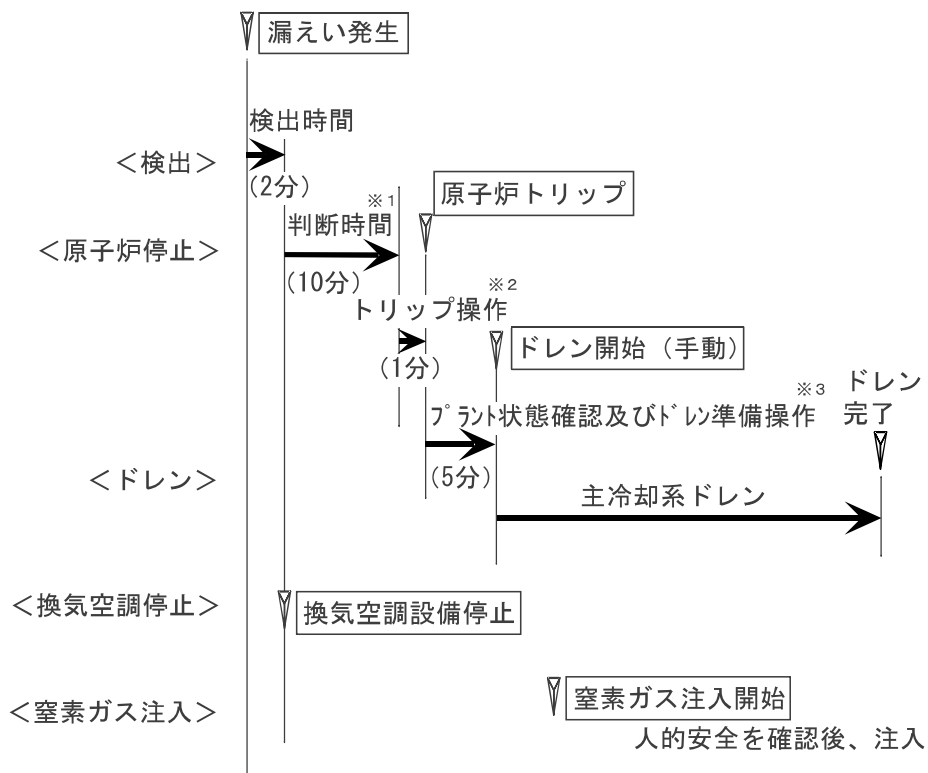


図 2-1 2次主冷却系設備ナトリウム燃焼解析におけるタイムチャート

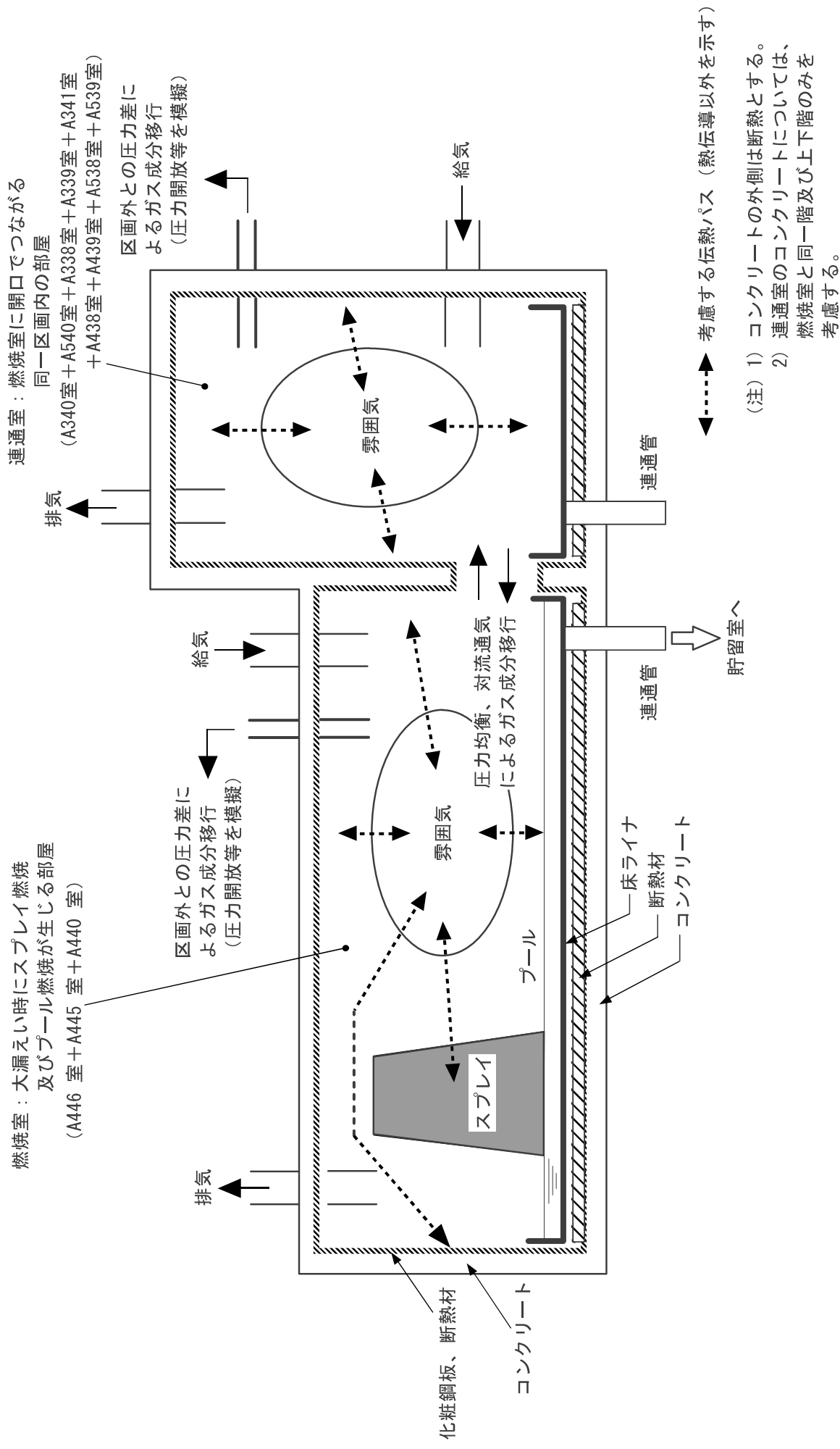


図 2-2 解析モデルの概要 (2 次主冷却系配管室の例)

主冷却系室区画注

注) 詳細は図2-3(2/2) 参照

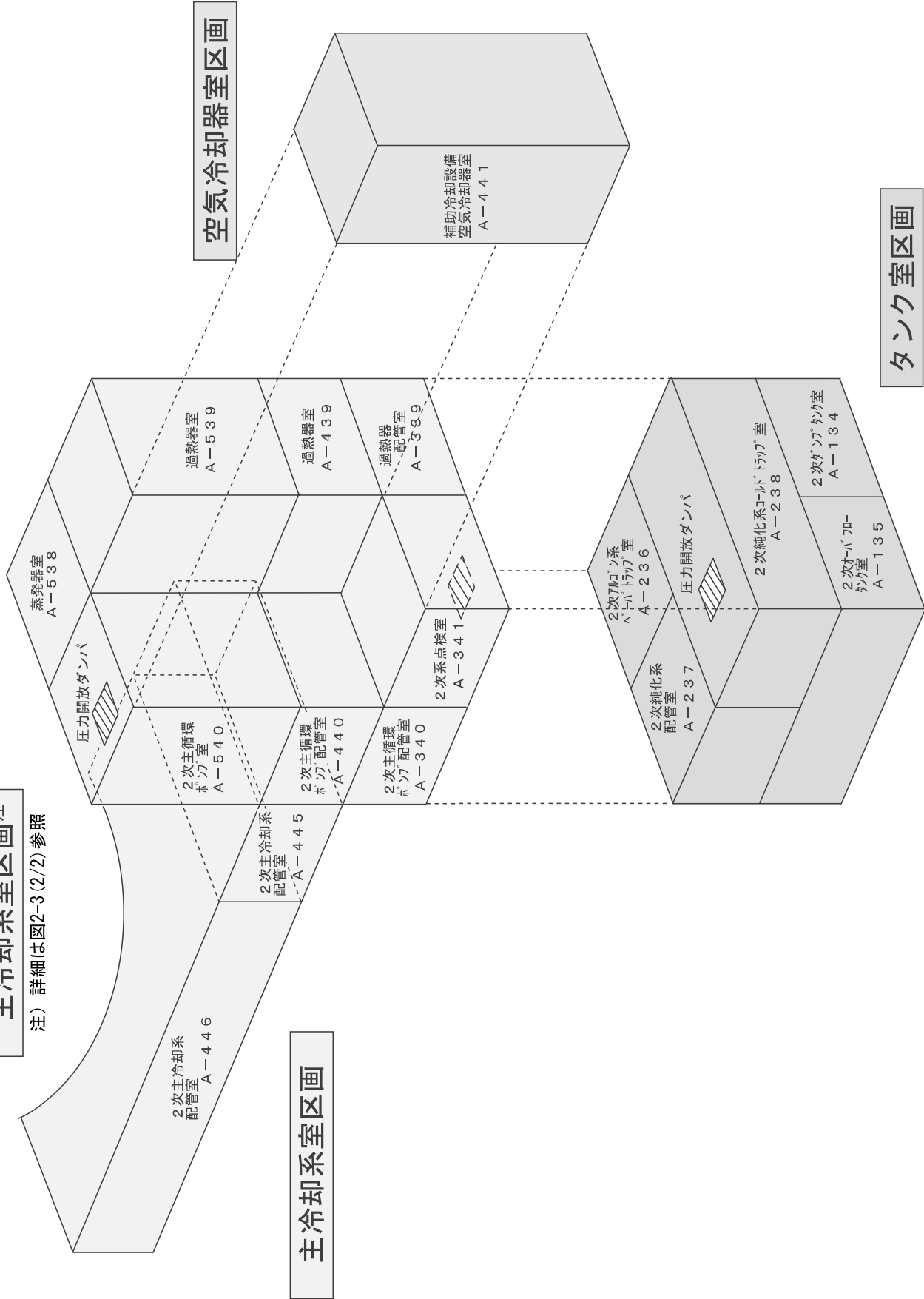


図2-3(1/2) 2次主冷却系設備Cグループ区画例

主冷却系室区画

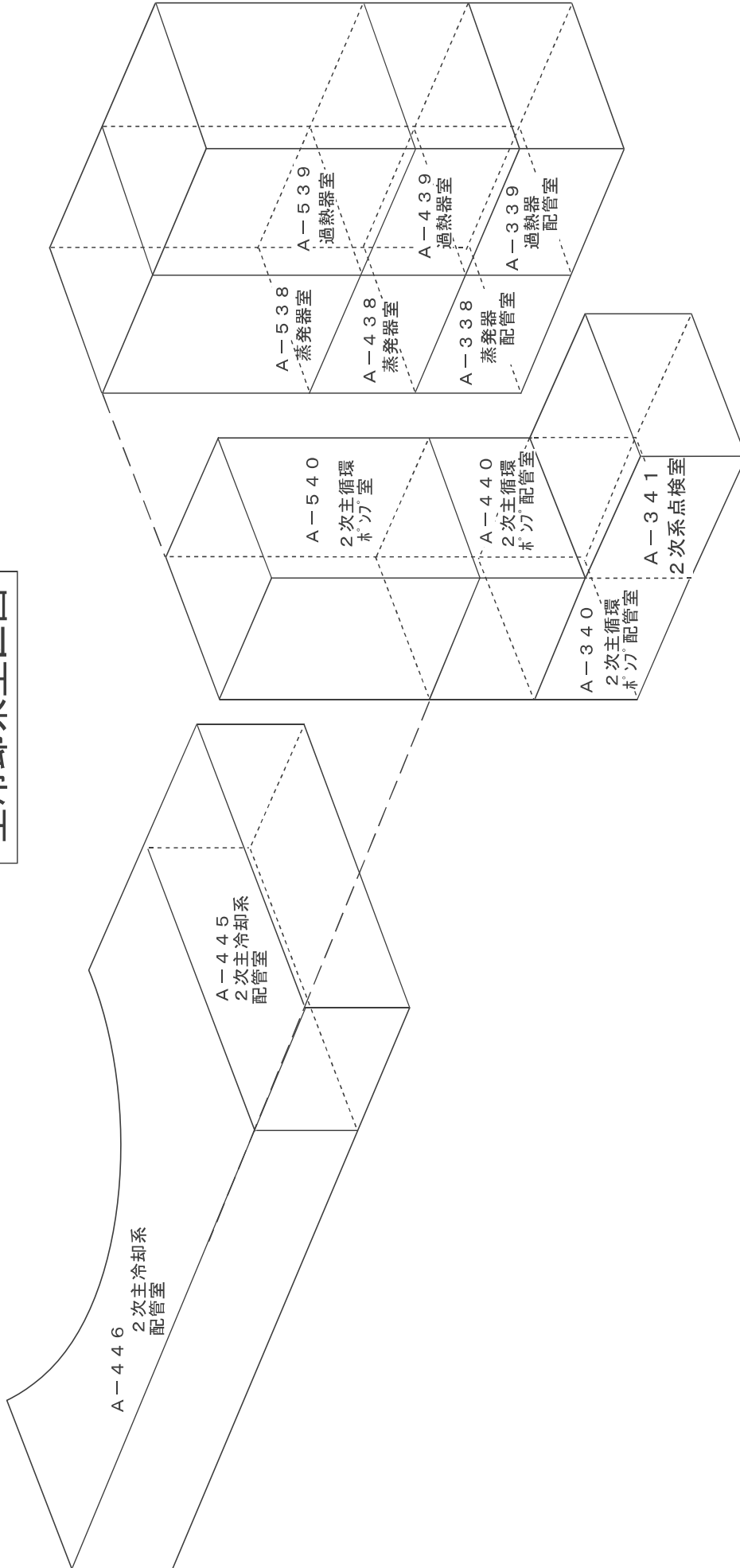
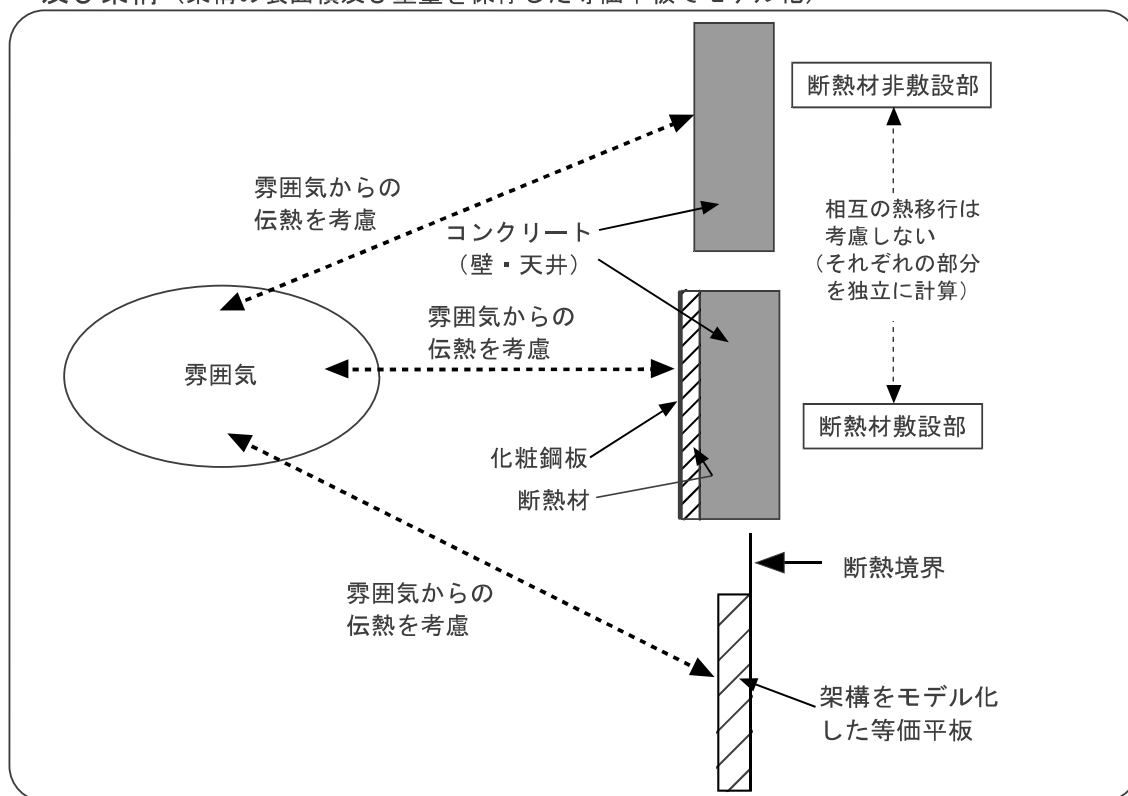


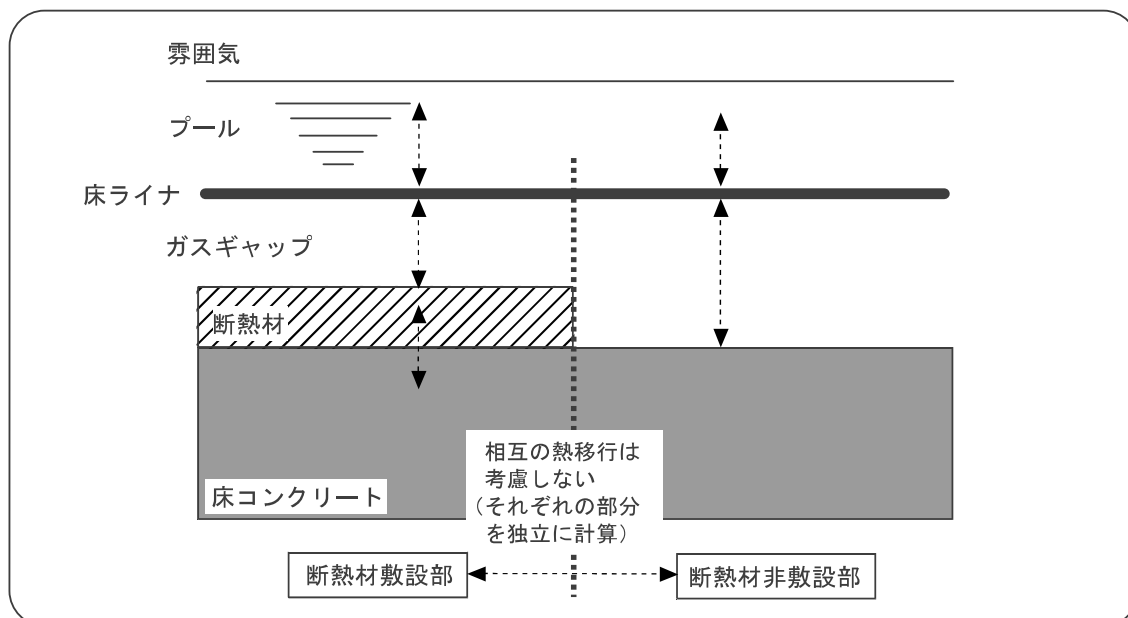
図 2-3 (2/2) 2次主冷却系設備Cループ区画例
(主冷却系室区画 詳細図)

壁・天井領域（断熱材の敷設部と非敷設部をそれぞれ独立にモデル化）
及び架構（架構の表面積及び重量を保存した等価平板でモデル化）



（注）水素濃度に着目した解析では、断熱材敷設割合を小さめに設定し、コンクリートからの水分放出量を大きめに評価する。

床領域（断熱材の敷設割合（注）を考慮してプールから下方への伝熱量を計算）



←-----→ 考慮する伝熱パス

図 2-4 断熱材敷設部と非敷設部及び架構のモデル化
（水素濃度に着目した解析にて使用）

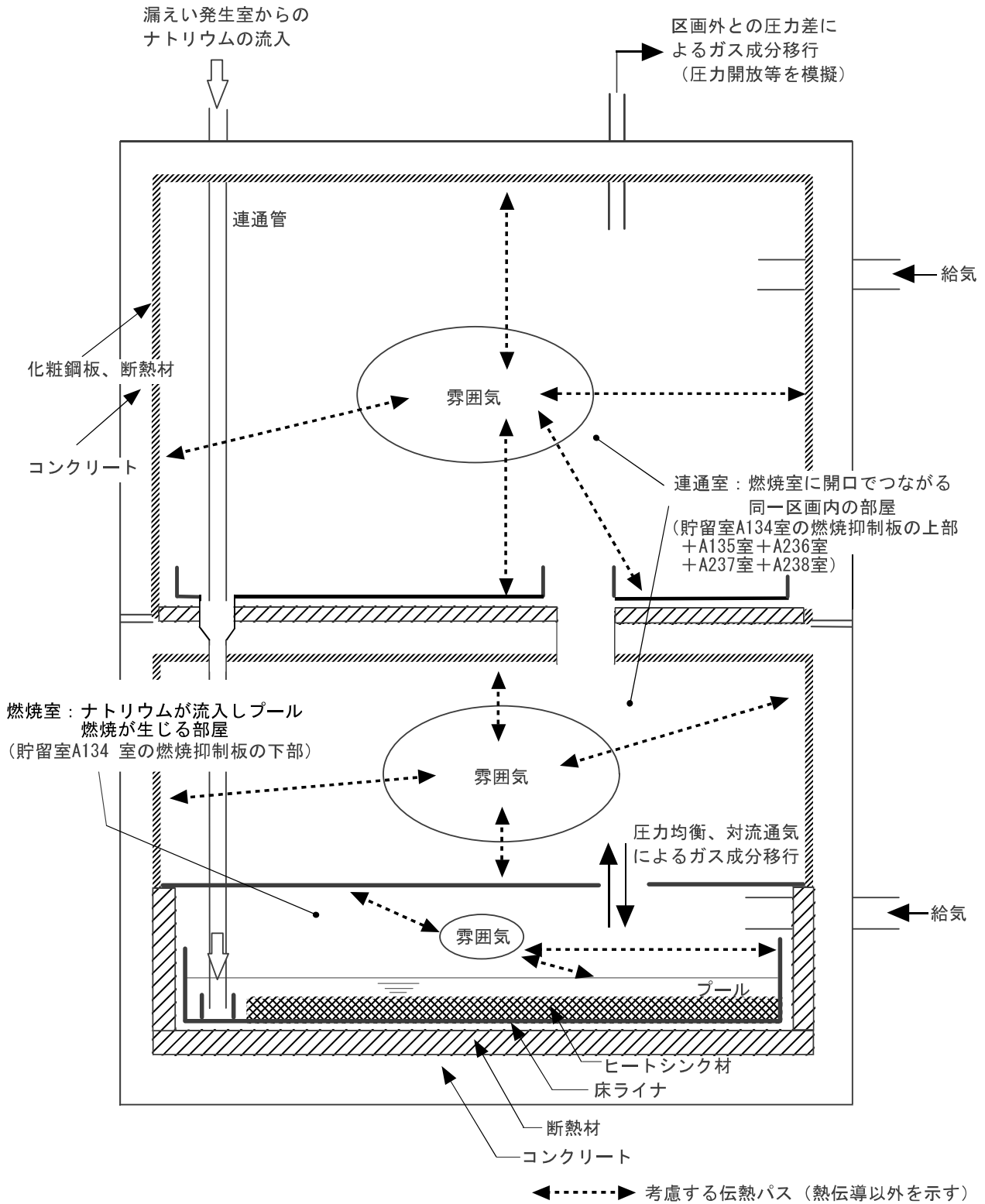


図 2-5 解析モデルの概要 (貯留後の解析)

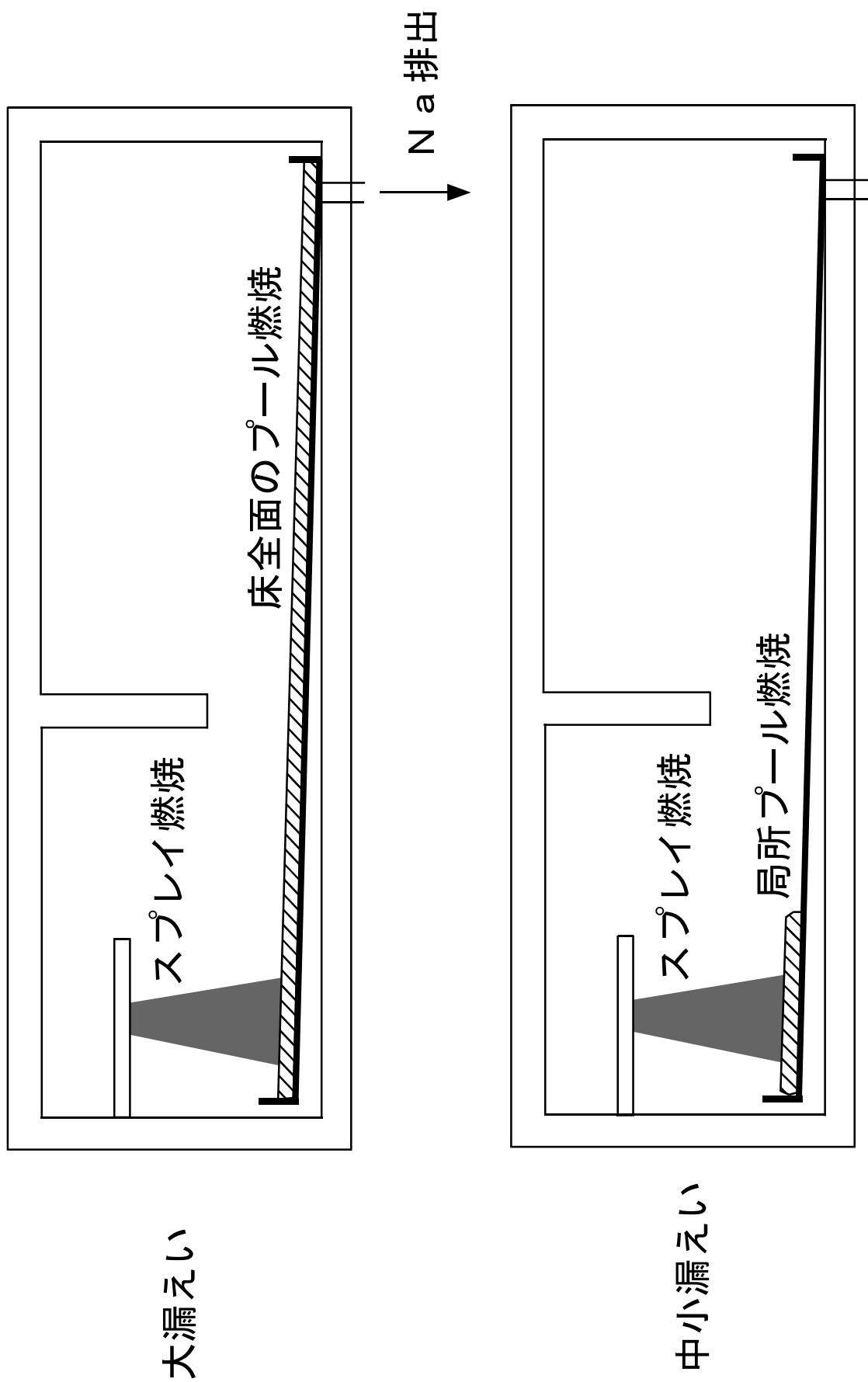


図2-6 漏えい規模の違いによるナトリウム燃烧の概念図の比較

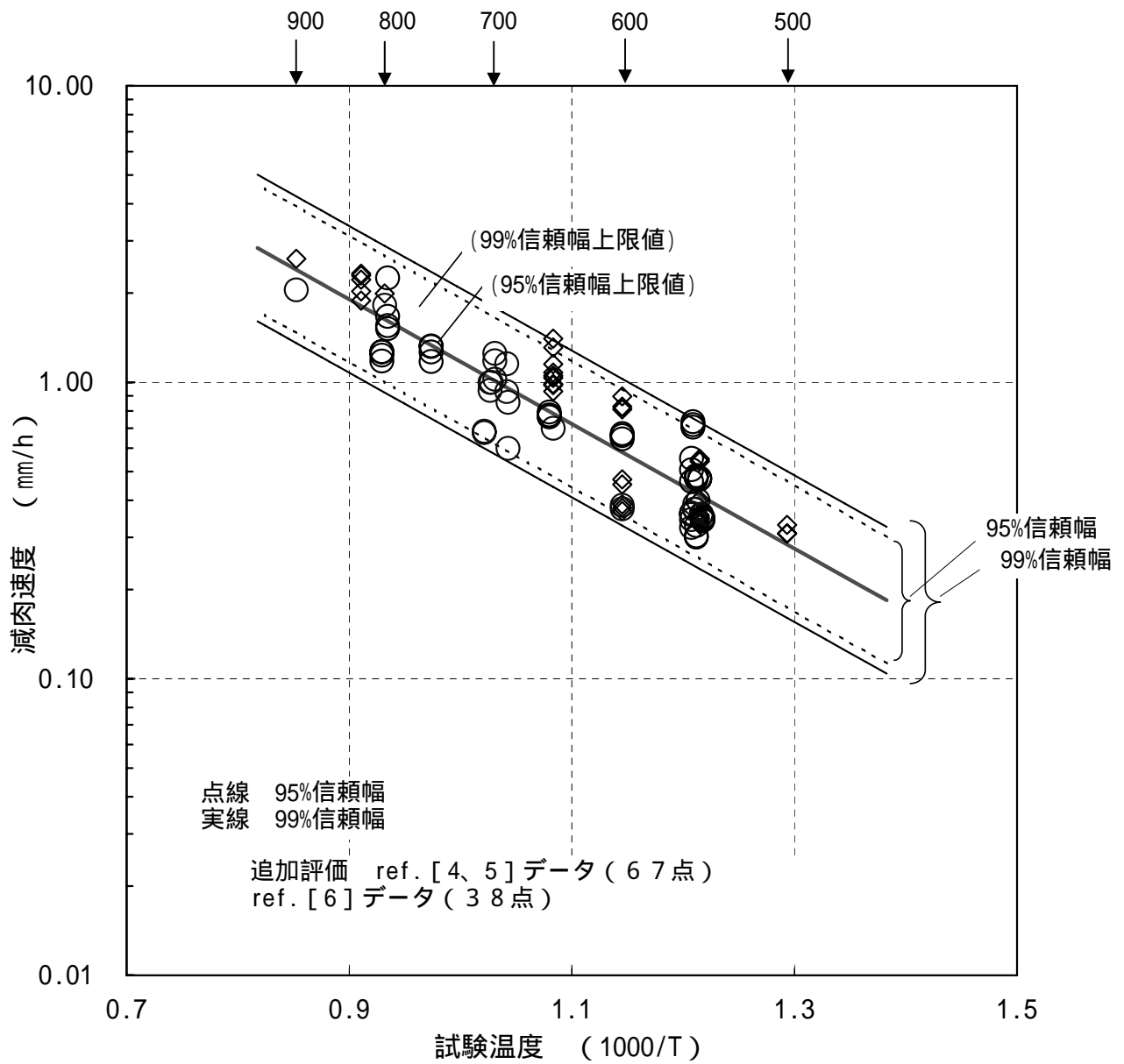


図2-7 溶融塩型腐食の減肉速度の温度依存性 (NaOH + Na₂O₂系環境)

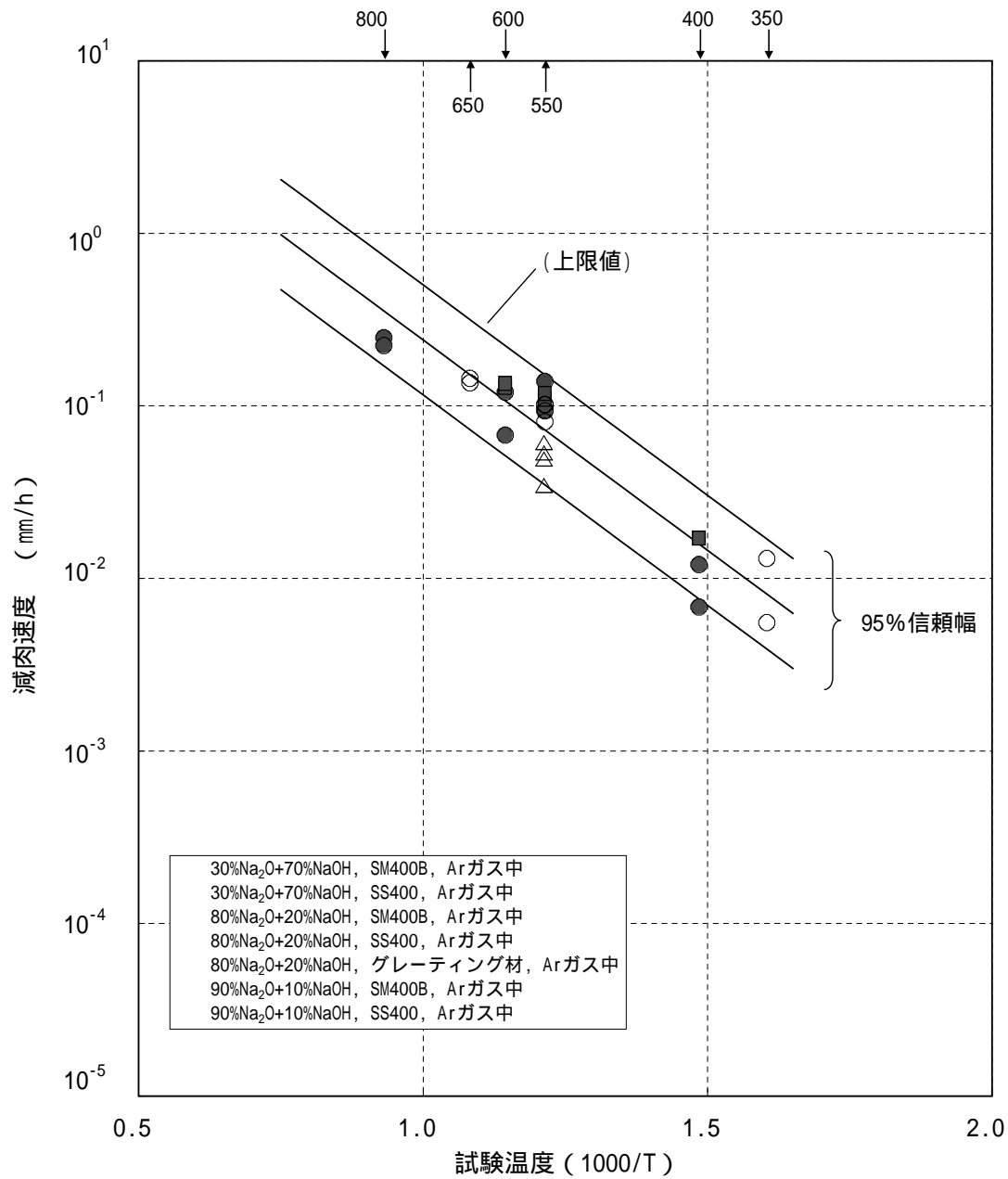


図2-8 NaFe複合酸化型腐食の減肉速度の温度依存性 (NaOH+Na₂O環境)

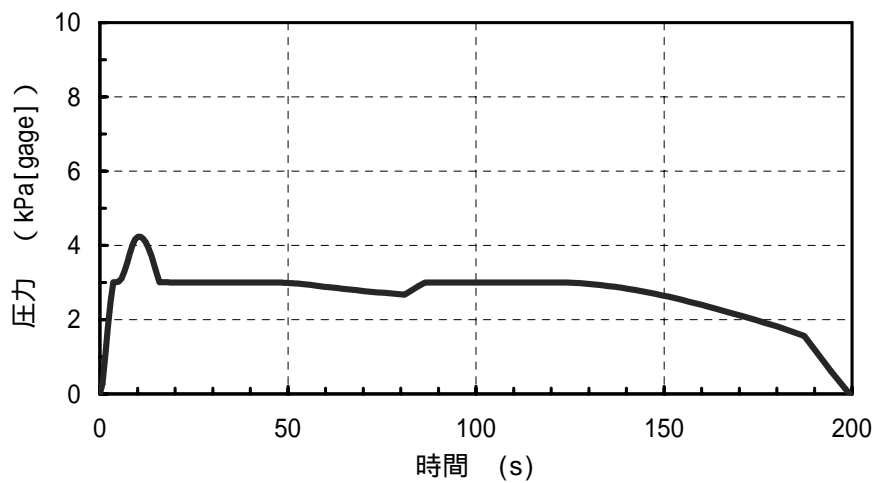
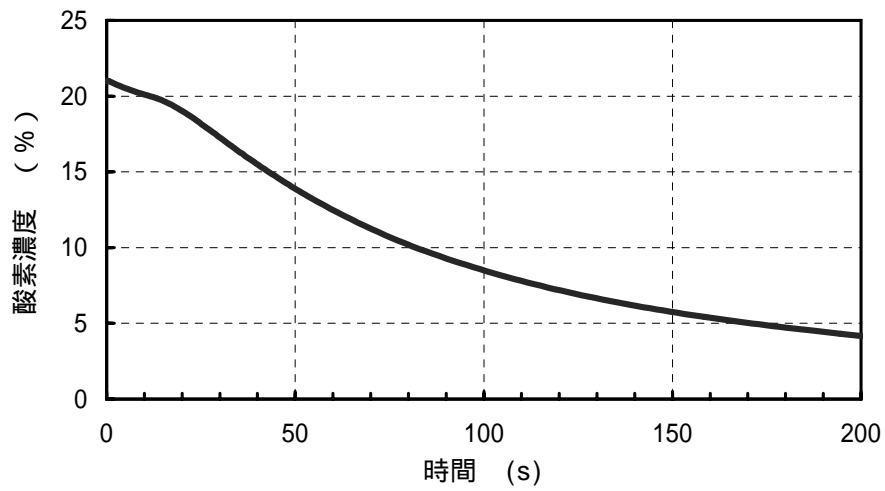
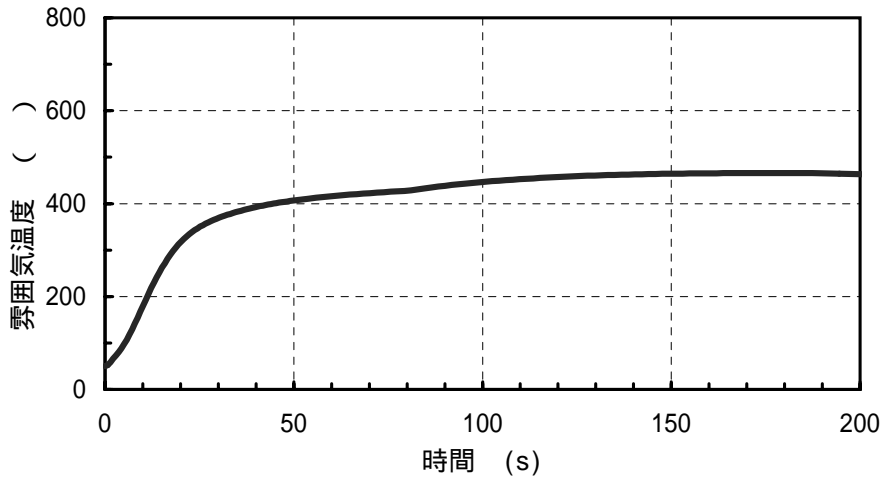


図 3.1-1 2次主冷却系設備 配管室 (A446) における大漏えい (1/4Dt破損) 時の解析結果 (圧力に着目した解析)

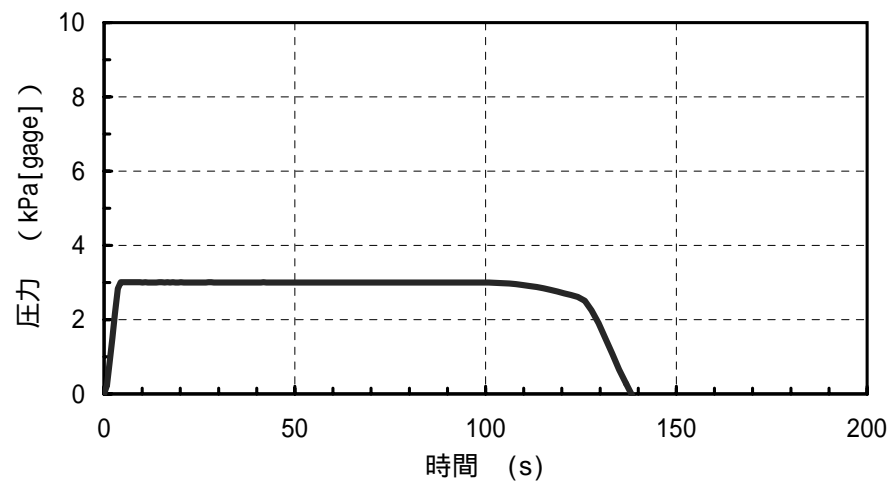
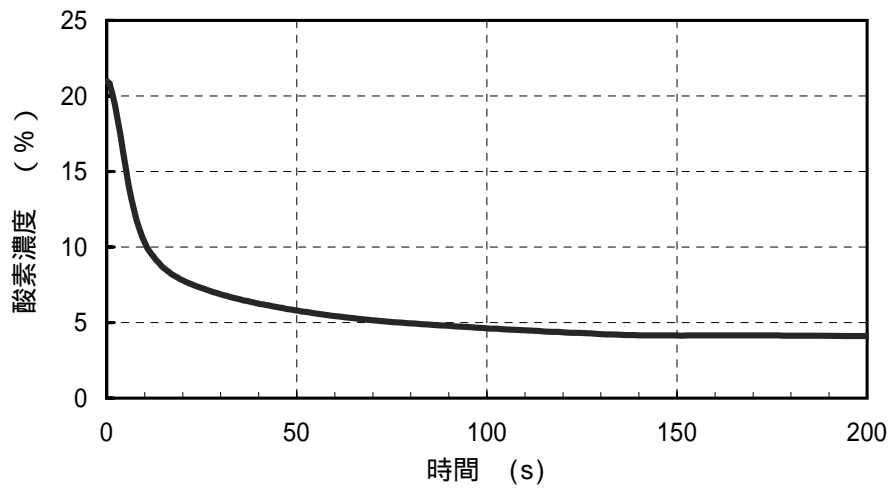
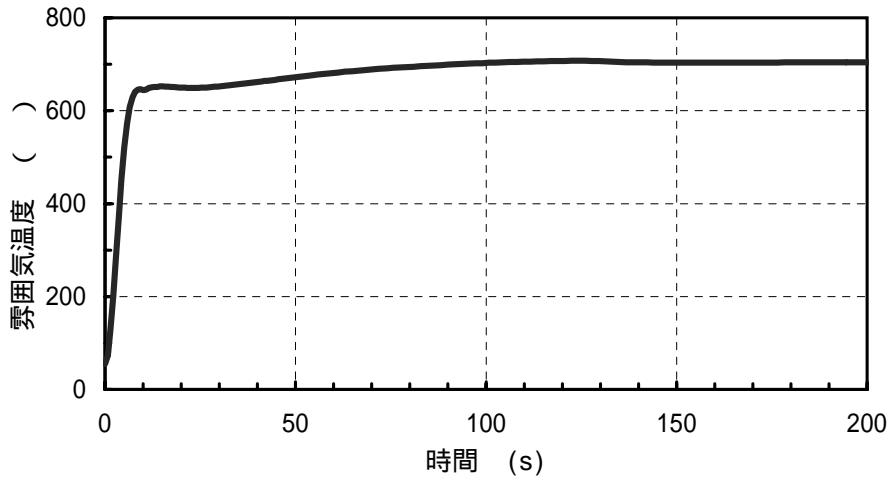


図 3.1-2 2次主冷却系設備 蒸発器室 (A438) における大漏えい (1/4Dt破損) 時の解析結果 (圧力に着目した解析)

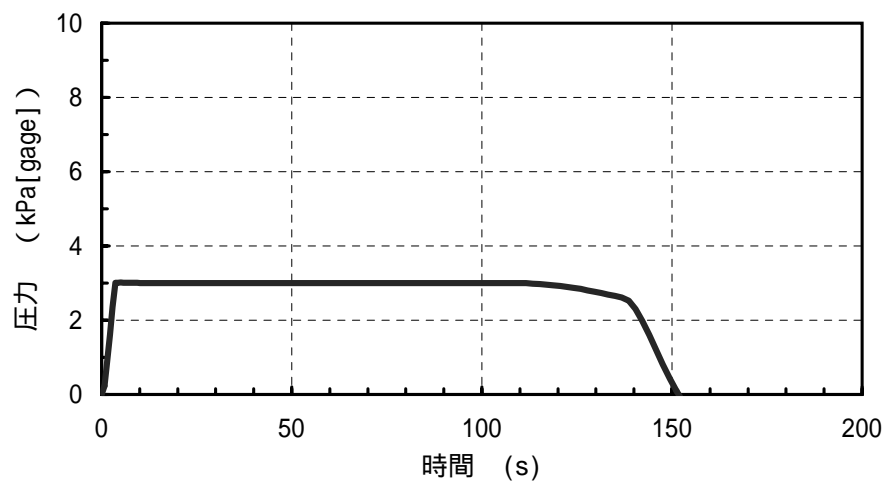
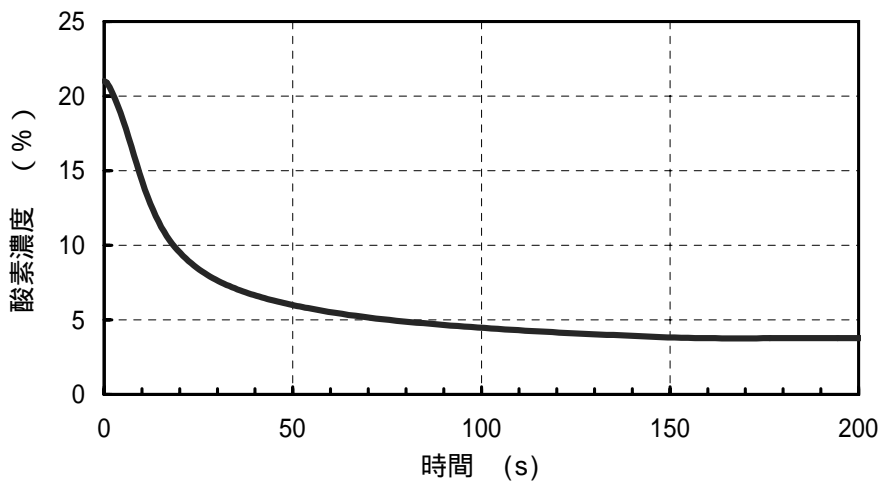
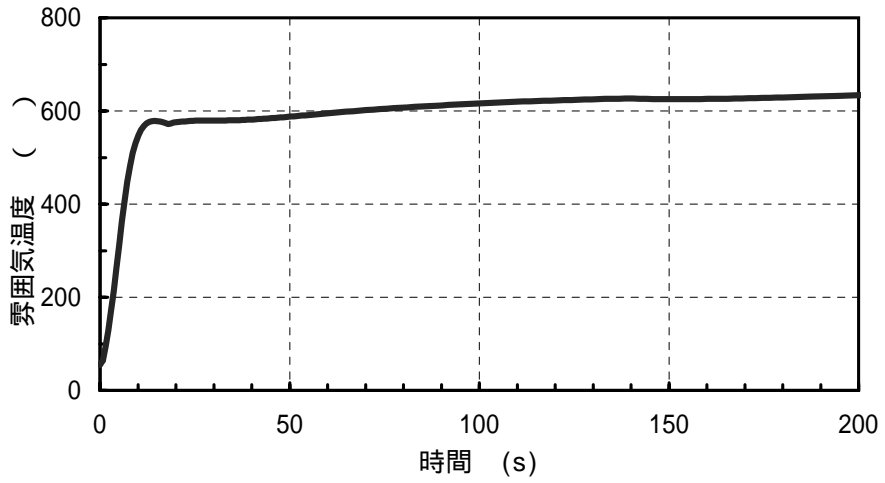


図 3.1-3 2次主冷却系設備 過熱器室 (A439) における大漏えい (1/4Dt破損) 時の解析結果 (圧力に着目した解析)

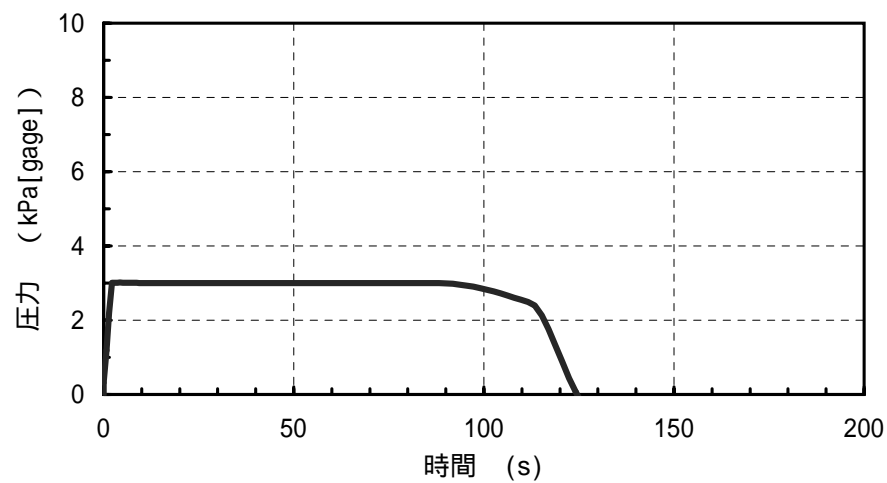
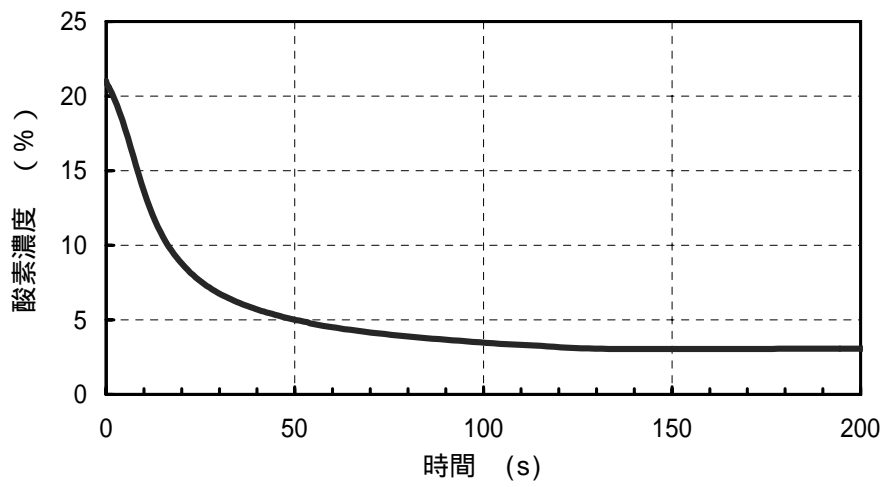
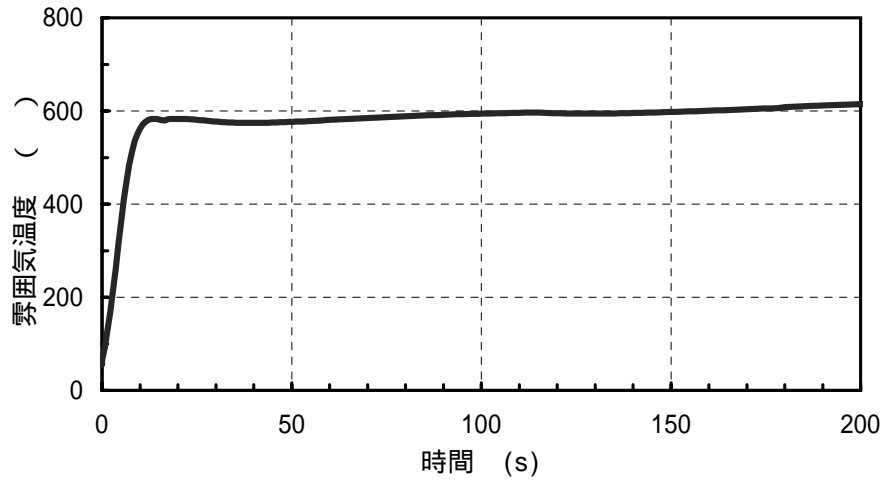


図 3.1-4 2次主冷却系設備 Bループ過熱器室 (A435) における
大漏えい (1/4Dt破損) 時の解析結果
(圧力に着目した解析)

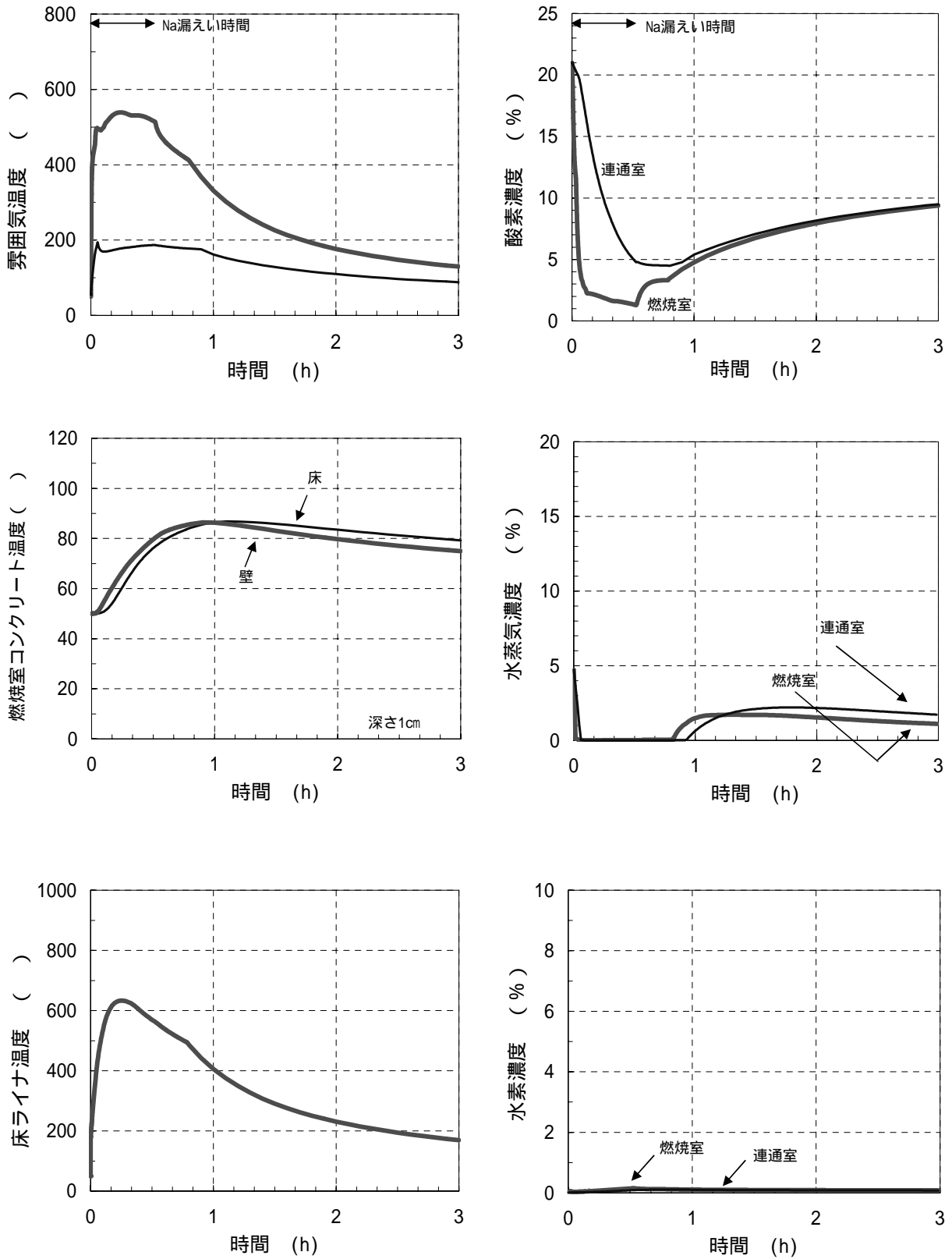


図 3.2-1 2次主冷却系設備 配管室(A446)における大漏えい(1/4Dt破損)時の解析結果(ライナ温度に着目した解析)

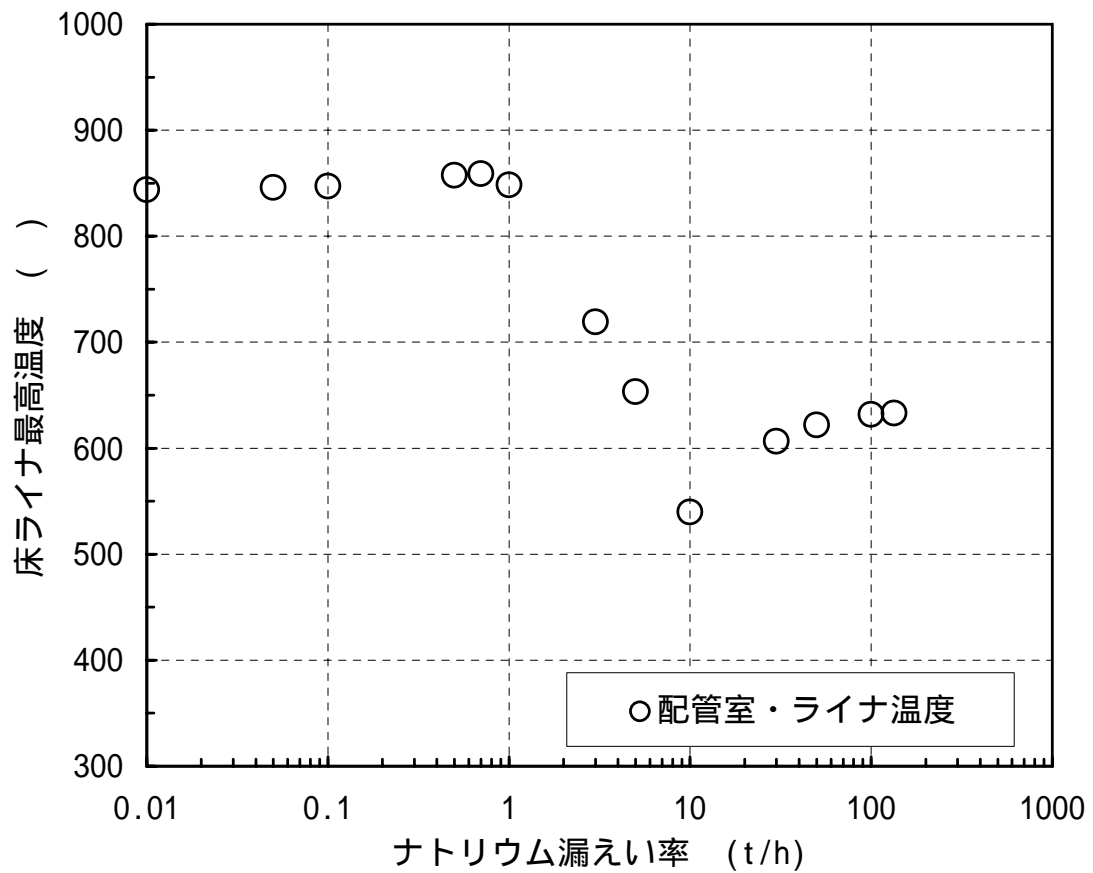


図 3.2-2 2次主冷却系設備 配管室 (A446) でのナトリウム漏えい時の床ライナ温度 (ライナ温度に着目した解析)

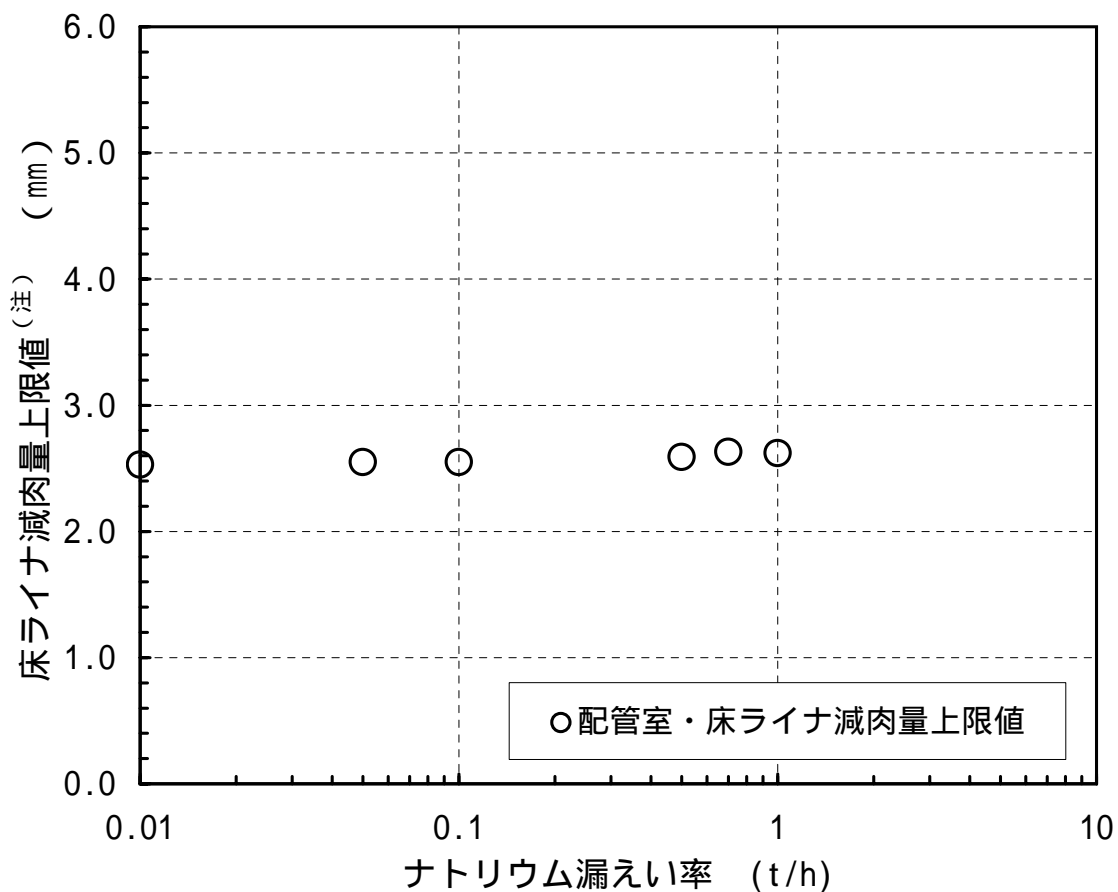


図 3.2-3 溶融塩型腐食を仮定した場合の床ライナ減肉量上限値
(配管室A446)

(注) 漏えいナトリウムが局所的に堆積して燃焼する小規模漏えいのうち、プール中の金属ナトリウム濃度が低く、 Na_2O_2 や NaOH の濃度が高いケースに関して、床ライナ温度が300 以上の場合に溶融塩型腐食を仮定し、腐食減肉速度データの99%信頼幅上限値と床ライナ温度計算値から減肉量を算出した。

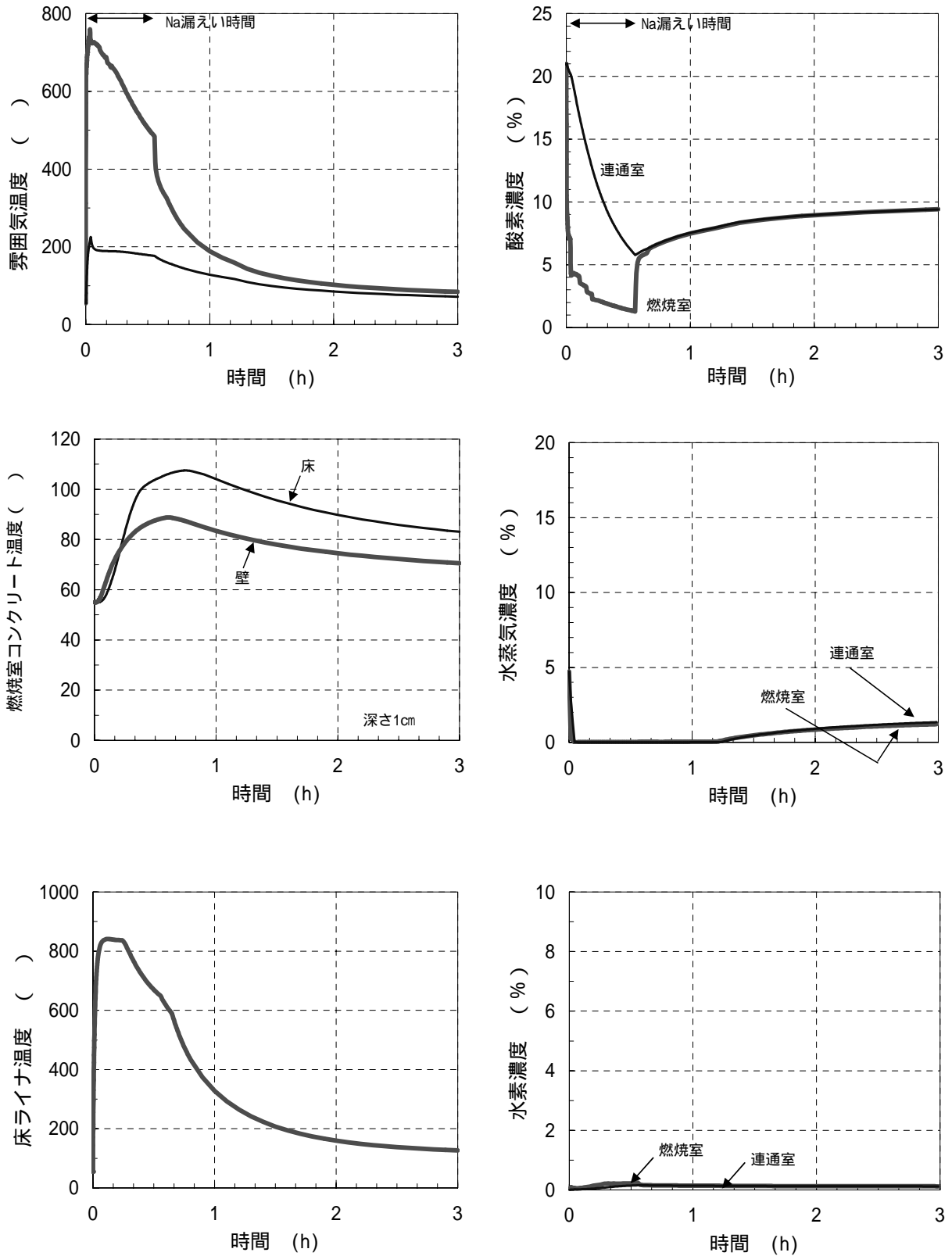


図 3.2-4 2次主冷却系設備 蒸発器室 (A438) における大漏えい (1/4Dt破損) 時の解析結果 (ライナ温度に着目した解析)

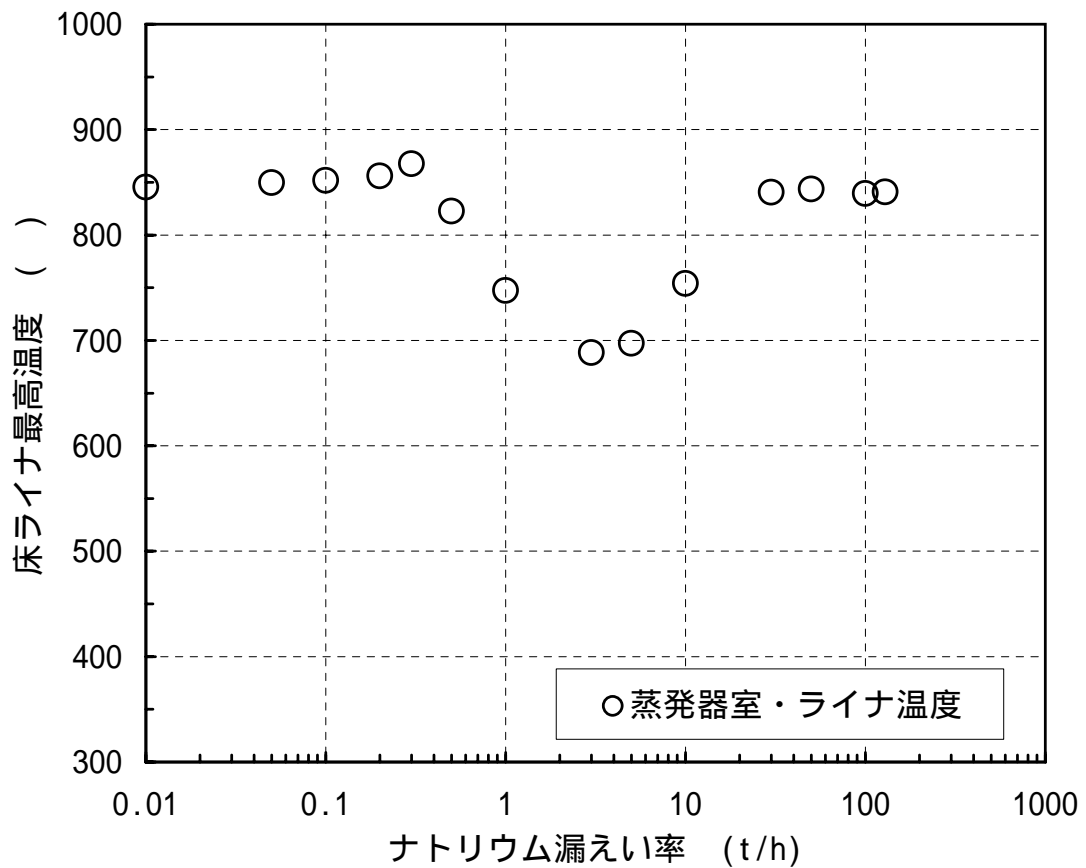


図 3.2-5 2次主冷却系設備 蒸発器室 (A438) でのナトリウム漏えい時の床ライナ温度 (ライナ温度に着目した解析)

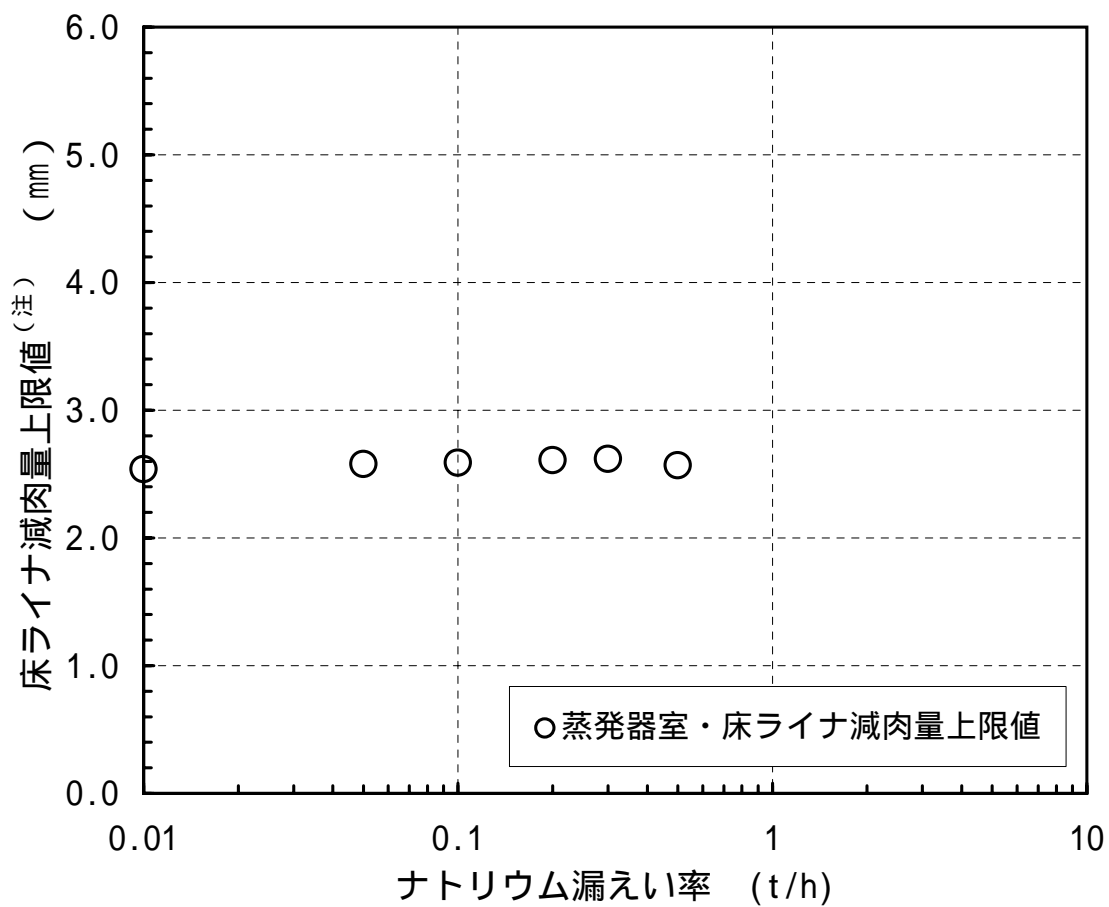


図 3.2-6 溶融塩型腐食を仮定した場合の床ライナ減肉量上限値
(蒸発器室A438)

(注) 漏えいナトリウムが局所的に堆積して燃焼する小規模漏えいのうち、プール中の金属ナトリウム濃度が低く、 Na_2O_2 や NaOH の濃度が高いケースに関して、床ライナ温度が300 以上の場合に溶融塩型腐食を仮定し、腐食減肉速度データの99%信頼幅上限値と床ライナ温度計算値から減肉量を算出した。

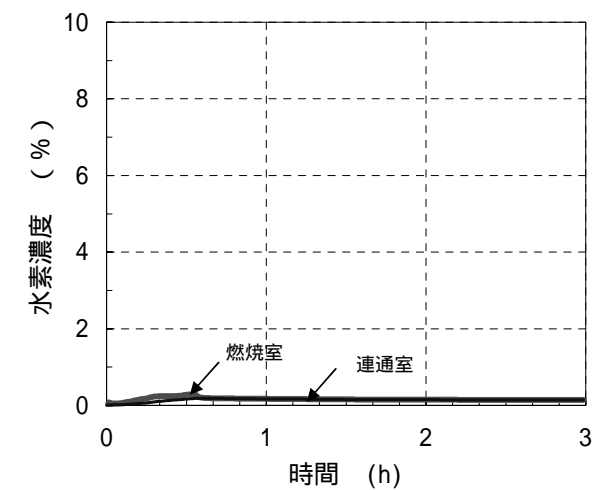
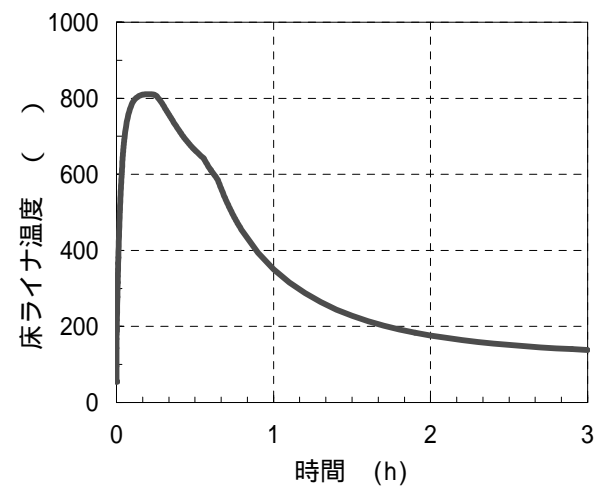
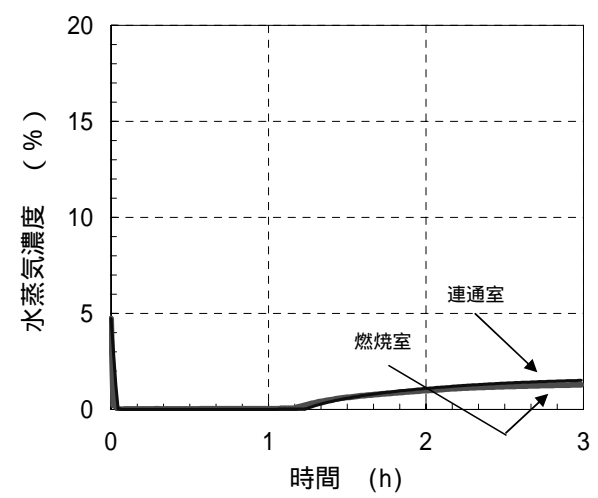
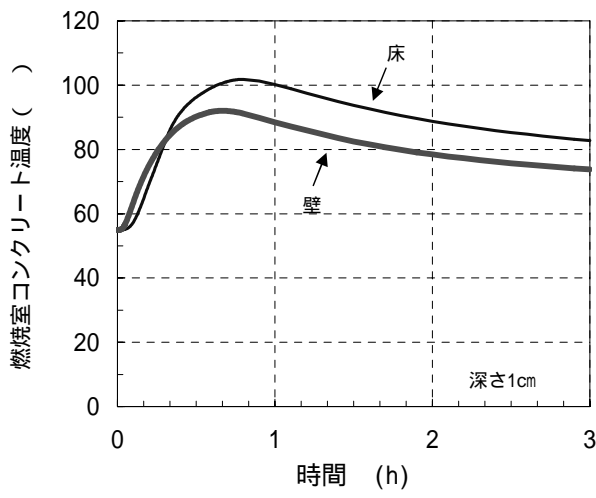
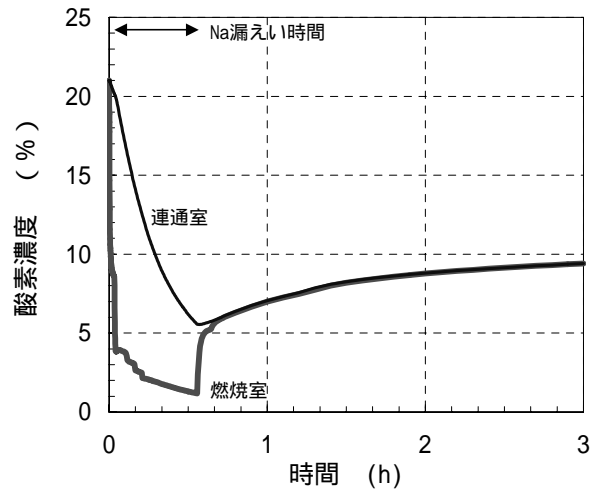
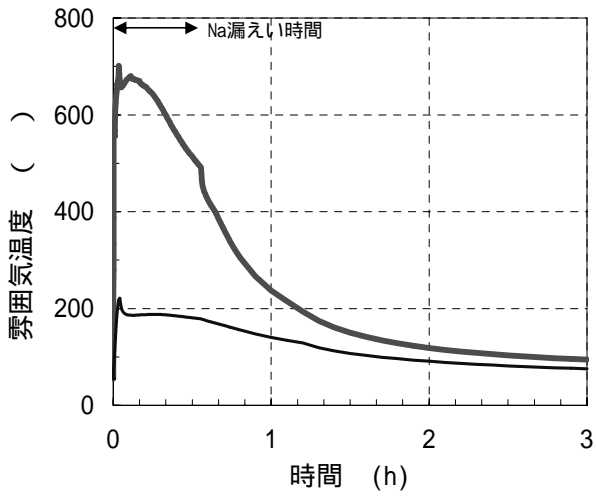


図 3.2-7 2次主冷却系設備 過熱器室 (A439) における大漏えい (1/4Dt破損) 時の解析結果 (ライナ温度に着目した解析)

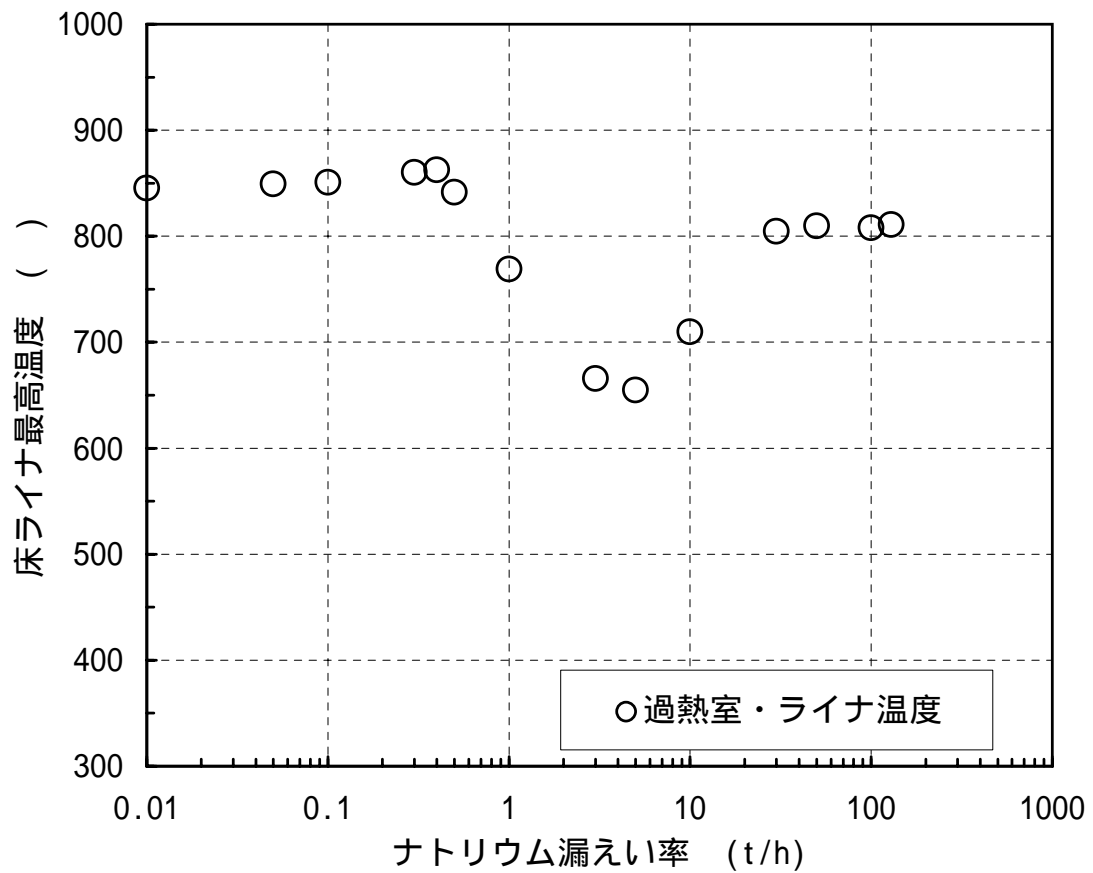


図 3.2-8 2次主冷却系設備 過熱器室 (A439) でのナトリウム漏えい時の床ライナ温度 (ライナ温度に着目した解析)

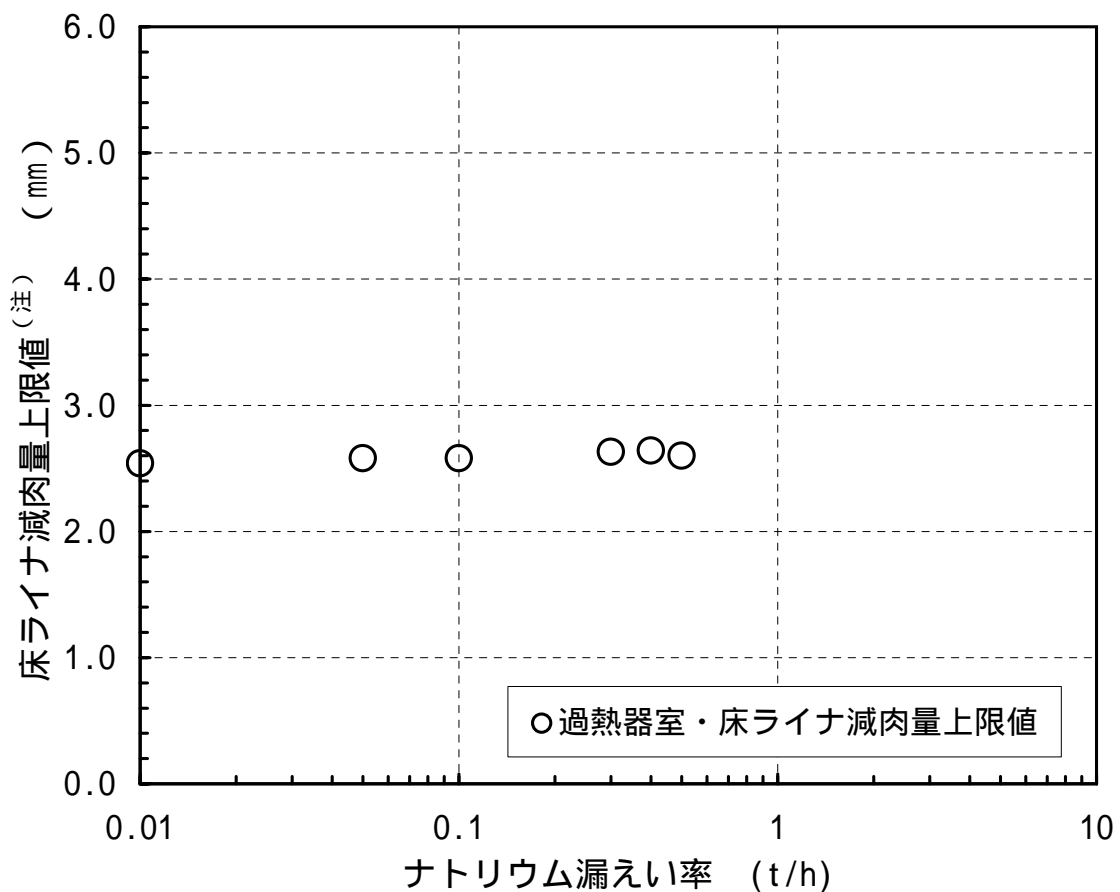


図 3.2-9 溶融塩型腐食を仮定した場合の床ライナ減肉量上限値
(過熱器室A439)

(注) 漏えいナトリウムが局所的に堆積して燃焼する小規模漏えいのうち、プール中の金属ナトリウム濃度が低く、 Na_2O_2 や NaOH の濃度が高いケースに関して、床ライナ温度が 300°C 以上の場合に溶融塩型腐食を仮定し、腐食減肉速度データの99%信頼幅上限値と床ライナ温度計算値から減肉量を算出した。

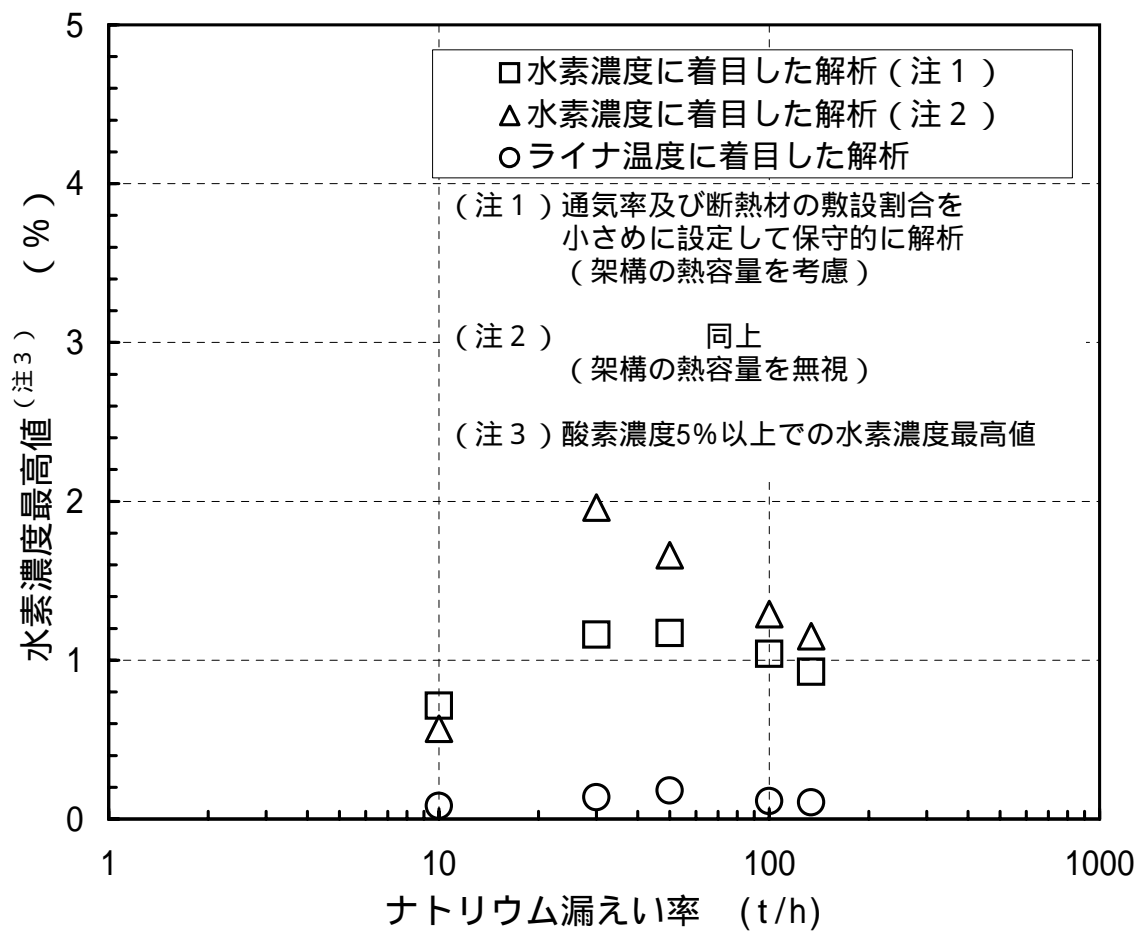


図 3.3-1 水素濃度最高値 (配管室 A446)

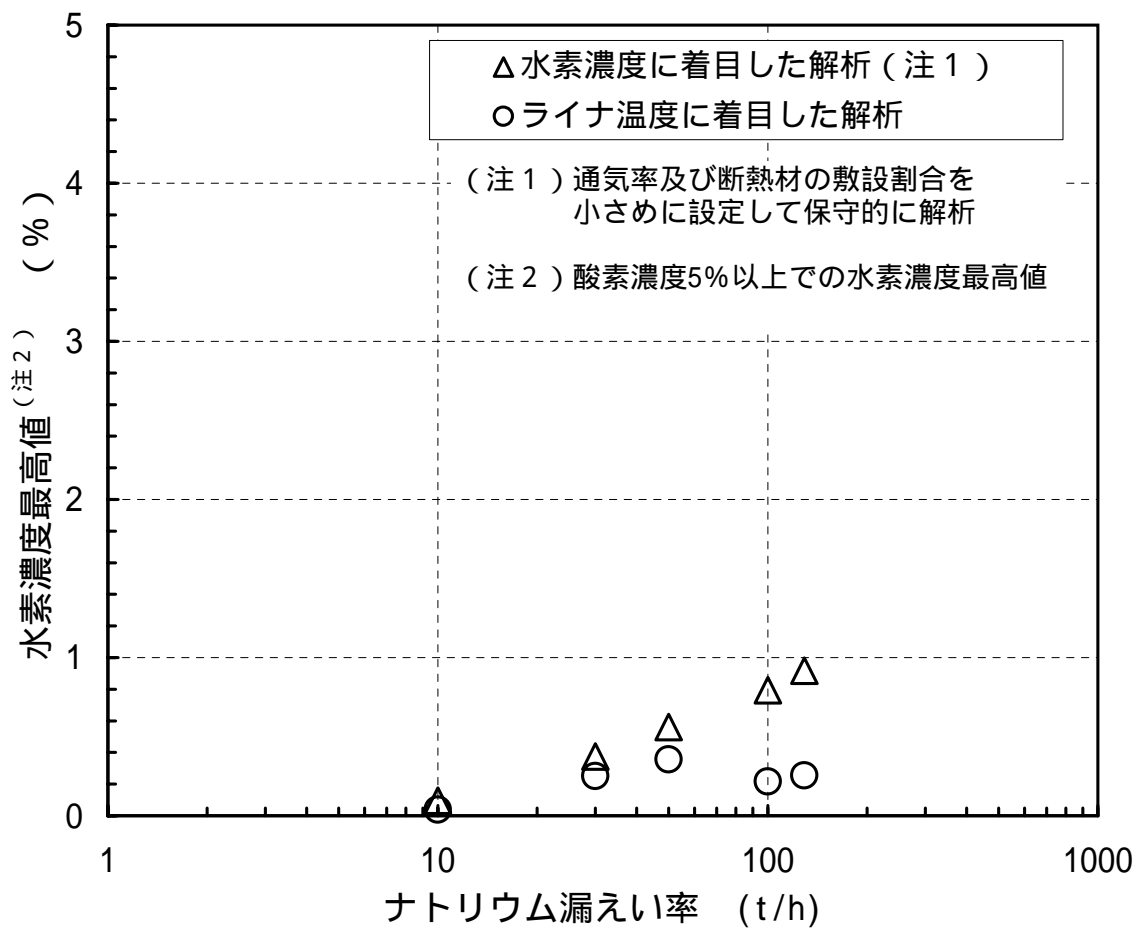


図 3.3-2 水素濃度最高値 (蒸発器室 A438)

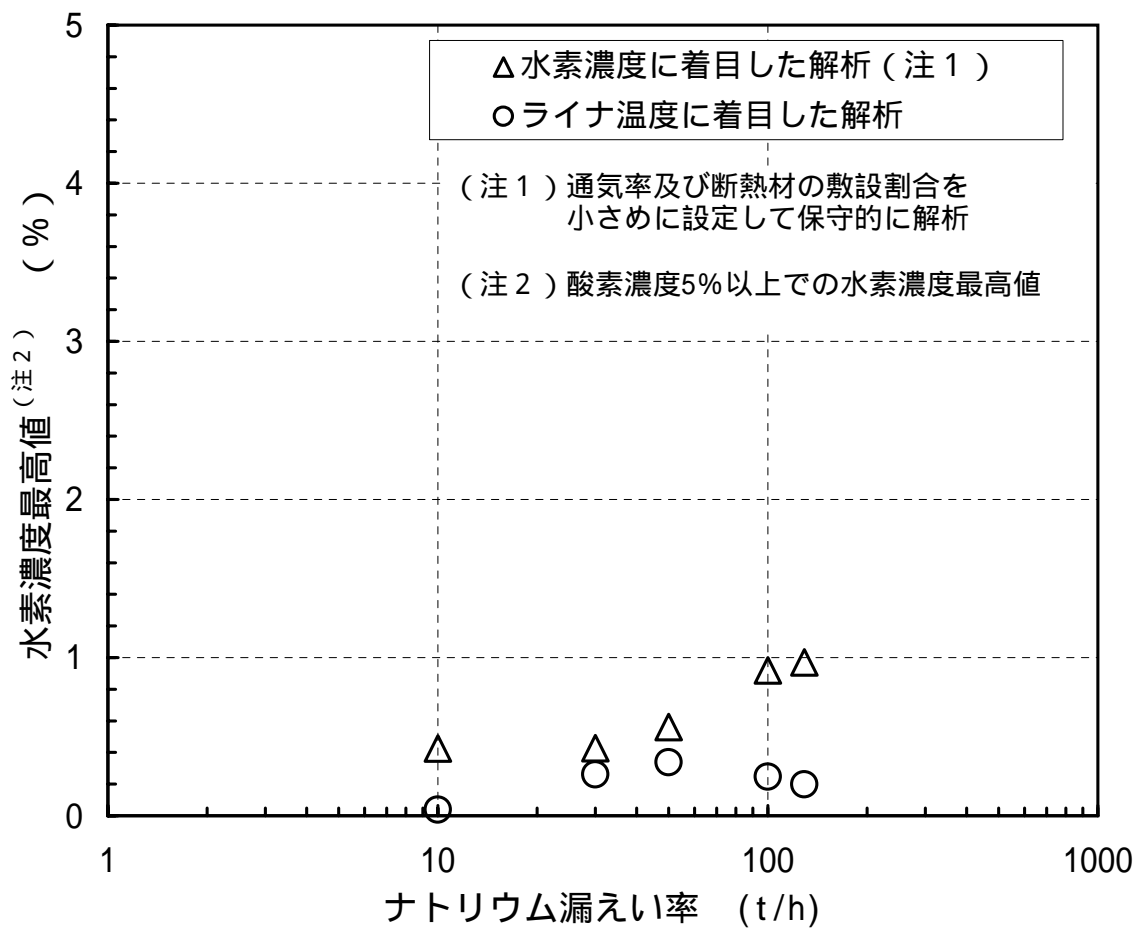


図 3.3-3 水素濃度最高値（過熱器室 A439）

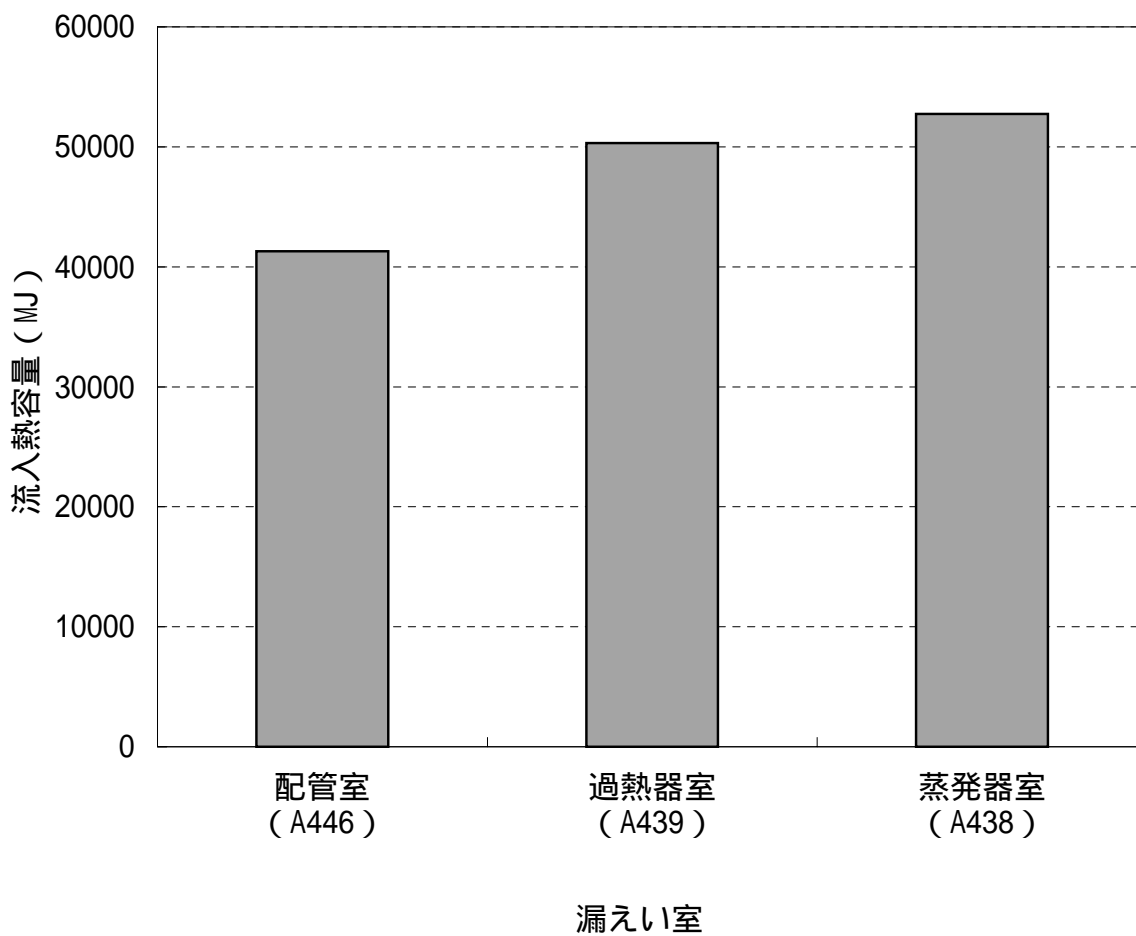


図 3.4-1 2次ダンプタンク室に流入する漏えいナトリウムの熱容量の比較

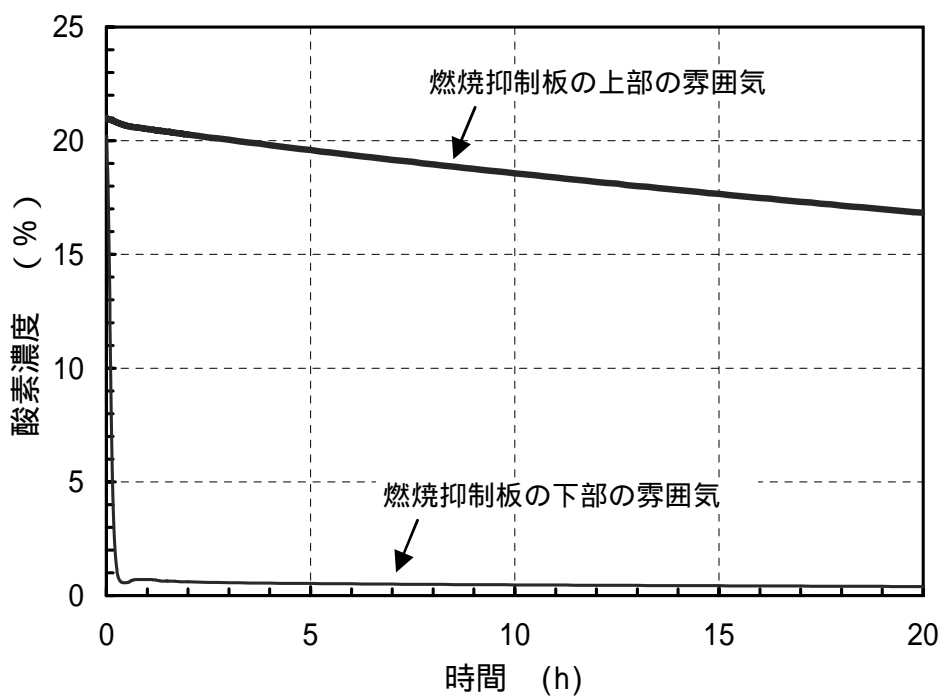
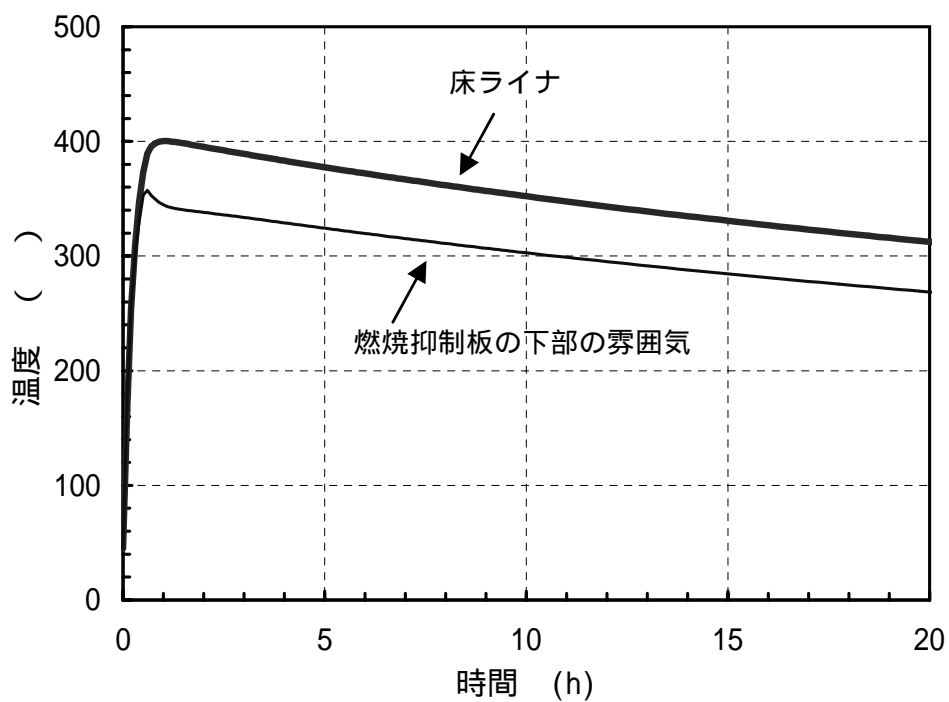


図 3.4-2 2次ダンプタンク室への貯留後の解析結果
(ライナ温度に着目した解析)

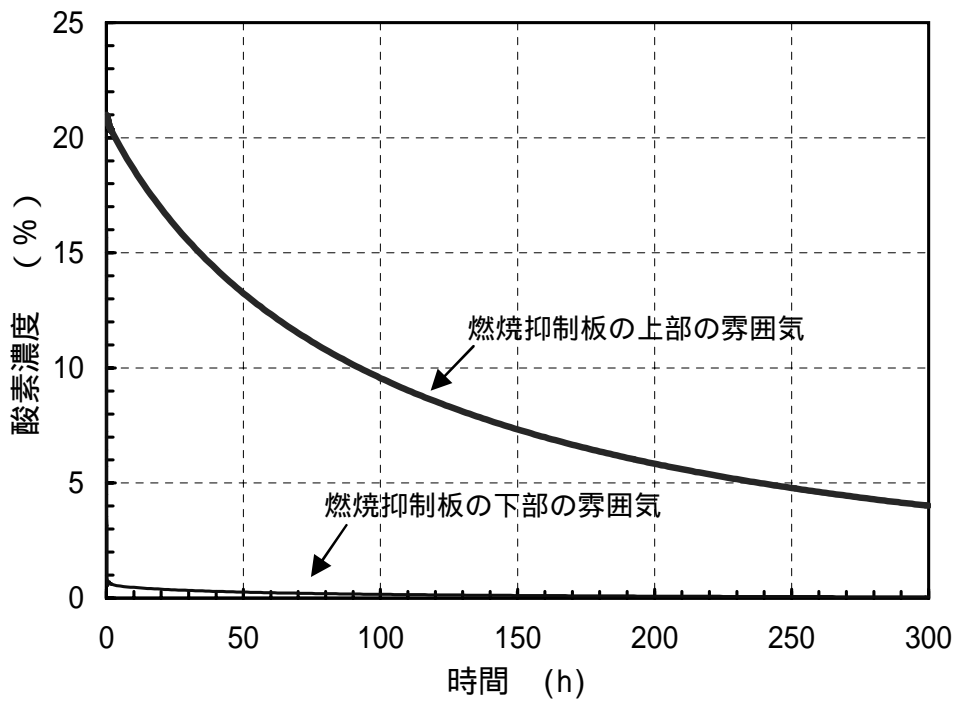
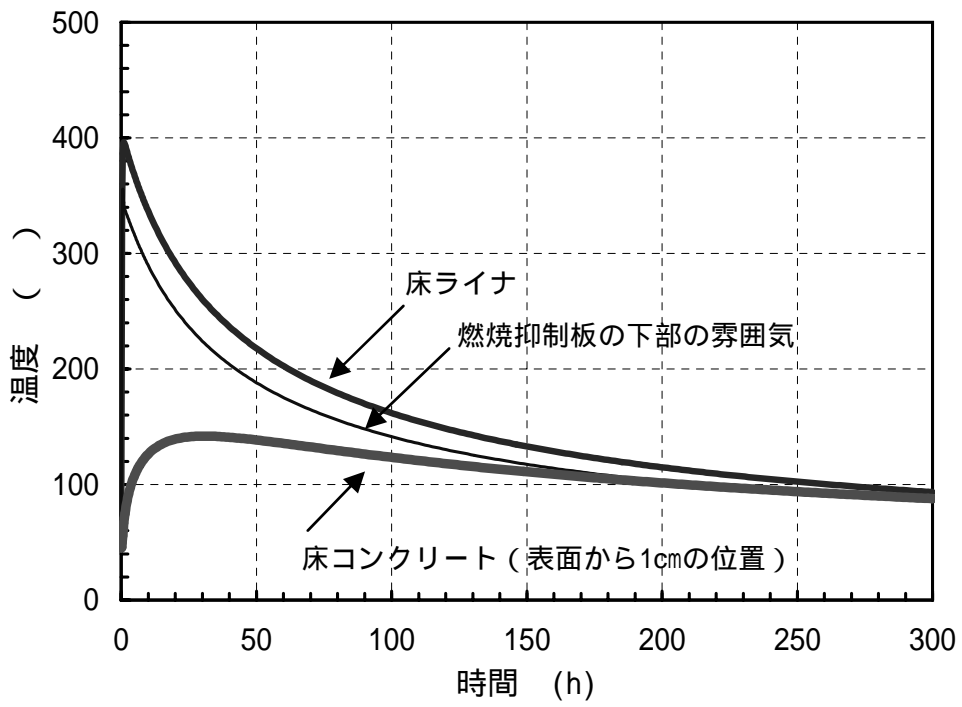


図 3.4-3 2次ダンプタンク室への貯留後の解析結果
(コンクリート温度に着目した解析)

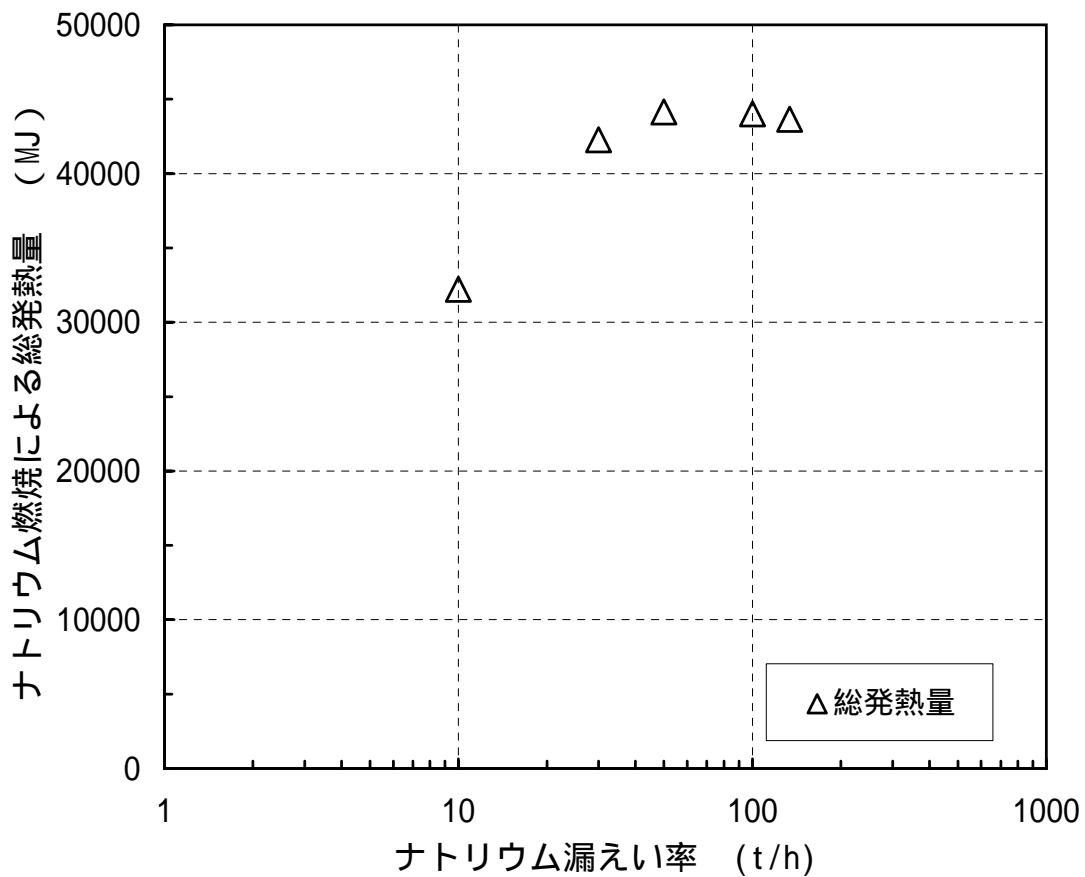


図 3.5-1 2次主冷却系設備 配管室(A446)でのナトリウム漏えい時のナトリウム燃焼による総発熱量(ライナ温度に着目した解析)

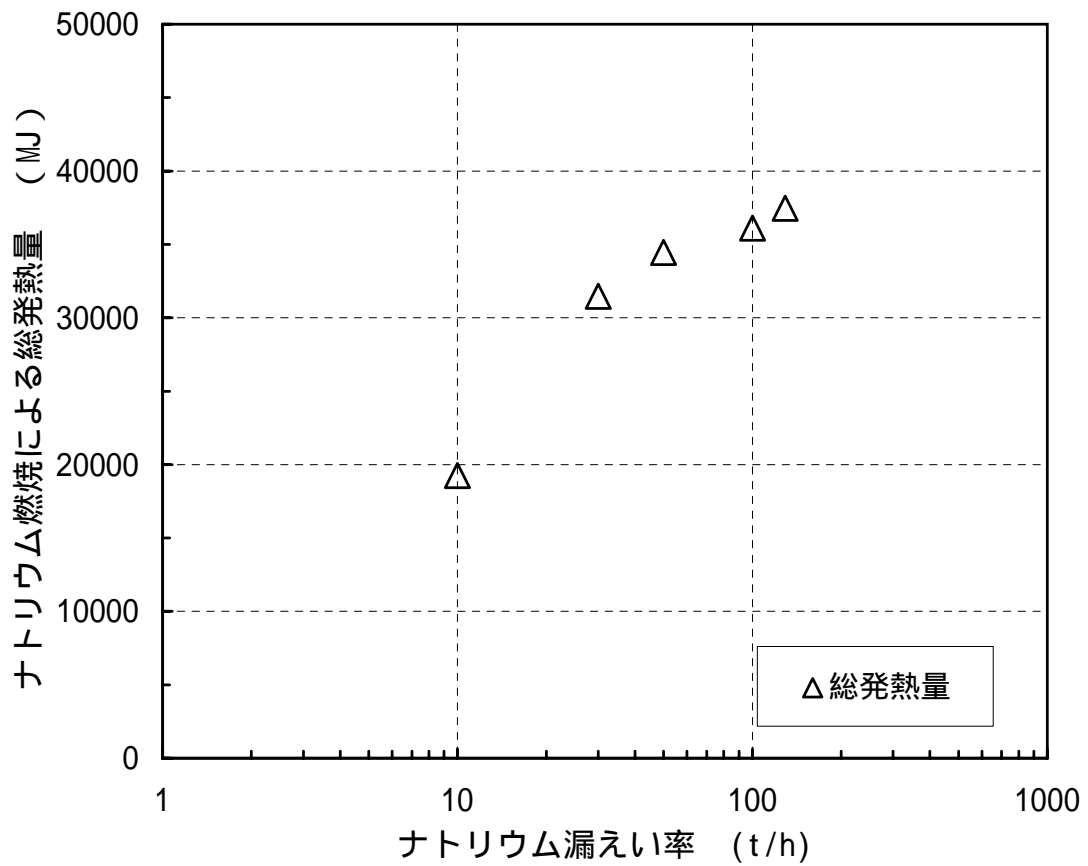


図 3.5-2 2次主冷却系設備 蒸発器室(A438)でのナトリウム漏えい時のナトリウム燃焼による総発熱量(ライナ温度に着目した解析)

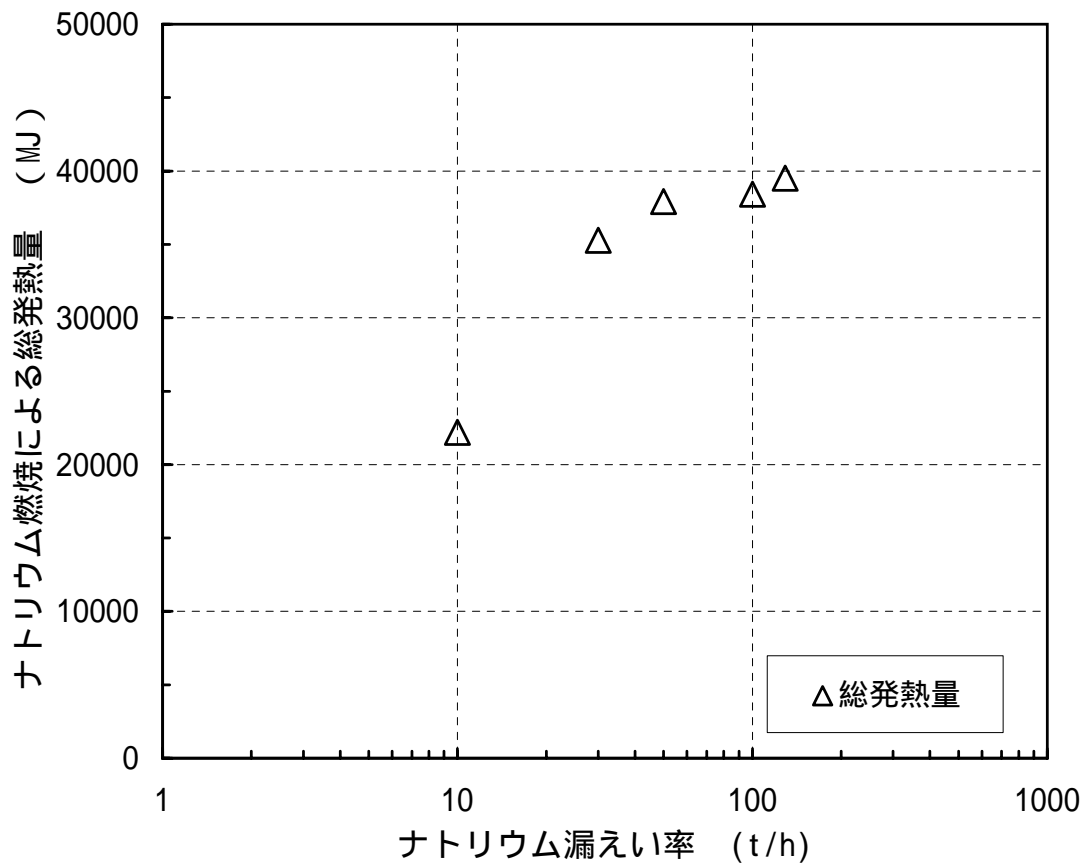


図 3.5-3 2次主冷却系設備 過熱器室(A439)でのナトリウム漏えい時のナトリウム燃焼による総発熱量(ライナ温度に着目した解析)

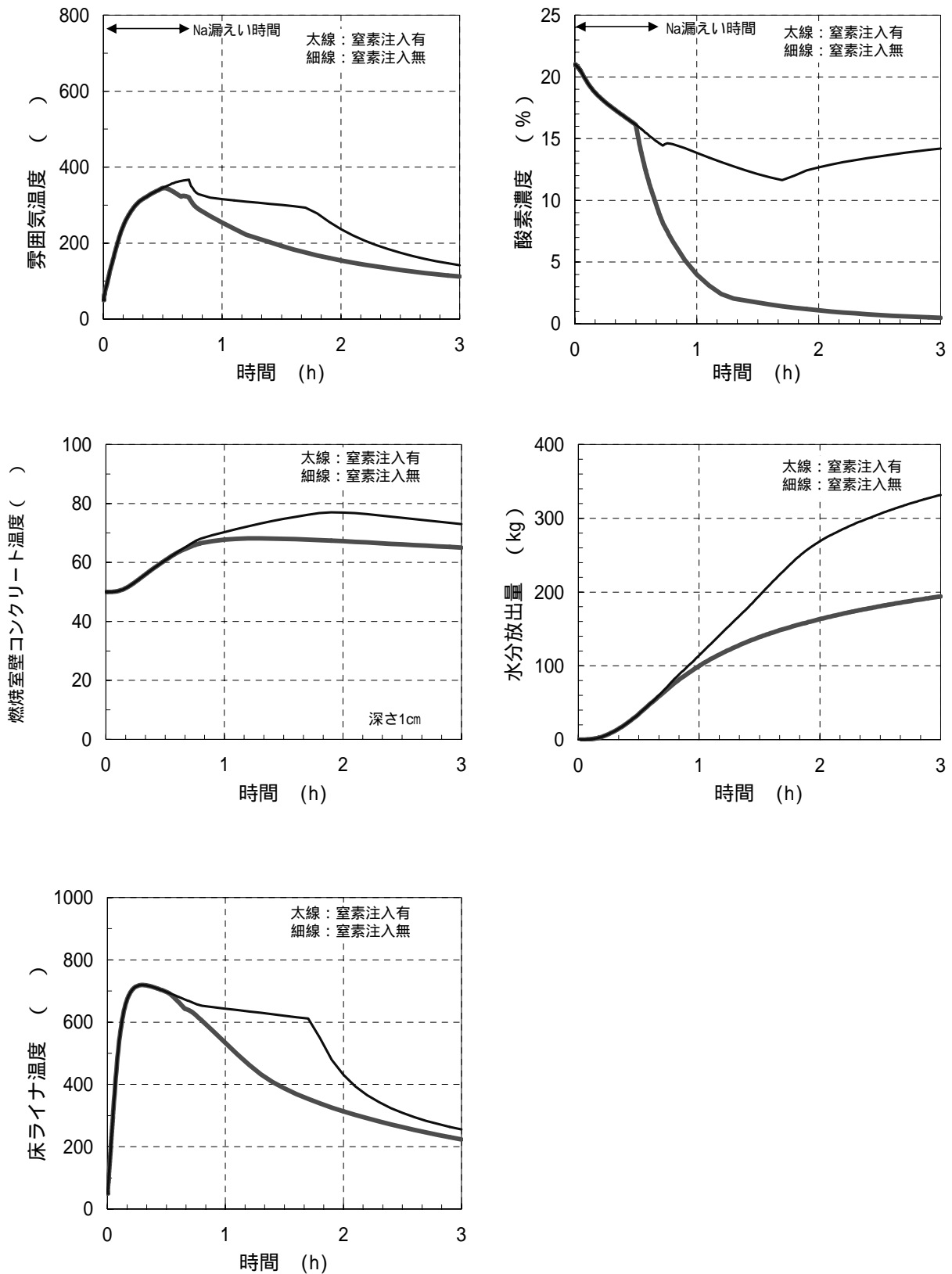


図 3.6-1 配管室 (A446) 3t/hの漏えい時の窒素ガス注入による影響緩和への寄与例 (漏えい開始30分後に注入を開始した場合)