

分置

高速増殖原型炉「もんじゅ」  
詳細設計におけるナトリウム燃焼解析  
(研究報告書)

2004年3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：[jserv@jnc.go.jp](mailto:jserv@jnc.go.jp)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

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

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2008

高速増殖原型炉「もんじゅ」  
詳細設計におけるナトリウム燃焼解析  
(研究報告書)

岡部 綾夫<sup>\*1</sup>, 大貫 康二<sup>\*2</sup>  
菊池 裕彦<sup>\*2</sup>, 内橋 昌也<sup>\*2</sup>  
西林 洋平<sup>\*2</sup>, 池田 真輝典<sup>\*2</sup>  
三宅 収<sup>\*3</sup>

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、詳細設計の妥当性を確認するため、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床ライナ温度及び水素濃度等をまとめたものである。

詳細設計構造を反映したナトリウム燃焼解析の結果、大規模及び中規模のナトリウム漏えい時の配管室の床ライナの温度上昇は、低減されることを確認した。

また、流出・移送過程において、ナトリウムと水分との反応により生成された水素濃度の最高値は、水素燃焼に関する判断基準の4%未満にとどまることが確認された。貯留後のナトリウムプール中におけるナトリウムと水酸化ナトリウムの反応による水素濃度の最高値についても、同様に、判断基準の4%未満にとどまることが確認された。

---

\*1 高速増殖炉もんじゅ建設所 技術課

\*2 高速増殖炉もんじゅ建設所 プラント第二課

\*3 大洗工学センター要素技術開発部 新技術開発試験グループ

March, 2004

Sodium Combustion Analysis  
for the Deatail Design of Prototype Fast Breeder Reactor MONJU

Ayao OKABE <sup>\*1</sup>, Koji OHNUKI <sup>\*2</sup>

Hirohiko KIKUCHI <sup>\*2</sup>, Masaya UCHIHASHI <sup>\*2</sup>

Youhei NISIBAYASHI <sup>\*2</sup>, Makinori IKEDA <sup>\*2</sup>

Osamu MIYAKE<sup>\*3</sup>

Abstract

Sodium combustion analyses were performed using ASSCOPS version 2.1 in order to obtain background data for evaluating validity of the mitigation system against SHTS sodium leak of MONJU. The analytical results of floor temperature and hydrogen concentration were summarized in this report.

In the sodium combustion analyses under the detailed design conditions, it was confirmed that the temperature rise of the floor liner was reduced

In addition, as for the hydrogen concentration in sodium leak process which is formed by the reaction of sodium and moisture, it was confirmed that it is restricted under 4% of the hydrogen burn criterion. In the same way concerning the hydrogen concentration due to the reaction with sodium and sodium hydroxide in the sodium pool after the storing,, it was also confirmed that it is restricted under 4% of the criterion.

---

\*1 Reactor and Systems Engineering Section, Monju Construction Office

\*2 Maintenance Engineering Section, Monju Construction Office

\*3 New Technology Development Group, O-arai Engineering Center

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 2次主冷却系設備の詳細設計におけるナトリウム燃焼解析 .....	2
2. 1 配管室の床ライナ温度評価 .....	2
2. 2 流出・移送過程の水素濃度評価 .....	5
2. 3 貯留後の水素濃度評価 .....	7
3. 結 言 .....	12
謝 辞 .....	13
参考文献 .....	14
付録-1 架構等の重量について .....	35
付録-2 2セルモデルと多セルモデルの比較について .....	36
付録-3 タンク室区画内水素移行解析について .....	47

## 表リスト

表 2.1-1 詳細設計構造等を反映した燃焼解析条件	15
(大規模漏えい：全面にナトリウムが広がる規模の漏えい)	
表 2.1-2 詳細設計構造等を反映した燃焼解析条件	16
(中小規模漏えい：局所にプールを形成する規模の漏えい)	
表 2.2-1 水素濃度評価の解析条件の整理 (1/2)	17
-水素濃度評価に直接的に係わると考えられるデータ-	
表 2.2-1 水素濃度評価の解析条件の整理 (2/2)	18
-水素濃度評価に間接的に係わると考えられるデータ-	
表 2.3-1 漏えい室での燃焼解析にかかわる主要な条件	19
表 2.3-2 漏えい室でのナトリウム燃焼解析結果	19
表 2.3-3 貯留室におけるナトリウム燃焼及び 水素移行挙動の解析条件	20
付表 1 架構の鋼材質量集計	35

## 図リスト

図 2.1-1	床ライナと建物壁のギャップの説明 (A-442)	21
図 2.1-2	局所にプールを形成する規模の漏えいモデル	22
図 2.1-3	2 次主冷却系設備 配管室 (A-446) 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)	23
図 2.1-4	プールの広がり相関と床ライナ温度 (2 次主冷却系配管室 : A-442, A-446)	24
図 2.1-5	2 次主冷却系設備 配管室 (A-446) でのナトリウム漏えい時の 床ライナ温度 (プール面積を一定 : 148m <sup>2</sup> とした場合)	25
図 2.2-1	解析モデルの概要 (2 次主冷却系配管の例)	26
図 2.2-2	ASSCOPS 計算用コンクリート放出水割合データ	27
図 2.2-3	コンクリートからの水分放出量 (2 次主冷却系配管室 A-446 でのナトリウム漏えいの場合)	28
図 2.2-4	酸素濃度 5 %以上での水素濃度最高値 (2 次主冷却系配管室 A-446 でのナトリウム漏えいの場合)	28
図 2.2-5	コンクリートからの水分放出量 (蒸発器室 A-438 でのナトリウム漏えいの場合)	29
図 2.2-6	酸素濃度 5 %以上での水素濃度最高値 (蒸発器室 A-438 でのナトリウム漏えいの場合)	29
図 2.2-7	コンクリートからの水分放出量 (加熱器室 A-439 でのナトリウム漏えいの場合)	30
図 2.2-8	酸素濃度 5 %以上での水素濃度最高値 (2 次主冷却系配管室 A-439 でのナトリウム漏えいの場合)	30
図 2.3-1	貯留室・水素評価モデル	31
図 2.3-2	Dissociation pressure of NaH in equilibrium with Na(l) vs temperature.	32
図 2.3-3	配管室ナトリウム漏えい時の燃焼抑制板下部雰囲気の 水素濃度及び酸素濃度	33
図 2.3-4	配管室ナトリウム漏えい時の燃焼抑制板上部雰囲気の 水素濃度	33
図 2.3-5	過熱器室ナトリウム漏えい時の燃焼抑制板上部雰囲気の 水素濃度	34

付図 2.1-1(1/2) SPHINCS 解析モデル 2セルモデル ..... 39 (Cループ配管室)
付図 2.1-1(2/2) SPHINCS 解析モデル 多セルモデル ..... 40 (Cループ配管室)
付図 2.1-2(1/2) SPHINCS 解析モデル 2セル-多セルモデル ..... 41 (Cループ配管室, 漏えい率 134t/h)
付図 2.1-2(2/2) SPHINCS 解析モデル 2セル-多セルモデル ..... 42 (Cループ配管室, 漏えい率 134t/h)
付図 2.2-1(1/2) SPHINCS 解析モデル 2セルモデル ..... 43 (Cループ過熱器室)
付図 2.2-1(2/2) SPHINCS 解析モデル 多セルモデル ..... 44 (Cループ過熱器室)
付図 2.2-2(1/2) SPHINCS 解析結果 2セルモデル-多セルモデル ..... 45 (Cループ過熱器室, 漏えい率 129t/h)
付図 2.2-2(2/2) SPHINCS 解析結果 2セルモデル-多セルモデル ..... 46 (Cループ過熱器室, 漏えい率 129t/h)
付図 3.2-1 Na 流入量の時間変化 ..... 50
付図 3.2-2 貯留室への NaOH 移行量及び水素発生量の時間変化 ..... 50
付図 3.3-1 SPHINCS コードによる水素移行の解析モデル ..... 51
付図 3.3-2 霧囲気温度変化 ..... 52
付図 3.3-3 水素濃度の時間変化 ..... 52
付図 3.3-4 部屋間の循環流量の整理 ..... 53

## 第1章 緒 言

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]。

改善策に対する設計の妥当性を確認するため、2次主冷却系設備におけるナトリウム漏えい時の床ライナ温度、流出・移送過程の水素濃度及び貯留後の水素濃度を解析した。解析には、ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS version 2.1[2] [3]を使用した。

## 第2章 2次主冷却系設備の詳細設計におけるナトリウム燃焼解析

### 2. 1 配管室の床ライナ温度評価

2次主冷却系配管室（A）(A-442)（以下部屋名の後に付ける（A）、（B）、（C）は、それぞれA、B、Cのループ名を表わす）と2次主冷却系配管室（C）(A-446)は、特に他の2次主冷却系設備を内包する部屋に比べ南北に細長く、東西方向の触れ止めアンカーから床ライナ北端までが長い特徴を持つ（図2.1-1参照）。このため、ナトリウム漏えい時に床ライナ温度が上昇したときに、床ライナが熱膨張して、北側への熱膨張量が大きくなり、建物壁とのギャップが小さくなる。ギャップが無くなり床ライナと建物壁が干渉すると床ライナに外力が加わり、構造健全性に影響を及ぼす可能性がある。このことから、2次ナトリウム漏えい時に床ライナが建物壁と干渉しないことを確認することが必要となる。本床ライナ温度評価は、干渉しないことの確認に用いる床ライナ温度を求めるため、配管室の詳細設計構造を反映した条件で燃焼解析を行ったものである。

#### （1）解析条件

配管室の床ライナ温度に着目した燃焼解析の解析条件を、表2.1-1（大規模漏えい）及び表2.1-2（中規模漏えい）に示す。詳細設計構造を反映した下記の部分を除き、解析条件は参考文献[4]と同じである。

##### （i）大規模漏えいの解析条件（床ライナ全面に広がるナトリウム漏えい）

大規模なナトリウム漏えい（ $10\text{t/h} \sim 134\text{t/h}$ ）時には、漏えいした部屋から連通管のある部屋までナトリウムが広がることからこれらの部屋をまとめて燃焼室と呼んでいる。Cループの配管室では、2次主冷却系配管室（C）(A-446及びA-445)、2次主循環ポンプ配管室（C）(A-440)の3室が燃焼室となる。これらの部屋の床ライナ下の断熱材（パーライトボード）の敷設率は、65%～70%である。同様にAループの配管室の燃焼室は、2次主冷却系配管室（A）(A-442)及び(A-443)、2次主循環ポンプ配管室（A）(A-432)の3室であり、これらの部屋の床ライナ下の断熱材敷設率は、69%～70%である。これに対し、安全側の設定として床ライナ下の断熱材を一律80%と仮定して燃焼解析評価を行う。

また、参考解析として、燃焼室に設置されている配管等の支持架構などの熱容量約30t（積算根拠は付録-1を参照）を考慮した燃焼解析評価を最大漏えい率（ $134\text{t/h}$ ）でCループを対象として行なう。

大規模漏えいの燃焼解析は、Cループを代表として行なうが、Aループではライナ面積が若干小さくライナ温度が高めになることから、最大漏えい率については、Aループの床ライナ温度も解析を行なう。

## (ii) 中規模漏えいの解析条件（局部にプールを形成するナトリウム漏えい）

中規模なナトリウム漏えい（1t/h～5t/h）時には、漏えいナトリウムが局部にプールを形成する。以下のとおり、詳細設計を反映した解析条件を設定している。

- ① 床ライナは、ライナ板とライナフレーム等により構成され、ライナ板は床ライナ下部に設置されているライナフレームにより支持されている。漏えいナトリウムからの入熱は、ライナ板を介してライナフレームにも伝達するため、ライナフレームの熱容量を考慮する。なお、これは全面に広がる漏えいに対しては、参考文献[4]における解析においても考慮している。
- ② 参考文献[4]の温度評価解析においては、床断熱材の敷設率を100%としていた。しかし、A-442及びA-446の実際の敷設割合は65～70%であることから、それらを保守側に包絡する値として80%とする。
- ③ ASSCOPSコードは2セルモデルであり、漏えいが生じた部屋を含む「燃焼室」と同一区画の中の他の部屋からなる「連通室」との2つのセルに区分している。安全審査時の配管室漏えいの解析においては、ナトリウム燃焼が生じる室を特定せず、床ライナが連続する3室<sup>\*)</sup>としていた。本評価においても、全面に広がる規模の漏えいに対しては同じ扱いとする。一方、局部にプールを形成する規模の漏えいにおいては、A-442及びA-446の北端近くで漏えいして床ライナ勾配方向に広がる漏えい形態の場合が熱膨張評価上厳しくなることから、本評価における燃焼解析においては、燃焼室をA-442またはA-446の1室とし、それ以外の室は全て連通室として扱うこととする。

\*1) Aループ:A-442, A-443, A-432 Cループ:A-446, A-445, A-440  
(Cループの場合のそれぞれの室の関係は図2.1-2参照)

- ④ 漏えいナトリウムのプール燃焼面積（A）は、下記のように漏えい率に比例するとしている。

$$A = W(1-f)/R$$

W:漏えい率

f:スプレー燃焼割合

R:プールの広がり相関

プールの広がり相関は、プールの単位面積あたりの燃焼率であり、実験結果から求めたもので、25kg/m<sup>2</sup>hである。プール面積が大きくなつた場合は、酸素濃度が低下し、燃焼率が低下するため、プールの広がり相関をパラメータとして25, 20, 15kg/m<sup>2</sup>hと変えて床ライナ温度の解析を行う。

なお、床ライナと建物壁が干渉しないことを確認するための評価では、細長い帯状（A-442では、3.25m幅の45.5mの帯状）のプールを想定した場合の自由熱膨張が最も熱膨張量が厳しくなることから、漏えい率に係らず、漏えい

ナトリウムのプール燃焼面積を  $148\text{m}^2 (=3.25\text{m} \times 45.5\text{m})$  一定とした場合の解析も実施する。

中規模な漏えいの場合、全体のライナ面積（約  $500\text{m}^2$ ）にくらべ、漏えいナトリウムのプール燃焼面積は最大でも  $150\text{m}^2$  程度と小さく、床ライナ温度のA, Cループでの差はほとんどないため、Cループを代表として解析を行なう。

## (2) 解析結果

参考文献[4]の2次主冷却系配管室（C）(A-446)の床ライナ温度と対比し、詳細設計構造を反映した解析結果を図2.1-3に示す。

大規模漏えいモデル（ $10\sim134\text{t/h}$ ）では、最大漏えい率  $134\text{t/h}$  で、床ライナ温度は  $617^\circ\text{C}$  である。参考に評価した最大漏えい率  $134\text{t/h}$  で架構重量約  $30\text{t}$  の熱容量を考慮した場合、床ライナ温度は、 $585^\circ\text{C}$  である。また、別途解析した結果、2次主冷却系配管室(A)(A-442)の最大漏えい率  $134\text{t/h}$  の床ライナ温度は  $619^\circ\text{C}$  である。

中規模漏えいモデル（ $1\sim5\text{t/h}$ ）の床ライナ温度は、漏えい面積を漏えい率に比例するとした場合、 $1, 3, 5\text{t/h}$  で、それぞれ  $782^\circ\text{C}, 647^\circ\text{C}, 591^\circ\text{C}$  となる。また、漏えいナトリウムのプール燃焼面積を  $148\text{m}^2$  一定とした場合、 $2\text{t/h}$  が最大となり、 $618^\circ\text{C}$  となる。

中規模漏えいモデルで、プールの広がり相関を  $25, 20, 15\text{kg/m}^2\text{h}$  と振った場合のプール面積、プール部温度、非プール部温度を図2.1-4に示す。プール広がり相関が小さくなるにしたがい、プール部の床ライナ温度は、低下する。また、漏えい率が上がるにしたがい、プール部の床ライナ温度は、低下する。逆に、非プール部の床ライナ温度は、逆に、プール広がり相関が小さくなるにしたがい、また漏えい率が上がるにしたがい、上昇する。

また、中規模漏えいモデルで、プール面積を一定（ $148\text{m}^2$ ）にしたまま漏えい率を変えた場合のプール部及び非プール部の床ライナ温度を図2.1-5に示す。プール部の床ライナ温度は、漏えい率  $2\text{t/h}$  で最大値を示すが、非プール部の床ライナ温度は、漏えい率の大きい方が、温度が高くなる傾向を示している。

## 2.2 流出・移送過程の水素濃度評価

コンクリートからの水分放出量が多くなる 10t/h の漏えい率から  $1/4Dt$  相当の破損規模の漏えい率を対象として、コンクリートからの水分放出量とナトリウムとの反応により発生する流出・移送過程（燃焼室）の水素濃度の評価をナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS ver.2.1 を用いて実施した。

### (i) 評価条件

漏えいナトリウムは、スプレイ状（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）するものと考える。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 2.2-1 参照）。

なお、2 セルモデルによるモデル化の保守性を付録-2 に示す。

流出・移送過程（燃焼室）の水素濃度の評価に関する主要な解析条件を以下に示す。また、これらの解析条件を表 2.2-1 にまとめて示す。ナトリウム燃焼解析に関する共通解析条件は、JNC TN2400 2003-002 “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(II)” [4]に示したとおりである。参考文献[4]と異なるのは、架構の熱容量を考慮したケースを基準としている点である。

#### (a) 漏えい発生箇所

想定する漏えい発生室は、次の三つの部屋を代表室とした。

- ・ 2 次主冷却系配管室 (C) (A-446)
- ・ 蒸発器室 (C) (A-438)
- ・ 過熱器室 (C) (A-439)

#### (b) ナトリウムと水分との反応及び水素の再結合

- ①水分としては、雰囲気中の湿分 (3 wt.%) と、コンクリートの温度上昇によりコンクリートから放出される水分を考慮する。
- ②水分放出量を多めに算出するように設定したコンクリート温度と、水分放出率の相関（図 2.2-2 に示す）を使用する。
- ③発生した水素は、酸素濃度が 5 %以上の場合に、生成水素の 90%が再結合するとする。
- ④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が設置されており、これら架構等の熱容量を考慮する。架構の重量は、30 t とする（付録-1 参照）。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。

#### (c) 断熱材解析データ

##### ①断熱材敷設率

コンクリートからの水分放出量を多めに評価する観点から、床、壁・天井の断熱材の敷設割合の下限値を使用する。

②断熱材厚さ、材質

- (ア) 壁・天井 : 12.5mm (セラミックファイバーブランケット)
- (イ) 床 : 25mm (パーライトボード)

(ii)評価結果

2次主冷却系配管室（C）(A-446), 蒸発器室（A-438）及び過熱器室（A-439）でのナトリウム漏えいについて、ナトリウム漏えい率をパラメータとした場合のコンクリートからの水分放出量及び水素濃度の解析結果を図2.2-3～図2.2-8に示す。

2次主冷却系配管室（A-446）、蒸発器室（A-438）及び過熱器室（A-439）でのナトリウム漏えい時のコンクリートからの水分放出量の最大値（漏えいナトリウムの床ライナ上から貯留室への排出完了時までの積算量）は、それぞれ約970kg（ナトリウム漏えい率50t/h）、約510kg（ナトリウム漏えい率30t/h）及び約910kg（ナトリウム漏えい率30t/h）となった。

また、2次主冷却系配管室（A-446）、蒸発器室（A-438）及び過熱器室（A-439）でのナトリウム漏えい時の水素濃度の最高値（酸素濃度5%以上での水素濃度最高値）は、それぞれ約1.2%（ナトリウム漏えい率50t/h）、約0.9%（ナトリウム漏えい率129t/h）及び約1%（ナトリウム漏えい率129t/h）となった。

以上の解析結果から、2次主冷却系配管室、蒸発器室及び過熱器室でのナトリウム漏えい時の流出・移送過程（燃焼室）の水素濃度最高値はいずれも2%未満であり、水素燃焼に関する判断基準<sup>\*1</sup>の4%未満にとどまる。

\*1 雰囲気中の酸素又は水素の濃度のいずれかが、それれ5%又は4%以下であること。

（出典：「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針  
解説 付録I 3.4.2 可燃性ガスの発生」）

### 2.3 貯留後の水素濃度の評価

2次主冷却系配管室（A-446）、過熱器室（A-439）あるいは蒸発器室（A-438）等の2次主冷却系区画で漏えいが発生した場合、流出・移送過程で生成されたNaOHがナトリウムに混入してタンク室区画の貯留室へ流入することが考えられる。このNaOHが、ナトリウムと反応すると水素が発生する。

ここでは、詳細設計を反映したヒートシンク材の材質、質量等の仕様に基づき、貯留室のナトリウム温度の解析を行い、貯留室のプール中ナトリウムとNaOHとの反応により水素が発生した場合のタンク室区画の水素濃度の評価を、ナトリウム燃焼解析コードASSCOPS ver.2.1を用いて実施した。

#### (i) 評価条件

漏えい室での燃焼解析にかかる主要な条件を表2.3-1に、また、貯留後の水素濃度の解析条件となる漏えい室でのナトリウム燃焼解析の主要な結果を表2.3-2に示す。貯留室におけるナトリウム燃焼及び水素移行挙動の解析条件を表2.3-3に示す。また、貯留後の水素濃度の解析に関する主要な解析条件及び解析モデルについて以下に示す。

##### (a) 漏えい箇所

想定する漏えい発生室は、次の部屋を代表室とした。

- ・ 2次主冷却系配管室（C）（A-446）
- ・ 過熱器室（C）（A-439）
- ・ 蒸発器室（C）（A-438）

##### (b) 断熱材敷設率

###### ①貯留室への流入NaOH量設定用のナトリウム燃焼解析

貯留室へ流入するNaOH量を大きめに評価するため、流出・移送過程におけるナトリウム燃焼解析において、断熱材敷設率の下限値を使用するものとした。

###### ②貯留室への流入ナトリウム温度設定用のナトリウム燃焼解析

貯留室へ流入するナトリウム温度及びプール温度を高めに評価するため、流出・移送過程におけるナトリウム燃焼解析において、燃焼室の床ライナ下部の断熱材敷設率は、大きめに80%とした。壁・天井の断熱材については保守的に最大の100%とした。

なお、貯留室の断熱材の敷設率は、床及び壁・天井共に100%とした。

##### (c) ヒートシンク材の熱容量

ヒートシンク材として貯留室にアルミナ球60tを敷設するものとした。

#### (d) 貯留後の水素濃度の解析モデル

貯留後の水素濃度の解析モデルを図 2.3-1 示す。

貯留後の水素濃度を評価するために、流出・移送過程（燃焼室）でのナトリウム燃焼解析の結果から得られる貯留室へ流入する NaOH とナトリウムの量及び温度条件を境界条件として、貯留室のナトリウムプール温度及び燃焼抑制板下部の雰囲気中の水素濃度を評価する。これに基づき ASSCOPS コードの対流通気モデルにより、水素濃度の移行を計算して燃焼抑制板上部雰囲気（連通室）の水素濃度を評価する。

配管室（A-446）漏えい時には、貯留室へ流入する NaOH の量が多いが、貯留室のプール温度が比較的低いことから、事象に沿って水素の移行解析を実施するものとした。過熱器室（A-439）及び蒸発器室（A-438）漏えい時には、貯留室に流入する NaOH の量が少ないと、貯留室のプール温度が比較的高くなり、燃焼抑制板下部雰囲気の水素濃度が高くなるため、貯留室へ流入した NaOH が全量水素に変換するものとして評価した。

なお、過熱器室（A-439）漏えい時については、配管室（A-446）漏えい時と同様に、水素の移行解析も実施するものとした。

##### ①貯留室への NaOH 流入量の設定

燃焼室における ASSCOPS の流出・移送過程のナトリウム燃焼解析結果から、貯留室へ流入する NaOH の量を設定する。

貯留室へ流入するナトリウム及び NaOH の量は、ポンプトリップ及び 2 次主冷却系内のナトリウムのドレンによるナトリウム漏えい率の時間変化を考慮した燃焼室のナトリウム燃焼解析結果に基づき設定する。

##### ②貯留室ナトリウムプール中からの水素の発生、移行モデル

ナトリウムプール面上の雰囲気（燃焼抑制板下部の雰囲気）の水素濃度は、プール温度で規定される平衡状態の水素濃度に常に等しく維持されるものとする。貯留室の燃焼抑制板下部雰囲気における水素の分圧は、貯留室のプール温度に対応する下式の平衡状態の水素分圧から決定されたものとした（図 2.3-2 参照）。

$$\log_{10} P_{H2} = 11.6 - \left( \frac{6100}{T_{pool} + 273.15} \right) \quad \dots(1)$$

ここで、

$P_{H_2}$  : Naプール中と平衡状態の水素分圧(Torr)

$T_{pool}$  : プール温度(°C)

(注) 760Torr = 1 気圧

### ③貯留室の燃焼抑制板上部の水素濃度の評価

貯留室のナトリウムプール中に存在する水素と雰囲気中（燃焼抑制板下部）の水素が濃度平衡の状態にあると仮定し、燃焼抑制板下部の雰囲気中の水素が、燃焼抑制板の開口部を通して、対流通気により燃焼抑制板上部の貯留室及びタンク室区画雰囲気中に移行するものとする。

#### (ii) 評価結果

##### ①燃焼抑制板下部の水素濃度

配管室（A-446）漏えい時には、貯留室のナトリウムプール温度が徐々に上昇することから、水素濃度は、図2.3-3に示すように約30分後に最高で約3%に達する。しかし、酸素濃度が5%を下回る約10分後では、約0.1%未満（水素の再結合を考慮しない場合）にとどまる。同様に、過熱器室（A-439）漏えい時及び蒸発器室（A-438）漏えい時には、酸素濃度が5%を下回る時点の水素濃度は、それぞれ約0.5%及び約1%にとどまる（水素の再結合を考慮しない場合）。なお、燃焼抑制板下部ではプール燃焼が生じているため火点があり、発生した水素の約90%は再結合すると考えられるため、再結合を考慮した場合には、水素濃度はこれらの値から約1桁低下するものと考えられる。

以上から、燃焼抑制板下部雰囲気では、いずれのケースにおいても水素濃度が判断基準を上回ることはない。

##### ②燃焼抑制板上部の水素濃度

###### (ア) 配管室（A-446）漏えい

配管室（A-446）からのナトリウム漏えい時については、燃焼抑制板下部雰囲気から燃焼抑制板上部雰囲気（連通室）への水素の移行解析を実施した。

貯留室のナトリウムプール最高温度及び燃焼抑制板上部雰囲気水素濃度を下表に示す。また、配管室（A-446）ナトリウム漏えい時の燃焼抑制上部雰囲気の水素濃度を図2.3-4に示す。

水素移行解析の結果、図2.3-4に示すとおり、配管室漏えい時の燃焼抑制板上部の水素濃度は約0.2%にとどまる。したがって、燃焼抑制板上部の雰囲気でも水素燃焼が生じることはない。

漏えい場所	流入 NaOH 量 (kg)	貯留室のナトリウムプール最高温度 (°C)	燃焼抑制板上部 雰囲気水素濃度 (%)
配管室 (A-446)	約 1500	約 320	約 0.2

(イ) 過熱器室 (A-439) 及び蒸発器室 (A-438) 漏えい

過熱器室 (A-439) 及び蒸発器室 (A-438) 漏えい時の貯留室への流入 NaOH の量、貯留室のナトリウムプール最高温度及び燃焼抑制板上部雰囲気の水素濃度を次表に示す。

漏えい場所	流入 NaOH 量 (kg)	貯留室のナトリウムプール最高温度 (°C)	燃焼抑制板上部 雰囲気水素濃度 <sup>*1</sup> (%)
過熱器室 (A-439)	約 220	約 410	約 2.6
蒸発器室 (A-438)	約 60	約 430	約 0.7

\*1 貯留室に流入した NaOH 全量が水素に変換し、燃焼抑制板上部雰囲気～移行したと仮定した場合の水素濃度

過熱器室 (A-439) 及び蒸発器室 (A-438) 漏えい時には、貯留室へ流入する NaOH 量がそれぞれ約 220kg 及び約 60kg と少ないので、NaOH の全量が水素に変化し、燃焼抑制板上部雰囲気に移行するとしても、水素濃度はそれぞれ約 2.6% 及び約 0.7% にとどまる。また、発生した水素はタンク室区画内で十分に混合しており、タンク室区画内の部屋間で大きな濃度差がつくことはないことが確認されている（付録-3 参照）。

なお、過熱器室 (A-439) からの漏えいについて、配管室 (A-446) からの漏えいの場合と同様に、事象に沿って水素の移行解析を実施した場合には、燃焼抑制板上部雰囲気の水素濃度の最高値は、次表及び図 2.3-5 に示すとおり約 1.5% にとどまる。

漏えい場所	流入 NaOH 量 (kg)	貯留室のナトリウムプール最高温度 (°C)	燃焼抑制板上部 雰囲気水素濃度 (%)
過熱器室 (A-439)	約 220	約 410	約 1.5

以上から、2次主冷却系からのナトリウム漏えい時に、貯留室におけるナトリウムとNaOHの反応によって水素が発生することを考慮しても、雰囲気中の酸素濃度5%以下又は水素濃度4%以下であることとする判断基準を満足することが確認された。

### 第3章 結 言

ナトリウム漏えい対策の詳細設計の妥当性を評価するため、詳細設計構造を反映したナトリウム燃焼解析を実施し、2次主冷却系設備におけるナトリウム漏えい時の床ライナ温度、流出・移送過程の水素濃度及び貯留後の水素濃度を求めた。

ナトリウム燃焼による熱的影響によって、床ライナが熱膨張し、建物壁とのギャップが小さくなる。特に配管室は、南北に細長い形状であり、北側の壁とのギャップが小さくなる。解析の結果、詳細設計構造を反映することにより参考文献[4]の解析結果に比べ床ライナ温度が低減され、床ライナは壁と干渉することがないことを確認した。

建物壁コンクリート等から放出された水分等により水素が生成される。詳細設計段階における壁等の断熱材の敷設状況等を踏まえて、流出・移送過程における燃焼室の水素濃度の評価を行った結果、水素濃度が最大となる配管室の漏えいの場合においても、その濃度は2%未満（酸素濃度5%以上において）にとどまり、水素燃焼に関する判断基準の4%を下回ることを確認した。

タンク室区画の貯留室に移送・貯留された漏えいナトリウムプール中におけるナトリウムとNaOHの反応により水素が生成される。貯留室のヒートシンク材の敷設状況を踏まえて、タンク室区画における水素の移行解析に基づき水素濃度を評価した結果、その最大値は過熱器室漏えい時において約1.5%（酸素濃度5%以上において）である。また、この時、貯留室へ流入したNaOHの全量が水素に変化するとした場合でも、水素濃度は約2.6%（酸素濃度5%以上において）にとどまり、水素燃焼に関する判断基準の4%を下回ることを確認した。

以上のように、詳細設計段階における構造を反映して、ナトリウム燃焼解析を実施した結果、ナトリウム漏えい時の熱的影響の緩和を適切に図る設計であり、原子炉施設の安全性が一層向上するものであることを確認した。

## 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]岡部、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（II）， JNC TN2400 2003-002 (2003)

表2.1-1 詳細設計構造等を反映した燃焼解析条件（大規模漏えい：全面にナトリウムが広がる規模の漏えい）

詳細設計構造等を反映した解析条件	参考文献 [4] (JNC TN2400 2003-002)	設定根拠又は考え方
漏えいナトリウム温度	507 °C	同左
部屋の初期酸素濃度	21 %	同左
部屋の初期温度	3 wt. %	同左
漏えい場所	A446 Cグループ 2次主冷却系配管室 (ホットレグ配管)	同左
漏えい高さ	4.5 m	同左
燃焼室	A446+A445+A440	同左
連通室	3階：全ての部屋 A338, A339, A340, A341 4階：A438, A439 5階：全ての部屋 A538, A539, A540	同左
部屋の空間容積	燃焼室：3248 m <sup>3</sup> 連通室：5088 m <sup>3</sup>	同左
部屋の初期温度	燃焼室：50 °C 連通室：55 °C	同左
ブル燃焼面積	燃焼室：501 m <sup>2</sup> (厚さ 1cm) 連通室：ブルなし	同左
ナトリウム漏えい率	パラメータ 最小：10 t/h一定 最大：134 t/h 一定 (破損開口面積 1/40t相当) (15cm <sup>2</sup> 相当)	同左
漏えい継続時間	134t/h：1900秒 50t/h：2200秒 30t/h：2400秒 10t/h：2600秒	同左
停止時刻	漏えい開始から 2 分後	同左
建物通気率 (ダンバを介した通気を除く)	換気中区画全体： 32800m <sup>3</sup> /h at 1kPa 停止後区画全体： 60000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa	同左
圧力逃がしライン 逆止ダンバを介した通気率	差圧0.15kPaで全開・全閉 0.15kPa以下で全閉時 区画全体： 8000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa 0.15kPa以上で全開時 区画全体： 30000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa	同左
圧力開放ダンバ設定差圧	差圧 3 kPa で全開・全閉	同左
圧力開放ダンバを介した 区画外との通気率	3 kPa で開時 区画全体： 333000 m <sup>3</sup> /h at 1 kPa	同左
断熱材の取り扱い	床：断熱材敷設率80% 壁・天井：断熱材全面	床：全面に敷設 壁・天井：全面に敷設
ライナフレームの熱容量	ライナの密度として考慮	同左
(架構の熱容量) <sup>注3</sup>	(架構の熱容量を考慮)	考慮せず

注1) 開口とは、部屋間の通路、排気口、機器据付の隙間等を指す。

注2) 区画を貫通する配管、ダクト、ケーブルトレイ、電線管、扉、ハッチについて気密処理を実施。

温度上昇を保守的に評価する観点から、気密処理対策の効果を小さめに考慮して、各々の通気率を積算した値。

注3) 参照として架構の熱容量を考慮したケースも解析

表2.1-2 詳細設計構造等を反映した燃焼解析条件（中小規模漏えい：局所にプールを形成する規模の漏えい）

詳細設計構造等を反映した解析条件	参考文献 [4] (JNC TN2400 2003-002)	設定根拠又は考え方	
漏えいナトリウム温度	507 °C	同左	ホットレグ配管のナトリウム温度 505°C [定格値] に熱出力校正誤差を考慮した値を設定。
部屋の初期酸素濃度	21 %	同左	外気と同じに設定。
部屋の初期湿度	3 wt. %	同左	気象測定データを参考として温度35°C及び相対湿度80%での重量濃度2.8wt.%を保守的に3wt.%として設定。
漏えい場所	A446 ○ループ 2次主冷却系配管室 (ホットレグ配管)	同左	ライナの熱膨張が最も大きくなる配管室を対象室とし、そこでの漏えいを代表事象とする。
漏えい高さ	4.5 m	同左	漏えい高さは、配管保温材頂部から床ライナまでの距離。
燃焼室	A446	A446+A445+A440	配管室での局所にプールを形成する規模の漏えい時にスプレー燃焼及びプール燃焼が生じる部屋。配管室内にナトリウムプールを形成する規模の漏えいを対象とするためA-446のみを燃焼室として、実際に壁で仕切られたA-445,A-440を分離し、連通室とした。
連通室	3階：全ての部屋 A338, A339, A340, A341 4階：A438, A439, A445, A440 5階：全ての部屋 A538, A539, A540	3階：全ての部屋 A338, A339, A340, A341 4階：A438, A439 5階：全ての部屋 A538, A539, A540	燃焼室に開口 <sup>注1)</sup> でつながる同一区画内の部屋 ナトリウムプールを形成しないA-445, A-440は連通室とした。
部屋の空間容積	燃焼室：2168 m <sup>3</sup> 連通室：6168 m <sup>3</sup>	燃焼室：3248 m <sup>3</sup> 連通室：5088 m <sup>3</sup>	空間容積 = (建物容積) - (機器・配管等の容積) とする。 A-445, A-440を適正值とした。
部屋の初期温度	燃焼室：50 °C 連通室：55 °C	同左	各部屋への給気温度、各部屋での機器等からの放散熱量を考慮し、解析の対象とする部屋の温度について容積平均し、数値を丸めた値を設定。
プール燃焼面積	1t/h~5t/h	パラメータ	局所にプールを形成する漏えいのうち、比較的大きな面積に広がる規模の漏えいの床ライナの熱膨張を検討するため、1t/h~5t/hの漏えい率について解析を行なう。
漏えい継続時間	2600秒	同左	系統内のナトリウムを緊急にドレンすることを考慮して設定。緊急ドレン開始10分+ドレン時間25分の計43分を想定。
プール燃焼面積	W (1-f) / R W:漏えい率 f:スプレー燃焼割合 R:プールの広がり相関 (=25kg/m <sup>2</sup> h)	同左	燃焼実験Ⅰと燃焼実験Ⅱの解析で使用した相関。
換気空調系の停止時刻	漏えい開始から2分後	同左	セルモニタの検出遅れを考慮し、漏えい開始後2分とした。
建物通気率 (ダンバを介した通気を除く)	換気中区画全体： 32800m <sup>3</sup> /h at 1kPa 停止後区画全体： 60000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa	同左	区画外への貫通部の通気率として大きめに設定した値(建物通気率 <sup>注2)</sup> の1.5倍)とする。
圧力逃がしライン 逆止ダンバを介した通気率	差圧0.15kPaで全開・全閉 0.15kPa以下で全閉時 区画全体： 8000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa 0.15kPa以上で全開時 区画全体： 30000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa	同左	温度上昇を厳しく評価する観点から、以下のように設定。 ・逆止ダンバの作動設定差圧は0.15kPaで開き始め、0.5kPaで全閉となるように設計するため、0.15kPaを超えると瞬時全閉とする。 ・通気率として大きめに設定した値(設計値の1.25倍)とする。
圧力開放ダンバ設定差圧	差圧3kPaで全開・全閉	同左	作動設定差圧は3kPaを上まわらない設計とするため、3kPaを超えると瞬時全閉とする。
圧力開放ダンバを介した 区画外との通気率	3kPaで開時 区画全体： 333000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa	同左	温度上昇を厳しく評価する観点から、大きめに設定した値(設計値の1.25倍)とする。
断熱材の取り扱い	床：断熱材敷設率80% 壁・天井：断熱材全面	床：全面に敷設 壁・天井：全面に敷設	ライナの詳細設計構造を反映した温度上昇を評価する観点から床ライナ下の床断熱材敷設率を設定。断熱材の敷設割合を大きめに設定し、80%の敷設率とする。 参考文献では基本設計段階の評価のため、保守的に全面敷設としている。
ライナフレームの熱容量	ライナの密度として考慮	考慮せず	複数ライナフレートにまたがる領域に広がる規模の漏えい(1~5t/h)では、ライナフレートだけでなく、ライナフレームにも熱が伝わるために、フレームの熱容量を考慮する。 参考文献ではこれより小規模(1t/h未満)の漏えいでライナフレートのみにナトリウムが漏えいする場合の温度上昇を評価するためライナのみの熱容量としている。

注1) 開口とは、部屋間の通路、排気口、機器据付の隙間等を指す。

注2) 区画を貫通する配管、ダクト、ケーブルトレイ、電線管、扉、ハッチについて気密処理を実施。

温度上昇を保守的に評価する観点から、気密処理対策の効果を小さめに考慮して、各々の通気率を積算した値。

表2.2-1 水素濃度評価の解析条件の整理（1／2）－水素濃度評価に直接的に係わると考えられるデータ（注1）

解析条件項目	内 容	備考
部屋の初期湿度	3 wt. % (相対湿度80% at 35°Cを包絡)	気象測定データを参考として温度35°C及び相対湿度80%での重量濃度2.8wt. %を保守的に3wt. %として設定。
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	水分放出量を多めに解析するよう設定
ナトリウムと水分の反応	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$ (スプレイとプールに共通)	文献 (Na過剰条件での反応) 化学熱力学的検討
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 (スプレイとプールに共通)	水素の燃焼限界に関する知見より設定。 燃焼実験Ⅱに関する感度解析を参考。
エアロゾルと水分の反応	反応速度係数* 1.0E-10 mol-H <sub>2</sub> O/個/s 反応式は $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ * 反応速度係数とは、ここでは、 $4\pi \times (\text{エアロゾル粒子の半径}) \times (\text{水蒸気拡散係数}) \times (\text{雰囲気ガス密度})$ をいう。	浮遊するナトリウム酸化物エアロゾル ( $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) と水分の反応については、水和物 ( $\text{NaOH}$ ・ $\text{H}_2\text{O}$ 等) は高温では生成されにくいとの知見があることから、酸化物エアロゾル：水分 = 1 : 1 のモル比で反応することとし、水素の再結合割合を90%にした。
エアロゾル発生割合	スプレイ：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	既往実験研究
エアロゾル落下高さ	部屋高さの半分	エアロゾル粒子が空間に均一分布すると考えた場合の、粒子の落下距離の平均値
エアロゾル密度	2130 kg/m <sup>3</sup>	エアロゾルの主成分であるNaOHの物性
エアロゾル粒径	1.0E-5 m	粒径測定結果を参考
区画外との通気率 m <sup>3</sup> /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  換気中： 区画全体272000 停止後： 区画全体4000	区画外への貫通部の通気率として小さめに設定した値 (建物通気率の1/1.5倍) とする。
ダンパを介した区画外との通気率 m <sup>3</sup> /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	通気率として小さめに設定した値 (設計値の0.75倍) とする。
断熱材敷設割合	床・壁・天井敷設割合を小さめに設定	コンクリートからの放出水量を多めに評価するよう下限値を用いて評価する。
断熱材寸法	壁・天井断熱材厚さ 12.5mm (セラミックファイバーブランケット) 床断熱材厚さ 25mm (パーライトボード)	詳細設計に基づく
断熱材物性値	温度依存性を考慮	メーカカタログ値 (一部JNCにてデータ採取)
架構の熱容量	30 t 考慮	実際の架構等*1総重量約35 t に余裕をみた30 t を考慮 *1点検用歩廊、配管等のサポート用の鋼製の支持架構

(注1) 本表は、配管室漏えい時の水素濃度評価に着目したデータを整理したものである。

表2.2-1 水素濃度評価の解析条件の整理（2／2）  
—水素濃度評価に間接的に係わると考えられるデータ<sup>(注1)</sup>—

解析条件項目	内 容	備考
部屋容積	配管室漏えい : 燃焼室3248m <sup>3</sup> 連通室5088m <sup>3</sup>	燃焼室：大漏えい時にスプレイ燃焼及びプール燃焼が生じる部屋 連通室：燃焼室に開口 <sup>*1</sup> でつながる同一区内の部屋 (* <sup>1</sup> : 開口とは、部屋間の通路、排気口、機器据付の隙間等を指す)
ナトリウム漏えい率	10t/h～1/4Dt相当漏えい率	ナトリウム漏えい率は、雰囲気温度の上昇が大きく、床コンクリート全面が加熱される場合にコンクリートからの水分放出量が多くなることから10t/h以上としている。
漏えい継続時間	1900～2600s (漏えい率依存)	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
漏えい温度	507°C	ホットレグ配管のナトリウム温度 505°C [定格値] に熱出力校正誤差を考慮した値を設定。
漏えい形態	頂部直径 2m 広がり角度 20度 質量平均液滴径 4.6mm 漏えい高さ 4.5m	頂部直径、広がり角度、高さは想定される漏えい燃焼領域を包絡するよう設定 平均液滴径は既往実験研究による 配管保温材頂部から床ライナまでの距離
プール燃焼面積	燃焼室:501 m <sup>2</sup> (厚さ1cm) 連通室：プールなし	床ライナ全面に広がる漏えい規模を対象としているため、ライナ床面積とする。
初期温度	配管室漏えい : 燃焼室50°C 連通室55°C	各部屋への給気温度、各部屋での機器等からの放散熱量を考慮し、解析の対象とする部屋の温度について容積平均し、数値を丸めた値を設定。
初期酸素濃度	21.0 %	外気と同じに設定。
換気空調系	漏えい開始2分後に停止	ナトリウム漏えいの検知に要する時間に基づいて設定
Naと酸素の反応	4Na + O <sub>2</sub> = 2Na <sub>2</sub> O 2Na + O <sub>2</sub> = Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ここで、Na <sub>2</sub> O : Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 : 40 (酸素10%以上) = 100 : 0 (酸素10%未満)	既往実験研究 化学熱力学的検討
プールからガスへの輻射伝熱係数	0.65	既往実験研究 プール燃焼実験の解析
ガスから壁等への輻射伝熱係数	0.9	コンクリート輻射率=0.94 (便覧値) 塗料(白) 輻射率=0.7~0.9 (便覧値)

(注1) 本表は、配管室漏えい時の水素濃度評価に着目したデータを整理したものである。

表 2.3-1 漏えい室での燃焼解析にかかる主要な条件

漏えい室	漏えい位置 配管口径	漏えい口の 大きさ	初期 Na 漏えい 率, 漏えい温度	漏えい 高さ (m)	燃焼室 容積 (m <sup>3</sup> )	燃焼室 床面積 (m <sup>2</sup> )
配管室	ホットレグ配管 22B	1/4Dt (15cm <sup>2</sup> )	134 t/h, 507°C	4.5	3248	501
過熱器室	ホットレグ配管 22B	1/4Dt (15cm <sup>2</sup> )	129 t/h, 507°C	5.5	691	99
蒸発器室	ホットレグ配管 22B	1/4Dt (15cm <sup>2</sup> )	129 t/h, 507°C	5.2	352	46

表 2.3-2 漏えい室でのナトリウム燃焼解析結果

漏えい室	貯留室への 流入 Na 量 (t) (注)	貯留室への 流入 Na 平均 温度(°C)	貯留室への 流入 Na の 熱負荷(kJ)
配管室	約 54	約 550	約 $4.1 \times 10^7$
過熱器室	約 49	約 750	約 $5.0 \times 10^7$
蒸発器室	約 49	約 800	約 $5.2 \times 10^7$

(注)貯留室への流入ナトリウム量には、NaOH の質量も含む。

なお、解析では上記データの経時変化を考慮して、貯留室のプール  
温度解析及び水素移行解析を行う。

表2.3-3 貯留室におけるナトリウム燃焼及び水素移行挙動の解析条件

解析条件		設定根拠又は考え方
燃焼室	A134室の燃焼抑制板の下部領域	プール燃焼が生じる部屋。 漏えいナトリウムは、連通管により燃焼抑制板下部領域へ流入する。
連通室	(A134室の燃焼抑制板の上部領域+A135室+A236室+A237室+A238室)	燃焼室に開口でつながる同一区画内の部屋
部屋の空間容積	燃焼室 : 195 m <sup>3</sup> 連通室 : 2869 m <sup>3</sup>	空間容積 = (建物容積) - (タンク・機器・配管等の容積)とする。 ナトリウム燃焼量を厳しく評価するため、燃焼室の空間容積は、ナトリウム等の流入前の自由空間容積とする。
部屋の初期温度	燃焼室 : 45 °C 連通室 : 55 °C	各部屋への給気温度、各部屋での機器等からの放散熱量を考慮し、解析の対象とする部屋の温度について容積平均し、数値を丸めた値を設定。
プール燃焼面積	燃焼室: 122 m <sup>2</sup> 連通室 : プールなし	ライナ床面積とする。
換気空調設備停止時刻	漏えい発生の2分後に停止	ナトリウム燃焼量を厳しく評価する観点から、漏えい検出時間2分の後に空調停止とする。
建物通気率	区画全体 : 換気中 200000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa 換気停止 40000 m <sup>3</sup> /h at 1kPa	ナトリウムプール温度を高めに評価するため通気率として大きめに設定した値（建物通気率の1.5倍）とする。  なお、換気中の建物通気率には、解析モデル上、給気に見合った排気を考慮している。
燃焼抑制板の開口の取り扱い	開口面積 0.8 m <sup>2</sup>	燃焼抑制板相互のギャップ及び燃焼抑制板とタンクの接合部などの開口面積に余裕を見て大きめに設定。
ヒートシンク材質量	60 t	ヒートシンク材としてアルミナ球60tの熱容量を考慮する。
貯留室床断熱材	床、壁・天井全面敷設	ナトリウムプール温度を高めに評価するため、保守的に想定

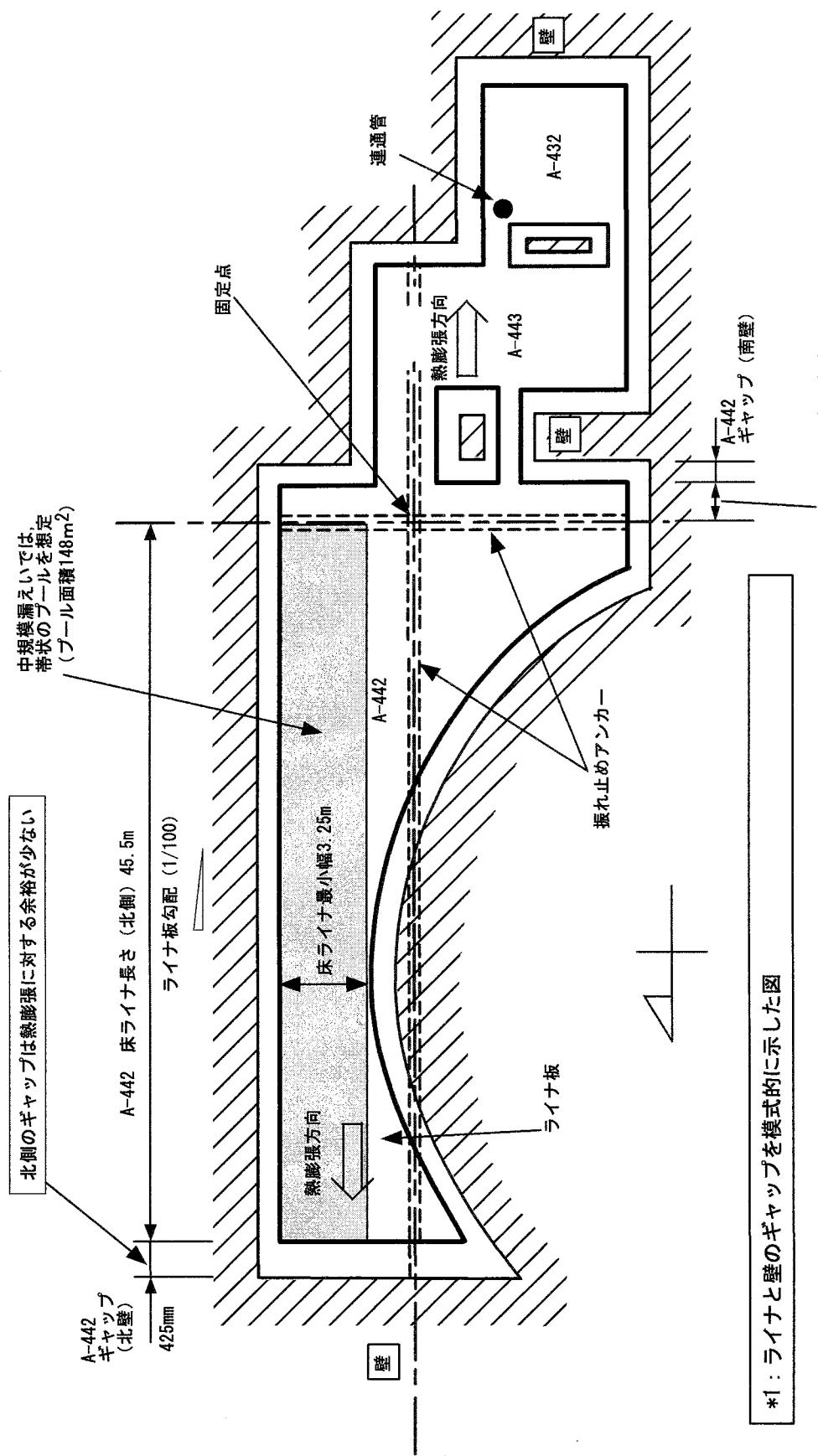


図2.1-1 床ライナと建物壁のギヤップの説明(A-442)

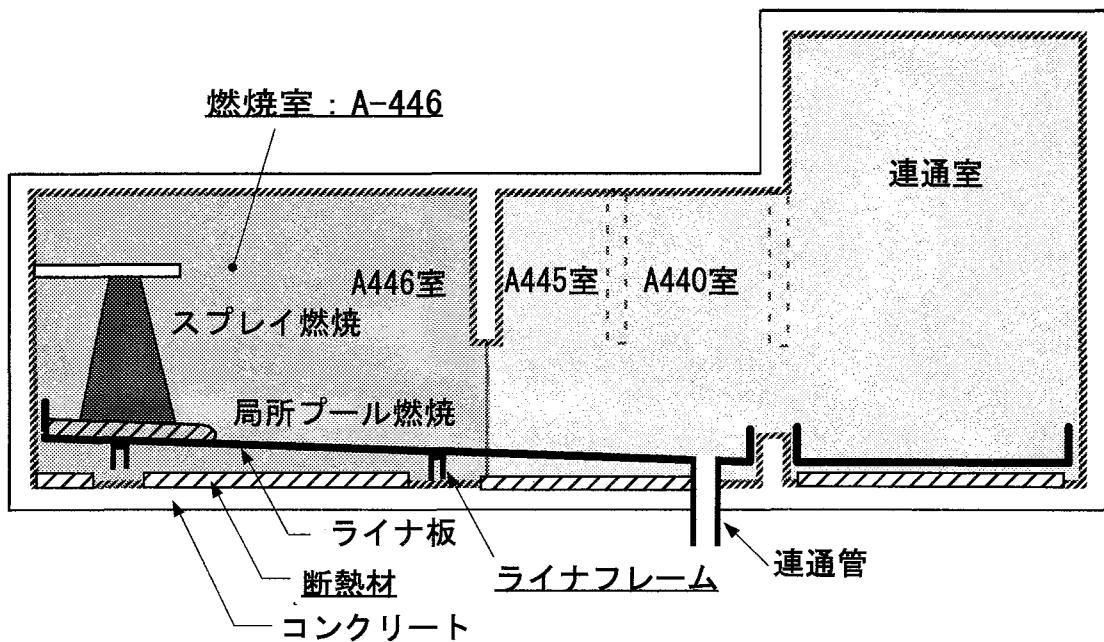
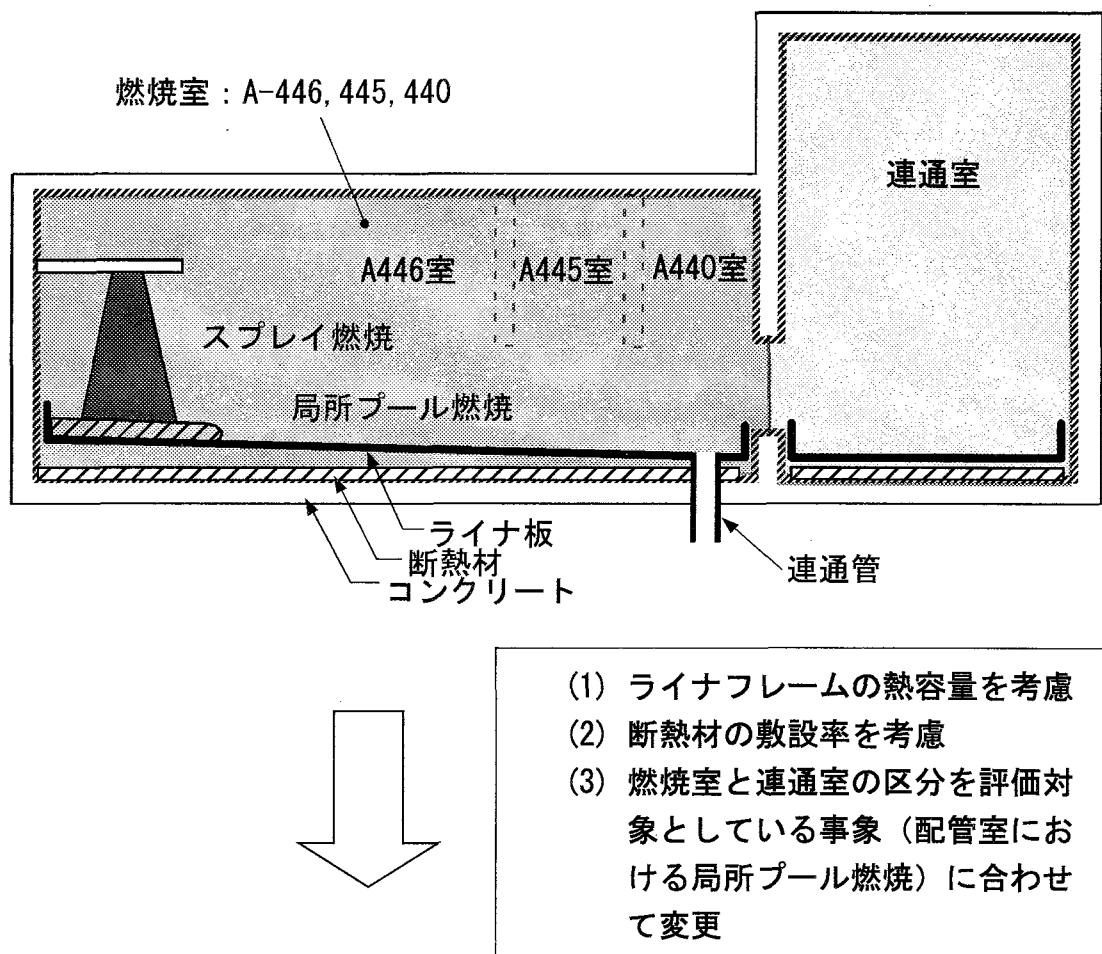


図2.1-2 局所にプールを形成する規模の漏えいモデル

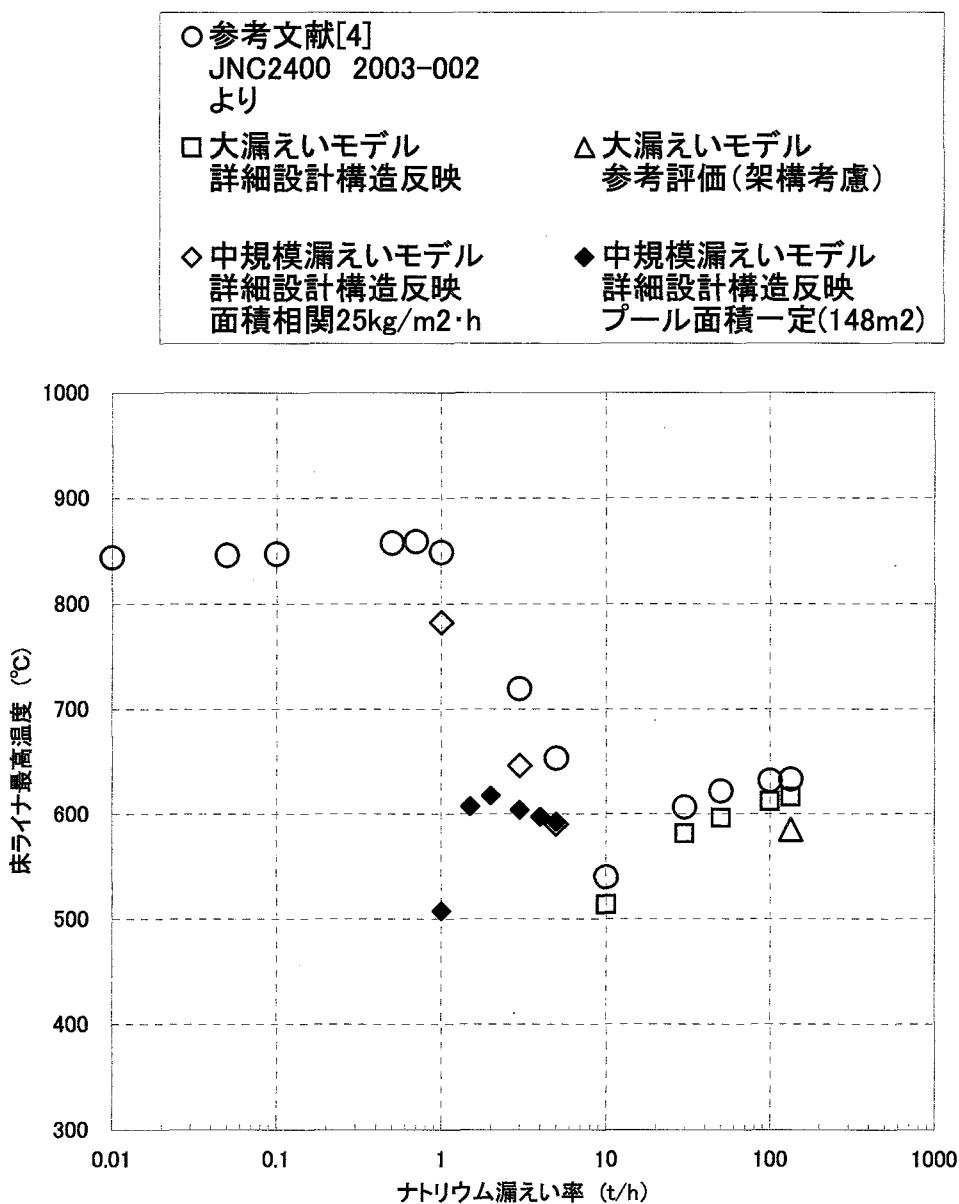


図2.1-3 2次主冷却系設備 配管室(A-446)でのナトリウム漏えい時の床ライナ温度(ライナ温度に着目した解析)

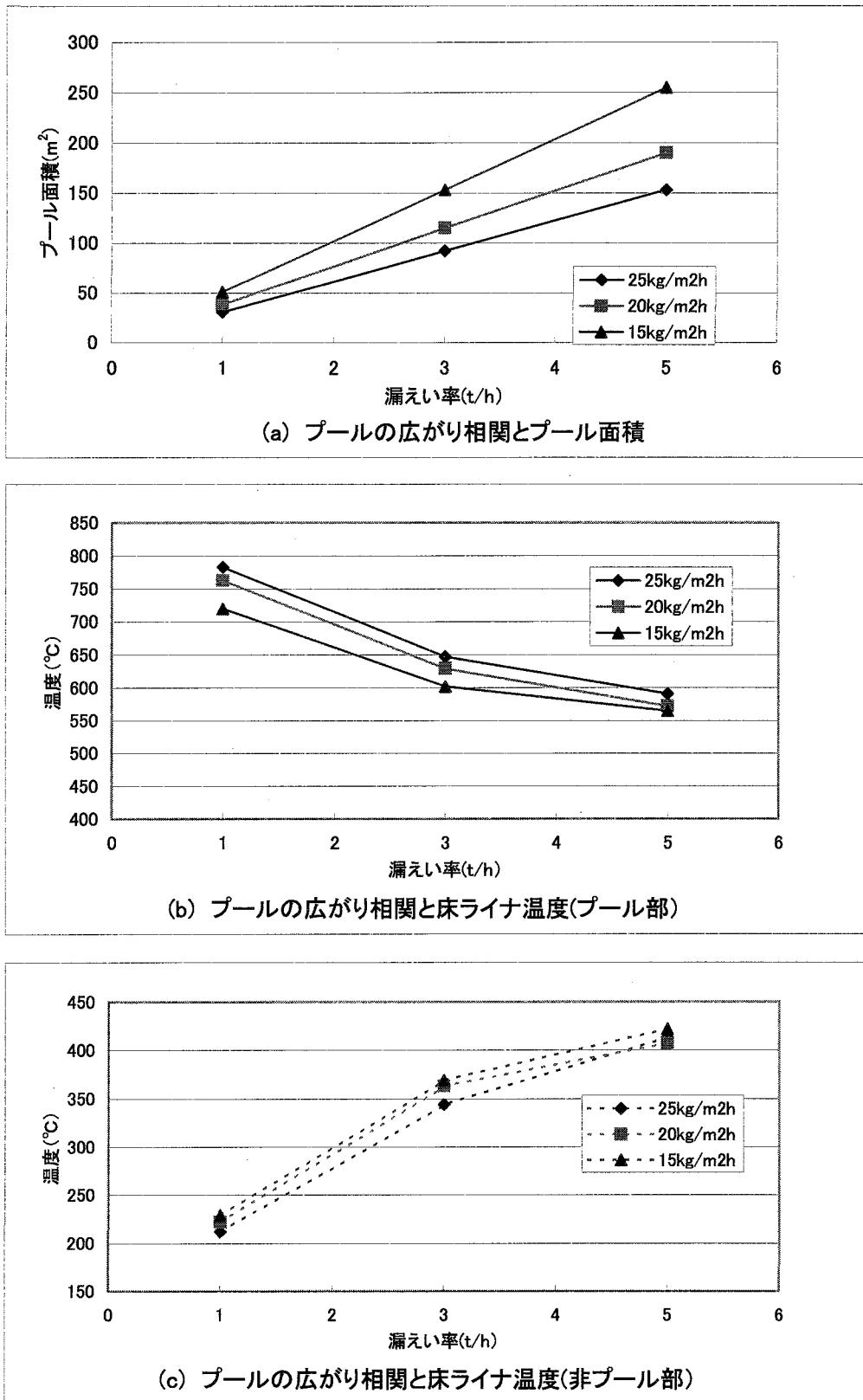


図2.1-4 プールの広がり相関と床ライナ温度  
(2次主冷却系配管室:A-442, A-446)

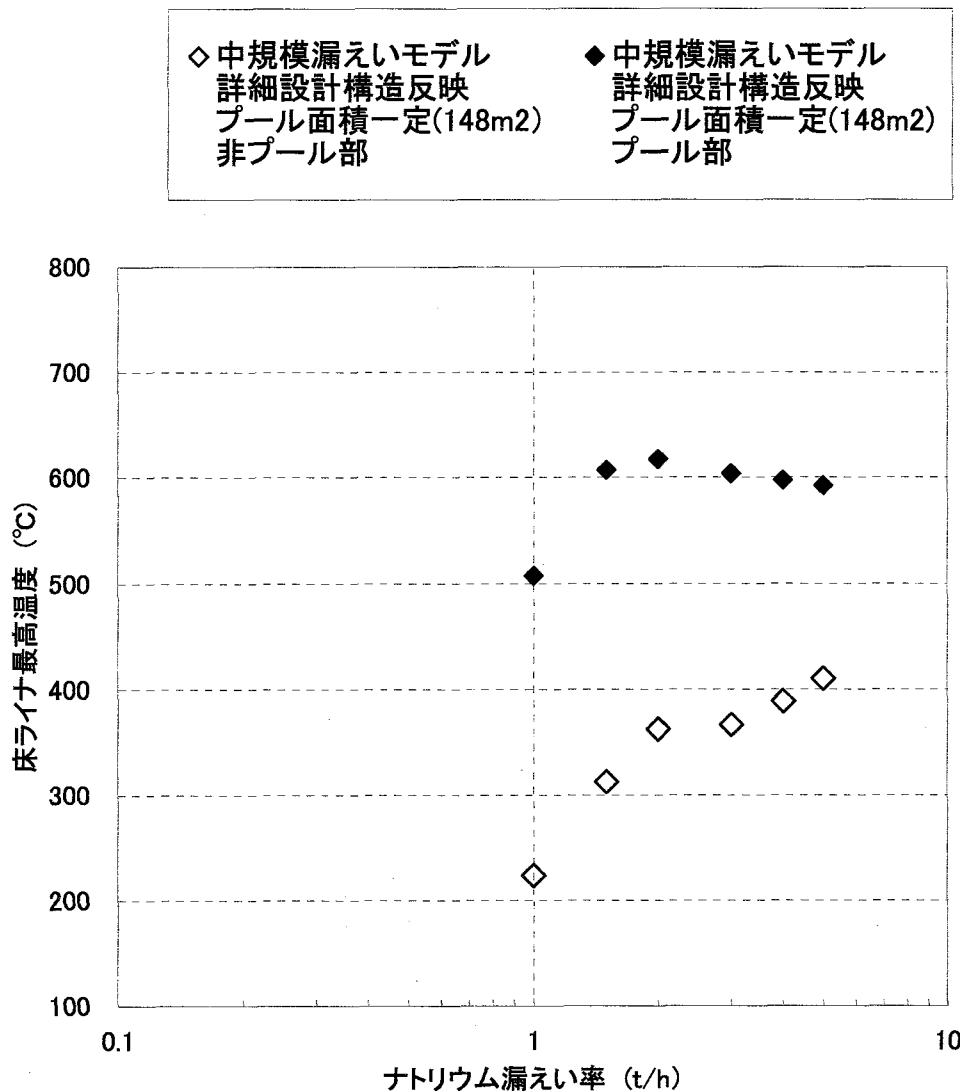


図2.1-5 2次主冷却系設備 配管室 (A-446) でのナトリウム漏えい時の床ライナ温度 (プール面積を一定 : 148m<sup>2</sup>とした場合)

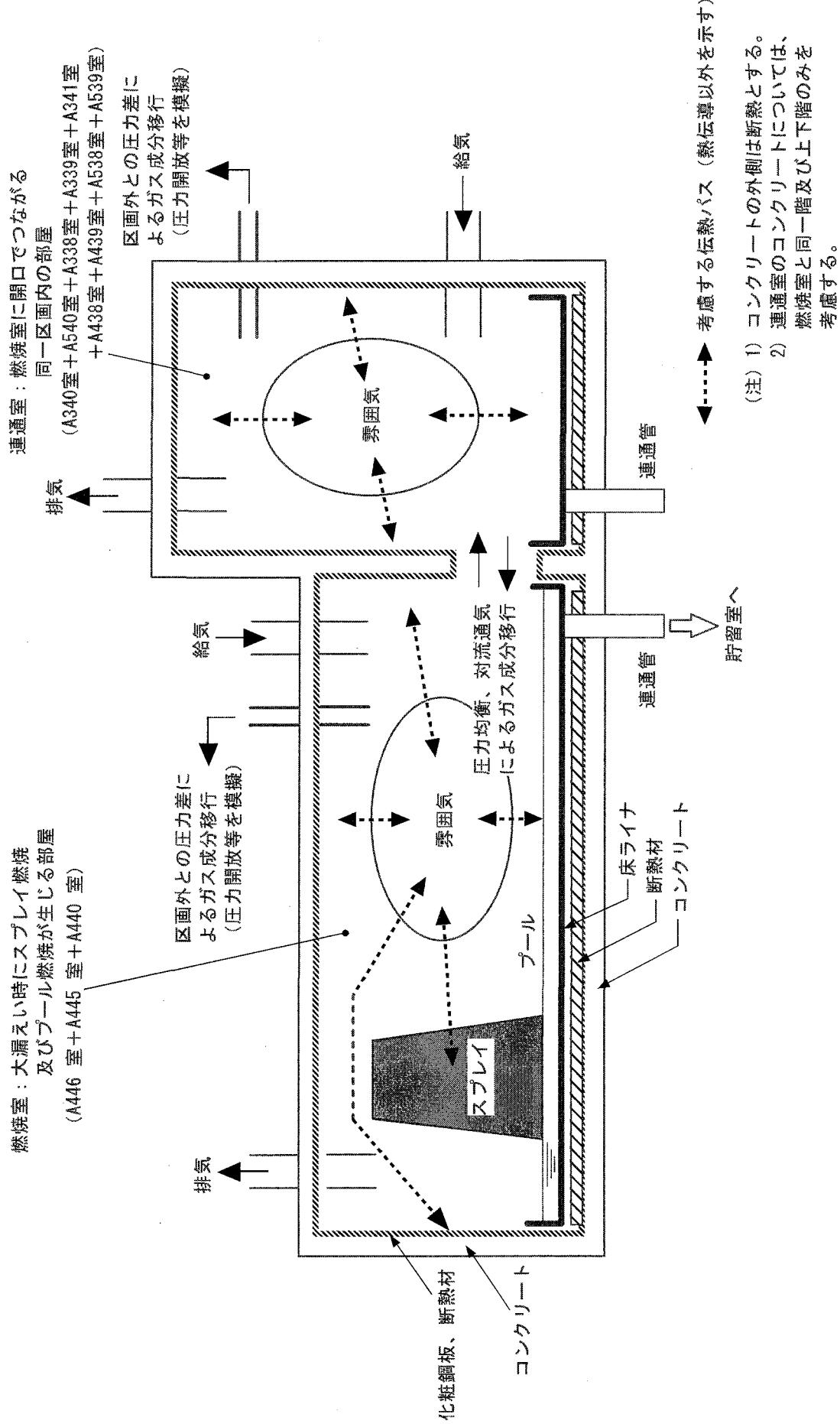


図2.2-1 解析モデルの概要（2次主冷却系配管室の例）

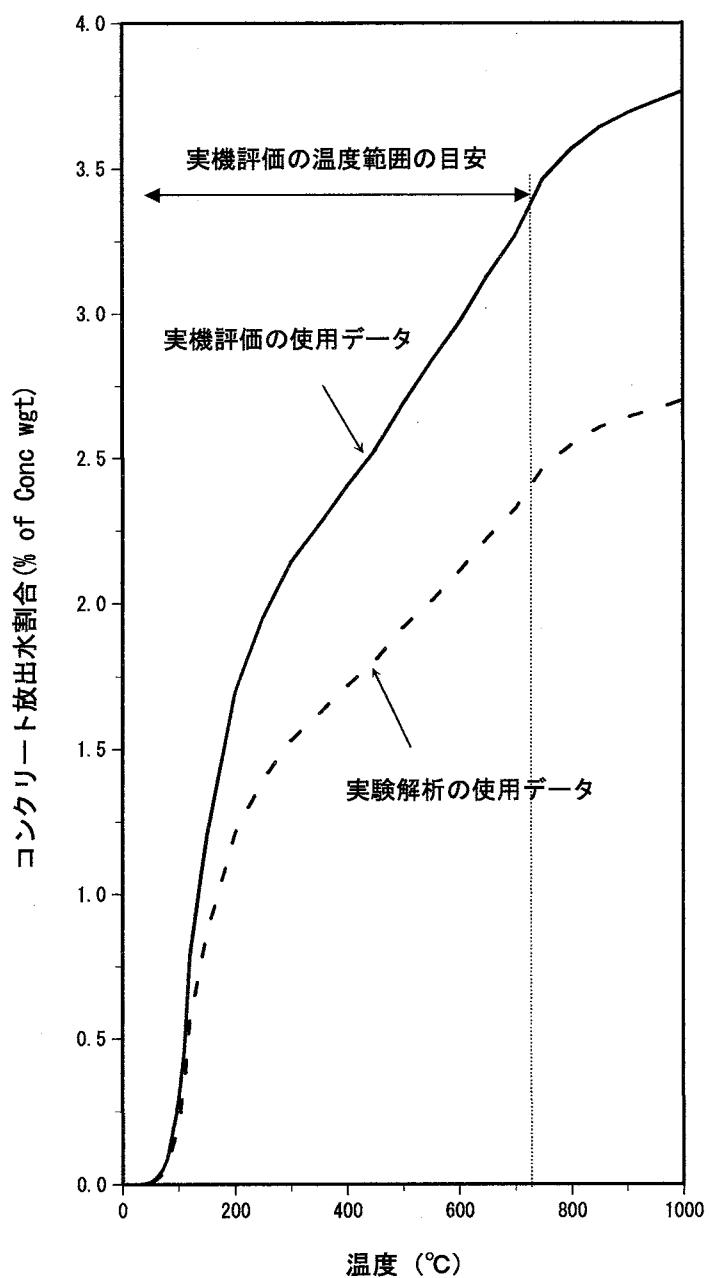


図 2.2-2 ASSCOPS 計算用コンクリート放出水割合データ

(注) コンクリート放出水割合は、コンクリート重量に対するその温度で放出される水分の重量の割合を指す

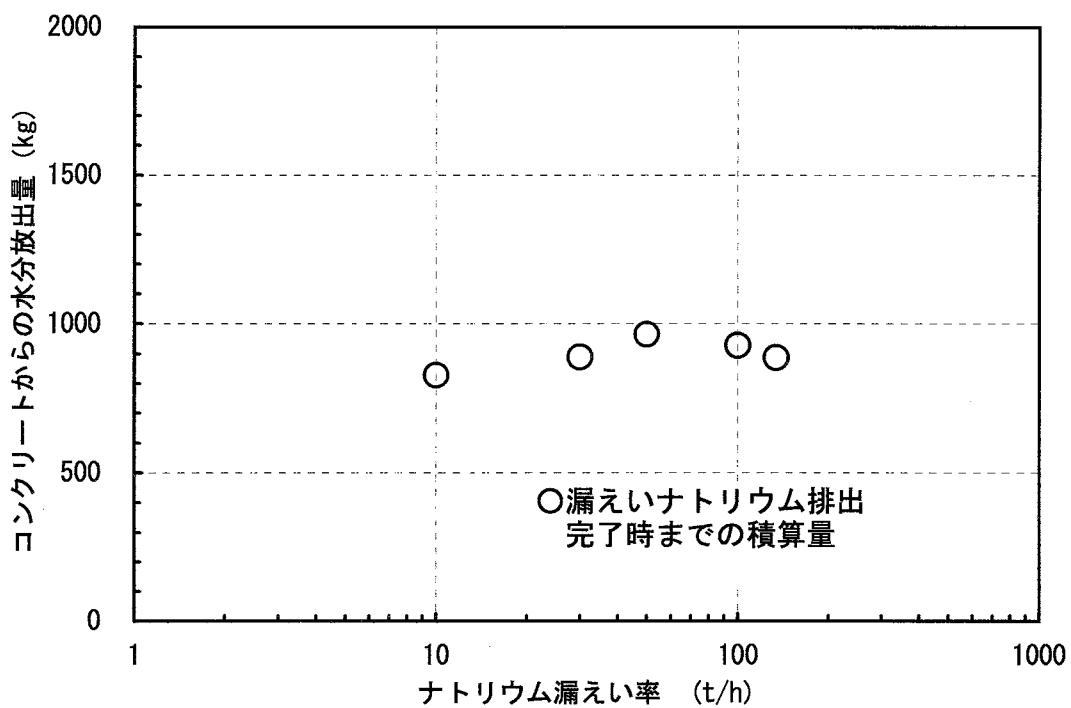


図2.2-3 コンクリートからの水分放出量  
(2次主冷却系配管室 A-446でのナトリウム漏えいの場合)

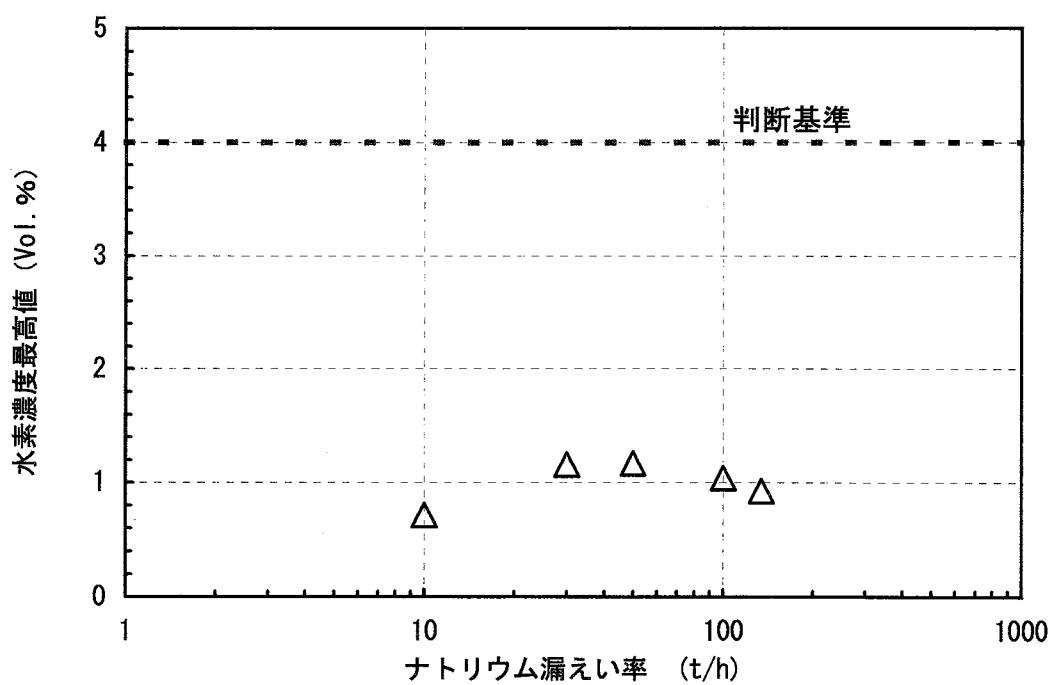


図2.2-4 酸素濃度 5 %以上での水素濃度最高値  
(2次主冷却系配管室 A-446でのナトリウム漏えいの場合)

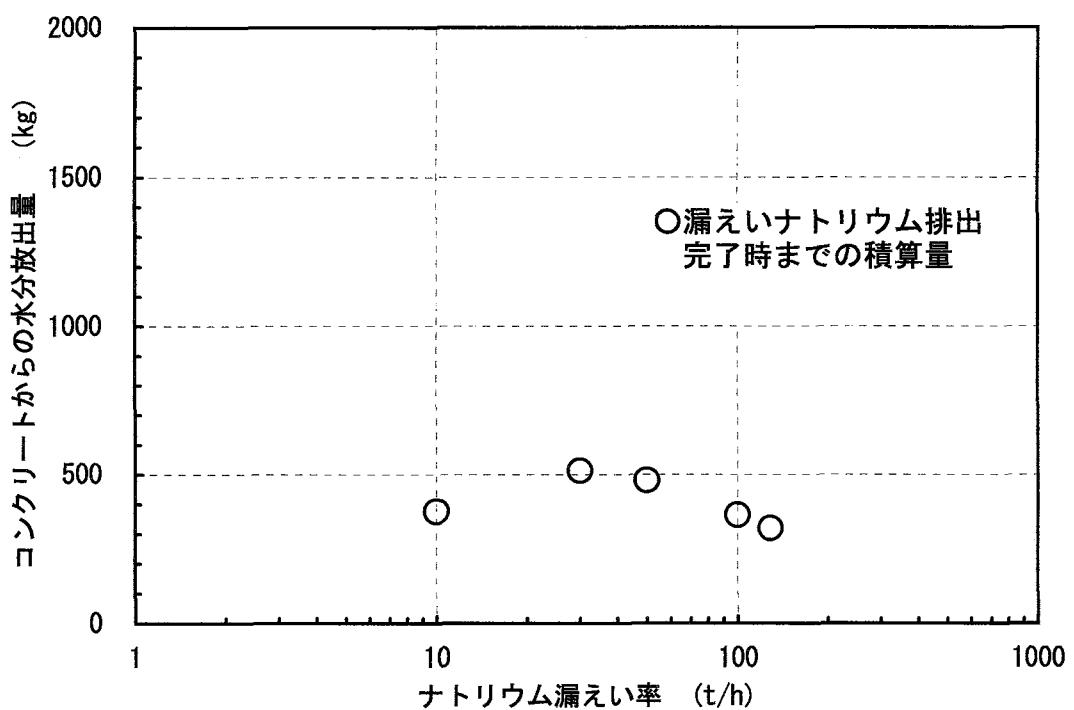


図2.2-5 コンクリートからの水分放出量  
(蒸発器室 A-438でのナトリウム漏えいの場合)

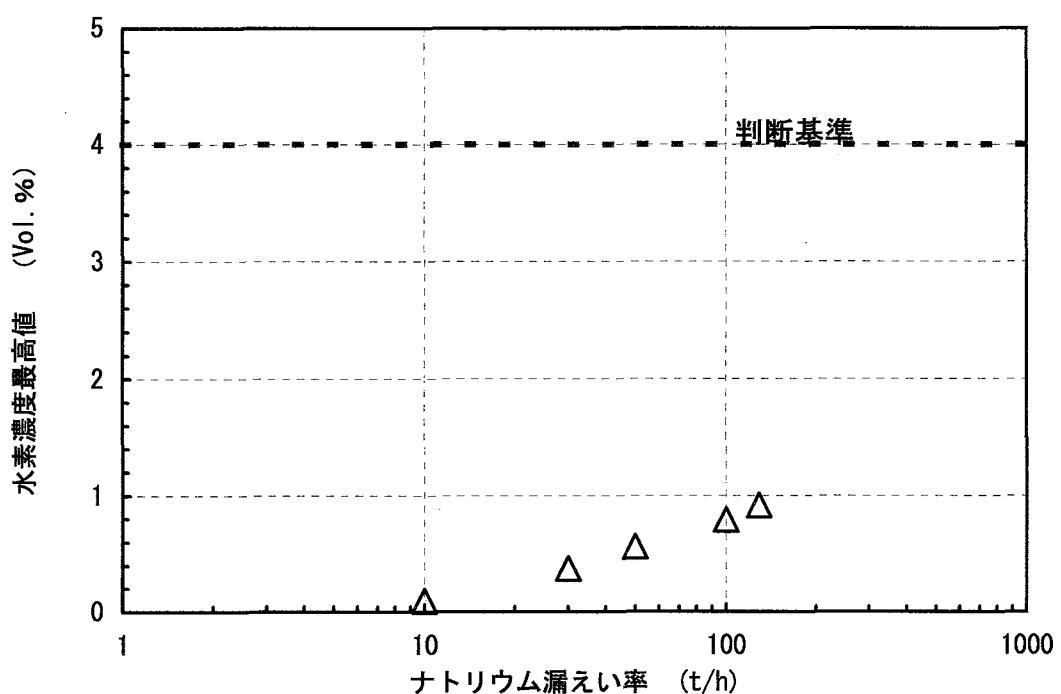


図2.2-6 酸素濃度 5 %以上での水素濃度最高値  
(蒸発器室 A-438でのナトリウム漏えいの場合)

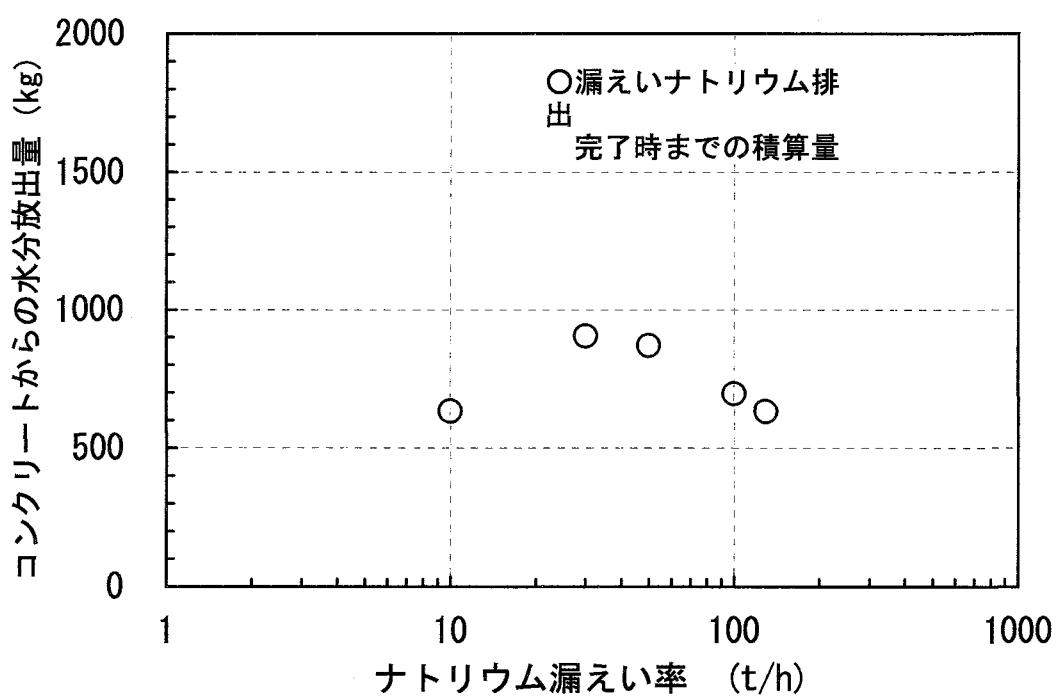


図2.2-7 コンクリートからの水分放出量  
(過熱器室 A-439でのナトリウム漏えいの場合)

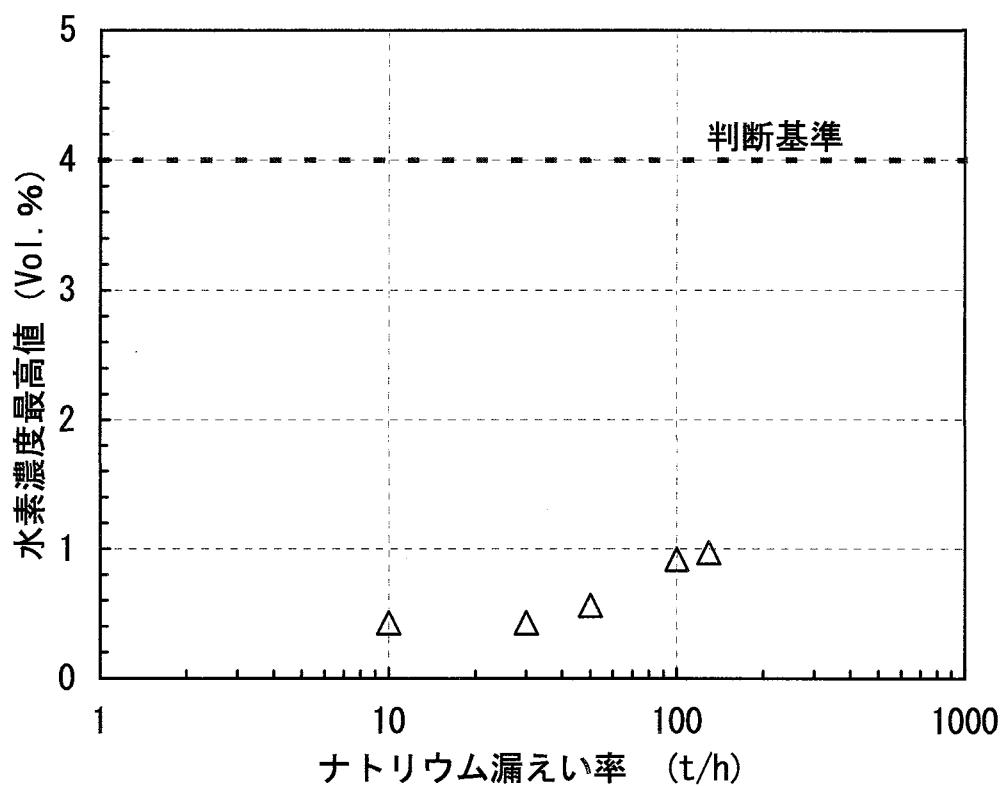


図2.2-8 酸素濃度 5%以上での水素濃度最高値  
(過熱器室 A-439でのナトリウム漏えいの場合)

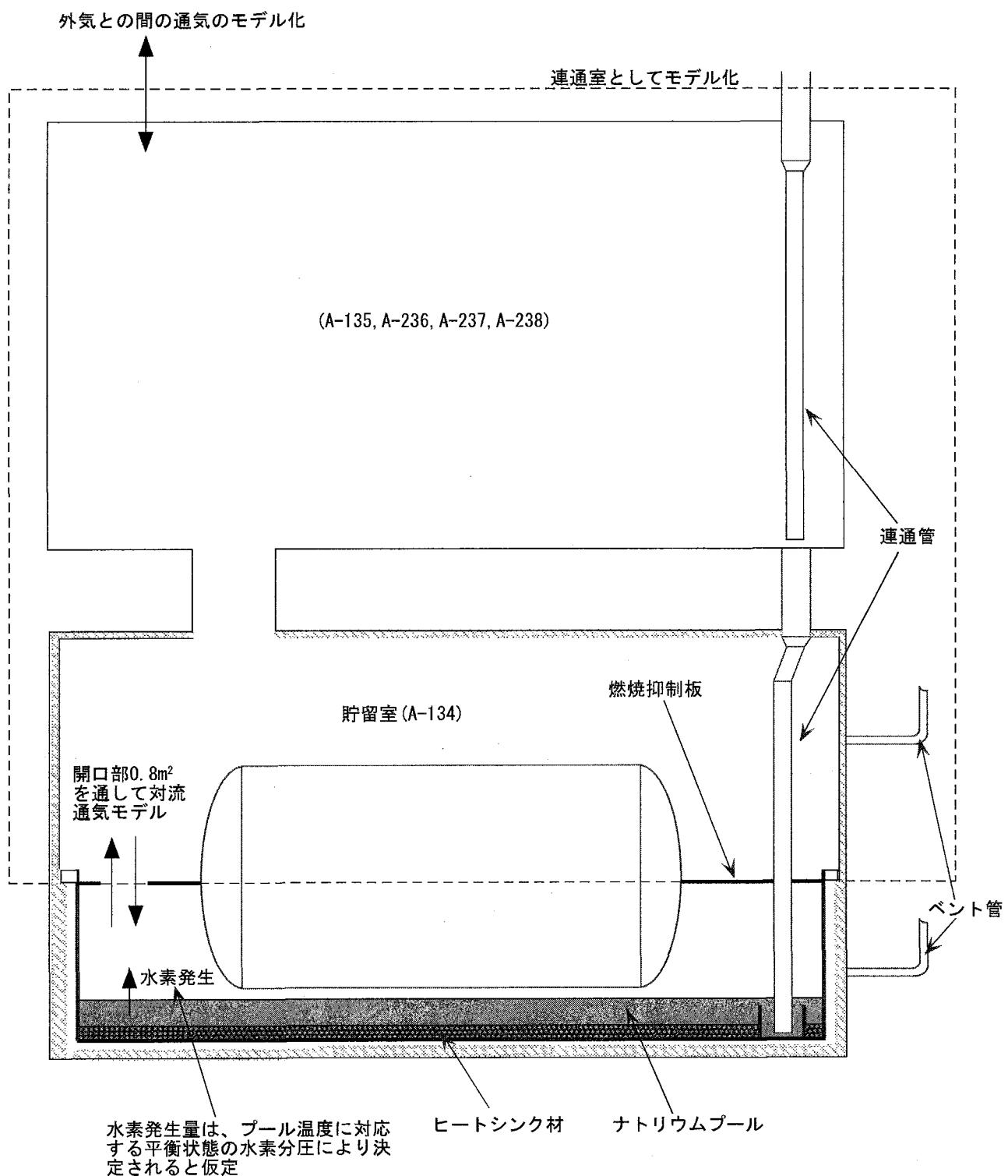


図2.3-1 貯留室・水素評価モデル図

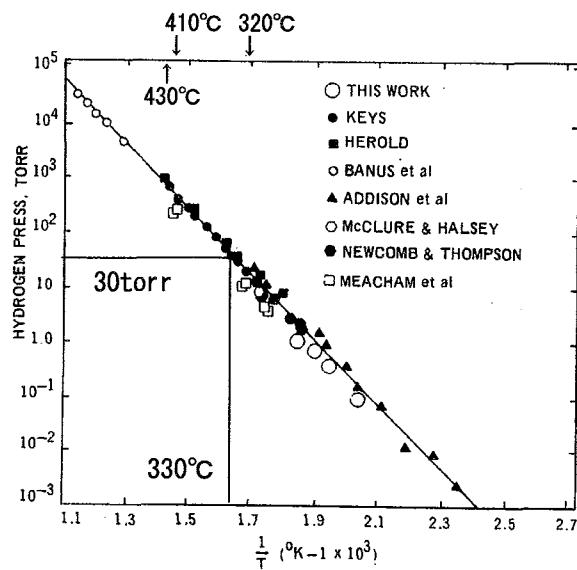


図 2.3-2 Dissociation pressure of NaH in equilibrium with Na(*l*) vs temperature.

温度 (°C)	$1/T (K^{-1} \times 10^3)$	水素分圧 P(torr)	P/760 (-)
320	1.69	20.7	0.03
410	1.46	469	0.62
430	1.42	841	1.11

文献[1]によれば、上図に示すような温度と水素分圧の関係を有する。本図から、約 330°C の場合の水素分圧は約 4 kPa [30 torr] (水素濃度約 4 %) と見積もられる。

### 参考文献

- [1] P. Roy and D. N. Rodgers, "Characterization of a Diffusion Tube Hydrogen Detector in a Dynamic Sodium System," Nuclear Technology, Vol. 12, pp. 388-392, Dec. 1972.

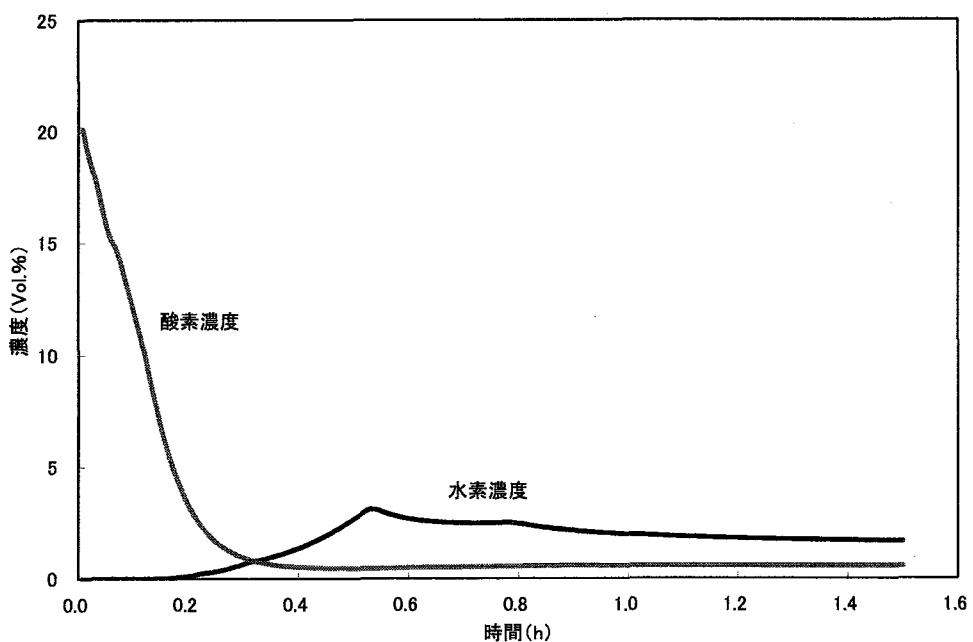


図 2.3-3 配管室ナトリウム漏えい時の燃焼抑制板下部雰囲気の水素濃度及び酸素濃度

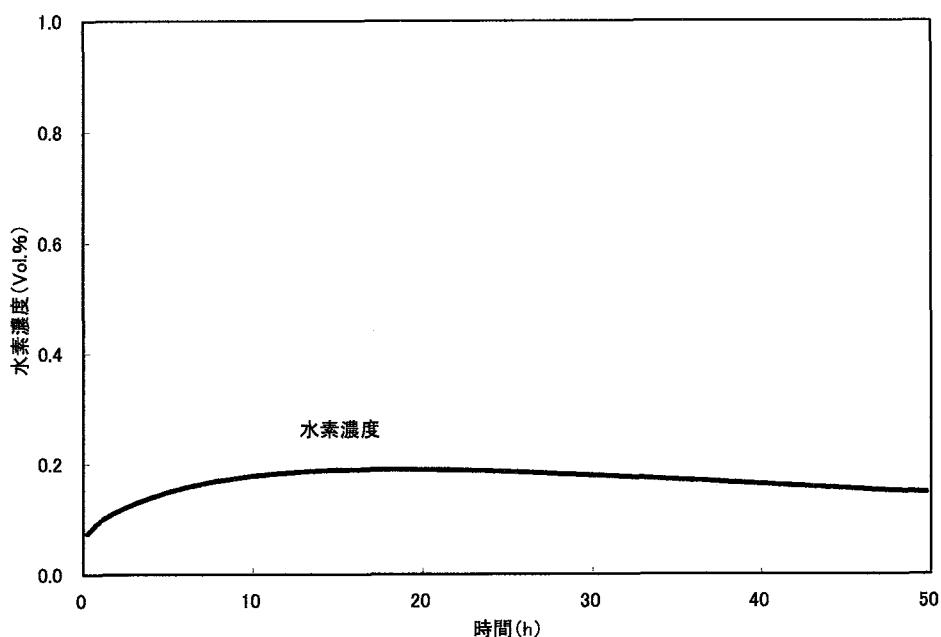


図 2.3-4 配管室ナトリウム漏えい時の燃焼抑制板上部雰囲気の水素濃度

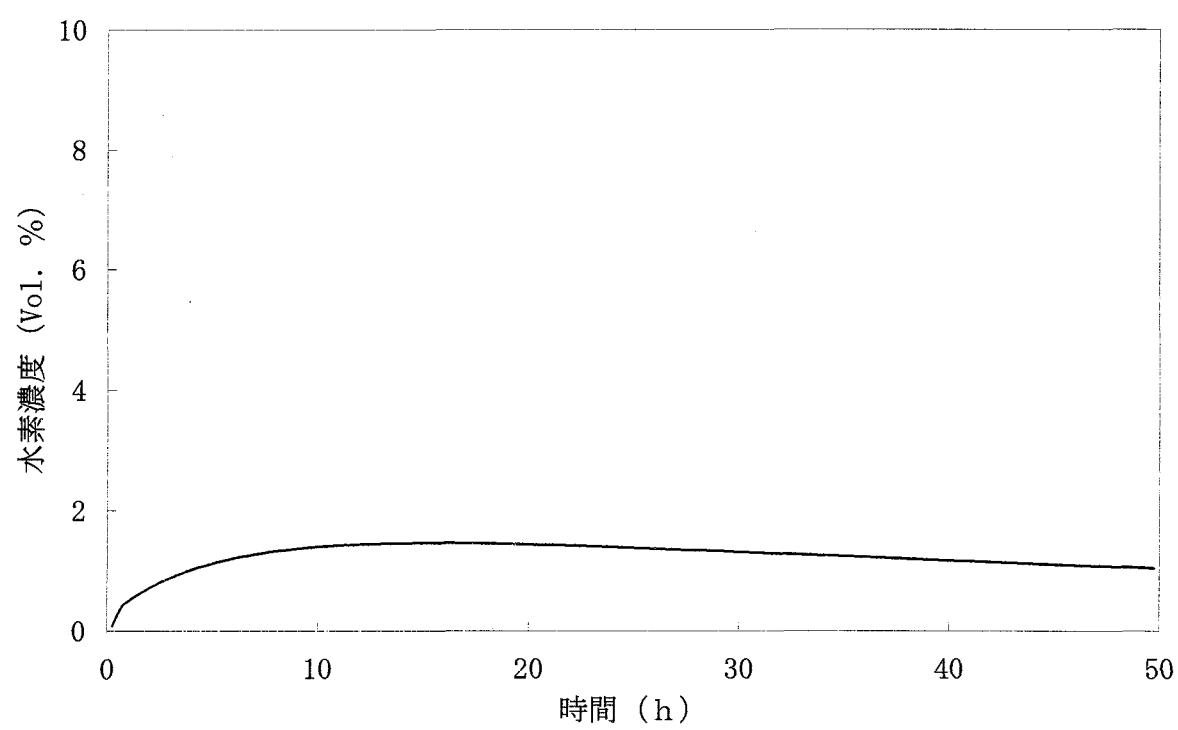


図2.3-5 過熱器室ナトリウム漏えい時の燃焼抑制板  
上部雰囲気の水素濃度

## 付録－1 架構等の質量について

配管室の床ライナ温度の架構熱容量を考慮した燃焼解析や水素濃度着目の燃焼解析では、熱容量となる架構の質量 30t と表面積 511m<sup>2</sup> を考慮して、評価している。A-440, A-445, A-446 にある実際の架構の総質量と表面積を付表 1 に示す。付表 1 より架構の総質量は約 31t で、表面積の合計は 614m<sup>2</sup> であり、解析で用いている数値は小さめの数値となっている。

付表 1. 架構の鋼材質量集計

部屋番号	構造物名	材質	質量 (t)	表面積 (m <sup>2</sup> )
			形鋼 角型鋼管 グレーチング	形鋼 角型鋼管 グレーチング
A-440	支持架構	炭素鋼	5.5	73.9
	歩廊	炭素鋼	—	—
A-445	支持架構	炭素鋼	2.5	43.3
	歩廊	炭素鋼	4.0	71.8
A-446	支持架構	炭素鋼	9.5	170.7
	歩廊	炭素鋼	9.4	254.0
合計			30.9	613.7

## 付録一 2 2セルモデルと多セルモデルの比較について

### 1. 目的

上下左右に繋がった多数の部屋の一室でナトリウム漏えいが生じた場合のナトリウム燃焼解析において、多数の部屋を2セルに統合化した2セルモデルで解析した場合と多セルモデルで解析した場合を SPHINCS コードを用いた解析例により比較検討する。

### 2. 評価内容

#### (1)評価方法

SPHINCS コードによる 2セルモデルと多セルモデル（18セルモデル、大気セルは除く）でのナトリウム燃焼解析を大漏えいについて行い、双方の解析結果の比較評価により、検討する。

#### (2)評価条件

##### (a)解析コード

多セル燃焼解析コード SPHINCS を使用する。

##### (b)解析モデル

①解析セルモデル：2次主冷却系区画を2セル及び18セルでモデル化

②対象室：2次主冷却系 C ループの配管室(A-446)及び過熱器室(A-439)

##### (c)漏えい条件

###### ①漏えい率

配管室(A-446) : 134t/h

過熱器室(A-439) : 129t/h

###### ②漏えい温度

507°C

### 3. 評価結果

#### (1)配管室(A-446) 大漏えい解析結果

2セルモデル及び多セルモデルを付図 2.1-1(1/2)及び付図 2.1-1(2/2)に示す。

また、2セルモデル及び多セルモデルでの雰囲気温度、酸素濃度等（連通室の結果は、連通室全室の平均）について比較した大漏えい 134t/h の結果を付図 2.1-2(1/2)及び付図 2.1-2(2/2)に示す。

2セルモデルの方が多セルモデルと比べて、スプレイ燃焼量が約 800kg 多く、雰囲気温度も高くなっている。これは、連通室から燃焼室へ供給される酸素量が多くなり、燃焼が促進される結果となっていることによるものである。その理由は、2セルモデルでは燃焼室を A-446, A-445, A-440 の 3 室としていることから、スプレイ燃焼に寄与する酸素の量を多めに評価することである。また、燃焼室は連通室と水平方向の開口でつながっており、部屋間の対流通気は温度差によって支配されるが、2セルモデルでは連通室の容積を大きくとるため相対的に温度が上昇しにくく、その結果、2セルモデルの方が燃焼室と連通室の温度差が大きくなり対流通気流量を大きめに評価することも要因と考えられる。

なお、燃焼室及び連通室の酸素濃度共に、2セルモデルの方が多セルモデルと比べて酸素濃度が低くなっていることから、保守的な燃焼モデルになっていることがわかる。

#### (2)過熱器室(A-439) 大漏えい解析結果

2セルモデル及び多セルモデルを付図 2.2-1(1/2)及び付図 2.2-1(2/2)に示す。

また、2セルモデル及び多セルモデルでの雰囲気温度、酸素濃度等について比較した大漏えい 129t/h の結果を付図 2.2-2(1/2)及び付図 2.2-2(2/2)に示す。

2セルモデルの方が多セルと比べて、雰囲気温度が高くなっている。これは、2セルモデルでは燃焼室を A-439, A-438 の 2 室としているためスプレイ燃焼に寄与する酸素の量を多めに評価することから、2セルモデルの方がスプレイ燃焼量が大きいためである。

多セルモデルの方が燃焼室と他の部屋との位置関係から循環流量が多くなり、

連通室から燃焼室への酸素移行流量（質量流量）、燃焼室から連通室への酸素移行流量（質量流量）は大きくなっている。しかしながら、連通室から燃焼室への正味流量（連通室から燃焼室への酸素移行流量-燃焼室から連通室への酸素移行流量）は、2セルモデルの方が大きくなっている。これは、多セルモデルの方がスプレイ燃焼量が小さいため、連通室からの流入酸素移行流量は大きいが、流出する酸素移行流量も大きいためである。

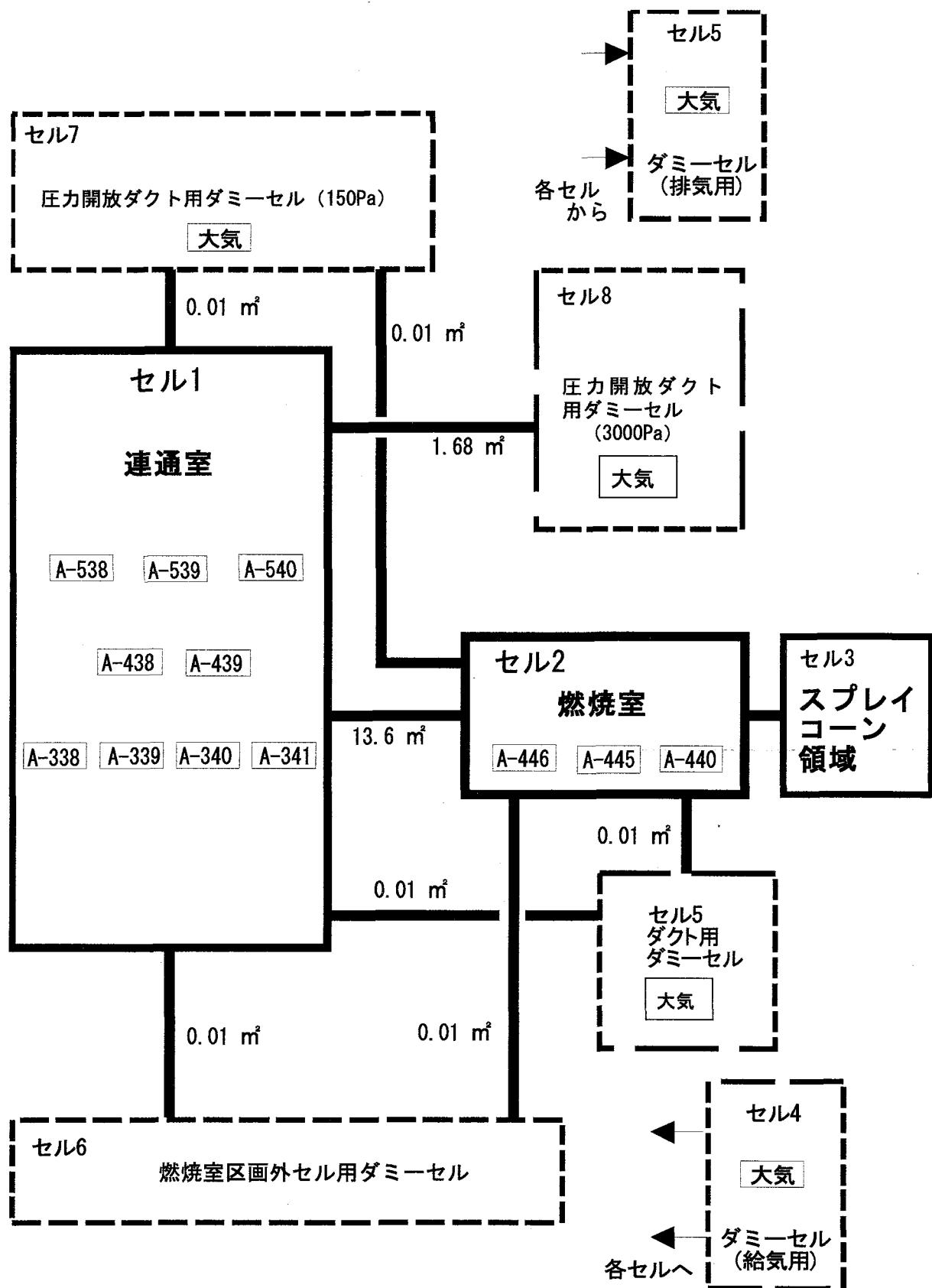
なお、配管室と同様に、燃焼室及び連通室の酸素濃度共に、2セルモデルの方が多セルモデルと比べて酸素濃度が低くなっていることから、保守的な燃焼モデルになっていることがわかる。

以上から、ナトリウム燃焼の影響により、建屋内で自然循環流量が大きくなり、燃焼室への酸素の供給が促進されるような場合を想定しても、2セルモデルによる評価は保守性を有するモデルになっている。

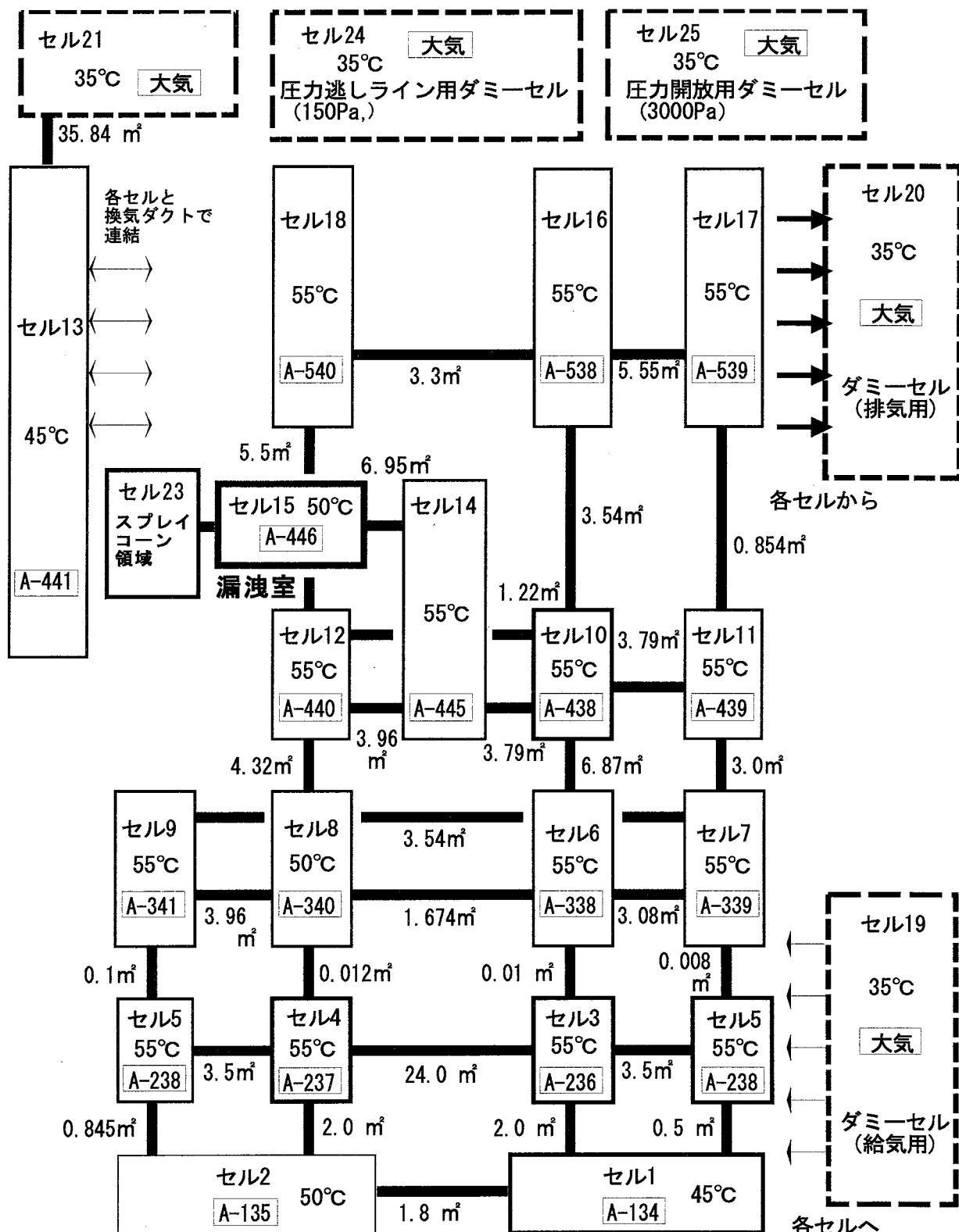
#### 4. まとめ

SPHINCS コードによる多セルモデル及び2セルモデルの解析結果を比較した結果、次のことが確認された。

- ・ 2セルモデルの方が、スプレイ燃焼量が大きくなり、プール燃焼量はほぼ同程度である。また、雰囲気温度も2セルモデルの方が高くなる。
- ・ 過熱器室での大漏えいのように、燃焼室の温度上昇が大きく、且つ燃焼室に上下2箇所の通気経路が存在する場合、多セルモデルでは燃焼室廻りに自然循環流れが形成されるが、それによる影響を考慮しても2セルモデルの評価は保守性を有する結果となっている。

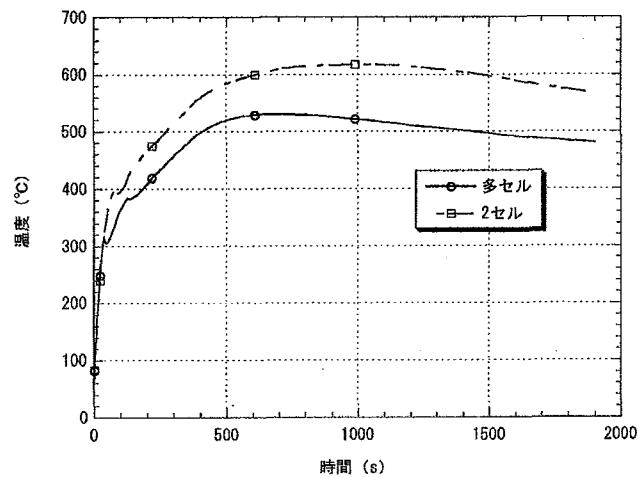


付図 2.1-1(1/2) SPHINCS 解析モデル 2セルモデル(Cループ配管室)

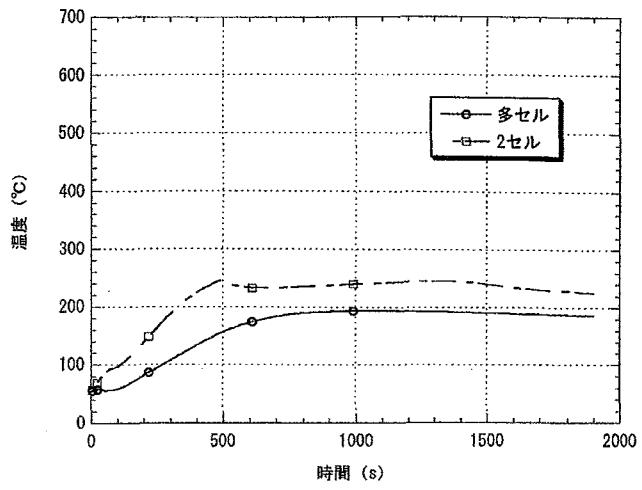


注. 温度は初期温度を示す。

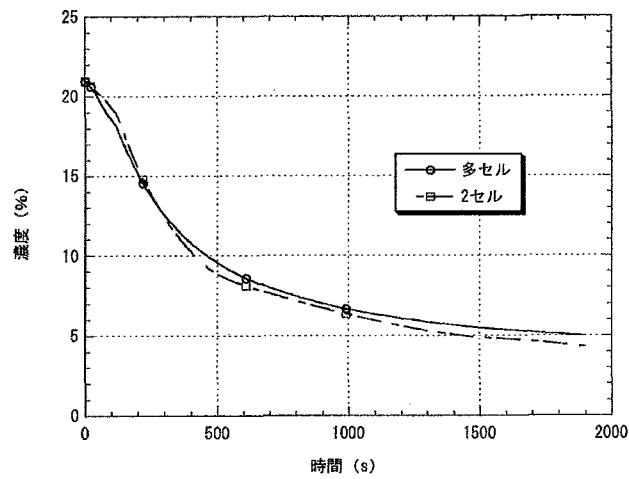
付図 2.1-1(2/2) SPHINCS 解析モデル 多セルモデル(Cループ配管室)



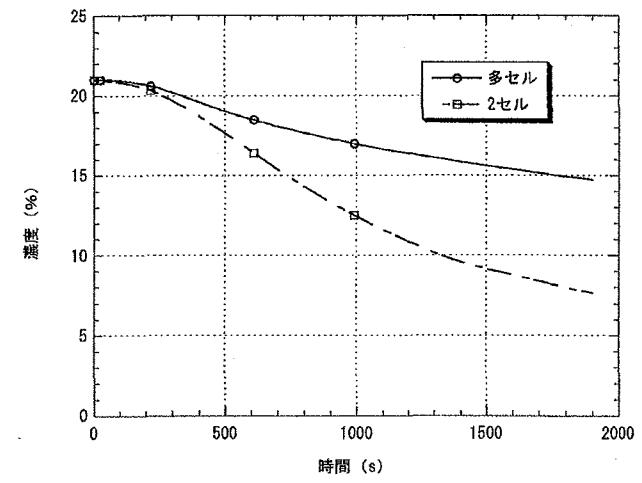
雰囲気温度、燃焼室



雰囲気温度、連通室



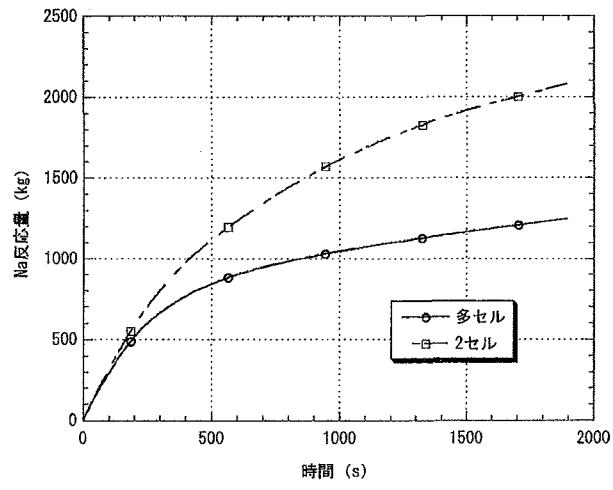
酸素濃度、燃焼室



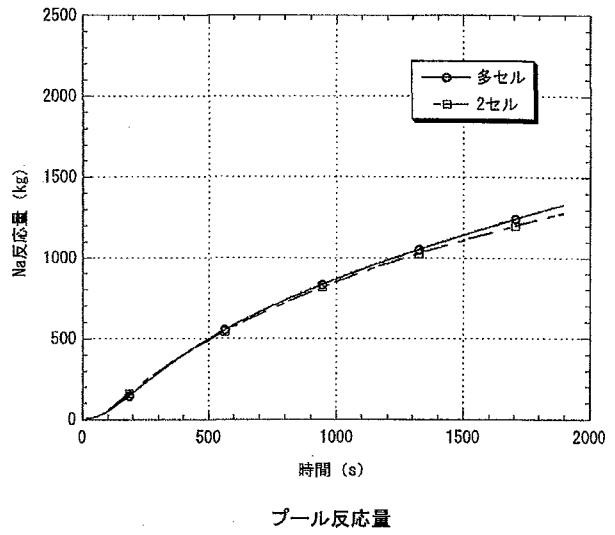
酸素濃度、連通室

付図 2.1-2(1/2) SPHINCS 解析結果 2セルモデルー多セルモデル

(Cループ配管室, 漏えい率 134t/h)



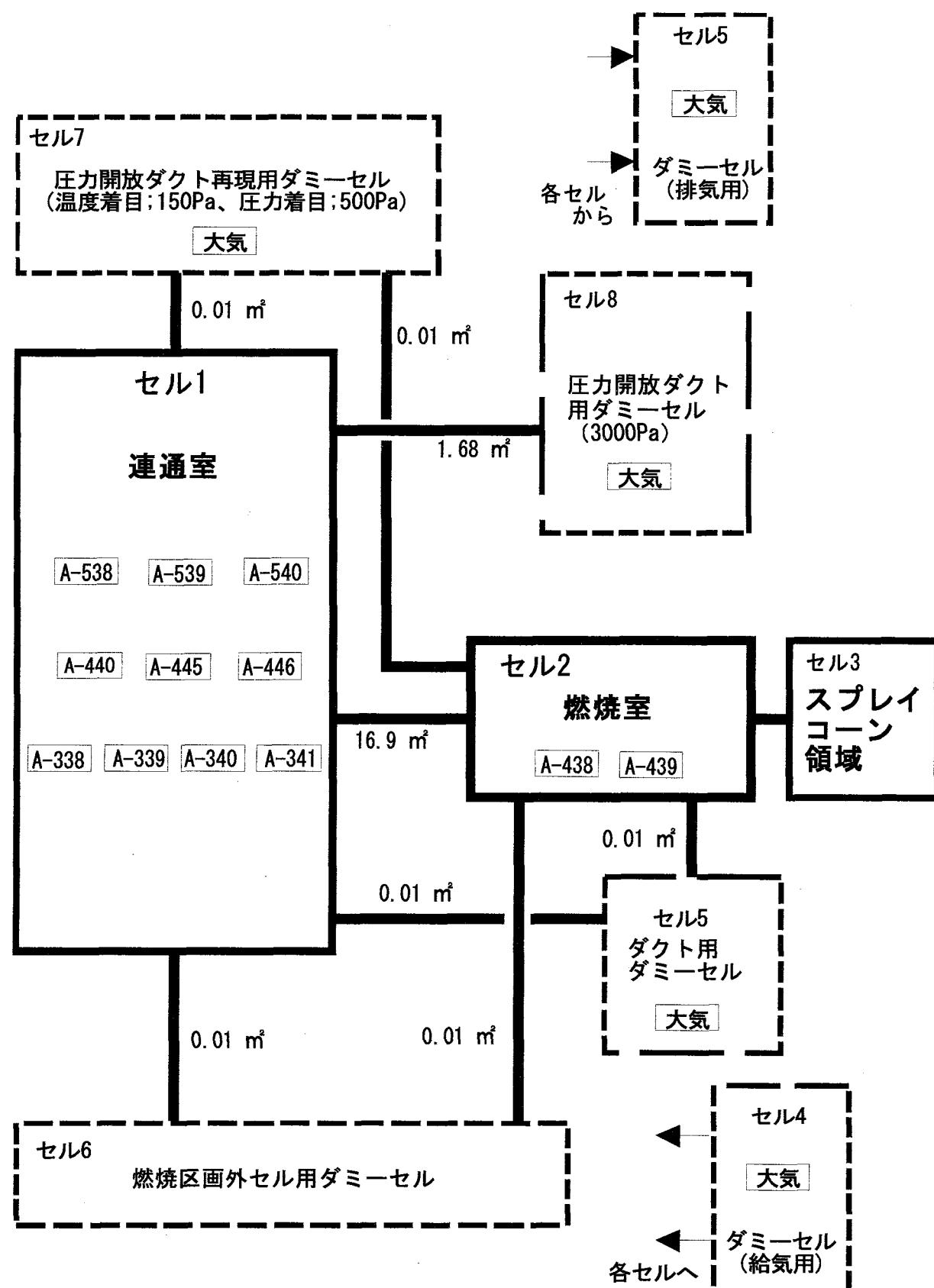
スプレイ反応量



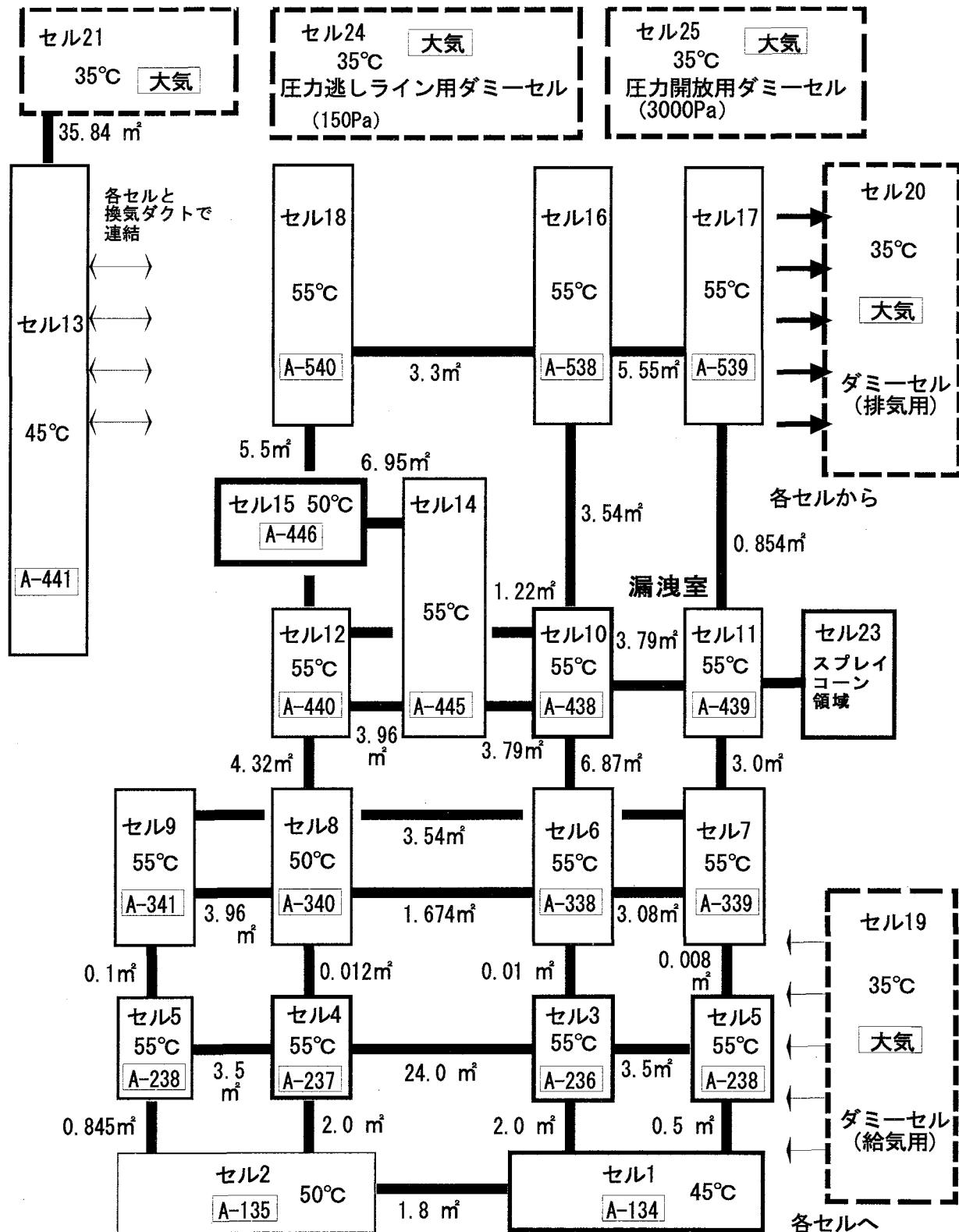
プール反応量

付図 2.1-2(2/2) SPHINCS 解析結果 2セルモデルー多セルモデル

(Cループ配管室, 漏えい率 134t/h)

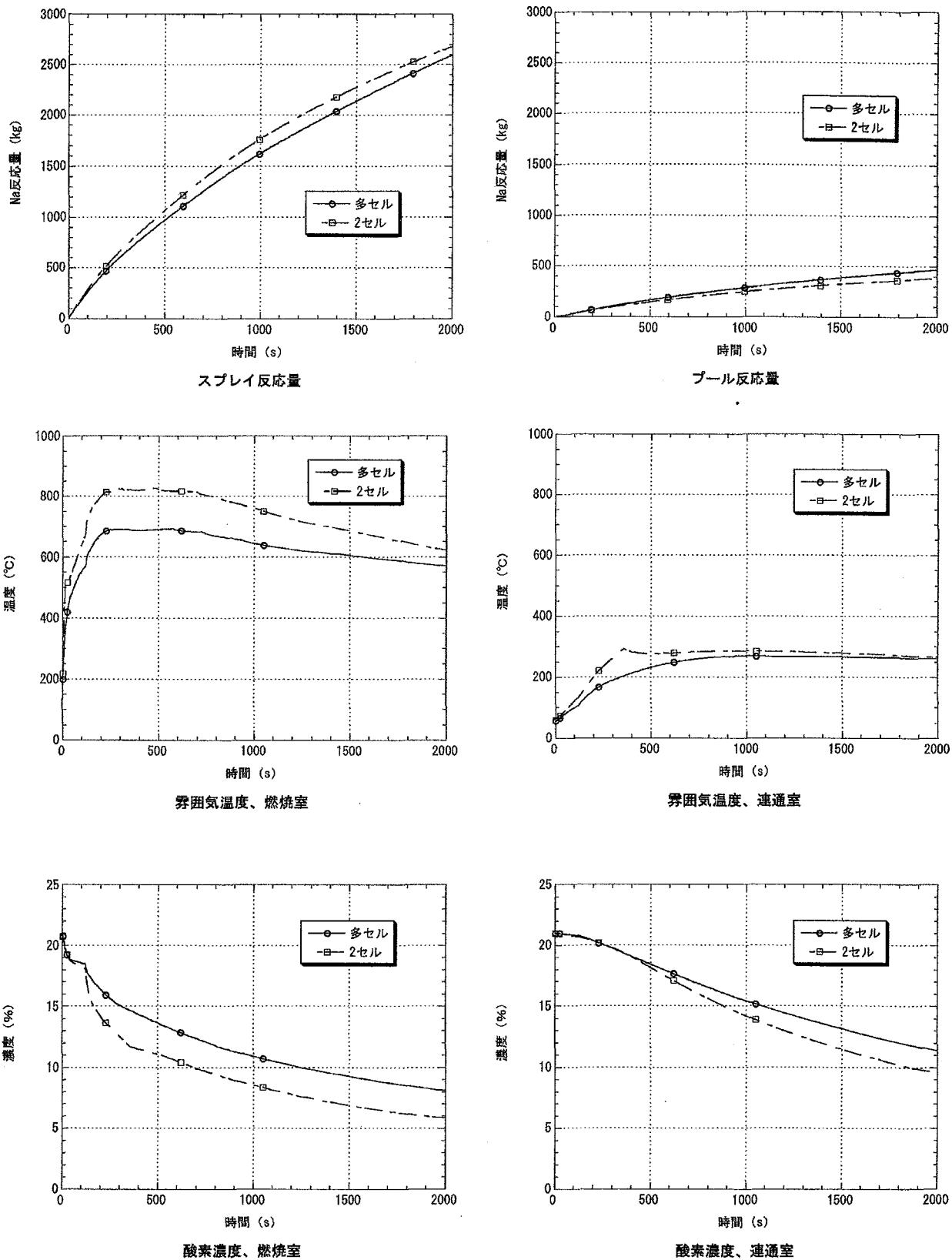


付図 2.2-1(1/2) SPHINCS 解析モデル 2 セルモデル(Cループ過熱器室)



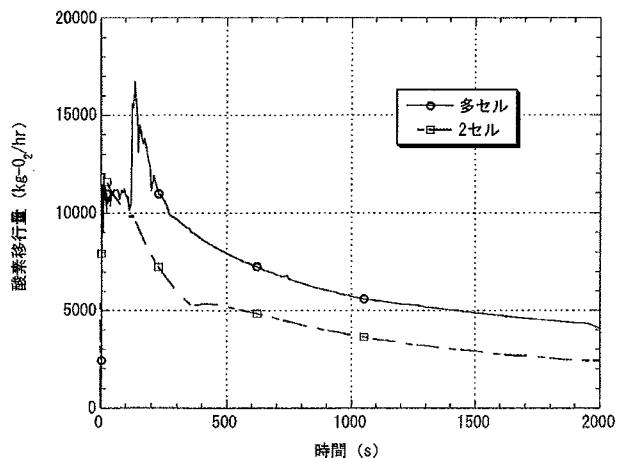
注. 温度は初期温度を示す。

付図 2.2-1(2/2) SPHINCS 解析モデル 多セルモデル(Cループ過熱器室)

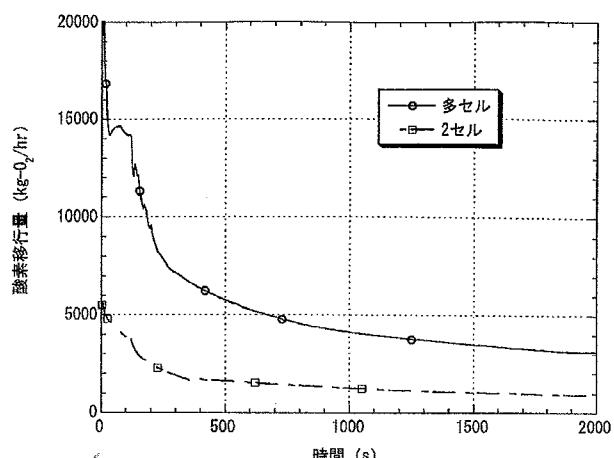


付図 2.2-2(1/2) SPHINCS 解析結果 2セルモデルー多セルモデル

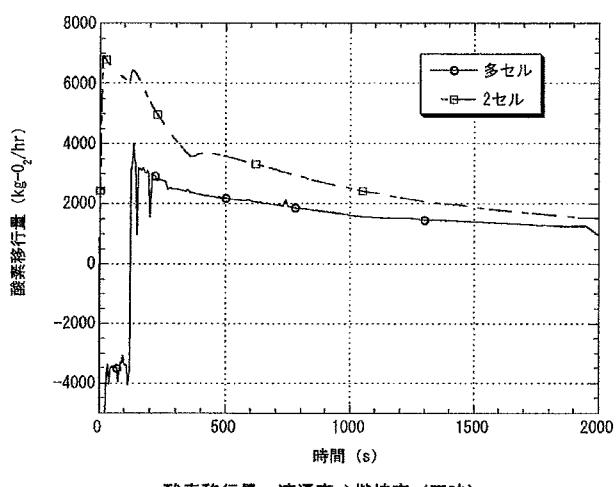
(Cループ過熱器室, 漏えい率 129t/h)



酸素移行量、連通室→燃焼室



酸素移行量、燃焼室→連通室



酸素移行量、連通室→燃焼室（正味）

付図 2.2-2(2/2) SPHINCS 解析結果 2セルモデルー多セルモデル  
(Cループ過熱器室、漏えい率 129t/h)

## 付録－3 タンク室区画内水素移行解析について

### 1. 目的

多セルコードにより、貯留後のナトリウムプール内における Na-NaOH (ナトリウム一水酸化ナトリウム) 反応による発生水素のタンク室区画内での移行解析を行う。解析は、過熱器室漏えいを対象とする。

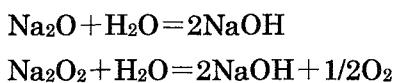
### 2. 解析条件

水素の移行解析を行う上で、入力条件となる水素の発生量等の解析条件は、ASSCOPS のナトリウム燃焼解析の結果に基づくものとする。

貯留室のプール中の Na-NaOH 反応による水素濃度の評価にあたっては、燃焼室における ASSCOPS のナトリウム燃焼解析結果から、貯留室へ流入する NaOH の量を設定している。以下に、NaOH の生成メカニズムとその生成量に関連する ASSCOPS の解析結果を示す。

#### (1) NaOH の生成メカニズム

水分とナトリウム酸化物との反応として、下記の化学反応式を考慮する。



#### (2) NaOH 生成評価で考慮する水分

水分としては、雰囲気中の湿分とコンクリートの温度上昇によりコンクリートから放出される水分を考慮する。

#### (3) 貯留室へ流入するナトリウム及び NaOH の量

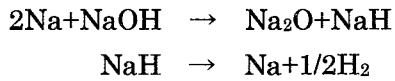
ASSCOPS の解析では、漏えい停止時間に、燃焼室プールの排出時間を加えた時間内に、ナトリウム及び NaOH が連通管を通して貯留室へ流入するものとしている。また、漏えい停止後の燃焼室プールの排出時間については、開渠の流れについての Manning の式を適用して設定している。

漏えい停止時間 1900 秒に、燃焼室プールの排出時間 300 秒を加えた 2200 秒の間に、貯留室へ流入するナトリウムの量及び NaOH の量は付図 3.2-1 及び付図 3.2-2 に示すとおりである。この間に貯留室へ流入する NaOH の量は約 220kg である。

#### (4) 水素の生成量

貯留室ナトリウムプールにおける Na-NaOH 反応による水素の発生は、以下

の反応式を考慮している。



ただし、Na と NaOH の反応、NaH からの熱解離の温度依存性や水素の放出遅れは考慮せず、流入した NaOH が流入量の時間変化に応じて全量が水素に変化するものと保守的に想定した（付図 3.2-2 参照）。したがって、質量比として流入 NaOH 量の 1/40 (H:NaOH 質量=1:40) の水素が発生するものとした。

### 3. 多セルコードによる水素移行解析

#### (1) 解析コード

シビアアクシデント評価のために開発された CONTAIN コードをベースに開発された SPHINCS コードを使用する。

#### (2) 解析モデル

SPHINCS コードによるタンク室区画の解析モデルを付図 3.3-1 に示す。

2 次ダンプタンク室 A-134 は、燃焼抑制板の上下をそれぞれ 1 つのセルでモデル化し、その他の部屋はそれぞれ 1 つのセルでモデル化している。燃焼抑制板の上下の空間は開口（燃焼抑制板相互のギャップ及び燃焼抑制板とタンクの接合部などの開口面積 0.8m<sup>2</sup>）を通して連通しているものとしている。また、各セルは排気口や開口により連通している条件をモデル化している。

### 4. 評価結果

各セル（部屋）の雰囲気温度の変化を付図 3.3-2 に、水素濃度の変化を付図 3.3-3 に示す。

2 次ダンプタンク室 (A-134) の燃焼抑制板下部の雰囲気温度は、ナトリウムプール燃焼及びナトリウムの顯熱の影響で約 300 数十°C になっている。また、この影響で A-134 の燃焼抑制板上部の雰囲気温度は約 30°C 程度の温度上昇となっているが、他の部屋の雰囲気温度上昇は約 15°C 程度にとどまっている。

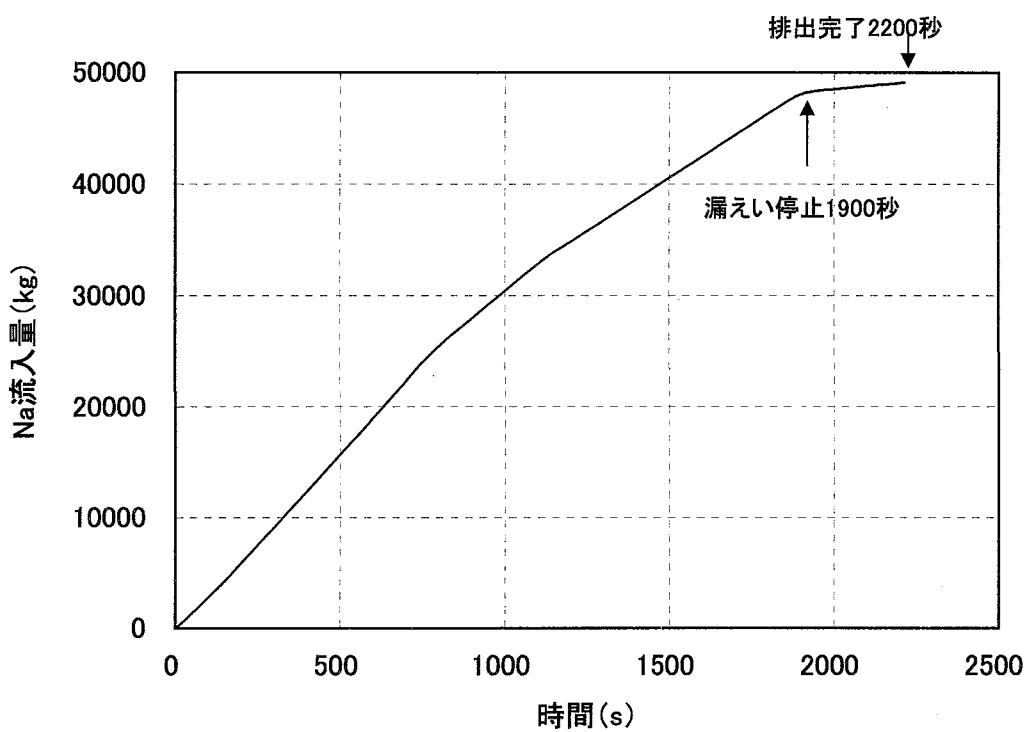
水素濃度については、燃焼抑制板下部で水素が発生している間はタンク室区画内の部屋間である程度の濃度差がつき、燃焼抑制板上部の A-134 の水素濃度が最も高くなるものの、タンク室区画内の部屋の温度差（雰囲気の密度差）によって生じる自然循環力によって、各部屋の雰囲気が混合される効果が大きいことから、いずれの部屋でも水素濃度は 4%未満となっている。

付図 3.3-4 に 600 秒後、1000 秒後及び 2200 秒後の部屋間の流量を示す。時間の経過とともに自然循環力が徐々に大きくなっているのが分かる。また、図の中に 600 秒～2200 秒のタンク室区画内の流れの向きを示した。これらから、タンク室区画内

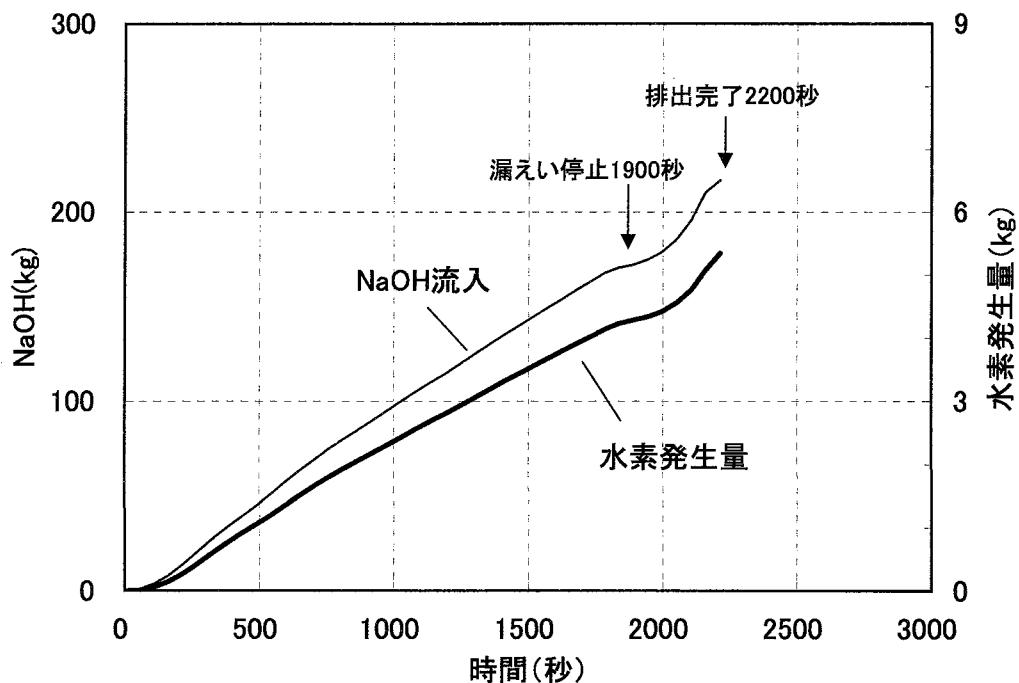
には、自然循環力による大きな循環流が生じていることが分かる。

約 600 秒後～2200 秒後の 2 次オーバーフロータンク室 A-135 から 2 次ダンプタンク室 A-134 (燃焼抑制板上部) への流量は約 7400～10400kg/h (約 7200～10100m<sup>3</sup>/h : 60°C換算) であり、2 次ダンプタンク室 A-134 (燃焼抑制板上部) の容積は約 478m<sup>3</sup>であることから、約 3～4 分でこれが全部入れ替わる流量に相当する。

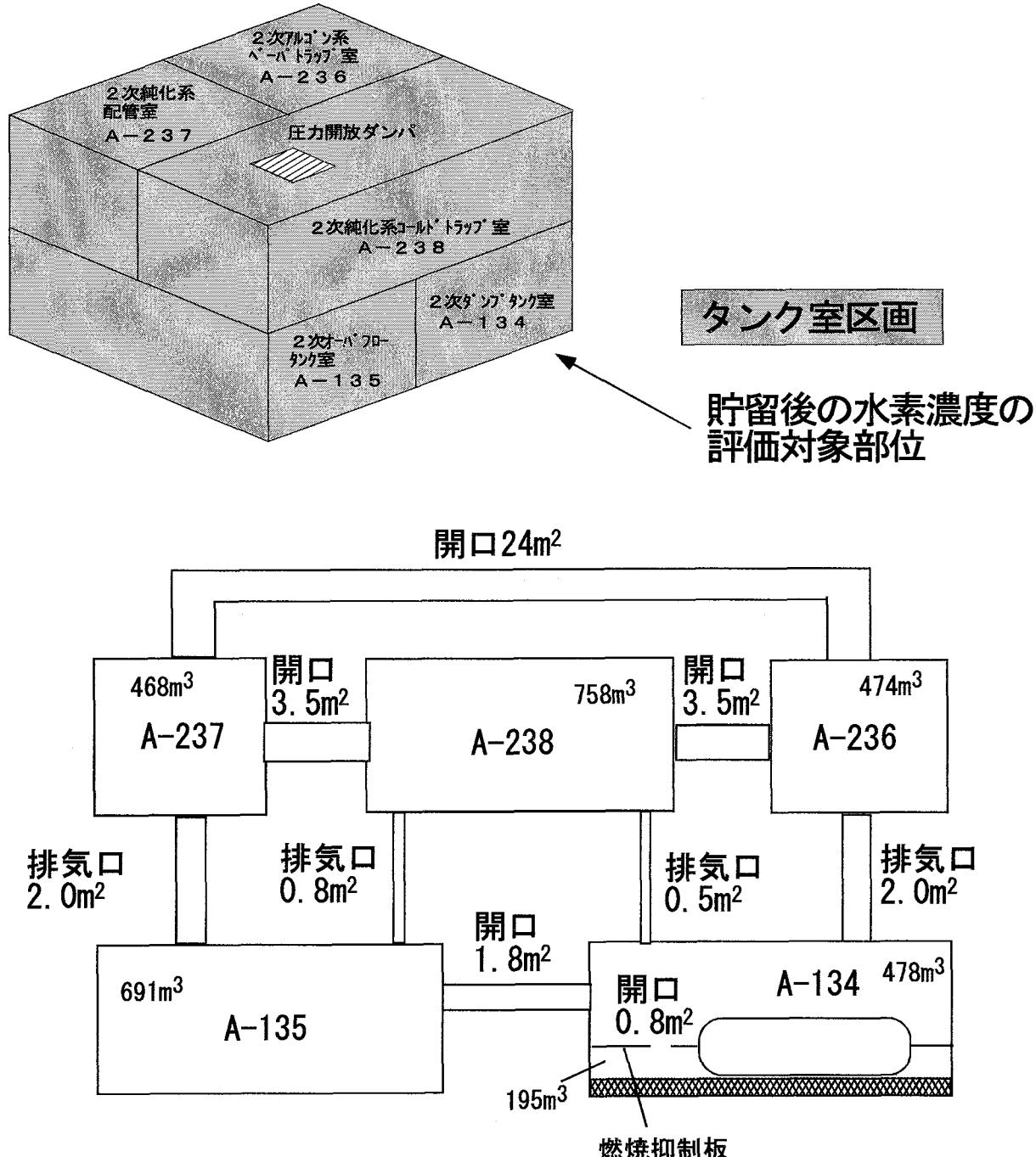
A-135 から A-134 へ流れる自然循環流量に対して、A-134 (燃焼抑制板上部) への水素流入流量は、流入した NaOH が全量水素に変換して、燃焼抑制板下部から上部に流入するとしても、その平均流量は約 8.8kg/h (約 98m<sup>3</sup>/h : 60°C換算) で A-135 から A-134 への上述した自然循環流量に対して体積比で約 1%程度と小さく、また上述したように大きな循環流れがあるため十分混合される。



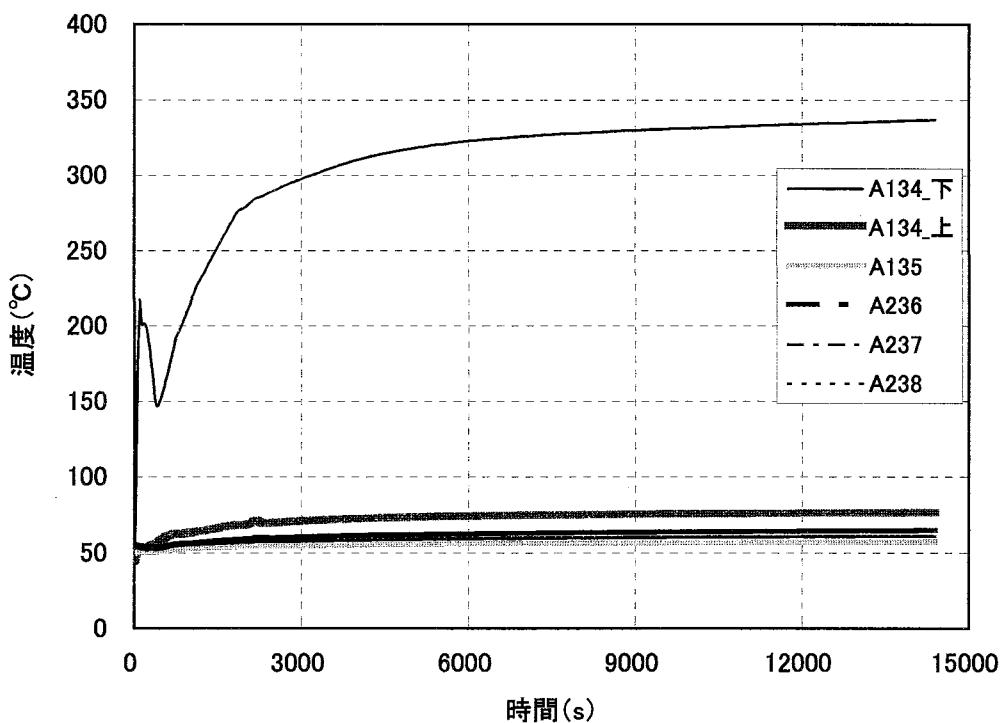
付図3.2-1 Na流入量の時間変化



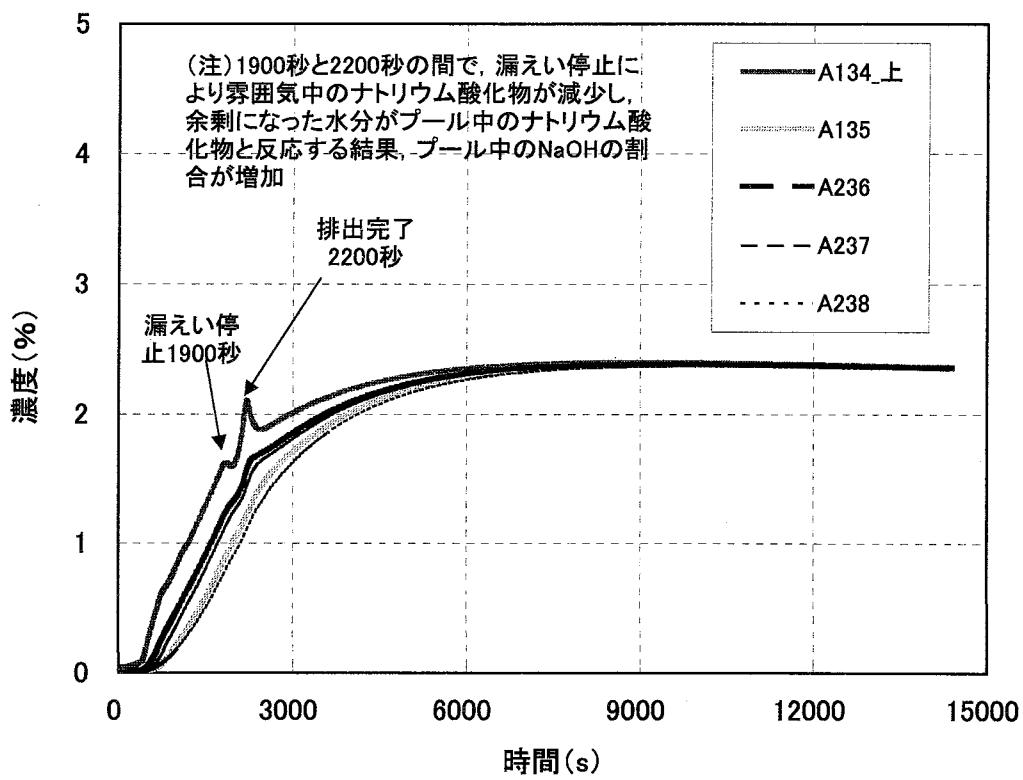
付図3.2-2 貯留室へのNaOH移行量及び水素発生量の時間変化



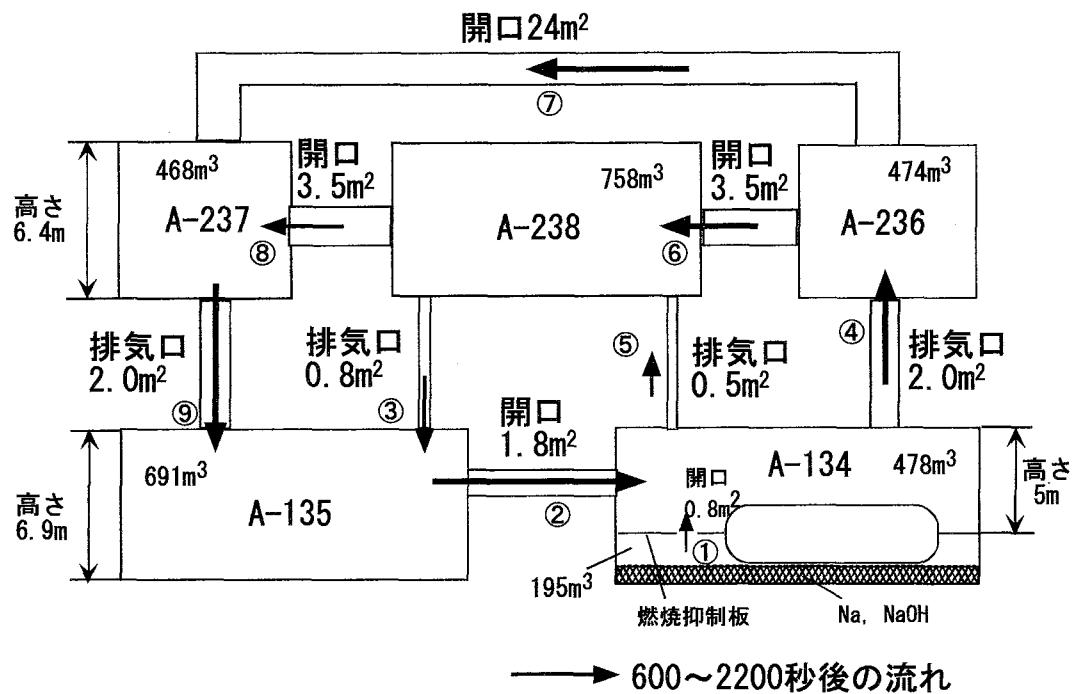
付図3.3-1 SPHINCSコードによる水素移行の解析モデル



付図3.3-2 雰囲気温度の時間変化



付図3.3-3 水素濃度の時間変化



部屋間の循環流量(kg/h)

パス	流れの向き	600秒後	1000秒後	2200秒後
①	A-134下→A-134上	291	149	53
②	A-135→A-134上	7423	8297	10406
③	A-238→A-135	1178	1637	2185
④	A-134上→A-236	6627	7608	9411
⑤	A-134上→A-238	1186	1055	1040
⑥	A-236→A-238	783	1540	2258
⑦	A-236→A-237	5787	5994	7145
⑧	A-238→A-237	567	785	1055
⑨	A-237→A-135	6212	6666	8167

付図3.3-4 部屋間の循環流量の整理