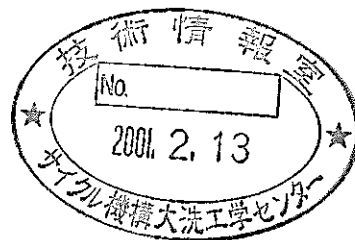


ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの
水分移行挙動の評価
(研究報告書)

2000年2月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

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)

2000

ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱの水分移行挙動の評価 (研究報告書)

中桐 俊男*

要 旨

高速増殖原型炉「もんじゅ」2次主冷却系ナトリウム漏えい事故の原因究明のために大洗工学センターで実施されたナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱ (Run-D4) に関して、実験時のセル内水蒸気のマスバランスを評価し、水蒸気濃度を時刻歴で推定した。マスバランス評価にあたっては、大洗工学センターで実施された複数の実験の結果を参考とし、ASSCOPS コードによる解析結果と比較した。評価結果の概要を以下に示す。

- (1) 試験時には、実験セル内は雰囲気温度が高かった (200℃～300℃) ためエアロゾルの水和物の生成は起こらなかったが、水蒸気濃度測定ライン内ではガス温度が低くなり (20℃～40℃)、エアロゾル水和物の生成による吸湿および水蒸気の凝縮が起こった可能性がある。このため、測定ラインを用いた水蒸気濃度測定値は実験セル内の値とは異なると考えるのが妥当である。
- (2) 試験時の実験セル内の水蒸気濃度は測定ラインを用いた測定結果よりも高く、ナトリウム漏えい中はほぼ約 35,000 ppm であり、漏えい停止前の約 190分後からコンクリート壁温度が約 100℃を超えたため上昇し、漏えい停止直前に最高値の約 70,000 ppm になったと推定される。漏えい中の約 35,000 ppm の推定値はマスバランスから推定した値と測定ライン測定値からライン中の水和物生成を推定して逆算した値がほぼ一致している。しかし、約 190分後からについては、マスバランスからの推定のみしか行えず、コンクリートからの放出水速度はコンクリートの加熱温度履歴による誤差が大きい可能性がある。

* : 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 プラント安全工学グループ

Evaluation of water transport behavior in Sodium Fire Experiment – II

Toshio Nakagiri*

Abstract

Evaluation of water transport behavior in Sodium Fire – II (Run-D4) was performed. Results of other experiments performed in Oarai-Engineering Center were considered in the evaluation, and the results of the evaluation were compared with the calculated results of ASSCOPS code.

The main conclusions are described below.

(1) It was estimated that aerosol hydrates were not formed in the test cell in the experiment, because of high gas temperatures (200°C~300°C), but water vapor absorption by the formation of aerosol hydrates and water vapor condensation were occurred in humidity measure line, because of low gas temperature (20°C~40°C). Therefore, it was considered appropriate that measured water vapor concentration in the humidity measure line was different from the real concentration in the test cell.

(2) Water vapor concentration in the test cell was assumed to be about 35,000 ppm during sodium leak, and reached to about 70,000 ppm because of water release from heated concrete (over 100°C) walls after 190 min from sodium leak started. The assumed value of about 35,000 ppm during sodium leak almost agree with assumed value from the quantity of aerosol in the humidity measure line, but no support for the value of about 70,000 ppm after 190 min could be found. Therefore, water release rate from heated concrete walls can change with their temperature history.

* : Plant Engineering Safety Group, Sodium Safety Engineering Division, OEC

目 次

	ページ
1. 背景	1
2. ナトリウム漏えい燃焼実験-II	2
2.1 概要	2
2.2 実験結果	2
3. 実験2におけるセル内水蒸気のマスバランス評価	4
3.1 水マスバランス評価の概要	4
3.2 計算条件	5
3.3 ASSCOPS Ver.2.1 による評価	6
3.4 計算結果	7
4. 考察	10
4.1 水蒸気マスバランス評価結果について	10
4.2 他の水蒸気消費メカニズム	10
5. まとめ	12
6. 謝辞	13
7. 参考文献	14
Appendix.1 セル内の水マスバランスの簡易評価	A1-1
A1.1 検討の概要	A1-1
A1.2 簡易評価の方法	A1-1
Appendix.2 ナトリウムエアロゾル吸湿効果確認試験結果	A2-1
A2.1 概要	A2-1
A2.2 試験装置・方法、試験条件	A2-1
A2.3 試験結果	A2-1
A2.4 まとめ	A2-1
Appendix.3 Run F8-1 試験結果	A3-1
A3.1 試験装置、試験条件	A3-1
A3.2 試験結果	A3-1
A3.3 結果の評価	A3-2
Appendix.4 エアロゾル吸湿・凝縮以外の水蒸気消費メカニズム	A4-1
A4.1 ライナ下空間への水蒸気の蓄積	A4-1
A4.2 壁・天井へ付着したエアロゾルによる吸湿	A4-3
A4.3 セル内の鋼製構造物との反応による消費	A4-6
A4.4 まとめ	A4-7

図表一覧

表一覧

- 表1 実験2条件一覧
- 表2 換気空調ダクト外面ナトリウム化合物組成分析結果 (28-1~28-3)
- 表3 コンクリート放出水実験でのコンクリートからの放出水量
- 表4 実験2のコンクリートから放出水速度計算結果
- 表5 ASSCOPS Ver.2.1 計算条件一覧
- 表6 水マスバランス計算結果 (最大エアロゾル吸湿速度: 0.470 (kg-h₂O/min))
- 表7 エアロゾル吸湿以外の水蒸気消費量

表A2-1 吸湿効果試験条件一覧

表A2-2 吸湿量測定結果

表A2-3 X線回折分析結果

表A3-1 Run F8-1 試験条件一覧

表A3-2 試験結果概要

表A3-3 セル内エアロゾル組成分析結果

表A4-1 実験2コンクリートからの放出水量分布

表A4-2 天井・壁の面積、解析条件

表A4-3 天井・床へのエアロゾル付着量計算結果

表A4-4 天井・床へ付着したエアロゾルの吸湿量計算結果

表A4-5 SOLFA-1 セル内鋼製構造物表面積、重量一覧

図一覧

- 図1 実験2試験装置概要図
- 図2 水蒸気濃度測定ライン概念図
- 図3 実験2排気流量履歴
- 図4 実験2セル内雰囲気温度履歴
- 図5-1 真空ヘッダー内ガス温度履歴 (TI001)
- 図5-2 真空ヘッダー内ガス温度履歴 (TI002)
- 図6 実験2セル内エアロゾル濃度履歴
- 図7 換気空調ダクト外面のナトリウム化合物サンプル採取位置
- 図8 床ライナ上堆積物下層部分の固体サンプル分析結果
- 図9 実験2セル内水蒸気濃度履歴
- 図10 NaOH-H₂O 二元系状態図
- 図11 実験2のセル内水マスバランスの考え方
- 図12 実験2セル内ガス温度履歴 (スムージング結果)
- 図13 実験2セル内エアロゾル濃度 (再計算、スムージング結果)
- 図14-1 実験2床・天井コンクリート温度履歴
- 図14-2 実験2北面壁コンクリート温度履歴
- 図14-3 実験2東西南壁コンクリート温度履歴
- 図15 実験2壁面領域分割結果
- 図16 実験2コンクリートからの放出水速度履歴 (スムージング結果)

- 図 1 7 水マスバランス計算結果（供給・発生速度）
- 図 1 8 水マスバランス計算結果（消費・排出速度）
- 図 1 9 水蒸気濃度計算結果
- 図 2 0 セル内エアロゾル濃度計算結果（ASSCOPS Ver.2.1）
- 図 2 1 水素濃度計算結果（ASSCOPS Ver.2.1）
- 図 2 2 コンクリートからの放出水量計算結果（ASSCOPS Ver.2.1）
- 図 2 3 ASSCOPS によるその他の計算結果（ASSCOPS Ver.2.1）
- 図 2 4 水蒸気濃度低下メカニズム評価結果

- 図A2-1 吸湿効果試験装置概要
- 図A2-2 NaOH への吸湿量測定結果

- 図A3-1 Run F8-1 試験装置概念図
- 図A3-2 40 リッターライン概念図
- 図A3-3 セル内ガス温度履歴
- 図A3-4 セル内水蒸気濃度履歴
- 図A3-5-1 フィルター部温度履歴（ラインA）
- 図A3-5-2 フィルター分温度履歴（ラインB）
- 図A3-6-1 真空ヘッダー内温度履歴（ラインA）
- 図A3-6-2 真空ヘッダー内温度履歴（ラインB）
- 図A3-7-1 真空ヘッダー内水蒸気濃度履歴（ラインA）
- 図A3-7-2 真空ヘッダー内水蒸気濃度履歴（ラインB）

- 図A4-1 SOLFA-1 床ライナ下空間図
- 図A4-2 ライナ裏面温度履歴
- 図A4-3 床コンクリート温度（表面から 15 mm）履歴
- 図A4-4 Na-Fe-O-H 系化学ポテンシャル図（600℃）

1. 背景

「もんじゅ」2次冷却系ナトリウム漏えい事故の原因究明の一環として実施された「ナトリウム漏えい燃焼実験-II（以下、実験2と略す。）¹⁾」において、1時間30分後～3時間後の間の水蒸気濃度の測定結果は約3,000 ppmで安定し、試験セル外から換気により供給される約15,000 ppmの水蒸気と加熱コンクリートから放出される水蒸気を併せたものに比べ低いものであった。

実験後に実施された ASSCOPS コードによる解析²⁾では、同時時間帯の約3,000 ppmの水蒸気濃度を再現するために、以下の2つの仮定を用いていた。

- (1) ナトリウム燃焼によって生成するエアロゾルは水蒸気との反応により水酸化ナトリウムの水和物 ($\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) になる。
- (2) セル内の自然対流がコンクリート壁面に沿って下降する。この下降流は、コンクリートから放出される水分を多く含んでいると考えられるため、ナトリウムプール（堆積物）に作用する水蒸気フラックスの計算では、セルの平均水蒸気濃度より高い（3倍）水蒸気濃度となる。

しかし、その後に実施された「ナトリウムエアロゾル吸湿効果確認試験」（詳細は Appendix.2 参照。以下、吸湿試験と略す。）および「ナトリウム漏えい燃焼環境における床ライナの腐食発生条件確認実験」（以下、Run F8-1 試験と略す。）³⁾の結果から、水酸化ナトリウムは実験2時のセル内雰囲気温度の高温条件（200℃～300℃）では水和物を生成しないことがわかった。また、Run F8-1試験の結果から、水蒸気濃度測定ライン内でエアロゾルの吸湿により水蒸気濃度の測定結果が低くなっていた可能性が示された。

このため、本報告書では、上記2つの試験（吸湿試験、Run F8-1 試験）の結果および「コンクリートからの放出水測定試験」（以下、コンクリート放出水試験と略す。）⁴⁾で得られたコンクリートからの放出水速度を考慮して、試験時の水蒸気のマスバランスを評価し、実験2の水蒸気濃度を推定した。また、同じ放出水速度を入力とした ASSCOPS コードによる解析を実施し、結果を上記のマスバランス評価結果と比較した。

2. ナトリウム漏えい燃焼実験-II¹⁾

2.1 概要

「もんじゅ」2次冷却系ナトリウム漏えい事故の原因究明の一環として、原子炉補助建屋部分モデル試験装置（SOLFA-1；コンクリート製矩形セル）の内部に模擬漏えい配管、換気空調ダクト、グレーチングおよび床ライナ等を実機と同様に配置し、ナトリウムの漏えい条件を事故時と同様に模擬して行われた。実験装置の概要を図1に、実験条件を表1に示す。また、実験時の水蒸気濃度測定ラインの概念を図2に示す。

2.2 実験結果

実験結果のうち、水蒸気濃度に関係のあるものについて、概要を以下に示す。

(1) 換気流量履歴

実験装置内の排気流量を図3に示す。排気流量は、実験中を通じてほぼ計画値である $35 \text{ Nm}^3/\text{min}$ に対し、 $\pm 5 \text{ m}^3/\text{min}$ で推移していた。しかし、実験開始後約2時間前後は不安定となり、約3時間40分以降はやや高めになっている。

(2) 試験セル内雰囲気温度

ガス空間には58点の熱電対を、特に漏えい部下方を密に配置した。試験時のセル内の代表的な雰囲気温度（TE5801～TE5819）の履歴を図4に示す。

セル内の温度分布は、高温のガスが北側から南側、西側から東側へ対流し、10数分後にはセル内温度が 100°C 程度になった。その後時間の経過とともに温度は上昇していき、1時間後で $200\sim 300^\circ\text{C}$ となり、1時間30分以降は $250\sim 350^\circ\text{C}$ で安定した。

(3) 水蒸気濃度測定ライン温度

水蒸気濃度測定ラインの温度は測定されていないが、真空ヘッダー内の温度は測定されており（TI001、TI002）、温度変動を考慮してもそれぞれ $20^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$ 、 $17^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ の範囲にあった。ヘッダー内のガス温度履歴を図5-1（TI001）、図5-2（TI002）に示す。

ヘッダー内のガス温度が周期的に変動しているのは、ガス吸入および真空ポンプによる減圧の影響である。ガス温度はガス吸入直後に急上昇した後なだらかに低下して吸入前の温度程度まで低下する。その後真空ポンプによる減圧のため急低下した後なだらかに上昇して減圧前の温度程度まで上昇する。このため、水蒸気濃度測定のために吸入されたガスの温度は $30^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ 、サンプリング終了時のガス温度は $25^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ であると考えられる。

(4) セル内エアロゾル濃度

試験時のセル内のエアロゾル濃度履歴を図6に示す。

実験開始から1時間まではセル中央側が高く、30分後に最大値 $26.6 \text{ g-Na}/\text{m}^3$ となり、1時間以降は北壁側が高く、2時間35分後に最大値 $32.2 \text{ g-Na}/\text{m}^3$ となった。漏えい終了後（実験開始から4時間以降）は $0.1 \text{ g-Na}/\text{m}^3$ 以下に低下した。

(5) エアロゾル化学形態分析結果

試験中に化学形態分析用エアロゾルサンプルは採取されておらず、エアロゾルの化学組成は不明である。

換気空調ダクト外面で、漏えいナトリウムが直接かからない部分に付着したナトリウム化合物は、ほぼエアロゾルが付着したものと考えられる。この部分のサンプル（試料 No. 28-1 ~ 28-3、位置は図 7 に示す。）の組成を表 2 に示すが、主成分は Na_2CO_3 及び $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ であり、実験終了後に空気中の CO_2 やセル雰囲気中の湿分と反応して生成したものと考えられ、実験中のエアロゾル組成の参考とはならないと考えられる。

また、床ライナ上の堆積物のうち、実験中にエアロゾルが沈降し、実験後の雰囲気湿分との反応の影響がないと考えられる固体堆積物下層部分の固体サンプルの分析結果を図 8 に示すが、この部分では金属ナトリウム、 Na_2O 、 Na_2O_2 、 NaOH および床ライナ端の立ち上がり部（サンプル No. 9-2, -4, -6）に $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ が検出された。検出された $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ は実験中のエアロゾルの成分と考えられていたものであるが、「吸湿試験」、「Run F8-1 試験」結果等から、実験後の温度堆積物の温度低下により生成したものと考えられ、この部分の分析結果も実験中のエアロゾル組成の参考とはならないと考えられる。

(6) セル内水蒸気濃度

試験時のセル内の水蒸気濃度履歴を図 9 に示す。

試験セル内水蒸気濃度は試験開始後急速に低下して 1 時間 30 分まで減少が続き、1 時間 30 分後 ~ 3 時間後までの間は約 3,000 ppm で、全体にゆっくり上昇していた。3 時間を過ぎた頃からセル内水蒸気濃度はやや上昇し始め、漏えい終了後にさらに顕著に上昇し、ピークで約 22,000 ppm と吸気中の水蒸気濃度より約 40% 高くなった。

水蒸気測定ラインの概念は図 2 に既に示した。湿度計のセンサーは真空ヘッダー内部に取り付けられており、SOLFA-1 試験容器から真空ヘッダーに至る配管の途中にはエアロゾル除去用のフィルターが取り付けられている。水蒸気濃度測定前に真空ヘッダー内を真空にしておき、測定時にはバルブの開閉により SOLFA-1 内の空気、エアロゾルを同時に吸引する。

図 10 に示す $\text{NaOH}-\text{H}_2\text{O}$ 二元系の状態図⁹⁾ からわかるように、60℃以下では、 NaOH の水和物 ($\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaOH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等) が生成するため、ライン内でエアロゾルの温度が 60℃以下に低下すれば、 NaOH エアロゾルが吸湿して $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ になり、真空ヘッダー内の湿度計センサー部に到達する水蒸気量が少なくなる可能性がある。この場合には、水蒸気濃度の測定結果は SOLFA-1 内より低くなることが考えられる。

真空ヘッダー内の温度は図 5-1、図 5-2 から、最高でも 40℃である。配管中の温度は測定されていないが、ヘッダー内温度から、エアロゾルが存在するフィルター以前の配管内温度が 60℃以下になる可能性はあるものと考えられる。

3. 実験2におけるセル内水蒸気のマスバランス評価

「コンクリート放出水実験」の結果から求めた実験2でのコンクリートからの放出水速度履歴を使用し、水マスバランスの簡易評価、セル内水蒸気濃度の推定およびASSCOPS Ver.2.1による水蒸気濃度の計算を実施した。水マスバランス評価の詳細についてはAppendix.1を参照のこと。

3.1 水マスバランスの簡易評価の概要

今回の評価で考慮したメカニズムを以下に示す。

(1) 水蒸気の供給メカニズム

- (a) コンクリートからの放出水
- (b) 換気による流入
- (c) 水素再結合による発生

(2) 水蒸気の消費メカニズム

- (a) 換気による排出
- (b) エアロゾルによる吸収
- (c) ナトリウムとの反応による消費
- (d) プール内の酸化物との反応による消費

これらのメカニズムの概念を図11に示す。バランス式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 & (Q_{in} \cdot \rho_{g,in} \cdot Ch_{2o,in}) + W_{p,con} + W_{p,rc} \\
 & = (Q_{out} \cdot \rho \cdot Ch_{2o}) + W_{c,aero} + W_{c,na} + W_{c,ox} \\
 & \quad + W_{atm}
 \end{aligned} \tag{1}$$

- Q_{in} : 吸気ガス流量 (m^3/min)
- $\rho_{g,in}$: 吸気ガス比重量 ($kg-gas/m^3$)
- $Ch_{2o,in}$: 吸気ガスの水蒸気濃度 ($kg-h_2o/kg-gas$)
- $W_{p,con}$: 加熱コンクリートの水放出速度 ($kg-h_2o/min$)
- $W_{p,rc}$: 水素の再結合による水の発生速度 ($kg-h_2o/min$)
- Q_{out} : 排気ガス流量 (m^3/min)
- ρ_g : 排気ガス (セル内ガス) 比重量 ($kg-gas/m^3$)
- Ch_{2o} : 排気ガス (セル内ガス) の水蒸気濃度 ($kg-h_2o/kg-gas$)
- $W_{c,aero}$: エアロゾルによる吸湿速度 ($kg-h_2o/min$)
- $W_{c,na}$: ナトリウム (液滴、プール) と水の反応速度 ($kg-h_2o/min$)
- $W_{c,ox}$: プール内酸化物と水の反応速度 ($kg-h_2o/min$)
- W_{atm} : 余剰水蒸気量 (セル内雰囲気の水蒸気変化量) ($kg-h_2o/min$)

(1) 式中の W_{atm} は供給量から消費量を差し引いて算出される余剰水蒸気量でセル内雰

囲気の水蒸気量変化分である。

3.2 計算条件

マスバランス評価には実験での以下の測定値を時系列でスムージングしたものを使用した。スムージングの方法は「探索的データ解析法」のうち、「時系列データならし」の方法⁹⁾を使用した。

(1) セル内ガス温度

実験での測定値（測定点 19 個：TE5801～TE5819）の平均値を算出し、その平均値を時系列でスムージングしたものを使用した。使用したガス温度履歴を図 1 2 に示すが、スムージングの効果は小さい。

(2) エアロゾル濃度

図 6 に示した 2 つの測定値の算出に使用されたガス体積（ヘッダー内容積：1 リットー）は既に図 5-1、図 5-2 に示したようにガス温度が低下した条件のものである。実際のセル内のガス温度は時刻歴で変化し、ナトリウム漏えい中は約 200～300℃で推移しているため、ガスは膨張する。このため、セル内のエアロゾル濃度は図 6 に示した測定値よりも低下する。

2 つの測定値（セル中央、北側上）を平均し、ガスの膨張の影響を考慮して再計算してスムージングした結果を図 1 3 に示す。ヘッダー内温度はヘッダー内ガス温度の時刻歴の平均値として 27.5℃とし、セル内のガス温度は図 1 2 のスムージングしたものを使用した。

(3) エアロゾル発生・沈降速度

上記のようにセル内のエアロゾル濃度はセル外で測定された値の約 1/2 の約 10 g-Na/m³であったと推定される。しかし、従来の ASSCOPS の解析では、エアロゾル発生速度は過去の知見¹⁾からスプレイ燃焼では 100%、プール燃焼では約 25% という値が使用されており、変更する理由は見当たらない。このため、従来の ASSCOPS の解析では考慮していなかった乱流等によるエアロゾルの沈降の促進の効果があったものと解釈した。エアロゾルの沈降速度はマスバランス計算では使用されないが、3.3 項で述べる ASSCOPS Ver.2.1 による計算では促進効果を考慮した計算を行った。

(4) コンクリートからの放出水速度

最高到達温度により領域分割された実験 2（SOLFA-1）の壁面積と、その各領域の最高到達温度、加熱速度等を再現した「コンクリート放出水実験」での放出水量の測定結果（各条件の測定結果の平均値）から、実験 2 での時刻歴（10 分ごと）の放出水速度を求め、その放出水速度を時系列でスムージングして計算に使用した。

「コンクリート放出水実験」での各時刻の累積放出水量の測定結果（2～3 回の実験の平均値）を表 3 に、実験時の壁各所の温度履歴を図 1 4 に、領域分割結果を図 1 5 に示す。また、放出水速度の計算結果およびスムージング結果を表 4 および図 1 6 に示す。

この結果から、ナトリウム漏洩開始とほぼ同時にコンクリートからの水放出も開始し、約 100 分後まで単調に増加し、約 100 分～約 200 分後までは約 60 kg-h₂O/hr で推移していたが、ナトリウム漏えい停止前の約 190 分後から増加を始め、ナトリウム漏えい停止の約 220 分（3 時間 40 分）後に放出水速度が最大になることがわかる。

図 16 に ASSCOPS で従来使用されていたモデルによる放出水速度履歴を合わせて示すが、約 200 分（3 時間 20 分：ナトリウム漏えい停止直前）から、従来の ASSCOPS モデルによる放出水速度は小さくなることがわかる。

(5) エアロゾルの吸湿速度

Appendix.2 に示す「吸湿実験」および Appendix.3 に示す「Run F8-1 実験」の結果³⁾ から実験 2 のセル内ガス温度である 200℃～300℃では NaOH の水和物は生成しないと考えられるため、エアロゾルの最大吸湿速度を以下のように設定した。詳細については Appendix.1 を参照のこと。

$$W_{c,aero,max} = 0.470 \text{ (kg-h}_2\text{O/min)} \quad (2)$$

また、エアロゾル吸湿速度は、ASSCOPS のモデルと同様に、セル内のエアロゾル濃度、水蒸気濃度に比例すると考え、以下モデルで計算した。

$$W_{c,aero} = A \cdot Ch_{2O} \cdot Caero \quad (3)$$

A : 比例定数（ここでは = 5.5 E-7）
Caero : セル内エアロゾル濃度 (g-Na/m³)

上記の比例定数 A については、吸湿速度の最大値が (2) 式の約 0.470 (kg-h₂O/min) となる値を使用した。

3.3 ASSCOPS Ver.2.1⁹⁾ による評価

簡易マスバランス評価と併せ、同じコンクリートからの放出水速度履歴を使用した ASSCOPS Ver.2.1 による評価を実施した。計算に際しては、コンクリートからの放出水速度履歴を入力とするよう、一時的にソースプログラムを変更して使用した。計算条件の概要を以下に従来の計算条件²⁾ との比較を表 5 に示す。

(1) エアロゾル沈降速度

従来の ASSCOPS の計算では、エアロゾルの沈降モデルとして次式のものを使用していた。

$$dn/dt = nvh \quad (4)$$

dn/dt : 沈降速度 (個/sec)

n : 粒子個数 (個)
 v : 粒子の落下速度 (m/sec)
 h : 落下高さ (入力データ : セル高さの 1/2 の値)

$$v = \rho \cdot d^2 \cdot g / (18 \cdot \eta) \quad (5)$$

ρ : 粒子の密度 (kg/m³)
 d : 粒子の平均径 (m)
 g : 重力加速度 (m/sec²)
 η : ガスの粘性係数 (Pa sec/m²)

$$n = w / (\pi / 6 \cdot d^3 \cdot \rho) \quad (6)$$

w : 粒子の総質量 (kg)

今回の計算では、セル内のエアロゾル濃度を 3.2 節の推定値 (約 10 g-Na/m³) に合わせるため、エアロゾル沈降速度を大きくするよう (4) 式に係数を乗じた次式を使用した。

$$dn/dt = k \cdot nvh \quad (7)$$

k : 係数 (-)

係数の値はパラメータ計算により 5.0 とした。

(2) エアロゾルの水和割合

NaOH・H₂O の生成は考慮せず、エアロゾルの水和割合は 0% とした。

(3) プールへ供給される水蒸気フラックス

従来の ASSCOPS による実験 2 の解析では、プールへ供給される水蒸気フラックスの計算については、水蒸気濃度をセル平均の 3 倍としていたが、今回は 1 倍 (従来の 1/3) とした。

(4) 水素の再結合割合

水素の再結合割合は簡易評価と同じ 90% とした。

3.4 計算結果

3.4.1 簡易水バランス評価結果

表 6 に簡易水マスバランスの計算結果を示す。

(1) セル内の水の供給・発生速度履歴を図 17 に示す。図から供給・発生源のほとんどは加熱コンクリートからの放出であることがわかる。このため、水の供給・発生速度はコン

クリートからの放出データに大きく依存することになる。

(2) セル内の水の消費・排出速度履歴を図18に示す。図から主な消費・排出メカニズムは換気による排出であり、ナトリウム漏えい中の消費・排出速度全体の約1/2を、漏えい停止後はほとんど全てを占めることがわかる。エアロゾルによる吸湿は全体の1/4程度、ナトリウムとの反応、プール酸化物との反応速度はそれぞれほぼ0.2 (kg-h₂o/min) 以下程度である。

エアロゾルによる吸湿速度の寄与が小さいのは、従来の計算よりエアロゾル濃度を低い(10 g-Na/m³) - ことを考慮したエアロゾル発生速度 (0.470 kg-Na/m³) としているためである。

(3) 水蒸気濃度の簡易評価結果を、実験での測定値、ASSCOPS Ver.2.1 による計算結果とともに図19に示す。

また、図には水蒸気濃度測定ライン内でのエアロゾルによる吸湿を考慮した推定値も併せて示した。この推定では、水蒸気濃度測定ラインのフィルターにセル内と同じ濃度のエアロゾルが捕集され、エアロゾルの全量が NaOH から NaOH・H₂O に変化し、水蒸気濃度の測定値はエアロゾルによる吸湿分だけ低下したものと考えた。

$$\text{Ch2o}' = \text{Ch2o} + \Delta\text{Ch2o,aero} \quad (8)$$

Ch2o' : 水蒸気濃度測定ライン内でのエアロゾルによる吸湿を考慮した、セル内の推定水蒸気濃度
 Ch2o : セル内水蒸気濃度の測定値
 ΔCh2o,aero : 水蒸気濃度測定ライン内でのエアロゾルの吸湿による水蒸気濃度低下分。以下の反応により、実験セル内よ同じ濃度のエアロゾルが吸湿したとした。



これらの結果から、簡易評価結果は ASSCOPS Ver.2.1 による解析結果に近い結果を与えることがわかる。水蒸気濃度はナトリウム漏えい開始とともに上昇し、漏えい停止まで約 35,000 ppm 程度で推移する。この水蒸気濃度は水蒸気濃度測定ライン内でエアロゾルがほぼ全量水和物 (NaOH・H₂O) になる濃度である。また、漏えい停止直前の約 190分後から急上昇し、漏えい停止時に最高値の約 70,000 ppm となる。

ナトリウム漏えい開始から約 1 時間後までは、簡易マスバランス評価結果は ASSCOPS Ver.2.1 による解析結果より約 10,000 ppm 程度高いが、これは簡易マスバランス評価では初期のエアロゾル成分に吸湿性の Na₂O、Na₂O₂ の割合が多いことを考慮していないため水蒸気濃度を高めに評価しているためである。

また、漏えい停止前後で簡易マスバランス評価結果は ASSCOPS Ver.2.1 による解析結果より約 5,000 ppm 程度高いが、これは簡易マスバランス評価で使用したこの時間帯でのエアロゾル濃度 (スミージングしたもの、図13) が ASSCOPS Ver.2.1 によるエ

アロゾル濃度の解析結果よりも小さいため、エアロゾルによる吸湿速度が小さいためである。

3.4.2 ASSCOPS Ver.2.1 による計算結果

(1) ASSCOPS Ver.2.1 によるエアロゾル濃度の計算結果を図 2 0 に示す。ナトリウム漏えい中のエアロゾル濃度の計算結果は 10 g-Na/m^3 程度で推移していることがわかる。

(2) ASSCOPS Ver.2.1 による水素濃度の計算結果を図 2 1 に示す。計算結果は測定値をやや上回る程度である。

(3) ASSCOPS Ver.2.1 おけるコンクリートからの累積放出水量の計算条件を図 2 2 に示す。

(4) ASSCOPS Ver.2.1 による他の計算結果を従来の計算条件による計算結果とともに図 2 3 に示す。上記以外の計算結果については、従来の計算結果²⁾ とほとんど変わらない。

4. 考察

4.1 水蒸気マスバランス評価結果について

図19から、ナトリウム漏えい中（～3時間）のセル内水蒸気濃度は水蒸気濃度測定ライン内エアロゾルのほぼ全量が水和物（ $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）になる濃度であると考えられる。Run F8-1 結果からも上記のように実験2のエアロゾル濃度ではほぼ全量がライン内で水和物を生成すると考えられることから、ナトリウム漏えい中のセル内水蒸気濃度は約35,000 ppm であり、水蒸気濃度測定ライン内でエアロゾルの吸湿により測定値が約3,000 ppm 程度まで低下したものと考えられる。また、下記のようにヘッダー内温度が低く、約30,000 ppm 以上の水蒸気はヘッダー内で凝縮して測定できなかった可能性もある。

3時間以降では、セル内エアロゾル濃度は低下し、水蒸気濃度ライン内でエアロゾルの吸湿の影響は時間の経過とともに小さくなるものと考えられる。しかし、この時のヘッダー内ガス温度は最低で約24℃であり、ヘッダー外部の実験室内温度も約24℃である。この温度での飽和水蒸気圧は約29,000 ppm であるため、これ以上の濃度の水蒸気は凝縮する。このため、ヘッダーに取り付けられた露点計で測定しうる最高の水蒸気濃度もほぼこの濃度であると考えられる。ヘッダー温度の測定誤差が2～3℃程度あるとすれば、3時間以降の水蒸気濃度の測定値（約25,000 ppm）以上になった場合には凝縮が起こる可能性は高いと考えられる。これらの推定を図24に図示する。

また、図16に示したように、今回使用したコンクリートからの放出水速度はナトリウム漏えい停止直前の約190分後に大きくなっているが、これはこの時刻に約100℃～110℃の自由水の放出開始温度に達したコンクリート面積が広いためである。このため、コンクリート温度の時間履歴、コンクリートの領域分割等が変化した場合には、放出水速度は変化する可能性がある。

4.2 他の水蒸気消費メカニズム

水蒸気濃度測定ラインでのNaOHエアロゾルの吸湿以外についても、セル内の水蒸気濃度を低下させるメカニズムは存在する可能性がある。このため、以下の3つのメカニズムについて、それぞれが水蒸気濃度を低下させる程度を概算し、水和に代わる水蒸気消費メカニズムになりうるかどうかを評価した。検討の詳細はAppendix.4を参照のこと。

- (1) 床ライナ下空間への水蒸気の蓄積
- (2) 壁・天井へ付着したエアロゾルによる吸湿
- (3) 床ライナとの反応による消費

検討結果の概要を以下に示す。また、概要を表7にまとめた。

4.2.1 床ライナ下空間への水蒸気の蓄積

床ライナ下空間へたまる得る水の量は空間のガス温度が100℃以上では最大でも1 kg であり、ガス温度が100℃以下ではライナ下コンクリートからの全放出水量の44.2 kg

が最大量となる。44.2 kg の場合にはコンクリートからの放出水量 213 kg と換気（吸気）による量 79 kg の合計約 290 kg の約 15% であるが、実際には床ライナ裏面温度は 200℃～400℃で推移しており、コンクリート温度（表面から 15 mm）も 100℃以上の部分があるため、床ライナ下空間のうちガス温度が 100℃以上で推移した部分がかかなりあると考えられる。このため、凝縮する水蒸気量はそれほど多くなく、床ライナ下空間への水蒸気の蓄積量は 44.2 kg よりかなり少なくなるものと考えられる。このため、このメカニズムが、40,000 ppm のセル内の水蒸気濃度を測定値の 3,000 ppm に低下させた原因になったとは考えにくい。

4.2.2 壁・天井へ付着したエアロゾルによる吸湿

壁・天井への付着に関して支配的であると考えられる 2 つのメカニズム（ブラウン拡散沈着、熱泳動沈着）⁹⁾ による付着量は約 5 kg-Na 以下であり、全エアロゾル発生量の 138 kg-Na の約 4% 以下である。このため、エアロゾルが吸収する水蒸気量も全エアロゾルが吸収する水蒸気量の約 4% 以下となると考えられる。このため、セル内の水蒸気濃度に与える影響は小さい。

4.2.3 セル内の鋼製構造物との反応による消費

水蒸気と鋼製構造物の反応のうち、水蒸気が鉄に吸収され、セル内の水蒸気濃度を低下させる反応としては次式のものが考えられる。



この反応は、Na₂O の活量が非常に小さい（10⁻¹²～10⁻¹⁵）の場所のみで発生可能であり⁹⁾、床ライナプール内、グレーチング、ダクトの漏えいナトリウムが直接かかる部分では発生しないものと考えられる。

これら以外の場所で、余剰水蒸気（NaOH エアロゾルが全て NaOH・H₂O となるのに必要な分）が、セル内鋼製構造物と反応したとすると、構造物は全面が約 0.38 mm 腐食することが必要となる。実際には床ライナのプール以外の部分では板厚の減少は 0.1 mm～0.2 mm であり、ダクト、グレーチングその他の漏えいナトリウムが直接接触れない部分では有意な腐食は認められていない。このことから、上記の余剰水蒸気量のうち構造物と反応した量は少なく、40,000 ppm の水蒸気濃度を 3,000 ppm まで低下させた原因になったとは考えにくい。

4.2.4 他の水蒸気消費メカニズムのまとめ

以上の結果から、次の 3 つのメカニズムは水蒸気濃度測定ライン内でのエアロゾル吸湿、水蒸気の凝縮に代わる水蒸気消費メカニズムとなる可能性は小さいことがわかった。

- (1) 床ライナ下空間への水蒸気の蓄積
- (2) 壁・天井へ付着したエアロゾルによる吸湿
- (3) 鋼製構造物との反応による消費

5. まとめ

実験2の試験時の水蒸気挙動について、「コンクリート放出水実験」結果から算出した放出水量を使用してマスバランスを評価し、セル内の水蒸気濃度を推定した結果以下の結論を得た。

- (1) 実験2でのコンクリートからの放出水速度は、ナトリウム漏えい中は従来 ASSCOPS で使用されていたモデルによる計算値に近く、漏えい停止後にはコンクリート温度上昇により従来のモデルによる計算値より大きかった可能性がある。しかし、コンクリートからの放出水量はコンクリートの加熱温度履歴、壁面の領域分割方法に大きく依存するため誤差が大きいものと考えられる。
- (2) セル内のエアロゾル濃度は測定結果の約半分の 10 g-Na/m^3 程度であったと考えられる。
- (3) 試験時には、実験セル内は雰囲気温度が高かった ($200^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$) ため、エアロゾルの水和物の生成は起こらなかったと考えられる。他方、水蒸気濃度測定ライン内では、ガス温度が低くなり ($20^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$)、エアロゾル水和物の生成による吸湿および水蒸気の凝縮が起こった可能性がある。このため、測定ラインを用いた水蒸気濃度測定値は実験セル内の値とは異なるのが妥当である。
- (4) 試験時の実験セル内の水蒸気濃度は測定ラインを用いた測定結果よりも高く、ナトリウム漏えい中はほぼ約 $35,000 \text{ ppm}$ であり、漏えい停止前の約 190分後からコンクリート壁温度が約 100°C を超えたため上昇し、漏えい停止直前に最高値の約 $70,000 \text{ ppm}$ になったと推定される。漏えい中の約 $35,000 \text{ ppm}$ の推定値はマスバランスから推定した値と測定ライン測定値からライン中の水和物生成を推定して逆算した値がほぼ一致している。しかし、約 190分以降については、マスバランスからの推定のみしか行えず、コンクリートからの放出水速度はコンクリートの加熱温度履歴による誤差が大きい可能性がある。

実験時の水蒸気濃度測定ラインでの水蒸気の凝縮、エアロゾルによる吸湿の程度を定量的に確認するためには、燃焼実験-IIの体系、温度条件等を模擬した小規模実験を実施する必要がある。

6. 謝辞

本報告書を作成するにあたり、貴重な助言を与えて下さった、プラント安全工学グループの三宅収グループリーダー、「Run F8-1試験」実験結果を提供して下さい下さった二神研究員、「ナトリウムエアロゾル吸湿効果確認試験」の実施準備および分析の手配を実施して下さい下さった東興機械株式会社の方々および原子力技術株式会社の加藤一憲氏、ASSCOPS Ver.2.1 の解析を手伝って下さった検査開発株式会社の松木卓夫氏、原子力システム株式会社の豊原大輔氏に感謝します。

7. 参考文献

- 1) 内山尚基、他、"もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明 - ナトリウム漏えい燃焼実験 - II -", "PNC報告書、PNC TN9410 97-051、1997年3月.
- 2) 石川浩康、他、"ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS version 2.0 の整備と検証 (3) ナトリウム漏えい燃焼実験 - II による検証"、日本原子力学会「1999年春の年会」予稿集 P. 482 (口頭発表)、1999年3月.
- 3) 二神敏 他、"ナトリウム漏えい燃焼環境における床ライナの腐食発生条件確認実験 (Run F7-3、Run F8-1)"、JNC TN9400 2000-092、2000年8月.
- 4) 「動力炉・核燃料開発事業団高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明結果について」、科学技術庁、1996年2月20日.
- 5) 日本ソーダ工業会、"ソーダハンドブック"、1975.
- 6) 奥野忠一、"探索的データ解析法"、現代統計実務講座テキスト、財団法人実務教育研究所、1988年.
- 7) 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年1月.
- 8) Mitsutsuka Norimasa, "ABC-INTG Code Features," PNC TN241 84-05, April, 1984.
- 9) 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, 1997.

表1 燃焼実験-II 実験条件一覧

項目	実験条件
漏えいナトリウム温度	480℃
ナトリウム漏えい速度	0~179 min : 54.1 g/sec
	179~192 min : 47.5 g/sec
	192~202 min : 39.2 g/sec
	202~224 min : 39.3 g/sec
ナトリウム漏えい時間	224 分
ナトリウム総漏えい量	690 kg
換気流量	~35 Nm ³ /min
セル内初期酸素濃度	約 21%

表2 換気空調ダクト外面ナトリウム化合物組成分析結果 (28-1~28-3)

(単位 : wt.%)

試料名	金属 Na	Na ₂ O ₂	Na ₂ O	NaOH	Na ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	Na ₅ FeO ₄	Na ₂ ZnO ₂ · 2H ₂ O	ZnO	その他	試料中 Na量
28-1	< 0.1	< 0.1	-	-	52.4	35.3	-	-	-	12.3 (水分、Al、Ti、Zn)	34.6
28-2	< 0.1	< 0.1	-	-	27.7	55.0	-	-	-	17.3 (水分、Al、Ti、Zn)	32.4
28-3	< 0.1	< 0.1	-	-	62.1	18.9	-	-	-	19.0 (水分、Al、Ti、Zn)	34.0

表3 コンクリート放出水実験でのコンクリートからの放出水量

時間 (分)	放出水量*(g)				
	L-120	L-160	L-350	U-120	U-150
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1.40	0.00	0.75	0.00	0.63
40	3.83	0.00	3.75	0.00	1.63
50	4.97	0.83	7.80	0.00	1.93
60	5.17	2.17	13.55	0.00	2.67
70	5.17	4.10	20.05	0.70	3.20
80	5.17	6.50	30.25	0.93	3.77
90	5.33	9.90	39.75	1.47	4.73
100	5.63	13.10	49.45	2.87	6.40
110	6.50	16.77	58.85	4.77	8.73
120	7.77	20.03	67.50	5.47	12.30
130	9.33	22.60	75.70	6.00	15.83
140	13.53	24.63	87.60	6.60	19.57
150	15.83	25.97	97.45	7.27	23.03
160	17.80	27.47	107.10	7.77	26.33
170	18.93	29.00	114.00	8.27	29.63
180	19.30	31.07	136.90	8.90	32.93
190	19.87	34.17	152.65	9.70	37.33
200	20.07	37.90	168.30	11.30	42.10
210	20.33	41.93	184.15	12.83	46.73
220	20.90	45.57	197.80	15.27	51.80
230	22.57	49.80	213.05	18.10	56.60
240	24.30	54.67	228.70	21.60	62.67
250	26.20	59.37	241.95	25.10	67.63
260	27.20	64.20	253.80	28.80	72.90
270	28.03	68.33	262.85	32.17	78.13
280	29.13	71.37	276.70	34.57	83.40
290	29.43	73.67	283.85	36.53	87.33
300	29.90	75.77	290.25	37.97	91.77

* : 表面積 0.0314 m² の試験体からの放水量

表4 実験2でのコンクリートからの放出水速度

時間 (分)	コンクリート試験放出水速度*2 (kg/m ² /hr)					実験2放出水速度 (kg/hr)	
	L-120	L-160	L-350	U-120	U-150	オリジナル*3	平滑化後
実験2該当 領域*1、面積 (m ²)	C, H, K, L 83.5	B, G, I 11.6	A, F 10.6	D, J 69.3	E 7.3	182.3	同左
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	17.12
10	0.268	0.000	0.143	0.000	0.120	24.74	23.79
20	0.464	0.000	0.573	0.000	0.191	46.24	27.60
30	0.218	0.159	0.774	0.000	0.057	28.65	28.28
40	0.038	0.256	1.099	0.000	0.141	18.84	27.74
50	0.000	0.369	1.242	0.134	0.101	27.45	28.06
60	0.000	0.459	1.949	0.044	0.109	29.82	31.26
70	0.031	0.650	1.815	0.103	0.183	37.82	39.49
80	0.057	0.611	1.854	0.268	0.319	52.40	50.46
90	0.166	0.701	1.796	0.363	0.445	69.47	57.53
100	0.243	0.623	1.653	0.134	0.682	59.26	59.27
110	0.298	0.491	1.567	0.101	0.675	59.14	62.78
120	0.803	0.388	2.274	0.115	0.715	108.78	69.77
130	0.439	0.256	1.882	0.128	0.661	73.32	71.32
140	0.376	0.287	1.844	0.096	0.631	65.53	67.42
150	0.216	0.292	1.318	0.096	0.631	46.62	65.47
160	0.071	0.396	4.376	0.120	0.631	69.82	66.56
170	0.109	0.592	3.010	0.153	0.841	64.60	69.02
180	0.038	0.713	2.990	0.306	0.911	71.00	70.97
190	0.050	0.770	3.029	0.292	0.885	71.90	74.79
200	0.109	0.696	2.608	0.466	0.969	84.19	87.80
210	0.319	0.808	2.914	0.541	0.917	111.08	106.76
220	0.331	0.931	2.990	0.669	1.160	124.91	118.40
230	0.363	0.898	2.532	0.669	0.948	120.84	117.39
240	0.191	0.923	2.264	0.707	1.007	107.01	106.89
250	0.159	0.789	1.729	0.644	0.999	92.65	95.95
260	0.210	0.581	2.646	0.459	1.007	91.47	82.87
270	0.057	0.439	1.366	0.375	0.751	55.80	63.37
280	0.090	0.401	1.223	0.275	0.848	50.38	47.11
290	0.076	0.191	1.022	0.115	0.642	32.07	36.07
300	0.076	0.191	0.850	0.134	0.415	29.91	29.90

* 1 : 図 1 4 に示す分割領域。

* 2 : 「放出水速度」は表3の放出水量を1m²あたりに換算し、各時刻の放出水量の差から算出した。

* 3 : L-120~U150までの放出水速度に実験2での該当面積を乗じ、合計したものである。

表 5 ASSCOPS Ver.2.1 計算条件一覧

項目	解析条件
ナトリウム漏えい率	2 - 179 min : 54 g/sec 179 - 192 min : 48 g/sec 192 - 224 min : 39 g/sec
ナトリウム漏えい時間	222 min
漏えいナトリウム初期温度	480°C
漏えいナトリウム量	690 kg
セルの空間容積	170 m ³
セル内初期酸素濃度	21 vol.%
セル内初期湿度、温度	R. H. 48%、24°C
外気の初期湿度、温度	R. H. 58%、21°C
プール燃焼面積	床上 : 5.9 m ² グレーチング等上 : 1.7 m ²
換気流量	33 Nm ³ /min
スプレー燃焼条件	頂部直径 : 0.1 m、スプレーコーン広がり角度 : 20度 漏えい高さ (漏えい部から床まで) : 3.6 m 質量平均液滴径 : 4.6 mm
ナトリウムと酸素の反応	酸素濃度 10% 以上 $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 : 40$ 酸素濃度 10% 未満 $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 : 40$
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化 プール : 反応生成物の 25% がエアロゾル化
プールからガスへの輻射伝熱係数	0.65
ガスから壁への輻射伝熱係数	0.9 (コンクリートの輻射率)
コンクリートからの水分放出条件	「コンクリートからの放出水測定実験」結果に基づく放出水速度 (表 4)
プールへの水蒸気供給	自然対流相当
水素の再結合割合	90% (スプレーとプールに共通)
エアロゾルと水分の反応	$\text{Na}_2\text{O} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2$

表6 水マスバランス計算結果 (最大エアロゾル吸湿速度 : 0.470 (kg-h2o/min))

時間 (min)	ガス温度 (℃)	エアロゾル 濃度 (g-Na/m3)	水蒸気濃度 測定値 (ppm)	セル内エアロ ゾル濃度 (g-Na/m3)	コンクリート 放出水速度 (kg-h2o/hr)	供給・発生速度 (kg-h2o/min)				消費・排出速度 (kg-h2o/min)				余剰 水蒸気量** (kg-h2o/min)	セル内水蒸気 モル数** (mol-h2o)	水蒸気濃度 予測値 (ppm)		
						コンクリート からの放出	換気 (吸気)	水素再結合 による発生	供給・発生 小計	換気 (排気)	エアロゾル との反応	ナトリウム との反応	フール酸化物 との反応				消費速度 小計*1	消費・排出 小計
0	24.0	0.00	16376	0.00	17.12	0.285	0.348	0.074	0.707	0.383	0.000	0.002	0.040	0.122	0.505	0.202	107.3	15376
10	100.9	18.42	13667	14.63	23.79	0.397	0.348	0.080	0.824	0.415	0.317	0.088	0.044	0.449	0.864	-0.040	84.9	16670
20	160.9	18.42	10382	12.61	27.60	0.460	0.348	0.087	0.895	0.457	0.301	0.097	0.048	0.446	0.903	-0.008	80.6	18355
30	199.8	18.32	6144	11.51	28.28	0.471	0.348	0.090	0.910	0.478	0.287	0.101	0.051	0.438	0.916	-0.006	77.3	19187
40	226.3	18.09	4000	10.76	27.74	0.462	0.348	0.091	0.902	0.483	0.272	0.102	0.051	0.424	0.908	-0.006	74.0	19413
50	245.3	17.86	3329	10.24	28.06	0.468	0.348	0.093	0.909	0.492	0.263	0.103	0.052	0.419	0.911	-0.002	72.7	19780
60	254.5	17.76	2993	10.00	31.26	0.621	0.348	0.098	0.967	0.523	0.273	0.109	0.055	0.438	0.962	0.006	75.9	21027
70	258.4	17.72	2760	9.91	39.39	0.657	0.348	0.111	1.116	0.600	0.310	0.124	0.063	0.497	1.097	0.019	86.3	24091
80	265.0	17.72	2631	9.78	50.46	0.841	0.348	0.129	1.318	0.710	0.363	0.144	0.075	0.582	1.292	0.026	101.0	28531
90	275.0	17.70	2628	9.60	57.53	0.959	0.348	0.142	1.449	0.793	0.397	0.158	0.084	0.639	1.432	0.017	110.7	31844
100	278.5	17.61	2753	9.49	59.27	0.988	0.348	0.146	1.482	0.821	0.407	0.163	0.087	0.656	1.477	0.005	113.8	32961
110	281.9	17.40	2989	9.32	62.78	1.046	0.348	0.152	1.547	0.860	0.418	0.169	0.091	0.679	1.538	0.008	118.5	34541
120	284.4	17.16	3278	9.16	69.77	1.163	0.348	0.163	1.674	0.932	0.445	0.181	0.099	0.725	1.657	0.017	127.9	37446
130	286.4	17.30	3574	9.19	71.32	1.189	0.348	0.167	1.703	0.954	0.458	0.185	0.101	0.744	1.699	0.005	130.6	38348
140	288.2	18.10	3836	9.58	67.42	1.124	0.348	0.160	1.632	0.912	0.456	0.178	0.096	0.731	1.643	-0.011	124.4	36646
150	288.9	18.75	4196	9.91	65.47	1.091	0.348	0.156	1.595	0.881	0.456	0.173	0.093	0.722	1.603	-0.008	119.9	35384
160	289.1	18.79	4675	9.93	66.56	1.108	0.348	0.156	1.614	0.886	0.459	0.174	0.094	0.727	1.613	0.001	120.6	35582
170	288.3	18.50	5152	9.78	69.02	1.150	0.348	0.160	1.659	0.911	0.466	0.178	0.096	0.741	1.652	0.007	124.2	36513
180	284.2	18.13	5822	9.67	70.97	1.183	0.348	0.164	1.694	0.935	0.472	0.182	0.099	0.753	1.687	0.007	128.3	37549
190	277.8	16.78	6290	9.05	74.79	1.247	0.348	0.171	1.766	0.988	0.467	0.191	0.105	0.762	1.750	0.016	137.2	39692
200	273.3	13.40	6880	7.29	87.80	1.463	0.348	0.197	2.009	1.171	0.446	0.219	0.124	0.789	1.960	0.048	164.0	47058
210	270.2	9.71	7729	5.31	106.76	1.779	0.348	0.236	2.363	1.464	0.406	0.262	0.155	0.823	2.287	0.076	206.2	58824
220	260.3	7.21	8964	4.02	118.40	1.973	0.348	0.263	2.585	1.692	0.355	0.293	0.179	0.827	2.519	0.066	242.8	67986
230	235.9	4.56	12307	2.66	117.39	1.957	0.348	0.000	2.305	1.809	0.251	0.000	0.191	0.443	2.252	0.053	272.0	72678
240	205.6	1.60	17722	0.99	106.89	1.782	0.348	0.000	2.130	1.812	0.094	0.000	0.192	0.286	2.098	0.032	289.7	72794
250	181.8	0.11	22335	0.07	95.95	1.599	0.348	0.000	1.947	1.748	0.007	0.000	0.185	0.191	1.939	0.008	294.0	70219
260	164.7	0.04	24370	0.03	82.87	1.381	0.348	0.000	1.729	1.568	0.002	0.000	0.168	0.170	1.759	-0.029	277.7	63812
270	151.9	0.03	24920	0.02	63.37	1.066	0.348	0.000	1.404	1.330	0.001	0.000	0.141	0.142	1.473	-0.069	239.6	53450
280	142.1	0.03	25017	0.02	47.11	0.785	0.348	0.000	1.133	1.087	0.001	0.000	0.115	0.116	1.204	-0.070	200.4	43684
290	133.4	0.03	25017	0.02	36.07	0.601	0.348	0.000	0.949	0.906	0.001	0.000	0.096	0.097	1.003	-0.054	170.6	36397
300	124.9	0.03	25017	0.02	29.9	0.498	0.348	0.000	0.846	0.794	0.001	0.000	0.084	0.085	0.879	-0.032	152.6	31886

*1 : 「消費速度小計」はエアロゾルとの反応、ナトリウムとの反応、フール酸化物との反応の合計
 *2 : 「余剰水蒸気量」は「供給・発生速度」と「消費・排出速度」の差である。
 *3 : 「セル内水蒸気モル数」はその時刻でセル内に存在する水蒸気のモル数

表7 エアロゾル吸湿以外の水蒸気消費量

メカニズム名	計算結果	評価結果
床ライナ下空間への蓄積	蓄積量 a) 空間温度 100℃ 以上の場合 : 最大 1 kg b) 空間温度 100℃ 以下の場合 : 最大 44.2 kg	セル内への水の供給量約 290 kg-h ₂ O (コンクリート放出水 : 213 kg-h ₂ O + 換気 (吸気) による量 : 79 kg-h ₂ O) の約 15%。
壁・天井へ付着したエアロゾルの吸湿	付着エアロゾル量 a) エアロゾル径 10 μm の場合 : 1.45 kg-Na b) エアロゾル径 1 μm の場合 : 4.03 kg-Na c) エアロゾル径 0.1 μm の場合 : 4.81 kg-Na	全エアロゾル発生量 138 kg-Na の 4% 以下。
鋼製構造物との反応	床ライナ上、グレーチング上プール以外の全面腐食の場合 a) 腐食量 : 233.28 kg-Fe b) 腐食厚さ : 0.38 mm	実験での腐食量は約 19%。 a) 腐食量 : 44.23 kg-Fe b) 腐食厚さ : 床ライナ (プールを除く) 上のみで 0.2 mm

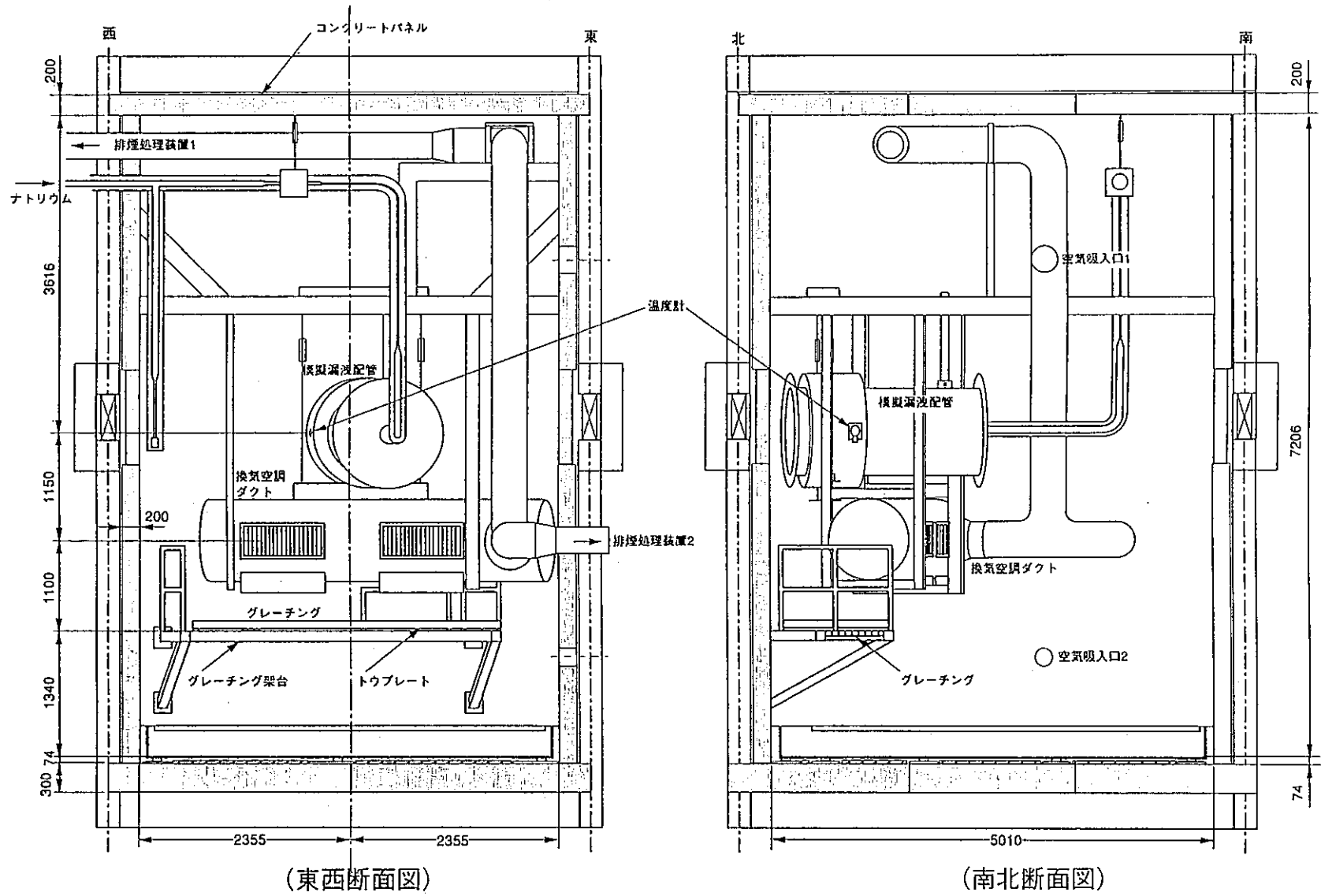


図1 実験2 試験装置概要図

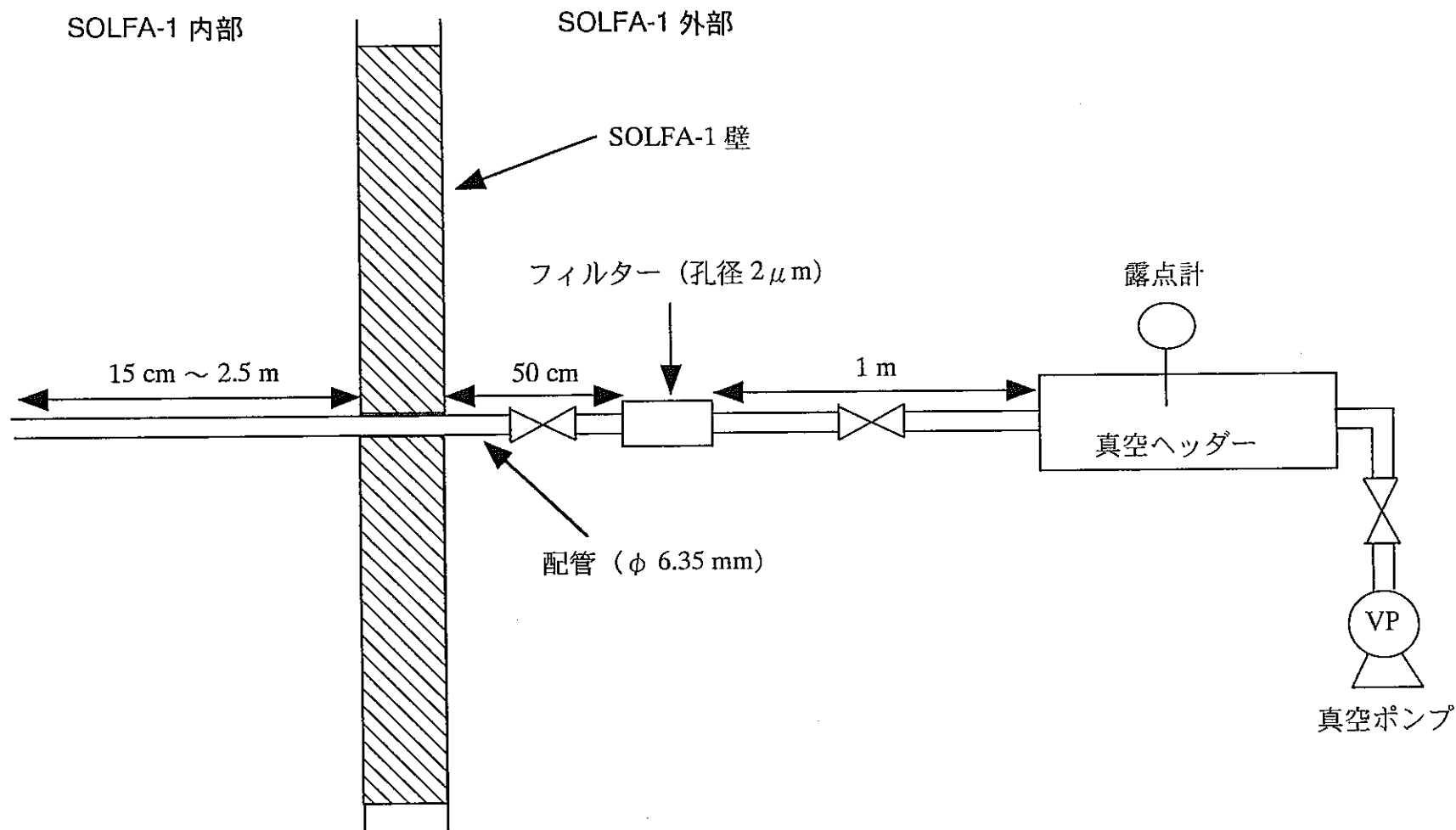


図2 水蒸気濃度測定ライン概念図

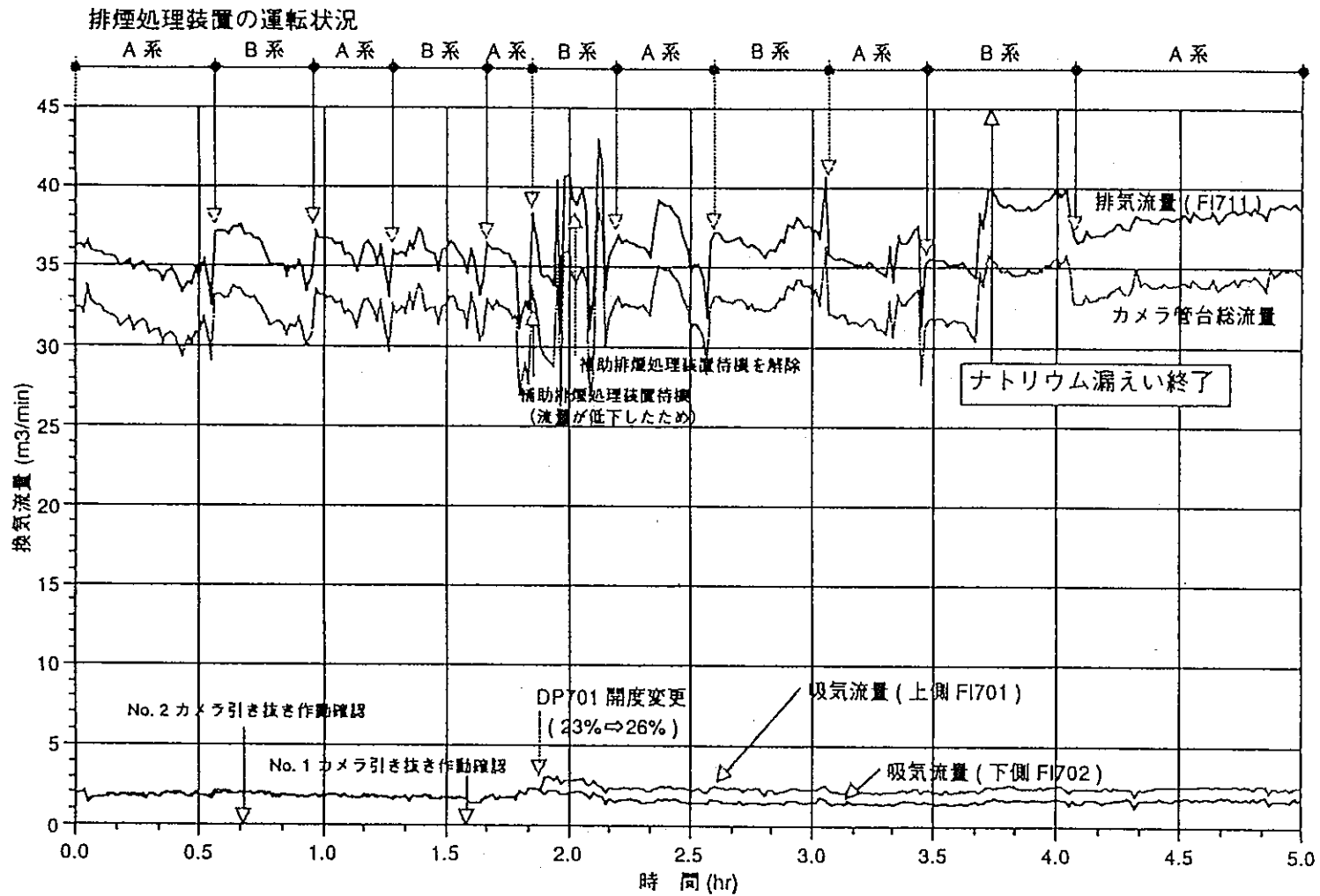


図3 実験2 排気流量履歴

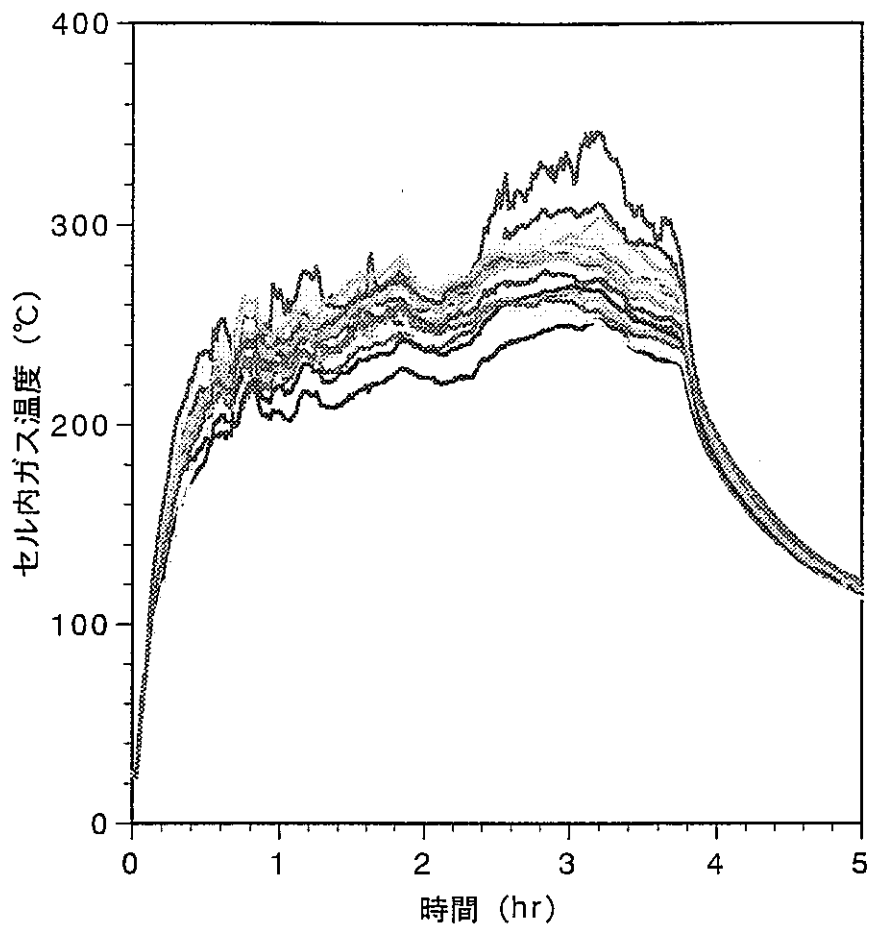


図 4 実験 2 セル内雰囲気温度履歴

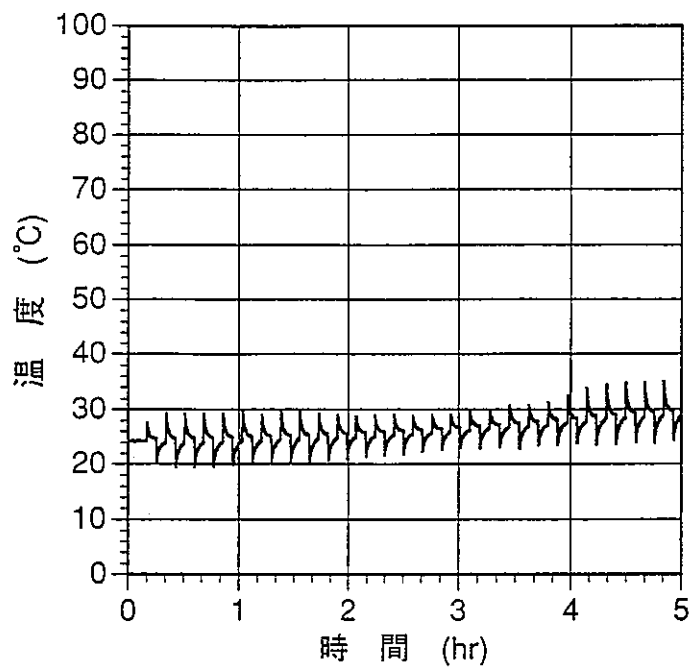


図 5-1 真空ヘッダー内ガス温度履歴 (TI001)

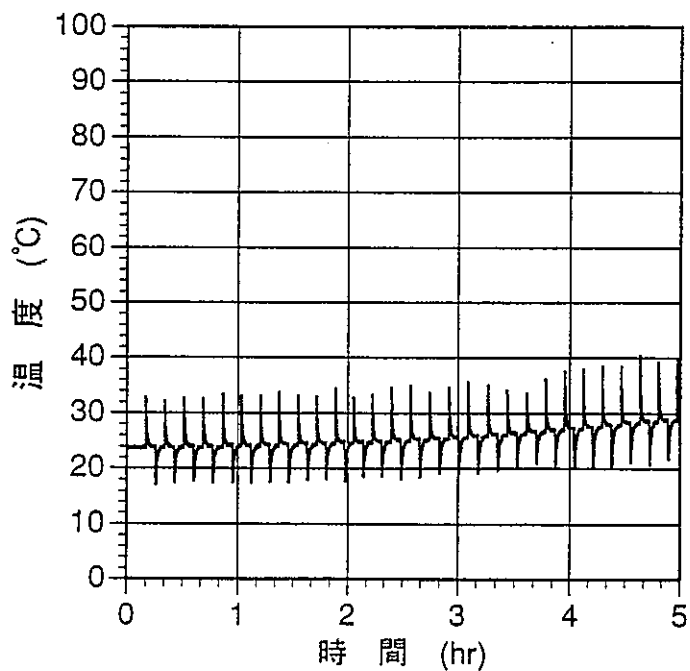


図 5-2 真空ヘッダー内ガス温度履歴 (TI002)

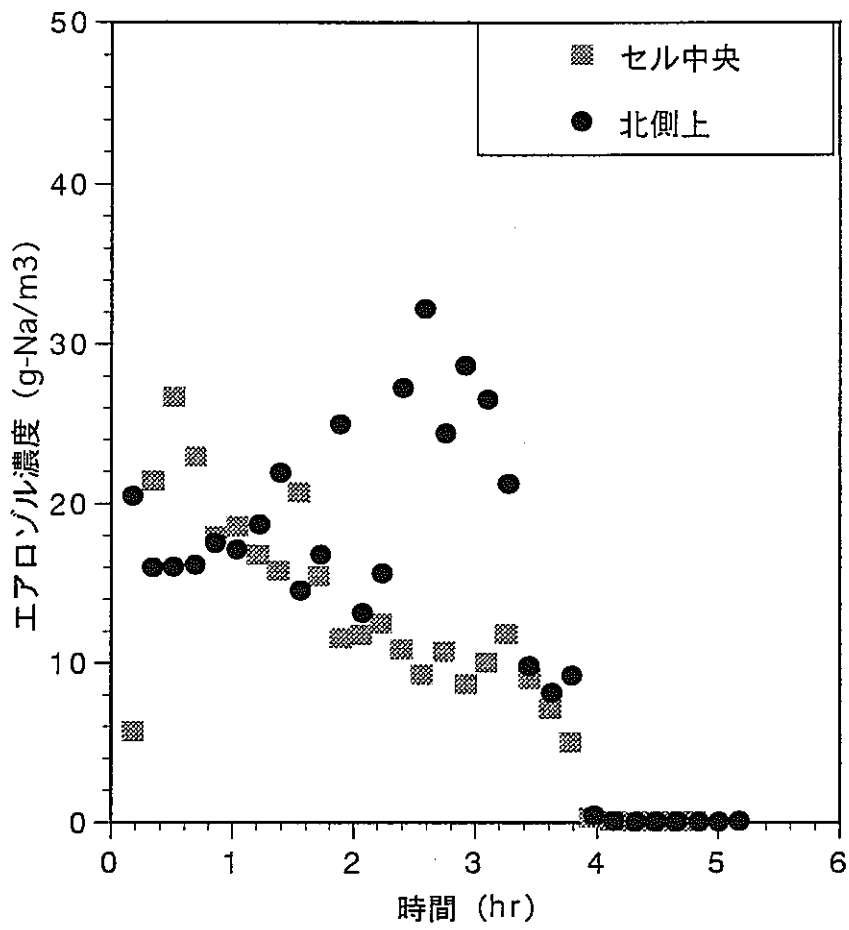


図6 実験2 セル内エアロゾル濃度履歴

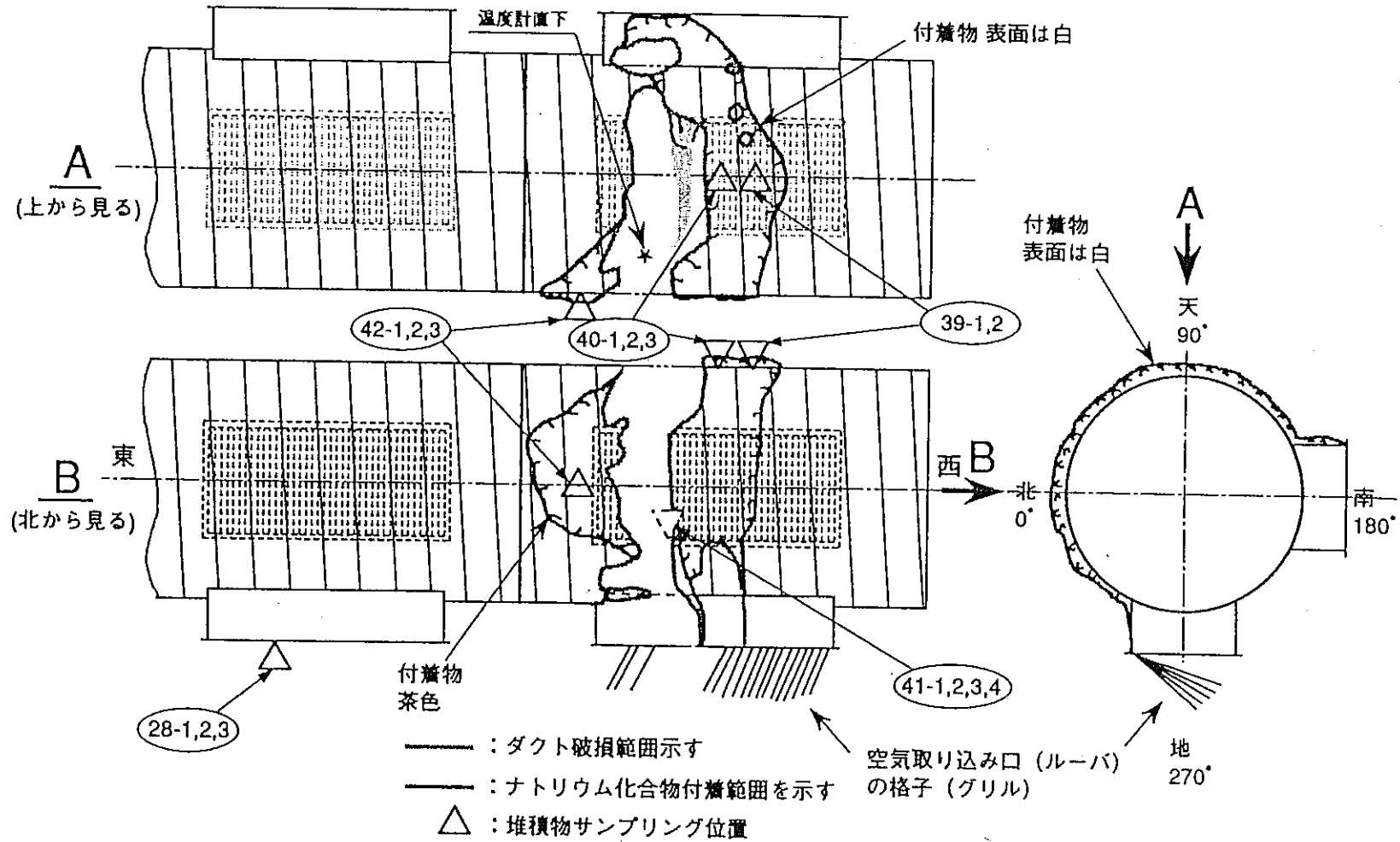
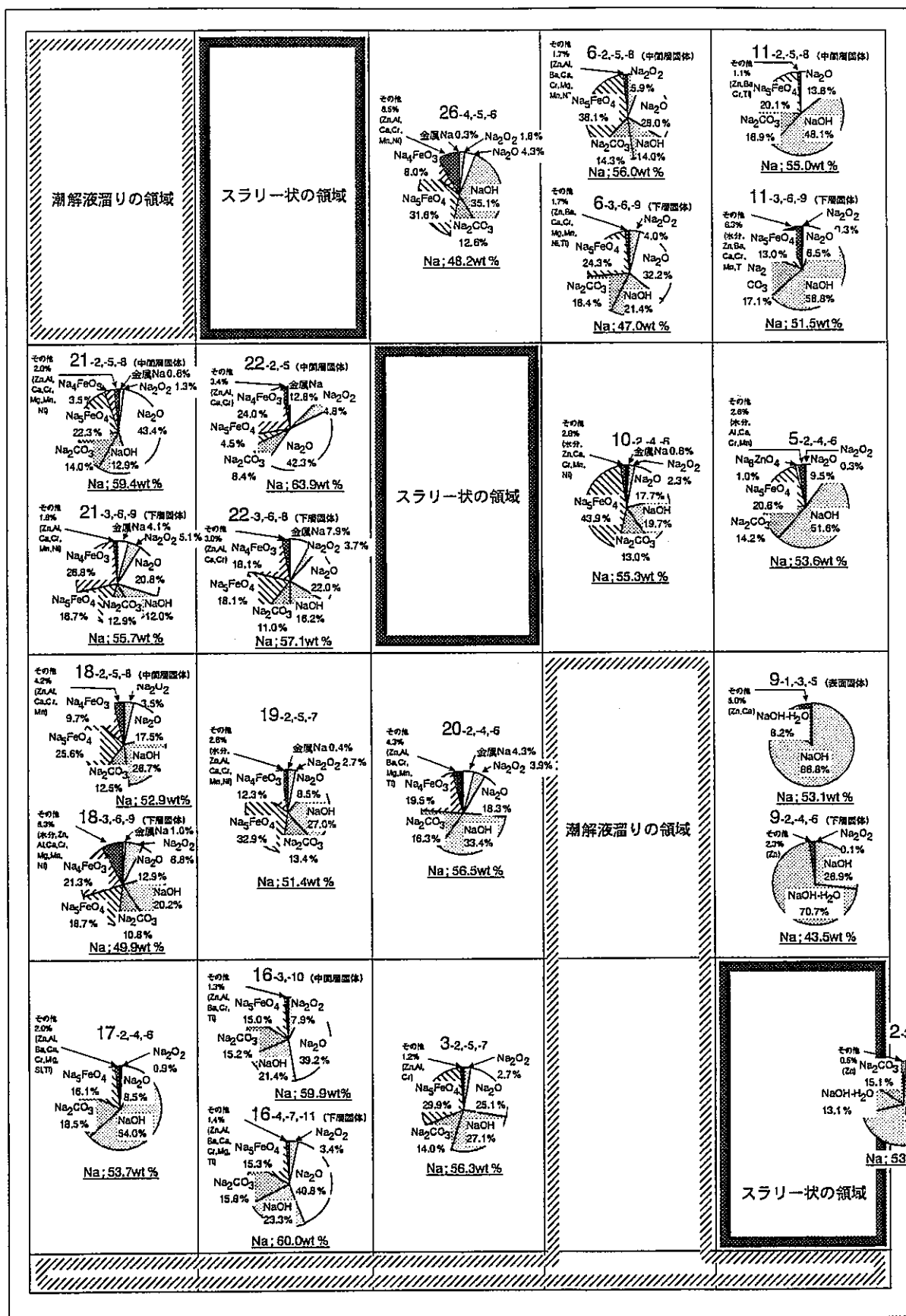


図7 換気空調ダクト外面のナトリウム化合物サンプル採取位置



入口扉

図 8 床ライナ上堆積物下層部分の固体サンプル分析結果

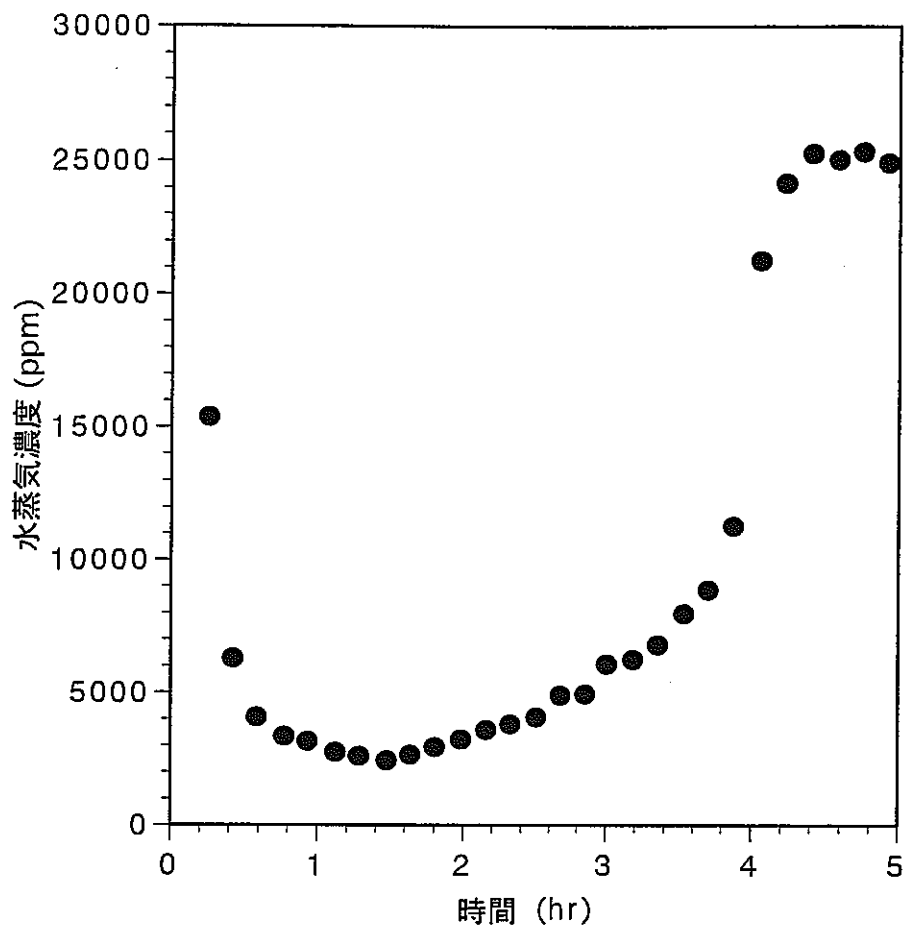


図 9 実験 2 セル内水蒸気濃度履歴

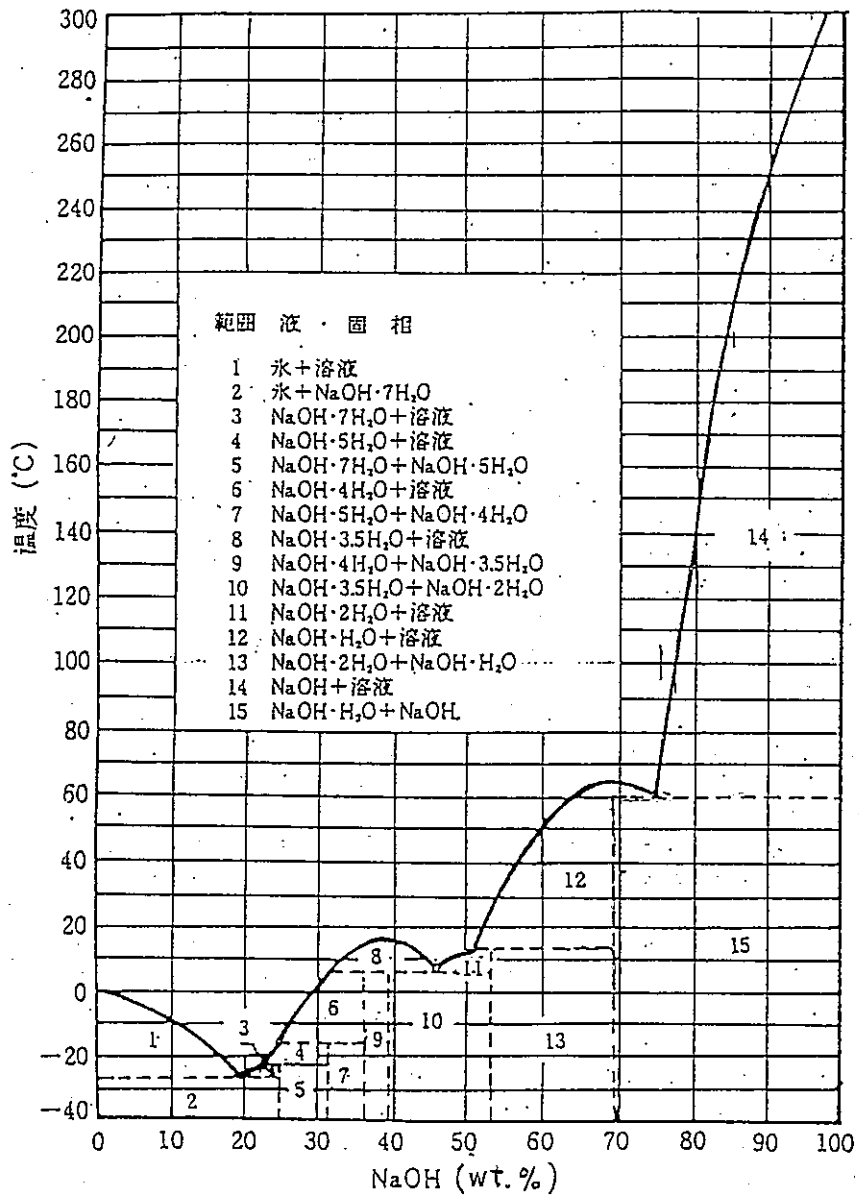


图 10 NaOH-H₂O 二元系状态图

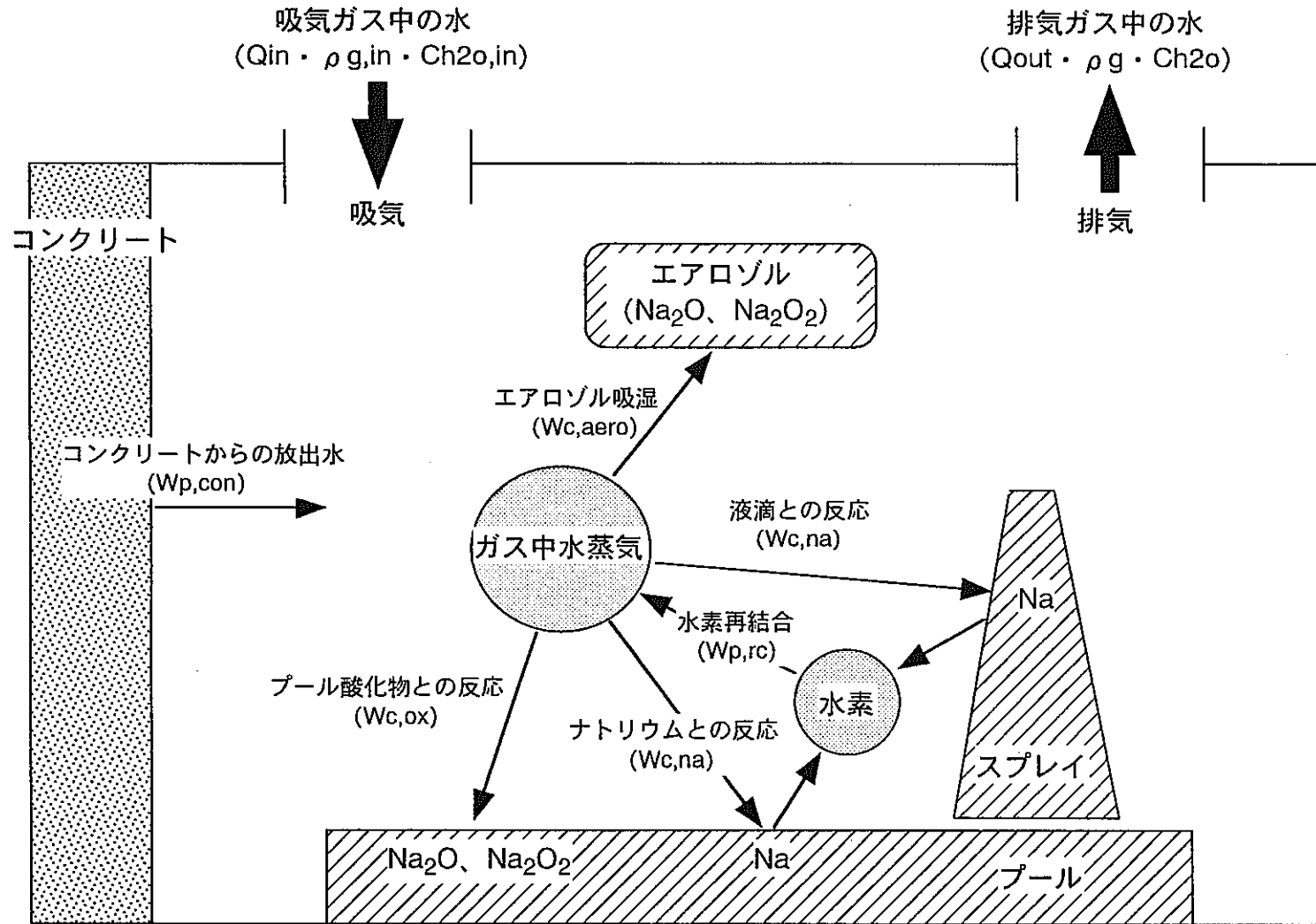


図 1 1 実験 2 のセル内水マスバランスの考え方

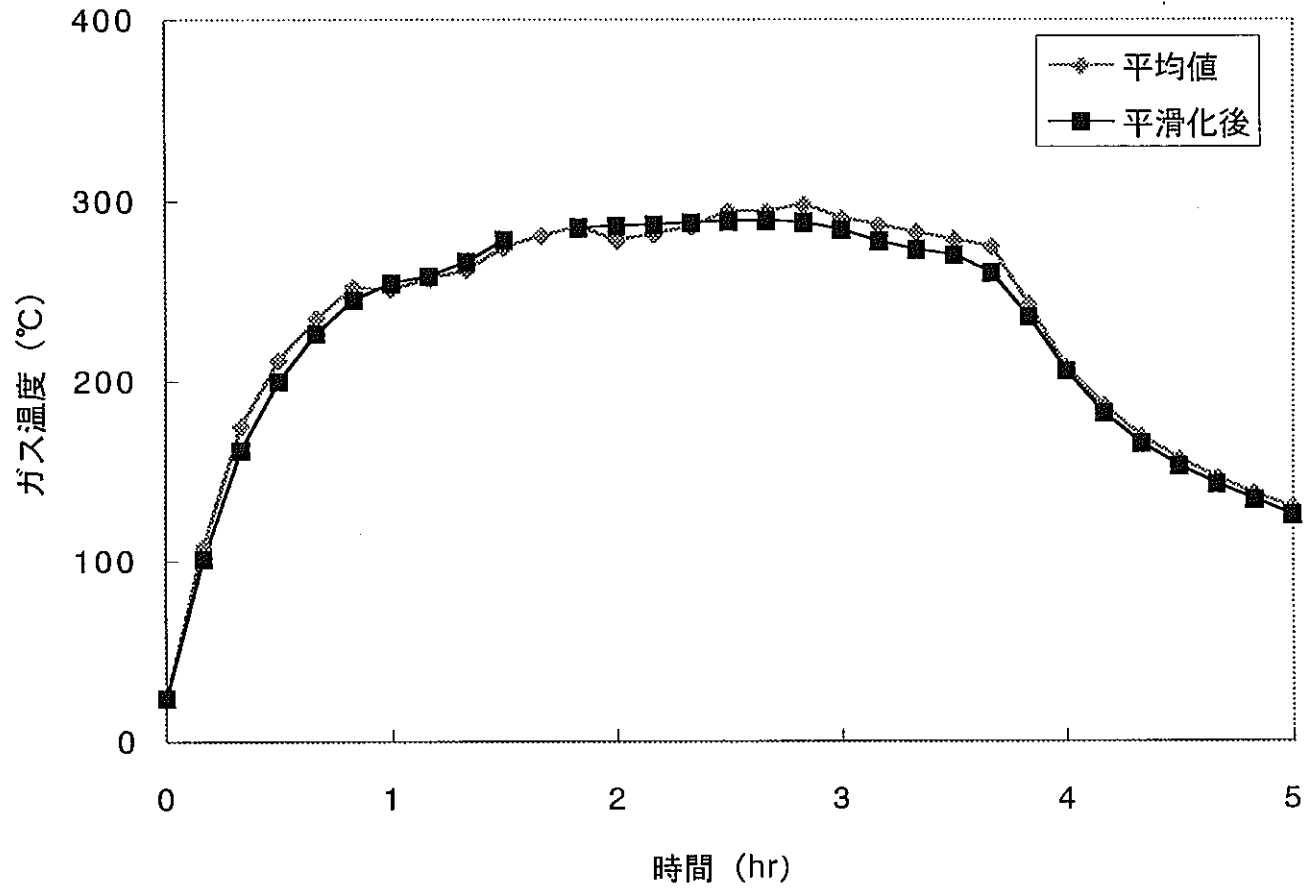


図1 2 実験2セル内ガス温度履歴 (スムージング結果)

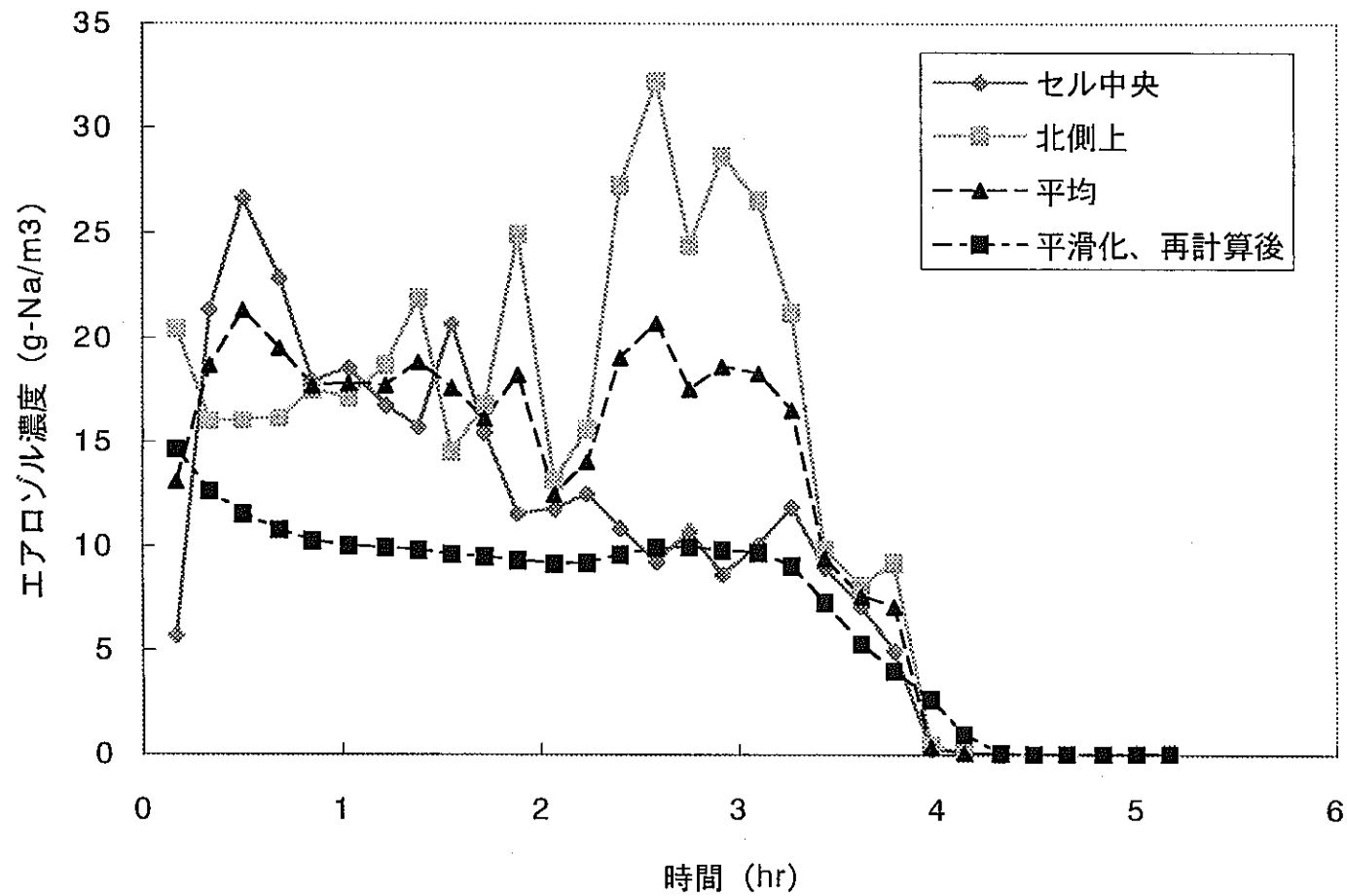


図 1 3 実験 2 セル内エアロゾル濃度 (再計算、スムージング結果)

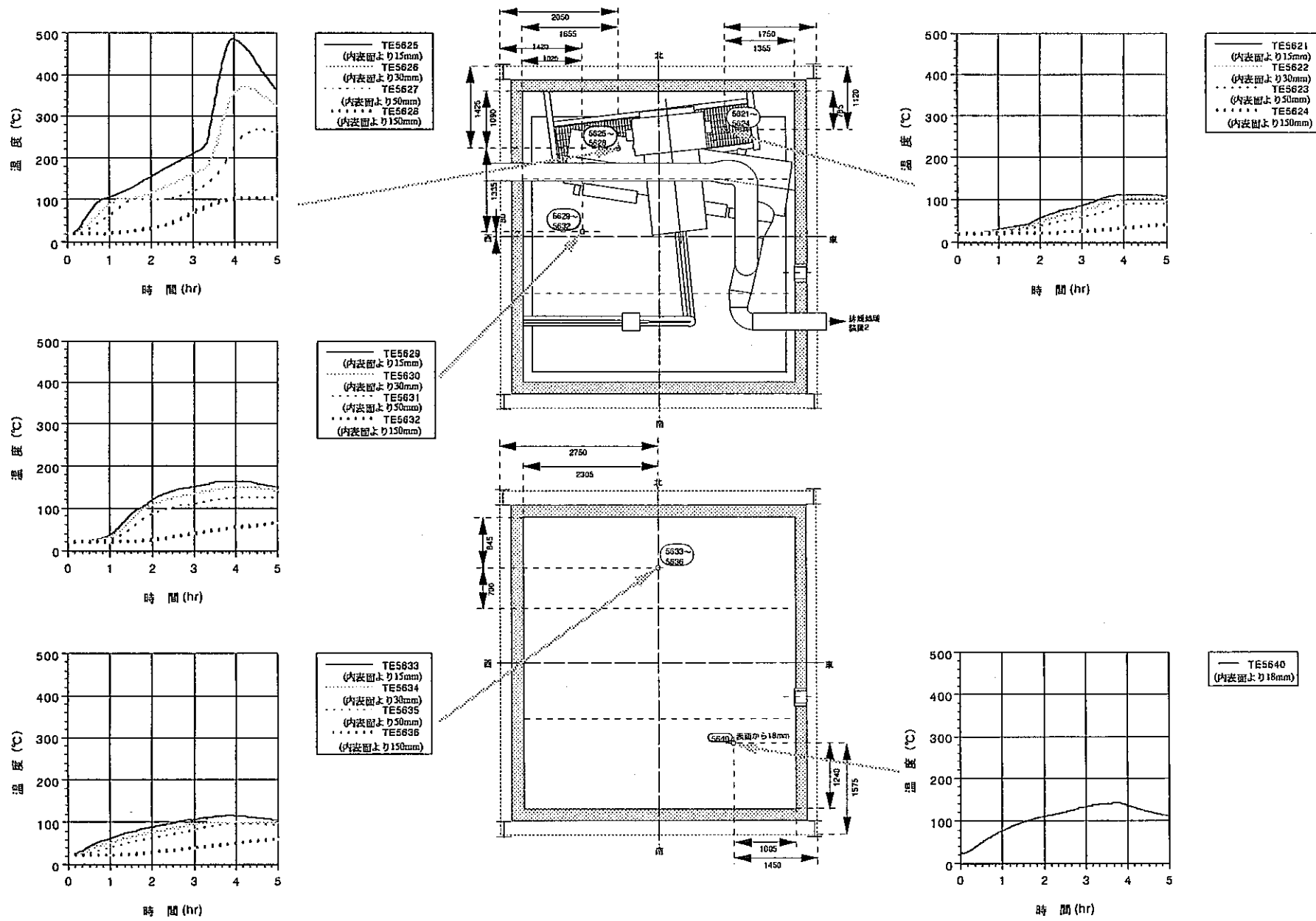


図 14-1 実験 2 床・天井コンクリート温度履歴

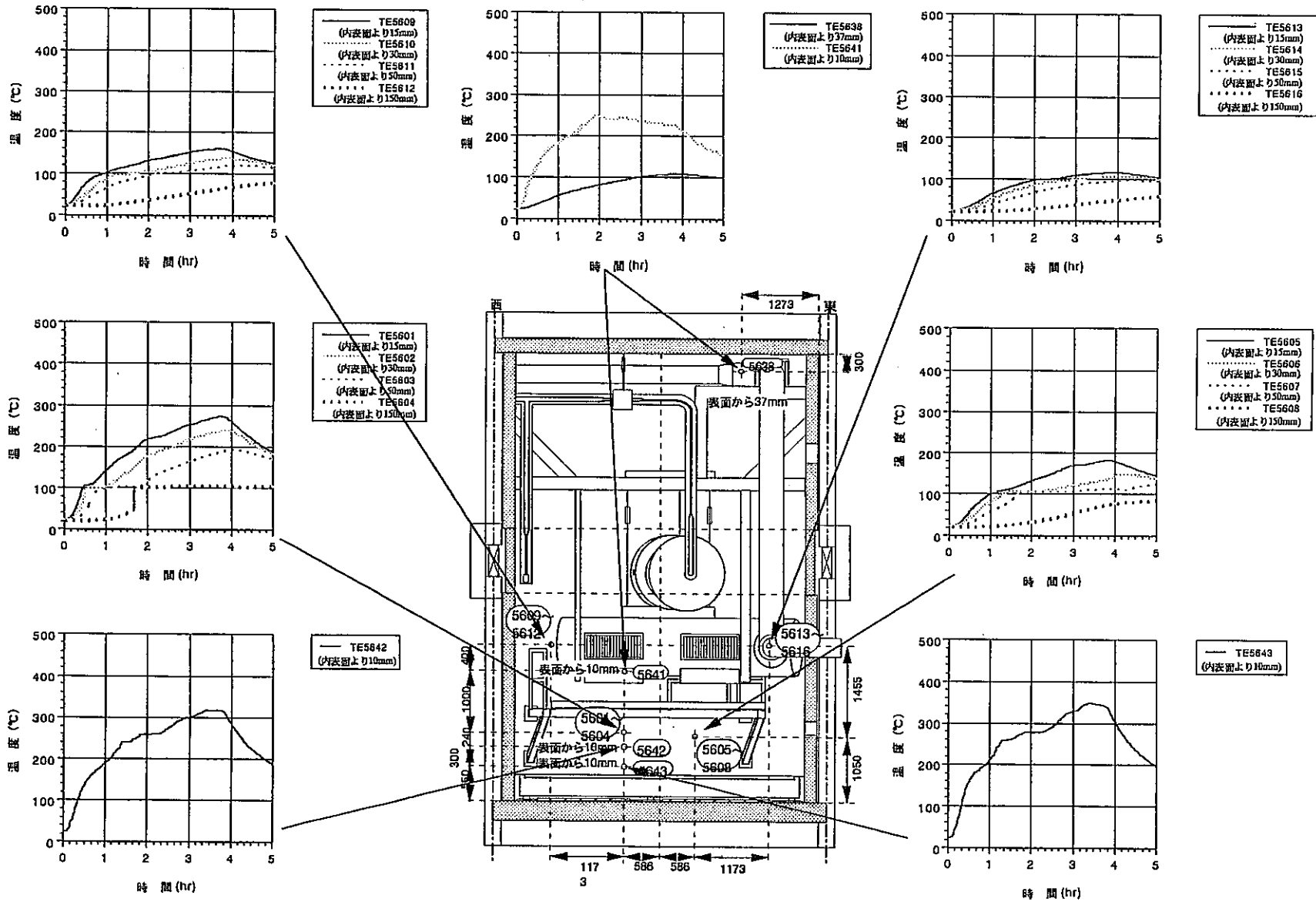


図14-2 実験2北面壁コンクリート温度履歴

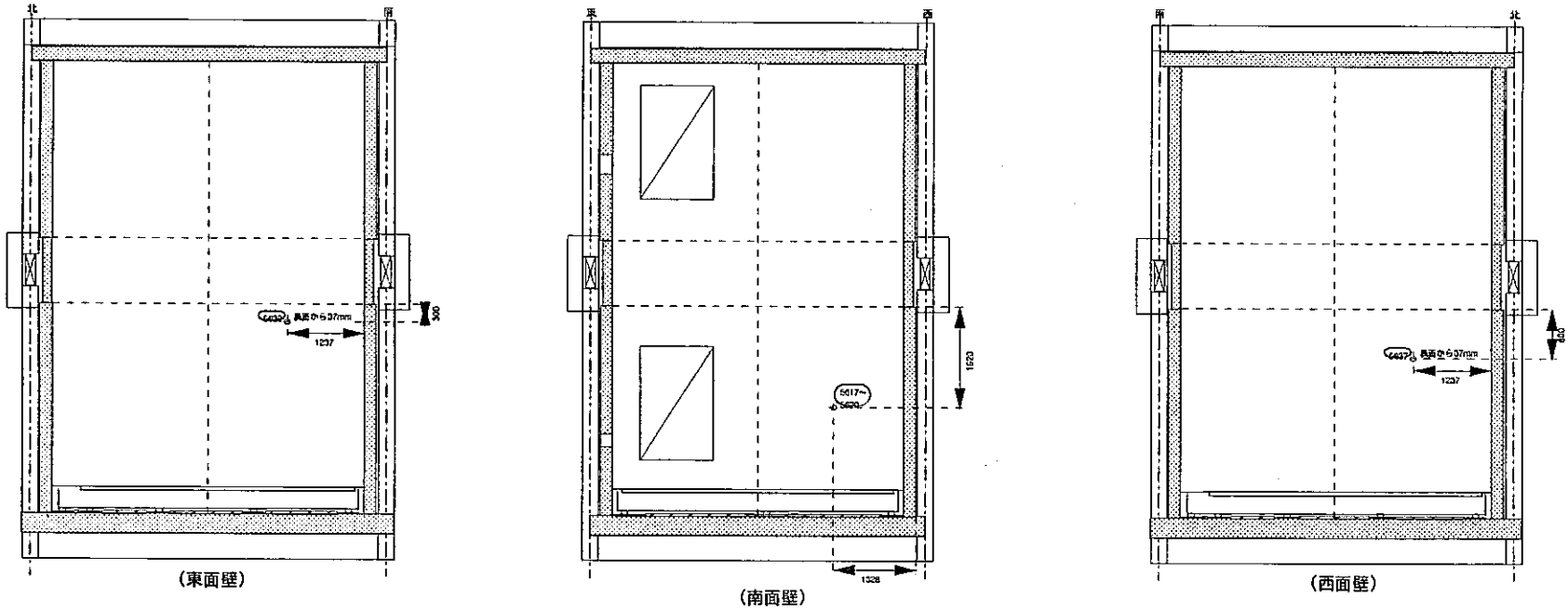
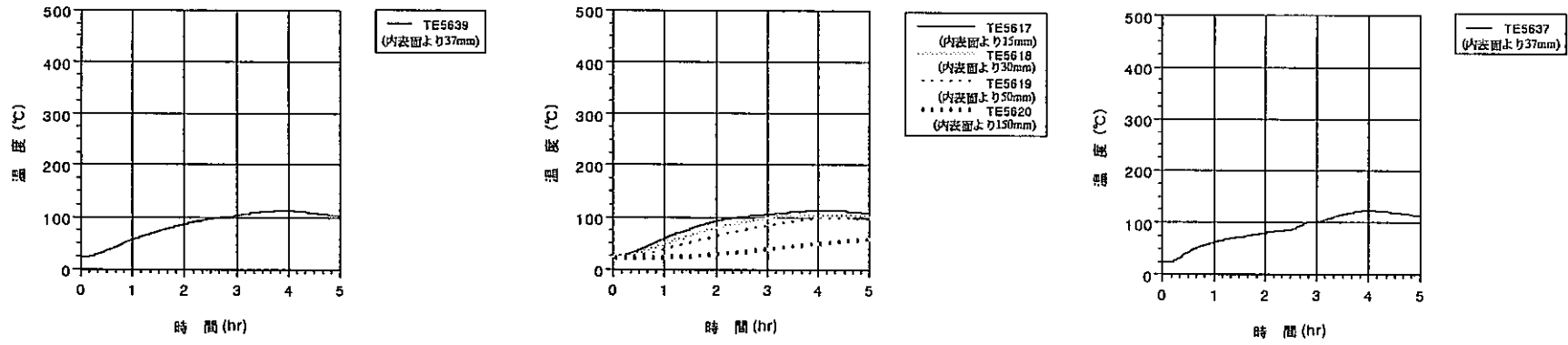


図14-3 実験2 東西南壁コンクリート温度履歴

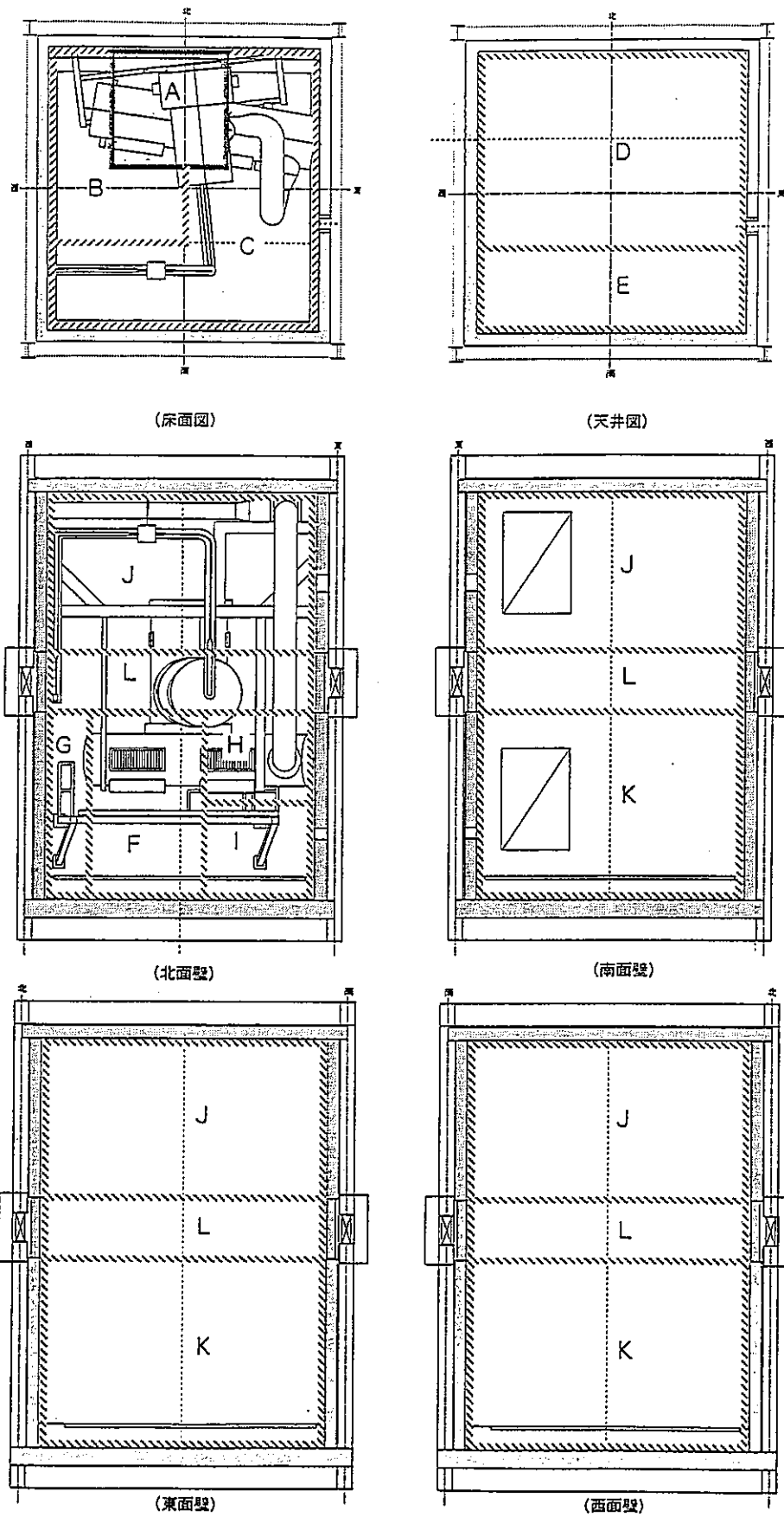


図15 実験2 壁面領域分割結果

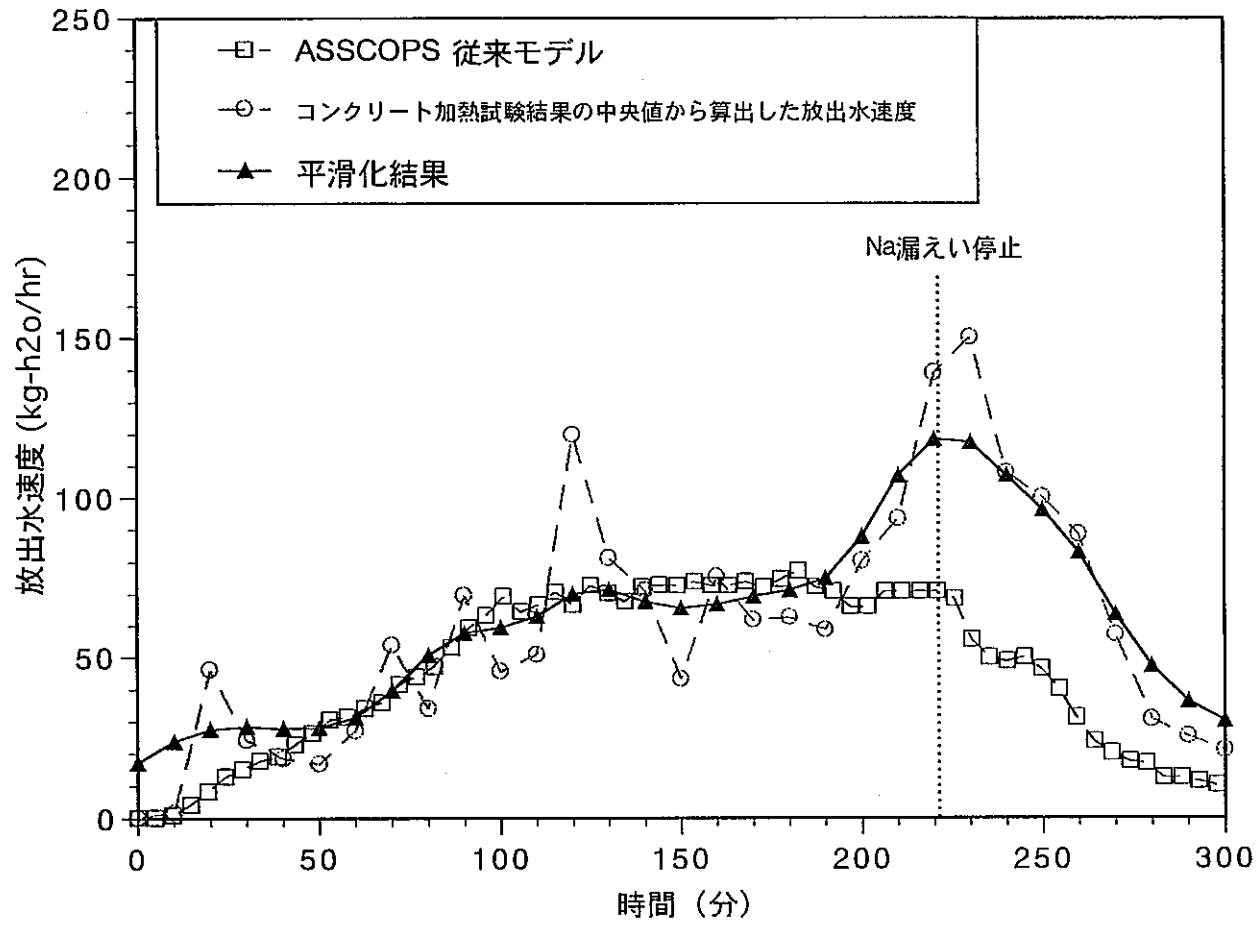


図16 実験2コンクリートからの放出水速度履歴（スムージング結果）

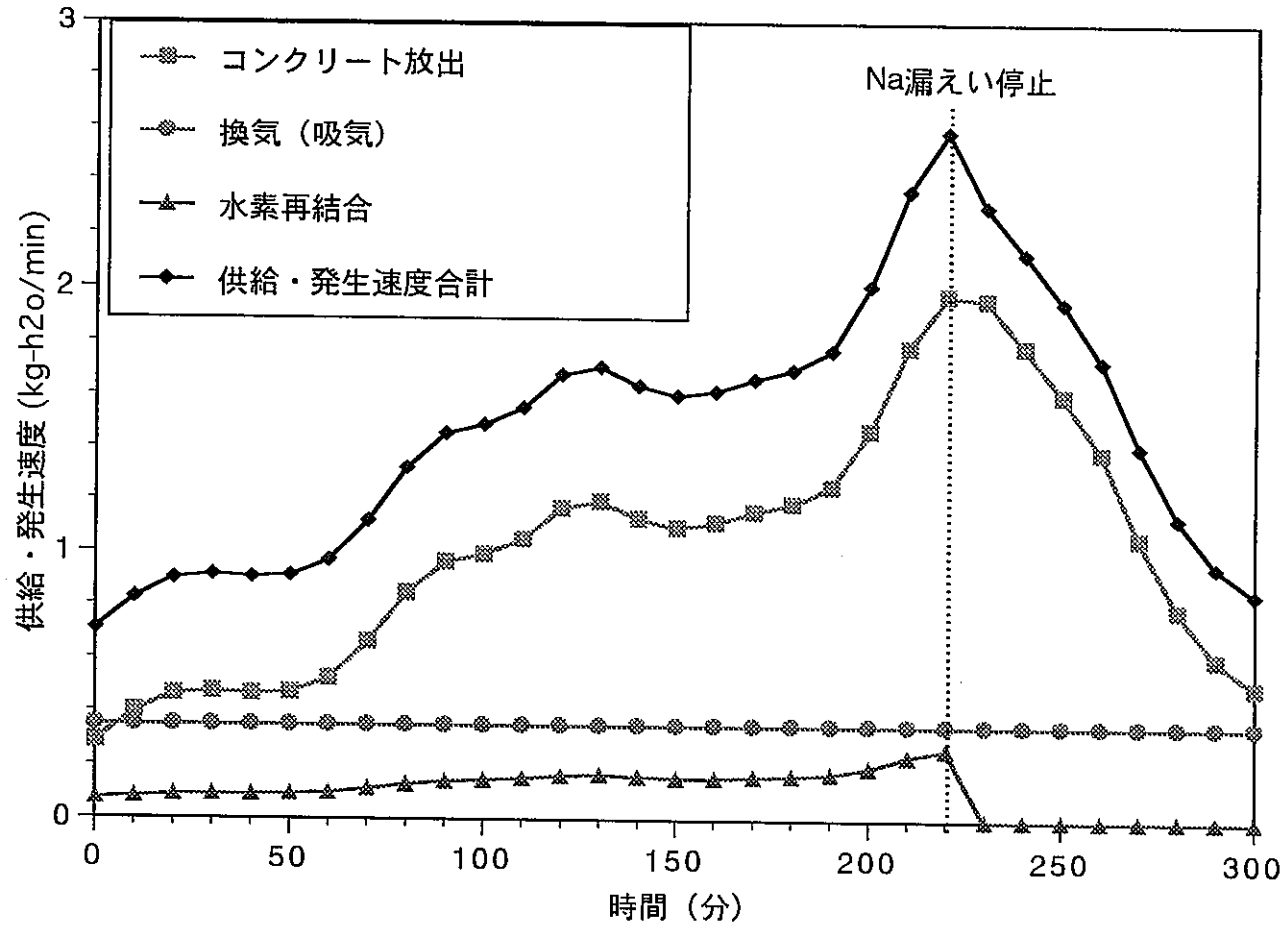


図17 水マスバランス計算結果 (供給・発生速度)

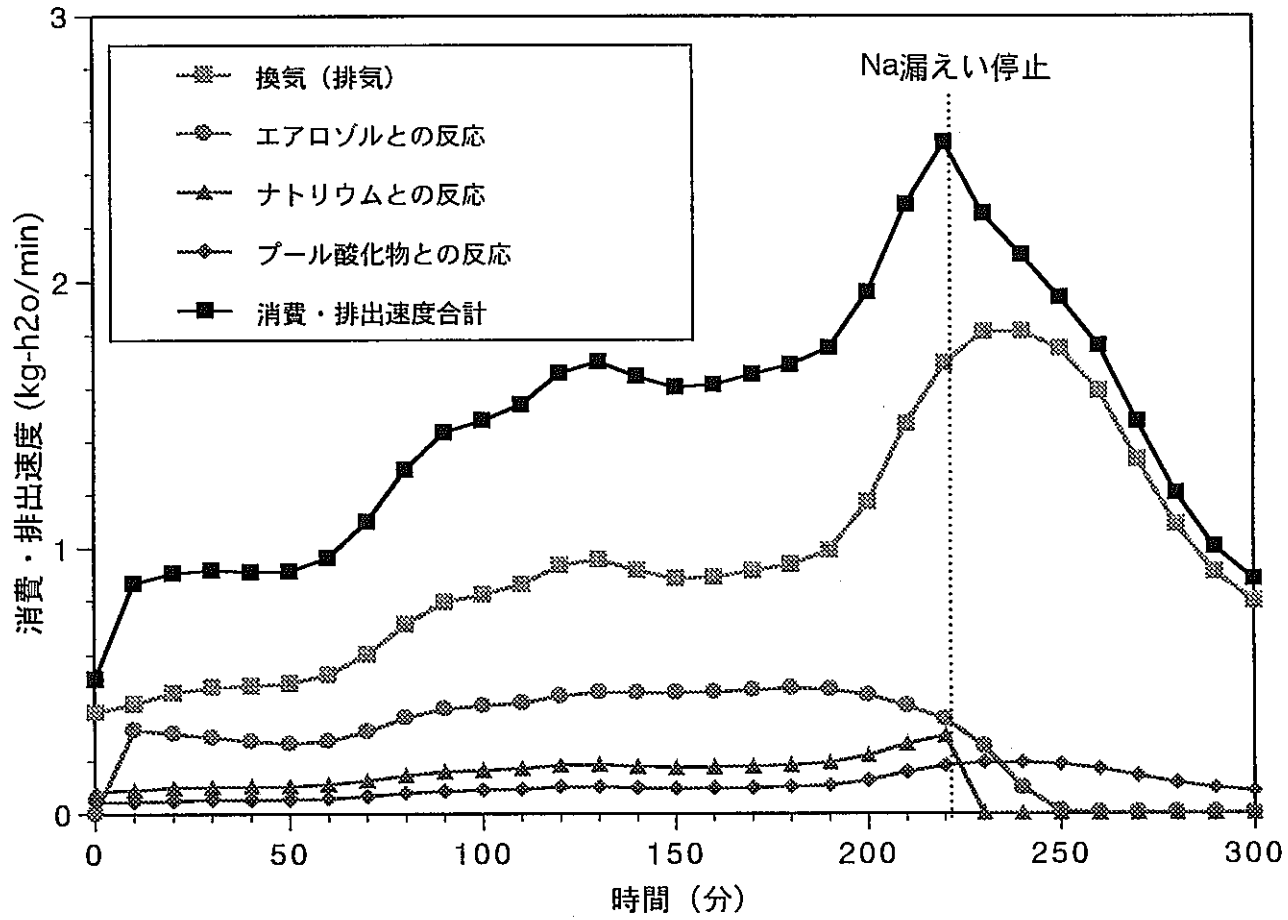


図18 水マスバランス計算結果 (消費・排出速度)

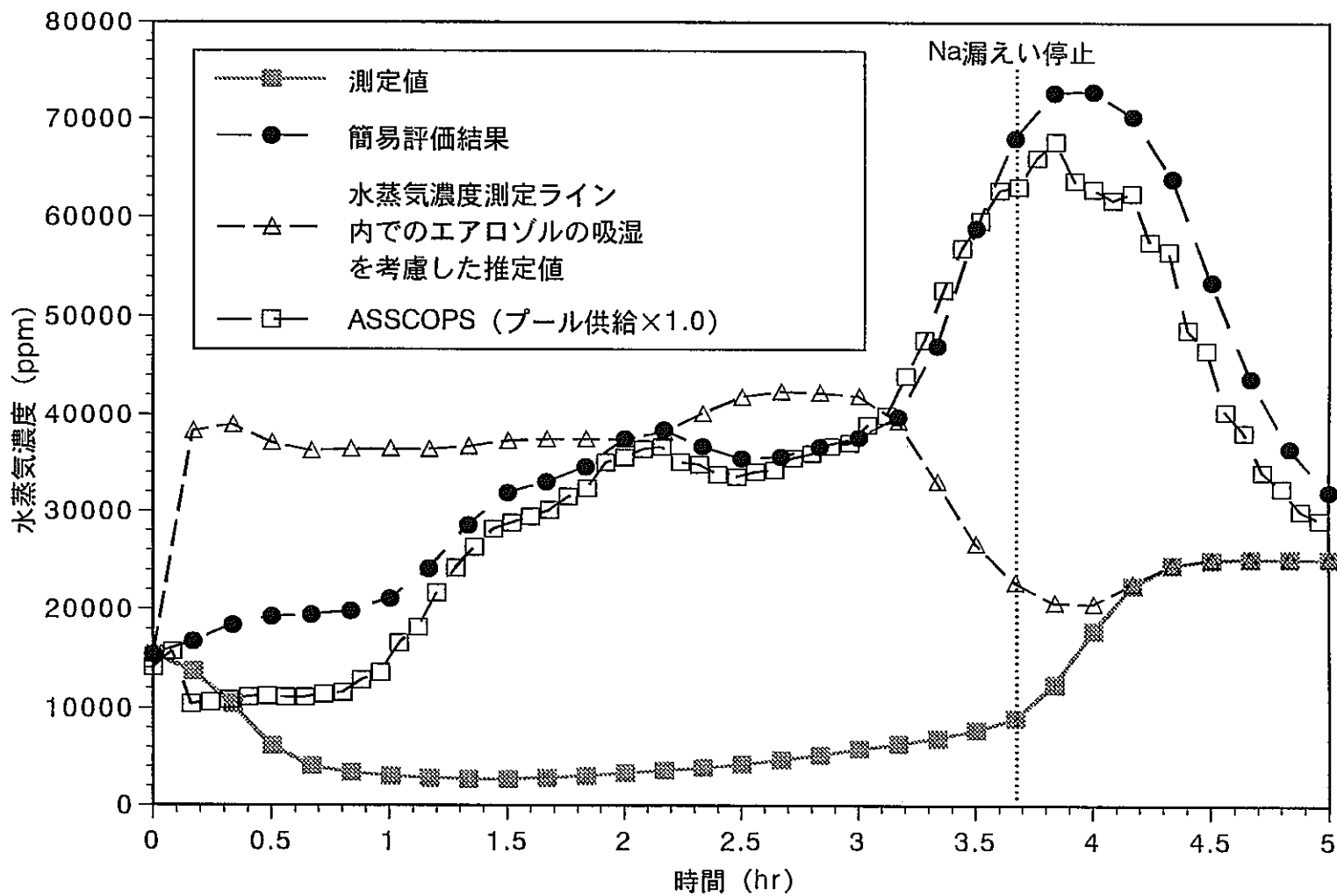


図 1 9 水蒸気濃度計算結果

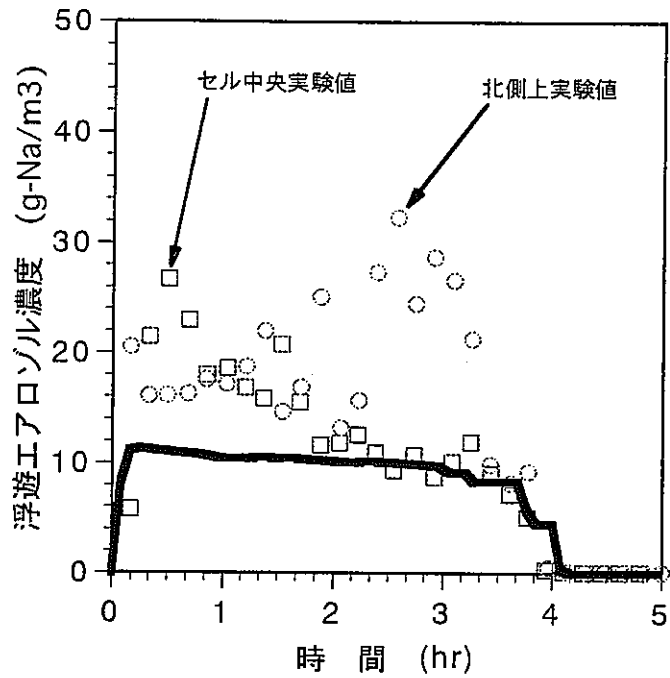


図 2 0 セル内エアロゾル濃度計算結果 (ASSCOPS Ver.2.1)

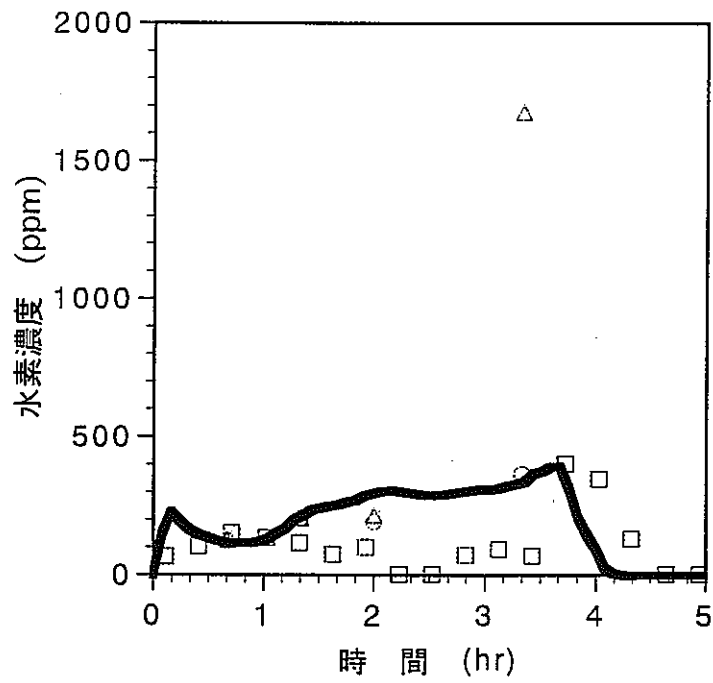


図 2 1 水素濃度計算結果 (ASSCOPS Ver.2.1)

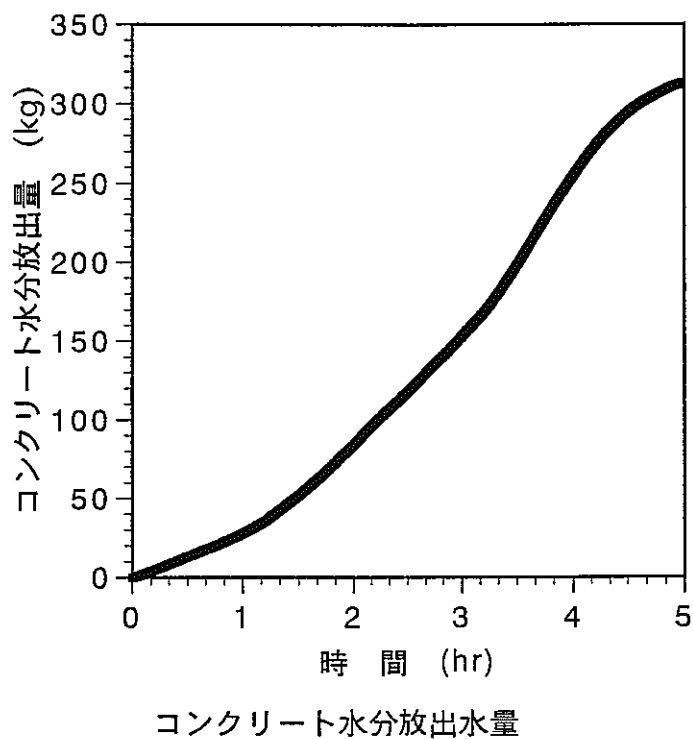
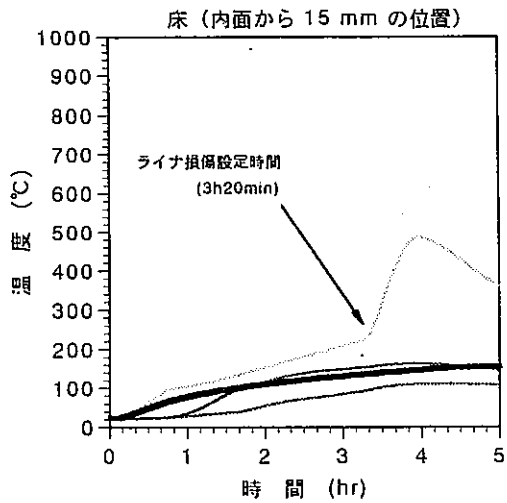
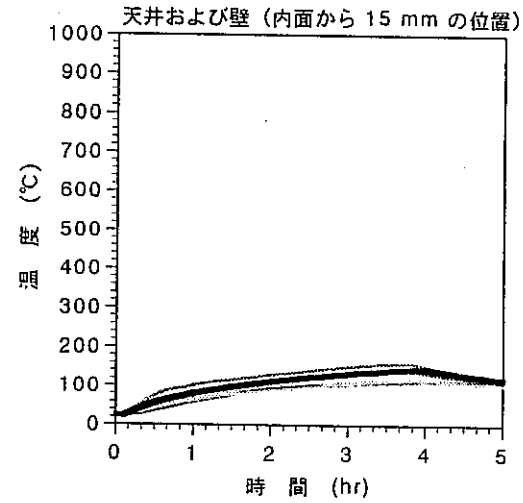


図 2 2 コンクリートからの放出水量計算結果 (ASSCOPS Ver.2.1)

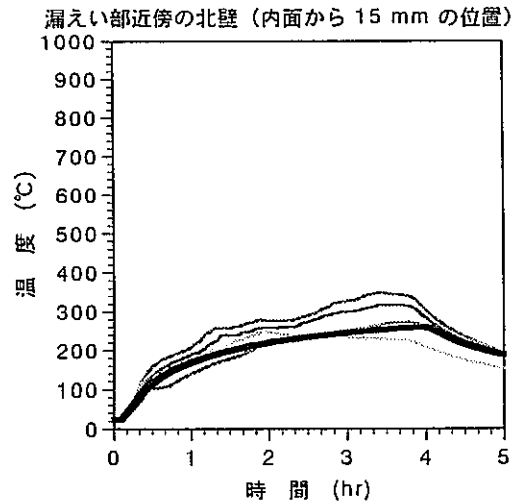


床コンクリート温度

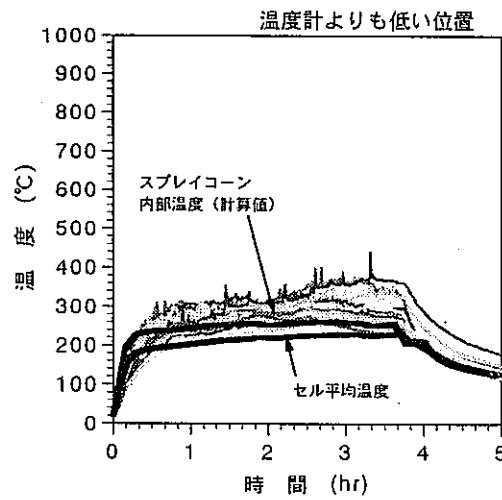
細線：実験測定値
太線：解析結果



側壁コンクリート温度



北壁コンクリート温度



ガス温度 (セル内下部)

図 2 3 ASSCOPS によるその他の計算結果 (ASSCOPS Ver.2.1)

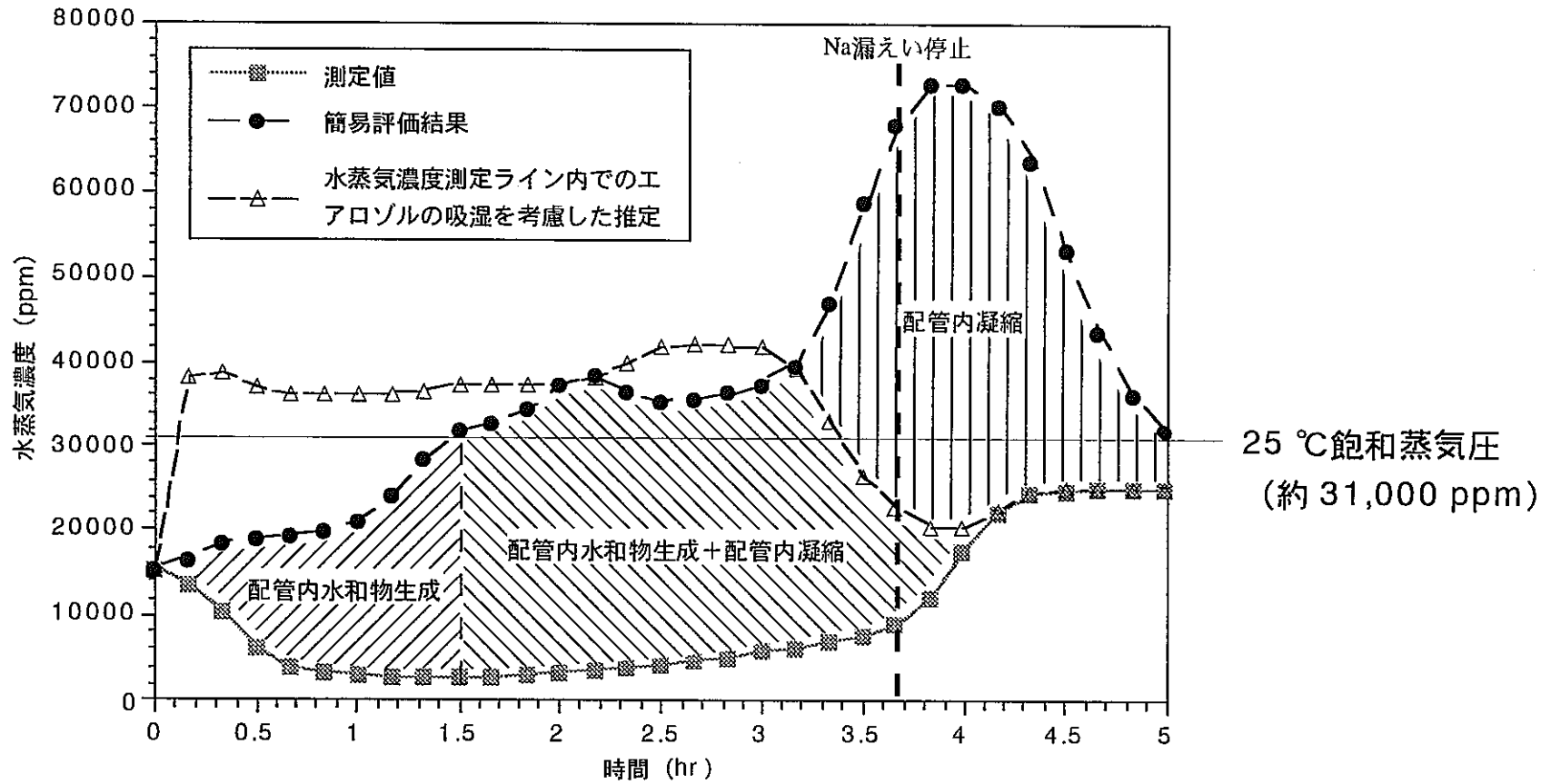


図 2 4 水蒸気濃度低下メカニズム評価結果

Appendix.1 セル内の水マスバランス簡易評価

A1.1 検討の概要

「コンクリート放出水実験」結果⁴⁾ から算出した実験 2 でのコンクリート放出水速度を用いて、実験 2 の水蒸気のマスのバランスの簡易評価を実施した。

検討に使用したコンクリートからの放出水速度は、「コンクリート放出水実験」結果と実験 2 の壁温度履歴を用いて算出したものを、時系列でスムージングしたものである。スムージングは「探索的データ解析法」のうち「時系列データならし」の手法⁹⁾ を使用した。

A1.2 簡易評価の方法

(1) 水蒸気マスバランスの考え方・水蒸気濃度の算出方法

実験 2 における水蒸気のマスのバランスは本文中の図 1-1 に示すように、供給、消費および両者の差としてのセル内水蒸気濃度変化として考えることができる。バランス式を以下に示す。

$$\begin{aligned} & (Q_{in} \cdot \rho_{g,in} \cdot Ch_{2o,in}) + W_{p,con} + W_{p,rc} \\ & = (Q_{out} \cdot \rho \cdot Ch_{2o}) + W_{c,aero} + W_{c,na} + W_{c,ox} \\ & + W_{atm} \end{aligned} \tag{A1-1}$$

Q_{in} : 吸気ガス流量 (m^3/min)

$\rho_{g,in}$: 吸気ガス比重量 ($kg-gas/m^3$)

$Ch_{2o,in}$: 吸気ガスの水蒸気濃度 ($kg-h_2o/kg-gas$)

$W_{p,con}$: 加熱コンクリートの水放出速度 ($kg-h_2o/min$)

$W_{p,rc}$: 水素の再結合による水の発生速度 ($kg-h_2o/min$)

Q_{out} : 排気ガス流量 (m^3/min)

ρ_g : 排気ガス (セル内ガス) 比重量 ($kg-h_2o/kg-gas$)

Ch_{2o} : 排気ガス (セル内ガス) の水蒸気濃度 ($kg-h_2o/min$)

$W_{c,aero}$: エアロゾルによる吸湿速度 ($kg-h_2o/min$)

$W_{c,na}$: ナトリウム (液滴、プール) との水の反応速度 ($kg-h_2o/min$)

$W_{c,ox}$: プール内酸化物との水の反応速度 ($kg-h_2o/min$)

W_{atm} : セル内水蒸気濃度変化分 ($kg-h_2o/min$)

今回は漏洩開始から 5 時間までの 10 分ごとに各時刻での水蒸気のマスのバランスを計算した。供給速度のうち、吸気、コンクリートからの放出によるものは入力で与えられるが、水素再結合による発生速度と消費 (排気、エアロゾル吸湿、ナトリウムとの反応、プール内酸化物との反応) 速度はセル内の水蒸気濃度により変化する。このため、陰的解法により、各時刻でバランスする水蒸気濃度を算出した。

(2) 換気による水蒸気の供給、排出率

実験2の換気は、排気側のブロアーにより実施された。すなわち、給気側は、試験装置の給気孔（およびカメラ管台）から装置内部が微負圧になった分のガスが給気される。排気側は、装置内部の換気ダクトから排煙処理装置（水冷却塔、スクラバー、フィルター）を通った後、ブロアーにより外気に強制排気される。換気流量は、ブロアー下流で測定されている。流量測定部ではガスは水冷却塔やスクラバーにより冷却されているが、若干温度上昇があり、漏洩開始から2時間後の排気ガス温度は55℃であった。給気（外気）の水蒸気濃度は0.88 wt.% (1.4 vol.% = 14,000 ppm)であり、換気による水蒸気の供給、排出速度は以下の通りとなる。

$$\text{換気による供給速度} : Q_{in} \cdot \rho_{g,in} \cdot Ch_{2o,in} = 0.348 \text{ (kg-h}_2\text{o/min)}$$

$$\text{換気による排出速度} : Q_{out} \cdot \rho_g \cdot Ch_{2o} \text{ (セル内水蒸気濃度により変化)}$$

$$Q_{in} : 33.0 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\rho_{g,in} : 1.20 \text{ (kg/m}^3\text{) (at } 21^\circ\text{C)}$$

$$Ch_{2o,in} : 0.0088 \text{ (kg-h}_2\text{o/kg-gas)}$$

$$(0.88 \text{ wt.\%} = 1.4 \text{ vol.\%} = 58 \%RH \text{ at } 21^\circ\text{C})$$

$$Q_{out} : 36.8 \text{ m}^3/\text{min} = Q_{in} (\rho_{g,in} / \rho_g)$$

$$\rho_g : 1.076 \text{ (kg/m}^3\text{) (at } 55^\circ\text{C)}$$

(2) エアロゾルと水蒸気の反応

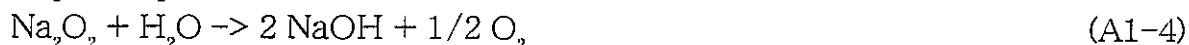
漏洩したナトリウムは液滴状あるいはプール状で燃焼するが、実験2の条件では漏洩速度 (50 g/sec) が小さく、雰囲気は高酸素濃度にて保たれていたため、近似的に漏洩したナトリウムは全て燃焼している（すなわち漏洩速度＝燃焼速度）と考えることができる。実験2の結果等²⁾から、漏洩したナトリウムの20%が液滴状で、80%がプール状で燃焼すると仮定する。

(a) エアロゾル発生速度、最大吸湿速度²⁾

従来の ASSCOPS による解析等²⁾と同様に、液滴状燃焼の場合は燃焼量の100%が、プール状燃焼の場合は25%がエアロゾル化すると仮定した。この場合のエアロゾル発生速度 (Raero) はナトリウム換算で以下となる。

$$Raero = 0.05 \times (0.2 + 0.8 \times 0.25) = 0.02 \text{ kg-Na/sec} = 1.2 \text{ kg-Na/min} \quad (\text{A1-2})$$

生成したエアロゾル (Na₂O、Na₂O₂) は以下の水蒸気との反応により、水酸化ナトリウム (NaOH) を生成する。



すなわち、エアロゾル（ナトリウム重量換算）と水蒸気の化学量論比は、 $\chi_{aero} = 18/46$ (kg-h₂o/kg-Na) である。したがって、発生したエアロゾルが全量水蒸気と反応すると仮定すると、エアロゾルによる最大吸湿速度 ($W_{c,aero}$) は次式となる。

$$W_{c,aero} = R_{aero} \cdot \chi_{aero} = 0.470 \text{ (kg-h}_2\text{o/min)} \quad (A1-5)$$

(b) 吸湿速度計算モデル

実際の計算では、下記のモデルにより吸湿速度がセル内の水蒸気濃度とエアロゾル濃度に比例するようにし、最大吸湿速度が (A1-5) 式の値になるように比例定数の値を設定した。

$$W_{c,aero} = A \cdot Ch_{2o} \cdot Caero \quad (A1-6)$$

A : 比例定数 (1.3 E-6、最大吸湿速度 0.470 kg-h₂o/min 時)

Caero : セル内エアロゾル濃度 (g-Na/m³)

(3) プールの酸化物と水蒸気の反応

プール状に広がった堆積物中の酸化物に雰囲気中の水蒸気が作用して反応する割合をガス対流による水蒸気のプール面への供給により計算する。水蒸気の物質伝達係数は、ナトリウムの燃焼計算に用いている Fishenden-Saunders の式から求める。実験 2 の漏洩開始から 2 時間の頃のガス温度は約 300℃、プール温度は約 800℃であるから、次のように物質伝達係数 (Kh_{2o}) を求めることができる。

$$Kh_{2o} = 0.14 \cdot Dh_{2o} \cdot (g \cdot Sc \cdot \beta \cdot \Delta T / \nu^3)^{0.333} = 0.0167 \text{ (m/sec)} \quad (A1-7)$$

Kh_{2o} : 物質伝達係数 (m/sec)

Dh_{2o} : 水蒸気拡散係数 = 1.6 E-4 (m²/sec) at 550℃

g : 重力加速度 = 9.8 (m/sec²)

Sc : シュミット数 = $\nu / D = 0.562$ (-)

β : 体膨張係数 = $1/T = 1/(550 + 273.15) = 0.001215$ (1/K)

ΔT : 温度差 = (800 - 300) = 500 (K)

ν : 動粘性係数 = 0.899E-4 (m²/sec) at 550℃

プール面積 (A_p) を 7.6 m² (床ライナ上 5.9 m²、グレーチング等上 1.6 m²) と仮定して、水蒸気の質量束を計算すると、 $\rho_g = 0.596$ (kg-gas/m³) at 300℃より、

$$\begin{aligned} W_{c,ox} &= Kh_{2o} \cdot \rho_g \cdot A_p \cdot Ch_{2o} = 0.07564 \cdot Ch_{2o} \text{ (kg-h}_2\text{o/sec)} \\ &= 4.539 \cdot Ch_{2o} \text{ (kg-h}_2\text{o/min)} \end{aligned} \quad (A1-8)$$

(4) ナトリウムと水蒸気の反応

上述したように漏洩したナトリウム (50 g/sec) は近似的にその全量が液滴状あるいはプール状で燃焼しているとみなすことができる。ナトリウムの燃焼 (酸素反応) と水蒸気との反応は、酸素/水蒸気の濃度と拡散速度に関連づけて考えることができる。すなわち、ナトリウムの消費に関し、酸素との反応 (B_{na,o_2}) と水蒸気との反応 (B_{na,h_2o}) の関係は次式で表わすことができる。

$$(B_{na,h_2o} / B_{na,o_2}) = (D_{h_2o} \cdot C_{h_2o} \cdot \chi_{h_2o}) / (D_{o_2} \cdot C_{o_2} \cdot \chi_{o_2}) \quad (A1-9)$$

実験 2 の頃の温度と測定値から、拡散係数と酸素濃度は以下である。

$$D_{h_2o} = 1.59 \text{ E-4 (m}^2\text{/sec)}$$

$$D_{o_2} = 1.2 \text{ E-4 (m}^2\text{/sec)}$$

$$C_{o_2} = 0.21 \text{ (kg-o}_2\text{/kg-gas)}$$

化学量論比は、

$$\chi_{h_2o} = 46/18 \text{ (kg-na/kg-h}_2\text{o)} \text{ (Na}_2\text{O 反応)}$$

$$\chi_{o_2} = 2.05 \text{ (kg-na/kg-o}_2\text{)} \text{ (Na}_2\text{O : Na}_2\text{O}_2 = 60 : 40)$$

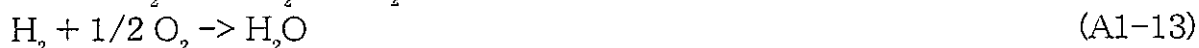
漏洩したナトリウム (50 g/sec) が上記の関係で、酸素と水蒸気との反応に配分されるとすると、水蒸気と反応するナトリウム量 (B_{na,h_2o} (kg-na/sec))、水蒸気の消費速度 ($W_{c,na}$ (kg-h₂o/sec)) は以下となる。

$$B_{na,h_2o} = 0.05 \cdot (D_{h_2o} \cdot C_{h_2o} \cdot \chi_{h_2o}) / (D_{h_2o} \cdot C_{h_2o} \cdot \chi_{h_2o} + D_{o_2} \cdot C_{o_2} \cdot \chi_{o_2}) \text{ (kg-na,sec)} \quad (A1-10)$$

$$W_{c,na} = (1/\chi_{h_2o}) \cdot B_{na,h_2o} = 18/46 \cdot B_{na,h_2o} \text{ (kg-h}_2\text{o/sec)} \\ = 36.52 \cdot B_{na,h_2o} \text{ (kg-h}_2\text{o/min)} \quad (A1-11)$$

(5) 水素再結合

ナトリウムと水蒸気の反応で生成する水素は、再結合を起こすことにより再び水を生成する。すなわち上記 (4) 項で仮定した反応では、



である。今回の計算では再結合割合 (R_{rc}) を 90% として、以下のように発生水蒸気量を計算した。

$$W_{p,rc} = R_{rc} \cdot W_{c,na} = 0.9 \cdot W_{c,na} \quad (A1-14)$$

計算条件については本文中の 3.2 項、計算結果については、本文中の 3.3 項に示す。

Appendix.2 ナトリウムエアロゾル吸湿効果確認試験結果

A2.1 概要

ナトリウム燃焼時に生成するナトリウム酸化物 (Na_2O 、 Na_2O_2) が吸収する水蒸気量を定量的に明らかにすることを目的として、これらのナトリウム酸化物が吸湿して生成する NaOH を用いて、 NaOH がさらに吸収する水蒸気量を測定した。

A2.2 試験装置・方法、試験条件

試験装置の概要を図A2-1 に示す。試験では、乳鉢で粉碎した NaOH 試料をフィルタエレメントを利用した試料ホルダーに入れ、所定の水蒸気濃度に加湿した窒素ガスをホルダー一部に流通させて、ホルダー一部で吸収される水蒸気量を測定した。吸収された水蒸気量はホルダー部の出入り口の水蒸気濃度（それぞれの場所でのガス温度と相対湿度から算出される）の差として算出した。

また、試験前後の試料の重量変化測定により吸湿量の確認を、試験後の試料のX線回折分析による化学形態分析等により NaOH 水和物の有無の確認を行った。

試験条件の一覧を表A2-1 に示す。試験温度は、文献⁹⁾ で水和物が生成するとされている 50°C 、 NaOH の水溶液が生成するとされている 150°C 、 300°C 、 NaOH が融解して液体となる 350°C とした。

A2.3 試験結果

試料への吸湿量の測定結果、X線回折分析の結果をそれぞれ表A2-2、表A2-3 に、吸湿量の測定結果を NaOH 量との割合として $\text{NaOH-H}_2\text{O}$ 二元系状態図の上にプロットしたものを図A2-2 に示す。概略を以下に述べる。

- (1) 50°C では、試験時間を長くすれば（50-1 試験：水蒸気供給約 5 時間） $\text{NaOH-H}_2\text{O}$ 二元系状態図の液相線付近の 40 wt.-% $\text{-H}_2\text{O}$ まで吸湿した。試験時間 60 分でも 15 wt.-% $\text{-H}_2\text{O}$ まで吸湿した。試験時間により吸湿量に違いがあるのは、試料が吸湿して稠密な塊状になっていたため、水分が試料内部に浸透しにくい状態にあったためと考えられる。X線分析の結果でも、 $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ が中程度の割合検出された。
- (2) 150°C 、 300°C では吸湿量は 1 wt.-% $\text{-H}_2\text{O}$ 以下であった。試験後の試料の状態は、 NaOH 粒の形は残っているが、互いに付着した疎な塊状であり、試料塊内部への水蒸気の供給は十分行われたものと考えられる。X線回折分析の結果では、 NaOH の水和物 ($\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) は痕跡程度しか検出されていない。
- (3) 350°C では 6 wt.-% $\text{-H}_2\text{O}$ 程度の吸湿があったが、水蒸気はフィルタエレメントの腐食により消費された可能性が高い。これは、X線回折分析の結果で NaOH の水和物が検出されていないことにより裏付けられる。

A2.4 まとめ

- (1) NaOH 粒を乳鉢で粉碎した試料で、約 17,000 vol-ppm の試験条件では、50℃では液相線相当の組成まで吸湿する可能性があるが、150℃～350℃の温度域ではほとんど吸湿が起こらないことが確認された。

- (2) 今回の 50℃の試験では、試料が稠密な塊状になっており、実際のナトリウム燃焼時に生成するエアロゾルに比べ吸湿しにくい状態になっていたものと考えられる。このため、実際のナトリウム燃焼時に生成するエアロゾルの吸湿速度は今回の試験よりもかなり速くなる可能性がある。

表A2-1 「吸湿効果試験」試験条件一覧

試験 No.	試験温度 (°C)	水蒸気濃度 (vol.ppm)	水蒸気供給時間 (min)	NaOH 重量 (g)	キャリアガス流量 (ℓ/min)
50-1	50	約 17,000	315	0.511	0.5
50-2	50	約 17,000	66	0.600	0.5
150-1	150	約 17,000	60	0.657	0.5
150-2	150	約 17,000	60	0.429	0.5
300-1	300	約 17,000	60	0.603	0.5
300-2	300	約 17,000	60	0.591	0.5
350-1	350	約 17,000	60	0.514	0.5
350-2	350	約 17,000	60	0.506	0.5

表A2-2 吸湿量測定結果

試験 No.	(a) 初期NaOH 重量 (g)	NaOH の吸湿量 (b) (g)	試験後試料中の NaOH 割合* (wt.%)
50-1	0.511	0.3510	59.3
50-2	0.600	0.0954	86.3
150-1	0.657	0.0036	99.5
150-2	0.429	0.0036	99.2
300-1	0.603	0.0018	99.7
300-2	0.591	0.0018	99.7
350-1	0.514	0.0324	94.1
350-2	0.506	0.0324	94.0

* : $\{(a)/[(a) + (b)]\} \times 100$

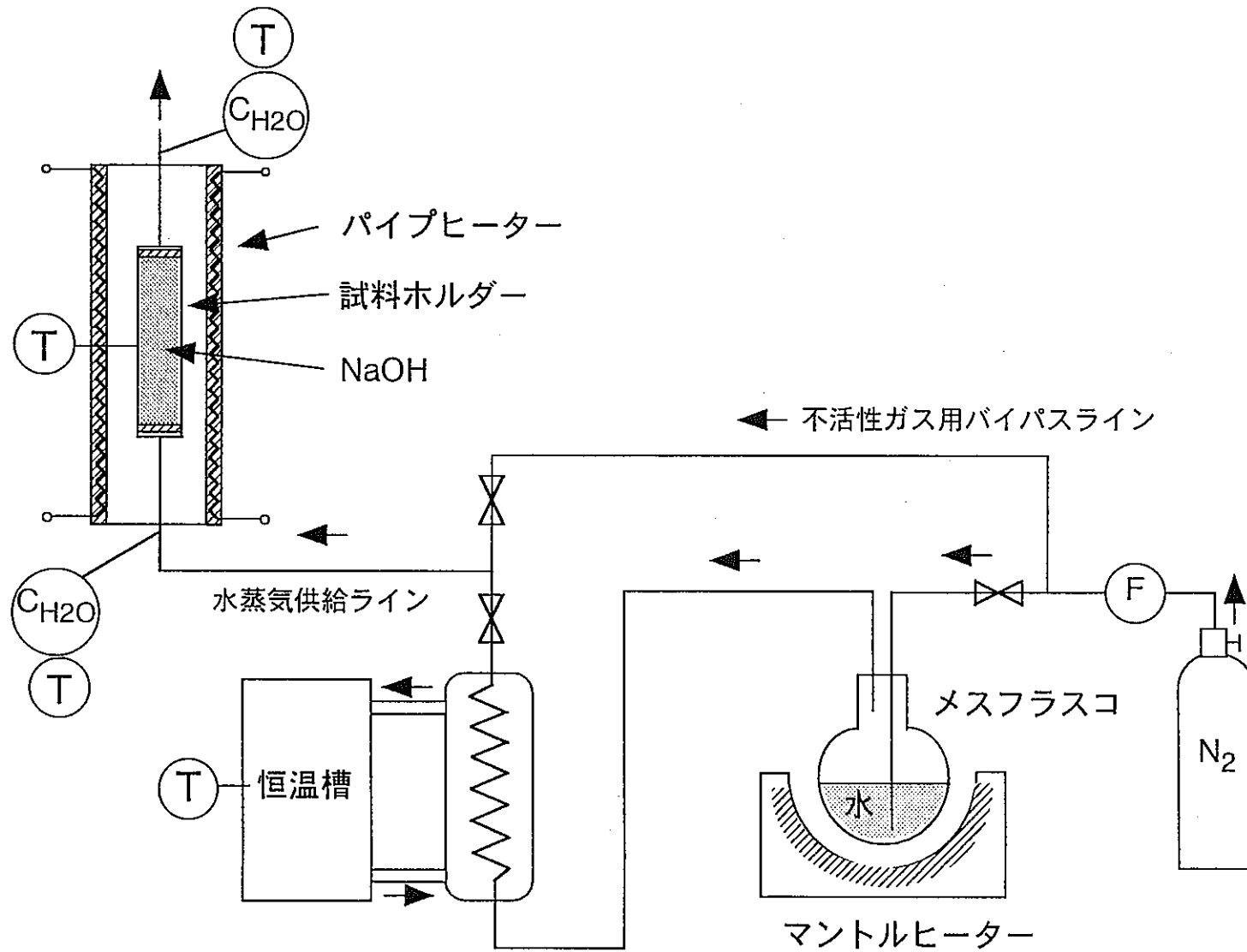
表A2-3 X線回折分析結果

試料の種類	試料 No.	結晶相		
		NaOH	NaOH · H ₂ O	その他
NaOH	init.-1*	++++	Tr.	-
	50-3	++++	++	-
	150-3	++++	Tr.	-
	300-3	++++	Tr.	-
	350-3	++++	-	-
フィルタエレメント	350-3	Tr.	-	++**

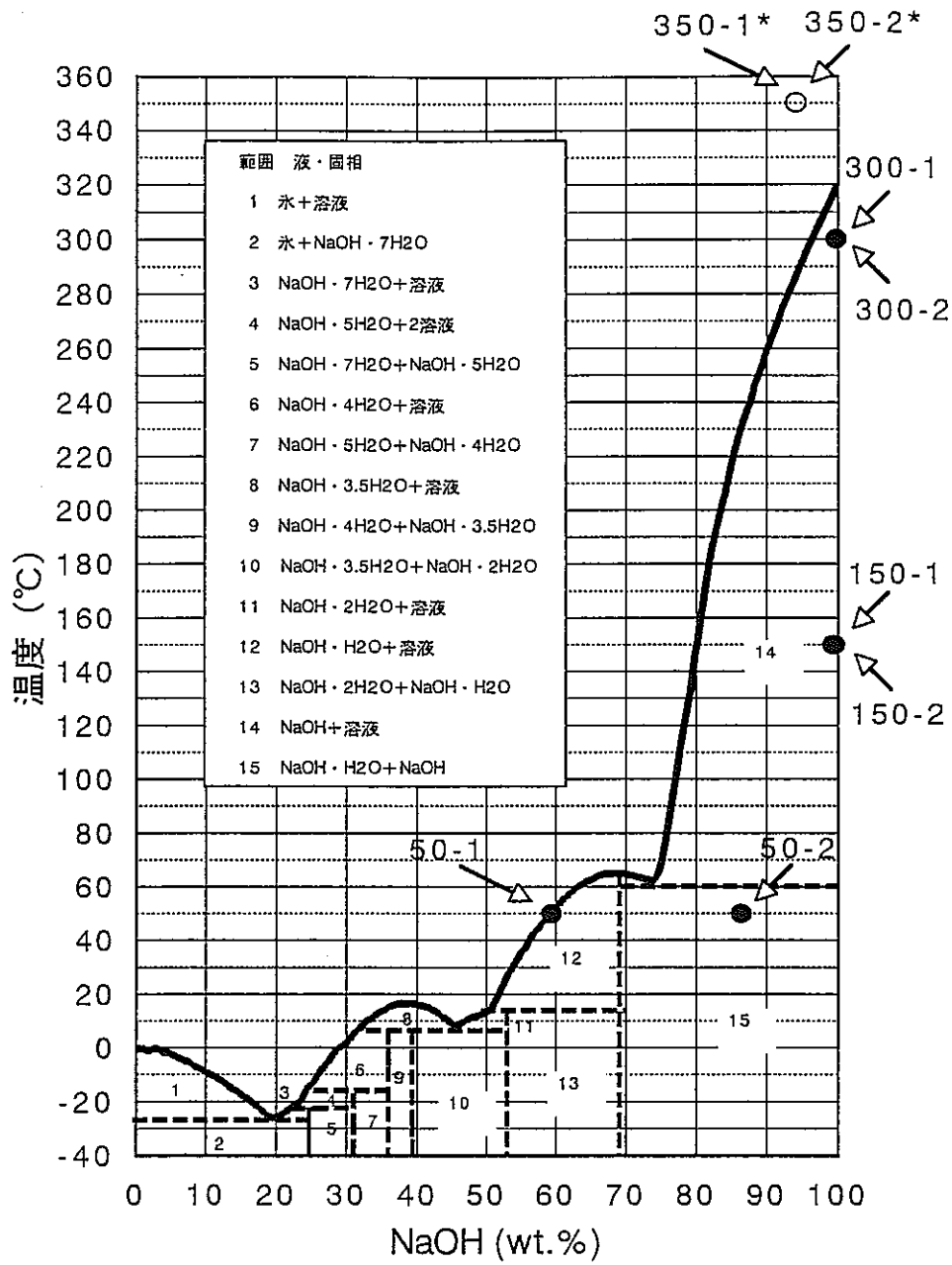
(注) * : 試験前の試料 (約300℃で乾燥したもの)

** : 検出された結晶相は Cr_{0.19} Fe_{0.7} Ni_{0.11}

++++ : 非常に多い、+++ : 多い、++ : 中程度、Tr. : 痕跡程度、- : 不検出



図A2-1 吸湿効果試験装置概要



* : フィルタエレメント等の腐食の可能性が高い。

図A2-2 NaOH への吸湿量測定結果

(状態図は文献 5) による)

Appendix.3 Run F8-1 試験結果³⁾

A3.1 試験装置、試験条件

試験装置は FRAT-1 試験装置 ($\phi 1,300 \text{ mm} \times h 2,200 \text{ mm}$) を使用し、供給水蒸気濃度を調整するための水蒸気供給装置を使用した。また、試験装置内部での水蒸気の凝縮・結露を防止するため、容器全面を予熱するヒータと保温材を敷設した。試験装置の概念図を図A3-1 に示す。

水蒸気濃度測定ラインの温度の違いによりライン途中のエアロゾルフィルター部で NaOH の水和が起こるかどうかを確認するため、40リッターのヘッダーを取り付けたラインを2系統（以下40リッターラインと呼ぶ）設け、一方は配管を水和の起こらない 100°C に、他方は水和が起こるが水蒸気の凝縮が起こらない 50°C に予熱・保温した。水蒸気濃度測定ライン図を図A3-2 に示す。

試験条件をまとめて表A3-1 に示す。

A3.2 試験結果

(1) セル内ガス温度、水蒸気濃度

試験時のセル内ガス温度、セル内水蒸気濃度の履歴をそれぞれ図A3-3、図A3-4 に示す。

(2) 40 リッターライン内ガス温度、水蒸気濃度

40リッターラインのフィルター位置での温度履歴を図A3-5-1（ラインA）、図A3-5-2（ラインB）に、真空ヘッダー内の温度履歴を図A3-6-1（ラインA）、図A3-6-2（ラインB）、ヘッダー内で測定された水蒸気濃度履歴を図A3-7-1（ラインA）、図A3-7-2（ラインB）に示す。

試験結果の概要をまとめて表A3-2 に示す。セル内の水蒸気濃度は約 $15,000 \text{ ppm}$ （約11分後：40リッターライン吸引開始時刻）～約 $12,000 \text{ ppm}$ （約17分後：40リッターライン吸引終了時刻）、セル内ガス温度は約 110°C （約11分後）～約 130°C （約17分後）であった。40リッターラインのフィルター部温度はラインAが 90°C 、ラインBが 40°C であり、ラインA、ラインBのヘッダー内の水蒸気濃度はそれぞれ $12,000 \text{ ppm}$ と $10,000 \text{ ppm}$ であった。

(3) 40 リッターラインで捕集されたエアロゾル量

ラインA、Bのフィルターで捕集されたエアロゾル量（ナトリウム換算）はそれぞれ、 0.0890 g 、 0.0636 g であった。

(4) セル内エアロゾル組成

セル内エアロゾル組成の時間変化を表A3-3 に示す。サンプルA（捕集時刻1～7分後：ガス温度 $50^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ ）では $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ が最も多く、 Na_2CO_3 、 NaOH と順に少なくなる。サンプルB（捕集時刻11～17分後：ガス温度 $100^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ ）では、ほとんどが NaOH であり、他には $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ が痕跡程度存在するだけである。

A3.3 結果の評価

(1) セル内水蒸気濃度

上記の測定結果から、40 リッターラインのヘッダー吸引時間（約 11分後～約 17分後）でのセル内の平均水蒸気濃度は約 13,500 ppm である。後述するようにこの時点でのエアロゾルはほとんどが NaOH となっており、余剰水蒸気が 13,500 ppm 分あったと考えられる。

(2) 40 リッターラインでの吸湿割合

セル内の平均水蒸気濃度とライン A、ライン B での水蒸気濃度から、ライン A、ライン B でのエアロゾルによる吸湿の割合はそれぞれ、11.1%、25.9% であり、NaOH の水和物（NaOH・H₂O 等）が生成する 50℃ のライン B のほうが、水和物を生成しない 90℃ のライン A に比べエアロゾルによる吸湿の程度が大きいことがわかる。

(3) エアロゾル化学組成

ガス温度が 100℃ 以下の場合には NaOH・H₂O が多い。Na₂CO₃ が中程度存在するのは、エアロゾル濃度が低く、水蒸気との反応により生成した NaOH が少ないため、NaOH から生成する Na₂CO₃ 量が相対的に多くなったものと考えられる。100℃～200℃ 以上ではほとんどが NaOH であり、エアロゾル濃度も十分であるため、Na₂CO₃ は検出されていないと考えられる。

(4) 実験 2 の水蒸気濃度測定ライン内での吸湿割合、エアロゾル化学組成の推定

(a) 吸湿割合

実験 2 の際の水蒸気濃度測定ライン内でのエアロゾル濃度は約 20 g-Na/m³ であり、40 リッター中には 0.80 g-Na/40 ℓ 存在することになる。このエアロゾル量は Run F8-1 のライン B で捕集された量の約 12.6 倍であり、実験 2 の水蒸気濃度測定ライン内ではほとんどの（326% > 100%）水蒸気がエアロゾルに吸収されたものと考えられる。

(b) エアロゾル化学組成

上記の結果から、ガス温度が 25℃ 程度であった水蒸気濃度測定ライン内では NaOH・H₂O が生成し、ガス温度が 300℃ 程度であったセル内では NaOH のみであったと考えられる。

表A3-1 Run F8-1 試験条件一覧

項目	実験条件
ナトリウム温度	506 °C
ナトリウム漏えい高さ	1.5 m
漏えいナトリウム量	10 kg
ナトリウム漏えい時間	25 分 26 秒
平均漏えい率	23.6 kg/hr
供給空気温度・湿分濃度	54 °C・26,000 ppm (露点 22 °C)
供給空気流量	5.0 m ³ /min
酸素濃度	初期：約 21.1%、漏えい終了時：約 19.4%
40 リッターライン予熱温度	ラインA：100 °C ラインB：50 °C

表A3-2 Run F8-1 試験結果概要

(11～17分 (40 リッターラインサンプリング時刻) の測定値)

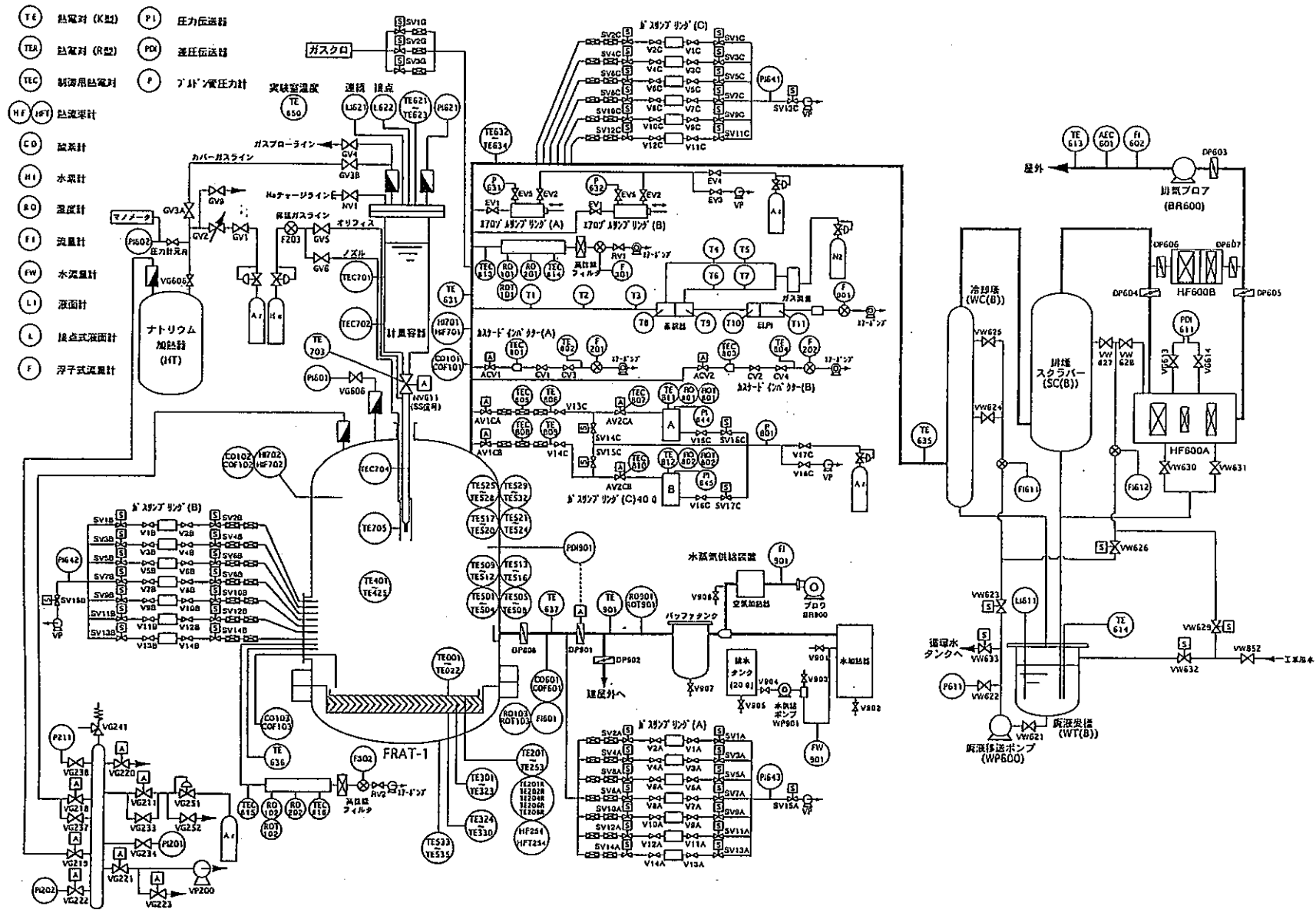
項目	FRAT-1 セル	40リッターライン*	
		ラインA	ラインB
ガス温度	110～140 °C (セル上部 : TE425)	約 80 °C (フィルター部)	約 41～43 °C (フィルター部)
水蒸気濃度	約 17,000 ～約 12,000 ppm	約12,000 ppm	約10,000 ppm
捕集エアロゾル量	-	0.0890 g	0.0636 g
エアロゾル濃度	10～20 g-Na/m ³	5.56 g-Na/m ³	3.98 g-Na/m ³

* : 40 リッターラインでのサンプリングは11～17分のみで行われた。

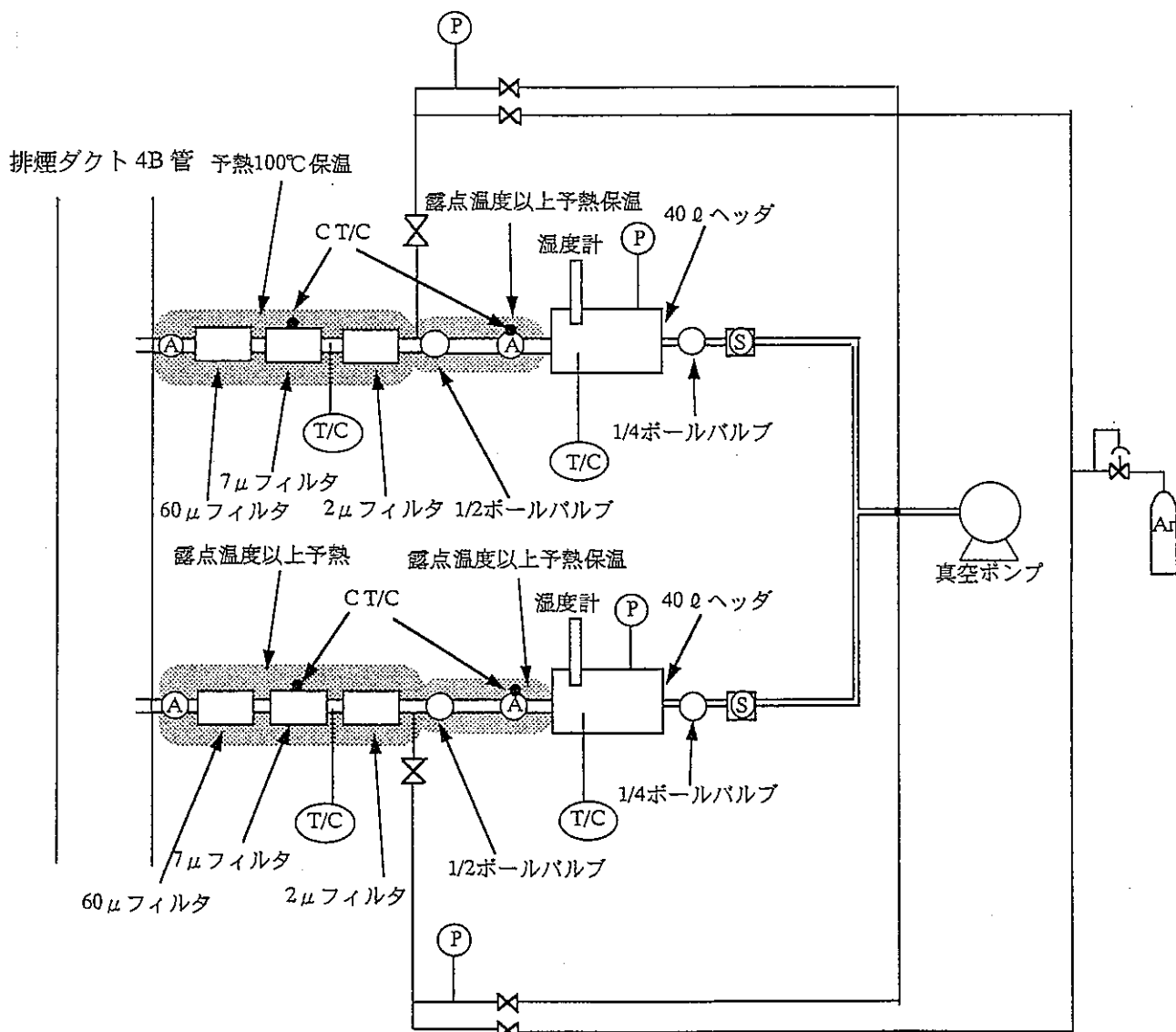
表A3-3 セル内エアロゾル組成分析結果

サンプル名	サンプリング時刻 (分)	結晶相					
		Na	Na ₂ O	NaOH	NaOH・H ₂ O	Na ₂ CO ₃	Na ₄ FeO ₃
サンプルA	1~7	-	-	+	++++	++	-
サンプルB	11~17	-	-	++++	Tr.	-	-

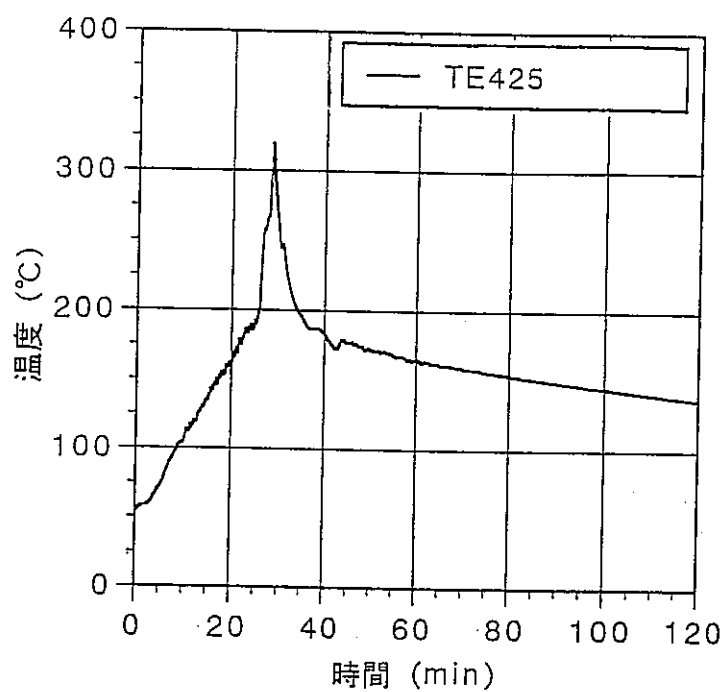
(注) +++++:非常に多い、+++ : 多い、++ : 中程度、+ : 少量、Tr. : 痕跡程度、- : 検出されず



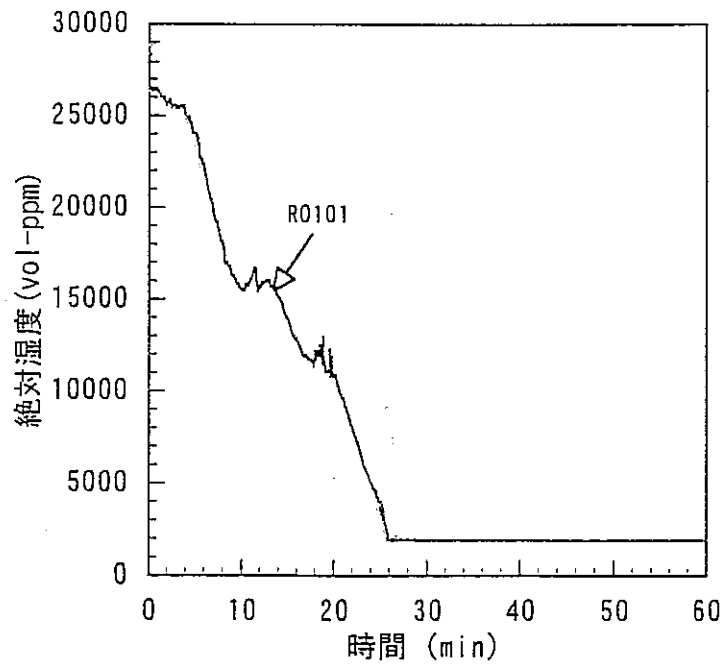
図A3-1 Run F8-1 試験装置 (FRAT-1) フロー図



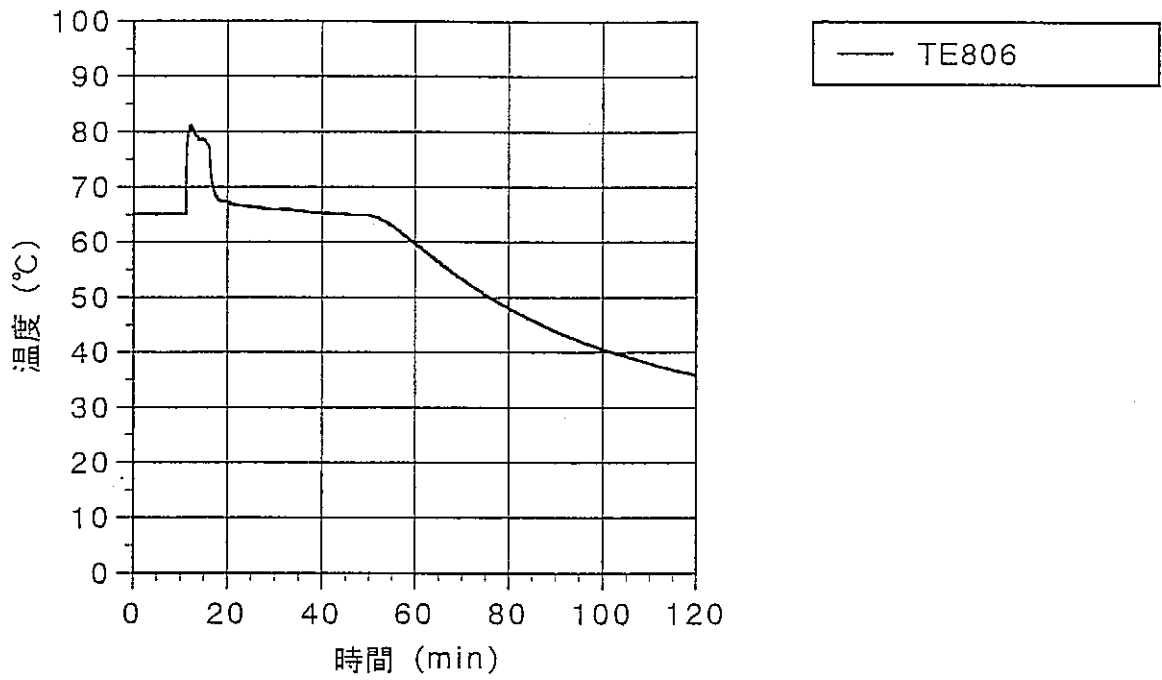
図A3-2 40 リッターライン概念図



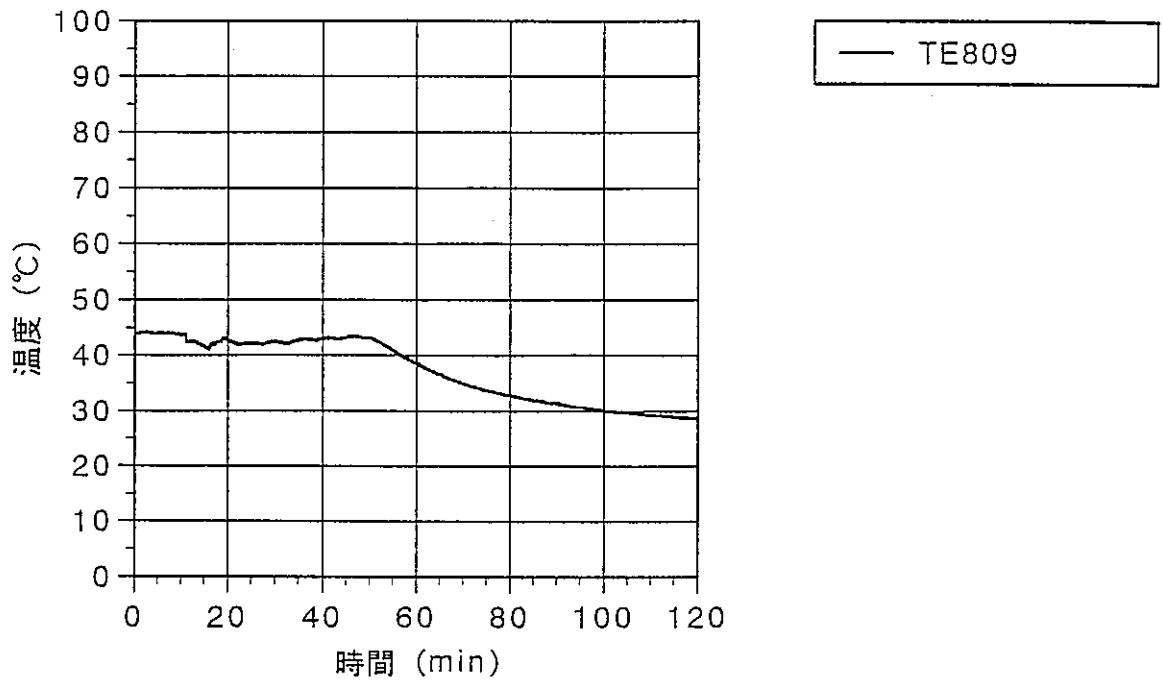
図A3-3 セル内ガス温度履歴



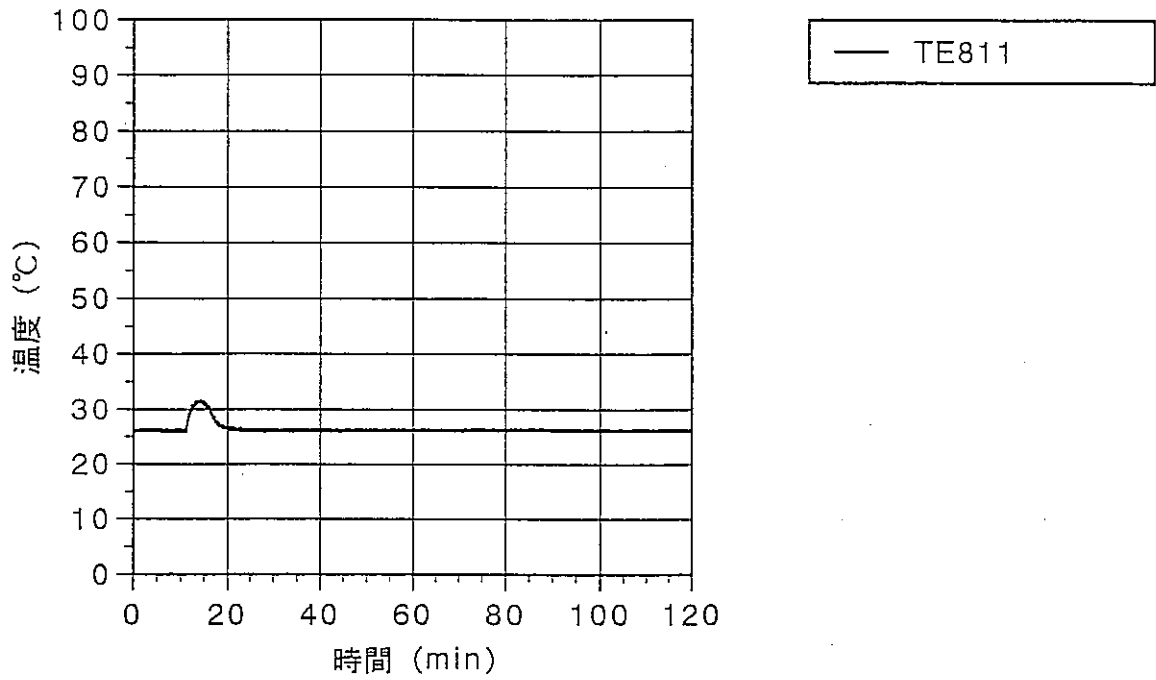
図A3-4 セル内水蒸気濃度履歴



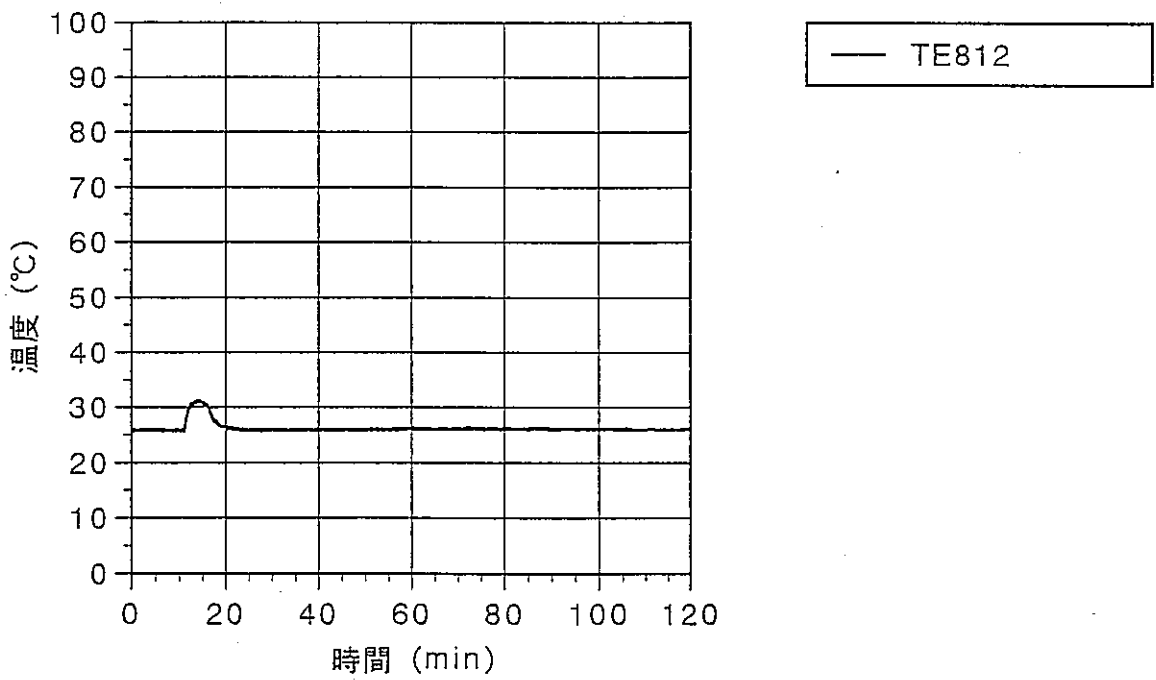
図A3-5-1 フィルター部温度履歴 (ラインA)



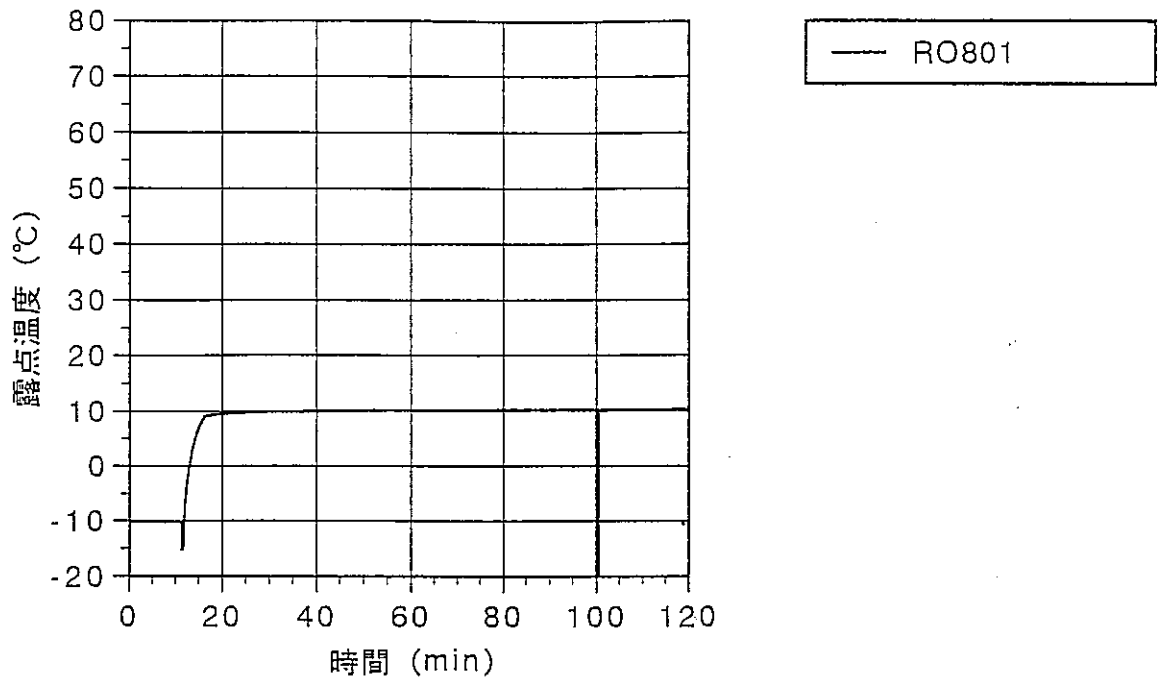
図A3-5-2 フィルター分温度履歴 (ラインB)



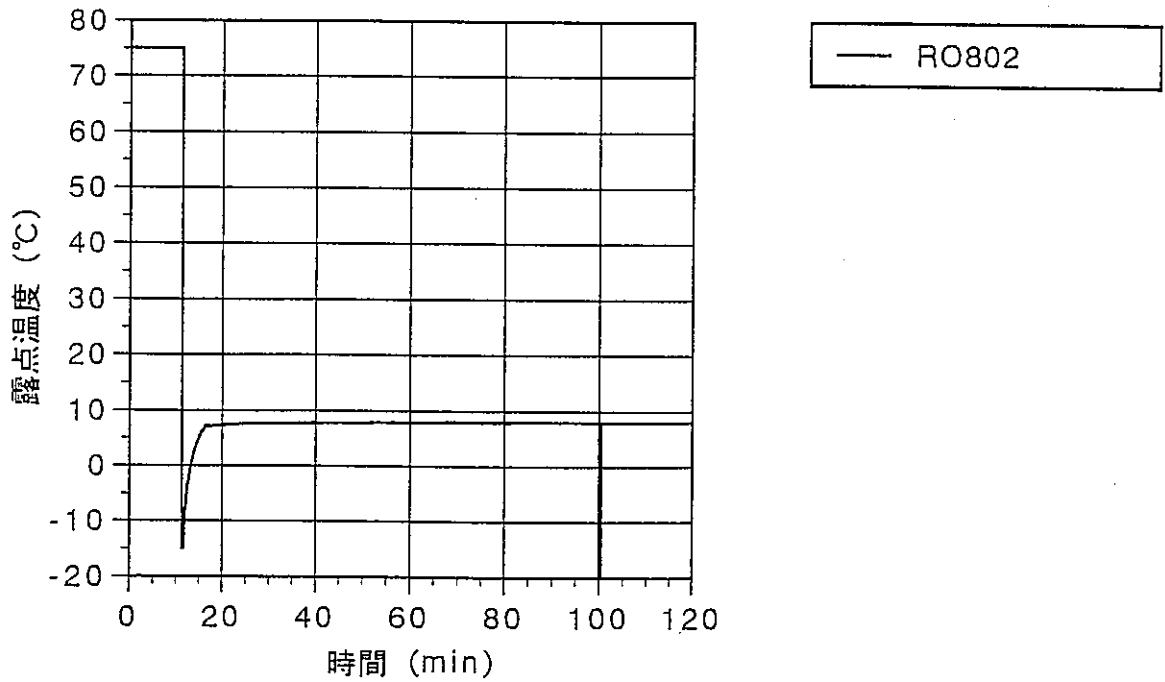
図A3-6-1 真空ヘッダー内温度履歴 (ラインA)



図A3-6-2 真空ヘッダー内温度履歴 (ラインB)



図A3-7-1 真空ヘッダー内水蒸気濃度履歴 (ラインA)



図A3-7-2 真空ヘッダー内水蒸気濃度履歴 (ラインB)

Appendix.4 エアロゾル吸湿・凝縮以外の水蒸気消費メカニズム

水蒸気濃度測定ラインでの NaOH エアロゾルの吸湿、水蒸気の凝縮以外にも、セル内の水蒸気濃度を低下させるメカニズムは存在する可能性がある。このため、実験 2 の測定でデータ¹⁾を使用して、以下の 3 つのメカニズムについて、それぞれが水蒸気濃度を低下させる程度を概算し、エアロゾルの吸湿、凝縮に代わる水蒸気消費メカニズムになりうるかどうかを評価した。

- (1) ライナ下空間への水蒸気の蓄積
- (2) 壁・天井へ付着したエアロゾルによる吸湿
- (3) 床ライナとの反応による消費

A4.1 ライナ下空間への水蒸気の蓄積

床下の加熱コンクリートから放出され、床下空間（コンクリートとライナの間の空間）にとどまって、セル内の水蒸気濃度に寄与しないと考えられる量を評価した。床ライナ下空間図を図A4-1 に示す。

A4.1.1 ライナ下空間容積

ライナ下コンクリート上にはほぼ全面に断熱材としてパーライトボードが敷設されている。ここでは、全面に敷設されていると仮定した場合と、ライナ下空間へたまる量を多く見積もるために、全く敷設されていないとした場合の計算も行った。

- (1) パーライトボード（2.5 cm 厚）が全面に敷設されている場合

$$501 \text{ cm} \times 471 \text{ cm} \times 4.3 \text{ cm} = 1,014,675.3 \text{ cm}^3 = 1,014.68 \text{ ㍓} \quad (\text{A4-1})$$

- (2) パーライトボードが全く敷設されていない場合

$$501 \text{ cm} \times 471 \text{ cm} \times 6.8 \text{ cm} = 1,604,602.8 \text{ cm}^3 = 1,604.60 \text{ ㍓} \quad (\text{A4-2})$$

A4.1.2 ライナ下空間温度

ライナ下空間へたまりうる水蒸気量は空間のガス温度により変化する。空間のガス温度は測定されていないが、ライナ裏面温度とコンクリート表面温度の間にあるものと考えられる。コンクリート表面温度も実験時には測定されていないので、表面から 15 mm 内部の測定結果で代用する。

- (1) ライナ裏面温度

ライナ裏面温度の測定結果を図A4-2 に示す。ほとんどの測定点で最高約 200℃～400℃で推移したと考えられる。

(2) コンクリート表面から 15 mm 内部の温度

コンクリート表面から 15 mm 内部の温度についてはナトリウム漏えい直下から比較的近い部分でしか測定されていない。漏えい直下では約 500℃になっているものの、それ以外の部分では最高約 100℃～150℃である。このことから、漏えい直下から遠い部分については測定されていないが、最高でも 100℃以下になっている可能性が高い。

(3) ライナ下空間温度

(1)、(2)の結果から、ガス空間温度は最高でも400℃であり、ライナ裏面温度が 200℃～400℃、漏えい直下から比較的近い部分のコンクリート表面から 15 mm 内部で 100℃～150℃であったため、かなりの部分で 100℃以上になったものと考えられる。

A4.1.3 ライナ下空間にたまり得る水蒸気量

ガス温度が 100℃以下の場合には、水蒸気は凝縮し、水になるため、ライナ下空間容積と、ガス温度からその量を算出することは不可能である。このため、ライナ下空間にたまり得る水蒸気量を 100℃と 400℃で評価した。また、たまり得る量を最大に見積もるため、空間は全て水蒸気で満たされるものとした。

(1) ガス温度 100℃の場合

(a) パーライトボードありの場合

$$1,014.68 (\text{ℓ}) / 22.4 (\text{ℓ} / \text{mol}) \times 273 / (273 + 100) \times 0.018 (\text{kg} / \text{mol}) = 0.5968 \text{ kg} \quad (\text{A4-3})$$

(b) パーライトボードなしの場合

$$1,604.60 (\text{ℓ}) / 22.4 (\text{ℓ} / \text{mol}) \times 273 / (273 + 100) \times 0.018 (\text{kg} / \text{mol}) = 0.9437 \text{ kg} \quad (\text{A4-4})$$

(2) ガス温度 400℃の場合

(a) パーライトボードありの場合

$$1,014.68 (\text{ℓ}) / 22.4 (\text{ℓ} / \text{mol}) \times 273 / (273 + 400) \times 0.018 (\text{kg} / \text{mol}) = 0.3308 \text{ kg} \quad (\text{A4-5})$$

(b) パーライトボードなしの場合

$$1,604.60 (\text{ℓ}) / 22.4 (\text{ℓ} / \text{mol}) \times 273 / (273 + 400) \times 0.018 (\text{kg} / \text{mol}) = 0.5230 \text{ kg} \quad (\text{A4-6})$$

これらの計算結果から、ライナ下空間のガス温度が 100℃以上であれば、空間にたまり得る水蒸気量は最大でも約 1 kg 以下であることがわかる。

また、上記のように 100℃以下の領域が存在したと考えられるため、水蒸気は凝縮した可能性があり、保守的に見積もれば表A4-1に示す床コンクリートから放出された水 44.2 kg 全てがたまったことになるが、実際には床ライナ裏面温度が 200℃～400℃、コンクリート表面近傍が 100℃～150℃で推移したため、ライナ下空間のかなりの部分が 100℃

以上になっており、44.2 kg の全量が凝縮してたまったとは考えにくい。

A4.1.4 セル内水蒸気濃度への影響

床ライナ下空間へたまり得る水の量は、空間のガス温度が 100℃ 以上では最大でも 1 kg、ガス温度が 100℃ 以下では最大で 44.2 kg であることがわかった。

ライナ下空間へたまる量が 44.2 kg の場合でも、表A4-1 に示すコンクリートからの全放出水量 213.1 kg と換気（吸気）による供給量約 79 kg の合計の約 15% であり、実際の温度履歴を考慮すると全量が凝縮したとは考えにくく、セル内の水蒸気濃度に与える影響は小さいと考えられる。

A4.2 壁・天井へ付着したエアロゾルによる吸湿

ここでは、まず、ABC-INTG コード⁸⁾ のエアロゾルの壁・天井への沈着モデルを使用した付着量評価を行い、次に付着エアロゾルへ吸収される水蒸気量を算出した。

A4.2.1 壁・天井への沈着モデル

ABC-INTG コードで考慮されている以下の 2 つのモデルを使用した。

(1) ブラウン拡散沈着

ブラウン拡散による沈着速度は次式で表わされる。

$$Vd(r) = D / \delta d = k_0 [(T_g + 273.0) / (6 \pi \mu_g r \delta d)] (1 + A \ell / r) (1 / \chi) \quad (A4-7)$$

$Vd(r)$: ブラウン拡散沈着速度 (cm/sec)

r : 粒径 (cm)

D : Stokes-Einstein の拡散係数

$$D = k_0 [(T_g + 273.0) / (6 \pi \mu_g r \delta d)] (1 + A \ell / r),$$

$$A = 1.257 + 0.40 \exp(-1.10 r / \ell)$$

δd : 拡散距離 (cm) (10^{-2} cm : ABC-INTG のデフォルト値)

k_0 : ボルツマン定数 ($g \text{ cm}^2 / \text{sec}^2 \text{ K}$)

$$k_0 = 1.38054 \text{ E-16 erg/K}$$

μ_g : ガスの粘性係数 ($g / \text{cm} \cdot \text{sec}$)

$$\mu_g = 1.830 \times 10^{-4} - 4.83 \times 10^{-7} (23.0 - T_g)$$

ℓ : ガスの平均自由行程 (cm)

$$\ell = 3 \mu_g / (2^{3/2} \rho_g) [1.1 \times 10^{-6} / (T_g + 273.0)]^{1/2}$$

ρ_g : ガスの密度 (g / cm^3)

$$\rho_g = 9.7 \times 10^{-8} / (1 + 3.67 \times 10^{-3} T_g) (P / 76)$$

P : ガス圧力 ($\text{dyne} / \text{cm}^2$)

T_g : ガス温度 ($^{\circ}\text{C}$)

χ : 重力沈着形状係数 (dynamic shape factor)

$$\chi = 1.0 \text{ : ABC-INTG のデフォルト値}$$

(A4-7) 式を用いて単位時間内に天井・壁に付着するエアロゾル量は以下のように算出される。

$$md(r) = Vd(r) \times S \times Ca \quad (A4-8)$$

$md(r)$: 単位時間にブラウン拡散により壁に付着するエアロゾル量
(g/sec)

S : 壁面積 (cm²)

Ca : エアロゾル濃度 (g/cm³)

(2) 熱泳動沈着

$$VT(r) = \{3 \mu g / [2 \rho g (Tg + 273.0)]\} [(1 + A \ell / r) / (1 + 3 Cm \ell / r)] \\ \times (kg / ka + Ct \ell / r) / (1 + 2 kg / ka + 2 Ct \ell / r) \\ \times [(Tg - Tw) / \delta T] / (1 / \chi) \quad (A4-8)$$

$VT(r)$: 熱泳動沈着速度 (cm/sec)

Cm : slip correction constant in Brock's formula (= 1.0)

Ct : slip correction constant in Brock's formula (= 3.32)

δT : 温度境界層厚さ (cm)

$$= 2 kg / h = 2 H / Nu$$

h : ガスと壁の熱伝達係数 (cal/cm² sec K)

H : セル高さ (cm)

Nu : ヌッセルト数 (= 0.129 (Gr · Pr)^{1/3})

$$Gr = g (Tg - Tw) \cdot H^3 / [(Tg + 273.0) (\mu_g / \rho_g)^2]$$

$$Pr = 0.7 \text{ (ABC-INTG)}$$

g : 重力加速度 (cm/sec²) (= 980.6 (cm/sec²))

ka : エアロゾル粒子の熱伝導度 (cal/cm sec K)

(ABC-INTG では、kg/ka = 3.69 E-2)

kg : ガスの熱伝導度 (cal/cm sec K)

(A4-8) 式を用いて単位時間内に天井・壁に付着するエアロゾル量は以下のように算出される。

$$mT(r) = VT(r) \times S \times Ca \quad (A4-9)$$

$mT(r)$: 単位時間に熱泳動により天井・壁に付着するエアロゾル量
(g/sec)

(3) 単位時間に天井・壁に付着するエアロゾル量

上記(1)、(2)より、単位時間に天井・壁に付着するエアロゾル量は以下のように算出される。

$$mt(r) = md(r) + mT(r) \quad (A4-10)$$

$mt(r)$: 単位時間に天井・壁に付着するエアロゾル量 (g/sec)

(4) 付着エアロゾルの吸湿量の評価

セル内のエアロゾル全体への最大吸湿速度は本文および Appendix.1 ですでに求められているとおり (0.235 kg-h₂o/min) であり、エアロゾル全体の吸湿量はこのエアロゾルへの吸湿速度にエアロゾル発生時間に乗じたものとして算出できる。付着エアロゾルの吸湿量は、このエアロゾル全体への吸湿量と比較することにより評価できる。

A4.2.2 計算条件

評価に使用した天井・壁の面積、解析条件を表A4-2に示す。解析条件の設定にあたっては ASSCOPS コードの解析条件²⁾を参考にした。エアロゾル粒径については、エアロゾルによる吸湿量に与える影響が大きいため、ASSCOPS コードで使用している10 μ mだけでなく、1 μ m、0.1 μ mでも評価した。

また、セル内の天井・壁の温度は計算終了時の約3時間40分後には全て100℃以上であり、NaOH水和物の生成は考えられない。このため、吸湿反応としては、次式のもののみ考慮した。



A4.2.3 計算結果

(1) 天井・壁へのエアロゾル付着量

エアロゾルの付着量の計算結果を表A4-3に示す。計算結果からエアロゾル粒径が小さいほど付着量は多くなることがわかる。しかし、付着量の最も多いエアロゾル径=0.1 μ mの場合でも、付着量は5 kg-Na以下であり、全エアロゾル発生量 (= 690 \times [0.2 \times 1.0 + (1-0.2) \times 0.25] \times 1/2、漏えいナトリウム量: 690 kg-Na、落下中燃焼割合: 0.2、スプレー燃焼、プール燃焼時のエアロゾル化割合をそれぞれ、1.0、0.25とした場合の半分)の138 kg-Naの約4%以下と小さいことがわかる。

(2) 付着したエアロゾルの吸湿量

天井・壁へ付着したエアロゾルによる吸湿量の計算結果を表A4-4に示す。この結果から、天井・壁へ付着したエアロゾルによる吸湿量は、エアロゾル全体の吸湿量の4%以下であることがわかる。

A4.2.4 セル内水蒸気濃度への影響

上記の計算結果から、天井・壁へ付着したエアロゾルによる吸湿量は、約3時間40分間に発生した全エアロゾルによる吸湿量の4%以下であり、セル内の水蒸気濃度に与える影響は小さいと考えられる。

A4.3 セル内の鋼製構造物との反応による消費

実験2時のセル内温度はガス温度でも約300℃、床ライナ温度では約800℃に達した。このため、セル内ガス空間にある水蒸気と鋼製構造物の反応が起こり、水蒸気が消費された可能性もある。このため、この鋼製構造物との反応メカニズム、反応する水蒸気量について検討した。

A4.3.1 反応メカニズム

水蒸気と鋼製構造物の反応のうち、水蒸気が鉄に吸収され、セル内の水蒸気濃度を低下させる反応としては、次式のものが考えられる。



この反応は図A4-3に示す600℃でのNa-Fe-O-H系化学ポテンシャル図¹⁰⁾からもわかるように、Na₂Oの活量が10⁻¹²~10⁻¹⁵と非常に小さい場所でのみ発生可能である。このため、グレーチング、ダクト等のうち、漏えいナトリウムが直接かかる部分、及び床ライナ上プール内等のNa₂Oが多量に存在する場所では発生しないと考えられる。

A4.3.2 反応面積の算出

表A4-5に各部の鋼製構造物の表面積及び重量の算出結果を示す。前項でも述べたように、Na₂Oの活量が大きいと考えられる床上プールの面積(5.9 m²)、グレーチング、ダクト等で漏えいナトリウムが直接かかる部分(1.7 m²)は除外するため、本計算で考慮する反応面積は、以下のように算出される。

$$86.0 \text{ m}^2 - (5.9 \text{ m}^2 + 1.7 \text{ m}^2) = 78.4 \text{ m}^2 \quad (\text{A4-13})$$

A4.3.3 鋼製構造物の腐食速度・腐食厚さの算出

エアロゾルの組成がNaOHのみであり、NaOH・H₂Oを生成するとした場合に消費される水蒸気量との差の分が全て鋼製構造物と反応すると考える。

NaOH・H₂O、NaOHが生成される時のエアロゾルの吸湿速度差は、以下のように算出される。

$$0.235 \text{ (kg-h}_2\text{o/min)} \times (3 - 1) = 0.47 \text{ (kg-H}_2\text{O/min)} \quad (\text{A4-14})$$

これと(A4-12)式から、鋼製構造物の腐食速度は以下のように算出される。

$$0.47 \text{ (kg-h}_2\text{o/min)} \times 55.85 / (18 \times 3/2) = 0.972 \text{ (kg-Fe/min)} \quad (\text{A4-15})$$

(A4-13) 式で算出した反応面積と (A4-15) 式の腐食速度から、鋼製構造物の厚さの減少速度は以下のように算出される。

$$\begin{aligned} 0.972 \text{ (kg-Fe/min)} \div 7,800 \text{ (kg/m}^3) \div 78.4 \text{ m}^3 &= 1.589 \text{ E-6 (m/min)} \\ &= 1.589 \text{ E-3 (mm/min)} \quad (\text{A4-16}) \end{aligned}$$

実験終了の 4 時間後の鋼製構造物腐食量、腐食厚さは以下である。

$$0.972 \text{ (kg-Fe/min)} \times 4 \text{ hour} \times 60 \text{ min} = 233.2 \text{ kg-Fe} \quad (\text{A4-17})$$

$$1.589 \text{ E-3 (mm/min)} \times 4 \text{ hour} \times 60 \text{ min} = 0.3814 \text{ mm} \quad (\text{A4-18})$$

A4.3.4 計算結果の評価

実験 2 の試験結果¹⁾では、床ライナのプール以外の部分では板厚の減少は 0.1mm ~ 0.2 mm 程度であり、ダクト、グレーチング等の漏えいナトリウムに直接触れない部分では有意な腐食は認められていない。このため、実験 2 の結果が床ライナのプール以外の部分で 0.2 mm、その他の鋼製構造物（プール部除く）上でゼロとした場合の腐食量は以下である。

$$(34.6 - 5.9) \text{ m}^2 \times 0.2 \text{ mm} \times 7,710 \text{ (kg/m}^3) = 44.26 \text{ kg-Fe} \quad (\text{A4-19})$$

この腐食量は (A4-17) 式で算出された腐食量の約 19 % であり、鋼製構造物との

A4.4 まとめ

以上の結果から、次の 3 つのメカニズムは水蒸気濃度測定ライン内でのエアロゾル吸湿、水蒸気の凝縮に代わる水蒸気消費メカニズムとなる可能性は小さいことがわかった。

- (1) ライナ下空間への水蒸気の蓄積
- (2) 壁・天井へ付着したエアロゾルによる吸湿
- (3) 床ライナとの反応による消費

表A4-1 実験2におけるコンクリートパネルからの放出水量計算結果

場所	面積 (m ²)	最高温度 (°C)	コンクリート加熱試験結果		放出水量 (kg)		
			試験体 No.	単位面積あたりの 放出水量 (3時間42分) (kg/m ²)			
床	局部	4	230	L-350	5.500	22.0	44.2
	西	5.8	165	L-160	2.319	13.5	
	東南	13.8	111	L-120	0.631	8.7	
天井	北・中央	16.3	116	U-120	0.841	13.7	30.6
	南	7.3	141	U-150	2.315	16.9	
壁	北壁(局部)	6.6	349	L-350	5.500	36.3	138.3
	北壁(西)	2.5	160	L-160	2.319	5.8	
	北壁(東上)	3.3	117	L-120	0.631	2.1	
	北壁(東下)	3.3	182	L-160	2.319	7.7	
	側壁上部	53	109	U-120	0.841	44.6	
	側壁下部(東西南)	47	-	L-120	0.631	29.7	
	側壁中央(東西南北)	19.4	113~123	L-120	0.631	12.2	
合計	182.3	-	-	-	-	213.1	213.1

表A4-2 天井・壁へのエアロゾル付着量、
吸湿量計算条件一覧（実験2）

項目	解析条件
付着面積	床以外のセル内面 (4.71 m×5.01 m×H7.21 m) 合計：163.7 m ²
ガス温度	0～1 hour：180℃ 1～2 hour：220℃ 2～3 hour：240℃ 3～3 h 44 m：250℃
天井・壁温度	0～1 hour：60℃ 1～2 hour：110℃ 2～3 hour：140℃ 3～3 h 44 m：160℃
セル内エアロゾル濃度	平均 10 g-Na/m ³
エアロゾル粒径	10 μm、1 μm、0.1 μm
計算時間	3時間44分

表A4-3 天井・壁へのエアロゾル付着量計算結果（実験2）

エアロゾル粒径 (μm)	付着量 (g-Na)		
	ブラウン拡散沈着	熱泳動沈着	合計
10	0.29	1447.91	1448.20
1	3.56	4028.94	4032.50
0.1	111.37	4702.70	4814.07

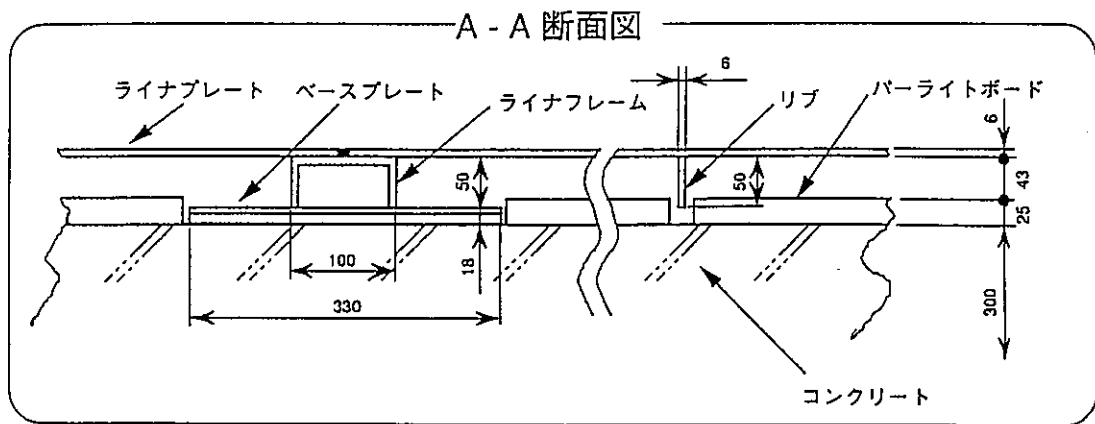
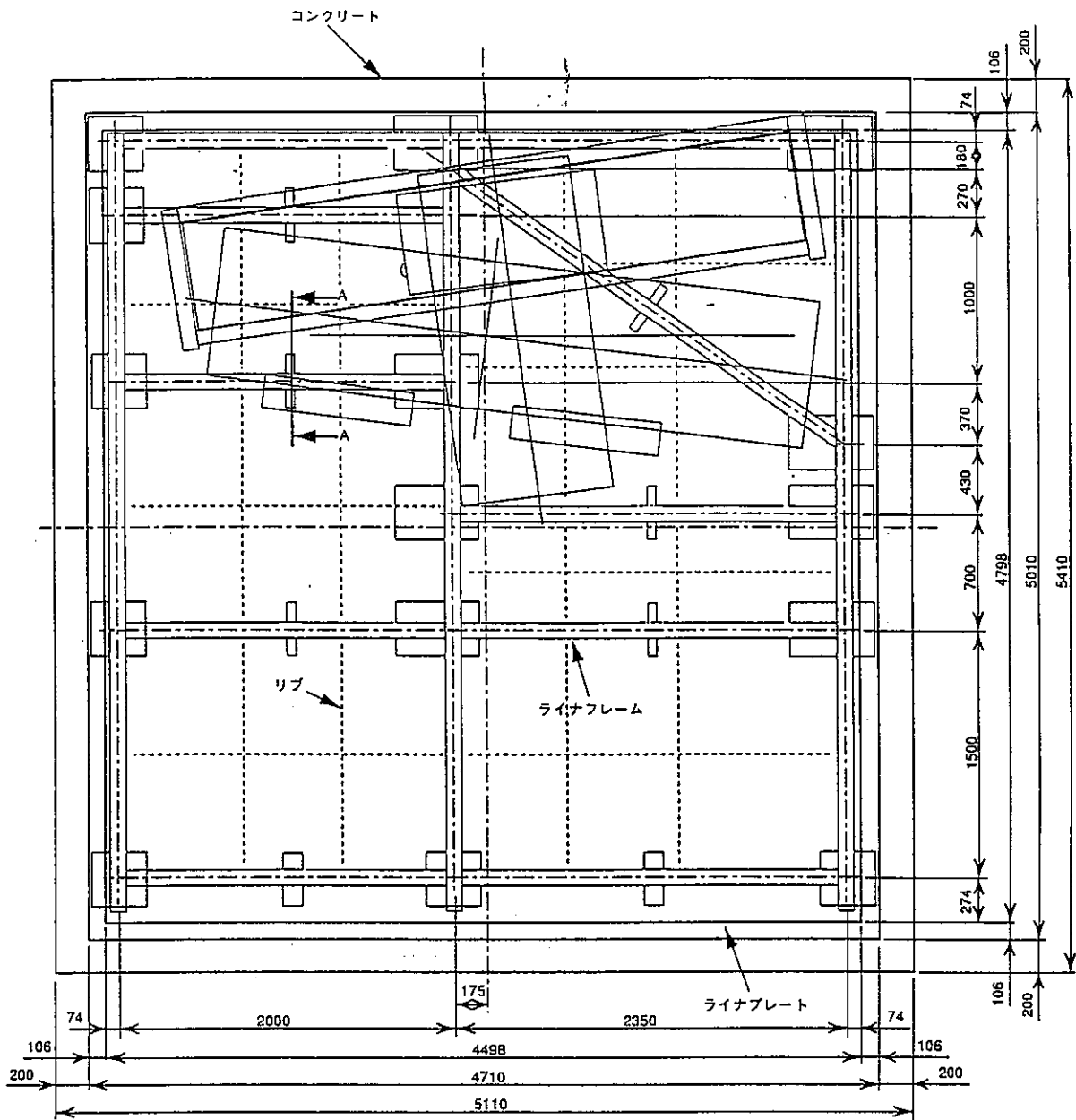
表A4-4 天井・壁へ付着したエアロゾル吸湿量計算結果（実験2）

エアロゾル粒径 (μm)	吸湿量 (kg-h ₂ o)	3時間44分の平均吸湿速度 (kg-h ₂ o/min)	全エアロゾルへの吸湿速度* に対する割合 (%)
10	0.5667	2.530E-3	1.077
1	1.5779	7.044E-3	2.998
0.1	1.8838	8.410E-3	3.579

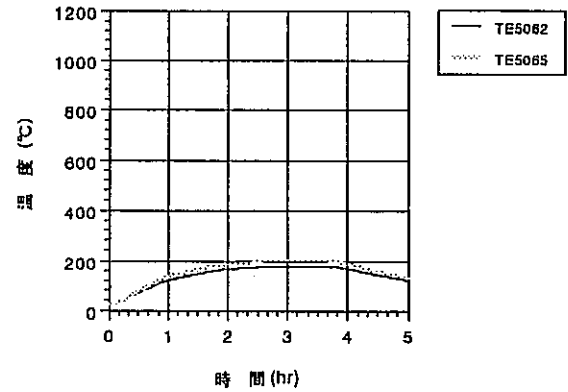
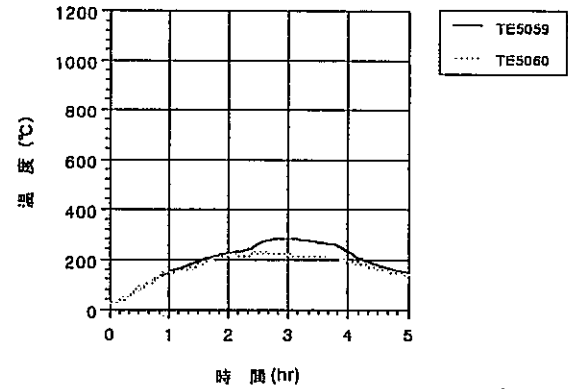
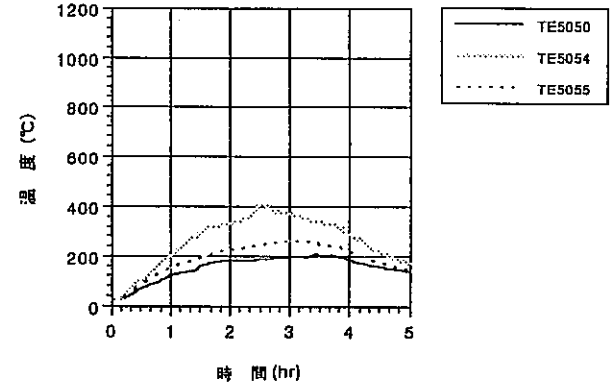
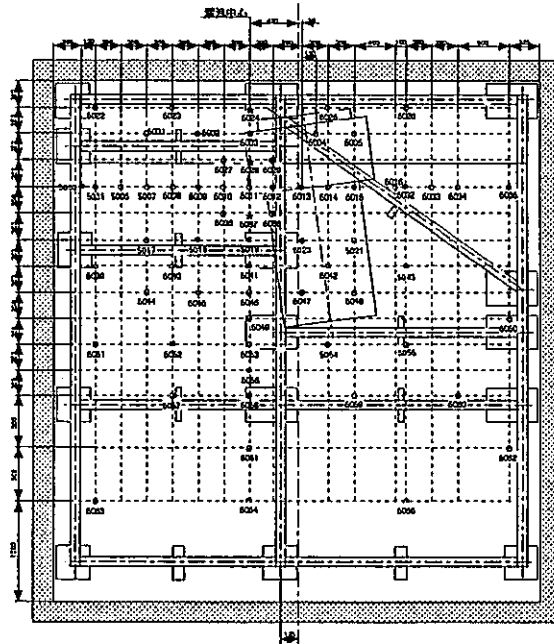
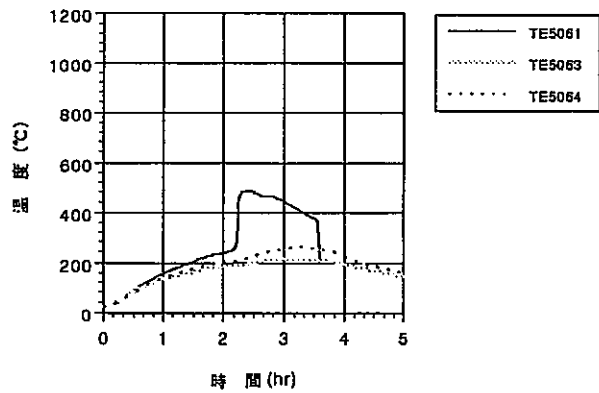
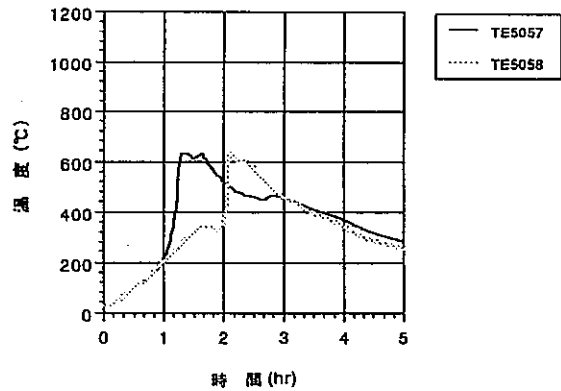
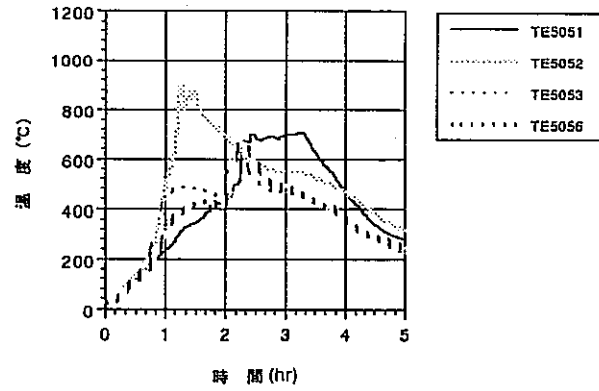
* : 0.235 kg-h₂o/min

表4-5 SOLFA-1 内の鋼製構造物の表面積及び重量 (実験 2)

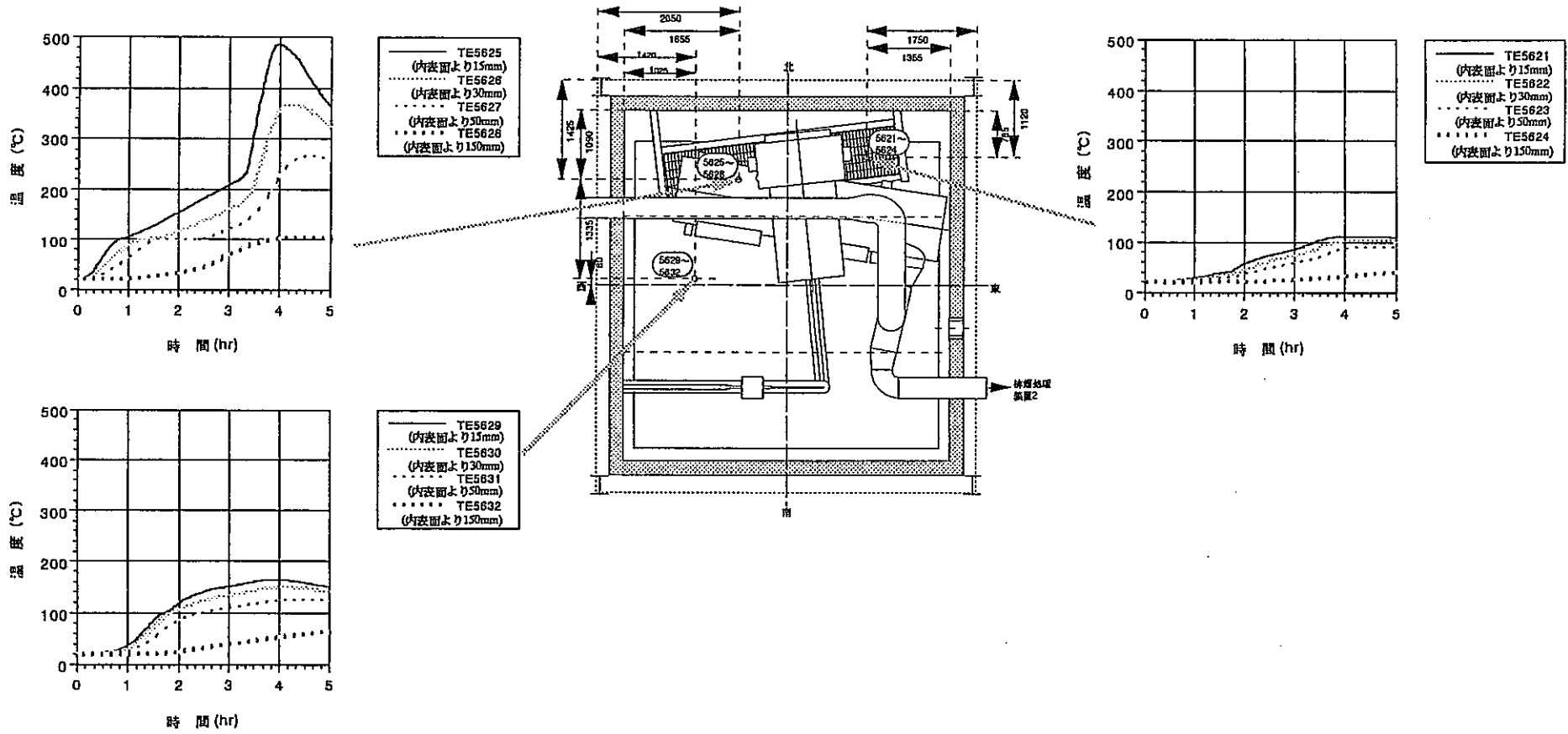
部位名		表面積 (m ²)	板厚 (mm)	重量 (kg)
床ライナ	ライナ底面	23.6	6.0	1104.3
	立ち上がり部	5.9	6.0	278.4
	リッド	5.1	2.5	99.2
	小計	34.6	-	1481.9
模擬漏洩配管	漏洩配管	6.0	0.8	37.6
	配管蓋	1.8	0.8	11.1
	小計	7.8	-	48.7
換気空調ダクト	ダクト	10.9	0.8	67.9
グレーチング	グレーチング	2.2	3.2	55.4
	架台	4.6	4.5	162.0
	手すり	1.4	1.0	10.6
	小計	8.2	-	228.1
EL+8,018 梁	梁	13.4	6.5×10.0	750.6
試験体サポート	(S-1)	1.5	4.5	51.9
	(S-2)	1.1	4.5, 6.5×6.0	41.0
	小計	2.5	-	93.0
ダクトサポート	(S-3)	2.3	5.0×7.5	96.8
	(S-4)	6.0	4.5	211.7
	小計	8.3	-	308.5
ナトリウム配管サポート	(S-5)	0.3	4.5	10.5
合計		86.0	-	2989.3



図A4-1 SOLFA-1 床ライナ下空間図

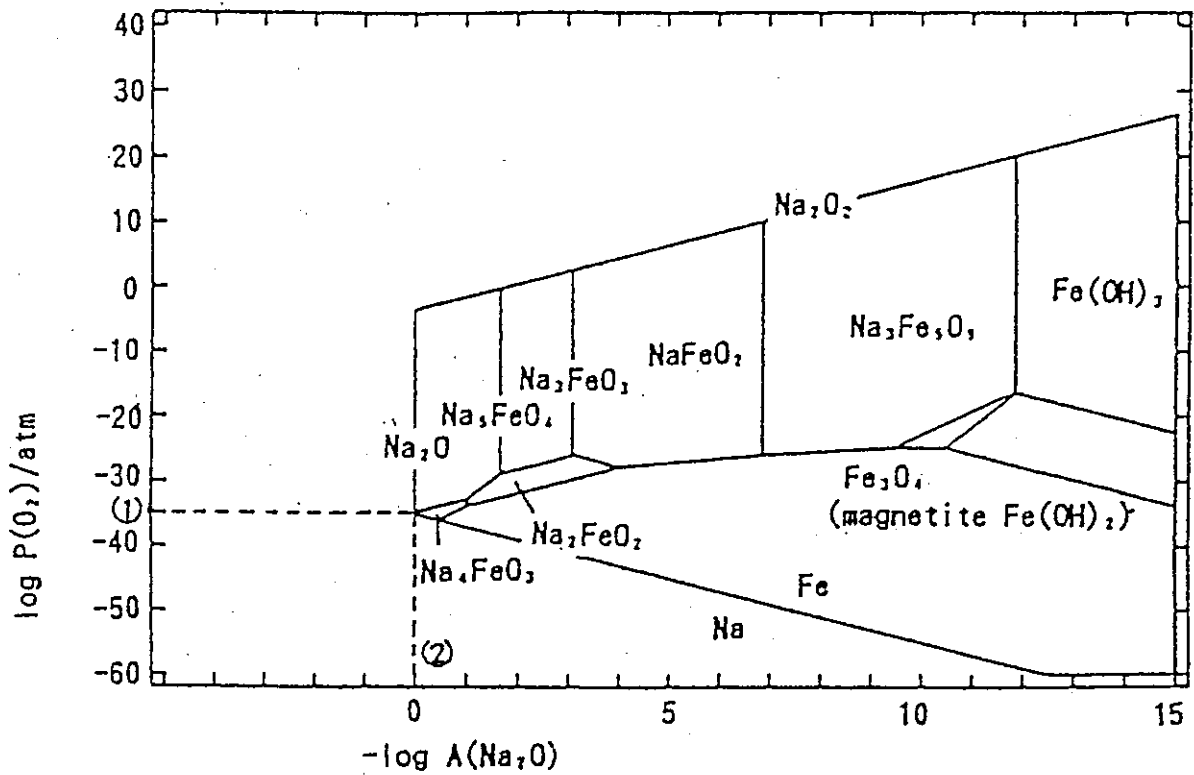


図A4-2 ライナ裏面温度履歴



A4-15

図A4-3 床コンクリート温度（表面から 15 mm）履歴



- ① NaとNa₂Oが共存できる環境 (平衡解離圧: $P_{O_2} = \text{約 } 8 \times 10^{-33} \text{ atm}$)
- ② 反応に寄与するNa₂Oの割合が最大である条件 (活量: $a_{Na_2O}=1$)

図A4-4 Na-Fe-O-H系化学ポテンシャル図 (600°C)