

ナトリウム燃焼解析コードASSCOPSの検証 (研究報告)

2000年12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

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

ナトリウム燃焼解析コードASSCOPSの検証 (研究報告)

大野 修司^{*}、松木 卓夫^{**}

要 旨

高速増殖炉プラントのナトリウム漏えい事故時の熱的影響を評価するための解析コードASSCOPSを使用して、7種類の既往ナトリウム燃焼試験の解析を実施した。

雰囲気ガスやナトリウム受け皿の温度、壁温度、雰囲気ガス圧力、酸素濃度等の項目について解析結果と試験測定値を比較することにより、本解析コードを適切な解析パラメータとともに使用することで、ナトリウム燃焼とそれに伴う熱的影響の評価を妥当または保守的な形で実施できることを確認した。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 プラント安全工学グループ

** 検査開発株式会社

Validation of Sodium Fire Analysis Code ASSCOPS

Shuji Ohno^{*}, Takuo Matsuki^{**}

Abstract

Sodium fire analyses were performed on 7 kinds of sodium leak tests using a computer code ASSCOPS which has been developed to evaluate thermal consequences of sodium leak accident in an FBR plant.

By the comparison between the calculated and the test results of gas pressure, gas temperature, sodium catch pan temperature, wall temperature, and of oxygen concentration, it was confirmed that the ASSCOPS code and the parameters used in the analysis give valid or conservative results on thermal consequences of sodium leak and fire.

* Plant Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, OEC

** Inspection Development Company

目 次

1. 緒 言	1
2. ASSCOPSコードの概要	2
3. ナトリウム燃焼解析条件	4
4. ナトリウム燃焼試験の解析	6
4. 1 FAUNA試験の解析	7
4. 2 Run D1試験の解析	20
4. 3 スプレイ燃焼試験TASPシリーズの解析	32
4. 4 スプレイ燃焼試験Run E1の解析	50
4. 5 ナトリウム漏えい燃焼実験 I の解析	62
4. 6 ナトリウム漏えい燃焼実験 II の解析	81
4. 7 小規模ナトリウムプール燃焼実験Run F7の解析	103
5. 結 言	119
謝 辞	120
参考文献	121

表リスト

第3章

表3.1	解析に使用した各種パラメータ	5
------	----------------	---

第4章

4.1節

表4.1-1	FAUNA試験装置の概要	9
表4.1-2	FAUNA試験条件	9
表4.1-3	FAUNA F5, F6試験の解析条件	10

4.2節

表4.2-1	Run D1 試験装置の概要	22
表4.2-2	Run D1 試験条件	22
表4.2-3	Run D1 試験の解析条件	23

4.3節

表4.3-1	TASP 試験装置の概要	35
表4.3-2	TASP 試験条件	35
表4.3-3	TASP-A1, TASP-A2 試験の解析条件	36

4.4節

表4.4-1	Run E1 試験装置の概要	53
表4.4-2	Run E1 試験条件	53
表4.4-3	Run E1 試験の解析条件	54

4.5節

表4.5-1	ナトリウム漏えい燃焼実験-Iの実験装置の概要	66
表4.5-2	ナトリウム漏えい燃焼実験-Iの実験条件	66
表4.5-3	ナトリウム漏えい燃焼実験-Iの解析条件	67

4.6節

表4.6-1	ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの実験装置の概要	86
表4.6-2	ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの実験条件	86
表4.6-3	ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの解析条件	87

4.7節

表4.7-1	小規模プール燃焼実験Run F7の実験装置の概要	106
表4.7-2	小規模プール燃焼実験Run F7-2の実験条件	106
表4.7-3	小規模プール燃焼実験Run F7-2の解析条件	107

図リスト

第2章

図2	ASSCOPSコードの計算機能	-----	3
----	-----------------	-------	---

第4章

4.1節

図4.1-1	FAUNA試験装置 (F5, F6試験)	-----	11
図4.1-2	FAUNA解析モデル	-----	12
図4.1-3	ガス温度の比較 (FAUNA)	-----	13
図4.1-4	ガス圧力の比較 (FAUNA)	-----	14
図4.1-5	ナトリウムプール温度の比較 (FAUNA)	-----	15
図4.1-6	燃焼皿温度の計算結果 (FAUNA)	-----	16
図4.1-7	壁温度の計算結果 (FAUNA)	-----	17
図4.1-8	ナトリウム反応速度の計算結果 (FAUNA)	-----	18
図4.1-9	酸素濃度の比較 (FAUNA)	-----	19

4.2節

図4.2-1	Run D1 試験装置 (SOLFA-1 装置)	-----	24
図4.2-2	Run D1 燃焼皿	-----	25
図4.2-3	Run D1 解析モデル	-----	26
図4.2-4	ガス温度の比較 (Run D1)	-----	27
図4.2-5	ガス圧力の比較 (Run D1)	-----	27
図4.2-6	ナトリウムプール温度の比較 (Run D1)	-----	28
図4.2-7	燃焼皿温度の比較 (Run D1)	-----	28
図4.2-8	壁ライナ温度の比較 (Run D1)	-----	29
図4.2-9	壁コンクリート温度の比較 (Run D1)	-----	29
図4.2-10	ナトリウム反応速度の計算結果 (Run D1)	-----	30
図4.2-11	酸素濃度の比較 (Run D1)	-----	30
図4.2-12	浮遊エアロゾル濃度の比較 (Run D1)	-----	31

4.3節

図4.3-1	TASP 試験装置	-----	37
図4.3-2	TASP 試験の熱電対配置	-----	38
図4.3-3	TASP-A1, TASP-A2 試験の解析モデル	-----	39
図4.3-4	ガス圧力の比較 (TASP-A1)	-----	40
図4.3-5	スプレー燃焼領域内ガス温度の比較 (TASP-A1)	-----	40

図4.3-6	スプレー燃焼領域外ガス温度の比較 (TASP-A1)	-----	41
図4.3-7	ナトリウムプール温度の比較 (TASP-A1)	-----	41
図4.3-8	ナトリウムプール温度測定値と スプレー最下端液滴温度計算値の比較 (TASP-A1)	-----	42
図4.3-9	壁温度の比較 (TASP-A1)	-----	42
図4.3-10	ナトリウムスプレー反応速度の計算結果 (TASP-A1)	-----	43
図4.3-11	ナトリウムプール反応速度の計算結果 (TASP-A1)	-----	43
図4.3-12	酸素濃度の比較 (TASP-A1)	-----	44
図4.3-13	ガス圧力の比較 (TASP-A2)	-----	45
図4.3-14	スプレー燃焼領域内ガス温度の比較 (TASP-A2)	-----	45
図4.3-15	スプレー燃焼領域外ガス温度の比較 (TASP-A2)	-----	46
図4.3-16	ナトリウムプール温度の比較 (TASP-A2)	-----	46
図4.3-17	ナトリウムプール温度測定値と スプレー最下端液滴温度計算値の比較 (TASP-A2)	-----	47
図4.3-18	壁温度の比較 (TASP-A2)	-----	47
図4.3-19	ナトリウムスプレー反応速度の計算結果 (TASP-A2)	-----	48
図4.3-20	ナトリウムプール反応速度の計算結果 (TASP-A2)	-----	48
図4.3-21	酸素濃度の比較 (TASP-A2)	-----	49
4.4節			
図4.4-1	Run E1 試験装置 (SOLFA-2 装置)	-----	55
図4.4-2	Run E1 試験における温度等計測位置	-----	56
図4.4-3	Run E1 解析モデル	-----	57
図4.4-4	ガス圧力の比較 (Run E1)	-----	58
図4.4-5	スプレー燃焼領域内ガス温度の比較 (Run E1)	-----	58
図4.4-6	スプレー燃焼領域外ガス温度の比較 (Run E1)	-----	59
図4.4-7	壁温度の比較 (Run E1)	-----	59
図4.4-8	燃焼抑制板温度の比較 (Run E1)	-----	60
図4.4-9	酸素濃度の比較 (Run E1)	-----	60
図4.4-10	ナトリウムスプレー反応速度の計算結果 (Run E1)	-----	61
図4.4-11	ナトリウムプール反応速度の計算結果 (Run E1)	-----	61
4.5節			
図4.5-1	ナトリウム漏えい燃焼実験- I の実験装置 (SOLFA-2 装置)	-	68
図4.5-2	ナトリウム漏えい燃焼実験- I の解析モデル	-----	69
図4.5-3	解析で使用した換気条件 (燃焼実験- I)	-----	70

図4.5-4	ガス温度の比較（燃焼実験-I）	-----	71	
図4.5-5	受け皿温度の比較（燃焼実験-I）	-----	72	
図4.5-6	グレーチング温度の比較（燃焼実験-I）	-----	73	
図4.5-7	内壁温度の比較（燃焼実験-I）	-----	74	
図4.5-8	酸素濃度の比較（燃焼実験-I）	-----	75	
図4.5-9	ナトリウム反応量の計算結果（燃焼実験-I）	-----	76	
図4.5-10	エアロゾル濃度の比較（燃焼実験-I）	-----	77	
図4.5-11	水蒸気濃度の比較（燃焼実験-I）	-----	78	
図4.5-12	水素濃度の比較（燃焼実験-I）	-----	79	
図4.5-13	プール内ナトリウム化合物量の計算結果（燃焼実験-I）	--	80	
4.6節				
図4.6-1	ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの実験装置（立面図）	-----	88	
図4.6-2	ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの実験装置（平面図）	-----	89	
図4.6-3	ナトリウム漏えい燃焼実験-II 計測図	-----	90	
図4.6-4	床ライナ裏面熱電対配置図（燃焼実験-II）	-----	91	
図4.6-5	ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの解析モデル	-----	92	
図4.6-6	ナトリウムスプレイ反応速度の計算結果（燃焼実験-II）	--	93	
図4.6-7	ナトリウムプール反応速度の計算結果（燃焼実験-II）	----	93	
図4.6-8	床ライナ温度の比較（燃焼実験-II）			
	模擬漏えい部直下の周囲50cmの領域	---	94	
図4.6-9	床ライナ温度の比較（燃焼実験-II）	北西側の1/4領域	----	94
図4.6-10	床ライナ温度の比較（燃焼実験-II）	北東側の1/4領域	----	95
図4.6-11	床ライナ温度の比較（燃焼実験-II）	南側の1/2領域	-----	95
図4.6-12	床コンクリート温度の比較（燃焼実験-II）	-----	96	
図4.6-13	ガス温度の比較（燃焼実験-II）	-----	96	
図4.6-14	天井および側壁コンクリート温度の比較（燃焼実験-II）	---	97	
図4.6-15	漏えい近傍の北壁コンクリート温度の比較（燃焼実験-II）	-	97	
図4.6-16	グレーチング温度の比較（燃焼実験-II）	-----	98	
図4.6-17	コンクリートからの水分放出量の計算結果（燃焼実験-II）	-	98	
図4.6-18	水蒸気濃度の比較（燃焼実験-II）	-----	99	
図4.6-19	水素濃度の比較（燃焼実験-II）	-----	99	
図4.6-20	浮遊エアロゾル濃度の比較（燃焼実験-II）	-----	100	
図4.6-21	酸素濃度の比較（燃焼実験-II）	-----	100	
図4.6-22	堆積物内のナトリウム化合物濃度の計算結果（燃焼実験-II）		101	

図4.6-23	ライナ温度推移から計算した腐食減肉量の比較（燃焼実験-II）	102
4.7節		
図4.7-1	Run F7 試験装置（FRAT-1 装置）	108
図4.7-2	Run F7-2 解析モデル	109
図4.7-3	ナトリウム反応速度の計算結果（Run F7-2）	110
図4.7-4	受け皿温度の比較（Run F7-2）	111
図4.7-5	断熱材温度の比較（Run F7-2）	112
図4.7-6	ガス温度の比較（Run F7-2）	113
図4.7-7	壁温度の比較（Run F7-2）	114
図4.7-8	酸素濃度の比較（Run F7-2）	115
図4.7-9	水蒸気濃度の比較（Run F7-2）	116
図4.7-10	エアロゾル濃度の比較（Run F7-2）	117
図4.7-11	堆積物内のナトリウム化合物濃度の計算結果（Run F7-2）	118

1. 緒言

高速増殖炉のナトリウム漏えい事故時の熱的影響を評価するために、ナトリウム燃焼解析コードASSCOPSが開発された⁽¹⁾。同コードは、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の後に改良されて小規模のナトリウム漏えいに対応させ、さらに計算機能の補強・多様化を進めてVersion 2^(注)として整備した⁽²⁾。

ASSCOPSコードの検証は、これまでにプール燃焼試験の解析⁽³⁾、スプレイ燃焼試験の解析⁽¹⁾、「もんじゅ」事故後のナトリウム漏えい燃焼実験の解析⁽⁴⁾等により実施されてきているが、本報告ではこれらをまとめ^(注)、さらに小規模プール燃焼実験の解析も含めて報告する。第2章においてASSCOPSコードの概要を、第3章にナトリウム燃焼解析条件の概要を述べ、第4章にナトリウム燃焼試験の解析結果を示す。

(注) 本報告で使用したASSCOPSコードはVersion 2.1である。Version 2.0と2.1の違いはSI単位系の採用、計算オプションの追加、細部の修正（詳しくは資料⁽²⁾）であり、計算結果に大きな差を与えるものではないが、本報告ではVersion 2.0を用いた既報告分^{(3),(4)}も再度Version 2.1で再計算してまとめた。

2. ASSCOPSコードの概要

ASSCOPSコードの主な計算機能を図2に示す。本コードは、プール燃焼解析コードSOFIRE-II⁽⁵⁾とスプレー燃焼解析コードSPRAY-II⁽⁶⁾を並列に計算させるように結合した解析コードであり、ナトリウムのスプレー状やプール状の漏えい燃焼が生じた場合の燃焼と熱・物質収支を計算するために、以下の挙動を扱う計算モデルが組み込まれている。

- ・ プール状の燃焼とそれに伴う熱移行、物質移行、ガス成分濃度変化
- ・ スプレー状の燃焼とそれに伴う熱移行、物質移行、ガス成分濃度変化
- ・ 加熱コンクリートから雰囲気への湿分放出、雰囲気湿分とナトリウム酸化物の反応
- ・ エアロゾル（浮遊した燃焼生成物）の反応と移行
- ・ 部屋間および部屋内外の通気等

雰囲気ガスの状態量（温度、圧力、ガス成分濃度）は一つの部屋について一つの代表値で近似し、壁・天井・床等の構造物については深さ方向の1次元の温度分布を計算する。ナトリウムの燃焼現象は、燃焼面（プール燃焼ではプール表面、スプレー燃焼では個々の液滴の表面）に寄与する酸素量から燃焼速度を計算する。燃焼による熱的影響の計算を行うための入力データとしては、プールやスプレーの条件（初期温度、量、液滴径、物性値等）、雰囲気ガス条件（初期温度、ガス成分等）、構造物条件（初期温度、材質、面積等）などを必要とする。

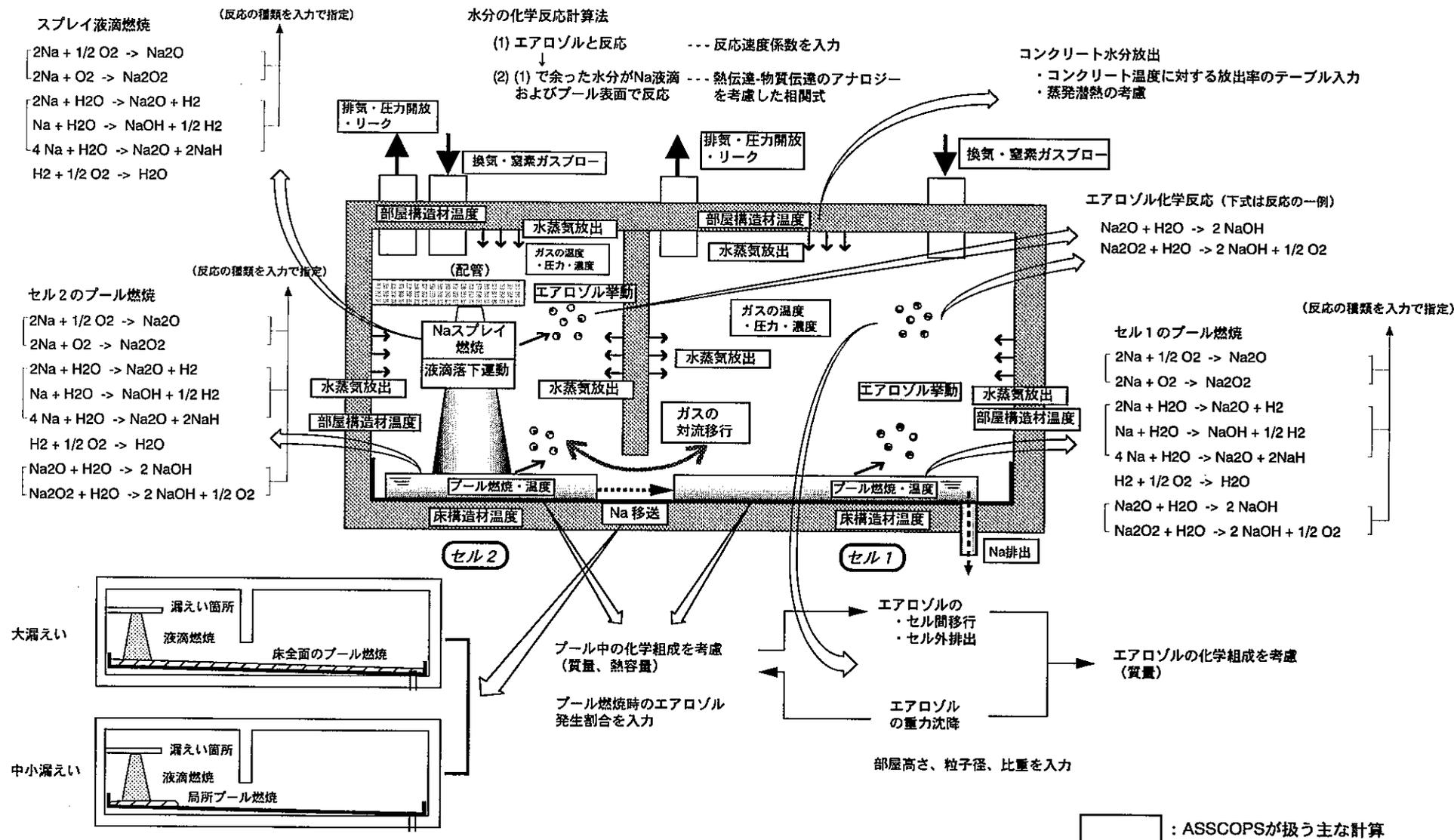


図2 ASSCOPS コードの計算機能

3. ナトリウム燃焼解析条件

ASSCOPSコードはナトリウム燃焼時の熱的影響を解析する一点近似コードであり、種々の物理・化学的挙動を計算するために工学的な計算モデルを採用している部分がある。このため、本コードを用いて解析を行うにあたっては、ナトリウム漏えいや周囲環境の条件に加えて、化学反応、伝熱、エアロゾル挙動など種々の物理・化学的挙動を計算するための解析パラメータを適切に設定することが必要である。

本報告書に記載するナトリウム燃焼試験の解析においては、この解析パラメータとして、これまでにナトリウム関連実験で得られてきた知見や解析検討を参考にして、全般において統一したパラメータ値を使用した。表3.1に、解析で使用したパラメータ値とその根拠または考え方をまとめる。

表3.1 解析に使用した各種パラメータ (注1)

No.	項目	使用値	根拠、考え方 (注2)
1	小規模漏えい時のプール面積	$W(1 - f_{\text{spray}}) / R$ W : Na漏えい流量 f spray : スプレイ燃焼割合 R : プール広がりとの相関 (=25kg/m ² h)	燃焼実験Iと燃焼実験IIの解析で使用した相関。小規模プール燃焼実験の解析に適用しても保守的。[4]および本報
2	スプレイ燃焼	酸素拡散速度補正係数 ∞	燃焼を抑制するための補正をしないことに相当
3	プールからガスへの輻射伝熱係数	0.65	既往実験研究 [7] プール燃焼実験の解析 [8]
4	ガスから壁への輻射伝熱係数	0.5~0.9	壁内面の材料の放射率を使用 (文献値) (試験に依存して異なる)
5	コンクリートからの水分放出	燃焼実験-IIの過渡加熱条件を模擬した「コンクリートからの放出水量測定」結果をもとに、コンクリート温度と水分放出率の相関を作成。	
6	ナトリウムと酸素の反応	$4\text{Na} + \text{O}_2 = 2\text{Na}_2\text{O}$ $2\text{Na} + \text{O}_2 = \text{Na}_2\text{O}_2$ ここで、 $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2$ =60 : 40 (酸素10%以上) =100 : 0 (酸素10%未満)	既往実験研究 [9] 化学熱力学的検討 [22]
7	ナトリウムと水分の反応	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$	文献 (Na過剰条件での反応) [10] 化学熱力学的検討 [22]
8	ナトリウム酸化物と水分の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ エアロゾルの場合は、反応速度係数=1.0E-10 mol-H ₂ O/個/s (燃焼実験-Iに関する感度解析より)	
9	水素の再結合割合	90% (酸素5%以上) 0% (酸素5%未満)	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。
10	エアロゾル発生割合	スプレイ : 100% プール : 25%	既往実験研究 [11], [12]
11	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、その落下距離の平均値
12	エアロゾル密度	2130 kg/m ³	エアロゾルの主成分であるNaOHの物性
13	エアロゾル粒径	1.0E-5 m	粒径測定結果を参考 [13]

(注1) 本表のパラメータ値は、本報告書の検証解析全般にわたって統一して使用した数値である。(本文中に示した一部の例外を除く)

(注2) []内の数字は、根拠とした参考文献の番号である

4. ナトリウム燃焼試験の解析

ASSCOPSコードがナトリウム燃焼とそれに伴う熱的影響に関して妥当な計算能力を有することを確認するために、既往のナトリウム燃焼試験の解析を行った。対象とした試験は以下の7種類である。

<プール燃焼試験>

- (1) ドイツKfKのFAUNA施設で実施された試験 (FAUNA試験)
- (2) Run D1 試験

<スプレイ燃焼試験>

- (3) TASP試験シリーズ
- (4) Run E1 試験

<小規模ナトリウム漏えい燃焼試験>

- (5) ナトリウム漏えい燃焼実験 I
- (6) ナトリウム漏えい燃焼実験 II
- (7) 小規模ナトリウムプール燃焼実験 Run F7

以下では、各試験ごとに、試験概要、解析モデルと解析条件、解析結果（試験測定値との比較）をまとめる。

4. 1 FAUNA 試験の解析⁽³⁾

(1) 試験概要

FAUNA 試験⁽¹⁴⁾, ⁽⁸⁾は、内容積220m³の鋼製円筒型容器内を空気雰囲気（密閉条件）とし、350kgのナトリウムを受け皿に供給したプール燃焼試験である。ここでは、受け皿面積の異なるF5試験（面積 2.0m²）とF6試験（面積 4.9m²）の2つを解析対象とした。試験装置と試験条件の概要を図4.1-1、表4.1-1、表4.1-2に示す。

(2) 解析モデルと解析条件

FAUNA 試験の解析モデルを図4.1-2に、解析条件を表4.1-3に示す。これらは、試験装置サイズや試験条件に関するものを試験と合致させるよう設定したものである。また、物理・化学的な挙動を計算するための解析パラメータについては、本報告書全体にわたって統一させたもの（第3章に示した値）を使用した。ただし、反応生成物割合に限っては、このFAUNA試験の解析では別途実施したパラメータ計算⁽³⁾, ⁽⁸⁾の結果に基づきNa₂O : Na₂O₂ = 0 : 100とした。

(3) 解析結果

計算結果と試験測定値との比較を図4.1-3から図4.1-9に示す。各図とも上段がF5試験、下段がF6試験である。

(a) ガス温度（図4.1-3）

ガス温度の計算結果と測定値は初期を除けば良く一致している。初期に測定値の方が高めとなっているのは、試験では20分間でナトリウムを燃焼皿に流入させているため、燃焼皿に衝突したナトリウムの跳ね返りによる液滴生成や液面の乱れが影響したものと考えられる。F5よりもF6の方が初期の測定値ピークが大きいのは、F6の方が燃焼皿面積が大きいためナトリウムの深さが浅く、上述の影響が強く現れたと解釈できる。

(b) ガス圧力（図4.1-4）

FAUNA試験は密閉条件で実施されているため、ガス温度の上昇に伴いガス圧力にも上昇が見られる。計算結果と測定値は一致度についてはガス温度の場合と同様である。

(c) ナトリウムプール温度（図4.1-5）

F5については測定値よりも計算値が高めの温度で推移している。F6について

はガス温度の場合と同様に、初期に測定値が高めで推移するが後半は一致度が良くなっている。

(d) 燃焼皿温度 (図4.1-6)

FAUNA試験では燃焼皿温度は測定されていないので、図には計算結果のみを示す。計算結果は(c)のナトリウムプール温度とほとんど同じである。

(e) 壁温度 (図4.1-7)

FAUNA試験では壁の温度は測定されていないので、図には計算結果のみを示す。

(f) ナトリウム反応速度 (図4.1-8)

FAUNA試験ではナトリウム反応速度は測定されていないので、図には計算結果のみを示す。時間の経過につれて酸素濃度が低下するためナトリウム反応速度も低下する。ナトリウム反応速度のピーク値(計算結果)をもとに単位面積あたりの値を算出すると、F5、F6ともに約 $30\text{kg/m}^2\text{h}$ となる。

(g) 酸素濃度 (図4.1-9)

酸素濃度の計算結果と測定値は概ね一致している。比較図を細かく見ると、F5では酸素消費(燃焼)を過大評価している傾向があるが、これは(c)のナトリウムプール温度が高めに計算されていることと整合する。

計算結果と測定値の比較については以下のようにまとめられる。

- ① 圧力および各部温度の計算結果は測定値と良く一致している。ただし、F5試験のプール温度と酸素消費については過大評価の傾向がある。
- ② F6試験のプール温度やガス温度の初期推移について測定値と一致しない傾向が見られるが、これは試験でのナトリウム流入(燃焼皿への衝突によるナトリウムの液滴化や液面の乱れ)による影響が現れたものと考えられる。
- ③ ナトリウム燃焼に関するパラメータである反応生成物割合は、本試験については解析で $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 0 : 100$ を使用することで試験測定値との一致が良好となる。(他の試験の解析と整合するパラメータ($\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 : 40$)を使うと解析が過大となる。)

表4.1-1 FAUNA 試験装置の概要

	F5 試験	F6 試験
試験容器形状	円筒形	⇐
試験容器内径 m	6	⇐
試験容器高さ m	6	⇐
試験容器容積 m ³	220	⇐
試験容器壁面積 m ²	176	⇐
試験容器壁厚さ mm	16	⇐
ナトリウム燃焼皿面積 m ²	2.0 (φ1.6 m)	4.9 (φ2.5 m)
ナトリウム燃焼皿高さ cm	50	⇐
ナトリウム燃焼皿厚さ mm	3	⇐

表4.1-2 FAUNA 試験条件

	F5 試験	F6 試験
ナトリウム漏えい速度 kg/min	17.5	⇐
ナトリウム漏えい総重量 kg	350	⇐
初期雰囲気ガス圧力 kPa	101	⇐
初期容器壁温度 °C	25	⇐
初期ナトリウム温度 °C	480	⇐
初期酸素濃度 %	21	⇐
ナトリウム漏えい時間 min	20	⇐

表4.1-3 FAUNA F5,F6試験の解析条件

	項目	条件	
		FAUNA F5	FAUNA F6
ナトリウム漏えい・燃焼条件	漏えい流量	(17.5 kg/min) 注1)	
	漏えい時間	(20分) 注1)	
	漏えいナトリウム量	350 kg	
	漏えいナトリウム温度	480 °C	
	プール面積	2 m ²	4.9 m ²
雰囲気条件	セル容積	220 m ³	
	セル内初期酸素濃度	21 %	
	セル内初期ガス温度、湿度	25 °C、R.H. 80 % (1.5 wt.%) 注2)	
	換気流量	換気なし (密閉)	
構造物条件	容器形状	円筒形	
	容器直径 (内径)	6 m	
	容器高さ	6 m	
	容器肉厚	16 mm	
	容器内壁 (含、天井) 面積	176 m ²	
輻射伝熱条件	壁からガスの輻射伝熱係数	0.5	
	プールからガスの輻射伝熱係数	0.65	
化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応及び生成割合	$2\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$ $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 0 \% : 100 \%$	
	ナトリウムと水蒸気の反応	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$	
	エアロゾル状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 反応速度係数 : $1.0 \times 10^{-10} \text{ mol}\cdot\text{H}_2\text{O}/\text{個}/\text{s}$	
	プール状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 水蒸気の拡散により反応	
	水素と酸素の再結合割合	生成水素の90%が再結合	
	エアロゾル発生割合	反応生成物の25%がエアロゾルとして生成	
	エアロゾル落下高さ	3 m	
エアロゾル条件	エアロゾル密度	2130 kg/m ³	
	エアロゾル粒径	$1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$	
備考	注1) 解析では初期に瞬時プール形成を仮定 注2) 湿度は正確な記録がなく、推定値		

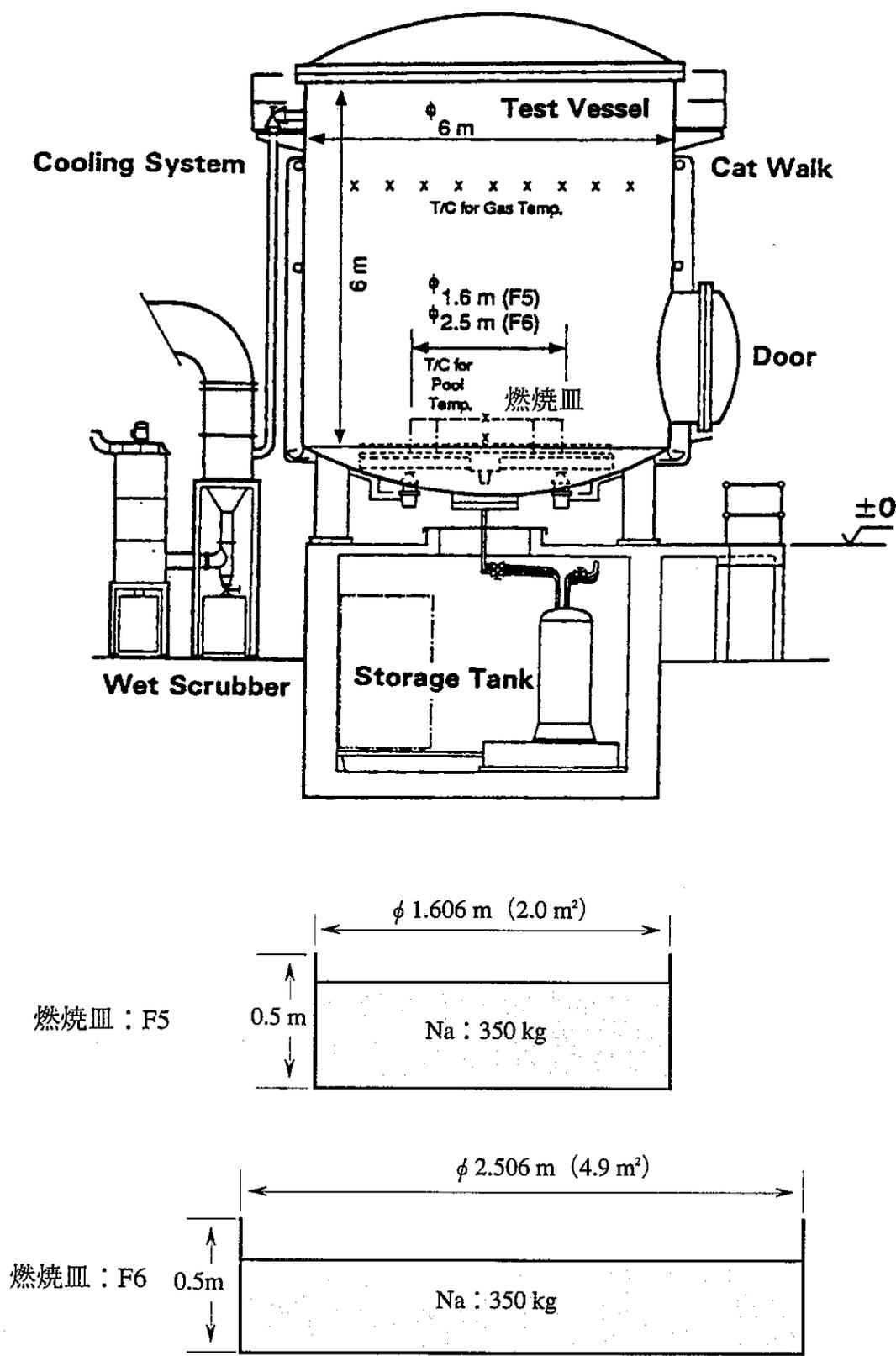


図4.1-1 FAUNA 試験装置 (F5, F6 試験)

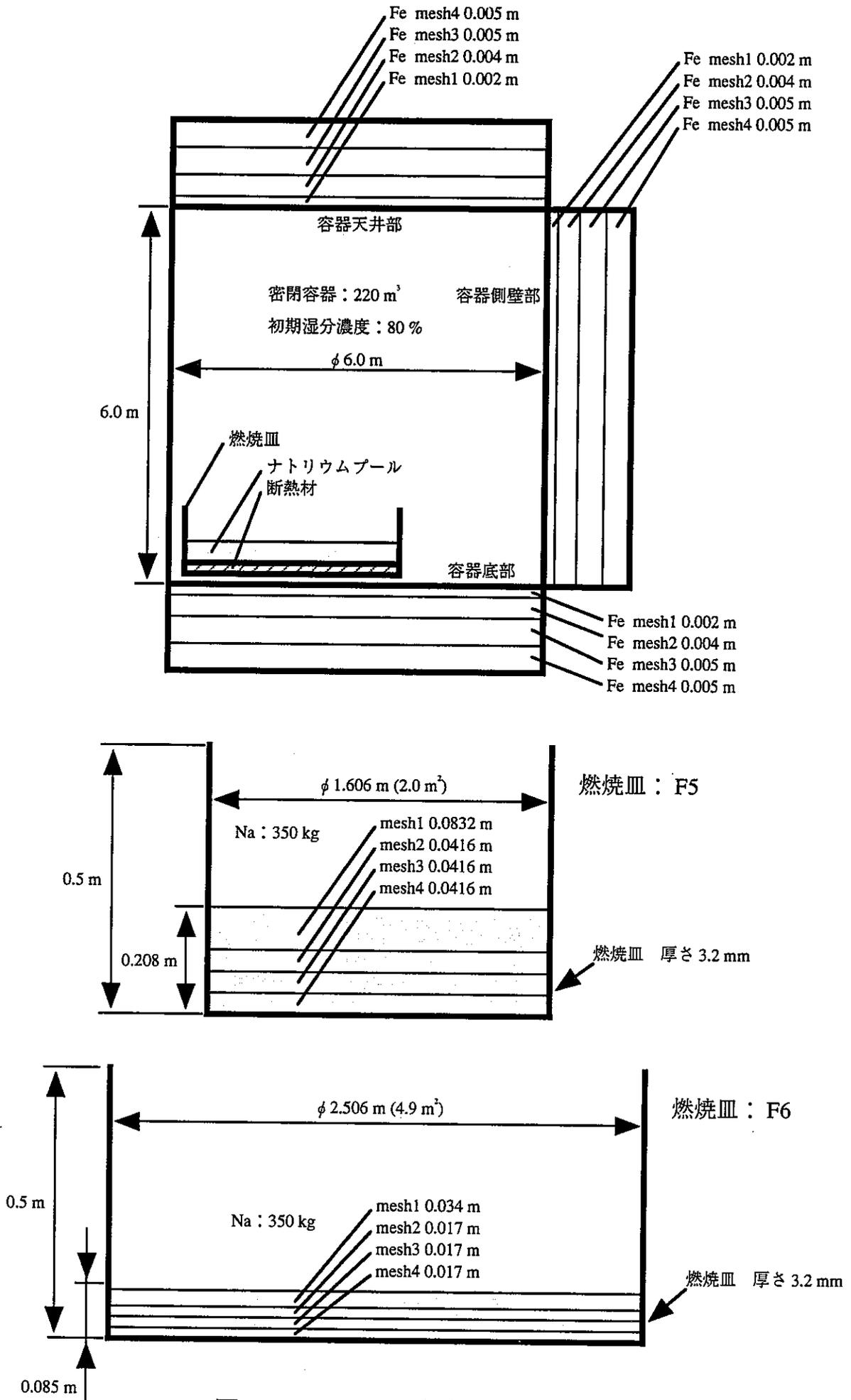


図4.1-2 FAUNA 解析モデル

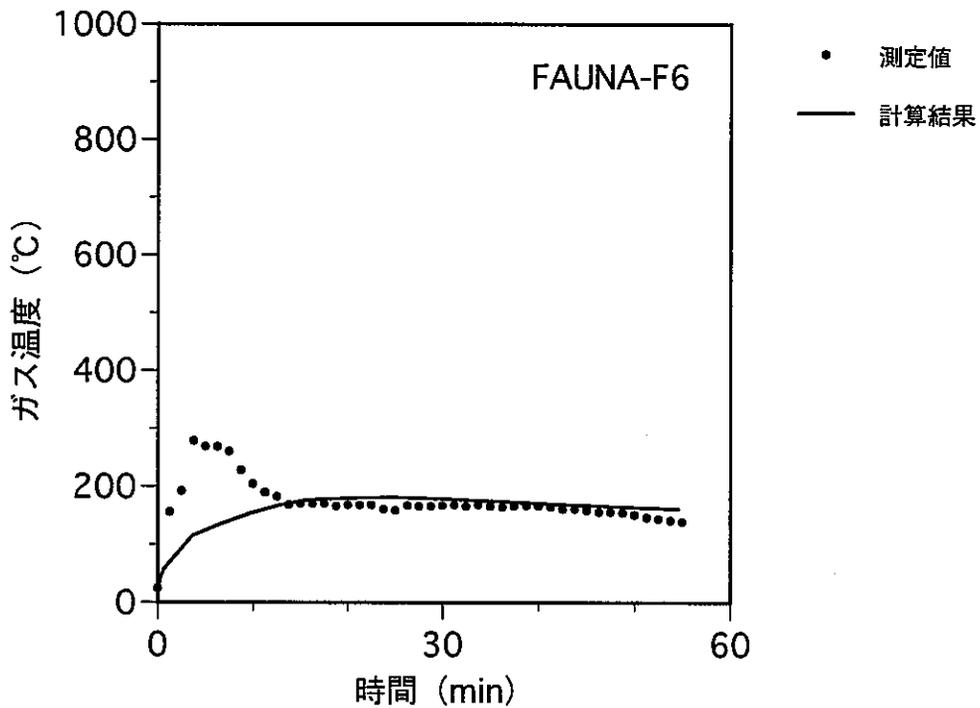
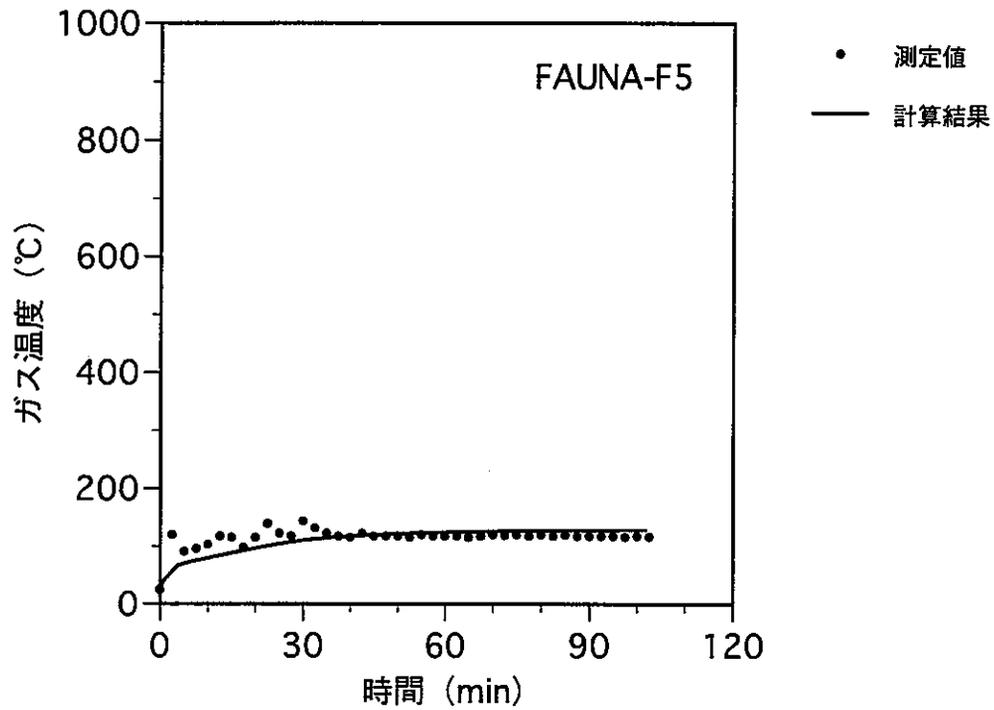


図4.1-3 ガス温度の比較 (FAUNA)

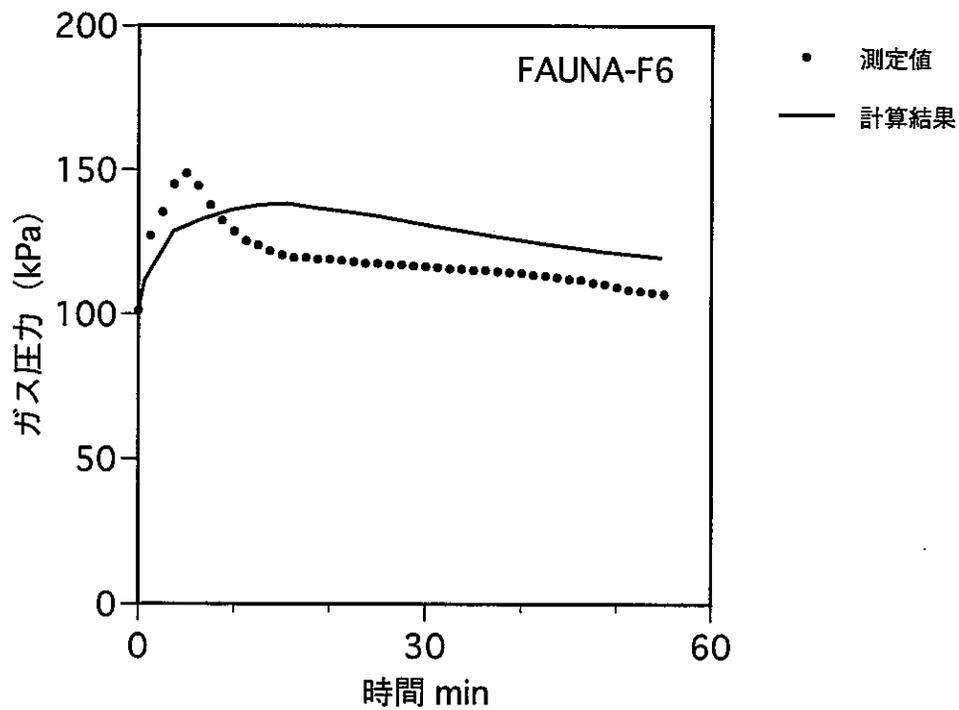
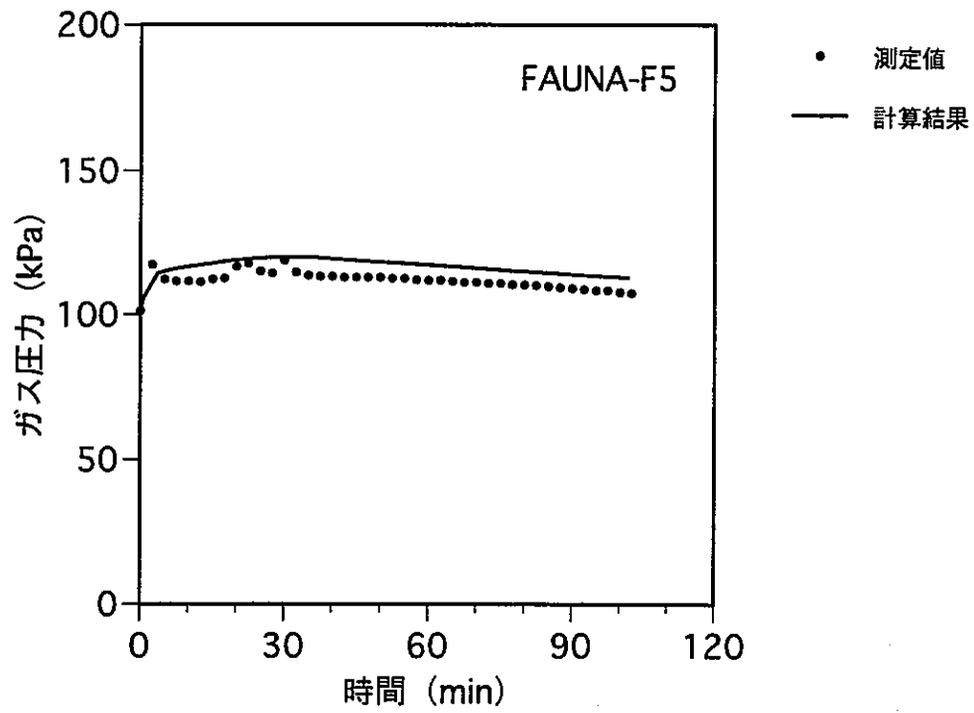


図4.1-4 ガス圧力の比較 (FAUNA)

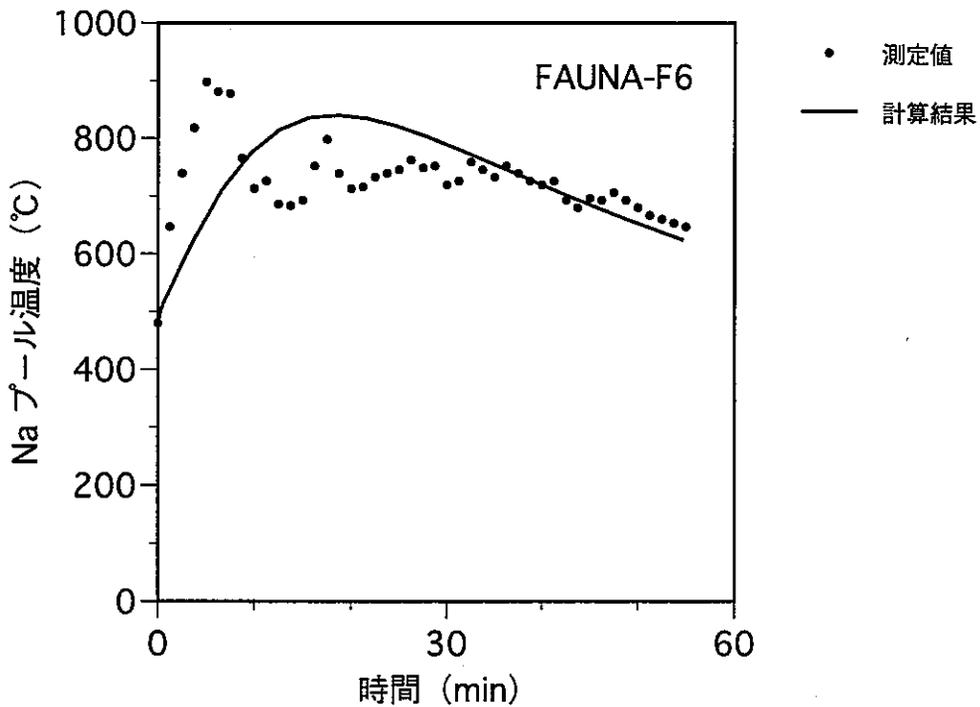
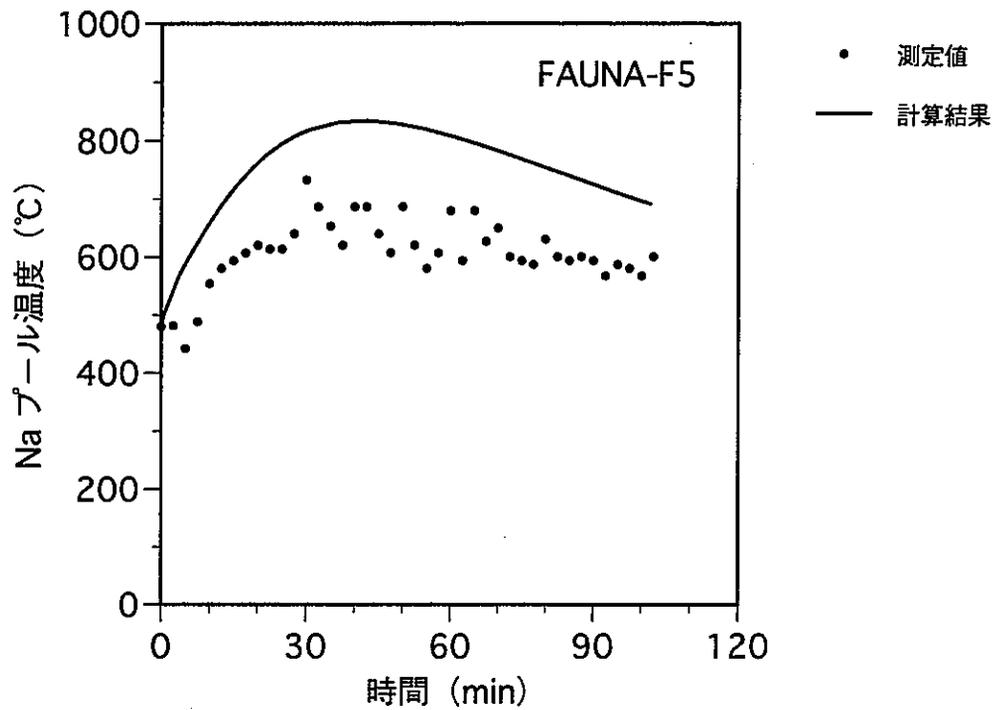


図4.1-5 ナトリウムプール温度の比較 (FAUNA)

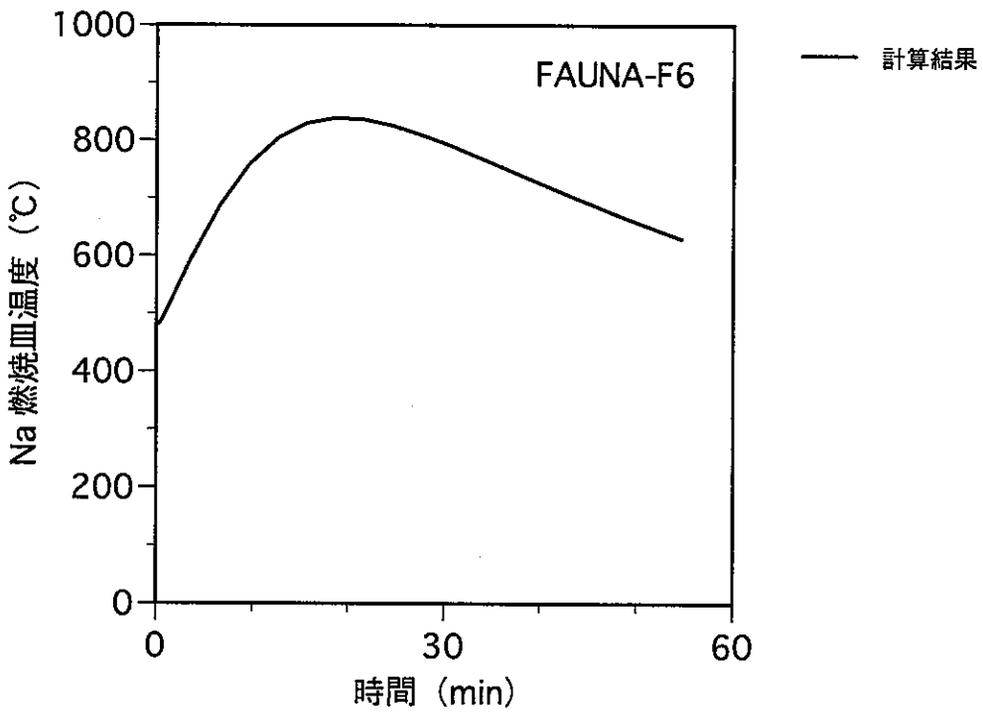
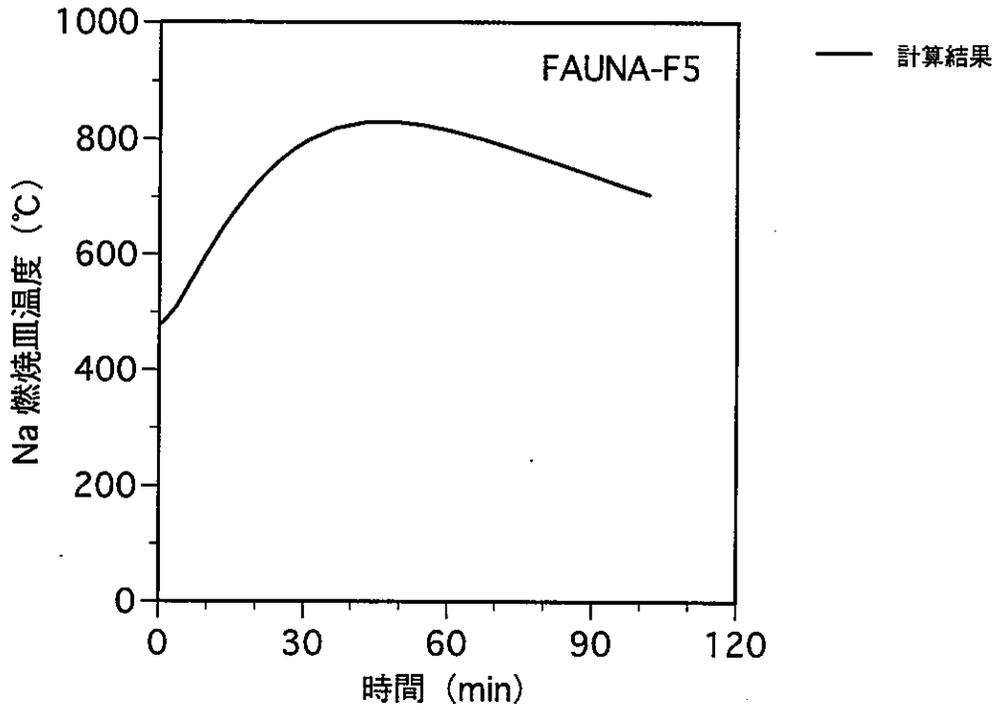


図4.1-6 燃焼皿温度の計算結果 (FAUNA)

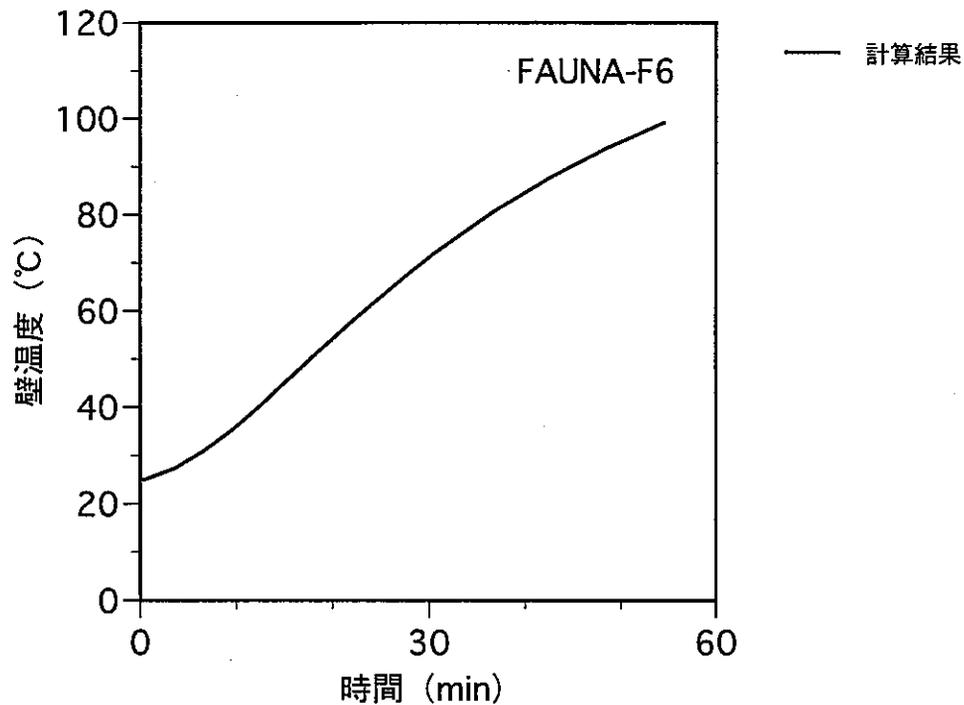
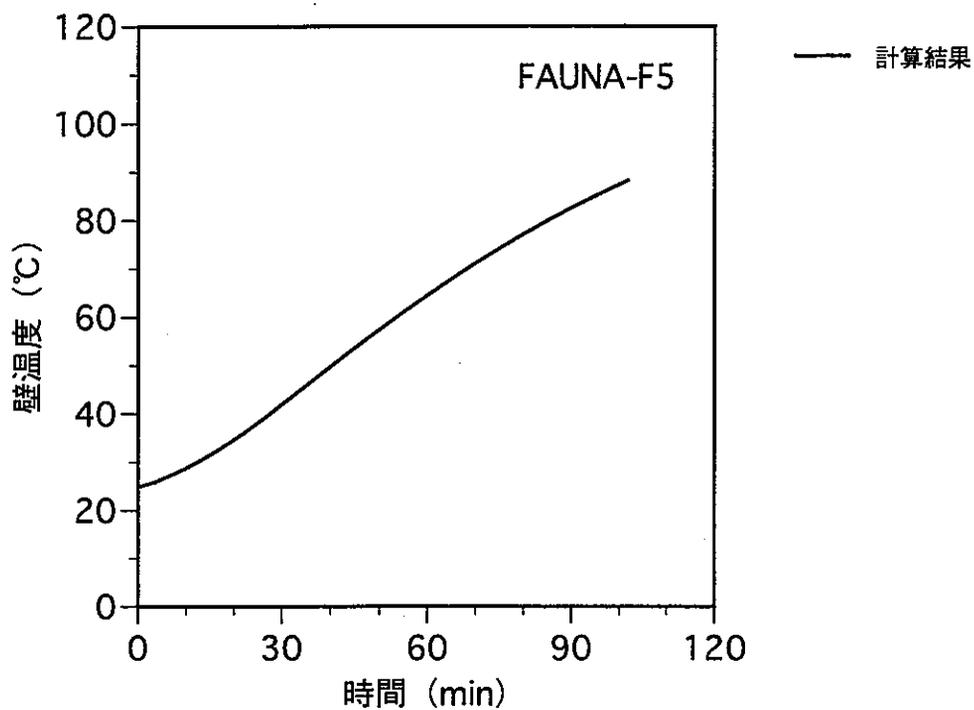


図4.1-7 壁温度の計算結果 (FAUNA)

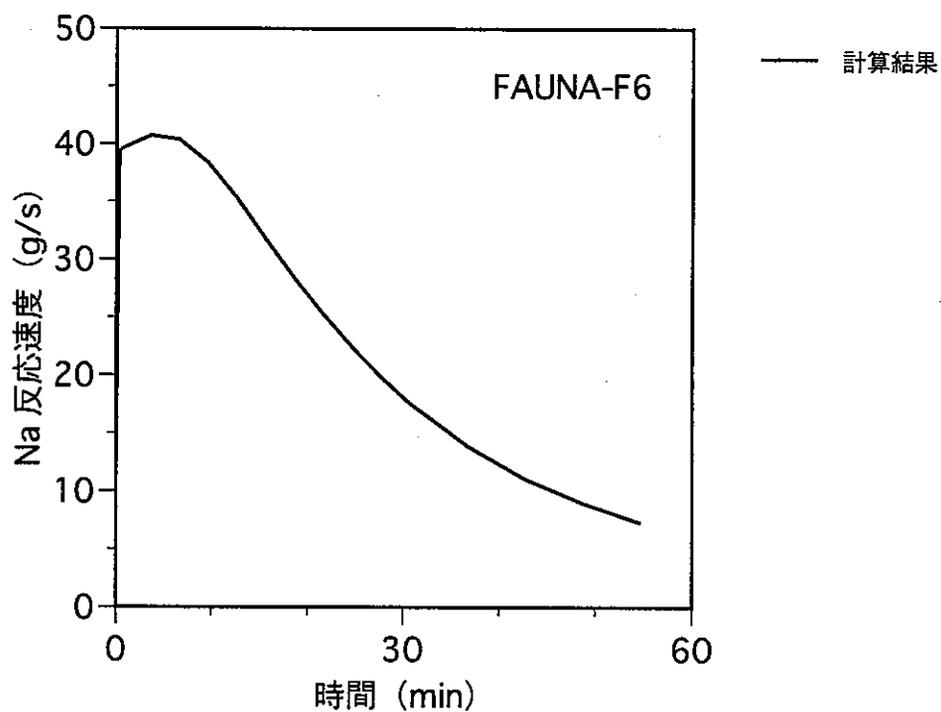
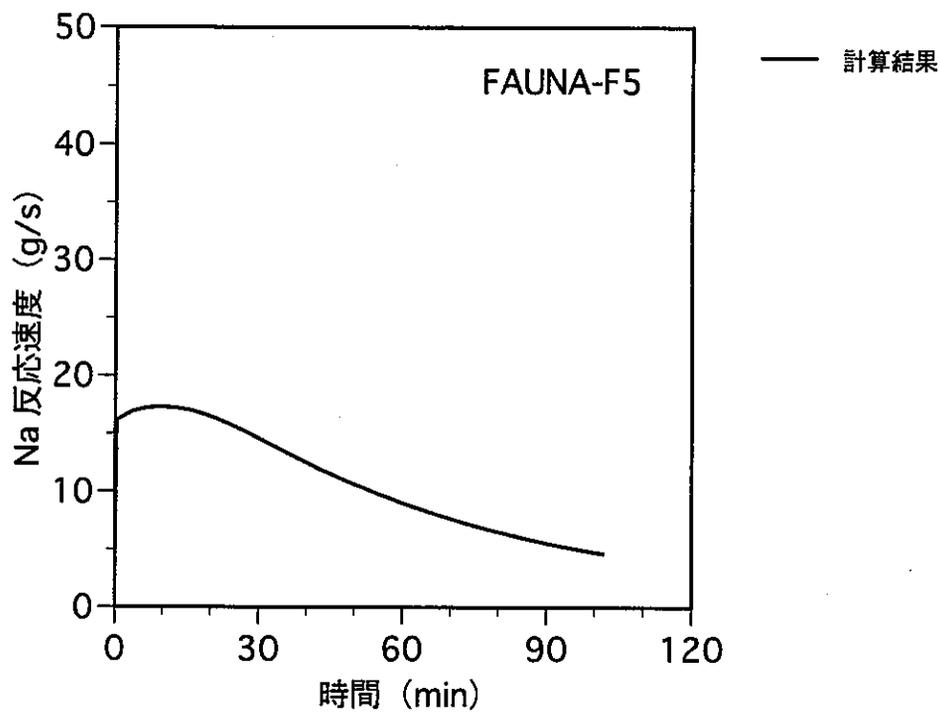


図4.1-8 ナトリウム反応速度の計算結果 (FAUNA)

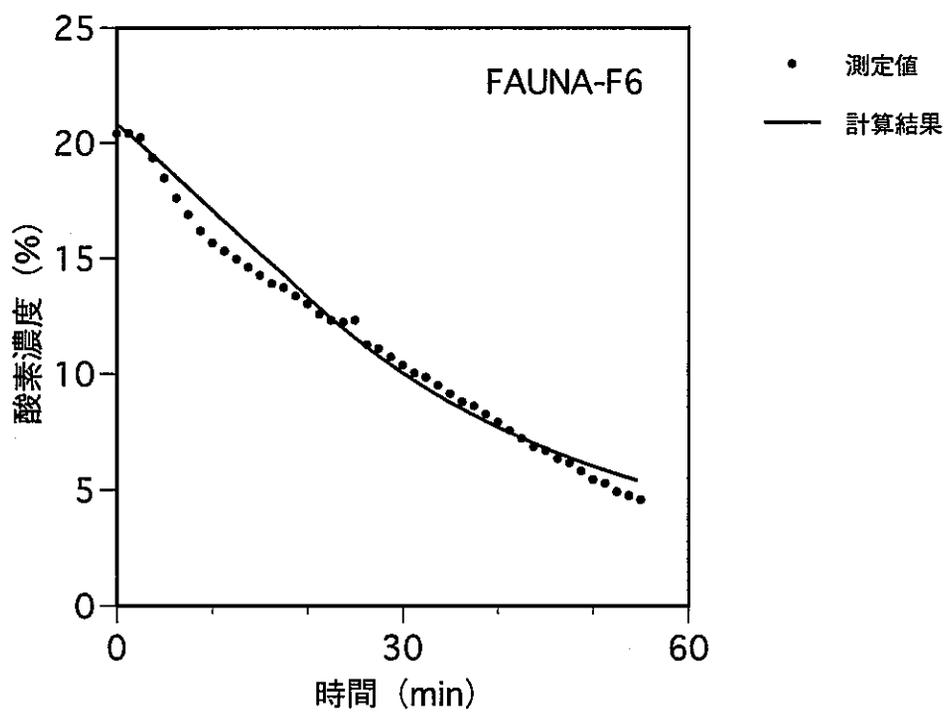
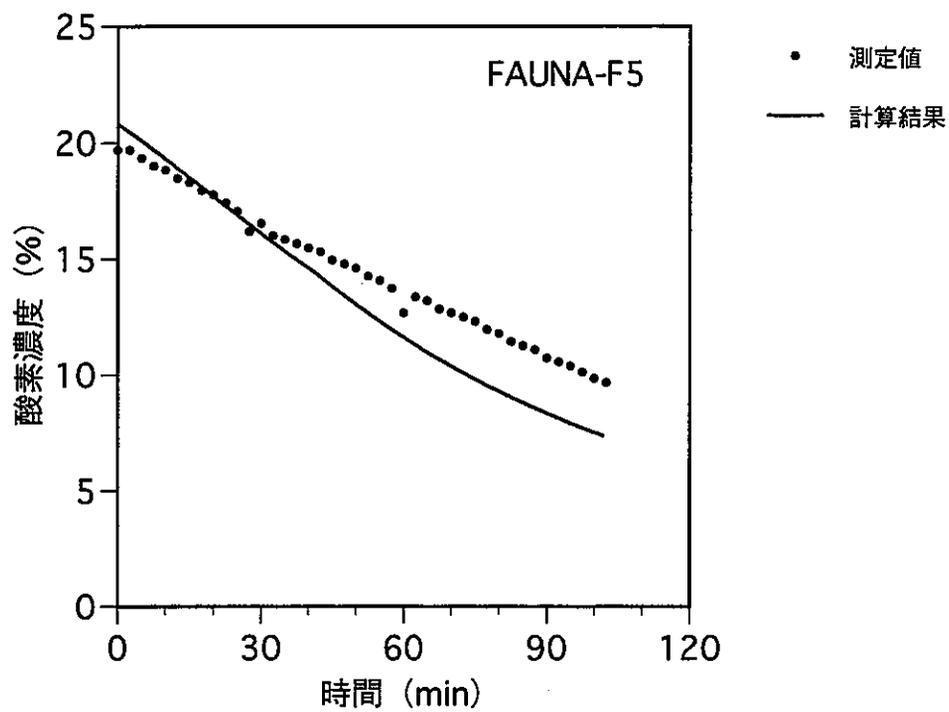


図4.1-9 酸素濃度の比較 (FAUNA)

4. 2 Run D1 試験の解析⁽³⁾

(1) 試験概要

Run D1 試験⁽¹⁵⁾はSAPFIRE施設のSOLFA-1装置（2階建て矩形コンクリート構造）の1階部分を使用した試験であり、内容積73.4m³の矩形コンクリートセル（内面を鋼板でライニング）を空気雰囲気（開放条件）とし、面積2.25m²の受け皿へ550kgのナトリウムを供給したプール燃焼試験である。試験装置と試験条件の概要を図4.2-1、図4.2-2、表4.2-1、表4.2-2に示す。

(2) 解析モデルと解析条件

Run D1 試験の解析モデルを図4.2-3に、解析条件を表4.2-3に示す。これらは、試験装置形状や試験条件に関するものを試験と合致させるよう設定したものである。また、物理・化学的な挙動を計算するための解析パラメータについては、第3章に示したとおり本報告書全体にわたって統一させたものを使用した^{注)}。

注) 反応生成物割合は、Na₂O : Na₂O₂ = 60 : 40（酸素濃度10%以上）、100 : 0（酸素濃度10%未満）であり、前述のFAUNA試験の解析条件よりも反応量や発熱量が大きくなるような条件である。本報告書に示す解析では、4.1節のFAUNA試験の解析を除き、この条件で統一した。

(3) 解析結果

計算結果と試験測定値との比較を図4.2-4から図4.2-12に示す。

(a) ガス温度（図4.2-4）

ガス温度の計算結果と測定値は、燃焼皿内のナトリウムがドレンされる約4時間までの全般にわたって、ナトリウム燃焼に伴って上昇しピークを迎えて下降する傾向が良く一致している。

(b) ガス圧力（図4.2-5）

Run D1試験は開放条件で実施されているため、計算結果と測定値の両方とも初期圧力でほぼ一定である。

(c) ナトリウムプール温度（図4.2-6）

ナトリウムプール温度の計算結果と測定値は、そのピーク値およびナトリウムがドレンされる約4時間までの傾向が良く一致している。

(d) 燃焼皿温度（図4.2-7）

燃焼皿温度はナトリウムプール温度とほとんど同じであり、計算結果と測定

値の一致も良い。

(e) 壁温度 (図4.2-8、図4.2-9)

壁の内面に敷設されたライナの温度に関する計算結果と測定値は、ピーク値と時間的挙動の両方について良く一致している。また、壁コンクリートの温度についても、計算結果と測定値は良く一致している。

(f) ナトリウム反応速度 (図4.2-10)

Run D1試験ではナトリウム反応速度は測定されていないので、図には計算結果のみを示す。ナトリウム反応速度は雰囲気中の酸素濃度に強く影響されるため、その時間推移は後述の酸素濃度の計算結果に似た傾向を示している。1時間頃の変化は試験で酸素供給を停止したことに相当し、1時間半頃に不連続に増大するのはナトリウムの反応生成物に関する解析条件 ($\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2$) を酸素濃度10%を境界として60 : 40から100 : 0に切り換えているためである。

なお、ナトリウム反応速度のピーク値 (計算結果) をもとに単位面積あたりの値を算出すると、約 $26\text{kg/m}^2\text{h}$ となる。

(g) 酸素濃度 (図4.2-11)

酸素濃度の計算結果と測定値は良く一致している。1時間頃の変化は試験で酸素供給を停止したことに相当する。また、測定値に見られる3時間40分頃の変化は燃焼皿内のナトリウムをドレン (ナトリウムの燃焼が停止) したことでセル外からセル内へ空気が流入したものと考えられるが、解析ではナトリウムドレンを模擬していない (ナトリウムの燃焼は継続している) ために酸素濃度推移に変化は見られない。

(h) 浮遊エアロゾル濃度 (図4.2-12)

浮遊エアロゾル濃度の計算結果と測定値は概ね一致している。計算結果の時間推移はナトリウム反応速度の推移に対応した挙動を示している。

計算結果と測定値の比較については以下のようにまとめられる。

- ① ナトリウムプール温度、ガス温度、壁温度、酸素濃度の時間変化に関する計算結果が試験測定値と良く一致していることから、本試験におけるプール燃焼とそれに伴う熱移行挙動が良好に計算されていると考えられる。
- ② ナトリウム燃焼に関するパラメータである反応生成物割合 ($\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2$) を60 : 40とすることで燃焼に伴う酸素濃度変化と各部温度変化を良く説明できる。

表4.2-1 Run-D1 試験装置の概要

試験容器形状	直方体
試験容器の大きさ m	3.4 (高さ) × 4.4 × 4.1
試験容器容積 m ³	73.4
試験容器壁面積 m ²	61.8
試験容器床面積 m ²	20.04
ナトリウム燃焼皿面積 m ²	2.25 (1.5 m × 1.5 m)
ナトリウム燃焼皿高さ cm	50
ナトリウム燃焼皿厚さ mm	3.2

表4.2-2 Run-D1 試験条件

ナトリウム漏えい速度 kg/s	2.56
ナトリウム漏えい量 kg	550
ナトリウム漏えい時間 sec	215
ナトリウム温度 °C	505
ナトリウムプール深さ m	0.3
酸素供給割合 m ³ /min	0.2 (7~60 min)
初期酸素濃度 %	21
初期雰囲気ガス圧力 kPa	101
初期容器内温度 °C	55

表4.2-3 Run-D1試験の解析条件

	項目	条件
ナトリウム漏えい・燃焼条件	漏えい流量	2.45 kg/s (2.56 kg/s) 注)
	漏えい時間	205.2 秒 (215 秒) 注)
	漏えいナトリウム量	549.82 kg (550 kg) 注)
	漏えいナトリウム温度	505 °C
	プール面積	2.25 m ²
雰囲気条件	セル容積	73.4 m ³
	セル内初期酸素濃度	21 %
	セル内初期ガス温度、湿度	55 °C、R.H. 5.9 % (0.57 wt.%)
	酸素注入	200 l/min (7~60 分)
構造物条件	容器形状	直方体
	容器寸法	4.4 m×4.1 m
	容器高さ	3.4 m
	容器床面積	20.04 m ²
	容器内壁面積	61.8 m ²
輻射伝熱条件	壁からガスの輻射伝熱係数	0.5
	プールからガスの輻射伝熱係数	0.65
化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応及び生成割合	$2\text{Na} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$ $2\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$ $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 \% : 40 \%$ (酸素濃度10%以上) $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 100 \% : 0 \%$ (酸素濃度10%未満)
	ナトリウムと水蒸気の反応	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$
	エアロゾル状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 反応速度係数： 1.0×10^{-10} mol-H ₂ O/個/s
	プール状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 水蒸気の拡散により反応
	水素と酸素の再結合割合	生成水素の90%が再結合
	エアロゾル条件	反応生成物の25%がエアロゾルとして生成
		エアロゾル落下高さ
	エアロゾル密度	2130 kg/m ³
	エアロゾル粒径	1.0×10^{-5} m
備考	注) 解析モデル上、初期にナトリウム 47.08 kgがプール内に存在することとし、漏えいナトリウム量を実験値と一致させたため、計算に用いた漏えい時間および漏えい流量は実測値と僅かに異なる。カッコ内は実測値。	

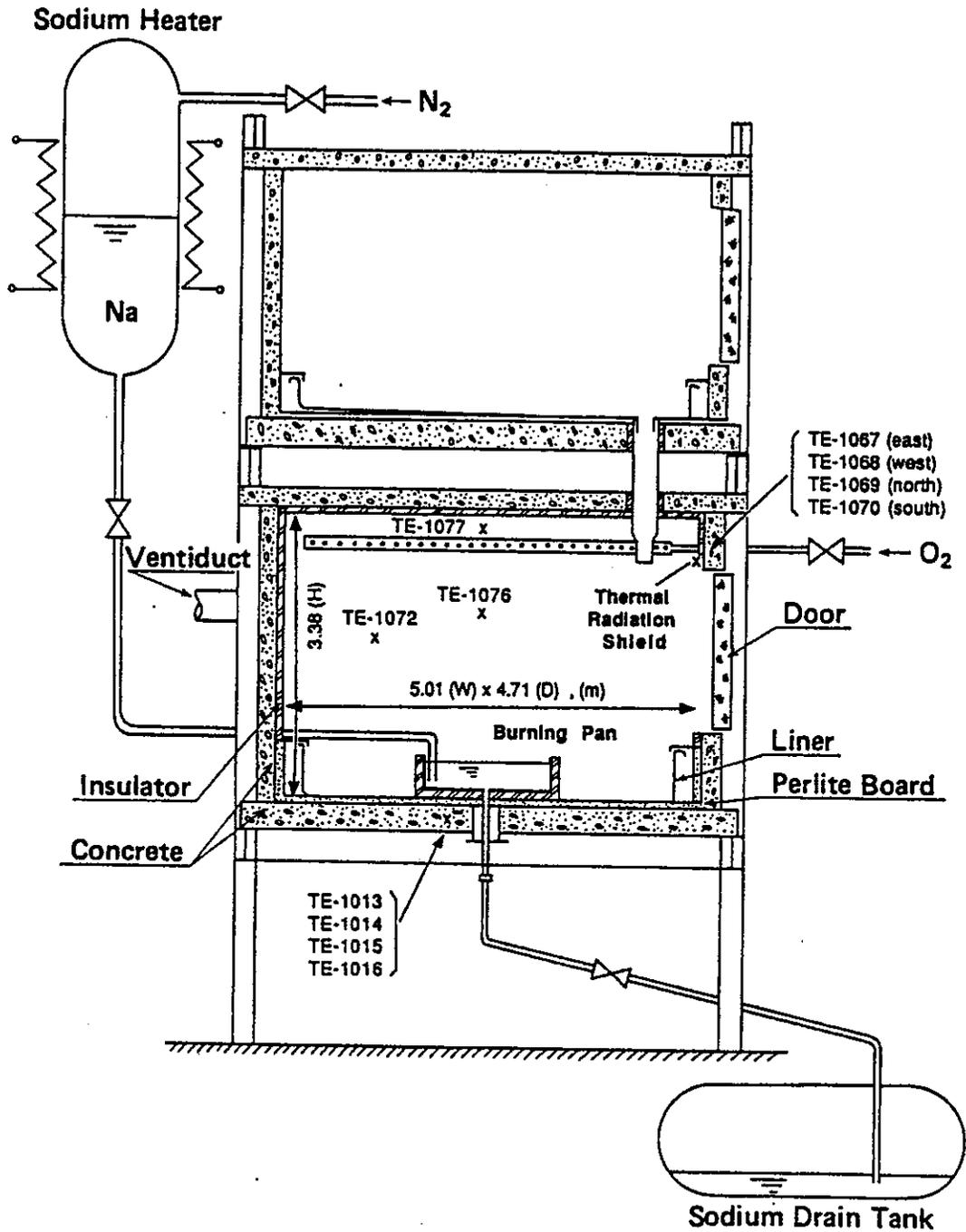


図4.2-1 Run D1 試験装置 (SOLFA-1 装置)

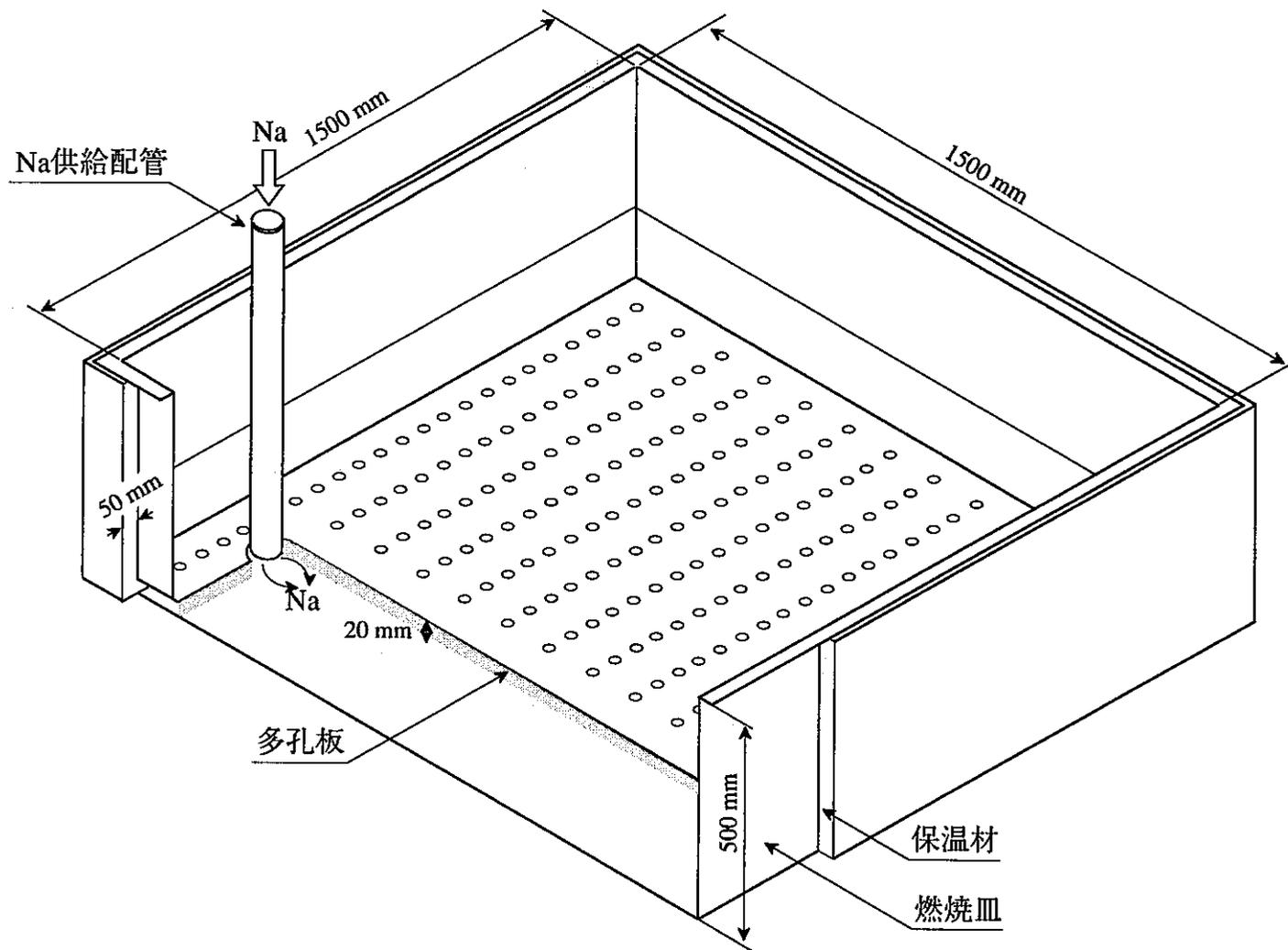


图4.2-2 Run D1 燃烧皿

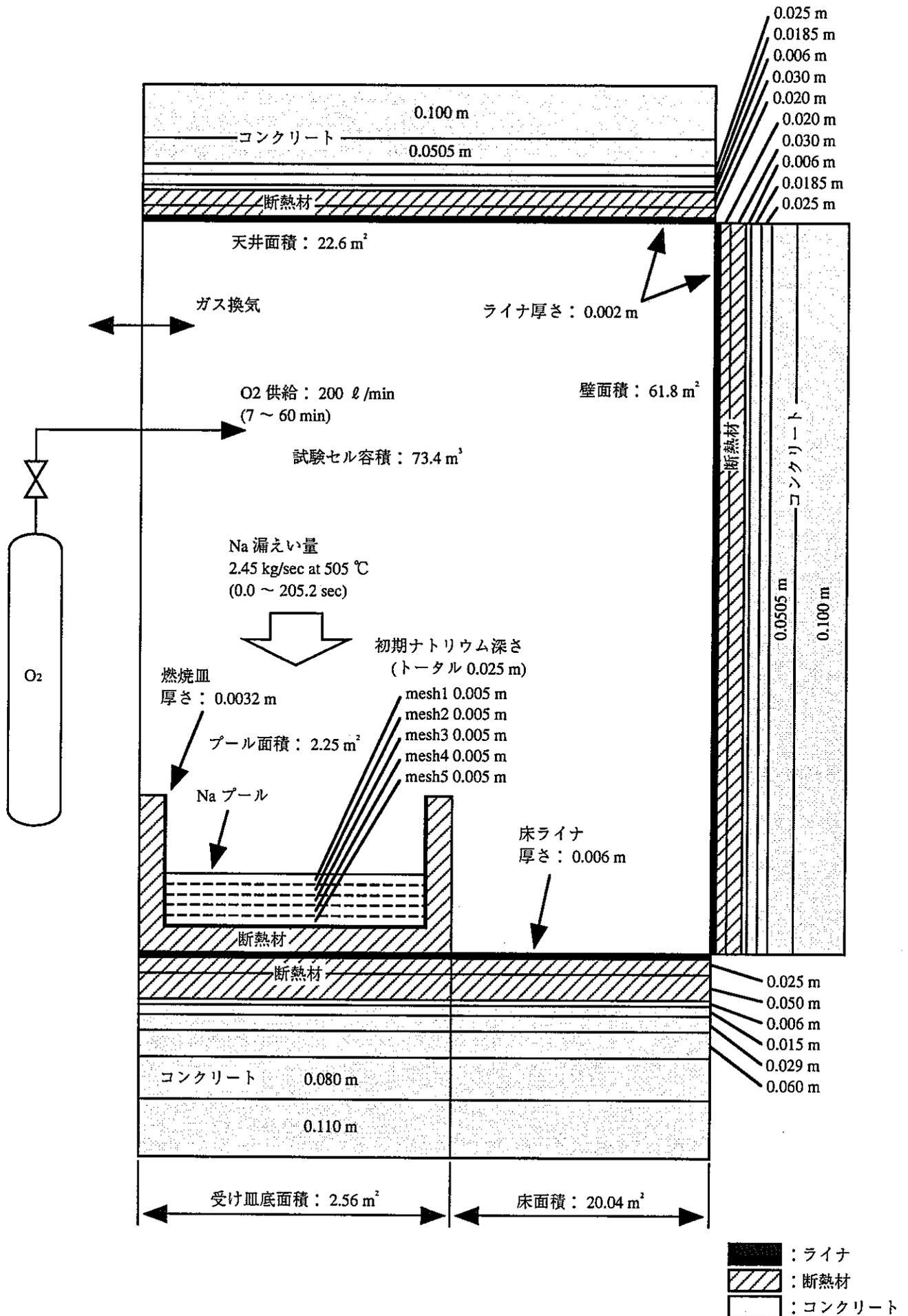


図4.2-3 Run D1 解析モデル

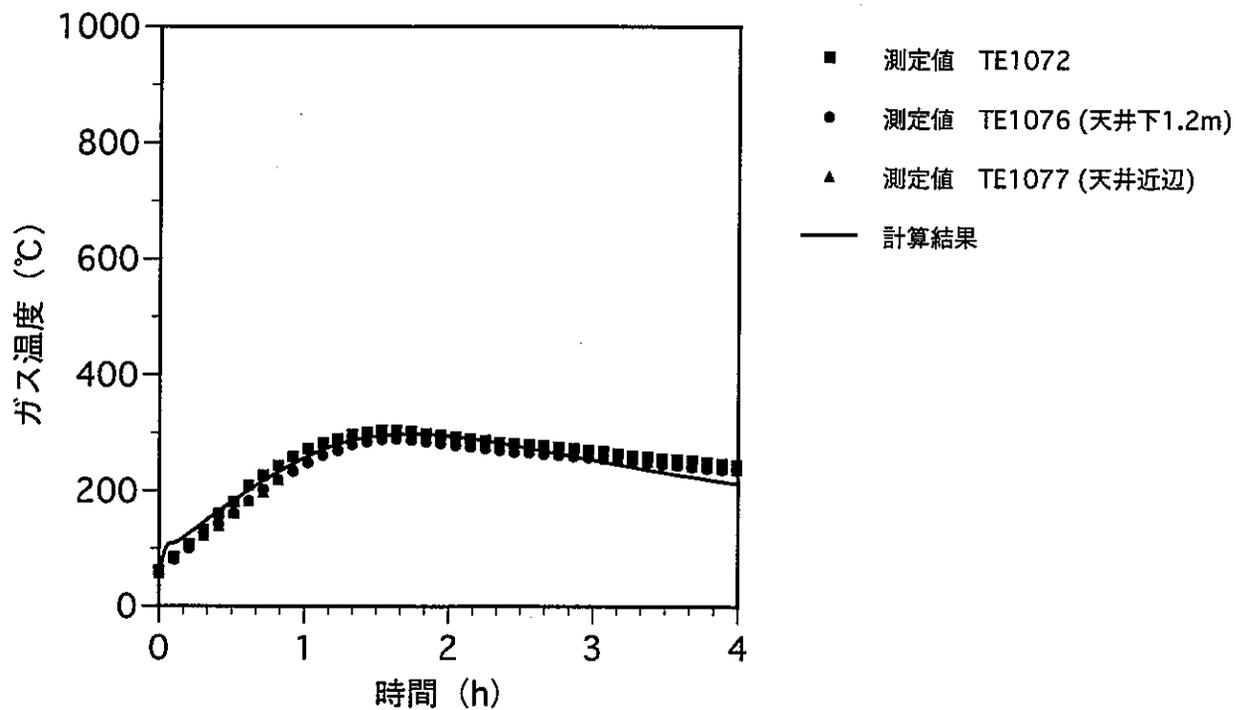


図4.2- 4 ガス温度の比較 (Run-D1)

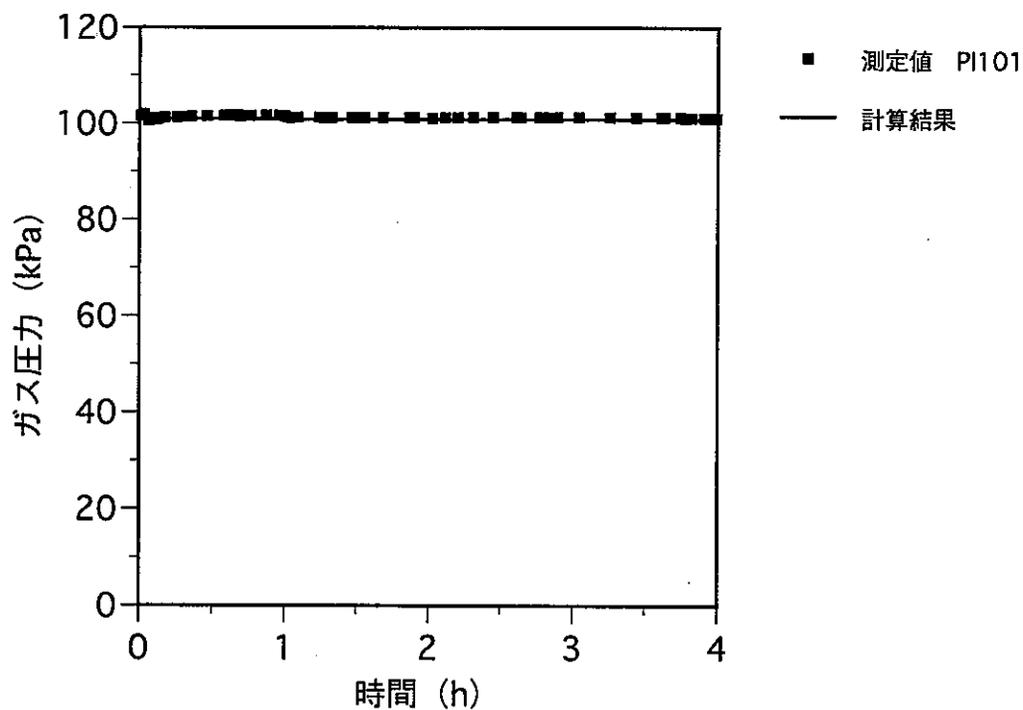


図4.2- 5 ガス圧力の比較 (Run-D1)

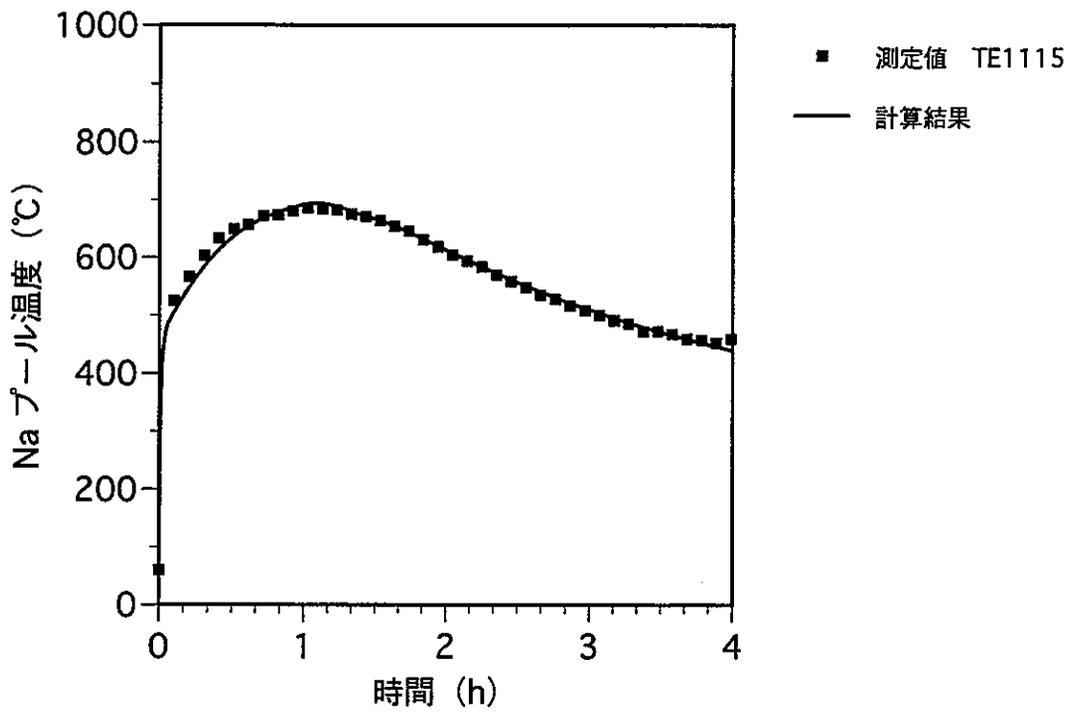


図4.2- 6 ナトリウムプール温度の比較 (Run-D1)

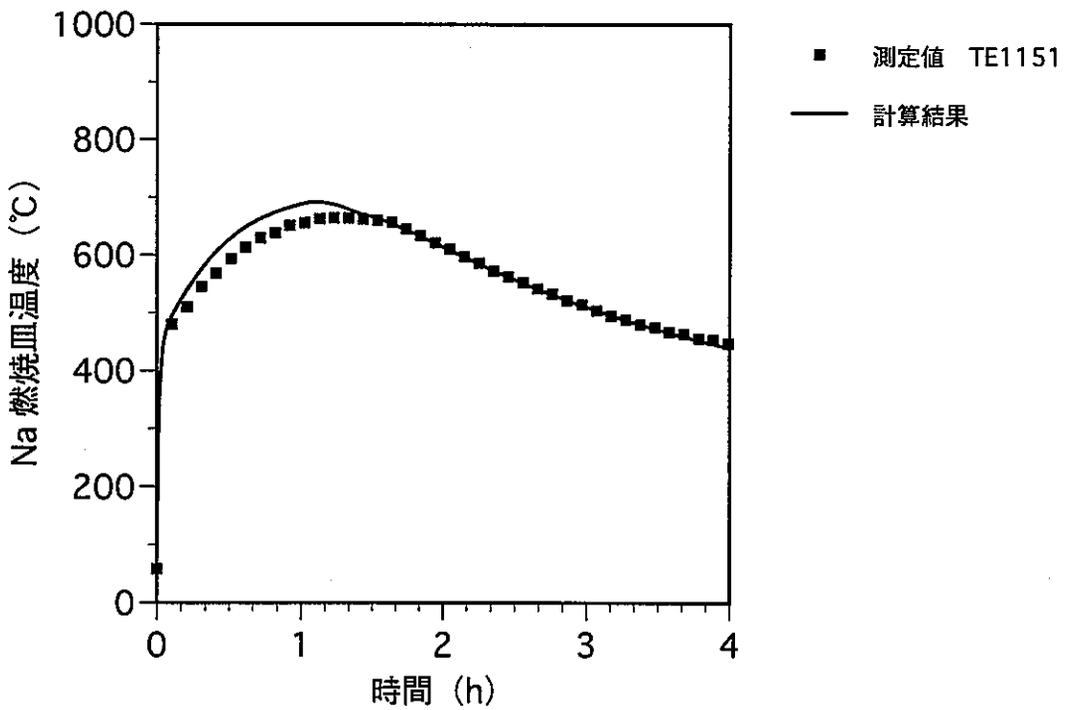


図4.2- 7 燃焼皿温度の比較 (Run-D1)

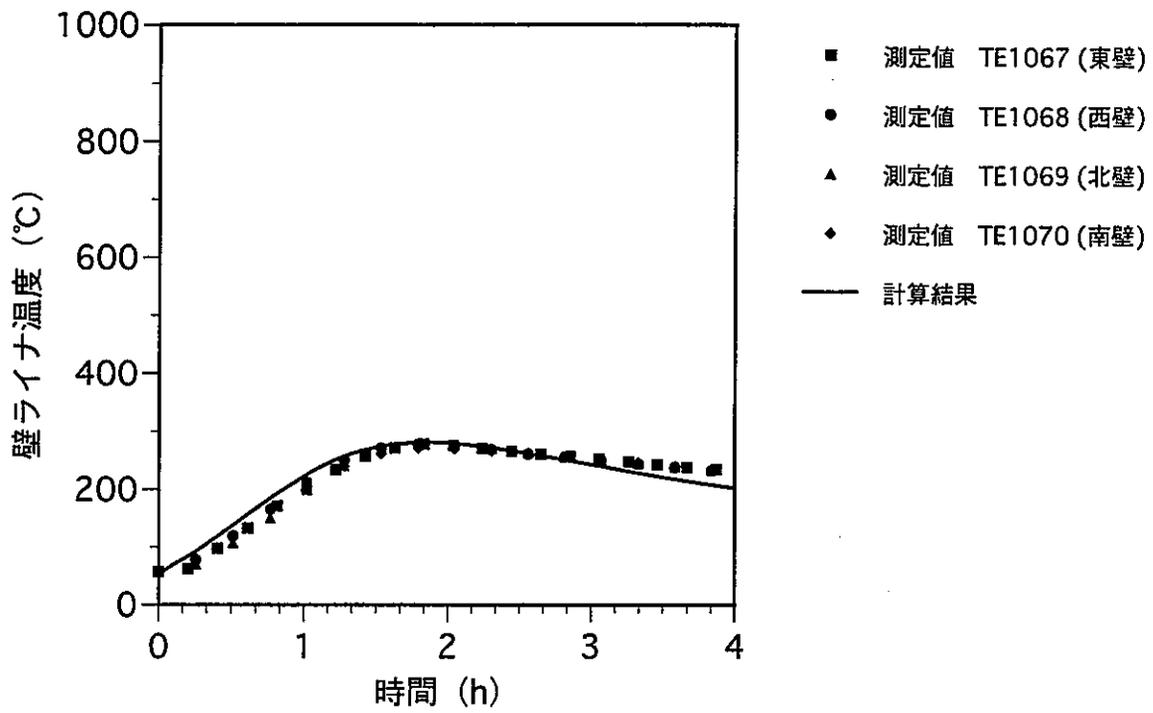


図4.2- 8 壁ライナ温度の比較 (Run-D1)

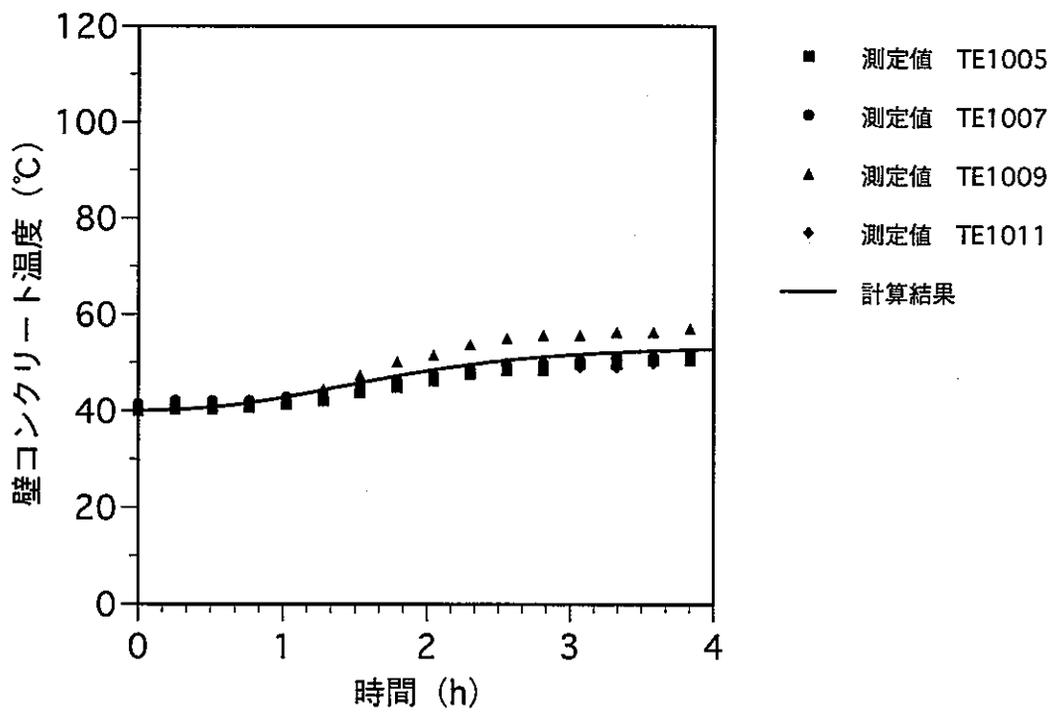


図4.2- 9 壁コンクリート温度の比較 (Run-D1)

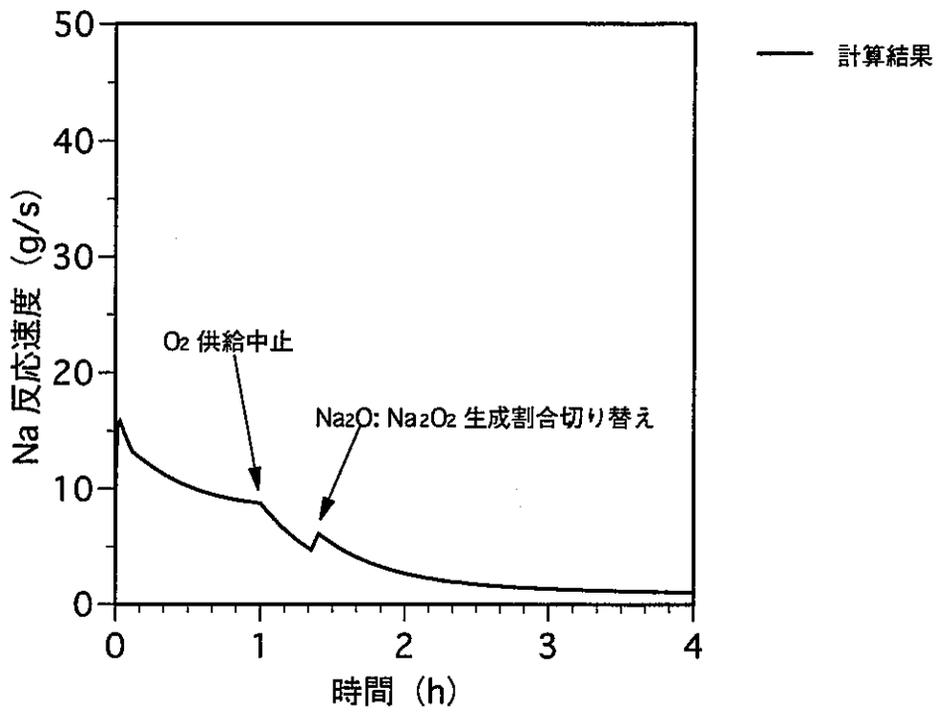


図4.2-10 ナトリウム反応速度の計算結果 (Run-D1)

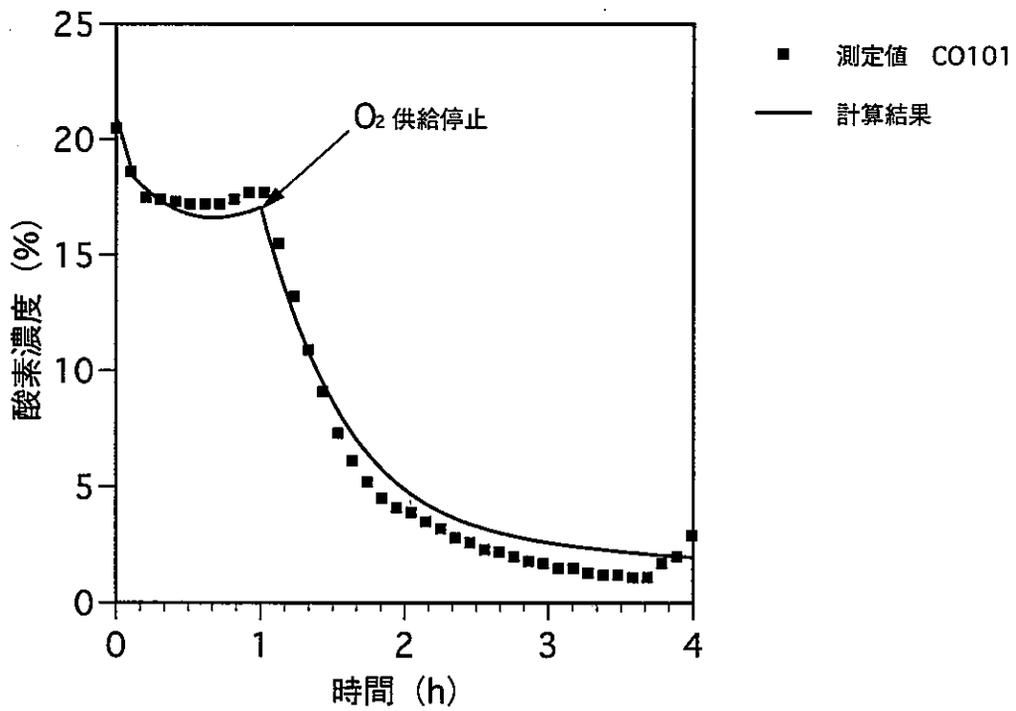


図4.2-11 酸素濃度の比較 (Run-D1)

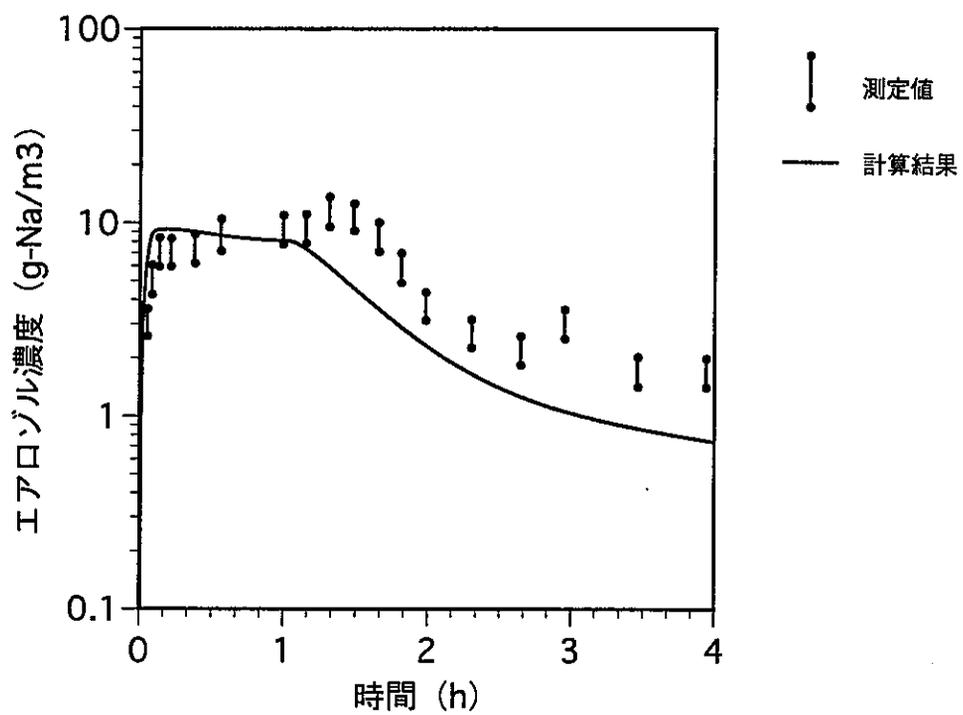


図4.2-12 浮遊エアロゾル濃度の比較 (Run-D1)

4. 3 スプレイ燃焼試験 TASP シリーズの解析⁽¹⁾

(1) 試験概要

TASP試験シリーズ^{(16),(17)}は、三菱重工業株式会社高砂研究所の鋼板内張りコンクリート製円筒容器で実施したナトリウムスプレイ燃焼試験である。試験装置は、内容積が21m³であり、床に炭素鋼（厚さ0.5mm）の分割受け皿が設置されている。

空気雰囲気でのナトリウムスプレイ燃焼試験として行われたTASP-A1試験とTASP-A2試験の試験装置と試験条件の概要を図4.3-1、図4.3-2、表4.3-1、表4.3-2に示す。ナトリウム漏えい速度は約0.5～0.6 kg/s、スプレイノズルの設置高さは床から3m、スプレイノズルにより生成される液滴の大きさは予め水を用いて測定され、0.9mmであった。TASP-A1試験とTASP-A2試験の主な違いは、スプレイ継続時間（TASP-A1：18秒、TASP-A2：57秒）と湿分濃度（TASP-A1：65%RH、TASP-A2：2%RH）である。

(2) 解析モデルと解析条件

TASP試験シリーズの解析モデルを図4.3-3に、解析条件を表4.3-3に示す。試験装置サイズや試験条件に関するものは試験と合致するよう設定し、物理・化学的な挙動を計算するための解析パラメータについては本報告書全体で統一させたものを使用したが、本試験の解析では「O₂拡散速度補正係数」という入力データについては他と異なる取り扱いとした。（注）

（注）O₂拡散速度補正係数（V_o）は、SPRAYコードで使用している反応速度係数（ε_o）を決める係数で、以下の式で表される。

$$\varepsilon_o = (1 + D_o / V_o / \delta_{bc})^{-1}$$

上式で、D_oは酸素の拡散係数、δ_{bc}はフィルム厚さ（SPRAYコードでは液滴燃焼面半径としている）である。ε_oは0～1.0の値をとり、単液滴の燃焼速度に対するスプレイ（液滴群）の燃焼速度への補正を意味するものであり、計算結果の燃焼速度に乘じられる。したがって、V_oが小さいほどε_oは小さくなり燃焼速度を小さくする補正になる。逆にV_o=∞ではε_o=1.0となり燃焼速度に補正を加えないことになる。

本報告書の全体において係数V_oは∞とし燃焼速度の補正は行わなかったが、このTASP-A1およびTASP-A2試験の解析ではV_oを∞とすると燃焼速度計算値が大きすぎて計算が不安定となったため、V_o=1.27cm/s (150 ft/h)とした計算を実施した。なお、V_o=1.27cm/s (150 ft/h)とした場合、温度500℃、液滴径0.9mm（δ_{bc}=0.45mm）ではD_o=1.08 cm²/sで、ε_o=0.05となる。ASSCOPSコードの元になるSPRAY-IIコードでは、V_oのデフォルト値は300 ft/hである。後述のRun E1実験ではV_o=2.54cm/s (300 ft/h)が適切である一方、本実験の解析でV_oを小さめに（燃焼速度を小さめに）しなければ計算値が過大となってしまうのは、本実験ではRun E1実験よりもスプレイ領域の液滴存在密度が高い（スプレイ領域体積は同程度であるが平均液滴径が小さい）ことに関連するものと考えられる。

(3) 解析結果

計算結果と試験測定値との比較を、TASP-A1に関して図4.3-4から図4.3-12に、TASP-A2に関して図4.3-13から図4.3-21に示す。

(a) ガス圧力 (図4.3-4、図4.3-13)

本解析ではTASP-A1、TASP-A2ともにO₂拡散速度補正係数を調整して燃焼を抑制するような計算条件としたが、ガス圧力は測定値よりも高い計算結果となっている。

(b) ガス温度 (図4.3-5, 4.3-6、図4.3-14, 4.3-15)

ガス温度は燃焼領域内 (図4.3-5, 4.3-14) と領域外 (図4.3-6, 4.3-15) に分けて図示した。燃焼領域内の測定値は装置の中心部に設置された熱電対によるものであるが、特にナトリウム接触防止や輻射防止の工夫を行っていないので、これらの測定値はナトリウムあるいは火炎の温度を測定している可能性が高いと考えられる。燃焼領域外については、ガス圧力と同様に、計算値が測定値よりも高めとなっている。

(c) ナトリウムプール温度 (図4.3-7, 4.3-8、図4.3-16, 4.3-17)

TASP試験では装置床に設置された受け皿は升状に仕切っており、落下したナトリウムが拡がらないようになっている。このため、測定されたプール温度は、中央部 (TE-601~603) は高く、周囲部 (TE-604~606) は低いという分布を持っている。他方、解析ではそれらの平均を計算していることになる。

図4.3-7と図4.3-16は測定されたプール温度と計算値を比較したものであるが、計算値は中央部と周囲部の測定値の中間を示している。

また、検討のために、スプレー最下端液滴温度の計算値と中央部プール温度測定値を比較して図4.3-8と図4.3-17に示す。これらは比較的一致しており、中央部についてはスプレー液滴に支配されていることが推定できる。

(d) 壁温度 (図4.3-9、図4.3-18)

装置の壁の内面に敷設されたライナの温度に関する計算結果は、TASP-A1、TASP-A2ともに初期 (約15秒までの時間帯) において測定値よりも低くなっている。ガス圧力やガス温度は測定値よりも高めに計算されていることと考えると、TASP試験では装置が小さいことから、スプレー燃焼液滴から壁面への輻射熱の影響が生じていることが考えられる (SPRAYのモデルでは高酸素濃度条件では液滴からの輻射熱は壁面へ届かないと仮定している)。

(e) ナトリウム反応速度 (図4.3-10, 4.3-11, 図4.3-19, 4.3-20)

ナトリウム反応速度の計算結果をスプレー液滴 (図4.3-10, 図4.3-19) とプール (図4.3-11, 図4.3-20) に分けて図示する。スプレー漏えい中は液滴反応がプールの反応よりも多く、またTASP-A1の解析から、プールの反応は漏えい終了後に増大している。

(f) 酸素濃度 (図4.3-12, 図4.3-21)

酸素メータおよびオルザット計による測定値と計算値の比較を図4.3-12と図4.3-21に示す。酸素濃度の計算値が測定値よりも低くなっているのは、ガス圧力や温度からスプレー燃焼を過大評価していると判断されることと定性的に整合している。ただし、この試験における測定は装置の外部に配管を引き出して行っている (取り付け方法等の詳細は不明) ため、配管内の残留ガスの影響や輸送後れがあると考えられる。このため、測定データの短時間の時間変化は信頼性が低いと考えられる。

計算結果と測定値の比較について以下のようにまとめられる。

- ① ガス圧力に関して、計算結果は測定値を上回っている。
- ② 温度に関しては、測定値に空間的な分布が見られ、計算結果は場所によって低かったり高かったりする傾向となる。
- ③ 平均的に見ると、本解析で使用したパラメータ (O_2 拡散速度補正係数=150 ft/h) はTASP試験に対して適切であると考えられる。本報告書に掲載した他の試験解析でのパラメータ (O_2 拡散速度補正係数= ∞) では本実験に関してナトリウム反応速度を過大評価する。

表4.3-1 TASP 試験装置の概要

試験容器形状	円筒形
試験容器内径 m	3
試験容器高さ m	3
試験容器容積 m ³	21
試験容器壁面積 m ²	26.6
試験容器床面積 m ²	7
ナトリウム燃焼皿面積 m ²	7 (約 40 cm四方の升目に仕切った構造)
ナトリウム燃焼皿厚さ mm	0.5
スプレインズル高さ m	3

表4.3-2 TASP 試験条件

	TASP-A1	TASP-A2
ナトリウム漏えい速度 (平均) g/s	423	327
ナトリウム漏えい量 kg	7.7	19
ナトリウム漏えい時間 sec	18	57
ナトリウム温度 °C	520	512
液滴初速度 m/s	11.1	8.3
初期酸素濃度 %	20.6	20.4
初期水蒸気濃度 ppm	16500	420
初期雰囲気ガス圧力 kPa	101	⇐
初期雰囲気ガス温度 °C	22	19

表4.3-3 TASP-A1,TASP-A2試験の解析条件

	項目	条件		
		TASP-A1	TASP-A2	
ナトリウム漏えい・ 燃焼条件	漏えい流量	630~340 g/s	530~220 g/s	
	漏えい時間	18 秒	57 秒	
	漏えいナトリウム量	7.7 kg	19 kg	
	漏えいナトリウム温度	520 °C	512 °C	
	スプレイコーン形状	円錐台形 上部直径：1 cm 拡がり角度：40 ° 注) 高さ：3 m		
	液滴の初期落下速度	11.1 m/s	8.3 m/s	
	スプレイ液滴径	0.9 mm (質量平均) 注)		
	プール面積	7 m ²		
	雰囲気条件	セル容積	21 m ³	
セル内初期酸素濃度		20.6 %	20.4 %	
セル内初期ガス温度、湿度		22 °C、R.H. 65 % (1.04 wt.%)	19 °C、R.H. 2 % (0.02 wt.%)	
換気流量		換気なし (密閉)		
構造物条件	容器形状	円筒形		
	容器直径 (内径)	3 m		
	容器高さ	3 m		
	床、壁および天井ライナ肉厚	6 mm		
	床面積	7 m ²		
	容器内壁 (含、天井) 面積	34 m ²		
輻射伝熱条件	壁からガスの輻射伝熱係数	0.73		
	プールからガスの輻射伝熱係数	0.65		
化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応及び生成割合 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$ $2\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$ $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 \% : 40 \%$ (酸素濃度10%以上) $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 100 \% : 0 \%$ (酸素濃度10%未満)		
	ナトリウムと水蒸気の反応 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$		
	エアロゾル状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 反応速度係数： 1.0×10^{-10} mol-H ₂ O/個/s		
	プール状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 水蒸気の拡散により反応		
	水素と酸素の再結合割合	生成水素の90%が再結合		
	エアロゾル条件	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	
		エアロゾル落下高さ	1.5 m	
エアロゾル密度		2130 kg/m ³		
エアロゾル粒径		1.0×10^{-5} m		
備考	注) 使用したスプレイノズルの水実験に基づく			

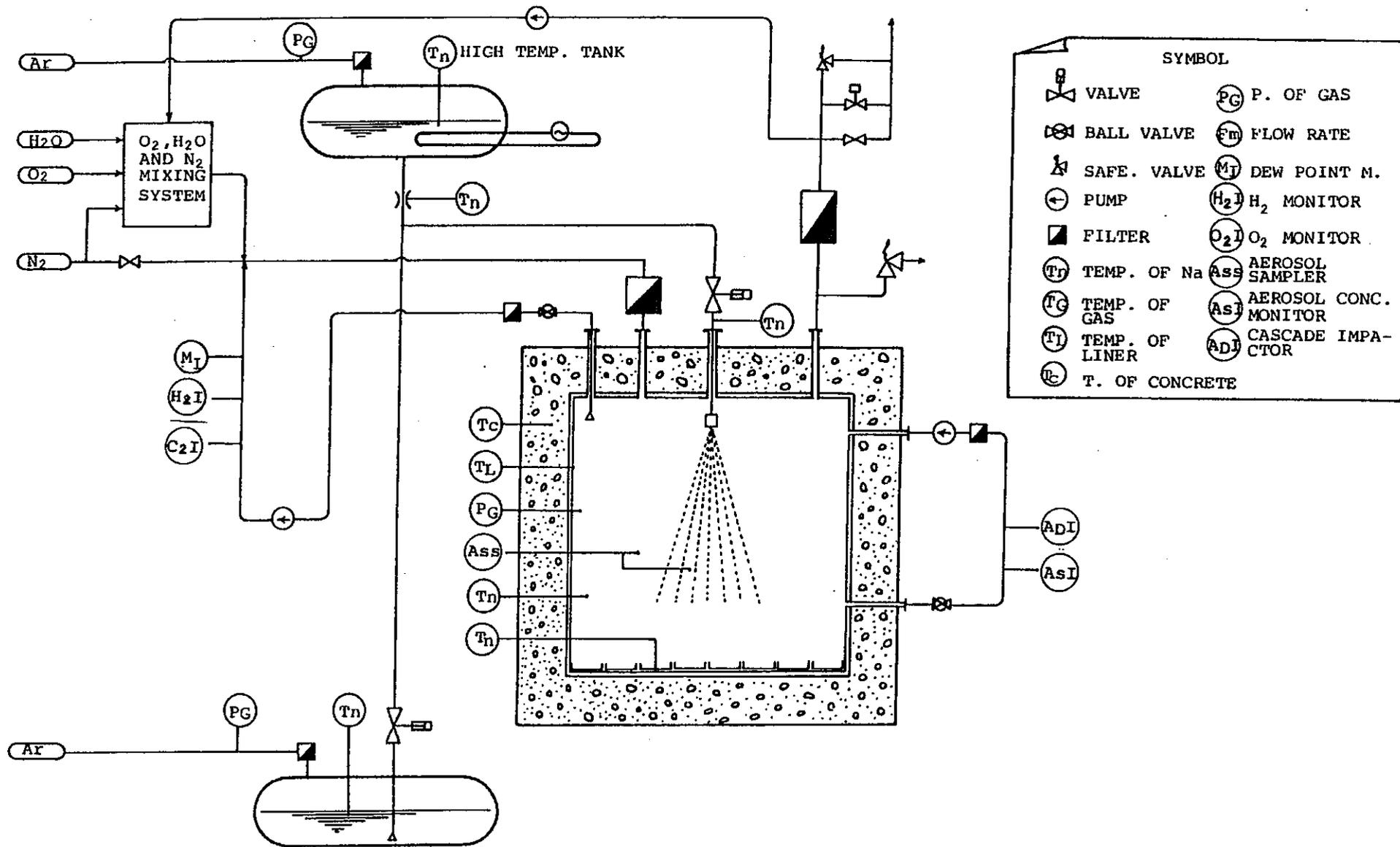


图4.3-1 TASP 試驗裝置

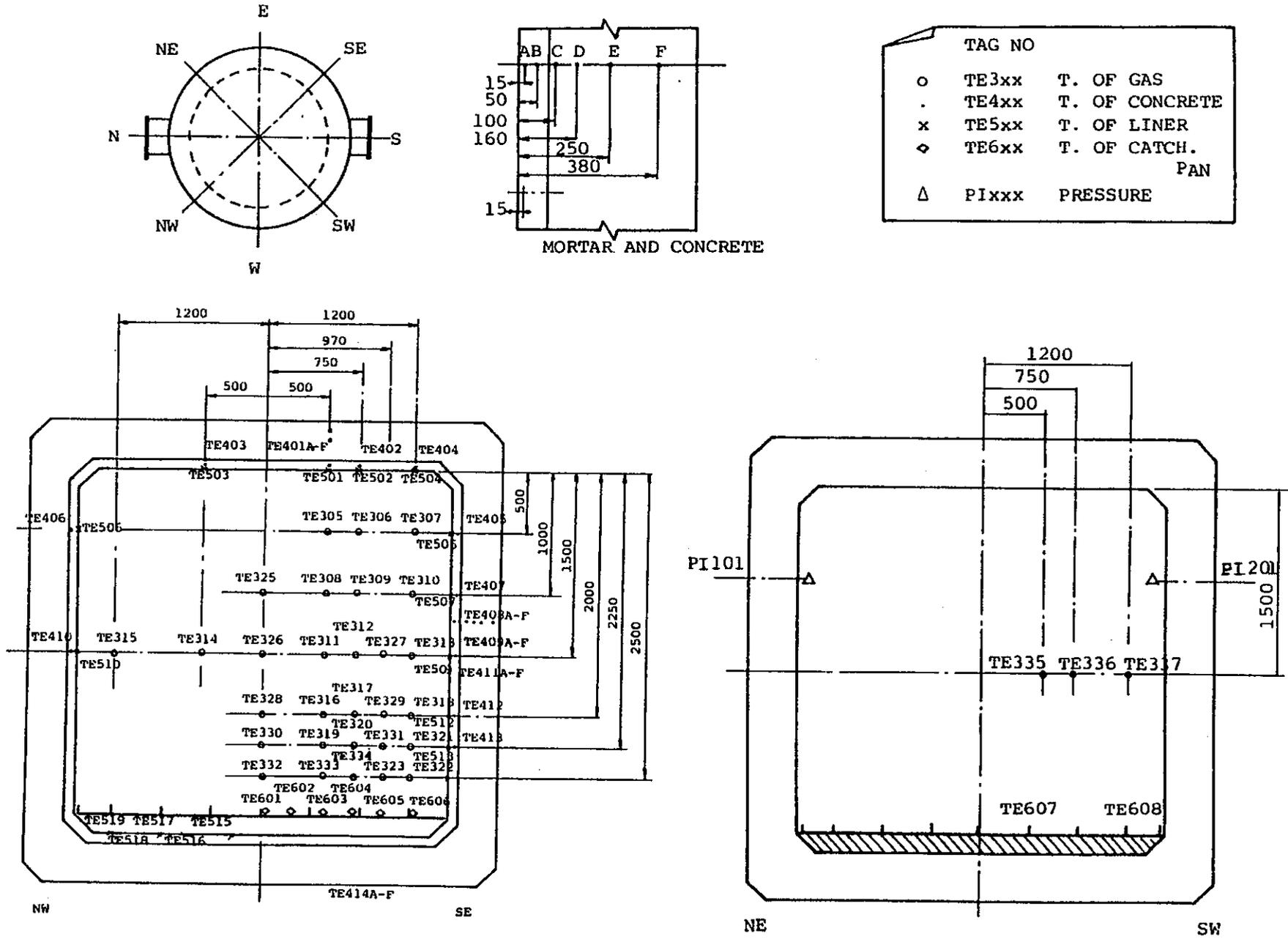
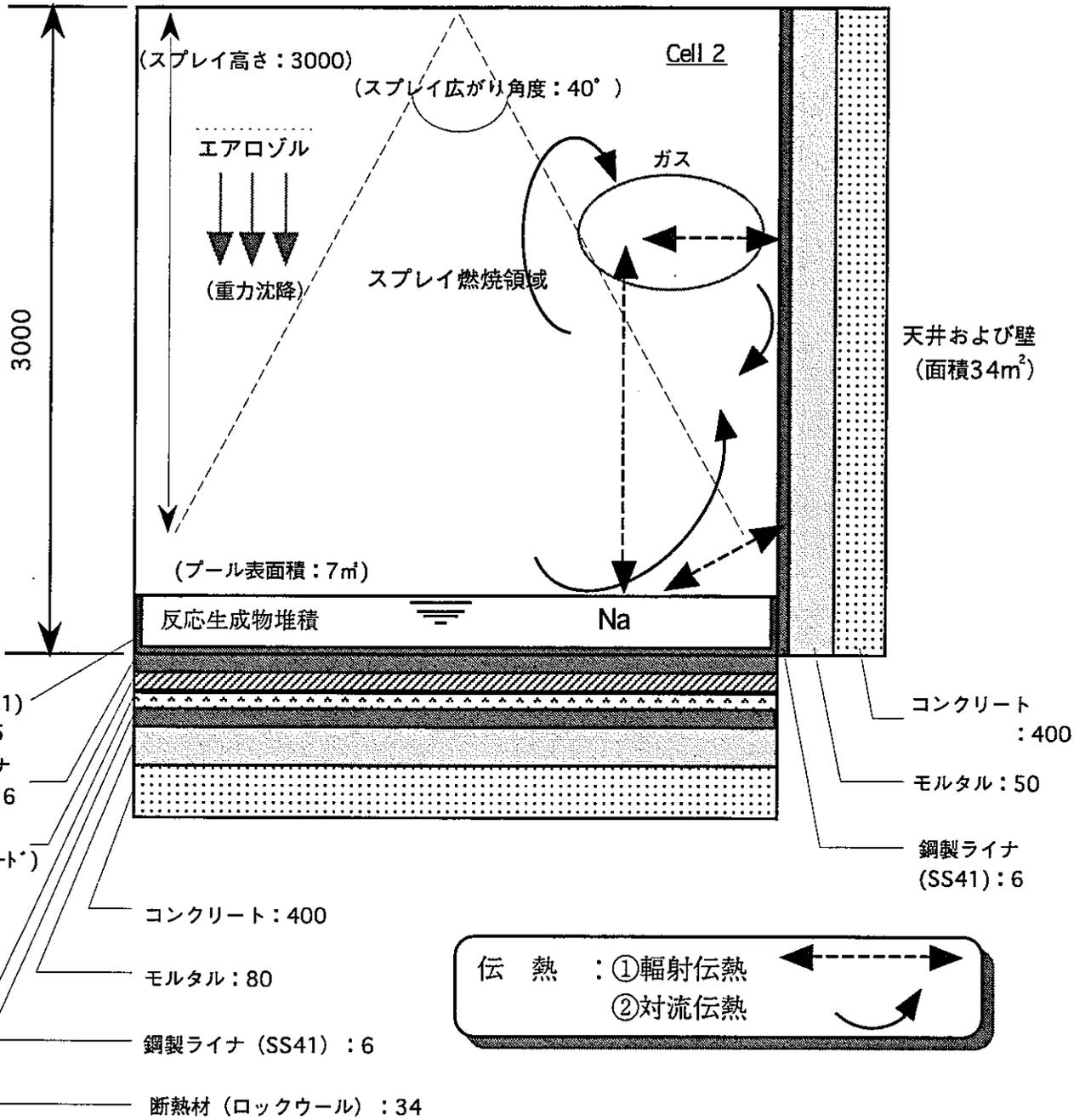


図4.3-2 TASP 試験の熱電対配置



長さ単位: mm

図4.3-3 TASP-A1, TASP-A2 試験の解析モデル

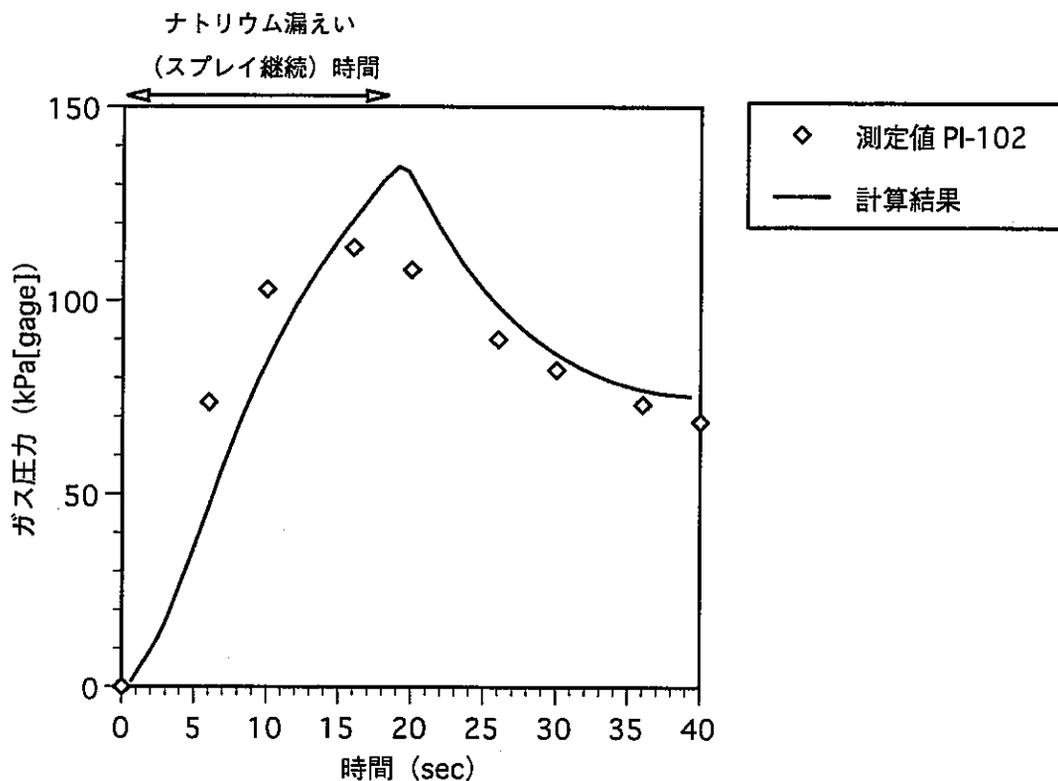
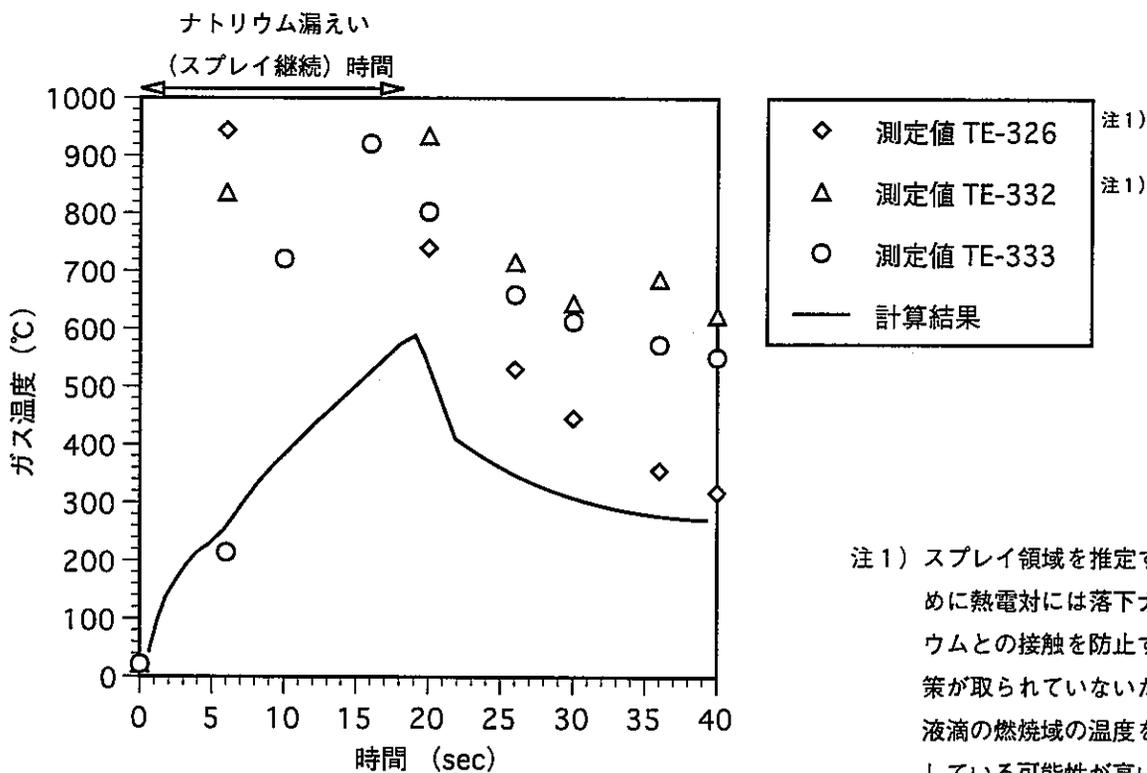


図4.3-4 ガス圧力の比較 (TASP-A1)



注1) スpray領域を推定するために熱電対には落下ナトリウムとの接触を防止する方が取られていないため、液滴の燃焼域の温度を測定している可能性が高い

図4.3-5 Spray燃焼領域内ガス温度の比較 (TASP-A1)

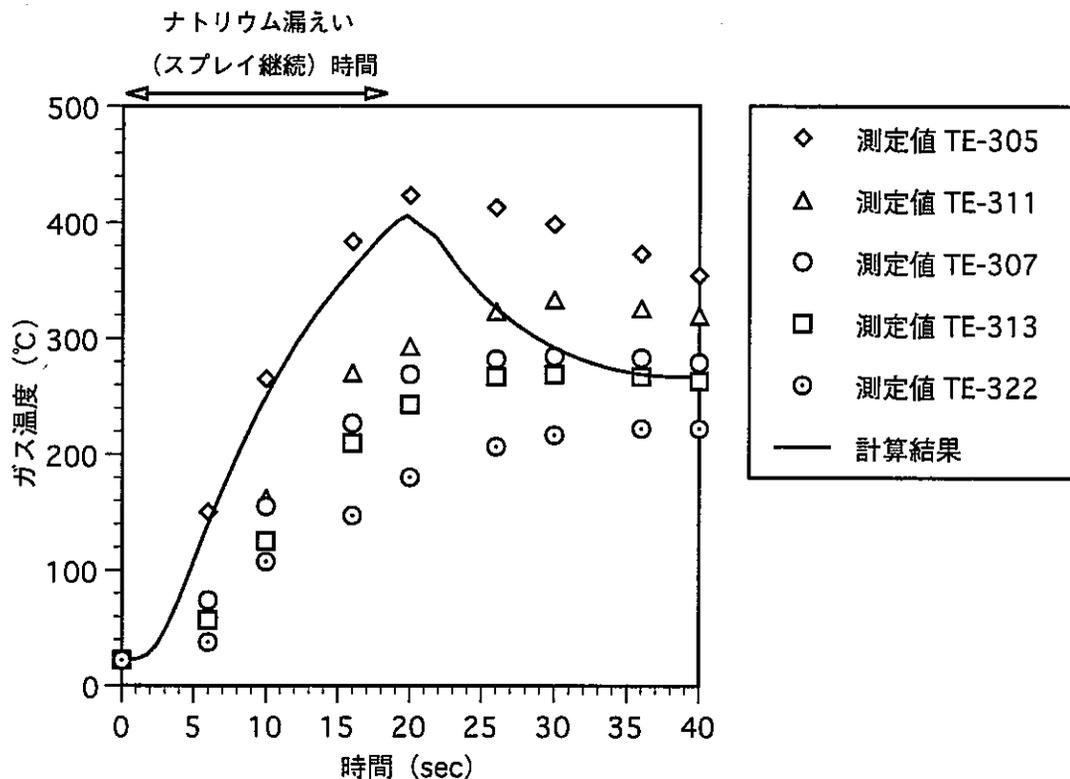


図4.3-6 スプレイ燃焼領域外ガス温度の比較 (TASP-A1)

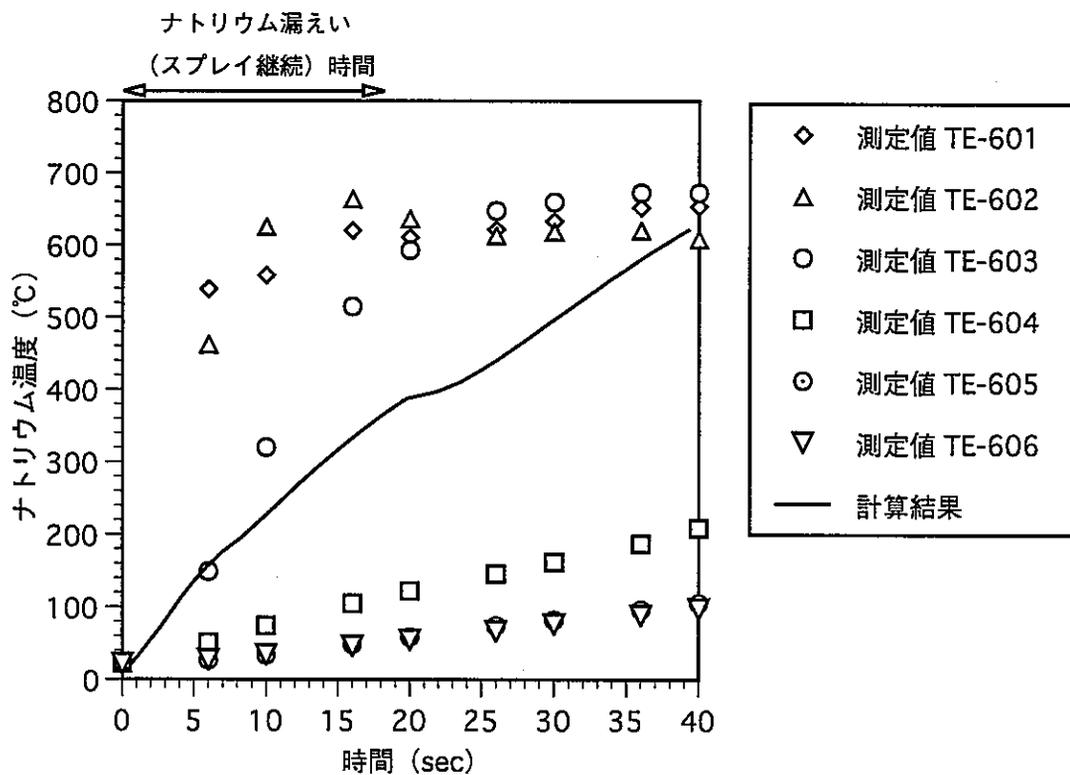


図4.3-7 ナトリウムプール温度の比較 (TASP-A1)

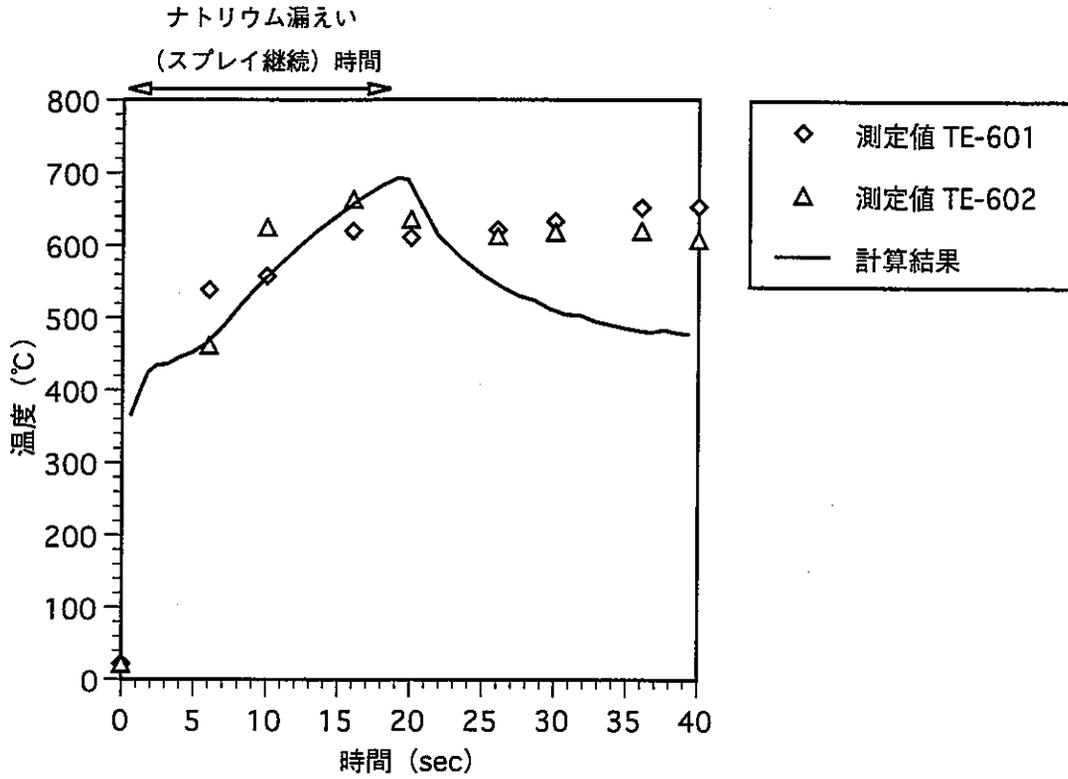


図4.3-8 ナトリウムプール温度測定値と
スプレイ最下端液滴温度計算値の比較 (TASP-A1)

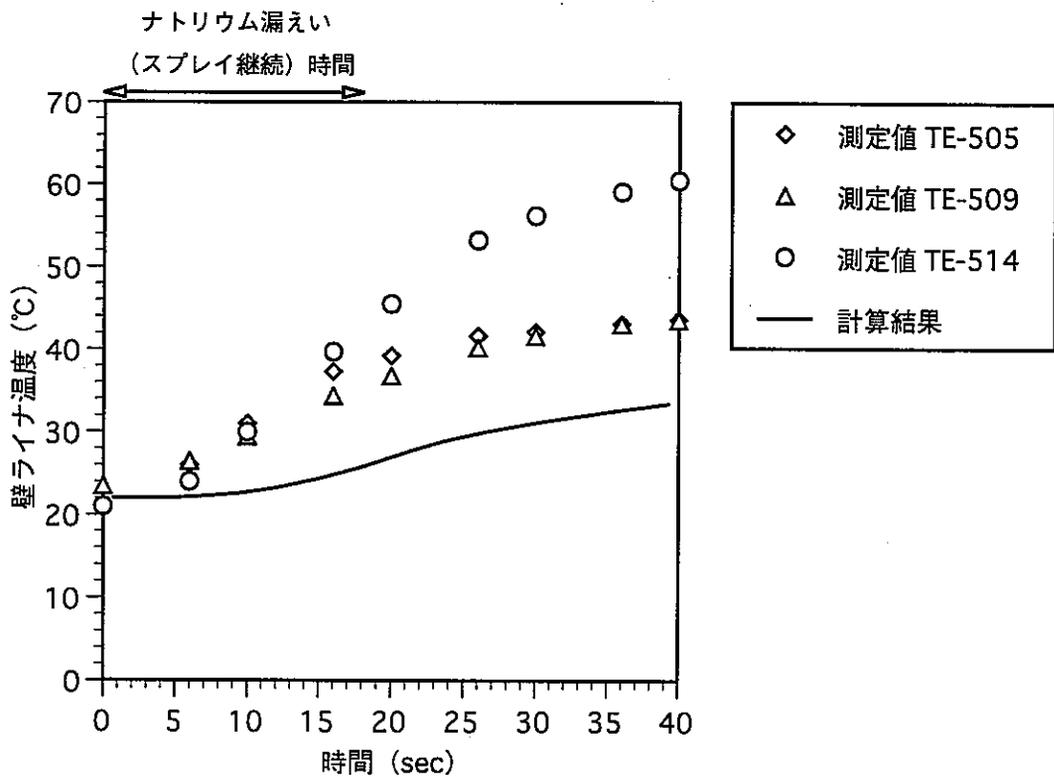


図4.3-9 壁温度の比較 (TASP-A1)

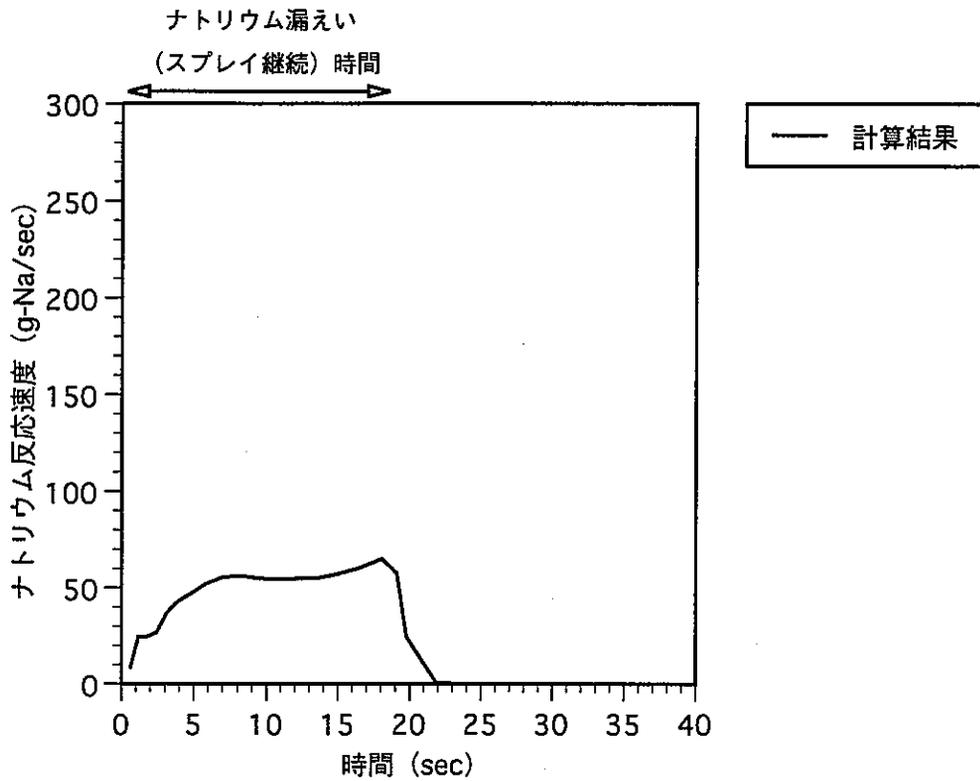


図4.3-10 ナトリウムスプレー反応速度の計算結果 (TASP-A1)

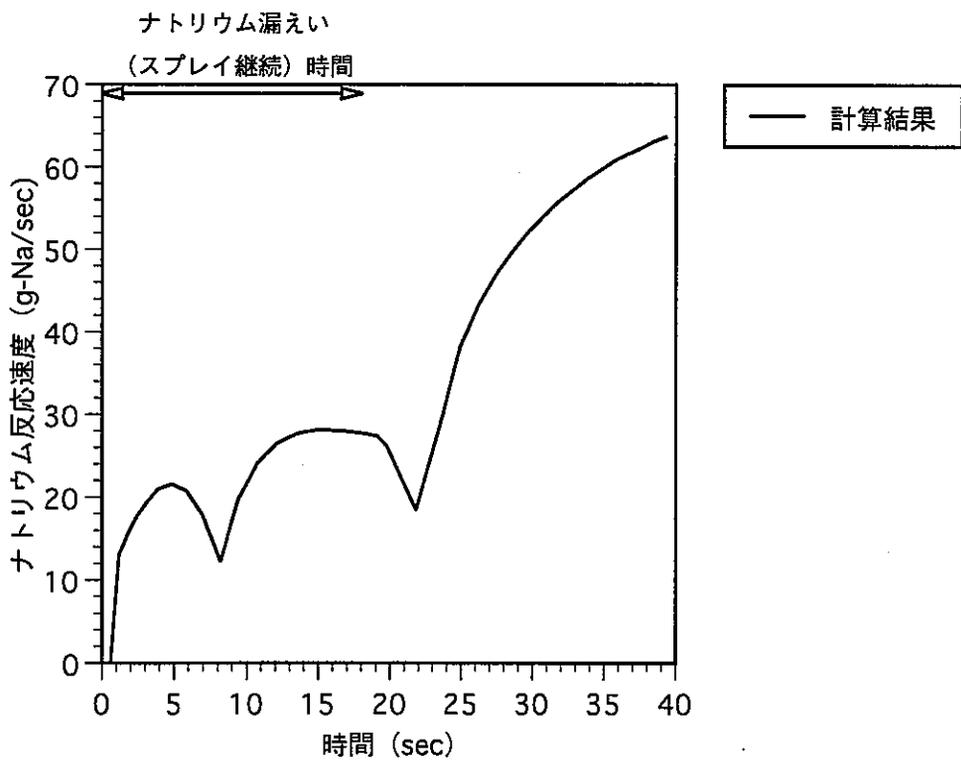


図4.3-11 ナトリウムプール反応速度の計算結果 (TASP-A1)

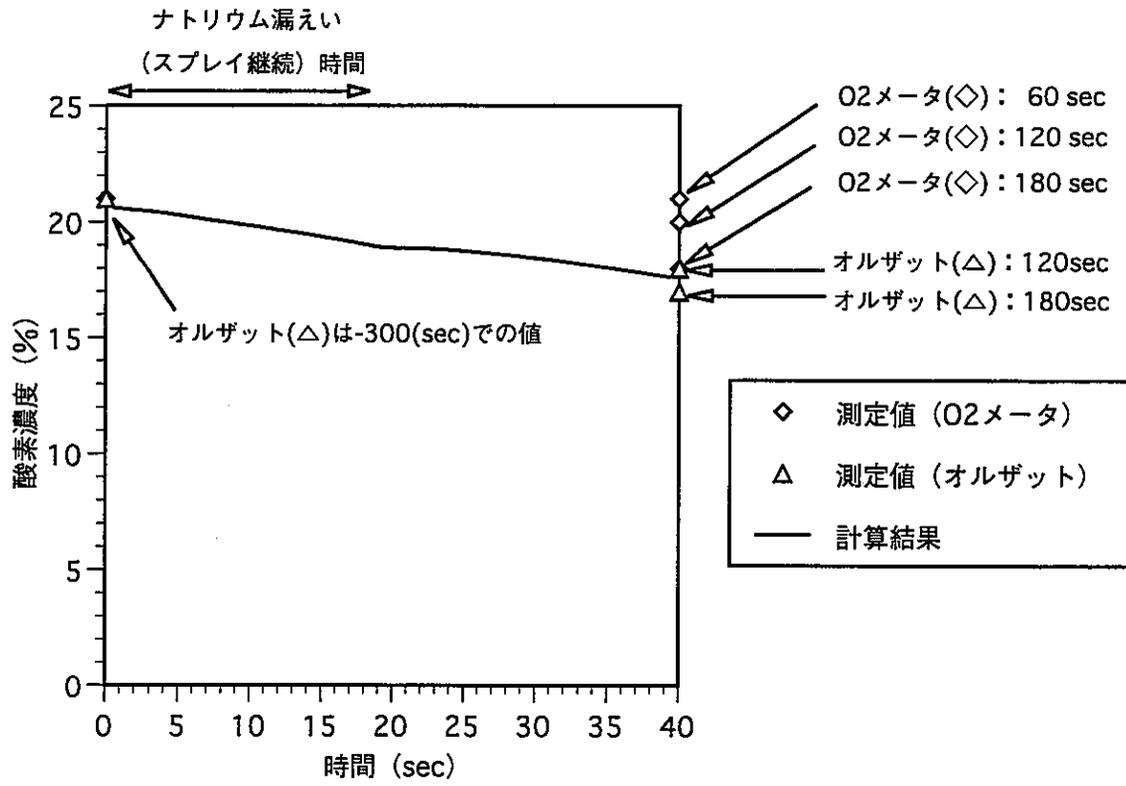


図4.3-12 酸素濃度の比較 (TASP-A1)

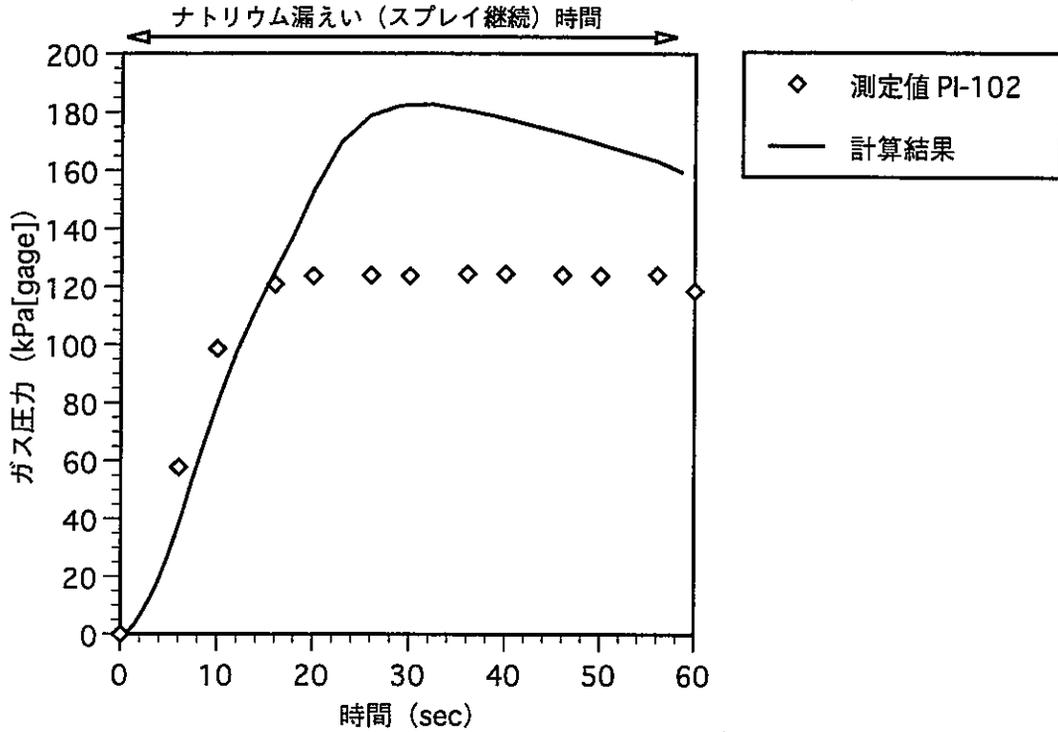
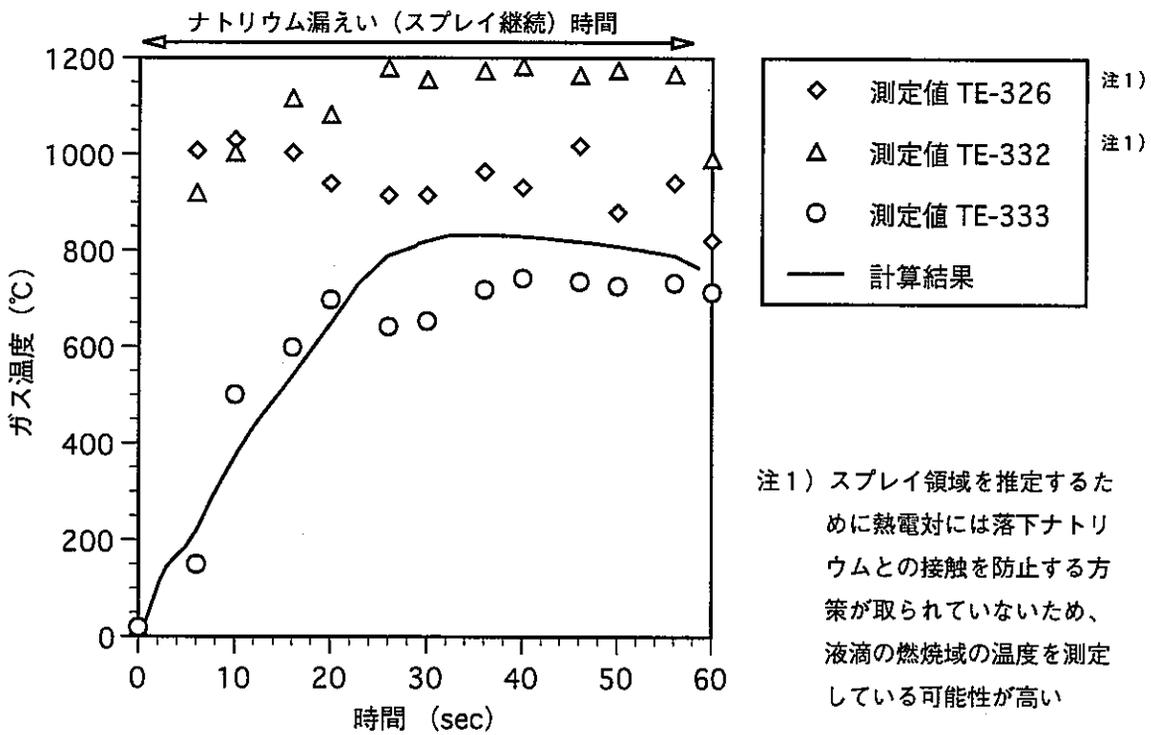


図4.3-13 ガス圧力の比較 (TASP-A2)



注1) スプレイ領域を推定するために熱電対には落下ナトリウムとの接触を防止する方策が取られていないため、液滴の燃焼域の温度を測定している可能性が高い

図4.3-14 スプレイ燃焼領域内ガス温度の比較 (TASP-A2)

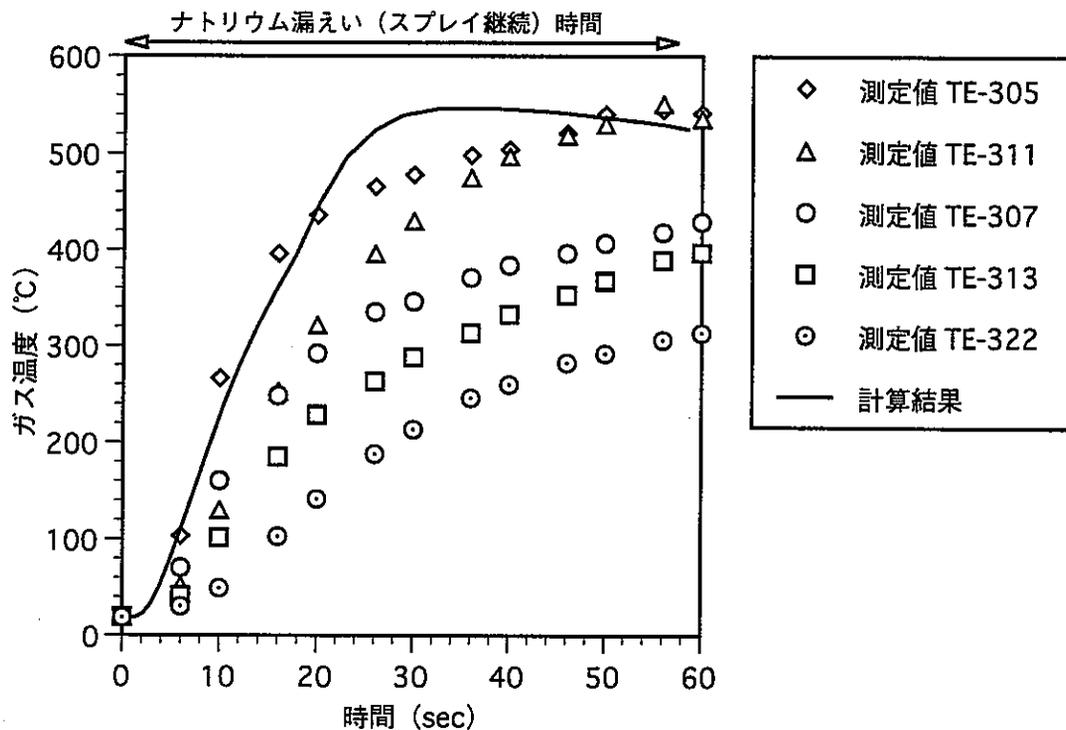


図4.3-15 スpray 燃焼領域外ガス温度の比較 (TASP-A2)

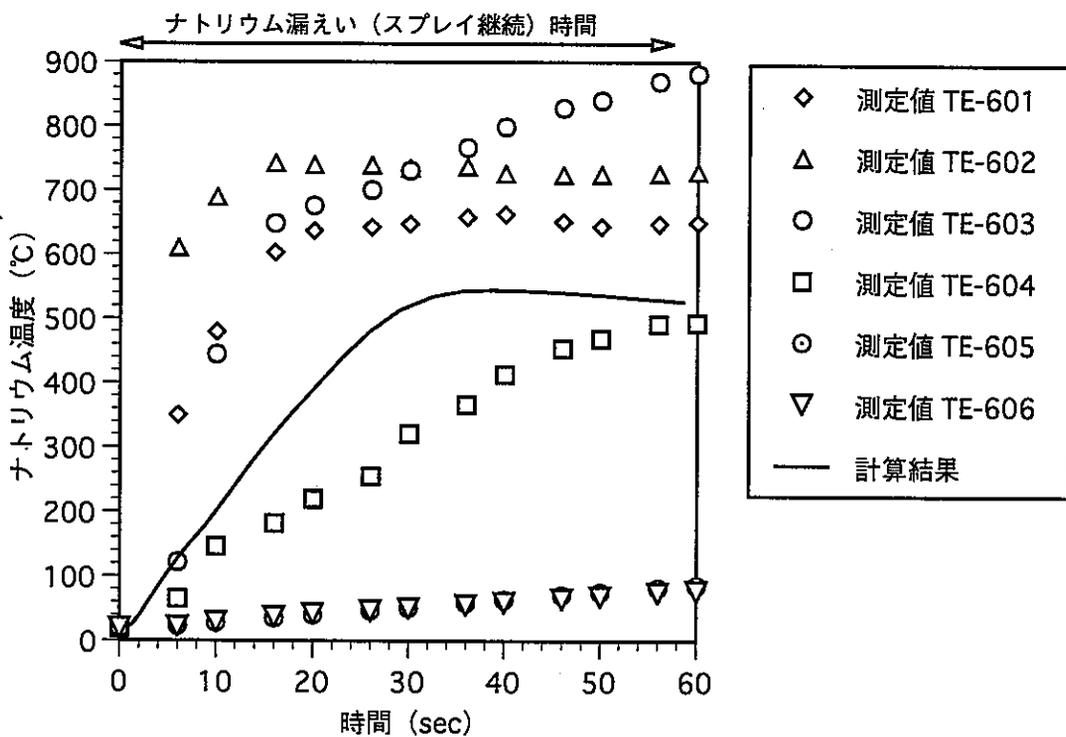


図4.3-16 ナトリウムプール温度の比較 (TASP-A2)

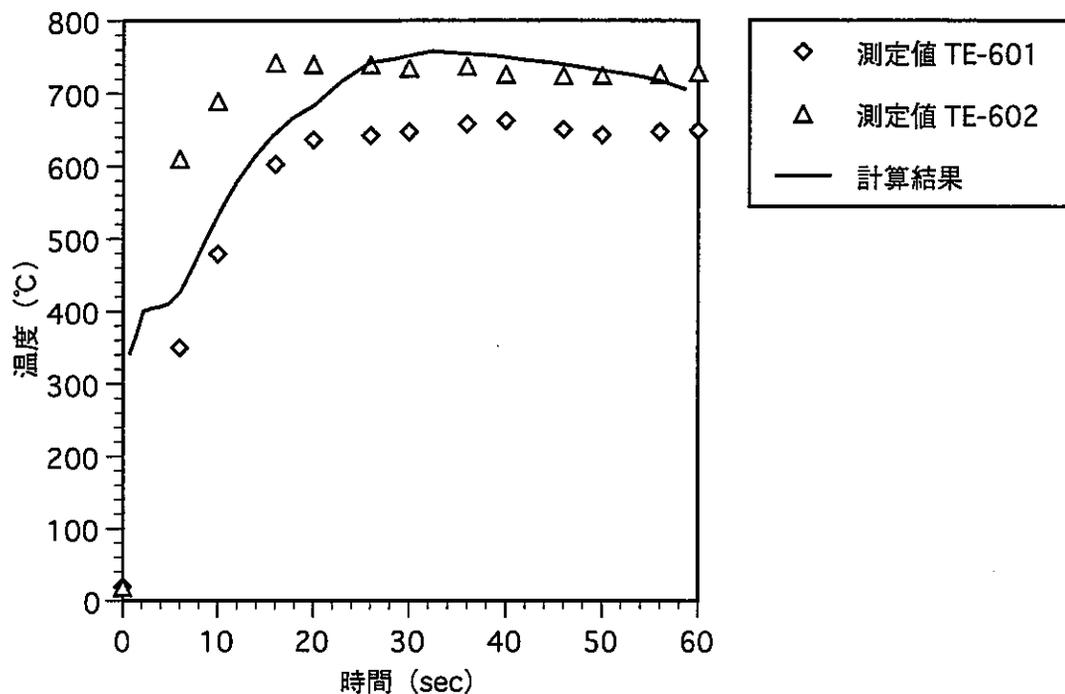


図4.3-17 ナトリウムプール温度測定値と
スプレー最下端液滴温度計算値の比較 (TASP-A2)

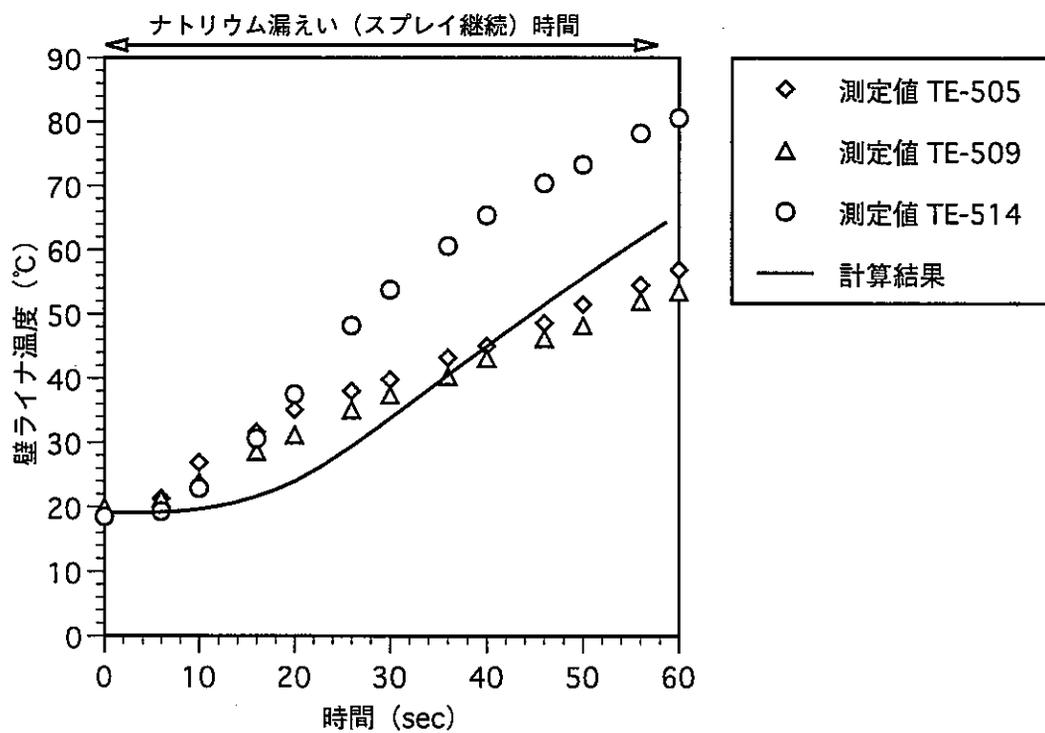


図4.3-18 壁温度の比較 (TASP-A2)

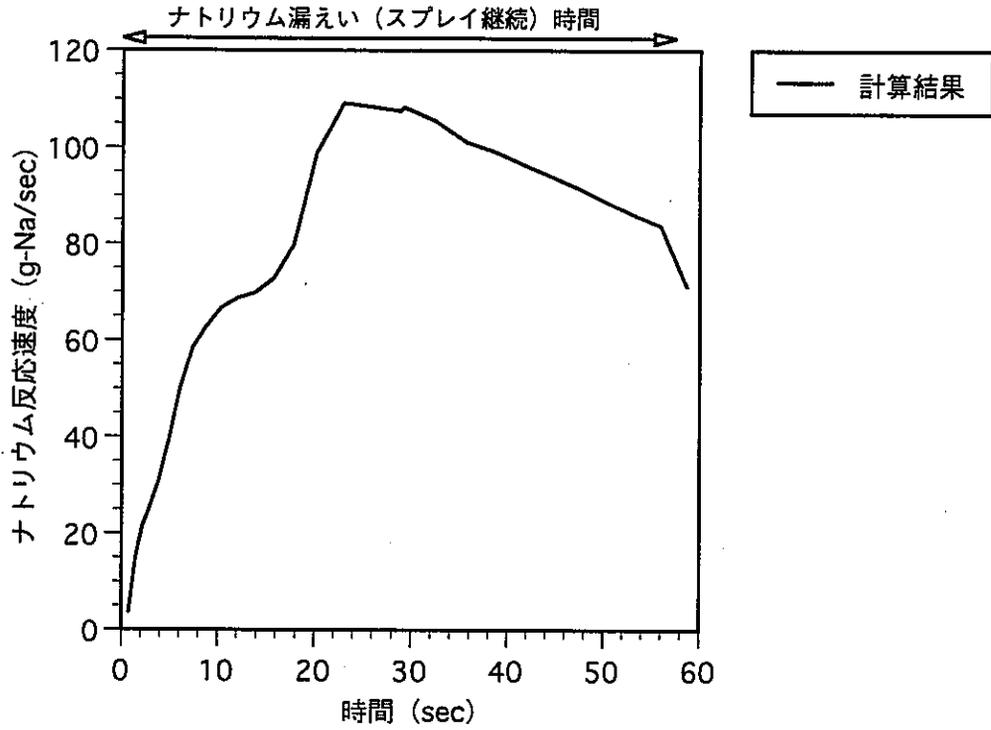


図4.3-19 ナトリウムスプレイ反応速度の計算結果 (TASP-A2)

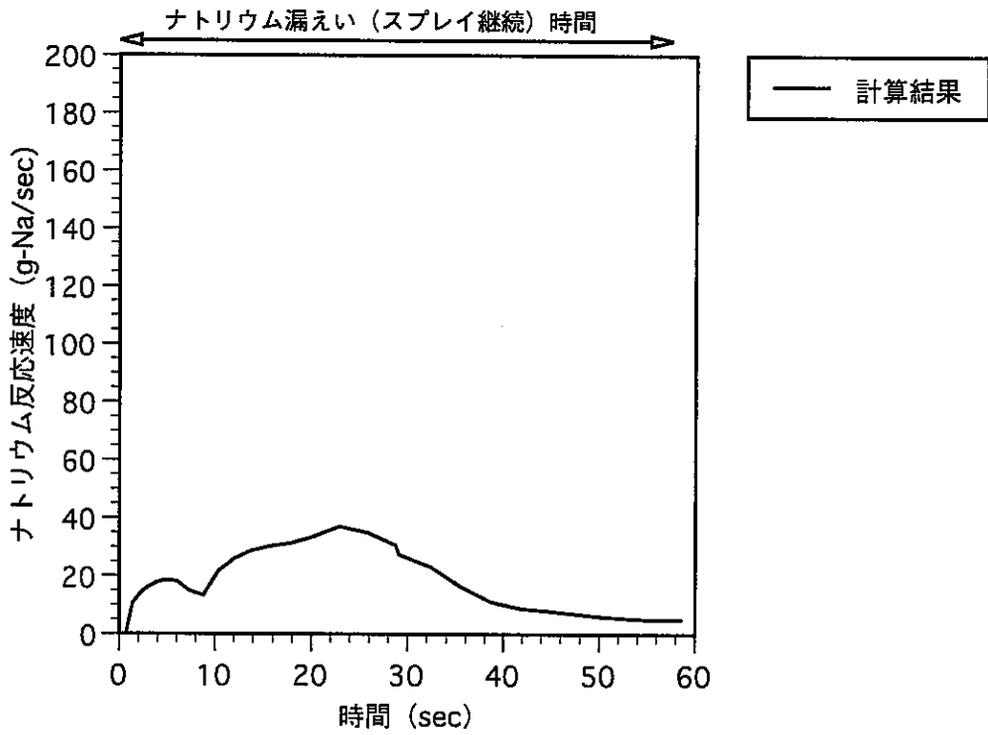


図4.3-20 ナトリウムプール反応速度の計算結果 (TASP-A2)

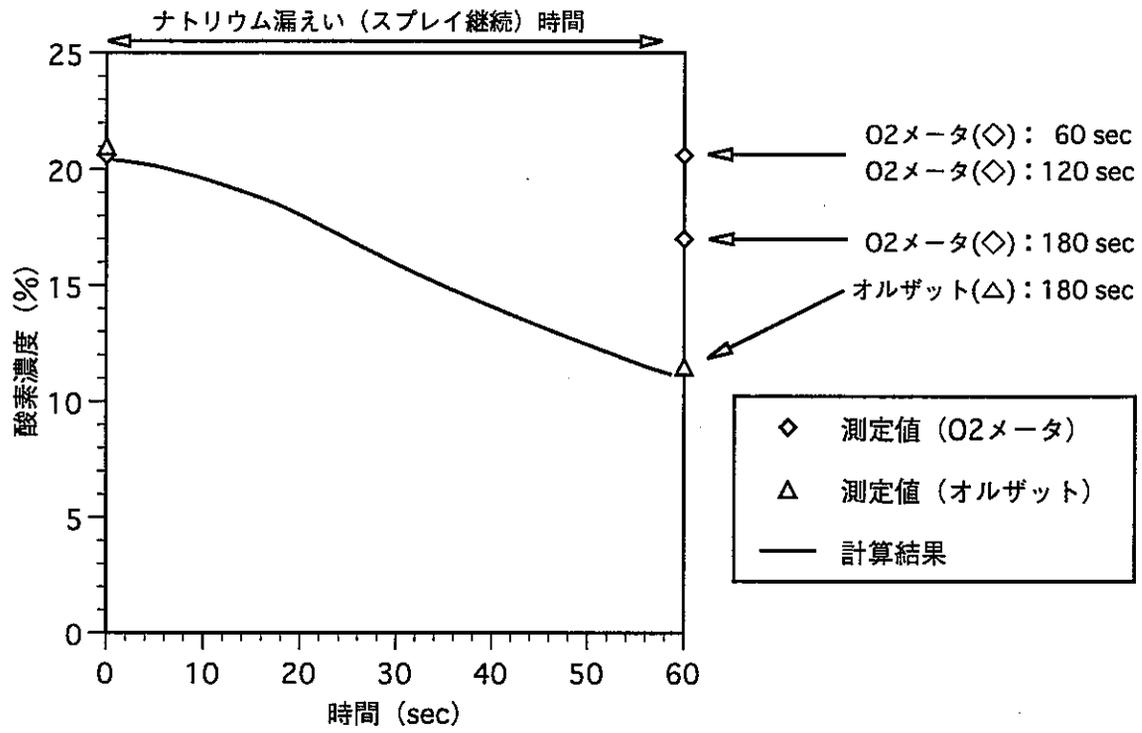


図4.3-21 酸素濃度の比較 (TASP-A2)

4. 4 スプレイ燃焼試験 Run E1 の解析

(1) 試験概要

Run E1試験⁽¹⁸⁾は、SAPFIRE施設のSOLFA-2装置（鋼製円筒型容器）を使用した試験であり、内容積100m³の試験容器内を空気雰囲気（密閉条件）とし、床に燃焼抑制板を設置した体系で実施した。試験装置と試験条件の概要を図4.4-1、図4.4-2、表4.4-1、表4.4-2に示す。

ナトリウム漏えい速度は約0.5kg/sであり、前節のTASP試験との主な違いは、上述の装置の大きさに加え、液滴の大きさ、スプレイ継続時間（Run E1では30分間に計920kgのナトリウムを漏えいさせた）である。スプレイノズルの設置高さは床から4mの位置、スプレイノズルにより生成する液滴の大きさは予め水を用いて測定され、2.2mmであった。

(2) 解析モデルと解析条件

Run E1試験の解析モデルを図4.4-3に、解析条件を表4.4-3に示す。試験装置サイズや試験条件に関するものは試験と合致するよう設定し、物理・化学的な挙動を計算するための解析パラメータについては本報告書で統一させたものを使用した。

(3) 解析結果

計算結果と試験測定値との比較を図4.4-4から図4.4-11に示す。

(a) ガス圧力（図4.4-4）

ガス圧力の計算結果はピーク値、時間推移ともに測定値と良く一致している。

(b) ガス温度（図4.4-5, 4.4-6）

燃焼領域内（図4.4-5）と領域外（図4.4-6）に分けて図示した。燃焼領域内の測定値は装置の中心部に設置された熱電対によるものであり約1000℃に達しているが、特にナトリウム接触防止や輻射防止の工夫を行っていないので、これらの測定値はナトリウムあるいは火炎の温度を測定している可能性が高いと考えられる。

燃焼領域外のガス温度については、燃焼領域内と同様に計算結果よりも測定値が高めの温度で推移している。ガス圧力の計算結果は測定値に良く一致していることを考えると、ガス温度については計算結果が過小評価になっていると言うよりもむしろガス温度測定用熱電対が液滴火炎からの輻射の影響を受けているものと思われる。

(c) 壁温度 (図4.4-7)

装置の側壁面に関する測定値と計算値の比較を図4.4-7に示す。計算結果には、測定値に見られる初期のピーキング挙動が現れていない。測定データのカーブは（絶対値は小さいが）ガス温度と相似形状の時間推移を示している。しかしながら、壁構造温度がこのようにガス温度に追従するとは考えにくいこと、測定に用いた熱電対は壁の内面に点溶接されたものであることを考えると、これらの測定データは壁の温度というよりむしろガスの温度に強く影響されているものと推定される。

(d) 燃焼抑制板温度 (図4.4-8)

装置の燃焼抑制板に関する測定データと計算値の比較を図4.4-8に示す。計算結果は測定データを下回っているが、その原因としては、計算では燃焼抑制板全体の平均温度を表しているが、測定値は漏えい部直下の中心部のみであり落下ナトリウムの影響を受けていると考えられることが挙げられる。

(e) 酸素濃度 (図4.4-9)

測定データと計算結果の比較を図4.4-9に示す。磁気式の測定は装置の外部に配管を引き出して行っているため、配管内の残留ガスの影響や輸送遅れがあると考えられる。このため、測定データの短時間の時間変化は信頼性が低いと考えられる（図に示したカーブは輸送遅れ補正を行ったものであるが、それでも初期の数分については補正が十分ではないと考えられる）。

酸素濃度の減少速度（カーブの傾き）については測定データと計算結果は良く一致している。このことから、ナトリウムの燃焼速度についての計算は適切であると判断できる。

(f) ナトリウム反応速度 (図4.4-10, 4.4-11)

ナトリウム反応速度の計算結果をスプレー液滴 (図4.4-10) とプール (図4.4-11) に分けて図示する。液滴反応がプールの反応よりも多いことから、ガス圧力や温度の上昇は主にスプレー燃焼に支配されていると言える。

計算結果と測定値の比較について以下のようにまとめられる。

- ① ガス圧力と酸素濃度の計算結果は測定値に一致していることから、スプレー燃焼とそれに伴う熱移行挙動は適切に計算されていると考えられる。
- ② 温度に関しては、計算結果が測定データよりも低い傾向にあったが、ガス温度と壁温度については測定データに火炎や輻射の影響が現れている可能性がある。

ここで、TASP 試験と Run E1 試験では O₂ 拡散速度補正係数の使用値が異なることについて付記する。

TASP試験の解析では燃焼速度を小さくするような補正を行わないと燃焼を過大評価する傾向にあり、Run E1 試験の解析では燃焼の補正なしで測定値に一致する結果が得られている。両試験のナトリウム漏えい速度とスプレー領域体積はほぼ同等であり、装置の大きさ、漏えい継続時間、液滴の大きさが違いの主な点であることから考えると、上記パラメータ（O₂ 拡散速度補正係数）の違いはスプレー領域内の液滴存在密度の違いと関連していることが考えられる。すなわち、液滴径の違いによってスプレー領域内の液滴個数密度に10倍程度の違いが現れ、密度の高いTASP試験では液滴燃焼を抑制するような効果が現れたという推測である。しかしながら、Run E1試験での使用パラメータはTASP試験に対して過大な燃焼速度を与えることから、保守性の観点ではRun E1のパラメータ（O₂ 拡散速度補正係数=∞）を用いれば良いと言える。

表4.4-1 Run-E1 試験装置の概要

試験容器形状	円筒形
試験容器内径 m	3.6
試験容器高さ m	10.8
試験容器容積 m ³	111
試験容器壁 (含、天井) 面積 m ²	110
試験容器肉厚 mm	25
燃焼抑制板面積 m ²	10
燃焼抑制板肉厚 mm	4.5
スプレインズル高さ m	3.98 (燃焼抑制板からの高さ)

表4.4-2 Run-E1 試験条件

ナトリウム漏えい速度 g/s	510
ナトリウム漏えい量 kg	920
ナトリウム漏えい時間 min	30
ナトリウム温度 °C	505
液滴初速度 m/s	10.3
初期酸素濃度 %	21
初期雰囲気ガス圧力 kPa	101
初期雰囲気ガス温度 °C	30

表4.4-3 Run-E1試験の解析条件

	項目	条件	
ナトリウム漏えい・燃焼条件	漏えい流量	510 g/s	
	漏えい時間	30 分	
	漏えいナトリウム量	920 kg	
	漏えいナトリウム温度	505 °C	
	スプレイコーン形状	円錐台形 上部直径：8.7 mm 拡がり角度：36° 注1) 高さ：3.98 m	
	液滴の初期落下速度	10.3 m/s	
	スプレイ液滴径	2.2 mm (質量平均) 注1)	
	プール面積	10 m ²	
	雰囲気条件	セル容積	91.5 m ³
セル内初期酸素濃度		21 %	
セル内初期ガス温度、湿度		30 °C、R.H. 80 % (2 wt.%) 注2)	
換気流量		換気なし (密閉)	
構造物条件	容器形状	円筒形	
	容器直径 (内径)	3.6 m	
	容器高さ	8.8 m	
	容器肉厚	25 mm	
	燃焼抑制板面積	10 m ²	
	容器内壁 (含、天井) 面積	110 m ²	
輻射伝熱条件	壁からガスの輻射伝熱係数	0.73	
	プールからガスの輻射伝熱係数	0.65	
化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応及び生成割合 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$ $2\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$ $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 \% : 40 \%$ (酸素濃度10%以上) $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 100 \% : 0 \%$ (酸素濃度10%未満)	
	ナトリウムと水蒸気の反応 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$	
	エアロゾル状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 反応速度係数： 1.0×10^{-10} mol-H ₂ O/個/s	
	プール状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 水蒸気の拡散により反応	
	水素と酸素の再結合割合	生成水素の90%が再結合	
	エアロゾル条件	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
		エアロゾル落下高さ	4.423 m
エアロゾル密度		2130 kg/m ³	
エアロゾル粒径		1.0×10^{-5} m	
備考	注1) 使用したスプレイノズルの水実験に基づく 注2) 湿度は正確な記録がなく、推定値		

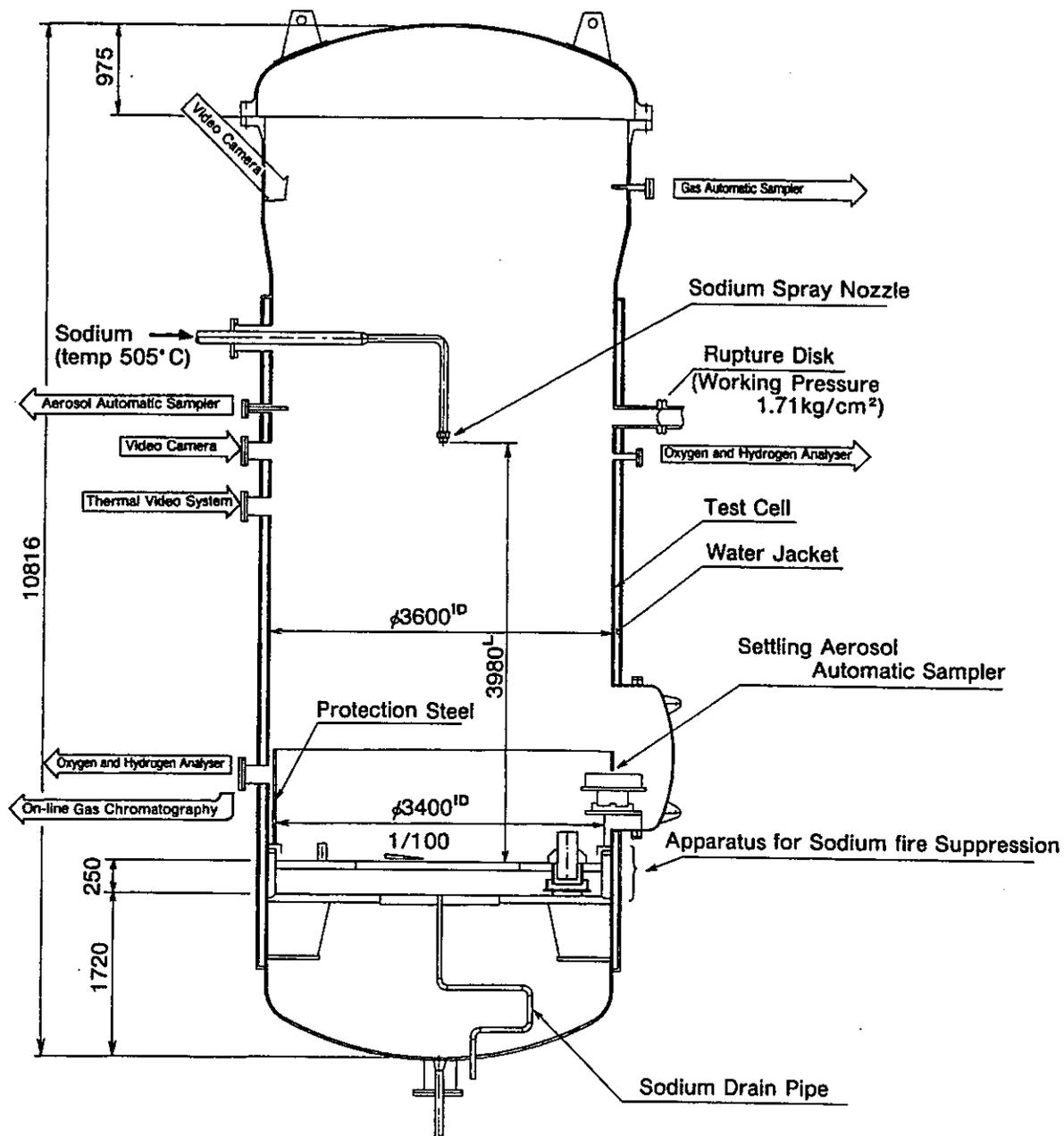


図4.4-1 Run E1 試験装置 (SOLFA-2 装置)

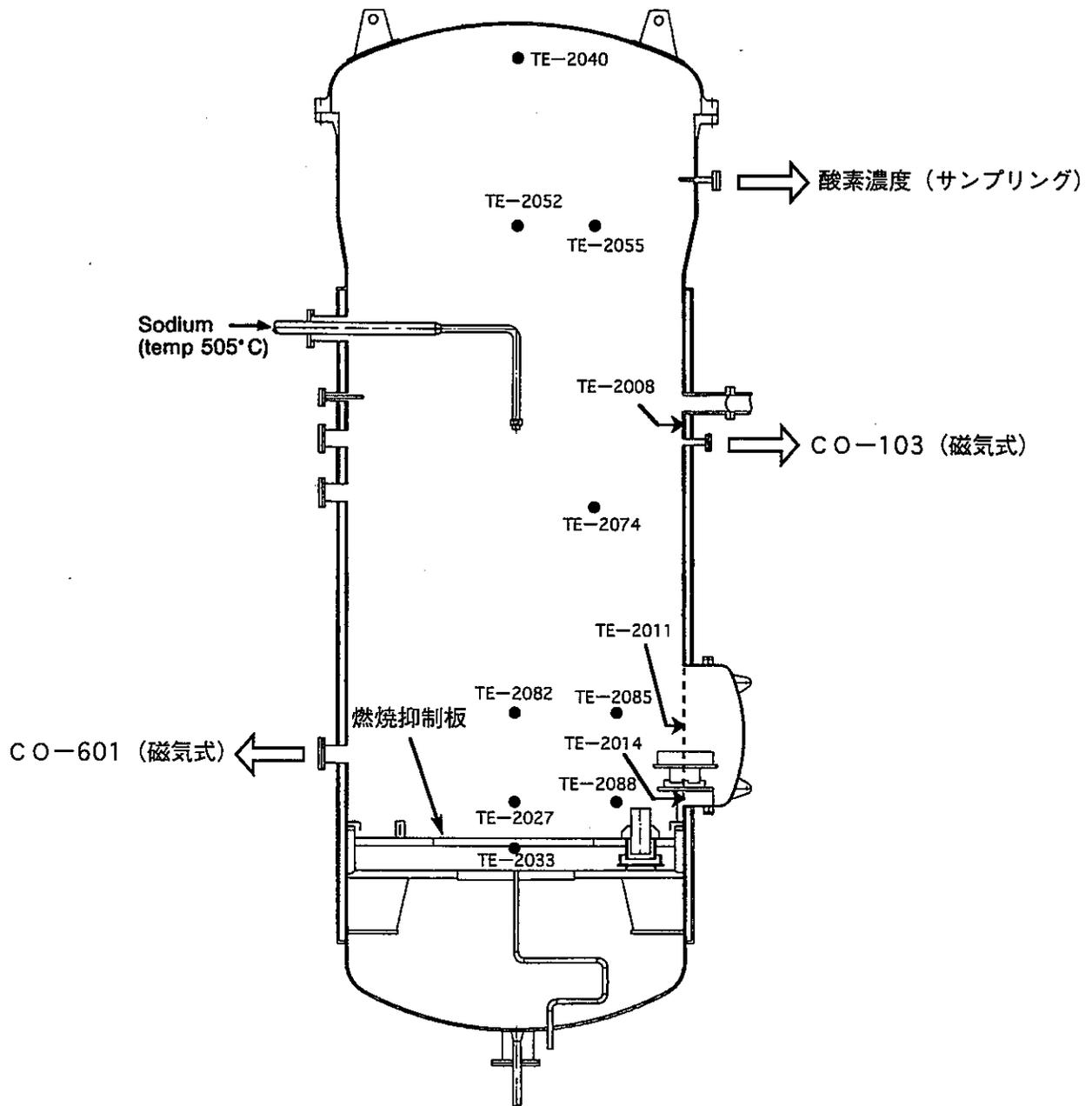


図4.4-2 Run E1 試験における温度等計測位置

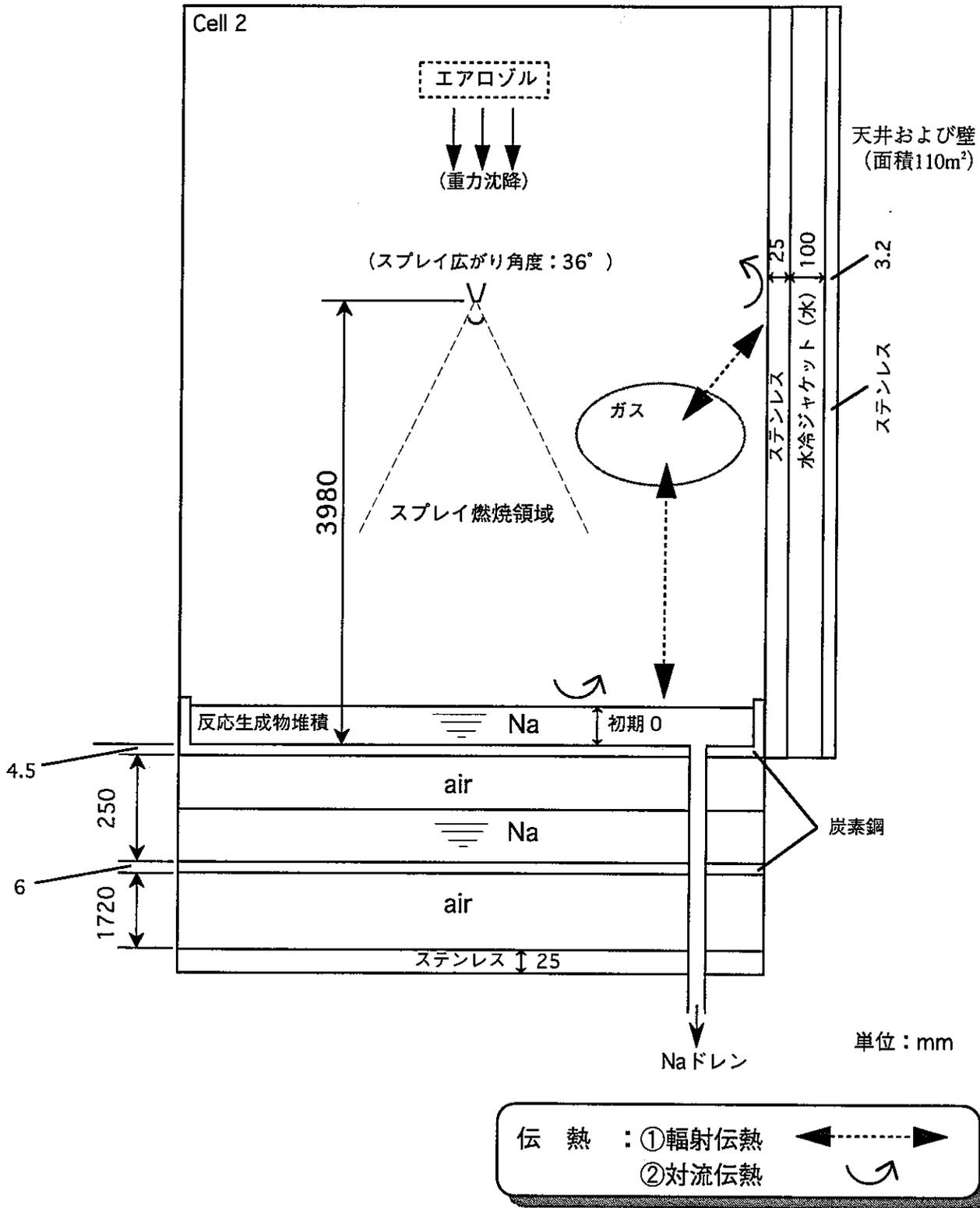


図4.4-3 Run E1 解析モデル

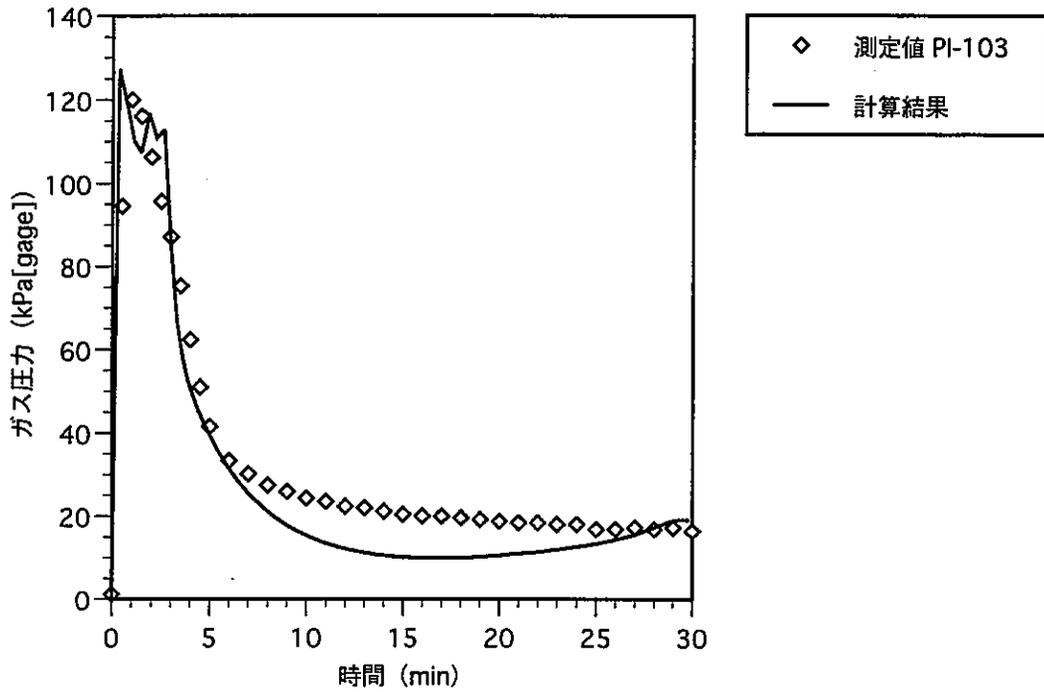
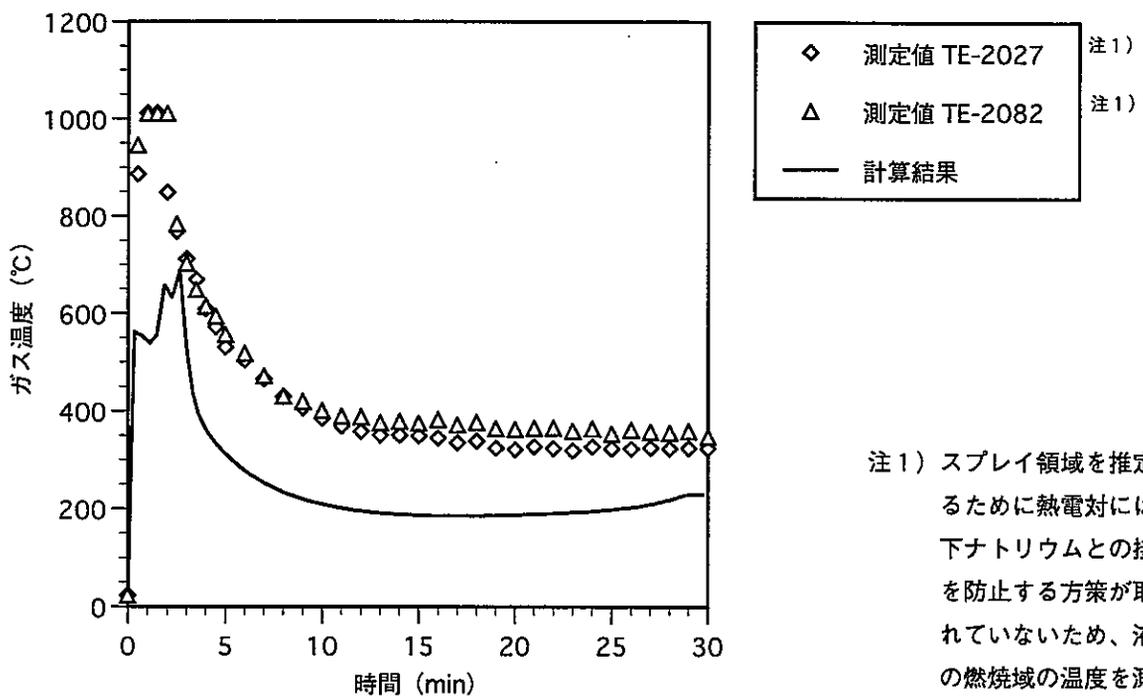


図4.4-4 ガス圧力の比較 (Run-E1)



注1) スpray領域を推定するために熱電対には落下ナトリウムとの接触を防止する方策が取られていないため、液滴の燃焼域の温度を測定している可能性が高い

図4.4-5 Spray燃焼領域内ガス温度の比較 (Run-E1)

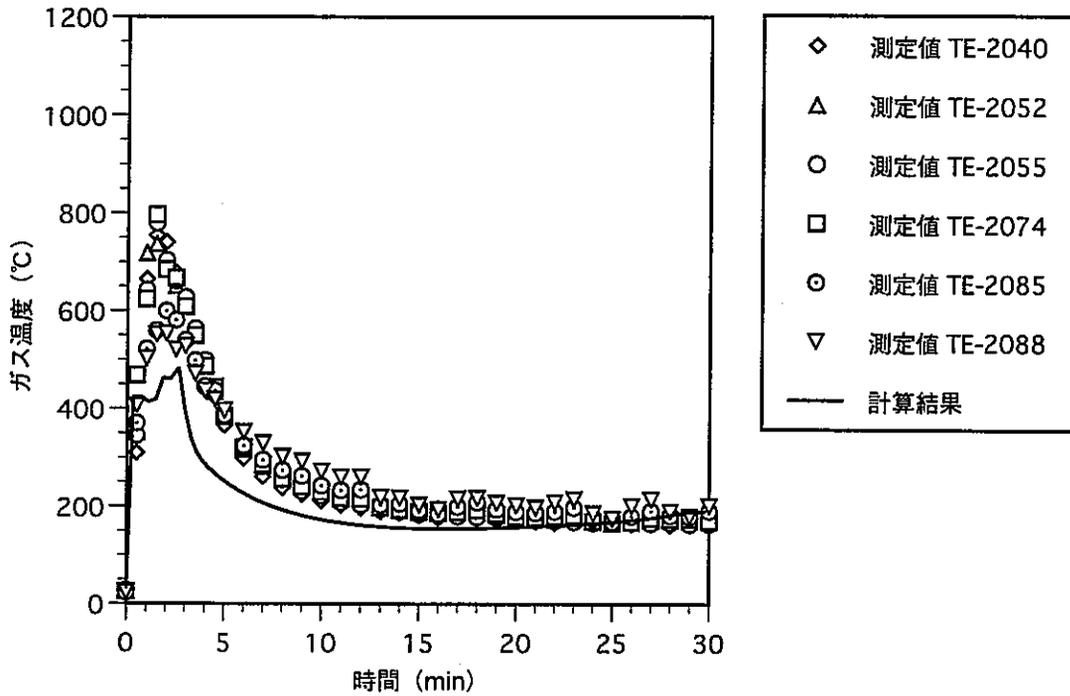
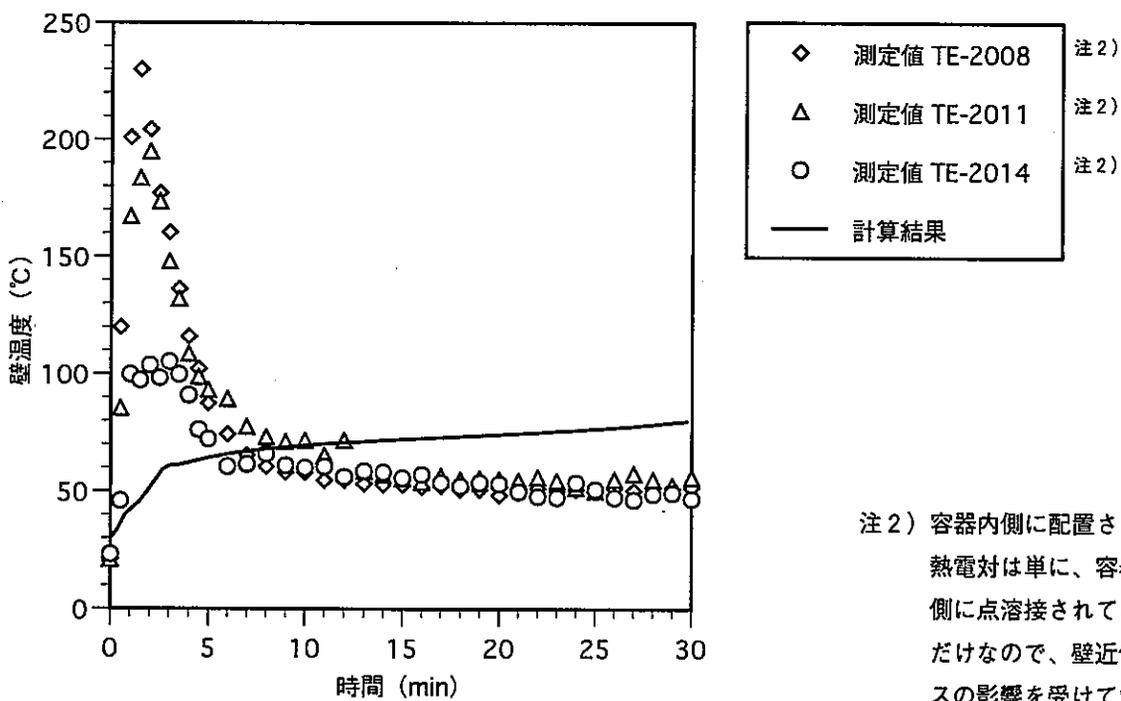
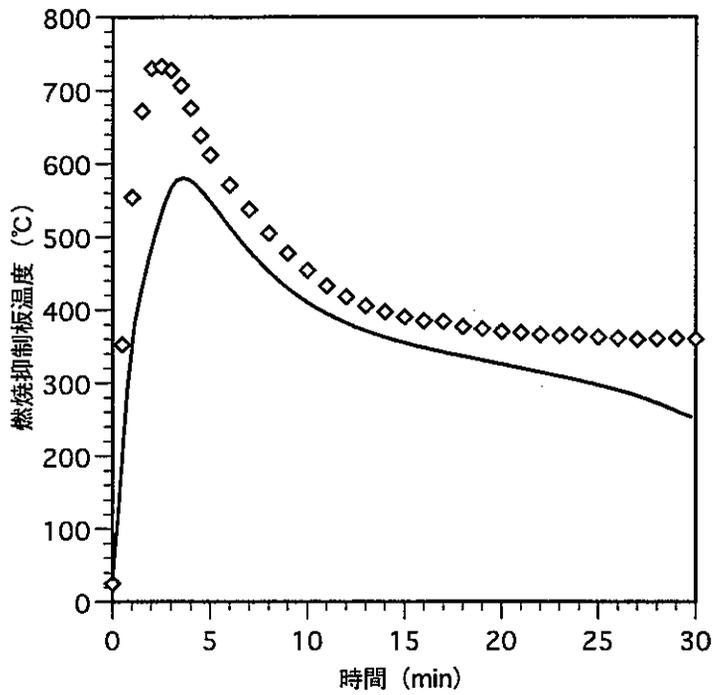


図4.4-6 スpray燃焼領域外ガス温度の比較 (Run-E1)



注2) 容器内側に配置された熱電対は単に、容器内側に点溶接されているだけなので、壁近傍ガスの影響を受けている可能性が高い

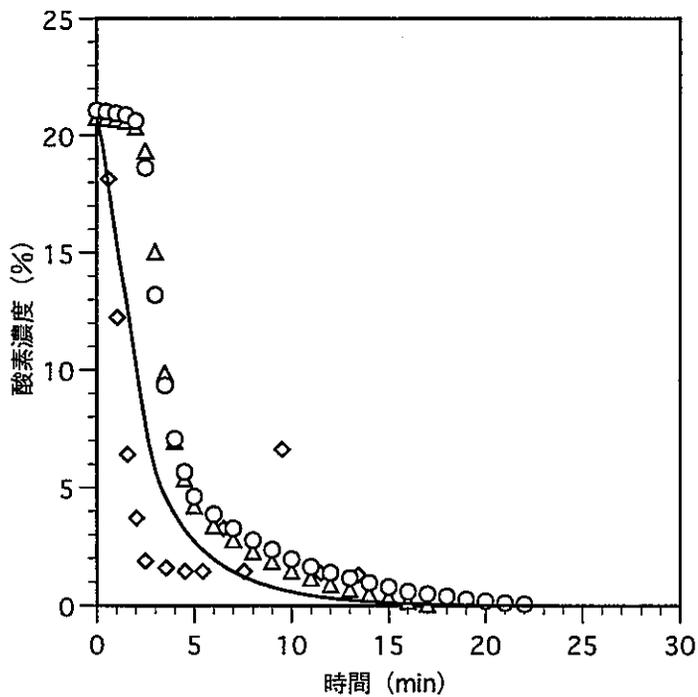
図4.4-7 壁温度の比較 (Run-E1)



◇ 測定値 TE-2033 注3)
 — 計算結果

注3) 燃焼抑制板の温度測定位置は中央部一点のみである

図4.4-8 燃焼抑制板温度の比較 (Run-E1)



◇ 測定値 注4)
 △ 測定値 CO-103 注5)
 ○ 測定値 CO-601 注5)
 — 計算結果

注4) サンプルング方式
 注5) 磁気式酸素濃度計
 (試験容器から測定器までガスラインで接続する必要があり、そのため測定時間遅れが存在する。図はすでに時間遅れ補正後の値であるが完全に補正仕切れていない)

図4.4-9 酸素濃度の比較 (Run-E1)

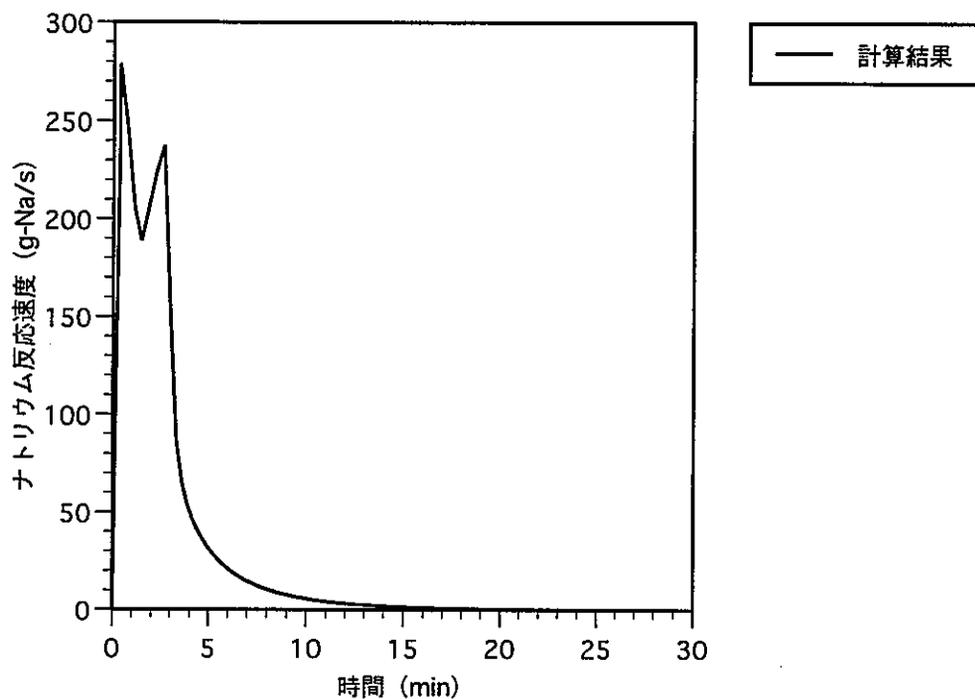


図4.4-10 ナトリウムスプレイ反応速度の計算結果 (Run-E1)

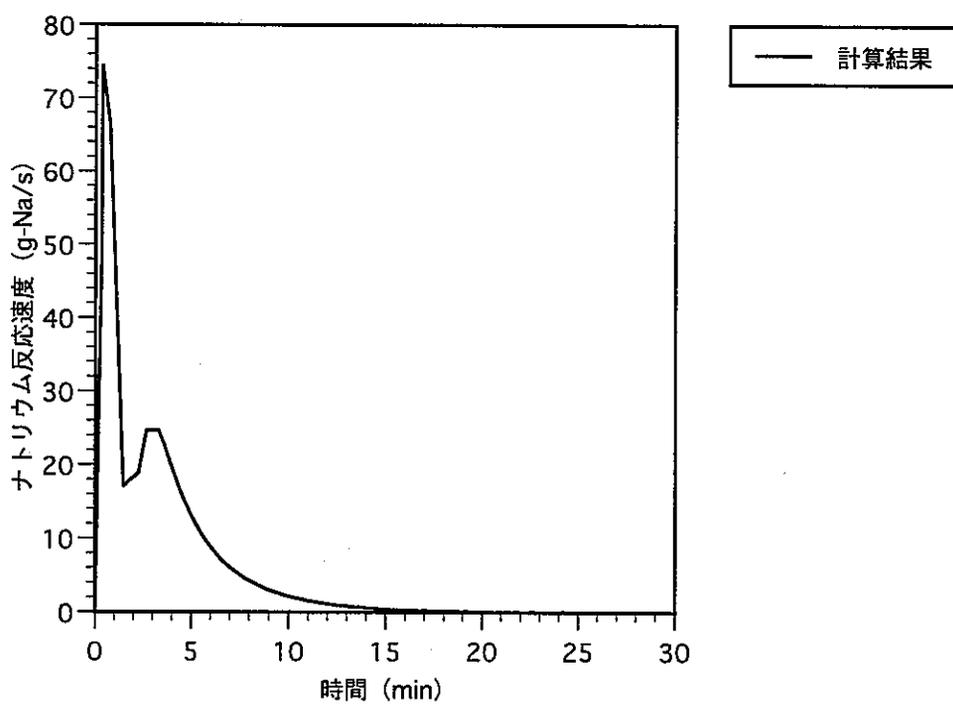


図4.4-11 ナトリウムプール反応速度の計算結果 (Run-E1)

4. 5 ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅰの解析⁽⁴⁾

(1) 実験概要

ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅰ (Run E6) ^{(19),(20)}は、SAPFIRE施設の鋼製円筒型試験容器 (SOLFA-2) を使用した実験である。「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一環として、内容積100m³の試験容器内を換気し、「もんじゅ」の温度検出器と周囲の保温構造を部分的に模擬した漏えい部試験体から、480℃のナトリウムを約1.5時間にわたって漏えいさせ、実機と同じ寸法・配置の換気空調ダクトとグレーチング上に落下させた。ナトリウム漏えい速度は約44g/s一定であった。実験装置と実験条件の概要を表4.5-1、表4.5-2、図4.5-1に示す。

(2) 解析モデルと解析条件

解析モデルを図4.5-2に、解析条件を表4.5-3、図4.5-3に示す。実験装置サイズや実験条件に関するものは試験と合致するよう設定し、物理・化学的な挙動を計算するための解析パラメータについては本報告書全体で統一させたものを使用した。また、小規模漏えいの解析に特有の条件であるプール拡がり面積については、受け皿上のプールは受け皿裏面温度の測定値をもとに拡がり面積を設定し、グレーチングと換気ダクト上のプール (解析上はひとつのプールとして設定) はそれぞれの堆積物配分をもとに決めた。

(3) 解析結果

計算結果と実験結果の比較を図4.5-4から図4.5-13に示す。

(a) ガス温度 (図4.5-4)

ガス温度の時間推移の定性的傾向とその絶対値は全般的に実験結果に近いものが計算されている。70分頃に温度上昇が急になっているのは換気流量が低下しその後停止したためであるが、この時の温度上昇については計算が実験よりも小さい。これは後述する酸素濃度履歴からわかるように、この時間域でのナトリウム燃焼速度の計算値が実験よりも小さくなっているためと考えられる。

(b) 受け皿温度 (図4.5-5)

受け皿温度の時間推移の定性的傾向は全般的に実験結果と一致している。高温で維持される時間帯 (10～80分頃) の受け皿温度は、実験では約750℃以下

で推移しているのに対して解析結果は約800℃であり、解析の方が高めとなっている。この原因としては、実験では受け皿上に反応生成物が堆積して雰囲気との接触面積が増大した（堆積物の雰囲気側への除熱面積が増大した）可能性、プール燃焼時の Na_2O_2 の生成割合が解析条件よりも高かった（単位酸素あたりの発熱量が小さかった）可能性が考えられる。

(c) グレーチング温度（図4.5-6）

グレーチング温度履歴は、実験では変動が激しいのに対して、解析結果は滑らかな履歴となっている。解析ではグレーチングを受け皿と同様の平板として取り扱っているため、グレーチング温度の解析は受け皿温度のそれと同様の結果である。

(d) 内壁温度（図4.5-7）

内壁温度の解析結果は、分布を持つ実験データの平均値に近い値となっており、挙動を良く表現できていると考えられる。実験で1点だけ約250℃まで上昇している測定値は、ナトリウム燃焼部に近い装置下部グレーチング近傍のものである。

(e) 酸素濃度（図4.5-8）

酸素濃度については、約70分頃の換気停止まで、実験結果と良く一致しており、この時点までのナトリウム燃焼を良く表現できていると言える。約80分以降の酸素濃度の低下傾向は計算結果が実験結果よりも緩やかになっており、この時間帯のナトリウム燃焼の計算が実験よりも小さくなっていることを示している。この原因としては、実験では受け皿上の堆積物の表面が次第に平坦でなくなったこと（ナトリウムの反応面積が次第に増加したこと）が考えられる。

(f) ナトリウム反応量（図4.5-9）

ナトリウム反応量については実験測定値がないため解析結果のみを図4.5-9に示す。解析対象とした120分間で、落下過程（スプレイ）での反応量は約50kg、ダクトおよびグレーチング上での反応量は約50kg、受け皿上での反応量は約120kgであり、スプレイで約1/4、ダクトおよびグレーチング上で約1/4、受け皿上で約1/2が燃焼したことになる。120分時点において、漏えいしたナトリウム約240kgのうち約220kgが反応したことになり、残りのナトリウムは120分以降に反応することになる。

(g) エアロゾル濃度 (図4.5-10)

エアロゾル濃度の解析結果と実験結果の比較を図4.5-10に示す。換気一時停止までは実験結果に近い値で推移しているが、その後は解析結果が急上昇して実験の2倍以上の値を示している。この時点でのナトリウム燃焼速度は(e)で述べたように小さめに計算されていると考えられるので、エアロゾル発生速度も実験よりも小さいと考えられる。したがって、エアロゾル濃度が高く計算されているのは、近似的に設定した換気量の解析条件が約80分以降について実験よりも小さく、エアロゾルがセル外へ排出されないためであろうと考えられる。

(h) 水蒸気濃度 (図4.5-11)

水蒸気濃度の履歴は約70分の換気一時停止までは比較的良く表現されている。しかし、その後は実験での水蒸気濃度が約1000ppmで推移するのに対し、解析ではほぼゼロになっている。これは上記(g)で述べたように、解析条件として設定した換気流量が低めであることから、外気からの給気流量が小さくなっていることと、上記エアロゾル濃度が高いためにエアロゾルと反応する水蒸気量が多くなったことが原因と考えられる。

(i) 水素濃度 (図4.5-12)

水素濃度の解析結果と実験結果を図4.5-12に示す。本実験は鋼製容器内に空気を供給しながら行ったものであるため、供給空気中に含まれる湿分が漏えいナトリウムと反応することによって水素が生成される。実験では散発的にわずかな水素が検出されているが、解析では換気系の停止する約70分頃まで湿分とナトリウムの反応が持続的に生じて水素濃度はほぼ一定の値で推移している。

(j) プール内ナトリウム化合物量 (図4.5-13)

受け皿内の堆積物を構成するナトリウム化合物について時間推移(解析結果)を図4.5-13に示す。漏えいしたナトリウムの多くが酸素と反応するため、ナトリウム酸化物(Na_2O と Na_2O_2)が主要構成物である。

計算結果と測定値の比較について以下のようにまとめられる。

- ① セル内の各部温度(雰囲気温度、受け皿温度、内壁温度)、酸素濃度、水蒸気濃度、エアロゾル濃度について、ほぼ実験結果に一致する結果が得られており、本実験におけるナトリウム燃焼挙動を模擬した計算ができていると考えられる。
- ② 受け皿温度については解析結果が高めとなったが、この原因としては実験で受け皿上に反応生成物が堆積して雰囲気との接触面積が増大した(堆積物の雰囲気側への除熱面積が増大した)可能性、プール燃焼時の Na_2O_2 の生成割合が解

析条件よりも高かった（単位酸素あたりの発熱量が小さかった）可能性が考えられる。

- ③セル内の換気を停止した約70分以降については、解析結果の方が酸素濃度の低下が緩やかであるとともに、雰囲気温度の上昇度合いが低め、エアロゾル濃度が高め、水蒸気濃度が低めであった。このような傾向となったのは、実験で換気系を一時停止した時刻以降について換気流量の解析条件が低めに設定されていたことが原因と考えられる。

表4.5-1 ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅰの実験装置の概要

試験容器形状	円筒形
試験容器内径 m	3.6
試験容器高さ m	10.8
試験容器容積 m ³	約100
試験容器壁（含、天井）面積 m ²	108
試験容器肉厚 mm	25
受け皿面積 m ²	6.6
受け皿肉厚 mm	6
模擬漏えい部高さ m	3.59（受け皿からの高さ）
換気空調ダクト高さ	2.44（受け皿からの高さ）
グレーチング高さ	1.34（受け皿からの高さ）

表4.5-2 ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅰの実験条件

ナトリウム漏えい速度 g/s	約50～約40
ナトリウム漏えい量 kg	241
ナトリウム漏えい時間 min	91
ナトリウム温度 °C	482～479
換気流量 m ³ /min	0～35
初期酸素濃度 %	21
初期雰囲気ガス圧力 kPa	101
初期雰囲気ガス温度 °C	20

表4.5-3 ナトリウム漏えい燃焼実験-Iの解析条件

	項目	条件
ナトリウム漏えい・燃焼条件	漏えい流量	44 g/s (2~93分)
	漏えい時間	91分
	漏えいナトリウム量	240 kg
	漏えいナトリウム温度	480 °C
	スプレイコーン形状	円錐台形 上部直径 : 10 cm 拡がり角度 : 20 ° 高さ : 3.6 m
	スプレイ液滴径	4.6 mm (質量平均)
	未燃焼ナトリウムの配分	床ライナ上 : 75 % グレーチング上 : 4 % 換気ダクト等 : 21 %
	プール面積	床ライナ上 : 3.8 m ² その他構造物上 : 1.6 m ²
雰囲気条件	セル容積	90 m ³ (セル1 : 36 m ³ , セル2 : 54 m ³)
	セル内初期酸素濃度	23.3 wt. %
	セル内初期ガス温度、湿度	20 °C, 0.63 wt. %
	換気流量	約 0~35 m ³ /min (約80分後に一時停止)
構造物条件	天井	面積 : 21 m ² 厚さ : SUS304 18 mm 保温材 25 mm
	側壁	面積 : 87 m ² 厚さ : SUS304 25 mm 空気ギャップ 75 mm SUS304 6 mm 保温材 25 mm
輻射伝熱条件	壁からガスの輻射伝熱係数	0.5
	プールからガスの輻射伝熱係数	0.65
	プールから壁の輻射伝熱係数	考慮せず
化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応及び生成割合 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$ $2\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$ $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60\% : 40\%$
	ナトリウムと水蒸気の反応 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$
	水素と酸素の再結合割合	生成水素の90%が再結合
	エアロゾル状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 反応速度係数 : $1.0 \times 10^{-10} \text{ mol}\cdot\text{H}_2\text{O}/\text{個}\cdot\text{s}$
	プール状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 水蒸気の拡散により反応
	エアロゾル条件	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
	エアロゾル落下高さ	4.4 m
	エアロゾル密度	2130 kg/m ³
	エアロゾル粒径	$1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$

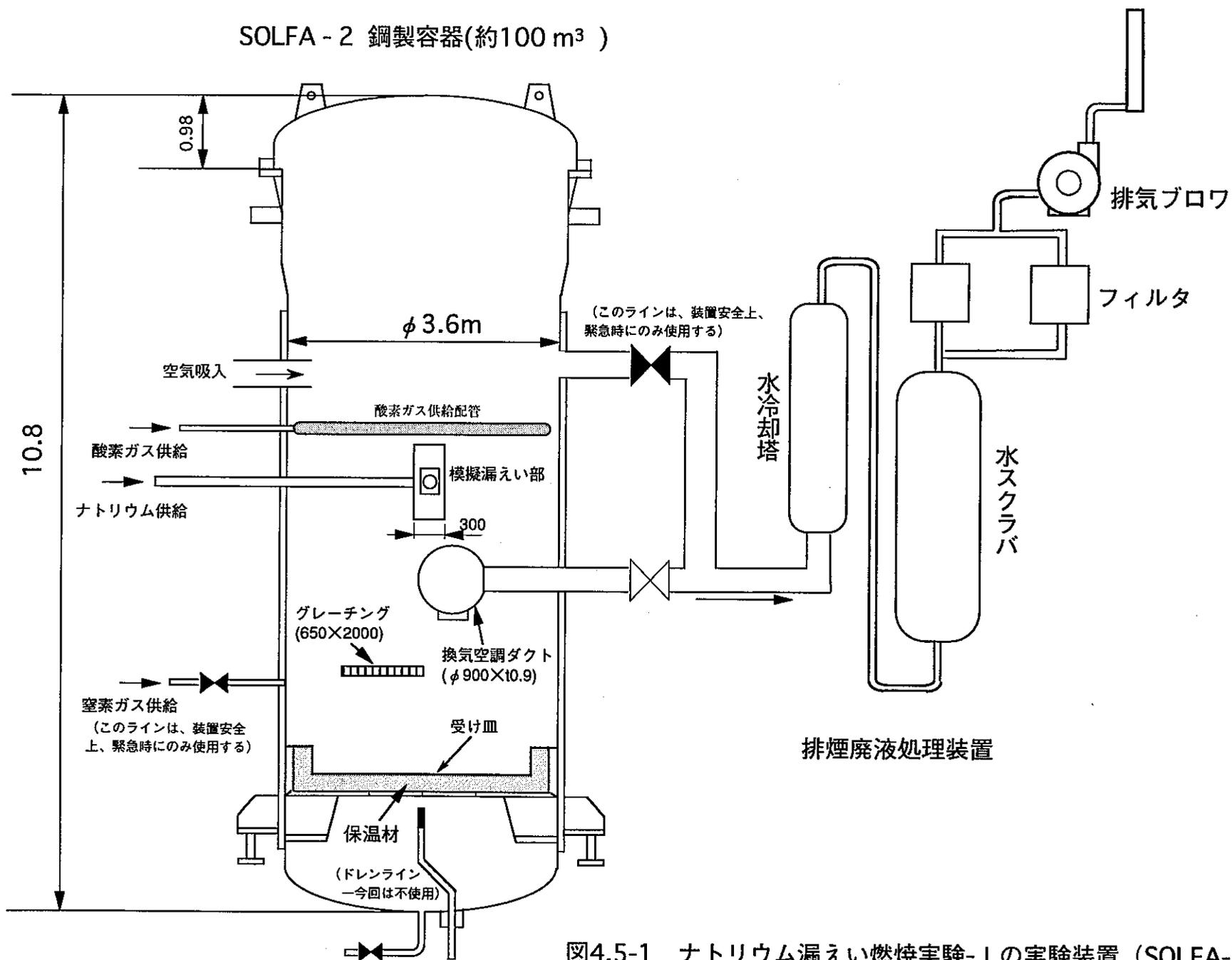


図4.5-1 ナトリウム漏えい燃焼実験-1の実験装置 (SOLFA-2 装置)

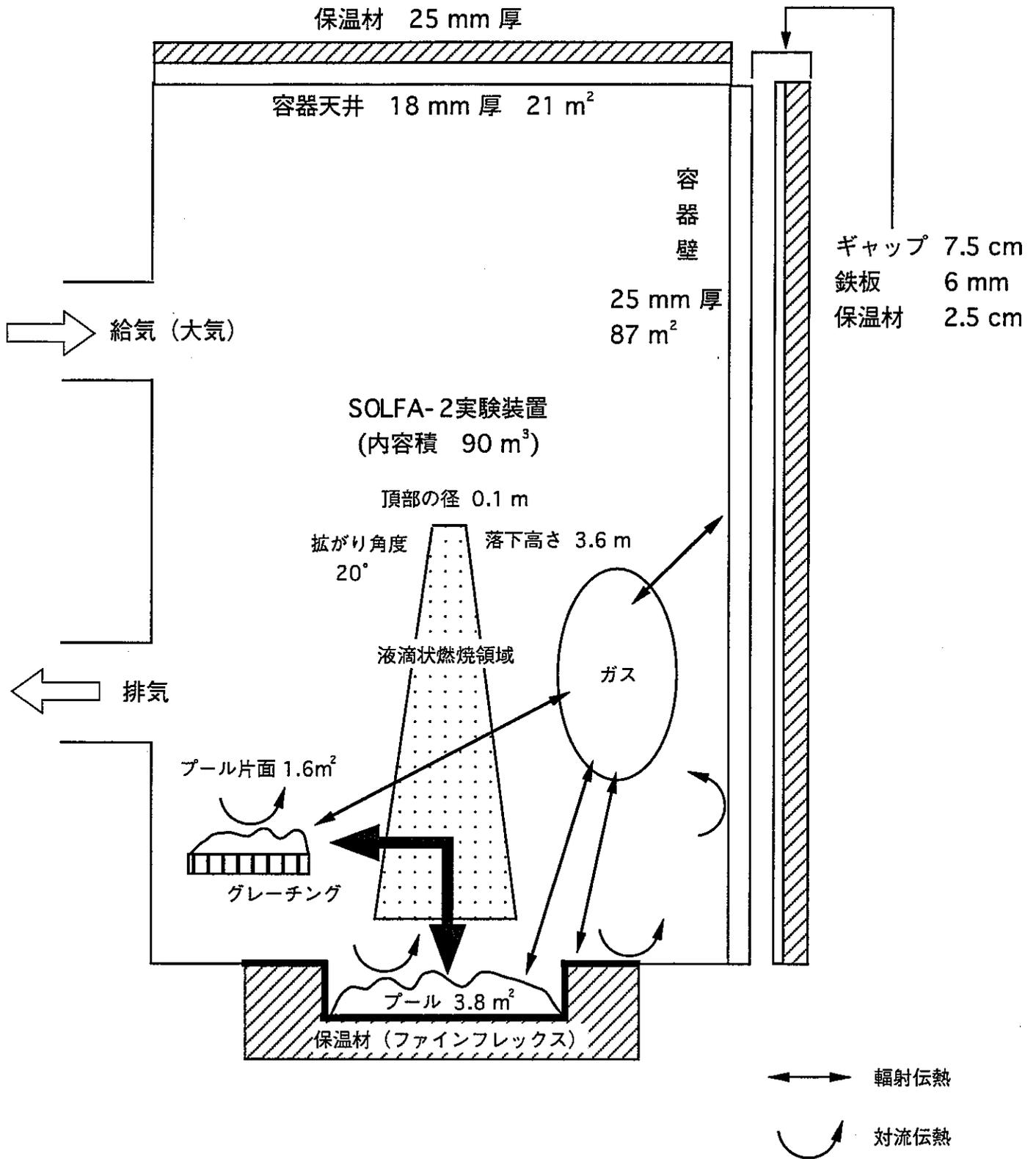


図4.5-2 ナトリウム漏えい燃焼実験- I の解析モデル

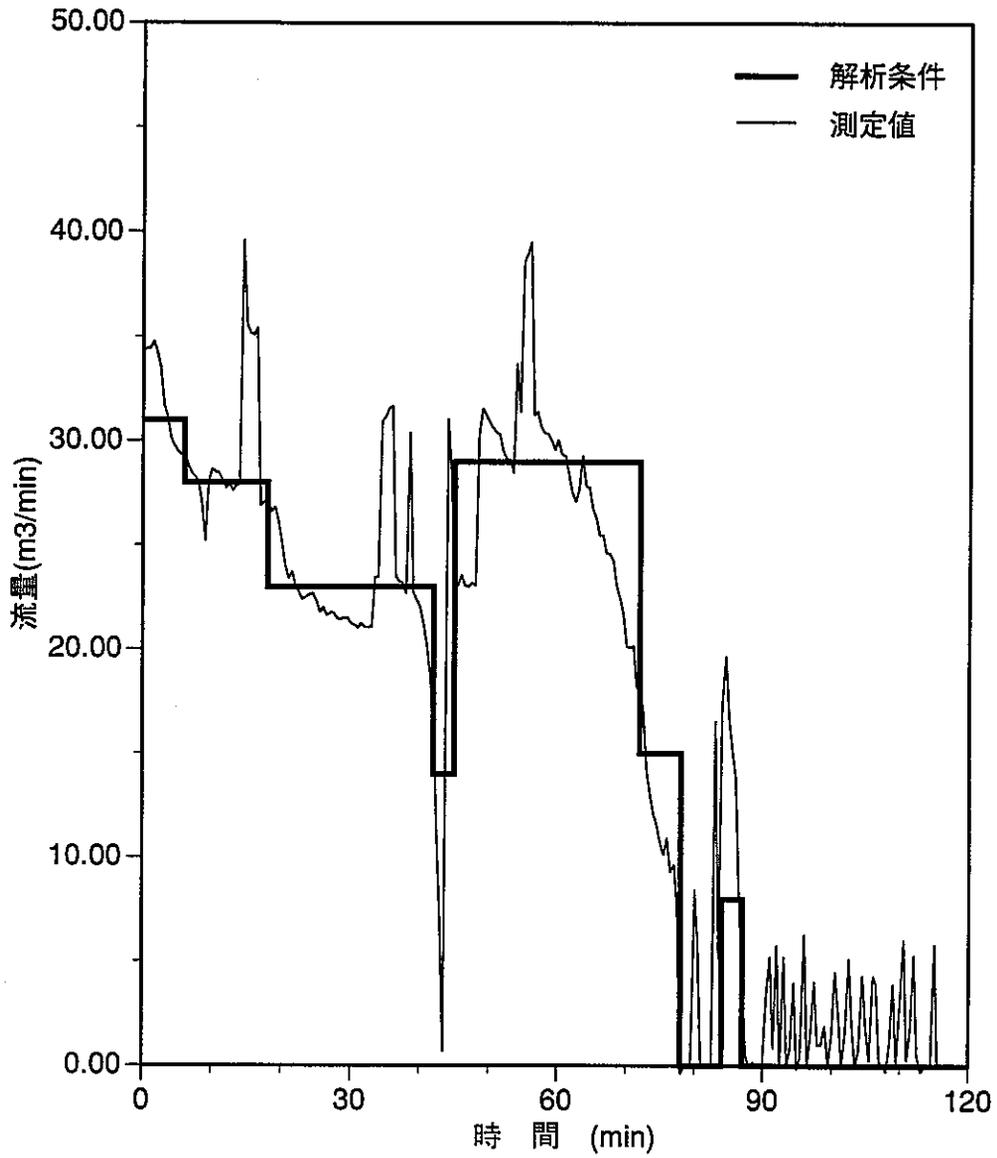


図4.5-3 解析で使した換気条件（燃烧実験-1）

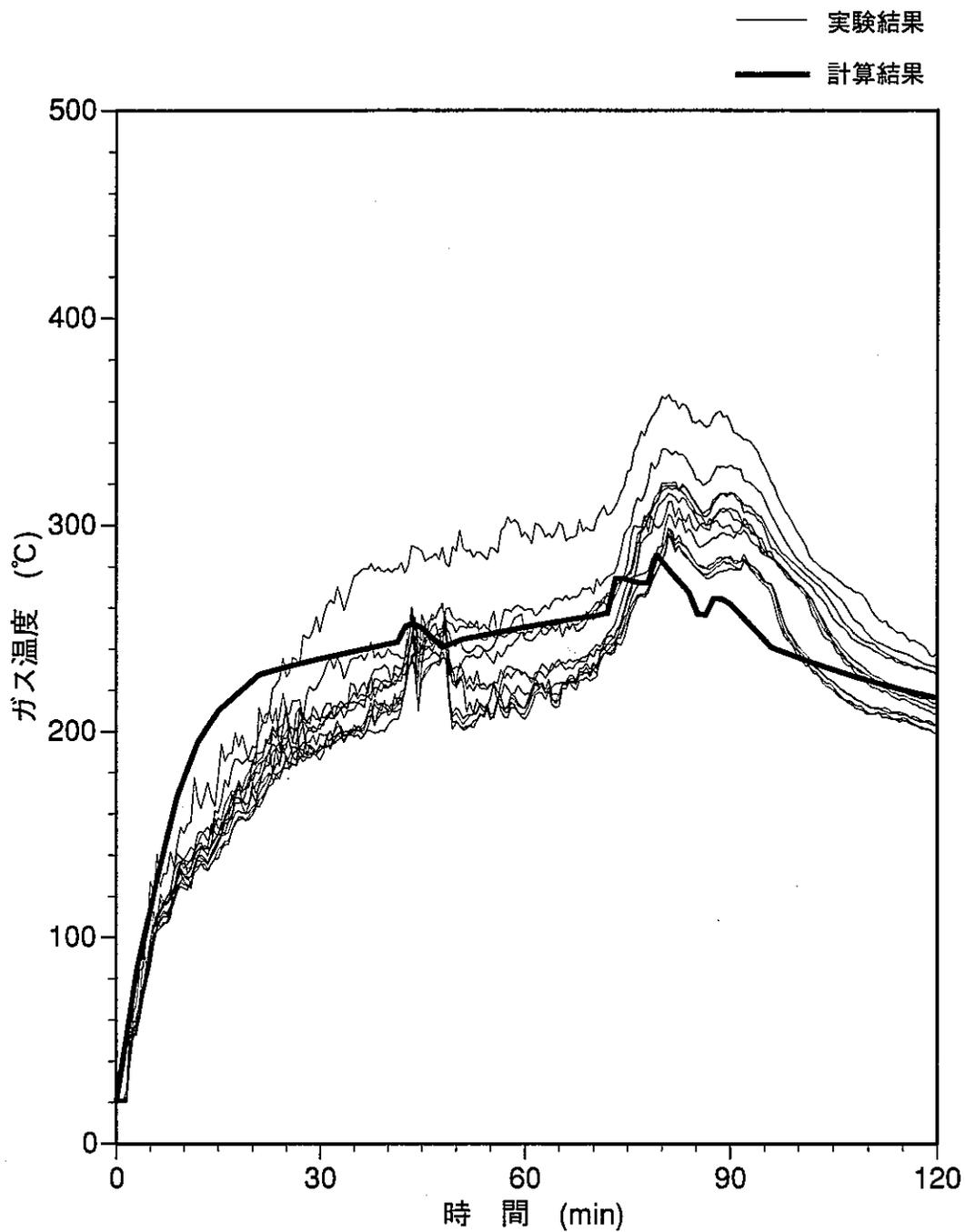


図4.5-4 ガス温度の比較 (燃焼実験-1)

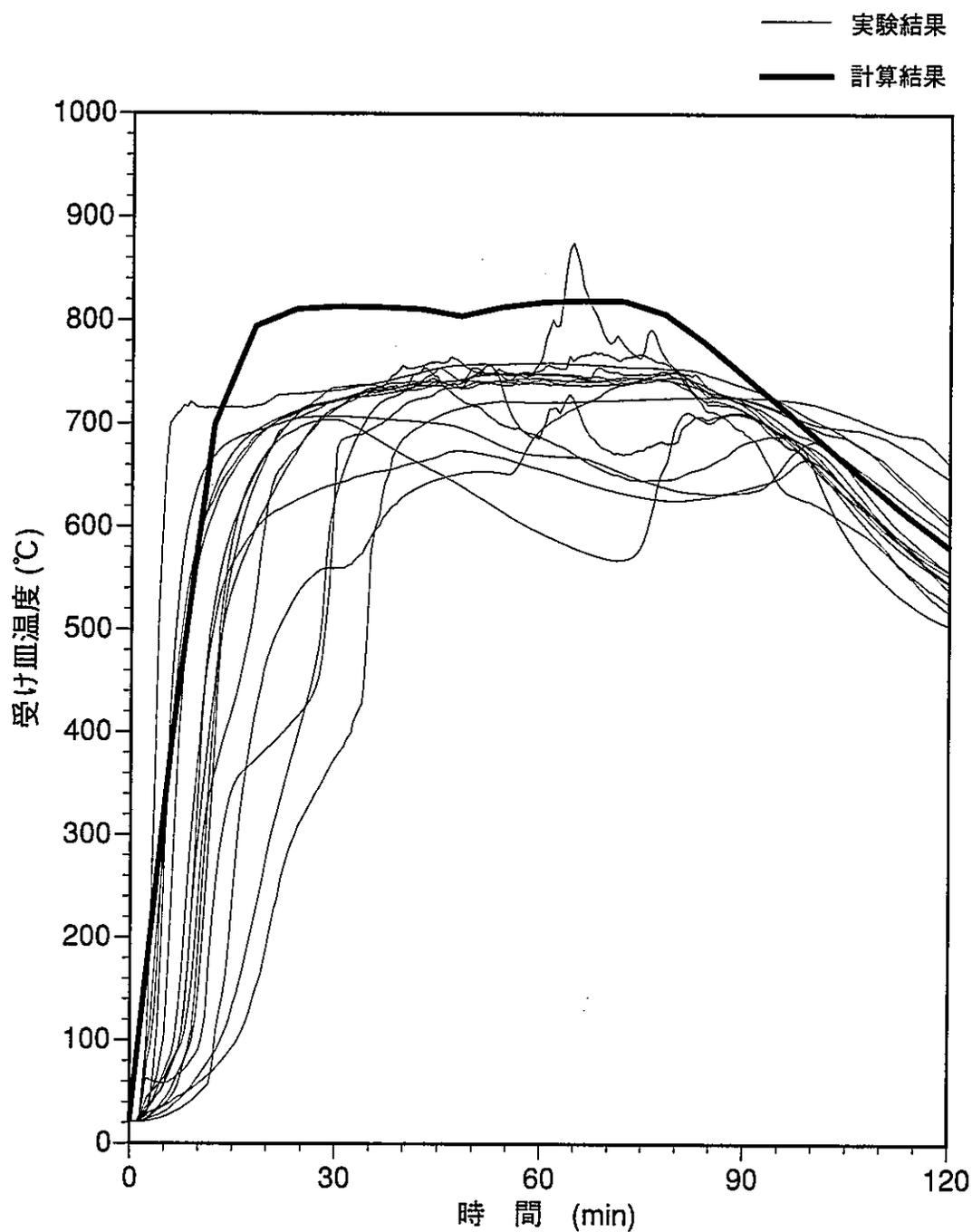


図4.5-5 受け皿温度の比較 (燃焼実験- I)

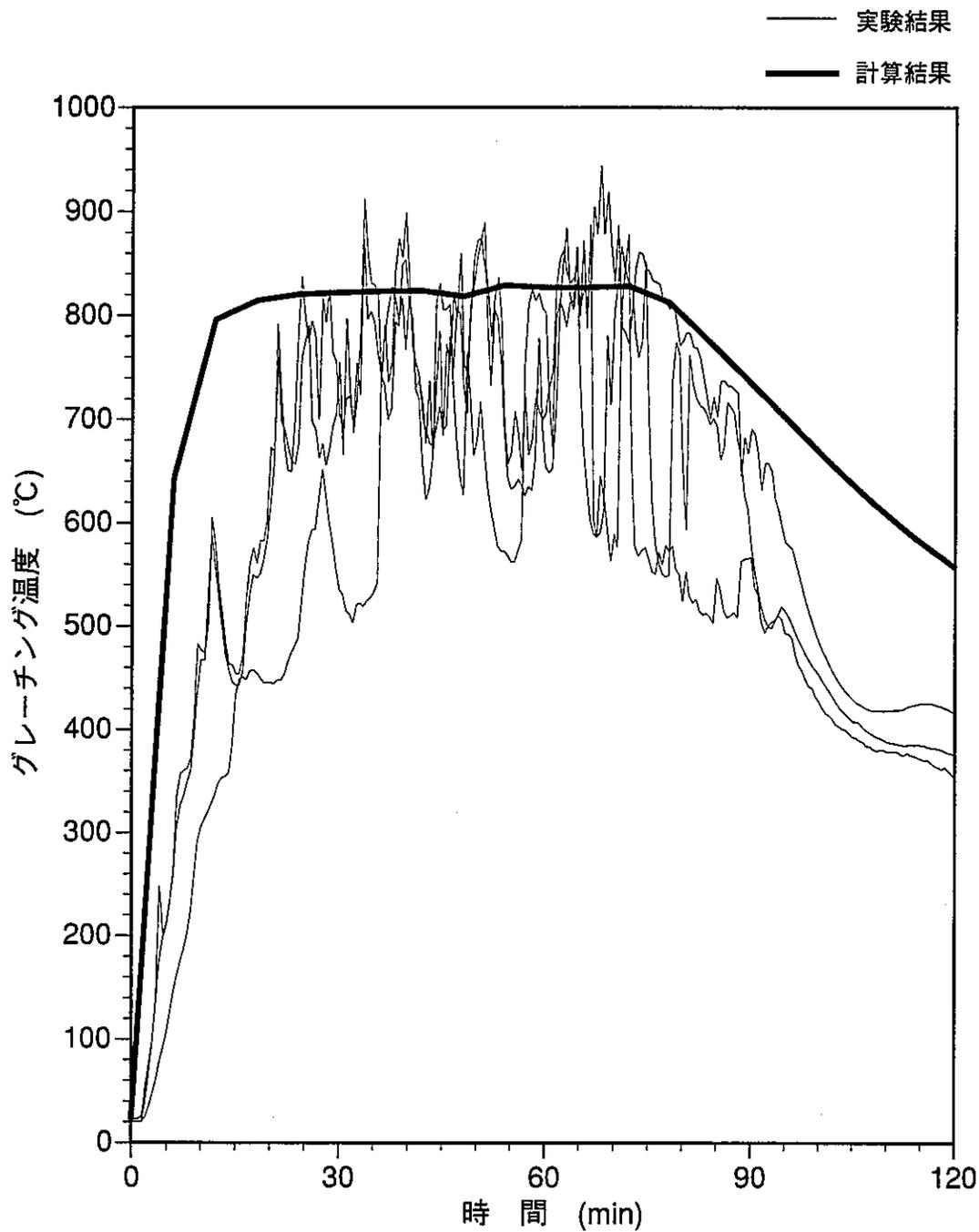


図4.5-6 グレーチング温度の比較 (燃焼実験-I)

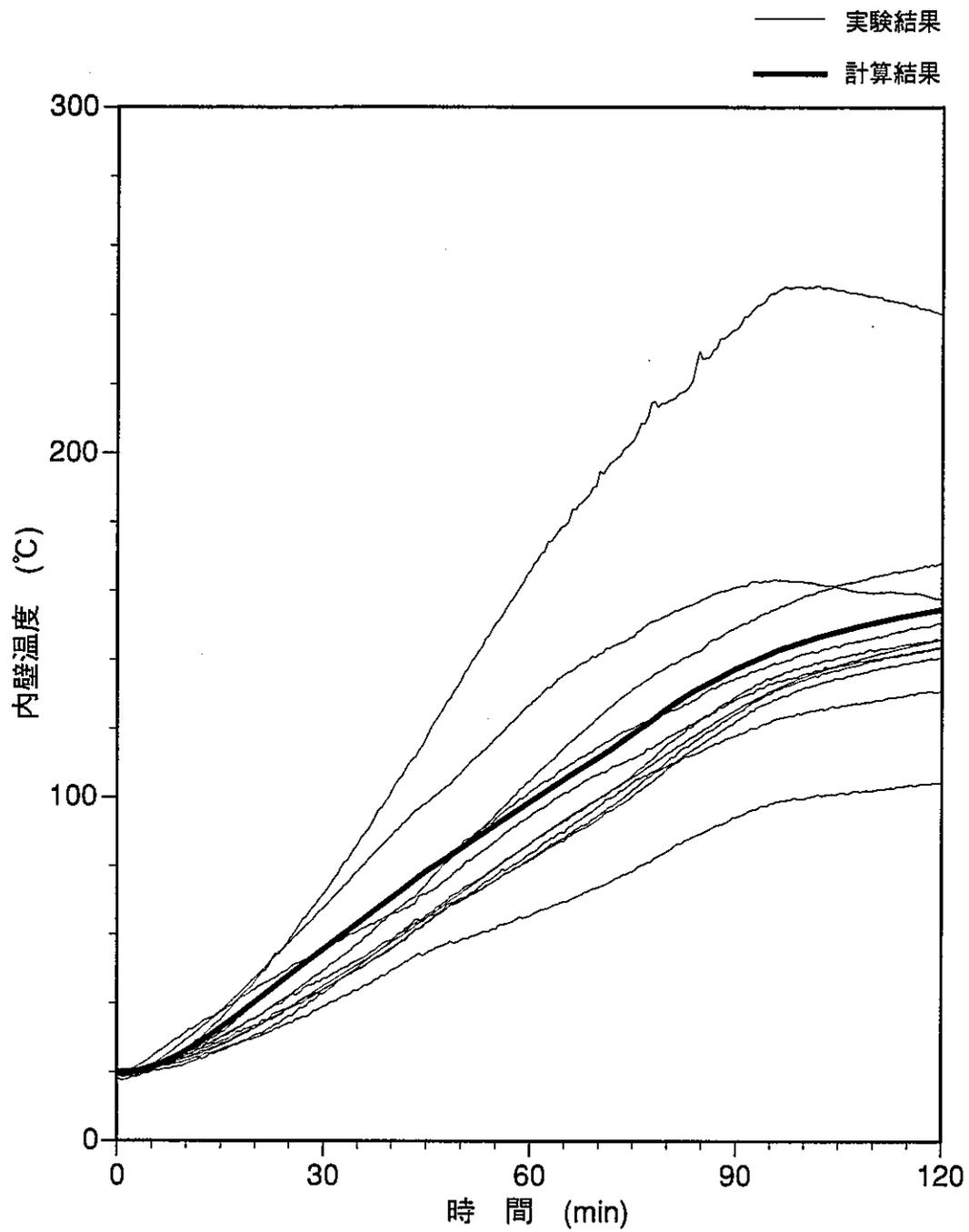


図4.5-7 内壁温度の比較 (燃烧実験- I)

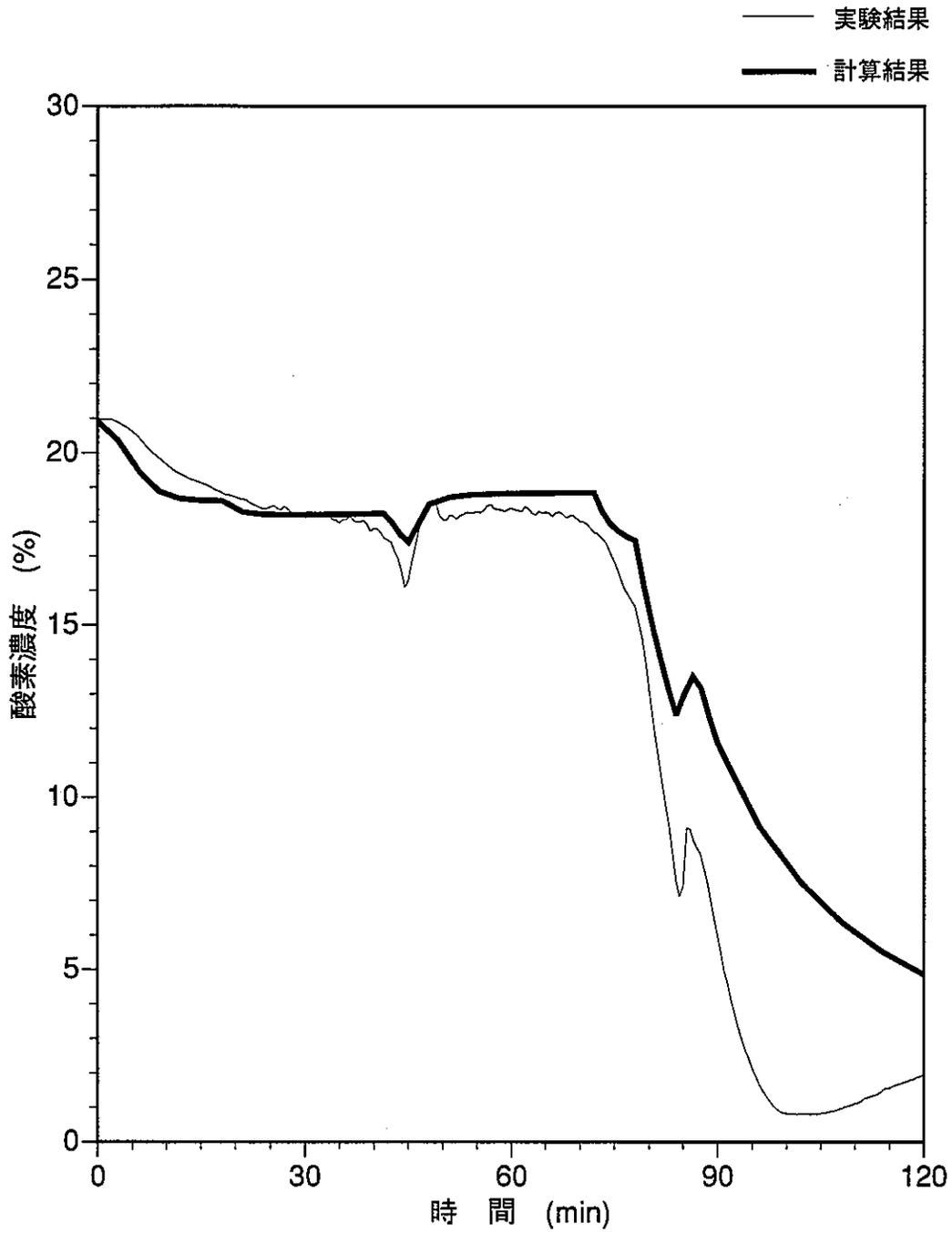


図4.5-8 酸素濃度の比較 (燃焼実験- I)

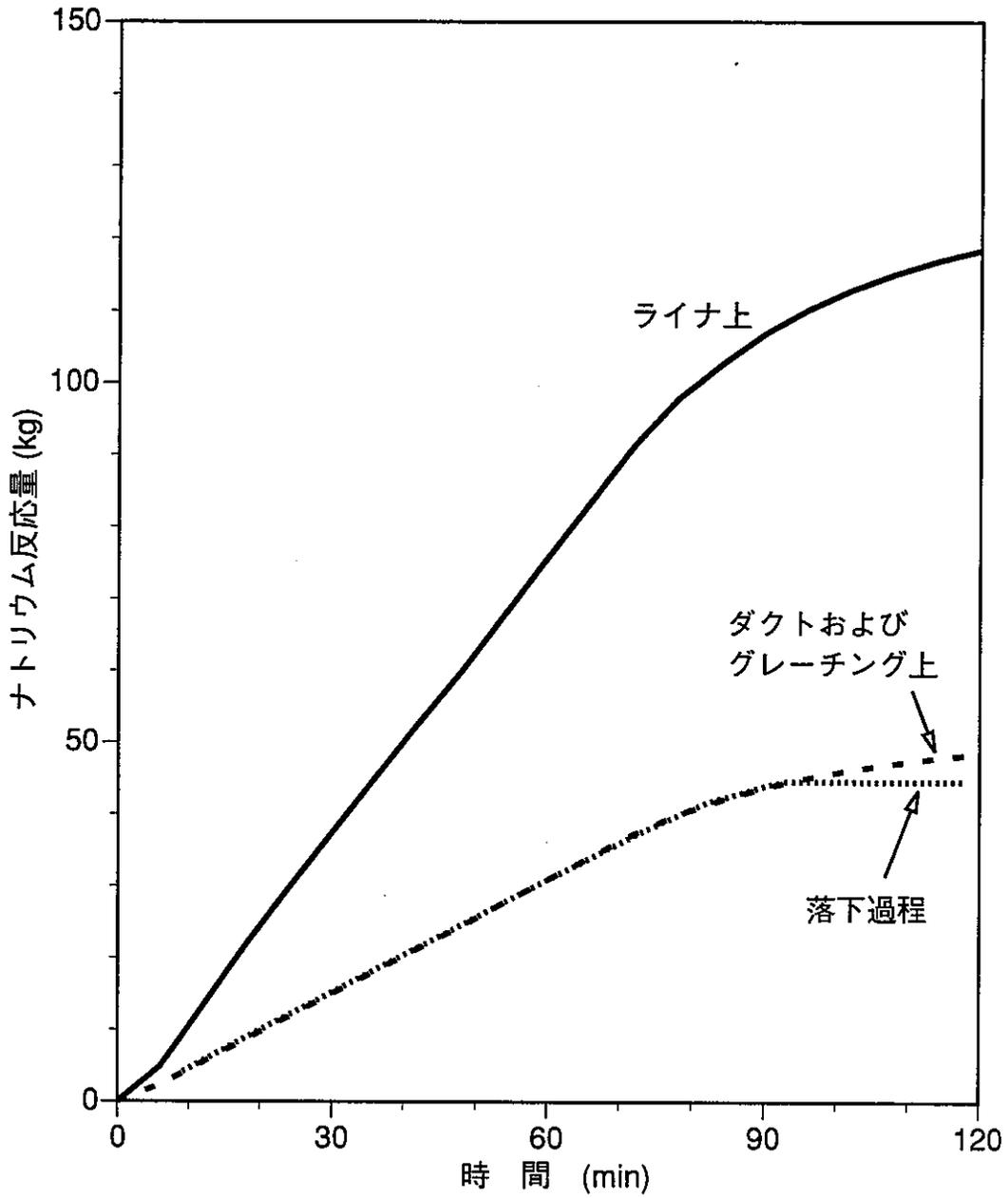


図4.5-9 ナトリウム反応量の計算結果（燃烧実験-1）

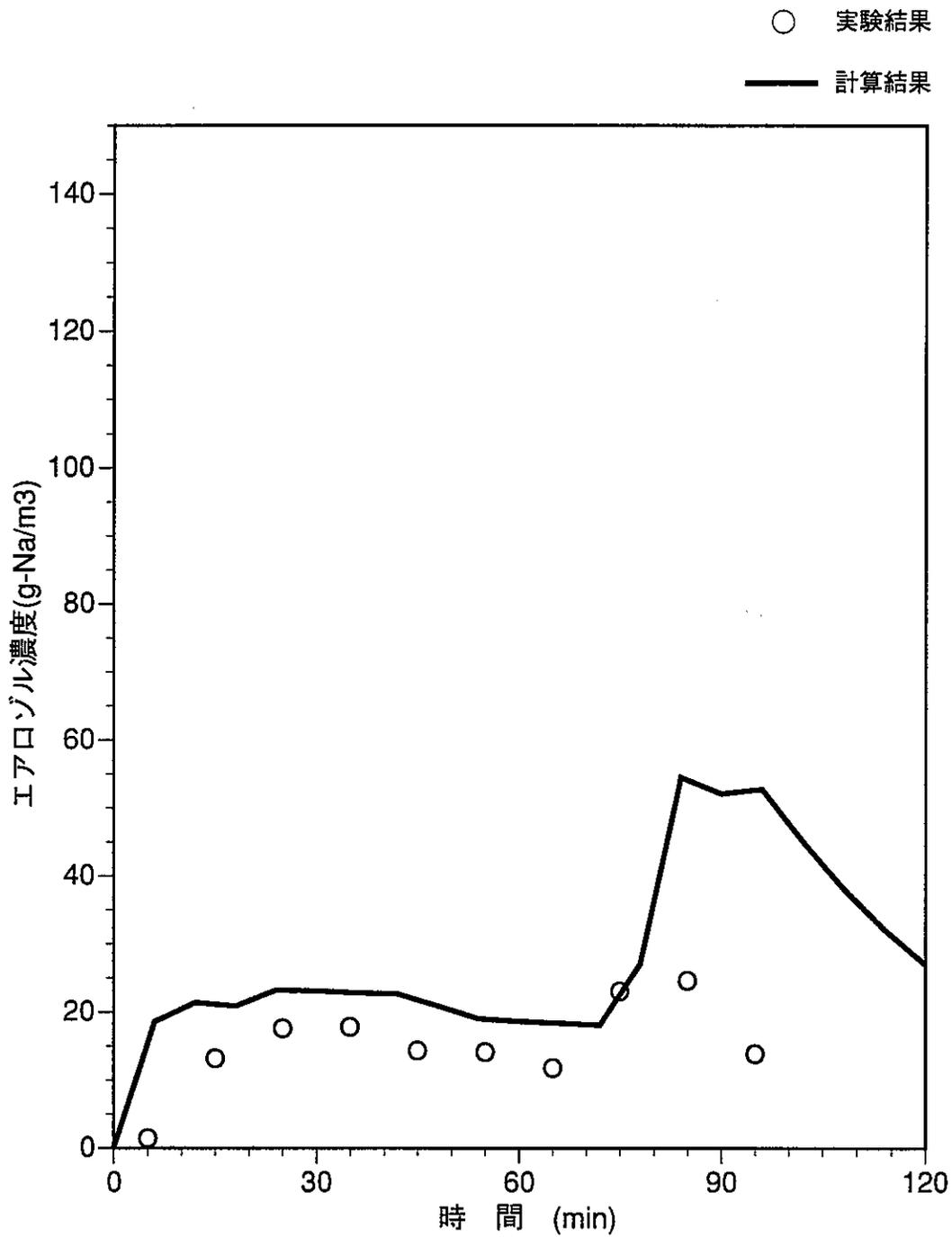


図4.5-10 エアロゾル濃度の比較 (燃焼実験- I)

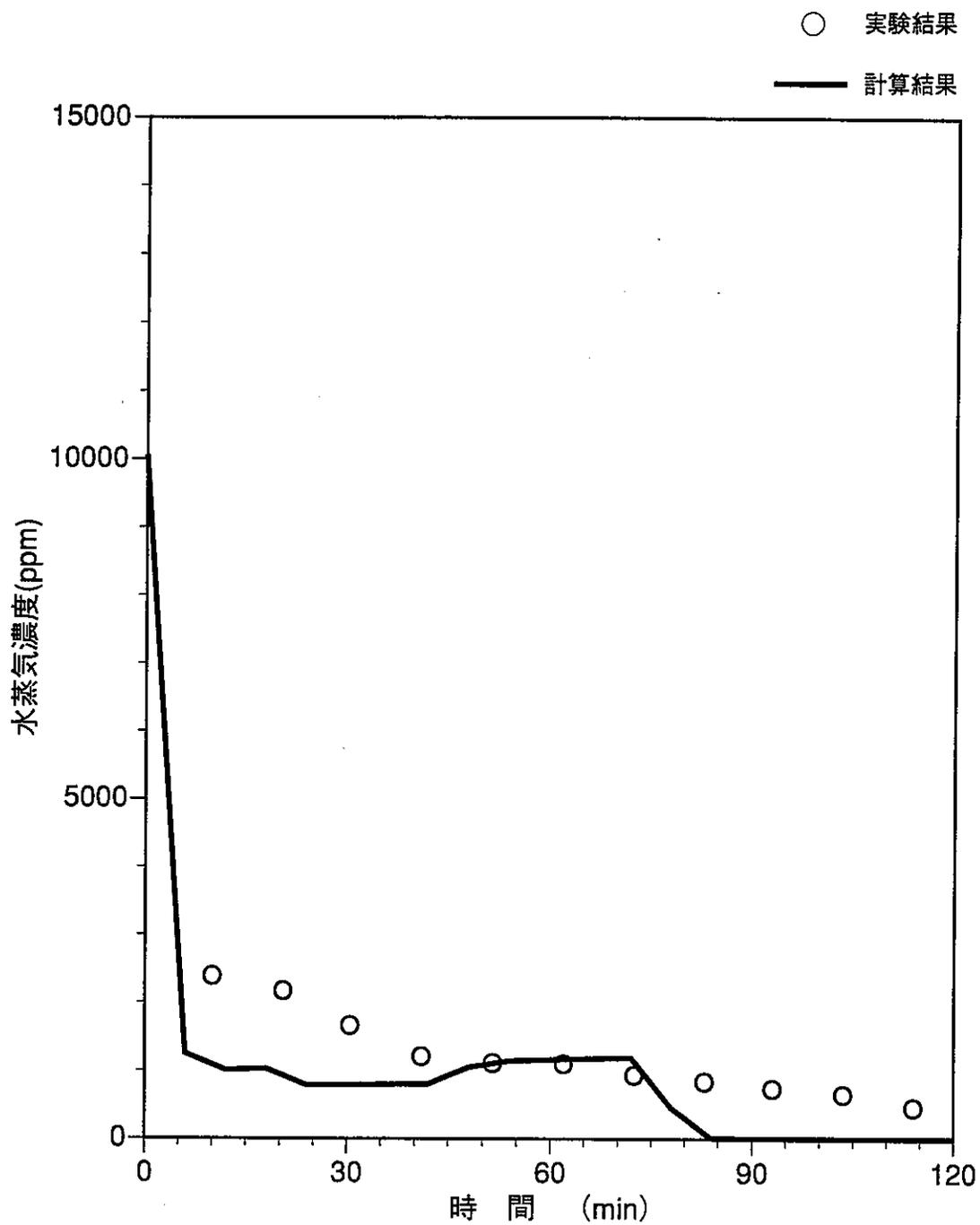


図4.5-11 水蒸気濃度の比較 (燃焼実験- I)

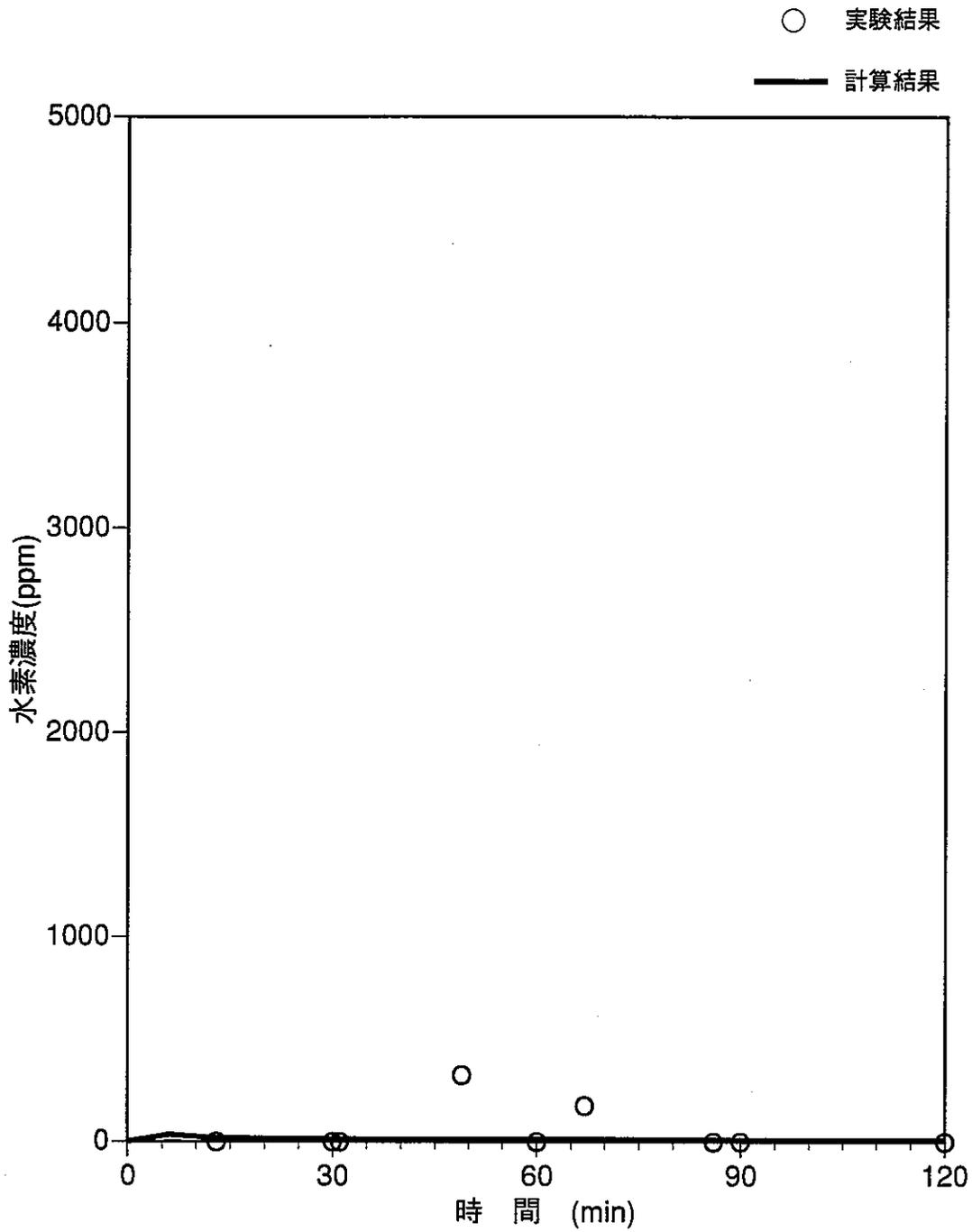


図4.5-12 水素濃度の比較（燃焼実験-1）

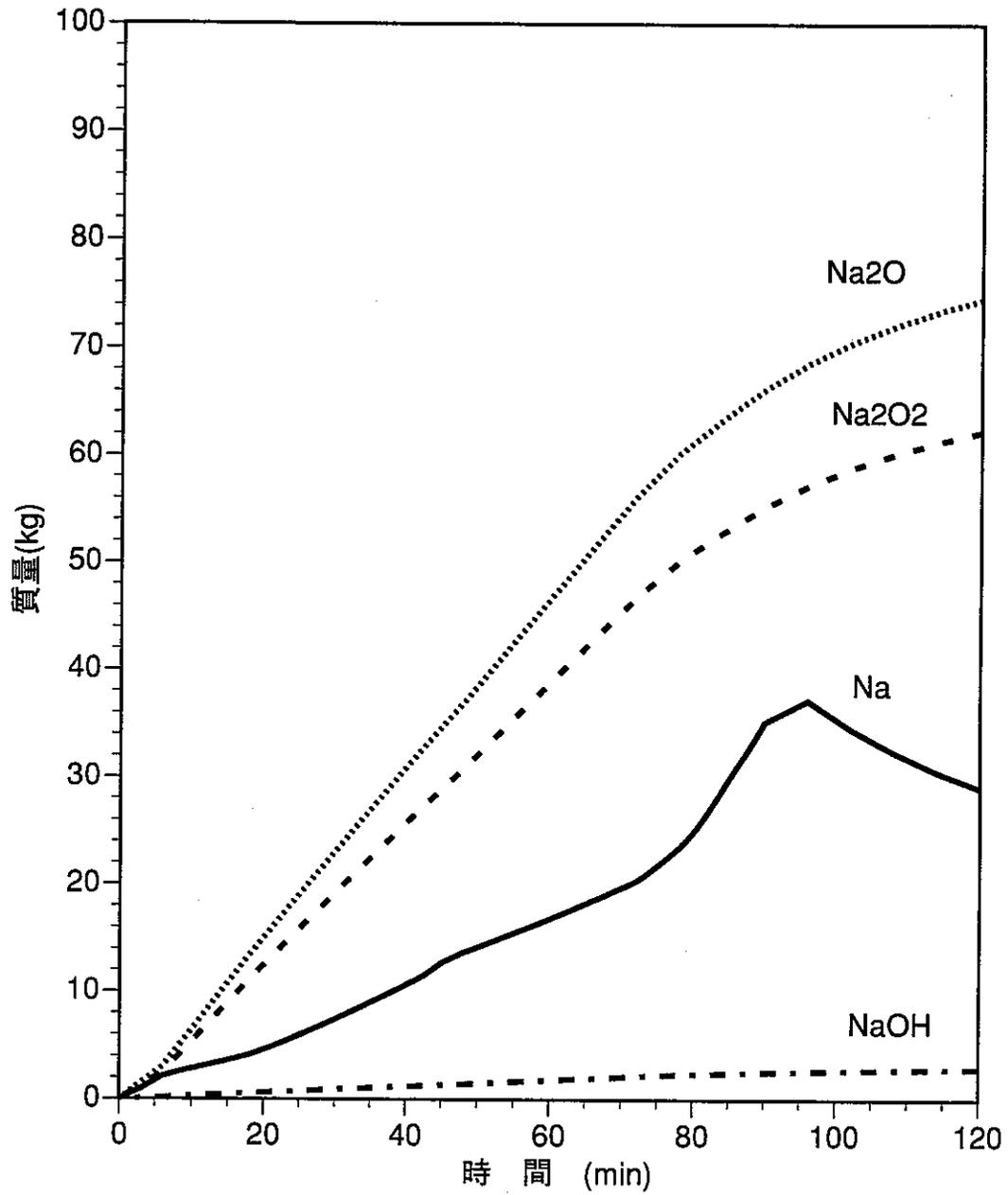


図4.5-13 プール内ナトリウム化合物量の計算結果 (燃焼実験-I)

4. 6 ナトリウム漏えい燃焼実験 II の解析

(1) 実験概要

ナトリウム漏えい燃焼実験 II (Run D4) (21),(22)は、SAPFIRE施設の原子炉補助建屋部分モデル試験装置 (SOLFA-1) を使用した実験である。「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一環として、鉄筋コンクリート製矩形セル (約5m×約5m×高さ約8m、内容積約170m³) の内部を換気し、「もんじゅ」事故の漏えい部を模擬した模擬漏えい配管、換気空調ダクト、グレーチングおよび床ライナを配置し、480℃のナトリウムを3時間42分にわたって漏えいさせた。ナトリウム漏えい速度は約40～50g/s、漏えいナトリウム量は約690kgであった。実験装置と実験条件の概要を図4.6-1～4.6-4および表4.6-1、表4.6-2に示す。

(2) 解析モデルと解析条件

解析モデルを図4.6-5に、解析条件を表4.6-3に示す。実験装置サイズや実験条件に関するものは試験と合致するよう設定し、物理・化学的な挙動を計算するための解析パラメータについては本報告書全体で統一させたものを使用した。また、プール拡がり面積については、床ライナ上のプールの面積は燃焼実験 I の知見を活用して下記のとおり設定し、グレーチングと換気ダクト上のプール (解析上はひとつのプールとして設定) はもんじゅナトリウム漏えい事故の解析と同一面積とした。

$$\text{プール面積} = W (1 - f) F / R$$

ここで、W : ナトリウム漏えい率 [kg/h]

f : スプレー燃焼割合 [-]

F : 床ライナ上の堆積物 / 全堆積物 (=0.96)

R : 燃焼実験 I におけるプール拡がりの相関 ($\approx 25 \text{ kg/m}^2\text{h}$)

(燃焼実験 I での受け皿へのNa供給流量計算値 / プール面積 3.8m^2)

(3) 解析結果

計算結果と実験結果の比較を図4.6-6から図4.6-22に示す。

(a) ナトリウム反応速度 (図4.6-6, 4.6-7)

スプレー反応速度とプール反応速度の計算結果を図4.6-6と図4.6-7に示す。

スプレーでの反応については、約3時間までの漏えい速度が54g/s一定の時間域では約10g/sの反応速度となった。漏えいナトリウムの約20%が落下中に液滴

燃焼したことになり、エアロゾル発生量から推定される範囲（注）に収まる結果となった。

（注）ナトリウムが落下中に燃焼する割合は次式を用いて推定することができる。

$$\text{エアロゾル発生総量} = \text{ナトリウム漏えい量} \times (\alpha + (1 - \alpha) \beta)$$

α : ナトリウムが落下中に燃焼する割合

β : プール状で燃焼したナトリウムがエアロゾル化する（雰囲気へ放出される）割合

（上式では、スプレー状で燃焼したナトリウムがエアロゾル化する割合を1と仮定している）

β は過去の研究で0.1～0.4程度であることが知られている。上式に本実験でのナトリウム漏えい量（690kg）とエアロゾル発生量（280kg）を代入すると、 $\alpha = 0.01 \sim 0.34$ となる。

床ライナ上でのプール反応は43～34g/s、グレーチングやダクトに付着したナトリウムの反応は1～2g/sの反応速度となった。床ライナ上プールの反応速度43g/sを単位面積あたりの値に換算すると26kg/m²hとなる。

(b) ライナ温度（図4.6-8～4.6-11）

ライナを4領域（模擬漏えい部直下の周囲50cmの領域、北西側の1/4領域、北東側の1/4領域、南側の1/2領域）に分けて実験結果と解析結果を比較させたものを図4.6-8～4.6-11示す。解析結果は2点（堆積物のある領域とない領域）である。

模擬漏えい部直下の周囲50cmの領域（図4.6-8）は実験の初期からプールが存在したと推定されるが、解析結果（堆積物のある領域）はこの領域の高温部分と一致する結果となっている。ASSCOPSによるライナ温度解析値は空間平均値であることを考慮すると、本解析結果はライナ温度を高め計算していると言える。解析結果を実験中に最も高温で推移した測定値と比較すると、実験測定値が振動しているために短時間は解析結果の方が低くなっている時間帯があるが、時間平均では同程度である。例えば図4.6-23に示すように、ライナ温度と他試験⁽²³⁾で得られた腐食減肉速度データからライナ腐食減肉量を計算してみると、ライナ温度解析結果をもとに計算した減肉量は測定値をもとに計算した減肉量を上回る結果となっている。なお、図4.6-8では3時間10分～3時間40分頃に解析値よりも実験測定値の方が高くなる傾向が見られるが、これはライナが破損してライナ下部でナトリウム-コンクリート反応が生じたことの影響を受けたものと考えられるため、この時間帯については比較対象外である。

その他の領域（図4.6-9～4.6-11）は、堆積物に覆われた時刻が比較的遅いか覆われなかった部位であると考えられる。実験後の観察結果によれば堆積物に覆われなかった部位は南側に多いが、その部位の実験測定値（図4.6-11の400℃以下で推移している測定値）と解析結果は良く一致している。

(c) 床コンクリート温度 (図4.6-12)

解析結果は実験測定値に見られる温度分布の範囲内に入っている。実験の熱電対の1つは3時間20分頃から急上昇を示しているが、これはライナ損傷に伴うナトリウム-コンクリート反応の開始に対応したものと考えられ、解析との比較の対象外である。

(d) ガス温度 (図4.6-13)

図4.6-13に示したガス温度測定値は、模擬漏えい配管よりも低い位置の熱電対のうちナトリウム液滴が直接触れないような位置に設置されたものの値である。一方、解析値については、スプレイコーン内部のガス温度、セル内平均温度の両方を示した。セル内平均温度の解析値は測定値よりも低めで推移しているが、定性的な時間推移は良好に表現されている。

(e) 天井および側壁コンクリート温度 (図4.6-14)

天井および側壁コンクリート温度については、解析値は測定値と良く一致している。

(f) 漏えい近傍の北壁コンクリート温度 (図4.6-15)

漏えい近傍の北壁コンクリート温度は、上述の天井・側壁の温度よりも高温で推移した。解析では、この領域についてプール燃焼部から輻射熱を直接受けることにより、測定値と一致する結果となっている。

(g) グレーチング温度 (図4.6-16)

グレーチング温度履歴は、実験では変動が激しいのに対して、解析結果は滑らかな履歴となっている。解析ではグレーチングを受け皿と同様の平板として取り扱っているため、グレーチング温度の解析はライナ温度のそれと同様の結果である。

(h) コンクリートからの水分放出量 (図4.6-17)

コンクリートからの水分放出は、本実験の過渡加熱条件を模擬した「加熱コンクリートからの放出水量測定実験」の結果に基づく水分放出データを用いて計算したものである。水分の放出は床、天井、側壁のコンクリート温度の上昇に応じて増加している。

(i) 水蒸気濃度 (図4.6-18)

雰囲気の水蒸気濃度に関する測定は、一定時間ごとにセル内のガスをサンプル

リングして、サンプルガスの水蒸気濃度を測定したものである。測定値は、実験開始後に低下して、1時間から3.5時間頃までは比較的低い値で推移し、4時間頃以降（漏えい終了以降）は高濃度になっている。これに対して解析結果は、実験開始後に低下する点は測定値と一致しているが、測定値よりも早期に高濃度となっている。

このような違いが現れる原因として、実験のサンプリングライン内で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考えられる。これは、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、サンプリングライン内ではガス温度が低くなった（20～40℃）ためである⁽¹⁷⁾。

(j) 水素濃度（図4.6-19）

水素濃度の実験測定値は3時間20分と4時間の一部のデータを除けば0～400ppmの低濃度で推移している。解析における水素濃度は、ナトリウムと水蒸気の反応で生成される水素、燃焼（酸素との再結合）で消費される水素、さらに排気で室外へ放出された水素のバランスから計算されるが、測定値を概ね表現できている。3時間20分と4時間の一部の測定値が比較的高い値となっているのは、ライナ損傷によって生じたナトリウム-コンクリート反応で発生した水素の影響であると考えられ、ASSCOPSコードによる解析では対象外である。

(k) 浮遊エアロゾル濃度（図4.6-20）

エアロゾル濃度に関する実験測定値は、セル中央でサンプリングされたもの、北壁上でサンプリングされたものの2種類がある。解析結果は2種類の測定値のほぼ中央となっており、このことからスプレー燃焼とプール燃焼で生じるエアロゾル量が妥当であると言える。

(l) 酸素濃度（図4.6-21）

酸素濃度について、解析は実験結果と良く一致している。したがって、スプレー燃焼とプール燃焼を合わせたナトリウム反応速度（酸素消費速度）が実験結果と良く一致したと言える。

(m) 堆積物内のナトリウム化合物濃度（図4.6-22）

図3.6-22に、プール反応時に堆積したナトリウム化合物と浮遊エアロゾルが堆積物上に沈降したものの両方を考慮に入れた化合物濃度解析結果を示す。実験における堆積物の化学組成は、実験後の時間が経過した時点でサンプリング

されたため、潮解や炭酸化の影響もあって比較できない。鋼製容器で行われた燃焼実験 I と解析結果同士を比較すると、コンクリートセルで行われた燃焼実験 II の方が湿分の影響が強く、堆積物中のNaOH濃度が高くなっていることがわかる。

計算結果と測定値の比較について以下のようにまとめられる。

- ①セル内の各部温度（雰囲気温度、ライナ温度、コンクリート温度）、酸素濃度、水素濃度、エアロゾル濃度について解析結果を実験測定値と比較すると、ライナ温度は高め、ガス温度は低めであったが、全般的にほぼ実験結果に一致する結果が得られた。
- ②本実験のようにナトリウム漏えい率が比較的小さい場合にはライナ上の堆積物は時間経過とともに拡がっていくためASSCOPSのような一点近似コードで温度評価を行うためにはプール面積等のパラメータを適切に設定する必要がある。また、湿分の寄与が比較的強いため、湿分の化学反応やエアロゾルの挙動に関する解析パラメータも解析結果に強い影響を与える。このような背景のもとで本実験の解析結果と測定値の比較結果を見ると、本解析で使用した解析パラメータセットは、小規模漏えいと湿分影響を扱う観点で適切なものであると判断する。

表4.6-1 ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱの実験装置の概要

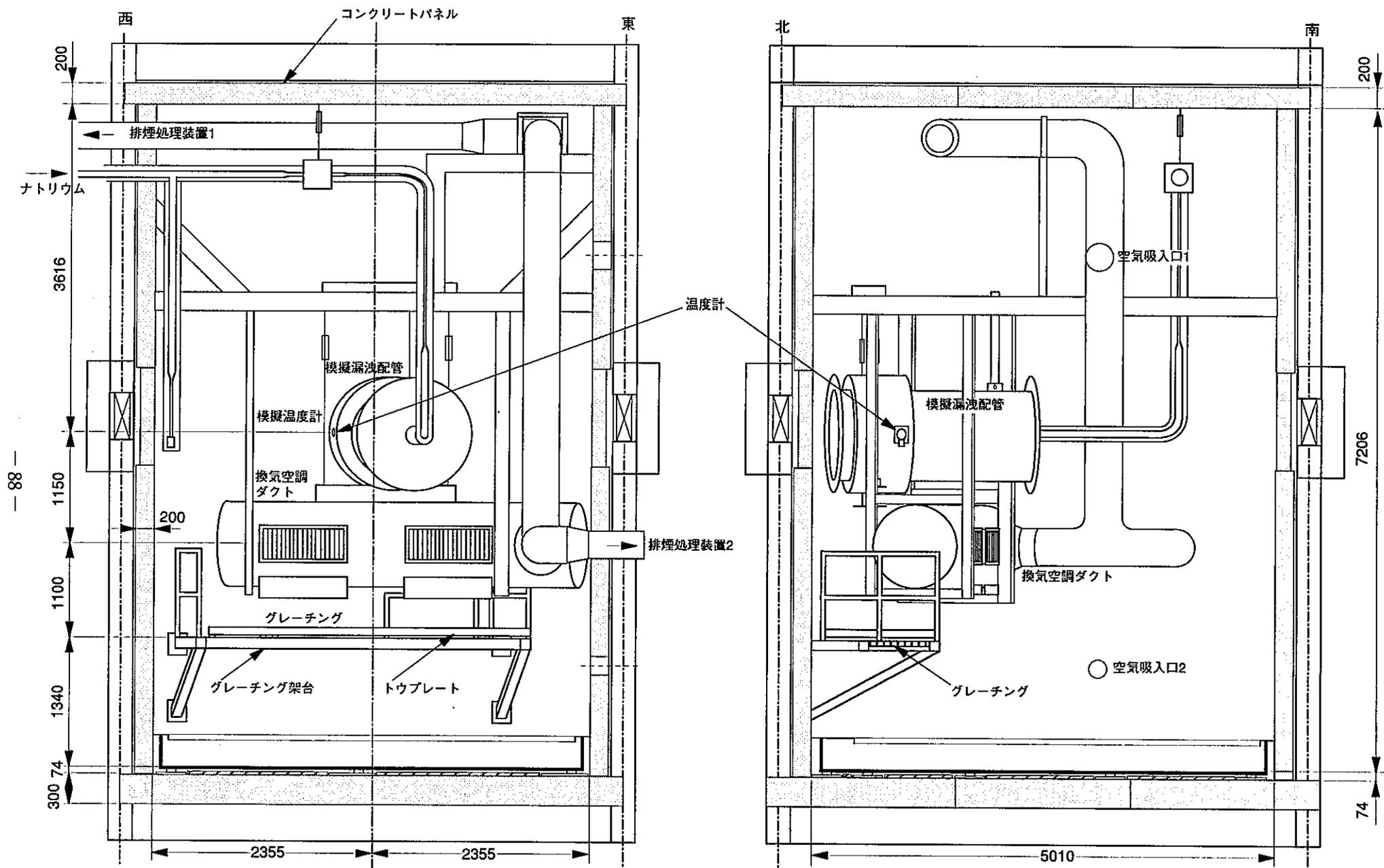
試験容器形状	直方体
試験容器の大きさ m	約5×5×8 (高さ)
試験容器容積 m ³	約170
試験容器壁面積 m ²	約140
試験容器天井面積 m ²	23.6
床ライナ面積 m ²	21.6
床ライナ厚さ mm	6
模擬漏えい部高さ m	3.59 (床ライナからの高さ)
換気空調ダクト高さ m	2.44 (床ライナからの高さ)
グレーチング高さ m	1.34 (床ライナからの高さ)

表4.6-2 ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱの実験条件

ナトリウム漏えい速度 g/s	約54~約39
ナトリウム漏えい量 kg	690
ナトリウム漏えい時間 min	222
ナトリウム温度 °C	480
換気流量 m ³ /min	約35
初期酸素濃度 %	21
初期雰囲気ガス圧力 kPa	101
初期容器内温度 °C	24

表4.6-3 ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱの解析条件

	項目	条件	
ナトリウム漏えい・燃焼条件	漏えい流量	約 54 g/s(2-179min)→48 g/s(179-192min)→39 g/s(192-224min)	
	漏えい時間	222 分	
	漏えいナトリウム量	690 kg	
	漏えいナトリウム温度	480 °C	
	スプレイコーン形状	円錐台形 上部直径：10 cm 拡がり角度：20 ° 高さ：3.6 m	
	スプレイ液滴径	4.6 mm (質量平均)	
	未燃焼ナトリウムの配分	床ライナ上：96 % グレーチング・ダクト上：4 %	
	プール面積	床ライナ上：5.9 m ² その他構造物上：1.7 m ²	
	雰囲気条件	セル容積	170 m ³ (セル1：85 m ³ 、セル2：85 m ³)
セル内初期酸素濃度		21 %	
セル内初期ガス温度、湿度		24 °C、R.H. 48 %	
換気流量		33 m ³ /min	
輻射伝熱条件	壁からガスの輻射伝熱係数	0.9	
	プールのない床からガスの輻射伝熱係数	0.8	
	床ライナ上プールからガスの輻射伝熱係数	0.59 注)	
	グレーチング・ダクト上プールからガスの輻射伝熱係数	0.616 注)	
	床ライナ上プールから漏えい近傍壁の輻射伝熱係数	0.06 注)	
	グレーチング・ダクト上プールから漏えい近傍壁の輻射伝熱係数	0.034 注)	
化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応及び生成割合 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$ $2\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$ Na ₂ O : Na ₂ O ₂ = 60 % : 40 % (酸素濃度10%以上) Na ₂ O : Na ₂ O ₂ = 100 % : 0 % (酸素濃度10%未満)	
	ナトリウムと水蒸気の反応 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$	
	エアロゾル状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 反応速度係数：1.0 × 10 ⁻¹⁰ mol-H ₂ O/個/s	
	プール状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 水蒸気の拡散により反応	
	コンクリートからの水分放出条件	ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱの過渡加熱条件を模擬した「加熱コンクリートからの放出水量測定」結果に基づく水分放出割合	
	水素と酸素の再結合割合	生成水素の90%が再結合	
	エアロゾル条件	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
		エアロゾル落下高さ	3.6 m
エアロゾル密度		2130 kg/m ³	
エアロゾル粒径		1.0 × 10 ⁻⁵ m	
備考	注) プールから漏えい近傍壁への直接放射の寄与を近似計算し、プールからの射出分が0.65となるように指定した。(0.59+0.06=0.65 0.616+0.034=0.65)		



(東西断面図)

(南北断面図)

図4.6-1 ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの実験装置 (立面図)

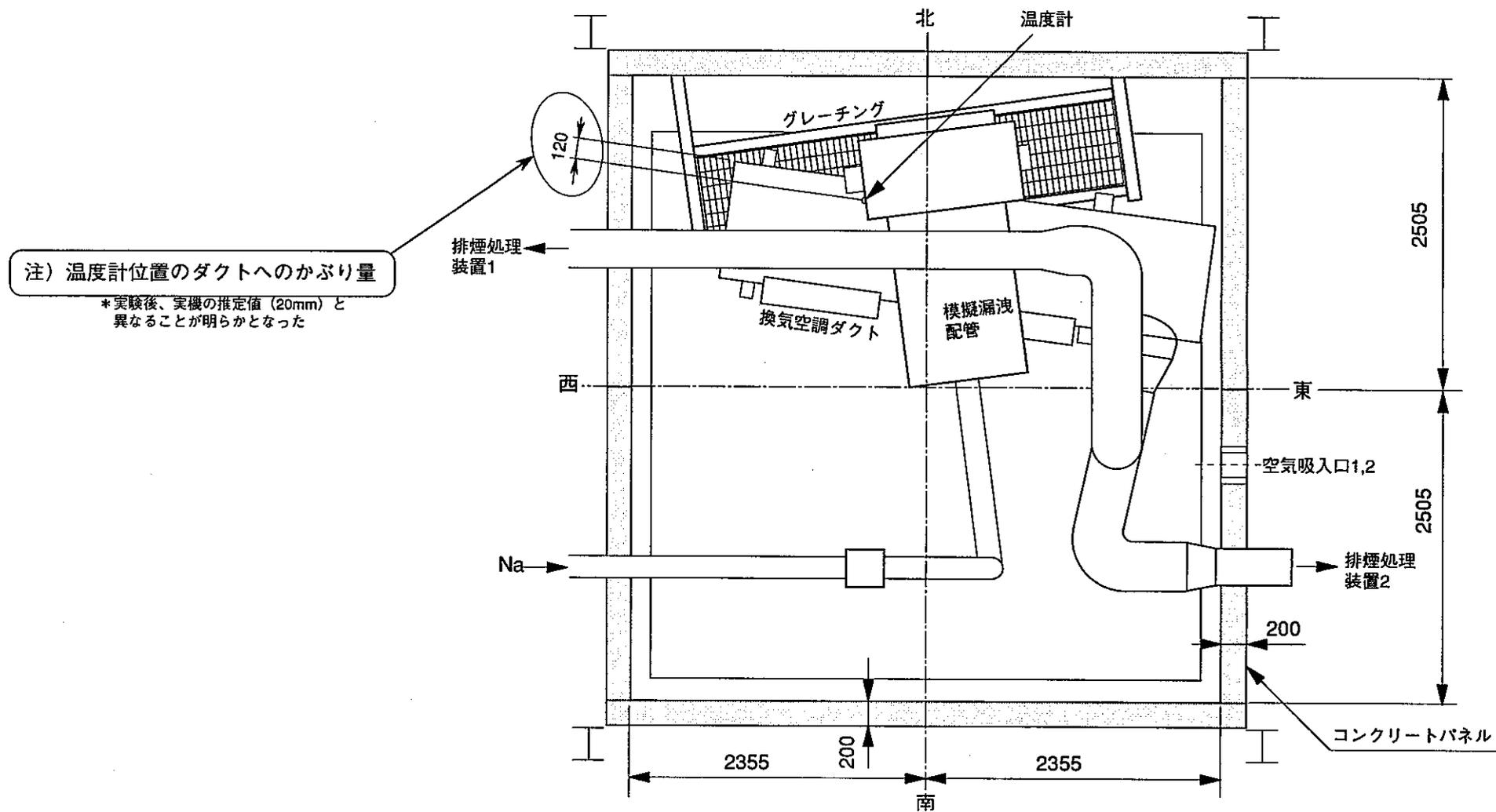


図4.6-2 ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの実験装置 (平面図)

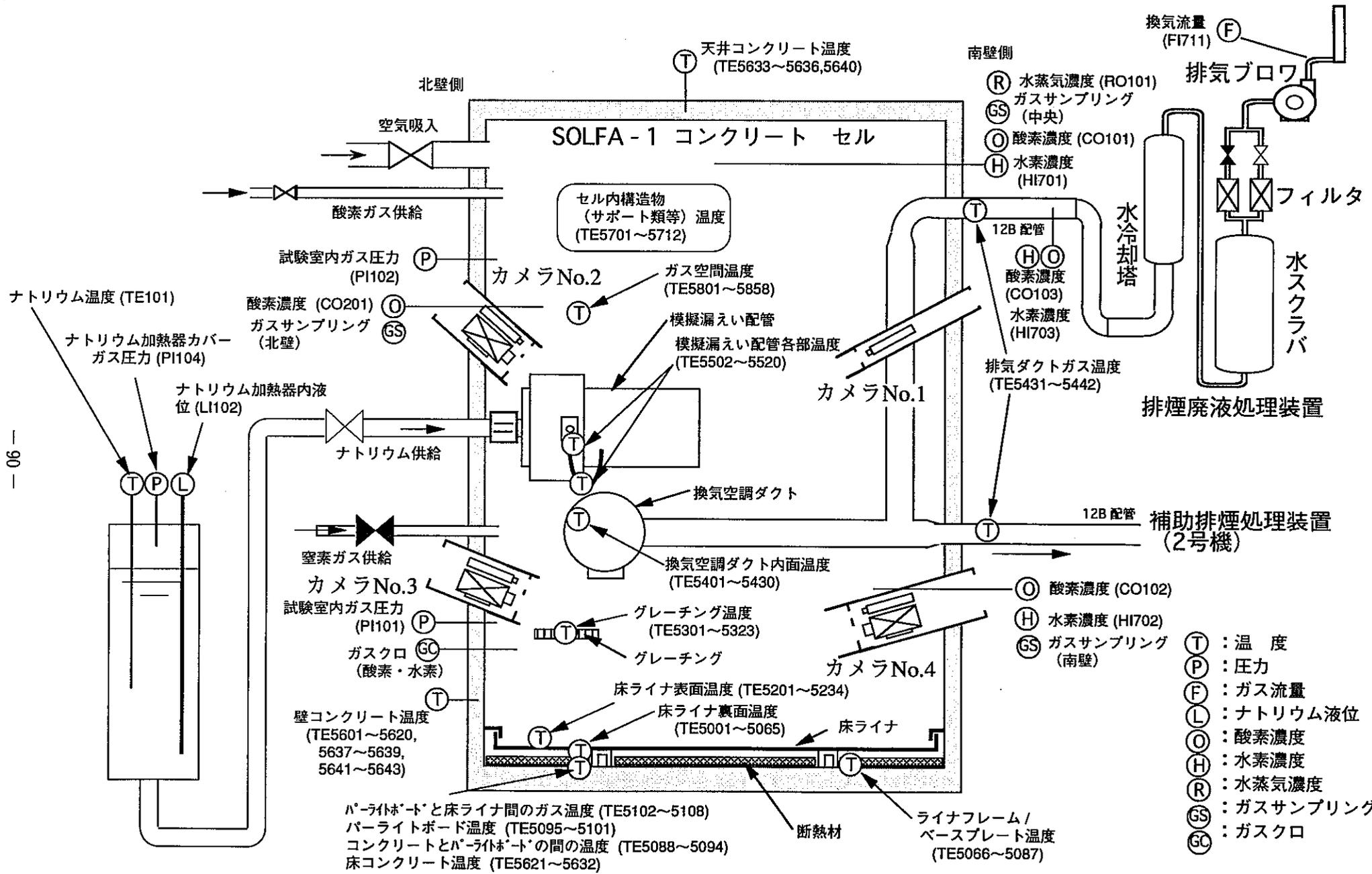


図4.6-3 ナトリウム漏えい燃焼実験-II 計測図

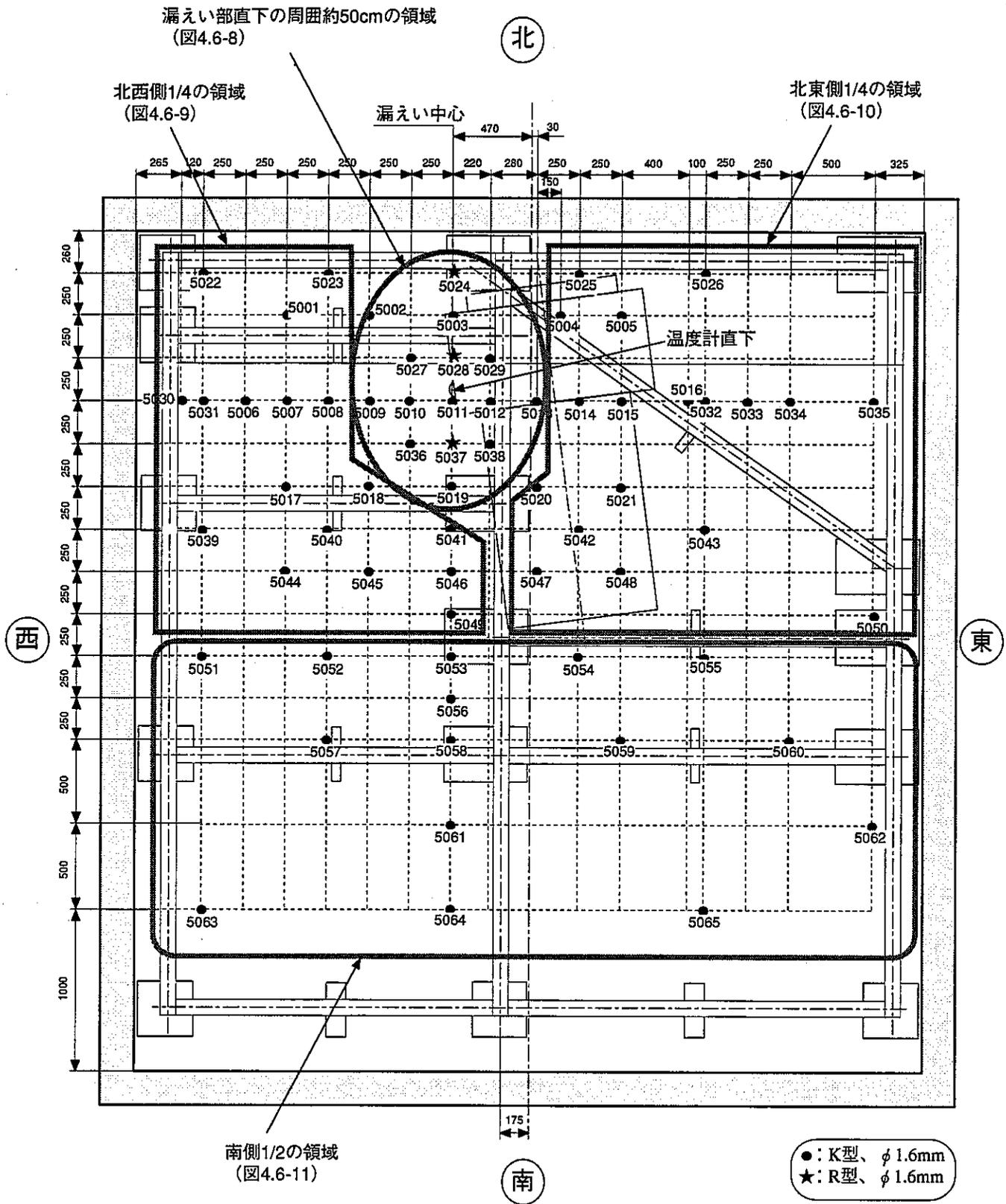


図4.6-4 床ライナ裏面熱電対配置図 (燃烧実験-II)

各セルでのガスの取扱い

*) 図中には第1セルガスを3つ示しているが、コード内では1点で扱う。
 **) 第2セルのスプレー・コーン外ガスと第1セルのガスの通気は対流通気+圧力均衡モデルを用いている。

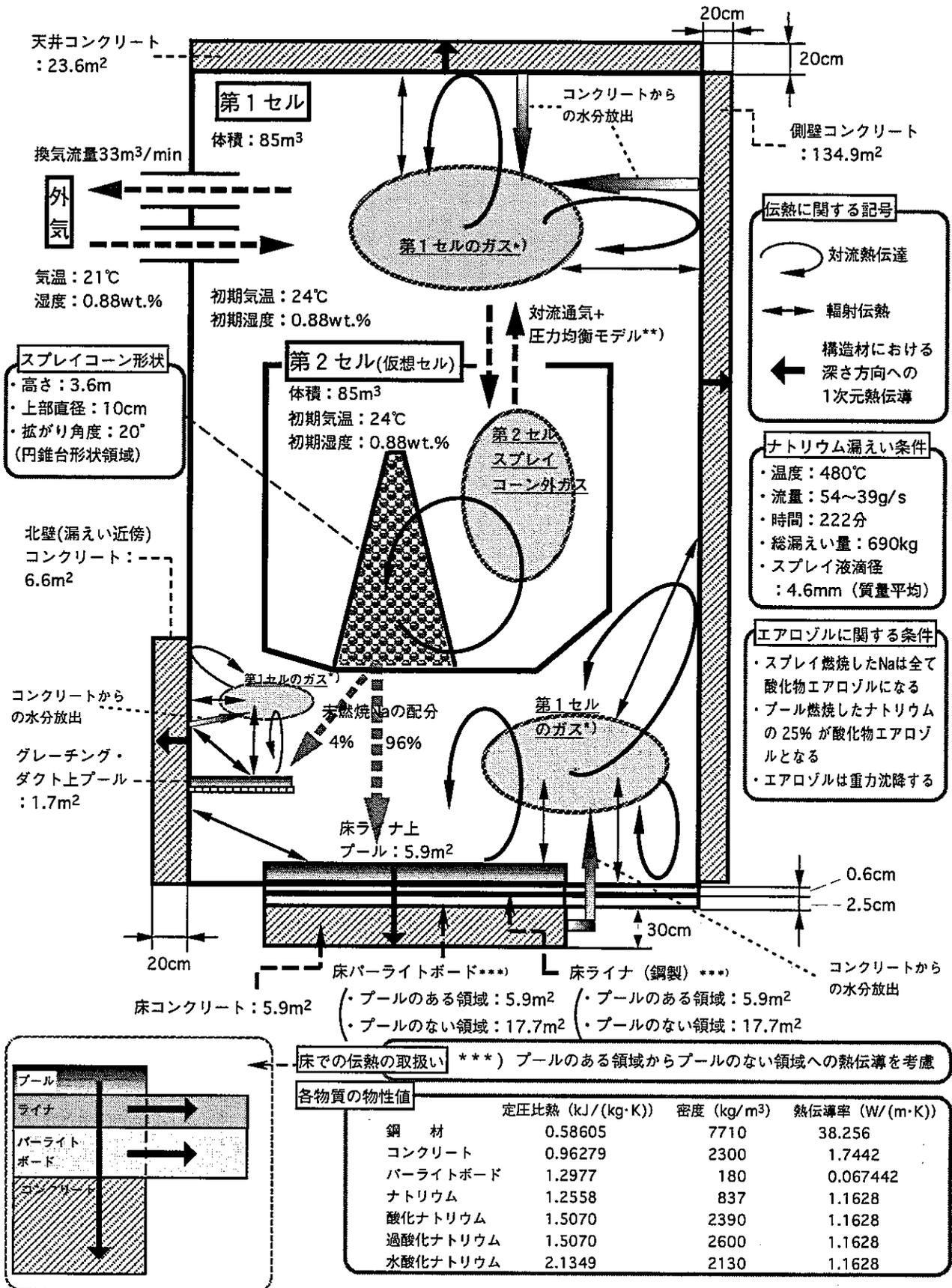


図4.6-5 ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの解析モデル

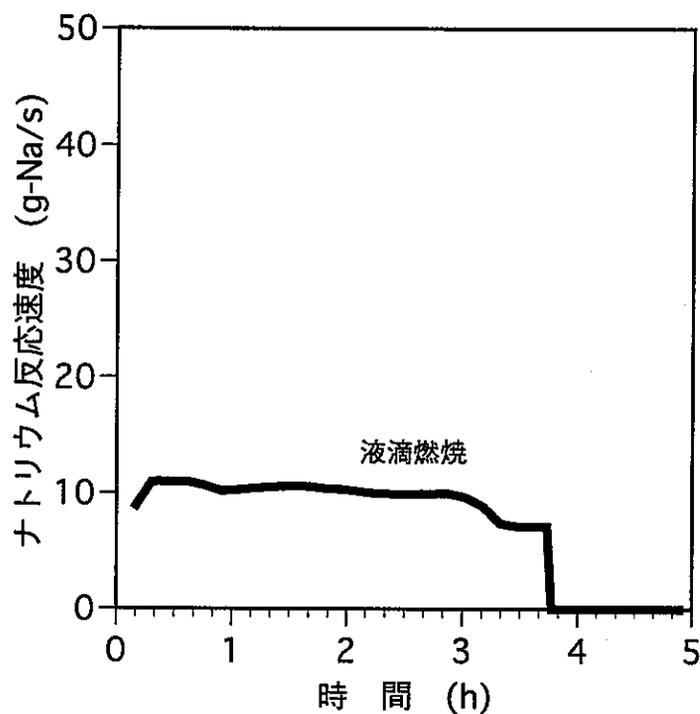


図4.6-6 ナトリウムスプレイ反応速度の計算結果（燃焼実験-II）

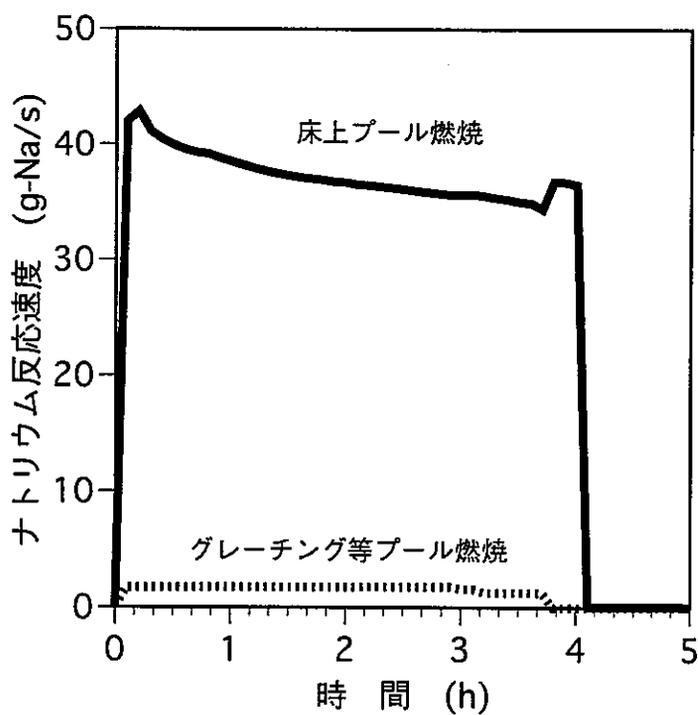


図4.6-7 ナトリウムプール反応速度の計算結果（燃焼実験-II）

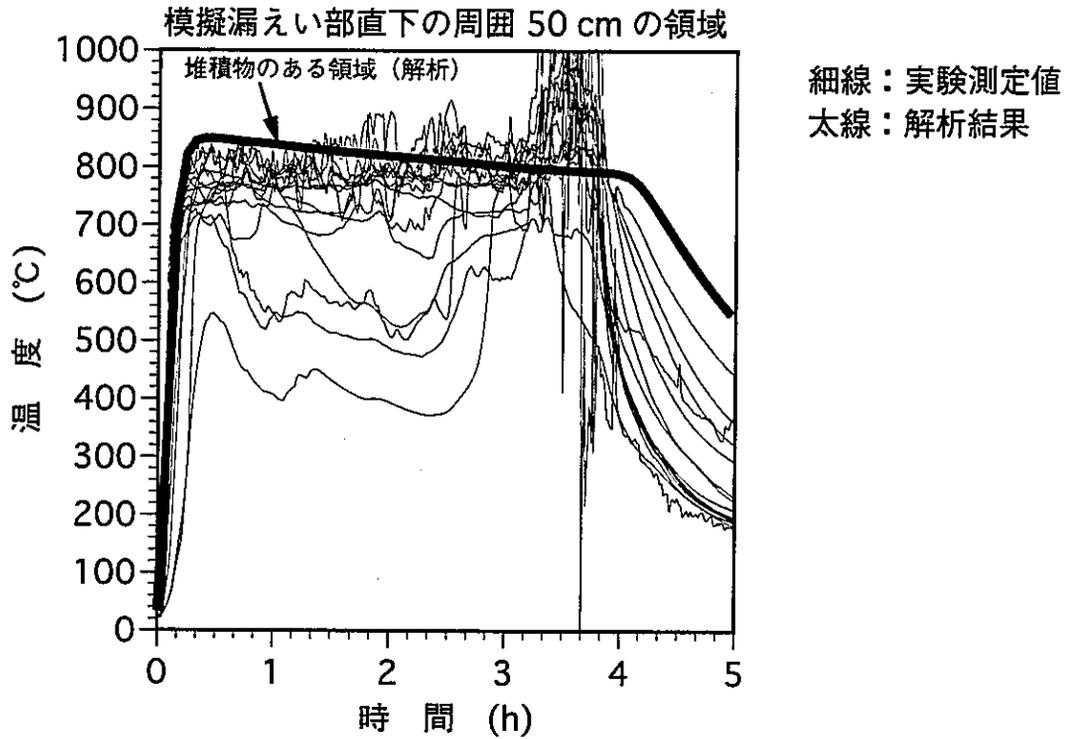


図4.6-8 床ライナ温度の比較（燃焼実験-II） 模擬漏えい部直下の周囲 50 cm の領域

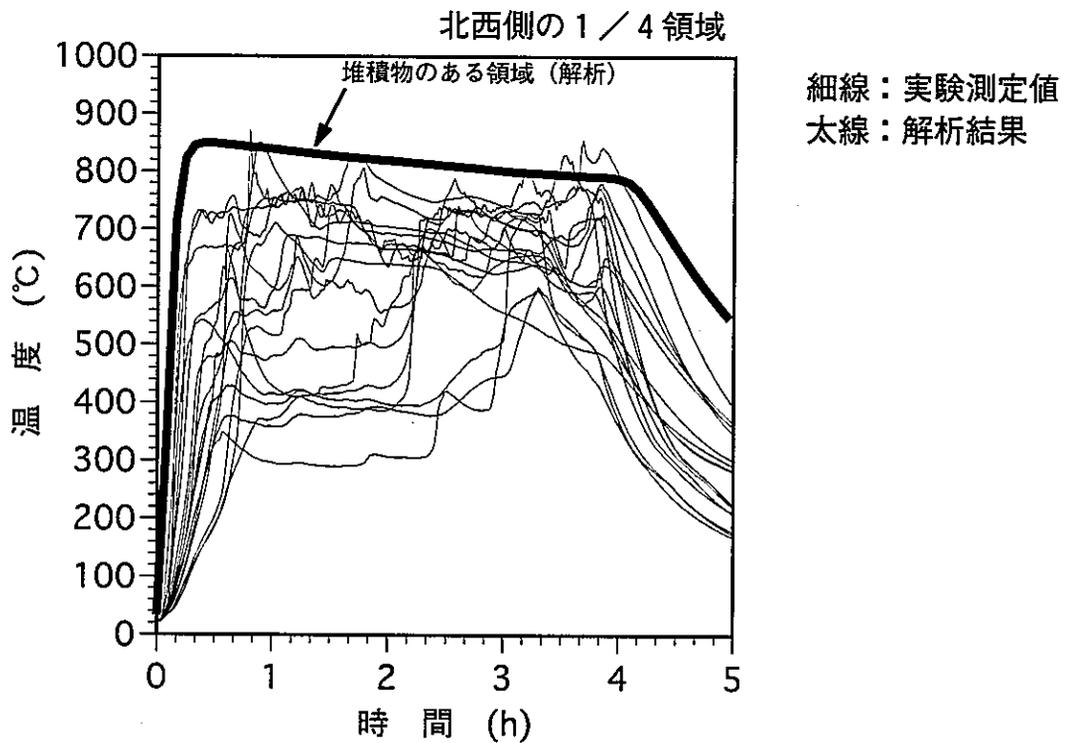


図4.6-9 床ライナ温度の比較（燃焼実験-II） 北西側の1/4 領域

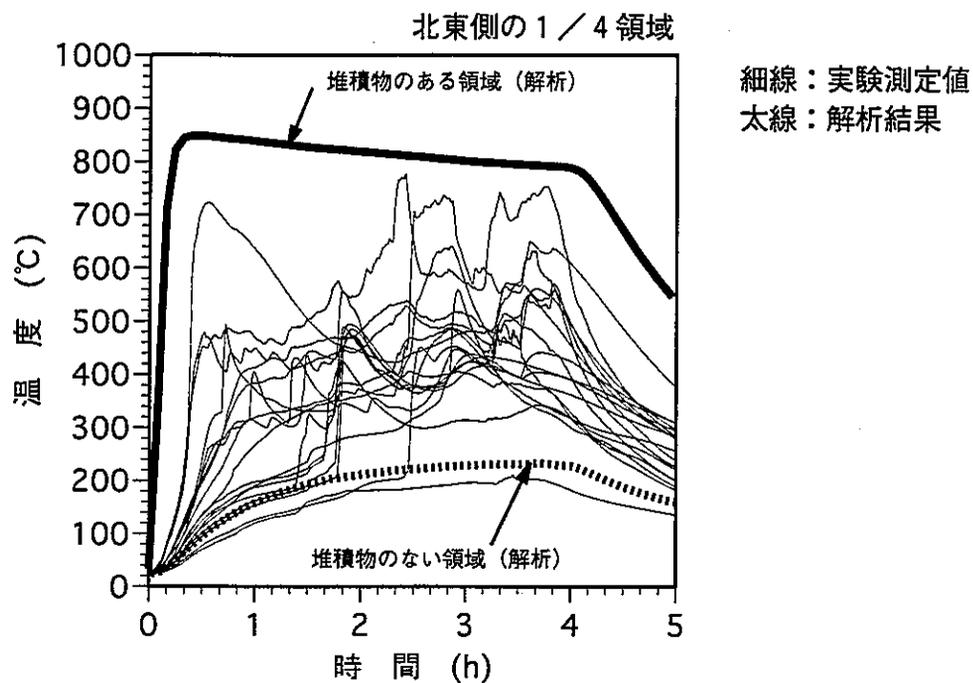


図4.6-10 床ライナ温度の比較 (燃焼実験-II) 北東側の1/4 領域

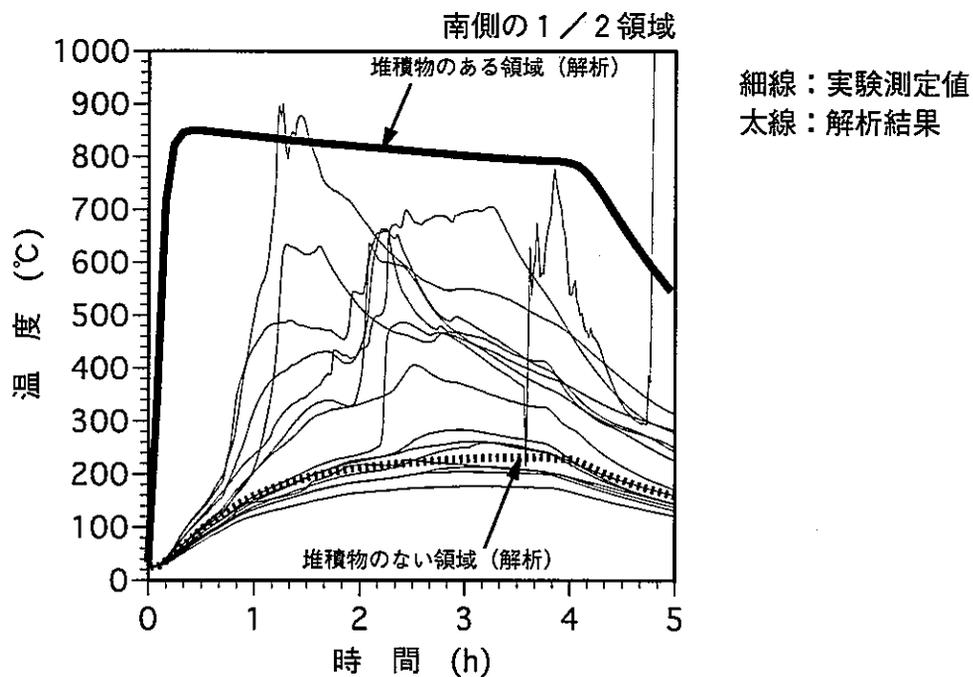


図4.6-11 床ライナ温度の比較 (燃焼実験-II) 南側の1/2 領域

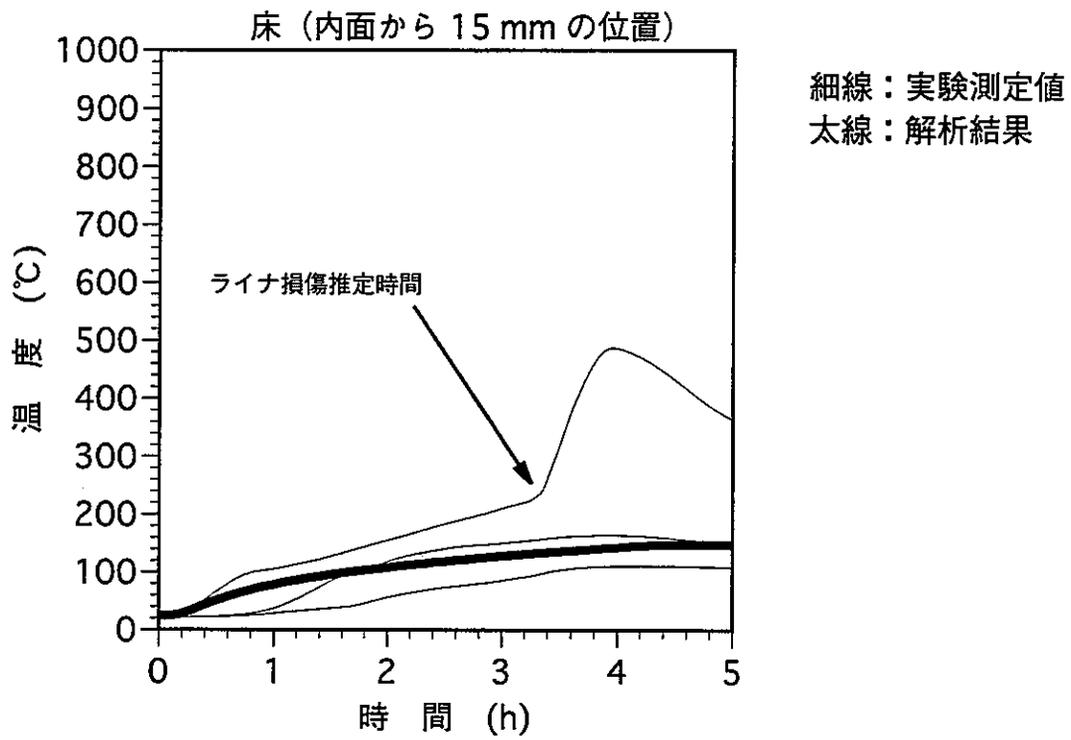


図4.6-12 床コンクリート温度の比較 (燃焼実験-II)

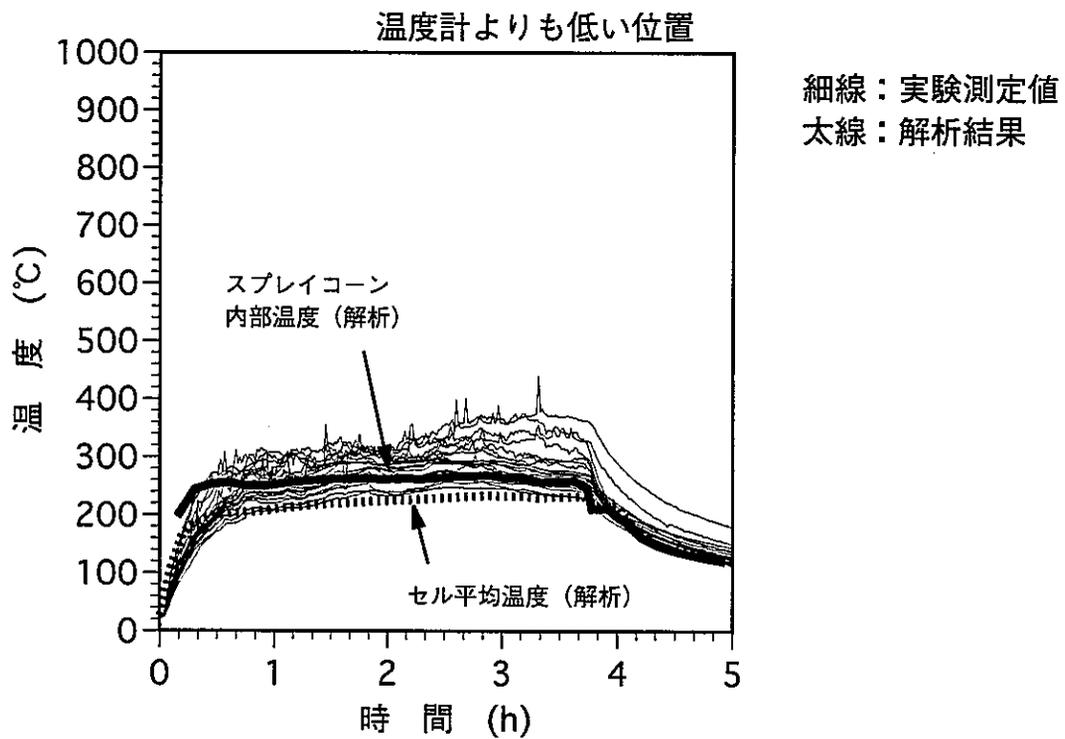


図4.6-13 ガス温度の比較 (燃焼実験-II)

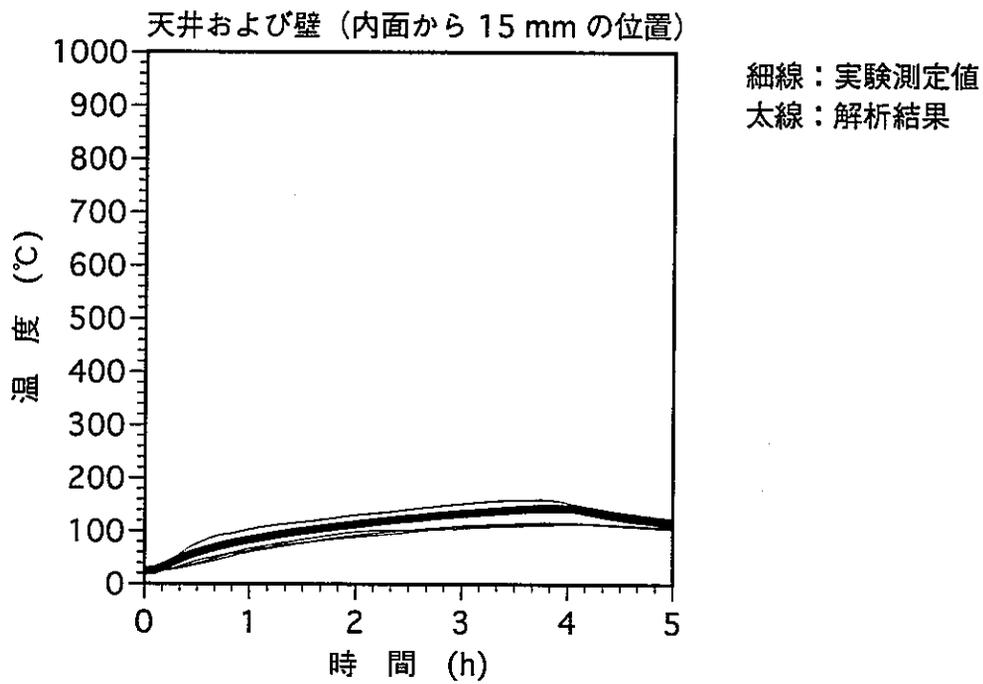


図4.6-14 天井および側壁コンクリート温度の比較 (燃焼実験-II)

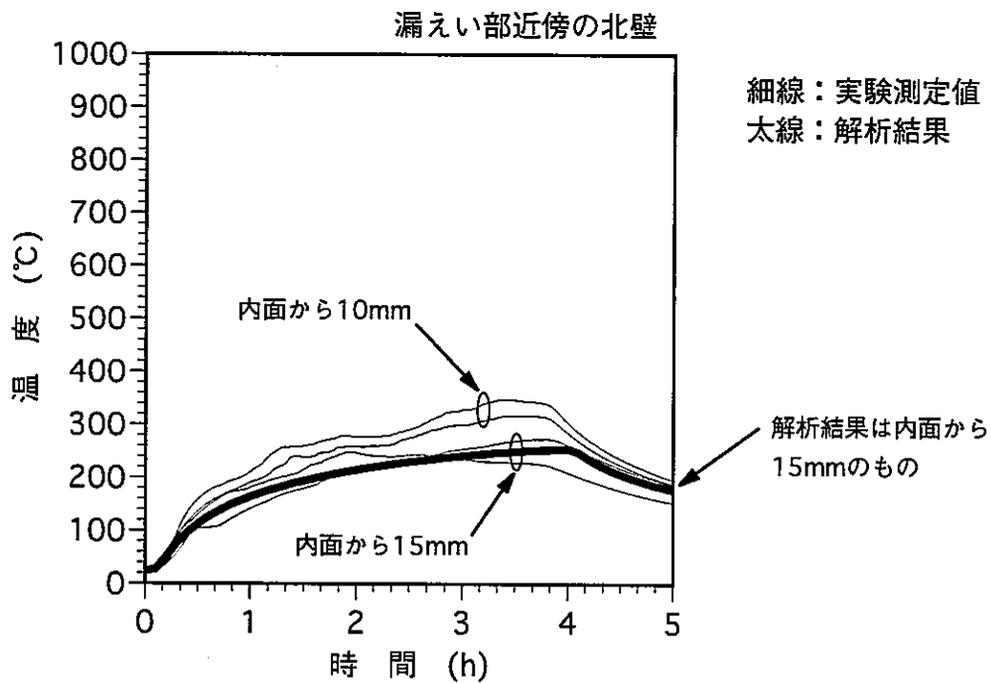


図4.6-15 漏えい近傍の北壁コンクリート温度の比較 (燃焼実験-II)

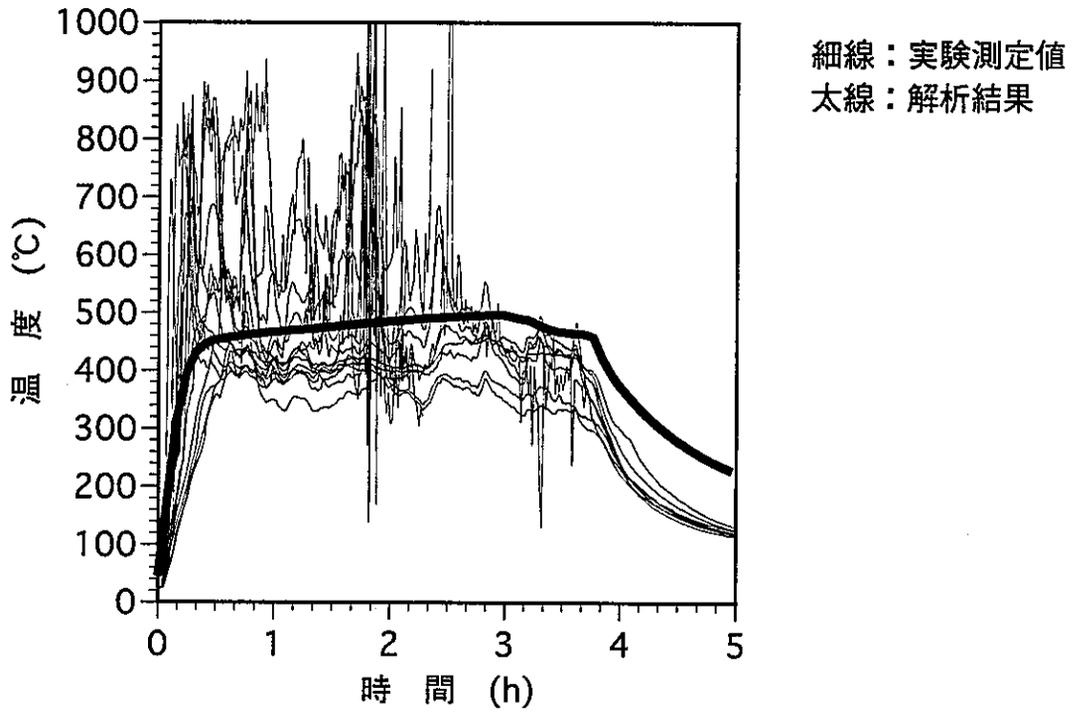


図4.6-16 グレーチング温度の比較（燃焼実験-II）

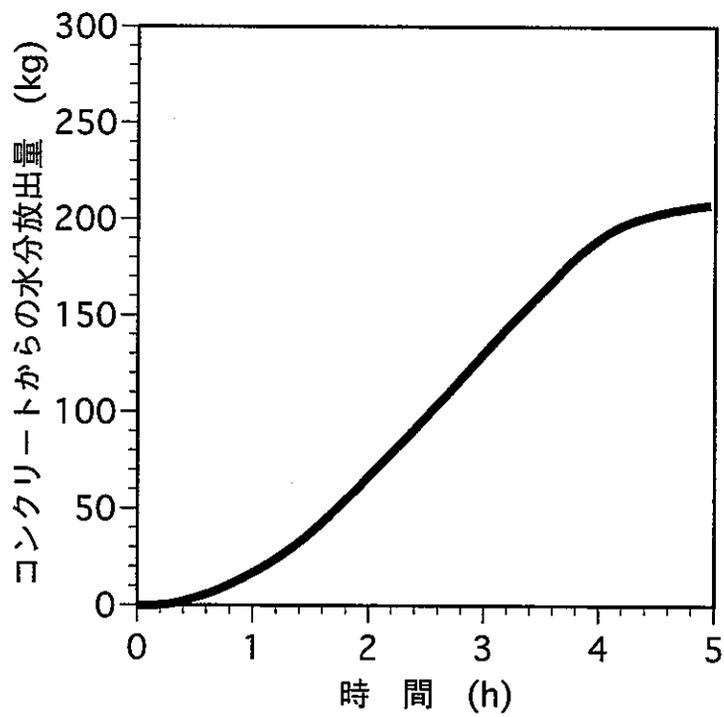


図4.6-17 コンクリートからの水分放出量の計算結果（燃焼実験-II）

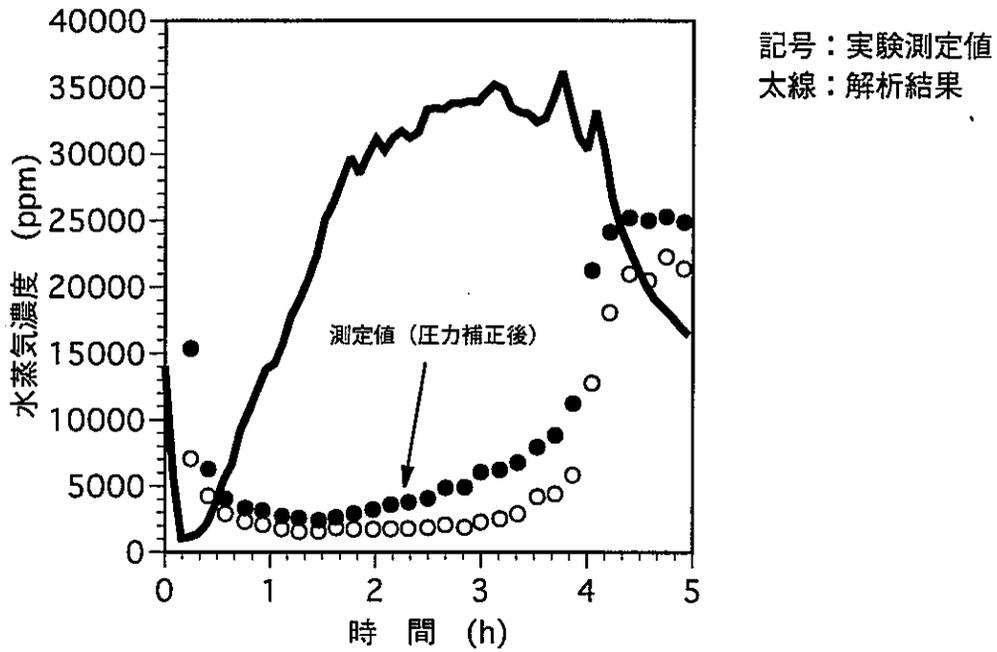


図4.6-18 水蒸気濃度の比較 (燃焼実験-II)

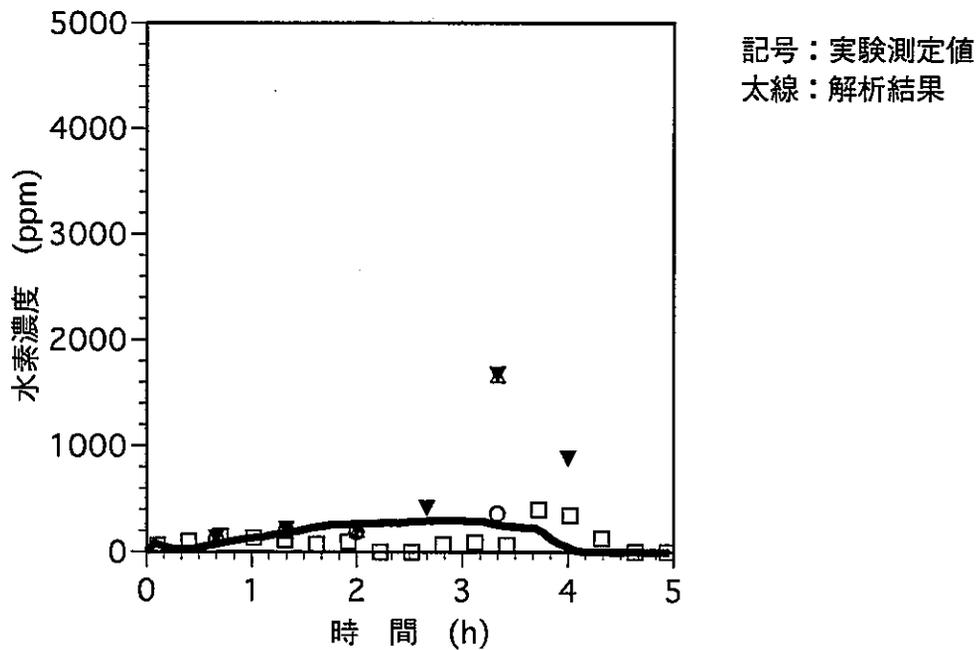


図4.6-19 水素濃度の比較 (燃焼実験-II)

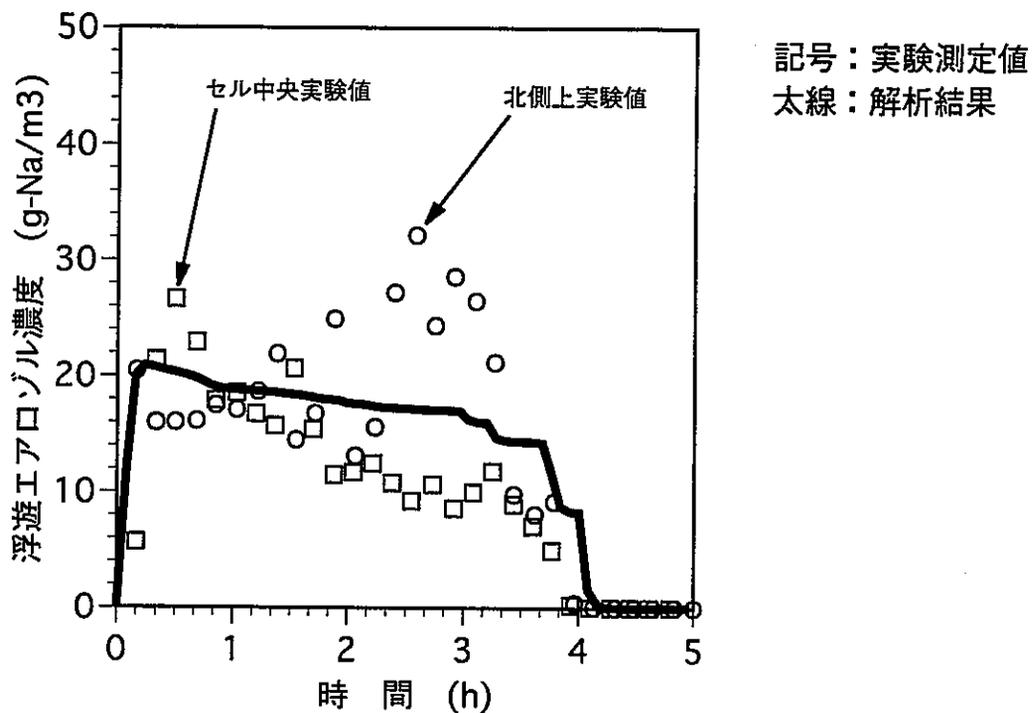


図4.6-20 浮遊エアロゾル濃度の比較 (燃焼実験-II)

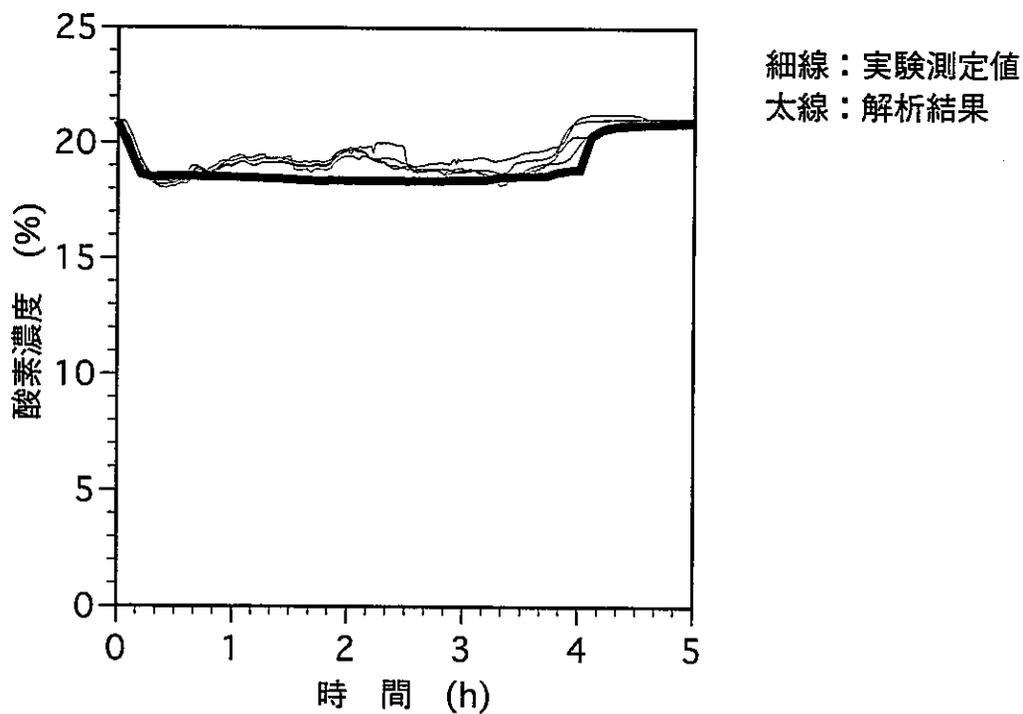


図4.6-21 酸素濃度の比較 (燃焼実験-II)

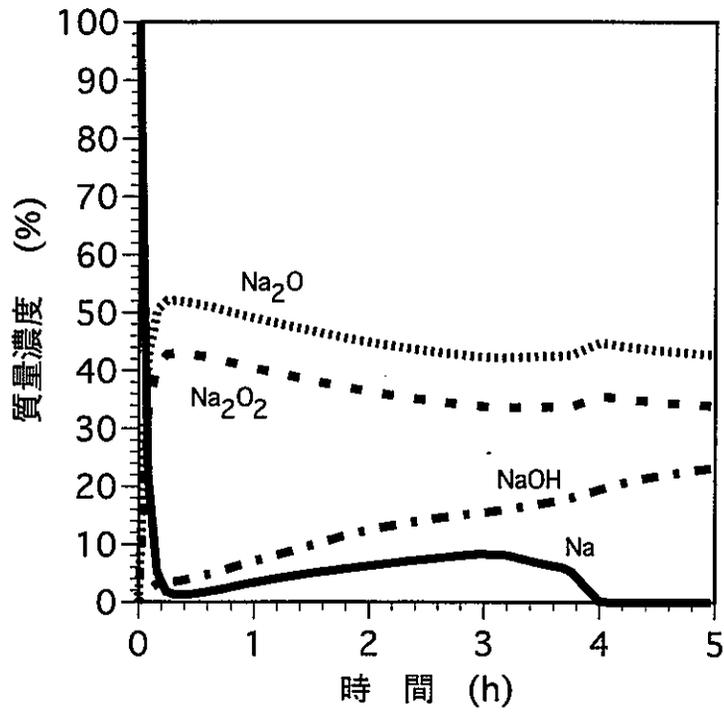
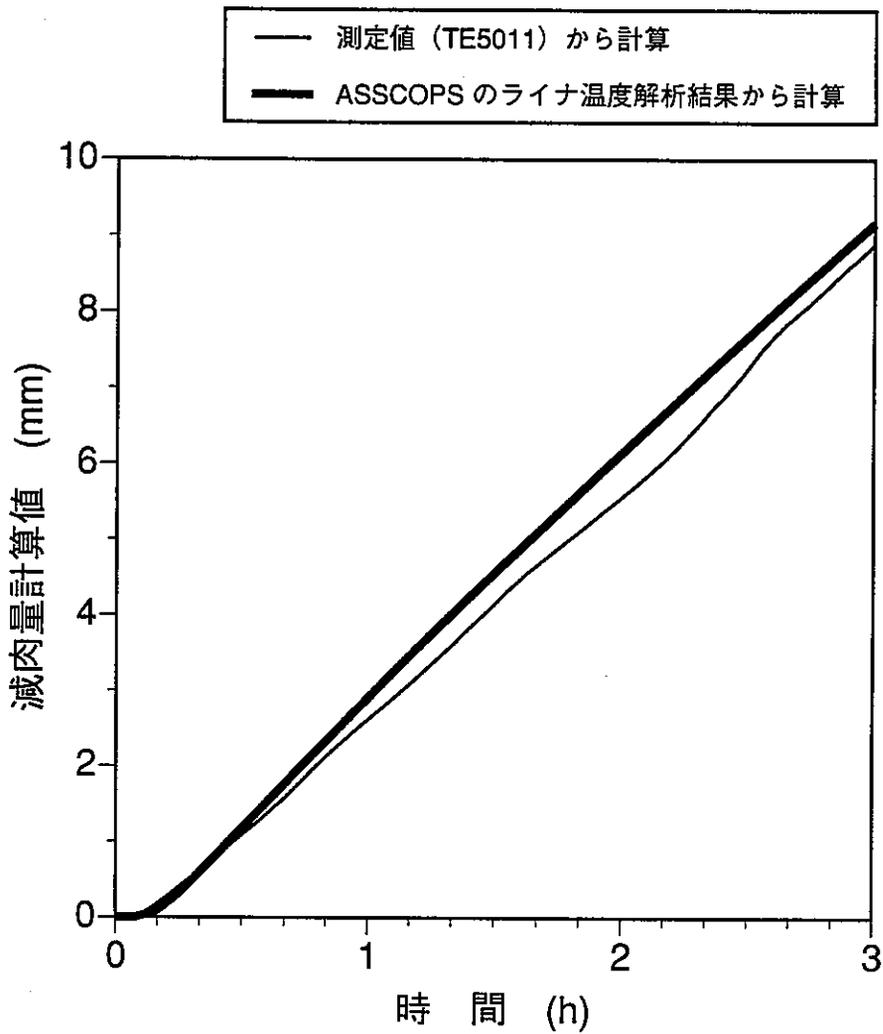


図4.6-22 堆積物内のナトリウム化合物濃度の計算結果（燃焼実験-II）



ライナ温度の解析結果または実験測定値^(注)と熔融塩型腐食の減肉速度データ(99%信頼幅上限値)から、減肉量を計算した。

(注) 実験中に最も高温で推移した熱電対 (TE5011) の測定値を使用

図4.6-23 ライナ温度推移から計算した腐食減肉量の比較 (燃烧実験 II)

4. 7 小規模ナトリウムプール燃焼実験 Run F7 の解析

(1) 実験概要

小規模ナトリウムプール燃焼実験 Run F7⁽²⁴⁾は、ナトリウム漏えい率が10 kg/h程度（約6.8～26kg/h）の小規模漏えい時の床ライナ温度やプールの拡がりを調べることを目的として、SAPFIRE施設のFRAT-1装置を使用して行われた実験である。

本報告書ではRun F7-2を解析対象とした。この試験は、内容積3m³の鋼製円筒容器（FRAT-1）内部に炭素鋼製の受け皿を設置し、漏えいナトリウムの初期温度約507℃、ナトリウム漏えい流量約12kg/h、漏えいノズルの位置（高さ）1.5m、漏えい継続時間は約25分、換気流量3m³/minの条件で実施された。実験装置の概要を図4.7-1と表4.7-1に、実験条件を表4.7-2に示す。

(2) 解析モデルと解析条件

解析モデルを図4.7-2に、解析条件を表4.7-3に示す。実験装置サイズや実験条件に関するものは実験と合致するよう設定し、物理・化学的な挙動を計算するための解析パラメータについては本報告書全体で統一させたものを使用した。また、小規模漏えい燃焼の解析に特有であるプール拡がり面積については、燃焼実験 II の解析と同様に下式から設定した。

$$\text{プール面積} = W (1 - f) F / R$$

ここで、W：ナトリウム漏えい率 [kg/h]

f：スプレー燃焼割合 [-]

F：床ライナ上の堆積物／全堆積物（=1.0）

R：燃焼実験 I におけるプール拡がりの相関（≒25 kg/m²h）

(3) 解析結果

小規模ナトリウムプール燃焼実験 Run F7-2 に関する計算結果と実験結果の比較を図4.7-3から図4.7-11に示す。

(a) ナトリウム反応速度（図4.7-3）

スプレー反応速度とプール反応速度の計算結果を図4.7-3に示す。本図には、実験中の酸素濃度測定データおよび各部温度測定データから計算したナトリウム反応速度も示している。

ナトリウム反応速度の計算結果と測定データからの計算値を比較すると、ASSCOPSによる計算結果は漏えい期間中の反応速度が高めであること、漏えい

終了後の反応が停止する時刻が早いことがわかる。すなわちASSCOPSの計算では漏えいナトリウムの全量を早期に燃焼し尽くしていることを示しているが、これは、漏えい開始と同時にプールが所定の面積に広がるモデルとしていることが原因と考えられる。

(b) 受け皿温度 (図4.7-4)

受け皿温度の計算結果は、漏えい期間中は測定データを上回る温度を示しており、また漏えい終了後については測定データよりも速い降温速度を示している。この傾向は、前述のナトリウム反応速度と同じ理由から説明可能である。すなわち、ASSCOPSによるナトリウム反応速度の計算結果が漏えい期間中は高く漏えい終了後は低めであるため、受け皿温度の計算結果がこのような傾向となったものと考えられる。

(c) 断熱材温度 (図4.7-5)

断熱材温度の計算結果は、その温度推移から、漏えい期間中は測定データよりも少し高めの受熱量を示し、漏えい終了後は低めの受熱量となっていることを表している。この傾向はナトリウム反応速度および受け皿温度の計算結果と同様の傾向である。

(d) ガス温度 (図4.7-6)

ガス温度の計算結果は、漏えい期間中は測定データよりも高めで推移している。ナトリウム反応速度や受け皿温度の比較結果と整合するものである。

(e) 壁温度 (図4.7-7)

壁温度の計算結果はガス温度のそれと同様に、漏えい期間中は測定データよりも高めで推移している。

(f) 酸素濃度 (図4.7-8)

図4.7-8に示す酸素濃度の計算結果から、漏えい期間中は酸素消費が大きめに計算され、また燃焼停止が早めに計算されていることがわかる。この傾向についても前述のナトリウム反応速度の傾向と整合している。なお、実験測定値のうち、排煙ダクト内の酸素濃度は他と異なる推移を示しているが、これはガスサンプリング系の閉塞によって測定データに影響が現れたものである。

(g) 水蒸気濃度 (図4.7-9)

水蒸気濃度の計算結果は、図4.7-9に示すように、測定データよりも少し高め

であるが時間的な推移は良く一致している。計算結果と測定データの両者ともに、容器内雰囲気エアロゾルが浮遊する時間帯（漏えい期間中）は容器入口よりも低い濃度で推移し、浮遊エアロゾルが減少するにつれて入口での濃度と同程度まで回復している。初期の水蒸気濃度低下は計算結果の方が早期に現れているが、これは漏えい開始と同時にプールが所定の面積に拡がる計算モデルとしているためと考えられる。

(h) エアロゾル濃度（図4.7-10）

浮遊エアロゾル濃度の計算結果は、前述の水蒸気濃度と同様にプール面積のモデリングに起因して初期の濃度上昇時期が早めとなっているが、漏えい期間中の値は測定データとほぼ一致している。

(i) 堆積物内のナトリウム化合物濃度（図4.7-11）

図4.7-11に、堆積物内のナトリウム化合物濃度の計算結果を示す。同図には実験後の堆積物サンプルの化学分析結果（計34サンプルの分析結果の算術平均値）も示した。計算結果によれば、金属ナトリウムは残っておらず、供給空气中的水蒸気と酸化ナトリウムの反応によってNaOHが生成されているが、この傾向は実験での堆積物分析結果を良く表している。

小規模ナトリウムプール燃焼実験 Run F7-2 の計算結果と測定値の比較について以下のようにまとめられる。

- ① ナトリウム反応速度、酸素濃度、セル内の各部温度（雰囲気温度、受け皿温度、壁温度）の比較から、小規模ナトリウム漏えい時の燃焼挙動と周囲への熱的影響について、計算結果はやや過大評価の傾向にあるがその時間推移は測定データと良く一致することが確認された。また、浮遊エアロゾル濃度および水蒸気濃度については、計算結果と測定データは良い一致が確認された。
- ② 計算結果の全般にわたって、漏えい開始初期と漏えい終了後の挙動に測定データと異なる推移が見られたが、これはプールが漏えい開始と同時に所定の面積まで拡がる計算モデルとしているためであり、プール燃焼速度の初期の上昇時期と終了時期を早めに計算することが原因と考えられる。

表4.7-1 小規模プール燃焼実験Run F7 の実験装置の概要

試験容器形状	円筒形
試験容器内径 m	1.3
試験容器高さ m	2.8
試験容器容積 m ³	3
試験容器壁面積 m ²	11
試験容器壁厚さ mm	8
ナトリウム受け皿面積 m ²	1.0 (φ1.128 m)
ナトリウム受け皿高さ cm	10
ナトリウム受け皿厚さ mm	6
スプレィノズル高さ m	1.5 (受け皿からの高さ)

表4.7-2 小規模プール燃焼実験Run F7-2 の実験条件

ナトリウム漏えい速度 kg/h	約12 (平均値)
ナトリウム漏えい量 kg	5
ナトリウム漏えい時間 min	約25
ナトリウム温度 °C	約507
換気流量 m ³ /min	3
初期酸素濃度 %	21
給気ガスの水蒸気濃度 %	1.6
初期雰囲気ガス圧力 kPa	101
初期容器内温度 °C	24

表4.7-3 小規模プール燃焼実験Run F7-2 の解析条件

	項目	条件	
ナトリウム漏えい・燃焼条件	漏えい流量	11.9 kg/h	
	漏えい時間	24 分 53 秒	
	漏えいナトリウム量	4.94 kg	
	漏えいナトリウム温度	506 °C	
	スプレイコーン形状	円錐台形	
		上部直径 : 4.35 mm 拡がり角度 : 20 ° 高さ : 1.5 m	
	スプレイ液滴径	4.6 mm (質量平均)	
プール面積	0.434 m ²		
雰囲気条件	セル容積	3 m ³	
	セル内初期酸素濃度	21 %	
	セル内初期ガス温度、湿度	24 °C、1 wt.%	
	換気流量	3 m ³ /min	
構造物条件	容器形状	円筒形	
	容器直径 (内径)	1.3 m	
	容器高さ (実効高さ)	2.8 m (2.2 m)	
	容器肉厚	8 mm	
	受け皿面積	1 m ²	
	容器内壁 (含、天井) 面積	10.84 m ²	
輻射伝熱条件	壁からガスの輻射伝熱係数	0.79	
	プールからガスの輻射伝熱係数	0.65	
化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応及び生成割合 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$	
		$2\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$ $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 \% : 40 \%$	
	ナトリウムと水蒸気の反応 (スプレイとプールに共通)	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$	
	エアロゾル状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 反応速度係数 : $1.0 \times 10^{-10} \text{ mol-H}_2\text{O}/\text{個/s}$	
		プール状ナトリウム酸化物と水蒸気の反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$ 水蒸気の拡散により反応
	水素と酸素の再結合割合		生成水素の90%が再結合
	エアロゾル条件	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
エアロゾル落下高さ		1.165 m	
エアロゾル密度		2130 kg/m ³	
エアロゾル粒径		$1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$	

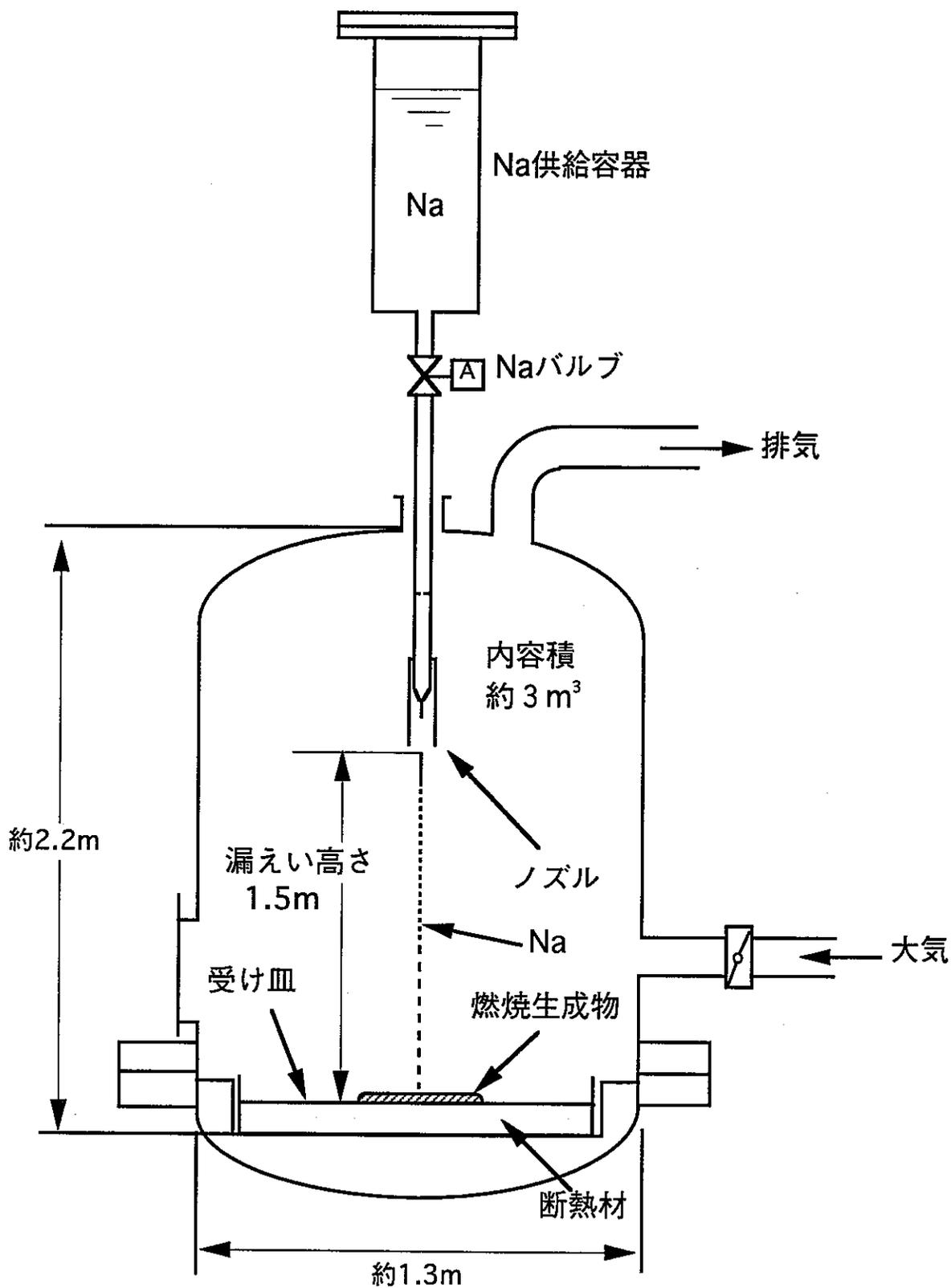


図4.7-1 Run F7 試験装置 (FRAT-1 装置)

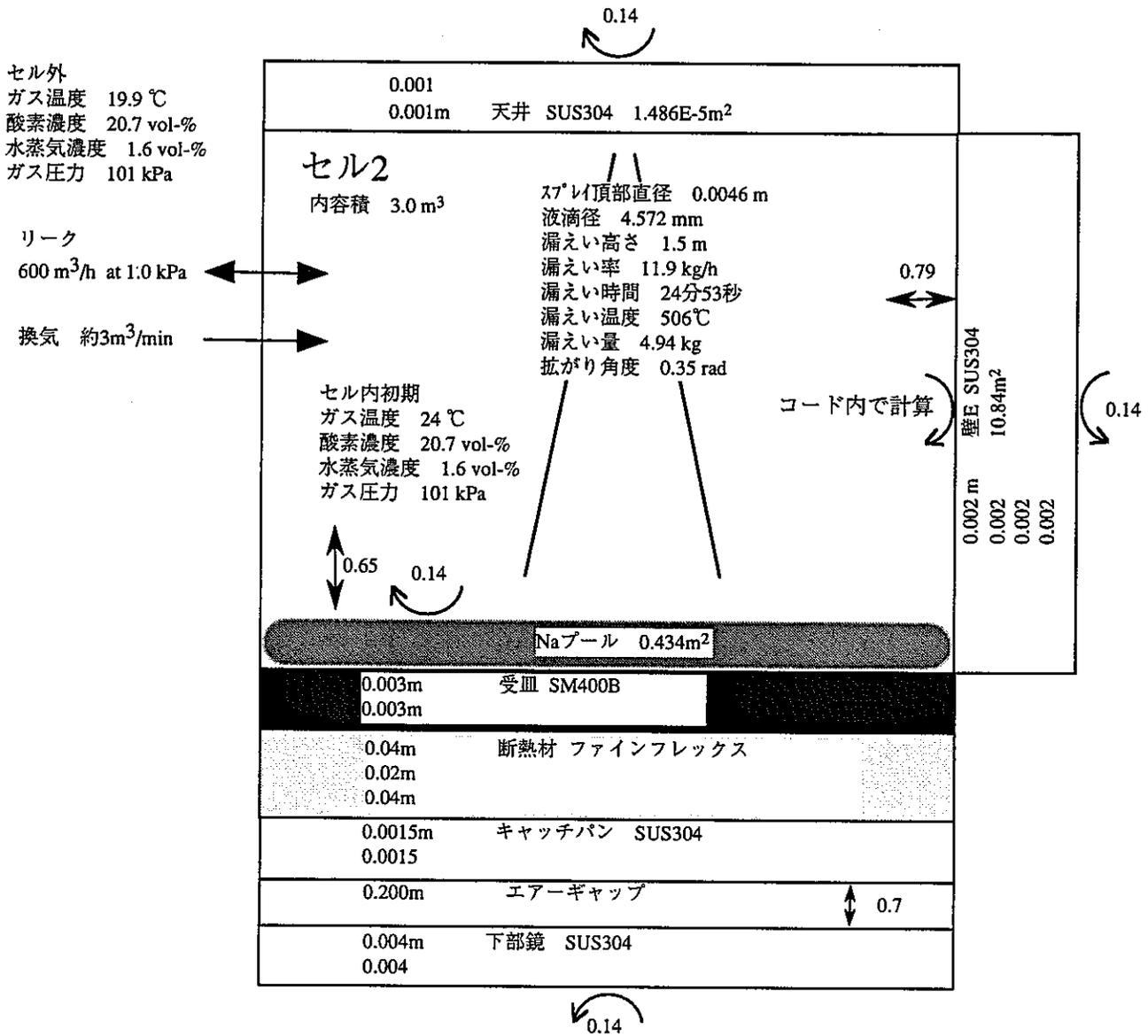


図4.7-2 Run F7-2 解析モデル

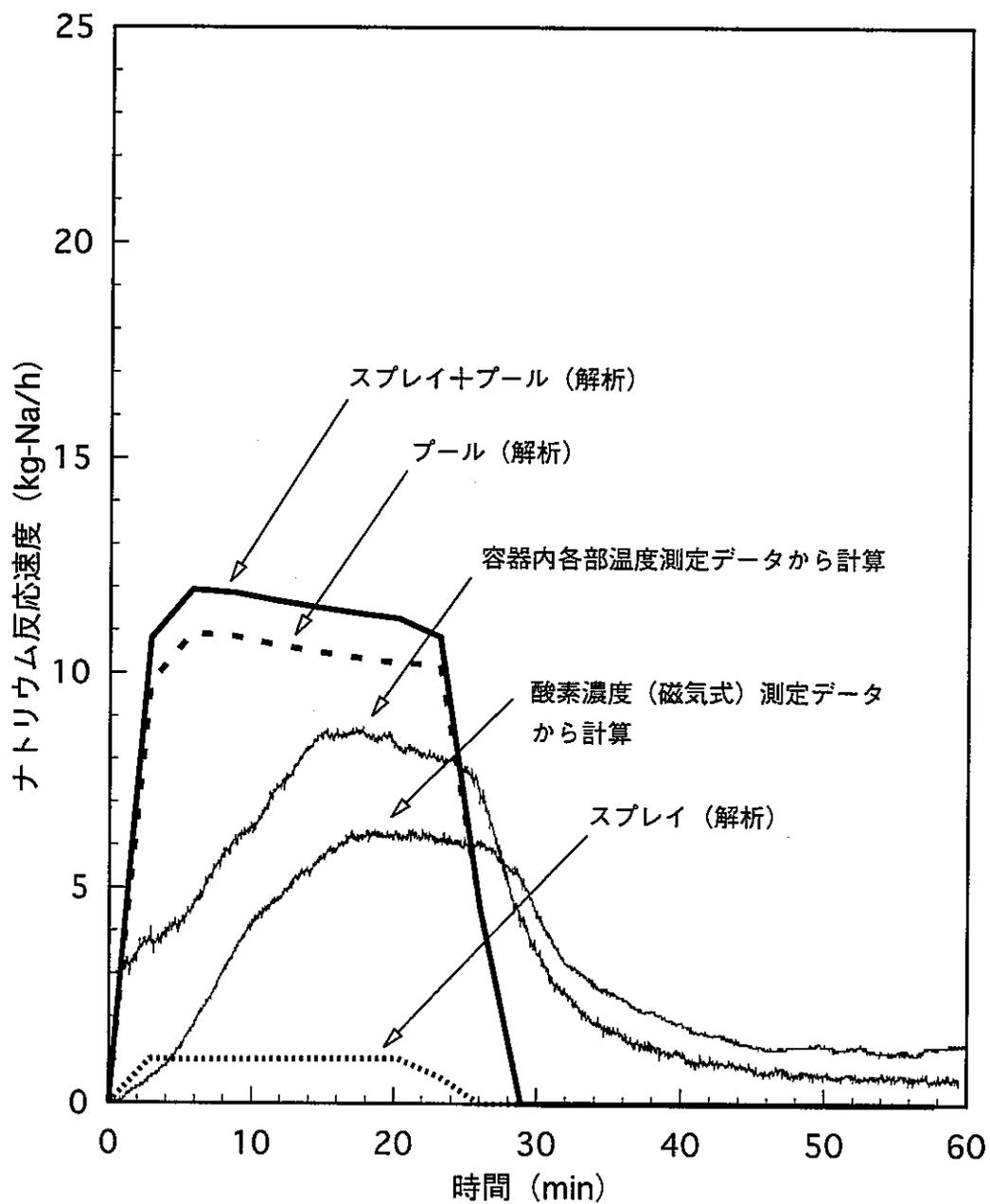


図4.7-3 ナトリウム反応速度の計算結果 (Run-F7-2)

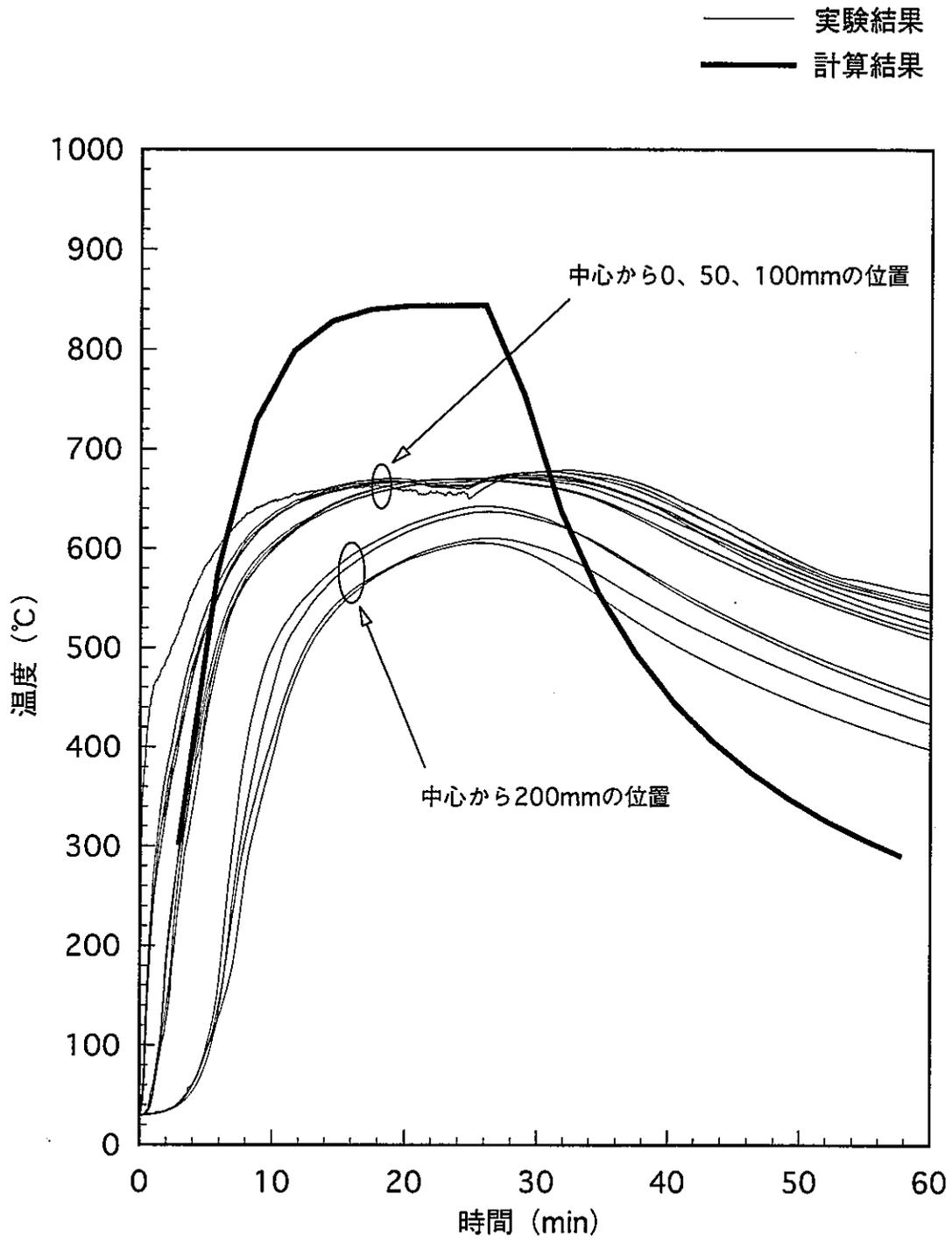


図4.7-4 受け皿温度の比較 (Run-F7-2)

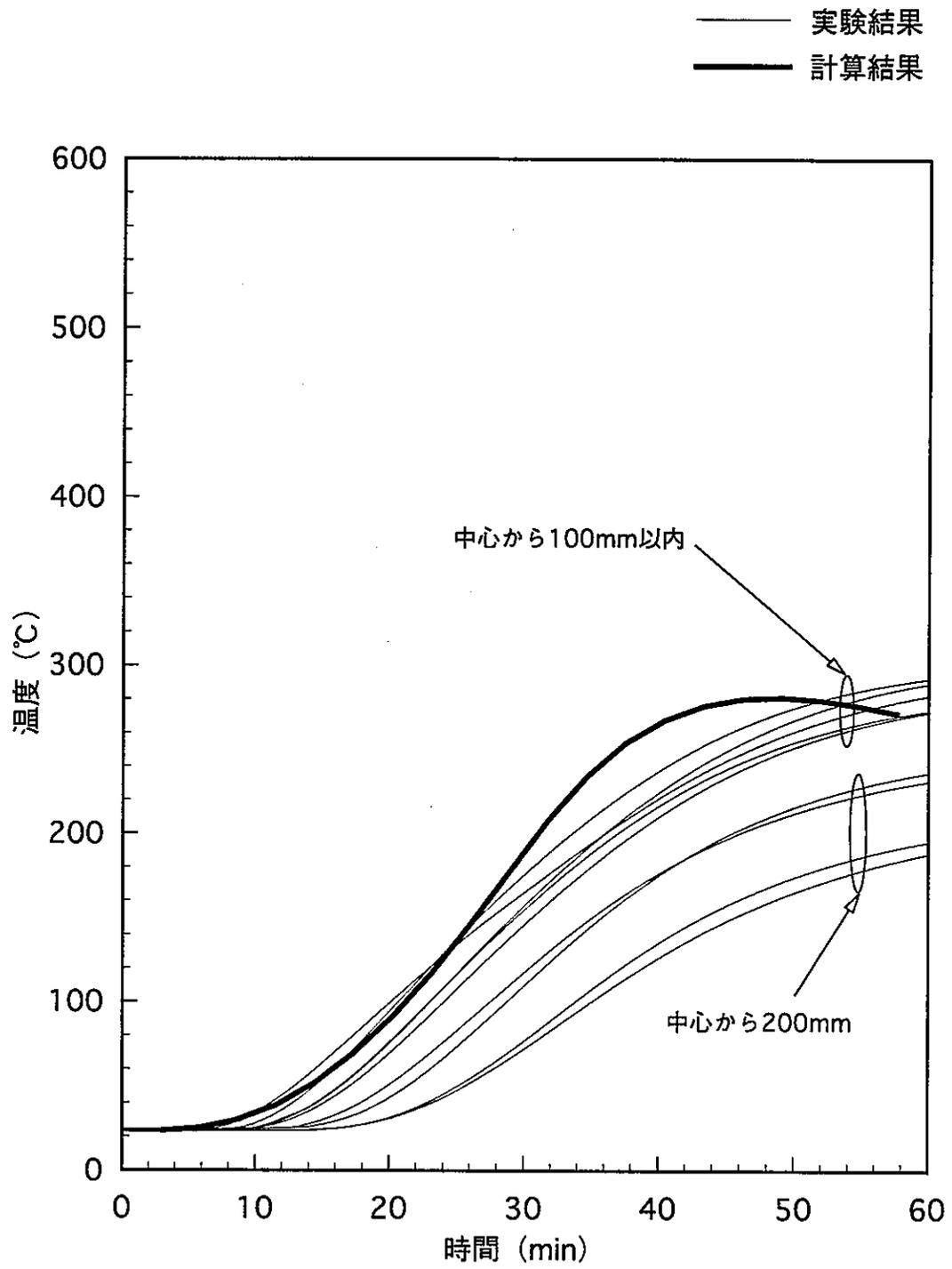


図4.7-5 断熱材温度の比較 (Run-F7-2)

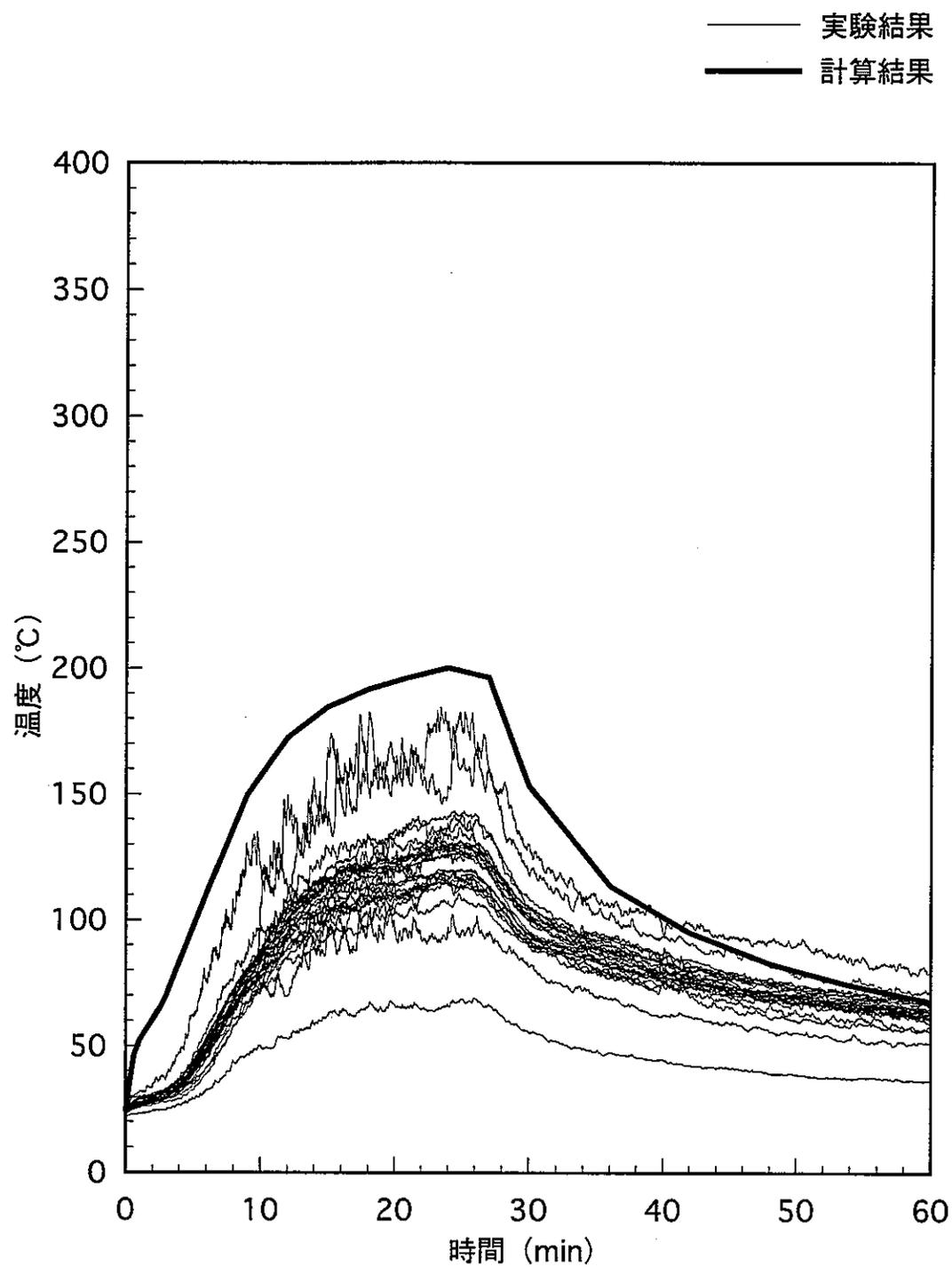


図4.7-6 ガス温度の比較 (Run-F7-2)

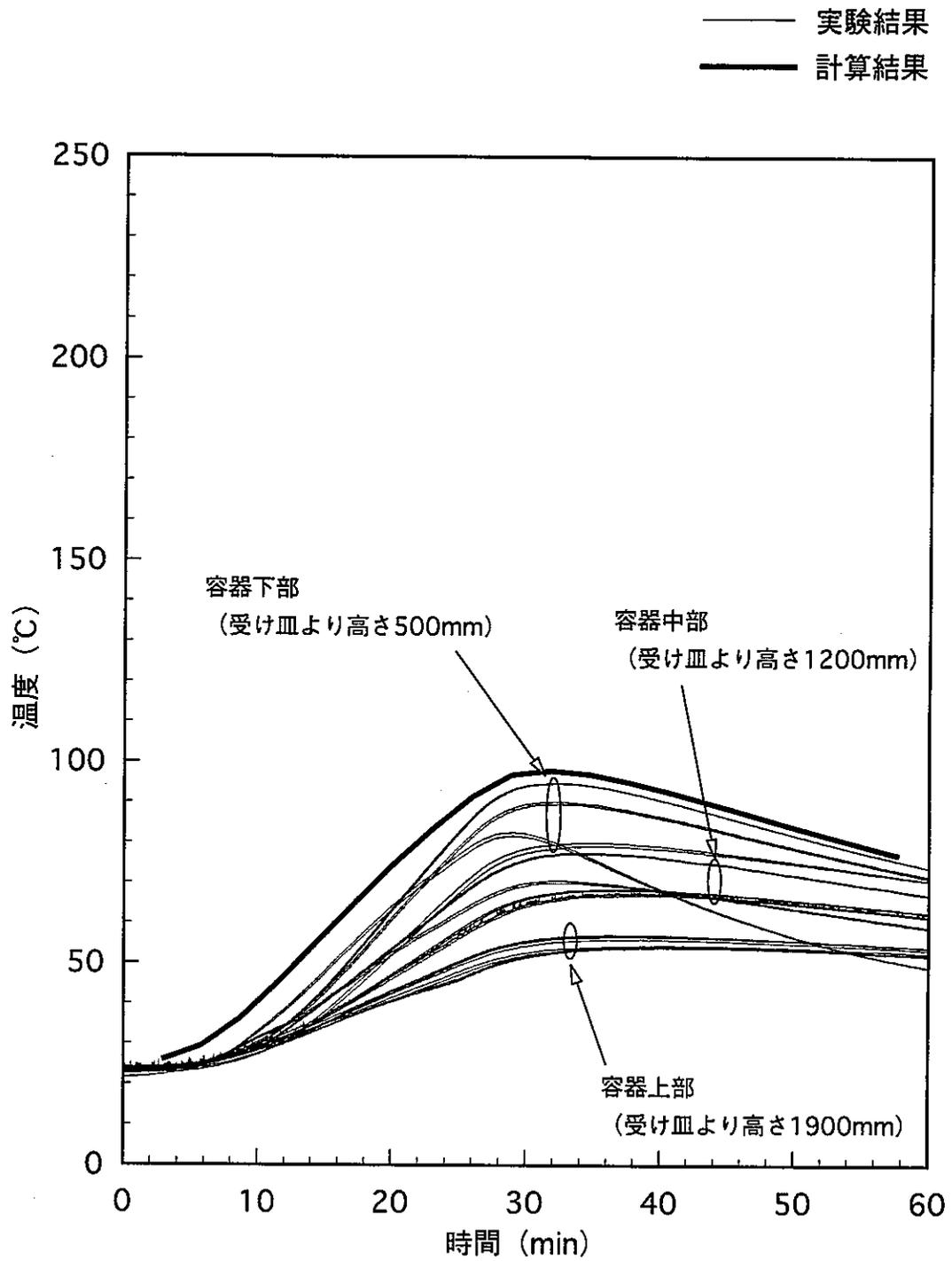


図4.7-7 壁温度の比較 (Run-F7-2)

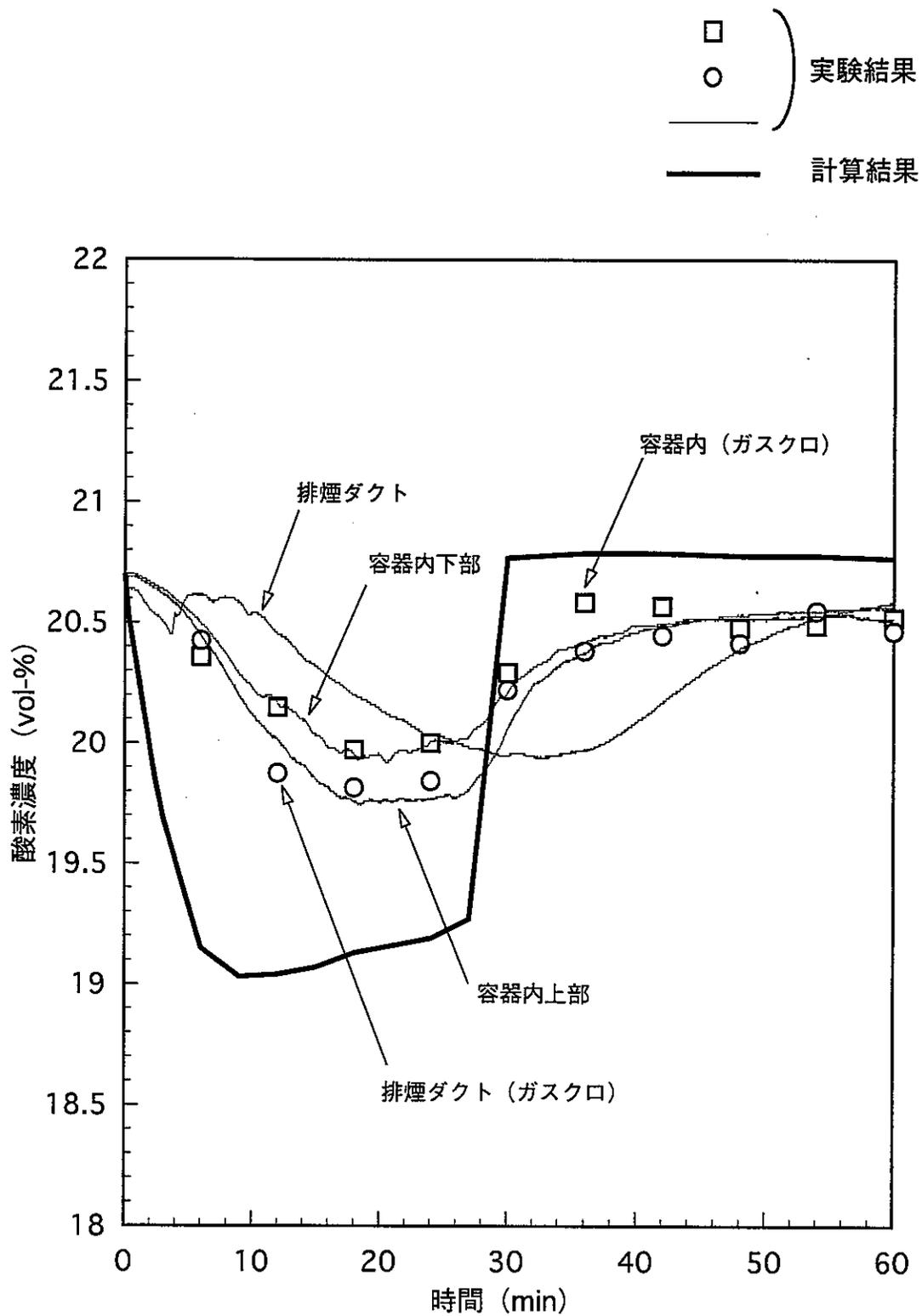


図4.7-8 酸素濃度の比較 (Run-F7-2)

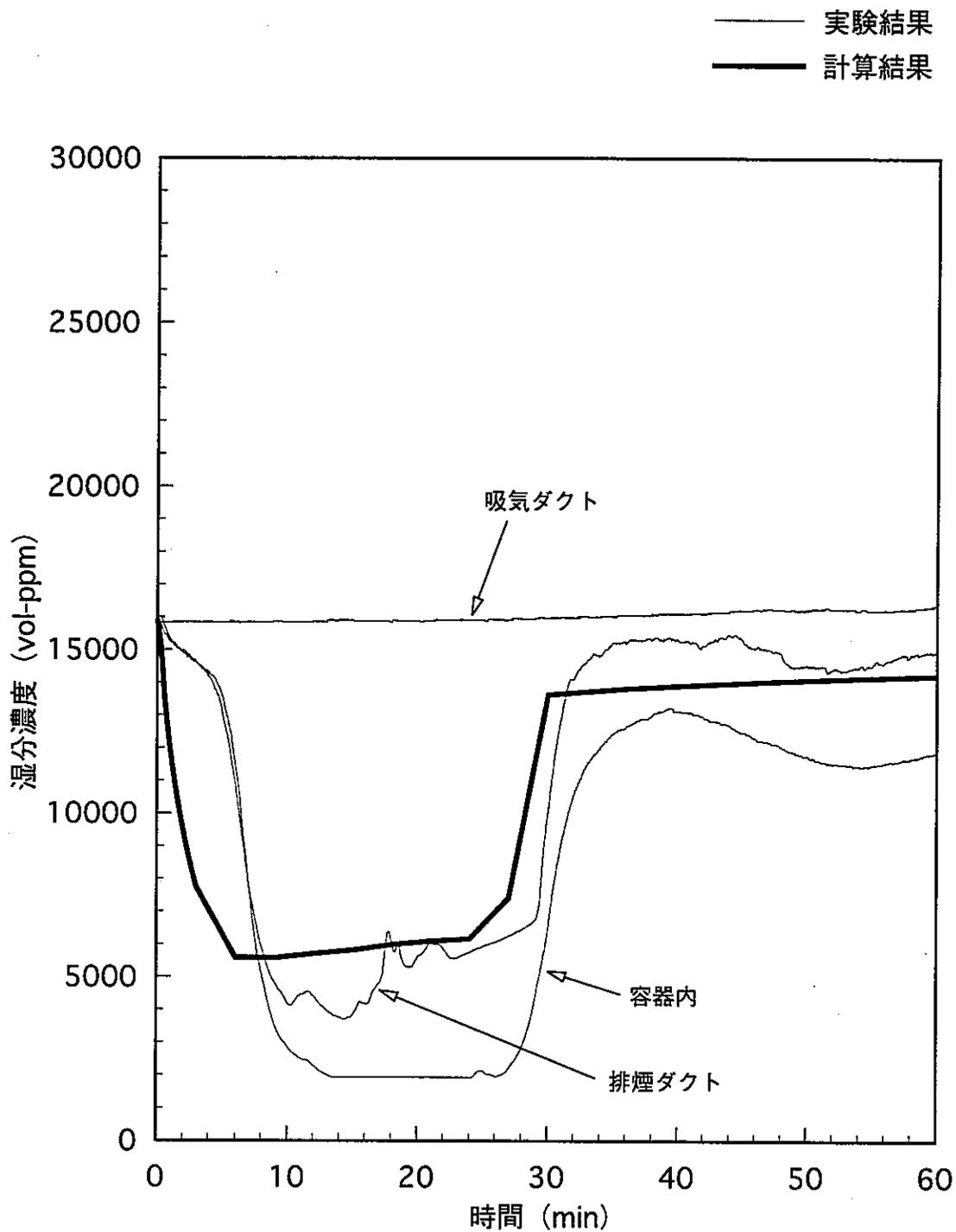


図4.7-9 水蒸気濃度の比較 (Run-F7-2)

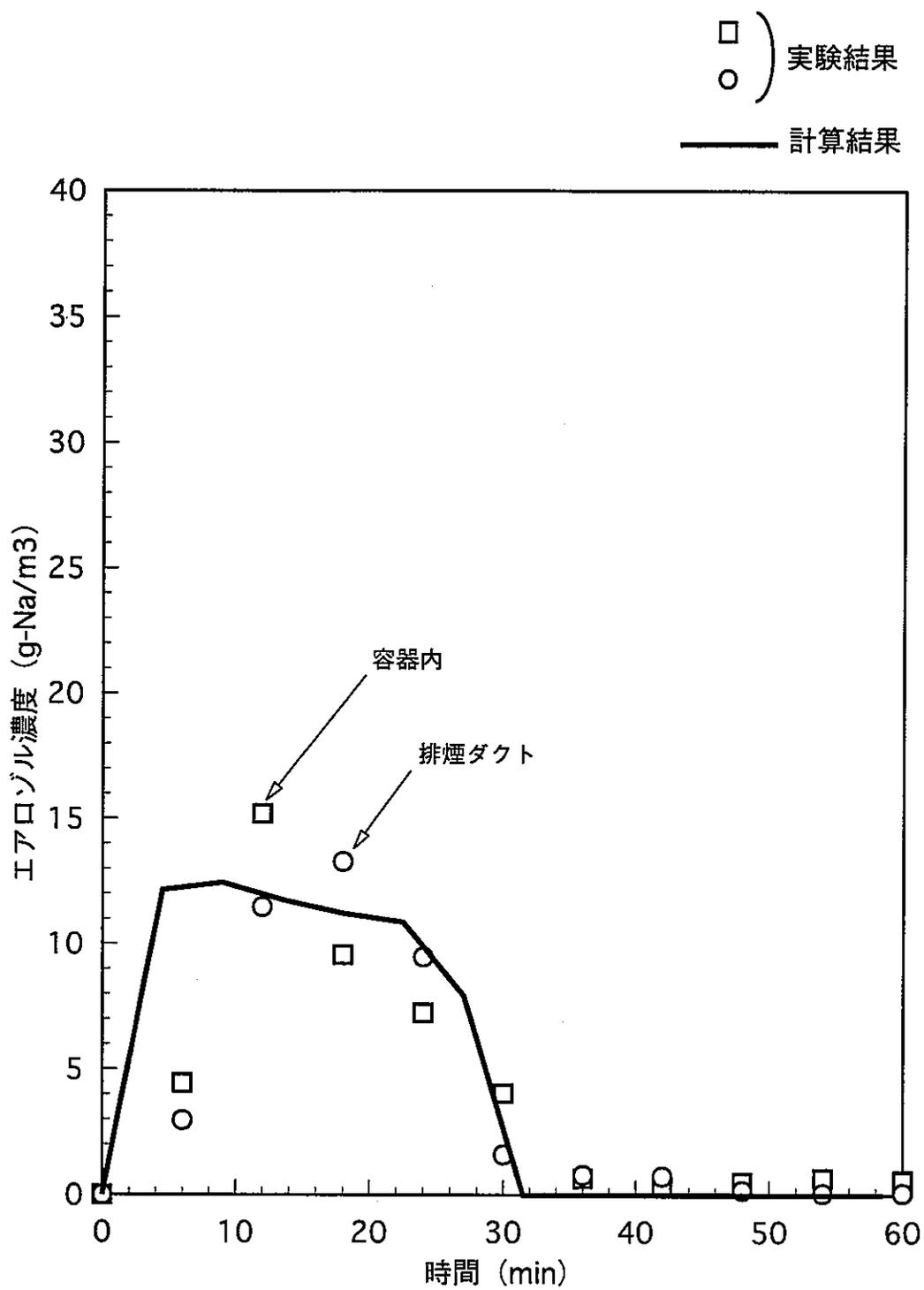


図4.7-10 エアロゾル濃度の比較 (Run-F7-2)

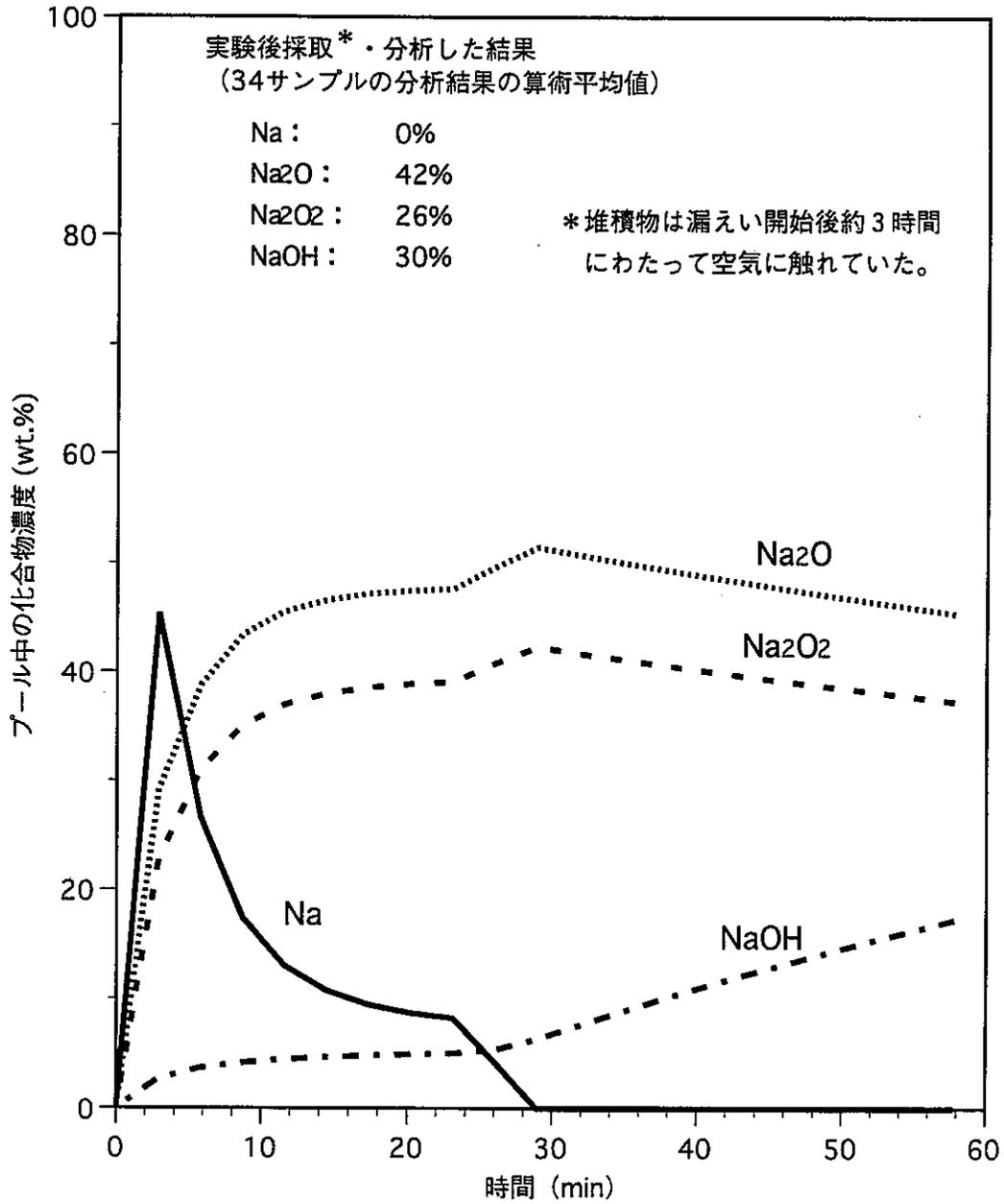


図4.7-11 堆積物内のナトリウム化合物濃度の計算結果 (Run-F7-2)

5. 結 言

ナトリウム燃焼解析コードASSCOPS Version 2を使用して、プール燃焼試験、スプレー燃焼試験、「もんじゅ」事故後に実施したナトリウム漏えい燃焼実験等の7種類の試験を対象とした解析を実施した。ASSCOPSコードによる解析結果と実験測定値を比較した結果をまとめると以下のようなになる。

- ①ナトリウムが受け皿内に溜まってその上面で燃焼するプール燃焼挙動とそれに伴う熱移行挙動（ガス圧力、酸素濃度、各部温度等の推移）について、解析結果は実験測定値を概ね再現できるものであった。
- ②ナトリウムが液滴状に落下飛散しながら燃焼するスプレー燃焼挙動とそれに伴う熱移行挙動について、適切または保守的な解析結果が得られることを確認した。
- ③ナトリウム燃焼と熱移行挙動に湿分やエアロゾルが影響を与えるような実験についても解析を行った結果、統一して使用した解析パラメータを含め、解析手法全体が適切または保守的な結果を導くものであることを確認した。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、大洗工学センター、要素技術開発部、プラント安全工学グループの三宅収グループリーダーから適切な助言と指導をいただいた。また、もんじゅ建設所、改革推進グループの中井良大主幹をはじめグループ員の方々からは、報告書作成にあたってコメントをいただいた。なお、本報告書に掲載した各種実験解析の多くは、それぞれの実験解析担当のプラント安全工学グループ員が作成した入力データに基づいて実施したものである。これらの方々に謹んで謝意を表します。

参考文献

- (1) 石川、他、「ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS の開発と検証」、PNC TN9410 97-030、1997年4月
- (2) 大野、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
- (3) 木曾原、他、「ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version 2.0 の検証－プール燃焼－」、PNC TN9410 98-037、1998年4月
- (4) 中桐、他、「ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version 2.0 によるナトリウム漏えい燃焼実験-I (Run-E6) の解析」、PNC TN9410 97-102、1997年11月
- (5) P. Beiriger, et al., "SOFIRE-II USER REPORT," AI-AEC-13055 (1973)
- (6) P. R. Shire, "SPRAY Code User's Report," HEDL-TME 76-94 (1977)
- (7) 橋口、他、「液体ナトリウムの輻射率」、日本原子力学会昭和53年年会 A55
- (8) O. Miyake, et al., "Comparison of SOFIRE-MII Predictions with the Results of German FAUNA F5 and F6 Tests," PNC TN941 85-67 (1985)
- (9) W. Cherdrón, et al., "Determination of Sodium Fire Aerosol Process Coefficients from FAUNA Experiments," Proc. of the CSNI Specialists Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, NUREG/CR-1724 (1980)
- (10) D. W. Cooper, "Prediction of the Rates of Chemical Transformation of Sodium Fire Aerosols," Proc. of the CSNI Specialists Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, NUREG/CR-1724 (1980)
- (11) R. N. Newman, et al., "The Burning Rates of Sodium Pool Fires," Combustion and Flame, 33 (1978)
- (12) S. C. Yung, "Sodium Pool Fire Model for CONACS Code," ANS Winter Mtg. (1982)
- (13) R. K. Hilliard, et al., "Aerosol Behavior during Sodium Pool Fires in a Large Vessel - CSTF Tests AB1 and AB2," HEDL-TME 79-28
- (14) W. Cherdrón, et al., 「FAUNA 施設における燃焼面積12m²までのナトリウム燃焼実験」、PNC TN951 84-01 (独 KfK3041 の翻訳)、1984年1月
- (15) 宮原、他、「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験 (I) - 空気雰囲気におけるナトリウムプール燃焼試験 Run-D1」、PNC TN9410 87-081、1987年5月
- (16) 中原、他、「ナトリウムスプレ燃焼試験成果報告書 - 第1分冊；ナトリウムスプレ燃焼実験-」、PNC TJ222 82-16(1)、1982年12月
- (17) 中原、他、「ナトリウムスプレ燃焼試験成果報告書 - 第2分冊；実験データ集-」、PNC TJ222 82-16(2)、1982年12月

- (18) 森井、他、「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験(Ⅲ) (空気雰囲気における大規模Naスプレー燃焼試験 Run-E1)」、PNC ZN9410 86-124、1986年12月
- (19) 川田、他、「もんじゅナトリウム漏洩事故の原因究明 -ナトリウム漏えい燃焼実験-I-」、PNC TN9410 97-036、1997年1月
- (20) 川田、他、「ナトリウム漏えい燃焼実験-I 実験データ集」、PNC TN9450 97-005、1997年3月
- (21) 内山、他、「もんじゅナトリウム漏洩事故の原因究明 -ナトリウム漏えい燃焼実験-II-」、PNC TN9410 97-051、1997年3月
- (22) 内山、他、「ナトリウム漏えい燃焼実験-II 実験データ集」、PNC TN9450 97-006、1997年3月
- (23) 吉田、他、「ナトリウム化合物溶融環境中における炭素鋼の腐食特性評価 - 溶融塩型腐食環境 (NaOH-Na₂O₂系) の腐食速度評価式 -」、JNC TN9400 2000-024、1999年10月
- (24) 二神、他、「ナトリウムプール燃焼実験 Run-F7 (中間報告)」、PNC TN9410 98-074、1998年8月