

# ナトリウム燃焼解析コードASSCOPSの開発と検証

1997年4月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

公開資料  
PNC TN9410 97-030  
1997年4月

## ナトリウム燃焼解析コードASSCOPSの開発と検証

石川 浩康\*, 大野 修司\*, 宮原 信哉\*,  
三宅 収\*, 田辺 裕美\*, 前田 清彦\*\*

### 要 旨

高速炉の安全評価におけるナトリウム漏えい燃焼の解析において、スプレイ燃焼とプール燃焼をお互いの影響を考慮しながら同時に取り扱うことが可能なようにするため、スプレイ燃焼解析コードSPRAY-ⅢMとプール燃焼解析コードSOFIRE-MⅡを結合させた新たなナトリウム燃焼解析コードASSCOPS (Analysis of Simultaneous Sodium Combustions in Pool and Spray) を開発した。

開発したASSCOPSコードの妥当性を検証するため、内容積21m<sup>3</sup>の試験容器を用いて実施したナトリウムスプレー燃焼の実験結果を解析し、以下の結論を得た。

- ① 窒素雰囲気においては、SPRAY-ⅢMコードでガスから壁への熱移行量が過小評価であった点について改善され、ガス圧力・温度に関してほぼ妥当な評価をする
- ② 空気雰囲気においても、SPRAY-ⅢMコードで全般的に過小評価であった点について改善され、ガス圧力・温度に関してほぼ妥当な評価をする
- ③ ガスと壁との間の輻射伝熱とプール燃焼を考慮しない「もんじゅ」パラメータを用いた場合には、窒素雰囲気および空気雰囲気ともにガス圧力・ガス温度に関して保守的な評価をする

これらの結論から、SPRAY-ⅢMコードを用いた従来の解析における課題を解決できたことを確認した。

---

\* 大洗工学センター安全工学部プラント安全工学室  
\*\* 大洗工学センター安全工学部

April, 1997

## Development and Validation of Sodium Fire Analysis Code, ASSCOPS

Hiroyasu Ishikawa\*, Shuji Ohno\*, Shinya Miyahara\*,  
Osamu Miyake\*, Hiromi Tanabe\* and Kiyohiko Maeda\*\*

### Abstract

A sodium fire analysis code, ASSCOPS (Analysis of Simultaneous Sodium Combustions in Pool and Spray) was developed coupling the computer codes of SPRAY-IIIM and SOFIRE-MII to assess temperature-pressure transients resulting from sodium spray and pool combustions, simultaneously.

The validation of ASSCOPS was conducted using the experimental results obtained from sodium spray fire experiments using 21 m<sup>3</sup> vessel and the accuracy of calculated results was discussed. The following results were obtained:

#### 1) Study under inert gas atmosphere

The comparison between analysis and experiment with regard to the pressure and the temperature showed a good agreement.

#### 2) Study under air atmosphere

The comparison between analysis and experiment with regard to the pressure and the temperature also showed a good agreement.

#### 3) Effects of parameter used in evaluating the design of Monju

The peak pressure and temperature obtained by the analysis overestimates the experimental results.

From these results, it was concluded that the development and validation of ASSCOPS indicate a improvement on the burning and the heat transfer models in SPRAY-IIIM.

---

\* Plant Safety Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center

\*\* Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center

## 目 次

ページ

I 緒言	1
II ASSCOPSコードの開発	3
1. SPRAY-III M コードとSOFIRE-M II コードの結合	
-ASSCOPS コード・バージョン 1.0の開発	3
1.1 はじめに	3
1.2 結合の概要	3
1.3 SOFIRE-M II コードへの湿分反応の組込み	3
1.3.1 反応式と反応熱	4
1.3.2 反応によるナトリウム消費量の計算	4
1.3.3 消費される湿分の量の計算	6
1.3.4 反応に伴う発熱量の計算	6
1.4 SPRAY-」 M コードとSOFIRE-M「 コードの結合	7
1.4.1 結合の概要	7
1.4.2 コードの修正	8
2. ASSCOPSコードとしての改良および新たな機能の追加	
-ASSCOPS コード・バージョン 1.1の開発	17
2.1 ASSCOPS Ver.1.0 の改良	17
2.1.1 ナトリウム燃焼反応比（酸化物/過酸化物生成比）に関する改良	17
2.1.2 燃焼に伴う反応生成熱に関する改良	18
2.2 新たな機能の追加	18
2.2.1 スプレイ室（セル2）における輻射伝熱の取扱い	18
2.2.2 セル間のナトリウム輸送に関する機能の追加	19
2.2.3 準3セル通気モデルの追加	20
III ASSCOPSコード（Ver.1.1）によるナトリウムスプレイ燃焼実験の解析	21
1. 解析の概要	21
2. 解析条件	21
2.1 基準ケースの解析条件	21
2.2 「もんじゅ」パラメータケースの解析条件	22
3. 解析結果と測定値の比較	22
3.1 窒素雰囲気試験（TASP-N2, TASP-N4）	22

3.1.1 TASP-N2 試験	22
3.1.2 TASP-N4 試験	24
3.2 空気雰囲気試験 (TASP-A1, TASP-A2)	25
3.2.1 TASP-A1 試験	25
3.2.2 TASP-A2 試験	27
4. まとめ	29
 IV SPRAY-III Mコードに対する課題の解決	30
 V 結言	33
 謝辞	34
 参考文献	35
 図表集 (表リストおよび図リスト参照)	37
 Appendix : ASSCOPS Ver.1.1 の計算モデルについて	79
A-1 ASSCOPS Ver.1.1 の計算機能の概要	81
A-2 各セルで扱うモデル	81
A-3 SOFIRE モジュール (プール燃焼計算) で扱う計算モデル	81
A-4 SPRAY モジュール (スプレイ燃焼計算) で扱う計算モデル	84
A-5 セル間通気モデル	88

## 表リスト

- 表III-1 解析条件(1) -SPRAYモジュール入力値-
- 表III-2 解析条件(2-1) -TASP-N2 スプレイ流量-
- 表III-3 解析条件(2-2) -TASP-N4 スプレイ流量-
- 表III-4 解析条件(2-3) -TASP-A1 スプレイ流量-
- 表III-5 解析条件(2-4) -TASP-A2 スプレイ流量-
- 表III-6 解析条件(3) -構造材の物性値と初期温度-
- 表A-1 Sparrow-Gregg のクライテリア

## 図リスト

- 図I-1 2次主冷却系配管室でのナトリウム漏えい解析の体系
- 図II-1 ナトリウム漏えい燃焼解析モデルの体系図
- 図II-2 結合方法の概要
- 図II-3 SPRAYモジュールを組込んだSOFIREモジュールの流れ
- 図II-4 スプレー室の熱輸送のパス
- 図II-5 通気モデル
- 図III-1 試験装置の概要
- 図III-2 解析に用いる壁と床の構造材の幾何学的配置
- 図III-3 実験における熱電対の配置
- 図III-4 ガス圧力 (TASP-N2 基準ケース)
- 図III-5 ガス温度 (TASP-N2 基準ケース)
- 図III-6 ナトリウムプール温度 (TASP-N2 基準ケース)
- 図III-7 壁温度 (TASP-N2 基準ケース)
- 図III-8 酸素濃度 (TASP-N2 基準ケース)
- 図III-9 ガス圧力 (TASP-N2 もんじゅパラメータケース)
- 図III-10 ガス温度 (TASP-N2 もんじゅパラメータケース)
- 図III-11 ナトリウムプール温度 (TASP-N2 もんじゅパラメータケース)
- 図III-12 壁温度 (TASP-N2 もんじゅパラメータケース)
- 図III-13 酸素濃度 (TASP-N2 もんじゅパラメータケース)
- 図III-14 ガス圧力 (TASP-N4 基準ケース)
- 図III-15 ガス温度 (TASP-N4 基準ケース)
- 図III-16 ナトリウムプール温度 (TASP-N4 基準ケース)
- 図III-17 壁温度 (TASP-N4 基準ケース)

- 図III-18 酸素濃度 (TASP-N4 基準ケース)  
 図III-19 ガス圧力 (TASP-N4 もんじゅパラメータケース)  
 図III-20 ガス温度 (TASP-N4 もんじゅパラメータケース)  
 図III-21 ナトリウムプール温度 (TASP-N4 もんじゅパラメータケース)  
 図III-22 壁温度 (TASP-N4 もんじゅパラメータケース)  
 図III-23 酸素濃度 (TASP-N4 もんじゅパラメータケース)  
 図III-24 ガス圧力 (TASP-A1 基準ケース)  
 図III-25 ガス温度 (TASP-A1 基準ケース)  
 図III-26 ナトリウムプール温度 (TASP-A1 基準ケース)  
 図III-27 壁温度 (TASP-A1 基準ケース)  
 図III-28 酸素濃度 (TASP-A1 基準ケース)  
 図III-29 ガス圧力 (TASP-A1 もんじゅパラメータケース)  
 図III-30 ガス温度 (TASP-A1 もんじゅパラメータケース)  
 図III-31 ナトリウムプール温度 (TASP-A1 もんじゅパラメータケース)  
 図III-32 壁温度 (TASP-A1 もんじゅパラメータケース)  
 図III-33 酸素濃度 (TASP-A1 もんじゅパラメータケース)  
 図III-34 ガス圧力 (TASP-A2 基準ケース)  
 図III-35 ガス温度 (TASP-A2 基準ケース)  
 図III-36 ナトリウムプール温度 (TASP-A2 基準ケース)  
 図III-37 壁温度 (TASP-A2 基準ケース)  
 図III-38 酸素濃度 (TASP-A2 基準ケース)  
 図III-39 ガス圧力 (TASP-A2 もんじゅパラメータケース)  
 図III-40 ガス温度 (TASP-A2 もんじゅパラメータケース)  
 図III-41 ナトリウムプール温度 (TASP-A2 もんじゅパラメータケース)  
 図III-42 壁温度 (TASP-A2 もんじゅパラメータケース)  
 図III-43 酸素濃度 (TASP-A2 もんじゅパラメータケース)  
 図IV-1 ガス圧力 (TASP-A2 基準ケース)  
 図IV-2 ガス温度 (TASP-A2 基準ケース)  
 図IV-3 ナトリウムプール温度 (TASP-A2 基準ケース)  
 図IV-4 壁温度 (TASP-A2 基準ケース)  
 図IV-5 ナトリウム燃焼量 (TASP-A2 基準ケース)  
 図A-1 ASSCOPSコードの計算機能ブロック図  
 図A-2 ASSCOPSコードの熱とマスに係わるネットワーク・モデル  
 図A-3 プール燃焼モデルの概念図  
 図A-4 スプレイ燃焼モデルの概念図

## I 緒言

高速炉において冷却材ナトリウムが配管等のバウンダリから漏えいする事故<sup>1)</sup>（1次冷却剤漏えい事故および2次冷却剤漏えい事故）が発生した場合、漏えいしたナトリウムは雰囲気中の酸素や湿分と反応（燃焼）し、反応に伴う熱を発生する。また、発生した熱は、輻射および対流による熱伝達、ならびに熱伝導により雰囲気および構造材の温度を上昇させ、それに伴い部屋内の圧力も上昇させる。一方、高速炉の安全性を確保するためには、液体ナトリウムの漏えい燃焼に至る事故が発生した場合でも、熱および圧力によってプラントの安全上重要な機器や設備の健全性が損なわれないことが必須の条件となる。したがって、ナトリウム漏えい燃焼に伴う温度と圧力の上昇に係る事象を評価することは、高速炉の安全評価において重要である。

このため、実機すなわち「もんじゅ」の安全評価においては、ナトリウムの漏えい燃焼形態としてスプレイ（液滴）状とプール状を想定し、スプレイ燃焼とスプレイ燃焼の未燃焼分ナトリウムが形成するプールの燃焼の両方を評価している。その一例として、図I-1に2次主冷却系配管室でのナトリウム漏えい燃焼の解析体系を示す。解析では、図I-1に示したように、複数の部屋を対象とした体系において、一つの部屋でスプレイ燃焼を、別の部屋でプール燃焼を同時に想定し、お互いの部屋のガスの通気も考慮しつつ各部屋の温度と圧力等を評価している。この解析を行うにあたっては、従来は、各々独立に開発されたスプレイ燃焼解析コード SPRAY-ⅢM とプール燃焼解析コード SOFIRE-MⅡ を使用し、SPRAY-ⅢMコードによる解析結果をSOFIRE-MⅡコードによる解析の入力データに反映させることでお互いの影響を考慮していた。しかしながら、本来二つの部屋で同時に進行するスプレイ燃焼とプール燃焼を、解析コードにおいてもお互いの影響を考慮しながら同時に取り扱うことが可能なようにすることは、解析結果の精度を向上させる上で重要である。また、従来の解析方法は煩雑さを伴うため、解析作業をより迅速かつ確実に行う観点からも改善が必要であった。

SPRAY-ⅢMコードとSOFIRE-MⅡコードの国内における検証は、前者については1982年に委託研究として実施されたナトリウムスプレイ燃焼実験の結果<sup>2)3)</sup>を用いた解析<sup>4)</sup>で、後者については1976年に委託研究として実施されたナトリウムプール燃焼実験の結果を用いた解析とドイツKfK（現FZK）のFAUNA施設で実施されたナトリウムプール燃焼実験の結果<sup>5)</sup>を用いた解析が行われている。検証結果は、プール燃焼については良好な結果が得られているものの、スプレイ燃焼については、特に空気雰囲気条件において、同時に起こるプール燃焼の効果をSPRAY-ⅢMコードで取り扱うことができないために、解析が過小評価傾向になり<sup>4)</sup>、非保守側の評価をするような解釈を受けざるをえない状況にあった。これは、純然たるスプレイ燃焼実験を行うことの困難さに起因するものである。した

がって、このようなスプレイ燃焼とプール燃焼が同時に起こる事象を解析するためのコード開発も望まれているところであった。

以上に述べたような背景と要請に基づき、SPRAY-ⅢMコードとSOFIRE-MⅡコードを結合させた新たなナトリウム燃焼解析コードASSCOPS (Analysis of Simultaneous Sodium Combustions in Pool and Spray) を開発し、スプレイ燃焼とプール燃焼をお互いの影響を考慮しながら取り扱うことを可能にした。そして、昭和60年2月18日から昭和61年3月25日にかけて行われた「もんじゅ」原子炉設置変更許可申請に係わる作業では、2次冷却材漏えい事故の評価においてASSCOPSコードがその解析ツールとして用いられた。

本報告書は、ASSCOPSコードを用いて上述したナトリウムスプレイ実験<sup>2),3)</sup>を再解析した結果をまとめたものである。今回の解析では、実験において装置の床部受皿に生じたプール燃焼を考慮した。以下、第Ⅱ章では解析に使用したASSCOPSコード・バージョン1.1までの開発についてその内容を説明し、第Ⅲ章でASSCOPSコード・バージョン1.1によるナトリウムスプレイ燃焼実験の解析について述べる。更に、第Ⅳ章では、第Ⅱ,Ⅲ章の内容を受け、SPRAY-ⅢMコードに対する課題<sup>4)</sup>が解決したことを述べる。第Ⅴ章は結言である。

## II ASSCOPSコードの開発

### 1. SPRAY-ⅢM コードとSOFIRE-MⅡコードの結合

-ASSCOPS コード・バージョン1.0の開発-

#### 1.1 はじめに

スプレイ燃焼解析コード SPRAY-ⅢM<sup>6)</sup>は、スプレイ条件（ナトリウム温度、漏えいナトリウム速度、スプレイ液滴径等）、雰囲気ガス条件（ガス温度、ガス成分等）や構造物条件（材質、温度、表面積等）を入力として、スプレイ燃焼に伴う熱流動計算を行うコードである。一方、プール燃焼解析コード SOFIRE-MⅡは、プール条件（ナトリウム温度、ナトリウム量、プール表面積等）、雰囲気ガス条件（ガス温度、ガス成分等）や構造物条件（材質、温度、表面積等）を入力として、プール燃焼に伴う熱流動計算を行うコードである。

以下において述べる、ASSCOPSコードは、SPRAY-ⅢM コードとSOFIRE-MⅡコードを結合することによって作成したコードであるので、計算モデルは、同等もしくはそれ以上となる。なお、Appendix にASSCOPSコードのプール燃焼モデルおよびスプレイ燃焼モデル等の計算モデルを述べているので参照されたい。

#### 1.2 結合の概要

従来のスプレイ燃焼解析コードSPRAY-ⅢMでは、図II-1に示すスプレイ室（セル2）を密閉かつ円筒形として解析していた。また、プール燃焼解析コードSOFIRE-MⅡでは、プール室（セル1）におけるプール燃焼の影響を室（セル）間のガス通気・漏えいを考慮して解析していたが、スプレイ燃焼を取り扱うことができなかった。

そこで、本作業においては、ナトリウム漏えい時のナトリウム燃焼を総合的に評価することを目的としてSPRAY-ⅢMコードとSOFIRE-MⅡコードを結合させ、セル2でのスプレイ燃焼とセル1でのプール燃焼の同時進行現象を同時に解析するためのASSCOPSコード・バージョン1.0（以下Ver.1.0）を開発した。

開発は、以下の2ステップで実施した。

第1ステップ：SOFIRE-MⅡコードへのナトリウム - 湿分反応の組込み

第2ステップ：SPRAY-ⅢMコードとSOFIRE-MⅡコードの結合

#### 1.3 SOFIRE-MⅡコードへの湿分反応の組込み

SOFIRE-MⅡコードでは、ナトリウムと湿分との反応によるナトリウム消費と反応熱の発生は、並行して進行する酸素との反応に比例するものとして取り扱っている。

このナトリウムと湿分との反応の効果は、単位酸素あたりのナトリウム消費量 S (入力項目No.9959) および単位ナトリウム当たりの発熱量 QC (入力項目No.9960) に対して陽に反映させていることから、セル内のガスに比べて湿分の多い外気の流入時においてもこの値は変換されず、したがって、湿分の取扱いが実際の現象に則していなかった。以上の理由から、SOFIRE-M II コードにおける湿分濃度の変数として、

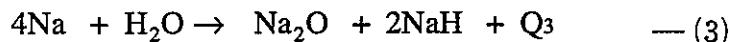
$\text{CH2O(K)}$  : 各室の  $\text{H}_2\text{O}$  の Mass fraction

$\text{CH2OA}$  : 大気の  $\text{H}_2\text{O}$  の Mass fraction

を追加し、これらの値を各タイムステップ毎に更新することとした。また、ナトリウムと湿分の反応は、後述する各タイムステップの濃度を用いて計算し、従来のナトリウム消費量および発熱量に加えることとした。

### 1.3.1 反応式と反応熱

SOFIRE-M II コードで取扱う反応式と反応熱は以下のとおり。



$$Q_1 = 208 \text{ (kcal)} \Rightarrow Q_1' = \frac{1}{4} \times 208 \times \frac{1000}{23} = 2260 \text{ (kcal/kg - Na)}$$

$$Q_2 = 124 \text{ (kcal)} \Rightarrow Q_2' = \frac{1}{2} \times 124 \times \frac{1000}{23} = 2696 \text{ (kcal/kg - Na)}$$

$$Q_3 = 74.4 \text{ (kcal)} \Rightarrow Q_3' = 74.4 \times \frac{1000}{18} = 4133 \text{ (kcal/kg - H}_2\text{O)}$$

### 1.3.2 反応によるナトリウム消費量の計算

燃焼等の反応により消費するナトリウムの量は、酸素との反応（燃焼）により消費する量と湿分との反応により消費する量の和とする。

(i) 酸素との反応により消費するナトリウム量 :  $B_{\text{Na},\text{O}2}$

$\Delta t$  時間において、前出の反応式(1)および(2)により消費される酸素の割合を  $(1-k)$ ,  $k$  とし、酸素消費量を  $B_{\text{O}2}$  (kg)、また、反応式(1)および(2)で消費される酸素モル数を  $[\text{O}_2]_{\text{mol}}^B$  とすれば、以下の要領で  $B_{\text{Na},\text{O}2}$  (kg) を得る。

$$\begin{aligned}
 B_{\text{Na}, \text{O}_2} &= [4(1-k) + 2k] (\text{mol-Na/mol-O}_2) \times [\text{O}_2]_{\text{mol}}^{\text{B}} \\
 &= \left\{ [4(1-k) + 2k] \times \left( \frac{\text{Bo}_2}{32} \right) \right\} (\text{mol-Na}) \times 23 (\text{g-Na/mol-Na}) \\
 &= [2.85(1-k) + 1.4375k] \times \text{Bo}_2 \\
 &= S \text{ Bo}_2 (\text{g-Na})
 \end{aligned}$$

(ii) 湿分との反応による燃焼ナトリウム量 :  $B_{\text{Na}, \text{H}_2\text{O}}$

反応で消費される湿分量は、従来のSOFIRE-M II コードでは計算していなかったことから、次の仮定、「反応で消費される湿分のモル数は、燃焼室中の湿分と酸素のモル濃度比を反応で消費される酸素のモル数に乘じたものとする」をおく。

すなわち、

$$[\text{H}_2\text{O}]_{\text{mol}}^{\text{B}} = \frac{[\text{H}_2\text{O}]_{\text{mol}}}{[\text{O}_2]_{\text{mol}}} \times [\text{O}_2]_{\text{mol}}^{\text{B}}$$

とする。したがって、 $[\text{H}_2\text{O}]_{\text{mol}}^{\text{B}}$  を前出の反応式(3)で消費される湿分のモル数とすれば、以下の要領で  $B_{\text{Na}, \text{H}_2\text{O}}$  (kg) を得る。

$$\begin{aligned}
 \text{但し、} r &= [\text{H}_2\text{O}]_{\text{mol}} / [\text{O}_2]_{\text{mol}} \\
 &= (32/18) \times ([\text{H}_2\text{O}]_{\text{mass}} / [\text{O}_2]_{\text{mass}})
 \end{aligned}$$

とする。

$$\begin{aligned}
 B_{\text{Na}, \text{H}_2\text{O}} &= 4 (\text{mol-Na/mol-H}_2\text{O}) \times [\text{H}_2\text{O}]_{\text{mol}}^{\text{B}} \\
 &= 4 (\text{mol-Na/mol-H}_2\text{O}) \times \frac{[\text{H}_2\text{O}]_{\text{mol}}}{[\text{O}_2]_{\text{mol}}} \times [\text{O}_2]_{\text{mol}}^{\text{B}} \\
 &= 4 r \frac{\text{Bo}_2}{32} (\text{mol-Na}) \\
 &= \frac{4 \times 23}{32} r \text{ Bo}_2 (\text{g-Na}) \\
 &= 2.875 r \text{ Bo}_2 (\text{g-Na})
 \end{aligned}$$

以上、(i) および(ii) より、燃焼ナトリウム量  $B_{\text{Na}}$  は、以下の(4)式で得られることとなる。

$$\begin{aligned} B_{Na} &= B_{Na,O_2} + B_{Na,H_2O} && \text{--- (4)} \\ &= S B_{O_2} + 2.875 r B_{O_2} && \text{--- (4)'} \end{aligned}$$

ここで、(4)'式の第2項  $B_{Na,H_2O}$  が新たに追加した湿分との反応により消費されるナトリウム量となる。

### 1.3.3 消費される湿分の量の計算

前述の 1.3.2 (ii) の仮定から、湿分の消費量  $B_{H_2O}$  は、

$$\begin{aligned} B_{H_2O} &= [H_2O]_{mol}^B \\ &= \frac{[H_2O]_{mol}}{[O_2]_{mol}} \times [O_2]_{mol}^B \\ &= r \left( \frac{B_{O_2}}{32} \right) \text{ (mol-H}_2\text{O)} \\ &= \frac{18}{32} r B_{O_2} \text{ (g-H}_2\text{O)} \end{aligned}$$

で得られる。この減少量に対応して SOFIRE-M II コードの湿分重量濃度を変更する。

### 1.3.4 反応に伴う発熱量の計算

反応に伴う発熱量  $Q$  は、1.3.2 項の消費量の計算と同様に、酸素との反応（燃焼）に伴う発熱量と湿分との反応に伴う発熱量の和とする。

(i) ナトリウムと酸素との反応による発熱量 :  $Q_{Na,O_2}$

$Q_{Na,O_2}$  (kcal) は、1.3.1 項の反応式(1)および(2)の  $Q_1$  と  $Q_2$  を用い、以下の式で得られる。

$$Q_{Na,O_2} = [(1-k)Q_1 + kQ_2] \text{ (kcal/mol-O}_2) \times [O_2]_{mol}^B$$

ここで、 $Q_1$  および  $Q_2$  を (kcal/kg-Na) の単位換算で表わし、各々を  $Q_1'$  および  $Q_2'$  とすれば、

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{Na}, \text{O}_2} &= [4.23(1-k)Q_1' + 2.23kQ_2'] \times \frac{B_{\text{Na}, \text{O}_2}}{32S} \\
 &= \left[ \frac{2.875(1-k)Q_1' + 1.4375kQ_2}{S} \right] \times B_{\text{Na}, \text{O}_2} \\
 &= Q_C B_{\text{Na}, \text{O}_2} \text{ (kcal)}
 \end{aligned}$$

が得られる。

(ii) ナトリウムと湿分の反応による発熱量 :  $Q_{\text{Na}, \text{H}_2\text{O}}$

$Q_{\text{Na}, \text{H}_2\text{O}}$  (kcal) は、1.3.1 項の反応式 (3) の  $Q_3$  を用い、以下の式で得られる。

$$Q_{\text{Na}, \text{H}_2\text{O}} = Q_3 [H_2O]_{\text{mol}}^B$$

ここで、 $Q_3$  を (kcal/kg-Na) の単位換算で表わし、 $Q_3'$  とすれば、

$$Q_{\text{Na}, \text{H}_2\text{O}} = Q_3' \frac{B_{\text{H}_2\text{O}}}{32} \text{ (kcal)}$$

が得られる。

以上 (i) および (ii) より、総発熱量  $Q$  は以下の式となる。

$$\begin{aligned}
 Q &= Q_{\text{Na}, \text{O}_2} + Q_{\text{Na}, \text{H}_2\text{O}} \\
 &= Q_C B_{\text{Na}, \text{O}_2} + Q_3' \frac{B_{\text{H}_2\text{O}}}{32}
 \end{aligned}$$

## 1.4 SPRAY-III M コードと SOFIRE-M II コードの結合

### 1.4.1 結合の概要

結合の概要を図 II-2 示す。結合後の各々の計算は、以下に示す手順で取扱うこととする。

(i) SPRAY-III M コード部分（以下 SPRAY モジュールと記す）を計算して、スプレイ室（セル 2）の諸変数を求め、これらを基準としてプールへのナトリウム流入率、および流入ナトリウム温度を求める。

(ii) 次に、求められたナトリウムの流入率および流入温度を用い、SOFIRE-M II コード部分（以下 SOFIRE モジュールと記す）で 3 セルモデルを計算し、スプレ

イ室（セル2）のガス、酸素、湿分の質量変化率、および熱量変化率を抜き出す。

- (iii) 更に、抜き出した変化率から各々の変化量を求め、それらの変化量を用いて(i)で求めたスプレイ室の諸変数を変更する。そして、変更したスプレイ室（セル2）の値を対応する変数に移す。
- (iv) 現在時点の計算時刻を比較して、次に(i)へ行くか、あるいは(ii)へ行くかを決める。

SPRAYモジュール、SOFIREモジュールとも計算時間の刻み幅( $\Delta t$ )は可変であるため、現在時点での両モジュール時刻の大小により、次の $\Delta t$ でSPRAYモジュールとSOFIREモジュールのどちらを実行させるのか判断する。

#### 1.4.2 コードの修正

##### (1) 改造の方針

図II-3にSPRAYモジュールを組み込んだSOFIREモジュールのフローを示す。修正の方針は以下のとおり。

(i) SPRAYモジュールとSOFIREモジュールで重複する入力に関しては、SOFIREモジュールで与えられたものをSPRAYモジュールに移す。

(ii) SPRAYモジュール稼働中は、通気・漏えいによるガスおよび熱の増減をSPRAYモジュール計算に反映させる。

(iii) スプレイ室（セル2）に生じるナトリウムプールの質量は入力で与える。ここで、受皿上端部の厚さが0のときは、ナトリウムプールの時間変化に応じて、ナトリウムプールと接している壁の面積「AREAW(J,1) J=3,4,5,6」を変更する。同時に、AREAWを用いて計算されている熱容量CAPW、熱伝達係数CWIJも更新する。従来のようにAREAWおよびAREACにはプールと接している面積を入力時に反映させる必要はない。

(iv) (ii)で用いるガスおよび熱の増減量は、SOFIREモジュールからの変化率を用いて計算する。

(v) SOFIREモジュールの計算で用いるスプレイ室（セル2）の諸変数値は、SPRAYモジュールの計算値に通気・漏えいの効果を加えたものとする。

(vi) リスタート機能は、従来通り使用できるようにする。

## (2) SPRAYモジュールの修正

結合に伴うSPRAYモジュールの修正は、以下の要領で行った。

(i) プール室（セル1）での計算（SOFIREモジュールへの引き渡し）に用いるナトリウム漏えい率および漏えいナトリウム温度は、以下の(1)式および(2)式で求める。なお、ナトリウム漏えい率をSYFNA、また漏えいナトリウム温度をSYTNAとすれば、

$$SYFNA = \frac{1}{t_{n+1} - t_n} \cdot \sum_{Loop}^1 TM(NV) \quad ——(1)$$

$$SYTNA = \sum_{Loop}^1 TM(NV) \cdot TS(NV) / \sum_{Loop}^1 TM(NV) \quad ——(2)$$

NV : スプレイコーンの最下層メッシュ番号

TM : スプレイコーン内のナトリウム質量

TS : スプレイコーン内のナトリウム温度

$t_n$  : スプレイ計算時刻（ループ開始前）

$t_{n+\ell}$  : スプレイ計算時刻（ $\ell$ 回のループ終了後）

(ii)スプレイ室（セル2）の実効体積 VOL は、以下の(3)式で求める。

$$VOL = VOLI - (POOL + \sum_{I=1}^{NV} TM(I)) / RHOSI \quad ——(3)$$

VOLI : 初期の実効体積

RHOSI : ナトリウムの密度

## (3) SOFIREモジュールの改造

結合に伴うSOFIREモジュールの改造は以下の要領で行った。

(i) Mainルーチンを図II-3に示すように、SOFIREモジュールとSPRAYモジュールのコントロールとして追加した。

- (ii) 湿分との反応を陽に反映するようにした。
- (iii) ナトリウム流入率および流入温度は、SPRAYモジュールで計算したものと、それぞれSOFIREモジュールのWNEWおよびTNEWに移す。
- (iv) ナトリウムプールと接する側壁の伝熱面積AREAC(3)およびAREAC(6)は、ナトリウム流入量に応じて更新する。（従来のSOFIRE-M II コードは固定であった。）
- (v) 新たに、入力変数として各室および外気の湿分濃度 (CH2O およびCH2OA) と、プール室（セル 2）のナトリウムプール質量(S¥POOL)、さらに、通気による流入ナトリウム熱量の振分けコントロール(I¥HEAT)を追加した。
- (vi) プール室（セル 2）の計算に用いるナトリウムプール質量S¥POOLは入力で与えるが、スプレイコーン最下層のナトリウム質量TM(NV)がゼロ以外の値になった時点で初めてプールを生じさせる。また、その時点でのプール初期温度は床の温度と等しいとする。その後、プール質量は一定とし、プール温度TPOOLのみ以下の(4)式で更新する。

$$TPOOL = \frac{TPOOL \cdot POOL + TS(NV) \cdot TM(NV)}{POOL + TM(NV)} \quad (4)$$

POOL：プールの質量 (=S¥POOL)

- (vii) プール室（セル 2）のガス温度、ガス質量、および壁温度等は、SPRAYモジュール計算の結果と変化率を用いて以下のように更新する。（サブルーチン RSET¥2で実行）

- ① プール室（セル 2）のガス重量、酸素量、湿分量、および熱流入量の変化率から、それぞれの増分量 $\Delta W_g$ 、 $\Delta W_o$ 、 $\Delta W_{H2O}$ および $\Delta Q_g$ を求める。
- ② ガスのモル数およびモル分率は以下に示す要領で計算する。

$$\begin{aligned} GASMOL(t_i) &= GASMOL(t_{i-1}) + \Delta \bar{W}_g / M \\ O2M(t_i) &= O2M(t_{i-1}) + \Delta W_o / 32 \end{aligned}$$

$$H2OM(t_i) = H2OM(t_{i-1}) + \Delta WH / 18$$

$$YO = O2M / GASMOL$$

$$YH2O = H2OM / GASMOL$$

$GASMOL(t_i)$  : 時間  $t_i$  でのガスのモル数

$GASMOL(t_{i-1})$  : 時間  $t_i$  の 1 つ前のタイムステップでのガスのモル数

$O2M(t_i)$  : 時間  $t_i$  での酸素のモル数

$O2M(t_{i-1})$  : 時間  $t_i$  の 1 つ前のタイムステップでの酸素のモル数

$H2OM(t_i)$  : 時間  $t_i$  での湿分のモル数

$H2OM(t_{i-1})$  : 時間  $t_i$  の 1 つ前のタイムステップでの湿分のモル数

③  $\Delta Q_g$  を用いてガス温度を更新する。この時、スプレイコーン外のガス温度、あるいはセル室全体のガス温度を更新するかの判断は、I¥HEAT (インプット) のコントロールによる。

④ ガス密度およびガス圧力は、湿分の分圧を考慮して求める。

⑤ ①～④で得られた結果を対応するSOFIREモジュールの変数に戻す。

⑥ SOFIRE モジュールの壁温度変数は、以下に示す要領でSPRAYモジュールの結果を移す。

床温度  $\leftarrow$  TMPM(\*, 3)

E, S, W, N の壁温度  $\leftarrow$  TMPM(\*, 2)

天井温度  $\leftarrow$  TMPM(\*, 1)

(vii) 圧力変化率DPGASをセットするサブルーチンVENTPは、以下のように修正した。

① セル室内のガス圧力、ガス温度、ガス重量、ガス濃度およびモル数は、それぞれ、P、T、W、 $\alpha$ 、N とし、対流通気による変化を反映させる。また、セル室内の実効体積をVとおく。

② セル1の圧力P<sub>1</sub>とセル2の圧力P<sub>2</sub>の関係において、P<sub>1</sub>>P<sub>2</sub>の場合、圧力を均させるように流動するガス質量を $\Delta W$ とおく。セル1内のガスの内部エネルギーの変化 $\Delta U$ は、以下の要領で求められる。

$$\begin{aligned}\Delta U &= \Delta Q + P_1 \Delta V_1 \\ &= C_v T_1 \Delta W + P_1 \frac{W}{W_1/V_1} \\ &= (C_v + N_1 R / W_1) T_1 \Delta W\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}C_v &\cong \frac{5}{2}R \\ \frac{N_1 - R}{W_1} &= \frac{R}{M} \cong \frac{R}{28} \\ \therefore C_v : \frac{N_1 - R}{W_1} &= 70 : 1\end{aligned}$$

で、 $(N_1 - R) / W_1$  を無視すれば、

$$\begin{aligned}\Delta U &\cong C_v T_1 \Delta W \\ &= \Delta Q\end{aligned}$$

$\Delta U$ は、持ち出される熱量変化 $\Delta Q$ に等しいと近似される。

$\Delta W$ の流出によるセル1の圧力は、 $\Delta P_1$ だけ変化し、

$$P_1 + \Delta P_1 = (N_1 - \Delta N_1) \frac{R}{V_1} (T_1 + \Delta T_1 + 273)$$

で与えられる。 $\Delta N_1$ は、 $\{\Delta W / (\text{セル1ガスの平均分子量})\}$  で与えられるモル変化であり、 $\Delta T_1$ はガスの流出により変化するガスの温度変化分である。ここで $\Delta U$ を求める場合の近似を考慮するならば、仕事による温度変化は無視できるから、

$$\Delta T_1 \cong 0$$

とおける。したがって、

$$\begin{aligned}P_1 + \Delta P_1 &= \frac{R}{V_1} (N_1 - \Delta N_1) K_1 \quad (K_1 = T_1 + 273) \\ &= P_1 - \frac{R}{V_1} K_1 \Delta N_1 \\ &= P_1 - P_1 \frac{\Delta N_1}{N_1} \\ &= P_1 - P_1 \frac{\Delta W}{W_1}\end{aligned}$$

となり  $\Delta P_1$  は、

$$\Delta P_1 = -\frac{P_1}{W_1} \Delta W$$

となる。

次に  $\Delta W$  の流入によるセル 2 の圧力変化  $\Delta P_2$  は

$$P_2 + \Delta P_2 = (N_2 + \Delta N_2) \cdot (K_2 + \Delta T_2)$$

で与えられる。 $\Delta N_2$  は組成の違うセル 1 からのガス流入によるセル 2 内のモル数の増加分であり、

$$\Delta N_2 = \left[ \frac{1 - \alpha'_{O_2} - \alpha'_{H_2O}}{28} + \frac{\alpha_{O_2}}{32} + \frac{\alpha_{H_2O}}{18} \right] \Delta W \equiv \beta_1 \Delta W$$

で与えられる。 $\Delta T_2$  はガス流入による温度変化で、前と同様にセル 2 内のガスになされた仕事による温度変化分は無視でき、

$$\begin{aligned} T_2 + \Delta T_2 &= \frac{\Delta Q + T_2 W_2 C_v}{(W_2 + \Delta W) C_v} \\ &= \frac{T_2 W_2 + T_1 \Delta W}{W_2 + \Delta W} \\ &= T_2 + \frac{\Delta W}{W_2 + \Delta W} (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

ここで、

$$\frac{\Delta W}{W_2} \ll 1$$

とすれば、

$$\Delta T_2 \equiv \frac{T_1 - T_2}{W_2} \Delta W$$

とあらわされる。したがって、

$$\begin{aligned}
 P_2 + \Delta P_2 &= \frac{R}{V_2} (N_2 + \beta_1 \Delta W) (K_2 + \Delta T_2) \\
 &= P_2 + \frac{R}{V_2} N_2 \frac{T_1 - T_2}{W_2} \Delta W \\
 &\quad + \frac{R}{V_2} \beta_1 \Delta W K_2 + \frac{R}{V_2} \beta_1 \frac{T_1 - T_2}{W_2} (\Delta W)^2
 \end{aligned}$$

となり、ここで  $(\Delta W)^2$  を無視すれば、

$$P_2 + \Delta P_2 \equiv P_2 + \frac{P_2}{W_2 K_2} (T_1 - T_2) \Delta W + \frac{P_1}{W_1} \cdot \frac{V_1 K_2}{V_2 K_1} \Delta W$$

より  $\Delta P_2$  は、

$$\Delta P_2 = \left[ \frac{P_1}{W_1} \cdot \frac{V_1 K_2}{V_2 K_1} + \frac{P_2}{W_2} \cdot \frac{T_1 - T_2}{K_2} \right] \Delta W$$

とあらわされる。

圧力均衡の

$$P_1 + \Delta P_1 = P_2 + \Delta P_2$$

なる条件をつければ、流出量と圧力変化は

$$\Delta W = \frac{P_1 - P_2}{\frac{P_1}{W_1} \left( 1 + \frac{V_1 K_2}{V_2 K_1} \right) + \frac{P_2}{W_2} \cdot \frac{T_1 - T_2}{K_2}}$$

$$\Delta P_1 = - \frac{P_1}{W_1} \Delta W$$

$$\Delta P_2 = \left[ \frac{P_1}{W_1} \cdot \frac{V_1 K_2}{V_2 K_1} + \frac{P_2}{W_2} \cdot \frac{T_1 - T_2}{K_2} \right] \Delta W$$

とまとめられる。

各々の変化率は  $\Delta t$  (= 計算の刻み幅DTI) で割って

$$\dot{W} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned}\dot{P}_1 &= \frac{\Delta P_1}{\Delta t} \\ \dot{P}_2 &= \frac{\Delta P_2}{\Delta t}\end{aligned}$$

を得る。

③ セル1とセル2の圧力が  $P_1 < P_2$  の場合は、②と同様に

$$\begin{aligned}\Delta W &= \frac{P_2 - P_1}{\frac{P_2}{W_2} \left( 1 + \frac{V_2 K_1}{V_1 K_2} \right) + \frac{P_1}{W_1} \cdot \frac{T_2 - T_1}{K_1}} \\ \Delta P_1 &= \left[ \frac{P_2}{W_2} \cdot \frac{V_2 K_1}{V_1 K_2} + \frac{P_1}{W_1} \cdot \frac{T_2 - T_1}{K_1} \right] \Delta W \\ \Delta P_2 &= -\frac{P_2}{W_2} \Delta W\end{aligned}$$

が得られる。

④ ②および③から

$$WGP(1, 2) = \dot{W}$$

$$DPGAS(1) = \dot{P}_1$$

$$DPGAS(2) = \dot{P}_2$$

$$PPGAS(1) = P_1 + \Delta P_1 - P0_1$$

$$PPGAS(2) = P_2 + \Delta P_2 - P0_2$$

とセットする。それ以外についてのVENTPの変数は変更しない。但し、  
P0は初期のガス圧力である。

(viii) 湿分の反応減少により失われる熱量を以下の式で反映する。

$$QLOSS = CVH2O \times TGAS(1) \times SWHB$$

$CVH2O : H_2O$  のCv = 0.34 (kcal/kg °C)

$TGAS(1)$  : セル1のガス温度

$SWHB$  : 反応で消費される (= BH2O)

(ix) 入力項目の変更

- ・項目番号 9959(S) :  $Na_2O_2$  の生成割合を入力する。この時、プログラム中

で使用する従来の S は、

$$S = 2.88 \times (1 - k) + 1.44 \times k$$

として求める。

- ・項目番号 9960(QC)：もしゼロならば、デフォルト値として

$$Q_c = \frac{1}{S} [(1-k) \cdot 2.88 \cdot Q'_1 + k \cdot 1.44 \cdot Q'_2]$$

で求められる値をセットする。

- ・項目番号 9996(RCLM)：コラム燃焼は扱えないので、必ず「ゼロ」を入力する。

(x) SPRAY モジュール入力データのうち次のものをSOFIREモジュールデータによりセットする。（但し、SPRAYモジュールの入力データが省略されている場合のみ）

- ・ ALINER (セル壁面積)  $\leftarrow \sum_{j=2}^6 \text{AREAW}(j, 2)$
- ・ PSIA (初期ガス圧力)  $\leftarrow \text{PGAS0}(2)$
- ・ TGI (初期霧囲気ガス温度)  $\leftarrow \text{TGAS0}(2)$
- ・ YH2OI (初期湿分率)  $\leftarrow \text{CH2O}(2)$ から求められるモル分率
- ・ VOL (霧囲気容積)  $\leftarrow \text{VOL}(2)$
- ・ YOI (初期酸素濃度)  $\leftarrow \text{CO2O}(2)$ から求められるモル分率
- ・ DIAM (実効セル径)  $\leftarrow$  天井面積を円に等価したときの直径で

$$2 * \sqrt{\text{AREAW}(2, 2) / \pi}$$

- ・ NA2O2 (Na2O2生成割合%)  $\leftarrow$  入力時の S の値 × 100  
(但し、Na2O2が負の値のときのみ置き替えられる。)
- ・ 壁と床のメッシュ切り  $\leftarrow$  セル 2 の E 壁と床のメッシュ切りに等しくする。衝突面（天井）のメッシュ組成はセル 2 の天井と同じものと移す。

(xi) セル 2 のガス温度の変化率は、サブルーチン RSET¥2 で更新された温度

FYTGASを用いてセットされる。

$$DTGAS(2) = \frac{FYTGAS_{n+1} - FYTGAS_n}{t_{n+1} - t_n}$$

但し、 $t_n$  は、SPRAYモジュールの計算時刻である。

- (xii) スプレイ計算終了後も引続いてナトリウムをセル1のプールへ流入させる場合、そのナトリウム質量を新たに追加した入力変数「SYNAIN」で与える。この場合、流入率および流入温度には、スプレイ計算最終時の流入率および流入温度を用いる。もし、最終時のナトリウム流入率がゼロまたは小さな値のためシミュレーション時間 (TMAX) までに「SYNAIN」が全て流入しきれない場合、時刻 TMAX までに全て流入できうるよう流入率 WNEW を変更する。
- (xiii) 新たに追加された出力は、「湿分濃度」および「湿分重量」で、湿分濃度のプロット指示は酸素濃度のプロットコントロールと同じものを用いる。  
(酸素濃度のプロット指示があれば湿分のプロットも出力される。)

## 2. ASSCOPSコードとしての改良および新たな機能の追加

### -ASSCOPS コード・バージョン1.1の開発-

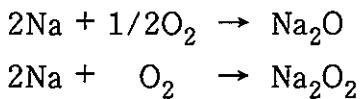
前述したとおり、SPRAY-III MコードとSOFIRE-M IIコードを結合させ、ASSCOPSコード・バージョン1.0（以下ASSCOPS Ver.1.0）を完成させたことにより、スプレイ燃焼とプール燃焼を同時に取り扱えるようになったばかりではなく、各々単独での評価よりもより現実的な評価が可能となった。

ここでは更に、燃焼解析コードとしての機能を充実させるため、Ver.1.0に対しての改良、および新たな機能の追加を行い、ASSCOPSコード・バージョン1.1（以下ASSCOPS Ver.1.1）を開発したので、その内容を以下に記述する。

### 2.1 ASSCOPS Ver.1.0 の改良

#### 2.1.1 ナトリウム燃焼反応比（酸化物/過酸化物生成比）に関する改良

ASSCOPS Ver.1.0 におけるナトリウム燃焼反応の比、即ち、酸化ナトリウム ( $Na_2O$ ) 生成反応と過酸化ナトリウム ( $Na_2O_2$ ) 生成反応

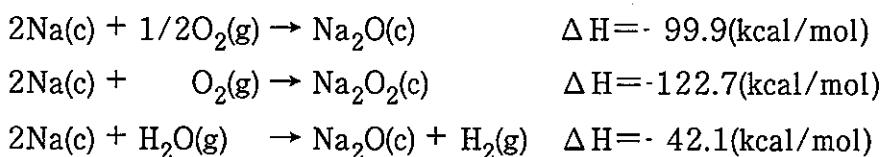


を生じさせる比率は、入力で指定した値を固定値とし、計算実行中に変更させることが出来なかった。そこで、ASSCOPS Ver.1.1においては、SOFIRE モジュールおよび SPRAY モジュールに対し、セル内雰囲気の酸素濃度に応じて切り替えるよう改良した。すなわち、生成反応比を酸素濃度の関数としテーブル入力によって切り替えられるようにした。

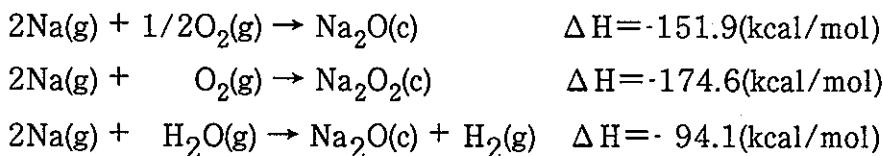
### 2.1.2 燃焼に伴う反応生成熱に関する改良

ASSCOPS Ver.1.0 のスプレイ燃焼に関して詳細に調査した結果、燃焼に伴う反応生成熱を蒸気相反応 (gas-gas 反応) として扱うべきところが、実際のコード内においては固相一気相反応 (crystal-gas 反応) として扱っていた。この点に関して、オリジナルである SPRAY コードのレポート<sup>6)</sup>においては、スプレイ液滴界面からのナトリウム蒸発を考慮するモデルの説明があり、その中にナトリウムと酸素および湿分との反応を扱う熱化学方程式を蒸気相反応 (gas-gas 反応) として扱うとの記述があるものの、現実にはそのようなモデルが採用されていなかった。即ち、スプレイ燃焼の反応生成熱に関しては、SPRAY コードのオリジナル時代からの取扱いに問題があったことになる。そこで、ASSCOPS Ver.1.1においては、スプレイ燃焼に伴う反応生成熱を蒸気相反応 (gas-gas 反応) として扱うように改良した。なお、以下に Ver.1.0 と Ver.1.1 で取り扱う反応生成熱の違いを示す。

- Ver.1.0のスプレイ燃焼で用いていた反応生成熱



- Ver.1.1スプレイ燃焼で用いる反応生成熱



## 2.2 新たな機能の追加

### 2.2.1 スプレイ室（セル2）における輻射伝熱の取扱い

従来のSPRAY-ⅢMコードおよびASSCOPS Ver.1.0においては、スプレイ室（セ

ル2) のナトリウムプールから雰囲気ガス (コーン外部) への輻射伝熱、並びに雰囲気ガス (コーン外部) と壁間の輻射伝熱を取り扱えなかつたかったことから、ASSCOPS Ver.1.1においては上記2種類の熱輸送経路を取り扱えるよう追加した。図II-4にスプレイ室の熱輸送の経路を示す。ここで、スプレイ室 (セル2) のナトリウムプールから雰囲気ガス (コーン外部) への輻射伝熱を QRAD55 (kcal/sec)、雰囲気ガス (コーン外部) と壁間の輻射伝熱を QRAD66 (kcal/sec) とすれば、各々以下の式で求められる。

$$QRAD\ 55 = APOOL \times FIPGO \times 0.1712 \times 10^{-8} \times [(TPOOL + 460)^4 - (TGOUT + 460)^4]$$

$$QRAD\ 66 = APOOL \times FIWGO \times 0.1712 \times 10^{-8} \times [(TSTEEL + 460)^4 - (TGOUT + 460)^4]$$

ここで、

APOOL : プール面積 ; ft<sup>2</sup>

FIPGO : ナトリウムプール／床から雰囲気ガス (コーン外部) への輻射係数

FIWGO : 雰囲気ガス (コーン外部) と壁間の輻射係数

TPOOL : スプレイ室 (セル2) プール温度 ; °F

TSTEEL : 壁温度 ; °F

TGOUT : 雰囲気ガス (コーン外部) 温度 ; °F

$0.01712 \times 10^{-8}$  : Stefan-Boltzmann 係数 ; BTU/h ft<sup>2</sup> R<sup>4</sup>

なお、上記輻射係数は、SPRAY モジュールの計算にのみ有効であるので、スプレイ燃焼が終了して、SOFIRE モジュールがセル2の計算を行うようになると、SOFIRE モジュールの入力データで与える輻射係数が有効となる。したがって、特別な理由がない限りは、SPRAY モジュールのデータとSOFIRE モジュールのデータに矛盾がないよう入力する注意が必要となる。

## 2.2.2 セル間のナトリウム輸送に関する機能の追加

セル間のナトリウム輸送のモデルを図II-5に示す。ASSCOPS Ver.1.0におけるナトリウム輸送モデルは、図II-5の左上に示すように、スプレイ室 (セル2) スプレイコーン最下層のナトリウム温度 {TS(N); Nはコーン最下層のメッシュ番号} とナトリウム流量 (WNa) をプール室 (セル1) へ輸送しており、輸送されたナトリウムが順次プール室 (セル1) のプール中に貯留するようにしていた。このモデルに関してASSCOPS Ver.1.1においては、以下に示すオプションを選択できるように追加した。

①輸送するナトリウム温度を選択するオプション

・スプレイコーン最下層の温度を選択 : オプション 0 or 2

・スプレイ室のナトリウムプール温度を選択 : オプション 1 or 3

②ナトリウムがプール室（セル1）に貯留するかどうかを選択するオプション

・ナトリウムをプール室に順次貯留する : オプション 0 or 1

・ナトリウムをプール室から更に外部へ流出する : オプション 2 or 3

### 2.2.3 準3セル通気モデルの追加

従来のSOFIRE-MⅡコードおよびASSCOPS Ver.1.0においては、対流通気モデルおよび圧力均衡通気モデルを用いて室（セル）間の通気を考慮する2セル通気モデルを取り扱っていた。そこで、ASSCOPS Ver.1.1では、各室（セル）から第3のセルへの通気としてガスリークモデルを組み込み、準3セル通気モデルを追加した。図II-6にこれまでの通気モデルと新たな準3セルモデルを示す。

以上で説明したモデルの使用にあたっては、ASSCOPSコードVer.1.1のインプット・マニュアルとして報告書が整備されている。また、計算モデルの説明を Appendix に示す。

### III ASSCOPSコード（Ver.1.1）によるナトリウムスプレイ燃焼実験の解析

#### 1. 解析の概要

本報告では、ASSCOPS Ver.1.1を検証するために、1982年に委託研究として実施されたナトリウムスプレイ燃焼実験の結果<sup>213)</sup>（以下スプレイ実験）とASSCOPS Ver.1.1による解析の結果を比較し、コードの妥当性について検討した。実験で用いた試験容器の概略を図III-1に示す。

比較の対象としたスプレイ実験の結果は、窒素雰囲気条件でのTASP-N2とTASP-N4、空気雰囲気条件でのTASP-A1とTASP-A2を選定したが、これらの実験結果に対する検証解析は、既にSPRAY-ⅢMコードにより実施され、報告<sup>4)</sup>（以下SPRAY-ⅢM報告）されている。

SPRAY-ⅢM報告としては、特に雰囲気ガスの圧力に着目し、以下(a)(b)の結論を得ている。

- (a) 窒素雰囲気条件での実験に関しては、解析での燃焼速度が過小評価であるにも係わらず、ガス圧力とガス温度共に解析結果がやや过大評価ながら実験結果と比較的よく一致していた。一方では、壁の鋼製ライナ温度が過小評価であったことから、ガスから壁への熱移行量が過小評価であったこと（ガスから壁への輻射を考慮できなかったこと）が原因となり、ガス温度が比較的よく一致し、ガス圧力も連動する形で同様の結果となっていることが判明した。
- (b) 空気雰囲気条件での実験に関しては、燃焼速度が過小評価であることに加え、プール燃焼を考慮できないために床で生じたナトリウムプールがガスから熱を吸収するために、全体として過小評価であることが判明した。

本報告では、SPRAY-ⅢM報告の結論から導かれた改善点を反映させたASSCOPS Ver.1.1を用い、上記の4種類のスプレイ実験の検証解析（以下基準ケース）と、各基準ケースに対して一部の計算上パラメータに実機安全評価の解析で使用された値を適用したケース（以下「もんじゅ」パラメータケース）の4ケース、計8ケースの解析を実施した。

#### 2. 解析条件

##### 2.1 基準ケースの解析条件

基準ケースの解析条件を表III-1からIII-6と図III-2に示す。基準ケースの解析条件は、基本的にはSPRAY-ⅢM報告<sup>4)</sup>で使用した解析条件と同様のものを用いた。ただし、以下に示す(a)に関しては、試験条件へ合わせるように訂正した。また、ASSCOPS Ver.1.1に追加した機能（SPRAY-ⅢMコードには無かった機能）について

ては、以下に示す(b)～(d)のようにオプションを選定した。

(a)壁表面積は、SPRAY-ⅢM 報告においては  $42.4\text{m}^2$  を使用していた。しかし、スプレイ実験の報告書<sup>2)</sup>においては  $33.5\text{m}^2$  が示されていることから、本解析ではこれを正確な値と判断して用いた。

(b)床に生じたナトリウムプールの燃焼に関して、SPRAY-ⅢM コードでは取り扱えなかつたが、ASSCOPS Ver.1.1 では取り扱えるため、これを考慮するモデルを用いた。

(c)ナトリウムプールとスプレイコーン外部ガスの間の輻射伝熱、およびスプレイコーン外部ガスと壁の間の輻射伝熱に関しても、SPRAY-ⅢM コードでは取り扱えなかつたが、ASSCOPS Ver.1.1 では取り扱えるため、これを考慮するモデルを用いた。

(d)ナトリウム燃焼生成物に関しては、SPRAY-ⅢM 報告では酸化ナトリウム（以下  $\text{Na}_2\text{O}$ ）と過酸化ナトリウム（以下  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ）の生成割合をパラメータとしていたが、本解析ではパラメータとせず、窒素雰囲気条件においては  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}_2 = 100/0$  (%)、酸素雰囲気条件においては  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}_2 = 60/40$  (%) と設定した。なお、酸素雰囲気条件における酸化物生成割合は、過去に行われた実験での知見<sup>7)</sup>を参考とした。

## 2.2 「もんじゅ」パラメータケースの解析条件

「もんじゅ」パラメータケースの解析では、基本的な条件は基準ケースと同じであるが、雰囲気圧力の上昇に着目するために、スプレイコーン外部ガスと壁の間の輻射伝熱を無くし、あえてガス温度・圧力を上昇させる条件を設定した。また、純然たるスプレイ室という設定に基づき、ナトリウムプールは設定するが燃焼させないこととした。なお、これらの設定条件は、いずれも「もんじゅ」の安全評価で用いられた条件である。

## 3. 解析結果と測定値の比較

解析結果とスプレイ実験の測定値を比較した。図Ⅲ-3 には、比較に用いた値の測定位置（熱電対取り付け位置）の概略を示す。

### 3.1 窒素雰囲気試験 (TASP-N2, TASP-N4)

#### 3.1.1 TASP-N2 試験

##### (1) 基準ケース

TASP-N2 試験に関して、基準ケース解析結果と測定値の比較を図Ⅲ-4、Ⅲ-5、

III-6、III-7、およびIII-8に示す。

#### ①ガス圧力（図III-4）

ガス圧力解析値は、2点の測定値よりも高い値になり、過大評価となった。したがって、ガス圧力評価は保守的になる。

#### ②ガス温度（図III-5）

ガス温度は解析値として3種類、すなわち、空間を2領域として分けたスプレイコーン内ガス温度およびスプレイコーン外ガス温度、さらに2領域の平均ガス温度を示した。一方、測定値に関しても空間に依存する分布があるものの、比較的解析値と同じような2領域区分としての高温領域（TE326, TE-332, TE-333）と低温領域（TE-305, TE-311, TE-307, TE-313, TE-322）に分離できる。したがって、単純に解析によるスプレイコーン内ガス温度と高温領域測定値を比較、また、解析によるスプレイコーン外ガス温度と低温領域測定値を比較した場合、前者は過小評価傾向、後者は過大評価傾向であった。ただし、スプレイコーン内ガス温度が過小評価傾向となった理由は、各試験値で高温を示した液滴熱電対がいずれもスプレイ液滴が直接降り注ぐ位置（図III-3）にあったことから、ガス温度ではなく、スプレイ液滴の温度を測定したためと推測される。

#### ③ナトリウムプール温度（図III-6）

ナトリウムプール温度の測定値に大きな分布の生じた理由は、受皿へのナトリウム供給率に差があったこと、すなわち落下ナトリウムがスプレイ中心では密、外周方向側で疎という分布があったことと、更に受皿が小さく区分されていたことにより中心から外周方向への流動が無かったことによる。一方、解析値は、ナトリウム落下のあった領域へ一様に拡がるナトリウムプールを設定するので、分布を示すことができなく、測定値の平均値的な値となった。

#### ④壁温度（図III-7）

壁温度は、解析値および測定値の表面側の鋼製ライナ温度と外側のモルタル温度を示すが、測定値のうちTE-505、TE-509、およびTE-514が鋼製ライナ温度を、TE-409Aがモルタルの温度を示している（図III-3）。ただし、TASP-N2試験におけるTE-509は、温度変化率がマイナスとなったので値を示せなかつた。TE-514は、ナトリウムプールからの輻射の影響があり、高い値を示しているが、TE-505と解析による鋼製ライナ温度はよく一致している。また、解析によるモルタル温度は、測定値と良く一致する結果が得られた。

#### ⑤酸素濃度（図III-8）

酸素濃度解析値は、測定値よりも低くなつた。したがって、解析では、燃焼

による酸素消費速度を過大評価したことが分かる。

## (2) もんじゅパラメータケース

基準ケースと同様に、TASP-N2試験に関して、もんじゅパラメータケース解析結果と測定値の比較を図III-9、III-10、III-11、III-12、およびIII-13に示す。

### ①ガス圧力（図III-9）

ガス圧力解析値は、2点の測定値よりも高くなり過大評価した。また、基準ケースよりも過大評価であり、もんじゅパラメータケースでのガス圧力評価は基準ケースよりも保守的になる。

### ②ガス温度（図III-10）

解析によるスプレイコーン外ガス温度と低温領域測定値（TE-305, TE-311, TE-307, TE-313, TE-322）の単純比較においては、解析によるスプレイコーン外ガス温度の方が高くなる結果となった。また、基準ケースと比較しても全体的に高くなかった。

### ③ナトリウムプール温度（図III-11）

基準ケースと同様に、解析値が測定値の平均温度程度になった。

### ④壁温度（図III-12）

もんじゅパラメータの影響により、鋼製ライナの温度解析値は測定値（TE-505, TE-514）より低く過小評価となった。しかし、モルタル温度（TE-409A）はよく一致した。

### ⑤酸素濃度（図III-13）

基準ケースと同様に、酸素濃度解析値が測定値よりも低くなかった。したがって、解析では燃焼による酸素消費速度を過大評価したと言える。

## 3.1.2 TASP-N4 試験

### (1) 基準ケース

TASP-N4 試験に関して、基準ケース解析結果と測定値の比較を図III-14、III-15、III-16、III-17、およびIII-18に示す。

### ①ガス圧力（図III-14）

TASP-N2 の基準ケースと同様に、ガス圧力解析値は測定値よりも高くなり、過大評価となった。

### ②ガス温度（図III-15）

TASP-N2 の基準ケースと同様に、解析によるスプレイコーン外ガス温度と低温領域測定値（TE-305, TE-311, TE-307, TE-313, TE-322）の単純比較におい

て、解析値の方が高くなつた。

③ナトリウムプール温度（図III-16）

TASP-N2 の基準ケースと同様に、解析値が測定値の平均温度程度になつた。

④壁温度（図III-17）

鋼製ライナの温度解析値は測定値（TE-505, TE-509, TE-514）よりも低く過小評価となつたが、モルタル温度（TE-409A）はよく一致した。

⑤酸素濃度（図III-18）

測定値としてO<sub>2</sub>メータの他にオルザット式測定法（以下オルザット）の値を示した。O<sub>2</sub>メータは0秒以降のデータが無く、一方オルザットは初期値が-1500秒での値を用いている。解析値は測定値とよく一致した。

(2) もんじゅパラメータケース

TASP-N4 試験に関して、もんじゅパラメータケース解析結果と測定値の比較を図III-19、III-20、III-21、III-22、およびIII-23 に示す。

①ガス圧力（図III-19）

ガス圧力の解析値は、測定値よりも高くなり、TASP-N2 と同様に基準ケースよりも過大評価した。

②ガス温度（図III-20）

他と同様に、解析によるスプレイコーン外ガス温度と低温領域（TE-305, TE-311, TE-307, TE-313, TE-322）の測定値の単純比較においては、解析値の方が高くなつた。TASP-N2 と同様にもんじゅパラメータケースの方が基準ケースよりも全体に高くなつた。

③ナトリウムプール温度（図III-21）

解析値が測定値の平均温度程度になつた。

④壁温度（図III-22）

もんじゅパラメータの影響により、解析による鋼製ライナの温度は測定値（TE-505, TE-509, TE-514）よりも低く過小評価となつたが、モルタルの温度（TE-409A）はよく一致した。

⑤酸素濃度（図III-23）

基準ケースと同様に、解析値と測定値がよく一致した。

### 3.2 空気雰囲気試験（TASP-A1, TASP-A2）

#### 3.2.1 TASP-A1 試験

(1) 基準ケース

TASP-A1 試験に関して、基準ケース解析結果と測定値の比較を図III-24、III-25、III-26、III-27、およびIII-28 に示す。

#### ①ガス圧力（図III-24）

解析によるガス圧力は、16秒まで測定値よりも低くなったものの、ピーク値では測定値よりも高くなつた。したがつて、ピーク値では過大評価したことになる。

#### ②ガス温度（図III-25）

スプレイ燃焼が窒素雰囲気よりも激しかつたことから、測定値の分布がより大きくなり、比較することが難しいが、解析によるスプレイコーン内ガス温度は、高温領域測定値（TE-326, TE-332, TE-333）との単純比較において、窒素雰囲気実験と同様の理由により過小評価であった。解析によるスプレイコーン内ガス温度と低温領域測定値（TE-305, TE-311, TE-307, TE-313, TE-322）の単純比較においては、比較的一致する結果を得た。

#### ③ナトリウムプール温度（図III-26）

窒素雰囲気と同様に、解析値が測定値の平均温度程度となつた。

#### ④壁温度（図III-27）

解析による鋼製ライナ温度は、スプレイ時間が18.4秒と短かつたことから、測定値（TE-505, TE-509, TE-514）よりも低く過小評価となつたが、モルタル温度（TE-409A）はよく一致した。

#### ⑤酸素濃度（図III-28）

測定値として、 $O_2$ メータとオルザット（初期値は-300秒）を示したが、両測定値と比較しても解析値の方が低くなつた。したがつて、解析での燃焼による酸素消費速度は、窒素雰囲気試験（TASP-N2, TASP-N4）と同様に過大評価であつた。

### (2) もんじゅパラメータケース

TASP-A1 試験に関して、もんじゅパラメータケース解析結果と測定値の比較を図III-29、III-30、III-31、III-32、およびIII-33 に示す。

#### ①ガス圧力（図III-29）

ガス圧力解析値は、基準ケースと同様に解析値が17秒までは測定値より低くなつたものの、ピーク値では測定値よりも高くなつた。また、基準ケースとの比較においては、スプレイ時間が短かつたことが影響して差が小さいが、ピーク値では基準ケースよりも高くなる結果を得た。

#### ②ガス温度（図III-30）

基準ケースと同様に単純な比較が難しいものの、解析によるスプレイコーン外温度と低温領域測定値（TE-305, TE-311, TE-307, TE-313, TE-322）に関しては、比較的一致する結果を得た。また、ガス圧力解析値のピーク値が基準ケースよりも高かったにも係わらず、解析スプレイコーン外ガス温度を基準ケースと比較するとピーク値ではほとんど差がない。これもまた、スプレイ時間の短さに原因があるが、もんじゅパラメータケースではガスと壁の輻射伝熱を無くしていることから、スプレイ終了後のガス温度低下が基準ケースよりも多少緩慢になったことがガス圧力ピーク値の上昇に影響している。

#### ③ナトリウムプール温度（図III-31）

プール温度解析値は、ナトリウムプール燃焼を無くしたことに加え、スプレイ時間が短いことから、測定値の平均値的値よりも低くなり、更に基準ケースよりも低くなった。これは、プールから受皿への熱流束が大きい間、つまり受皿温度が十分上昇しない間にスプレイが停止してしまったことに起因する。

#### ④壁温度（図III-32）

解析による鋼製ライナの温度は測定値（TE-505, TE-509, TE-514）よりも低くなり、更に基準ケースよりも過小評価となったが、モルタル温度（TE-409A）はよく一致した。

#### ⑤酸素濃度（図III-33）

酸素濃度解析値は、測定値よりも低くなかった。したがって、解析での燃焼による酸素消費速度は過大評価であった。また、本ケースの酸素濃度解析値は基準ケースよりも酸素消費が少なかったので、プールを燃焼させない影響も確認できた。

### 3.2.2 TASP-A2 試験

#### (1) 基準ケース

TASP-A2 試験に関して、基準ケース解析結果と測定値の比較を図III-34、III-35、III-36、III-37、およびIII-38 に示す。

##### ①ガス圧力（図III-34）

解析によるガス圧力は、12秒までは測定値とほぼ一致し、12秒以降は測定値よりも高くなかった。また、ピーク値でも過大評価しており、保守的評価であった。

##### ②ガス温度（図III-35）

TASP-A2 同様にスプレイ燃焼が激しく、測定値の分布が大きくなり、比較することが更に難しいが、解析によるスプレイコーン外温度と低温領域測定値

(TE-305, TE-311, TE-307, TE-313, TE-322) の単純比較においては、比較的一致する結果を得た。

③ナトリウムプール温度 (図III-36)

他のケースと同様に、解析値が測定値の平均温度程度となった。

④壁温度 (図III-37)

解析による鋼製ライナ温度は測定値 (TE-505, TE-509) と比較的一致し、モルタル温度 (TE-409A) もよく一致した。

⑤酸素濃度 (図III-38)

解析による酸素濃度は、O<sub>2</sub>メータを考慮しない場合の測定値と比較しても低くなつておらず、解析での燃焼による酸素消費速度は過大評価であった。

## (2) もんじゅパラメータケース

TASP-A2 試験に関して、もんじゅパラメータケース解析結果と測定値の比較を図III-39、III-40、III-41、III-42、およびIII-43 に示す。

①ガス圧力 (図III-39)

解析によるガス圧力は、12秒までは測定値よりも低くなったものの、12秒以降は高くなり、基準ケースよりも更に過大評価となった。

②ガス温度 (図III-40)

解析によるスプレイコーン外温度と低温領域測定値 (TE-305, TE-311, TE-307, TE-313, TE-322) との単純比較では、解析スプレイコーン外温度の方が高くなつた。また、解析値全体が、他のもんじゅパラメータケースと同様に、基準ケースよりも高くなつた。

③ナトリウムプール温度 (図III-41)

ナトリウムプール温度解析値は、プール燃焼が無いことから低い温度になつたが、45秒以降は上昇して基準ケースと比較的一致する温度となつた。これは、プールから受皿への熱流束が飽和に達したことによる。

④壁温度 (図III-42)

もんじゅパラメータの影響で解析による鋼製ライナの温度は測定値 (TE-505, TE-509, TE-514) よりも低く過小評価となつたが、モルタル温度 (TE-409A) はよく一致した。

⑤酸素濃度 (図III-43)

解析による酸素濃度は、測定値よりも小さくなつた。したがつて、解析での燃焼による酸素消費速度は過大評価であった。

#### 4. まとめ

ASSCOPS Ver.1.1 によるスプレイ実験の検証解析においては、圧力については、窒素霧囲気あるいは空気霧囲気ともに過大評価、あるいは良く一致する結果を得た。また、もんじゅパラメータを用いると、空気霧囲気においては更に過大評価、あるいは測定値よりも過大評価となることを確認出来た。

ガス温度は、実験における測定の難しさからスプレー領域での結果の比較評価に限界があるものの、ナトリウム液滴が降り注がない領域に関しては全般的に過大評価、あるいは良く一致する結果が得られた。また、もんじゅパラメータを用いた場合においては、圧力と同様に、より過大評価、あるいは測定値よりも過大評価となる結果を得た。

一方、構造材温度に関しては、基準ケースにおける壁の鋼製ライナ温度がほぼ一致しており、もんじゅパラメータを用いた場合には、過小評価する結果が得られた。

また、ナトリウムプール温度に関しては、一点近似で扱っている解析値と体系の異なる多領域分割測定の実験測定値を単純に比較できない困難さはあるものの、全体の平均的な温度で論ずる場合、基準ケースにおいて一致がみられたと言える。

最後に、酸素濃度に関しては、解析値が測定値より低く、あるいは良く一致する結果を得られたことから、燃焼による酸素消費速度を过大あるは適正に評価することが分かった。

#### IV SPRAY-ⅢMコードに対する課題の解決

従来のSPRAY-ⅢMコードに対しては、検証解析を通して改善すべき課題をあげていた<sup>4)</sup>が、ASSCOPS Ver.1.1までの開発においてその点を解決したので、その点について課題と対比させながら述べる。

##### 課題1：燃焼を打ち切った場合の蒸発潜熱の評価

SPRAY-ⅢMコードにおいては、燃焼を打ち切るガス濃度の限界をYMINという内部変数で与えていた。一方蒸発潜熱は燃焼によって消費されたナトリウム量から求めていたので、YMINによって燃焼が打ち切られた場合には蒸発潜熱が評価出来なくなるという問題があった。

これに対しASSCOPS Ver.1.1においては、YMINを入力で与えることとし、解析条件に合わせてYMINを用いることにより燃焼の打ち切りが発生することを防ぐ方策をとることで対処した。

##### 課題2：燃焼速度と液滴落下運動を評価する際の液滴径について

SPRAY-ⅢMコード（およびASSCOPS Ver.1.1）においては、スプレイの液滴を対数正規分布として取り扱っており、燃焼速度を計算する際に表面積平均粒径を用いている。ところが、液滴落下運動を計算する際にも表面積平均粒径を用いて用いているため、質量が問題となる液滴の落下運動では質量平均粒径を用いるべきであるという課題があった。

これに関しては、スプレイの液滴を対数正規分布として取り扱っていることから、表面積平均粒径（ds）と質量平均粒径（dv）は以下の関係が成立する<sup>6)</sup>。

$$ds/dv = \exp(-0.5 \ell n^2 \sigma_G)$$

ただし、 $\sigma_G$ は液滴の幾何標準偏差である。

この関係を用いて、液滴落下運動に質量平均粒径（dv）を用いるようにし、既に述べたASSCOPS Ver.1.1 検証解析のうちの1ケースを実施して従来モデルの計算結果と比較したところ、図IV-1～図IV-5に示す結果を得た。これらの図からわかるように、液滴落下運動に質量平均粒径（dv）を用いた場合はガス圧力や各部温度が従来モデルを用いた場合よりも低くなる。これは、スプレイ液滴の落下速度が速くなるために、液滴の落下時間が短くなつてナトリウム燃焼量が少なくなるためである。

したがって、安全評価の観点からは、従来モデルを用いた方が保守側の結果を与えるため、これについてはモデルの変更を行わないこととした。

### 課題 3：ナトリウム燃焼速度について

SPRAY-ⅢMコードの検証解析の結果から、同コードで取り扱うナトリウム燃焼速度が過小評価であると考えられた。

これについては、酸素消費速度について、既に述べたASSCOPS Ver.1.1 の検証解析の結果と実験結果の比較を行い、ASSCOPSコードによる燃焼速度の妥当性を確認した。図Ⅲ-8, Ⅲ-13, Ⅲ-18, Ⅲ-23, Ⅲ-28, Ⅲ-33, Ⅲ-38, Ⅲ-43 に示したように、窒素雰囲気あるいは酸素雰囲気に係わらず酸素消費速度の解析値が測定値よりも大きくなっていることからナトリウム燃焼速度に関しては測定値よりも解析値の方が大きくなる結果を得た。したがって、ASSCOPS Ver.1.1 で取り扱うナトリウム燃焼速度が過小評価ではないと判断する。

### 課題 4：ガスから壁への伝熱について

SPRAY-ⅢMコードの検証解析の結果から、ガスから壁への伝熱も過小評価であると考えられた。

ASSCOPS Ver.1.1においては、2.2.1項において前述したとおり、ガスから壁への輻射伝熱モデルを組み込んだことにより、対流伝熱と輻射伝熱の両モデルを取り扱えるようにした。この結果、ガスから壁への伝熱評価の精度が向上し、後述する検証解析においては解析値が測定値とよく一致する結果が得られるようになった。したがって、ASSCOPS Ver.1.1 のガスから壁への伝熱は過小評価ではないと判断する。

### 課題 5：プール燃焼モデルの取扱い

SPRAY-ⅢMコードにおいては、プール燃焼を扱えなかったが、SOFIRE-M IIとの結合により、ASSCOPSコードにおいては取扱い可能となった。

### 課題 6：ガスリークモデルの組み込み

SPRAY-ⅢMコードにおいては、セル外へのガスリークを取り扱えなかつたが、2.2.3項に前述したとおり、ASSCOPS Ver.1.1においてはガスリークモデルを組み込んだことにより取り扱うことが可能となった。

### 課題 7：壁と天井の分離モデル

ガスと壁あるいは天井との相対的な位置関係は、熱移行を考える重要なにも係わらず、SPRAY-ⅢMコードでは、壁と天井を一体として取扱わざるを得なかった。これに対し、ASSCOPSコードでは、床、壁、天井の構造材をSOFIRE-M IIのモデルで扱うことにしたため、壁と天井を区別して取り扱うことが可能となった。

### 課題 8：スプレー終了後の燃焼

これについては、解析結果を詳細に調査したところ、スプレー終了直後の

液滴が床に到達するまでの間、雰囲気中を落下して燃焼していることによるものであることがわかった。したがって、現象を忠実にあらわしていると判断された。

## V 結言

スプレイ燃焼とプール燃焼をお互いの影響を考慮しながら同時に取り扱うことが可能なようにするため、スプレイ燃焼解析コードSPRAY-ⅢMとプール燃焼解析コードSOFIRE-MⅡを結合させた新たなナトリウム燃焼解析コードASSCOPS (Analysis of Simultaneous Sodium Combustions in Pool and Spray) を開発した。

1982年に委託研究として実施されたナトリウムスプレイ燃焼実験の結果<sup>2)3)</sup>を用いた検証解析の結果から、ASSCOPS Ver.1.1 を用いた場合、

- ① 窒素雰囲気においては、SPRAY-ⅢMコードでガスから壁への熱移行量が過小評価であった点について改善され、ガス圧力・温度に関してほぼ妥当な評価をする
  - ② 空気雰囲気においても、SPRAY-ⅢMコードで全般的に過小評価であった点について改善され、ガス圧力・温度に関してほぼ妥当な評価をする
  - ③ ガスと壁との間の輻射伝熱とプール燃焼を無くした場合、すなわち「もんじゅ」の安全評価で用いたパラメータ（いわゆるもんじゅパラメータ）を用いた場合には、窒素雰囲気あるいは空気雰囲気ともにガス圧力・ガス温度に関して保守的な評価をするが、壁温度については過小評価する
- という結論を得るとともに、SPRAY-ⅢMコードを用いた従来の解析における課題<sup>4)</sup>を解決できたことを確認した。

謝 辞

本報告書に記載のASSCOPSコードによる解析を行うにあたっては、入力データの作成と計算の実行および計算結果の整理を、検査開発（株）の松木卓夫氏と原子力技術（株）の加藤一憲氏の多大な御協力をいただいた。ここに、謹んで謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団, "高速増殖炉もんじゅ発電所原子炉設置許可申請書," 昭和55年12月
  - 2) 中原 崇文, 他, "ナトリウムスプレ燃焼試験成果報告書 - 第一分冊: ナトリウムスプレ燃焼実験," PNC TJ222 82-16(1), 1982年12月.
  - 3) 中原 崇文, 他, "ナトリウムスプレ燃焼試験成果報告書 - 第二分冊: 実験データ集," PNC TJ222 82-16(2), 1982年12月.
  - 4) 宮原 信哉, 前田 清彦, "ナトリウム・スプレー燃焼の解析 (II)," PNC TN241 83-10, 1983年7月.
  - 5) プラント安全工学室編集, "FAUNA施設における燃焼面積12m<sup>2</sup>までのナトリウム燃焼実験," PNC N951 84-01, 1984年1月.
  - 6) P. R. Shire, "SPRAY CODE USER'S REPORT," HEDL-TME 76-94, March 1977.
  - 7) W. Cherdron, S. Jordan, "Determination of Sodium Fire Aerosol Process Coefficients from FAUNA Experiments," NUREG/CR-1724, 1980
- A1) M. Fishenden and O. A. Saunders, "Introduction to Heat Transfer," p.180, 1950, Clarendon Press.
- A2) W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr., "Evaporation from Drops," Chemical Engineering Progress, Part I, 48, 3 (March 1952) and Part II, 48, 4 (April 1952).
- A3) W. G. Brown, "Natural Convection through Rectangular Openings in Partitions," J. Heat and Mass Transfer, Vol. 5, 1962.

表 III-1 解析条件(1) —SPRAYモジュール入力値—

	変数名	単位	TASP-N2	TASP-N4	TASP-A1	TASP-A2
初期平均液滴径	DI	cm	0.09355	0.09355	0.09355	0.09355
セル壁表面積	ALINER	m <sup>2</sup>	33.6	33.6	33.6	33.6
初期ガス圧力	PSIA	kg/cm <sup>2</sup>	1.033	1.033	1.033	1.033
初期ガス温度	TGI	°C	30.1	21.1	22.4	18.7
初期ナトリウム温度	TSI	°C	574	521.0	523.0	512.0
初期酸素濃度	YOI	mol fract.	0.028	0.03	0.206	0.204
初期水蒸気濃度	YH2OI	mol fract.	0.0012	0.023	0.0165	0.0004
ガス容積	VOL	m <sup>3</sup>	21.0	21.0	21.0	21.0
スプレイコーン高さ	HCELL	m	3.0	3.0	3.0	3.0
スプレイ時間	SMAX	sec	77.0	75.6	18.4	57.5
計算継続時間	TMAX	sec	80	80	40	60
スプレイ衝突面の実効直径	XS(1)	m	0.01	0.01	0.01	0.01
スプレイコーンの頂角	THETA	rad	0.6981	0.6981	0.6981	0.6981
実効セル径	DIAM	m	3.0	3.0	3.0	3.0
セル高さ	HCELL	m	3.0	3.0	3.0	3.0
単位面積当たりの壁の熱容量	CPS	kcal/m <sup>2</sup> °C	5.15	5.15	5.15	5.15
単位面積当たりの衝突面の熱容量	CPI	kcal/m <sup>2</sup> °C	0.0	0.0	0.0	0.0
液滴の形状の標準偏差	SIGMA	—	1.673	1.673	1.673	1.673
スプレイコーンのメッシュ数	NV	—	20	20	20	20
Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> の生成割合	NA2O2	%	0	0	40	40

表 III-2 解析条件(2-1) —TASP-N2 スプレイ流量—

試験No.	時間 (sec)	スプレイ流量* (ℓ / min )	スプレイ流量** (g / sec)	ナトリウム温度 (°C)
TASP-N2	0.0	0.0	0.0	574.0
	0.5	45.5	619.2	562.0
	5.0	45.3	623.7	624.0
	10.0	43.0	593.2	517.0
	15.0	37.5	516.9	520.0
	20.0	32.7	450.5	522.0
	25.0	30.8	424.0	524.0
	30.0	30.0	413.0	524.0
	35.0	30.3	416.8	527.0
	40.0	30.5	419.1	531.0
	45.0	30.5	418.8	533.0
	50.0	31.0	425.6	534.0
	55.0	31.5	432.2	536.0
	60.0	32.5	445.6	538.0
	65.0	33.0	452.0	542.0
	70.0	34.0	465.5	543.0
	75.0	36.0	492.2	543.0
	76.0	36.3	496.9	544.0
	77.0	0.0	0.1	545.0
	80.0	0.0	0.1	545.0

ナトリウムの密度は以下の Epstein の式を用いて求めた。

$$\gamma \text{ (kg/m}^3\text{)} = 951.4 - 0.2392 t(\text{°C})$$

\* : 試験計測値

\*\* : 解析入力値

表 III-3 解析条件(2-2) —TASP-N4 スプレイ流量—

試験No.	時間 (sec)	スプレイ流量* (ℓ / min )	スプレイ流量** (g / sec)	ナトリウム温度 (°C)
TASP-N4	0.0	0.0	0.0	521.0
	0.1	48.0	661.4	521.0
	7.5	42.0	578.7	521.0
	17.5	35.0	482.3	521.0
	27.5	32.0	440.9	521.0
	37.5	35.0	482.3	521.0
	47.5	37.5	516.7	521.0
	57.5	38.0	523.6	521.0
	67.5	37.0	509.8	521.0
	75.5	37.0	509.8	521.0
	75.6	0.0	0.1	521.0
	80.0	0.0	0.1	521.0

ナトリウムの密度は以下の Epstein の式を用いて求めた。

$$\gamma \text{ (kg/m}^3\text{)} = 951.4 - 0.2392 t(\text{°C})$$

\* : 試験計測値

\*\* : 解析入力値

表 III-4 解析条件(2-3) —TASP-A1 スプレイ流量—

試験No.	時間 (sec)	スプレイ流量* (ℓ / min )	スプレイ流量** (g / sec)	ナトリウム温度 (°C)
TASP-A1	0.0	0.0	0.0	523.0
	0.3	32.5	447.6	522.5
	2.2	33.0	454.7	521.5
	2.3	46.0	633.8	521.5
	4.3	40.5	551.2	521.0
	6.3	35.0	482.4	520.0
	7.3	33.0	454.9	520.0
	8.3	30.0	413.5	520.0
	9.3	28.0	385.9	520.0
	10.3	27.0	372.2	520.0
	11.3	26.0	358.4	520.0
	12.3	25.0	344.6	520.0
	18.3	25.0	344.5	521.0
	18.4	0.0	0.1	521.0
	40.0	0.0	0.1	521.0

ナトリウムの密度は以下の Epstein の式を用いて求めた。

$$\gamma \text{ (kg/m}^3\text{)} = 951.4 - 0.2392 t(\text{°C})$$

\* : 試験計測値

\*\* : 解析入力値

表 III-5 解析条件(2-4) —TASP-A2 スプレー流量—

試験No.	時間 (sec)	スプレー流量* (ℓ / min )	スプレー流量** (g / sec)	ナトリウム温度 (°C)
TASP-A2	0.0	0.0	0.0	512.0
	0.5	16.0	221.0	512.0
	1.5	27.5	379.9	512.0
	3.5	33.0	455.9	512.0
	5.5	38.0	525.0	512.0
	7.5	35.5	490.5	512.0
	9.5	33.0	455.9	512.0
	11.3	29.5	407.6	512.0
	13.5	26.5	366.1	512.0
	15.5	25.0	345.4	512.0
	17.5	23.5	324.7	512.0
	19.5	23.0	317.8	512.0
	21.5	22.5	310.8	512.0
	23.5	22.5	310.8	512.0
	25.5	22.0	303.9	512.0
	57.0	22.0	303.9	512.0
	57.5	0.0	0.1	512.0
	60.0	0.0	0.1	512.0

ナトリウムの密度は以下の Epstein の式を用いて求めた。

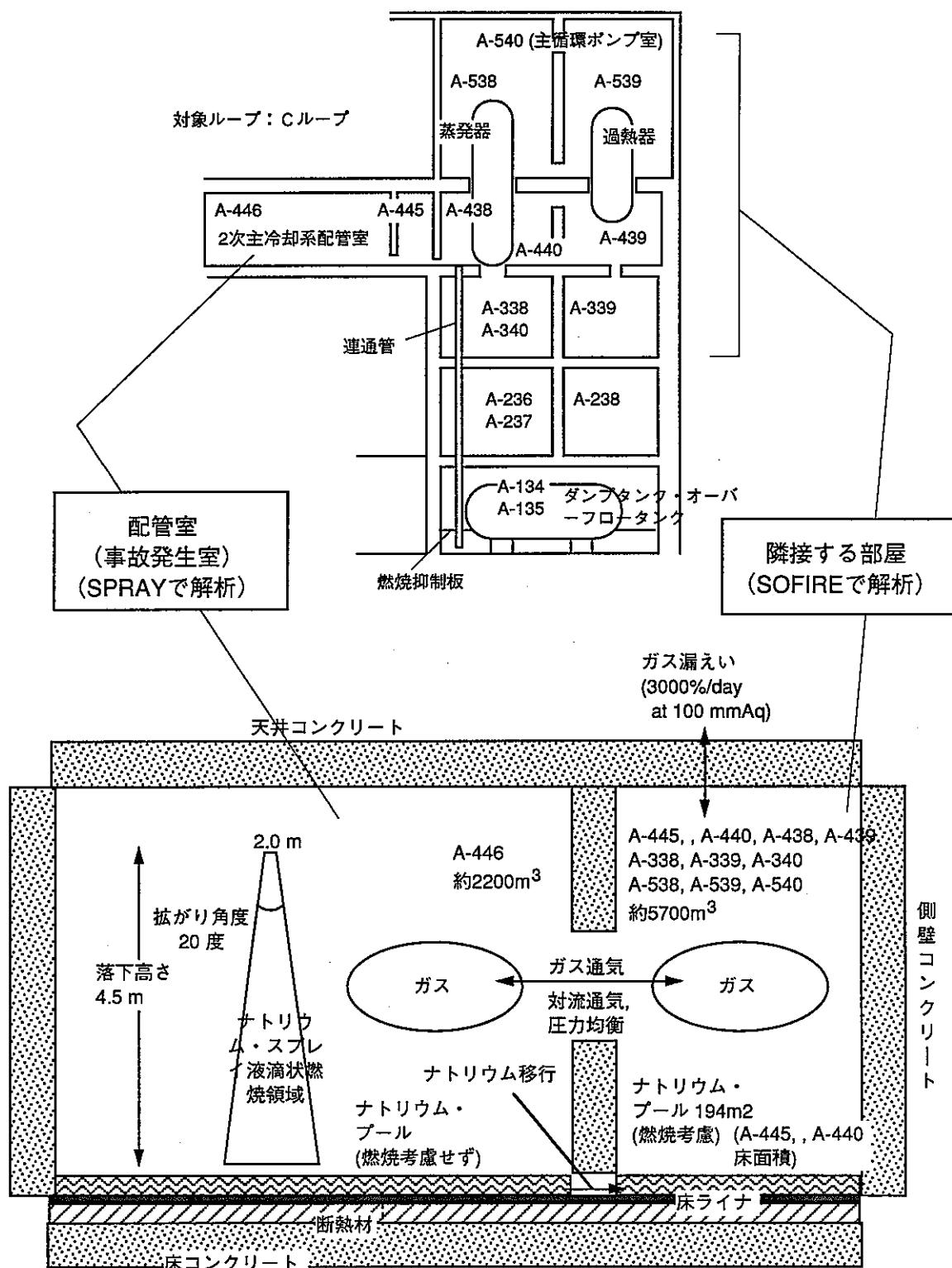
$$\gamma \text{ (kg/m}^3\text{)} = 951.4 - 0.2392 t(\text{°C})$$

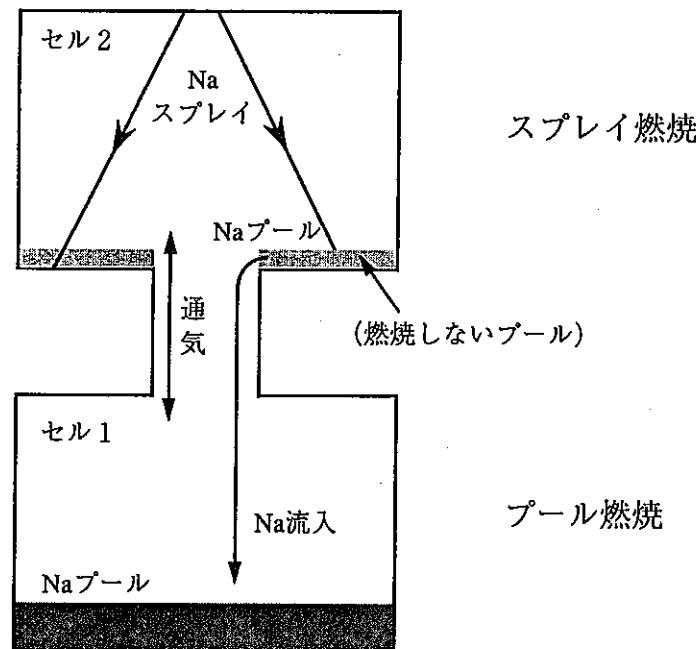
\* : 試験計測値

\*\* : 解析入力値

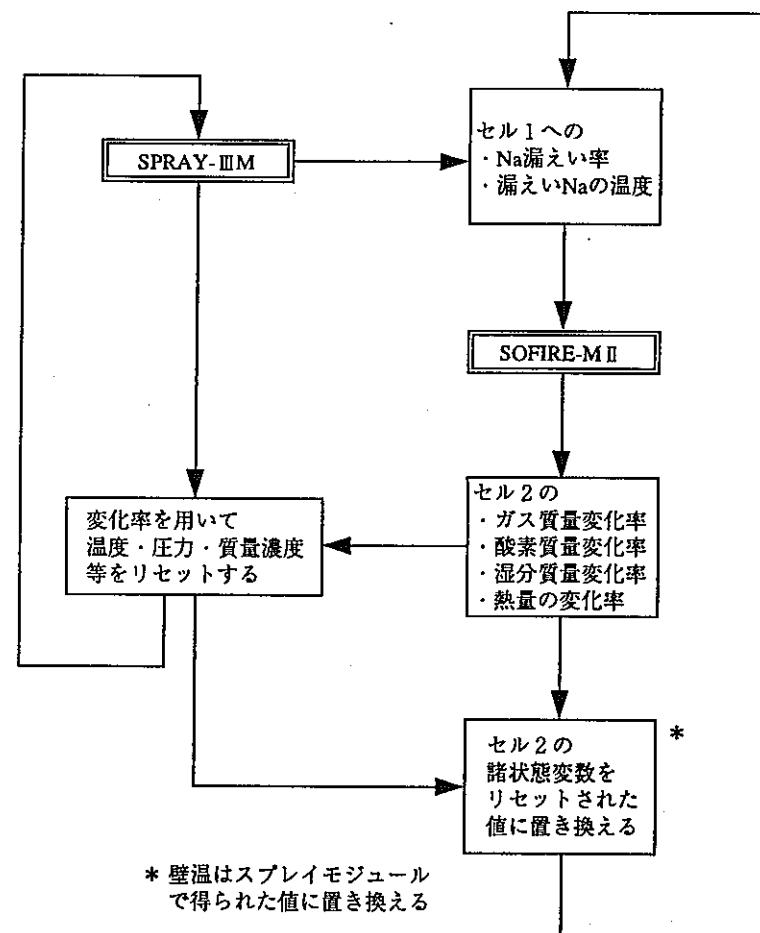
表III-6 解析条件(3) 一構造材の物性値と初期温度一

	構造材	厚さ (m)	熱伝導率 (kcal/mh °C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (kcal/kg °C)	初期温度 (°C)			
						TASP-N2	TASP-N4	TASP-A1	TASP-A2
天井 壁	鋼製ライナ (SS41)	0.006	46	7830	0.11	27.0	20.5	22.0	19.1
	モルタル	0.03	0.47	2000	0.2	26.7	19.4	20.8	18.3
	モルタル	0.04	0.47	2000	0.2	26.7	19.4	20.9	18.6
	モルタル	0.01	0.47	2000	0.2	26.6	19.4	20.8	18.3
	コンクリート	0.04	1.8	2340	0.22	26.4	19.4	20.6	17.9
	コンクリート	0.08	1.8	2340	0.22	26.5	19.3	20.5	18.4
	コンクリート	0.1	1.8	2340	0.22	26.6	19.1	20.7	18.4
	コンクリート	0.16	1.8	2340	0.22	26.3	18.9	20.4	18.3
	コンクリート	0.02	1.8	2340	0.22	26.3	18.9	20.4	18.3
	受皿 (SS41)	0.0005	46	7830	0.11	28.3	20.8	22.0	18.9
床	鋼製ライナ (SS41)	0.0032	46	7830	0.11	28.2	20.7	21.9	18.8
	断熱材 (パーライト)	0.03	0.04	280	0.17	27.4	20.1	21.3	18.4
	断熱材 (ロックウール)	0.12	0.034	200	0.16	24.6	17.8	19.1	16.8
	鋼製ライナ (SS41)	0.006	46	7830	0.11	23.6	17.0	18.3	16.2
	モルタル	0.03	0.47	2000	0.2	23.8	17.5	18.8	16.5
	モルタル	0.04	0.47	2000	0.2	23.3	17.5	19.5	16.8
	モルタル	0.01	0.47	2000	0.2	24.8	18.4	19.9	17.3
	コンクリート	0.04	1.8	2340	0.22	26.3	19.3	20.3	17.8
	コンクリート	0.08	1.8	2340	0.22	24.5	21.0	21.5	18.5
	コンクリート	0.1	1.8	2340	0.22	24.0	17.5	18.5	16.0
	コンクリート	0.16	1.8	2340	0.22	24.0	17.5	18.5	16.0
	コンクリート	0.02	1.8	2340	0.22	24.0	17.5	18.5	16.0





図II-1 ナトリウム漏えい燃焼解析モデルの体系図



図II-2 結合方法の概要

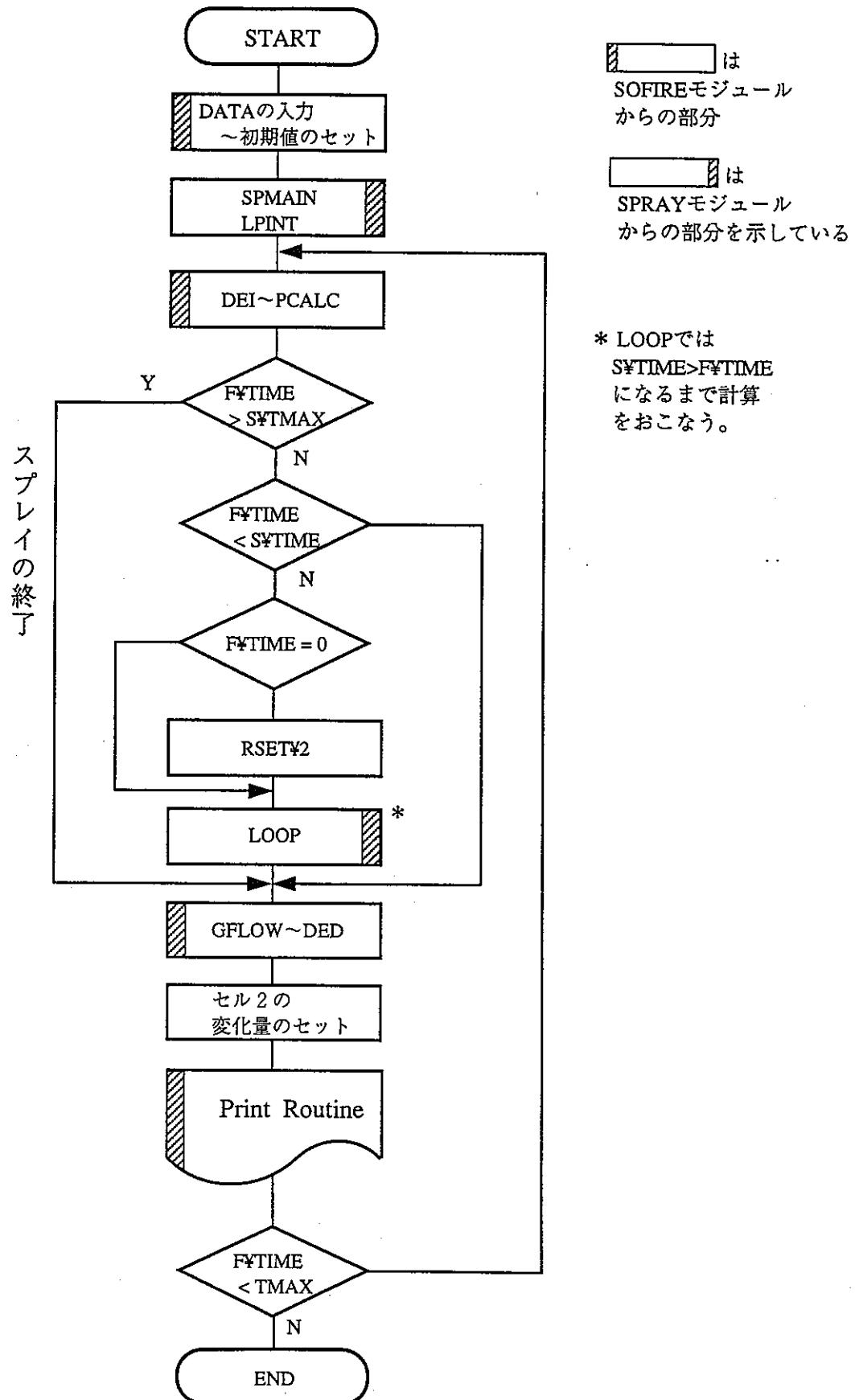


図 II-3 SPRAYモジュールを組込んだSOFIREモジュールの流れ

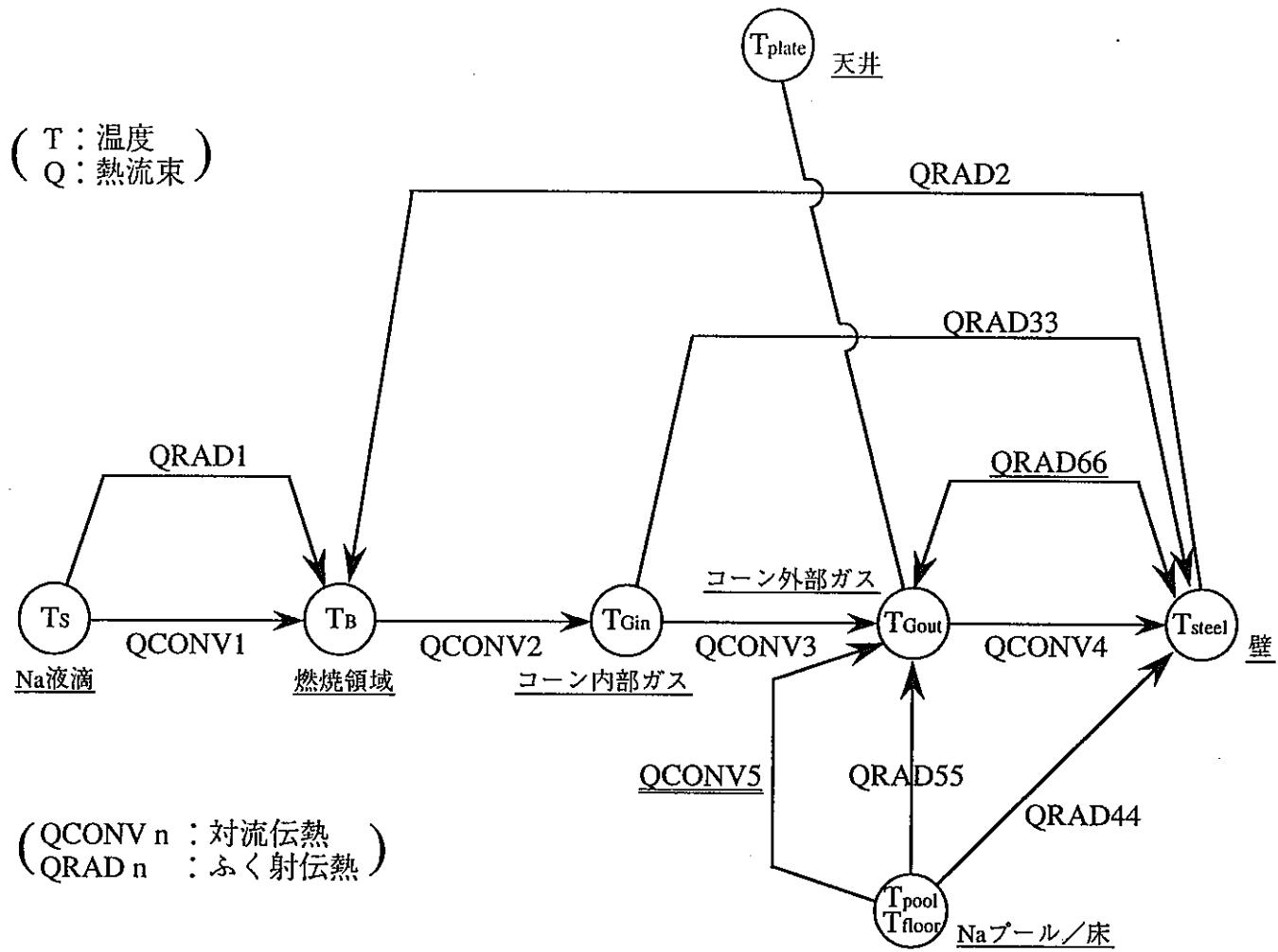


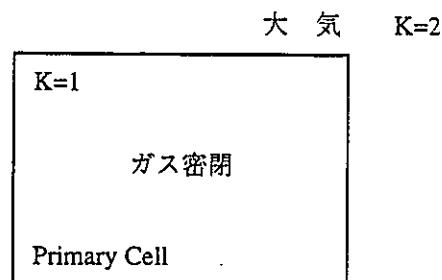
図 II-4 スプレー室の熱輸送のパス

Case 1 (1セルモデル)

KMAX=1, IGFLOW=0

従って、IDUM(2)は無視される

IDUM(6) ノ



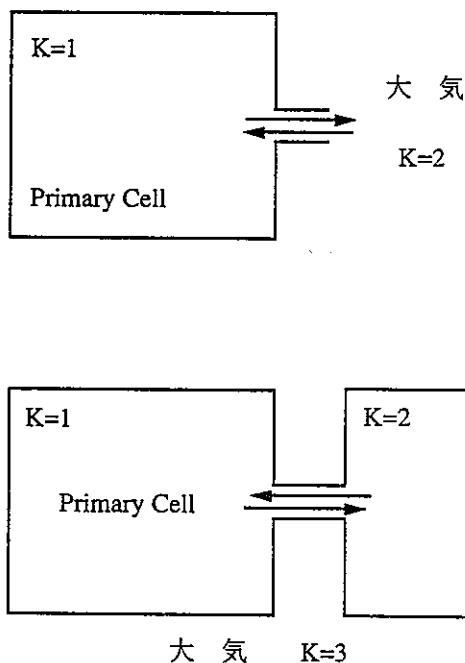
Case 2 (1セル+大気)

KMAX=1, IGFLOW=1

IDUM(2)=1

IDUM(6)=-1

IDUM(6)<0 ならば大気との通気を計算する。

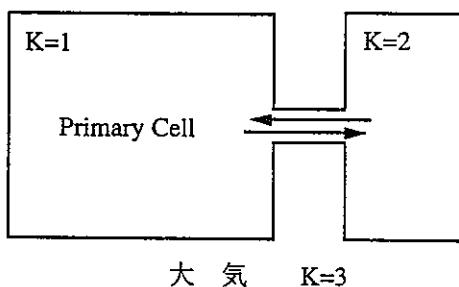


Case 3 (2セルモデル)

KMAX=2, IGFLOW=1

IDUM(2)=1

IDUM(6)=1



Case 4 (準3セルモデル)

KMAX=3, IGFLOW=1

IDUM(2)=1

IDUM(6)=1

RLEAK (1→3) ≠ 0

ノ (2→3) ≠ 0

IDUM(2)≠0ならIDUM(6)≠0にしないと、セル間の圧力がアンバランスとなる。

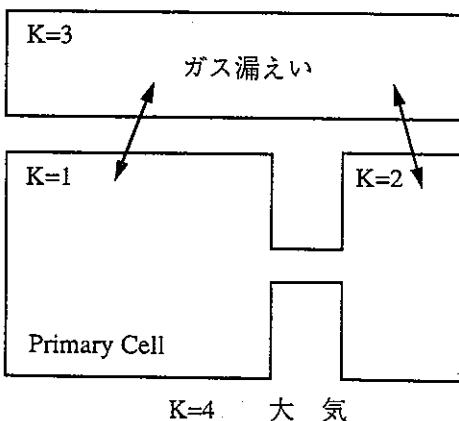


図 II - 5 通気モデル

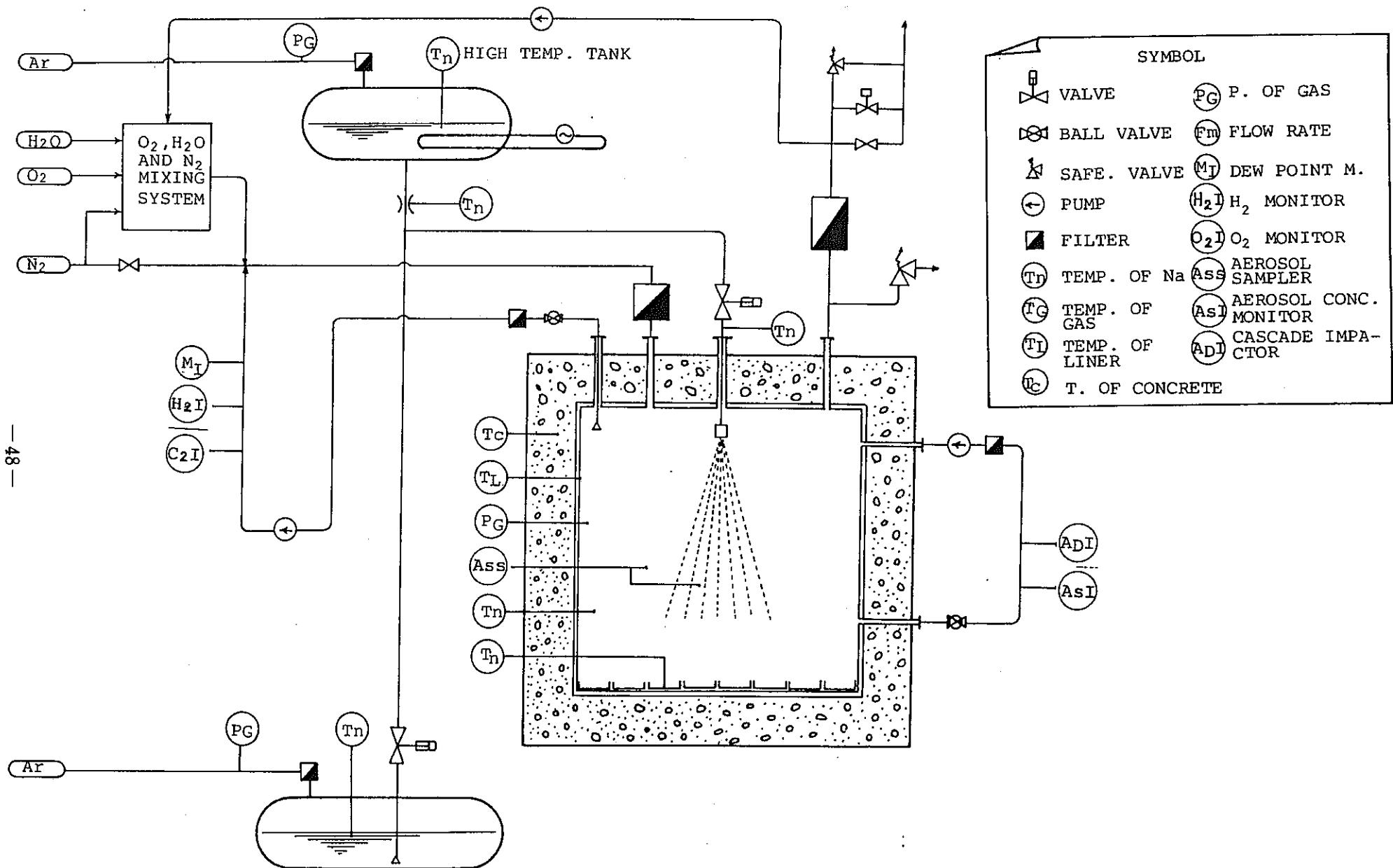
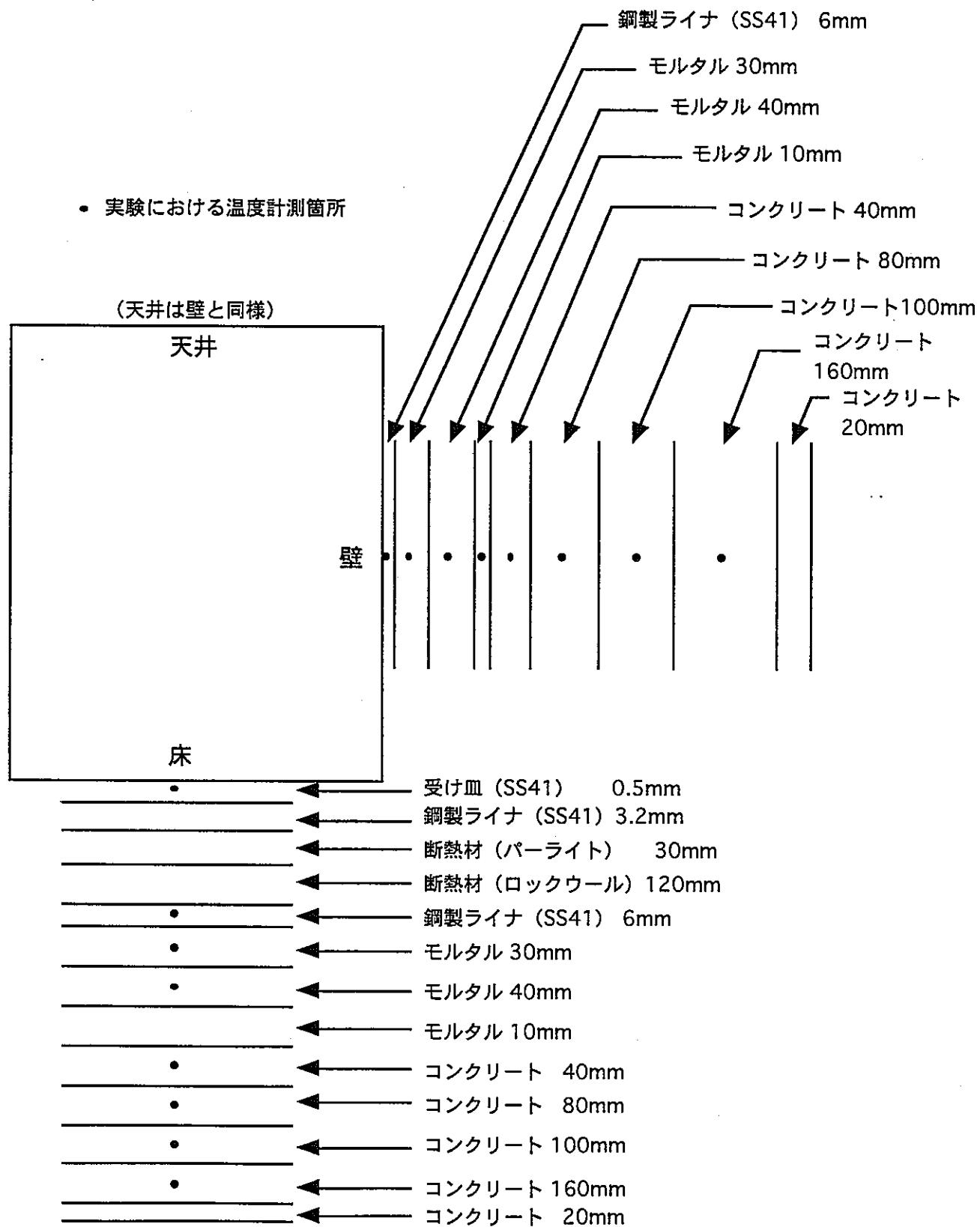


図 III-1 試験装置の概要



図III-2 解析に用いる壁と床の構造材の幾何学的配置

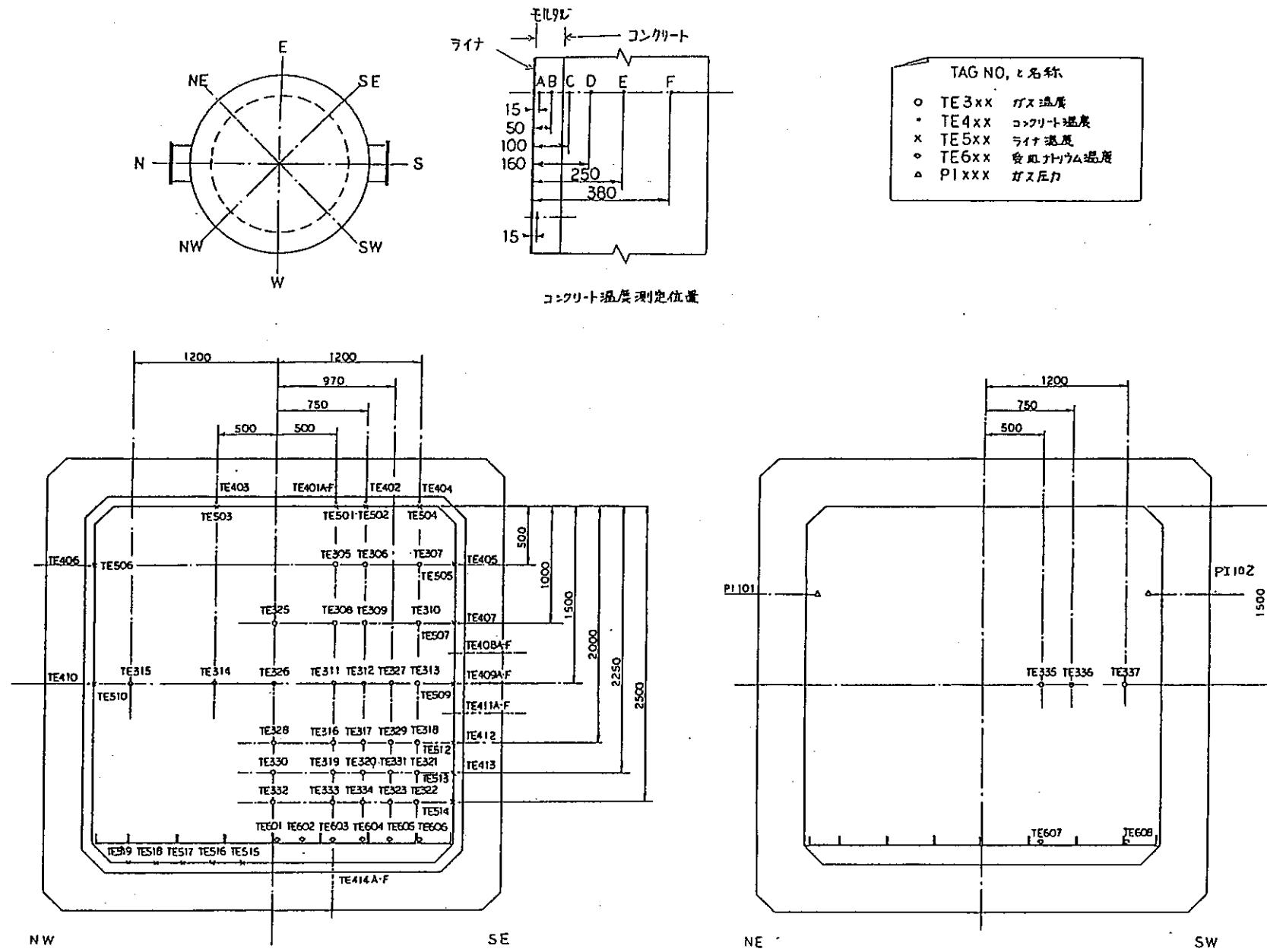
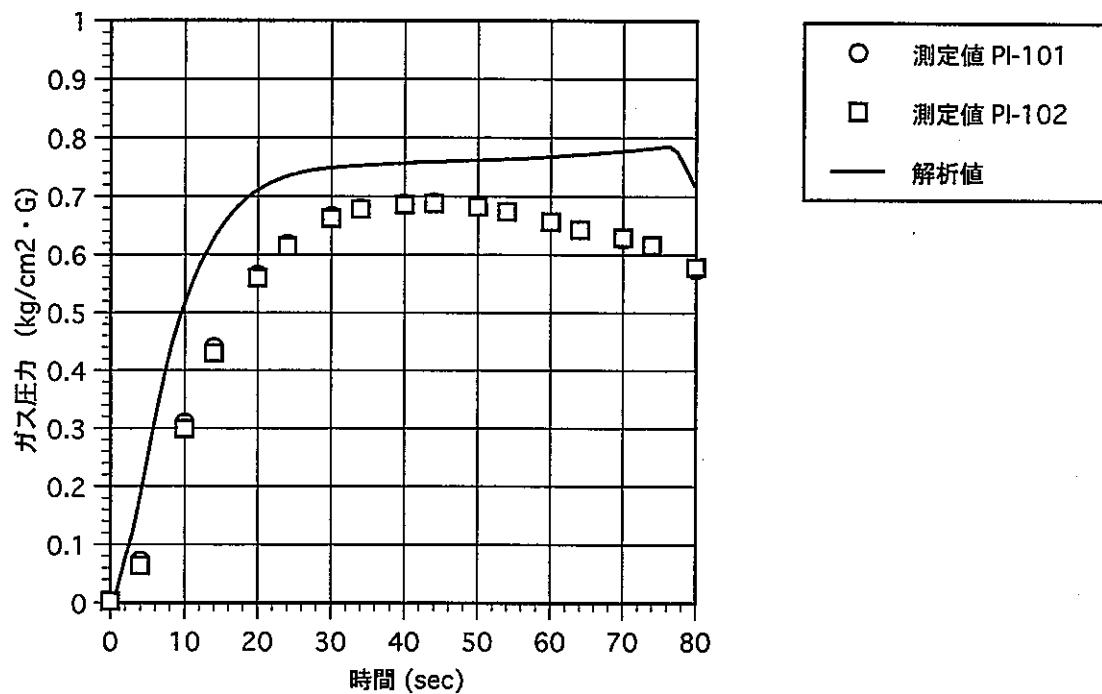
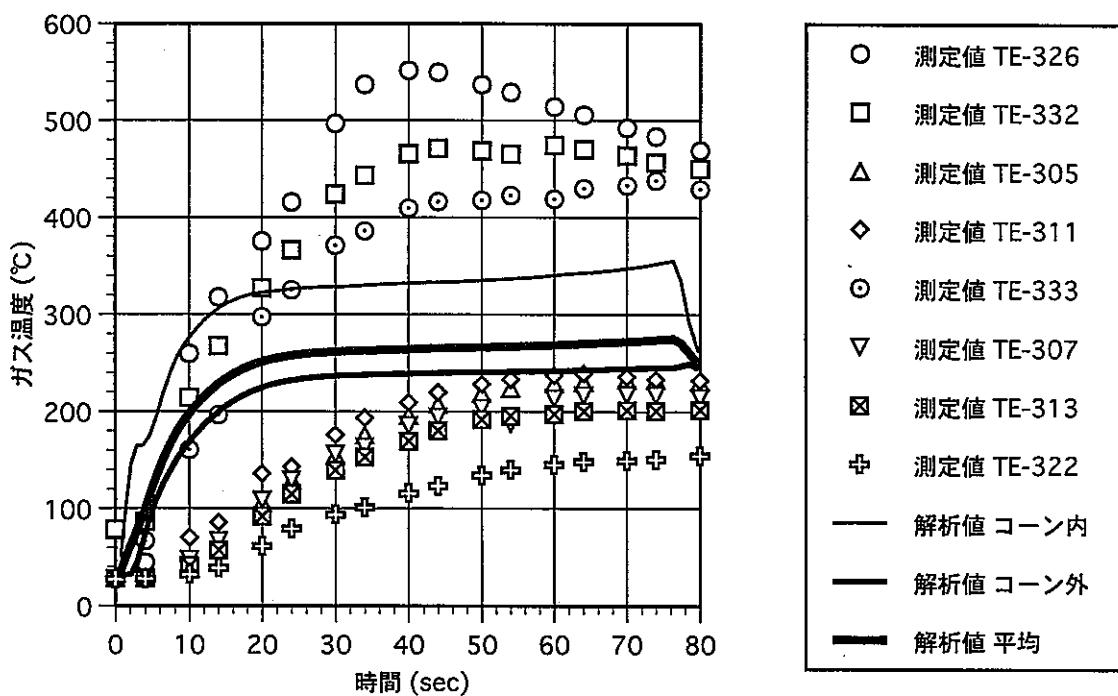


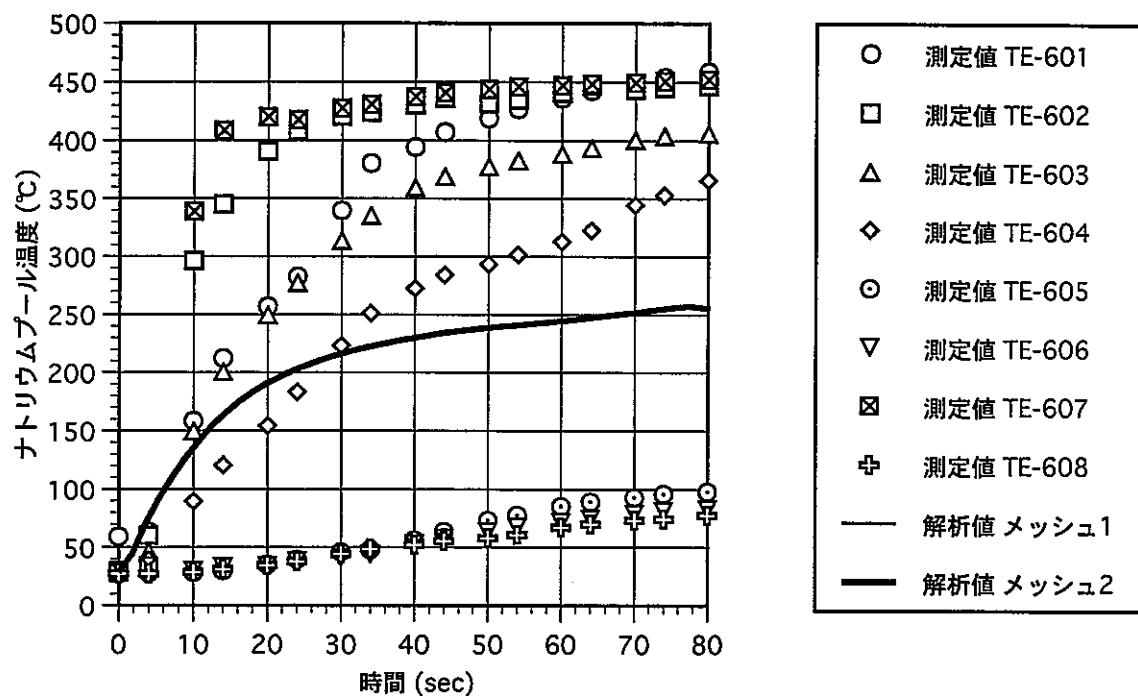
図 III-3 実験における熱電対の配置



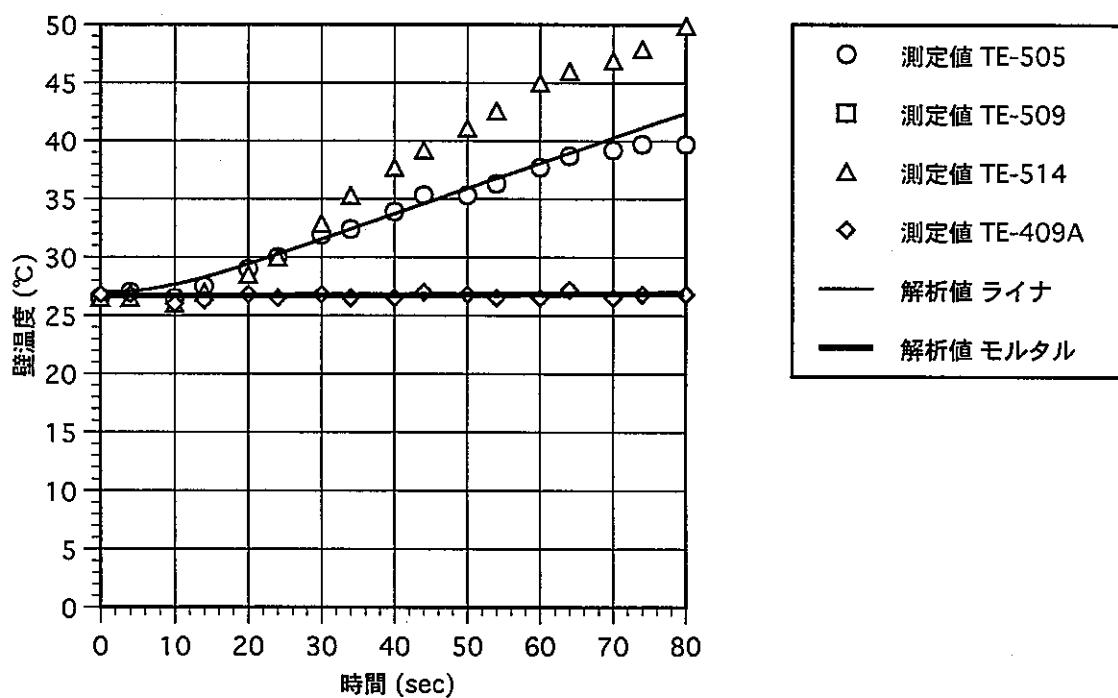
図III-4 ガス圧力 (TASP-N2 基準ケース)



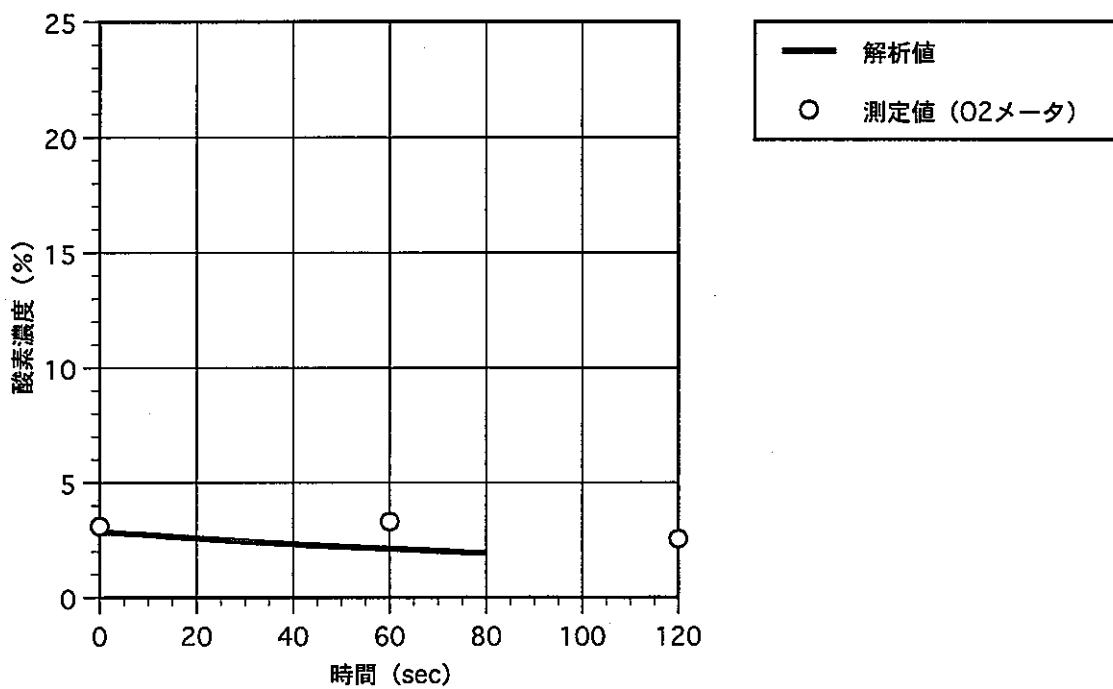
図III-5 ガス温度 (TASP-N2 基準ケース)



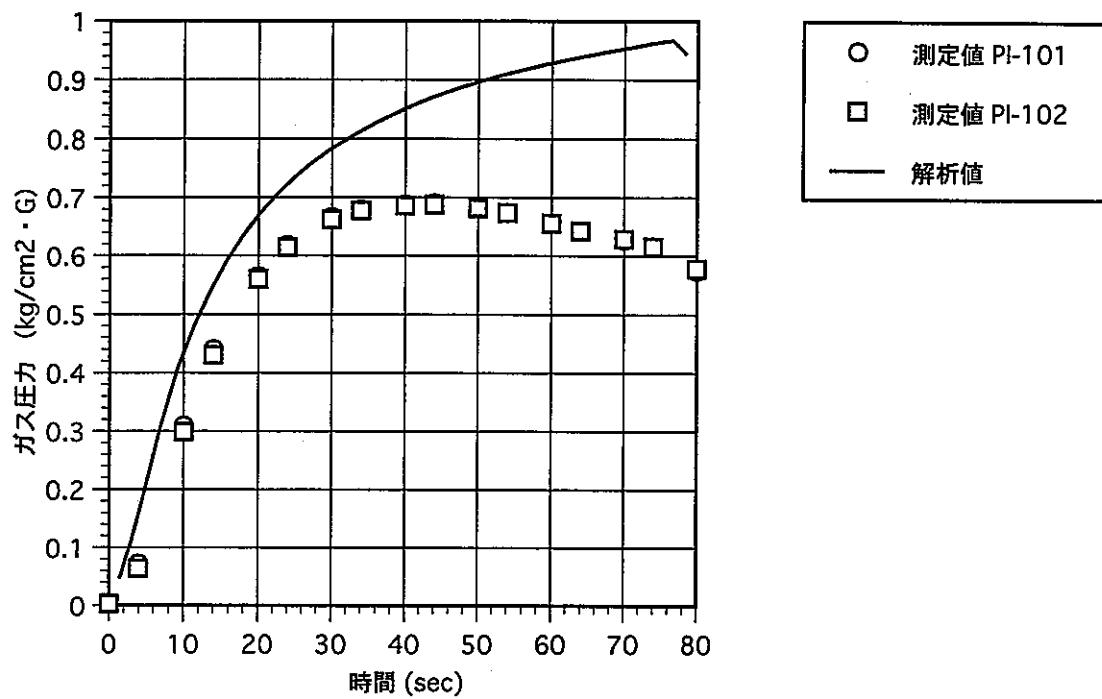
図III-6 ナトリウムプール温度 (TASP-N2 基準ケース)



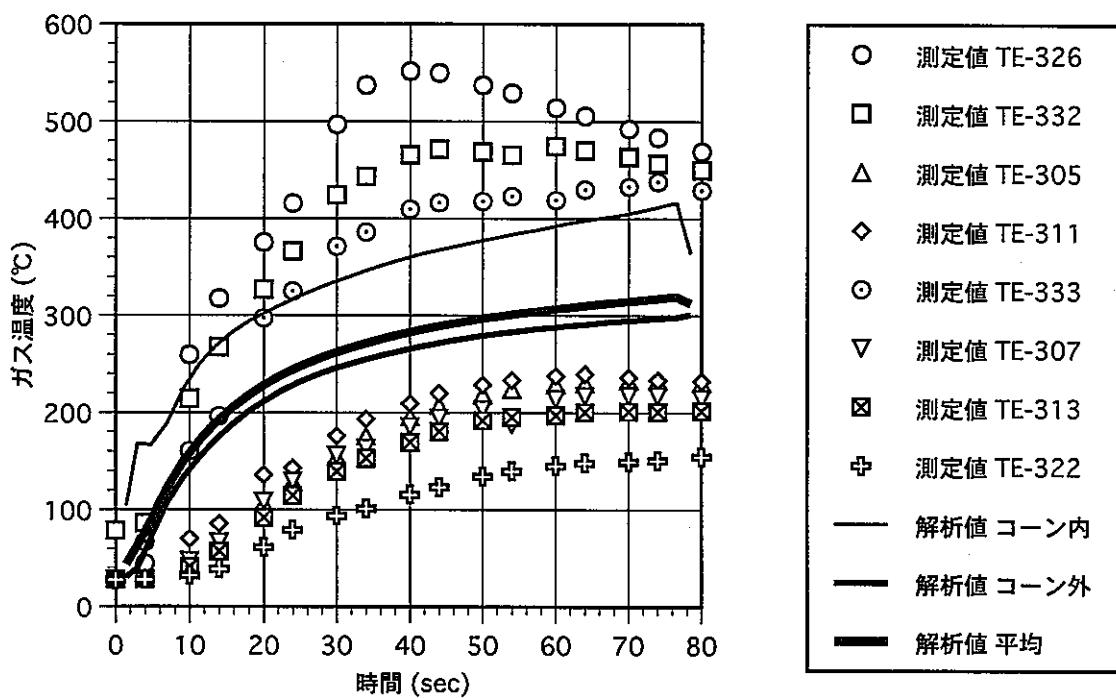
図III-7 壁温度 (TASP-N2 基準ケース)



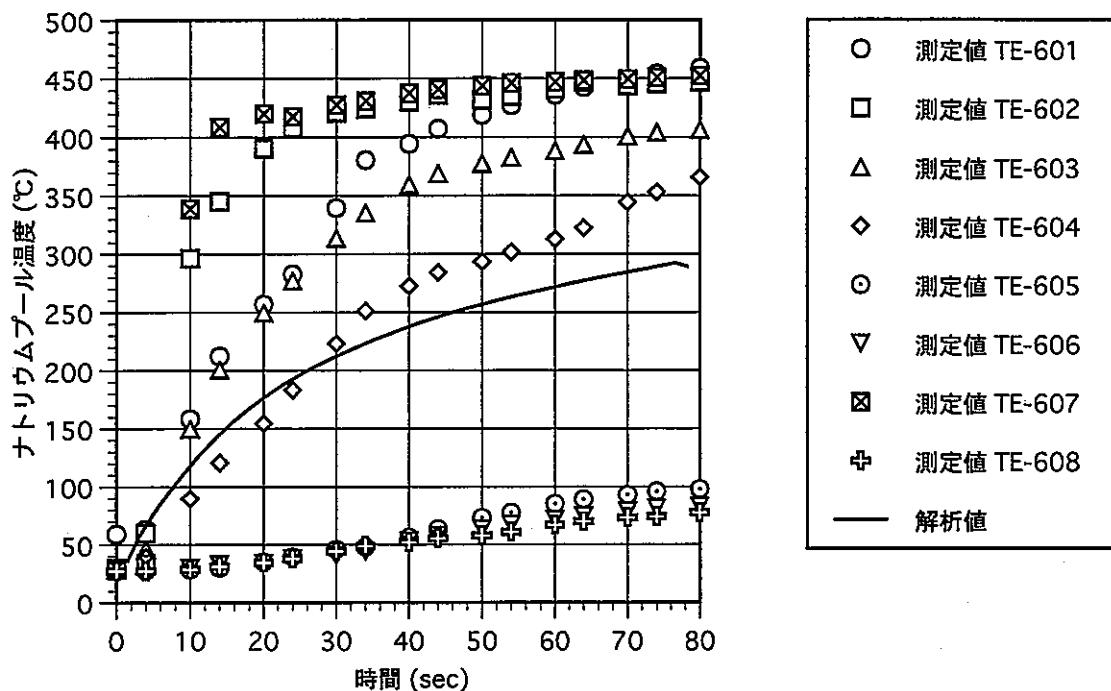
図III-8 酸素濃度 (TASP-N2 基準ケース)



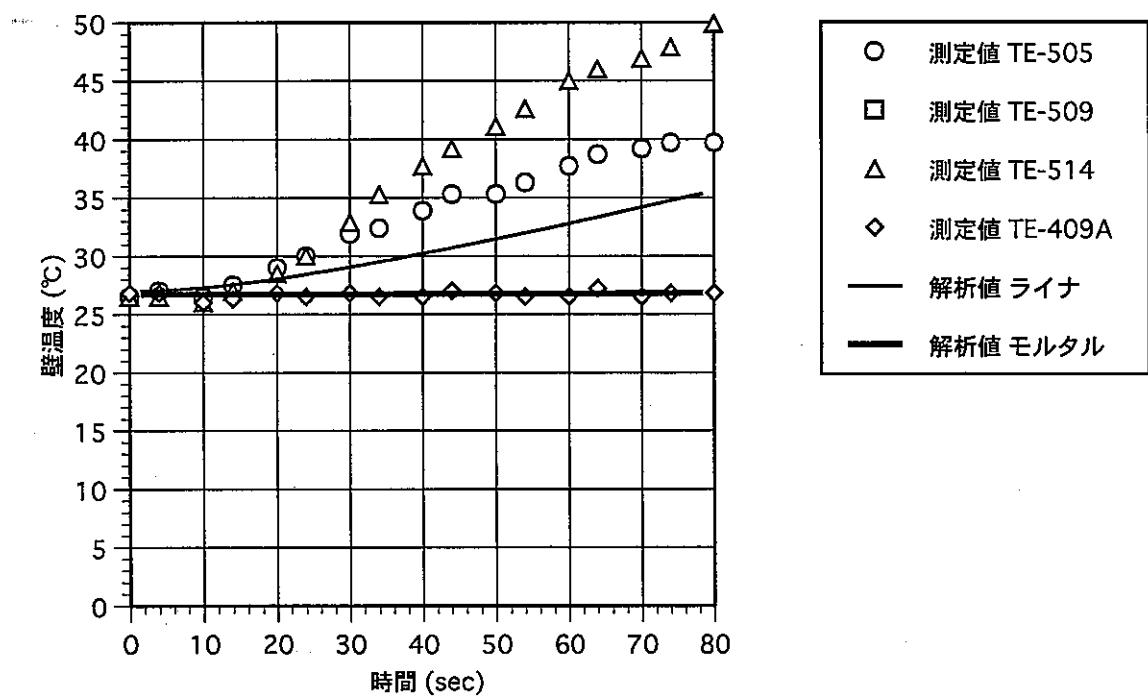
図III-9 ガス圧力 (TASP-N2 もんじゅパラメータ ケース)



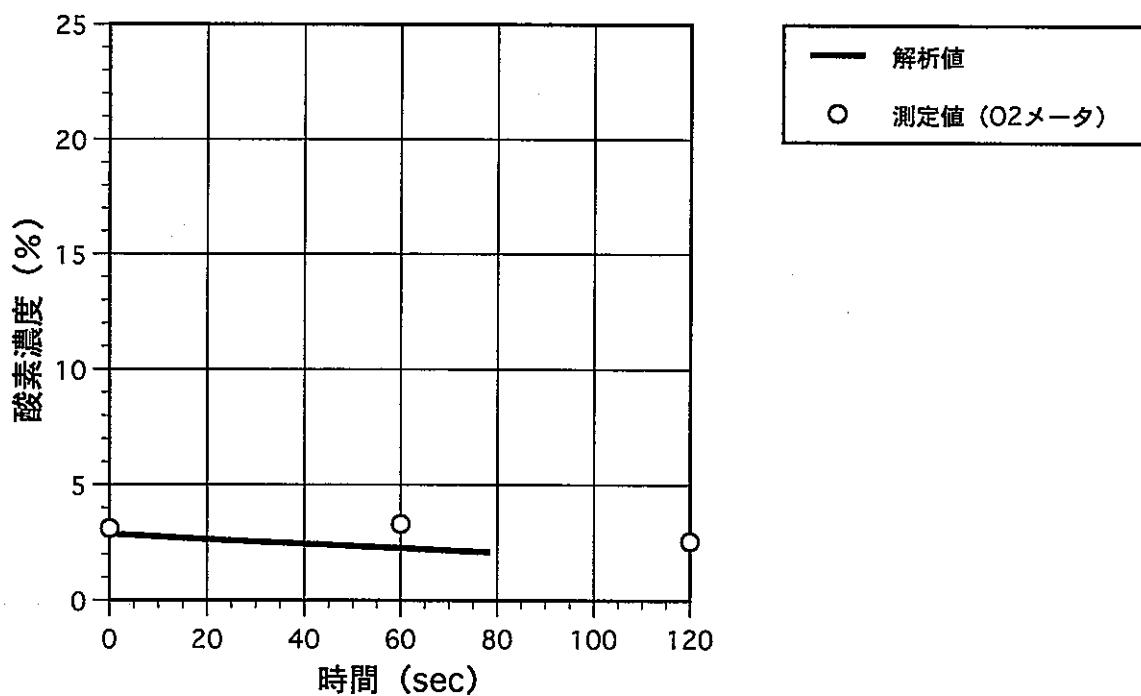
図III-10 ガス温度 (TASP-N2 もんじゅパラメータ ケース)



図III-11 ナトリウムプール温度 (TASP-N2 もんじゅパラメータ ケース)



図III-12 壁温度 (TASP-N2 もんじゅパラメータ ケース)



図III-13 酸素濃度 (TASP-N2 もんじゅパラメータケース)

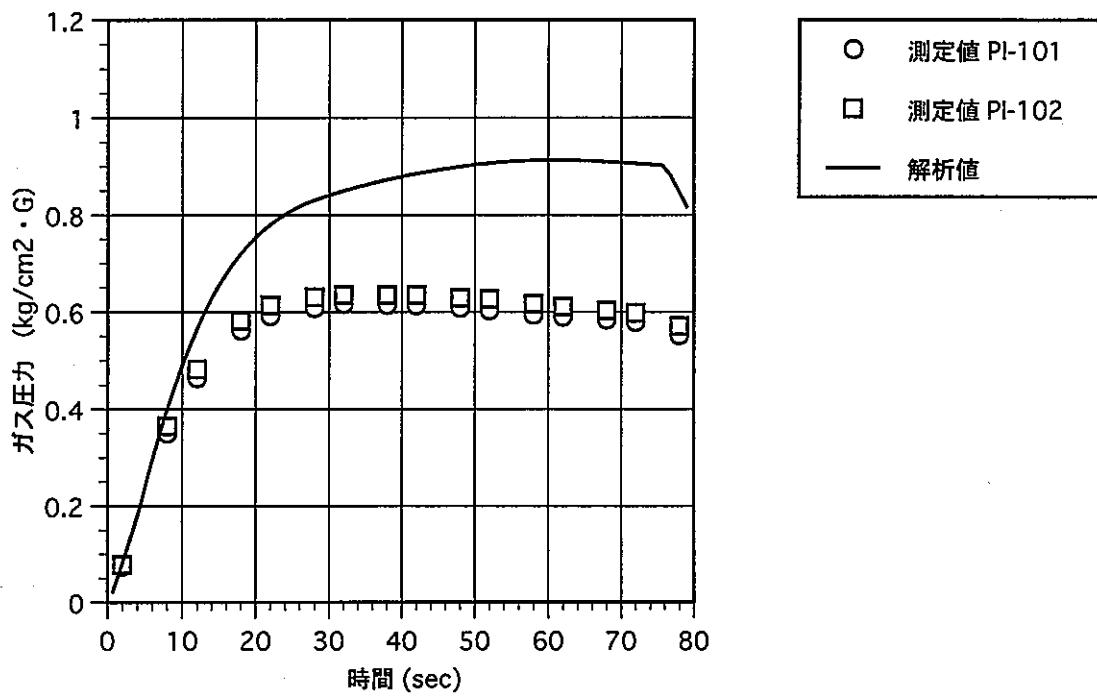


図 III-14 ガス圧力 (TASP-N4 基準ケース)

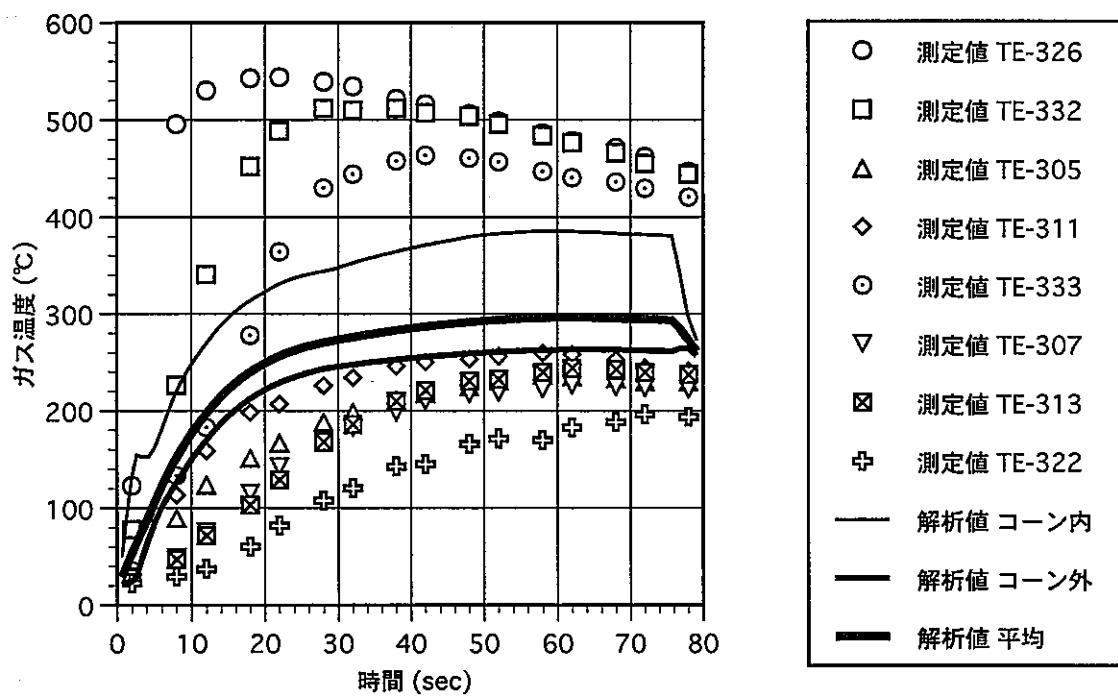
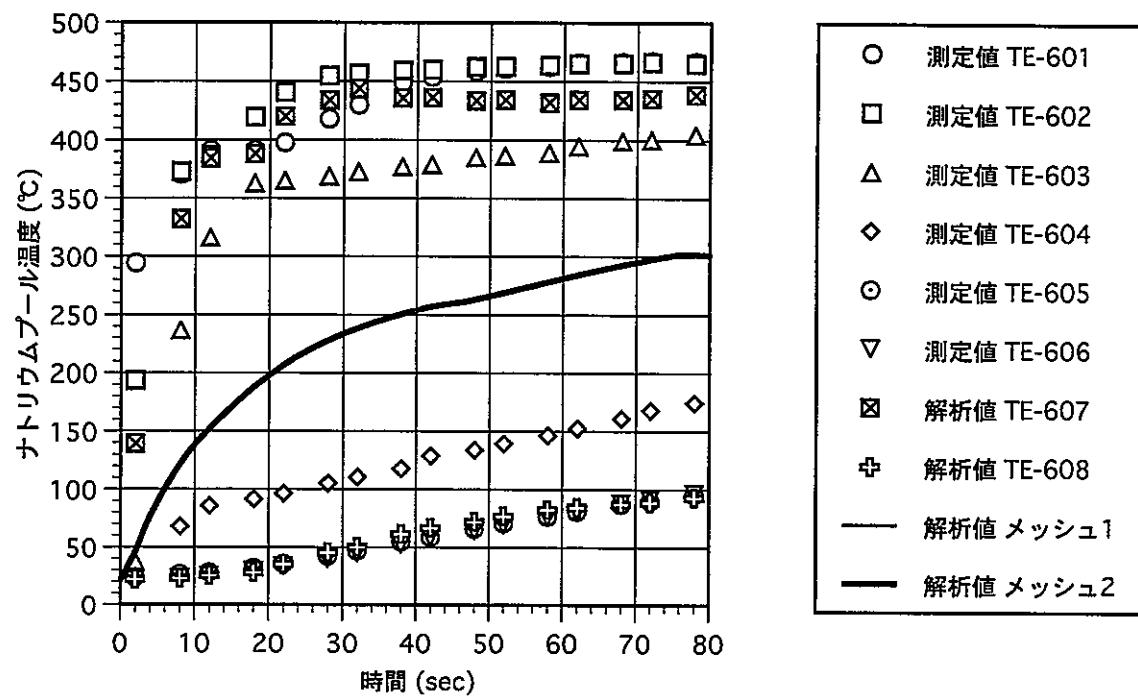
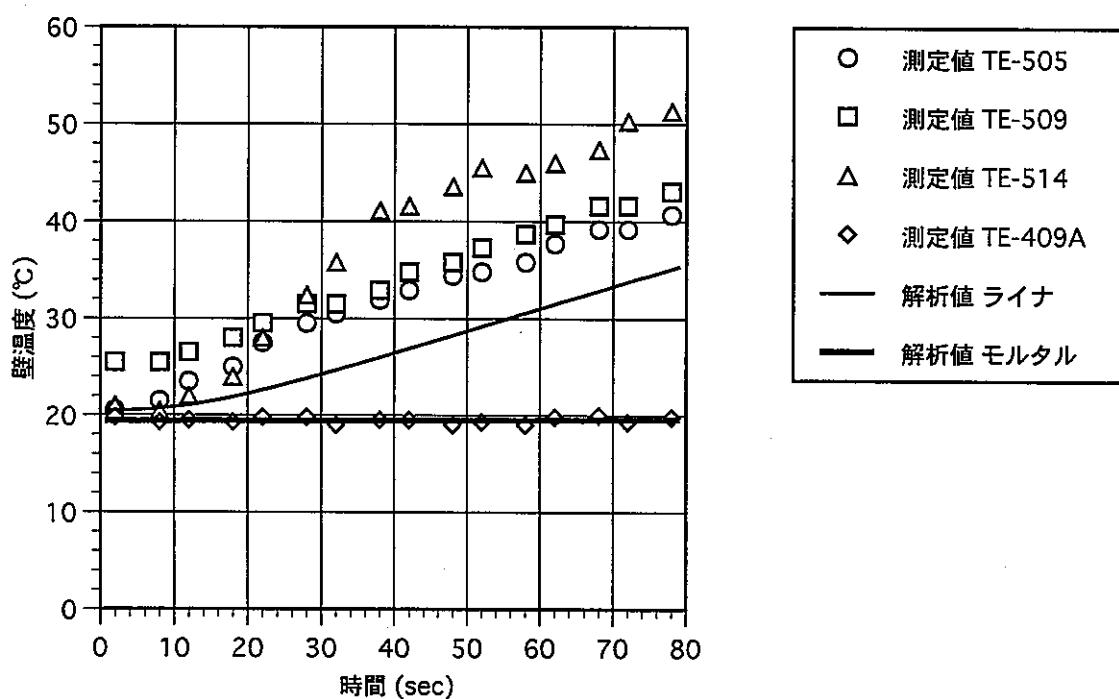


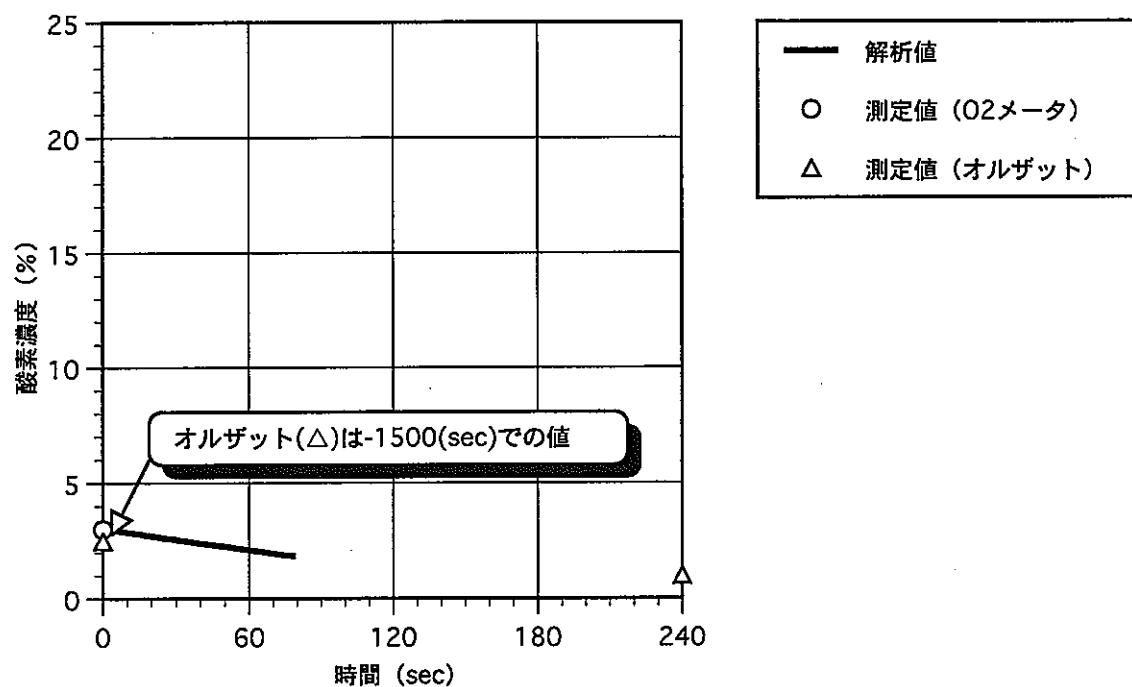
図 III-15 ガス温度 (TASP-N4 基準ケース)



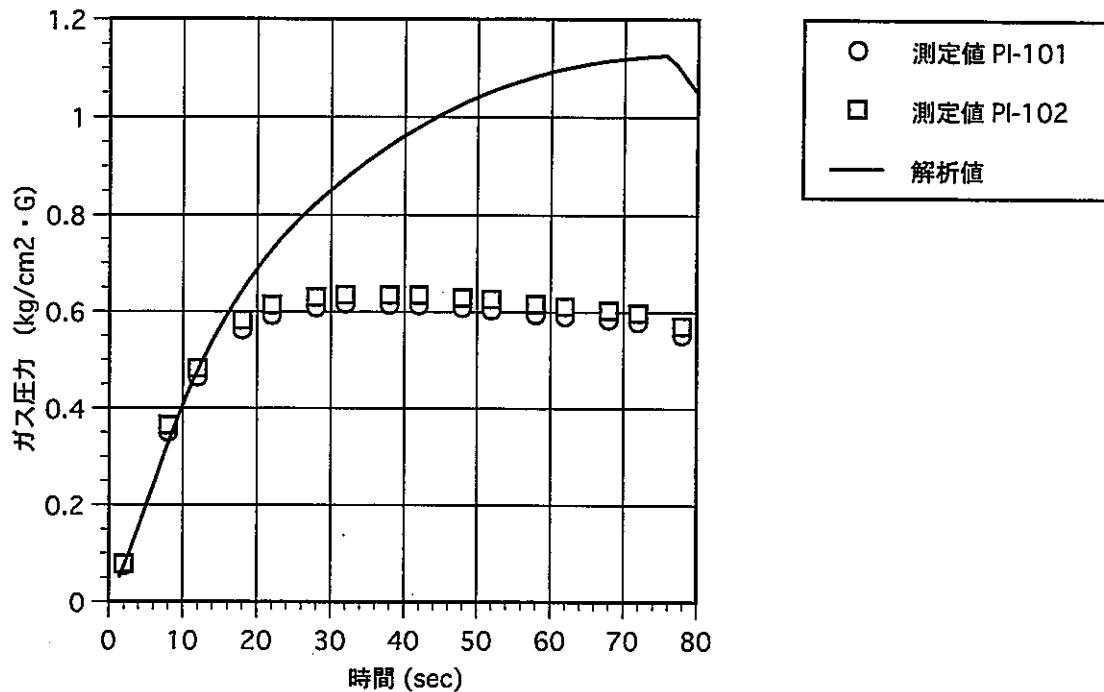
図III-16 ナトリウムプール温度 (TASP-N4 基準ケース)



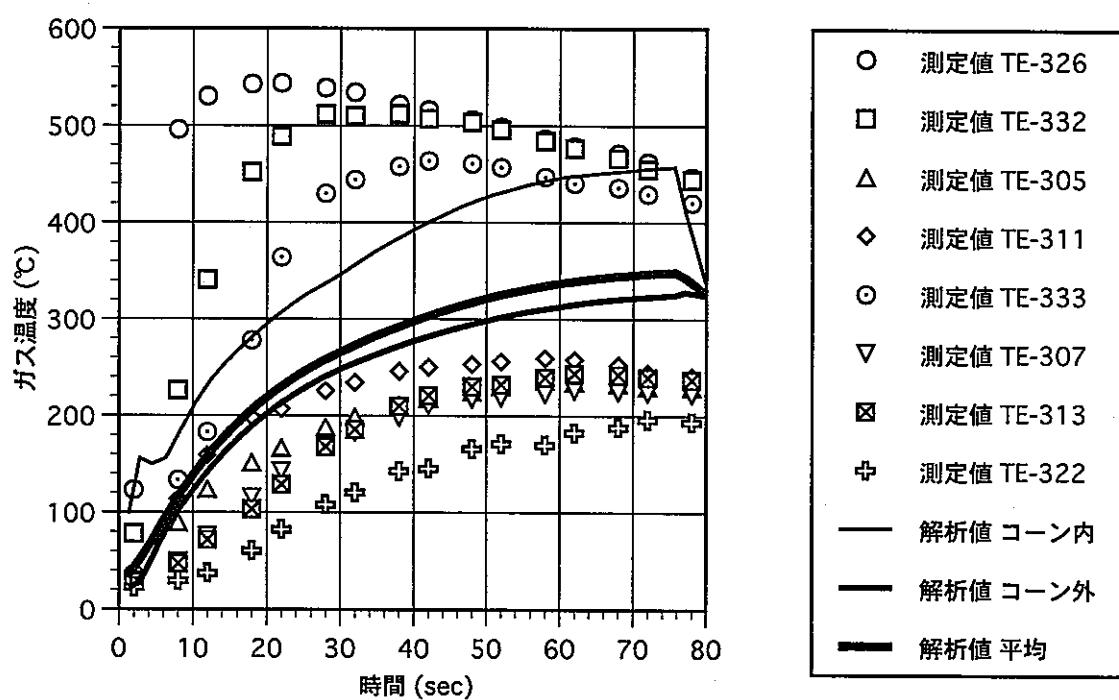
図III-17 壁温度 (TASP-N4 基準ケース)



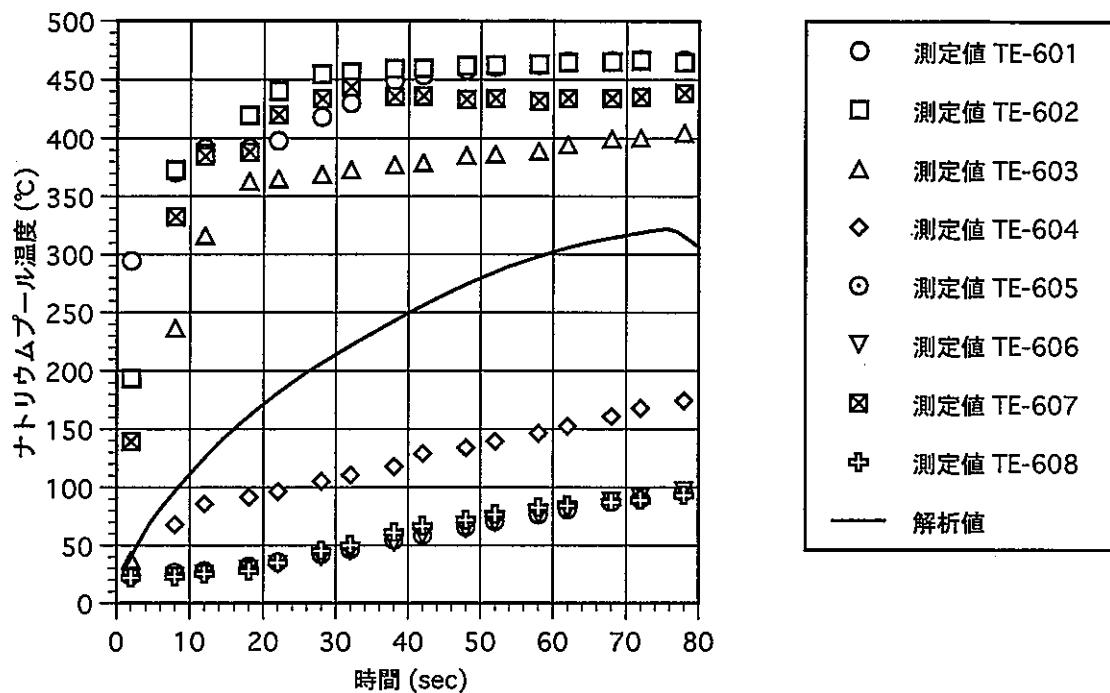
図III-18 酸素濃度 (TASP-N4 基準ケース)



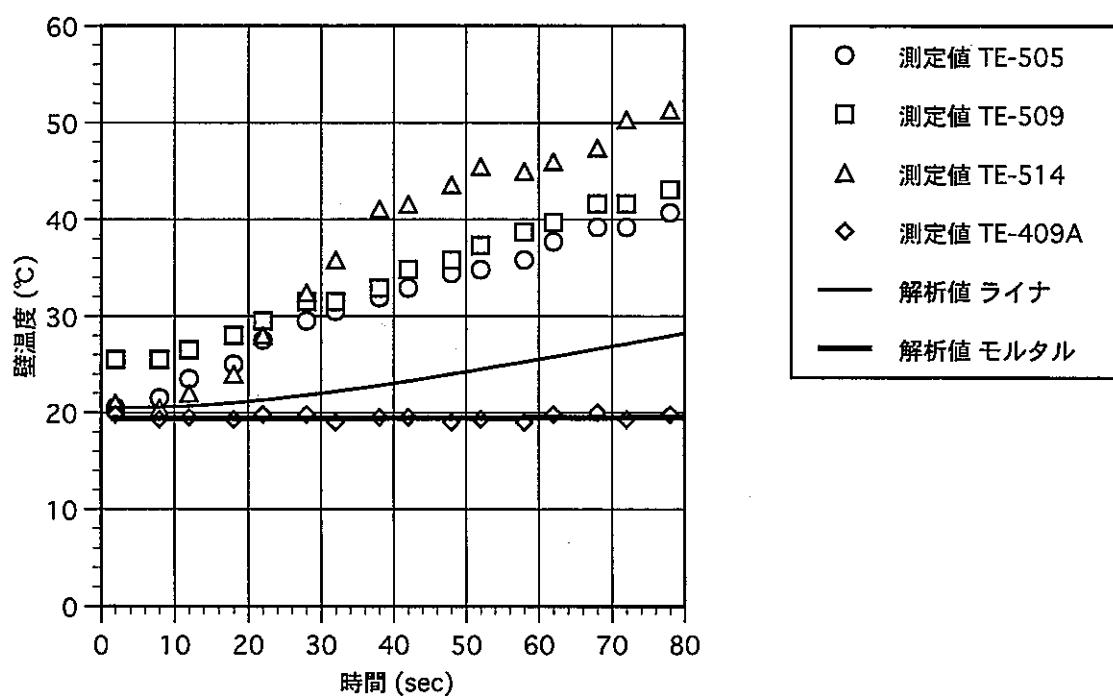
図III-19 ガス圧力 (TASP-N4 もんじゅパラメータ ケース)



図III-20 ガス温度 (TASP-N4 もんじゅパラメータ ケース)



図III-21 ナトリウムプール温度 (TASP-N4 もんじゅパラメータ ケース)



図III-22 壁温度 (TASP-N4 もんじゅパラメータ ケース)

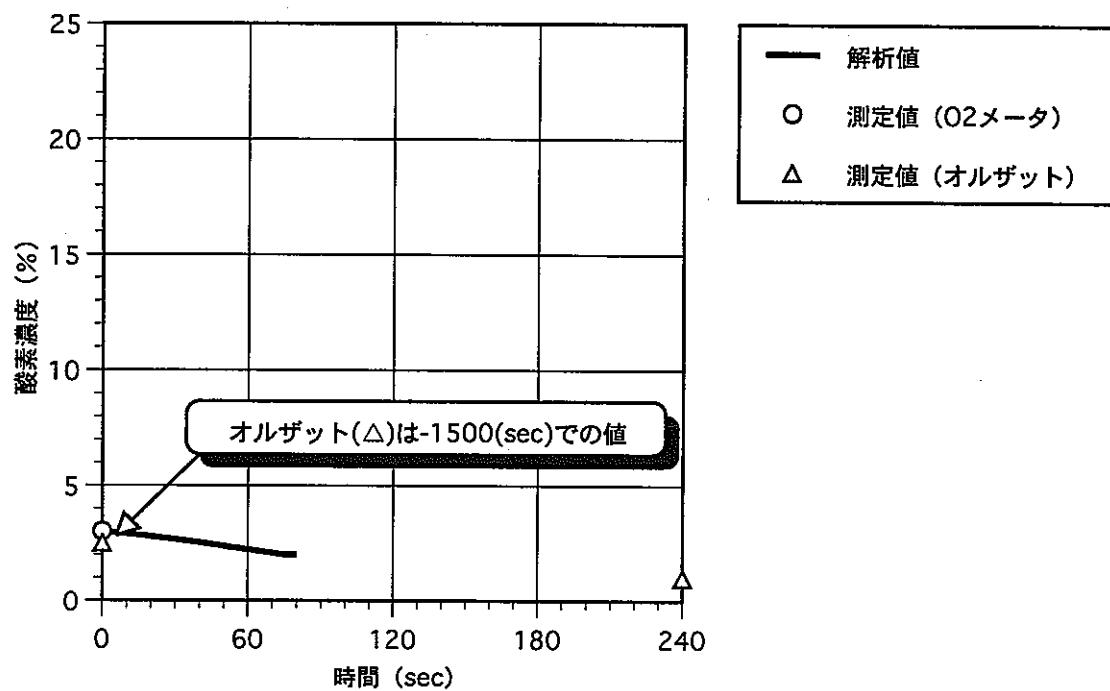
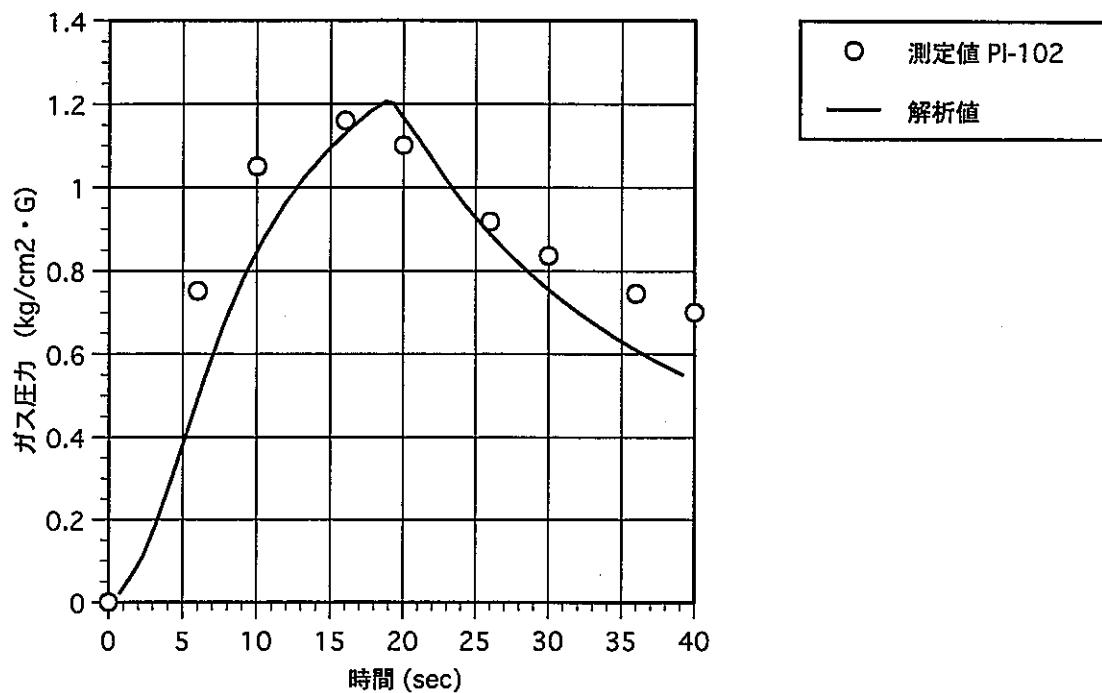
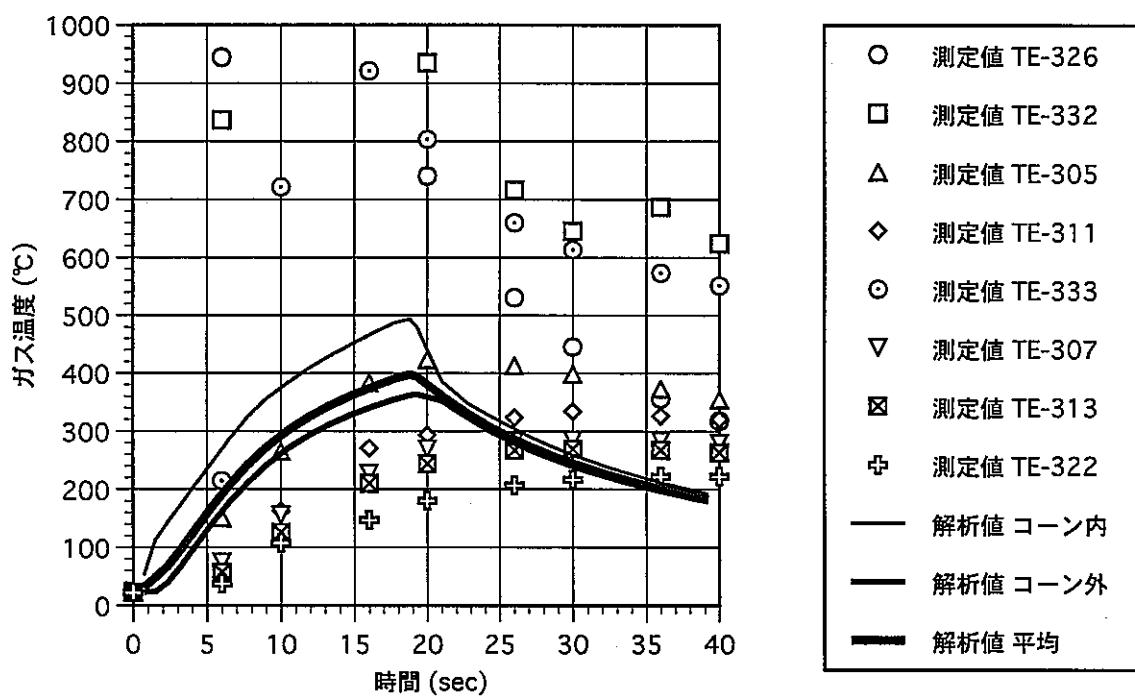


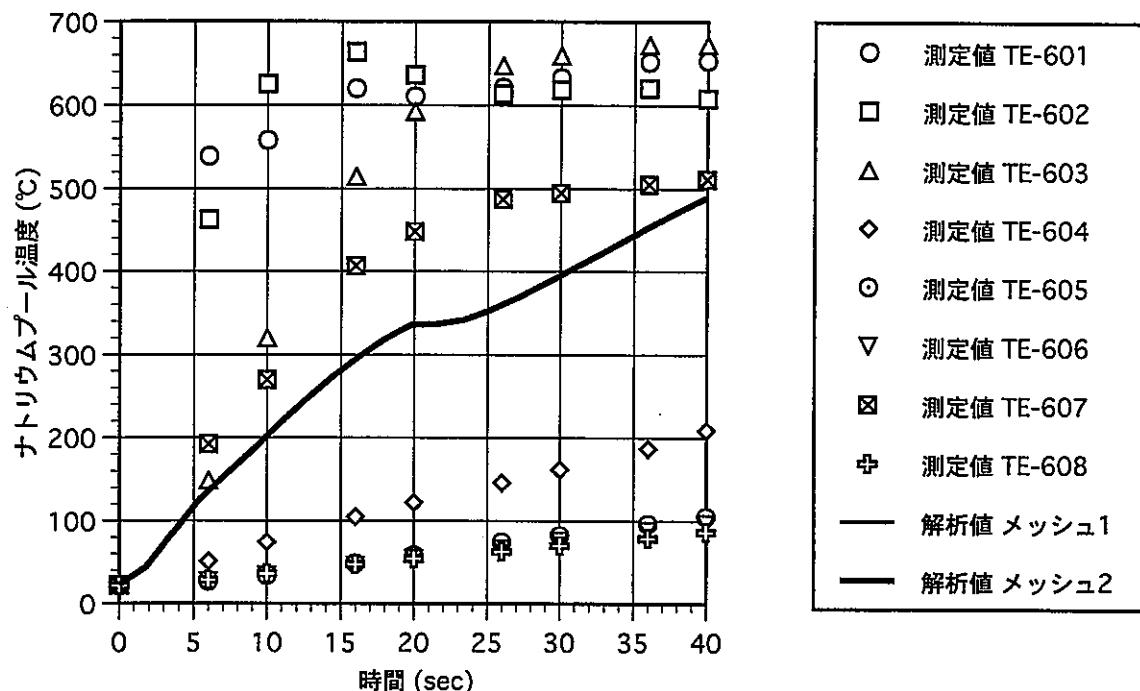
図 III-23 酸素濃度 (TASP-N4 もんじゅパラメータケース)



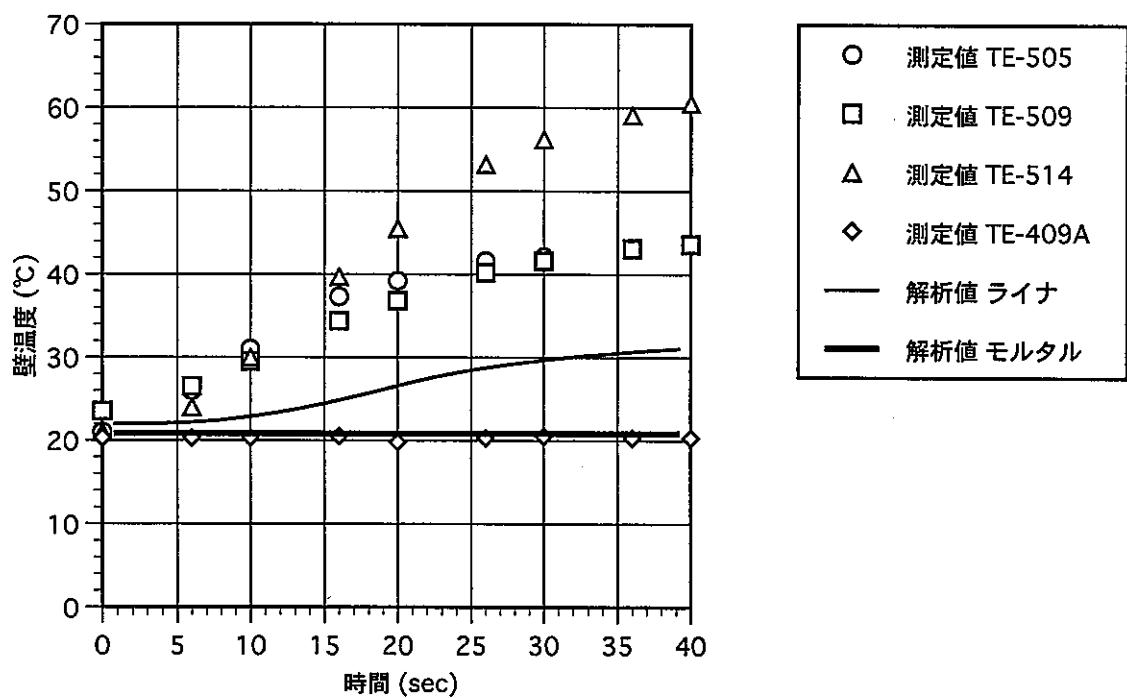
図III-24 ガス圧力 (TASP-A1 基準ケース)



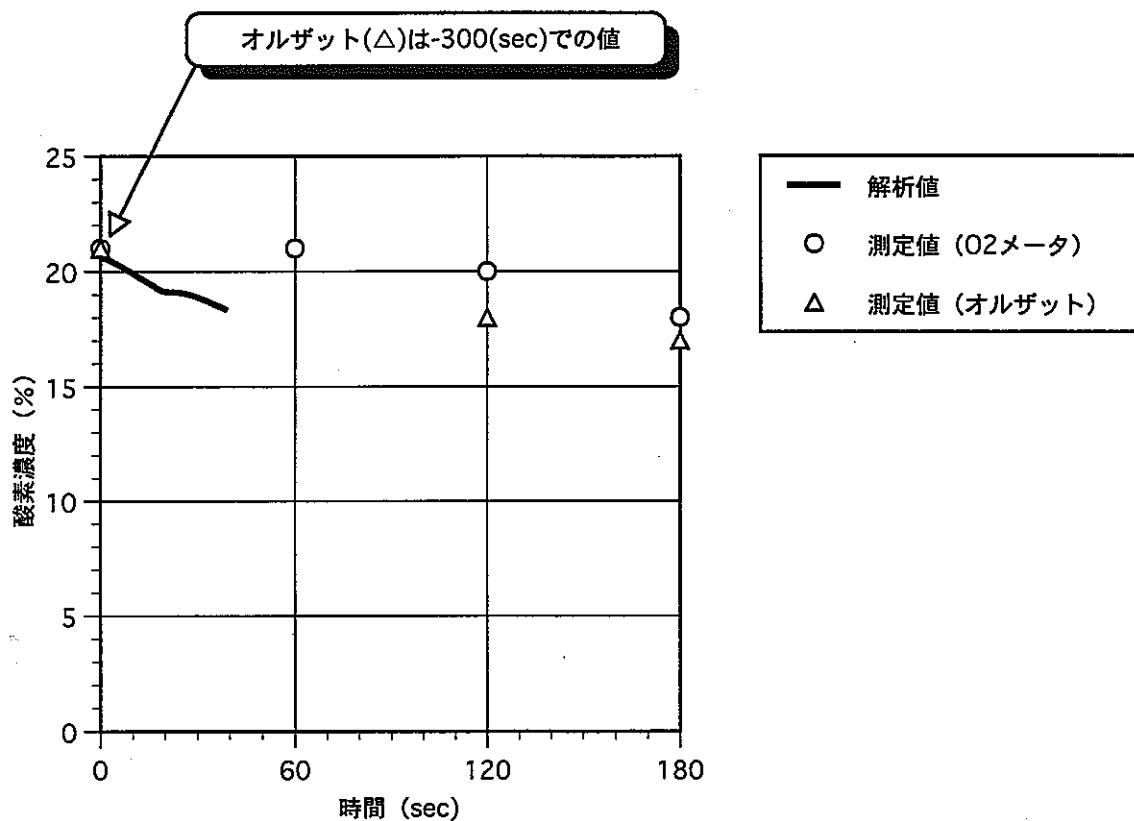
図III-25 ガス温度 (TASP-A1 基準ケース)



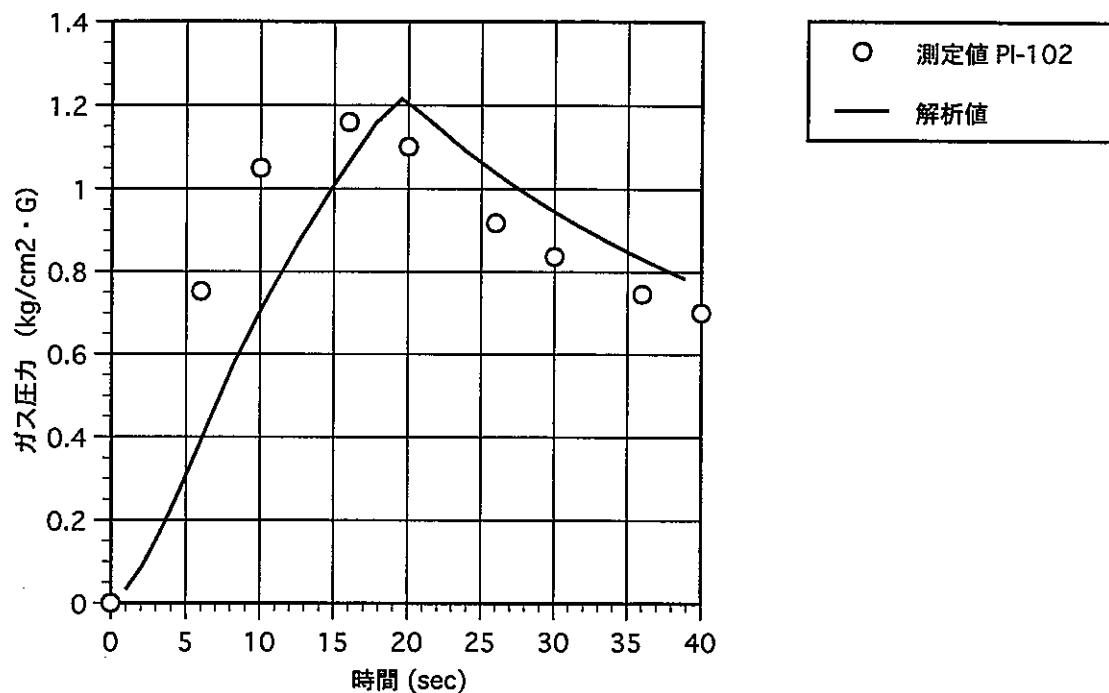
図III-26 ナトリウムプール温度 (TASP-A1 基準ケース)



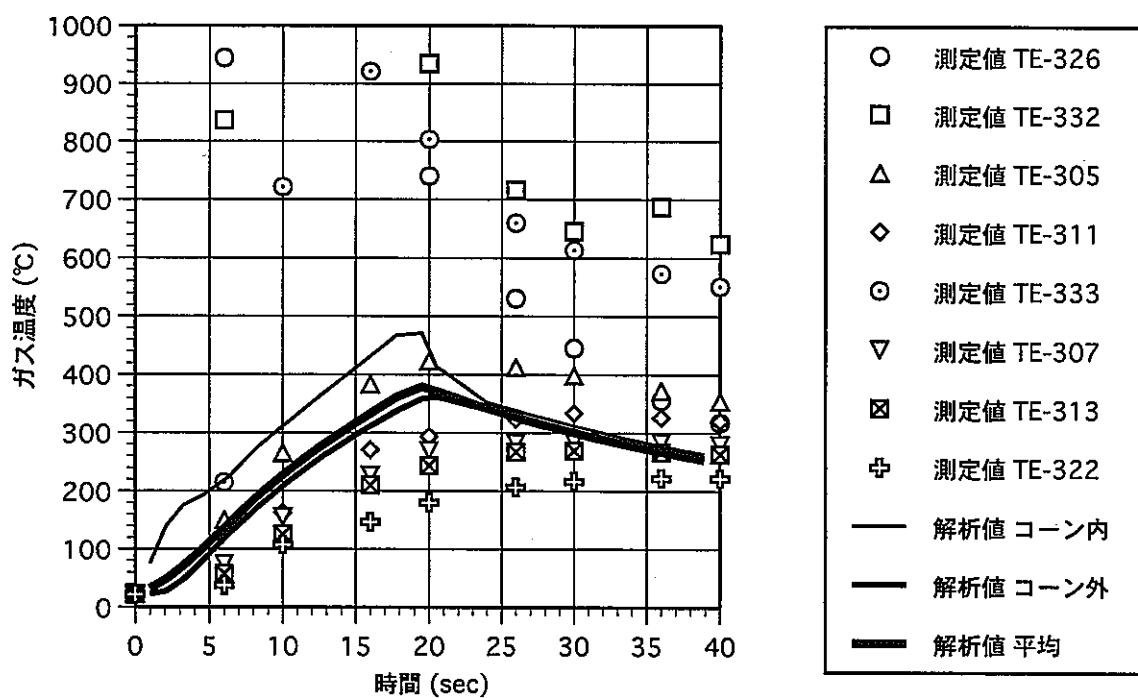
図III-27 壁温度 (TASP-A1 基準ケース)



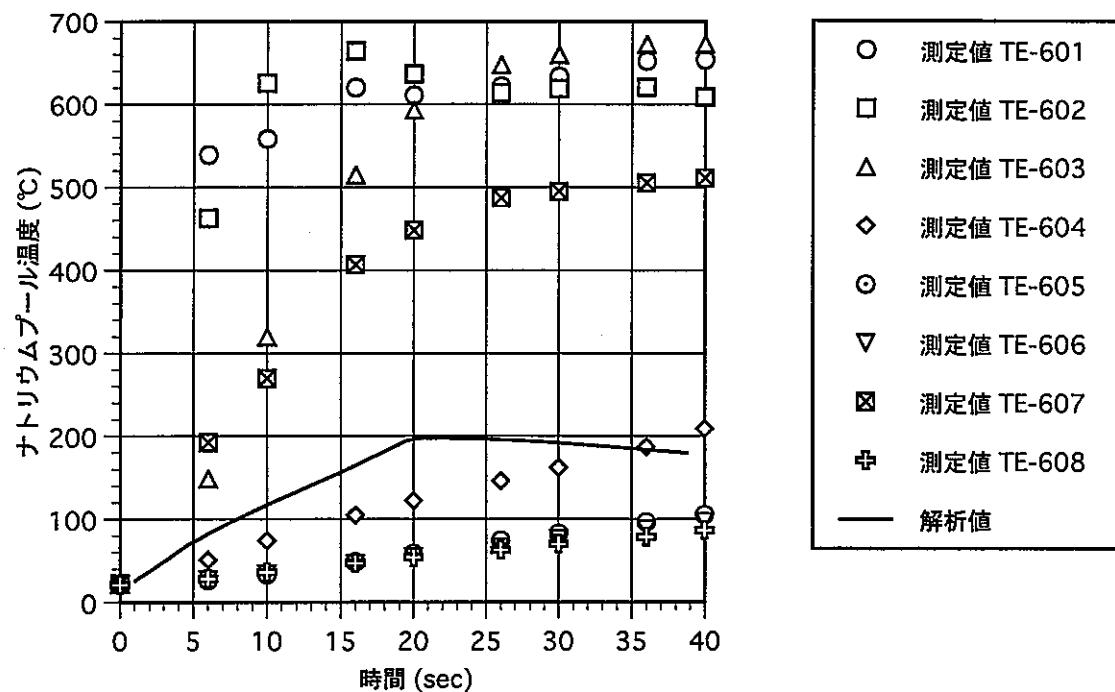
図III-28 酸素濃度 (TASP-A1 基準ケース)



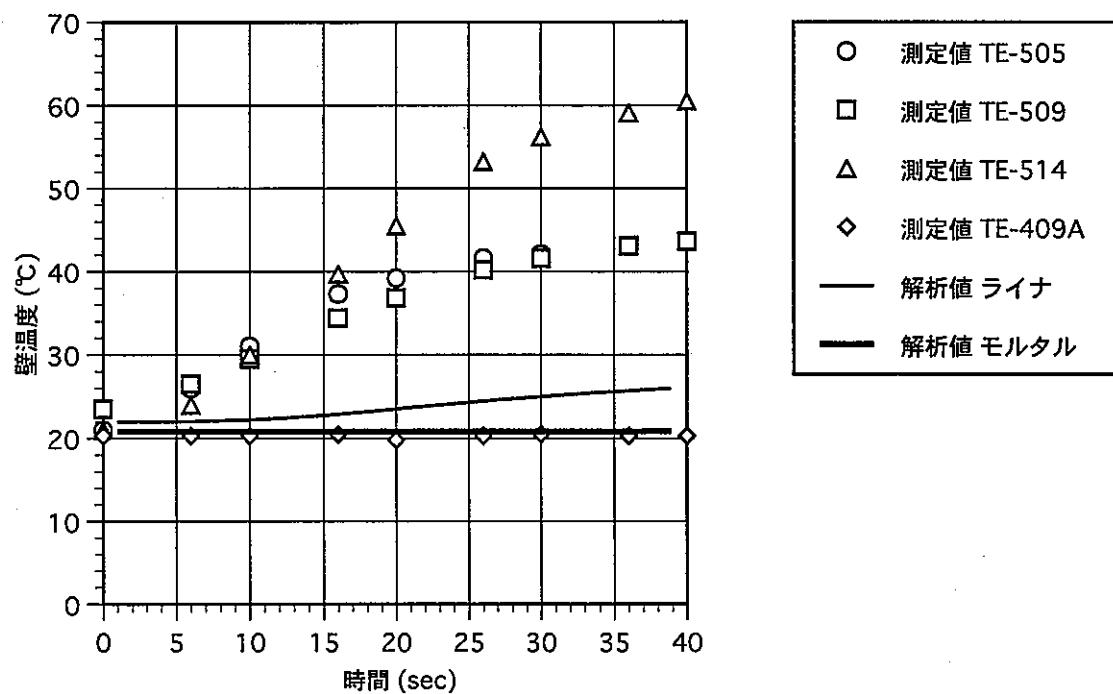
図III-29 ガス圧力 (TASP-A1 もんじゅパラメータ ケース)



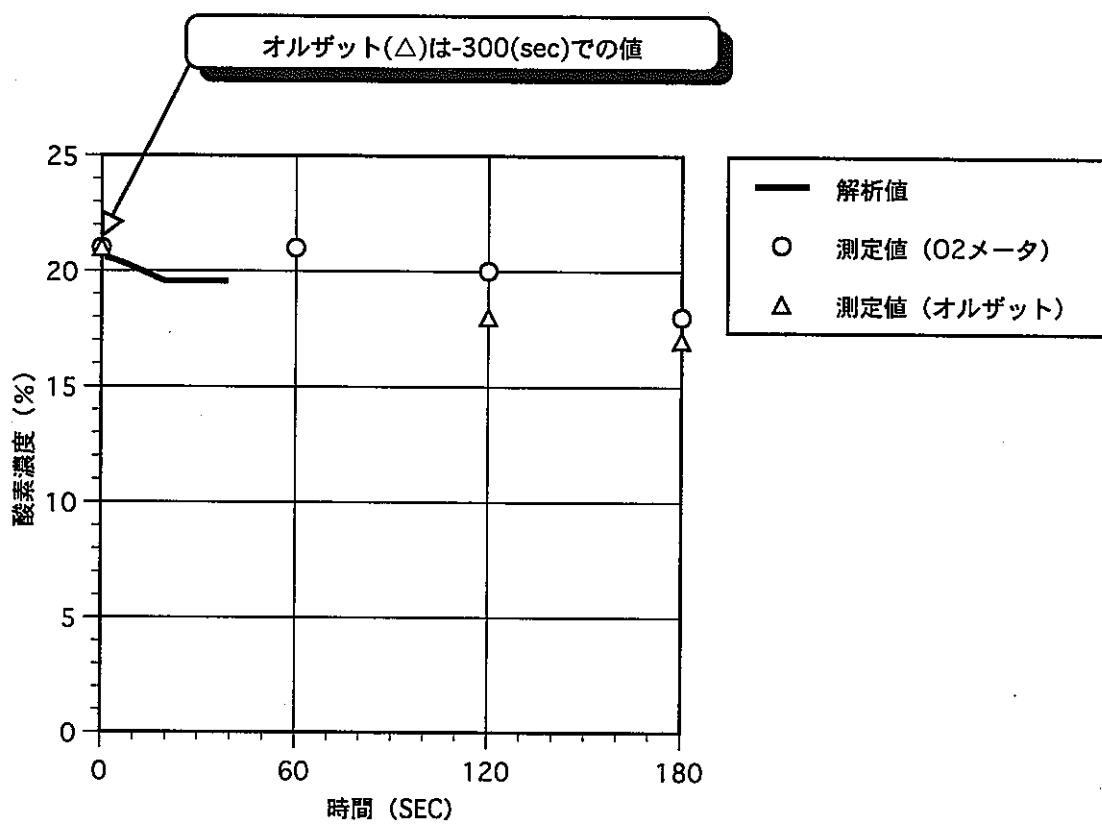
図III-30 ガス温度 (TASP-A1 もんじゅパラメータ ケース)



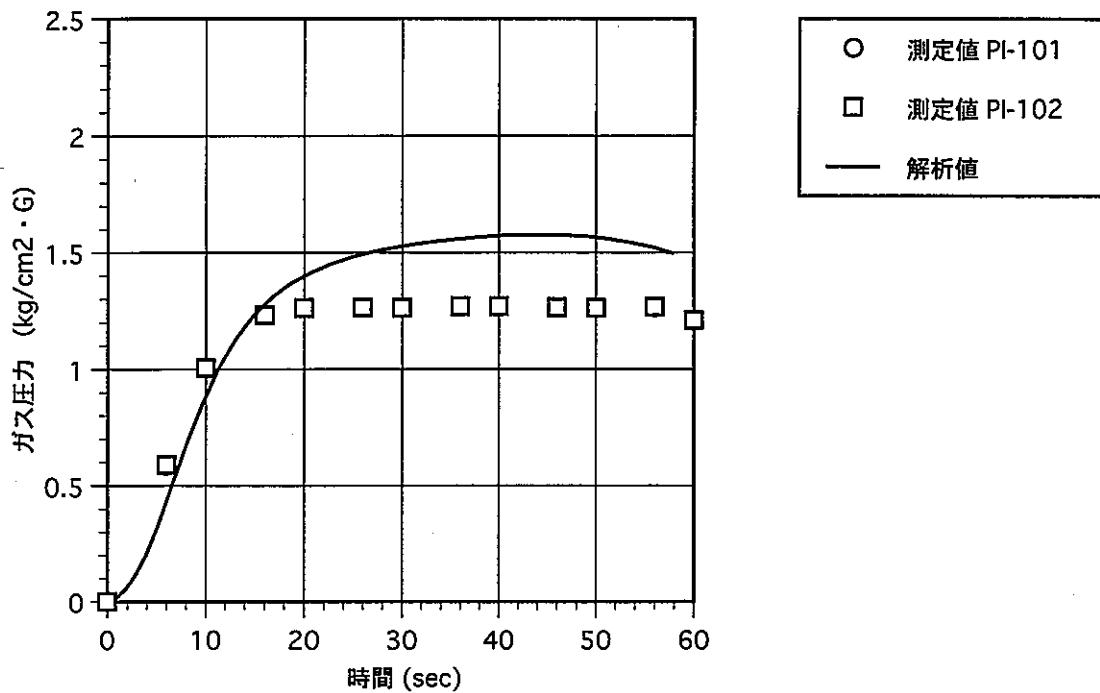
図III-31 ナトリウムプール温度 (TASP-A1 もんじゅパラメータ ケース)



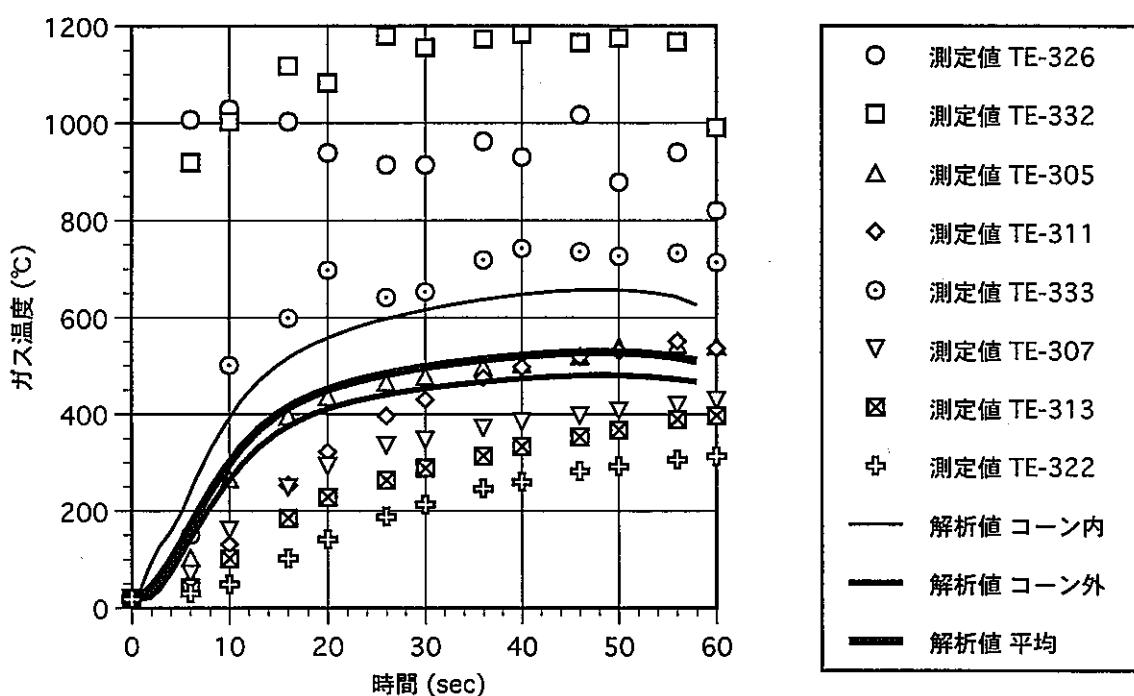
図III-32 壁温度 (TASP-A1 もんじゅパラメータ ケース)



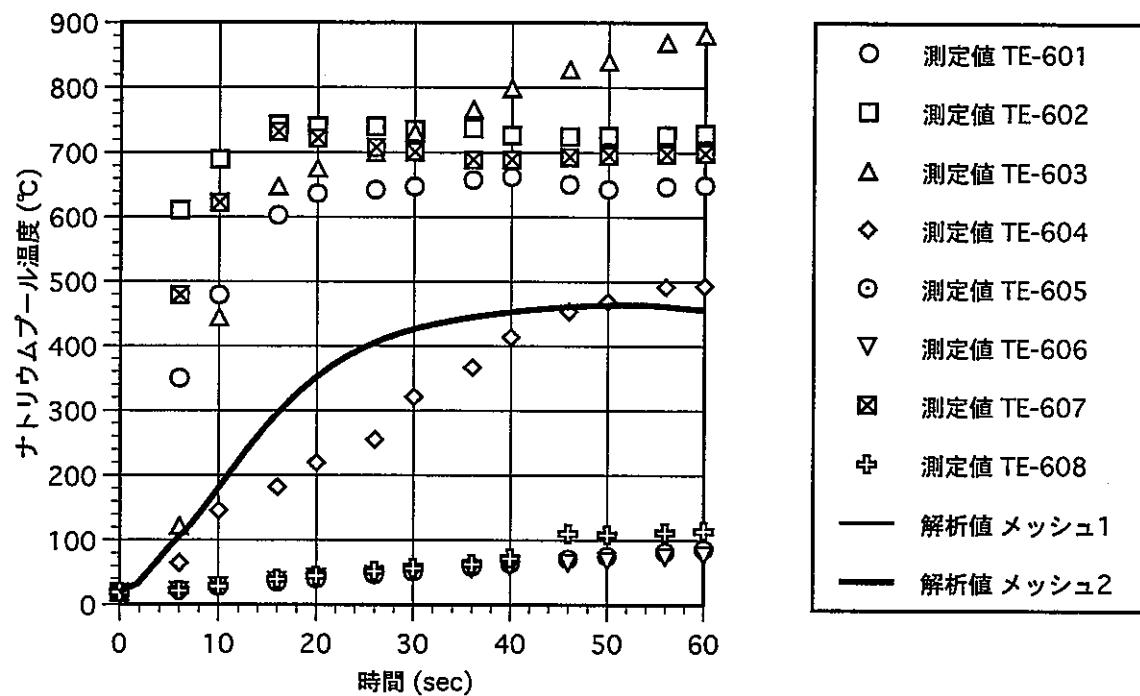
図III-33 酸素濃度 (TASP-A1 もんじゅパラメータケース)



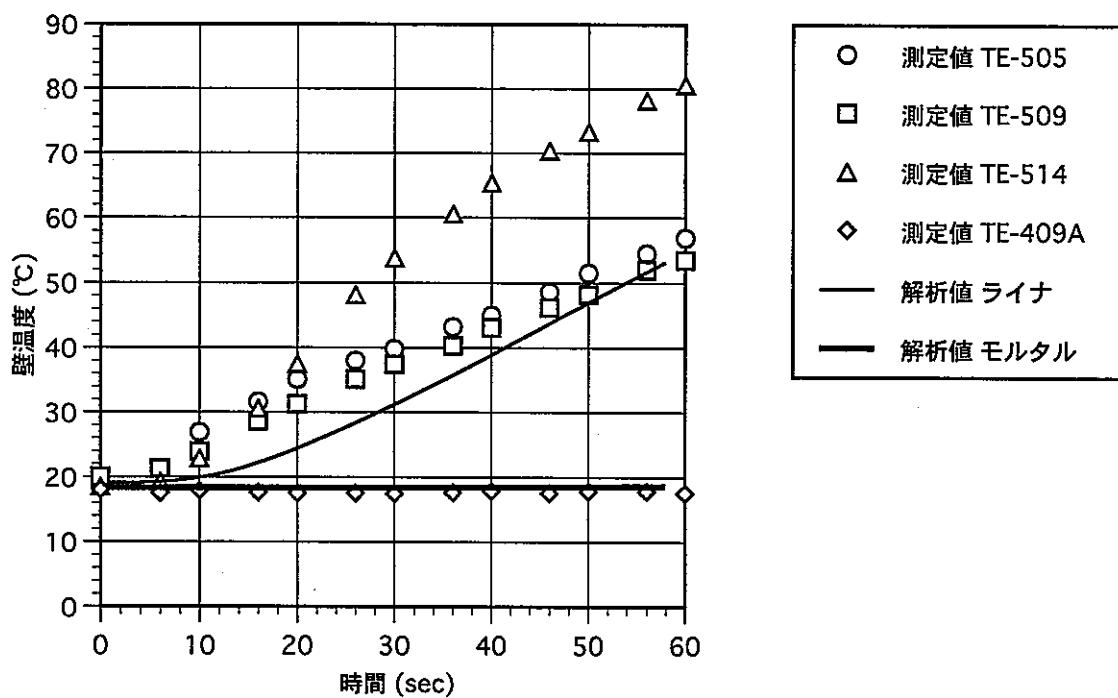
図III-34 ガス圧力 (TASP-A2 基準ケース)



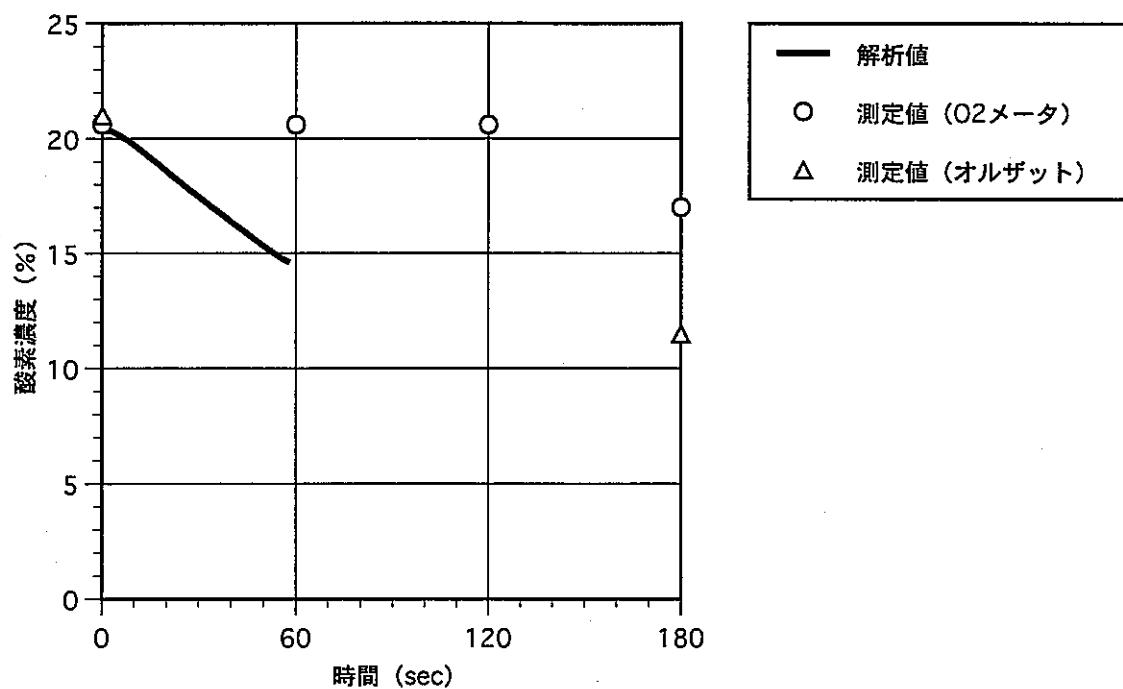
図III-35 ガス温度 (TASP-A2 基準ケース)



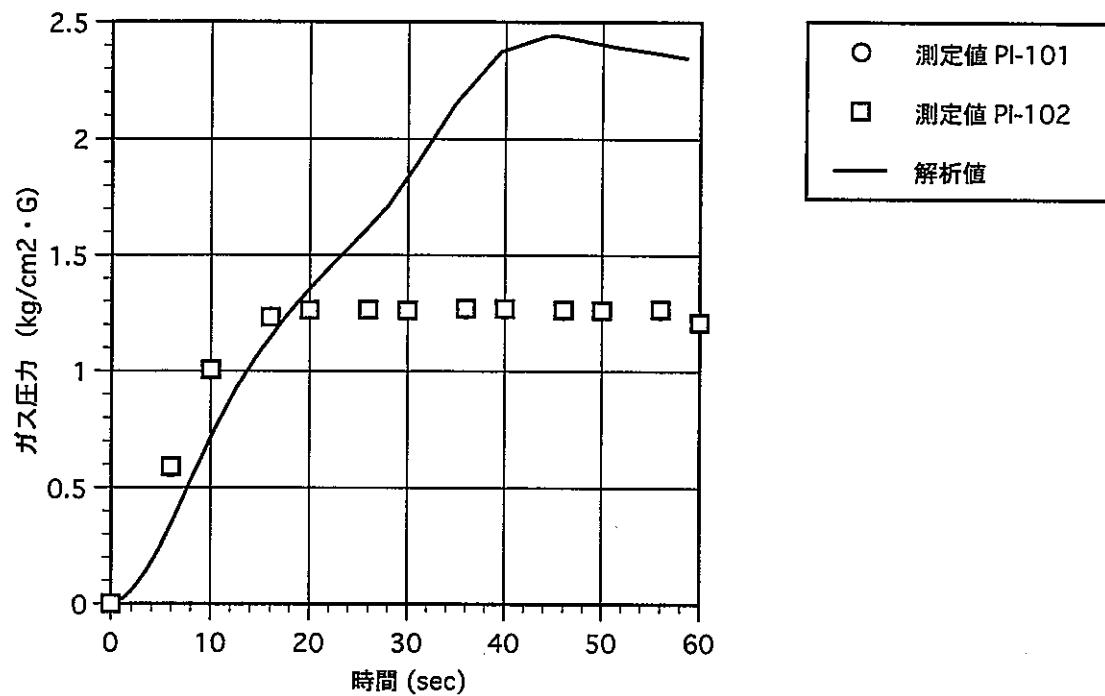
図III-36 ナトリウムプール温度 (TASP-A2 基準ケース)



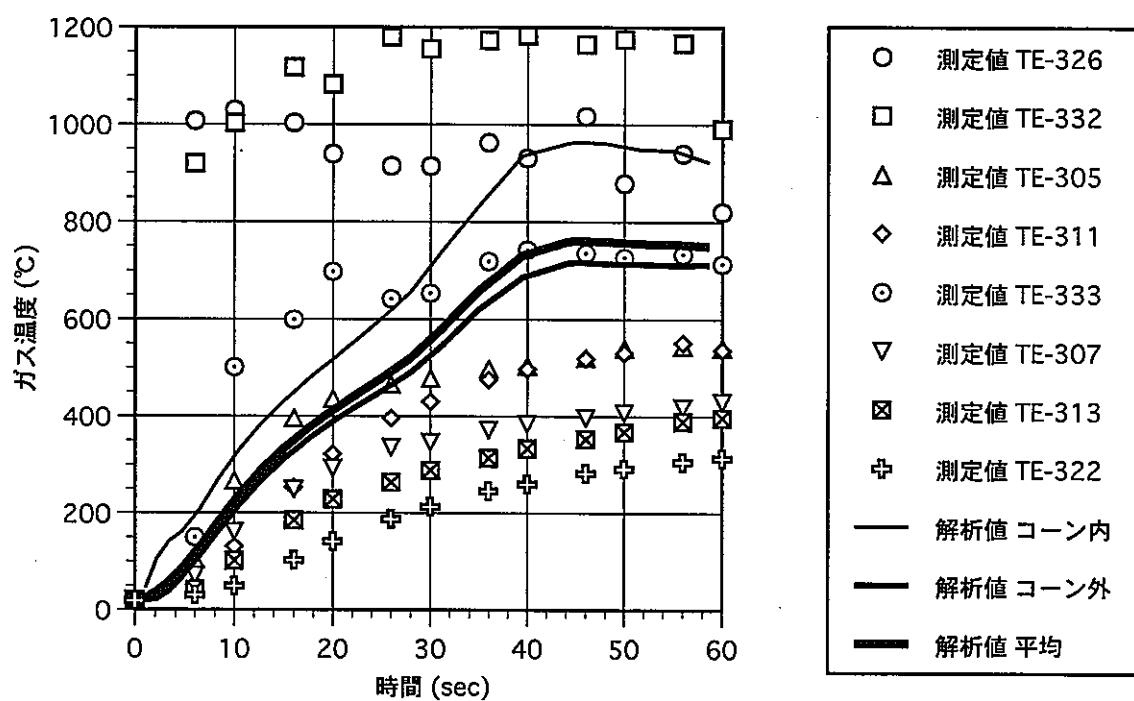
図III-37 壁温度 (TASP-A2 基準ケース)



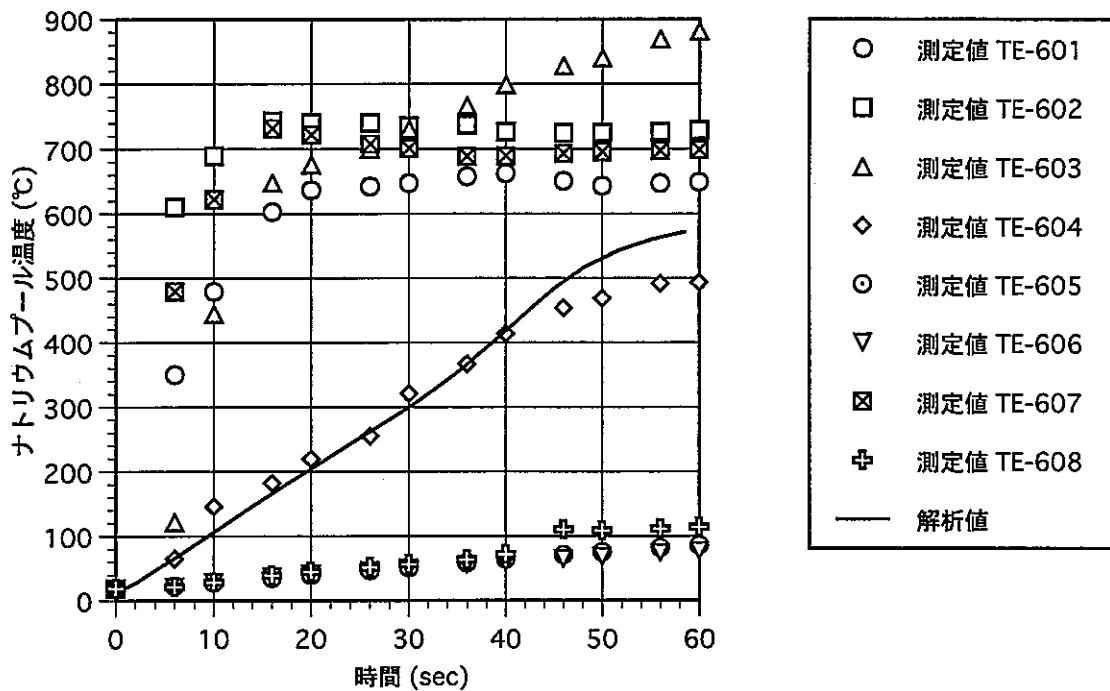
図III-38 酸素濃度 (TASP-A2 基準ケース)



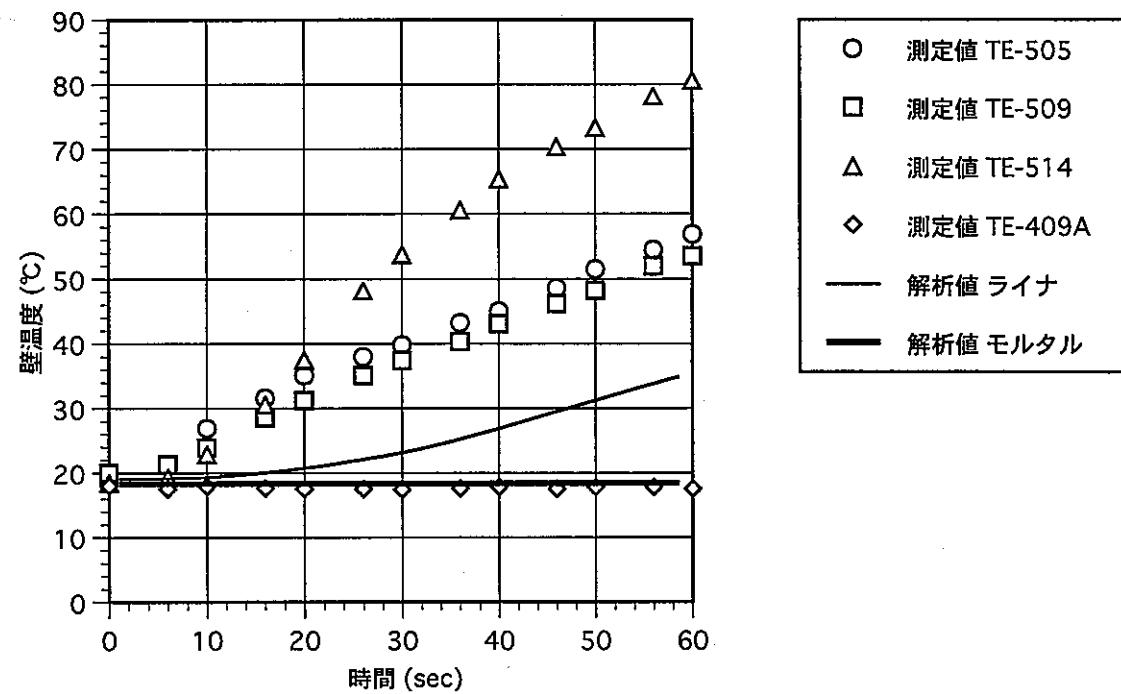
図III-39 ガス圧力 (TASP-A2 もんじゅパラメータ ケース)



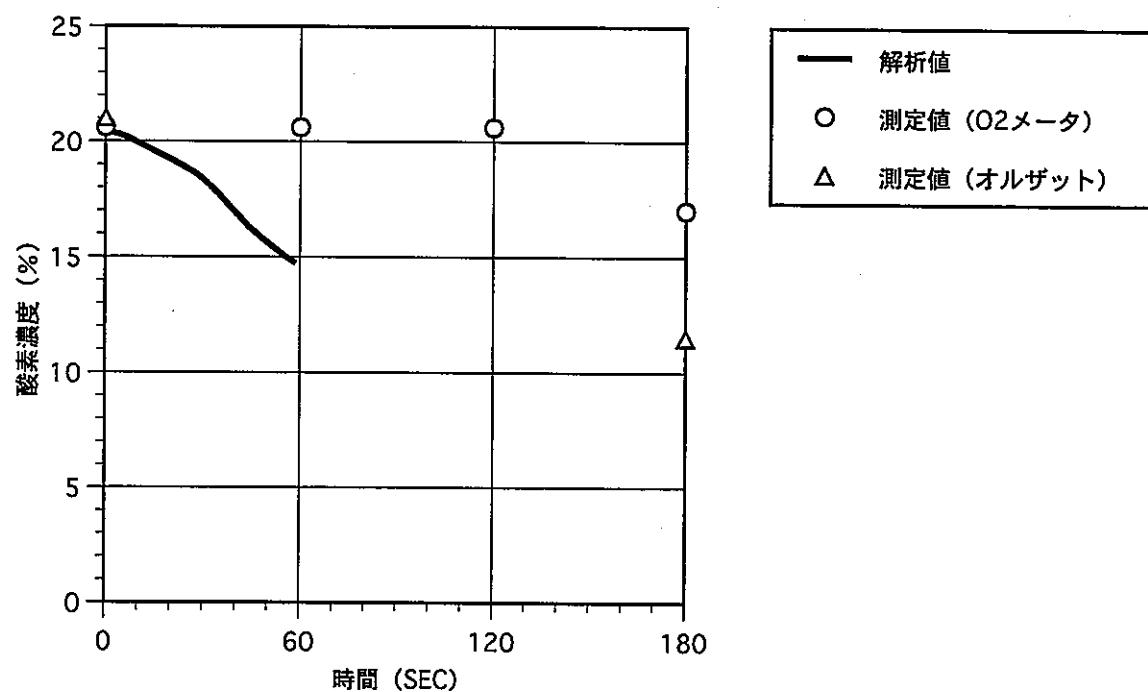
図III-40 ガス温度 (TASP-A2 もんじゅパラメータ ケース)



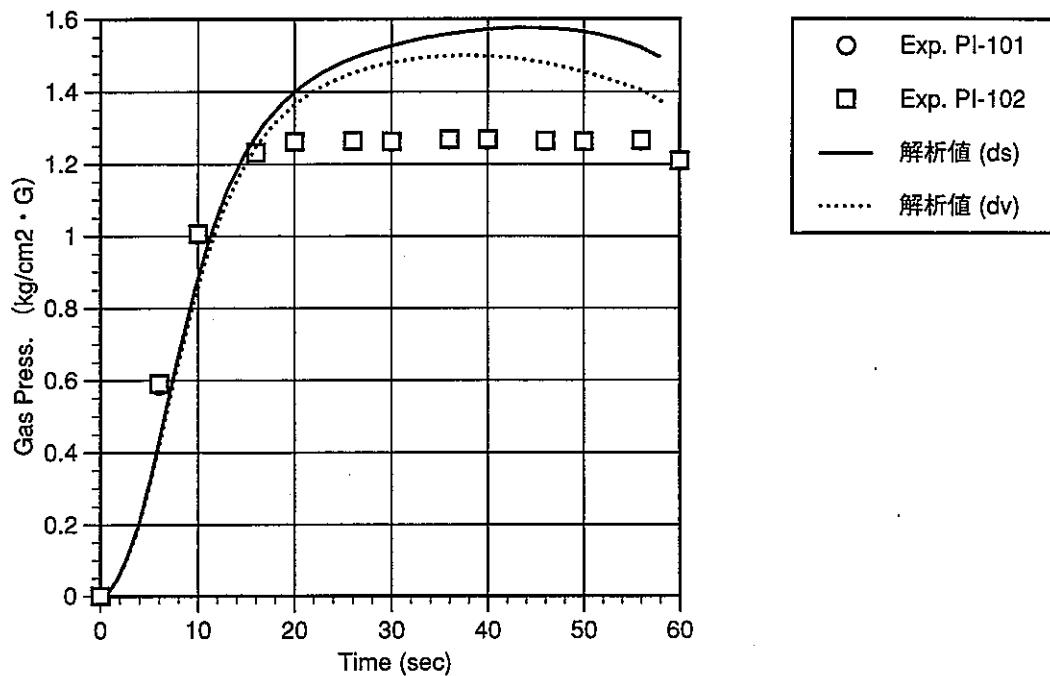
図III-41 ナトリウムプール温度 (TASP-A2 もんじゅパラメータ ケース)



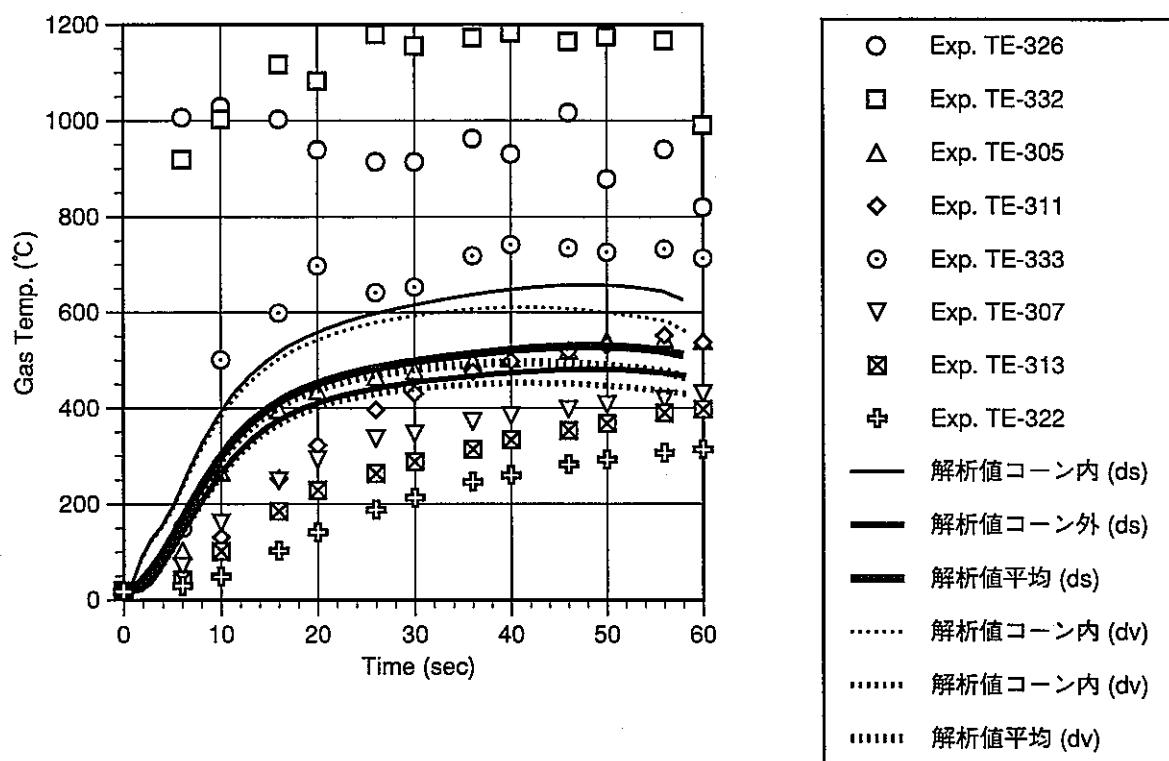
図III-42 壁温度 (TASP-A2 もんじゅパラメータ ケース)



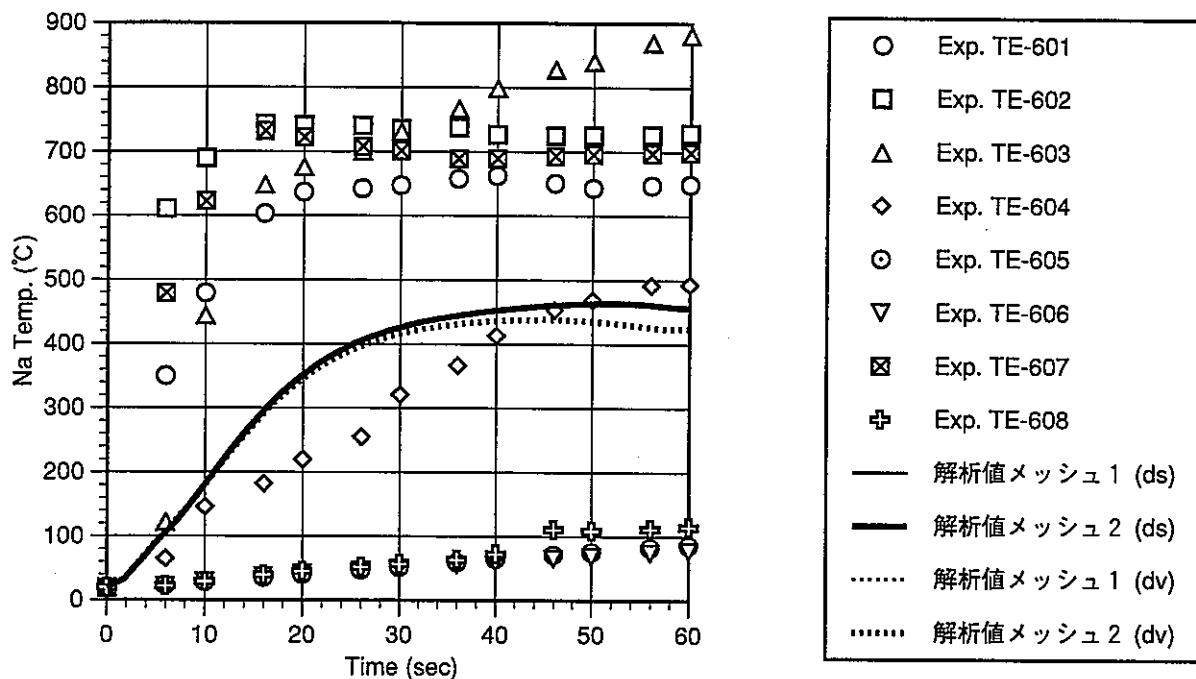
図III-43 酸素濃度 (TASP-A2 もんじゅパラメータケース)



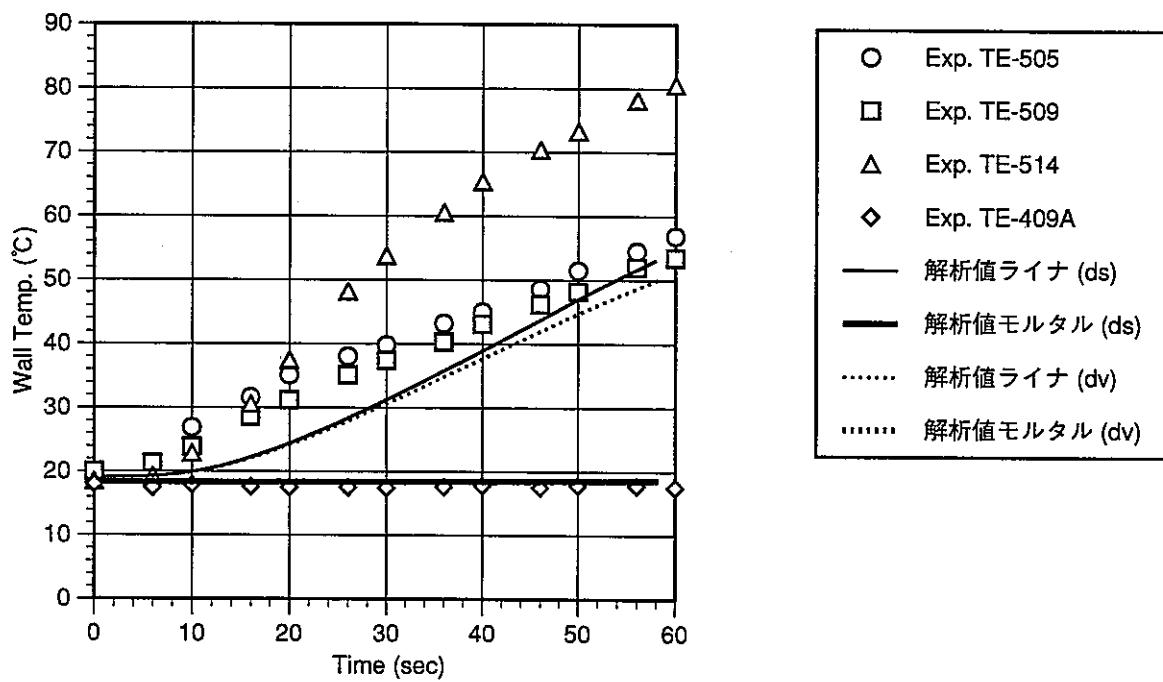
図IV-1 ガス圧力 (TASP-A2 基準ケース)



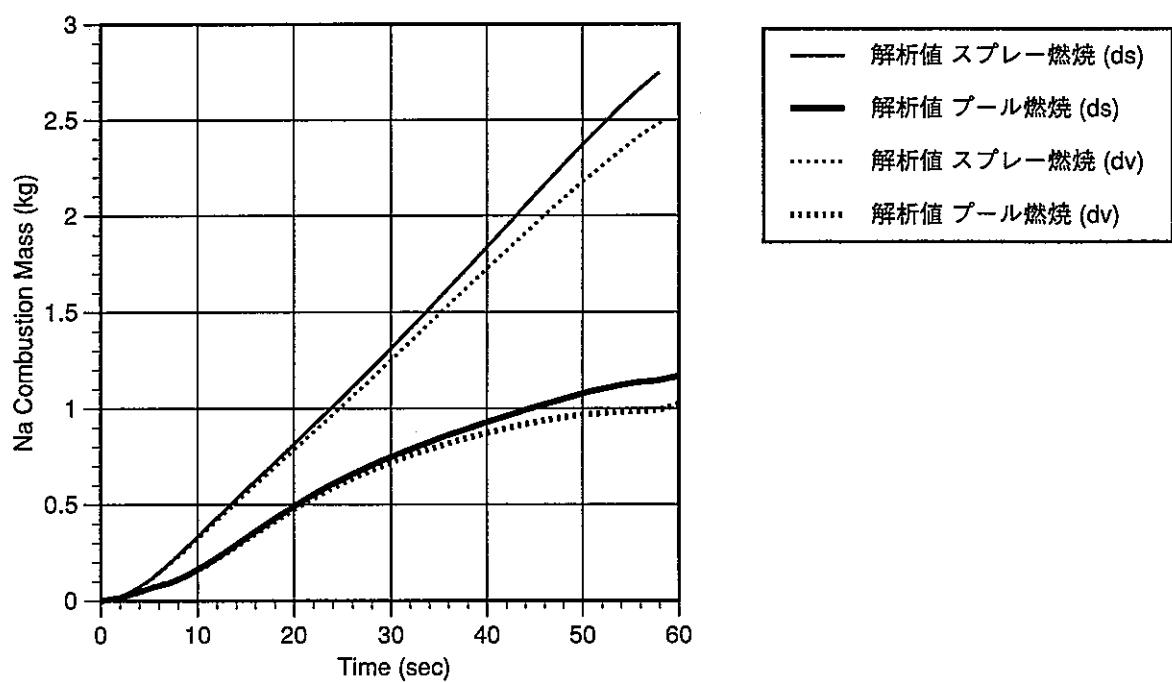
図IV-2 ガス温度 (TASP-A2 基準ケース)



図IV-3 ナトリウムプール温度 (TASP-A2 基準ケース)



図IV-4 壁温度 (TASP-A2 基準ケース)



図IV-5 ナトリウム燃焼量 (TASP-A2 基準ケース)

## Appendix

ASSCOPS Ver.1.1 の計算モデルについて

### A-1 ASSCOPS Ver.1.1 の計算機能の概要

ASSCOPS Ver.1.1 の計算機能に関するブロック図を図A-1に示す。プール燃焼に関してはSOFIREモジュール（SOFIRE-M IIコードに相当）で、スプレイ燃焼に関してはSPRAYモジュール（SPRAY-III M コードに相当）で計算を行う。

SOFIREモジュールでは、プール条件（ナトリウム温度、ナトリウム量、プール表面積等）、霧囲気ガス条件（ガス温度、ガス成分等）や構造物条件（材質、温度、表面積等）を入力として、プール燃焼に伴う熱流動計算を行う。一方、SPRAYモジュールでは、スプレイ条件（ナトリウム温度、漏えいナトリウム速度、スプレイ液滴径等）、霧囲気ガス条件（温度、ガス成分等）や構造物条件（材質、温度、表面積等）を入力として、スプレイ燃焼に伴う熱流動計算を行う。ASSCOPS Ver.1.1 では、プール燃焼（SOFIREモジュール）をセル1に、またスプレイ燃焼（SPRAYモジュール）をセル2に設定し、セル2からセル1へのナトリウムの輸送をも考慮する。さらに、セル間では、ガスの通気とナトリウムの移行を考慮する。

ASSCOPS Ver.1.1 の熱移行と質量移行に係わるネットワーク・モデルを図A-2に示す。以下、図A-2を用いて各モデルを説明する。

### A-2 各セルで扱うモデル

ASSCOPS Ver.1.1 は3つのセルを扱えるが、前述したように、セル1ではプール燃焼を、セル2ではスプレイ燃焼を、それぞれ固定して扱う。なお、セル3は、本文の第II章の2.2.3項で述べたガスリークモデルにおけるリークガスしか取り扱えない。

セル1：プール燃焼

セル2：スプレイ燃焼

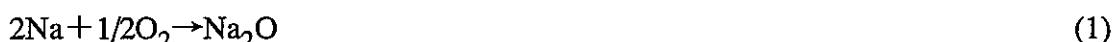
セル3：リークガスのみ

### A-3 SOFIRE モジュール（プール燃焼計算）で扱う計算モデル

SOFIREモジュールは、プール燃焼、燃焼に伴う発熱とプール温度、セル内のガス温度や圧力、および各構造物の温度の過渡変化を計算する。以下に、SOFIREモジュールが扱うモデルを述べる。

#### 1) 化学反応

プール燃焼において考慮している化学反応は以下の3つである。



(1)式と(2)式の発生割合は、酸素濃度に依存する関数として入力で指定する。なお、ナトリウムと湿分の反応については、同式以外の反応（例えば、 $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + 1/2\text{H}_2$  等）も考えられるが、ナトリウム-湿分反応のうち最大の熱発生量を与えるものとして(3)を用いる。

## 2) プール燃焼速度計算モデル

プール燃焼モデルの概念を図A-3に示す。プール燃焼速度は、霧囲気からプール表面への酸素の供給によって支配されることから、燃焼が生じているプール表面の上部霧囲気では、プール（燃焼面）と霧囲気の間の温度差により自然対流が生じることになる。したがって、自然対流に関する熱伝達と物質伝達のアナロジーにより酸素の供給を計算することができる。

水平平板の自然対流式として以下のFishenden-Saunders<sup>A1)</sup>の式を使用する。

$$\text{Nu} = 0.14 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/3} \quad (4)$$

また、(4)式は熱伝達と物質伝達のアナロジーにより、次式に変換できる。

$$\text{Sh} = 0.14 (\text{Gr} \cdot \text{Sc})^{1/3} \quad (5)$$

ここで、Sh：シャーウッド数、Gr：グラスホフ数、Sc：シユミット数である。

以上より、ナトリウム表面への酸素の物質伝達係数 ( $H_{g,O_2}$  : m/h) は次式となる。

$$H_{g,O_2} = 0.14 \cdot D_{O_2} (g \cdot Sc \cdot \beta_g (T_{Na} - T_g) / v_g^2)^{1/3} \quad (6)$$

ここで、

$D_{O_2}$  : 酸素ガスの拡散係数 (m<sup>2</sup>/h)      g : 重力加速度 (m/h<sup>2</sup>)

$\beta_g$  : ガスの体膨張係数 (1/K)       $v_g$  : ガスの動粘性係数 (m<sup>2</sup>/h)

$T_{Na}$  : プール表面温度 (K)       $T_g$  : ガス温度 (K)

従って、ナトリウムプールの燃焼速度 ( $B_{r,O_2}$  : kg-Na/m<sup>2</sup> h) は燃焼面へ到達する酸素の量にナトリウムと酸素の化学量論比を乗じて次式となる。

$$B_{r,O_2} = H_{g,O_2} \cdot \rho_g \cdot C_{O_2} \cdot \chi_{Na,O_2} \quad (7)$$

ここで、

$\rho_g$  : ガス密度 (kg/m<sup>3</sup>)       $C_{O_2}$  : 酸素濃度 (mass-fraction)

$\chi_{Na,O_2}$  : 化学量論比 (kg-Na/kg-O<sub>2</sub>)

同様にして、水蒸気に関しても以下の式で計算する。

$$H_{g,H_2O} = 0.14 \cdot D_{H_2O} (g \cdot Sc \cdot \beta_g (T_{Na} - T_g) / v_g^2)^{1/3} \quad (8)$$

$$B_{r,H_2O} = H_{g,H_2O} \cdot \rho_g \cdot C_{H_2O} \cdot \chi_{Na,H_2O} \quad (9)$$

### 3) 热移行の計算モデル

図A-2および図-3に示したように、SOFIREモジュールにおいては、ナトリウムプールから各部への熱移行、およびセル内各部相互間の熱移行を計算する。以下に各熱移行に関する基礎式を記す。

#### a) 自然対流熱伝達

自然対流による熱伝達量は次式で計算する。

$$Q_{CONVi} = h \cdot \lambda_g \cdot (g \cdot Pr \cdot \beta_g (T_g - T_i) / v_g^2)^{1/3} (T_g - T_i) \cdot A_i \quad (10)$$

$Q_{CONVi}$  : ガスから構造物*i*への熱伝達量 (kcal/h)

$h$  : 対流のNu数の係数 (水平: 0.14、垂直: 0.129)

$\lambda_g$  : ガスの熱伝導率 (kcal/m h K)

$T_i$  : 構造物*i*の表面温度 (K)

$A_i$  : 構造物*i*の表面積 ( $m^2$ )

#### b) 輻射熱伝達

輻射による熱伝達量は次式で計算する。

$$Q_{RADi,j} = F_{\epsilon i,j} \cdot A_i \cdot (T_i^4 - T_j^4) \cdot \sigma \quad (11)$$

$Q_{RADi,j}$  : *i*から*j*への輻射による熱伝達量 (kcal/h)

$F_{\epsilon i,j}$  : *i*から*j*への輻射係数

$A_i$  : 輻射表面積 ( $m^2$ )

$T_i$  : *i*の温度 (K)

$T_j$  : *j*の温度 (K)

$\sigma$  : ステファンボルツマン係数 (kcal/ $m^2 h K^4$ )

#### c) 热伝導

構造物およびプール内部の熱伝導は次式で計算する。

$$Q_{CONDi,j} = K_{i,j} \cdot A_{i,j} \cdot (T_i - T_j) \quad (12)$$

$Q_{CONDi,j}$  : *i*から*j*への熱伝導による熱伝達量 (kcal/h)

$K_{i,j}$  : *i*から*j*への熱通過率 (kcal/ $m^2 h K$ )

### 4) 各部の温度計算モデル

ガス温度は、1点近似で各セル内一様として扱う。また、構造物（床、壁、天井）およびナトリウムプールは、各々深さ方向の1次元の温度分布（各ノードは一点近似で一様の温度とする）を計算するが、この際、前述の熱移行による熱収支を勘案して計算する。

例えば、構造物の温度を計算する場合は、構造物の表面部と内部に分けて考え、各々次式を用いる。

## a) 表面部の温度変化率

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{(Q_{g,1} + Q_{R,1} - Q_{D,1})}{(C_{p1} \cdot d_1 \cdot A_1 \cdot \rho_1)} \quad (13)$$

$Q_{g,1}$  : ガスと構造物の対流熱伝達量 (kcal/h)

$Q_{R,1}$  : ガスと構造物の輻射熱伝達量 (kcal/h)

$Q_{D,1}$  : 热伝導による熱伝達量 (kcal/h)  $C_{p1}$  : 構造物の定圧比熱 (kcal/kg K)

$d_1$  : 構造物表面 (第1メッシュ) の厚さ (m)

$A_1$  : 構造物の表面積 (m<sup>2</sup>)

$\rho_1$  : 構造物の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

## b) 内部の温度変化率

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{(Q_{D,i-1} - Q_{D,i})}{(C_{pi} \cdot d_i \cdot A_i \cdot \rho_i)} \quad (14)$$

## 5) ガス圧力計算モデル

雰囲気ガスは理想気体であるとし、また、一点近似モデルであるのでガス圧力はセル内で一様であるとして、セル内のガス密度とガス温度とから計算する。

$$P_g = R \cdot \rho_g \cdot T_g / M_g \quad (15)$$

R : 気体定数 (kcal/mol K)

$M_g$  : ガスの分子量 (kg/mol)

## A-4 SPRAY モジュール（スプレイ燃焼計算）で扱う計算モデル

SPRAY モジュールでは、図A-2に示したように、配管破損時における漏えいナトリウムのスプレイ燃焼、燃焼に伴う発熱と液滴温度、燃焼領域と漏えいナトリウムの顯熱からガスへの熱移行からガス温度および圧力の変化を計算する。以下に、SPRAY モジュールで扱うモデルを述べる。なお、スプレイ燃焼に伴う熱移行の概念を図A-4に示す。

## 1) 化学反応モデル

スプレイ燃焼において考慮する化学反応は、以下の4種類である。



前述のプール燃焼の場合と同様に、(1)式と(2)式の発生割合は酸素濃度に依存する関数として入力で指定する。

## 2) スプレイ燃焼速度計算モデル

SPRAYモジュールでは、液滴の周囲に燃焼面を仮定し、液滴表面から蒸発したナトリウムが燃焼面に到達するモルフラックス ( $N_{Na}$ ) と雰囲気から燃焼面への酸素のモルフラックス ( $N_{O_2}$ ) のマスバランスよりスプレイ燃焼を計算する。液滴（直径：d）は落下運動をしているので、液滴（球）への強制対流に関する熱伝達（Ranz-Marshallの式<sup>A2)</sup>）と物質伝達のアナロジーにより燃焼速度を計算する。

ヌッセルト数およびシャーウッド数は以下の式で求められる。

$$Nu = 2 + 0.6 (Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}) \quad (18)$$

$$Sh = 2 + 0.6 (Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3}) \quad (19)$$

ナトリウム液滴表面 ( $r_A$ ) と燃焼面 ( $r_B$ ) の距離におけるナトリウム蒸気のモルフラックスは、球座標系における拡散より次式で表すことができる。

$$N_{Na} = (r_A/r^2) / (1/r_A - 1/r_B) \cdot K_{Na} \cdot \ln (1/(1-Y_{Na,A})) \quad (20)$$

ここで、

$K_{Na}$ ：物質移行係数 (mol/m<sup>2</sup>h)       $Y_{Na,A}$ ：モル分率 (-)

添字Na：ナトリウム      添字A：液滴表面

トータルのナトリウム蒸気のモルフラックス ( $W_{Na}$ ) は、(20)式に対して任意の  $r$  における液滴の表面積を乗ずることによって得られる。ここで  $r=r_A$  とし、

$$W_{Na} = 4\pi r_A^2 N_{Na} = 4\pi r_A / (1/r_A - 1/r_B) \cdot K_{Na} \cdot \ln (1/(1-Y_{Na,A})) \quad (21)$$

また、雰囲気から燃焼面に到達する酸素と水蒸気のフラックスも同様にして、

$$W_{O_2} = 4\pi r_A^2 N_{O_2} = 4\pi r_A / (1/r_B - 1/r_C) \cdot K_{O_2} \cdot \ln (1/(1-Y_{O_2})) \quad (22)$$

$$W_{H_2O} = 4\pi r_A^2 N_{H_2O} = 4\pi r_A / (1/r_B - 1/r_C) \cdot K_{H_2O} \cdot \ln (1/(1-Y_{H_2O})) \quad (23)$$

添字O<sub>2</sub>：酸素      添字H<sub>2</sub>O：水蒸気

これらのフラックスは燃焼面において反応することから、化学量論比 ( $\chi$ ) を用いて次式のマスバランスが成立する。

$$W_{Na} = \chi_{O_2} W_{O_2} + \chi_{H_2O} W_{H_2O} \quad (24)$$

ここで、 $W_{Na}$  は燃焼速度 (=Br<sub>Na</sub>) と示せる。

他方、液滴と燃焼面の各々について以下のヒートバランスが成立する。

$$\text{液滴: } m_{Na} C_{p,Na,A} (dT_A/dt) = -Q_v W_{Na} + Q_{AB} \quad (25)$$

$$\text{燃焼面: } W_{Na} Q_b + Q_{AB} = 4\pi r_B^2 h (T_B - T_C) + 4\pi r_B^2 \epsilon \sigma (T_B^4 - T_W^4) \quad (26)$$

ここで

$m_{Na}$  : 液滴質量 (kg) $Cp_{Na}$  : Na比熱 (kcal/kg K) $Q_v$  : Na蒸発潜熱 (kcal/kg) $Q_b$  : 燃焼反応熱 (kcal/kg) $T_A$  : 液滴温度 (K) $T_B$  : 燃焼面温度 (K) $T_C$  : スプレイ領域内ガス温度 (K) $T_W$  : 壁温度 (K)

$Q_{AB}$  は液滴と燃焼面の間の熱移行量、 $h$  は周囲のガスへの熱伝達係数であり、各々下式で表される。

$$Q_{AB} = 4\pi r_A r_B h (T_A - T_B) + 4\pi r_A^2 \varepsilon \sigma (T_A^4 - T_B^4) \quad (27)$$

$$h = \lambda_g (2 + 0.6 (Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3})) / d \quad (28)$$

以上の式を連立させて解くことにより、燃焼面の位置 ( $r_B$ ) 、燃焼面温度 ( $T_B$ ) 、燃焼速度 ( $W_{Na} = Br_{Na}$ ) を計算することができる。

### 3) 热移行の計算モデル

セル 2 の空間を、漏えいしたナトリウム液滴が落下する領域（スプレイコーン領域）と、その外側の領域（スプレイコーン外ガス領域）に分割する。さらにスプレイ領域は鉛直方向にメッシュ分割（分割数は入力で指定）し、各メッシュでの平均液滴径を計算する。熱源および熱移行としては、主に以下を考慮する。

- a) 化学反応 (1), (2), (16), (17) 式による発熱量
- b) 液滴と燃焼面の間の熱移行量 ( $Q_{AB}$  ; (27)式)
- c) 液滴表面でのナトリウム蒸発熱
- d) 燃焼面-スプレイ領域内ガス間の対流熱伝達 ( $Q_{cBC}$ )

$$Q_{cBC} = 4\pi r_B^2 h (T_B - T_C) \quad (29)$$

ここで、 $h$  は(28)式で表される。

- e) 燃焼面-壁間の輻射熱伝達 ( $Q_{rBW}$ )

$$Q_{rBW} = 4\pi r_B^2 \varepsilon_{BW} \sigma (T_B^4 - T_W^4) \quad (30)$$

$\varepsilon_{BW}$  : 燃焼面からの輻射係数

なお、 $Q_{rBW}$  は、雰囲気中のナトリウム酸化物エアロゾル濃度が低い場合（酸素濃度が 5% 以下の場合にエアロゾル濃度が低いと定義）のみ考慮する。

- f) ガス-壁間の対流熱伝達 ( $Q_{cDW}$ )

ガス空間においてはガスの対流が生じるので、まず、表A-1に示す Sparrow-Gregg クライテリアによりヌセルト数  $Nu$  を求める。

表A-1 Sparrow-Greggのクライテリア

0.225Re <sup>2</sup> >Gr			
Yes (強制対流)		No (自然対流)	
Re>4×10 <sup>5</sup>		Ra>10 <sup>9</sup>	
No	Yes	No	Yes
層流 Nu=0.664Re <sup>0.5</sup> Pr <sup>1/3</sup>	乱流 Nu=0.037Re <sup>0.8</sup> Pr <sup>1/3</sup>	層流 Nu=0.555Ra <sup>0.25</sup>	乱流 Nu=0.021Ra <sup>0.4</sup>

なお、レイノルズ数Re、グラスホフ数Gr、およびレーレー数Raは、以下のとおりに定義する。

$$Re=u_D H / \nu \quad (31)$$

$$Gr=g \beta H^3 (T_D - T_W) / \nu_g^2 \quad (32)$$

$$Ra=Gr \cdot Pr \quad (33)$$

ここで、

$u_D$ ：コーン外側ガス平均流速 (m/h)      H : セル高さ (m)

$T_D$  : コーン外側ガス温度 (K)

以上より、ガスから壁への対流熱伝達係数h (kcal/m<sup>2</sup> h K) は下式になる。

$$h = \lambda_g \cdot Nu / H \quad (34)$$

したがって、

$$Q_{cDW}=h \cdot \lambda_g \cdot (g \cdot Pr \cdot \beta_g (T_D - T_W) / \nu_g^2)^{1/3} (T_D - T_W) \cdot A_w \quad (35)$$

$\lambda_g$  : ガスの熱伝導率 (kcal/m h K)

$T_w$  : 壁の表面温度 (K)

$A_w$  : 壁の表面積 (m<sup>2</sup>)

g) ナトリウムプール (燃焼なし) から雰囲気ガスへの熱伝達係数

スプレイ燃焼における未燃焼ナトリウムが床に貯留することによって形成するナトリウムプール (燃焼なし) から雰囲気ガスへの熱伝達係数h (Btu/ft<sup>2</sup> h R) は、

$$h=0.22 \Delta T^{1/3} \quad (37)$$

と仮定する。

h) ナトリウムプール (燃焼なし) から床への熱伝達係数

ナトリウムプール (燃焼なし) から床への熱伝達係数 h (Btu/ft<sup>2</sup> h R) は、次式の様に一定値とする。

$$h=250 \quad (38)$$

## 4) ナトリウム液滴の落下運動

ナトリウム液滴の運動は、鉛直方向を考慮(水平方向の動きは小さく無視できる)し、鉛直方向の運動は重力、液滴に対する抗力および浮力によって計算する。したがって、液滴の落下(相対)速度 $u$ は次式で表せる。

$$\frac{du}{dt} = g - \frac{3}{4} \left( \frac{u^2 C_D}{d} \right) \left( \frac{\rho_g}{\rho_{Na}} \right) \quad (39)$$

$C_D$  : ドラッグ係数 (-) ~ 液滴レイノルズ数の関数で表される。

$d$  : 液滴径 (m)

$\rho_{Na}$  : ナトリウム密度 (kg/m<sup>3</sup>)

## 5) ガスと液滴の相互作用

セル2の空間は、前述の熱移行計算モデルで考慮したように、スプレイコーン領域とスプレイコーン外ガス領域に二分しているが、セルのガスについても、スプレイコーン内ガスとスプレイコーン外ガスを考慮し、この2領域間の対流を考慮している。その際の対流は、ガスの浮力が支配的な場合(上向き)と液滴の流体摩擦によるガスのエントレインメントが支配的な場合(下向き)の2つのモードに分かれる。

ガスの運動は、浮力( $f_b$ )、抗力( $f_d$ )、流体摩擦力( $f_f$ )の和として計算する。即ち、各力の釣り合いにより対流を求める。なお、スプレイコーン内ガスの浮力は、高温のため上方向に作用し、したがって抗力は下向きに作用する。

$$\frac{d(mv)}{dt} = f_b - f_d \pm f_f \quad (40)$$

## A-5 セル間通気モデル

各セル間の通気に関しては、以下の3種類を考慮することが可能である。

## 1) ガス漏えい通気モデル

ガス漏えい通気モデルは、基準圧力とガス漏えい率を入力値とし、ガス漏えい流量を計算する。

$$W_{LEAK,k,l} = RL_{k,l} \cdot \left( \frac{\Delta P_{k,l}}{PD_{k,l}} \right)^{1/2} \cdot \rho_{gk} \quad (41)$$

ここで、

$W_{LEAK,k,l}$  : k室からl室へのガス漏えい流量 (kg/h)

$RL_{k,l}$  : k室からl室へのガス漏えい率 (m<sup>3</sup>/h)

$\Delta P_{k,l}$  : k室とl室の圧力差 (kg/cm<sup>2</sup>)

$PD_{k,l}$  : k室とl室のガス漏えいを計算するための基準圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\rho_{gk}$  : k室のガス密度 (kg/m<sup>3</sup>)

## 2) ガス対流通気モデル

ガス対流通気モデルは、通気部の断面積、厚さ、直径からガス流速を求め、セル間を移動するガスの流量を計算する。

$$W_{CONV_{k,l}} = V_{k,l} \cdot A_{k,l} \cdot \rho_{gk} \quad (42)$$

$W_{CONV_{k,l}}$  : k 室から l 室へのガス漏えい流量 (kg/h)

$V_{k,l}$  : Brown の実験式<sup>A3)</sup>を使用して求める k 室から l 室への対流速度 (ft/h)

$$V_{k,l} = 0.07753 / X_{k,l} \left( D_{k,l} / X_{k,l} \right)^{1/3} \alpha_{gk} \left( X_{k,l}^3 \cdot g \cdot \beta_k | T_{gk} - T_{gl} | / \nu_k^2 \right)^{0.55}$$

$X_{k,l}$  : k 室と l 室の通気部の厚さ (ft)       $D_{k,l}$  : k 室と l 室の通気部の直径 (ft)

$\alpha_{gk}$  : k 室のガス熱拡散率 (ft<sup>2</sup>/h)       $\beta_k$  : k 室のガス体膨張係数 (1/K)

$\nu_k$  : k 室のガス動粘性係数 (ft<sup>2</sup>/h)       $T_{gk}, T_{gl}$  : k 室、l 室のガス温度 (K)

なお、l 室から k 室への流量は次式で計算する。

$$W_{CONV_{k,l}} = V_{k,l} \cdot A_{k,l} \cdot \rho_{gl} \quad (43)$$

## 3) ガス圧力均衡通気モデル

ガス圧力均衡通気モデルは両セルの圧力が常に等しくなる分だけのガスが流れる。

例えば  $P_k > P_l$  の時は、 $P_k = P_l$  となるようにその分だけガスが k 室から l 室に流れる。

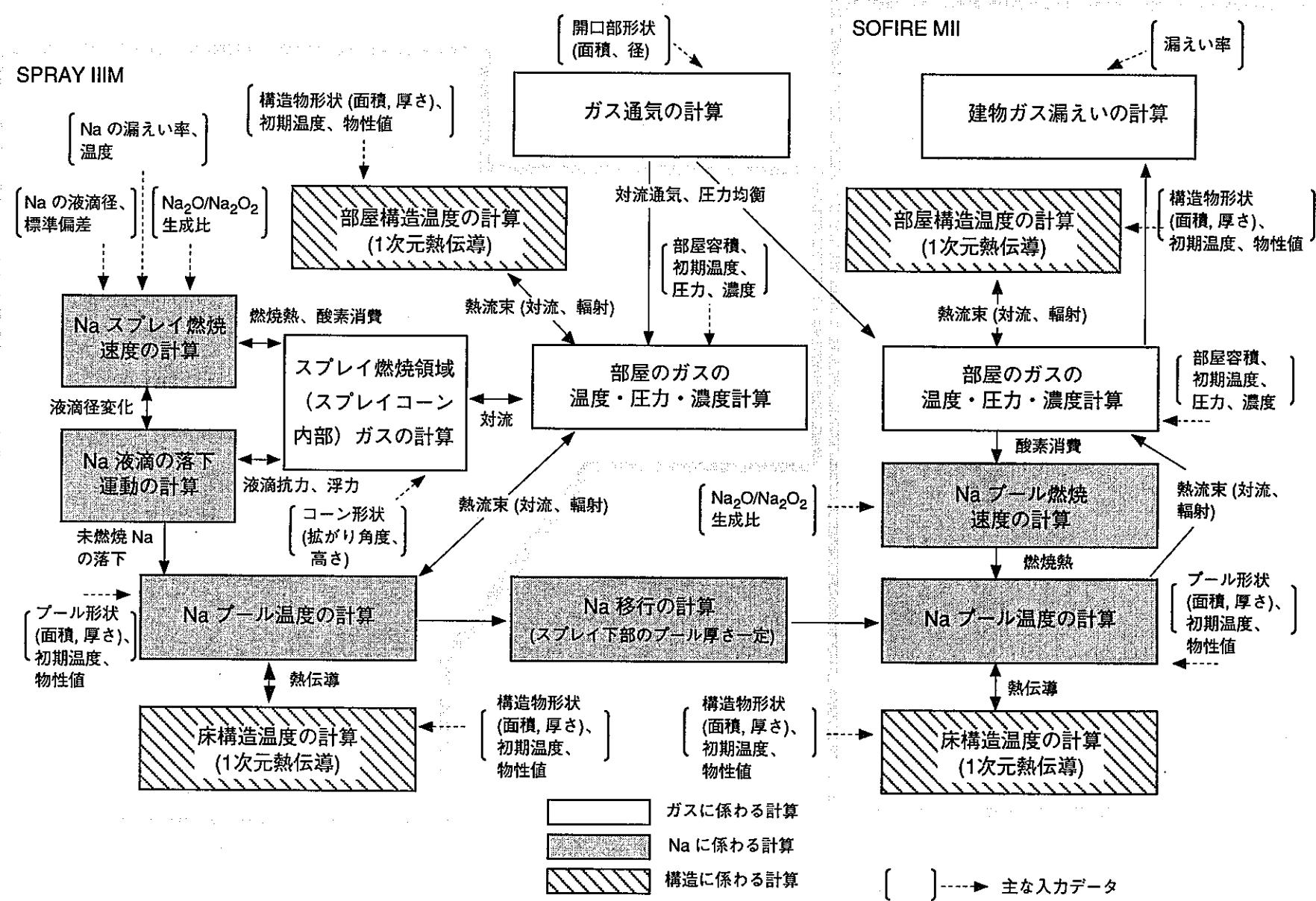
ここで、

$P_k, P_l$  : k 室、l 室の圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)

なお、以上の 3 種類の通気のうち、ガス漏えい通気モデルとその他のモデルの併用はできない。ガス対流通気モデルとガス圧力均衡通気モデルは併用可能である。

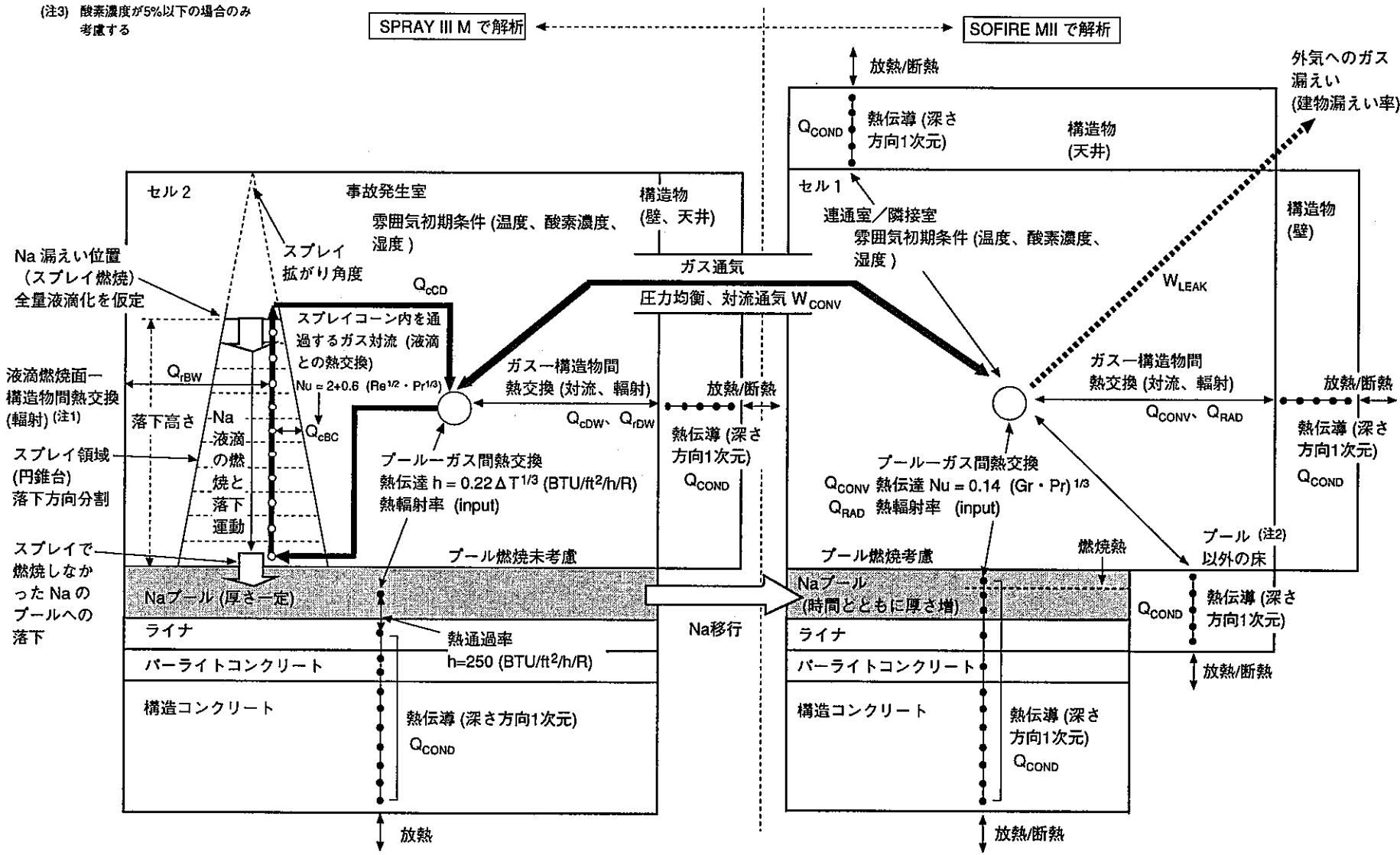
## 参考文献

- A1) M. Fishenden and O. A. Saunders, "Introduction to Heat Transfer," p.180, 1950, Clarendon Press.
- A2) W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr., "Evaporation from Drops," Chemical Engineering Progress, Part I, 48, 3 (March 1952) and Part II, 48, 4 (April 1952).
- A3) W. G. Brown, "Natural Convection through Rectangular Openings in Partitions," J. Heat and Mass Transfer, Vol. 5, 1962.

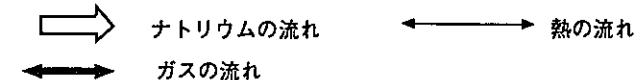


図A-1 ASSCOPS コードの計算機能ブロック図

(注3) 酸素濃度が5%以下の場合のみ考慮する

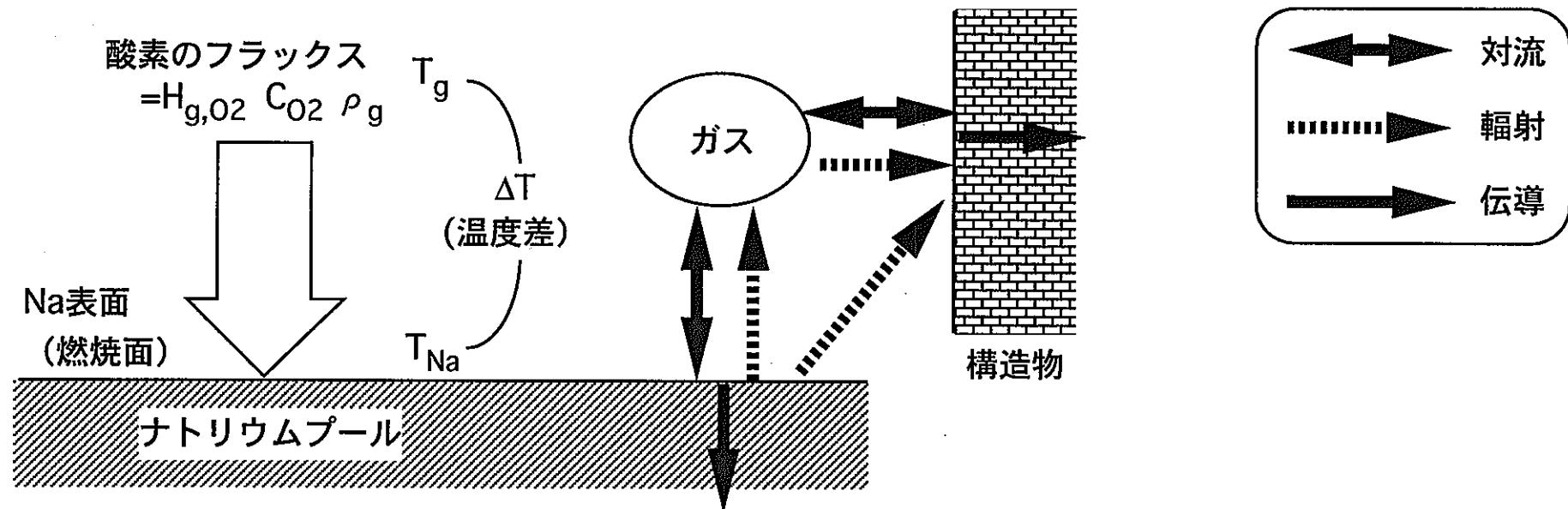


図A-2 ASSCOPS コードの熱とマスに係わる  
ネットワーク・モデル

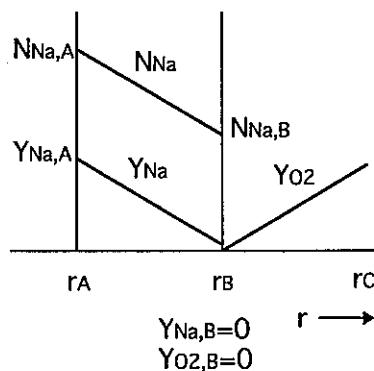
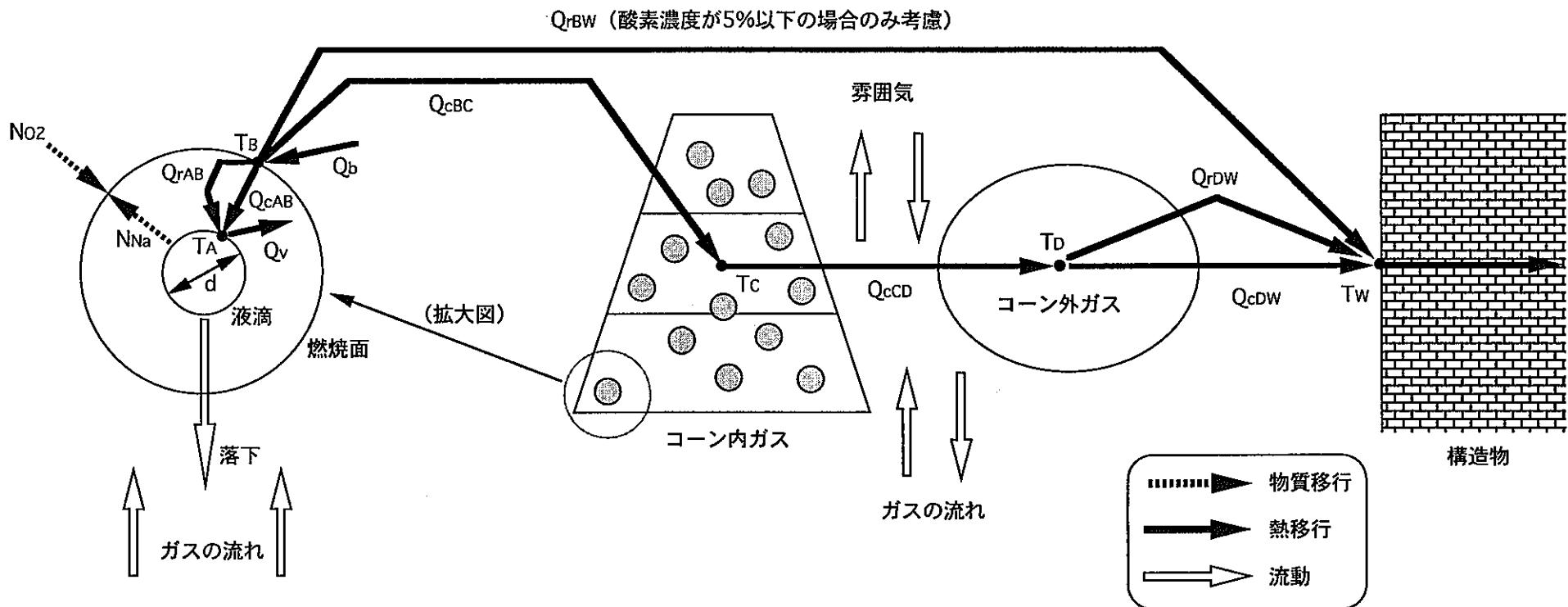


$H_{g, O_2}$  : 酸素の物質伝達係数、 $C_{O_2}$  : 酸素濃度、

$\rho_g$  : ガス密度、 $T_g$  : ガス温度、 $T_{Na}$  : プール表面温度。



図A-3 プール燃焼モデルの概念図



$r_A$ : 液滴表面座標、 $r_B$ : 燃焼界面座標、 $r_C$ : 雰囲気座標、 $N_{Na}$ : Naモルフラックス、 $N_{O2}$ : 酸素モルフラックス、 $Y_{Na}$ : Naモル分率、  
 $Y_{O2}$ : 酸素モル分率、 $T_A$ : 液滴温度、 $T_B$ : 燃焼面温度、 $T_C$ : コーン内ガス温度、 $T_D$ : コーン外ガス温度、 $T_W$ : 構造物  
 温度、 $Q_{cAB}$ : 液滴と燃焼面間の対流熱伝達量、 $Q_{rAB}$ : 液滴と燃焼面間の輻射熱伝達量、 $Q_{cBC}$ : 燃焼面とコーン内ガ  
 ス間の対流熱伝達量、 $Q_{rBW}$ : 燃焼面と構造物間の輻射熱伝達量、 $Q_{cCD}$ : コーン内ガスとコーン外ガス間の対流熱伝  
 達量、 $Q_{cDW}$ : コーン外ガスと構造物間の対流熱伝達量、 $Q_{rDW}$ : コーン外ガスと構造物間の輻射熱伝達量、 $Q_b$ : Na  
 燃焼反応熱量、 $Q_v$ : Na蒸発潜熱量、 $d$ : 液滴径、添字A: 液滴表面部、添字B: 燃焼面部。

図A-4 スプレイ燃焼モデルの概念図