

ナトリウム燃焼解析コード  
ASSCOPS Version 2.0の検証

－ プール燃焼 －

1998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。

〒311-1393 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 311-1393, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

## ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version 2.0 の検証 — プール燃焼 —

木曾原 直之<sup>1</sup> 北浦 義和<sup>1</sup> 三宅 収<sup>1</sup>

### 要旨

ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS は高速炉のナトリウム漏えい事故時の建物内の熱的挙動（圧力・温度の時間変化）を解析することを目的に開発されている。本報告書で使用する Version 2.0 では、ナトリウムやその酸化物と雰囲気中の水分の化学反応、エアロゾル挙動、プール中の反応生成物の取り扱い等に、改良・機能強化が図られている。本報告書では、ASSCOPS のプール燃焼計算に係わる検証として、独のカールスルーエ研究所と動燃サファイア施設で実施された、プール燃焼実験について解析を行った結果を報告する。

検証計算では測定データとの比較を行い、さらに主要パラメータについてもその感度解析を実施した。

以下に主たる解析結果を示す。

- ①ナトリウムプール、壁およびガスの各部温度、圧力の計算結果は測定データと良く一致している。
- ②ナトリウム燃焼に関して重要なパラメータである反応生成物割合 ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}_2$  比) は、生成割合比の最適値を導入することで実験データの圧力、温度および酸素濃度と良く一致した。また、保守的な結果を得るための生成割合比の検討を行い、 $\text{Na}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}_2 = 60:40$  (酸素濃度 10 % 以下では100:0) の組合せを用いることが良いと考えられる。
- ③感度解析の結果、初期湿分濃度の温度、圧力に及ぼす影響は、他の反応生成物割合やふく射係数を変化させたときのものにくらべると小さかった。
- ④ナトリウムプールからガスへのふく射係数に関して、小さくするとプールの放熱が抑制されるためナトリウム温度が上昇し、逆にふく射係数を大きくとするとナトリウム温度が下がることが確認できた。しかし、プールナトリウム温度を除いてその影響はほとんどなかった。

<sup>1</sup>大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室

## Validation of Sodium Combustion Computer Code ASSCOPS Version 2.0 — Pool Combustion —

Naoyuki KISOHARA<sup>1</sup>, Yoshikazu KITAURA<sup>1</sup>, and Osamu MIYAKE<sup>1</sup>

### Abstract

The sodium combustion computer code ASSCOPS has been developed for analyses of thermal consequences (i.e. pressure and temperature time histories) of sodium leak accidents in FBR plants. Version 2.0 of ASSCOPS, that is used in the study of this report, includes improvements and additional models over the previous versions. This report describes the validation of ASSCOPS (Version 2.0) by using sodium pool combustion tests data obtained from FAUNA (F5, F6) at KfK, Germany, and SOLFA-1 (Run-D1) at PNC. The validation includes comparisons of calculation results of ASSCOPS (Version 2.0) with experimental data, and with calculation results of the previous version of ASSCOPS (Version 1.1). Furthermore, the effects of reaction products ratio ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}_2$ ), initial humidity in the atmosphere, and radiation coefficient from the sodium pool to the gas were studied.

The following results have been obtained from the study.

- ① The calculation results agree well with the experimental data of the gas, sodium, and structure temperatures, and gas pressures.
- ② The reaction products ratio ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}_2$ ) is one of the most important parameters for sodium combustion evaluation. It affects the pressure and temperature due to the difference of the reaction heat. Selection of proper value for this parameter results in the best estimate of the pressure, temperature and oxygen concentration. The ratio of  $\text{Na}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}_2 = 60:40$  is adequate for the purpose of conservative evaluation. (The analysis under the oxygen concentration below 10 % assumes  $\text{Na}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}_2 = 100:0$ )
- ③ Initial humidity concentration in the air has been more little affect to the pressure and temperature than the reaction products ratio or the radiation coefficient of pool surface affect.
- ④ The radiation coefficient of pool surface was surveyed around the value obtained by conventional evaluation. The results shows that suppression of radiative heat transfer increases the sodium temperature. However, it affects mainly the sodium pool temperature.

---

<sup>1</sup> O-arai Engineering Center, Safety Engineering Division,  
Plant Safety Engineering Section

目 次

1	緒言	-----	1
2	ASSCOPS Version 2.0の概要	-----	2
2.1	ASSCOPS Version 1.1	-----	2
2.2	ASSCOPS Version 2.0	-----	2
3	検証用試験の概要	-----	4
3.1	FAUNA試験	-----	4
3.1.1	試験装置	-----	4
3.1.2	試験条件	-----	4
3.2	Run-D1試験	-----	4
3.2.1	試験装置	-----	4
3.2.2	試験条件	-----	5
4	解析条件と解析モデル	-----	11
4.1	FAUNA試験	-----	11
4.1.1	解析条件	-----	11
4.1.2	解析モデル	-----	11
4.1.3	解析ケース	-----	11
4.2	Run-D1試験	-----	12
4.2.1	解析条件	-----	12
4.2.2	解析モデル	-----	12
4.2.3	解析ケース	-----	12
5	試験解析と実験値の比較	-----	18
5.1	FAUNA試験	-----	18
5.2	Run-D1試験	-----	20
5.3	試験解析のまとめと考察	-----	22
6	パラメータ計算	-----	47
6.1	パラメータの設定	-----	47
6.2	パラメータ解析の結果	-----	47
7	結言	-----	62
	謝辞	-----	63
	参考文献	-----	64
	Appendix A ASSCOPS Version 1.1 と Version 2.0の比較	-----	65
	Appendix B FAUNA 試験における初期ナトリウム注入時の液滴飛散について	-----	77

## 図表リスト

## [表リスト]

表 3.1- 1	FAUNA 試験装置概要	-----	6
表 3.1- 2	FAUNA 試験条件	-----	6
表 3.2- 1	Run-D1 試験装置概要	-----	7
表 3.2- 2	Run-D1 試験条件	-----	7
表 4.1	FAUNA F5, F6 試験の実験条件と解析条件	-----	14
表 4.2	Run-D1 試験の実験条件と解析条件	-----	15
表 5.1- 1	解析結果 FAUNA (F5)	-----	23
表 5.1- 2	解析結果 FAUNA (F6)	-----	24
表 5.2	解析結果 Run-D1	-----	25
表 6.1- 1	解析パラメータ ASSCOPS Version 2.0 (新計算機能使用)	----	49
表 6.1- 2	解析パラメータの組合せ	-----	49
表 6.2- 1	ナトリウム-酸素反応生成物比 (Na <sub>2</sub> O: Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	-----	50
表 6.2- 2	初期湿分濃度に関するパラメータ計算結果	-----	50
表 6.2- 3	プルーガスふく射に関するパラメータ計算結果	-----	50
表 6.2- 4	パラメータ計算によるプールのナトリウムと反応生成物組成 計算結果(FAUNA F5)	-----	51

## [図リスト]

図 3.1- 1	FAUNA 試験装置 (F5, F6試験)	-----	8
図 3.2- 1	SOLFA-1 試験装置 (Run-D1)	-----	9
図 3.2- 2	Run D-1 燃焼皿	-----	10
図 4.1	FAUNA 計算モデル	-----	16
図 4.2	Run D-1 計算モデル	-----	17
図 5.1- 1	ガス温度の比較 (FAUNA)	-----	26
図 5.1- 2	ガス圧力の比較 (FAUNA)	-----	27
図 5.1- 3	ナトリウムプール温度の比較 (FAUNA)	-----	28
図 5.1- 4	燃焼皿温度の比較 (FAUNA)	-----	29
図 5.1- 5	容器壁温度の比較 (FAUNA)	-----	30
図 5.1- 6	ナトリウム反応速度の比較 (FAUNA)	-----	31
図 5.1- 7	酸素濃度の比較 (FAUNA)	-----	32
図 5.1- 8	湿分濃度 (FAUNA)	-----	33
図 5.1- 9	水素濃度 (FAUNA)	-----	34
図 5.1-10	ナトリウムと反応生成物の計算結果 (FAUNA)	-----	35
図 5.1-11	酸化ナトリウム形態計算結果 (FAUNA)	-----	36
図 5.1-12	過酸化ナトリウム形態計算結果 (FAUNA)	-----	37
図 5.1-13	水酸化ナトリウム形態結果 (FAUNA)	-----	38
図 5.2- 1	ガス温度の比較 (Run-D1)	-----	39
図 5.2- 2	ガス圧力の比較 (Run-D1)	-----	39
図 5.2- 3	ナトリウムプール温度の比較 (Run-D1)	-----	40
図 5.2- 4	燃焼皿温度の比較 (Run-D1)	-----	40
図 5.2- 5	容器壁ライナ温度の比較 (Run-D1)	-----	41
図 5.2- 6	容器壁コンクリート温度の比較 (Run-D1)	-----	41
図 5.2- 7	ナトリウム反応速度の比較 (Run-D1)	-----	42
図 5.2- 8	酸素濃度の比較 (Run-D1)	-----	42
図 5.2- 9	湿分濃度 (Run-D1: PD1V2B)	-----	43
図 5.2-10	水素濃度 (Run-D1: PD1V2B)	-----	43
図 5.2-11	エアロゾル濃度 (Run-D1: PD1V2B)	-----	44
図 5.2-12	ナトリウムと反応生成物の計算結果 (Run-D1: PD1V2B)	-----	45
図 5.2-13	酸化ナトリウム形態計算結果 (Run-D1: PD1V2B)	-----	45
図 5.2-14	過酸化ナトリウム形態計算結果 (Run-D1: PD1V2B)	-----	46
図 5.2-15	水酸化ナトリウム形態計算結果 (Run-D1: PD1V2B)	-----	46

図 6.2- 1	ガス温度の比較 (Na <sub>2</sub> O: Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)	— —	52
図 6.2- 2	ガス圧力の比較 (Na <sub>2</sub> O: Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)	— —	52
図 6.2- 3	プール温度の比較 (Na <sub>2</sub> O: Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)	—	53
図 6.2- 4	容器壁温度の比較 (Na <sub>2</sub> O: Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)	—	53
図 6.2- 5	ナトリウム反応速度の比較 (Na <sub>2</sub> O: Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)		54
図 6.2- 6	酸素濃度の比較 (Na <sub>2</sub> O: Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)	— —	54
図 6.2- 7	ガス温度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)	— — —	55
図 6.2- 8	ガス圧力の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)	— — —	55
図 6.2- 9	ナトリウムプール温度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)		56
図 6.2-10	容器壁温度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)	— — —	56
図 6.2-11	ナトリウム反応速度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)		57
図 6.2-12	酸素濃度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)	— — —	57
図 6.2-13	湿分濃度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)	— — —	58
図 6.2-14	ガス温度の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)		59
図 6.2-15	ガス圧力の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)		59
図 6.2-16	ナトリウムプール温度の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)	— — — — —	60
図 6.2-17	容器壁温度の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)		60
図 6.2-18	ナトリウム反応速度の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)	— — — — —	61
図 6.2-19	酸素濃度の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)		61



## 1 緒言

ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS<sup>[1],[2]</sup> は高速炉のナトリウム漏えい事故時の熱的影響、すなわち建物内の圧力や温度の時間変化を解析することを目的に開発された。本報告書では同コードの検証として、プール燃焼実験の測定データとの比較解析結果を報告する。

ASSCOPS は湿分とエアロゾルの取り扱いおよびプールの化学組成変化等の新モデルを追加することにより改良が加えられ、現在 Version 2.0 となっている<sup>[2]</sup>。本報告書では、この新しい計算機能を追加した Version 2.0 の検証を、ナトリウムプール燃焼試験に基づいて行うものである。

検証に使用する実験データは、独のカールスルーエ研究所で実施された FAUNA F5, F6 試験<sup>[3],[4]</sup> および動燃サファイア施設で実施された Run-D1 試験<sup>[5]</sup> の計三つとし、これらは全て空気雰囲気中のプール燃焼ナトリウム漏えい実験である。特に新計算機能の追加による計算結果の差異の検討を行うために、旧バージョン (Version 1.1) および新バージョン (Version 2.0) で新モデルを使用しない計算も合わせて実施した。さらに、計算結果に影響を与えると考えられる主要パラメータについてもその感度解析を実施した。

## 2 ASSCOPS Version 2.0 の概要

解析に使用した ASSCOPS は、Version 1.1 と新しい Version 2.0 である。それらの概要を以下に示す。

### 2.1 ASSCOPS Version 1.1<sup>[1]</sup>

SOFIRE MII (プール燃焼解析コード) と SPRAY II (スプレー燃焼解析コード) をベースとして、それらを統合化した計算コードとして開発された。ASSCOPS Version 1.1 では SOFIRE MII と SPRAY II を二つのセル (部屋) に振り分け、セル 1 には SOFIRE MII を、セル 2 には SPRAY II が割り当てられている。このため、スプレー燃焼とプール燃焼が一つのセルで同時に生じていることは、直接扱うことができない。

### 2.2 ASSCOPS Version 2.0<sup>[2]</sup>

ASSCOPS Version 1.1 に対して、以下の項目について改良されている。

- (1) プールの質量計算 (プールの化学組成変化)
- (2) 水蒸気 (湿分) とナトリウム/ナトリウム酸化物との反応計算の詳細化
- (3) 換気計算モデルの付加
- (4) エアロゾル挙動計算モデルの付加

本報告書に記載する実験検証では、各項目を考慮しない場合 (新計算機能未使用) と考慮した場合 (新計算機能使用) の両者の計算結果を示すことにする。以下に本報告の計算に関係する (1), (2), (4) の項目について概要を述べる。

#### ・プールの質量計算 (プールの化学組成変化考慮)

床に形成されるプール内には、金属ナトリウムと反応生成物である酸化ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) および過酸化ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) が混在しており、燃焼の進行とともに反応生成物がプールに蓄積される。プール中の反応生成物の割合が大きくなるような場合、すなわち小規模の漏えい量の場合は、蓄積された反応生成物の熱伝導性が低いことにより、ナトリウムプールと床構造材の間の伝熱が低下することが考えられる。そこで、床に形成させるプールの組成として、金属ナトリウムと反応生成物の両者を考慮したモデルを作成した。これらの量は燃焼挙動に対応して変化するものとし、酸化ナトリウムおよび過酸化ナトリウムの生成割合、反応生成物の空気中およびプールへの移行割合は入力データで与える。

プール下面に反応生成物の堆積する現象は、計算される反応生成物の厚さで床への熱伝達率を補正することによってモデル化した。

・水分とナトリウム／ナトリウム酸化物との反応計算の詳細化

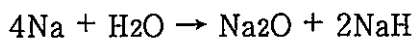
雰囲気中水蒸気分（湿分）は、ナトリウム及びナトリウム化合物と反応することが考えられるため、ナトリウムと酸素の反応以外にこれらの反応を考慮することが必要となる。これらの化学反応に関連して、Version 2.0 では次の 5 つの項目について改良されている。

①ナトリウム燃焼に伴う雰囲気中への反応生成物エアロゾルの算出

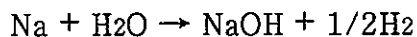
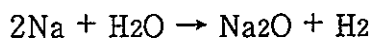
ナトリウム燃焼に伴い、雰囲気中へ放出される反応生成物を評価する。燃焼して生成する反応生成物の内プールに堆積する割合を入力で与え、それ以外の反応生成物は雰囲気中にエアロゾルとして放出されるものとする。

②水蒸気（湿分）とナトリウムの反応モデルの改良

Version 1.1 においてナトリウムプールと水蒸気の反応は、酸素との反応量に水蒸気と酸素の濃度比を乗じて簡易的に計算していた。Version 2.0 では水蒸気についても拡散速度を考慮して反応速度を求める様に改良を行った。また、水蒸気とナトリウムの反応式を Version 1.1 で考慮されていた次式

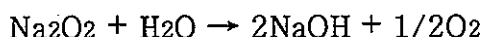


に加え以下の式を追加する。それぞれの反応比率は入力で与える。



③水蒸気（湿分）と堆積した反応生成物との反応のモデル化

水蒸気と堆積した反応生成物との反応は以下の 2 式を想定する。



反応生成物と水蒸気の反応はプール面に供給される水蒸気がナトリウムと反応生成物との体積比で反応するモデルとした。

④水蒸気（湿分）と雰囲気中の反応生成物（エアロゾル）との反応のモデル化

雰囲気中の反応生成物（エアロゾル）と水蒸気の反応モデルは、水蒸気のエアロゾル粒子への拡散によりモデル化する。反応で生じた反応熱は雰囲気ガス（混合ガス）への入熱とする。

⑤反応によって発生する水素量の算出

上記の反応によって発生した水素の濃度及びセル間の移行を考慮できるように改良した。発生した水素は、入力で与えた割合が酸素と再結合し、湿分として雰囲気中に加え反応熱は雰囲気中のガスに入熱する。セル間の移行量は、従来より求められているガスの各々の部屋から部屋への流量を基に計算する。

・エアロゾル挙動計算モデルの付加

セル内に浮遊しているエアロゾル粒子はセル内で均一に混合すると仮定し、ガス流量に応じてセル間を移行するモデルとした。また、粒子の落下速度式に基づいてエアロゾルは床上へ沈降することを考慮して、プールへの沈降量はセル床面積とプール面積の割合によって算出することとした。

### 3 検証用試験の概要

本報告では、空気雰囲気中のナトリウムプール燃焼実験として、ドイツ (KfK) と日本 (動燃) で実施された2つの実験装置による計3回の実験を解析の対象とした。

#### 3.1 FAUNA 試験<sup>[9],[10]</sup>

FAUNA は1982年頃に独カールスルーエ研究所 (KfK) にて実施されたナトリウムプール燃焼試験の装置の名称である。FAUNA 装置では多数の実験が実施されているが、本検証においては、F5 試験、F6 試験と呼ばれる2つの実験を解析の対象とする。以下に試験装置および条件を記載する。

##### 3.1.1 試験装置

表 3.1-1 と図 3.1-1 に試験装置の概要を示す。FAUNA は容積  $220 \text{ m}^3$  の鋼製円筒型装置で、外部は水冷式の冷却系が設置されている。内部には、底部に鋼製のナトリウム燃焼用受け皿が断熱材を介して取り付けられており、試験前に電気ヒーターによって昇温可能である。F5 試験では  $2.0 \text{ m}^2$ 、F6 試験では  $4.9 \text{ m}^2$  の面積の受け皿が各々使用された。また、容器内に床から  $1 \text{ m}$  の位置に径  $\phi 7 \text{ mm}$  のノズルが設置されており、ここからナトリウムが受け皿に供給された。

本試験装置により、ナトリウムプール温度、雰囲気ガス温度と圧力および酸素濃度を計測した。

##### 3.1.2 試験条件

表 3.1-2 に実験条件を示す。漏えい速度は約  $17.5 \text{ kg/min}$  (約  $0.3 \text{ kg/sec}$ ) であり、20 分間継続させてトータル  $350 \text{ kg}$  のナトリウムを供給している。F5 と F6 の違いは、受け皿の面積のみであり、他の実験条件は同じである。また、雰囲気ガスは空気で密閉条件としている。

#### 3.2 Run-D1 試験<sup>[9]</sup>

Run-D1 試験は1985年に動燃大洗工学センター SAPFIRE 施設 (SOLFA-1 装置) にて実施されたナトリウムプール燃焼試験である。以下に試験装置および条件を記載する。

##### 3.2.1 試験装置

表 3.2-1、図 3.2-1 に試験装置の概要を示す。SOLFA-1 装置は 2 階建構造であるが、Run-D1 試験では 1 階部分のみを利用している。1 階部分の容積は  $73.4 \text{ m}^3$  で、床には面積  $2.25 \text{ m}^2$  の燃焼皿が設置されている。装置は矩形のコンクリート構造であり、装置内面は断熱材層を介して鋼板でライニングされている。実験では、図 3.2-2 に示す燃焼皿の底部にナトリウムを注入する供給系配管を設け、さらに燃焼皿の底部に多孔板を設置することによりナトリウムを注入することによる液滴の飛散やプール表面の乱れの影響を抑制する方法を採用している。また、酸素濃度を維持した実験を行うため、天井直下  $50 \text{ cm}$  の位置に酸素供給ノズルを有している。計測については、雰囲気、床ライナー、天井の放射熱防止板、壁の放射熱防止板およびコンクリート内部にそれぞれ熱電対を設置した。

### 3.2.2 試験条件

表 3.2-2 に実験条件を示す。ナトリウムは 3.5 分間でトータル 550 kg を供給した。ただし、上述したように燃焼皿において供給操作の影響を抑制する手段を講じている。実験条件は密閉ではなく、換気配管から自然排気されるようにしている。また、意図的に酸素濃度を維持するため、実験開始後 7 分～1 時間まで 200 ℓ/分 の速度で酸素を装置内部に供給した。

表 3.1-1 FAUNA 試験装置概要

	F5 試験	F6 試験
試験容器形状	円筒型	←
試験容器内径 m	6	←
試験容器高さ m	6	←
試験容器容積 m <sup>3</sup>	220	←
試験容器壁面積 m <sup>2</sup>	176	←
試験容器壁厚さ mm	16	←
ナトリウム燃焼皿面積 m <sup>2</sup>	2.0 ( $\phi$ 1.6 m)	4.9 ( $\phi$ 2.5 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 3.1-2 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 kgf/cm <sup>2</sup> A	1.03	←
初期容器壁温度 °C	25	←
初期ナトリウム皿温度 °C	480	←
初期酸素濃度 %	21	←
ナトリウム漏えい時間 min	20	←
ナトリウム燃焼時間 min	20	60

表 3.2-1 Run-D1 試験装置概要

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 <sup>3</sup>	73.4
試験容器壁面積 m <sup>2</sup>	61.8
試験容器床面積 m <sup>2</sup>	20.04
ナトリウム燃焼皿面積 m <sup>2</sup>	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 3.2-2 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 <sup>3</sup> /min	0.2 (7 ~ 60 min)
初期酸素濃度 %	21
初期雰囲気ガス圧力 kgf/cm <sup>2</sup> A	1.03
初期容器内温度 °C	53

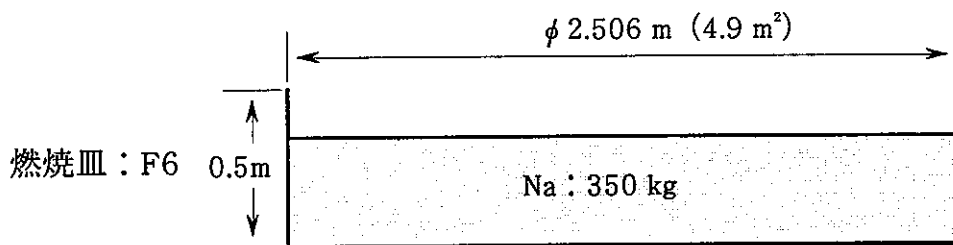
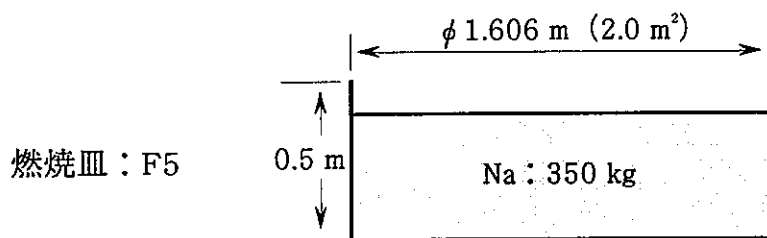
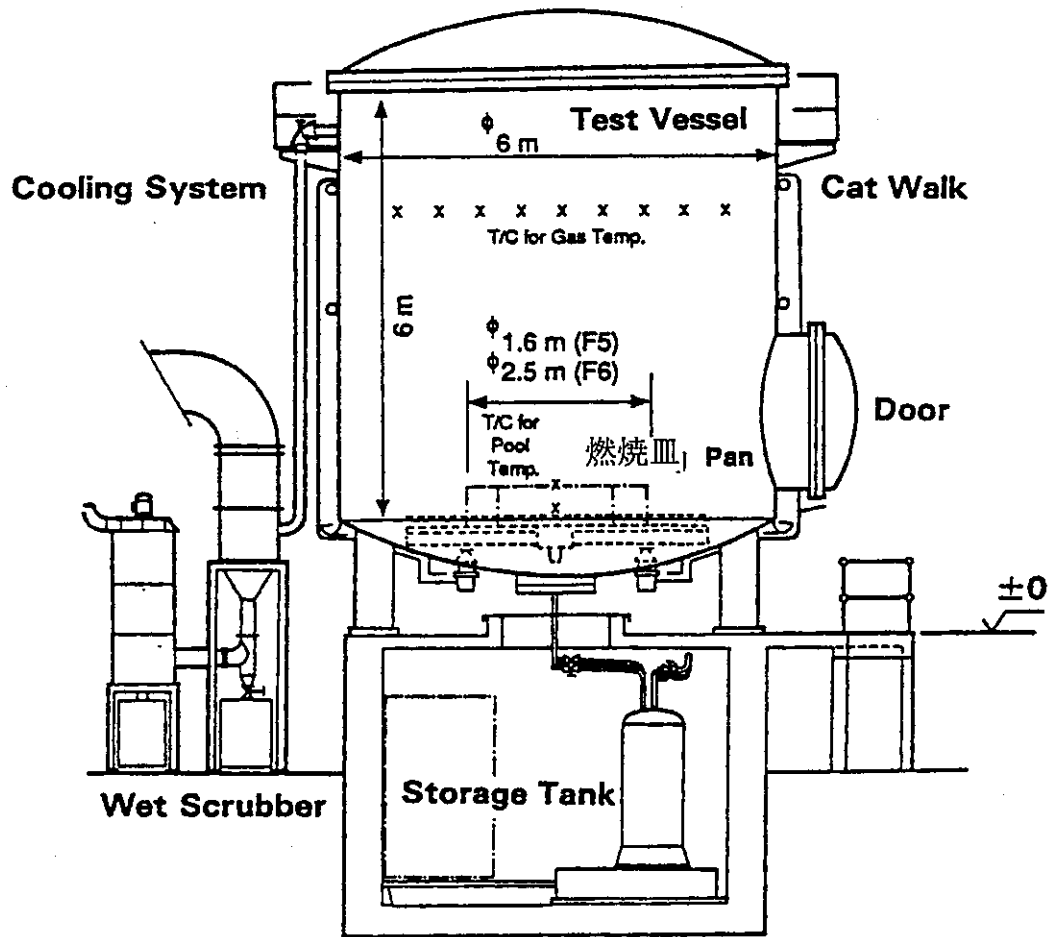


図 3.1- 1 FAUNA 試験装置 (F5, F6 試験)



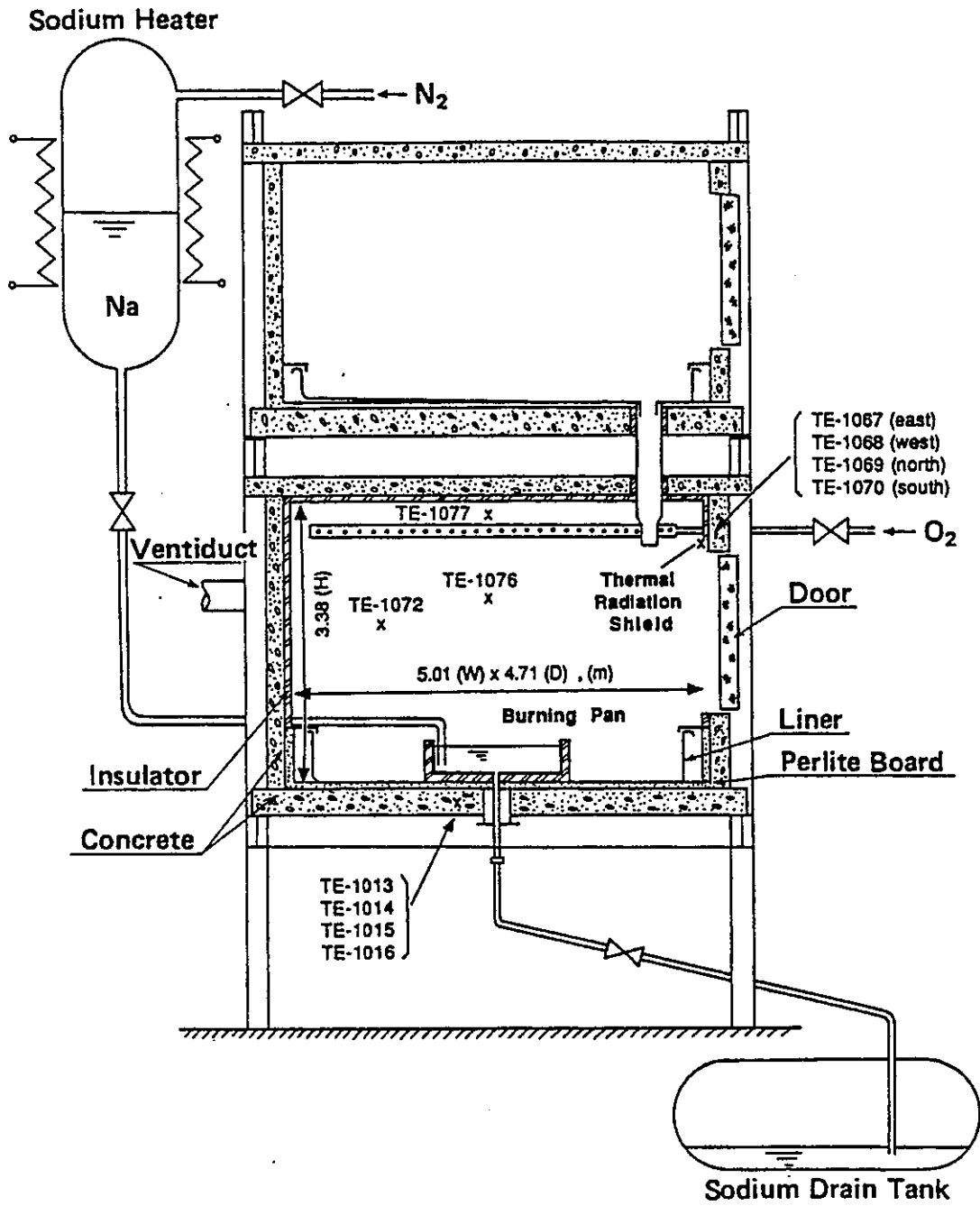


図 3.2-1 SOLFA-1 試験装置 (Run-D1)

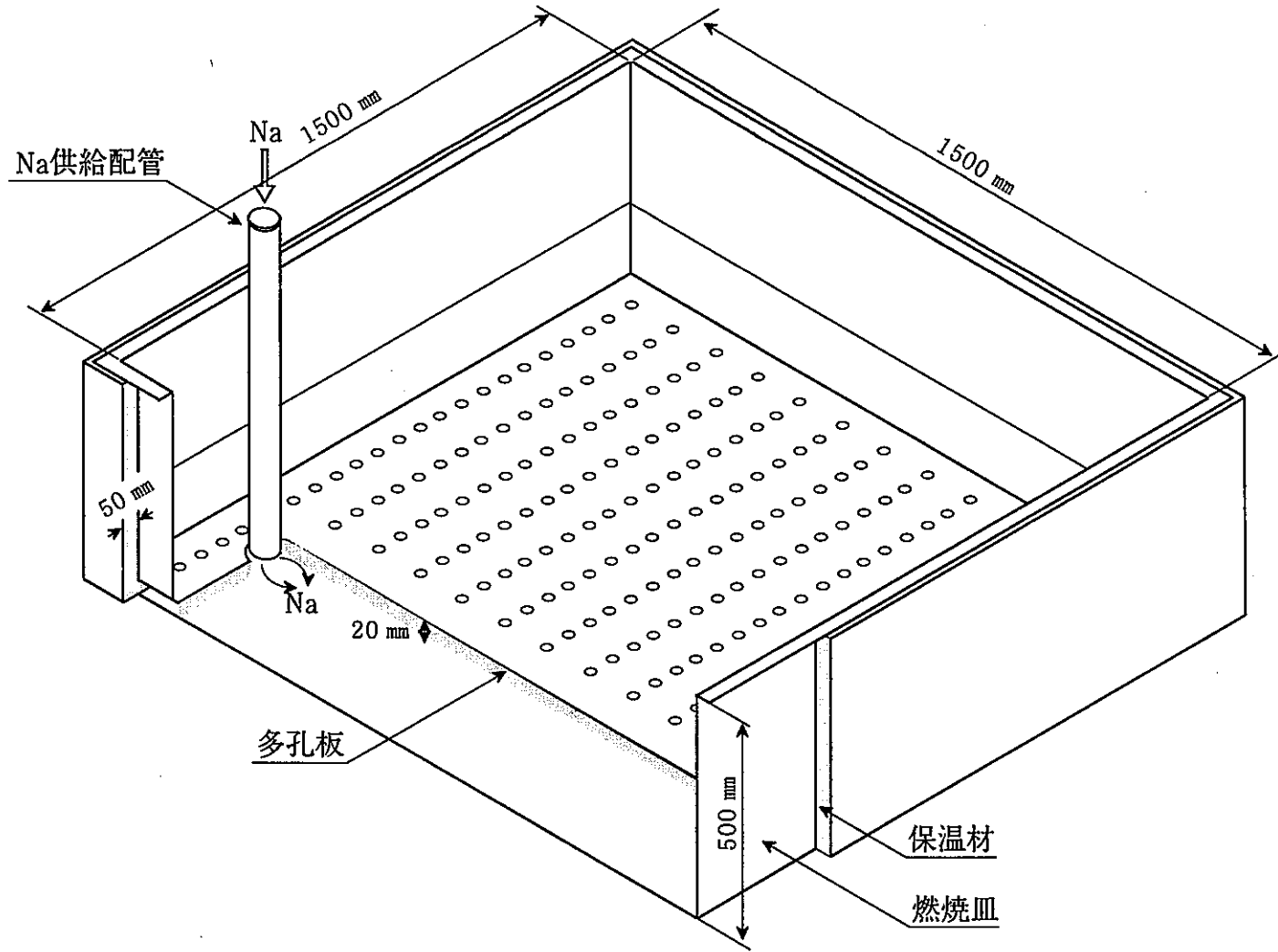


图 3.2- 2 Run-D1 燃烧皿

## 4 解析条件と解析モデル

### 4.1 FAUNA 試験

FAUNA 試験に関する解析条件を表 4.1 に、また解析モデルを図 4.1 に示す。F5 試験と F6 試験の違いは燃焼皿の面積のみである。

#### 4.1.1 解析条件

試験装置形状や実験条件に係わる解析条件は、実験時の条件に合致させるように設定を行った。化学反応に関する計算条件は、 $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2$  比 = 0 : 100 をリファレンスとした。このパラメータは過去の検討<sup>(4)</sup>で適切と判断したものである。その値を変えたパラメータ計算については 6 章で述べる。

FAUNA 試験は、湿度に関するデータが不明であるため、新計算機能を使用しない解析ケースでは、湿分濃度を 0 とした。他方、新計算機能を使用する解析ケースでは、その効果を把握することを目的として、仮の値として 80 %RH の値を用いた。この際、水分反応やエアロゾルに係わる解析パラメータは、表 4.1 に示すように設定した。

#### 4.1.2 解析モデル

FAUNA 試験解析に使用した解析モデルを図 4.1 に示す。FAUNA 試験は、燃焼皿上の 1 m の位置から 20 分間ナトリウムを落下供給しているため、ナトリウムの飛散による影響が測定データに現れているが (図 5.1- 1 参照)、解析では初期に 350 kg のナトリウムが瞬時にプールとして存在していると仮定して計算を行う。このため、特に F6 の測定データの初期 20 分間に見られる乱れは比較検討の対象としない。(この初期の現象については別途検討しており詳細は Appendix B で述べる。)

また、試験装置壁外面の水流下による冷却については、その詳細が不明であるため計算では無視し、断熱扱いとした。

#### 4.1.3 解析ケース

F5 および F6 の各々について、ASSCOPS Version 2.0 の計算機能向上を把握するために新計算機能を使用した場合と使用しない場合の比較計算を実施した。(Version 1.1 の計算と Version 2.0 で新機能未使用の計算はコード上で相違はないが、バージョン間で同じ計算結果が出ることを確認することを目的としたものである。Version 1.1 の結果の図については Appendix A に記載する。)

ケース ID	内容
PF5V2A (PF6V2A)*	Version 2.0 を用いた計算. 湿分なし (新機能未使用)
PF5V2B (PF6V2B)*	Version 2.0 を用いた計算. 湿分あり (新機能を使用)
PF5V1A (PF6V1A)*	Version 1.1 を用いた計算. (→ Appendix A 参照)

\* ケース ID の ( ) は F6 のケースを示す

Version 2.0 で新機能を使用した計算では、プールの化学組成の考慮、ナトリウム/ナトリウム酸化物と湿分の反応の考慮、エアロゾル挙動の考慮が異なる。ただし、上述したように FAUNA 試験では実験の湿分条件が不明であるため、任意に初期湿度 80 %RH として計算を行った。従って、測定データとの比較には意味がない。

## 4.2 Run-D1試験

Run-D1 実験に関する解析条件を表 4.2 に、また解析モデルを図 4.2 に示す。

### 4.2.1 解析条件

試験装置形状や実験条件に係わる解析条件については、実験時の条件に合致させるように設定を行った。

化学反応に関する計算条件は、 $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2$  比 = 60: 40 (酸素濃度 10 % 以下では 100: 0 とする) をリファレンスとした。このパラメータは過去の検討<sup>[6]</sup>で適切と判断したものである。FAUNA 試験解析で使用した 0: 100 と比較すると、燃焼速度として大きく評価するパラメータとなる (6 章参照)。

初期湿分濃度に関しては実験時の計測データとして 5.9 %RH を用いた。ただし、実験開始後については測定されていない。これを勘案して、計算結果の検討を容易にするため、新機能を使用しない計算ケースでは、FAUNA 試験解析と同様に初期湿分を無視した計算とした。他方計算機能を使用する計算ケースでは、上述の 5.9 %RH を初期条件として用いた。

湿分の化学反応に関する計算条件は、表 4.2 に示すように設定した。これらの考え方は、FAUNA 試験の考え方と同一である。

### 4.2.2 解析モデル

Run-D1 試験解析に使用した解析モデルを図 4.2 に示す。基本的には FAUNA 試験解析と同様のモデルであるが、Run-D1 試験では酸素の供給を行っているので、その供給とガスの排出をモデル化している。一方、ASSCOPS ではセル-1 に酸素を注入させる入力オプションはないため、Run-D1 解析のための一時的扱いとしてその機能をプログラムに付加した。

### 4.2.3 解析ケース

FAUNA の検証計算の場合と同様に、ASSCOPS Version 2.0 の計算機能向上を把握するために新計算機能を使用した場合と使用しない場合の比較計算を実施した。

(Version 1.1 の計算と Version 2.0 で新機能未使用の計算はコード上で相違はない。したがって、バージョン間で同じ計算結果が出ることを確認するために FAUNA 試験解析の場合と同じように両者の比較したものである。Version 1.1 の結果の図については Appendix A に記載する。)

<u>ケース ID</u>	<u>内容</u>
PD1V2A	Version 2.0 を用いた計算. 湿分なし (新機能未使用)
PD1V2B	Version 2.0 を用いた計算. 湿分あり (新機能使用)
PD1V1A	Version 1.1 を用いた計算. (→ Appendix A 参照)

Version 2.0 の新機能使用計算では、プールの化学組成の考慮、ナトリウム／ナトリウム酸化物と湿分の反応の考慮、エアロゾル挙動の考慮が Version 2.0 の新機能未使用の計算と異なる。

表 4.1 FAUNA F5, F6 試験の実験条件と解析条件

## (実験条件)

項目		内容
ナトリウム漏えい ・ 燃焼条件	漏えい量 漏えい時間 漏えい率 漏えい温度	350 kg (20 min) <sup>注1</sup> (17.5 kg/min) <sup>注1</sup> 480 °C
	プール燃焼部 ・ プール広がり面積	2.0 m <sup>2</sup> (F5) 4.9 m <sup>2</sup> (F6)
雰囲気条件	容積 初期温度 初期湿度 (相対湿度)	220 m <sup>3</sup> 25 °C 0.015360 (80 %) <sup>注2</sup>
換気条件		換気無し (密閉容器)
構造物条件	容器形状 寸法	円筒形 φ 6 m × H6 m

<sup>注1</sup> : 解析では初期に瞬時プール形成を仮定した。

<sup>注2</sup> : 湿分濃度は不明であり、その効果の把握が容易になるように高めの任意値を用いた。

## (解析条件)

化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応 生成割合	$2\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$ (Na <sub>2</sub> O: Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0: 100)
	ナトリウムと水分の反応	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2 \uparrow$
	水素と酸素の再結合割合 (発生水素の消費)	70 % ( $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ )
	ナトリウム酸化物 (プール内) と 水分反応	$\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2 \uparrow$ $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}$
	ナトリウムエアロゾル (Na <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) 放出割合	25 % (75 % はプール内に留まる)
	ナトリウムエアロゾル (ガス空間) と 水分反応	$\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2 \uparrow$ $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}$

表 4.2 Run -D1 試験の実験条件と解析条件

## (実験条件)

項目		内容
ナトリウム漏えい ・ 燃焼条件	漏えい量 (カッコ内は実測値) <sup>注</sup>	549.82 kg (550 kg)
	漏えい時間 (       〃       ) <sup>注</sup>	205.2 sec (215 sec)
	漏えい率 (       〃       ) <sup>注</sup>	2.45 kg/sec (2.56 kg/sec)
	漏えい温度	505 ℃
	プール燃焼部 ・ プール広がり面積	2.25 m <sup>2</sup>
雰囲気条件	容積	73.4 m <sup>3</sup>
	初期温度	55 ℃
	初期湿度 (相対湿度)	0.00573 (5.9 %)
換気流条件	酸素注入 (7 ~ 60 分)	200 ℓ / 分
	給排気	
構造物条件	容器形状	直方体
	寸法	3.4 (高さ) m × 4.4 m × 4.1 m

<sup>注</sup> : 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率は実測値と僅かに異なる。

## (解析条件)

化学反応条件	ナトリウムと酸素の反応生成物 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 % 未満では $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 100 : 0$
	ナトリウムと水分の反応	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2 \uparrow$
	水素と酸素の再結合割合 (発生水素の消費)	70 % ( $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ )
	ナトリウム酸化物 (プール内) と 水分反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$
	ナトリウムエアロゾル ( $\text{Na}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}_2$ ) 放出割合	25 % (75 % はプール内)
	ナトリウムエアロゾル (ガス空間) と 水分反応	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}$ $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + 1/2\text{O}_2$

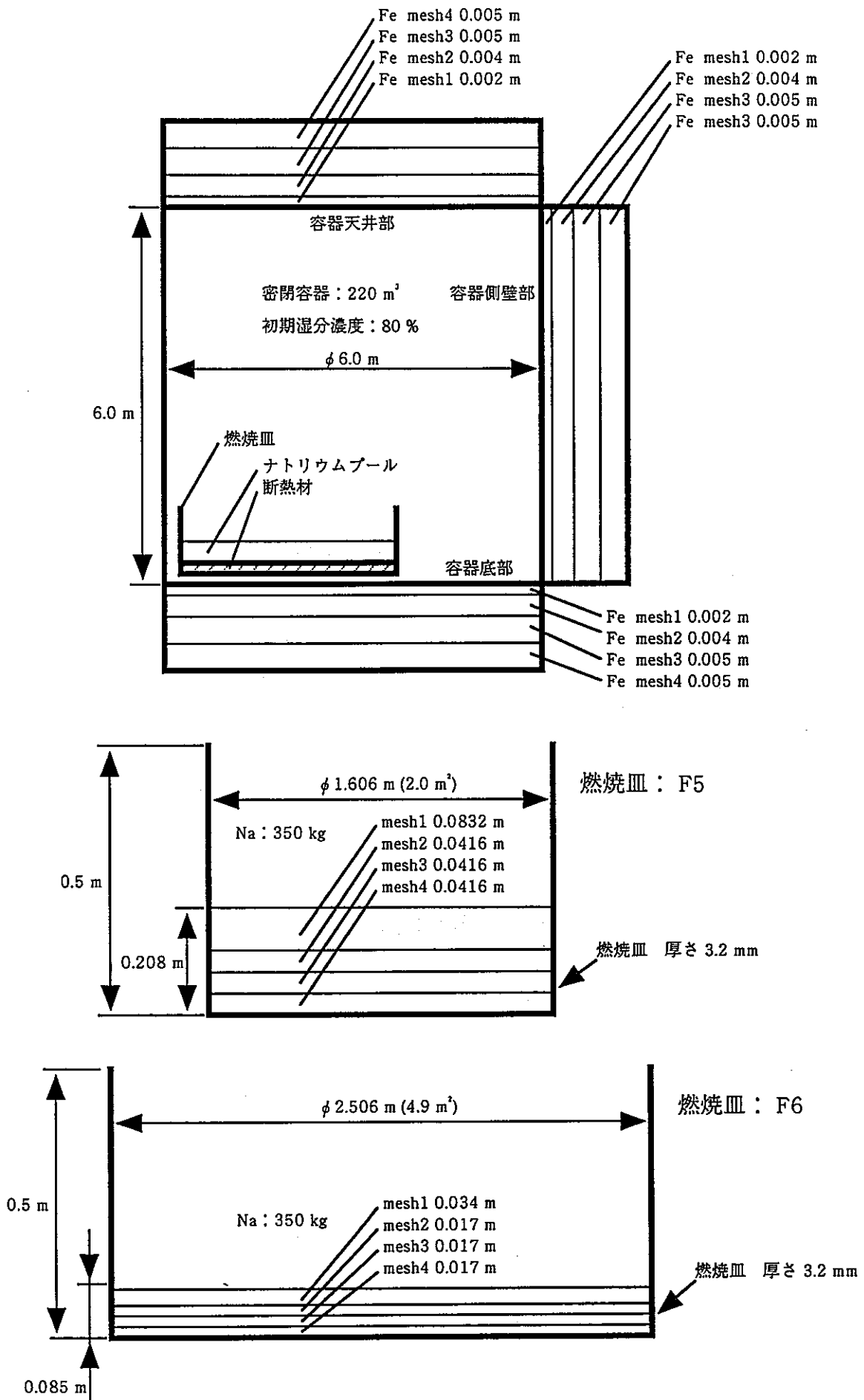


図 4.1 FAUNA計算モデル



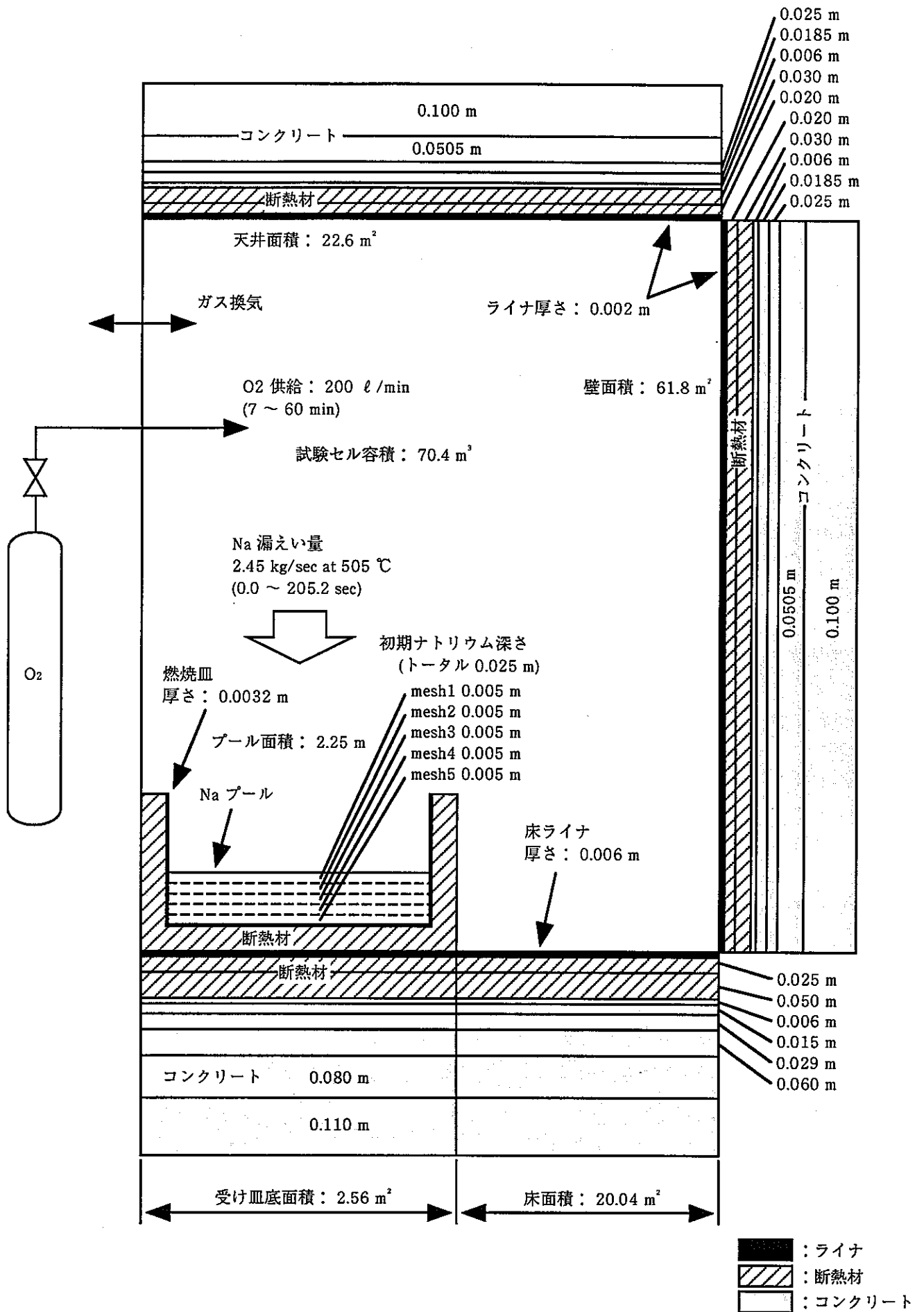


図 4.2 Run-D1 計算モデル

## 5 試験解析と実験値の比較

### 5.1 FAUNA 試験

計算結果を測定データが得られているものはそれらと比較して、表 5.1- 1 (F5)、表 5.1- 2 (F6) および 図 5.1- 1 ~ 図 5.1-13 (F5, F6) に示す。

#### (1) ガス温度 (図 5.1- 1)

ガス温度の測定値は、ナトリウム流入の影響がある初期を除くと、F5 において約 120 °C、F6 で約 170 °C である。計算結果はいずれもこれらと一致している。初期においては、F6 の測定値にピークがみられ約 280 °C に達しているが、F5 ではその程度は小さい。この理由は、F6 では燃焼皿面積が大きいいためナトリウムの溜まる深さが浅く、その結果燃焼皿に衝突したナトリウムの跳ね返りによる液滴の生成や液面の乱れが大きく影響していると解釈できる。本章の計算では、これらの効果は考慮されておらず、初期の時間域は比較できない。(ナトリウム液滴の飛散を考慮したモデルの検討については別途実施しており、Appendix B に記載する。)

新機能使用時の計算結果は、ピーク温度で新機能未使用の計算結果より F5 において約 2 °C、F6 で約 8 °C 高くなっている。これは主にエアロゾルと水蒸気反応の発熱に起因する。

#### (2) ガス圧力 (図 5.1- 2)

FAUNA 試験は密閉条件で実施されているため、ガスの温度上昇に伴い圧力にも上昇がみられる。測定データは F5 において約 1.2 kgf/cm<sup>2</sup>A、F6 で約 1.4 kgf/cm<sup>2</sup>A である。F5 について、計算結果は測定データとほぼ一致している。ただし、F6 については、ナトリウムの流入によると考えられるピークが測定データに生じており、計算結果より実験値の方が圧力の立ち上がりとピーク値が大きくなっている。

新計算機能追加の比較は、ガス温度の項で述べた傾向と同じである。

#### (3) プールナトリウム温度 (図 5.1- 3)

F5 については、測定データのピーク温度が約 730 °C に対して計算値は約 820 °C となり計算は過大傾向にある。F6 については初期にナトリウムの流入による振動があるため、比較が難しいが、全体には一致していると考えられる。

新計算機能追加の比較では、新機能使用の計算結果の方が、ピーク温度で約 10 °C 高くなっている。

#### (4) 燃焼皿温度 (図 5.1- 4)

FAUNA 試験では燃焼皿自体の温度は測定されていないので、計算結果のみを図 5.1-4 示す。これらは、上述したプールナトリウム温度の計算結果とほとんど差はない。

#### (5) 壁温度 (図 5.1- 5)

FAUNA 試験では壁の温度は測定されていないので、計算結果のみを図 5.1- 5 に示す。また、上述したように装置壁外面の水流下冷却について計算では無視していることに注意が必要である。

## (6) ナトリウム反応速度 (図 5.1- 6)

ナトリウム反応速度の計算結果を図 5.1- 6 に図示する。ここで、ナトリウム反応速度はナトリウム-酸素反応とナトリウム-湿分反応の合計を指す。

新機能を使用しない場合は、ピークの値で、F5 では約 16 g/sec、F6 では約 37 g/sec である。単位面積当たりの値にすると両者はほぼ等しく約 27 kg/m<sup>2</sup>/hr である。

新機能使用の計算結果は、ピーク値が F5 において約 6 %、F6 で約 10 % 程度大きくなっている。これは雰囲気湿度とナトリウムの反応の寄与分に相当する。ただし、ここでの計算条件は上述したように実験条件が不明であるため、その効果をみるため任意に設定した初期湿分濃度によるものであることに注意が必要である。

## (7) 酸素濃度 (図 5.1- 7)

酸素に関する測定データと計算結果の比較を図 5.1- 7 に示す。両者は全般によく一致しており (F5 は消費速度の計算結果がやや過大)、上述したナトリウム燃焼速度の計算が妥当であることを裏づけている。F5 について消費速度の計算結果がやや過大であることは、ナトリウム温度が過大 (図 5.1- 3) になっていることと関連づけられると考えられる。

新機能使用の計算結果では、新機能を使用しない場合に比べ酸素消費速度が少し小さくなっている。これはガスの温度が高くなることにより自然対流効果が若干弱まり、プール面への酸素供給フラックスが少し小さくなったことによる。

## (8) 湿分濃度 (図 5.1- 8) と水素濃度 (図 5.1- 9)

上述したように、FAUNA 試験では湿分条件が不明であるので、ここでは任意に初期濃度を 80 %RH と設定した新機能使用の計算結果のみ示す。

湿分は燃焼で生成したエアロゾルとの反応と、プール液面でのナトリウムとの反応の両者で計算されるが、F6 では燃焼皿面積が約 2.5 倍大きく、トータルのエアロゾル発生率とプール液面の両者がその分大きくなる。これにより湿分の消費速度が F6 では大きく、短時間で湿分が消失している。水素はナトリウムと湿分の反応で生じるが、その絶対量は非常に小さく F5 において 0.01 % 以下、F6 で 0.03 % 以下である。

## (9) 化合物組成 (図 5.1-10 ~ 図 5.1-13)

ナトリウムと反応生成物の計算結果について、図 5.1-10 に図示する。また、Na<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NaOH の各々の内訳詳細を図 5.1-11 ~ 図 5.1-13 に示す。これらは、新機能使用時のケースのみに結果として得られるものである。

実験条件であるナトリウムの供給量の 350 kg に対して、実験終了時でのナトリウムの残留量は、288 kg (F5: 表 5.1- 1)、275 kg (F6: 表 5.1- 2) である。両者の反応ナトリウム重量に大きな差が生じていないのは、酸素濃度 (量) がトータル量を支配しているからである。ここで示すケースでは、ナトリウム燃焼に関して Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 生成を仮定しているので (Na<sub>2</sub>O: Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 0: 100)、Na<sub>2</sub>O の生成はプールのナトリウムと湿分の反応過程で、また NaOH は雰囲気湿度の Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (と Na<sub>2</sub>O) と湿分の反応過程で生成する。図 5.1-13 の内訳をみると、NaOH はエアロゾルとしてトータル F5 において約 6 kg、F6 で約 16 kg 生成しているが、その内プールに沈降するのは結果的に F5 において 1.2 kg、F6 で

2.6 kg である。

## 5.2 Run-D1 試験

計算結果を測定データが得られているものはそれらと比較して、表 5.2 ならびに図 5.2-1 ～ 図 5.2-14 に示す。

### (1) ガス温度 (図 5.2-1)

ガス温度の測定データのピークは約 305 °C であり、計算値はピーク値と全体的挙動ともによく一致している。

### (2) ガス圧力 (図 5.2-2)

Run-D1 実験は雰囲気を解放する条件で実施されているため、測定データと計算値ともに圧力の変化はない。

### (3) プールナトリウム温度 (図 5.2-3)

測定されたプール温度のピーク値は約 690 °C であり、計算値はピーク値と全体的挙動ともによく一致している。新機能使用計算では、計算値が測定データよりやや小さい傾向にあるが、これは上述したようにエアロゾルと湿分の反応でガス温度が上昇し、プールに供給される酸素フラックスが小さくなる計算となっているためである（後述のナトリウム反応速度(6) 参照）。

### (4) 燃焼皿温度 (図 5.2-4)

燃焼皿の温度はプールナトリウム温度とほとんど差がなく、計算値はピーク値と全体的挙動ともに測定データとよく一致している。

### (5) 壁温度 (図 5.2-5 ～ 図 5.2-6)

壁の内面に貼られたライナの温度のピーク値は約 280 °C であり、ピーク値と全体的挙動ともによく一致している。

セルの構造コンクリートの温度は、ライナとコンクリートの間に断熱材があるため、僅かな上昇に留まっている。計算値は全体的に測定データとよく一致している。

### (6) ナトリウム反応速度 (図 5.2-7)

ナトリウム反応速度の計算結果を図 5.2-7 に図示する。ここで、ナトリウム反応速度はナトリウム-酸素反応とナトリウム-湿分反応の合計を指す。

新機能未使用計算結果は、ピークの値で約 16 g/sec であり、これを単位面積当たりの値に換算すると約 25 kg/m<sup>2</sup>/hr である。一方、新機能使用計算の結果は時間経過とともに若干小さくなっているが、これは上述したようにエアロゾルと湿分の反応でガス温度が上昇し、i) ガスの密度が低下する（圧力は解放されている）ことと、ii) プールとガスの温度差が小さくなることによりプールに供給される酸素フラックスが小さくなる計算となっていることが原因として考えられる。5.1 節で述べた FAUNA 試験の解析と比較すると、FAUNA の同様の解析ではガス温度が上昇してもナトリウム反応速度は低下せず、むしろ

増加している。これは上記した二つの原因のうち、前者が支配的であること、つまり FAUNA 試験は密閉であるのでガス温度が上昇しても密度は変化しないが、Run-D1 は密閉ではないのでガスが解放され密度が低下するという違いと考えられる。

計算結果に二つの急激な変化が見られるが、1 時間後の変化は実験において酸素の供給を停止した時間に相当し、1 時間半前後の変化は計算条件としてナトリウム-酸素反応の  $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2$  発生比を酸素濃度 10 % で 60: 40 から 100: 0 に切り替えているためである。

#### (7) 酸素濃度 (図 5.2- 8)

酸素に関する測定データと計算結果の比較を図 5.2- 8 に示す。1 時間後の変化は実験において酸素の供給を停止した時間に相当する。計算結果は、測定データと全般に一致している。

#### (8) 湿分濃度 (図 5.2- 9) と水素濃度 (図 5.2-10)

これらは測定データはなく、新機能使用時の計算結果のみ示す。湿分は約 5 分で消費され、水素濃度は低い。

#### (9) エアロゾル濃度 (図 5.2-11)

ナトリウムに換算したエアロゾル濃度の測定データと計算結果の比較を図 5.2-11 に示す。1 時間後の変化は実験において酸素の供給を停止した時間に相当する。エアロゾル濃度の計算結果は、測定データと全般に一致している。

#### (10) 化合物組成 (図 5.2-12 ~ 図 5.2-15)

ナトリウムと反応生成物の計算結果について図 5.2-12 図示する。また、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}_2$ 、 $\text{NaOH}$  の各々の内訳詳細をそれぞれ図 5.2-13 ~ 図 5.2-15 に示す。これらは、新機能使用の計算のみに結果として得られる。

実験条件であるナトリウムの供給量の 550 kg に対して、4 時間経過後のナトリウムの残留量は 482 kg (表 5.2-1) であり、約 70 kg のナトリウムが燃焼していることになる。プール中の酸化ナトリウムの重量組成比は約 13.6 % ( $\text{Na}_2\text{O}$ : 9.1 %,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ : 4.5 %) であり、 $\text{NaOH}$  はわずか (0.02 %) である。 $\text{NaOH}$  は雰囲気中の  $\text{Na}_2\text{O}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$  と湿分の反応過程で生成するが、図 5.2-15 の内訳をみると、トータル約 0.8 kg の生成量のうち、多くはプール以外の床部に沈降していることが分かる。

### 5.3 試験解析のまとめと考察

#### (1) FAUNA 試験

- ① 圧力および各部の温度計算結果は測定データと良く一致している。F5 のプール温度と酸素消費速度はやや過大の傾向がある。
- ② F6 試験に関しては、実験におけるナトリウムの流入により、その初期時間域において測定データに乱れややピークが生じている。
- ③ ナトリウムの燃焼に関する主要パラメータである反応生成物割合は、 $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 0 : 100$  とすることで実験データの圧力・温度・酸素濃度変化を良く説明している。(Na<sub>2</sub>O の割合を増やすと、計算はさらに過大の方向となる。これについては 6 章のパラメータ計算でその結果を示す。)
- ④ 新計算機能である湿分関係の反応は、実験測定データがないため直接的な確認はできないが、初期湿分に関する限り圧力や温度に対する影響は小さいと言える。

#### (2) Run D-1試験

- ① 圧力および各部の温度計算結果は測定データと良く一致している。
- ② ナトリウムの燃焼に関する主要パラメータである反応生成物割合は、 $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 : 40$  (酸素濃度 10 % 以下では 100: 0) とすることで実験データの圧力・温度・酸素濃度変化を良く説明している。(このパラメータの効果については、FAUNA 試験の体系についてのサーベイ結果を 6 章に示す)

表 5.1-1 解析結果 FAUNA (F5)

		FAUNA F5			実験結果
		解析結果			
ケース名		PF5V1A <sup>2</sup>	PF5V2A	PF5V2B	
ASSCOPS Version		1.1	2.0	2.0	
新計算モデル <sup>1</sup>			未使用	使用	
Na 反応速度 g/sec		4.4 ~ 15.5	4.4 ~ 15.5	4.6 ~ 16.4	— <sup>5</sup>
Na プール温度 °C		480 ~ 820	480 ~ 820	480 ~ 820	440 ~ 730
セル内 雰囲気	ガス温度 °C	25 ~ 120	25 ~ 122	25 ~ 124	25 ~ 140 (t < 40 分) 110 ~ 120 (t > 40 分)
	ガス圧力 kgf/cm <sup>2</sup> A	1.03 ~ 1.22	1.03 ~ 1.22	1.03 ~ 1.20	1.03 ~ 1.21
	酸素濃度 vol. %	6.9 ~ 21	6.9 ~ 21	7.3 ~ 20.8	10.2 ~ 19.7
	セル壁温度 °C	25 ~ 83	25 ~ 83	25 ~ 85	— <sup>5</sup>
Na プール 化学組成 (t= 102 分)	Na kg	(351) <sup>3</sup>	(351) <sup>3</sup>	288 (77.8 %)	— <sup>5</sup>
	Na <sub>2</sub> O kg	— <sup>4</sup>	— <sup>4</sup>	1.0 (0.3 %)	— <sup>5</sup>
	Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> kg	— <sup>4</sup>	— <sup>4</sup>	80.7 (21.8 %)	— <sup>5</sup>
	NaOH kg	— <sup>4</sup>	— <sup>4</sup>	0.4 (0.1 %)	— <sup>5</sup>

<sup>1</sup>: ガス中湿分による化学反応、水素再結合およびエアロゾル発生、沈降を考慮。

<sup>2</sup>: PF5V1A (Version 1.1) の結果の図については、Appendix A に示す。

<sup>3</sup>: Version 1.1, Version 2.0 (新計算機能未使用) では燃焼した分のナトリウムを差し引かない扱いとなる。

<sup>4</sup>: Version 1.1, Version 2.0 (新計算機能未使用) では計算されない。

<sup>5</sup>: 測定されていない。

表 5.1-2 解析結果 FAUNA (F6)

		FAUNA F6			実験結果
		解析結果			
ケース名		PF6V1A <sup>2</sup>	PF6V2A	PF6V2B	
ASSCOPS Version		1.1	2.0	2.0	
新計算モデル <sup>1</sup>			未使用	使用	
Na反応速度 g/sec		7 ~ 37.0	7 ~ 36.8	7 ~ 40.6	— <sup>5</sup>
Naプール温度 °C		480 ~ 823	480 ~ 827	480 ~ 840	480 ~ 898 (t < 10 分) 647 ~ 762 (t > 10 分)
セル内 雰囲気	ガス温度 °C	25 ~ 171	25 ~ 173	25 ~ 181	25 ~ 278 (t < 15 分) 139 ~ 170 (t > 15 分)
	ガス圧力 kgf/cm <sup>2</sup> A	1.03 ~ 1.40	1.03 ~ 1.40	1.03 ~ 1.41	1.03 ~ 1.52
	酸素濃度 vol. %	5.0 ~ 21	5.0 ~ 21	5.4 ~ 21	4.6 ~ 20.5
	セル壁温度 °C	25 ~ 93	25 ~ 93	25 ~ 99	— <sup>5</sup>
Na プール 化学組成 (t= 55 分)	Na kg	(349) <sup>3</sup>	(349) <sup>3</sup>	275 (73.6 %)	— <sup>5</sup>
	Na <sub>2</sub> O kg	— <sup>4</sup>	— <sup>4</sup>	2.7 (0.7 %)	— <sup>5</sup>
	Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> kg	— <sup>4</sup>	— <sup>4</sup>	93.0 (24.9 %)	— <sup>5</sup>
	NaOH kg	— <sup>4</sup>	— <sup>4</sup>	2.7 (0.7 %)	— <sup>5</sup>

<sup>1</sup>: ガス中湿分による化学反応、水素再結合およびエアロゾル発生、沈降を考慮。

<sup>2</sup>: PF6V1A (Version 1.1) の結果の図については、Appendix A に示す。

<sup>3</sup>: Version 1.1, Version 2.0 (新計算機能未使用) では燃焼した分のナトリウムを差し引かない扱いとなる。

<sup>4</sup>: Version 1.1, Version 2.0 (新計算機能未使用) では計算されない。

<sup>5</sup>: 測定されていない。



表 5.2 解析結果 Run-D1

		Run-D1			実験結果
		解析結果			
ケース名		PD1V1A <sup>2</sup>	PD1V2A	PD1V2B	
ASSCOPS Version		1.1	2.0	2.0	
新計算モデル <sup>1</sup>			未使用	使用	
Na 反応速度 g/sec		1.05 ~ 15.8	1.03 ~ 15.9	1.04 ~ 15.5	— <sup>6</sup>
Na プール温度 °C		~ 687	~ 687	~ 693	458 ~ 687
セル内 雰囲気	ガス温度 °C	55 ~ 292	55 ~ 292	55 ~ 296	55 ~ 305
	ガス圧力 kgf/cm <sup>2</sup> A	1.03 ~ 1.04 <sup>3</sup>	1.03 ~ 1.04 <sup>3</sup>	1.03 ~ 1.04 <sup>3</sup>	1.03 ~ 1.04 <sup>3</sup>
	酸素濃度 vol. %	1.9 ~ 21	1.8 ~ 21	1.9 ~ 21	1.1 ~ 20.5
Na プール 化学組成 (t= 4 hr)	Na kg	(547) <sup>4</sup>	(550) <sup>4</sup>	482.2 (86.4 %)	— <sup>6</sup>
	Na <sub>2</sub> O kg	— <sup>5</sup>	— <sup>5</sup>	50.6 (9.1 %)	— <sup>6</sup>
	Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> kg	— <sup>5</sup>	— <sup>5</sup>	24.9 (4.5 %)	— <sup>6</sup>
	NaOH kg	— <sup>5</sup>	— <sup>5</sup>	0.1 (0.02 %)	— <sup>6</sup>

<sup>1</sup>: ガス中湿分による化学反応、水素再結合およびエアロゾル発生、沈降を考慮。

<sup>2</sup>: PD1V1A (Version 1.1) の結果の図については、Appendix A に示す。

<sup>3</sup>: 開放条件の実験であるため、圧力変化はほぼ無視できる。

<sup>4</sup>: Version 1.1, Version 2.0 (新計算機能未使用) では燃焼した分のナトリウムを差し引かない扱いとなる。

<sup>5</sup>: Version 1.1, Version 2.0 (新計算機能未使用) では計算されない。

<sup>6</sup>: 測定されていない。

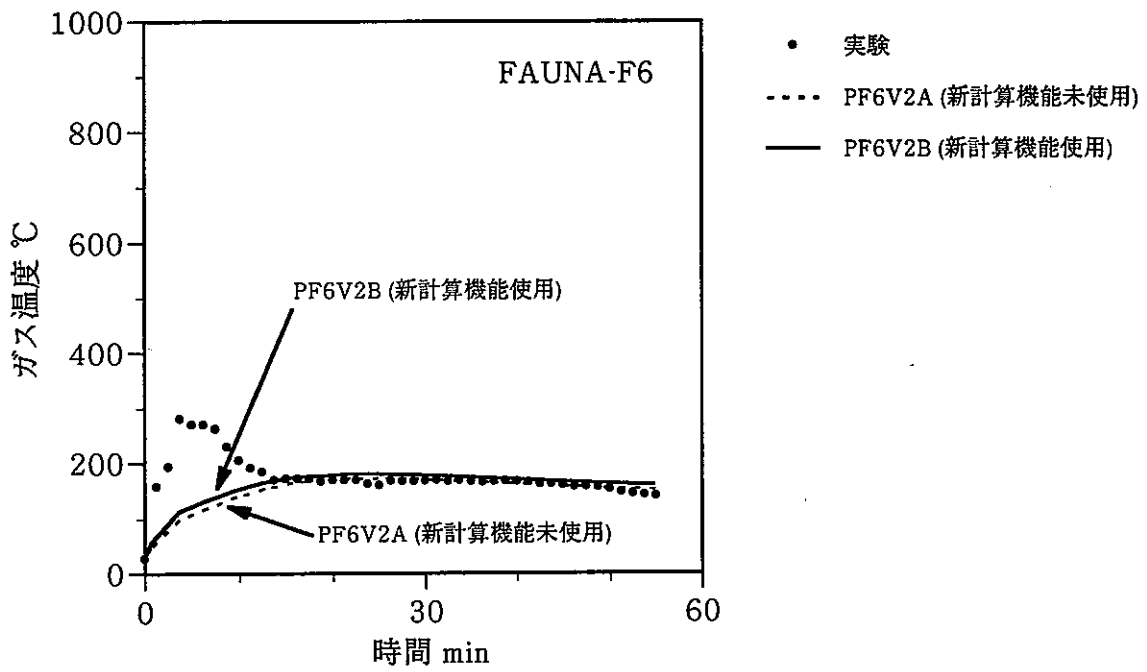
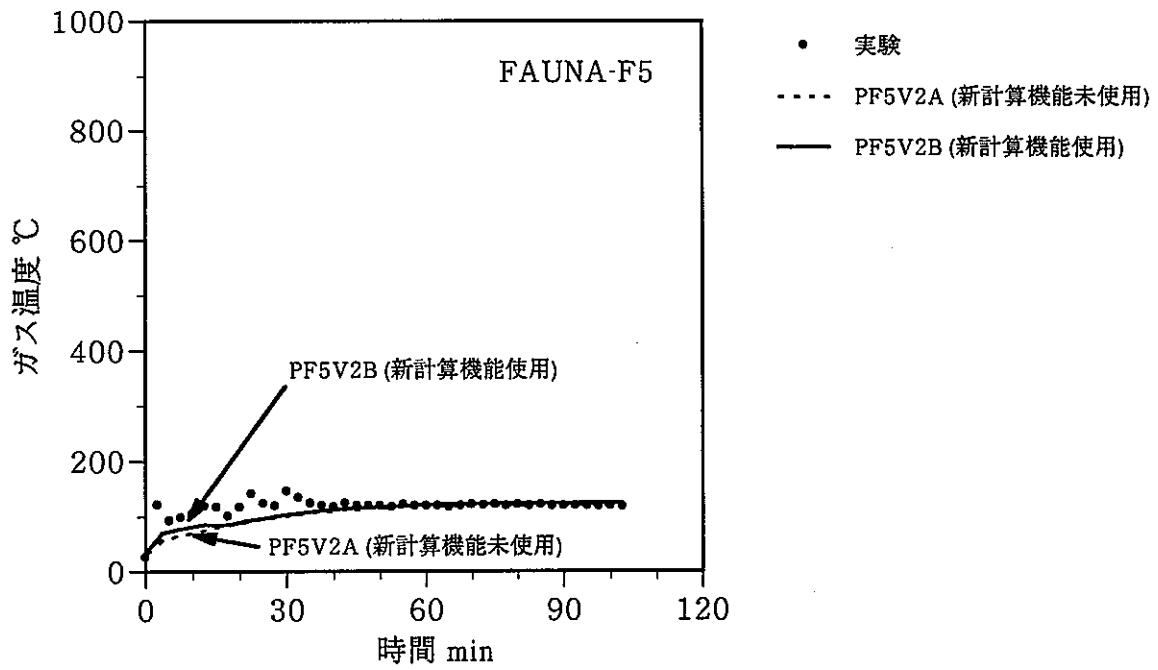


図 5.1-1 ガス温度の比較 (FAUNA)

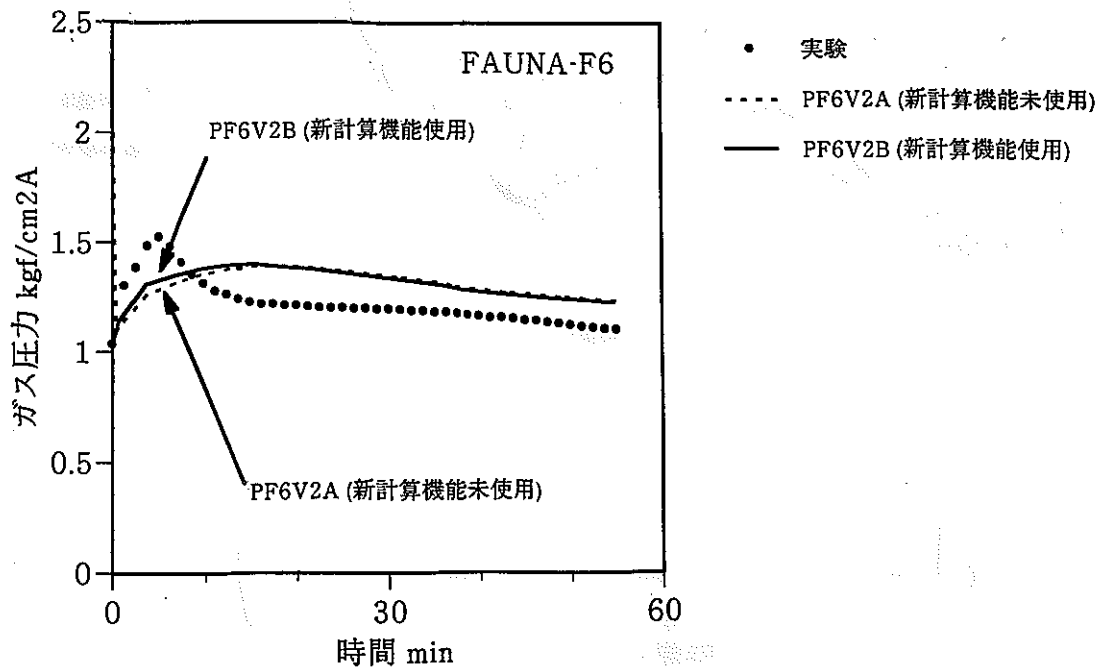
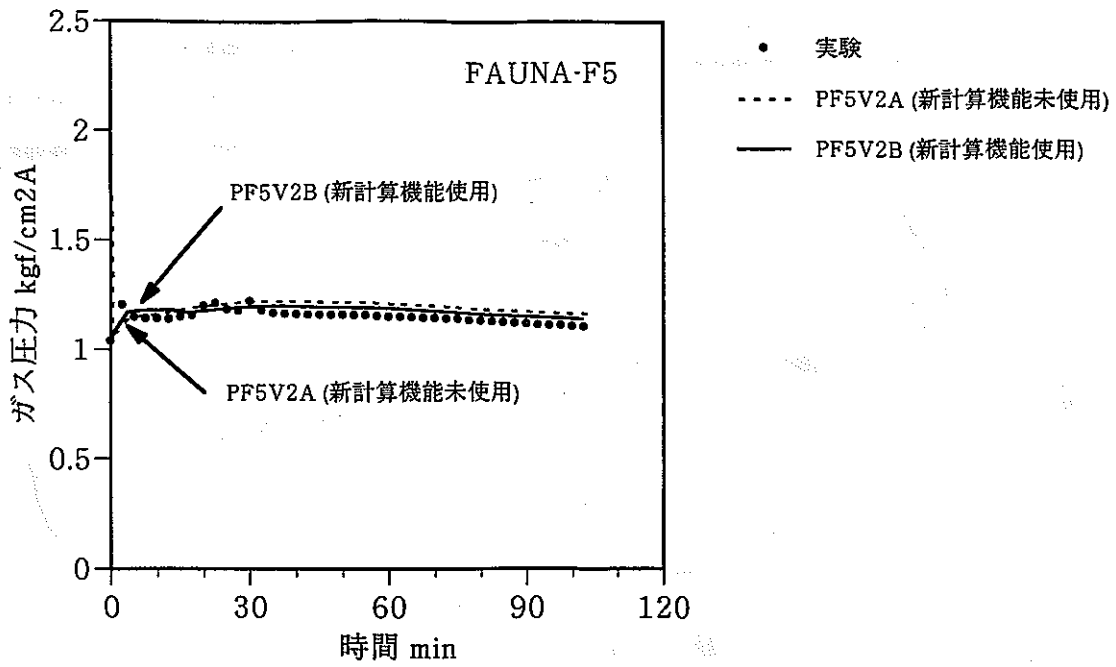


図 5.1-2 ガス圧力の比較 (FAUNA)

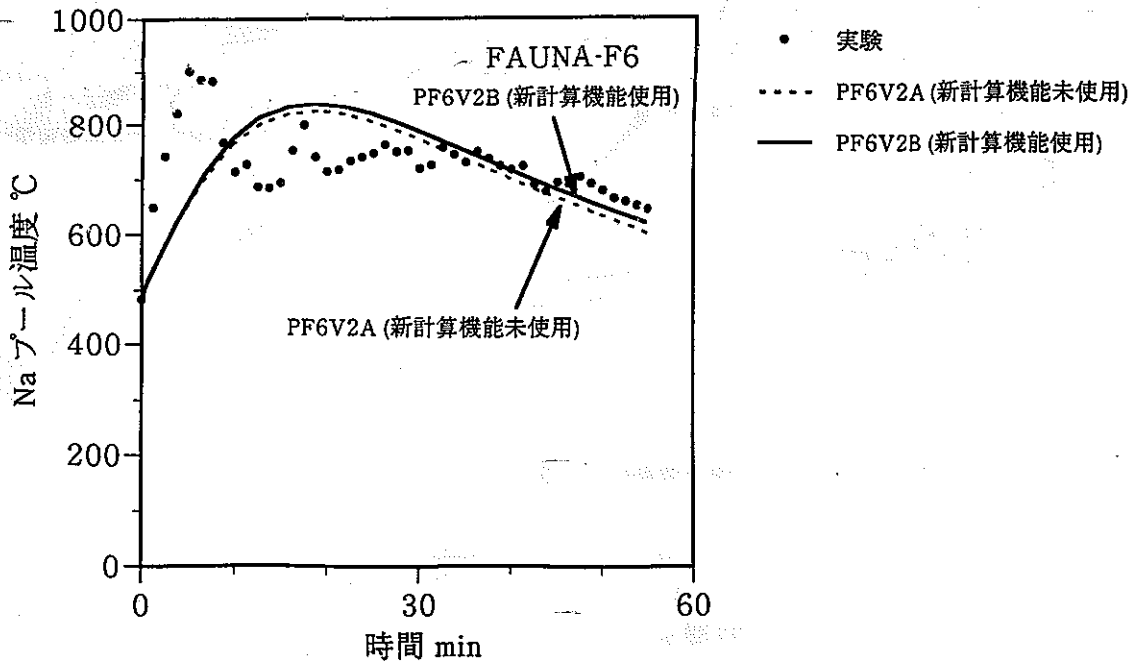
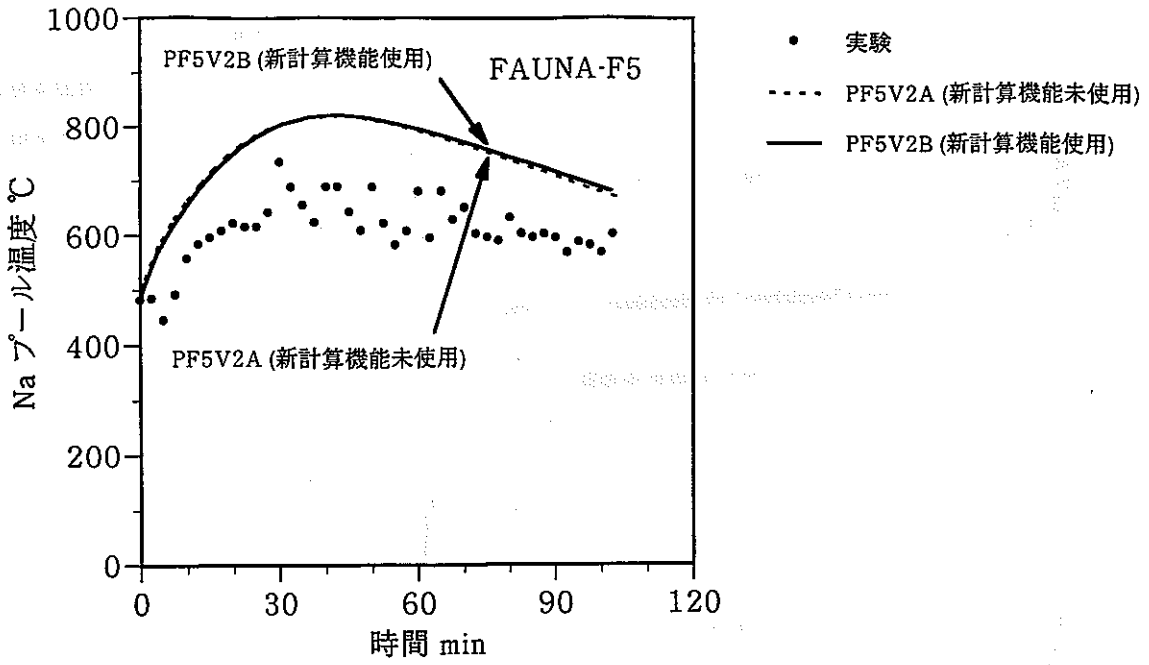


図 5.1-3 ナトリウムプール温度の比較 (FAUNA)

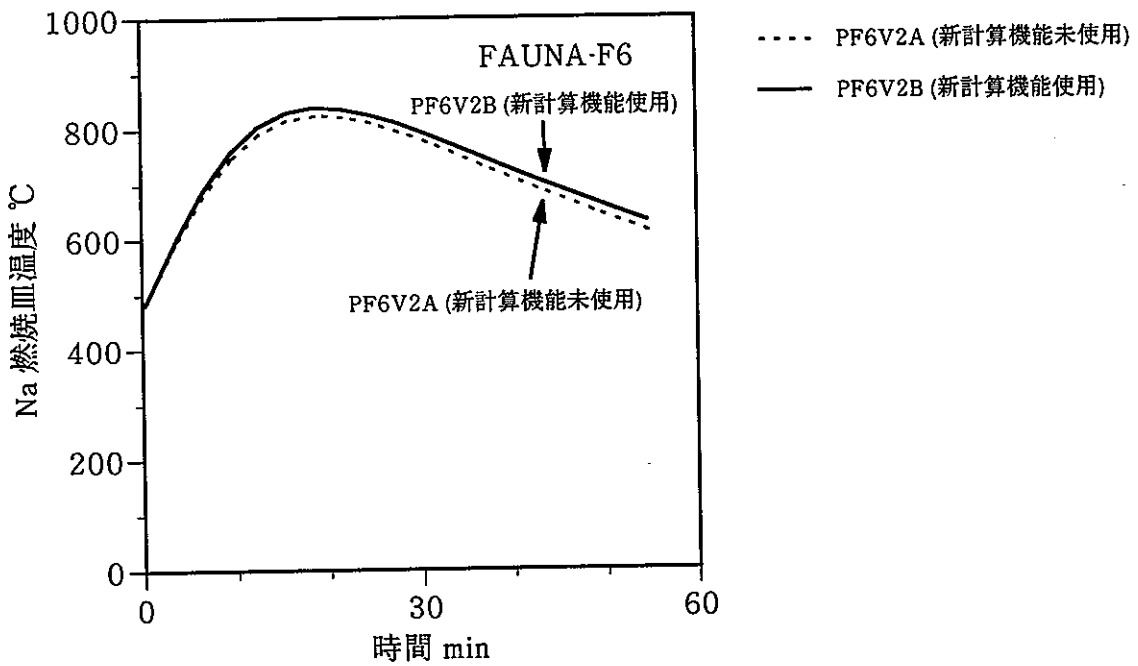
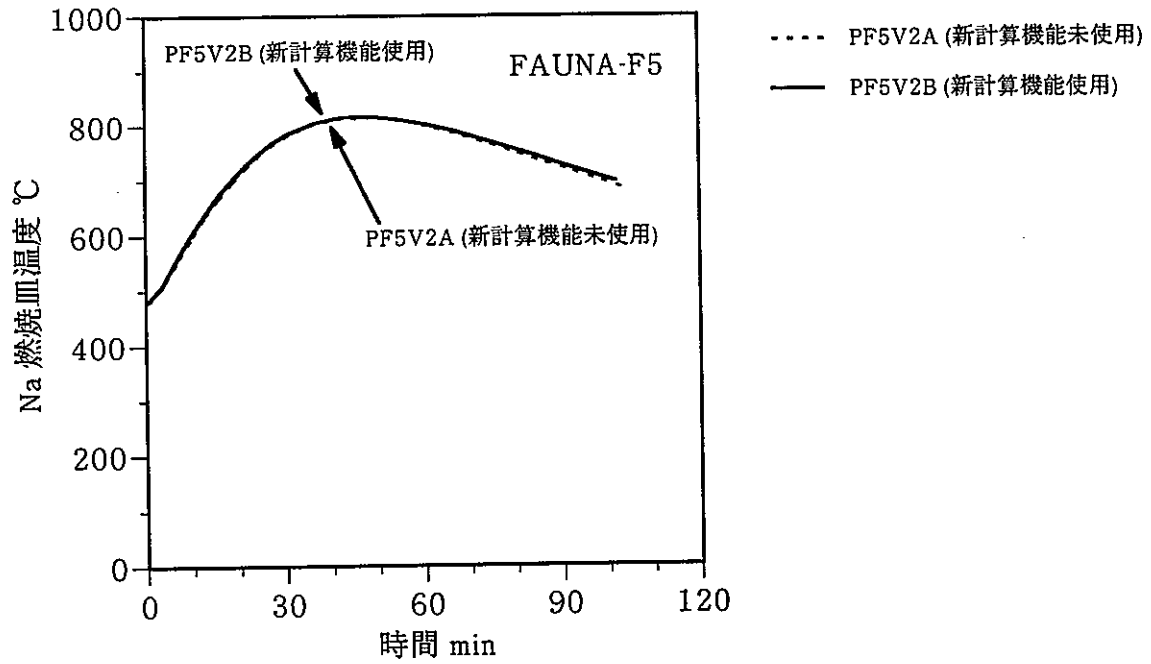


図 5.1-4 燃焼皿温度の比較 (FAUNA)

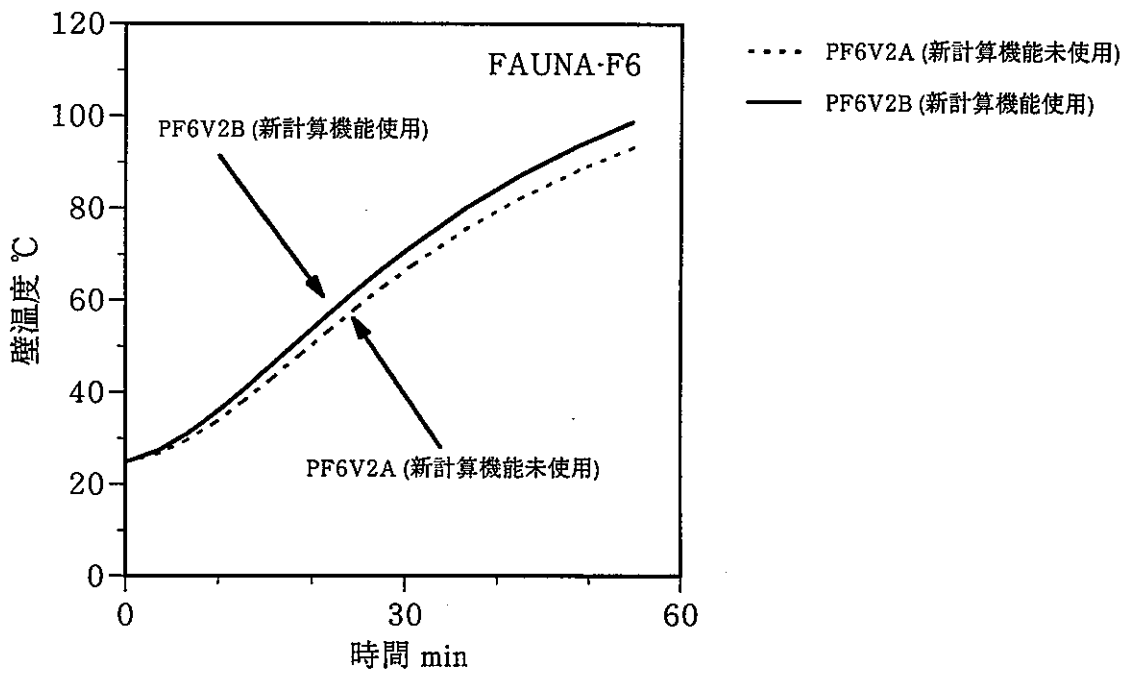
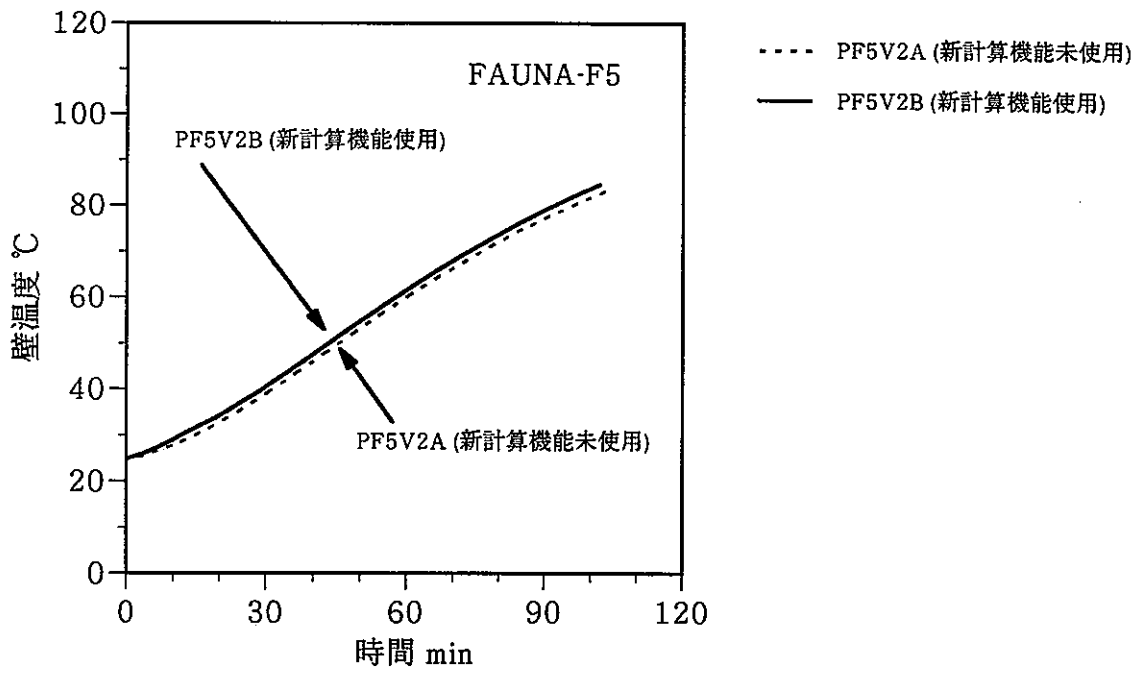


図 5.1-5 容器壁温度の比較 (FAUNA)

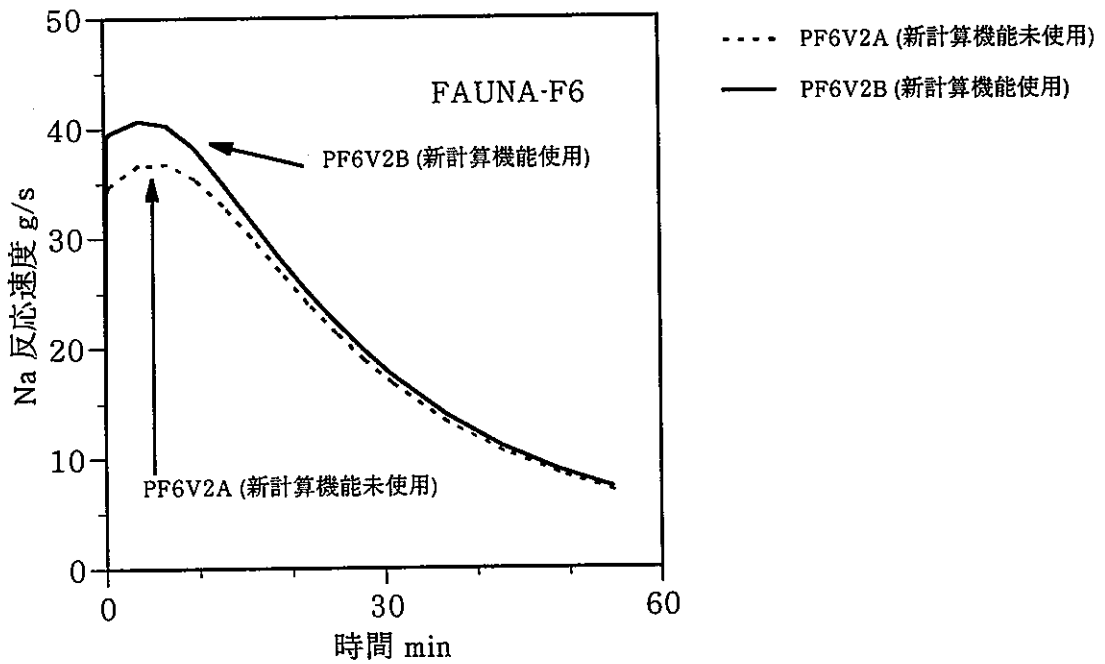
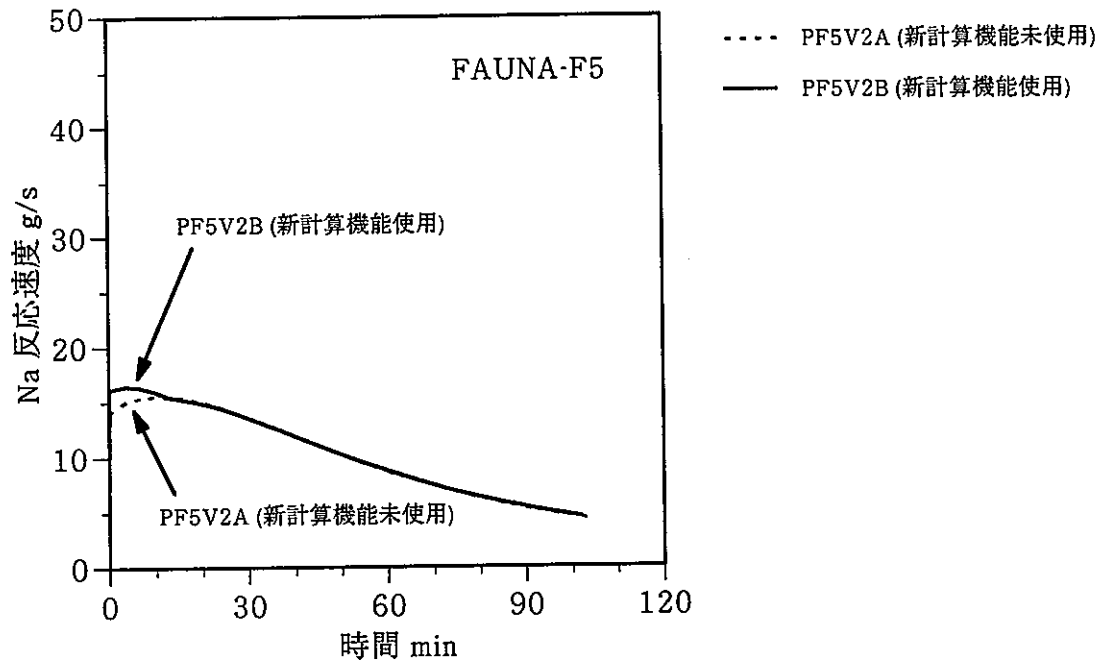


図 5.1-6 ナトリウム反応速度の比較 (FAUNA)

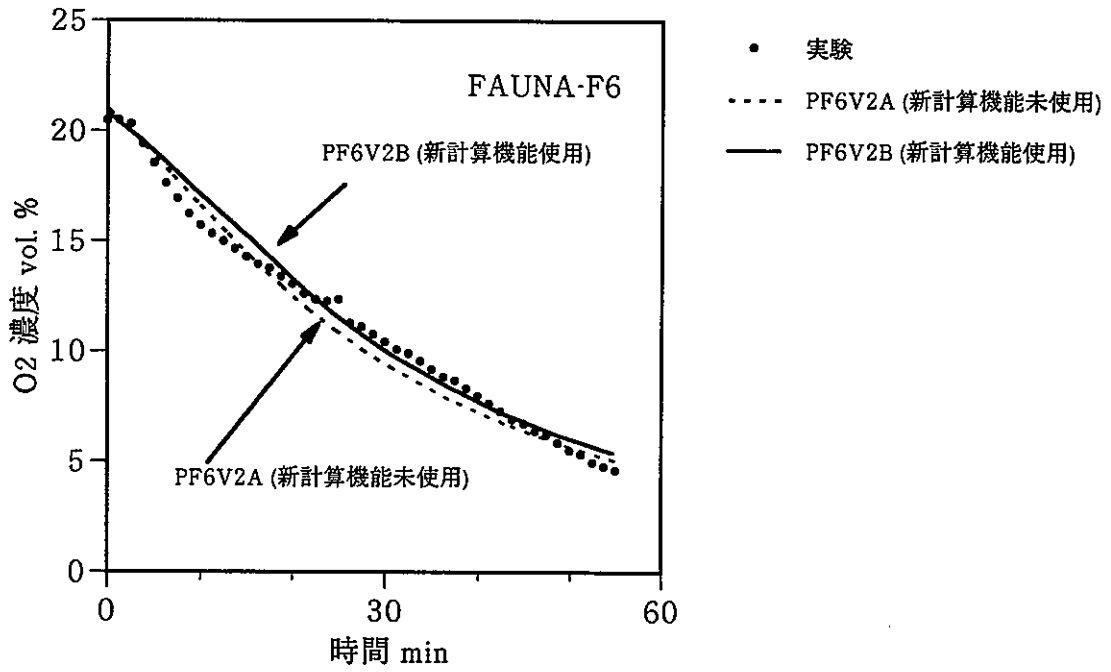
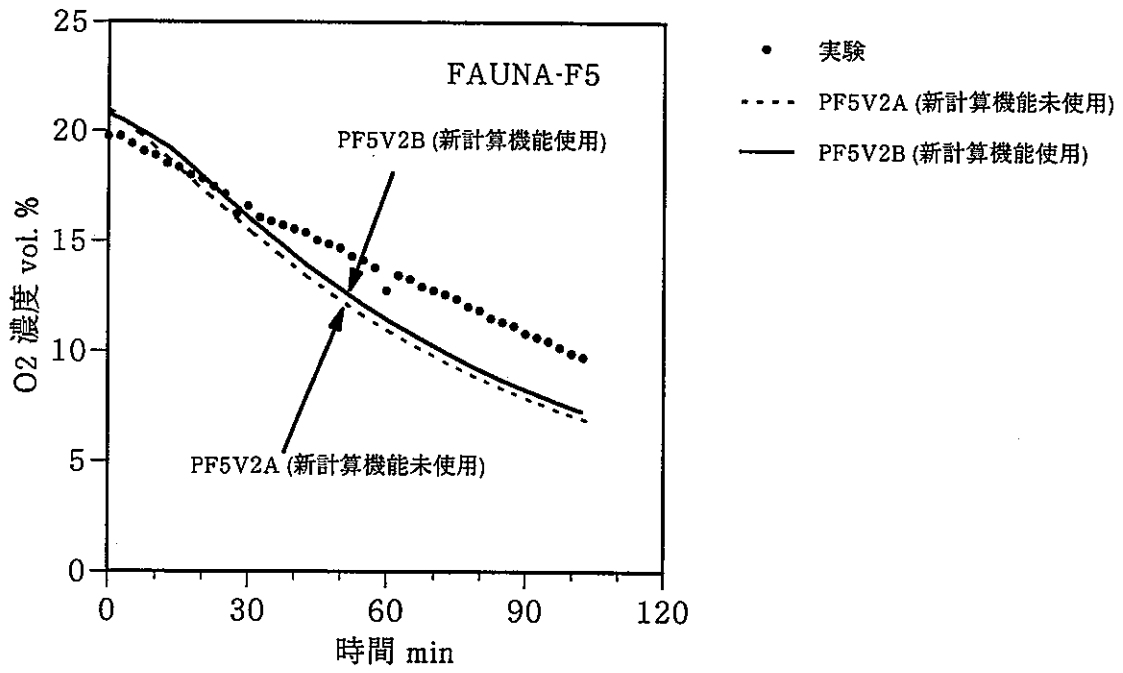


図 5.1-7 酸素濃度の比較 (FAUNA)



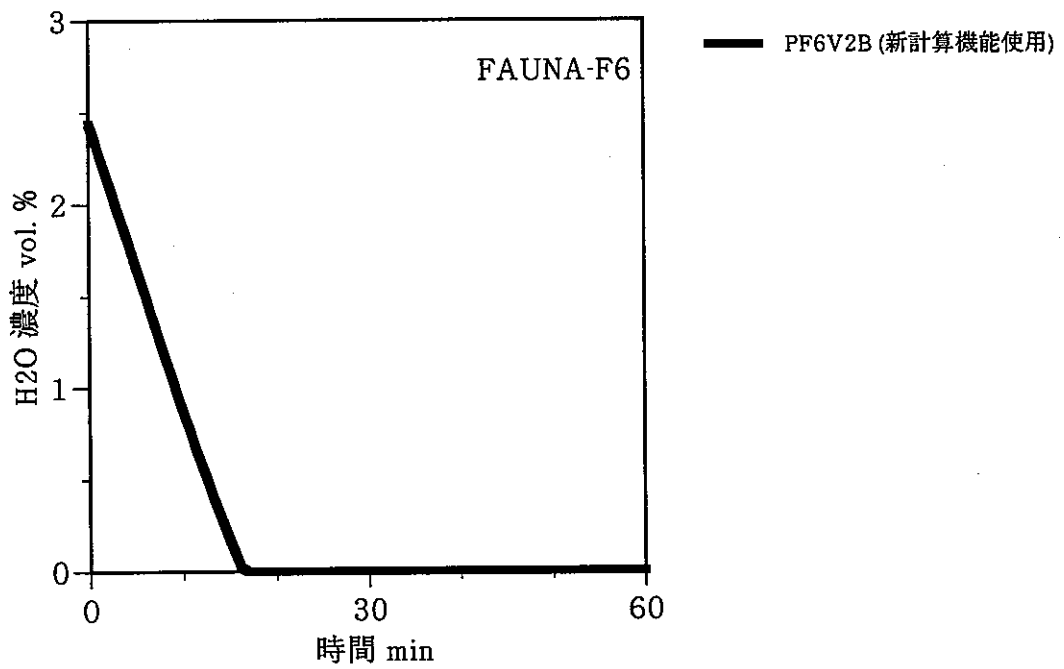
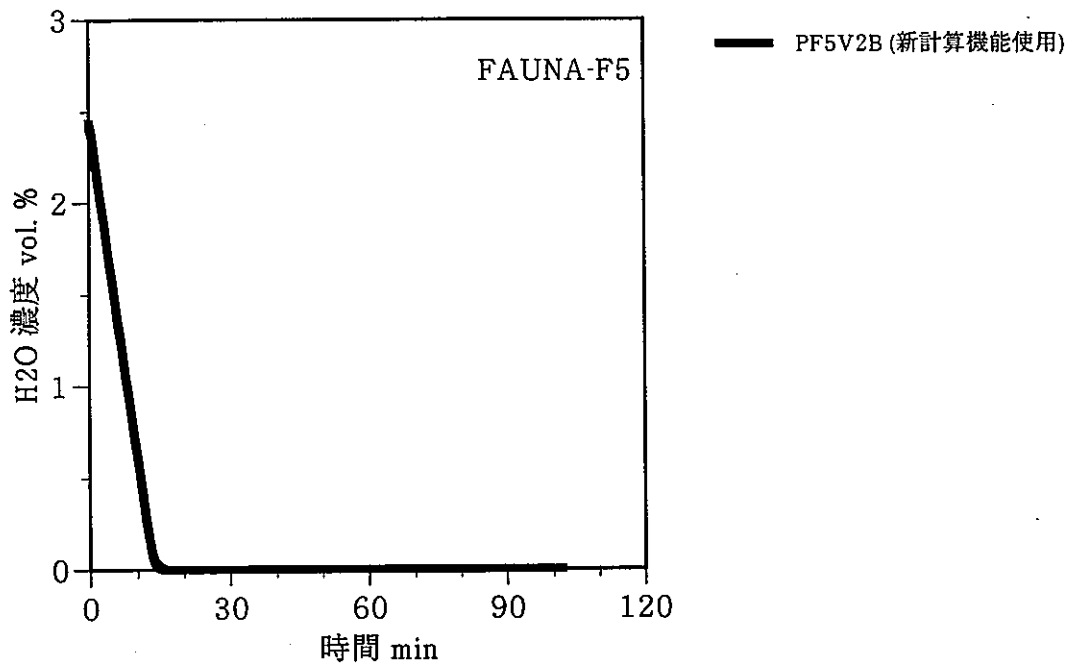


図 5.1-8 湿分濃度 (FAUNA)

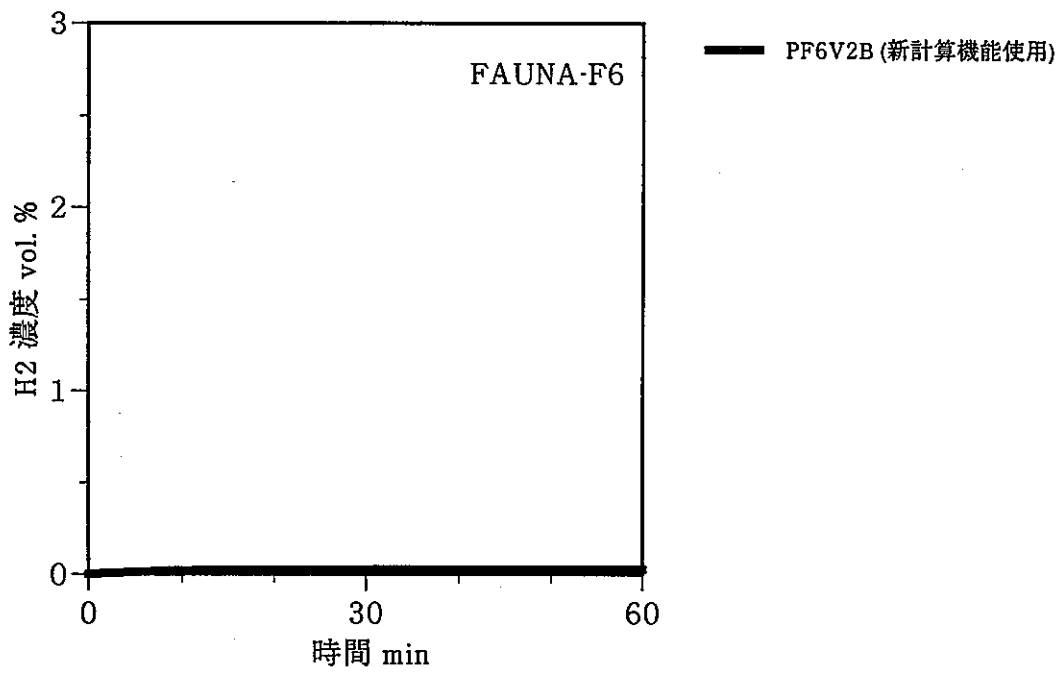
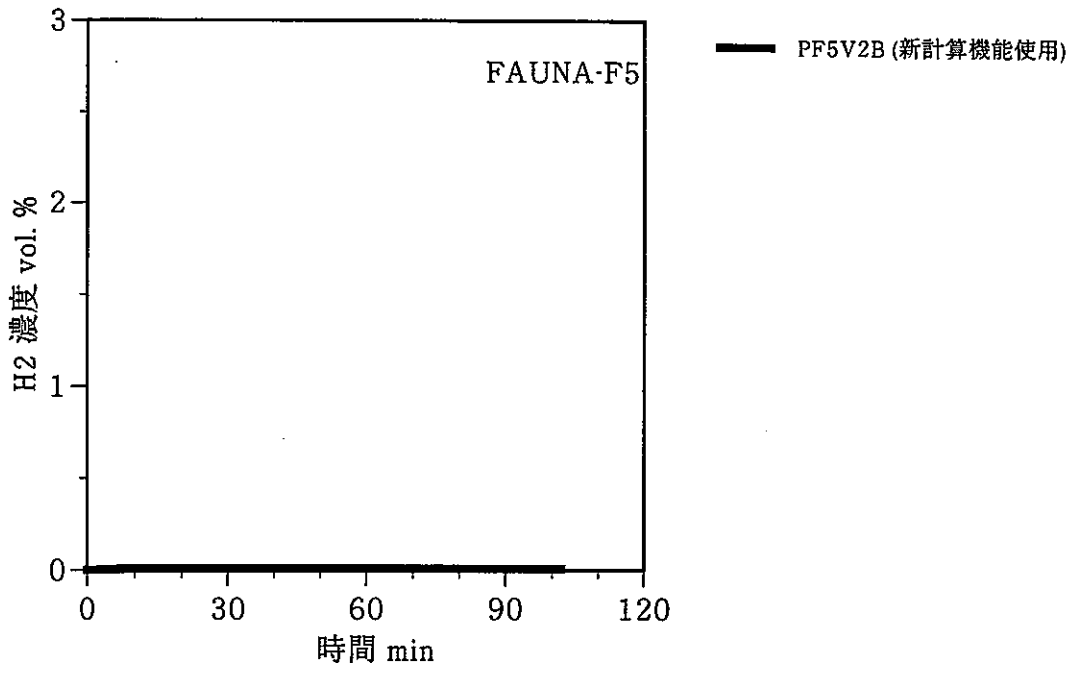


図 5.1-9 水素濃度 (FAUNA)

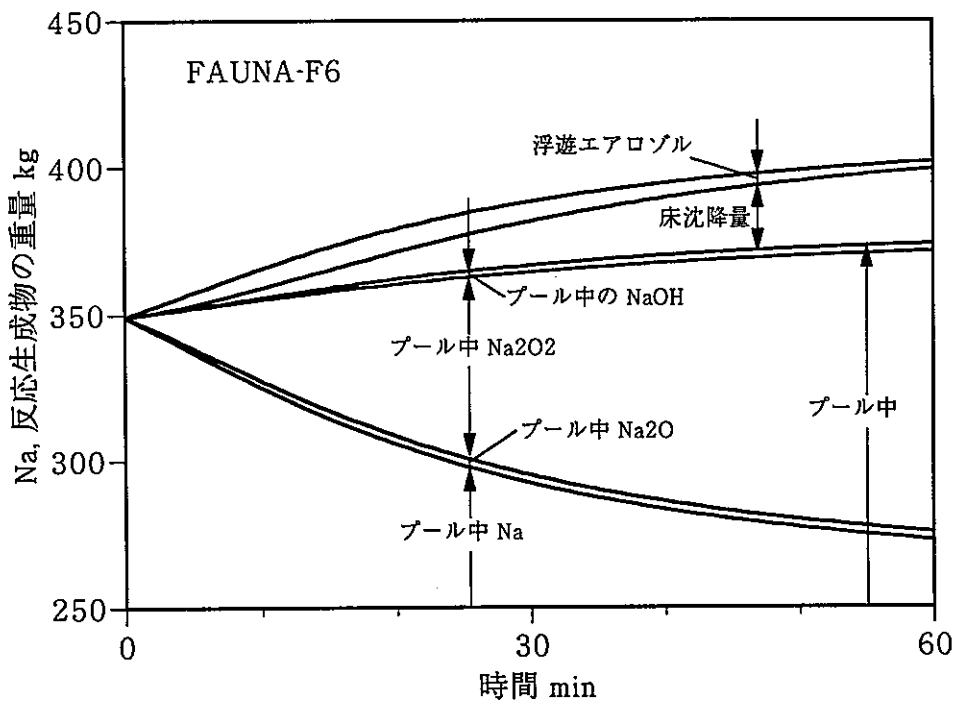
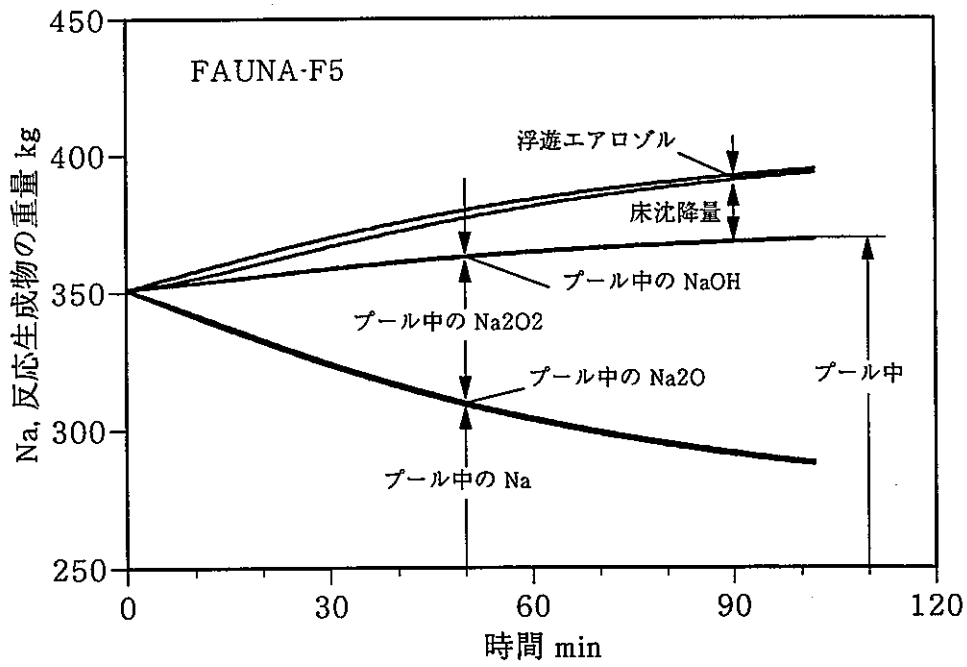


図 5.1-10 ナトリウムと反応生成物の計算結果 (FAUNA)

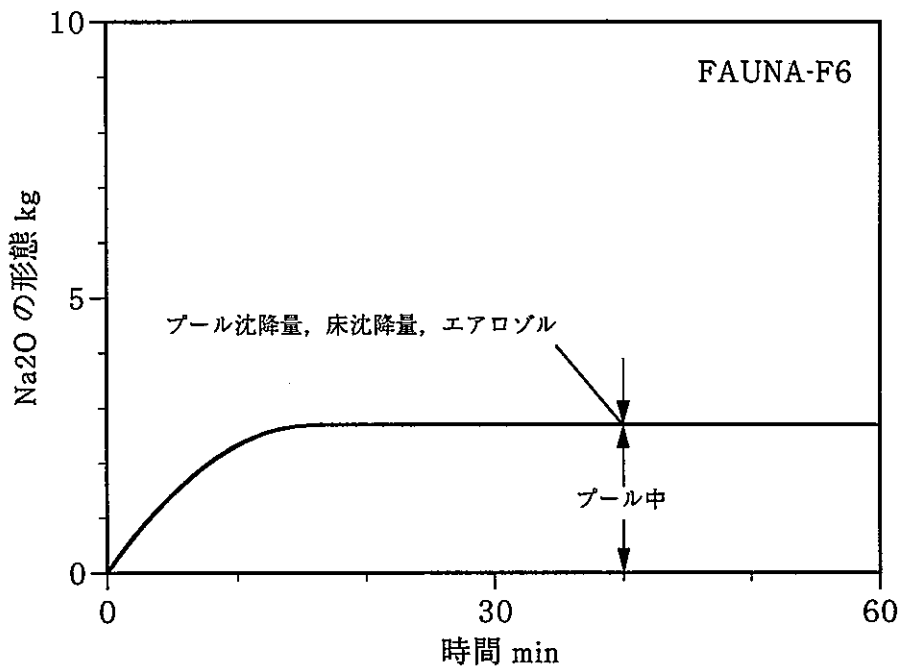
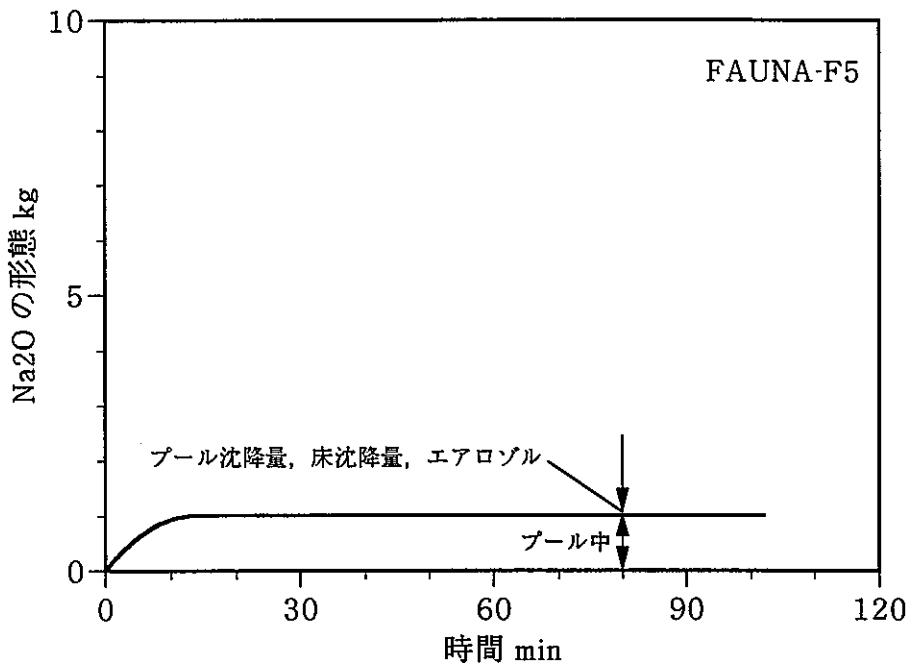


図 5.1-11 酸化ナトリウム形態計算結果 (FAUNA)

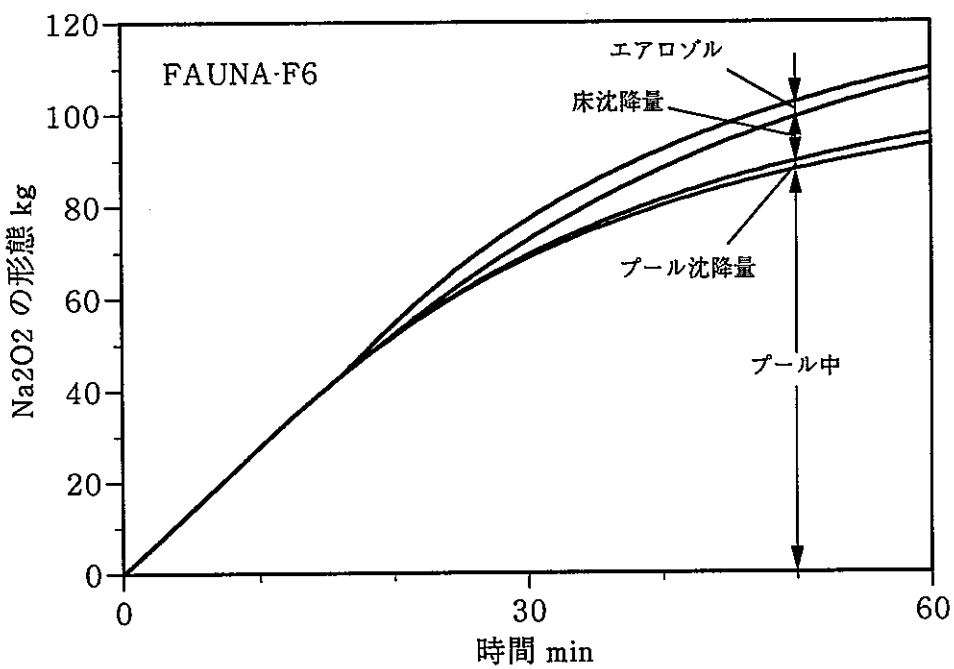
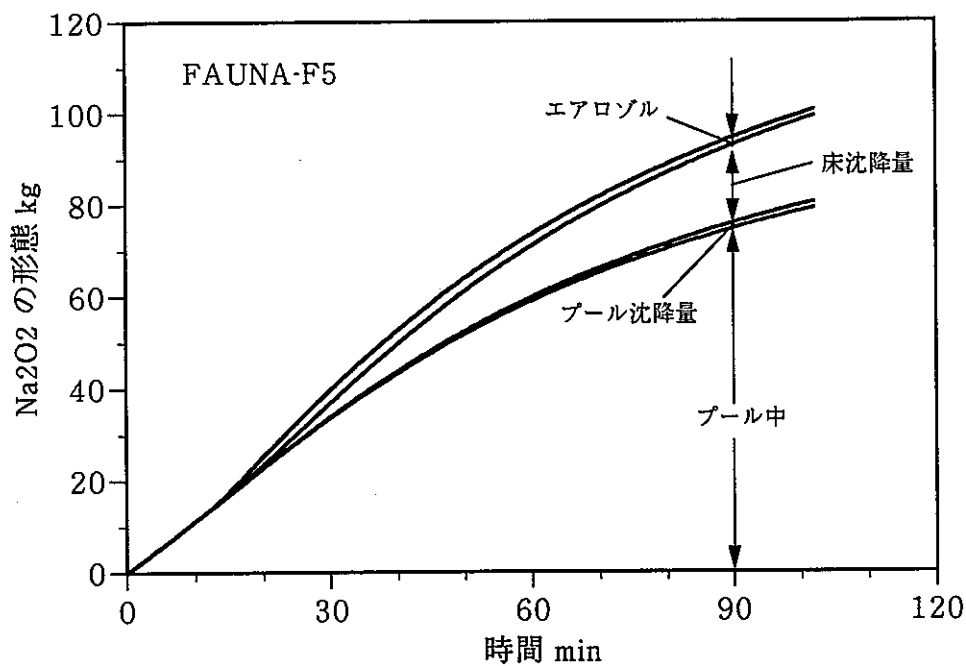


図 5.1-12 過酸化ナトリウム形態計算結果 (FAUNA)

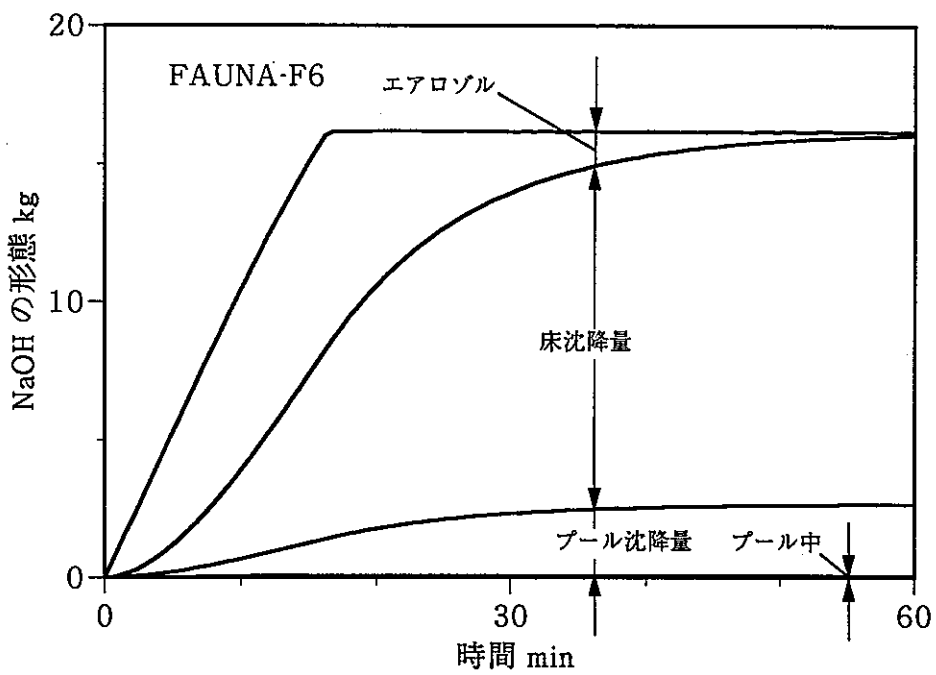
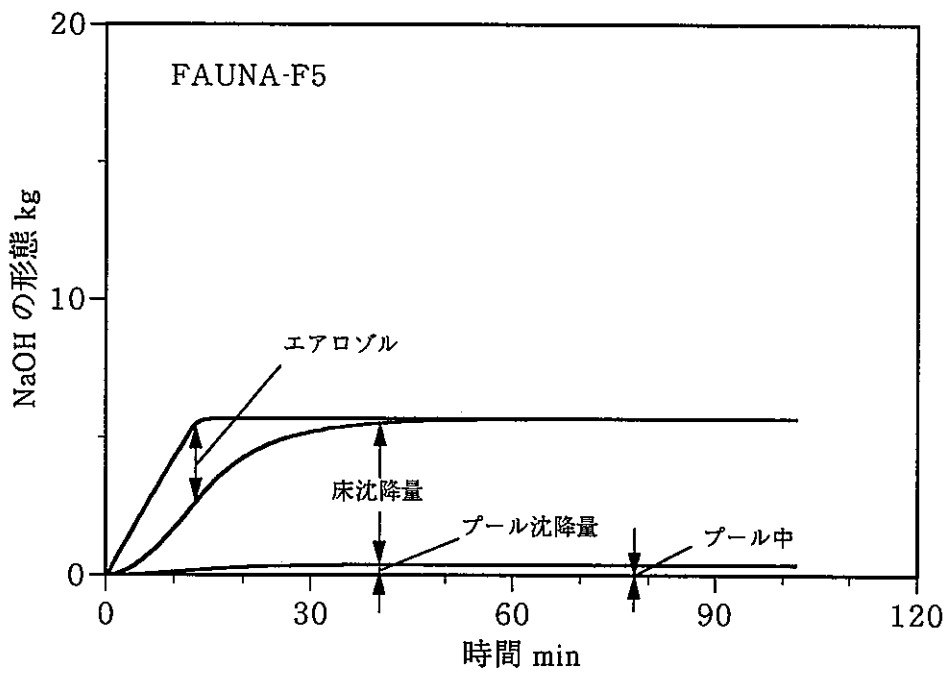


図 5.1-13 水酸化ナトリウム形態結果 (FAUNA)

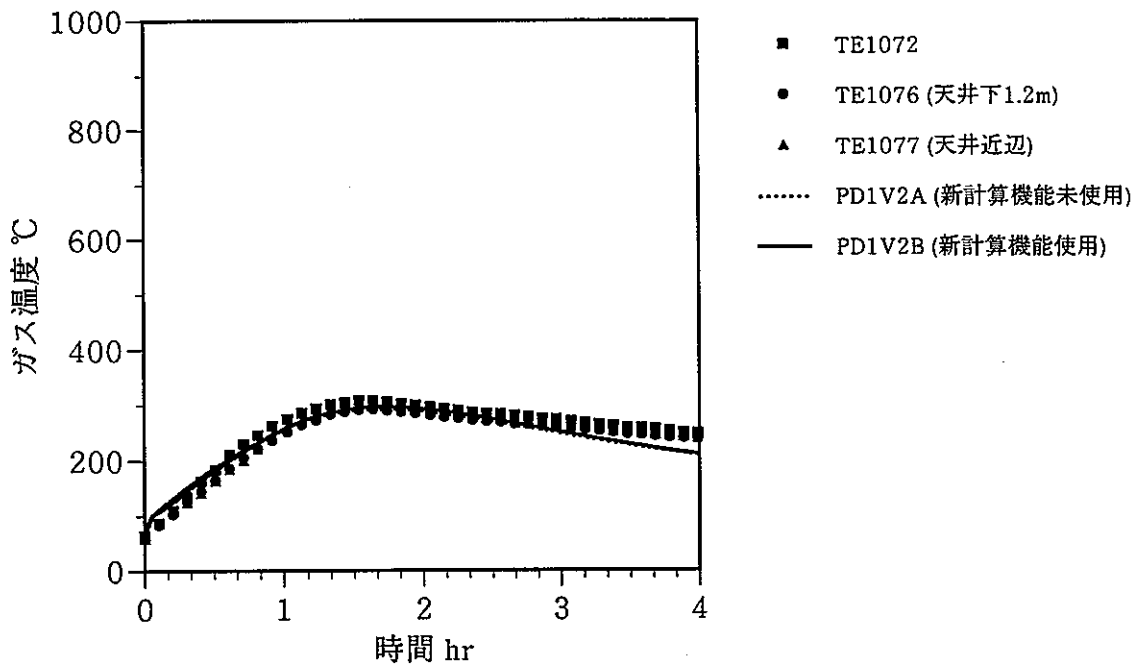


図 5.2-1 ガス温度の比較 (Run-D1)

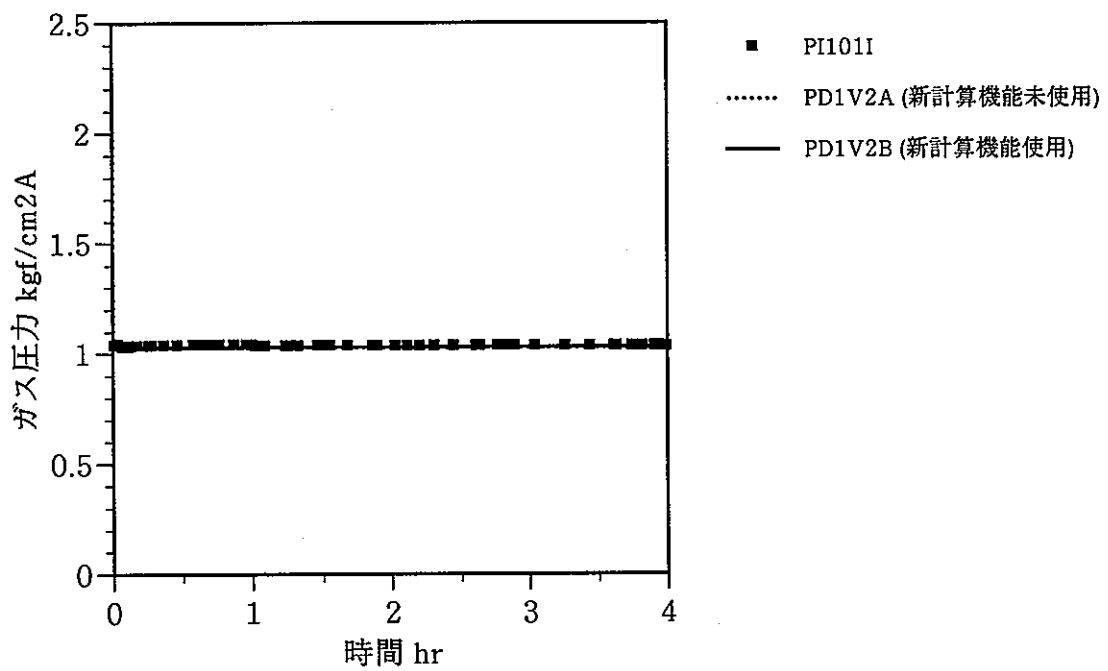


図 5.2-2 ガス圧力の比較 (Run-D1)

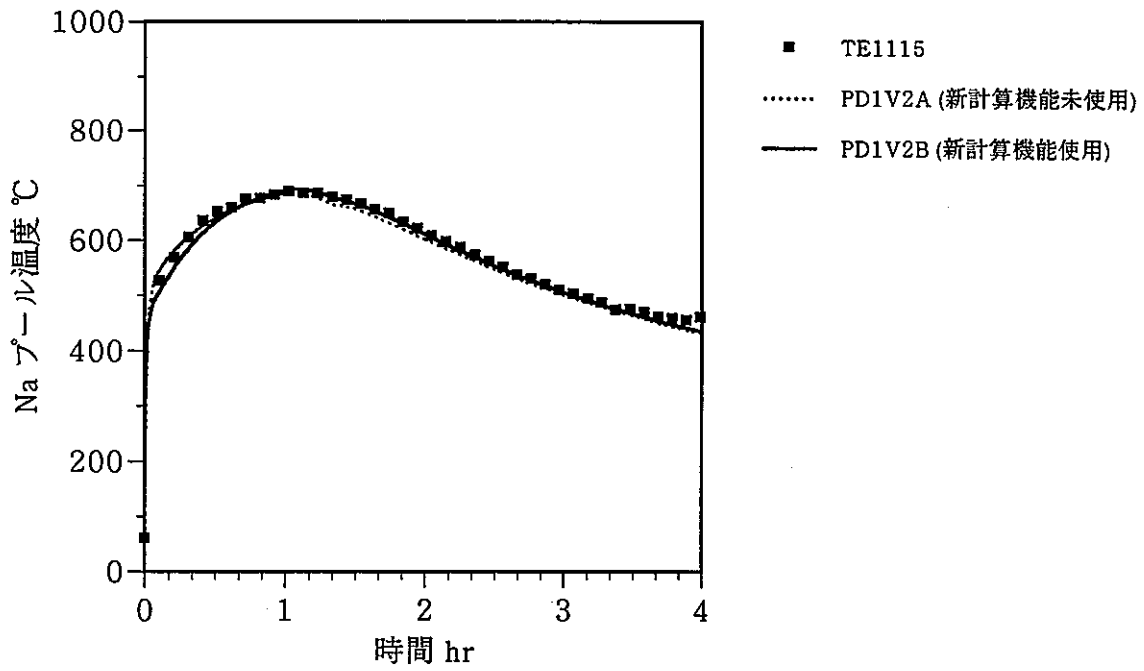


図 5.2- 3 ナトリウムプール温度の比較 (Run-D1)

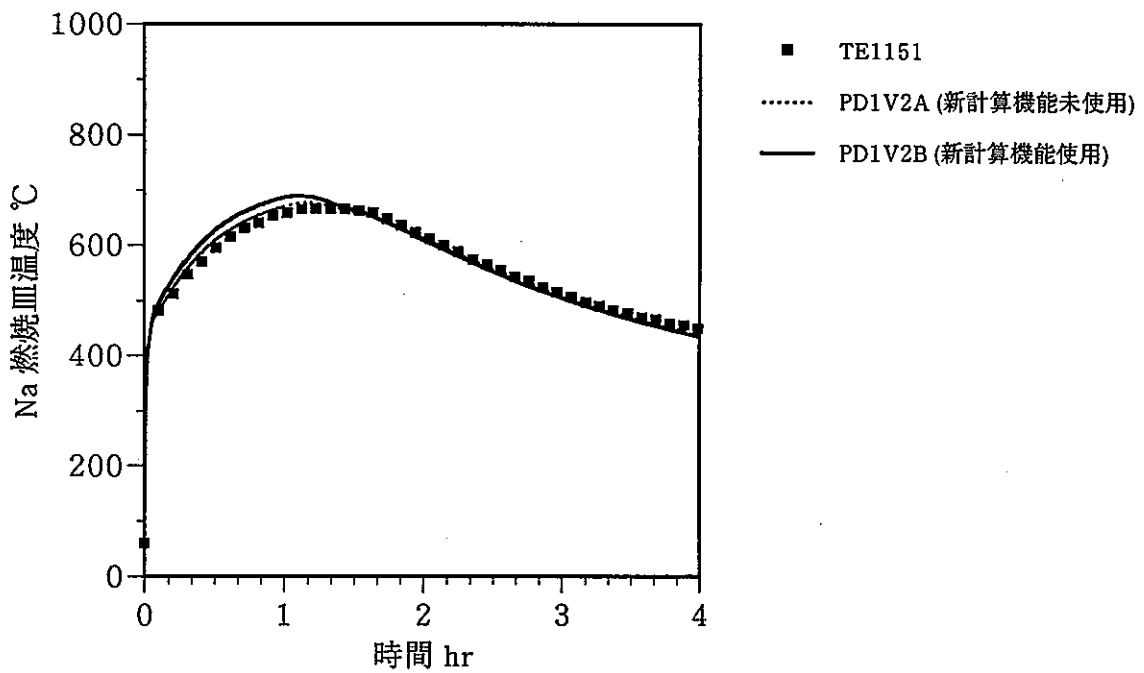


図 5.2- 4 燃焼皿温度の比較 (Run-D1)



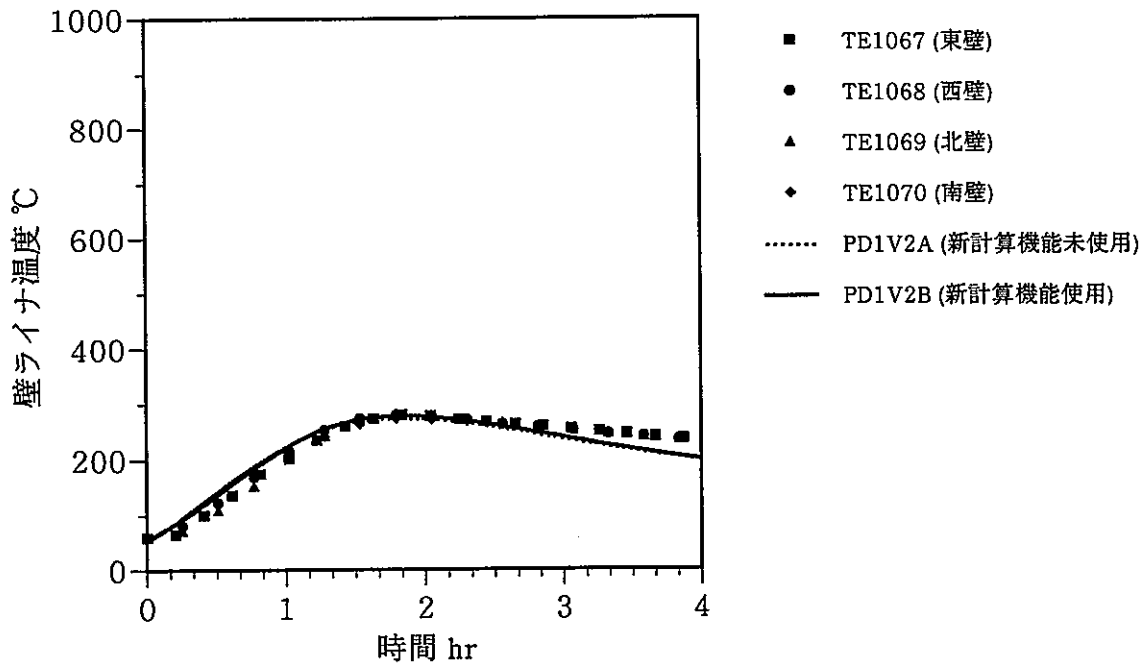


図 5.2-5 容器壁ライナ温度の比較 (Run-D1)

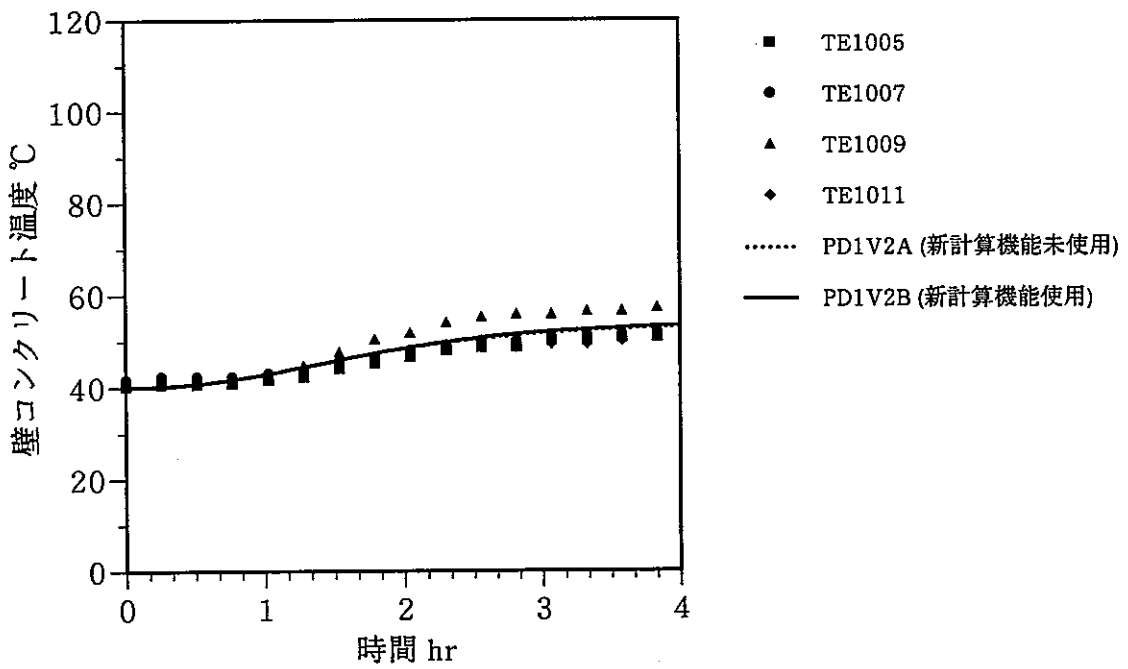


図 5.2-6 容器壁コンクリート温度の比較 (Run-D1)

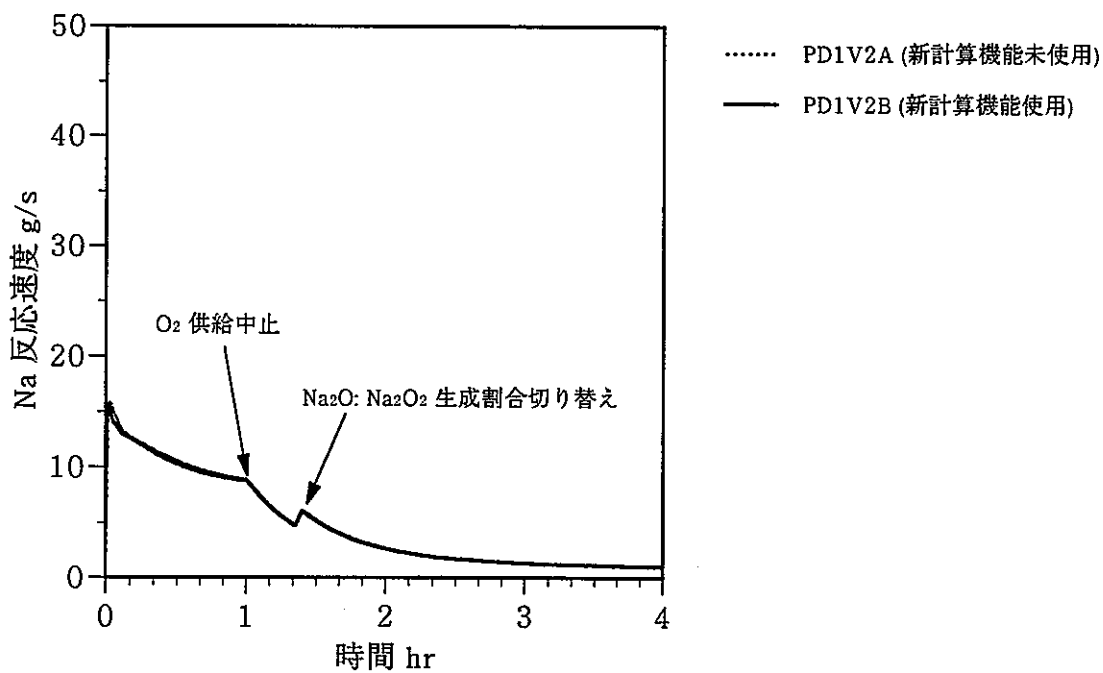


図 5.2-7 ナトリウム反応速度の比較 (Run-D1)

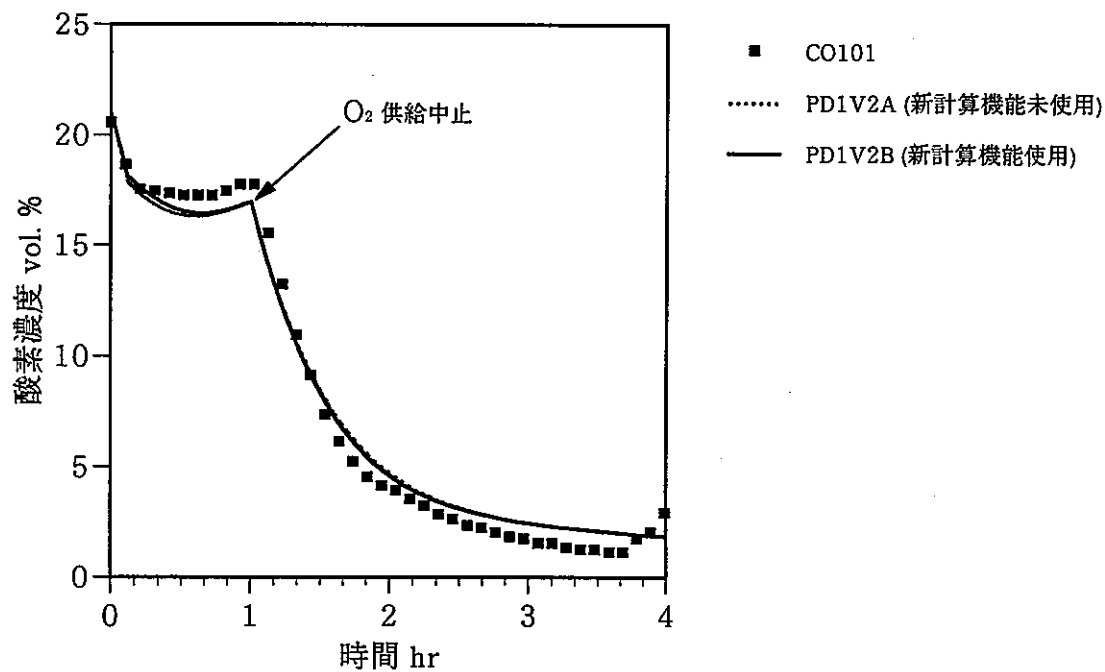


図 5.2-8 酸素濃度の比較 (Run-D1)

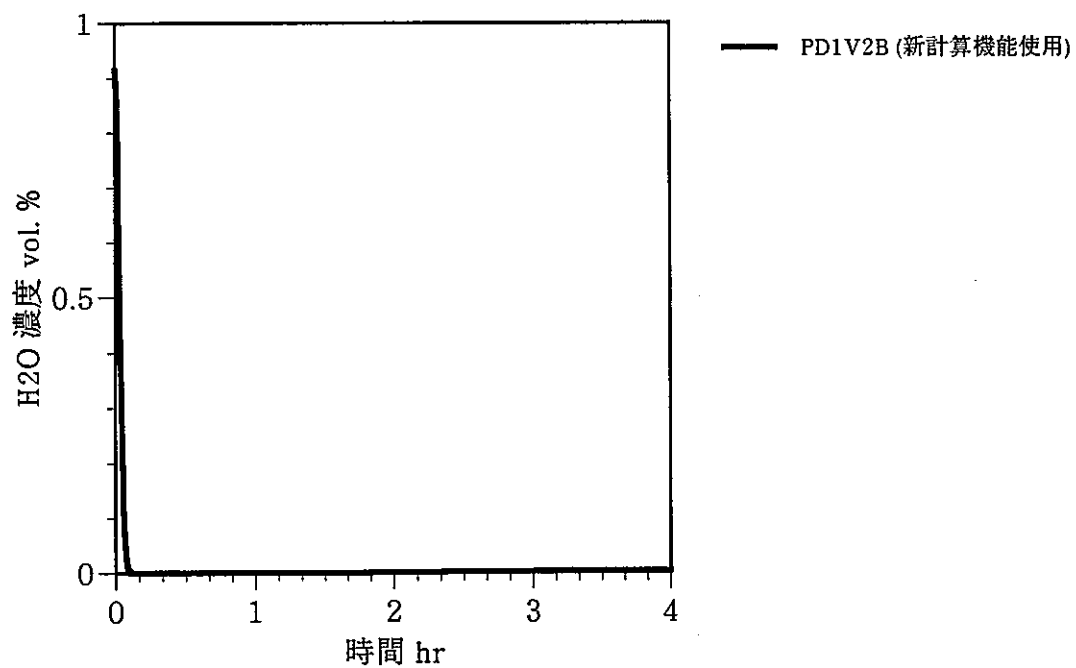


図 5.2-9 湿分濃度 (Run-D1: PD1V2B)

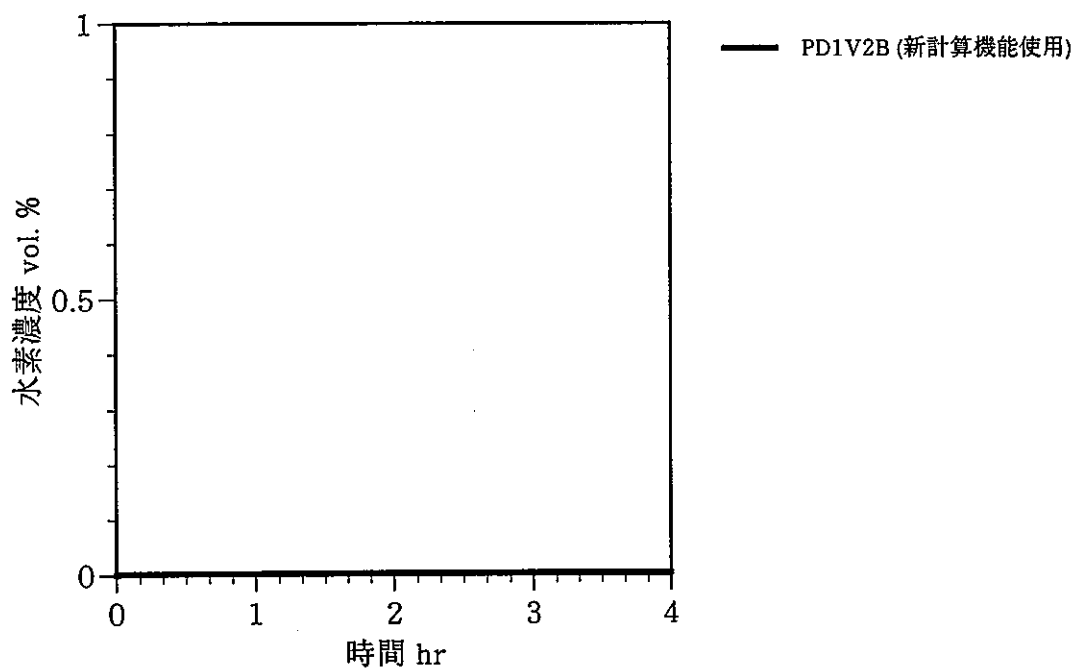


図 5.2-10 水素濃度 (Run-D1: PD1V2B)

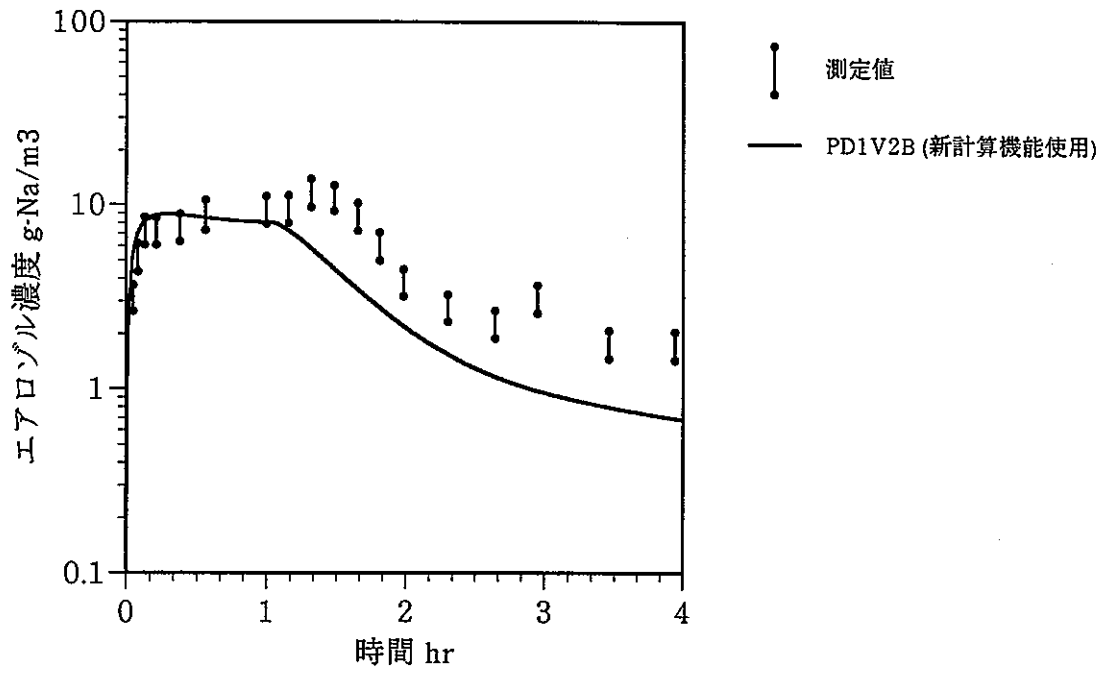


図 5.2-11 エアロゾル濃度 (Run-D1: PD1V2B)

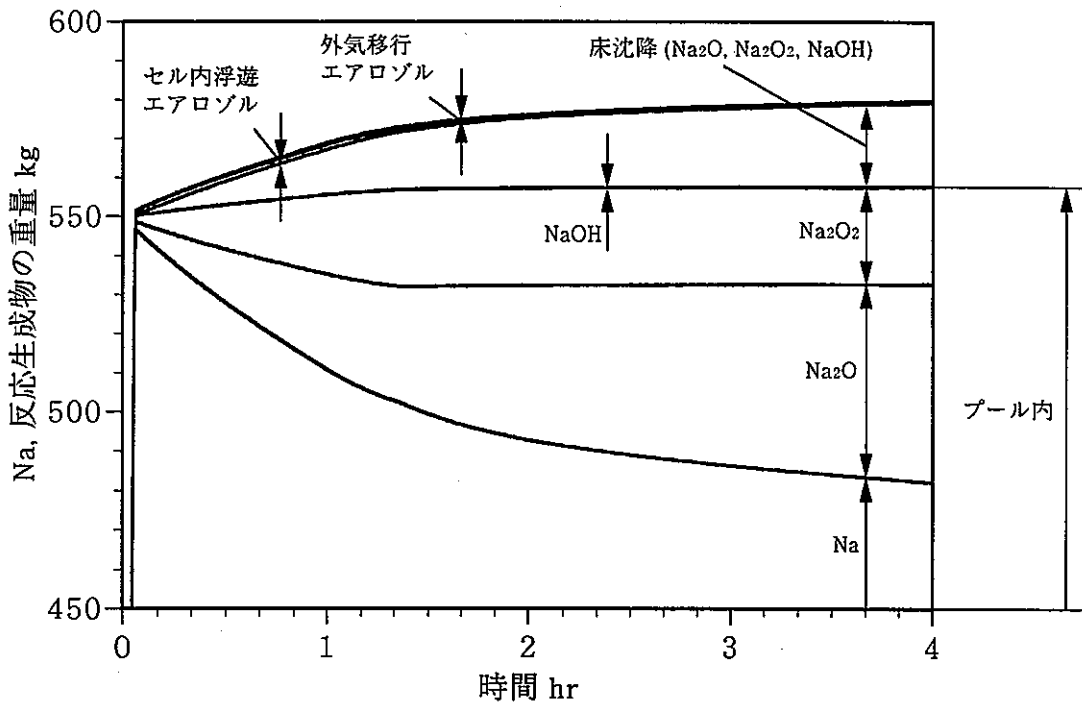


図 5.2-12 ナトリウムと反応生成物の計算結果 (Run-D1: PD1V2B)

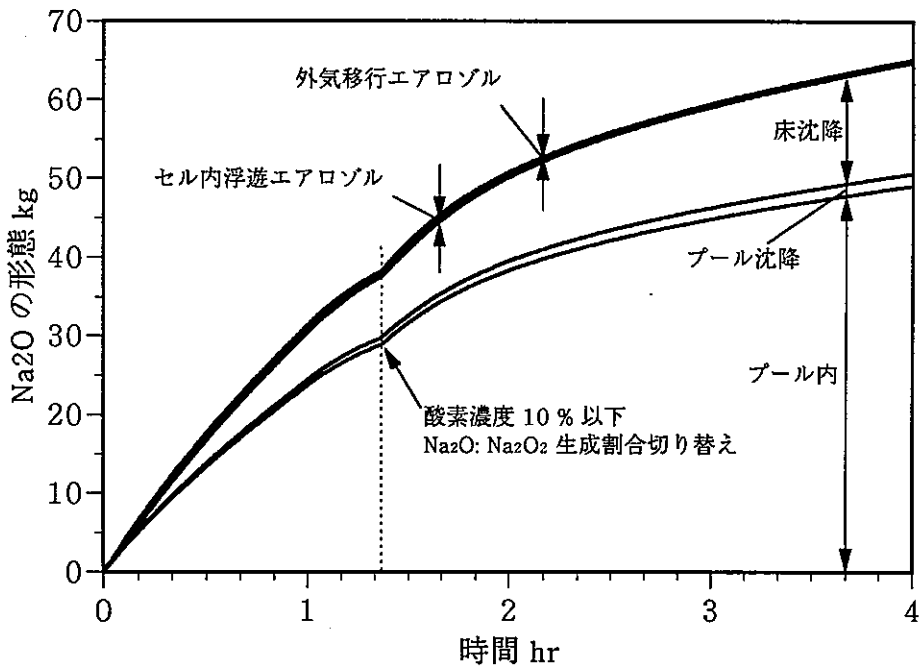


図 5.2-13 酸化ナトリウム形態計算結果 (Run-D1: PD1V2B)

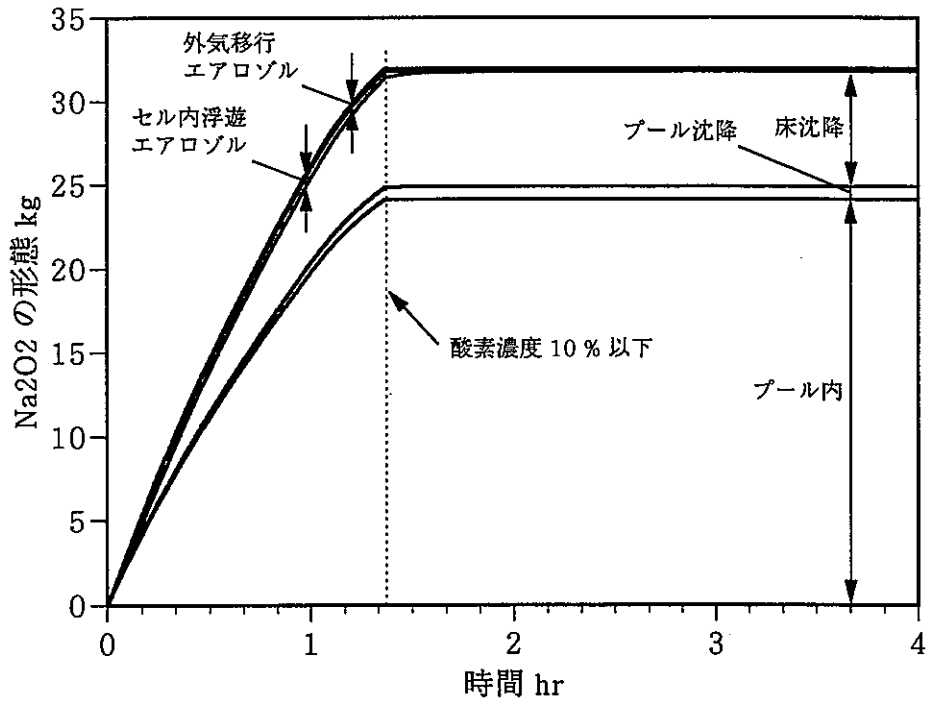


図 5.2-14 過酸化ナトリウム形態計算結果 (Run-D1: PD1V2B)

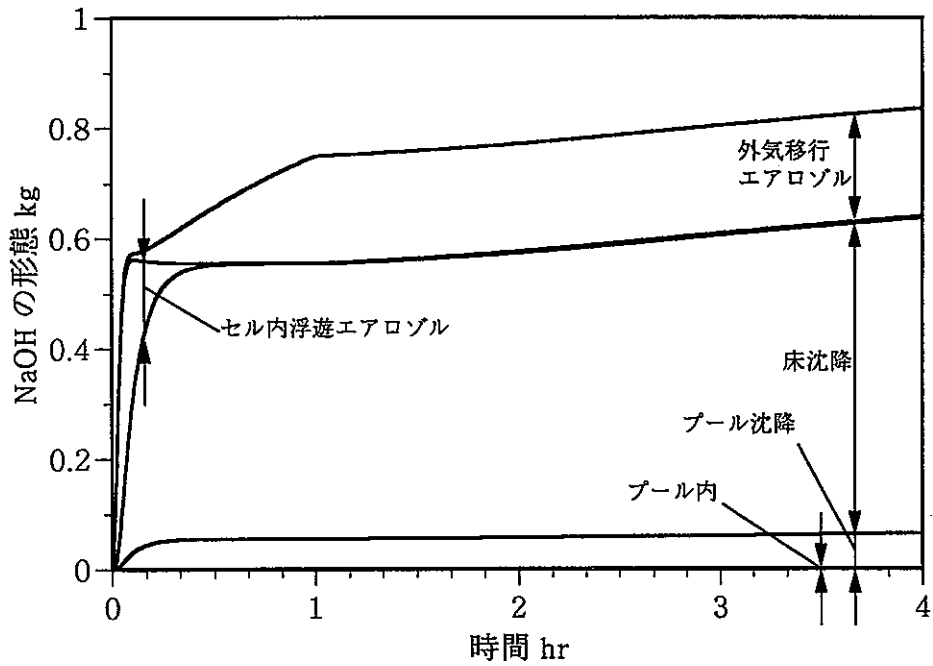


図 5.2-15 水酸化ナトリウム形態計算結果 (Run-D1: PD1V2B)

## 6 パラメータ計算

### 6.1 パラメータの設定

ナトリウム燃焼計算の結果に影響が大きいと考えられる計算上のパラメータについて、その効果を把握するために実施したパラメータ計算の結果をまとめる。パラメータ計算の実施にあたって、以下の方針とした。

- ① 実験検証計算とも比較参照できるように、実験検証の計算の一つをリファレンスとした。ここでは、FAUNA-F5 試験を取り上げることにした。
- ② 以下の3つの計算上のパラメータを検討した。
  - 1) ナトリウムと酸素の反応生成物割合
  - 2) 初期湿分濃度
  - 3) プール-ガスのふく射係数

これらの計算では、基準パラメータを実験検証計算の FAUNA-F5 の新機能使用計算とすることとしたが、実験検証の項の PF5V2B は初期湿分濃度を任意に 80 %RH と誇張した値としたため、本パラメータ計算では、初期湿分濃度のみ 30 %RH と変えて基準ケースとすることにした。

各パラメータについては、それらの効果が十分に現れるように範囲を定めた(表 6.1-1, 表 6.1-2)。ここで、基準ケースは PF5V2B2 である。ただし、ここで検討するパラメータの範囲は実験検証の目的ではなく、それらの効果を把握する目的としていることに注意されたい。各々の計算結果について次節にまとめる。

### 6.2 パラメータ解析の結果

#### (1) ナトリウムと酸素の反応生成物割合

反応生成物割合 ( $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2$ ) を基準ケース (PF5V2B2) の 0:100 に対して、60:40 (ケース PF5V2B4)、100:0 (ケース PF5V2B5) と変えた場合の計算結果を表 6.2-1、表 6.2-4、図 6.2-1 ~ 図 6.2-6 に示す。

計算結果を比較すると、圧力と温度について  $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 100:0$  (ケース PF5V2B5) が最も高く、次いで 60:40 (ケース PF5V2B4)、0:100 (ケース PF5V2B2) の順である。ナトリウム燃焼は燃焼面に供給される酸素フラックスにより律速されると仮定した計算を行っていることから、反応生成物として  $\text{Na}_2\text{O}$  を仮定することによりナトリウムの消費速度が大きくなる。また、単位酸素量に関し  $\text{Na}_2\text{O}$  生成反応の方が発熱量が大きいため、温度・圧力の上昇も大きくなると説明できる。

#### (2) 初期湿分濃度

初期湿分濃度を基準ケース (PF5V2B2) の 30 %RH に対して、80 %RH (ケース PF5V2B)、0 %RH (ケース PF5V2B3) と変えて計算を行った。80 %RH (ケース PF5V2B) は、4章の FAUNA 実験検証の項に示した計算ケースである。計算結果を表 6.2-2、表 6.2-4、図 6.2-7 ~ 図 6.2-13 に示す。計算結果を比較すると、このサーベイ範囲において圧力や温度に与える効果は小さいとすることができる。

### (3) プールーガスのふく射係数

プールーガスのふく射係数については、基準ケースではガスを黒体（エアロゾルが多量にある状態）と仮定し、プール（燃焼面）ふく射率として 0.65 を採用している。

ナトリウム燃焼火炎のふく射率を直接測定することは困難であるが、不純物によってナトリウム表面に形成された反応生成物のふく射率が 0.65 であるという報告<sup>6)</sup>、ナトリウムプール燃焼解析で、プール面のふく射率を 0.65 とすることで実験と一致するという報告<sup>7),8)</sup>がされている。また、本資料の解析結果からも 0.65 が妥当と考えられる。

パラメータ計算では、プールーガスのふく射係数を基準ケース (PF5V2B2) の 0.65 に対して、0.4 (ケース PF5V2B6)、0.9 (ケース PF5V2B7) と変えて計算を行った。計算結果を表 6.2-3、表 6.2-4、図 6.2-14 ~ 図 6.2-20 に示す。

計算結果を比較すると、ふく射係数を小さく 0.4 (ケース PF5V2B6) とするとプールの放熱が抑制されるためナトリウム温度が上昇し、ふく射係数を大きく 0.9 (ケース PF5V2B7) とするとナトリウム温度が下がることが分かる。ナトリウム温度以外の計算結果に対する影響は比較的小さい。



表 6.1-1 解析パラメータ ASSCOPS Version 2.0 (新計算機能使用)

成分比 Na <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	湿分 %	プール → ガスへのふく射係数
0/100 ref.	0	0.4
60/40	30 ref.	0.65 ref.
100/0	80	0.9

表 6.1-2 解析パラメータの組合せ

ケース名	成分比 Na <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	湿分 %	プール → ガスへのふく射係数
PF5V2B	0/100	80	0.65
PF5V2B2 ref.	0/100	30	0.65
PF5V2B3	0/100	0	0.65
PF5V2B4	60/40	30	0.65
PF5V2B5	100/0	30	0.65
PF5V2B6	0/100	30	0.4
PF5V2B7	0/100	30	0.9

## パラメータ計算結果 (FAUNA F5)

表 6.2-1 ナトリウム-酸素反応生成物比 (Na<sub>2</sub>O: Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

		PF5V2B2 ref.	PF5V2B4	PF5V2B5
成分比 Na <sub>2</sub> O/ Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		0 %/ 100 %	60 %/ 40 %	100 %/ 0 %
Na 反応速度 g/sec		4.5 ~ 15.3	6.1 ~ 23.8	7.9 ~ 37.1
Na プール温度 °C		480 ~ 820	480 ~ 935	480 ~ 1070
セル内 雰囲気	ガス温度 °C	25 ~ 123	25 ~ 147	25 ~ 178
	ガス圧力 kg/cm <sup>2</sup>	1.033 ~ 1.208	1.033 ~ 1.284	1.033 ~ 1.386
	酸素濃度 %	21 ~ 7.1	21 ~ 6.3	21 ~ 5.6
	セル壁温度 °C	25 ~ 83	25 ~ 104	25 ~ 133

表 6.2-2 初期湿分濃度に関するパラメータ計算結果

		PF5V2B3	PF5V2B2 ref.	PF5V2B
湿分 %		0	30	80
Na 反応速度 g/sec		4.5 ~ 15.3	4.5 ~ 15.3	4.5 ~ 16.4
Na プール温度 °C		480 ~ 819	480 ~ 820	480 ~ 820
セル内 雰囲気	ガス温度 °C	25 ~ 122	25 ~ 123	25 ~ 124
	ガス圧力 kg/cm <sup>2</sup>	1.033 ~ 1.216	1.033 ~ 1.208	1.033 ~ 1.195
	酸素濃度 %	21 ~ 6.9	21 ~ 7.1	21 ~ 7.2
	セル壁温度 °C	25 ~ 83	25 ~ 83	25 ~ 85

表 6.2-3 プール-ガスふく射に関するパラメータ計算結果

		PF5V2B6	PF5V2B2 ref.	PF5V2B7
プール → ガスへのふく射係数		0.4	0.65	0.9
Na 反応速度 g/sec		4.5 ~ 15.8	4.5 ~ 15.3	4.5 ~ 15.0
Na プール温度 °C		480 ~ 933	480 ~ 820	480 ~ 746
セル内 雰囲気	ガス温度 °C	25 ~ 122	25 ~ 123	25 ~ 123
	ガス圧力 kg/cm <sup>2</sup>	1.033 ~ 1.187	1.033 ~ 1.208	1.033 ~ 1.221
	酸素濃度 %	21 ~ 6.3	21 ~ 7.1	21 ~ 7.7
	セル壁温度 °C	25 ~ 81	25 ~ 83	25 ~ 85

表 6.2-4 パラメータ計算によるプールのナトリウムと反応生成物組成計算結果 (FAUNA F5)

パラメータ	パラメータの値	Na kg/%	Na <sub>2</sub> O kg/%	Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> kg/%	NaOH kg/%
成分比 Na <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0/100 ref.	288.1/78.0	0.2/0.05	81.1/21.9	0.1/0.03
	60/40	257.9/70.9	57.5/15.8	48.2/13.3	0.1/0.03
	100/0	216.0/60.8	139.0/39.1	0/0	0.1/0.03
湿分 %	0	288.4/78.0	0/0	81.2/22.0	0/0
	30 ref.	287.8/78.0	0.2/0.05	81.1/21.9	0.1/0.03
	80	287.5/77.8	1.0/0.3	80.7/21.8	1.2/0.1
プール → ガスへの ふく射	0.4	285.2/77.0	0.2/0.05	84.8/22.9	0.2/0.05
	0.65 ref.	288.1/78.0	0.2/0.05	81.1/21.9	0.1/0.03
	0.9	290.3/78.7	0.2/0.05	78.2/21.2	0.2/0.05

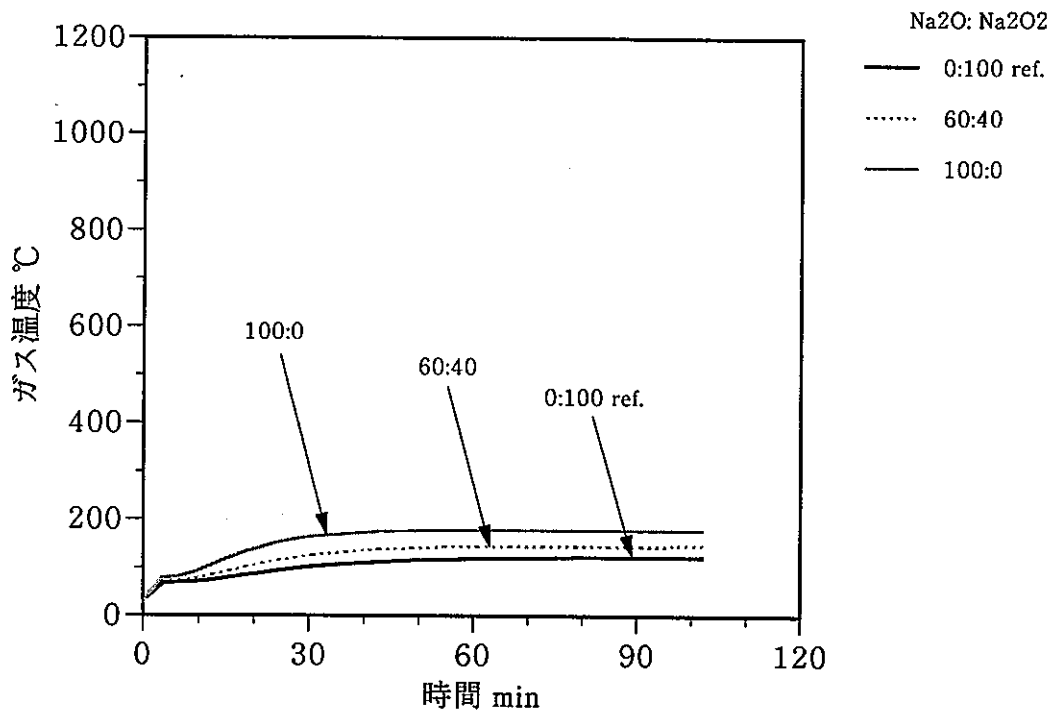


図 6.2- 1 ガス温度の比較 (Na<sub>2</sub>O: Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)

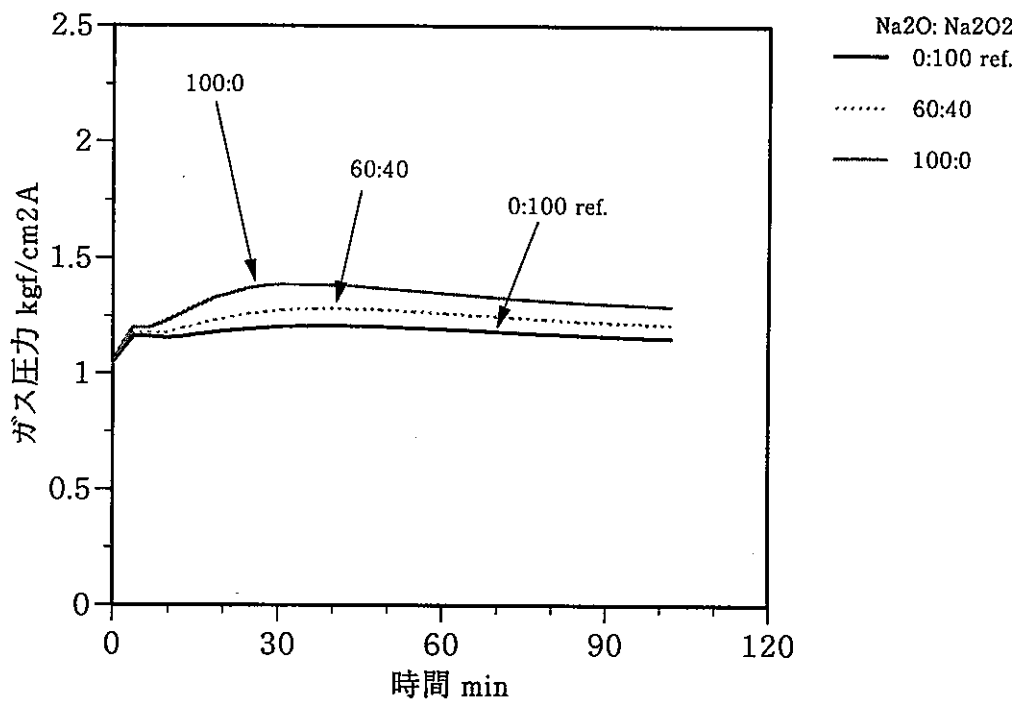


図 6.2- 2 ガス圧力の比較 (Na<sub>2</sub>O: Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)

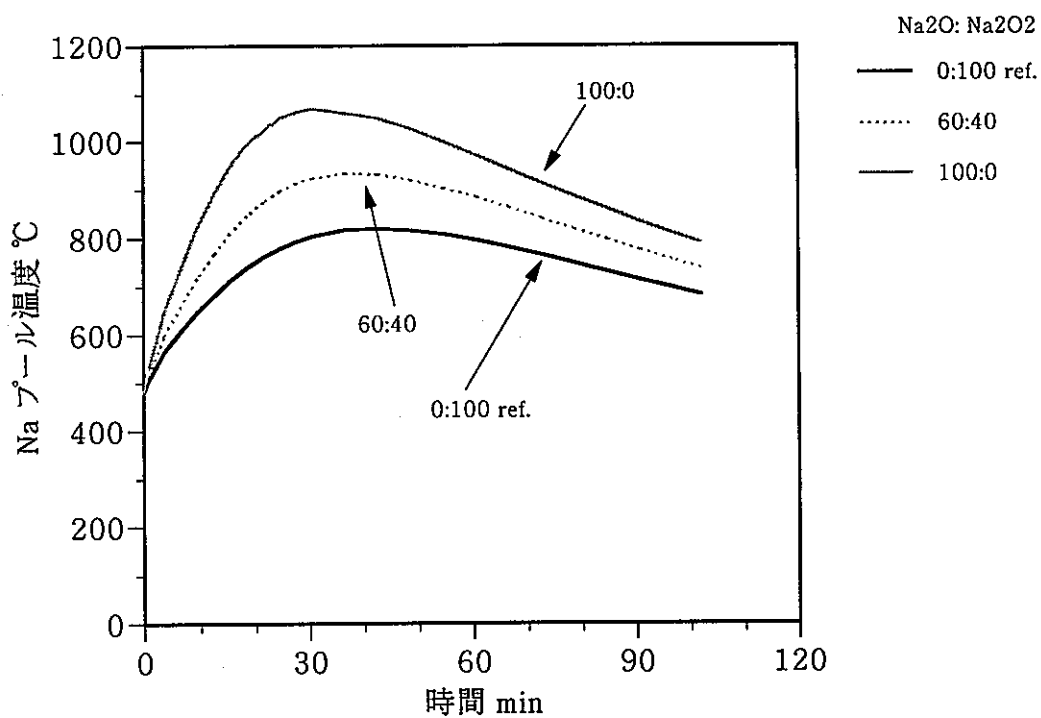


図 6.2-3 プール温度の比較 (Na<sub>2</sub>O: Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)

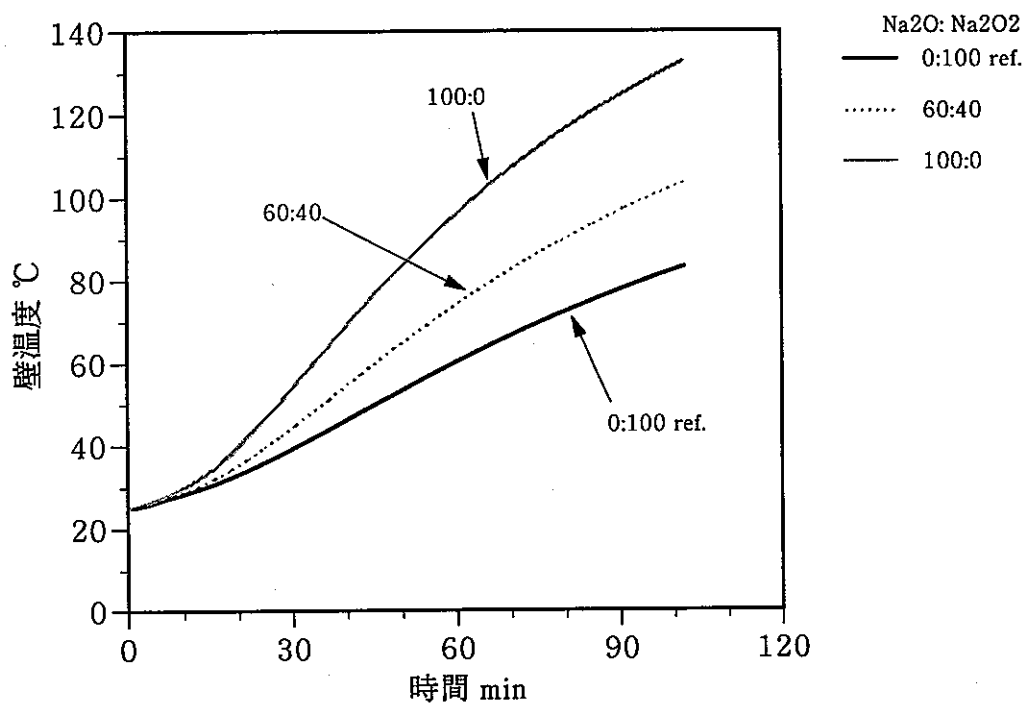


図 6.2-4 容器壁温度の比較 (Na<sub>2</sub>O: Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)

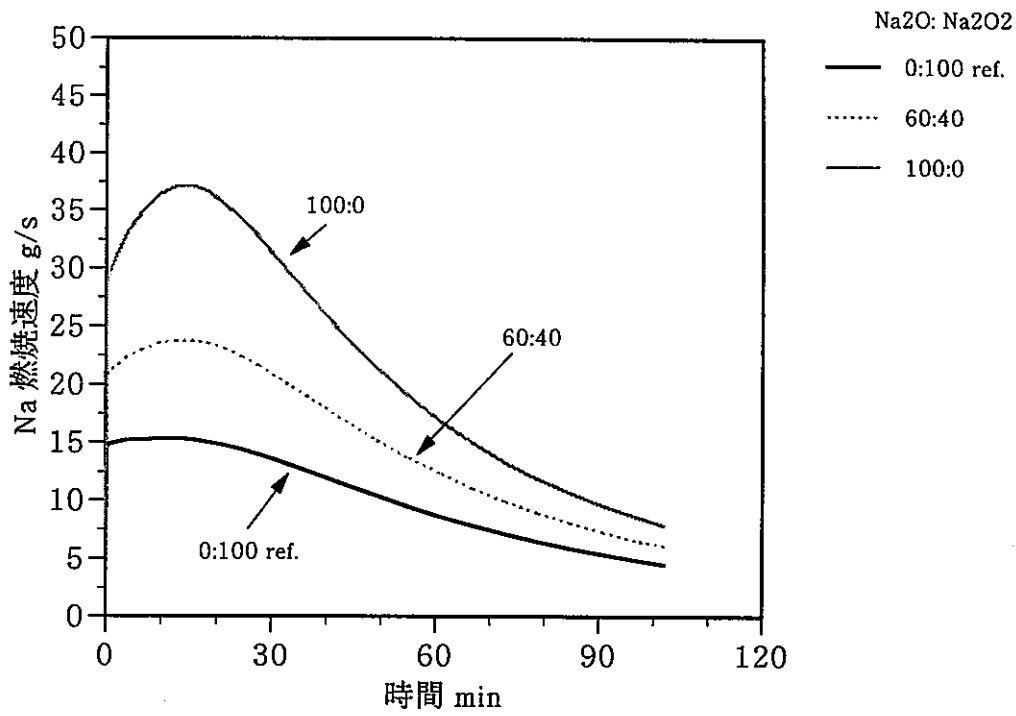


図 6.2- 5 ナトリウム反応速度の比較 (Na<sub>2</sub>O: Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)

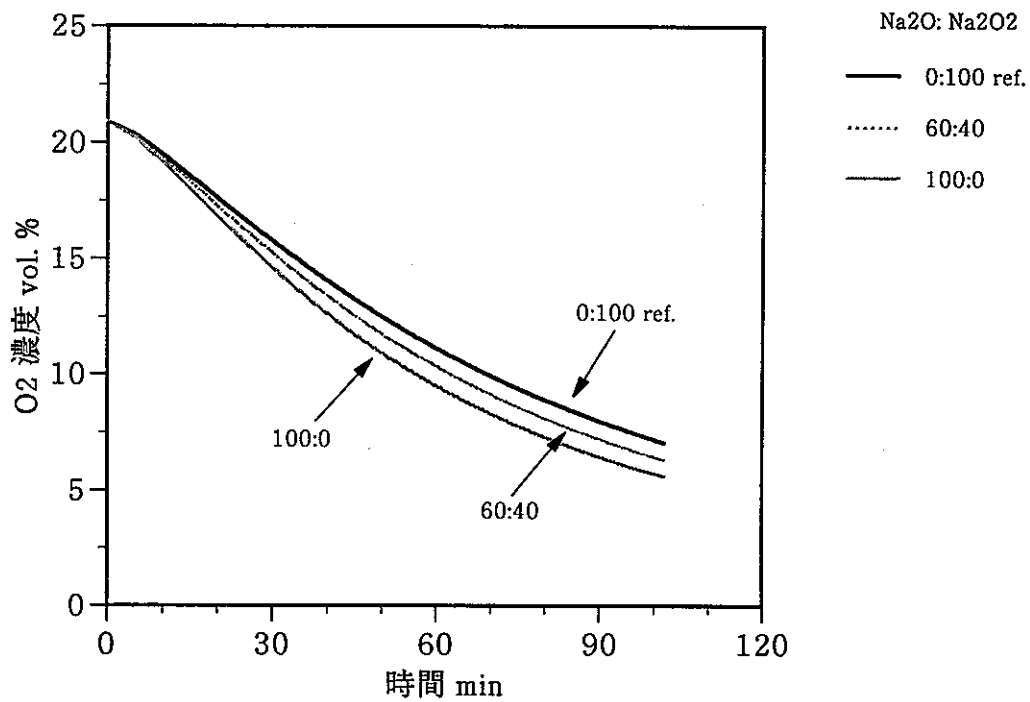


図 6.2- 6 酸素濃度の比較 (Na<sub>2</sub>O: Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 比の効果: FAUNA-F5 体系)

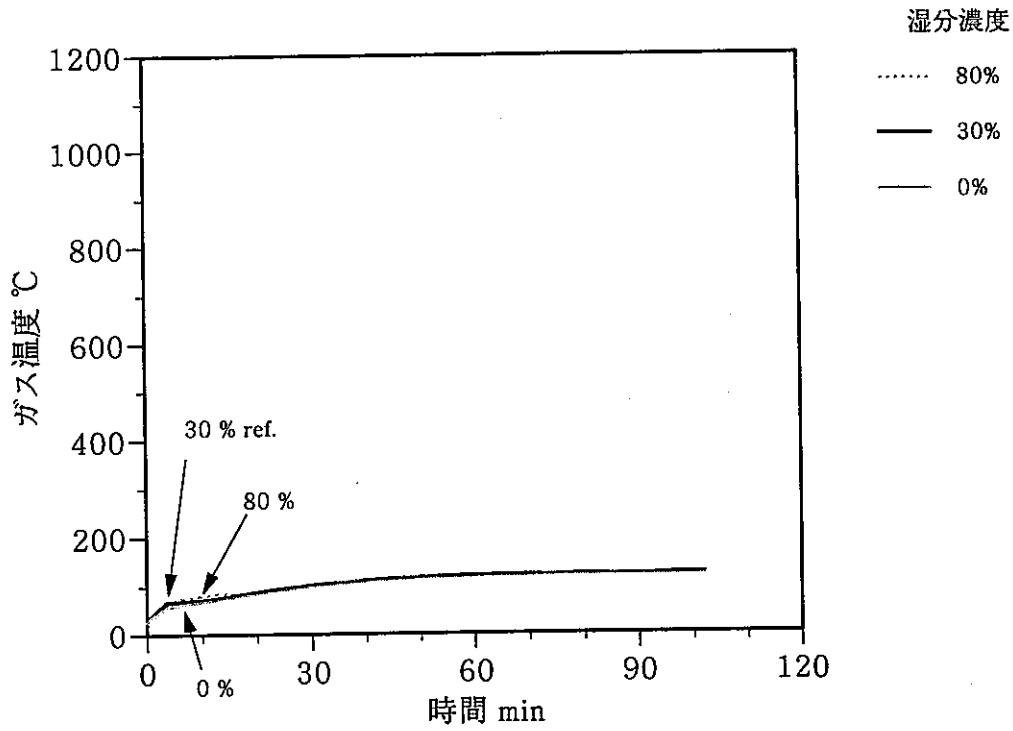


図 6.2-7 ガス温度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)

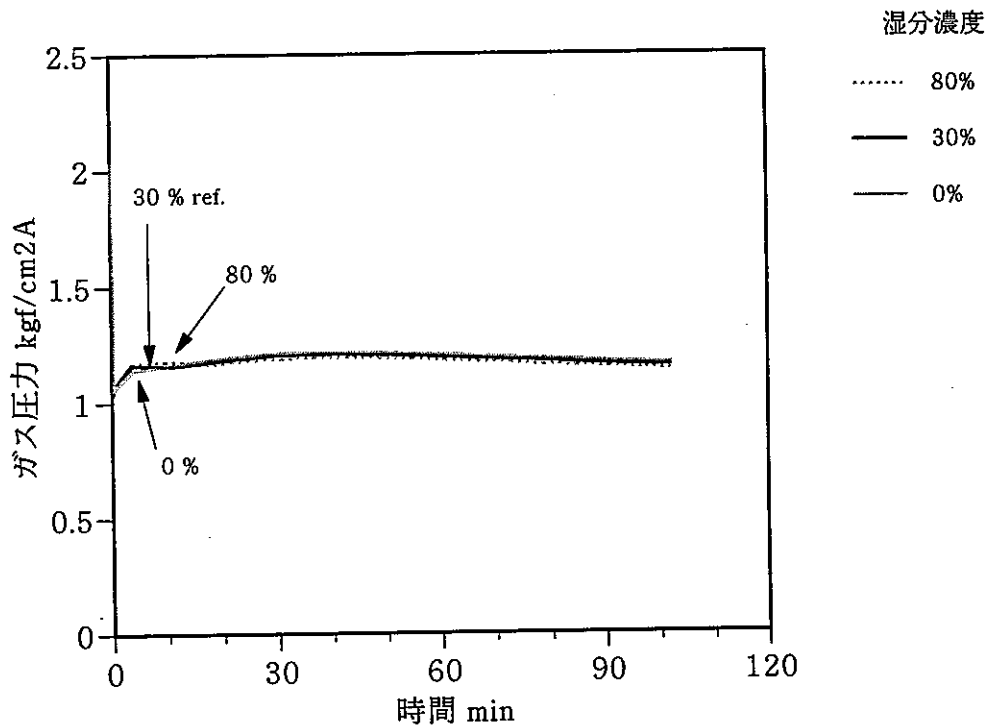


図 6.2-8 ガス圧力の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)

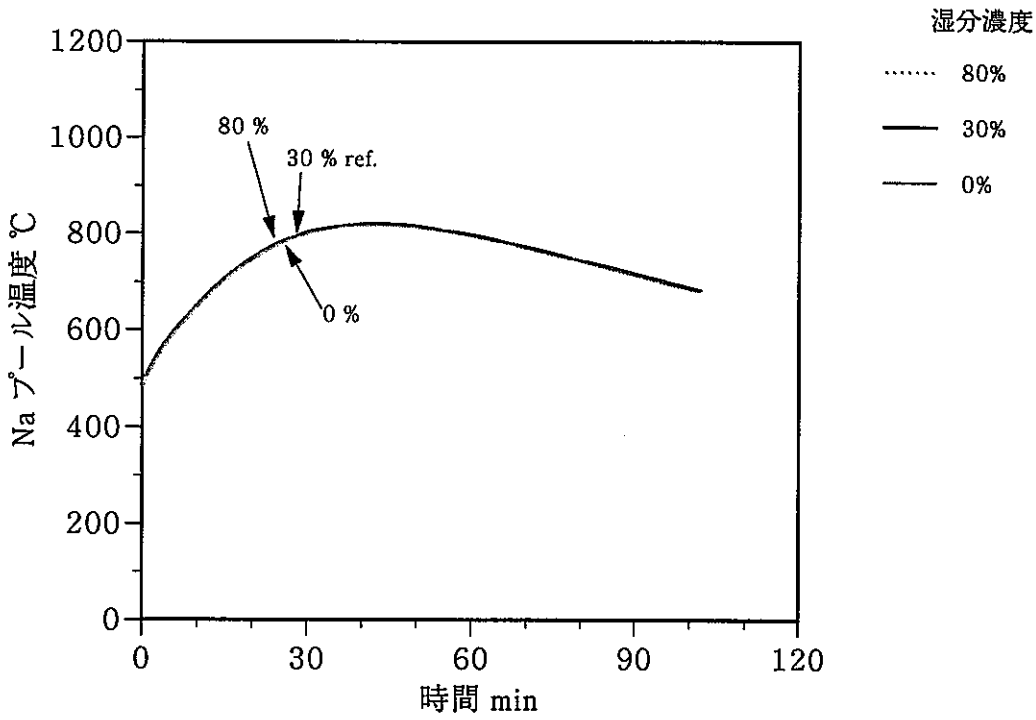


図 6.2-9 ナトリウムプール温度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)

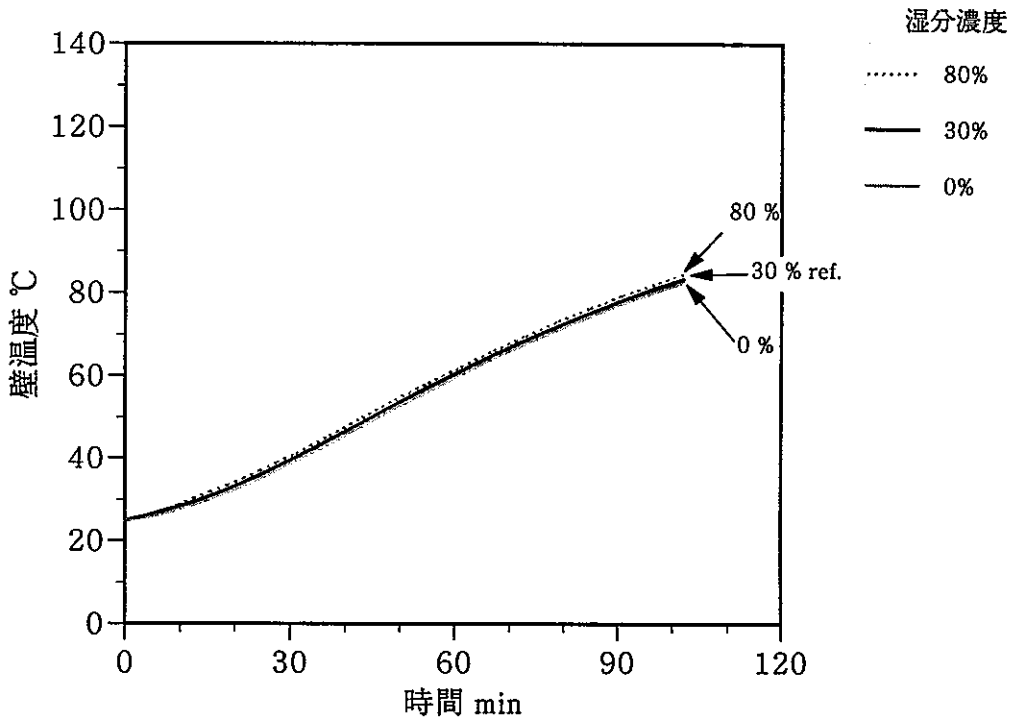


図 6.2-10 容器壁温度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)



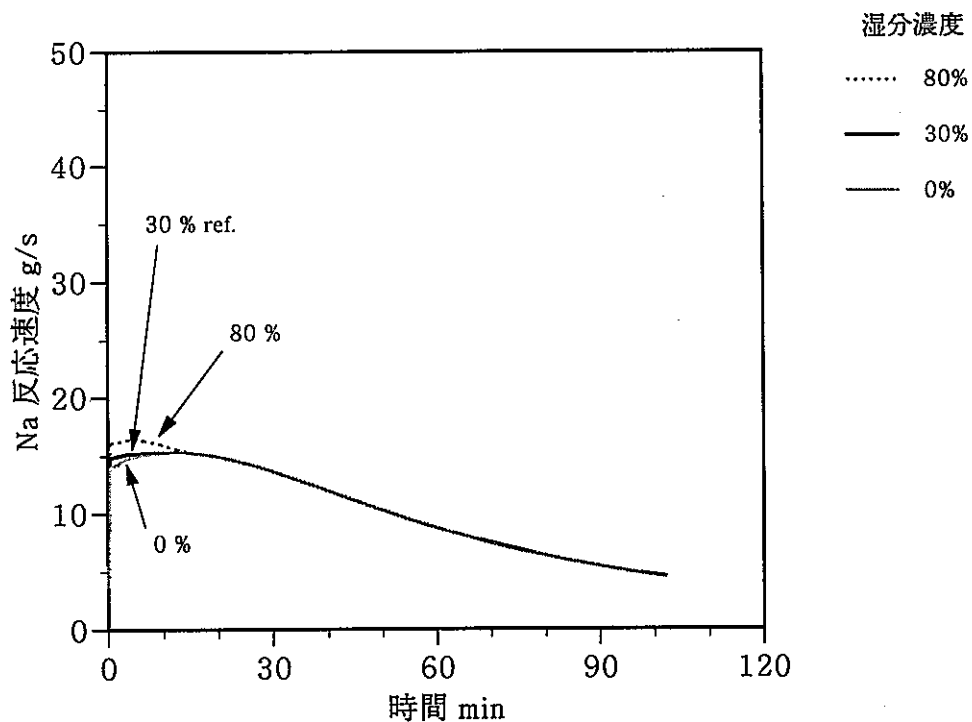


図 6.2-11 ナトリウム反応速度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)

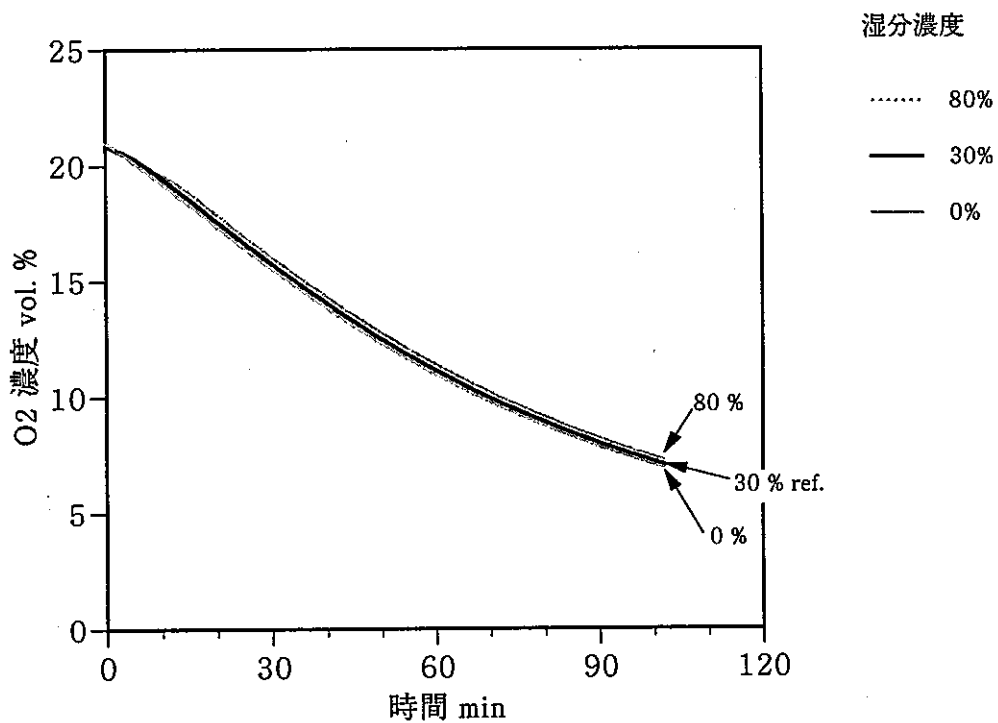


図 6.2-12 酸素濃度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)

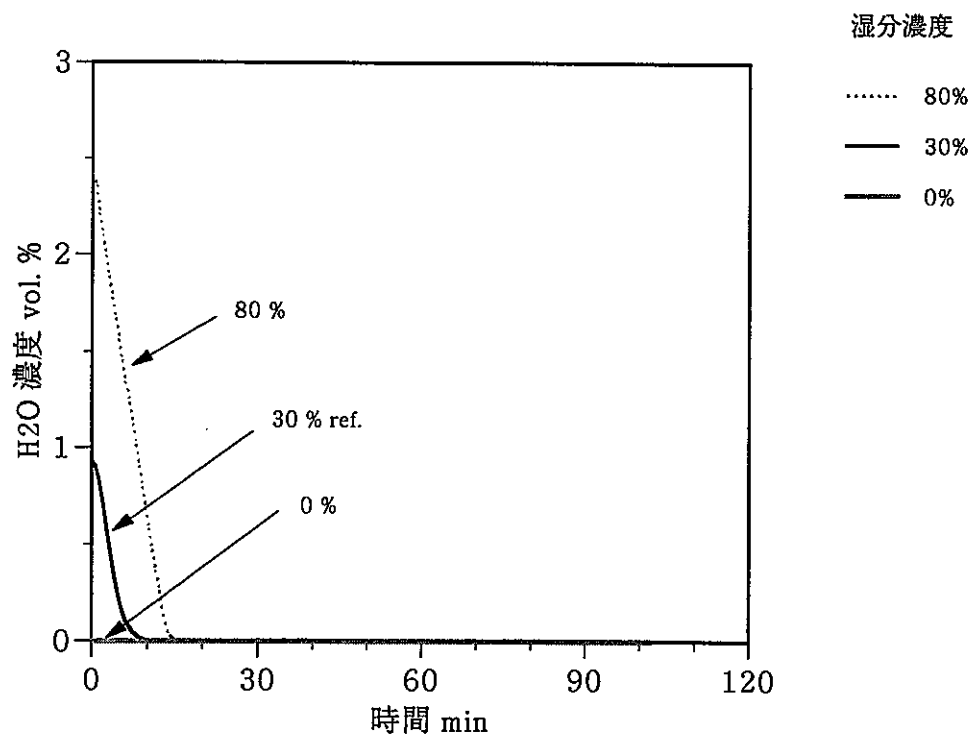


図6.2-13 湿分濃度の比較 (初期湿分濃度の効果: FAUNA-F5 体系)

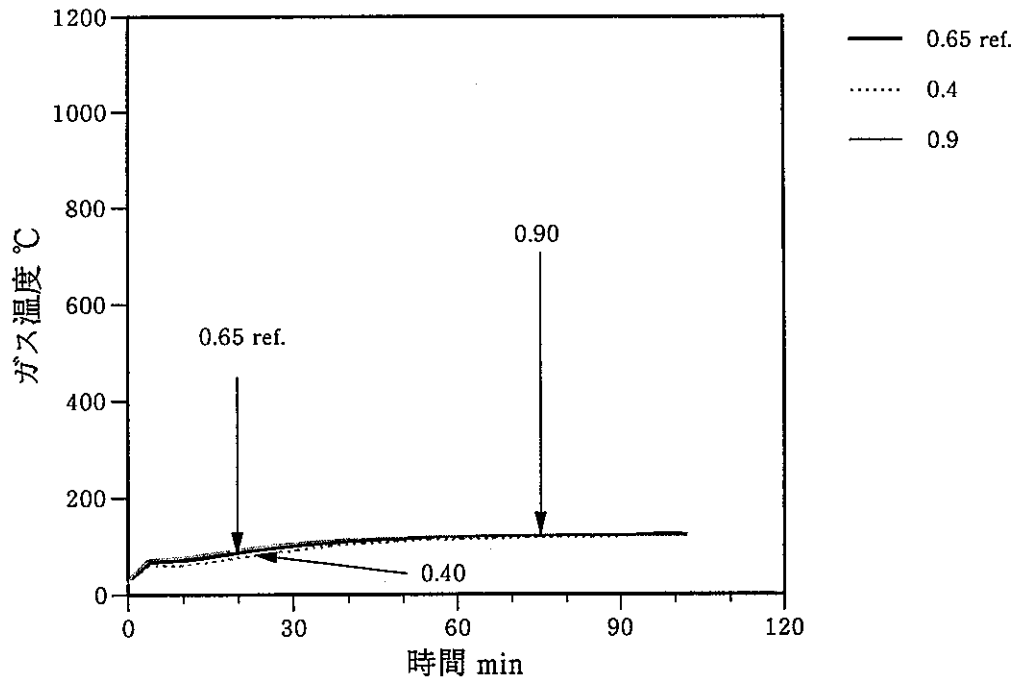


図 6.2-14 ガス温度の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)

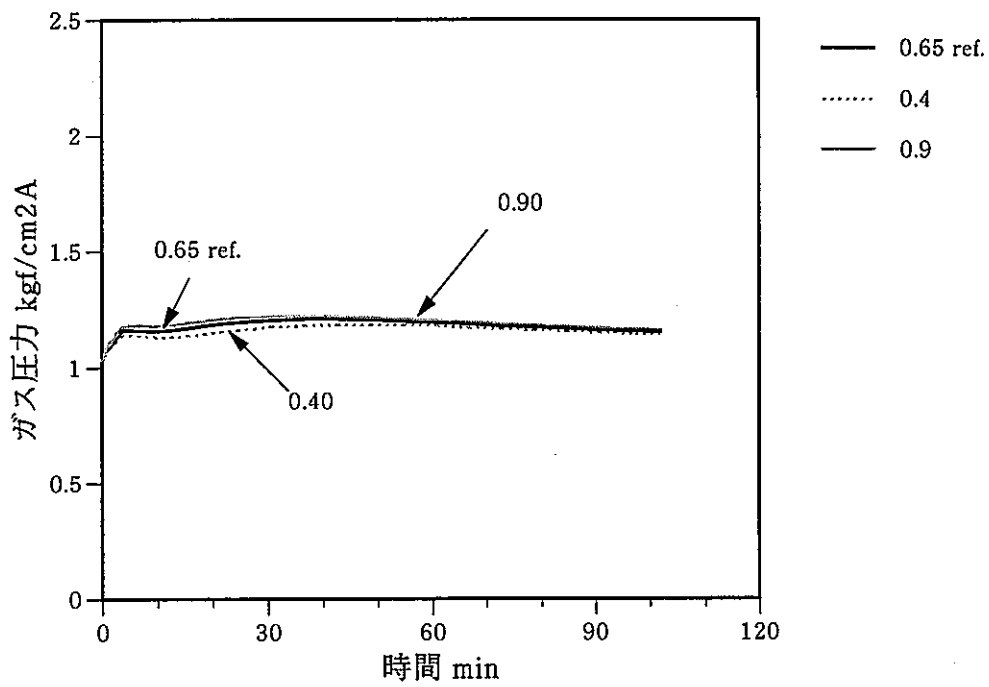


図 6.2-15 ガス圧力の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)

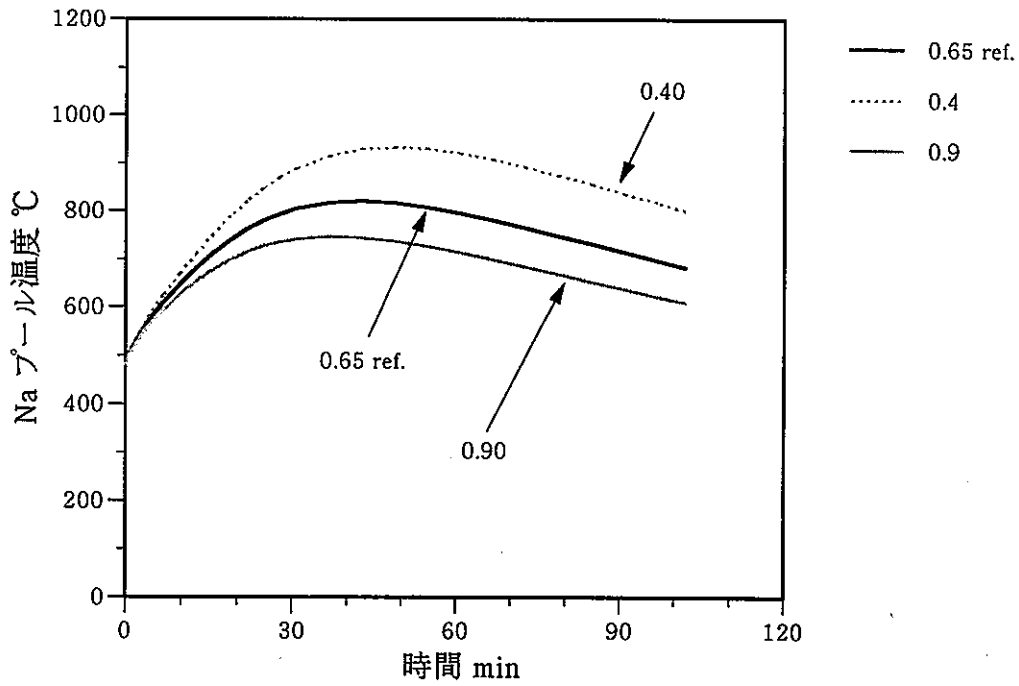


図 6.2-16 ナトリウムプール温度の比較  
(プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)

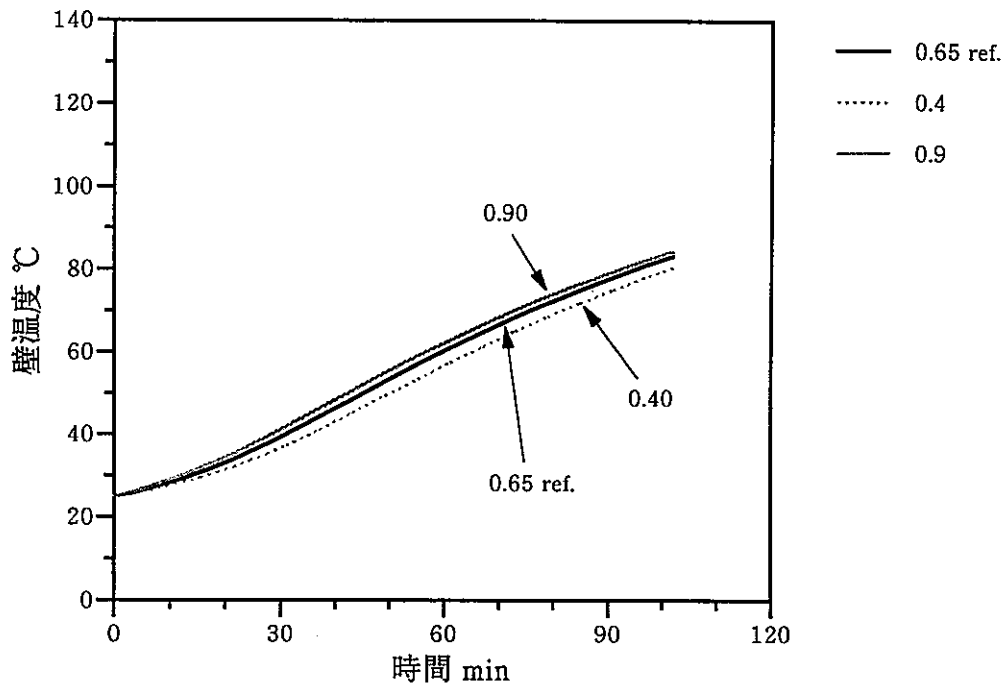


図 6.2-17 容器壁温度の比較 (プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)

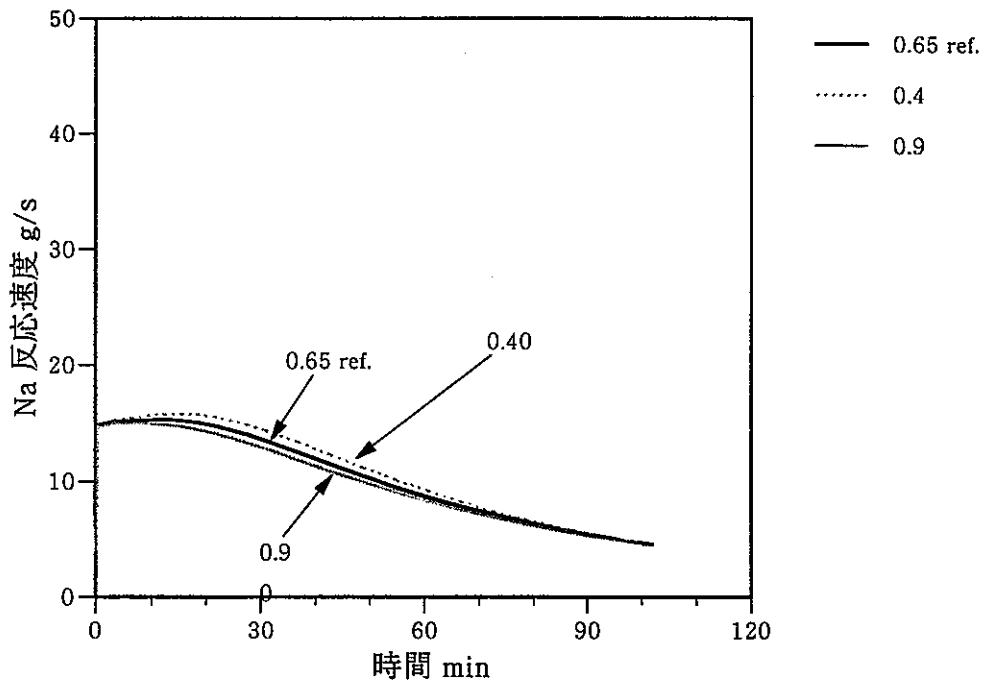


図 6.2-18 ナトリウム反応速度の比較  
(プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)

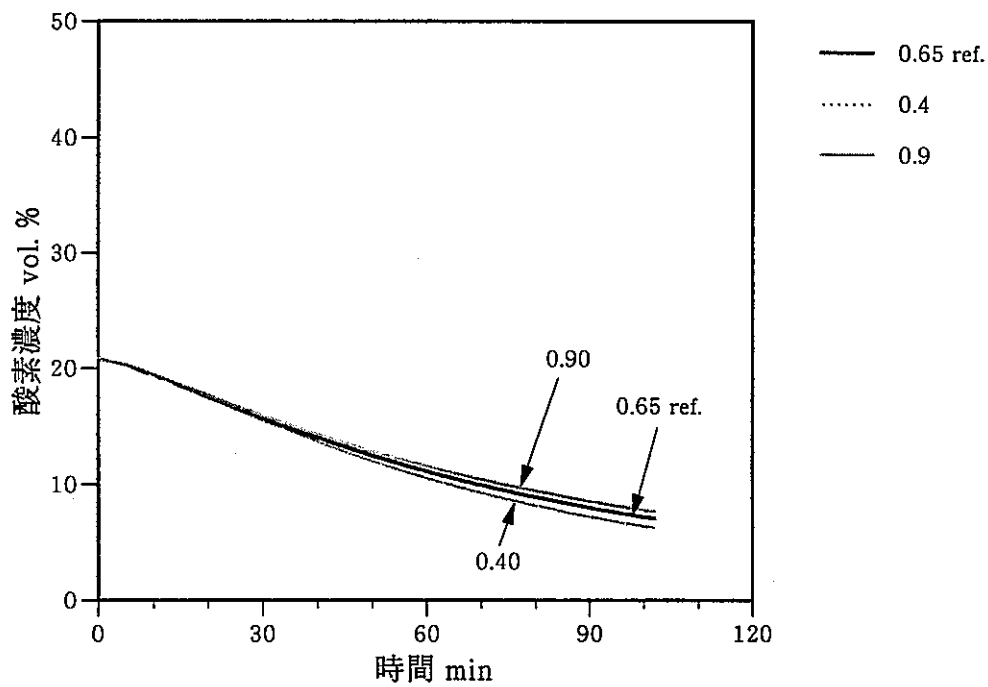


図 6.2-19 酸素濃度の比較  
(プルーガスふく射係数の効果: FAUNA-F5 体系)

## 7 結言

独の FAUNA 試験と動燃サファイア施設の Run-D1 試験に関する ASSCOPS による検証計算では、測定データと計算結果は全般によく一致することが確認できた。

以下に主たる解析結果を示す。

- ①ナトリウムプール、壁およびガスの各部温度、圧力の計算結果は測定データと良く一致している。
- ②ナトリウム燃焼に関して重要なパラメータである反応生成物割合 ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}_2$  比) は、 $\text{Na}_2\text{O}$  と  $\text{Na}_2\text{O}_2$  の反応熱の相違により圧力、温度が影響を受けるが、生成割合比の最適値を導入することで実験データの圧力、温度および酸素濃度と良く一致した。また、保守的な結果を得るための生成割合比の検討を行い、 $\text{Na}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}_2 = 60:40$  (酸素濃度 10 % 以下では 100:0) の組合せを用いることが良いと考えられる。
- ③感度解析の結果、初期湿分濃度の温度、圧力に及ぼす影響は、他の反応生成物割合やふく射係数を変化させたときのものにくらべると小さかった。
- ④ナトリウムプールからガスへのふく射係数については既往の解析から最適とされる値を中心にパラメータを変化させた。ふく射係数を小さくするとプールの放熱が抑制されるためナトリウム温度が上昇し、逆にふく射係数を大きくするとナトリウム温度が下がることが確認できた。しかし、プールナトリウム温度を除いてその影響はほとんどなかった。

## 謝辞

ASSCOPS の検証に当たり、原子力システム（株）の豊原大輔氏にはコードの計算およびグラフの作成を、また常陽産業（株）の根本兼吉氏には本報告書で用いた図面の作成をしていただいた。よって、ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] 石川浩康, 大野修司, 宮原信哉, 三宅収, 田辺裕美, 前田清彦,  
「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] 石川浩康, 二神敏, 大野修司, 清野裕, 三宅収,  
「ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version 2.0 使用説明書」  
PNC TN9520 97-001, 1997年12月
- [3] W. Cherdron and S.Jordan,  
「FAUNA 施設における燃焼面積 12 m<sup>2</sup> 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
- [4] Osamu MIYAKE, Ryuhei KAWABE, Yoshiaki HIMENO  
「COMPARISON OF SOFIRE-MII PREDICTIONS WITH THE RESULTS OF GERMAN  
FAUNA F5 AND F5 TESTS」  
PNC TN941 85-67, March 1985
- [5] 宮原信也, 佐々木和一, 山田敏雄, 姫野嘉昭,  
「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験 (1)  
— 空気雰囲気におけるナトリウムプール燃焼試験 Run D-1 —」  
PNC TN9410 87-081, 1987年 5月
- [6] 橋口他, 「液体ナトリウムのふく射率」, 原子力学会, S53年, 会A55
- [7] 澤田他, 「ナトリウム漏えい試験によるナトリウム火災解析コードの検証」,  
原子力学会, S54年, 会C47
- [8] 三宅他, 「ナトリウム火災計算コード (SOFIRE-MII) による西独FAUNAプール火災  
実験の解析」, 原子力学会, S60年, 分科会A37



## Appendix A ASSCOPS Version 1.1 とVersion 2.0の比較

本文 4 章にも記載したように、Version 1.1 の計算と Version 2.0 で新機能未使用の計算はコード上で相違はない。したがって、バージョン間で同じ計算結果が出ることを確認するためにこの両者の比較を行った。対象は FAUNA 試験 (F5 および F6) および Run-D1 試験のガス温度、ガス圧力、Na プール温度、受け皿温度、壁面温度、Na 燃焼速度、酸素濃度である。次ページ以降にそれぞれについて計算した結果をグラフにて示す。すべてについて両者は一致していることを確認した。

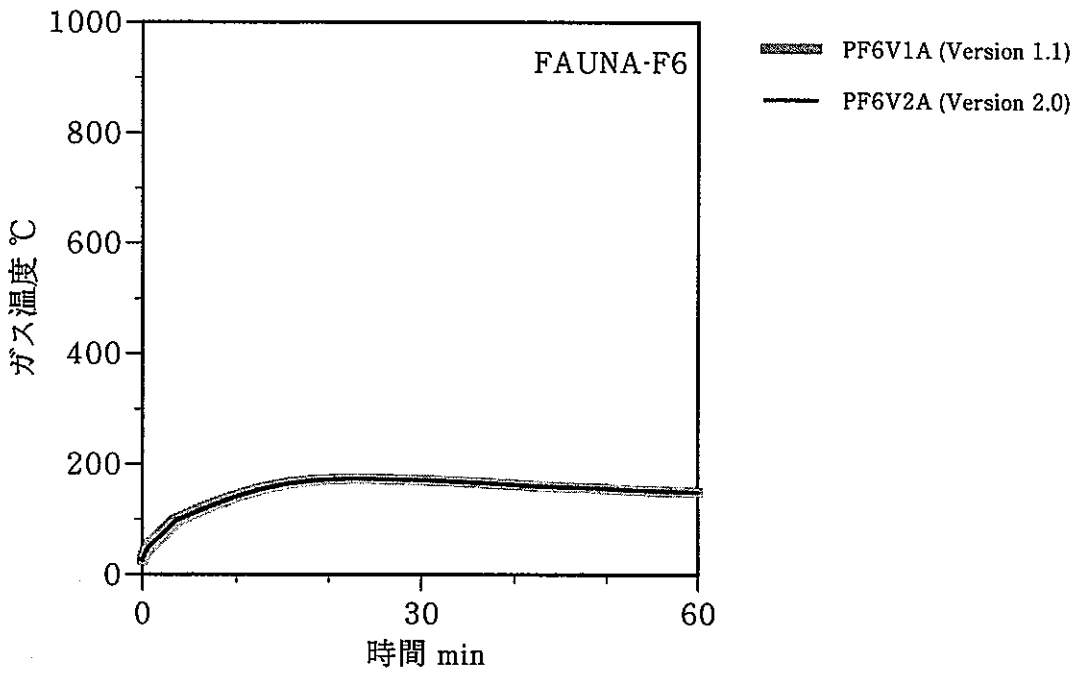
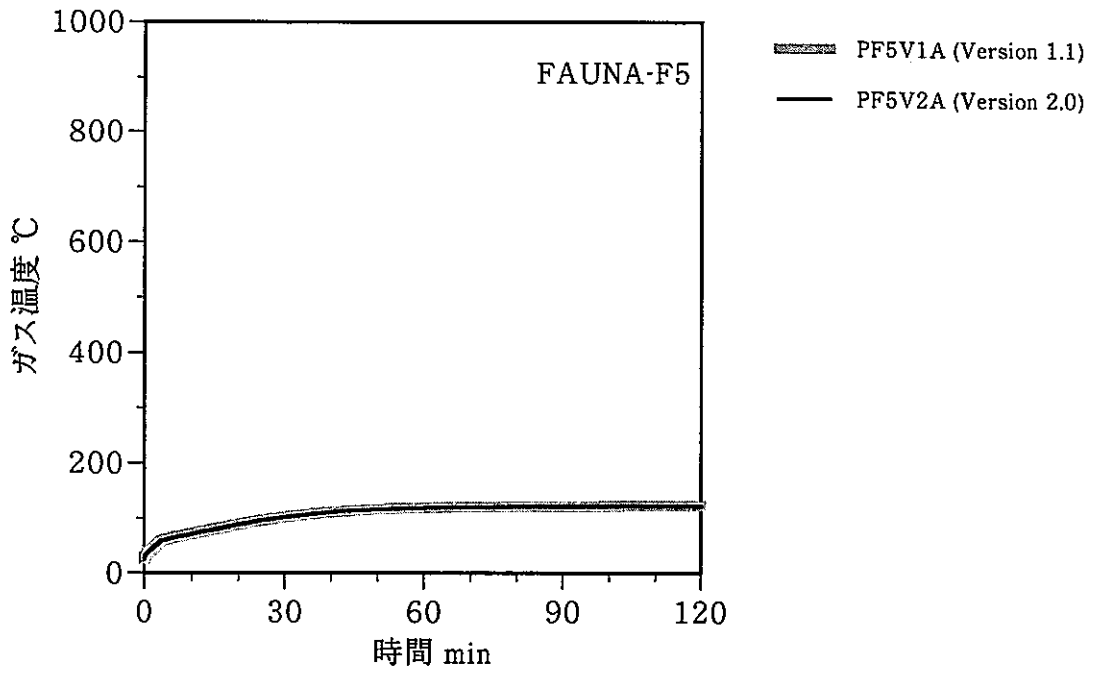


図 A-1(1) ガス温度の比較 (FAUNA)

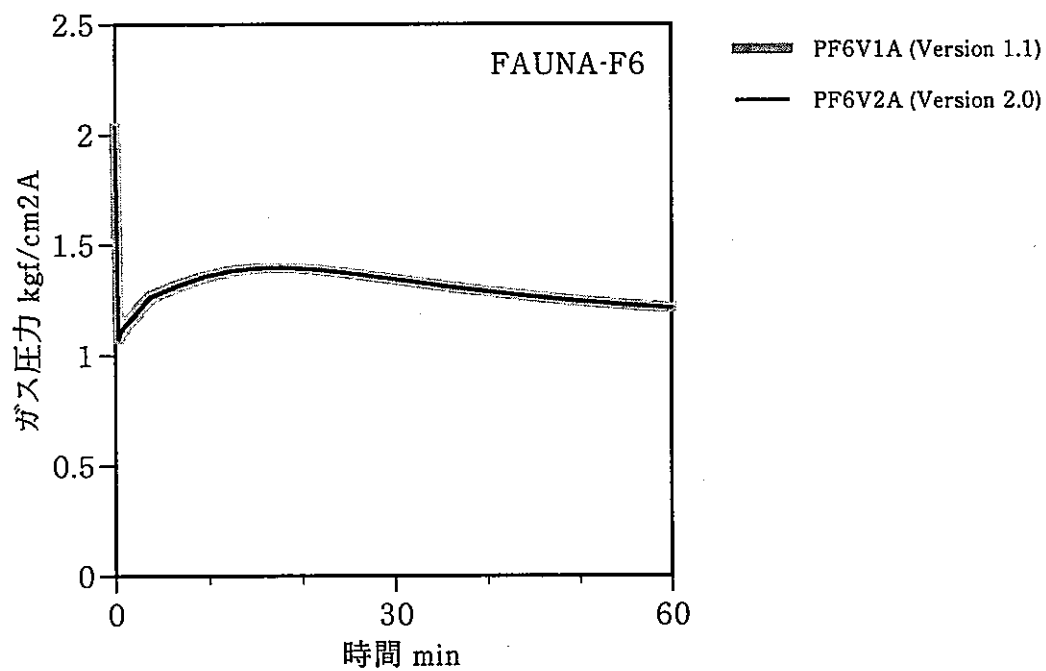
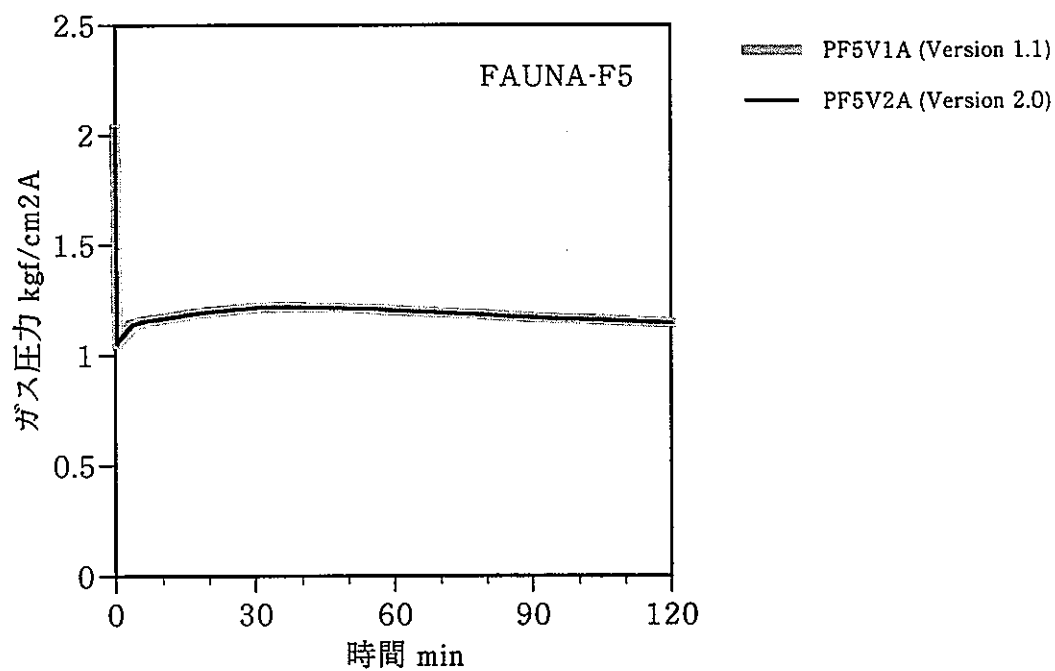


図 A-1(2) ガス圧力の比較 (FAUNA)

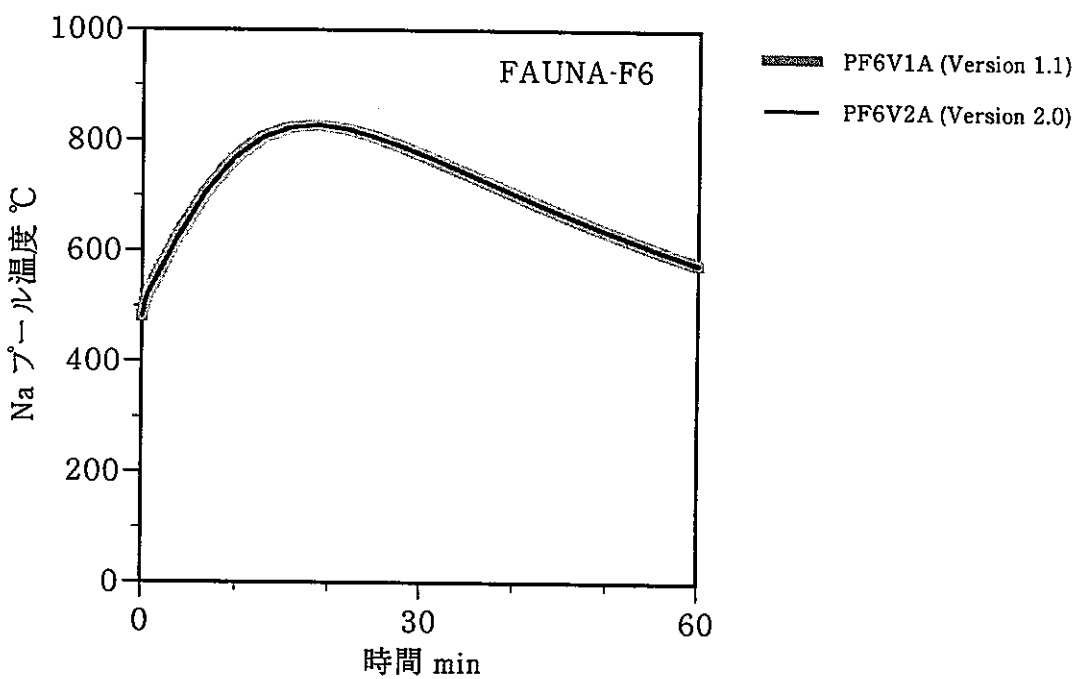
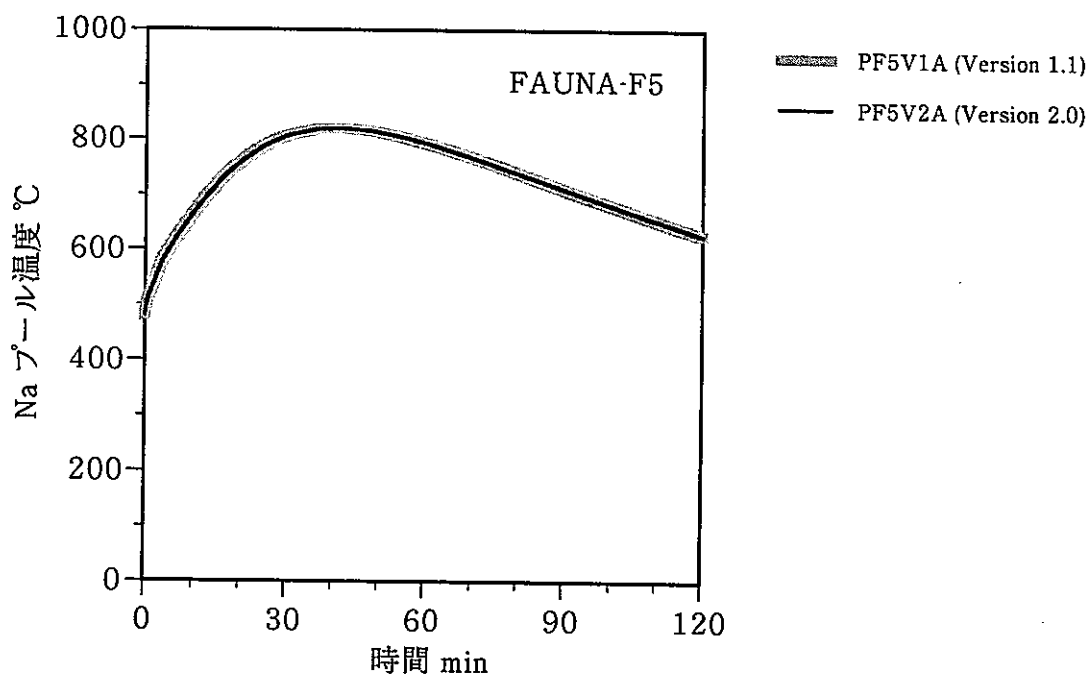


図 A-1(3) ナトリウムプール温度の比較 (FAUNA)

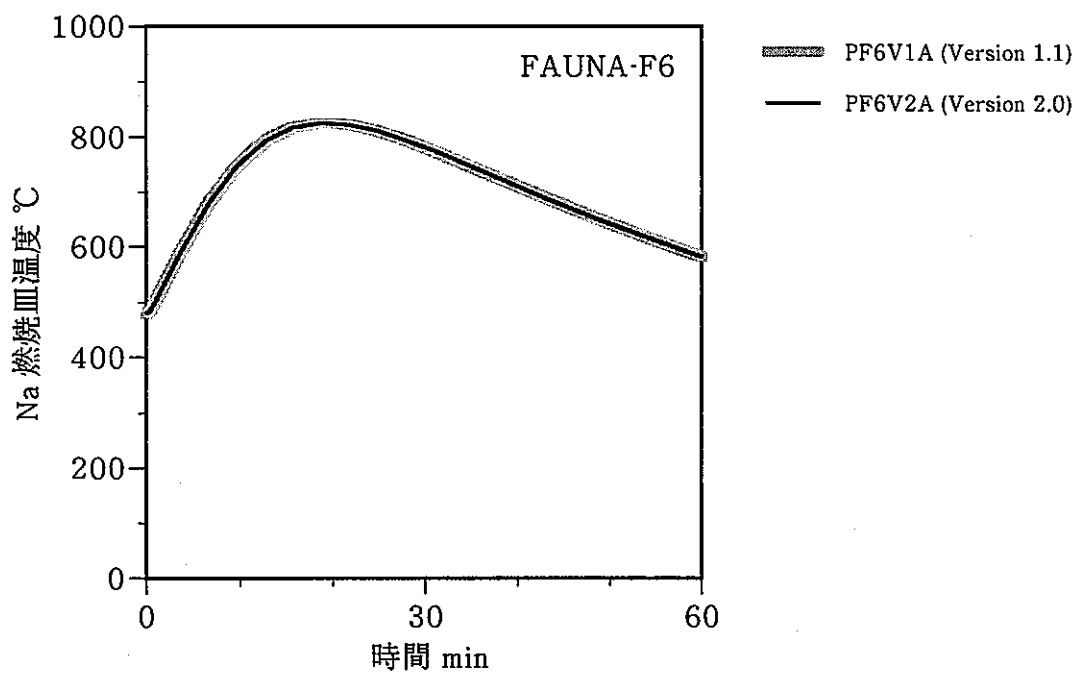
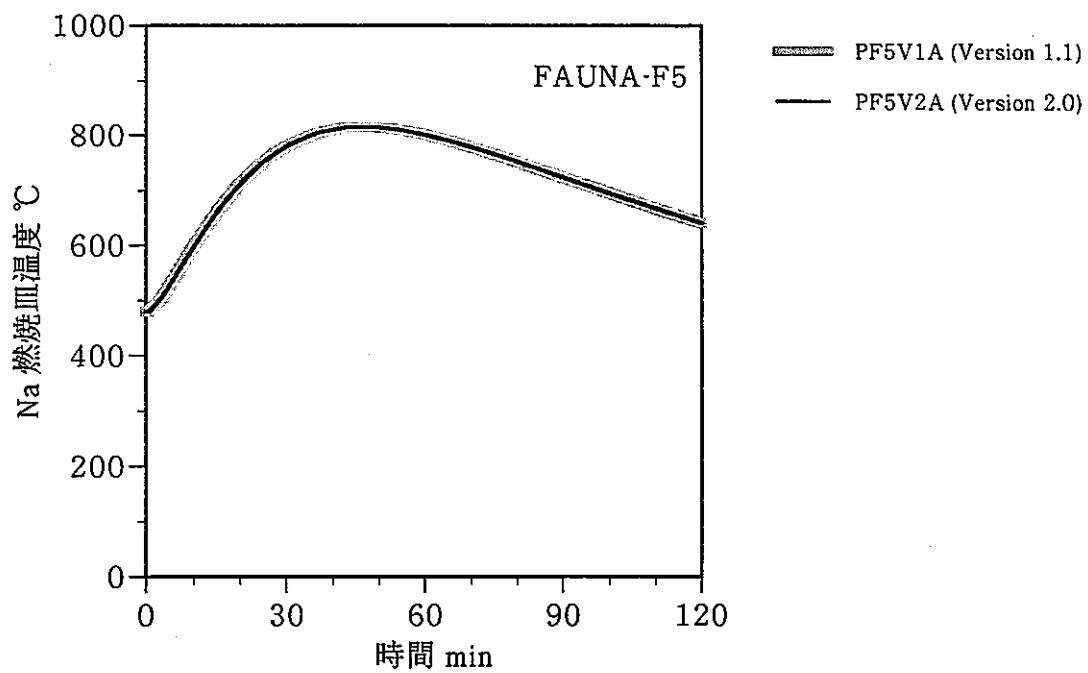


図 A-1(4) 燃焼皿温度の比較 (FAUNA)

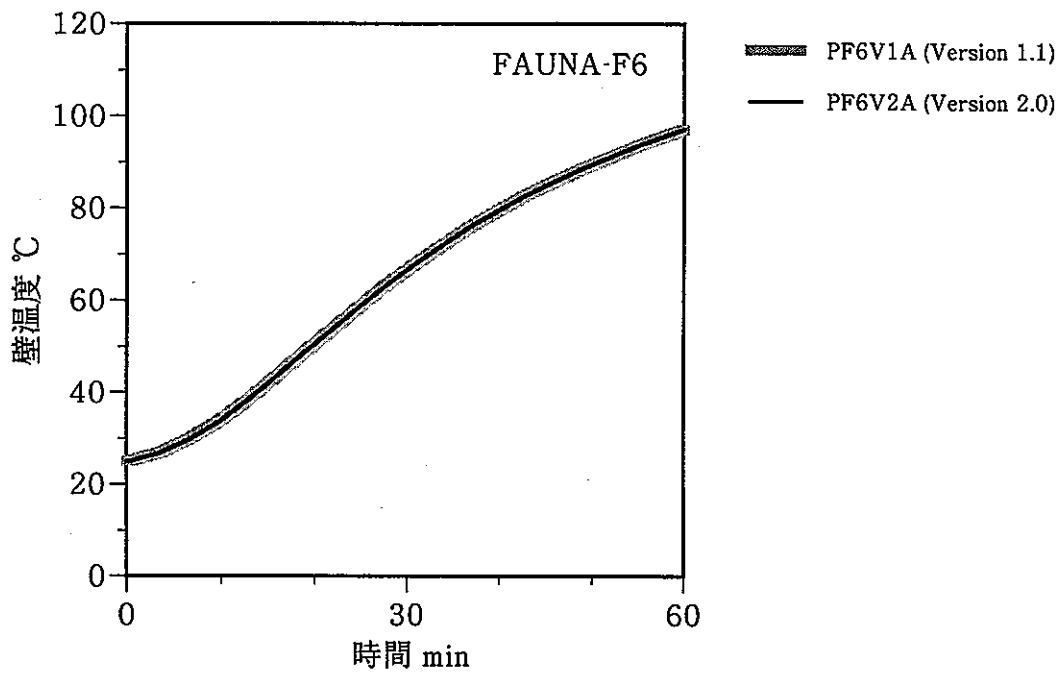
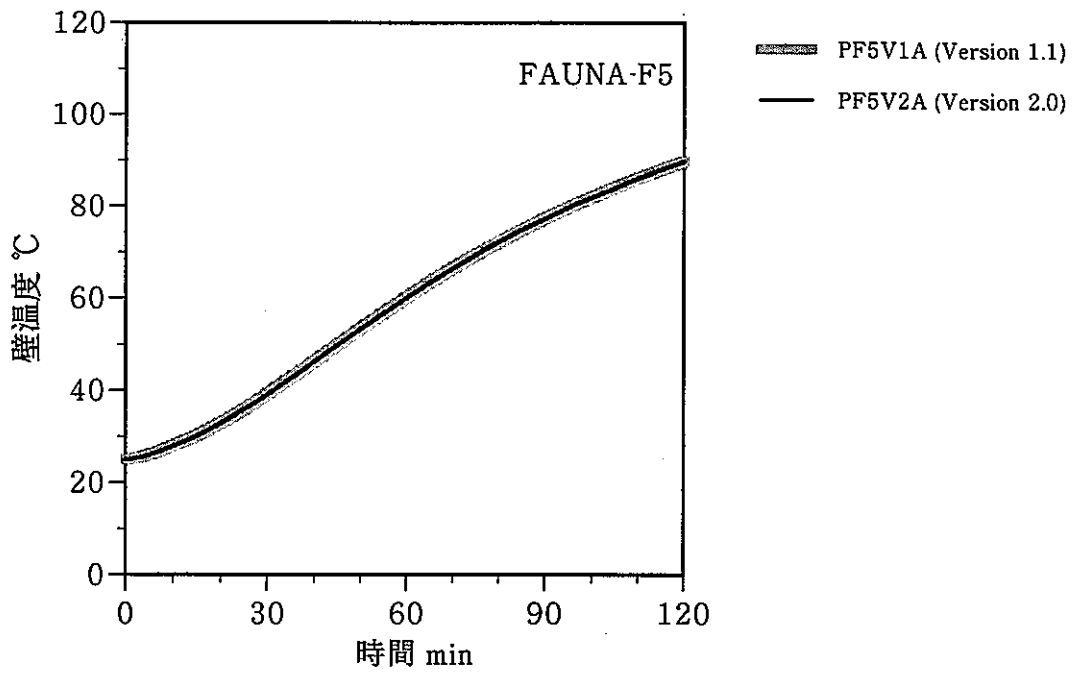


図 A-1(5) 容器壁温度の比較 (FAUNA)

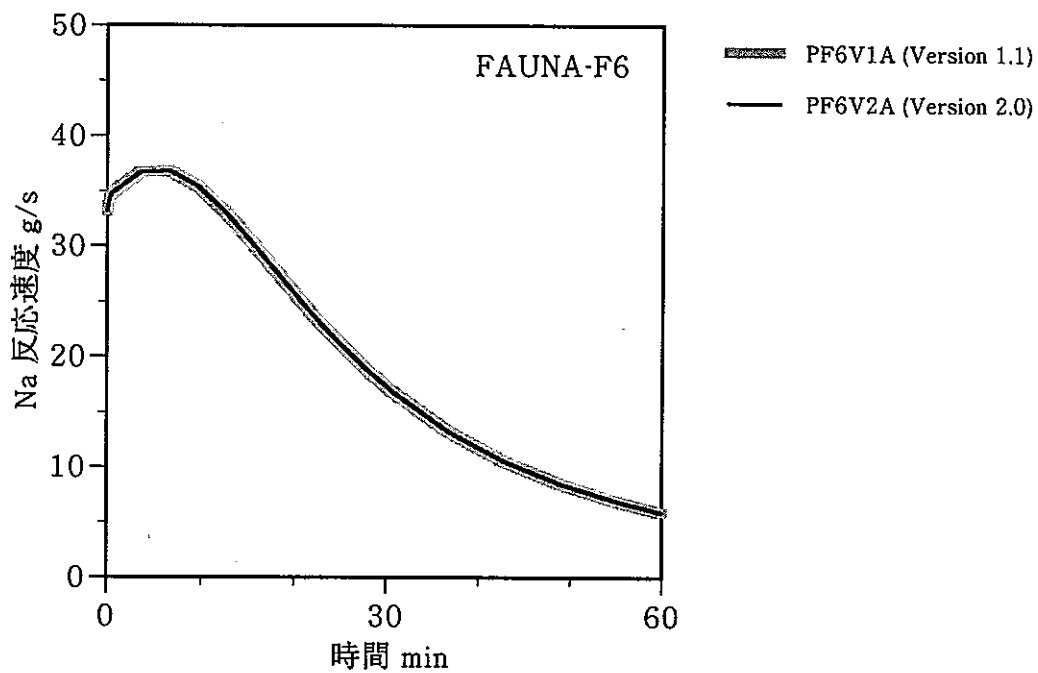
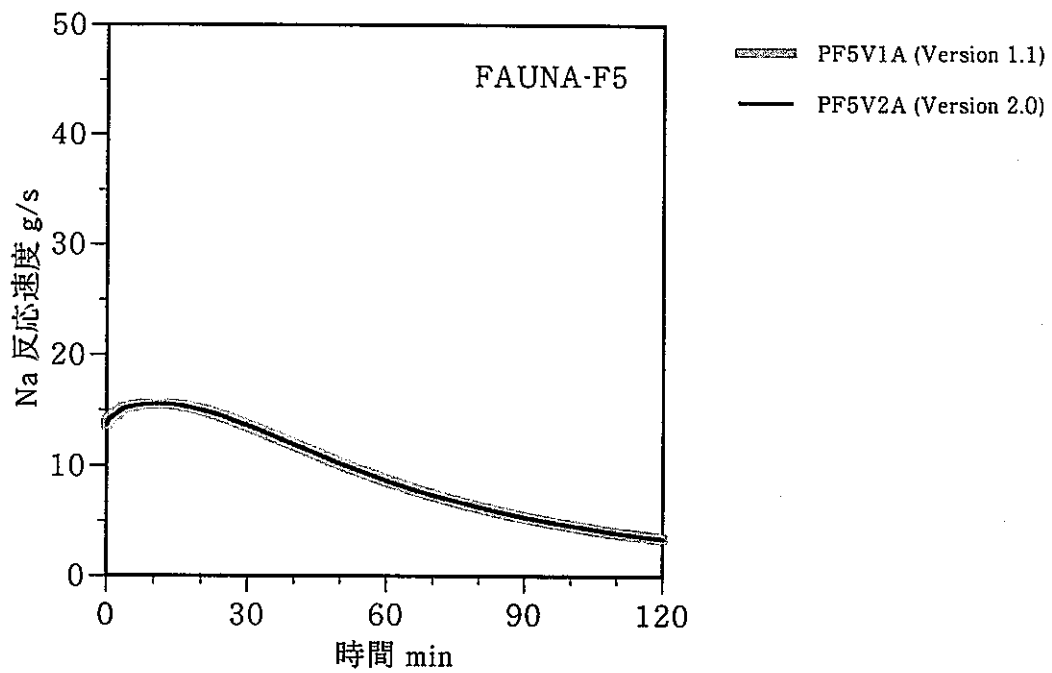


図 A-1(6) ナトリウム反応速度の比較 (FAUNA)

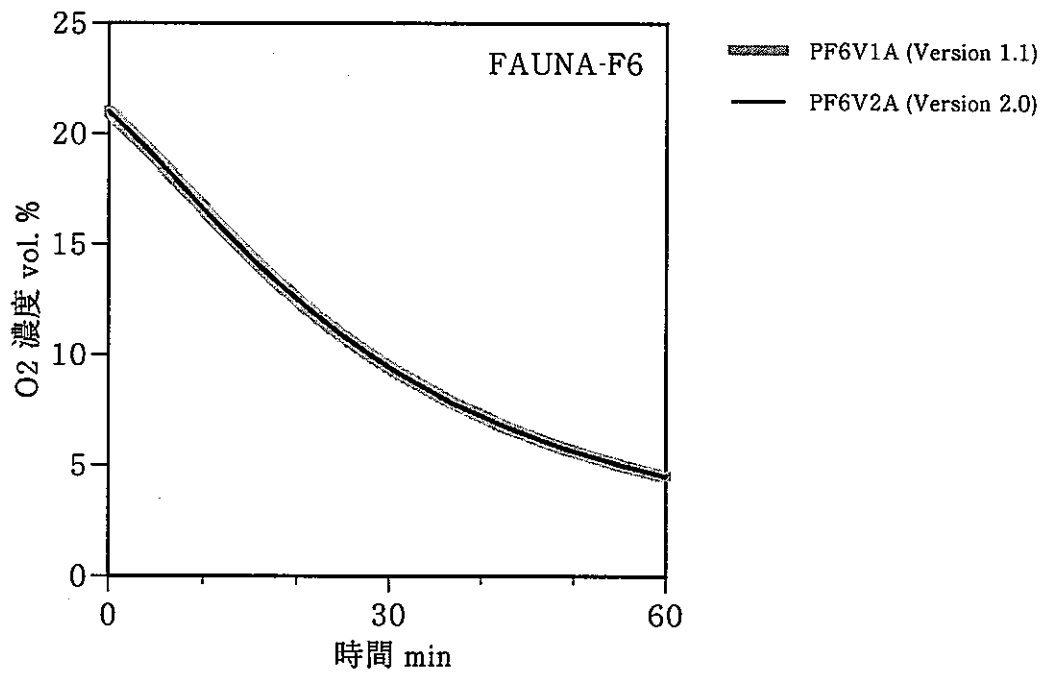
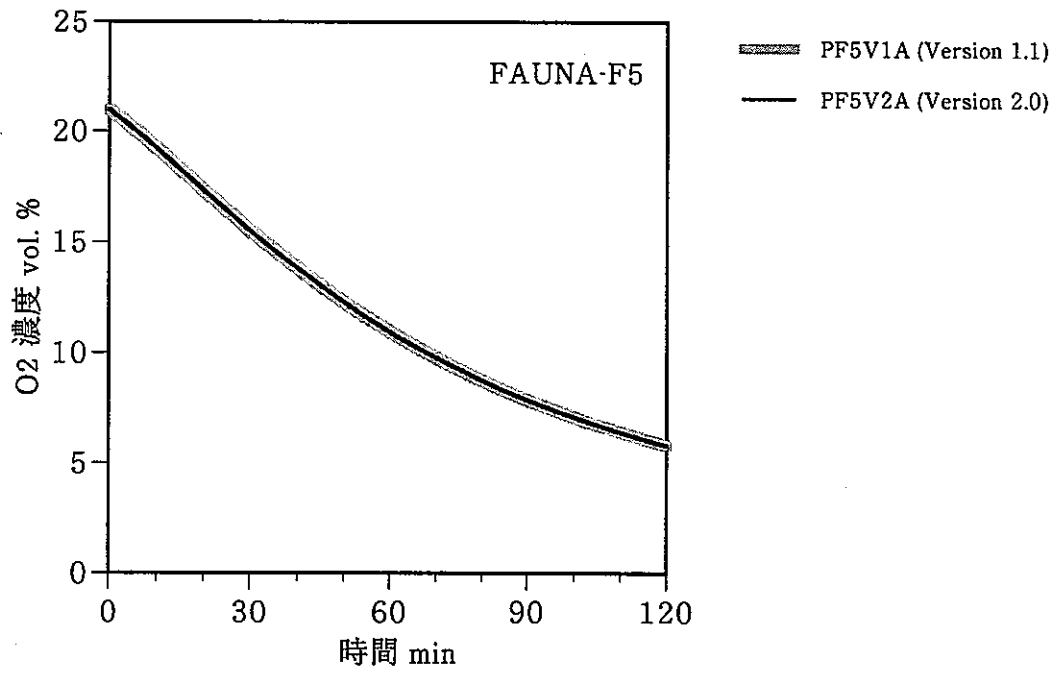


図 A-1(7) 酸素濃度の比較 (FAUNA)



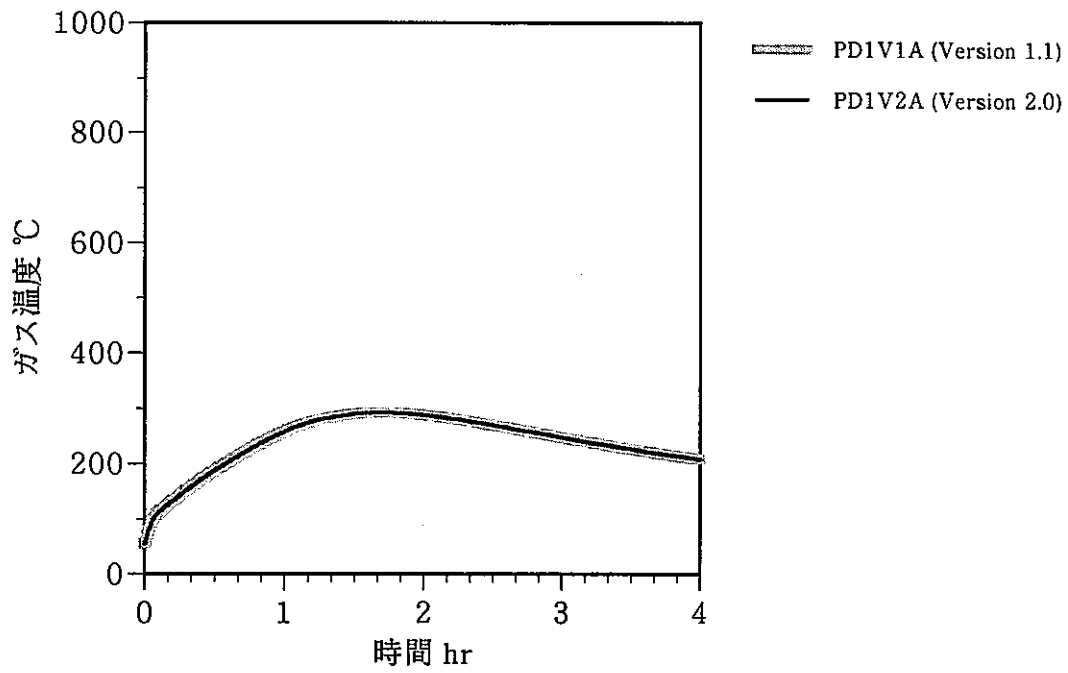


図 A- 2(1) ガス温度の比較 (Run-D1)

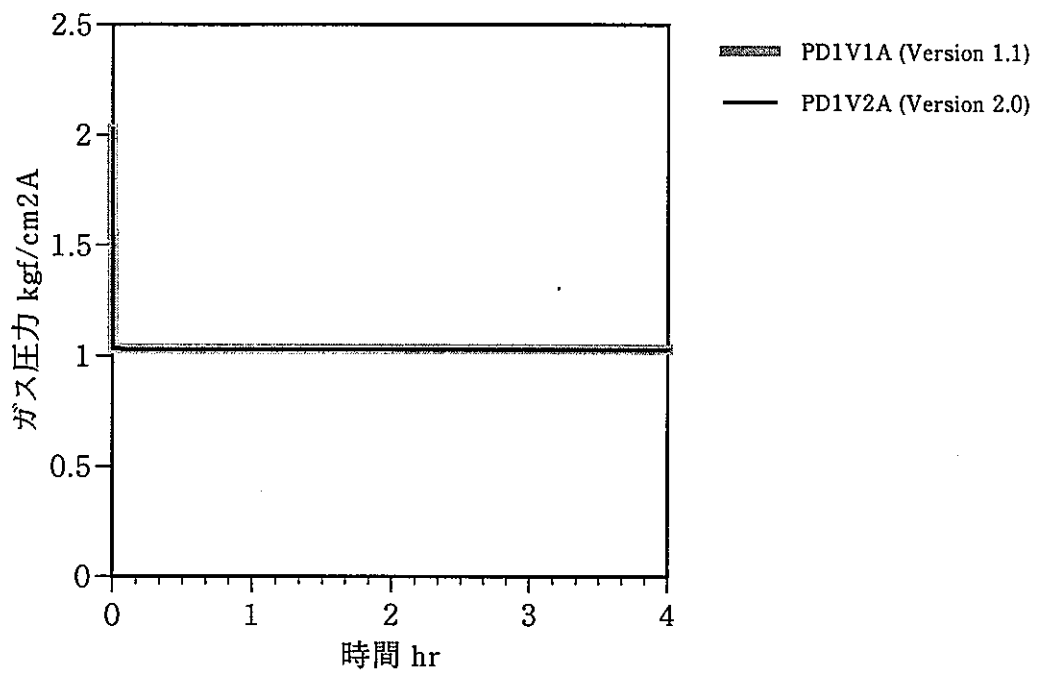


図 A- 2(2) ガス圧力の比較 (Run-D1)

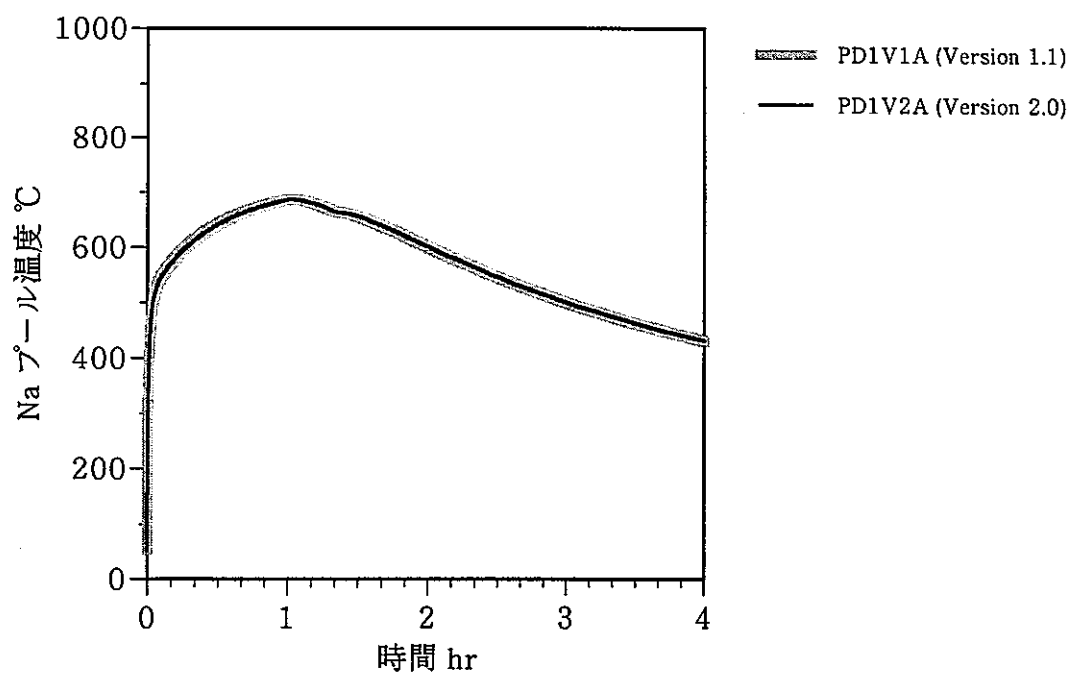


図 A- 2(3) ナトリウムプール温度の比較 (Run-D1)

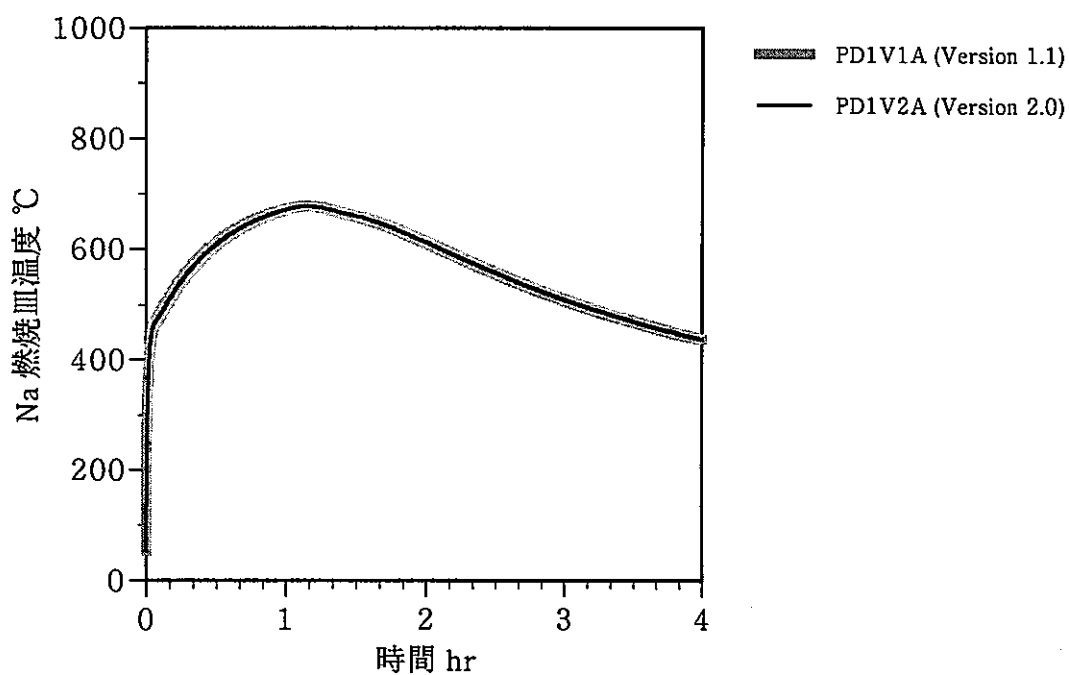


図 A- 2(4) 燃焼皿温度の比較 (Run-D1)

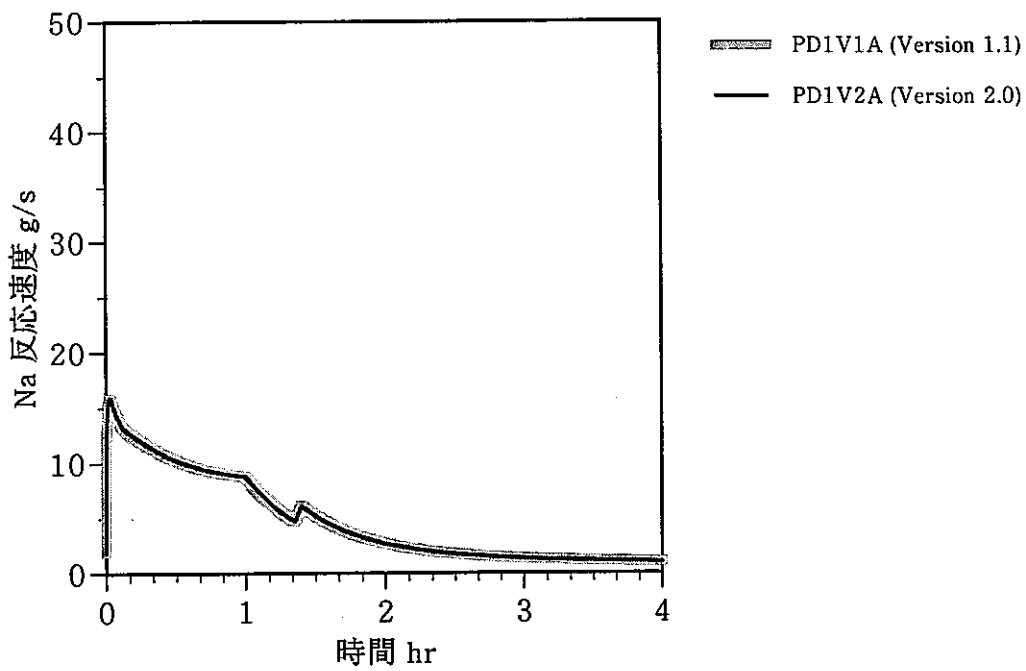


図 A-2(5) ナトリウム反応速度温度の比較 (Run-D1)

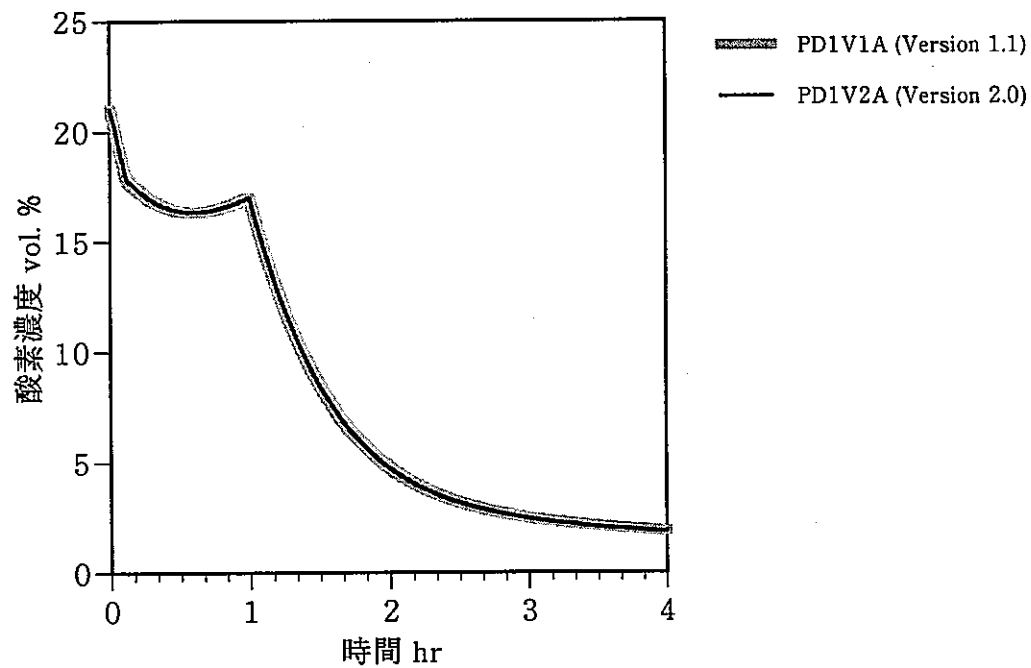


図 A-2(6) 酸素濃度の比較 (Run-D1)

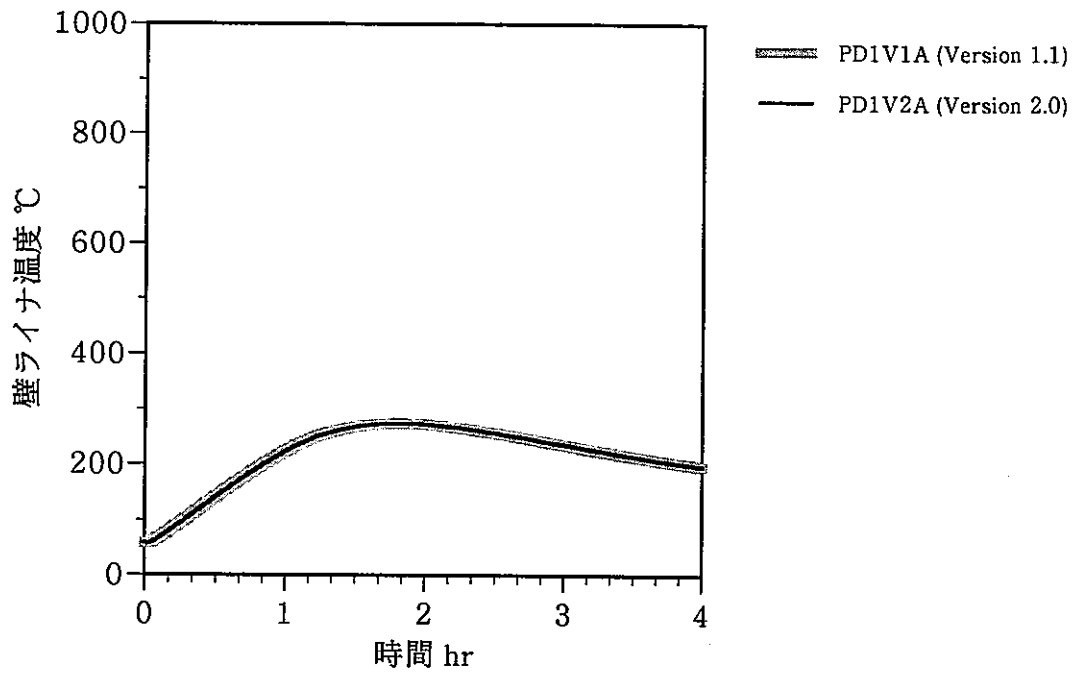


図 A- 2(7) 容器壁ライナ温度の比較 (Run-D1)

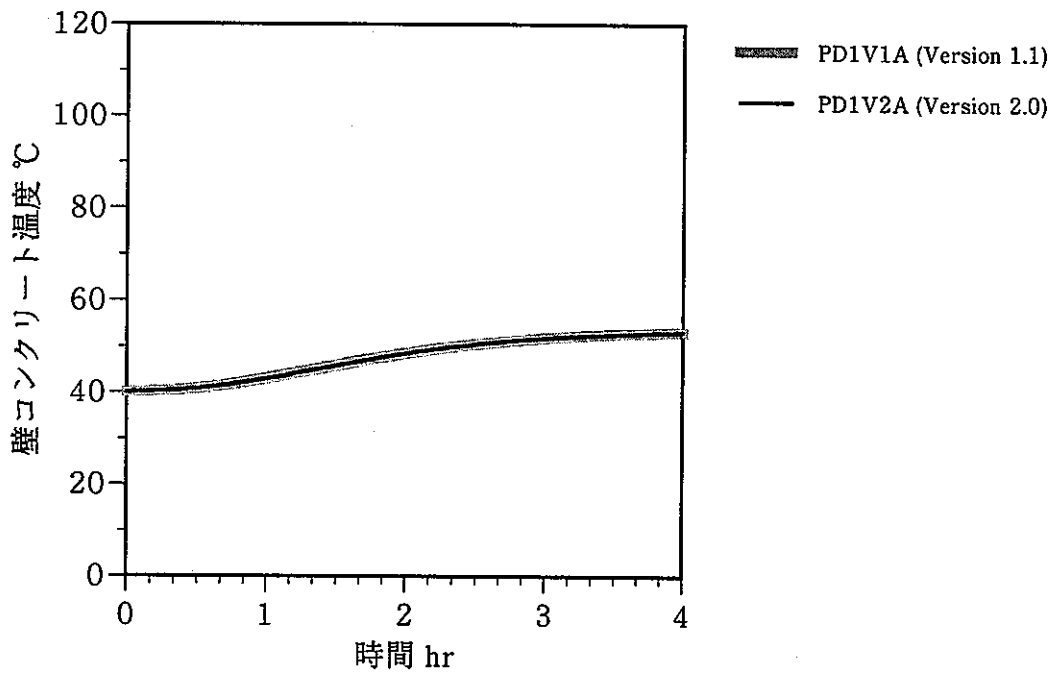


図 A- 2(8) 容器壁コンクリート温度の比較 (Run-D1)

## Appendix B FAUNA試験における初期ナトリウム注入時の液滴飛散について

FAUNA 試験 (特に F6) において燃焼初期 (0 ~ 約 15 分) にナトリウムプール温度、ガス温度およびガス圧力が上昇し、ピークが観測されている (図 5.1-1、図 5.1-2)。いずれもプール燃焼モデルを用いた計算値よりも高い値を示した。一方、図 5.1-7 の酸素濃度は、約 0 分 ~ 20 分の間は計算値よりも酸素濃度実測値は若干低い傾向を示している。本報告書に記載した検証はナトリウムプール燃焼モデルに関するものであるため、この初期の燃焼現象について本文では言及していないが、ここではスプレイ燃焼モデルによるこの挙動の検討を行った。

FAUNA 試験は、図 B-1 に示すように、ナトリウムは燃焼皿上方 1 m の高さから 20 分間にわたり連続して注入されており、注入初期においてナトリウムは燃焼皿に追突し、跳ね返りによる液滴の生成、飛散および液面の乱れが発生したことが推定される。このため、ナトリウムからガスへの熱移動が増加し、さらに酸素との反応 (燃焼) が促進され、温度、圧力上昇を招いたと考えられる。特に F6 試験では燃焼皿の面積が広いため、ナトリウムプールの液深が増加しにくく、その影響が顕著に現れていると考えられている。しかし、時間が経過し燃焼皿中のナトリウム量が多くなるにしたがって蓄積したナトリウムのために液滴飛散量が減少し、通常のプール燃焼に移行したと考えられる。

Appendix B では上述の初期の燃焼現象を解析するために ASSCOPS Version 2.0 のスプレイモデルによる液滴燃焼を用いた計算を行った。図 B-1 に想定される注入初期の状況 (図 a) と解析に用いるスプレイ燃焼モデル (図 b) を示す。コーン角度と液滴径を計算パラメータとし、ナトリウムプール温度、ガス圧力の実測値との比較および想定される液滴温度、コーン内温度から最適な値を検討した。この結果、液滴径 6 mm、コーン角度 20 度と選定し、計算結果と実測値を表 B-1 および図 B-2 に記載する。ナトリウムプール温度はプール燃焼モデル解析値より高くなり、実験値に近づいた。ガスについては圧力は比較的良く一致しているが、温度は実験値より低い温度となった。これは計算モデルではセル内は均一な空間として取り扱っているのに対し、実際には燃焼による対流によりセル内にかかなりの温度分布が生じており、本試験で温度計測した場所 (燃焼皿の直上 4 m) は比較的温度的の高い場所であったため実験値と計算値は異なると推定される。酸素濃度については 0 分 ~ 8 分においてスプレイ燃焼のため酸素の消費が促進されプール燃焼より濃度が早く減少し実験値と一致する傾向となった。全体的に実測値は 0 分 ~ 約 8 分はスプレイ燃焼モデル解析値と良く一致し、その後は図 B-1 (図 c) に示すようにナトリウムプールの形成によりプール燃焼モデル解析値へと近づいていく。

以上の検討により、ナトリウム注入初期の液滴の飛散等による温度、圧力上昇をスプレイモデルのナトリウム液滴燃焼解析により等価的に評価することができた。

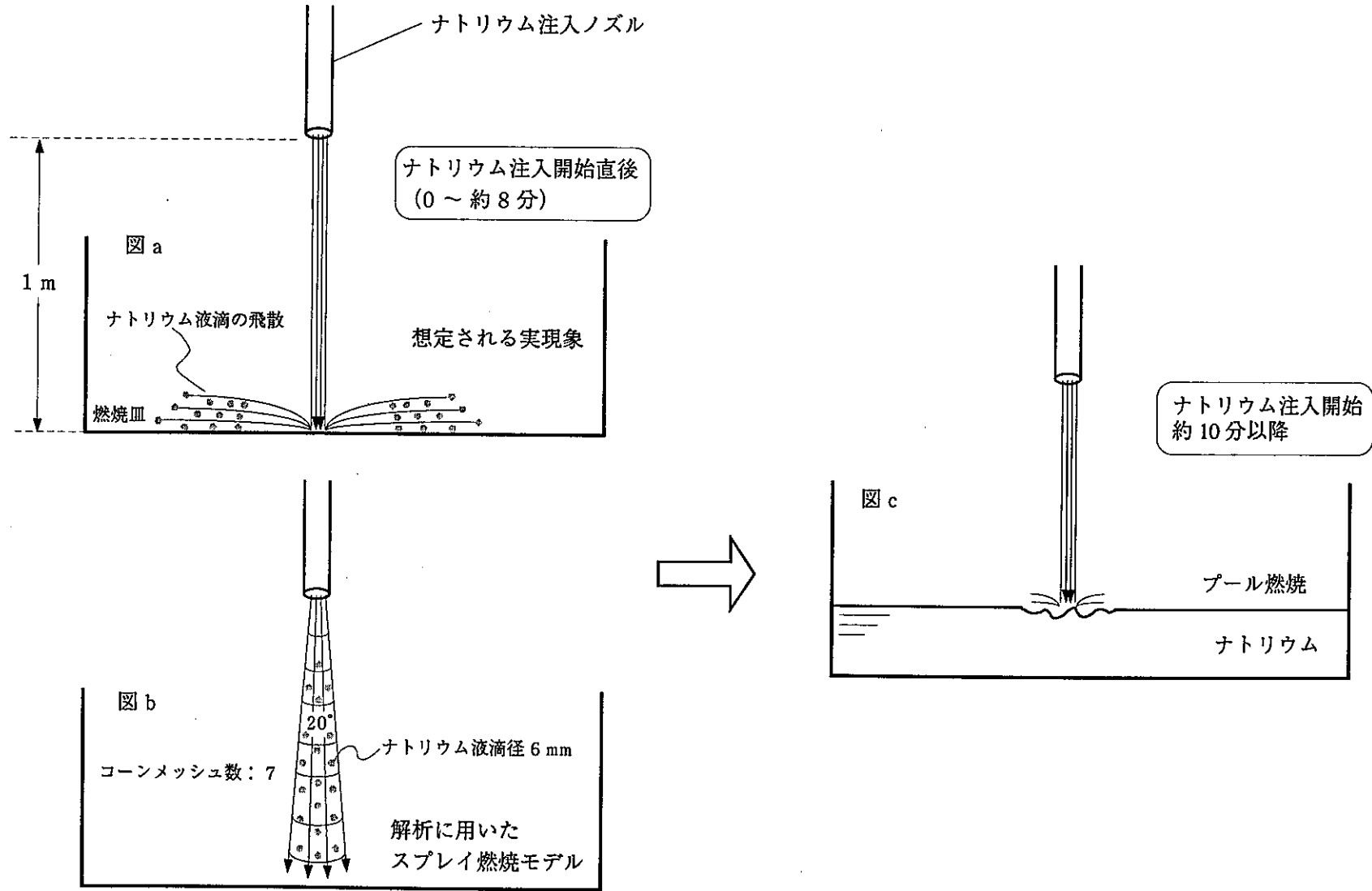


図 B-1 ナトリウム注入状況図 (推定図)

表 B-1 スpray燃焼モデルパラメータ解析結果

解析ケース	計算条件		計算結果					
	Na 液滴直径 mm	コーン角度 °	Na 液滴温度 ℃	コーン温度 ℃	プール温度 ℃		ガス圧力 kgf/cm <sup>2</sup> A	
					実験値	計算値	実験値	計算値
SPRAP1 <sup>注</sup>	6	20	510 ~ 635 (267 sec)	477 (267 sec)	480 ~ 898	480 ~ 843	1.03 ~ 1.52	1.03 ~ 1.53
SPRAP2	6	10	517 ~ 709 (267 sec)	851 (267 sec)		480 ~ 862		1.03 ~ 1.53
SPRAP3	6	30	505 ~ 603 (267 sec)	354 (267 sec)		480 ~ 834		1.03 ~ 1.53
SPRAP4	5	20	530 ~ 759 (273 sec)	631 (273 sec)		480 ~ 864		1.03 ~ 1.58
SPRAP5	4	20	564 ~ 931 (283 sec)	729 (283 sec)		480 ~ 984		1.03 ~ 1.61

<sup>注</sup> SPRAP1 の計算条件を最適として選定し、この結果を図 B-2 に示す。

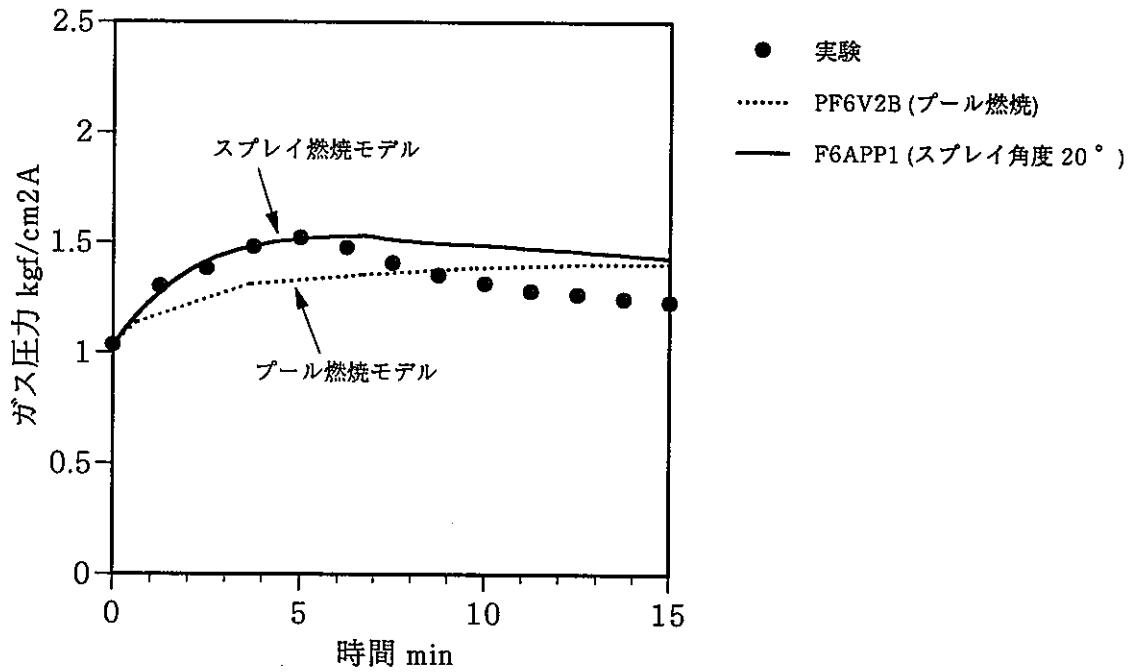
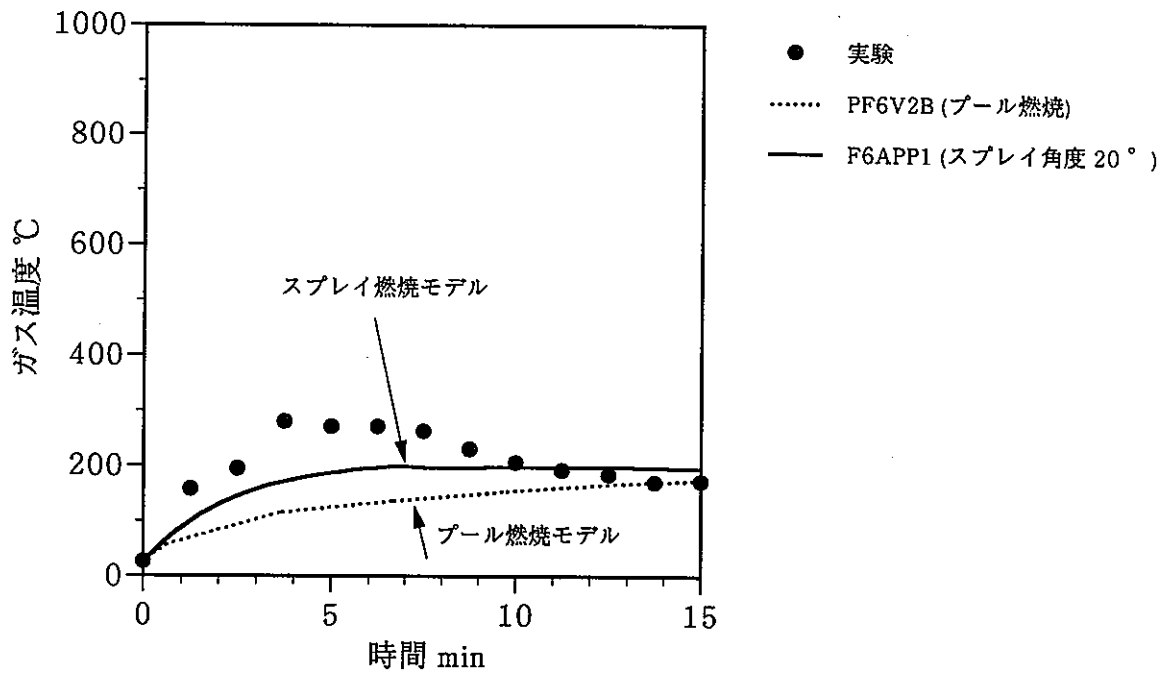


図 B-2 (1) FAUNA F6 解析結果  
 (スプレイ燃焼モデルとプール燃焼モデルの比較)



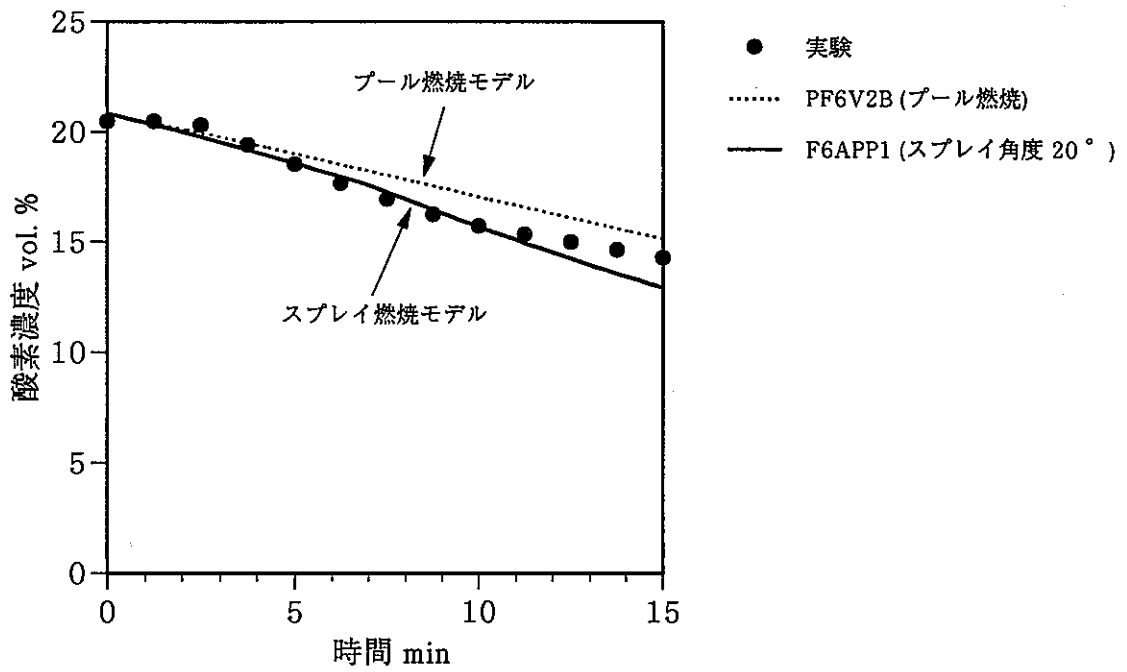
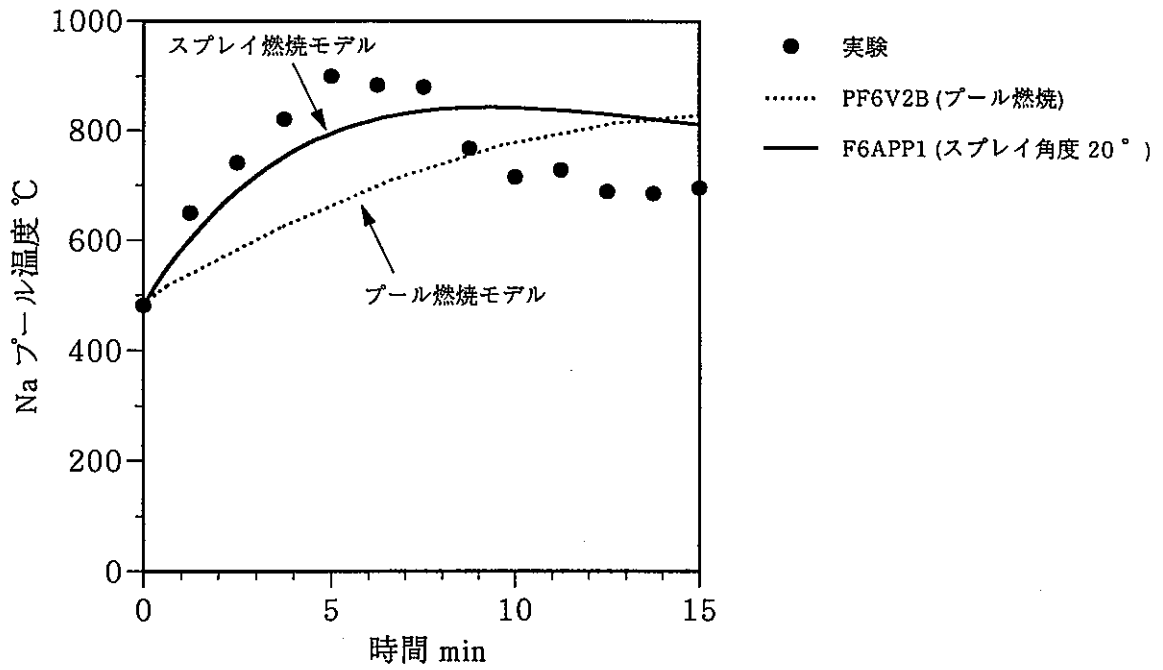


図 B-2 (2) FAUNA F6 解析結果  
 (スプレイ燃焼モデルとプール燃焼モデルの比較)