

# SPHINCSコードによるナトリウムプール 燃焼実験(Run-F7)の検証解析

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-chō, 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

# SPHINCS コードによるナトリウムプール燃焼実験 (Run-F7) の検証解析

Validation Analysis of Pool Fire Experiment (Run-F7) Using SPHINCS Code

山口 彰<sup>1</sup>、田嶋 雄次<sup>2</sup>

## 要旨

高速炉のナトリウム燃焼安全評価のため、SPHINCS(Sodium fire PHenomena IN multi-Cell System)コードを開発している。SPHINCS コードでは、床上のナトリウムプールや鋼製床ライナを多次元でモデル化したこと、プールの拡がり挙動を質量保存則に基づいてモデル化したこと、燃焼反応に化学平衡モデルを用いていること等により、特に小規模から中規模の漏えい時のライナ温度分布を詳細に解析することができる。

本研究では、SPHINCS コードの検証のため、小漏えい (毎時 11.8kg)時のナトリウムプール燃焼実験(Run-F7)の検証解析を実施した。この実験ではナトリウムプールの直径はおよそ 60cm であり、ライナの最高温度は 616℃であった。解析の結果、ライナ温度の上昇、プールの拡がり速度、ライナ温度分布が実験結果と一致することを確認した。また、ガス温度も実験結果を良好に予測することを示した。

本研究により SPHINCS コードのプール燃焼挙動に関するモデルが検証され、もんじゅのナトリウム小漏えい時のプール燃焼評価、ライナ温度評価に適用できることを確認した。今後も、引き続き実施される予定の小漏えい実験の検証解析を行なうとともに、高速炉の安全評価に適用する計画である。

---

<sup>1</sup> 大洗工学センター基盤技術開発部熱流体技術開発室

<sup>2</sup> ENO 数理解析リサーチ

## Validation Analysis of Pool Fire Experiment (Run-F7) Using SPHINCS Code

Akira Yamaguchi<sup>1</sup>, Yuji Tajima<sup>2</sup>

### Abstract

SPHINCS (Sodium Fire Phenomenology IN multi-Cell System) code has been developed for the safety analysis of sodium fire accident in a Fast Breeder Reactor. The main features of the SPHINCS code with respect to the sodium pool fire phenomena are multi-dimensional modeling of the thermal behavior in sodium pool and steel liner, modeling of the extension of sodium pool area based on the sodium mass conservation, and equilibrium model for the chemical reaction of pool fire on the flame sheet at the surface of sodium pool during. Therefore, the SPHINCS code is capable of temperature evaluation of the steel liner in detail during the small and/or medium scale sodium leakage accidents.

In this study, Run-F7 experiment in which the sodium leakage rate is 11.8kg/hour has been analyzed. In the experiment the diameter of the sodium pool is approximately 60 cm and the maximum steel liner temperature was 616 degree C. The analytical results tell us the agreement between the SPHINCS analysis and the experiment is excellent with respect to the time history and spatial distribution of the liner temperature, sodium pool extension behavior, as well as atmosphere gas temperature.

It is concluded that the pool fire modeling of the SPHINCS code has been validated for this experiment. The SPHINCS code is currently applicable to the sodium pool fire phenomena and the temperature evaluation of the steel liner. The experiment series are continued to check some parameters, i.e., sodium leakage rate and the height of sodium leakage. Thus, the author will analyze the subsequent experiments to check the influence of the parameters and applies SPHINCS to the sodium fire consequence analysis of fast reactor.

---

<sup>1</sup> O-arai Engineering Center, Advanced Technology Division,  
Thermalhydraulic Research Section

<sup>2</sup> ENO Suri Kaiseki Research

## 目次

## 図表リスト

1	はじめに .....	1
1-1	背景 .....	1
1-2	燃焼解析コードの体系化 .....	1
1-3	プール燃焼実験 .....	2
1-4	研究の目的と報告書の構成 .....	3
2	SPHINCS コードの概要 .....	6
3	プール燃焼実験の解析 .....	12
3-1	実験条件 .....	12
3-2	解析条件 .....	13
3-3	プール面積と燃焼速度の補正 .....	13
3-4	解析結果と実験結果の比較 .....	15
3-5	プールのモデル化に関する考察 .....	17
4	プール燃焼に関する仮定の影響 .....	31
4-1	ケース1 (もんじゅ解析条件相当) .....	31
4-2	ケース2 (プール最大面積を 0.28m <sup>2</sup> に設定) .....	32
4-3	ケース3 (プール燃焼速度を(1)式により補正) .....	32
5	結論 .....	42
6	謝辞 .....	43
7	参考文献 .....	44

## 図表リスト

図 1-1	ASSCOPS コードによるナトリウム漏えい量とライナ温度の関係	4
図 1-2	ナトリウム漏えい燃焼の機構論的解析コード体系	5
図 2-1	ナトリウムプールの移流モデル概念図	11
図 3-1	ライナ裏面の温度測定点	19
図 3-2	ライナ裏面中央部の温度履歴 (解析と実験の比較)	20
図 3-3	ライナ裏面中心より 5cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	20
図 3-4	ライナ裏面中心より 10cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	21
図 3-5	ライナ裏面中心より 20cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	21
図 3-6	ライナ裏面中心より 28cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	22
図 3-7	ライナ裏面中心より 40cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	22
図 3-8	プール半径の時間変化	23
図 3-9	プール平均温度	23
図 3-10	ガス温度の時刻歴	24
図 3-11	酸素濃度の時刻歴	24
図 3-12	プール燃焼率	25
図 3-13	雰囲気中のエアロゾル質量	26
図 3-14	プール中の反応生成物質量	26
図 3-15	各時刻 (0-10 分、1 分毎) におけるライナ温度分布	27
図 3-16	各時刻 (11-20 分、1 分毎) におけるライナ温度分布	27
図 3-17	各時刻 (20-38 分、2 分毎) におけるライナ温度分布	28
図 3-18	各時刻 (40-58 分、2 分毎) におけるライナ温度分布	28
図 3-19	ナトリウムプールの多点モデルと一点モデルの比較	29
図 3-20	平均プール温度 (ライナの熱伝導を無視した場合)	30
図 4-1-1	ライナ裏面中央部の温度履歴 (解析と実験の比較)	33
図 4-1-2	ライナ裏面中心より 5cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	33
図 4-1-3	ライナ裏面中心より 10cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	34
図 4-1-4	ライナ裏面中心より 20cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	34
図 4-1-5	ライナ裏面中心より 28cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	35
図 4-1-6	ライナ裏面中心より 40cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	35
図 4-2-1	ライナ裏面中央部の温度履歴 (解析と実験の比較)	36
図 4-2-2	ライナ裏面中心より 5cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	36
図 4-2-3	ライナ裏面中心より 10cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	37
図 4-2-4	ライナ裏面中心より 20cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	37
図 4-2-5	ライナ裏面中心より 28cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)	38

図 4-2-6	ライナ裏面中心より 40cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較) ……	38
図 4-3-1	ライナ裏面中央部の温度履歴 (解析と実験の比較) ……	39
図 4-3-2	ライナ裏面中心より 5cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較) ……	39
図 4-3-3	ライナ裏面中心より 10cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較) ……	40
図 4-3-4	ライナ裏面中心より 20cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較) ……	40
図 4-3-5	ライナ裏面中心より 28cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較) ……	41
図 4-3-6	ライナ裏面中心より 40cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較) ……	41
表 1	SPHINCS、ASSCOPS、CONTAIN コードの相互比較 ……	9
表 2	Run-F7 実験条件 ……	12
表 3	Run-F7 実験解析条件 ……	13
表 4	燃焼に関する仮定の検討のための解析条件 ……	31

## 1 はじめに

### 1-1 背景

1995年の12月に発生したもんじゅのナトリウム漏えいでは、温度計のニップル部よりナトリウムが漏えい・落下し、ダクトやグレーチングに衝突・飛散しながら床ライナ上に堆積した[1]。その過程では、ナトリウム液滴は蒸発・拡散し、空気中の酸素や水蒸気と反応している。これらのナトリウム漏洩・燃焼挙動はASSCOPSコード[2]で解析・評価されている。

ASSCOPSコードはいわゆる工学的なモデルに基づく評価手法であり、豊富な実験的知見とグローバルな質量やエネルギーのバランスなどに基づいているため、平均的挙動としては概ね現象を記述できるし、必要な裕度を考慮することも可能である。

しかしながら、その工学モデルの基づくところの実験的知見が、評価しようとする現象と異なっている場合には、その現象を適切にモデル化していることを確認する必要がある。特に、局所性が特徴的な現象については、グローバルなバランスに基づいた評価だけでなく、より詳細な解析手法を適用してその影響を検討する必要がある。そのような一つの例は、小規模のナトリウム漏洩である。ここで言う工学モデルの適用範囲を超えるであろう漏えい規模は、もんじゅでのナトリウム漏えいを下回る規模程度であると考えられる。もんじゅの漏えい規模は、およそ200 kg/h程度であった。

従来より、ナトリウム燃焼の安全評価では、エネルギー的に結果が厳しくなる大規模の漏えいを主たる評価事象としていた。これは事故影響の上限を把握することにより、必要十分な裕度をもって対策を施すという思想である。ASSCOPSの評価によれば、例えば原子力安全委員会の報告書[3]の中で図1-1が示されている。ここで注目している点はもんじゅの漏えい規模を下回る、例えば、10kg/hとか100kg/hの漏えい規模である。この程度の漏えい規模で、ASSCOPSの与えるライナ温度は800℃強となっている。

### 1-2 燃焼解析コードの体系化

近年の数値解析技術と計算機性能の進展を踏まえて、ナトリウム燃焼の機構論的な安全解析評価手法を確立すべく、図1-2に示すような解析コードの体系を開発してきた[4,5]。

安全評価における着目点は、建物の健全性とライナの健全性である。その評価のためには、燃焼に伴うセル内の圧力、室内のガス並びにコンクリート壁の温度、ライナ温度、水蒸気発生量と化学反応量を精度良く評価する必要がある。



その課題解決のため、(1)多セル燃焼解析コード SPHINCS、(2)多次元燃焼解析コード AQUA-SF、(3)三次元粒子法コード MPS-3D、(4)ナトリウム液滴の燃焼直接シミュレーションコード COMET、(5)Gibbs の自由エネルギー極小化法による化学平衡解析コード BISHOP を開発した。ナトリウム燃焼解析コード体系は図 1-2 に示されるように、これらの解析コードで構成され、それぞれに対して検証実験を検討している。

SPHINCS コードは、ナトリウム漏えい燃焼時のガス温度、圧力、ライナ温度、水素生成量などを包括的に評価する機能を備える。SPHINCS コードは多点近似（ゾーンモデル）に基づいており燃焼影響解析（安全評価）に適用する。AQUA-SF はフィールドモデルに基づき多次元効果の検討を行って、SPHINCS コードの対流通気モデル等の妥当性評価に使用する。COMET コードは単一液滴の燃焼量を直接解析により評価し、SPHINCS のスプレイ燃焼モデルの妥当性を示すものである。MPS-3D は液滴の飛散挙動の解析を行い、スプレイ燃焼モデルとプール拡大挙動の妥当性を評価するものである。BISHOP は化学平衡計算により、燃焼やその他の化学反応に伴う反応生成物の定量化を行う。

以上に述べたコードはいずれも新規に開発したものであり、多様な側面から検証実績を積み重ねる必要がある。ナトリウム燃焼は熱流動と化学反応が相互作用する複雑な現象である。そこで、安全評価の観点からは、適切な保守性を見極めることが大切である。図中に示す、液滴燃焼実験、プール拡大挙動実験、化学反応実験、液滴径分布の測定実験を通じて、現象の理解を深めるとともにモデル化の妥当性をさらに補強することを検討している。

### 1-3 プール燃焼実験

本報告では、図 1-2 中に記載されるプール燃焼実験に相当する、Run-F7 実験 [6]の結果を用いて、SPHINCS コードを検証した結果を述べる。Run-F7 実験は 1998 年 2 月 17 日に実施された実験で、漏えい規模は 3.3g/sec(12kg/h)であり、もんじゅのナトリウム漏えい規模の 15 分の 1 程度である。漏えい高さは 10cm であり、ナトリウムはプールの中心部に落下するような体系である。

この実験の解析を、図 1-2 に示す粒子法解析コード MPS-3D と SPHINCS の双方で実施している。そのうち、本報告書は後者の結果をまとめたものである。

SPHINCS コードは、小規模の漏えいを評価するべく、鋼製ライナ、保温材、コンクリートの全てを多次元化している。それを用いて、Run-F7 実験の予備解析を行った結果、小漏洩における SPHINCS コードのプールの取り扱いに限界があることがわかった。そこで、ナトリウムプールも多次元でモデル化するように SPHINCS コードの改良を行った。すなわち、ライナやコンクリート内部の熱輸送の機構は熱伝導であることに対して、ナトリウムプールでは、ナトリウ

ムの移流も考慮する必要がある。そこで、ナトリウムプールについては、プール内部の熱伝導等に加えてナトリウムの移流に伴う熱輸送もモデル化し、保存則が厳密に満足するようにした。このモデルについては、2章に述べる。

#### 1-4 研究の目的と報告書の構成

ナトリウム燃焼の安全評価を行う上でライナの温度評価を行うことが重要である。プール燃焼に着目した本実験結果を活用すれば、ライナの温度評価手法の検証を行うことが可能である。すなわち、実験の目的は、小漏洩時のプールの拡がり挙動、ライナの温度挙動を評価することである。解析の立場からは、今般の実験結果を用いて、SPHINCS コードを検証し、安全評価に適用するにあたってのコードの妥当性を示すことが大切であり、本報告の主旨である。今後、いくつかのシリーズ実験が実施される予定であるので、そこで漏えい率を変更することにより、漏えい率とライナ最高温度の関係を評価することが可能となる。これらのシリーズ実験については、順次、コード検証を実施する計画である。

報告書の構成は以下の通りとする。第2章では SPHINCS コードの概要並びにプール燃焼実験の解析評価を行うためのコードの改良、モデル化について述べる。1-3節で述べたとおり、重要なポイントはプールもライナも多次元化することである。

第3章では実験条件並びに解析結果を示す。実験の概要に関しては、解析を行う上で最低限のインフォメーションをここに含めた。詳しくは文献[6]を参照していただきたい。解析結果に関しては、第4章と併せて、若干の感度解析も含めて考察した。

第5章には結論を述べることとする。

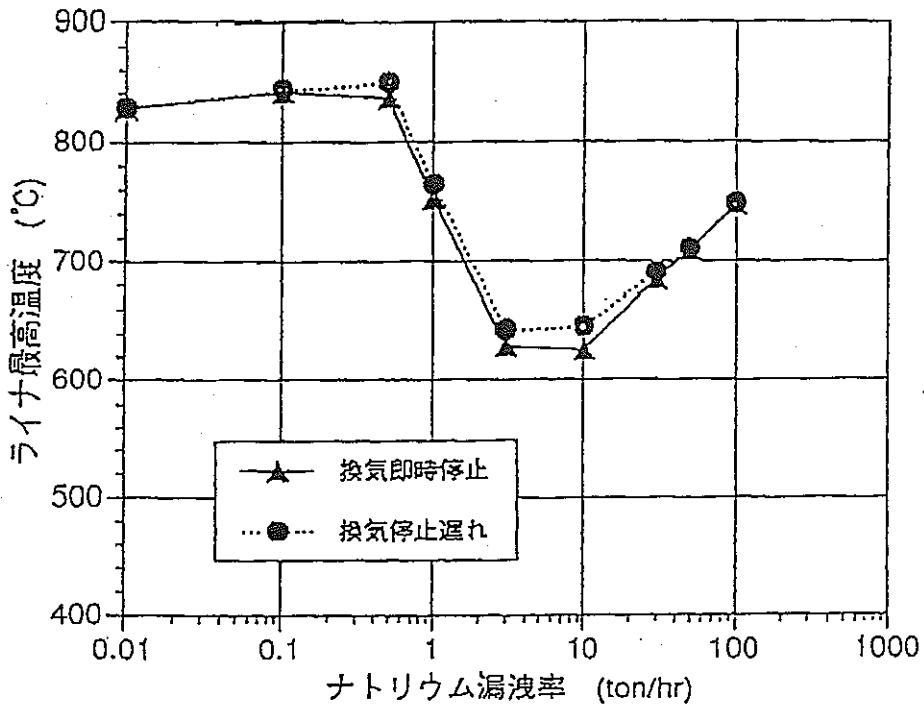
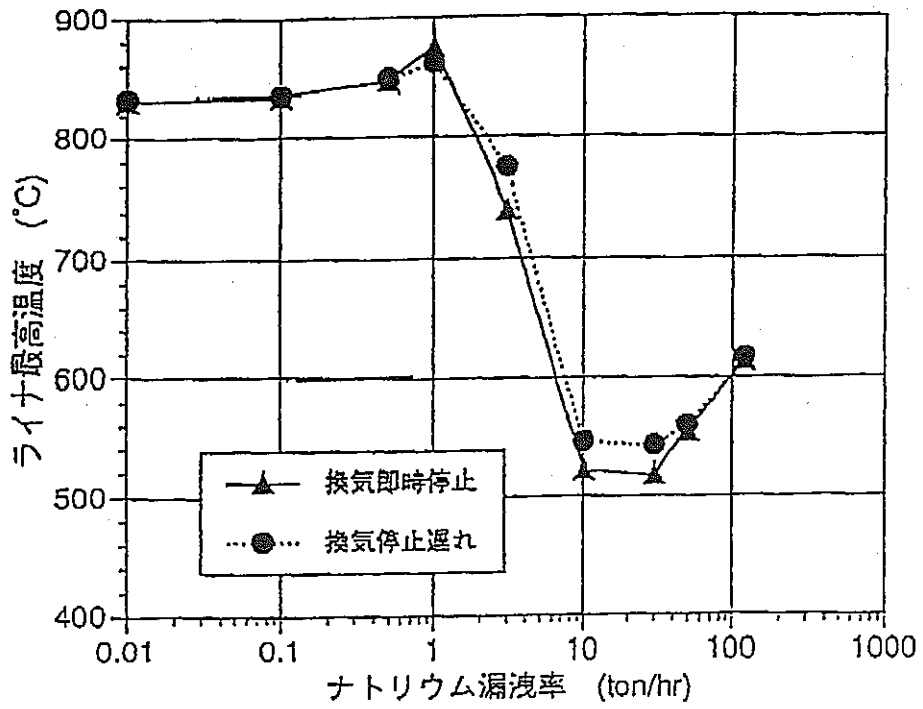


図 1-1 ASSCOPS コードによるナトリウム漏えい量とライナ温度の関係

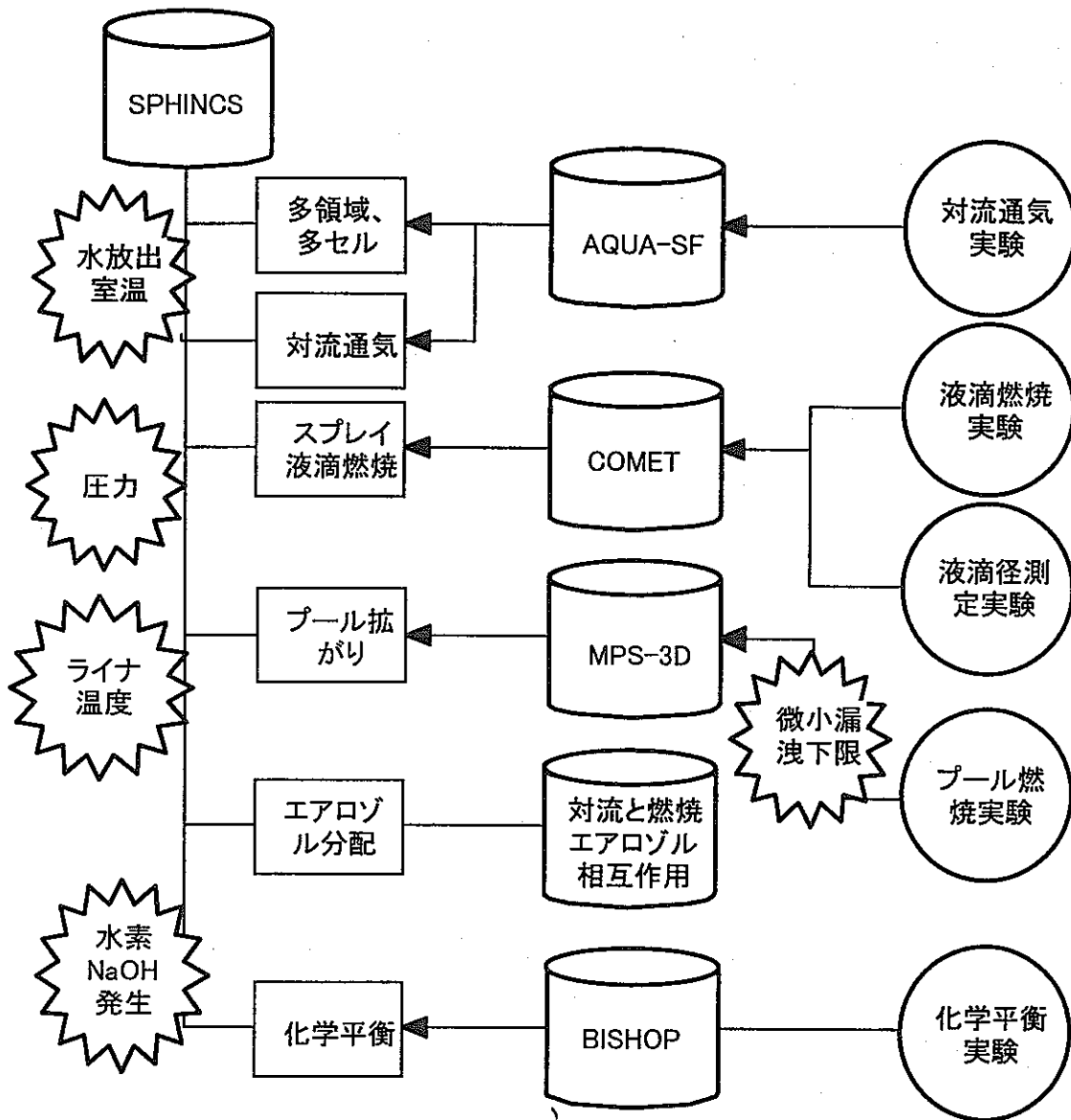


図 1-2 ナトリウム漏えい燃焼の機構論的解析コード体系

## 2 SPHINCS コードの概要

SPHINCS コードは、高速炉の安全評価で実績のある CONTAIN コード[7]をベースとして開発した[8]が、コード構造の明確化と、計算効率、解析精度の向上を図るため、新たに再構築した。その場合には、解析モデルなどのソフト資産とコード検証度をできるだけ継承することを心がけた。

SPHINCS コードと ASSCOPS コード、及び CONTAIN コードの比較を表1に示す。SPHINCS コードのモデルの詳細はここでは述べないが、主な特徴を列挙すれば以下の通りとなる。

### ① ナトリウム-酸素-水蒸気系の化学平衡モデル

スプレイ燃焼部、プール燃焼部、雰囲気中でのエアロゾルや水素の燃焼反応/化学反応量を化学平衡モデルにより評価するようにしたため、各化学反応式の順序、反応割合、水素再結合割合を機構論的に(温度や圧力、酸素濃度、水蒸気濃度、水素濃度、ナトリウム蒸気濃度といった場の状態量に基づき)評価できるようになった。その結果、それらの諸量を入力で指定する必要がなくなった。

### ② プール燃焼フレイムシートモデル

プール表面からのナトリウムの蒸発速度と雰囲気から供給される酸素のモル流束とプール燃焼により生成される熱のプールへの移行量とガスや壁への移行量を計算できるようになった。従って、燃焼熱のプールと雰囲気への配分と、プールの温度が現実的に解析されるようになった。

### ③ プールでの質量保存から時間依存のプール面積を計算するモデル

落下する未燃焼ナトリウム量とプール燃焼ナトリウム量との質量バランス及びナトリウムの物性値から、プール面積が徐々に拡大する挙動を解析する。これにより、プール燃焼率を現実的に評価できるようになった。

### ④ セル間の温度差に基づく鉛直方向と水平方向の対流通気モデル

セル間の相対的なエレベーション差、連通口の幅、高さ、厚さによって対流通気量を計算できるようになり、通気のモデル化の不確定性が排除された。

### ⑤ 多セル・多領域モデルとセル間のフローネットワークモデル

各室を任意の領域に分割できるようになり、雰囲気温度分布、コンクリート壁の温度分布を多次元的に評価できるようになった。従って、コンクリートからの水分放出量が現実的に評価できるようになった。また、任意の個数のセルを相互に連結してモデル化できるようになったため、全システムを2セルに一括して扱うことによるモデリングの不確定性が排除された。

## ⑥ 圧力解放ラインなどの工学的安全系のモデル

換気系の運転、ダンパーなどの開閉操作を考慮することができる。

## ⑦ エアロゾル挙動モデル

粒径分布、ブラウン拡散、熱泳動、重力沈降、凝集、沈着、生成、流入・流出を考慮したエアロゾルモデル。

⑧ 熱放射気体 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) とエアロゾルによる吸収・輻射を考慮した輻射伝熱モデル

ガス中の輻射エネルギーを吸収するガス成分の濃度、エアロゾルの濃度に応じてガスの吸収率を計算する。従って、エアロゾル濃度の上昇に伴うガスへの輻射伝熱量の増加、燃焼終了後のエアロゾルが無くなったときに重要となるプールと壁構造物の直接輻射などが機構論的に評価できるようになった。また、室の形状と寸法に応じた放射有効厚さを用いて輻射伝熱量を計算する。このモデルにより、入力データとして必要なものは壁表面（プール表面を含む）の輻射率（コンクリートで0.9など、既存のデータに基づいて設定する）のみとなった。

## ⑨ 機構論的な液滴燃焼モデル

空気の抵抗力、浮力、強制対流効果を考慮した液滴自由落下速度の評価、着火前後の反応/燃焼速度の変化を考慮した液滴燃焼モデルを用いた。

## ⑩ 液滴径分布 (Nukiyama-Tanasawa 分布) を考慮したスプレイ燃焼モデル

スプレイナトリウム液滴径を Nukiyama-Tanasawa 分布に従う多群で評価できる。大粒径から小粒径までの燃焼速度や熱容量等の違いを考慮して、各サイズの液滴の温度、スプレイ燃焼量を現実的に評価することが可能となった。

## ⑪ ナトリウムプール、床ライナ、コンクリートの多次元モデル

ナトリウムプール、床ライナ、断熱材、コンクリートを多次元でモデル化した。その結果、床ライナの一部にプールが存在するような小漏洩時のライナ温度を精度良く評価することが可能となった。また、ライナの温度分布をプールとの熱伝達、ガスとの熱伝達、断熱材やコンクリートとの熱伝達、ライナ横方向への熱伝導等を考慮して評価できるようになった。壁コンクリートも同様である。

## ⑫ ナトリウムプールの隣接セルへの移流、連通管からの排出を評価するモデル

漏えい室から隣接室へ、プールが拡大し、連通管のある部屋からダンプタンク室へ排出される挙動が解析できるようになった。その結果、大漏えいから小漏えいまでを一貫したモデルで扱える。

## ⑬ 自由水と結合水を考慮した水蒸気放出モデル

コンクリートからの水放出量は自由水と結合水の組み合わせでモデル化している。放出量に関しては表形式で入力するが、自由水の放出量は

雰囲気中の圧力（沸点）に依存する。

SPHINCS コードの妥当性を検証するために、動燃事業団で実施したスプレイ燃焼実験（Run E1）、プール燃焼実験（Run D1）、漏洩燃焼実験Ⅰ及びⅡの解析を実施し、実験結果との良好な一致を確認した。

SPHINCS コードは、小規模の漏えいを評価するべく、鋼製ライナ、保温材、コンクリートの全てを多次元化している。それを用いて、Run-F7 試験の予備解析を行った結果、小漏洩における SPHINCS コードのプールの取り扱いに限界があることがわかった。そこで、小規模漏えい時のプール燃焼影響評価のために、ナトリウムプールも多次元でモデル化するように SPHINCS コードの改良を行った。その要点は、プールの質量保存、エネルギー保存を非定常、多次元でモデル化し、プール拡大挙動モデルと組み合わせたことである。

小規模漏えい時のプール燃焼影響評価のために、SPHINCS の改良を行った点については、少し詳しく述べる。

ライナやコンクリート内部の熱輸送の機構は熱伝導であることに対して、ナトリウムプールでは、ナトリウムの移動現象を考慮する必要がある。すなわち、質量保存に関しては、スプレイから落下する量、プール燃焼量、半径方向に移流する量の均衡と総量保存を満たさなければならない。エネルギー保存に関しては、スプレイ燃焼で加熱されたナトリウムの流入エンタルピー、ナトリウムの蒸発によるエンタルピー、燃焼に伴う発熱によるエンタルピー、ナトリウムの移流に伴い輸送されるエンタルピー、伝導、輻射、対流によりガス中あるいはライナへのエンタルピー輸送を考慮する必要がある。これらのバランスの概念を図 2-1 に示す。これらにより、保存則が厳密に満足された上でプールやライナの温度分布を評価している。

表1 SPHINCS、ASSCOPS、CONTAIN コードの相互比較

	SPHINCS	ASSCOPS
一般		
物性値	最新のデータを使用し、温度依存性を考慮	SOFIRE, SPRAY コードの値を使用
検証度	検証解析 (RunE1, D1, 実験 2、実験 1 等) を実施中	検証実績多数
空間の取り扱い		
セル間フローモデル	運動量保存式を解く	瞬時圧力平衡を仮定
セル間の通気モデル	対流通気 (上下、左右)	対流通気 (上下のみ)
多次元効果	セル内を多領域に分割可能 (疑似多次元モデル)	1 点近似
多セルモデル化	任意の数のセルを考慮	燃焼室と連通室の 2 セルを考慮
エアロゾルモデル	粒径分布、重力沈降、凝集、移流などを考慮	重力沈降を考慮
エアロゾルの化学反応	入力で計算	入力で指定、(反応速度定数を指定)
輻射モデル	ガス-構造物-プール相互の輻射を考慮	プール-ガス、ガス-構造材を考慮
輻射係数	エアロゾル濃度、熱放射性気体 (H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , CO) 濃度に応じてガス吸収率を計算	輻射係数を指定
コンクリート水蒸気放出モデル	表形式で温度の関数	同左
プール燃焼		
プール面積モデル	時間依存の質量保存則を解いて評価	プール面積を入力で指定
プール、ライナー	多次元モデル	1 次元モデル
燃焼モデル	酸素フラックス+フレームシートモデル	酸素フラックスモデル
燃焼熱	フレームシートからプールと雰囲気、構造間の輻射と熱伝達を計算	全量プール中に入熱



燃焼生成物の移行	プールとガスへの移行割合を入力指定	同左
燃焼反応生成物割合	酸素濃度、Na 濃度、水蒸気濃度、水素濃度温度より評価（化学平衡モデル）	反応順序、割合を指定
水素再結合割合	化学平衡モデルまたは入力で指定	入力で指定
セル間の移流、連通管からの排出	プールの拡大、隣接セルへの移流を計算	瞬時に指定した面積に広がる
スプレイ燃焼		
スプレイ燃焼モデル	Spalding の液滴燃焼理論	同等
液滴の運動	重力、抗力、浮力を考慮して運動方程式を解く	同左
液滴径分布	Nukiyama-Tanasawa 分布を用いて離散化する	代表直径を使用（対数正規分布を想定）
燃焼速度	着火前後の反応／反応速度を考慮	スプレイ後直ちに着火
燃焼熱生成物	エアロゾルは全量雰囲気へ	同左
燃焼反応生成物割合	化学平衡モデル、水蒸気との反応は考慮せず	入力で指定
水素再結合割合	化学平衡モデルまたは入力で指定	入力で指定

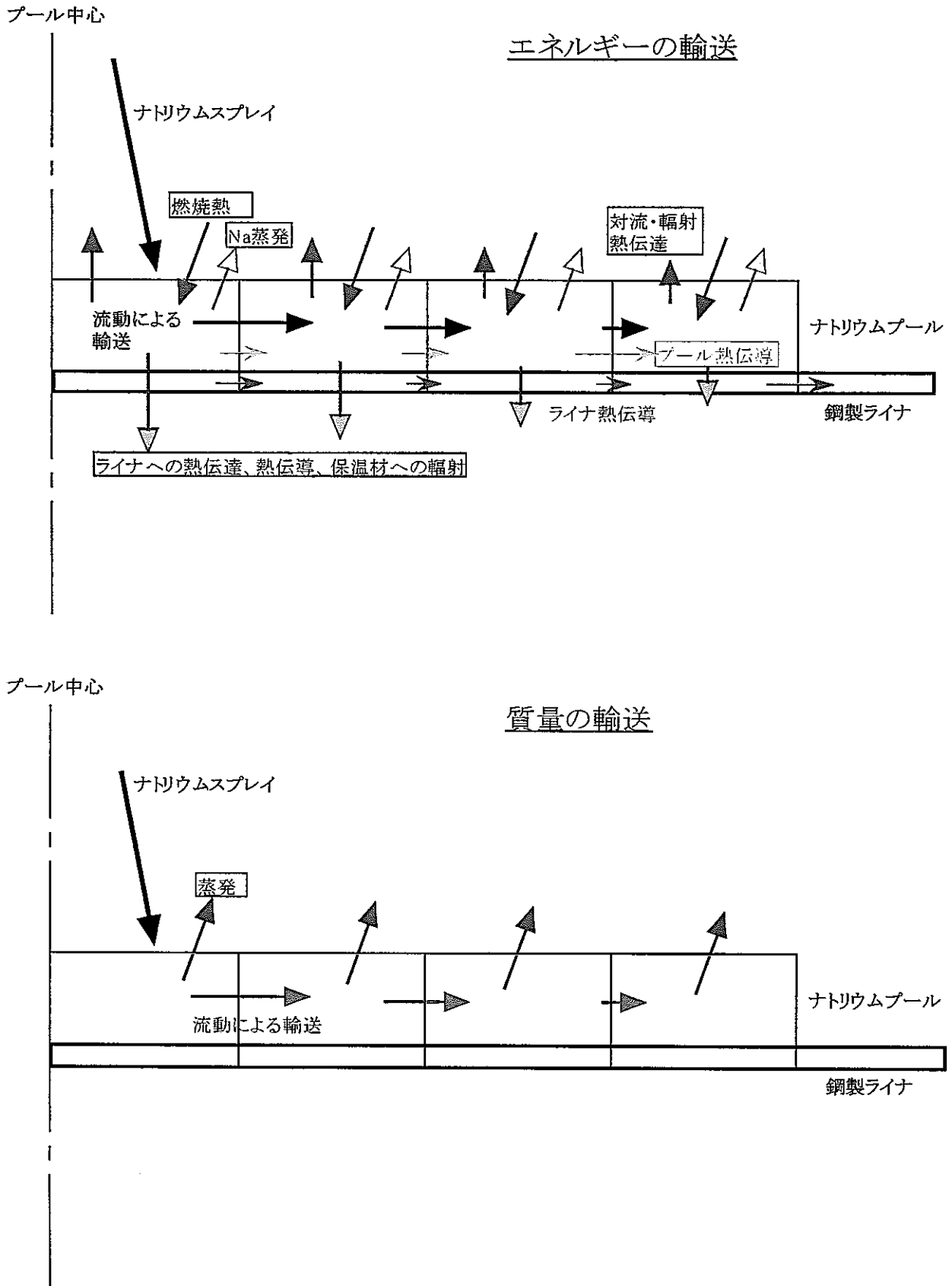


図 2-1 ナトリウムプールの移流モデル概念図

### 3 プール燃焼実験の解析

#### 3-1 実験条件

Run-F7 実験は 1998 年 2 月 17 日に大洗工学センターにて実施された。その目的は、①ある漏洩量以下になるとライナ温度最高値は低下するため、評価対象とすべき漏洩量に下限が存在すること、及び、②プールの拡大挙動とそれに伴うライナ温度変化を確認することである。漏えい規模は 3.3g/sec(11.8kg/h)であり、もんじゅ事故のナトリウム漏えい規模の 15 分の 1 程度である。漏えい高さ（漏えいナトリウムノズルのライナ表面からの位置）は 10cm であり、ナトリウムはコラム状にプール中心部に落下するような体系である。

以下に実験条件の概略を示す。

表 2 Run-F7 実験条件

項目	実績	備考
ライナ材質	SM400B	保温材上に直置き
ライナ直径	1128mm	円形の鋼製ライナ
ライナ厚さ	6mm	実機ライナと同一厚さ
ナトリウム総漏洩量	4940g	
ナトリウム漏洩時間	25 分 05 秒	実測値（30 分の予定で実施した）
ナトリウム漏洩率	3.28g/sec	漏えい量と漏えい時間から計算
漏洩ナトリウム温度	504℃	実測値
漏洩高さ	10cm	ライナ表面からのノズル高さ
容器直径	1300mm	円筒形鋼製容器
容器高さ	2200mm	
容器容積	3m <sup>3</sup>	
天井面積×厚さ	1.33m <sup>2</sup> ×8mm	
壁面積×厚さ	8.96m <sup>2</sup> ×8mm	
初期温度	20℃	試験実施前の容器内熱電対測定値
外気温度	13℃	実測値
吸気流量	成り行き	吸気口内側に 30cm 角の邪魔板設置
排気流量	3m <sup>3</sup> /min	強制排気

ライナは、実機のライナと同一素材、厚さとし、保温材の上に直置きしてい

る。ナトリウム漏えい量は当初の目標 10kg/h よりも若干多く、11.8kg/h であったが、ほぼ目標値となっている。

### 3-2 解析条件

前節に述べた条件で SPHINCS にてモデル化を実施した。解析に用いた物理モデル等は SPHINCS の標準モデル（もんじゅの評価で用いるモデル）である。ただし二点の重要な仮定を用いており、それに関しては後述する。SPHINCS によるモデル化、解析条件の概要を以下に述べる。

表3 Run-F7 実験解析条件

Na プール格子分割	$\Delta r=1\text{cm}$	極座標
ライナ格子分割	$\Delta r=1\text{cm}$	極座標
保温材格子分割	$\Delta r=1\text{cm}$	極座標
プール燃焼モデル	フレイムシート	
反応生成物	化学平衡モデル	
スプレイ液滴径の分布	抜山-棚沢分布	
体積平均液滴径	4.5mm	
プール拡大挙動	プール拡大モデル	質量保存と表面張力による
プールからの輻射	輻射係数=0.65	ASSCOPS と同等、プールと雰 囲気間の輻射のみを考慮

液滴径はもんじゅの評価と同様に体積平均直径が 4.5mm の Nukiyama-Tanasawa 分布とした。同じ量のナトリウムが、直径 4.5mm の液滴で落下する場合とコラム状に滴下する場合を考える。すなわち、体積平均直径  $D$  の液滴径分布を持つスプレイがある流量  $W$  で漏えいするとき、時間  $\Delta t$  に落下する全液滴表面積は  $\frac{6W}{\rho D}\Delta t$ 、である。それと、同じ漏えい量で直径  $d$  のコラムで落下する

ときの表面積は  $\frac{4W\Delta t}{\rho d}$  である。直径 4.5mm の液滴と表面積が等しくなるのはコ

ラムの直径が 3mm のときである。なお液滴の体積平均を 7.5mm とした場合も比較のため解析したが、スプレイ高さが低いこともあり、結果はほとんど変わらなかった。本実験のように漏えい高さが低い場合には、液滴径は重要ではないと言える。

### 3-3 プール面積と燃焼速度の補正

SPHINCS では保温材やコンクリートなどのライナ以下の構造を多次元でモデル化していたが、プールについては 1 点近似であった。そこで、先に述べたようにプールに関する保存則の改良を実施した。まず、プールを 1 点で近似した SPHINCS による予備解析を実施し、その場合にどのような問題点があるのかを検討した。

(1) プール厚さと面積について

表面張力に基づいてプール厚さを決め、プール中の質量保存則を解くプール拡大モデルを用いると、プール面積は約  $0.4\text{m}^2$  (半径 35cm) となり、実験結果(約  $0.28\text{m}^2$ : 半径 30cm) と整合しない。一方で、ライナ温度の上昇挙動から、プール面積が  $0.28\text{m}^2$  に到達するまでのプール拡大速度に関しては、実験とプール拡大モデルはほぼ一致していた。要すれば、実験では、プール面積が  $0.28\text{m}^2$  近傍に達するにつれてプール拡大が抑制されている。

(2) 漏洩直下の温度上昇について

実験結果から、プールの温度にも空間分布が顕著に現れていることが示された。特に、漏洩直下では、漏えいしている間は、ライナ温度と滴下ナトリウムの温度とが等しくなっている。プール外側部ではより高温となっており、さらに外縁部では徐々に温度低下していく。当然ながら、一点近似のプールモデルではこのような現象を再現できない。そこでプールも多次元でモデル化する必要があることが認識された。

(3) 漏洩停止後の残存ナトリウムの燃焼挙動について

漏洩停止後 10 分 (実験開始から 35 分) 程度から、実験ではライナ温度が低下し始めている。一方、解析では、漏えい停止時点で全漏えい量の約 30~40% 程度のナトリウムが残存しており、漏えい停止後もこれがそのまま燃焼するとすれば残存ナトリウムが無くなるまで燃焼が続き、約 35 分後から温度低下が始まるという実験事実を再現できない。なお、堆積物中には、金属ナトリウムが残存していたことが堆積物の試験後分析から確認されている。

上に述べた点に配慮して、これらの改善を施すため以下を仮定した。

(1) プール厚さと面積について

プール面積が  $0.28\text{m}^2$  に達するまでは SPHINCS のプール拡大モデルを用いるが、そこでプール面積を頭打ちとした。

(2) 漏洩直下の温度上昇について

ライナだけでなく、ナトリウムプールも多次元でモデル化し、半径方向の温度分布を考慮できるようにした。この改良については既に述べたとおりである。

(3) 漏洩停止後の残存ナトリウムの燃焼挙動について

プール中のナトリウムが燃え尽きる以前に燃焼が停止したこと、また、プー

ル燃焼中もプール全面で燃えたと言うよりも堆積物の所々に空いた空孔からナトリウム蒸気が流出して燃焼しているような挙動が観察されたことから以下のモデルを想定した。

$$\text{実効燃焼速度} \approx \text{燃焼速度} \times \frac{\text{プール中の未反応金属Na質量}}{\text{プール中のNa及びNa化合物の総質量}} \quad (1)$$

ここに述べた仮定はライナ上に厚く堆積したナトリウムとナトリウム酸化物との混合物プール中で、ナトリウムが空気から遮断される効果を考慮したものである。換言すれば、プールの表面積はその一部はナトリウムであり、残りは酸化物であるとし、その比率はプール中の物質の組成比に拠っていると仮定することに相当する。第一近似としては妥当なものであると考えられる。

以上まとめれば、本解析に特有の仮定は、(1)と(3)であり、

◎プールの燃焼速度を(1)式に従って補正する

◎プールの最大面積を実験結果に基づき指定する

の二点である。なお、この二点の仮定を用いない場合には、燃焼量を過大に評価することになると考えられる。

### 3-4 解析結果と実験結果の比較

図 3-1 にライナ裏面の温度測定点を示す。漏えい点直下 ( $r=0\text{cm}$ ) に一点、そこを中心に基盤目状に熱電対が配置されている。

図 3-2 から図 3-7 にそれぞれ、ライナ中心部(図 3-2)、中心より 5cm(図 3-3)、10cm(図 3-4)、20cm(図 3-5)、28cm(図 3-6)、40cm(図 3-7)の位置におけるライナ裏面の温度に関する実験結果と計算結果の比較を示す。実験結果に関しては同じ半径の測定点が 4 カ所あるので、その全てを示す。これらの図から概略示されるのは、

- (1) 解析結果と実験結果は温度過渡変化が良く一致していること、
- (2) 温度の絶対値に関しては全般的に解析結果が数十度高めになっていること、
- (3) 最高温度は解析結果では  $652^{\circ}\text{C}$ (1920 秒後)、実験では  $616^{\circ}\text{C}$ (1980 秒後)といずれも十分に低いこと、
- (4) ライナの温度上昇率、降下率も実験を良く予測できていること、

である。これらの点について、以下で、さらに検討を加える。

図 3-2 に示される中心点のライナ温度の実験と解析の比較から、初期の温度上昇、それに続く温度が一定の領域、漏えい停止後の温度上昇、2000 秒以降の温度低下の傾向が良く予測されている。全ての時間にわたっておよそ  $50\sim 70^{\circ}\text{C}$

ほど、解析結果が実験結果を上回っている。その理由は、プール燃焼挙動のモデル化によると考えられる。実験結果では、プール中心部温度と滴下ナトリウムの温度(504℃)は 1500 秒まではほぼ等しくなっている。解析結果では、滴下ナトリウムの温度は 515℃であり、ほぼ漏えいナトリウム温度とほぼ等しくなっている。両者がわずかに異なるのは実験でノズル周辺に不活性ガスを流しているためと考えられる。中心部でライナ温度が実験よりも高く解析された理由は、実験では中心部でプール燃焼が阻害されているのに対して、解析では中心の計算セルにおいても他の計算セルと同様にプール燃焼が解析されるためと考えられる。

図 3-3 や図 3-4 でも、数十℃だけ解析結果が高いことを除いては解析結果と実験結果は良く一致し、両者の差は図 3-2 のプール中心と同程度なので、プール燃焼挙動は実現象を良く再現していると考えられる。図 3-3 の中心から 5cm の位置、図 3-4 の 10cm の位置でのライナ温度は等方的となっている。また 300 秒の時点までは温度の立ち上がりは解析結果と実験結果は一致している。この時点では、プール半径は 20~25cm 程度まで到達している。すなわち、プール外側にナトリウムが輸送され、プールが拡大する挙動も実験を再現していると考えられる。

SPHINCS の解析が、プール中心で燃焼を過大評価していることに関して、考え得る理由としては、①拡散燃焼でよく見られるように、プール外周部に比べてプール中心部では空気の供給が少なく、燃焼が抑制されるという現象が実験において生じているのに対し、解析ではそのようなガスの多次元的特性を考慮していない、あるいは②漏えい高さが低いため、滴下ナトリウムが中心熱電対位置に落下してプールを攪拌するため、実質的にプール燃焼が生じていないのに対し、解析ではプール内部の深さ方向の温度分布などを考慮していないこと等が指摘される。これをさらに精度向上させようとするれば、ガス空間を多次元化し、プール中央部と外縁部での酸素濃度やガス温度の違いを考慮したり、プール内部の伝熱流動を詳細に分析する等が必要であると考えられる。

SPHINCS の解析モデルでは、プール中央部では現実に起きるよりもプール燃焼を過大評価する。その結果、プール中央部のナトリウムはより高温となり、そのナトリウムが外側に移流してくるため、全般的に温度が高くなるという傾向があらわれる。従って、ガス空間を 1 点で近似するゾーンモデルによる燃焼評価はプール燃焼量を多めに評価することは必然の結果とも考えられる。

図 3-5 には中心から 20cm の位置でのライナ温度を示す。温度の立ち上がりは解析の方が若干早く、実現象ではこの位置近傍からプール拡大が抑制されていると考えられる。温度変化については、解析結果は実験値を数十度上回るが、傾向は概略一致する。この位置では、プール形成過程（後で図 3-8 に示すように約 900 秒まで）は温度上昇挙動は周方向に等方的であるが、それ以降、特に

漏えい停止後の温度挙動は若干非等方的である。以下、図 3-6 と図 3-7 においても同じ方向の温度が高くなっている。なお、試験後のプール形状から、わずかながらこの方向に最も成長しているようである。

図 3-6 は中心から 28cm の位置でのライナ温度を示す。この点は、プールの外縁部に相当する。解析結果では温度を高め評価するが、これはプールエッジの堆積物の形状によるものである。この部分は半径方向の温度勾配がもっとも大きいところである。解析結果では、プール端点は半径 30cm の位置にある。30cm の位置の温度であれば、実験結果と近く、満足すべき結果が得られている。

図 3-7 はプールのない位置の温度分布である。従って、この点においては、ライナ温度は、ライナ半径方向の熱伝導と、ライナとガス、保温材との熱伝達で決定される。実験結果ときわめて良好な一致が得られている。この結果はプール外縁部におけるライナの温度勾配の観点から非常に重要である。ナトリウムプール外部の点におけるライナ温度が実験と良く一致すること、プール内部及び周辺部の温度は実験の傾向を若干高めながら着実に捉えていることは、プール外縁部の温度勾配をほぼ正しく評価するものと考えて良い。

図 3-8 にはプールの拡大挙動を示す。十数分でプール半径の増加は停滞しており、図 3-8 の結果はそれまでのプール拡大挙動を良く模擬しているものである。十数分でプールの拡大が停止することに関しては、ナトリウムプールが拡大しつつ、そのフロントで酸化して凝固するという現象を評価する必要があると考えられる。

図 3-9 にはプールの平均温度を示す。プール平均温度は、各メッシュのエンタルピーを質量平均してプール平均温度を求めた。平均温度の最高値は 600℃となっており、温度の空間分布評価の重要性を示すものである。

図 3-10 にはガス温度を、図 3-11 には酸素濃度を示す。これらも実験値と良く一致していることが確認された。

図 3-12 にはプールの燃焼速度を示す。また、図 3-13 と図 3-14 にはそれぞれ雰囲気中のエアロゾル量とプール中の組成を示す。

図 3-15 から図 3-18 にはプールの半径方向温度分布の時間変化を示す。上に述べた特性がこの図から見て取れる。なお、図中の○と×は表示している時刻の最初と最後の時刻を表している。温度分布は○をつけた曲線から×をつけた曲線にむかって変化している。

### 3-5 プールのモデル化に関する考察

プールの温度分布を評価するために、本解析では 1 次元軸対称でメッシュ分割した。それによる評価を行った結果と一点モデルによる結果との差について考察する。



図 3-19 に、プールの 1 点モデルと多次元モデルに関して、プール面積、プール温度、フレーム温度、ガス温度を比較して示す。プール温度に関しては、多点モデルの場合には各メッシュのエンタルピーを質量平均してプール平均温度を求めた。なお、ライナの分割は両ケースともに多次元で分割している。この結果から、ガス温度、プールの拡大挙動は両者でほぼ一致している。しかし、プール温度は多点でプールをモデル化した場合が、わずかながら高い温度となっている。

多点モデルでは、プールに温度分布があるのでライナにもそれに対応する温度分布がつくことにより、プール最外周における半径方向への熱伝導が小さくなることがその理由であると考えられる。そこで、ライナの半径方向熱伝導を無視して、プールを多点とした場合と一点とした場合の解析結果を比較したところ、図 3-20 に示すとおり、両者は良好に一致した。また、図 3-19 に比べてピーク値は約 60℃高くなった。

すなわち、この試験ではライナの熱伝導を無視すれば、ライナ温度を過大評価すること、一点モデルと多点モデルはほぼ同等の結果を与えることが示された。また、プールを一点モデルとしてライナの横方向熱伝導を考慮すればライナ温度を低めに評価することが示された。ASSCOPS の解析ではプールを一点としライナの熱伝導を無視しているため、このような条件ではライナ温度を数十度ほど過大評価していると推察できる。また、ライナの半径方向への熱伝導を無視することは、プール外縁部の温度勾配に関しても厳しい結果を与えるものである。これらの解析から、ライナの最高温度、温度分布や勾配を評価するためには、半径方向熱伝導とプールの温度分布を考慮するべきであることが指摘される。

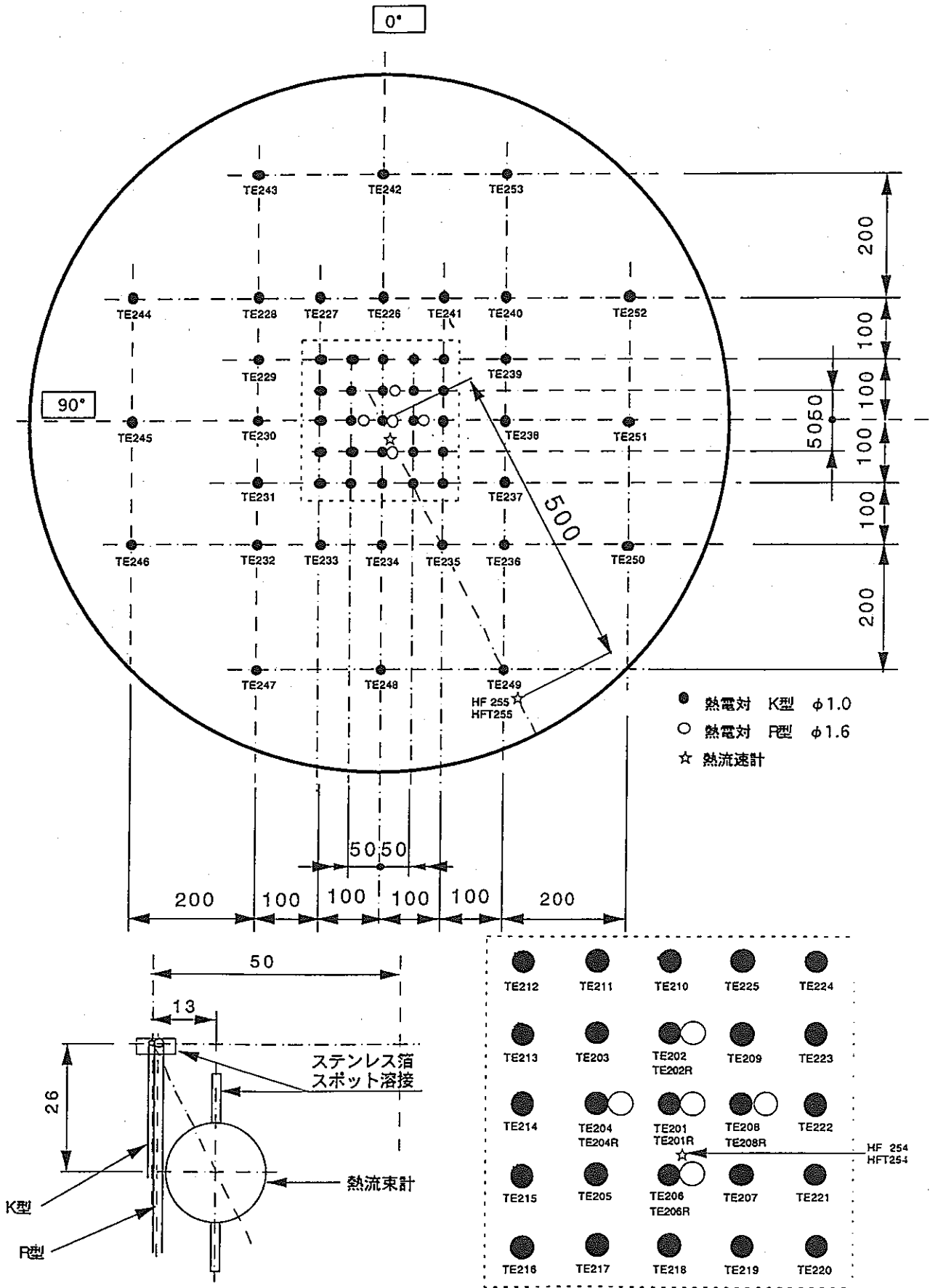


図 3-1 ライナ裏面の温度測定点

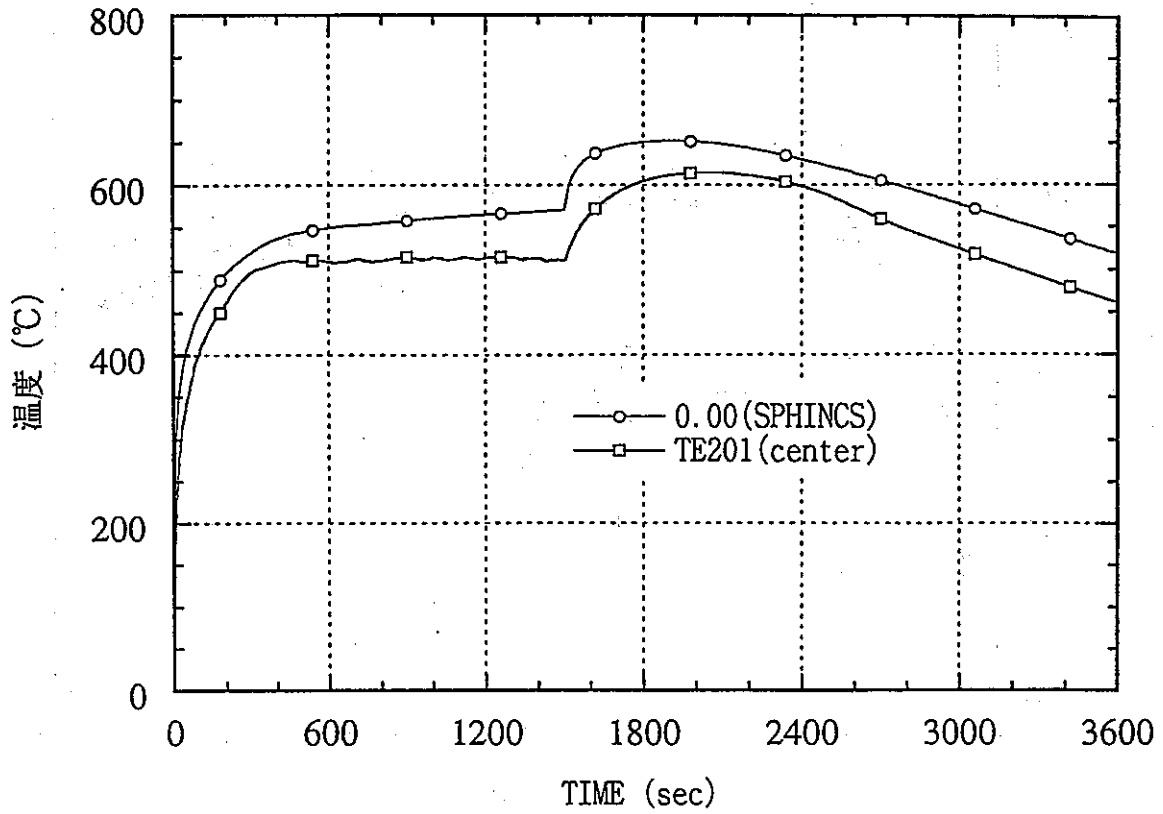


図 3-2 ライナ裏面中央部の温度履歴 (解析と実験の比較)

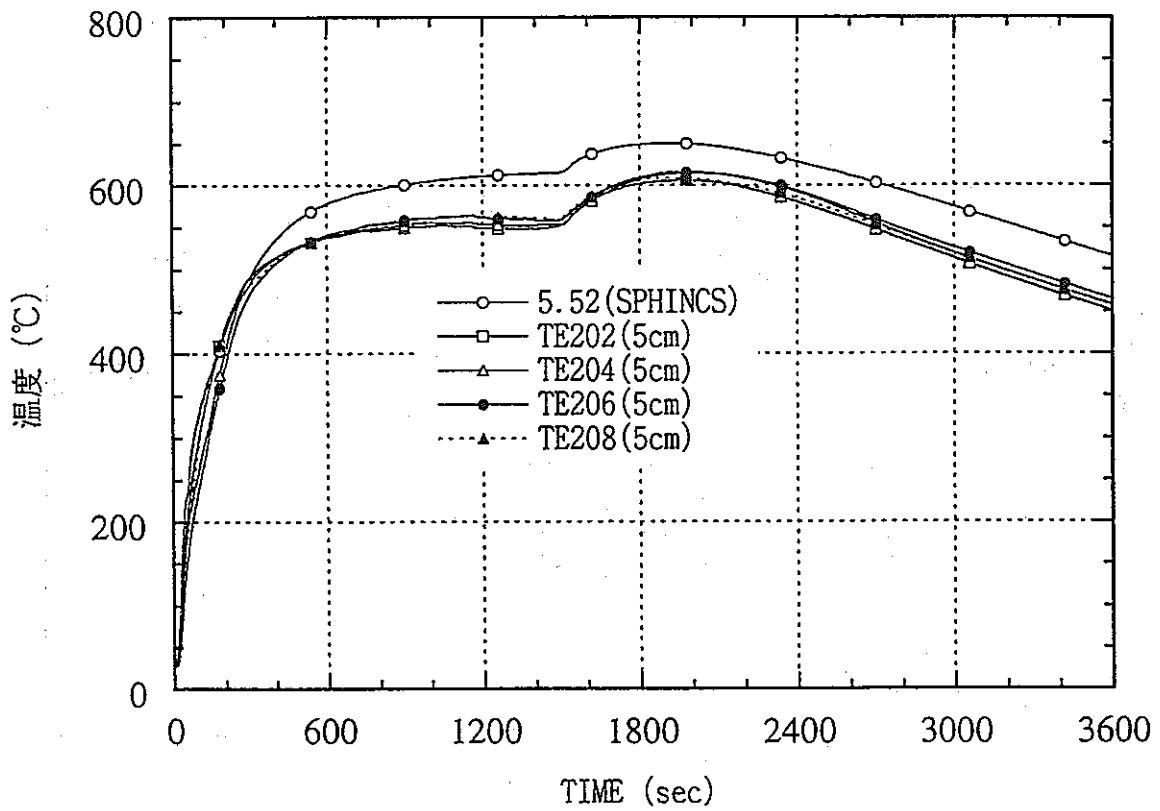


図 3-3 ライナ裏面中心より 5cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

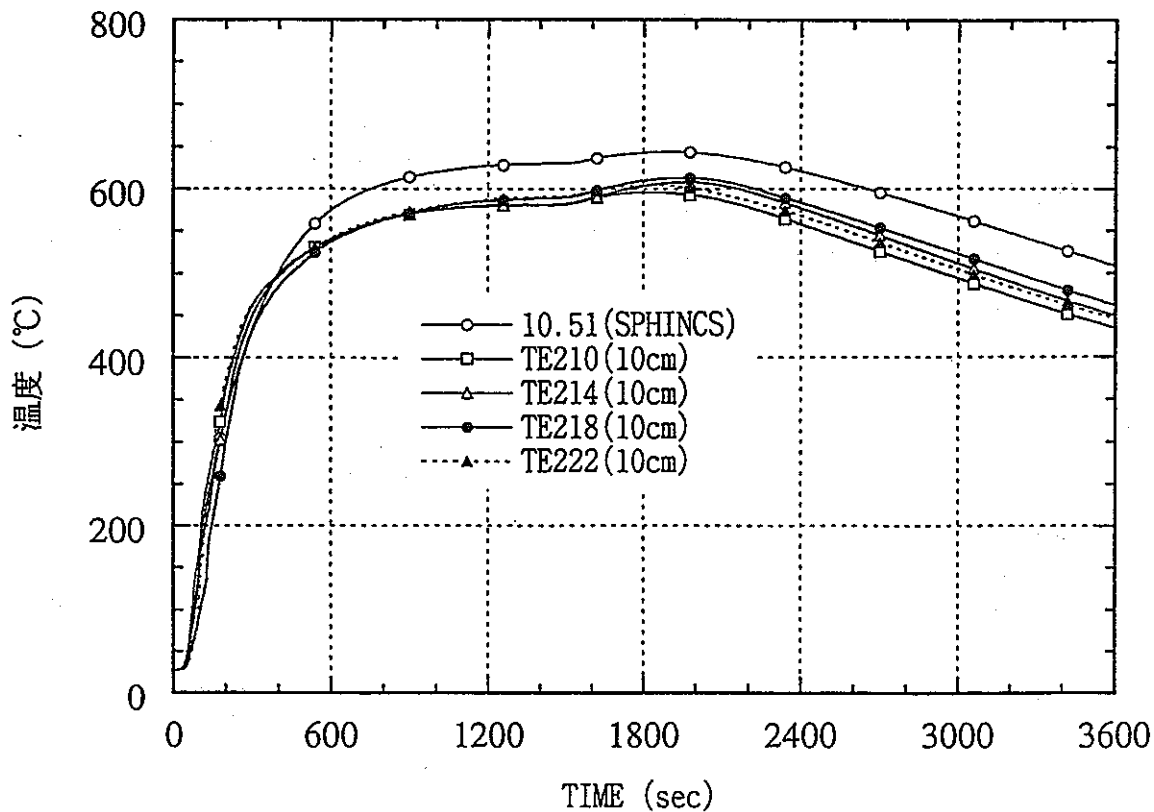


図 3-4 ライナ裏面中心より 10cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

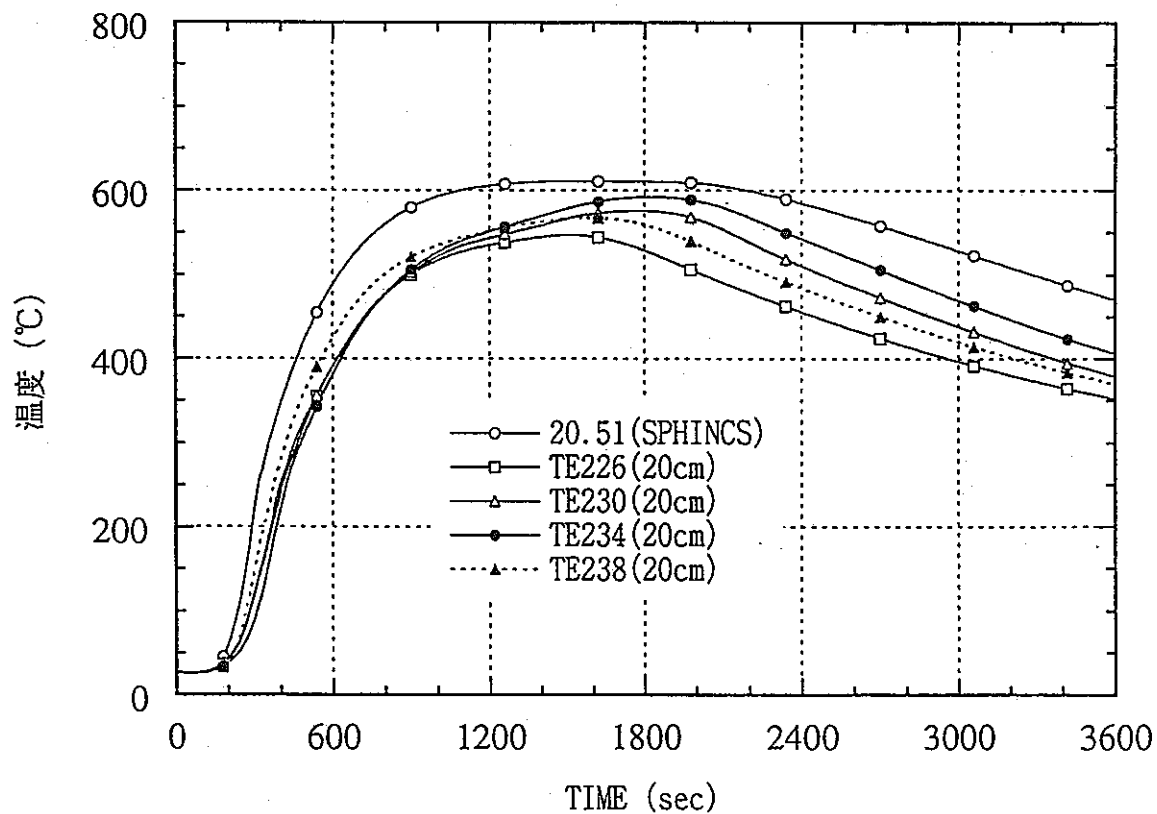


図 3-5 ライナ裏面中心より 20cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

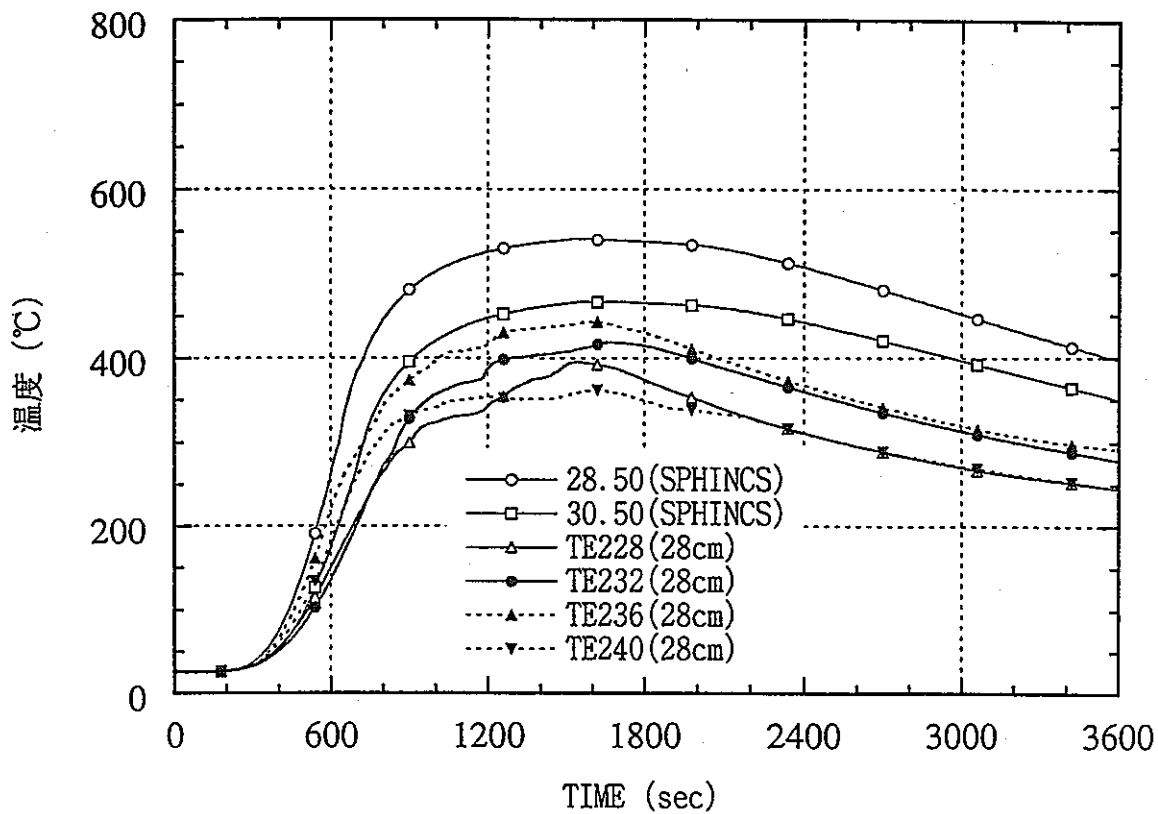


図 3-6 ライナ裏面中心より 28cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

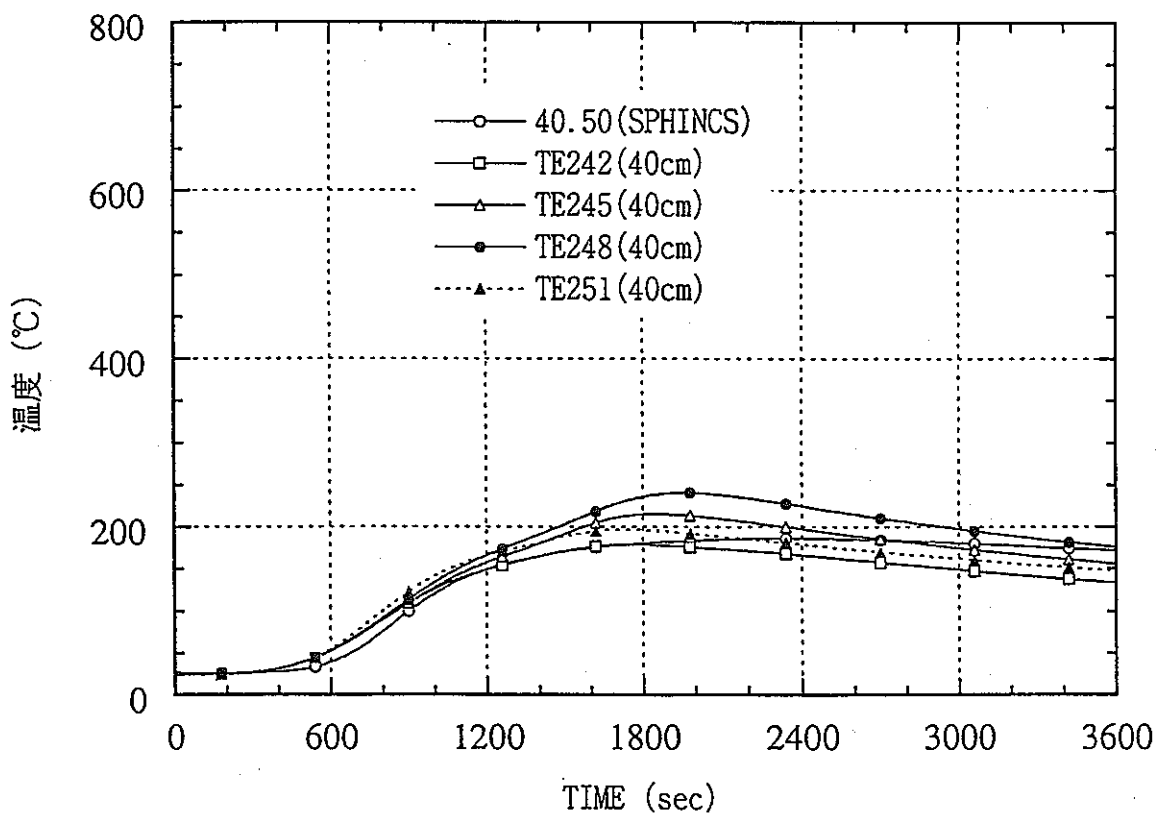


図 3-7 ライナ裏面中心より 40cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

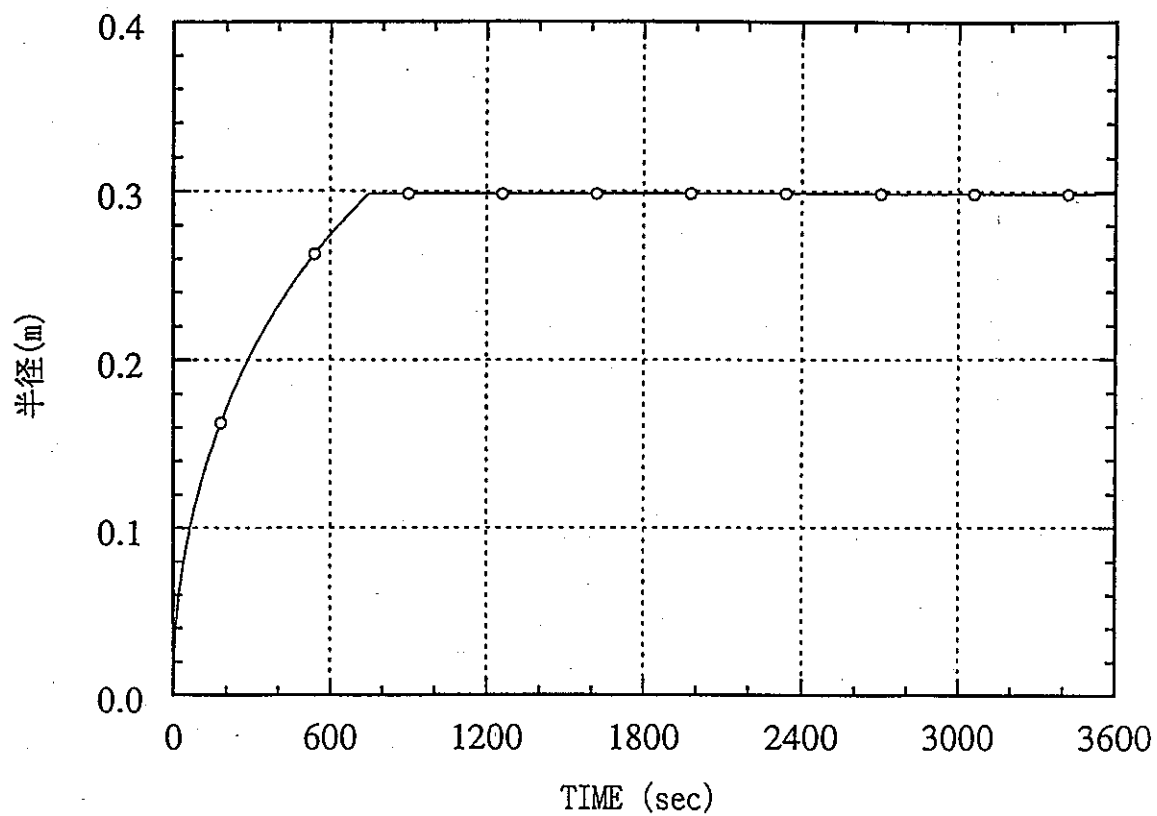


図 3-8 プール半径の時間変化

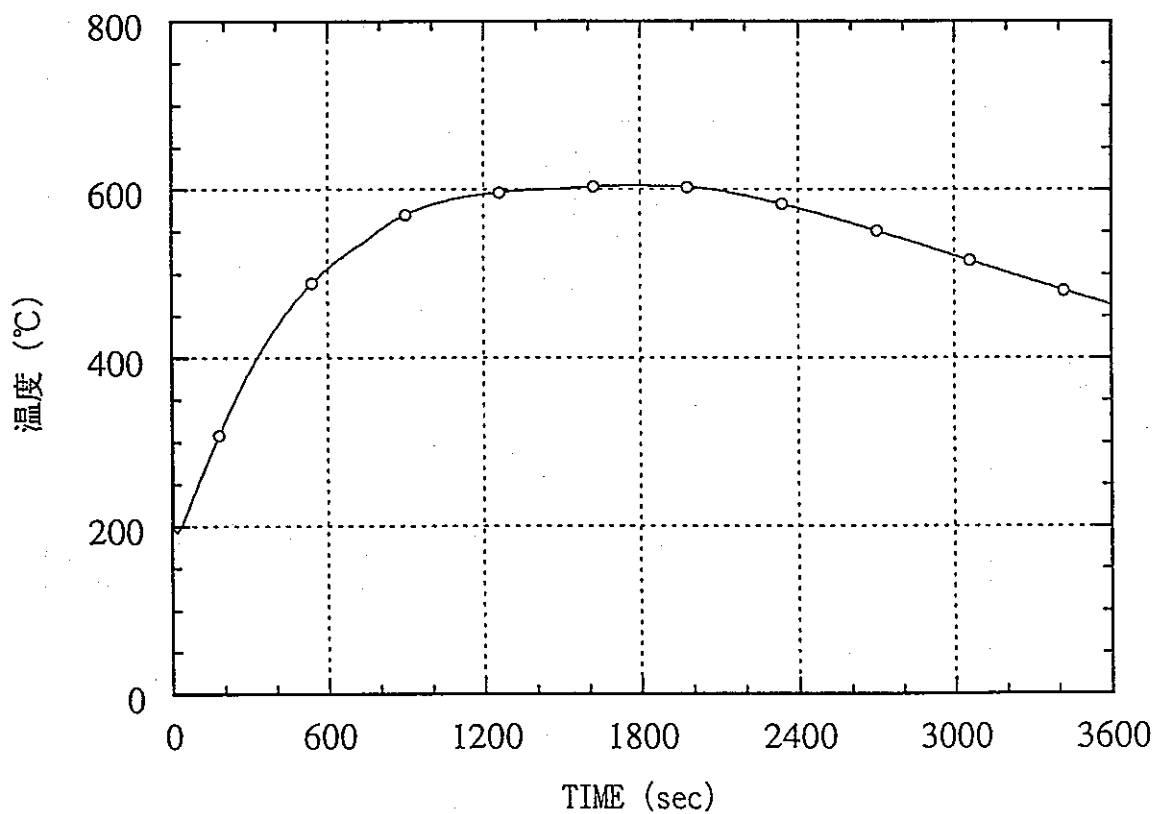


図 3-9 プール平均温度

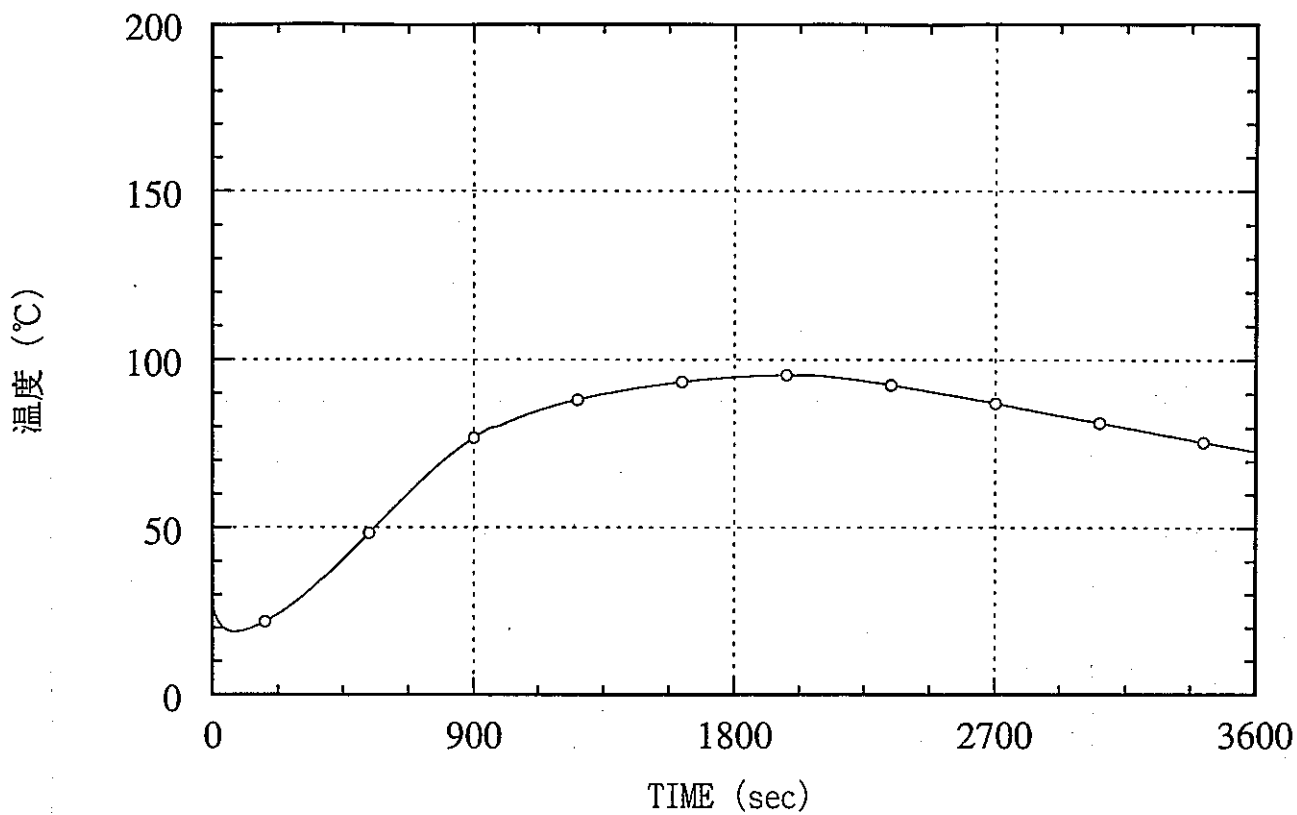


図 3-10 ガス温度の時刻歴

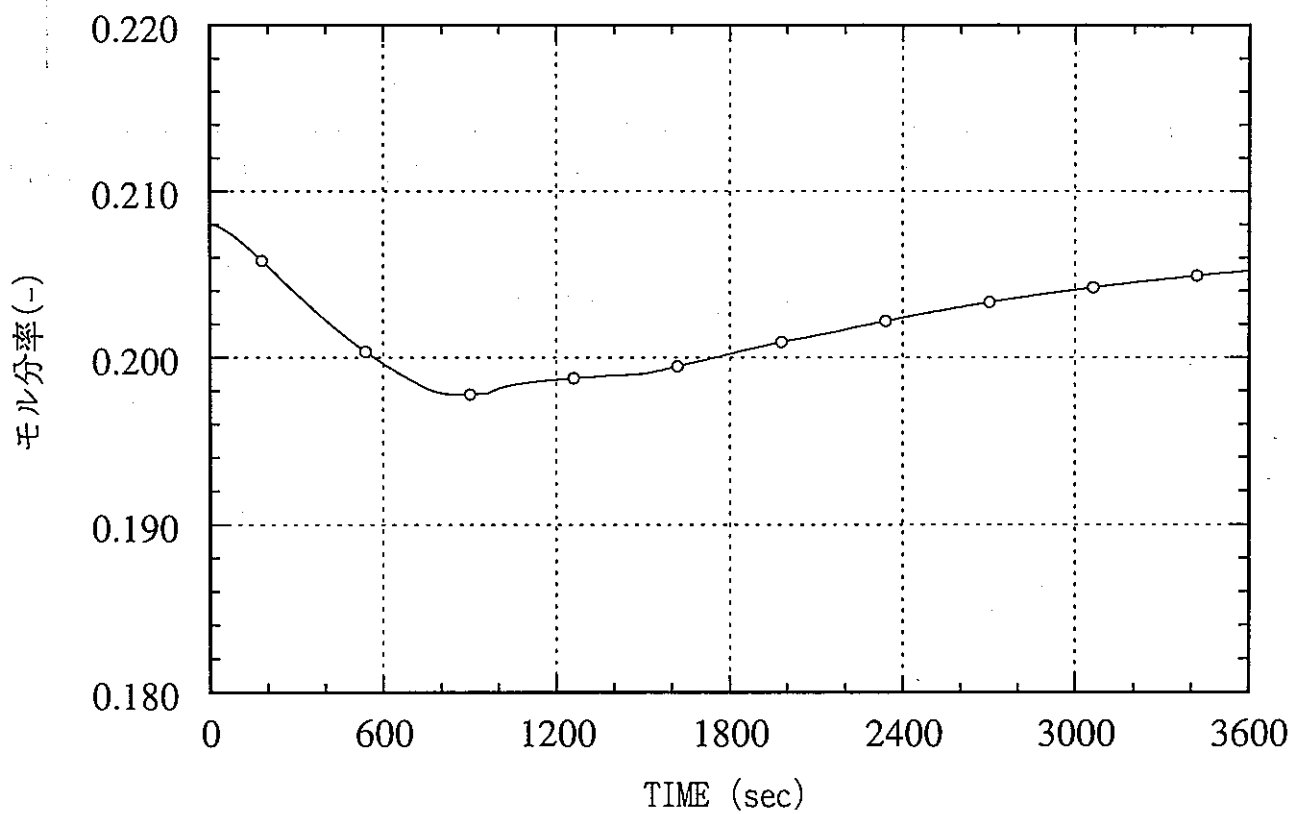


図 3-11 酸素濃度の時刻歴

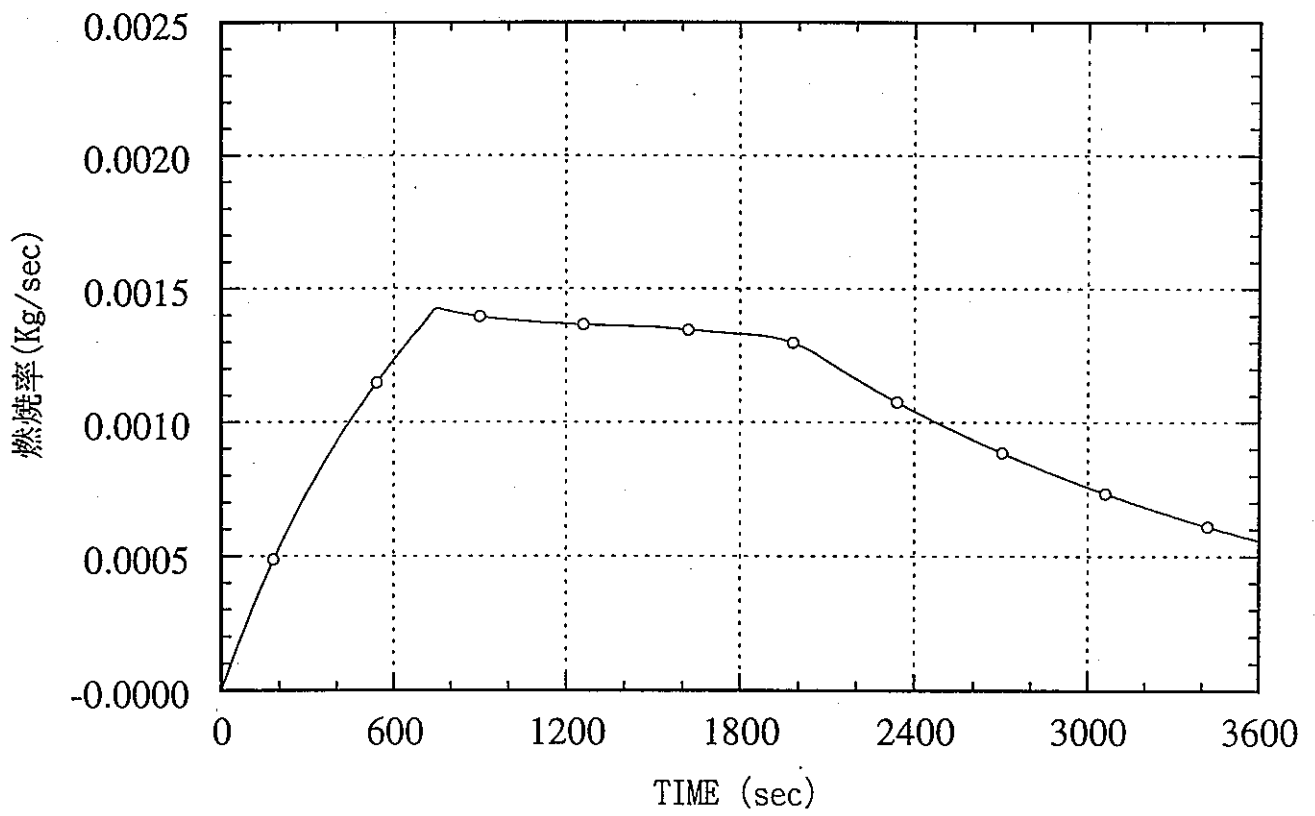


図 3-12 プール燃焼率



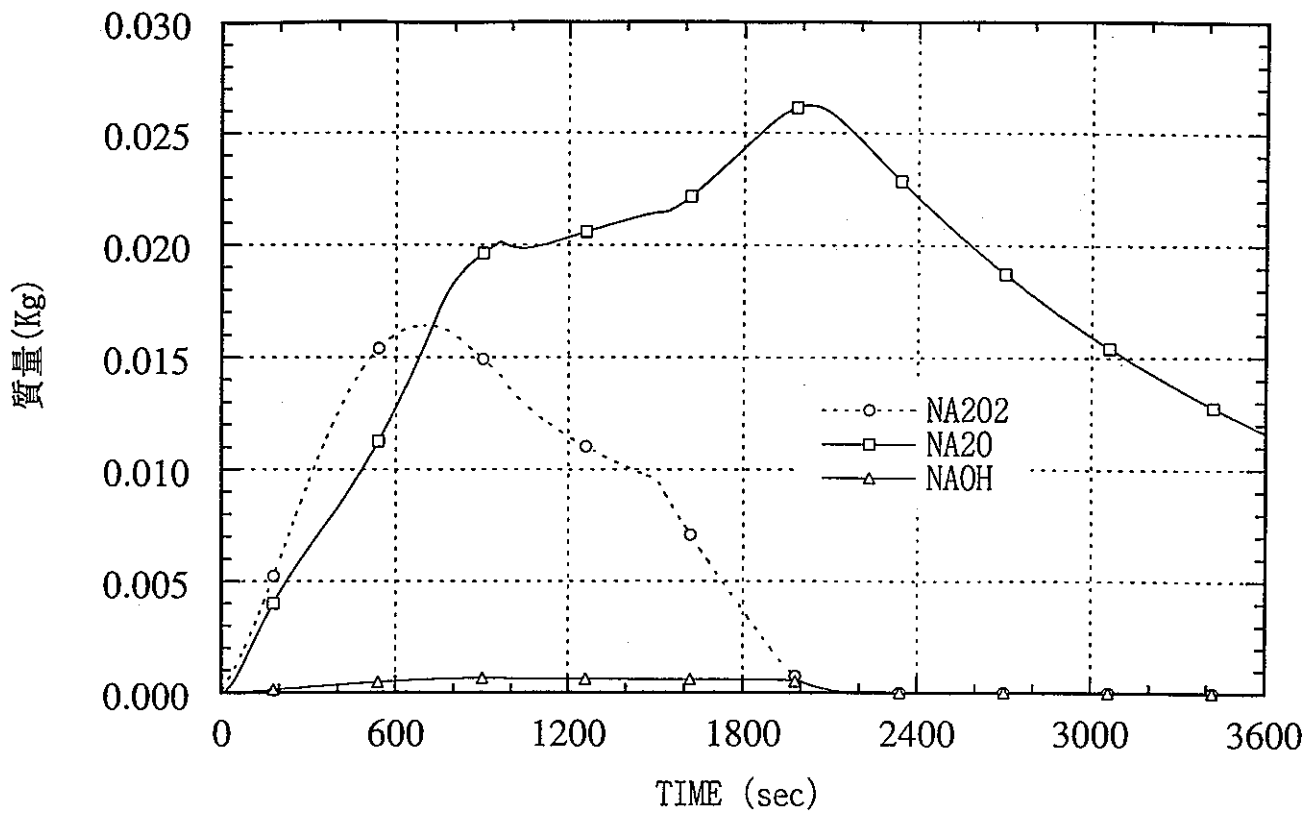


図 3-13 霧囲気中のエアロゾル質量

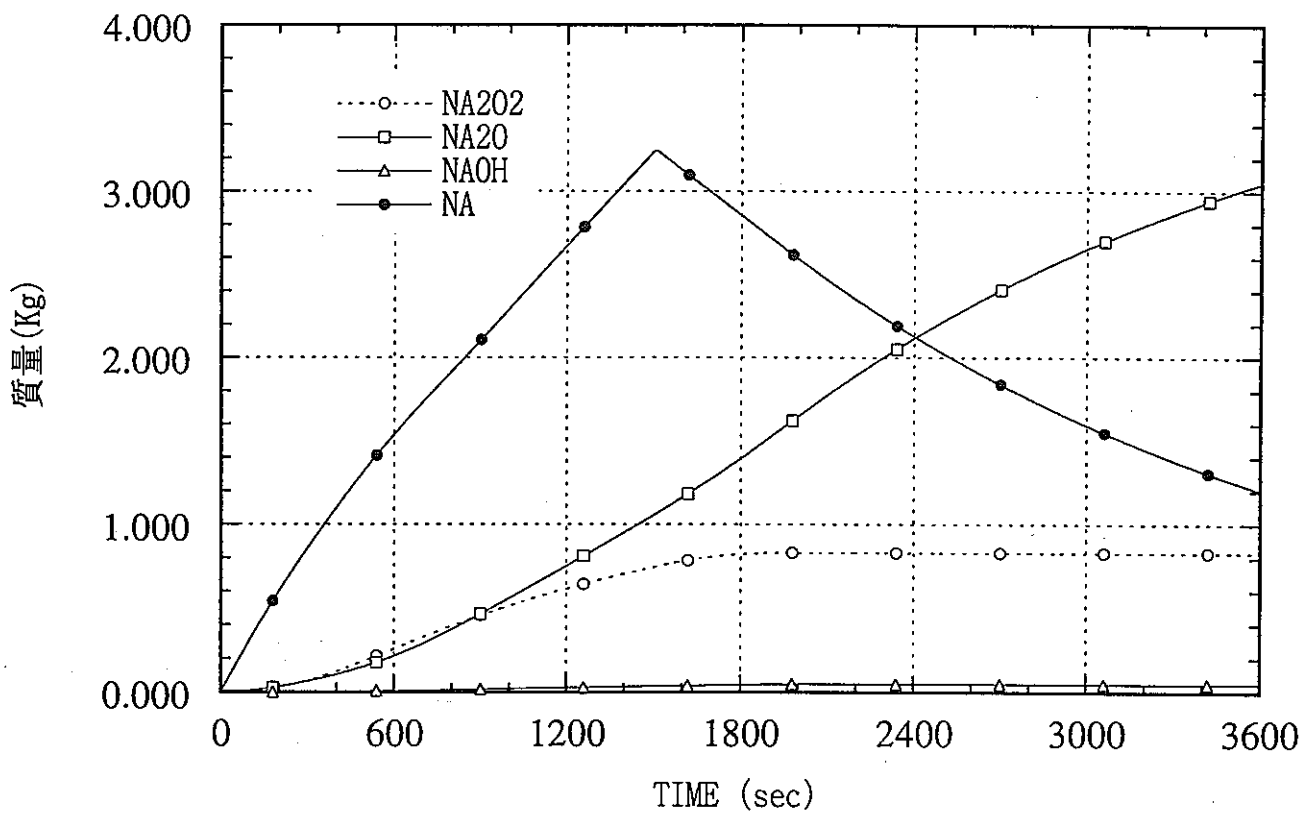


図 3-14 プール中の反応生成物質量

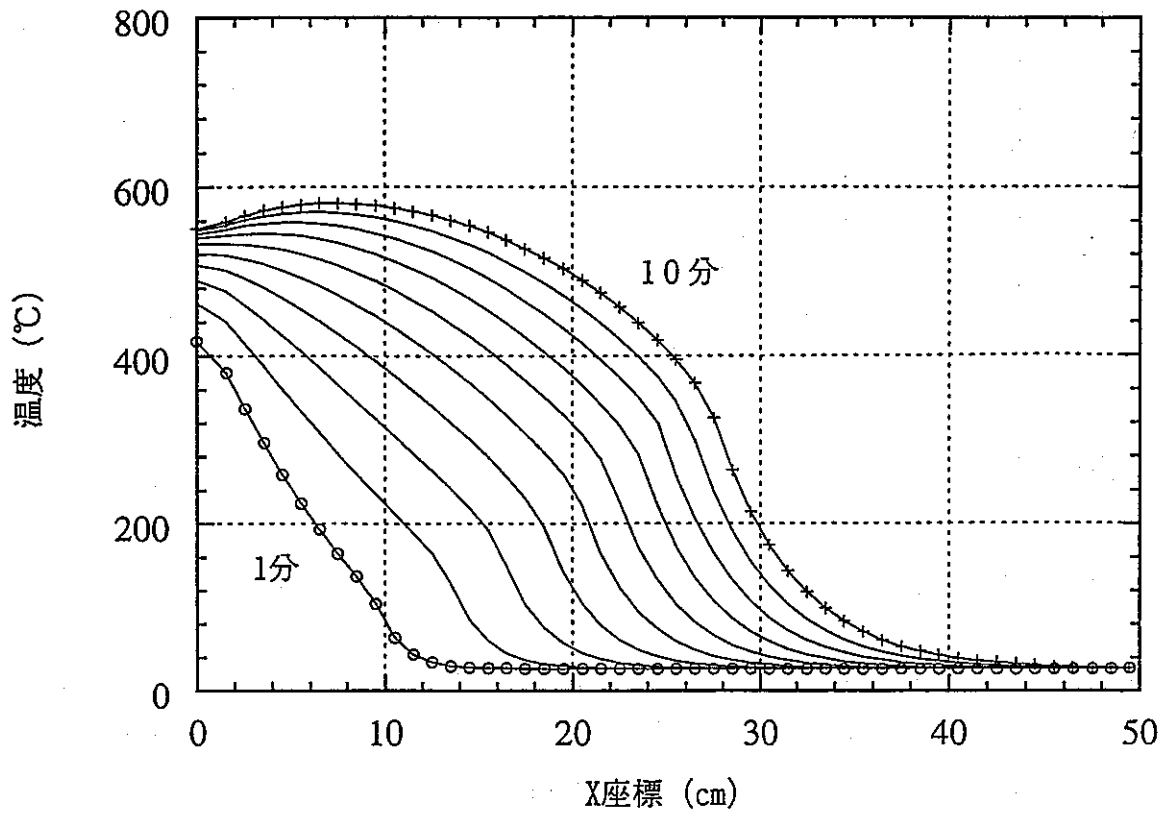


図 3-15 各時刻 (0-10 分、1 分毎) におけるライナ温度分布

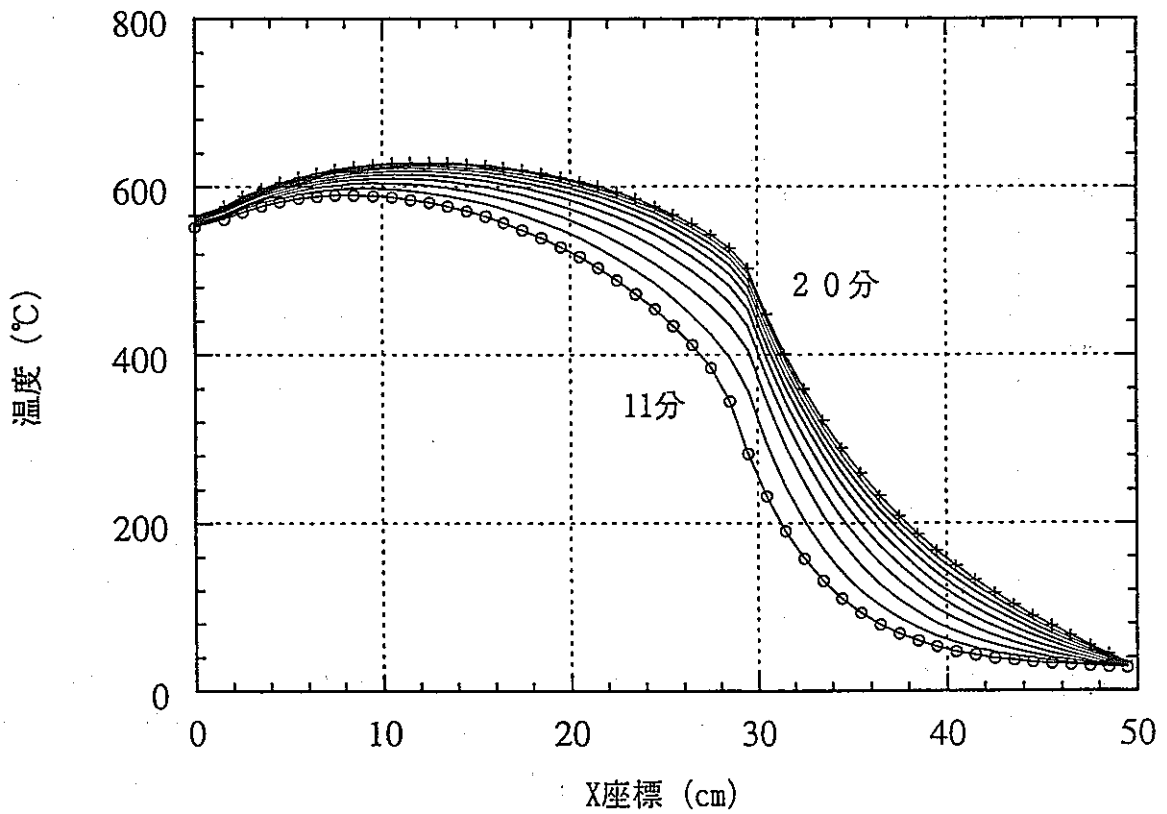


図 3-16 各時刻 (11-20 分、1 分毎) におけるライナ温度分布

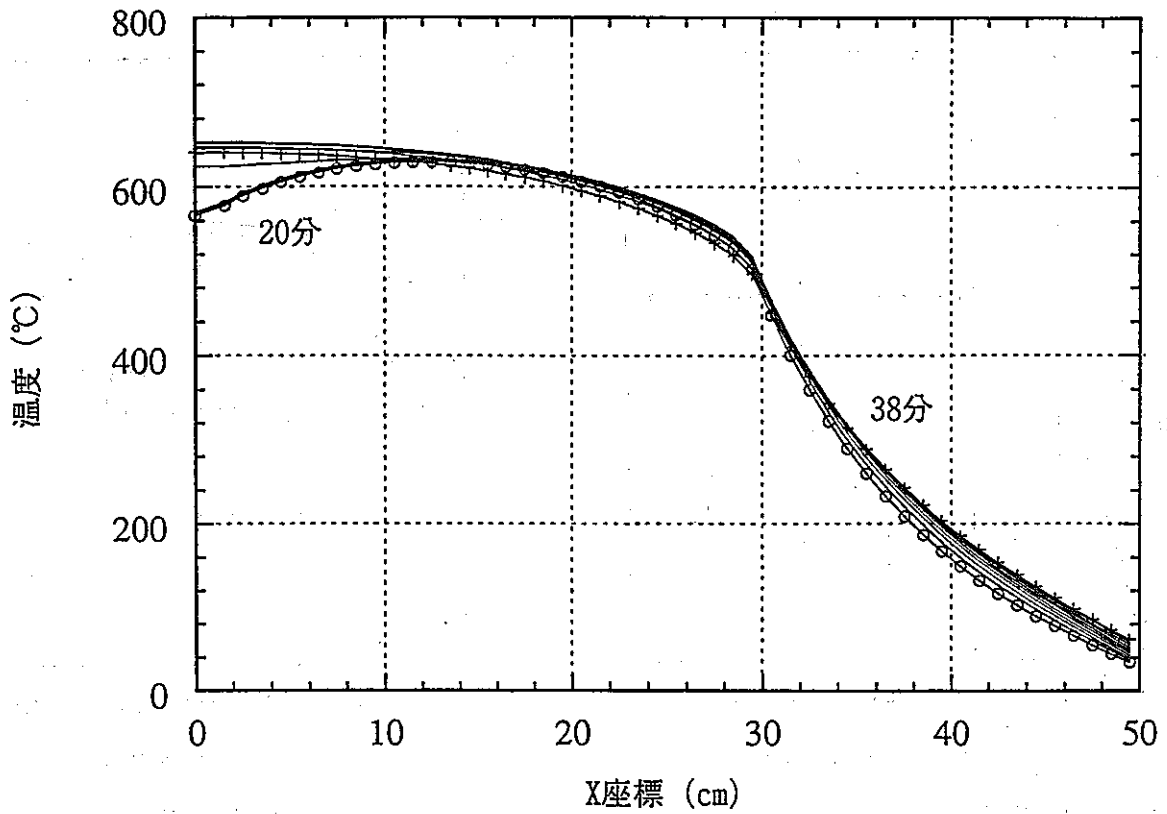


図 3-17 各時刻 (20-38 分、2 分毎) におけるライナ温度分布

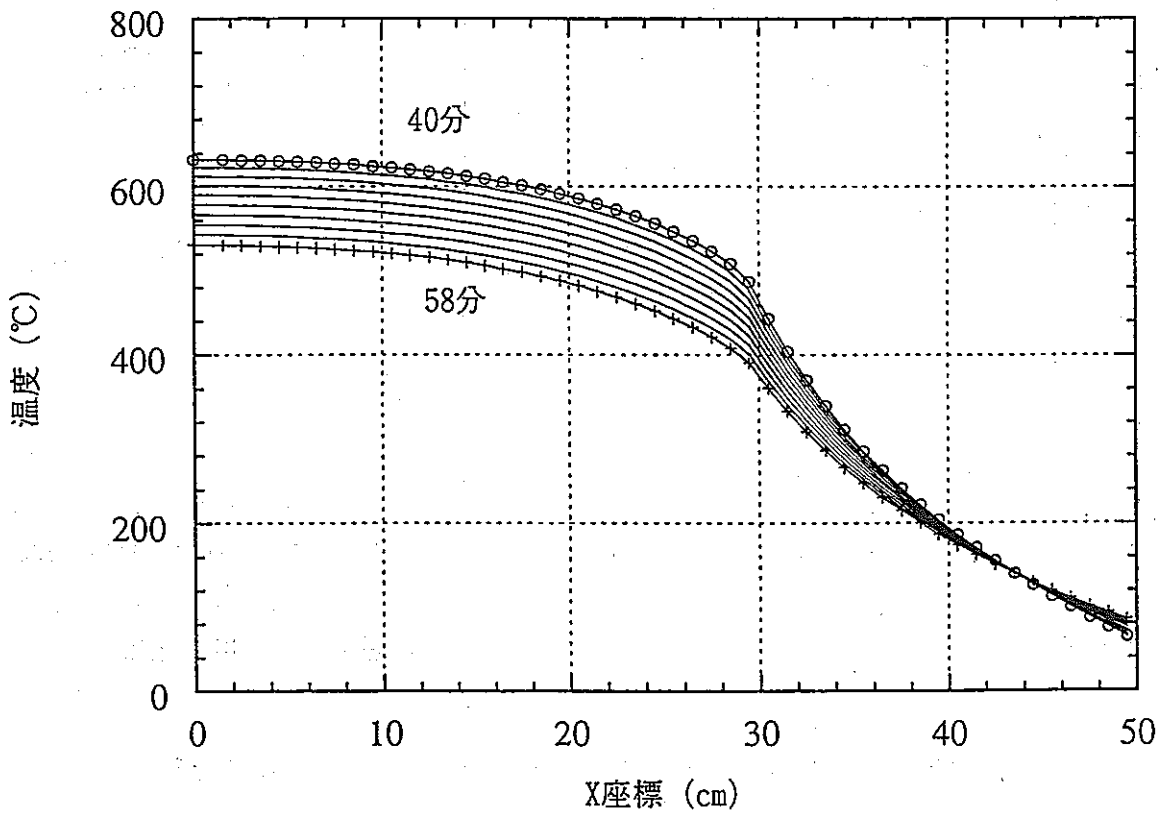
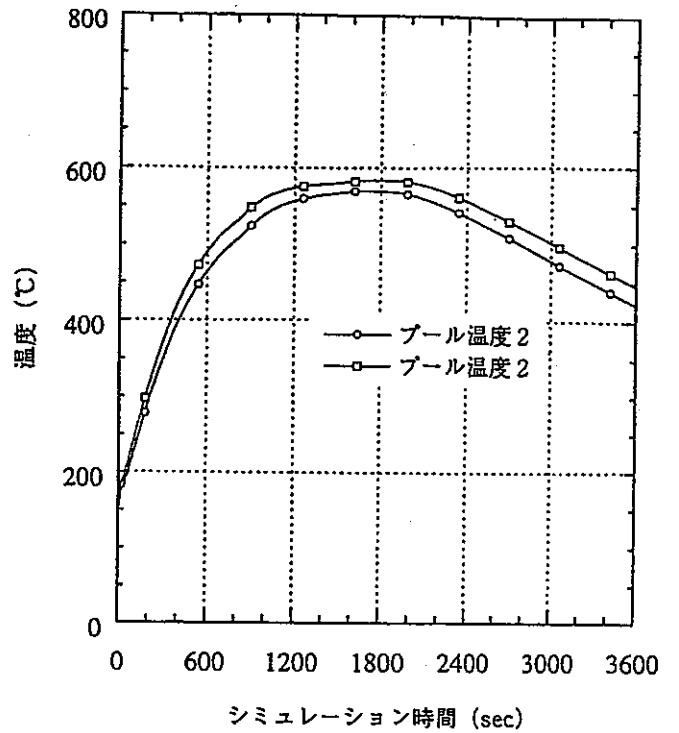
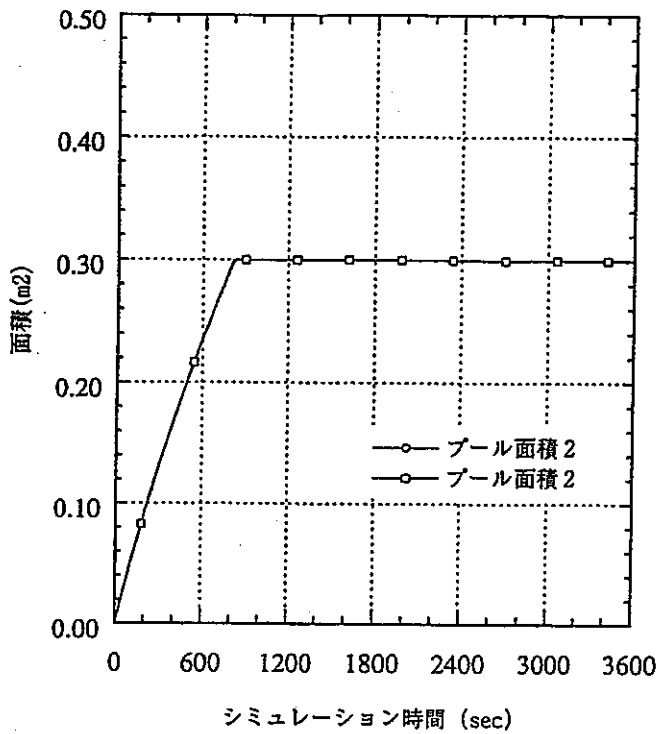
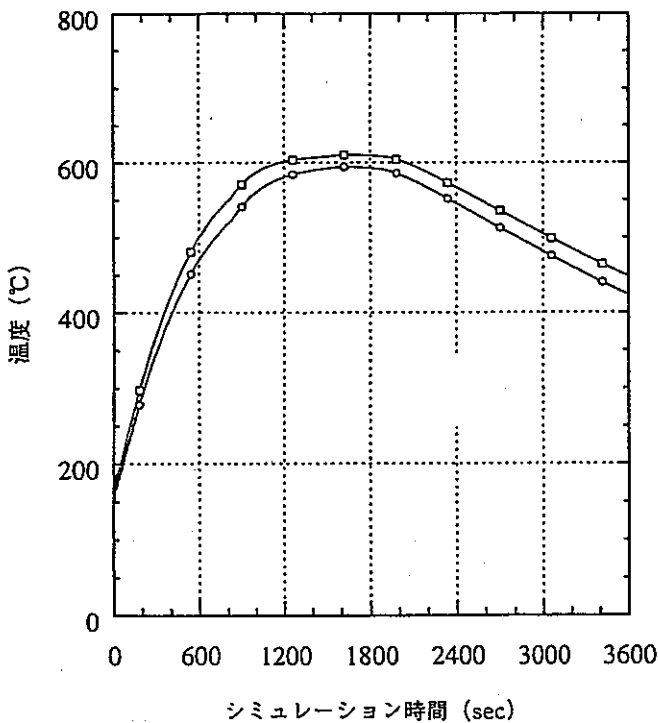


図 3-18 各時刻 (40-58 分、2 分毎) におけるライナ温度分布

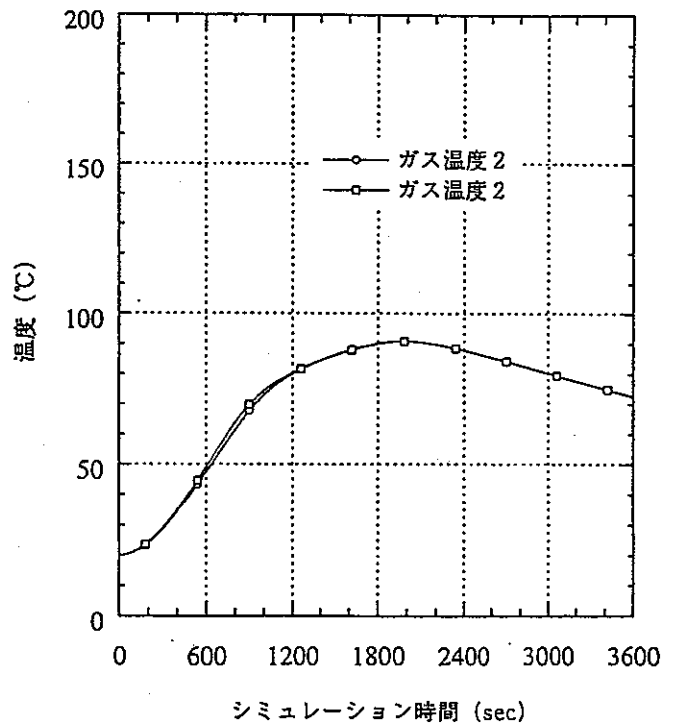


プール面積の比較



フレイム温度の比較

プール平均温度の比較



雰囲気ガス温度の比較

図 3-19 ナトリウムプールの多点モデルと一点モデルの比較

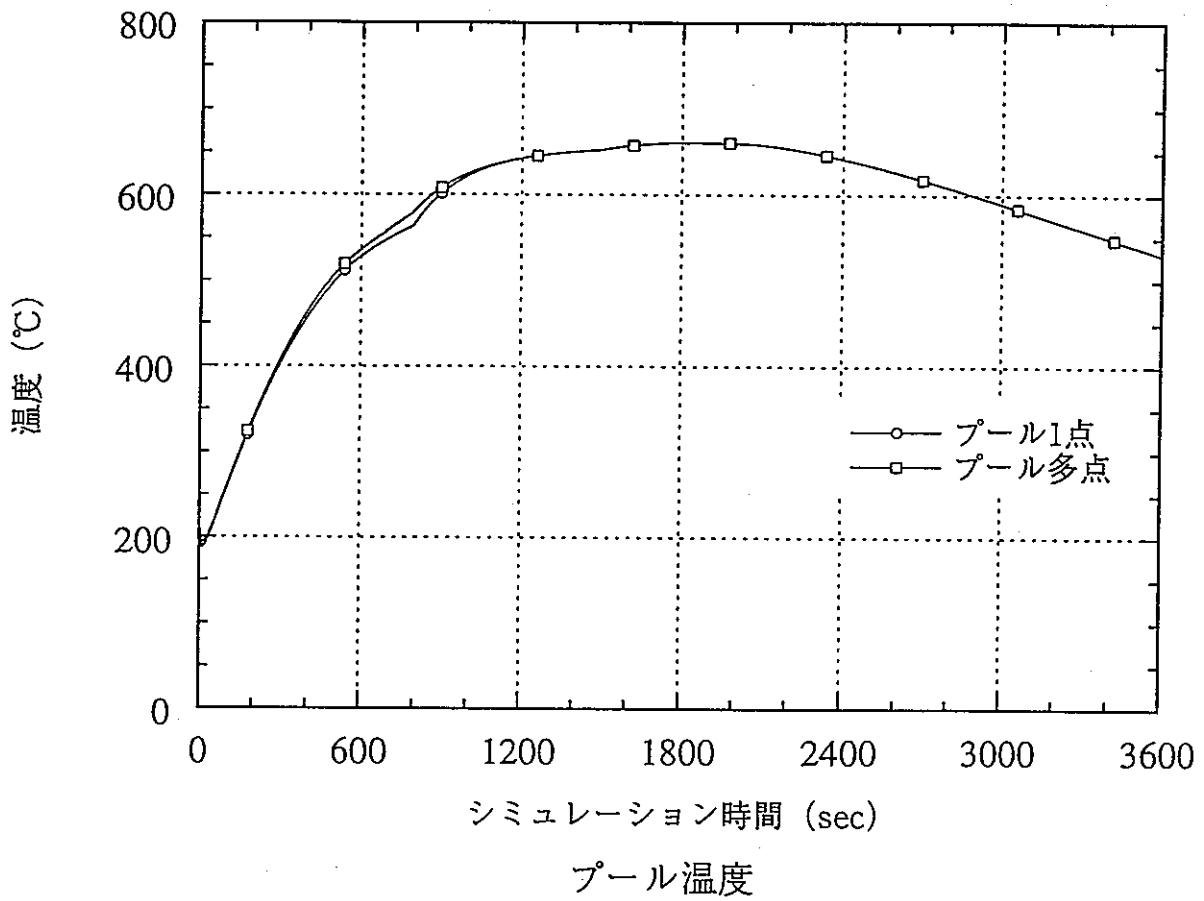


図 3-20 平均プール温度 (ライナの熱伝導を無視した場合)

#### 4 プール燃焼に関する仮定の影響

ここに述べた解析では、以下の二つの重要な仮定を用いた。

- ◆ プールの最大面積を実験結果に基づき指定する
- ◆ プールの燃焼速度を(1)式（以下に再掲する）に従って補正する

$$\text{実効燃焼速度} \approx \text{燃焼速度} \times \frac{\text{プール中の未反応金属Na質量}}{\text{プール中のNa及びNa化合物の総質量}}$$

その解析結果に及ぼす影響を検討する。

プール燃焼に関する仮定の影響を見るために以下の 3 ケースの解析を実施した。その他の条件は 3.3 節の解析と同一である。

表 4 燃焼に関する仮定の検討のための解析条件

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	検証解析
プール最大面積を 0.28m <sup>2</sup> に設定	仮定せず	○	仮定せず	○
プール燃焼速度を(1)式により補正	仮定せず	仮定せず	○	○

○はその仮定を用いたことを示す。Run-F7 の検証解析のケースは両方の仮定ともに用いている。

##### 4-1 ケース 1（もんじゅ解析条件相当）

プール最大面積を制限せず、また燃焼速度も補正しない場合の結果を図 4-1-1 から図 4-1-6 に示す。それぞれ、ライナ中心部(図 4-1-1)、中心より 5cm(図 4-1-2)、10cm(図 4-1-3)、20cm(図 4-1-4)、28cm(図 4-1-5)、40cm(図 4-1-6)の位置におけるライナ裏面の温度に関する実験結果と計算結果の比較である。実験結果に関しては同じ半径の測定点が 4 カ所あるので、その全てを示す。

およそ 2700 秒まで燃焼は継続しており、その時刻まで徐々にライナ温度は上昇した後、減少に転じる。ライナの最高温度はおよそ 740℃である。全ての場所、時刻にわたって解析結果は実験結果を上回っていることが示される。温度の変動挙動は概ね模擬できているが、①解析では（プール面積が過大なため）ライナ外側での温度が大幅に高いこと、②漏えい停止後の温度の低下挙動が再現できないことが指摘される。

#### 4-2 ケース2 (プール最大面積を $0.28\text{m}^2$ に設定)

プール最大面積を  $0.28\text{m}^2$  に制限し、燃焼速度は補正しない場合の結果を図 4-2-1 から図 4-2-6 に示す。それぞれ、ライナ中心部(図 4-2-1)、中心より 5cm(図 4-2-2)、10cm(図 4-2-3)、20cm(図 4-2-4)、28cm(図 4-2-5)、40cm(図 4-2-6)の位置におけるライナ裏面の温度に関する実験結果と計算結果の比較である。

#### 4-3 ケース3 (プール燃焼速度を(1)式により補正)

プール燃焼速度を(1)式に従って補正した場合の結果を図 4-3-1 から図 4-3-6 に示す。それぞれ、ライナ中心部(図 4-3-1)、中心より 5cm(図 4-3-2)、10cm(図 4-3-3)、20cm(図 4-3-4)、28cm(図 4-3-5)、40cm(図 4-3-6)の位置におけるライナ裏面の温度に関する実験結果と計算結果の比較である。

解析終了時刻においてもプール中の残存ナトリウムが燃焼し続けている。ライナー温度はケース1とほとんど同じであり、最高温度は解析終了時刻で  $750^{\circ}\text{C}$  である。

漏えい停止までの温度挙動は実験結果と良く一致する。また、燃焼停止後の温度低下速度も実験結果と一致している。ただし、温度が低下し始める時刻は実験よりも早くなっている。また、プール面積が異なるため外周部では全般に高温となっている。

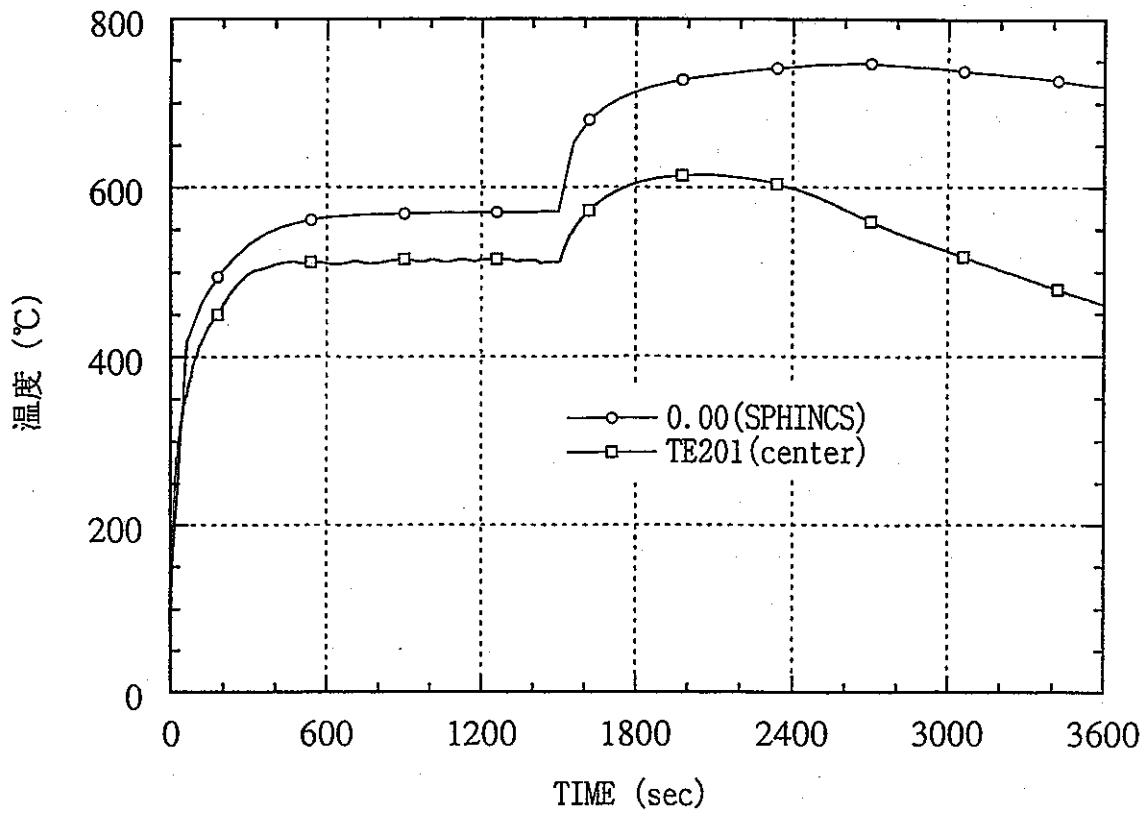


図 4-1-1 ライナ裏面中央部の温度履歴 (解析と実験の比較)

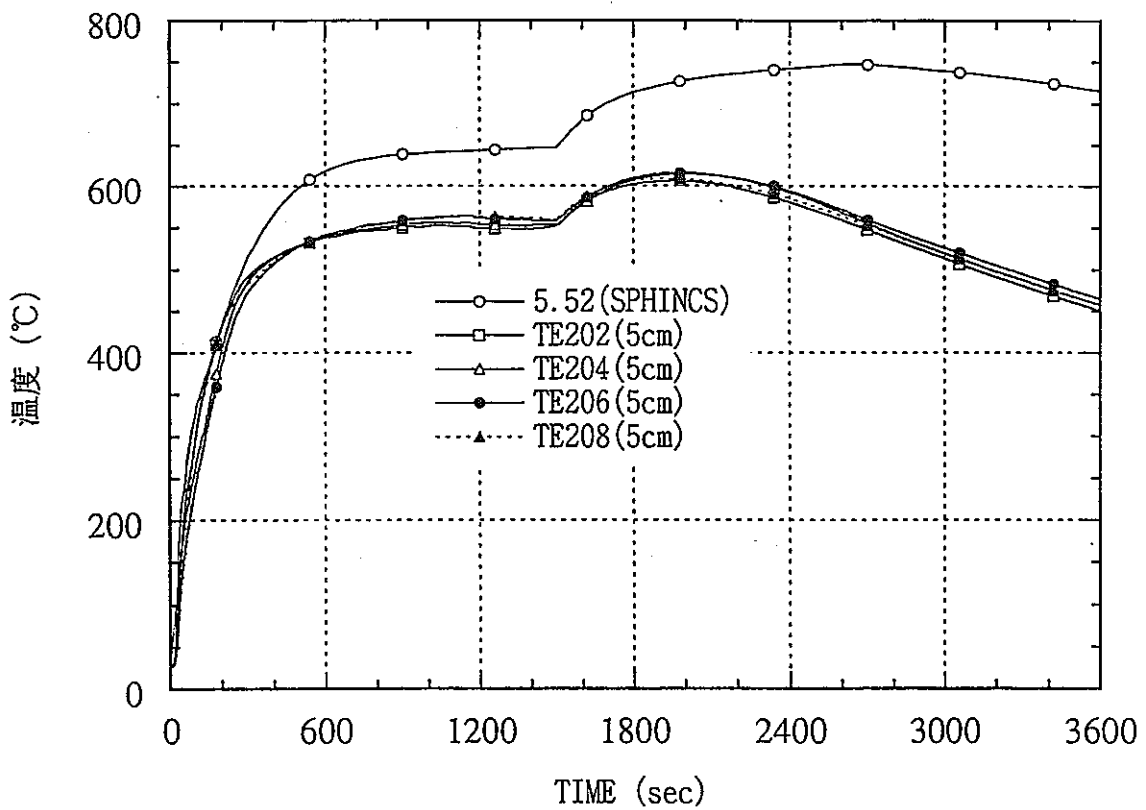


図 4-1-2 ライナ裏面中心より 5cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)



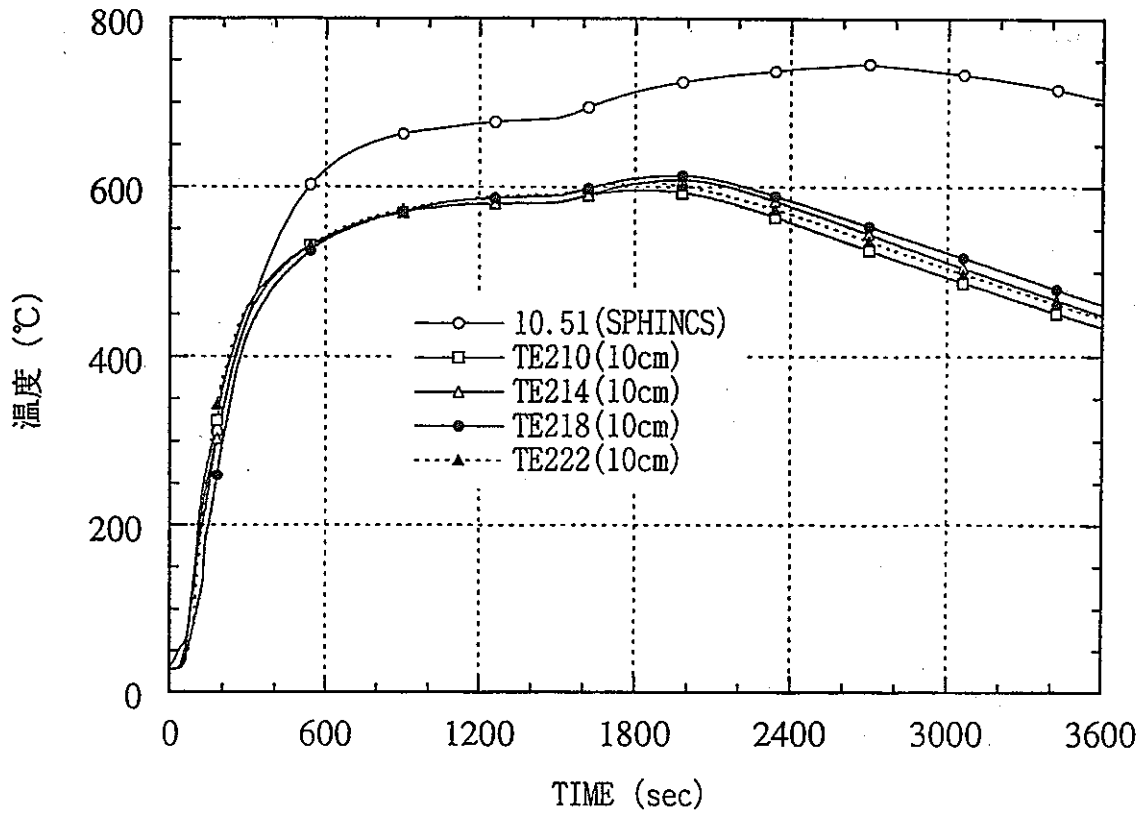


図 4-1-3 ライナ裏面中心より 10cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

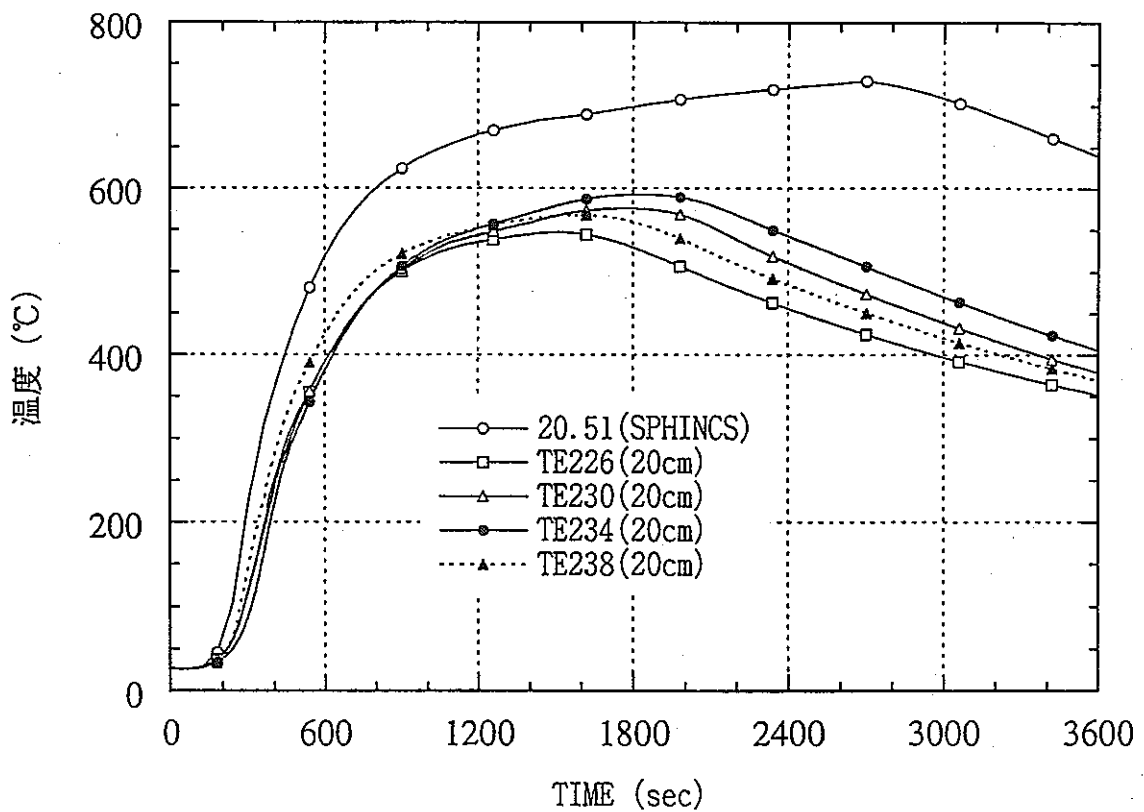


図 4-1-4 ライナ裏面中心より 20cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

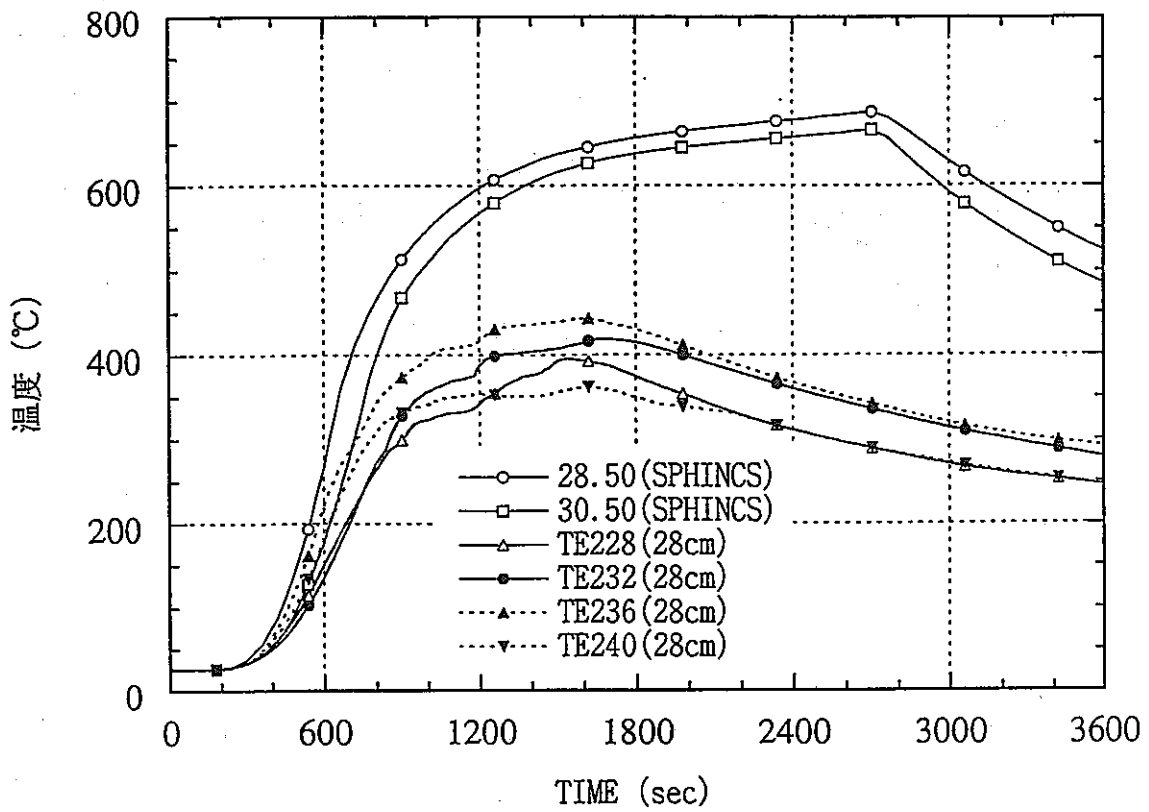


図 4-1-5 ライナ裏面中心より 28cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

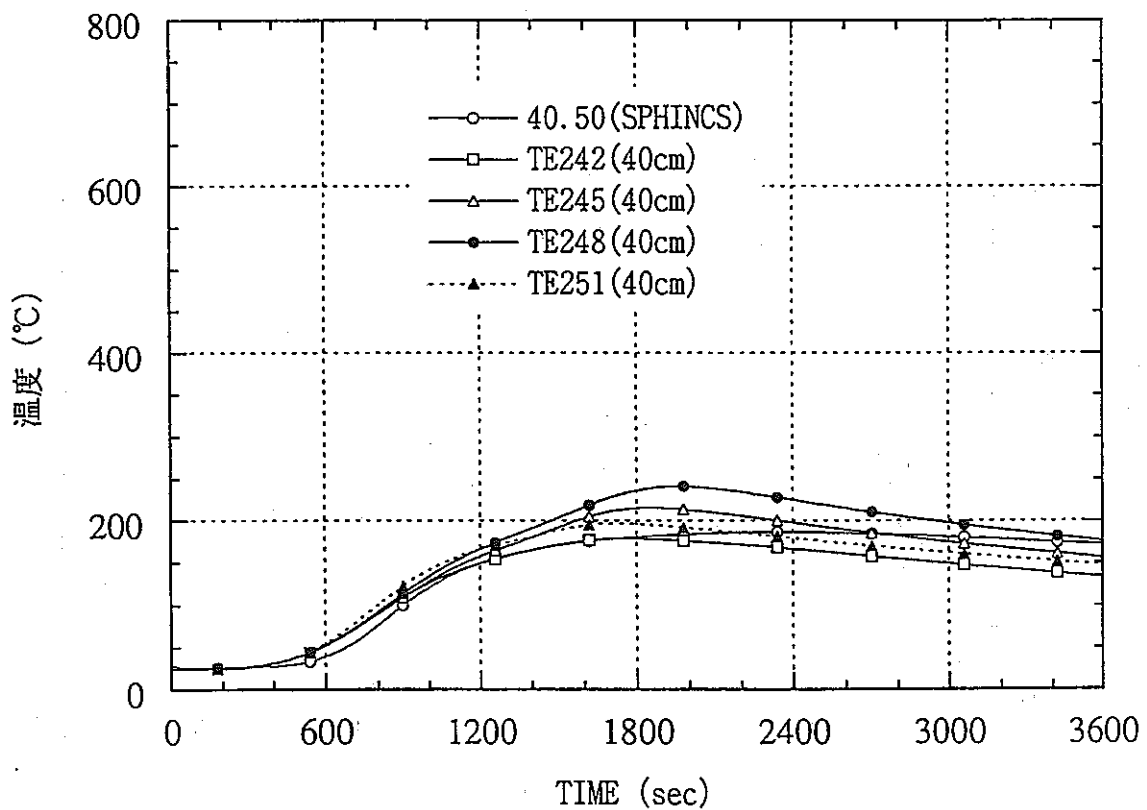


図 4-1-6 ライナ裏面中心より 40cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

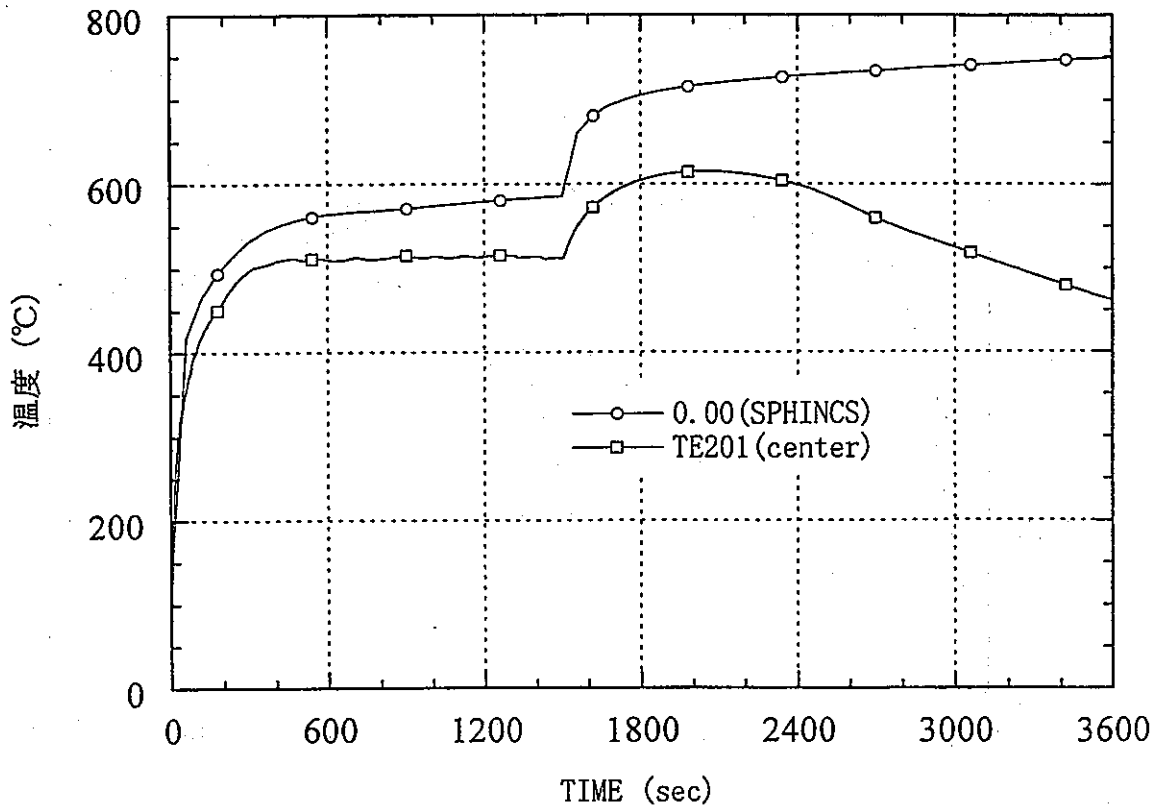


図 4-2-1 ライナ裏面中央部の温度履歴 (解析と実験の比較)

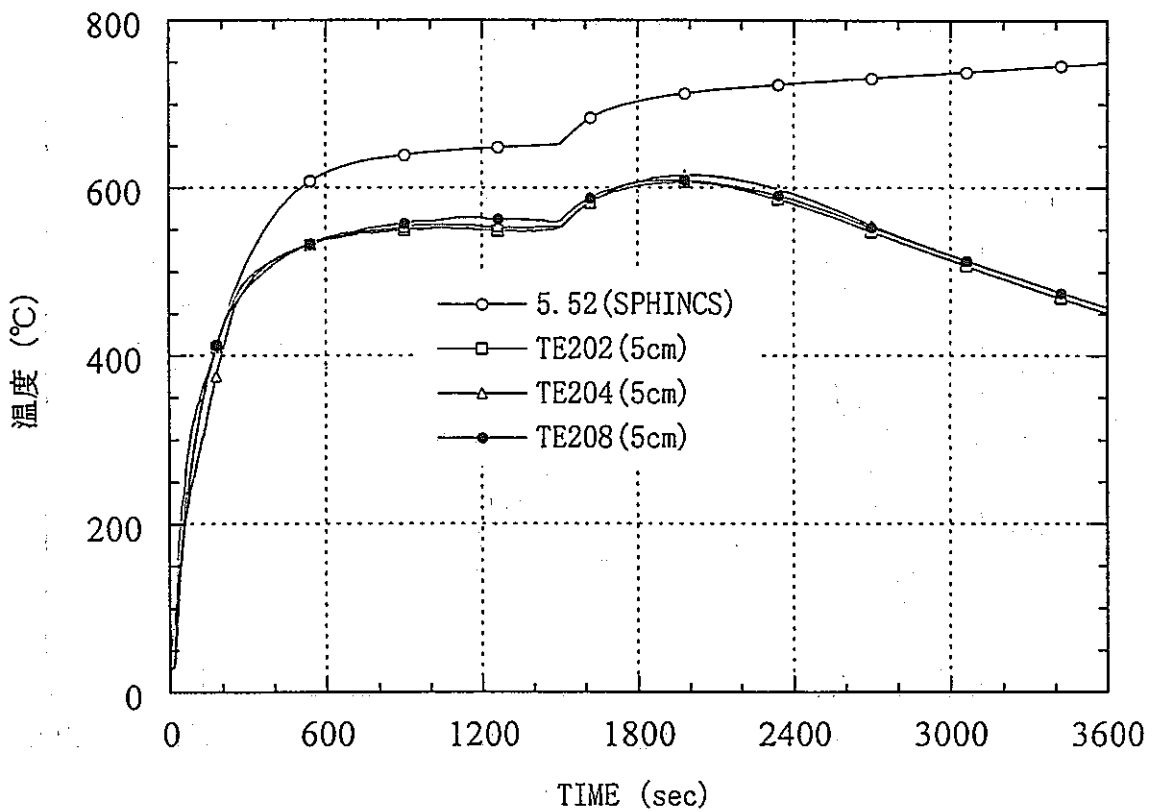


図 4-2-2 ライナ裏面中心より 5cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

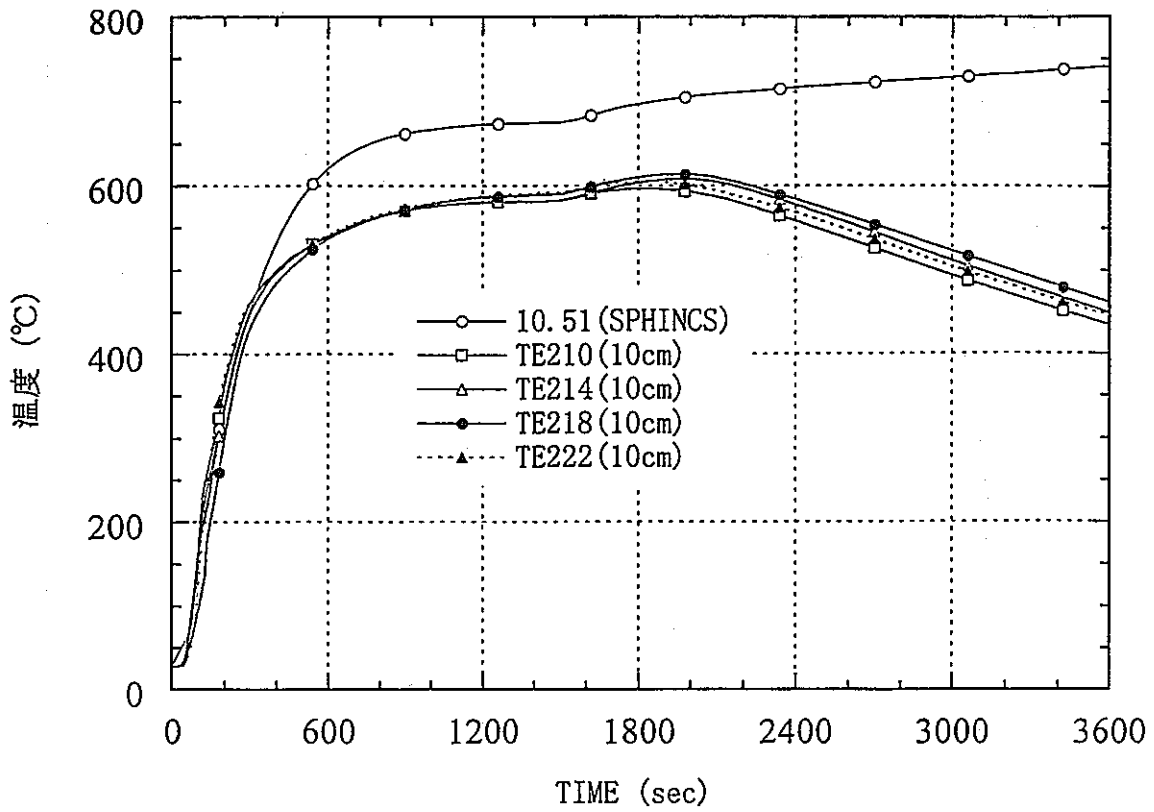


図 4-2-3 ライナ裏面中心より 10cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

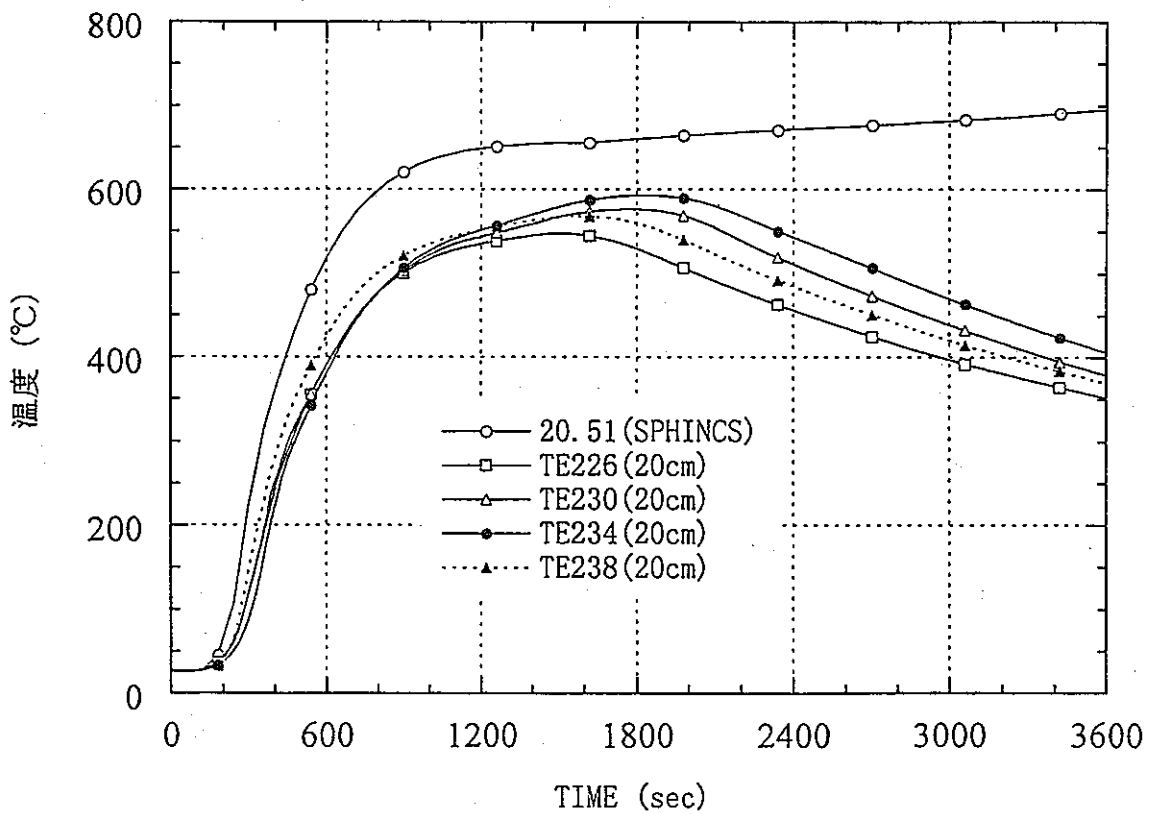


図 4-2-4 ライナ裏面中心より 20cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

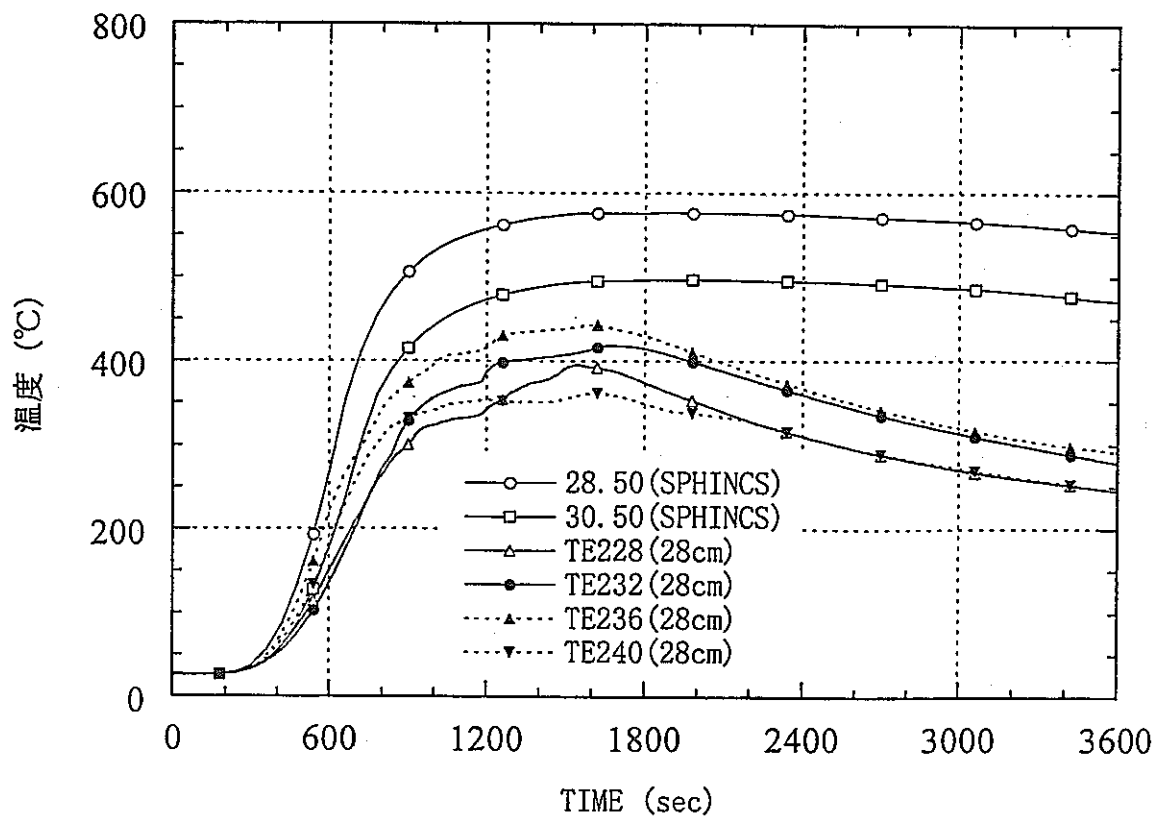


図 4-2-5 ライナ裏面中心より 28cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

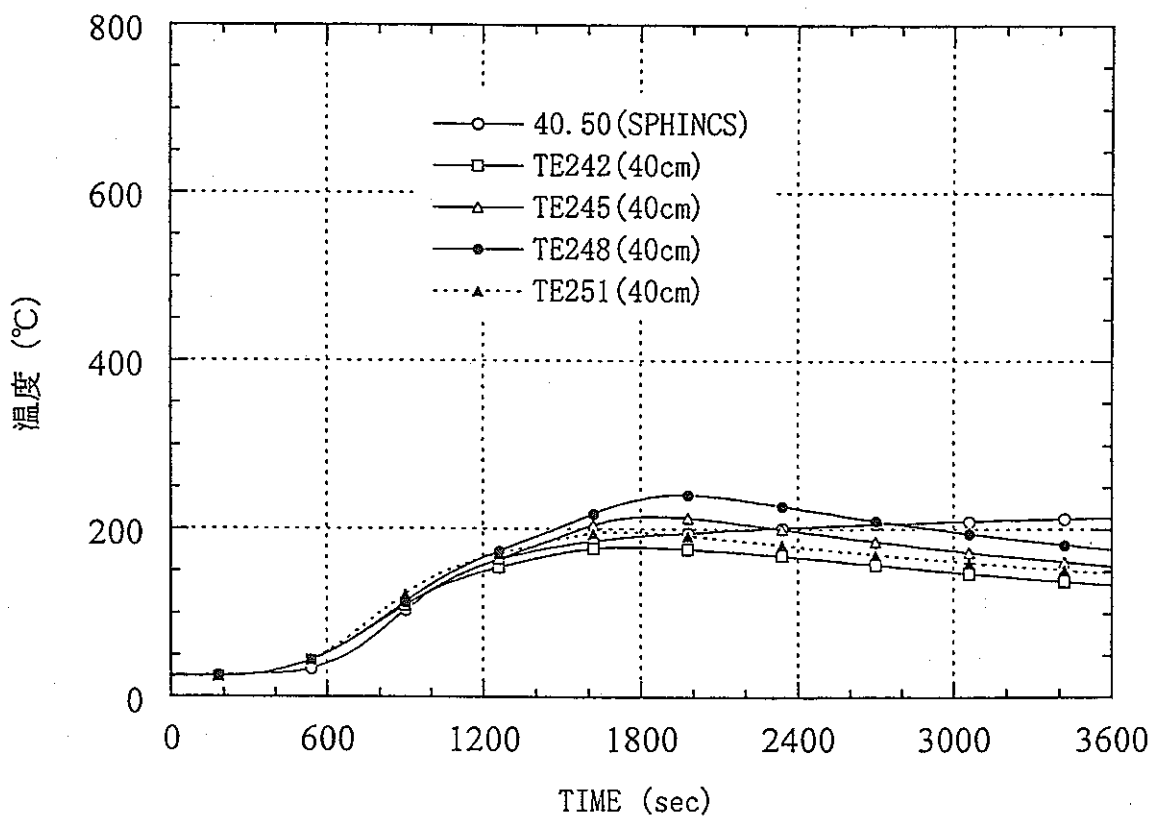


図 4-2-6 ライナ裏面中心より 40cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

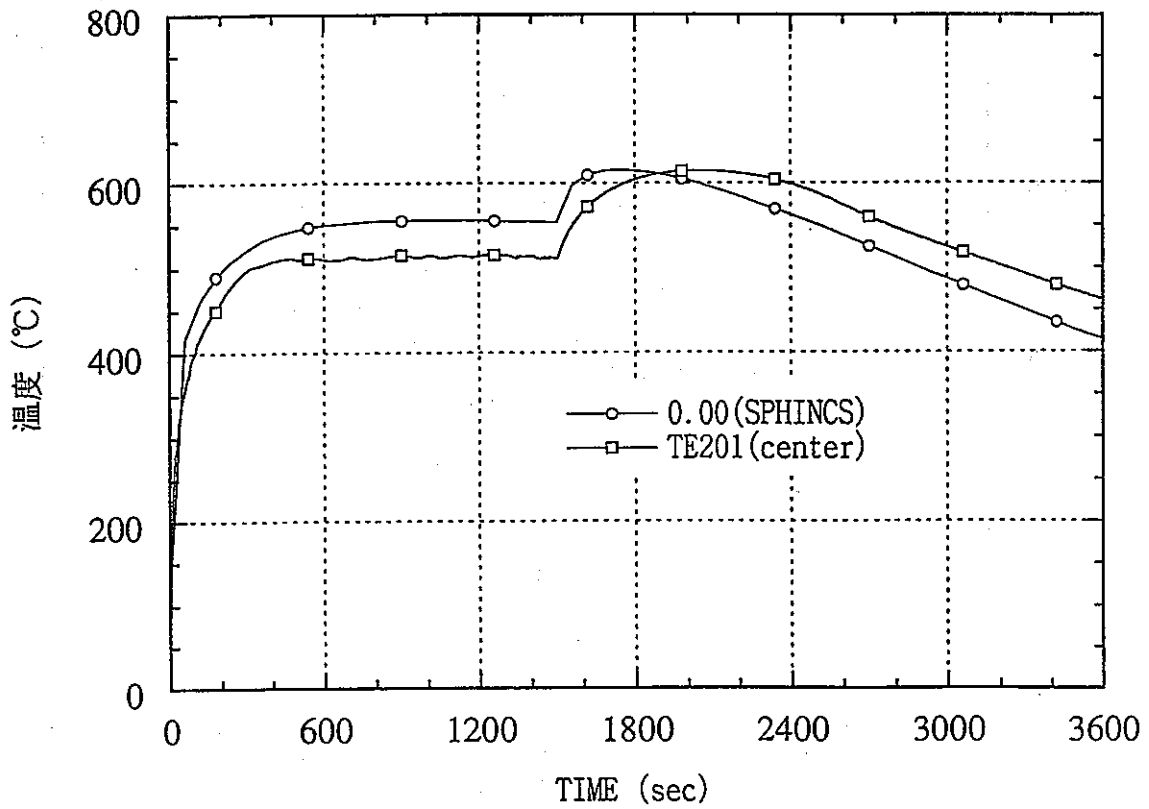


図 4-3-1 ライナ裏面中央部の温度履歴 (解析と実験の比較)

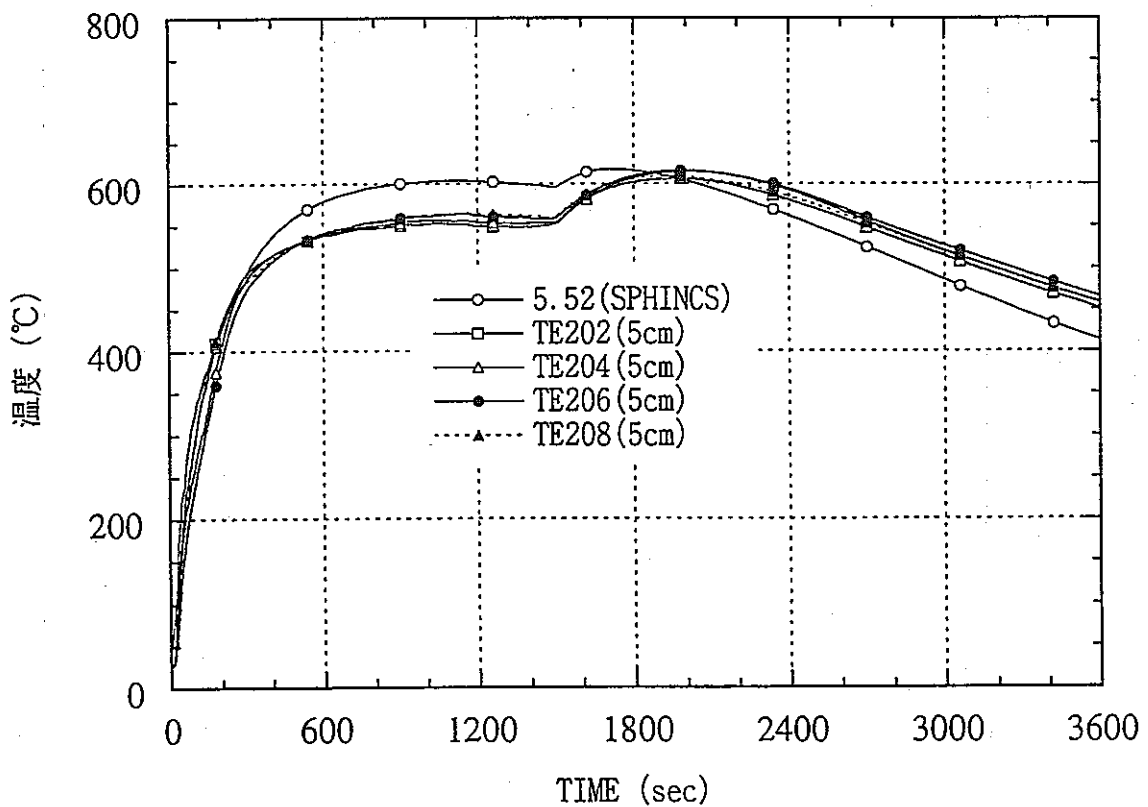


図 4-3-2 ライナ裏面中心より 5cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

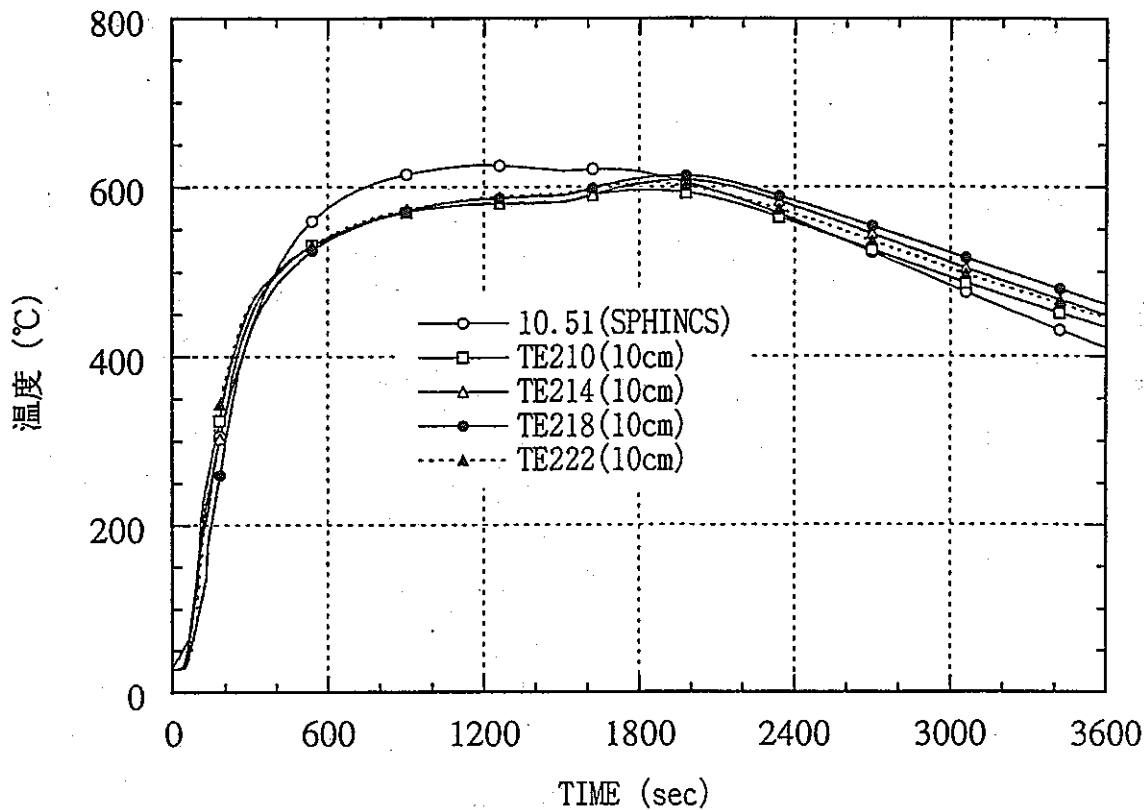


図 4-3-3 ライナ裏面中心より 10cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

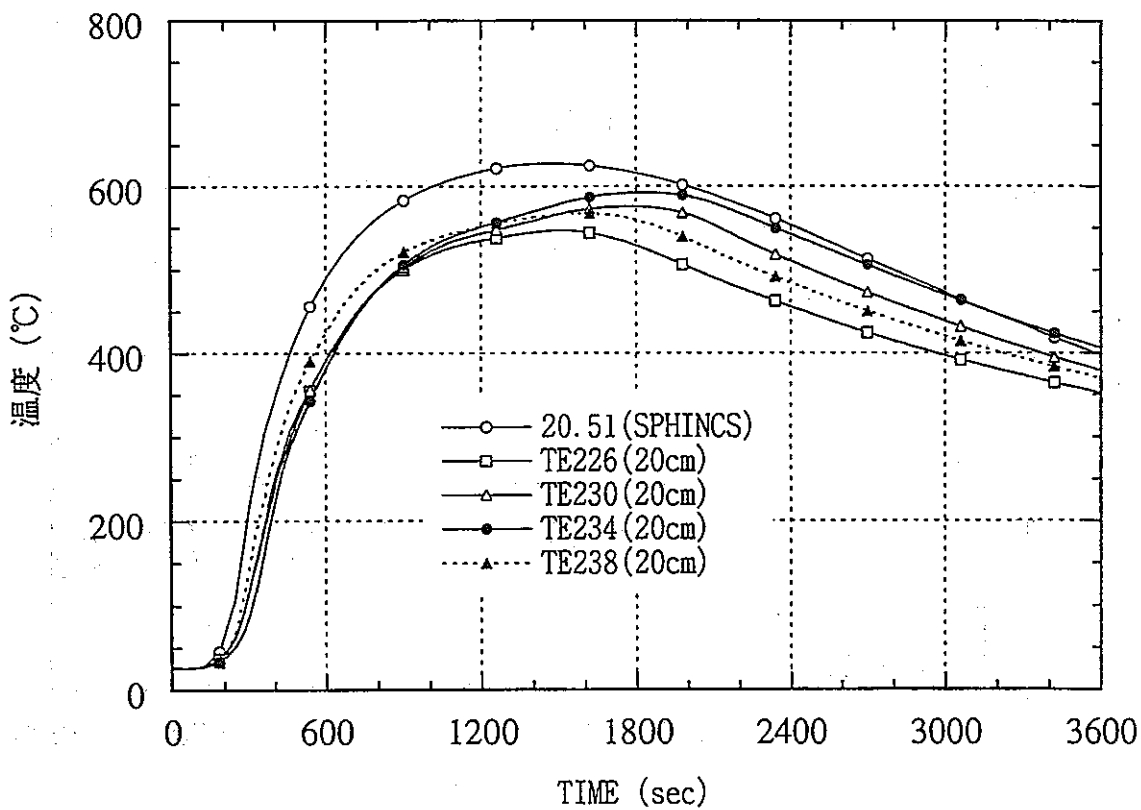


図 4-3-4 ライナ裏面中心より 20cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

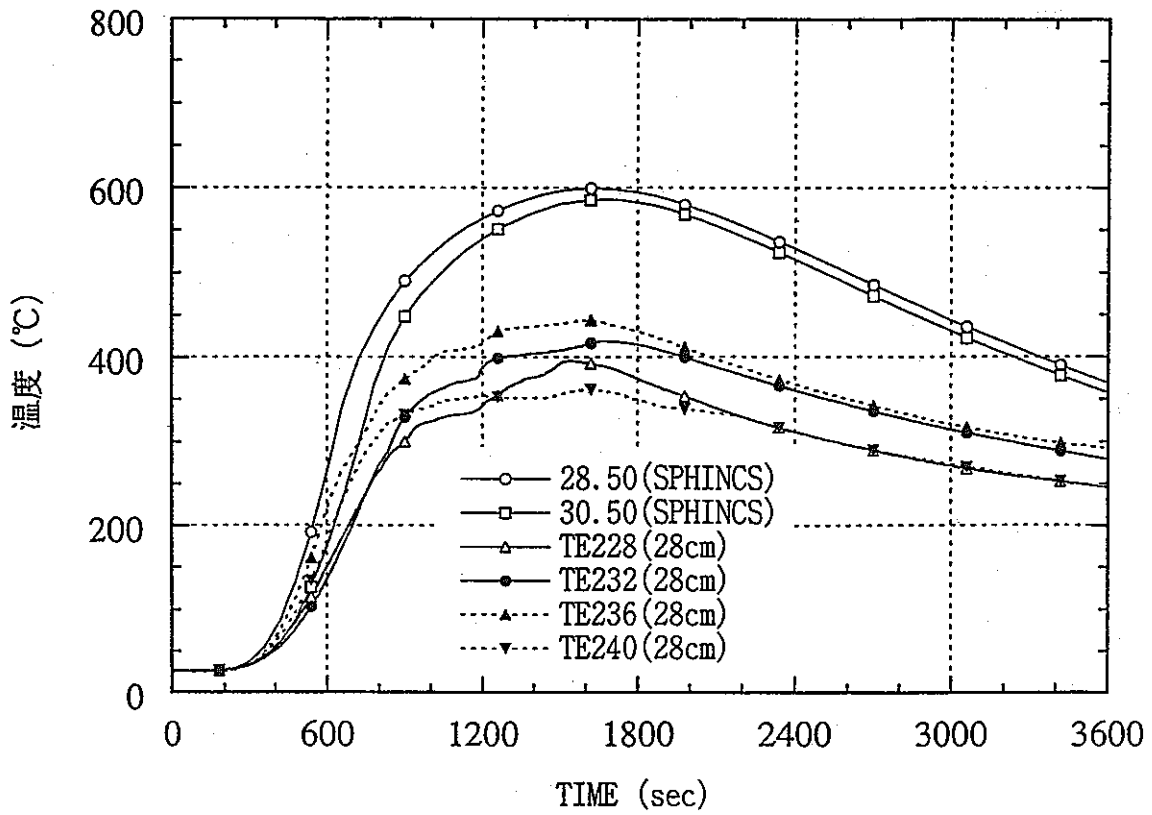


図 4-3-5 ライナ裏面中心より 28cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)

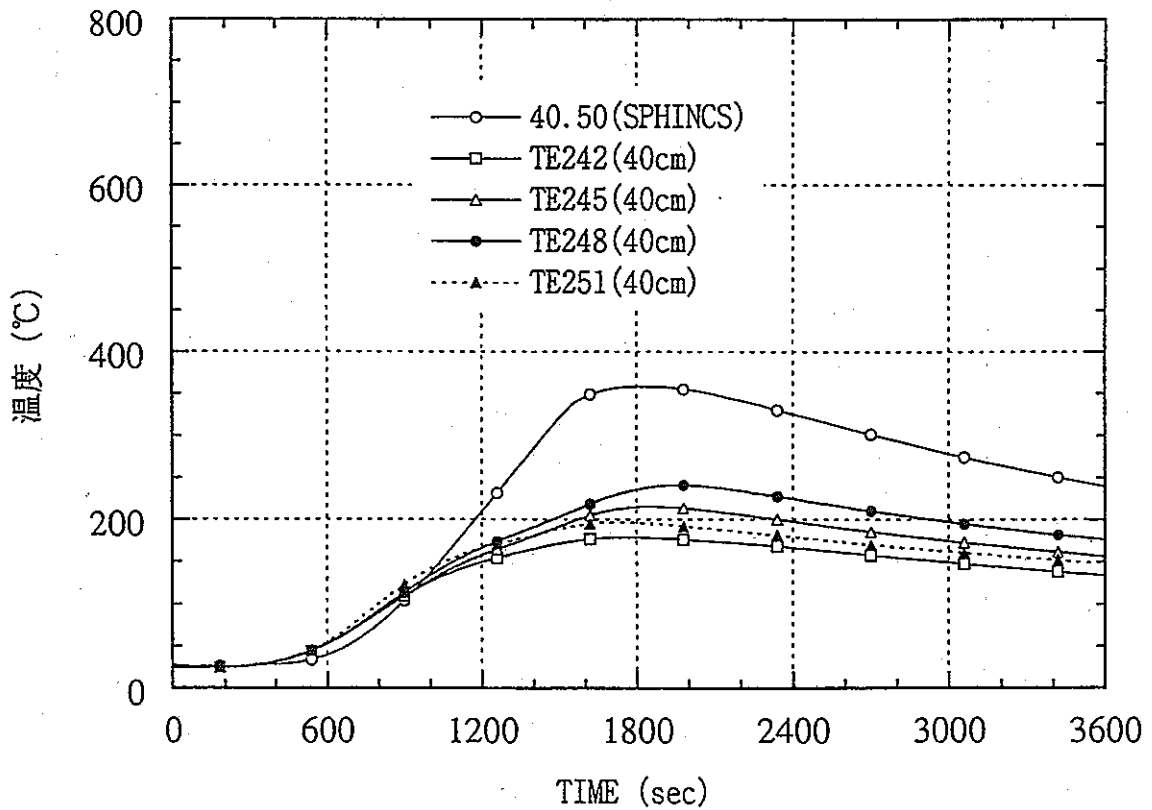


図 4-3-6 ライナ裏面中心より 40cm 位置での温度履歴 (解析と実験の比較)



## 5 結論

小漏えいプール燃焼実験 Run-F7 の解析を SPHINCS コードで行った結果、実験結果と良好に一致し、解析コードのプール拡大挙動、プール燃焼挙動、ライナとの熱授受につき SPHINCS の検証がなされた。また、ライナ温度は、実験、解析ともに 600℃ 台であり、ライナ腐食の観点から十分に低かった。小漏洩における現象が概ね理解されたこと、それらの多くがプール以下を多次元化した SPHINCS コードで表現できることがわかったことは重要な結論である。解析で用いた仮定は、(1)燃焼率を酸化物生成量に応じて低減させたこと、(2)ナトリウムプールの上限を実験値に基づいて設定したこと、の二点であり、これらはいずれも実機の評価では用いない仮定である。ここで用いた二つの仮定の影響度を検討した結果、①プールの最大面積を実験結果に基づき指定する、②プールの燃焼速度を(1)式に従って補正するの両仮定を用いなければライナー温度は高く解析されることを確認した。現象を理解するためにここで用いた二つの仮定は一般的に適用できるものではないが、それを用いないことによって燃焼影響を保守側に評価できることが示された。

すなわち、SPHINCS でもんじゅの小漏洩の解析を行うときには、上述の二つの仮定を採らなければ、燃焼量を大きめに評価するものである。

今後、本試験シリーズは、漏えい高さや漏えい率等を変更して継続実施される予定である。従って、本解析で仮定したモデルを用いてシリーズ試験の解析を行うことにより、検証性を追認する予定である。ここで検証した手法を用いれば、漏えい高さや漏えい規模などのパラメータを任意に変えて影響評価を行うことが可能である。

## 6 謝辞

Run-F7 実験は、安全工学部プラント安全工学室で実施したものである。プラント安全工学室のメンバー各位には、実験の計画段階からいろいろと議論していただき、燃焼モデルを検討する上で随分と参考になった。また、実験結果を早速に整理し、解析結果と比較できるように用意していただいた。同室の田辺裕美室長、三宅収室長代理、宮原信哉主任研究員、石川浩康研究員、西村正弘研究員の各位に感謝申し上げます。

もんじゅ建設所もんじゅ対策班の中井良大担当役、大野修司副主任研究員、清野裕研究員にはもんじゅの燃焼影響評価の課題等を議論していただき、解析コード開発の方向性を定めるのに有益であった。さらに研究費に関する支援も頂いた。本研究を、実質的に可能為らしめて頂いたことに感謝する。

本報告書に掲載した解析の実施にあたり、NDD 株式会社の橋本昭彦氏（熱流体室）にはモデル開発、解析結果の解釈に関して、有意義な討論をして頂いた。さらに、本研究は、大洗工学センターの燃焼解析コード高度化タスクフォース、熱流体室研究会でメンバー各位にいろいろと提案やコメントを頂いたことによってブラッシュアップされた。ここにお礼申し上げます。

## 7 参考文献

- [1] 動燃事業団、40%出力試験中における2次主冷却系ナトリウム漏えい事故について(第5報報告書)、平成9年3月
- [2] 大野修司、川田耕嗣、宮原信哉、ナトリウム漏洩燃焼に関する研究、動燃技報 92, pp18-31, 1994
- [3] 原子力安全委員会、原子力安全専門審査会研究開発炉用部会、高速増殖原型炉もんじゅ 2次ナトリウム漏えい事故に関する調査報告書、平成9年8月
- [4] 山口彰、大平博昭、村松壽晴、飯田将雄、ナトリウム燃焼の機構論的解析手法の開発、PNC TN9410 97-040, 1997年4月
- [5] 山口彰、ナトリウム燃焼解析評価手法の開発(6)、全体概要と解析コード体系、1998年原子力学会年会
- [6] 西村正弘、二上敏、川田耕嗣、他、ナトリウムプール燃焼実験(Run-F7)中間報告、PNC TN9410 98-074、1998年8月
- [7] K.K. Murata, et al., User's Manual for CONTAIN 1.1: Computer Code for Severe Nuclear Reactor Accident Containment Analysis, NUREG/CR-5026, SAND87-2309 R4, November 1989.
- [8] 坂場 弘、山口 彰、清野 裕、ナトリウム燃焼解析評価手法の開発(5) 多室内ナトリウム燃焼影響評価のためのCONTAINコードの改良、原子力学会1997秋の大会、G63 (1997)