

分置

広温度・広酸素濃度範囲Na燃焼試験 (IV)
－低温Naスプレー燃焼試験－
(研究報告)

2005年8月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

広温度・広酸素濃度範囲 Na 燃焼試験 (IV)
— 低温 Na スプレー燃焼試験 —
(研究報告)

川田耕司^{*1}、松木卓夫^{*2}、宮原信哉^{*3}

要 旨

初期温度が約 250°C のナトリウムを用いたスプレー燃焼試験を、空気雰囲気（酸素濃度 21%）と低酸素雰囲気（酸素濃度 3%）で行い、各々の条件におけるナトリウムの燃焼速度とエアロゾル放出割合を評価して、これまでに得ている初期温度約 500°C の条件における空気雰囲気でのナトリウムスプレー燃焼試験の結果と比較検討した。

試験は、内容積が 100m³ の円筒型ステンレス鋼容器 (SOLFA-2) 内にスプレーノズルを用いてナトリウムを噴霧して行い、容器内の酸素濃度変化および各部温度変化から燃焼速度を求めた。また、エアロゾル放出割合は、エアロゾル挙動解析コード ABC-INTG によるエアロゾル濃度の解析結果を実験結果と一致させる方法で評価した。

主な結論は以下の通りである。

(1) 空気雰囲気試験

- a) Na 温度が 250°C と低温であっても、スプレー状に漏えいした場合は着火・燃焼する。
- b) Na 燃焼速度は約 400g·Na/s となり、Na 供給流量に対する割合は約 70% となる。

(2) 低酸素濃度雰囲気試験

- a) 低酸素濃度雰囲気では、250°C の低温 Na がスプレー状に漏えいしても着火は生じない。
- b) Na 燃焼速度は約 44g·Na/s で、Na 供給流量に対する割合は 10% 未満である。

*1 大洗工学センター、開発調整室

*2 検査開発株式会社

*3 大洗工学センター、要素技術開発部、熱化学安全試験グループ

August, 2005

Sodium Fire Test at Broad Ranges of Temperature and Oxygen Concentration (IV)
— Low Temperature Sodium Spray Fire Tests —

Koji Kawata^{*1}, Takuo Matsuki^{*2}, Shinya Miyahara^{*3}

Abstract

Sodium spray fire tests at the initial sodium temperature of 250°C were conducted under the atmospheric conditions of air and 3% oxygen containing nitrogen to determine the sodium burning rate and the aerosol release fraction and compare them with the test results at the initial sodium temperature of 500°C in air atmosphere.

In the tests, sodium was supplied using a commercial spray nozzle into a stainless steel vessel of 100 m³ volume (SOLFA-2). The sodium burning rate was calculated from two independent methods : the consumption rate of oxygen in the vessel and the enthalpy change of vessel components during the test. The aerosol release fraction was determined from the comparison between the measured aerosol concentrations and the calculated ones by the ABC-INTG code.

The main conclusions were as follows,

(1) In air atmosphere,

- a) sodium droplets ignited instantaneously and the spray fire was observed, and
- b) the sodium burning rate was about 440 g-Na/s and the fraction of supplied sodium was about 70%.

(2) In 3% oxygen containing nitrogen,

- a) ignition of sodium droplets was not observed, and
- b) the sodium burning rate was about 44 g-Na/s and the fraction of supplied sodium was less than 10%.

*1 Research and Development Coordination Section, O-arai Engineering Center

*2 Inspection Development Company

*3 Thermochemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center

目 次

1. 緒論	1
2. 試験装置と計測	2
2. 1 試験装置の概略	2
2. 2 SOLFA-2 試験容器	2
2. 3 計測	2
2. 4 スプレーノズル	2
3. 試験条件と試験方法	3
3. 1 試験条件	3
3. 2 試験方法	3
4. 試験結果	5
4. 1 空気雰囲気試験 (Run-E4-2)	5
4. 1. 1 燃焼状況	5
4. 1. 2 容器内ガス圧力	5
4. 1. 3 容器内ガス温度	5
4. 1. 4 各部構造材温度	5
4. 1. 5 酸素濃度	6
4. 1. 6 Na 燃焼速度	6
(1) 燃焼速度の算出方法	6
(2) Na 燃焼速度の計算結果	7
4. 1. 7 エアロゾル放出割合	8
4. 2 低酸素濃度雰囲気試験 (Run-E4-1)	9
4. 2. 1 燃焼状況	9
4. 2. 2 容器内ガス圧力	9
4. 2. 3 容器内ガス温度	9
4. 2. 4 各部構造材温度	9
4. 2. 5 酸素濃度	10
4. 2. 6 Na 燃焼速度	10
4. 2. 7 エアロゾル放出割合	10
5. 結論	11
謝辞	12
参考文献	13

図表リスト

表 1 Run-E4 と Run-E1 の試験条件	14
表 2 Run-E4 の試験経過	15
図 1 Run-E4 における試験装置の構成	16
図 2 SOLFA-2 試験容器	17
図 3 Run-E4 における計測項目と計測点	18
図 4 SOLFA-2 試験容器の熱電対配置	19
図 5 SOLFA-2 試験容器内ガス空間の熱電対配置	20
図 6 SOLFA-2 試験容器内 Na 燃焼皿の熱電対配置	21
図 7 試験で使用したスプレーノズル	22
図 8 Run-E1、空気雰囲気試験、低酸素濃度雰囲気試験における容器内ガス圧力	23
図 9 空気雰囲気試験における容器内ガス温度	24
図 10 Run-E1 試験における容器内ガス温度	25
図 11 空気雰囲気試験における容器外壁温度	26
図 12 空気雰囲気試験における Na 燃焼皿と Na プール温度	27
図 13 空気雰囲気試験における容器内酸素濃度	28
図 14 空気雰囲気試験における酸素濃度変化から算出した Na 燃焼速度	29
図 15 空気雰囲気試験における各部温度変化から算出した Na 燃焼速度	30
図 16 初期 Na 温度と Na 供給流量に対する燃焼速度の割合	31
図 17 空気雰囲気試験におけるエアロゾル濃度の実験結果と解析結果の比較	32
図 18 空気雰囲気試験におけるエアロゾル沈降量の実験結果と解析結果の比較	33
図 19 低酸素濃度雰囲気試験における容器内ガス温度	34
図 20 低酸素濃度雰囲気試験における容器外壁温度	35
図 21 低酸素濃度雰囲気試験における Na 燃焼皿と Na プール温度	36
図 22 低酸素濃度雰囲気試験における容器内酸素濃度	37
図 23 低酸素濃度雰囲気試験における酸素濃度変化から算出した Na 燃焼速度	38
図 24 低酸素濃度雰囲気試験における各部温度変化から算出した Na 燃焼速度	39
図 25 低酸素濃度雰囲気試験におけるエアロゾル濃度の実験結果と解析結果の比較	40

図 26 低酸素濃度雰囲気試験におけるエアロゾル沈降量の実験結果
と解析結果の比較 41

1. 緒論

高速炉プラントでは、冷却材にナトリウム（以下、Naと略す）を使用しているため、設計基準内事故の一つとしてNa漏えい事故を想定している。このため、Na漏えい事故に備えたNa漏えい対策設備の健全性および有効性の確認や、Na燃焼による熱的影響を評価するための解析コードの検証を行っておくことは、高速炉プラントの信頼性を担保するために重要な課題である。

核燃料サイクル開発機構では、旧動燃時代から大洗工学センターの大規模Na漏えい火災試験施設（SAPFIRE）を用いて数多くの実験研究を実施してきた。しかしながら、これまでのNa漏えい燃焼実験は、主として空気雰囲気において初期Na温度が約500°C前後の高温条件で実施されたもので、今後設計の合理化と安全性を両立させるためには、雰囲気中酸素濃度とともに初期Na温度の範囲を拡げたNa漏えい燃焼データを取得しておく必要がある。特に、高速炉プラントで比較的低温のNaを使用する原子炉定格運転時以外の主冷却系や炉外燃料貯蔵槽（EVST）およびメインテンанс冷却系での低温Na漏えい事故については、空気雰囲気および低酸素濃度（3%）雰囲気の両条件下で従来のNa燃焼解析コードが妥当な熱的影響評価結果を示すことを確認しておく必要がある。

本研究では、初期温度が約250°CのNaを用いたスプレー燃焼試験を、空気雰囲気（酸素濃度21%）と低酸素雰囲気（酸素濃度3%）で行い、各々の条件におけるNaの燃焼速度とエアロゾル放出割合を評価して、これまでに得ている初期温度約500°Cの条件における値と比較検討した。

2. 試験装置と計測

2. 1 試験装置の概略

低温 Na スプレー燃焼試験で用いた試験装置は、図 1 に示すように、SOLFA-2 試験容器とその周辺装置である Na 加熱器 (MH)、不純物沈殿タンク (DT)、Na ストレージタンク (ST) および排煙処理装置から構成されている。

Na 加熱器は、最大約 4000kg の Na を加熱して所定の温度まで昇温し、カバーガスである窒素ガスの加圧操作によって Na を試験容器へ供給することができる。不純物沈殿タンクは、試験後の Na 燃焼皿などに溜まった Na を回収し貯蔵するためのものである。Na ストレージタンクは常時 Na を貯蔵し、試験時にはここから Na を Na 加熱器へ移送する。また、排煙処理装置は、試験時に発生した Na エアロゾルを水スクラバーおよび HEPA フィルターにて除去し、大気中へ放出するのを防止するためのものである。

2. 2 SOLFA-2 試験容器

図 2 に SOLFA-2 試験容器の構造を示す。試験容器は内容積約 100m³ のステンレス鋼製 (SUS304, 25mm^t) の縦置き円筒型密閉容器である。試験では、この容器上部にある Na 供給配管の先端にスプレーノズルを取り付け、その下方 4m にステンレス鋼製 (SUS304) の Na 燃焼皿 ($\phi 2900\text{mm} \times H350\text{mm} \times 6\text{mm}^t$) を設置した。Na 燃焼皿は、スプレー燃焼で燃え残った Na を受け止めて貯留するためのものである。

2. 3 計測

図 3 に試験時の主な計測項目と計測点を示す。試験時の Na 供給温度と供給流量は、Na 供給配管に設置した熱電対と電磁流量計により測定した。また、図 4 と図 5 および図 6 に試験容器と容器内ガスおよび Na 燃焼皿の熱電対設置位置を示す。酸素濃度と水素濃度は、磁気式酸素濃度計と熱伝導度式水素濃度計を用いて測定し、その測定位置は図 3 に示したように試験容器内の高さ方向に 3 箇所とした。雰囲気中の Na エアロゾルサンプリングは、焼結金属フィルターを介して一定量の雰囲気ガスを真空ボンベにて吸引する方法で行い、その測定位置は図 3 に示したように試験容器内の高さ方向に 2 箇所とした。さらに、沈降エアロゾルのサンプリングはサンプリング皿を間欠的に一定時間曝す方法を行い、その測定位置は試験容器のマンホール部内側 1 箇所とした。

2. 4 スプレーノズル

試験で用いたスプレーノズルを図 7 に示す。このスプレーノズルは、高温 Na

スプレー燃焼試験（Run-E1）¹⁾で用いたものと同じ仕様であり、そのコーン角度は約25°、水試験で計測した液滴径は体積平均で約2.6mm、表面積平均で約1.8mmである。

3. 試験条件と試験方法

3. 1 試験条件

主な試験条件を、高温Naスプレー燃焼試験（Run-E1）のそれとともに表1に示す。試験は空気雰囲気（酸素濃度21%）と低酸素雰囲気（酸素濃度3%）の2ケース実施し、それぞれのRun No.をRun-E4-2、Run-E4-1とした。試験条件の設定にあたっては、初期Na温度を除いてRun-E1と同じ条件を目標とした。このため、スプレーノズルによって得られる液滴径、スプレーコーン角度などもRun-E1とほぼ同仕様のものを使用した。

初期Na温度については、低温を代表する温度として250°Cを選定した。これは、低温Naを用いる系統温度の例として、原型炉「もんじゅ」の炉外燃料貯蔵槽（EVST）冷却系の一次系（低酸素濃度雰囲気）では260°C、二次系（空気雰囲気）では240°C、二次メインテナンス冷却系（空気雰囲気）では230°Cであることから、これらの代表値とした。Na供給時間としては、測定上の必要最低時間を目安として5分間とした。

その他、Naスプレーノズルの設置高さや酸素供給の有無等も、Run-E1と等しくした。

3. 2 試験方法

試験は2ケースを連続して行い、空気雰囲気での試験であるRun-E4-2を先に、低酸素濃度雰囲気での試験であるRun-E4-1を後に実施した。これは、最初の試験でNa受け皿に落下して貯留した未燃焼Naが、次の試験でプール燃焼することによる影響を極力排除するためである。試験経過の概要を表2に示す。

空気雰囲気試験（Run-E4-2）では、予めNaストレージタンクからNa加熱器にNaを移送し、Na温度を約250°Cに昇温して維持した。次に、試験容器内の酸素濃度等の条件が整っていることを確認した後、Na供給量が所定の流量になるようにNa加熱器のカバーガス圧力を調整し、Na供給弁（VN-109）を開いて試験を開始した。さらに、Na供給量を試験条件に継続して一致させるため、Na流量調節弁（VN-105）の開度を手動で操作した。Naの供給は約5分で完了した。Na供給終了後は、試験容器内外の安全を確認してからNa燃焼皿内に貯留したNaを不純物沈殿タンクへドレンした。Naドレン作業は、Na燃焼皿を

傾け、ドレン配管部へ多くの Na を移送させるようにした。

試験データの収録は、図 3 に示した計測項目について、空気雰囲気試験の Na 供給開始前から 2 回目の低酸素濃度雰囲気試験が終了するまでの間、データ収録装置（HP-1000）により行った。データ収録間隔は 500ms である。

試験中の燃焼状況の観察・撮影は、空気雰囲気試験では試験容器内部の天井から、低酸素濃度雰囲気試験では試験容器側壁部覗き窓から、ビデオカメラにより行った。さらに、空気雰囲気試験では、試験容器側部覗き窓から高速度ビデオカメラにより漏えい形態を撮影した。

雰囲気中の Na エアロゾルのサンプリングは、試験容器側部の管台から内部にサンプリングノズルを挿入して 30 秒間隔で、一方沈降エアロゾルのサンプリングはサンプリング皿を回転させる方式の専用装置にて 1 分毎に行った。

低酸素濃度雰囲気試験は、空気雰囲気試験終了後に各部温度と容器内圧力が常温、常圧に戻った後各サンプリング装置の再設定を行い、さらに試験条件である試験容器内酸素濃度を 3% に調整・確認してから、空気雰囲気試験と同様の操作で実施した。

2 回の試験が全て終了した後は、試験容器側部のマンホールを開放し、内部状態の写真撮影を行ってから試験容器内壁に付着した Na エアロゾルおよび Na 燃焼皿内に残留した Na の処理などを実施した。

4. 試験結果と考察

4. 1 空気雰囲気試験 (Run-E4-2)

4. 1. 1 燃焼状況

試験容器内部に設置したビデオカメラによる観察結果から、スプレー nozzle から供給された Na は瞬時に着火し、大量のエアロゾルを発生していることが認められた。このことは、Na 燃焼現象確認試験²⁾で約 1mm 前後の液滴径の Na 着火温度が約 250°C であったことと一致している。また、1987 年にスペインのアルメリアで発生したソーラープラントでの Na 漏えい事故³⁾において、約 250°C の Na がスプレー状に漏えいして燃焼し、多大な被害をもたらしたこととも整合している。

以上のことから、約 250°C の比較的低温の Na が空気雰囲気中へスプレー状に漏えいした場合においても Na は瞬時に着火して燃焼し、その状況は約 500°C の高温 Na によるスプレー燃焼となんら変わらないことが認められた。

4. 1. 2 容器内ガス圧力

試験容器内ガス圧力変化を、Run-E1 の結果とともに図 8 に示す。本試験では、スプレー開始後から約 2 分後に最高圧力である 1.0 kg/cm²G に達したが、Run-E1 の最高圧力である 1.2 kg/cm²G と比べるとやや低い値であった。

4. 1. 3 容器内ガス温度

図 9 に試験容器内ガス温度変化を、スプレーコーン内側、外側およびスプレーノズル上部に分けて示す。スプレーコーン内側のガス温度は、スプレー開始直後に Na 液滴の着火が生じたために急激に上昇し、最高温度は 800°C 以上にまで達した。その後は、容器内の酸素濃度が減少するとともに低下した。コーン外側とスプレーノズル上部のガス温度は、コーン内側からの輻射や対流による熱を受けてそれぞれ約 500°C と約 550°C にまで達した。

図 9 に示した本試験におけるガス温度変化を図 10 に示す Run-E1 のガス温度の結果と比較すると、上述のガス圧力結果と同様に本試験の結果はやや低い値を示している。

4. 1. 4 各部構造材温度

試験容器天井と側壁の外側温度を図 11 に示す。天井温度は最高で 80°C に達し、試験開始時からの温度上昇は約 60°C であった。これは、Run-E1 における当該部の温度上昇が約 130°C であったことから、ほぼ半分である。また、側壁温度の最高は 35°C で、試験開始時からの温度上昇は約 15°C であった。Run-E1 におけ

る当該部の温度上昇は約 10°C で、本試験よりも低いが、これは Run-E1 では側壁の水冷ジャケットに冷却水を満たしていたことによる。

図 12 には、Na 燃焼皿の温度変化を Na プールのそれとともに示す。Na プール底面 (Na 燃焼皿より高さ 1mm) の温度は、Na スプレー終了時点で約 700°C に達し、Na プール表面付近 (Na 燃焼皿より高さ 70mm) では Na プール燃焼によって生じた火炎からの輻射等により 800°C 以上となっている。Na 燃焼皿は、その底部に厚さ約 350mm の断熱層を設けてあるため、燃焼皿中央部の表裏両面で 700°C 以上となって最終的には Na プール温度とほぼ等しくなっている。

4. 1. 5 酸素濃度

試験容器の高さ方向に取付けた 3 台の磁気式酸素濃度計による試験容器内酸素濃度変化を図 13 に示す。磁気式酸素濃度計は、測定するガス中に含まれる Na エアロゾルの除去とガス冷却のために連続サンプリング方式を採用しており、ガス採取位置から測定部までは配管でつながっている。このため、サンプリング時刻と測定時刻には、一定の時間遅れが生じる。図 13 はこの時間遅れを補正した結果であるが、スプレーノズル下部空間の酸素濃度の減少開始が上部空間に比べて早く、濃度に若干の分布があることがわかる。これは、スプレーーン内での Na 燃焼によってノズル下部空間の酸素がまず消費され、その後ガスの対流によって上部空間の酸素が下部に移送され消費されるためである。

4. 1. 6 Na 燃焼速度

Na 燃焼速度は、上述の容器内酸素濃度変化と各部の温度変化の二つの方法で算出した。

(1) 燃焼速度の算出方法

a) 酸素濃度変化から算出する方法

ある時刻 t における容器内酸素のモル数は、次式で表される。

$$N_{O_2}(t) = [C_{O_2}(t)/100 \cdot P(t) \cdot V] / [R \cdot T(t)] \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ただし、 $N_{O_2}(t)$: 容器内酸素モル数 (mol)

$C_{O_2}(t)$: 容器内酸素濃度 (%)

$P(t)$: 容器内ガス圧力 (Pa)

V : 容器容積 (m^3)

R : 気体定数 ($kg \cdot m^2/s^2 \cdot mol \cdot K$)

$T(t)$: 容器内ガス温度 (K)

Na 燃焼速度は、(1)式による Δt の時間内に消費される酸素量から、次式によつて求めることができる。

$$B(t) \cdot \Delta t = [N_{O_2}(t) - N_{O_2}(t + \Delta t)] \cdot M_{O_2} \cdot S \quad \dots \dots \dots \dots \quad (2)$$

ただし、
 $B(t)$: Na 燃焼速度 (kg-Na/s)
 M_{O_2} : 酸素 1mol の質量 (kg-O₂/mol)
 S : 単位質量の酸素と反応する Na 質量 (kg-Na/kg-O₂)
 で、Na と酸素との反応生成物は以下の割合とした。
 $C_{O_2} \geq 11.3$ wt-% のとき、Na₂O : Na₂O₂ = 3 : 2
 $C_{O_2} < 11.3$ wt-% のとき、Na₂O : Na₂O₂ = 1 : 0

b) 各部温度変化から算出する方法

各部温度変化から Na 燃焼に伴う発熱量を求め、これを Na 燃焼速度に換算する。

$$B(t) \cdot \Delta t \cdot Q_{Na} + Q_s(t) = \Sigma [C_{pi} \cdot \Delta T_{i(t)}] \quad \dots \dots \dots \dots \quad (3)$$

ただし、
 Q_{Na} : 単位質量 Na の燃焼熱 (kJ/kg-Na)
 $Q_s(t)$: 他の熱源からの発熱 (kJ)
 C_{pi} : 構造物 i の熱容量 (kJ/°C)
 $\Delta T_{i(t)}$: 時間 Δt の間の構造物 i の温度変化 (°C)

(2) Na 燃焼速度の計算結果

図 14 に酸素濃度変化から求めた Na 燃焼速度の時間変化を、図 15 に各部温度変化から求めた Na 燃焼速度の時間変化を、それぞれ示す。これらの値を平均して酸素濃度が 21%の条件に換算すると、前者の燃焼速度は約 387g-Na/s、後者のそれも約 387g-Na/s となって両者は一致する。この値は、Na 供給流量である 540g-Na/s の約 70%に相当する。

Run-E1 では、Na 燃焼速度は約 160g-Na/s で、これは Na 供給流量の約 30% に相当すると報告されているが、この燃焼速度はスプレー期間中の平均酸素濃度である約 10%における値である。さらに、単位質量の酸素と反応する Na 質量 : S を決める反応生成物の割合も、今回とは異なる。これらを補正し、酸素濃度が 21%の条件に換算すると、Na 燃焼速度は約 500g-Na/s となって、Na 供給流量とほぼ等しくなる。

酸素濃度が 21%の条件での Na 供給流量に対する Na 燃焼速度の割合を、初

期 Na 温度について整理した結果を図 16 に示す。図には、ほぼ同条件の棒状流 Na 燃焼試験⁴⁾である Run-E3-3 の結果も参考のため示してある。これらの結果から、初期 Na 温度が 250°C の低温 Na スプレー時の燃焼割合は、500°C の高温 Na スプレー時に比べて約 30% 低くなることが明らかとなった。また、500°C の高温 Na 棒状流の場合よりは高くなることもわかった。

4. 1. 7 エアロゾル放出割合

エアロゾル放出割合は、エアロゾル濃度や沈降量についてエアロゾル挙動解析コード ABC-INTG による解析結果と実験結果が一致するように決定した。これまでの知見から、エアロゾル放出割合は Na プール燃焼速度の約 20~40%、棒状 Na 漏えい燃焼速度の 20~30% と報告されていることから、今回の解析では 30% として解析を行った。その他の主な解析条件は、棒状流 Na 燃焼試験⁴⁾で得た以下の値を用いた。

エアロゾル平均半径 r_g	:	$1.5 \mu m$
エアロゾル密度 ρ	:	$1.0 g/cm^3$
重力凝集形状係数に乘じるファクター ϵ	:	-1

エアロゾル濃度についての実験結果と解析結果の比較を図 17 に、エアロゾル沈降量のそれを図 18 にそれぞれ示す。これらの結果から、エアロゾル濃度についてはスプレー開始直後は実験結果が解析結果を大きく下回っているが、数分経過後からスプレー終了までの期間はほぼ等しい結果となっている。この理由は、実験ではスプレー開始直後は発生したエアロゾルが試験容器内全体に広がっておらず、サンプリングした位置の濃度が低かったのに対し、解析では発生したエアロゾルが容器内空間で常に均一として扱っていることによる。一方、エアロゾル沈降量については、全ての期間にわたって解析結果が実験結果を下回っている。この理由は、実験ではスプレー状に漏えいさせた Na 液滴の燃え残りがサンプリング皿に混入したためと推察される。

以上から、エアロゾル放出割合を約 30% と仮定したエアロゾル挙動解析は、実験結果のエアロゾル濃度変化を再現できている。

4. 2 低酸素濃度雰囲気試験 (Run-E4-1)

4. 2. 1 燃焼状況

低酸素濃度 (3%) 雰囲気で初期温度が 250°C の Na をスプレー状に漏えいさせた時の燃焼状況を、試験容器側壁部覗き窓からビデオカメラにより観察した。この映像から、漏えいした Na の液滴は空気雰囲気試験 (Run-E4-2) と異なり、着火することなく落下し、エアロゾルが発生したのみであった。また、この映像からスプレーノズルによって形成されたコーンの角度は約 27° であり、水試験で得られた結果の約 25° とほぼ等しいことを確認した。

4. 2. 2 容器内ガス圧力

図 7 に試験容器内のガス圧力変化を示す。本試験での最高ガス圧力は約 0.5kg/cm²G と、既に記述した空気雰囲気試験での最高ガス圧力約 1.0kg/cm²G の半分である。これは、低酸素濃度雰囲気では燃焼状況の観察で明らかになつたように Na が着火しないためである。したがって、Na が着火・燃焼する空気雰囲気試験より最高ガス圧力は低くなる。

4. 2. 3 容器内ガス温度

図 19 に試験容器内ガス温度変化を、スプレーコーン内側、外側およびスプレーノズル上部に分けて示す。スプレーコーン内側の最高ガス温度は、漏えいした Na の初期温度である 250°C よりも高い約 350°C を示した。このことから、酸素濃度が 3% の低酸素濃度雰囲気では漏えいした Na は着火しないものの、雰囲気中に 3% 存在する酸素による酸化発熱反応は生じていることがわかる。

一方、スプレーコーン外側およびスプレーノズル上部の最高ガス温度は、漏えい Na 温度よりも低い値にとどまり、スプレーコーン外側よりもスプレーノズル上部の方が高い温度となつた。

4. 2. 4 各部構造材温度

試験容器天井と側壁の外側温度を図 20 に示す。本試験は空気雰囲気試験の後に連続して実施したため、いずれも初期温度は常温より高いが、試験による温度上昇は天井温度が約 10°C、側壁温度が 5°C 以下といずれも空気雰囲気試験に比べると低いことがわかる。

図 21 には、Na 燃焼皿の温度変化を Na プールのそれとともに示す。Na プール底面 (Na 燃焼皿より高さ 1mm) の初期温度は、空気雰囲気試験による Na が少し残っているために約 100°C と高いが、スプレー終了時においても供給 Na 温度である 250°C までしか上昇していない。Na プール表面付近 (Na 燃焼皿より高さ 70mm) ではスプレー開始後 1 分くらいで 500°C 以上の温度となってい

るが、これは酸化発熱反応によって温度が上昇したNa液滴が落下したことによるものと推察する。Na燃焼皿は、その底部に厚さ約350mmの断熱層を設けてあるため、最終的にはNaプール温度とほぼ等しくなっている。

4. 2. 5 酸素濃度

図22に酸素濃度変化を示す。試験開始前の試験容器内酸素濃度は、その前に実施した空気雰囲気試験の影響が多少残っているために場所の違いによる分布があることを示している。スプレー期間中の酸素濃度の減少勾配は、試験容器下部の酸素濃度計が大きく、中部と上部はほぼ同じであった。

4. 2. 6 Na燃焼速度

Na燃焼速度は、空気雰囲気試験と同様の方法で、酸素濃度変化と各部温度変化から算出した。図23に酸素濃度変化から求めたNa燃焼速度を示す。この結果から、低酸素濃度雰囲気試験でのNa燃焼速度は、試験容器下部の酸素濃度計(CO-101)による酸素濃度変化から求めた結果がやや高い値を示している。一方、各部温度変化から求めたNa燃焼速度を図24に示すが、この結果は平均すると約45g·Na/sとなり、3つの酸素濃度計による酸素濃度変化から求めた結果を平均したNa燃焼速度である約43g·Na/sとほぼ等しい。したがって、これらのNa燃焼速度は妥当な結果であると判断され、その値はNa供給流量の10%未満である。この結果を、図16に示したNa供給流量に対するNa燃焼速度の割合を初期Na温度について整理した図に表すと、空気雰囲気では初期Na温度の影響が30%程度であったのに比べて、低酸素濃度雰囲気ではさらに抑制されていることがわかる。

4. 2. 7 エアロゾル放出割合

エアロゾル放出割合の算出は、空気雰囲気試験の場合と同様に、エアロゾル濃度や沈降量についてエアロゾル挙動解析コードABC-INTGによる解析結果と実験結果が一致するように決定した。解析で仮定したエアロゾル放出割合は、既に実施した低酸素濃度プール燃焼試験⁵⁾での値が約20%であったことから、20%とした。図25にエアロゾル濃度についての解析結果と実験結果の比較を、図26にエアロゾル沈降量についての比較を、それぞれ示す。エアロゾル濃度については、両者の一致はほぼ良好である。一方、エアロゾル沈降量については、全ての期間にわたって解析結果が実験結果を下回っている。この理由は、空気雰囲気試験と同様に、実験ではNa液滴の燃え残りがサンプリング皿に混入したためと推察される。

5. 結論

約 250°C の低温 Na によるスプレー燃焼実験を、酸素濃度の異なる雰囲気条件で 2 ケース（空気雰囲気、3% 低酸素濃度雰囲気）実施し、それぞれの Na 燃焼速度とエアロゾル放出割合を調べた。以下に結論を示す。

5. 1 空気雰囲気試験

- (1) 空気雰囲気では、Na 温度が 250°C と低温であっても、スプレー状に漏えいした場合は着火・燃焼する。
- (2) Na 燃焼速度は約 400g·Na/s となり、Na 供給流量に対する割合は約 70% となる。
- (3) Na 燃焼速度に対するエアロゾル放出割合を約 30% と仮定してエアロゾル挙動解析を行うと実験結果のエアロゾル濃度変化を再現できる。

5. 2 低酸素濃度雰囲気試験

- (1) 低酸素濃度雰囲気では、250°C の低温 Na がスプレー状に漏えいしても着火は生じない。
- (2) Na 燃焼速度は約 44g·Na/s で、Na 供給流量に対する割合は 10% 未満である。
- (3) Na 燃焼速度に対するエアロゾル放出割合を約 20% と仮定してエアロゾル挙動解析を行うと実験結果のエアロゾル濃度変化を再現できる。

以上のことから、250°C の低温 Na が空気雰囲気にスプレー状に漏えいした場合には、Na の着火・燃焼が起こり、500°C 程度の高温 Na がスプレー状に漏えいした場合と同様の燃焼状況を呈する。一方、酸素濃度が 3% の低酸素濃度雰囲気では、Na は着火せず、非常に穏やかな燃焼状況となる。

謝辞

本試験研究を実施するにあたり、東興機械工業㈱の鈴木和右氏には、試験装置の改造整備や各試験の準備・実施・後処理において多大なご尽力を頂戴した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 森井, 福地, 山田, 姫野, 「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験（III）－空気雰囲気における大規模 Na スプレー燃焼試験 Run-E1－」, PNC TN9410 86-124, 1986 年 12 月
- 2) 川田, 宮原, 広井, 姫野, 「広温度・広酸素濃度範囲ナトリウム燃焼試験（I）－ナトリウム燃焼現象確認試験－」, PNC TN9410 88-004, 1988 年 1 月
- 3) 大野, 姫野, 「スペインのアルメリアにおける Na 漏洩事故に関する調査結果」, PNC ZD0135 88-001, 1988 年 12 月
- 4) 大野, 川田, 森川, 姫野, 「ナトリウム棒状流漏洩燃焼試験－燃焼速度とエアロゾル発生速度－」, PNC TN 9410 89-154, 1989 年 11 月
- 5) 川田, 大野, 森川, 姫野, 「広温度・広酸素濃度範囲ナトリウム燃焼試験（II）－低酸素濃度雰囲気での Na プール燃焼速度とエアロゾル放出速度－」, PNC TN9410 88-164, 1988 年 12 月

表1 Run-E4 と Run-E1 の試験条件

Items	Run-E4-1	Run-E4-2	Run-E1
Sodium Temperature	248°C	249°C	505°C
Spray Flow Rate	38.4 ℥/min	39.4 ℥/min	36.7 ℥/min
Mass of Supplied Sodium	192 ℥	197 ℥	1101 ℥
Spray Duration	5.1 min	5.1 min	30 min
Height of Falling Nozzle	4 m	4 m	3.98 m
Mean Droplet Diameter			
(1) Surface Mean Diameter	1.84 mm	1.84 mm	1.6 mm
(2) Volume Mean Diameter	2.58 mm	2.58 mm	2.2 mm
Initial Oxygen Concentration	3.3 %	20.8 %	21 %
Initial Relative Humidity	< 1 %	7 %	—
Gas Pressure	Atmospheric Pressure		
Vessel Volume	100 m³		

表2 Run-E4 の試験経過

Time	Test Progression
2/28 8:58	Sodium Charge in Sodium Heater Tank
10:21	Start of Data Recording
10:25	Start of Sodium Feed for Run-E4-2
10:30	Stop of Sodium Feed
10:50	Drain of Remaining Sodium in Pan
15:28	Start of Sodium Feed for Run-E4-1
15:33	Stop of Sodium Feed
15:34	Drain of Remaining Sodium in Pan
19:00	Stop of Data Recording

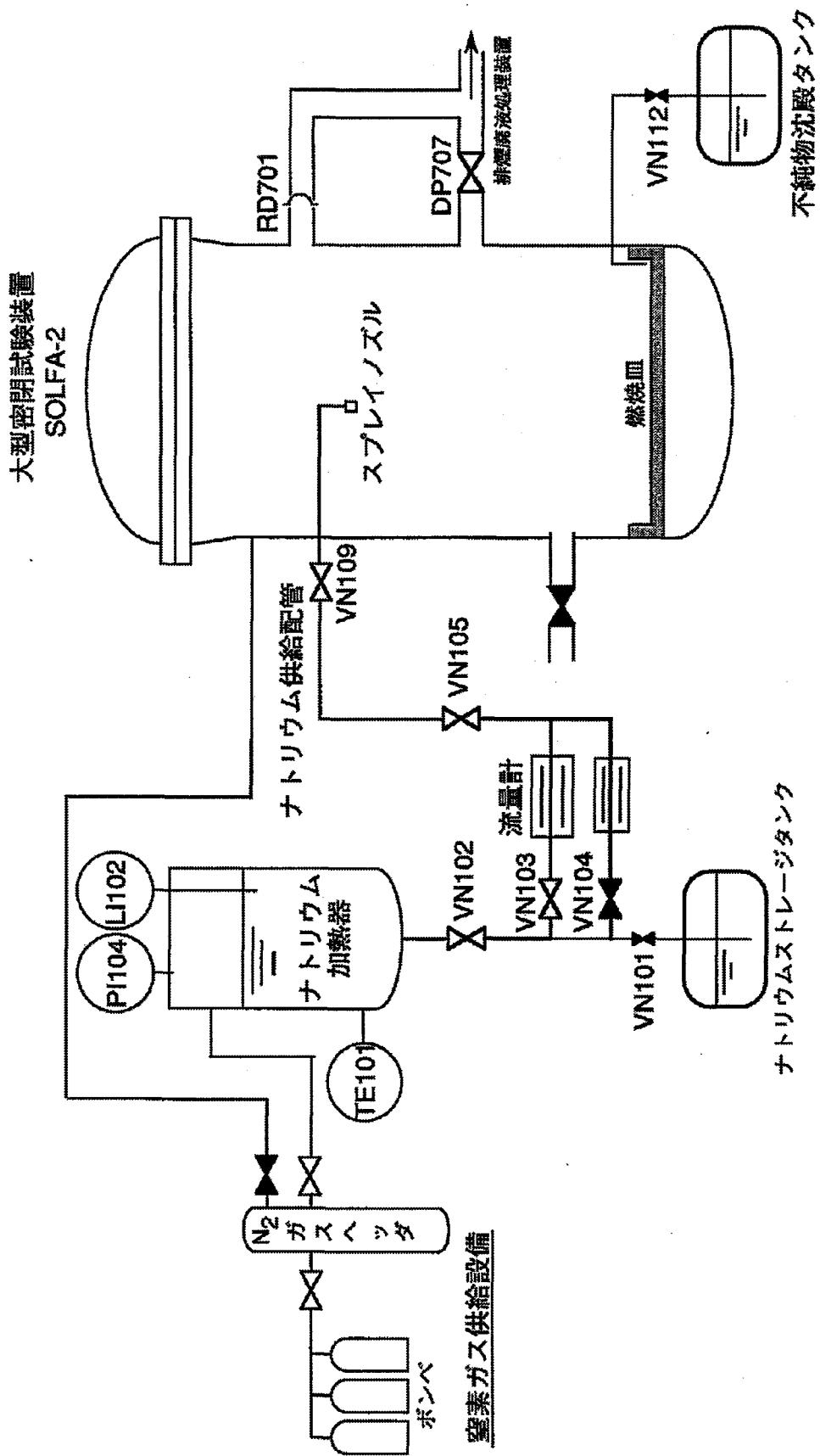


図1 Run-E4における試験装置の構成

SOLFA - 2 鋼製容器(約100 m³)

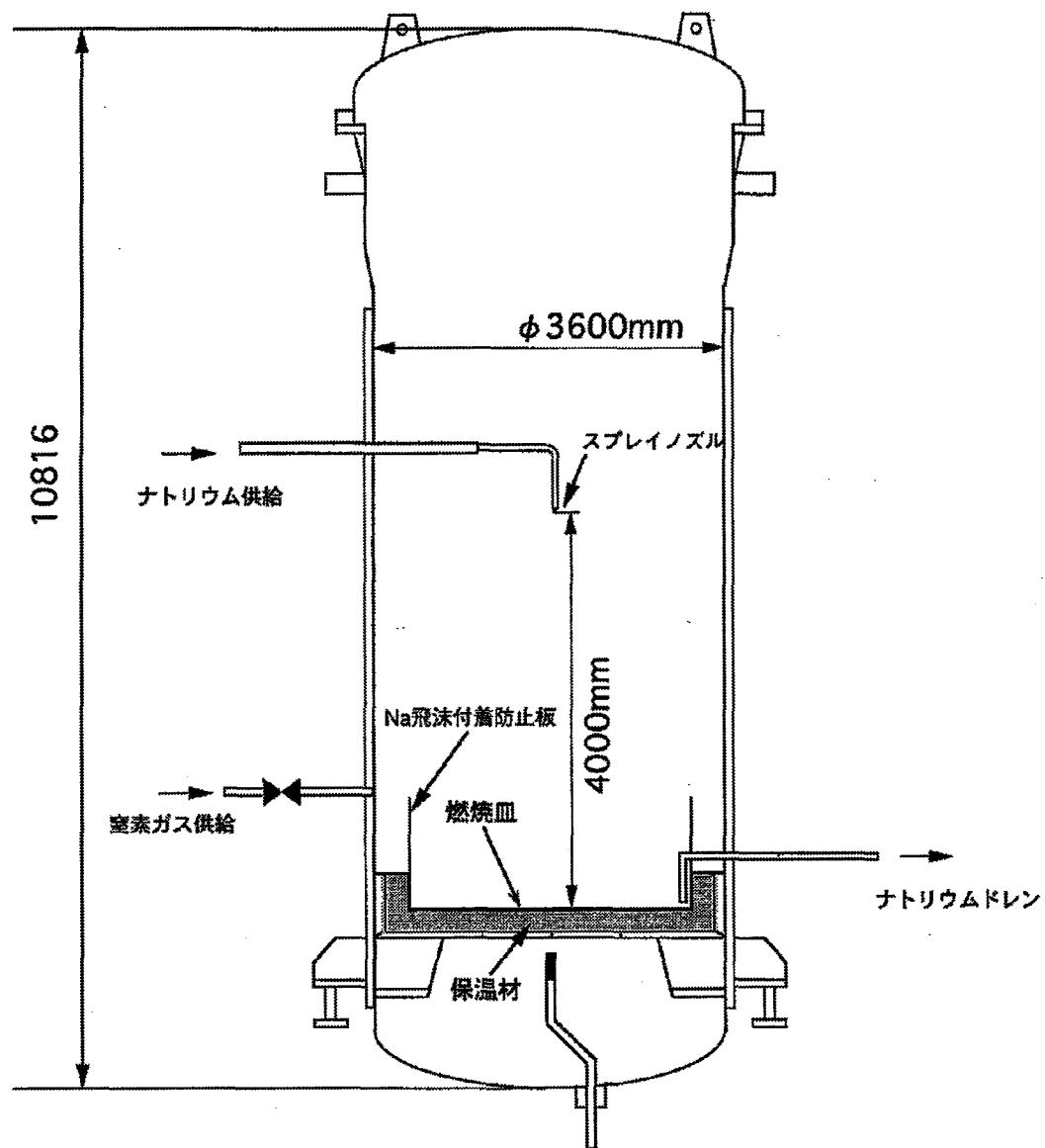


図 2 SOLFA-2 試験容器

SOLFA - 2 鋼製容器(約100 m³)

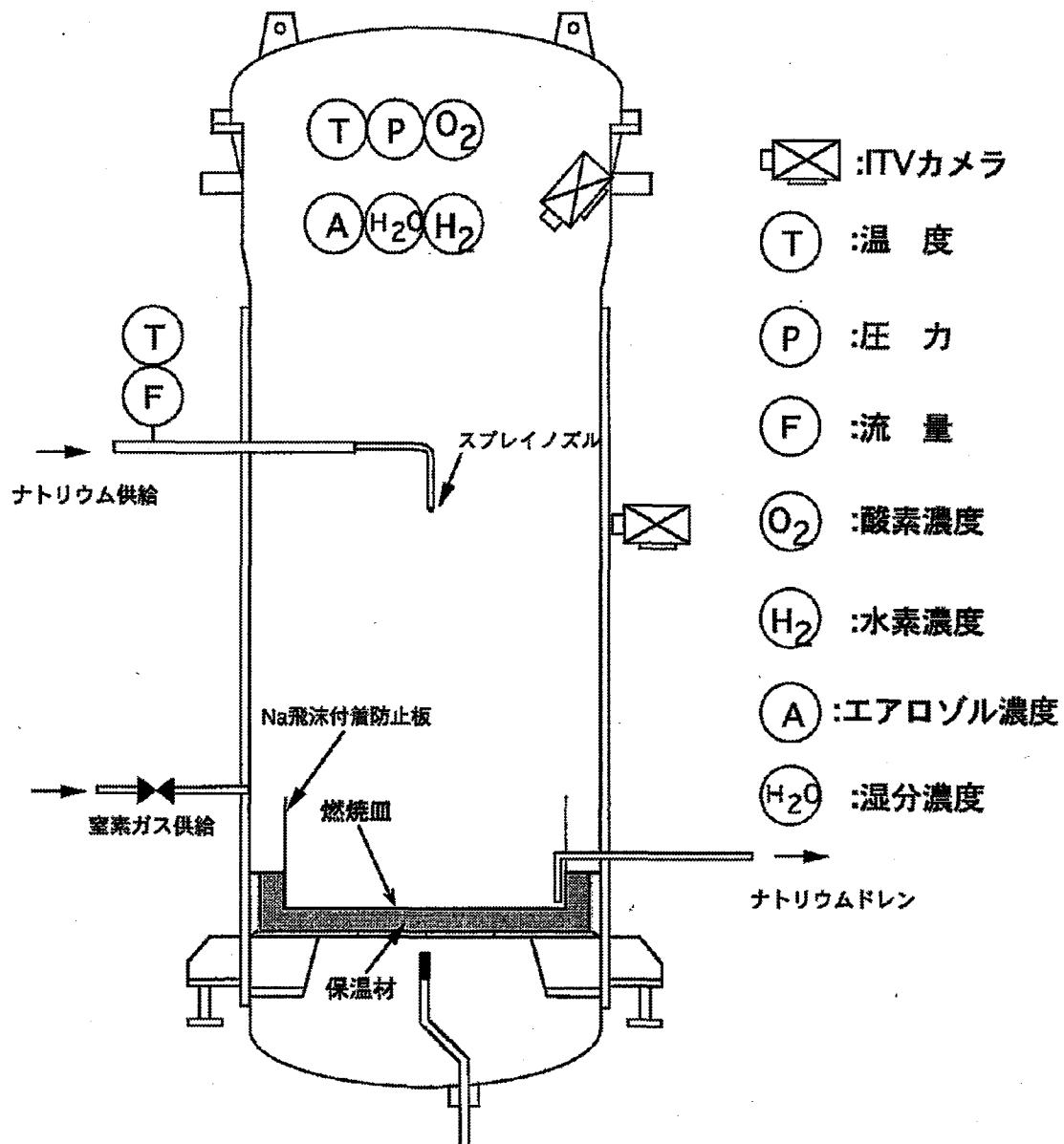


図3 Run-E4における計測項目と計測点

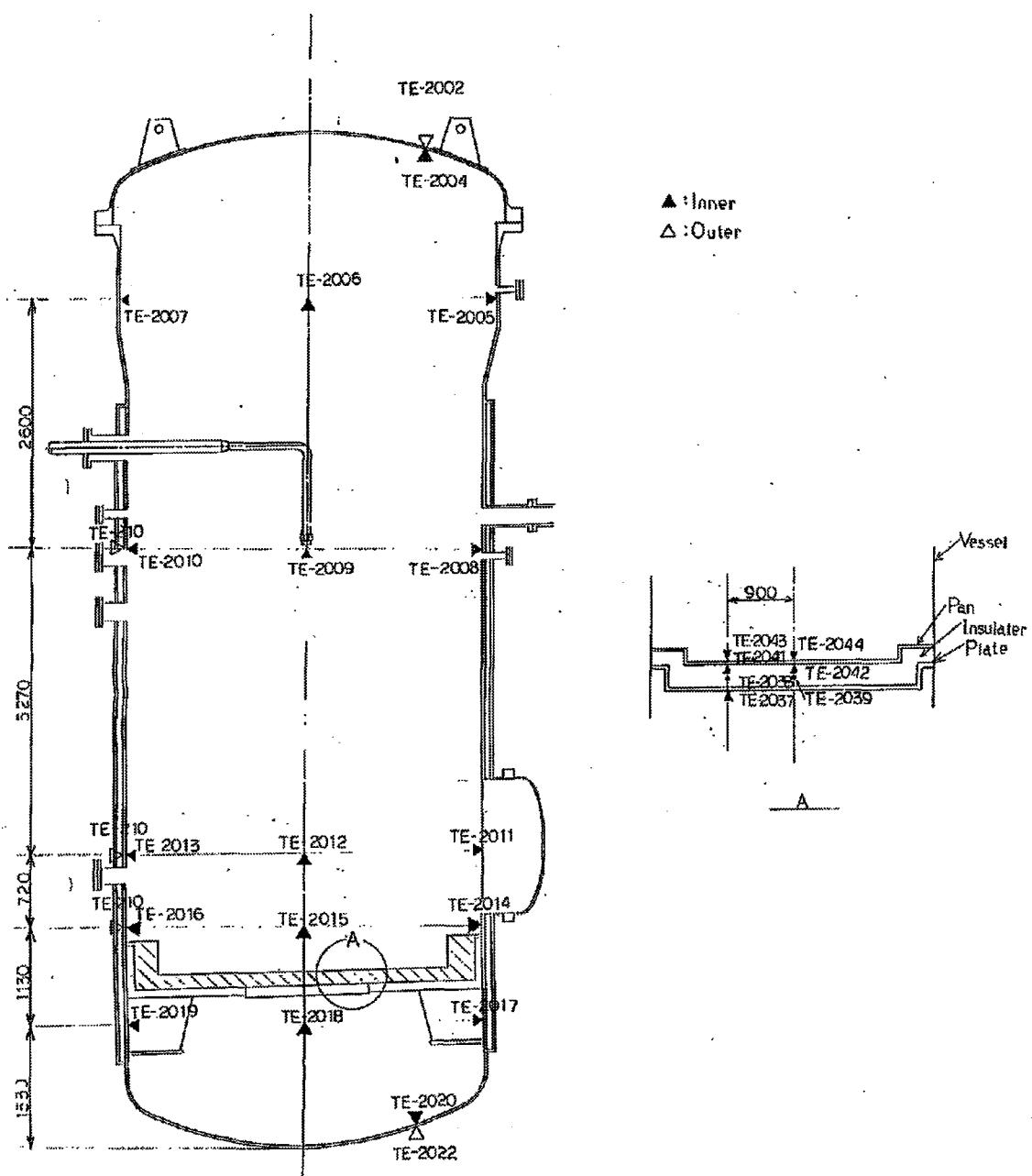


図4 SOLFA-2試験容器の熱電対配置

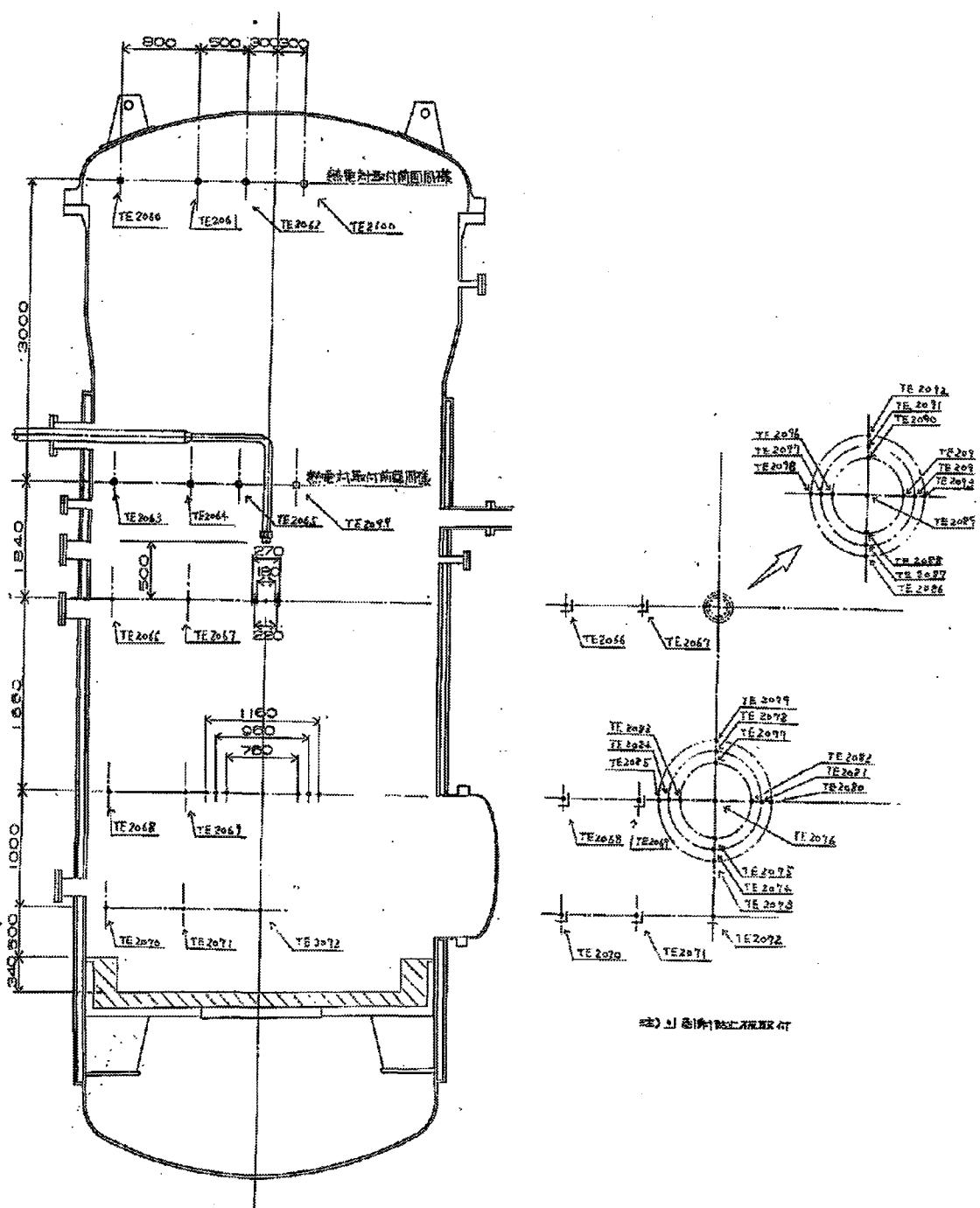


図5 SOLFA-2 試験容器内ガス空間の熱電対配置

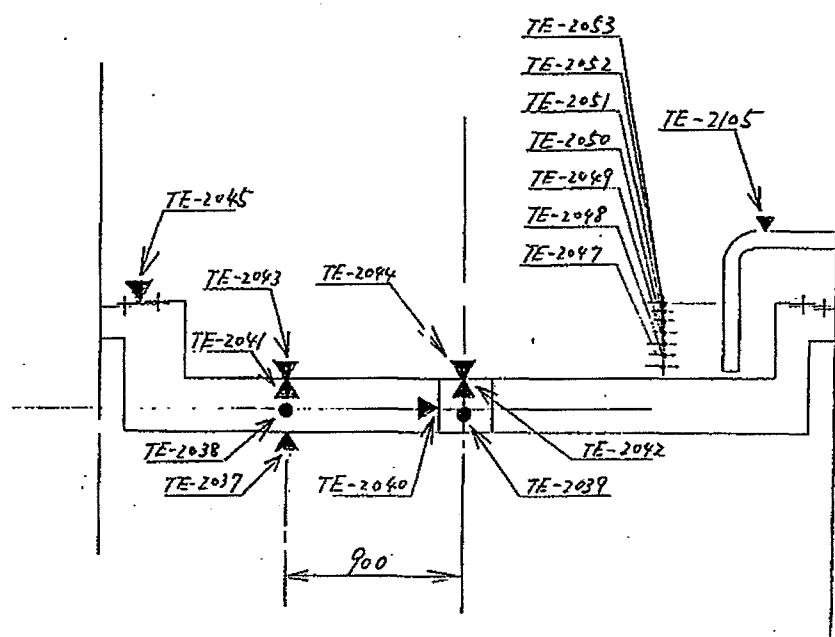
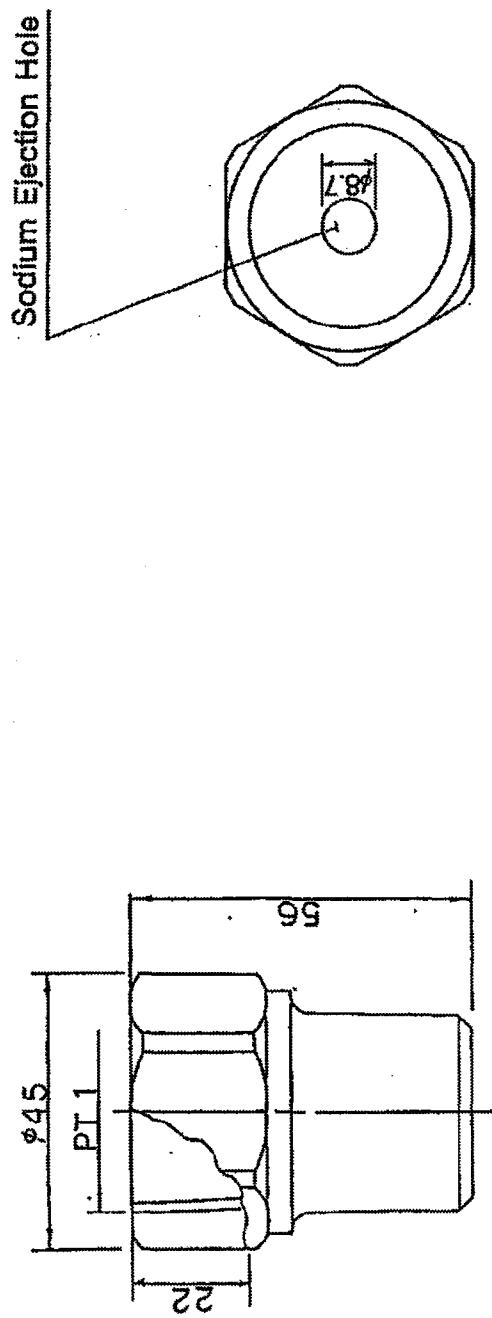


図 6 SOLFA-2 試験容器内 Na 燃焼皿の熱電対配置

Test Results (Water)

(1) Calculated as a sodium	
	Condition
Nozzle Type	1EX440D-0N
Spray Pattern	Full Cone
Pressure	1.5 kg/cm ²
Flow Capacity	36.2 l/min
Spray Angle	25°
Mean Surface Diameter	1.8 mm
Mean Volume Diameter	2.6 mm



A-A' View

図7 試験で使用したスプレー nozzle

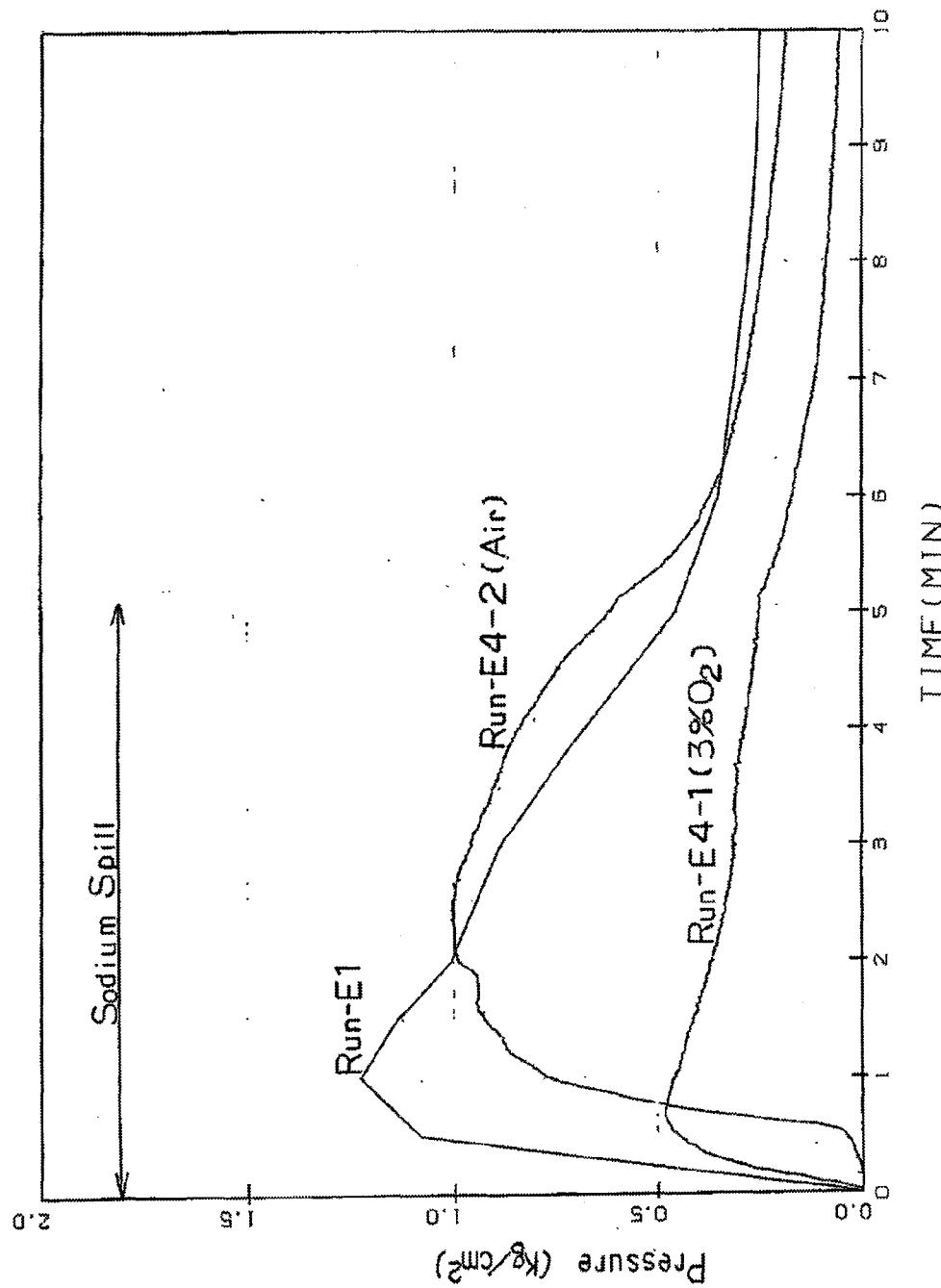


図 8 Run-E1、空気雰囲気試験、低酸素濃度雰囲気試験における容器内ガス圧力

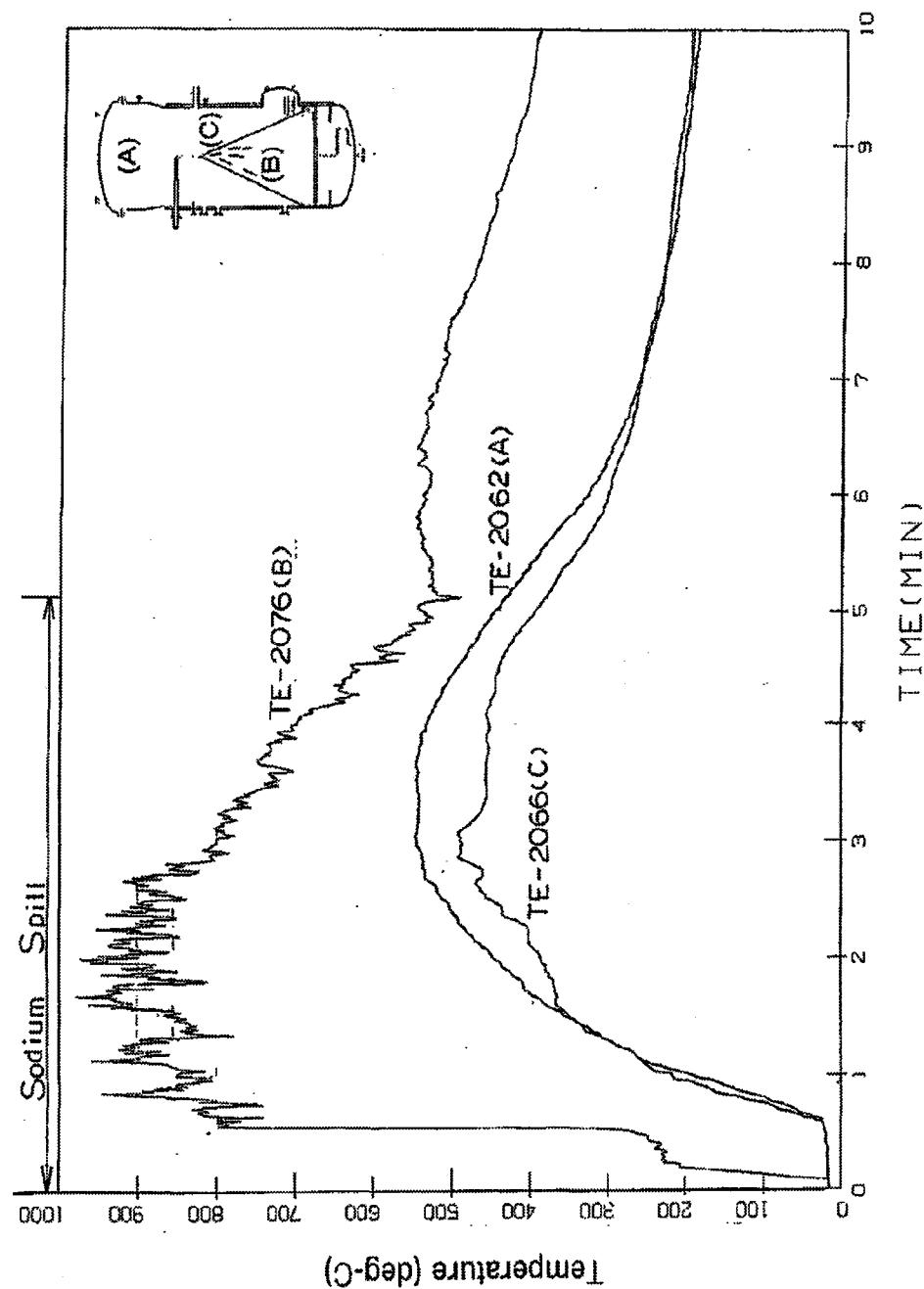


図 9 空気雰囲気試験における容器内ガス温度

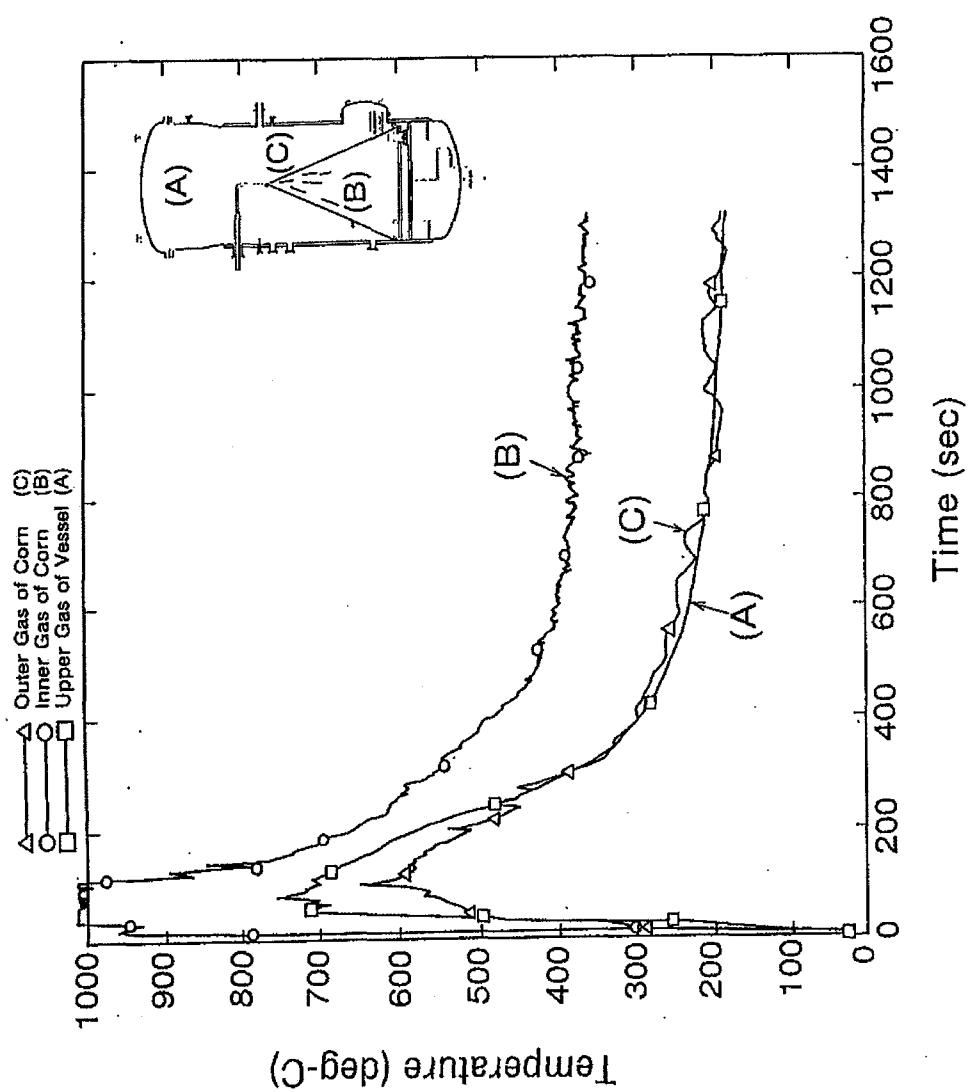


図 10 Run-E1 試験における容器内ガス温度

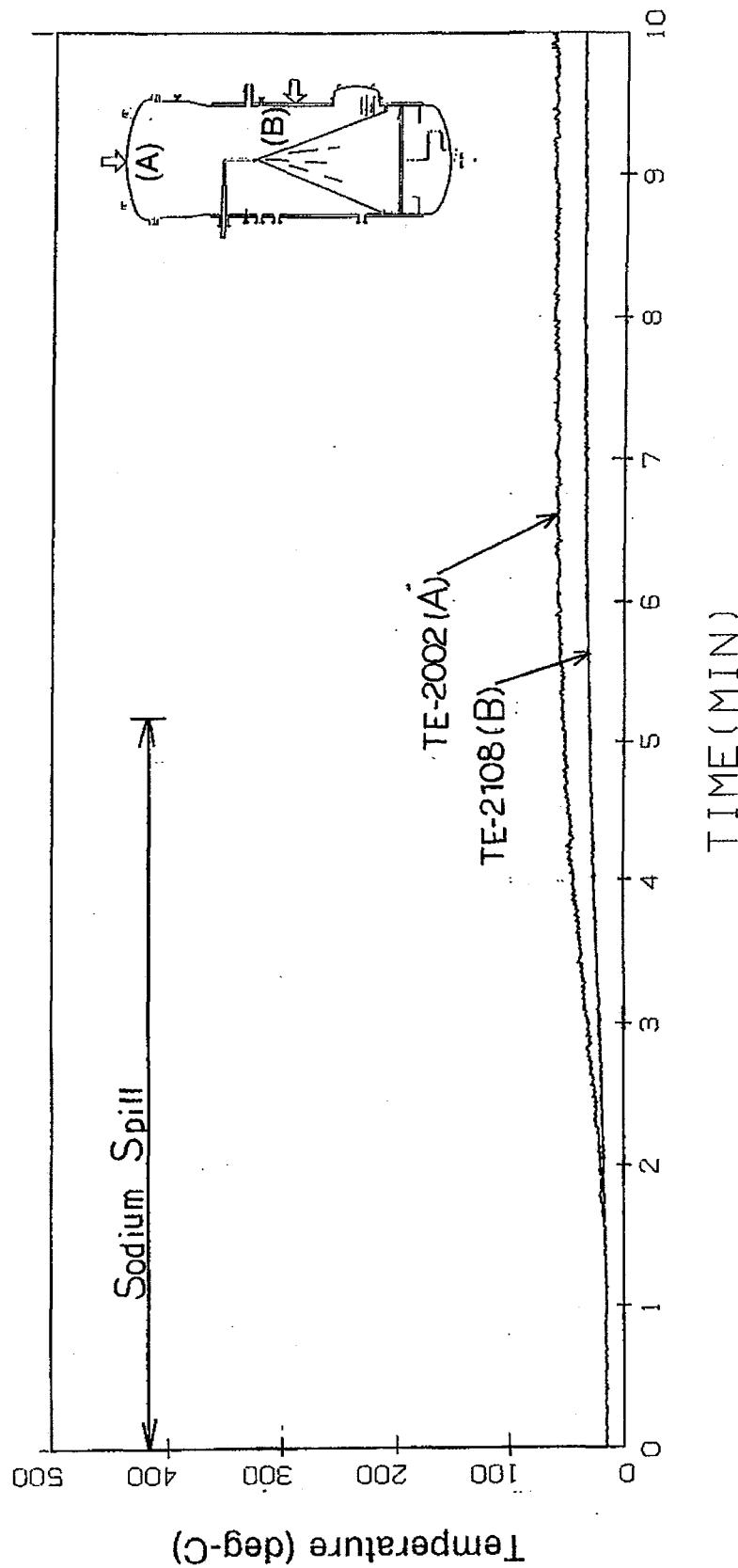


図 11 空気雰囲気試験における容器外壁温度

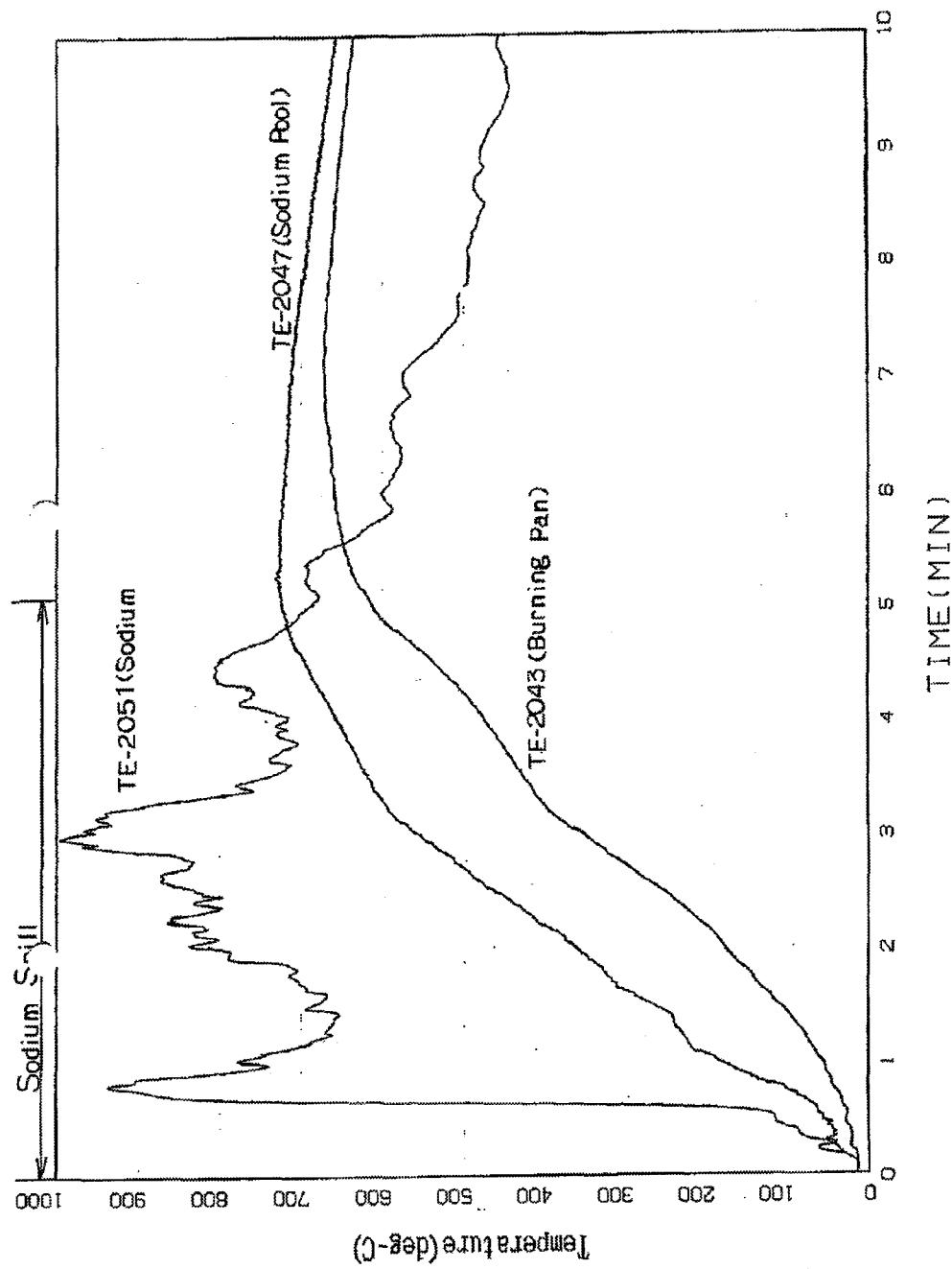


図 12 空気雰囲気試験における Na 燃焼と Na プール温度

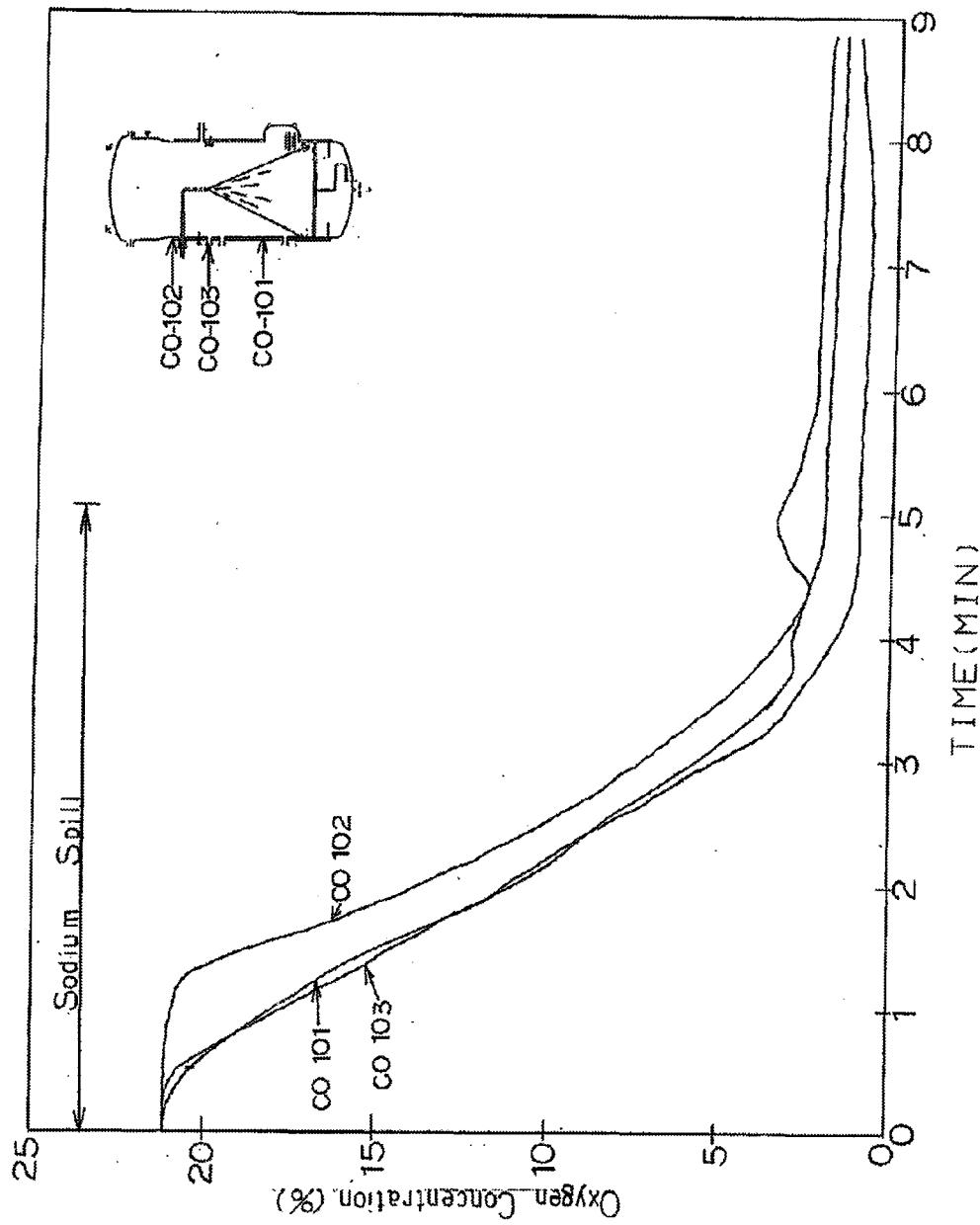


図 13 空気雰囲気試験における容器内酸素濃度

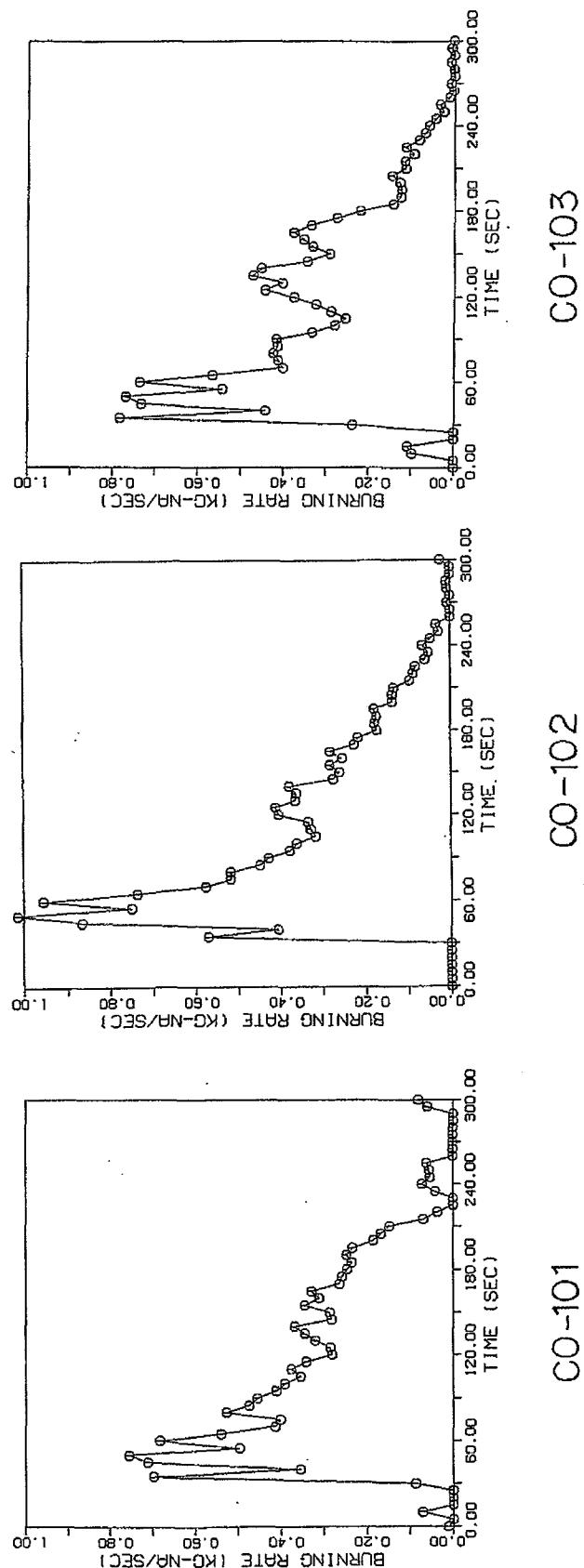


図 14 空気雰囲気試験における酸素濃度変化から算出した Na 燃焼速度

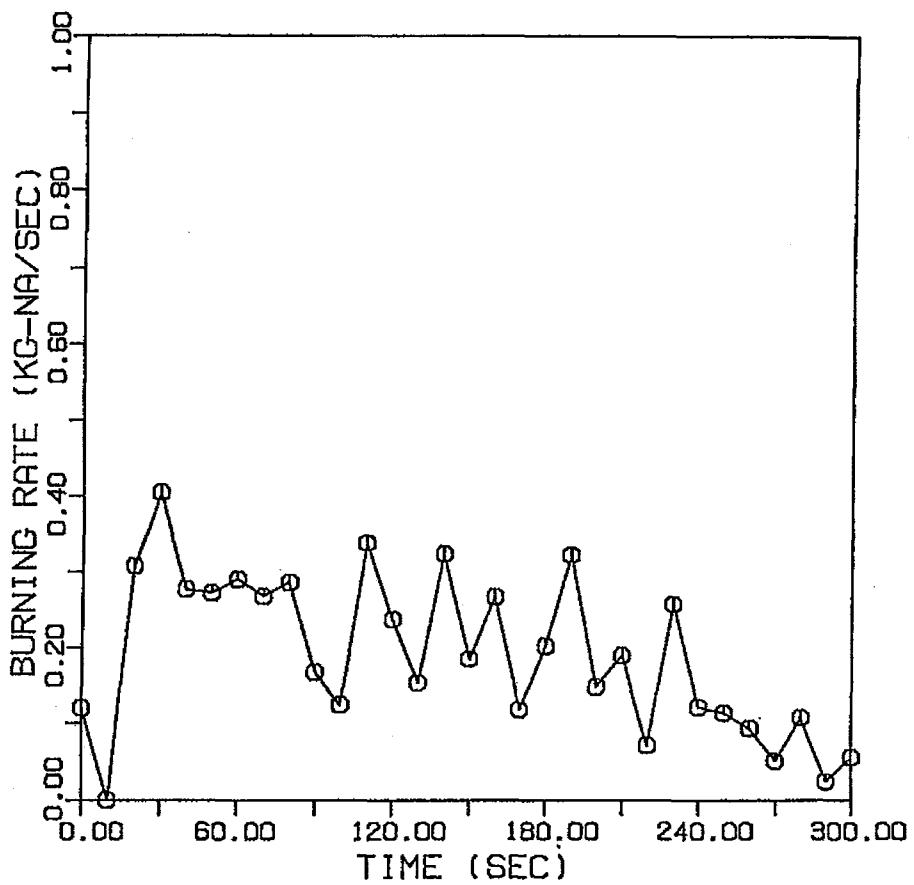


図 15 空気霧囲気試験における各部温度変化から算出した Na 燃焼速度

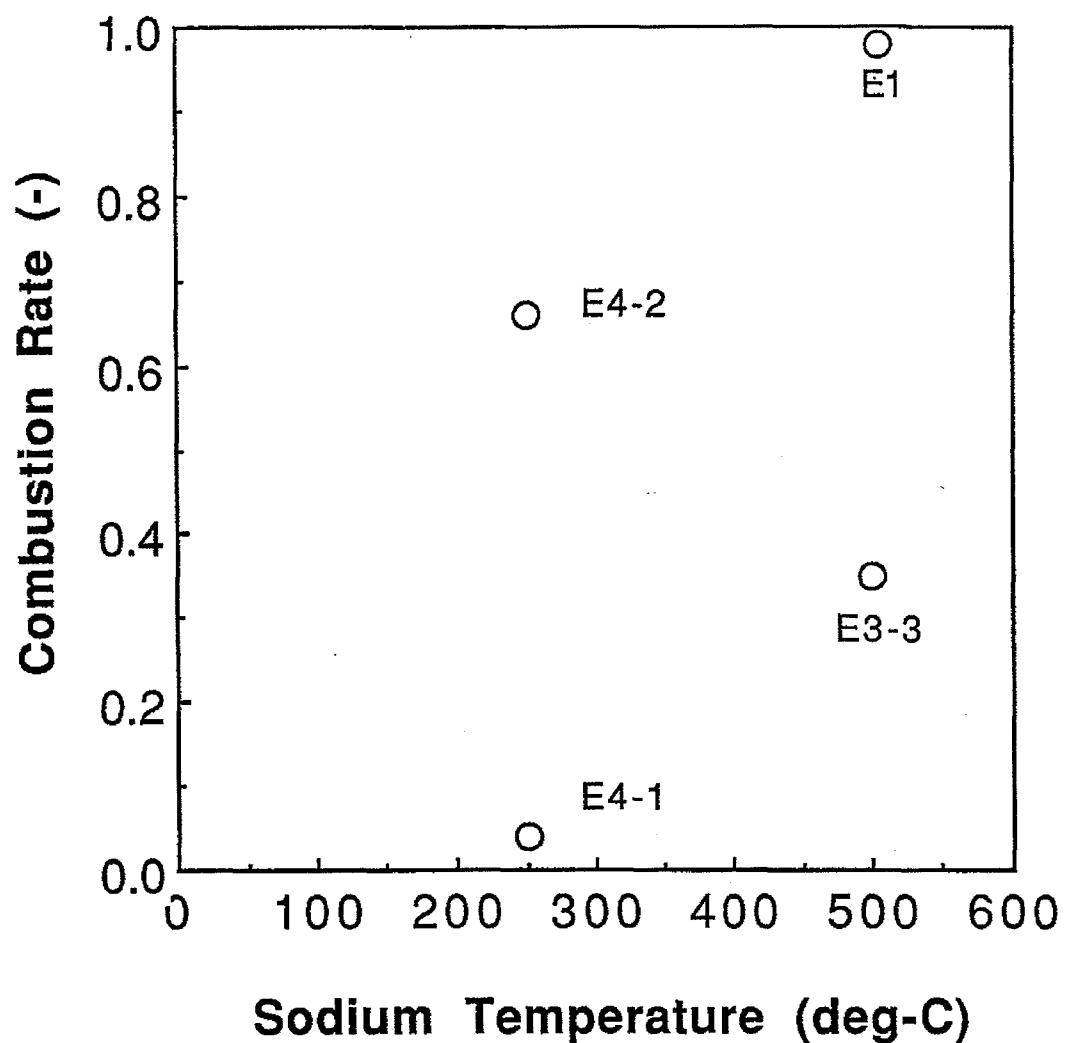


図 16 初期 Na 温度と Na 供給流量に対する燃焼速度の割合

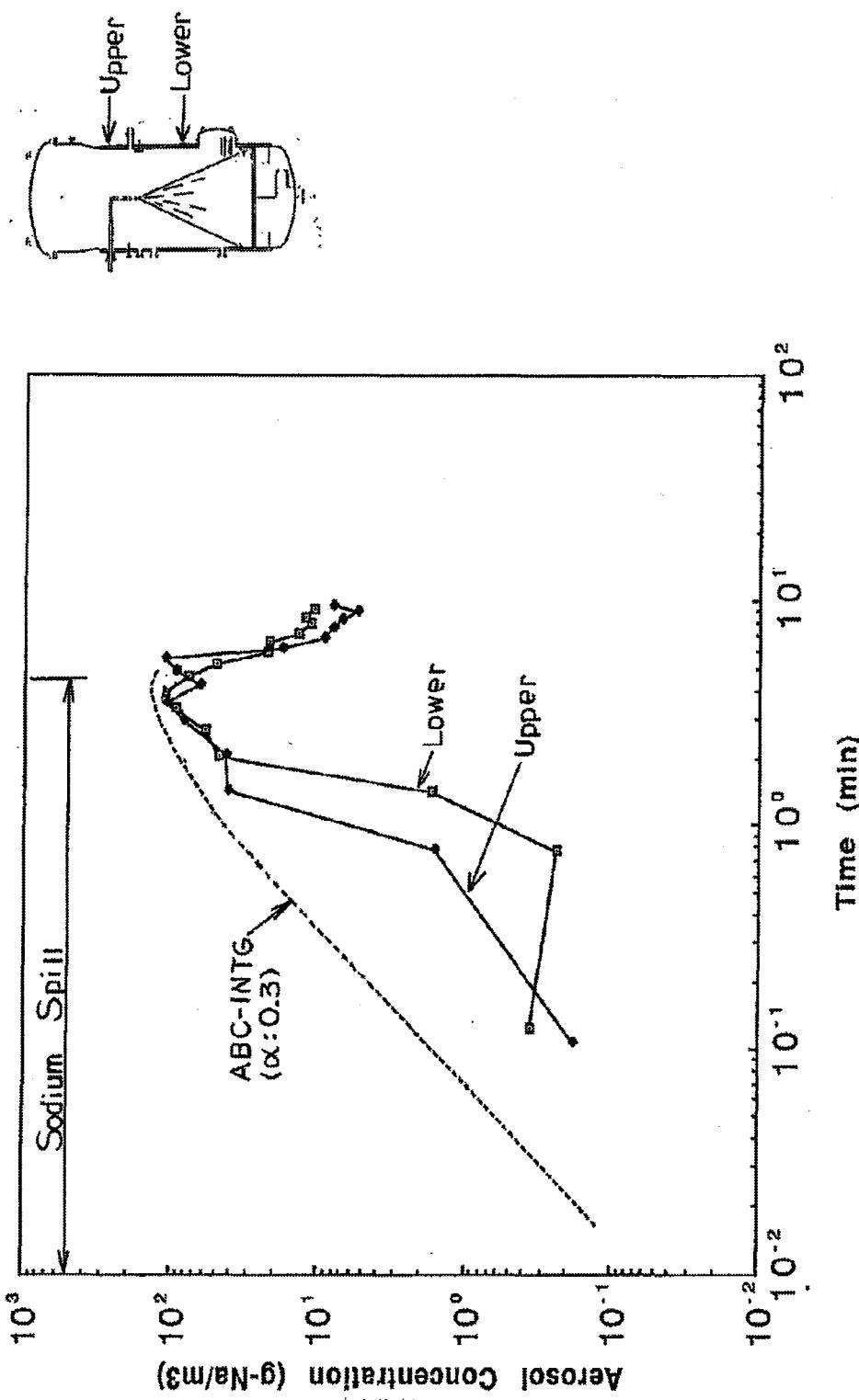


図 17 空気雰囲気試験におけるエアロゾル濃度の実験結果と解析結果の比較

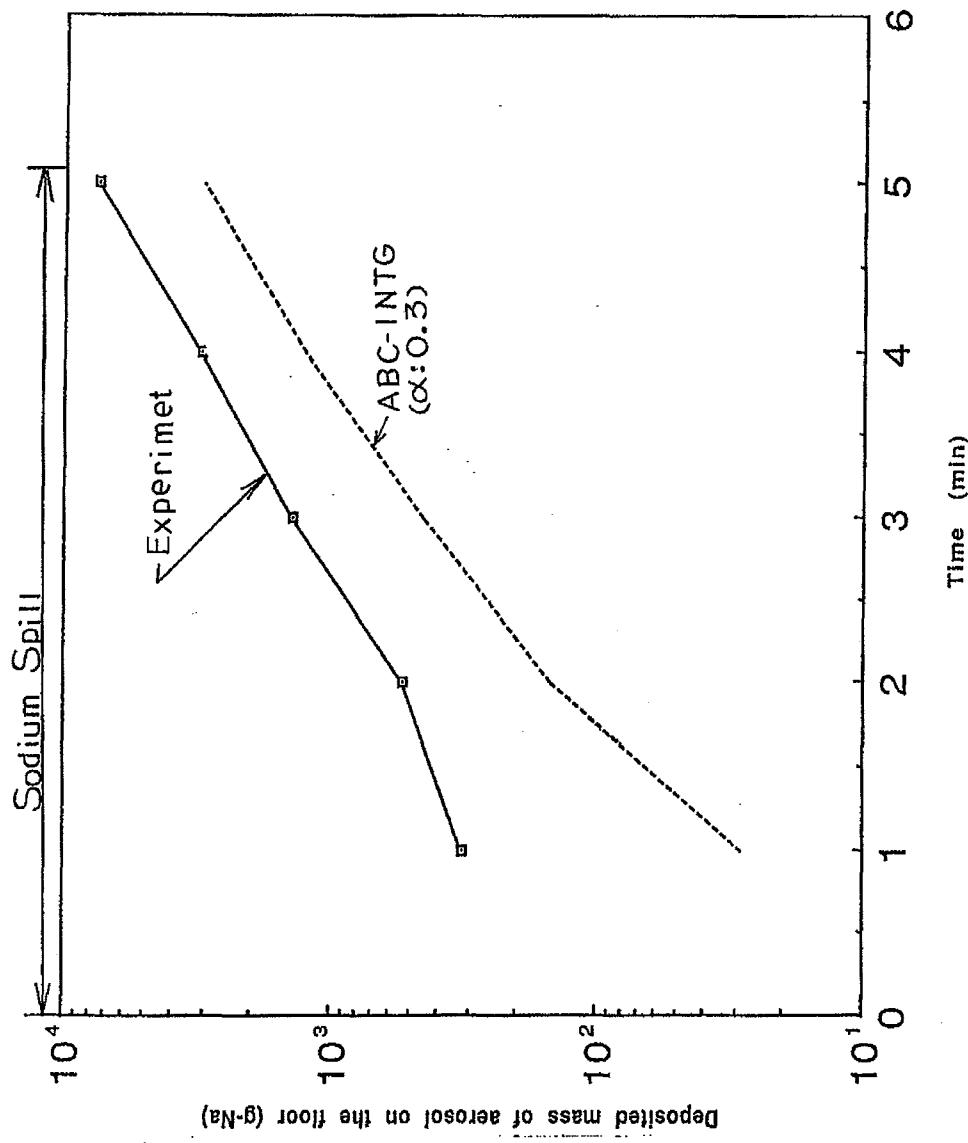


図 18 空気雰囲気試験におけるエアロゾル沈降量の実験結果と解析結果の比較

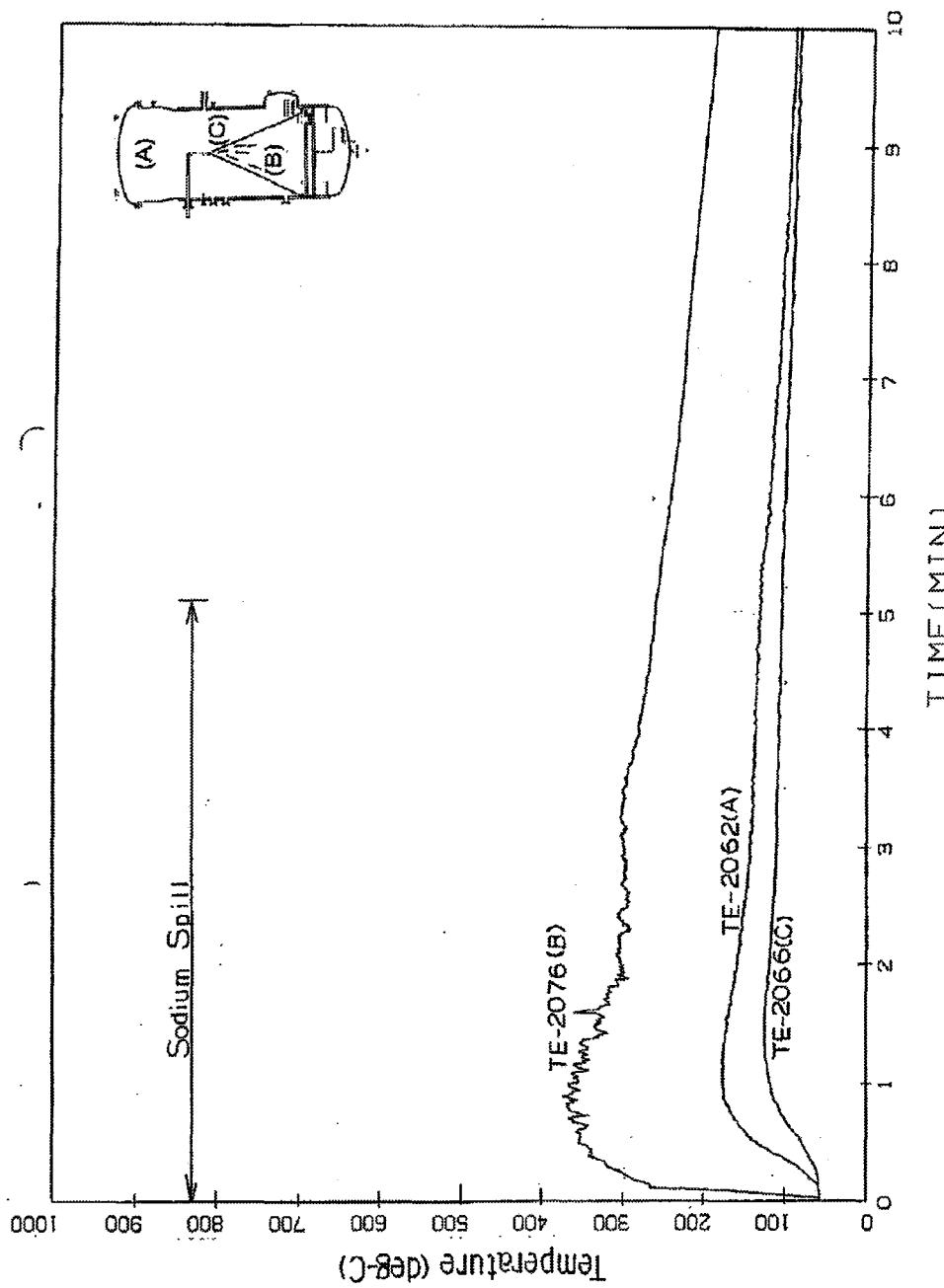


図 19 低酸素濃度雰囲気試験における容器内ガス温度

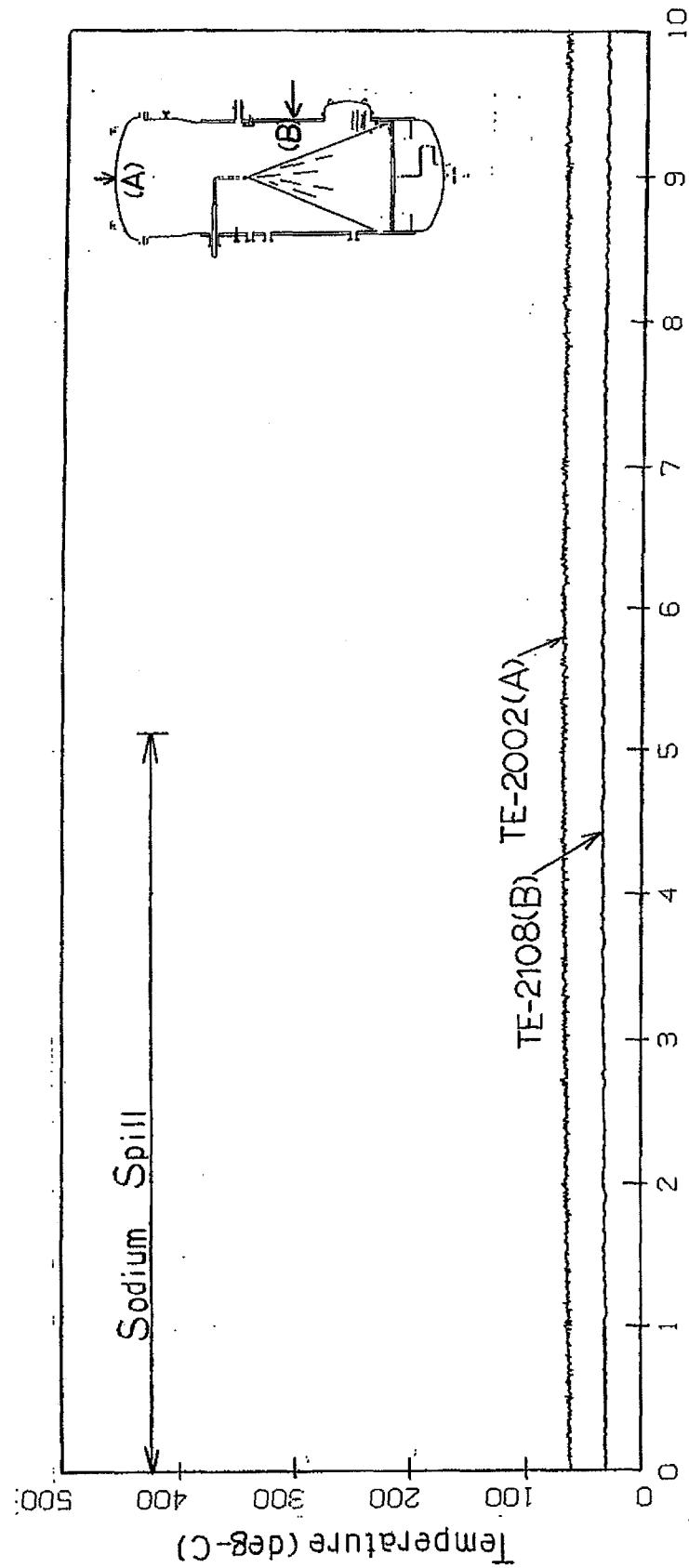


図 20 低酸素濃度雰囲気試験における容器外壁温度

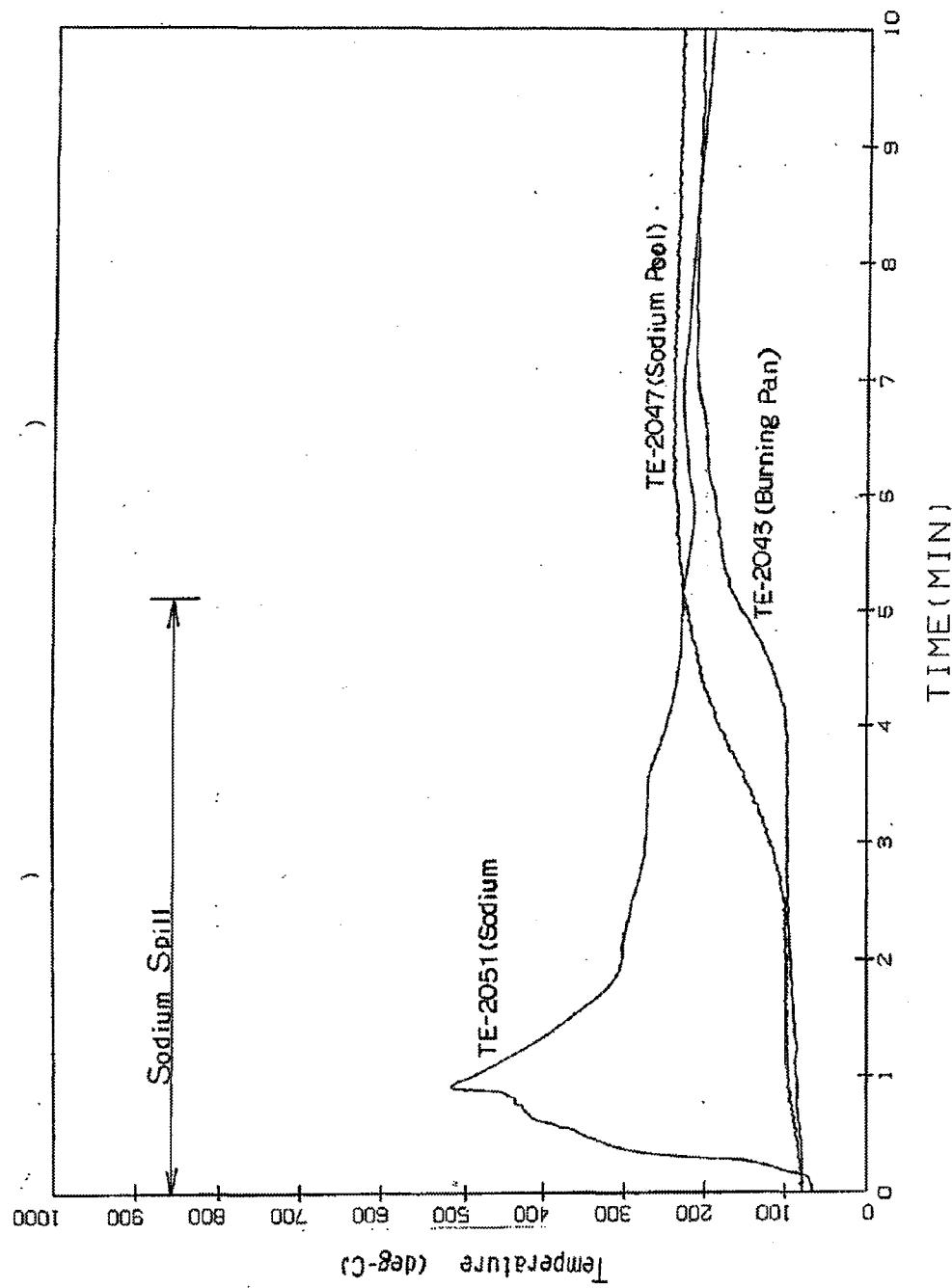


図 21 低酸素濃度雰囲気試験における Na 燃焼皿と Na プール温度

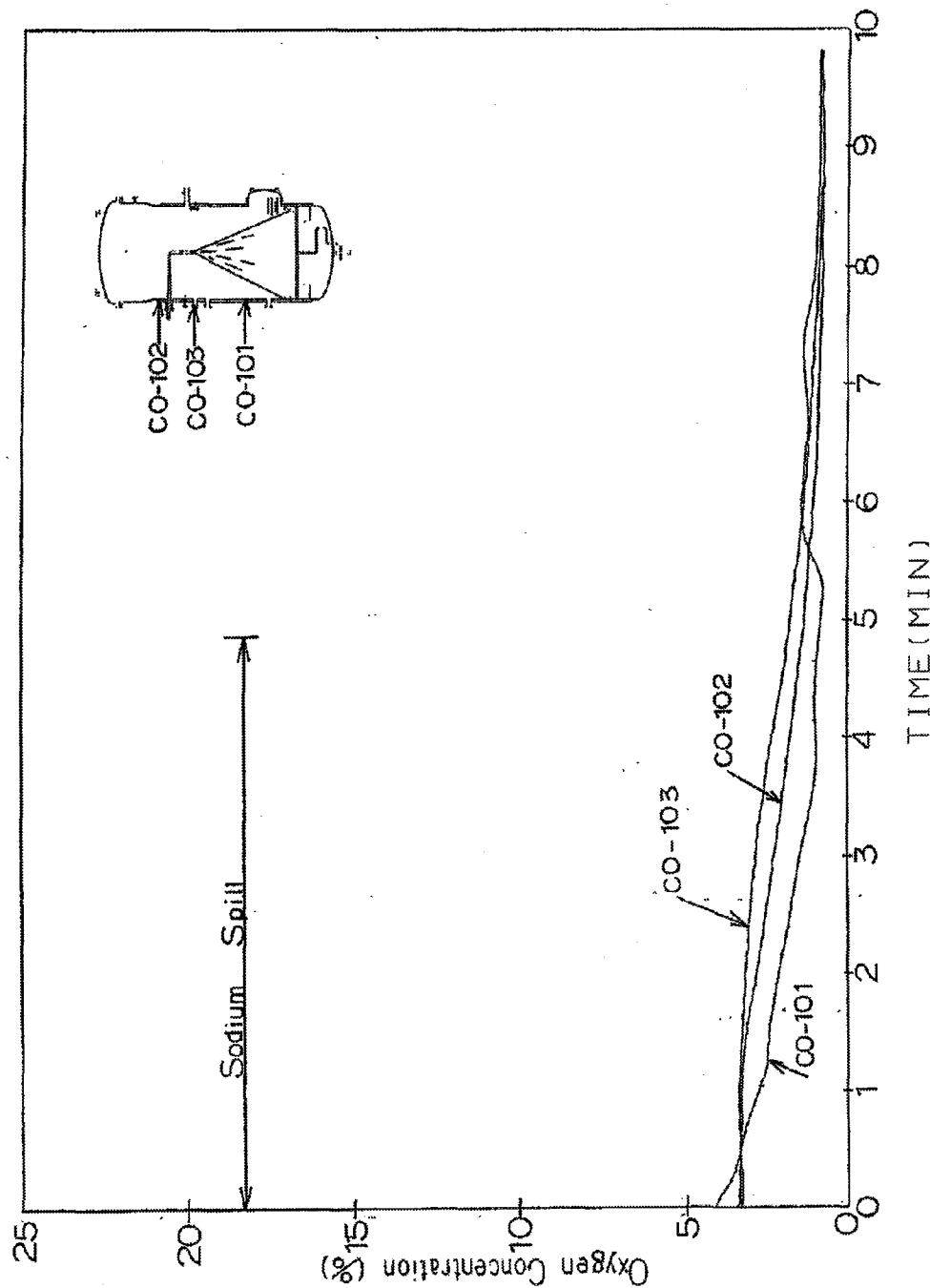


図 22 低酸素濃度雰囲気試験における容器内酸素濃度

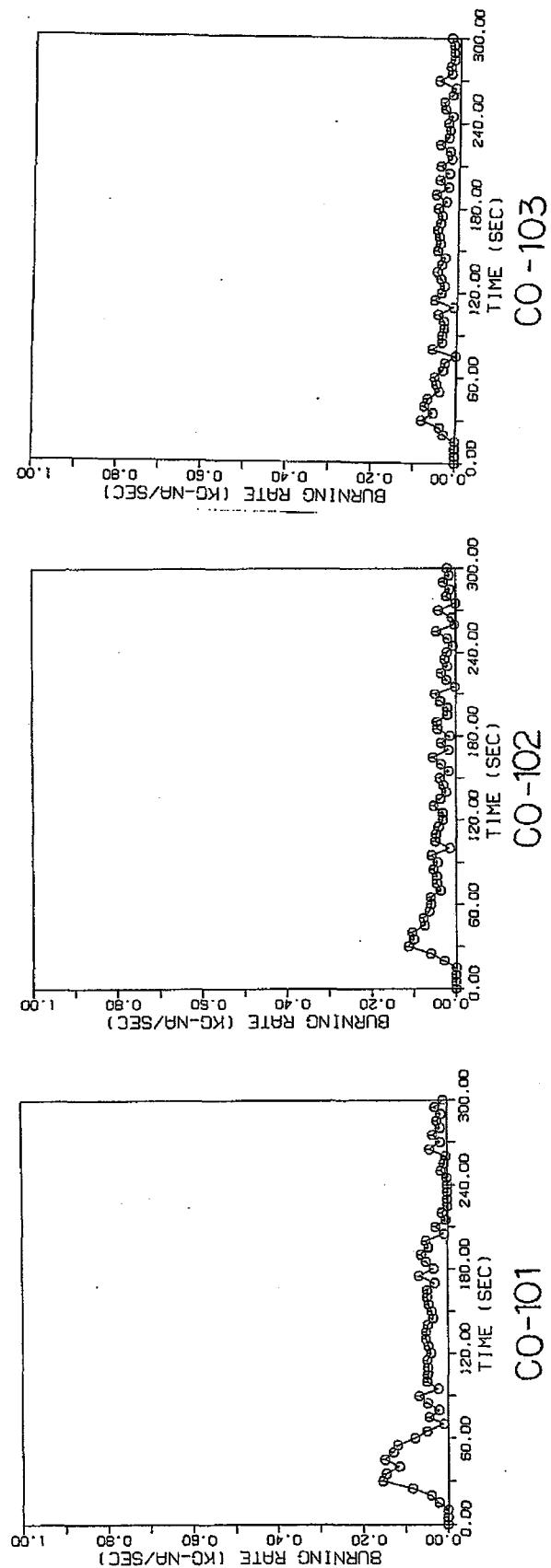


図 23 低酸素濃度雰囲気試験における酸素濃度変化から算出した Na 燃焼速度

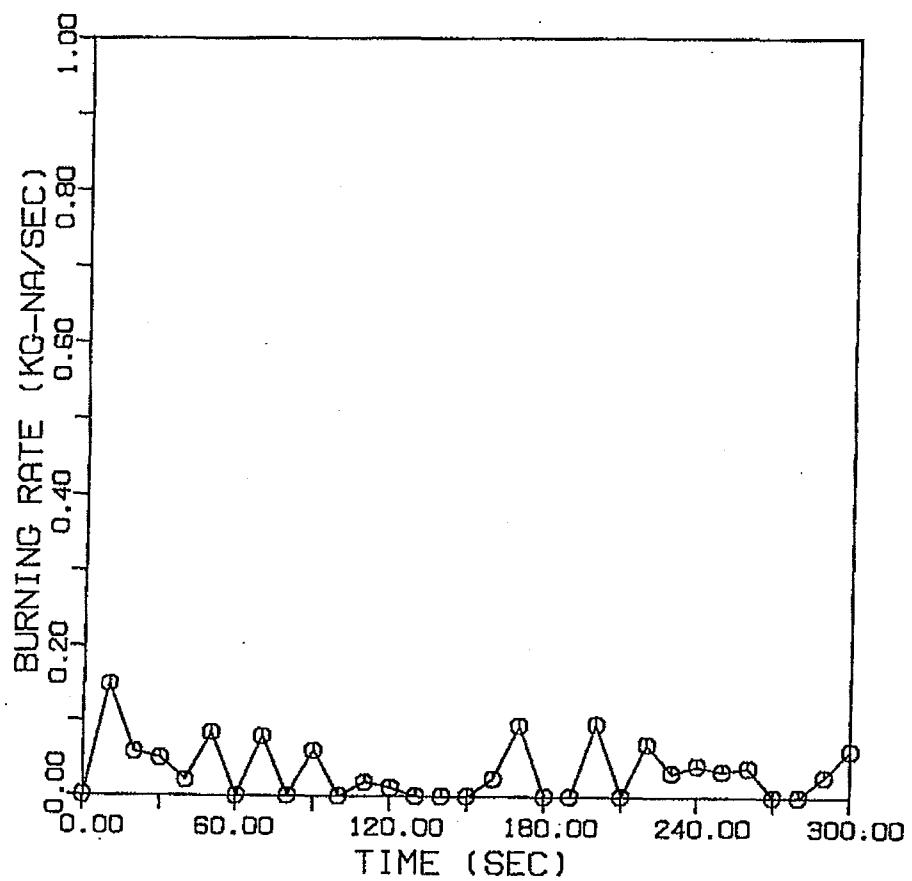


図 24 低酸素濃度雰囲気試験における各部温度変化から算出した Na 燃焼速度

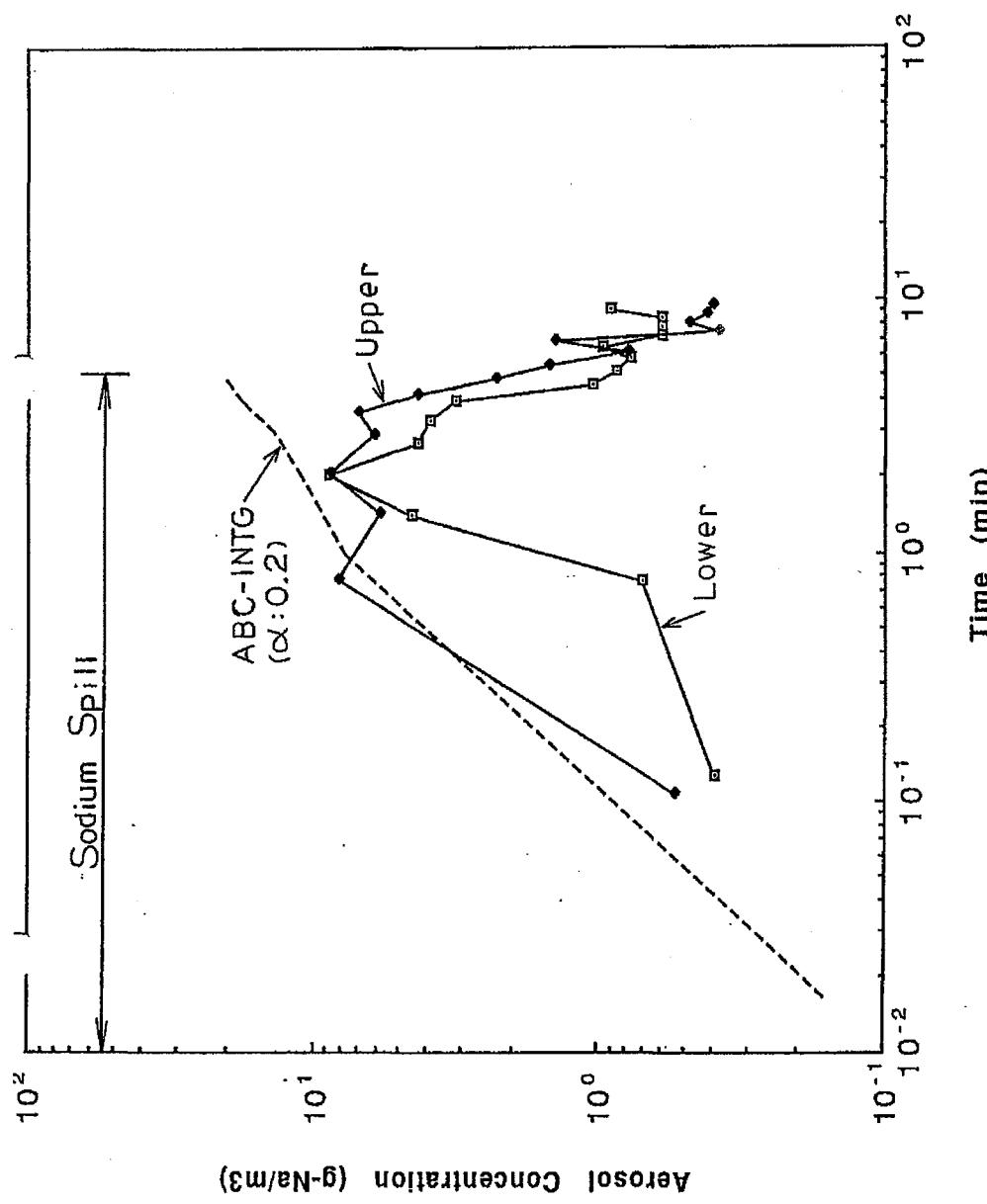


図 25 低酸素濃度雰囲気試験におけるエアロゾル濃度の実験結果と解析結果の比較

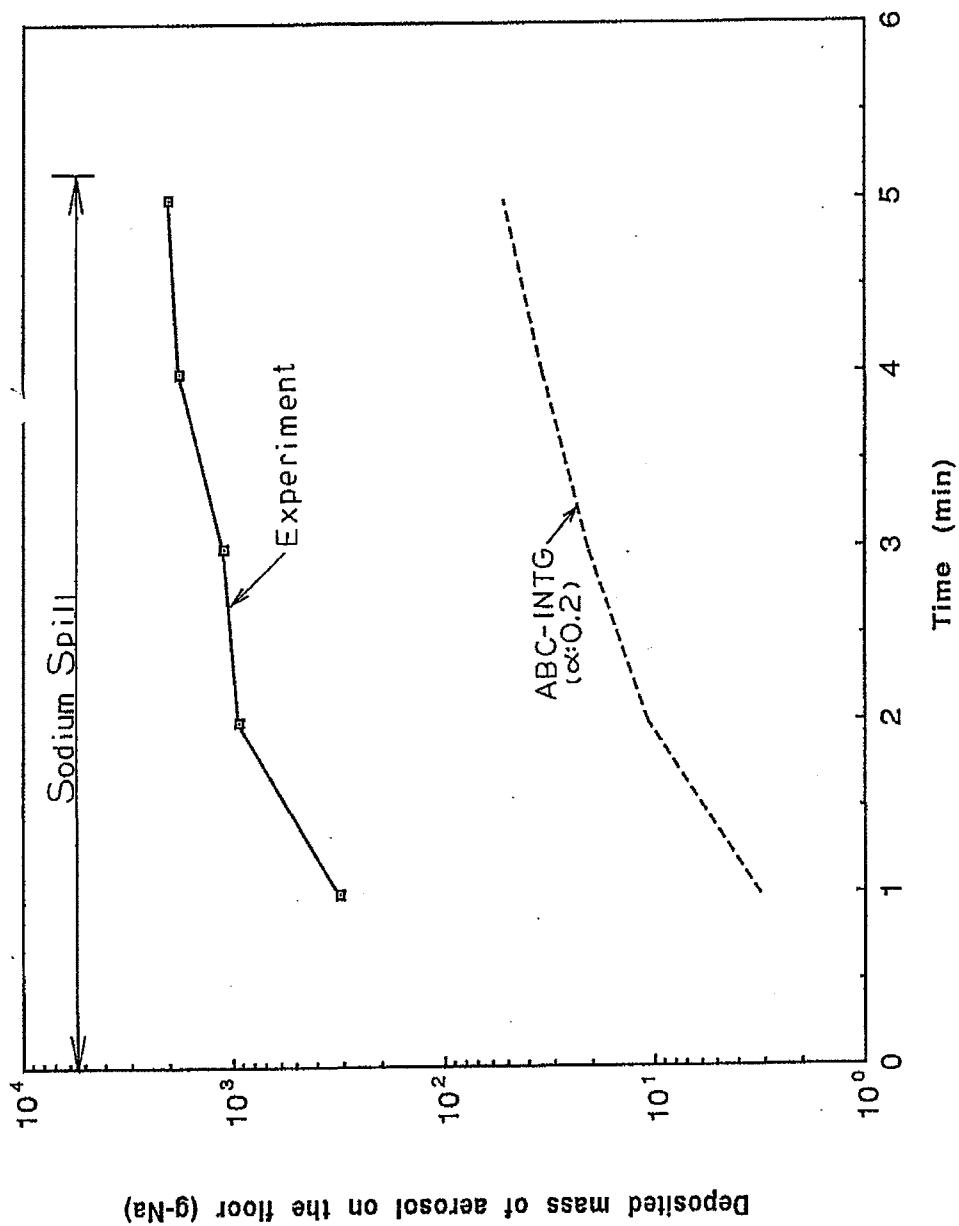


図 26 低酸素濃度雰囲気試験におけるエアロゾル沈降量の実験結果と解析結果の比較