

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNC
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

ナトリウム火災防護設備基礎試験(III)

—三次系ナトリウム火災の事故推移に関する縮尺モデル試験、Run-B3—



1985年9月

技術資料コード	
開示区分	レポート No.
S	N941 85-130
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。
したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払って
ください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、
特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

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

1985年9月

ナトリウム火災防護設備基礎試験（Ⅲ）

-二次系ナトリウム火災の事故推移に関する縮尺モデル試験、Run-B3-



姫野嘉昭*，宮原信哉*，川田耕嗣*，川部隆平*，

佐々木和一*，山田敏雄*，宮口公秀*。

要旨

ナトリウム配管、床ライナ、連通管および燃焼抑制槽のそれぞれの縮尺モデル試験体を用いて、二次系ナトリウム火災に関する試験を行った。試験では、各試験体を実機と類似に配置し、模擬事故室内の配管からのナトリウム漏洩によって始まり、燃焼抑制槽で事故が終息するまでを調べた。使用したナトリウムは、温度 505°C、総重量約 150kgで、これを模擬ナトリウム配管から流量約 1 l/sec で約 3 分間にわたって漏洩させた。今回の試験結果から、次の結論を得た。

(1) 模擬配管からの漏洩ナトリウムは、現在「もんじゅ」設計で想定されている事故推移と同様に、床ライナから連通管を経て燃焼抑制槽に円滑にドレンされ、燃焼抑制槽内のナトリウム燃焼の自然鎮火によって事故が終息した。

(2) 模擬ナトリウム漏洩配管では、内装板及び外装板の腐食破損及び高温破損は生じておらず、試験期間中は漏洩ナトリウム飛散防止機能が維持された。模擬事故室の床ライナ上及び連通管内については、燃焼生成物によるナトリウム流路の閉塞は認められなかった。また模擬事故室における漏洩ナトリウムの塊状（コラム状）及びプール状の混合燃焼による発熱量は、床ライナの単位面積当たりに換算するとプール燃焼発熱量の約 1.6倍であった。

(3) 燃焼抑制槽にドレンされたナトリウムの燃焼は一定時間後に自然に鎮火した。燃焼抑制槽下部のコンクリートについては、断熱コンクリートであるパーライトコンクリートと構造コンクリートのそれぞれの温度データを得た。また試験期間中のコンクリート放出水量は、従来のR&D結果と比べ非常に少なかった。

* 大洗工学センター、安全工学部、プラント安全工学室

AUG, 1985

PNC SN941 85-130



Basic Test on Sodium Fire Protection Systems (III)

- Simulation Test , Run-B3 of a Design Basis Sodium Leak from the Monju IHTS -

Y. Himeno*, S. Miyahara*, K. Kawata*, R. Kawabe*,
 K. Sasaki*, T. Yamada*, and K. Miyaguchi*.

Abstract

Test of sodium fires in an auxiliary building of the fast reactor has been conducted by use of a test rig in which reduced scale models of a sodium pipe, a floor liner, a sodium drain pipe, and a smothering tank were installed to simulate the configuration of fire mitigation systems in the reactor. In the test, a 150kg sodium at temperature of 505 °C was spilled from the model sodium pipe at flow rate of 1ℓ/sec for 3 minutes. Then a whole accident sequence that starts from a sodium spill and ends at a self-extinguishment of fire within the smothering tank was studied.

From the test results obtained and through their analysis, the following conclusions were drawn.

- (1) A whole sodium leak and fires accident sequence proceeded as expected in the Monju design, i.e., a spilled sodium was smoothly drained into the smothering tank via the floor liner and the drain pipe, then sodium fire was self-extinguished in the smothering tank.
- (2) In regard to the model sodium pipe, failures of the thermal insulation jackets due to sodium corrosion and due to generated sodium combustion heat are not found. The thermal insulation jackets kept its original geometries and functioned properly as a barrier to prevent the dispersion of spilled sodium into the atmosphere during the test. No flow blockage of a spilled sodium occurred both on the floor liner and in the drain pipe. Combustion heat of mixed fires (a columnar fire and a pool fire) that occurred within an accident cell of the test rig was determined to be 1.6 times of that of a pool fire. This value is not so large as expected and indicates that the mild fires proceeds during the test.
- (3) With the smothering tank, temperatures data of sodium, steel liner, perlite concrete, and structural concrete were obtained. The data of concretes indicated that the structural concrete was not heated so high as to interfere its structural integrity. A total water released from the concretes per unit surface area of the liner during the test was determined to be only 30 % of the reference data.

* Plant Safety Section, Safety Engineering Division, OEC.

目 次

要 旨	I
目 次	III
List of Tables	IV
List of Figures	V
List of Photographs	VII
緒 論	1
1. 目 的	1
2. 試験装置	2
2. 1 試験装置の概略	2
2. 2 模擬 N a 漏洩配管	3
2. 3 床ライナ	4
2. 4 連通管	4
2. 5 燃焼抑制槽	5
3. 試験方法	5
4. 試験結果と考察	6
4. 1 N a 漏洩開始以降の全体の事故推移	6
4. 2 模擬事故室（燃焼炉箱）内の事故推移	7
4. 3 連通管の挙動	12
4. 4 燃焼抑制槽の挙動 - N a 火災の自然鎮火性能とコンクリートの変化 -	12
4. 5 解体検査	16
結 論	18
文 献	20

List of Tables

- Table 1 : Composition of Perlite Concrete
- Table 2 : Composition of Structural Concrete
- Table 3 : Test Conditions of Run-B3
- Table 4 : Test Record
- Table 5 : Enthalpy Change in Combustion Cell
- Table 6 : Heat Flux and Apparent Overall Heat Transfer Coefficient

List of Figures

- Fig. 1 : Arrangement of Test Rig for Run-B3
- Fig. 2 : Concept of Monju Secondary Sodium Piping with Thermal Insulation Cover
- Fig. 3 : Assembling of Simulated Sodium Pipe
- Fig. 4 : Simulated Sodium Pipe and Its Thermocouple Locations
- Fig. 5 : Arrangement of Simulated Sodium Pipe in Combustion Cell for Run-B3
- Fig. 6 : Floor Liner and Its Thermocouple Locations (Top View)
- Fig. 7 : Drawing Smothering Tank
- Fig. 8 : Smothering Tank and Its Thermocouple Locations
- Fig. 9 : Record of Air Flow Rate into Combustion Cell
- Fig. 10 : Flow Rate of Feed Sodium into Simulated Sodium Pipe
- Fig. 11 : Change of Temperature at Sodium Spill Hole of Simulated Sodium Pipe
- Fig. 12 : Changes of Temperature at Three Representative Positions in Simulated Sodium Pipe
- Fig. 13 : Temperature Distribution of Sodium on Floor Liner and Its Change During Sodium Spill
- Fig. 14 : Temperature Change of Sodium on Floor Liner
- Fig. 15 : Calculated Heat Flux from Hot Sodium to Floor Liner
- Fig. 16 : Changes of Aerosol Concentration and Aerosol Release Rate During the Test (in Combustion Cell)
- Fig. 17 : Mass Distribution of Aerosol Particles
- Fig. 18 : Hydrogen and Oxygen Concentration Changes During the Test
- Fig. 19 : Temperature Change of Liner in Smothering Tank
- Fig. 20 : Temperature Change of Perlite and Structural Concertes in Smothering Tank during the Test
- Fig. 21 : Temperature Change of Stud Bolt, Silicon Fiber, and Structural Concrete near Stud Bolt in Smothering Tank
- Fig. 22 : Local Sodium Heat Loss to Floor Concrete

List of Figures (cont.)

- Fig. 23 : Apparent Overall Heat Transfer Coefficient between Sodium and Perlite Concrete
- Fig. 24 : Relation between Temperature and Weight Loss (Perlite Concrete)
- Fig. 25 : Relation between Temperature and Weight Loss (Structural Concrete)
- Fig. 26 : Transient Weight Loss of Perlite Concrete
- Fig. 27 : Post-Test Sodium Distribution in Test Rig
- Fig. 28 : Post-Test Aerosol Distribution in Test Rig

List of Photographs

Photo. 1 : Sodium Leakage from Simulated Sodium Pipe

Photo. 2 : Simulated Sodium Pipe and Floor Liner in Combustion Cell after the Test

Photo. 3 : Disassembling of Simulated Sodium Pipe after the Test

Photo. 4 : Solid Sodium in Smothering Tank after the Test

Photo. 5 : Removal of Solid Sodium from Smothering Tank

緒論

原型炉「もんじゅ」では、設計基準内のナトリウム（以下、Naと略す）漏洩事故として、 $1/4 Dt$ (D は配管口径、 t は配管肉厚) 相当の配管破損口からの漏洩を想定している。この場合、配管からの漏洩Na量は最大100ton以上になるものと見積られ、Na温度が500 °C以上と高いこともある。Na漏洩事故の建物構造物に与える影響が大きい。特に原子炉二次冷却系建屋内の事故では、Na燃焼発熱とそれに伴う建屋構造物への熱的影響を生じるため、本来簡素であるべきNa漏洩対策防護設備は重装備化し易い。このため、試験に基づいた合理的な設計及び製作を進め、更に事故時に対策設備が効果的に機能することの検証が求められている。

すでにプラント安全工学室では、上記の要求に答えるべく昭和58年度より関連する基礎試験を開始し、これまでプール火災、模擬燃焼抑制板設置状態でのプール火災、高温の漏洩Naがドレンされた時の連通管の過渡熱挙動、ライナ上の高温及び低温Naの燃焼と燃焼Naの流動性、室温のライナに高温のNaを流下させた時のライナ変形挙動などに関する部分試験を行い、Na漏洩対策設備の特性及び関連する現象の把握に努めてきた〔文献(1), (2)〕。昭和59年度はこれを更に進め、配管からのNa漏洩によって始まり、ライナと連通管を経て燃焼抑制槽にNaがドレンされ、そこで自然鎮火するまでの一連のNa漏洩事故推移に関する試験（以下、RUN-B3と呼ぶ）を、縮小モデル試験体を用いて行った。

本報では、昭和59年度に行ったこのRUN-B3試験とその結果について報告する。結果から、「もんじゅ」二次系配管からのNa漏洩開始とそれ以降の事故推移については、設計で想定されているものと試験によって明らかにされたものの間に本質的な相違はなく、また現設計によるNa漏洩対策設備で被害の拡大防止およびNa燃焼の自然鎮火が確実に行えることを明らかにした。ただし、今回の試験は漏洩Naの流出圧力が約 0.2kg / cm²G と実機のそれと比べて低く、流出Naの流動状況は完全には模擬できていない。実機相当のNa流出圧力による試験は、昭和60年度に予定しているため、そこで改めて報告を行う。

1. 目的

今回の試験であるRUN-B3では、従来の単独試験と同様な部分縮小モデル試験体を用い、これらを組み合わせて実機と類似な配置とし、これでNa漏洩を起こし、漏洩から自然鎮火に至までの一連の

事故推移を調べた。

具体的には、次に述べる各項目を明らかにすることが今回の試験の目的である。

〔試験全体〕

- ① 縮小モデル試験体による部分単独試験の結果と著しく異なる現象は起こらないか？
- ② 実機で想定されている事故の推移に誤りはないか？

〔模擬Na漏洩配管〕

- ③ 保温材と漏洩Naとの化学反応による過度の発熱と、それに伴う内装板及び外装板の高温破損もしくは腐食破損はないか？
- ④ 漏洩時の流出Naと床上のプールNaによる混合燃焼の発熱量は？

〔燃焼抑制槽〕

- ⑤ 流入したNaを自然鎮火させる性能は十分か？
- ⑥ 床ライナ下部のコンクリートの異常温度上昇はないか？

2. 試験装置

2.1 試験装置の概略

Fig. 1 に示すように、試験装置は大きく分けて、Na供給タンク、燃焼炉箱、及び試験セルの3つの部分から成る。

Na供給タンクは、約 180kg の加熱NaをArガス圧で加圧操作することによって供給することができる。

試験で模擬事故室を形成する燃焼炉箱は、鋼鉄製で一辺が1.4mの立方体をなし、その内部には模擬Na漏洩配管と床ライナが設置されている。燃焼炉箱の壁には相対する2つの垂直壁にそれぞれ空気流入ダクトと排気ダクトを設置し、これらをNa燃焼に必要な酸素の供給と発生するエアロゾルの排出に使用した。燃焼炉箱の床には、模擬Na漏洩配管からの漏洩Naを受け止める床ライナを設置し、このライナには落下したNaが直ちに排出されるよう中央部に連通管（口径:3B, 材質:STPG38）を取りつけた。ライナの連通管取付箇所へ向けた勾配は 1/100 である。

試験セルも鋼鉄製で、一辺が3.0mの立方体をなし、その内部には燃焼抑制槽を設置した。側壁には、燃焼炉箱と同様に空気流入ダクトと排気ダクトが取りつけてあるが、これらは今回の試験には使用していない。燃焼抑制槽は、試験時にこれにNaが流入すると、床ライナ下部のコ

ンクリート（パーライトコンクリート及び構造コンクリート）が加熱されて水放出を起こす。この時の放出水を回収し、その量を測定するために床ライナ直下にベント管を取りつけ、ベント管の放出口は、水冷却器を経てメスシリングダに開口した。

次に装置全体の計測について述べる。計測センサ等については、まずNa供給タンクに熱電対と液面計を取りつけ、これらで試験時の供給（漏洩）Na温度と供給Na流量の測定を行った。燃焼炉箱については、空気流量測定用の差圧式流量計を空気流入ダクトに、また排気ダクトには排気温度測定用の熱電対とエアロゾル濃度測定装置及び酸素・水素濃度測定装置を設置した。このうちエアロゾル測定装置は、エアロゾル捕集フィルタをダクト内に挿入してエアロゾルを捕集し、その時の捕集エアロゾル重量とフィルタ通過ガス容積の商からエアロゾル濃度を求める方式で、間欠的に使用する装置である。酸素・水素濃度測定装置も同様に間欠式で、これは標準ガスボンベにダクト内のガスを捕集し、試験終了後は同ボンベ内の捕集ガスをガスクロマトグラフによって分析するものである。この他に、排気ダクト内のエアロゾルの粒径分布測定用にカスケードインパクタを使用した。また熱電対については、上述したもの以外に燃焼箱の模擬Na配管上方に霧囲気ガス温度測定用を、また側壁には温度測定用を設置した。

2.2 模擬Na漏洩配管

模擬Na漏洩配管は、Fig. 2 に示す「もんじゅ」二次主冷却系配管の直管部（昭和58年度の設計で文献(3)及び文献(4)の試験研究に用いたものと同じ。）を、周囲の保温構造体を含めて長さで約 1/3.5 に縮尺したもので、Fig. 3 にその概略組立図を示す。

配管は、材質と形状がSUS-304, sch20, 6B、全長が 1,000mm、下部にはNa漏洩口が開口されている。Na漏洩口の口径は28mm（断面積 0.61575cm²）であるが、これは使用した配管のDt/4相当ではなく、Na漏洩配管に接続しあつこのNa漏洩口に開口する1BのNa供給配管の口径である。配管外表面には、後述の内装板と配管外表面との間を一定の距離に保ちアニュラス部を設けるためのリング状スペーサーバンド（高さ:7mm）を配管軸方向 200mm間隔で設置した。配管予熱用のマイクロヒータは、Fig. 2 に示す「もんじゅ」のそれが直線状のシーズヒータであるのに対し、ここではアニュラス部内の配管表面にスパライラル状に密着させて取りつけた。

次に保温構造体は、内装板（材質:SUS-304、板厚:0.8mm）、保温材（材質：ロックウール、商品名：ニチアスNU-MG テンプ、厚さ：44mm）及び外装板（材質:SCG2、板厚:0.4mm）で構成されている。このうち、内装板と外装板の板厚については、実機縮尺寸法ではなく、耐熱性及び

耐Na性を試験する目的から実機と同一な寸法とした。内装板は、上下方向に2つ割り、左右にも2つ割りの4分割に製作した。これらを組立てる際は、上下方向の分割に対しては配管の側部水平方向でビス止めを行い、左右の分割に対しては繋ぎ目部分を帯板で固定した。外装板は保温材外側に巻きつけて左右の方向に2分割した状態に製作し、組立の際には、上下方向の分割に対してはハゼ折りとビスで、また左右の分割に対しては中央で重ね合わすのみで固定した。保温構造体には軸方向中央部下端に、配管予熱用マイクロヒータの取り出し口がある。この取り出し口付近は、外装板がNa漏洩時の流出圧によって容易に変形し、開口部が拡大するよう製作されている。尚、保温構造体の水平方向の両端部は、側部を溶接とパッキンで完全にシールし、試験時の不必要な箇所からのNa漏洩を防止した。試験用の計測センサとして模擬Na漏洩配管に設置したのは、熱電対のみである。ただし今回の試験の目的から、保温材とNaとの化学反応があればそれを検出し、また漏洩Naの流路を把握するために多数の熱電対を取りつけた。熱電対の合計は81本で、21本を配管の表面に、20本を内装板の表面に、20本を保温材の中に、20本を外装板の表面に取りつけた。Fig.4に熱電対の取りつけ状況を示す。

2.3 床ライナ

床ライナは、一辺が1.3mで板厚6mmの鋼板（材質:SS41）を用いて表面積1.69m²の正方形に製作し、周囲には高さ100mmのNaオーバーフロー防止用の縁を、また中央部には連通管への開口部を設けた。周囲部分からこの連通管開口部へ向うライナ勾配は1/100である。床ライナの固定は、200mm間隔でライナ裏面に32本のスタッドボルトを溶接し、これで下部のH型鋼製の支持構造体に固定した。

試験用の計測センサは熱電対のみで、ライナの裏面とライナ上Naの各温度測定用に合計34本を取りつけた。Fig.5に燃焼炉箱内における上述の模擬Na漏洩配管との相対位置関係を示す。また、Fig.6にライナの熱電対配置状況を示す。

2.4 連通管

連通管は3Bの炭素鋼製（STPG38, sch20）で、Fig.1に示した燃焼炉箱内の床ライナ開口部から試験セル内の燃焼抑制槽入口までの総延長距離は12.3mである。

試験用の計測センサは熱電対で、管の内面と外面に合計8本を取りつけた。

2.5 燃焼抑制槽

燃焼抑制槽は、今回の試験を計画した時点で「もんじゅ」補助建屋のライナ構造の詳細が確定していなかったことから、Fig. 7 に示すように、上部のNa貯留部と下部のコンクリート部とで構成されたセミフローティング型で、「もんじゅ」の一次系建屋のセルライナに採用が予定されている型式である。

Na貯留部は、直方体で内容積が 0.45m^3 、床面は一辺が1.5mで表面積が 2.25m^2 の正方形で、高さは 200mm である。使用材質は、床板が板厚 6mm の炭素鋼 (SM41B)、抑制板が板厚 3.2mm の炭素鋼 (SS41) である。中央部の連通管さし込み口には、下部にバケットを設け、試験時にはそこに流入する Na で連通管開口部をシールし、連通管の煙突効果とそれによる Na 貯留部内の Na 燃焼促進を防止出来るよう製作した。この他、Na 貯留部には Na 流入時の内部の膨張ガスの解放のためにガス抜きノズル（材質:STPG, 1/4B, sch20）を取りつけた。

次にコンクリート部は、周囲を鋼板製の外枠で密閉し、コンクリート放出水を排出するためのペント管のみをこの外枠に貫通させた。コンクリートは、上層が断熱用の厚さ 50mm のパーライトコンクリート、下層が厚さ 300mm の構造コンクリートである。これらのコンクリートには、周囲をセラミックファイバで囲った長さ 300mm、直径 13mm のスタッドボルト（材質:S15C）16本を埋め込んだ。各スタッドボルトの上端は Na 貯留部の床ライナ裏面に溶接されており、これらで床ライナの固定を行っている。尚、構造コンクリートには「もんじゅ」で使用が予定されている福井県葉原産の硬質砂岩と同県三国産の陸砂をその骨材として使用した。Table-1 及び Table-2 に、パーライトコンクリートとともにその配合条件を示す。

試験用の計測センサは熱電対で、燃焼抑制板の上下面、ライナの上下面、パーライトコンクリート内、構造コンクリート内、およびスタッドの周囲に合計 43 本をそれぞれ取りつけた。 Fig. 8 にこれらの配置状況を示す。

3. 試験方法

試験では、予め Na 供給タンクを所定の温度に加熱し、またエアロゾルスクラバーを起動させて燃焼炉箱に大気側からの強制空気流を送り込みながら、Na 供給配管のバルブを開き Na の供給を開始した。なお燃焼炉箱への強制空気流量については、内部の雰囲気ガス中酸素濃度が有為な変化を示し、かつ炉箱と排気ガスの温度上昇の著しくない値を予め計算によって求め $21\text{m}^3/\text{min}$ とした。但し Fig. 9 に示すように、この流量は試験中に排気系のエアロゾルフィルタの目詰まりのために

途中で減少し、試験開始後約210秒で殆どゼロとなっている。Table-3に試験条件を示す。Na使用量は152kgで、これを「もんじゅ」二次主冷却系のホットレグ温度(505°C)とほぼ等しい507°Cに加熱し流量約1l/secで約180秒間流した。Fig.10に試験中の供給Naの流量変化を、またTable-4に試験経過を示す。

各センサからのデータは、試験開始前からデータ収録装置による収録を始めた。またITVと赤外線テレビ及びカメラを用いてNaの漏洩状況と燃焼状況の観察記録を行った。

Naの供給終了後は、約4分20秒後に空気流入ダクトと排気ダクトのそれぞれのダンパーを閉じ、燃焼炉箱中に窒素ガスを注入し、内部のNa燃焼を強制的に鎮火させた。この窒素ガスの注入は、Naの燃焼による試験体各部の過度な損傷を避け、Na漏洩終了直後の状態を保存するためである。

試験後のデータ収録は、試験装置及び試験体各部の温度が十分に低くなった状態で終了させた。試験装置と試験体の解体は、十分な冷却期間を置いた後に行った。解体では、模擬Na漏洩配管については、内装板、外装板及び保温材に損傷が発生していた場合についてはその状況についても調べることとした。連通管については、既に前回の試験で詳細な検査が行われていることから、ここでは解体後の詳細な検査は省略した。燃焼抑制槽については、上部の燃焼抑制板を切断して槽内のNa除去を行った。

4. 試験結果と考察

4.1 Na漏洩開始以降の全体の事故推移

Naの供給開始以降の試験全体に関する観察結果をまず述べる。Naの供給を開始すると、数秒の遅れのあと模擬Na漏洩配管の予熱ヒータ取り出し口からNaの漏洩が始まった。最初の漏洩は、この予熱ヒータ取り出し口からのみであったが、その後は漏洩Naの流出部が外装板の左右の重ね合わせ部に沿って上方に移動する傾向が認められた。しかしこの場合も、漏洩Naの流出は殆ど予熱ヒータ取り出し口からで、また外装板の腐食もしくは破損などによる予期せざる場所からの漏洩も認められなかった。Photo.1にこの時の写真を写す。赤外線テレビによる観測でも、模擬Na漏洩配管下部の漏洩口からの流出Naは、最初は外装板の下部に満たされ、その後徐々に外装板の上方に向かい、一方この間は予熱ヒータ取り出し口及び外装板の左右の重ね合わせ部分の下部から外部に向かって流出するのが認められた。また流出形態は、Na流出圧の低いことあってスプレイ状ではなく滝状(コラム状)であった。

つぎに、模擬Na漏洩配管から床ライナ上に流下したNaは、同ライナの勾配によって連通管に向かって流れ、その後はスムーズにドレンされて燃焼抑制槽内に流入した。

燃焼抑制槽では、高温Naの流入によってNa貯留部内部のガスが急峻な熱膨張を起こしたが、ガス抜き配管の口径が小さかったためこの膨張ガスが十分に排出されなかった。このため、一部のNaが燃焼抑制板上に溢れて燃焼した。一定時間が経過し、Na貯留部の温度上昇がほぼ終わりガスの熱膨張が穏やかになると、燃焼抑制板のNaは重力による自然落下でNa貯留部内にドレンされ、それにともなって燃焼抑制板上のNa燃焼も鎮火した。

ITVおよび赤外線テレビによる観察結果に基づくと、配管からの漏洩で始まり、連通管を経て燃焼抑制槽に収納されるまでの一連のNa漏洩事故の推移は予想されたとおりである。よって、現在「もんじゅ」設計で想定されている事故推移には、本質的に修正を加える必要はないと考える。

4.2 模擬事故室（燃焼炉箱）内の事故推移

(1) 模擬Na漏洩配管の各部の温度変化

模擬Na漏洩配管のNa漏洩口の温度変化をFig. 11に、また各部に取りつけた熱電対による代表的な温度変化をFig. 12に示す。

Fig. 12によると、Na漏洩期間中（すなわちNa供給期間中）は内装板、保温材および外装板のいずれの温度も漏洩Na温度に向かい上昇しているが、次々と流出するNaで冷却されるために漏洩Naの温度以上には上昇していない。しかしNaの供給が終了すると、内装板、保温材および外装板のいずれも更に温度上昇を始め、内装板はNa供給停止後約5分50秒に最高555℃を、また保温材も同様に約5分後に最高590℃を、また外装板は1分10秒後に最高745℃に達した。このうち、外装板の温度上昇は外装板外表面における空気雰囲気下のNa燃焼のために特に急峻であった。ただし、このような高い温度にもかかわらず、後で述べるように、試験後の解体検査では内装板及び外装板のいずれについても焼損は認められず、また保温材とNaとの異常反応の痕跡も認められてはいない。

(2) 床ライナ上の漏洩Na挙動

Fig. 13とFig. 14にそれぞれライナ表面のNa温度分布とその変化および代表的な熱電対によるライナ上のNa温度時間変化を示す。まずFig. 13から、ライナ上のNaの流動状況については、

流下Naが一旦模擬Na漏洩配管のNa漏洩口である予熱ヒータ取り出し口から真下に落下し、落下後はライナ上で対角線に向かって広がり、後には全面に広がっていることが分かる。またFig.14からは、Naが流下するとライナ温度は直ちに上昇を始め、約1分経過後には供給Na温度である507°Cより更に上昇を続け、最高温度で約650°Cを記録した。既に報告したRUN-B2試験〔文献(1)〕では、ライナに沿ってNaを水平方向に流出させたが、そこではNa供給中はライナ温度は供給Na温度に向かって上昇したが供給Na温度を越えることはなかった。今回これがNa供給中にもかかわらず供給Na温度を越えたのは、流下Naがライナに到達するまでの間に模擬Na漏洩配管とライナの間の雰囲気中で既に滝状(コラム)火災を起こしていること、ならびにライナ上では垂直に落下した流下Naが飛散し、この飛散Naが新たな液滴燃焼を起こしていたこと、などが原因になったものと推定する。

ここに示したライナ各部の温度を基に、Naからライナへの熱流束を計算によって求めると、Fig.15に示す結果を得た。熱流束の値は室温のライナに高温のNaが流下した初期が最も大きく、最大で約360kw/m²である。なお熱流束の計算方法は既報のRUN-B1と同様である。

(3) 燃焼炉箱内のNa燃焼発熱量

先に実施したRUN-B2試験〔文献(1)〕のプール燃焼との比較のため、試験データを基に滝状とプールのNa混合燃焼が同時に進行した燃焼炉箱内の燃焼発熱量を求めた。燃焼発熱量の算出方法は、排気ガス、床ライナ、燃焼炉箱の各壁および模擬Na漏洩配管のそれぞれのエンタルピー上昇分から床ライナ中央の連通間から流出したNaと供給Naのエンタルピー差分を差し引く方法である。

ある特定の時間間隔tにおける燃焼炉箱内混合火災による平均燃焼速度Q'は、次の式で表わすことができる。

$$Q' = Q_{\text{Na,out}} - Q_{\text{Na,in}} + Q_{\text{ceil}} + Q_{\text{wall}} + Q_{\text{floor}} + Q_{\text{gas}} \quad (1)$$

ここで、 $Q_{\text{Na,out}} - Q_{\text{Na,in}}$ ；燃焼炉箱から連通管を経てドレンされたNaと模擬漏洩配管に供給されたNaのエンタルピー差、(Kcal/h)

Q_{ceil} ；燃焼炉箱の天井鋼板の受けた熱量、(Kcal/h)

Q_{wall} ；燃焼炉箱の側壁鋼板の受けた熱量、(Kcal/h)

Q_{floor} ；床ライナ鋼板の受けた熱量、(Kcal/h)

Q_{gas} ；燃焼炉箱の排気ガスと流入空気のエンタルピー差、(Kcal/h)

Naのエンタルピー差 $Q_{Na,out} - Q_{Na,in}$ は、次の(2)式で表わされる。

$$Q_{Na,out} - Q_{Na,in} = 1/t \left(\int_0^t W_{Na,in} \cdot C_{p,Na} \cdot T_{Na,in} dt - \int_0^t W_{Na,out} \cdot C_{p,Na} \cdot T_{Na,out} dt \right) \quad (2)$$

$W_{Na,in}$; 模擬漏洩配管へのNa供給流量、(kg/h)

$W_{Na,out}$; 連通管へのNaドレン流量、(kg/h)

$C_{p,Na}$; Naの比熱、(Kcal/kg°C)

$T_{Na,in}$; 模擬漏洩配管への供給Naの温度、(°C)

$T_{Na,out}$; 連通管へのドレンNaの温度、(°C)

t ; 時間(hr)

燃焼炉箱の天井鋼板の受けた熱量 Q_{ceil} は、次の(3)式で表わされる。

$$Q_{ceil} = \frac{1}{t} \Delta T_{ceil} \cdot C_{p,s} \cdot G_{ceil} + \frac{1}{t} \int_0^t \alpha_{ceil} (T_{ceil} - T_\infty) \cdot S_{ceil} \cdot dt \quad (3)$$

ここで、 ΔT_{ceil} ; 天井鋼板の温度上昇値、(°C)

$C_{p,s}$; 天井鋼板の比熱、(Kcal/kg°C)

G_{ceil} ; 天井鋼板の重量、(kg)

α_{ceil} ; 天井鋼板から周囲空気への自然対流熱伝達率、(Kcal/m²hr°C)

T_{ceil} ; 天井鋼板の平均温度、(°C)

T_∞ ; 周囲の空気温度、(°C)

S_{ceil} ; 天井鋼板の表面積、(m²)

尚、 α_{ceil} の計算には上向きの加熱水平平板自然対流熱伝達に関する(4)式を用いる。

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

ここで、 Gr ; グラスホフ数

Pr ; プラントル数

燃焼炉箱の側壁の受けた熱量 Q_{wall} は、次の(5)式で表わされる。

$$Q_{wall} = \frac{1}{t} \Delta T_{wall} \cdot C_{p,s} \cdot G_{wall} + \frac{1}{t} \int_0^t \alpha_{wall} (T_{wall} - T_\infty) \cdot S_{wall} \cdot dt \quad (5)$$

ここで、 ΔT_{wall} ; 側壁の温度上昇値、(°C)

G_{wall} ; 側壁の重量, (kg)

α_{wall} ; 側壁から周囲空気への自然対流熱伝達率,
(Kcal/m²hr °C)

T_{wall} ; 側壁の平均温度, (°C)

T_∞ ; 周囲の空気温度, (°C)

S_{wall} ; 側壁の表面積, (m²)

尚, α_{wall} の計算には垂直加熱板の自然対流に関する(6)式を用いる。

$$Nu = 0.0214 (Gr \cdot Pr)^{2/5} \quad (6)$$

床ライナ鋼板の受けた熱量 Q_{floor} は, 次の(7)式で表わされる。

$$Q_{floor} = \frac{1}{t} \cdot \Delta T_{floor} C_{p,s} \cdot G_{floor} \quad (7)$$

ここで, ΔT_{floor} ; 床ライナ鋼板の温度上昇値, (°C)

G_{floor} ; 床ライナ鋼板の重量, (kg)

排ガスの受けた熱量 Q_{gas} は, 次の(8)式で表わされる。

$$Q_{gas} = \frac{1}{t} \int_0^t W_{gas,out} \cdot C_{p,gas} \cdot (T_{gas,out} - T_{gas,in}) dt \quad (8)$$

ここで, $W_{gas,out}$; 排気ガス流量, (kg/hr)

$C_{p,gas}$; ガスの比熱, (Kcal/kg °C)

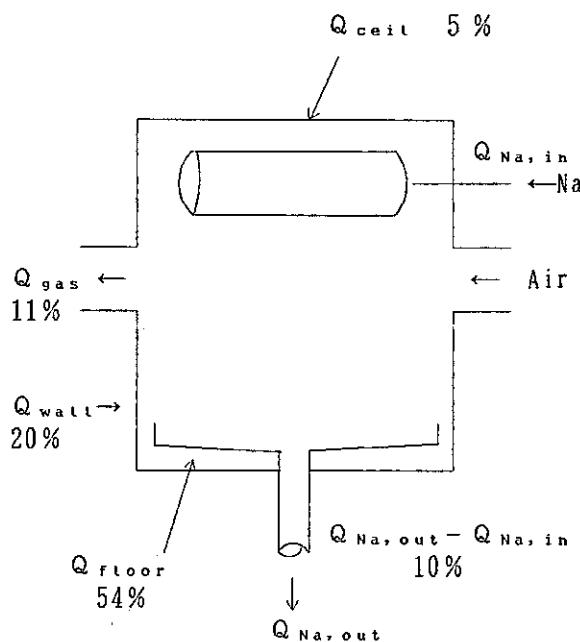
$T_{gas,out}$; 排気ガス温度, (°C)

$T_{gas,in}$; 流入ガス温度, (°C)

実験データを基に(2)式～(7)式の計算を行い, (1)式に代入して平均燃焼速度 Q' を求めると, 次の値を得た。尚, 各部の計算結果をTable-5に示す。

$$Q' = 2.39 \times 10^5 \text{ Kcal/h}$$

この Q' を床ライナの単位面積当たりの平均燃焼速度に換算すると, 165KW/m²となり, これはプール火災の平均燃焼速度 100KW/m² [文献(1)] の約 1.6倍である。また, 燃焼による生成物を Na_2O_2 と仮定すると, 上記の Q' は Na の消費速度に換算すると 92kg-Na/hr となり, 試験時の Na 流量が約 1 l/sec すなわち 2990kg-Na/hr であるため, その約 3%にしか相当しない。Table-5 の燃焼炉箱各部に与えられた燃焼発熱量からそれぞれの全発熱量に対する比率を求めると次頁の図のごとくなる。この図によると, 全燃焼発熱量の内の 64% が連通管へ



のドレンNaと床ライナの温度上昇に消費され、燃焼炉箱の天井と壁側の温度上昇には約26%が、また残りの約11%は排気ガスの温度上昇に消費されていることがわかる。

ここに示した燃焼発熱量および燃焼速度から、模擬漏洩配管からの漏洩Naによる滝状燃焼と床ライナ上のプール燃焼の混合燃焼のため、プール燃焼単独の場合と比べると高い燃焼発熱量となっているが、たかだかプール火災の1.6倍に過ぎず、非常に穏やかな燃焼であったと言える。また、漏洩Naの内で実際に燃焼した割合は3%に過ぎず、さらに平均燃焼発熱量の内の60%がNa自身と床ライナに吸収され、約40%が周囲の壁とガス相に吸収されたことがわかる。

(4) エアロゾルの発生速度、濃度、粒径分布および霧囲気のガス成分

エアロゾル発生速度は、エアロゾルスクラバの洗浄水を一定時間間隔で採取し、これに塩酸を用いた中和滴定を行って決定した。エアロゾル発生速度とエアロゾル濃度の測定結果をFig. 16に示す。エアロゾル発生速度は、Naの漏洩によって燃焼炉箱内でNaの滝状およびプールの混合燃焼が始まると上昇し、Na漏洩の終了する試験開始後3分の時点で約10.5g-Na/sec (Na₂O₂換算で17.8g/sec)を示した。エアロゾル濃度も同様にNaの漏洩開始とともに上昇し、最高 23g-Na/m³ (Na₂O₂換算で39g/m³) を示した。

エアロゾルの粒径分布については、カスケードインパクターによる測定結果を重量基準分布でFig. 17に示す。この結果は、カスケードインパクタによるエアロゾルの捕集時間が試験開始直前からNa漏洩終了後までと比較的長く約30分であったため、その間の平均的な分布である。重量中心半径は、約1ミクロンで文献値〔文献(5)〕に近い。

霧囲気のガス成分については、燃焼炉箱内のガスと排気ダクト内のガスのガスクロマトグラフによる分析結果をFig. 18に示す。分析対象は酸素と水素である。まず酸素は、Na漏洩期

間中及びその後を含めて、Na燃焼のために初期の空気組成である21%から18~19%へと減少している。水素は、Naの燃焼開始とともに最高200ppmまで上昇しているが、これは模擬Na漏洩配管の保温材中の水分および床ライナ表面の塗料とNaの反応によって生成されたものと考える。

4.3 連通管の挙動

前回のRUN-B1試験〔文献(1)〕と同様、連通管ではNaはスムーズにドレンされ、流動閉塞の問題は生じていない。流下したNaから連通管管壁への熱流束を管壁の温度データから求めると、最高値約250kw/m²を得た。この値は、RUN-B1試験〔文献(1)〕で求めた値とほぼ同じである。なお、熱流束の計算方法は、RUN-B1試験と同様に管の外表面を断熱と仮定して管壁の過渡温度上昇率から求めた。

4.4 燃焼抑制槽の挙動 - Na火災の自然鎮火性能とコンクリートの変化 -

(1) Na流入状況とNa温度

Na貯留部の床ライナ裏面とライナ上に取りつけた熱電対によりライナ各部の過渡温度変化を測定し、得られたデータをもとにNaの流入状況とその時のライナ温度変化を調べた。

Fig. 19にライナ裏面の温度変化を示す。なおNa貯留部内のNaプール深さは、エアロゾル発生量及び試験セル壁面への沈着量を差し引きNa貯留部への流入Na量を求めるとき116kgであったため、これを換算すると約75mmとなる。ここに示したライナ温度によると、ライナ上への流入Naは、ライナ自身及びライナ下部コンクリートの持つ大きな熱容量及びコンクリート放水による冷却効果のため、流入時のNa温度が最高 590°C以上であったが、瞬時に冷却されてNa貯留部のNa流入口に最も近い部分(L=170mm)では約20秒間、また最も遠い部分(L=740mm)で約 200秒間も凝固温度以下に保たれた。しかし、その後は凝固温度以上に上昇している。既に述べたように、試験の初期に連通管から燃焼抑制槽に流入したNaの一部が燃焼抑制板の上に溢れ、そこで燃焼を起こしている。一方Fig. 19によると、Naの温度上昇傾向はNa貯留部内での燃焼を示唆するような場所に無関係な一様な上昇ではなく、Na流入口に近い程速く上昇し場所に対する依存性の有ることを示している。このことから、Naが凝固温度以上に上昇はじめたのは、燃焼抑制板上の燃焼Naが重力によって自然にドレンされ、それが内部のNa

を加熱したためと考える。すなわち、流入したNaは、このような燃焼Naの再流入がなければ低温に保持されていたものと考える。Naの溢流という不測の事態にもかかわらず、Naの最高温度は約240秒後の320°Cであり、その後は時間とともに穏やかに下降した。ここに示した図によると、窒素ガスのブローの開始以前にNa温度は一部を除くと、すでに燃焼の下限温度である250°C以下となっている。また、後の解体検査ではNa貯留部内ではNaの殆どが金属状を呈していた。すなわち、燃焼によるNa酸化物の生成の顕著でないことが確認されており4.2の(3)の「燃焼炉箱内のNaの燃焼発熱量」で得た結果とも一致する。よって、ガス抜き構造に不備があったものの、燃焼抑制槽は十分なNa火災鎮火性能を持っていると結論出来る。なおガス抜きについては、本報告書執筆時点ですでに容易に解決出来るとの見通しを得ている。

(2) コンクリート部の温度変化

コンクリート部の温度変化については、まずFig. 20に断面方向各部の温度時間変化を示す。まず断熱コンクリートについては、Na貯留部の床ライナ上のNaから受ける伝導熱のために、Na漏洩終了後も温度上昇を続け、約2時間後に最高温度である約88°Cに達し、その後は下降している。次に構造コンクリートの横方向の温度分布をみると、初期の10時間の間は周辺に近い部分の温度が中央部のそれよりも高いことから、この間はNa貯留部からコンクリートへの熱伝導が外枠の炭素鋼板を経由する伝導に支配されていることが分かる。10時間以降については、これとは逆に外枠が冷却面となり、周辺部のコンクリートの温度と比べると中央部の温度が高い。構造コンクリートの最高温度は約3時間後の55°Cで、この温度ではコンクリートの強度上の問題は発生しない。

スタッドボルトおよびスタッドボルト周辺の弾性材の温度変化については、測定結果をFig. 21に示す。弾性材のみが高い温度を示し、最高が約1時間半後の約93°Cである。スタッドボルトの最高温度はたかだか45°Cで、周囲のコンクリートとほぼ同じ温度を示している。

(3) 燃焼抑制槽のNa冷却性能

ここでは燃焼抑制槽のNa火災鎮火性能と深い係わりのある、燃焼抑制槽のNa冷却性能、特にコンクリート側への放熱量について述べる。

すでに述べたように、燃焼抑制槽内部のNaは、ライナおよび燃焼抑制槽外枠のそれぞれを経由したコンクリート側への熱伝導、ならびに燃焼抑制槽外枠から周囲雰囲気への自然対流

熱伝達によって冷却され、一方では短時間ながらも燃焼抑制板上の燃焼Naからの熱入力を受け加熱されている。長時間にわたるNaの温度変化は、これら放熱と加熱との熱収支によって支配されるが、ここでは簡単のため、Naからライナを経由したコンクリート側への放熱のみに着目する。

試験で得たNa温度データによると、貯留部内のNaにはライナを経由したコンクリート側への放熱のためその垂直方向下方に向かって負の温度勾配がある。いまこの温度勾配を用いると、(9)式からコンクリート側への放熱熱流束 $Q_{Na \rightarrow c}$ を求めることが出来る。

ただし、 $Q_{Na \rightarrow c}$: Naからコンクリート側への熱流束 (Kcal / m² hr)

λ : Naの熱伝導率 (Kcal / m hr °C)

T_{Na} : 槽内のNaの温度(°C)

T_c : ライナ表面のNa温度 (°C)

L : 2点間の距離 (m)

ここで、ライナ下部のパーライトコンクリートについて、その中の特定の個所の温度 T_c が既知であれば、Naからライナ、ライナ直下の空隙、このパーライトコンクリート中の特定の個所の間の熱貫流率を次の(10)式で定義出来る。

ただし、K : 熱貫流率 (Kcal / m² hr °C)

T_c : パーライトコンクリート温度 (°C)

試験データを基に、(9)式及び(10)式から計算によって求めた熱流束 $Q_{Na \rightarrow c}$ と熱貫流率 K をそれぞれFig. 22, Fig. 23 及びTable- 6 に示す。尚、これらの計算に用いた温度データは、燃焼抑制槽外枠からの放熱の影響を避けるため、Na貯留部の水平方向中心部で測定した値を用いた。まず、Fig. 22によると、コンクリート側への熱流束は、試験開始後約30分で約 6Kw/m^2 、その後は時間の経過とともにほぼ直線的に下降し、100分後には約 1.8Kw/m^2 と始めの約 $1/3$ に減少している。前報の試験Run-B1 [文献(1)] では、スリット条の燃焼抑制板で、その上部の雰囲気空気条件が強制対流の場合で、模擬燃焼抑制槽内のNa燃焼速度が開放プール燃焼の約3 %の 3Kw/m^2 であった。今回の試験に使用した燃焼抑制槽は、燃焼抑制板の開口面積比がより小さいためNa貯留部における燃焼速度はこの 3Kw/m^2 以下のはずである。一方、貯留部のNaからコンクリート側への放熱熱流束は、Fig. 22に示したとおりこの予想される燃焼速度の上

限値 $3 \text{ Kw} / \text{m}^2$ より大きい。よって、燃焼抑制槽内のNaは時間とともに確実に冷却され、一定時間後には凍結するものと結論づけられる。次に熱貫流率については、Fig. 23からその値を示すが、およそ $30 \text{ Kcal} / \text{m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$ である。この値はセミフローティング型ライナについて今回初めて明らかにされた熱貫流率であり、燃焼抑制槽下部のライナ、ライナ直下の空隙、パーライトコンクリート、及びライナからコンクリートの中に埋めこまれたスタッドボルトなど燃焼抑制槽下部の工学的な構造に関する値である。よって、これは今後セミフローティング型ライナについて、解析コードでライナ下部のコンクリート温度を正確に評価する際に使用できる。

(4) コンクリート部の放出水量

試験完了までの全放出水量は $1,775 \text{ cc}$ であった。この値との比較のため、今回と同じ配合条件及び同じ骨材で製作された構造コンクリート試料およびパーライトコンクリート試料の重量減少率を文献から Fig. 24 および Fig. 25 に示す [文献(6), (7)]。なおこれらのデータは、試料を各温度で十分長い時間放置したときのものである。図からまず同一温度条件であれば、構造コンクリートと比べパーライトコンクリートの重量減少率、すなわち放出水量の多いことが分かる。今回の試験では構造コンクリートの最高温度は 55°C であり、パーライトコンクリートのそれは 88°C であった。これらの温度から、試験中は構造コンクリートからの放出水は殆どなく、パーライトコンクリートからの放出水のみと断定できる。Fig. 24 から試験中に記録されたパーライトコンクリートの最高温度における放出水量を求める $5.6 \sim 11.3 \text{ l}$ となり、実測結果の $1,775 \text{ cc}$ は、この値の $16 \sim 30\%$ に過ぎない。この差の原因は、比較対象とした試料のデータが長時間をかけて平衡状態に達したときのものであるのに対して、後者の今回の試験結果は過渡状態のものであったためと考える。またこのことからコンクリートからの放出水量の現実的な評価には、コンクリートが最高温度に達するまでの加熱時間が重要なパラメータになることが分かる。ちなみに Fig. 24 の結果を、加熱時間を横軸にした場合の重量減少率で表すと、Fig. 26のごとくなる。この図に今回の試験結果を適用し、約 70°C に 2.5 時間保った時の放出水量を求める $\text{約 } 1,300 \text{ cc}$ となり今回の試験結果に近い。尚、今回の試験では、放出水量の時間変化も測定する予定であったが、不慣れなためデータを得ることが出来なかった。

4.5 解体検査

(1) 模擬Na漏洩配管

解体に先立って、燃焼炉箱の天井を撤去し、模擬Na漏洩配管及びその下の床ライナを燃焼炉箱の上部から観察した。Photo. 2にその時の写真を示す。模擬Na漏洩配管については、その周囲の外装板に燃焼後のNa酸化物が側部および下部に付着しているのが見られる。また床ライナについては、ライナ全面にわたる燃焼酸化物が見られる。燃焼炉箱の側壁には、下部に飛散Naの痕跡の燃焼酸化物が認められた。

解体は、外装板、保温材、内装板の順序で行った。Photo. 3にこの時の写真を示す。まず外装板については、多量の燃焼酸化物が付着していたものの、外装板の焼損およびNa腐食による損傷は認められていない。保温材についても同様で、漏洩Naとの反応による焼損は認められていない。内装板についても、異常は認められていない。配管周囲には、スパライラル状に巻きつけた予熱ヒータに沿って金属Naが付着していた。

(2) 燃焼抑制槽

解体では、最初に燃焼抑制板を切断してこれを撤去し、次にNa貯留部内部のNa及びNa酸化物の除去を行った。Photo. 4にこの時の写真を示す。残留Naには殆ど酸化物は認められず大部分が金属状であった。金属状Naの除去は、塊状のNaを入力で除去することによって行い、除去Naはそのままドラム缶に回収した。Photo. 5に、金属状Naの除去作業状況を示す。

(3) 試験装置各部の残留Na量とエアロゾル沈着量およびそれらの分布

解体時の測定結果をFig. 27およびFig. 28に示す。エアロゾル量は中和滴定によって求めたものであるためNa量の割合で表示しており、また他のNa重量は回収したNa重量を直接計量したものとの割合でNa酸化物および残留Naを含んでいる。

供給Na量 151.7kgのうち、模擬Na漏洩配管と途中のNa配管に残った量がその約 8.3%の12.7kgであることから、実際に模擬漏洩配管から外部に漏洩したのは 139kgである。

まず残留Naの装置内の分布については、Fig. 27より、供給Na量を 100%とすると、燃焼抑制槽の内部には約77%が回収されていることが分かる。他の場所については、燃焼炉箱の床ライナ上が12.6%と比較的多く、また燃焼抑制槽の上部にも15%が残留している。燃焼炉箱内、試験セル内および連通管内の壁、天井、床、管壁などの残留量はそれぞれ 1.5%未満に

過ぎない。なお、燃焼炉箱からエアロゾルとして排出された量は 0.8% と非常に少ない。

次に、エアロゾルのみに関する分布については、Fig. 28より、試験セルの内部が全エアロゾル量の約 60% と多い。これは試験セル内の燃焼抑制槽上部で溢れた Na の燃焼が起こったためである。燃焼炉箱は約 7% と少なく、また燃焼炉箱から排出されたエアロゾルも全体の約 25% と比較的少ない。

ここで述べた残留 Na 量およびエアロゾル量の分布から、試験では Na 漏洩終了後直ちに窒素ガスの注入を行い過度な燃焼を防止するための操作を行ったが、漏洩 Na の殆ど、すなわち約 77% が燃焼抑制槽内に回収され、またエアロゾルの発生量についても全ての箇所のエアロゾルを回収しても漏洩 Na の 2.4% と究めて少ないことが示された。

結論

ナトリウム配管、床ライナ、連通管および燃焼抑制槽のそれぞれの縮尺モデル試験体を用いて、「もんじゅ」二次系ナトリウム火災に関する試験を行った。試験では、模擬事故室内の配管のナトリウム漏洩で始まり、ナトリウムの床ライナ上の流動燃焼と連通管によるドレンを経て燃焼抑制槽に回収され、そこでナトリウム燃焼が自然鎮火し事故が終息するまでの事故推移を調べた。使用したナトリウムは、温度 505°C、総重量約 150kgで、これを模擬ナトリウム漏洩配管から流量約 1 l / sec で約 3 分間にわたり漏洩させた。試験結果から、次の結論を得た。

(1) 全体の事故推移：

模擬配管からの漏洩ナトリウムは、現在「もんじゅ」設計で想定されている事故推移と同様に、床ライナから連通管を経て燃焼抑制槽に円滑にドレンされ、燃焼抑制槽内でその燃焼が鎮火され、またこれによって事故が終息した。

(2) 模擬事故室のナトリウム火災の状況：

i) 模擬ナトリウム配管：

ナトリウムとの化学反応及び燃焼に起因する内装板及び外装板の腐食破損及び高温破損は生じていない。すなわち、配管周囲の保溫構造体は、必要とされる漏洩ナトリウム飛散防止機能を試験期間中維持し続けた。

ii) 床ライナ上及び連通管内のナトリウムの流動性：

過去に実施した部分モデル試験の結果と同様、燃焼生成物による流路閉塞は認められなかった。

iii) 燃焼による発熱量：

模擬事故室における漏洩ナトリウムの滝状（コラム状）及びプール状の混合燃焼による発熱量は、試験時の雰囲気空気条件が強制対流であったため燃焼発熱量の観点からは実機と比べ過酷な条件であったが、床ライナの単位面積当たり約 165Kw / m² であった。この発熱量はプール火災による燃焼発熱量（約 100Kw / m²）の約 1.6 倍にすぎず、滝状ナトリウムの燃焼がきわめて穏やかに進行したことを示している。また燃焼発熱量から、漏洩したナトリウムの中で実際に燃焼した割合は今回の試験体系である模擬Na漏洩配管から床ライナまでの距離が約 50cm の場合では 3 % に過ぎないことが明らかにされた。

iv) エアロゾル及び燃焼生成物

模擬事故室のエアロゾルについては、漏洩期間中に最高 $17.8\text{g-Na}_2\text{O}_2/\text{sec}$ のエアロゾル発生速度と最高 $39\text{g-Na}_2\text{O}_2/\text{m}^3$ のエアロゾル濃度を記録し、エアロゾルの重量中心半径は約1ミクロンであった。またエアロゾルを含む反応生成物の約12%が模擬事故室内に沈着もしくは残留した。

(3) 燃焼抑制槽：

燃焼抑制槽については、漏洩ナトリウムの約77%がこれにドレンされ回収された。また燃焼抑制槽へのドレン時にはナトリウム温度が最高約590°Cと高温であったが、コンクリート側への放熱のため、内部ナトリウム温度はドレン終了直後に最高320°Cに到達したにすぎなかった。燃焼抑制槽下部のコンクリートについては、断熱コンクリートであるパーライトコンクリートが最高温度88°Cを、パーライトコンクリート下部の構造コンクリートが最高温度55°Cを記録したが、いずれも構造強度の観点からは問題となる温度ではない。ライナ、ライナ下部の空隙、パーライトコンクリートの一部を含めた垂直方向下方のNaからコンクリート側への熱伝導に関して、見掛けの熱貫流率は約 $30\text{Kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ であった。試験期間中のコンクリート放出水量は、コンクリート部分のライナ接触面積当たり約 $0.8\ell/\text{m}^2$ であった。尚、燃焼抑制槽は、試験装置の設計時点では「もんじゅ」補助建屋内ライナ設計が確定していなかったことから、そのライナ構造を一次系建屋のセルライナと同じセミフローティング型とし、床ライナはパーライトコンクリートと構造コンクリートにスタッドボルトで固定した。

文献

(1) 川部, 姫野, 藤枝, 奥村, 佐藤., 「ナトリウム火災防護設備基礎試験」,

PNC 報告書, SN941 84-124, 1984 年 8 月

(2) 川部, 姫野, 川田, 宮口., 「ナトリウム火災防護設備基礎試験(Ⅱ) - ライナ上の低温

ナトリウム流動燃焼試験(RUN-B4) - 」, PNC 報告書, SN941 85-104, 1985年 7 月

(3) 星, 根井, 大島, 他., 「二次主冷却系配管保溫構造崩壊試験」, PNC 報告書,

ZJ201 83-16, 1983年 5 月

(4) 木下, 宇佐美, 他., 「ナトリウム火災防護設備基礎試験(Ⅳ) - 水による模擬二次系配

管ナトリウム漏洩試験 - 」, PNC 報告書, 執筆中

(5) G. Nishio, S. Kitani and J. Takada., " Behavior of Sodium Oxide Aerosol in Closed

Chamber under Thermal Convection Flow ", Nucl. Sci. Technol., 14, 12, 1977.

(6) 畠本, 高崎, 岡本, 他., 「Na + コンクリート反応基礎試験」, PNC 報告書,

SJ270 82-02, 1982年10月

(7) 畠本, 橋本, 高崎, 他., 「ナトリウム - コンクリート反応基礎試験(Ⅱ)」,

PNC 報告書, SJ270 83-01, 1983年 9 月

Table 1 Composition of Perlite Concrete

Cement-Perlite Volume Ratio	Water- Cement Ratio (%)	Slump (cm)	Specific Weight (ton/m ³)	Materials			
				Cement	Perlite	AE Plasticizer	Foaming Agent
1 : 4	78	12±1	0.9~1.0	Flyash B	Mitsui Perlite C	Pz No.70	No.505

-21-

Table 2 Composition of Structural Concrete

Max. Size of Coarse Aggregate (mm)	Design Strength (kgf/cm ²)	Specific Weight (kg/m ³)	Water- Cement Ratio (%)	Slump (cm)	Air Content (%)	Materials	
						Cement	AE Plasticizer
25	240	2150	55	12±1	4~4.5	Flyash B	Pz No.70

Table 3 Test Conditions of Run-B3

Sodium Feeded	151.7kg
Sodium Temperature	507°C
Initial Temperature of Simulated Sodium Pipe	505°C
Temperature of Feed Air	22.9°C
Relative Humidity of Feed Air	62%
Initial Air Flow Rate into Combustion Cell	20m ³ /min

Table 4 Test Record

Time	Record	Time after Initiation of Sodium Feed
11 : 03	Start-up of aerosol scrubber	
13 : 21	Sodium feed tank and simulated sodium pipe reached 505°C	
13 : 32	Start-up of data acquisition system	
13 : 33	Trace heaters of sodium feed tank and simulated sodium pipe were turned off	
13 : 34	Start of sodium feed	0
13 : 37	End of sodium feed	3min05sec
13 : 39	Ceiling of combustion cell reached 180.6°C	5min40sec
13 : 41	Start of N ₂ blow into combustion cell and test cell	7min36sec
16 : 08	Turn-off of data acquisition system	3hr31min

Table 5 Enthalpy Change in Combustion Cell

	Enthalpy Change (kcal/hr)
Sodium, $Q_{Na, out} - Q_{Na, in}$	2.30×10^4
Ceiling Plate of Combustion Cell, Q_{ceil}	1.26×10^4
Wall Plates of Combustion Cell, Q_{wall}	4.94×10^4
Floor Liner in Combustion Cell, Q_{floor}	1.28×10^5
Gas, Q_{gas}	2.61×10^4
Total, $Q_{Na, out} - Q_{Na, in} + Q_{ceil} + Q_{wall} + Q_{floor} + Q_{gas}$	2.39×10^5

Table 6 Heat Flux and Apparent Overall Heat Transfer Coefficient

Time (min)	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100
Average Sodium Temp. at 50mm high from Floor Liner Surface, \tilde{T}_{Na} ($^{\circ}C$)	208.9	193.6	179.5	166.4	154.5	144.2	134.5
Average Sodium Temp. on Floor Liner Surface, \tilde{T}_L ($^{\circ}C$)	205.3	190.9	177.2	164.4	153.0	142.6	133.5
Distance, L (m)	0.05	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Thermal Conductivity of Sodium, λ (kcal/mh $^{\circ}C$)	70.1	70.8	71.4	71.9	72.4	72.8	73.3
Heat Flux from Sodium to Concrete, $Q_{Na \rightarrow C}$ (kcal/m 2 h)	5050	3820	3280	2880	2170	2330	1470
Average Temp. of Perlite Concrete, \tilde{T}_P ($^{\circ}C$)	56.6	62.5	66.9	70.2	72.5	73.9	74.5
Apparent Overall Heat Transfer Coefficient, K (kcal/m 2 h $^{\circ}C$)	33.9	29.8	29.8	30.5	27.0	33.9	24.5

Note for Keys

- (T) Thermocouple
- (L) Level meter
- (O₂) Oxygen meter
- (C) Aerosol concentration meter
- (F) Flow meter

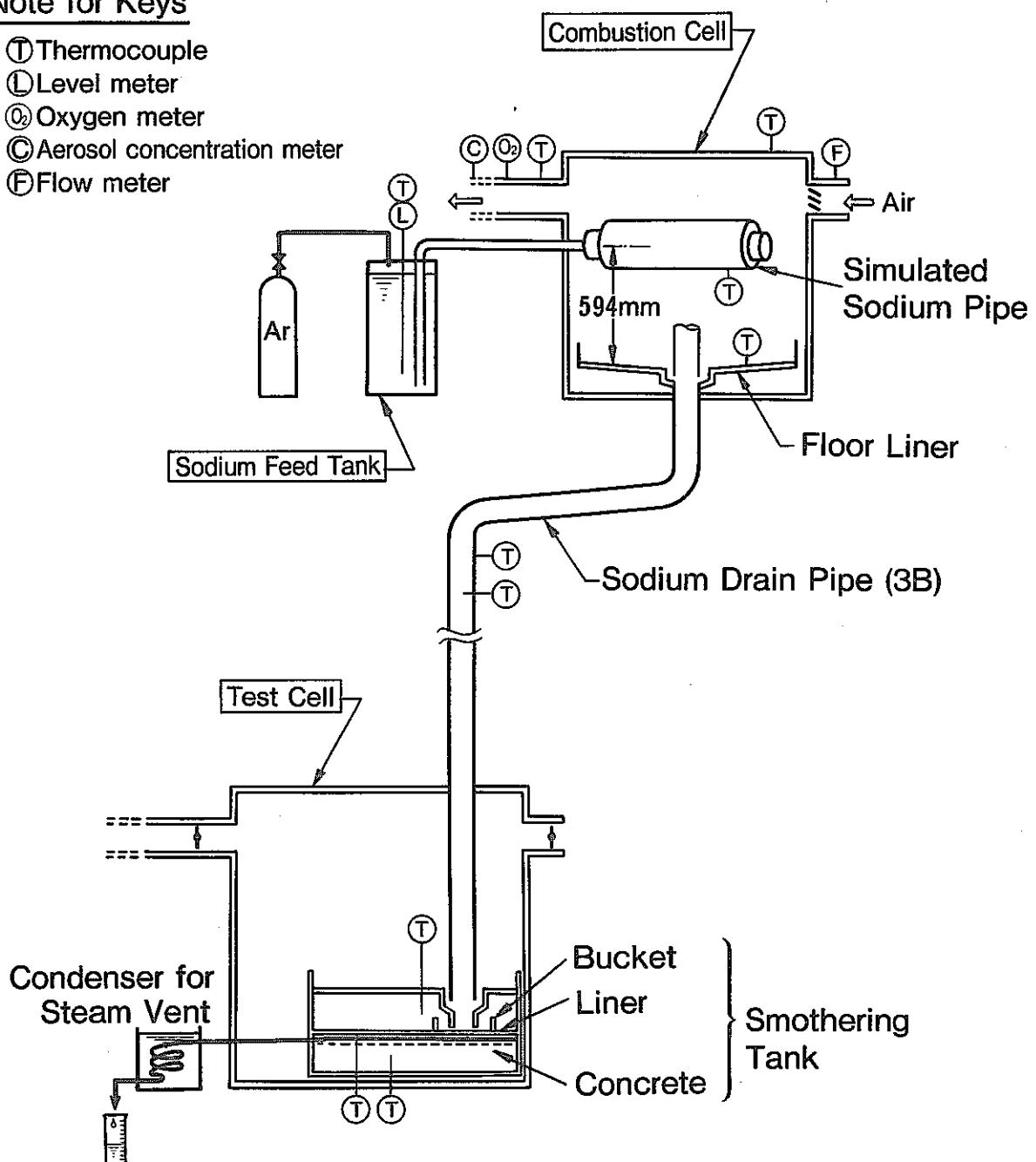


Fig.1 Arrangement of Test Rig for Run-B3

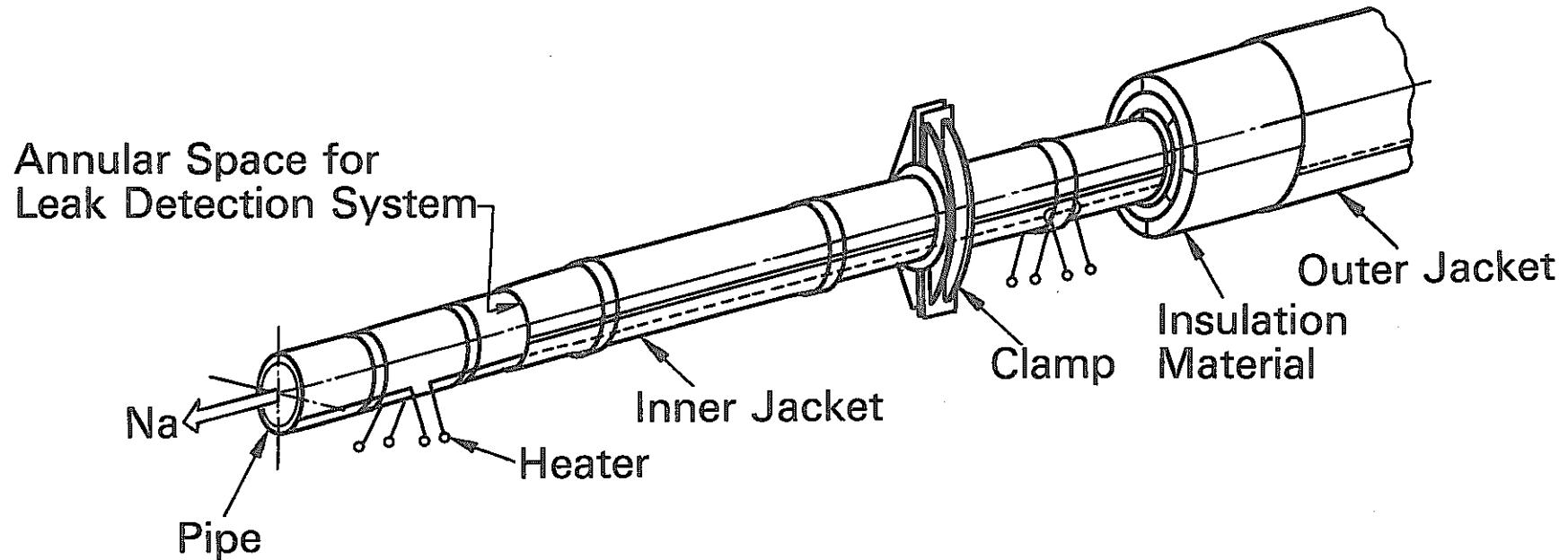


Fig.2 Concept of Monju Secondary Sodium Piping
with Thermal Insulation Cover

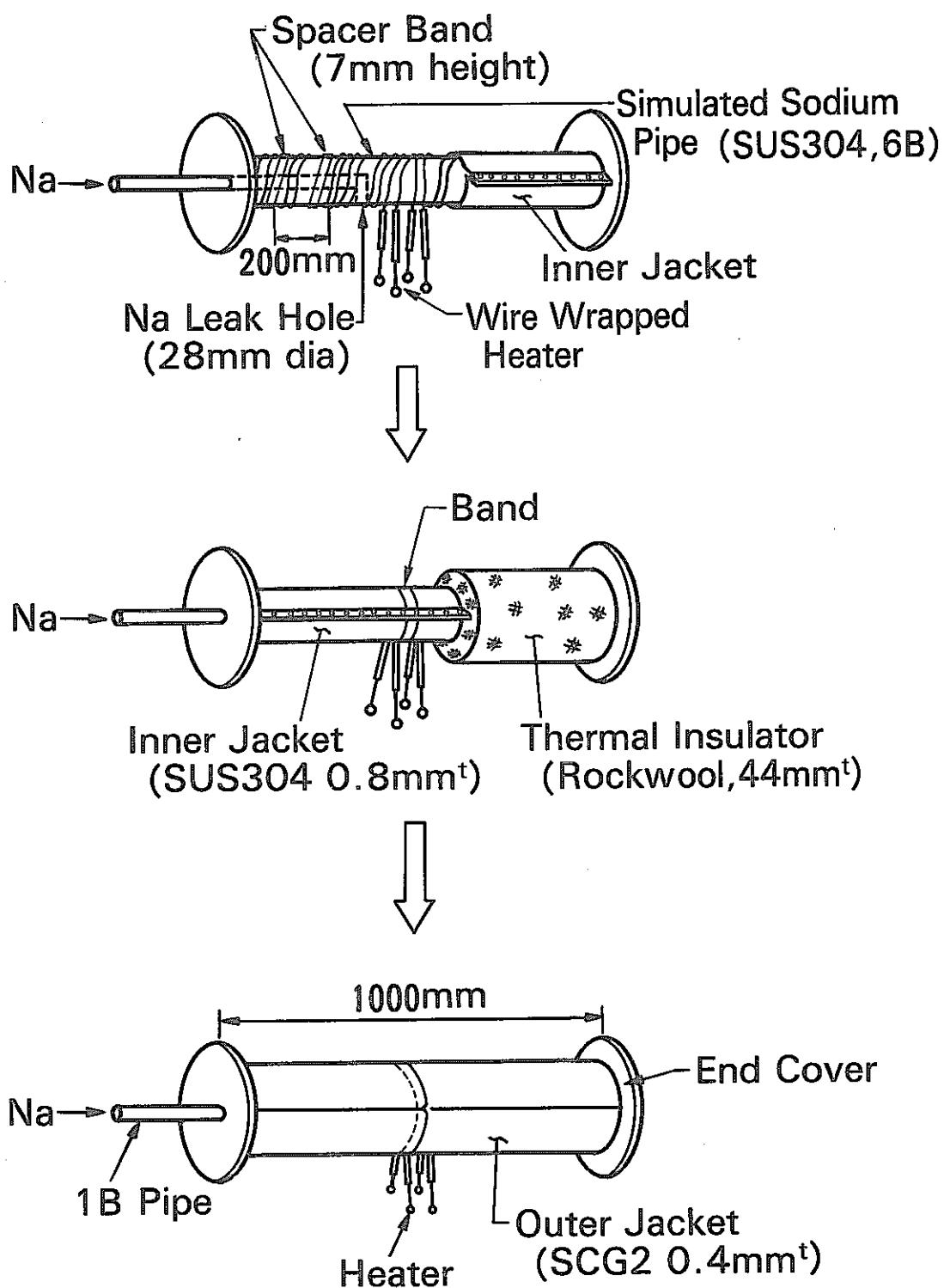
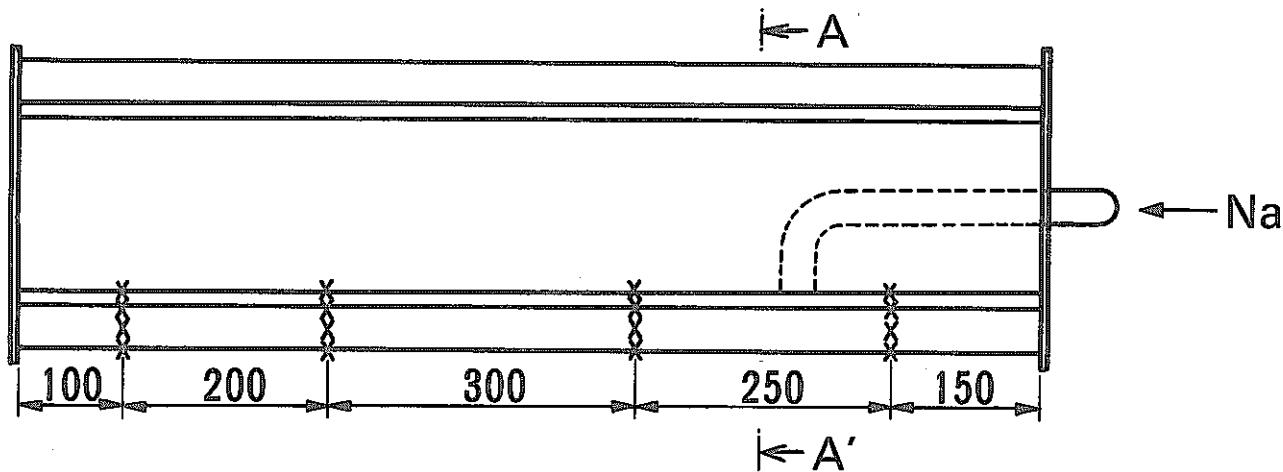


Fig.3 Assembling of Simulated Sodium Pipe



X : Thermocouple

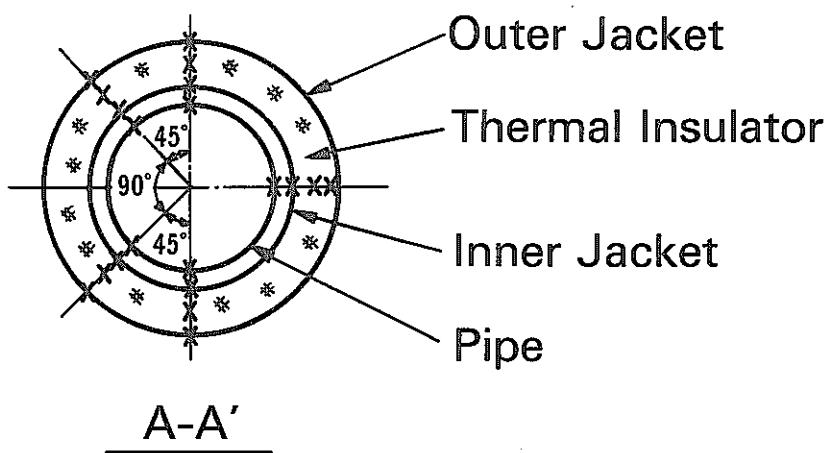


Fig.4 Simulated Sodium Pipe and Its Thermocouple Locations

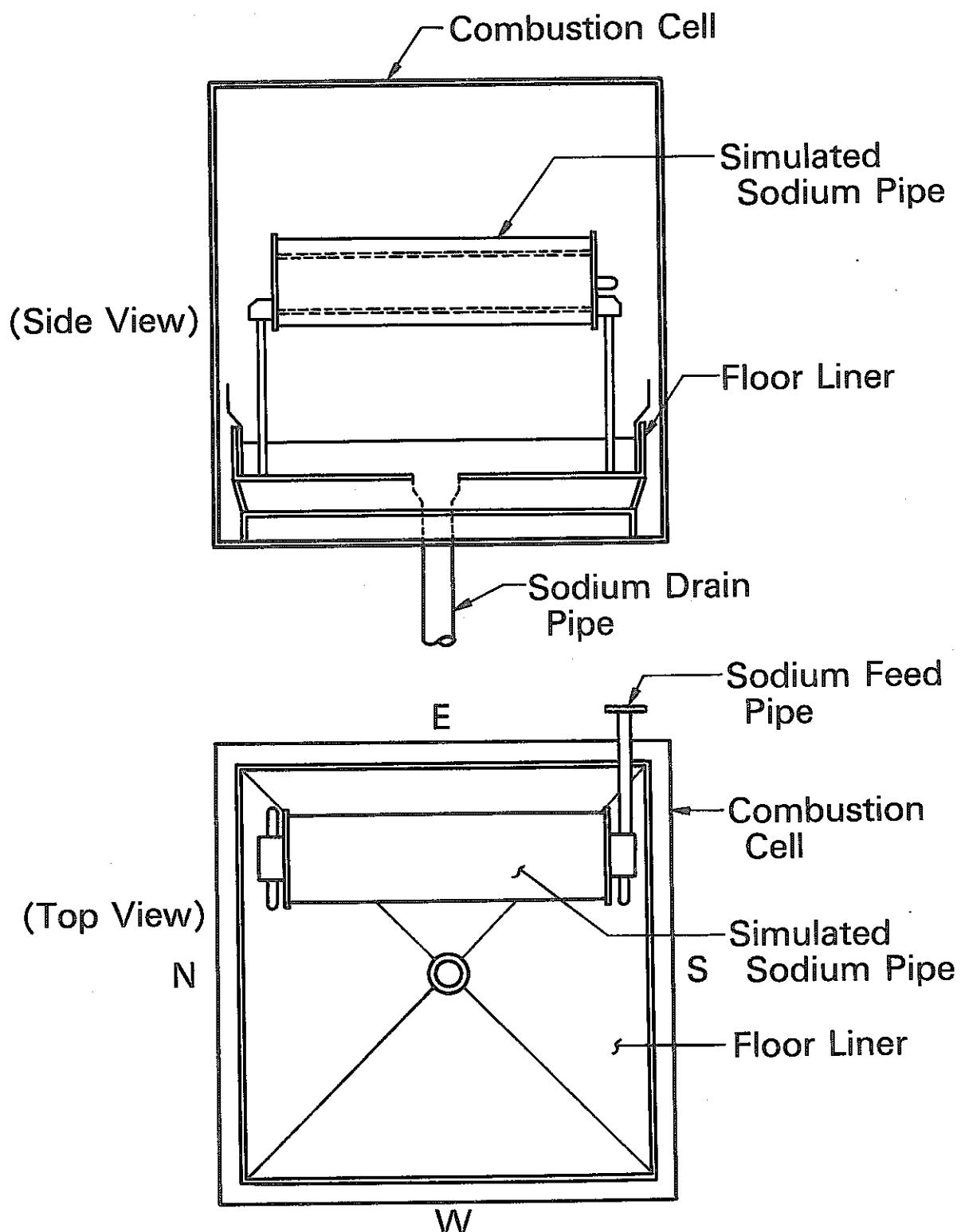


Fig.5 Arrangement of Simulated Sodium Pipe in Combustion Cell for Run-B3

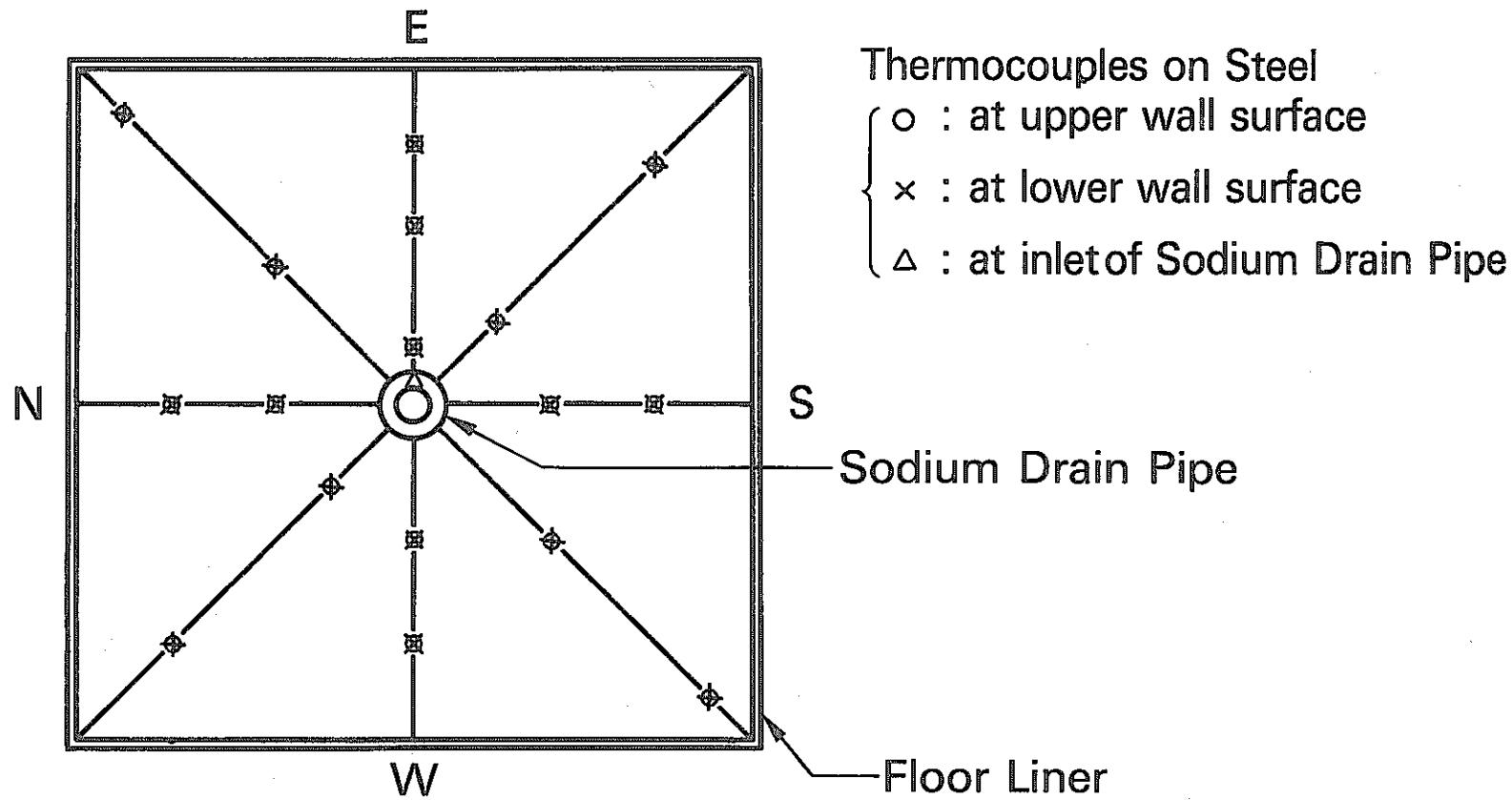


Fig.6 Floor Liner and Its Trermocouple Locations (Top View)

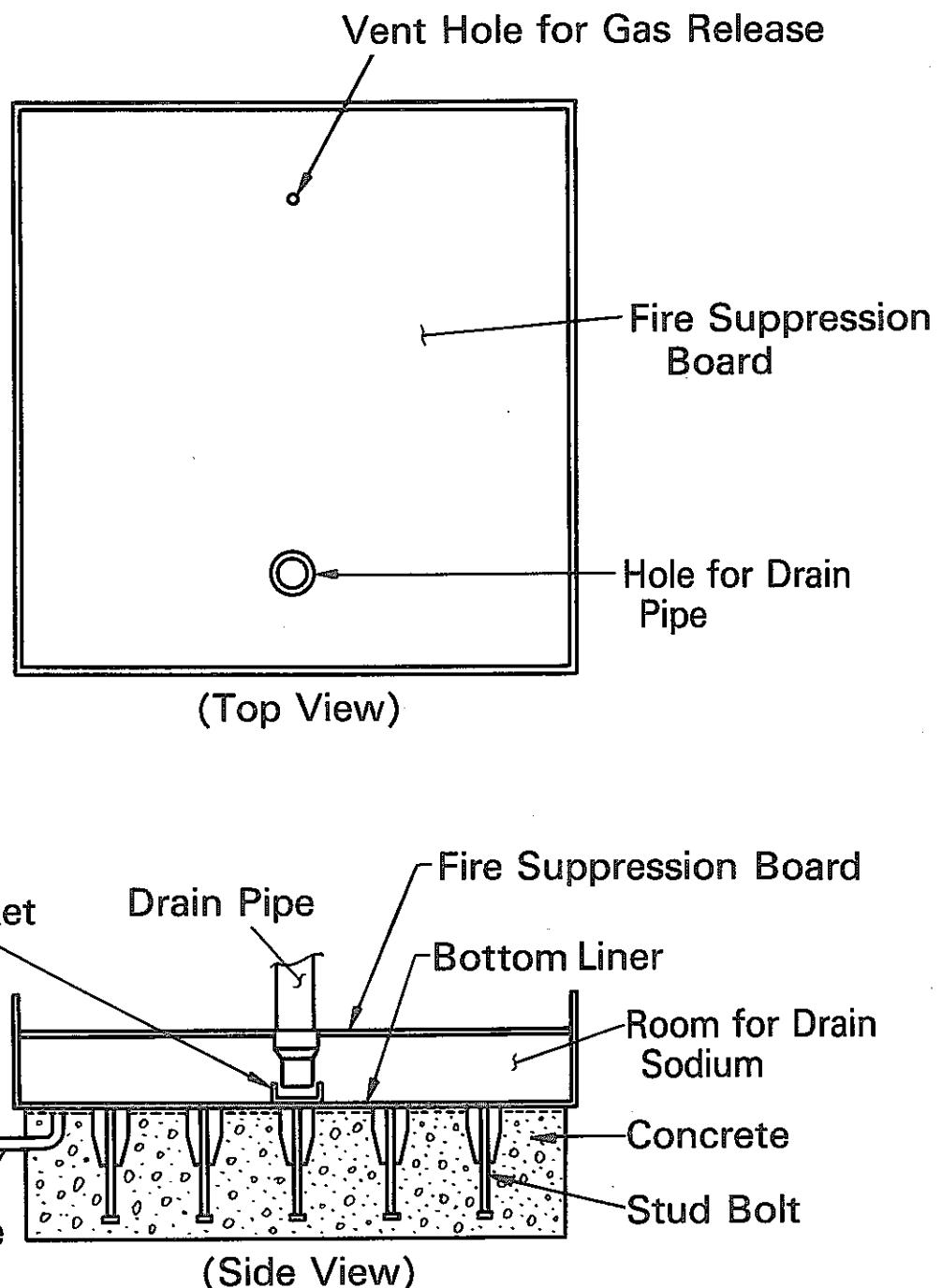


Fig.7 Drawing Smothering Tank

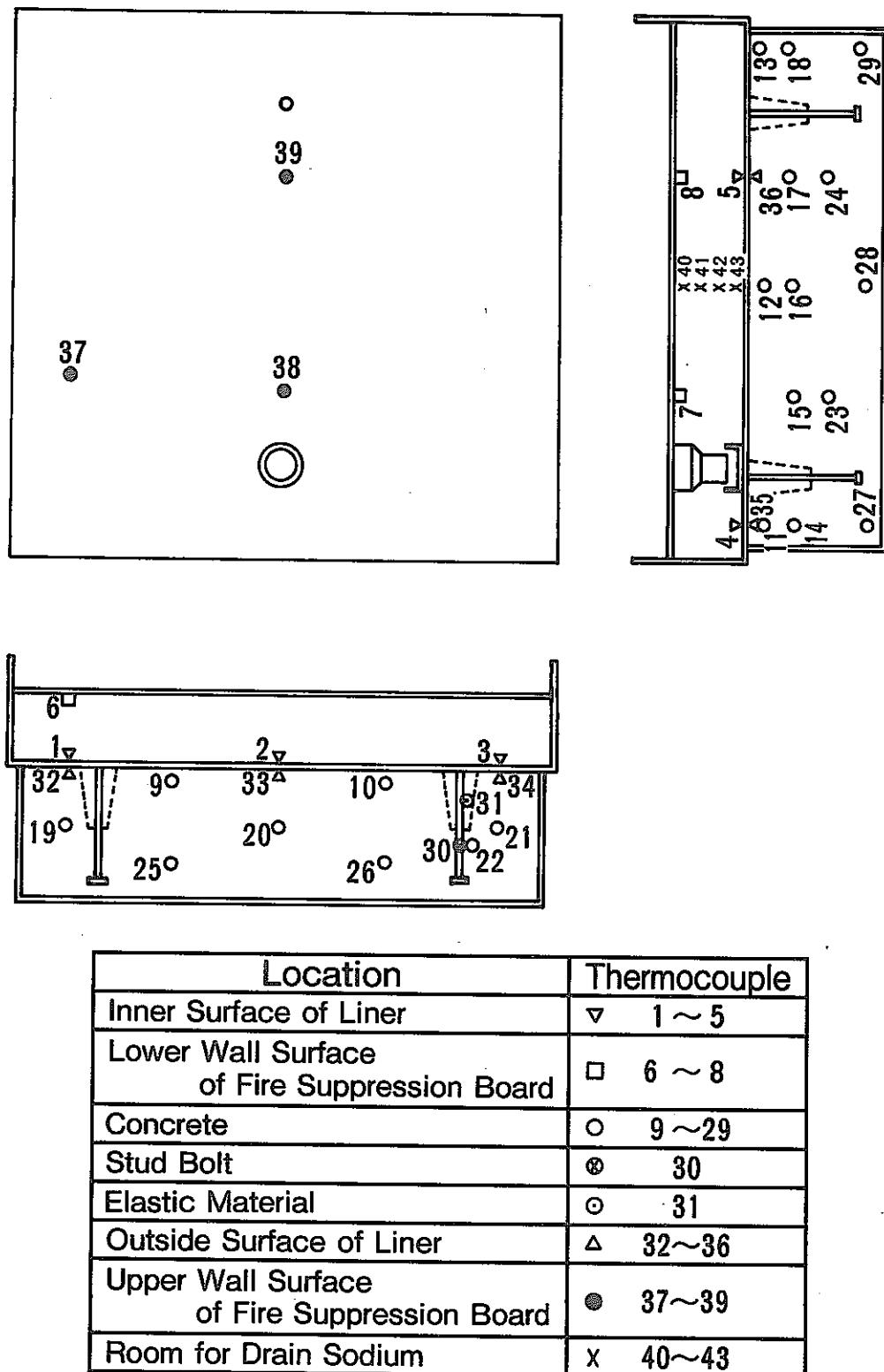


Fig.8 Smothering Tank and Its Thermocouple Locations

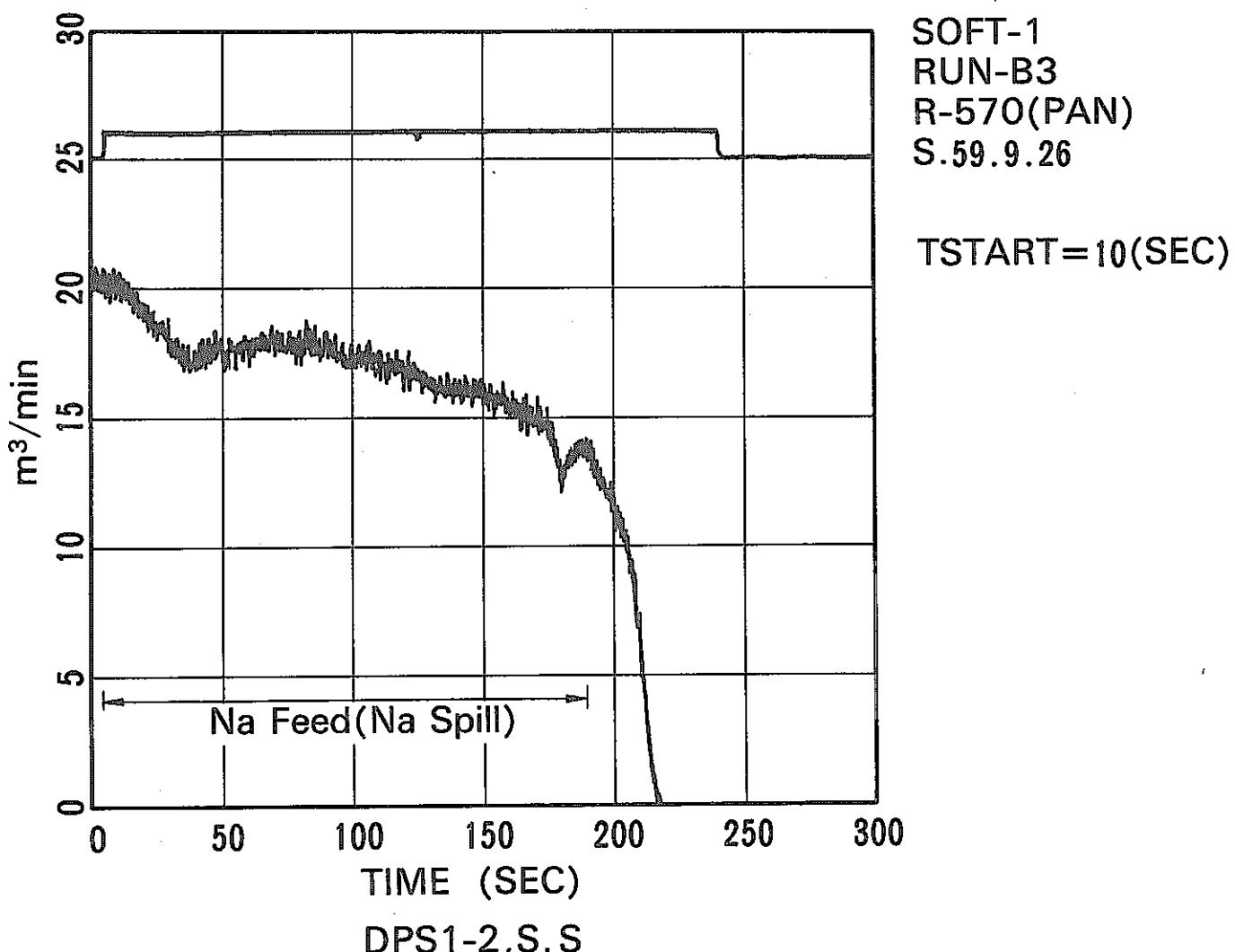


Fig.9 Record of Air Flow Rate into Combustion Cell

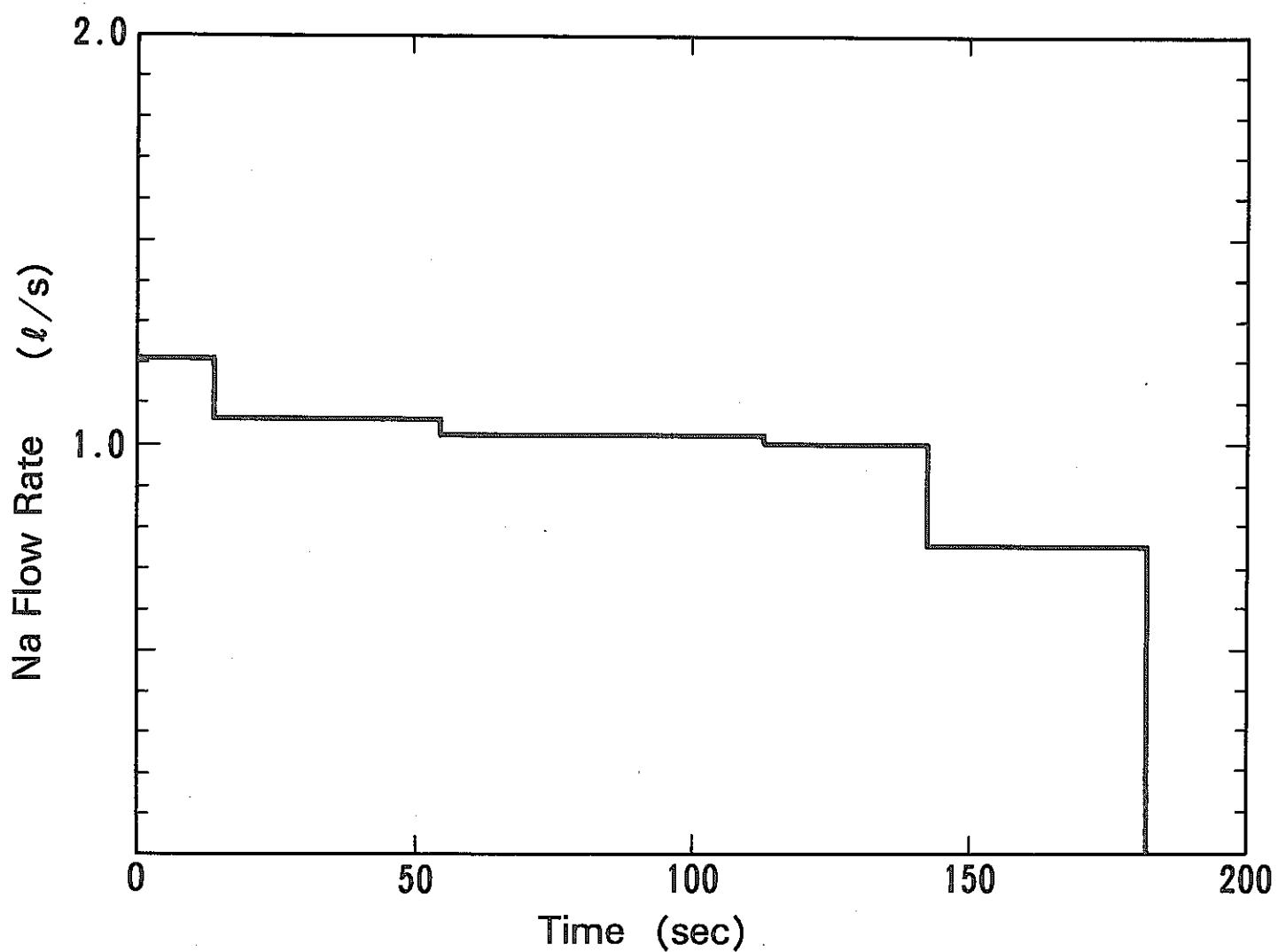


Fig. 10 Flow Rate of Feed Sodium into Simulated Sodium Pipe

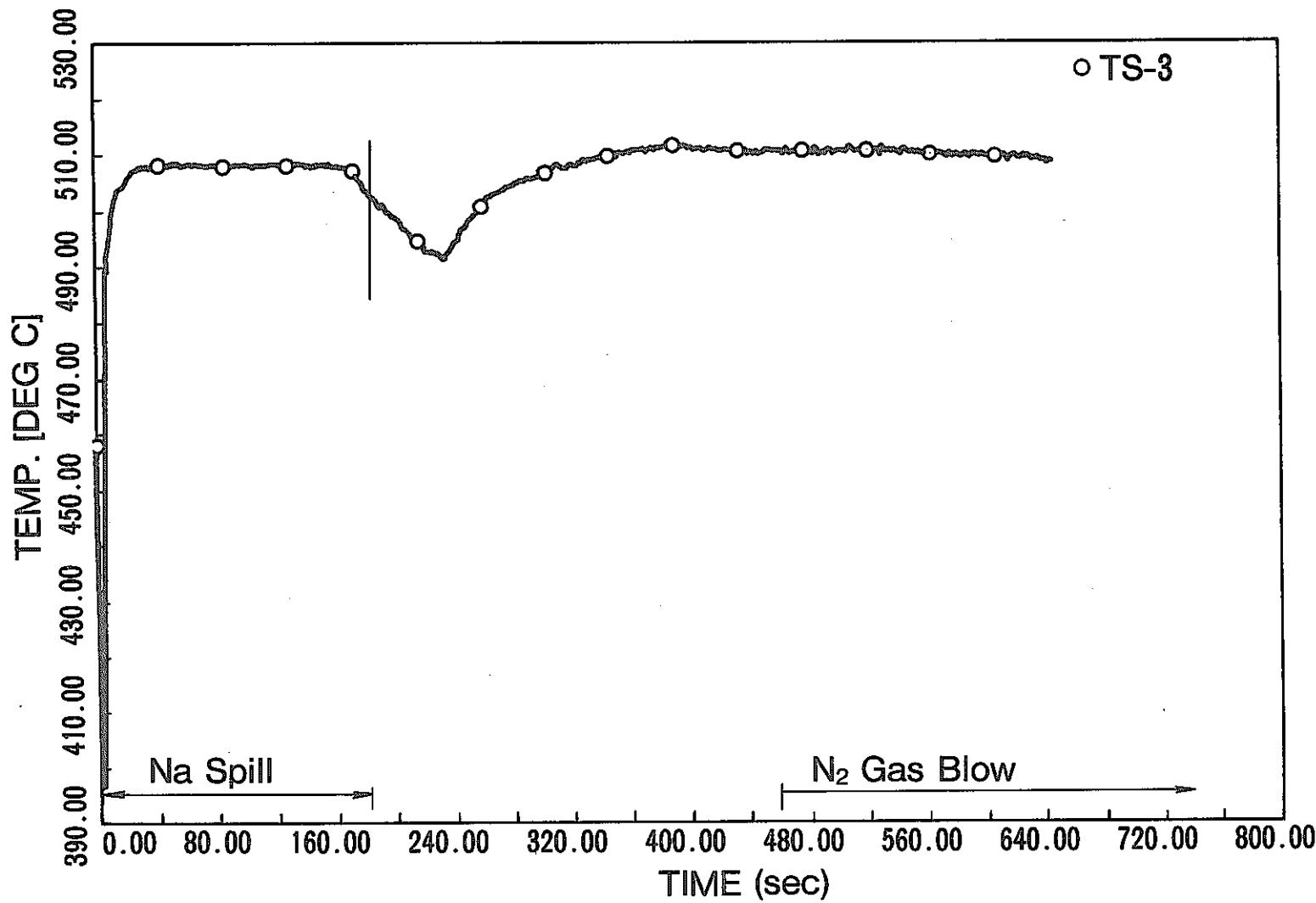


Fig.11 Change of Temperature at Sodium Spill Hole of Simulated Sodium Pipe

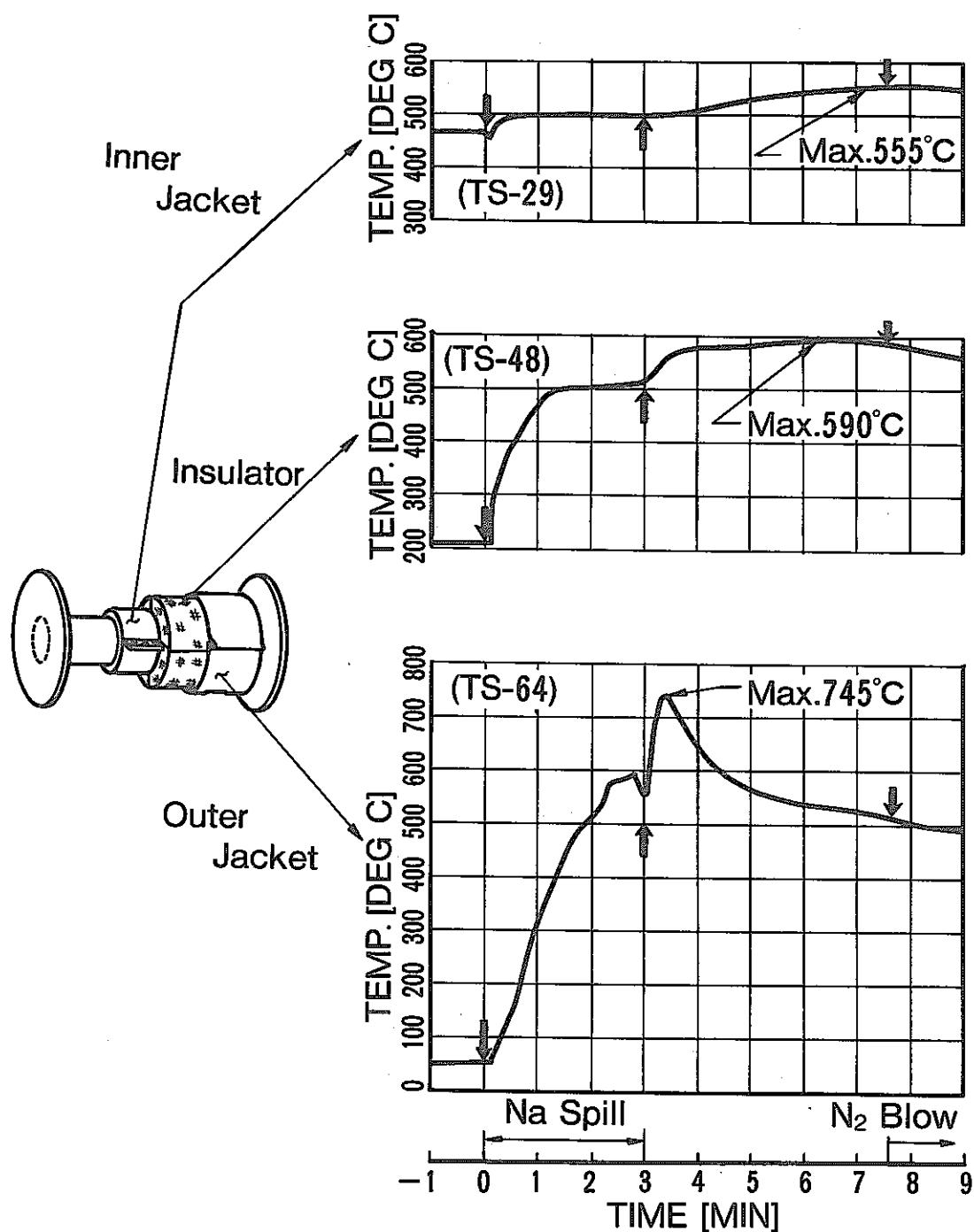


Fig.12 Changes of Temperature at Three Representative Positions in Simulated Sodium Pipe

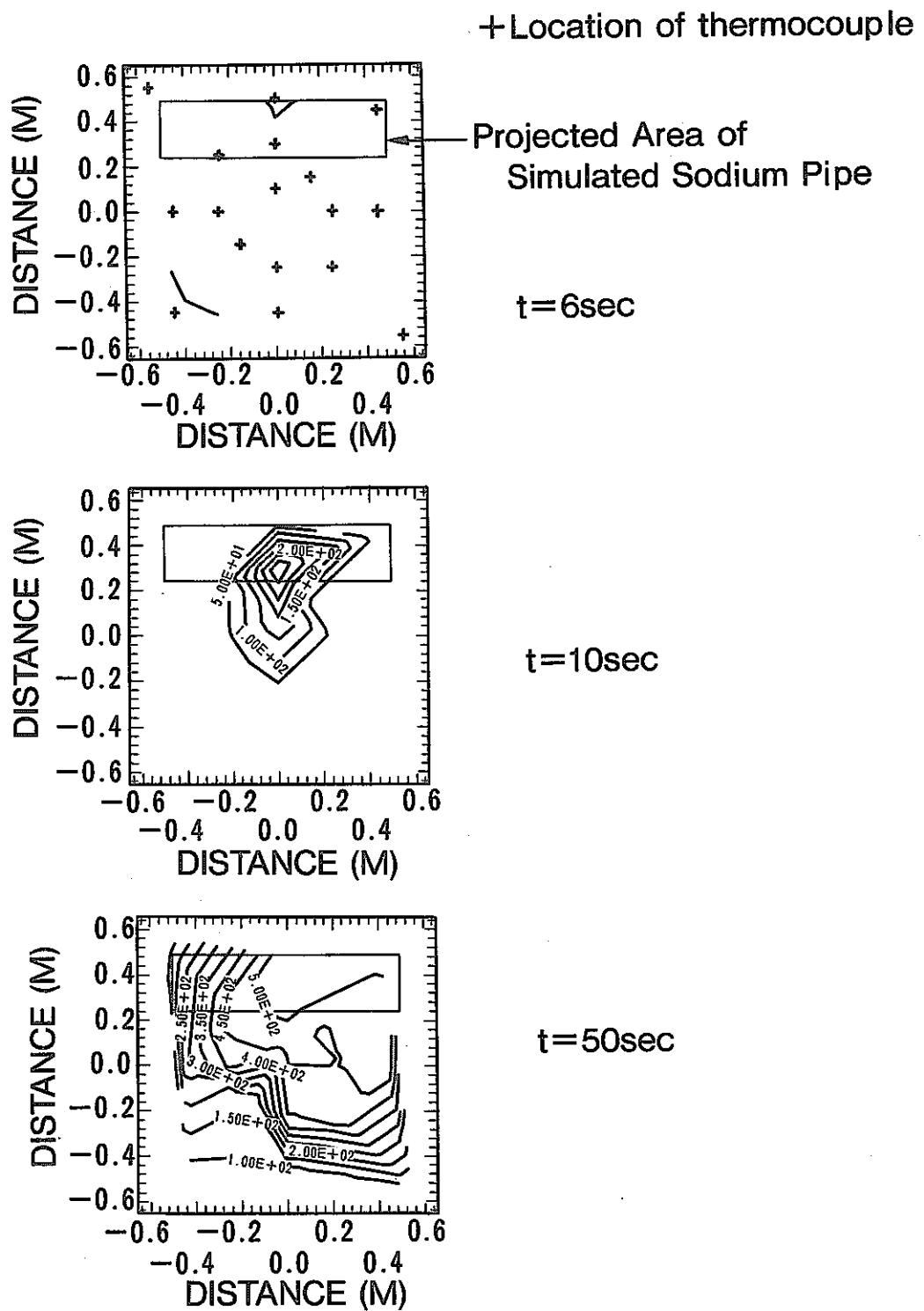


Fig.13 Temperature Distribution of Sodium on Floor Liner and Its Change During Sodium Spill

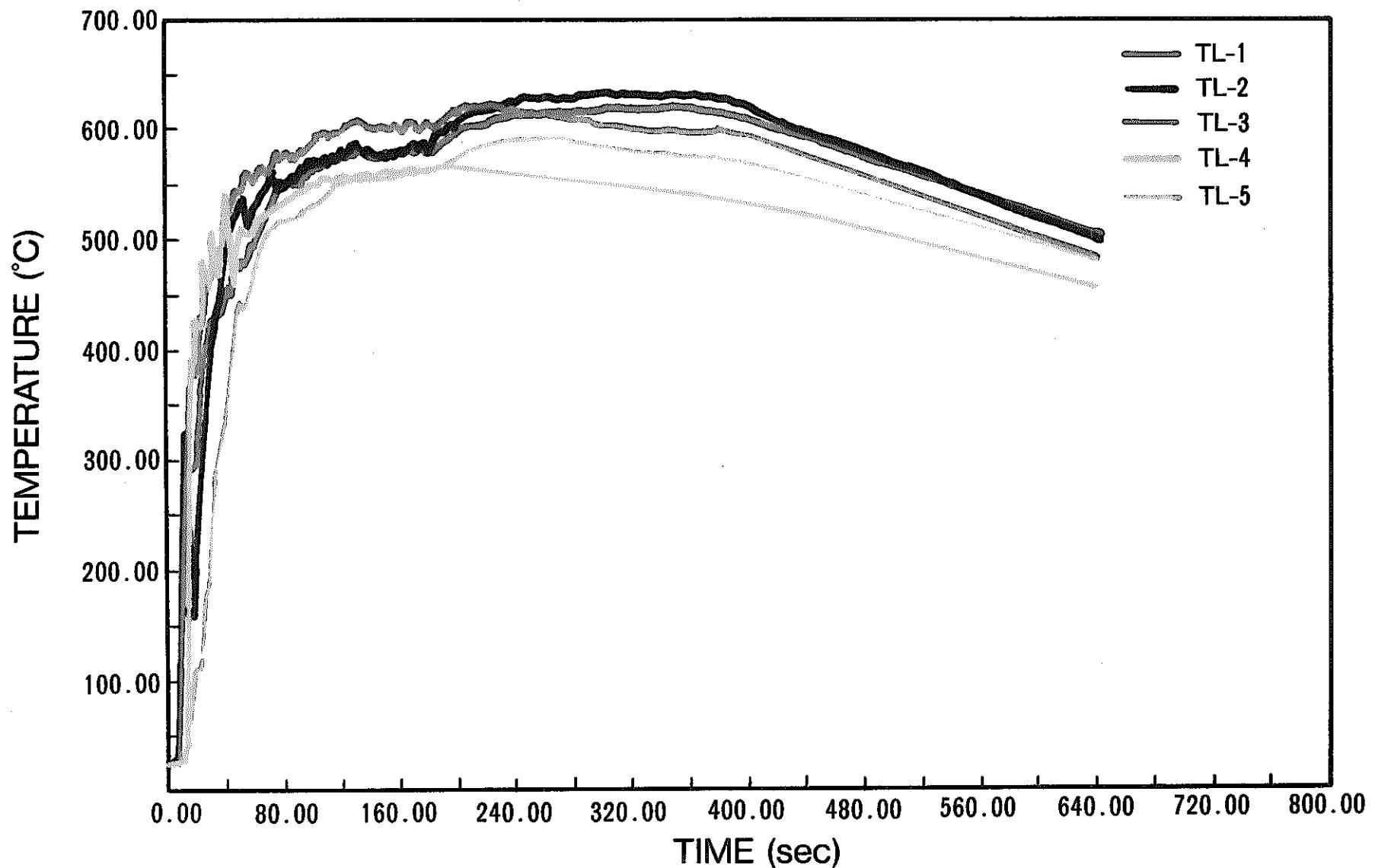


Fig.14 Temperature Change of Sodium
on Floor Liner

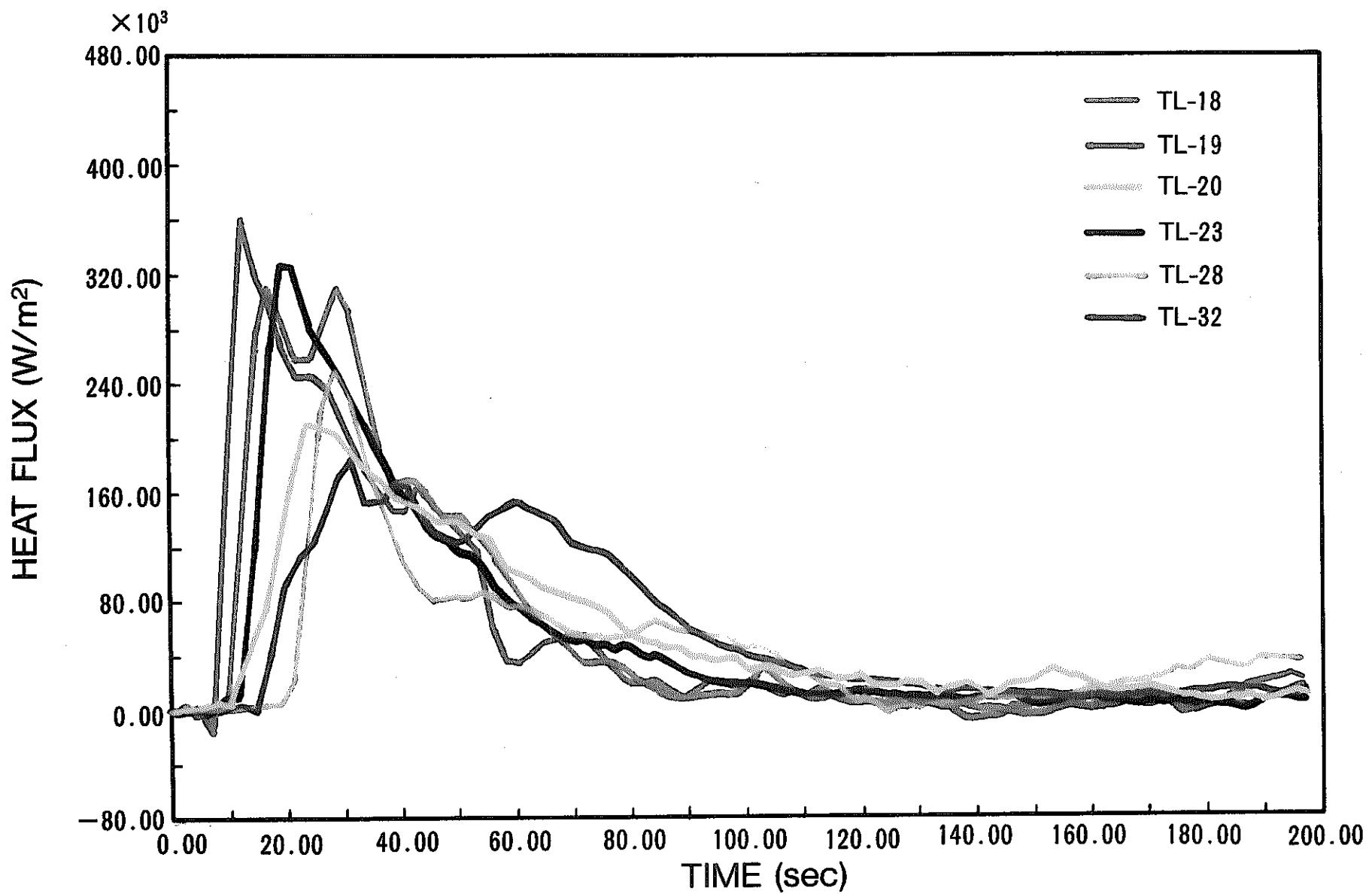


Fig.15 Calculated Heat Flux from Hot Sodium
to Floor Liner

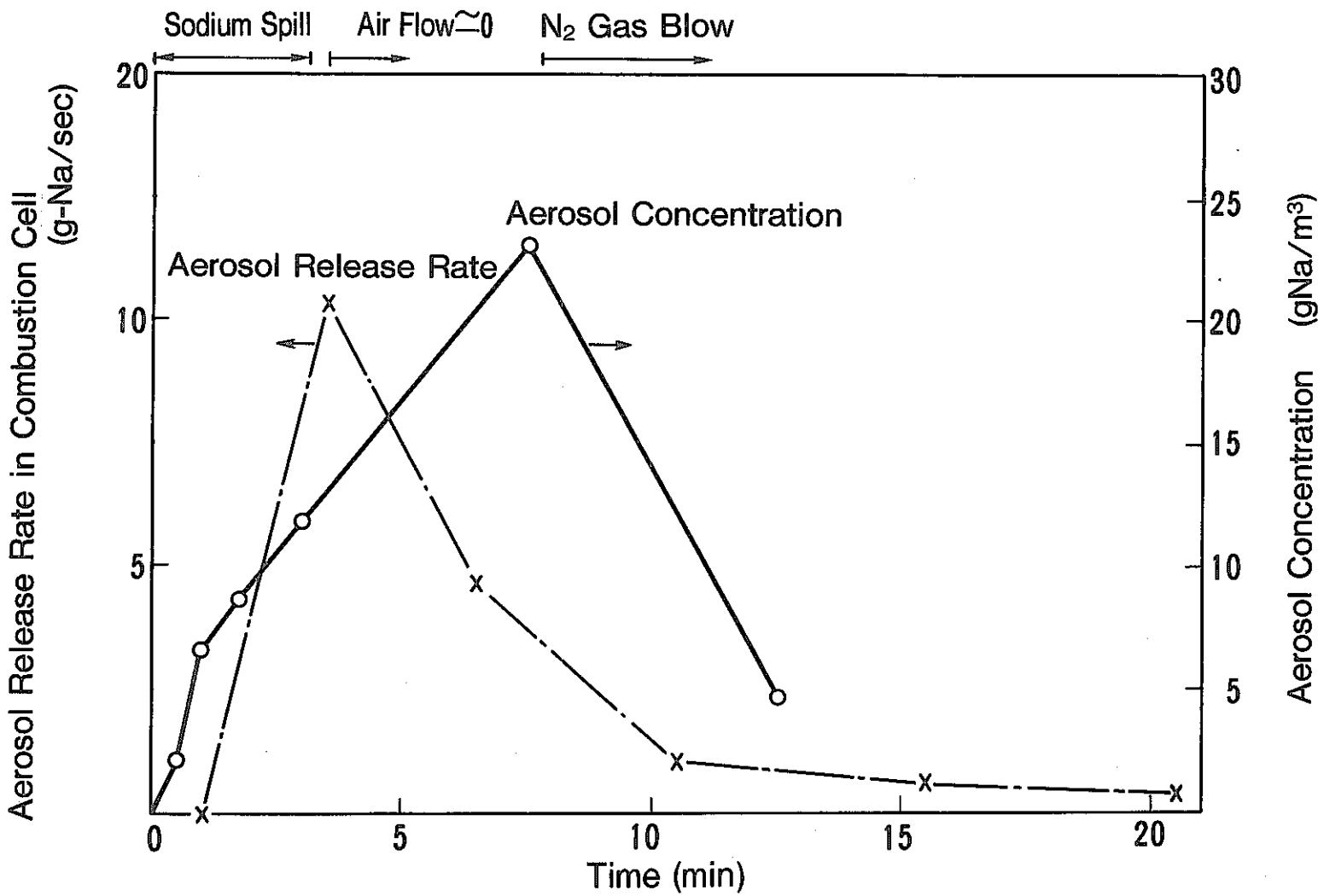


Fig.16 Changes of Aerosol Concentration and Aerosol Release Rate During the Test (in Combustion Cell)

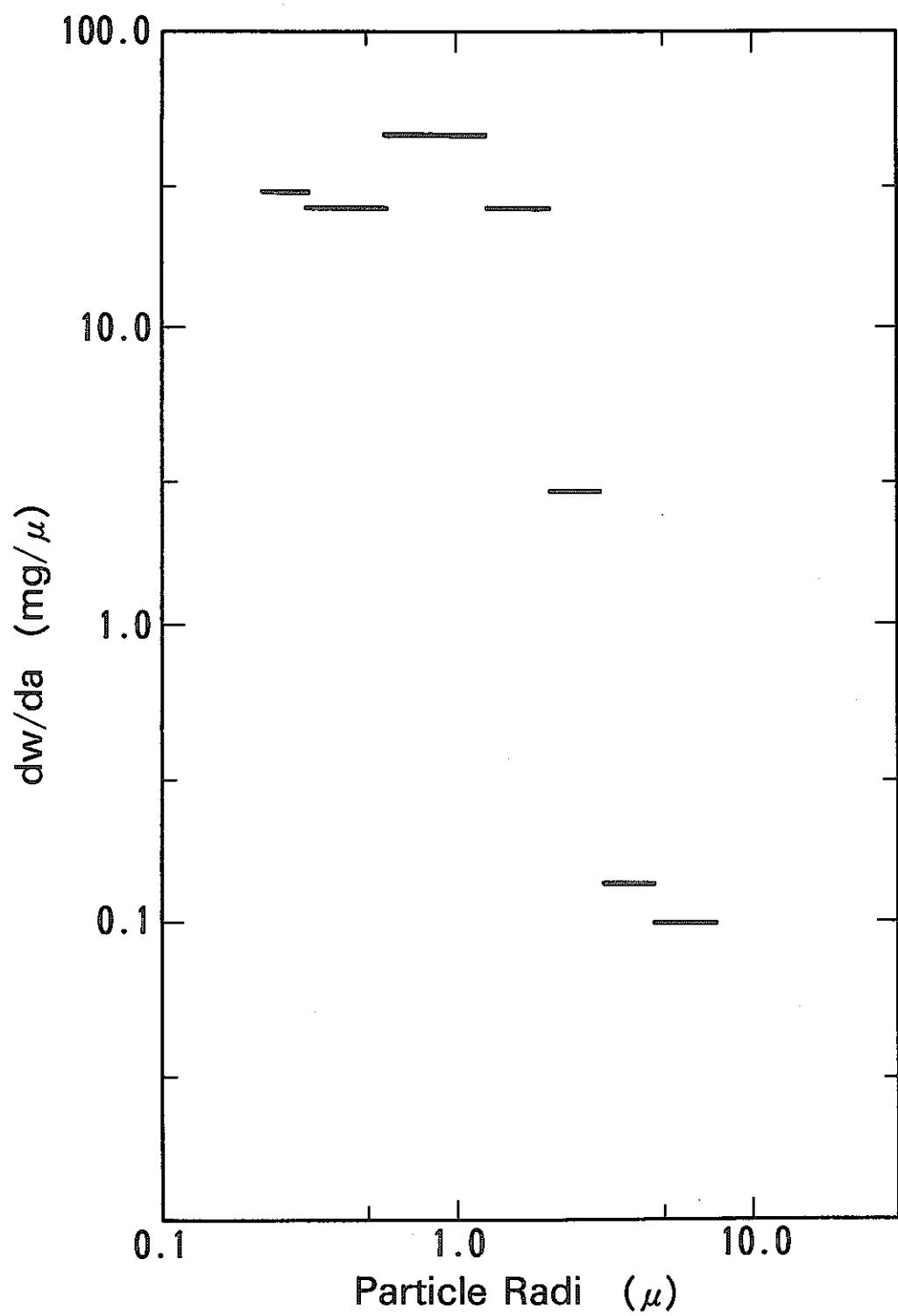


Fig. 17 Mass Distribution of Aerosol Particles

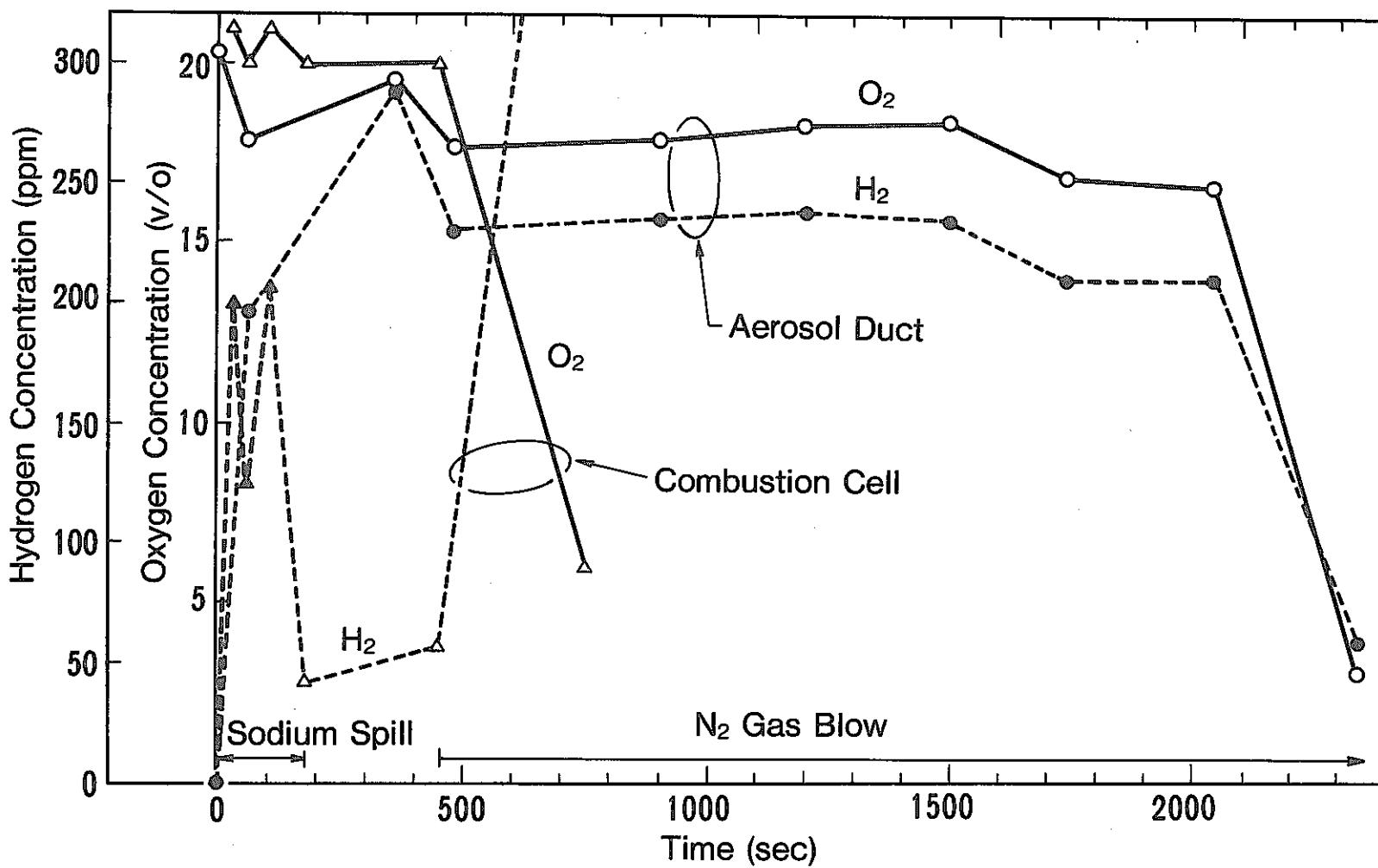


Fig.18 Hydrogen and Oxygen Concentration Changes During the Test

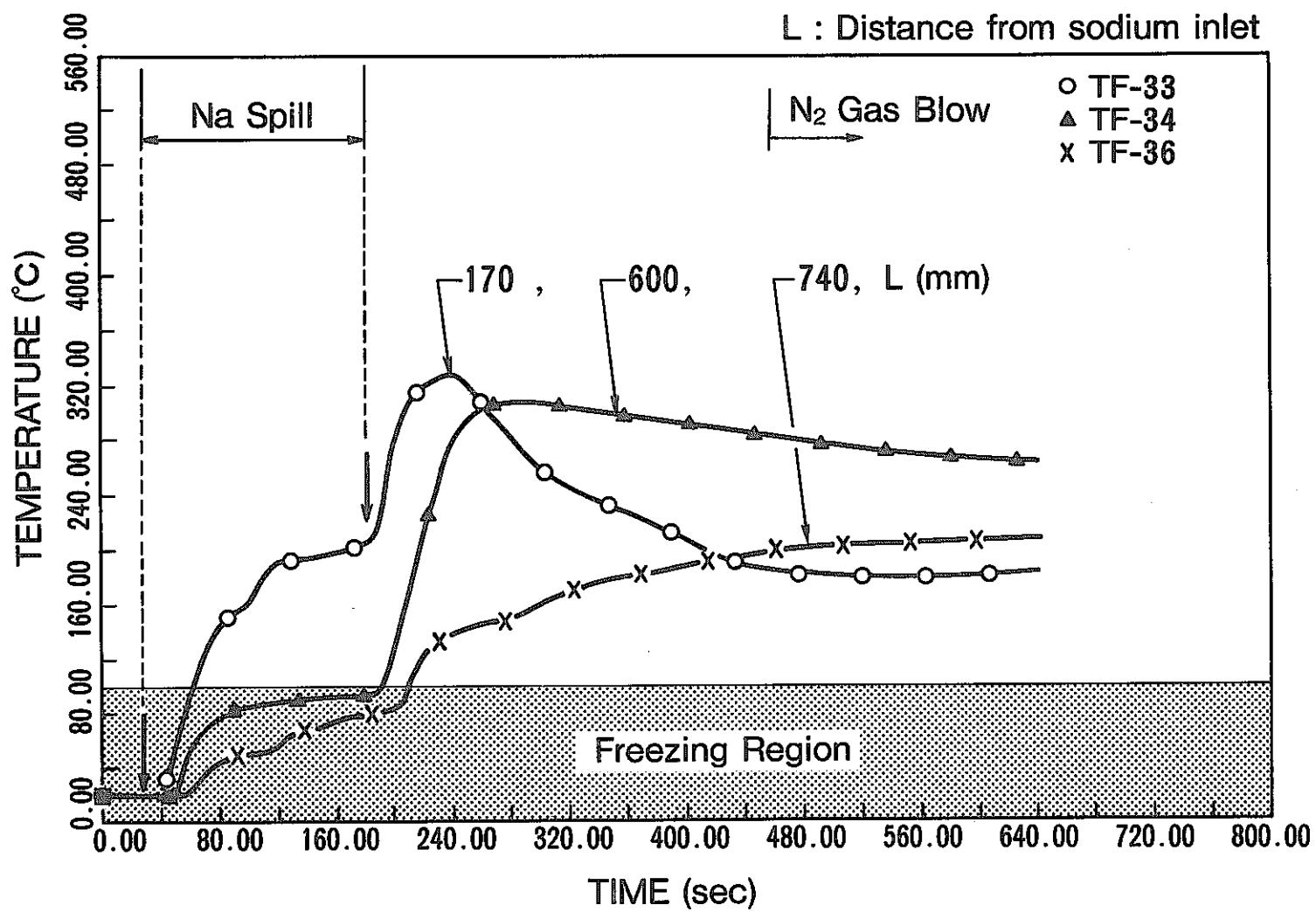


Fig.19 Temperature Change of Liner in Smothering Tank

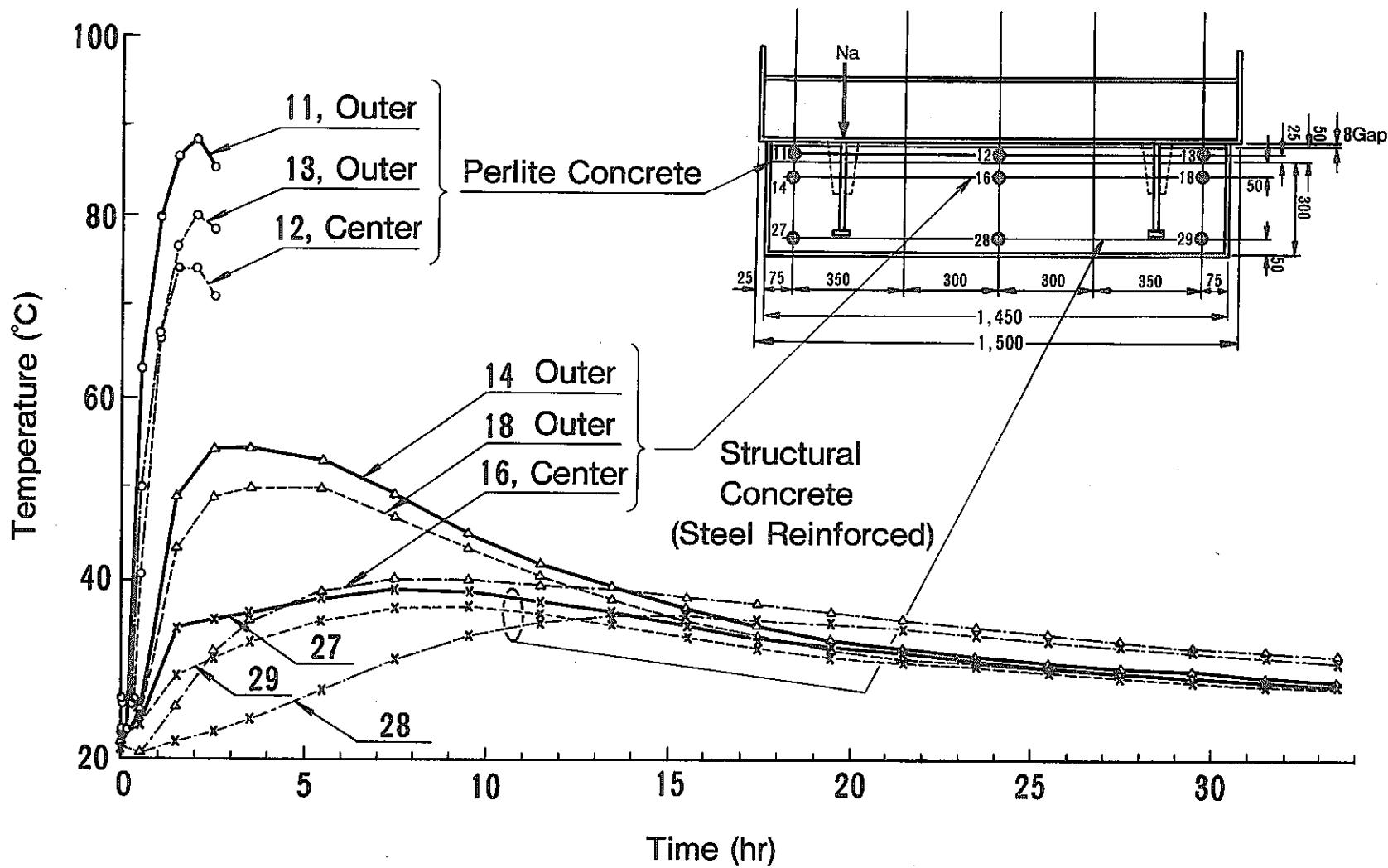


Fig.20 Temperature Changes of Perlite and Structural Concretes in Smothering Tank during the Test

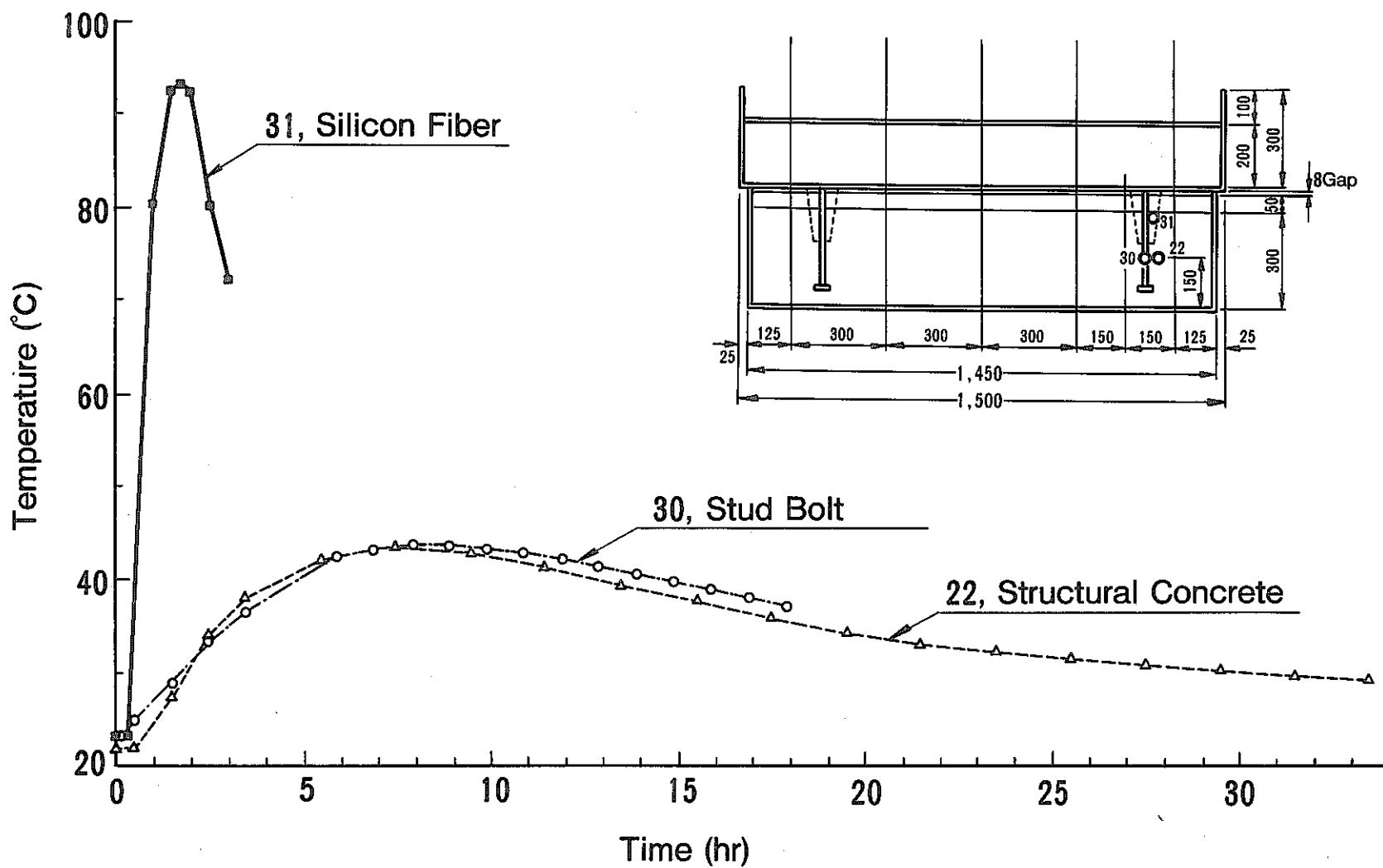


Fig.21 Temperature Changes of Stud Bolt, Silicon Fiber, and Structural Concrete Near Stud Bolt in Smothering Tank

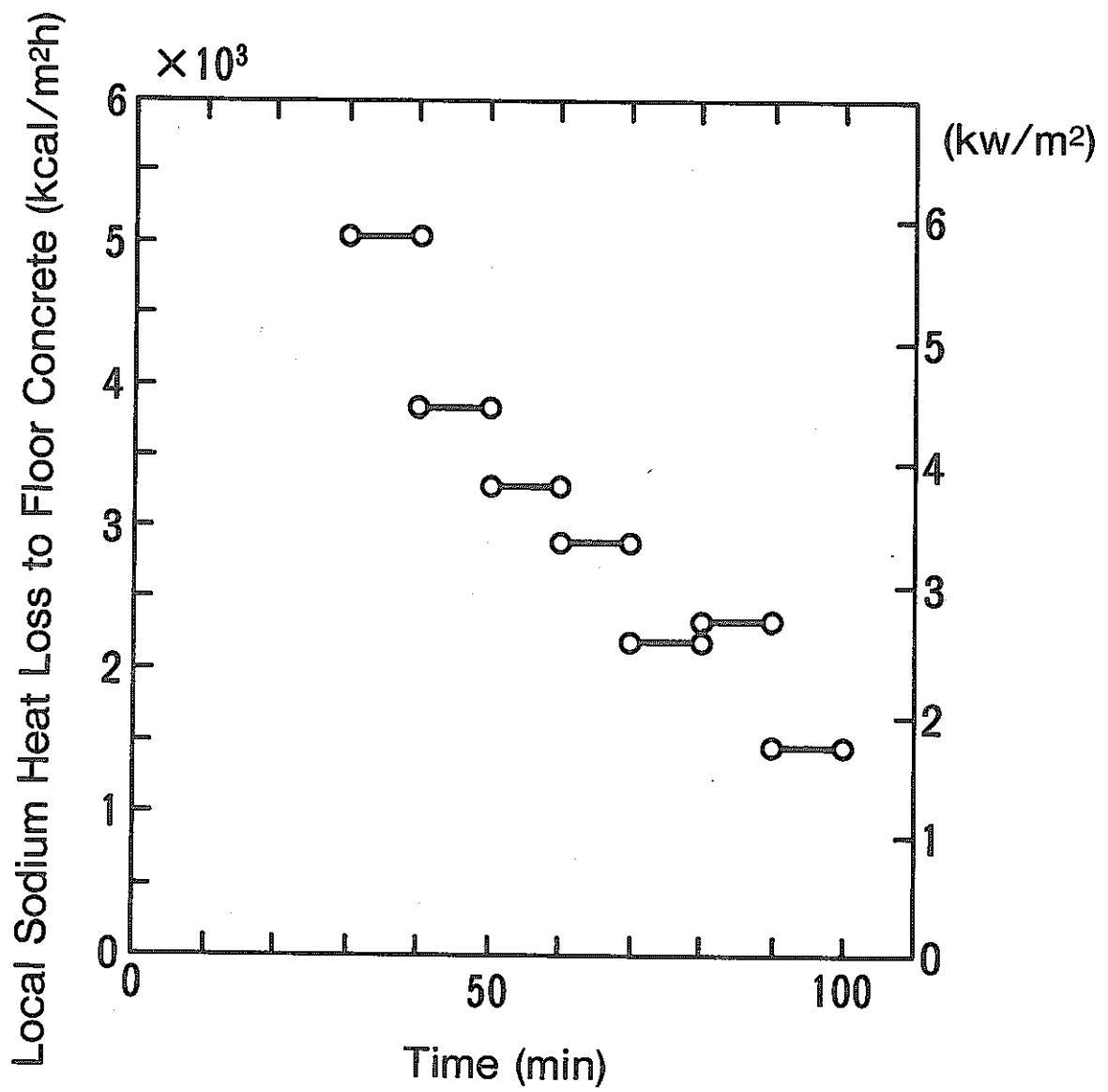


Fig.22 Local Sodium Heat Loss to Floor Concrete

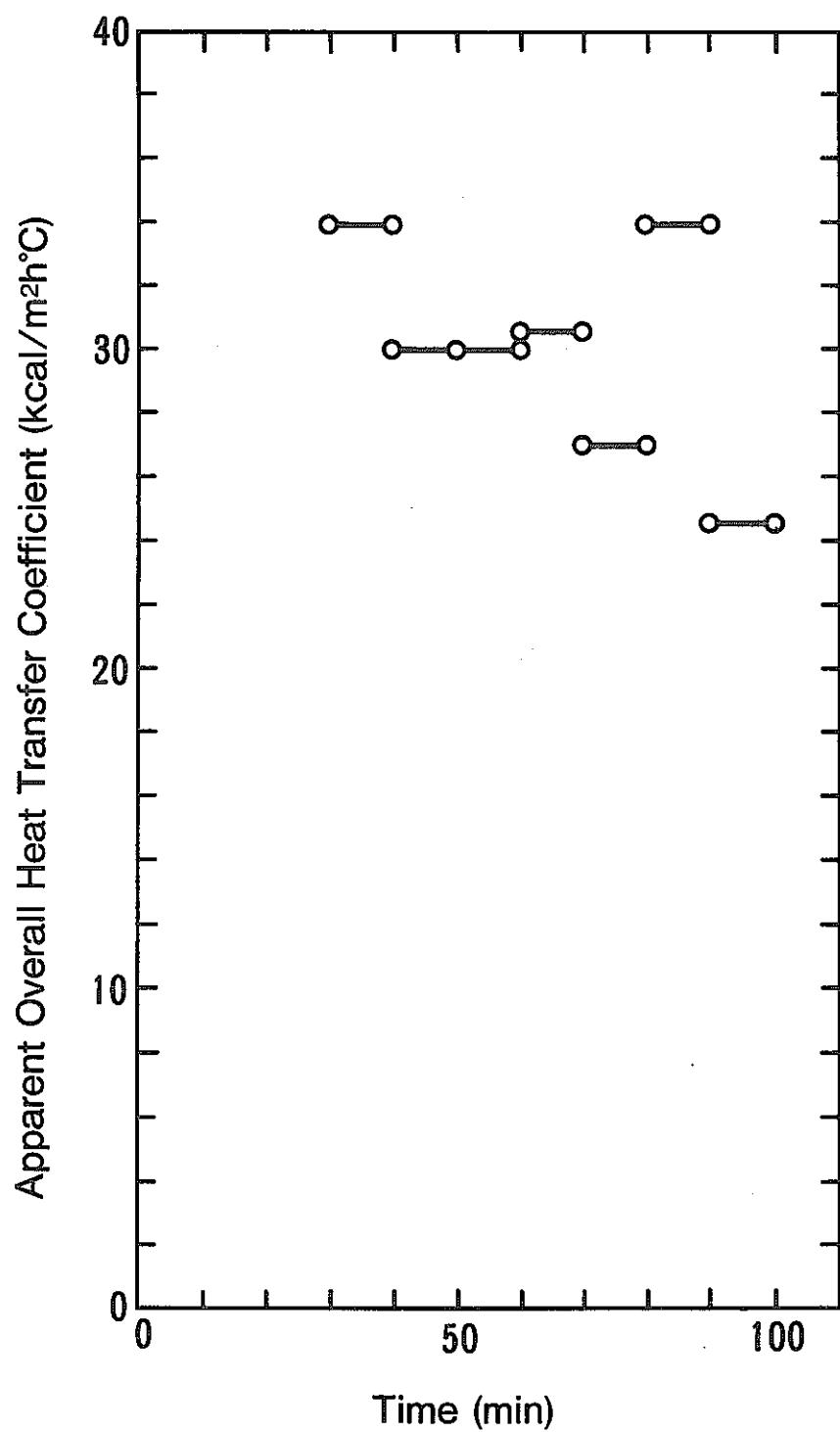


Fig.23 Apparent Overall Heat Transfer Coefficient between Sodium and Perlite Concrete

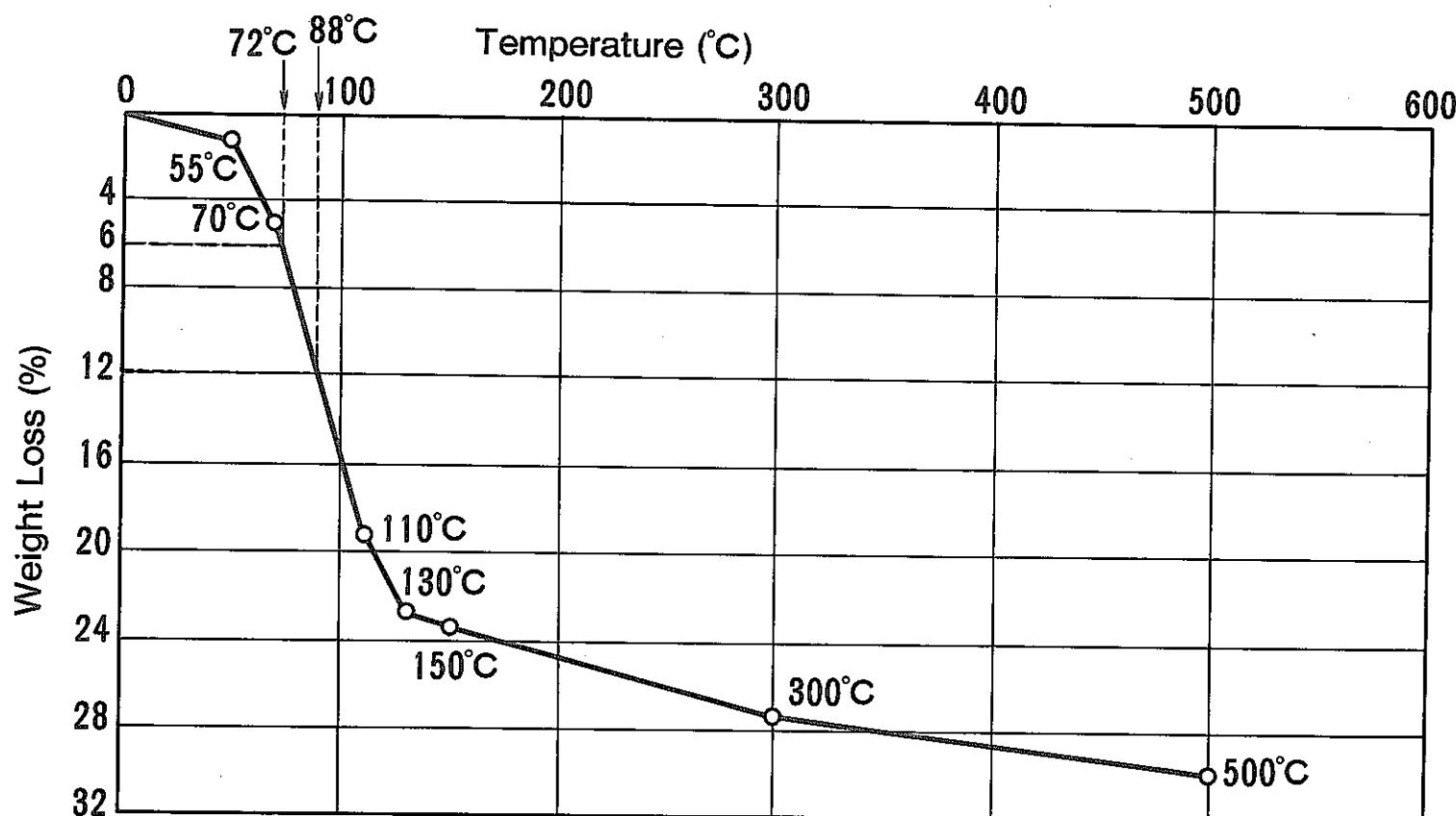


Fig.24 Relation between Temperature and Weight Loss (Perlite Concrete)

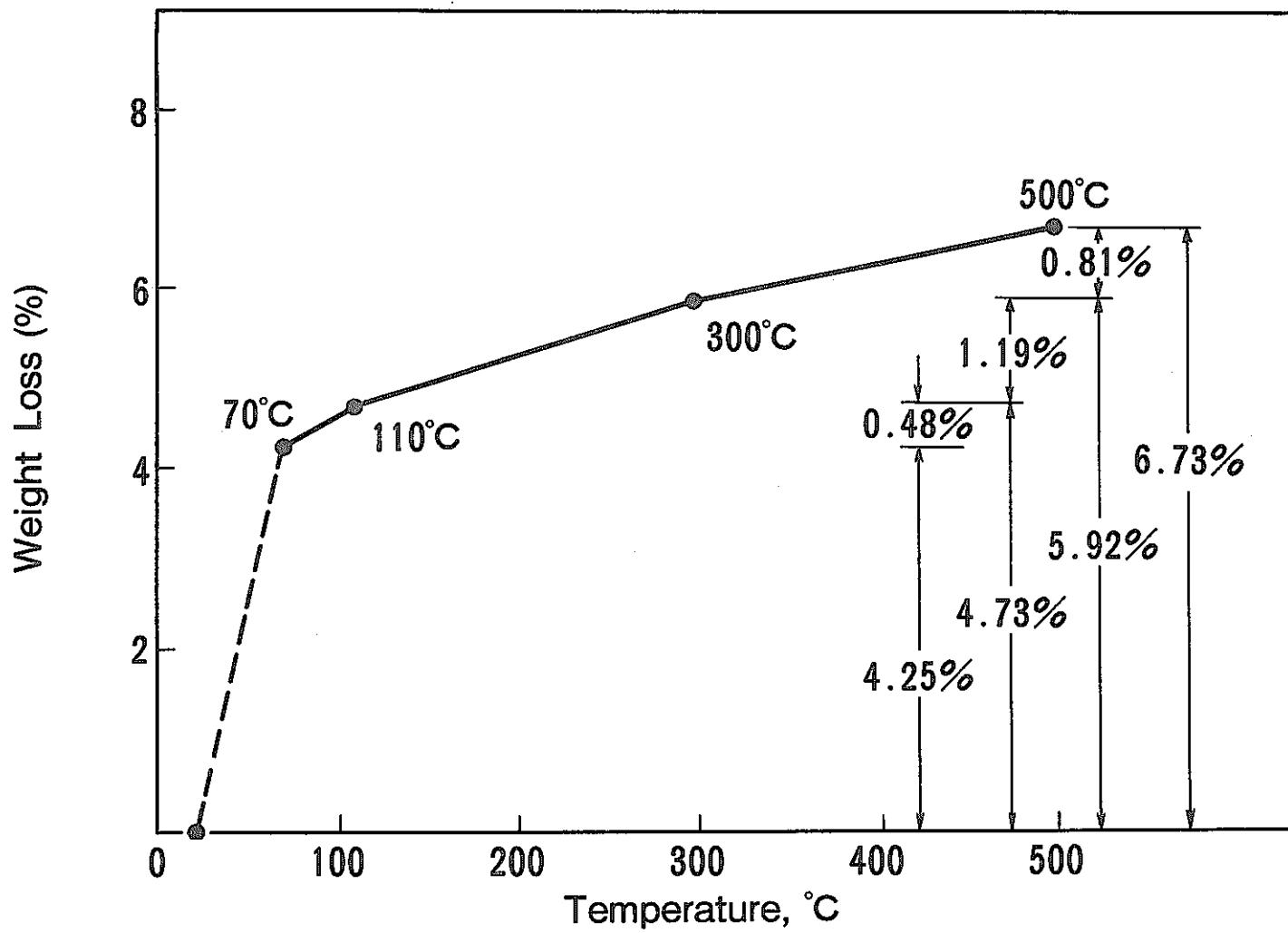


Fig.25 Relation between Temperature and Weight Loss (Structural Concrete)

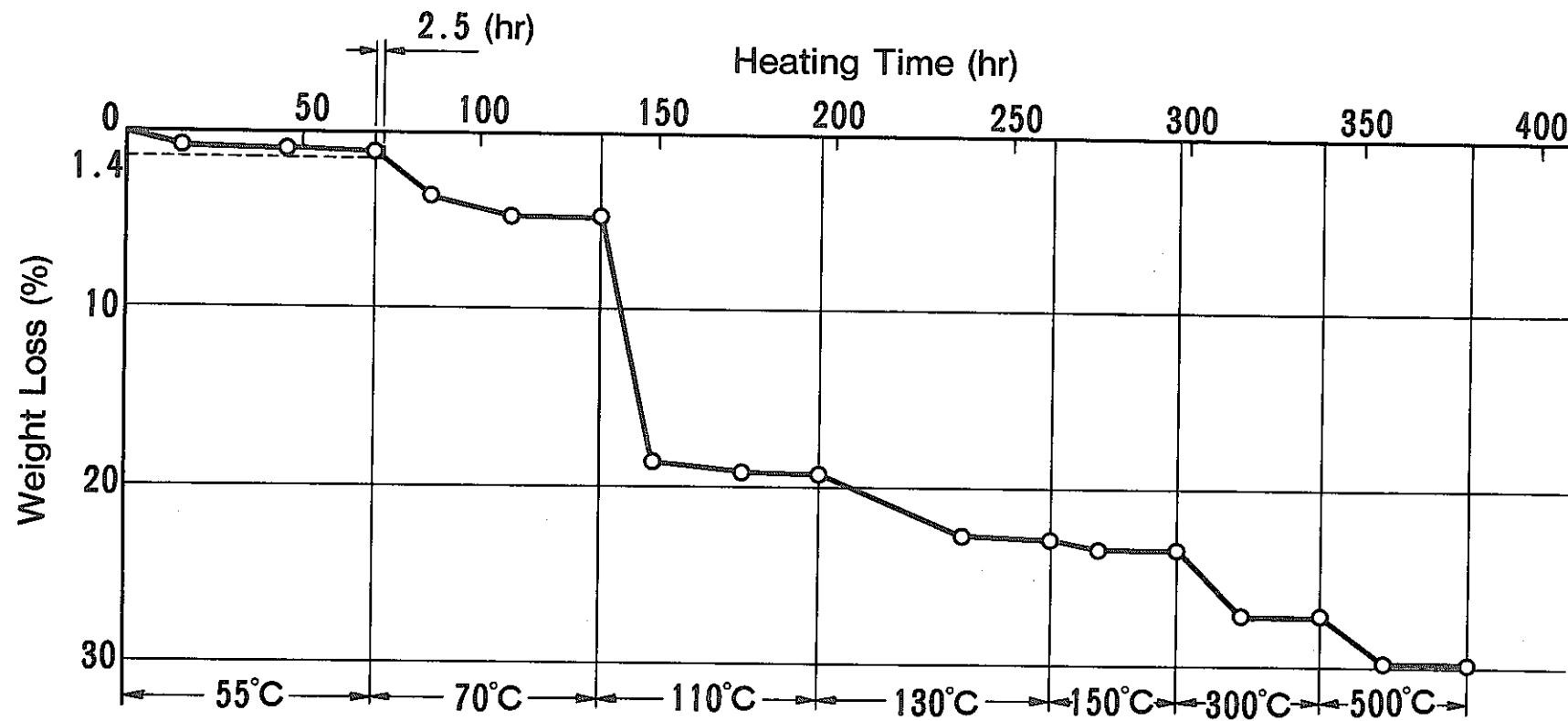


Fig.26 Transient Weight Loss of Perlite Concrete

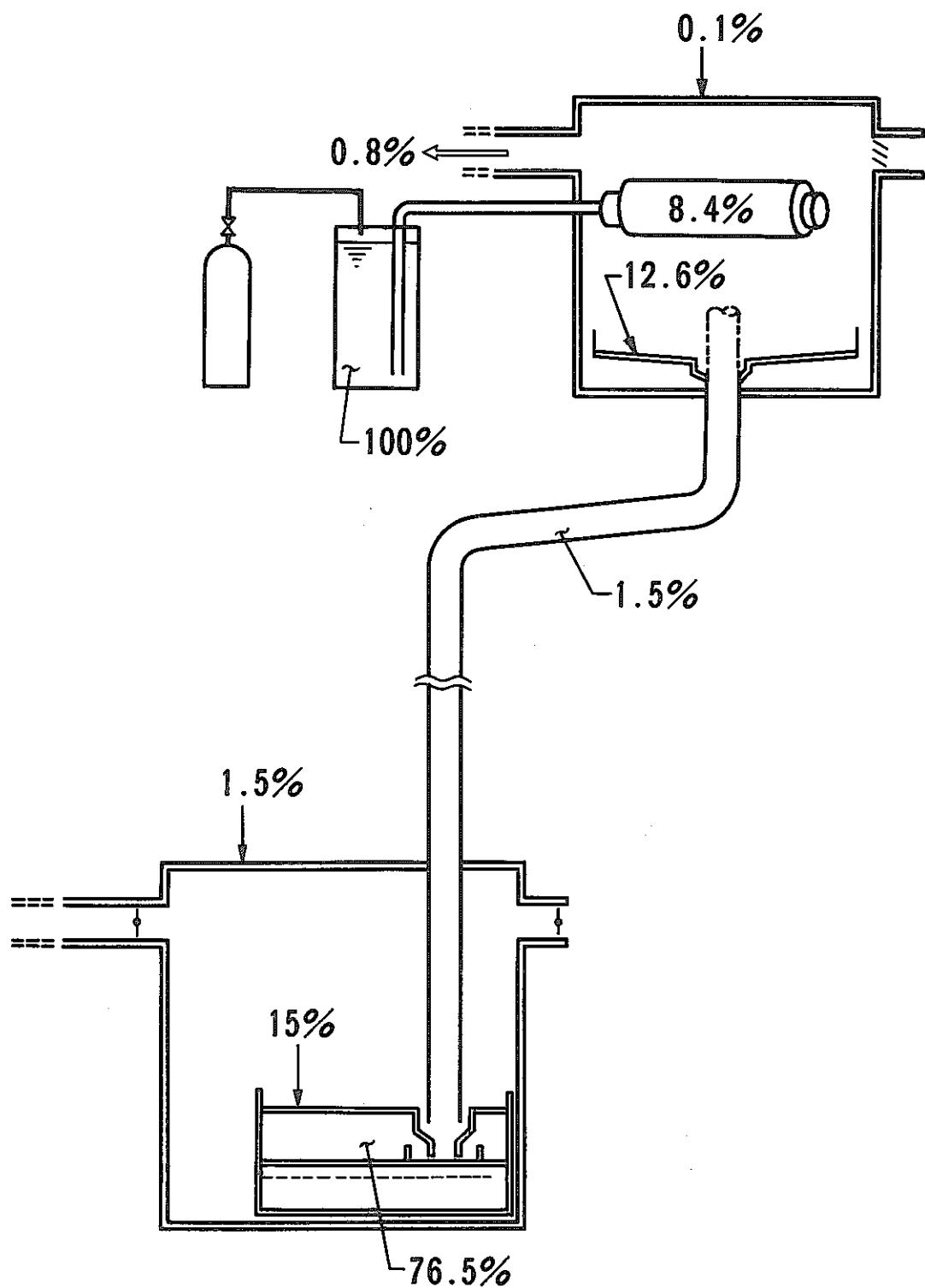


Fig. 27 Post-Test Sodium Distribution in Test Rig

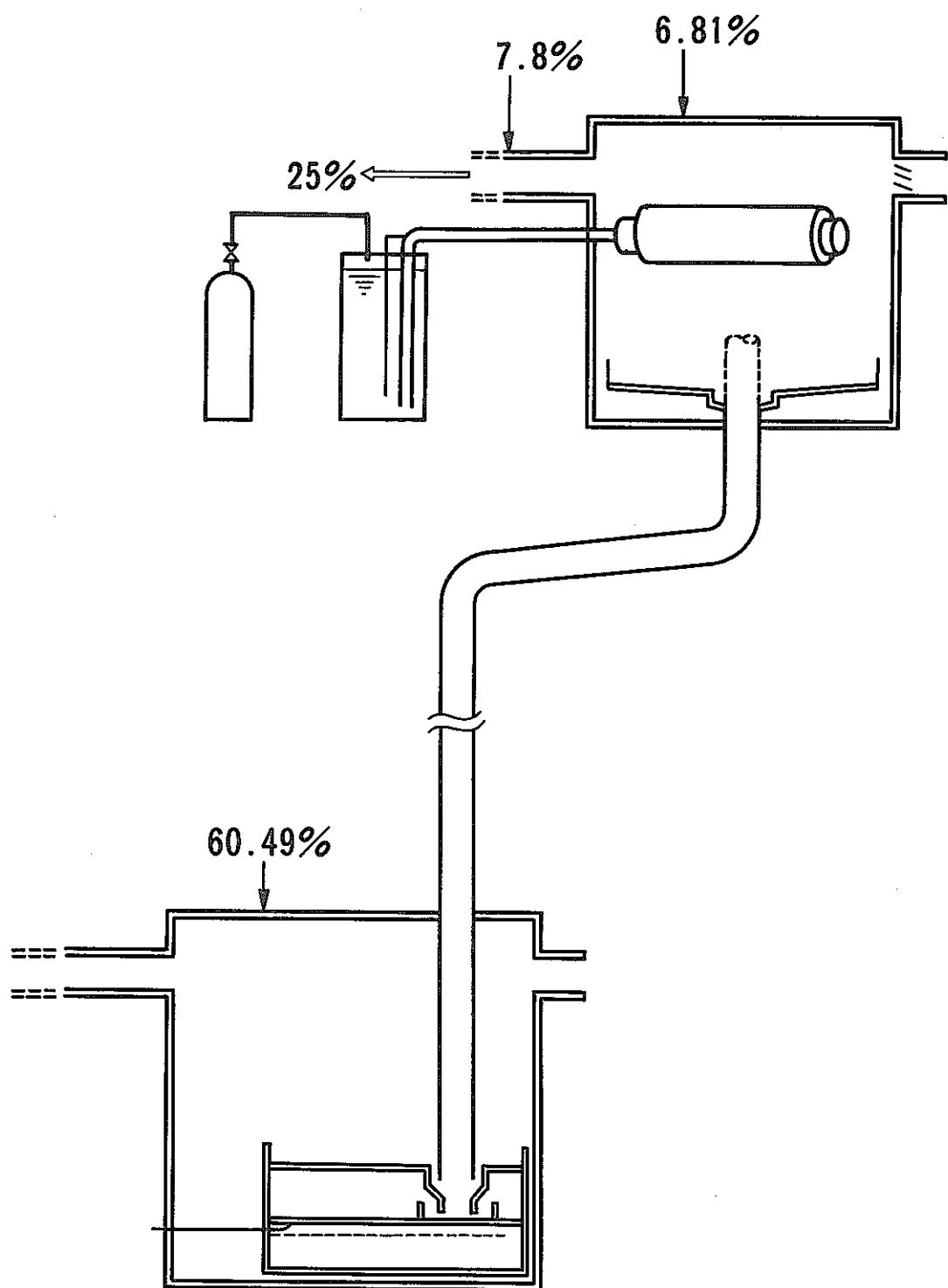


Fig.28 Post-Test Aerosol Distribution in Test Rig

PNC SN941 85-130

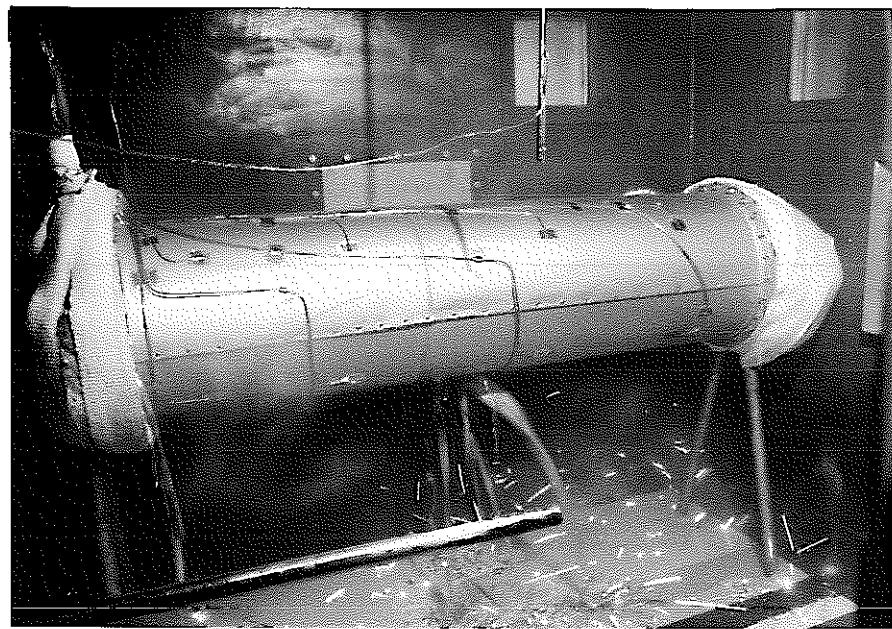


Photo. 1 : Sodium Leakage from Simulated Sodium Pipe

PNC SN941 85-130



Photo. 2 : Simulated Sodium Pipe and Floor Liner in Combustion
Cell after the Test



Photo. 3 : Disassembling of Simulated Sodium Pipe after the Test



Photo. 4 : Solid Sodium in Smothering Tank after the Test

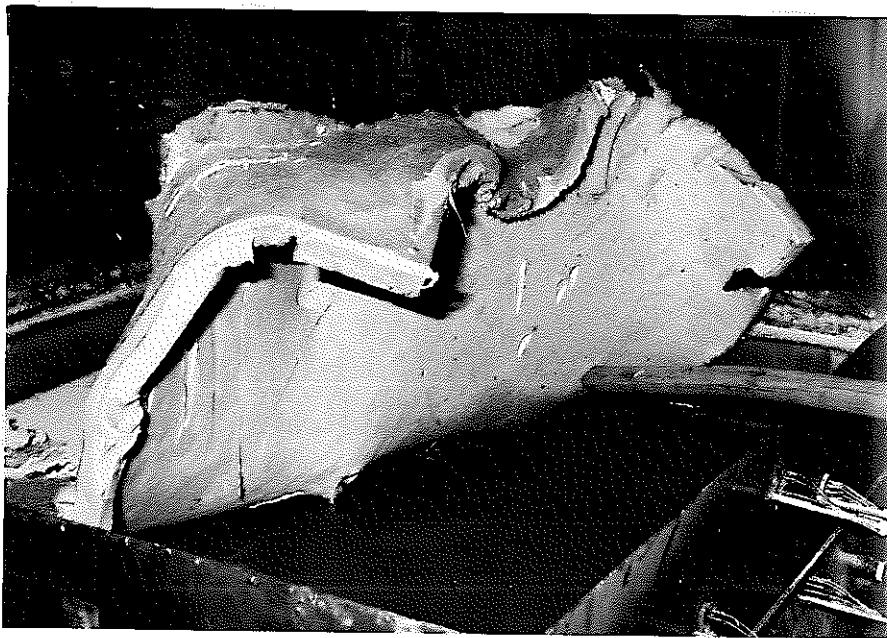


Photo. 5 : Removal of Solid Sodium from Smothering Tank