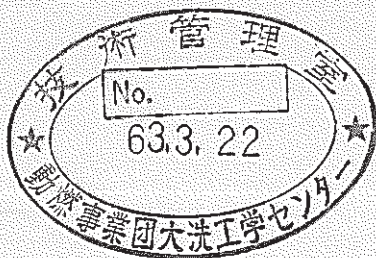


# 広温度・広酸素濃度範囲ナトリウム燃焼試験(1)

ナトリウム燃焼現象確認試験



1988年1月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 88-004
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

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ください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

## 広温度・広酸素濃度範囲ナトリウム燃焼試験(1)

### ナトリウム燃焼現象確認試験

川田 耕嗣,\* 宮原 信哉\*  
広井 博,\* 姫野 嘉昭\*

#### 要 旨

従来の国内外のナトリウム燃焼研究は、原子炉定格運転時等のナトリウム温度を主な対象としてきたため、炉外燃料貯蔵槽や原子炉予熱運転時に於けるナトリウム漏洩燃焼を想定した研究例が少ない。そこで、主に 300℃以下のナトリウムを用いて、スプレー・コラム・プールについて、着火温度、エアロゾル発生開始温度を明らかにするために実施したものである。

ナトリウムスプレー及びナトリウムコラム試験は、ナトリウム漏洩火災基礎試験装置 (SOFT-1)、ナトリウムプール試験は、大規模ナトリウム漏洩火災試験施設の SOLFA-1 試験装置を使用して行った。

試験結果は、次の通りである。

#### (1) ナトリウムスプレー燃焼試験

着火温度は、液滴径に依存する傾向を認めたが、安全を見込むと 160℃以上である。

#### (2) ナトリウムコラム燃焼試験

流入するコラムの本流は着火せず、途中で生じる飛散液滴のみ着火し、本流が床で跳ね返りによって生成された跳ね返り飛沫は 180℃で、床上の落下堆積物は 160℃で着火した。

#### (3) ナトリウムプール燃焼試験

静止液面での着火は、280～315℃で、目視によるエアロゾル発生開始温度は、140～165℃、一旦酸欠状態にして鎮火させた液面の自然再着火は、80℃以上で生じた。

今後、これらの基礎データを基に広温度・広酸素濃度範囲ナトリウム燃焼試験を実施する。



## Sodium Fire Test at Broad Ranges of Temperatures and Oxygen Concentrations (1)

## Effect of Leak Patterns on Ignition Temperatures

K. KAWATA \* S. MIYAHARA\*

H. HIROI \* and Y. HIMENO\*

## abstract

Since sodium leak and fire researches have been performed at high-temperatures simulating an accident during the rated reactor operation knowledge of sodium leak and fire at low-temperatures which may happen at Ex-vessel Storage Tank or during the partial power operation of the reactor was very limited. Therefore, the present test was carried out to clarify the ignition temperatures and the temperature at which aerosol starts to release during sodium spray, column, and pool fires.

Sodium spray and column tests were conducted at Sodium Fire Test Rig (SOFT-1), while sodium pool test was carried out at Sodium Leak Fire and Aerosol Test Rig (SOLFA-1).

The following test results were obtained from these tests.

## (1) Sodium Spray Test

The ignition temperature was 160°C depending upon the droplet diameter of sprayed sodium.

## (2) Sodium Column Test

- 1) Sodium main flow did not ignite, while the scattered sodium droplets ignited.
- 2) The ignition temperature of the main flow rebounded on a pan was 180°C.
- 3) The ignition temperature of deposits on a pan was 160°C.

## (3) Sodium Pool Test

- 1) The ignition temperature of the static pool ranged from 280 to 315°C.
- 2) Temperature at which aerosol starts to release was determined to be 140 to 160°C by visual inspection.
- 3) After extinguished artificially by closing a lid, sodium reignited at temperatures higher than 80°C when the lid was reopened.

---

\* Plant Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC

## 目 次

緒 論 .....	4
1. N a スプレー燃焼試験 .....	5
1.1 目 的 .....	5
1.2 試験装置と方法 .....	5
1.3 結果と検討 .....	5
2. N a コラム燃焼試験 .....	7
2.1 目 的 .....	7
2.2 試験装置と方法 .....	7
2.3 結果と検討 .....	8
3. N a プール燃焼試験 .....	9
3.1 目 的 .....	9
3.2 試験装置と方法 .....	9
3.3 結果と検討 .....	10
結 論 .....	13
参考文献 .....	15

List of Figures

Fig.1	Test Rig of Sodium Spray Combustion .....	20
Fig.2	Test Rig of Sodium Column Combustion .....	21
Fig.3	Results of Sodium Column Test .....	22
Fig.4	Test Rig of Sodium Pool Combustion .....	23
Fig.5	Test Rig of Sodium Column Flow into Sodium Pool .....	24
Fig.6	Test Rig of Sodium Droplet Splash into Sodium Pool .....	25
Fig.7	Sodium Aerosol Release Temperature and Sodium Ignition Temperature .....	26
Fig.8	Combustion Duration vs Pool Depth .....	27
Fig.9	Sodium Aerosol Release Rate vs Pool Depth .....	28
Fig.10	Average Sodium Combustion Rate vs Pool Depth .....	29

List of Tables

Table 1	Test Conditions of Sodium Spray Test .....	16
Table 2	Test Conditions of Sodium Column Test .....	17
Table 3	Test Conditions of Sodium Pool Test .....	18
Table 4	Sodium Ignition Temperature in Air .....	19

## List of Photographs

Photo. 1	Spray Nozzle Test ( with Water )	29
Photo. 2	Spray Nozzle Test ( with Sodium )	29
Photo. 3	Spray Nozzle Test ( with Sodium )	29
Photo. 4	Sodium Spray Test ( Not Combustion )	30
Photo. 5	Sodium Spray Test ( Combustion )	30
Photo. 6	Sodium Column Test (Sodium Temp. =160 °C、Height=5.0m 、 side view)	31
Photo. 7	Sodium Column Test (Sodium Temp. =160 °C、Height=5.0m 、 Top view of catch pan )	31
Photo. 8	Sodium Column Test (Sodium Temp. =170 °C、Height=5.0m 、 side view)	32
Photo. 9	Sodium Column Test (Sodium Temp. =170 °C、Height=5.0m 、 Top view of catch pan )	32
Photo. 10	Sodium Column Test (Sodium Temp. =175 °C、Height=5.0m 、 side view)	33
Photo. 11	Sodium Column Test (Sodium Temp. =175 °C、Height=5.0m 、 Top view of catch pan )	33
Photo. 12	Sodium Column Test (Sodium Temp. =180 °C、Height=5.0m 、 side view)	34
Photo. 13	Sodium Column Test (Sodium Temp. =180 °C、Height=5.0m 、 Top view of catch pan )	34
Photo. 14	Sodium Column Test (Sodium Temp. =200 °C、Height=5.0m 、 side view)	35
Photo. 15	Sodium Column Test (Sodium Temp. =200 °C、Height=5.0m 、 Top view of catch pan )	35
Photo. 16	Sodium Column Test (Sodium Temp. =260 °C、Height=5.0m 、 side view)	36
Photo. 17	Sodium Column Test (Sodium Temp. =260 °C、Height=5.0m 、 Top view of catch pan )	36
Photo. 18	Test Rig of Sodium Pool Test	37
Photo. 19	Typical Sodium Pool Test Except RUN-5 Pool	37
Photo. 20	Sodium Pool Test ( RUN-5)	37
Photo. 21	Sodium Pool Test (Na <sub>2</sub> O、Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 、Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 、NaOH)	38
Photo. 22	Sodium Pool Test (Reignited)	38
Photo. 23	Drop Test Rig of Sodium Column into Sodium Pool	39
Photo. 24	Drop Test of Sodium Column into Sodium Pool ( at ignition )	39
Photo. 25	Drop Test of Sodium Column into Sodium Pool ( at extinction )	39
Photo. 26	Drop Test Rig of Sodium Splash into Sodium Pool	40
Photo. 27	Drop Test Rig of Sodium Splash into Sodium Pool ( at test )	40

## 結 論

従来、国内外のナトリウム（以下、Naと略す）燃焼研究は、設計基準事故とその際の事象推移を対象に安全防護設備の機能をいかに確保するか、また事故をいかに早期に終息させるか、などの観点から進められて来た。このため、研究対象としたNa温度は、原子炉の定格運転時もしくはそれ以上（400℃以上）であった。しかし、昨今、より高い安全性の確保と設計の合理化を目指して、これら以外の低温領域に対する研究ニーズが生じて来ている。具体的には、炉外燃料貯蔵槽や使用済燃料を炉内から搬出する際の燃料輸送ポットからのNa漏洩事故並びに原子炉予熱運転時のNa漏洩事故である。これらの事故では、Na温度が200～250℃と低いことから着火しづらく、そのため燃焼に伴う発熱量も低いこと、また一次系の不活性雰囲気では放射性物質の飛散原因となるエアロゾルの発生速度が低いことなどが予測される。しかし、これまでの設計では、関連する研究例が極めて少ないことから、いずれについても従来のプール燃焼解析コードをそのまま低温領域にまで適用した相対的に大きな値を使用している。

より現実的な事故影響評価と設計の合理化のためには、従来過大な保守性が見込まれていたこのような低温Naの燃焼とそれに伴う発熱量及びエアロゾル発生速度など試験データを基に正確に把握する必要がある。そこで、本研究では第1段階として、主に300℃以下のNaを用いたNaスプレー、Naプール、Naコラム（棒状）に関する試験を行い、低温Naのエアロゾル発生開始温度、着火温度などを明らかにした。



## 1. Na スプレー 燃焼試験

### 1.1 試験目的

Na スプレー燃焼試験は、空気雰囲気におけるNa着火温度を求めるために行った。

### 1.2 試験方法

試験には、Fig. 1に示すNa漏洩火災基礎試験装置(SOFT-1)を使用した。予めNaを充填したNa供給ポットをこのSOFT-1試験セル天井の上に設置し、ヒータでこれを昇温して、所定の温度に達したところでノズル途中に設けたNa弁(空気作動弁)を開いて、セル内下方に向けてスプレーを放出させた。

Fig. 1の右端にNaスプレー・ノズルを示す。スプレーの着火の有無は、試験セル側面に取りつけた高速度カメラとセル上部のビデオカメラを用いた間接的およびセル側壁に取りつけたガラス窓からの直接の目視によって判定を行った。

主な条件をTable 1に示す。

### 1.3 結果と検討

始めに、スプレーノズルに対する水及びNaを使用したスプレーの噴出状況の確認と液滴径の測定を行った。液滴のサンプリング方法は、他の類似な試験<sup>(1)</sup>を行う際に開発した方法で、流動パラフィン入りの上向きを受け皿をスプレー直下に置き、これに液滴を回収する方法である。

水試験で回収した水滴をPhoto. 1に示す。水滴形状はほぼ球形で、液滴径は4mmが最大である。同様に約150℃のNaで得た液滴をPhoto. 2及び3に示す。液滴形状は水と異なって球形とはならず、針状の不定形をなしている。これらの液滴を球形と見做すと、径はおおよそ1mm前後である。なお、スプレー噴出状況は、後に述べる写真でも見られるように、コーン拡がり角度内での不均一液滴分布が観察されたが、試験の目的を阻害するほどではない。

これらに続いて、本格的な空気雰囲気でのNaスプレー試験を行った。そこでは、Na温度を150℃から10℃ステップ毎に上昇させて、1回毎に着火の有無を観

察した。結果では、250℃で始めてスプレーが床に落下する直前、すなわち床の直上での着火を認めたが、床への落下後は直ちに鎮火した。Photo. 4 及び 5 に着火状況を示す。

また、毎回スプレー状のNaを噴出させ終わった後に、スプレーノズル先端に残留するNaの除去のため、Fig. 1の右端に示したノズルの分岐配管から窒素ガスによるガス吹きを行った。その際、予定はしていなかったことではあるが、Na温度160℃以上の時にガス吹きによって生成される飛散液滴の着火を認めた。この場合の液滴は上述したスプレーより微細で、径も明らかでないが、参考データとして後の議論に使用する。

これらより、スプレーの着火下限温度は250℃、微細液滴ではこれが160℃である。

## 2. Naコラム燃焼試験

### 2.1 試験目的

Naコラム燃焼試験は、3%酸素濃度雰囲気及び空気雰囲気において、Naをコラム状（棒状）に落下させた時のNa着火下限温度と床の跳ねかえり（リバウンド）飛沫の着火下限温度を求めるために行った。

### 2.2 試験方法

Naコラム燃焼試験には、前述のNaスプレー燃焼試験と同様に、装置としてFig. 2に示す配置でSOFT-1を使用した。Naコラムは、Fig. 2の右端に示すコラムノズルにより発生させ、ノズル途中に設けた弁（空気作動弁）によってその流出開始および停止を操作した。

試験ではコラムノズルから床までの距離をパラメータとしたが、これを効率的に行うために、床の代わりに落下距離を4段階（0.5、1.0、1.5、2.0m）に変更することの可能な多段の受皿を設けた。各段の受皿は水平方向に回転できるように設計しており、1回の試験では特定の段のみをコラムノズル直下にまで回転させてセットし、次の試験では別の段を回転させて同様にコラムノズル直下にセットさせ、このような操作を繰り返すことで次つぎと試験を行うことが出来る。

Naの着火の有無は、試験セル側面とセル上部のビデオカメラを用いた間接的なおよびガラス窓を介した直接的な目視で判断した。試験時の雰囲気酸素濃度3%時には、酸素濃度をガスクロマトグラフとジルコニア式酸素濃度計で測定しつつ窒素ガスを試験セル内に封入し、更に内部の濃度を均一化させるため機械的な攪拌も行った。

主な試験条件をTable 2に示す。落下距離の5mと7m（「もんじゅ」二次系に繋がるNa配管の最大高さ）は、コラム流が床上に衝突する時の衝突速度が、これらの高さから落下するコラム流と同一となるようにノズル先端での初速度を与えたものである。

## 2.3 結果と検討

### (1) 3%酸素濃度雰囲気

試験は、Na温度260℃と530℃で行ったが、いずれの条件でもコラム本流、床上での跳ね返り飛沫ともに着火は認められずNaエアロゾルだけが発生した。

### (2) 空気雰囲気

結果をFig. 3に示す。コラム流が低温であるために、落下すると火山のクレイターのような落下体積物が床上（すなわち受皿）に形成されるが、この落下堆積物の着火下限温度が160℃であった。また、コラム流が床で跳ね返る際に生成される跳ね返り飛沫の着火下限温度は180℃であった。Naコラム本流の着火は、試験条件の範囲では認められなかった。

Photo. 6～17に落下距離5mのときの各温度における燃焼状態を示す。これらの中で、Photo. 11、13、17は、落下堆積物が燃焼している状況時又は燃焼後の状況を、Photo. 12、16は跳ね返り飛沫が着火した状況を、その他の写真は着火も燃焼も生じていない状態を示す。

### 3. Naプール燃焼試験

#### 3.1 試験目的

Naプール燃焼試験の目的は、空気雰囲気中に於いて次の諸項目に関する定性的及び半定量的なデータを求めることにある。

- (1) 自然着火温度とエアロゾル発生開始温度
- (2) 燃焼持続時間（又は時間平均燃焼速度）とクラストによる燃焼抑制効果
- (3) エアロゾル発生割合
- (4) 機械的外乱並びに燃焼生成物を加えた場合の着火温度
- (5) 自然再着火温度
- (6) コラム落下流が流入した場合の着火温度
- (7) Na飛沫の落下がある場合の着火温度

#### 3.2 試験装置と方法

上の3.1節で述べたNaプール燃焼に関する試験項目の内、(1)～(5)まではFig. 4に示すSOLFA-1の下部セル内にクリーンハウスを設置して実施した。試験開始前のクリーンハウスの状況をPhoto. 18に示す。

試験では、クリーンハウス内に上蓋を載せたNa燃焼ポットを置き、その内部のNaを加熱して所定の温度に達したところで上蓋を取り除きNa自由液面を雰囲気空気に接触させた。燃焼によって生じたNaエアロゾルは、Photo. 18にも見られるクリーンハウス上部の簡易ダクトを経て大型排煙廃液処理装置に排気した。Na自由液面を雰囲気空気に曝した場合の着火の有無は、ビデオカメラによる間接的な目視によった。エアロゾル発生量は、発生した殆どのエアロゾルが大型排煙廃液処理装置の循環水中に回収されていることから、この循環水の一部を採取して標準塩酸液で中和滴定することによって求めた。

上に述べた以外のNaプール燃焼に関する試験項目の内、3.1節で述べた(6)のコラム落下流が流入した場合の着火温度はSOFT-1を用いてFig. 5に示すような構成で調べた。Photo. 23に試験状況を示す。試験方法は既に述べたNaコラム燃焼試験に類似し、相違点はコラム落下点に試験対象となるNaプール（Na液深51mm）



を置いただけである。着火の有無は、ここでもビデオカメラを経た間接的な目視によった。

最後の試験項目である(7)のNaプール表面に連続するNa飛沫の落下がある場合の着火温度は、SOPT-1を用いてFig. 6の構成で調べた。Photo. 26に試験状況を示す。この試験方法もNaコラム燃焼試験と類似し、相違点は床(受皿)で飛散したNa飛沫の落下地点に試験対象であるNaプール(Na液深51mm)を設置した点にある。着火の有無は上と同様な方法によった。

各試験の条件をTable 3に示す。

### 3.3 試験結果と検討

#### (1) 自然着火温度とNaエアロゾル発生開始温度

Na液深(試験時のプール温度が異なるために500℃へ換算した値。以下Na液深とはこれを指す。)に対する自然着火温度及びNaエアロゾル発生開始温度の関係をFig. 7に示す。

着火温度は、プール表面に最初の火点が生じた温度とした。図からこの着火温度、は液深及びプール表面積に依存しないで280~315℃であることが分る。またこの値は、文献値<sup>2)</sup>とほぼ一致する。エアロゾル発生開始温度は、125~165℃である。ここで、Naエアロゾル発生の有無は目視によっているため、視認できる量のエアロゾル発生が開始される温度の意味となる。このNaエアロゾル発生開始温度も、液深には依存しないことは図から明らかである。

#### (2) 燃焼持続時間及び時間平均燃焼速度とクラストによる燃焼抑制効果の有無

Na液深と燃焼持続時間の関係をFig. 8に、またNa液深と時間平均燃焼速度の関係をFig. 9に示す。燃焼持続時間とは、Na自由液面を雰囲気空気に曝した状態で、Naプール表面に最初の火点が生じた時(Na着火)から火点がなくなる(Na鎮火)までの時間と定義した。

図より、燃焼中の時間平均燃焼速度の液深(Na温度)に対する依存性は一例を除くとなく、また値もほぼ一定であることから、Na表面のクラスト(燃焼生成物)による燃焼抑制効果は小さいと推定される。例外はRUN-5で、そこでは他と比べ

て燃焼持続時間が短かく、Na 温度の最大値も低い。これがプール表面を覆ったクラストによって燃焼の持続が阻害された唯一の例である。

Photo. 19に多くの場合について観察された燃焼後の燃焼ポット上部を、またPhoto. 20にRUN-5のそれを示す。

### (3) エアロゾルの発生割合

ここで言うエアロゾルの発生割合とは、燃焼した全Na量に対して空气中にエアロゾルとして放出されたNaの割合を指す。Fig. 10にNa液深(500℃換算値)に対するこのエアロゾルの発生割合の関係を示すが、値は24~45%で、Na液深に対する依存性は無い。

### (4) 機械的外乱並びに燃焼生成物を加えた場合の着火温度

ここでは、プールに機械的外乱(攪拌操作)を加えたり燃焼生成物の構成物質である $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}_2$ 、 $\text{NaOH}$ および $\text{Na}_2\text{CO}_3$ をプール表面に置くことによって着火温度がどのように変化するかを調べた。Photo. 23に $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}_2$ 、 $\text{NaOH}$ および $\text{Na}_2\text{CO}_3$ をプール表面に置いた時の状況を示す。

結果から、プールに機械的外乱(攪拌操作)を加えた場合については、着火下限温度は280℃で静止表面との相違は無い。燃焼生成物と同一な化学物質を加えた場合については、Na表面に浮いた $\text{Na}_2\text{O}_2$ が285℃に達すると瞬時に燃焼した。ただし、この燃焼はプール全域までは拡がらず、プール温度を310℃にした時に始めて全体に拡がり、結果的には静止プール表面の着火温度とは何ら変わらなかった。

これらの結果から、機械的及び化学的な外乱を加えても着火下限温度には何ら変化の無いことが明らかになった。ただ、Na表面に浮いた $\text{Na}_2\text{O}_2$ が自然着火温度より低い温度で発火したことは、この物質が着火のメカニズムで重要な役割を果たしているものと考えられる。

### (5) 自然再着火温度

ここでは、一旦自然着火し一定時間燃焼させたポット内のNaをポットの開口部を閉じることで強制的に窒息消火させ、Na温度が低下した時点で、開口部を開放し

て再び空気雰囲気中に曝し、この曝した時に燃焼を開始する下限温度を求めた。

試験は、Na 温度を 200℃から 10℃ステップ毎に降下させながら数回にわたって行った。Photo. 24に再着火した後に鎮火させたプール表面を示す。

結果では、プール温度（容器底から20mmの位置）80℃以下では再燃焼せず、80℃以上では再燃焼によってNa 温度は急上昇し、数分で100℃以上となり、最終的には高温でのNa プール燃焼と何等変わらない状態となった。

これより、鎮火Naは凝固点以下でも再着火することが明らかとなったが、その理由は、試験では温度の高くなった燃焼Naを強制的に窒息鎮火させているため、鎮火中に蒸発Naがクラストおよびポット側壁に化学的活性度の高い形態のNaのままで沈着し、これがポットを開放すると直接空気と接して燃焼するために、結果的に再着火温度を低下させたものと推定する。

#### (6) Na コラム落下による Na プール着火温度

試験は、Na プール温度と落下Na 温度を等しくして、110℃から 10℃毎に段階的に昇温して行った。Photo. 25に着火時を、Photo. 26に強制消火後を示す。

結果では、Na 温度が 130℃の時にNa の落下面の一部から着火して燃焼がNa プール全面に拡がった。

#### (7) 着火した Na 飛沫による Na プール着火温度

試験は、落下Na 温度を 300℃にし、Na プール温度を 100℃から 10℃ステップ毎に昇温して行った。Photo. 27に試験状況を示す。

結果では、Na プール温度が 170℃の時に着火したNa 飛沫の流入によってプールが着火してNa プール全体に拡がった。

## 結 論

低温Naを使用した試験を行い、Naスプレー、Naコラム及びNaプールのそれぞれの着火下限温度を調べ、次の結論を得た。

## (1) 着火下限温度（3%酸素濃度雰囲気）

Naコラム流について行った結果、コラム本流及び床上での跳ね返り飛沫のいずれについても着火は認めなかった。

## (2) 着火下限温度（空気雰囲気）

結果の一覧表をTable 4 に示す。

a. Naスプレー

250℃で他と比べて高い。ノズルのがス吹きによる微細液滴では160℃から着火（瞬時燃焼）を認めた。スプレーの着火は、液滴径に対する依存性があり、小液滴になるほど着火温度は低くなるはずであるが、0.5μの小液滴でもその着火温度は150℃との報告<sup>(3)</sup>もあることから、150℃以下となる可能性は無いと考える。

b. Naコラム

Na本流の着火は無く、床の跳ね返り液滴により着火のみを生じ、その着火下限温度は180℃である。床上に形成された落下堆積物の着火下限温度は160℃であった。このように、Naコラム燃焼では、コラム本流の燃焼より、跳ね返り飛沫及び落下堆積物の着火が重要となる。

c. Naプール

静止表面での着火下限温度は、280℃～310℃である。機械的外乱（攪拌）やプール表面に燃焼生成物と同一な組成の化学物質を添加してもこれは変化しない。また、Naコラムを直接Naプールに落下させた時の着火下限温度は130℃、着火Na飛沫を直接Naプールに落下さ

せた時の着火下限温度は170℃であった。このように、低温（200℃未満）でも、着火飛沫を投入するとプールの着火下限温度は下がり、また一旦着火すると燃焼はプール全面に広がって高温Na燃焼と同様に高温まで温度上昇する。

### (3) 燃焼生成物による抑制効果

海外の文献<sup>(4)</sup>にNaプール燃焼ではプール表面のクラスト（燃焼生成物）による燃焼抑制効果の有ることが報告されているが、本試験の如き小型の燃焼ポットでは、一例を除くとそのような効果は認められなかった。よって、クラストによる燃焼抑制効果はプールの大きさに依存（短縮）すると考える。

### (4) 自然再着火温度

FBRプラントでNa漏洩事故が起こった場合、事故後に燃焼抑制槽内のNaを回収することも考えられる。その際、空気雰囲気中に開放された抑制槽内のNaが何度で再着火するかを予め明らかにしておく必要がある。

この目的で、窒息鎮火Naプールの再着火温度を調べたところ、プール温度70℃以上であることが明らかになった。原因は、鎮火中に高温Naからの蒸発Naが燃焼ポットの気相壁面およびプール表面のクラスト表面に沈着し、比表面積の大きなこれらの沈着物が発火したためと推定する。よって、事故後のNa処理では、抑制槽内の炭酸ガス等による不活性化が必要と考える。一貫して空気雰囲気に曝されたままで自然鎮火したNaプールについての再着火下限温度については今後の課題である。

### (5) 着火のメカニズム

燃焼生成物を加えた試験から、着火のメカニズムは、 $\text{Na}_2\text{O}_2$ の化学変化もしくはその熱または衝撃による分解が原因で、分解の際に放出される酸素が燃焼の拡大を助長するものと推定する。



参 考 文 献

- 1) 姫野、他、「ナトリウム火災防護設備基礎試験 (IV) — 水による2次系主配管ナトリウム漏洩模擬試験 — 」, SN9410 86-088, 1986年8月
- 2) C. CASSELMAN, "Ignition of A Liquid Sodium Pool", IAEA Specialists' Meeting on Sodium Fires Prevention, 11.1978.
- 3) R. K. WIERMAN, R. K. HILLIARD, "Experimental Study of Hydrogen Formation and Recombination under Postulated LMFBR Accident Condition", HEDL-TC-730, 12.1976.
- 4) R. N. NEWMAN "The Role of Carbon Dioxide in The Combustion of Sodium in Fire" Lyon Meeting, 7.1982.

Table 1 Test Conditions of Sodium Spray Test

Items	Values
Sodium Temp.	150, 160, 170, 180, 190, 200, 230, 260, 270 °C
Pressure	2.0 kg / cm <sup>2</sup> G
Height	2.0 m
Atmosphere	Air

PSS - SFE - 5 8 3

Table 2 Test Conditions of Sodium Column Test

(1) 3% Oxygen Atmosphere

Items	Values
Sodium Temp .	260 °C, 530 °C
Height	2.0 m
Nozzle Size	φ 8.7 mm

(2) 21% Oxygen Atmosphere

Items	Values
Sodium Temp .	150, 160, 170, 175, 180, 200, 260 °C
Height	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0, 7.0 m
Nozzle Size	φ 8.7 mm

PSS - SFE - 584

Table 3 Test Conditions of Sodium Pool Test

Test No.	Test Name	Sodium Depth (mm)	Pool Area (m <sup>2</sup> )
RUN - 1		114	0.0314 ( $\phi$ 200mm)
RUN - 2		38	0.0314 ( $\phi$ 200mm)
RUN - 3		76	0.0314 ( $\phi$ 200mm)
RUN - 4		114	0.0314 ( $\phi$ 200mm)
RUN - 5		152	0.0314 ( $\phi$ 200mm)
RUN - 8	Sodium Pool	17	0.0707 ( $\phi$ 300mm)
RUN - 9	Test	34	0.0707 ( $\phi$ 300mm)
RUN - 10		51	0.0707 ( $\phi$ 300mm)
RUN - 11		68	0.0707 ( $\phi$ 300mm)
RUN - 12		102	0.0707 ( $\phi$ 300mm)
RUN - 13		136	0.0707 ( $\phi$ 300mm)
RUN - 14		170	0.0707 ( $\phi$ 300mm)
RUN - 6	Reignition Test	76	0.0314 ( $\phi$ 200mm)
RUN - 7	Na <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , NaOH, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	76	0.0314 ( $\phi$ 200mm)
-	Sodium Column Flow into Pool	51	0.0707 ( $\phi$ 300mm)
-	Sodium Droplet Splash into Pool	51	0.0707 ( $\phi$ 300mm)

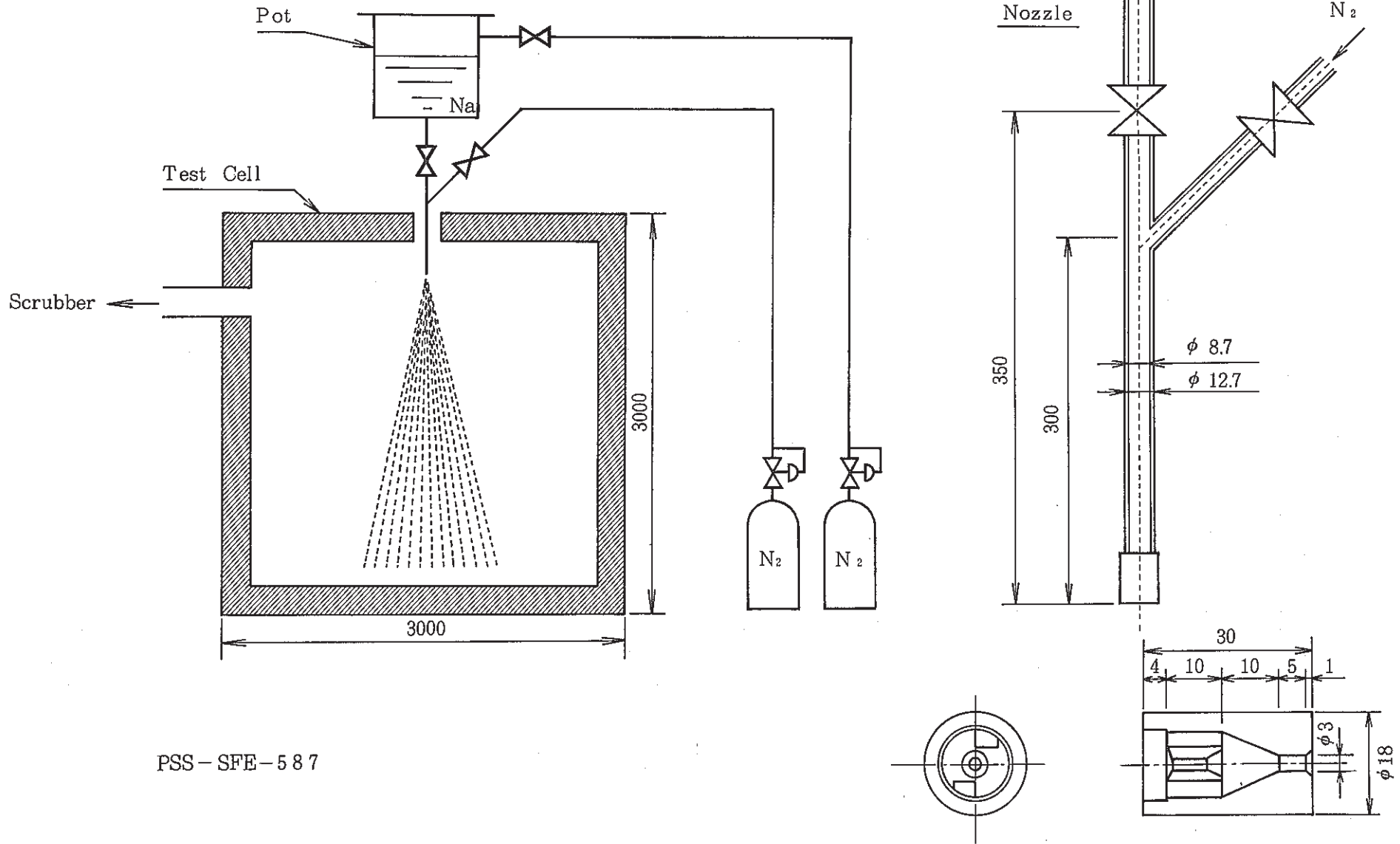
PSS - SFE - 585

Table 4 Sodium Ignition Temperature in Air

Items		Sodium Temp						
		0	50	100	150	200	250	300
Spray	droplet dia. $\approx$ 1 mm							250-300
	droplet dia. $<$ 1 mm				150-200			
Column	main	No Ignition						
	rebound					180-200		
Pool	static							280-300 (dashed)
	deposit on floor				150-180			
	column into Pool				120-150			
	splash into Pool				160-180			
	stirring							280-300
	Na <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , NaOH, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> on Sodium Pool							280-300
Reignition at Sodium Pool (extinguishment by smothering)				50-100				
Aerosol Release Temperature at sodium Pool								150-200 (dashed)

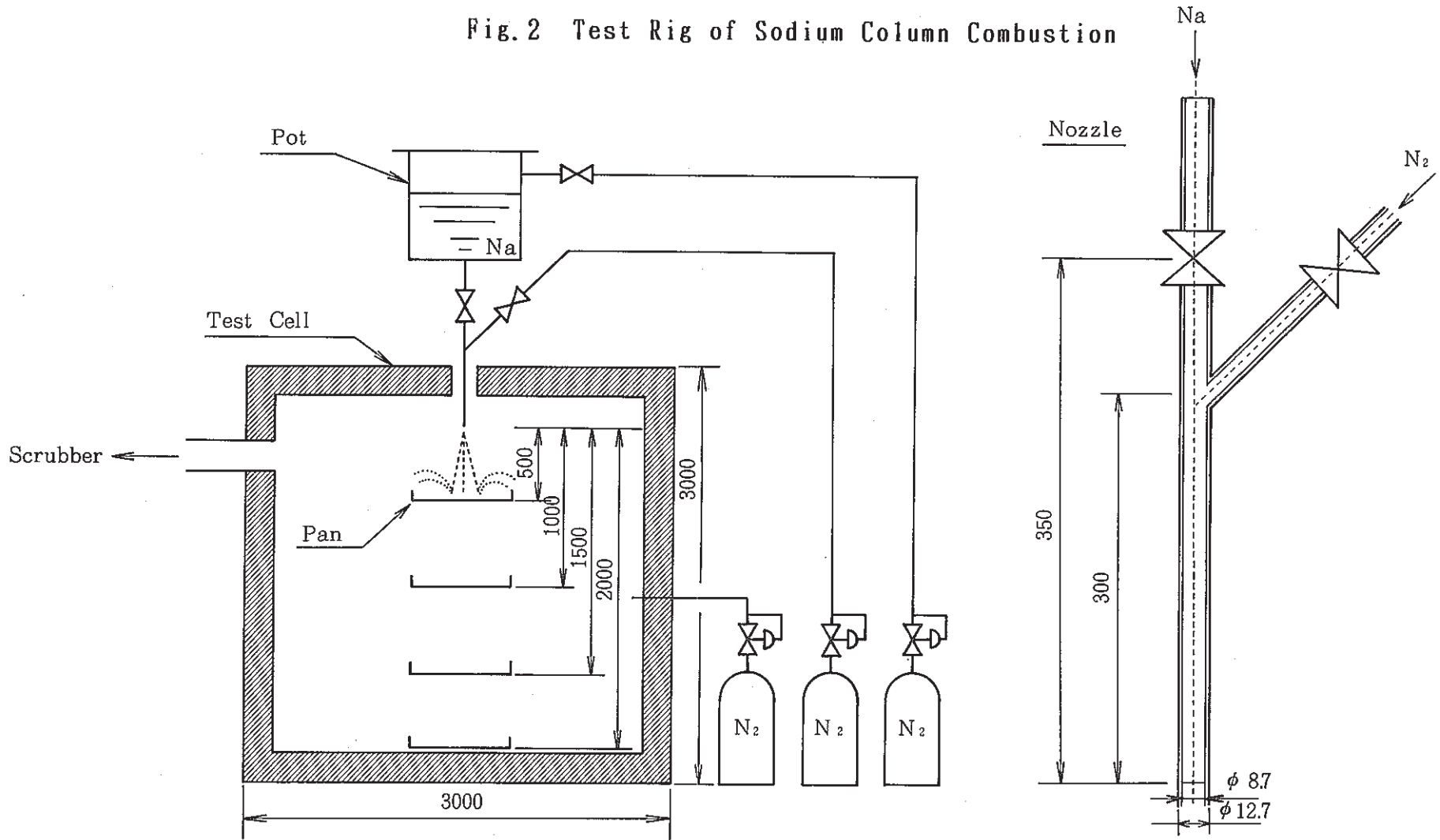


Fig.1 Test Rig of Sodium Spray Combustion



PSS - SFE - 587

Fig.2 Test Rig of Sodium Column Combustion



PSS - SFE - 588

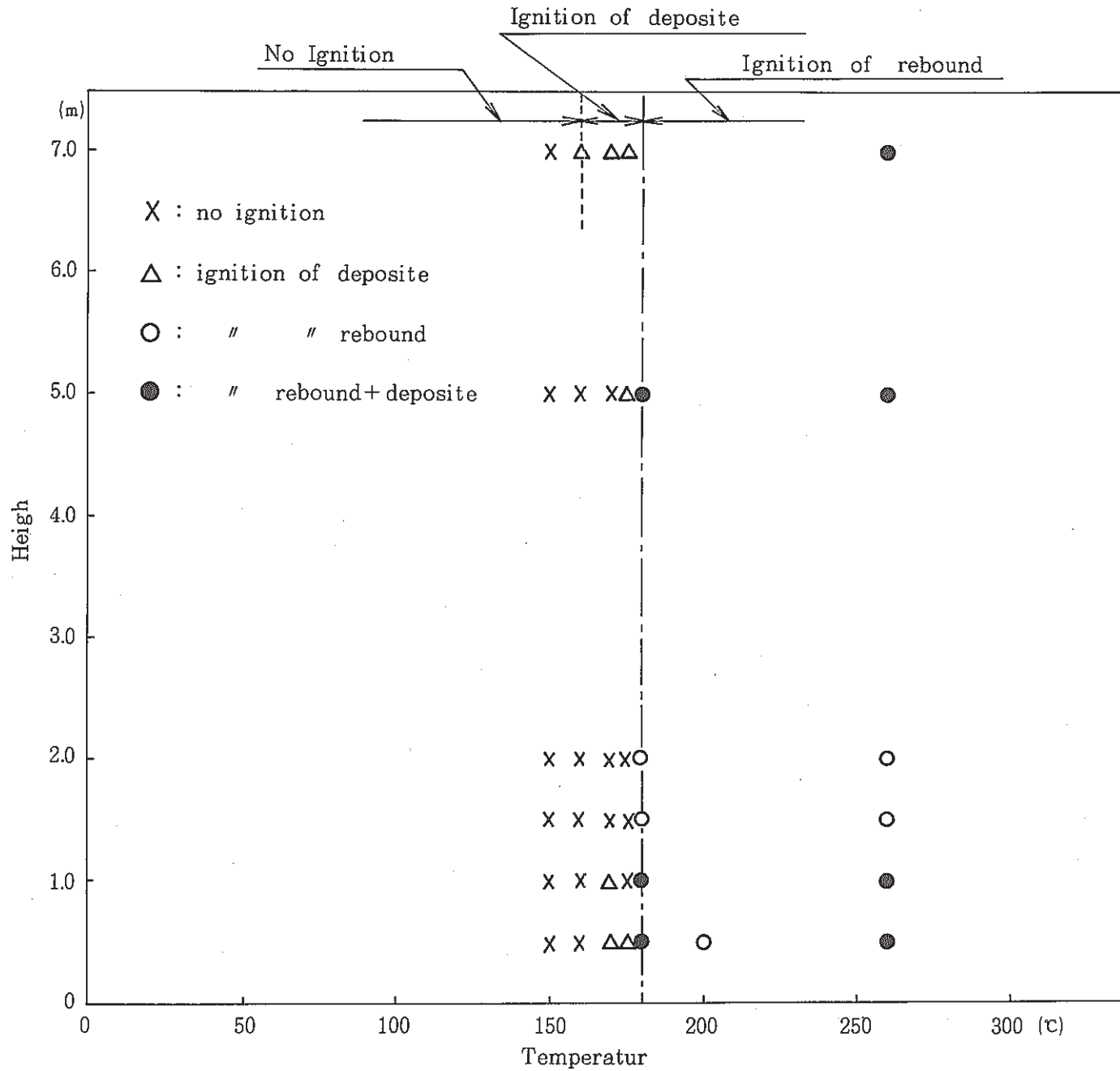


Fig. 3 Results of Sodium Column Test

Fig. 4 Test Rig of Sodium Pool Combustion

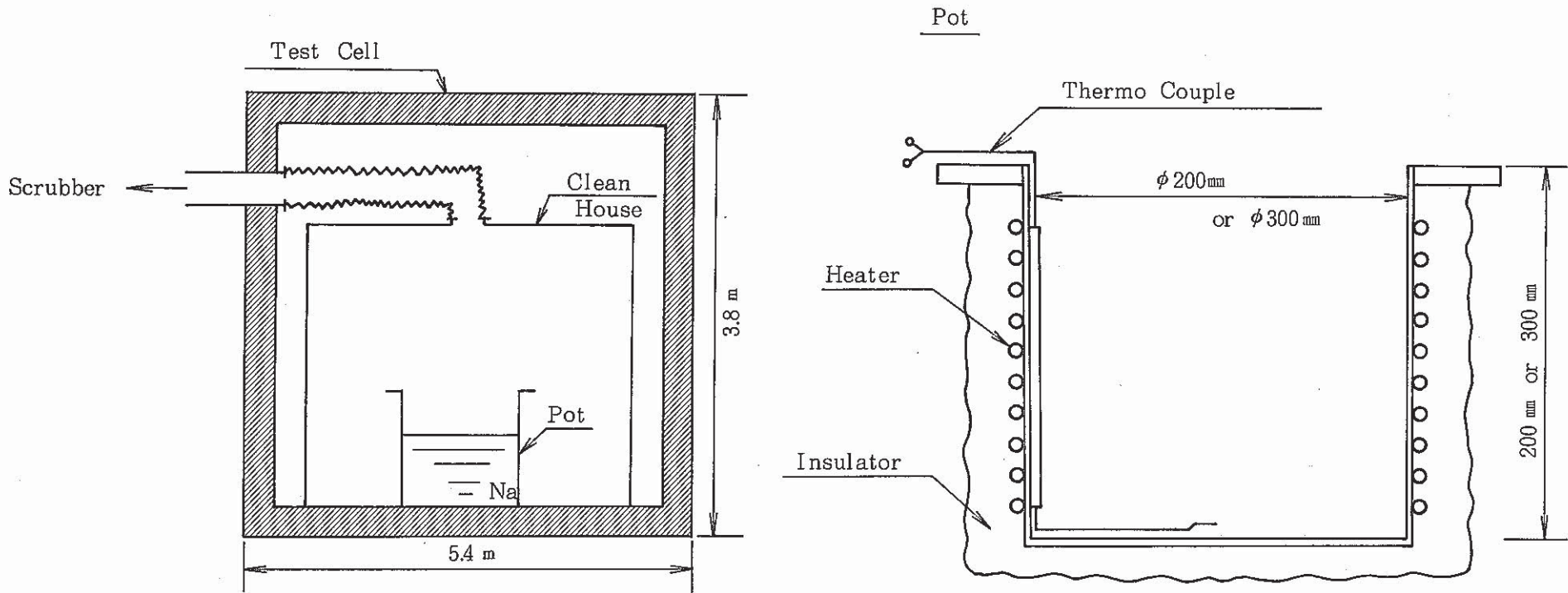


Fig.5 Test Rig of Sodium Column Flow into Sodium Pool

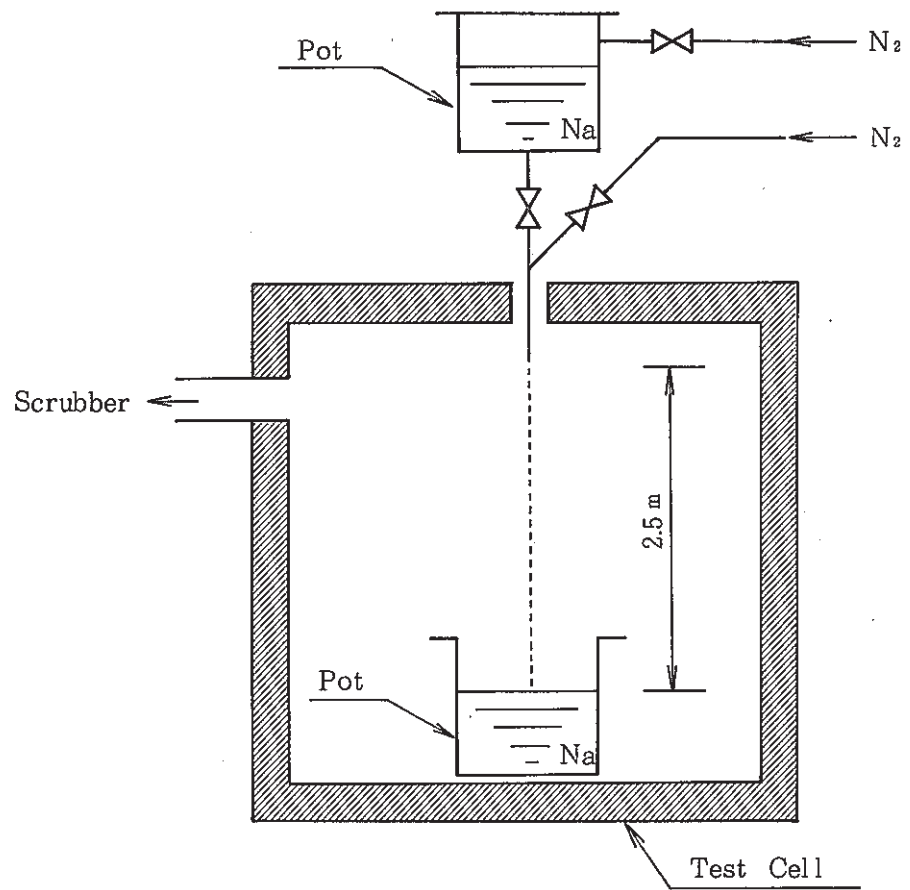
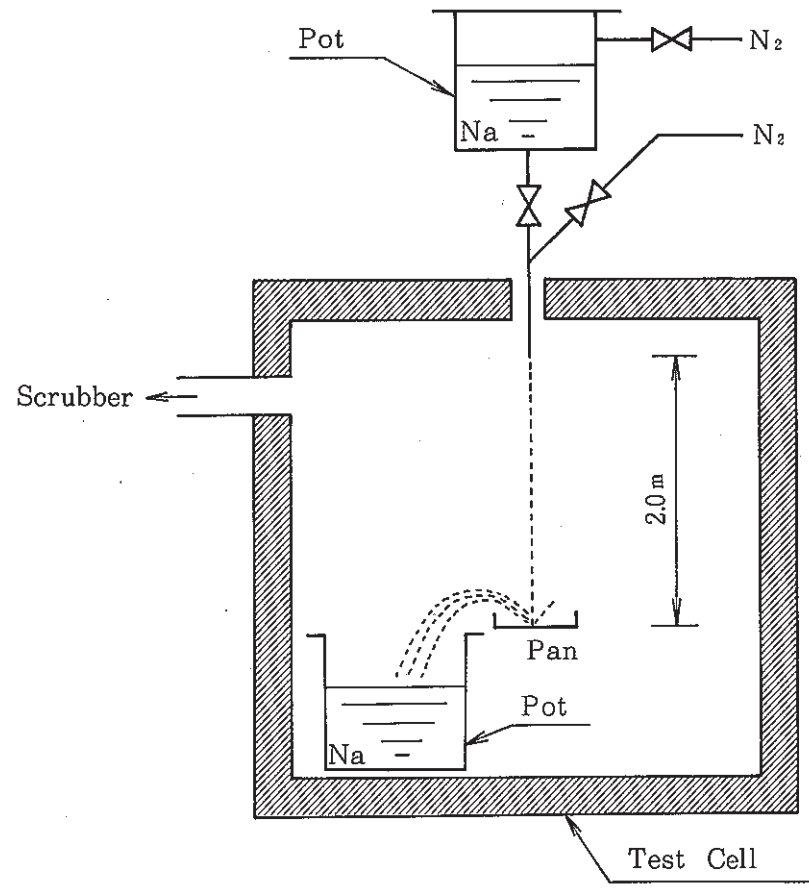
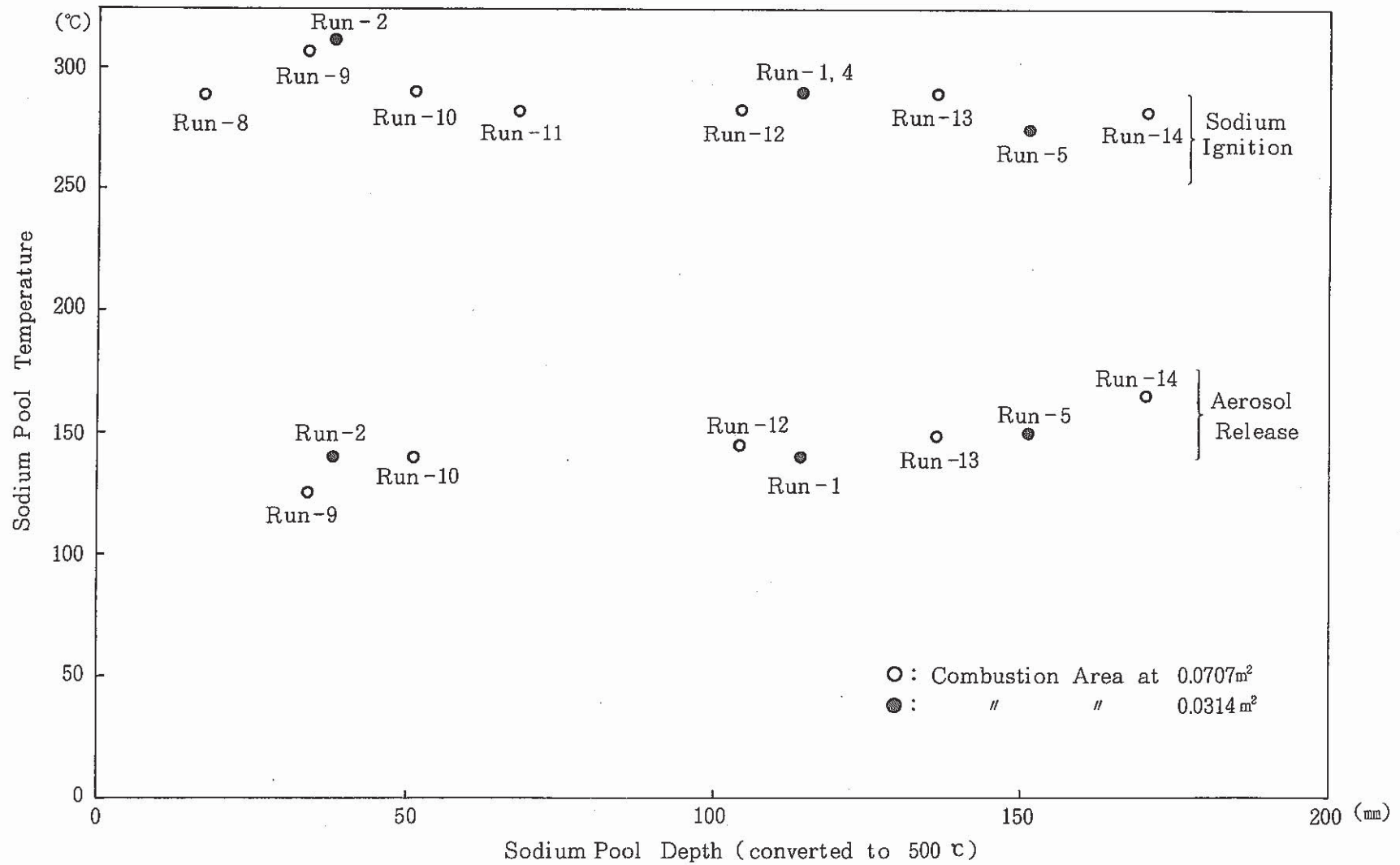


Fig.6 Test Rig of Sodium Droplet Splash into Sodium Pool

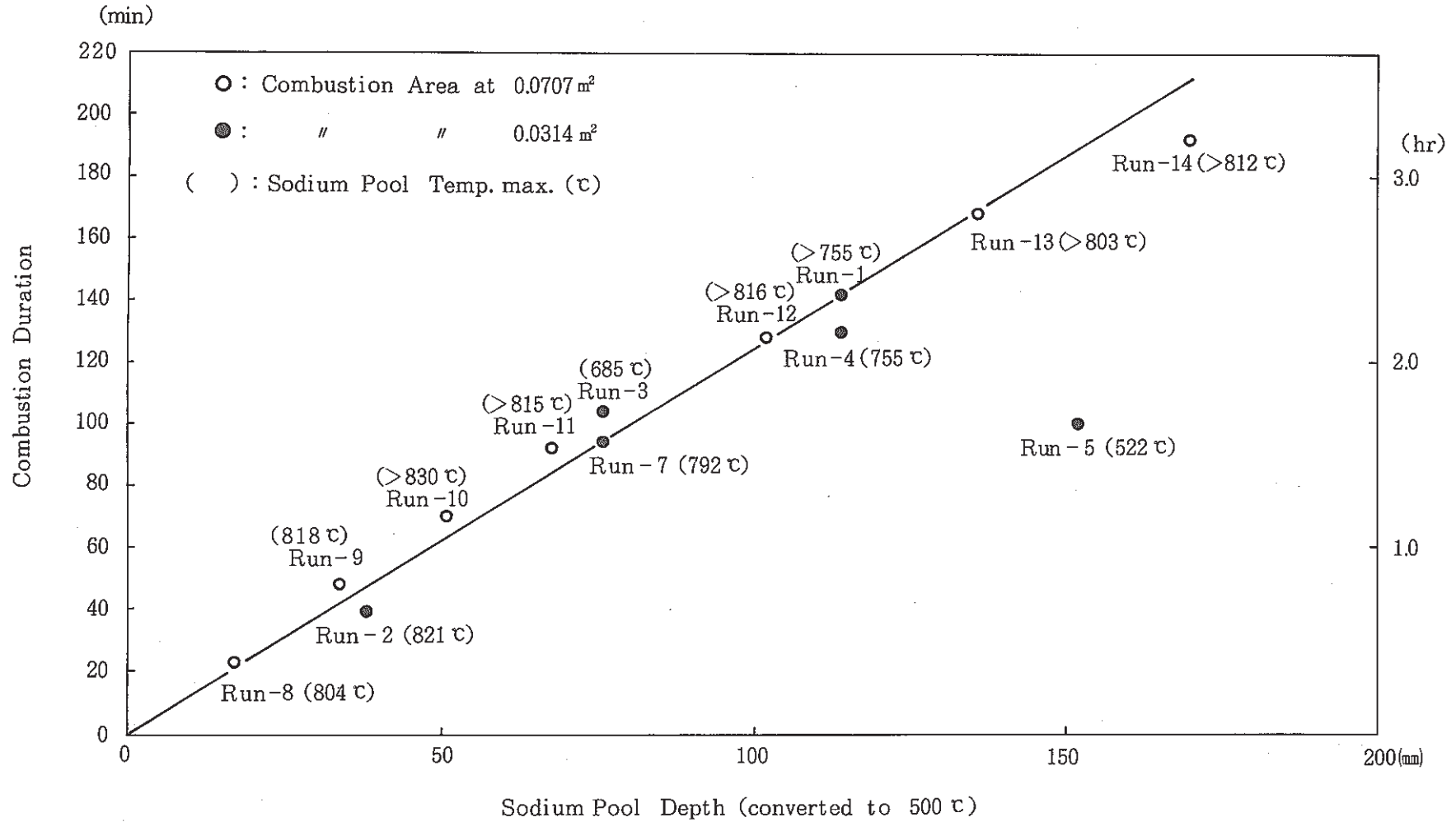




PSS-SFE-592

Fig. 7 Sodium Aerosol Release Temperature and Sodium Ignition Temperature





PSS - SFE - 593

Fig. 8 Combustion Duration vs Pool Depth

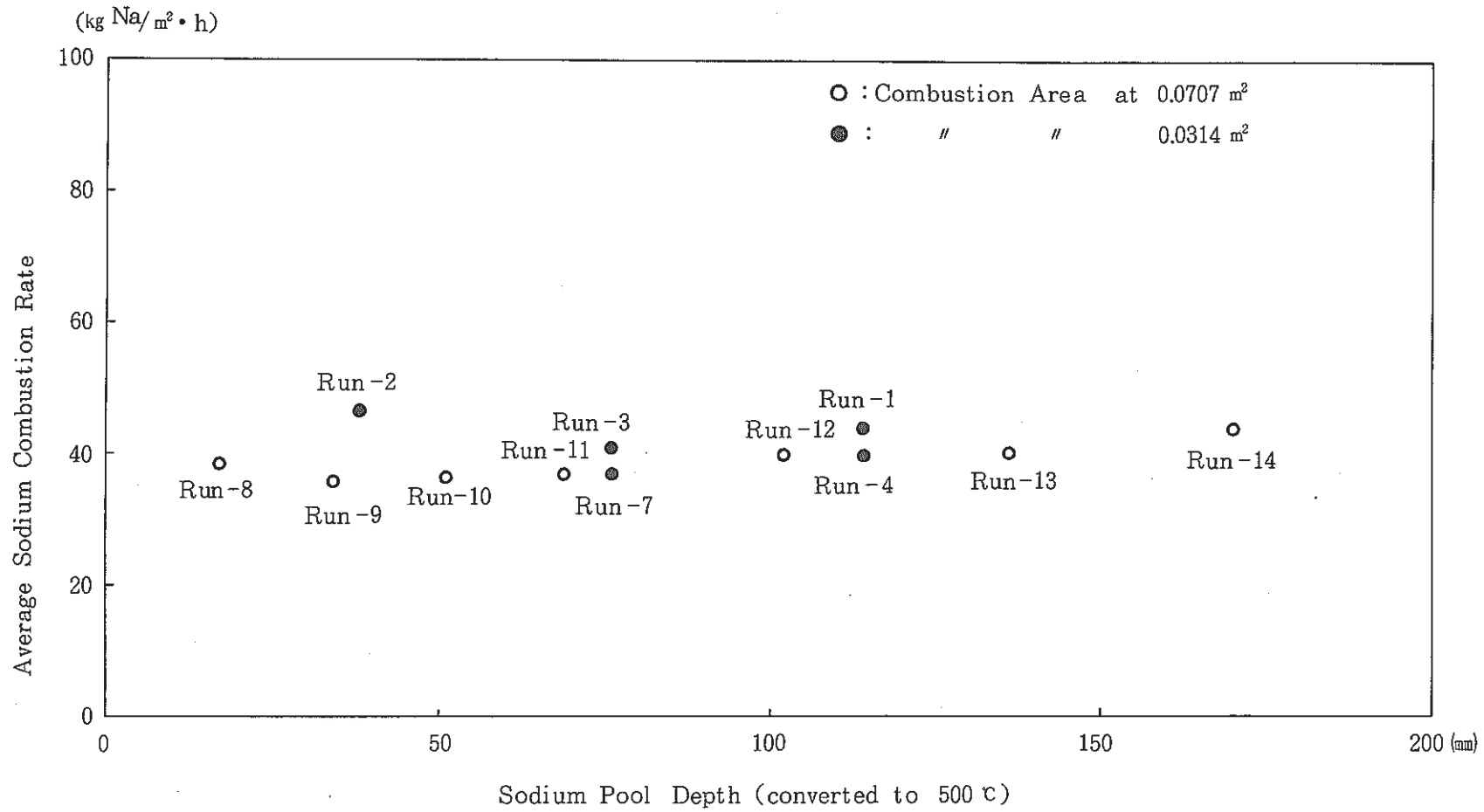


Fig. 9 Sodium Aerosol Release Rate vs Pool Depth

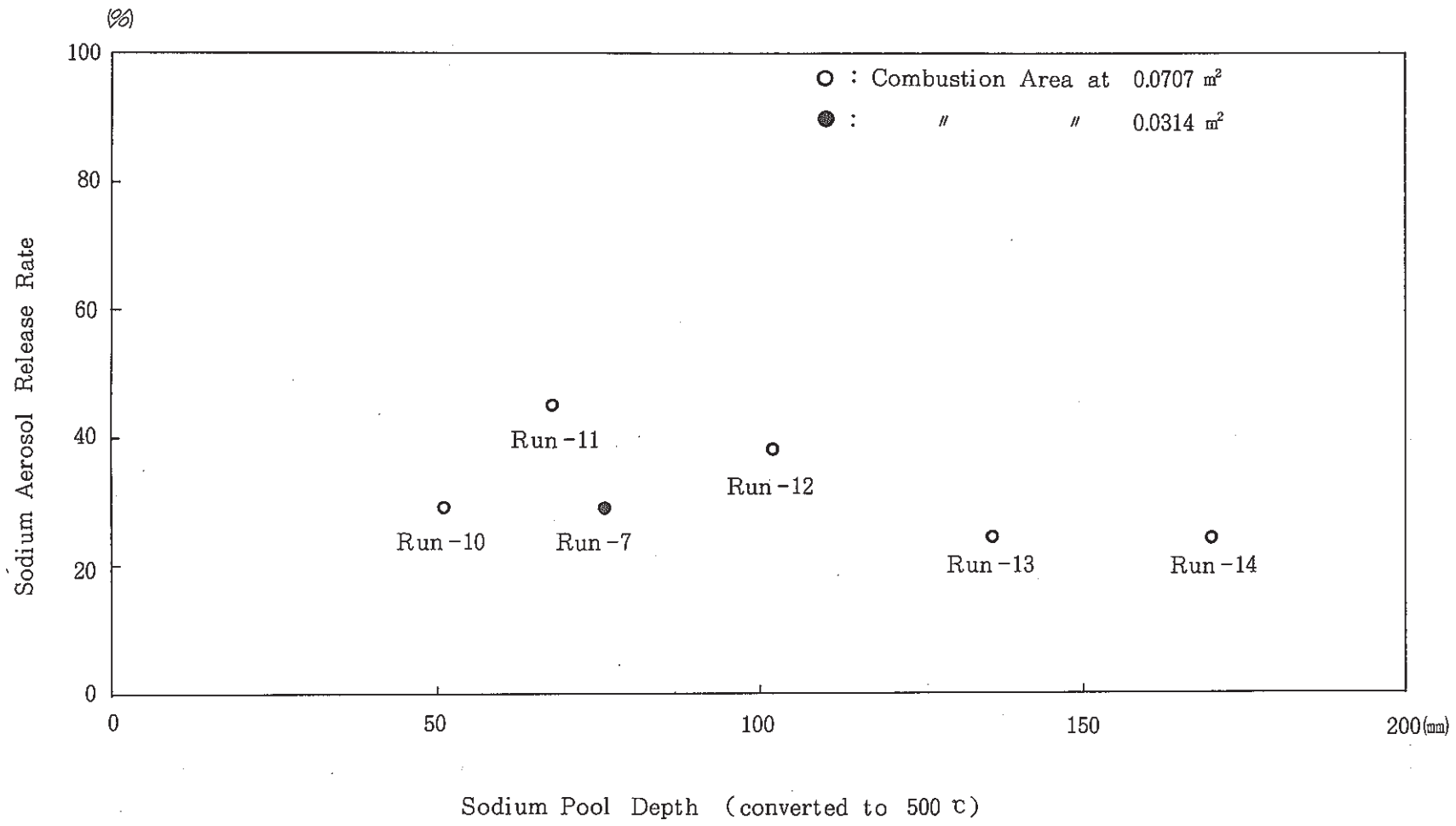


Fig. 10 Average Sodium Combustion Rate vs Pool Depth

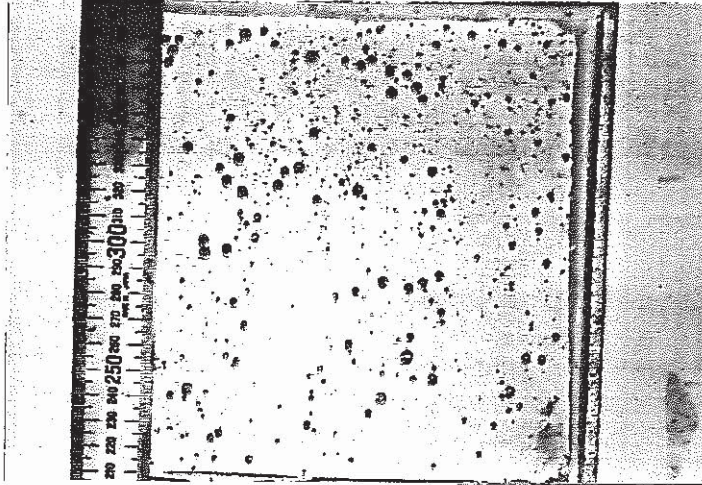


Photo.1 Spray Nozzle Test ( with Water )

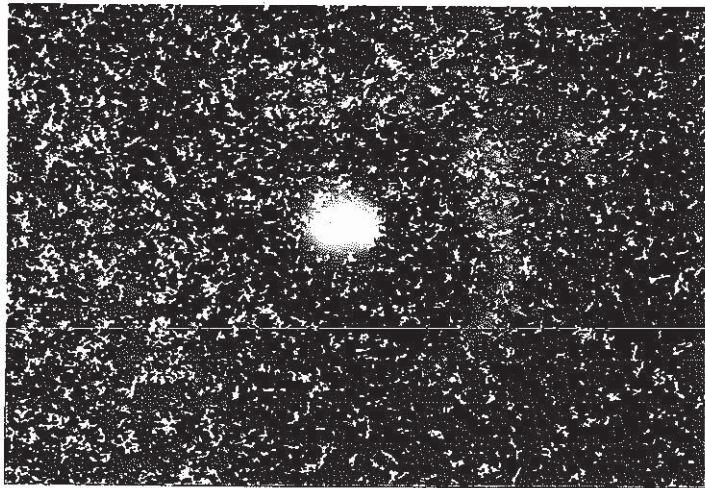


Photo.2 Spray Nozzle Test ( with Sodium ) Na=150 °C

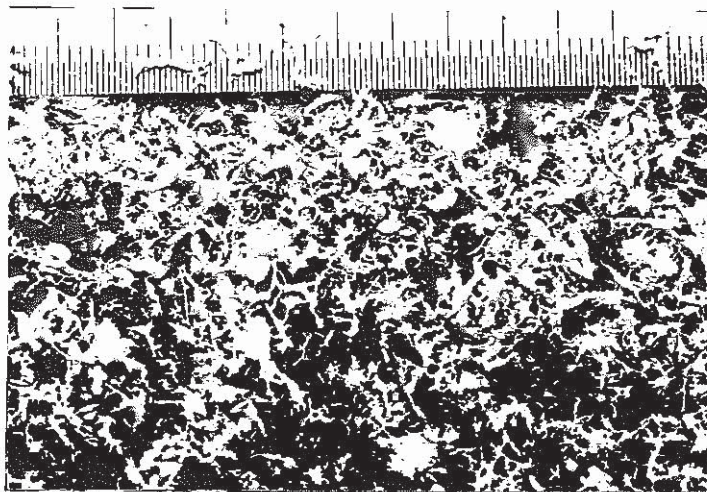


Photo.3 Spray Nozzle Test ( with Sodium ) Na=150 °C

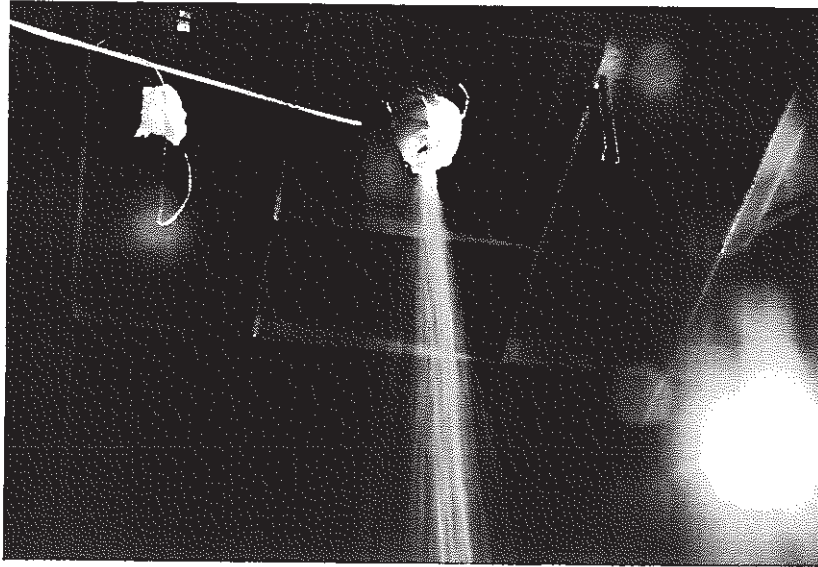


Photo.4 Sodium Spray Test ( Not Combustion ) Na=150°C

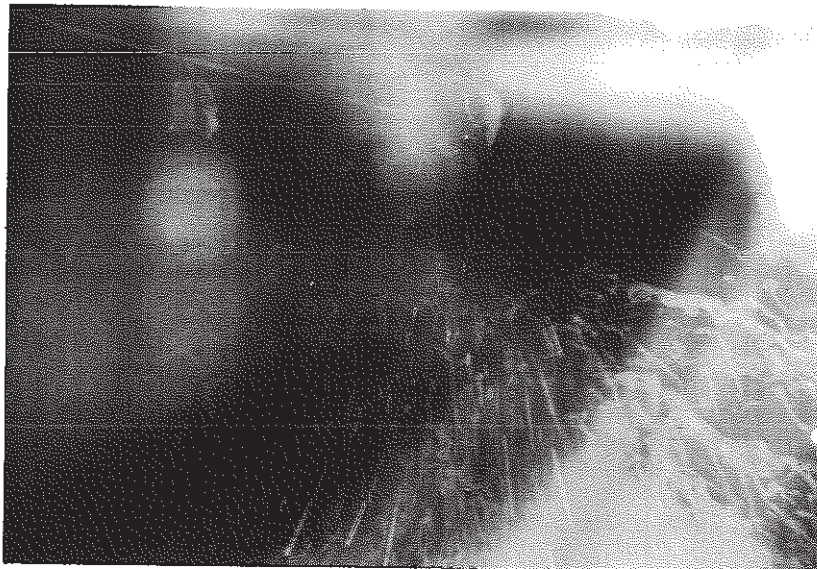


Photo.5 Sodium Spray Test ( Combustion ) Na=300°C



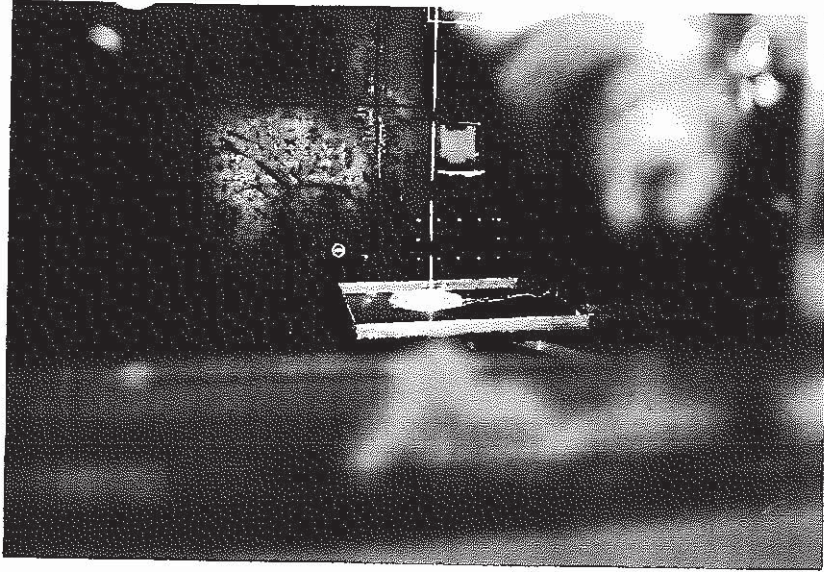


Photo.6 Sodium Column Test (Sodium Temp.=160 °C、Height=5.0m、side view)

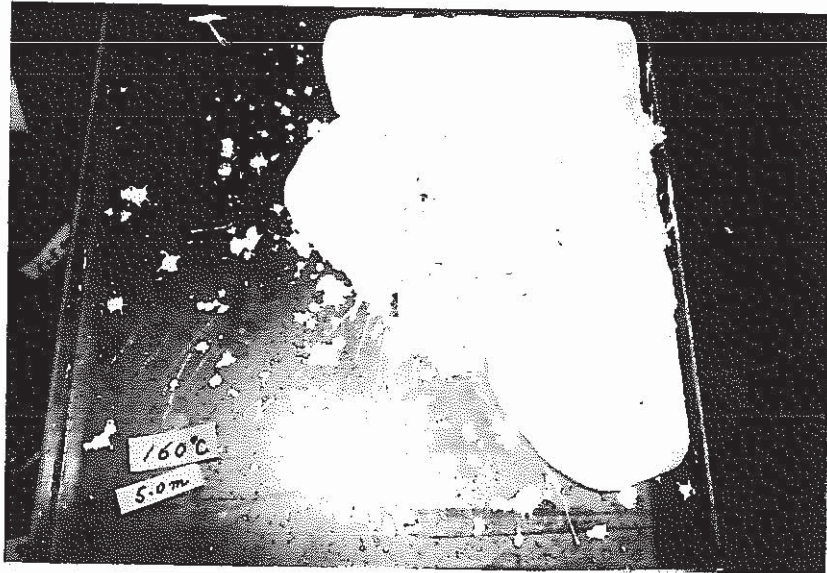


Photo.7 Sodium Column Test (Sodium Temp.=160 °C、Height=5.0m、Top view of catch pan )





Photo.8 Sodium Column Test (Sodium Temp.=170 ℃、Height=5.0m、side view)

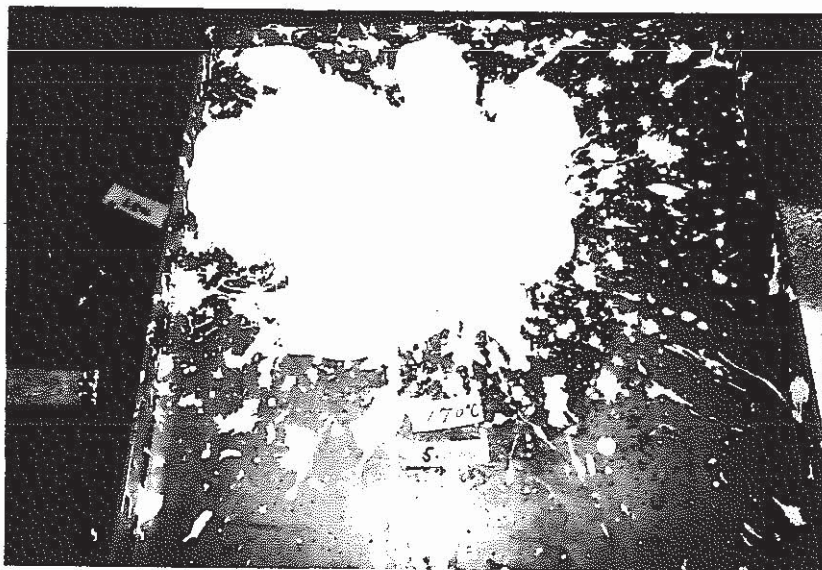


Photo.9 Sodium Column Test (Sodium Temp.=170 ℃、Height=5.0m、Top view of catch pan)

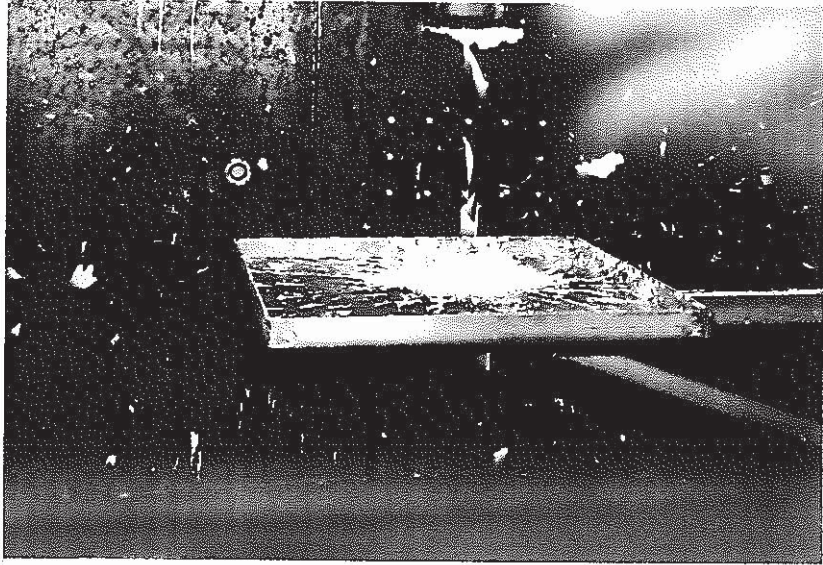


Photo.10 Sodium Column Test (Sodium Temp. =175 °C、Height=5.0m、side view)

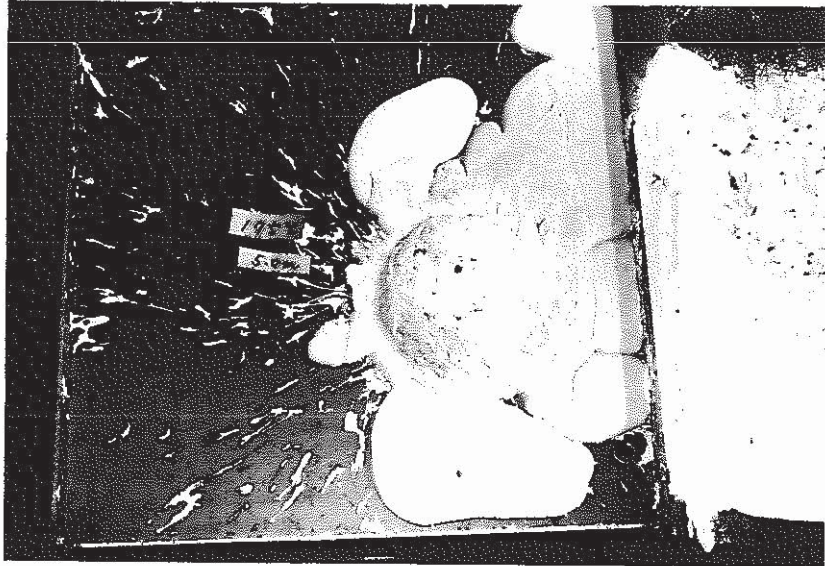


Photo.11 Sodium Column Test (Sodium Temp. =175 °C、Height=5.0m、Top view of catch pan )



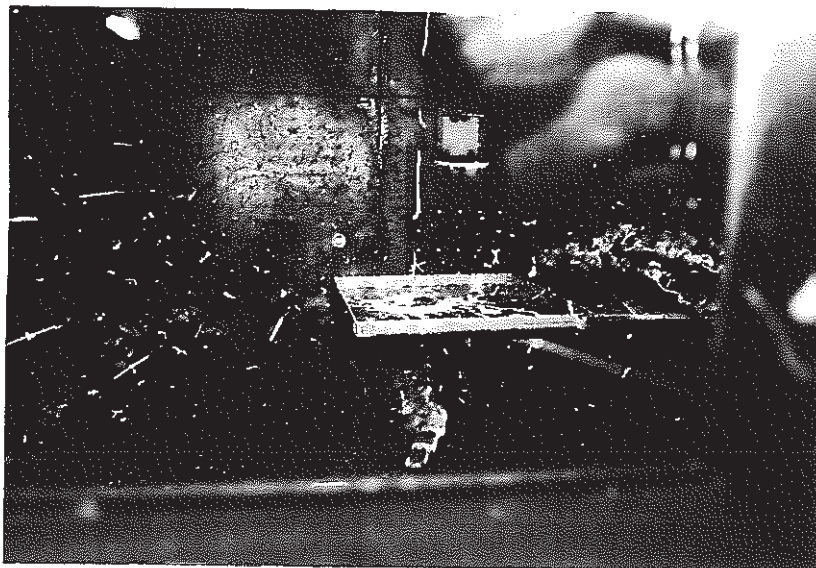


Photo.12 Sodium Column Test (Sodium Temp.=180 °C、Height=5.0m、side view)



Photo.13 Sodium Column Test (Sodium Temp.=180 °C、Height=5.0m、Top view of catch pan)



Photo.14 Sodium Column Test (Sodium Temp.=200 ℃、Height=5.0m、side view)

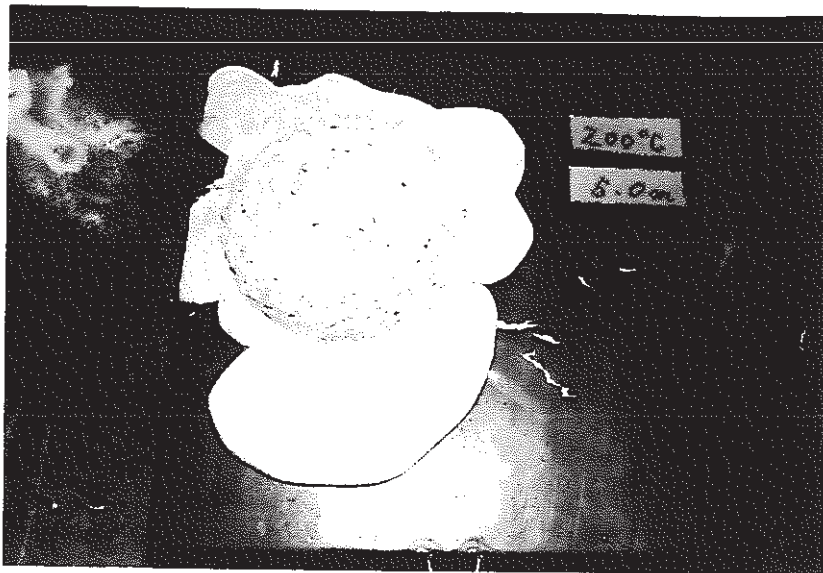


Photo.15 Sodium Column Test (Sodium Temp.=200 ℃、Height=5.0m、Top view of catch pan )

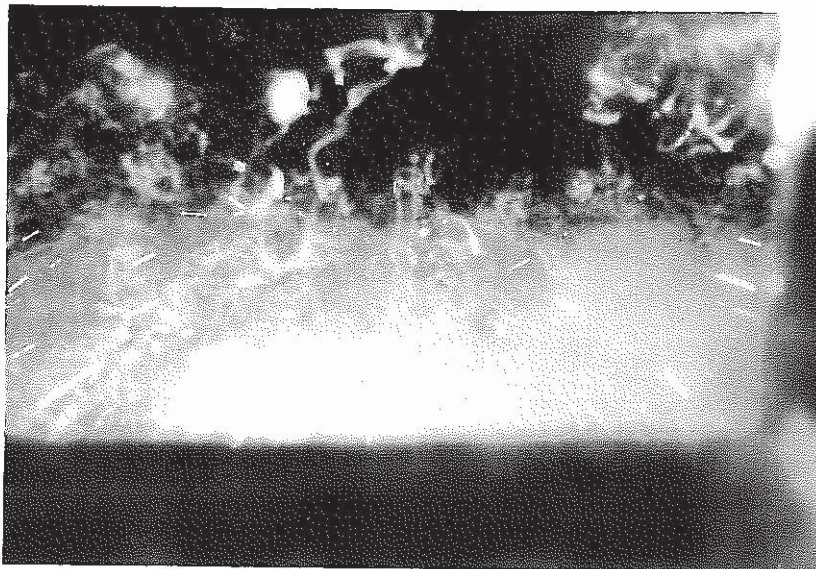


Photo.16 Sodium Column Test (Sodium Temp.=260 °C、Height=5.0m、side view)

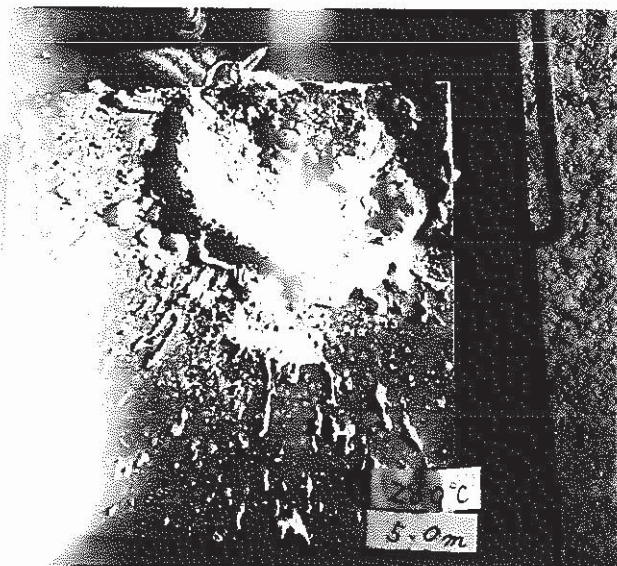


Photo.17 Sodium Column Test (Sodium Temp.=260 °C、Height=5.0m、Top view of catch pan)



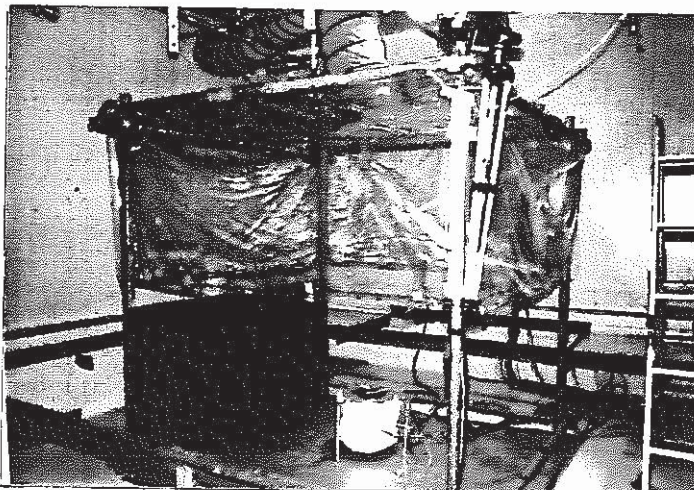


Photo. 18 Test Rig of Sodium Pool Test

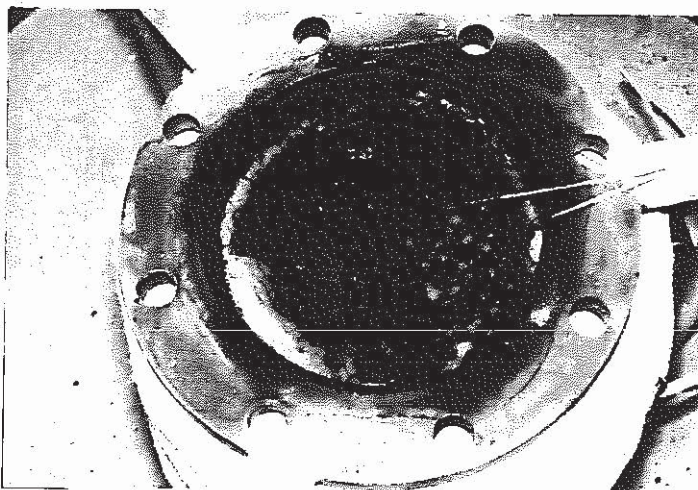


Photo. 19 Typical Sodium Pool Test Except RUN-5 Pool

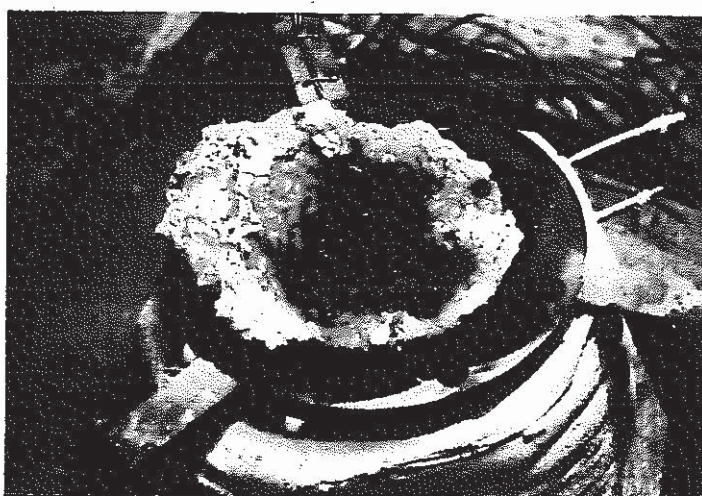


Photo. 20 Sodium Pool Test ( RUN-5)



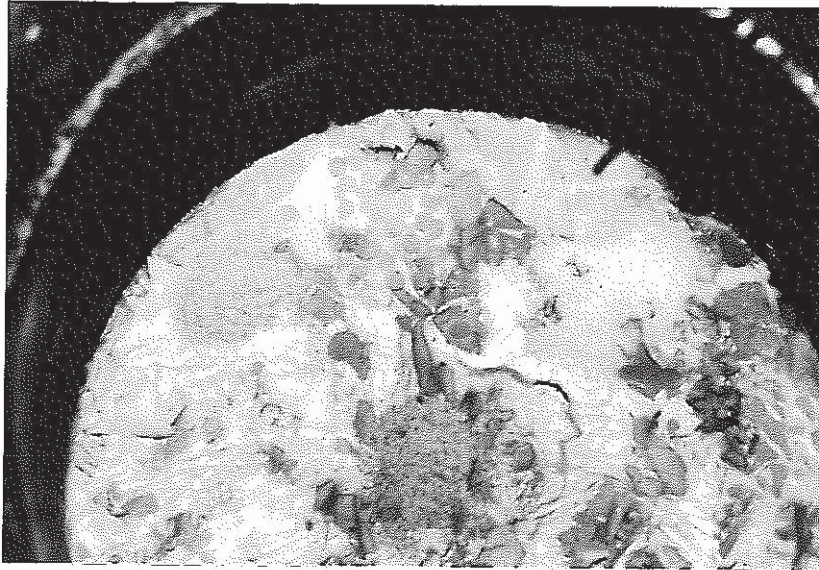


Photo. 21 Sodium Pool Test ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ )

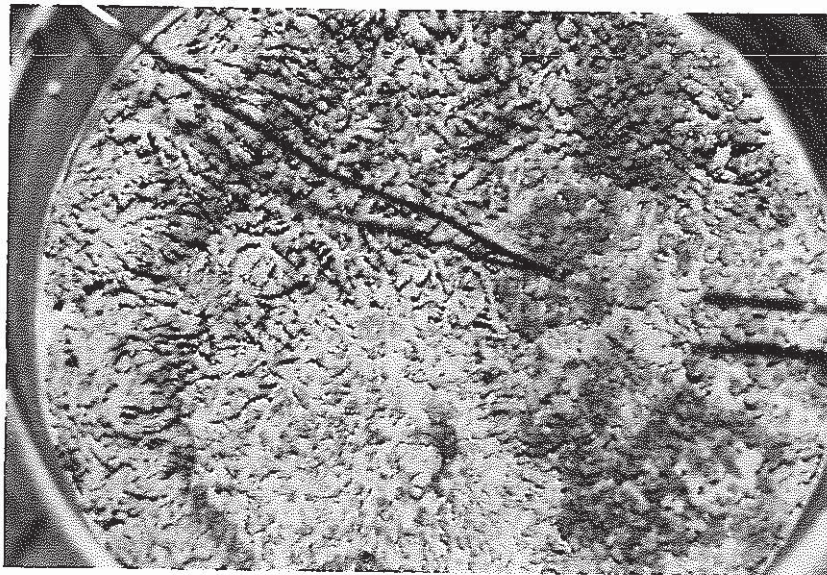


Photo. 22 Sodium Pool Test (Reignited)



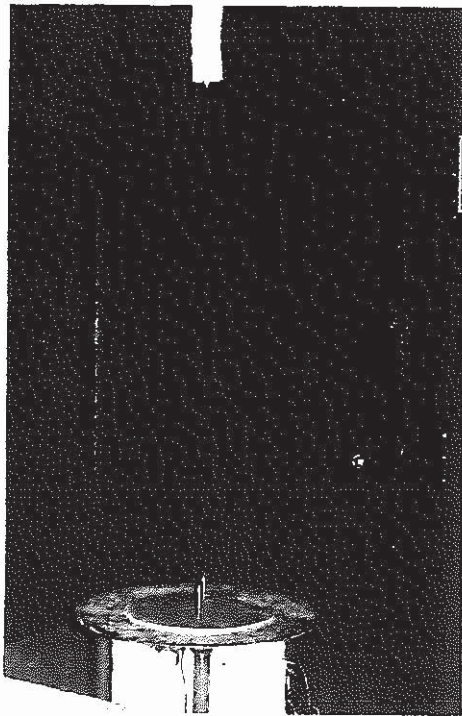


Photo.23 Drop Test Rig of Sodium Column into Sodium Pool



Photo.24 Drop Test of Sodium Column into Sodium Pool ( at ignition )

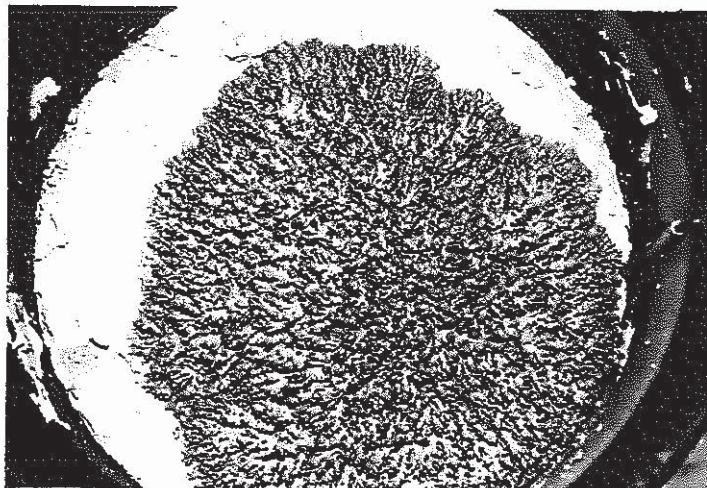


Photo.25 Drop Test of Sodium Column into Sodium Pool ( at extinction )



Photo.26 Drop Test Rig of Sodium Splash into Sodium Pool



Photo.27 Drop Test Rig of Sodium Splash into Sodium Pool ( at test )