

# 大規模ナトリウム漏洩燃焼試験(Ⅳ)

(空気雰囲気における模擬配管からのナトリウム漏洩燃焼試験, RunE2)



1987年6月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 87-088
<p>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</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室</p>	

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)

## 大規模ナトリウム漏洩燃焼試験 (IV)

(空気雰囲気における模擬配管からのナトリウム漏洩燃焼試験、RUN-E2)

森井 正\*、福地 平\*

山田 敏雄\*、姫野 嘉昭\*

## 要 旨

- 〔目的〕 Na配管破損時に漏洩するNaが、配管まわりの保温構造のために、スプレー状に噴出飛散しないことを工学的に実証する。
- 〔方法〕 「もんじゅ」2次系Na配管の1/3.5縮尺模擬配管試験体に、 $1/4 \cdot Dt$ 相当の破損孔を上向きに設け、同2次系ホットレグ配管の系統圧 $3.8 \text{ kg/cm}^2\text{-g}$ と同じ圧力をかけてNaを漏洩させた。
- 〔結果〕 配管まわりの保温構造は、事故時のNa漏洩・燃焼によってもその健全性が損なわれることはなく十分に漏洩Naのスプレー状飛散を防止出来ることを実証した。また、漏洩中のNa燃焼速度は、漏洩Na流量の約4%程度であった。以前に実施した完全なスプレー状Na燃焼試験ではこの値が約30%であったのに比較すると、実機配管からの現実的なNa漏洩の際の燃焼は、スプレー燃焼と比べて穏やかである。
- 〔結論〕 配管保温構造は、想定Na漏洩事故時にも崩壊することなく、漏洩Naのスプレー状噴出飛散を防止する機能を有していることを実証した。この時の燃焼形態は棒状であり、スプレー状燃焼に比べて、燃焼速度は小さいことを明らかにした。

---

\* 大洗工学センター、安全工学部、プラント安全工学室

Large-scale Test on Sodium Leak and Fire (IV)

—Test of Sodium Leak and Fire using Simulated Piping ; Run-E2—

T. Morii\* , T. Fukuchi\* , T. Yamada \*  
and Y. Himeno\*

Abstract

- Objectives : To demonstrate that flow pattern of a leakage sodium is not a spray due to presence of the thermal insulation jackets around the sodium piping system.
- Method : A 1/3.5 scale model of the Monju IHTS having a Dt/4 equivalent leak hole was manufactured. The model was mounted in an air filled closed vessel (inner volume : 111 m<sup>3</sup>), then a sodium leak test was conducted at sodium pressure 3.8 kg/cm<sup>2</sup>-g, sodium temperature 505°C with the leak rate about 3.1 kg/sec for 13 minutes. The total sodium used was 2.4 tons.
- Results : The thermal insulation jackets did not fail preventing spray formation of the leak sodium. Leakage flow pattern was in the form of columnar. The combustion rate during the leak was about 4% of the leakage sodium flow rate which is much smaller than 30% determined in the previous spray combustion test.
- Conclusions: The thermal insulation jackets prevent spray formation in the event of an accident. Leakage flow pattern was columnar, therefore, the combustion rate was much smaller than that during a spray combustion.

---

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

## 目 次

1. 緒 論 .....	1
2. 試験装置 .....	2
2.1 SOLFA-2 .....	2
2.2 模擬試験体 .....	3
2.3 Na受皿 .....	3
2.4 計測装置、計測項目及び計測方法 .....	4
3. 試験方法 .....	7
3.1 試験条件 .....	7
3.2 試験方法 .....	8
4. 試験結果 .....	10
4.1 模擬試験体の熱的挙動 .....	10
4.2 Na漏洩流量と漏洩形態 .....	11
4.3 酸素濃度変化 .....	13
4.4 ガス圧力とガス温度変化 .....	14
4.5 Na受皿上のNaプール温度、各構造材温度 .....	16
4.6 エネルギーバランス .....	17
4.7 模擬試験体試験後検査 .....	19
5. 結 論 .....	20
参考文献 .....	21
Appendix A .....	44
Appendix B .....	48

LIST OF TABLES

Table-1	Pressure Loss Coefficient of Simulated Sodium Pipes .....	22
Table-2	Progression of RUN-E2 Test .....	23

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1	Arrangement of Test Rig for Run-E2 .....	24
Fig. 2.2	SOLFA-2 Overview .....	25
Fig. 2.3	Cut View of Simulated Sodium Pipe for Run-E2 .....	26
Fig. 2.4	Locations of the Thermocouples Attached to the Simulated Sodium Pipe .....	27
Fig. 2.5	Leakage Flow Pattern from Mock-up Straight Pipe .....	28
Fig. 4.1	Surface Temperatures of Outer Jacket of Simulated Sodium Pipe .....	29
Fig. 4.2	Temperature Histories of Simulated Sodium Pipe .....	30
Fig. 4.3	Records of Cover Gas Pressure in Sodium Heater and Sodium Leak Rate .....	31
Fig. 4.4	Temperature Profiles in Gas Phase below Simulated Sodium Pipe (Vertical Profiles) .....	32
Fig. 4.5	Temperature Profiles in Gas Phase below Simulated Sodium (Horizontal Profiles) .....	33
Fig. 4.6	Temperature Profiles in Gas Phase below Simulated Sodium Pipe (Vertical Profiles) .....	34
Fig. 4.7	Temperature Profiles in Gas Phase below Simulated Sodium Pipe (Horizontal Profiles) .....	35
Fig. 4.8	Transient Oxygen Concentration .....	36
Fig. 4.9	Transient Gas Pressure .....	37
Fig. 4.10	Transient Gas Temperature above Test Pipe .....	37
Fig. 4.11	Transient Pool Temperature .....	38
Fig. 4.12	Transient Vessel Temperature .....	38

Fig. 4.13	Transient Heat Flux Toward Vessel Wall .....	39
Fig. 4.14	Partition of Structures of Test Vessel for Evaluating Energy Balance .....	40
Fig. 4.15	Total Combustion Energy .....	41
Fig. 4.16	Sodium Latent Heat and Energy Transferred to Gas .....	41
Fig. 4.17	Energy to Vessel Wall .....	42
Fig. 4.18	Energy to Catch Pan .....	42
Fig. 4.19	Sodium Combustion Rate .....	43
Fig. B-1	Details of Sodium Catch Pan .....	49
Fig. B-3	Temperature Profiles of Gas Phase below Test Pipe (Vertical Profiles) 120 sec ~ 240 sec .....	50
Fig. B-4	Temperature Profiles of Gas Phase below Simulated Sodium Pipe (Vertical Profiles) 300 sec ~ 900 sec .....	51

## 1. 緒 論

原型炉「もんじゅ」では、2次系の設計基準のNa漏洩事故として配管の $1/4 \cdot Dt$ 相当破損孔からのNaスプレー-燃焼を想定している。しかし、実機のNa配管の廻りには保温構造があり、Na漏洩事故時にはこの保温構造が漏洩Naのスプレー-状飛散を防止する機能を有することが期待出来る。ただ、この機能を明らかにするには、運転時の系統圧を印加させた状態で、漏洩する高温のNaによって配管まわりの保温構造が崩壊しないことを実証する必要がある。そこで、「もんじゅ」実機配管保温構造を出来るだけ忠実に縮尺した試験模擬配管を製作し、これを用いたNa漏洩実験を実施した。

本報告書はこの実験について報告するもので、第2章で試験装置の説明を行い、第3章では、試験条件および試験方法を、第4章で試験結果を説明し、結論を第5章にまとめた。



## 2. 試験装置

本試験は、安全工学部プラント安全工学室の大規模ナトリウム漏洩燃焼試験施設（以下、サファイア施設）を使用して行った。サファイア施設は、SOLFA-1、SOLFA-2、Na貯蔵供給設備および大型排煙廃液処理装置から成り、今回の試験では、その内のSOLFA-2を用いて行った。

### 2.1 SOLFA-2

詳細は、すでに別報<sup>1)</sup>で報告したので、ここでは、装置の概略と本試験のための変更部分についてのみ説明する。

Fig. 2.1に装置廻りの概略フローシートを、Fig. 2.2にSOLFA-2の断面図を示す。

SOLFA-2試験装置は、Fig. 2.2に示す様に、試験容器本体と酸素ガス供給ヘッダー、試験容器周囲の水冷ジャケット、試験容器下部に設置したNa受皿、このNa受皿に取付けたNaドレン配管および試験容器内部の高さ方向中央部に水平に取付けた配管保温構造模擬試験体（以下模擬試験体という）から成る。

試験容器は、内容積約100m<sup>3</sup>のステンレス鋼（SUS304）製の縦置円筒型密閉容器で、周囲の水冷ジャケットはNa燃焼時の発熱に起因する容器の過度な温度上昇を防止するために設置してある。ただ今回の試験では、発熱量が少なく水冷ジャケットへの水張りは行っていない。Na受皿は模擬試験体の下方約2040mmに位置し、漏洩させたNaをこれで受止めて貯溜する。貯溜したNaは、Na受皿中央に設けたドレン配管を通して、試験後に不純物沈殿タンクにドレンする。酸素ガス供給ヘッダーは、Na漏洩試験中、試験容器内に酸素ガス（純度100%）を最大300N<sup>3</sup>/minで供給することが出来る。この酸素ガス供給ヘッダーのガス吹出部は、容器内壁に沿って設けた環状ヘッダーの周方向に無数の穴を開け、これらの穴をワイアーメッシュで包み、ガスが周囲におだやかに流出するよう設計してある。この他に、試験容器には、内圧が設計圧力（2kg/cm<sup>2</sup>）以上となったときにガスをブローダウンするラプチャーディスク（破裂設定1.71kg/cm<sup>2</sup>）が設けてある。

## 2.2 模擬試験体

「もんじゅ」2次主冷却系配管は、22B(SUS304, Sch20)管であるが、模擬試験体では8B(SUS304, Sch20)管を用いた。Fig. 2.3に、その構造を示す。

周囲の保温構造に用いた内・外装板の板厚、連絡管台、連絡管台フランジ、あて板の厚み、外装板継手部、その他、ビス等の寸法については、「もんじゅ」と同一寸法である。全体の線縮尺比は8/22で0.39であるが、これらの部品が実寸であるために、構造強度の観点からは「もんじゅ」2次系配管より強化されている。

### (1) Na漏洩孔

模擬試験体のNa漏洩孔断面積は、模擬試験体の線縮尺比0.39を面積縮尺比に換算し2.3cm<sup>2</sup>とした。すなわち、

$$15.0\text{cm}^2 \times 0.39 \times 0.39 = 2.3\text{cm}^2$$

この式で、15.0cm<sup>2</sup>とは、「もんじゅ」の想定漏洩孔1/4・Dtに相当する。2.3cm<sup>2</sup>は、直径1.69cmの円の面積に相当する。開孔位置は、保守側の試験結果を得る目的で水平配管の中央部上側とした。

### (2) 部材

クランプ、連絡管、スペーサ等の構造は、可能な限り「もんじゅ」配管を線縮尺比に従ってスケールダウンした。

### (3) 材質

保温材、配管、内装板、外装板等の材質は「もんじゅ」と同一である。

保温材は、1層目に原子炉級ロックファインを、2層目及び3層目には一般のロックファインを使用した。

## 2.3 Na受皿

Na受皿は、「もんじゅ」の床ライナを模擬するためのもので、3400<sup>1D</sup>×456<sup>H</sup>×板厚6<sup>t</sup>の一般炭素鋼で製作した。Na受皿中央部には、貯溜したNaをドレンするドレン配管(1Bsch20のSUS304製)が設けられている。Na受皿の構造図をAPPENDIX-BのFig. B-1に示した。

## 2.4 計測装置、計測項目及び計測方法

基本的には、RUN-E1<sup>1)</sup>で使用した各計測装置と同じで、Fig. 2.2 にそれらの配置を示す。温度、圧力、流量、酸素濃度等の計測器信号は、計算機(YHP-1000)を使用し、MT(Magnetic Tape)にデジタル信号として収録した。

模擬試験体からのNa漏洩の様子は、ビデオカメラ2台と赤外線カメラ1台により撮影した。

### 2.4.1 模擬試験体の熱的挙動

模擬試験体の熱的挙動は、Fig. 2.4 に示す試験体に設置した熱電対で測定した。なお、これらの熱電対の配置と役割は、以下の考えで決めた。

- (1) 配管温度の試験前制御用 (TE1088)
- (2) 内装板、外装板が熱的に破壊していないことを示すために内・外装板温度を測定する。 (TE1089~TE1091, TE1094 ~TE1100)
- (3) Na/保温材反応が起こっていないことを示すために保温材温度を測定する。 (TE1092, TE1093)
- (4) 保温構造内での初期漏洩Naの流動方向を測定する。

但し、RUN-B3の試験結果<sup>2)</sup>から、内装板の温度は漏洩開始直後にNa漏洩温度と同一となり、漏洩中もこれがほとんど変化していないことがわかっている。また、漏洩Naは外装板内側下部に沿って広がっていることなどから、Fig. 2.4に示すごとく外装板下部に多くの熱電対を配置した。

- (5) 可燃性ガスの燃焼、Naの上方噴出の有無の判定をする。 (TE1099)

### 2.4.2 酸素濃度変化

RUN-E1試験<sup>1)</sup>と同様に、容器の上・中・下の各場所における酸素濃度の時間変化の追跡のため、Fig. 2.2に示す位置に自動ガスサンプリング装置、ガスクロマトグラフ装置、磁気式酸素濃度計のそれぞれのガス吸引口を設けた。

### 2.4.3 ガス圧力変化、水素ガス濃度変化、エアロゾル濃度変化

これらの測定方法、測定装置は、すべてRUN-E1<sup>1)</sup>で使用したのと同じである。

#### 2.4.4 模擬試験体からの熱放射

RUN-B3試験の結果<sup>2)</sup>では、試験体の外装板表面でNa燃焼が進行し、このため、外装板表面温度は約750℃まで上昇した。このような高温では、外装板表面からかなりの放射エネルギーが放出されるものと予想した。そこで、この放射エネルギーの測定のため、RUN-E1試験と同様、試験容器壁に2つの熱流速計を設置し、一方の熱流速計はその前面を放射熱に対して遮蔽し、他方の熱流速計は裸のままの状態とした。熱流速計の設置場所は、模擬試験体と同一な水平面上で、その位置をFig. 2.2 に示す。

#### 2.4.5 模擬試験体からのNa漏洩形態

模擬配管からの漏洩形態についてこれまでに実施した試験は、実寸大の試験体による水試験<sup>3)</sup>、および縮尺モデル配管によるSOFT-1装置を用いたNa漏洩試験Run-B3<sup>2)</sup>の2つである。後者では、外装板のヒーター取り出し口の当て板がはずれるようになっており、そこからNaが漏洩した。しかし、本試験での模擬試験体では、保温構造に若干の改良を加えている。このため、前者の水試験と同様、Naは外装板の継目から漏洩するものと予想される。そこで、継目のずれ方次第で漏洩Naが試験容器側壁に衝突する可能性があるために、その検討を以下の様に行った。

水試験の結果によると、Fig. 2.5に示すように、20cm落下するうちに50cm拡がった。同様に今回のNa試験でも、噴流が放物線を描いて落下するものと仮定すると、試験体の高さが2.1mであることから、Na受皿に落下した時の水平方向の拡がり距離は、次のようになる。

$$\frac{0.2}{(0.5)^2} = \frac{2.1}{x^2}, \quad x = 1.6 \text{ m}$$

SOLFA-2の内半径は約2.0mで、この水平方向の拡がり距離よりも大きい。よってNa噴流が、SOLFA-2の内壁に衝突することはない。

漏洩形態は、空間に配置した熱電対で推定できるようにした。また、漏洩Naの床での飛散飛沫が、万が一試験容器壁に衝突した場合をも想定して、容器壁にも熱電対を配置した。

これらの他に、漏洩形態を可視化するための耐熱ビデオカメラ（エアロゾル密度が濃い時は機能しない）と赤外線カメラ（視野は狭いが）を配置した。

#### 2.4.6 その他の温度計測

容器壁温度、上記ガス空間温度、およびその他の箇所の温度計測のための熱電対配置は、基本的にRun-E1試験と同じである。

### 3. 試験方法

#### 3.1 試験条件

試験条件を次に示す。個々の条件に対する根拠は、次節以降で説明する。

(試験条件)

漏洩Na温度	: 505℃
漏洩Na流量	: 目標値3.6kg/sec(実測値3.1kg/sec)
漏洩Na総量	: 約2.4ton
Na漏洩時間	: 約13分
雰囲気条件	: 空気雰囲気。湿分成り行き。初期温度は室温。
通気条件	: 試験容器密封。Na漏洩期間中、85.8Nm <sup>3</sup> /hrで酸素を一定速度で注入。

模擬配管Na圧力: 3.76kg/cm<sup>2</sup>G

##### 3.1.1 Na漏洩条件

「もんじゅ」2次主冷却系で想定し得るNa漏洩事故の内、最も漏洩Na温度の高いのは、2次主冷却系配管室ホットレグ配管からの漏洩で、その時の配管内Na圧力は3.761kg/cm<sup>2</sup>Gである。そこで、配管模擬試験体のNa内圧は3.761kg/cm<sup>2</sup>-Gとし、Na温度は上記の実機ホットレグ配管内のそれに等しい505℃とした。

なお、Na加熱器のカバーガス圧力は、APPENDIX-Aに示したように、上記の圧力にNa供給系の圧損(0.115kg/cm<sup>2</sup>G)とNaヘッド圧[-0.0868(漏洩初期)kg/cm<sup>2</sup>G]とを足し合わせた3.789kg/cm<sup>2</sup>Gとした。

##### 3.1.2 雰囲気条件

試験容器は、密封条件とした。さらに、試験中のNa燃焼を継続させる目的で、予備解析結果から決定した流量85.8Nm<sup>3</sup>/hrの酸素ガスを容器外部から強制注入した。酸素の注入はNa漏洩開始後144sec後に開始した。

##### 3.1.3 Na漏洩量

Na漏洩量は、Na受皿のNa深さが、その高さの半分となる約2.4tonとした。

### 3.1.4 漏洩 N a 流量

漏洩孔を含めた漏洩 N a 流路の圧力損失係数は、過去の実験からすでに得られている。ここでは、その値を用いて流量を求める。

Table-1 に、これまでに得た圧力損失係数を示す。実寸大の模擬配管試験体からは、圧力範囲 2.4~6.6 kg/cm<sup>2</sup>G で 2.3~3.0 を得ている。ただ、N a を使用した SOFT-1 装置による RUN-B3 試験では、この値が 58.9 とかなり大きい。これは次の点で水試験と異なっていたためである。

- (1) 試験時の N a 供給圧力が、水試験の 1/10 以下と低い。
- (2) このため、水試験では、外装板の継目から漏洩しているが、RUN-B3 試験では、ヒーター取り出し口から漏洩した。
- (3) RUN-B3 の模擬試験体の、実機に対するスケール比は 0.27 であるが、配管部に設けた開口面積は、実機 1/40t 破損口面積 15m<sup>2</sup> の 0.27 倍とはなっていない。そこで、この RUN-B3 のデータは無視し、Table-1 から模擬試験体の圧力損失係数は 2.5 であるとする。この時の N a 漏洩流量は、次の計算から 3.64 kg/sec となる。

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot A^2 \cdot P}{\eta}} = \sqrt{\frac{2 \times 3.761 \times 9.804 \times 10^4 \times (2.3 \times 10^{-4})^2 \times 832}{2.5}}$$

$$= 3.6 \quad (\text{kg/sec})$$

### 3.2 試験方法

試験は、次の手順で計測制御装置 (CENTUM) の自動シーケンスを使用して行った (Fig 2.1 のフローシートを参照のこと)。

#### (I) N a 供給および酸素ガス供給要領

- N a 加熱器内の N a を 505℃ まで昇温した後に、N a 加熱器内のガス圧を 3.8 kg/cm<sup>2</sup>G まで加圧して、その状態で保持する。
- N a バルブを開度 100% まで開とする。

以上の準備が整った所で、次の N a バルブを開き、模擬試験体から N a を漏洩させる。なお、このときの N a 漏洩流量の制御は行わない。試験容器内への酸素ガス供給は、N a 漏洩開始から 144 秒後に流量 85.8 N m<sup>3</sup>/min の一定で開始した。

(2) Na 供給および酸素ガス供給停止要領

以下の停止条件のいずれかが満足された時点で、Na および酸素ガスの供給を停止した。

(停止条件)

- ・ Na 漏洩積算量が2.4tonを越えたとき。
- ・ 試験容器内圧力が1.6kg/cm<sup>2</sup> 以上になったとき。
- ・ 試験容器内天井壁温度が400℃（設計温度）を越えたとき。
- ・ 予期せぬ事態が発生し、緊急停止の必要性を生じたとき。

(3) Na 受皿内貯溜ナトリウムドレン

ナトリウム受皿に貯溜されたNa 温度が450℃以下に下がり、尚かつNa 漏洩開始から2 時間経過した時点で、Na 受皿内のNa を不純物沈澱タンクにドレンした。

試験経過記録を、Table-2に示す。



## 4. 試験結果

### 4.1 模擬試験体の熱的挙動

Fig. 4.1 に、模擬試験体の外装板外表面温度の時間変化を示す。外装板外表面の下部4ヶ所に取り付けた熱電対 (TE1097, TE1096, TE1098, TE1100) による温度変化傾向は類似している。このため、漏洩 Na は、最初は外装板内側下部に沿って配管の長さ方向に一様に広がったものとする。

一方、配管クランプ上部の温度 (TE1099) は、漏洩期間中は、Na 漏洩温度である 500℃ には到達していない。このため、この場所には Na の侵入は有っても、間歇的であったと考える。

Na 漏洩口からクランプまでの間の3ヶ所の温度 (TE1097, TE1096, TE1098) は、漏洩停止後、Na の燃焼熱により上昇し、最高 580℃ 程度になった。一方、クランプより外側 (TE1100) では、漏洩停止後の温度上昇は見られない。これは、試験体の端の外装板の継目が、試験体両端を覆った保温材の中に覆われているためである。このことは、試験後処理のところでも触れる。

漏洩開始後、すべての外装板の外表面温度に温度ピークが現れている。ビデオカメラによる観察では、漏洩開始直後に可燃物ガスの燃焼が観察されていることから、温度ピークの原因はこの可燃物ガスの炎によるものと推定する。

Fig. 4.2 に、Fig. 4.1 に示した模擬配管試験体の A-A 断面、すなわち漏洩口を横切った断面の各部温度変化を示す。まず、内装板温度 (TE1089, TE1091) は、Na 漏洩中はどれもほぼ同一温度、すなわち漏洩 Na と等しい温度であった。漏洩停止後は、なだらかな温度低下を示している。これより、破損口からの流出 Na は、始めは内装板と配管との隙間の領域に拡がり、そこでは燃焼はなかったものと推定する。

次に、保温材温度 (TE1092, TE1093) を見ると、上部 (TE1092) と下部 (TE1093) で明確な差が認められる。すなわち、下部では、漏洩開始直後に温度が漏洩 Na 温度と等しくなり、その後の漏洩期間中はほぼ一定であるが、上部 (TE1092) の温度は漏洩期間中も上昇し続けている。これは、内装板の継目およびヒータ取り出し口から流れ出した Na が、保温材の下方から溜ってゆき、次第とその液位が上昇したものと推定する。

一方、外装板の温度 (TE1094, TE1096) を見ると、外装板下部 (TE1096) の温度は、Na 漏洩期間中ほぼ Na 漏洩温度に等しく一定の値であったが、側部、上部と上に行

くに従って、その温度が時間的に変動し、特に上部(TE1094)は、漏洩末期では最高700℃にまで到達している。これは、上部でのNa燃焼によるものと推定する。

これらの知見をまとめると、以下のようになる。

- (1) 破損孔より流出したNaは、ほぼ瞬時に内装板と配管の隙間を満たし、その後、内装板の隙間(内装板の継目、ヒータ取り出し口)から保温材中に流入した。
- (2) 保温材中に流入したNaは、保温材下部から溜まり始め、外装板の継目から外部に流出するとともに、保温材中の液位を上昇させ、さらに保温材の毛細管現象によって配管上部にまで広がった。
- (3) Naの保温材との化学反応による温度上昇はない。
- (4) Naが外装板の継目より外部に流出し始めると、それと同時に可燃性ガス\*が放出され燃焼した\*\*。

( \*保温材中に含まれる水分とNaとの反応により発生する水素であると予想する。  
 \*\*ビデオカメラによる撮影結果より推測した。 )

- (5) 外装板表面における可燃性ガス及びNaの燃焼熱のため、外装板と保温材のそれぞれの温度はNa漏洩初期においては漏洩Na温度よりも上昇した。しかし、続々と漏洩するNaによって冷却され、Na漏洩期間中はほぼ漏洩Na温度(500℃)と同一となった。但し、漏洩Naにさらされていない模擬配管側部・上部は、燃焼熱によって温度が変動し、Na漏洩期間中でも、漏洩Na温度以上となる場所もあった。
- (6) Na漏洩が停止すると、それまで漏洩Naによって冷却されていた配管下部の外装板が、その表面のNaの燃焼熱によって温度上昇をし始め、Na燃焼が終了すると下降した。

#### 4.2 Na漏洩流量と漏洩形態

Fig. 4.3に、Na加熱器のカバーガス圧の変化とNa流量変化を示す。Na漏洩中のカバーガス圧は、試験条件の設定値にほぼ等しい3.7kg/cm<sup>2</sup>Gであり、変動はみられず一定であった。

測定されたNa流量は、220ℓ/min(3.1kg/s)であり、これも漏洩中ほぼ一定であった。これは事前に計算で求めた3.6kg/sにほぼ一致する。ちなみに、実測データを

基に、模擬配管破損口からみた試験体の圧損係数を計算すると\*、

$$\eta = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot A^2 \cdot \rho}{W^2}$$

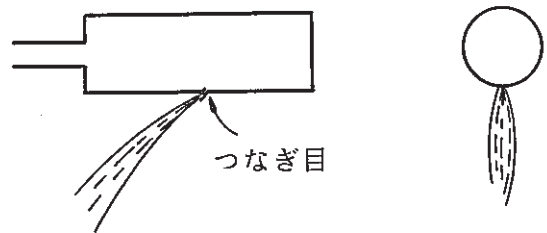
$$= \frac{2 \cdot 3.7 \cdot 9.804 \times 10^4 \cdot (2.3 \times 10^{-4})^2 \cdot 832}{3.1^2} = 3.33$$

( \* APPENDIX-Aに示すように、Na配管途中の圧損、Na高低差はかなり小さいのでここでは無視する。 )

となる。

次に、Naの漏洩形態については、規則正しく配置した合計137本の熱電対の信号から調べた。それらの出力を図形処理し、Naが漏洩している空間の温度分布として100℃幅の等温線で表してFig. 4.4に示す。図は、模擬配管から下の空間を、配管から横方向に見た時の温度分布の変化を示しており、右上に示した時刻は、試験開始（ナトリウム供給弁の開放）からの経過時刻である。Naは、図の左から供給されている。図から分かるように、Naは試験開始後約7秒後に配管から外に漏れ出している。Fig. 4.5に、試験開始後10秒の時点における試験容器の横方向断面のガス温度分布を、床から0.25m、1.0m、及び1.5mのそれぞれの高さについて示す。図からNaは、配管長手方向に直角な方向については左右対象に漏れ出していること、すなわち概略、右図の様なものであることが推定できる。

右図で、Naが配管長手方向に速度成分を持って、落下している（すなわち、真下に落下しない）のは、外装板の継目から漏れ出したためと推定する。漏洩開始直後の数秒間は、模擬配管下



のガス空間にも温度ピークを生じたが、その後は、床上のNa落下地点付近の空間に温度ピークを生じ、途中の空間の温度ピークはなくなっている。ガス温度は、漏洩開始後数秒で最高900℃近く上昇しているが、これは落下しているNaのまわりの燃焼域の温度を計測したためである。

Fig. 4.6に、試験開始後1分までの温度分布を10秒ごとに示す。時間の経過とともに、ガス空間における高温部分の拡がりが見られるが、30秒以降はこの拡がりも停止

し、解析コードにモデル化されているようなNa燃焼ゾーンが形成されている。

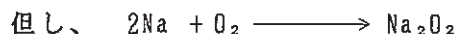
Fig. 4.7に、試験開始後1分の時点でのより詳細な温度分布を示すが、Na燃焼ゾーンの存在がはっきりとわかる。試験開始後1分経過すると、このゾーン以外の空間にも、細かな高温領域が見られる。

模擬配管の横および正面から見た温度分布については、試験開始後2分以降の結果をAPPENDIX-Bに示す。Fig. 4.7で見られたNa燃焼ゾーンも、時間経過とともに、その境界が不明瞭となっている。これは、ガス対流により、温度の均一化が進行したためである。Naの漏洩時間が約13分であったため、APPENDIX-BのFig. B.4は漏洩終了後のものもある。それまで700℃以上の領域が常に存在していたのに対して、15分後の図では最高温度は高々600℃である。

#### 4.3 酸素濃度変化

Fig. 4.8に、酸素濃度の時間変化を示す。ここに示した酸素濃度変化から、最大酸素消費速度を求めると、SOLFA-2試験容器上部で約300m<sup>3</sup>/hr、中部で約210m<sup>3</sup>/hr、下部で約130m<sup>3</sup>/hrとなり、平均は約210m<sup>3</sup>/hrとなる。(本試験では、試験途中から酸素を85.8Nm<sup>3</sup>/hrで注入しているが、上記最大値をとった時刻では、まだ注入は開始していない)。なお、これらは、常温、常圧に換算した時の酸素ガス消費速度である。100%Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>反応を仮定して、上に述べた平均酸素ガス消費速度をNa燃焼速度に換算すると、

$$\frac{210 \times 2 \times 23}{22.4 \times 10^{-3} \times 3600} = 120 \text{gNa/sec}$$



となる。一方、4.2章より、漏洩Na流量が3100g/sと測定されていることから、この値は、漏洩Naの約3.9%に相当する。

ちなみに、実機の安全解析のごとく100%スプレー燃焼を想定した場合は、燃焼Naの漏洩Na流量に対する割合は約30%にもなる<sup>1)</sup>。それに対して、配管からの現実的な漏洩の場合は、その約1/10にすぎない。

今回の場合、Na落下高さが、前記スプレー実験の約半分であり、Na燃焼速度がNa落下高さにはほぼ比例するものと仮定すると、上記1/10は1/5となるが、いずれにしても、「もんじゅ」設計での考え方である「配管からのNa漏洩は、100%スプレー

と仮定する”は、Na 燃焼速度に関して十分保守的であることが実証されたことになる。

#### 4.4 ガス圧力とガス温度変化

Fig. 4.9 に SOLFA-2 容器内ガス圧の時間変化を、Fig. 4.10 に模擬配管上部空間のガス温度を高さの異なる3点について示す。

模擬配管上部空間は、かなり大きな体積を有しているが（配管から容器上端までは約6m）、激しい対流のために、Fig. 4.10 から明らかな様に、場所によるガス温度差はほとんど認められない。一方、ガス温度の時間変化については、Na 漏洩開始より急上昇し、最高450℃を経た後に低下し、Na 漏洩終了時点ではほぼ一定となり、その後 Na 漏洩停止とともに急激に低下している。ガス圧も、同様な傾向を示し最高圧力は、0.9kg/cm<sup>2</sup>G を記録した。但し、本試験では、途中から酸素ガスの強制注入を行っており、この注入は、Na 漏洩開始後2.4分経過した時点で開始している。このため、燃焼が穏やかになる Na 漏洩終了ごろに圧力の上昇が見られた。

以下に、ガス圧の時間変化と平均ガス温度の時間変化との関係を比較検討してみる。Na 受皿より上の空間の体積は95.5m<sup>3</sup>である。よって、ガスが断熱膨張するとして、理想気体則から最高ガス圧力を計算すると、

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{T_r + 273.15}{T_i + 273.15}$$

$$= 2.34 \text{ kg/cm}^2\text{-a}$$

$$= 1.34 \text{ kg/cm}^2\text{G}$$

$P_i$  : 初期ガス圧力 1.013kg/cm<sup>2</sup>-a  
 $T_i$  : 初期ガス温度 40℃  
 $T_r$  : 最高圧力到達時 450℃  
 ガス温度

となり、測定値0.9 kg/cm<sup>2</sup>G よりもかなり大きい。原因として、次の2つの要因を考えている。

- (1) 燃焼による酸素減少分
- (2) Na 受皿下のガス空間へ圧力が逃げた効果。（受皿取付け部を通して上部空間と下部空間との間にガスリークが存在する）

このことを、明らかにするため、上記2要因を考慮して、圧力測定値1.34kg/cm<sup>2</sup>G に以下の補正を加えてみる。

ガスを理想気体とし、試験初期を*i*、最高圧力に到達した状態を*f* とすると、

$$\begin{aligned}
 P_i (V_1 + V_2) &= (n_{N_2} + n_{O_2}) RT_i \\
 P_f V_1 &= (n_{N_2,1}^f + n_{O_2,1}^f) RT_f \\
 P_f V_2 &= (n_{N_2,2}^f + n_{O_2,2}^f) RT_f \\
 n_{N_2,1}^f + n_{N_2,2}^f &= n_{N_2}, \quad n_{O_2,1}^f + n_{O_2,2}^f = n_{O_2}
 \end{aligned}$$

が成立する。

$V_1, n_{O_2,1}, n_{N_2,1}$  : 受皿より上の容積、および $O_2, N_2$ モル数

$V_2, n_{O_2,2}, n_{N_2,2}$  : 受皿より下の容積、 "

酸素消費速度は測定結果より、上部・下部の平均で約21%/7分、また最高ガス圧力到達時刻が約2分であることから、 $n_{O_2}$ は15モル%に相当する。

上式より、

$$\begin{aligned}
 n_{N_2,1}^f + n_{O_2,1}^f + n_{N_2,2}^f + n_{O_2,2}^f &= \frac{P_f}{R} \left( \frac{V_1}{T_f} + \frac{V_2}{T_f} \right) = n_{N_2} + n_{O_2} \\
 &= \frac{P_i}{RT_i} (V_1 + V_2) \cdot (1 - (0.21 - 0.15))
 \end{aligned}$$

となり、

$$\frac{V_1}{T_f} + \frac{V_2}{T_f} = \frac{P_i}{P_f} \frac{V_1 + V_2}{T_i} \cdot 0.94$$

となる。ここで、 $V_1=95.5m^3$ 、 $V_2=15.5m^3$ 、 $T_2=70℃^*$ 、 $T_1=450℃$ であるから、

$$\begin{aligned}
 P_f &= P_i \cdot \frac{V_1 + V_2}{T_i} \cdot 0.94 / \left( \frac{V_1}{T_1} + \frac{V_2}{T_2} \right) = 1.88kg/cm^2-a \\
 &= 0.88kg/cm^2 G
 \end{aligned}$$

\*受皿下部空間の約2分後の測定値 (TB2090, 2091, 2092の平均温度)

となり、測定値とよく一致する。これよりNa受皿取付け部を通した下部ガス空間へのガスリークを適切に評価することで、上記のガス圧力はガス温度に対応することが判る。

## 4.5 Na受皿上のNaプール温度、各構造材温度

Fig. 4.11にNa受皿に溜まったNaプールについて、その底と底から10cm上方の2ヵ所の温度変化を示す。底から10cmの場所での温度は、最初の数分間で最高950℃のピークを示しているが、これは落下して来るNaの火炎温度を熱電対が拾ったためである。Na漏洩流量が3.1kg/sで、Na受皿直径が3.4mであることから、Na受皿の中のNa液位上昇速度は、先に得たNaが落下する際の空間での燃焼割合4%を考慮することで、

$$\frac{(1-0.04) \times 3.1/832}{3.4^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \times 100 \times 60 = 2.4 \text{ (cm/分)}$$

となり、10cmの深さになるには約4分かかる。Fig. 4.11でも約4分以降から温度が本来のNaプール温度である約600℃となっている。

漏洩中のNaプール温度は約550℃で、漏洩Na温度505℃に比べると約50℃高い。これは、落下中にNaが燃焼によって加熱されたためである。Na漏洩終了後は、Naプール温度は酸素供給の停止のために単調に低下している。

Fig. 4.12に試験容器各部の温度変化を示す。ここに示したのは、(A) 試験容器頂部鏡板外表面温度、(B) 同内表面温度、(C) 側壁内表面温度、(D) ジャケット内ガス温度（今回の実験では、水冷ジャケット内には水を張っていない）、の4ヵ所の温度である。図から、試験頂部の温度が側部の温度より高くなっているが、これは、ガス対流のために熱いガスが上昇して頂部に衝突し、側部より多くの熱量が加えられたためである。

Fig. 4.13に試験容器側壁内側に取付けた熱流束計で得た壁への熱流束とその時間変化を示す。以前実施した、模擬配管からのNa漏洩実験RUN-B3<sup>2)</sup>の結果によると、試験体外装板表面でのNa燃焼によって、外装板表面温度はかなり高温（～750℃）となり、またASSCOPSコードによるRUN-B3試験後解析でも、外装板表面からの熱放射が重要であることが指摘されている。そこで、すでに述べたように、本試験では、配管表面からの熱放射量を明らかにする目的で、Fig. 4.13に示したように、2つの熱流束計を配管と同一の高さの壁面上に設置している。

測定結果から、配管表面からの放射熱流束は、対流のそれと比べてかなり小さいことが判った。また、壁への放射熱流束は、漏洩初期に多く、燃焼が進むにつれて少な

くなっている。これは、ガス中に存在する多量のエアロゾルのためにガスが不透明になったためと考える。

#### 4.6 エネルギーバランス

模擬配管からの漏洩Naは、落下しながら燃焼・発熱し、その後はNa受皿上に溜まり、Na受皿上で燃焼しながら、Na受皿や周囲の構造材へ熱を伝える。一方、高温になったガスは試験容器に熱を伝える。これより、燃焼エネルギーは、最終的には試験容器各部の温度上昇分とバランスすることになる。試験容器各部の温度は、熱電対で測定しているため、これらのデータから逆に燃焼エネルギーを求めることが出来る。エネルギーバランスを評価する上で、考慮に入れた構造材は、熱容量の大きさと温度上昇の程度が無視出来ないものを選んだ。Fig. 4.14にエネルギーバランス評価上考慮した部位とそれぞれの部位の代表温度を測定した熱電対の番号を示す。

試験容器は、全体として一様に温度上昇を来たしたわけではなく、温度上昇幅は場所によって異なる。ここでは、試験容器を温度不均一の少ない容器頂部(WALL1)、容器同上部(WALL2)、胴下部(WALL3)、Na受皿底(FLOOR1)、Na受皿支持フランジ(FLOOR2)、Na受皿側部(FLOOR3)、容器底部(FLOOR4)の7つに分割した。各部の温度は、内表面と外表面のそれぞれについて平均し、得られた内表面平均温度と外表面平均温度の平均をその代表温度とした。

なお、ガスについては、上部と下部との2つに分けて評価したが、後述するようにガスの熱容量が小さく、その全体のエネルギーバランスに与える効果は無視出来る。時刻tにおけるエネルギーバランスは、

$$q_{\text{heat}} = W C_p (T_{\text{POOL}} - T_{\text{IN}}) + M_{\text{gas}} C_p \dot{T}_{\text{gas}} + M_{\text{wall}} C_p \dot{T}_{\text{wall}} + M_{\text{floor}} C_p \dot{T}_{\text{floor}}$$

ここに、 $q_{\text{HEAT}}$  : 燃焼による発生熱(Kcal/sec)

$W$  : Na漏洩流量(kg/sec)

$C_p$  : 比熱 (Kcal/kg $^{\circ}$ C)

$M$  : 重量 (kg)

$T, \dot{T}$  : 温度( $^{\circ}$ C), 温度変化率( $^{\circ}$ C/sec)

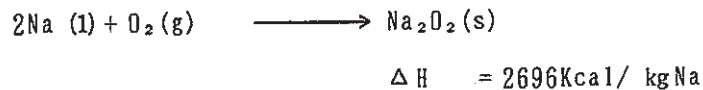
で表され、この式から発生熱の時間変化を評価することが出来る。

漏洩開始から10分間のデータを用いて、上式の各項を計算で求めた。Fig. 4.16に、



Naの潜熱（上式右辺の第1項）とガスのエネルギー変化を、Fig. 4.17に、容器側壁のエネルギー変化を、Fig. 4.18に、受皿と容器底のエネルギー変化をそれぞれ示す。

まず、Fig. 4.16より、ガスの保有エネルギー変化は、他の項に比べると、約一桁小さいことが分かる。Fig. 4.15から、燃焼熱は、最初の約90秒間は3000Kcal/sec、その後の漏洩期間中は300～400Kcal/secと安定した値を示している。燃焼熱からNa消費速度への換算のために、100%Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>生成反応を仮定すると、反応熱は、



であることから、Na消費速度を求めるには、上記の燃焼熱をΔHで割ればよい。また、4.3節で、酸素濃度の時間変化が得られているため、ここでの評価とは独立にNa消費速度を求める事が出来る。両者の値をFig. 4.19に示す。ここで、酸素濃度の時間変化からNa消費量を求めるには、次の式を用いた。

$$-\dot{m}_{\text{Na}} = \frac{23}{16} \frac{\dot{m}_{\text{O}_2}}{C_{\text{O}_2}} \cdot C_{\text{O}_2} = \frac{23}{16} \frac{1.013 \times 10^5 \times 95.5}{8.3169 \cdot 300} \cdot 0.21 \cdot 32 \times 10^{-3} \cdot C_{\text{O}_2}$$

$$= \frac{23}{16} \cdot 124 \cdot \dot{C}_{\text{O}_2} = 178 \cdot \dot{C}_{\text{O}_2}$$

ここで  $\dot{m}_{\text{Na}}, \dot{m}_{\text{O}_2}$  : 燃焼によるNa, O<sub>2</sub>の消費量 (kg/s)  
 $\dot{C}_{\text{O}_2}$  : 酸素濃度変化 (-/sec)

上式には、酸素注入分が含まれていないので\*、全体としては、

$$\dot{m}_{\text{Na}} = -178 \cdot \dot{C}_{\text{O}_2} + \frac{1.013 \cdot 10^5 \cdot 85.5}{8.3169 \cdot 300} \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{23}{16} / 3600$$

$$= -178 \cdot \dot{C}_{\text{O}_2} + 0.044 \text{ (kg/s)}$$

\* 酸素注入は漏洩開始後 144sec

となる。

Fig. 4.19から、次の事がわかる。まず、燃焼開始後100秒間のNa燃焼速度は

非常に大きい、それ以降は約150g/secの比較的安定した値に落ち着き、図中の実線（酸素ガス測定値より求めた値）に接近している。これより、模擬配管からのNa漏洩によるNa燃焼速度は、100~200g-Na/secであると判定出来る。

一方、初期の100秒間のNa燃焼速度は異常に大きい、これは構造材の吸収エネルギーの計算で、試験容器の内・外壁表面の平均値を代表温度として採用したためと考える。すなわち、構造材の内側表面温度測定用の熱電対は、高温ガスにさらされていることから、例えばFig. 4.12の(A)で明らかなように、壁近傍のガス温度を拾い、実際の容器内表面温度よりも高い温度を示していたことがわかる。このような温度を、容器の代表温度として用いると、実際よりも高めの吸収エネルギーとして評価することになる。誤差の少ない外表面温度測定値を用いて吸収エネルギーを評価し直したものをFig. 4.19に破線で示す。初期の対流する高温ガスによる外乱がかなり少なくなっている。

#### 4.7 模擬試験体試験後検査

試験後、炭酸ガスによる安定化処理を施した後に試験体を試験容器から運びだし、その分解検査を実施した。検査の様子は、ビデオカメラ撮影及び35mmカメラ撮影により記録した。目視観察による所見を以下に示す。

- (1) 外装板表面には、Naエアロゾルが多量に付着していたが、板そのものの破損はなく、又つなぎめも特に破損した形跡はない。
- (2) 試験体両端を覆っている保温材の中に、多量の金属Naが存在していた。これは、外装板両端の継目より漏洩したNaが、両端を覆っている保温材中に流れ込み、しかも、両端の保温材のカバーには、Naが漏れ出るところがなかったため、そのまま保温材中に金属Naとして残っていたためであると考えられる。
- (3) 試験体部の保温材は、黒く変色しもろくなっているが、原型はとどめており、特にNaと化学反応した形跡は見当たらない。
- (4) 試験体部の保温材中の金属Naは、破損口のまわりには全周にわたって、また、その他の部分については、主に下半分に残っていた。
- (5) 内装板は健全であり、スペーサー、模擬ヒータ取り出し口も変形せず元のままであった。
- (6) 配管そのものは健全であり、予め設けられた破損口も原型のままであり健全であった。

## 5. 結 論

内容積約 $100\text{m}^3$ のSOLFA-2容器を空気雰囲気での密封状態にし、その中に「もんじゅ」2次系Na配管の1/3.5縮尺模擬配管試験体を設置してNa漏洩試験(RUN-E2)を実施した。試験体にはあらかじめ、実機1/4・Dt破損孔面積を縮尺した直径1.69cmの破損穴を設け、この破損穴に実機2次系ホットレグ配管の系統圧 $3.8\text{kg/cm}^2\text{-g}$ と同じ圧力を印加して合計2.4tonのNaを約13分で漏洩させた。

主な試験結果は、以下の通りである。

### (1) 模範試験体の熱的挙動

- ・ 配管、外装板、内装板はNaによる腐食や高温破損もなく健全で、保温材についてもNaとの化学反応による温度上昇を認めなかった。
- ・ 各部の温度は、Na漏洩中はNaの冷却効果によっておおむねNa温度にほぼ等しいが、Na漏洩停止後、外表面でのNa燃焼のために一時的な急上昇を生じた。

### (2) 模擬試験体からのNa漏洩

- ・ Na漏洩流量は $3.1\text{kg/sec}$ で、漏洩中はほぼ一定であった。

### (3) その他

- ・ Na燃焼速度は、反応が全て $\text{Na}_2\text{O}_2$ 生成反応として進行したとすると、約 $120\text{gNa/sec}$ であった。この値は漏洩Na流量の約4%に相当する。
- ・ 模擬試験体より下のガス温度、試験容器内面温度の最高値は、それぞれ約 $900^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ で、またプール表面燃焼域の最高温度は約 $950^\circ\text{C}$ であった。
- ・ 模擬試験体より上の試験容器の最高温度は、天井内面で約 $200^\circ\text{C}$ 、外面で約 $130^\circ\text{C}$ 、側壁内面及びジャケット内ガスで約 $80^\circ\text{C}$ であった。
- ・ 試験容器内ガス温度、圧力の最高値は、それぞれ約 $450^\circ\text{C}$ 、約 $0.8\text{kg/cm}^2\text{G}$ であった。

以上の結果から、配管廻りの保温構造は、事故時のNa漏洩・燃焼によってもその健全性が損なわれず、充分漏洩Naのスプレー状飛散を防止出来ることを実証した。また、Na燃焼速度は、漏洩Na流量の約4%程度であり、以前に実施した完全スプレー燃焼試験においてNa燃焼速度が漏洩Na流量の約30%であったことと比較すると、配管からの現実的なNa漏洩による燃焼は、スプレー燃焼に比べて穏やかである。

## 参考文献

- 1) 森井, 福地, 他, "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スプレ燃焼試験, Run-E1 -"  
PNC SN9410 86-124, 1986年12月.
- 2) 姫野, 宮原, 他, "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 -"  
PNC SN941 85-130, 1985年9月.
- 3) 星, 根井, "二次主冷却配管保温構造崩壊試験"  
PNC ZJ201 83-16, 1983年5月.
- 4) 姫野, 宇佐美, 他, "ナトリウム火災防護設備基礎試験(Ⅳ) - 水による二次系主配管ナトリウム漏洩模擬試験 -"  
PNC SN941 86-088, 1986年8月.

**Table-1 Pressure Loss Coefficient of Simulated Sodium Pipes**

	Fluid	Area of Leak Hole [cm <sup>2</sup> ] <sup>**</sup>	Fluid Pressure [kg/cm <sup>2</sup> · g]	Flow Rate [kg/s]	Pressure Loss Coefficient [-] <sup>***</sup>
Water Test by PNC <sup>*4)</sup> (Straight Pipe)	Water	15.0	5.8	29.9	2.85
"	"	"	5.5	28.9	2.89
"	"	"	3.8	25.0	2.69
"	"	"	2.4	20.0	2.65
Water Test by Toshiba <sup>3)</sup> (Straight Pipe)	"	"	6.41	35.1	2.3
" (Elbow Pipe with Insulator)	"	"	6.68	33.9	2.56
RUN - B3 <sup>2)</sup>	Na	10.0	0.25	0.832	58.9
Data for "Monju"	"	15.0	6.0	33.0	1.0

\* These Pipes are Actual Dimensions with no Insulator

\*\* Area of the Leak Hole

\*\*\* Pressure Loss Coefficient is Defined as Following

$$P = \frac{1}{2} \eta \rho v^2$$

P : Fluid Pressure

$\eta$  : Pressure Loss Coefficient

$\delta$  : Fluid Density

V : Flow Velocity at the Leak Hole

$$V = W / \rho \cdot A$$

W : Flow Rate

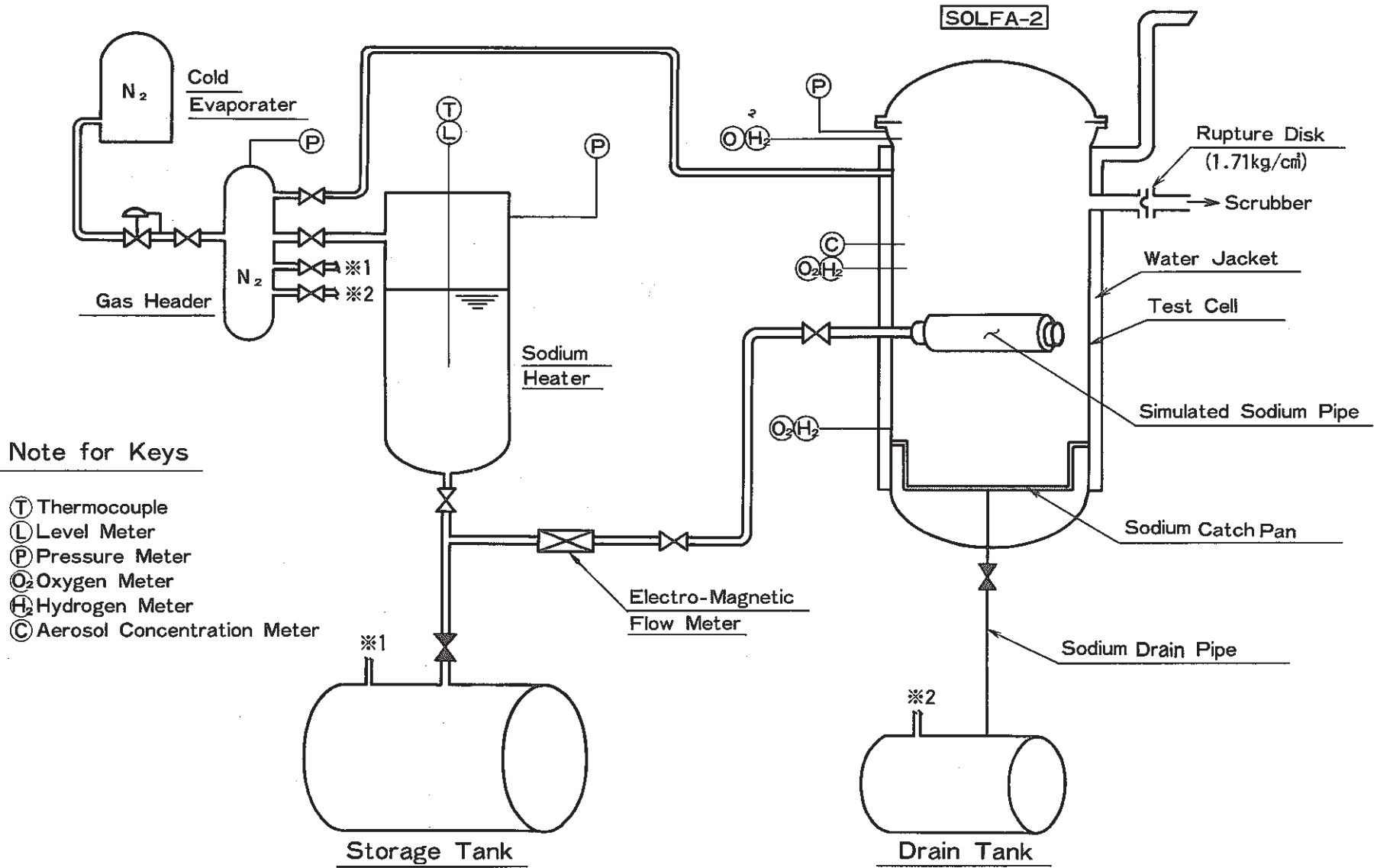
A : Area of Leak Hole

(PSS - SFE - 404)

Table-2 Progression of RUN - E2 Test

Time	Test Progression
11/12	
10 : 12	Sodium Charge in Sodium Heater
13 : 02	Start Heating up of Sodium Heater (250°C)
11/13	
11 : 32	Data Input of Stop Conditions to CENTUM
11 : 02	Start Aerosol Scrubber
	Completion of Heating of Sodium Heater (505°C)
14 : 20	Stop Cover Gas Control
14 : 20	Start Pressurizing Cover Gas of Sodium Heater
14 : 10	Switch Off SCR Control Heater
14 : 52	Start Data Recording
14 : 55	Start Sodium Feed to Simulated Sodium Pipe
15 : 00	Start Oxygen Gas Supply (85.8Nm <sup>3</sup> /hr)
15 : 10	Stop Sodium Feed
15 : 10	Stop Oxygen Gas Supply
15 : 15	Gas Blow of Sodium Heater
15 : 33	Change Temperature Level of Pre-Heating of Sodium Piping (505°C → 250°C)
16 : 40	Drain Remaining Sodium in Catch Pan
	Stop Aerosol Scrubber
	Holding the Conditions
15 : 15	Start Cover Gas Control of Test Vessel
	Stop Data Recording
	Drain of Remaining Sodium from Test Vessel

(PSS - SFE - 386)



**Note for Keys**

- Ⓣ Thermocouple
- Ⓛ Level Meter
- Ⓟ Pressure Meter
- Ⓞ<sub>2</sub> Oxygen Meter
- Ⓜ<sub>2</sub> Hydrogen Meter
- Ⓒ Aerosol Concentration Meter

Fig. 2.1 Arrangement of Test Rig for Run-E2

(PSS - SFE - 387)

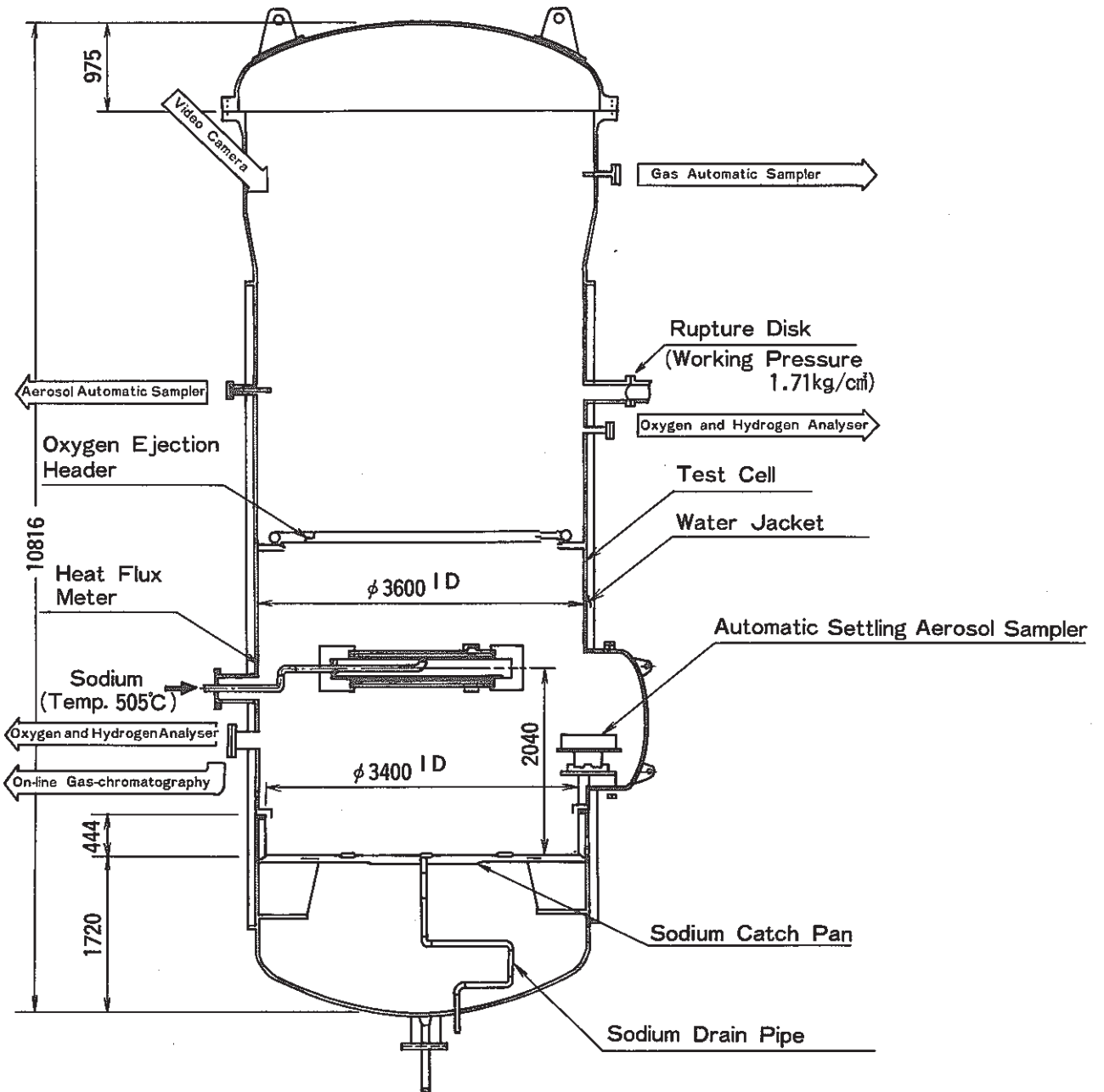


Fig. 2.2 SOLFA-2 Overview

(PSS - SFE - 388)



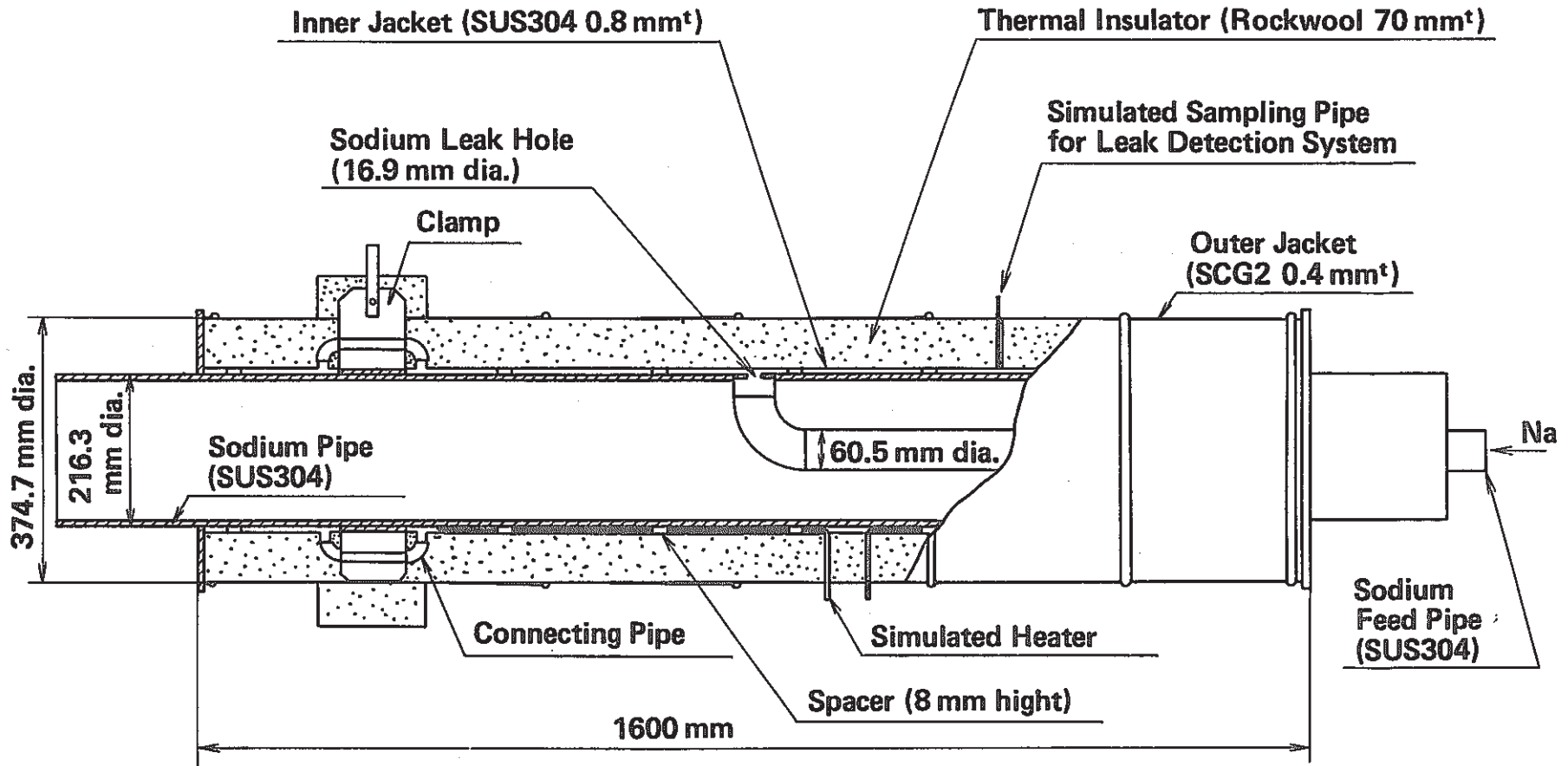


Fig.2.3 Cut View of Simulated Sodium Pipe for Run-E2

PSS-SFE-354

SOLFA-2 Cut View of Simulated Sodium Pipe

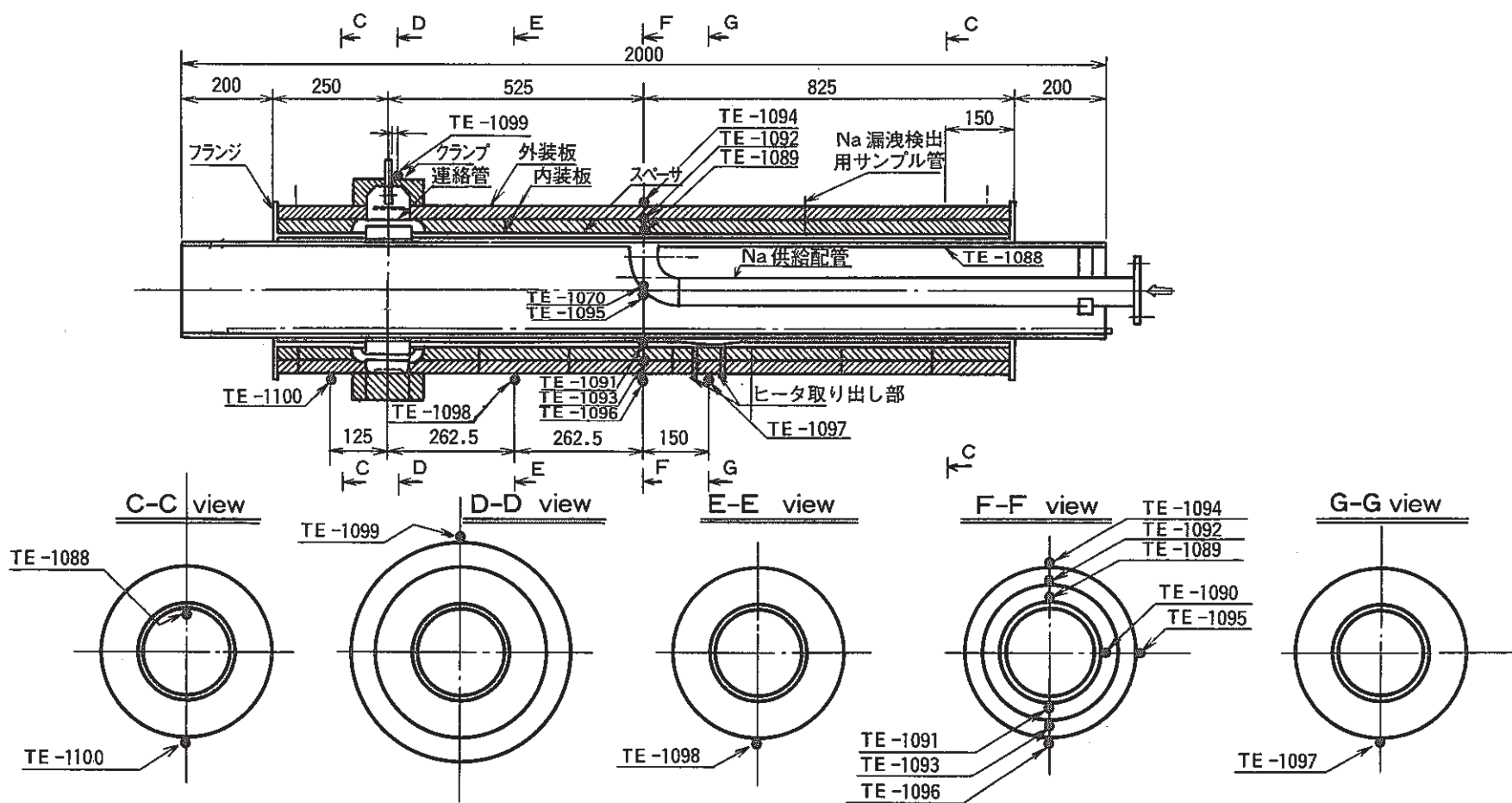


Fig. 2.4 Locations of the Thermocouples Attached to the Simulated Sodium Pipe

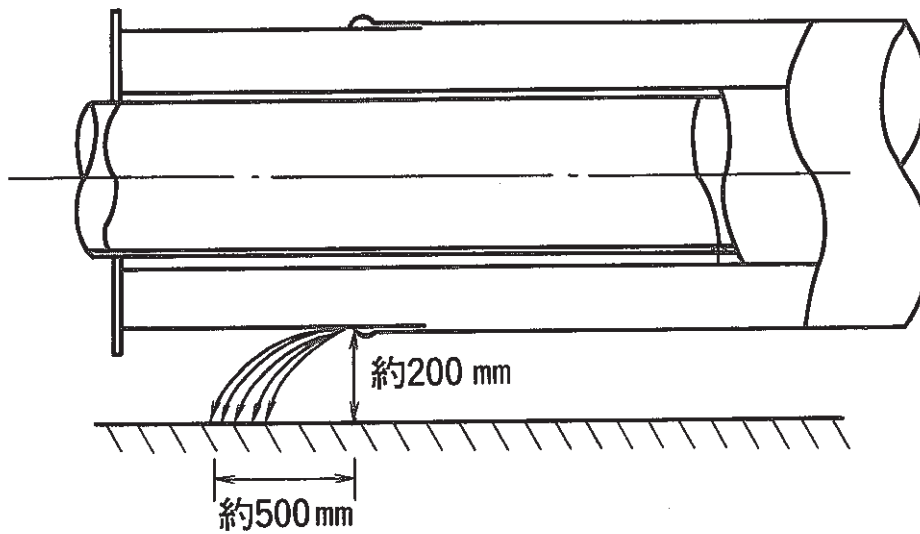


Fig. 2.5 Leakage Flow Pattern  
from Mock-up Straight  
Pipe

- Water Simulation Test -

(PSS - SFE - 390)

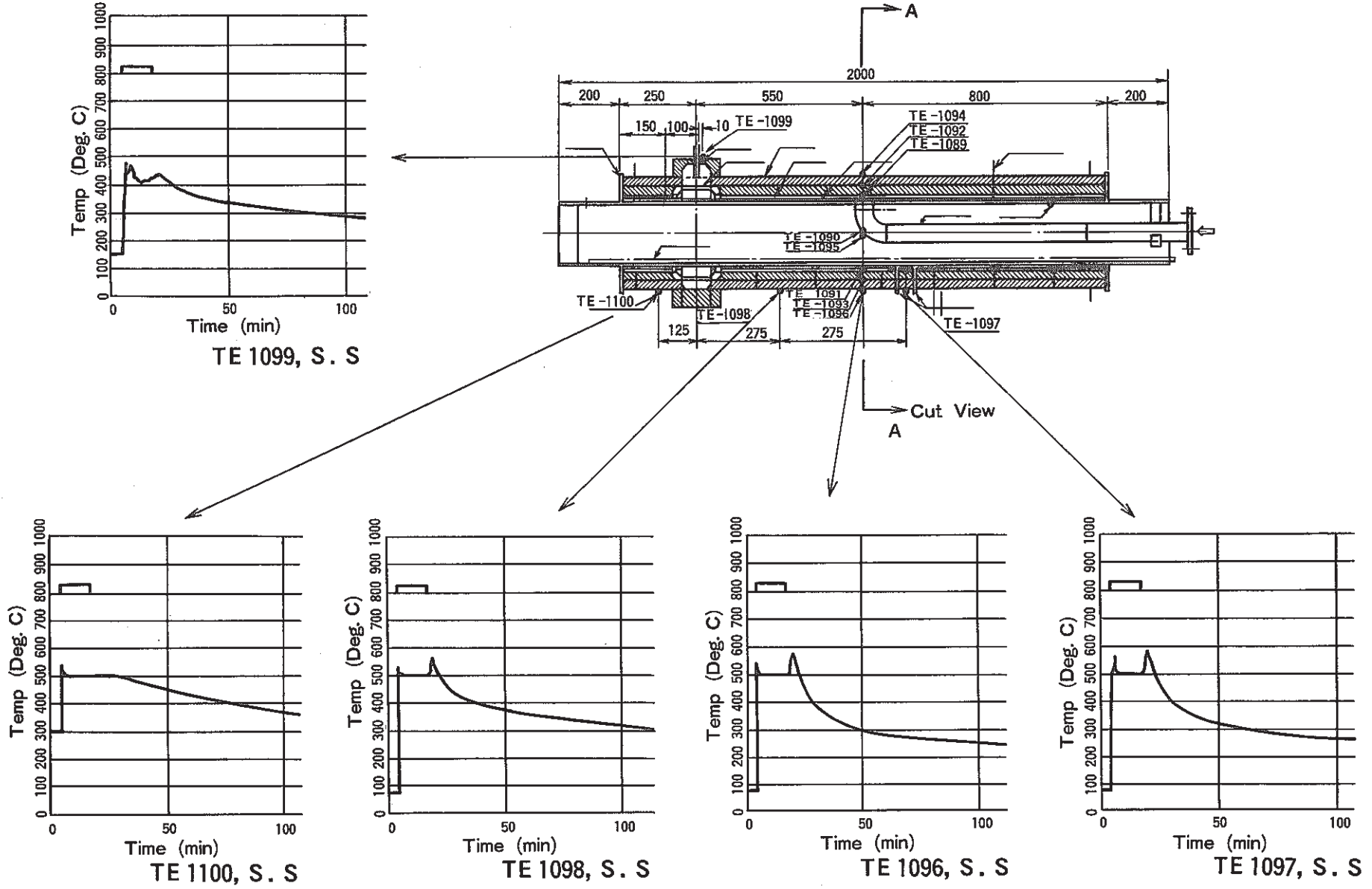


Fig. 4.1 Surface Temperatures of Outer Jacket of Simulated Sodium Pipe (PSS - SFE - 391)

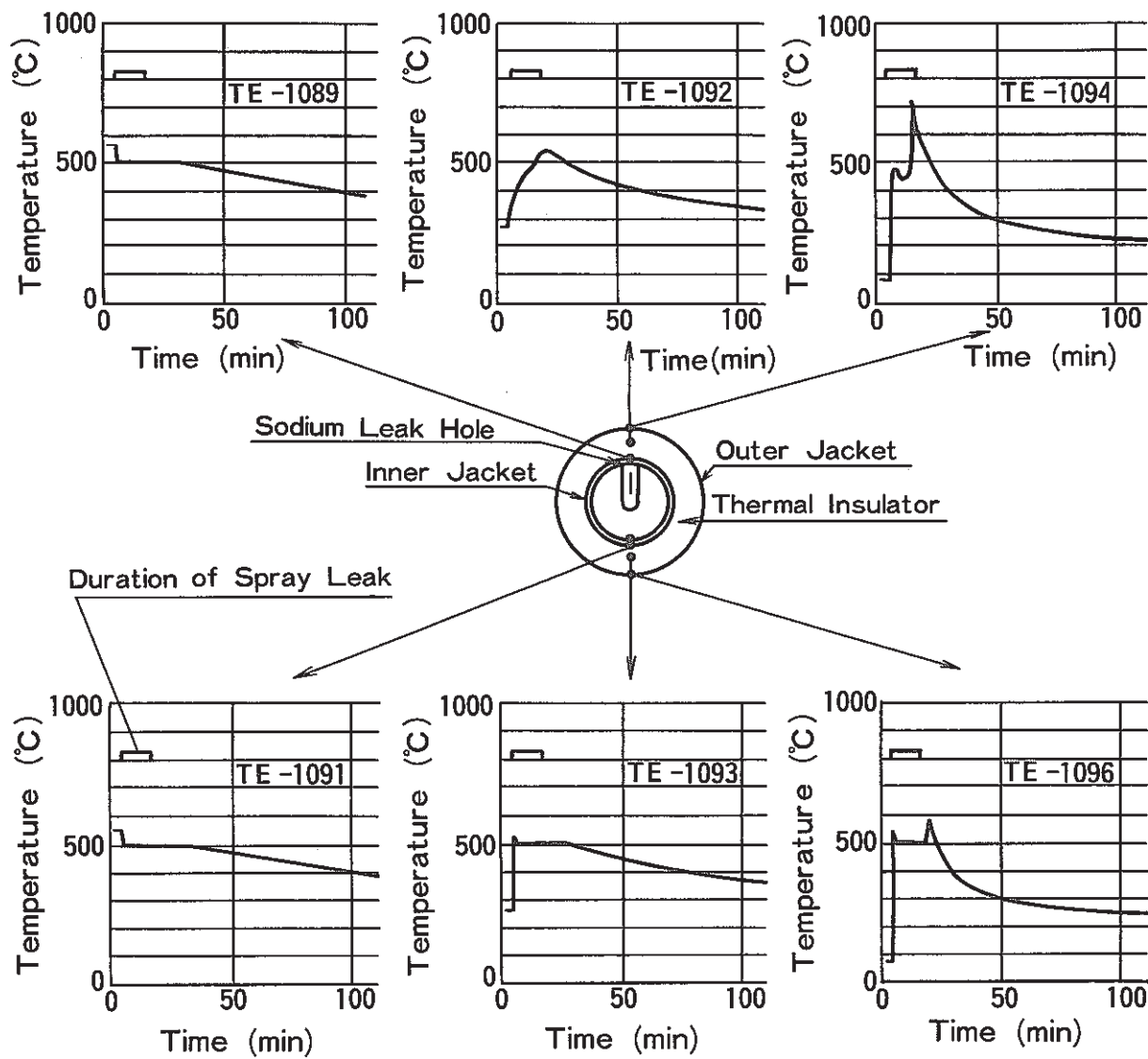


Fig. 4.2 Temperature Histories of Simulated Sodium Pipe  
(PSS - SFE 392)

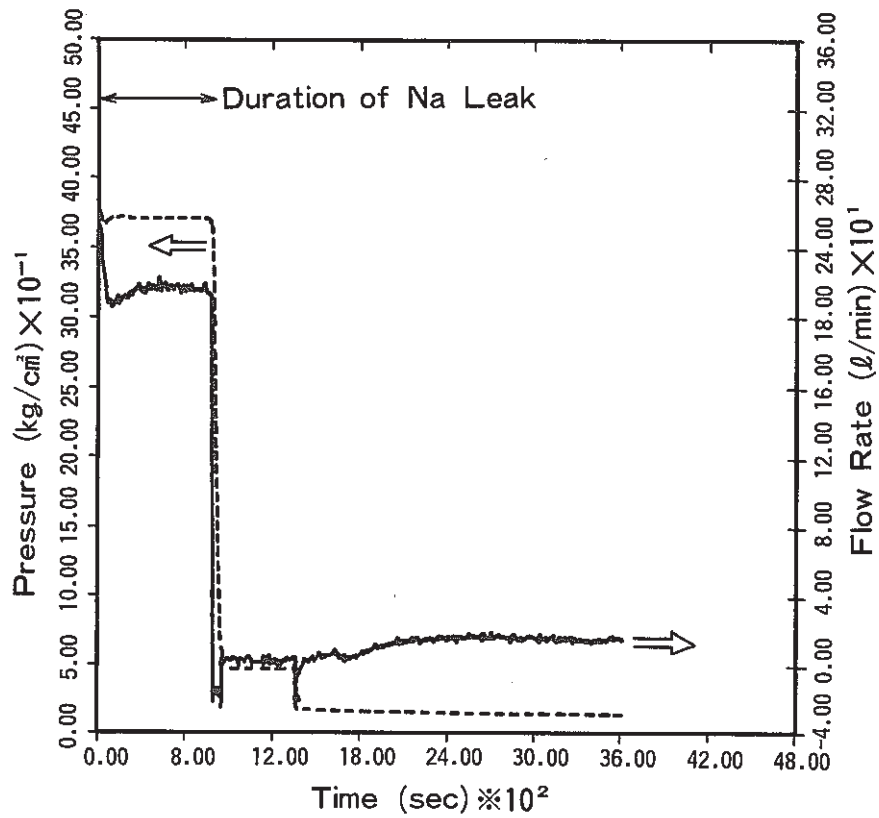


Fig. 4.3 Records of Cover Gas Pressure in Sodium Heater and Sodium Leak Rate

(PSS - SFE 393)

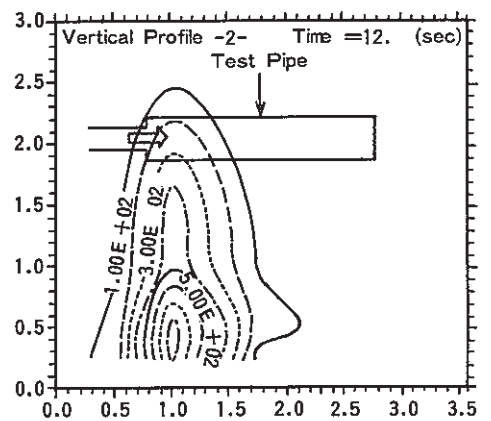
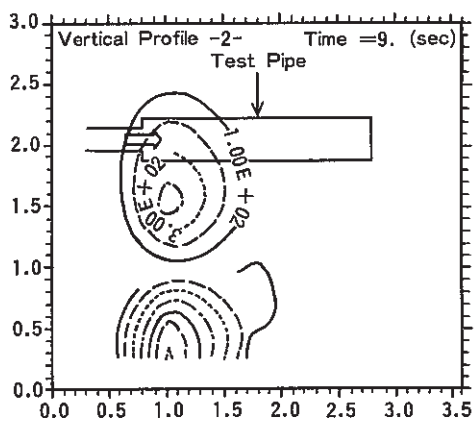
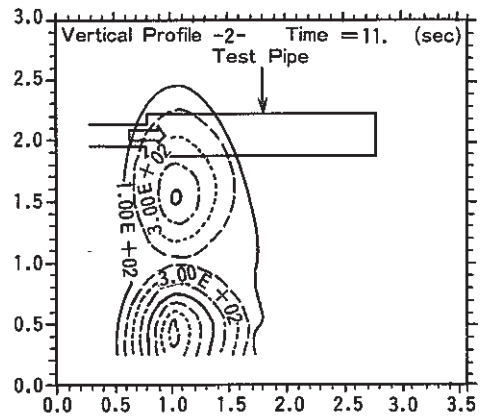
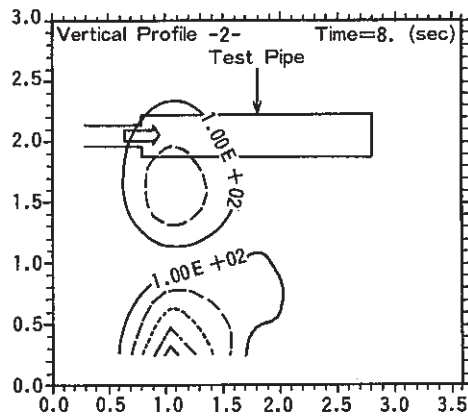
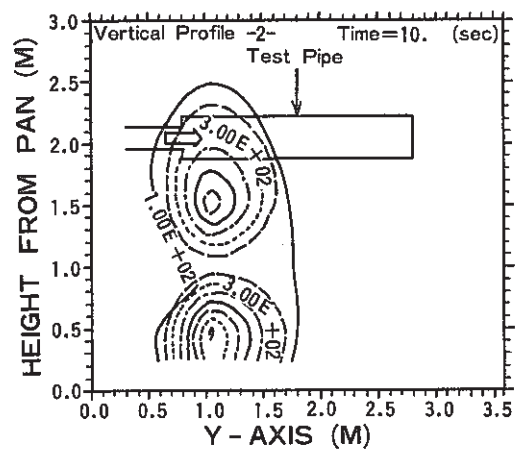
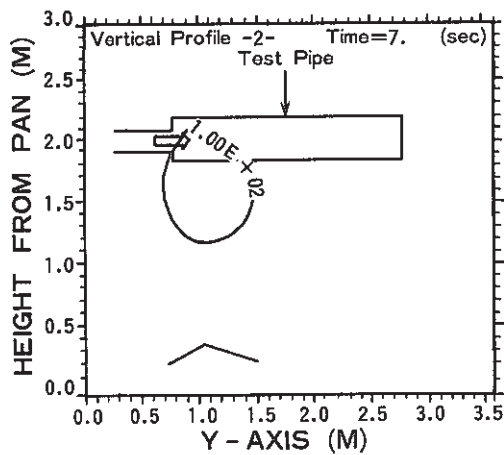


Fig. 4.4 Temperature Profiles in Gas Phase below Simulated Sodium Pipe (Vertical Profiles) (PSS - SFE 394)

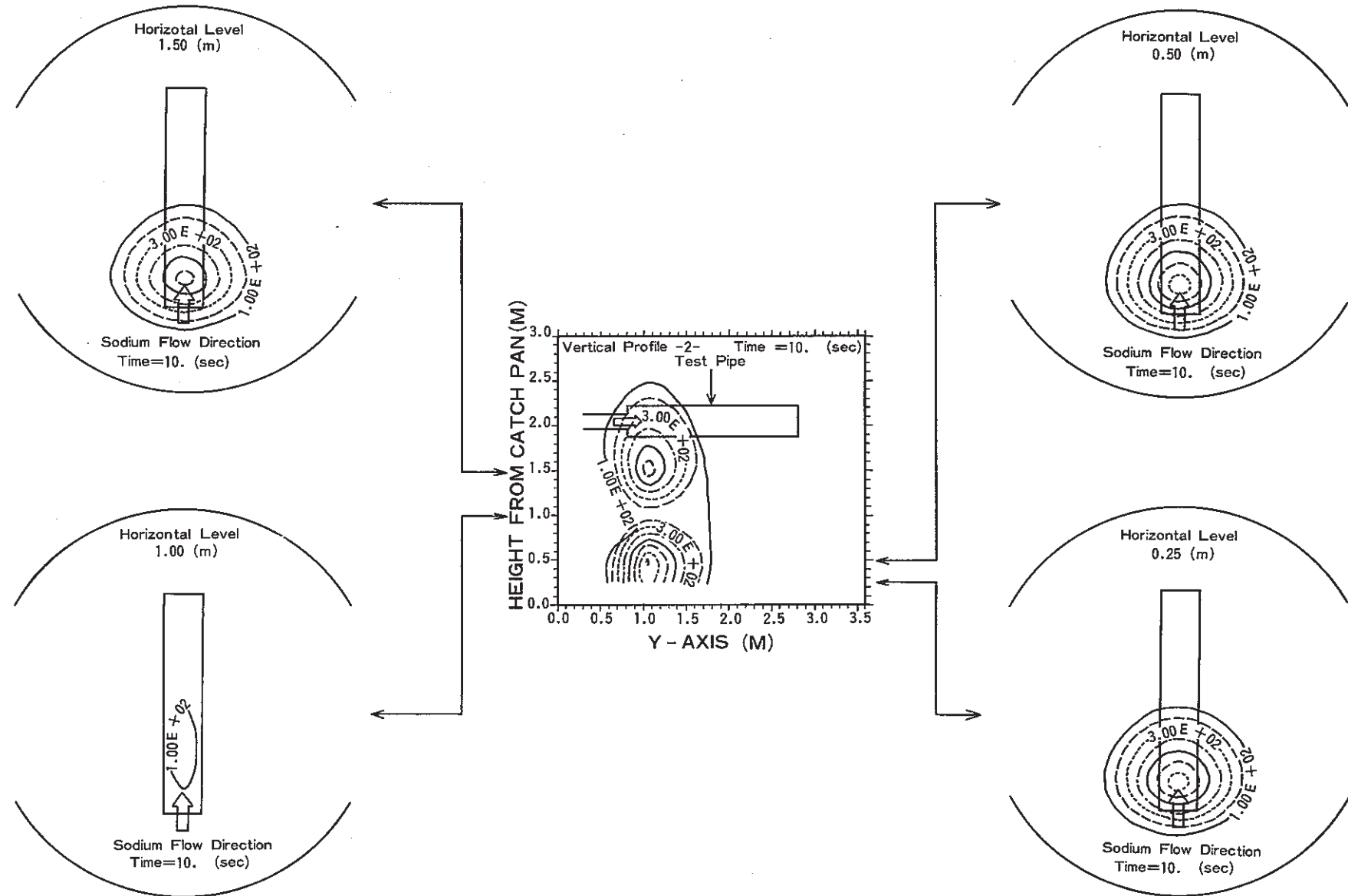


Fig. 4.5 Temperature Profiles in Gas Phase below Simulated Sodium Pipe (Horizontal Profiles) (PSS - SFE 395)



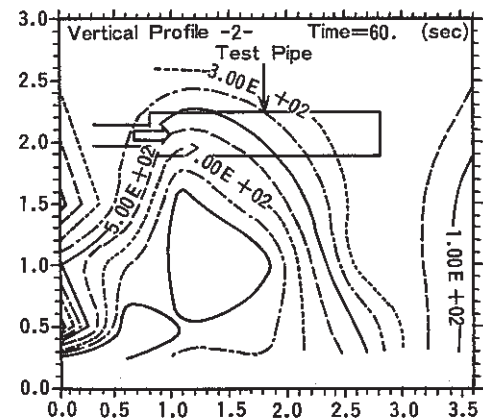
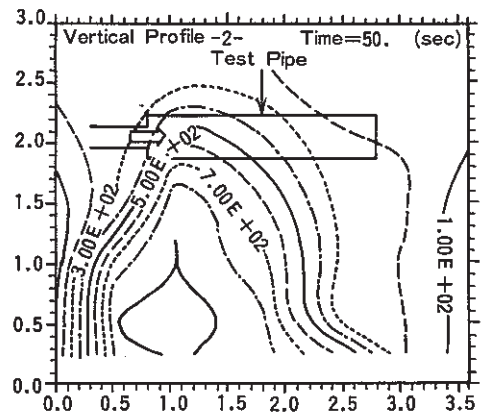
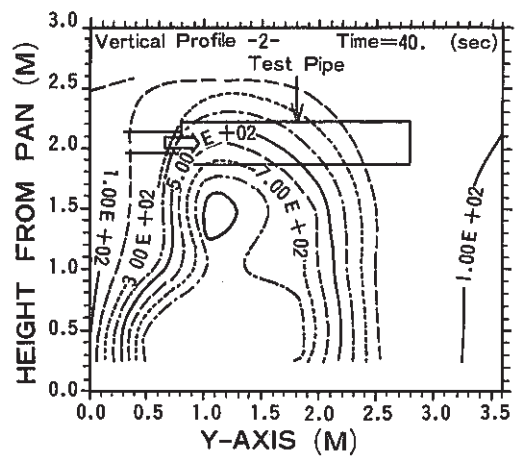
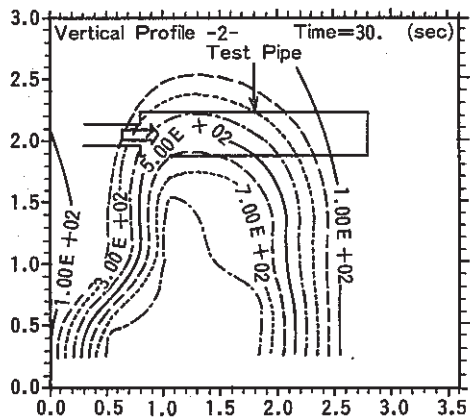
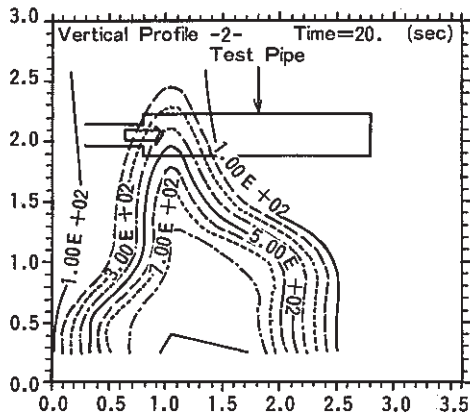
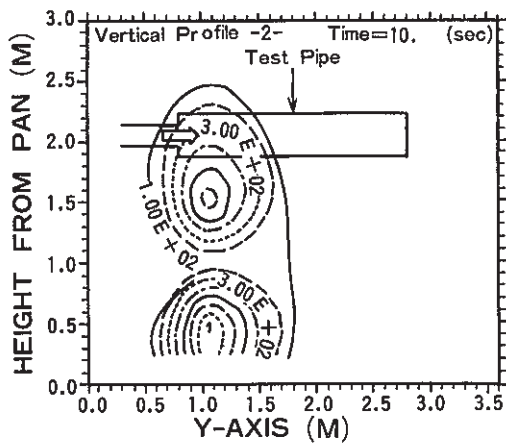


Fig. 4.6 Temperature Profiles in Gas Phase below Simulated Sodium (Vertical Profiles) (PSS - SFE 396)

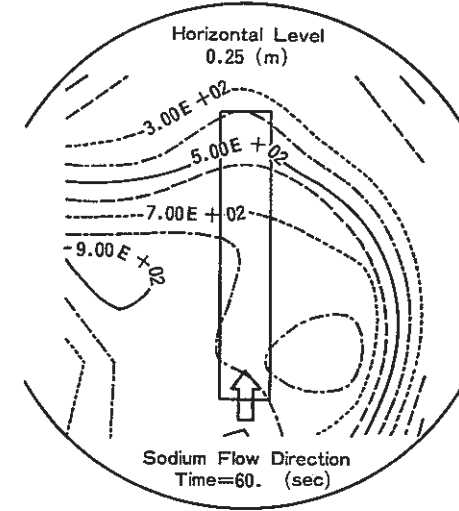
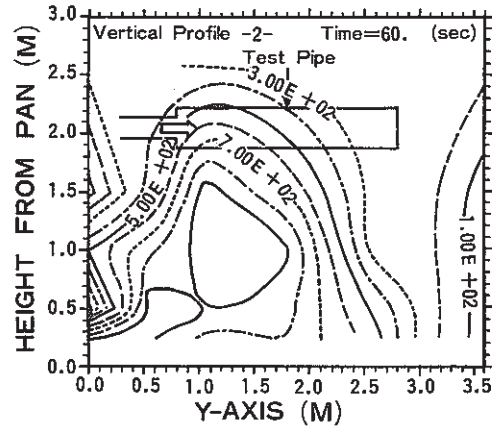
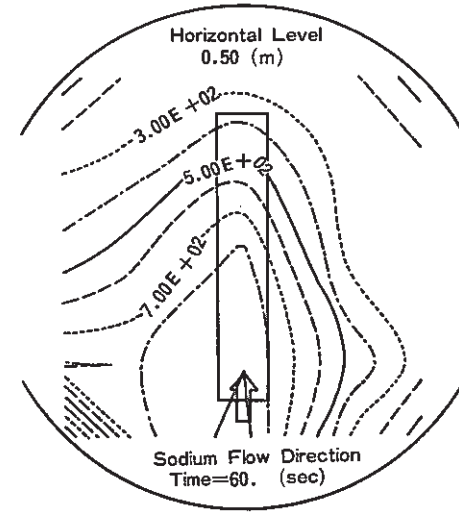
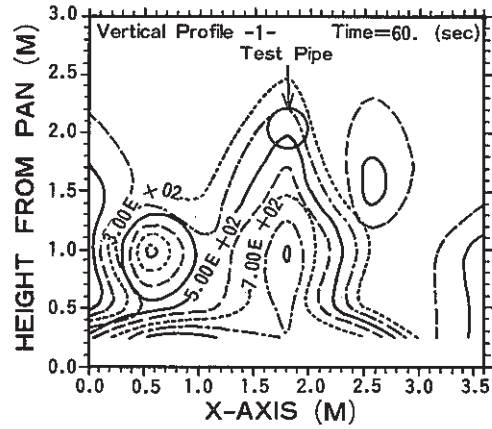
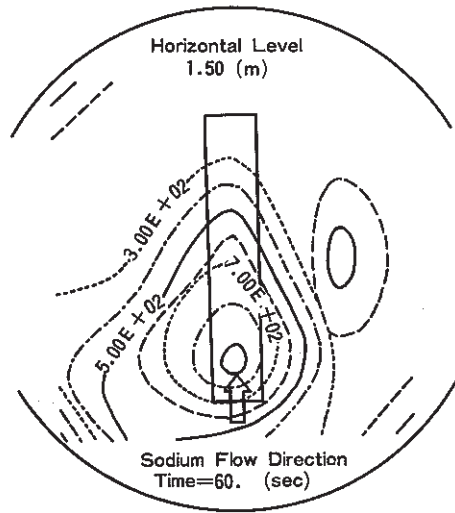


Fig. 4.7 Temperature Profiles in Gas Phase below Simulated Sodium Pipe (Horizontal Profiles)

(PSS - SFE - 397)

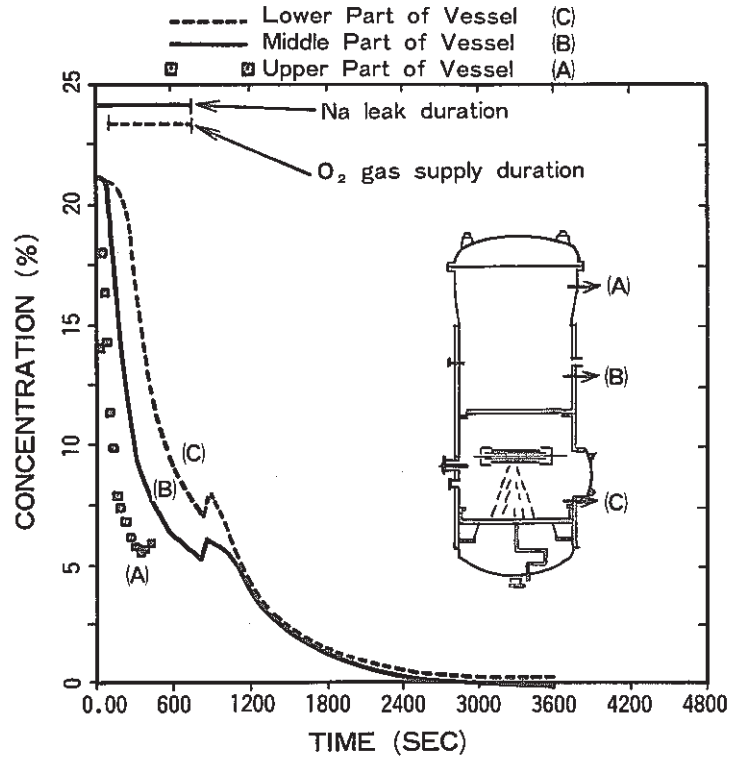


Fig. 4.8 Transient Oxygen Concentration  
(PSS-SFE-534)

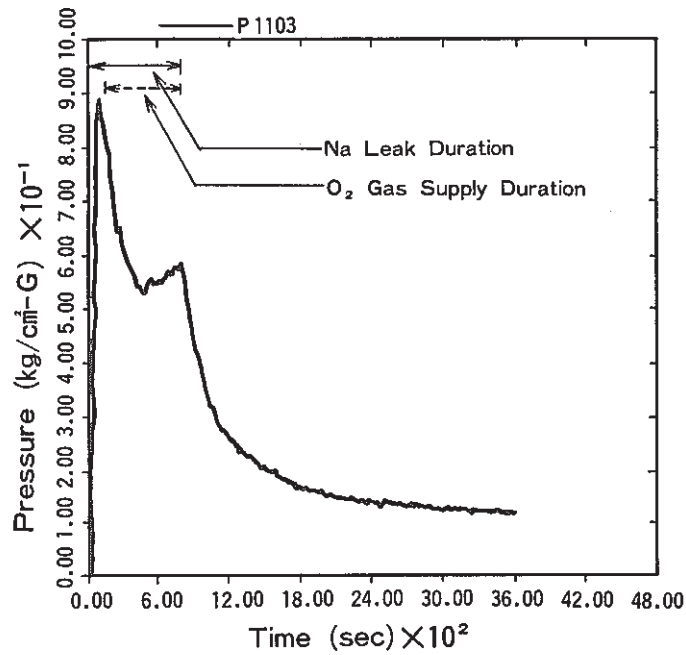


Fig. 4.9 Transient Gas Pressure

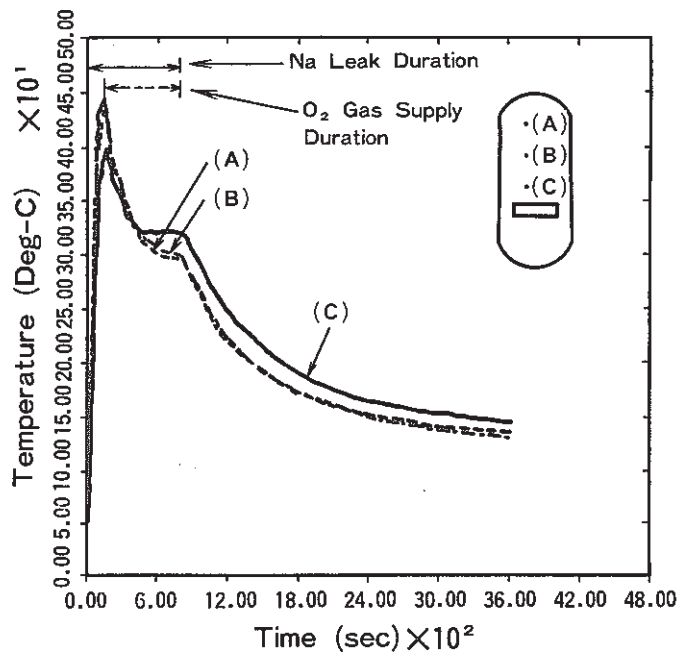


Fig. 4.10 Transient Gas Temperature above Test Pipe

(PSS - SFE - 398)

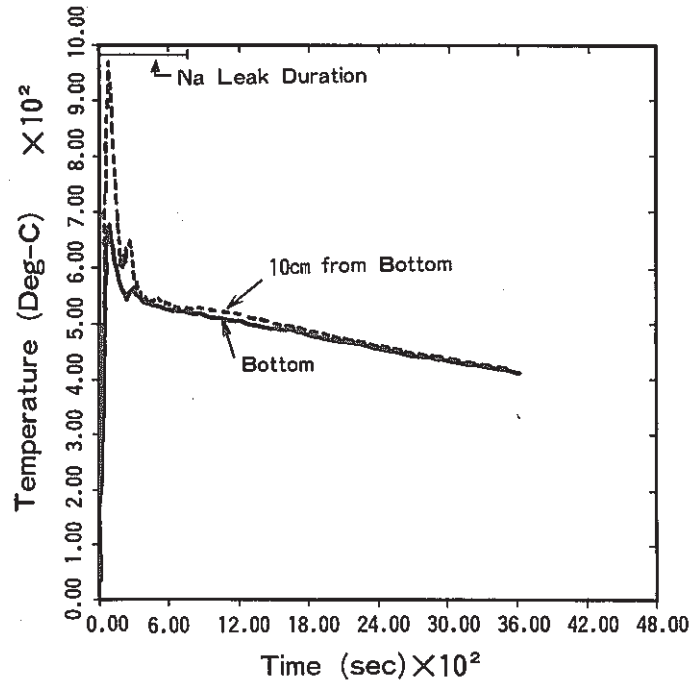


Fig. 4.11 Transient Pool Temperatures

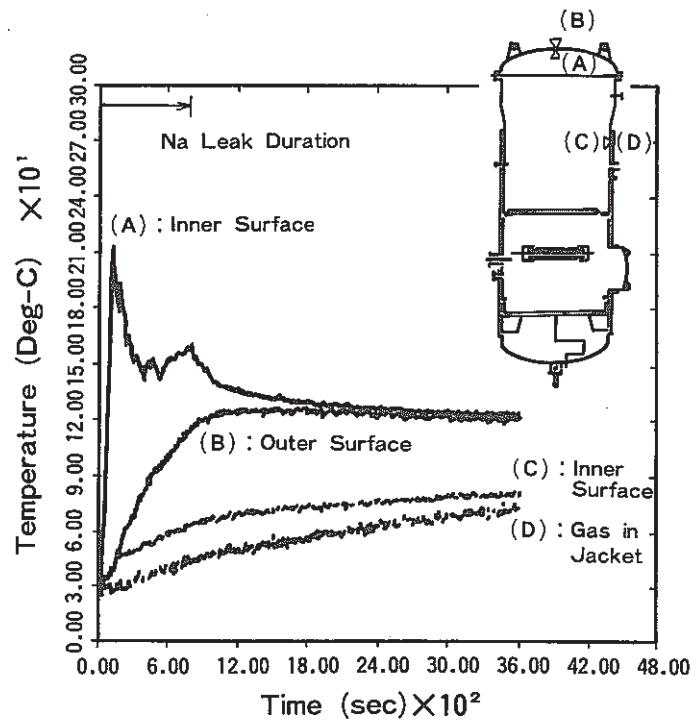


Fig. 4.12 Transient Vessel Temperatures

(PSS - SFE - 399)

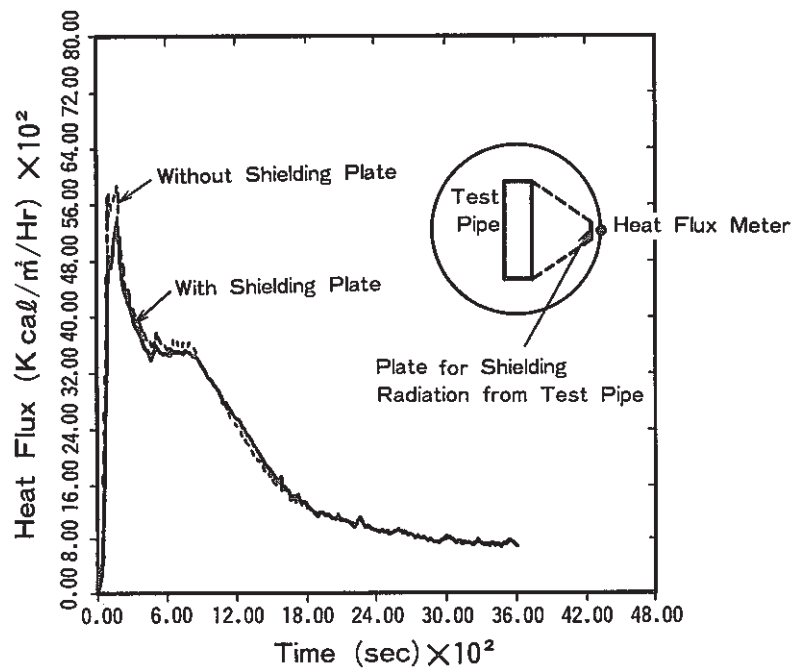


Fig. 4.13 Transient Heat Flux  
Toward Vessel Wall

(PSS - SFE - 400)

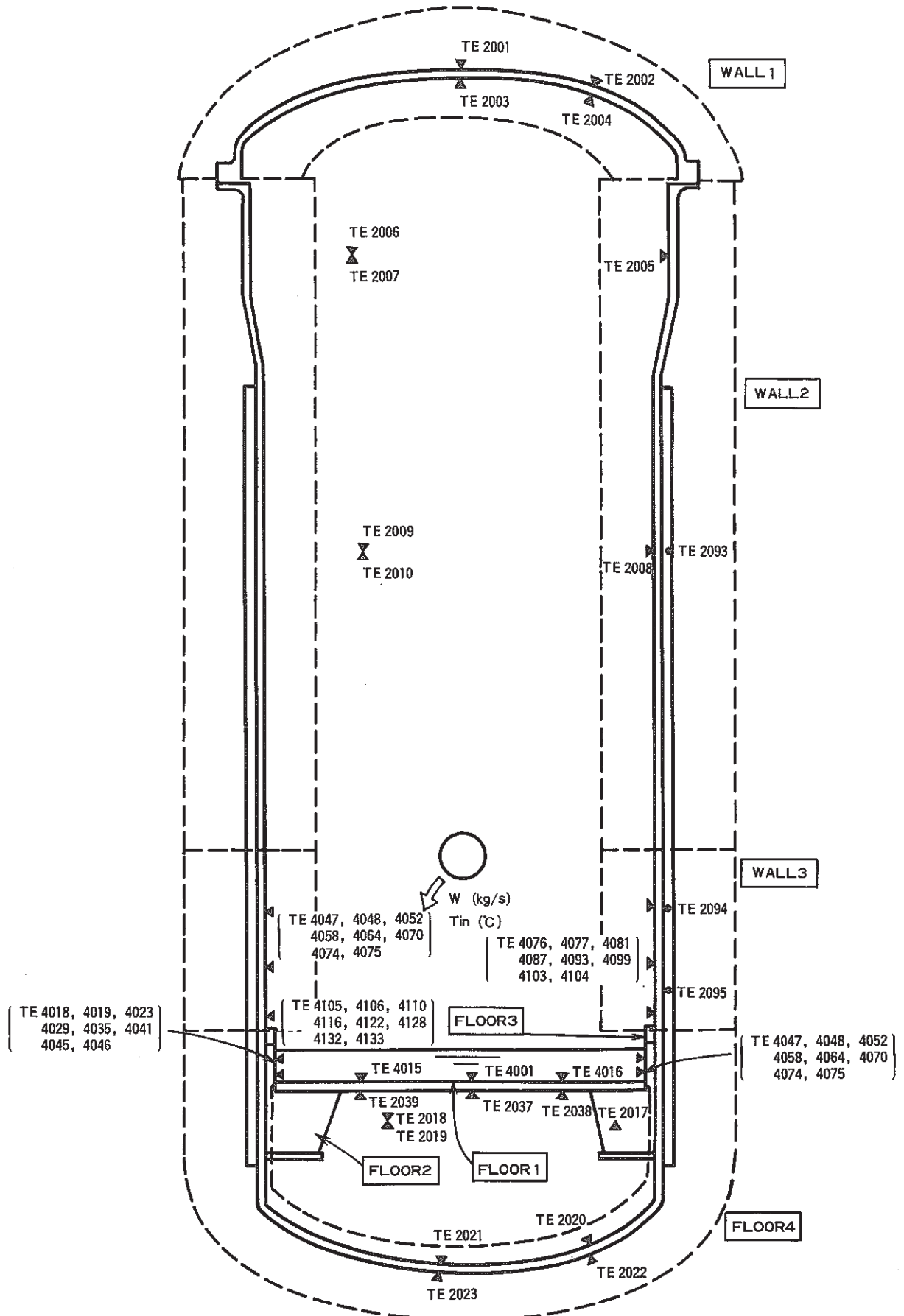


Fig. 4.14 Partition of Structures of Test Vessel for Evaluating Energy Balance (PSS-SFE-531)

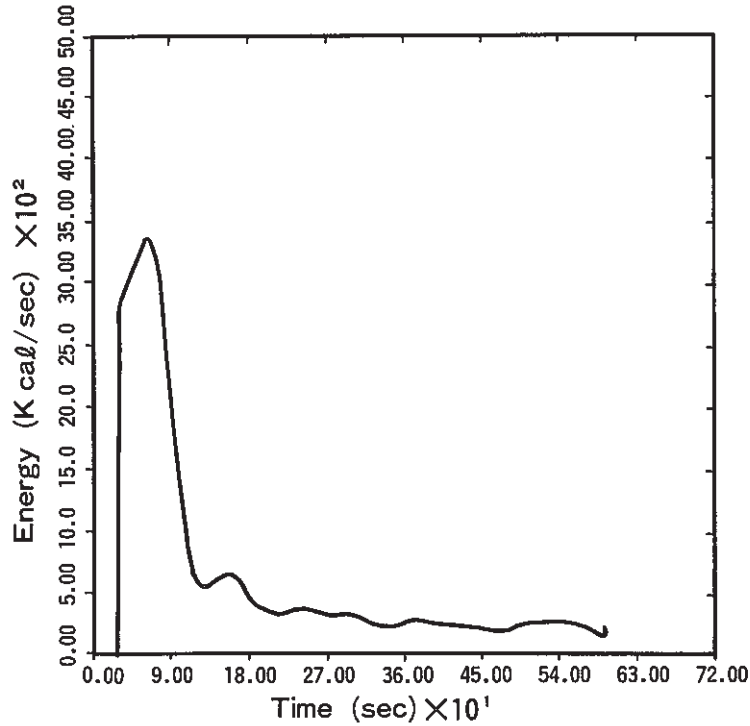


Fig. 4.15 Total Combustion Energy

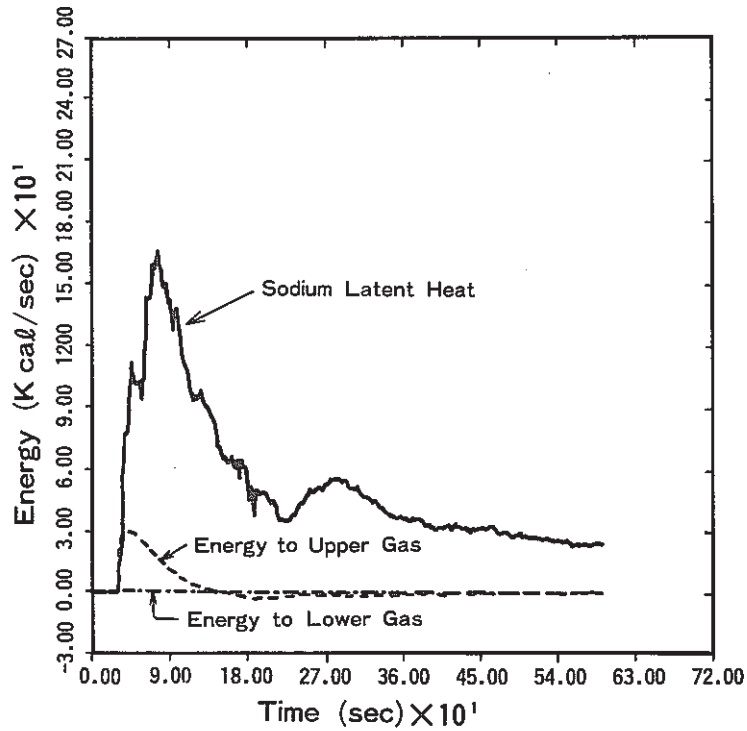


Fig. 4.16 Sodium Latent Heat and Energy Transferred to Gas

(PSS - SFE - 401)



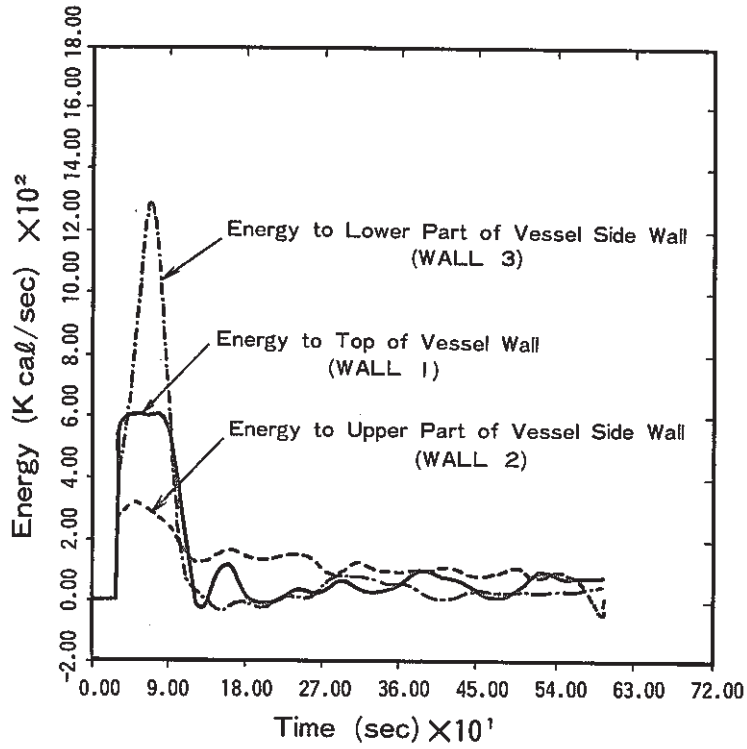


Fig. 4.17 Energy to Vessel Wall

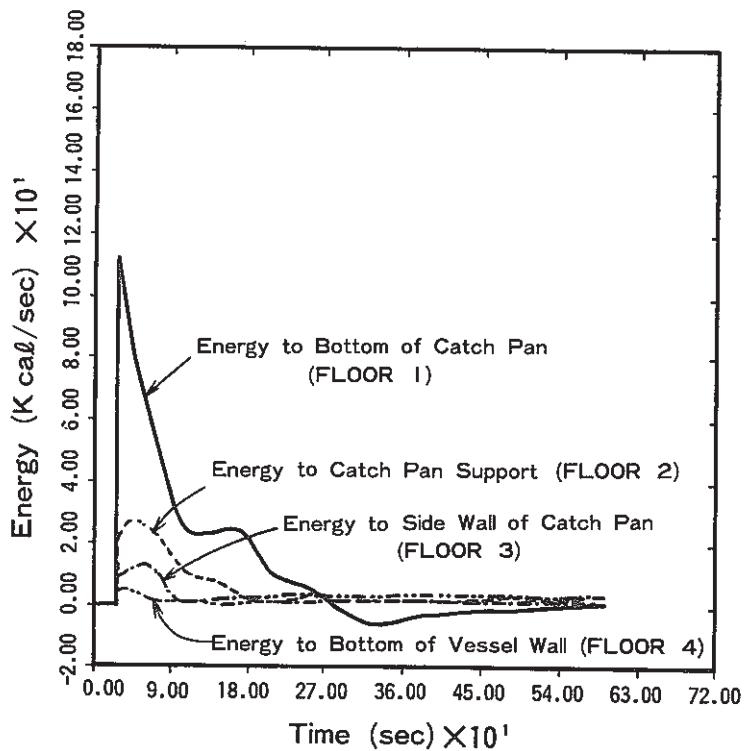


Fig. 4.18 Energy to Catch Pan

(PSS - SFE - 402)

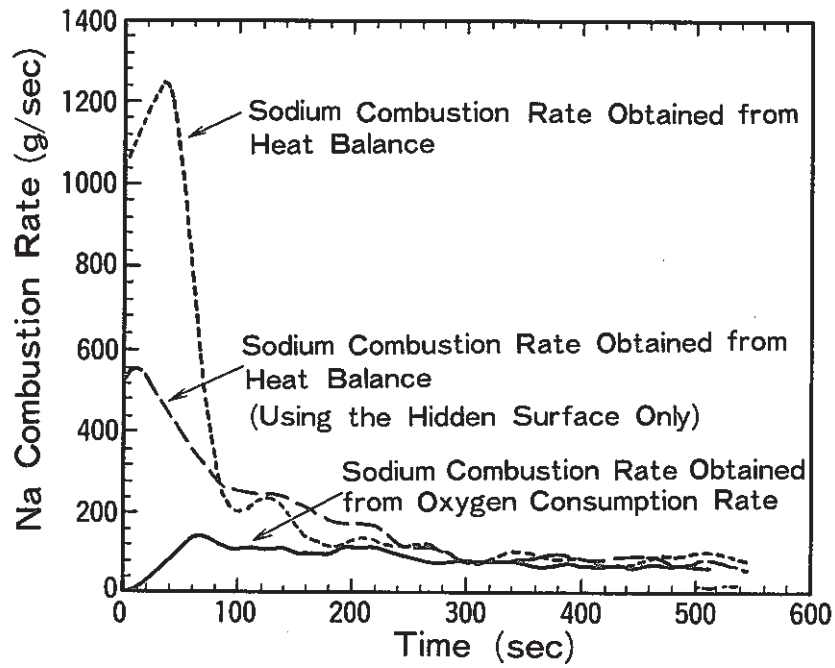


Fig. 4.19 Sodium Combustion Rate

(PSS - SFE - 403)

A P P E N D I X - A      N a 配管の圧損、N a 液面高低差

(1) 配管部の圧損 ΔP の計算

配管部については、

	d (m)	v (m/s)	ν (m <sup>2</sup> /s)	Re=dv/ν
4 <sup>B</sup>	0.1063	0.4771	2.96×10 <sup>-7</sup>	1.71×10 <sup>5</sup>
2 <sup>B</sup>	0.0535	1.8837	2.96×10 <sup>-7</sup>	3.40×10 <sup>5</sup>

ν は、500℃における N a の動粘性係数であるから管摩擦係数 λ は、White の式<sup>(10)</sup>

$$\frac{1}{\lambda} = 1.8 \log_{10} Re - 1.4985 \dots\dots\dots (3)$$

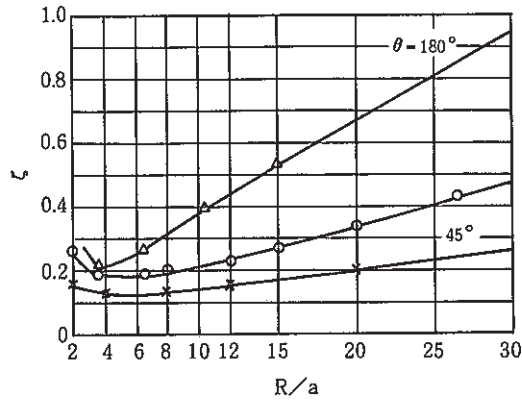
ただし  $6 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^7$

を用いて求める。

	λ	ℓ (m)	λ $\frac{\ell}{d}$
4 <sup>B</sup>	0.0159	10.54	1.58
2 <sup>B</sup>	0.0140	5.09	1.33

バンド部については、次頁の図から

	$\frac{R \text{ (バンド中心線の曲率半径)}}{a \text{ (管内半径)}}$	θ (°)	ζ	n (個)	ζ · n
4 <sup>B</sup>	$\frac{0.1524}{0.0508} = 3$	90	0.2	3	0.6
2 <sup>B</sup>	$\frac{0.0762}{0.0254} = 3$	90	0.2	2	0.4

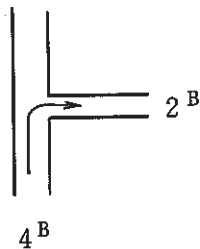


なめらかなベンドの全損失係数  $\zeta$  の半径比  $R/a$  による変化 実線は式 (4.54) 又は式 (4.52) <sup>(89)</sup>

T字管部については、

i) 管路の断面積比が1以上の場合

$$m = \frac{4^B \text{管断面積}}{2^B \text{管断面積}} = 4$$



右図より

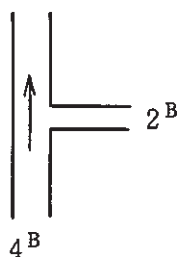
$$Q_3 / Q_1 = 0$$

$$\therefore \frac{\zeta}{m^2} = 3.5$$

$$\zeta = 1.4$$

個数  $n = 1$  (コ) より

$$n\zeta = 1.4$$

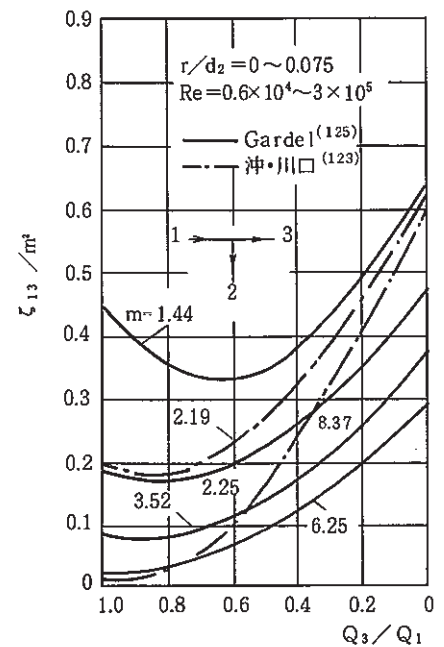


次頁の図より

$$Q_2 / Q_1 = 0$$

$$\therefore \zeta = 0.02$$

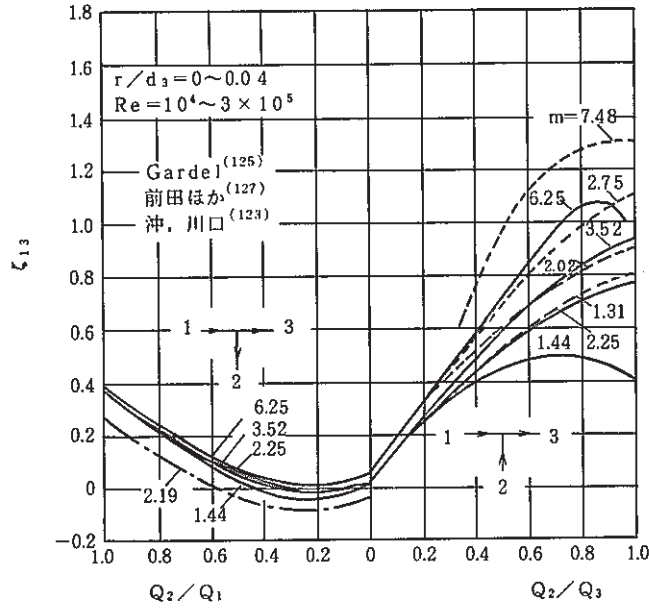
$$n = 2 \text{ (コ) より } n\zeta = 0.04$$



面積比  $m$  が1以上の値をとる

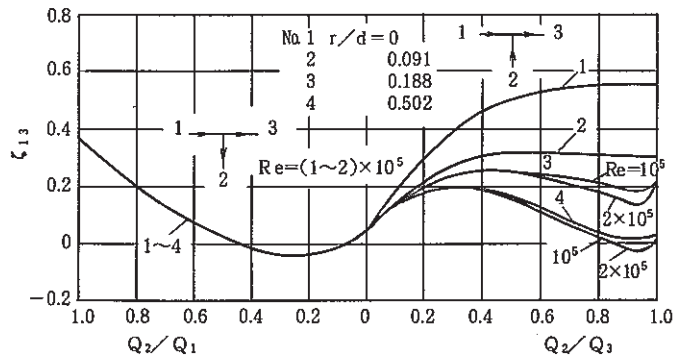
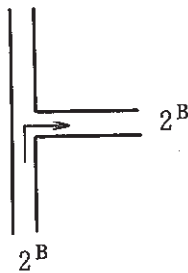
T形管の支流の損失係数 <sup>(3)</sup>

(本管から支管に向かう流れの場合)



面積比  $m$  が 1 以上の値をとる T 形管の本流の損失係数

ii) 管路の断面積比が 1 以下の場合



右図より

$$Q_2 / Q_1 = 1$$

$$\therefore \zeta = 0.35$$

$$n = 1 \text{ (コ) より } n\zeta = 0.35$$

Na 弁については、表-A. 1 に示した水流動データから、弁開度 100% の時は  $\Delta P = 0.2 \text{ kg/cm}^2$  のとき、 $Q_{\text{水}} = 731.2 \text{ l/min}$  であるから  $Q_{Na} = 4.2345 \text{ (l/s)}$   $\times 60 = 254.1 \text{ l/min}$  の時の圧力損失は、

$$\frac{\Delta P_{Na}}{\Delta P_{水}} = \frac{\frac{1}{2} n \frac{W_{Na}^2}{g r_{Na} A}}{\frac{1}{2} n \frac{W_{水}^2}{g r_{水} A}} = \frac{r_{Na} \times Q_{Na}^2}{r_{水} \times Q_{水}^2}$$

(∵ Q = W / r)

より

$$\Delta P_{Na} = 0.2 \times \frac{830.604 \times (254.1)^2}{1000 \times (731.2)^2}$$

$$= 0.0201 \text{ (kg/cm}^2\text{G)}$$

以上の結果から ΔP は

$$\Delta P = (1.58 + 0.6 + 1.4 + 0.04) \times \frac{830.604 \times (0.4771)^2}{2 \times 9.804}$$

$$+ (1.33 + 0.4 + 0.35) \times \frac{830.604 \times (1.8837)^2}{2 \times 9.804}$$

$$+ 0.0201 \times 10^4 \times 4 \text{ (合)}$$

$$= 34.905 + 312.64 + 804.0$$

$$= 1151.5 \text{ (kg/m}^2\text{G)}$$

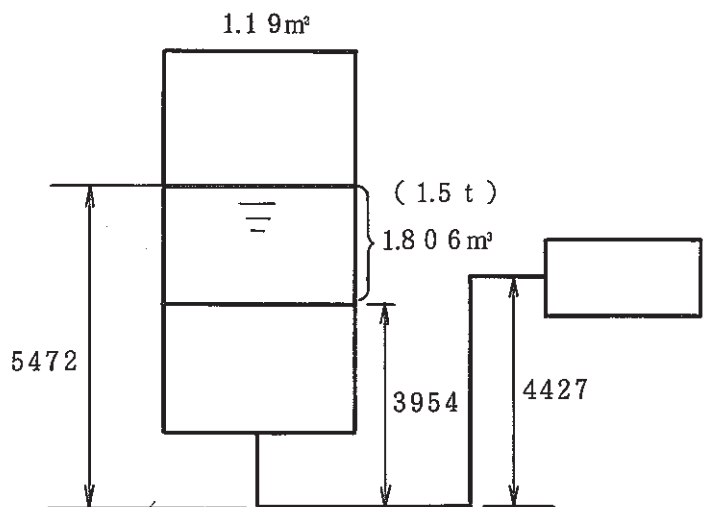
$$= 0.115 \text{ (kg/m}^2\text{G)}$$

(2) Na 液面のヘッド差

試験開始

$$830.604 \times (4.427 - 5.472)$$

$$= -0.0868 \text{ kg/cm}^2\text{g}$$



## APPENDIX-B

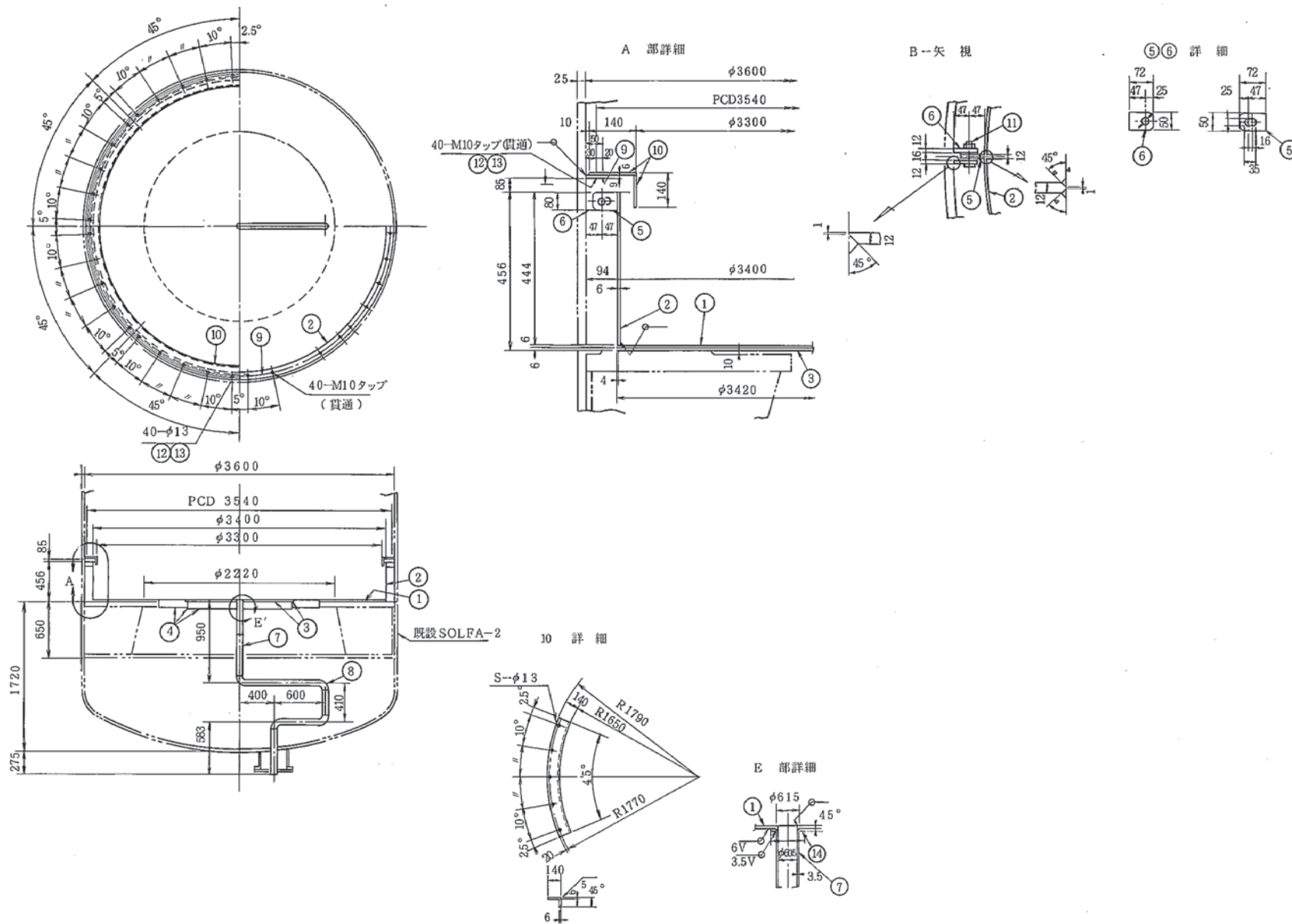


Fig.B.1 Details of Solium Catch Pan  
(PSS-SFE-535)



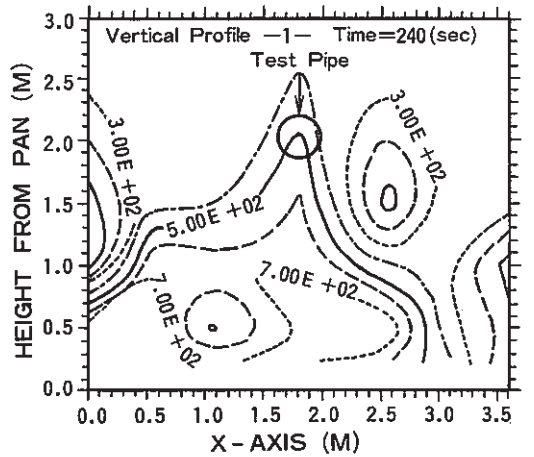
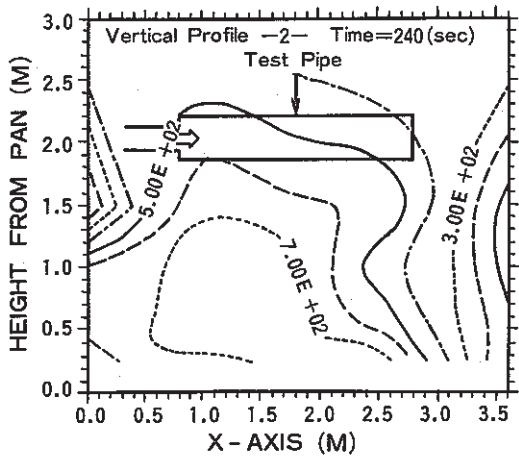
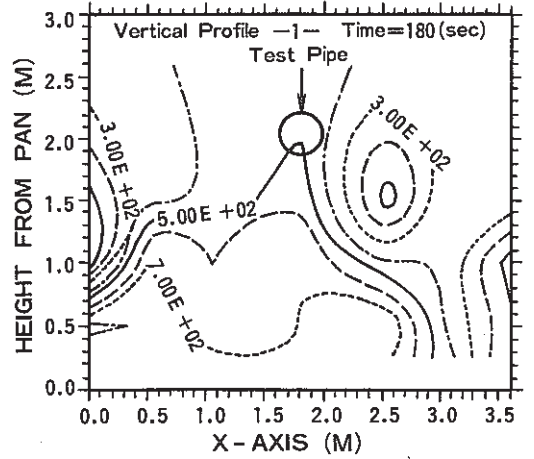
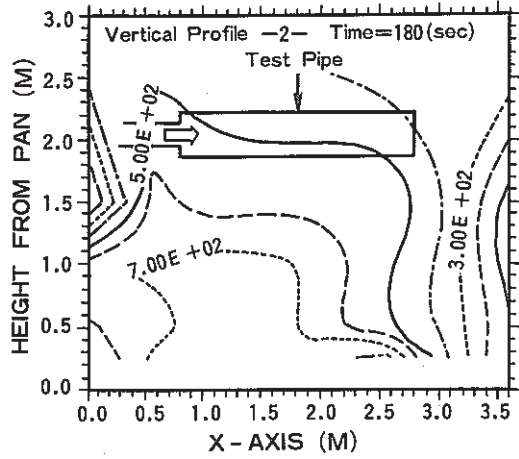
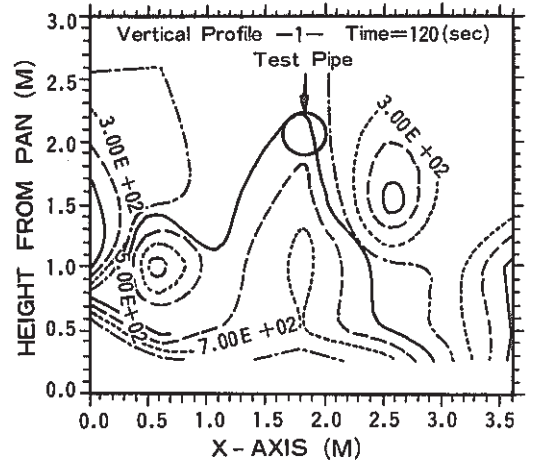
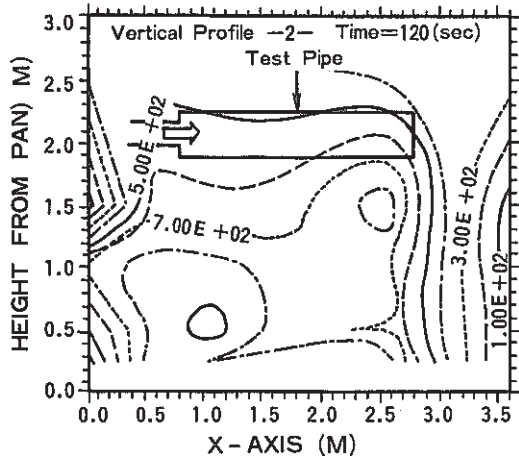


Fig. B. 3 Temperature Profiles of Gas Phase below Test Pipe  
(Vertical Profiles) 120 sec~240 sec  
(PSS-SFE-532)

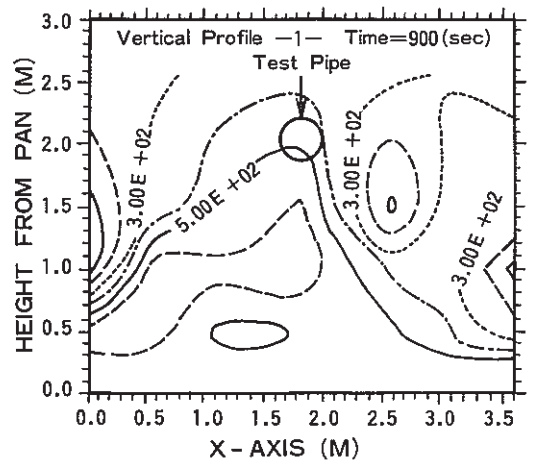
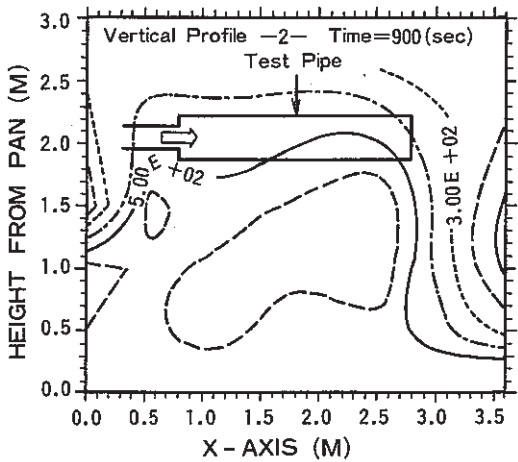
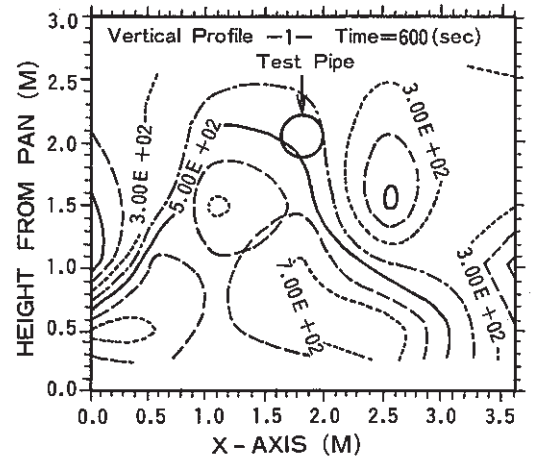
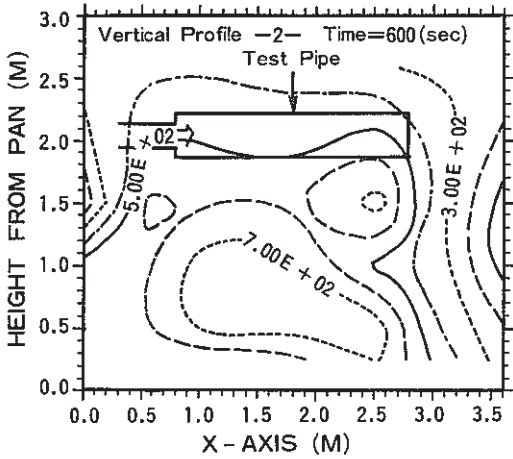
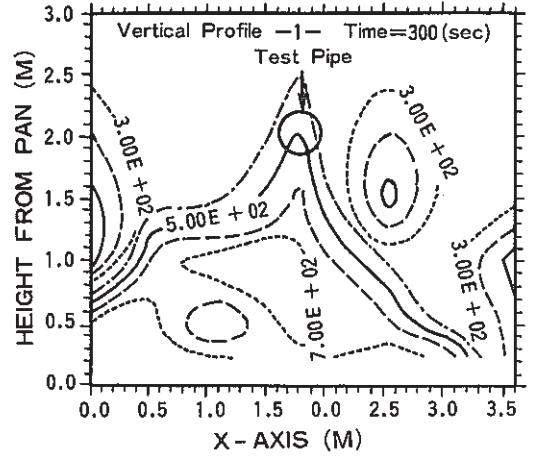
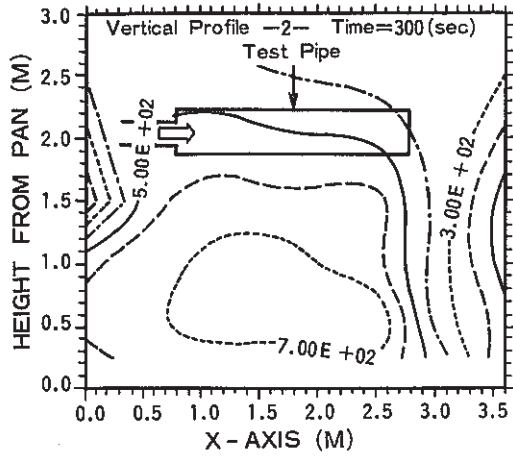


Fig. B. 4 Temperature Profiles of Gas Phase below Simulated Sodium Pipe (Vertical Profiles) 300 sec~900 sec (PSS-SFE-533)