

大規模ナトリウム漏洩燃焼試験（V）

—二次系ナトリウム漏洩事故の事象推移に関する総合模擬試験，Run—D2—

1986年10月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒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)

1986年10月.

大規模ナトリウム漏洩燃焼試験 (V)

—二次系ナトリウム漏洩事故の事象推移に関する総合模擬試験, Run-D.2—

宮原信哉*, 佐々木和一*, 山田敏雄*, 姫野嘉昭*

要 旨

「もんじゅ」の原子炉補助建屋を模擬したコンクリート製二階建セルSOLFA-1を用い、二次系Na漏洩事故の事象推移に関する総合模擬試験を行った。試験では、「もんじゅ」二次主冷却系配管の保温構造を模擬した模擬Na配管、床ライナ、連通管及び燃焼抑制板と床ライナで構成された貯留槽を試験セル内に実機と類似に配置し、温度505℃、総重量約3 tonのナトリウムを模擬Na配管から実機と同じ圧力(約3.8 Kg/cm²G)で漏洩させることによって、配管からのナトリウム漏洩に始まり貯留槽でのナトリウム燃焼の自然鎮火によって事故が終息するまでの事象推移を調べた。その結果、次の結論を得た。

- (1) 模擬Na配管から漏洩したNaは、現在「もんじゅ」設計で想定されている事象推移と同様に床ライナから連通管を経て貯留槽に円滑にドレンされ、燃焼抑制板によってその燃焼が抑制されることにより事故が終息した。
- (2) 配管からのNa漏洩形態は下向きの滝状(コラム状)漏洩であり、保温構造体の崩壊による上向きのスプレー状漏洩は生じなかった。
- (3) 模擬Na配管から漏洩したNaは、床ライナ上及び連通管内を円滑に流れて貯留槽にドレンされ、燃焼生成物やNaの凍結による流路の閉塞は起こらなかった。
- (4) 貯留槽内にドレンされたNaの燃焼は、燃焼抑制板による燃焼抑制効果によって自然鎮火した。
- (5) Na燃焼の熱的影響によるコンクリート建物とNa漏洩対策設備の破損や著しい変形等は生じなかった。また、雰囲気に出露したコンクリート表面の浸食や破損も認められなかった。

* 大洗工学センター安全工学部プラント安全工学室

OCT. 1986

A Large-Scale Test on Sodium Leak and Fire (V)
— Demonstration Test of a Sodium Leak Accident
within the Monju Secondary Building, Run-D2—

S. Miyahara * , K. Sasaki* , T. Yamada* , Y. Himeno*

A b s t r a c t

A large-scale test of a secondary sodium leak accident has been conducted to demonstrate the feasibility of the Monju fire mitigation systems using two-story high concrete cell, SOLPA-1, which simulates the Monju Secondary Building. A reduced scale-model of the Monju IHTS pipe including its thermal insulation jackets, a floor liner, a sodium drain pipe, and a smothering tank (consisting of a fire suppression board and a liner) were installed in the test cell to simulate the configuration of the fire mitigation systems.

In the test, a leak of about 3 ton of sodium at the temperature of 505°C was made from the pipe with an inner pressure of 3.8kg/cm²G, then a whole accident sequence starting from a sodium leak and ending a self-extinguishment of the fire within the smothering tank was studied.

From the test results, the following conclusions were obtained.

- a) A whole sodium leak and fires accident sequence proceeded as postulated for the Monju design.
- b) The sodium leaked from the pipe in the form of a downward columnar flow but not of an upward spray because failure of the thermal insulation jackets did not occur.
- c) The spilled sodium on the liner was led smoothly toward the smothering tank via the drain tank.
- d) Sodium fires could successfully be self-extinguished in the smothering tank.
- e) Break and remarkable transformation of the fire mitigation systems were not observed. No appreciable damage was observed on the surfaces of the bare concrete walls and the ceiling.

* Plant Safety Section, Safety Engineering Division, OEC.

目 次

要 旨	I
Abstract	II
目 次	III
List of Tables	V
List of Figures	VI
List of Photographs	VIII
緒 論	1
1. 目 的	2
2. 試験装置と計測	4
2. 1 試験装置の概略	4
2. 2 模擬ナトリウム配管	5
2. 3 床ライナ	6
2. 4 連通管	7
2. 5 燃焼抑制板と貯留槽	7
3. 試験条件と試験方法	9
4. 試験結果と考察	11
4. 1 二次ナトリウム漏洩の全体事象推移	11
4. 2 事故室内の事象推移	11
(1) 模擬ナトリウム配管からのナトリウム漏洩	11
(2) 床ライナ上における漏洩ナトリウムの流動性	13
(3) 事故室の熱伝達特性	13
(4) エアロゾル挙動及びナトリウムと水分との反応	15
4. 3 貯留室内の事象推移	16
(1) 連通管による漏洩ナトリウムドレン性能	16
(2) 燃焼抑制板の有効性	17
(3) 貯留室の熱伝達特性	17
(4) エアロゾル挙動及びナトリウムと水分との反応	19
4. 4 試験後の試験セル各部の目視観察及びナトリウム洗浄	20
(1) 各部の目視観察及び目視検査	20
(2) コンクリートとその表面に付着したエアロゾルとの反応	21
(3) ナトリウム洗浄とその際に測定した残留物の試験セル内の分布	21
(4) 模擬ナトリウム配管保温構造の検査	22

(5) 床ライナ，連通管及び貯留槽の検査	22
4. 5 試験後の上部セルのコンクリートに対する破壊検査	23
結 論	25
謝 辞	26
文 献	27

L i s t o f T a b l e s

Table	1	:	Compositions of Structural Concrete used in SOLFA-1 and in Monju
Table	2	:	Test Conditions of Run-D2
Table	3	:	Test Record of Run-D2
Table	4	:	Enthalpy Change in Upper Cell
Table	5	:	Distribution of Residual Sodium in Test Rig after the Test
Table	6	:	Specific Weight, Compressive Strength and Young's Modulus of Upper Cell Concrete after the Test

L i s t o f F i g u r e s

- Fig. 1 : Subject Examples in Monju Secondary System
- Fig. 2 : Arrangement of Test Rig for Run-D2
- Fig. 3 : Bird's-eye View of SOLFA-1 for Run-D2
- Fig. 4 : Instrumentations and Sensors Installed in Test Rig for Run-D2
- Fig. 5 : Concept of Monju Secondary Sodium Piping with Thermal Insulation Cover
- Fig. 6 : Cut View of Simulated Sodium Pipe for Run-D2
- Fig. 7 : Geometric Configuration of the Upper Cell of SOLFA-1
- Fig. 8 : Location of Thermocouples on Floor Liner of the Upper Cell of SOLFA-1
- Fig. 9 : Location of Thermocouples in the Lower Cell of SOLFA-1
- Fig. 10 : Changes of Oxygen Injection Rate and of Oxygen Concentration during the Test (Upper Cell)
- Fig. 11 : Flow Rate of Feed Sodium into Simulated Sodium Pipe
- Fig. 12 : Temperature Distribution Changes in Vertical Cross Section of Upper Cell Atmosphere during Sodium Spill
- Fig. 13 : Flow Pattern of Gas and of Spilled Sodium in Vertical Cross Section of Upper Cell Atmosphere during Sodium Spill
- Fig. 14 : Temperature Distribution of Sodium on Floor Liner and Its Change during Sodium Spill
- Fig. 15 : Temperature Changes of Liner and of Sodium on the Liner during the Test (Upper Cell)
- Fig. 16 : Temperature Distribution Change in the Upper Cell of SOLFA-1 During the Test
- Fig. 17 : Heat Generating Rate and Sodium Combustion Rate during the Test (Upper Cell)
- Fig. 18 : Distribution of Combustion Heat Transferred to the Various Portions of the Upper Cell
- Fig. 19 : Concentration Changes of Aerosol, Hydrogen and Water Vapor during the Test (Upper Cell)
- Fig. 20 : Temperature Changes of Sodium Drain Pipe and of Sodium at Inlet of the Pipe during the Test
- Fig. 21 : Temperature Changes in Bucket and in Smothering Tank during Sodium Spill
- Fig. 22 : Flow Rate of Drain Sodium into Smothering Tank
- Fig. 23 : Oxygen Concentration Changes of Cell Atmosphere and of Gas Phase in Smothering Tank during the Test
- Fig. 24 : Temperature Changes of Sodium in Bucket and in Smothering Tank during the Test

Fig. 2 5 : Temperature Distribution Change in the Lower Cell of SOLFA-1 during the Test

Fig. 2 6 : Heat Generating Rate and Sodium Combustion Rate in the Smothering Tank

Fig. 2 7 : Heat Flux to Floor Concrete in Lower Cell during the Test

Fig. 2 8 : Concentration Changes of Aerosol ,Hydrogen and Water Vapor during the Test
(Lower Cell)

Fig. 2 9 : Amount of Aerosol in SOLFA-1 after the Test

Fig. 3 0 : Post-Test Sodium Distribution in Test Rig

Fig. 3 1 : Post-Test Aerosol Distribution in Test Rig

Fig. 3 2 : Temperature Changes of Upper Cell Concrete during the Test

Fig. 3 3 : Compressive Strength of the Various Portions in Upper Cell Concrete after the
Test

Fig. 3 4 : Relation between Specific weight and Compressive Strength of Upper Cell Concrete

Fig. 3 5 : Relation between Compressive Strength and Young's Modulus of Upper Cell Concrete

Fig. 3 6 : Relation between Weight Loss and Compressive Strength of Upper Cell Concrete

Fig. 3 7 : Temperature Changes of Lower Cell Concrete during the Test

L i s t o f P h o t o g r a p h s

- Photo. 1 : Simulated Sodium Pipe installed in the Upper Cell of SOLFA-1 (Pre-Test)
- Photo. 2 : Arrangement of Drain Pipe and Smothering Tank
- Photo. 3 : Sodium Leak at the Beginning of the Test
- Photo. 4 : Post-Test View of the Upper Cell of SOLFA-1
- Photo. 5 : Post-Test View of Inlet of Drain Pipe
- Photo. 6 : Post-Test View of Sodium and Its Reaction Products in Smothering Tank
 (A part of fire suppression board is removed for Visual Inspection)
- Photo. 7 : Post-Test View of wall Concrete Surface in Upper Cell
- Photo. 8 : Post-Test View of Simulated Sodium Pipe
- Photo. 9 : Disassembling of Simulated Sodium Pipe after the Test
- Photo. 1 0 : Post-Test View of Connecting Pipe in Simulated Sodium Pipe
- Photo. 1 1 : Non-desructive Inspection of Weld Line of Liner in Upper Cell after the Test
- Photo. 1 2 : Non-desructive Inspection of Weld Line of Liner in Lower Cell after the Test
- Photo. 1 3 : Concrete Samples for mesuring the Compressive Strength and the Young's Modulus

結 論

高速増殖原型炉「もんじゅ」の原子炉補助建屋で、二次冷却材であるナトリウム（以下、Naと略す）が万が一漏洩した場合には、漏洩Naが空気中の酸素や水蒸気と反応して燃焼発熱し、それに伴う建屋構造物への熱的影響を生じることが考えられる。そこで、「もんじゅ」では設計基準内のNa漏洩事故として $1/4 \cdot D \cdot t$ （Dは配管口径、tは配管肉厚）相当の配管破損口からのNa漏洩事故を想定し、これによる熱的影響を防護するための配管保温構造、床ライナ、連通管及び燃焼抑制板と床ライナで構成された貯留槽からなるNa漏洩対策設備を設け、これらによって事故時においても建屋の健全性が維持できる様な合理的な設計を行っている。

これらのNa漏洩対策設備が、事故時に効果的に機能することは、昭和58年度から59年度にかけて実施したNaを用いた部分基礎試験（Run-A1, B1, B2, B4）⁽¹⁾⁽²⁾、全体縮尺モデル試験（Run-B3）⁽³⁾並びに水を用いたフルモックアップ配管構造水漏洩試験⁽⁴⁾によって部分的或いは小規模に既に検証している。昭和60年度はこれらに引き続き、より大規模かつ総合的な見地からの検証を目的に、大規模Na漏洩火災試験施設（サファイア施設）を用いた以下の5回の試験を実施した。

- 1) 空気雰囲気におけるNaプール燃焼試験（Run-D1）⁽⁵⁾
- 2) 水蒸気注入空気雰囲気におけるNaスプレー燃焼試験（Run-F1）⁽⁶⁾
- 3) 空気雰囲気における大規模Naスプレー燃焼試験（Run-E1）⁽⁷⁾
- 4) Na漏洩形態確認試験（Run-E2）⁽⁸⁾
- 5) 二次系Na漏洩事故の事象推移に関する総合模擬試験（Run-D2）

本報では、昭和60年度に実施したこれら一連の試験のうち、5)の二次系Na漏洩事故の事象推移に関する総合模擬試験（Run-D2）について報告する。

1. 目 的

「もんじゅ」の原子炉補助建屋では、万が一Na漏洩事故が起こった場合には、Fig. 1に示す様に、配管から漏れたNaはまず床に敷設した鋼製ライナ上に落下させ、次に連通管を経て建屋の最下層の室内に設置した燃焼抑制板と床ライナから成る貯留槽内にドレンし、そこでNa燃焼を抑制させることによって事故を終息させるよう設計が成されている。このように想定されている事象推移に対して、建屋内に設置されたNa漏洩対策設備が設計どおりに機能することを立証するためには、以下のことを確認しておく必要がある。

〔全体の事象推移〕

既に実施した小規模な全体縮尺モデル試験（以下、Run-B3と略す）⁽³⁾の結果から、実機で想定されているとおりの事象推移となることを確認したが、規模が大きくなることによって、スケール効果による工学的に未知な現象は起こらないか。

〔配管からのNa漏洩形態〕

実機と同じ温度のNaを使用したRun-B3では、Naの流出圧力が約0.2 Kg/cm²Gと実機のそれと比べて低かった。しかし、そこではNaと保温材との反応による保温構造の崩壊は認められず、Naの漏洩形態は下向きのコラム状である事を確認した。また、これに先立って行った配管水漏洩試験では、配管の内圧を実機と同じにし、そこでも圧力による保温構造の崩壊はなく漏洩形態は下向きのコラム状である事を確認した。しかし、実機と同じ温度と圧力のNaを使用した場合にも、同様の結果となるか。換言すれば、配管から漏洩したNaがライナを敷設していない天井や壁においてコンクリートと直接接触しないか。

〔漏洩Naの流動性〕

床ライナ上及び連通管内における漏洩Naの流動性については、部分基礎試験（Run-B1, B2, B4, 以下、Run-B1, Run-B2, Run-B4と略す）及びRun-B3の結果から、燃焼生成物やNaの凍結による流路の閉塞は起こらない事を確認した。しかし、漏洩Naの流量や流路面積が大きくなることによって、漏洩箇所から貯留部までのNa流動が阻害される現象は起こらないか。

〔燃焼抑制板による燃焼抑制効果〕

Run-B1及びRun-B3の結果から、燃焼抑制板の開口面積を小さくすることによってNaの燃焼を抑制できることを確認したが、実機で設置される構造においても同様の効果が得られるか。

〔コンクリート建物とNa漏洩対策設備の健全性〕

事故時のNa燃焼による熱的影響によって、コンクリート建物やNa漏洩対策設備の構造健全性が損なわれないか。また、原子炉補助建屋の大部分の部屋では、天井及び壁にはライナを敷設していないためにコンクリートが雰囲気露出している。このため、事故時に発生するNaエアロゾルが付着して、反応・浸食等を起こさないか。

以上の各項目を、総合的かつ大規模な試験で確認することを目的として、二次系Na漏洩事故の事象推移に関する総合模擬試験（以下、Run-D2と略す）を実施した。

2. 試験装置と計測

2. 1 試験装置の概略

Fig. 2 に示すように、Run-D2 で用いた試験装置は、SOLFA-1 試験装置とその周辺装置である Na 加熱器、Na ドレンタンク、及び排煙廃液処理装置より構成されている。

Na 加熱器は、最大約 4 t o n の Na を加熱して所定の温度まで昇温し、カバーガスである窒素を加圧操作することによって、Na を試験セル内に供給することができる。また、排煙廃液処理装置は、試験時に発生する Na エアロゾルを水スクラバー及び H E P A フィルタにてトラップし、大気中に放出するのを防止するためのものである。

SOLFA-1 試験セルは、「もんじゅ」の原子炉補助建屋を模擬したコンクリート製二階建セルで、二階部は事故室を、一階部は燃焼抑制板と床ライナで構成された貯留槽が設置されている貯留室を模擬している（以下、二階は事故室、一階は貯留室と呼ぶ）。

SOLFA-1 試験セルの鳥瞰図を Fig. 3 に示す。

コンクリート部については、試験によってコンクリートが劣化した場合の交換作業を容易にする目的からパネル構造としており、このために構造上は必ずしも実機を模擬していない部分もあるが、熱的影響を調べる上で現象を支配すると考えられるコンクリートの組成については、「もんじゅ」で使用される予定の福井県葉原産の硬質砂岩と同県三国産の陸砂を骨材として用いた。Table 1 に、「もんじゅ」で使用されるコンクリートと SOLFA-1 のコンクリートとの配合条件の比較表を示す。

試験セル 2 階の事故室内部には、Na を漏洩させるための模擬 Na 配管と床ライナを設置し、その天井及び壁は「もんじゅ」原子炉補助建屋の大部分の部屋と同様に、コンクリート表面を露出状態とした。また、事故室の側壁には、空気の流入・流出ダクトと計測用のノズル類を設置し、これらを試験時の圧力開放と計測のために使用した。事故室内の天井部には、試験時の Na 燃焼継続のために必要な酸素の供給を行う酸素注入配管を設置した。

試験セル 1 階の貯留室には、内部に燃焼抑制板と床ライナで構成されている貯留槽と事故室で漏洩した Na を貯留槽内へ導くための連通管が設置されている。側壁部には、事故室と同様に空気の流入・流出ダクトと計測用のノズル類を設置し、これらを室内の換気と計測のために使用した。また、天井及び壁には実機と同様に、燃焼抑制板からの熱放射によるコンクリートの温度上昇を防止するための放射熱防止板と保温材を設置した。

次に、装置全体の計測について述べる。Fig. 4 に、計測項目と計測点を示す。試験時における模擬 Na 配管への供給 Na 温度と供給 Na 流量は、Na 加熱器及び Na 供給配管内の熱電対と Na 供給配管に取りつけた Na 電磁流量計により測定した。また、事故室内への酸素供給流量と貯留室内の空気換気量は、それぞれ、オリフィス流量計と熱細管空気流量計で測定した。さらに、SOLFA-1 試験セルはコンクリート製で耐圧構造となっていないため、

試験時のセル内圧力監視用として電送式圧力計を用いた。事故室内及び貯留室内では、熱電対を用いた各部の温度測定を行うとともに、雰囲気中のエアロゾル濃度、酸素濃度、水素濃度、及び水蒸気濃度を測定した。これらのうち、エアロゾル濃度の測定には、雰囲気ガスを吸引して焼結金属フィルタでその中のNa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を採用した間欠式の装置を用いた。酸素濃度と水素濃度の測定は、前者については磁気式酸素濃度計とガスクロマトグラフを、後者については、熱伝導式水素濃度計とガスクロマトグラフを、それぞれ併用して行った。また、水蒸気濃度の測定については、上記のエアロゾル濃度測定時に吸引したフィルタ通過後のガスについて、その露点を測定する方式であり、したがって、エアロゾル濃度の測定と同様に間欠的に測定されるものである。この方式を採用した理由は、露点計測センサ部がNa等のアルカリに腐食され易いためと、エアロゾル自身に吸湿性があるため、連続的に測定するとフィルタに捕集されたエアロゾルの吸湿効果によって雰囲気中の真の露点が測定できなくなり、これを防止するためである。この他に、試験中に室内で起こる現象を観察・記録するため、工業用テレビカメラと35mmカメラ及び赤外線テレビカメラを設置した。

2. 2 模擬ナトリウム配管

模擬Na配管は、Fig. 5に示す「もんじゅ」二次主冷却系配管の直管部を、周囲の保温構造体を含めて長さで約 $1/2.6$ に縮尺したもので、Fig. 6にその概略組立図を示す。保温構造体の構造については、Run-B3と配管水漏洩試験で用いたものが昭和58年度の設計を模擬したものであったのに対し、昭和60年度実施した別途報告するNa漏洩形態確認試験（以下、Run-E2⁽⁵⁾と略す）と、ここで報告するRun-D2のそれは、昭和60年度の設計を模擬したものである。これらの構造の違いについては、その詳細部において若干の合理化が図られているのみで、基本的には昭和58年度の設計と同一である。昭和60年度の試験では、保温構造体からのNa漏洩をより現実的に評価するため、クランプ部の構造も模擬した。

配管は、材質と形状がSUS-304, sch20, 8B、全長が1600mmで、上部にFig. 6のようにNa漏洩口を設けている。Na漏洩口の面積は、模擬Na配管全体を長さで約 $1/2.6$ に縮尺したことから、実機の二次主冷却系配管の $1/4 \cdot D_t$ の面積（13.3cm²）の約 $1/(2.6)^2$ になる大きさとした。配管の外表面には、実機の配管予熱用直線状シーズヒータの模擬のために丸棒を取付け、試験時の模擬Na配管の予熱は、配管の内表面にはりつけたシーズヒータにて行った。また、配管の一端部近傍には、前述した様に配管サポート用のクランプを取付けた。ただし、これは試験における模擬Na配管のサポートとして用いたのではなく、単にその形状と取付け方法を模擬しただけのもので、実際のサポートは、配管両端部を天井からの

フックで吊るすことにより行った。

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：ロックファイン、厚さ：70mm）、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、Run-B3と同様に、実機と同一寸法とした。これは、設計基準のNa漏洩の際に内・外装板に加わる漏洩Naの流体力に対しては、すでに配管水漏洩試験によって内・外装板が十分な強度を有していること、また漏洩時の内外装板の耐熱性及び耐Na性についても、すでにRun-B3によって確認していることから、これら過去に行った個別の試験結果を総合的に評価するためである。

内装板は、上下方向に二つ割で製作し、配管への固定は配管側部軸方向のツバ部分をボルト・ナットを用いて行った。また、周方向の継ぎ目は、クランプ部と模擬ヒータ取り出し部の二箇所があり、前者については円周に沿ったツバ部分をクランプに、後者については継ぎ目部分にかぶせた上下二つ割の帯板を内装板の配管への固定方法と同様の方法で、それぞれボルト・ナットどめして固定した。

内装板と配管外表面との間には、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：8mm）を、配管軸方向に195mm間隔で設置した。これは、実機ではこの部分の雰囲気ガスが、Na漏洩検出器に導かれているためであり、したがってこのためのサンプル管とクランプ部の連結管も模擬して設置した。

外装板は、保温材の外側に巻きつける様に製作し、配管周方向についてはハゼ折り、配管軸方向については単に重ねあわすのみで固定した。クランプ部については、配管断面に対して左右に二分割した外装板の舟型を製作し、それらをかぶせて上下部分でハゼ折りにて固定した。

保温構造体には、配管軸方向中央部下端に模擬ヒータ取り出し口がある。この取り出し口は、内装板についてはNa漏洩時の流出圧によって容易に変形し、開口部が拡大されるように、また、外装板については、ヒータ径よりもひと回り大きな開口部を設けて製作されている。なお、保温構造体の両端部は、側部を溶接とパッキンで完全にシールし、試験時の必要な箇所からのNa漏洩を防止した。

模擬Na配管の事故室内設置状況を、Photo. 1に示す。

試験時の計測センサとしては熱電対を用いたが、Run-B3の結果から、保温材とNaとの化学反応は生じないことが既に確認されている。このため、今回の試験では配管予熱制御用として配管内表面に1本と、漏洩Na温度測定用として外装板外表面のヒータ取り出し部に1本を取りつけたのみで保温材中には取り付けではない。

2. 3 床ライナ

床ライナは、Fig. 3に示した様に、事故室、貯留室ともにコの字型鋼の梁の上に板厚6mm

の鋼板（材質：SM41B）を敷設して製作した。これは、セミ・フローティング型ライナと呼ばれているもので、「もんじゅ」の二次系建屋のセルライナに採用が予定されている形式である。コの字型鋼の梁は、コンクリートに固定されたアンカーボルトと押え金物によって、上下方向の動きは拘束されているが、横方向にはスライド可能な構造となっており、Na漏洩時の床ライナ温度上昇による熱膨張を吸収することができる。

腰壁部は、床ライナ上に漏洩・貯留したNaがあふれない程度の高さの縁（事故室は、高さ375 mm、貯留室は、高さ600mm）が設けてあり、事故室については模擬Na配管側から連通管入口側に向かって1/100の勾配をつけてある。また、床ライナとコンクリートとの間には、梁と梁との間隙に断熱用のパーライト・ボードを設置してある。これらの施工方法は、すべて「もんじゅ」で予定されている方法と同一にした。

試験用の計測センサは熱電対のみで、事故室については、ライナの裏面とコの字型鋼の梁及びライナ上のNaの各温度測定用に合計28本を、貯留室については、ライナの裏面とコの字型鋼の梁の各温度測定用に合計7本を取付けた。Fig. 7に、事故室内における前述の模擬Na配管との相対位置関係を、Fig. 8, 9に、床ライナの熱電対配置状況を示す。

2. 4 連通管

連通管は、事故室床ライナ開口部から貯留室天井部までは、12Bの炭素鋼管(STPG38, sch 20)で、貯留室天井部から貯留槽内までは、8Bの炭素鋼管(STPG38, sch20)であり、両者はレジュースを使用して溶接で連結されている。Fig. 3に示した事故室の床ライナ開口部から貯留槽内までの総延長距離は、約4.1 mである。

試験用の計測センサは熱電対のみで、連通管入口Na温度測定用として事故室床ライナ開口部に、また、連通管温度測定用として貯留室内連通管外表面に、それぞれ1本ずつ取りつけた。

2. 5 燃焼抑制板と貯留槽

貯留室内の燃焼抑制板は、一辺が約900 mm×約1100mm及び約900 mm×約1800mmの炭素鋼板（材質：SS41, 厚さ：4.5mm）15枚で構成されている。これらは、Fig. 3に示した様に、ライナ上に立てた支柱とその梁の上に敷設し、床ライナとともに深さ500mmの貯留槽を形成している。

連通管の挿入部分には、Photo. 2に示すように、その下部にバケットを設け、これによって試験時にはそこに流入するNaで連通管下部開口部をシールし、連通管の煙突効果とそれによる貯留槽内のNa燃焼促進を防止できるようになっている。また、その対角位置の燃焼抑制板には、Na流入時の貯留槽内部の膨張ガスの解放のために、4Bのガス抜き孔（材質：SGP, 長さ：150mm）を取りつけた。これを含めた燃焼抑制板の開口面積比は、実機と同様に

1 %以下である。

試験用の計測センサは熱電対で、バケット内部に1本と、貯留槽内部の深さ方向に12本を2箇所、及びそれと同じ位置の燃焼抑制板に2本を取りつけた。Fig. 9に、燃焼抑制板及び貯留槽の熱電対配置状況を示す。

3. 試験条件と試験方法

Run-D2の試験条件を、Table 2に示す。これら試験条件の選定にあたっては、試験目的のうちの

1) 配管からのNa漏洩形態

2) 燃焼抑制板による燃焼抑制効果

の二つについて特に注目し、前者からは試験時の漏洩Na温度とNa漏洩圧力を、後者からは試験時の総漏洩Na量を決定した。即ち、漏洩Na温度とNa漏洩圧力は、模擬Na配管全体を長さの次元で実機の約 $1/2.6$ に縮尺し、Na漏洩口の面積についても、実機配管の $1/4Dt$ の面積の約 $1/(2.6)^2$ に縮尺したため、実機の二次主冷却系配管におけるNaと同じ条件とすることによって、模擬Na配管に対するNa漏洩条件を実機と同一にすることを狙ったものである。また、総漏洩Na量は、貯留槽内に貯留されたNaの燃焼現象が槽内に存在する酸素量によって左右されるため、貯留Naの単位表面積当りの空間容積が実機と同一となるようにした。ただし、Run-B3の経験から、総漏洩Na量の約10%が事故室等に残留するため、この分を上乗せして総漏洩Na量を決めた。

試験期間中に、事故室では酸素ガスの注入を、貯留室では換気を行ったが、これは、事故室については酸素が消費しつくされてNaの燃焼が試験の途中で抑制されるのを防止するためであり、貯留室についても同様に、室内が酸素不足になって燃焼抑制板による本来の燃焼抑制効果を確認できなくなるのを防ぐためである。

事故室への酸素注入流量は、試験時の雰囲気中酸素濃度が空気中の酸素濃度(21%)を超えない程度になるようにし、その値は、「もんじゅ」安全審査及び変更申請における評価に用いた解析コードで予備解析を実施して決めた。また、総酸素注入量は、事故室が実機二次主冷却系配管室を模擬したものであり、この実機の配管室が隣接室や連通室と開口部を通してつながっているため、これらの部屋に存在する酸素量に、事故室(SOLFA-1上部室)と実機二次主冷却系配管室の空間容積比を掛け合わせた量を超えない値とした。Fig. 10に、試験中の事故室への酸素注入流量変化と室内の酸素濃度変化を示す。

一方、貯留室の換気流量は、実機の貯留槽が設置されている二次ダンプタンク室の酸素濃度が、事故時のNa貯留時においてもほとんど変化することなくほぼ一定(21%)との事前評価結果を受けて、これを模擬するものとし、その値は、上述の事故室と同様の方法で決めた。

次に、試験方法について述べる。試験では、予めNa加熱器内のNaと模擬Na配管を所定の温度まで昇温し、エアロゾル・スクラバーを起動させた。次に、模擬Na配管の破損口におけるNa流出圧力が所定の値になるように、Na加熱器のカバーガスを加圧し、Na供給配管のバルブを開いてNaを漏洩させ試験を開始した。Table 3に、試験経過を示す。試験開始後は、貯留室内に漏洩Naが流入する頃を見計らって貯留室の換気を開始し、その後、室内の圧力が安定した時点で事故室内への酸素注入を開始した。ただし、所定のNa量が漏洩し終わった後は酸素注入流量を変更し、また試験開

始後約40分には注入を停止した。この後は、事故室内と貯留室内の事象推移の観察を継続し、貯留槽内の貯留Na温度がNaの燃焼下限温度以下となった時点で貯留Naをドレンタンクへドレンした。

試験後処理と解体検査では、まず始めに装置内部の残留Na処理を行い、残留Na及び残留エアロゾルの分布状況を調査し、また、床ライナ、連通管、及び燃焼抑制板の試験後における健全性に関する検査も行った。事故室の天井と壁のコンクリートについては、NaやNaエアロゾルとの反応の有無について観察を行った。模擬Na配管の保温構造体については、既にRun-B3で詳細な検査を行っていることから、解体による状況観察を行うにとどめた。さらに、事故室の天井・壁・床のコンクリートパネルは解体し、それらからコア（試料）を切り取って試験後の強度測定に供した。

4. 試験結果と考察

4. 1 二次系ナトリウム漏洩の全体事象推移

まず初めに、模擬Na配管からNaが漏洩開始した以降の試験全体に関する観察結果について述べる。模擬Na配管にNaの供給を開始すると、数秒の遅れの後、保温構造体の模擬ヒータ取り出し口からNaの漏洩が始まった。その後、すぐに外装板の配管周方向とクランプ部の継ぎ目から下方に向かってNaが漏洩し、さらに、漏洩Naの流出部が外装板の継ぎ目に沿って上方に移動する傾向が見られた。しかし、Na漏洩期間中にわたって、外装板の腐食もしくは破損等による保温構造体の予期せざる場所からの上方へのNa漏洩はなく、下方への滝状（コラム状）漏洩が持続した。Photo. 3に、この時の状況を示す。

模擬Na配管から漏洩したNaは、周囲の壁に接触することなく床ライナ上に落下し、ライナ上ではその勾配に沿って連通管に向かい円滑に流れた。連通管入口部に達したNaは、管内で閉塞を起こすことなく速やかに貯留室の貯留槽内にドレンされた。

貯留槽では、Run-B3で生じたようなガス抜き配管の口径不足によるドレンNaの燃焼抑制板上への溢れはなく、槽内の膨張ガスを十分に排出でき、事故室からの漏洩Naを収納することができた。また、その後は、燃焼抑制板による貯留Naの燃焼抑制効果によってNa燃焼は鎮火し、周囲への熱放散によって貯留Naの温度は時間とともに降下した。

工業用テレビカメラ及び赤外線テレビカメラによる観察結果からは、「もんじゅ」二次系Na漏洩の全体事象推移は実機で想定されているとおりであり、また、小規模で実施したRun-B3から規模が大きくなることによって著しく異なる現象も起こらなかった。したがって、現在「もんじゅ」設計で想定されている事象推移について、本質的な修正を加える必要はないと考える。

4. 2 事故室内の事象推移

(1) 模擬ナトリウム配管からのナトリウム漏洩

Fig. 11に、試験中の漏洩Naの流量変化を示す。この図からわかるとおり、試験期間中の漏洩Na流量は約240l/min（約3.22kg/sec）でほぼ一定であり、予定のNa量を874秒で漏洩させることが出来た。実機の安全評価では、その結果をより保守的なものとするために、Na漏洩事故時のNa漏洩流量を保温構造体による圧力損失がないものと仮定して（即ち、圧力損失係数=1.0としている）求めているが、これとの比較のため、今回の試験におけるNa流出圧力とNa漏洩流量の結果から、実際の圧力損失係数を求めてみた。圧力損失係数の算出方法は、以下の式を用いて行った。

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho}{2} v^2 = \zeta \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{W}{\gamma A} \right)^2 \quad \text{—————(1)}$$

ここで、

ΔP : Na 漏洩口における Na 流出圧力と大気圧との差 $= 3.8 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 \text{G}$

ζ : 保温構造体の圧力損失係数

ρ : 漏洩 Na の密度 ($\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$)

v : Na 漏洩口における Na 流出速度 (m/sec)

r : 漏洩 Na の比重量 $= 830.6 \text{ kg/m}^3$

g : 重力加速度 $= 9.807 \text{ m/s}^2$

w : Na 漏洩流量 $= 3.22 \text{ kg/s}$

A : Na 漏洩口の面積 $= 2.247 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

実測した ΔP 、 v 及び (1) 式から、圧力損失係数を求めると、次の値となった。

$$\zeta = 3.015$$

この値は、配管水漏洩試験で得た値 (2.582~2.843) 及び Run-E2 で得た値 (3.33) とほぼ一致する。このことから、実機の安全評価では、Na 漏洩事故時の Na 漏洩流量を約 2 倍保守的に見積もっていると言える。

次に、Na 漏洩時の事故室雰囲気と模擬 Na 配管からの漏洩 Na の挙動について述べる。Fig. 12 に示す図は、Na 漏洩時における事故室空間を模擬 Na 配管の中央部断面を通る線で鉛直方向に切断した空間断面での温度分布時間変化である。この図からわかるように、模擬 Na 配管から Na が漏洩し始めると、模擬 Na 配管直下の空間ガス温度が上昇し始め、時間とともにその温度は高くなっている。また、その高温領域の分布から、模擬 Na 配管の下部空間に漏洩 Na によるコーン状領域が形成されていることがわかる。しかし、模擬 Na 配管の上方には、その様なホットスポットは生じておらず、4.1 項で前述したとおり、模擬 Na 配管からの Na 漏洩形態は下向きの滝状 (コラム状) であり、上向きのスプレー状漏洩ではないことがわかる。一方、この時の雰囲気温度の変化に着目すると、模擬 Na 配管から流下する漏洩 Na の近傍のガス温度がまず初めに上昇し、その後、その分布は模擬 Na 配管上方の天井に移動している。さらに、天井部を這うようにして模擬 Na 配管の位置する方とは反対側の壁に向かい、その壁を伝って下方に降りている。

以上のことから、事故室においては、模擬 Na 配管から下向きの滝状 (コラム状) Na 漏洩が起こったこと、及びそれによって Fig. 13 に示す雰囲気の大気対流が生じたことが明らかになかった。このような対流パターンは、雰囲気の大気対流を考慮したより高精度な解析コードを今後開発する際の参考となるものと考えられる。

(2) 床ライナ上における漏洩Naの流動性

Fig. 14とFig. 15に、それぞれライナ表面のNa温度分布とその変化、及び代表的な位置におけるライナ温度とライナ上のNa温度の時間変化を示す。まず、Fig. 14から、床ライナ上における漏洩Naの流動性については、模擬Na配管から漏洩したNaがその直下に落下し、落下後はライナ上で広がって徐々に連通管入口部に向かって流れていることがわかる。また、Fig. 15からは、Naが落下するとライナ温度は直ちに上昇を始め、Na漏洩終了時には既に供給Na温度である505℃より高い600℃以上になっていることがわかる。既に実施したRun-B2では、ライナ的一端から505℃のNaを流しライナ温度を測定したが、この場合は、Naが流れている間はライナ温度が漏洩Na温度に維持された。また、今回の試験よりも漏洩Naの落下距離が短いRun-B3では、Na漏洩中にライナ温度が供給Na温度を超えたが、今回の試験結果程ではなかった。したがって、これらのことは、落下Naの滝状（コラム状）燃焼やライナ上で飛散したNaの液滴燃焼によるNa温度上昇の程度が、漏洩Naの落下距離に依存しており、これによってNa漏洩期間中のライナ温度上昇が左右されることを示している。Na漏洩終了後のライナ温度は、さらに上昇を続け、最高温度で約680℃を記録したが、これは、床ライナ上に残留したNaがプール燃焼したことによるものである。

床ライナ各部の最高温度は、いずれも事故室内への酸素注入を停止した時刻に到達しており、すでに示したFig. 10の酸素濃度変化がこの後一旦下降して上昇していることから、酸素注入をさらに継続していた場合は、ライナ温度はもっと上昇していたことも考えられる。また、各部の最高温度は、連通管入口部に近くなるほど高くなる傾向が見られる。これは、その位置に残留しているNa量が、連通管入口部に近い程多いためにプール燃焼が継続し易い状態であったためと考える。

(3) 事故室の熱伝達特性

試験期間中における事故室内各部の温度変化を、Fig. 16に示す。この図から、各部の最高温度のうちで著しく高かったのは、上の(2)に述べたライナ温度とライナ上のNa温度である。その他の、雰囲気温度とコンクリート温度については、前者が約400℃を記録し、後者については天井・壁・床のいずれについても150℃以下であった。

既に実施したRun-A1、Run-B1のプール燃焼やRun-B3の滝状とプールの混合燃焼との比較のため、Fig. 16に示した試験データをもとに事故室内の燃焼発熱量を求めた。燃焼発熱量の算出方法は、雰囲気ガス、床ライナと床コンクリート、及び天井と壁のコンクリートのそれぞれのエンタルピー上昇分から、連通管から流出したNaと供給Naのエンタルピー差を差し引く方法で、既報のRun-B3と同様である。式は、以下のとおりである。

$$Q = Q_{Na, out} - Q_{Na, in} + Q_{ceil} + Q_{wall} + Q_{floor} + Q_{gas} \quad (2)$$

ただし、

$Q_{Na, out} - Q_{Na, in}$: 事故室から連通管を経てドレンされたNaと模擬Na配管に供給されたNaのエンタルピー差 (Kcal/h)

Q_{ceil} : 事故室の天井コンクリートの受けた熱量 (Kcal/h)

Q_{wall} : 事故室の壁コンクリートの受けた熱量 (Kcal/h)

Q_{floor} : 事故室の床ライナと床コンクリートの受けた熱量 (Kcal/h)

Q_{gas} : 事故室の雰囲気ガスの受けた熱量 (Kcal/h)

試験データを基に(2)式の計算を行い、燃焼発熱量 Q を求めると、Fig. 17に示す結果を得た。また、この図には、燃焼発熱量 Q を床ライナ単位面積当りの燃焼発熱量に換算した結果並びに燃焼による生成物を Na_2O_2 と仮定した場合のNa燃焼速度に換算した結果についても併せて示した。

この図でNa漏洩期間中に着目すると、Na漏洩初期の燃焼発熱量が室内の酸素濃度の減少のために一旦下降しているが、酸素の注入を開始すると再び上昇し、最大で約 2.2×10^6 Kcal/hに達している。これは、床ライナの単位面積当りで約 135 Kw/m²であり、プール燃焼の場合の平均燃焼発熱量 100 Kw/m²の 1.35 倍にすぎない。また、Run-B3で得られた 165 Kw/m²よりも小さい値であった。さらに、Na漏洩流量が 3.22 Kg/sec (11592 kg/h)であるから、燃焼による生成物を Na_2O_2 と仮定した場合のNa燃焼速度約 850 Kg/hはNa漏洩流量の約 7.3% にしか相当しない。これらの結果から、模擬Na配管からの滝状(コラム状)とプール状のNa混合燃焼は、プール燃焼と比べても激しいものではなく、非常に穏やかなものであったと言える。

Na漏洩終了後は、燃焼発熱量は酸素の注入を停止するまで $70 \sim 90$ Kw/m²に維持されており、床ライナ上でプール燃焼が起こっていることがわかる。しかし、酸素の注入を停止すると下降し、試験開始後約1時間ではほぼゼロとなって鎮火した。

次に、(2)式の計算過程で求めた事故室各部の受け取った熱量から、それぞれの全燃焼発熱量に対する比率を求めた。この結果を、Fig. 18に示す。この図から、全燃焼発熱量のうちの 90% 以上が、事故室の天井・壁・床の温度上昇に消費され(特に、天井と壁のみで 70% 以上)、連通管へのドレンNaと雰囲気ガスの温度上昇に消費された分は、ごく僅かであったことがわかる。

Run-B3では、全燃焼発熱量の 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ており、この結果と大きく異なる結果となったが、この理由としては、Run-B3ではNa漏洩量に対して床面積が狭く、また、Na漏洩終了直後にセル内の換気を停止して窒素ガスをブローしたために、プール燃焼による影響をあまり受けて

いないのに対し、今回の試験では床面積が相対的に広く、また、Na漏洩期間中及びNa漏洩終了後ともNa燃焼に必要な酸素が十分に存在していたために、プール燃焼による影響を大きく受けたためと考える。Table 4に示す各部のエンタルピー変化から、特にNa漏洩終了後の影響も考慮した試験開始から1時間までの結果を見ると、全燃焼発熱量のうちの50%以上が壁の温度上昇に消費されていることから、床ライナ上に残留したNaプール燃焼による放射熱の影響が大きいと考える。

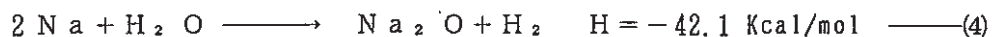
(4) エアロゾル挙動及びナトリウムと水分との反応

Fig. 19に、試験期間中の事故室内雰囲気におけるエアロゾル、水蒸気及び水素の濃度変化を示す。エアロゾル濃度は、模擬Na配管からのNa漏洩開始とともに上昇し、Na漏洩終了時に約 23g-Na/m^3 の最高濃度を示した。しかし、Na漏洩終了後は、Fig. 17に示したNa燃焼速度の下降とともに減少し、試験開始1時間以後は約 1g-Na/m^3 以下になっている。試験開始後約2.5時間近くで一旦濃度が上昇しているのは、後述する室内の換気によって、沈降・付着していたエアロゾルが舞い上がったことによるものと推定する。

水蒸気濃度は、試験開始前に0.5%であったものがNa漏洩開始とともに減少し、試験開始後約30分ごろまではほとんどゼロを示していたが、その後は上昇し、約1.5~2.0%を維持し続けた。この高い水蒸気濃度は、コンクリートが加熱されて放出された水蒸気によるものであると考える。

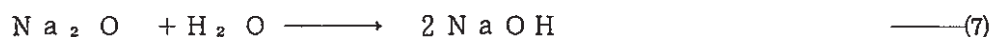
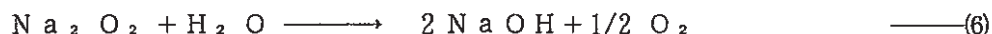
水素濃度は、試験開始前から開始後約30分まではゼロで、その後は水蒸気濃度の上昇とともに増加し、開始後40分で測定限界である5%を超えた。水素の爆発限界は、酸素濃度が4.9%以上の場合は4%であるため、今回の試験では3%を超えた時点で室内に設置したディーゼルエンジン用グロープラグを赤熱させ、強制燃焼させることを試みたが、燃焼にはいたらなかった。このため、やむをえず試験開始後約1.5時間から室内を換気し、水素濃度を低下させた。水素が燃焼に至らなかった理由としては、室内の雰囲気に混在した水蒸気とNaエアロゾルの影響が考えられる。即ち、Naエアロゾル、水蒸気及び水素の3つの濃度の傾向に着目すると、試験期間中の初期のNaエアロゾル濃度の高い時には、水蒸気濃度と水素濃度のいずれもほとんどゼロに保たれており、Naエアロゾル濃度が減衰すると、これらはいずれも上昇している。したがって、この結果から以下の様な現象が起こっていると考ええる。

- (i) Na漏洩開始とともに、Naと水蒸気との反応が起こり水素が発生したが、Naが酸素と激しく反応して燃焼している期間中は、この水素は燃焼領域で酸素と反応し消費された。



しかし、Naと酸素との反応による燃焼が起こらなくなると、(5)の反応が進行しなくなるために、(4)の反応によって生成した水素が蓄積した。

(ii) Na漏洩開始とともに発生したNa酸化物エアロゾルは、雰囲気中の水蒸気と反応して水酸化ナトリウムエアロゾルを形成するが、このとき雰囲気中の水蒸気を消費し、Naと水蒸気との反応を抑制した。



しかし、Naと酸素との反応による燃焼が起こらなくなると、Na酸化物エアロゾルが発生しなくなるために水蒸気が消費されなくなり、(4)の反応が進行して水素が発生した。また、雰囲気の水蒸気濃度も上昇した。

以上のことは、高速増殖炉における水素燃焼に関して固有の安全性となる可能性がある。ただ、今回の試験結果から定性的な議論を行なえるにとどまり、今後、二次系Na燃焼時の水素発生機構と水素爆発抑制機構について定量的なデータを取得する必要があると考える。

4. 3 貯留室内の事象推移

(1) 連通管による漏洩ナトリウムドレン性能

4. 1で前述した様に、連通管では事故室で漏洩したNaは閉塞することなく、円滑に貯留室の貯留槽内にドレンされた。Fig. 20に、試験期間中の連通管と連通管への流入Naの温度変化を示す。この図から、連通管へのNaの流入が開始されると連通管温度も上昇し、Naが連通管に流入している間は500℃以上に維持されていることがわかる。このことから、連通管内でのドレンNaの凍結による閉塞は生じていないと言える。また、Fig. 21に示す貯留槽内の深さ方向の温度変化から、ドレンされたNaの流量を求めると、Fig. 22に示す如くとなる。この図の結果から、Na漏洩初期には、漏洩Naが事故室内の床ライナ上に広がりながらその一部がドレンされるために、模擬Na配管からの漏洩Na流量よりも少ない流量でドレンされているが、試験開始約150秒後からは、ほぼ漏洩Na流量(240l/min=4l/sec)と等しい流量となっていることがわかる。したがって、Na漏洩事故時の事故室内床ライナ上における漏洩Naの著しい滞留は生じ

ないと考える。

(2) 燃焼抑制板の有効性

燃焼抑制板による貯留Naの燃焼抑制効果は、貯留槽の内側と外側の酸素濃度変化及び貯留Naの温度変化を調べることにより行った。Fig. 23に貯留槽内外の酸素濃度変化を示す。この図からわかるように、貯留槽内にドレンNaが流入すると槽内の酸素はNaとの反応によって消費されて約30分後にはゼロになっている。また、試験終了時まで約4%以下に維持されている。一方、貯留槽外の酸素濃度は、貯留槽にNaが流入した際の一時的な激しい燃焼のために一旦低下しているが、その後は室内の換気によって21%の一定値に保たれている。これらのことから、燃焼抑制板は貯留槽内に外部から空気が流入するのを十分抑制しており、燃焼抑制効果が有効に働いていると言える。

また、この時の貯留Na温度は、Fig. 24に示す如くNa流入終了時刻に約400℃の最高温度に達しているが、その後は時間が経過するとともに下降し、試験終了時には燃焼限界温度以下である約240℃まで下がった。ところで、ここで模擬Na配管からの漏洩Naが貯留槽に流入するまでの温度履歴を振り返ってみると505℃⇒680℃（上部セルのライナ上）⇒700℃（連通管入口）⇒560℃（連通管出口）⇒400℃（貯留槽）と変化し、連通管入口の後流側では新たな燃焼のないこと及び周囲への熱損失のために温度は降下の一途をたどっていることがわかる。なお、燃焼抑制板によるNa燃焼抑制効果と深いかかわりのある貯留Naの冷却性能については、次の(3)で後述する。

(3) 貯留室の熱伝達特性

試験期間中における貯留室内部の温度変化を、Fig. 25に示す。各部の最高温度のうちで、最も高い温度を示したのは、(2)で述べた貯留Na温度とライナ温度であり、これらはほぼ同じ温度を示している。ただ、これらの温度は、貯留Na上面の貯留槽内雰囲気から燃焼抑制板、室内雰囲気、放射熱防止板へと上に行くにしたがって、燃焼抑制板からの放熱のため徐々に低い値を示している。

また、各部のコンクリートに着目するとその温度上昇幅は低く、このことから、天井・壁については放射熱防止板と保温材の、床についてはライナ下部に設けたパーライトボードのそれぞれによる断熱効果が有効に働いていたことがわかる。

次に、これらの試験データを基に、貯留槽内のNa燃焼発熱量を求めた。算出方法は事故室における燃焼発熱量と同じであり、雰囲気ガス、天井・壁・床の構造材、連通管及び燃焼抑制板のそれぞれのエンタルピー上昇分から、貯留室内に流入したNaのエンタルピー分と貯留Naプールのエンタルピー変化分を差し引く方法で、以下の式によった。

$$Q = Q_{\text{ceiling}} + Q_{\text{wall}} + Q_{\text{floor}} + Q_{\text{gas}} + Q_{\text{pipe}} + Q_{\text{board}} - Q_{\text{Na, in}} - Q_{\text{pool}} \quad (8)$$

ただし、

Q_{ceiling} : 貯留室の天井構造材の受けた熱量 (Kcal/h)

Q_{wall} : 貯留室の壁構造材の受けた熱量 (Kcal/h)

Q_{floor} : 貯留室の床構造材の受けた熱量 (Kcal/h)

Q_{gas} : 貯留室の雰囲気ガスの受けた熱量 (Kcal/h)

Q_{pipe} : 貯留室の連通管の受けた熱量 (Kcal/h)

Q_{board} : 貯留室の燃焼抑制板の受けた熱量 (Kcal/h)

$Q_{\text{Na, in}}$: 貯留室内に流入したNaの熱量 (Kcal/h)

Q_{pool} : 貯留室の貯留Naの熱量変化 (Kcal/h)

試験データを基に(8)式の計算を行い、燃焼発熱量 Q' を求めると、Fig. 26に示す結果を得た。(2)の燃焼抑制板の有効性の所で述べた様に、貯留槽内にドレンNaが流入し始めた時は、槽内と貯留室内の酸素と流入Naとの反応による燃焼のために、最大約50Kw/m²の燃焼発熱量を示しているが、これもプール燃焼の平均燃焼発熱量100Kw/m²の約1/2にすぎない。また、ドレンNaが貯留槽内に流入し終わった後は、燃焼抑制板による燃焼抑制効果のため、燃焼発熱量はほとんどゼロに維持されている。

一方、燃焼抑制板による燃焼抑制効果と深いかかわりのある貯留Naの冷却性能は、貯留Naから床コンクリートへの放熱量を貯留Naの燃焼発熱量と比較することによって評価することができる。そこで、以下の式を用いて、貯留Naから床コンクリートへの熱流束 Q_{flux} を求めて、前述の燃焼発熱量 Q' と比較した。

$$Q_{\text{flux}} = Q' + Q_{\text{Na, in}} + Q_{\text{pool}} - Q_{\text{conv1}} - Q_{\text{rad1}} - Q_{\text{conv2}} - Q_{\text{rad2}} \quad (9)$$

ただし、

Q' : (8)式より求めた貯留Naの燃焼発熱量 (Kcal/h)

$Q_{\text{Na, in}}$: 貯留槽に流入したNaの熱量 (Kcal/h)

Q_{pool} : 貯留槽内Naプールの熱量変化 (Kcal/h)

Q_{conv1} : 貯留Naプール表面から貯留槽内雰囲気への自然対流による
放熱量 (Kcal/h)

Q_{rad1} : 貯留Naプール表面から燃焼抑制板への熱放射による
放熱量 (Kcal/h)

Q_{conv2} : 燃焼抑制板から貯留室内雰囲気への自然対流による
放熱量 (Kcal/h)

Q_{rad2} : 燃焼抑制板から天井・壁の放射熱防止板への熱放射による
放熱量 (Kcal/h)

自然対流による放熱量の計算における自然対流熱伝達率は、上向きの加熱水平平板自然対流熱伝達に関する次式を用いた。

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

ただし、

Nu : ヌセルト数

Gr : グラスホフ数

Pr : プラントル数

試験データ並びに (8) 式から求めた燃焼発熱量 Q' を基に (9) 式の計算を行い熱流束 Q_{flux} を求め Fig. 27 に示す結果を得た。この図から、床コンクリート側への熱流束は、ドレン Na が貯留槽内に流入した初期に約 10 Kw/m^2 の最大値を示し、その後は時間の経過とともに下降して約 1 時間半後にはほぼ 3 Kw/m^2 と初めの約 $1/3$ に減少している。参考のために図に Run-B3 の結果も併せて載せた。Run-B3 では、床ライナ下部の断熱材はパーライトボードではなくパーライトコンクリートであり、また床ライナ構造も実機一次系建屋のセルライナに採用が予定されている fixed 型を用いているが、今回の試験の初期の結果と良く一致している。このことから、貯留 Na から床コンクリートへの熱流束は、床ライナの形式とパーライトの種類によらず、ほぼ同様の値を示すものと考ええる。また、Fig. 26 に示した貯留 Na の燃焼発熱量と Fig. 27 に示した貯留 Na から床コンクリート側への熱流束を比較してみると、試験開始後 2 時間以降は両者はほぼ同じ値を示していることから、貯留 Na の燃焼発熱量に相当する熱量は床コンクリート側への放熱によって費やされ、したがって、貯留槽全体でみると燃焼抑制板を経た放熱がこれに加わるために、貯留 Na は時間とともに確実に冷却されて一定時間後には凍結するものと結論づけられる。

(4) エアロゾル挙動及びナトリウムと水分との反応

Fig. 28 に、試験期間中の貯留室内雰囲気におけるエアロゾル、水蒸気及び水素の濃度変化と貯留槽内の水素濃度変化を示す。まず、貯留室内雰囲気に着目すると、エアロゾル濃度は、初期に約 5 g-Na/m^3 の最高濃度に達した。これは、ドレン Na が槽内に流入した際の膨張ガスが槽内から排出されるが、その時にガスとともにエアロゾルが舞い上がったためである。しかし、その後は燃焼抑制板によって貯留 Na の燃焼によるエアロゾル発生が抑制されたこと及び室内を換気したことによってエアロゾル濃度は約 1 g-Na/m^3 以下となった。

水蒸気濃度と水素濃度を含めた 3 つの濃度の関係は、事故室で見られた結果と同じ傾向を示し、エアロゾル濃度が高くなると水蒸気濃度が低下し、また水素の発生もないが、エアロゾル濃度が減衰すると、これらのいずれも上昇している。しかし、水蒸気濃度は

試験開始前の値から著しく上昇することはなく、また水素濃度もその最高値はせいぜい約0.5 %で爆発限界を超えることはなかった。これは、貯留室の場合は事故室と異なり、換気していたために発生した水蒸気と水素が室内に滞留しなかったことによる。

次に、貯留槽内に着目すると、事故室内と同様に水素濃度が著しく上昇し、試験開始後約10分で爆発限界である4 %と測定限界である5 %を超えた。しかし、その後約1時間で減少しはじめ、試験開始後約2時間ではほぼゼロになった。この期間中の貯留槽内酸素濃度は、Fig. 23に示した酸素濃度変化の結果から爆発下限の4.9 %以下に維持されており、したがって爆発する危険はなかった。

槽内の水素濃度が上昇した原因としては、コンクリートが加熱されることによって発生した放出水蒸気が貯留槽内に侵入してNaと反応し、水素を発生させたことが考えられる。また、その侵入経路は、貯留槽壁部分の燃焼抑制板と床ライナ立ち上がり部の接合部が単に重ね合わせてあるだけであるため、その間隙であると予想される。

4. 4 試験後の試験セル各部の目視観察及びナトリウム洗浄

(1) 各部の目視観察及び目視検査

Run-D2試験は、貯留室内のNaをドレンすることによって終了したが、その後もSOLFA-1各部の温度がほぼ室温近くなるまで温度計測を継続し、監視を行った。その後、外部から炭酸ガスを事故室及び貯留室内に注入し、これによって残留Naおよび残留Naエアロゾルの化学的な安定化を計り、その安定化を確認した後に事故室及び貯留室の扉を開けて内部の状態の目視観察と写真撮影を行った。

まず、この時に撮影した事故室の内部の状況をPhoto. 4に示す。目視観察によると、模擬配管は外装板および保温材が大きく変形し、裸のコンクリート面である側壁および天井にはエアロゾルが薄く付着しているのが認められた。また、床ライナ上の残留物はその殆どがNa酸化物および苛性ソーダを主成分とするNa化合物であった。後に述べるNa処理の際に測定したこれらの床ライナ上の残留物の量が全Na供給量の約7 %と少ないことから漏洩Naの殆どがライナ勾配によって連通管にドレンされていたことが分かる。

次に、事故室の床ライナの一端に取りつけた連通管入口の写真をPhoto. 5に示す。連通管は、その入口から約1234mmの箇所まで12B(318.5mm)から8B(216.3mm)へとその口径を減じているために写真にもその部分の段が見えるが、この段付近を含めて入口付近にはわずかな残留物を認める程度で、試験中のドレンNaに対する流路障害となるような固形物は既報のRun-B3試験結果と同様に認められなかった。

最後に貯留室の貯留槽については、試験の後半にその内部のNa温度が約200℃に低下した時点、すなわち試験開始から6時間36分経過した時点でサファイア施設のNa不

純物沈澱タンクに向けてNaドレンを行っている。その際に貯留槽内の2729.7kgのNaの内の約80%がNa不純物沈澱タンクにドレンされたが、残りの約20%が貯留槽内に残った。この貯留槽内に残ったNa及びNa化合物の状態を貯留槽の抑制板の一部を取り除いて撮影した写真をPhoto. 6に示す。後のNa処理で明らかになったことであるが、写真に見える残留物については、連通管の近傍は酸化物を主成分とし、連通管から離れるに従いこれが金属Naを主成分のするものへと変化している。このような残留物の化学成分の場所による違いは、Na漏洩試験の初期は比較的純度の高いNaが事故室から連通管を経て貯留槽内に流れ込み、その後半は事故室の床ライナ上に生成された燃焼生成物が流入したことを示唆しており、試験の推移から考えてもこのような成分分布は合理的に説明することが出来る。Table 5に試験終了後の残留Na量の分布を示す。

(2) コンクリートとその表面に付着したエアロゾルとの反応

今回の試験では、「もんじゅ」補助建屋を模擬して、事故室の床部分以外の側壁および天井はコンクリートを剥き出しである。このため、試験によってこれら裸のコンクリート表面に付着したエアロゾルがコンクリートと化学的な反応を起こすか否かが大きな関心事の1つであった。そこで、エアロゾルが付着したコンクリート表面を目視で検査することによって、この反応の有無を調べた。

検査では、Photo. 7に示すようにコンクリート表面に薄く付着しているエアロゾルを水洗浄によって取り除き、その後のコンクリート表面を調べたが、反応によって生じると推定される表面の荒れ等は認めなかった。ただし、漏洩Naのリバウンドが直接付着した北壁の下部はNaによるコンクリートの浸食が一部みられた。このことより、今回の試験のごとき温度200℃以下の状態では付着エアロゾルのコンクリートとの反応は進行しないものと結論できた。尚、各部の付着量をFig. 29に示す。

(3) ナトリウム洗浄とその際に測定した残留物の試験セル内の分布

Naの洗浄とその処理に当たっては、まず事故室及び貯留室の残留Naと燃焼生成物をスコップ等でかき集め、Na輸送用のドラム罐にそれらを回収した。次に事故室については床ライナが、また貯留室については貯留槽の床ライナがそれぞれ見える程度にまで残留物が除去された段階で、残りの残留物の水洗浄を行った。これらの作業は、試験セル各部の残留物および付着エアロゾルの重量分布の測定を行いながら進めた。特にエアロゾル付着量の測定に当たっては、天井、床、壁について一辺が30cmの正方形の面積のそれぞれの代表箇所について付着エアロゾルを回収し、それらを水に溶解し、そのサンプル中のNa量を原子吸光法を用いて測定して単位表面当たりのエアロゾル付着量を求めた。

Fig. 30 に上記のようにして得た残留 Na と付着エアロゾルの試験装置内の分布を示す。図は漏洩させた全 Na 量を100%とした時の分布であるが、貯留槽にはその約92%と漏洩 Na の殆どがこれに回収され、また事故室の床ライナ上には約7%程度の非常に少ない量しか残留していない事が分かる。全漏洩 Na に対してエアロゾルとなった量は、事故室内、貯留室内及び排煙処理装置のスクラバに回収された量を総合しても0.3%にすぎず、今回の試験に用いた一連の Na 燃焼に関する防護設備、換言すれば「もんじゅ」の防護設備が有効に機能した事を示している。

付着エアロゾルのみにについての分布については、測定結果をFig. 29, 31 に示す。ここで、事故室内が全体の約55%と多いのは、試験中の床ライナ上でのプール燃焼が原因であり、また貯留室内が約15%と比較的に少ないのは燃焼抑制板が有効に機能したためである。

(4) 模擬ナトリウム配管保温構造の検査

Na 洗浄の前に模擬 Na 配管試験体を事故室内から取り外し、その外観検査および解体検査を実施した。

Photo. 8 に外観検査の際に撮影した写真を示す。外装板および保温材は、Na 燃焼による高温のために大きく変形している。ただし、これらの変形は試験中に Na の漏洩が終了し、それに伴って外装板表面が残留 Na の燃焼によって高温となったため、Na 漏洩中はこのような変形が生じていない事が漏洩流量からすでに明らかになっている。これは、Na 漏洩中は漏洩 Na の冷却効果の作用のために外装板および保温材ともに温度は漏洩 Na のそれ以上とはならないためである。

次に模擬 Na 配管試験体の解体途中の写真をPhoto. 9、10 に示す。内装板及び内装板の継手部分のいずれにも損傷等を認められず、クランプ部の連結管についても異常は認められなかった。

(5) 床ライナ、連通管及び貯留槽の検査

周知の通り、床ライナおよび貯留槽の下部ライナには、事故の拡大を防止するための重要な機能、すなわち、Na 漏洩事故時に受ける急激な熱衝撃に対しても亀裂を生じることなく、建屋のコンクリートから漏洩 Na を完全に隔離する機能を維持することが要求されている。すでに、これまでの試験で、Na 漏洩時の急激な熱衝撃はライナの塑性変形を起こすのみで、溶接部等には亀裂を生じることの無いことが立証されている。しかし、大規模な試験でこの事を確認した例は無い。そこで、試験セル各部の水洗浄が完了し、また洗浄水の乾燥を行った後に、床ライナ、連通管及び貯留槽下部ライナに対する非破壊検査である液体浸透探傷試験を実施した。

検査は、床ライナ及び貯留槽の下部ライナについては、それらの全溶接線を対象に、また連通管については、30cm間隔で輪切りにした後にそれらの内面を対象に行った。事故室の床ライナ及び貯留槽の下部ライナに対する非破壊検査時の状況を、それぞれ Photo. 11, 12 に示す。

結果は、いずれの箇所についても割れおよび亀裂は皆無であった。

4. 5 試験後の上部セルのコンクリートに対する破壊検査

今回の試験では、すでに述べたように事故室の壁及び天井のコンクリートが裸で、試験中は直接コンクリート表面が燃焼 Na による高温雰囲気曝され、コンクリート内部温度（内面より12mmの位置）は Fig. 32 に示すとおり約50分で最高温度 114℃～133℃に達した。このため、一連の試験後の検査等が完了した後に事故室を解体し、コンクリート・パネルからコア供試体を切取り、圧縮強度試験及び静弾性係数試験の破壊検査を実施した。コア供試体切取り時の写真を Photo. 13 に示す。

切取りコア供試体の単位容積重量、圧縮強度試験結果、静弾性係数試験結果及びコンクリート・パネル製作時の単位容積重量、圧縮強度試験結果を Table 6 に、パネル組立状態におけるコア切取り位置と圧縮強度の関係を Fig. 33 に、コア切取り時単位容積重量と圧縮強度の関係を Fig. 34 に、圧縮強度と静弾性係数の関係を Fig. 35 に示す。また、Table 6 に示したコンクリート・パネル製作時の単位容積重量から換算した放出水量と圧縮強度の関係を Fig. 36 に示す。

これらの試験結果より以下のことが明らかになった。

- (1) コンクリート・パネル製作時の単位容積重量は2301～2311 kg/m³、材令28日圧縮強度は 318～335 kgf/cm² と各パネル共製作時のコンクリート品質には大きな相違はなかったが、試験後は単位容積は2220～2340 kg/m³、圧縮強度は 250～421 kgf/cm² とパネルにより試験値が変動した。
- (2) 試験後の単位容積重量と圧縮強度の関係は高度に相関し、Fig. 33 に示すように単位容積重量が小さい程圧縮強度が低い傾向にあった。この原因は Na 燃焼時における加熱と脱水の影響と考えられる。
- (3) また、圧縮強度と静弾性係数の関係も Fig. 35 に示すように高い相関性を示し、この傾向は日本建築学会基準式とほぼ相似の線形傾向であった。一般に高温下に曝されたコンクリートの静弾性係数は圧縮強度の低下割合より大きくなる傾向にある。しかし、今回の結果では前述のように日本建築学会基準式とほぼ同様な傾向であり、厳しい高温下に曝された場合に生じる静弾性係数の著しい低下傾向は認められず、Na 燃焼時に受けた熱はコンクリート・パネルの機能を損なう程は高くはなかったと云える。

また、貯留室コンクリート・パネルについては破壊検査を実施していないが、事故室のようにコンクリートが裸ではなく、Fig. 37に示すようにコンクリート内部温度も上昇していないことから、コンクリート・パネルは健全であると推定する。

結 論

「もんじゅ」の原子炉補助建屋を模擬したコンクリート製二階建試験セルSOLFA-1を用い、二次系Na漏洩事故の事象推移に関する総合模擬試験を行った。試験では、事故室を模擬した二階に模擬Na配管を設置し、そこから漏洩したNaを床ライナ上に落下させ、連通管を経て貯留室を模擬した一階の貯留槽内にドレンして、燃焼抑制板によりNa燃焼が抑制されるまでの事象推移を調べた。

使用したNaは、温度505℃、総重量約3tonで、これを模擬Na配管から実機と同じ圧力（約3.8Kg/cm²G）で漏洩させた。その結果、次の結論を得た。

〔全体の事象推移〕

模擬Na配管から漏洩したNaは、現在「もんじゅ」設計で想定されている事象推移と同様に床ライナから連通管を経て貯留槽に円滑にドレンされ、燃焼抑制板によって貯留Naの燃焼が抑制されて事故が終息した。これら一連の事象推移について、小規模で実施したRun-B3から規模が大きくなったことによる結果の著しい相違も認められなかった。

〔配管からのNa漏洩形態〕

Naと保温材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、並びにNa漏洩圧力による保温構造体の崩壊は認められなかった。また、配管からのNa漏洩形態は下向きの滝状（コラム状）漏洩であり、上向きのスプレー状漏洩は生じなかった。

〔漏洩Naの流動性〕

模擬Na配管から漏洩したNaは、床ライナ上及び連通管内を円滑に流れて貯留槽にドレンされ、燃焼生成物やNaの凍結による流路の閉塞は起こらなかった。

〔燃焼抑制板による燃焼抑制効果〕

貯留槽内への空気流入は、実機で設置される構造の燃焼抑制板によっても十分に阻止することができ、貯留Naの燃焼は抑制された。また、貯留Naは周囲への熱放散によって自然にその温度を低下させ、燃焼限界温度以下に至った。

〔コンクリート建物とNa漏洩対策設備の健全性〕

試験後の解体検査の結果から、Na燃焼の熱的影響によるコンクリート建物とNa漏洩対策設備の破損や著しい変形等は生じていないことが確認された。また、雰囲気中に露出したコンクリート表面の浸食や破損も認められなかった。

謝

舌辛

本試験の立案に当たっては、建設運転本部、機械課の関係者に助言をいただき、実施に当たっては大洗工学センタープラント安全工学室、福地平，川田耕嗣，森井正，加藤木洋一の各位の技術面での協力をいただいた。また、安全工学部、北原種道部長には高所からの御指導をいただいた。

これら、各位に謝意を表します。

文 南大

- (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)ーライナ上の低温
ナトリウム流動燃焼試験(RUN-B4)ー」, PNC 報告書, SN941 85-104, 1985年 7月
- (3) 姫野, 宮原, 川田, 川部, 佐々木, 山田, 宮口., 「ナトリウム火災防護設備基礎試験
(Ⅲ)ー二次系ナトリウムの事故推移に関する縮尺モデル試験, Run-B3ー」, PNC 報告書,
SN941 85-130, 1985年 9月
- (4) 姫野, 宇佐美, 木下, 山田., 「ナトリウム火災防護設備基礎試験(Ⅳ)ー水による二次
系主配管ナトリウム漏洩模擬試験ー」, PNC 報告書, SN941 86-088, 1986年 8月
- (5) 宮原, 佐々木, 山田, 姫野., 「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験(Ⅰ)ー空気雰囲気にお
けるNaプール燃焼試験, Run-D1ー」, PNC 報告書, 執筆中
- (6) 姫野, 川田, 加藤木, 木下, 山田., 「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験(Ⅱ)ー水蒸気注
入空気雰囲気におけるNaスプレー燃焼試験, Run-F1ー」, PNC 報告書, 執筆中
- (7) 森井, 福地, 山田, 姫野., 「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験(Ⅲ)ー空気雰囲気におけ
る大規模Naスプレー燃焼試験, Run-E1」, PNC 報告書, 執筆中
- (8) 森井, 福地, 山田, 姫野., 「大規模ナトリウム漏洩燃焼試験(Ⅳ)ーNa漏洩形態確認
試験, Run-E2」, PNC 報告書, 執筆中

**Table 1 Compositions of Structural Concrete
used in SOLFA-1 and in MONJU**

		SOLFA-1	MONJU
Materials	Cement	Flyash B	Flyash B
	Aggregate	Graywacke	Graywacke
	Retarder	——	Pz. No. 8
	AE Water Reducing Agent	Pz. No. 5L	303A
Maximum Size of Coarse Aggregate (mm)		25	25
Design Strength (kgf/cm ²)		240	240
Bulk Density (kg/m ³)		2150	2150
Water Cement Ratio (%)		49.6	55
Sand Percentage (%)		40.3	43
Slump (cm)		8±2.5	12±1.5
Air Content (%)		3±1	4±1

PSS-SFE-343

Table 2 Test Conditions of Run-D2

Sodium Fedded	: 2974.1 kg
Sodium Temperature	: 505 °C, Hot-Leg Temperature of Monju IHTS
Sodium Pressure	: 3.8 kg/cm² G, Hot-Leg Sodium Pressure of Monju IHTS
Simulated Sodium Pipe	: 1/2.6 (linear scale) of Monju ITHS Pipe
Cross Area of Leak Hole	: 1/(2.6)² of a 1/4 Dt Leak Hole Posturated for Monju IHTS Pipe
Initial Temperature of Simulated Sodium Pipe	: 505 °C
Oxygen Injection Rate into Upper Cell	: 2.2 m³/min (during Sodium Spill) 0.2 m³/min (after the end of Sodium Spill)
Air Flow Rate into Lower Cell	: 1.4 m³/min
Temperature of Feed Air	: 16.0 °C
Relative Humidity of Feed Air	: 52.0 %

PSS-SFE-344

Table 3 Test Record of Run-D2

Time	Record	Time after Initiation of Sodium Feed
10:13	Start-up of Aerosol Scrubber	
14:05	Pressurization of Cover Gas in Sodium Heater	
14:43	Start-up of Data Aquisition System	
14:44	Start of Sodium Feed	0
14:45	Start of Ventilation in Lower Cell (1.3m ³ / min)	1min 30sec
14:49	Start of Oxygen Injection into Upper Cell (2.2m ³ / min)	5min 01sec
15:01	End of Sodium Feed	14min 35sec
15:03	Change of Oxygen Injection Rate (0.2m ³ / min)	17min 22sec
15:25	End of Oxygen Injection	39min 47sec
21:20	Drain of Sodium in Smothering Tank	6hr 36min
6:31	Turn-off of Data Aquisition System	15hr 48min

PSS-SFE-345

Table 4 Enthalpy Change in Upper Cell

	Enthalpy Change (kcal)	
	up to the end of Sodium spill	up to 1 hour
Sodium, $Q_{Na,out} - Q_{Na,in}$	1.82×10^4	1.82×10^4
Ceiling Concrete, Q_{ceil}	7.17×10^4	1.90×10^5
Wall Concretes, Q_{wall}	1.70×10^5	5.87×10^5
Floor liner and Floor Concrete, Q_{floor}	1.27×10^5	3.10×10^5
Gas, Q_{gas}	5.84×10^3	1.21×10^4
Total, $Q_{Na,out} - Q_{Na,in} + Q_{ceil} + Q_{wall} + Q_{floor} + Q_{gas}$	3.87×10^5	1.11×10^6

PSS-SFE-346

Table 5 Distribution of Residual Sodium in Test Rig after the Test

	Compartment	Place		Distribution					
				Weight (kg)		Ratio (%)			
Sodium	Upper cell	Floor liner		217.0	232.9	2961.0	7.3	7.9	99.7
		Simulated sodium pipe		10.5			0.4		
		Sodium drain pipe		5.4			0.2		
	Lower cell	Smothering tank	Reaction products	422.9	613.4		20.6		
			Sodium	190.5					
Dump tank	—		2114.7		71.2				
Aerosol	Upper cell	Ceilling		2479 g	5.5	10.1	0.2		
		Wall	East	740 g					
			South	757 g					
			West	687 g					
			North	872 g					
	Lower cell	Fire suppression board (upper surface)		1514 g	1.6		0.1		
		Ceilling		4 g					
		Wall	East	11 g					
			South	7 g					
			West	9 g					
			North	9 g					
		Scrubber (Water pool)		3.0			0.1		

PSS-SFE-347

Table 6 Specific Weight, Compressive Strength and Young's Modulus of Upper Cell Concrete after the Test

Panel No.	Sample No.	Speicific Weight (kg/m ³)			Compressive Strength (kgf/cm ²)			Young's Modulus (x10 ⁵ kgf/cm ²)	
		Post-test Data	Mean Value of Post-test Data	Pre-test Data	Post-test Data	Mean Value of Post-test Data	Pre-test Data	Post-test Data	Mean Value
3W2	1	2312	2291	2311	359	364	322	3.47	3.28
	2	2286			384			3.24	
	3	2276			349			3.13	
3W3	1	2275	2275	2302	356	348	328	3.08	3.14
	2	2268			329			3.13	
	3	2283			359			3.22	
3W4	1	2272	2283	2311	330	329	333	2.84	2.87
	2	2304			320			2.85	
	3	2273			337			2.91	
3W5	1	2241	2248	2309	284	279	335	3.14	2.81
	2	2261			275			2.67	
	3	2243			279			2.61	
3W6	1	2283	2290	2302	339	360	323	3.06	3.05
	2	2285			396			3.17	
	3	2296			345			2.91	
3W7	1	2310	2304	2311	339	320	322	3.24	3.17
	2	2319			322			3.30	
	3	2283			298			2.98	
3W8	1	2336	2325	2302	365	350	323	3.16	3.03
	2	2316			364			2.94	
	3	2323			320			2.98	
3S1	1	2227	2255	2302	279	299	328	2.77	2.76
	2	2273			297			2.64	
	3	2265			322			2.86	
3S2	1	2333	2340	2301	398	421	318	3.24	3.36
	2	2334			434			3.24	
	3	2353			432			3.61	
3S3A	1	2232	2222	2311	332	317	322	2.71	2.55
	2	2243			312			2.57	
	3	2191			307			2.37	
3S3B	1	2226	2278	2311	377	390	322	3.35	3.20
	2	2306			402			3.09	
	3	2265			390			3.18	
4C1	1	2209	2220	2302	250	250	328	2.57	2.57
	2	2265			252			2.64	
	3	2185			248			2.51	
4C2	1	2289	2312	2311	360	369	333	2.93	2.96
	2	2317			372			2.99	
	3	2330			374			2.96	
4C3	1	2239	2234	2309	343	309	335	2.91	2.79
	2	2219			281			2.72	
	3	2244			302			2.73	

PSS-SFE-348

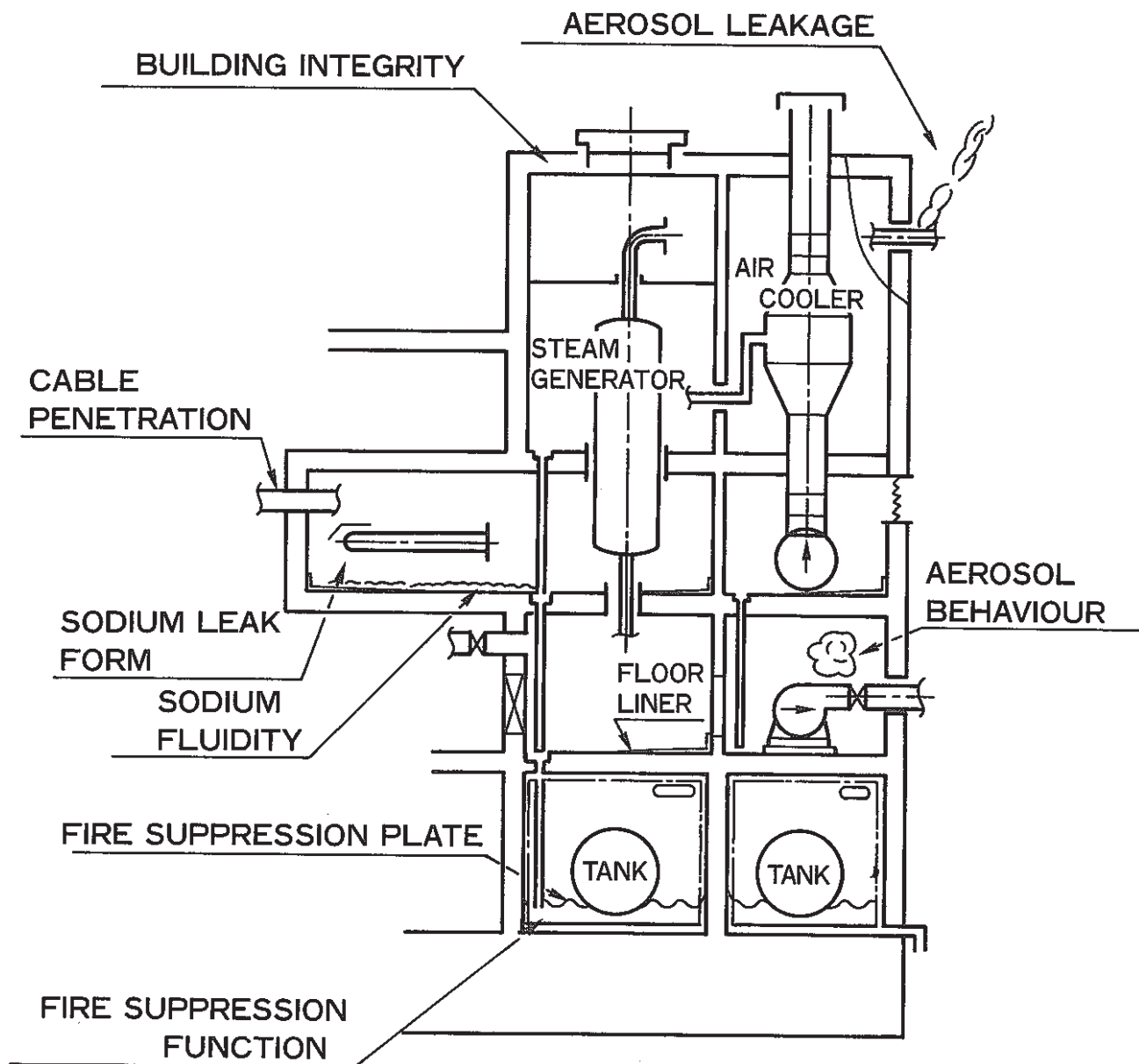


Fig.1 SUBJECT EXAMPLES IN "MONJU"
SECONDARY SYSTEM

PSS-SFE-349



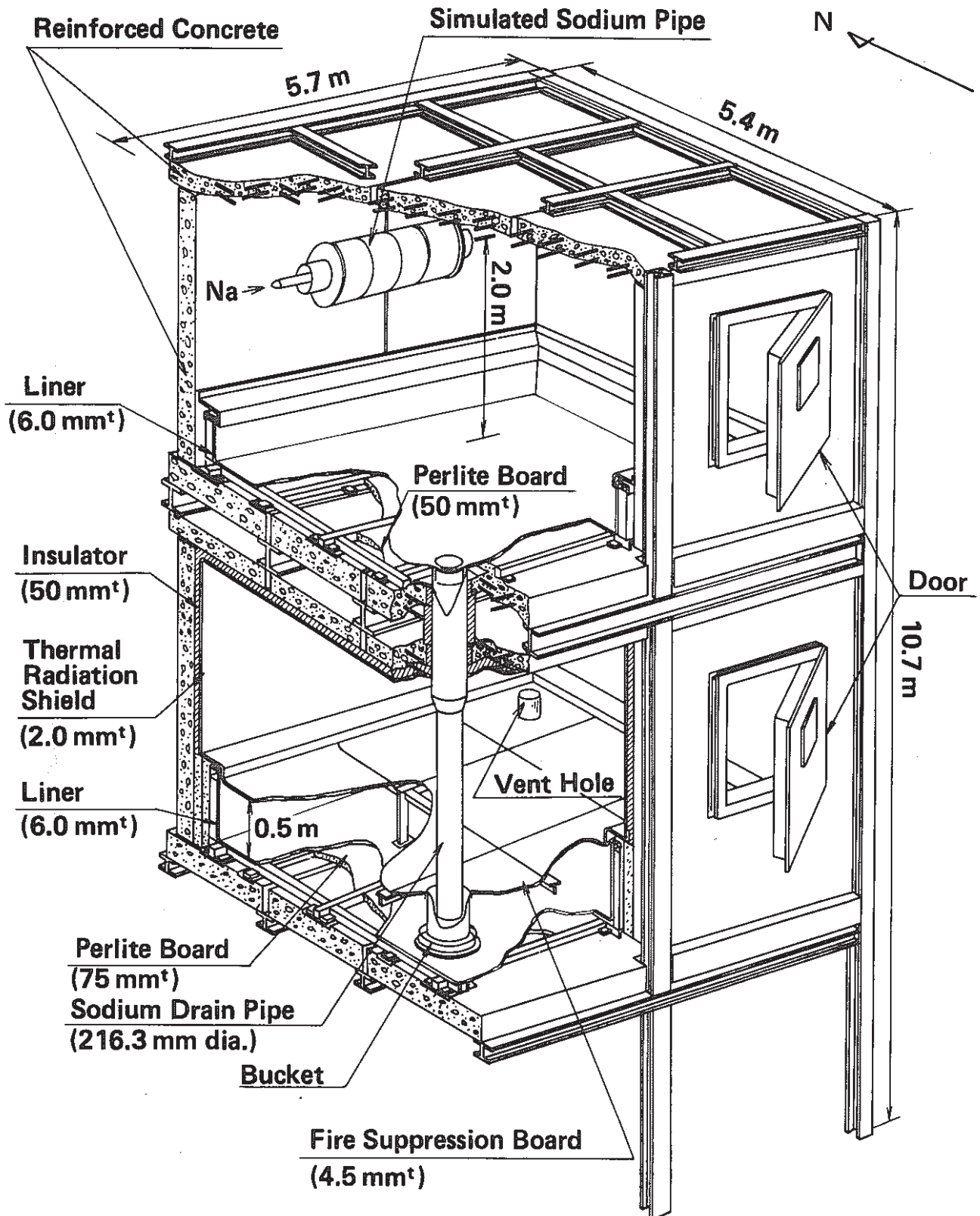


Fig.3 Bird's-eye View of SOLFA-1 for Run-D2

PSS-SFE-35 I

Note for keys

(T) Thermocouple

(P) Pressure gauge

(F) Flow meter

(C) Aerosol concentration meter

 TV Camera(O₂) Oxygen meter(H₂) Hydrogen meter(H₂O) Dew point meter

(D) Displacement meter

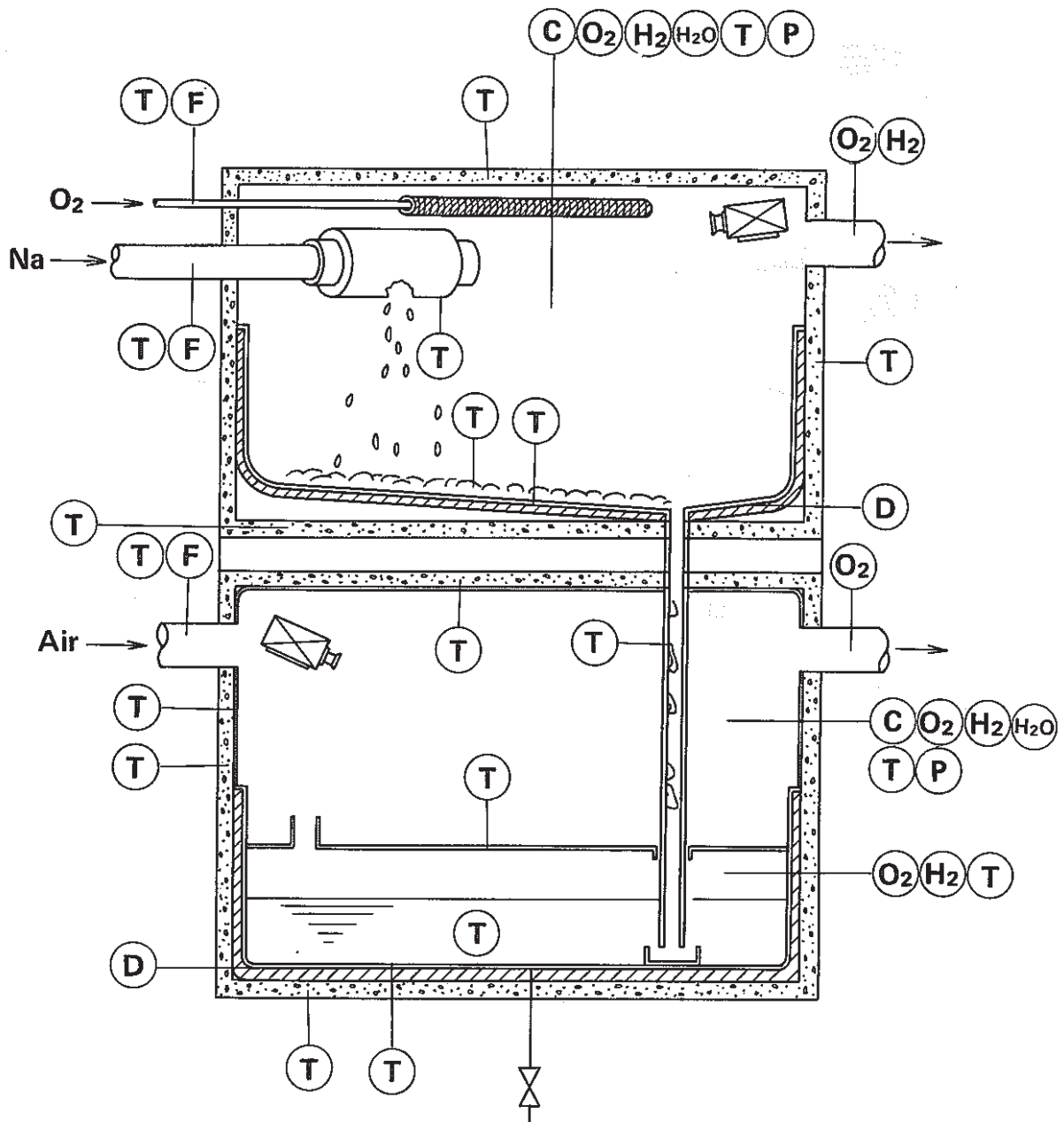


Fig.4 Instrumentations and Sensors Installed in Test Rig for Run-D2

PSS-SFE-352

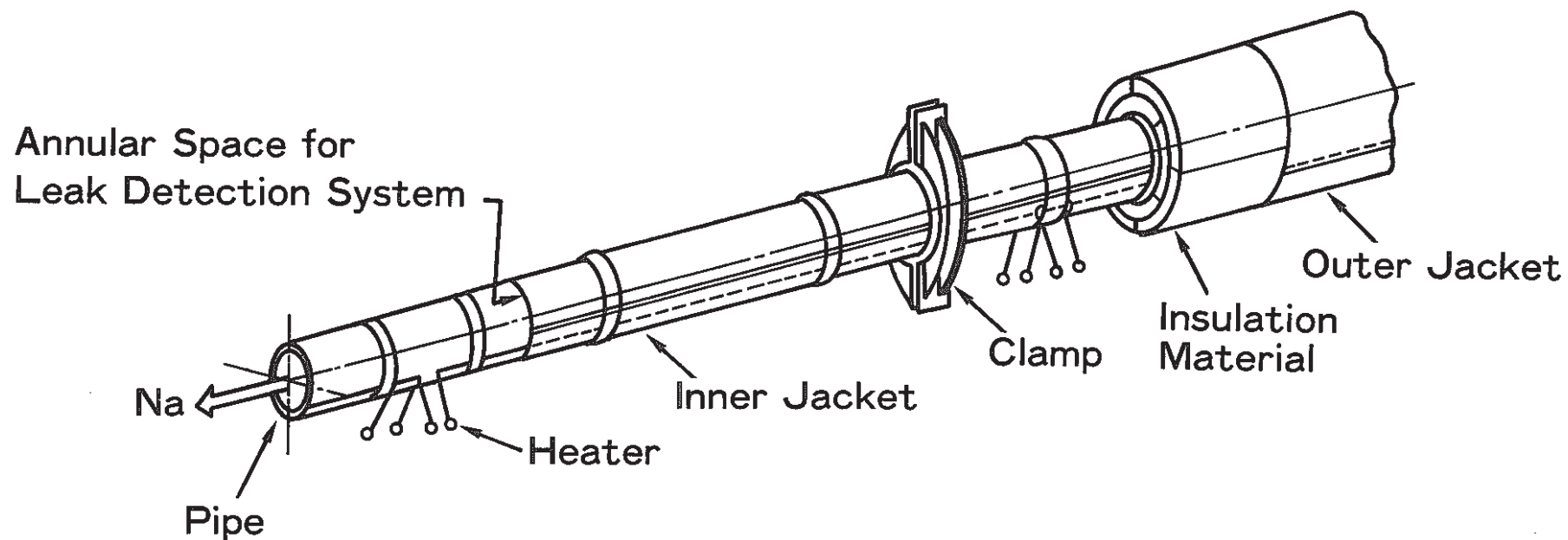


Fig.5 Concept of Monju Secondary Sodium Piping with Thermal Insulation Cover

PSS-SFE-353

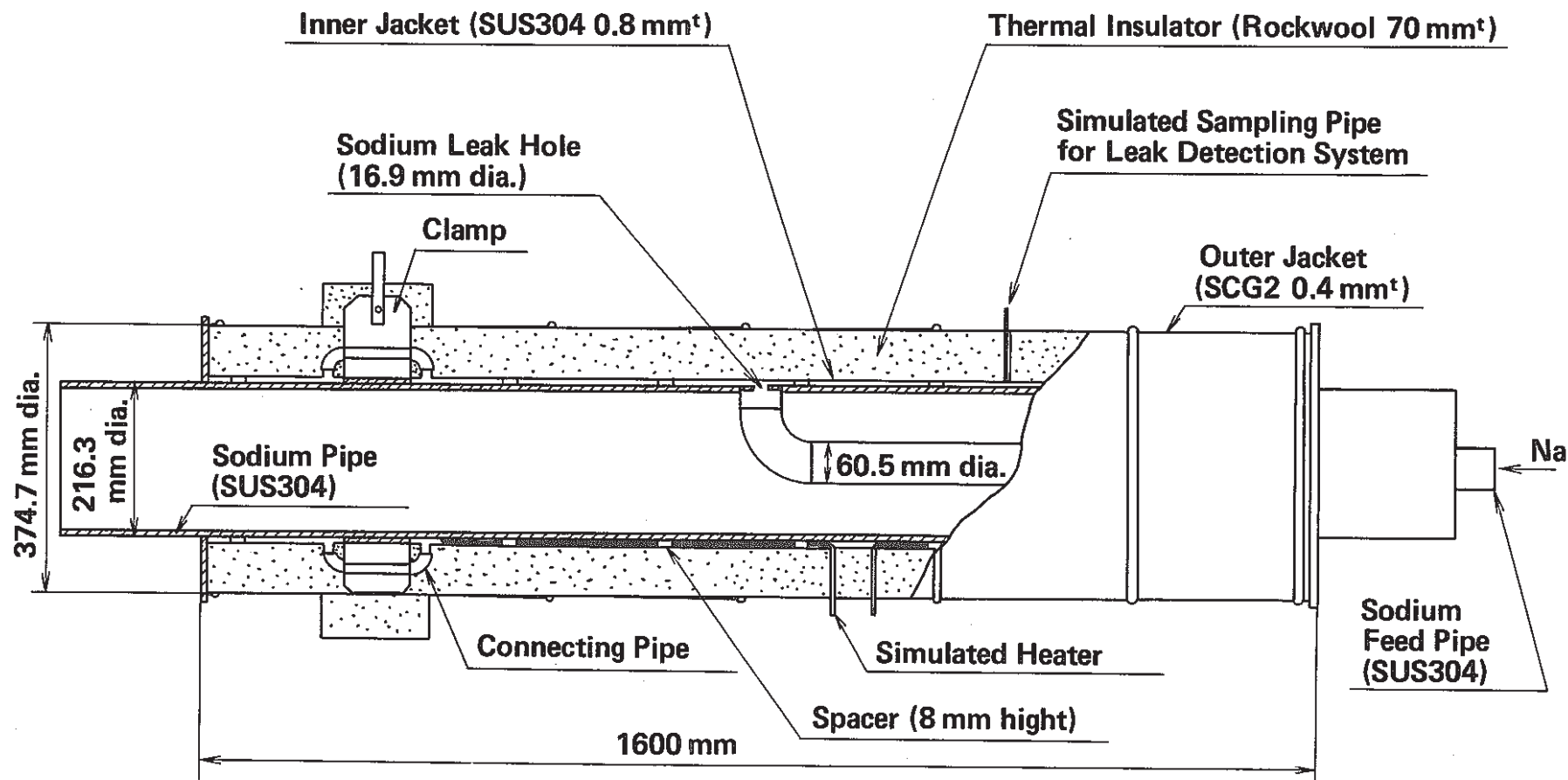
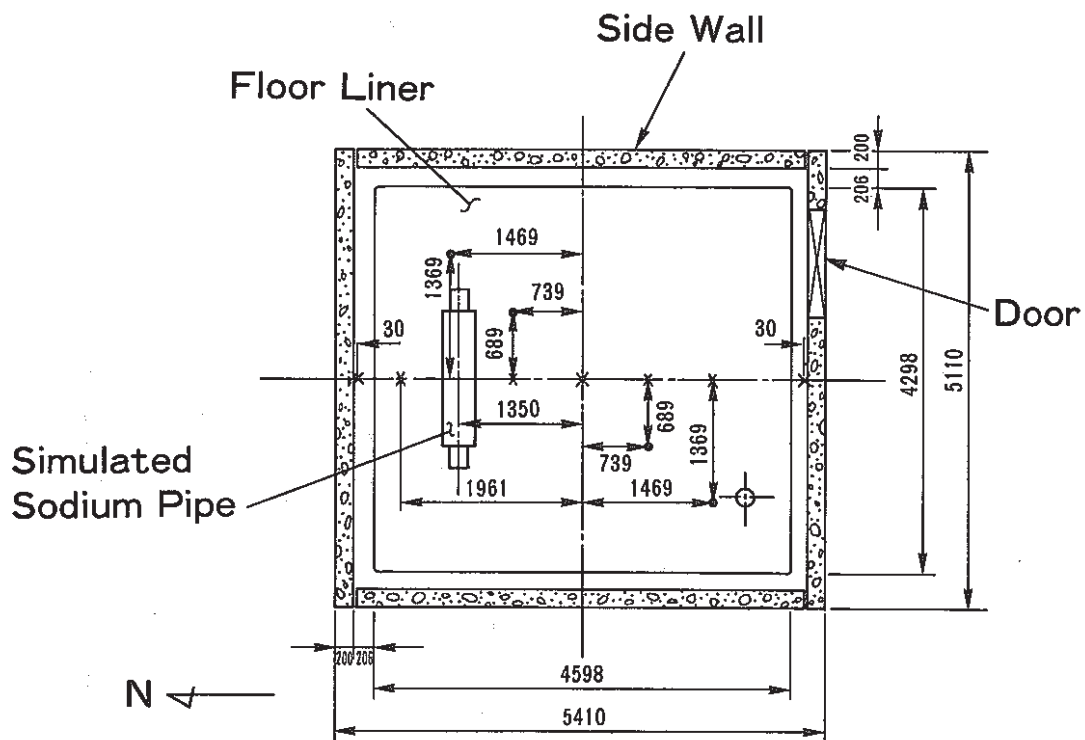


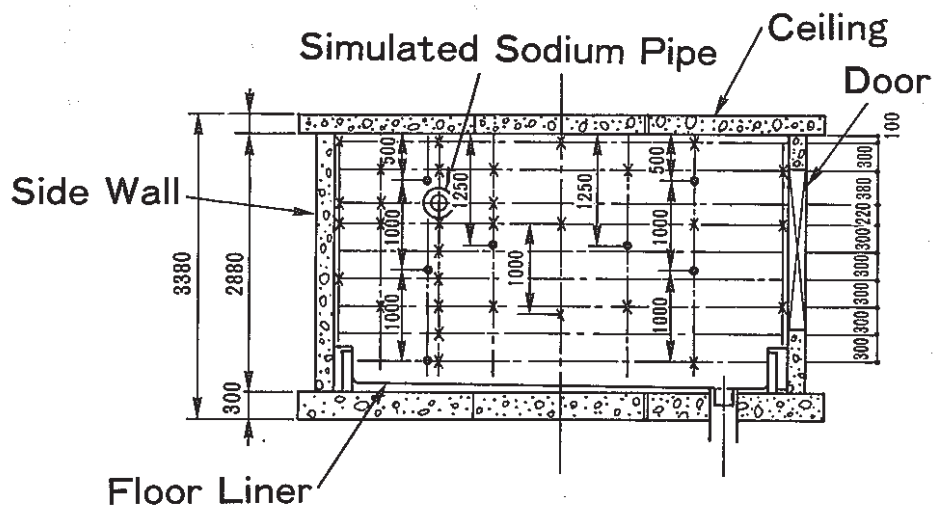
Fig.6 Cut View of Simulated Sodium Pipe for Run-D2

PSS-SFE-354

unit : mm



(a) Top View



(b) Side View from West

Fig.7 Geometric Configuration of the Upper Cell of SOLFA-1

PSS-SFE-355

unit : mm

× indicates location of thermocouples on upper surface of floor liner

● indicates location of thermocouples on lower surface of floor liner

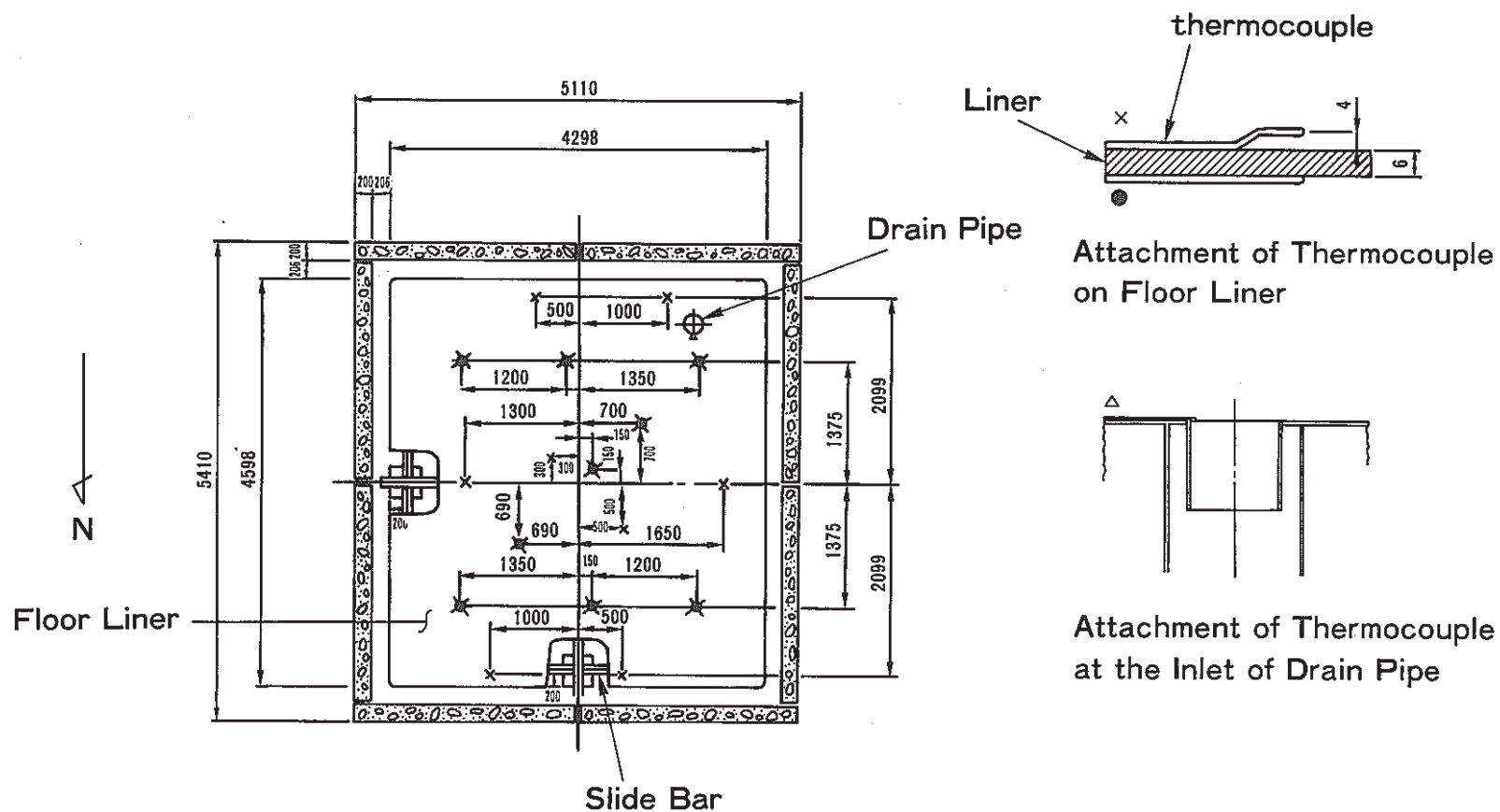


Fig.8 Location of Thermocouples on Floor Liner of the Upper Cell of SOLFA-1

PSS-SFE-356

unit : mm

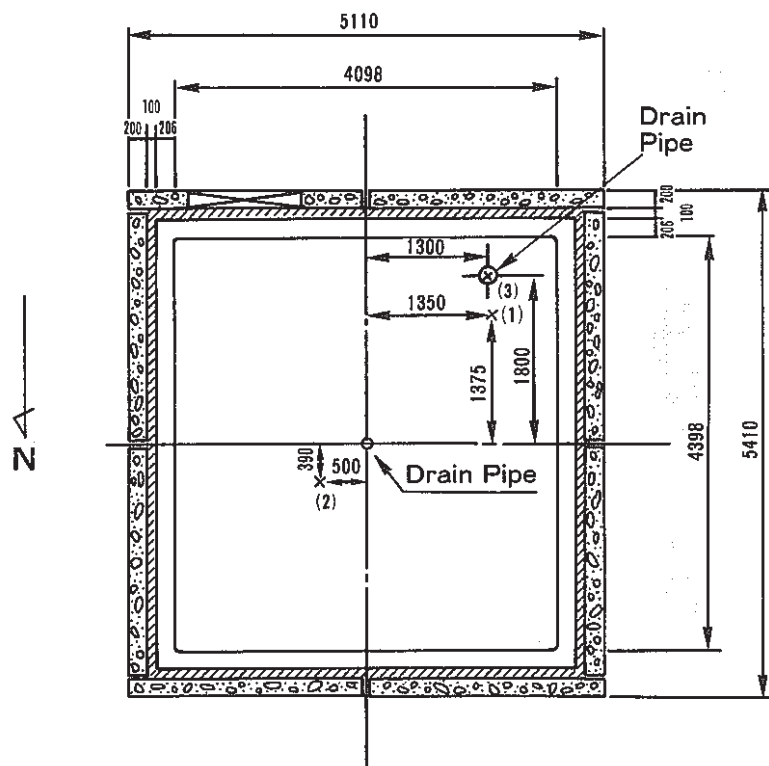
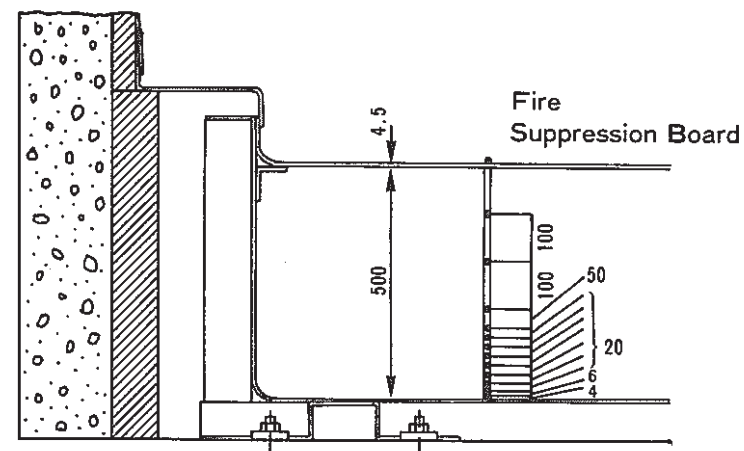
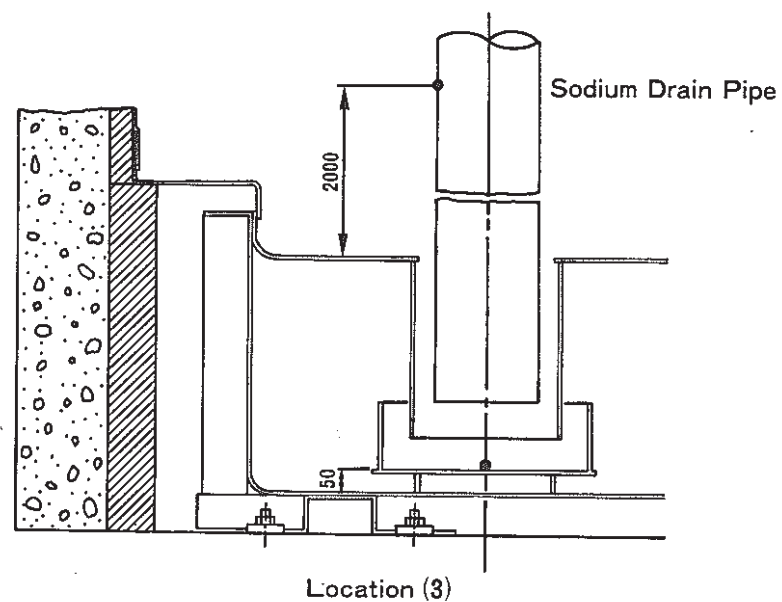


Fig.9 Location of Thermocouples in the Lower Cell of SOLFA-1



Location (1) and (2)



Location (3)

PSS-SFE-357

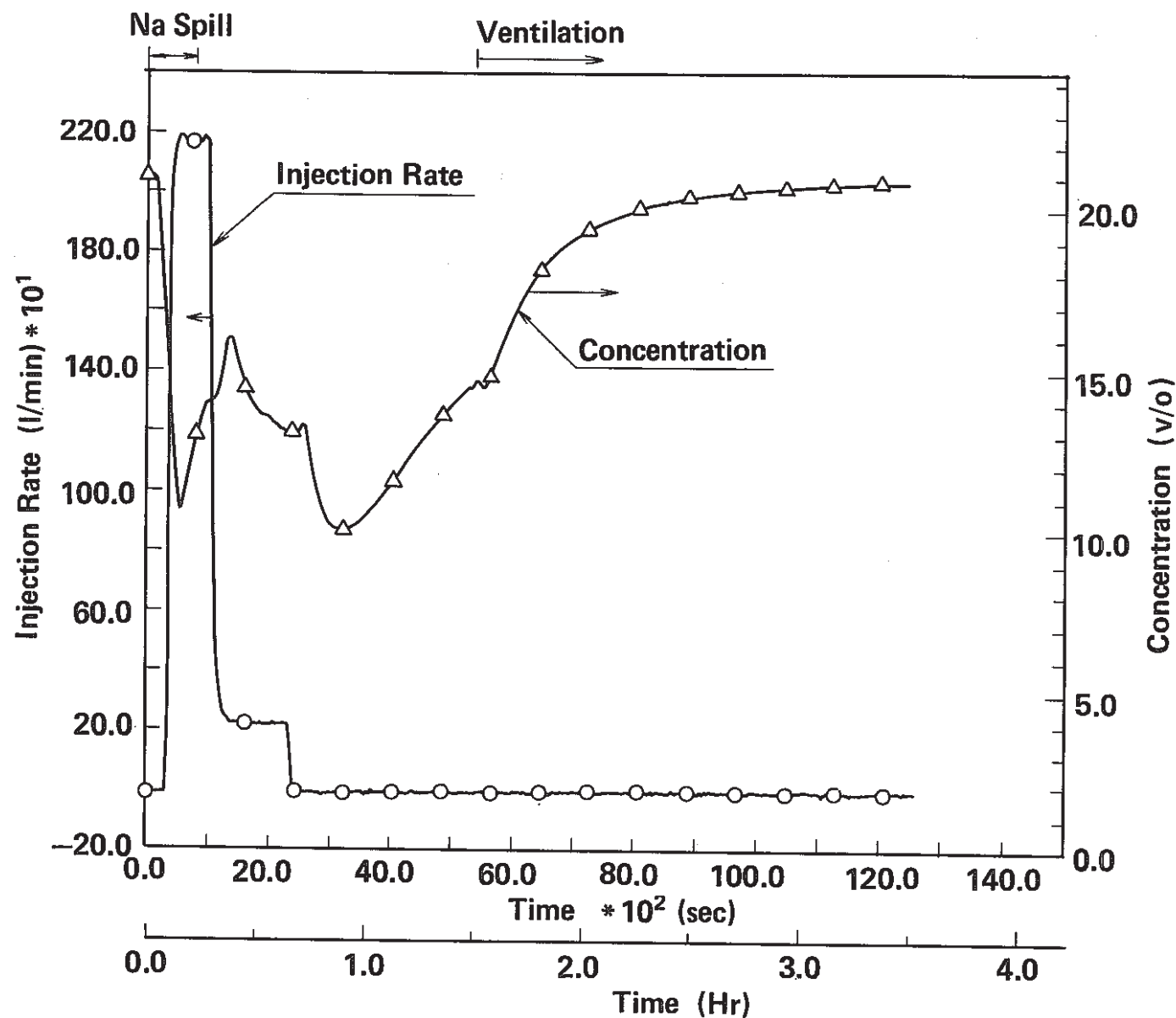


Fig.10 Changes of Oxygen Injection Rate and of Oxygen Concentration during the Test (Upper Cell)

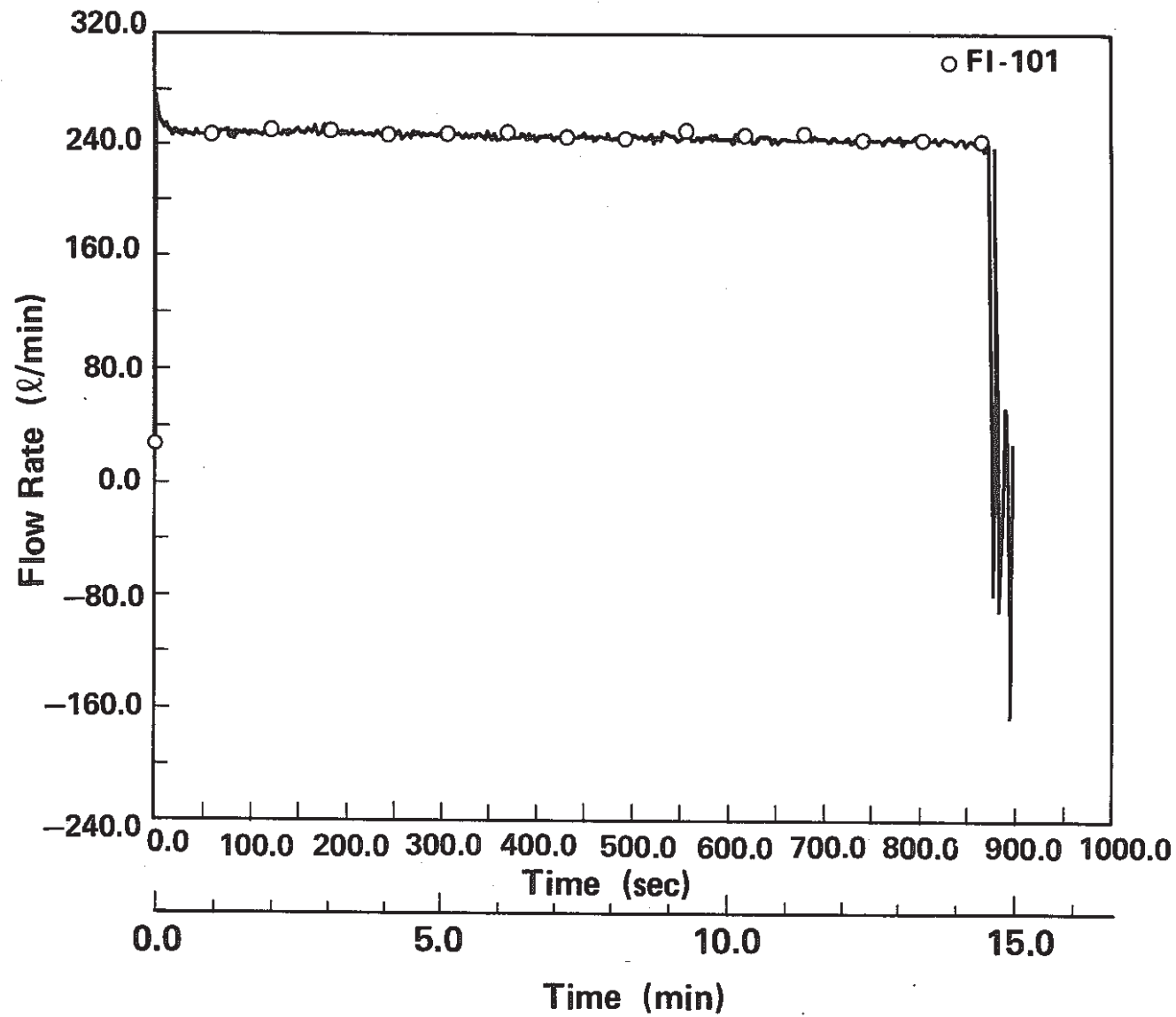


Fig.11 Flow Rate of Feed Sodium into Simulated Sodium Pipe

PSS-SFE-359

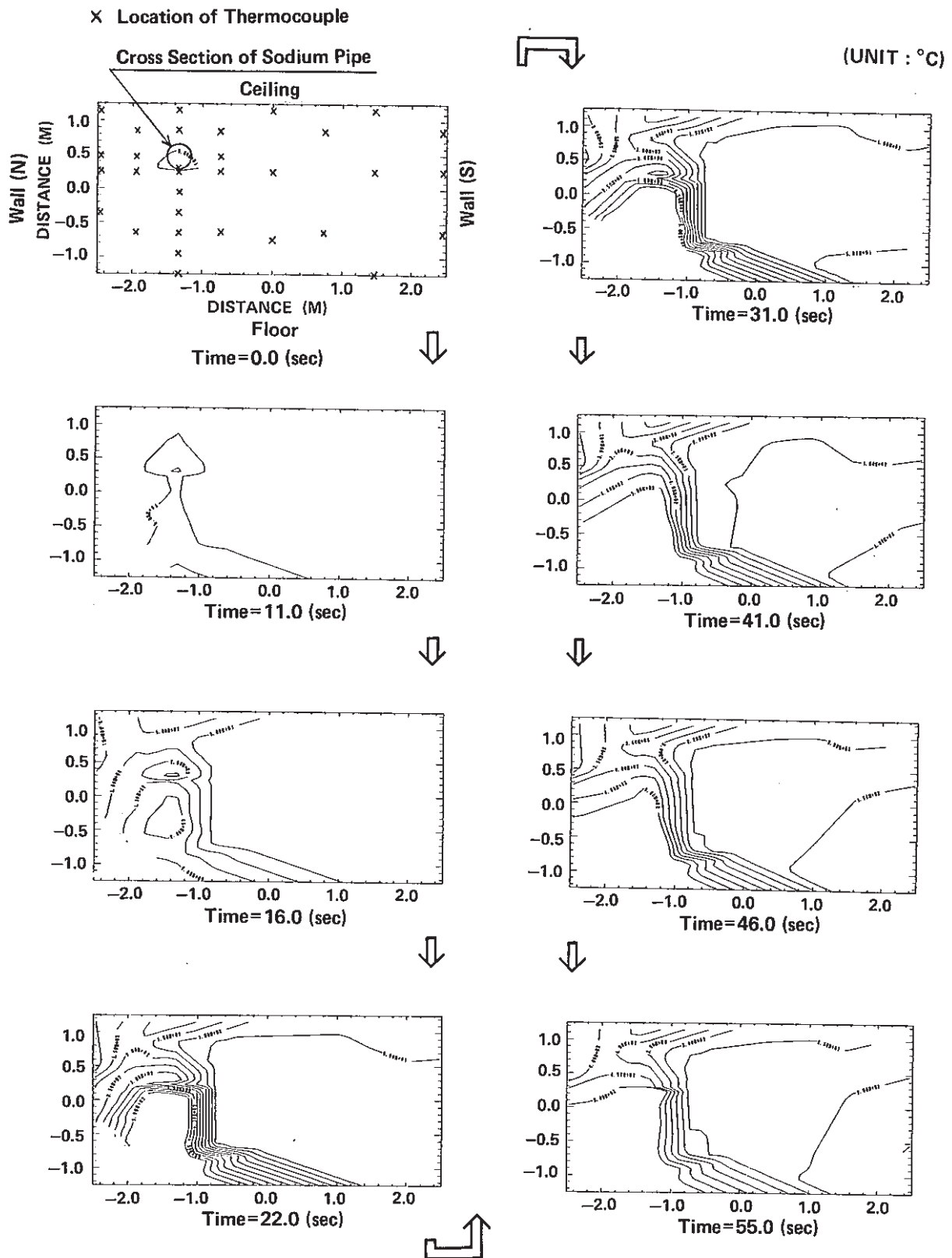


Fig.12 Temperature Distribution Changes in Vertical Cross Section of Upper Cell Atmosphere during Sodium Spill

PSS-SFE-360

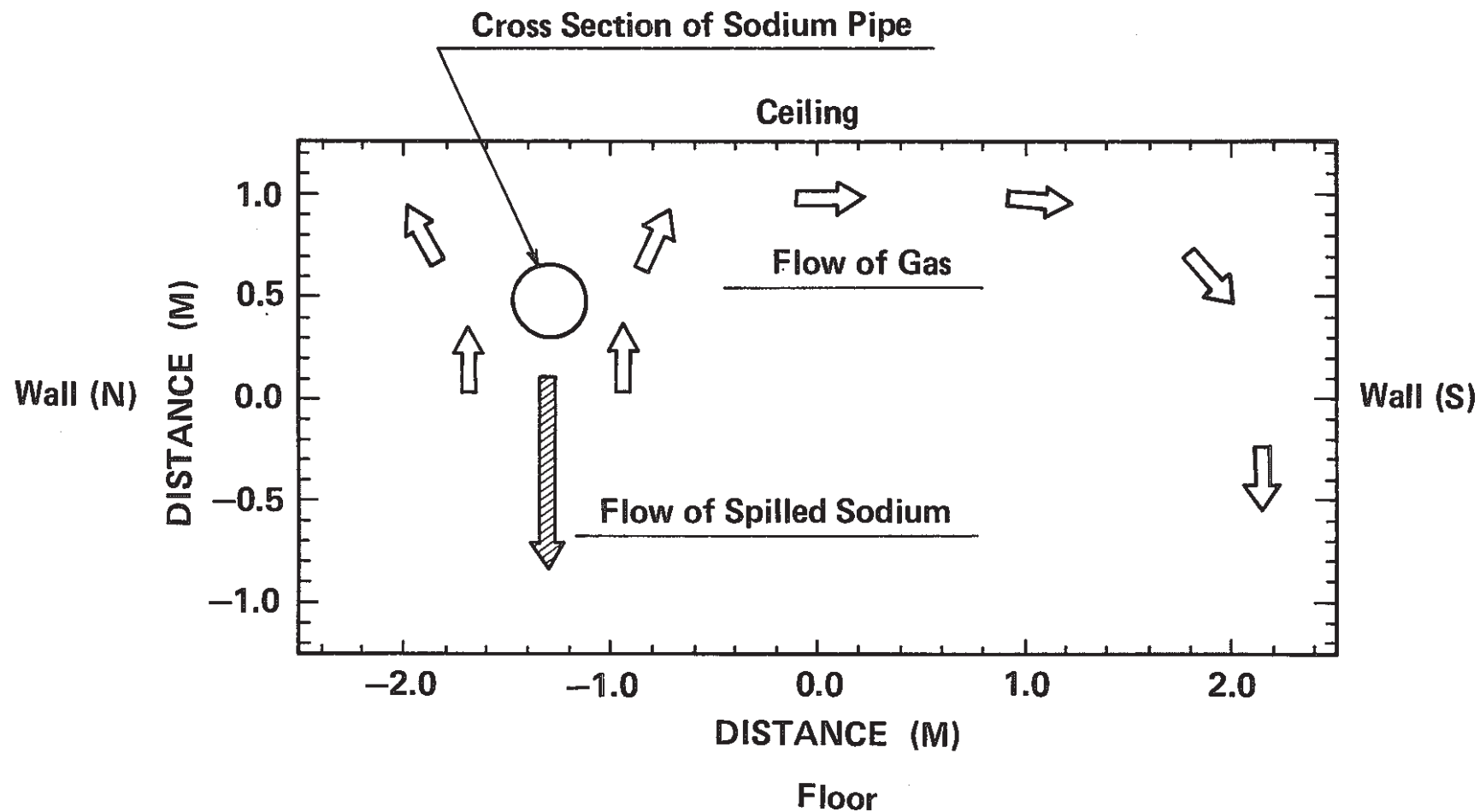


Fig.13 Flow Pattern of Gas and of Spilled Sodium in Vertical Cross Section of Upper Cell Atmosphere during Sodium Spill

PSS-SFE-36 I

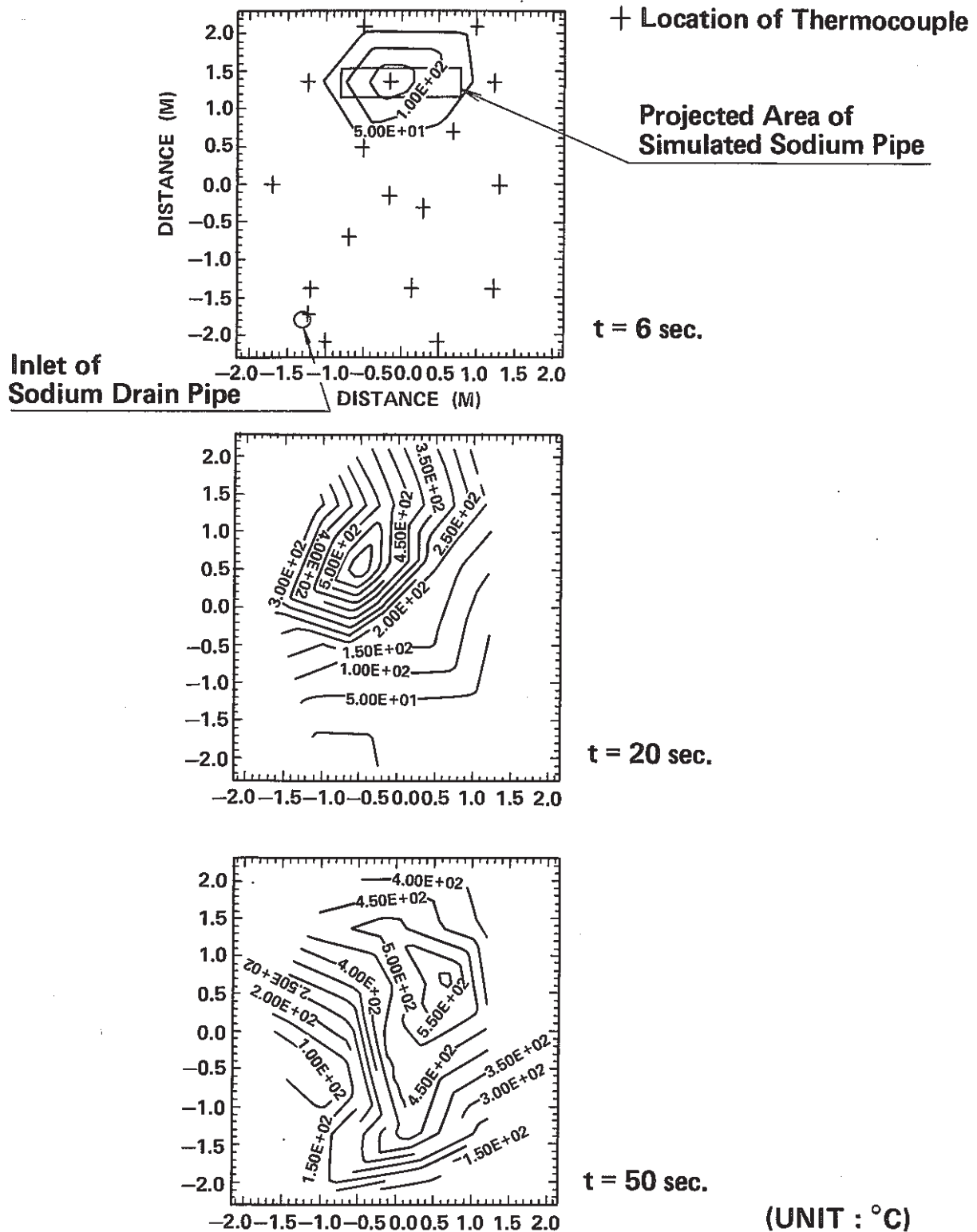


Fig.14 Temperature Distribution of Sodium on Floor Liner and Its Change during Sodium Spill (Top View)

PSS-SFE-362

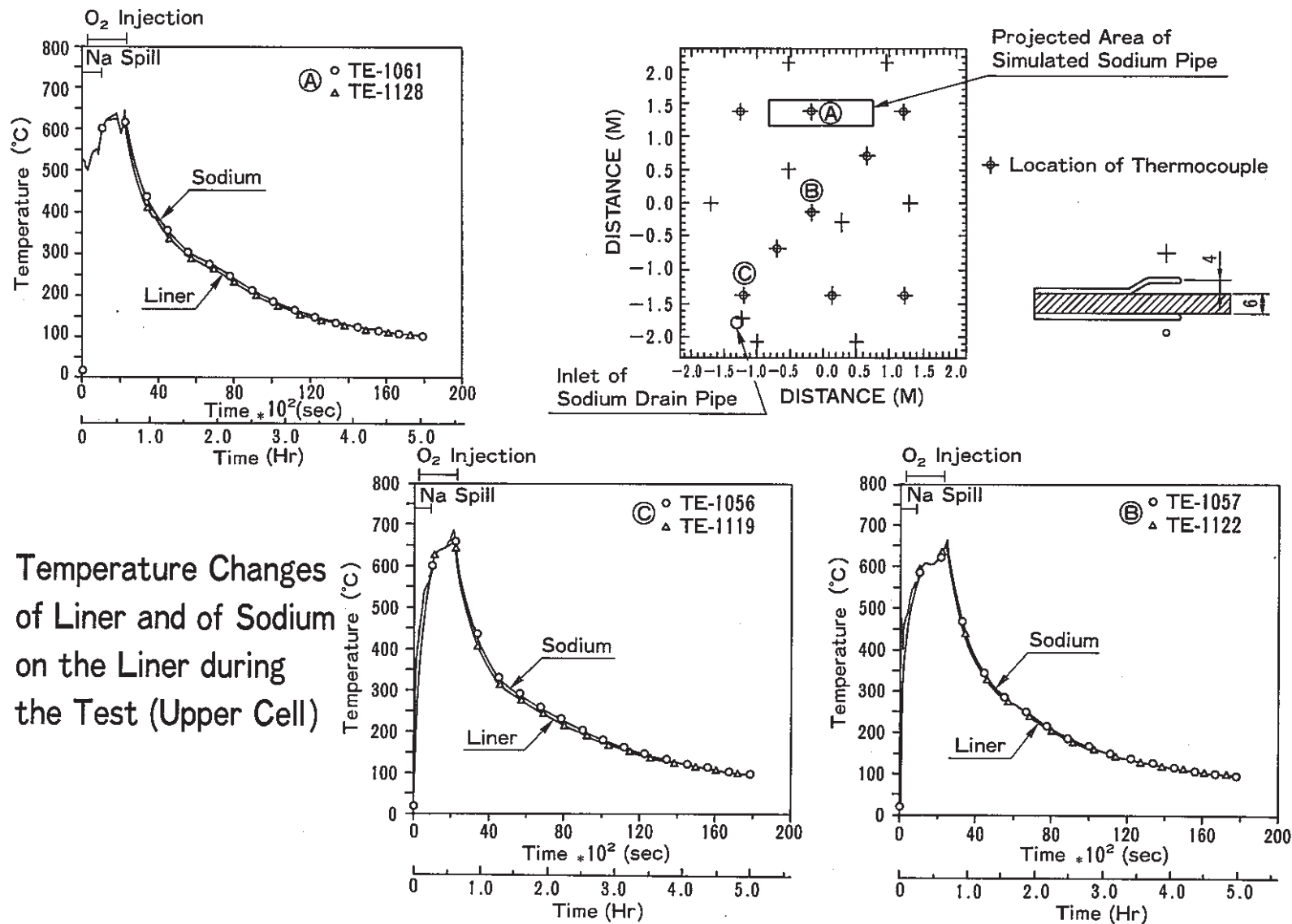


Fig.15 Temperature Changes of Liner and of Sodium on the Liner during the Test (Upper Cell)

PSS-SFE-363

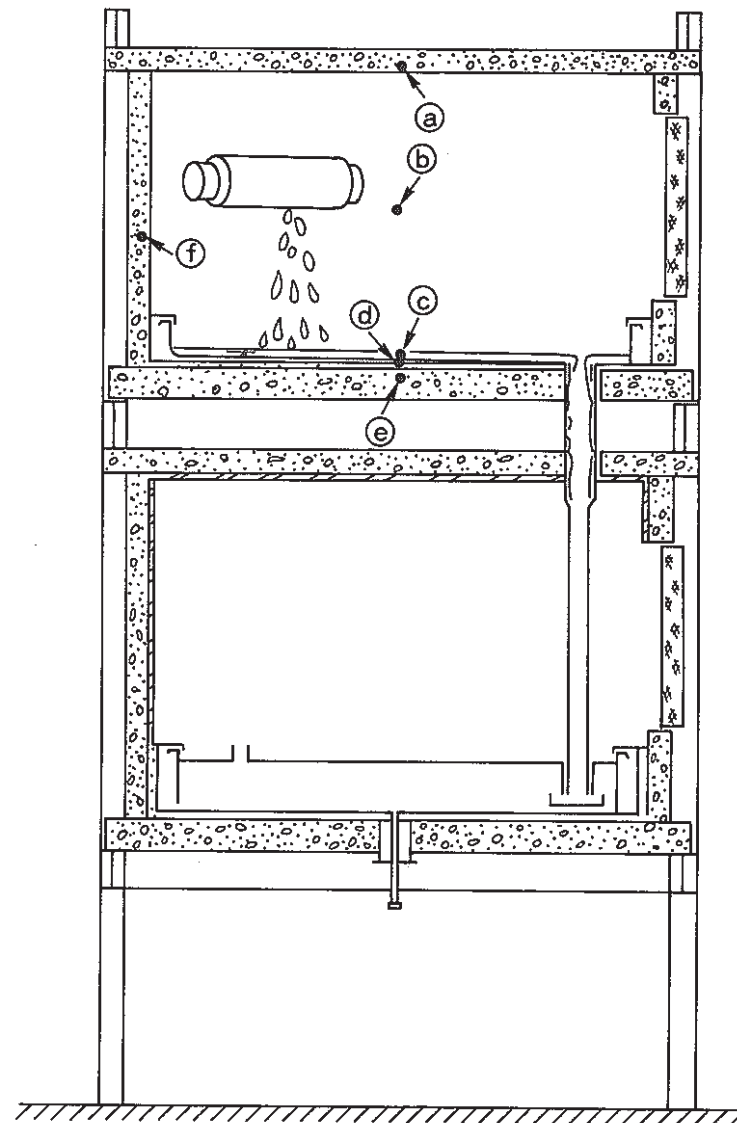
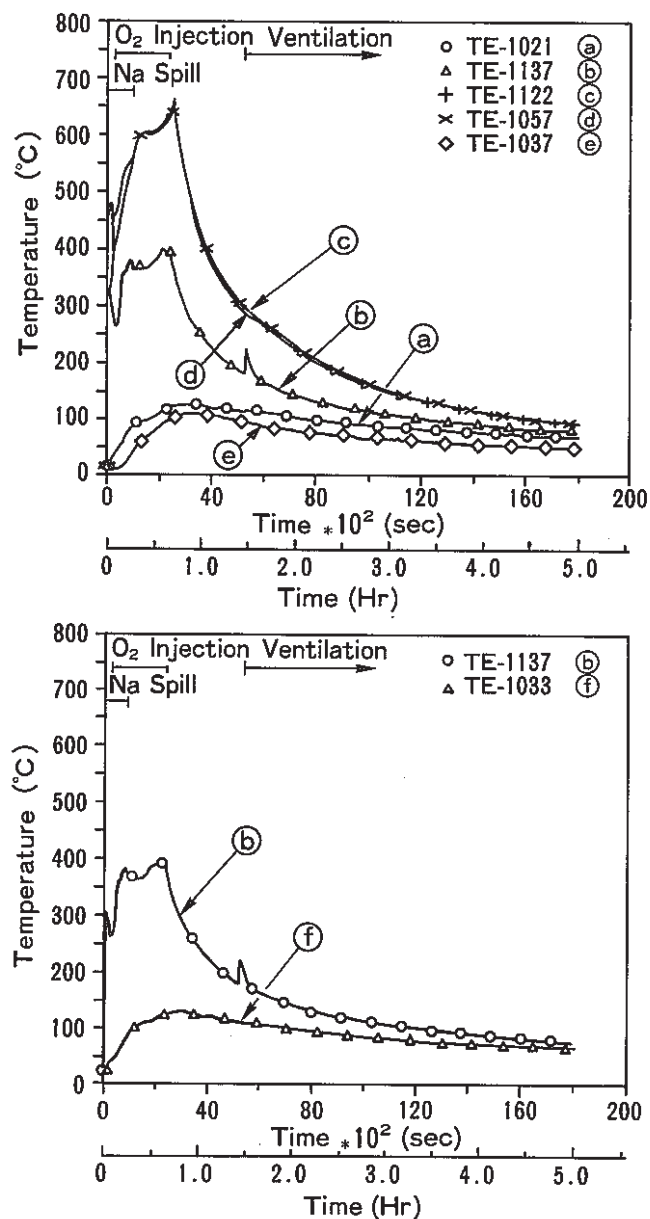


Fig.16 Temperature Distribution Change in the Upper Cell of SOLFA-1 during the Test

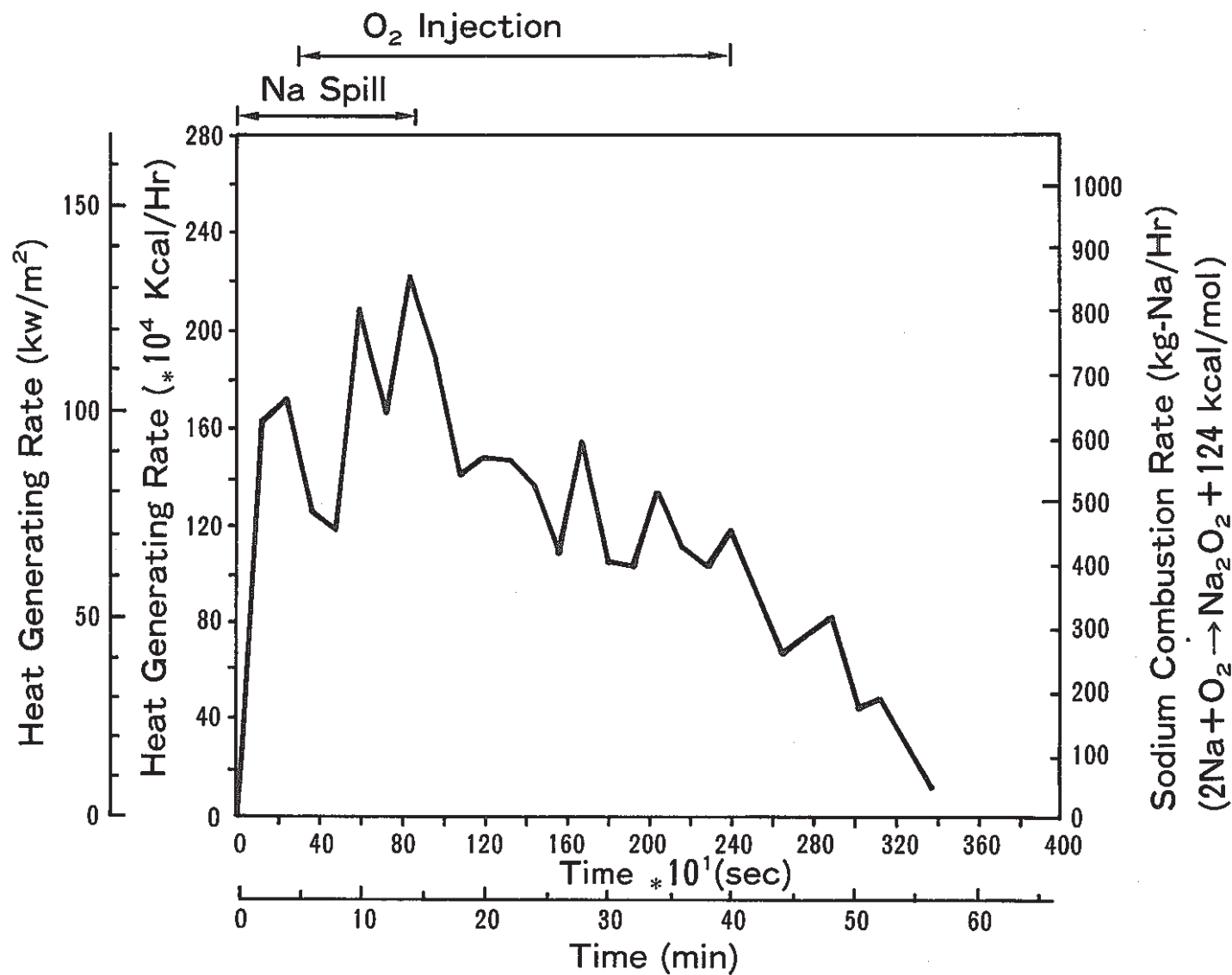


Fig.17 Heat Generating Rate and Sodium Combustion Rate during the Test (Upper Cell)

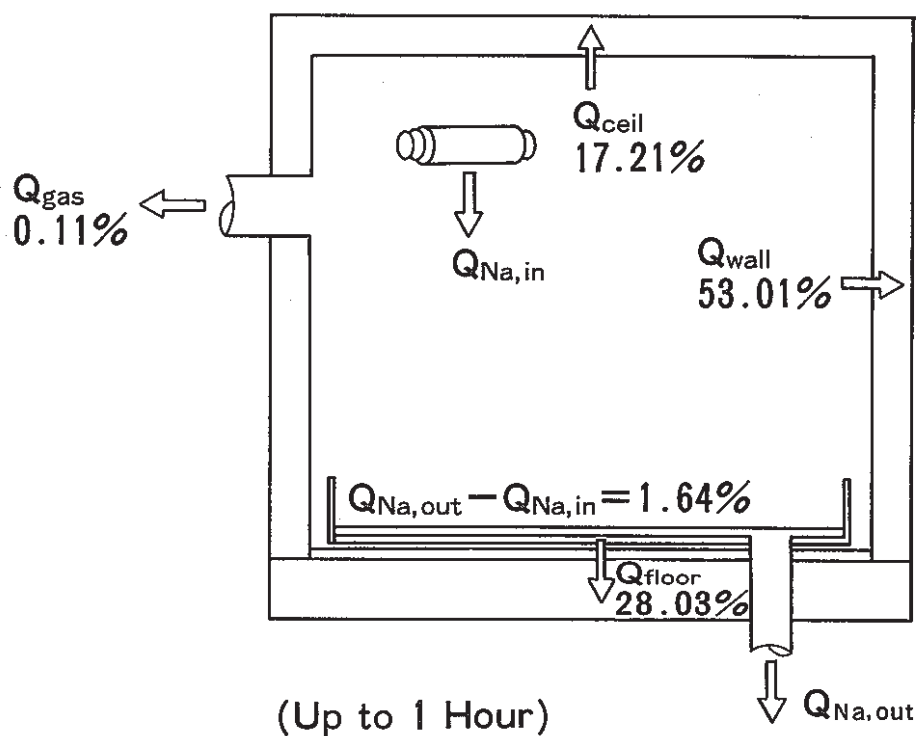
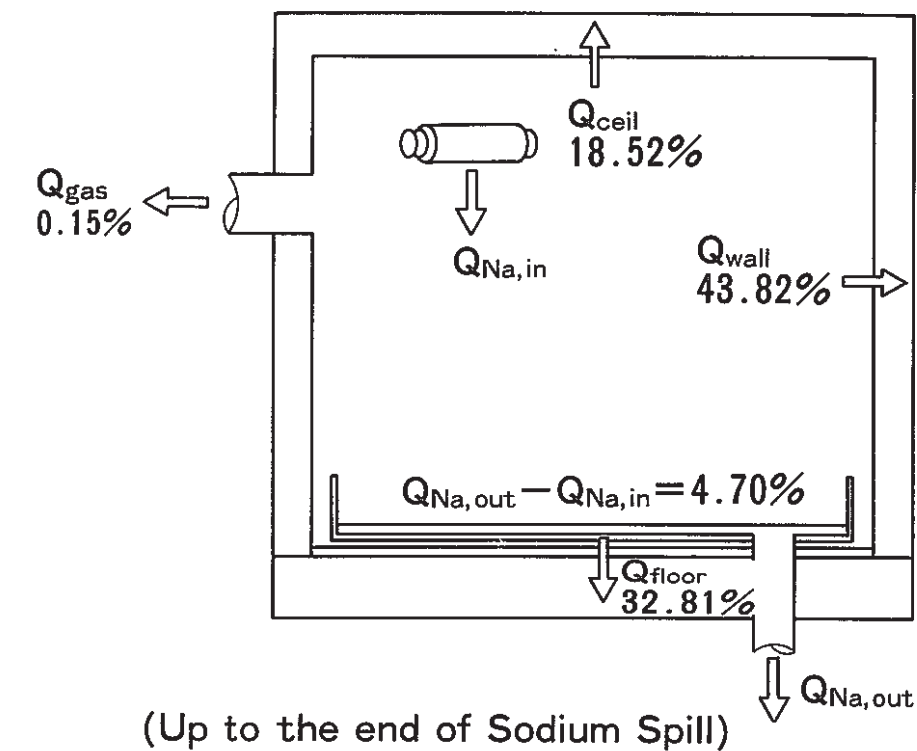


Fig.18 Distribution of Combustion Heat Transferred to the Various Portions of the Upper Cell

PSS-SFE-366

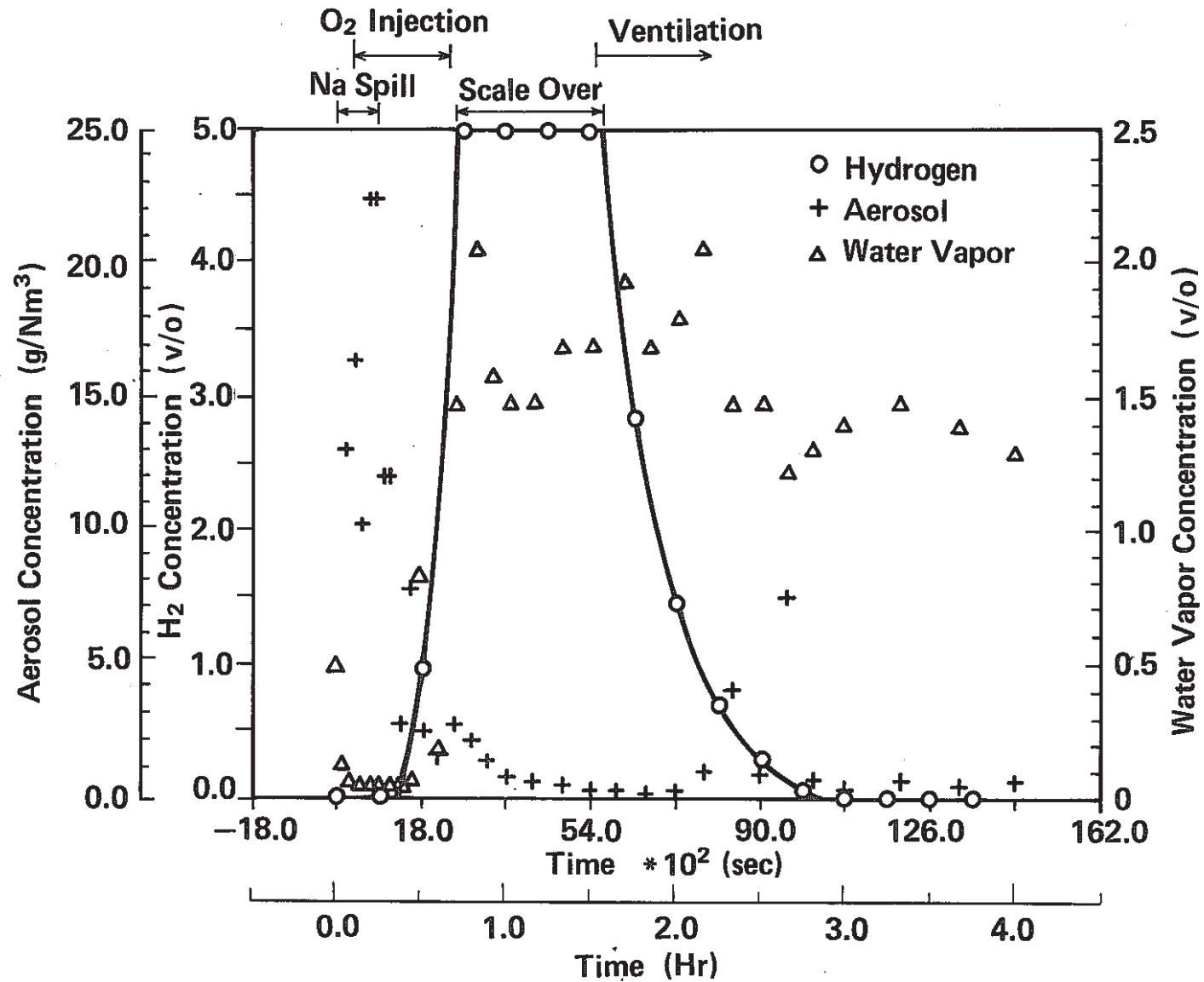


Fig.19 Concentration Changes of Aerosol, Hydrogen and Water Vapor during the Test (Upper Cell)

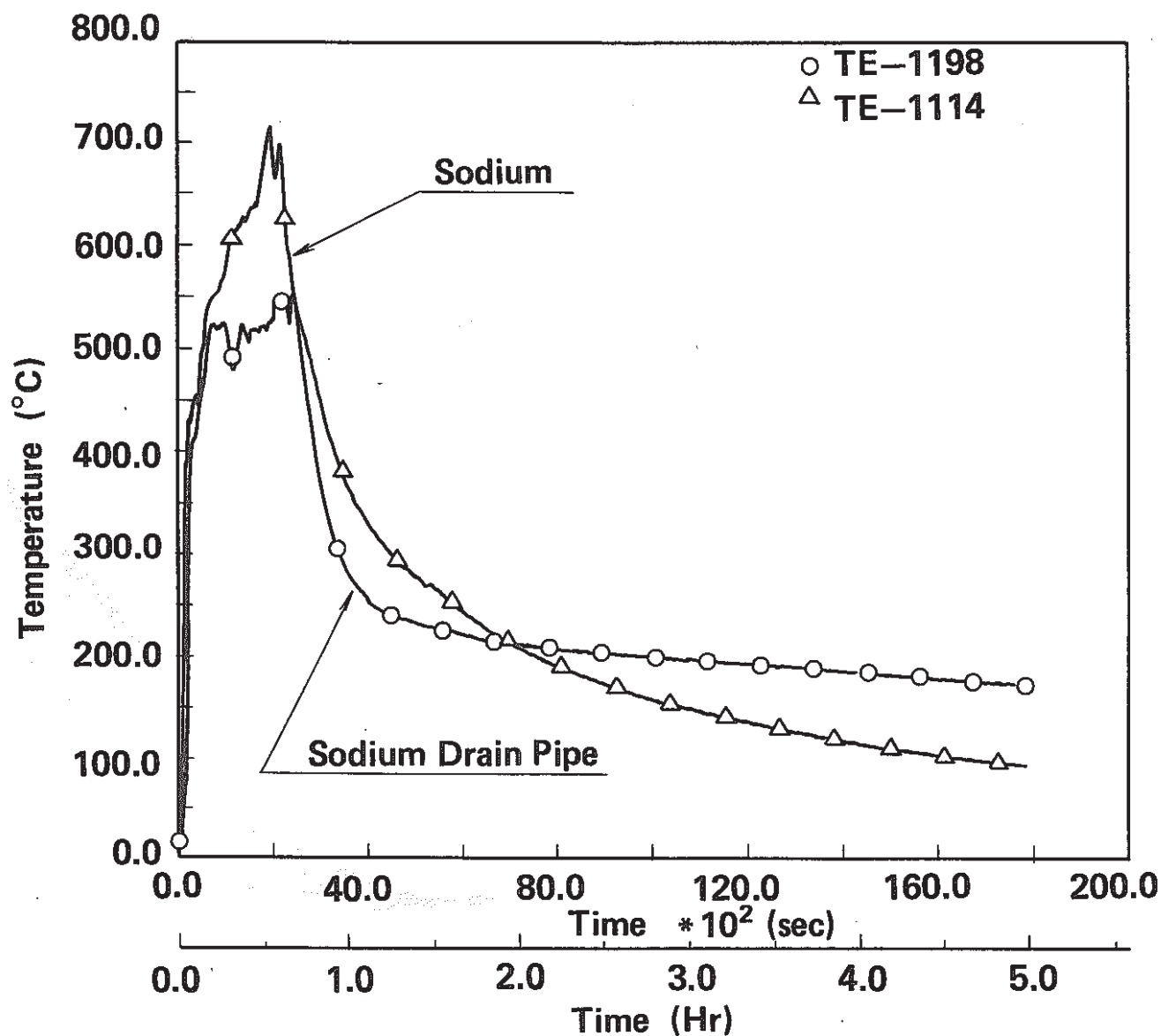


Fig.20 Temperature Changes of Sodium Drain Pipe and of Sodium at Inlet of the Pipe during the Test

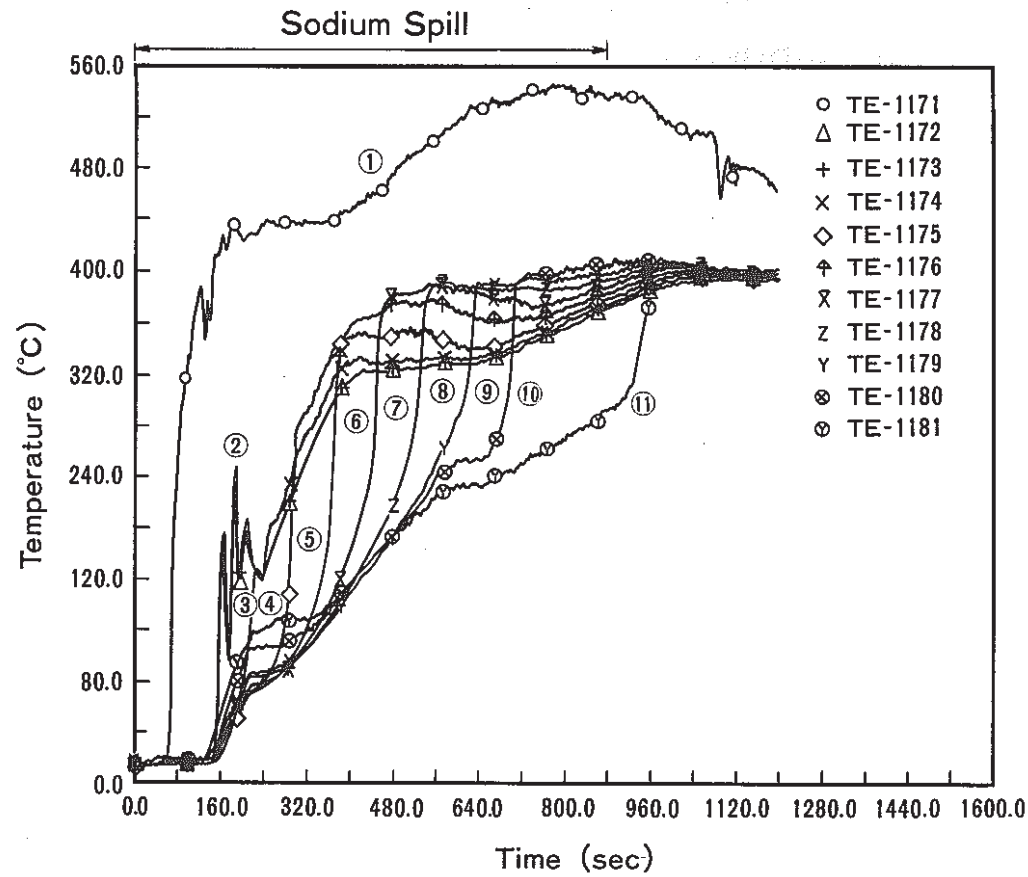
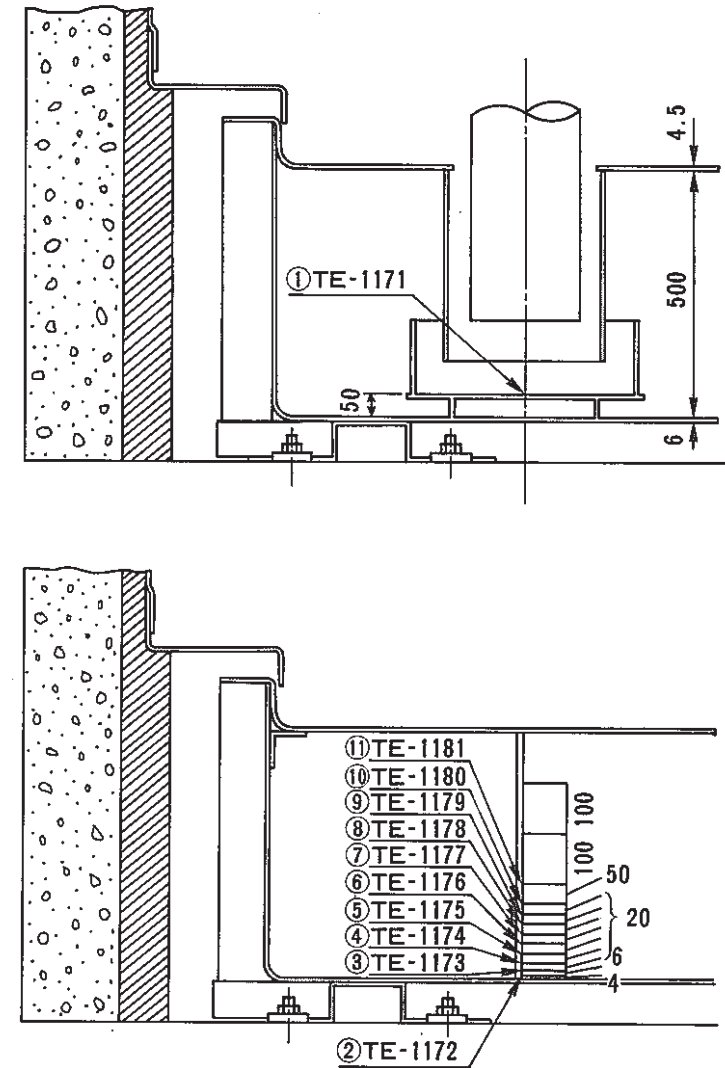


Fig.21 Temperature Change in Bucket and in Smothering Tank during Sodium Spill



PSS-SFE-369

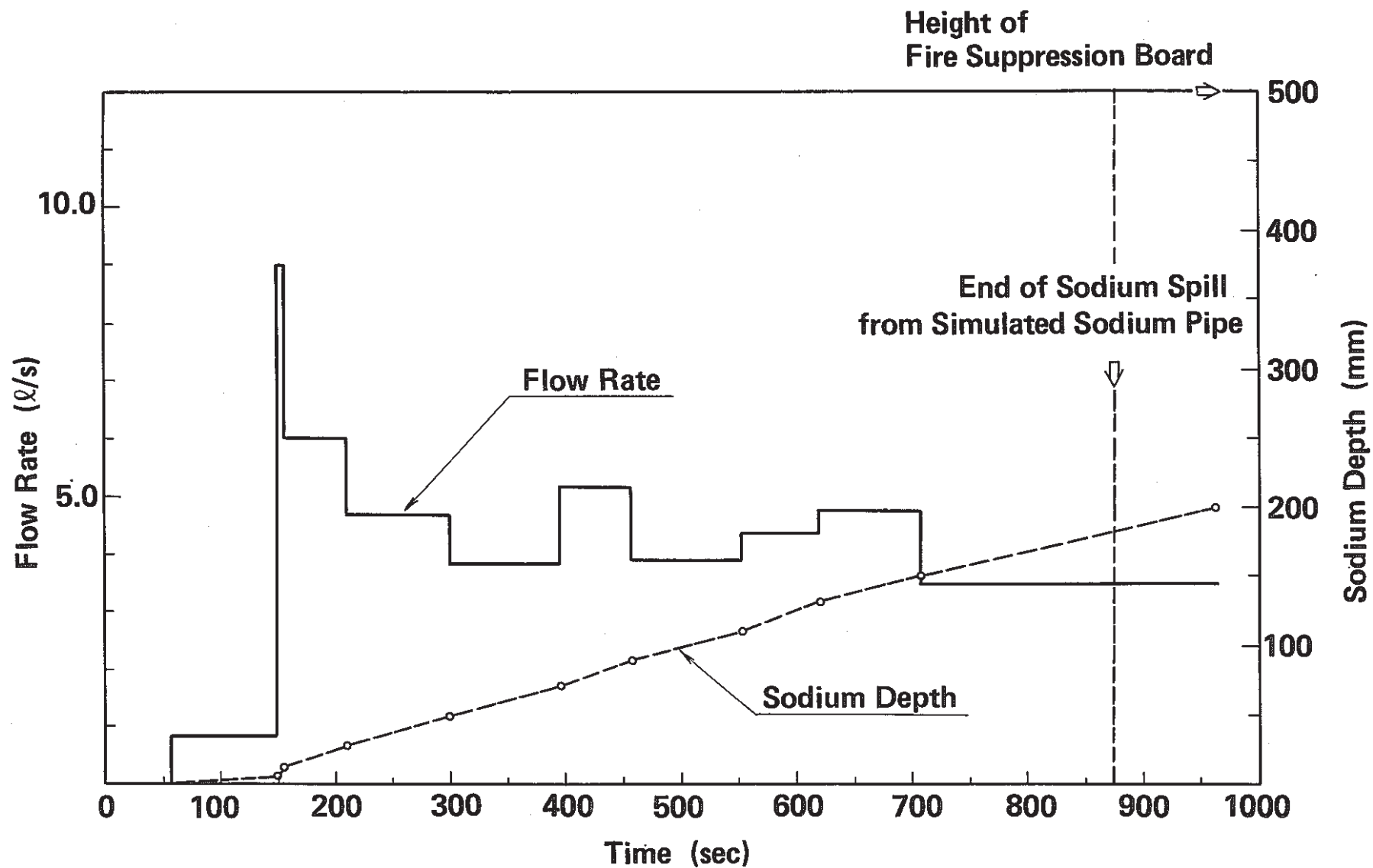


Fig.22 Flow Rate of Drain Sodium into Smothering Tank

PSS-SFE-370

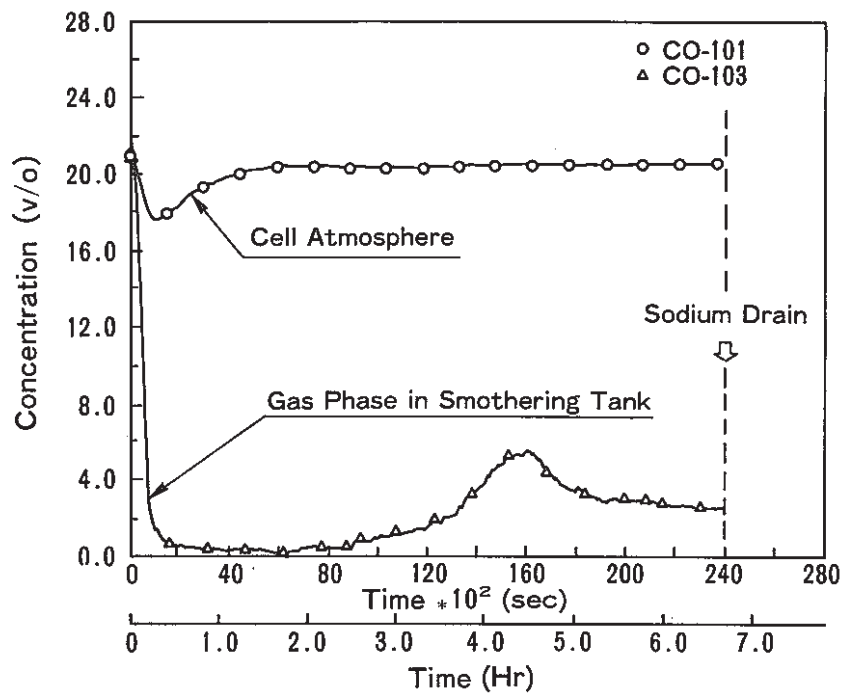


Fig.23 Oxygen Concentration Changes of Cell Atmosphere and of Gas Phase in Smothering Tank during the Test

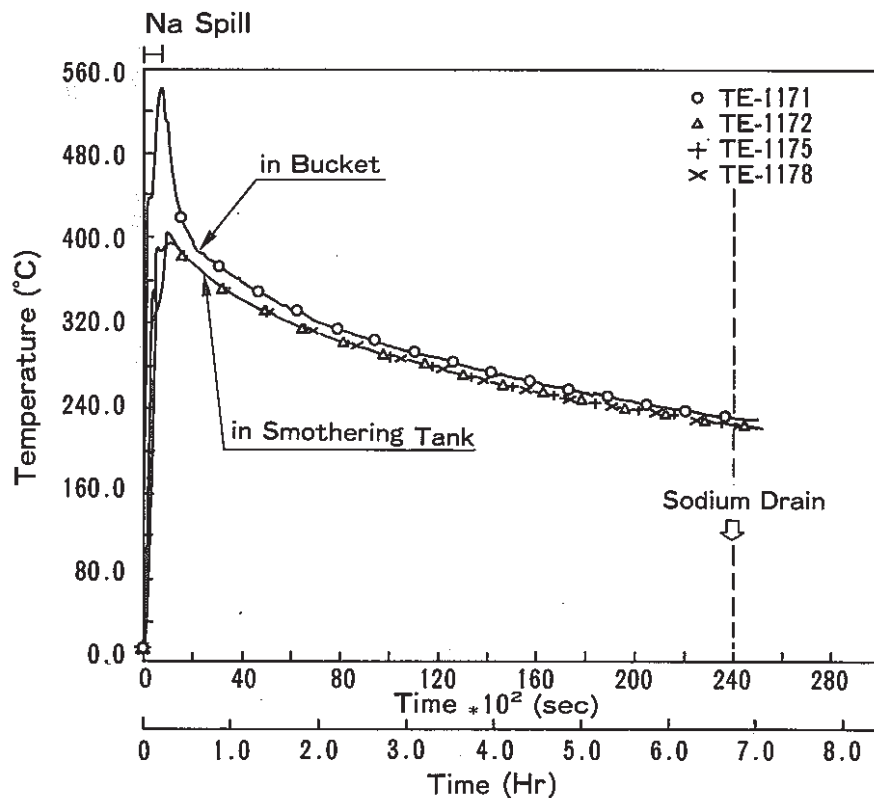


Fig.24 Temperature Changes of Sodium in Bucket and in Smothering Tank during the Test

PSS-SFE-371

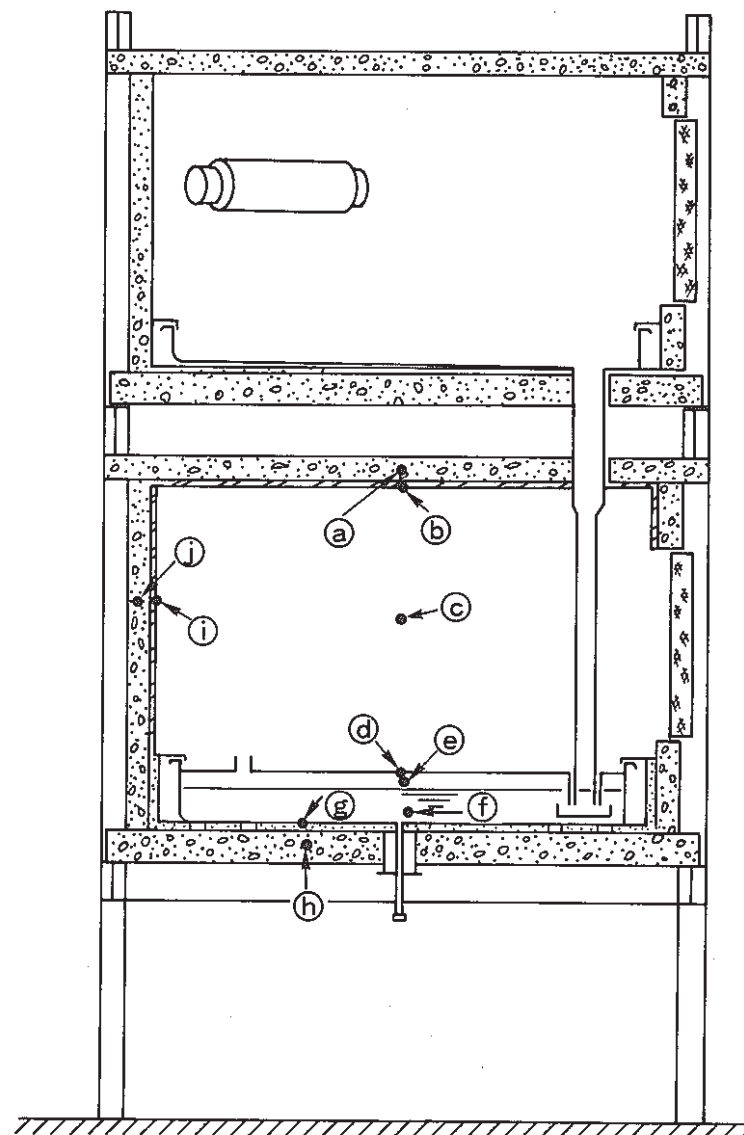
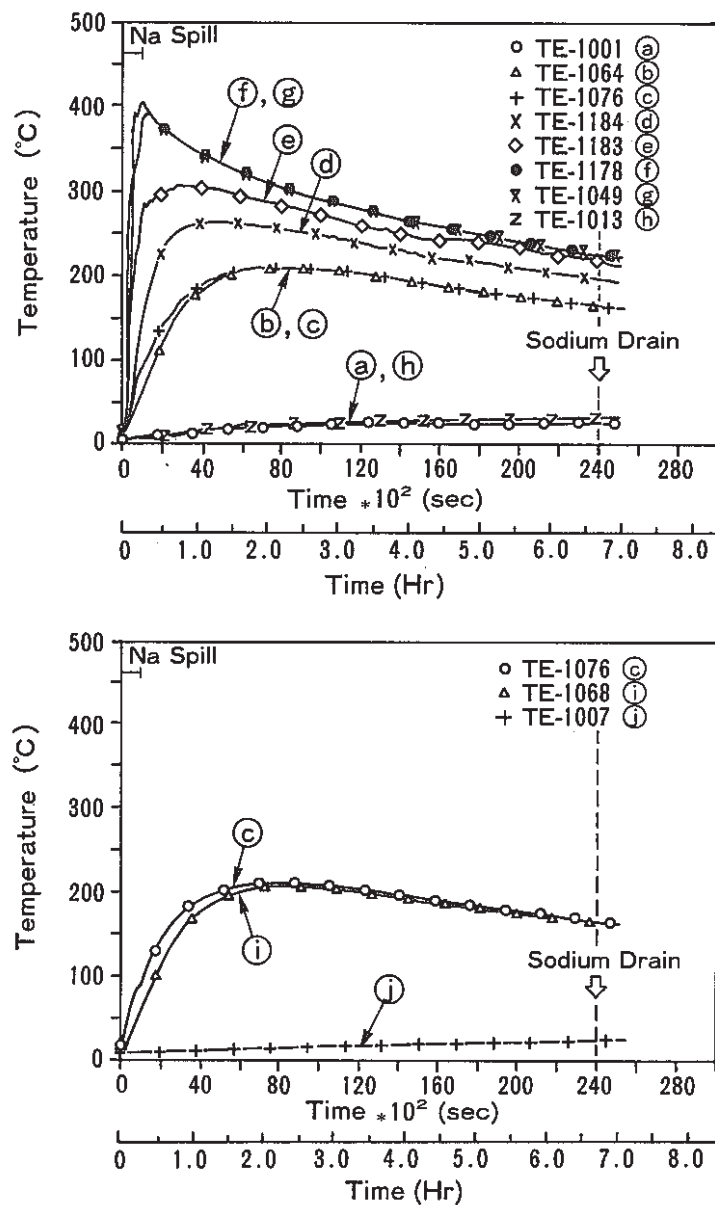


Fig.25 Temperature Distribution Change in the Lower Cell of SOLFA-1 during the Test

PSS-SFE-372

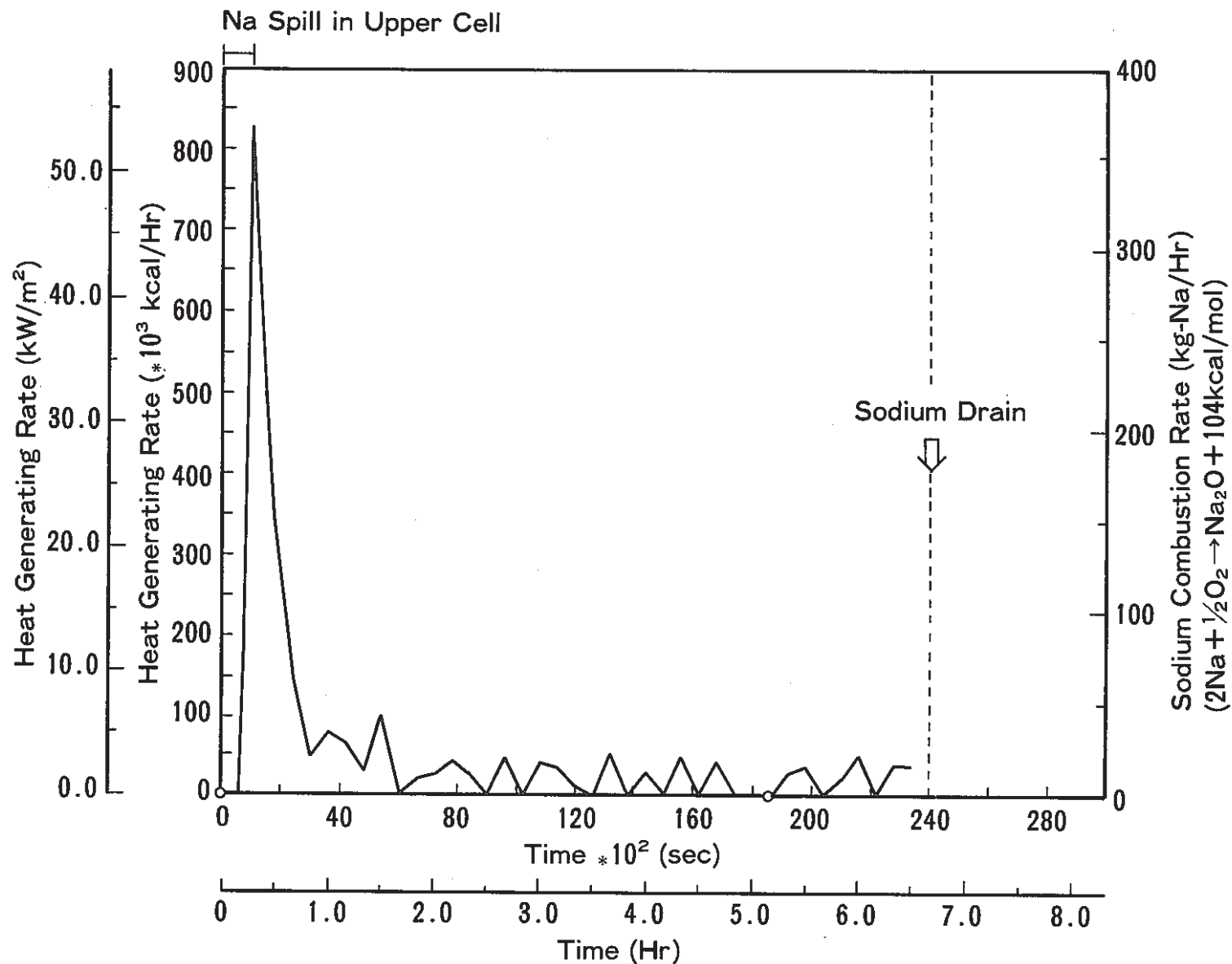


Fig.26 Heat Generating Rate and Sodium Combustion Rate in Smothering Tank during the Test (Lower Cell)

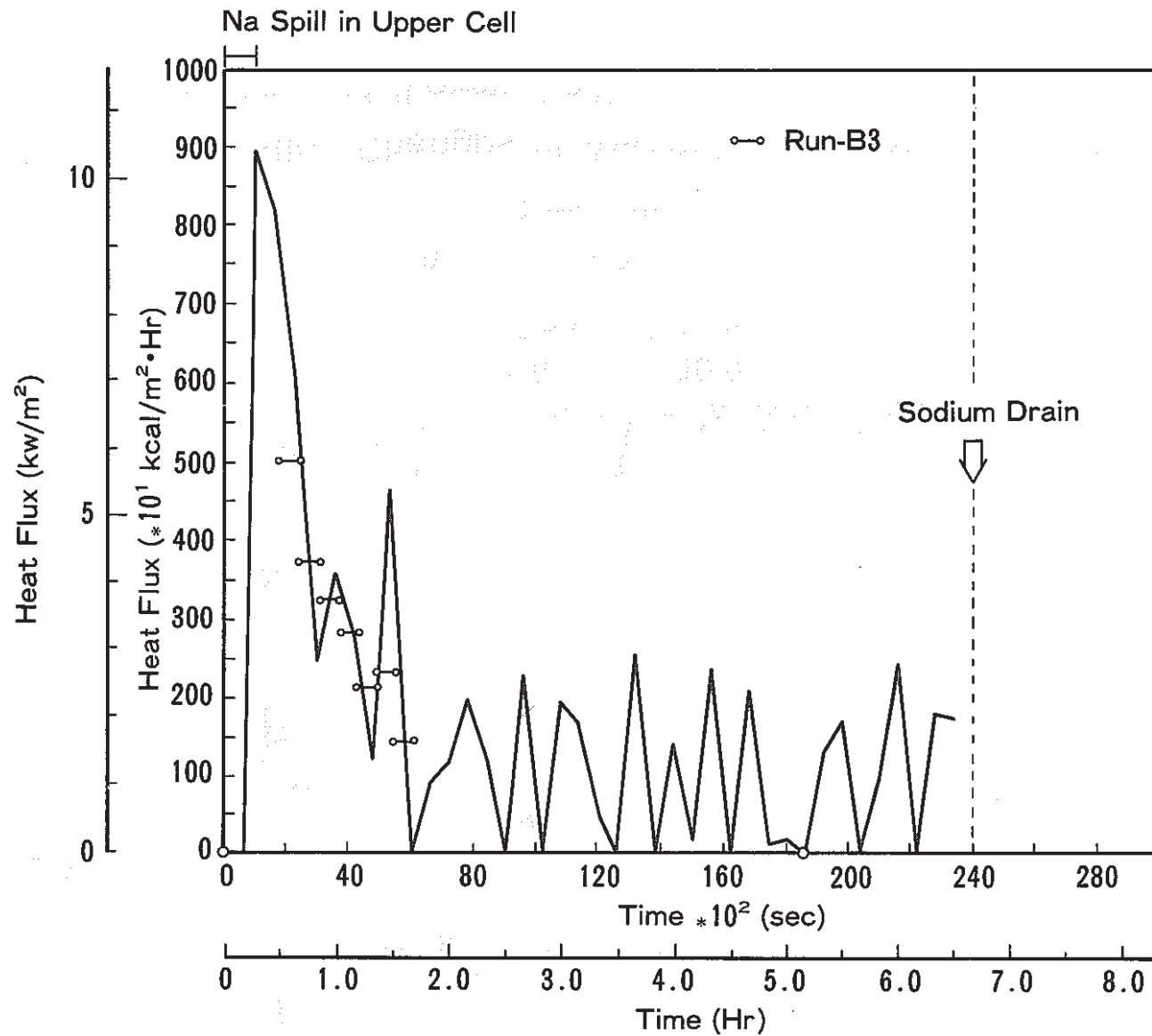


Fig.27 Heat Flux to Floor Concrete in Lower Cell during the Test

PSS-SFE-374

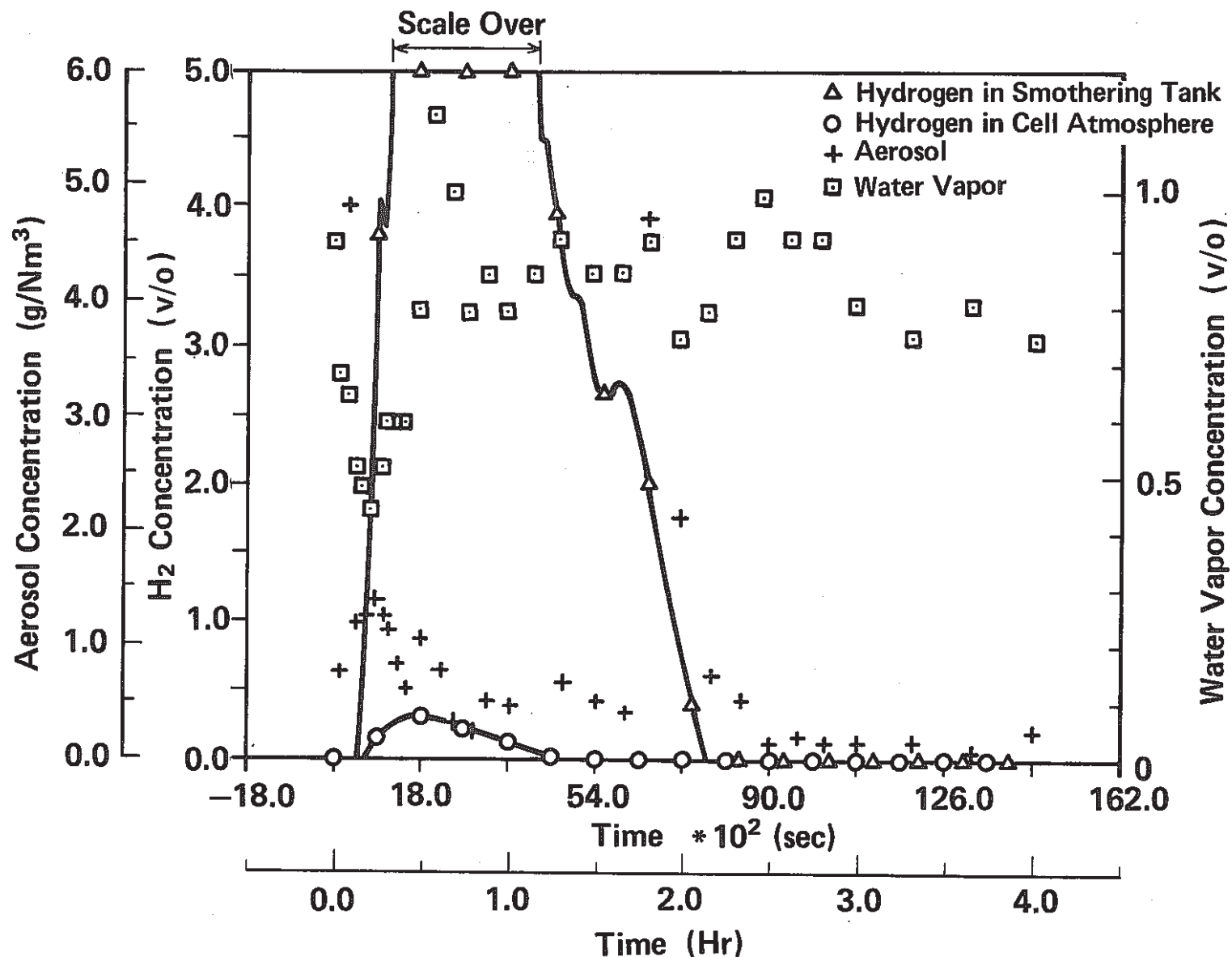


Fig.28 Concentration Changes of Aerosol, Hydrogen and Water Vapor during the Test (Lower Cell)

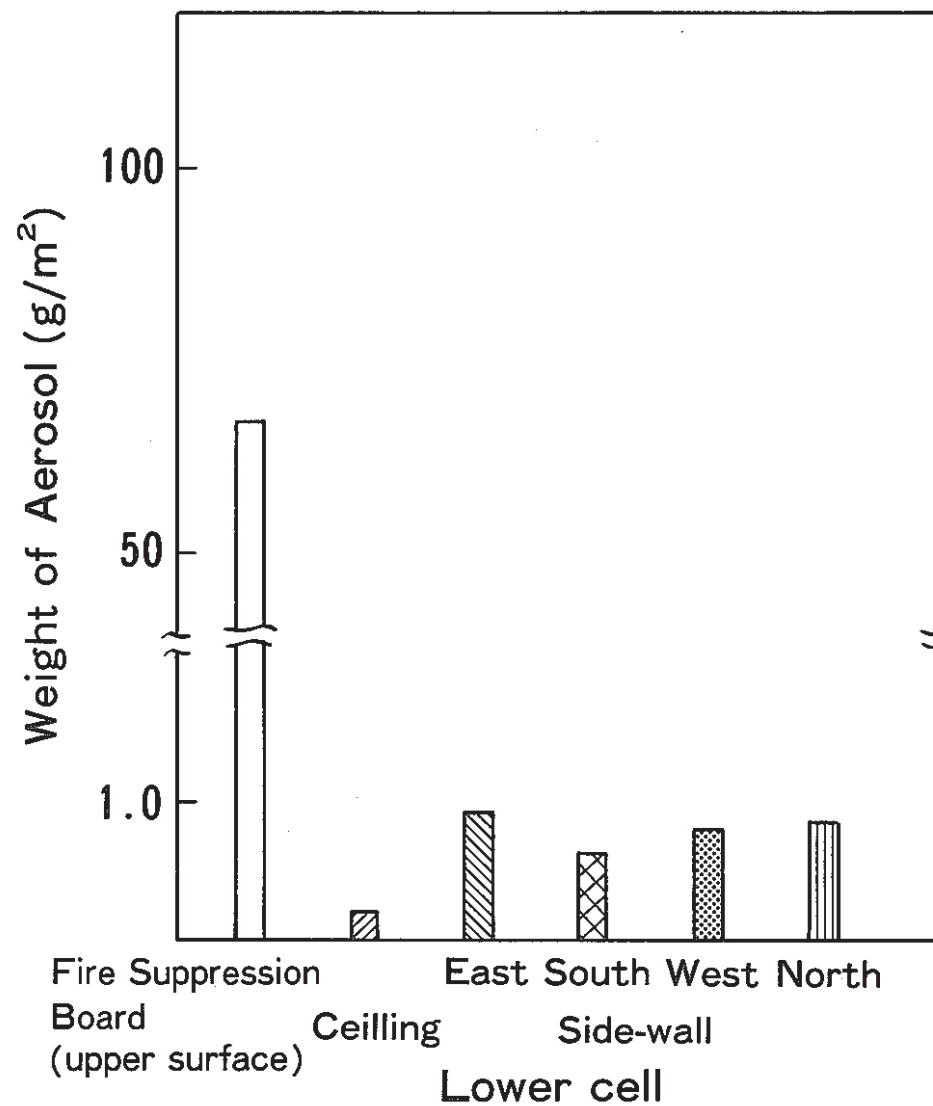
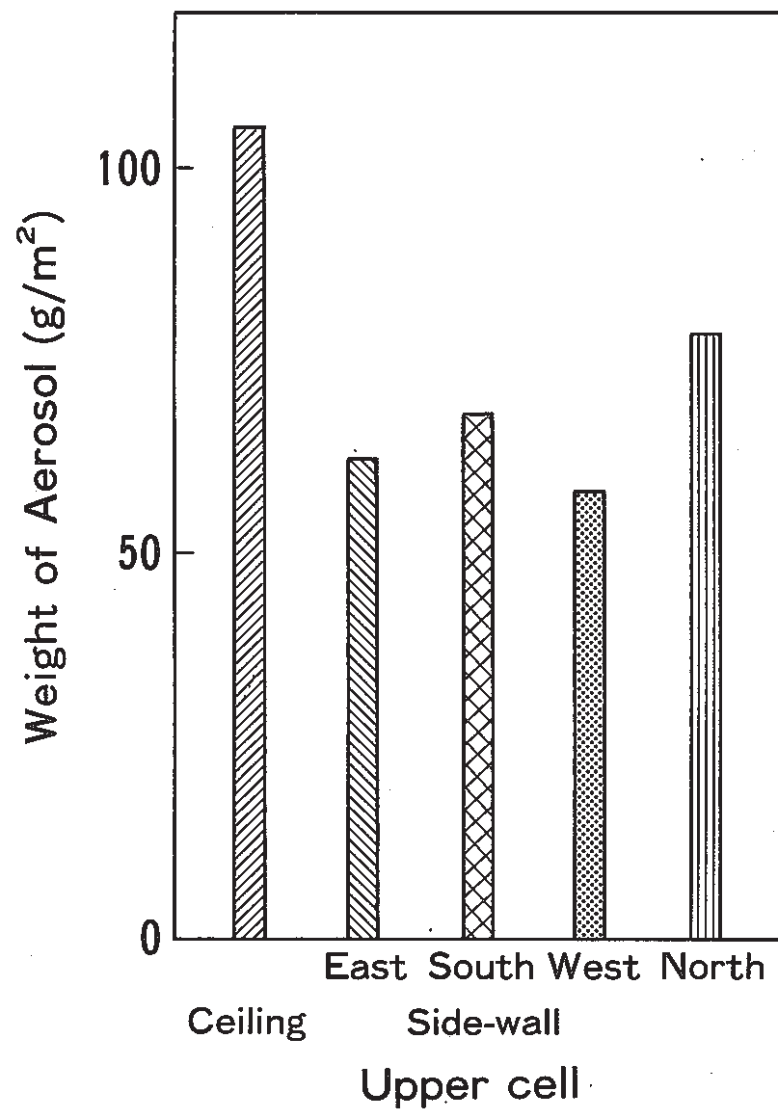


Fig.29 Amount of Aerosol in SOLFA-1 after the Test

PSS-SFE-376

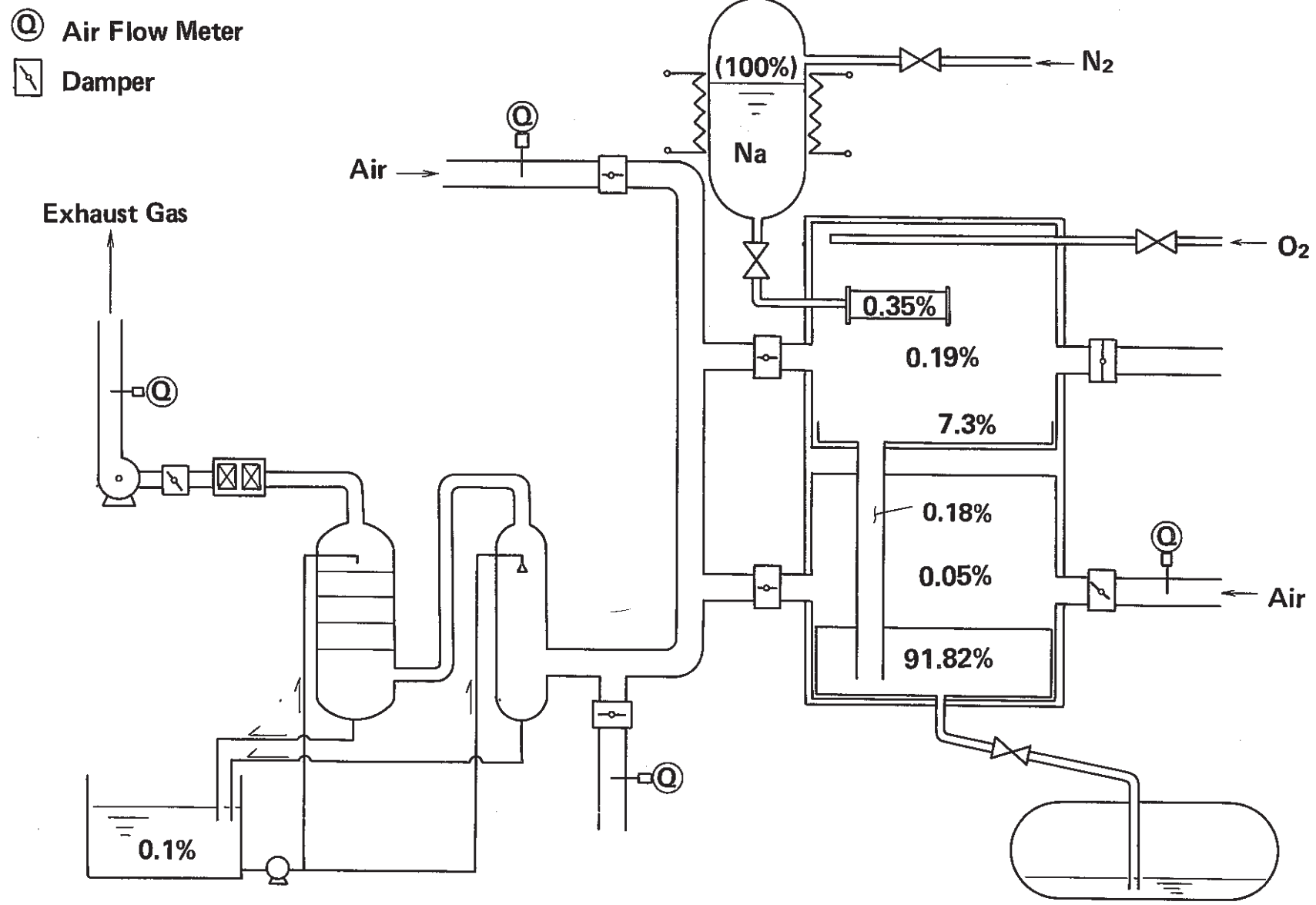


Fig.30 Post-Test Sodium Distribution in Test Rig

PSS-SFE-377

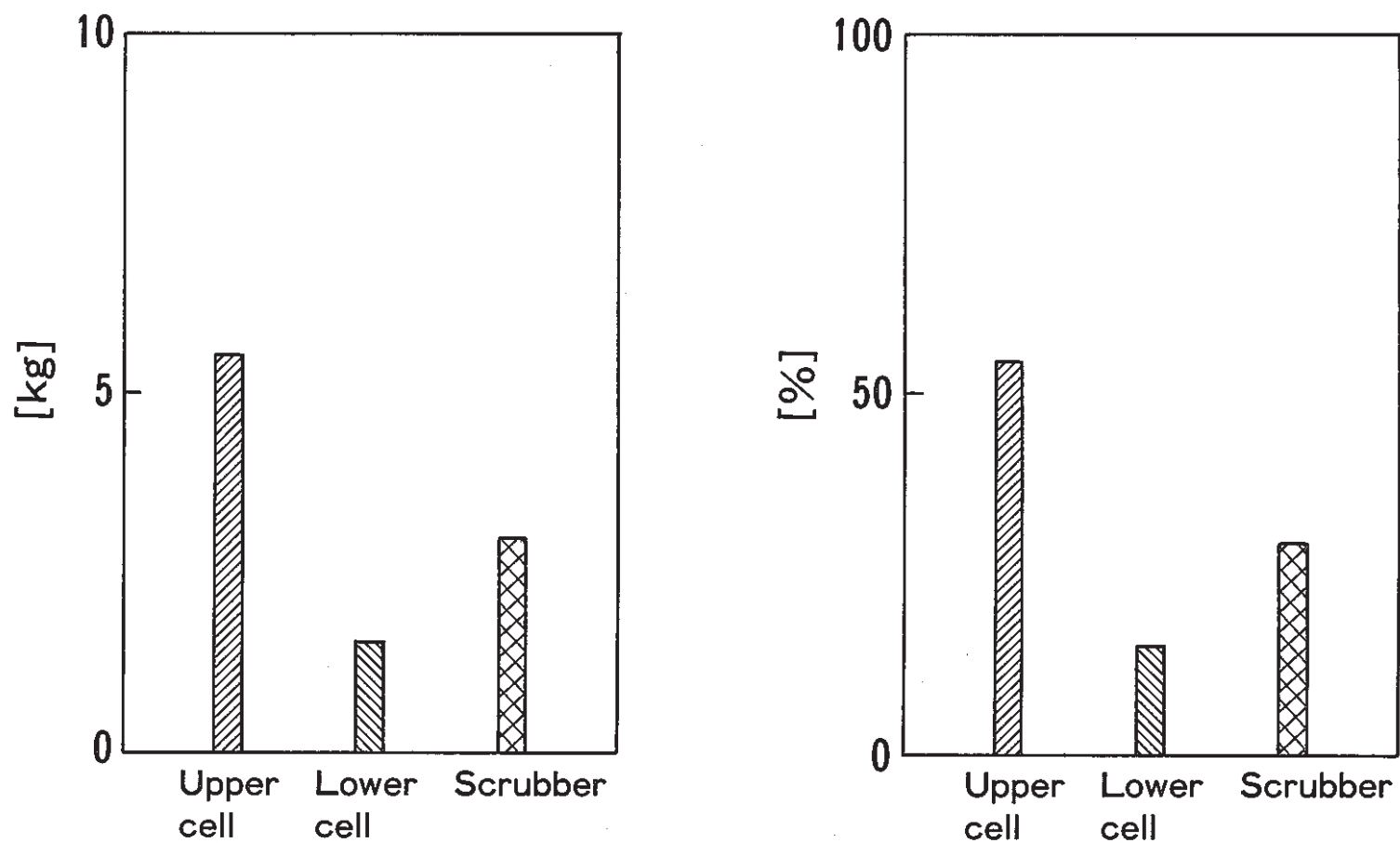


Fig.31 Post-Test Aerosol Distribution in Test Rig

PSS-SFE-378

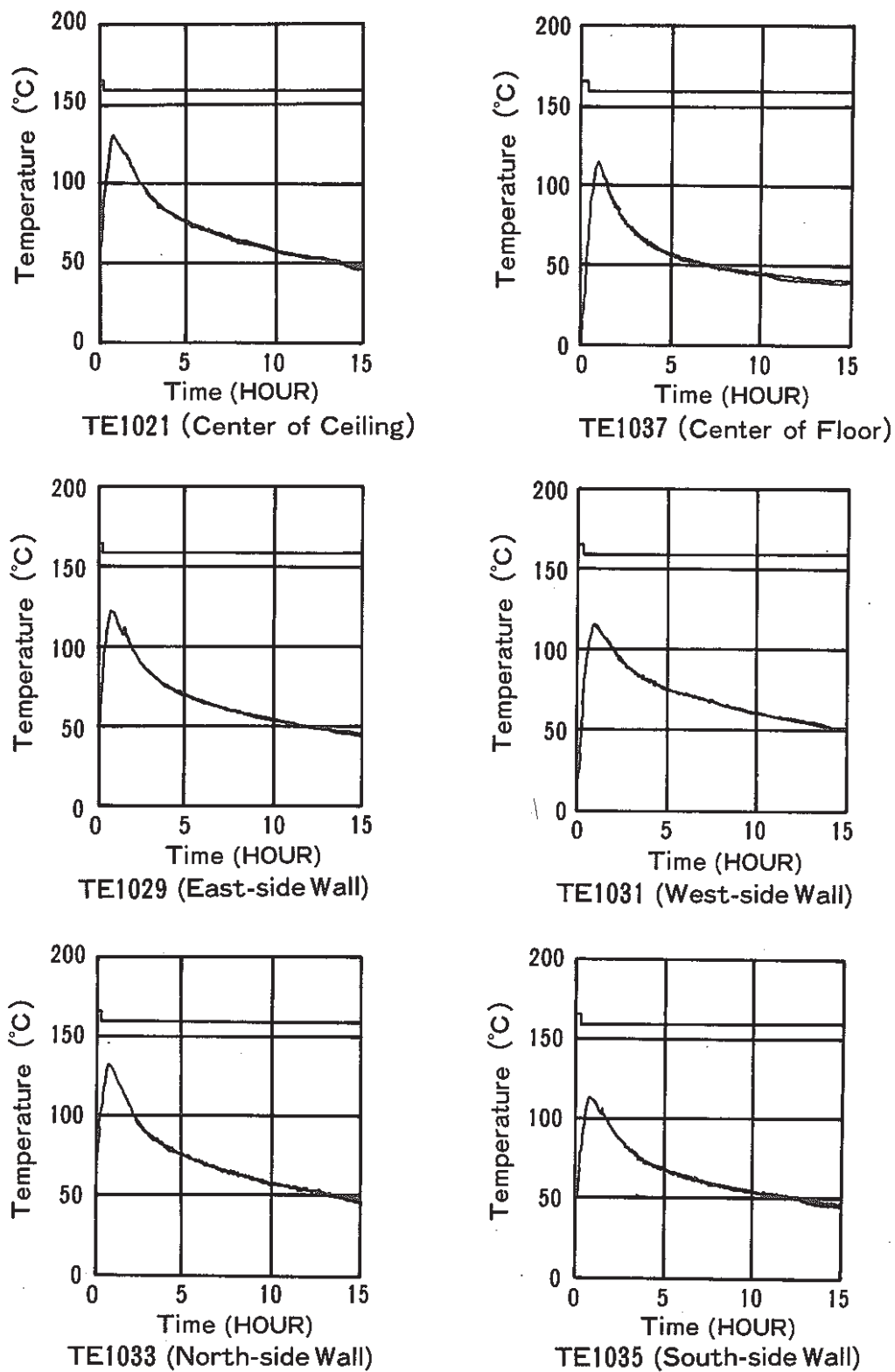


Fig.32 Temperature Changes of Upper Cell Concrete during the Test
(At the point of 12mm from inner surface)

PSS-SFE-379

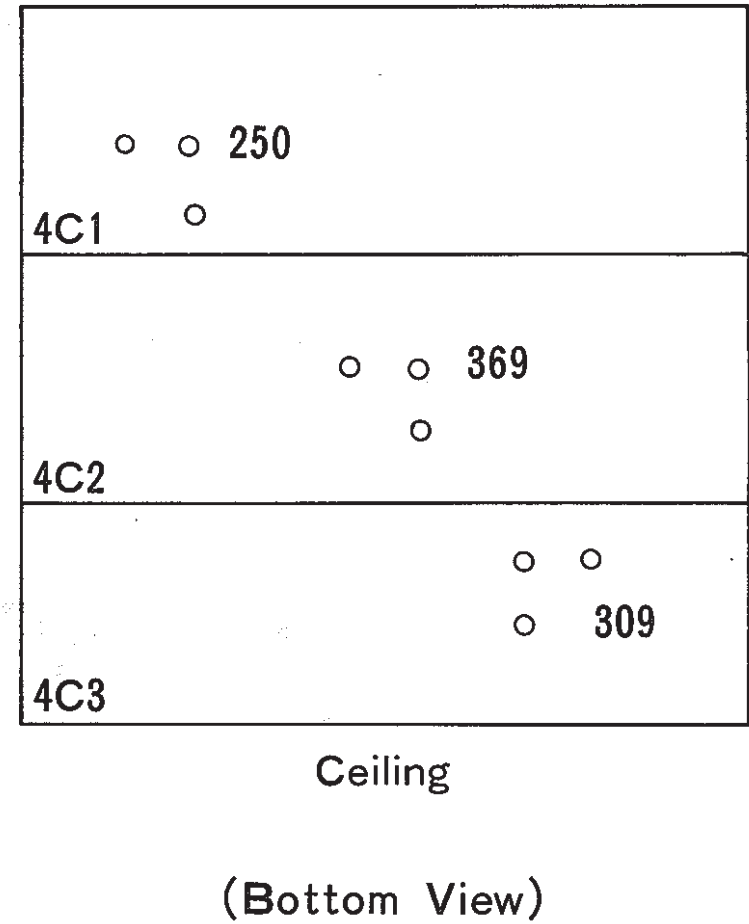
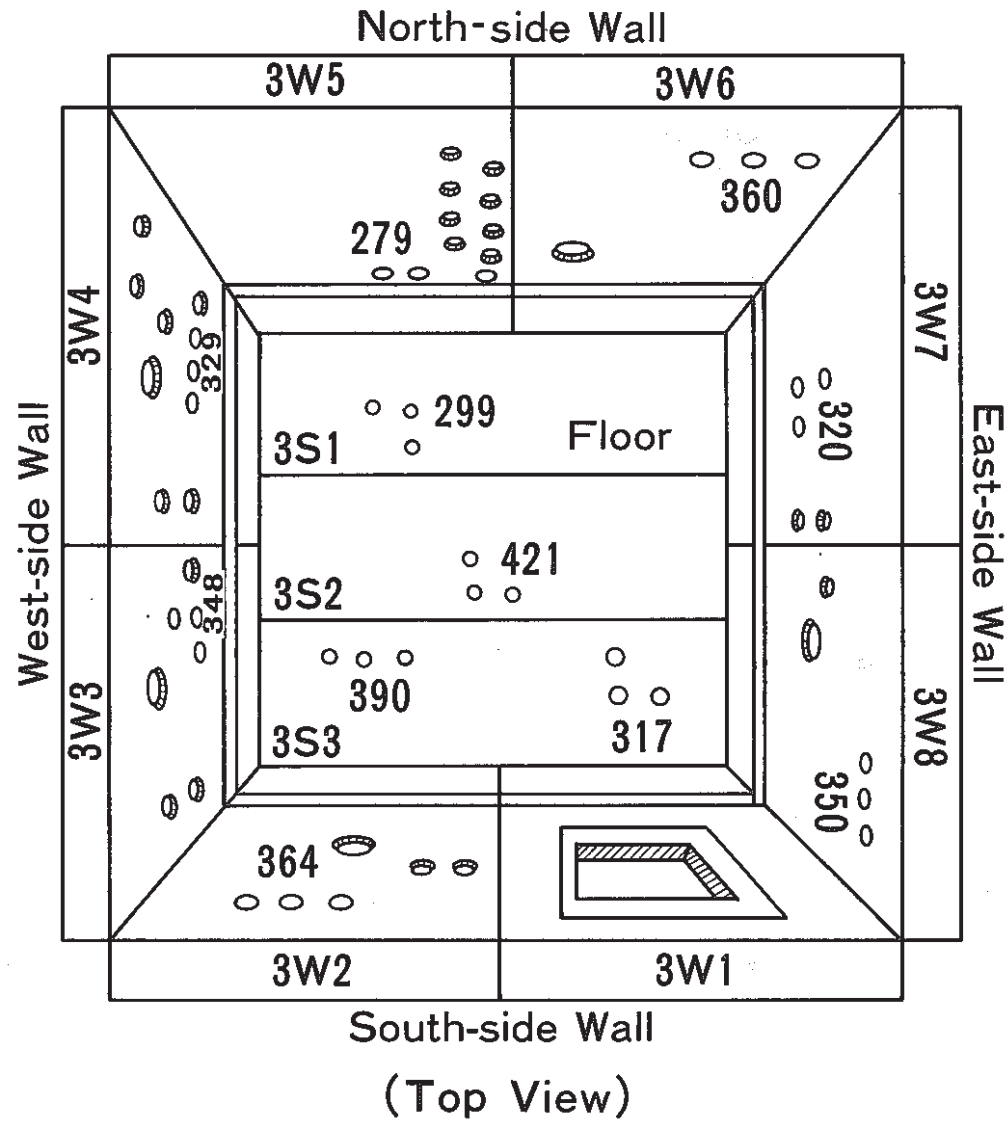


Fig.33 Compressive Strength of the Various Portions
in Upper Cell Concrete after the Test

PSS-SFE-380

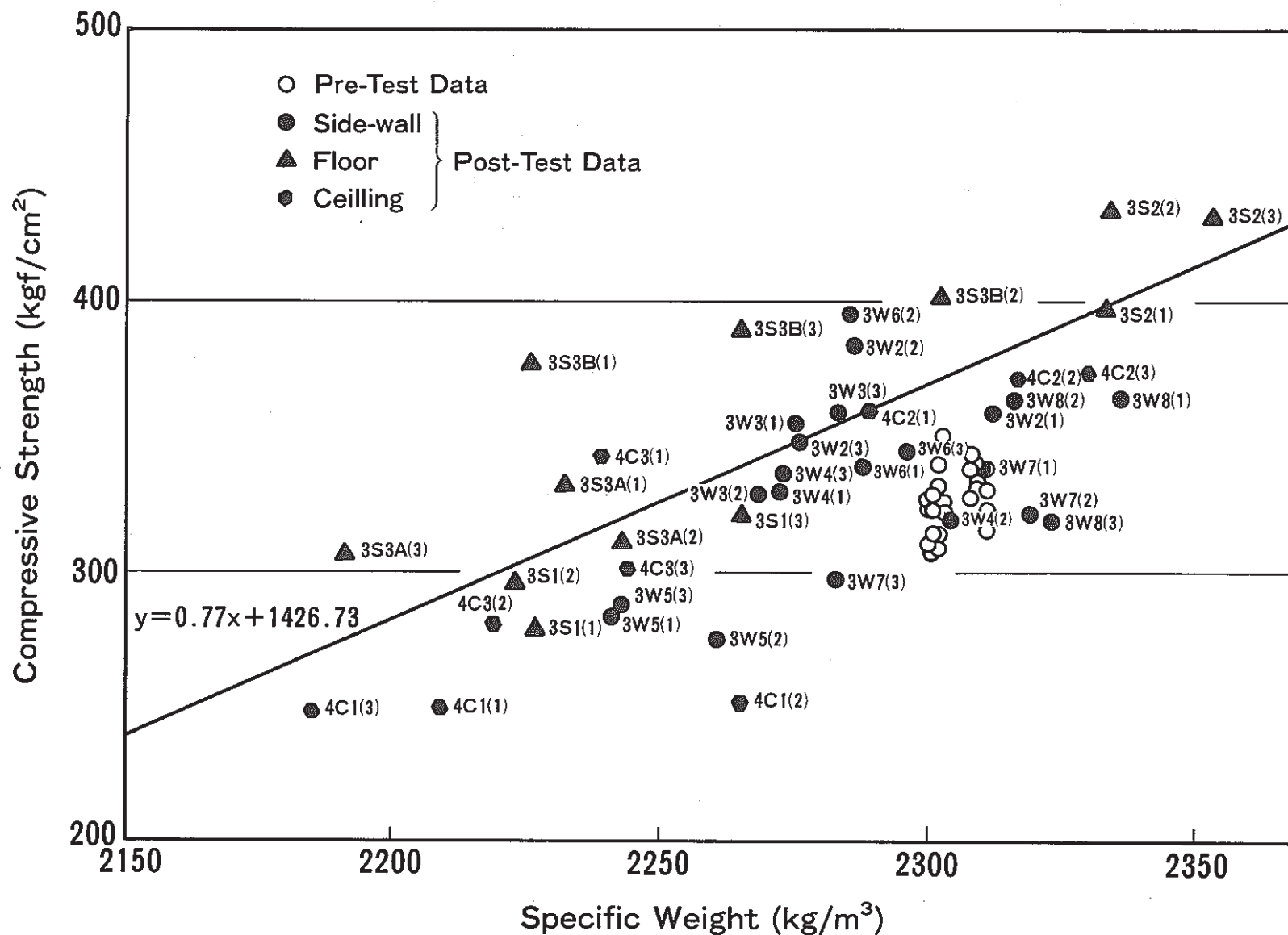


Fig.34 Relation between Specific Weight and Compressive Strength of Upper Cell Concrete

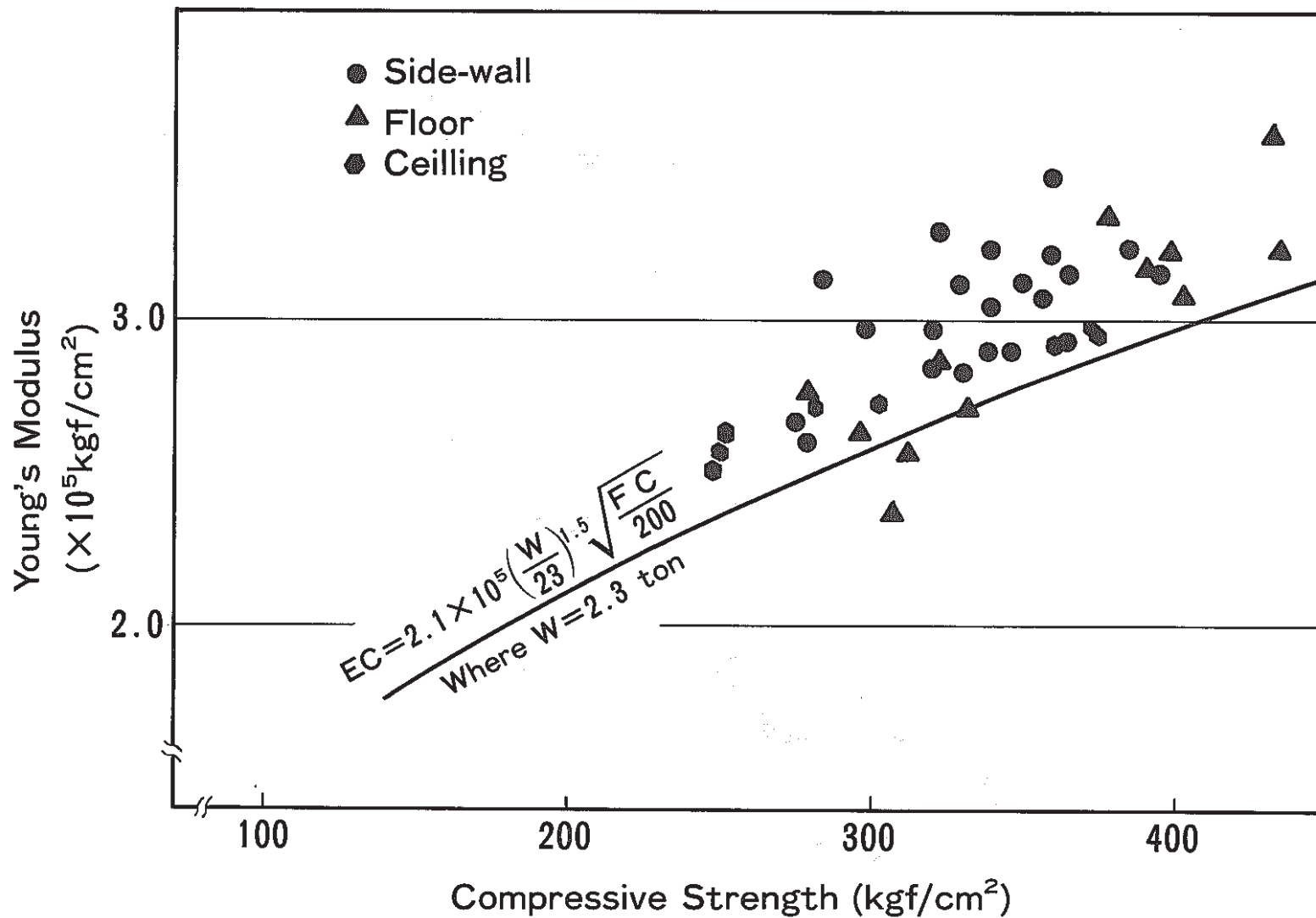
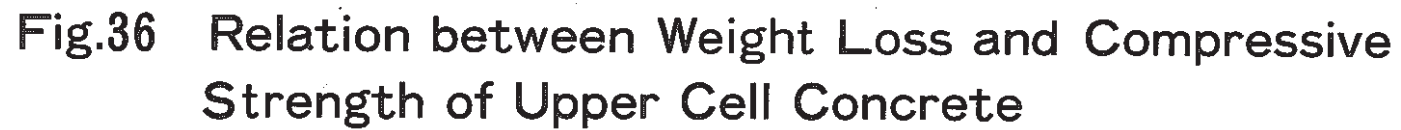


Fig.35 Relation between Compressive Strength and Young's Modulus of Upper Cell Concrete



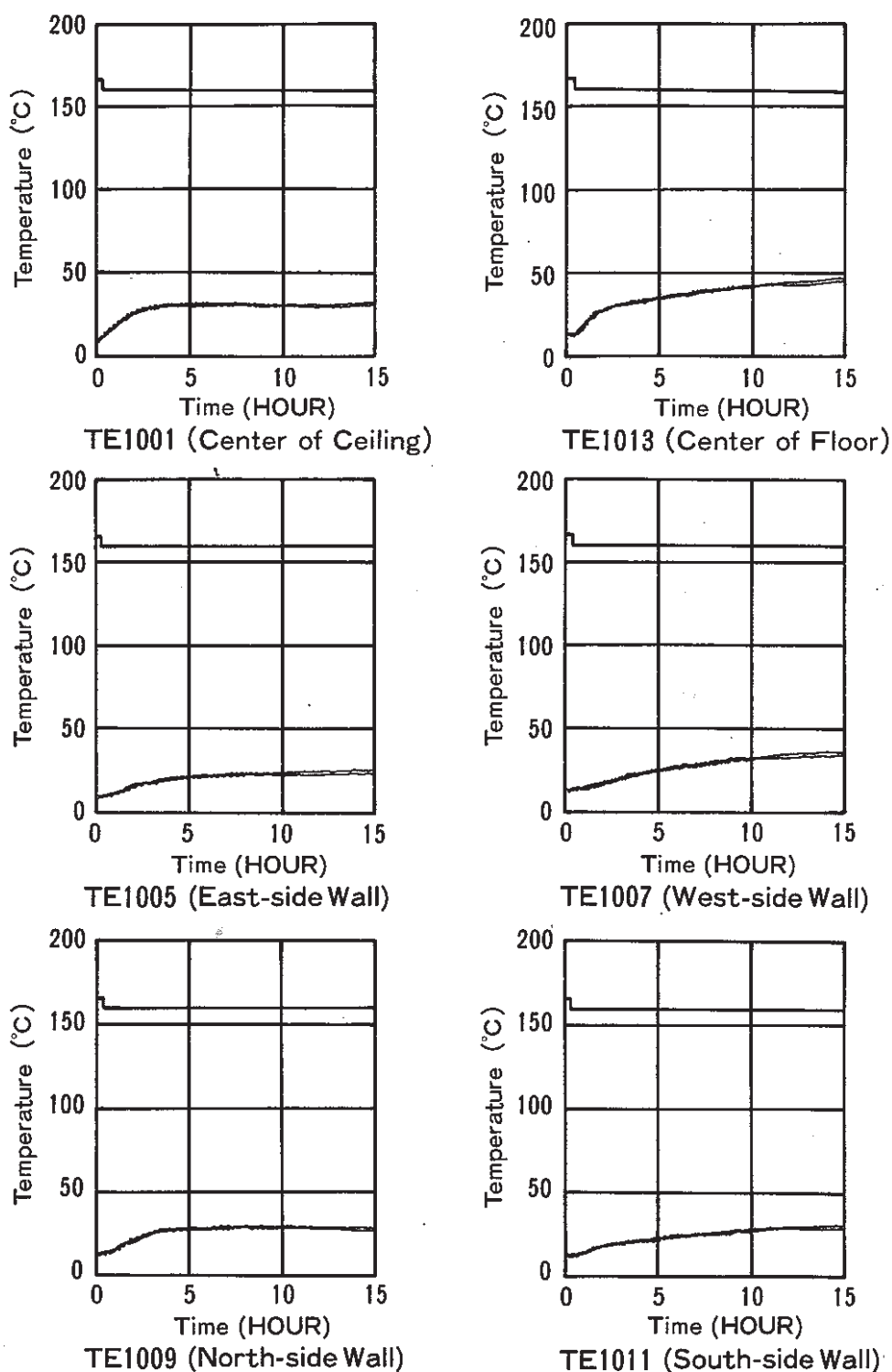


Fig.37 Temperature Changes of Lower Cell
Concrete during the Test
(At the point of 12mm from inner surface)

PSS-SFE-384

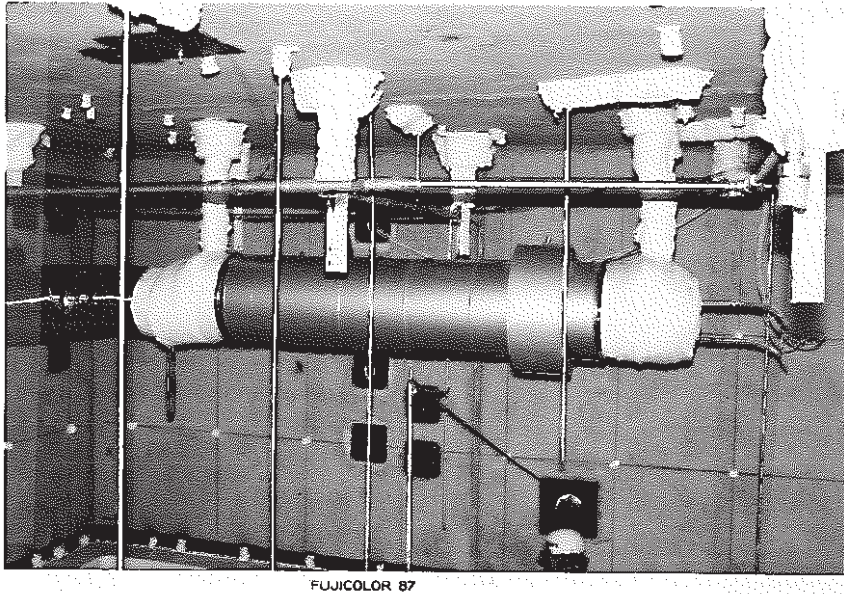


Photo. 1 : Simulated Sodium Pipe installed in the Upper Cell of SOLFA-1 (Pre-Test)

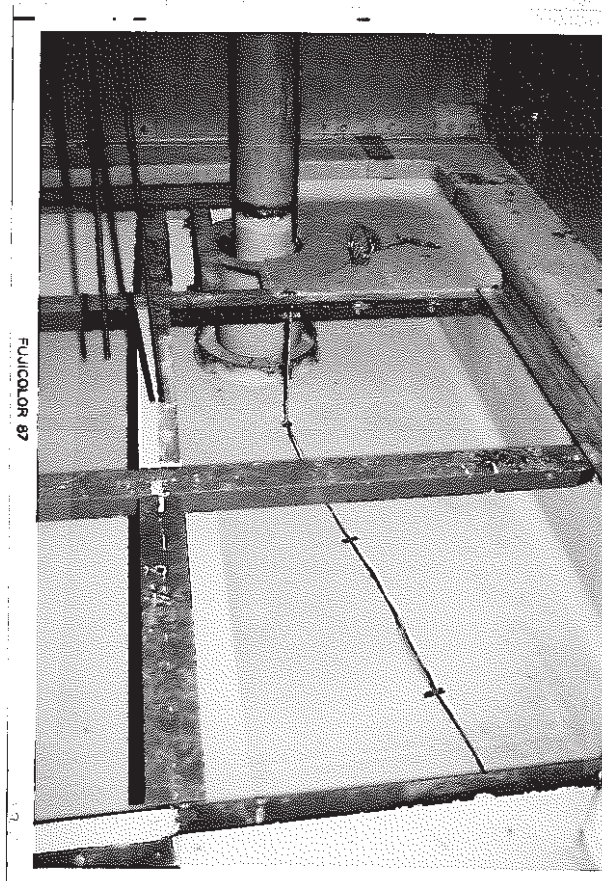


Photo. 2 : Arrangement of Drain Pipe and Smothering Tank

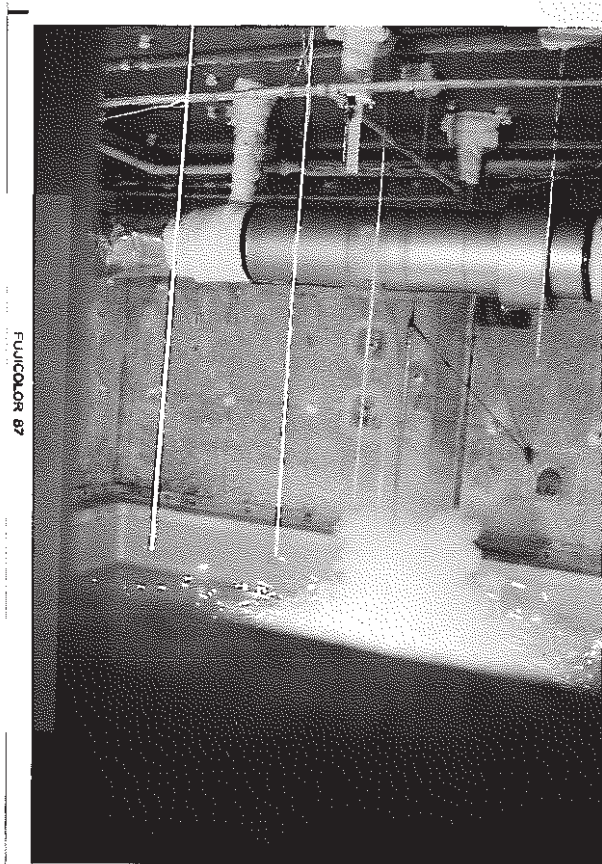
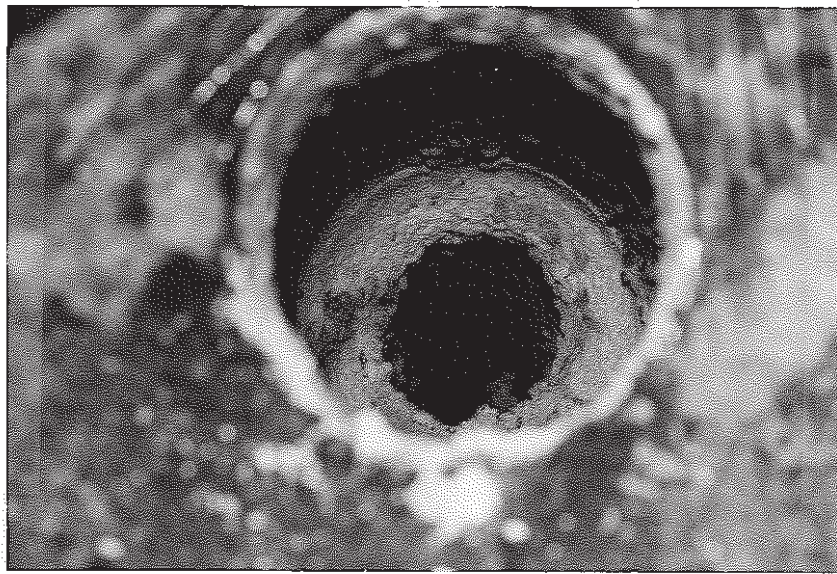


Photo. 3 : Sodium Leak at the
Beginning of the Test

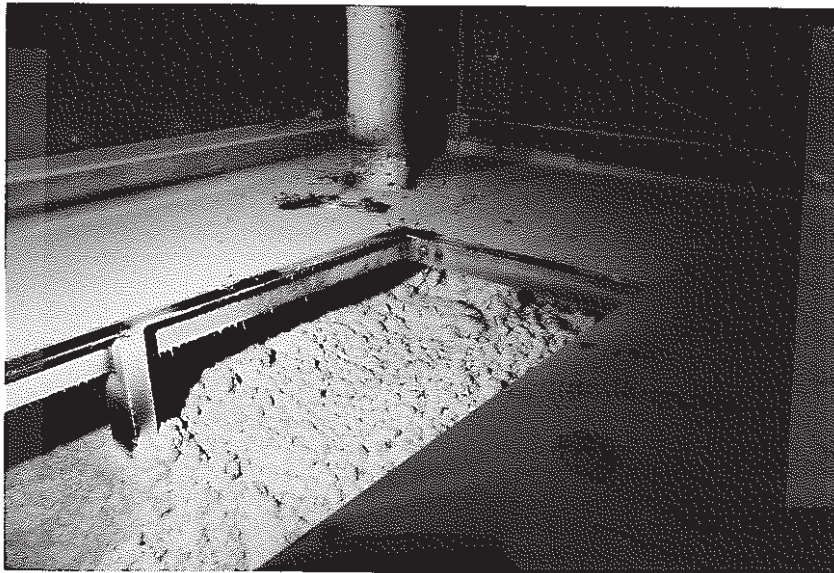


Photo. 4 : Post-Test View of
the Upper Cell of SOLFA-1



FUJICOLOR 87

Photo. 5 : Post-Test View of Inlet of Drain Pipe



FUJICOLOR 87

Photo. 6 : Post-Test View of Sodium and Its
Reaction Products in Smothering Tank
(A part of fire suppression board is removed
for Visual Inspection)



Photo. 7 : Post-Test View of wall Concrete
Surface in Upper Cell



Photo. 8 : Post-Test View of Simulated Sodium Pipe

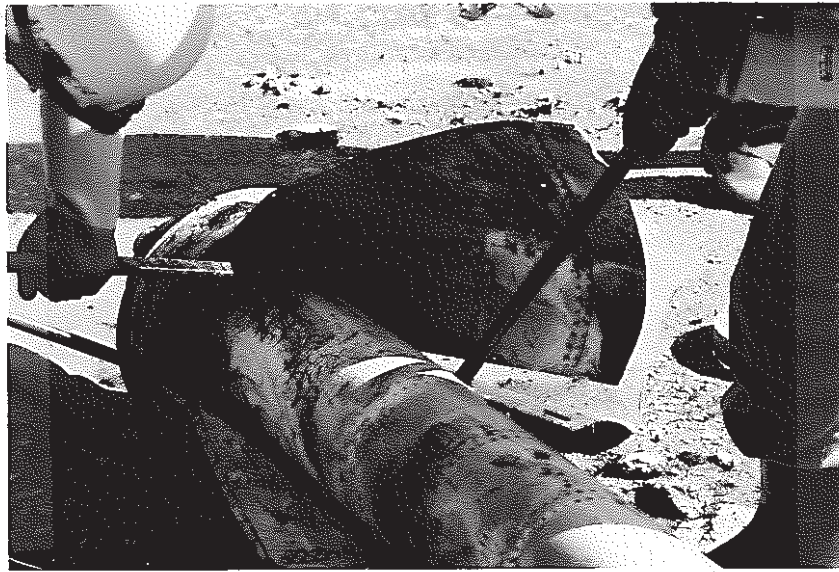
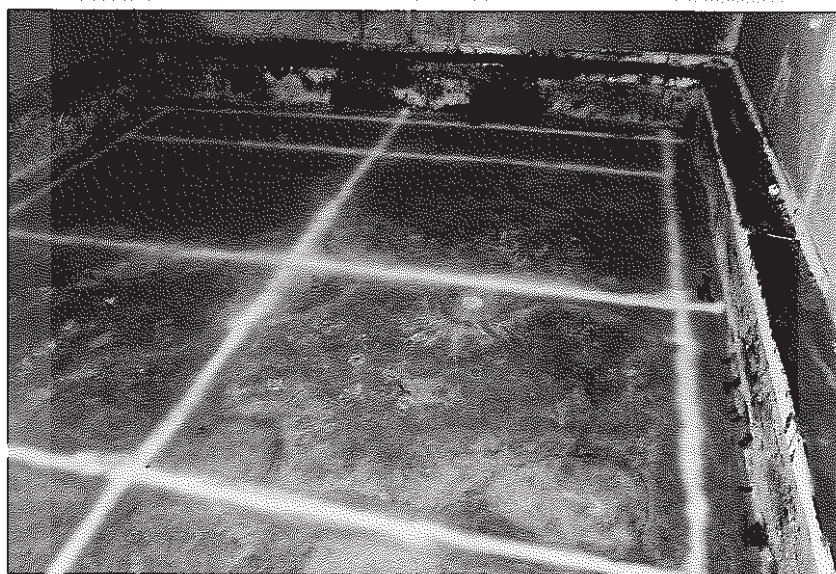


Photo. 9 : Disassembling of Simulated Sodium Pipe
after the Test

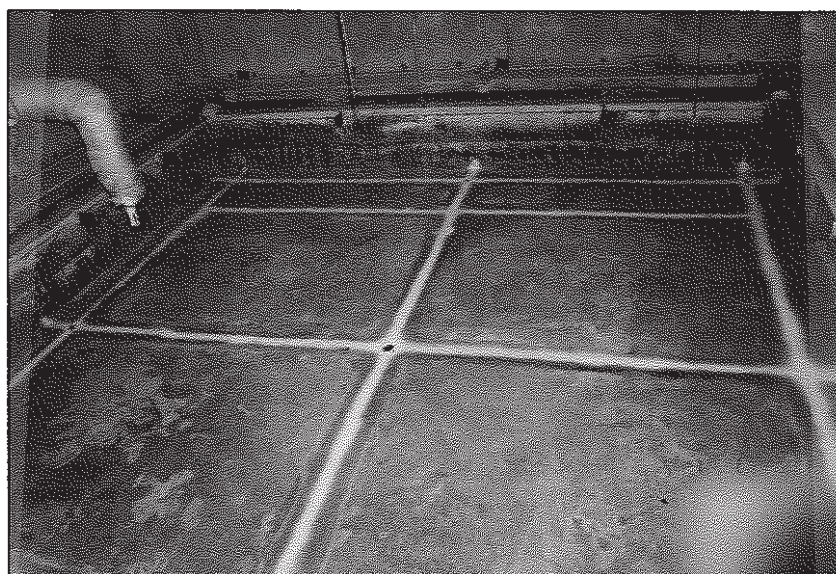


Photo. 1 0 : Post-Test View of Connecting
Pipe in Simulated Sodium Pipe



FUJICOLOR 87

Photo. 1 1 : Non-desructive Inspection of Weld Line
of Liner in Upper Cell after the Test .



FUJICOLOR 87

Photo. 1 2 : Non-desructive Inspection of Weld Line
of Liner in Lower Cell after the Test



Photo. 1 3 : Concrete Samples for measuring the Compressive Strength and the Young's Modulus