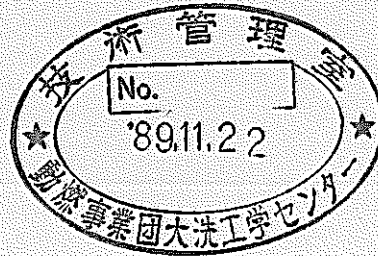


蒸気発生器の設計基準リーク低減のための試験研究

—伝熱管保護スリーブの破損伝播抑制効果確認試験—



1989年8月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 89-123
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

蒸気発生器の設計基準リーク低減化のための試験研究
－伝熱管保護スリーブの破損伝播抑制効果確認試験－

宇佐美 正行* 田辺 裕美*

黒羽 光男** 姫野 嘉昭*

要 旨

伝熱管溶接部からの水リークによる破損伝播を抑制するために、伝熱管保護スリーブを考案・試作し、その効果を試験で確認した。

試作した伝熱管保護スリーブは、①ターンバックル、②スペーサー、③防護用バンド状板から成り、材質はすべてSUS304である。伝熱管へは、幅30mmの防護用バンド状板を巻き付けて装着するが、ターンバックルおよびスペーサーを用いることで、短時間で容易に取付けられ、かつ溶接施工を必要としない構造となっている。

試験は、模擬欠陥孔を設けた伝熱管(Mod. 9Cr-1Mo鋼)に伝熱管保護スリーブを装着し、これに132kg/cm²gの蒸気を供給して行った。試験時のナトリウム温度は505℃である。

試験の結果から、伝熱管保護スリーブは、次のように破損伝播に対して効果的な抑制機能を有することが確認された。

1. 水リークが発生すると、伝熱管保護スリーブの両端部近傍ではナトリウム-水反応が生じ、このためにリーク伝熱管自体に2次的な損耗が起こるが、隣接伝熱管は、これによる貫通破損が起こるまでの間ウェステージされない。
2. 水リーク率が10g/sのとき、隣接伝熱管が破損するまでの時間は、伝熱管保護スリーブを装着しない場合の約6倍に遅延され、破損伝播が起こる前に水素計による水リーク検出（検出時間120秒以上）が十分可能となる。

伝熱管保護スリーブは、本試験によって、破損伝播を抑制するための有効な手段となることが実証された。しかし、その実用化には、耐久性や装着性などまだいくつかの課題がある。

* 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室

** (現) 本社 総務部訴訟対策室

August, 1989

Study to Decrease Design Basis Leak (DBL) in the FBR
Steam Generators (SG)

- Feasibility Test of Tube Protection Sleeve to Prolong
Failure Propagation -

Masayuki Usami* Hiromi Tmanabe*
Mituo Kuroha** Yoshiaki Himeno*

Abstract

In the present study, a tube protection sleeve was designed and manufactured as one of the positive measure against tube failure propagation. Its effectiveness was confirmed by water leak test in sodium.

The tube protection sleeve manufactured was made of (1) a turn buckle, (2) a spacer and (3) a belt that are made from SUS304 steel. It was attached to a heat transfer tube by a belt of 30mm in width. Its attachment is able to be done easily in short time and is not necessary to weld.

In the test, steam was fed to a tube attached by a tube protection sleeve in sodium. An artificial hole is drilled in the initial leak tube. Sodium temperature was 505°C at the test.

Results of the test revealed that the tube protection sleeve has enough function to postpone the failure propagation.

Major results are as follows:

1. Sodium - water reaction occurred near both ends of the tube protection sleeve. Nevertheless, neighboring tube was not wasted until the failure of the sleeve.
2. At the water leak rate 10g/s, the secondary failure was delayed to six times in comparison to a tube having no sleeve.

* FBR Plant Safety Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Litigation Support Office, Administration Division, Head Office, PNC.

Therefore, it is possible to detect water leak (normal detection time is over 120sec) well in advance to the secondary failure.

Effectiveness of the tube protection sleeve against the failure propagation was demonstrated by test. But, for its application to the SG component, several problems, such as durability and attachment property are still remained.

目 次

1. 緒論	1
2. 伝熱管保護スリーブの開発	2
2.1 考案・試作の条件	2
2.2 考案・試作した伝熱管保護スリーブの構造	2
2.3 伝熱管保護スリーブの装着方法	2
3. 伝熱管保護スリーブの破損伝播抑制効果確認試験	4
3.1 目的	4
3.2 試験装置と試験体	4
3.3 試験条件と試験方法	5
3.4 結果と検討	6
4. 結論	10
5. 課題	11
6. 参考文献	12

Appendix.1 Mod.9Cr-1Mo鋼伝熱管 検査証明書

Appendix.2 伝熱管保護スリーブ写真

Appendix.3 試験後注水伝熱管（保護スリーブ装着伝熱管）のウェステージマップ

Appendix.4 試験計測データ

図・表リスト

Table 3.3.1	試験計測一覧	1 3
Table 3.4.1	試験条件表	1 4
Table 3.5.1	伝熱管のウェステージデータ	1 5
Fig.2.2.1	伝熱管保護スリーブの試作仕様	1 6
Fig.2.3.1	伝熱管保護スリーブの装着説明図	1 7
Fig.3.2.1	SWAT-1 試験装置	1 8
Fig.3.2.2	SWAT-1 反応容器	1 9
Fig.3.2.3	伝熱管配列側板	2 0
Fig.3.2.4	伝熱管の配置と熱電対の取付位置	2 1
Fig.3.2.5	ピストン型注水管	2 3
Fig.3.4.1	水リーク検出特性図	2 4
Fig.3.5.1	注水試験時の伝熱管周辺温度（最高値）	2 5
Fig.3.5.2	注水試験時の注水管（リーク伝熱管）および伝熱管保護スリーブ部の温度	2 7
Fig.3.5.3	Run-4112試験時の伝熱管周辺の温度とウェステージ状況	2 9
Fig.3.5.4	Run-4113試験時の伝熱管周辺の温度とウェステージ状況	3 0
Fig.3.5.5	試験時の注水管、伝熱管保護スリーブ外表面温度およびウェステージ状況	3 1
Fig.3.5.6	リーク発生から2次破損に至るまでの時間と水リーク率変化	3 2

1. 緒 論

高速増殖炉用蒸気発生器はナトリウムと水の熱交換器であるため、万一、伝熱管に孔が開き水リークが発生すると、リークした水とナトリウムが激しく反応し、高温の腐食性反応生成物（NaOH、Na₂O等）ジェットが形成される。この反応生成物ジェットは、伝熱管をエロージョンおよびコロージョンによって損耗（ウェステージ）させ、ついには伝熱管を次々に破損させてリークが拡大し、大リークに進展する可能性がある。このため、蒸気発生器には水リーク検出システム（水素検出計）が設けられ、リークを早期に検出し、その拡大を防止する対策がとられている。

しかし、より積極的なリークの拡大防止対策、換言すれば2次的、3次的な伝熱管の破損伝播を大幅に遅延させることができる方策が施されれば、蒸気発生器の信頼性は飛躍的に向上する。

文献⁽⁵⁾によれば、伝熱管からの水リークは母材部で発生する可能性はほとんどなく、その大半は伝熱管溶接部で発生する。このため、溶接部に伝熱管の破損伝播を抑制するための効果的な方策を講じることができれば、有効なリーク拡大防止対策となる。

そこで、伝熱管保護スリーブを考案、試作し、破損伝播の抑制効果を確認するための試験を行なった。

なお、考案、試作した伝熱管保護スリーブは、本報の試験でその有効性が確認されたため、特許申請（管理No.D1421、特願昭61-181766号）した。

2. 伝熱管保護スリーブの開発

2.1 考案・試作の条件

伝熱管保護スリーブは、以下を考慮して考案・試作した。

- (1)高温の腐食性反応生成物ジェットに対し、十分な耐久性を有し、かつジェットを拡散させることが可能な構造であること。
- (2)溶接施工や機械的な加工を必要とせず、短時間で容易に装着できる構造であること。
- (3)振動および熱応力等によるゆるみが生じない構造であること。
- (4)低コスト化が望めること。

2.2 考案・試作した伝熱管保護スリーブの構造

Fig.2.2.1に試作した構造例を示した。同図の①～③は伝熱管保護スリーブの各構成要素で、①はターンバックル、②はスペーサー、③は防護用バンド状板である。また、④には伝熱管保護スリーブを装着したときの側面図および断面図である。

図において、防護用バンド状板は、漏洩水が直接隣接伝熱管に影響を与えないように伝熱管の溶接部全周にわたって巻かれている。ターンバックルは、防護用バンド状板およびスペーサーを伝熱管の溶接部周囲に固定するもので、振動等により固定がゆるまないよう平板を湾曲状に形成し、防護用バンド状板の折り返された巻き終り端部を押さえるための押え板部が設けてある。

2.3 伝熱管保護スリーブの装着方法

Fig.2.3.1に伝熱管保護スリーブの装着説明図を示す。

まず、防護用バンド状板の巻始め端部側をターンバックルの細長いスリット28に通してもとの方向に折り曲げる。この巻始め端部側は、図(B)の図示では、スペーサー24どうしの間隔よりも若干長い程度分スリット28を通過させて折り曲げ、スリット28を通過させた端部側は隣接のスペーサー24に通しておく。

次いで、防護用バンド状板を伝熱管の周りに一周させる。その間に複数個のスペーサー24も等間隔に配置する。巻終わり端部側も前記の細長いスリット28を通過させる。巻終わり端部側を引っ張っての防護用バンド状板の引締めは、前述の巻始め端部側の折

り目を固定点として、バンド引締め用の特別の用具を用いて行なう。引締め後、巻終わり端部側も、元の方向に折り返す。この巻終わり端部側は、ターンバックルに設けた押え板部25による折り曲げ押えによって、平板湾曲状のターンバックル基体側と、折り曲げられた押え板部25間に圧接して固定する。

図示した試作例では、防護用バンド状板22およびターンバックルとして、SUS304材を使用している。

スペーサー24は、漏洩した水を伝熱管21と防護用バンド状板22との間に拡散させる間隙を形成するためのもので、図(B)に示すように偏平形状のリング状部材からなり、防護用バンド状板22が偏平形状のリング孔内に挿入され、またターンバックルにおいては、ターンバックル23に設けた2つの孔29を通してスペーサー24が装着される。複数個の偏平形リング状部材のスペーサーのうち、ターンバックルの2つの孔29を通して装着されるスペーサーは、装着のためリング周の適宜箇所に分断部が設けられている。こうして伝熱管の全周にわたって、防護用バンド状板との間に間隙が形成される。なお、スペーサー24は本考案において重要な役目を果たし、このスペーサーの形状により拡散する漏洩水の形態が変わる。図示した試作例は、スペーサー24としてSUS304の材質で、2.0mmφのものを8本用い等間隔に配置した伝熱管保護スリーブで、この場合の伝熱管と伝熱管保護スリーブ間の間隔(ギャップ)は、狭い部分(スペーサー24間の中央部)で約1.0mm、広い部分(スペーサー24付近)で約2.0mmである。

3. 伝熱管保護スリーブの破損伝播 抑制効果確認試験

3.1 目的

試作した伝熱管保護スリーブについて、次の4項目を実験的に明らかにする。

- (1)伝熱管保護スリーブ装着時の隣接伝熱管への影響
- (2)伝熱管保護スリーブを装着したリーク伝熱管の自損状況
- (3)プラント保護操作に与える時間的余裕
- (4)ナトリウム-水反応環境下での伝熱管保護スリーブの健全性

3.2 試験装置と試験体

試験装置には、Fig.3.2.1に示す大リーク・ナトリウム水反応試験装置SWAT-1を用いた。SWAT-1の反応容器は、原型炉蒸気発生器の1/7スケール・モデルで、Fig.3.2.2に示すように内径400mmφ×高さ2580mmであり、5Bの放出系配管および内容積1.2m³の収納容器が接続されている。

試験体は、伝熱管の配列ピッチを54mm×50mmとしたFig.3.2.3の伝熱管配列側板を用い、初期リーク管を模擬した伝熱管保護スリーブ付きの注水管1本と、ガス加圧管（伝熱管の破損を圧力計で検知するために、約10kg/cm²gのN₂ガスを加圧）2本およびダミー管（両端開放の伝熱管）21本の合計24本で構成した。これらの伝熱管の配置と伝熱管表面温度計測用熱電対の配置をFig.3.2.4に示す。

伝熱管材は、Mod.9Cr-1Mo鋼（^{OD}31.8mmφ×3.2mm^t）のNT（焼きならし、焼きもどし）処理材を用いた。購入時の検査証明書をAppendix.1に示す。

注水管は、Fig.3.2.5に示す0.8mmφのリーク孔を有するピストン型を用いた。この型は、注水管に流入する水/蒸気の圧力によって内部のピストンを作動させ、これにより注水ノズルを破断させることでナトリウム中に水/蒸気を噴出する構造である。この型の注水管を採用した理由は、リーク孔から噴出した水/蒸気が、リーク孔周囲に装着した伝熱管保護スリーブによって反射、拡散され、その影響で注水管自体がウェステージされる可能性があるために、その調査用として反射、拡散した水/蒸気の流れを阻害することのない型を用いる必要があったためである。

本試験の計測項目とそれらの測定位置等をTable 3.3.1に示す。主な計測項目は次のとおりである。

－温度－

- 反応域および注水伝熱管を含むターゲット伝熱管表面での温度分布を調べて、ウェステージ現象との関連を見るもので47点。

－圧力－

- ターゲットとなる隣接伝熱管のウェステージによる貫通破損検知用として1点。
- ナトリウム－水反応時の、反応容器ナトリウム中およびカバーガス中の圧力測定用として3点。
- ラプチャーディスク破裂検知用として1点。

これ以外に、試験時の注水率を求めるための各種計測器や試験装置を運転するための温度、圧力センサーを配置している。

3.3 試験条件と試験方法

要素技術設計研究(Ⅱ)⁽¹⁾では、原型炉の水素計をベースにした水リーク検出特性解析が行われ、Fig.3.4.1に示す初期リーク率に対する隣接伝熱管の破損時間と検出時間の関係が得られている。

そこで、この解析結果を参考に、水リーク率はリーク検出時間よりも隣接伝熱管の破損時間の方が速くなる10.0g/sを、注水時間はこのときの検出時間に相当する120sを試験条件として選定した。ただし、注入する水/蒸気圧力およびナトリウム温度は、Mod.9Cr-1Mo鋼を用いることで可能となる蒸気発生器の高温指向を想定し、それぞれ132kg/cm²g、505℃とした。これは、従来の知見でサブクールや飽和域よりもウェステージの進行が速いとされている過熱蒸気域（蒸気発生器の水/蒸気出口付近）に着目し、そこで想定される値として設定したものである。

試験は、装置の水加熱器の運転条件を温度331℃、圧力132kg/cm²gの飽和水とし、水加熱器から反応容器に至るまでの水系配管および反応容器内のナトリウムにより加熱して、注水管のノズル(リーク孔)から噴出する蒸気が過熱蒸気になるようにした。

Table 3.4.1に本試験の条件を示す。

3.4 結果と検討

(1) 隣接伝熱管への影響

ウェステージは、エロージョンとコロージョンの複合作用で進行する。従って、ウェステージを受ける伝熱管やその進行で貫通破損に至る伝熱管の割合は、ナトリウム-水反応によって生じる高温の腐食性反応生成物域（以下、高温反応域）の大きさによって変わる。

ここでは、伝熱管束各部の外表面温度の測定結果から、伝熱管保護スリーブを注水管に装着したときの高温反応域の分布を、装着しない場合の分布と比較することによって隣接伝熱管への影響を検討する。

伝熱管保護スリーブを装着した場合の、隣接する伝熱管の外表面部の温度分布（注水120s間中の最高値）をFig.3.5.1に、注水管（リーク伝熱管）本体部の温度変化をFig.3.5.2に示す。隣接する伝熱管の周辺は15~20℃程度の温度上昇にとどまっているが、注水管近傍では、その一部が著しい温度上昇を示している。

これを比較するために、Fig.3.5.3およびFig.3.5.4に、これまでに行った伝熱管保護スリーブを装着していないRun-4102、Run-4103試験の温度分布を示す。両試験は、ともに2¼Cr-1Mo鋼を試験材に用いており、伝熱管配列ピッチ（軸/周方向）は40mm/45mm、水リーク率は10g/sで、ターゲットとなる伝熱管に衝突する反応生成物ジェットの角度（注水角度）が異なること以外は同じ条件で行なわれている。ただし、比較した本試験とは初期ナトリウム温度が約100℃（本試験の505℃に対して、Run-4102、4103試験は約400℃）異なる。図から、反応生成物ジェットの衝突する方向に位置した伝熱管（No.13, 18, 19）が部分的に高温反応域下におかれ、Run-4102試験で最高200℃、Run-4103試験で170℃の温度上昇が見られる。また、測定データはないが、ウェステージされている部分は、更に高温になっているものと推定する。

これに比べて、伝熱管保護スリーブを装着した場合の隣接伝熱管周辺の温度上昇は、約1/10であり、高温反応域が存在しないことがFig.3.5.1から分かる。また、隣接伝熱管のウェステージが皆無であったのに対し、伝熱管保護スリーブを装着していないRun-4102およびRun-4103試験では、Fig.3.5.3、Fig.3.5.4に示すように各2本の隣接伝熱管がウェステージを受け、伝熱管の膨張（ともにNo.19）や貫通破損（ともにNo.13）に至っている。

これらの結果から、伝熱管保護スリーブが隣接伝熱管へのウェステージ（破損伝播）

に対して効果的な抑制機能を有していることが明らかになった。

(2) 注水管（リーク伝熱管）の自己損耗

水リーク率0.1g/s以下の微小リーク域では、伝熱管内の水/蒸気が管外のナトリウム中にリークするときに、反応界面が伝熱管の外表面近傍に形成されて、リーク位置の壁面の自己損耗を引き起こし、セルフ・ウェステージと呼ばれるリーク孔の拡大現象が生じる。しかし、水リーク率が0.1g/sを越えると、高温反応域が拡大し、反応界面も隣接伝熱管側に移動するため、水リーク率が10.0g/sの本試験のようなケースでは、セルフ・ウェステージよりも、むしろターゲット・ウェステージ（隣接伝熱管の損耗）が支配的となる。伝熱管保護スリーブを装着することによって、このターゲット・ウェステージは抑制できるが、注水管にはセルフ・ウェステージ現象とは異なるメカニズムによる自己損耗現象が生じる。ここでは、この現象を自己2次損耗と称し、これをナトリウム-水反応時の注水管近傍の温度とウェステージから、伝熱管保護スリーブを装着したことによる注水管自体への影響を検討する。

Fig.3.5.2に示した注水管近傍の温度データから、リーク位置の周方向148°で著しい温度上昇（リーク位置から軸方向に20mm離れた外表面部で500℃以上、50mm離れた外表面部で200℃～400℃）が見られる。これ以外の周方向位置では、最高100℃程度の極めて低い温度上昇である。また、148°方向で測定した伝熱管保護スリーブ外表面温度とAppendix.3のウェステージマップから、伝熱管保護スリーブが装着されている伝熱管の軸方向30mmの範囲ではナトリウム-水反応は生じていない。

Fig.3.5.5に、注水管と伝熱管保護スリーブの外表面で測定した最高温度と注水管の自己2次損耗状況の関係図を示す。

図から、①リーク孔から噴出した水/蒸気は、伝熱管保護スリーブの防護用バンド状板で反射され、流れ方向をスペーサーが伝熱管の軸方向に沿うように変えている、②スペーサーで区切られた148°方向の伝熱管保護スリーブ両端部近傍でのみ、ナトリウム-水反応が生じている、などが確認される。

伝熱管保護スリーブ両端で起こる自己2次損耗のウェステージ率は、(3.1)式により求められ、Mod.9Cr-1Mo鋼を用いた本試験（水リーク率10.0g/s）の場合は 1.61×10^{-2} mm/sである。また、自己2次損耗が生じてから貫通破損に至るまでの時間は、伝熱管の内圧ラプチャーが肉厚の10%⁽²⁾で起こると仮定すると、(3.2)式から約180s.となる。

$$W_R = \frac{t_0 - t_a}{\tau} \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

ただし、 W_R ：ウェステージ率(mm/s.)
 t_0 ：伝熱管の初期肉厚(mm)
 t_a ：試験後の肉厚(mm)
 τ ：試験注水時間(s.)

$$T_B = \frac{3.2 \times 0.9}{W_R} \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

ただし、 T_B ：自己2次損耗による貫通破損時間(s.)
 W_R ：(3.1)式で得たウェステージ率(mm/s.)

ただし、ここで得た自己2次損耗のウェステージ率は、限られた条件下での結果であり、水リーク率の大きさや伝熱管の材料によって変わることが十分予想される。

(3) プラント保護操作に与える時間的裕度

伝熱管保護スリーブを装着しない場合、隣接伝熱管へのウェステージは、リークが発生した時点から開始されるため、蒸気発生器で起こる水リークの規模（伝熱管の破損伝播による水リーク率の増大）は、伝熱管材料の持つ耐ウェステージ性と水リーク検出システムの検出特性によって決まる。

現状の水リーク検出システムで最も高い信頼性を有する水素計による検出は、Fig. 3.4.1に示したように、初期の水リークが7.0g/sを越えていると、リーク検出時間よりも隣接伝熱管の破損時間の方が早くなる。そのため、伝熱管の破損伝播を防止することができなくなり、水リーク率の増大を許容することになる。従って、この領域において水リーク規模を最小限（たとえば、初期リークのみ）に抑えようとする、数10秒で貫通破損に至る伝熱管の2次破損を遅延させる対策が必要となる。

本報の伝熱管保護スリーブはこれを狙ったもので、ここでは試験の結果を基に、水素計と併用した場合の伝熱管保護スリーブの効果について検討する。

Fig. 3.5.6に、リーク発生後の水リーク率の変化を、これまでのR & Dおよび本試験の結果から伝熱管保護スリーブを装着した場合と装着しない場合について比較して示した。ここで、初期リークは、本試験と同じ10.0g/sとした。隣接伝熱管の2次破損時間

(T_w) は、(3.3)式のMod.9Cr-1Mo鋼実験整理⁽³⁾を用いて、(3.4)式から求めた。自己2次損耗による貫通破損時間(T_p)は(3.2)式で得た時間、水素計の応答時間(T_o)はFig.3.4.1から得られる水リーク率10g/s相当の検出時間である。

$$W_r = \frac{3.63}{L^{1.37}} \exp\left\{-0.265\left(\ln \frac{G}{6.25}\right)^2\right\} \quad \text{----- (3.3)}$$

ただし、 W_r : Mod.9Cr-1Mo鋼のウェステージ率(mm/s)
 L : ウェステージ率が最大になる伝熱管の間隔(16.2mm)
 G : 水リーク率(10g/s)

$$T_w = \frac{3.2 \times 0.9}{W_r} \quad \text{----- (3.4)}$$

ただし、 T_w : 隣接伝熱管の2次破損時間(s)
 W_r : (3.3)式で得たウェステージ率(mm/s)

伝熱管保護スリーブを装着しない場合は、隣接伝熱管はリーク発生から38秒後に2次破損に至るため、それ以前に水素計でリークを検出することは不可能で、2次破損の状況(2次リーク孔径の大きさなど)によっては、3次、4次的な破損伝播に進展する可能性がある。伝熱管保護スリーブを装着した場合は、リーク伝熱管の自己2次損耗による貫通破損が生じて初めて隣接伝熱管へのウェステージが開始され、またこの時のリーク発生から隣接伝熱管が2次破損に至るまでの時間は、リーク伝熱管の自己2次損耗による貫通破損時間180秒と隣接伝熱管の2次破損時間38秒(自己2次損耗による貫通破損の結果生じる水リークを、初期リーク率相当として仮定)を合わせた218秒となるので、破損伝播が起こる前に水素計による水リーク検出(120秒以上)が十分可能となる。

(4) 試験後伝熱管保護スリーブの検査結果

試験前後の伝熱管保護スリーブの装着状態を、Appendix.2の写真(1)、(2)に示す。

防護用バンド状板は、リーク位置付近にかなりの変形が見られたが、ウェステージによる損耗や高圧水/蒸気による損傷などは認められていない。

ターンバックルおよびスペーサーは、変形もなく健全である。

伝熱管保護スリーブの装着状態は、ゆるみ等もなく試験前の状態と大差ない。

4. 結論

伝熱管保護スリーブの試作品を用いて実施した確認試験（試験材:Mod.9Cr-1Mo鋼、3.2mm^t）で、次のことを明らかにした。

- (1) リークした水/蒸気は、伝熱管保護スリーブによって伝熱管の軸方向に拡散される。そのため、反応生成物ジェットが形成されなくなり、ウェステージが生じる高温の腐食性反応生成物域は存在しなくなる。
- (2) 伝熱管保護スリーブ装着部で水リークが発生すると、リークした伝熱管の伝熱管保護スリーブ両端部近傍でナトリウム-水反応が生じ、自己2次損耗が起こる。
- (3) 自己2次損耗のウェステージ率は、水リーク率10.0g/s.の場合 1.61×10^{-2} mm/s.であり、約180秒で自己2次損耗による貫通破損（内圧ラプチャーを肉厚の10%で考慮）が起こる。
- (4) 伝熱管保護スリーブを装着した場合、隣接伝熱管はリークした伝熱管の自己2次損耗による貫通破損が生じるまでの間ウェステージされない。
- (5) 隣接伝熱管は、水リーク率10.0g/s.のとき、リーク発生から38秒後に2次破損（内圧ラプチャーを肉厚の10%で考慮）に至るが、伝熱管保護スリーブを装着するとこれは218秒後まで遅延され、破損伝播が起こる前に水素計による水リーク検出（検出時間120秒以上）が十分可能となる。

5. 課題

試作した伝熱管保護スリーブは、伝熱管の破損伝播に対して有効な抑制効果を有することが確認されたが、実用化するためには以下の課題を解決する必要がある。

- (1) 水リーク率の変化に対する自己2次損耗のウェステージ率
- (2) 自己2次損耗をできる限り小さく抑えるための適切な伝熱管保護スリーブの仕様
- (3) 長期使用の際の熱的影響および振動などに対する装着性
- (4) 中～大リーク発生時のナトリウム-水反応環境下における健全性

6. 参考文献

- (1) 要素技術設計研究 (Ⅱ)
大型炉の関する設計研究に伴う設備設計役務 (2)
- 2次輸送系設備等 - (1986年.3月)
- (2) 田辺裕美、錦見正和、山田敏雄、佐々木和一、渡辺智夫、佐藤稔
「高速炉蒸気発生器伝熱管の中リークウェステージ試験」
PNC SN941 80-27 (1980年.2月)
- (3) 宇佐美正行、田辺裕美、姫野嘉昭
「高クロム系SG伝熱管材のウェステージ特性」
PNC SN9410 88-129 (1988年.10月)
- (4) 藤井啓次、佐藤稔、田辺裕美、大後美道
「高速炉蒸気発生器伝熱管の中リーク・ウェステージ破損伝播試験 (Ⅱ)」
PNC SN941 83-38 (1983年.3月)
- (5) 動燃-原電共同研究報告書
2次系削除型蒸気発生器の要素試験研究 (Ⅰ)
PNC SY9410 88-005 (1988年.3月)

Table 3.3.1 試験計測一覧

測定位置	計測項目	計測点数	Tag. No.	備考
水加熱器	温度	1	T-WH	内部温度
	圧力	1	P-WH	
	液位	1	L-WH	注水量の測定
水系配管	温度	2	T5001, T5003	
	圧力	2	P5001, P5003	
反応容器	温度	1	T-EV	トリウム温度
	圧力	3	P-EV, P1101 P1108	加圧ガス中および トリウム中圧力
収納容器	圧力	1	P-RT	
試験体部	加圧管圧力	1	P5201	伝熱管破損検知用
	反応温度	47	T1101~T1147	
放出系配管	ラヂオアイ ス破裂	1	R-1D	

Table 3.4.1 試験条件表

系統	試験条件項目	条件値	備考	
水系	水加熱器 圧力	kg/cm ² g	132	} 飽和条件
	同上 温度	°C	331	
	同上 初期貯水量	kg	18	
	水系配管 予熱温度	°C	480	
	ラプチャーディスク設定圧力	kg/cm ² d.	70	R-0a 反転型
	水リーク率	g/s.	10.0	リーク孔径:0.8mmφ
	試験注水位置	mm	1120	反応容器底部から
	注水時間	s.	120	*1)
ナトリウム系	反応容器 ナトリウム温度	°C	505	T-EV
	同上 ナトリウム液レベル	mm	1500	反応容器底部より
	同上 初期カバーガス圧力	kg/cm ² g	~ 0.5	P-EV
放出系	収納容器 予熱温度	°C	350	
	同上 初期カバーガス圧力	kg/cm ² g	~ 0.5	P-RT
	放出系配管 予熱温度	°C	350	
	放出系配管ラプチャーディスク設定圧力	kg/cm ² d	3.0	R-1D
	収納容器ラプチャーディスク設定圧力	kg/cm ² d	1.5	R-2
試験体	ターゲット伝熱管内部圧力	kg/cm ² g	10	*2) P-5201 (伝熱管No.12,13)

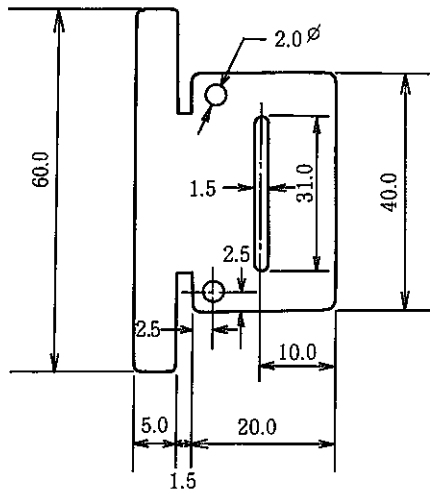
*1): 水リーク率10g/s. のときの水素計での検出時間相当(要素技術設計研究(Ⅱ)による)

*2): 試験時圧力、No.12, 13伝熱管は同一ヘッダー

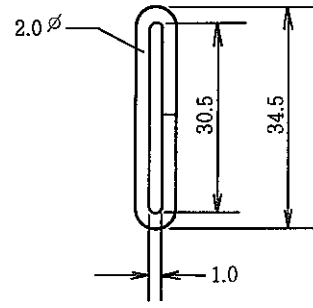
Table 3.5.1 伝熱管のウェステージデータ

試験No.	試験鋼種	伝熱管 No.	注水管との関係	L (mm)	L/D (-)	ジェットからのずれ (°)	伝熱管の貫通破損の有無	最大ウェステージ深さ (mm)	注水時間 (s.)	ウェステージ率 $\times 10^{-2}$ (mm/s.)
Run-4102	2¼Cr-1Mo鋼	13	隣接伝熱管	23	29	3	有	2.97	57.2	5.19
		19	〃	81	101	16	無	0.269	61.3	0.439
Run-4103	2¼Cr-1Mo鋼	12	注水管本体	—	—	—	無	0.177	186.0	0.0952
		13	隣接伝熱管	25	31	5	有	2.97	181.0	1.64
		19	〃	81	101	8	無	1.889	186.0	1.02
S-101	Mod. 9Cr-1Mo鋼	9	注水管本体	—	—	—	無	1.931	120.0	1.61

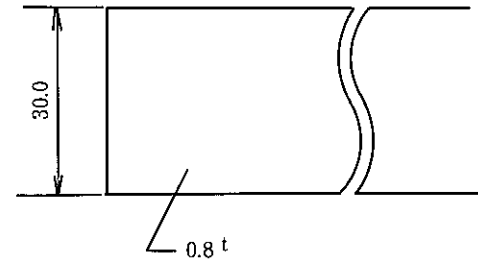
- 注) ① S-101: 本報の伝熱管保護スリーブ確証試験
 ② L : リーク孔～伝熱管の最大ウェステージ深さまでの距離
 ③ L/D : ①/リーク孔径
 ④ ジェットからのずれ: 注水方向と最大ウェステージ点のずれ角度
 ⑤ ウェステージ率: 最大ウェステージ深さ/注水時間



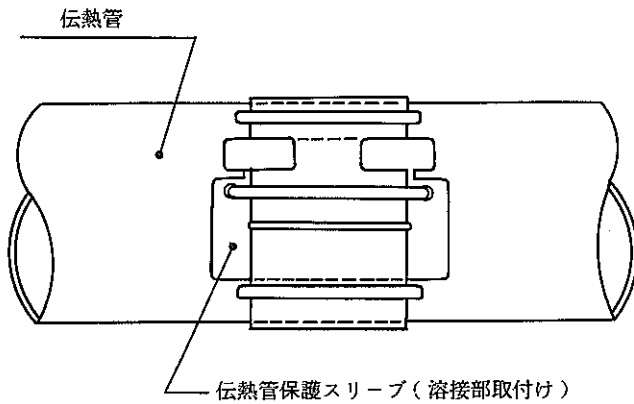
① 部品図



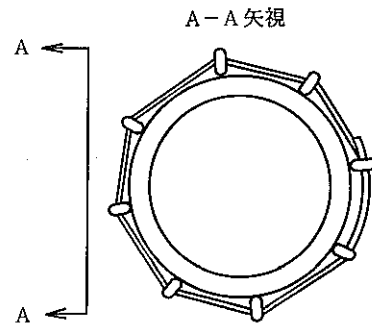
② 部品図



③ 部品図



④ 装着図(側面および断面図)



No.	名称	材質・仕様
①	ターンバックル	SUS304 2.0 t
②	スペーサー	" 2.0φ
③	防護用バンド状板	" 0.8 t

Fig. 2. 2. 1 伝熱管保護スリーブの試作仕様

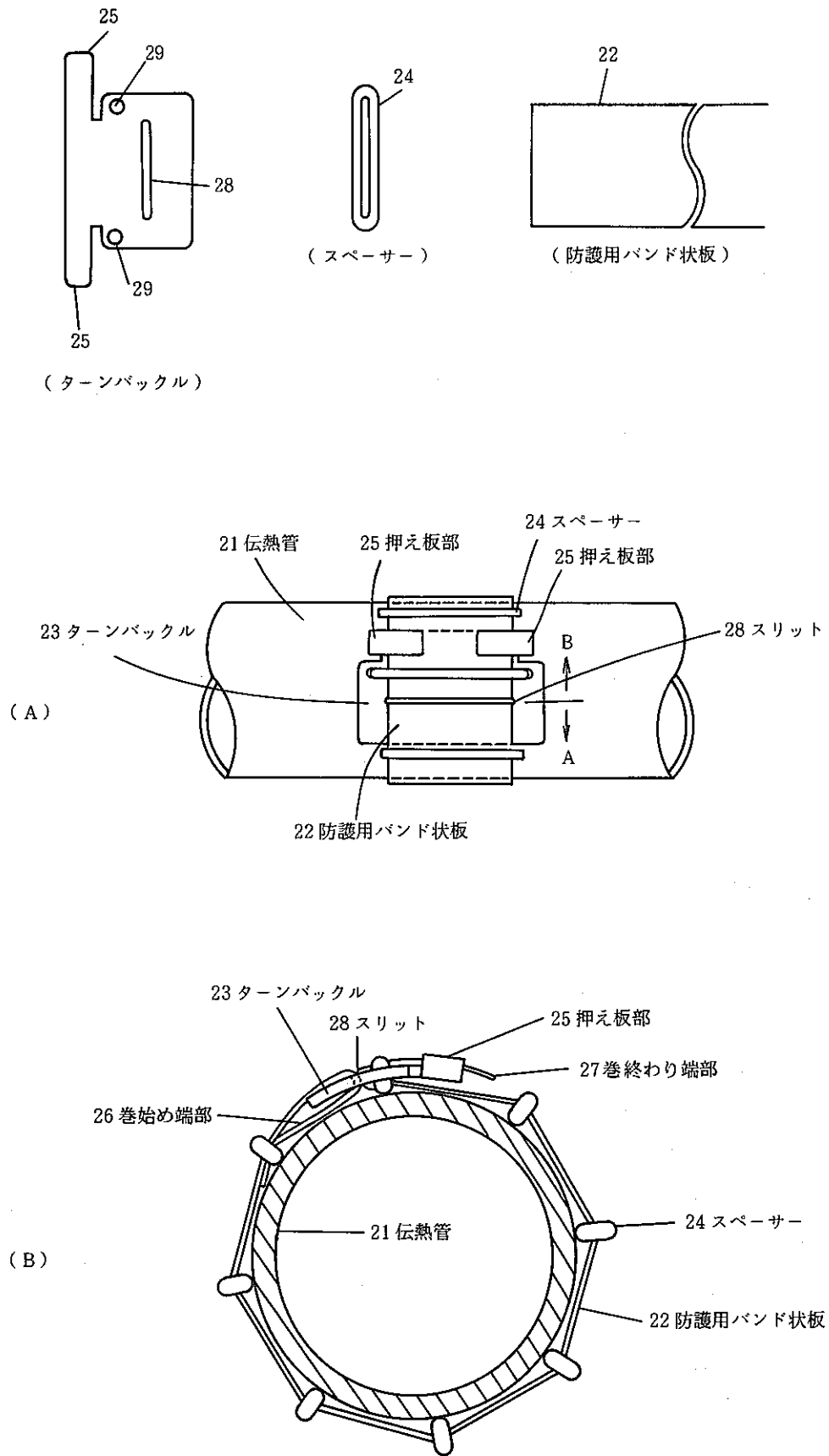


Fig. 2. 3. 1 伝熱管保護スリーブ装着説明図

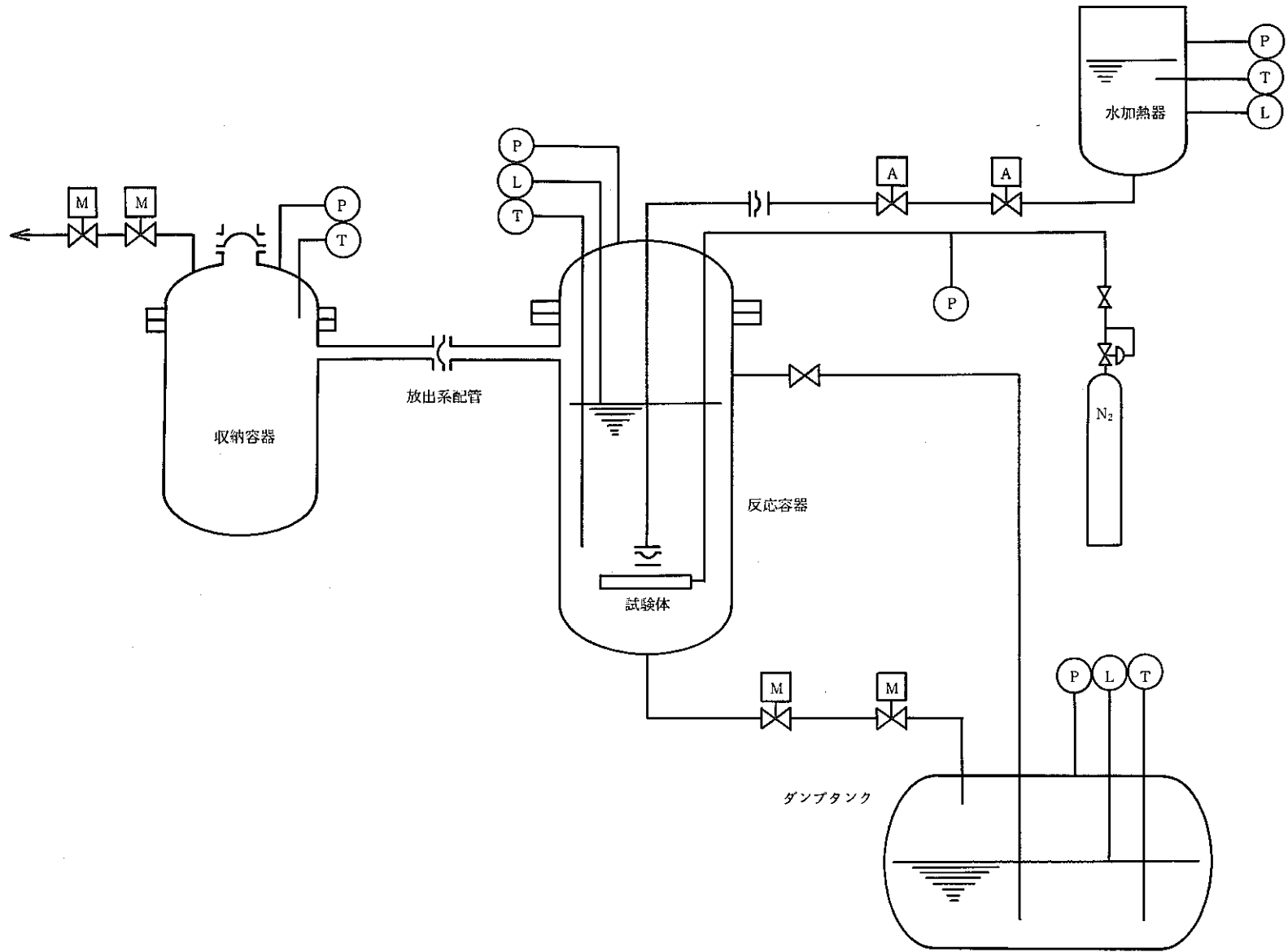


Fig. 3.2.1 SWAT-1 試験装置

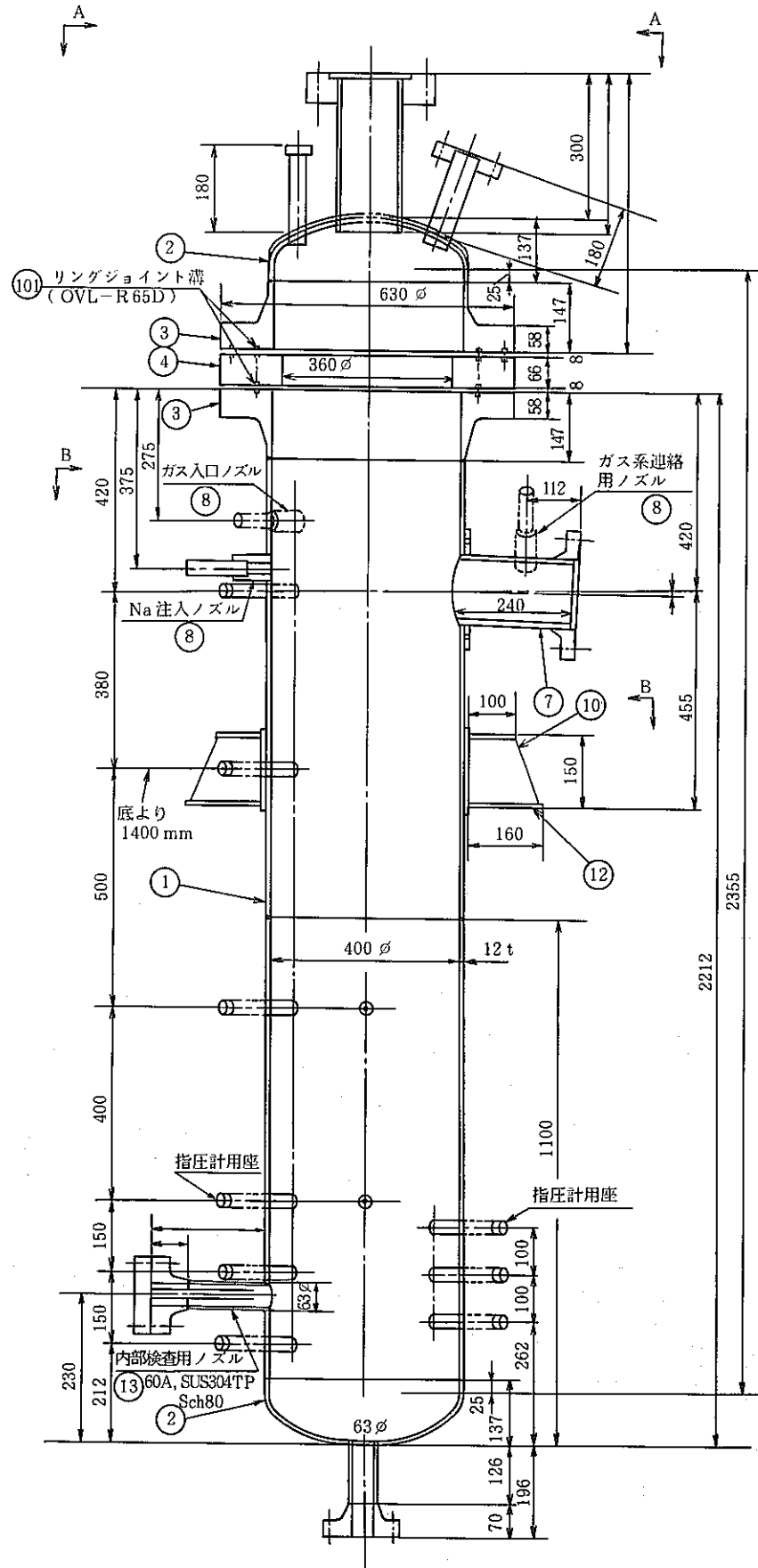


Fig. 3.2.2 SWAT-1 反応容器

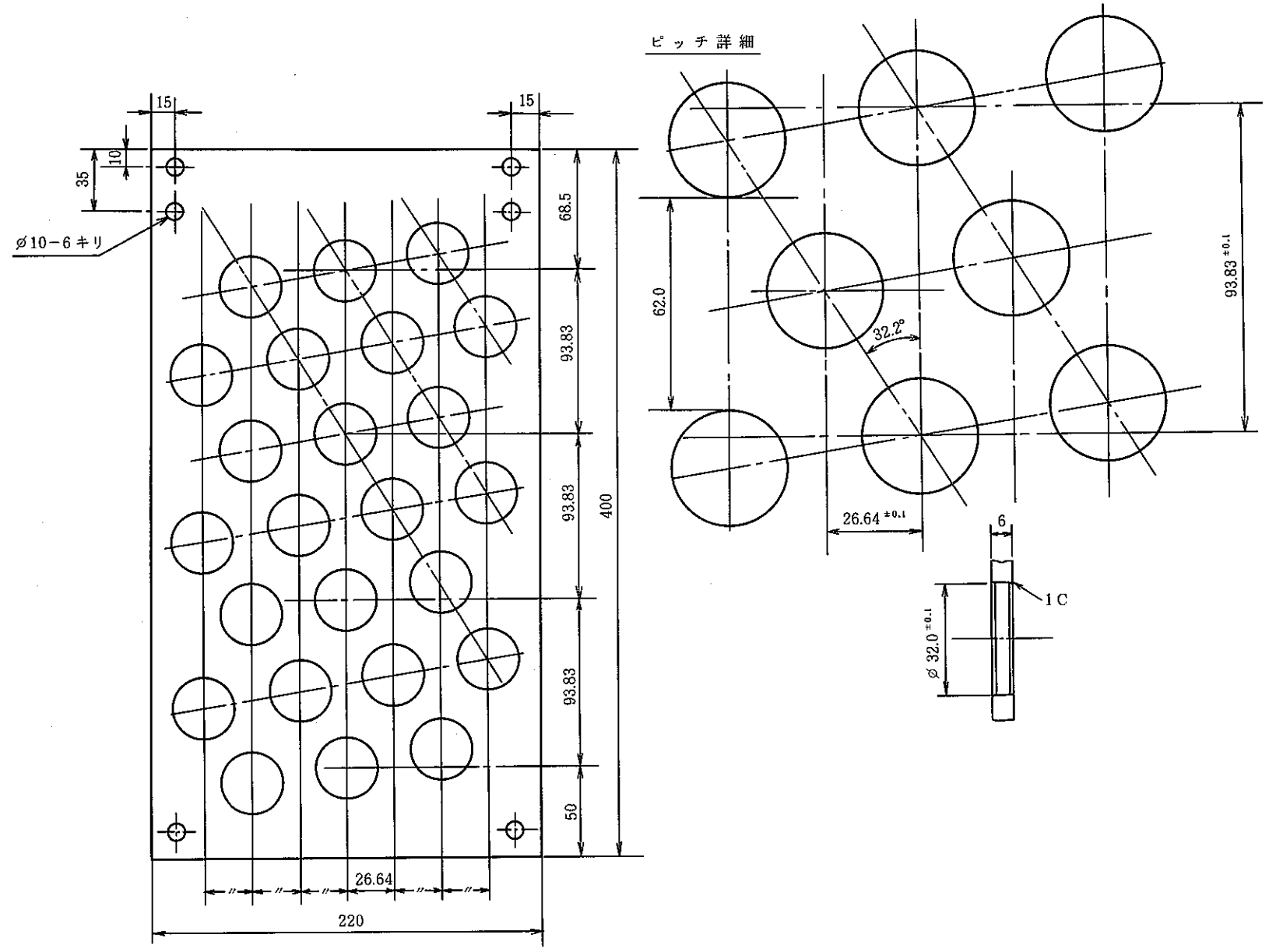


Fig. 3.2.3 伝熱管配列側板

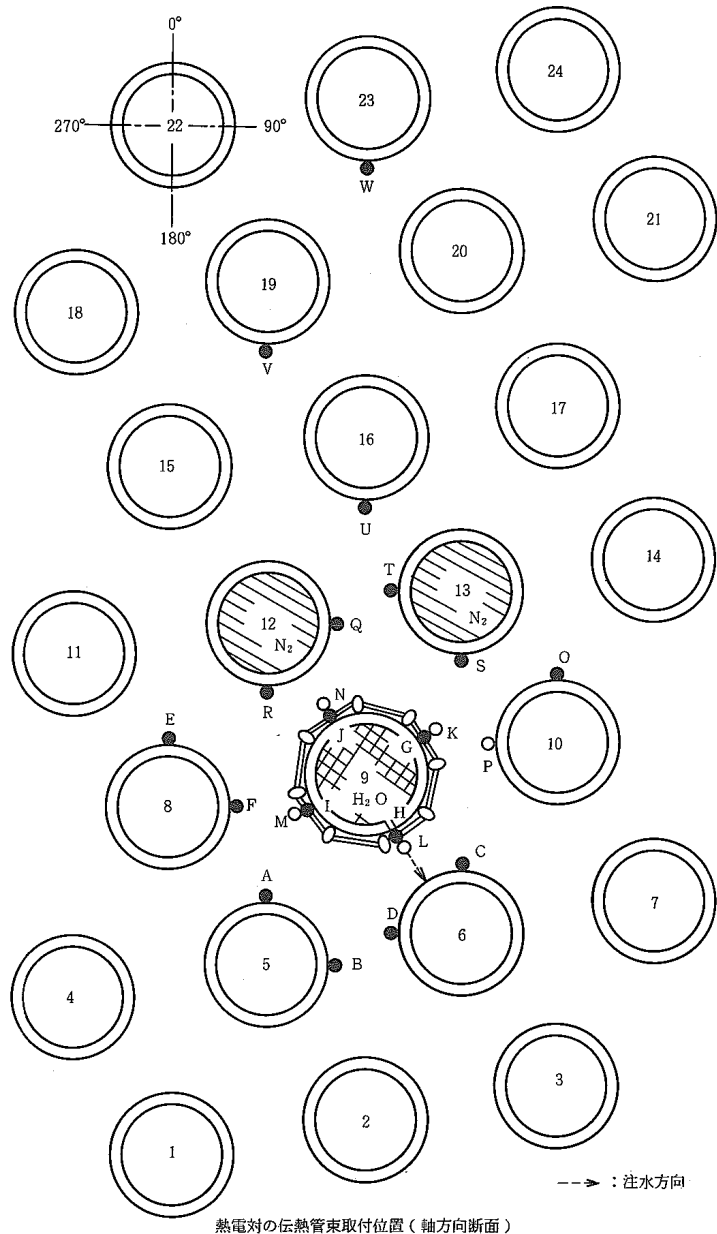
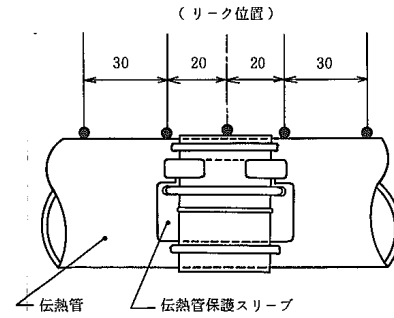


Fig. 3.2.4 伝熱管の配置と熱電対の取付位置 (1/2)



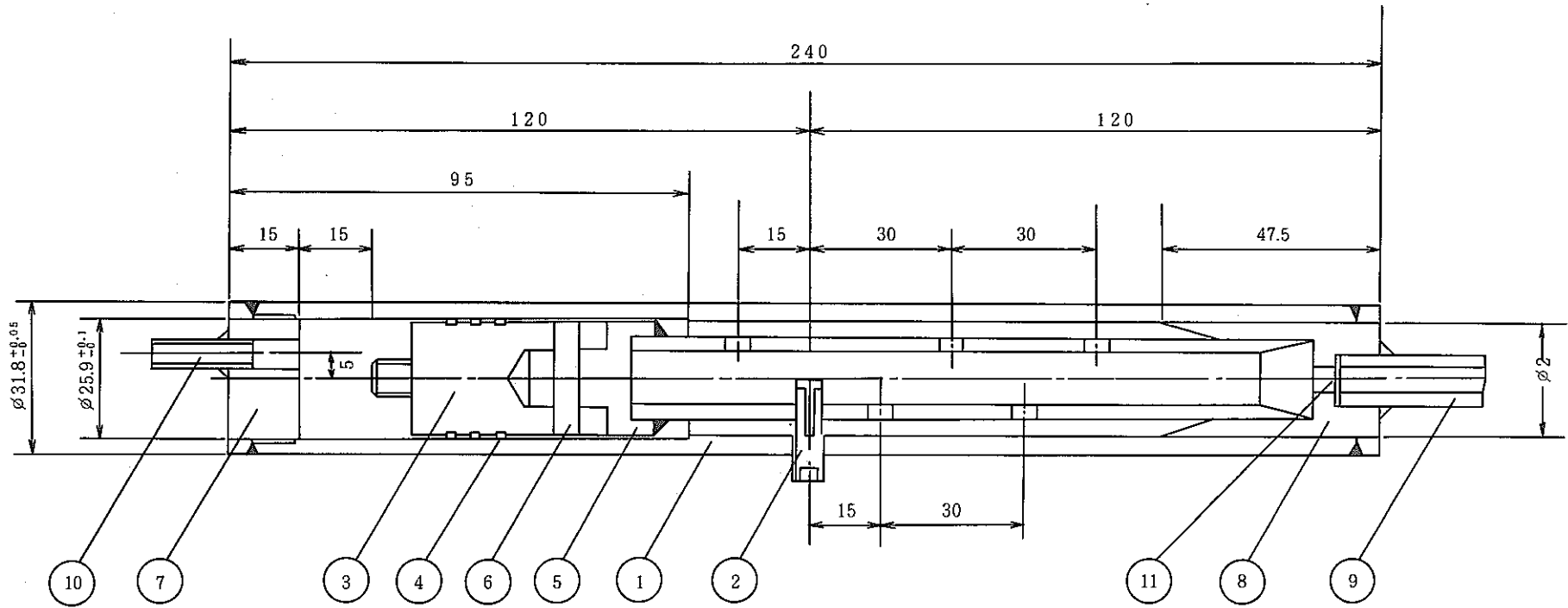
伝熱管保護スリーブを装着した注水管 (リーク伝熱管)の熱電対取付位置 (側面)

熱電対の取付位置詳細

熱電対 No.	伝熱管 No.	取付位置			熱電対 No.	伝熱管 No.	取付位置		
		ポイント	軸方向距離	角度			ポイント	軸方向距離	角度
T-1101	5	A	+30	0	T-1125	9	G	-50	58
02		B	+30	90	26		H	-50	148
03		A	-30	0	27		I	-50	238
04	5	B	-30	90	28		J	-50	328
05	6	C	+30	0	29		K	0	58
06		D	+30	270	30		L	0	148
07		C	-30	0	31		M	0	238
08	6	D	-30	270	32	9	N	0	328
09	8	E	+30	0	33	10	O	+30	0
10		F	+30	90	34		P	+30	270
11		E	-30	0	35		O	-30	0
12	8	F	-30	90	36	10	P	-30	270
13	9	G	+20	58	37	12	Q	+30	90
14		H	+20	148	38		R	+30	180
15		I	+20	238	39		Q	-30	90
16		J	+20	328	40	12	R	-30	180
17		G	-20	58	41	13	S	+30	180
18		H	-20	148	42		T	+30	270
19		I	-20	238	43		S	-30	180
20		J	-20	328	44	13	T	-30	270
21		G	+50	58	45	16	U	0	180
22		H	+50	148	46	19	V	0	180
23		I	+50	238	47	23	W	0	180
24	9	J	+50	328					

- 注) ① ポイントは、左図参照のこと。
 K, L, M, N は伝熱管保護スリーブ外表面, それ以外は伝熱管外表面に配置
 ② 表中の軸方向からの距離は、伝熱管中心からのずれを示す。
 + : 水/蒸気入口方向へのずれ, - : 水/蒸気出口方向へのずれ
 ③ 角度は、水/蒸気入口方向から見た角度を示し、垂直方向上部が「0」である。

Fig. 3.2.4 伝熱管の配置と熱電対の取付位置 (2/2)



11	フィルター		3枚	
10	ガス抜き管	SUS 316	1	$\phi 6.35 \times 1 t$
9	注水管	SUS 304	1	$\phi 10.5 \text{ Sch \# } 80$
8	エンドプラグ(1)	SUS 304	1	
7	エンドプラグ(2)	SUS 304	1	
6	結合ピン	SK-7	1	
5	連結治具・ロッド	SUS 304	1	
4	ピストンリング	FC-25	3	
3	ピストン	S-45 C	1	
2	注水ノズル	F-22	1	ノズル径 $\phi 0.8$
1	シリンダー	Mod 9 Cr-1 Mo	1	$\phi 31.8 \times 3.2 t$

Fig. 3.2.5 ピストン型注水管

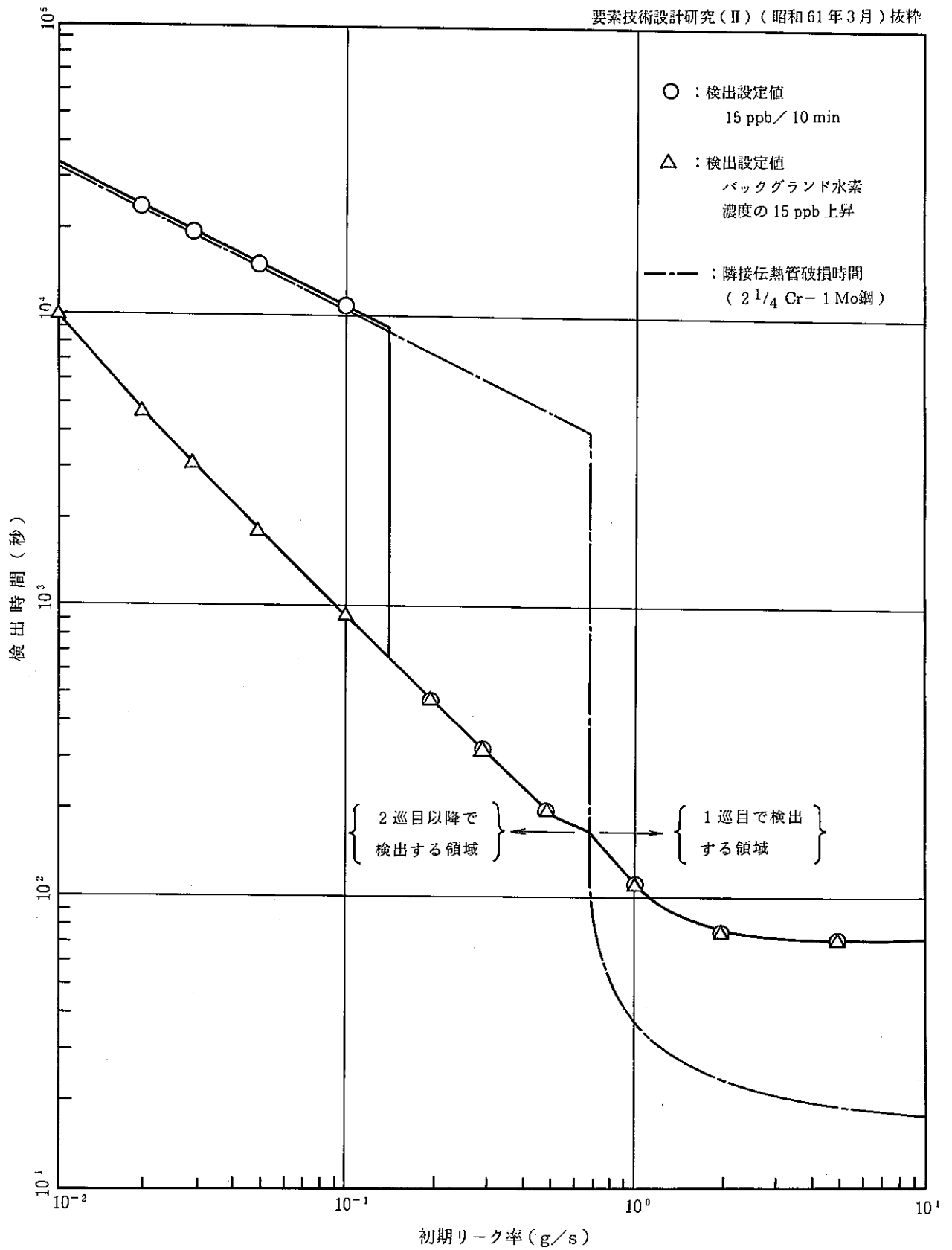


Fig. 3.4.1 水リーク検出特性図

初期ナトリウム温度：505℃

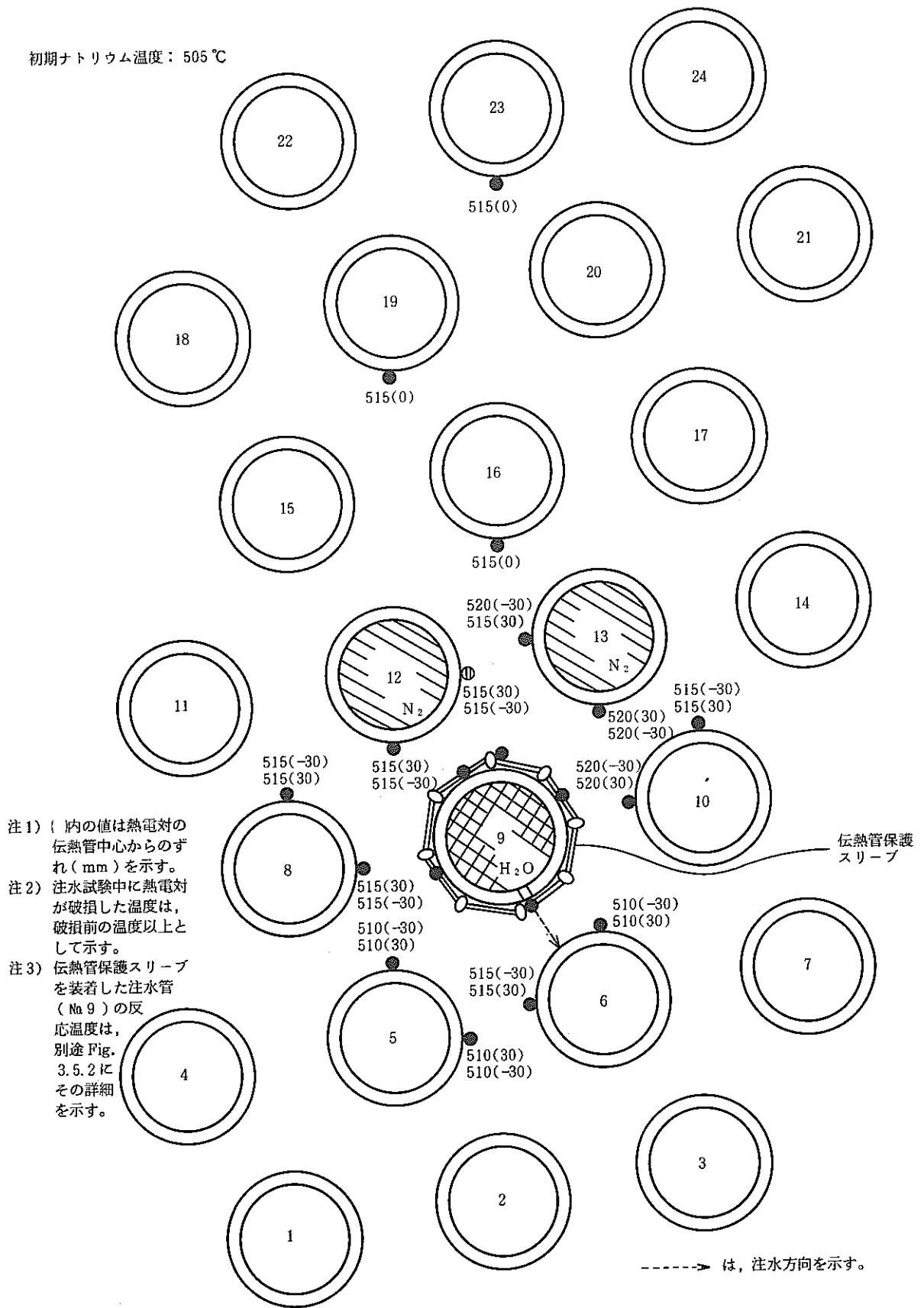


Fig. 3.5.1 注水試験時の伝熱管周辺温度(最高値)

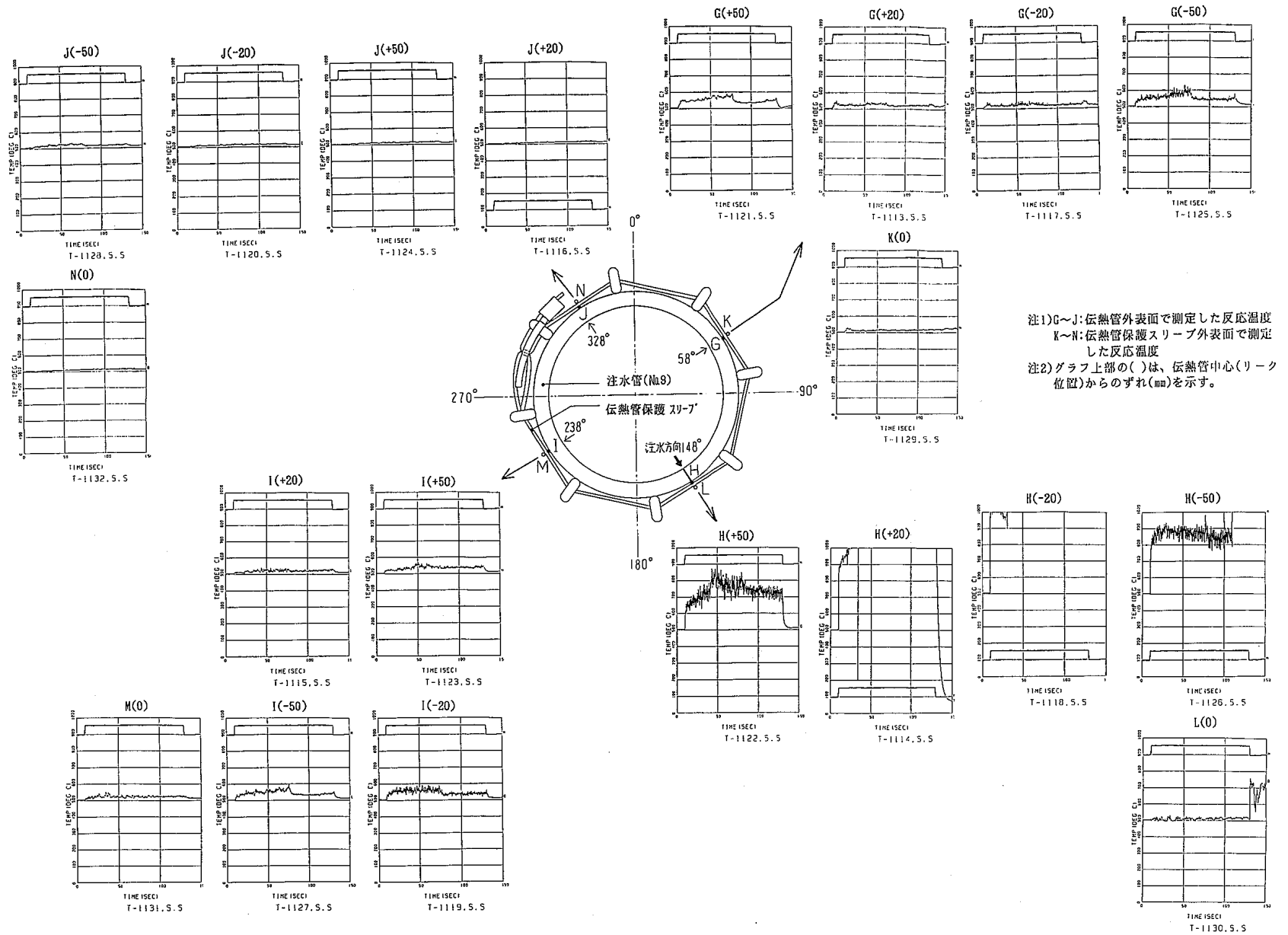


Fig. 3.5.2 注水試験時の注水管（リーク伝熱管）および伝熱管保護スリーブ部の温度

初期ナトリウム温度：400 °C

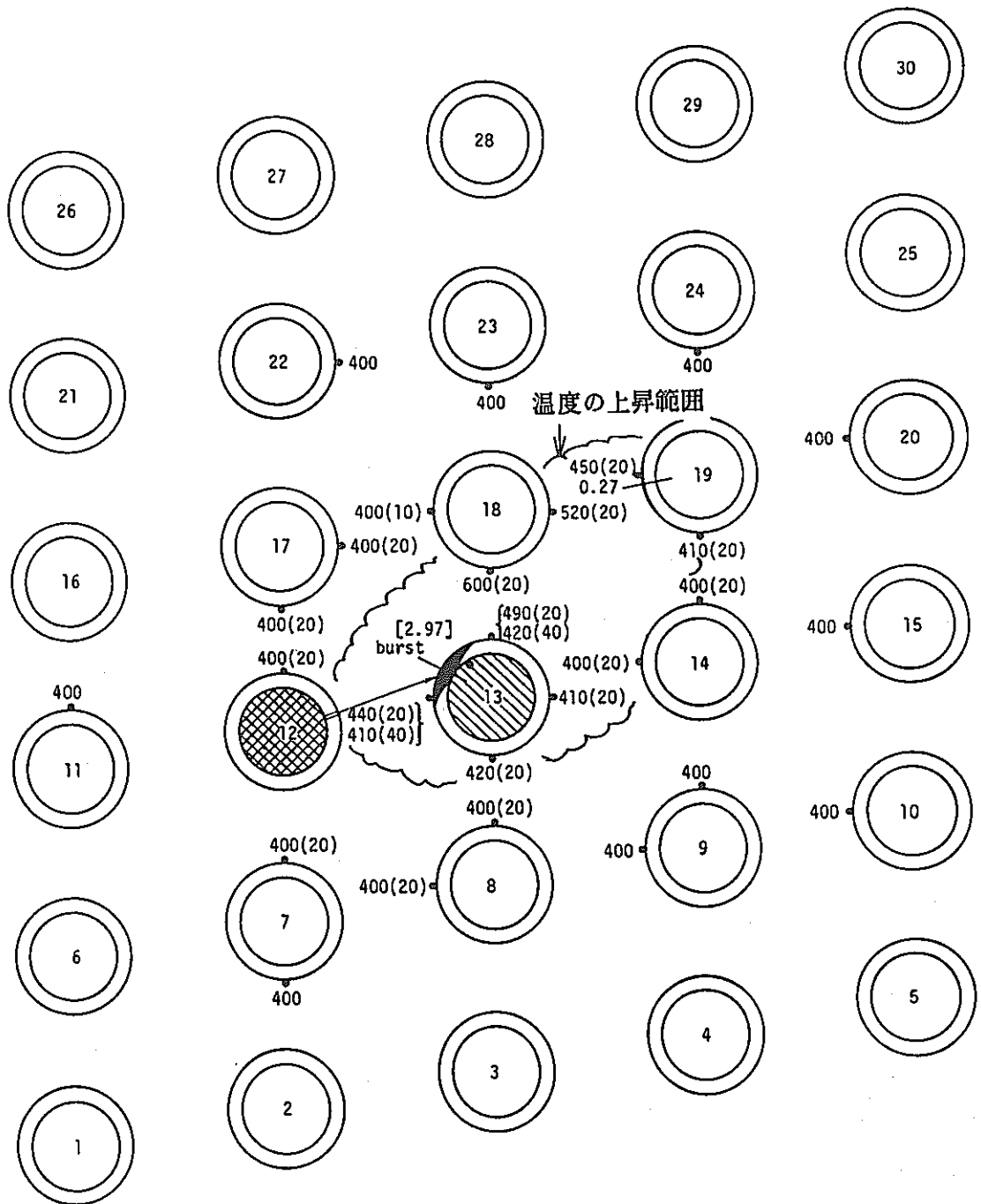


Fig. 3.5.3 Run-4102 試験時の伝熱管周辺の温度とウェステージ状況

初期ナトリウム温度：394℃

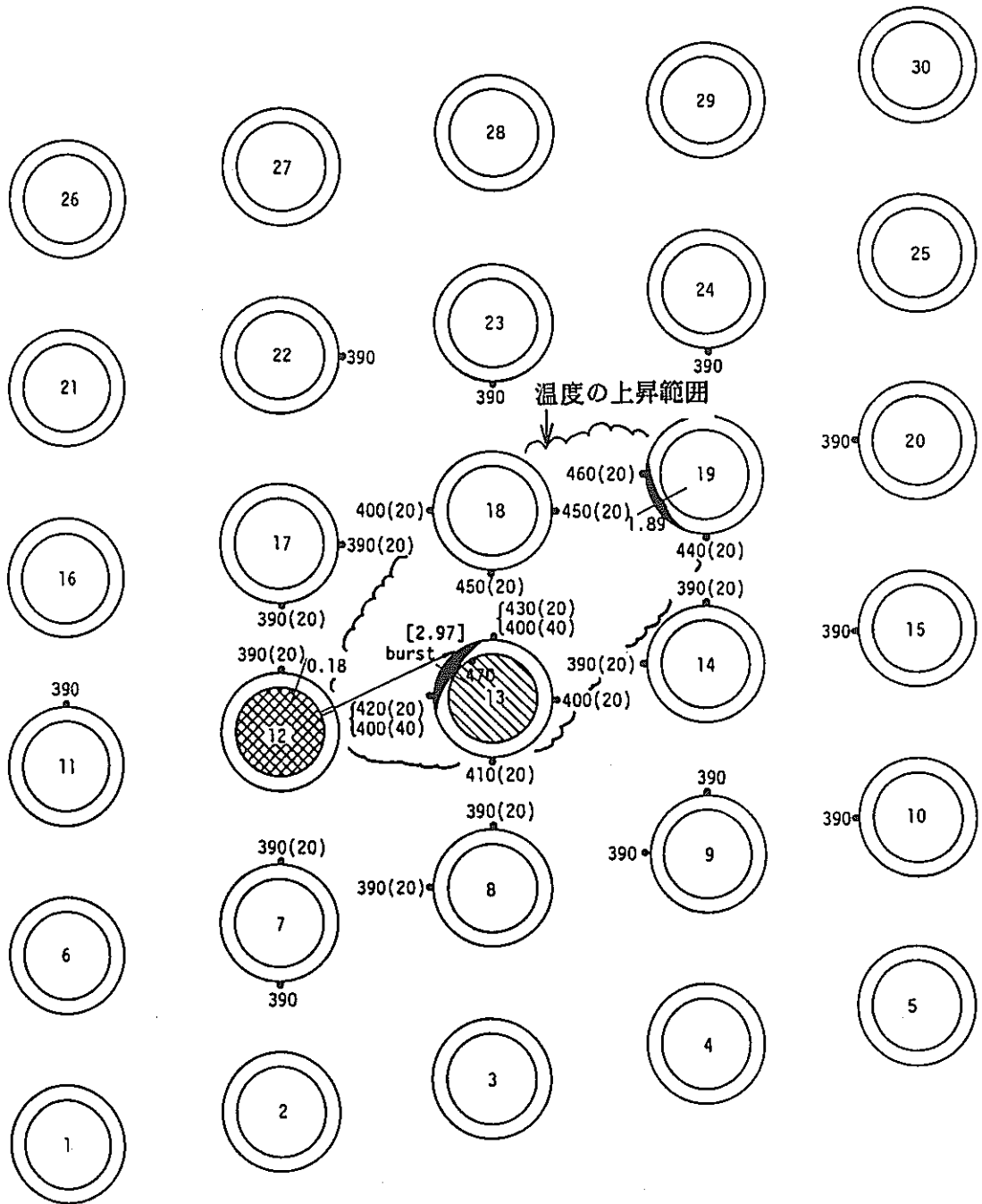


Fig 3.5.4 Run-4103 試験時の伝熱管周辺の温度とウェステージ状況

148°方向ウェステージ状況 (3次元マップ)

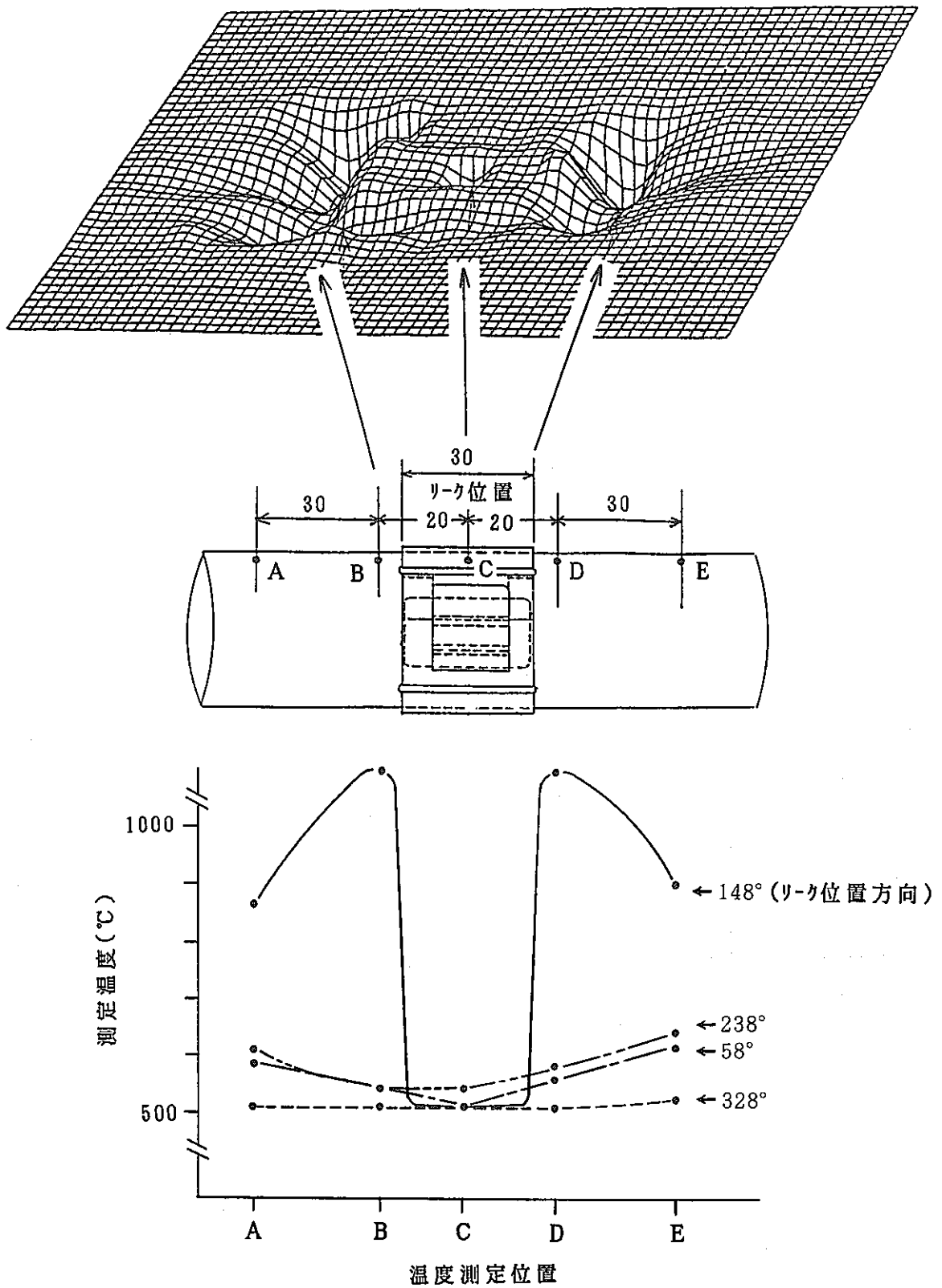


Fig. 3.5.5 試験時の注水管, 伝熱管保護スリーブ外表温度およびウェステージ状況

- : 伝熱管保護スリーブを装着した場合
 - : 同上 装着しない場合
- ただし、

伝熱管材質: Mod. 9Cr-1Mo鋼 3.2^t

(内圧 σ_{fr} を肉厚の10%として考慮)

初期水リーク率: 10.0g/s.

T_w : 隣接伝熱管の2次破損時間(s.)

T_B : 自己2次損耗による貫通破損時間(s.)

T_D : 水素計の応答時間(s.)

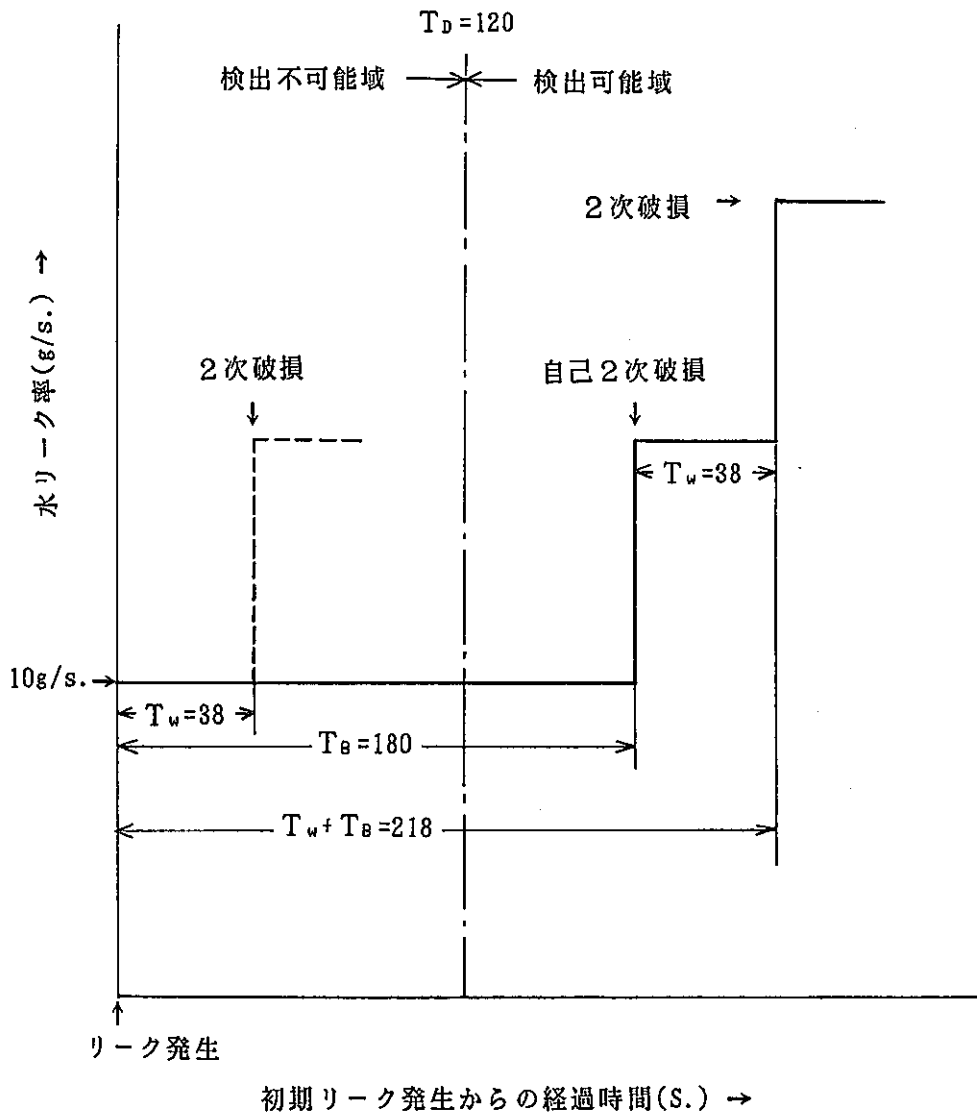


Fig. 3. 5. 6 リーク発生から2次破損に至るまでの時間と水リーク率の変化

Appendix. 1

Mod. 9Cr-1Mo 鋼伝熱管 検査証明書

Appendix. 2

- 写真1 : 試験前伝熱管保護スリーブ装着状態
写真2 : 試験後伝熱管保護スリーブおよび注
水伝熱管のウェステージ状態

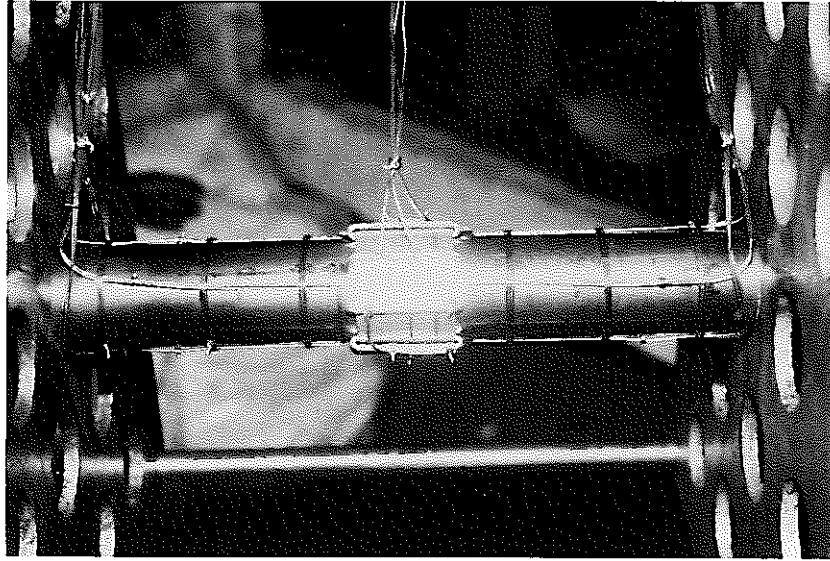


写真1：試験前伝熱管保護スリーブの装着状態

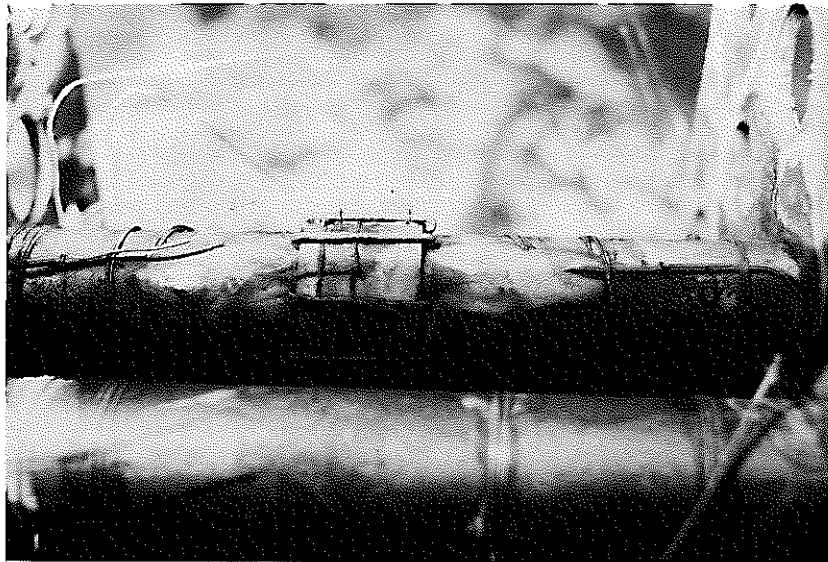
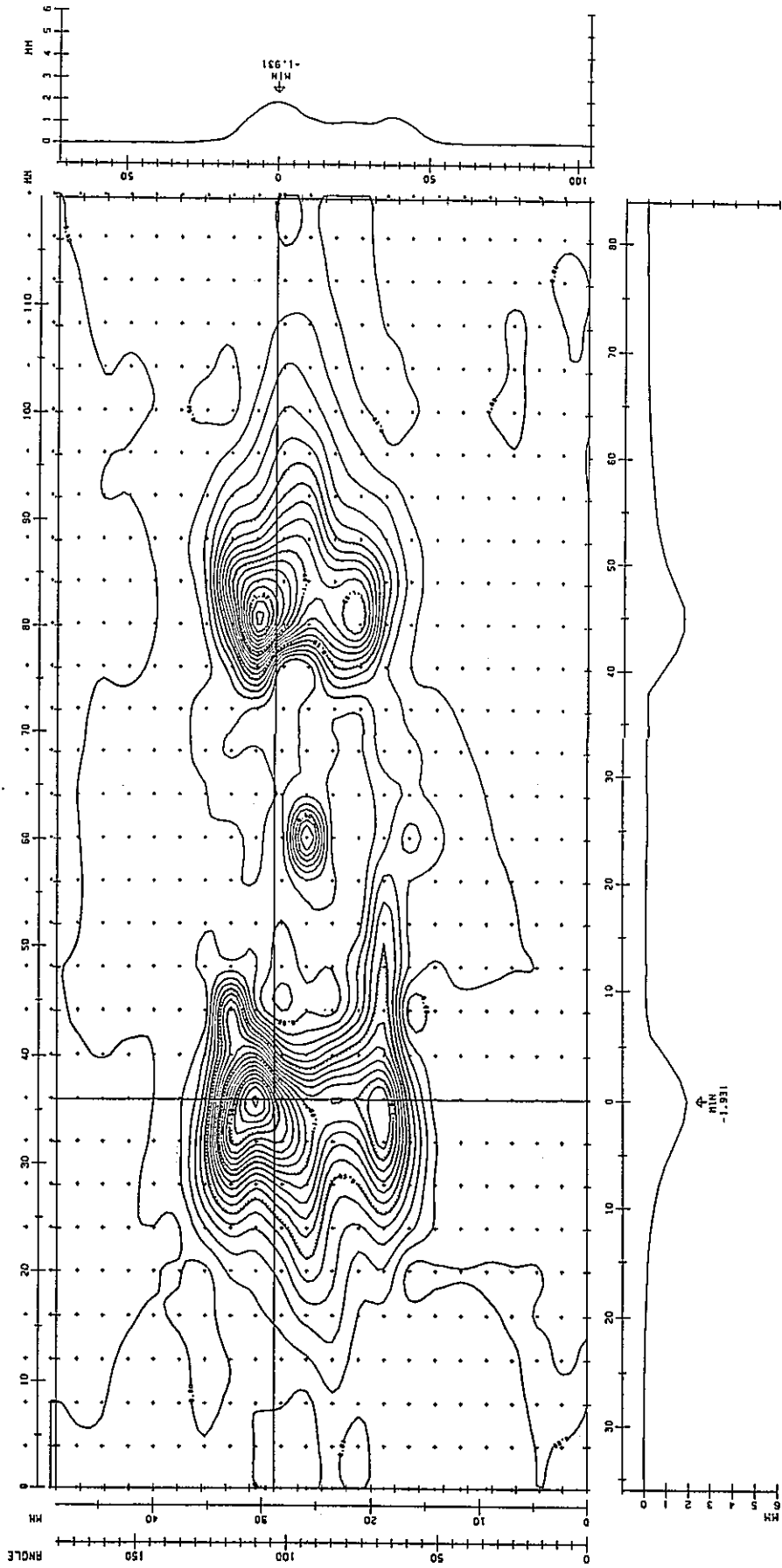


写真2：試験後伝熱管保護スリーブおよび注水伝熱管のウェステージ状態

Appendix. 3

試験後注水伝熱管（保護スリーブ装着伝熱管）
のウェステージマップ

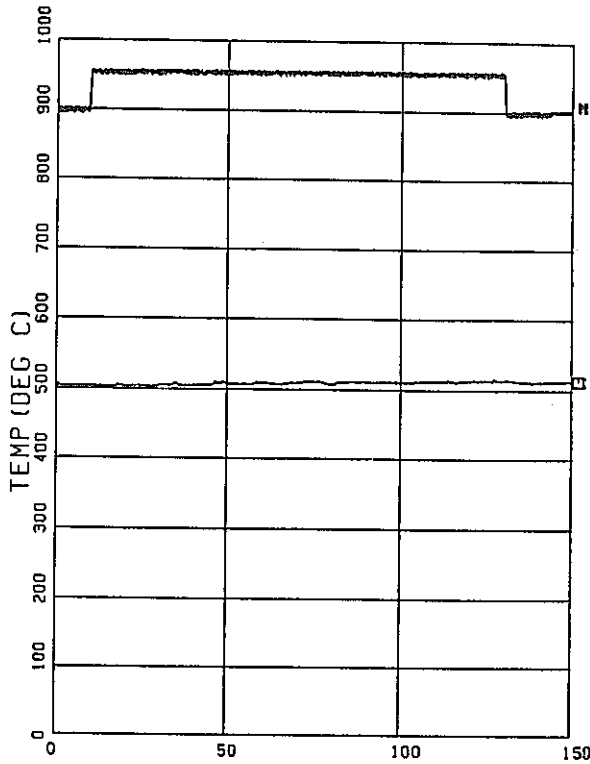
52-172, 58-238, 2, 2



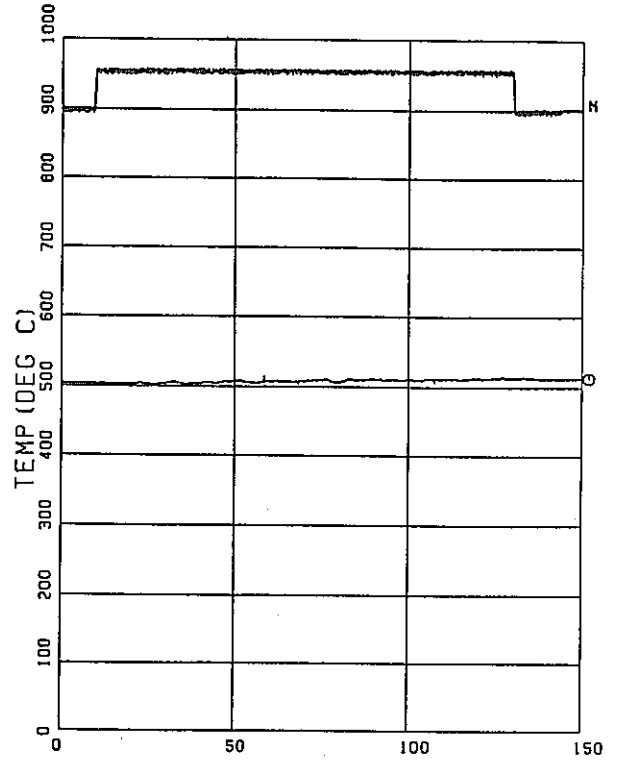
Appendix. 4

試験計測データ

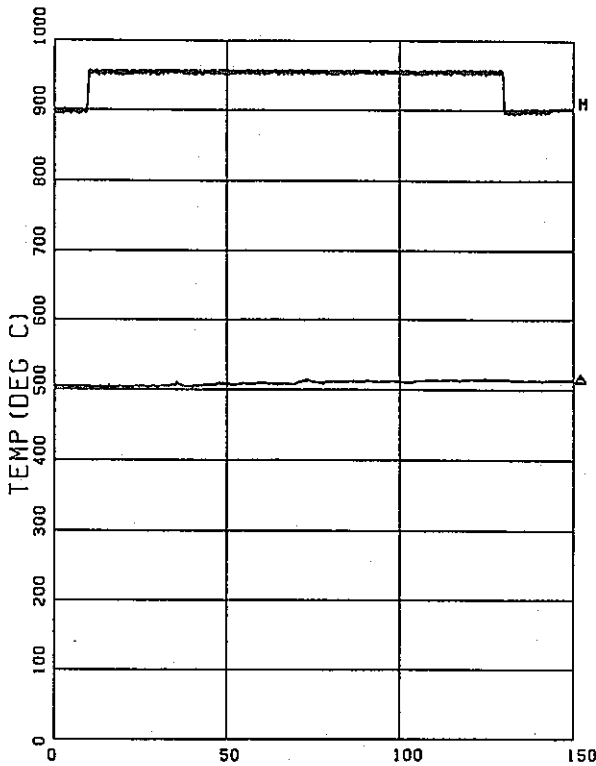
- (1) 隣接伝熱管各部温度 (T-1101～T-1112, T-1133～T-1147)
- (2) 水加熱器温度, 圧力, 液位 (T-WH, P-WH, L-WH)
- (3) 反応容器圧力 (P-EV)
- (4) 水系配管温度 (T-5003)
- (5) 放出系ラプチャーディスク破裂信号 (R-1D)



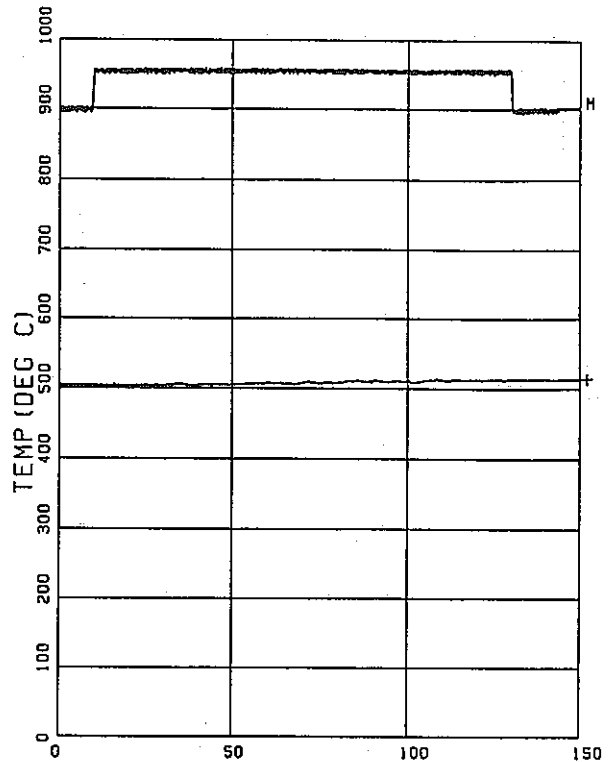
TIME (SEC)
T-1101, S.S



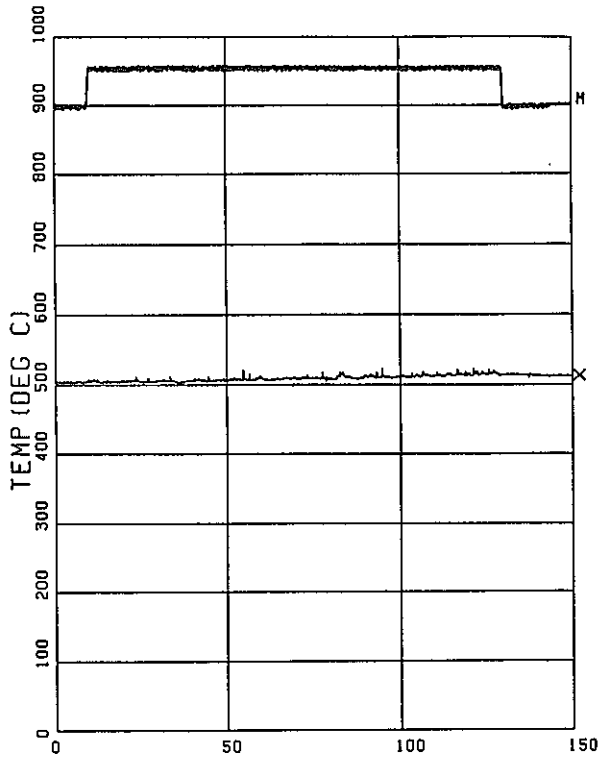
TIME (SEC)
T-1102, S.S



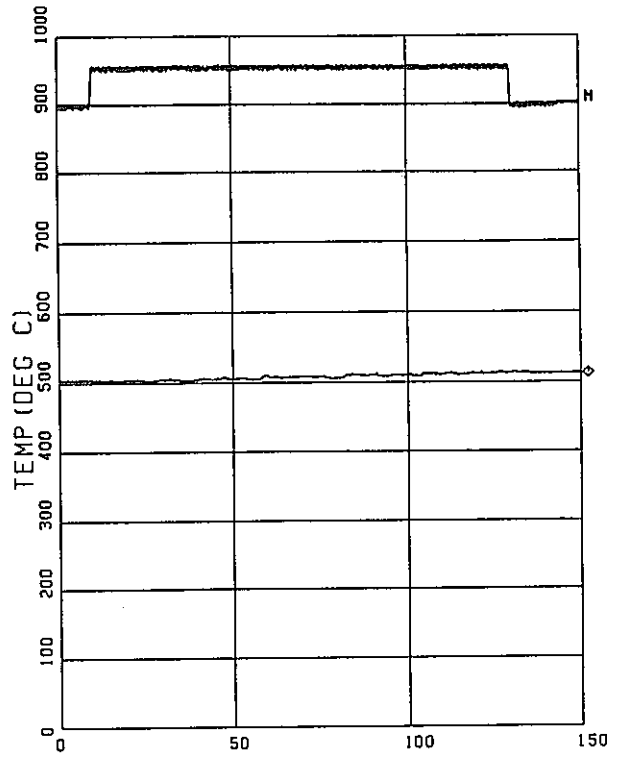
TIME (SEC)
T-1103, S.S



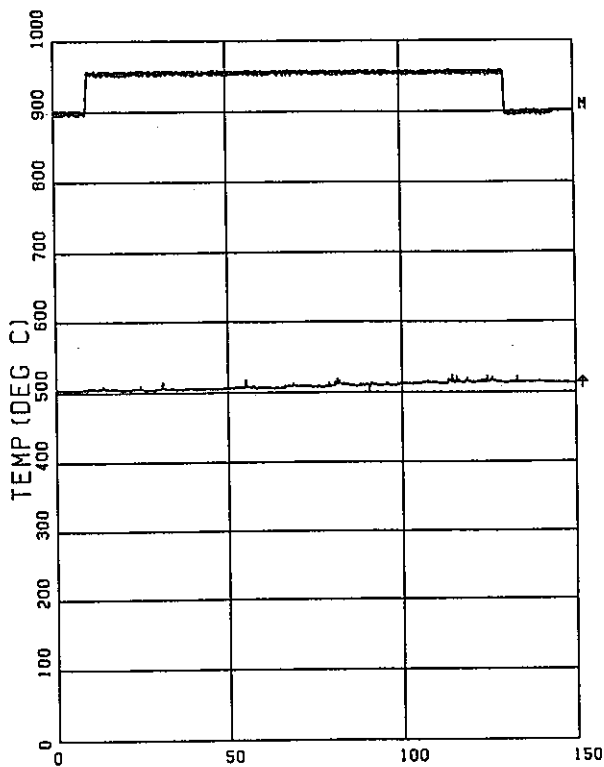
TIME (SEC)
T-1104, S.S



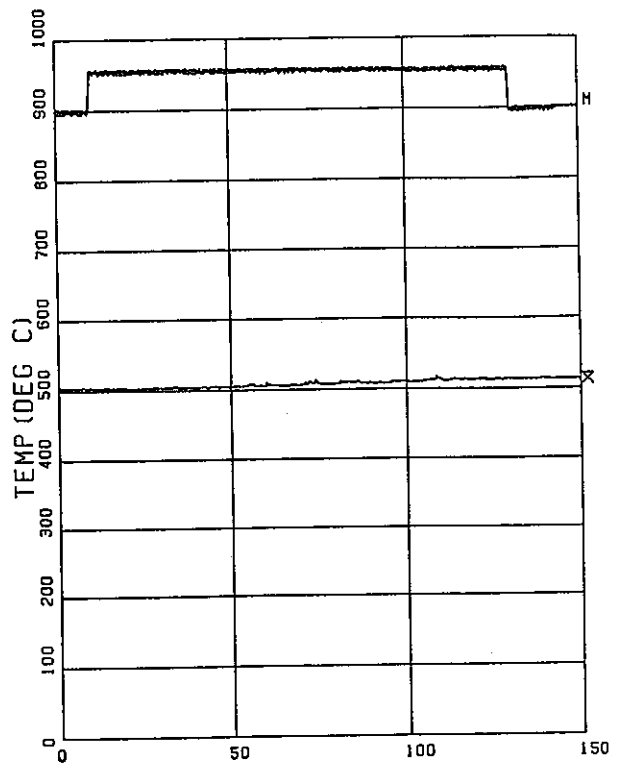
TIME (SEC)
T-1105, S.S



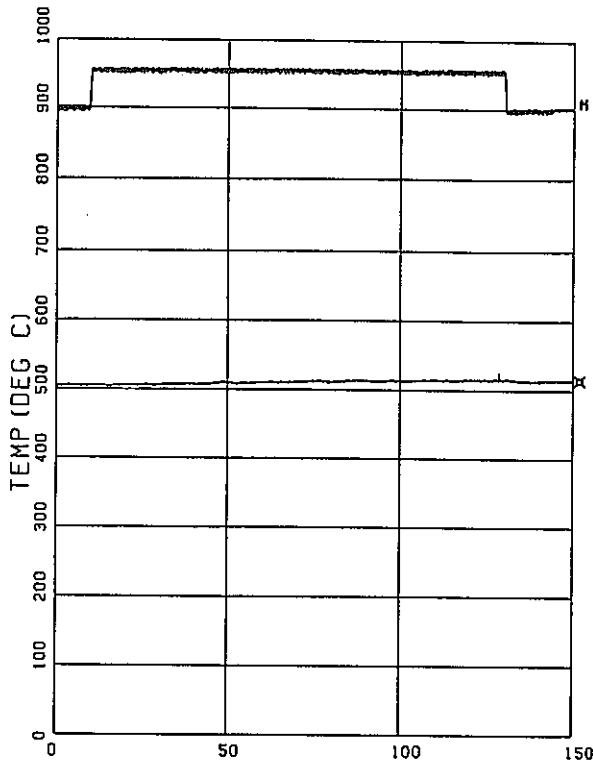
TIME (SEC)
T-1106, S.S



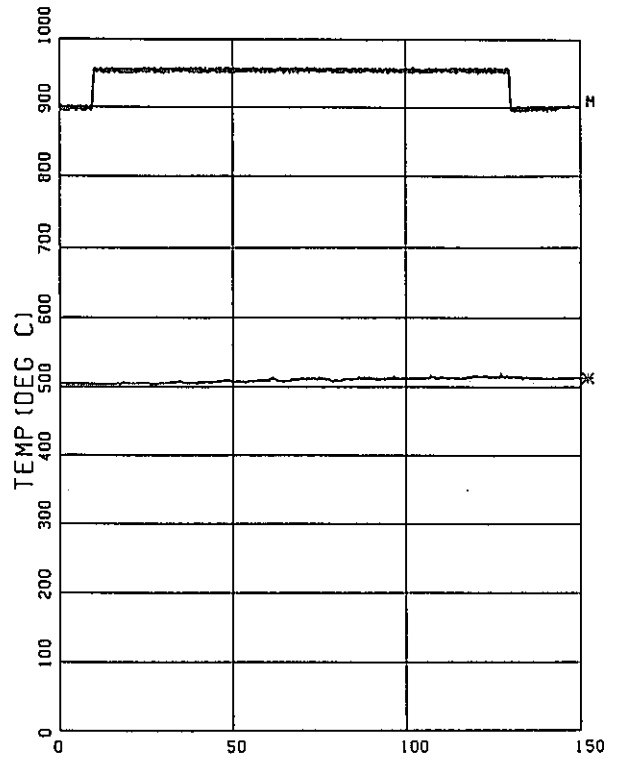
TIME (SEC)
T-1107, S.S



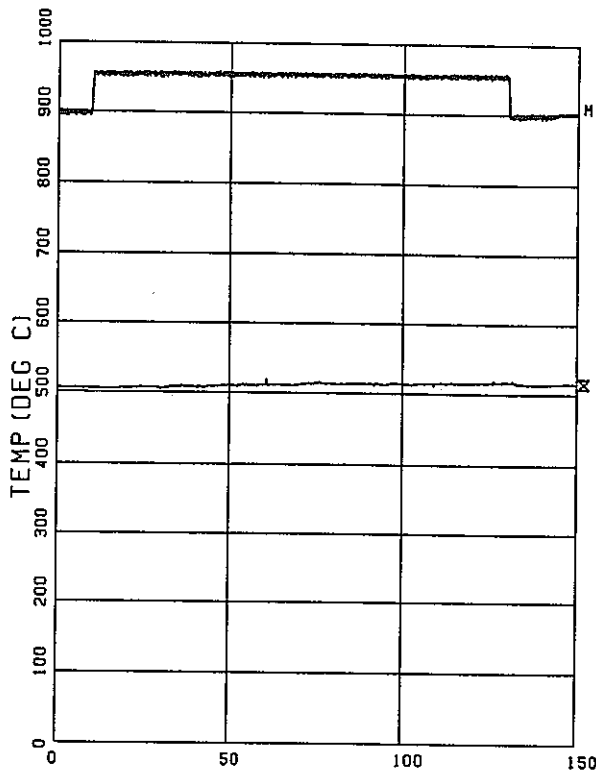
TIME (SEC)
T-1108, S.S



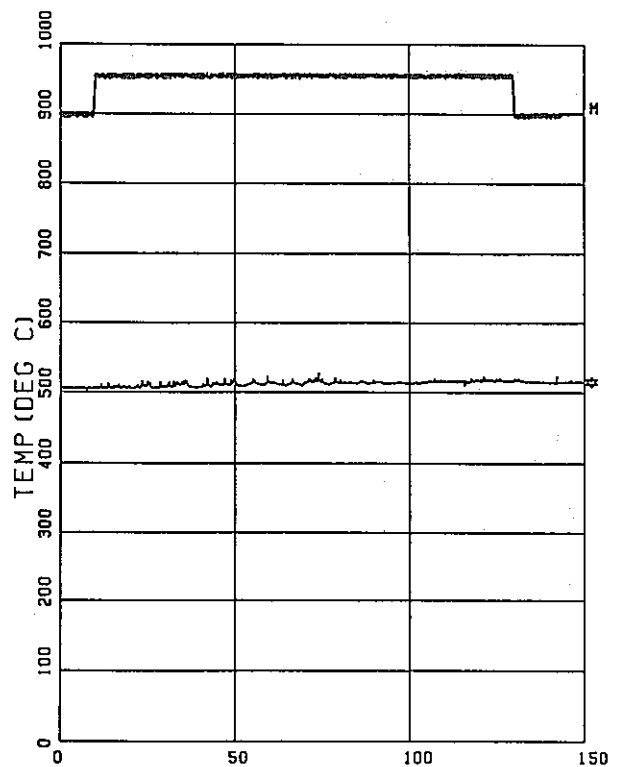
T-1109, S.S



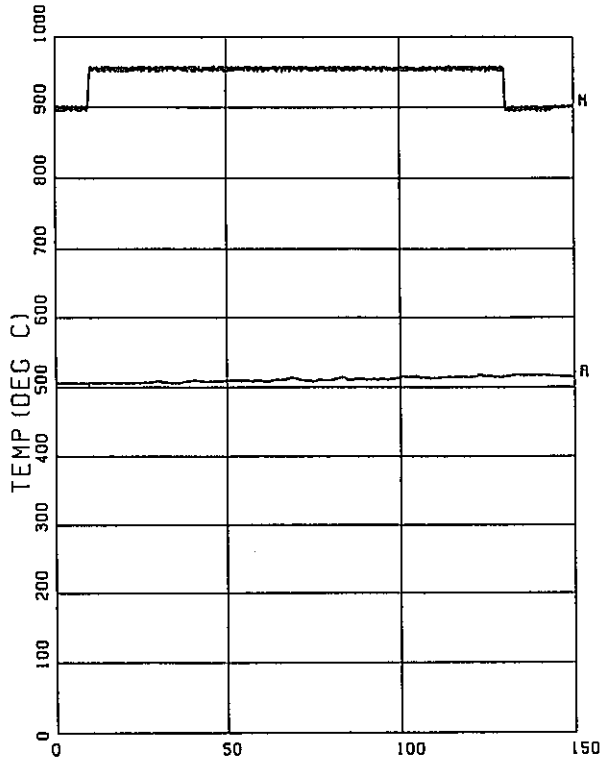
T-1110, S.S



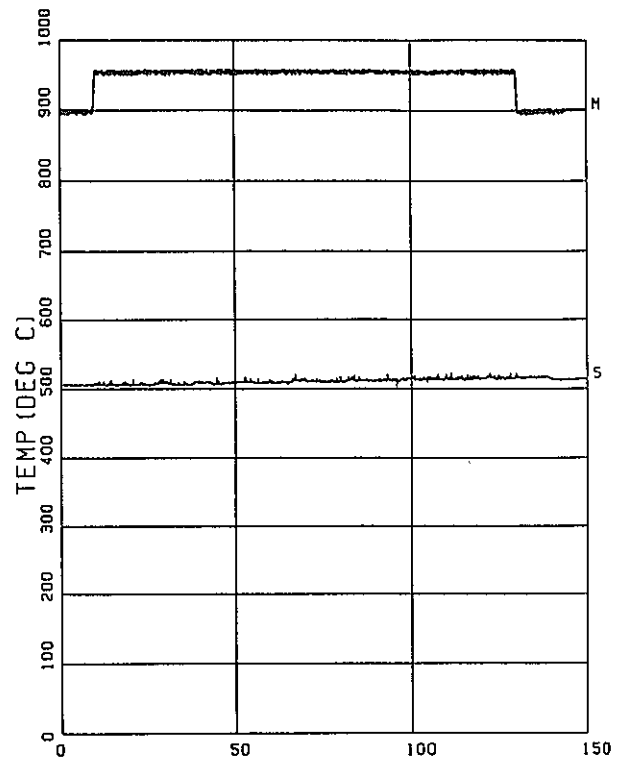
T-1111, S.S



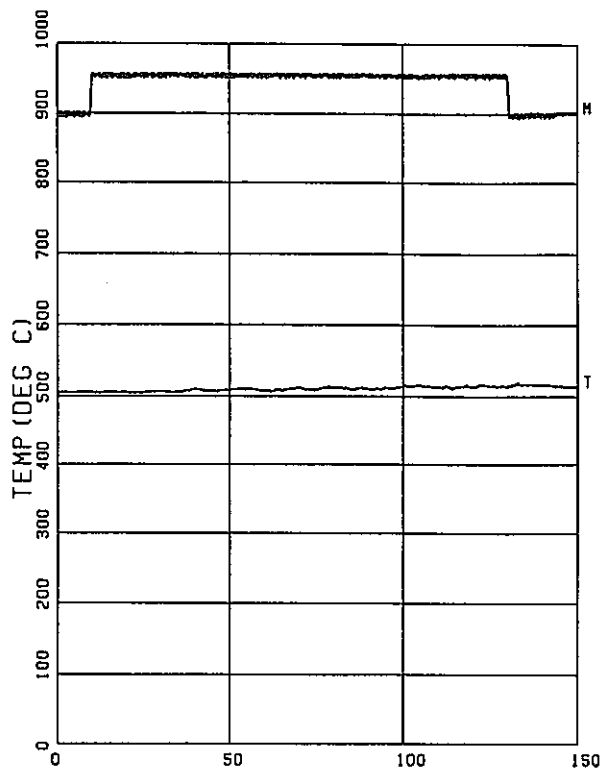
T-1112, S.S



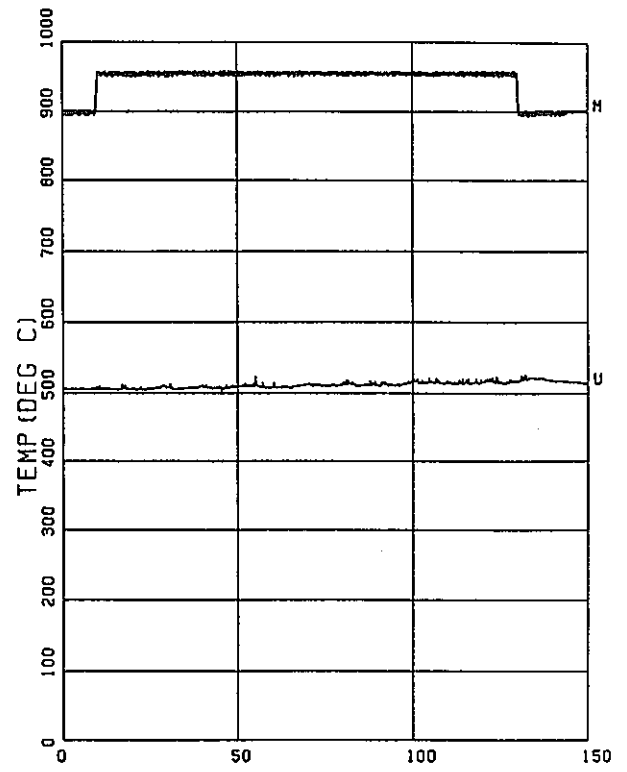
TIME (SEC)
T-1133, S.S



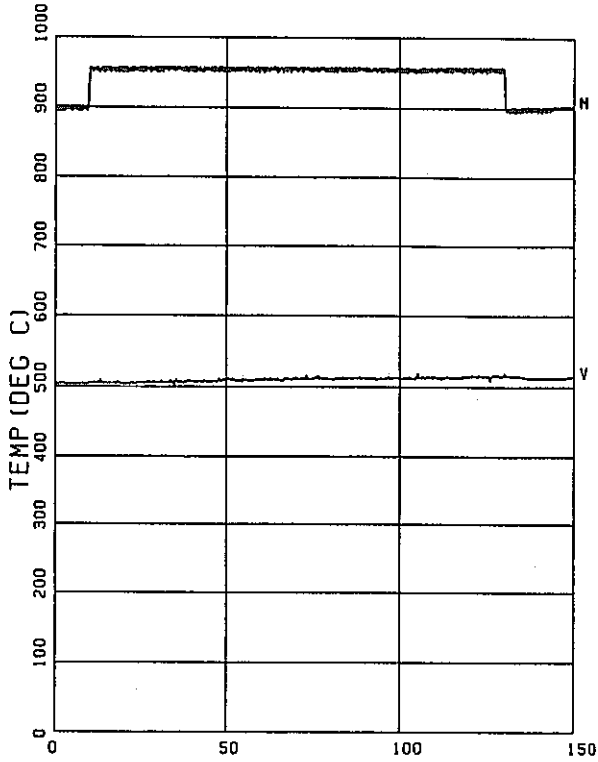
TIME (SEC)
T-1134, S.S



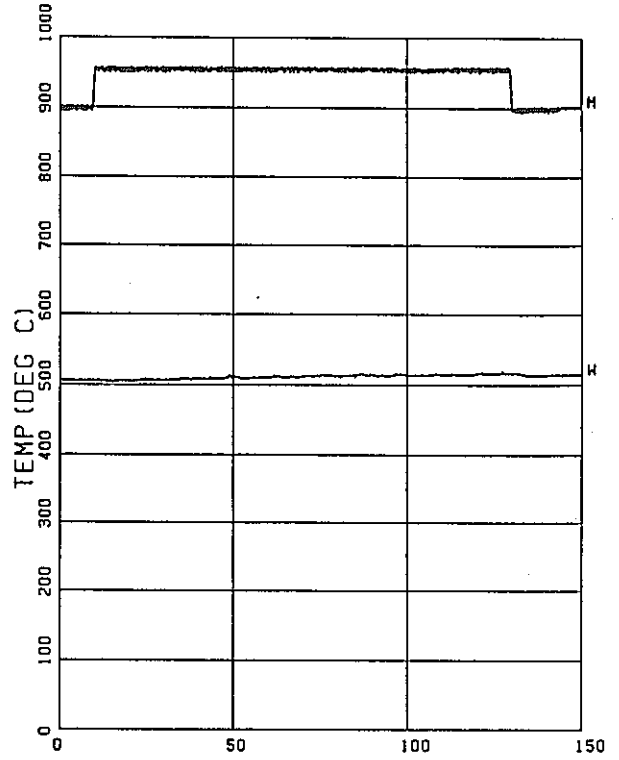
TIME (SEC)
T-1135, S.S



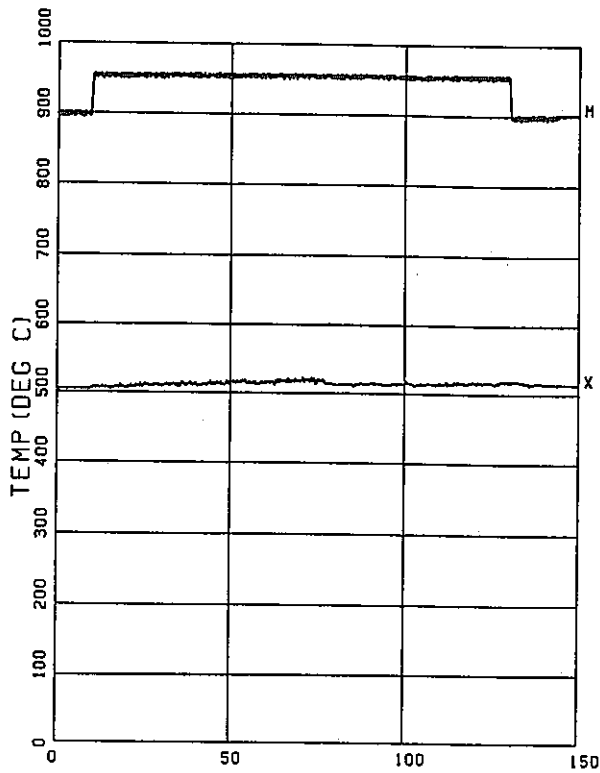
TIME (SEC)
T-1136, S.S



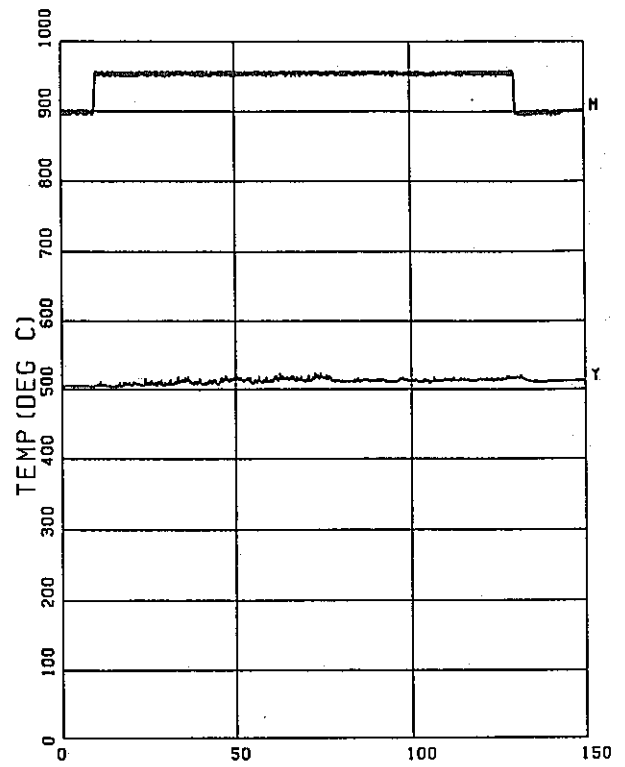
TIME (SEC)
T-1137, S.S



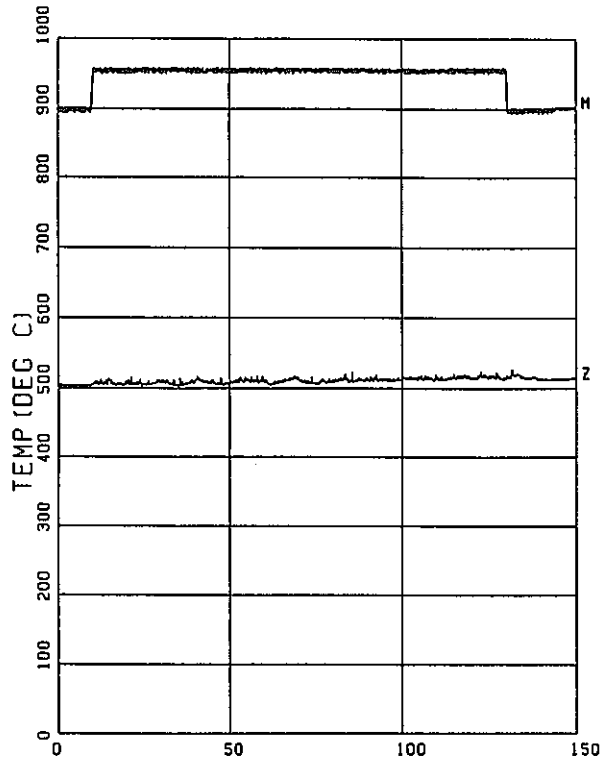
TIME (SEC)
T-1138, S.S



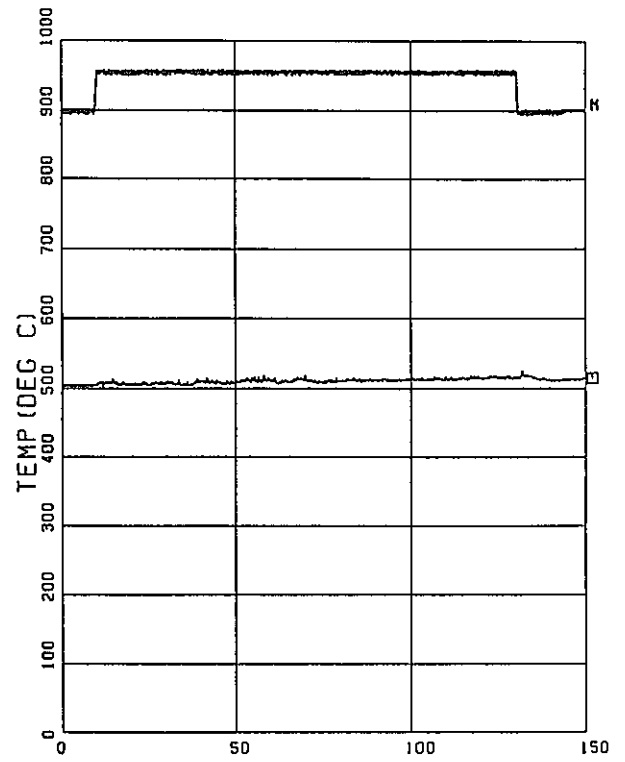
TIME (SEC)
T-1139, S.S



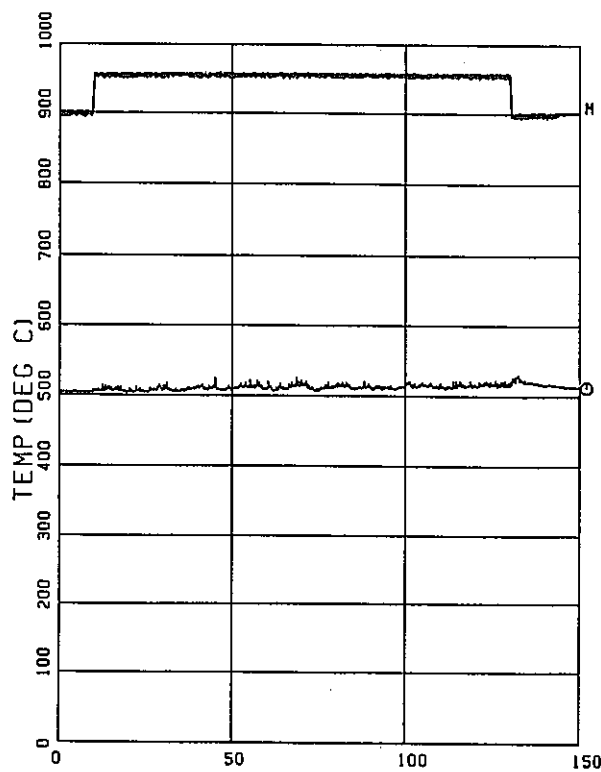
TIME (SEC)
T-1140, S.S



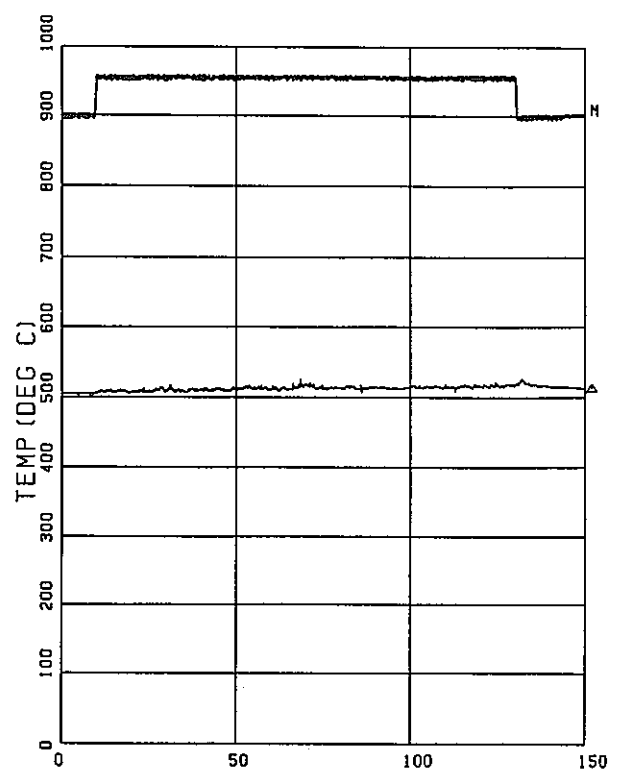
TIME (SEC)
T-1141, S.S



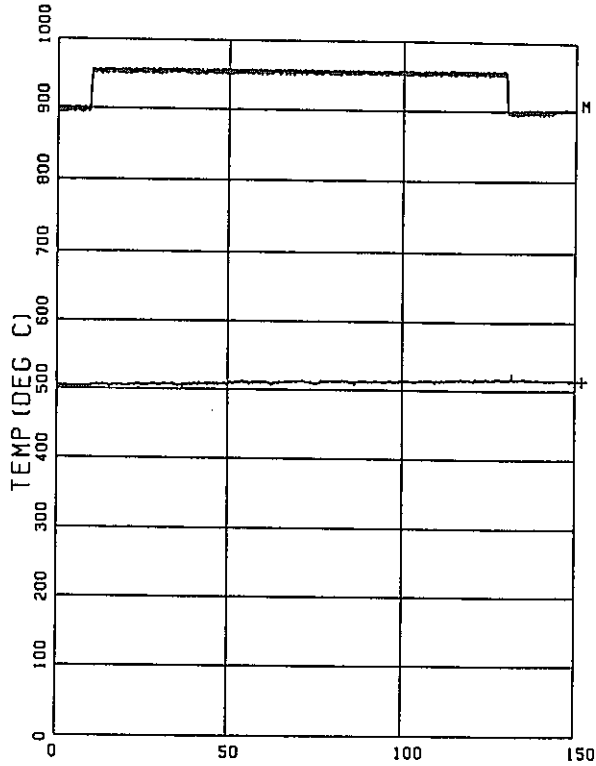
TIME (SEC)
T-1142, S.S



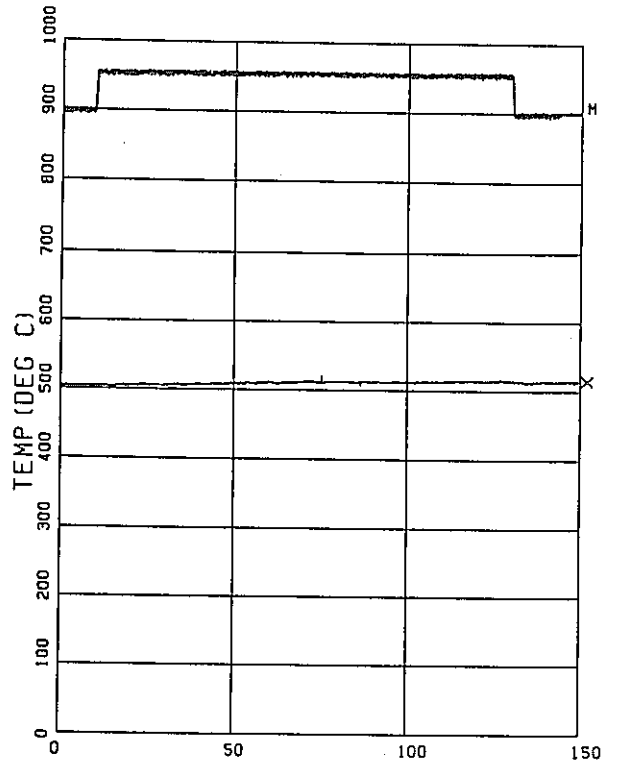
TIME (SEC)
T-1143, S.S



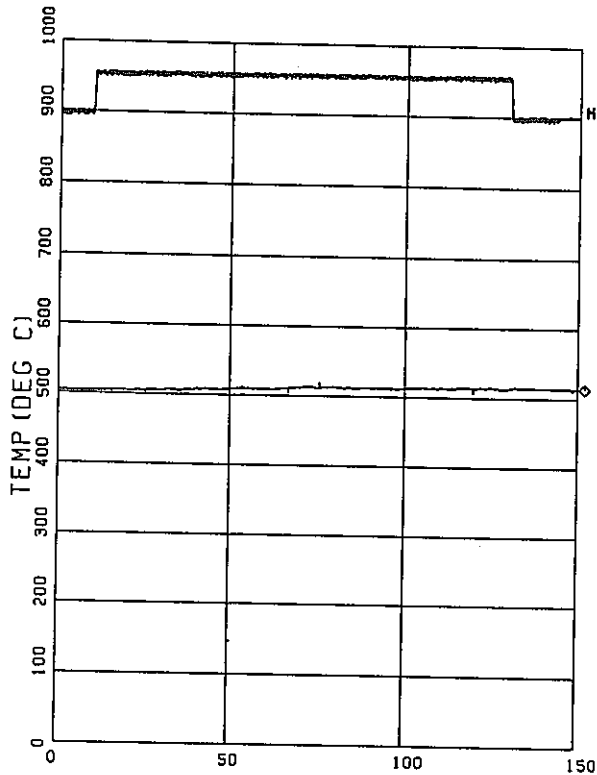
TIME (SEC)
T-1144, S.S



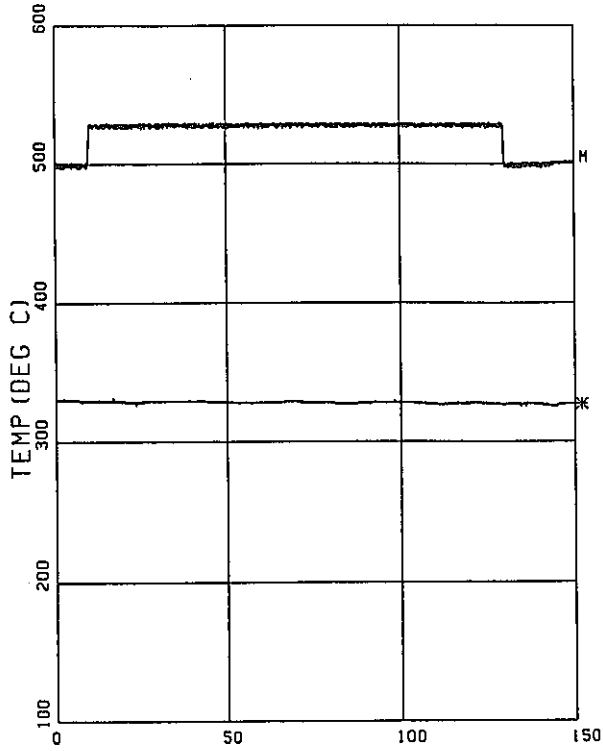
TIME (SEC)
T-1145, S.S



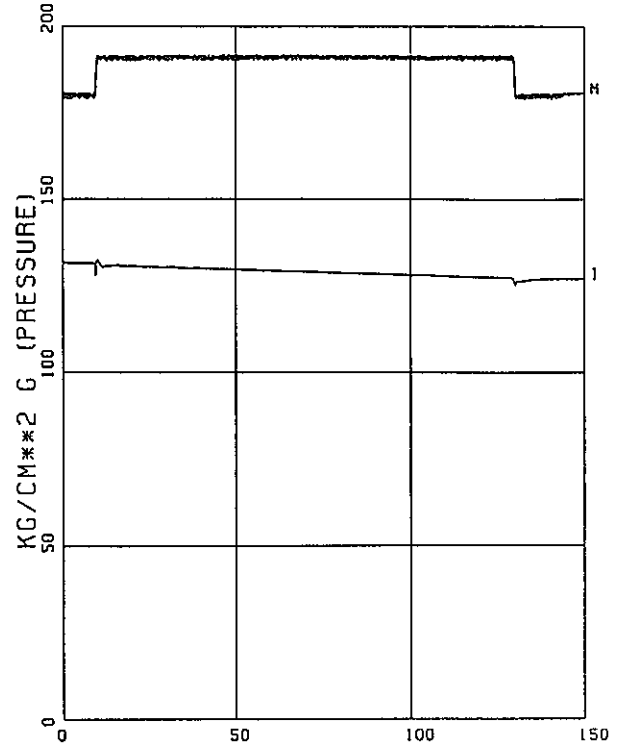
TIME (SEC)
T-1146, S.S



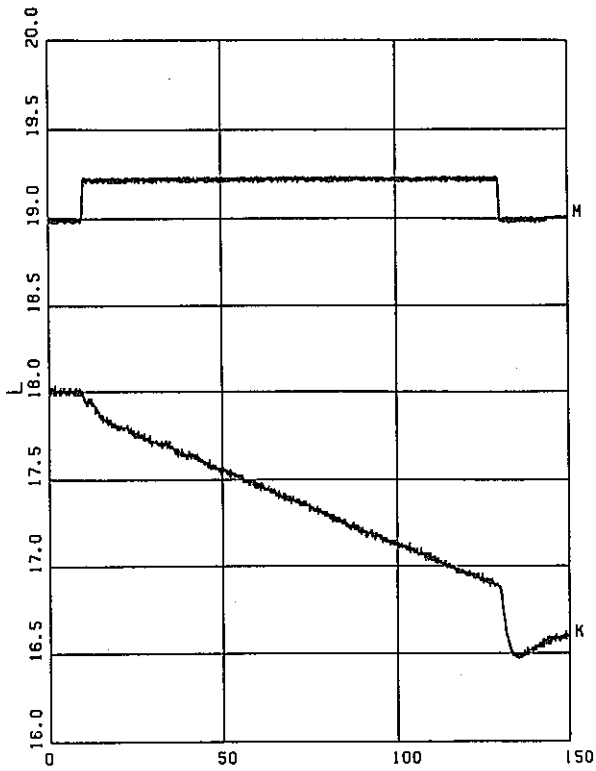
TIME (SEC)
T-1147, S.S



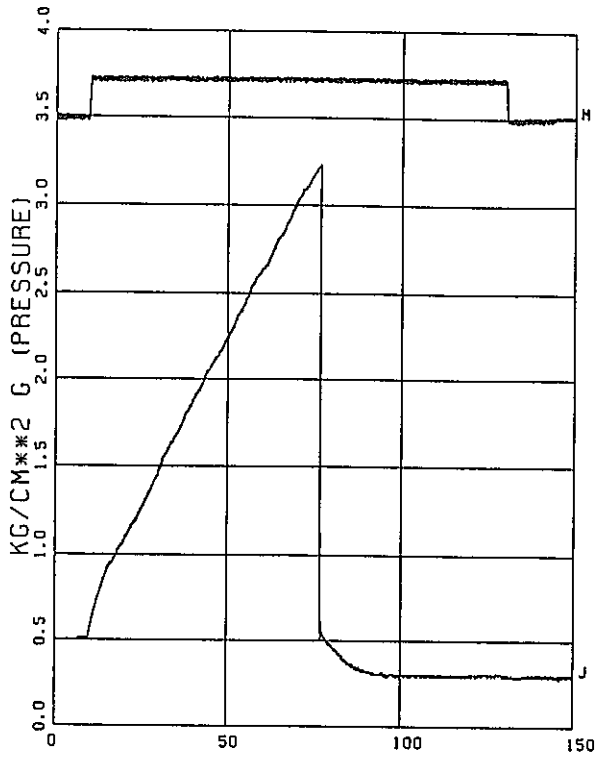
TIME (SEC)
T-WH, S.S



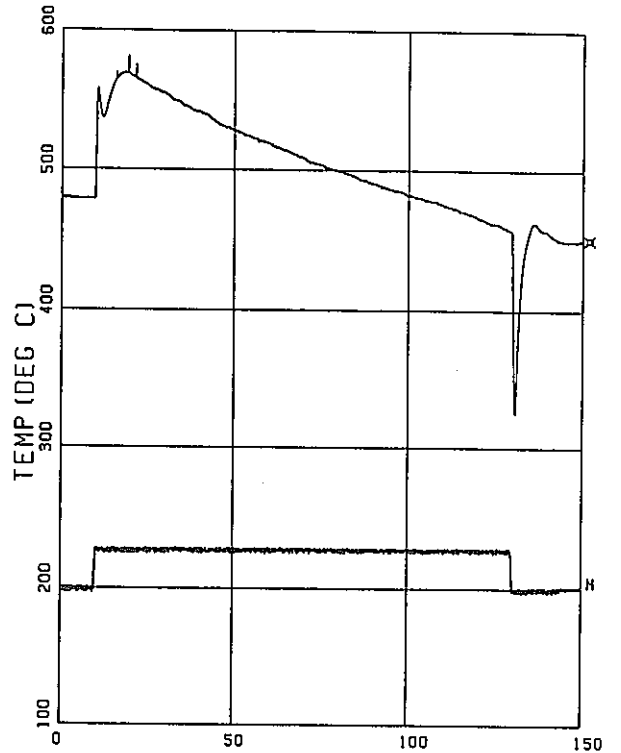
TIME (SEC)
P-WH, S.S



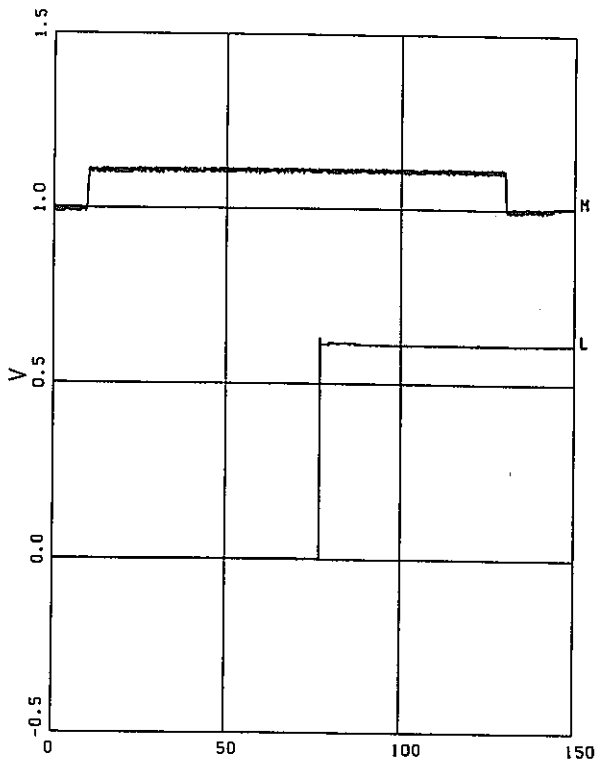
TIME (SEC)
L-WH, S.S



TIME (SEC)
P-EV, S.S



TIME (SEC)
T-5003, S.S



TIME (SEC)
R-1D, S.S