

II-223 73-01

開 示 制 限

は 年 月 日付けで改訂され、
変更する。

2001. 7. 31

[技術情報室]

分 置

二次冷却系用通電式ナトリウム漏洩検出器の試作試験

(受 託 研 究)

1 9 7 3 年 7 月

三 菱 重 工 業 株 式 会 社

三 菱 電 機 株 式 会 社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

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

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

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

計画管理部技術情報室

二次冷却系用通電式ナトリウム漏洩検出器の試作試験

要 旨

高速実験炉「常陽」の二次冷却系配管におよび機器等に取り付ける通電式ナトリウム漏洩検出器を開発するため配管用および弁用の検出器を試作した。この検出器の耐熱性耐湿性等を調べるとともに模擬配管において実際にナトリウムを流してその流れの状態と漏洩検出器作動特性を調べた。試験の結果次の結論を得た。(1) 空気中で使用する通電式漏洩検出器は電極の耐酸化性と絶縁物の耐湿性が要求されるが、試作した検出器は良好な性能を示した。(2) 1/100勾配の配管から空気中に漏洩したナトリウムは数cc/sec程度の漏洩率でも確実に1mは流れる。(3) しかし470℃においては漏洩したナトリウムは直ちに発火燃焼するため、ナトリウム酸化物が配管とスチールシートとの間を埋めてしまい、漏洩率が数cc/sec以下の場合には数m以上の流れは期待できない。(4) 150℃および470℃においてナトリウムと接触した漏洩検出器の作動は良好である。(5) ナトリウムの漏洩検出をより確実にするためには漏洩検出器をできるだけスチールシートに接近させて取付けることが必要である。(6) ナトリウムが燃焼した場合はスチールシートの継目から外に漏れやすい。

1973年7月

菅原 宏 足立 清 小島 秀子
松永 義弘 田中 光雄 飯田 昌二
小俣 虎之助

本報告は 三菱重工業株式会社 および 三菱電機株式会社が 動力炉・核燃料開発事業団の委託により、おこなった研究の成果である。

A study of sodium leak detector for a secondary cooling system

Abstract

In order to develop sodium leak detectors for secondary cooling piping system and component equipments of the Japan Experimental Fast Reactor 「Jō Yō」, two short circuit types of detectors were manufactured, one for the piping system and the other for the valve.

Characteristic properties of these detector and flow of leaked sodium in model pipes were studied.

The results obtained as follows:

- (1) The leak detectors used in air are required to have heat-resisting properties of electrodes and moisture-resisting properties of insulators, respectively. And the detectors showed good results.
- (2) Leaked sodium flow as far as 1 m when the leak rate is about few cc/sec when the pipe is built with $1/100$ gradients.
- (3) At 470°C , no sooner sodium burns out than it leaks and the space between pipes and steel-sheets is filled with sodium oxides. Thereby flow of sodium cannot be expected over several meters when leak rate is below few cc/sec at the temperature.
- (4) These detectors show good leak-detection performance, when they come in contact with sodium at the test temperatures of 150°C and 470°C , respectively

- (5) More better leak-detection performance may be obtained, by means of setting detectors in contact with steal-sheets.
- (6) When sodium burns, it tends to leak out at overlapped part of steal-sheets.

July, 1973

Hiroshi SUGAHARA	Kiyoshi ADACHI
Hideko KOSHIMA	Yoshihiro MATSUNAGA
Mitsuo TANAKA	Shoji IIDA
Toranosuke KOMATA	

The work performed under contacts between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Mitsubishi Heavy Industry Co, Ltd. and Mitsubishi Electric Corporation.

写真リスト

- 写真 1 配管用漏洩検出素子(端末)
2 弁用漏洩検出素子(ネジ栓を溶接したもの)
3 配管用検出素子へのナトリウムの滴下
4 漏洩予備試験装置
5 ナトリウム注入装置
6 漏洩予備試験装置
7 漏洩予備試験 150℃; 0.5φ(発火状態)
8 漏洩予備試験 470℃; 0.5φ(砂をかけた後の発火状態)
9 〃 150℃; 0.3φ
10 3B.1m長模擬配管 保温装着前
11 3B.1m長模擬配管
12 漏洩警報盤
13 模擬配管ナトリウム漏洩試験試験装置
14 8m長模擬配管の設置状態
15 試験番号1. 配管下流端
16 〃 配管中央部 スチールシート内部
17 〃 1m部漏洩検出器
18 〃 〃
19 試験番号2. 配管下流端(8m)
20 〃 7m部スチールシート継目と保温材
21 〃 6m部スチールシート継目と保温材
22 試験番号4. エチルアルコールで洗淨した後の漏洩検出器
23 試験番号2. 4m部スチールシート継目と保温材
24 〃 3m部スチールシート継目と保温材
25 〃 2m部スチールシート継目と保温材

写真リスト

- 写真 26 試験番号 2. 1 m部スチールシート継目と保温材
- 27 " . 配管上流部
- 28 " . 0~1m部スチールシート内部
- 29 " . 1~2m部スチールシート内部
- 30 " . 1m部漏洩検出器
- 31 " . 2m部漏洩検出器
- 32 " . 4~5 m スチールシート内部
- 33 " . 7m スチールシート内部
- 34 試験番号 3. 保温材をはいた状態
- 35 " . 配管とスチールシートの間につまったナトリウム
- 36 試験番号 4. 配管下流部から漏れたナトリウムの燃焼跡
- 37 " . 配管下流端におけるナトリウムと保温材の反応
- 38 " . 1m部漏洩検出器
- 39 " . エチルアルコールで洗浄した後の漏洩検出器
- 40 試験番号 5. 配管上流端
- 41 " . 1m部スチールシート継目
- 42 " . 1m部 スチールシート継目に対応する保温材
- 43 " . 2m部スチールシート継目
- 44 " . 50cm部スチールシート内部
- 45 " . 1m部漏洩検出器
- 46 " . ナトリウム流れの先端の塊の断面
- 47 " . 2m部漏洩検出器
- 48 試験番号 6 配管下流端から漏れたナトリウムの燃焼跡
- 49 " . 下流部保温材外側
- 50 " . 配管下流部保温材内側

写真リスト

- 写真 51 試験番号6、1m部漏洩検出器
52 試験番号7、漏洩孔近傍
53 〃 スチールシート内側
54 〃 配管底部
55 試験番号8、配管下部保温材外への漏れ
56 〃 スチールシートからの漏れ
57 〃 配管上のナトリウムの流れ
58 〃 スチールシート上のナトリウムの流れ
59 〃 配管上のナトリウムの流れ
60 試験番号9 1m部スチールシート継目からの漏れ
61 〃 漏洩孔から15cm程離れた場合
62 〃 漏洩孔から50cm程離れた部分
63 〃 1m部漏洩検出器付近
64 〃 3m部漏洩検出器
65 試験番号10 垂直模擬配管の設置状態

図リスト

- 図 1 配管用Na漏洩検出素子
2 各種金属板の500℃(空气中)における酸化重量増加
3 配管用Na漏洩検出素子端末処理法
4 弁用Na漏洩検出素子
5 Na漏洩検出器接続図
6 漏洩電流の相対湿度依存性
7 漏洩電流の通電効果
8 模擬配管にとりつけた漏洩検出器の漏洩電流
9 Na漏洩予備試験装置
10 漏洩試験装置概念図
11 Na漏洩試験配管 A, B, C
12 Na漏洩試験配管 D
13 Na漏洩試験配管 E
14 3B水平配管スパーサー取付図
15 12B水平配管スパーサー取付図
16 3B水平配管 T.C., L.D. 取付図
17 12B水平配管 T.C., L.D. 取付図
18 3B弯曲配管 T.C., L.D., スパーサー取付図
19 3B 1m配管におけるナトリウム漏洩率と検出時間の関係

表リスト

- 表 1 模擬配管試験・試験条件
2 模擬配管ナトリウム漏洩試験結果

目 次

1. まえがき	1
2. 二次冷却用通電式ナトリウム漏洩検出器	2
2.1 配管用漏洩検出器	2
2.2 弁用漏洩検出器	4
2.3 漏洩警報盤	5
3. 漏洩検出器特性試験	6
3.1 耐熱試験	6
3.2 耐湿試験	6
3.3 弁用検出器作動試験	8
4. ナトリウム漏洩試験	9
4.1 予備試験	9
4.2 模擬配管試験	13
(1) 試験条件	13
(2) 試験装置および試験方法	14
(3) 模擬配管	15
(4) 結果と検討	18
5. まとめ	30
6. 謝 辞	31

1. まえがき

ナトリウム冷却型高速増殖炉においては、その配管あるいは機器からのナトリウムの漏洩を早期に発見し、火災や人身事故を未然に防ぐことが必要である。

高速実験炉「常陽」の二次冷却系は一重配管であり、配管とそれに巻きつけるスチールシートとの間に通電式ナトリウム漏洩検出器を設置することが計画されている。通電式ナトリウム漏洩検出器とは電圧の印加された電極間が漏洩したナトリウムにより短絡されることによって漏洩を電氣的に検出するという極めて簡単な作動原理に基づくものである。

ただし「常陽」の二次冷却系は雰囲気は空気であるために特に次の二点が問題となる。

先づ初めに通電式漏洩検出器の電極は一般に金属製であるため、それが空气中で高温に長時間加熱され厚い酸化膜が生成した場合検出特性の劣化につながる。

次に漏洩したナトリウムが空気により酸化されるため流動性が悪くなり検出器まで到達できない恐れのあることである。

そこで本研究では空気雰囲気用として試作した通電式漏洩検出器の特性試験および実機配管を想定した模擬配管にナトリウムを漏洩させこれを検出する試験を行ない、空気雰囲気における通電式ナトリウム漏洩検出器の有効性を調べることにした。

2. 二次冷却系用通電式ナトリウム漏洩検出器

2.1. 配管用漏洩検出器

空気雰囲気において通電式漏洩検出器を使用する場合は次のような点を考慮しておかなければならない。先づ漏洩検出器自身の問題として電極が酸化すること、および吸湿により誤動作すること。この2点の対策が必要である。通電式漏洩検出器の電極は一般に金属製であるから高温において長時間加熱されれば電極表面は酸化されてしまう。もっともナトリウムは高温においては多くの金属酸化物を還元するため、電極間の短絡が全く不可能になるようなことはないが、それでも検出時間の遅れは避けられない。また検出器が高温に加熱され酸化した後、予熱温度(150℃)付近に保持中ナトリウムが漏洩したような場合は電氣的短絡が非常に困難になることが予想される。また雰囲気が空気ということは、空調設備があるとしても湿気の影響は免れ得ない。つまり電極間の絶縁材が吸湿してしまい電極間がそのために短絡され誤動作する恐れがある。勿論検出器に水滴がつくような状態ではどんな絶縁物を使っても作動電流を極端に大きくとらない限り誤動作は避けられないが、100℃以上ではこのような状態にならないのでナトリウムの漏洩との区別はつけやすい。ただしいったん水滴がついたり、高湿度雰囲気におかれたりした後100℃以上に加熱されても水分が抜けず誤動作状態が続くようなことがあってはいけなない。すなわち絶縁材は乾燥しやすいものでなければならぬ。

次に空気雰囲気における漏洩ナトリウムの流れの問題がある。液体ナトリウム自身の粘性は水よりかなり小さいが空気中に漏洩したナトリウムの表面はただちに酸化されナトリウム酸化物の層により被覆されてしまう。このような状態では非常に漏れが悪くなり、見かけの粘性、表面張力も大きくなって細い間隙には入りにくくなる。したがって漏洩検出器の電極はナトリウムに接触しやすいようにできるだけ露出していることが望ましい。しかしなが

う通電式漏洩検出器は液体ナトリウムだけでなくどんな金属片が電極に接触しても作動するので誤動作を避けるためにも電極の露出度はあまり大きくできない。

また高温で空気中に漏洩したナトリウムは直ちに発火するため漏洩量が小さい場合は漏洩したナトリウムが全てたちまちにして酸化物になってしまいナトリウムの流れはあまり期待できないかも知れない。したがって漏洩検出器の電極部分が一点だけでは確実な検出が望めないので、電極部分(有効検出部)の長い漏洩検出器が要求される。

以上のことを考慮して試作した二次冷却用通電式ナトリウム漏洩検出器を図1.に示す。これは電極として金メッキを施した2本のニッケルテープの間にガラス繊維テープを絶縁物としてはさみ全体をガラス繊維テープでうせん状に巻いて固定したものである。2本の金メッキニッケルテープ間に電圧を印加しておきナトリウムがこの間を短絡することによって電極間に電流が流れ漏洩を検出する。金メッキニッケルテープを用いた理由は空気中で高温に加熱された場合の電極の酸化を防止するためである。金はほとんど酸化しないし、たとえ金メッキはがれがあってもニッケル自身の耐酸化性により断線にまでは至らない。勿論高温においては金はニッケル中に拡散し見かけは金色から薄褐色に変化するが、金；ニッケルは全率固溶体でなく、固体状態での二相分離を示すため、ニッケル表面における金濃度の減少は遅い。金メッキニッケルテープの酸化速度がいかに遅いかは図2. 各種金属の酸化重量増と比較すればわかる。

ニッケル、SUS304も比較的耐酸化性は良いが、それでもこれらの金属に6φの銅棒を押し当て、銅棒と金属板間にD.C. 10Vを印加しその間に流れる電流を測定するとニッケルは24時間、SUS304は53時間の加熱(500℃、空気中)によって1μA以下に減少してしまう。すなわち電極にニッケルやステンレス鋼を使用した場合は空気中に加熱されると電極表面

が絶縁被覆され検出特性の劣化をきたす。金メッキニッケルテープは酸化がほとんどないため約2500時間の加熱後でも接触抵抗はほとんどなく、上記のような測定を行なおうとしても通常的手段では10Vもの電圧を加えることはできない。

一方、図1.に示すような構造をとることにより、検出器は①可撓性に富む、②衝撃に強い、③長さを自由に変えられる、④耐湿性が良い、等の特徴を備えている。

この漏洩検出器の短所は最外層がガラス繊維テープであるため、金属片等により擦られると損傷する恐れがあり、取付工事においては十分な注意を必要とすることである。

この漏洩検出器は長尺の素子を製造しておき、それを適当な長さに切って使用するため端末処理は図3.に示すように行う。漏洩検出器の端末を写真1.に示す。

2.2 弁用漏洩検出器

弁用漏洩検出器はベローズが破損してナトリウムがベローズ内に入りさらに芯棒に沿ってグラウンドパッキン上に漏洩するのを検出するものである。試作した弁用漏洩検出器を図4に示す。これは白金芯線を一方の電極とし、もう一方の電極としては弁本体を利用している。

一般に弁用の通電式漏洩検出器としてはシース型熱電対の先端のシースを取り芯線を露出させたようなものが使用されている。ここで試作したものも基本的考え方は全く同じである。ただ空気中において高温で使用されるので2.1で述べたように電極の酸化防止と有効検出部の増加を考慮した。

すなわち電極には白金芯線を使用し、芯線先端にはアルミナ碍子をつけて芯線露出量を小さくした。アルミナ碍子なしで単に芯線の露出長さだけを大きくすると高温加熱により芯線のタレが生じ弁本体と接触して誤動作する恐れがある。弁への取付は弁のグラウンドパッキンより上部に穴をあけ、そこに

漏洩検出器をネジ込む方式でこれも一般にとられている方式である。ネジ栓は予め漏洩検出器のシースに溶接しておく。これを写真2に示す。

2.3 漏洩警報盤

漏洩警報盤は漏洩検出器への電圧の供給および短絡電流を検出してランプの点灯とブザーの発音を行なう役目を持つ。その接続図を図5に、外観を写真3に示す。

漏洩検出器に加える電圧は直流12Vとし、約7mAの短絡電流でマイクロリレーが作動し、警報を発する。

3. 漏洩検出器特性試験

3.1 耐熱試験

(a) 絶縁性

“常陽”二次冷却系のホットレック温度は 470°C であるので、漏洩検出器が高温に加熱された場合の絶縁性の測定を行った。長さ50cmの検出素子を空気雰囲気電気炉中で 500°C に加熱し、両極間に直流12Vを印加してその間に流れる電流を測定した。

電流は $2\mu\text{A}$ で安定し、そのまま200時間加熱を続けたが全く電流値に変化はなくガラス繊維テープの高温絶縁性が確認された。

(b) 耐酸化性

金メッキニッケルテープの耐酸化性の優れていることは2.1で述べた通りである。このことをさらに確かめるため空気中で高温に加熱した検出素子との検出特性の比較を次のようにしておこなった。加熱は 500°C 、650時間である。前述したように一度高温に加熱された検出素子が低温においてナトリウムと接するときに最も検出特性が悪くなると考えられる。そこで室温の検出素子に約 150°C の液体ナトリウムを滴下しながら検出素子に接続した漏洩警報盤の作動状態を見た。

結果は加熱前の検出素子も加熱後の検出素子も約0.5ccの液体ナトリウム一滴で瞬時に作動し、耐酸化性の優れていることが確認された。試験後の検出素子とナトリウムの状態を写真3に示す。

3.2 耐湿試験

(a) 恒温恒湿槽中での耐湿試験

漏洩検出器の吸湿による誤動作という恐れもあるため、絶縁抵抗が湿度によってどのような影響を受けるか調べた。

長さ40cmの検出素子を恒温恒湿槽(タハイ製“ルシファー”)に入れ両極間に直流12Vを印加し、その間の漏洩電流を測定した。温度は 70°C とし、湿度

を50~96%に変化させた。その結果を図6に示す。湿度の増加とともに漏洩電流も増加するが、96%でも40 μ A以下(300k Ω 以下)であることが判る。

以上の実験は常に電圧を印加した状態で漏洩電流を測定したのであるが、いったん電圧をさげて電流を切ってもまうと吸湿は著るしくなる。図7にその様子を示す。70 $^{\circ}$ C、97%において電圧を加えずにしばらく放置しておいた検出素子に12Vを印加した瞬間には数100 μ Aの漏洩電流が流れる。しかし、通電を続けることにより7分後には100 μ A、25分後には50 μ Aにまで減少する。

また検出素子の乾燥の速さを見るため湿度を97%から50%に急に変化させて見た(約10分間程かかる)。図7に示すように、湿度の減少とともに漏洩電流を急激に減少し、乾燥の早いことがわかる。なお図7の漏洩電流の周期的変化は恒温恒湿槽内の温度の変化に基づくものである。

(b) 模擬配管中での耐湿試験

二次冷却系配管の保温材は“カボサイト”を使用するが、配管が加熱されるときには保温材からかなりの水分発生が予想される。またヒータ近傍の温度上昇が速いと温度の低い部分に水滴のつく可能性もある。このようなことから実際に検出素子を配管にとりつけ加熱しながら漏洩電流を調べてみた。配管は後述のナトリウム漏洩検出試験に使用する3B1m配管であり、検出素子の長さは25cmである。昇温速度はおよそ13 $^{\circ}$ C/10minである。結果を図8に示す。

150 $^{\circ}$ C前後で保温材から薄い煙が発生するとともに漏洩電流が大きくなる。300 $^{\circ}$ C前後では漏洩電流は再び非常に小さくなるが400 $^{\circ}$ C付近から急激に大きくなり500 $^{\circ}$ Cではほぼ1 μ Aに落ち着く。

このような変化の理由は詳しくはわからないが、いずれにしても誤動作を起こす程の絶縁抵抗の低下は見られない。

3.3 弁用漏洩検出器作動試験

弁用漏洩検出器の作動試験は実際の $\frac{3}{4}$ B バルブのベローズをとって弁に入
ったナトリウムがすぐに漏洩検出器に到達するような状態で行った。
すなわち、試験用バルブの入口にフランジをつけて 4.2 で後述するナトリウム
注入装置に接続し、バルブの出口はふさいでしまった。弁中に漏洩させる
ナトリウムは約 50 cc とした。ナトリウム温度を 520°C 、検出器温度を 490°C
にしておき、検出器自身の熱起電力の変化をもってナトリウムの到達とし、
弁本体との短絡をもって漏洩の検出とした。この時間差はほとんどなかった。
また検出器のナトリウムとの接触抵抗を短絡電流から計算すると 1Ω
以下であった。

4. ナトリウム漏洩試験

2.1 で述べたように空気中に漏洩したナトリウムは酸化、燃焼という反応を起こすため実際の配管とスチールシートとの間隙に漏洩したナトリウムがどのような状態になるかはわかっていない。そこで“常陽”二次冷却系配管を想定した模擬配管を製作し、配管とスチールシートとの間隙にナトリウムを漏洩させ、漏洩検出器でこれを検出させるとともにナトリウムの流れ状態を観察するという試験を行なった。

またこの実験を行なう前に配管の小さい孔から空気中に漏洩するナトリウムの状態を直接観察するという予備試験を行なった。

4.1 予備試験

(1) 試験装置および試験方法

試験装置の構造を図9に示す。これは3B配管の真上に小さい孔があいた場合を想定したものである。細孔からナトリウムが空気中に漏れる場合、その状態に影響する因子としては配管温度、孔径、配管材質、配管肉厚、内圧等がある。

ここでは配管材質はSS41、配管肉厚を5.5mm、孔径を0.5mm、0.3mmとした。3B配管をそのまま使用しなかったのは配管中に入ったナトリウムが孔に達する前に酸化されることを避けるため内部空間を小さくする必要があったのと、孔の周辺はナトリウムの流れを見るためかなり露出させたいので、熱容量を大きくして冷却を防ぐ必要があったためである。

加熱はマイクロヒーターを巻きつけて行ない、保温材としてはカボナイトとアスベスト布を用いた。その状態を写真4に示す。

この装置を4.2で後述するナトリウム注入装置のフランジに接続する。このとき細孔はアルミテープでふさぎ、装置内はアルゴンガスで置換しておく。

(あまり十分な置換はできなかった。) (写真5)

ナトリウムタンクおよび試験装置の温度が所定温度まで上昇したら、細孔の

上の保温材を取除き、アルミテープをはがした後、バルブを開いて装置内にナトリウムを導入する。

試験は次の組合せによる4ケースについておこなった

- (i) 150°C (二次冷却系メンテナンス時温度) : 0.5%
- (ii) 340°C (二次冷却系コールドレグ温度) : 0.5%
- (iii) 470°C (二次冷却系ホットレグ温度) : 0.5%
- (iv) 150°C : 0.3%

(2) 結果と検討

ケース(i) 弁を開く (ヘッド圧 0.07 kg/cm²、ガス圧 0 kg/cm² G)

5分後 漏れがないのでガス圧を増加し始める。

10分後 ガス圧 0.2 kg/cm² G に達するが漏れなし。

孔表面温度が120°Cに低下してきたので再び保温材をかぶせる。

15分後 ガス圧 0.4 kg/cm² G に達する。

保温材をはずすとすでに20cc程漏洩していた。

続いて湧出している。

20分後 弁を閉じる。総漏洩量約200cc

漏れて溜っているナトリウムの温度が140°Cでは表面は酸化膜で覆われ、カポサイト、アスベスト布、配管との濡れが悪い。(写真6)

この状態のナトリウムに警報盤に接続した通電式漏洩検出器を軽く触れさせても、ナトリウム(実際はナトリウム酸化物)がガラス繊維テープにはじかれて動作しない。漏洩検出器をすこし押しつけると警報盤が動作する。

次に、漏洩の状態をもう一度観察するため再び弁を開き漏洩孔付近のナトリウムをピンセットで押しのけようとしたところ発火した。(写真7)

ケース(ii) 弁を開く (ヘッド圧 0.07 kg/cm²、ガス圧 0 kg/cm² G)

直ちにナトリウムが漏洩した。状態はケース(i)と同一

じであるが、約20秒後に自然発火した。

ケース(iii) 弁を開く (ヘッド圧 0.07 kg/cm^2 、ガス圧 $0 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$)

6分後 漏れがないのでガス圧を増加し始める。

10分後 ガス圧 $0.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ で漏れると同時に発火した。

すぐに砂をかけて鎮火させたが、ナトリウムは砂の上に湧き出では発火する。(写真8)

ケース(iv) 弁を開く (ヘッド圧 0.07 kg/cm^2 、ガス圧 $0 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$)

5分後 漏れがないのでガス圧を増加し始める。

10分後 ガス圧 $0.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に達するが漏れなし。

18分後 ガス圧 $0.35 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ でナトリウムが噴出した。

最高高さは約 30 cm 。(写真9)

ケース(i)では漏洩圧力が $0.2 \sim 0.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の間で正確にはわからない。

そこでケース(iv)でナトリウムの噴出高さ 30 cm ということから漏洩速度を求めると、初速度 v_0 は $v_0 = \sqrt{2gh_{\text{max}}}$ であるから $v_0 = 240 \text{ cm/sec}$ である。

ベルヌーイの定理により 0.5ϕ の孔でも漏洩速度は同じとすれば(i)の漏洩量は 0.47 cc/sec となる。保温材をとったときすでに 20 cc 程漏れていたから漏れはじめは約40秒前、すなわち $0.37 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の圧力のときとなる。

以上の結果ではケース(i)、(iii)、(iv)では $0.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 以上のガス圧を加えないと漏れがなく、(iii)だけはガス圧 $0 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ で漏れが生じている。

ガス圧を加えないと漏洩しない理由としては、ナトリウム酸化物が孔につまるため、あるいは液体ナトリウム表面に薄い酸化膜ができるためということが考えられる。ナトリウム酸化物がつまるということは全く無視することはできないが以上の結果に説明を加えることができない。

表面の酸化膜の影響は、これができるために孔の内壁との濡れが悪くなり、(写真9で濡れたナトリウムが配管上で球状になっているように濡れは非常に悪い。)ちょうど、水銀中にガラス管をたてた時の毛细管現象のような状

態になる。そのために圧力を加えないと孔の上端まで液面が上昇してこない。この濡れの悪さの程度は配管材料の表面状態によっても変る。実は実験に使用した試験装置(配管)の細孔の孔あけ加工(放電加工)は(i)、(iii)、(iv)は実験のおよそ二週間前に行なったものであり、(ii)は前日に行なったものであった。この放置時間の差が孔内壁表面の酸化状態の差となり、濡れの程度の相違につながったとも考えられる。ただしこれらの議論は推論の域を出ない。この実験を行なうに当たっての頭初の考えとして、空気中ではどの位小さな孔までナトリウムの漏れが可能なのか知りたいという期待もあったが、それは前述の圧力、温度、配管材質、配管内厚等に依存するだけでなく孔の内壁の状態も関係してくるので簡単な実験では系統的知見は得られない。すなわち配管に小さい孔があいたとしても、その孔の内壁の酸化状態、また孔がナトリウム側からあいたのか空気側からあいたのかによってナトリウム漏洩の状態も変化するものと思われる。

この実験で確認されたことは

- (a) 470°C で空気中に漏洩したナトリウムは瞬時に発火、燃焼する。
- (b) 340°C で空気中に漏洩したナトリウムもすぐに発火する傾向にある。
- (c) 150°C で空気中に漏洩したナトリウムはなかなか発火しないが、攪拌されたり、ナトリウムと反応の可能性のあるもの(保温材等)に触れたりすると発火することもある。
- (d) 150°C で空気中に漏洩したナトリウムは表面を酸化膜で覆われて、非常に濡れが悪くなり、細いすき間には入りにくい。
- (e) $150^{\circ}\text{C} \sim 470^{\circ}\text{C}$ で配管上面の 0.5° 程度の小さい孔から空気中へナトリウムが漏洩する場合、孔の出口でのナトリウムの酸化により孔が塞がって漏洩のとまることはない。

4.2 模擬配管試験

(1) 試験条件

“常陽”二次冷却系を想定した模擬配管でナトリウム漏洩試験を行なうについては次の点を調べることにした。

- (a) 水平あるいは $1/100$ 勾配配管でスチールシートに沿って配管軸方向にナトリウムを流す。
- (b) $1/100$ 勾配配管で配管上部から下部に向けてナトリウムを流す。
- (c) 垂直配管において上から下にナトリウムを流す。

そこで試験条件としては10ケースを選んだ。これを表1に示す。

(a)、(c)については3B配管とし、(b)については最大径の12B配管とした。温度はメンテナンス時の 150°C とホットレグ温度 470°C を選んだ。コールドレグ温度は 340°C であり、運転中の配管の大部分は $340^{\circ}\text{C} \sim 470^{\circ}\text{C}$ になるわけであるが、予備試験の結果からわかるように 340°C 以上ではナトリウムは自然発火する。いったん発火燃焼すればナトリウムの温度は少なくとも 600°C 以上になり、最初の温度はナトリウムの流れに対して無関係となる。したがって 470°C の結果は他の温度での結果と似たものとして取扱える。

ナトリウムの漏洩率はナトリウムの流れおよび漏洩検出器の作動特性に対して大きな影響を与える。

ナトリウムが燃焼した場合はナトリウム酸化物の塊が生じてナトリウムの流路を妨げ、燃焼しない場合でも表面の酸化膜がだんだん厚くなって流動性の妨げられることが予想される。したがって漏洩量が非常に大きくてナトリウムの酸化速度よりもナトリウムの供給速度が大きければ、ナトリウムはより遠くまで流れるであろう。また漏洩量が非常に小さければ、ナトリウムが流れる間もなく酸化物となり、漏洩孔周辺をふさいでナトリウムの流れは止まってしまう。そのようなナトリウムの流れと漏洩量の関係についてはまだ不明であるため、漏洩流量は $1\text{cc/sec} \sim 200\text{cc/sec}$ と大きな幅を設けた。

(2) 試験装置および試験方法

試験装置の概念図を図10に示す。この図はナトリウム注入装置と模擬配管(3B配管1m長)をフランジ⑳で接続した状態である。接続をスムーズに行なうため、ナトリウム注入装置側のフランジは溶接ベローズ㉑を介して取り付けられている。模擬配管は“常陽二次冷却系”と同様にシースヒーター、熱電対、漏洩検出器を取り付けた後、スチールシート㉒(SUS 304, 0.3⁺)で巻き、保温材㉓(カポサイト)をかぶせた上にカバーシート㉔(カラー鋼板)で外装してある。(写真10, 写真11)

配管には傾斜を測定するための傾斜測定端子㉕がついており、ここにスケールをたてて測量儀で測定しながら1/100勾配、水平の傾斜を設定した。

ナトリウムはナトリウム容器に入れてヒーター㉖により所定温度に加熱され、配管も所定温度に上昇したら1Bバルブ㉗を開いてナトリウムを導入管㉘を通じて配管とスチールシートとの間に漏洩させる。このときナトリウム容器内のアルゴンガス圧の変化をできるだけ小さくするためナトリウム容器内とガスボンベとの間には120ℓのバッファータンクが入っている。

ナトリウム容器には可動式の接点式液面計㉙がついており、これを予め液面から一定距離下方に設定しておくことにより、液面の降下速度がわかり、漏洩率がわかる。

漏洩孔から配管とスチールシートとの間隙にナトリウムが漏れたことは漏洩孔の真下に漏洩検出器を設置しておき、これの動作により確認し、この動作時刻と下流の漏洩検出器の動作時刻との差をとって検出時間とした。ただしナトリウムを配管上面から下に流す試験では漏洩検出器がナトリウムの流れを妨げることを恐れてシース熱電対を漏洩孔の直前に置き、この温度変化から漏洩開始時刻を求めた。この測定には警報室は使用せず、漏洩検出器に流れる短絡電流および熱電対起電力を電磁オシロで記録するようにした。ナトリウムと漏洩検出器電圧との誘導抵抗はこの記録から求められる。

漏洩したナトリウムが発火した場合、大量の煙の発生が予想されるため、模擬配管はステンレス鋼製の箱⑦に入れ上蓋⑧をかぶせて、ガムテープでシールした。(470°Cの場合のみ) 試験装置全景を写真13に示す。また8m長配管の場合の模擬配管設置状態を写真14に示す。

模擬配管の寸法を図11、図12、図13に示す。

フランジにはナタルOリング用の溝がついている。

漏洩率を1cc/sec、2cc/sec、20cc/sec、200cc/secにするための漏洩孔の口径とガス圧は次のように決めた。

1cc/sec : 0.7φ, 0.01 kg/cm² G

2cc/sec : 1.0φ, 0.01 kg/cm² G

20cc/sec : 2.0φ, 0.1 kg/cm² G

200cc/sec : 6.5φ, 0.1 kg/cm² G

これは常温においてエチルアルコール、水、キシレン等粘性定数の異なる液体について実際の試験結果を用いて測定した結果から決めたものである。

漏洩率は粘性定数にはほとんど依存せず、口径と圧力によってほぼ定まる。

なおナトリウム漏洩試験時における漏洩率の測定結果は

0.7φ, 0.01 kg/cm² G → 1.5cc/sec (470°C)

1.0φ, 0.01 kg/cm² G → 2.5cc/sec (470°C)

2.0φ, 0.1 kg/cm² G → 22cc/sec (470°C)

となった。

(3) 模擬配管

模擬配管にはシースヒーター、漏洩検出器、スパーサー、熱電対を取り付けたうえでスチールシートが巻かれる。

シースヒーターの取り付け断面図を図14、図15に示す。3B配管では片側に8φのシースヒーターが2本つき、12B配管では両側に10φのシースヒーターが2本ずつ取り付けられる。ヒーターの固定はスチールバンド(厚さ0.5mm)

により行なった。漏洩検出器の取り付けは図16、図17、図18に示す。水平配管では漏洩孔の真下に有効長100mmの漏洩検出器をつけ、配管の他端に有効長200mmの漏洩検出器をつけた。3m・8m配管ではこの中間にも有効長100mmの漏洩検出器をつけ、ナトリウム通過を確認することとした。12B配管では配管全長にわたって1本の漏洩検出器を取り付け、垂直配管では下部の弯曲部から水平部にかけて1本の漏洩検出器を取り付けた。

漏洩検出器の取り付け方法は素子の先端と終端に保護ガラス繊維テープとステンレス鋼テープを巻き、この部分にスチールバンド(厚さ0.5mm)を当てて配管に固定する。(写真64) ただしスチールバンドによる固定は配管端部の漏洩検出器だけとし、他の漏洩検出器の固定はスチールバンドがナトリウムの流れを妨げるのを恐れて針金とした。また漏洩孔真下の漏洩検出器はナトリウムの漏洩を邪魔しないように、配管端部の漏洩検出器はナトリウムと接触しやすいようにそれぞれ検出素子を固定部の中間で下方に撓ませておいた。一方中間の漏洩検出器はこれがあるためにナトリウムの流れが妨げられるようにできるだけ配管に密着させた。漏洩検出器の外部への引出しはステンレス鋼パイプをステンレスバンドに溶接したものを配管に固定し、そのパイプの根元に穴をあけ、そこから検出素子をパイプの中を通して外部に引出した。このようにすることによりスチールシート、保温材、カバーシート、の取り付け工事の際の素子の損傷を防ぐことができる。

空気中でナトリウムを配管とスチールシートとの間隙に流すためには配管とスチールシートとの間隙を流路全体にわたって維持しなければならない。そこで25×25のスチールアングルをバンドで配管に固定して、スペーサーとした。これの取り付け位置を図14～図18に示す。スペーサーは今回の実験でナトリウムの流路となる個所にのみ取り付けた。すなわち3B配管では底部だけであり、12B配管では片側側面と底部だけである。

間隙をどの程度に保てば良いかは予測できなかったが、予備試験におけるナトリウムの流れの状態および実際の配管工事上の問題等を考慮して一応約10mmとした。

模擬配管は架台の上に置かれるので配管の重量により、漏洩孔がスチールシートと密着してしまわないように漏洩孔の真下(3B配管の場合)あるいは真横(12B配管の場合)にはどうしても必要である。あとは3B配管では約1m間隔、12B配管では約50cm間隔にスペーサーをつけた。

スペーサーとしてこのようなアングルを用いると12B配管の場合、配管とスチールシートとの密着をさけるには図15、に示すように片側だけで少なくとも4個のスペーサーが必要となる。

スチールシートはSUS304で厚さ0.3mmのものをを使用した。これを配管に巻きつけ、重なり部を折り曲げてかしめて固定した。スチールシートは幅1mのものを使用したので配管長手方向に約1m毎に継目が生じる。この継目は単にスチールシートを重ね合わせるだけであり、上流側を内側にし、2~3cmの重なり量をとっている。なお漏洩検出器取り出し管が通るスチールシートの穴が大きすぎた個所が一部あったため、そこは更に幅10cm程度のスチールシートを重ねて巻いた。

シースヒーターとスチールシートの取り付け施工法および取り付け工事は“常陽”においてこれを担当する大同産業K・Kに依頼した。

(4) 結果と検討

実験結果を表3にまとめて示し、各試験における状況を次に説明する。

試験番号(1)

試験後、保温材をはずした状態を写真15に示す。ナトリウムは配管とスチールシートとの間隙を埋めさらに配管の中、スチールシートと保温材との間にまで侵入している。ここで注目すべきは配管とスチールシートとの間の液面よりも配管中の液面の高いことである。すなわち 150°C におけるナトリウムは配管に対して非常に濡れが悪く、スチールシートとの間の狭い間隙を完全に埋め尽くしてはいない。写真16はスチールシートをひらいた状態であり、ナトリウムの側面(すなわち配管とスチールシートとの間のナトリウム液面)は丸くなっていてこれも濡れの悪さを示している。

写真17は1m部漏洩検出器であるが、漏洩検出器に対しては濡れはあまり良くない。検出器はもっと下方に大きく挟ませた方が検出時間が短くなると予想される。写真18はナトリウムが漏洩検出器に付着している部分である。

試験番号(2)

この試験では結果的には8m部漏洩検出器は作動しなかった。

また中間に設置した4個の漏洩検出器もナトリウム流を妨げることを恐れて配管に密着させすぎたためナトリウムの通過を直ちに検出することはできなかった。

漏洩孔真下の検出器はバルブを開くとすぐに作動したが、その他の検出器は34分後に4m部検出器、43分後に2m部検出器、62分後に1m部検出器がようやく作動した。

タンクにはナトリウムは約2ℓしか入れてないので、 $20^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ の割合で漏洩すれば、100秒でナトリウムは全部出てしまうはずであったが、開始直後には約 $22^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ の割合で漏洩したものの、その後は漏洩率が減少し、約40

分後でも $0.3^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 程度の割合で漏洩が続いていた。

66分後に6m部検出器が作動し、この頃から配管より煙が発生し始め、4m部検出器取り出し口からは黄色い小さな炎と見えた。

配管の温度がさがってからこれを解体してみた。

写真19は配管下流端の保温材をはずした状態であり、ナトリウムは全然流れてきていない。7m部スチールシート継目からナトリウムが外に漏れ保温材と反応している。(写真20) 6m部スチールシートの継目からと大量に漏れて保温材は完全に穴があき(写真21)、スチールカバーは変色している。

5m部スチールシートの継目からの漏れはほとんどなく、保温材がわずかに変色しているだけである。4m、3m、2mの継目からと相当量漏れている。(写真23、24、25) 1m部では漏洩検出器案内管取り出し口からと少し漏れている。(これは配管側面よりやや上方に位置している。)(写真26)

配管上端部においては上流端への逆流はない。(写真27)

スチールシートをはいて見ると漏洩孔から2m位までは配管とスチールシートとの間に酸化物と金属ナトリウムとが連続して詰っている。(写真28、29) それから先は不連続的に金属ナトリウムと酸化物とがあり、その先端は7m部スパーサーに達してそこで止まっている。(写真32、33)

不連続になったのはナトリウムの燃焼とスチールシート継目からの漏れのためと思われる。

以上の状況からナトリウムの流れ状態を推量すると次のようになる。

漏洩孔から出たナトリウムは酸化しながらと下流に流れるが、スチールシートの凸凹やスパーサー等に多少妨げられるため、流れの先端は7mまで達したところで表面酸化膜が非常に厚くなり止まってしまう。続いて出てくるナトリウムはその前に出たナトリウムの酸化物に妨げられて流れがスムーズではなくなり、そのため漏洩孔周辺の酸化物の量を増し、漏洩孔からの漏れ自体が妨げられるようになる。

中間の漏洩検出器は配管と密着して取り付けため、ナトリウムとの接触状態が悪く作動しない。それでも少量ながらナトリウムが漏れ続けているため 2 m、4 m 部の検出器は作動した。

そのうち酸化によるナトリウムの温度上昇で急速に酸化速度が速まり、ついには一部では燃焼状態になったため 1 m、6 m 部の検出器が作動するとともに、配管外へ煙が発生した。

またスチールシートの継目からの漏れは 150°C におけるナトリウムの濡れの悪さから考えても、 150°C で漏れたのではなく、燃焼によって温度が上昇して初めて漏れたものと思われる。

なお 1 m、2 m 部の漏洩検出器は両端はナトリウムに浸っているが、有効検出部はナトリウムと接触していない。これは検出器も スペースアングルと 1 m 毎に取り付けたため、検出器の有効部分がアングルと一致し、しかも 150°C におけるナトリウムはアングルと配管の間よりもアングルとスチールシートとの間を流れ易かったためである。

試験番号 (3)

この試験では発煙はなかった。

模擬配管の保温材をはずした状態を写真 34 に示す。

大量のナトリウムが漏洩したため、スチールシートと保温材との間にまで相当量流れ込んでいる。この場合とナトリウムは濡れが悪く細いすき間には侵入し難いようである。(写真 35)

この模擬配管は、配管とナトリウムとの濡れの悪さは試験番号 (1) と同じであるが、3.2 (b) の試験で一度 520°C まで加熱したためか配管とナトリウムの接触した部分の粘着力が強く、スチールシートをはがして漏洩検出器の状態を損傷せずに観察することはできなかった。なお保温材とナトリウムとの反応は全くない。

試験番号(4)

この試験では短時間で漏洩検出器が作動し、煙が発生するとともに1分後には模擬配管下流端から炎が出て、1分間程燃焼するのが上蓋ののぞき穴から見えた。その跡を写真36に示す。

配管下流端ではナトリウムと保温材との反応が激しかったことがわかる。

(写真37)

スチールシート内には金属ナトリウムは全く残っておらず、全部酸化物になっている。(写真38)

試験後の漏洩検出器をエチルアルコールで洗淨したものを写真39に示す。ガラス繊維テープはそのままの形状で残っている部分もあるが、これを水につけると気泡を発生しながら全部溶けてしまう。すなわち直接ナトリウムと接触しない部分でナトリウム蒸気との反応で変質しているのと思われる。

試験番号(5)

バルブを開くとほとんど同時に漏洩孔真下の漏洩検出器は作動し、1分後にはこの検出器の取り出し管から煙が発生し始めた。煙は量が少なく間歇的である。

5分後 1m部検出器が作動した。

20分後 煙は4m付近から発生した。

30分後 タンク液面の降下がほとんどなくなったのでバルブを閉じた。

結局作動した検出器は漏洩孔真下と1m部だけである。

試験後の解体では漏洩孔の下流方向が酸化物でつまったため上流側の端部へと流れ出たことがわかった。(写真40)

1m部のスチールシートの継目からはナトリウムが相当量漏れ出た形跡がある。(写真41、42) この部分におけるスチールシートの重なり量は約2cm、最大すき間が3mmであった。

2m部のスチールシート継目から若干の漏れがある。(写真43)

スチールシート内部は漏洩孔から50 cm下流で多量の酸化物が配管とスチールシートとの間を埋め、シースヒーターの位置まで盛上っており(写真44)、ここでナトリウムの流れはほとんど妨げられている。

塊としてのナトリウムの流れは約1.2 mのところにとまっている。(写真45)

この塊を割ってみると、断面は金属ナトリウムと酸化物とが中心部まで混り合っており、ナトリウムがここまで流れて酸化したのではなく、ナトリウムとそれと同量程度の酸化物の混合物が流れついたと考えられる。(写真46)

ごく微量のナトリウムが流れたと思われる形跡は2 m部スチールシート継目の70 cm程度先まである。ここも検出素子をスチールシートと接触させておけば作動する可能性はあった。しかしながら、いずれにしても数cc/sec程度の漏洩量では8 m近く流れることはあまり期待できない。

試験番号(6)

この試験ではバルブを開くまえにバルブの下に付着していたナトリウムが滴下して漏洩孔真下の検出器が導通状態になった。しかレバルブを開くことにより、この検出器はより完全な導通状態になったため、漏洩開始時刻をほぼ正確に求められた。検出時間は2.2秒であり、この後すぐに大きな炎が配管より吹き出し、白煙も大量に発生した。そのためシースヒーター、漏洩検出器のリード線が焼損するくらいであった。(写真48)

写真49、50に保温材との反応状態を示す。これら反応生成物の大半は水をかけると溶けてしまう。

漏洩検出器はこの場合と一見原型を保っているように見える(写真51)

がナトリウムと反応しており、ガラス繊維テープは水に溶ける。

またナトリウム燃焼時に高温にさらされたため電極の金メッキはニッケル中に完全に拡散して銀色になっている。

スチールシート内には金属ナトリウムは全くない。

試験番号 (7)

漏洩検出器が5分30秒で作動した後、さらに5分程してから煙が発生し始め、その熱のため配管温度は最高 200°C まで上昇した。

漏洩孔から漏れたナトリウムは真直ぐ下に向ってガイドを乗越えて落ちている。(写真52) 横のヒーターの上へ向う流路は十分なスペースがあるにもかかわらず、最大でも数mm以下の間隙しかないガイドとスチールシートとの間に落ち込んでいる。これはナトリウムに加わる圧力の大きさが問題である。すなわち直下方向へはガイドから漏洩孔までの高さ約15cmのナトリウムの圧力が加わるが、もし漏洩孔の位置が、ガイドと近かったり、3B配管の場合等は圧力が数cmナトリウムにかならないので、ナトリウムは小さい間隙を流れ落ちず、むしろ横に流れて、十分間隙のあるヒーター上を乗越えて下に落ちるかも知れない。

ガイドを乗り越えたナトリウムはそのまま配管に沿って流れ落ちるのではなく、漏洩孔から $1/3$ 円周程度のところでスチールシート側に落ち、そこからはスチールシートに沿って底部まで流れる(写真53) 底部では $1/100$ 勾配のため下流(左方向)に流れる。

漏洩検出器は全体にわたってナトリウムと接しているのではなく、全長の $2/3$ 程度だけが、短絡状態にあると思われる(写真54)。

配管底部は激しい燃焼を起した形跡はないが、ナトリウムはほとんど酸化物になっており、金属ナトリウムは少なくなっている。

試験番号 (8)

漏洩検出器作動後約5分で発煙が生じた。

カバーシートをはずしてみるとナトリウムが配管底部上流端から漏れ、保温材には完全に穴があいている。(写真55)

また1m部のスチールシートの継目側面からわずかの漏れがある。
(写真56)

ナトリウムの流れ経路は写真57からわかるように漏洩しから
ほぼ真直ぐ下に流れガイドおよびヒーター端部を乗り越えて
底部に達している。底の流れはあまり良くなく、上流から約
80cmまでしか流れていない。また30~40cm部分に酸化物
が大量にたまっており、このため上から落ちてきたナトリウムは下流
への流れが妨げられ、上流端からスチールシート外へ流れ出たので
あろう。(写真58)

この試験でも漏洩検出器は部分的にしか短絡状態になっ
ていない。

ナトリウムの流れは真下への流れの他にヒーターに沿っての
分流もあり、ヒーターの左端で下に向って落ちているが、量が
少ないため底まで行かないうちに酸化してとまってしまっている。
(写真59)

試験番号(9)

漏洩孔真下の検出器作動後6分で煙が出始める。
10分後に1m部検出器が作動したが、20分後にはタンクの
液面の低下がほとんどなくなり、結局3m部検出器は作動
しなかった。

保温材をはずすと1m部スチールシート継目から漏れのあること
がわかる。(写真60) この継目は約3cmの重なり合いで、すき
間はほとんどない。このような継目からも相当量漏れる。

漏洩しから15cm程のところまでナトリウム酸化物がいはいつま
っており、ナトリウムの流れの妨げとなっている(写真61)

ナトリウムの流れの最先端は約1mであり3m部漏洩検出器

には何の変化もない。(写真 63, 64)

試験番号 (10)

垂直模擬配管の設置状態を写真 65 に示す。

バルブを開いて約 10 秒後にはナトリウム導入管の根元およびビーターの上部取出口から白煙が発生した。これは配管が縦型であり空気の対流が著しく、煙が外部へ逃げやすいため、煙の出が速いのであろう。

配管のナトリウムを漏洩させる側は検出器取付側と反対にしたため落下したナトリウムが直接検出器に触れることはなく、エルボの部分で配管の反対側にまで回り込んで初めて検出される。

エルボの部分ではスチールシートを配管に完全に密着させて巻きつけることはどうもできないので、スパーサーによりナトリウムの回り込みのための間隙を故意に設けるようなことはしなかった。

約 6 分後にはエルボ部分からカバーシート外側に少量のナトリウムが燃えながら落ちた。エルボ部分はスチールシート、保温材、カバーシートとも継目が多いので、垂直部でナトリウムの漏れがあった場合はここから外に洩れ出す可能性が大きいであろう。

以上のような実験結果から次のようなことが考えられる。

＜漏洩検出器の特性＞

470℃ではナトリウムに触れる限り作動は確実であるし、燃焼が激しい場合は直接の接触がなくてもナトリウム蒸気、あるいは炎等により作動が生じている。

150℃のナトリウムは漏洩検出器に対して濡れは良くないので、軽くふれるだけでは作動は困難であり、そのため検出時間は一般に470℃の場合よりも長い。この点の改善のためには検出器の下方への撓みを十分にとり、スチールシートにできるだけ接近させて、流れてくるナトリウムによく浸るようにすることが必要である。

検出器が漏洩を検出した時の電極間の短絡状況は試験番号(2)の2m部中間検出器以外全ての場合において、数MΩから10Ω以下に瞬時に変化し、この中間付近の抵抗値をとるということとはなかった。

試験番号(2)の2m部中間検出器だけは例外としてこの変化が10数分間にわたって連続的に徐々に行なわれた。この原因は不明であるが、離れた場所におけるナトリウムの燃焼の結果、ナトリウム蒸気等が流れてきた結果かも知れない。

漏洩検出時の短絡抵抗は表2に示すように10Ω以下になる（実際には数mの検出素子を使用するので抵抗はさらに小さくなる。）ので印加電圧が12Vならば短絡電流は1.2A以上となり警報盤の作動電流を数10mAとすれば実用的に十分である。

＜1/100 勾配配管における漏洩ナトリウム流れとその検出＞

漏洩率が数cc/sec以下の場合470℃では燃焼のためにたちまちにして大量の酸化物が形成されてナトリウムの流れを妨げるので2m以上の流れは期待できない。150℃では漏洩率20cc/secで7mまでは流れたが、数cc/secの場合はやはり流れの距離は短くなるであろう。したがって、数cc/sec程度の漏れを

早期に検出するためには漏洩検出器は少なくとも2m毎には取り付けなければならない。しかしナトリウムの漏れは数 cc/sec とは限らず、とっと小さな漏れもあるかも知れない。そうするとナトリウムの流れの距離はとっと短くなるから結局ナトリウムの漏れは配管のどんな場所にでも生じる可能性があり、しかもどんな小さな漏れもすぐに検出しなければならないという考えに立つ限り漏洩検出器は配管全面に取り付けなければならないことになる。

1m配管における漏洩率と検出時間との関係を図19に示す。漏洩検出器による検出時間はナトリウムが酸化して流れてこない場合は無限大になってしまうのでデータをグラフにしても、検出時間の長い方向への外挿は信頼性はほとんどない。

<スパーサー>

この実験では配管とスチールシートとの内にナトリウムの流路を作るためアングルをスパーサーとして利用して約10mm程度の間隙を維持させた。実験の結果この間隙の小さいことが直接の原因となってナトリウムの流れが止まり不都合を生じたということにはなかった。確かに間隙を大きくとればより遠く、より遠くナトリウムが流れる傾向にはなるが、流れの止まる根本原因が酸化、燃焼にある限り多少間隔を広くしても大きな効率は見込めない。配管の上部から下部に流れ落とす実験でも間隙は十分であった。470℃の場合等はスパーサーをつけなくても、スチールシートからの漏れを考慮すると1mm程度の間隙があれば流れ落ちると予想される。また垂直配管においては特にスパーサーを使用しなくとも、ヒーターや支持金具等による間隙を通して落下する可能性が大きい。470℃では特に狭い間隙でも通りやすいし、150℃でも漏洩率が数 cc/sec 以上ならば落下するものと思われる。

スパーサーの材質は炭素鋼であるが、150℃においてはナトリウムは炭素鋼とは濡れが悪くてスパーサーのアングルと配管(炭素鋼)との間には入りにくくアングルとスチールシート(SUS 304)との間を流れやすかった。

これは結局、ナトリウムの流路を多少小さくしていることとなる。

したがってスパーサーとしてはステンレス鋼を用いるかあるいはスパーサーと配管との間に間隙をつけるのではなく、スパーサーとスチールシート、または配管とスチールシートとの間隙を大きくするような構造にした方が良い。

<スチールシートからの漏れ>

470℃の実験においては、ほとんどの場合スチールシートの継目からナトリウムが外に漏れていた。

ナトリウムの流れは漏洩孔から1m以内のところで酸化物により大半が堰止められるのでスチールシートからの漏れが全くなっても、ナトリウムの流れ距離が増えることは考えられない。しかし防炎上の見地からはこの漏れはない方が望ましい。スチールシートを重ねる部分は一応上流側のスチールシートを内側にしているが、1/100の公差では3cmの重なりの高さの差は0.3mmとなり、ナトリウムが継目付近に溜った場合は上流側を内側にする効果は全くなくなる。しかも1mm以下のすき間しかないような継目からも漏れているので、ただ重ね合わせるだけで漏れをなくすることは難しい。

スチールシート内では酸化により流れが妨げられるような状態になるのにスチールシートの小さいすき間から漏れるのは次のような理由によると思われる。

スチールシート内では酸化したナトリウムがそこにそのまま堆積していくために流れが妨げられるが、スチールシートの継目から出たナトリウムは保温材(カボサイト)を侵してそこに穴をあけ、継目からどんどん出るナトリウムは継目出口に滞ることなく下に落ちる。また継目の重ね合わせのすき間内にナトリウムが充満して流れ続ける限り、すき間内では酸化が生じにくい。

5. まとめ

空気中で使用される二次冷系用通電式漏洩検出器を試作した。

配管用は金メッキした2枚のニッケルテープをガラス繊維テープで絶縁したものであり弁用は熱電対式を改良したものである。

この検出器の耐熱性耐湿性を調べるとともに模擬配管において実際にナトリウムを漏洩させその流れの状態と検出器の作動性を調べた。

試験の結果の要点をまとめると、

- (1) 配管用検出器は空気中において 500°C で使用されても電極の耐酸化性、絶縁の耐熱性は十分である。
- (2) 配管用検出器は耐湿性が良好である。
- (3) 150°C および 470°C においてナトリウムと接触した漏洩検出器の作動性は良好であるが 150°C の場合はナトリウムと検出器との濡れ状態が悪く、 470°C に比べると検出時間が遅い。そこで検出器を配管に取付ける時は、下方に傾かせてスチールシートとできるだけ接近した状態にすることが望ましい。
- (4) 漏洩警報盤の作動電流としては印加電圧 12V の場合、数 10mA 程度にとれば十分である。
- (5) ナトリウムを配管とスチールシートとの間を流すためのスペーサーとしては間隙を約 10mm とれるようなものを使用すれば十分である。
- (6) $1/100$ 勾配の配管から空気中に漏洩したナトリウムは漏洩率が数 cc/sec 以上であれば 1m 以上流れる。
- (7) しかし 470°C においては直ちに燃焼して酸化物を形成するため漏洩率 数 cc/sec 以下では数 m 以上の流れは期待できない。
- (8) 垂直面におけるナトリウムの落下速度は速いので、垂直配管における漏洩、 12B 配管上面からの漏洩試験の検出の信頼性は高い。
- (9) 470°C ではスチールシートの継目からの漏れが大きい。

6. 謝 辞

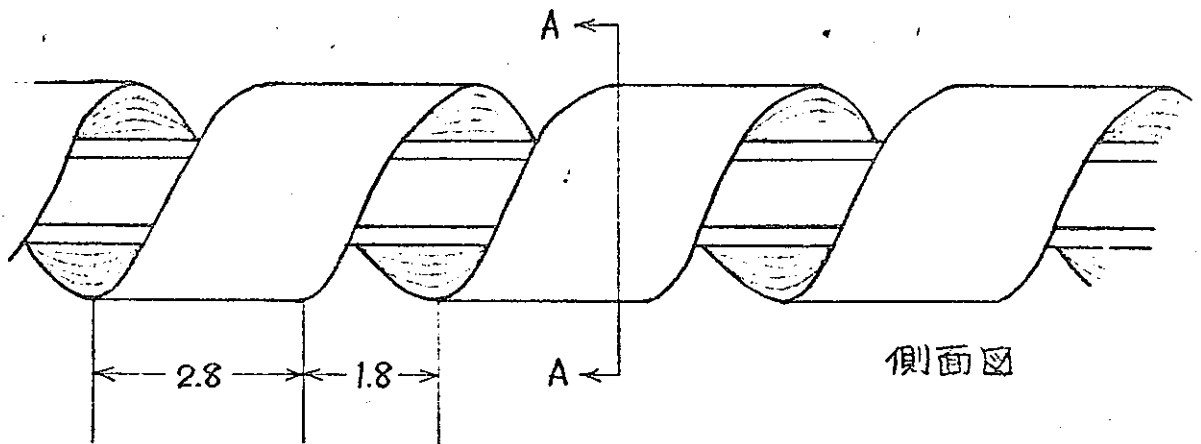
本研究の遂行に当り、動力炉・核燃料開発事業団の関係各位には、いろいろ御指導、御教示を賜りました。とりわけ高速増殖炉建設部の原 広氏には、計画の段階から終始有益な御意見をいただきました。

また模擬配管の加熱設計につきましては、三菱重工業神戸研究所の藤本氏にお願い致しました。

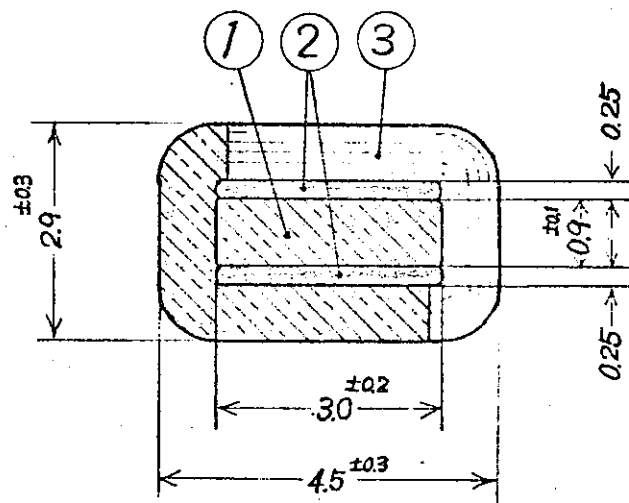
ここに記して、衷心より感謝の意を表します。



記 録	所要数 (個)					品番 ITEM	品 名 DESCRIPTION	材 料 MATERIAL	部品図番号(資材コード) MATERIAL CODE	備 考 REMARKS
						1	ガラスファイバーテープ	無アルカリガラス		
						2	ニッケルテープ	全面金メッキ2μ		
						3	ガラスファイバーテープ	無アルカリガラス		



側面図



A-A断面図

高木 敏 田

8p
Pnc 5
中研 1

改定CHANGE

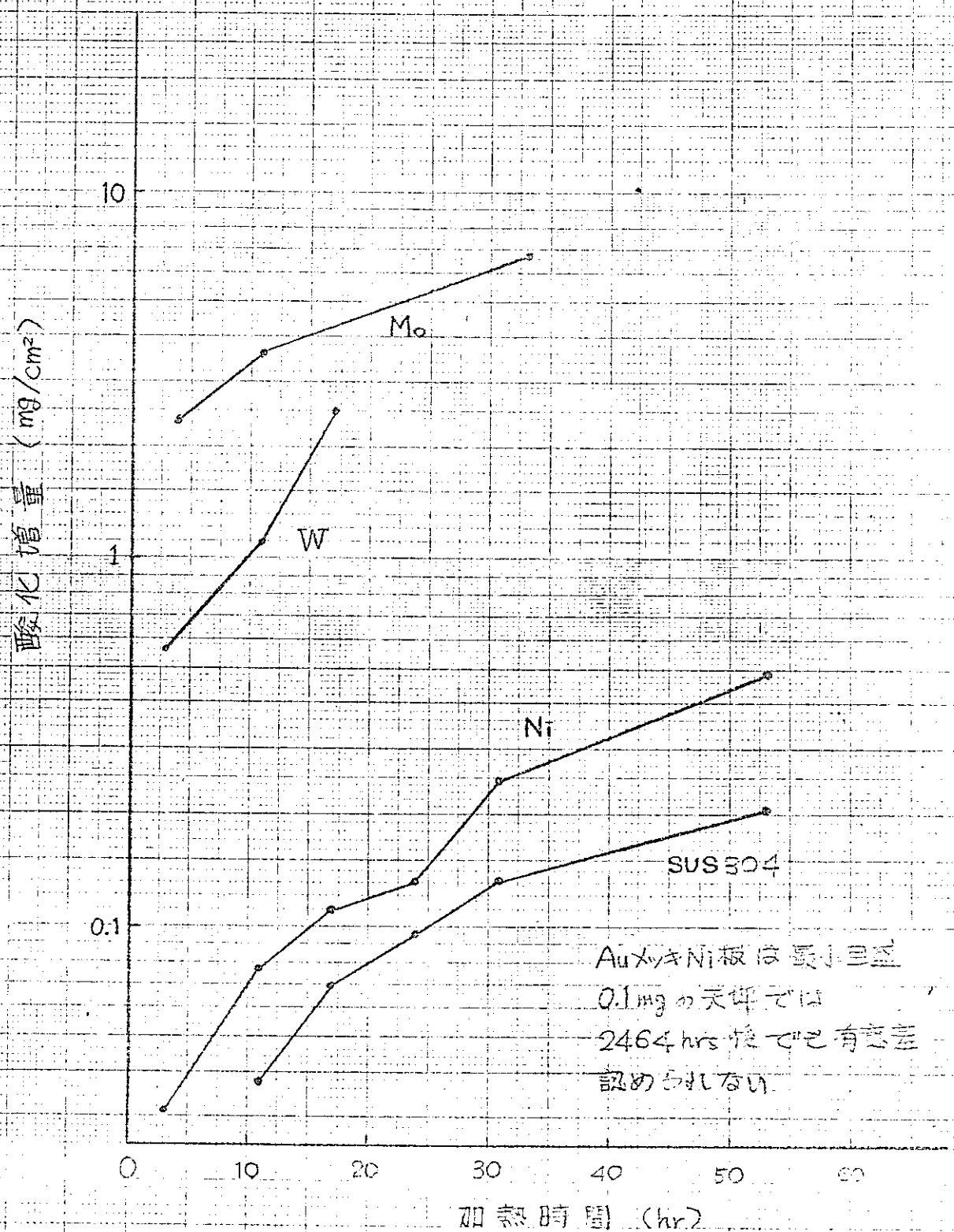
A

図 1. 配管用 Na漏洩検出素子

常用	指定以外二対スル部等
保留	
一時	加工加工、中研、材料
商用	製造加工、材料、材料

控 出 図 先	第3角法 3RD ANGLE PROJECTION		MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION				配管用 Na漏洩検出素子	
	DIM IN mm		DRAWN	CHECKED	DESIGNED	APPROVED		
	尺 寸	1/2 NTS	管 原			高 敏 田		
	DATE	48.3.12						
							XNN-1010- 9	

図2 各種金属板の500°C (空气中)における
酸化重量増加

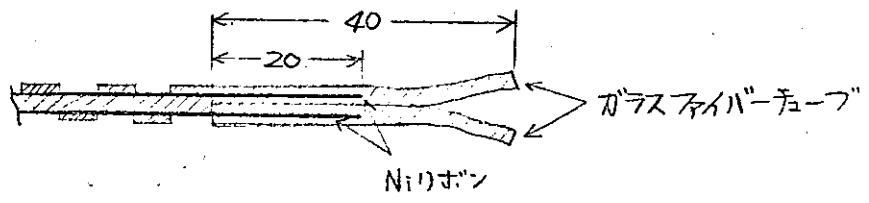


三菱電機株式会社

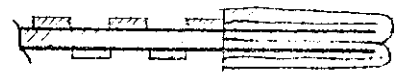
作成	菅原	改定	A				
検認							

配管用 Na 漏洩検出素子 端末処理法

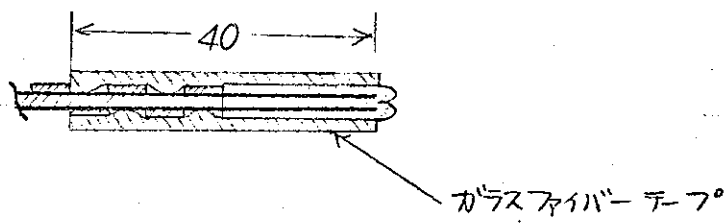
(1) Niリボン端部に ガラスファイバーテープを差し込む



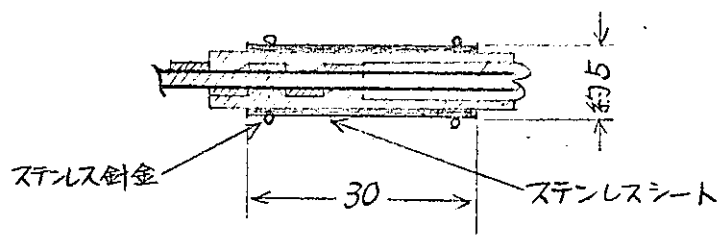
(2) 差込んだ ガラスファイバーテープを 外側に折曲げる。



(3) ガラスファイバーテープで 端部から 40mm の中で 3 巻きする。



(4) さらに その上を ステンシルシート (SUS304, 0.15mm) で 2 巻きし、
ステンシル針金で 固定する。

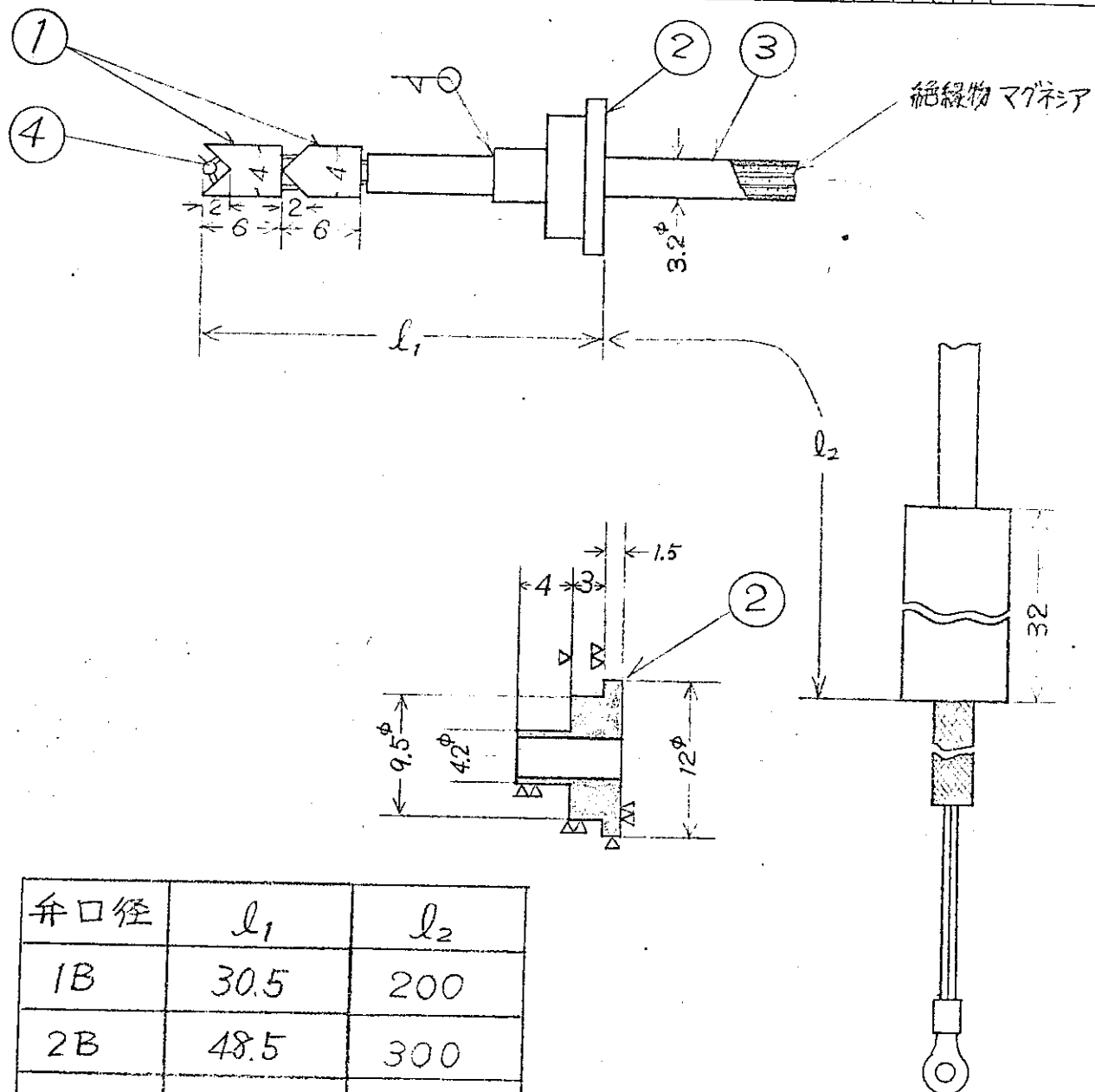


注: (4) を行なうのは 配管用のように スチールバンドで 固定する場合のみ
であり、機器用のように 止金具で 固定する場合は (4) 項は 行なわ
なくともよい。

図 3.



記 録	所要数 (個)	REQ'D PER SET	品番 ITEM	品 名 DESCRIPTION	材 料 MATERIAL	部品図番号(資材コード) MATERIAL CODE	備 考 REMARKS
			1	アルミナ硝子			
			2	フランジ	SUS27		
			3	シース	SUS27		
			4	芯線	Pt 0.5φ		



弁口径	l_1	l_2
1B	30.5	200
2B	48.5	300
3B	30.5	600

改定CHANGE

A

図4. 弁用Na漏洩検出素子

常用	指定以外ニ対スル許容差
保留	
一時	加工 材料
商用	材料加工 材料加工 材料加工

第3角法 3RD ANGLE
PROJECTION

DIM 1:1 mm

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION

DRAWN CHECKED DESIGNED APPROVED

高橋

小島

弁用Na漏洩検出素子

DK-031-020

SCALE 2/1 NTS

DATE 47.12.6

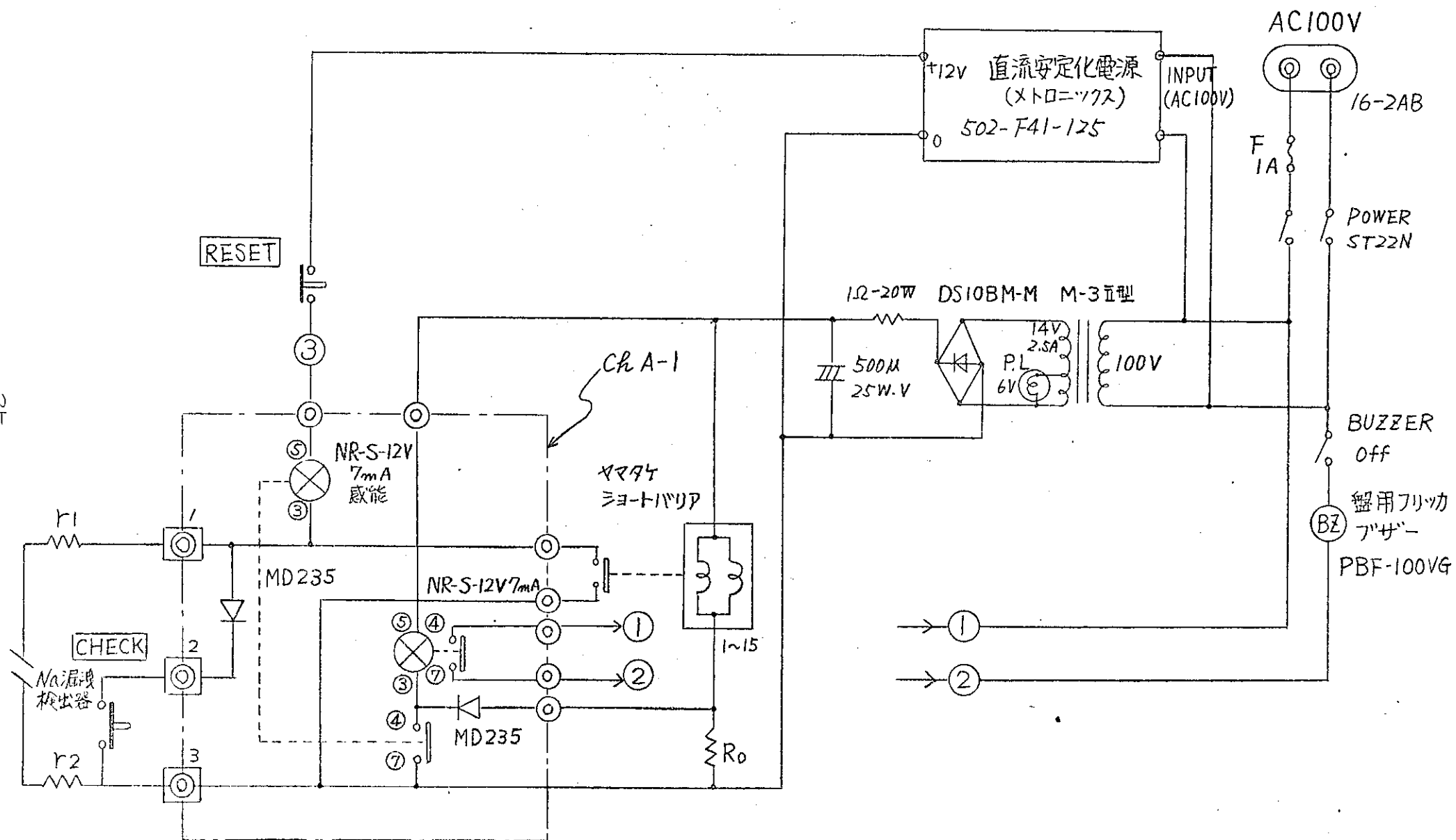


図5. Na漏洩検出器接続図

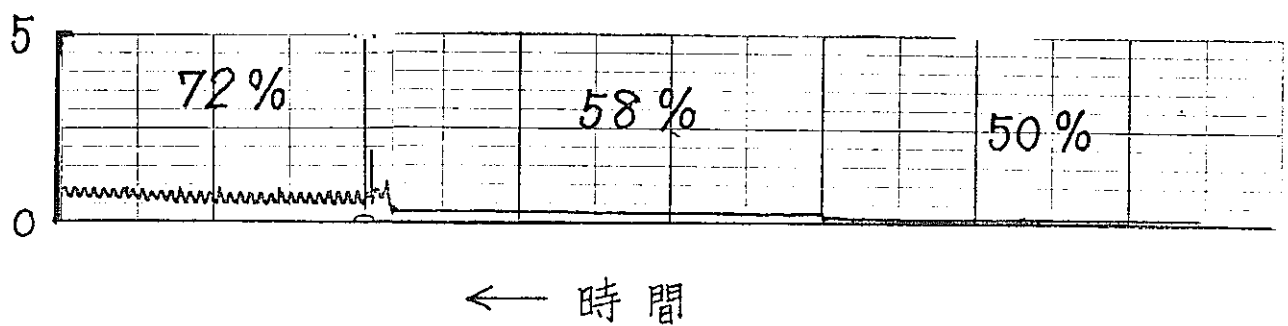
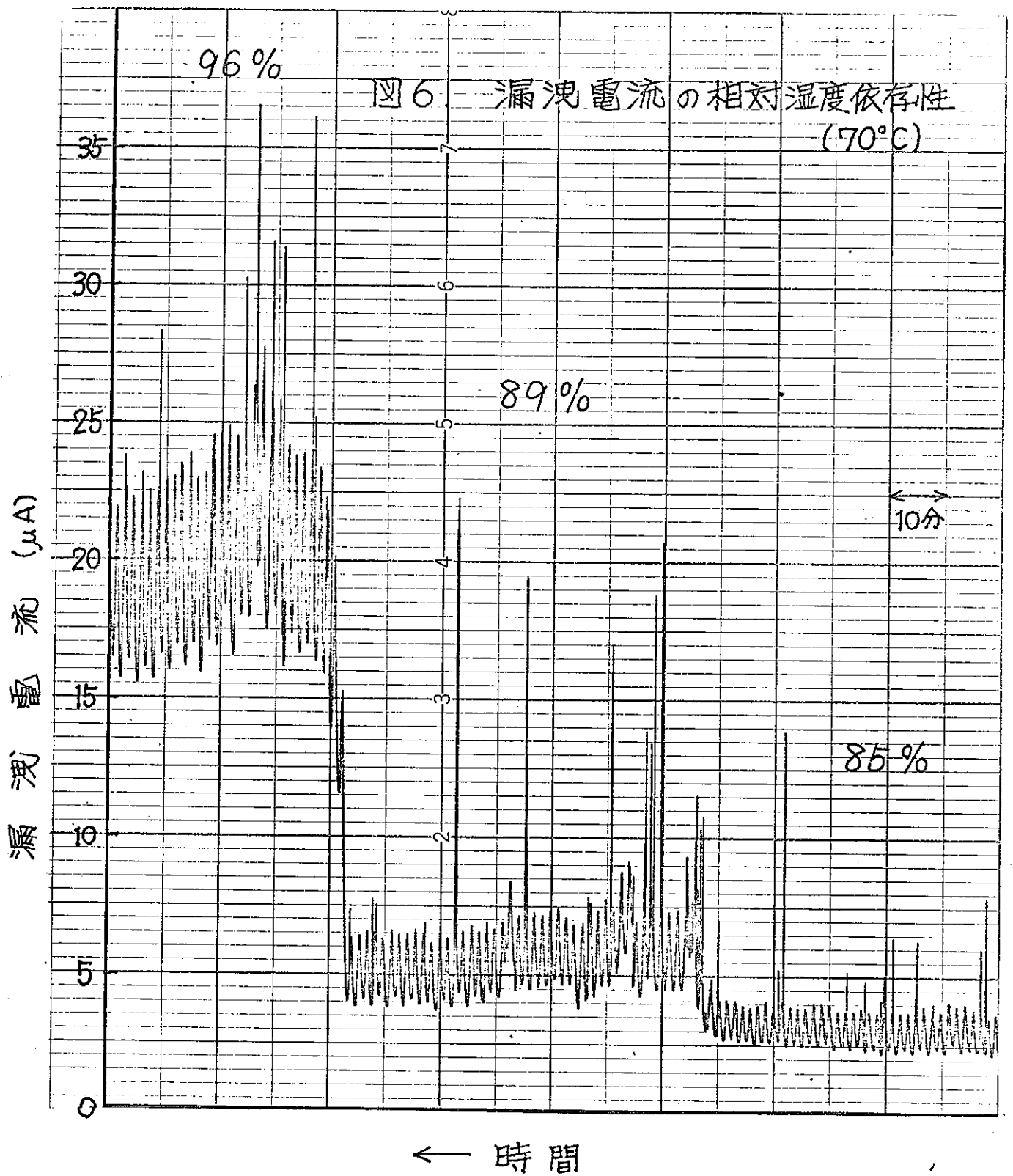
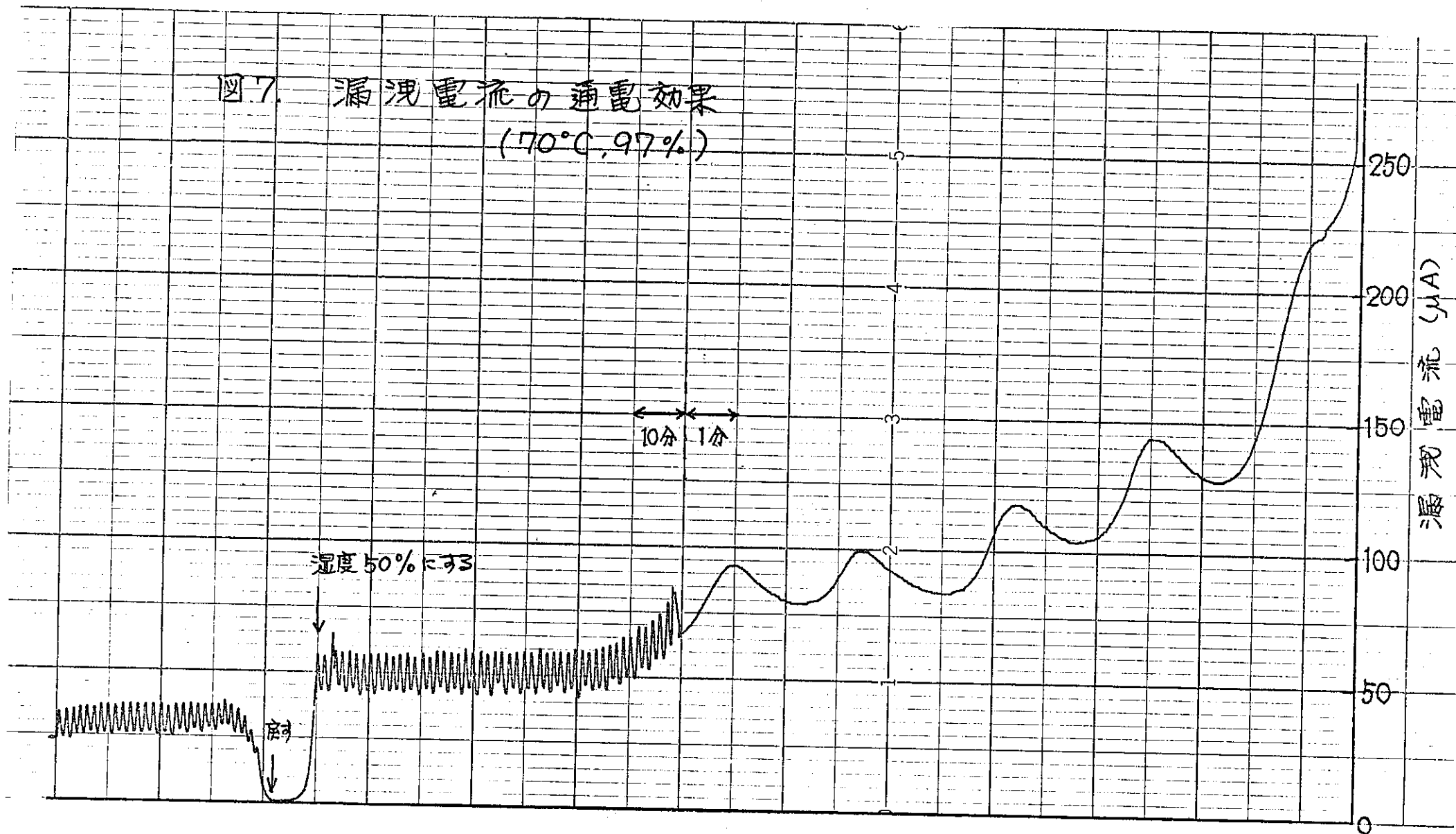


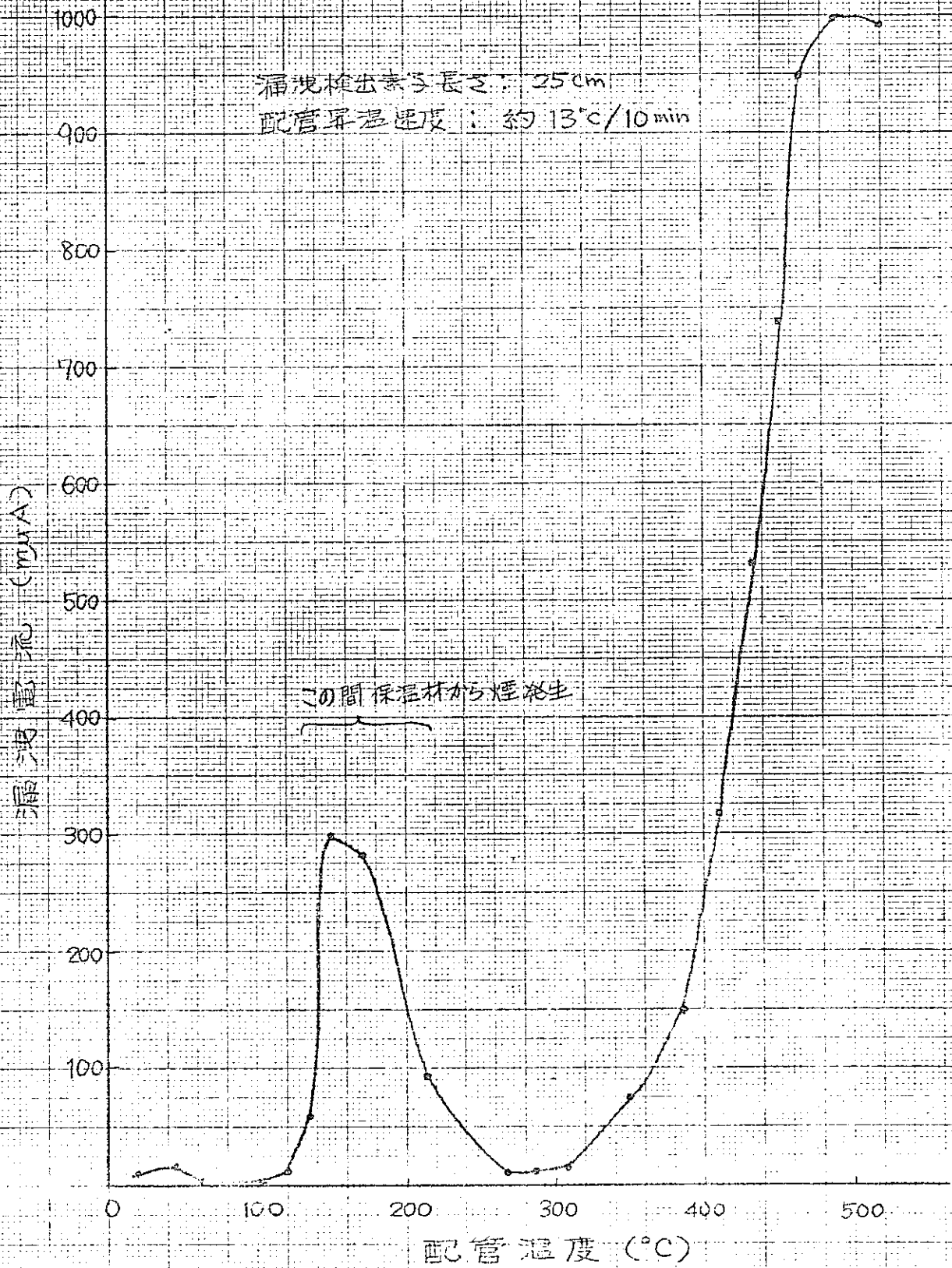
図7. 漏洩電流の通電効果
(70°C, 97%)



← 時間

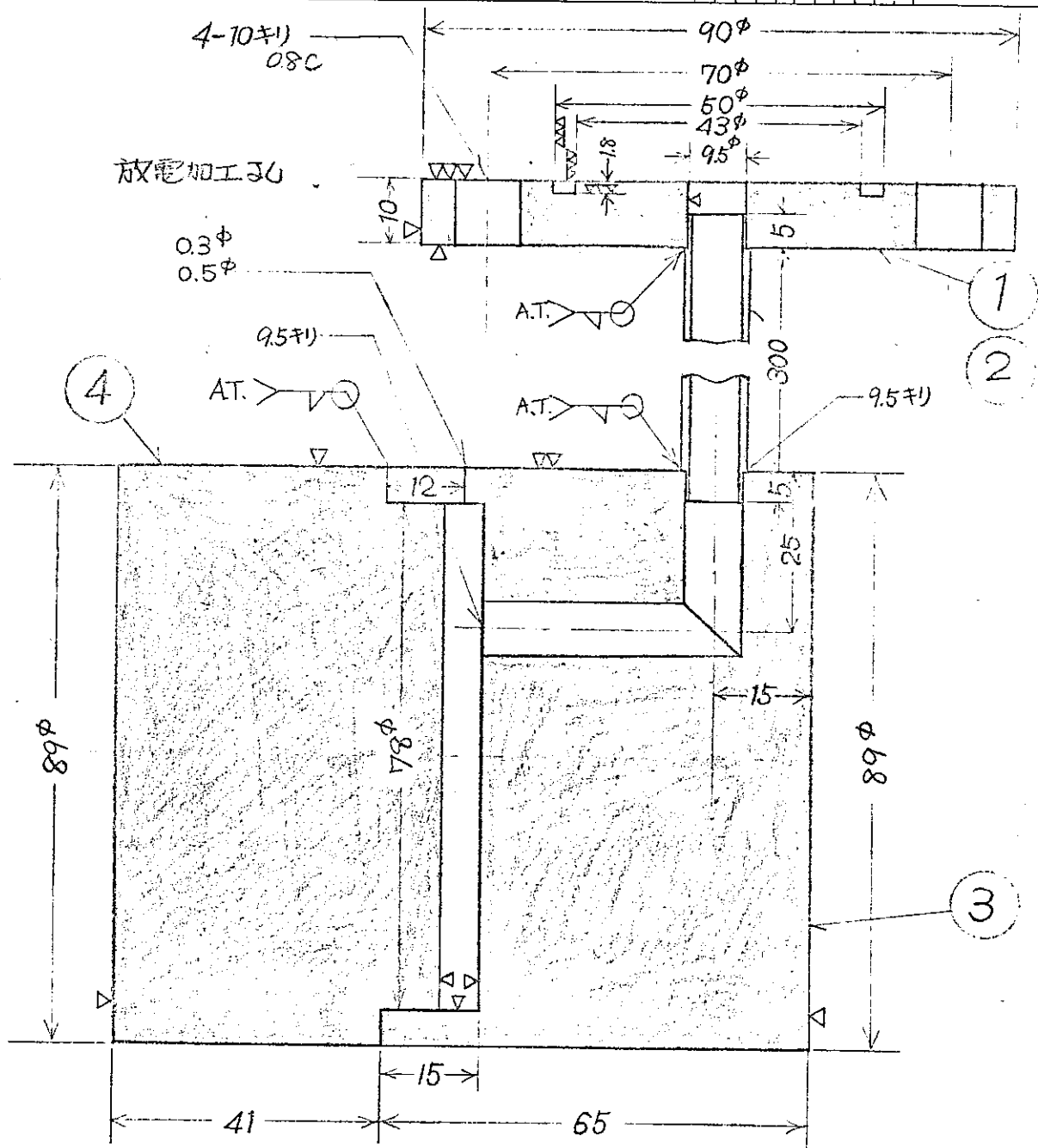
漏洩電流 (μA)

図 8 模擬配管に切りつけ漏れ検出器
の漏洩電流





記 録	所要数 (個)	REQD PER SET	品番 ITEM	品 名 DESCRIPTION	材 料 MATERIAL	部品図番号(資材コード) MATERIAL CODE	備 考 REMARKS
			1	フレンジ	SUS304		
			2	パイプ	SUS304 TREGA Sch 10		
			3	模擬配管 A	SS41		
			4	B	SS41		



改定

A

図9. Na漏洩予備試験装置

常用

指定以外ニ対スル許容差

保留

一時

商用

加工

削り加工(中) 5

鋳造加工 5

プレス加工 5

第3角法 3RD ANGLE PROJECTION

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION

DIM IN mm

DRAWN CHECKED DESIGNED APPROVED

尺 寸 SCALE 1/1 445

菅原

原

47.12.12

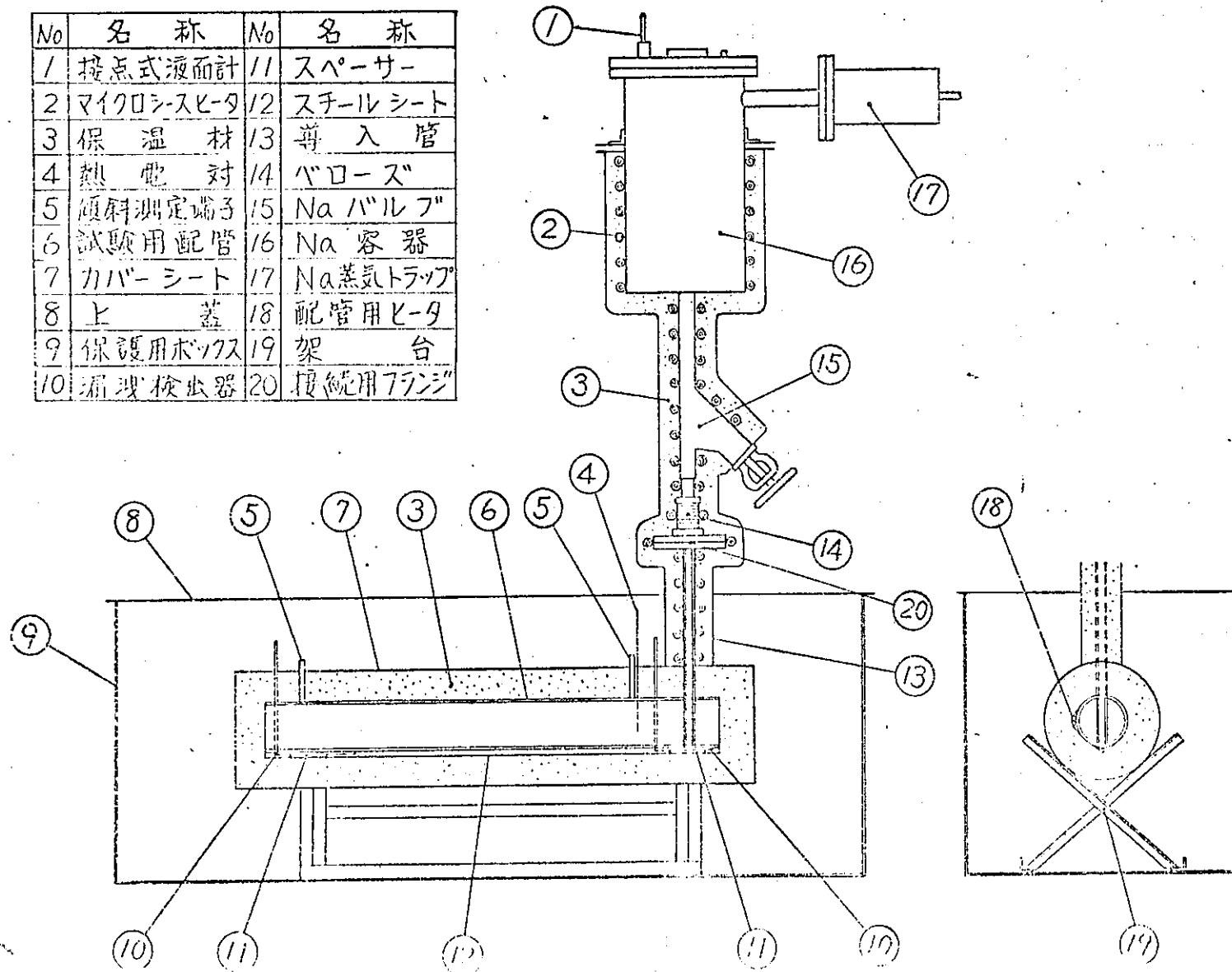
Na漏洩予備試験装置

DK-031-021

控
出
図
先

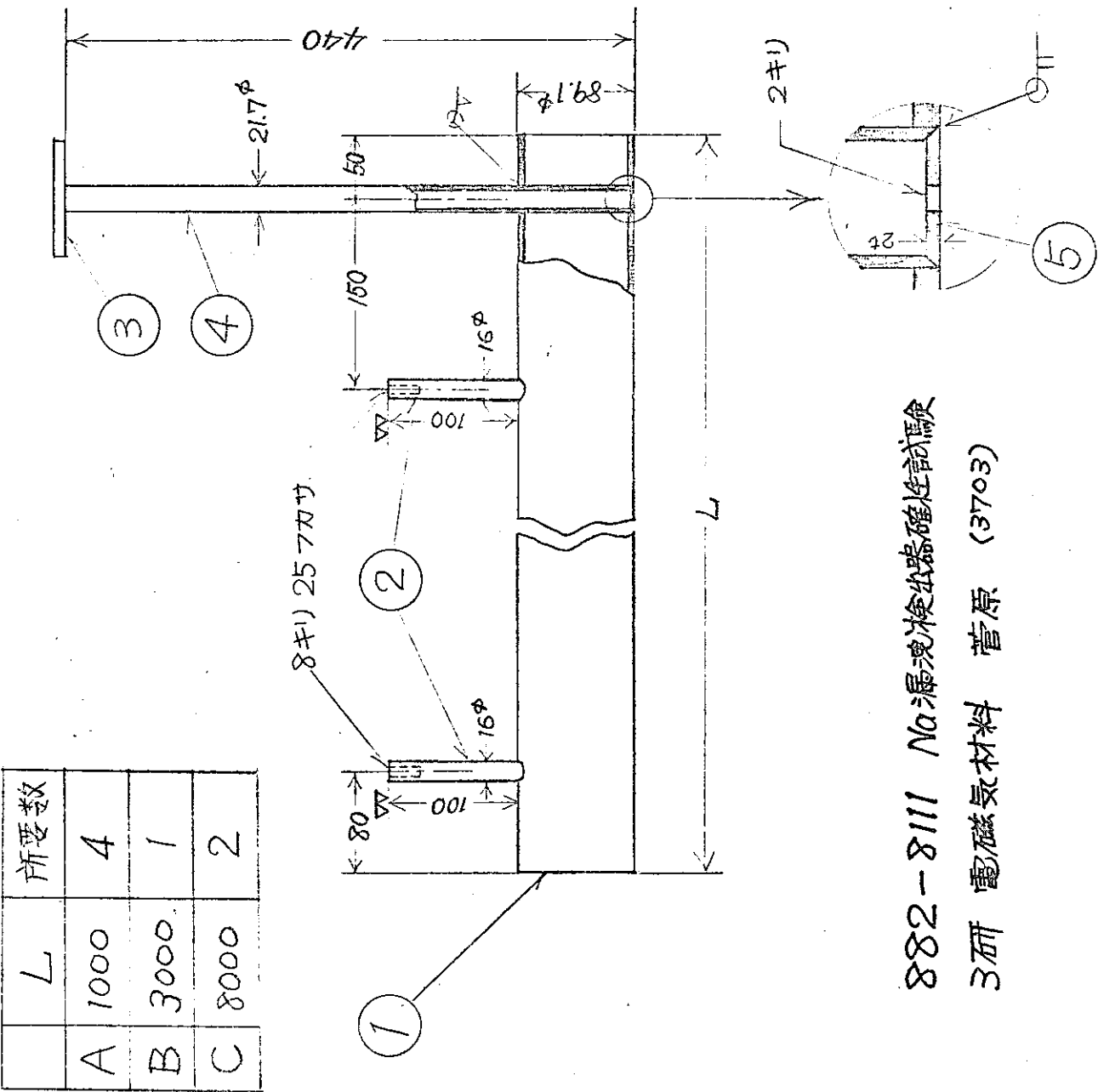
図10. 漏洩試験装置概念図

No	名 称	No	名 称
1	接点式液面計	11	スペーサー
2	マイクロヒータ	12	スチールシート
3	保温材	13	導 入 管
4	熱 電 対	14	ベローズ
5	傾斜測定端子	15	Na バルブ
6	試験用配管	16	Na 容 器
7	カバーシート	17	Na 蒸気トラップ
8	上 蓋	18	配管用ヒータ
9	保護用ボックス	19	架 台
10	漏洩検出器	20	接続用フランジ





記 録	所要数 (個)	REQD PER SET	品番 ITEM	品 名 DESCRIPTION	材 料 MATERIAL	部品図番号(資材コード) MATERIAL CODE	備 考 REMARKS
			1	Na 模擬配管	SGP		
			2	勾配測定端子	SUS27B 16φ		
			3	フレンジ		DK031-010	
			4	Na 導入管	SUS27TP15A 10s		
			5	底板	SUS27CP 2.0t		

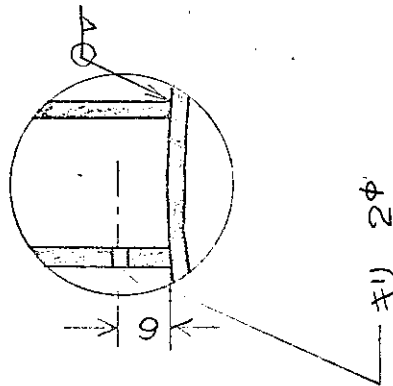


882-8111 Na漏洩検査装置確立試験
3研 電磁気材料 菅原 (3703)

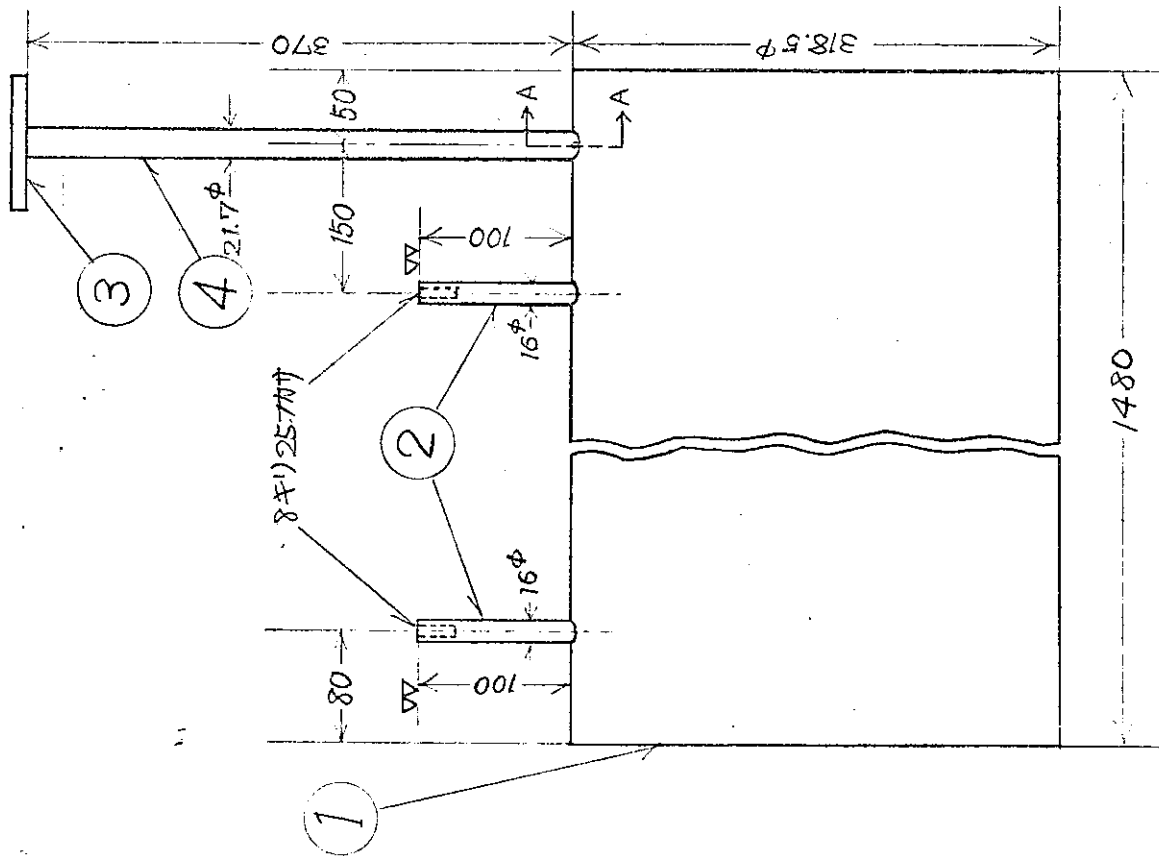
改定CHANGE	A	2φ → A 1φ...2本, 6.5φ...2本 B 2φ...1本 C 2φ...2本	常用	指定以外ニ対スル許容差
			保留	
			一時	加工 研
			商用	削り加工 中研 研 鋳造加工 研磨 ニ研 プレス加工 研磨 ニ研
第3角法 3RD ANGLE PROJECTION		MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION		Na漏洩試験配管A,B,C DK031-007
DIM IN mm		作成 DRAWN	検査 CHECKED	
尺 度 SCALE 1/5 NTS		設計 DESIGNED	承認 APPROVED	
作成日付 DATE 47.10.4		菅原	A710-7	



記 録	所要数 (個)				品番 ITEM	品 名 DESCRIPTION	材 料 MATERIAL	部品図番号(資材コード) MATERIAL CODE	備 考 REMARKS
					1	Na 横配管	SGP 12B		
					2	勾配 測定端子	SUS21B 10P		
					3	フランジ		DK031-010	
					4	Na 貫入管	SUS27TP15A10S		



882-8111
Na 漏洩検査器確性試験
3研 電磁気材料 管原 (3703)



改定CHANGE

A

常用	指定以外ニ対スル許容差	
保留		
一時	加工	組
商用	削り加工	研削
	鍛造	鍛造
	プレス加工	プレス加工

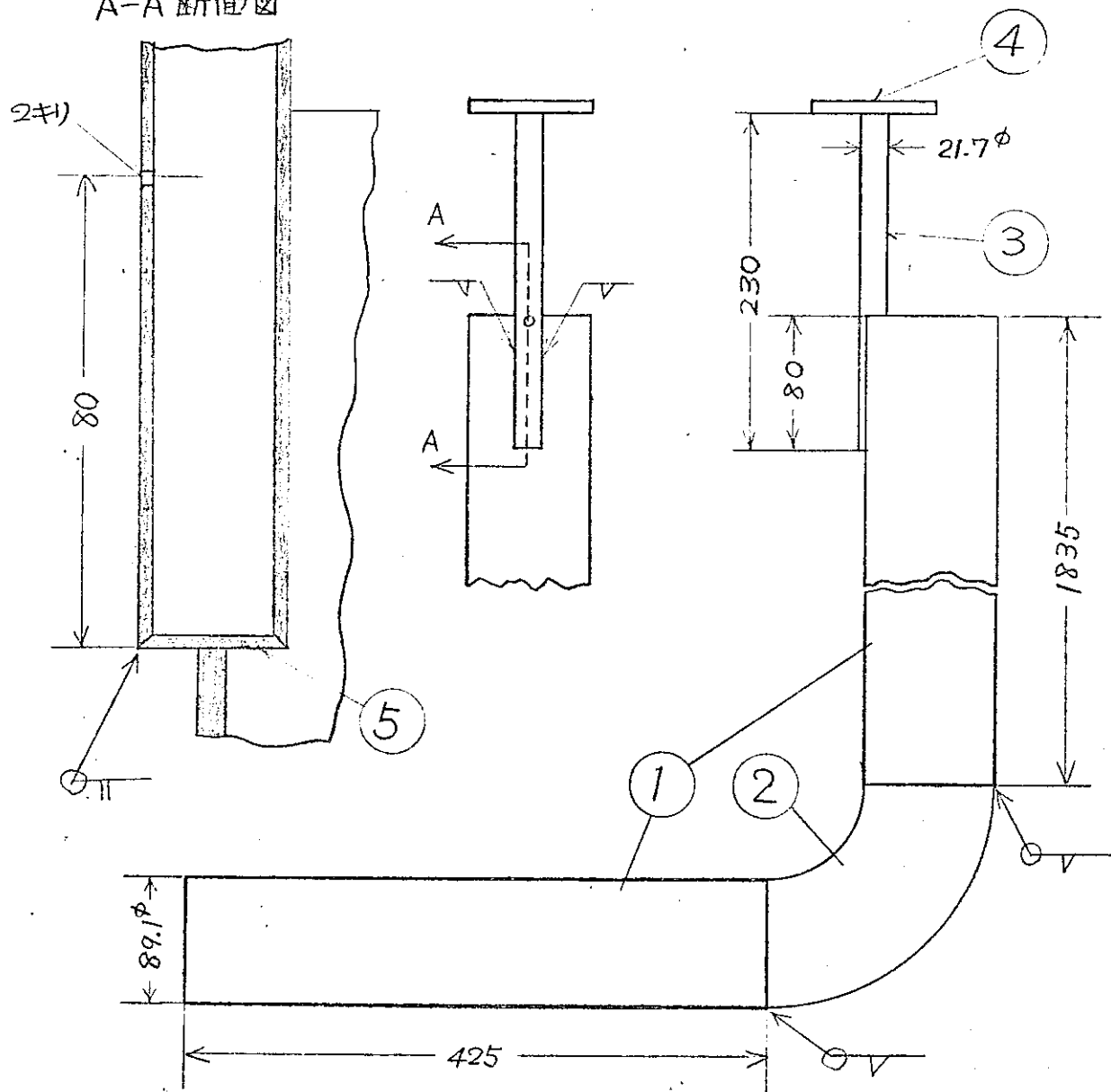
図12.

控
出
図
先

第3角法 3RD ANGLE PROJECTION		MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION				Na 漏洩試験配管 D. 12	
DIM IN mm		作 成 DRAWN	監 査 CHECKED	設 計 DESIGNED	検 査 APPROVED		
尺 度 SCALE	1/5 NTS	管原		47.10.7		DK031-000	
作成日付 DATE	47.10.7						

記 録	所要数 (個)				品番 ITEM	品 名 DESCRIPTION	材 料 MATERIAL	部品図番号(資材コード) MATERIAL CODE	備 考 REMARKS
					1	Na模擬配管	SGP 3B		
					2	90°ロングエルボ	SGP 3B		
					3	Na導入管	SUS27TP15A10S		
					4	フランジ		DK031-010	
					5	底板	SUS27CP		

A-A 断面図



882-8111 Na漏洩検出器確性試験
3研 電磁気材料 菅原 (3703)

改定CHANGE

A

常用

指定以外ニ対スル許容差

保留

加工 終

一時

削り加工 (中程) 粗研

商用

鍛造加工 精研 二級
プレス加工 精研 二級

図13.

第3角法 3RD ANGLE
PROJECTION

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION

DIM IN mm

作 図
DRAWN図 面
CHECKED設 計
DESIGNED検 査
APPROVED

Na漏洩試験配管 0E

尺 度
SCALE 1/5 NTS作成日付
DATE 47.10.7

菅原

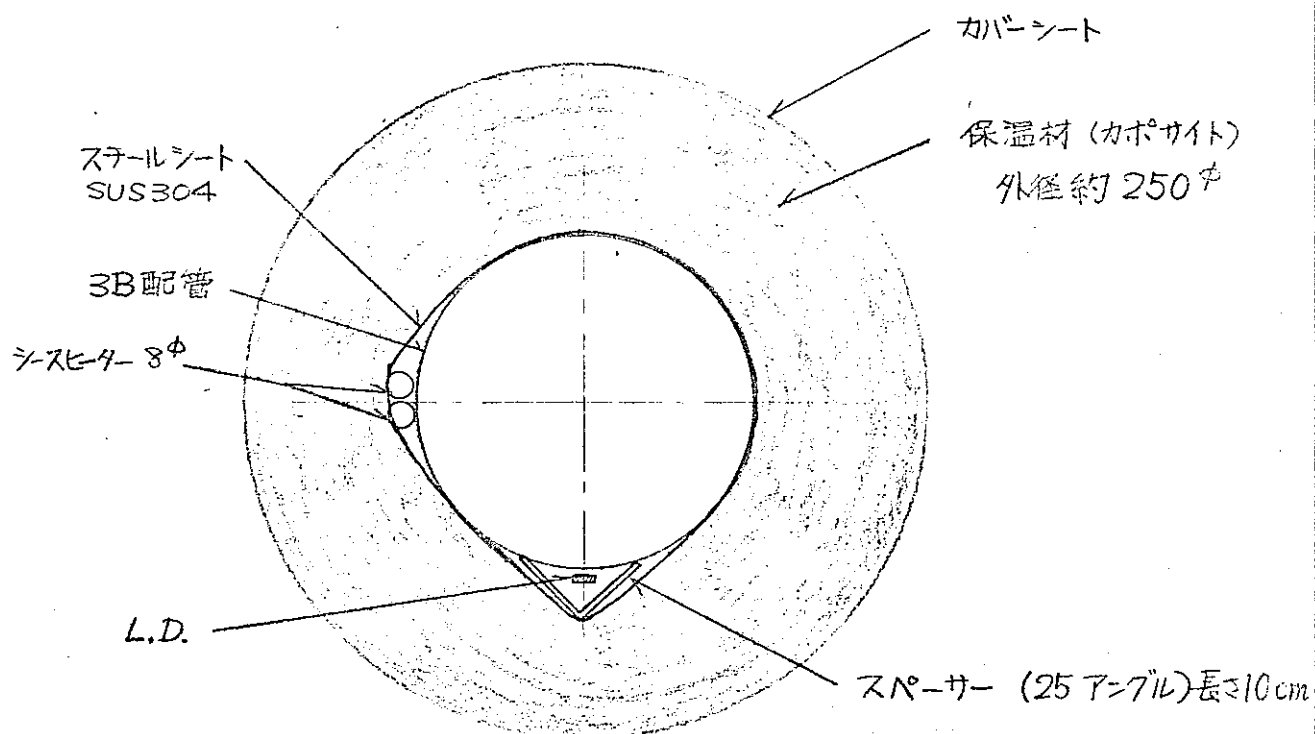
47.10-7
田中

DK031-009

控
出
図
先

三菱電機株式会社

	作成	管原	改定	A				
	検認							



配管とスチールシートとの最大間隙：約 10mm

スペーサー取付間隔：約 1m

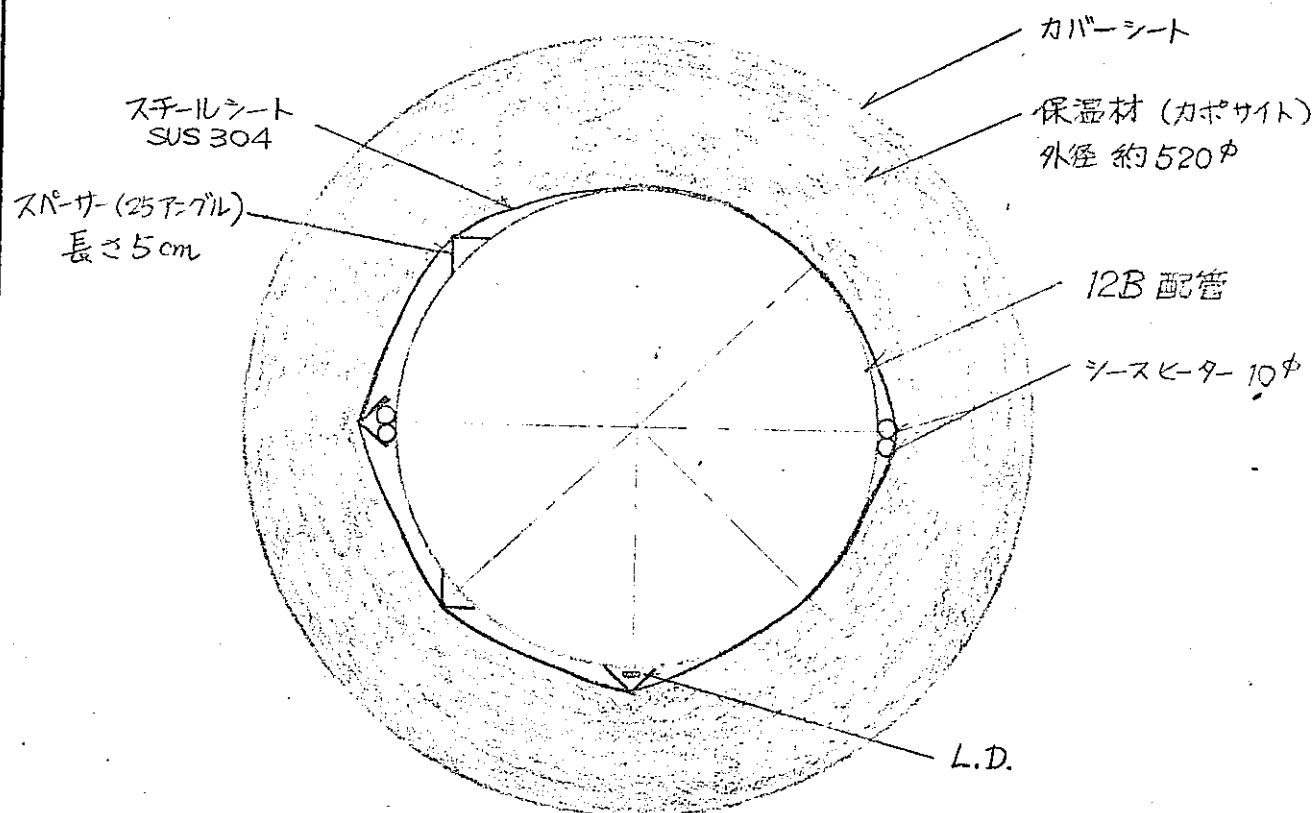
図14.

3B水平配管 スペーサー取付図

LD-004

三菱電機株式会社

作成	菅原	改定	A						
検認									



配管とスチールシートとの最大間隙 : 約 15 mm

シースヒーターと " : 約 10 mm

スパーサー取付間隔 : 約 50 cm

図15.

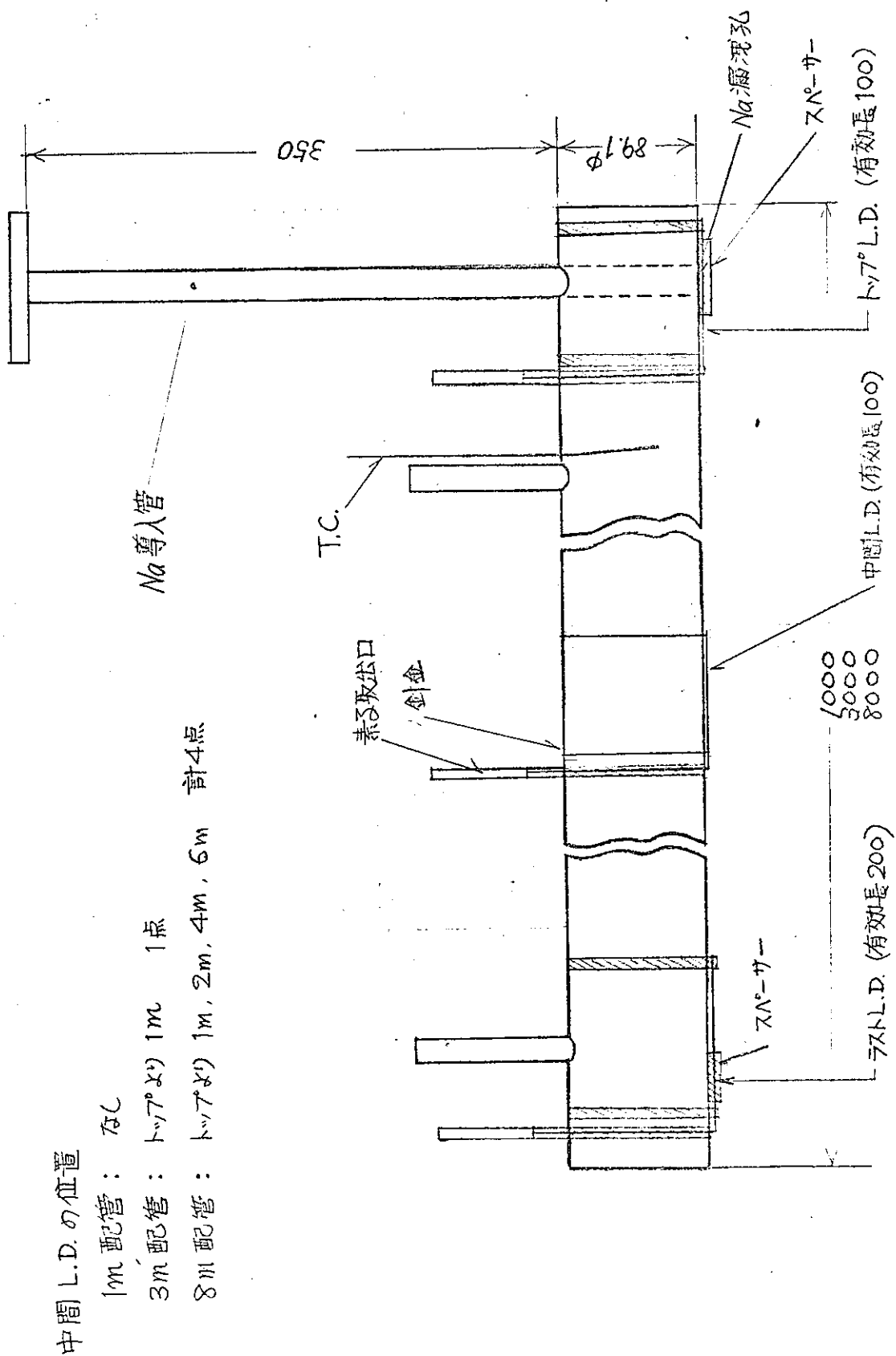
12B水平配管 スパーサー取付図

LD-005

三菱電機株式会社

作成 菅原
検認

改定 A



中間L.D.の位置

1m配管：なし

3m配管：トップより1m 1点

8m配管：トップより1m, 2m, 4m, 6m 計4点

図16

3B水平配管 T.C. 取付図

LD-001

三菱電機株式会社

作成	菅原
検認	

改定	A

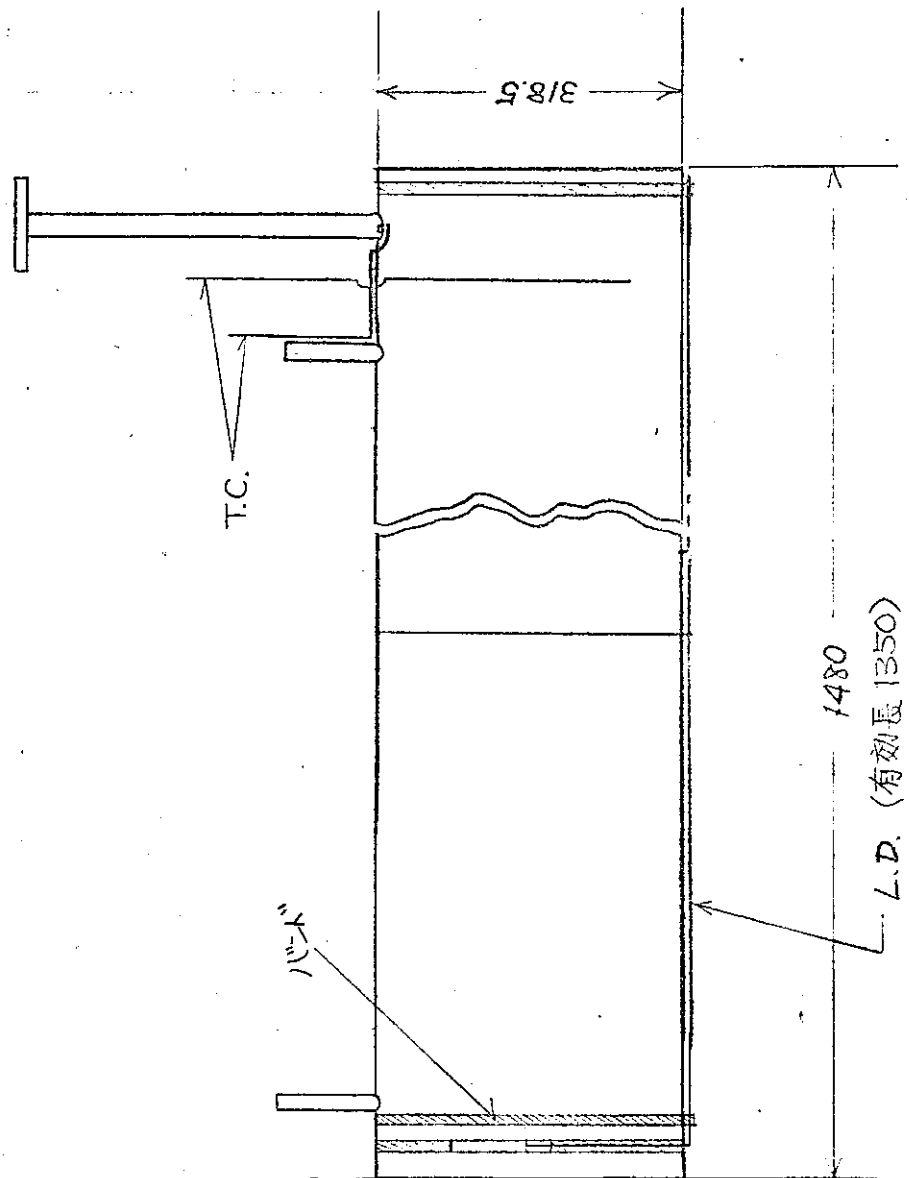
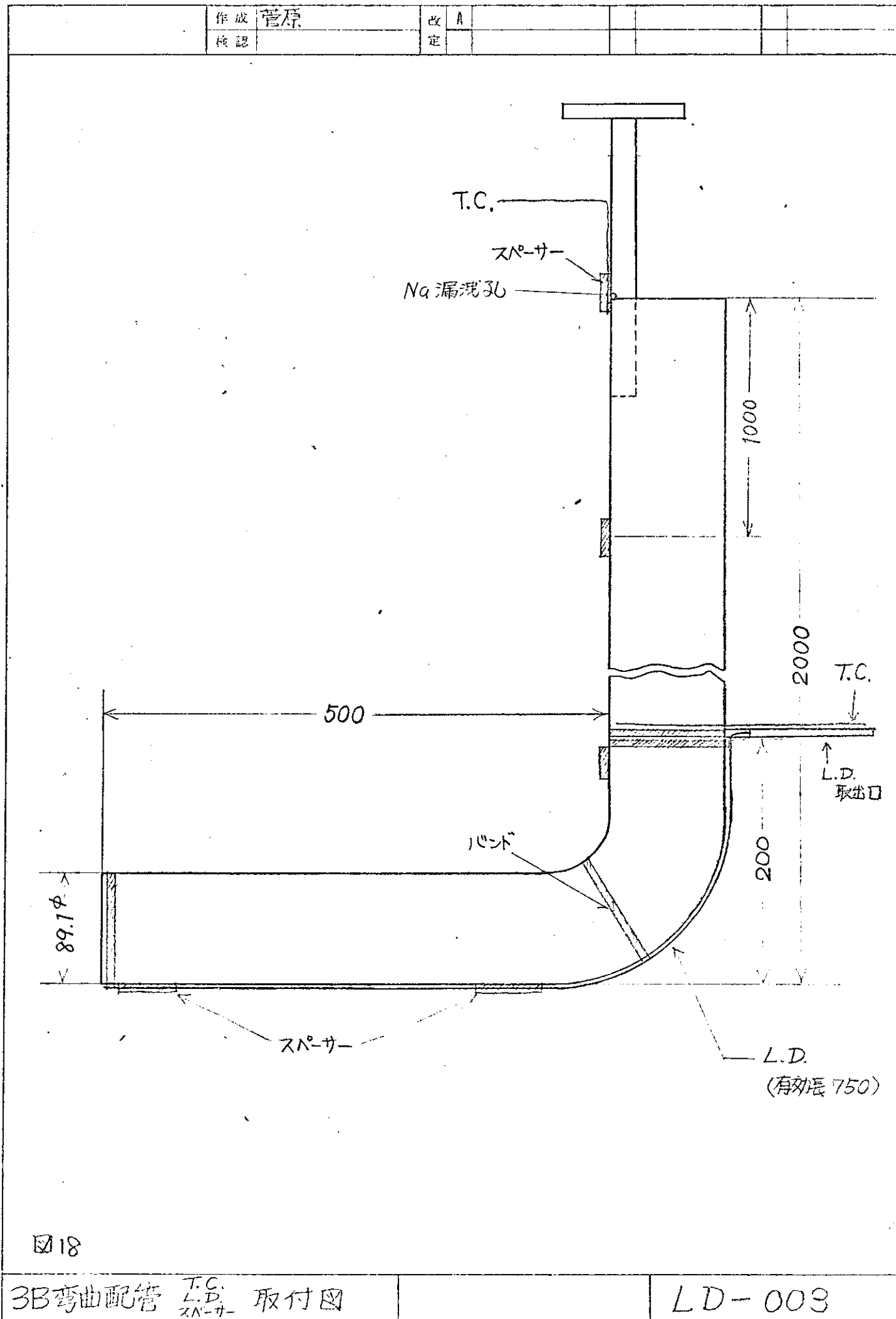


図17

12B 水平配管 T.C. 取付図

LD-002

三菱電機株式会社



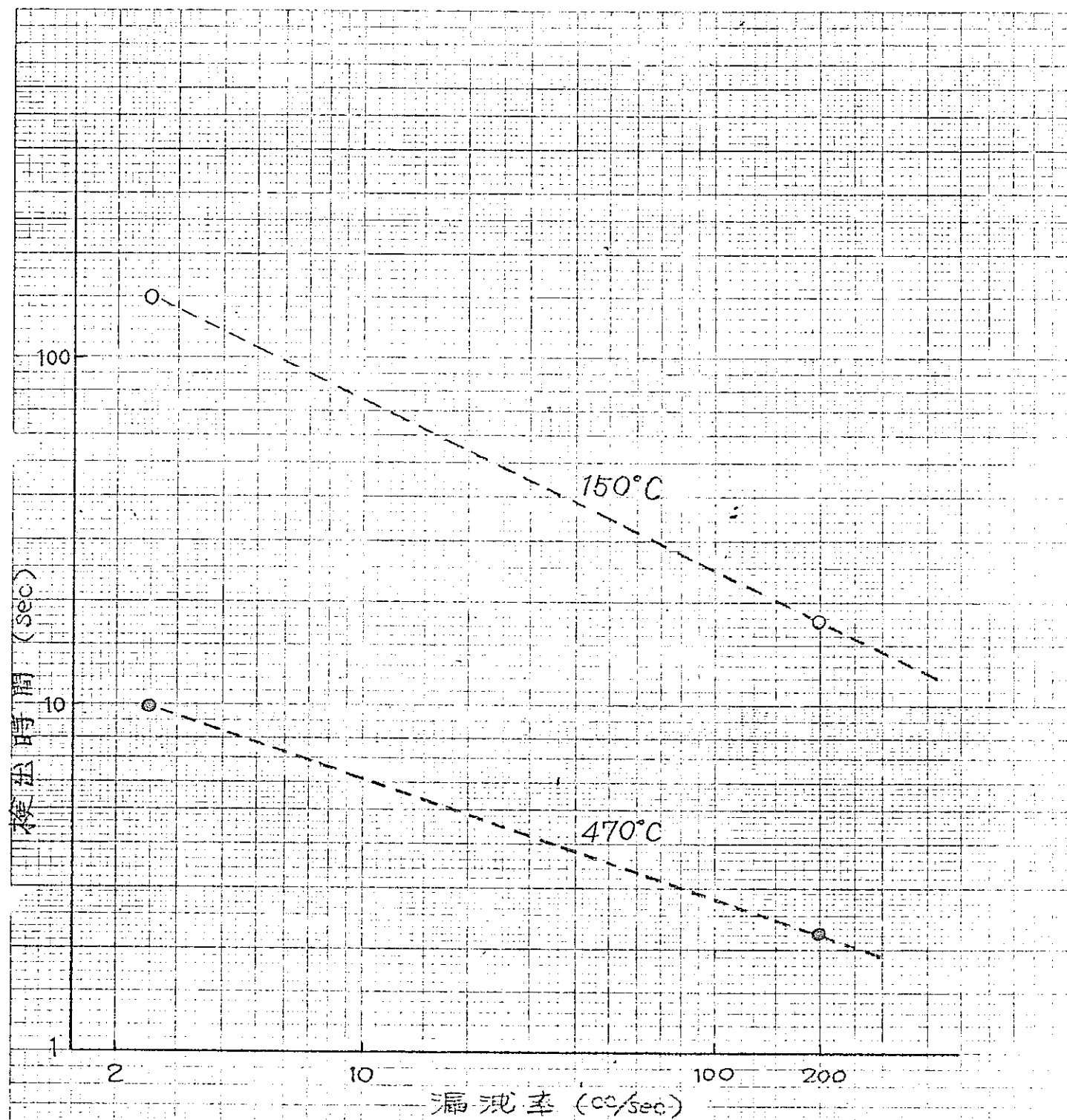


図 19. 3B1m配管におけるナトリウム漏洩率と検出時間の関係

表 1. 模擬配管試験・試験条件

試験番号	勾配	漏洩孔位置	漏洩率(cc/sec)	温度(℃)	配管長(m)	配管外径(mm)	雰囲気
1	1/100	下面	2	150	1	89.1(3B)	空気
2	〃	〃	20	〃	8	〃(〃)	〃
3	〃	〃	200	〃	1	〃(〃)	〃
4	〃	〃	2	470	1	〃(〃)	〃
5	〃	〃	1	〃	8	〃(〃)	〃
6	〃	〃	200	〃	1	〃(〃)	〃
7	〃	上面	2	150	1.48	318.5(12B)	〃
8	〃	〃	2	470	〃	〃(〃)	〃
9	水平	下面	2	〃	3	89.1(3B)	〃
10	垂直	——	2	〃	2.5	〃(〃)	〃

表2. 模擬配管ナトリウム漏洩試験結果

試験番号	検出時間	漏洩検出時の電極間抵抗 (Ω)	発火状況	総漏洩量 (L)	備考
1	2min30sec	5	発煙なし	0.5	
2	—	—	発煙あり 小さい炎も発生	1.5	ナトリウムは7mまでしか流れない
3	18 sec	5	発煙なし	4	
4	10 sec	4	炎が見え大量の煙発生	0.2	
5	—	—	発煙あり 小さい炎も発生	0.6	ナトリウムは2mまでしか流れない
6	2.2 sec	7	炎が噴出し 大量の煙発生	1.8	
7	5min30sec	1以下	発煙あり	1.0	
8	5.5 sec	1以下	〃	0.4	
9	—	—	〃	0.4	ナトリウムは1mまでしか流れない。
10	40 sec	1以下	〃	0.3	

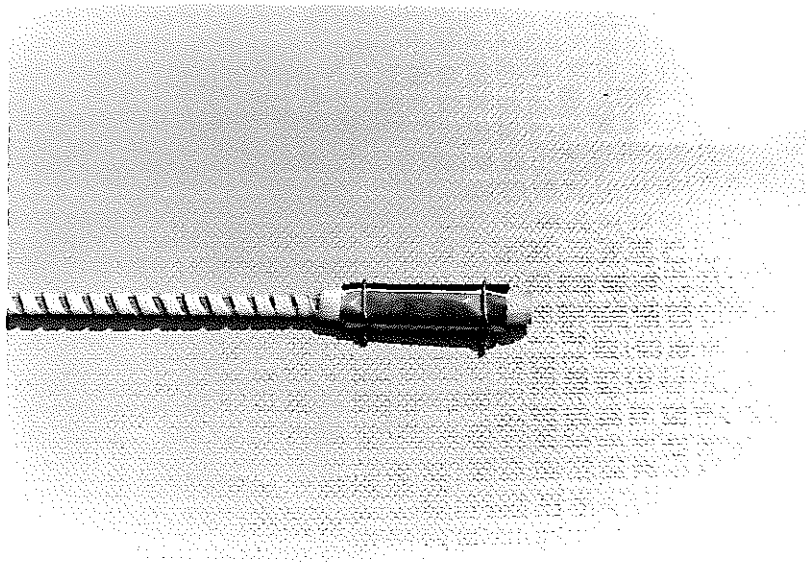


写真 1. 配管用漏洩検出素子 (端末)

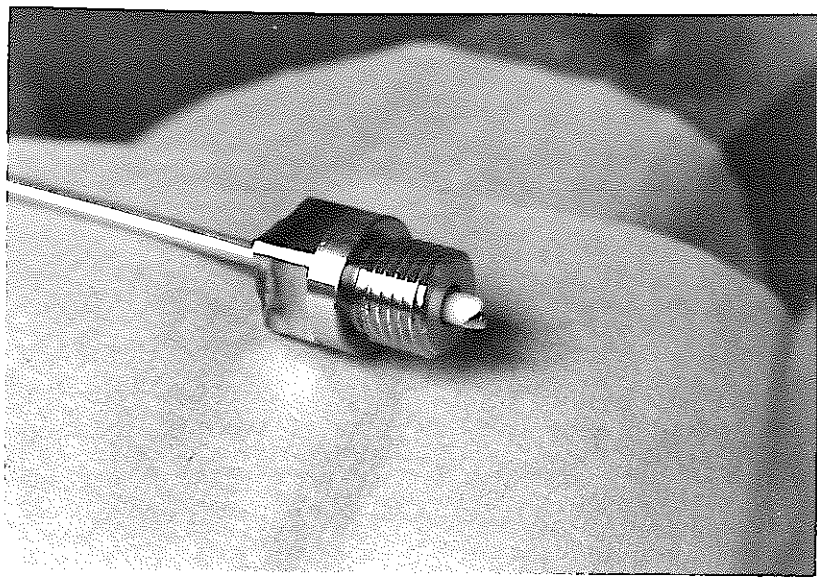


写真 2. 弁用漏洩検出素子
(ネジ栓を溶接したもの)

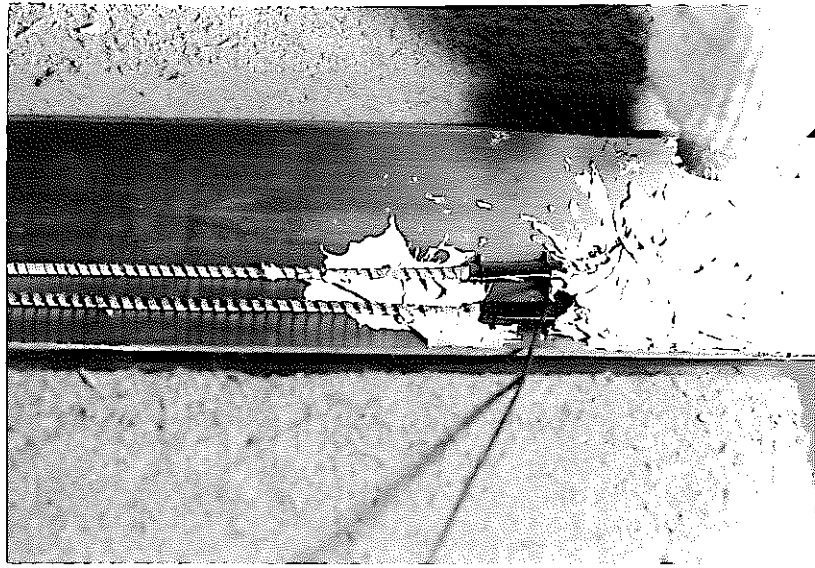


写真 3. 配管用検出素子へのナトリウムの滴下

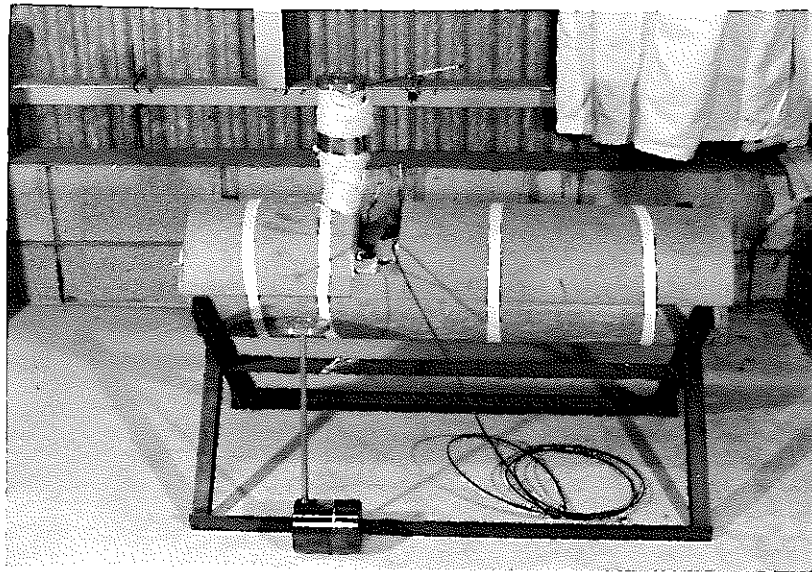


写真 4. 漏洩予備試験装置

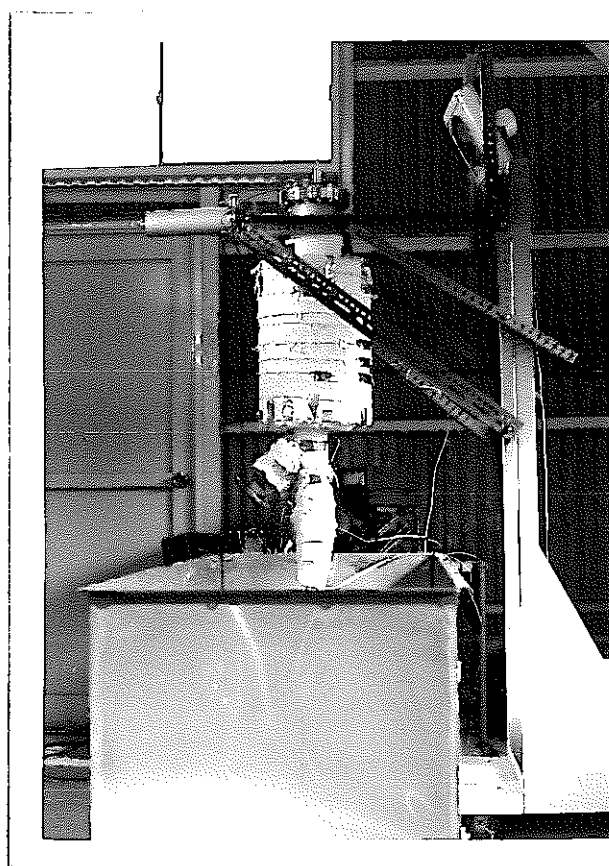


写真 5. ナトリウム注入装置

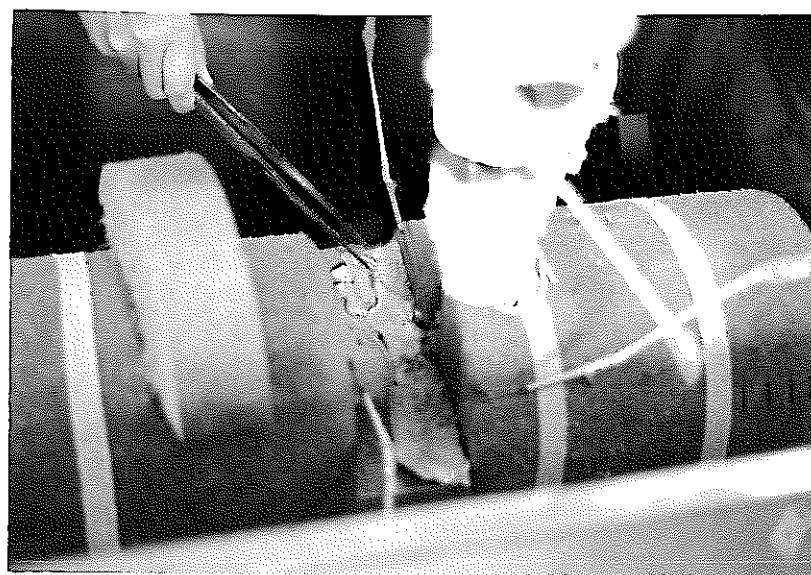


写真 6. 漏洩予備試験
150℃ ; 0.5φ

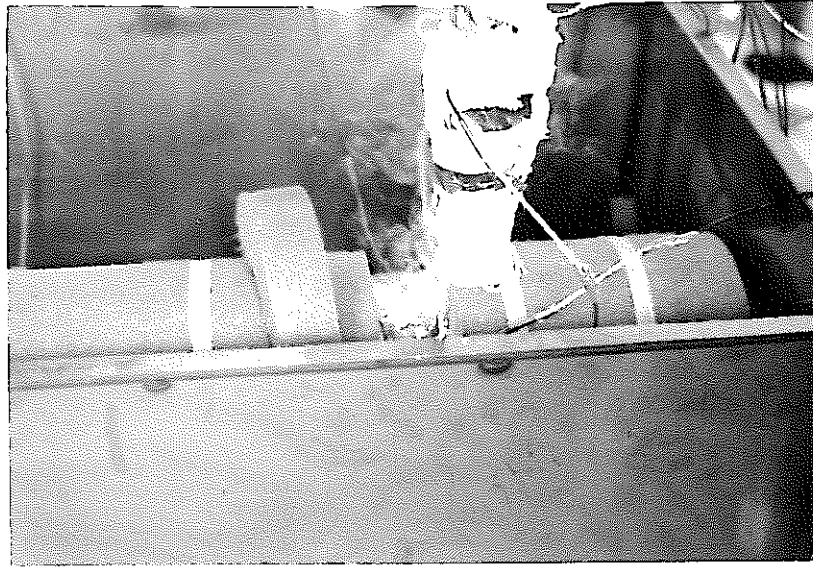


写真7. 漏洩予備試験
150℃; 0.5φ (発火状態)

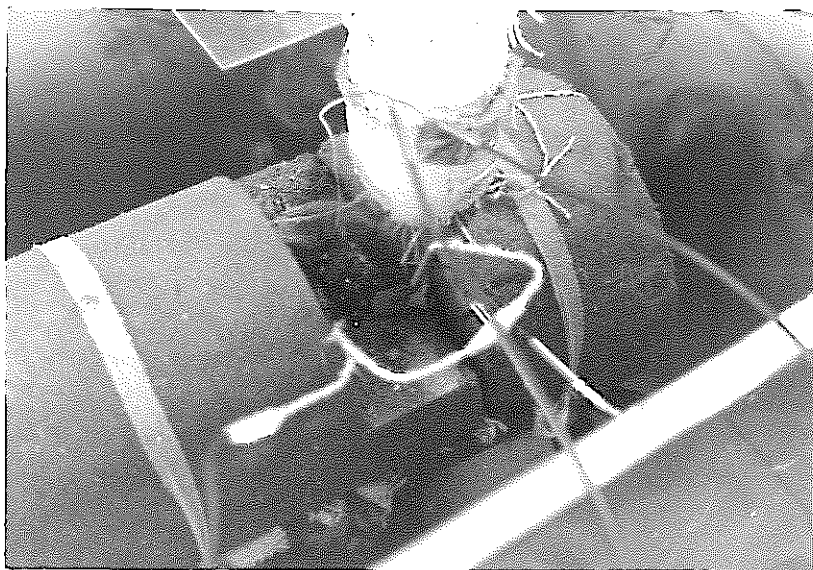


写真8. 漏洩予備試験
470℃; 0.5φ (砂をかけた後の発火状態)

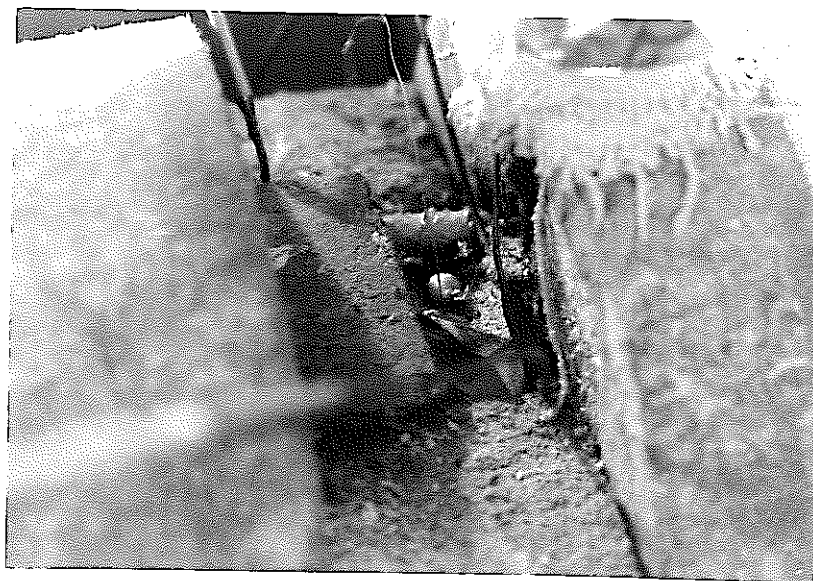


写真9 漏洩予備試験
150℃; 0.3φ



写真10 3B.1m長模擬配管
保温装着前

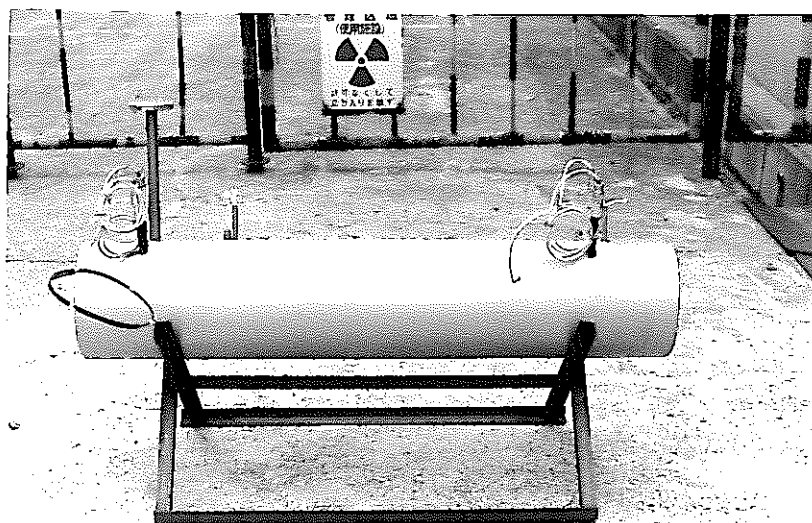


写真 11. 3B、1m長模擬配管

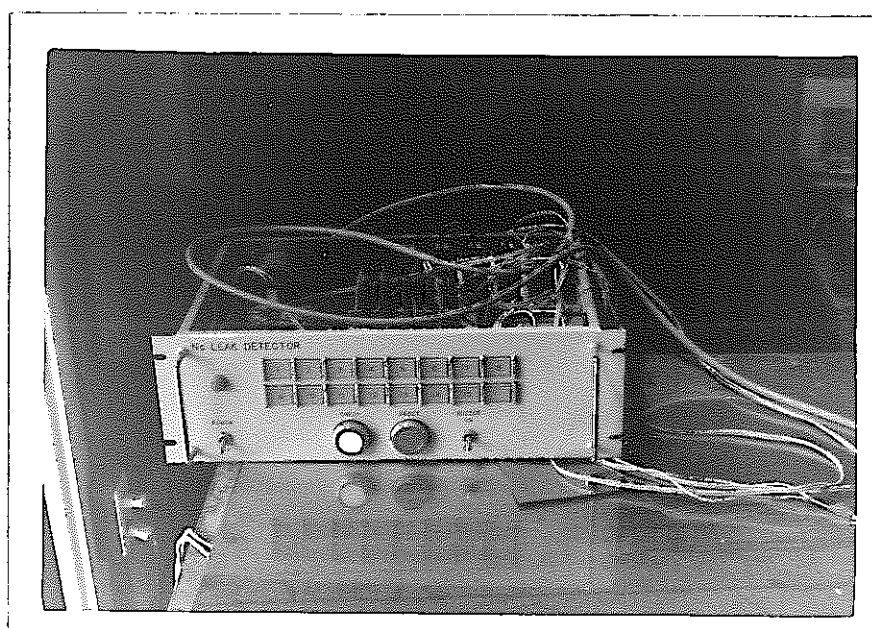


写真 12. 漏洩警報盤

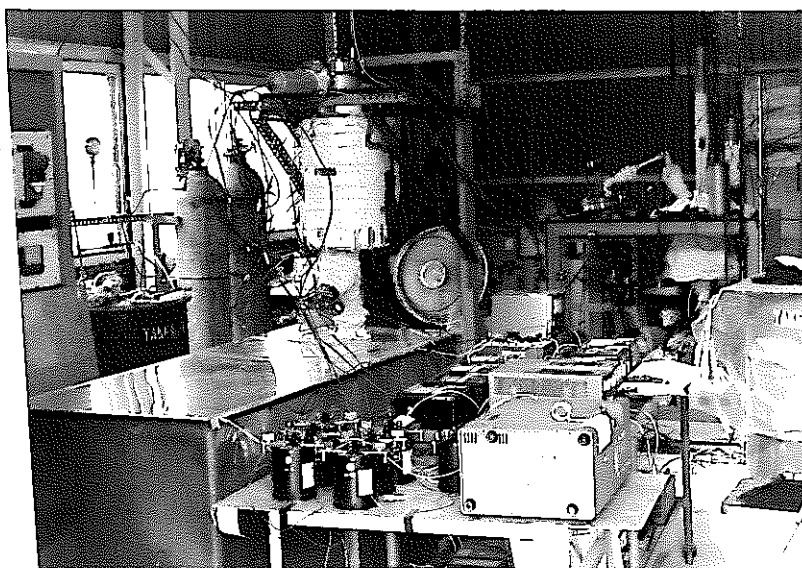


写真13 模擬配管ナトリウム漏洩試験
試験装置



写真14 8m長模擬配管の設置状態

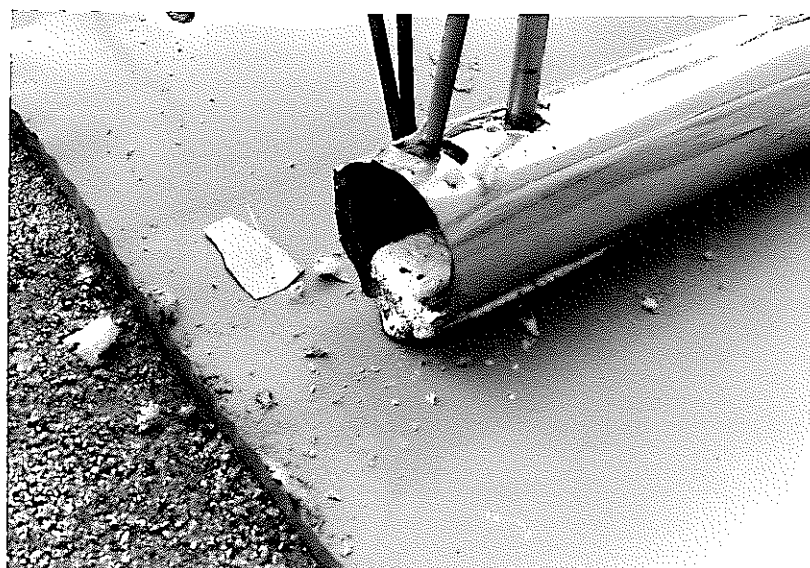


写真 15 試験番号 1
配管下流端

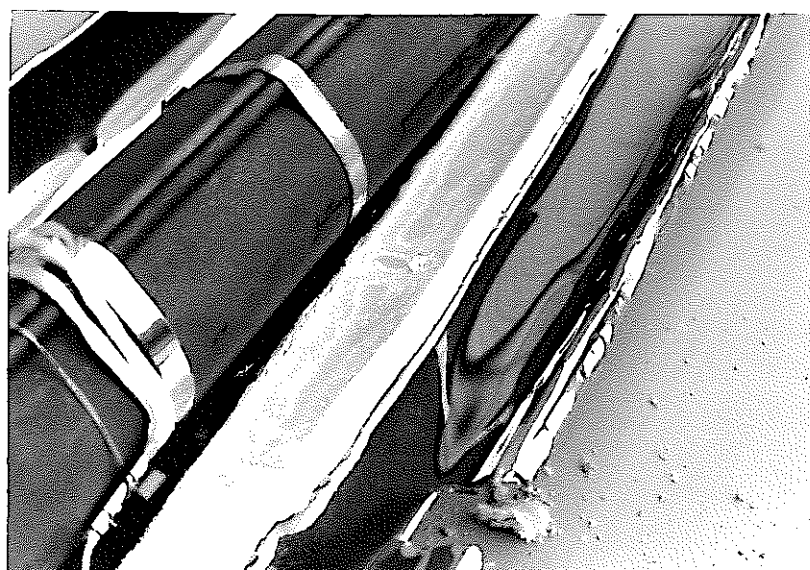


写真 16 試験番号 1
配管中央部 スチールシート内部

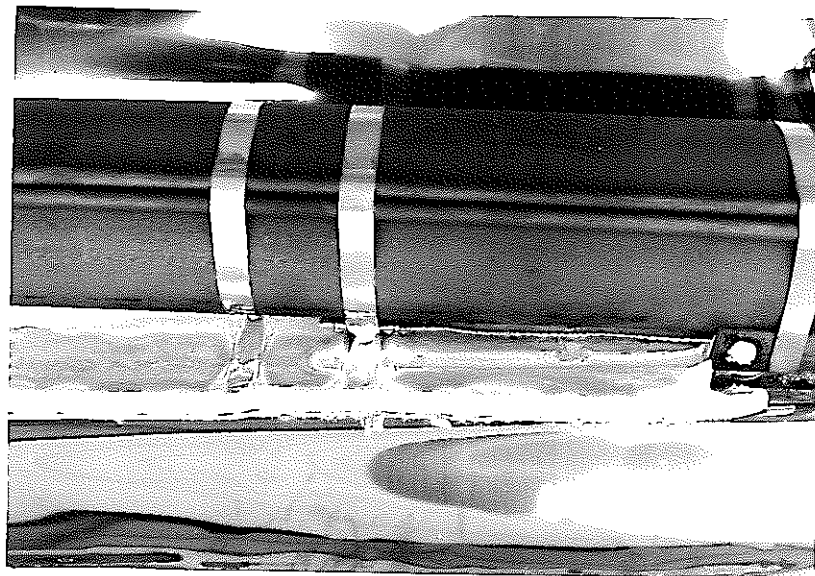


写真 17 試験番号 1
1m部漏洩検出器

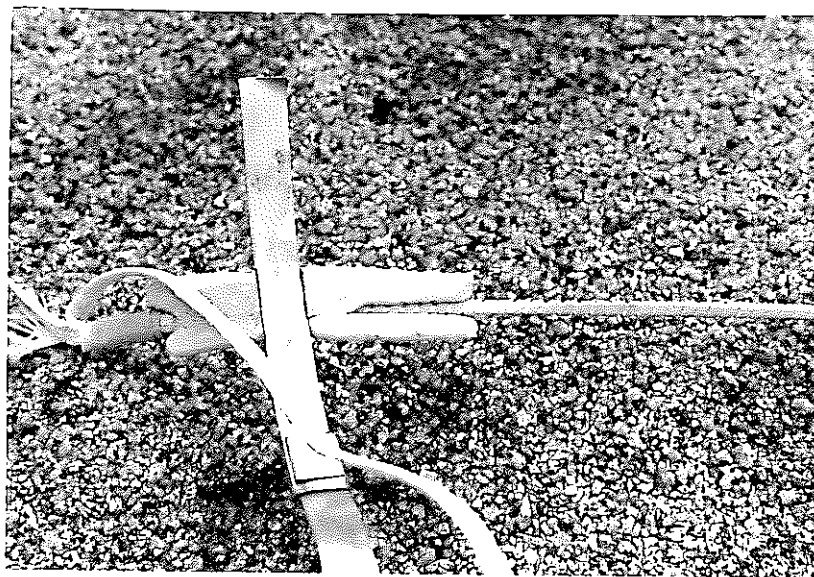


写真 18 試験番号 1
1m部漏洩検出器

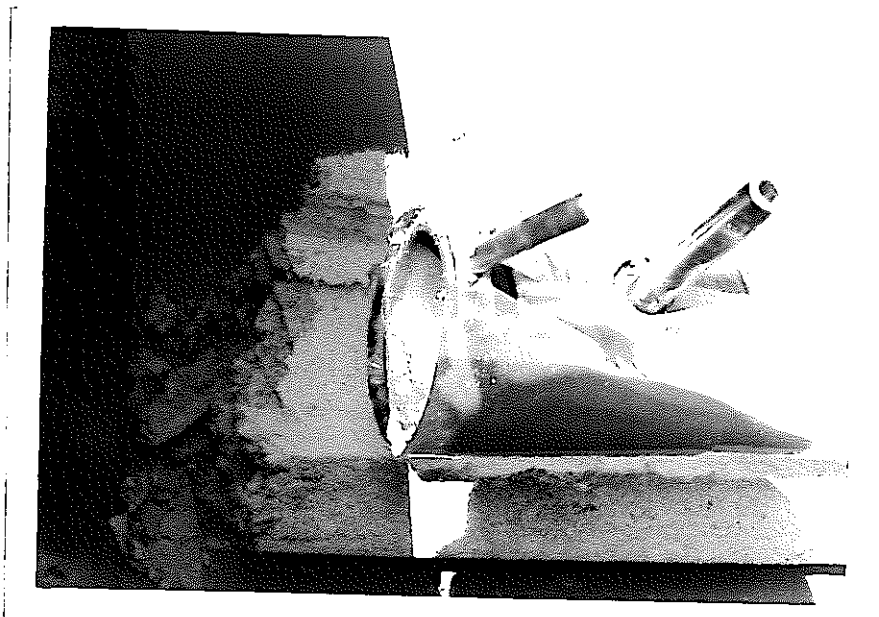


写真19、試験番号2
配管下流端(8m)



写真20、試験番号2
7m部スチールシート継目と保温材

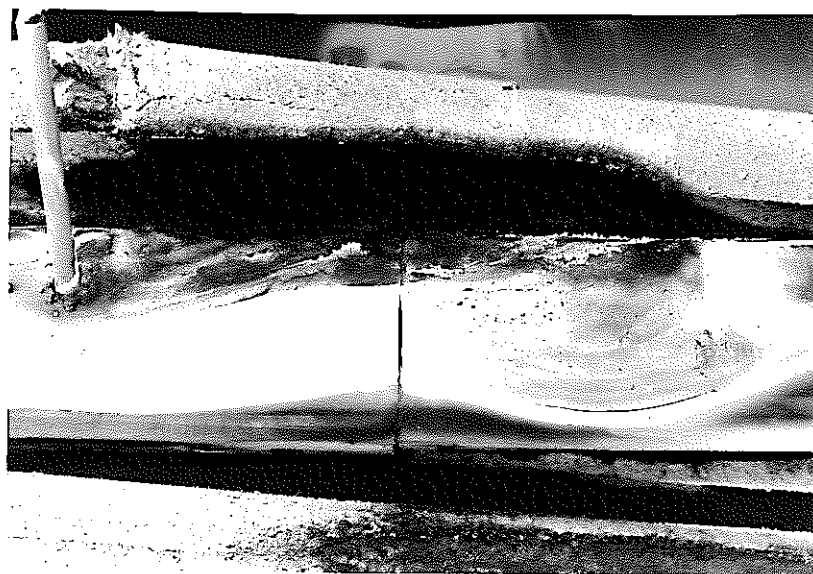


写真21、試験番号2
6m部スチールシート継目と保温材

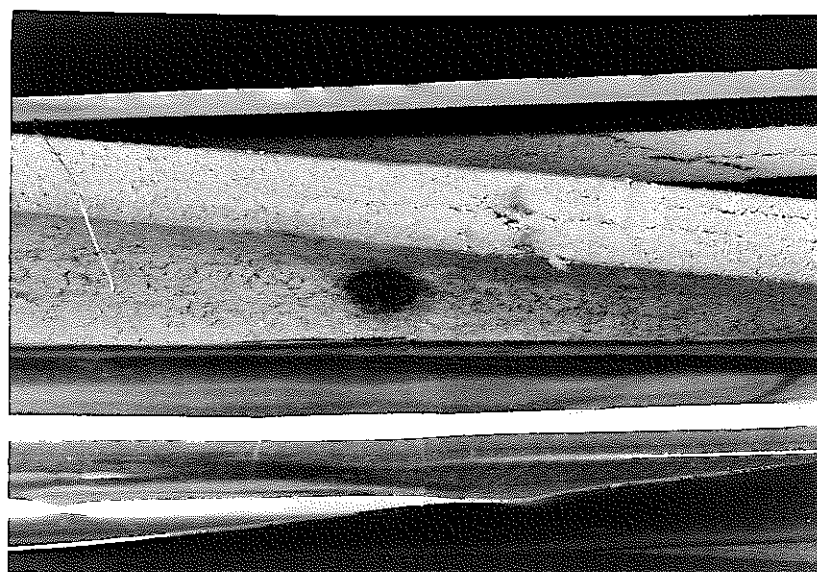


写真22、試験番号2
5m部スチールシート継目と保温材

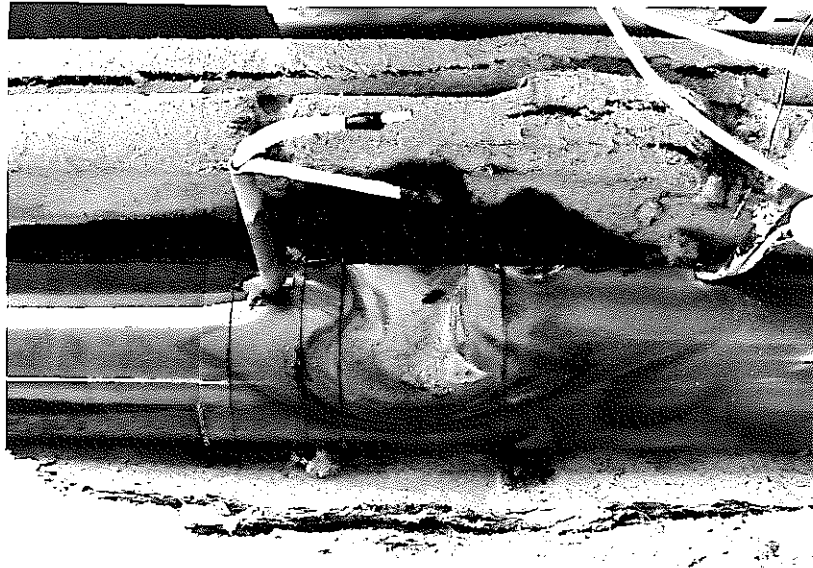


写真 23 . 試験番号 2
4m部スチールシート継目と保温材

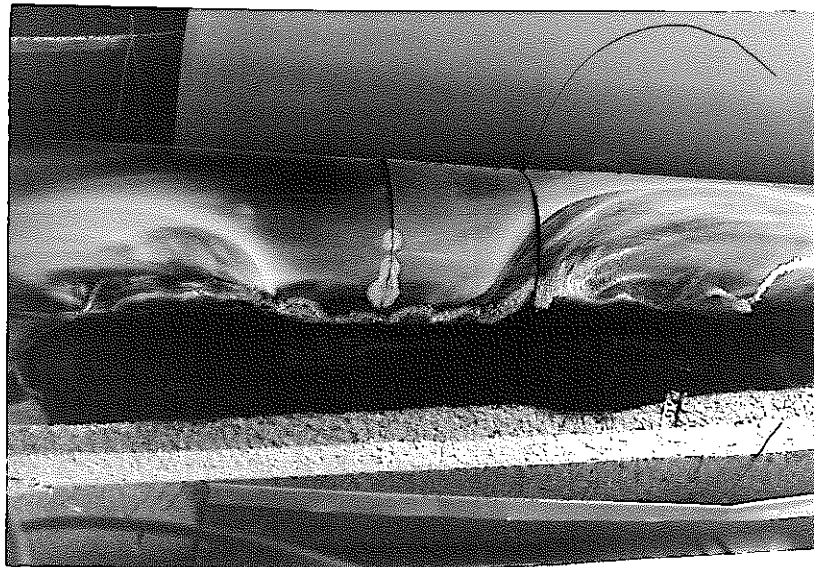


写真 24 . 試験番号 2
3m部スチールシート継目と保温材

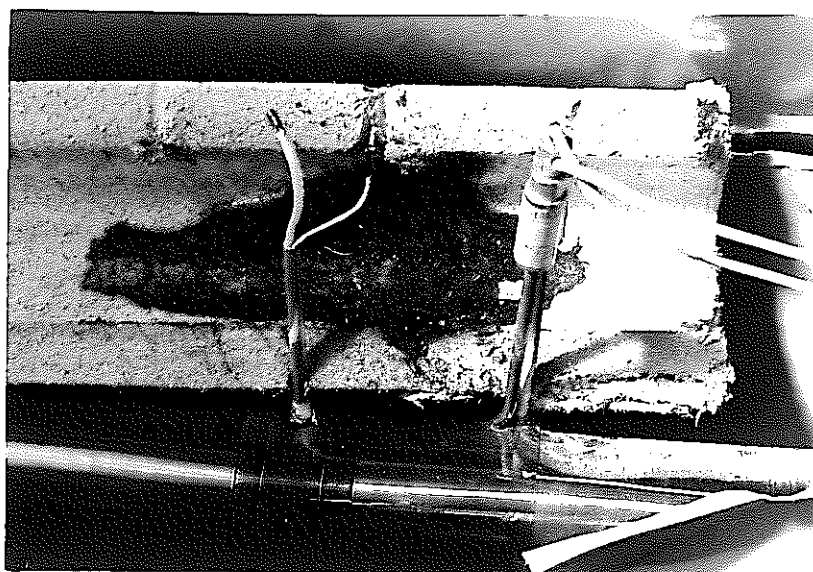


写真25 試験番号2
2m部スチールシート継目と保温材

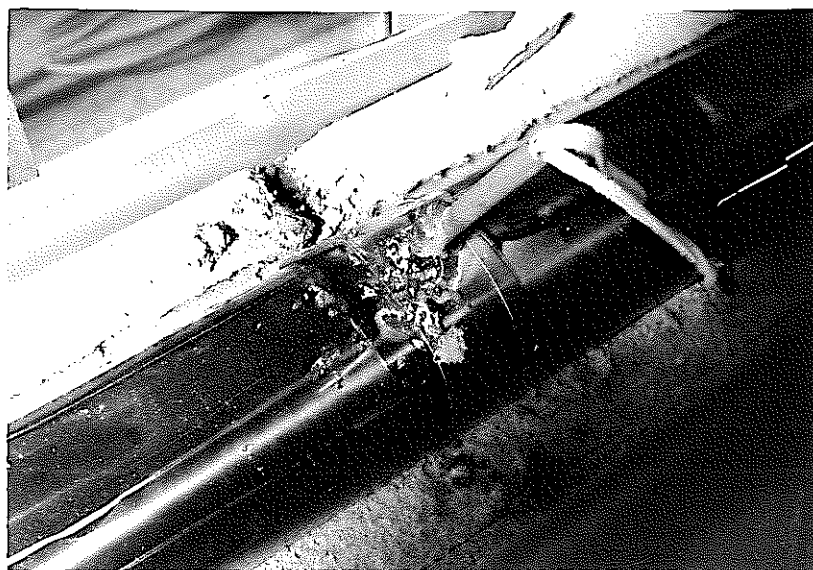


写真26 試験番号2
1m部スチールシート継目と保温材



写真27 試験番号2
配管上流部

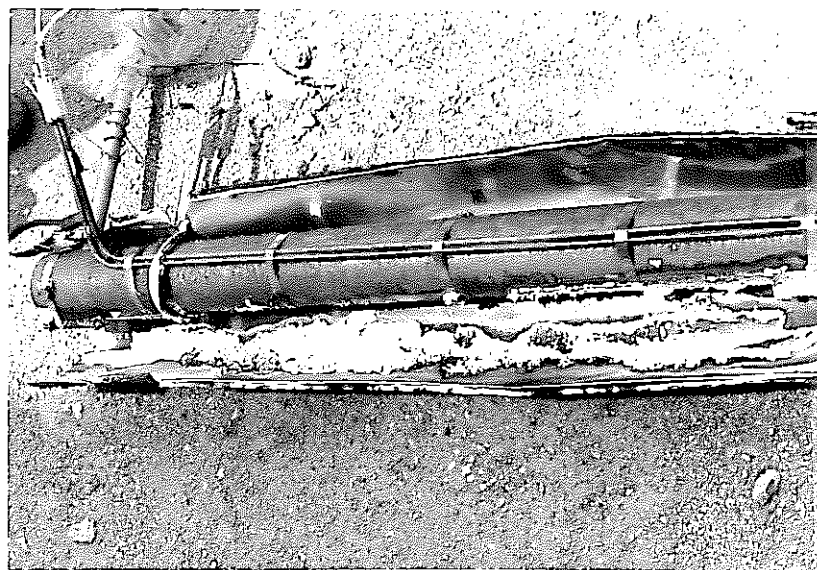


写真28 試験番号2
0~1m部スチールシート内部

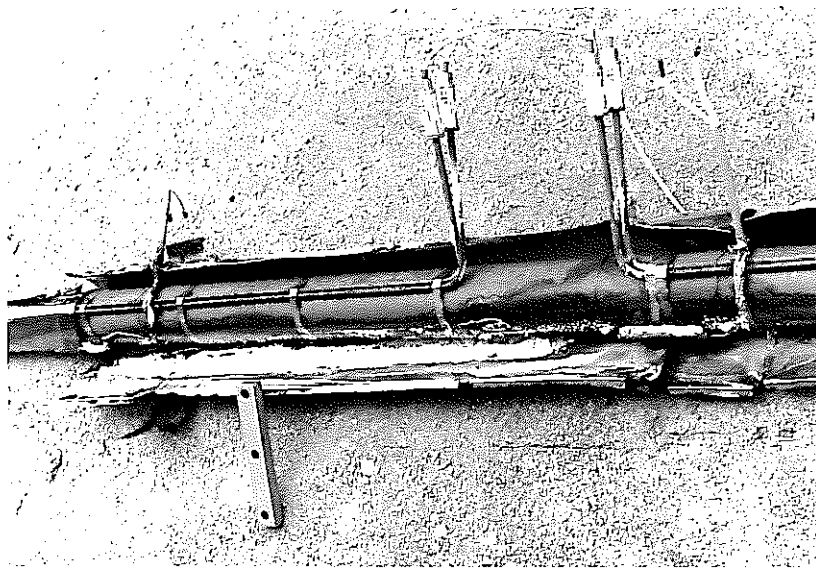


写真29 試験番号2
1~2m部スチールシート内部

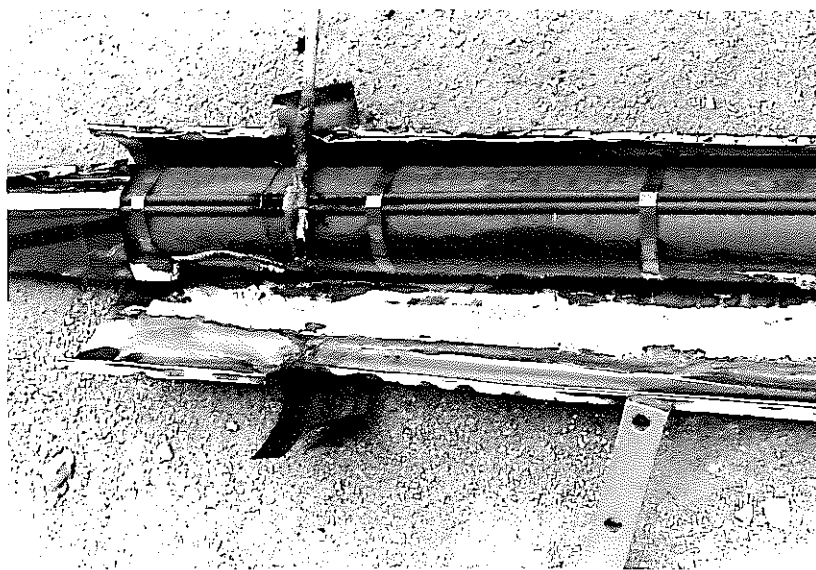


写真30 試験番号2
1m部漏洩検出器

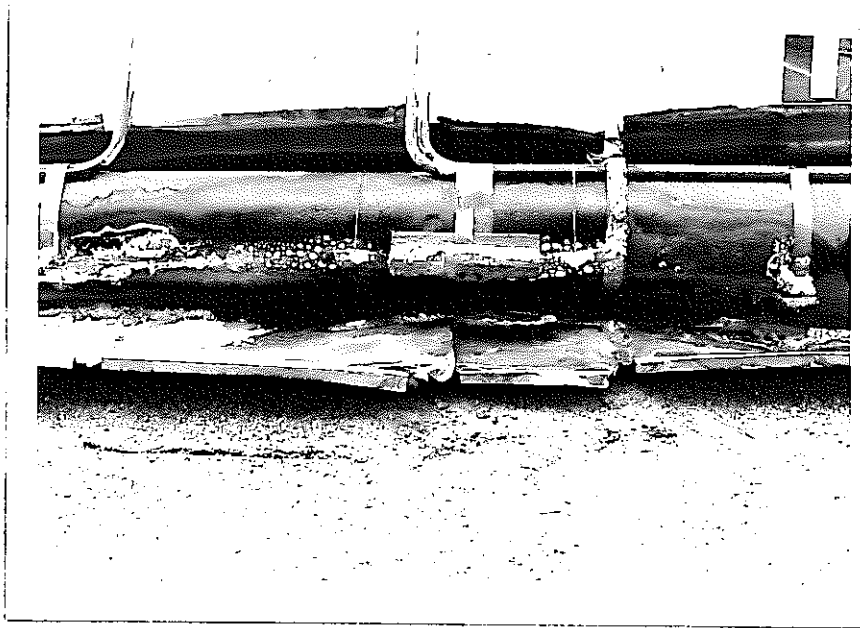


写真31, 試験番号 2
2m部漏洩検出器

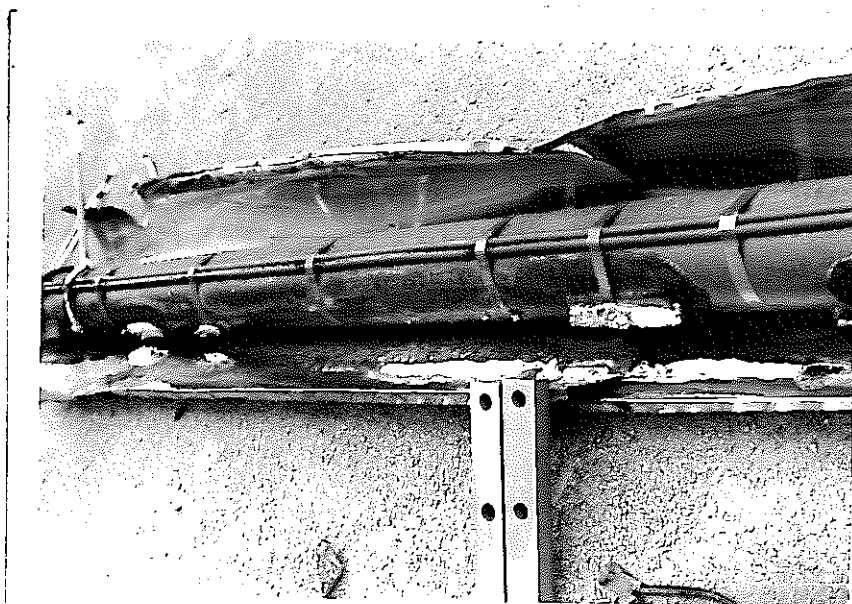


写真32, 試験番号 2
4~5m スチールシート内部

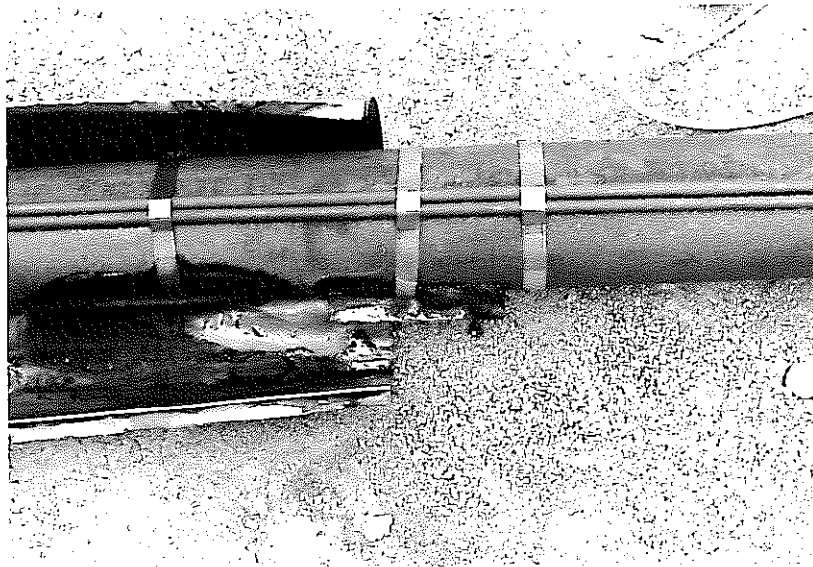


写真33 試験番号 2
7m スチールシート内部



写真34 試験番号 3
保温材をはいだ状態



写真 35 試験番号 3
配管とスチールシートの間につまったナトリウム

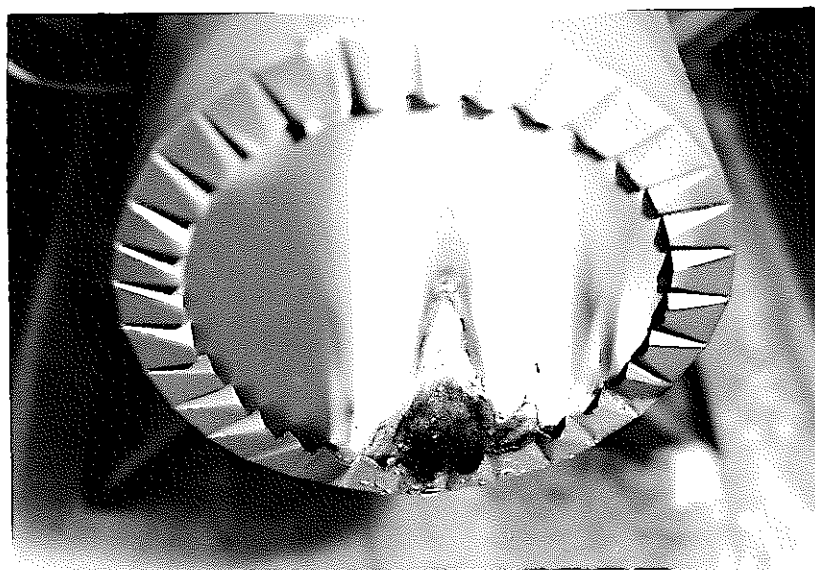


写真 36 試験番号 4
配管下流端から漏れたナトリウムの燃焼跡

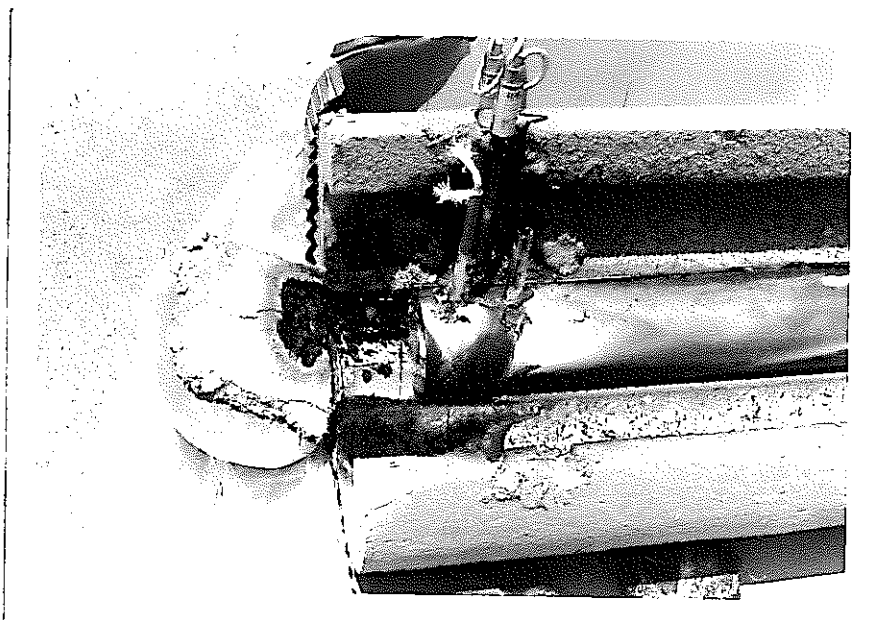


写真 37 試験番号 4
配管下流端におけるナトリウムと保温材の反応

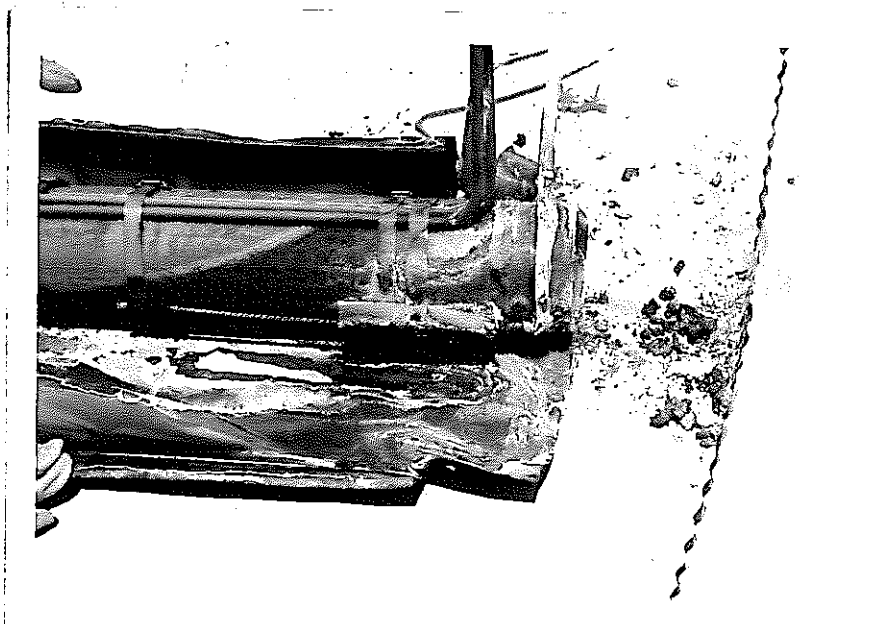


写真 38 試験番号 4
1m部漏洩検出器

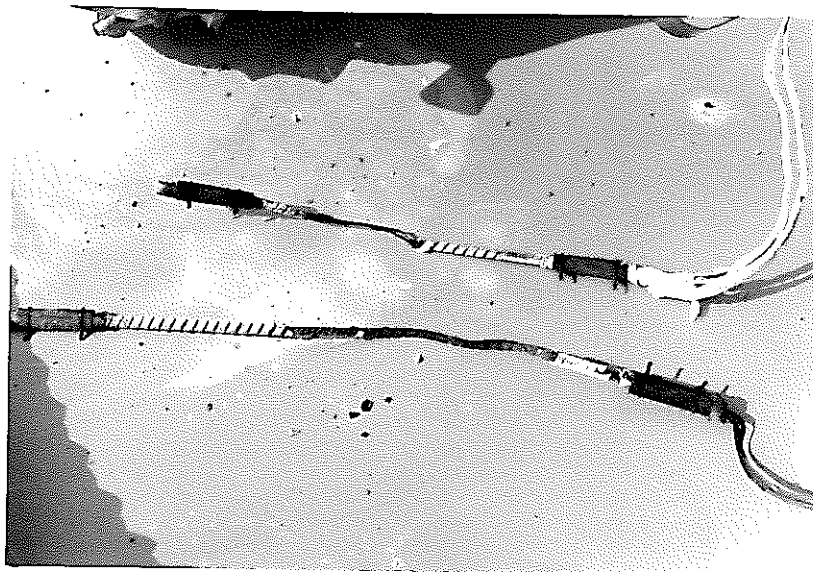


写真39. 試験番号 4
エチルアルコールで洗浄した後の漏洩検出器

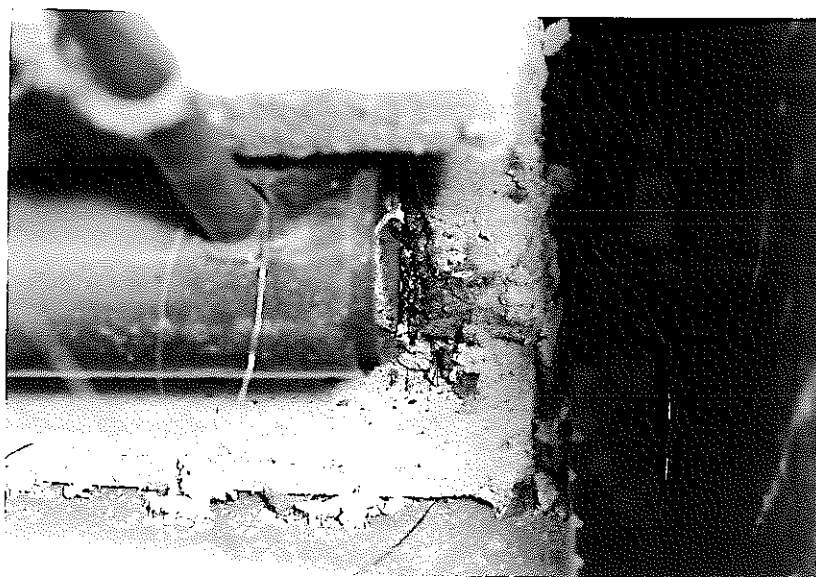


写真40. 試験番号 5
配管上流端

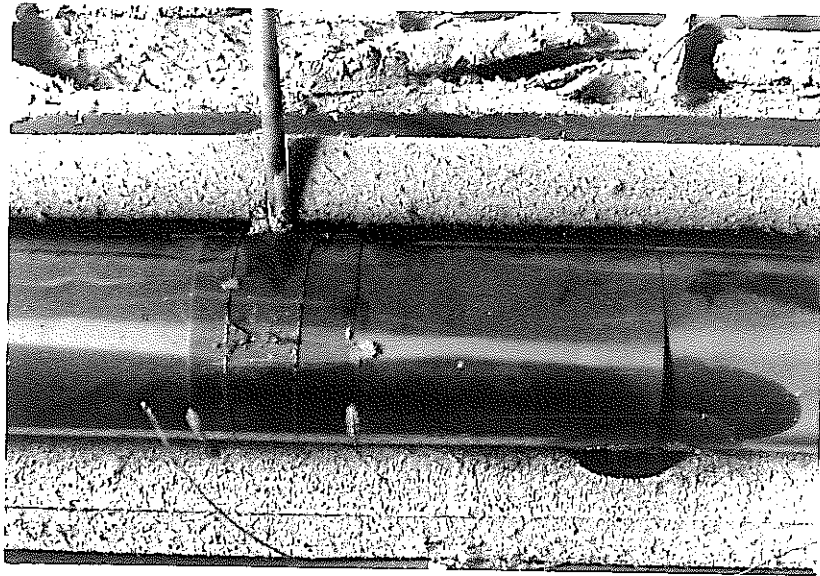


写真41、試験番号5
1m部スチールシート継目

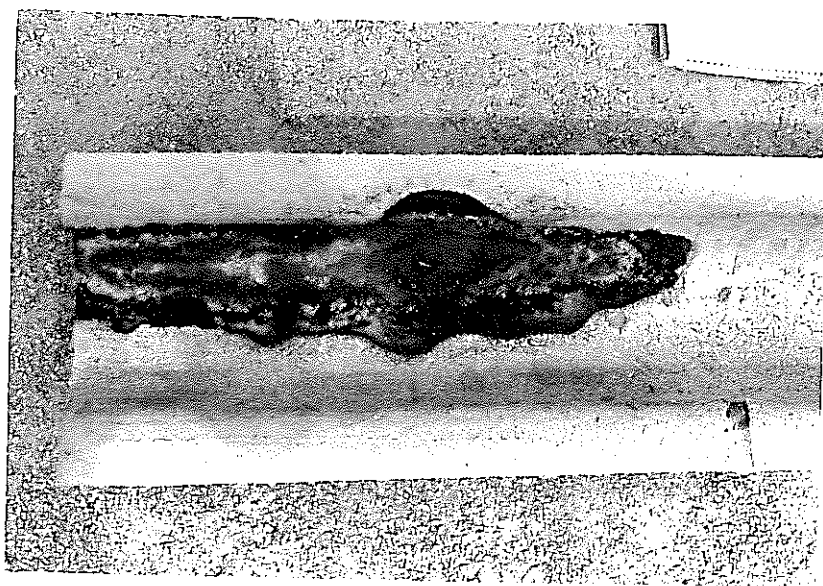


写真42、試験番号5
1m部スチールシート継目に
対応する保温材

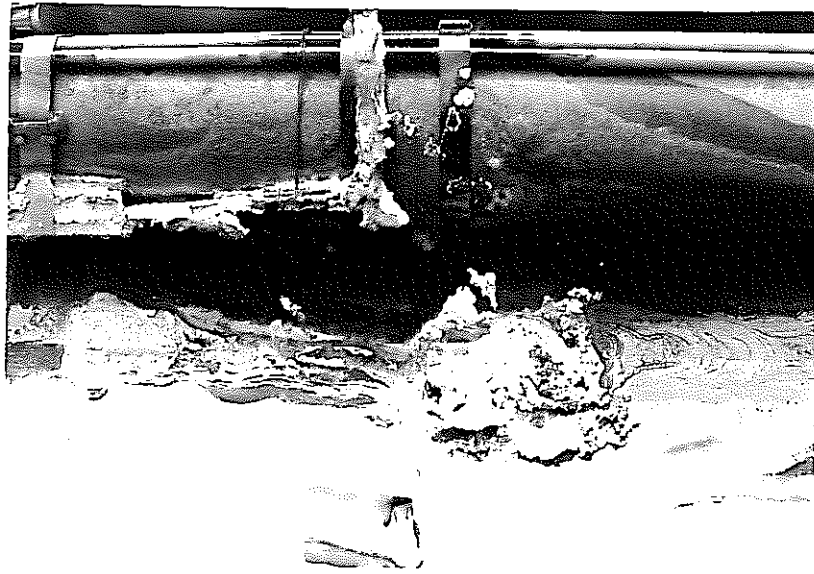


写真45 試験番号5
1m部漏洩検出器



写真46 試験番号5
ナトリウム流れの先端の塊の断面

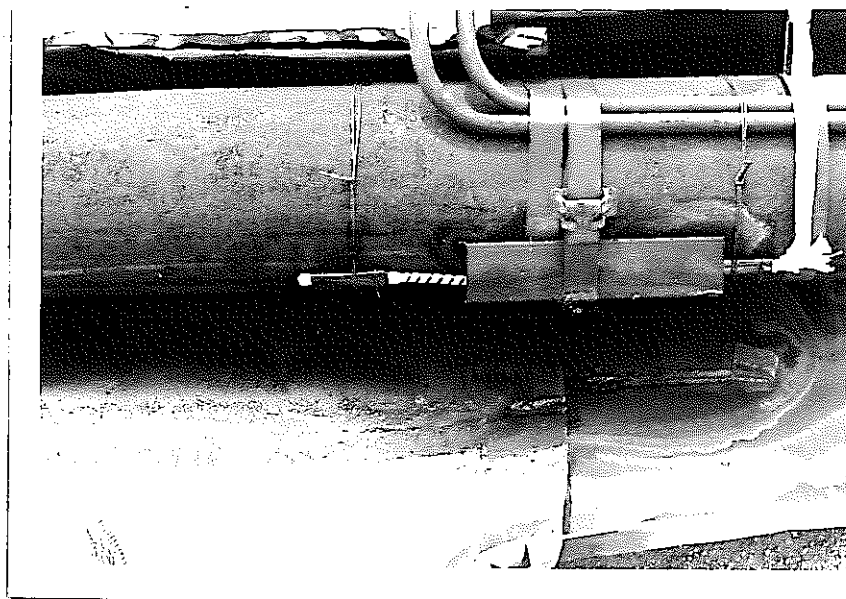


写真47. 試験番号5
2m部漏洩検出器



写真48. 試験番号6
配管下流端から漏れたナトリウムの燃焼跡

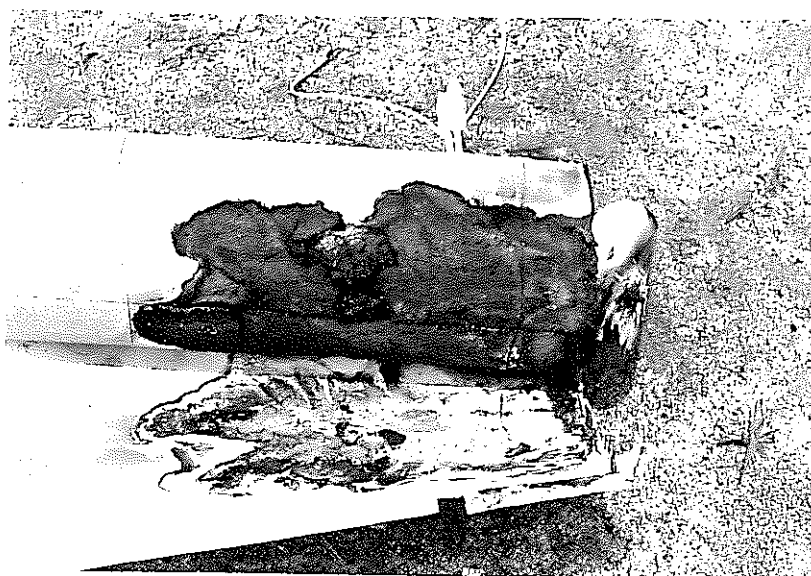


写真 49 . 試験番号 6
下流部保温材外側

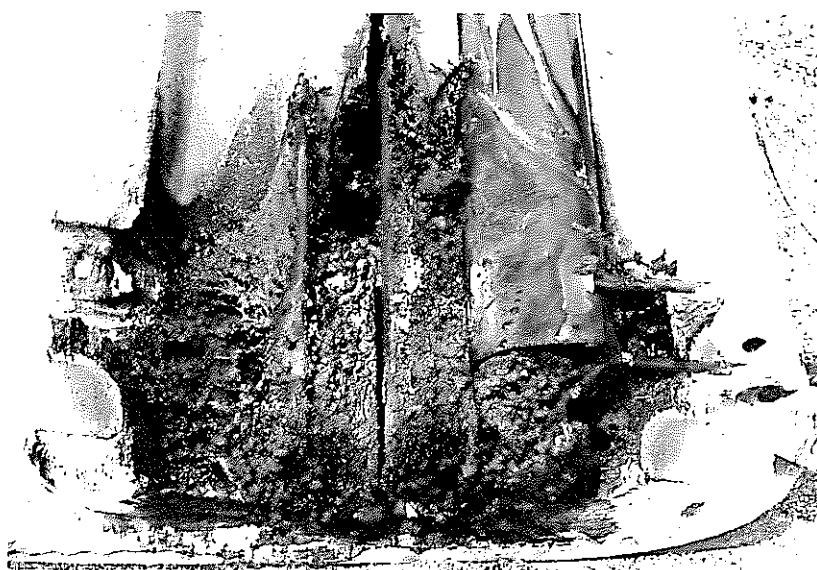


写真 50 . 試験番号 6
配管下流部保温材内側

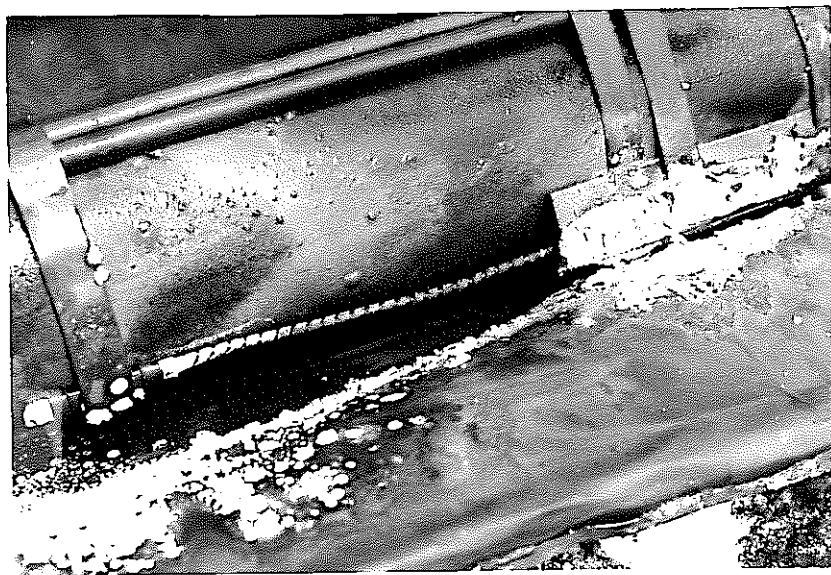


写真 51 . 試験番号 6
1 m 部漏洩検出器



写真 52 . 試験番号 7
漏洩孔近傍



写真53. 試験番号7
スチールシート 内側

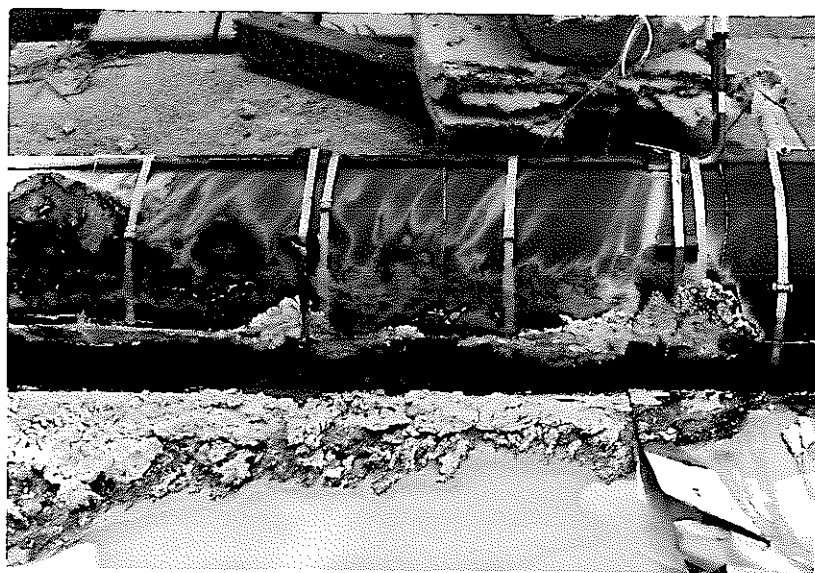


写真54. 試験番号7
配管底部



写真 55、試験番号 8
配管下部 保温材外への漏れ



写真 56、試験番号 8
スチールシートからの漏れ

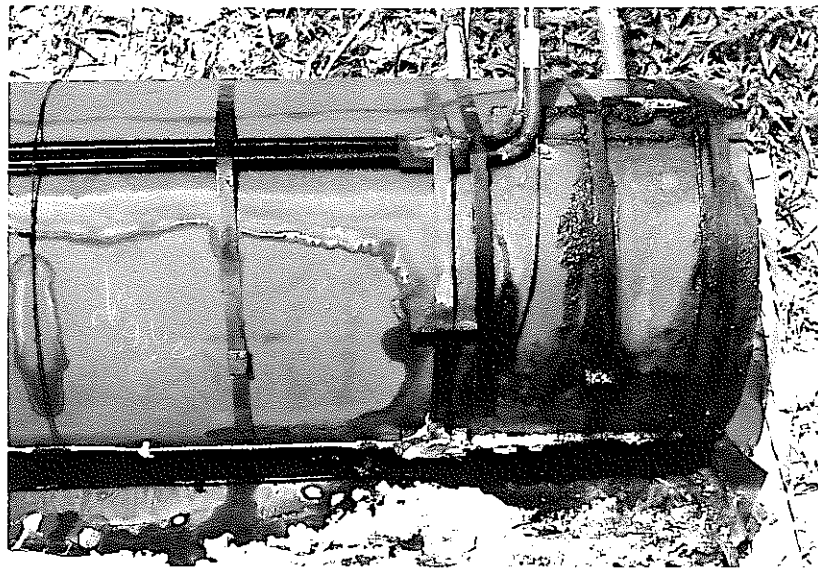


写真57、試験番号8
配管上のナトリウムの流れ

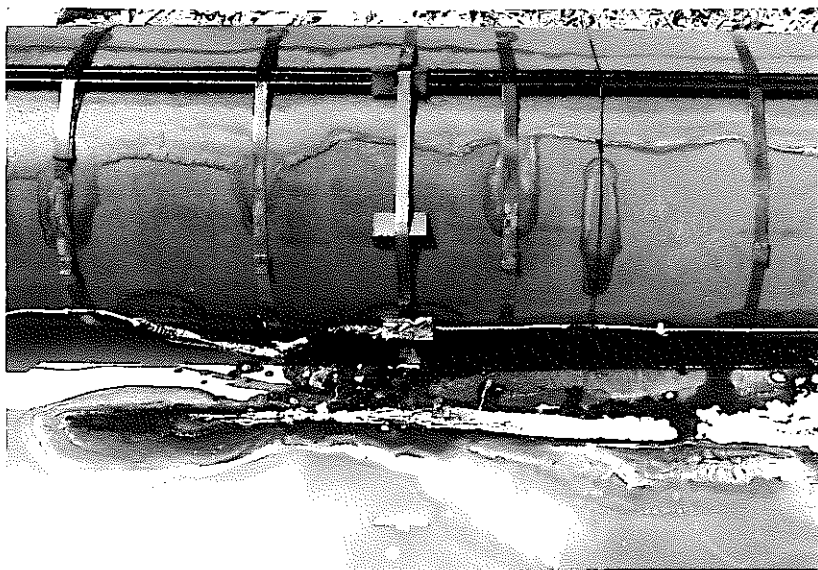


写真58、試験番号8
スチールシート上のナトリウムの流れ

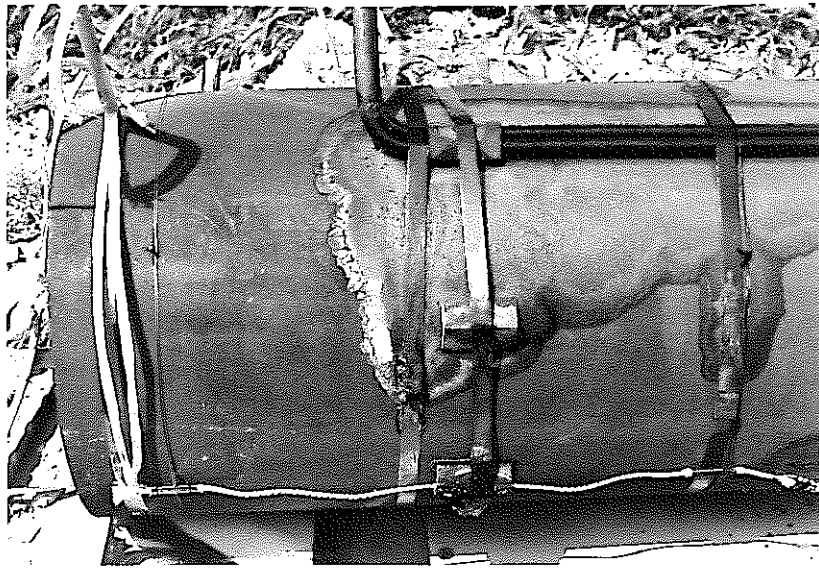


写真59 試験番号8
配管上のナトリウムの流れ

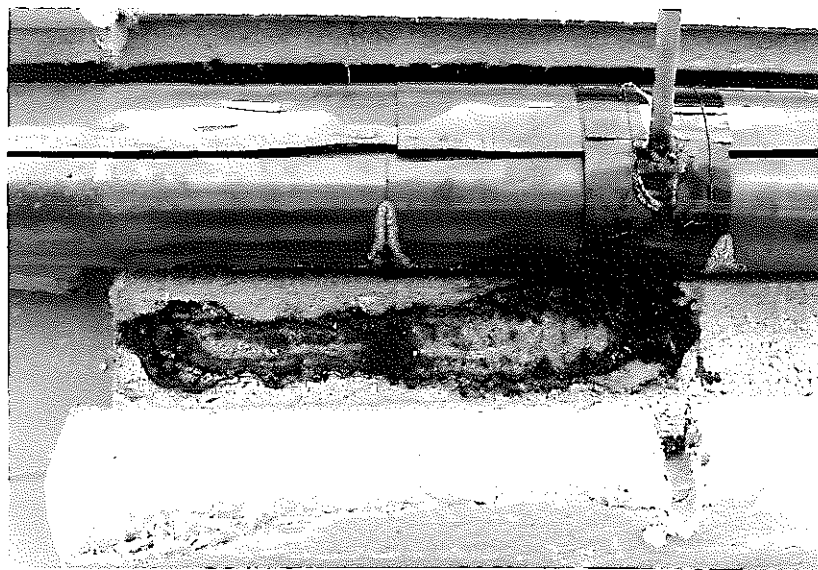


写真60 試験番号9
1m部スチールシート継目からの漏れ

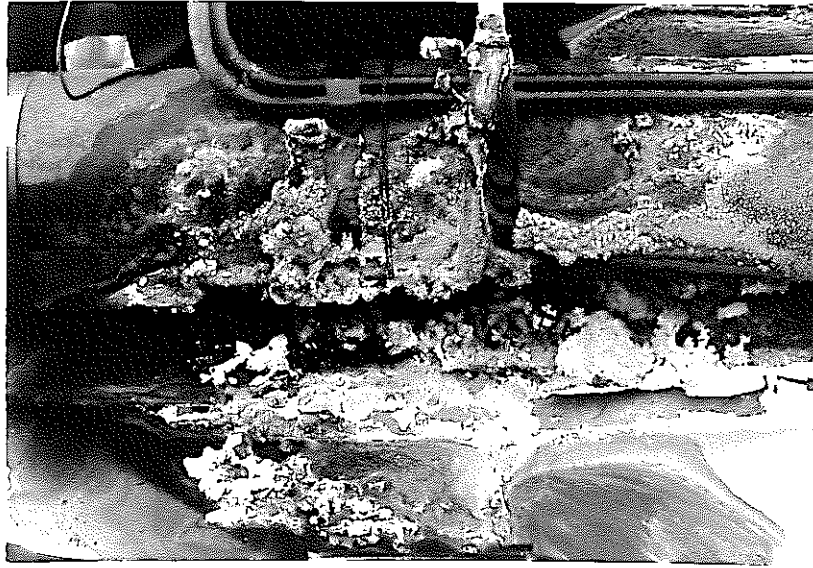


写真61、試験番号9
漏洩孔から15cm程離れた場合

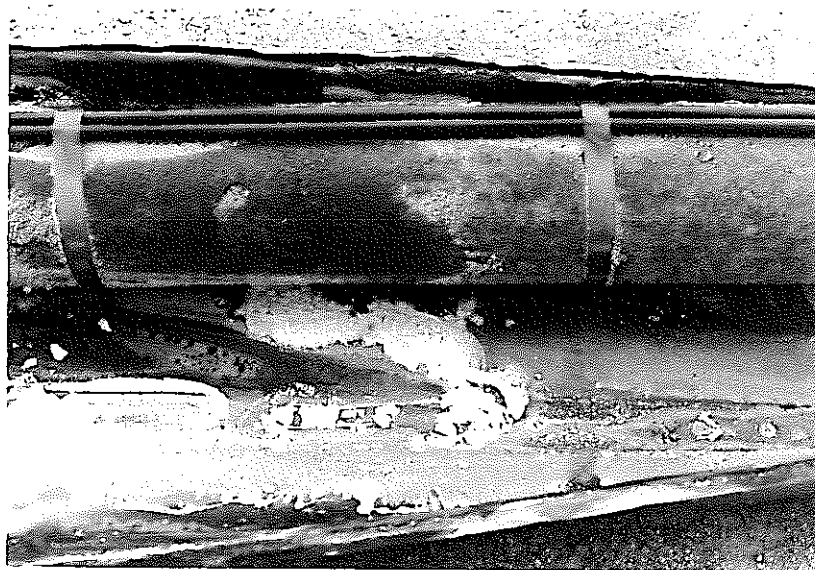


写真62、試験番号9
漏洩孔から50cm程離れた部分

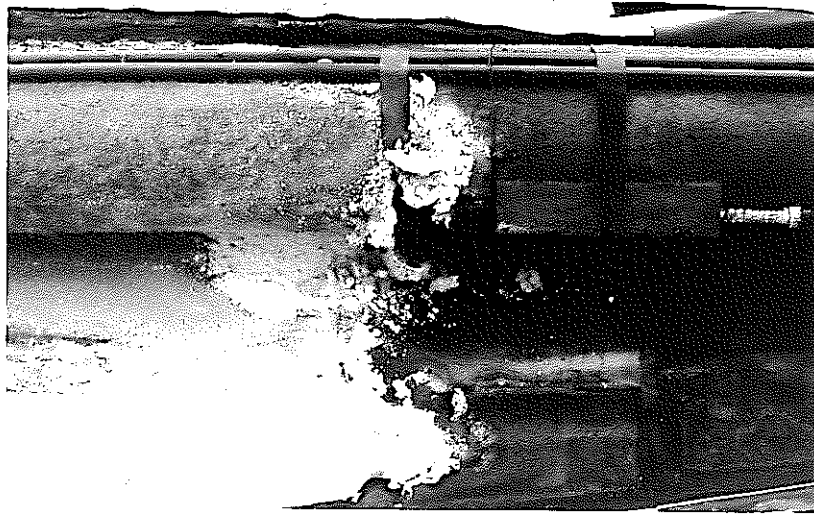


写真63、試験番号9
1m部漏洩検出器付近

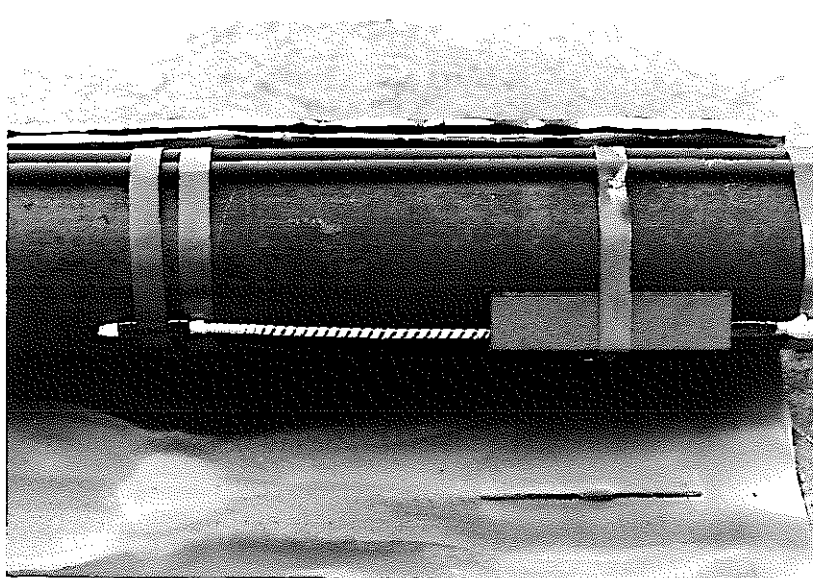


写真64、試験番号9
3m部漏洩検出器

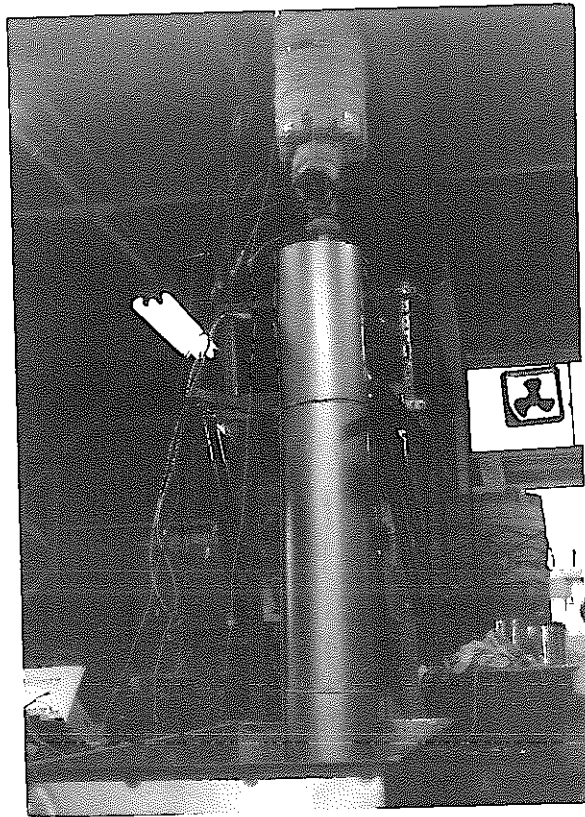


写真66. 垂直模擬配管の設置状態