

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. -6

[技術情報室]

高速実験炉用ブランケット燃料集合体ナトリウム 流動試験後の評価試験

—— 被覆管・ワイヤのナトリウムによる性質劣化 ——

1973年7月

動力炉・核燃料開発事業団

東 海 事 業 所

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

良られた範囲
ノファランス
お、開示制限

発事業団
究管理課
情報室

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

高速実験炉用ブランケット燃料集合体ナトリウム流動試験後の評価試験
——被覆管・ワイヤのナトリウムによる性質劣化——



実施責任者	青 木 利 昌	(技術部検査課)
報 告 者	宇井正泰	神谷和明 (")
	柴田照夫	横山 昭 (")
	小山真弘	川崎道隆 (")
	植野重男	小原勝昭 (")

研究期間 1971年12月1日～1972年2月28日

研究目的 大洗工学センターナトリウムループ中で流動試験したのちの高速実験炉用ブランケット燃料集合体の被覆管及びラッピングワイヤについて一連の評価試験を行ない、ナトリウム流動による性質の劣化を調べた。

研究要旨 燃料棒の外観は総じてカッ色を呈していたが、局部的に白色、金属光沢を呈していたものがあった。ナトリウム流動試験により被覆管、ワイヤの引張性質や耐圧性質などの強度において著しい性質劣化は生じていなかった。被覆管、ワイヤおよび端栓溶接部とも素材の溶体化処理による溶解炭素がナトリウム中で長時間加熱されたために炭化物として析出していた以外変化は認められなかった。

目 次

1	はじめに	1
2	供試材料	1
3	試験方法	1
3.1	試験項目及び内容	1
3.2	引張試験	2
3.3	内圧破壊試験	2
3.4	押拵げ試験	2
3.5	ワイヤの引張試験	3
3.6	顕微鏡観察及び硬さ測定	3
4	試験結果	3
4.1	引張試験	3
4.2	内圧破壊試験	4
4.3	押拵げ試験	4
4.4	被覆管の顕微鏡観察	4
4.5	ワイヤの顕微鏡観察	5
4.6	被覆管の硬さ	5
4.7	ワイヤの硬さ	6
4.8	上部端栓溶接部の顕微鏡組織及び硬さ	6
5	まとめ	7
6	参考文献	7

図 表 リ ス ト

表 1	ナトリウム流動試験の条件(概要)	8
表 2	被覆管の製造ミルシート	9
表 3	ワイヤの製造ミルシート	10
表 4	試験項目及び内容	14
表 5	被覆管引張試験結果	15
表 6	ワイヤ引張試験結果	15
表 7	被覆管内圧破壊試験結果	16
表 8	被覆管押抜け試験結果	17
図 1	ブランケット燃料集合体ピン構成	18
図 2	試験片採取位置	19
図 3	引張試験片の形状・寸法	24
図 4	内圧破壊試験片の形状・寸法	25
図 5	内圧破壊試験装置略図	26
図 6	被覆管の引張性質	27
図 7	被覆管の応力-歪線図(常温)	28
図 8	同 上 (650℃)	30
図 9	被覆管の耐圧性質	32
図 10	内圧破裂後の被覆管のふくれ(%)	33
図 11	ナトリウム流動試験前後の被覆管の表面硬さ	35
図 12	ナトリウム流動試験後の被覆管の硬さ	36
図 13	ナトリウム流動試験後の被覆管の表面硬さ	37
図 14	被覆管横断面の硬さ	38
図 15	同 上	39
図 16	同 上	40
図 17	ワイヤの表面硬さ	41
図 18	ワイヤの横断面の硬さ	42
図 19	上部端栓溶接部の硬さ	43
写真 1	ナトリウム流動試験後の燃料棒の外観	44
写真 2	同 上	45
写真 3	破断した引張試験片の外観	46

写真4	内圧破裂後の試験片の外観	47
写真5	押拵げ試験後の外観	47
写真6	ナトリウム流動試験前の被覆管の顕微鏡組織	48
写真7	通常部を示す部分の顕微鏡組織	49
写真8	白色部の顕微鏡組織	50
写真9	被覆管のワイヤとの接触部の顕微鏡組織	51
写真10	円状黒カッ色部の顕微鏡組織	52
写真11	金属光沢を呈する部分の顕微鏡組織	53
写真12	同 上	54
写真13	ナトリウム流動試験前のワイヤの顕微鏡	55
写真14	ワイヤの通常部の顕微鏡組織	56
写真15	ワイヤの被覆管との接触面の顕微鏡組織	57
写真16	傷のついたワイヤの顕微鏡組織	59
写真17	ワイヤの傷ついた部分の顕微鏡組織	60
写真18	ナトリウム流動前の上部端栓溶接部の顕微鏡組織	61
写真19	同 上	63
写真20	ナトリウム流動後の上部端栓溶接部の顕微鏡組織	65

1. はじめに

大洗工学センターのナトリウム炉で、700時間（最高温度600℃で228時間，平均温度550℃で480時間⁽¹⁾）の流動試験を行なった高速実験炉（常陽）用ブランケット燃料集合体の被覆管及びラッピングワイヤについて一連の評価試験を行なった。評価試験は引張試験，内圧破壊試験，押し拵げ試験，金相試験，硬さ試験とし，ナトリウムによる腐食，侵炭後の機械的性質の変化や金属組織の変化を主として調べた。

これらの結果について報告する。

2. 供試材料

流動試験後の性質と比較するために，ナトリウム流動を行なわないものについても試験を行なった。このための供試材は，燃料棒に組立てられたもの（燃料棒番号 S53, S107）を選んだ。

ナトリウム流動試験後の供試材は，住友電工製第2次試作集合体（PNC №14 住友 №S-6）のうちから，図・1に示す4本を選んで試験に供した，この集合体のナトリウム流動試験の条件を表・1に示す。⁽¹⁾

試験片の採取に際しては，ナトリウムにより変化の生じたとみられる部分を重点的に行なった。それぞれの燃料棒についての試験片の採取位置とその表面状況の観察結果とを，図2(a)～(e)に示す。写真1には燃料棒番号S72の表面の様子を，写真2にはS74, S97, S100の表面様子の一例を示す。ナトリウム流動試験後，被覆管の外観は一般にカッ色を呈しているが，ところどころ金属光沢を呈するものや，黒色味を呈するものがあった。

このうち，S100については，切断したところ内部にナトリウムが侵入していたので，試験片採取を中止した。⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾しかし，ラッピングワイヤについては試験片を採取して試験に供した。

燃料棒に使用した被覆管及びワイヤの製造者によるミルシートを表2～3に示す。材質及び公称寸法を下記に示す。

被覆管材質	:	SUS	32
被覆管公称寸法	:	外径	15.0 mm
		肉厚	0.6 mm
ワイヤ材質	:	SUS	32
ワイヤ公称寸法	:	直径	1.2 mm

3. 試験方法

3.1 試験項目及び内容

今回の評価試験として行なった、被覆管及びワイヤについての評価試験項目とその内容を表・4に示す。

3.2 引張試験

引張試験片は、島津製作所製オートグラフ（IS-5000）である。

試験温度は、常温及び650℃とした。常温においては試験片中部に歪ゲージ（新興通信製M102）を貼付し、これより検出した歪量と荷重とから、応力-歪曲線を記録し、0.2%歪に相当する応力から0.2%耐力を求めた。650℃においては、加熱環状ニクロム炉により行ない、雰囲気は大気中とした。引張速度はJIS規格（JIS G-0567）によると、0.2%耐力までは0.3%/min、0.2%耐力から破断までは、 7.5 ± 2.5 %/min、で行なり規定になっている。今回の試験では、常温及び650℃のいずれにおいても、0.2%耐力まで0.3%/min、0.2%耐力以後は7.5%/minで行なった。

650℃における0.2%耐力は、管状試験片の標点距離（50mm）にくさび型の治具を直接とりつけて、差動トランスにより伸びを求め、応力-歪曲線から求めた。

3.3 内圧破壊試験

試験片の長さは、有効に加圧される部分の長さを外径の10倍以上とするために、200mmとした。試験片の一端は端栓を溶接して密封し、他の一端は試験装置の加圧部に接続できるようなものとした。試験片の形状を図・4に示す。試験に際して端栓溶接ビード部及び熱影響部における破裂を避けるために、溶接部にSUS-27の針金を巻いて拘束した。燃料棒の端栓を付したまゝの試験片（図4(b)）では溶接部を拘束せずに試験を行なった。

常温においては水圧破壊試験装置を、高温においては高温内圧破壊試験装置を、それぞれ用いたが、これらの装置の略図を図・5に示す。加圧媒体は、常温においては水を、650℃においてはアルゴンを使用した。雰囲気はいずれも大気中である。

燃料被覆管においては、破裂時の円周伸びが大きな意味をもつので、非伸縮性のテープを用いて破裂後の試験片の最大ふくれ部の外周を測定し、次の式から破裂後の円周伸びを求めた。

$$\text{円周伸び}(\%) = \frac{C_f - C_o}{C_o} \times 100$$

C_f = 試験後の外周（割れ口を除く）

C_o = 試験前の外周

3.4 押し抜け試験

長さ50mmの試験片に60度の角度を有する円錐工具を押し込んで管外径を押し抜け亀裂の生じるまでの押し抜け率を次の式から求めた。押し込み速度は1mm/minである。

$$\text{押し上げ率(\%)} = \frac{(\text{試験後外径}) - (\text{試験前外径})}{(\text{試験前外径})} \times 100$$

3.5 ワイヤの引張試験

ナトリウム流動前後の燃料棒からラッピングワイヤをはずして引張試験に供した。JIS規格(JIS Z 2241 9号試験片)では標点距離を100mm, 200mmとしているが、今回の試験では試験片採取の都合上、全長を150mmとし、標点距離を50mmとした。試験温度は常温とし、歪速度は7.5%/minで行なった。クロスヘッド変位量から0.2%耐力を求めた。

使用した試験機は被覆管と同じく、島津製作所製オートグラフ(IS-5000)である。

3.6 顕微鏡観察及び硬さ測定方法

被覆管及びワイヤは、特別変化のない通常部と、外観上変化のあった異常部についてそれぞれ、表面状態(エッチングなどは行っていない)と横断面(エッチングは王水にて行なう)とを、また上部端栓溶接部は縦断面の顕微鏡観察を行なった。

硬さ測定は、荷重100gについて行ない、少なくとも3点以上の測定点の平均として求めた。

4. 試験結果

4.1 引張試験結果

被覆管及びラッピングワイヤの引張試験結果を、表・5及び表・6に示した。図・6には、ナトリウム流動前後を比較するために被覆管についての結果をグラフとして示した。

ナトリウム流動前後を比較すると、顕著な差は認められない。常温における耐力が多少低下している。4.2にも述べるように、内圧破壊試験におけるふくれがナトリウム流動試験後のものが大きくなっていることから、回復による軟化が生じているものと思われる。今回の試験の結果、常温における伸びがミルシートに比べて低く、仕様値より低下していることが判る。ステンレス鋼においては、歪速度の大小が伸びに与える影響が著しい。このため、ナトリウム流動前の試験片1本について0.3%/minの歪速度で破断まで引張った。この結果によると、伸びは30%となり、ミルシート値に一致する。

破断した試験片の外観を写真・3に示す。破断後の様相もナトリウム流動前後では変化が認められない。

ワイヤについては、燃料棒に使用した素材が、神戸材、住友材のいずれであるか不明のため、直接の比較はできない。

図・7、図・8に被覆管の常温及び650℃における代表的な応力-歪曲線を示した。

4.2 内圧破壊試験結果

表・7及び図・9に常温及び650℃における内圧破壊試験結果を示す。

常温の水圧破壊試験では、試験片中央部円周方向に歪ゲージを貼付し、圧力の増加に対する管のふくれ量を求めた。内圧試験の場合は引張試験の場合の0.2%耐力のような規定が明確でないので、円周方向に0.2%の塑性変形が生ずる圧力を便宜的に降伏圧力と呼ぶこととして整理した。

常温においては、引張試験の場合と同じく、ナトリウム流動試験後は、降伏圧力が低下するとともに、破裂時の円周伸びが増加している。破裂口を除く管部の直径を測定して求めたふくれ量(図・10)からもこのことが認められる。即ち、ナトリウム流動前のふくれ量が破裂口以外では1~2%と低いのに対して、ナトリウム流動後のふくれ量は3~6%と大きくなっている。この結果からも、ナトリウム流動により、回復が生じたと思われる。この回復は600℃、200時間という温度条件によるものと思われる。

650℃においては、ナトリウム流動試験前後の差異は認められない。この結果も引張試験の結果と対応する。

燃料棒の端栓の付いたまゝの管においても、端栓溶接部では破裂しない。硬さ試験の結果から熱影響部は小さいことが判っているので熱影響部から破裂しないことが妥当づけられる。

写真・4に破裂後の外観を示す。加圧媒体が異なるために、常温と650℃では破裂後の様相が異なる。

4.3 押抜け試験結果

表・8に被覆管の常温における押抜け試験結果を示す。ナトリウム流動前後では差異が認められずに、いずれも亀裂を生ぜず、亀裂発生前に軸方向荷重による坐屈が生じている。

試験後の外観を写真・5に示す。

4.4 被覆管の顕微鏡観察結果

写真・6はナトリウム流動前の被覆管(燃料棒番号S53)の顕微鏡組織である。(a)は表面状態を示す写真であり、最終仕上げは表面を研削加工しているものと思われる。(b)は横断面組織であり、焼きなまし双晶及び変形双晶が現われており、炭化物の析出はない。

写真・7~12はナトリウム流動試験後の被覆管の顕微鏡写真である。

写真・7は、S72の特別変化のない通常部の表面状態及びその横断面組織である。目視によれば、表面は試験前の金属光沢からカッ色に変色しており、顕微鏡による表面観察写真も写真・7(a)のように変っている。結晶粒界、変形双晶に炭化物が析出しているのが認められる(写真・7(b))。

写真・8はS72に認められた表面が白色を呈した部分の顕微鏡写真である。表面状態を示す写真・8(a)は通常部の表面状態を示す写真・7(a)とは異なっている。研磨のまゝを示す

写真・8(b)では粒界腐食などは観察されない。王水エッチングすると、表面の結晶粒界はある程度選択的に腐食されるようであるが、明確でない。炭化物析出状態は通常部と差異はない。

写真・9はワイヤとの接触面を示す組織である。表面状態及び横断面組織とも通常部と変わらない。即ち今回の流動試験によってワイヤと被覆管との間の相互作用(例えば摩耗など)は生じていないようである。

写真・10は円状の黒カッ色部の組織を示すものであり、表面状態は写真・10(a)及び写真・10(b)に示すような二種類の様相を呈し、通常部とは異なっていたが、横断面組織は特に変化はなかった。

写真・11と写真・12はそれぞれS74, S97の金属光沢を示した部分の組織である。どの組織も通常部と差異は認められなかった。

4.5 ワイヤの顕微鏡観察結果

ナトリウム流動試験前のSS120(燃料棒SS120に巻かれたワイヤ)の顕微鏡組織を写真・13に示す。炭化物の析出は認められない。

写真・14~17にナトリウム流動試験後のワイヤの組織を示す。

通常部の組織を写真・14に示す。600℃ナトリウム中の試験により粒界に炭化物が析出している。

写真・15に被覆管との接触した部分の組織を示した。表面状態を示す写真・15(a)は通常部の写真・14(a)とは異なっており、横断面にもへこみが観察される。しかし横断面組織写真からは、ナトリウムの侵食、浸炭などの現象は観察されなかった。

写真・16, 写真・17に表面に傷のついた部分を示した。この傷は写真より判るようにワイヤ表面に盛り上がったものである。この傷のあるS100はブランケット燃料集合体ピン構成図(図・1)より判るようにラッパー管に接しており、集合体をラッパー管の出し入れのときラッパー管と接触してついた引っかき傷と思われる。このため写真・16(b)に示すように盛り上がった部分は強冷間加工されているので、黒くエッチングされ、つぎに続く組織は変形双晶に炭化物が析出しているものと思われる。しかしこれは推測であり、ナトリウムからの浸炭現象或いはナトリウム侵食なども生じていると思われる。

X線マイクロアナライザー等により更に詳細な調査が必要であろう。

写真・17の横断面は凹凸が生じ、変形部表面より一つの結晶粒内の変形双晶に析出物が観察される。

4.6 被覆管の硬さ試験結果

図・11はナトリウム流動試験前後の被覆管表面通常部の硬さ測定結果である。試験前後を比較すると、ナトリウム流動試験により硬さが約HV25~35低下している。

図・12は、ナトリウム流動試験後の通常部、黒カッ色部及び金属光沢部表面の硬さを示

している。それぞれ硬さの差異は認められないといってよい。

図・13は、ナトリウム流動試験後の表面硬さである。図・12のS74より硬さは低下している。また白点部はHv263と低下度合が著しい。この原因は明らかでないが、写真・8に示すように白点部の表面結晶粒界が他の部分と異なりナトリウム侵食組織のためかもしれない。

図・14はナトリウム流動試験前後の横断面硬さを示す。前後では変化が認められない。これは図1.1の表面硬さ結果とは異なっているがその原因は明らかでない。外面、内面、中央部の硬さ変化も認められない。

図・15は、S74について同様の結果を示したものである。

図・16は、S72についての横断面硬さである。図・15のS74に比べ、硬さが多少低いようであり、図・13と同様に白点部の硬さが低い。しかしこれらの差はわずかであり組織写真も考慮に入れると、差異があるか明確でない。

以上、ブランケット被覆管ナトリウム流動試験による変化は顕微鏡組織及び硬さ測定結果からでは表面状態のみで、被覆管内部までの組織変化は認められなかった。

なお、上記のような表面状態の異なった部分はクロム炭化物或いはクロム酸化物ではないかといわれているが、金属顕微鏡のみでは推測すら不可能でありX線マイクロアナライザ、走査型電顕などによる観察が必要である。

4.7 ワイヤの硬さ試験結果

図・17はナトリウム流動試験前後のワイヤの表面硬さを示している。前後に硬さの変化は見られない。

図・18もナトリウム流動試験前後の横断面の硬さを示している。写真・16に示したように盛り上った傷で組織変化している部分(S72, S100)はピッカース硬さにして約180高くなっている。これは主としてラッパー管との引っかきによる冷間加工のためであると思われるが、ある程度は浸炭現象などが起っているためかもしれない。

4.8 上部端栓溶接部の顕微鏡観察及び硬さ測定結果

図・2に示すように下部端栓部はいずれも内圧破壊試験に供したため、顕微鏡観察には上部端栓溶接部を供した。

写真・18は、ナトリウム流動前の上端栓溶接部の顕微鏡写真である。溶け込み深さは十分であり、被覆管の熱影響部にはクロム炭化物の粒界析出(Weld Decay)は認められなかった。これは、溶接物が小さく溶接入熱が少ないために炭化物析出の起る前に850℃～500℃の炭化物析出温度範囲以下に冷却されたためと思われる。なお写真・18(a)で熱影響部付近が少し黒くなっているのは写真の不備(写真の端が黒く現象される傾向にある)によるものである。被覆管には加工方向に伸びたA系非金属介在物が多く見られる。

写真・19・20は、ナトリウム流動試験後の顕微鏡組織である。溶着金属寄りの熱影響部を除いた部分にナトリウム流動試験によって粒界に炭化物が析出している(写真・19(b), 20(b))。溶着金属寄りの熱影響部に炭化物析出が少ないのは、溶接入熱により高温に加熱されて溶体化処理がより完全に行なわれ、600℃程度では炭化物が容易には析出しないためと思われる。

写真・19(c), (d)及び写真・20(c), (d)に示したように表面部に黒色の変化層が見られる。この部分の硬さはHv 380となっており、かなり硬化している。この原因は余盛除去のため溶接部をヤスリがけしており、この冷間加工によるものと思われるが、他にナトリウムからの浸炭も考えられる。

図・19は、ナトリウム流動試験前後の硬さを示す。試験前後では硬さの変化は認められない。熱影響部は被覆管側で約1.2mmである。

5. ま と め

大洗工学センターナトリウムループ中で流動試験(最高温度600℃, 700時間, 0.4 m/Sec流速)した後の高速実験炉用ブランケット燃料集合体の被覆管及びラッピングワイヤについて一連の評価試験を行ない、ナトリウム流動による性質の劣化を調べた。

これらの結果をまとめると次のようになる。

- (1) 燃料棒の外観は総じてカッ色を呈していたが、局部的に黒カッ色, 白色, 金属光沢を呈していたものがあった。
- (2) ナトリウム流動試験により, 被覆管・ワイヤの引張性質, 耐圧性質などの強度において著しい性質劣化は生じていない。しかし600℃の加熱による回復が生じて常温における耐力の減少・伸びの増加, 内圧ふぐれの増加が認められた。
- (3) 被覆管・ワイヤ 溶接部とも素材の溶体化処理による溶解炭素が, 600℃ナトリウム中で長時間加熱されたため, 炭化物として析出していた以外特に変化はなかった。
- (4) 黒カッ色, 白色を呈していた部分の表面状態は, 顕微鏡観察及び硬さ測定によって変化が認められた。この発生原因は今回行なった顕微鏡観察及び硬さ測定では明らかにすることができず, X線マイクロアナライザ, 走査型電顕などによるより詳細な観察が必要である。
- (5) ワイヤの一部, 溶接部付近の表面の変化した部分は, 燃料棒の製作・集合体の組立の時の冷間加工(引っかき傷など)が主原因となっているものと思われる。

6. 参 考 文 献

- (1) 石橋・姫野: 「常陽」模擬ブランケット燃料集合体のナトリウム流動試験結果報告(1),

動燃資料 SN941 71-13

(2) 「常陽」模擬ブランケット燃料集合体のナトリウム流動試験結果報告(2)

動燃資料 SN941 72-04

(3) 青木ら：高速実験炉用燃料集合体のナトリウム流動試験による燃料ピン破損調査，動燃資料（印刷中）

(4) 小泉ら：高速炉模擬燃料ピンの Thermal Cycle Test による破損の検討：動燃資料 SN841-72-39

表・1 ナトリウム流動試験の条件（概要）(1)

ループの配管材質	： SUS 27 (Commercial・Grade)
ナトリウム平均流量	： 40 ℓ/min, (~0.4m/sec,)
ナトリウム平均温度	： 550℃, 700時間
(集合体は，このうち228時間は最高温度600℃, 残り480時間は平均温度550℃ におかれた。)	
ナトリウム純度	： 酸 素 ~25 ppm
	炭 素 ~11 ppm

表 2 被覆管のミルシート

FBR ブランケット被覆管

KOBE STEEL LTD Certificate of Test Results

NORTH CHOFU PLANT
2MINATOMACHI CHOFU SHIMONOSEKI
YAMAGUCHI-PREF JAPAN
HEAD OFFICE
36-1,1-CHOME WAKINOHAMA-CHO FUKUI-KU KOBE

CABLE ADDRESS
KOBE STEEL KOBE

No S-70-08

DATE May 20, 1970

CUSTOMER				KIND OF MATERIAL			
動力炉核燃料開発事業団				Stainless Steel Seamless Tubes, for Nuclear Reactor			
CUST. SPEC		GRADE		CONDITION		SHIPPING DATE	
		AISI 316		冷間加工材		70.5.19	
Manufacture No	Charge No	Lot No	Size mm		Pieces	Weight Kg	Remarks
SV 41501	TWC 9571	1	15.00.D×0.6t×2,000L		200	85.8	
CHEMICAL ANALYSIS.				MECHANICAL PROPERTIES			
	Spec	トリベ		Lot Position	Spec	(1)	(2)
C %	0.04-0.08	0.065		Tensile	Temp R-T		
Si	≦ 0.75	0.59		UTS	Kg/mm ²	≧ 60	828 84.5
Mn	≦ 2.00	1.32		YS 0.2% offset	Kg/mm ²	≧ 40	69.5 69.2
P	≦ 0.03	0.014		Elongation	% in mm	≧ 25	30.6 27.6
S	≦ 0.03	0.012		Flare	%OD Expansion	≧ 21	40 49.0
Ni	11.0-14.0	12.18		Flatten	% of OD	≦ F-50	4.3 4.5
Cr	16.0-18.0	17.58		Burst	Kg/cm ²		
Co	≦ 0.10	0.02		Grain Size	ASTM No	≧ 6.0	9.5 9.5
Mo	2.0-3.0	2.50		表面状況			合格 合格
B	≦ 0.001	0.0003		Surface Roughness	内	≦ 30S	1.1S 1.2S
N	≦ 0.035	0.026			外	≦ 3.0S	1.5S 1.7S
SUPPLEMENTAL INFORMATION				CORROSION TESTS			
高温引張				hours °C Kg/cm ² Rm No			
1) 650°C				Lot Position			
	Spec	(1)	(2)	Gain			
U.T.S	≧ 30	48.3	48.9	Appearance			
Y.S	≧ 20	45.6	47.5	Intercrystalline Corrosion			
E	≧ 15	25.0	21.0				
2) 硬度							
		(1)	(2)	NON DESTRUCTIVE TEST			
	HMV	27.8	28.8	Ultrasonic			
3) 介在物				Hydrostatic			
(1) B系列-1				Kt/cm ²			
(2) B系列-1				浸透探傷			
4) 腐食試験及び粒界腐食試験中				全数合格			
				全数合格			
				REMARKS			

表3(a) ワイヤーのミルシート (S材)

動力炉核燃料事業団御中						提出番号特品第50103号				
契約番号 — 契約数量 27Kg 仕様書 45年1月 製作番号 CS 6115 検査数量 28Kg (10分割/把)						昭和45年3月16日 住友電気工業株式会社 特殊線事業部生産部品品質保証課 兵庫県伊丹市昆陽字宮東一番地				
試 験 成 績										
高速実験炉燃料集合体用 ラッピングワイヤー 316 TYPE 1.2 mm										
試験 項目 規格	直 径 mm	引張り 強 度 Kg/mm ²	伸 長 率 200mm %	捻 回 mm 回	屈 曲 mm/R 回	捲 付 6.3mm				腐 蝕 試 験
	把 毎 1.2 ±0.010	70 以下	10以上	偏 差 0.010 以下	以 上	良 好	表 面 アラサ <6S	結 晶 粒 度	cm /month	
常 温	1,200 1,200	63.3 62.4	42 42	0 0		良 好 良 好	2 S 3 S	7.2	0.00130	
350℃	1,200 1,200	59.2 59.2	24.5 25.0							
650℃	1,200 1,200	46 47	21 21							
項 目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo		
規 格 (φ)	0.04 -0.08	≒0.75	≒2.00	0.03以下	0.03以下	11.00 -14.00	16.00 -18.00	2.00 -3.00		
981446	0.064	0.57	1.64	0.001	0.012	1284	16.63	2.47		
	Co≒0.10	B≒0.001	N≒0.035							
			0.021							

表 9(b) ワイヤのミルシート (K材)

1970年4月6日

1970年4月6日

動力炉核燃料開発事業団

高速増殖炉開発本部 殿

株式会社 神戸製鉄所

鉄鋼事業

ショッピングワイヤ検査成績表

1. 製品明細

コイル地	寸法 (mmφ)	長さ (m)
1	1.20	300
2	1.20	"
3	1.20	"
4	1.20	"
5	1.20	"
6	1.20	"
7	1.20	"
8	1.20	"
9	1.20	"
10	1.20	"
合計長さ (m)		3,000

2. 化学成分

銅番	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N
TWC9571	0.06	0.59	1.32	0.014	0.012	12.18	17.58	2.50	0.02	0.0003	0.026

3. 機械的性質

3-1 常温試験

コイル No	線 径 (mm)	破断荷重 (KS)	引張強さ (Kg/mm ²)	伸 び (%) G ₁ L = 200 mm	捲 付 テスト
1	1.197	79.0	70.0	45.5	O・K
2	"	"	"	46.0	"
3	"	"	"	45.5	"
4	"	"	"	46.0	"
5	"	"	"	45.0	"
6	"	"	"	46.0	"
7	"	"	"	44.5	"
8	"	80.0	70.8	50.0	"
9	"	79.0	"	48.0	"
10	"	78.0	69.1	45.0	"

3-2 高温引張試験

試験温度 (℃)	コイル No	線 径 (mm)	引張強さ (Kg/mm ²)	伸 び (%) G ₁ L = 50 mm
350	1	1.197	56.5	29.0
	"	"	60.7	32.0
	"	"	58.3	29.0
650	"	"	43.8	29.0
	"	"	45.6	30.0
	"	"	45.6	30.0

(コイル No 1 について実施)

4. 組織写真 (オーステナイト結晶粒度)

ASTM No. 6

SN841-73-15

5. 耐食性試験 (ASTM・A-262, Practice A法)

合格

6. 表面疵

表面疵深さ 0.015 mm 以下 : 合格

7. 寸法

1.197 mm ϕ

公差 ± 0.01 mm 以下 : 合格

偏径差 0.01 mm 以下 : 合格

8. 表面あらさ

6 S (中心線平均あらさ : 1.1 ~ 1.5 μ)

表 4 試験項目及び内容

		前 ^(※)	後 ^(※)	内 容	求めるデータ
被 覆 管	引張試験 引張試験	◎	◎	腐食前後の管について常温及び650℃で行ない、前後の差異を調べるとともにミルシート値をチェックする。	引張強さ 0.2%耐力 伸び
	内圧破壊試験	◎	◎	管部及び端栓溶接部を含む管について常温、650℃で行ない、破裂強度を調べるとともにふくれ量を調べる。	破裂圧力 (降伏圧力) 外径ふくれ
	押抜け試験	◎	◎	60℃のコーンを押込み、亀裂又は座屈の生じるまでの押抜け率を求める。	最大荷重 押し抜け率 亀裂の有無
	金相試験	◎	◎	・表面—表面腐食 ・横断面—管とワイヤーの接触部、滲炭炭化物析出、ナトリウム腐食結晶粒度、双晶	
	硬さ試験	◎	◎	・表面—腐食状態の違いによるカタサ変化 ・横断面—外面、中央、内面のカタサ変化(特に腐食、滲炭が著しい部分) ・溶接部—溶接部、熱影響部、素材のカタサ変化	
ワ イ ヤ	引張試験	◎	◎	腐食前後の線について常温で試験を行ない、強度変化を調べる。 被覆管に準ずる。	引張強さ (0.2%耐力) 伸び
	金相試験	◎	◎	被覆管に準ずる。 被覆管に準ずる。	
	硬さ試験	◎	◎	被覆管に準ずる。	

(※) ナトリウム腐食試験の前後を示す。

表5 被覆管引張試験結果

試験機 島津オートグラフIS-5000型 雰囲気大気中

引張速度 0.3%/min 0.2%耐力以後は7.5%/minの歪速度で引張る。

(JIS-G-0567 FBR被覆管の引張速度に準じて実施する)

(※)は引張速度0.3%/minで破断に至るまで引張る

試料番号	(Kg/mm ²) 引張強さ	(Kg/mm ²) 0.2%耐力	(%) 伸 び	破断位置	(°C) 試験温度	Na流動試験
S53-1	86.1	73.9	21.8	A	常温	前
S53-2	86.0	74.8	22.0	A	常温	前
(※)S53-5	85.1	72.6	30.5	B	常温	前
S53-3	51.4	37.1	18.8	B	650	前
S53-4	51.5	39.5	18.7	B	650	前
S74-1	87.7	68.1	23.9	A	常温	後
S74-2	89.3	69.1	23.5	A	常温	後
S74-4	49.9	38.4	19.8	C	650	後
S72-1	46.6	37.7	19.2	A	650	後

表6 ラッピングワイヤー引張試験結果

試験機 島津オートグラフ 試験温度 常温

歪速度 7.5%/min (耐力は参考値として全伸びより求める。)

試料番号	(Kg/mm ²) 引張強さ	(Kg/mm ²) 0.2%耐力	(%) * 伸 び 率	破断位置	Na流動試験	備 考
S100-1	67.8	34.7	51.0	B	後	キズの生じた試料
S100-2	67.8	35.4	50.9	A	後	
SS120-1	65.6	33.3	59.7	A	前	
SS120-2	66.1	38.0	53.0	B	前	

(※) GL=50で求めた値

(JIS Z 2241, 9号試験片ではGL=100 or 200である)

表7 FBRブランケット燃料被覆管内圧破壊試験結果

試験条件	流動試験 前後の別	試料番号	破壊圧 Kg/cm^2	0.2%耐力 Kg/cm^2	周伸び%
R. T 水 圧	前	S53-B3	840 (100.8)	745 (89.4)	1.9
		S53-B4	840 (100.8)	790 (94.8)	1.6
		S107-B1・端栓付	820 (98.4)	730 (87.6)	1.9
	後	S72-B1・端栓付	750 (90.0)	660 (79.2)	12.5
		S74-B2・端栓付	800 (96.0)	715 (85.8)	9.5
		S97-B2	780 (93.6)	700 (84.0)	9.2
		S97-B3	770 (92.4)	670 (80.4)	8.9
650℃ ガス圧 (Ar)	前	S53-B1・端栓付	470 (56.4)	—	—
		S53-B2	470 (56.4)	—	—
	後	S74-B1	485 (58.2)	—	—
		S97-B1・端栓付	460 (46.0)	—	—

()内は平均径の式 $\sigma = P (D/2t - 0.5)$ による等価応力 (Kg/mm^2)

周伸び：破断開口部の最大円周伸び

表8 被覆管押し抜け試験

試験機 島津万能試験機RH-10型 試験温度 常温

試料番号	(Kg) 最大荷重	(%) 押し抜け率	Na流動試験	試験後の試料の状態
S53-1	2190	55.1	前	座屈する・亀裂なし
S53-2	2160	58.9	前	座屈する・亀裂なし
S74-1	2100	46.0	後	座屈する・亀裂なし
S74-2	2100	48.1	後	座屈する・亀裂なし

Na試験前

Na試験後

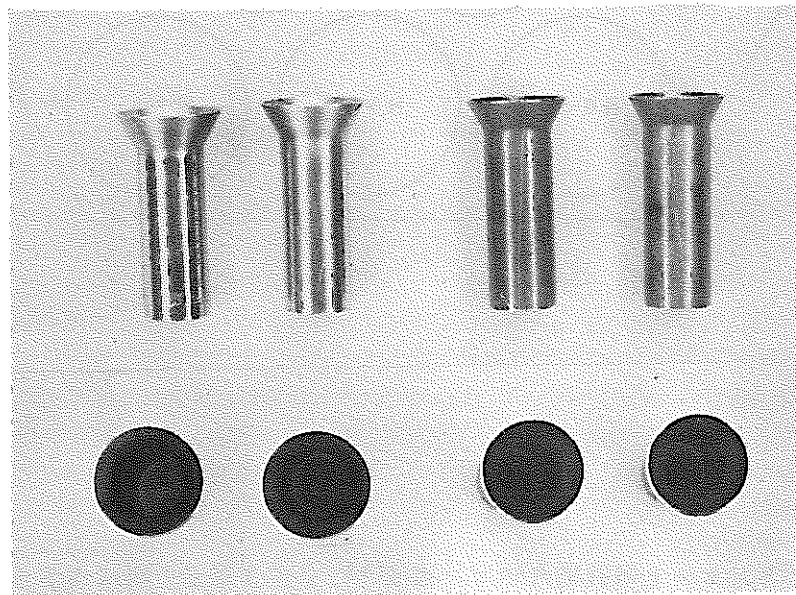
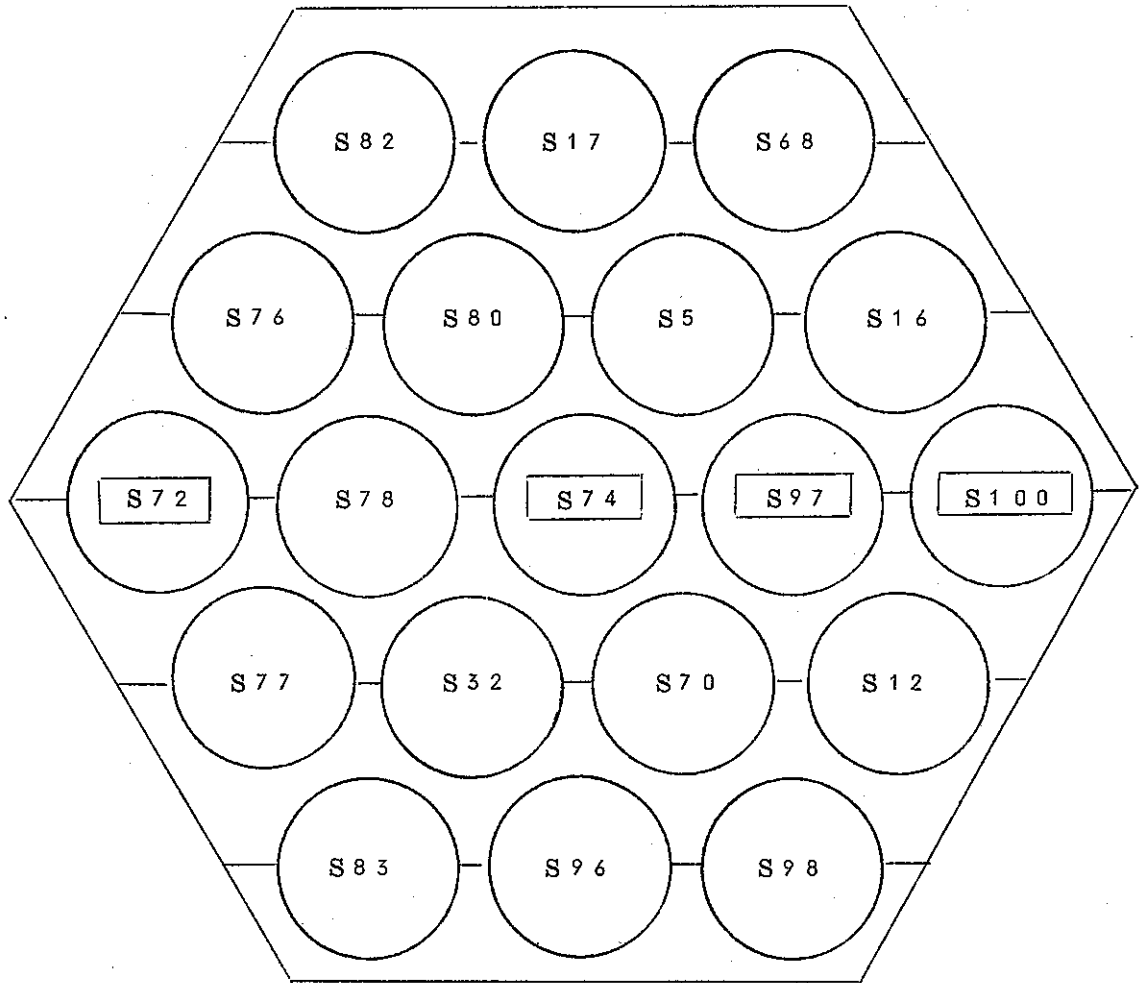


写真5 押し抜け試験後の外観

Na試験前：S53

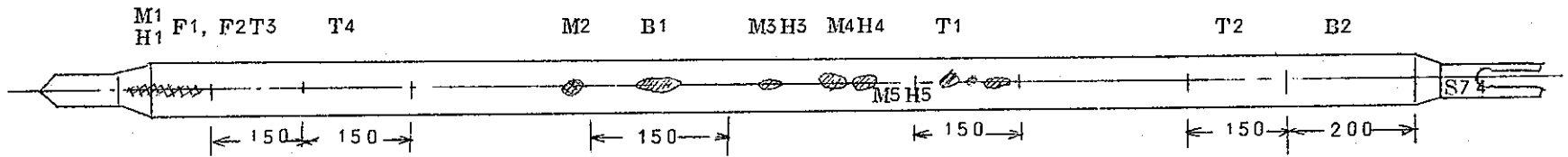
Na試験後：S74



図・1 ブランケット燃料集合体ピン構成⁽²⁾ (住友電工2次試作S-6)

□ は評価試験に供した燃料棒を示す。

このうちS100はナトリウムの侵入があり試験は行なわなかった。



- | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| M1 H1-0 ~ 60 ;上部端栓溶接部付近 8.5mmの金相, 硬さ | F1-70~120 ; 長く伸びた黒カッ色部を含むフレア試験 | B1-670~870 ; やゝ光沢のある部分を中央に含むバースト試験 |
| M2-655~665 ;直径 8mmの丸い光沢のある部分金相 | F2-120~70 ; 余り変化のない部分フレア試験 | B2-1760~ ; 下部端栓部バースト試験 |
| M3 H3-930~965 ; 光沢のある部分の金相, 硬さ | | |
| M4 H4-103~1060 ; 光沢のある部分の金相, 硬さ | | |
| M5 H5-1100~1130 ; 通常の様相を示す部分の金相, 硬さ | T1-1170~1320 ; やゝ光沢のある部分を含む引張試験 | |
| | T2-1610~1760 ; 通常の様相を示す引張試験 | |
| | T3-170~320 ; 同上 | |
| | T4-320~470 ; 同上 | |

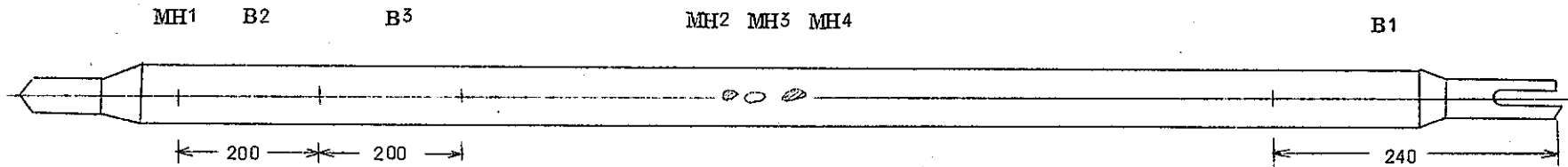
M	: 金相試験片
F	: フレア試験片
T	: 引張試験片
B	: バースト試験片
H	: 硬さ試験片

図・2 (a)

FBRブランケット燃料棒 Na流動試験後評価試験 試験片採取位置

燃料棒番号 S74

試験片番号のうちハイフン(一)の次にある数字は、上部端栓側よりの距離を示す。



MH1-0~60 : 上部端栓溶接部を含む金相・硬さ

B1-1660~1900: 下部端栓を含むバースト試験

MH2-890~910: 丸い光沢を示す部分の金相・硬さ

B2-60~260 : 管のバースト試験

MH3-920~940: 通常の様相を示す部分の金相・硬さ

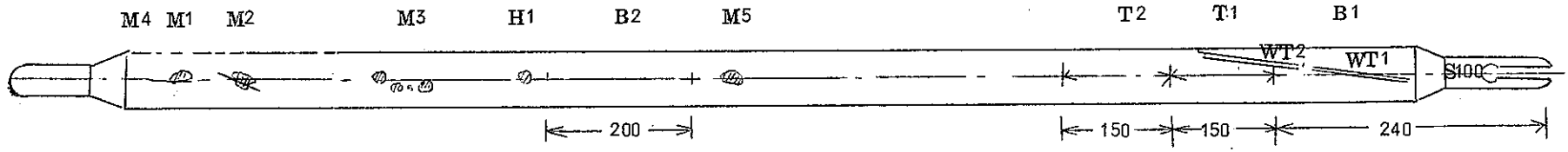
B3-260~460 : 同上

MH4-975~995: 光い光沢を示す部分の金相・硬さ

図・2 (b)

FBRプランケット燃料棒 流動試験後評価試験 試験片採取位置

燃料棒番号 S97



-21-

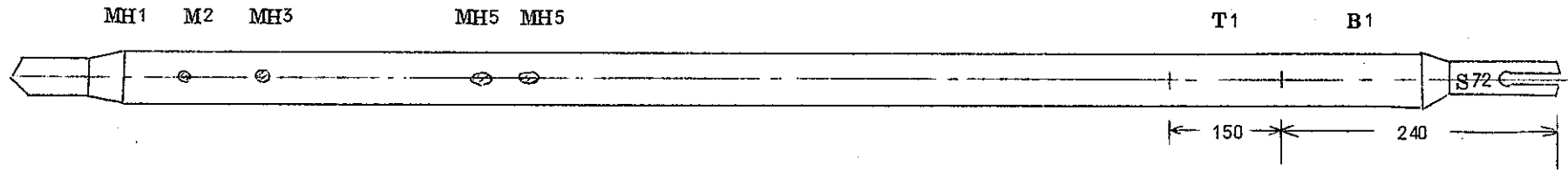
M1-100~120; 黒点のある部分の金相	WMH1- 300~ 350; ラッパ管との接触により傷ついたワイヤーの金相・硬さ	B1; 下部端栓部のパースト試験
M2 210~240; ワイヤ部分が黒カッ色のもの金相	WMH1- 600~ 650; 同	B2-620~820; 管部のパースト試験
M3 400~460; 黒点となっている部分の金相	WMH3- 900~1020; 同	T1; 管部の引張試験
H1 610~620; 黒点のある部分の硬さ	WMH4-1270~1320; 同	T2; 同 上
M4 0~ 60; 端栓部金相	WT1 -1710~1860; ワイヤーの引張試験	
M5 880~910; 黒点となっている部分の金相	WT2 -1560~1710; 同	

図・2 (c)

FBRブランケット燃料棒 Na 流動試験後評価試験 試験片採取位置

燃料棒番号 S100

WT ;ワイヤーの引張試験片
WMH ;ワイヤーの金相・硬さ試験片



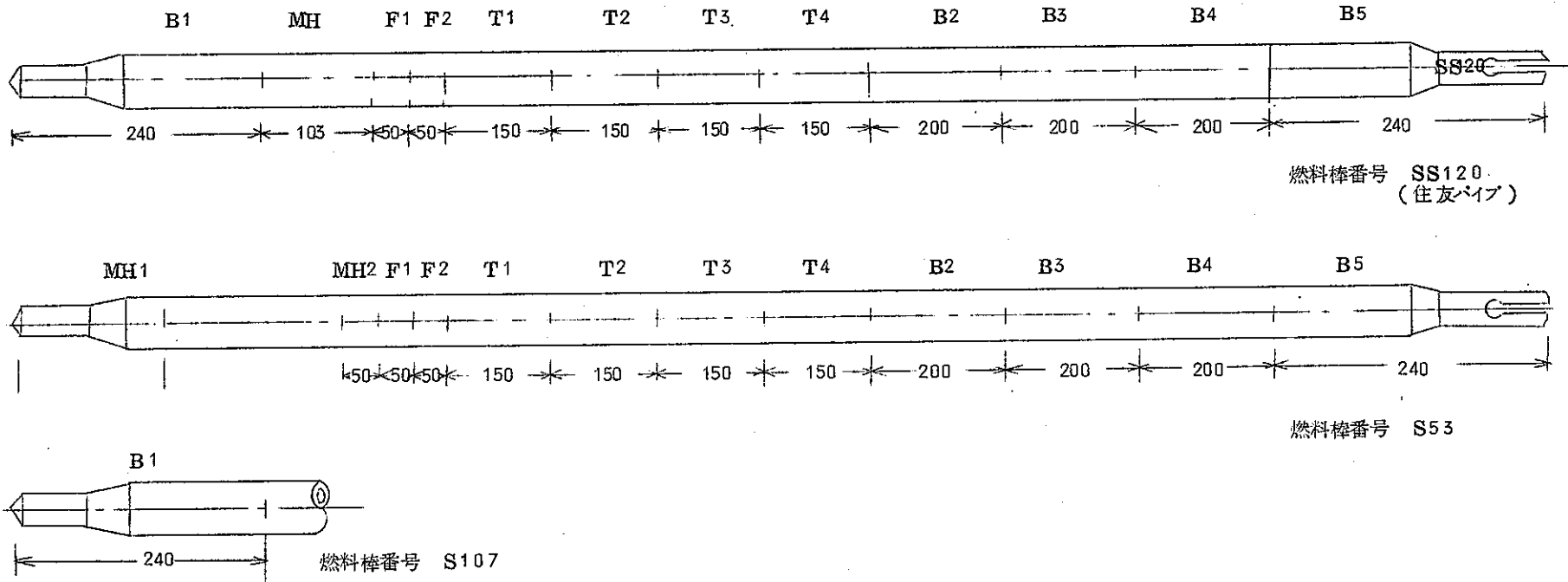
-22-

MH1-0~60	；上部端栓溶接部の金相・硬さ	WMH1-750~800	；ラッピングワイヤーの傷ついている部分の金相・硬さ	T1；引張試験
M2-130~150	；丸く黒カッ色を帯びている部分の金相・硬さ	WMH2-1380~1420	；同	B1；下部端栓溶接部を含む バースト試験
MH3-230~250	； 同		上	
MH4-525~535	； 同		上	
MH5-600~610	； 同		上	

図・2 (d)

FRRブランケット燃料棒 Na 流動試験後評価試験 試験片採取位置

燃料棒番号 S72



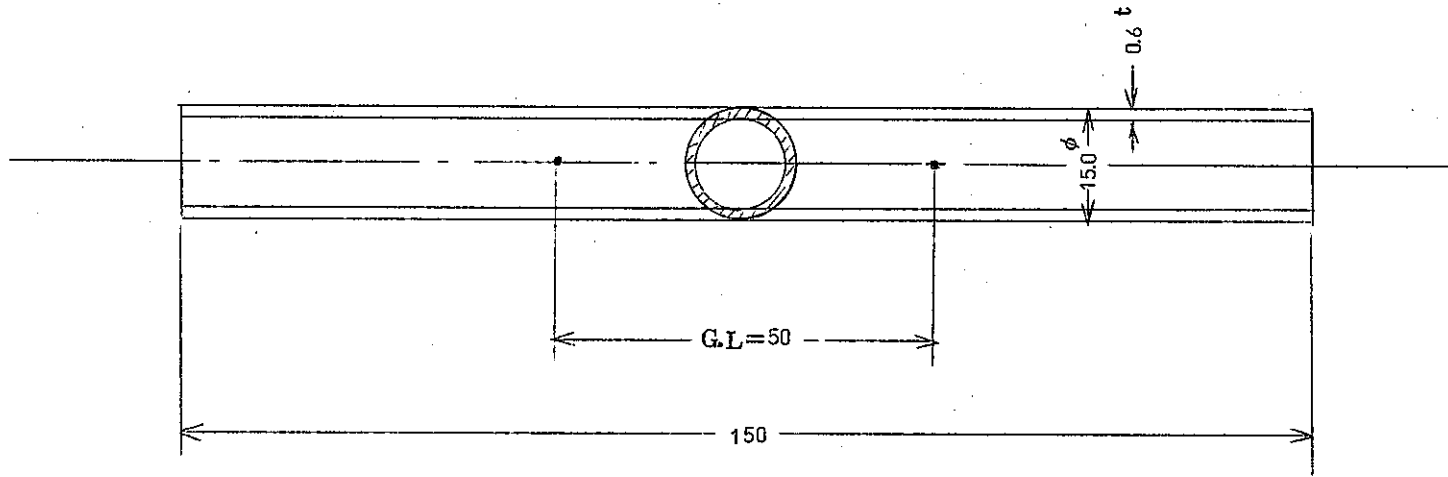
-23-

図・2 (e)

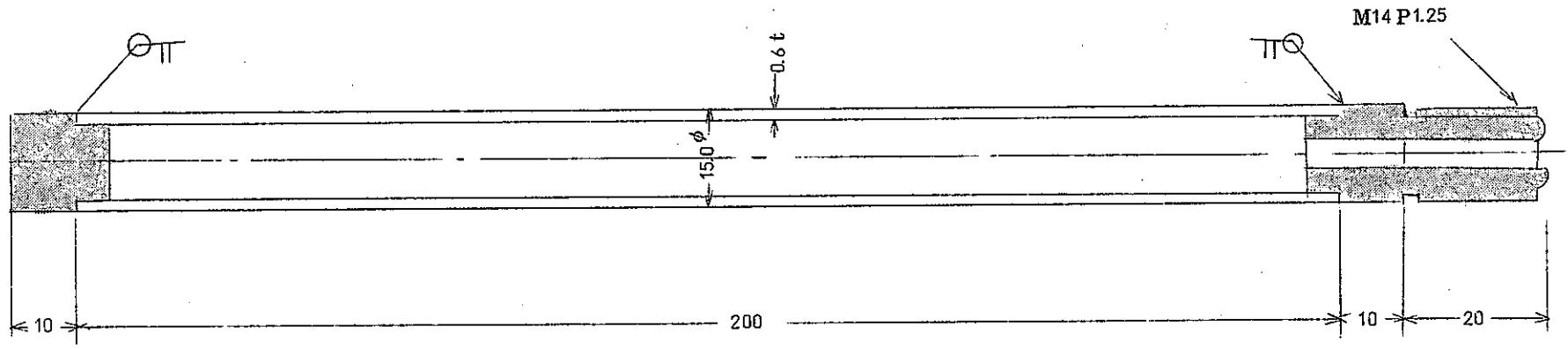
FBRプランケット Na流動試験後評価試験 試験片採取位置

燃料棒番号 SS120, S53 及びS107

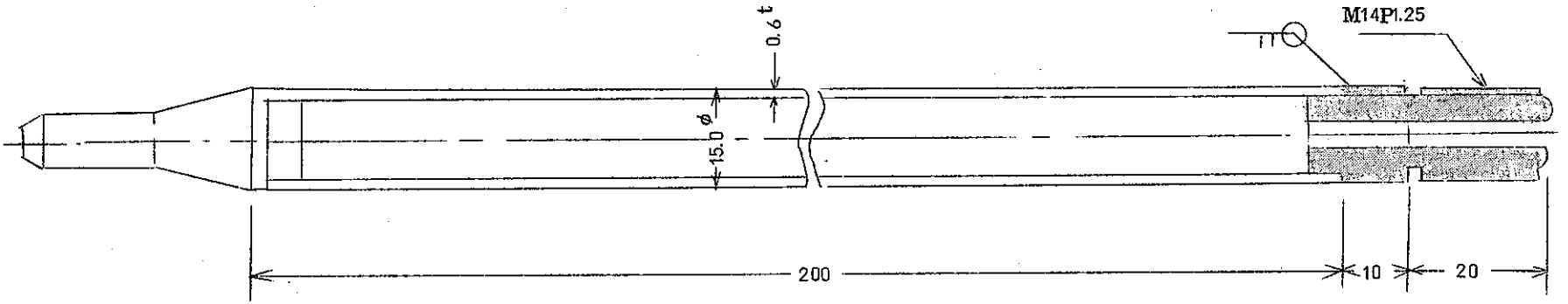
いずれもNa流動前の燃料棒であり, 素材試験として採取



図・3 被覆管引張試験片 (J I S Z 2 2 4 1 1 1 号試験片) の形状・寸法



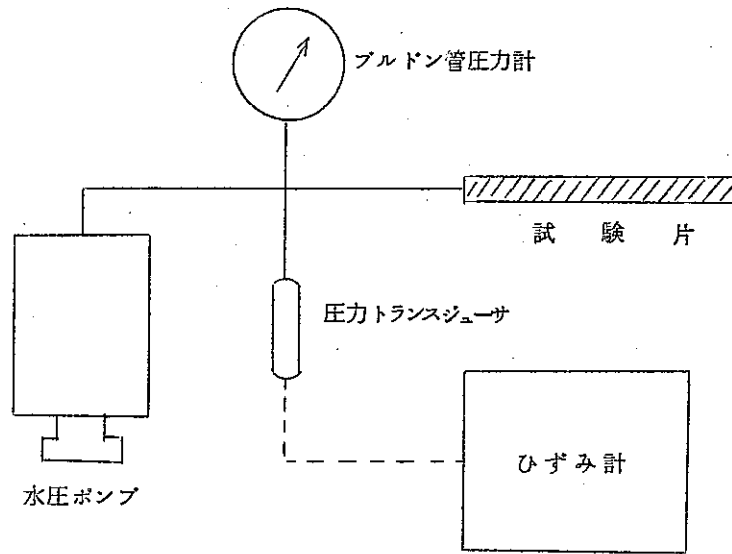
(a) 管部の内圧破壊試験片



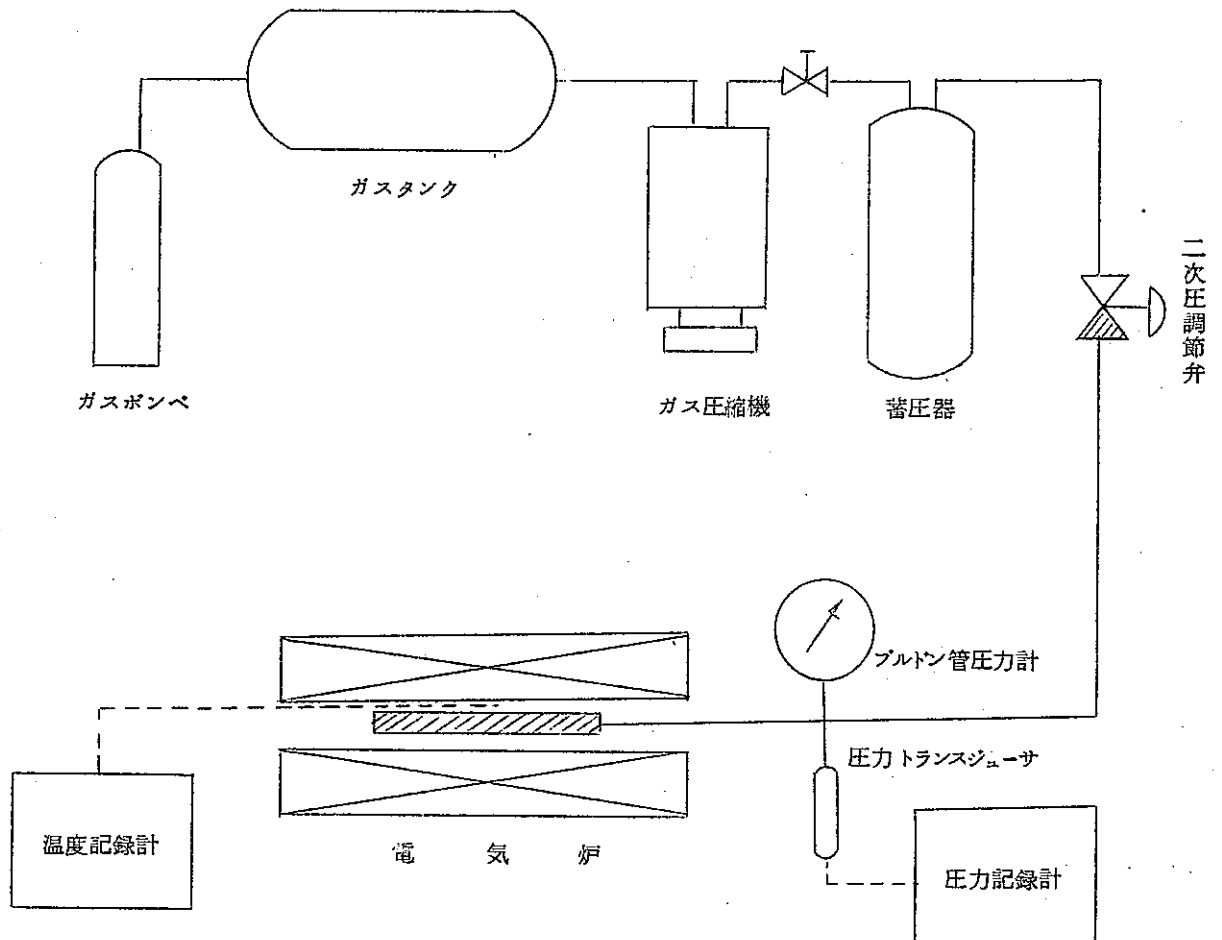
(b) 端径つき管の内圧破壊試験片

-25-

図・4 内圧破壊試験片の形状・寸法

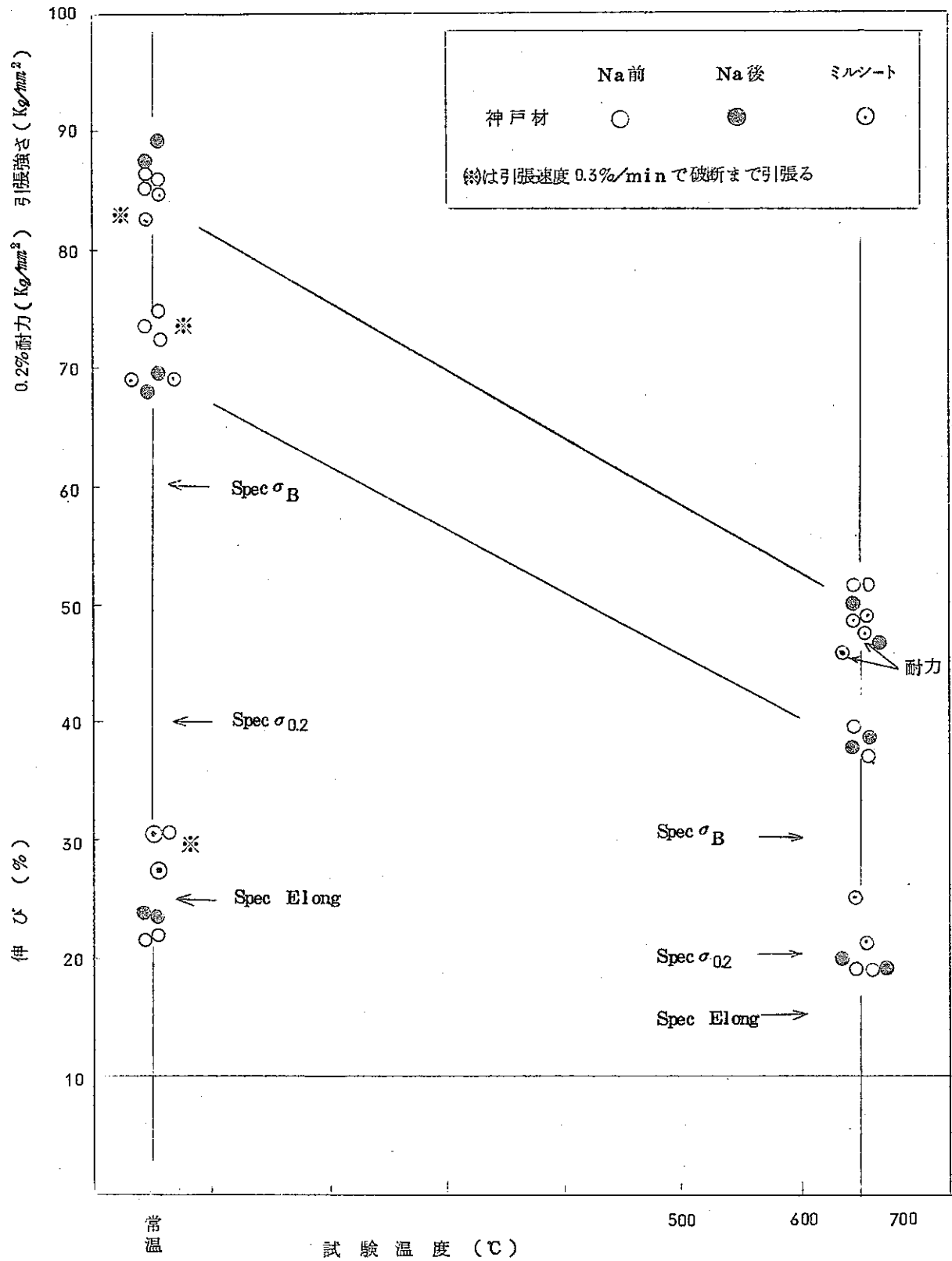


(a) 水圧破壊試験装置

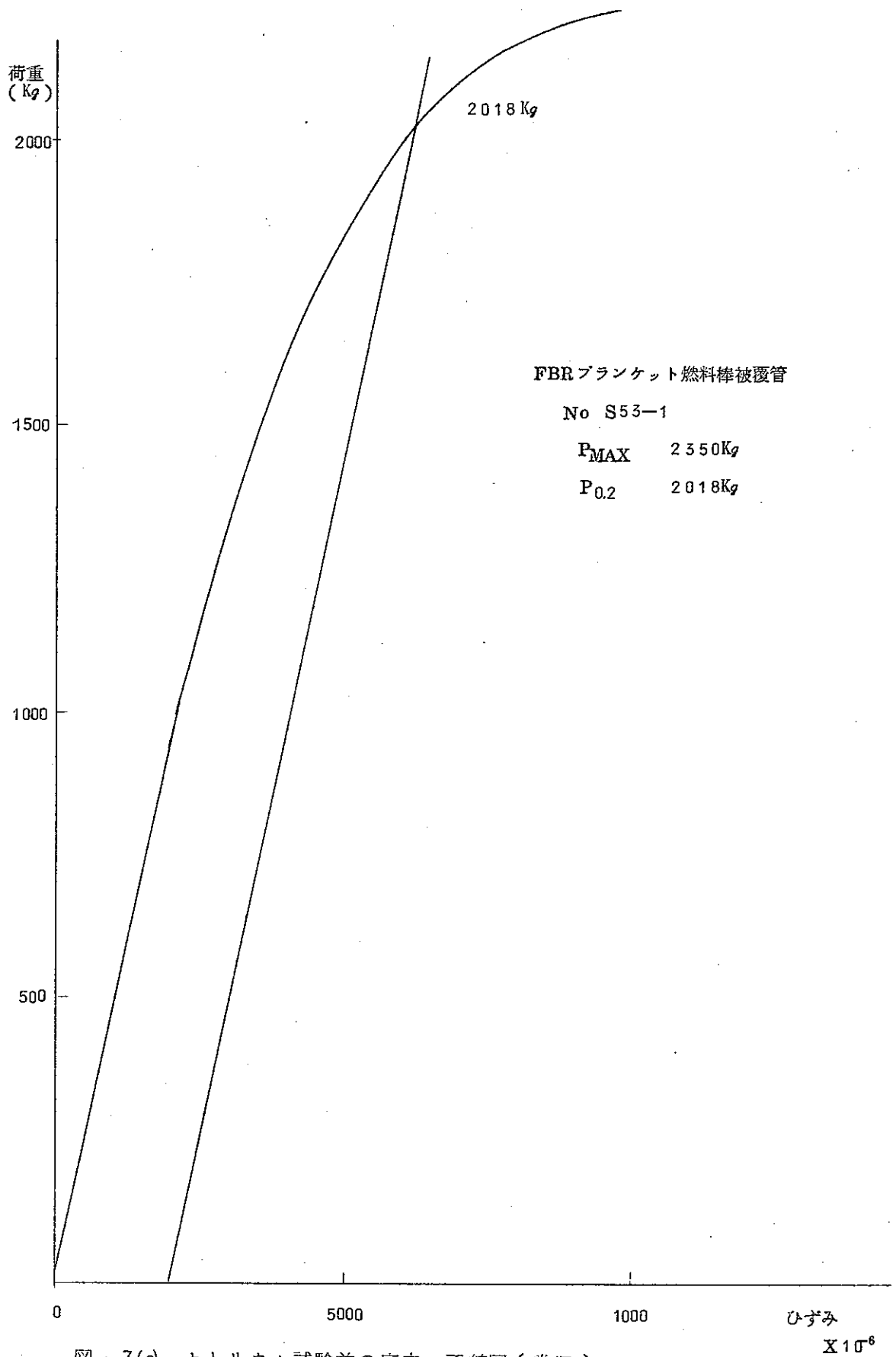


(b) 高温内圧破壊試験装置

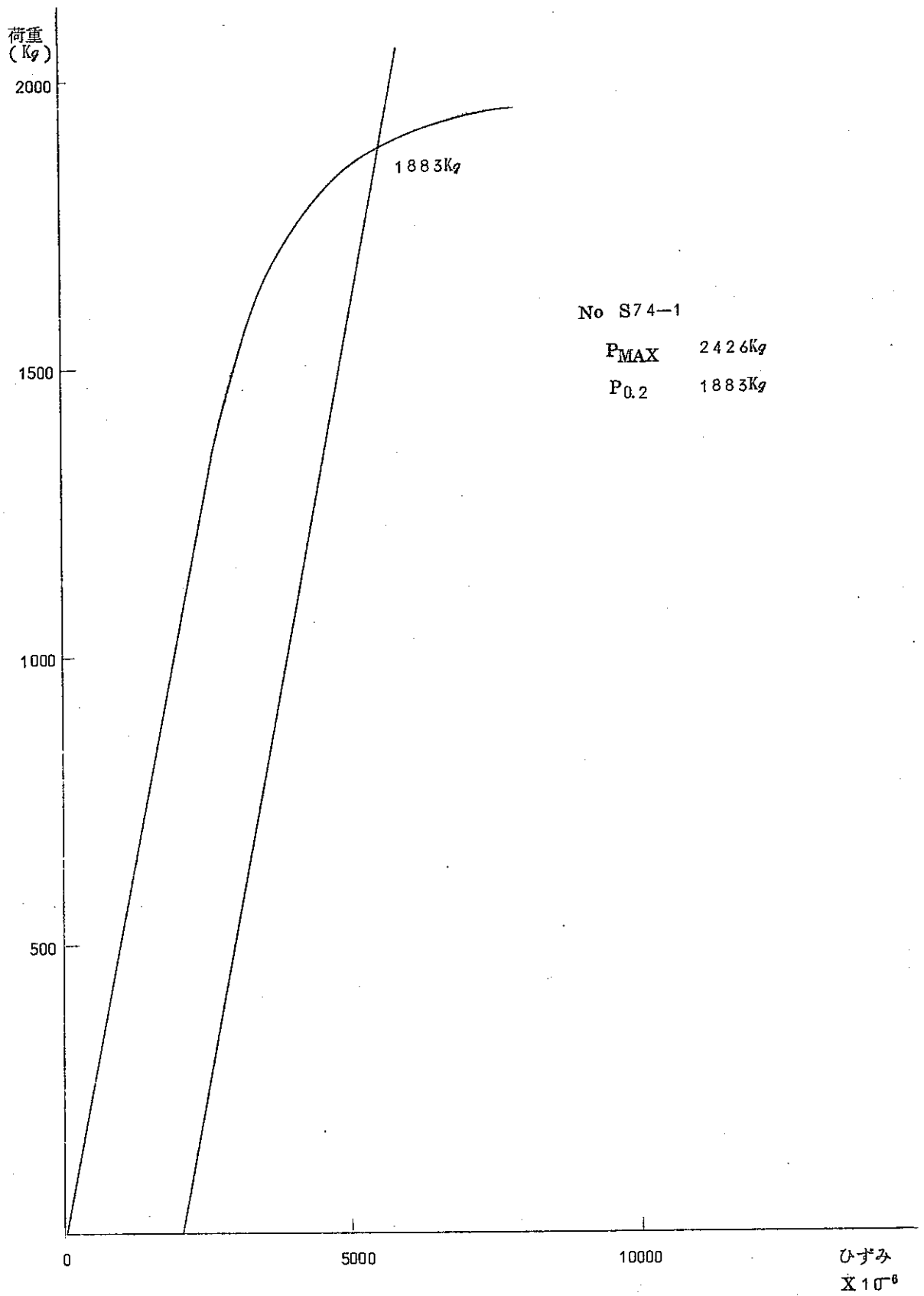
図・5 内圧破壊試験装置略図



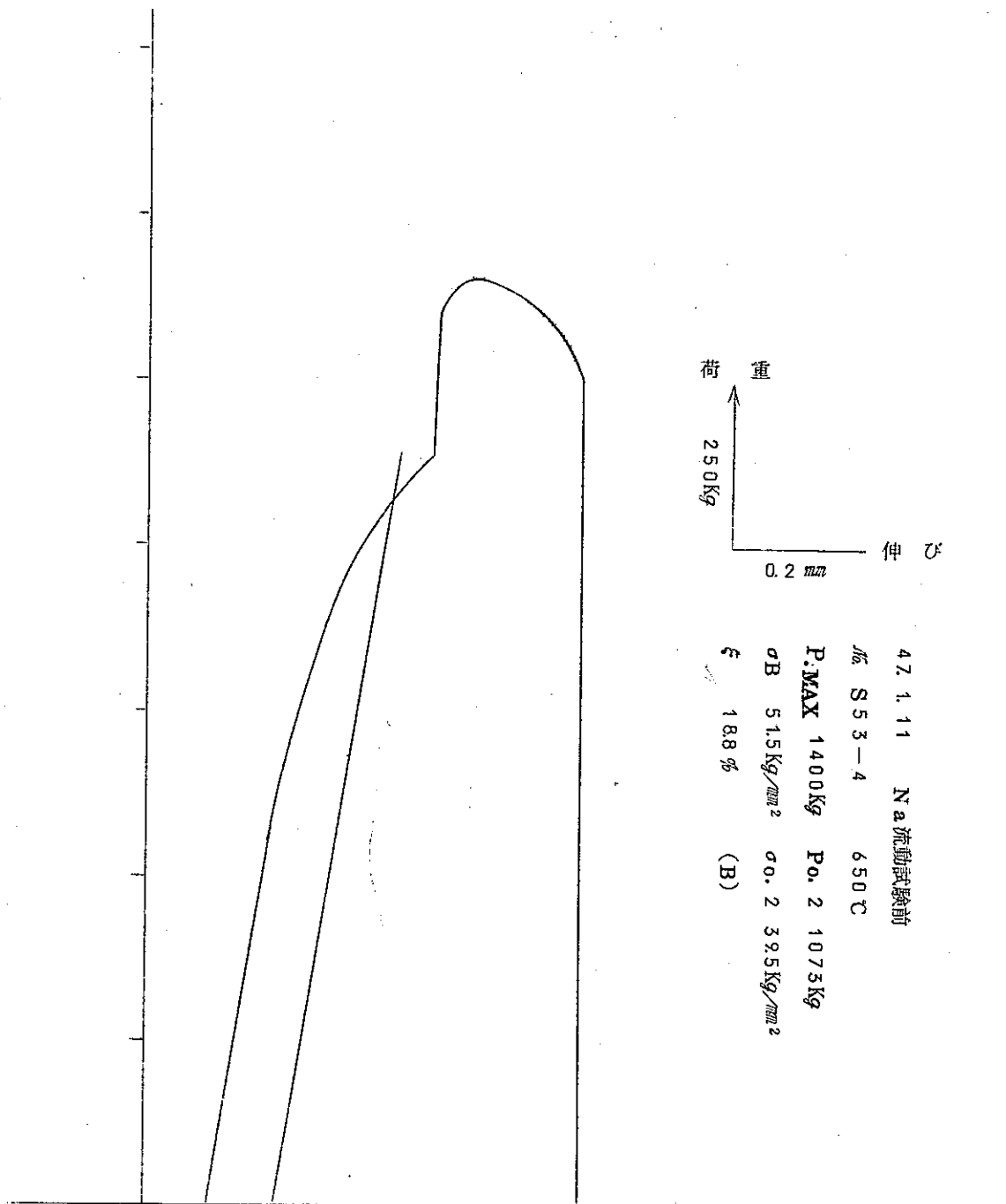
図・6 ブランケット燃料集合体被覆管ナトリウム流動試験前後の引張性質



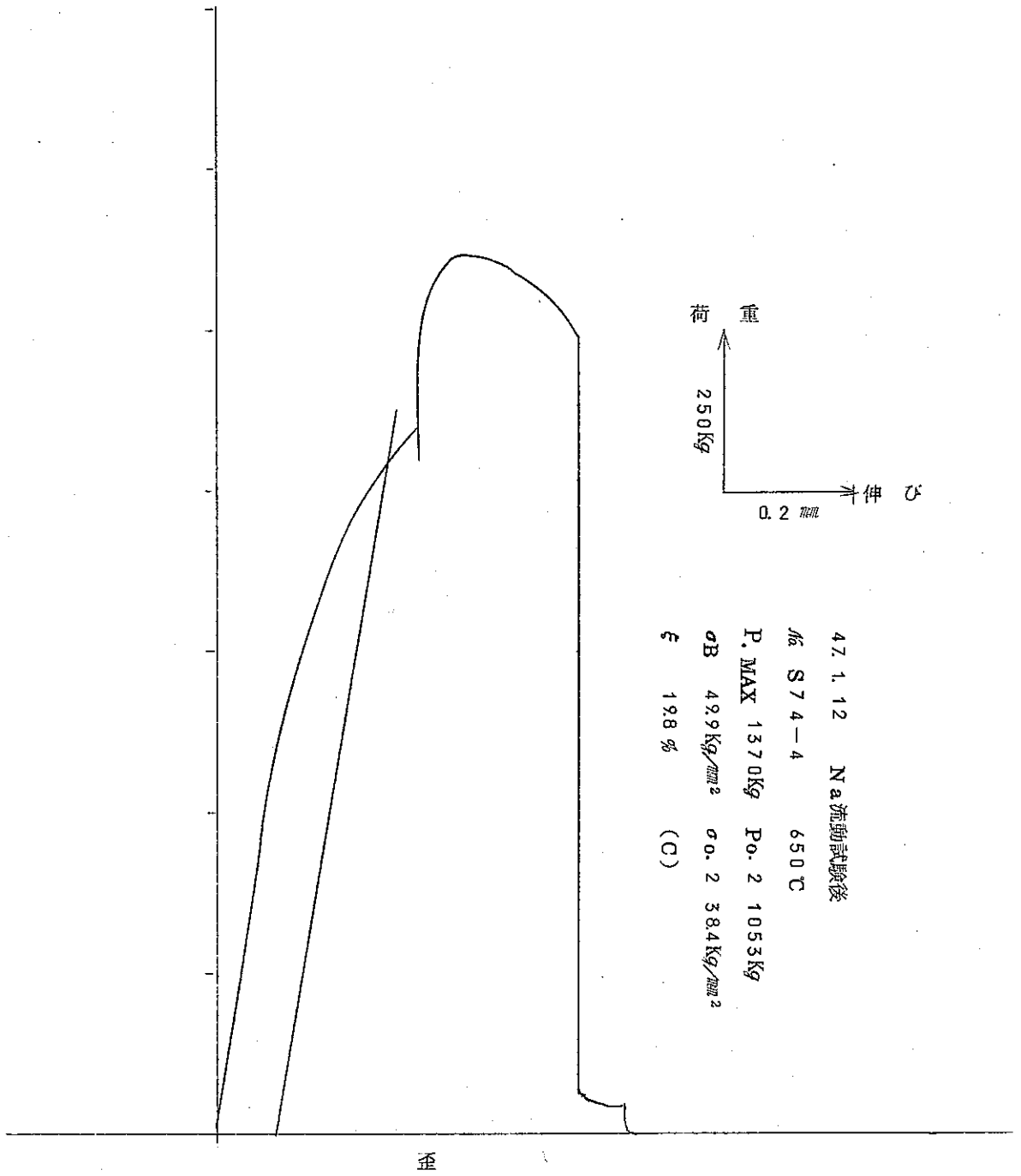
図・7(a) ナトリウム試験前の応力-歪線図(常温)



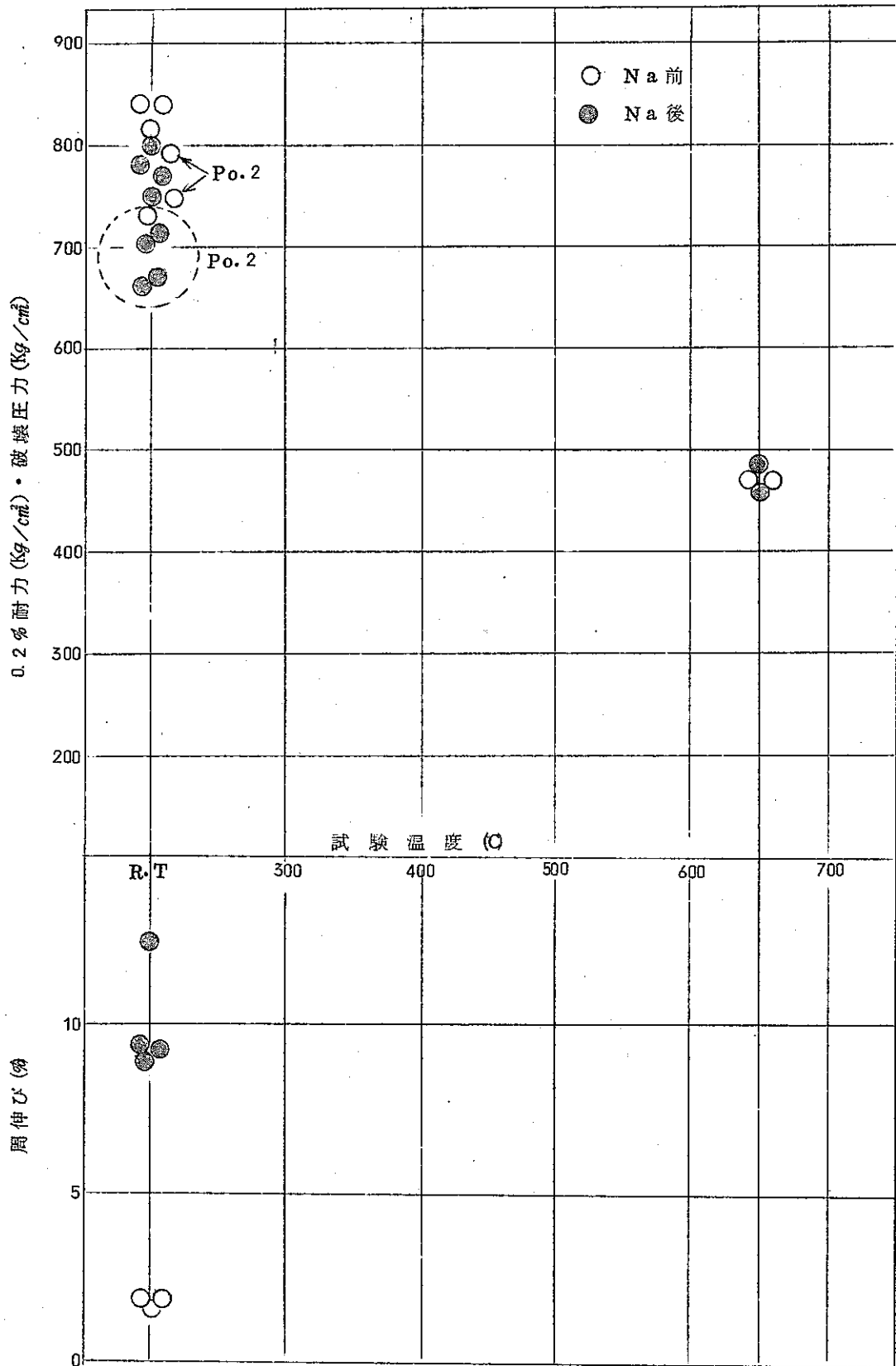
図・7(d) ナトリウム流動後の応力-歪線図(常温)



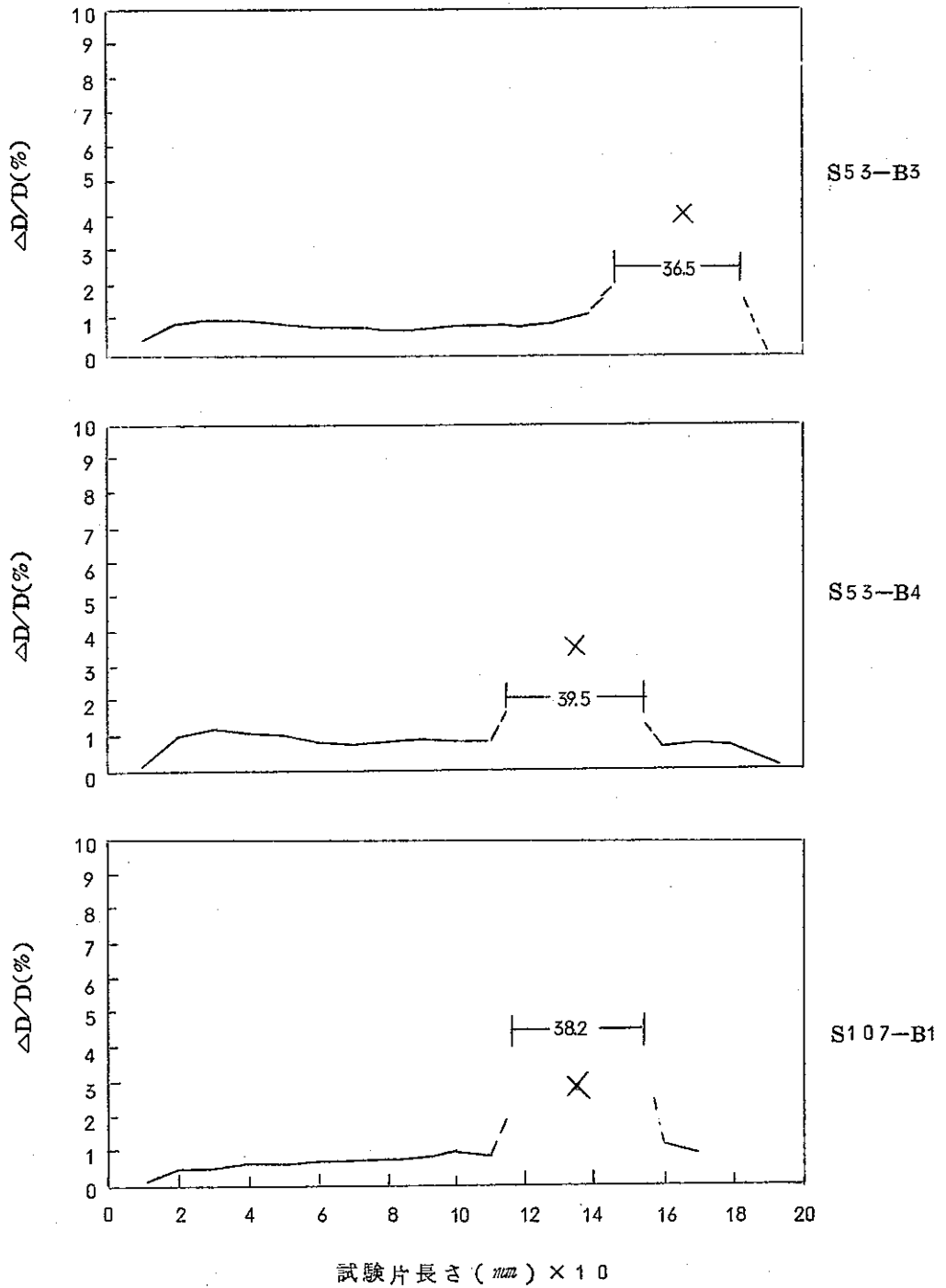
図・8(a) ナトリウム流動試験前の応力-歪線図(650°C)



図・8(d) dナトリウム流動試験後の応力-歪線図(650℃)



図・9 被覆管の耐圧性質

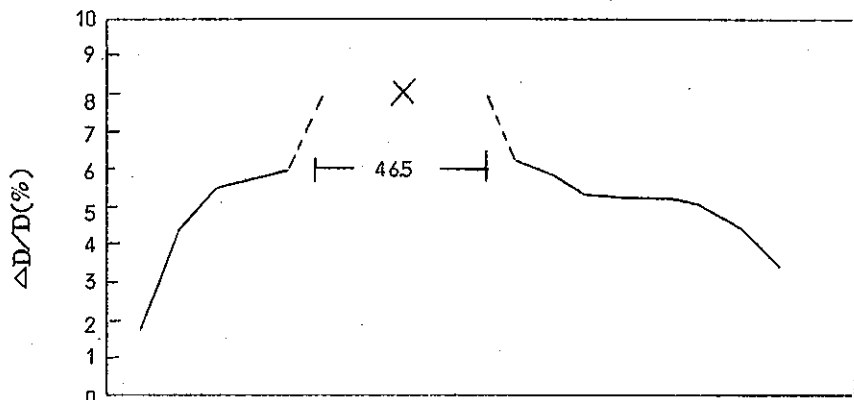


図・10(a) 試験片長さ方向の直径伸び (%)

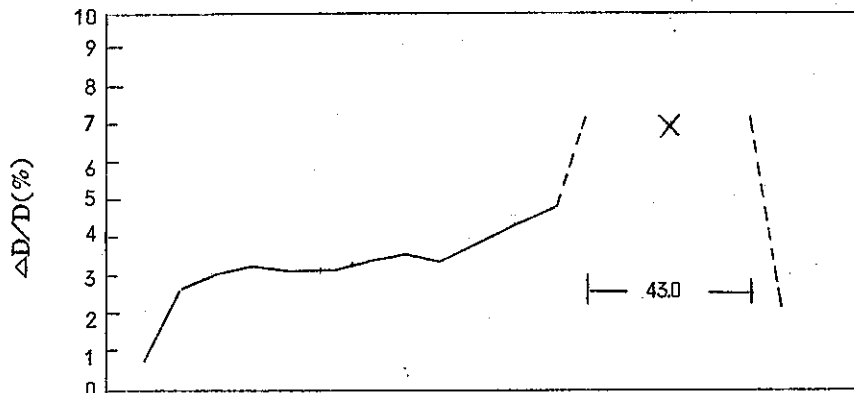
ナトリウム流動試験前

×は破裂口

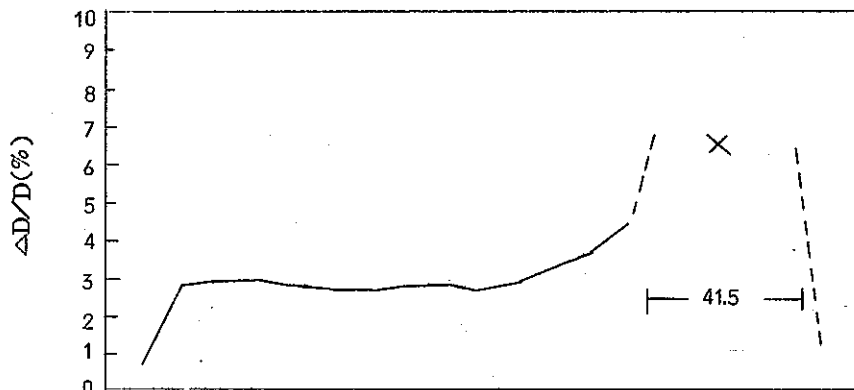
↔は破裂口の長さを示す



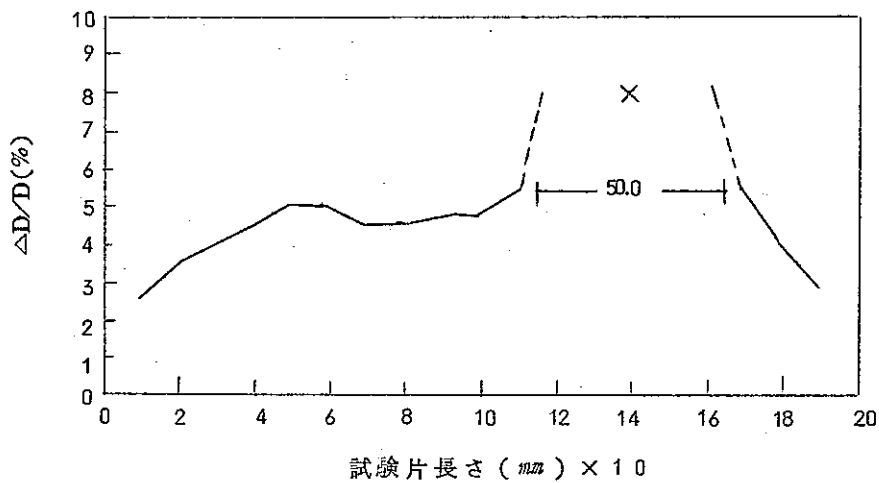
S72 B1



S74 B2

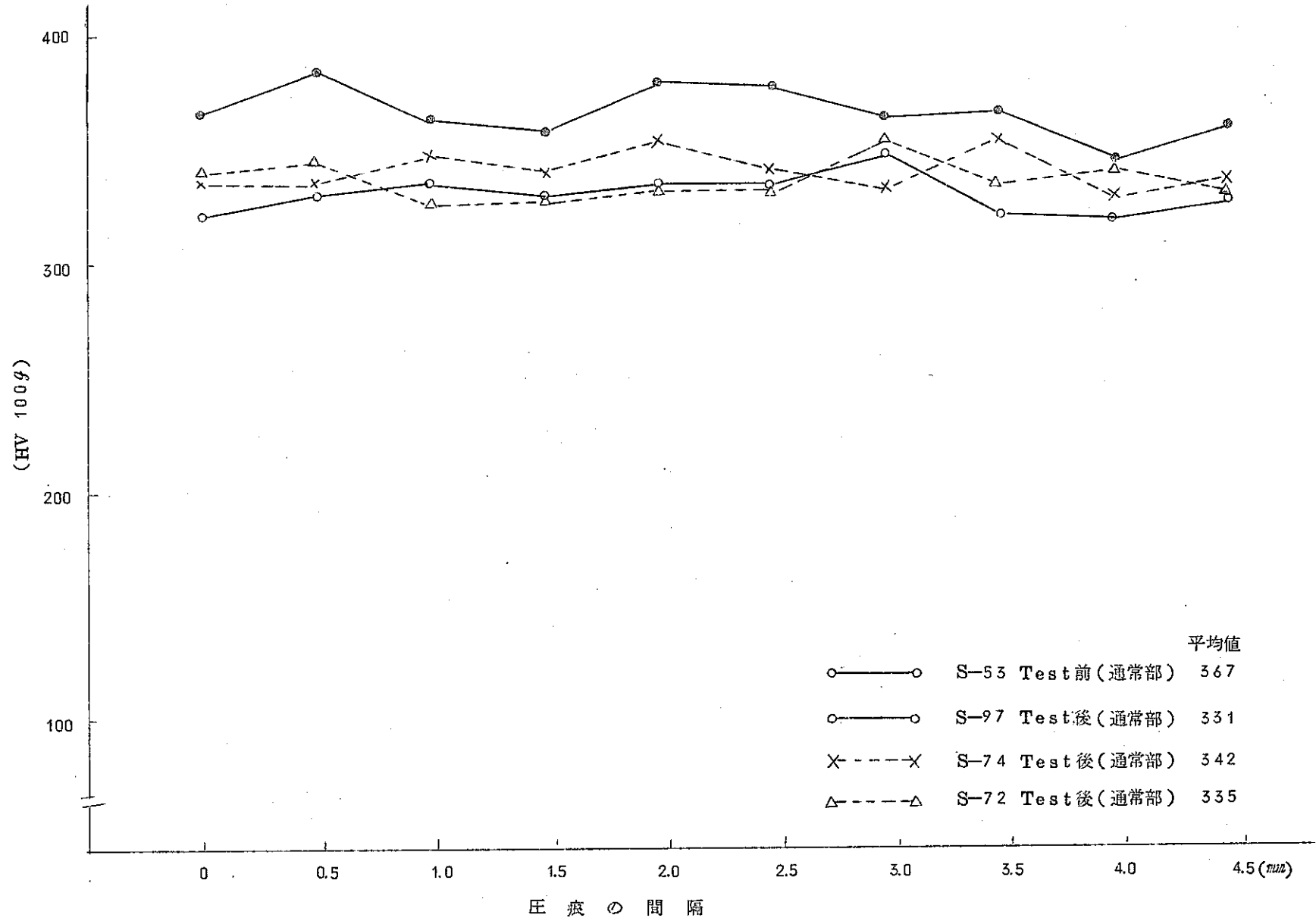


S97 B2

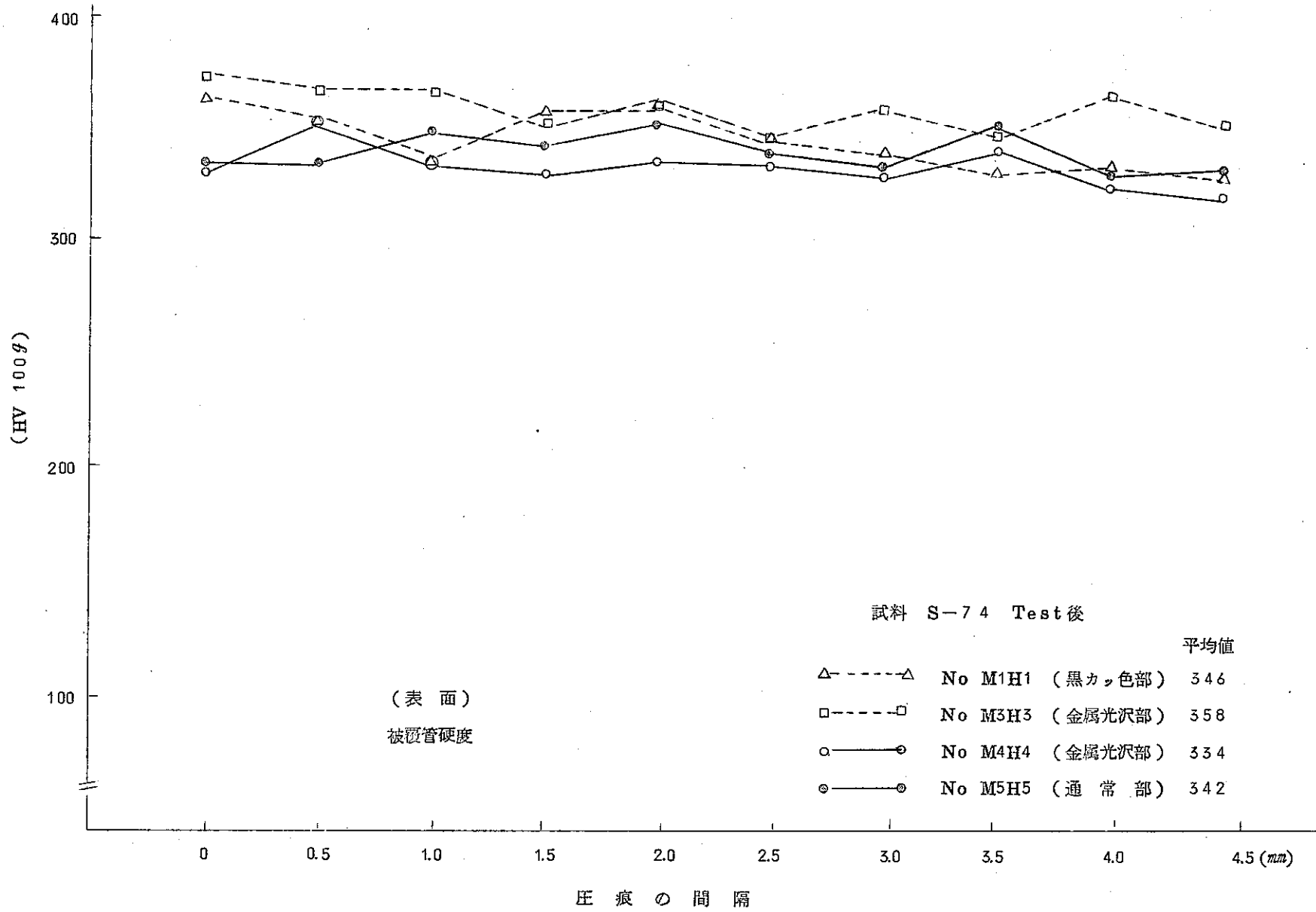


S97 B3

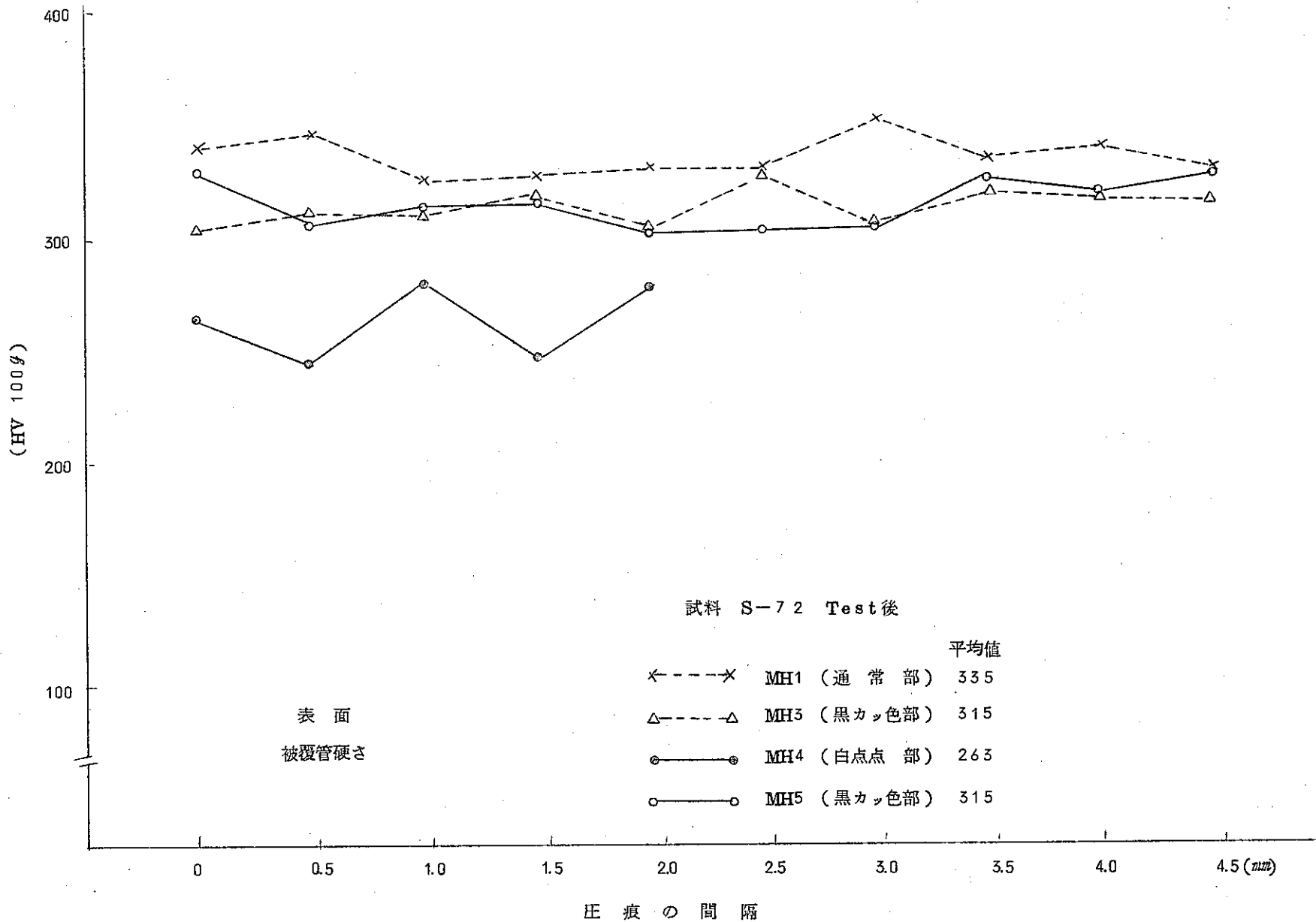
図・10(b) 試験片長さ方向の直径伸び(%) ナトリウム流動試験後



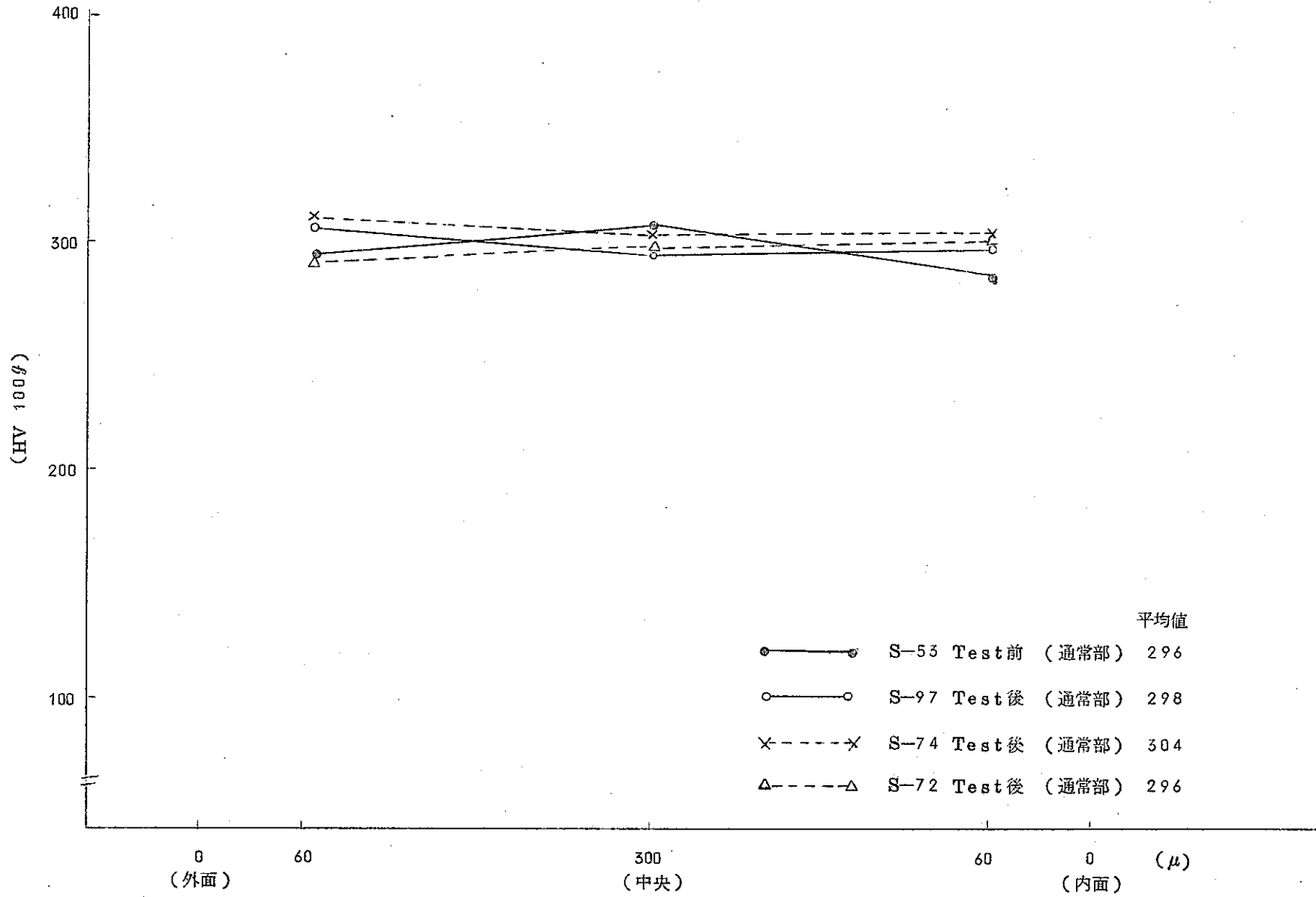
図・11 ナトリウム流動試験前後の被覆管の表面硬さ



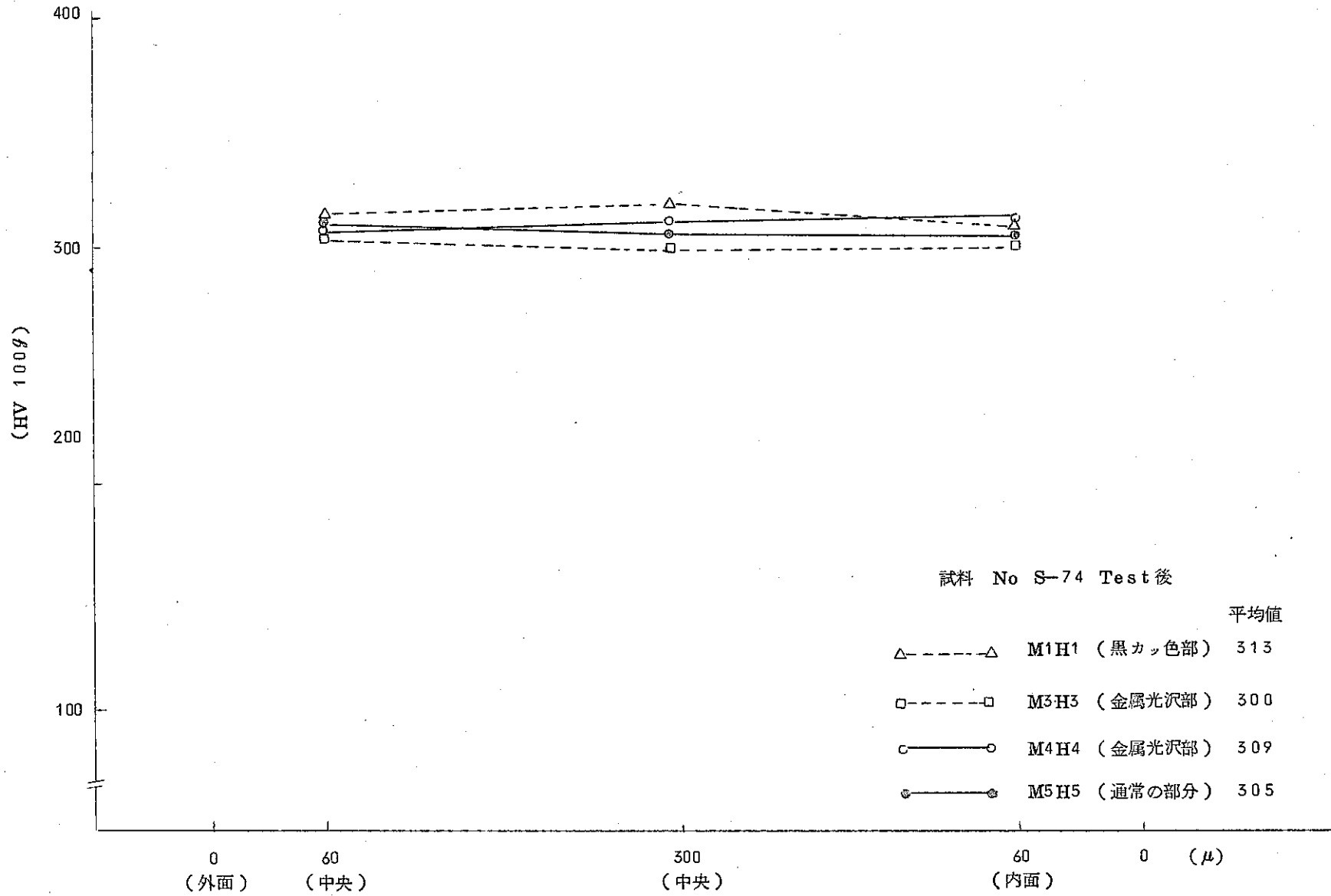
図・12 ナトリウム流動試験後の被覆管の硬さ



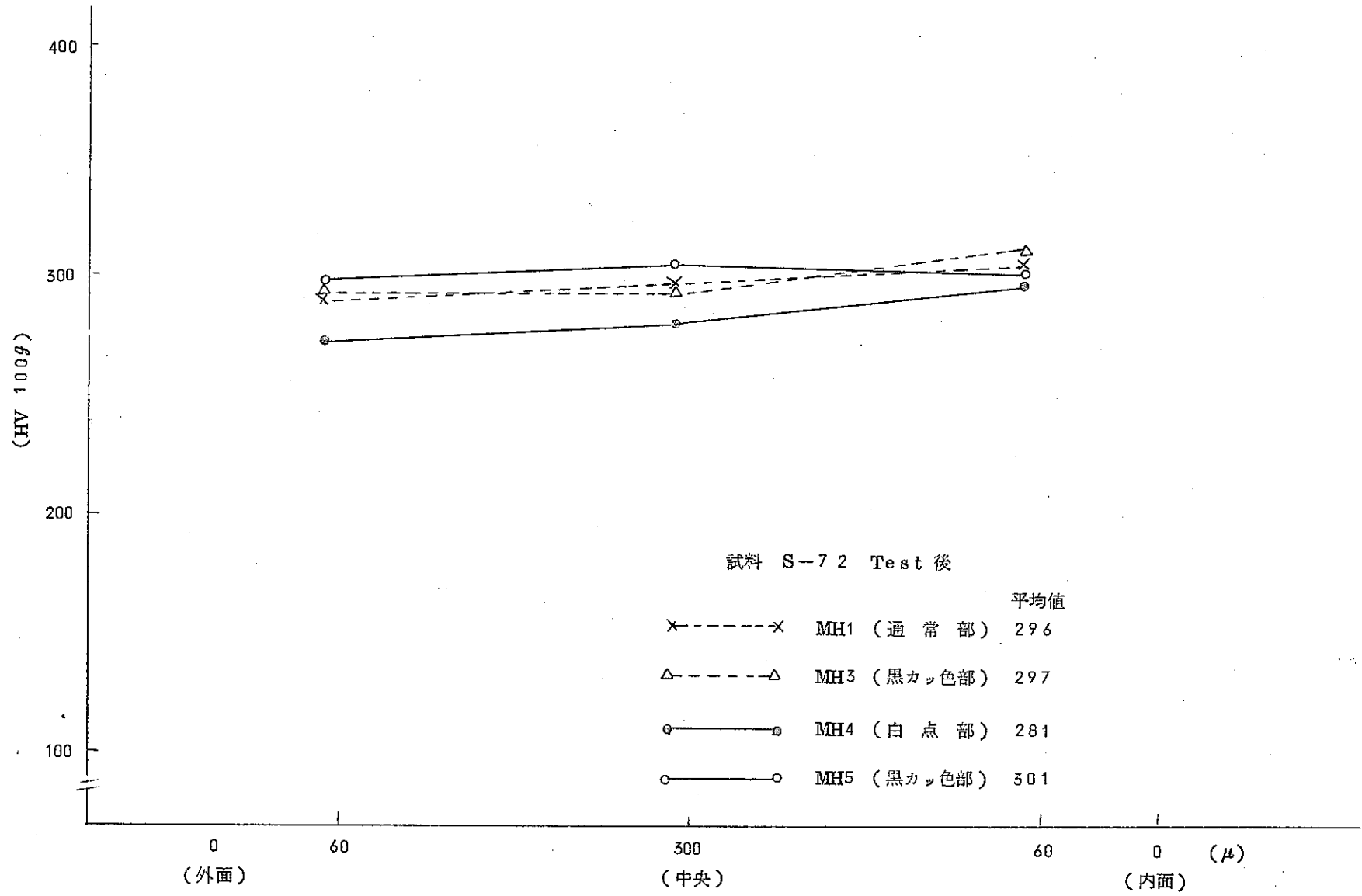
図・13 ナトリウム流動試験後の被覆管の表面硬さ



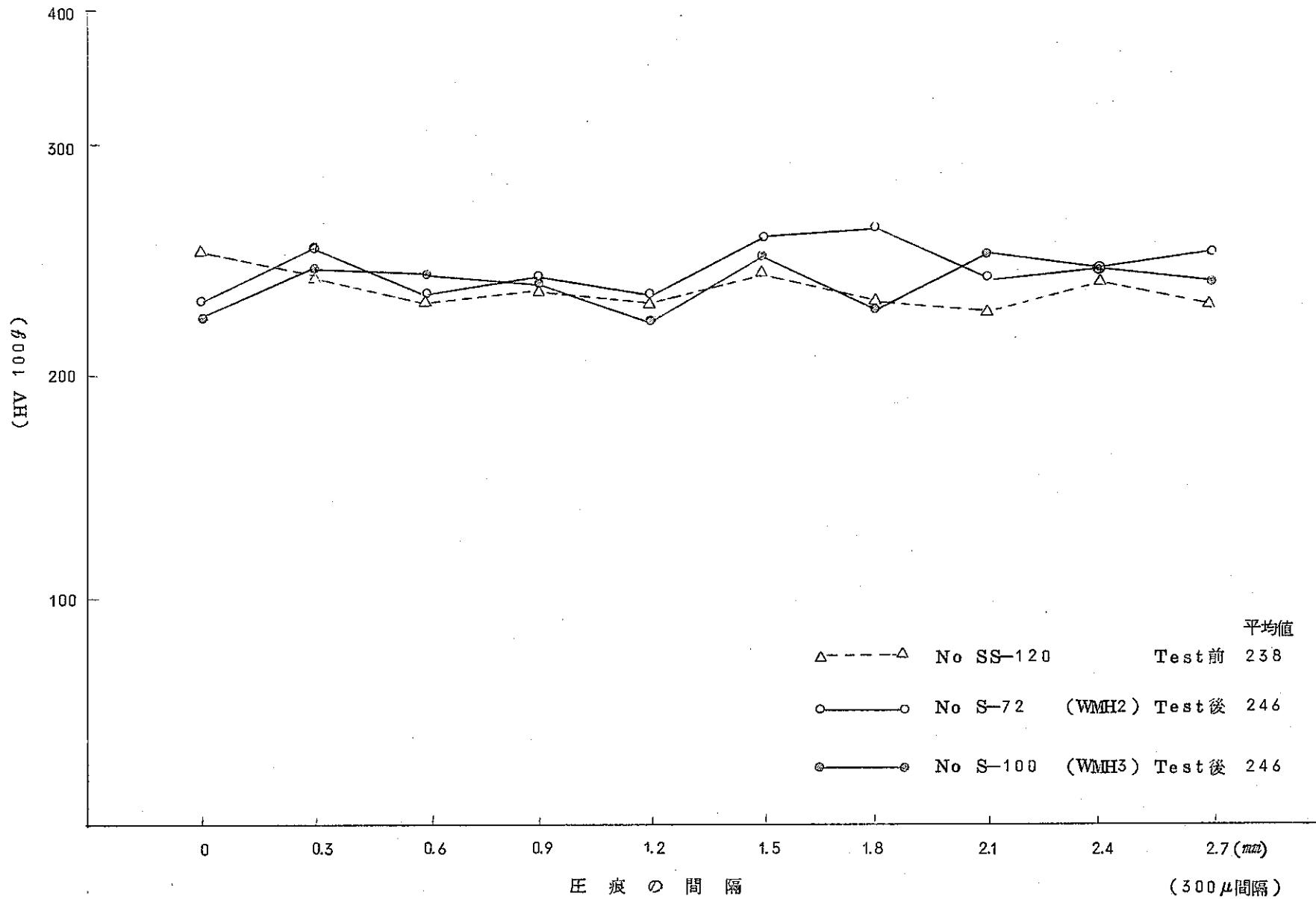
図・14 被覆管の横断面の硬さ



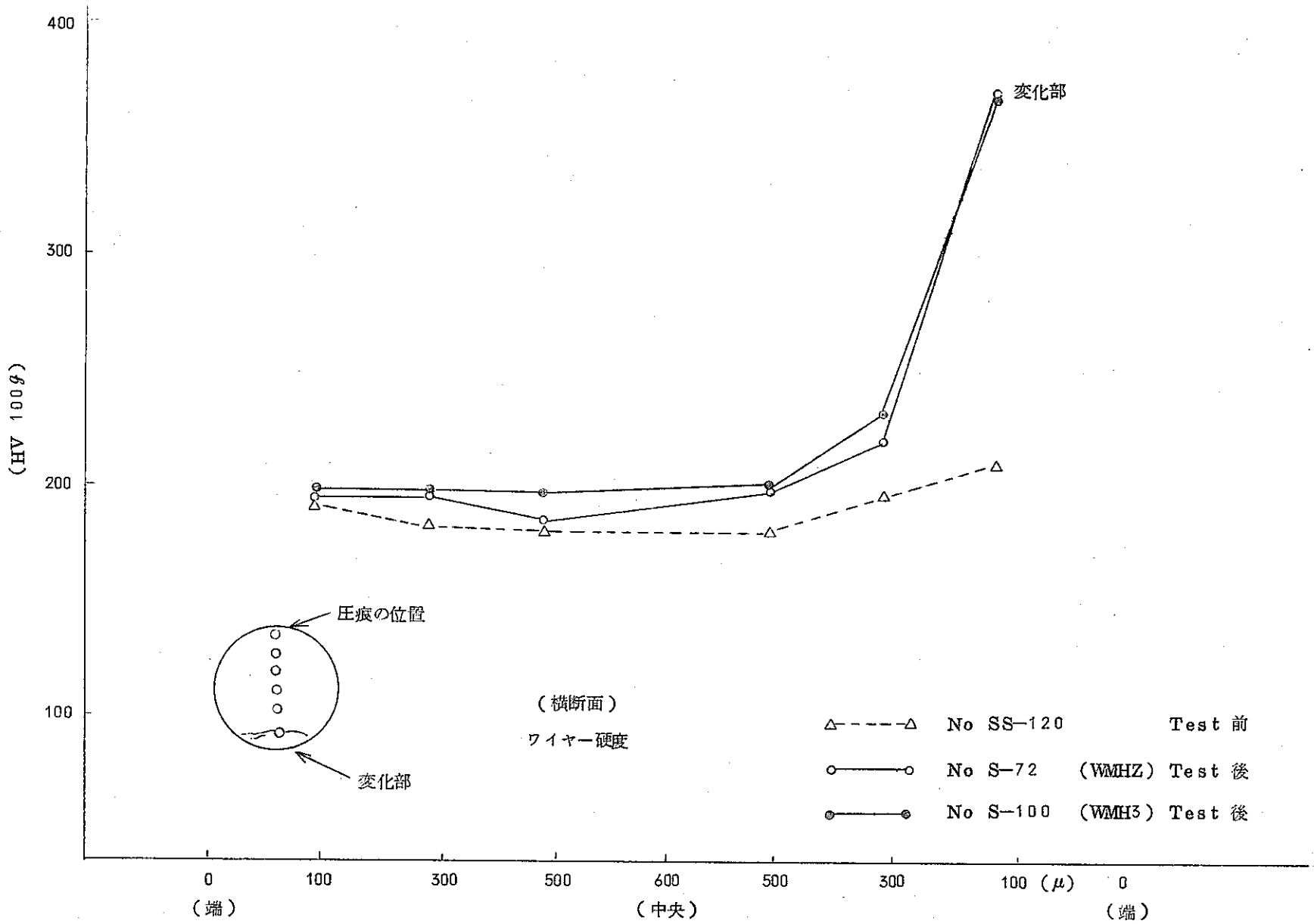
図・15 被覆管の横断面の硬さ



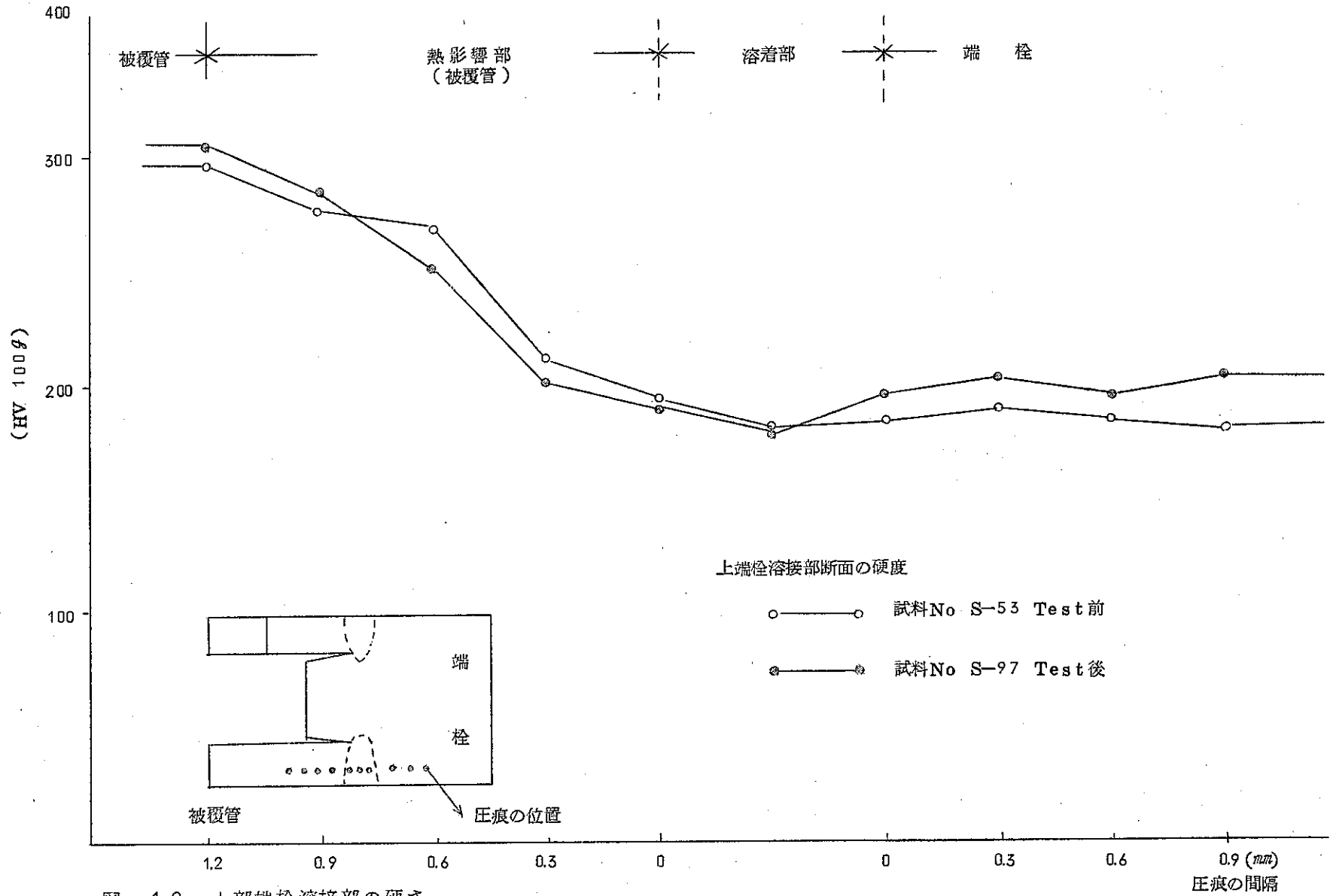
図・16 被覆管硬さ(横断面)



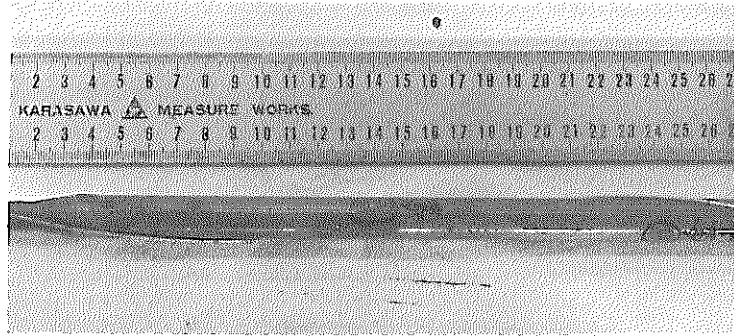
図・1.7 ナトリウム流動試験前後のワイヤの表面硬さ



図・18 ナトリウム流動前後のワイヤの硬さ 圧痕の間隔



図・19 上部端栓溶接部の硬さ

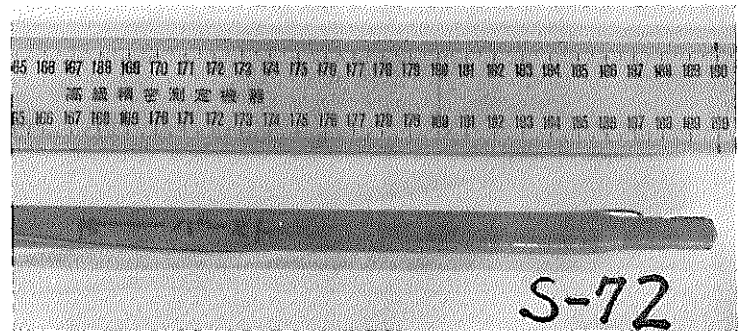
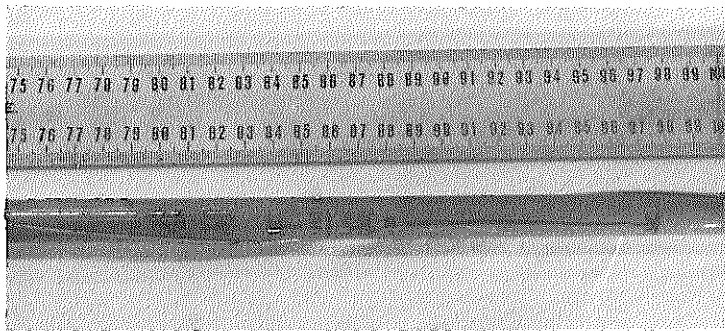


(上部端栓)

↑
白点部

↑
黒カッ色部

—44—

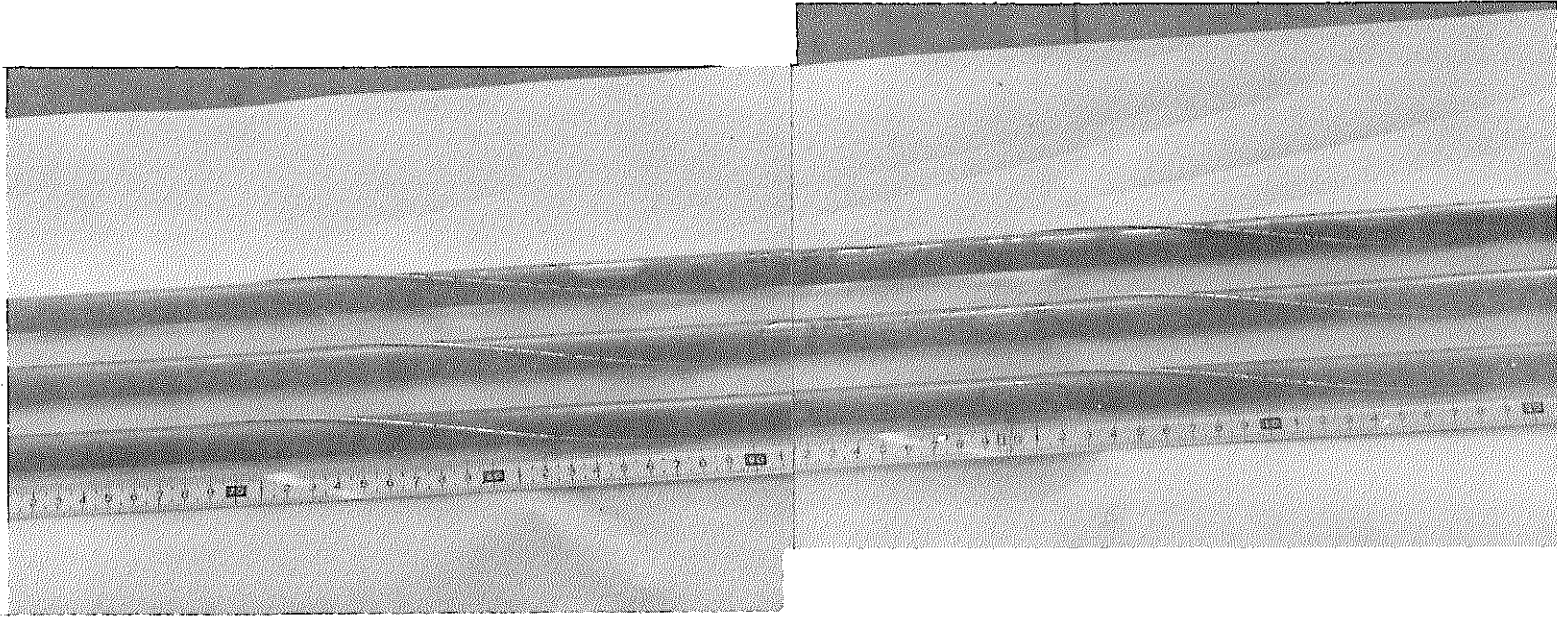


↑
この部分のワイヤに傷あり

(下部端栓)

写真1 ナトリウム流動試験後の燃料棒の外観 (S72)

全体としてカッ色を呈しているが、局部的に白色を呈す部分、黒カッ色を呈す部分がみられる。



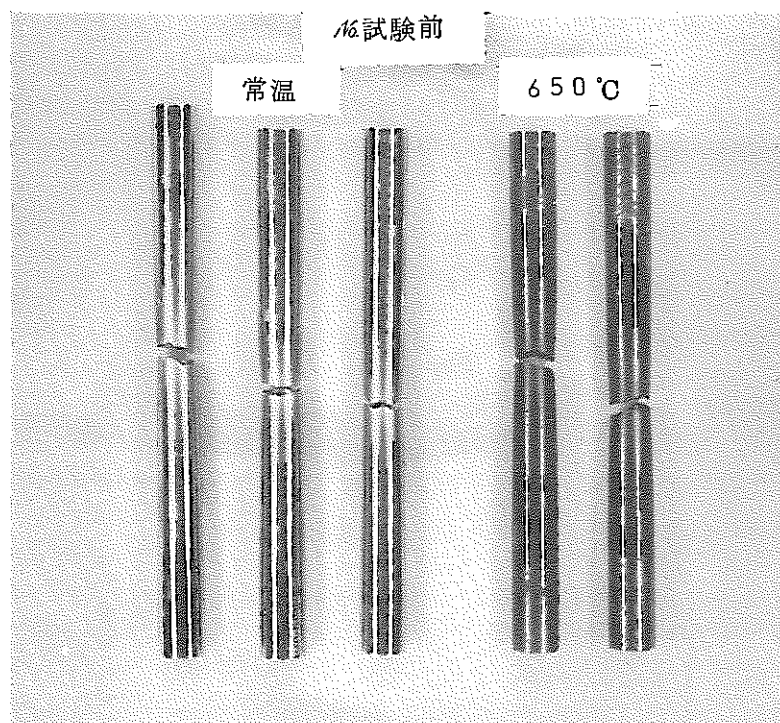
S 7 4

S 9 7

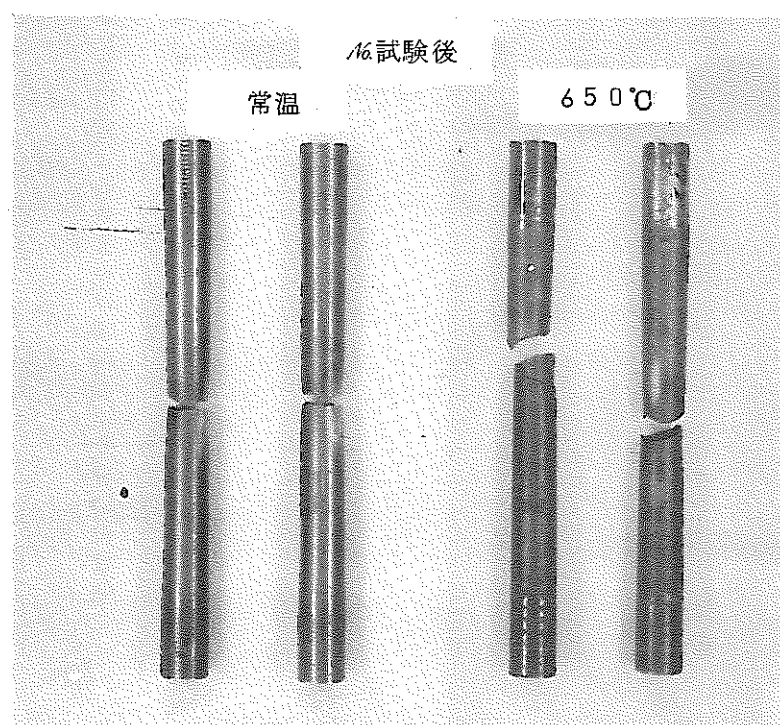
S 1 0 0

写真2 ナトリウム流動試験後の燃料棒の外観 (S74, S97, S100)

全体としてカッ色を呈しているが、局部的に金属光沢を示すものがある。



(a) 破断した試験片の外観 (ナトリウム流動試験前)



(b) 破断した試験片の外観 (ナトリウム流動試験後)

写真3 破断した試験片の外観

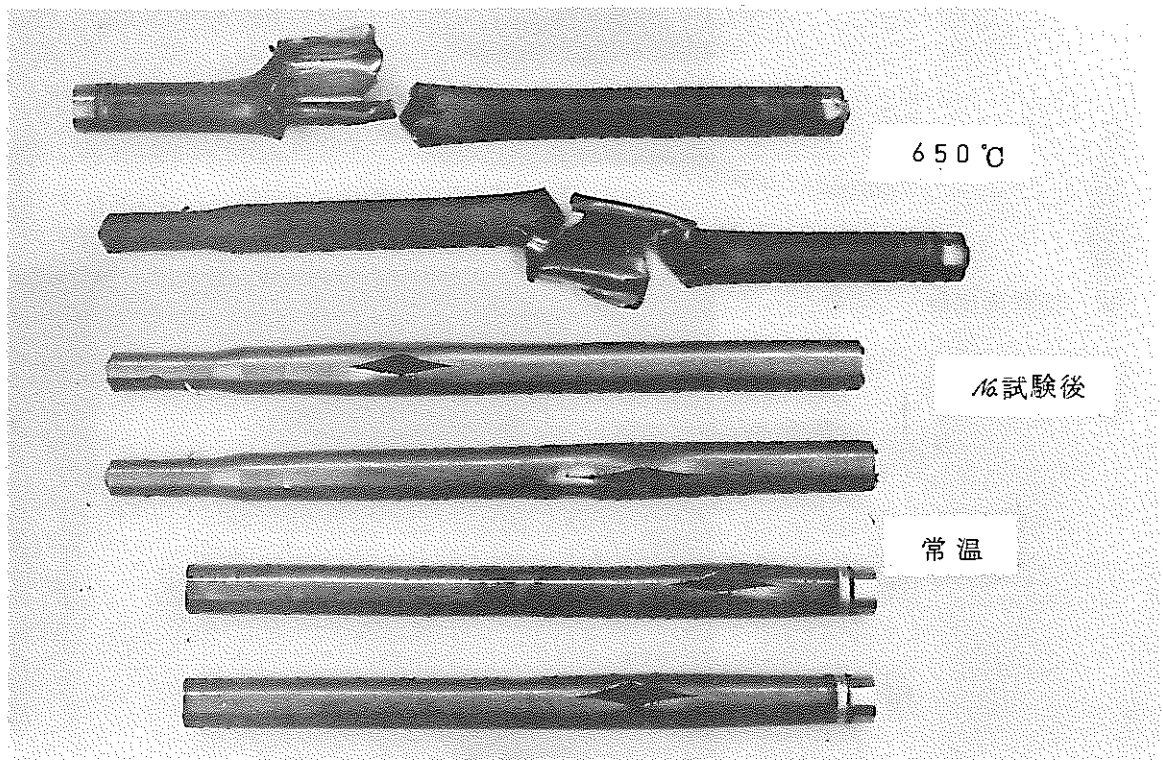
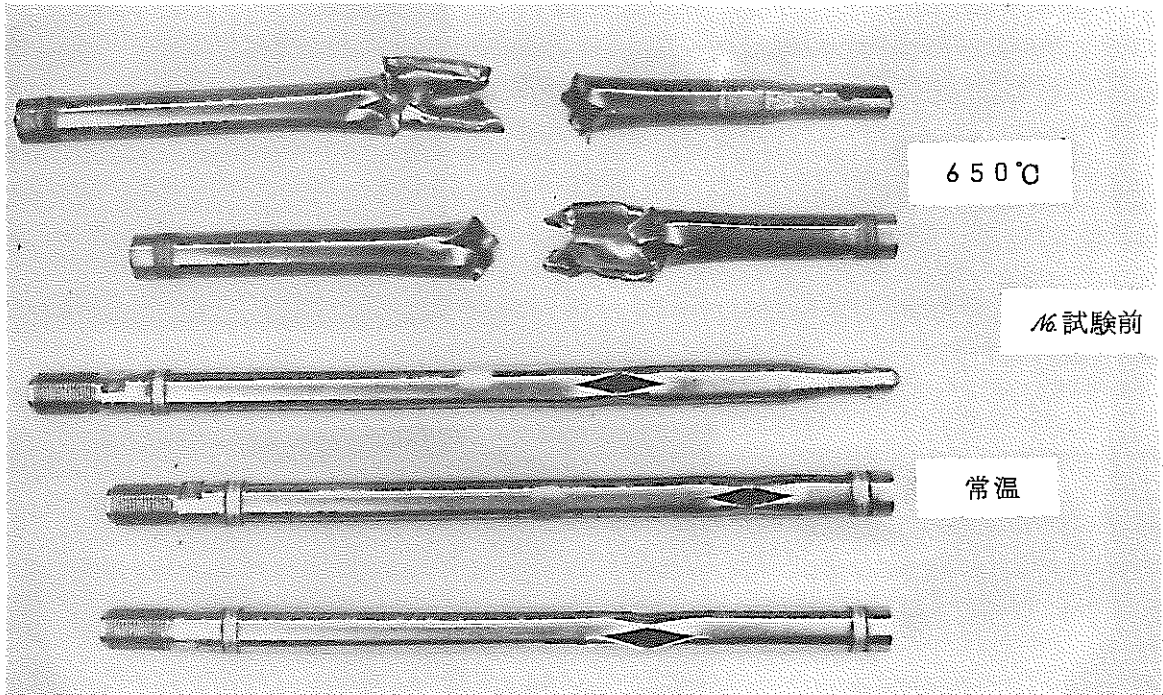
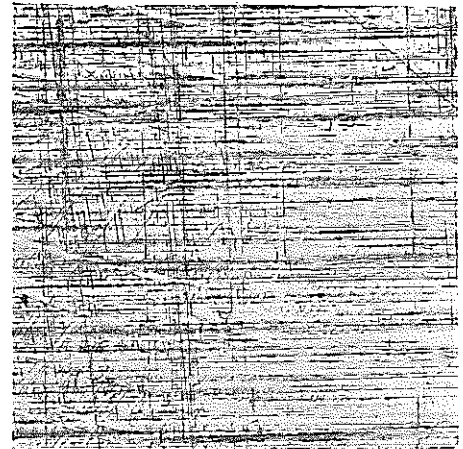


写真4 破裂後の試験片の外観

(a) 表面状態



×100

表面 →



×400

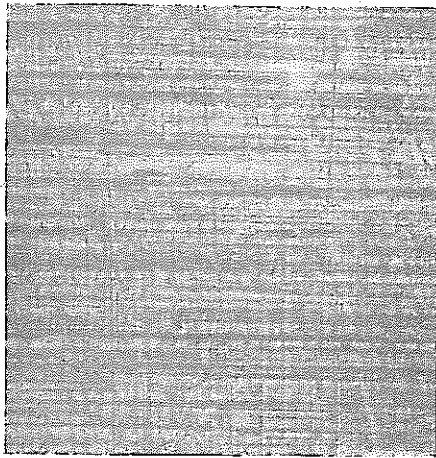
(b) 横断面組織

表面 →



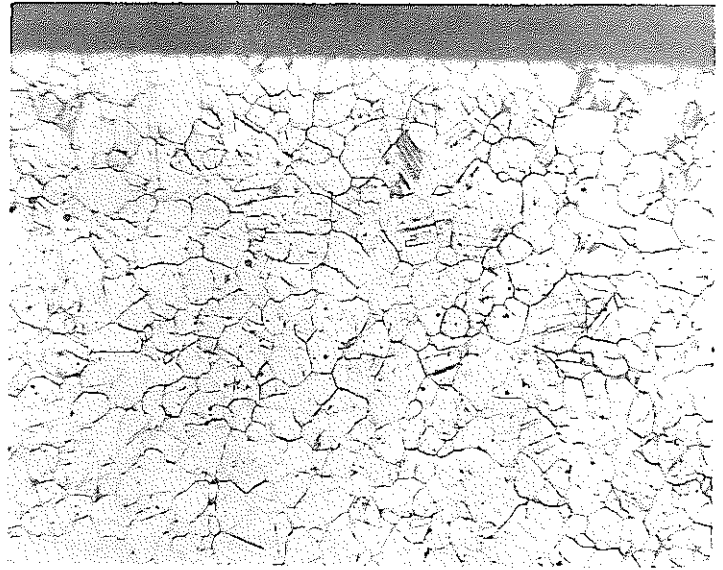
写真6 ナトリウム流動試験前の被覆管の顕微鏡組織 (S53)

×800



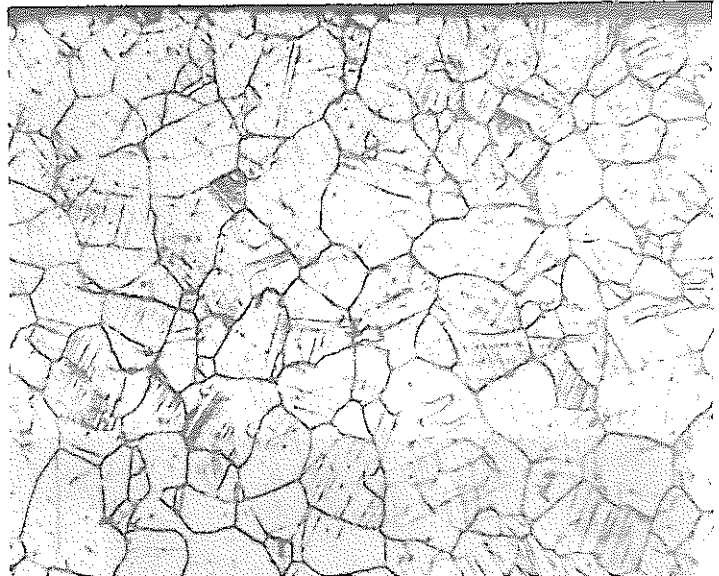
×100

(a) 表面状態



×400

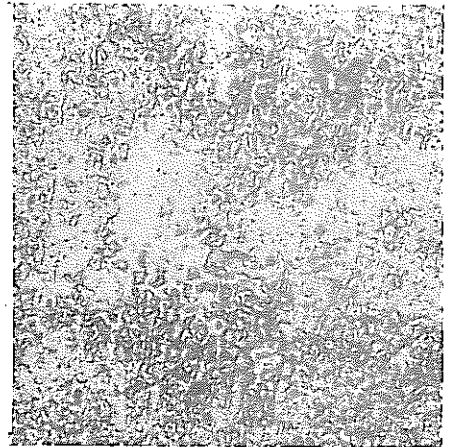
(b) 横断面組織



×800

写真7 通常部を示す部分の顕微鏡組織 (S72)

(a) 表面状態



× 100

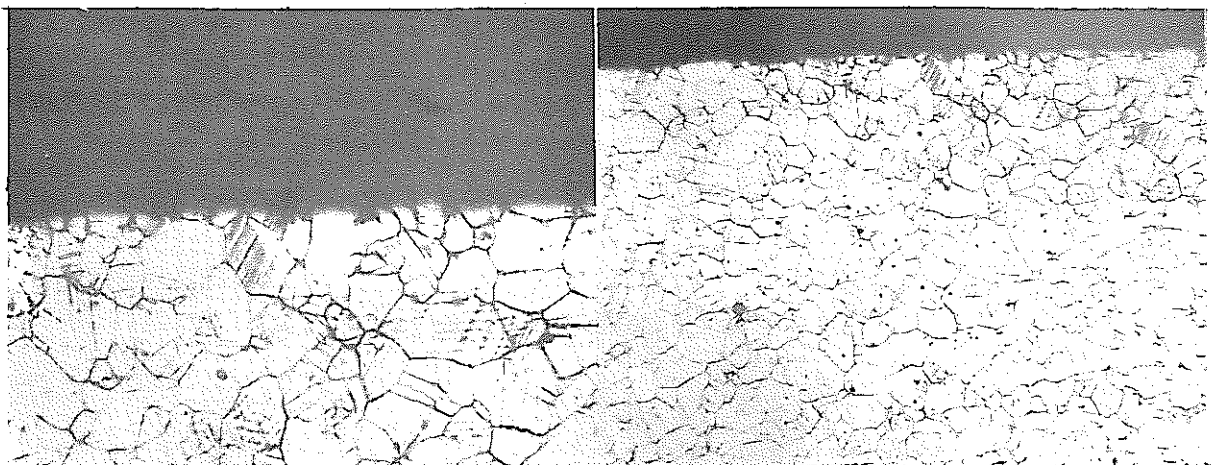
(b) 横断面

研磨のまゝ



(c) 横断面組織

× 400

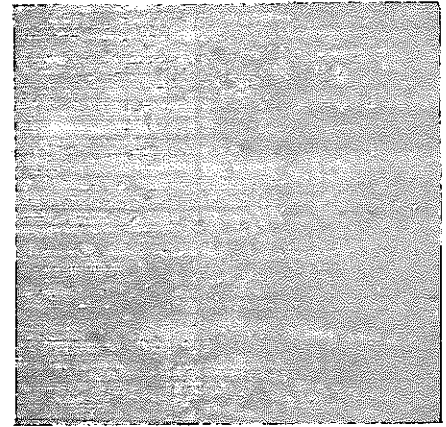


× 800

写真8 白点部分の表面及び横断面組織

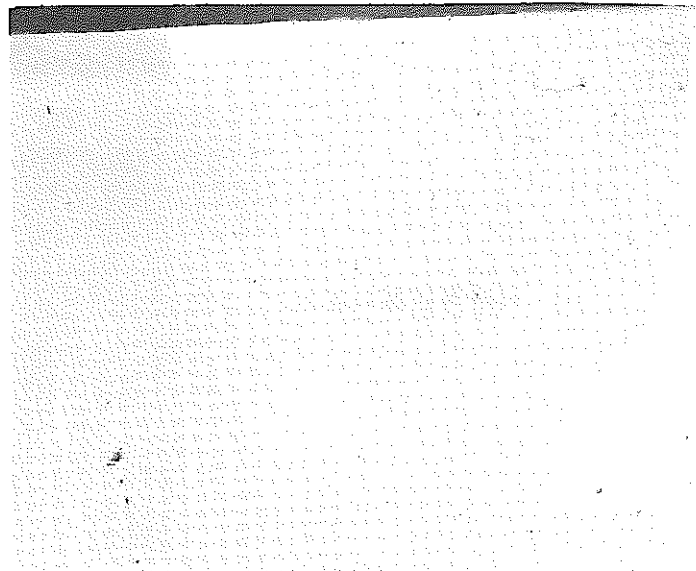
× 400

(a) 表面状態



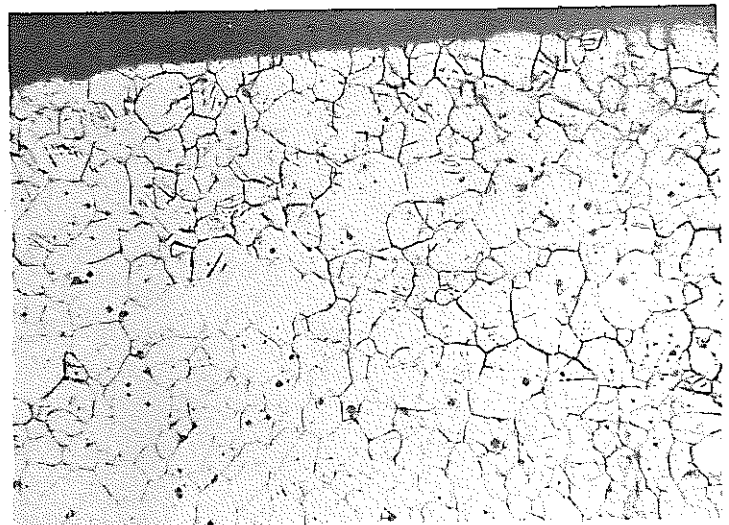
×100

(b) 横断面研磨のまま



×100

(c) 横断面組織



×100

写真9 被覆管のワイヤとの接触部の顕微鏡組織 (S72)

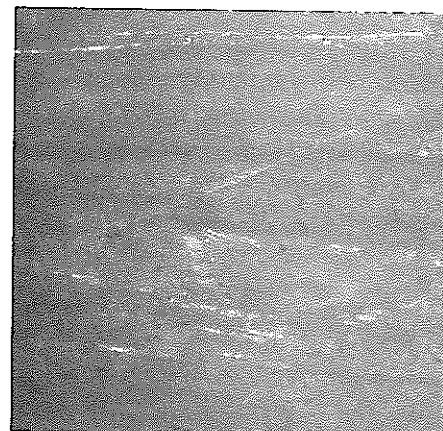
表面状態

16のような所
と17のような
所が見られる。



(a)

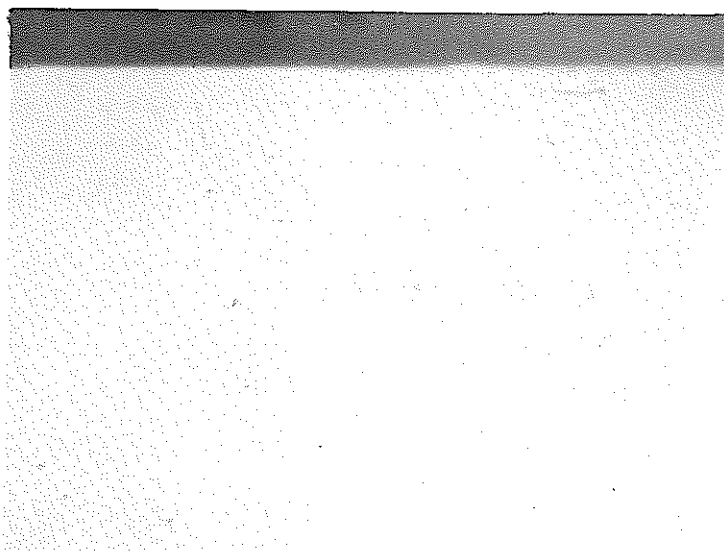
×100



(b)

×100

(c) 横断面研摩のまま



×400

(d) 横断面組織



×100

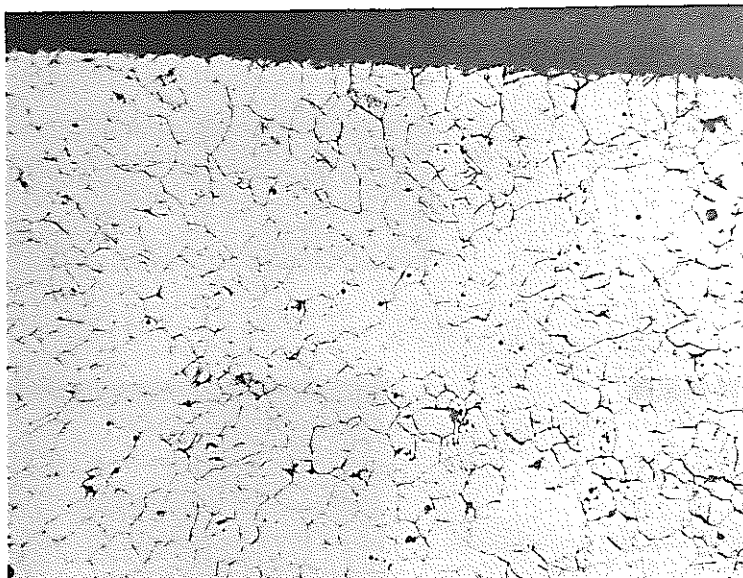
写真1-0 円状に黒カッ色となった被覆管の顕微鏡組織 (S72)

(a) 表面状態



×100

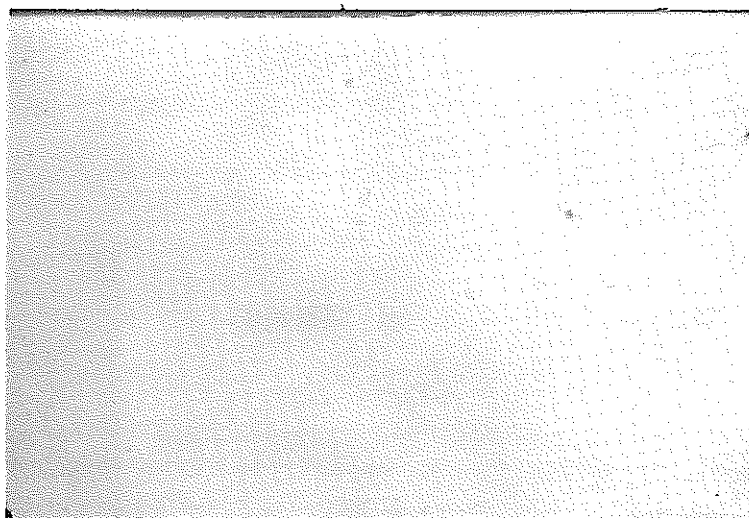
(b) 横断面組織



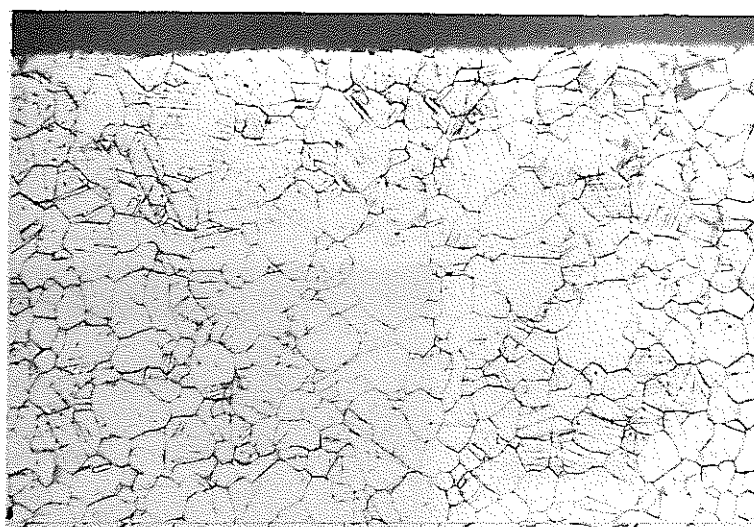
×400

写真 1 1 金属光沢を呈する部分の顕微鏡組織 (S74)

(a) 横断面研摩のまま



×400



×400

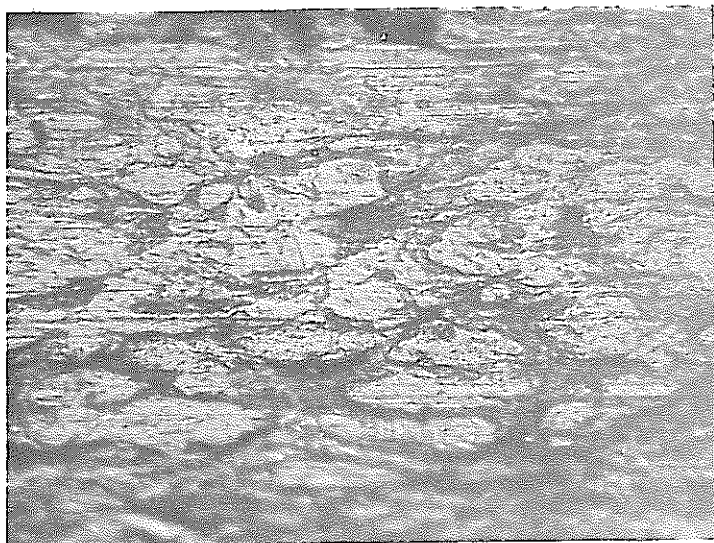
(b) 横断面組織



写真12 金属光沢を呈する部分の顕微鏡組織 (S79)

×800

(a) 表面状態



×400

(b) 横断面表面組織



×400

(c) 横断面中央組織

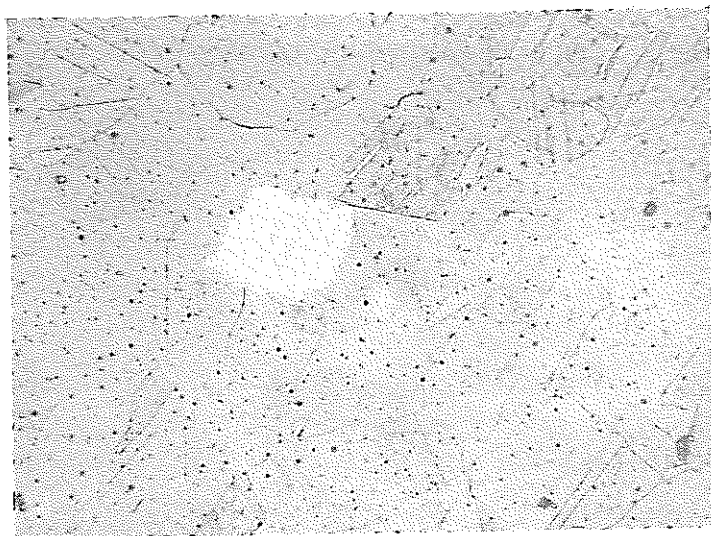
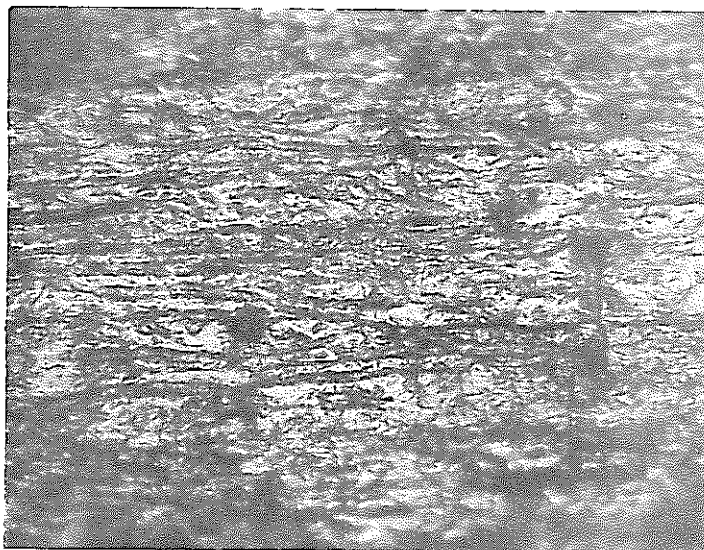


写真13 ナトリウム流動試験前のワイヤの顕微鏡組織 (SS120)

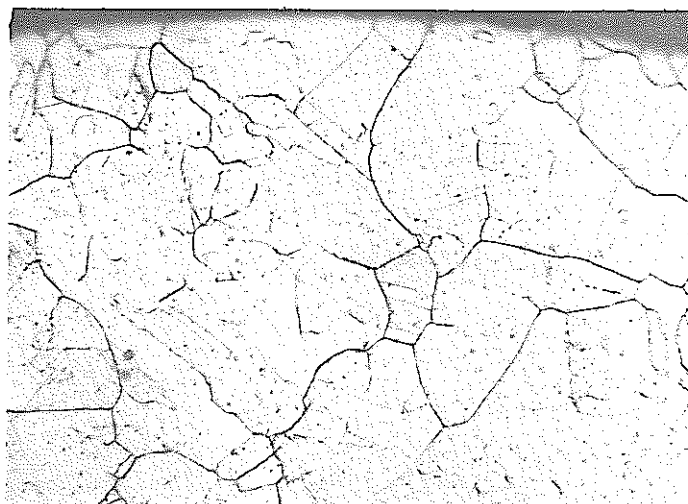
×400

(a) 表面状態



×400

(b) 横断面表面組織



×400

(c) 横断面中央組織

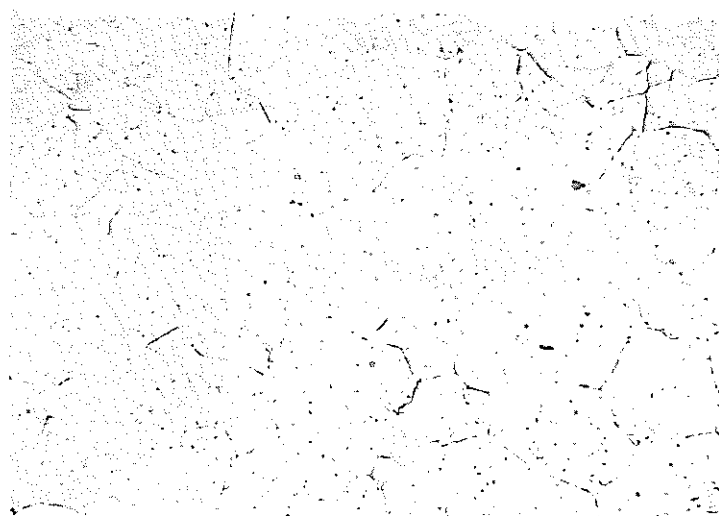


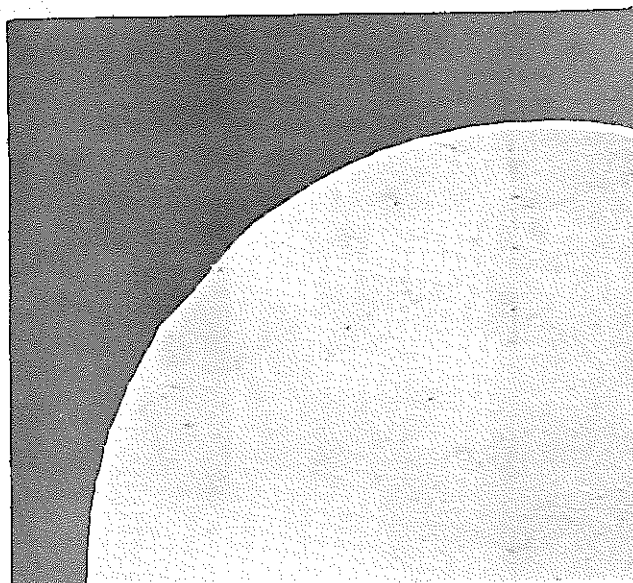
写真14 ナトリウム流動後のワイヤの通常部の顕微鏡組織 (S100) ×400

(a) 表面状態



×400

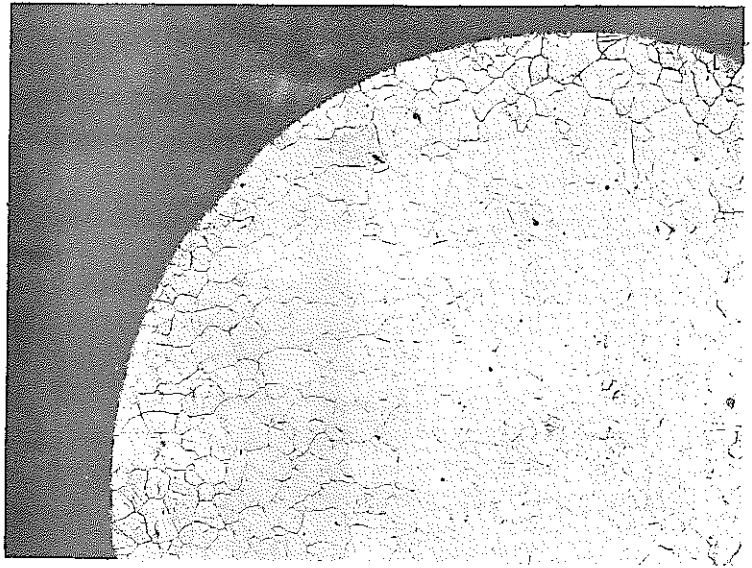
(b) 横断面研磨のまま



×100

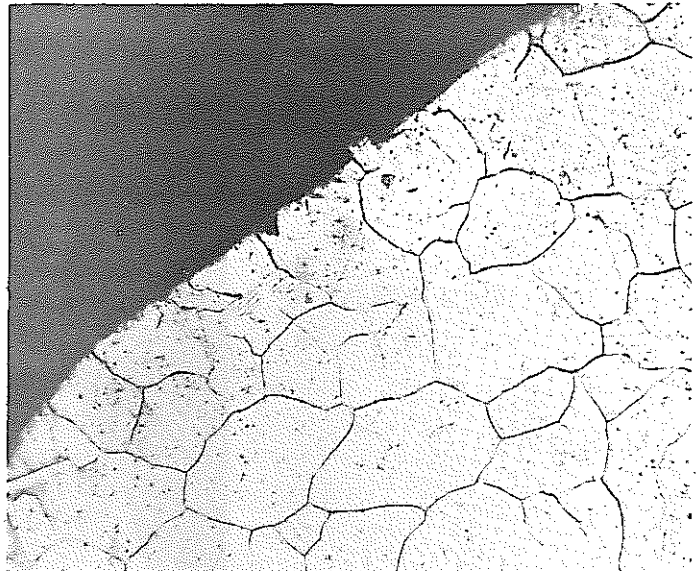
写真15(A) ワイヤの被覆管との接触面の顕微鏡組織 (S100)

接触面



(c) 横断面組織

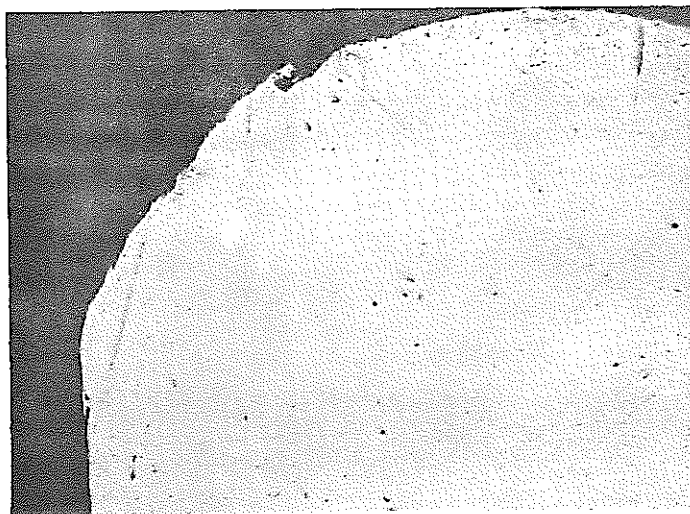
×100



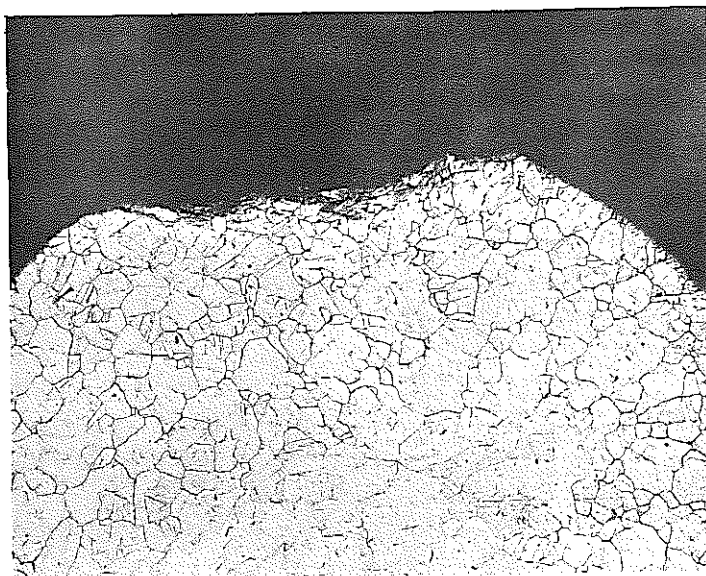
×400

写真15(B) ワイヤの被覆管との接触面の顕微鏡組織(S100)

(a) 横断面研摩のまま



×100



×100

(b) 横断面組織

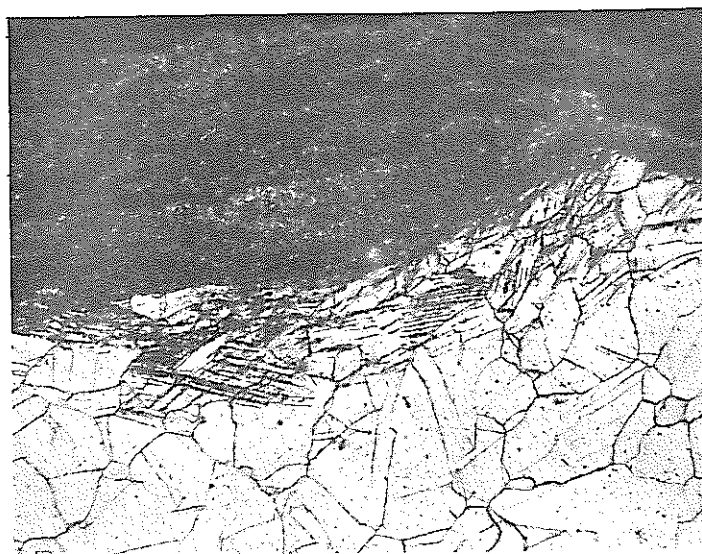


写真16 傷のついたワイヤの顕微鏡組織 (S100)

×400

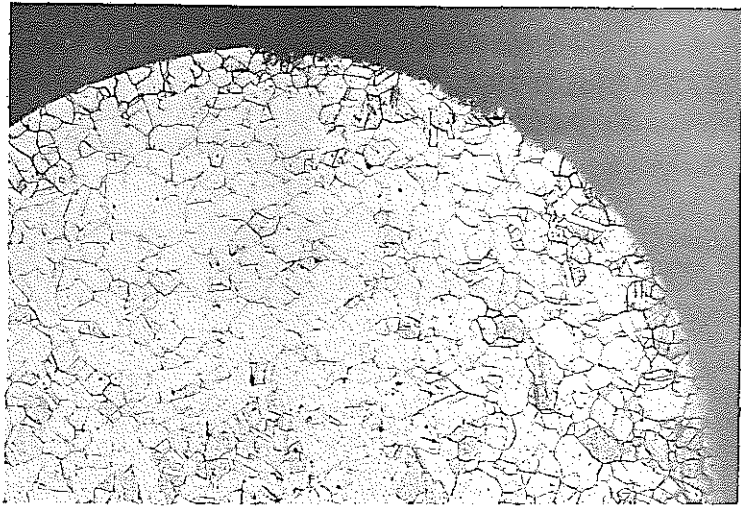
←キズのついた部分

(a) 研摩のまま



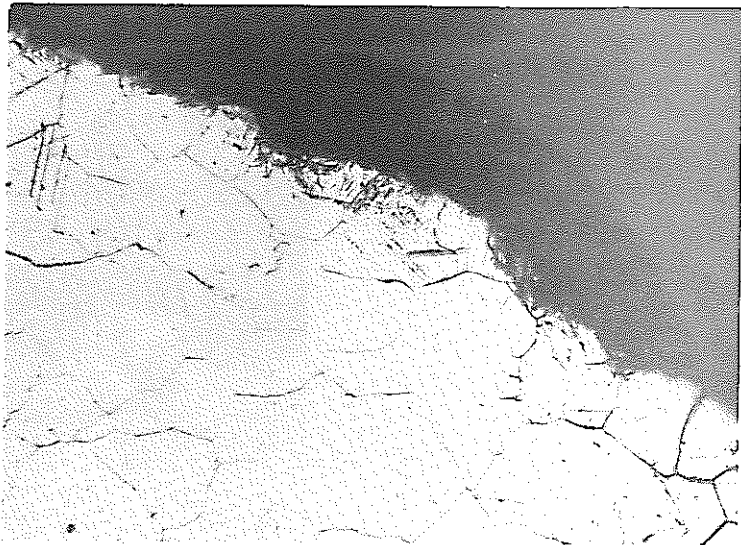
×100

←キズのついた部分



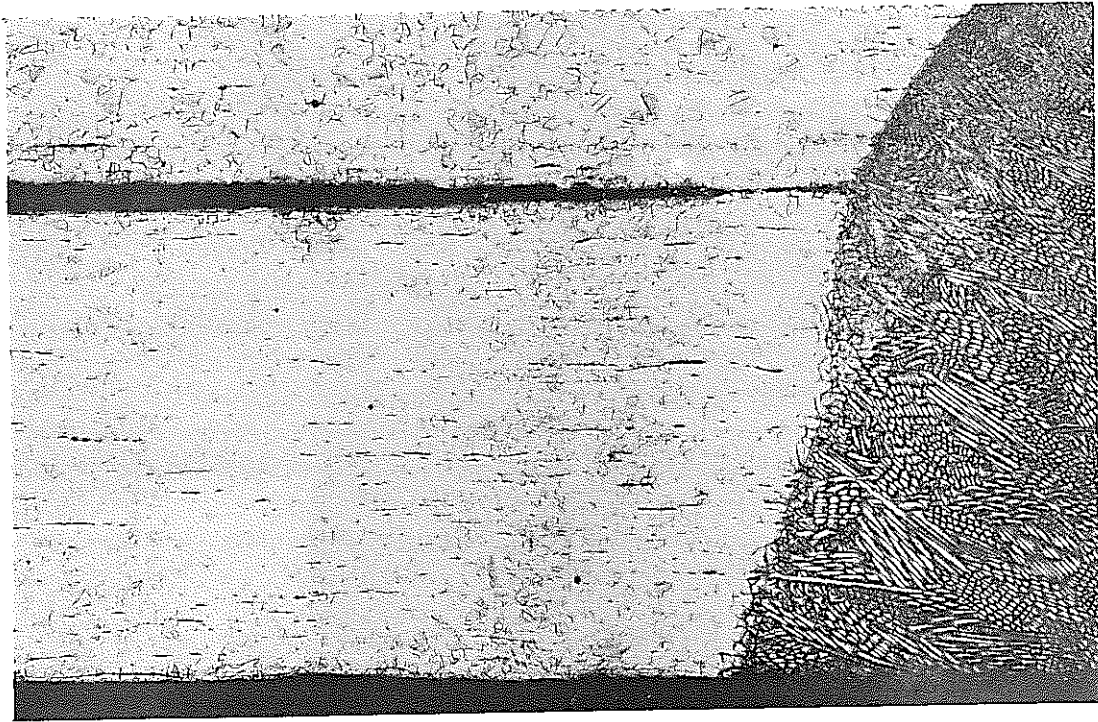
×100

(b) 横断面組織



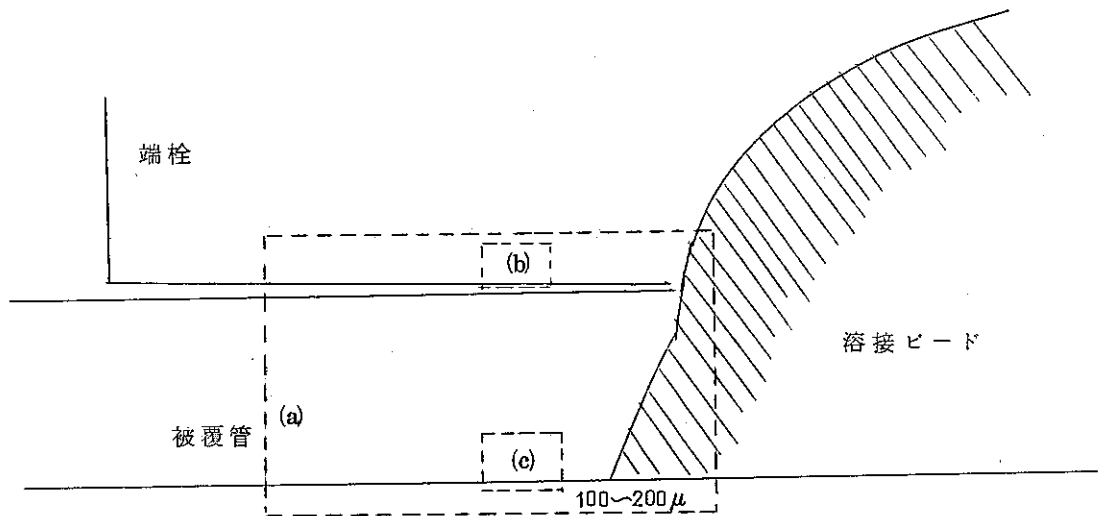
×400

写真17 ワイヤの傷ついた部分の顕微鏡組織 (S72)



×100

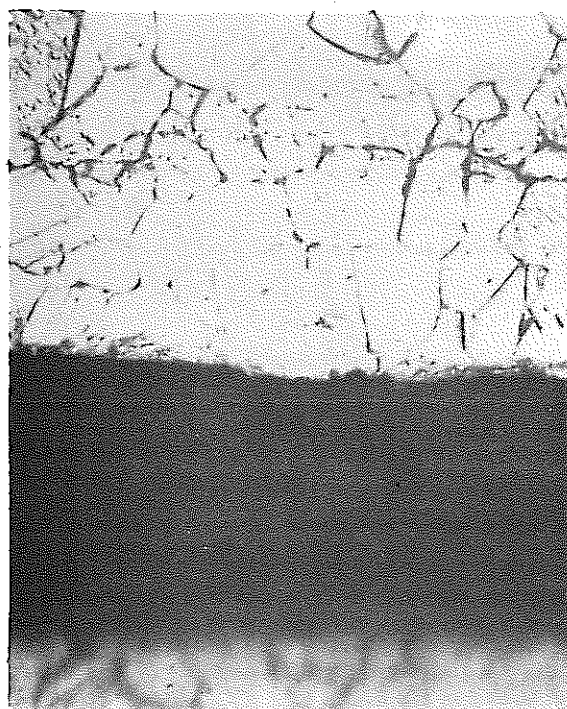
縦断面組織 (a)



端栓縦断面写真撮影箇所

写真18(A) ナトリウム流動試験前の上部端栓溶接部の顕微鏡組織(S53)

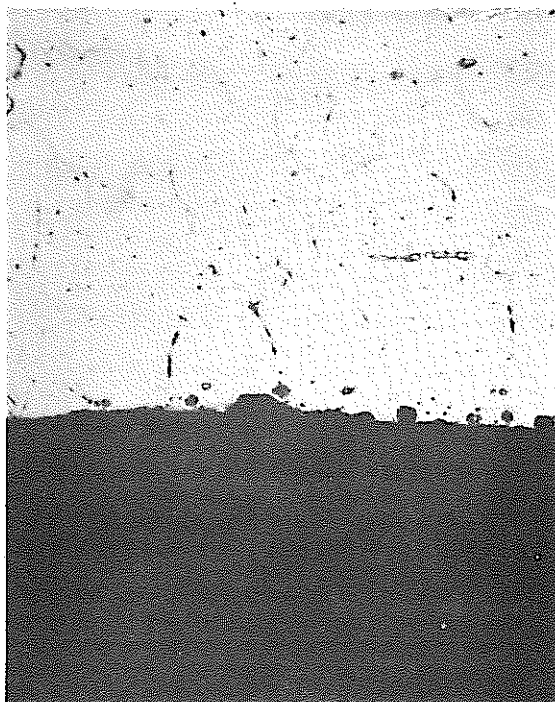
(b) 端栓部



← 端栓表面

×800

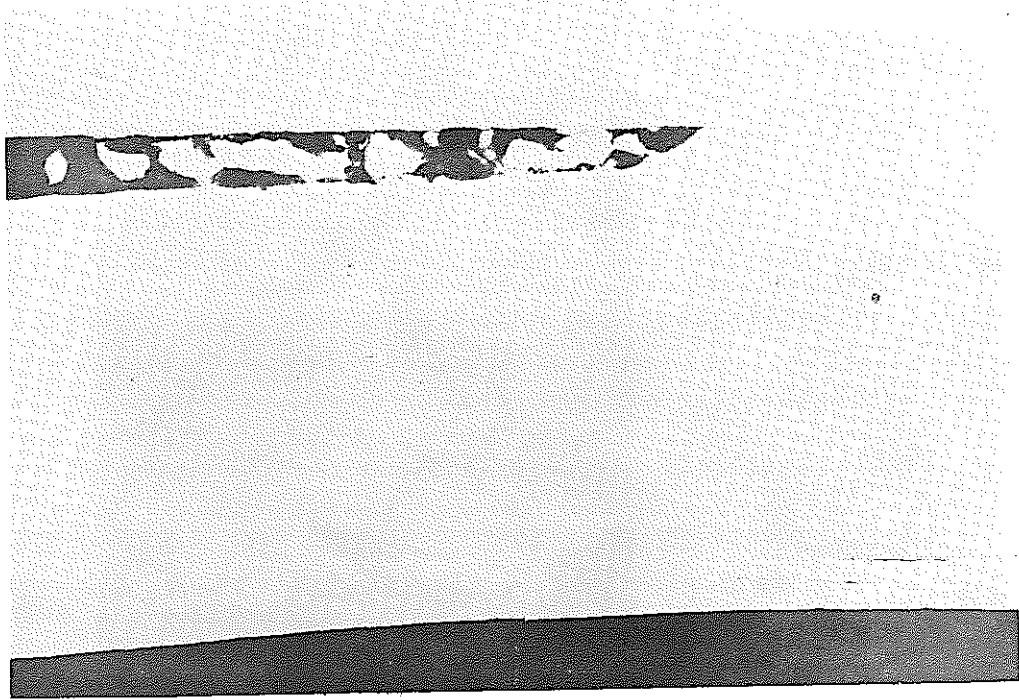
(c) 被覆管外表面



← 被覆管表面

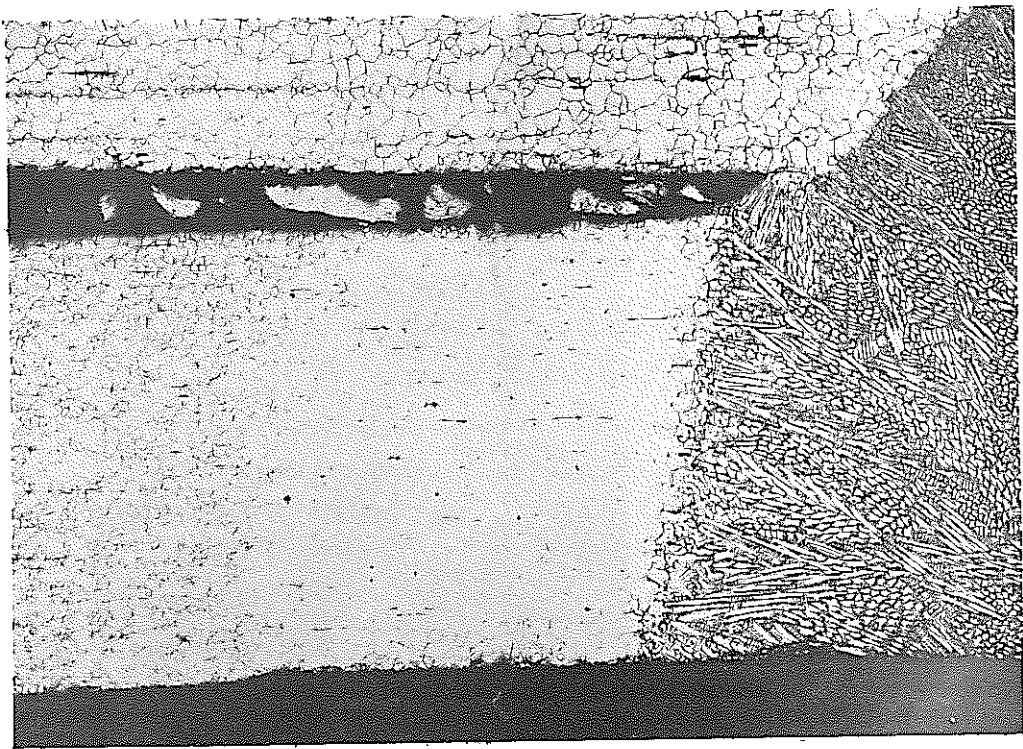
×800

写真 18 (B) ナトリウム流動試験前の上部端栓溶接部の顕微鏡組織 (S53)



(a) 縦断面研磨のまま

×100

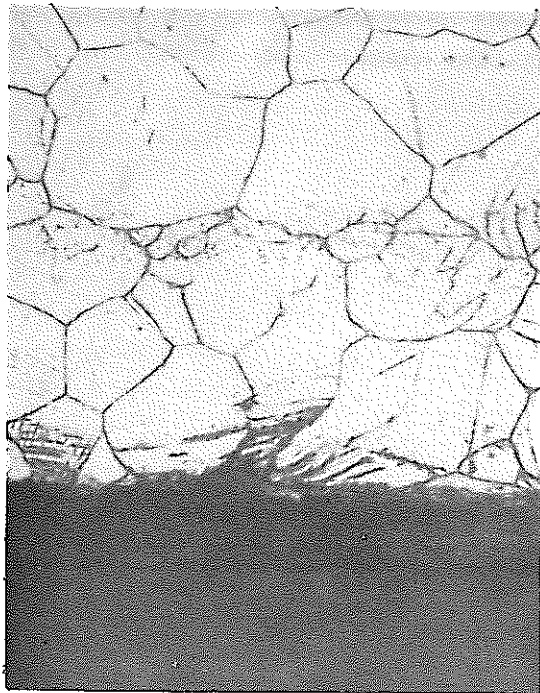
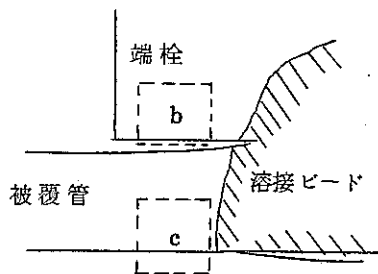


(a) 縦断面組織

×100

写真19(A) ナトリウム流動試験後の上部端栓溶接部の顕微鏡組織(S72)

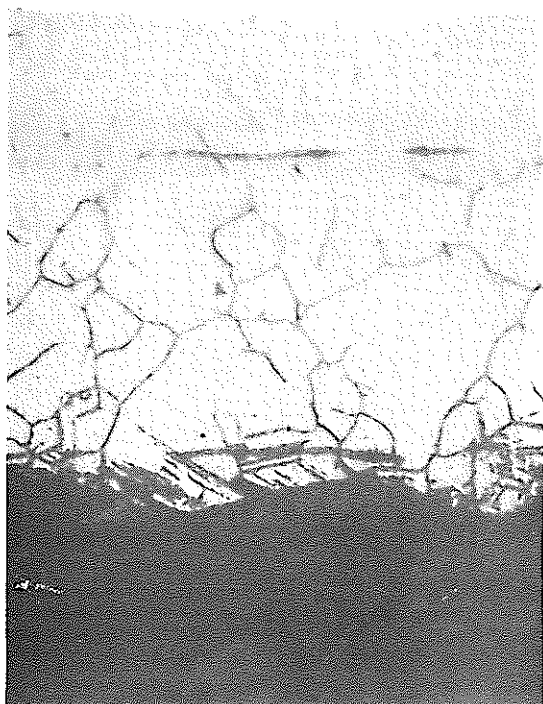
(b) 端栓部



←端栓表面

×800

(c) 被覆管外表面

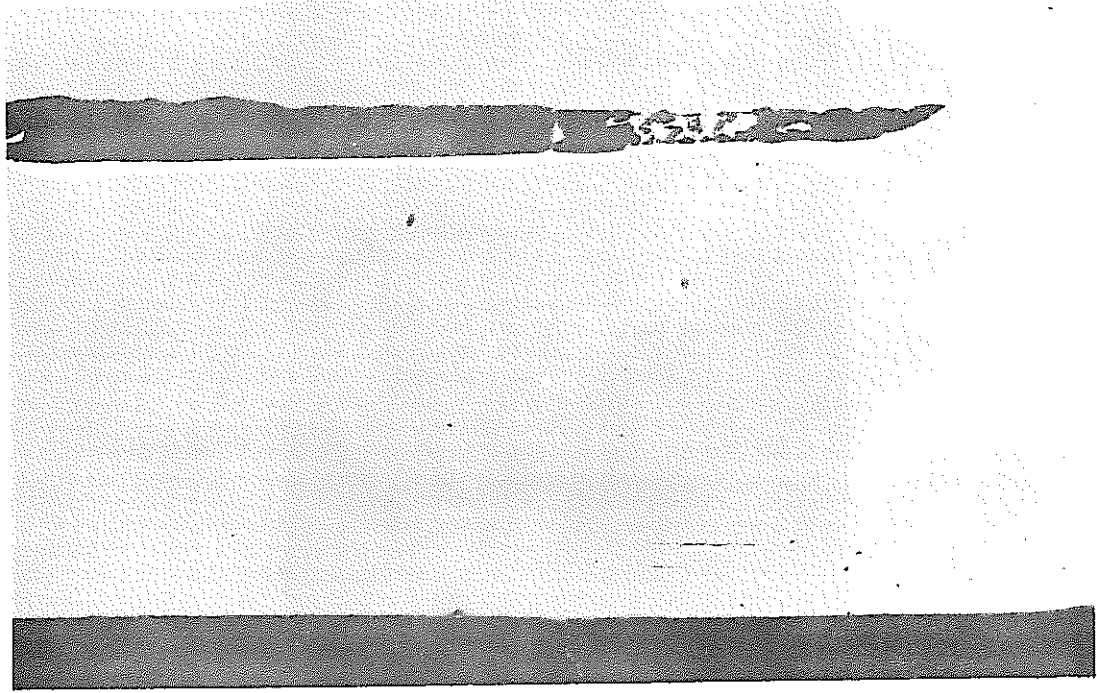


←被覆管表面

×800

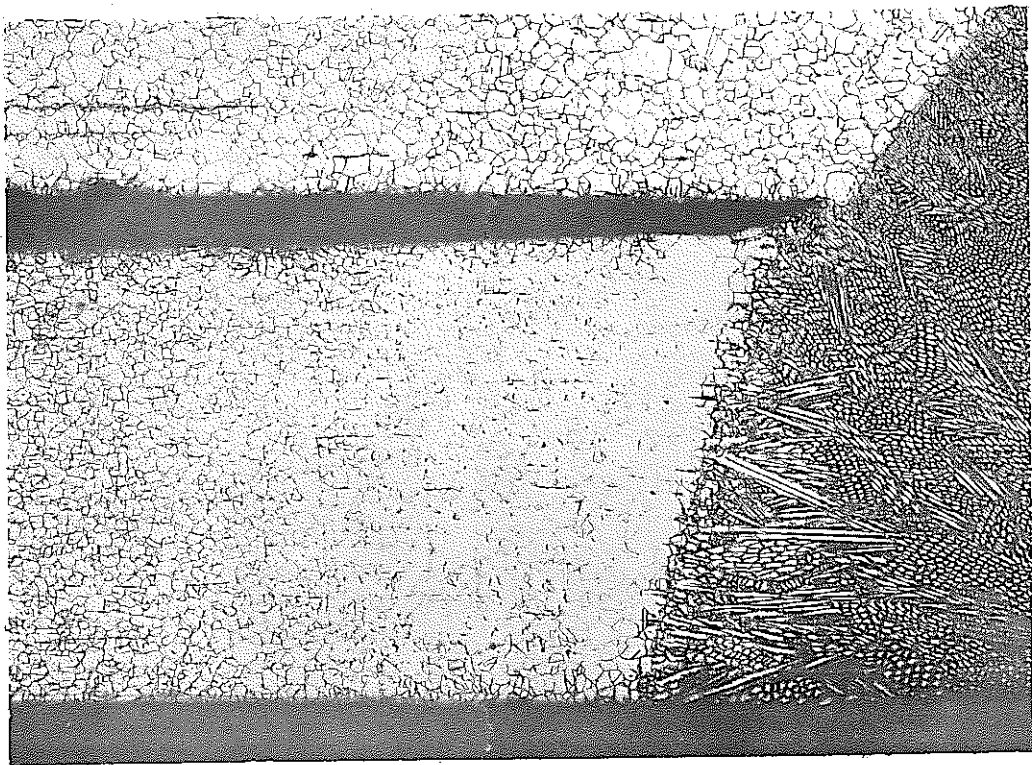
写真 19 (B)

検鏡位置は写真 18 に同じである。



(a) 縦断面研摩のまま

×100



(a) 縦断面組織

×100

写真20 ナトリウム流動試験後の上部端栓溶接部の顕微鏡組織 (S97)

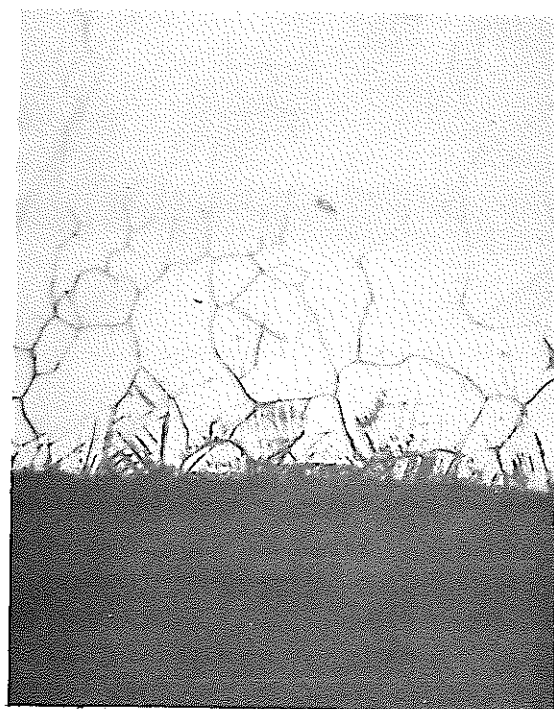
(b) 端栓部



← 端栓表面

×800

(c) 被覆管外表面



← 被覆管表面

×800

写真 20 (B)

検鏡位置は写真 18 に同じである。