

ナトリウム中材料試験速報(2)

高速炉用燃料被覆管の質量移行およびフレッキング腐食試験

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNC TN 943 72-05
決裁年月日	平成10年3月26日

1972年8月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた範囲の関係者に配布するものです。供覧、複製、転載、引用、レファレンスおよびその他の利用には、事業団の承認が必要です。なお、開示制限が解除になつた場合には、その旨通知します。

動力炉・核燃料開発事業団
計画管理部技術情報室

1972年8月

SN943 72-05

報告者 柚原俊一
鈴木康夫
加納茂機
厚母栄夫

期 間 1971年4月 ～ 1972年3月

目 的 高速実験炉「常陽」燃料被覆管の高温ナトリウム中における質量移行現象およびフレツテング腐食現象を実験的に明らかにする。

要 旨 高速炉用燃料集合体のより厳密にして、有効な設計を行ない、かつ、その使用限界を明らかにするため、高速炉の実際の稼動状態に即した高温ナトリウム中における材料特性データを国産高速炉用材料について得ることが要請されている。高速炉材料のナトリウム中試験用として建設された材料試験ループに付設せる被覆管質量移行試験用ドータループおよび被覆管フレツテング腐食試験装置によりAISI-316タイプの燃料被覆管についてそれぞれ試験を行なった。これらの試験により得られたことは次の通りである。(1)高温ナトリウム中における燃料被覆管の質量移行およびフレツテングに関する試験技術をほぼ確立することができた。(2)ナトリウム浸漬時間約1000時間の質量移行データから650℃のナトリウム中における年間のAISI-316タイプ燃料被覆管の厚さ減少は約10ミクロンから35ミクロンであると推定される。(3)600℃のナトリウム中における燃料被覆管フレツテング試験では、3kgの保持力までは、摺動保持力と最大フレツテング深さはほぼ直線関係にある。

目 次

1.	ま え が き	1
2.	A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管の質量移行試験	2
2.1	被覆管質量移行試験用ドータ・ループ (M - 2) の概要	2
2.2	供試被覆管および試験片形状	2
2.3	被覆管質量移行ドータ・ループ運転条件と経過	3
2.4	A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管の重量変化	4
3.	A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管のフレツテング腐食試験結果	14
3.1	被覆管フレツテング腐食試験装置	14
3.2	供試被覆管および試験片形状	14
3.3	フレツテング腐食試験装置の運転条件と経過	15
3.4	A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管のフレツテング腐食試験結果	16
4.	ま と め	17
5.	あ と が き	24
6.	参 考 文 献	24
	付録 ナトリウム分析結果	25

図 ・ 表 目 次

図-1	被覆管質量移行試験用ドータ・ループ (M - 2) のフローシート	6
図-2	被覆管質量移行試験用ホルダー	7
図-3	被覆管質量移行試験片	8
図-4	被覆管質量移行試験時の試料挿入部温度と流量	9
図-5	A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管のナトリウム浸漬による 厚さ変化率	11
図-6	A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管のホット・レグ部浸漬による 厚さ減少率 (試験温度 6 5 0 ℃)	12
図-7	A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管の質量移行試験前後の外観写真	13
図-8	被覆管フレツテング腐食試験装置のフローシート	19
図-9	被覆管フレツテング試験部機構	20
図-10	フレツテング腐食試験片	21
図-11	摺動保持力とフレツテング・マーク最大深さとの関係	22
図-12	A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管のフレツテング・マーク外観写真	12

表-1	AISI-316タイプ供試被覆管の組成および前処理条件	3
表-2	低純度材料試験ループ運転経過	14
表-3	AISI-316タイプ高速炉用燃料被覆管の重量変化率	6
表-4	フレツテング腐食試験条件	15
表-5	AISI-316タイプ高速炉用燃料被覆管のフレツテング腐食データ	16
表-6	低純度材料試験ループ2500時間運転時のナトリウム中不純物分析値	25

1 ま え が き

高速炉用燃料集合体の厳密な設計を行なうためには、燃料被覆管のナトリウム中使用温度での腐食による厚さ減少（浸漬前後の重量変化から求める）、燃料被覆管とスペーサ（グリットもしくはワイヤースペーサ）とのフレツテング腐食挙動等は明らかにされるべき重要な問題と考えられる。これまで、高速炉の実際の稼動状態に即した高温ナトリウム中での国産高速炉用材料に関する試験データは、充分得られておらず、特に実加工形状の燃料被覆管の厚さ減少量およびフレツテング腐食に関するデータは、殆んど得られていない。

そこで、上記の問題を実験的に明らかにするため、低純度材料試験ループには被覆管質量移行試験用ドータ・ループおよびフレツテング腐食試験装置が付設された。本報告は、この低純度材料試験ループで行なわれた昭和46年度の連続運転試験（2.3参照）により得られたナトリウム浸漬試験結果のうち、高速炉用燃料被覆管の質量移行およびフレツテング腐食試験に関する結果の一部→650℃、1000時間試験（実試験時間953時間）による燃料被覆管の厚さ減少およびスペーサ・摺動保持力3kgまでのフレツテング・マーク最大深さ←を速報として取りまとめたものである。本報告は動燃団内部資料として、生に近い一部のデータを集録してあるが、試験データ解析のためのナトリウム浸漬後試験、試験結果の吟味等は現在・進行中である。近くこれらの解析結果を補足し、それぞれ成果報告書として提出する予定である。また、これらの試験は、今後とも継続して行ない、より高温でのより長時間試験により、高速炉用燃料被覆管の高温ナトリウム中における腐食挙動等を実験的に究明して行きたいと考えている。

2 A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管の質量移行試験

今回の高速炉用燃料被覆管の質量移行試験は低純度材料試験マザー・ループの2500時間試験(表-2参照)に付随して行なわれた。

2.1 被覆管質量移行試験用ドータ・ループ(M-2)の概要

M-2ループは高温、高流速のナトリウム中における質量移行試験を行なうための装置で既設の低純度材料試験マザー・ループに付設されており、マザー・ループからナトリウムの供給をうけて運転される。

試験部の主要性能は次に示す通りである。

ナトリウム流量	5 l/min (試験部流速~6 m/sec)
最高使用圧力	5 $\frac{kg}{cm^2}$
設計温度	650℃
ナトリウム温度	
第1試料挿入部(T-1)	~650℃
" 2 " (T-2)	~550℃
" 3 " (T-3)	~480℃
" 4 " (T-4)	~400℃
" 5 " (T-5)	~380℃

図-1にM-2ループのフローシートが示されている。外挿型加熱器によつてナトリウムは最高温度650℃まであげられる。図-2に被覆管質量移行試験用ホルダーの形状を示す。供試被覆管とナトリウムが流れるホルダー内壁のギャップ、すなわち、流路ギャップは0.65 mmである。

2.2 供試被覆管および試験片形状

被覆管の材質はA I S I - 3 1 6 タイプオーステナイト・ステンレス鋼である。供試材の組成、結晶粒度および加工度を表-1に示す。供試被覆管の概略の製造工程および熱処理は以下の通りである。

製鋼→造塊→鍛造→ピレット加工→押出→圧延→抽伸→熱処理(光揮焼鈍, 1000℃~1100℃)→最終冷間抽伸→ロール矯正→曲りとり→素管

表-1 AISI-316タイプ供試被覆管の組成および前処理条件

元素 分析条件	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Co	B	N
レドール分析値	0.06	0.58	1.52	0.005	0.017	0.23	13.14	16.60	252	0.02	0.0005	0.042
チェック分析値	0.06	0.56	1.52	0.003	0.013	0.22	13.14	17.05	240	0.02	0.0002	0.0262
"	0.06	0.56	1.53	0.003	0.013	0.22	13.15	17.00	241	0.02	0.0002	0.0260

結晶粒度 ASTM No. 7.1~7.0, 加工度 10~12%

管公称寸法 6.3φ (O・D) × 5.6φ (I・D) × 2000 mm (L)

図-3に被覆管質量移行試験片の形状を示す。

試験片はA, Bの2つからなり, Aは溶接部の腐食を調べるために両端に溶接端栓を有するものであり, 試験片Bは燃料被覆管素管の厚さ変化(質量移行)を主とする腐食挙動を明らかにするためのものであつてループ挿入時には中子により固定された(図-2参照)。

試験片A, Bはそれぞれの試験部(T-1~T-5)に1組ずつ挿入される。

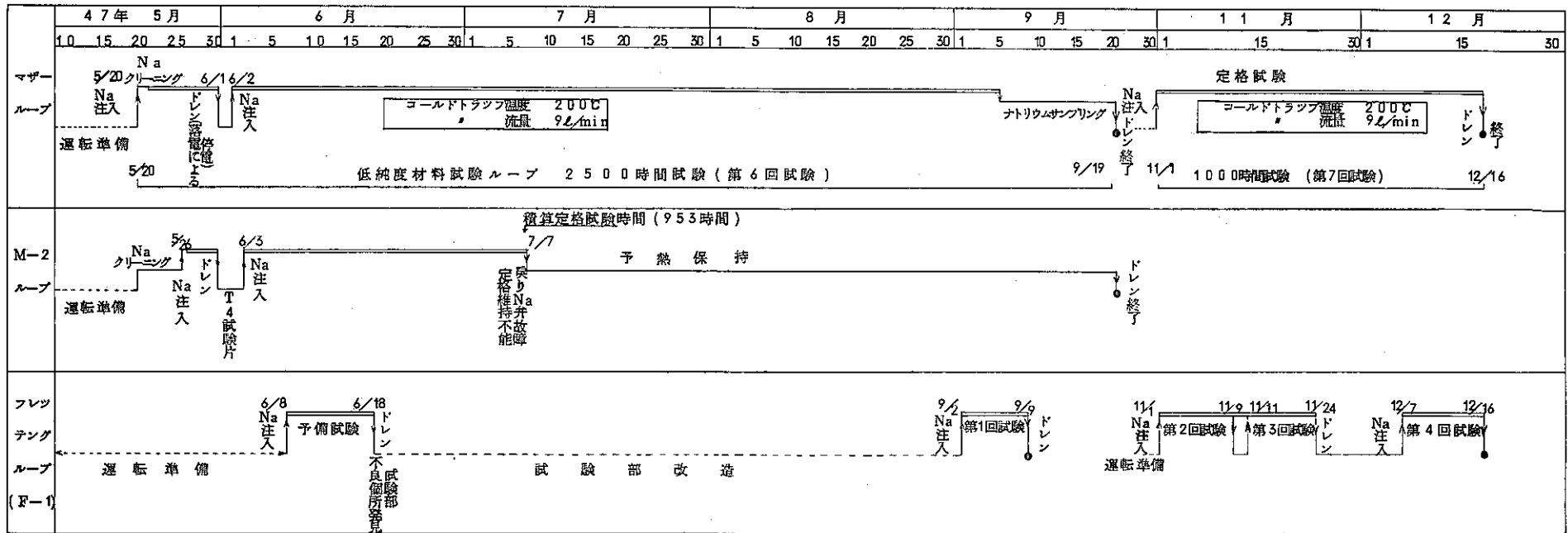
2.3 被覆管質量移行データ・ループ運転条件と経過

定格条件(試料挿入部T-1温度650℃, ホット・レグ部流量2.2ℓ/min)での試験はマザーループ2500時間試験期間の初期の約1000時間(表-2参照)の間に行なわれた。従つて試験データは, すべて定格条件が維持された953時間で整理してある。その後の1500時間は(甲)の運転経過に示すようにデータ・ループ全系が低い同程度の温度(250℃~350℃)に保持されたため, 質量移行現象は, 生じていないと考えられる。

データ・ループ内のナトリウム純度を一定に保つためのナトリウム供給量(マザー・ループからM-2ループへ)は平均1.3ℓ/minであつた。運転中の試料挿入部の試験条件は下記の通りである。

(i) 試料挿入部の試験条件

試料挿入部	試験温度 (℃)	平均流量(ℓ/min)	平均流速(m/sec)
T-1	~650 (630~660)	2.2	2.6
T-2	~440 (300~570)	0.9	1.1
T-3	~390 (280~510)	0.9	1.1
T-4	~300 (230~450)	0.9	1.1
T-5	~370 (300~410)	2.2	2.6



備考 ——— 定格試験

表-2 低純度材料試験ループ運転経過

試験温度の項の括弧内の数値は試験中の温度変動範囲を示す。被覆管質量移行試験時の試験挿入部温度と流量を図-4に示す。

(ii) 定格試験時間

積算 953時間

(iii) 運転経過

運転経過を表-2に示す。M-2ループのナトリウムチャージは、5月26日に行ない、同日から定格試験を開始した。連続約100時間の定格運転後、落雷による停電のため、ドレン用自動弁が作動し、循環中のナトリウムは自動的にドレンされた。6月3日に再びチャージ・アップを行ない、7月7日までに積算(実試験時間は953時間)の定格運転を行なった。その後、ポット系(他のドータ・ループ)の試験片交換のため、M-2ループについては、まず、外挿加熱器の入力を切り、定格温度条件を下げた。ポケット系のドレン後、マザー・ループ流動条件を定格に設定し、M-2ループについても定格調整を試みたが、M-2ループからマザー・ループへの戻り弁(V-5-3)のベローシール部が故障しナトリウム・ペーパーの浸出が認められたので、定格条件での運転を中止し、7月7日から9月10日までは、M-2ループ系の条件をナトリウム温度250℃から350℃、ナトリウム流量(ドータ・ループ内ホットレグ流量)を約1.3ℓ/minから0.1ℓ/minに維持した。

2.4 AISI-316タイプ高速炉用燃料被覆管の重量変化

表-2にAISI-316タイプ燃料被覆管のナトリウム浸漬前後の重量、重量変化厚さ変化を示す。表から明らかなように、温度上昇側試験部T-1(ホット・レグ部)では、試験片A、Bとも、重量減少がみられ、温度下降側試験部(コールド・レグ部)T-2、T-3では沈着(Deposition)によると考えられる重量増加がみられる。Na入口部試験部T-5では、僅かの重量増加がみられる。これらの重量変化から換算して得られた厚さ変化率を図-5に示す。得られた650℃における厚さ減少率がさらに比較のために前に得られたデータとUKAEAのデータ(実線)と共に図6に示されている。図-6および表-3に示されるように昇温側である650℃のデータを観察すると試験片Bの方が厚さ減少率は大きい。その理由については、現段階では明らかでない。

今回の試験データのバラツキはホット・スチール・ループで得られた試験データのバラツキと比較しても、それほど、大きいものではないと考えられる。またUKAEAの(2)、(3) ~ 25 Ppm と < 5 Ppm とのデータ曲線の間に入っていることが分る。図-7はナトリ

ウム浸漬前後の外観写真である。マクロ的な外観観察（光学顕微鏡観察）では、異常腐食スポット等は認められていない。

表-3 AISI-316タイプ高速炉用燃料被覆管の重量変化率

試験片 A 6.3φ(O・D)×100mm(L)…溶接端栓を含む

試験部	項目	浸漬前重量(g)	浸漬後重量(g)	重量変化(%)	年当りの厚さ変化率(ミクロン/年)	管記号
T-1	(~650℃)	13,50282	13,48362	-0.01920	-11.1	S
T-2	(~440℃)	12,46711	13,47212	+0.00501	+2.9	"
T-3	(~390℃)	13,50376	13,50480	+0.00104	+0.6	"
T-4	(~300℃)	13,50557	-	-	-	"
T-5	(~370℃)	13,45962	-	-	-	"

試験片 B 6.3φ(O・D)×150mm(L)

試験部	項目	浸漬前重量(g)	浸漬後重量(g)	重量変化(%)	年当りの厚さ変化率(ミクロン/年)	管記号
T-1	(~650℃)	7,86755	7,77910	-0.08845	-34.1	S
T-2	(~440℃)	7,86748	7,87669	+0.00921	+3.6	"
T-3	(~390℃)	7,87015	7,87309	+0.00294	+1.1	"
T-4	(~300℃)	7,86571	-	-	-	"
T-5	(~370℃)	7,86795	7,86878	+0.00083	+0.3	"

註) T-4の試験片A, Bは、ドータ・ループ内の圧力損失が試験時間の経過と共に増加し、定格流動条件の維持が不能となつたので、試験開始後、約100時間で抜き出し、以後は、ダミーホルダーを挿入して運転した。T-5の試験片Aは取出、もしくは洗浄時に引きかき傷が発生したため、浸漬後の重量データは削除されている。

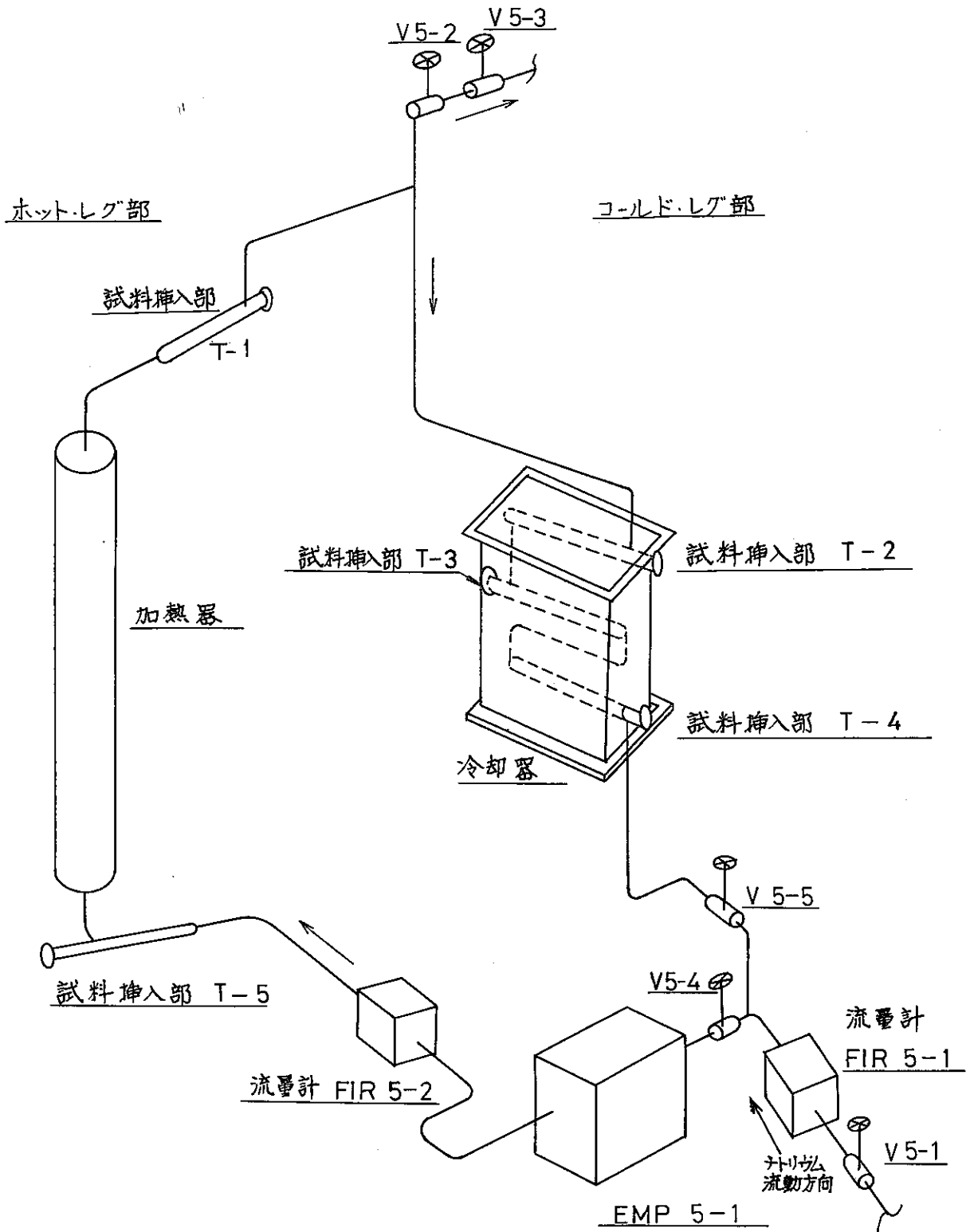


図-1 被覆管質量移行試験用ドータループ (M-2) のフローシート

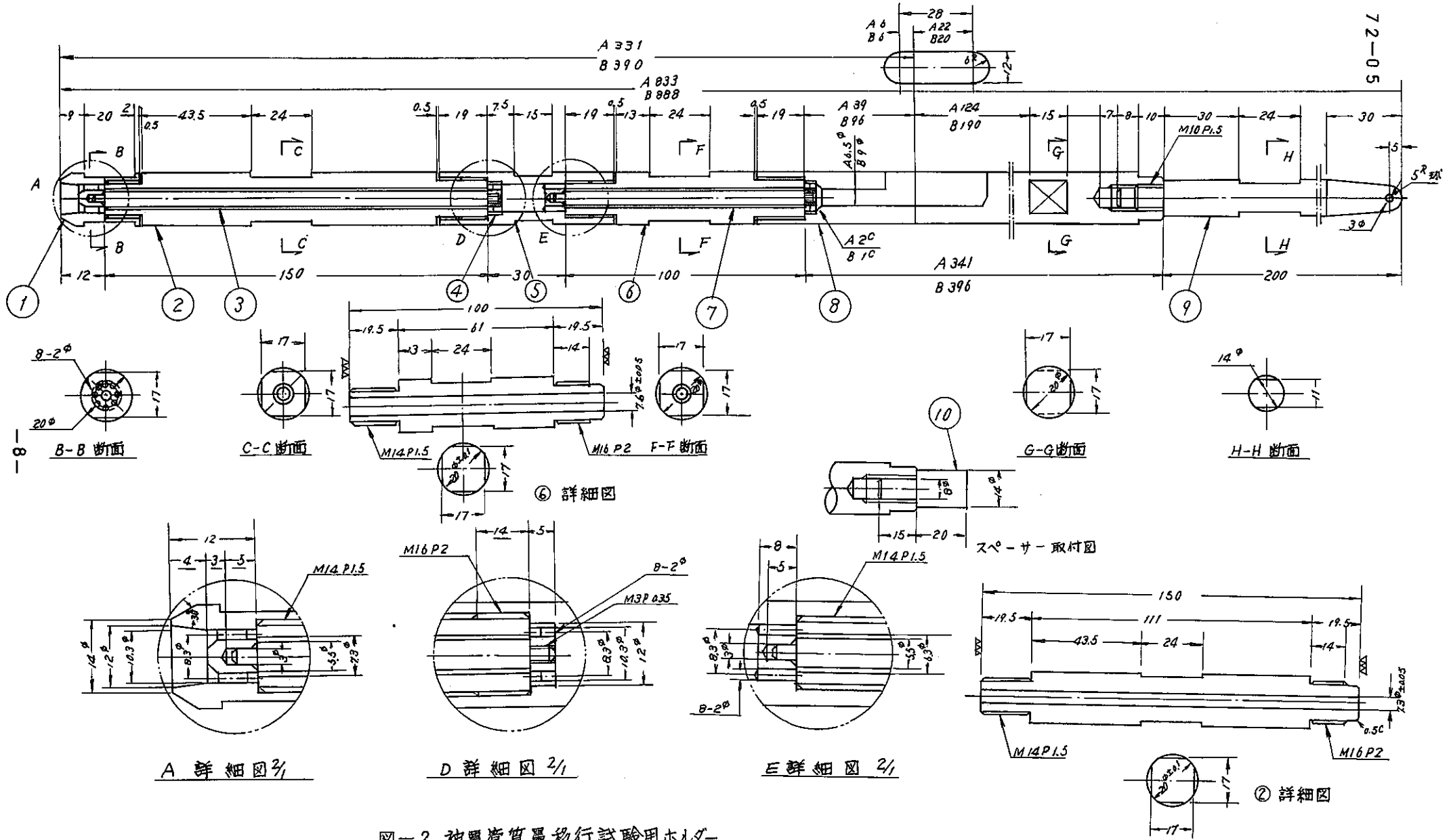
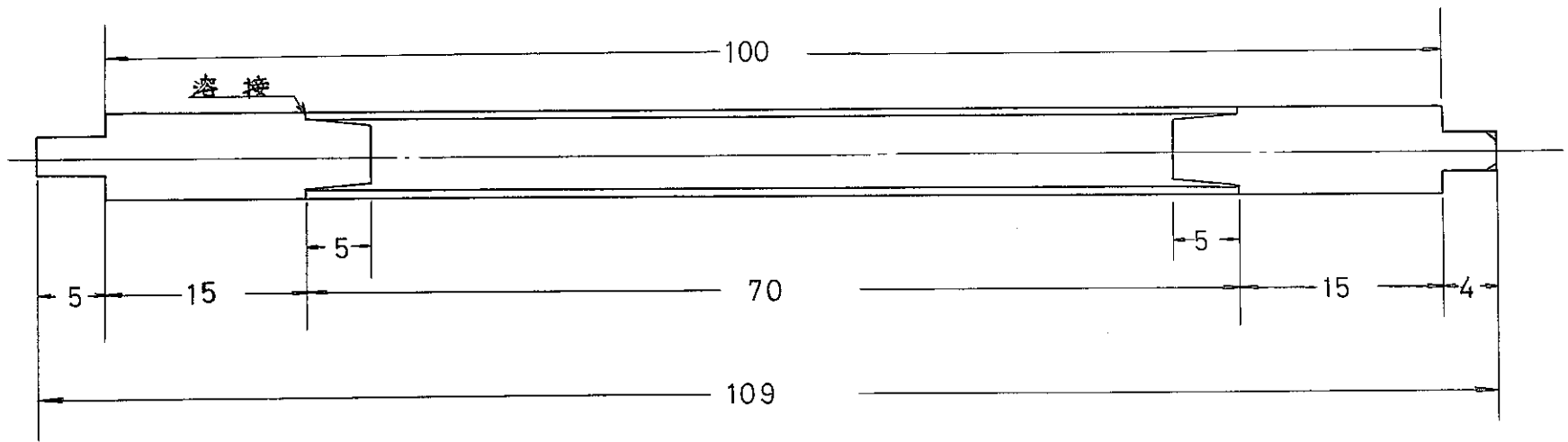
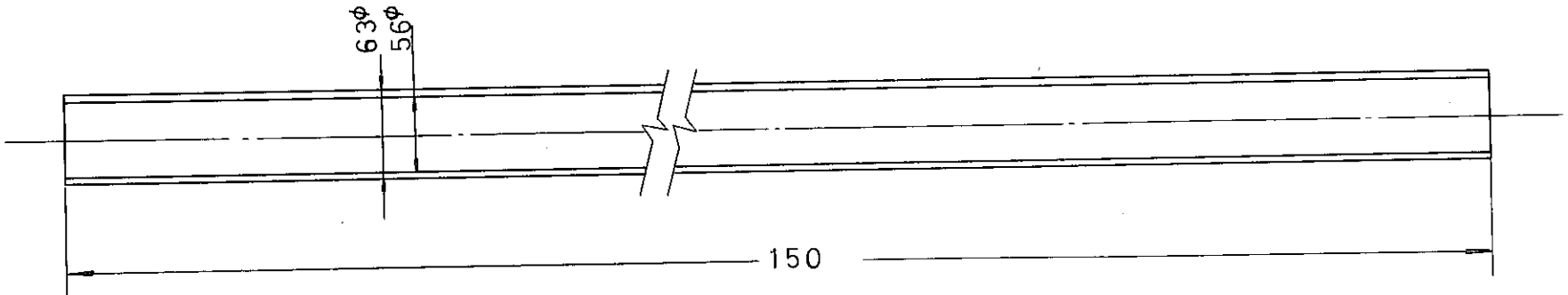


図-2 被覆管質量移行試験用ホルダー



試驗片 A



試驗片 B

單位 mm

圖-3 核覆管質量移行試驗片

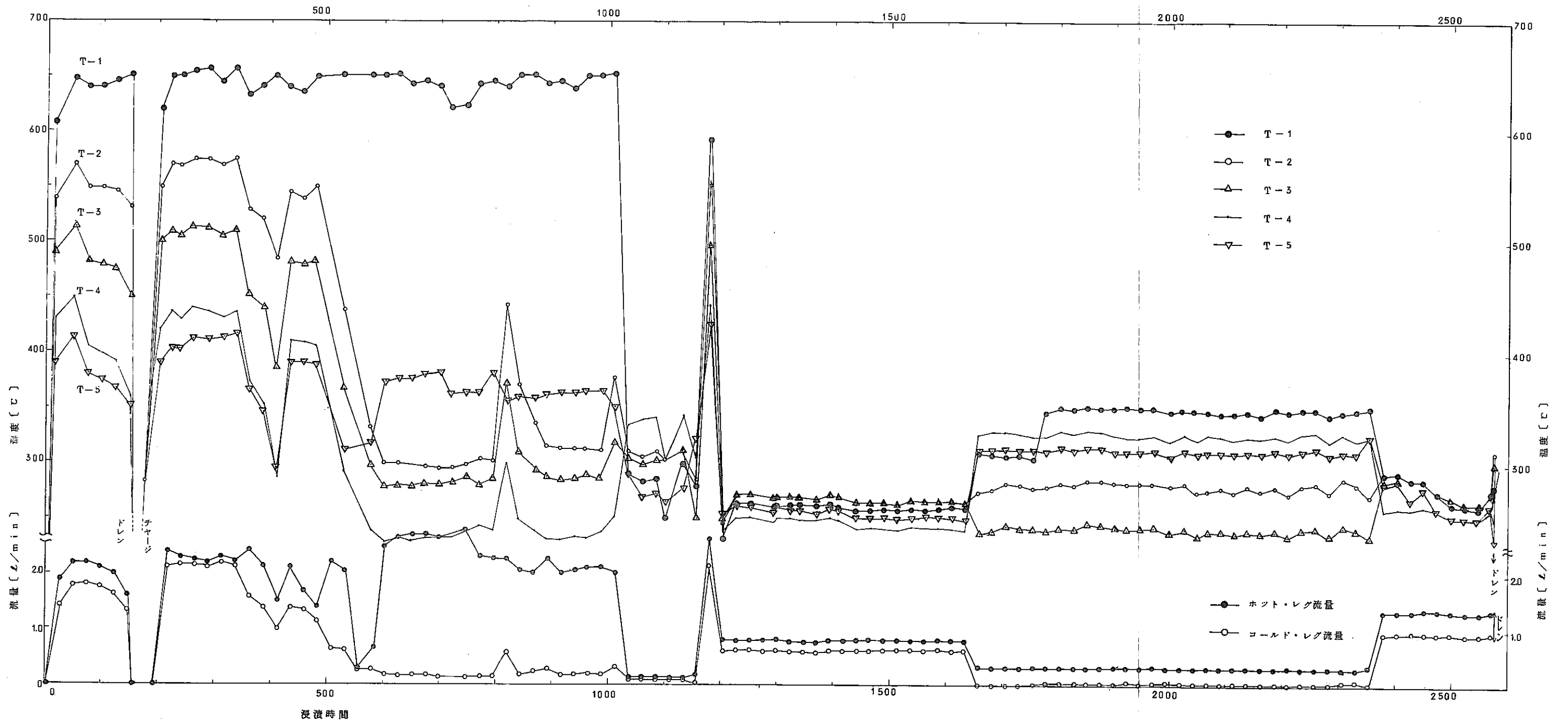


図-4 被覆管質量移行試験時の試料挿入部温度と流量

Data Source	O ₂ (PPm)	Flow Rate (m/sec)	Exposed Time (hour)	Reference
P N C	○ ~12	2.6	953	Test Piece A
"	●	"	"	" <i>b</i>
"	△ < 5	2.5	500 (2)	
"	▲ ~ 8	"	1000 (3)	

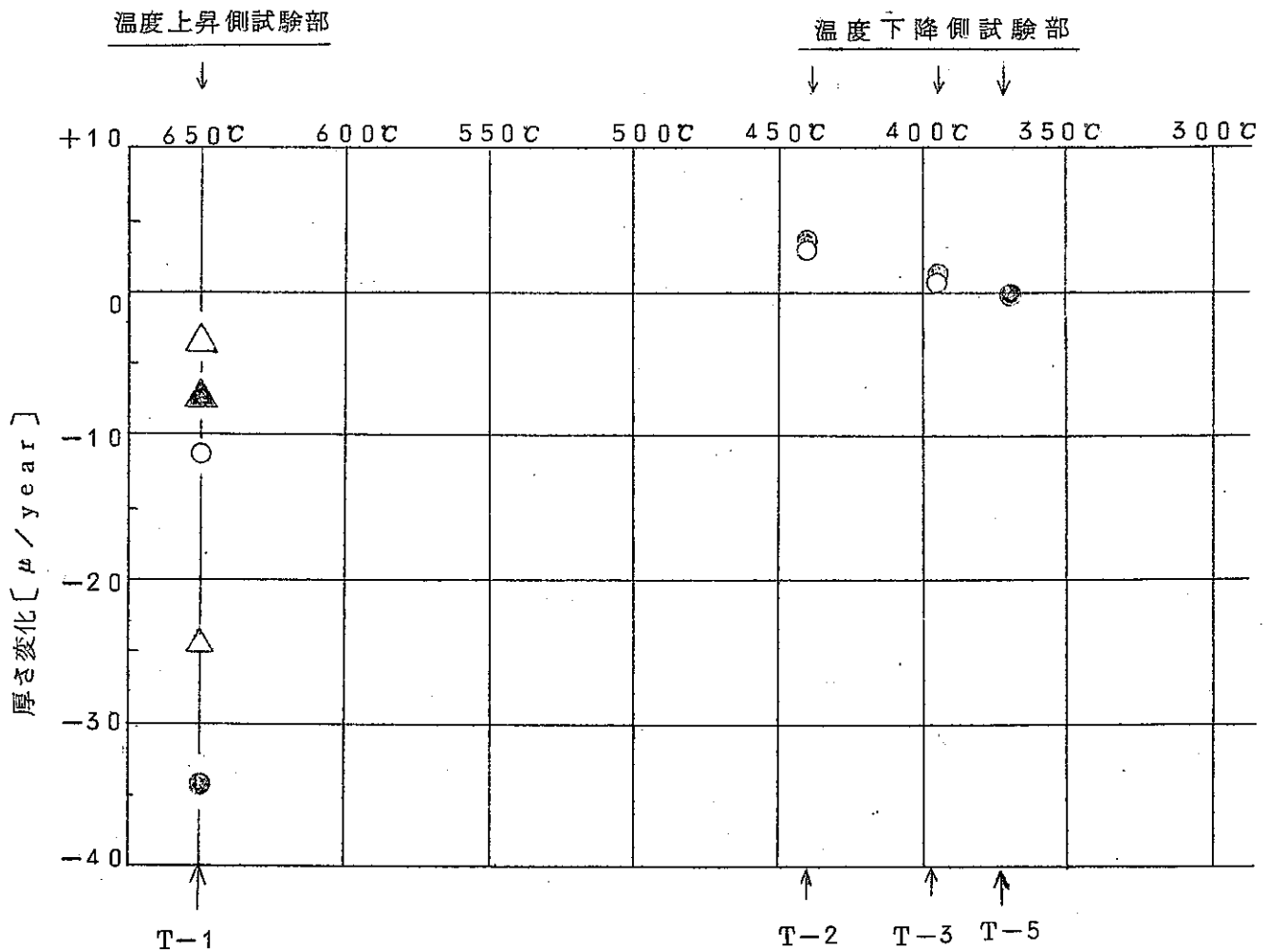


図-5 AISI-316 タイプ高速炉用燃料被覆管のナトリウム浸漬
漬による厚さ変化率

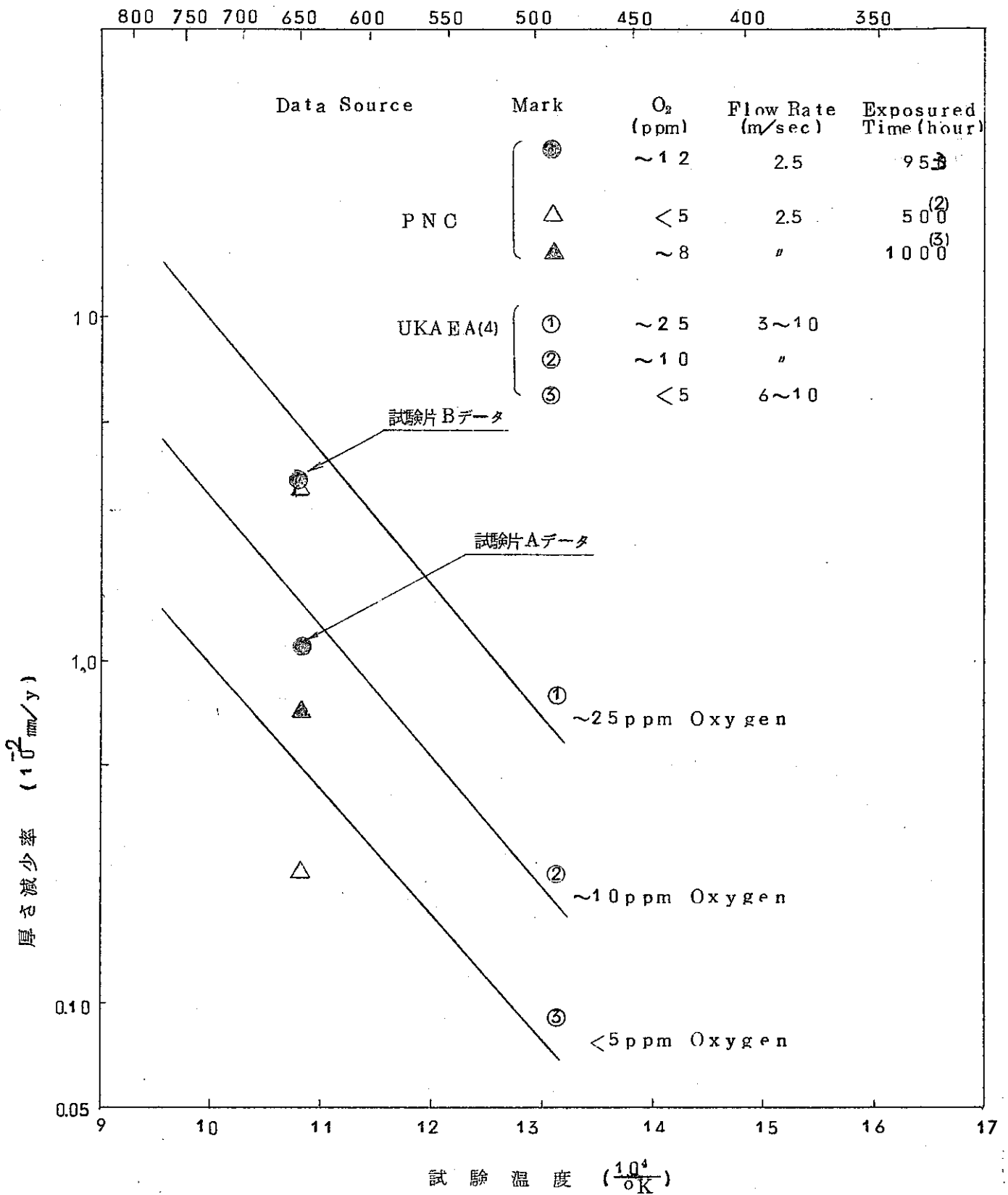
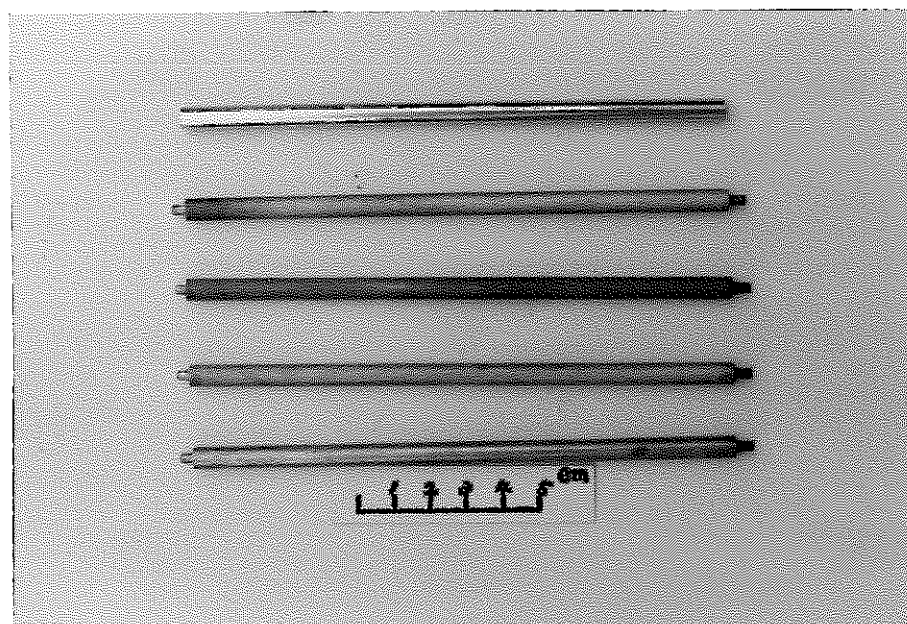


図-6 AISI-316タイプ高速炉用燃料被覆管ホット・レグ部浸漬による厚さ減少率 (試験温度650℃)



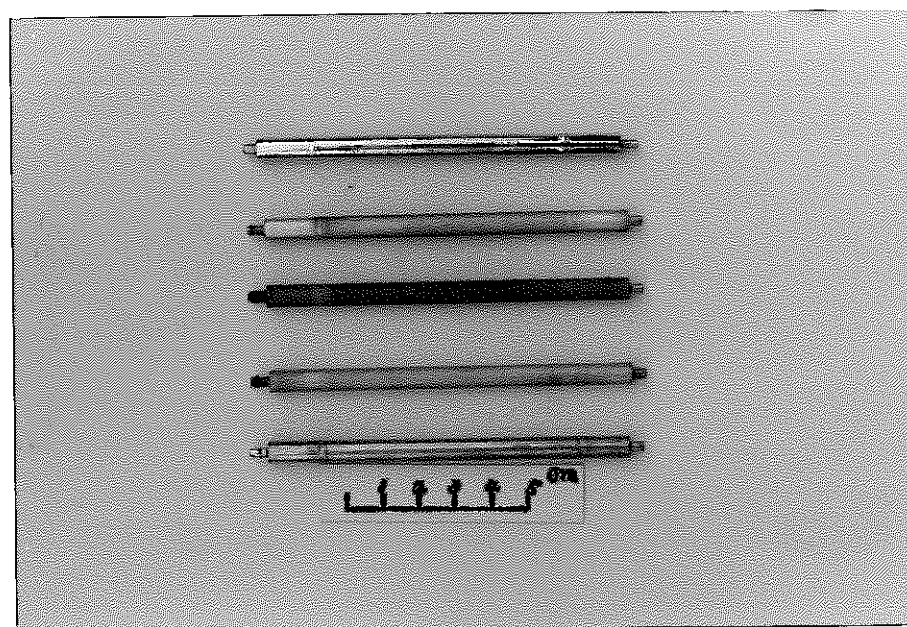
浸漬前試験片

T-1 浸漬後試験片

-2 "

-3 "

-5 "



浸漬前試験片

T-1 浸漬後試験片

-2 "

-3 "

-5 "

図-7 AISI316タイプ高速炉用燃料被覆管の質量移行試験前後の外観写真

3 A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管のフレツテング腐食試験

3.1 被覆管フレツテング腐食試験装置

本試験装置は、高温ナトリウム中で高速炉用燃料集合体に組みこまれた燃料被覆管が被覆管スペーサ支持具との摺動によつて生ずる材料の腐食摩耗現象を実験的に明らかにするために低純度材料試験ループに付設されたものである。

本試験装置のフローシートを図-8に示す。本試験装置の性能は次の通りである。

ナトリウム最高温度	600℃
ナトリウム流量	0.3ℓ/min
摺動距離	0~3mm
摺動周期	3.6~10c/sec
摺動面圧	0~10Kg

低純度材料試験ループのマザー系から導かれたナトリウムは加熱器によつて最高600℃の温度に加熱され、ナトリウム・ポットに導かれる。この高温ナトリウム内で、一定液面を保ちつつ、一部はマザー系へ戻る循環回路を形成している。

燃料被覆管のフレツテング腐食試験は次のようにして行なわれる。すなわち図-9に示すように、ナトリウム中の試験片の燃料被覆管部は、固定保持スペーサーにより保持力を受けながら、同スペーサーと接触しつつ、上下方向に摺動運動を行なう。摺動サイクルは3.6c/sec から10c/secの範囲で連続的に変えることが可能である。

また、摺動面圧（保持力）は装置に重錘を負荷することにより段階的に変えられる。

摺動機構は、先づ、試験容器（ナトリウムポット）外部で、モータによる回転を往復運動に変換し、軸封（S・Sベローズ使用）を通して試験容器内に往復運動を伝達する。試験容器内では、軸の往復運動が直接被覆管試験片の上下運動に変換される。一方、負荷機構は摺動機構と同様に、試験容器外部で、負荷伝達支持棒にテコ式により、引張力を加え、軸封を通して、試験容器内に伝達される。試験容器内の試験片部で、支持棒の引張力は、負荷面圧に変換される。

3.2 供試被覆管および試験片形状

供試被覆管の組成および前処理履歴は2.2節で記したものと同一ヒート材である。図-10にフレツテング腐食試験片形状が示されている。材質はA I S I - 3 1 6タイプ

ステンレス鋼、寸法は $6.3 \phi (O \cdot D) \times 0.35 \text{ mm} (T) \times 120 \text{ mm} (L)$ である。試験片はナトリウム浸漬後内圧破壊試験を行なうため、高圧導管部を有し、ポットへの試験片接合は外界との遮断（軸封）のため、ペローズつきフランジにより構成される。

3.3 フレッテング腐食試験装置の運転条件と経過

フレッテング腐食試験は、昭和46年6月20日から9月10日までの2500時間連続ループ運転と昭和46年11月1日から12月16日までの1000時間連続ループ運転の期間に行なつた（表-2参照）。実施したフレッテング腐食試験条件を表-4に示す。試験条件の設定は次の観点からなされた。試験温度は、ナトリウム冷却高速炉の燃料被覆管とナトリウムとの接液面最高温度が600℃近辺の温度であることから設定された。撓動回数については、実用条件下での燃料被覆管のフレッテング回数は $\sim 10^8$ 回（燃料被覆管のナトリウム流動による振動周波数10サイクル/秒、燃料集合体の燃焼時間を5000～10000時間とした場合）であると推定されるので、所期の試験目標は実条件に近い条件を狙つたのであるが今回の試験では、装置の軸封に使用しているステンレス・スチール成形ペローズの繰返し伸縮寿命が $\sim 10^6$ 回であるため、試験条件である撓動回数は、約 2.0×10^6 回および 4.0×10^6 回に設定して行なつた。撓動速度は装置の持つ最低速度を選択した。

2500時間連続運転期間中でのフレッテング腐食試験は撓動試験部および荷重試験部に問題が生じ改修に時間を要したため、終了間際に約136時間（撓動回数 1.8×10^6 回）の第1回連続試験しかできなかつた。次のマザーループの1000時間連続運転時には、ドータ・ループのナトリウムをクリーニングしたのち（約12PPm酸素濃度）マザー系から本試験装置への入口弁を閉じた状態（static sodium）で3回の試験を行なつた。

表-4 フレッテング腐食試験条件

試験No	試験期間	試験時間	試験温度 ($\pm 10^\circ\text{C}$)	ナトリウム 流量 (ℓ/min)	撓動保持力 (kg)	撓動速度 (c/sec)	撓動数 (回)	撓動距離 (mm)
1	9/3～9/9	13時間20分	600	0.44	2.0	3.6	1.8×10^6	~ 1
2	11/2～11/9	15時間4分	600	0	0.9	3.6	2.0×10^6	~ 1
3	11/13～11/13	17時間4分	600	0	3.0	3.6	2.0×10^6	~ 1
4	12/9～12/16	16時間12分	600	0.12	2.0	6.9	4.0×10^6	~ 1

3.4 A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管のフレツテング腐食試験結果

表-5 に試験条件と得られたフレツテング・マーク最大深さを示した。図-11 に摺動保持力とフレツテング・マーク深さとの関係を示す。図-12 は、600℃の高温ナトリウム中フレツテング腐食試験によつて得られたA I S I - 3 1 6 タイプ燃料被覆管の代表的なフレツテング・マーク外観写真の1例である。これらのフレツテング・マークの最大深さは触針式超アラサ計（三豊製作所製）によつて測定された。

表-5 A I S I - 3 1 6 タイプ高速炉用燃料被覆管のフレツテング腐食データ

ナトリウム条件

- (1) 温度……………600℃±10℃
- (2) 流量……………0~0.44ℓ/min
- (3) 酸素濃度……………12ppm（コールドトラップ温度200℃）

試験 №	摺動保持力 (Kg)	摺動速度 (c/sec)	摺動距離 (mm)	摺動回数 (回)	最大フレツテング深さ (ミクロン)		備 考
1	2.0	3.6	~1	1.8×10 ⁶	-136	-80	
2	0.9	3.6	~1	2.0×10 ⁶	-33	-35	
3	3.0	3.6	~1	2.0×10 ⁴	-220	-112	
4	2.0	6.9	~1	4.0×10 ⁴	+	+	摺動部は融着による盛り上りがみられた。

得られたデータの範囲内では、図-11 に示すように、ナトリウム温度600℃、ナトリウム中酸素濃度12ppm、摺動速度3.6c/sec、摺動回数約2×10⁶回の条件、固定スペーサーの保持力が3Kg（試験終了時の平均面応力約0.3~0.5Kg/mm²）程度までは保持力の増加と共に最大フレツテング深さはほぼ直線的に増加する。

外観観察では試験片のナトリウム浸漬後の表面は、フレツテング・マーク部分も含めて、金属光沢は失われていない。

フレツテング・マークは、第1回から第3回目までの試験では浅いすりばち形状を示したが、摺動速度を速くすると（第4回試験）摺動表面部分に盛り上りが観察された。これは固定子からのフレツテング摩耗により剝離した金属の融着によるものと推察されるが今後の解析をまちたい。

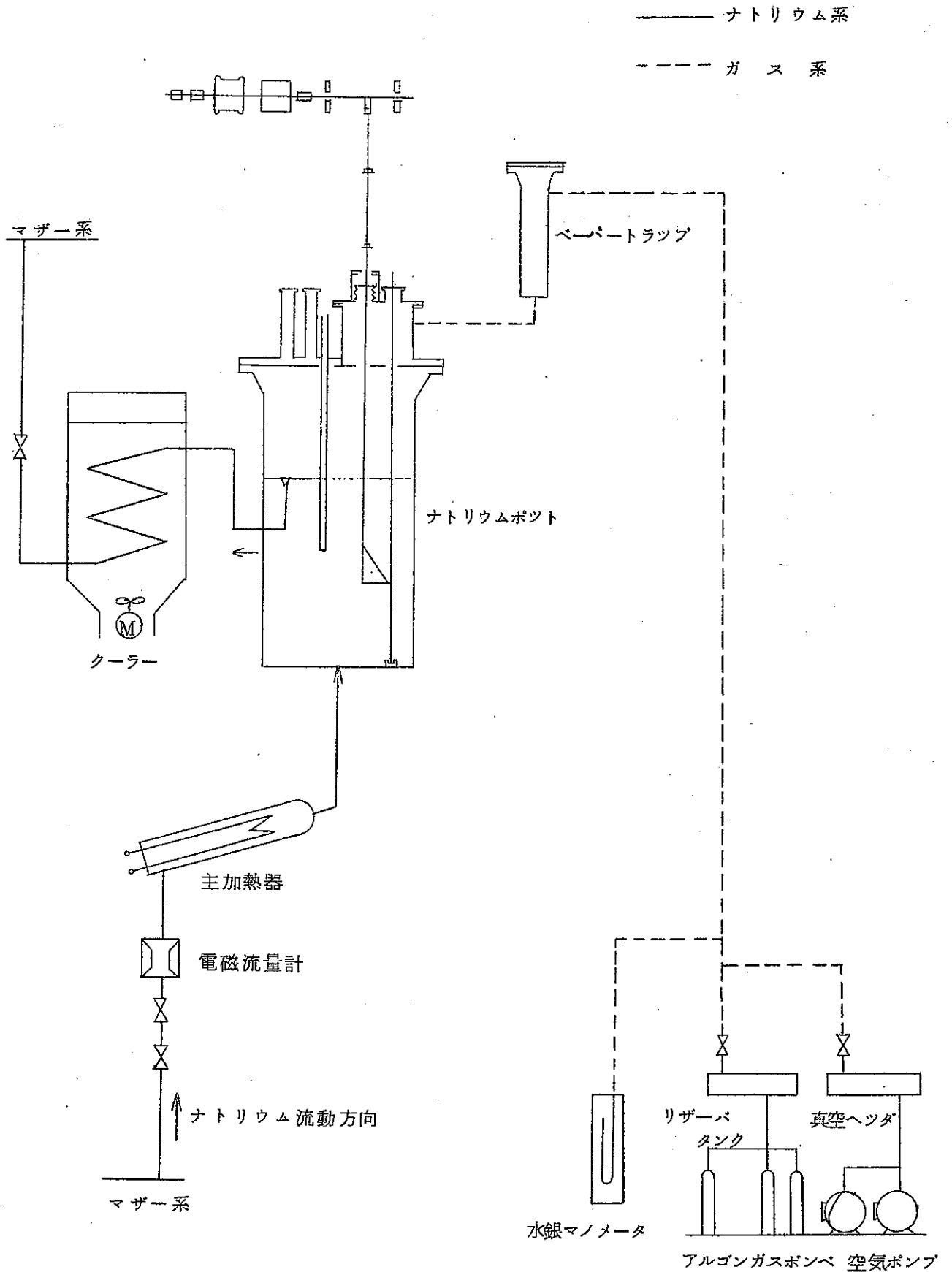


図-8 被覆管フレツテング腐食試験装置のフロシシート

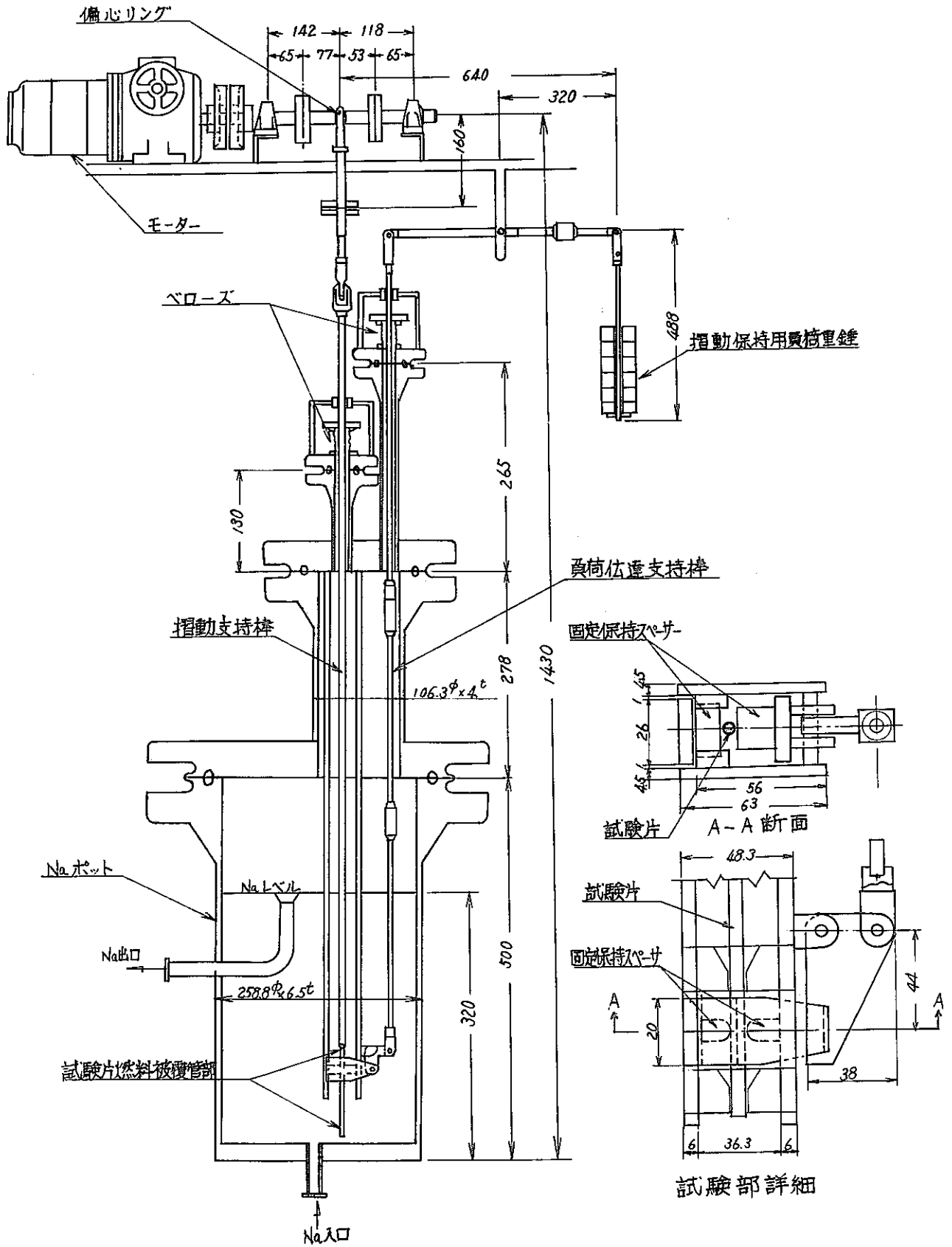


図9 被覆管フレツテング試験部機構

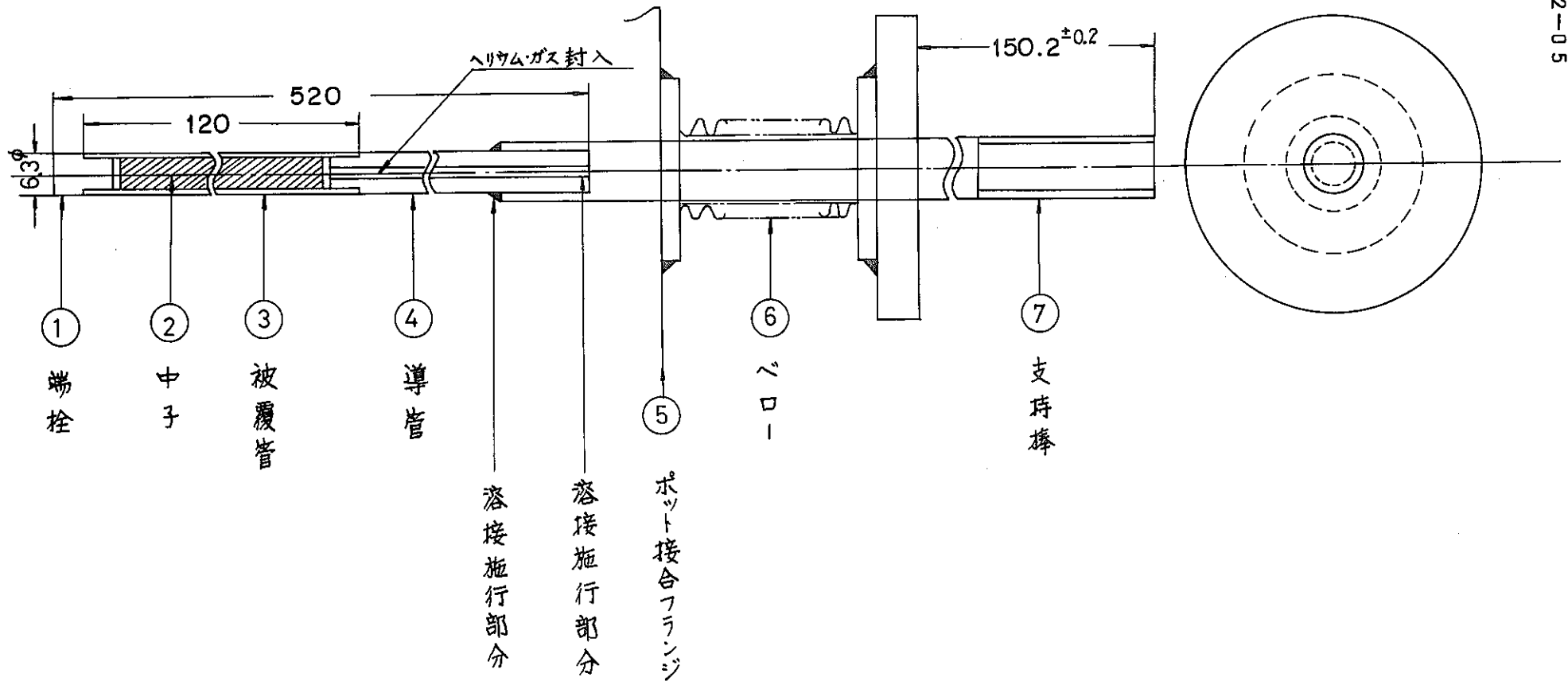


図-10 フレッシング腐食被覆管試験片(寸法単位mm)

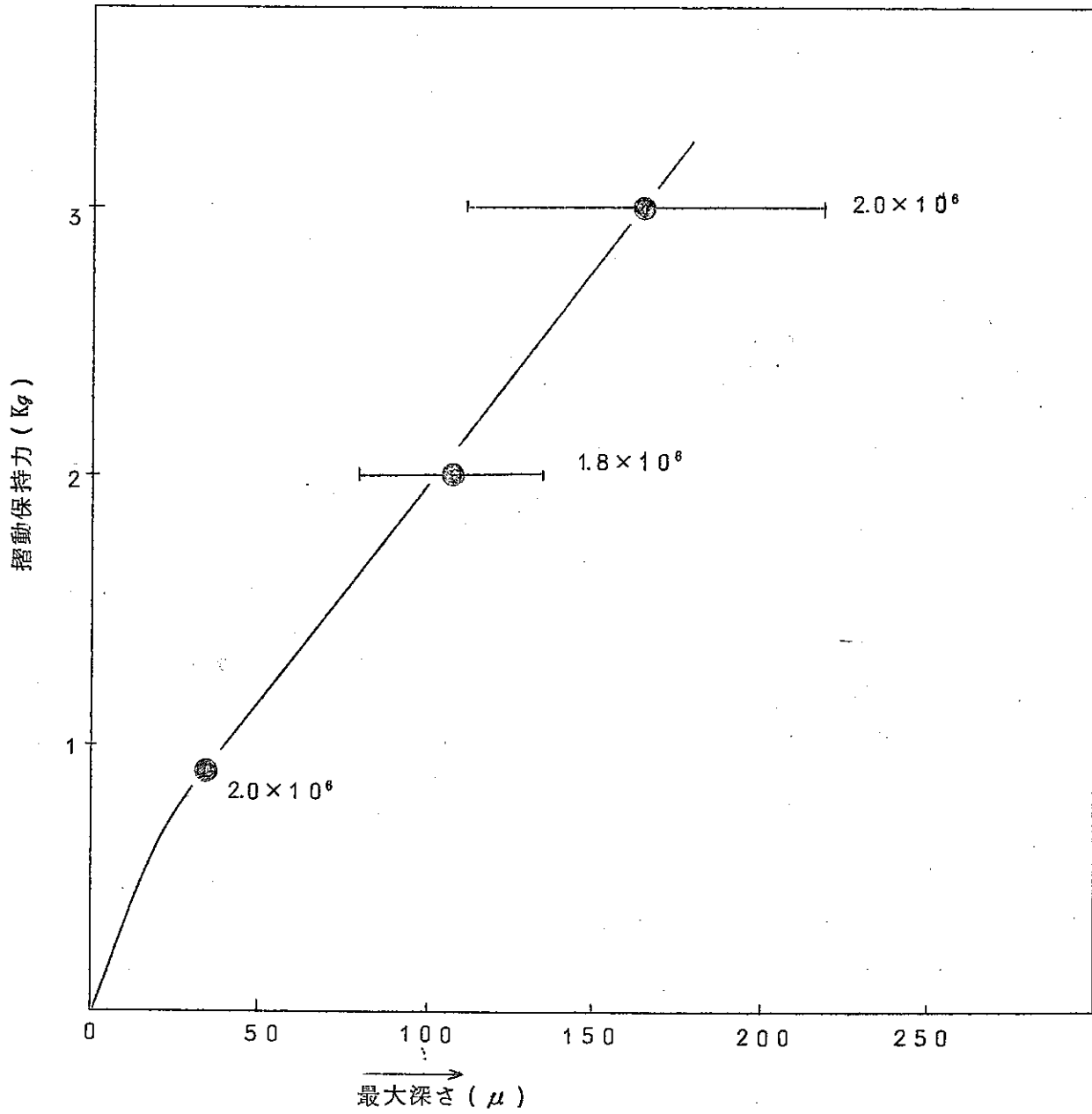


図-11 摺動保持力とフレットング：マーク最大深さとの関係

試験条件

ナトリウム試験温度	.....	600℃
保持力	.....	2.0 Kg
摺動回数	.....	1.8×10^4 回
距離	.....	~ 1 mm
速度	.....	3.6 c/s

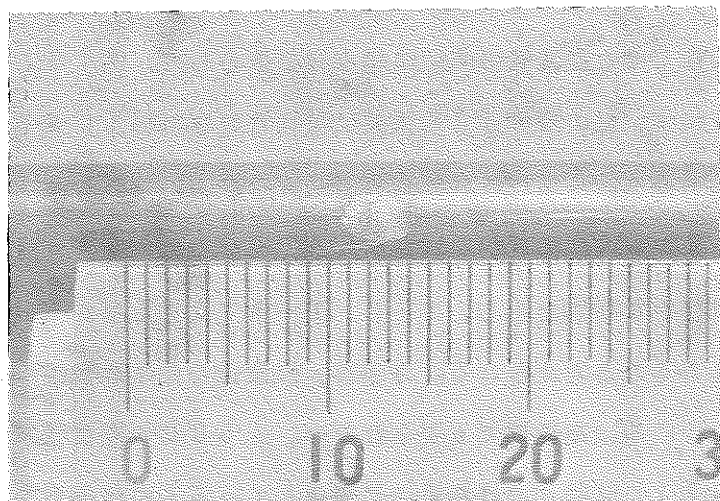


図-12 AISI-316 Type 高速炉用燃料被覆管のフレツテ
ンクマーク外観写真

4 ま と め

(1) 燃料被覆管の質量移行試験技術の確立

図-2に示す形状の桃割型試料ホルダーを設計し、試験片には両端固定および内面腐食防止用の中子を挿入することにより、被覆管の質量移行試験技術をほぼ確立することができた。残された問題点としては、現在のホルダーでは流動圧力損失が大きいので、さらに圧力損失を少なくするように試料ホルダーの改良をする必要がある。第2に試料挿入部の温度のバラツキを少なくするため、温度制御方法を改良しなければならない。これらの2点については、現在、改良され試験が進められている。

(2) 燃料被覆管の質量移行試験結果

ナトリウム温度約650℃、流速約2.6 m/sec、ナトリウム中酸素濃度約12PPm (コールド・トラップ温度200℃)の高温ナトリウム中における953時間の試験結果から、同一使用条件下での被覆管の年間の厚さ減少量として、約10ミクロンから35ミクロンの値が得られる。この最大厚さ損失量は被覆管肉厚の約10% (常陽用燃料被覆管肉厚は0.35mm)であり、高速炉燃料集合体の強度設計上、考慮しなければならない値と考えられる。ナトリウム入口部近傍の試料挿入部T-5 (ナトリウム温度300℃~410℃)では、重量変化は僅かな増加を示し、T-2、T-3でも重量増がみられるがこれは腐食生成物の沈着によるものと考えられる。さらに、浸漬後の光学顕微鏡による外観観察では、異常な腐食スポット等は高温部でも見られない。650℃の浸漬後試験片は薄い灰色に、降温試験部(T-2)の試験片では灰黒色に着色しているものがみられた。

(3) 燃料被覆管のフレツテング試験技術

図-7に示す方式、即ち、保持力を固定スペーサーにテコ方式により与え、被覆管試験片に上下方向の変位を与える装置を製作することにより、高温ナトリウム中におけるグリッド・タイプ・スペーサーと被覆管のフレツテング腐食現象を模擬する試験方法を開発することができた。

この装置の今後の問題としては、(1)実用時間に近い $10^7 \sim 10^8$ 回の摺動時の保持力を一定応力の状態で負荷することが可能な、もしくは、時間的な保持応力の変化が解析可能な固定スペーサー保持機構を考案すること等があげられる。

(4) 燃料被覆管のフレツテング腐食試験結果

今回は加速試験のため、試験条件としては荷酷な保持荷重条件で行なつた。

ナトリウム温度 $600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、ナトリウム中酸素濃度約 12 P P m 、摺動速度 3.6 c/sec 、摺動回数約 2×10^6 回で、固定スペーサの摺動保持力が 3 Kg 程度までは、保持力の増加と共に、最大フレツテング深さは、ほぼ直線的に増加する。

外観観察では、試験片のナトリウム浸漬後の表面は、フレツテング・マーク部分も含めて、金属光沢は失われていない。

摺動速度を速くすると、供試被覆管の摺動表面部分に盛り上りが観察された。これは摺動固定子の表面から、フレツテング摩耗により剝離した金属の融着による盛り上りであると推察される。摺動速度の増加によつて融着現象が観察されたことは、フレツテング腐食挙動が摺動速度によつて質的に変化することを示すものと考えられ、これらの現象を解明することは工学的な応用面からも重要である。

5 あとがき

この試験研究を遂行するにさいして、推進を図つて載いた斎藤ナトリウム技術部長、稲恒前部長（現中国電力会社原子力部次長）、植松（燃料・材料）グループ・リーダー、山本主任研究員、井上守副主任研究員（現住友金属KK）の各位に感謝の意を表す。またNa分析を担当された高荷副主任研究員をはじめ長期間にわたり黙々として試験に従事された丸山、河井、小坪両君をはじめとする当室員諸君に対し衷心感謝する。

6 参考文献

- (1) 動燃団内部資料，ナトリウム中材料試験速報(1)，SN943 71-16
- (2) 動燃団内部資料，オーステナイト不銹鋼の高温ナトリウムによる腐食（第1報），石橋 関口他。 SN941 71-03 （1971年3月）
- (3) 未発表資料（ホット・スチール・ループ1000時間コールド・ラン・データ）。
- (4) Thorley, A.W. et al., Alkali Metal Coolant, SM-85/18, IAEA, Vienna (1967)

付録 ナトリウム分析結果

ここに記す分析値はナトリウム技開室の分析グループの高荷副主任研究員他によつてなされた結果である。

表-6 低純度材料試験ループ2500時間運転時のナトリウム中不純物分析値

第1回分析 コールドトラップ温度 185℃			
第2回分析 " 258℃			
単位 (PPm)			
元 素	第1回試料	第2回資料	備 考
Cr	0.54 } < 1 0.65 }	0.39 } < 1 0.62 }	吸光度法
Fe	0.66 } < 1 0.66 }	1.18 } ~ 1 1.18 }	"
Ni	0.20 } < 1 0.37 }	0.24 } < 1 0.32 }	"
Mo	0.71 } ~ 1 1.78 }	2.00 } 2 2.24 }	"
C	8.1, 5.6 } 平均値 3.9 } 5.9	9.6 } 平均値 11.3 } 10.5	湿式酸化マンometリー法
O	10.8, 6.0 9.0 平均値 8.6	20.8, 22.0, 26.7 24.2, 26.8 平均値 24.1	水銀アマルガム法

今回の低純度材料試験ループの2500時間および1000時間試験時のコールド・トラップ温度は200℃に設定して運転を行なつたので、前記の表の試験結果から内挿により、ループ運転中の酸素濃度を単純な比例計算から求めると、12PPmという値が得られる。

2500時間連続試験中には、ループ付設のプラグ計によりプラグ温度が求められた。プラグ計の冷却速度(3±1)℃/minで、サンプリング時のコールド・トラップ温度に近接した温度条件でのプラグ温度は次に示す通りである(4回の実験値の平均値)。

コールドトラップ温度	プラグ温度	備 考
256	226℃	測定温度のバラツキは ±3℃以下である。
172	147℃	

これらのプラグ計試験結果とサンプリングによる化学分析結果との対応関係については、現在検討中である。