PNC TN8410 91－174

社内資料

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]

酸化物分散強化型フェライト鋼材の溶接試験(2)

(MA957被覆管形状の模擬による溶接試験)

1991年2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

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

Ⓣ

社　内　資　料
PNC TN8410 91-174
1 9 9 1 年 2 月

登録区分
2001. 6. -6
変更表示

酸化物分散強化型フェライト鋼材の溶接試験(2)

(MA957被覆管形状の模擬による溶接試験)

実施責任者　長井修一朗*　上村勝一郎*　飛田　典幸**
関　正之*　蔦木　浩一****　志賀　哲也*
西山　元邦*　井坂　和彦**　平子　一仁**
三島　毅***

要　　旨

(目　的)

MA957鋼被覆管を用いての溶接試験に先立ち，被覆管形状を模擬した溶接試験を行いその溶接特性，機械的性質等に関するデータを取得し，同材料の溶接特性評価の一助とする。

(方　法)

MA957鋼の棒材を被覆管形状に機械加工し，端栓との溶接をレーザ溶接法により溶接試験を行った。

(結　果)

① 従来の端栓のツバ部をテーパ型に改良することにより，溶接金属部のアンダーカットは改善された。
② 溶接金属部全周に渡り，空孔が多数観察された。
③ 引張強度については，常温で約82 kg／mm²となりSUS316相当鋼と同等値を示したが，600℃を超えると急激な強度低下を示した。また内圧バースト試験についても同様な結果が観察された。
④ 元素の分散状態としては，空孔部にチタン，イットリウムが凝集しクロムは若干減少した。

(結　論)

端栓形状を改良することによりアンダーカットは改善できたが，空孔の発生，イットリウムの凝集は解決されなかった。従って，MA957鋼の溶接は融接法であるレーザ溶接法では，健全な溶接ができないため融接法に変る溶接法を検討する必要がある。

*：核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室　**：原子力技術株式会社
：プルトニウム燃料工場管理課　*：再処理工場　化学処理二課

目　　次

Ⅰ 緒　言 …… 1
Ⅱ 試験方法 …… 2
1. 供試材料 …… 2
1.1 化学成分及び金属組織 …… 2
1.2 試験片形状 …… 4
2. 溶接試験 …… 5
2.1 使用装置及び溶接方法 …… 5
2.2 溶接条件設定試験 …… 6
2.3 最終溶接条件 …… 11
2.4 試験検査項目及び評価項目 …… 11
Ⅲ 試験結果及び考察 …… 16
1. 溶接部の外観観察結果 …… 16
2. 溶接部の寸法測定結果 …… 17
3. X線透過試験結果 …… 18
4. 溶接部断面の観察結果 …… 19
5. 硬さ測定試験結果 …… 27
6. 引張試験結果 …… 28
7. 内圧バースト試験結果 …… 30
8. 内圧クリープ試験結果 …… 32
9. 単軸クリープ試験結果 …… 35
Ⅳ 結　論 …… 38
Ⅴ 謝　辞 …… 39
Ⅵ 参考文献 …… 40

図 リ ス ト

図－1 試験片形状 …… 4
図－2 溶接方法 …… 5
図－3 断面金相・硬さ測定・引張試験片形状 …… 13
図－4 内圧バースト試験片形状 …… 14
図－5 内圧クリープ試験片形状 …… 14
図－6 単軸クリープ試験片形状 …… 15
図－7 母材の元素分析結果 …… 24
図－8 空孔部の元素分析結果 …… 25
図－9 ボンド部の元素分析結果 …… 26
図－10 ビッカース硬さ測定結果 …… 27

表 リ ス ト

表－1 MA957化学成分表 …… 3
表－2 溶接条件決定試験 …… 7
表－3 最終溶接条件 …… 11
表－4 検査方法及び評価項目 …… 12
表－5 ビード外径寸法測定結果 …… 17
表－6 X線検査結果 …… 18
表－7 引張試験結果 …… 28
表－8 内圧バースト試験結果 …… 30
表－9 内圧クリープ試験結果 …… 32
表－10 単軸クリープ試験結果 …… 35

写真リスト

写真－1　母材の金属組織 …… 3
写真－2　試験　1（レーザ集光位置：0.3mm） …… 9
写真－3　試験　1（レーザ集光位置：0.5mm） …… 9
写真－4　試験　2（レーザ集光位置：0.4mm） …… 9
写真－5　試験　3（レーザ集光位置：0.4mm） …… 9
写真－6　試験　3（レーザ集光位置：0.5mm） …… 10
写真－7　試験　4（レーザ集光位置：0.3mm） …… 10
写真－8　試験　4（レーザ集光位置：0.4mm） …… 10
写真－9　試験　5（レーザ集光位置：0.2mm） …… 10
写真－10　溶接金属部外観 …… 16
写真－11　溶接金属部断面（縦方向） …… 20
写真－12　溶接金属部断面（横方向） …… 21
写真－13　EPMA解析結果（溶接金属部，母材） …… 22
写真－14　EPMA解析結果（空孔部） …… 23
写真－15　引張試験後の試験片破断部 …… 29
写真－16　内圧バースト試験後の試験片破断部 …… 31
写真－17　内圧クリープ試験後の試験片破断部 …… 33
写真－18　内圧クリープ試験後の試験片破断部 …… 34
写真－19　単軸クリープ試験後の試験片破断部 …… 36
写真－20　単軸クリープ試験後の試験片破断部 …… 37

I 緒　　言

MA 957鋼等の分散化型フェライト鋼は，低スエリング性と高いクリープ強度から高速増殖炉の長寿命燃料被覆管として期待されている。しかし，これらの材料を使用して燃料要素として組み立てるには，溶接性に問題（溶接強度の低下，溶接欠陥の発生等）があり，その問題の解決が急務となっている。

一次試験の結果としては，圧延材（板形状）を使用しパルスTIG溶接法及びレーザ溶接法にて溶接試験を行った。その結果，パルスTIG溶接法では，溶接金属部にクラック及び空孔の溶接欠陥が発生し，機械的強度は，母材強度よりもはるかに低下することが判明した。

レーザ溶接法では，溶接金属部表面がアンダーカットになり且つ内部には，微小な空孔が発生し，Y_2O_3が凝集していたが，機械的強度は，パルスTIG溶接法よりも高い値を示したので，今後の試験方法の次第では改善できる可能性があるとの結論を得た。

そのため，本溶接試験では，MA957鋼製棒材を被覆管形状に加工したものと同組成の棒材を端栓に加工し，パルスYAGレーザ溶接装置を用い溶接を行い，その溶接特性や機械的強度に関するデータを取得することにより，同材料の溶接法開発の一助とすることを目的としている。

本報告書は，上記の溶接試験データ及び結果を試験検査項目毎にまとめたものである。

II 試 験 方 法

1. 供試材料

1.1 化学成分及び金属組織

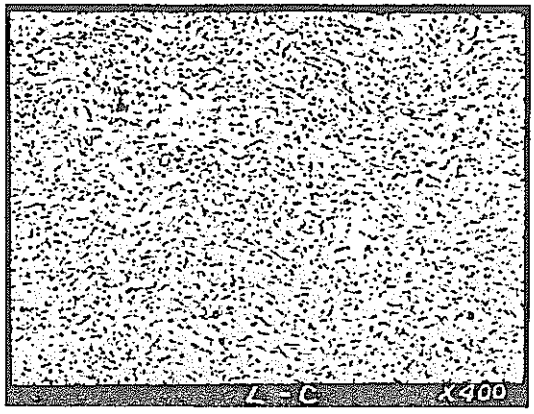
表－1は，本試験に使用した部材の化学成分を示す。また，母材の金属組織を写真－1に示す。本部材は金属組織からもわかる様に，結晶粒は加工方向に延びており，縦断面と横断面では，異方性を示している。

表−1　MA957化学成分表

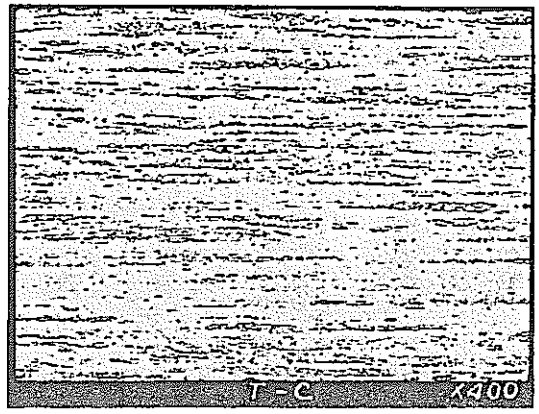
単位（WT／O）

C	Si	Cu	Fe	Mn	Cr	Ti	Al	Co	Mo	Ni	P	S	N	O
.017	.04	.04	Bal	.06	14.17	.99	.06	.03	.30	.13	≦.005	.006	.045	.22

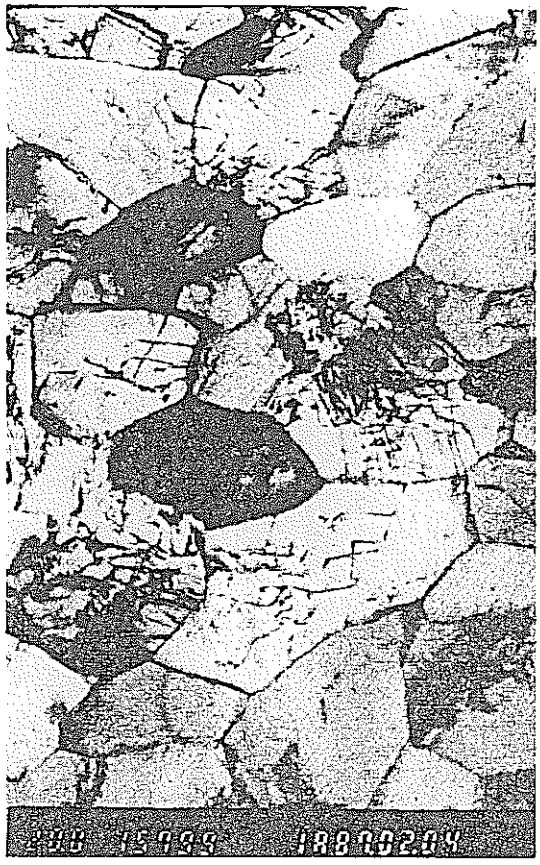
Y_2O_3：0.27



（横断面）



（縦断面）

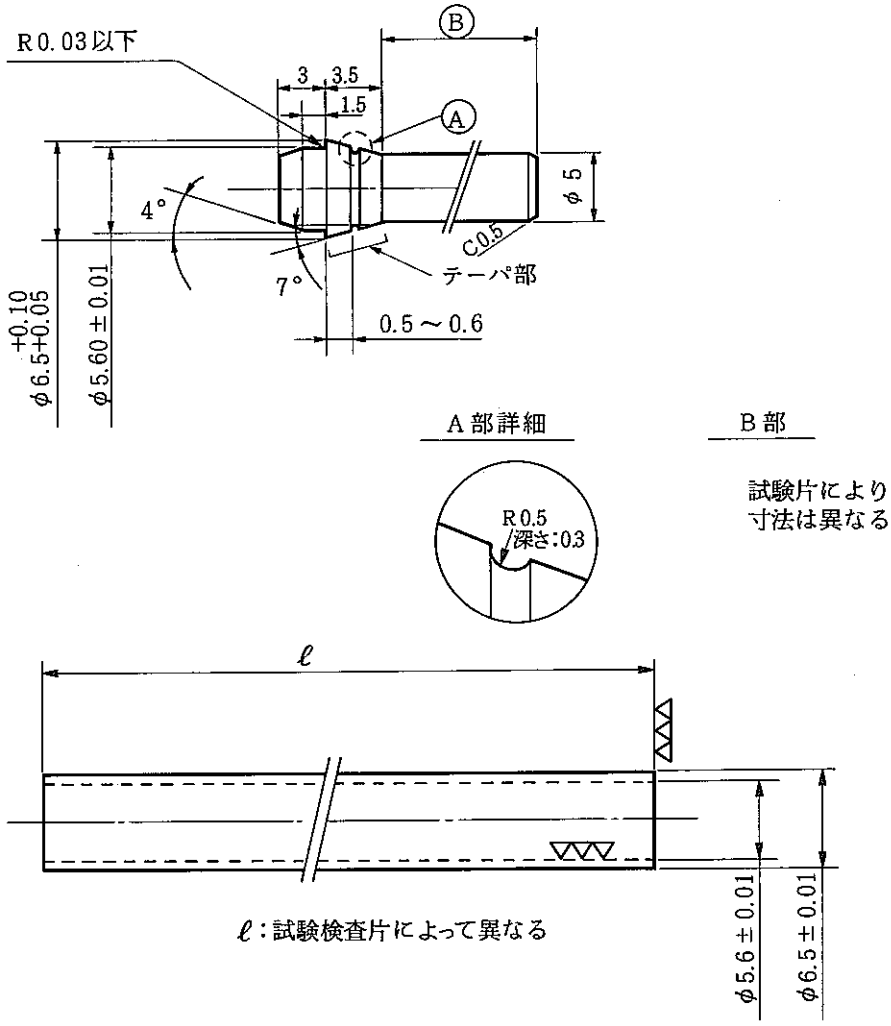


写真−1　母材の金属組織

1.2　試験片形状

米国より購入したMA957棒材を管形状及び端栓形状にそれぞれ加工して使用した。図−1に基本となる試験片形状を示す。（検査項目により試験片形状は若干異なる）

尚，検査項目に対する試験片の形状は2,4項（試験検査項目及び評価項目）で詳細に示す。



図−1　試験片形状

＊レーザ溶接で現在使用しているツバ型端栓と被覆管を溶接すると①溶接部がアンダーカットになる。②溶接部が肩だれになる。③　①，②により溶接部の強度低下につながる。と言う問題点が生じ，この問題を解決するために端栓形状を従来のツバ型から図−1に示すテーパ型[3]に改良した。

2. 溶接試験

2.1 使用装置及び溶接方法

(1) 溶接装置

本溶接試験には，パルスＹＡＧレーザ溶接装置を使用した。以下に，本装置の仕様を示す。

① 型　　式　　：　ＬＡＹ−６０３型（東芝）

② 発振素子　　：　Ｎｄ−ＹＡＧロッド

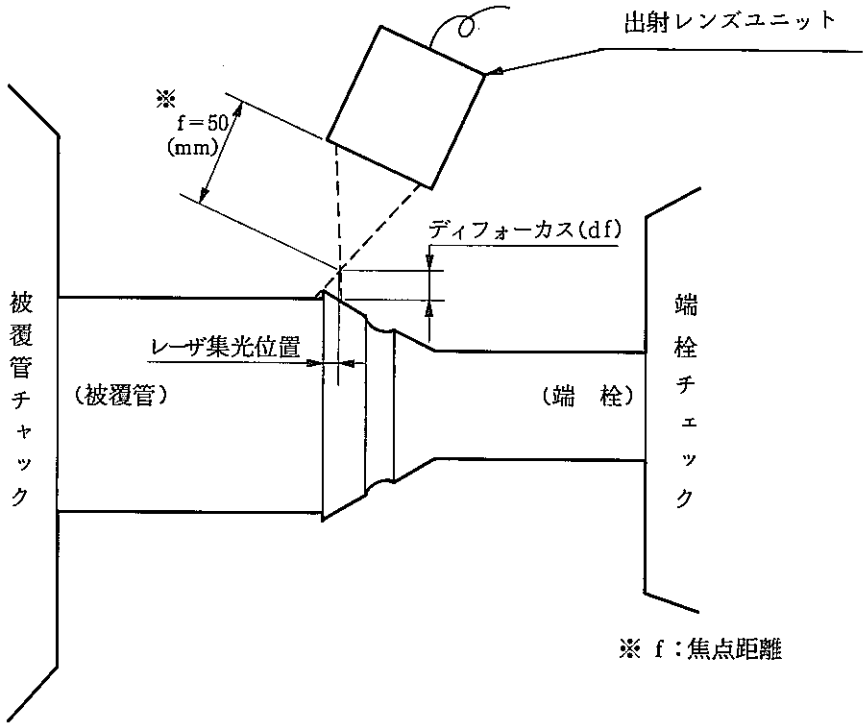
③ 発振光波長　　：　１０６μｍ

④ 最大出力エネルギー　：　３０Ｊ／Ｐ

⑤ パルス周波数　　：　　２ＰＰＳ

(2) 溶接方法

図−２に溶接方法を示す。



図−２　溶接方法

2.2 溶接条件設定試験

溶接条件を決定するために，以下に示す項目にパラメータを取り，溶接条件設定試験を行った。また，初期条件の設定は，一次試験結果を参考に決定した。

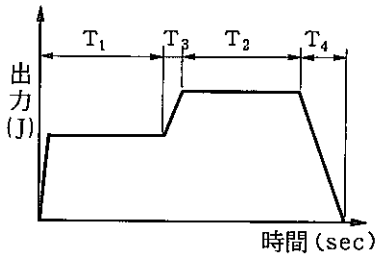
パラメータ

- パルス数
- ディフォーカス
- トーチ角度
- レーザ集光位置
- 出力（T_1, T_2）
- 時間（T_1, T_2）
- 端栓形状(幅)
- 回転数

初期条件

レンジ	パルス (PPS)	回転数 (mm/sec)	ディフォーカス (mm)	トーチ角度 (°)	レーザ集光位置 (mm)
4.5	1	0.58	3	20	0.3

	T_1	T_2	T_3	T_4
出力 (J)	11.5	35	−	−
時間 (sec)	35	33	2	4



尚，溶接条件は，以下の項目について評価し設定した。

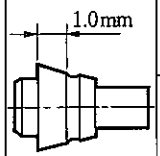
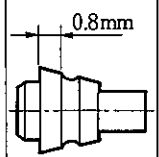
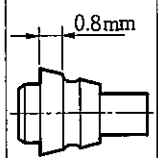
評価項目

- ビード外径（φ6.644mm以下）
- アンダーカットの発生無し
- 肩だれの発生無し
- 溶け込み量（被覆管肉厚寸法 0.47 mm以上）

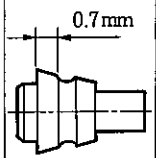
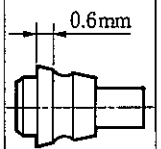
評価項目については，特殊燃料要素製造の品質管理要領書（以下「特燃製造要領書」と称す。）を基に決定した。

表－2に溶接条件設定試験結果を示す。

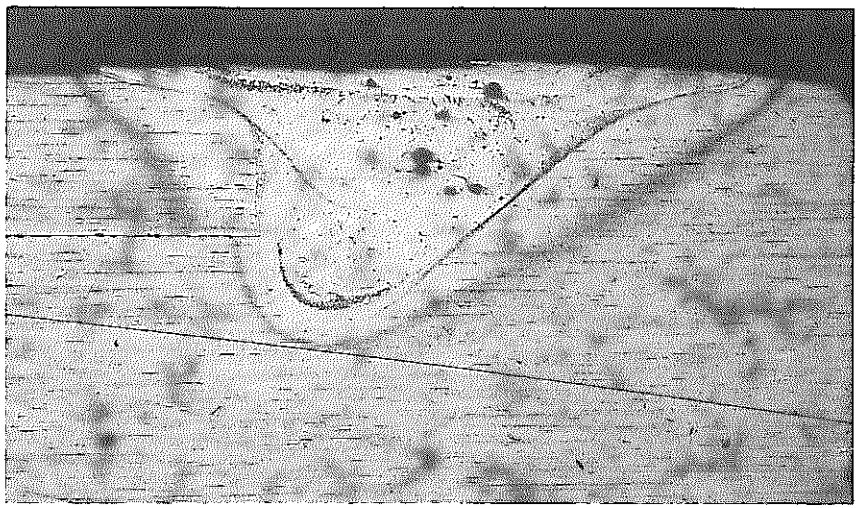
表－2　溶接条件設定試験(1)

条件等 / 試験No.	溶接条件											端栓形状	※ 観察結果					備考
	レンジ	パルス数 (PPS)	ディフォーカス (mm)	トーチ角度 (°)	レーザ集光位置 (mm)	出力(J) T_1	出力(J) T_2	時間 (sec) T_1	時間 (sec) T_2	時間 (sec) T_3	時間 (sec) T_4		ビード外径	アンダーカット	肩だれ	溶け込み量	溶け込み方	
1	4.5	1	3	20	0.3	11.5	35	35	33	2	4		×	△	—	○	○	◦断面金相写真を写真－2～写真－3に示す。 (対策) ◦ビード外径が盛り上がらないためトーチ角度を30°に変更する。 ◦端栓形状(幅)を0.8mm，レーザ集光位置を0.4mmにし溶け込み量の増加及びアンダーカットの発生を防止する。
					0.5								×	△	—	○	△	
2	4.5	1	3	30	0.4	11.5	35	35	33	2	4		○	△	—	×	○	◦断面金相写真を写真－4に示す。 (対策) ◦ビード外径が盛り上がった分，溶け込み量が減少したと思われるため溶け込み量の増加をはかるためトーチ角度を35°にしレーザ集光位置を0.4mm，0.5mmにする。またアンダーカットの対策についても上記条件で考慮する。
3	4.5	1	3	35	0.4	11.5	35	35	33	2	4		×	×	△	×	○	◦断面金相写真を写真－5～写真－6に示す。 (対策) ◦ビード外径がφ6.683mmと大きくなった(ビード外径:アウト)ためトーチ角度を30°に戻す。 ◦アンダーカットの対策としては，端栓形状(幅)を0.7mmにし溶け込み量の増加をはかるためパルス数を2PPSにしてレーザ集光位置についても0.3mm，0.4mmにする。また電圧及び時間の変更も行う。
					0.5								△	△	×	×	○	

表－2　溶接条件設定試験(2)

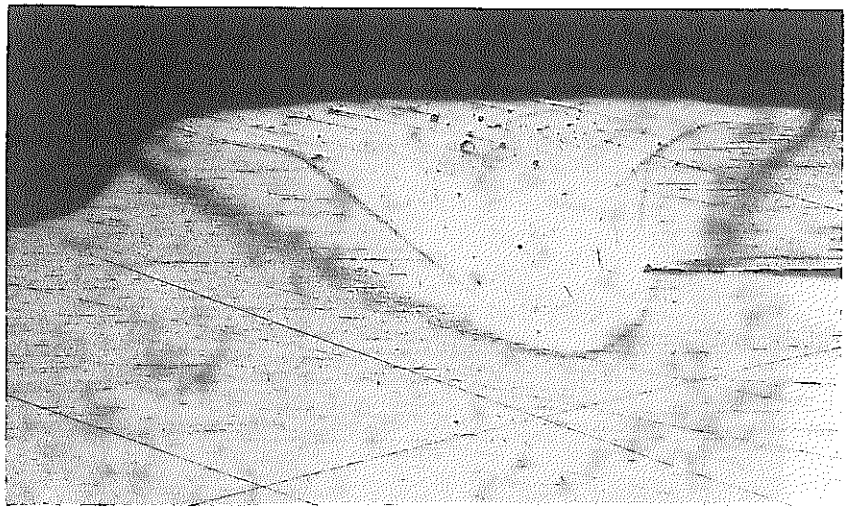
条件等 / 試験No.	溶接条件											端栓形状	※観察結果					備考
	レンジ	パルス数 (PPS)	ディフォーカス (mm)	トーチ角度 (°)	レーザ集光位置 (mm)	出力 (J)		時間 (sec)					ビード外径	アンダーカット	肩だれ	溶け込み量	溶け込み方	
						T_1	T_2	T_1	T_2	T_3	T_4							
4	4.5	2	3	30	0.3	20	32	38	38	2	6		○	○		○	○	◦断面金相写真を写真－7～写真－8に示す。 (対策) ◦レーザ集光位置0.3mmは良好であるが，0.4mmでは溶け込み方が接合部ぎりぎりであるため溶接条件にある程度の範囲をもたせたい。よって，レーザ集光位置を0.2mmにし端栓形状(幅)を0.6mmにする。また上記の条件で溶接を行った場合，溶け込み量が必要以上に増してしまうことが今までの試験経過より判断できるために出力(T_2)を若干下げることにする。
					0.4								○	○	○	○	△	
5	4.5	2	3	30	0.2	20	30	38	38	2	6		○	○	○	○	○	◦断面金相写真－9に示す。 ◦ビード外径φ6.550mm程度となりアンダーカットも発生していないということで試験5で実施した溶接条件を最良の条件と判断した。

※観察結果
○－良好
△－OUTぎみ
×－OUT



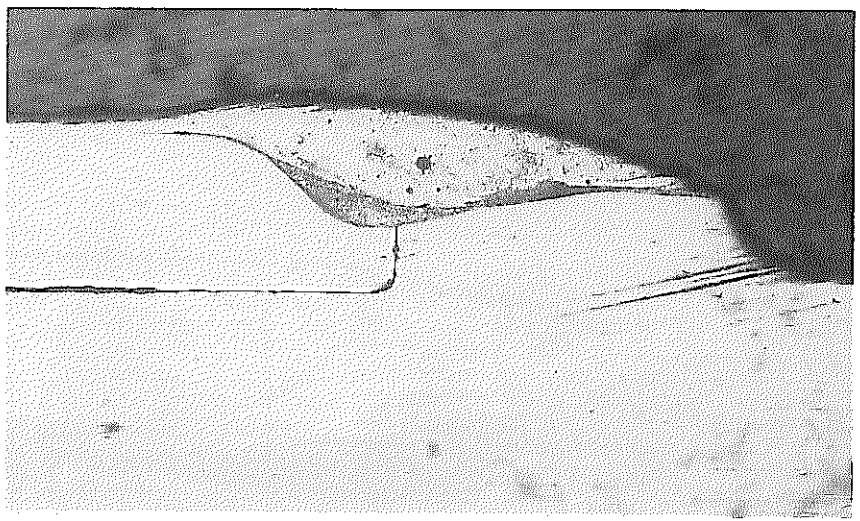
×25

写真－2　試験1（レーザ集光位置：0.3mm）



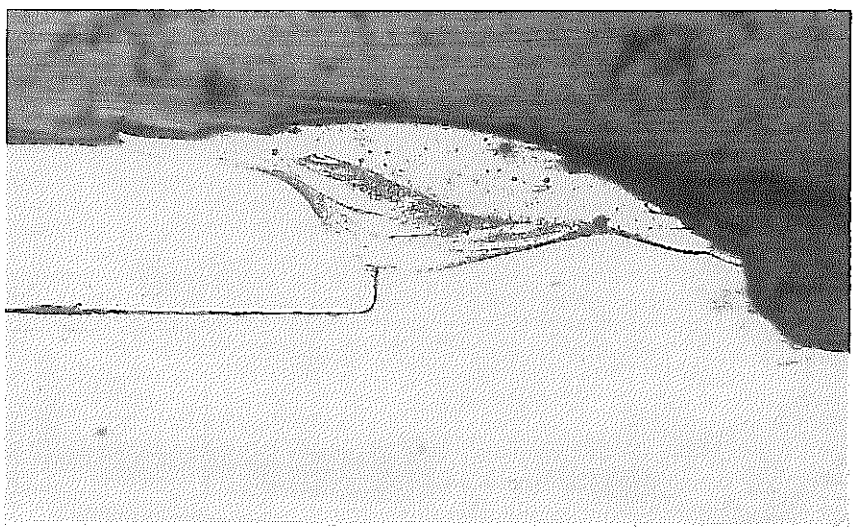
×25

写真－3　試験1（レーザ集光位置：0.5mm）



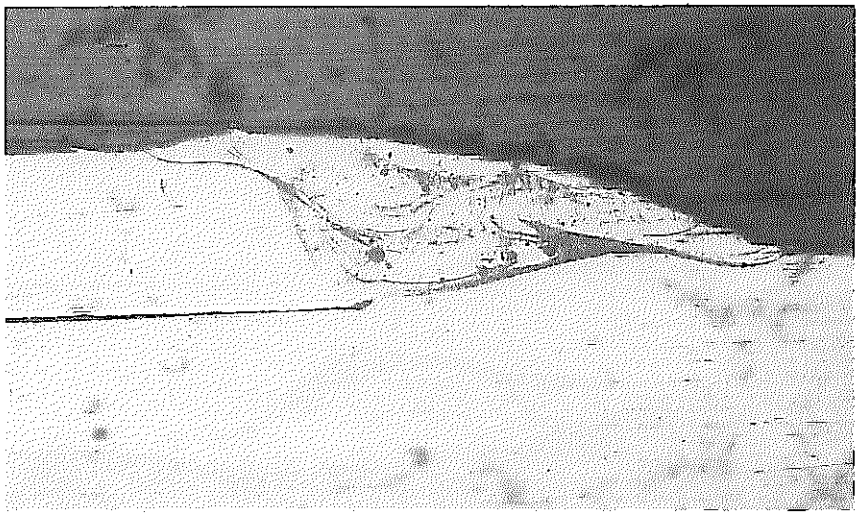
×25

写真－4　試験2（レーザ集光位置：0.4mm）



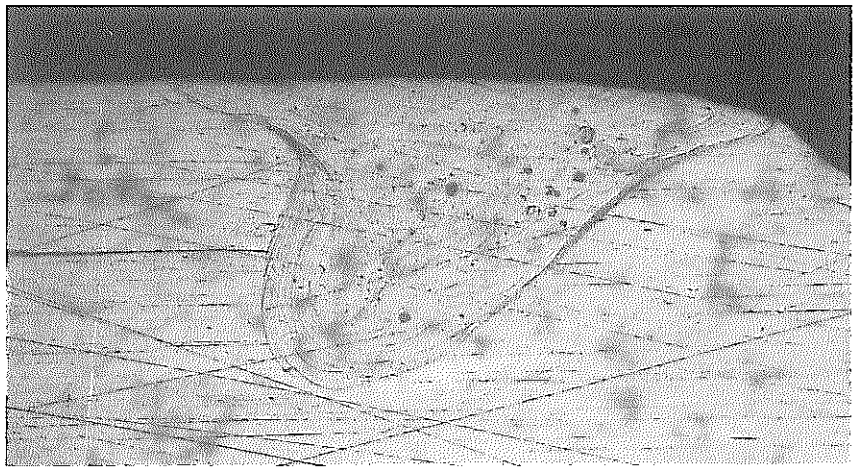
×25

写真－5　試験3（レーザ集光位置：0.4mm）



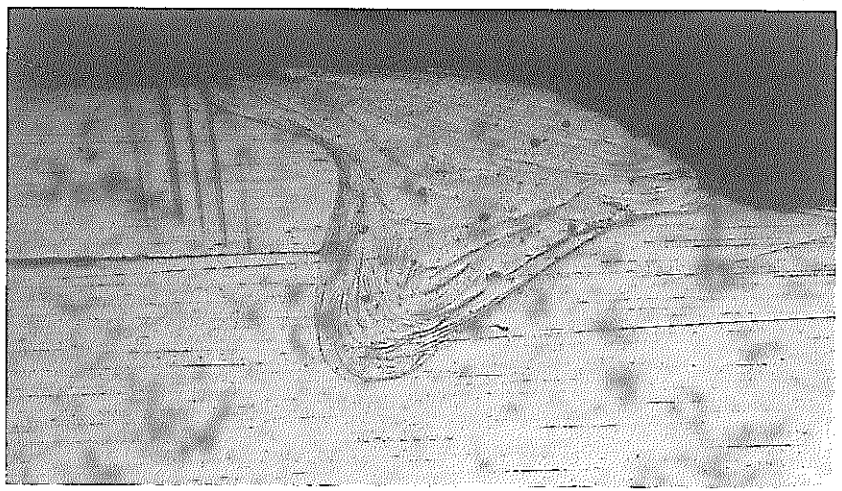
×25

写真－6　試験3（レーザ集光位置：0.5mm）



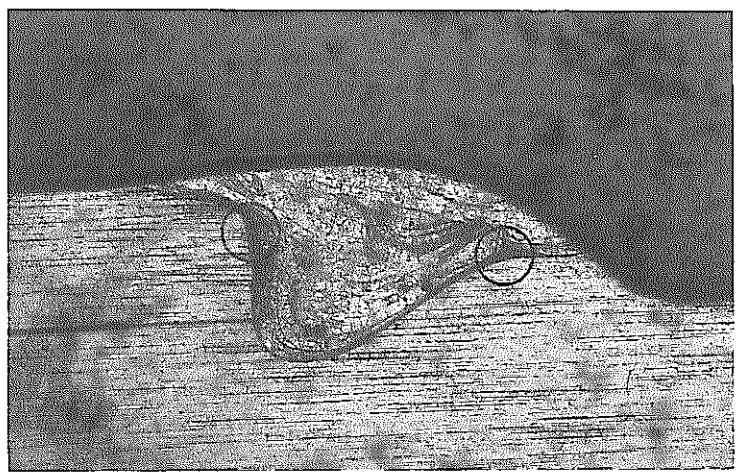
×25

写真－7　試験4（レーザ集光位置：0.3mm）



×25

写真－8　試験4（レーザ集光位置：0.4mm）



×25

写真－9　試験5（レーザ集光位置：0.2mm）

2.3　最終溶接条件

上記の溶接条件設定試験にてパラメータを取り試験を行った結果，評価項目を満足する溶接条件は表−3に示す通りである。

この溶接条件にて，各種試験検査に使用する試験片の作製を実施した。

表−3　最終溶接条件

レンジ	パルス (PPS)	回転数 (mm/sec)	ディフォーカス (mm)	トーチ角度 (°)	レーザ集光位置 (mm)		T_1	T_2	T_3	T_4
4.5	2	0.54	3	30	0.2	出力 (J)	20	26.5	—	—
						時間 (sec)	38	38	2	6

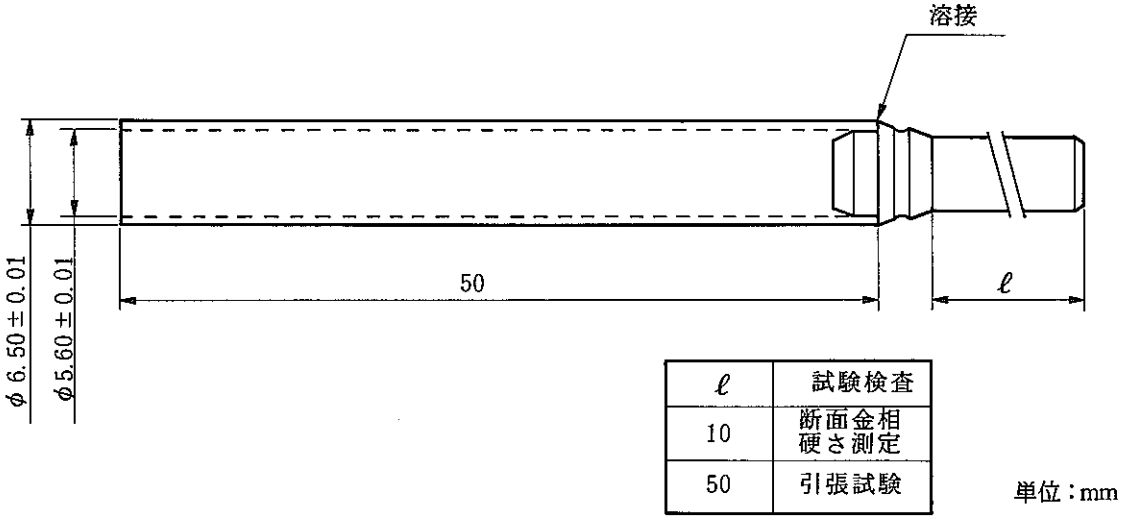
2.4　試験検査項目及び評価項目

溶接特性を評価するために，試験検査項目及び評価項目を表−4に示す。

また，試験検査に使用する試験片形状を図−3〜図−6に示す。

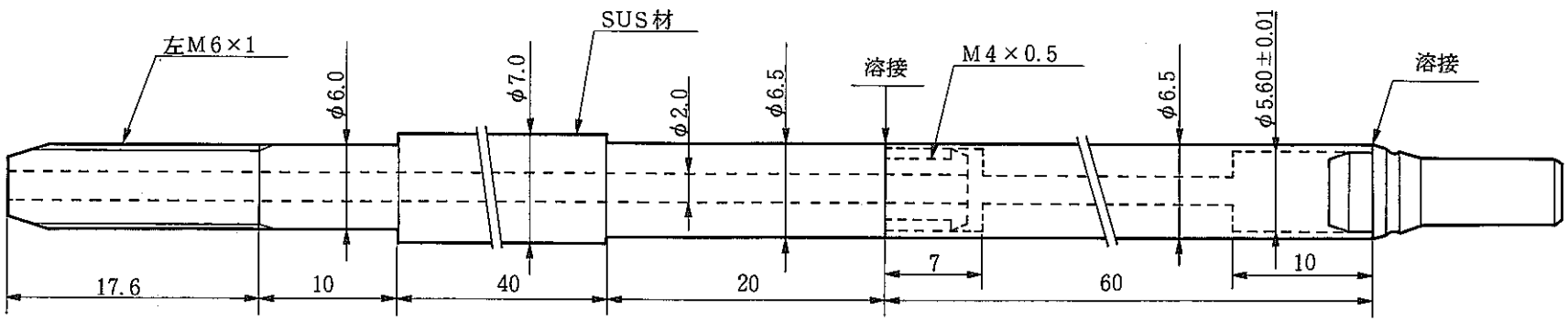
表－4　検査方法及び評価項目

検査項目		検査方法及び条件	評価項目
非破壊検査	外観検査	・目視及び顕微鏡又は，SEMにて観察する	・マイクロクラックの有無
	寸法検査	・マイクロメータ（X，Y2方向） ・拡大鏡	・ビード外径 ・ビード幅
	X線検査	・X，Y2方向撮影	・空孔の有無 ・溶け込み状態
破壊検査	金相試験	・縦，横断面2方向 ・顕微鏡，SEM使用 ・電解エッチング	・空孔の有無 ・溶け込み深さ ・欠陥の大きさ
	硬さ測定	・マイクロビッカース　荷重：300g 時間：10sec	・硬さ ・位置と硬さの対応
	引張試験	・引張速度：0.5mm／sec ・試験温度：RT，4000℃	・破断荷重 ・破断位置 ・伸び，耐力 ・破断部写真
	内圧バースト試験	・加圧速度：175kg／cm^2／min ・試験温度：RT，650℃	・破裂圧 ・破裂部写真
	内圧クリープ試験	・試験温度：650℃ ・内圧：100～400kg／cm^2	・破断時間 ・破断部写真
	単軸クリープ試験	・試験温度：650℃ ・試験時間：100,300,1000Hr目標	・破断時間 ・破断部写真
	元素分析	・EPMA使用 ・分析位置：溶接金属部及びその周辺 ・分析法　：広域スキャン ・分析元素：Y，Cr，Ti	・各元素の分散状態



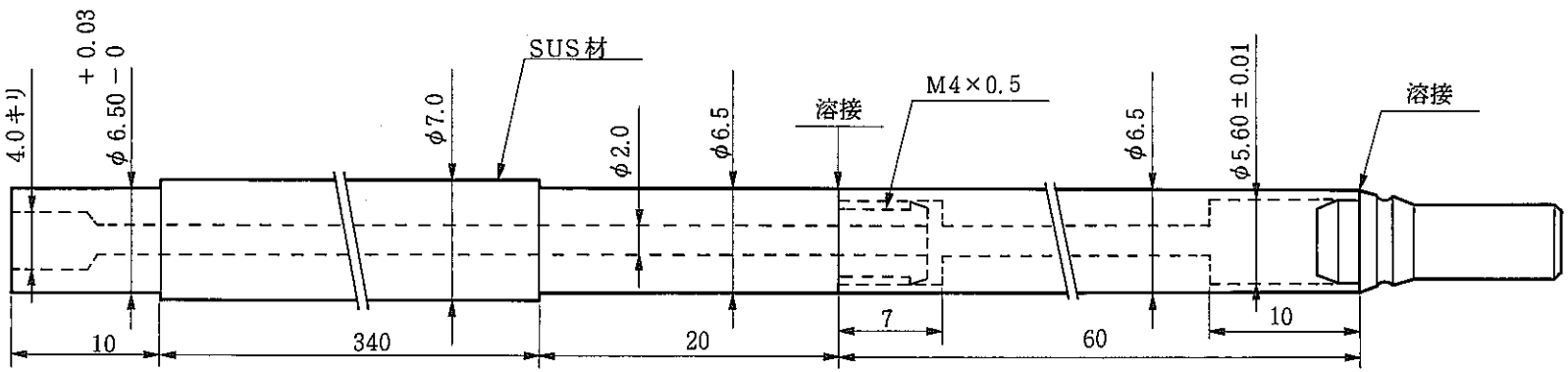
ℓ	試験検査
10	断面金相 硬さ測定
50	引張試験

図−3　断面金相・硬さ測定・引張試験片形状



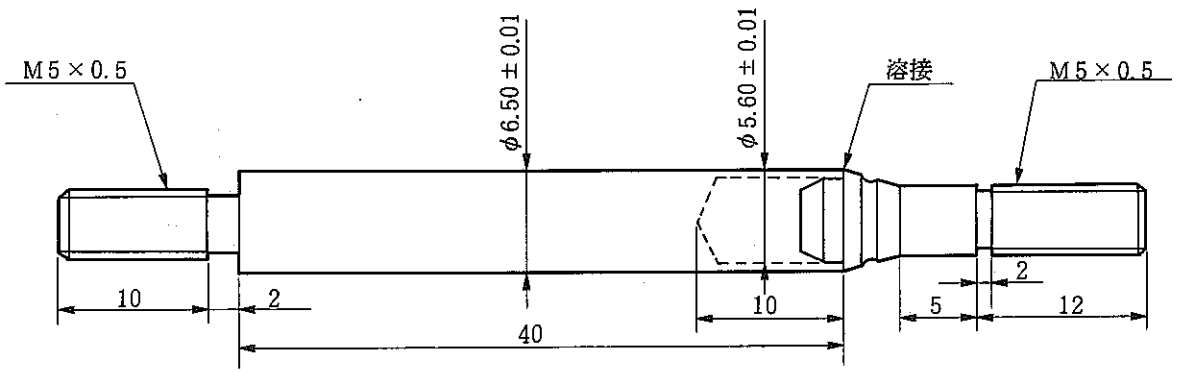
単位：mm

図－4　内圧バースト試験片形状



単位：mm

図－5　内圧クリープ試験片形状



単位：mm

図－6　単軸クリープ試験片形状

Ⅲ 試験結果及び考察

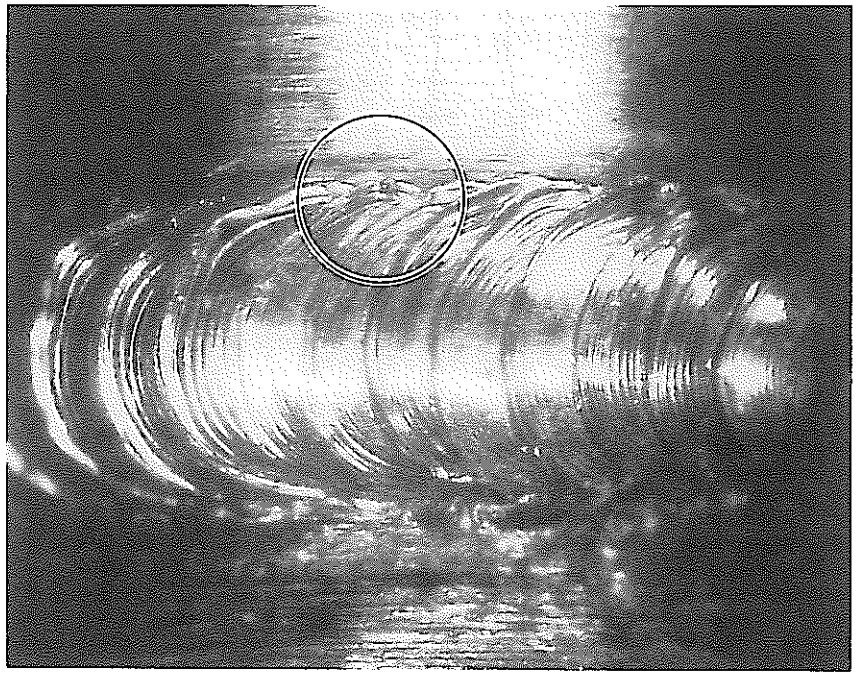
1. 溶接部の外観観察結果

光学顕微鏡を用いて溶接金属部の表面を観察した。その一例を写真－10に示す。

溶接部には，一定間隔でウエービングが観察される。これは，被覆管を一定速度で回転させながらレーザ光をパルス的に照射するために生じた現象である。

溶接金属部の表面には，アンダーカット及びクラック等の溶接欠陥は生じなかった。

被覆管側



×30

端栓部

×200

○印 拡大写真

写真－10　溶接金属部外観

2. 溶接部の寸法測定結果

マイクロメータを用いて行った溶接ビード部の外径測定結果を表－5に示す。

溶接ビード部の外径は，最高値ではφ6.570mm，最低値ではφ6.510mmとなり，全試料ともφ6.644mmのリングゲージを通過し，特燃製造要領書を満足するとともに，ビード外径の標準偏差値は，0.012と極めて小さい。この事からも溶接条件は外面的には安定していると言える。

表－5　ビード外径寸法測定結果

試料No.	ビード外径 (Max) (Min) (mm)	ビート幅 (mm)	試料No.	ビード外径 (Max) (Min) (mm)	ビート幅 (mm)	試料No.	ビード外径 (Max) (Min) (mm)	ビート幅 (mm)
2	6.542	1.5	17	6.564	1.5	45	6.534	1.5
	6.534			6.552			6.531	
3	6.540	1.5	18	6.546	1.5	62	6.535	1.5
	6.530			6.531			6.530	
4	6.543	1.5	19	6.550	1.5	64	6.552	1.5
	6.520			6.541			6.546	
5	6.545	1.5	20	6.546	1.5	69	6.542	1.5
	6.533			6.531			6.533	
6	6.542	1.5	21	6.542	1.5	73	6.560	1.5
	6.520			6.530			6.550	
7	6.555	1.5	22	6.555	1.5	79	6.531	1.5
	6.535			6.533			6.530	
8	6.556	1.5	23	6.541	1.5	81	6.532	1.5
	6.550			6.524			6.530	
9	6.542	1.5	24	6.550	1.5	86	6.550	1.5
	6.523			6.530			6.540	
10	6.556	1.5	25	6.550	1.5	108	6.556	1.5
	6.535			6.540			6.540	
11	6.570	1.5	26	6.550	1.5	110	6.520	1.5
	6.562			6.542			6.510	
12	6.550	1.5	27	6.540	1.5	$\bar{x}$	6.539	$\bar{x}$
	6.530			6.533		$\bar{V}$	0.012	1.5
13	6.522	1.5	30	6.550	1.5			
	6.510			6.540				
14	6.544	1.5	34	6.522	1 5			
	6.531			6.520				
15	6.553	1.5	36	6.550	1.5			
	6.545			6.530				
16	6.556	1.5	40	6.536	1.5			
	6.530			6.523				

3. X線透過試験結果

表－6に検査結果を示す。検査本数40本の内，29本が合格品となり11本が不合格品となった。不合格品の内訳は，空孔（φ0.3mm）2本，空洞6本及び溶け込み不良は3本であった。

不合格品の発生原因は，以下に示す事が推測できる。

(1) 空孔及び空洞について

母材内に含まれている酸素が0.22Wt％と多く，この溶存酸素が溶接時の熱により飽和状態となり，溶接部は急速に冷却されるため，空孔として残存するとものと考えられる。

空洞については，空孔が重なり合って撮影されたために生じた現象と考えられる。

(2) 溶け込み不良について

溶接条件の設定誤差により生じたと考えられる。特に，レーザ光の照射位置，ディフォーカスの長さの設定誤差及びレーザ光の発振不良が重要な因子と考えられる。

表－6　X線検査結果

No.	判　定	No.	判　定	No.	判　定
2	合　格	16	合　格	36	合　格
3	合　格	17	不合格 （溶け込み不良）	40	合　格
4	合　格	18	合　格	45	合　格
5	合　格	19	合　格	62	合　格
6	合　格	20	不合格 （空洞）	64	合　格
7	合　格	21	合　格	69	合　格
8	合　格 （空洞）	22	合　格	73	合　格
9	合　格	23	不合格 （空洞）	79	不合格 （溶け込み不良）
10	合　格	24	合　格	81	合　格
11	不合格 （空洞） （ブローホールφ0.3）	25	合　格	86	合　格
12	不合格 （空洞）	26	不合格 （ブローホールφ0.3）	108	合　格
13	不合格 （溶け込み不良）	27	不合格 （空洞）	110	合　格
14	合　格	30	合　格		
15	合　格	34	不合格 （空洞）		

4. 溶接部断面の観察結果

光学顕微鏡により溶接金属部の縦断面を観察した結果を写真－11に示し，横断面を観察した結果を写真－12に示す。

写真－11の縦断面の溶接金属部の溶け込み状態は，被覆管の肉厚以上あり充分満足する。また，空孔については0.1mm程度であり問題ない。しかし，写真－12の横断面では，0.1mm 程度の空孔が円周方向全体に渡り多数発生していた。

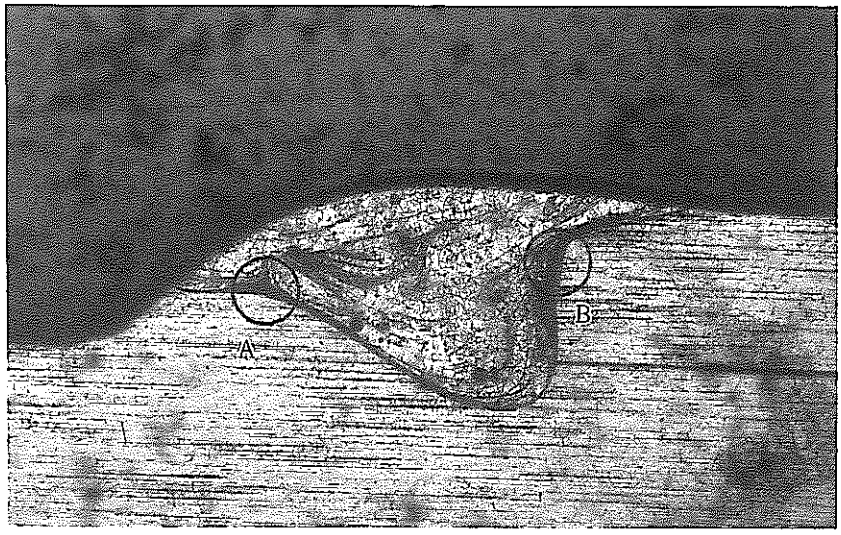
EPMAを用いて特定元素の分布状態を観察した結果を写真－13～14に示し，構成元素の定性分析結果を図－7～9に示す。

写真－13は溶接金属部と母材部のイットリウム（Y）及びチタン（Ti）の分布状態を観察した結果である。母材部では，Y及びTiは均一に分散しているが，溶接金属部では，Y及びTiは凝集していた。

写真－14は，空孔部（ブローホール部）の元素分布状態を示す。空孔では，クローム（Cr）が減少しているが，Y及びTiが凝集していることがわかる。また，この現象は図－9の定性分析結果からも確認できる。

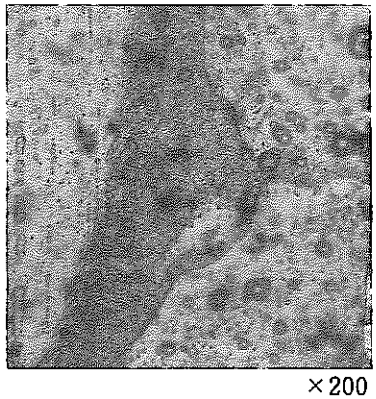
なぜ，溶接金属に空孔が発生し，空孔部には，Y及びTiが凝集するのかについて考えてみる。

本材料は，粉末冶金法にて製造され温間加工にて圧延された材料であり，母材内に溶存酸素が多く取り込まれている。この溶存酸素が溶接時の入熱により気泡化したとき，Y及びTiは酸化物の状態として添加されており融点が高く，且つ微粒子であるため，気泡の表面張力により気泡の表面に凝集し，急冷され，空孔部に残存してしまうと考えられる。空孔が0.1mmと微小な原因としては，レーザ光がパルス的に照射されるため，溶接部全体の入熱量が極めて少なく，冷却速度が速いためと考えられる。



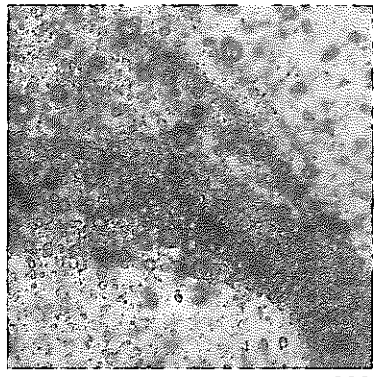
×25

A 部



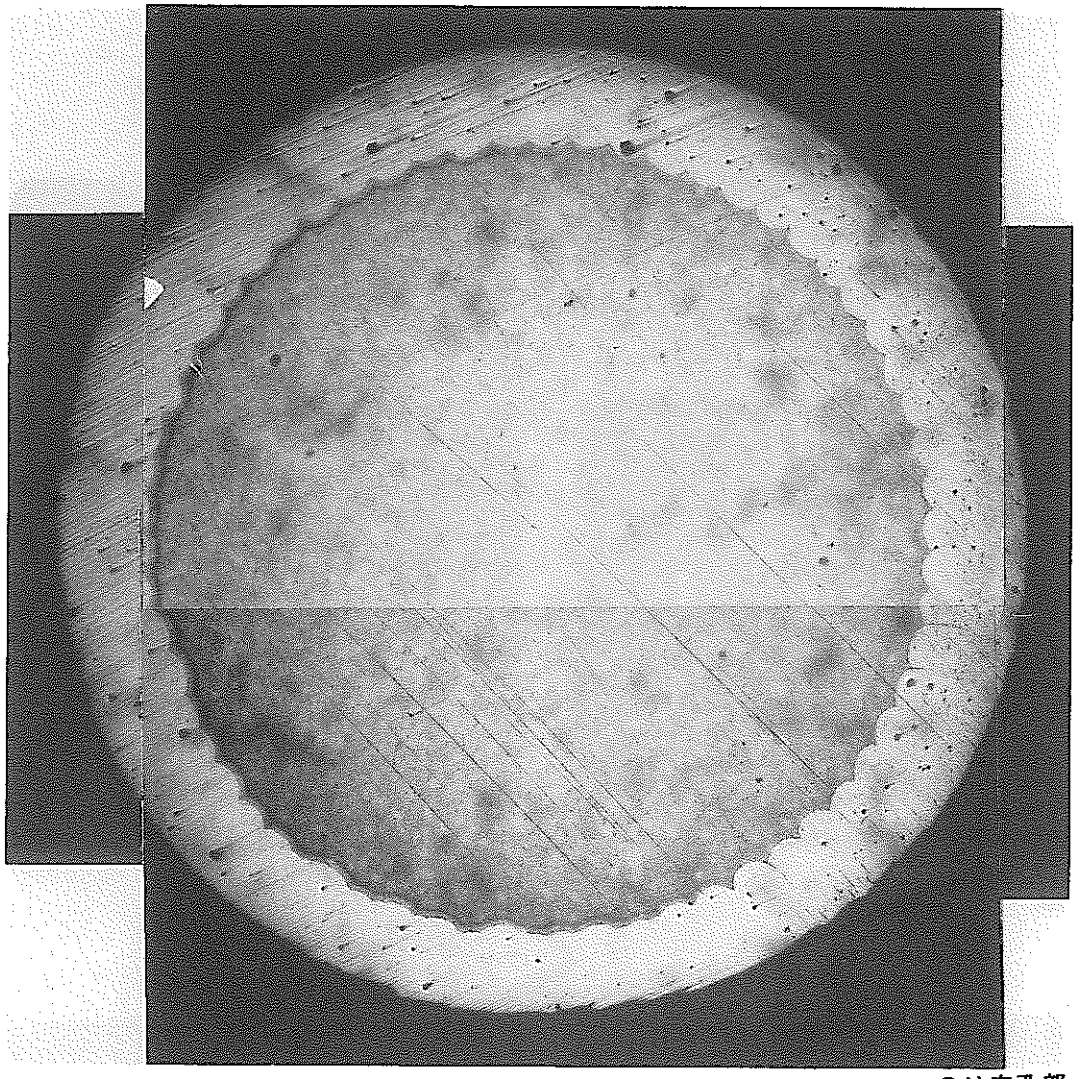
×200

B 部



×200

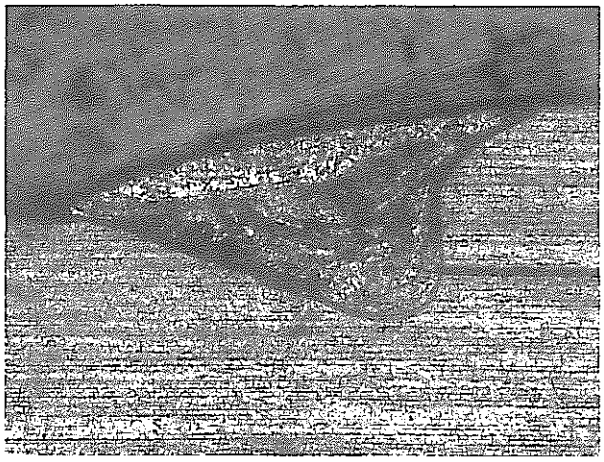
写真－11　溶接金属部断面（縦方向）



●は空孔部

写真－12　溶接金属部断面（横方向）

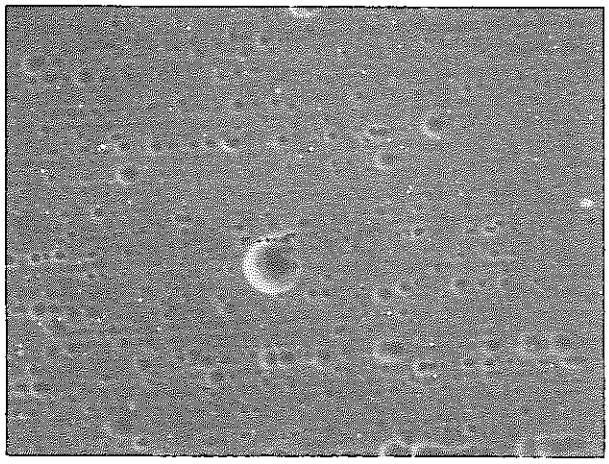
光学顕微鏡像



×50

溶接金属部

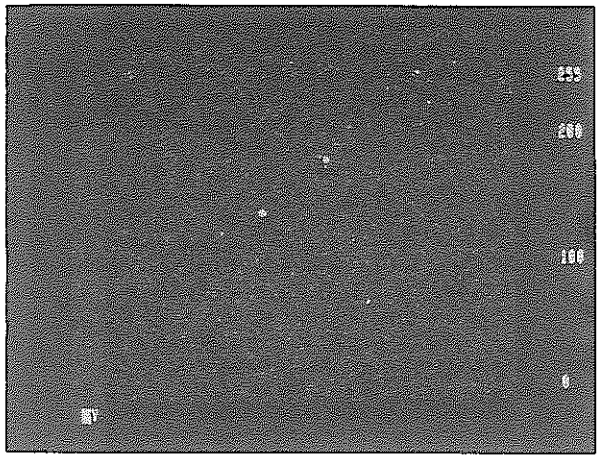
SEM像



10μm

×1000

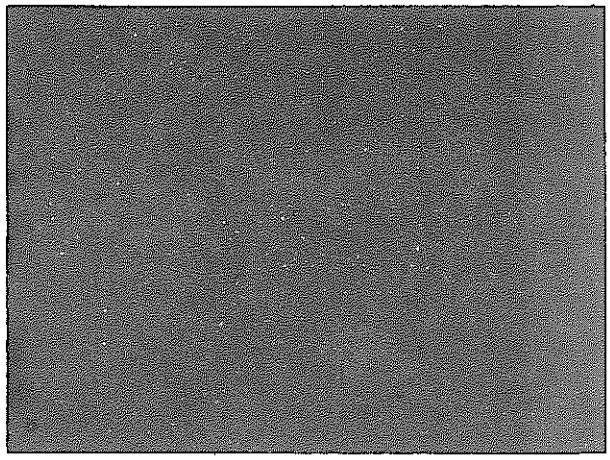
母材部



×40

白点がY分布

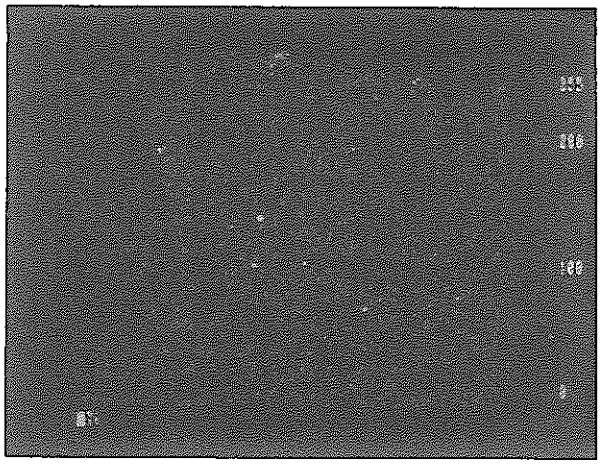
X線像



10μm

×1000

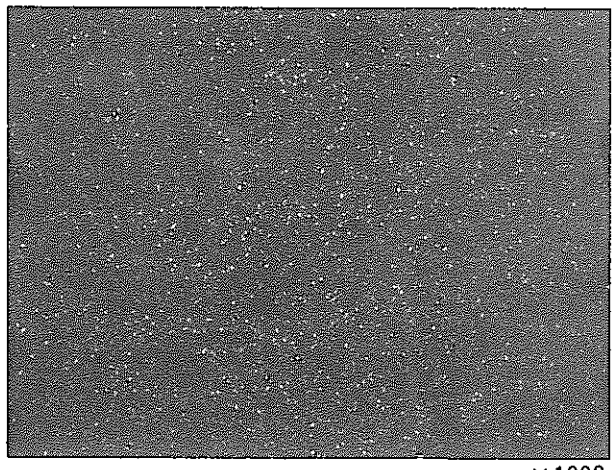
白点がY分布



×40

白点がTi分布

X線像



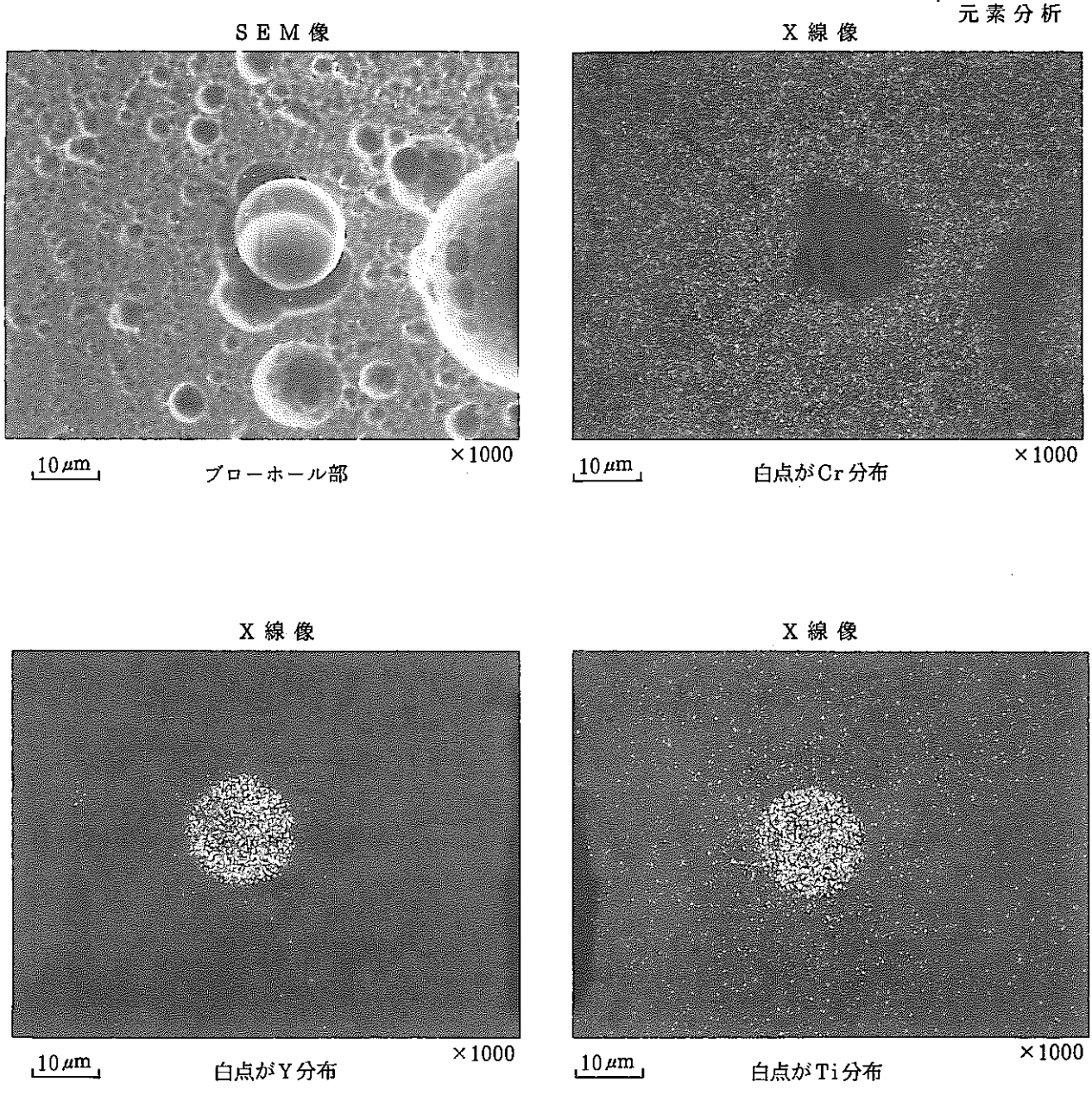
10μm

×1000

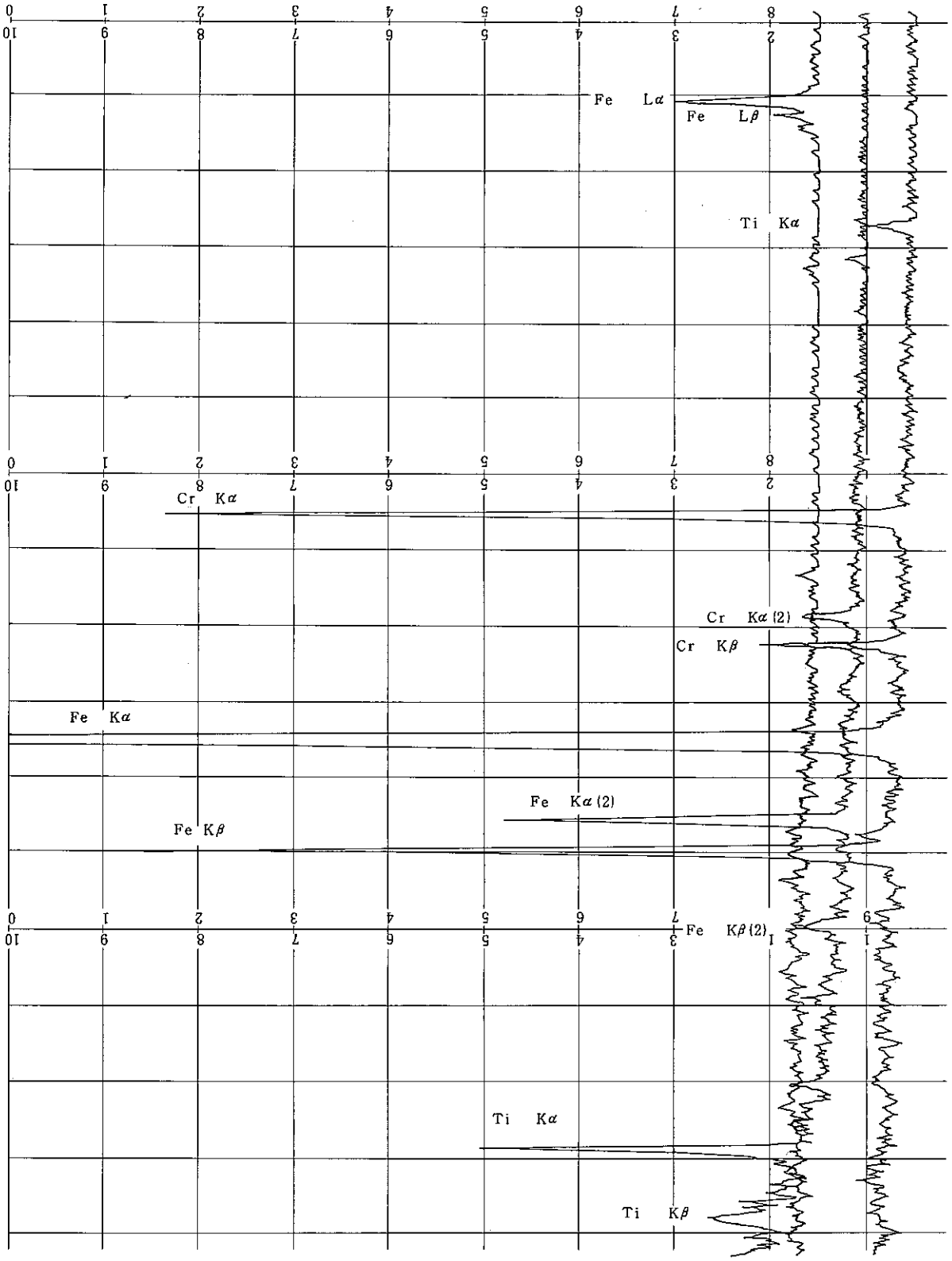
白点がTi分布

写真−13　EPMA解析結果（溶接金属部，母材）

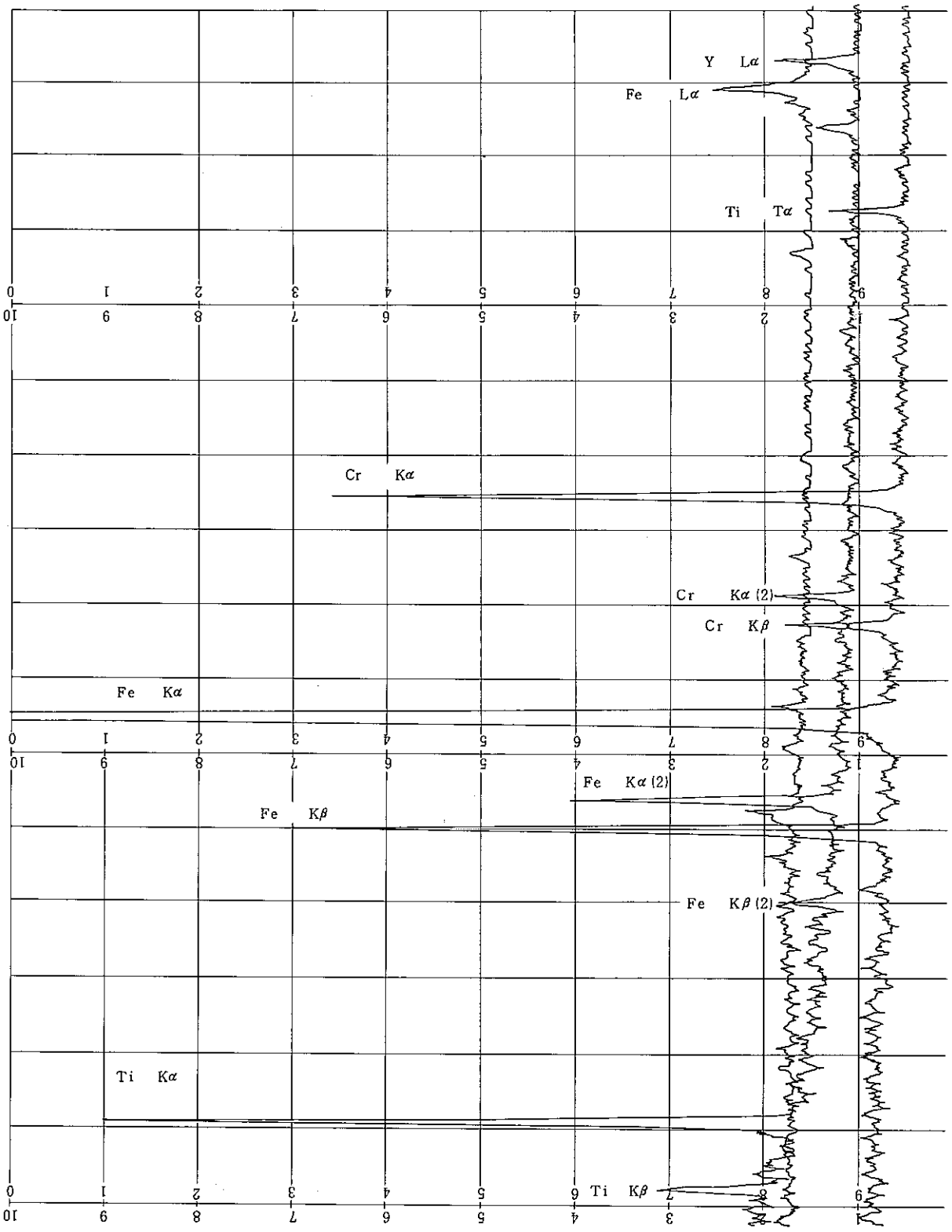
元素分析



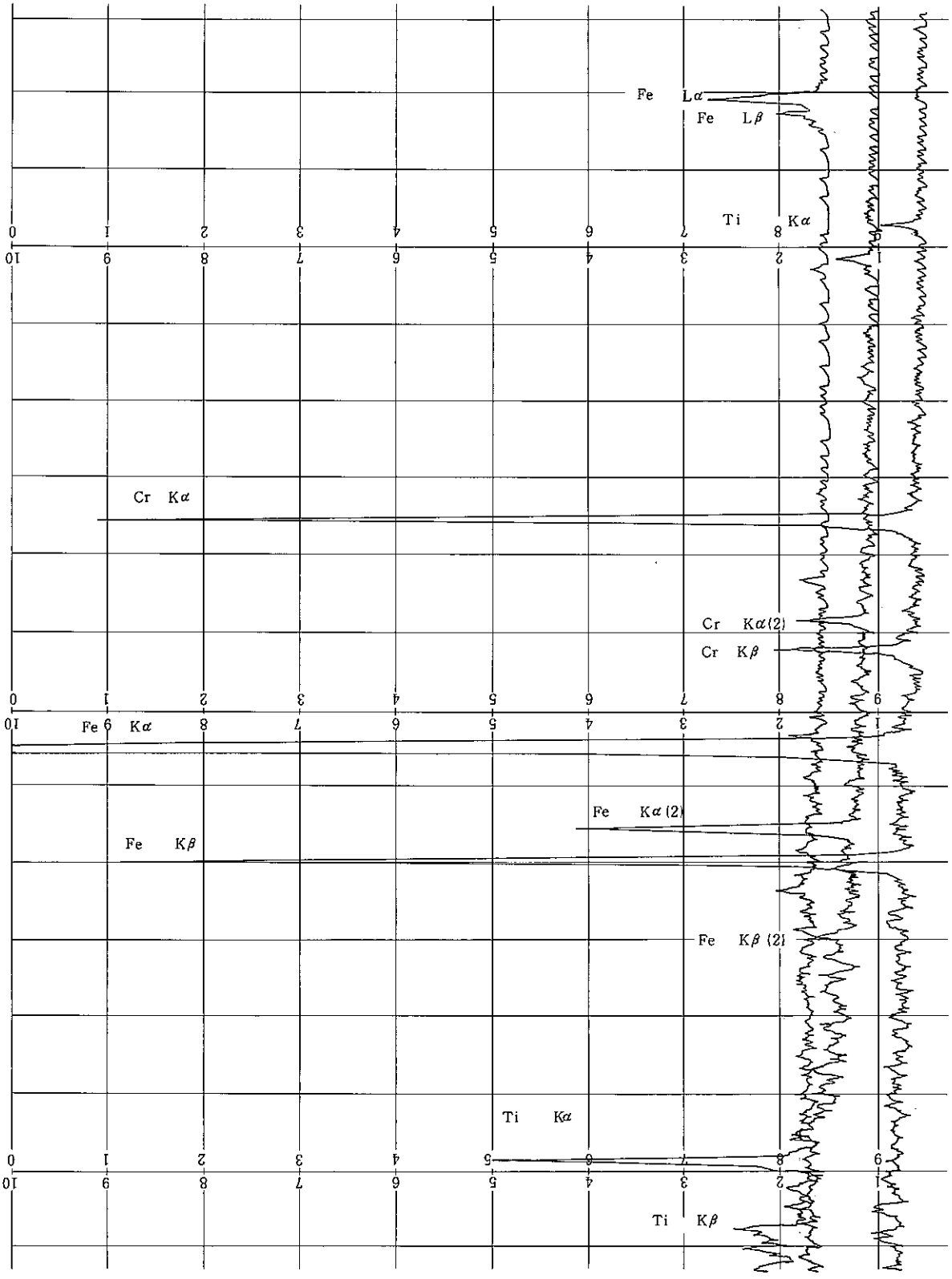
写真−14　EPMA解析結果（空孔部）



図−7　母材の元素分析結果



図−8　空孔部の元素分析結果



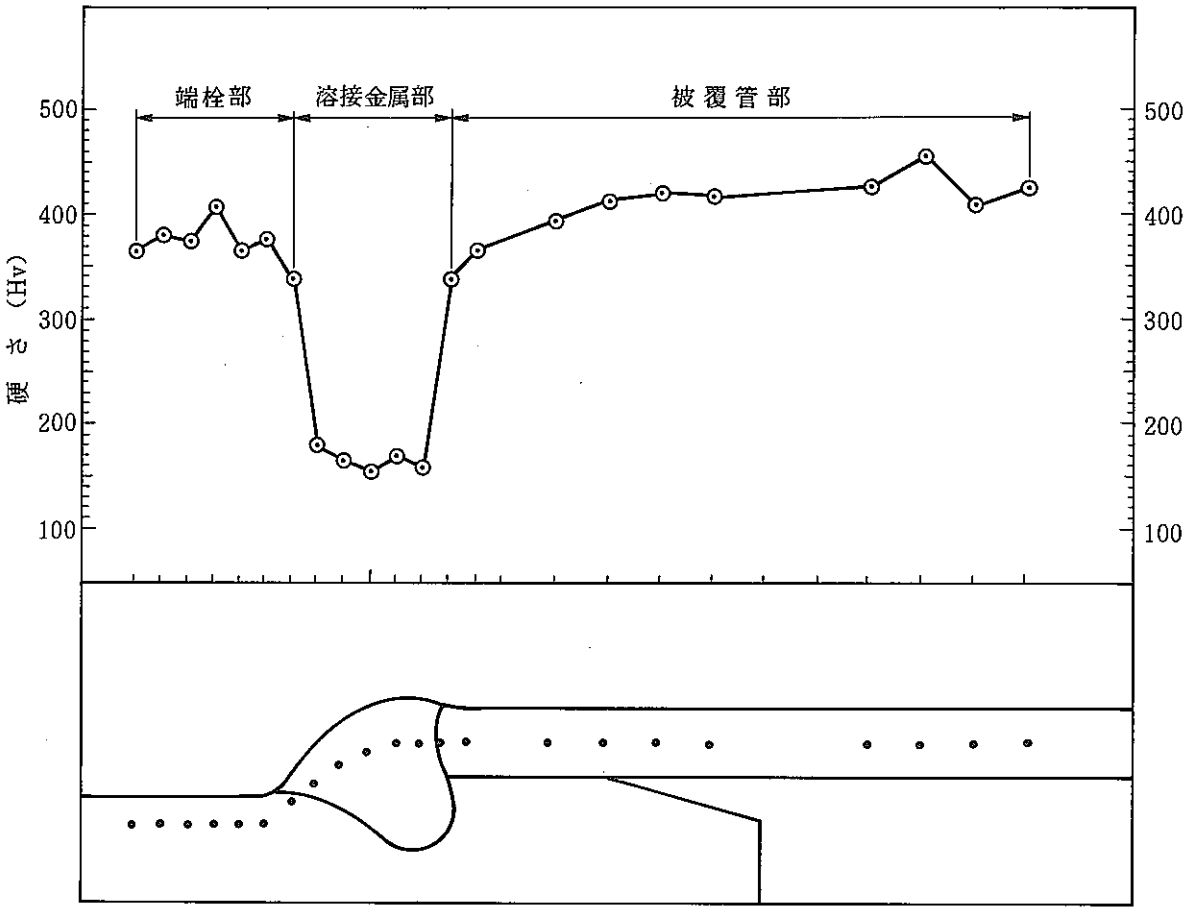
図−9　ボンド部の元素分析結果

5. 硬さ測定試験結果

図－10には，マイクロビッカース硬度計を用いて，溶接金属部近傍の縦断面の硬さ分布を測定した結果を示す。

母材の硬さは，約380Hvに対 して溶接金属部の硬さは約160Hvと大幅に低下した。
低下した原因としては，次に示す事が考えられる。

本部材（棒材）は製作工程において，温間処理により絞り加工を数回に渡り実施しており，棒材自体は加工度が増し，加工硬化が生じている。その加工硬化した部材を溶接する事より，加工度が減少し，溶接金属部はフェライト地になり，硬さが減少したと考えられる。



図－10　ビッカース硬さ測定結果

6. 引張試験結果

引張試験結果を表－7に示す。また，破断部の写真を写真－15に示す。

引張強さは，試験温度　常温（RT）から500℃までは，SUS316相当鋼と同等の値を示したが，600℃を越えると急激な強度低下を示した。

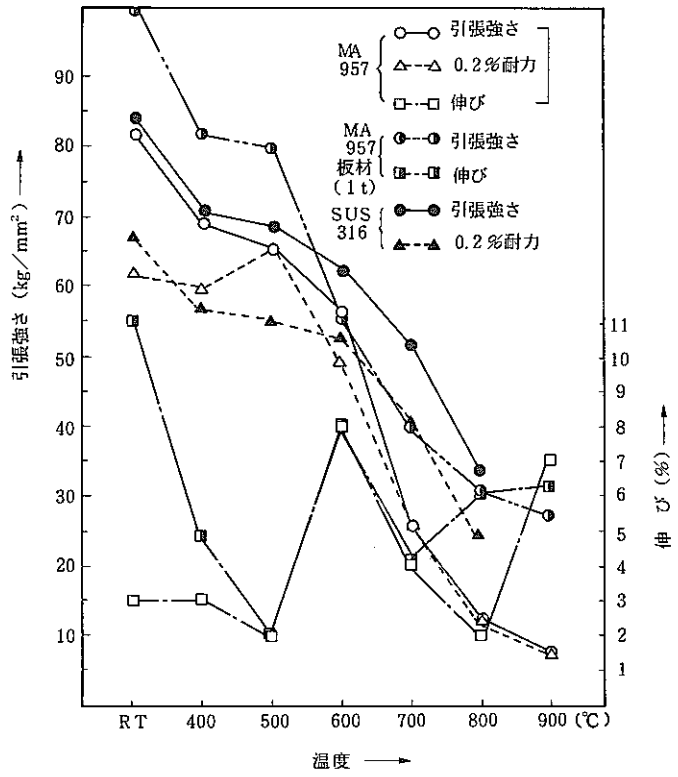
0.2%耐力については，引張強さと同様な傾向を示した。しかし，400℃ではSUS 316相当鋼よりも強いことがわかった。

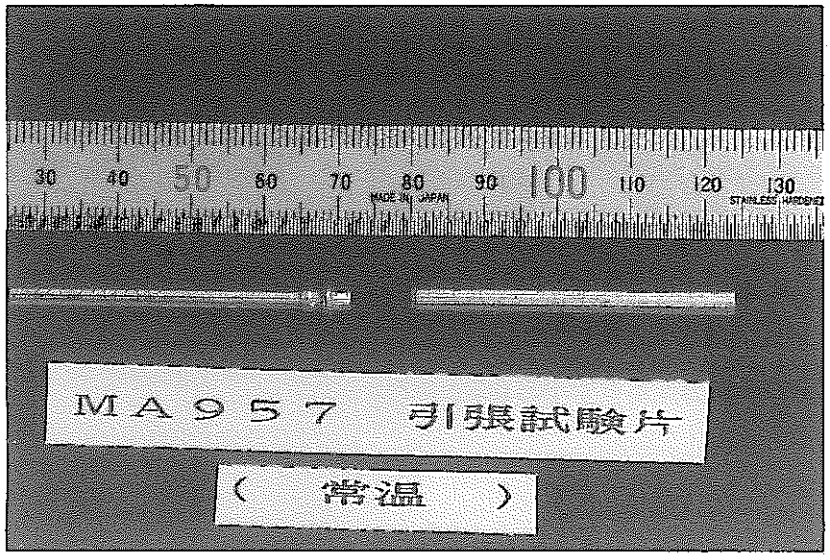
伸びについては，600℃で急激に伸びている。これは，破断位置が母材であるため，母材の特性と考えられる。

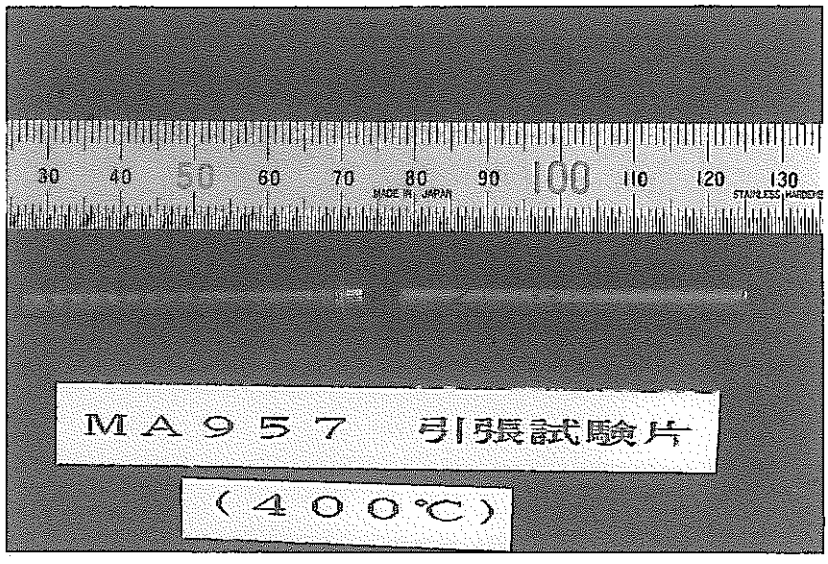
本部材は，溶接（融接）等の加工を施すと特に高温強度（600℃以上）が劣る事がわかった。その主原因としては，溶接金属部の硬さ低下に問題が有ると考えられる。そのため，硬さが低下しない溶接法を検討する必要があると思われる。

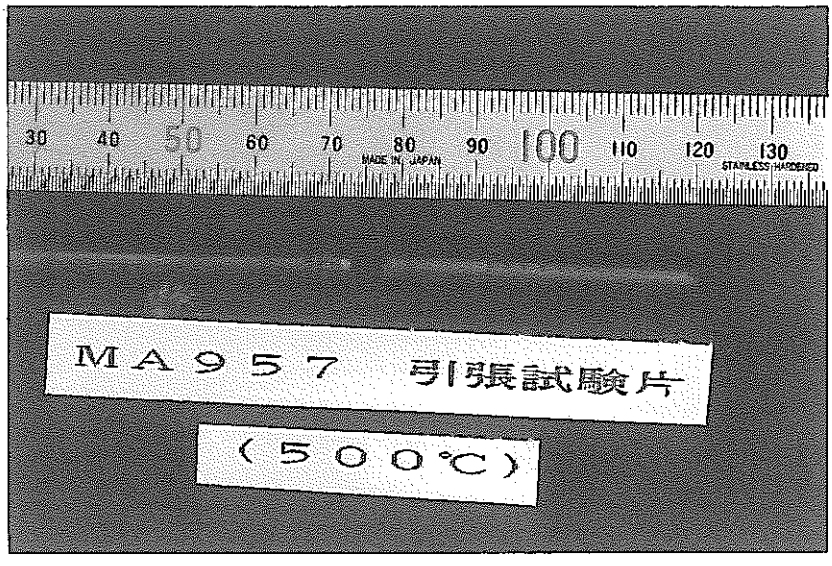
表－7　引張試験結果

温度（℃）	NO	（kg）	引張強さ（kg／mm²）	0.2%耐力（kg／mm²）	伸び率（%）	破断位置
RT	2	697.02	81.52	62.34	3	ビード部
400	3	590.47	69.06	59.62	3	ビード部
500	5	561.29	65.65	65.50	2	ビード部
600	30	482.24	56.40	49.12	8	管　部
700	22	222.22	25.99	25.38	4	ビード・管部
800	24	108.58	12.70	11.99	2	ビード・管部
900	4	67.03	7.84	7.84	7	ビード部









写真－15　引張試験後の試験片破断部

7. 内圧バースト試験結果

内圧バースト試験結果を表−8に示す。また，破断部の写真を写真−16に示す。

試験温度（常温）では，SUS316相当鋼よりも高い値を示したが，650℃では，SUS316相当鋼よりも約500 kg／cm²も低くなった。

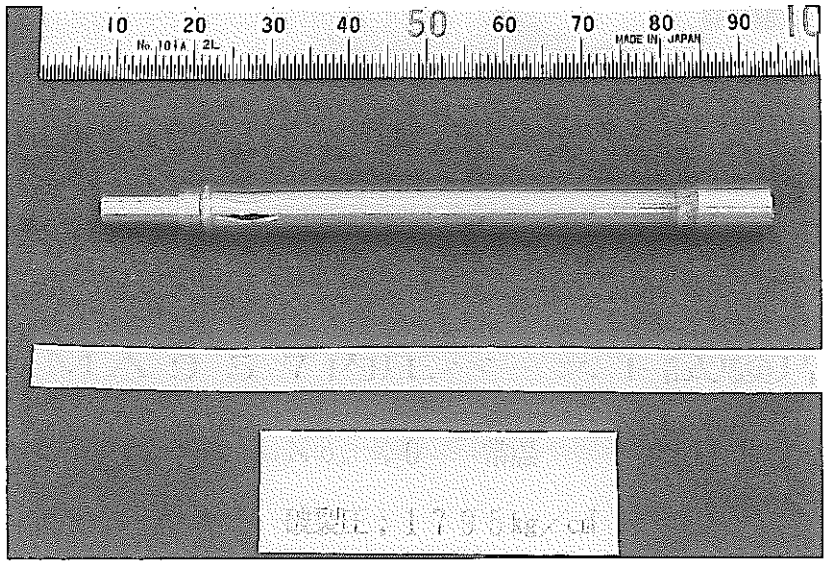
破断位置については，室温では管部から破断しているが，650℃では管部から破断が始まり，次に溶接部の円周方向に沿って破断している。

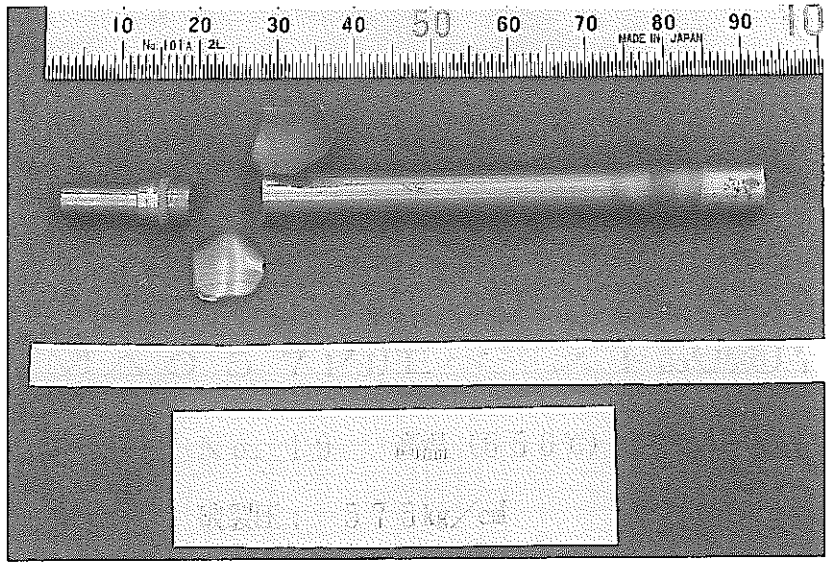
本試験では，溶接部の強度よりも母材の高温強度の低下に問題があり，高精度のデータを取得するには，母材の特性を改善する必要があることがわかった。

表−8　内圧バースト試験結果

単位：kg／cm²

材質＼温度	常温	650℃
MA 957	1795	575
SUS316相当鋼	1650	1100





写真－16　内圧バースト試験後の試験片破断部

8. 内圧クリープ試験結果

内圧クリープ試験結果を表－9に示す。また，破断部の写真を写真－17，18に示す。

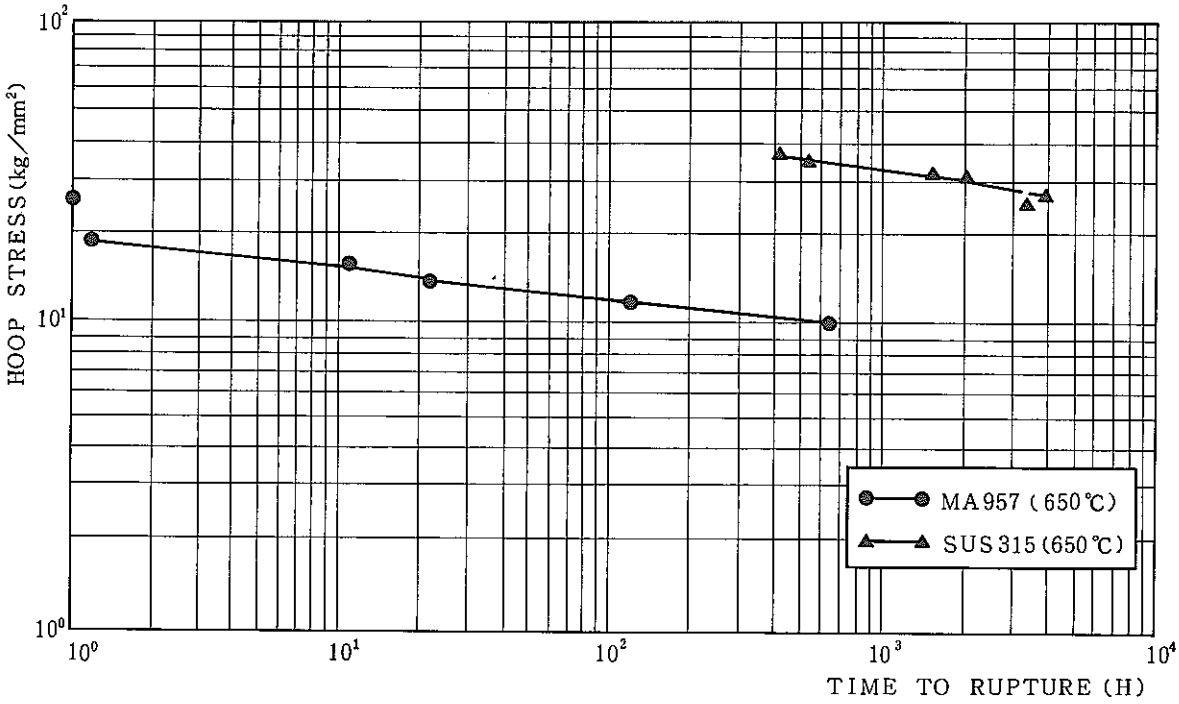
試験温度は650℃一定にし，応力を10 kg／mm²から26 kg／mm²にパラメータを取り試験を行った。その結果，SUS 316相当鋼と比べ大幅に強度は低い。また，応力26 kg／mm²の破断位置は溶接金属部であったが，それ以外の試料は全て管部から破断し，しかも破断部は軸方向にのび，且つ応力が低くなるにつれピンホール的な破壊現象を示した。

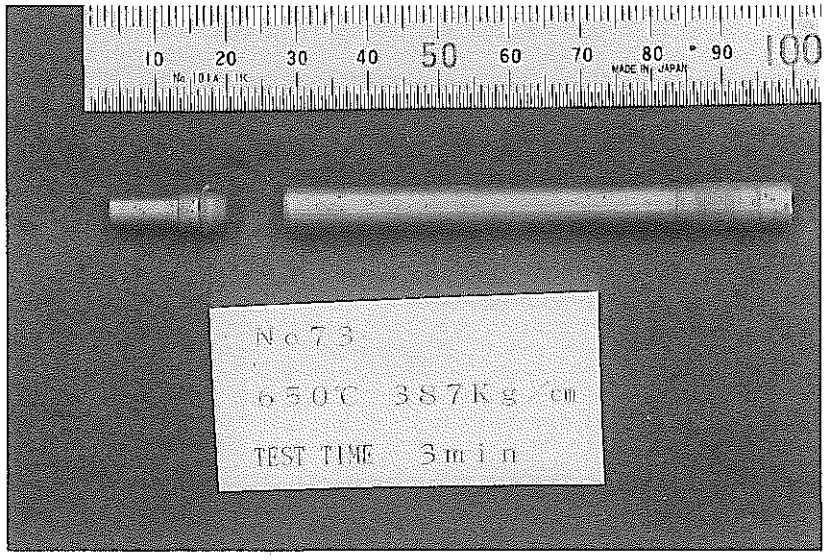
この様な現象は，本部材の金属組織からも推察できるように，組織の異方性に原因が有ると考えられる。

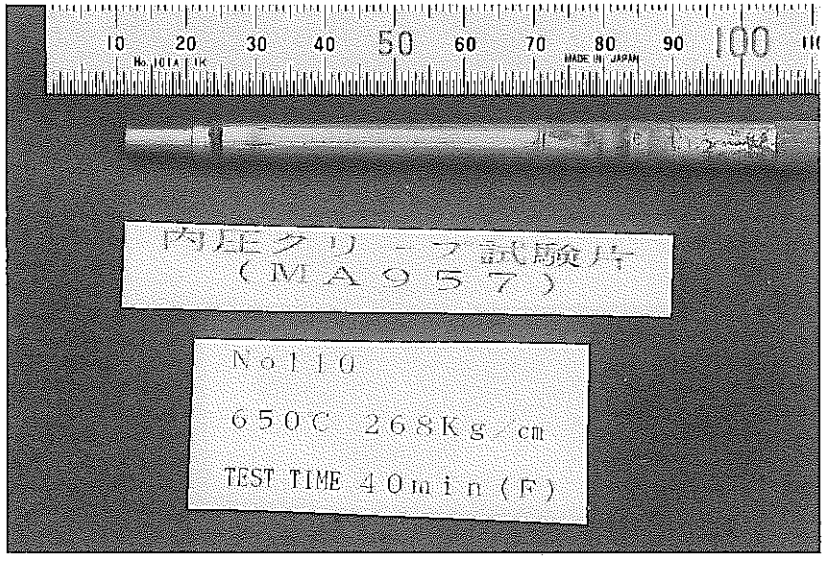
尚，本部材を用いて10,000時間等の長時間試験を行うには，内部応力は7 kg／mm² 以下と極端に低くする必要がある。

表－9　内圧クリープ試験結果

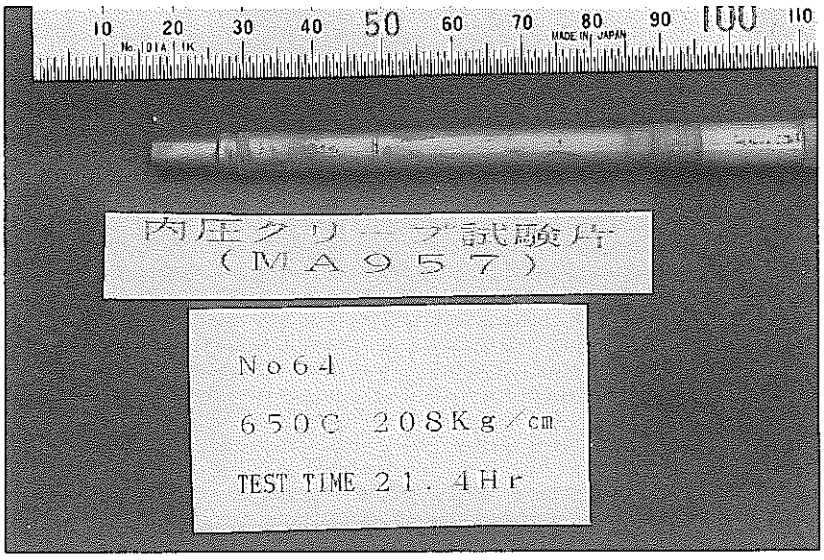
応　力（kg／mm²）	圧　力（kg／cm²）	破　断　時　間	破　断　位　置
26	387	3 (min)	溶接金属部
18	268	40 (min)	管　部
16	238	11 (h)	管　部
14	208	21.4 (h)	管　部
12	179	118.2 (h)	管　部
10	149	612 (h)	管　部

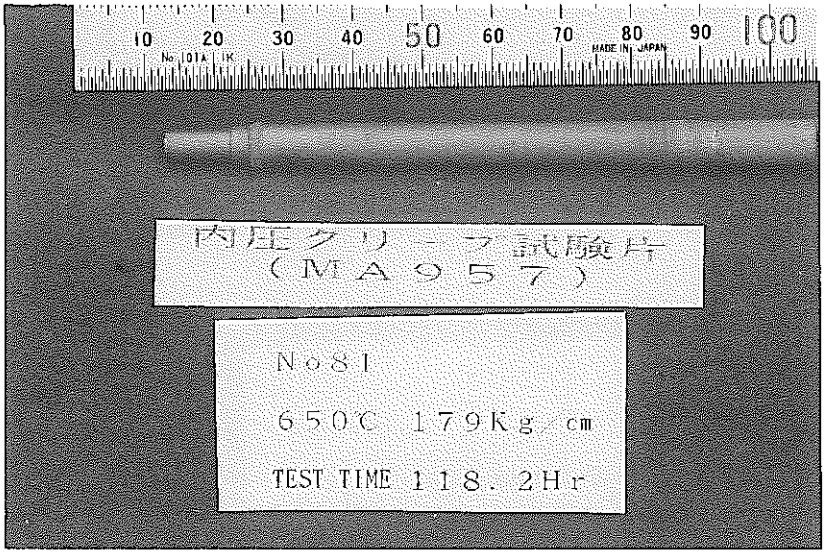


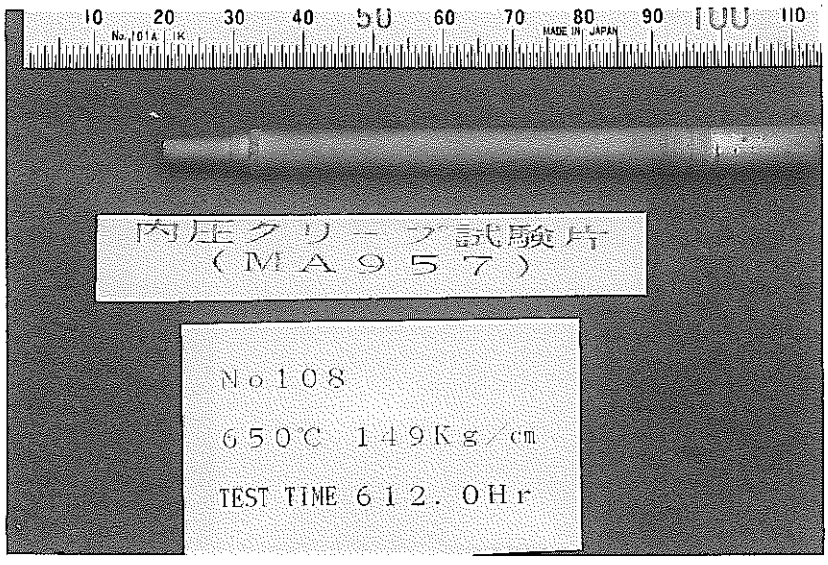




写真−17　内圧クリープ試験後の試験片破断部







写真－18　内圧クリープ試験後の試験片破断部

9. 単軸クリープ試験結果

単軸クリープ試験結果を表－10に示す。また，破断部の写真を写真－19, 20に示す。

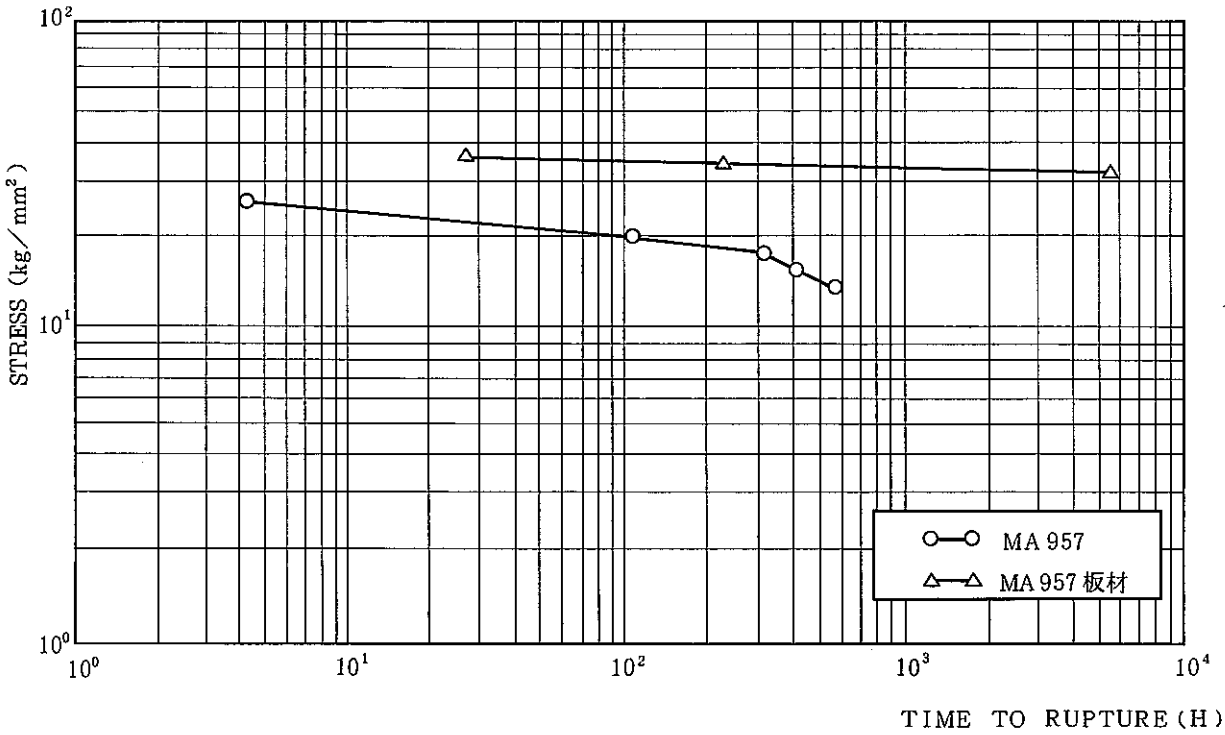
試験応力は，14 kg／mm² ～ 20 kg／mm² まで変化させて試験を行った。その結果，同材料の板材で実施したクリープ強度よりも低く，且つ長時間側では極端に低下している。

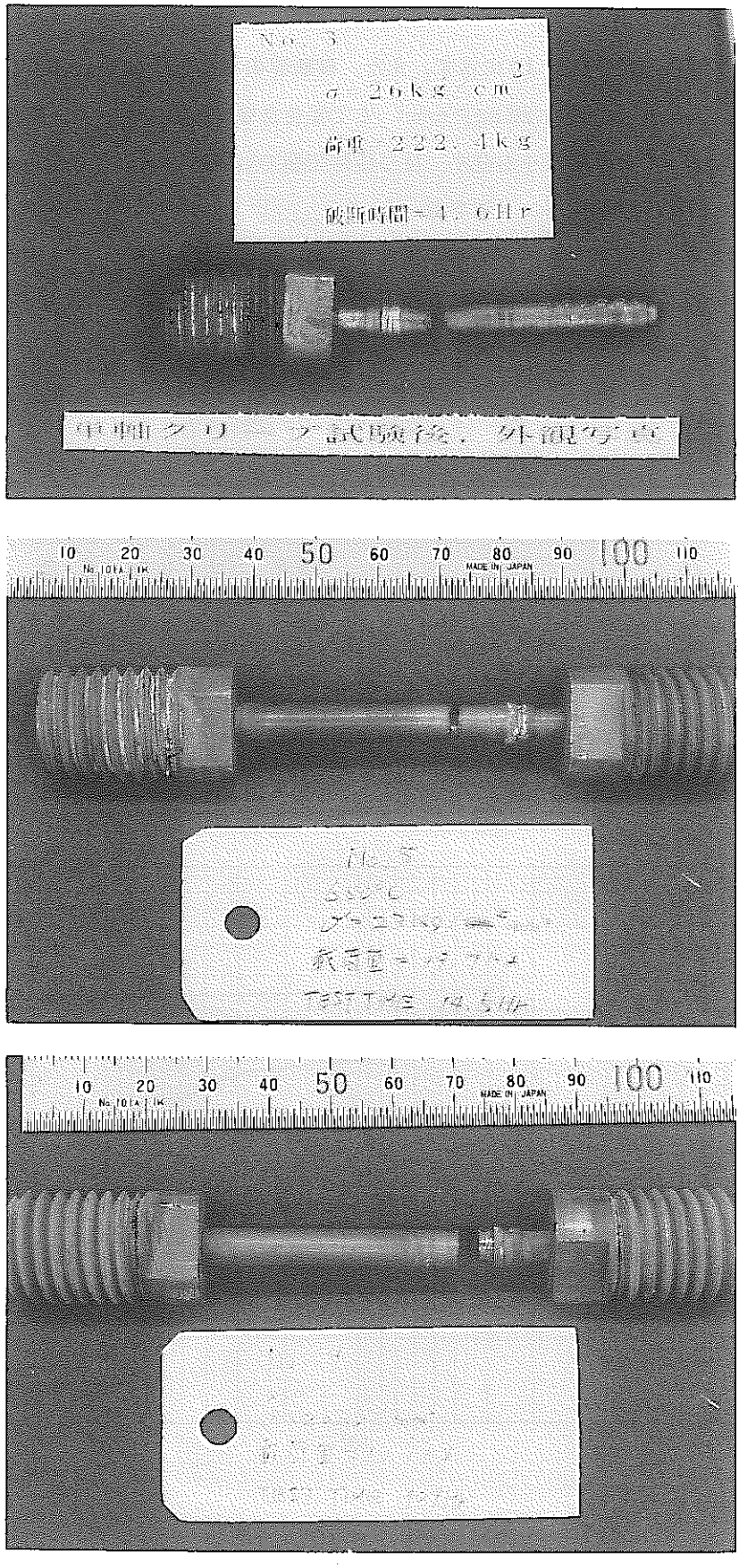
破断位置は，管部及び溶接ボンド部であった。

内圧クリープ強度と単軸クリープ強度を比較すると，単軸クリープ強度は高応力において破断時間は長くなり，母材の影響は受けずらいと言える。よって溶接部の強度を評価するには，単軸クリープ試験を主として考慮すべきと考える。

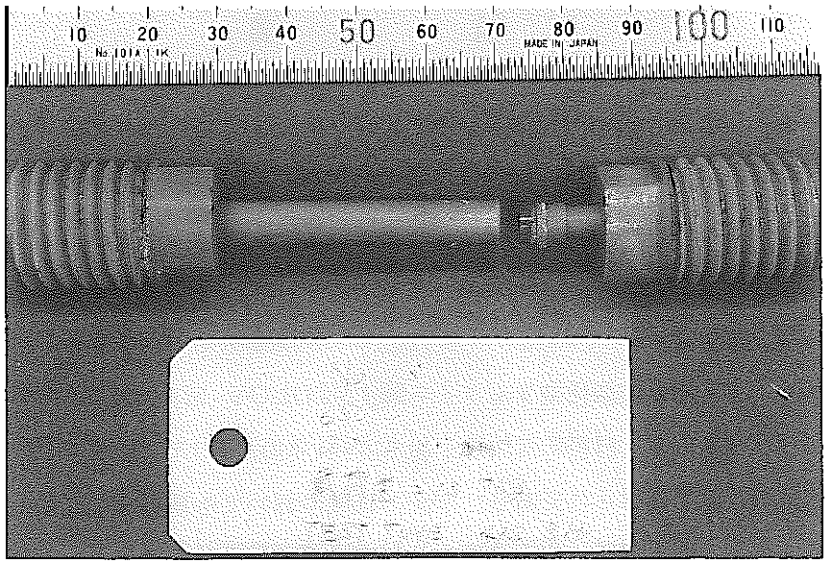
表－10　単軸クリープ試験結果

応　力(kg／mm²)	減荷重(kg)	破断時間	破断位値
26	22.2	4.6 (h)	管　部
20	17.1	109 (h)	溶接金属部と管部の境界
18	15.4	316 (h)	管　部
16	13.7	415 (h)	溶接金属部と管部の境界
14	12.0	585.6 (h)	





写真－19　単軸クリープ試験後の試験片破断部



写真－20　単軸クリープ試験後の試験片破断部

Ⅳ 結　　論

MA 957鋼の特徴としては，粉末冶金法で製造し，耐スエリング特性及び高温強度を確保するために，酸化イットリウム（Y_2O_3）を母材内に均一に分散させている点である。

特に，溶接性に影響するのは酸化物分散材（本材料ではY_2O_3である）である。一般的に，この様な材料を溶接すると分散材が溶接金属部に凝集，空孔等の溶接欠陥を作ることが知られている。

そこで，溶接時の入熱量が少なくてすむ，パルスYAGレーザ溶接法を用いて溶接試験を実施してきた。

現段階においては，酸化物分散強化型フェライト鋼INCOLOY MA956, 957 材料データ集（PNC ZN 9450 87−004）に，材料的な問題〔加工方向（垂直方向）での強度が低い〕や加工性，異方性等の改善が必要であると述べられており，今回の試験においても機械的強度にその影響が現れている。また，溶接金属部の硬さ低下，空孔の発生及び空孔部の分散材の凝集等の溶接部の品質に影響を受ける問題点については，解決されなかった。

以上の内容から，パルスYAGレーザ溶接法は酸化物分散強化型フェライト鋼の溶接はできない。そのため，融接法に変わる溶接法（PMW法又は抵抗溶接法）の開発を進める必要があると判断する。

V 謝　　辞

本試験の各種試験検査にあたりましては，プルトニウム燃料工場，検査課及び核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室　物性グループの課室員にご協力を頂きました。

本紙にて，関係各位の方々に感謝の意を表します。

Ⅵ 参 考 文 献

1) PNC SN8430 88−2　酸化物分散強化型フェライト鋼材の溶接試験（Ⅰ）

2) PNC SN9450 87−004　酸化物分散強化型フェライト鋼

INCOLOY MA956, 957　材料データ集

3) 核施N管理表No.D1854　核燃料ピン密封用テーパ形状端栓

（実願平　1−56726号）