

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

高強度フェライト/マルテンサイト鋼(61年度材) 溶接試験その1

1991年5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

製、
下さ

高強度フェライト/マルテンサイト鋼(61年度材) 溶接試験その1



筆者氏名	長井修一郎*	飛田 典幸*
	関 正之*	蔦木 浩一***
	井坂 和彦**	平子 一仁**
	西山 元邦*	豊島 光男*

要 旨

(目 的)

高強度フェライト/マルテンサイト鋼を用いた照射試験計画に先だち、本材料の溶接試験を行いその溶接特性評価の一助とする。

(方 法)

TIG及びレーザ溶接法により、高強度フェライト/マルテンサイト鋼を用いて製作した被覆管及び端栓の溶接試験を行った。また本材料は、溶接による焼入れ硬化性を示すため、コールドの焼結炉を用いて溶接後に熱処理（焼きもどし）試験を行った。

(結 果)

- ① 溶接部断面金相試験において、レーザ溶接の場合は溶接部表面に向かって成長した組織（筋状の組織）が観察された。TIG溶接では、このような現象は観察されなかった。
また、結晶粒の大きさはTIG溶接の方が大きくなった。
- ② 溶接後の溶接部硬さは、どの溶接法の場合も母材よりも大幅に増加した。またレーザ溶接よりTIG溶接の方が硬化度は大きかった。
- ③ 熱処理有り、無し共に引張強度及び単軸クリープ強度は溶接法に関係なく同じような値を示した。

* 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

*** 再処理工場 化学処理二課

- ④ 800℃、10分間の熱処理によって、溶接による焼入れ硬化部の硬度は、大幅に軟化した。

(結 論)

TIG溶接は、レーザ溶接よりも溶接時の入熱量が大きいため(1)結晶粒が大きくなる。(2)焼入硬化度が大きくなる。(3)熱影響部の範囲が広がる等の特性がある。しかし、引張強度や単軸クリープ強度においては、どちらの溶接法の場合でもさほど差は出ない。従って汎用性やコストの面から現段階では、TIG溶接の方がフェライト／マルテンサイト鋼を溶接するには有用と思われるが、今後さらなる試験において、溶接パラメーターを変化させた場合の溶接状態及び結晶組織の観点から溶接法の評価を行って行く予定である。また、鋼を焼きもどすための最適な熱処理条件を見いだすことも今後の課題となる。

目 次

1. 序	1
2. 部材特性	2
2.1 化学組織	2
2.2 機械的特性	2
3. 試験方法	3
3.1 試験パラメータ	3
3.2 使用溶接装置	3
3.2.1 レーザ溶接装置	3
3.2.2 パルスTIG溶接装置	3
3.3 試験片部材形状	4
3.4 溶接条件	5
3.4.1 溶接条件	5
3.4.2 溶接パターン	5
3.4.3 溶接方法	6
3.5 熱処理（焼鈍）条件	6
4. 検査項目	7
5. 試験検査片形状	8
6. 試験検査結果	9
6.1 外観検査	9
6.1.1 TIG溶接法	9
6.1.2 パルスTIG溶接法	10
6.1.3 レーザ溶接法	11
6.2 寸法検査	11
6.2.1 TIG溶接法	11
6.2.2 パルスTIG溶接法	13
6.2.3 レーザ溶接法	13

6. 3	X線検査結果	15
6. 4	断面金相試験	15
6. 4. 1	TIG溶接法	15
6. 4. 2	レーザ溶接法	19
6. 5	ビッカース硬さ試験	23
6. 5. 1	TIG溶接法	23
6. 5. 2	レーザ溶接法	31
6. 6	引張試験	39
6. 6. 1	TIG溶接法	39
6. 6. 2	パルスTIG溶接法	40
6. 6. 3	レーザ溶接法	41
6. 7	単軸クリープ試験	47
6. 7. 1	TIG溶接法	47
6. 7. 2	レーザ溶接法	49
7.	ま と め	51
8.	考 察	53
9.	あとがき	54
10.	謝 辞	55

図 リ ス ト

図－１	試験片部材形状	４
図－２	溶接方法	６
図－３	ビッカース硬さ試験結果（TIG）	24
図－４	ビッカース硬さ試験結果（レーザ）	32
図－５	引張試験結果（TIG）	44
図－６	引張試験結果（パルスTIG）	45
図－７	引張試験結果（レーザ）	46

表リスト

表－1	化学組成	2
表－2	機械的特性	2
表－3	溶接条件	5
表－4	検査項目及び検査方法と検査条件	7
表－5	ビード外径測定結果（TIG）	12
表－6	ビード外径測定結果（パルスTIG）	13
表－7	ビード外径測定結果（レーザ）	14
表－8	引張試験結果	43
表－9	単軸クリープ試験結果（TIG）	48
表－10	単軸クリープ試験結果（レーザ）	50

写真リスト

写真－１	外観検査	9
写真－２	外観検査	10
写真－３	外観検査	11
写真－４	断面金相試験（TIG, FK）	16
写真－５	断面金相試験（TIG, FS）	17
写真－６	断面金相試験（TIG, FSP）	18
写真－７	断面金相試験（レーザ, FK）	20
写真－８	断面金相試験（レーザ, FS）	21
写真－９	断面金相試験（レーザ, FSP）	22
写真－10	ビッカース硬さ試験（TIG, FK, 熱処理無）	25
写真－11	ビッカース硬さ試験（TIG, FK, 熱処理有）	26
写真－12	ビッカース硬さ試験（TIG, FS, 熱処理無）	27
写真－13	ビッカース硬さ試験（TIG, FS, 熱処理有）	28
写真－14	ビッカース硬さ試験（TIG, FSP, 熱処理無）	29
写真－15	ビッカース硬さ試験（TIG, FSP, 熱処理有）	30
写真－16	ビッカース硬さ試験（レーザ, FK, 熱処理無）	33
写真－17	ビッカース硬さ試験（レーザ, FK, 熱処理有）	34
写真－18	ビッカース硬さ試験（レーザ, FS, 熱処理無）	35
写真－19	ビッカース硬さ試験（レーザ, FS, 熱処理有）	36
写真－20	ビッカース硬さ試験（レーザ, FSP, 熱処理無）	37
写真－21	ビッカース硬さ試験（レーザ, FSP, 熱処理有）	38

1. 序

高強度フェライト／マルテンサイト鋼は、耐照射スエリング特性に優れているため、高速炉炉心材料としての適用が検討されており、日米共同研究Phase I に基づき平成4年に「常陽」B型特殊燃料を用いて照射試験が実施される予定である。本試験は、それに先立ち同材料の溶接特性及び機械的強度に関するデータを取得し溶接法開発、並びに照射試験に反映させることを目的としている。

高強度フェライト／マルテンサイト鋼は、昭和59年度より試作が開始され、昭和61年度には、クリープ破断強度を増すためにW、Nを添加し、成分の最適化を図った3鋼種（神戸製鋼、住友金属製の61FK、61FS、61FSF）が製作された。

2. 部 材 特 性

以下に各鋼種の部材特性を示す。

2.1 化学組成

以下の表－1 に化学組成を示す。

表－1 化 学 組 成

単位 (wt%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	Co	N	B
61FS	.09	.08	.52	.001	.002	.32	11.09	.51	1.86	.22	.05	≤0.1	.047	—
61FSF	.12	.06	.68	≤.001	.002	.86	11.15	.12	2.11	.20	.05	≤0.1	.045	.021
61FK	.044	.05	.63	.009	.002	.45	11.08	1.94	—	.24	.051	≤0.1	.061	—

2.2 機械的特性

以下の表－2 に母材の機械的特性を示す。

表－2 機 械 的 特 性

単位 (kg/mm²)

(kg/cm²)

(Hv)

鋼 種	引 張 試 験 結 果						内圧破裂試験結果		硬さ 測定結果
	常 温			650 ℃			破裂	降伏	
	引張強さ	耐力	伸び	引張強さ	耐力	伸び	内圧	内圧	
61FS	72.2	61.5	18	27.9	21.2	13	1249	1030	236
61FSF	74.6	63.1	18	27.6	21.1	14	1308	1060	241
61FK	79.1	65.3	16	33.3	28.5	20	1390	1330	274

3. 試 験 方 法

3.1 試験パラメータ

以下に試験パラメーターを示す。

因 子	種 類	水 準
溶 接 法	3	レーザ溶接法・パルスTIG溶接法・TIG溶接法
被 覆 管	3	61FS, 61FSF, 61FK
熱 処 理	2	有・無

3.2 使用溶接装置

3.2.1 レーザ溶接装置

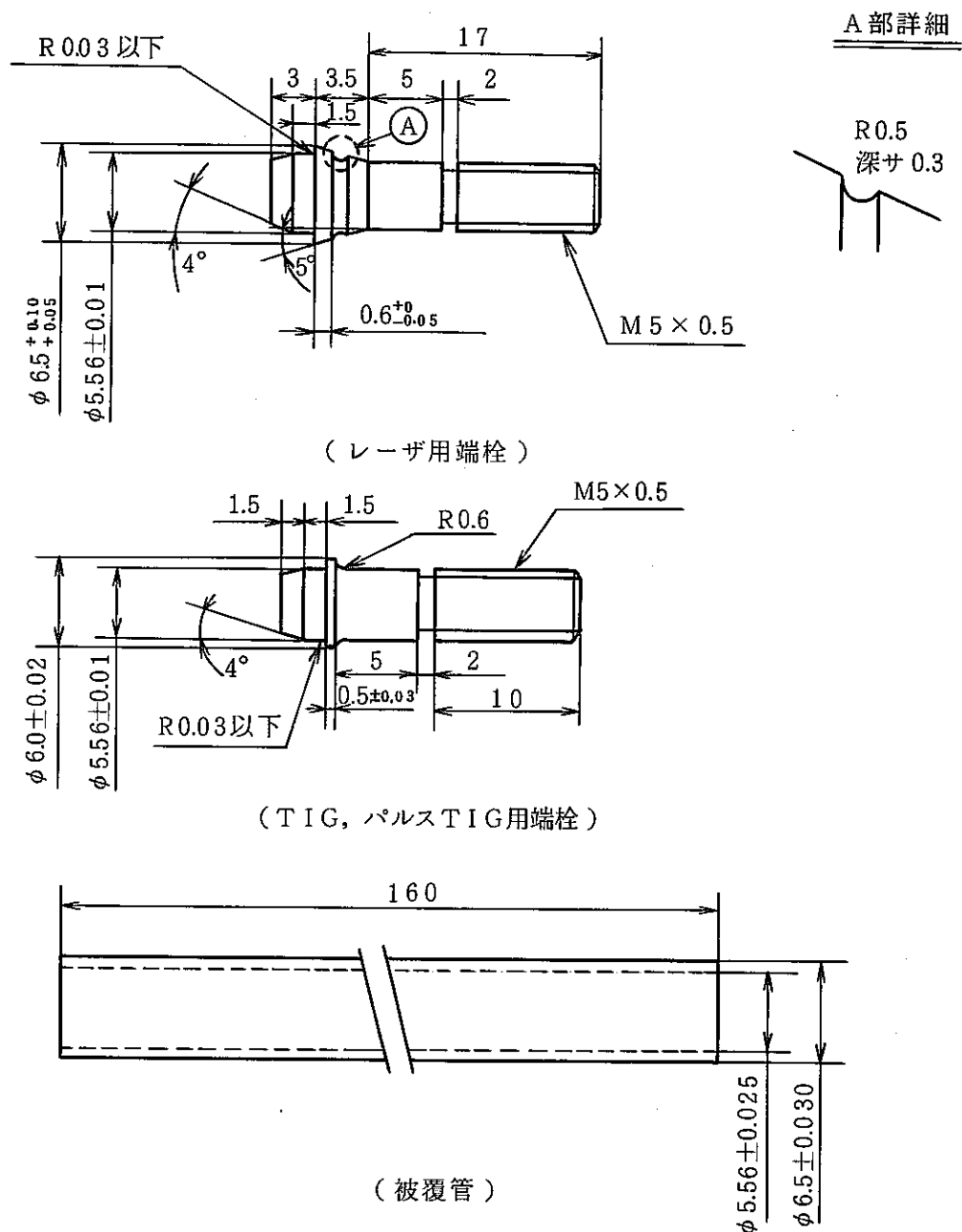
- ① 型 式 : LAY-603型 (東芝製)
- ② 発 振 素 子 : Nb^3YAG ロッド
- ③ 発 振 光 波 長 : $1.06\mu\text{m}$
- ④ 最大出力エネルギー : 30 (J/P)
- ⑤ 発 振 パ ル ス 数 : 2 (PPS)

3.2.2 パルスTIG溶接装置

- ① 型 式 : DT-NP (日立製)
- ② 制 御 法 : インバータ制御
- ③ 最 大 出 力 : 300 (A)
- ④ パルス周波数 : 5～500 (PPS)

3.3 試験片部材形状

以下の図-1に試験片部材形状を示す。



※) レーザ溶接については、TIG、パルスTIG用端栓を使用すると、溶接欠陥であるアンダーカットが発生してしまい端栓形状を変更した。この端栓は、テーパ部を設けることにより、溶接欠陥のアンダーカットを防止した。

又、互いの端栓の先端部にネジが切っているのは単軸クリープ試験に対応させるためである。

図-1 試験片部材形状

3.4 溶接条件

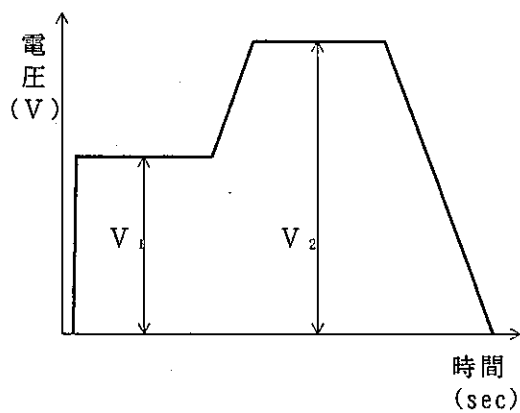
本試験に採用した溶接条件を表-3に示す。また溶接方法を図-2に示す。

3.4.1 溶接条件

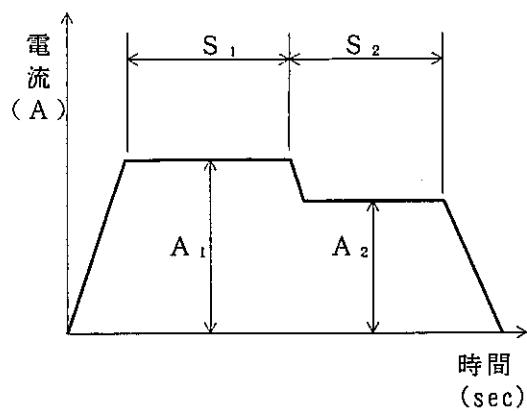
表-3 溶 接 条 件

レーザ溶接法			パルスTIG溶接法			TIG溶接法		
出力	4.5		電 流 (A)	A1	35	電 流 (A)	A1	17
電 圧 (V)	V1	490		A2	30		A2	15
	V2	540	時 間 (S)	S1	4.0	時 間 (S)	S1	4.0
焦点距離 (mm)	50			S2	2.5		S2	2.5
ディフォーカス (mm)	2		回 転 数 (rpm)		17	回 転 数 (rpm)		17
			A.G (mm)		0.2	A.G (mm)		0.2
回 転 数 (rpm)	0.5		トーチ位置 (mm)		0.4	トーチ位置 (mm)		0.4
溶 接 雰 囲 気	He		パルス数 (PPS)		2	溶 接 雰 囲 気		He
			溶 接 雰 囲 気		He			

3.4.2 溶接パターン



〔レーザ溶接法〕



〔パルスTIG, TIG溶接法〕

3.4.3 溶接方法

以下に溶接方法（レーザ，TIG，パルスTIG）を示す。

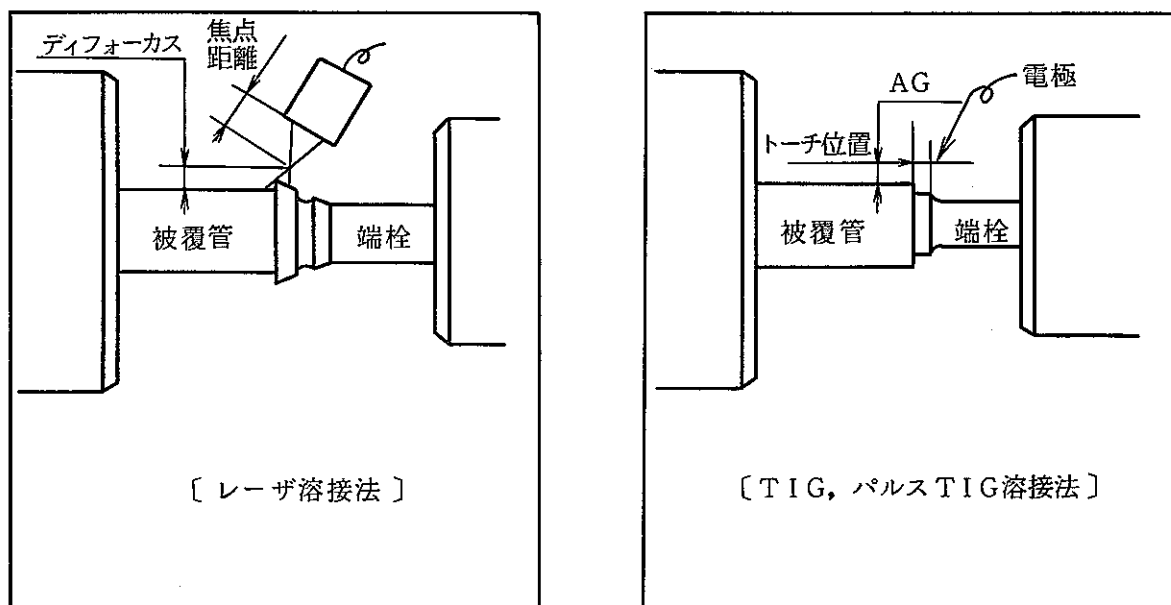


図2 溶接方法

※） 各種（レーザ，TIG，パルスTIG）溶接条件の決定に当っては，溶け込み量（被覆管肉厚0.45mm）を満足しているか，溶接欠陥（クラック，ブローホール，アンダーカット）は，発生していないかを前試験により確認し決定した。

3.5 熱処理（焼鈍）条件

以下に熱処理条件を示す。

昇温速度	: 400 (°C/hr)	冷却法	: 自然冷却
到達温度	: 800 (°C)	熱処理雰囲気	: 真空
キープ時間	: 5 (min)	使用装置	: 焼結炉

※） 本熱処理（焼鈍）条件は，フェライト鋼の熱処理（焼鈍）条件範囲（700℃～800℃）の上限値を採用して行った。

4. 検 査 項 目

溶接特性データを取得するための検査項目及び検査項目に対する検査方法、検査条件を表－４に示す。

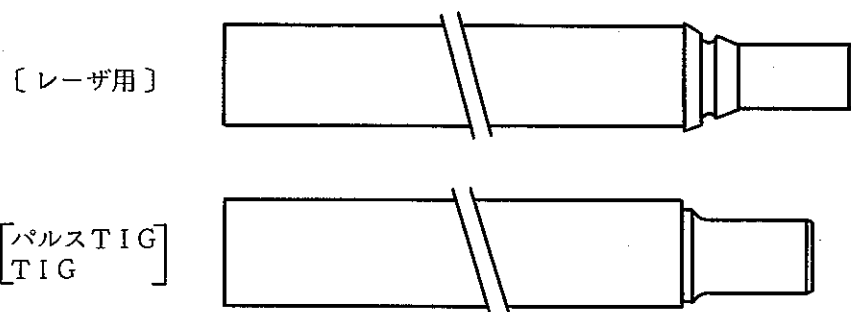
表－４ 検査項目及び検査方法と検査条件

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, Y 2方向）	・ ビード外形
	X 線 検 査	・ X, Y 2方向撮影	・ フローホールの有無 ・ 溶け込み状態
破 壊 検 査	断面金相試験	・ 電解エッチング	・ 断面写真 ・ 溶け込み状態 ・ 欠陥の有無
	硬 さ 測 定	・ マイクロビッカース	・ 硬さ ・ 位置と硬さの対応
	引 張 試 験	・ 試験温度：室温，650℃ ・ 引張速度：0.5mm/sec	・ 破断荷重 ・ 破断位置 ・ 伸び，耐力 ・ 破断部写真
	単軸クリープ試験	・ 試 験 温 度：650℃ ・ 目標破断時間：10, 100, 1000時間	・ 破断時間 ・ 破断応力 ・ 破断位置

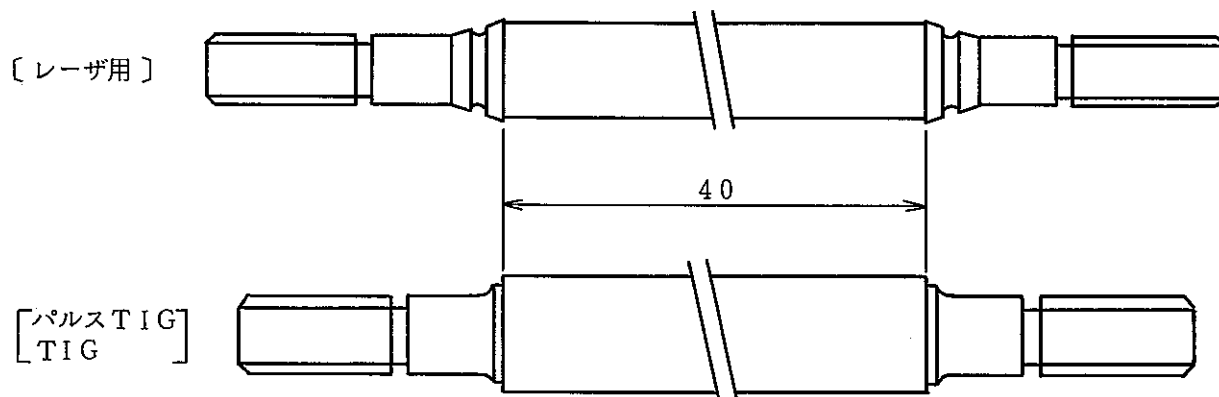
5. 試験検査片形状

以下の図に、各種試験検査片の形状を示す。

(1) 断面金相・ビッカース硬さ・引張試験片



(2) 単軸クリープ試験片



6. 試験検査結果

6.1 外観検査

6.1.1 TIG溶接法

3 鋼種とも写真－1 に示すように溶接金属部表面にクラック等の溶接欠陥は発生しなかった。これは、熱処理有無共に同様である。

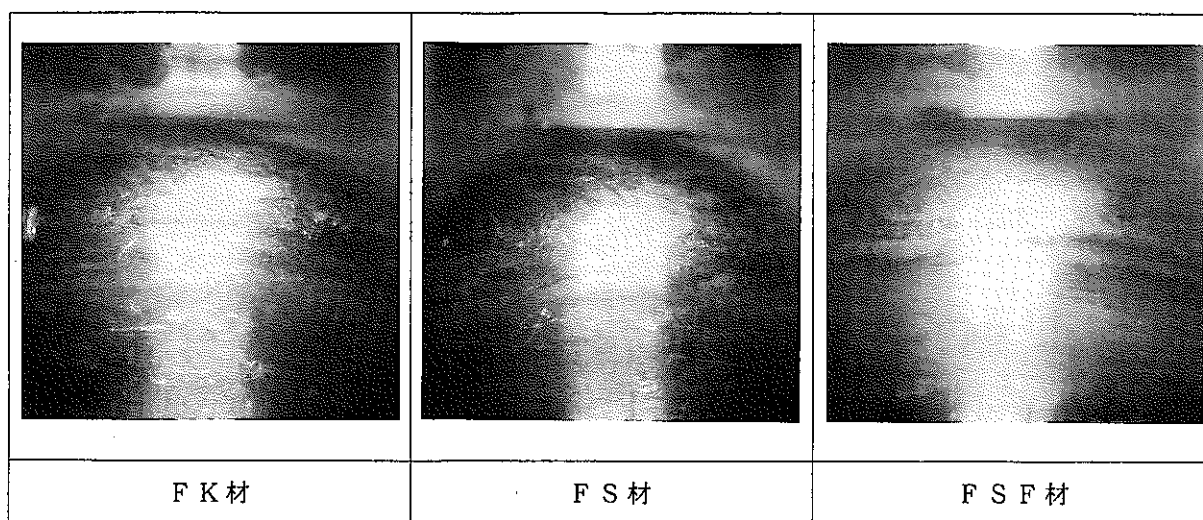


PHOTO : ×10
※写真は、熱処理有

写真－1 外 観 検 査

6.1.2 パルスTIG溶接法

3 鋼種とも写真－2 に示すように、溶接金属部表面にはクラック等の溶接欠陥は発生しなかった。これは、熱処理有無共に同様である。

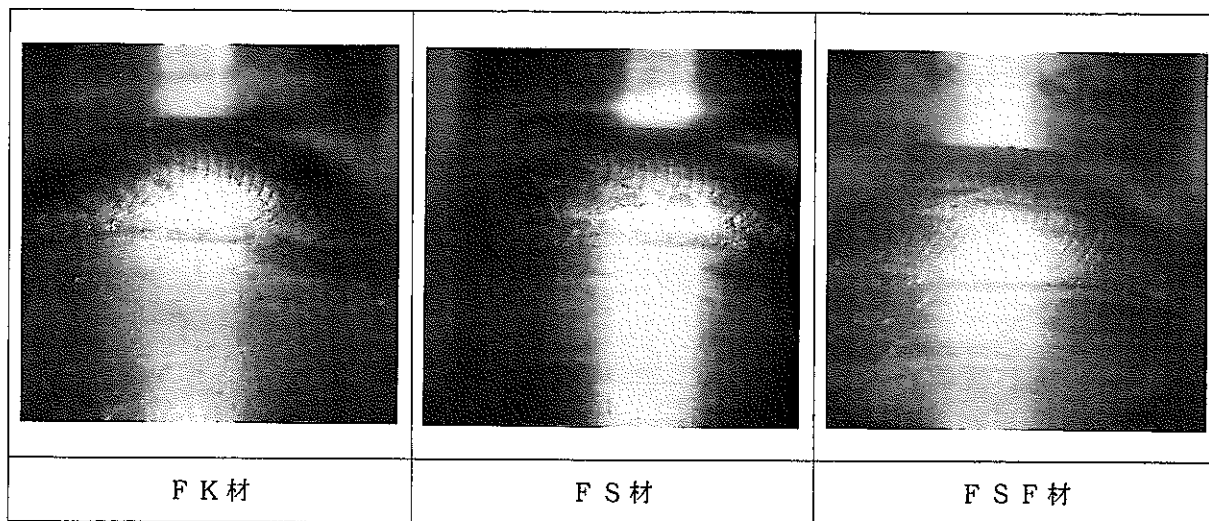


PHOTO : ×10
※写真は、熱処理有

写真－2 外 観 検 査

6.1.3 レーザ溶接法

3 鋼種とも写真－3 に示すように，溶接金属部表面にはクラック等の溶接欠陥は発生しなかった。これは，熱処理有無共に同様である。

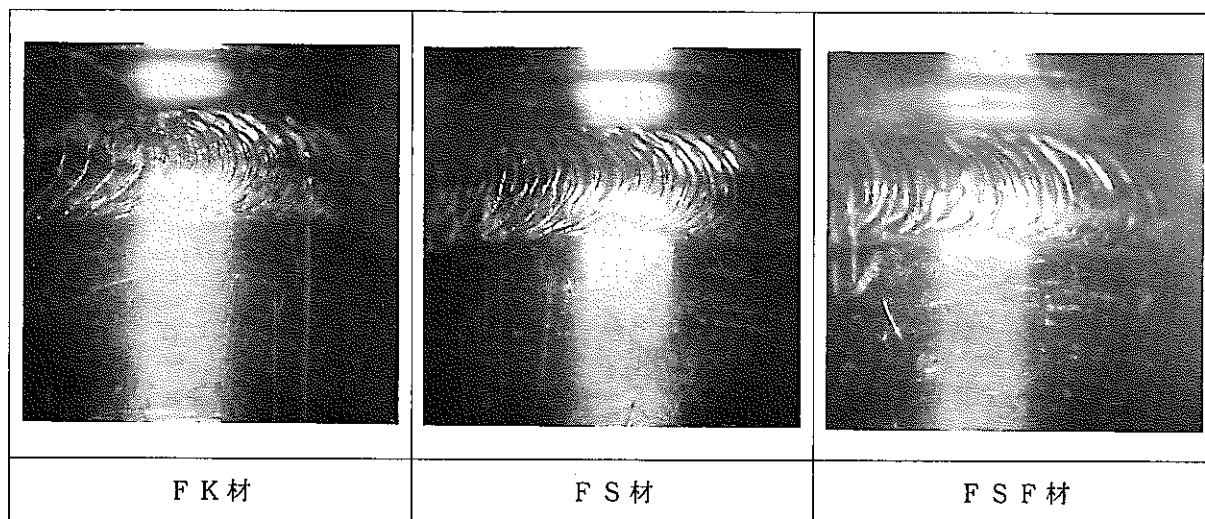


PHOTO : ×10
※写真は，熱処理有

写真－3 外 観 検 査

6.2 寸法検査

6.2.1 TIG溶接法

表－5 に示すようにビード外径は，被覆管径 $\phi 6.5\text{mm}$ に対し，平均値でFK材： $\phi 6.563\text{mm}$ ，FS材： $\phi 6.546\text{mm}$ ，FS材： $\phi 6.574\text{mm}$ となり， $FS < FK < FSP$ の順に大きくなっている。

尚，全試料とも $\phi 6.644\text{mm}$ （「常陽」特燃製造規格）のリングゲージを通過した。

（溶接ビード部の盛り上りの検査は，リングゲージで行っており，これを通過させることにより仕様値を管理している。）

表 - 5 ビード外径測定結果 (TIG)

単位 (mm)

F K			F S			F S F		
No.	Max	Min	No.	Max	Min	No.	Max	Min
3	6.590	6.580	4	6.527	6.522	4	6.621	6.582
6	6.550	6.545	5	6.553	6.552	10	6.554	6.554
13	6.551	6.545	7	6.532	6.525	12	6.610	6.600
20	6.588	6.572	8	6.567	6.566	17	6.578	6.576
25	6.551	6.543	11	6.603	6.598	19	6.580	6.570
39	6.561	6.556	14	6.548	6.542	21	6.564	6.560
40	6.560	6.552	23	6.534	6.533	22	6.588	6.582
41	6.576	6.572	30	6.533	6.530	27	6.562	6.556
46	6.563	6.555	32	6.536	6.532	34	6.565	6.555
47	6.582	6.560	33	6.532	6.531	35	6.586	6.584
52	6.585	6.571	43	6.534	6.531	49	6.565	6.563
67	6.554	6.553	45	6.542	6.540	51	6.564	6.557
68	6.550	6.545	50	6.542	6.536	55	6.572	6.562
70	6.588	6.575	54	6.592	6.591	56	6.562	6.560
71	6.556	6.552	57	6.555	6.542	59	6.561	6.555
72	6.562	6.561	58	6.533	6.532	63	6.558	6.553
85	6.558	6.550	65	6.534	6.532	68	6.579	6.573
87	6.556	6.551	84	6.562	6.553	76	6.577	6.575
96	6.561	6.557	99	6.534	6.532	92	6.566	6.563
03	6.557	6.554	105	6.589	6.582	95	6.580	6.576
04	6.585	6.576	111	6.547	6.542	100	6.583	6.564
108	6.583	6.576	142	6.549	6.540	102	6.598	6.595
114	6.564	6.562	158	6.547	6.542	152	6.569	6.565
157	6.563	6.560	161	6.546	6.534	155	6.593	6.590
159	6.574	6.572	181	6.535	6.532	160	6.592	6.578
160	6.556	6.553	200	6.563	6.542	198	6.576	6.572
$\overline{x}$	6.563		$\overline{x}$	6.546		$\overline{x}$	6.574	

6. 2. 2 パルスTIG溶接法

表－6 に示すようにビード外径は、被覆管径 $\phi 6.5\text{mm}$ に対し平均値でFK材： $\phi 6.567\text{mm}$ ，FS材： $\phi 6.551\text{mm}$ ，FSF材： $\phi 6.560\text{mm}$ となり $\text{FS} < \text{FSF} < \text{FK}$ の順に大きくなっている。

尚、全試料とも $\phi 6.644\text{mm}$ （「常陽」特燃製造規格）のリングゲージを通過した。

表－6 ビード外径測定結果（パルスTIG）

単位（mm）

F K			F S			F S F		
No.	Max	Min	No.	Max	Min	No.	Max	Min
11	6.582	6.576	2	6.552	6.548	9	6.550	6.540
16	6.574	6.564	10	6.572	6.560	17	6.561	6.551
19	6.550	6.545	12	6.553	6.542	20	6.570	6.556
24	6.552	6.551	48	6.532	6.530	26	6.580	6.573
28	6.583	6.583	57	6.560	6.551	29	6.587	6.575
38	6.556	6.553	64	6.550	6.544	44	6.587	6.580
42	6.583	6.583	66	6.548	6.546	47	6.570	6.570
62	6.554	6.547	77	6.560	6.552	54	6.550	6.547
69	6.560	6.554	84	6.542	6.535	61	6.554	6.551
72	6.563	6.561	86	6.554	6.550	82	6.546	6.542
74	6.593	6.592	98	6.576	6.571	91	6.546	6.543
83	6.585	6.576	100	6.546	6.540	93	6.563	6.560
$\bar{x}$	6.567		$\bar{x}$	6.551		$\bar{x}$	6.650	

6. 2. 3 レーザ溶接法

表－7 に示すようにビード外径は、被覆管径 $\phi 6.5\text{mm}$ に対し平均値でFK材： $\phi 6.571\text{mm}$ ，FS材： $\phi 6.564\text{mm}$ ，FSF材： $\phi 6.572\text{mm}$ となり $\text{FS} < \text{FK} < \text{FSF}$ の順に大きくなっている。

尚、全試料とも $\phi 6.644\text{mm}$ （「常陽」特燃製造規格）のリングゲージを通過した。

表-7 ビード外径測定結果 (レーザ)

単位 (mm)

F K			F S			F S F		
No.	Max	Min	No.	Max	Min	No.	Max	Min
2	6.542	6.552	5	6.540	6.513	3	6.590	6.584
7	6.610	6.602	10	6.614	6.600	4	6.548	6.532
8	6.570	6.545	11	6.623	6.611	5	6.577	6.555
14	6.606	6.595	17	6.560	6.525	9	6.552	6.538
21	6.575	6.555	18	6.550	6.533	12	6.598	6.570
24	6.560	6.548	19	6.572	6.532	13	6.573	6.537
28	6.571	6.542	20	6.611	6.586	15	6.572	6.545
30	6.610	6.591	21	6.555	6.530	16	6.574	6.554
31	6.603	6.573	31	6.527	6.500	19	6.603	6.593
32	6.563	6.544	33	6.600	6.590	21	6.580	6.555
38	6.570	6.530	34	6.563	6.534	23	6.590	6.550
39	6.566	6.545	35	6.558	6.540	26	6.596	6.540
40	6.566	6.545	36	6.574	6.564	28	6.590	6.560
41	6.561	6.540	37	6.550	6.532	29	6.590	6.570
43	6.603	6.577	45	6.550	6.536	32	6.603	6.580
44	6.569	6.540	49	6.561	6.539	33	6.585	6.562
46	6.565	6.543	50	6.560	6.540	37	6.576	6.550
47	6.563	6.542	64	6.575	6.563	40	6.587	6.570
53	6.612	6.584	66	6.564	6.545	41	6.593	6.556
71	6.573	6.556	76	6.566	6.552	42	6.615	6.552
72	6.593	6.574	92	6.578	6.555	44	6.634	6.608
73	6.583	6.566	93	6.600	6.571	48	6.568	6.538
77	6.600	6.572	96	6.570	6.551	50	6.575	6.560
81	6.573	6.564	99	6.580	6.564	52	6.580	6.570
87	6.575	6.567	103	6.606	6.595	65	6.564	6.555
88	6.602	6.587	108	6.611	6.591	74	6.576	6.570
$\overline{x}$	6.571		$\overline{x}$	6.564		$\overline{x}$	6.572	

6.3 X線検査結果

3 鋼種とも溶接法に関係なく空孔及び溶け込み不良等の溶接欠陥は、全試料発生しなかった。

6.4 断面金相試験

6.4.1 TIG溶接法

断面金相写真を写真－4～写真－6に示す。

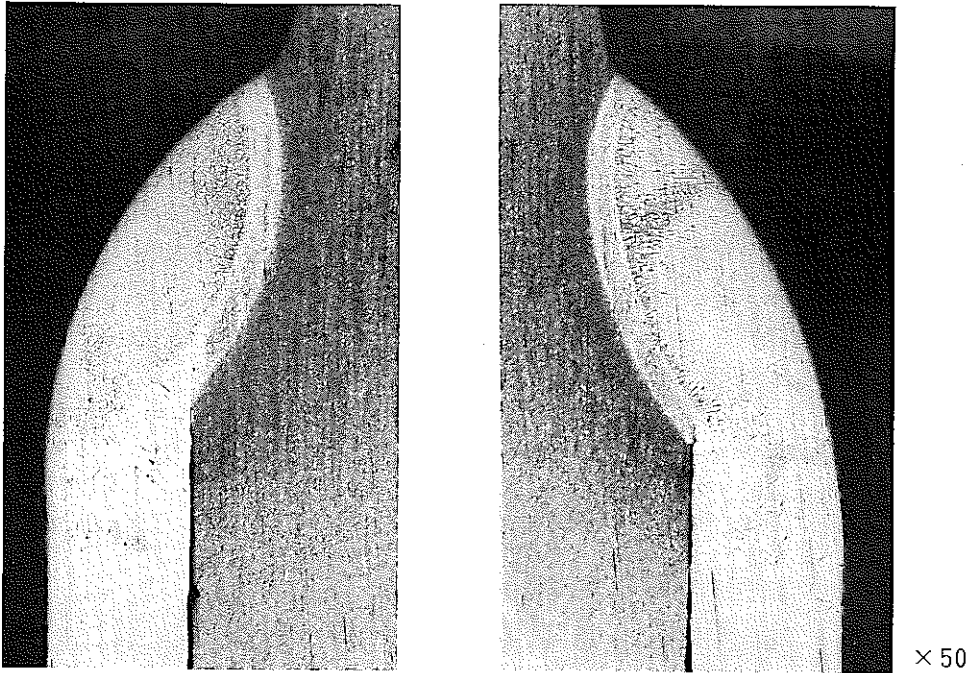
① 熱処理（無）について

- FK材は、熱影響部に結晶粒の成長が観察された。また端栓側のボンド部は、溶け込みに沿って溶接金属部より組織が微粒化している。
- FS材は、熱影響部から端栓側のボンド部に沿って溶接金属部より組織が微粒化している。また、FK材に観察された熱影響部の結晶粒の成長は観察されなかった。
- FSP材は、FS材と同様な結晶が観察された。

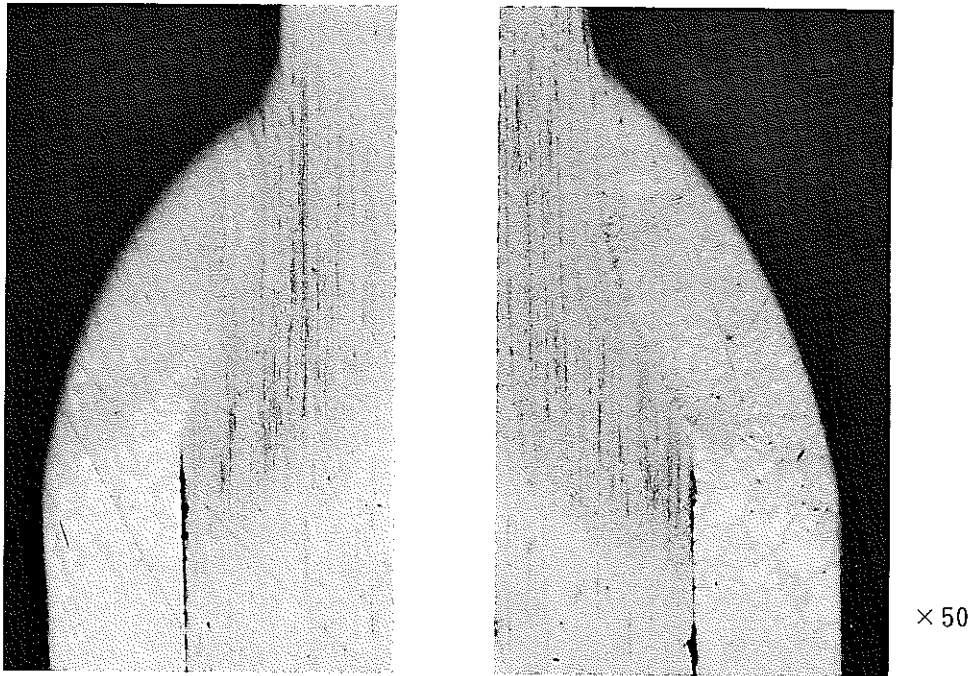
② 熱処理（有）について

- FK材は、熱処理（無）の際に観察された結晶粒の成長は、改善されなかった。また熱影響は、白色な組織におおわれこの現象は、溶接金属部にも観察された。
- FS材は、熱影響部及び溶接金属部に白色な組織が観察されたがFK材よりも小さな面積である。
- FSP材は、FK材、FS材に観察された白色な組織の発生は観察されなかった。

尚、パルスTIGについては、TIGと同様な結果の為、断面金相については、削除する。

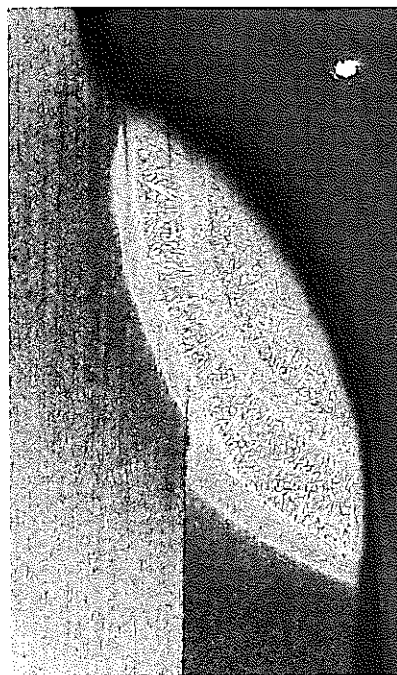
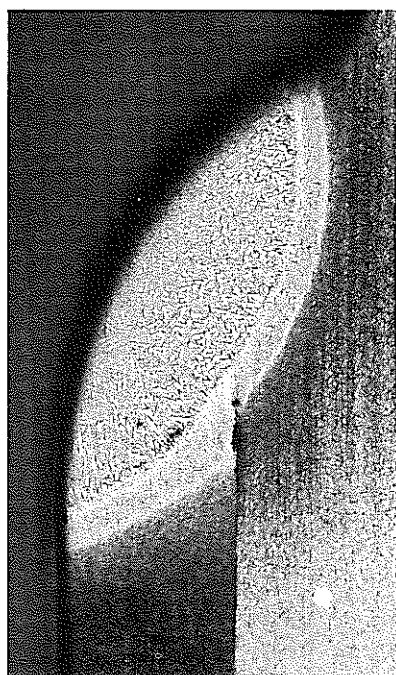


熱処理無



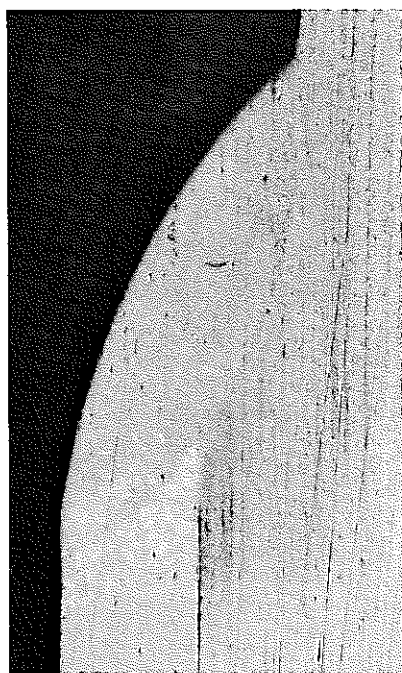
熱処理有

写真－4 断面金相試験（TIG，FK）



× 50

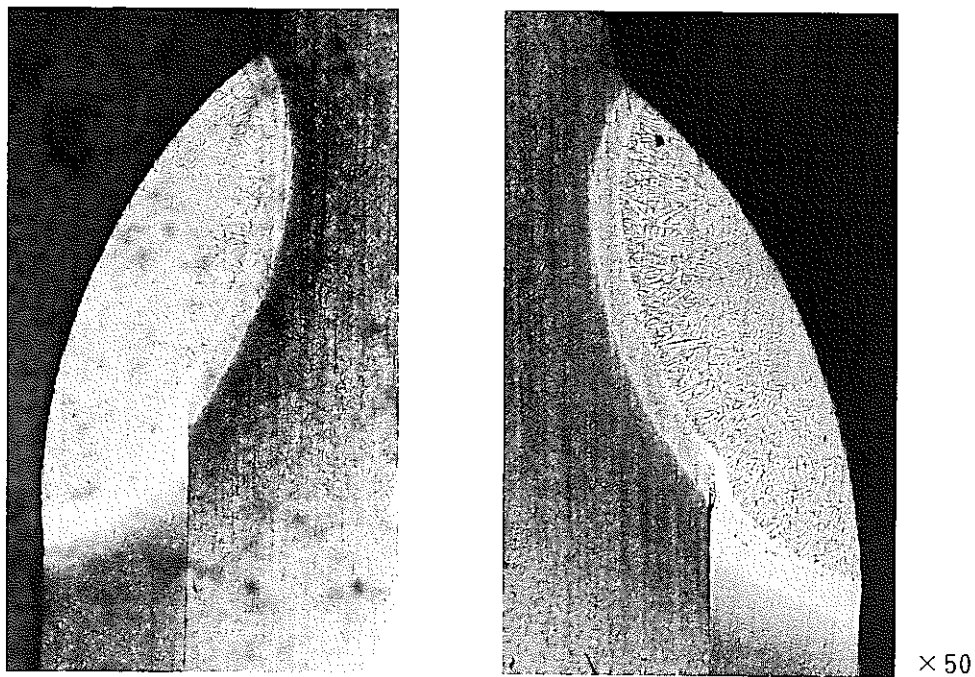
熱処理無



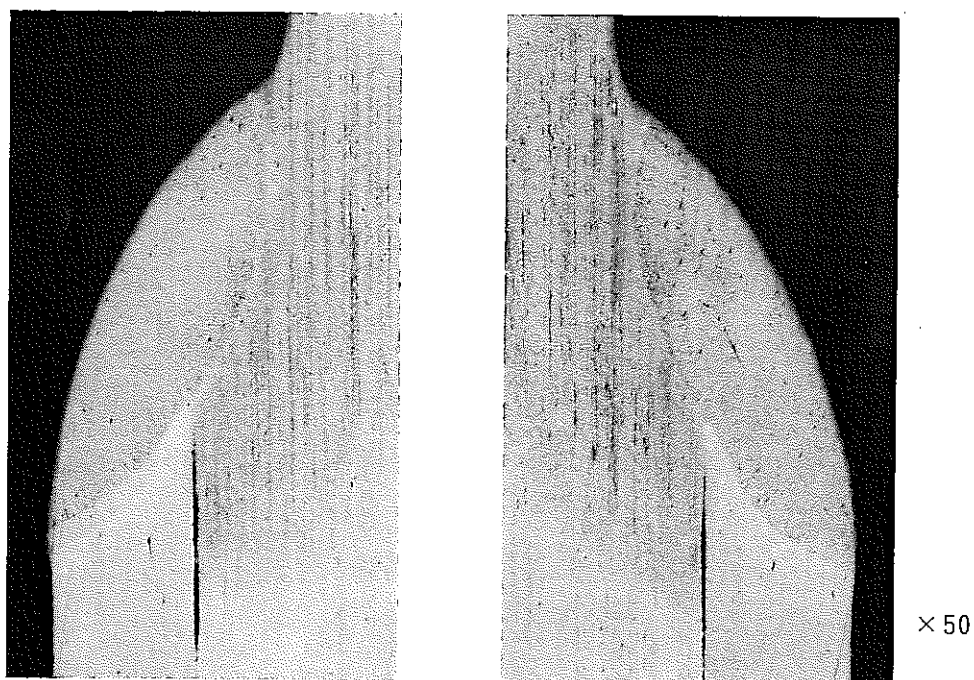
× 50

熱処理有

写真 - 5 断面金相試験 (TIG, FS)



熱処理無



熱処理有

写真 - 6 断面金相試験 (TIG, FSF)

6.4.2 レーザ溶接法

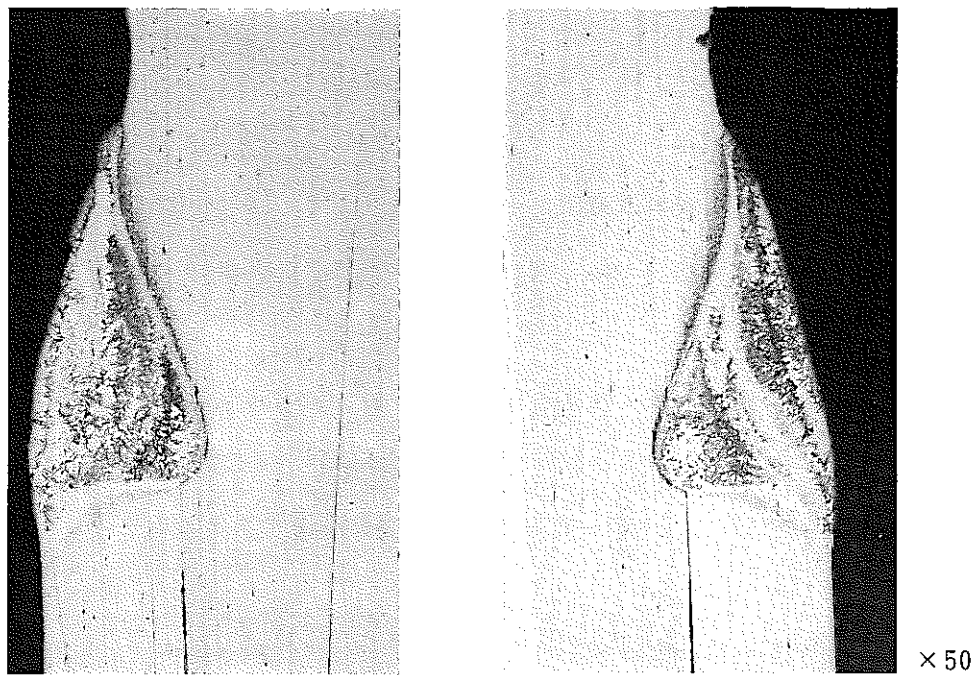
断面金相写真を写真－7～写真－9に示す。

① 熱処理（無）について

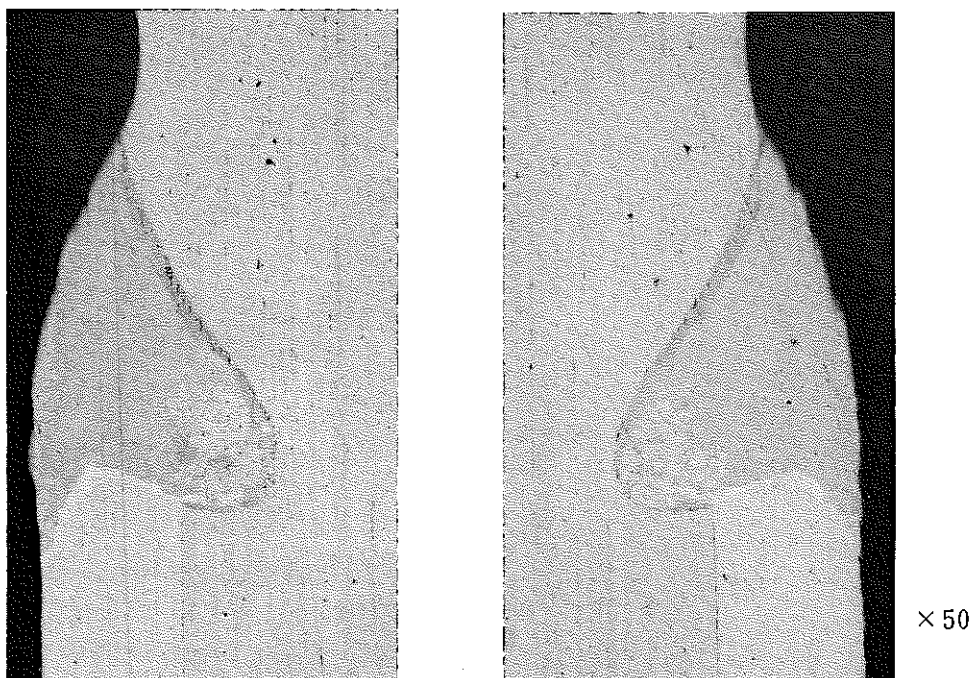
- FK材は，溶接金属の表面部から内部に沿ってすじ状の組織が観察された。また溶け込みの深底部にしみ状の組織が観察された。熱影響部は，母材に比べ若干結晶粒が成長している。
- FS材は，FK材と同様な観察結果だが，溶接金属の表面部から内部に沿ってすじ状の組織がはっきり観察された。
- FSP材についても，FK材，FS材と同様な観察結果である。

② 熱処理（有）について

- 3鋼種とも溶接金属の表面から内部に沿ったすじ状の組織は，熱処理を施しても観察された。また，溶接金属の表面部及び溶け込みの深底部には，白色の組織が観察され，これは，FK>FS>FSPの順に小さくなっている。

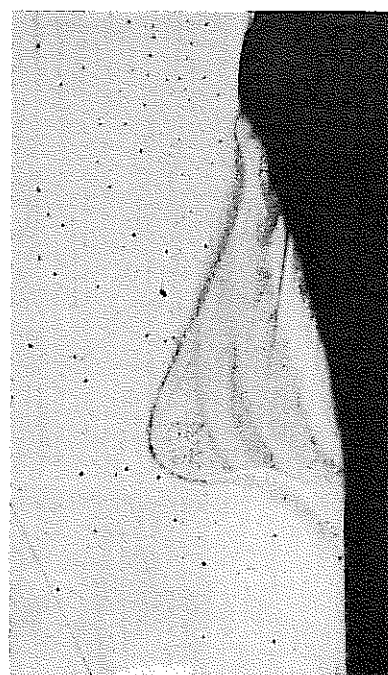


熱処理無



熱処理有

写真－7 断面金相試験（レーザ，FK）



× 50

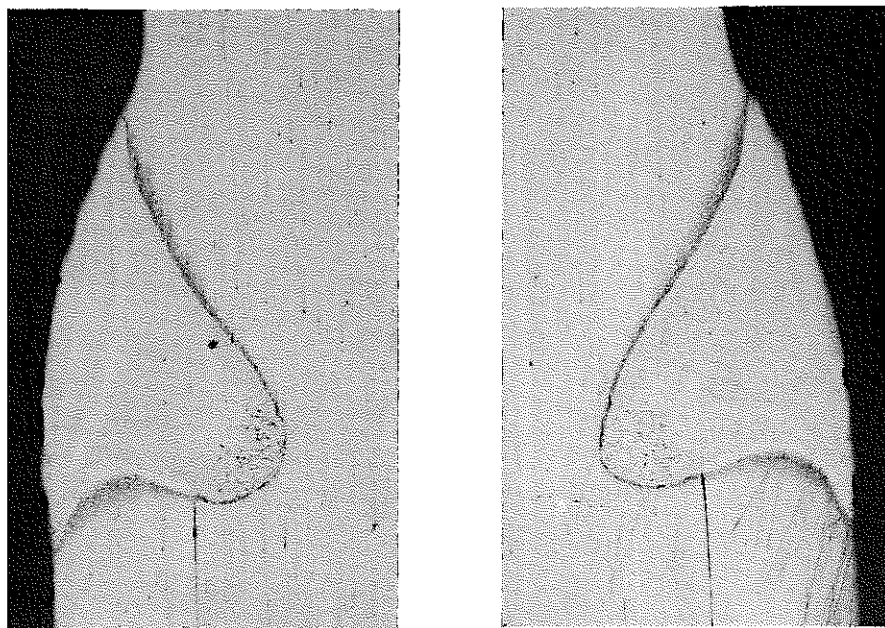
熱処理無



× 50

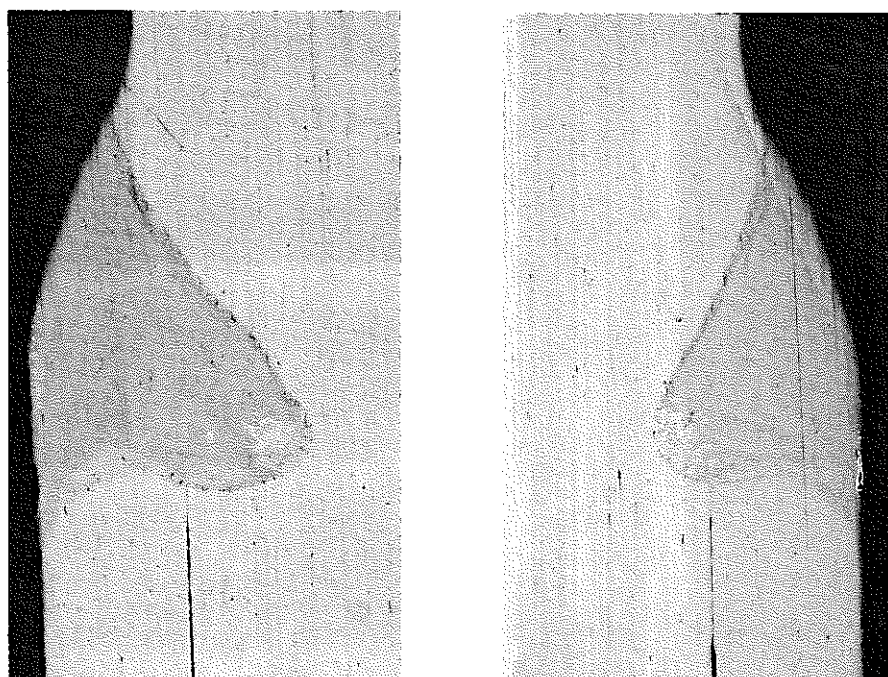
熱処理有

写真－8 断面金相試験（レーザ，FS）



× 50

熱処理無



× 50

熱処理有

写真 - 9 断面金相試験 (レーザ, FSP)

6.5 ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ測定結果を図-3, 4及び写真-10～写真-21に示す。

6.5.1 TIG溶接法

① 熱処理（無）について

- FK材は、熱影響部に観察された結晶粒の成長部が母材の硬さ（274HV）より軟化し219HVとなった。また溶接金属部は最高値で約520HVとなり、最も高い硬度値を示したのは、端栓側の熱影響部で約600HVを示した。
- FS材で最も高い硬度値を示したのは、溶接金属部において約670HVであった。また、被覆管側のボンド部と熱影響部の間で硬度は、溶接金属部及び熱影響部より軟化するものの母材（236HV）に比べ2倍以上の硬度を示した。
- PS材は、FS材と似かよった硬度変化を示したが、FS材よりも硬度は、低く最も高い硬度値は、溶接金属部の約600HVを示した。

② 熱処理（有）について

- 熱処理を施すことにより硬度は、3鋼種とも母材硬度より軟化あるいは、若干高い値を示した。また、断面金相で観察された熱影響部の白色な組織の硬度値は、約200HV～270HVであり鋼種によって異なっている。

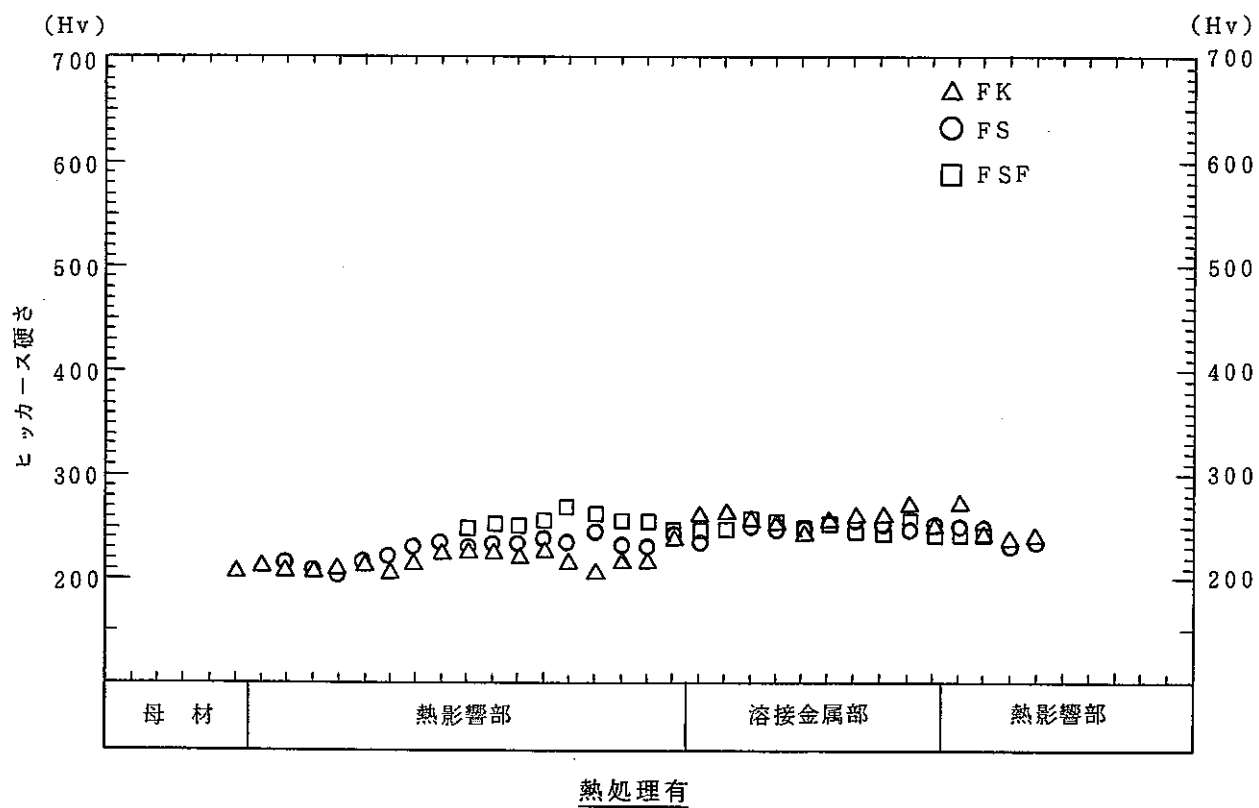
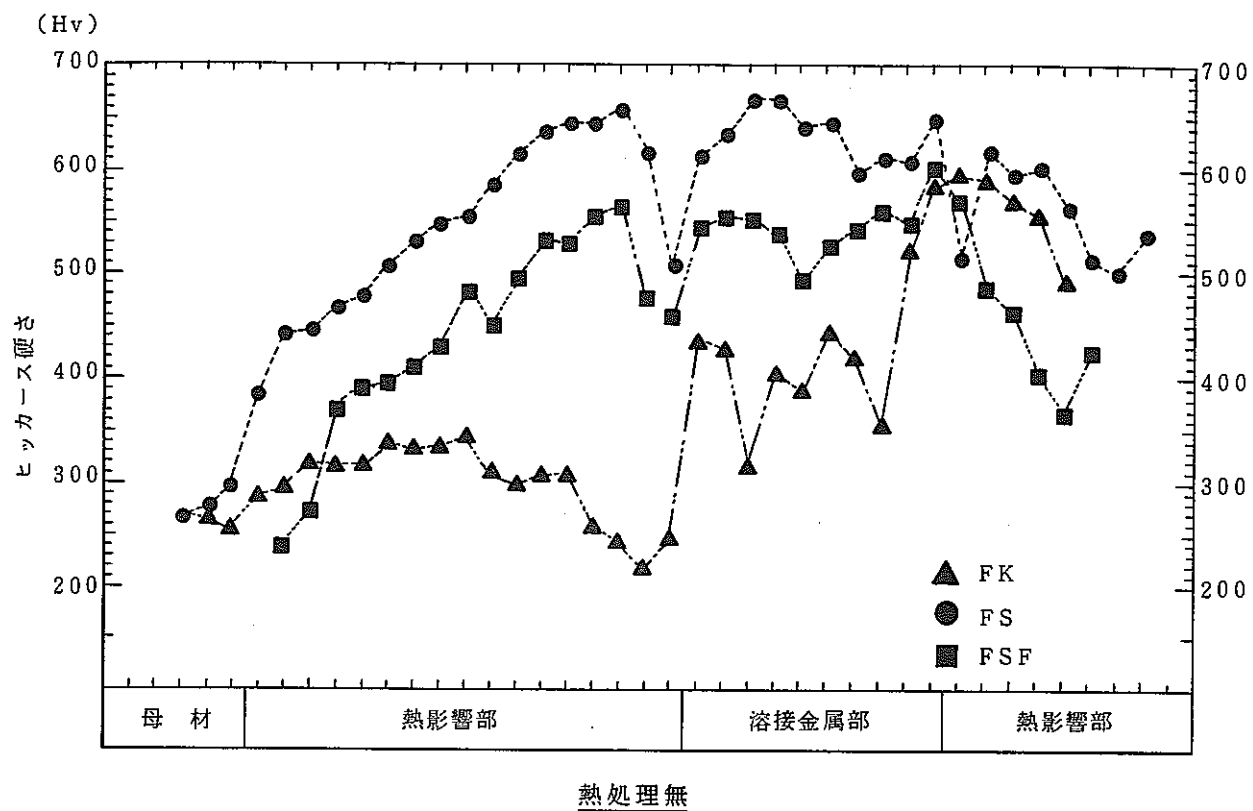


図-3 ビッカース硬さ試験結果 (TIG)

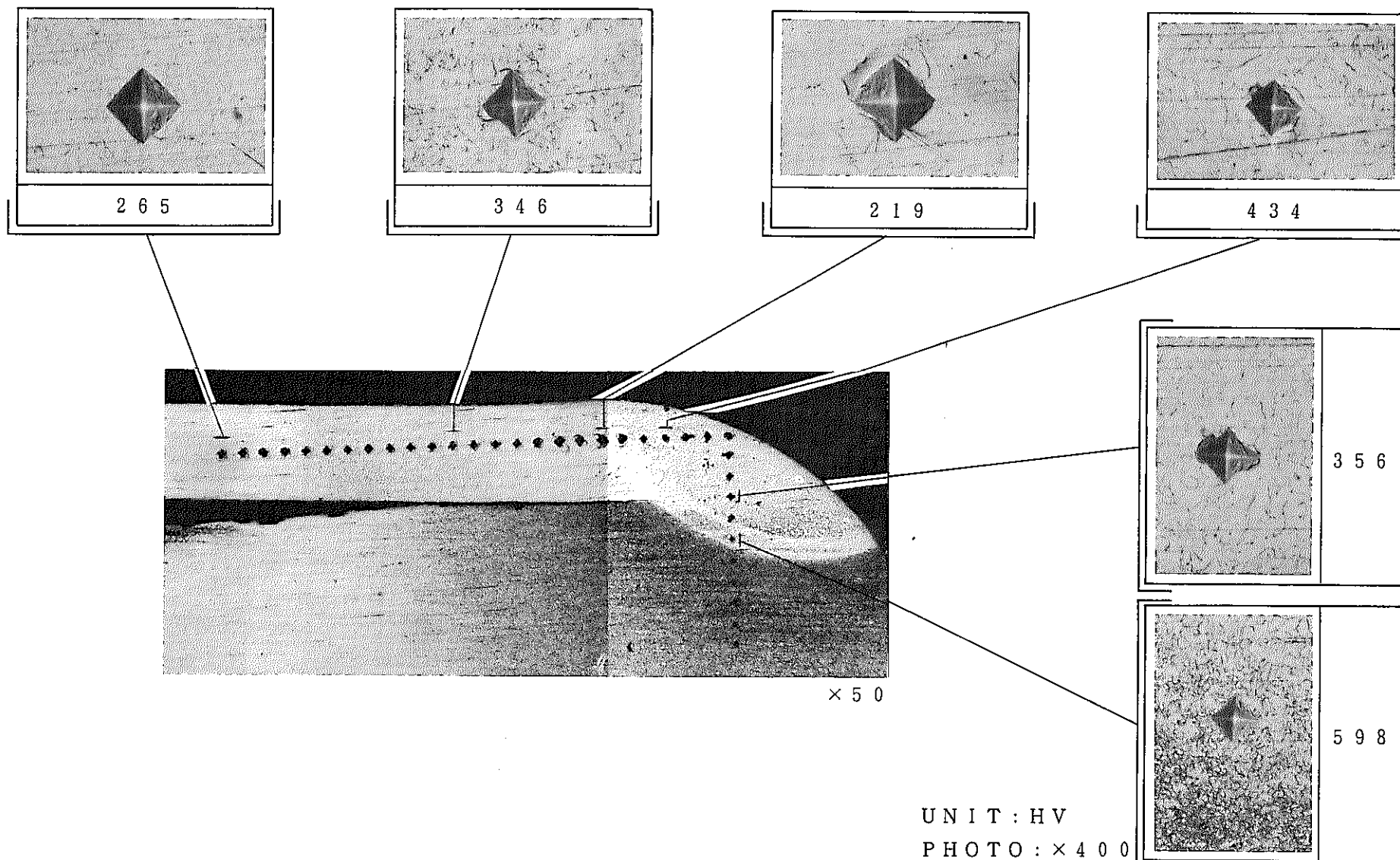


写真-10 ビッカース硬さ試験 (TIG, FK, 熱処理無)

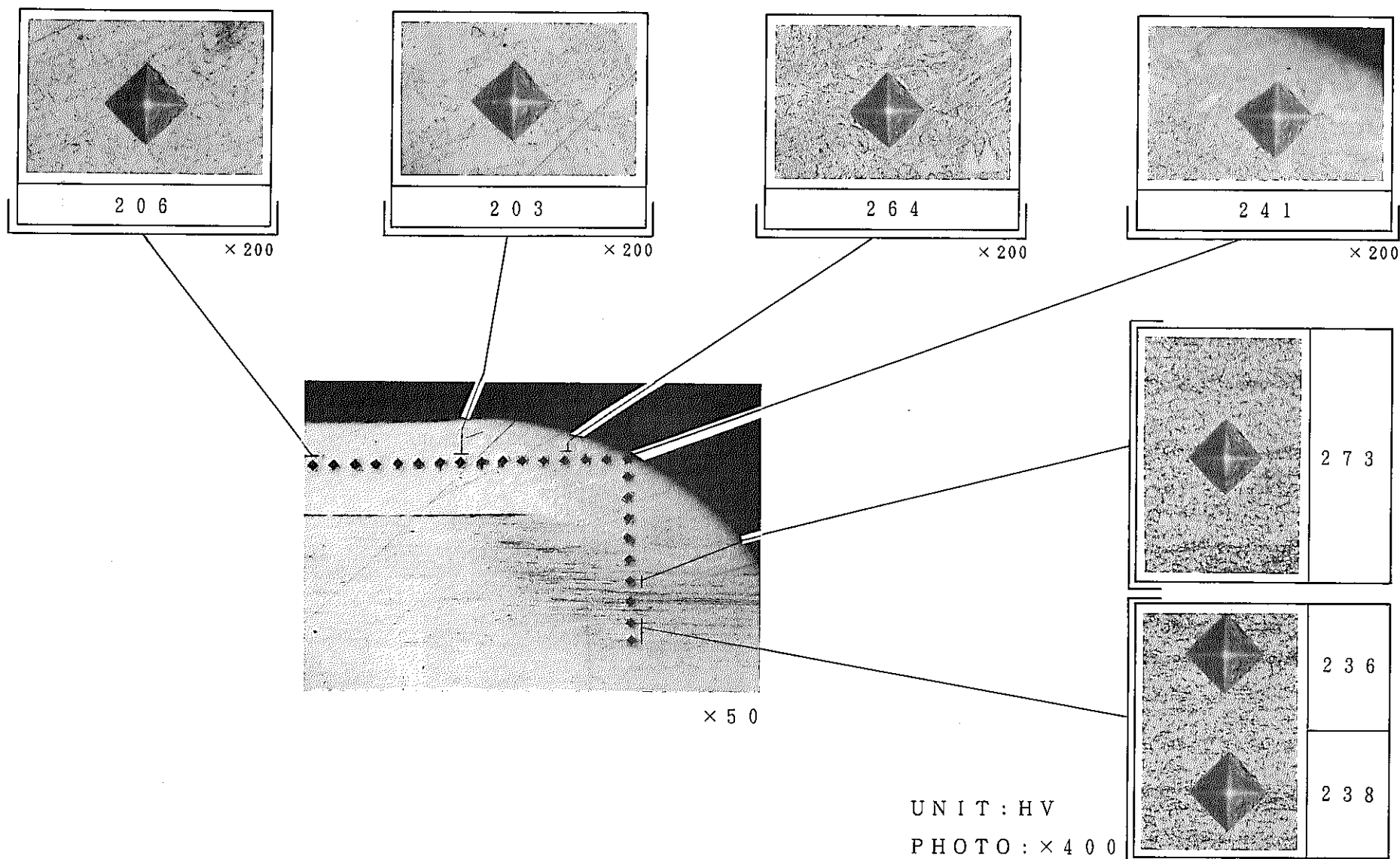
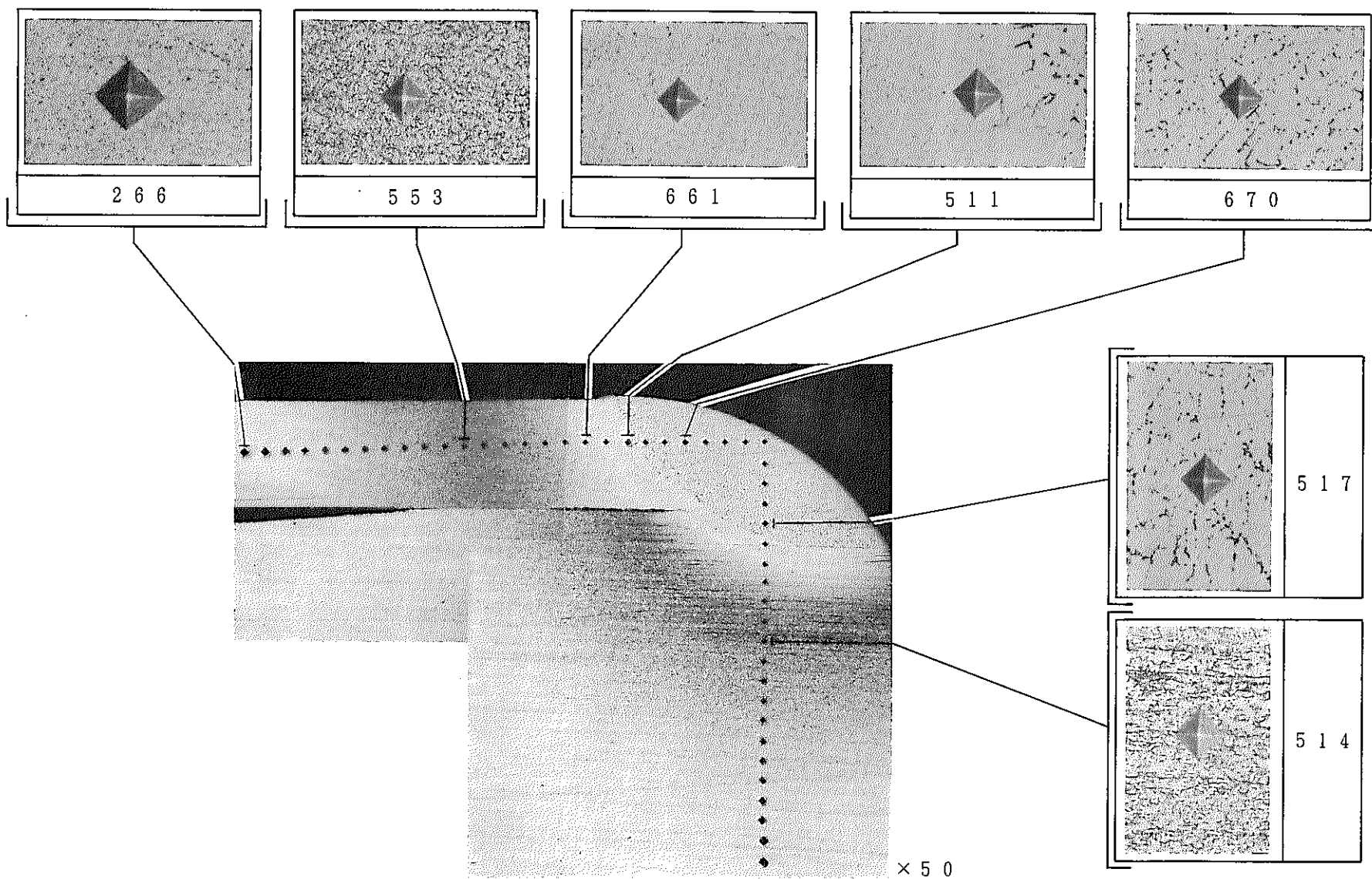


写真-11 ビッカース硬さ試験 (TIG, FK, 熱処理有)



UNIT:HV
 PHOTO:×400

写真-12 ビッカース硬さ試験 (TIG, FS, 熱処理無)

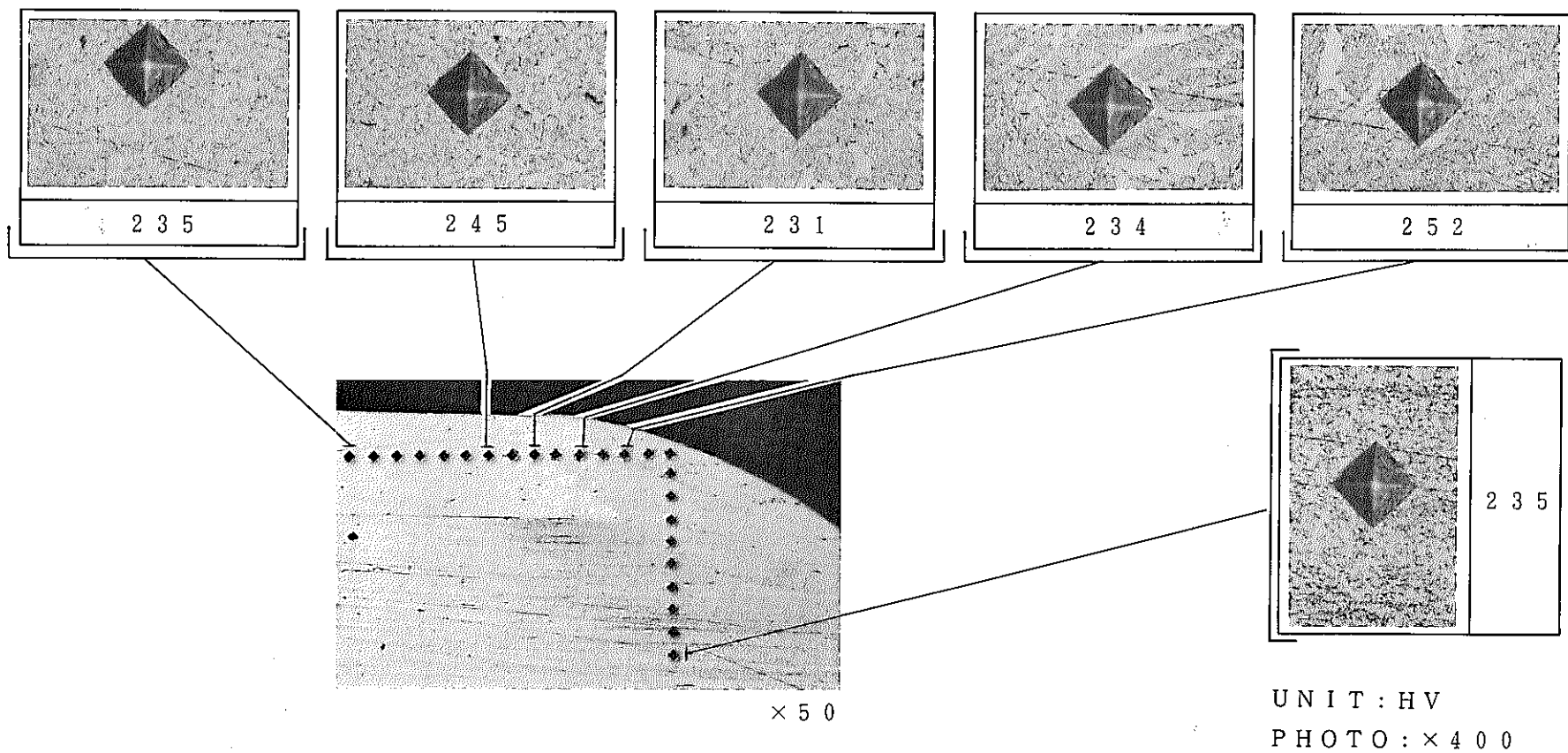
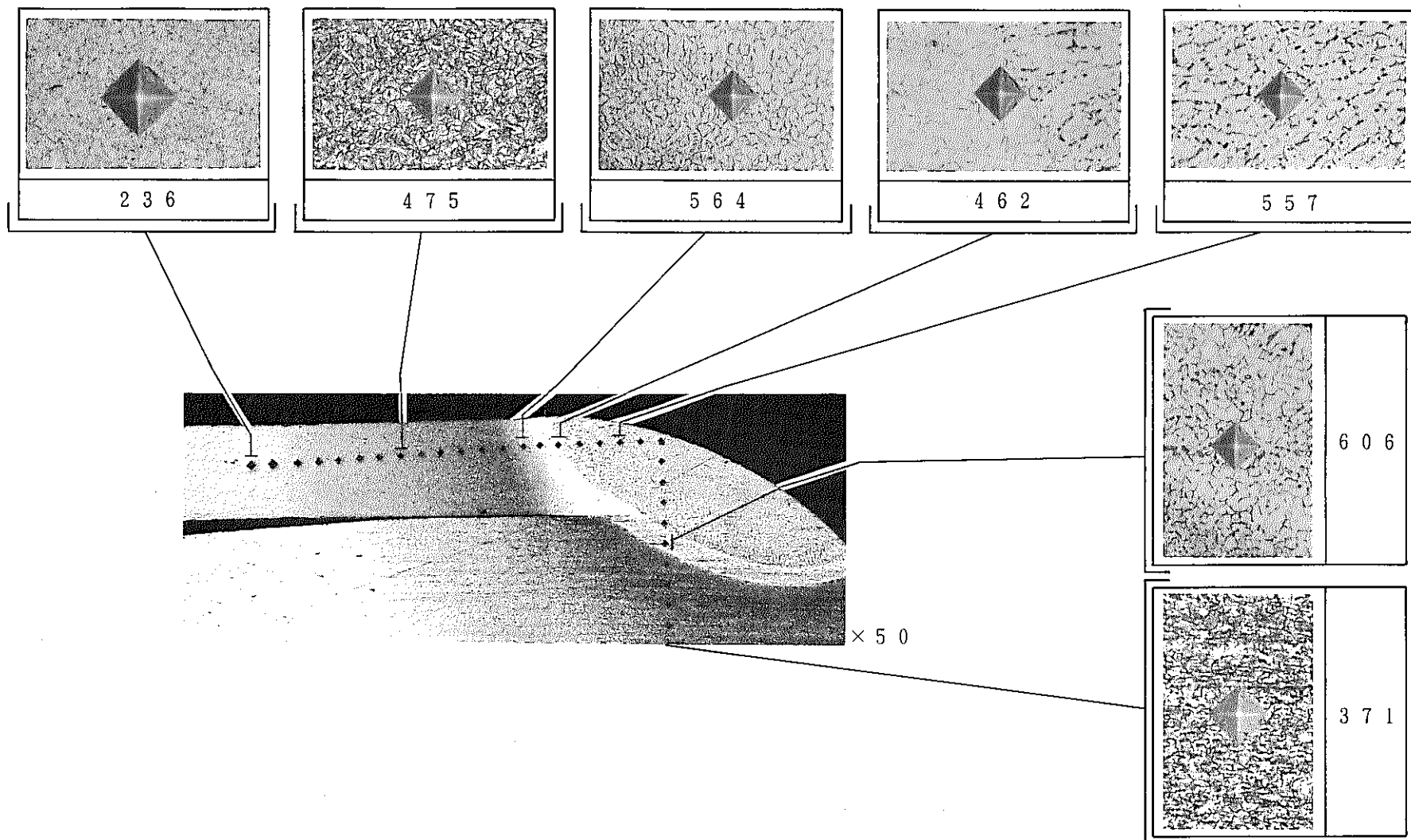


写真-13 ビッカース硬さ試験 (TIG, FS, 熱処理有)



UNIT:HV
PHOTO:×400

写真-14 ビッカース硬さ試験 (TIG, FSP, 熱処理無)

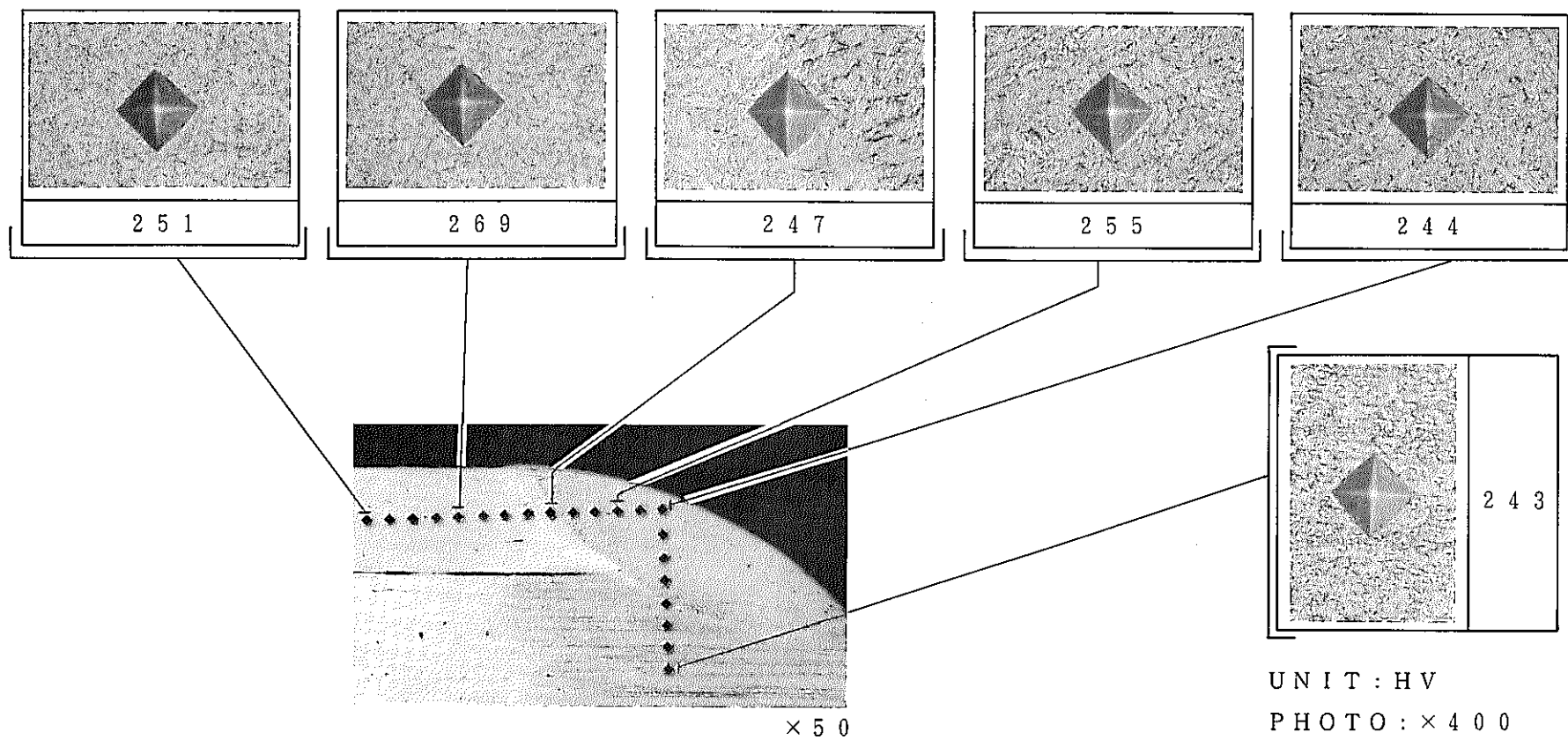


写真-15 ビッカース硬さ試験 (TIG, FSP, 熱処理有)

6.5.2 レーザ溶接法

① 熱処理（無）について

- FK材で、最も高い硬度値を示したのは、溶接金属部の約430HVである。また溶接金属部内の硬度値に若干の差が観察されたが、被覆管側の熱影響部とボンド部の硬度差はない。
- FS材で、最も高い硬度値を示したのは、溶接金属部の約550HVであり、その他は、FK材と同様な観察結果になった。また、FK材よりも溶接金属部の硬度は、高く溶接金属の表面部に断面金相で観察されたすじ状の組織位置では、FK材約350HVに対しFS材約110HVとなりFS材の方が低い値を示した。

尚、溶接金属の深底部に観察されたしみ状の組織位置では、FS材約370HV、FK材約250HVとなり、FS材の方が高い値を示した。

- FS材で最も高い硬度値を示したのは、溶接金属部の約580HVである。また溶接金属部内の硬度差は、それほどない。

尚、FK材、FS材と同様に断面金相で観察された溶接金属表面部のすじ状の組織位置の硬度は、約470HV、溶接金属深底部のしみ状の組織位置では、約360HVとなった。

② 熱処理（有）について

- 3鋼種とも溶接金属部の硬度は、約250HV～300HVとなり母材の硬度に近ずき、硬度差は、それほどない。また、断面金相で観察された溶接金属表面部のすじ状の組織位置では、FK材：170HV、FS材：203HV、FSF材：106HVであり、溶接金属深底部のしみ状の組織では、FK材：224HV、FS材：209HV、FSF材：217HVで深底部の硬度差は小さいが表面部については、大きくなっている。

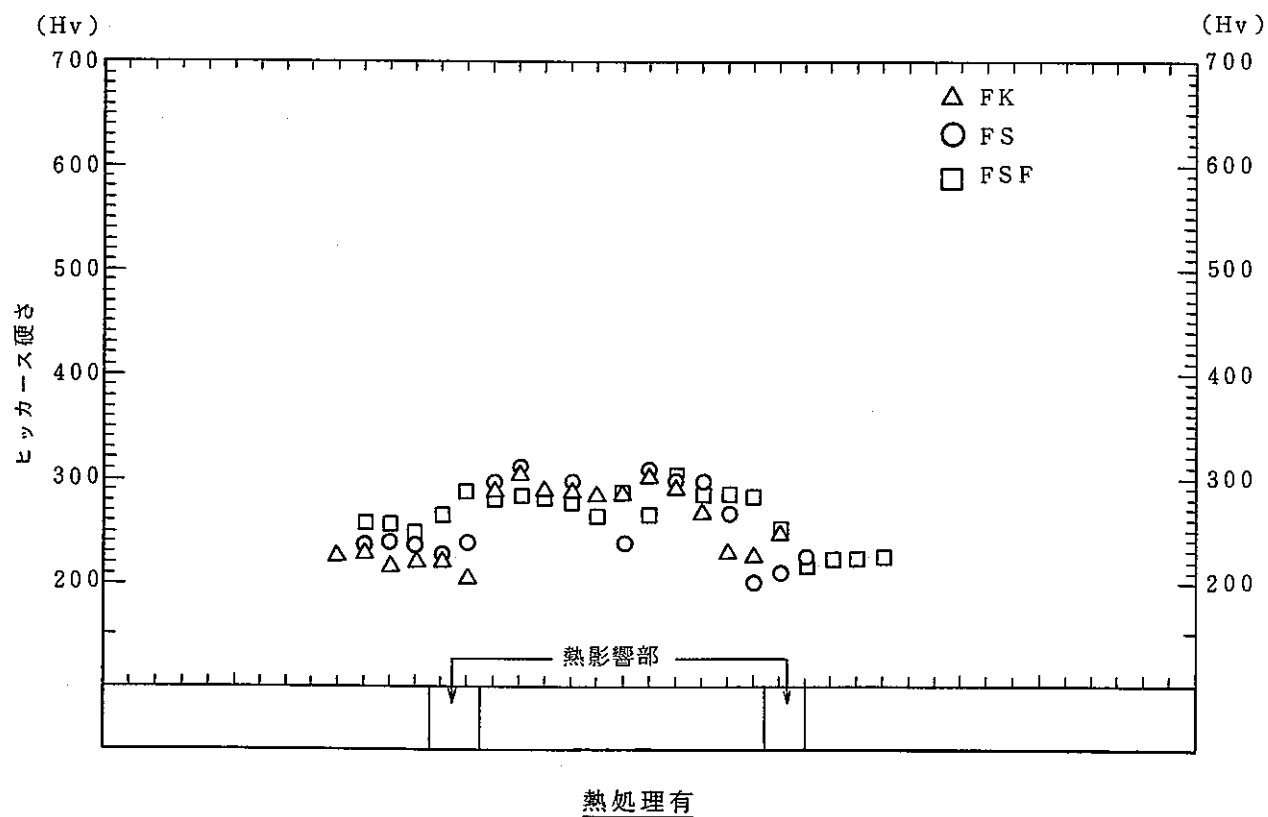
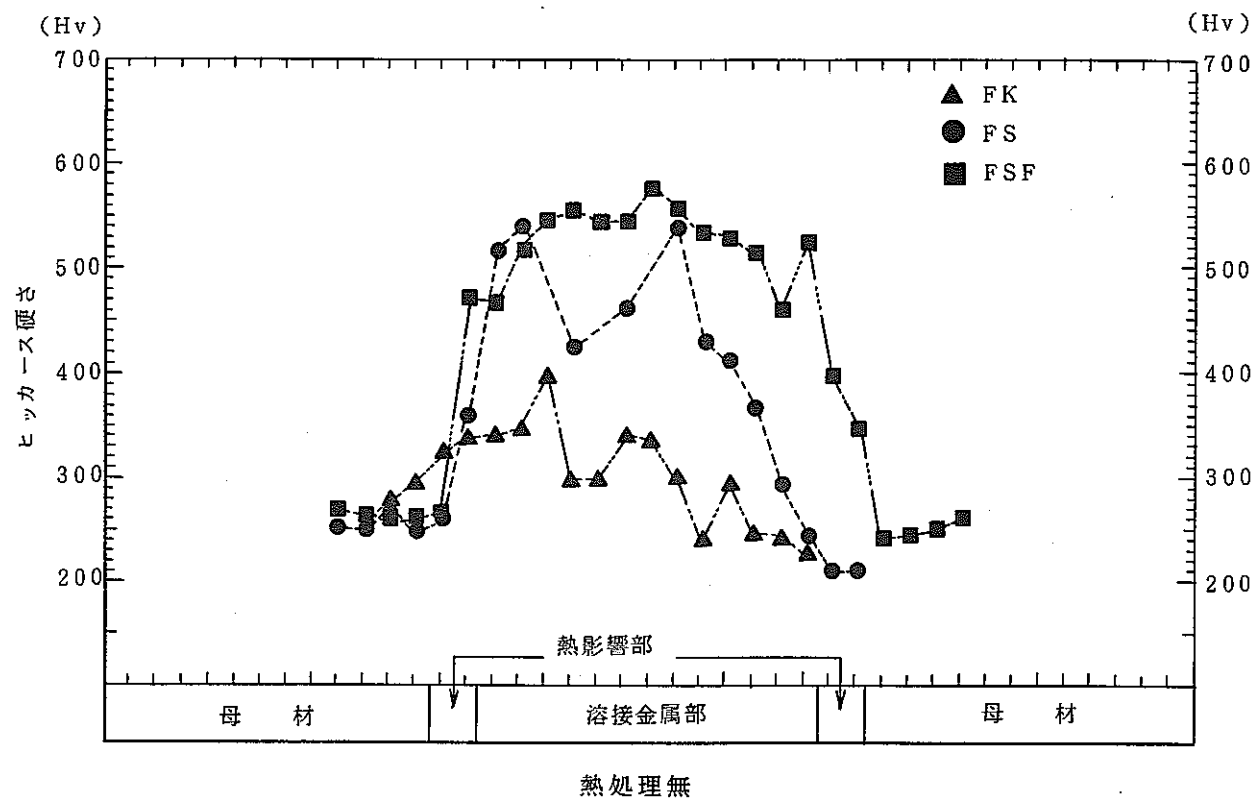
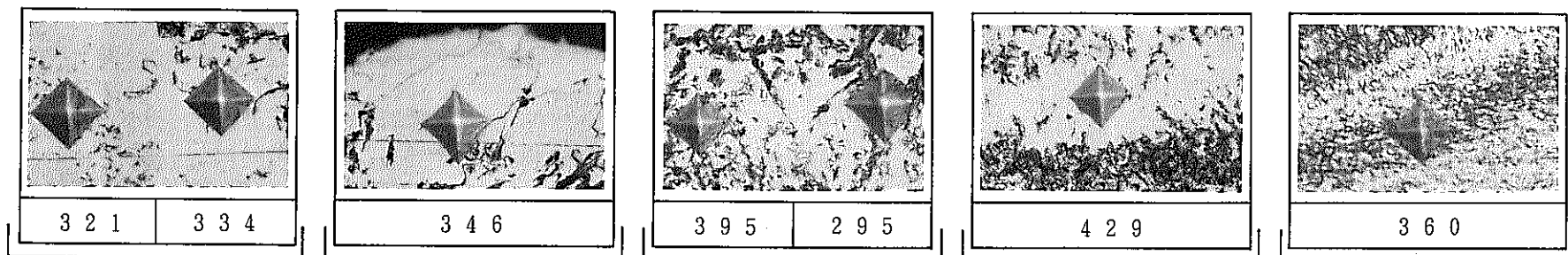
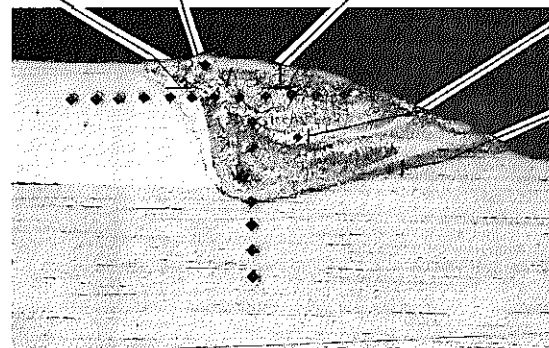


図-4 ビッカース硬さ試験結果 (レーザ)



UNIT:HV
PHOTO:×400



×50

写真-16 ビッカース硬さ試験（レーザ，FK，熱処理無）

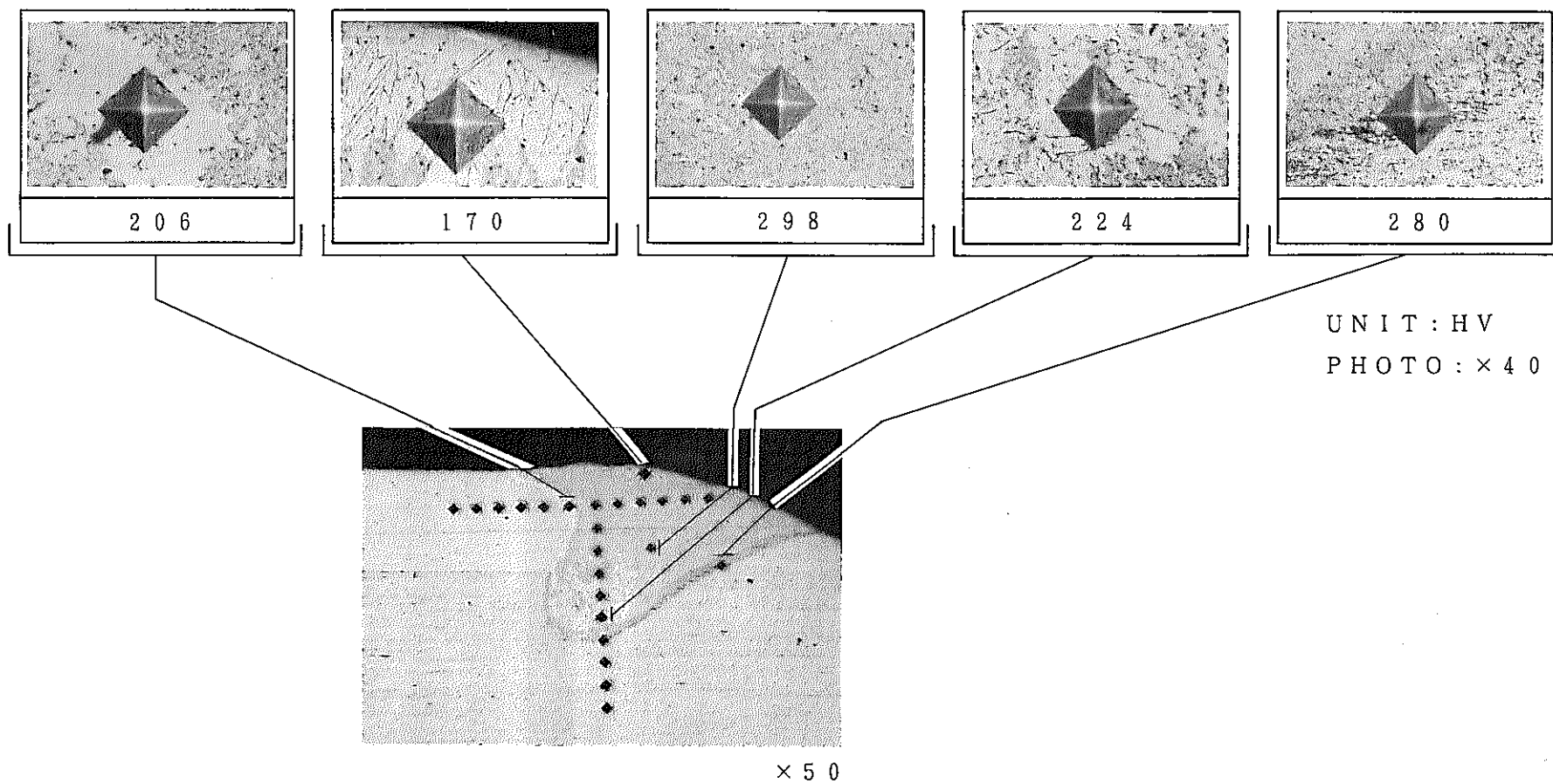
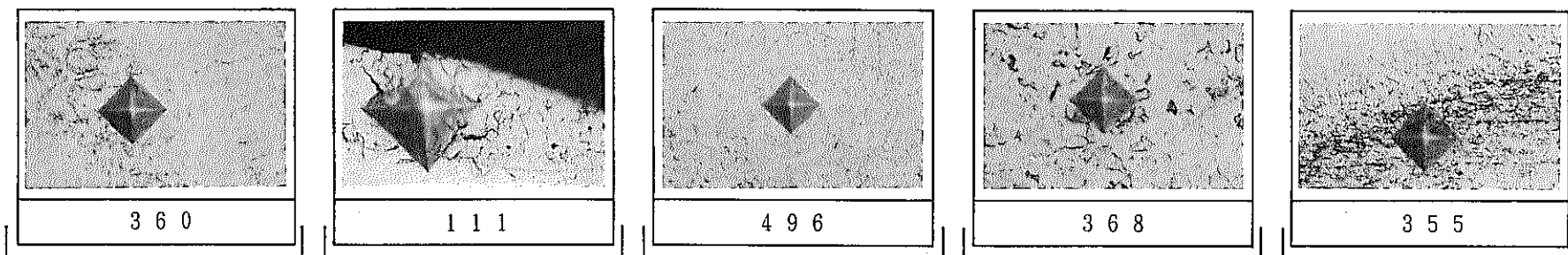
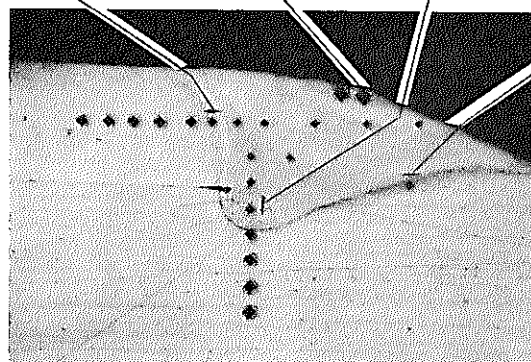


写真-17 ビッカース硬さ試験（レーザ，FK，熱処理有）

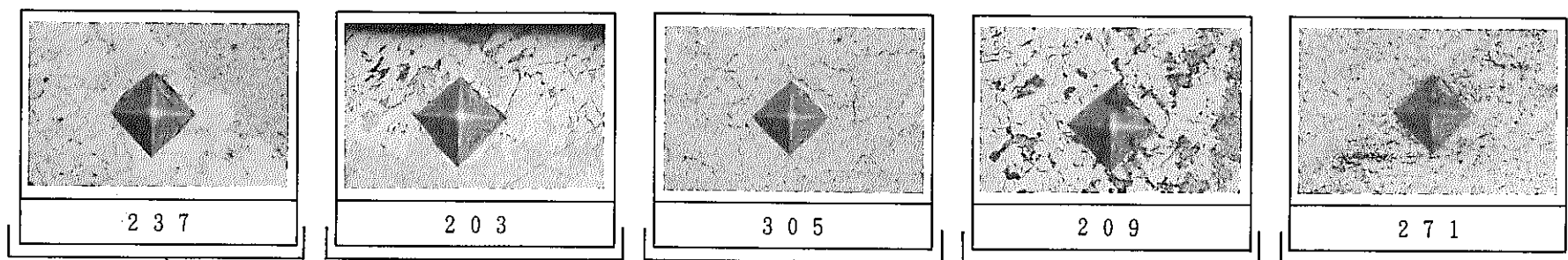


UNIT:HV
PHOTO:×400

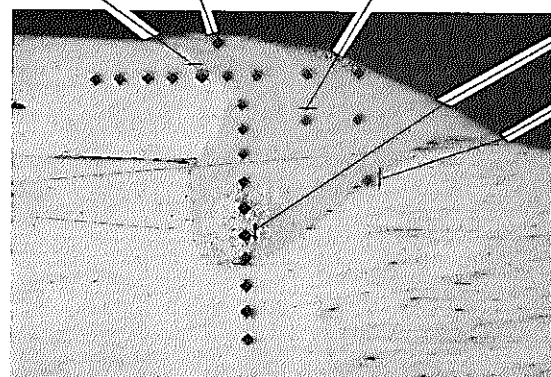


×50

写真-18 ビッカース硬さ試験（レーザ，FS，熱処理無）

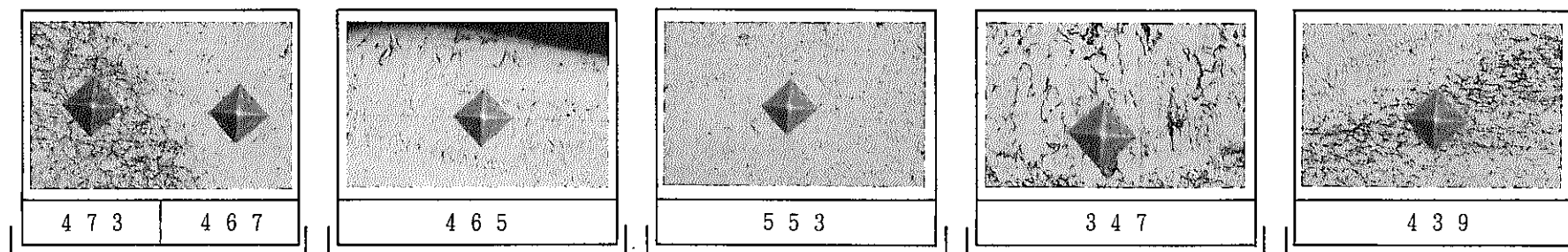


UNIT:HV
PHOTO:×400

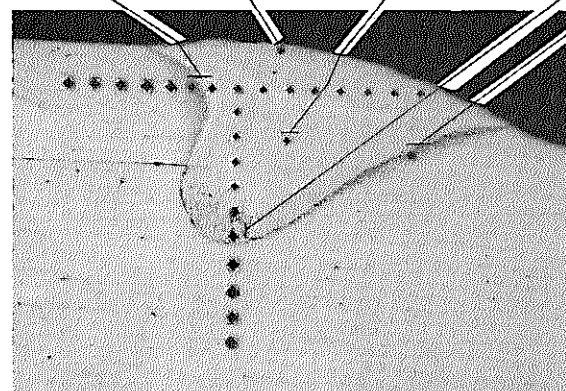


×50

写真-19 ビッカース硬さ試験（レーザ，FS，熱処理有）

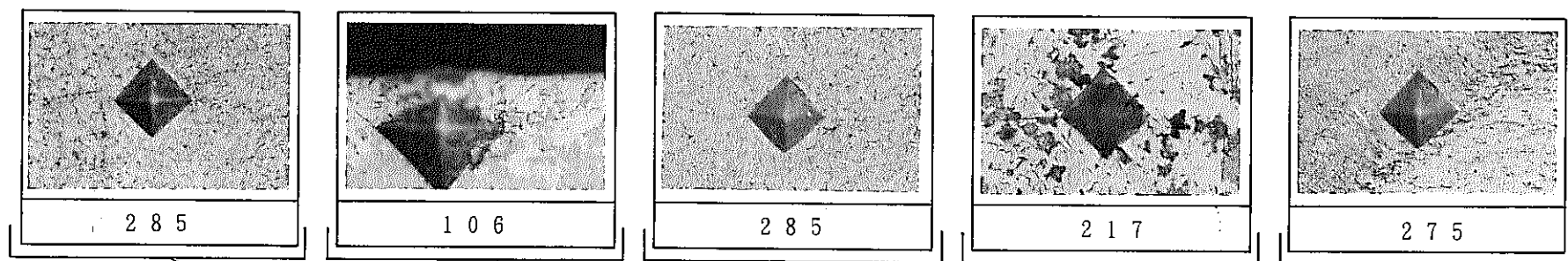


UNIT : HV
PHOTO : × 4 0 0

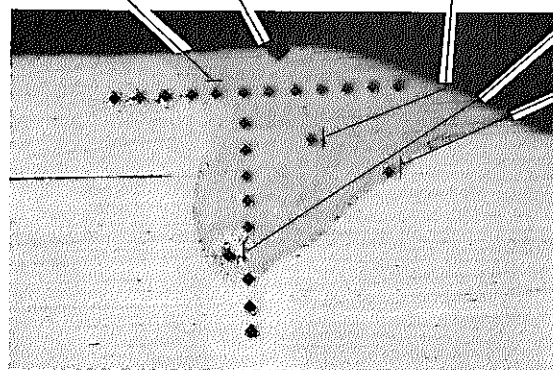


× 5 0

写真-20 ビッカース硬さ試験（レーザ，FSP，熱処理無）



UNIT:HV
PHOTO:×400



×50

写真-21 ビッカース硬さ試験（レーザ，FSF，熱処理有）

6.6 引張試験

引張試験結果を表－8及び図－5～図－7に示す。

6.6.1 TIG溶接法

① 熱処理（無）について

- FK材は、RTで引張強さが $81.7\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C では、 $34.8\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材の引張強さ（RT： $79.1\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C ： $33.3\text{kg}/\text{mm}^2$ ）よりも高い値を示し、伸びについては、RTで19%、 650°C で17%となり母材の伸び（RT：16%、 650°C ：20%）と比較し、RTで高目になり 650°C で低目になったが、母材とさほど変わらない。また破断位置については、RT、 650°C とも管部より破断した。
- FS材は、RTで引張強さが $77.5\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C では $30\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材の引張強さ（RT： $72.2\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C ： $27.9\text{kg}/\text{mm}^2$ ）よりも高い値を示し伸びについては、RTで17%、 650°C で18%となり母材の伸び（RT：18%、 650°C ：13%）と比較しRTで低い値を示し、 650°C では、高い値を示した。また、破断位置については、RT、 650°C とも管部より破断した。
- FSP材は、RTで引張強さが $81.2\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C では、 $31\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材の引張強さ（RT： $74.6\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C ： $27.6\text{kg}/\text{mm}^2$ ）よりも高い値を示し伸びについては、RTで20%、 650°C で14%となり母材の伸び（RT：18%、 650°C ：14%）と比較しRTで高い値を示し 650°C では同等値になった。また破断位置については、RT、 650°C とも管部より破断した。

② 熱処理（有）について

- FK材は、RTで引張強さが $68.9\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C では、 $27.2\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材及び熱処理無と比較しRT、 650°C とも低下した。

また、伸びについては、RTで21%、 650°C で17%となり、熱処理無とほぼ同等値を示すものの母材よりはRTで高い値を示し 650°C で低い値を示した。

なお破断位置については、RT、 650°C とも管部より破断した。

- FS材は、RTで引張強さが $71.3\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C では、 $27.6\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材及び熱処理無と比較し母材とほぼ同等値を示すものの熱処理無よりは若干低下した。また伸びについては、RT、 650°C とも18%となり、母材の 650°C よりも高い値を示

し、その他は、熱処理無（RT, 650℃）及び母材のRTとほぼ同等値を示した。

なお破断位置については、RT, 650℃とも管部より破断した。

- FSF材は、RTで引張強さが $82.9\text{kg}/\text{mm}^2$ 、650℃では、 $29.2\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材及び熱処理無と比較し母材よりも高い値を示し、熱処理無とほぼ同等値を示した。また伸びについては、RTで17%、650℃で16%となり母材とほぼ同等値になり、熱処理無と比較するとRTで低い値を示し、650℃では高い値を示した。なお破断位置については、RTで管部、650℃で熱影響部より破断した。

6.6.2 パルスTIG溶接法

① 熱処理（無）について

- FK材は、RTで引張強さが $82.1\text{kg}/\text{mm}^2$ 、650℃では、 $35.5\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材より高い値を示した。また、伸びについては、RT, 650℃とも19%となり、母材より、RTで若干高い値を示し、650℃では、ほぼ同等値を示した。なお破断位置については、RT, 650℃とも管部より破断した。
- FS材は、RTで引張強さが $75.4\text{kg}/\text{mm}^2$ 、650℃では $31\text{kg}/\text{mm}^2$ となり、母材より若干高い値を示した。また、伸びについては、RT, 650℃とも17%となり母材と比較しRTでほぼ同等値、650℃で若干高い値を示した。なお破断位置については、RT, 650℃とも管部より破断した。
- FSF材は、RTで引張強さが $81.2\text{kg}/\text{mm}^2$ 、650℃では、 $28.3\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材よりRTで若干高い値を示し、650℃では、低い値を示した。また、伸びについては、RTで18%、650℃で21%となりRTは母材と同等値を示し650℃では母材より高い値を示した。なお破断位置については、RT, 650℃とも管部より破断した。

② 熱処理（有）について

- FK材は、RTで引張強さが $69.6\text{kg}/\text{mm}^2$ 、650℃で $27.6\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材及び熱処理無より低い値を示した。また伸びについては、RTで21%、650℃で22%となり母材及び熱処理無よりも若干高い値を示した。なお破断位置については、RT, 650℃とも管部より破断した。
- FS材は、RTで引張強さが $73\text{kg}/\text{mm}^2$ 、650℃で $28.2\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材とほぼ同等値を示し、熱処理無よりは、若干低い値を示した。また、伸びについてはRTで

19%，650℃で17%となりRTで母材及び熱処理無よりも若干高い値を示し，650℃では母材より高く熱処理無と同等値を示した。なお破断位置については，RTで管部，650℃で熱影響部より破断した。

- FSF材は，RTで引張強さが80.5kg/mm²，650℃で30.2kg/mm²となり母材よりも若干高い値を示し，熱処理無とほぼ同等値を示した。また伸びについては，RT，650℃とも17%となり，RTは母材及び熱処理無とほぼ同等値を示し，650℃については母材より若干高く，熱処理無よりは，若干低くなった。なお破断位置については，RTで管部，650℃で熱影響部より破断した。

6.6.3 レーザ溶接法

① 熱処理（無）について

- FK材は，RTで引張強さが81.6kg/mm²，650℃では，31.8kg/mm²となり母材と比較するとRTで母材より若干高い値を示し，650℃では母材より若干低い値を示した。また伸びについては，RTで18%，650℃で17%となり母材と比較するとRTで母材より若干高い値を示し，650℃では若干低い値を示した。なお破断位置については，RT，650℃とも管部より破断した。
- FS材は，RTで引張強さが78.2kg/mm²，650℃では，28.2kg/mm²となり母材と比較するとRT，650℃とも母材より若干高い値を示した。また伸びについては，RTで20%，650℃で17%となり，母材と比較するとRT，650℃とも母材より高い値を示した。なお破断位置については，RT，650℃とも管部より破断した。
- FSF材は，RTで引張強さが81.4kg/mm²，650℃では31.3kg/mm²となり母材と比較するとRT，650℃とも母材より高い値を示した。また伸びについては，RTで17%，650℃で13%となり，母材と比較するとほぼ同等値を示した。なお破断位置については，RT，650℃とも管部より破断した。

② 熱処理（有）について

- FK材は，RTで引張強さが69.4kg/mm²，650℃では，26.3kg/mm²となり母材及び熱処理無よりも低い値を示した。また伸びについては，RTで19%，650℃で22%となり母材及び熱処理無よりも高い値を示した。なお破断位置については，RT，650℃とも管部より破断した。

- PS材は、RTで引張強さが $72.5\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C では、 $32.5\text{kg}/\text{mm}^2$ となり、母材及び熱処理無とほぼ同等値を示した。また伸びについては、RT、 650°C とも18%となり母材と比較すると、RTで同等値を示し、 650°C では、母材よりも高い値を示した。次に熱処理無と比較すると、RTで若干低い値を示すものの 650°C では、ほぼ同等値を示した。なお破断位置については、RT、 650°C とも管部より破断した。
- FSP材は、RTで引張強さが $80.7\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 650°C では、 $29.1\text{kg}/\text{mm}^2$ となり母材よりは若干高い値を示し、熱処理無とほぼ同等値を示した。また伸びについてはRTで17%、 650°C で21%となり、母材及び熱処理無と比較すると、RTは、同等値、 650°C では、高い値を示した。なお破断位置については、RT、 650°C とも管部より破断した。

表-8 引張試験結果

溶接法	鋼種	試料 No.	熱処理 有 無	試験温度 (℃)	破断荷重 (kg)	引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び率 (%)	破断位置	
レ ー ザ	F K	E21	有	RT	597.1	69.4	52.2	19	管 部	
		E43	有	650	226.1	26.3	24.8	22		
		E41	無	RT	701.8	81.6	64.0	18		
		E46	無	650	273.5	31.8	29.8	17		
	F S	E20	有	RT	623.6	72.5	53.1	18		
		E19	有	650	279.1	32.5	31.4	18		
		E35	無	RT	672.6	78.2	51.7	20		
		E45	無	650	242.2	28.2	26.2	17		
	F S F	E42	有	RT	693.7	80.7	59.9	17		
		E12	有	650	250.2	29.1	27.0	21		
		E15	無	RT	700.2	81.4	66.9	17		
		E2	無	650	269.4	31.3	30.5	13		
T I G	F K	96	有	RT	592.9	68.9	51.4	21		
		79	有	650	234.0	27.2	26.9	17		
		87	無	RT	702.3	81.7	60.8	19		
		68	無	650	299.7	34.8	34.5	17		
	F S	7	有	RT	613.0	71.3	52.1	18		
		33	有	650	237.2	27.6	27.2	18		
		50	無	RT	666.1	77.5	63.4	17		
		23	無	650	258.4	30.0	29.7	18		↓
	F S F	95	有	RT	712.8	82.9	59.9	17	管 部	
		49	有	650	251.2	29.2	28.4	16	熱影響部	
		92	無	RT	698.3	81.2	57.0	20	管 部	
		34	無	650	266.4	31.0	30.3	14	管 部	
パ ル ス T I G	F K	83	有	RT	298.6	69.6	53.6	21	管 部	
		16	有	650	237.1	27.6	27.2	22		
		19	無	RT	706.4	82.1	60.1	19		
		24	無	650	305.5	35.5	34.9	19		↓
	F S	100	有	RT	627.5	73.0	54.7	19	管 部	
		84	有	650	242.2	28.2	27.7	17	熱影響部	
		2	無	RT	648.4	75.4	59.2	17	管 部	
		64	無	650	266.2	31.0	30.2	17		↓
	F S F	61	有	RT	692.7	80.5	59.3	17	管 部	
		44	有	650	259.8	30.2	29.3	17	熱影響部	
		82	無	RT	698.3	81.2	59.3	18	管 部	
		17	無	650	243.4	28.3	27.6	21	管 部	

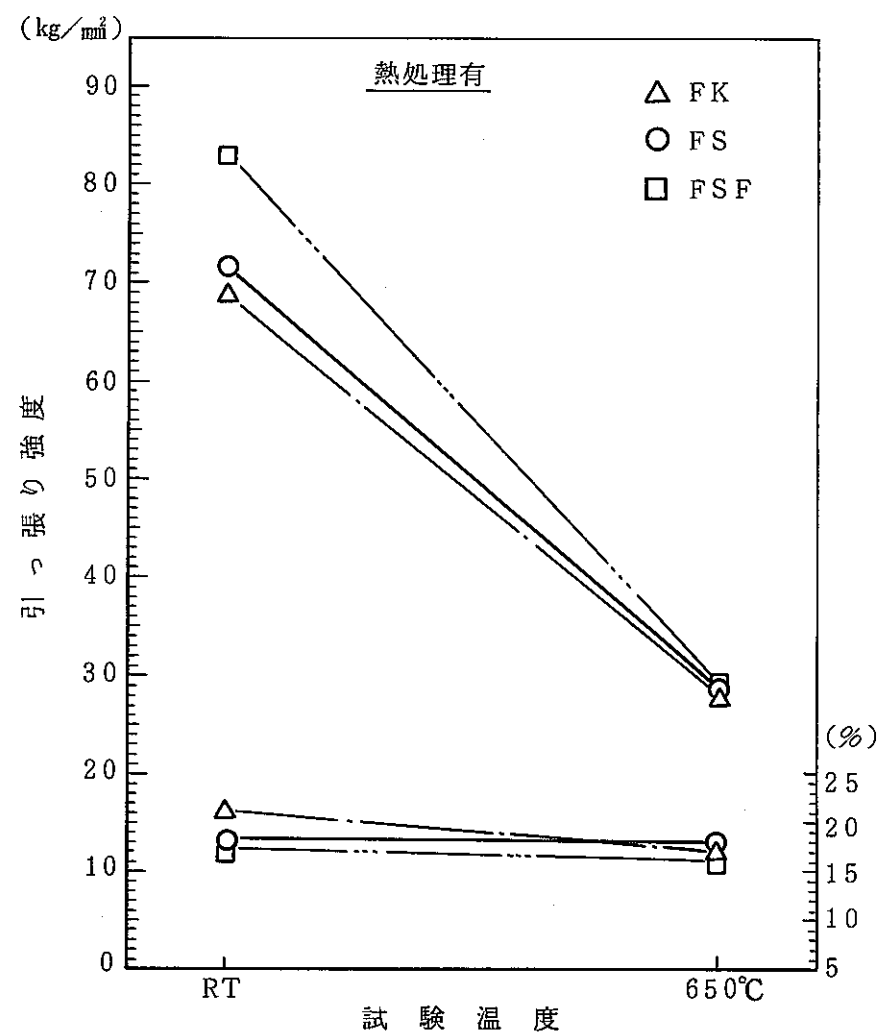
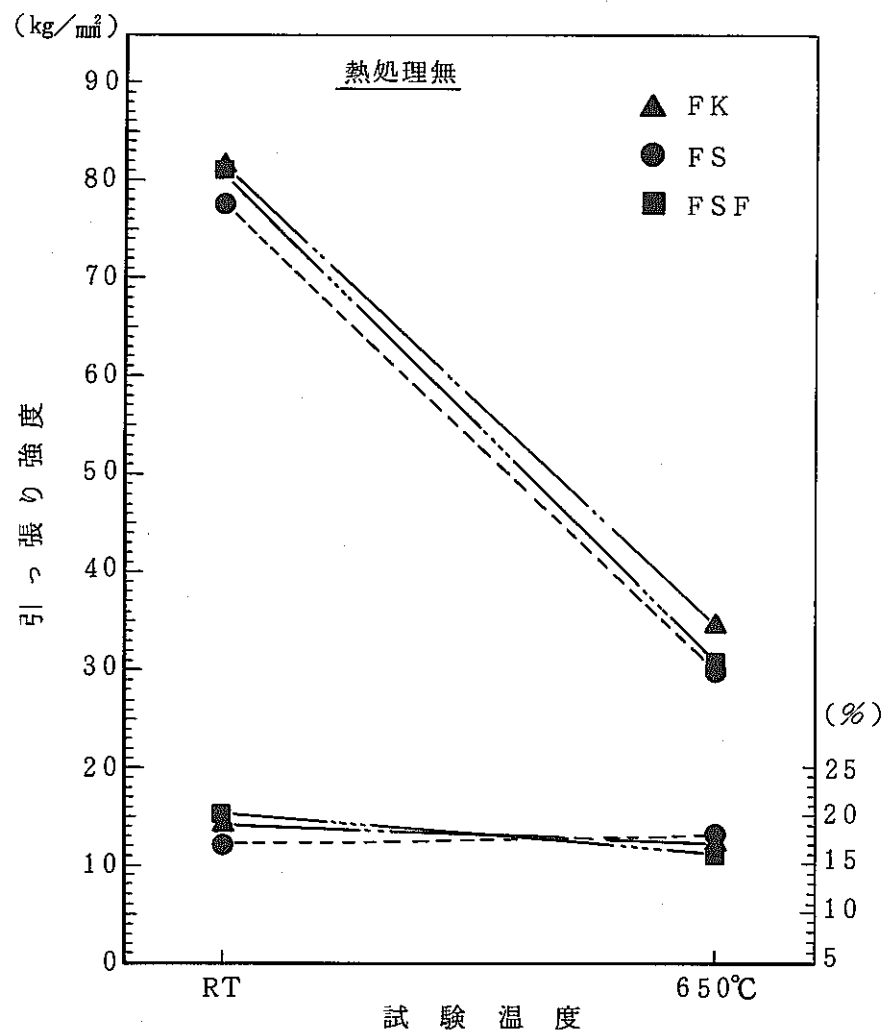


図-5 引張試験結果 (TIG)

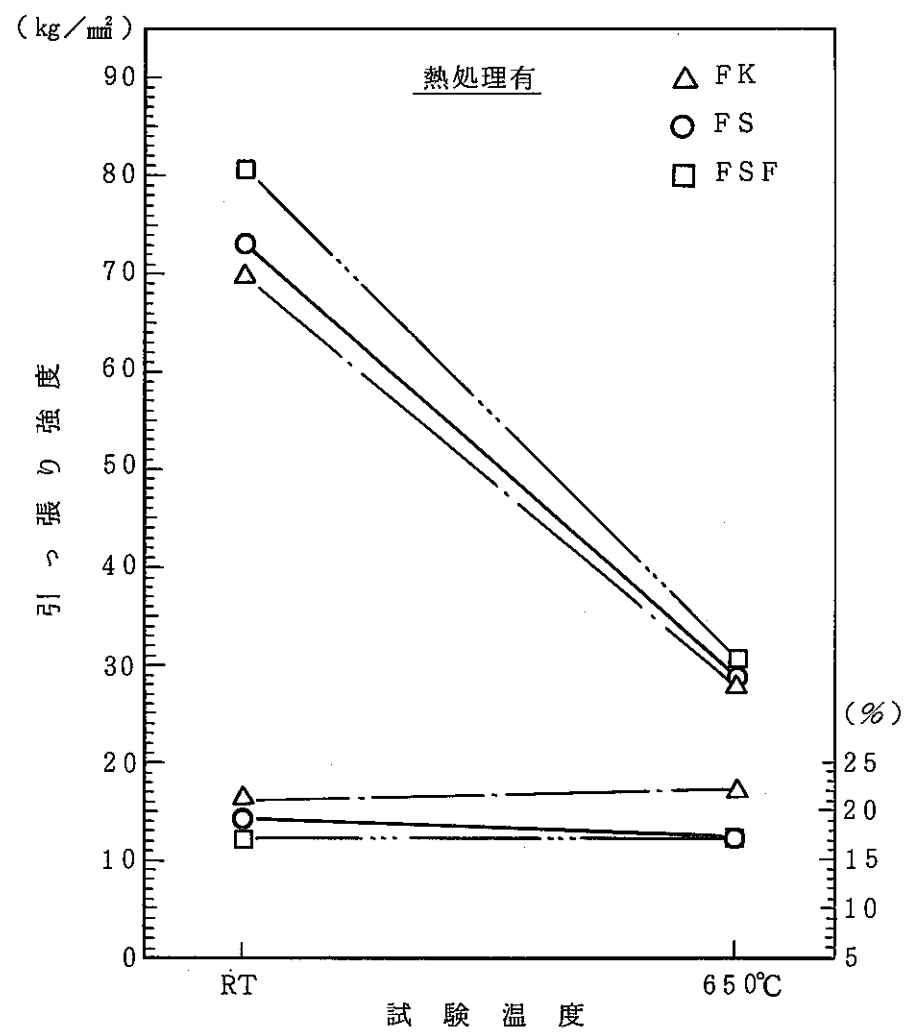
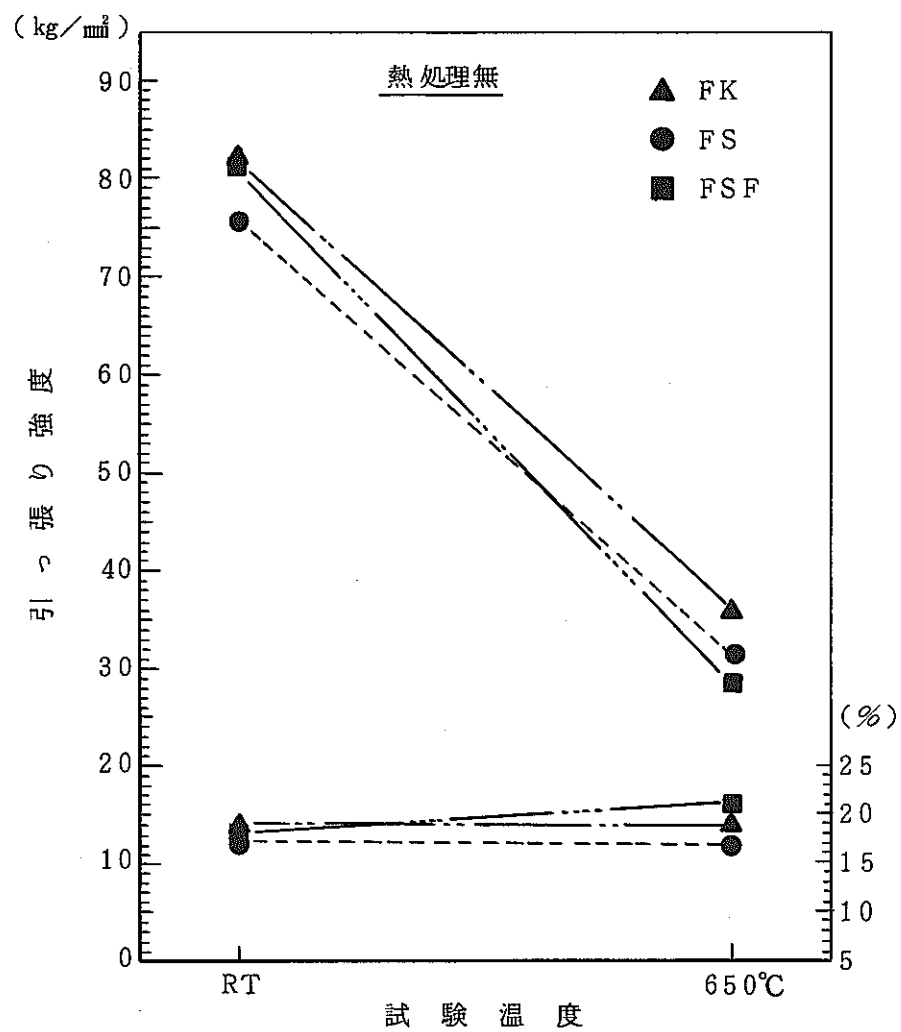


図-6 引張試験結果 (パルスTIG)

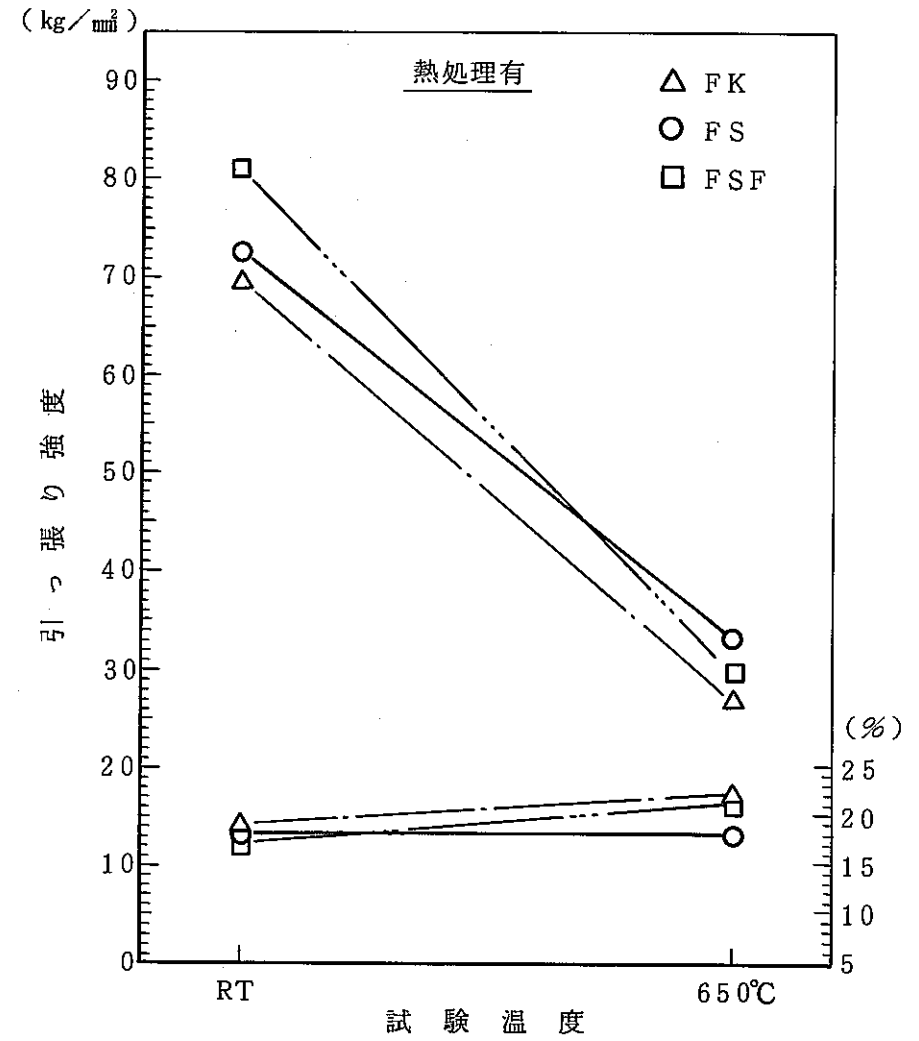
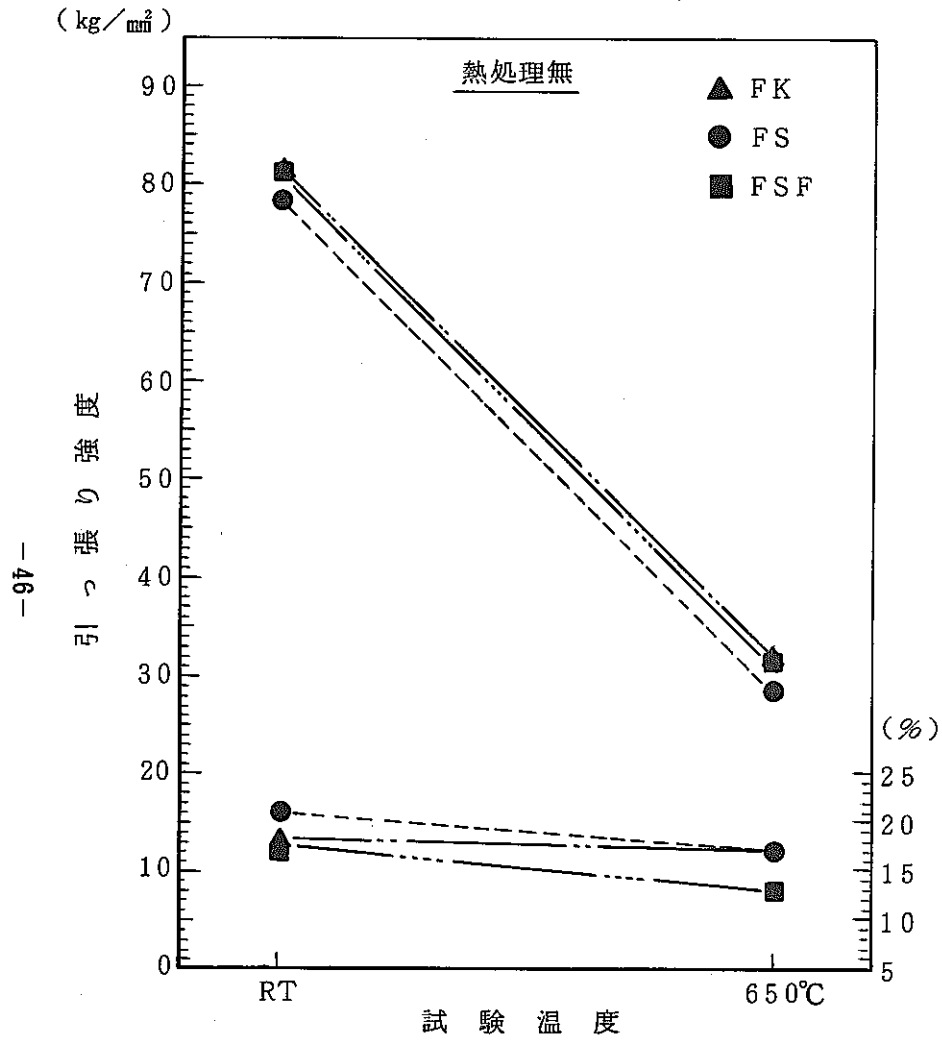


図-7 引張試験結果 (レーザ)

6.7 単軸クリープ試験

単軸クリープ試験結果を表-9～表-10に示す。

6.7.1 TIG溶接法

① 熱処理（無）について

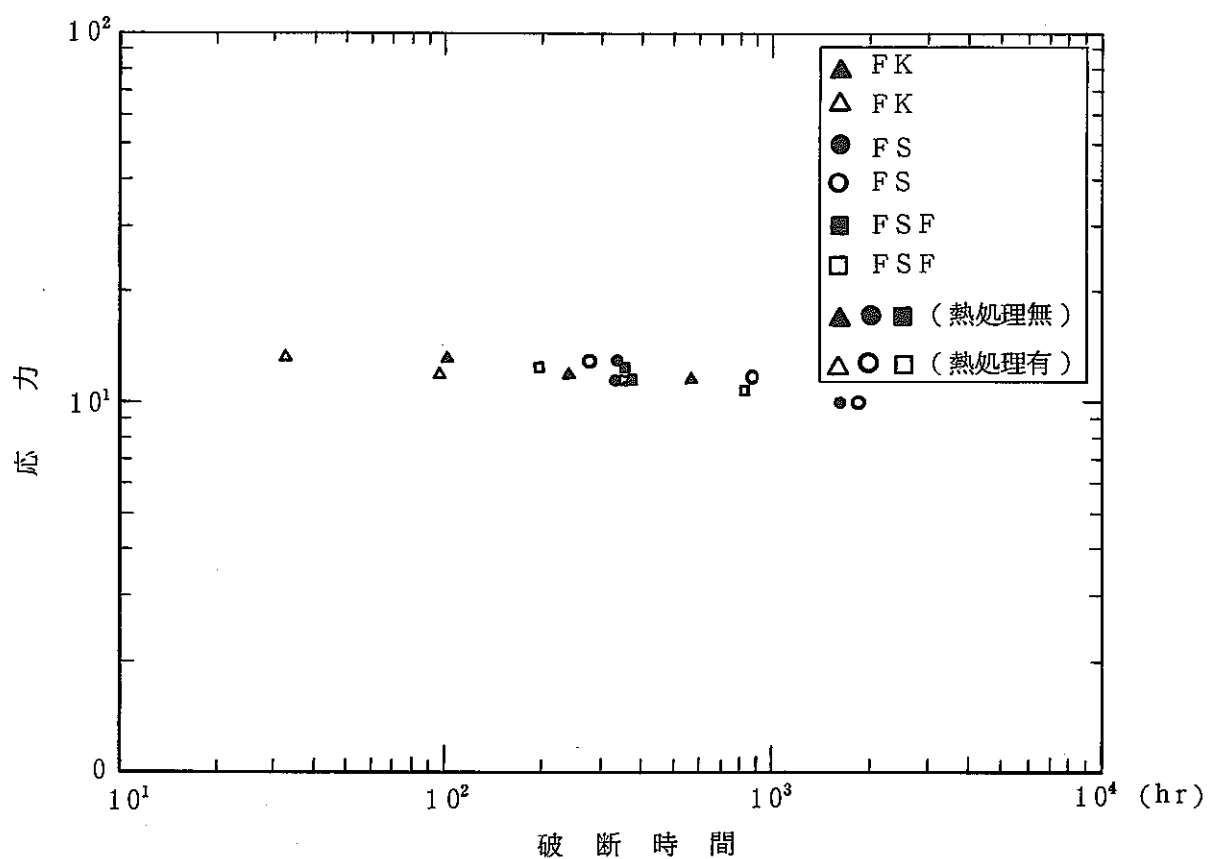
- FK材は、応力 $14\text{kg}/\text{mm}^2$ では、102.7時間で破断し、破断位置は管部であった。
 応力 $12.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、240.1時間で溶接部より破断し、応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ では、
 585.7時間でネジ部より破断した。
- FS材は、応力 $13.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、337.8時間で破断し、破断位置は溶接部であった。
 応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ では、331時間でネジ部より破断し、応力 $10\text{kg}/\text{mm}^2$ では、
 1763.5時間でネジ部より破断した。
- FSP材は、応力 $13\text{kg}/\text{mm}^2$ では、352.8時間で破断し、破断位置はネジ部であった。
 応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ では、371.3時間で溶接部より破断し、応力 $11\text{kg}/\text{mm}^2$ では、
 811.4時間で溶接部より破断した。

② 熱処理（有）について

- FK材は、応力 $14\text{kg}/\text{mm}^2$ では、32.1時間で破断し、破断位置はネジ部であった。
 応力 $12.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、97時間で管部より破断し、応力 $11\text{kg}/\text{mm}^2$ では、819.2時
 間で溶接部より破断した。
- FS材は、応力 $13.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、287.2時間で破断し、破断位置はネジ部であっ
 た。応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ では、879.1時間で溶接部より破断し、応力 $10\text{kg}/\text{mm}^2$ では、
 1898.4時間でネジ部より破断した。
- FSP材は、応力 $13\text{kg}/\text{mm}^2$ では、196.7時間で破断し、破断位置はネジ部であった。
 応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ では、356.8時間でネジ部より破断し、応力 $11\text{kg}/\text{mm}^2$ では、824.8
 時間で溶接部より破断した。

表-9 単軸クリープ試験結果 (TIG)

溶 接 法	材 質	処理条件	試 験 片 番 号	破断時間 (Hr)	応 力 (kg/mm ²)	载荷重 (kg)	破断位置
TIG溶接	61FS	熱処理有	54-8	287.2	13.5	12.0	ネジ部
			111-5	879.1	12.0	10.7	溶接部
			181-200	1898.4	10.0	8.9	ネジ部
		熱処理無	11-158	337.8	13.5	12.0	溶接部
			57-84	331.0	12.0	10.7	ネジ部
			105-161	1763.5	10.0	8.9	ネジ部
	61FK	熱処理有	39-159	32.1	14.0	12.5	ネジ部
			72-103	97.0	12.5	11.1	管部
			20-114	819.2	11.0	9.8	溶接部
		熱処理無	157-52	102.7	14.0	12.5	管部
			104-3	240.1	12.5	11.1	溶接部
			108-71	585.7	12.0	10.7	ネジ部
	61FSF	熱処理有	198-152	196.7	13.0	11.6	ネジ部
			68-12	356.8	12.0	10.7	ネジ部
			115-17	824.8	11.0	9.8	溶接部
		熱処理無	102-35	352.8	13.0	11.6	ネジ部
			4-10	371.3	12.0	10.7	溶接部
			100-22	811.4	11.0	9.8	溶接部

(kg/mm²)

6.7.2 レーザ溶接法

① 熱処理（無）について

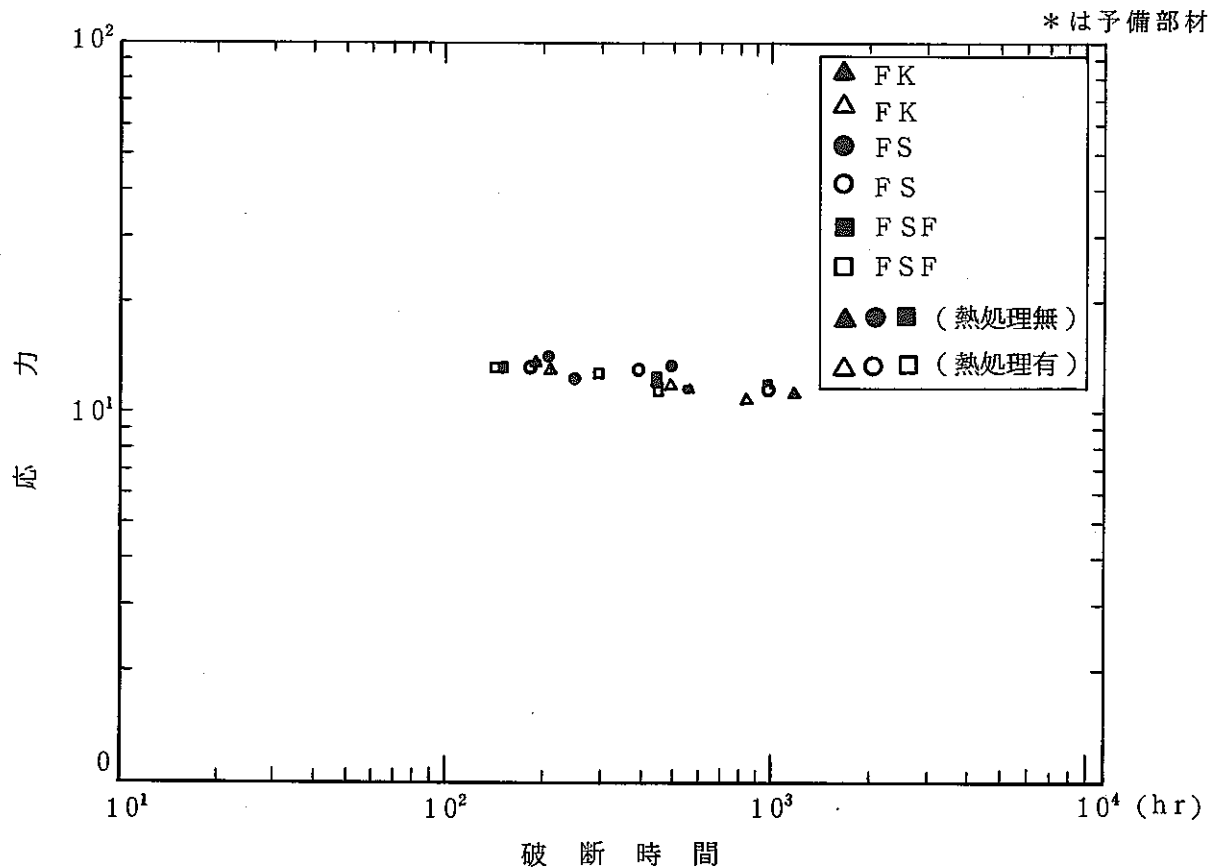
- FK材は、応力 $14\text{kg}/\text{mm}^2$ では、186.8時間で破断し、破断位置はネジ部であった。
応力 $12.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、430.9時間でネジ部より破断し、応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ では、55
 $7.5\text{kg}/\text{mm}^2$ でネジ部より破断した。また応力 $11.5\text{kg}/\text{mm}^2$ については、1154.6時
間でネジ部より破断した。
- FS材は、応力 $15\text{kg}/\text{mm}^2$ では、205.8時間で破断し、破断位置はネジ部であった。
応力 $14\text{kg}/\text{mm}^2$ では496.7時間でネジ部より破断し、応力 $13\text{kg}/\text{mm}^2$ では254.4時間
でネジ部より破断した。また応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ については、547時間でネジ部より破
断した。
- PSF材は、応力 $14\text{kg}/\text{mm}^2$ では、168.8時間で破断し、破断位置はネジ部であっ
た。応力 $13\text{kg}/\text{mm}^2$ では、434.8時間でネジ部より破断し、応力 $12.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、
982.5時間で溶接部より破断した。

② 熱処理（有）について

- FK材は、応力 $13.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、202.2時間で破断し、破断位置は溶接部であった。
応力 $12.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、487.2時間で溶接部より破断し、応力 $11\text{kg}/\text{mm}^2$ では、
816.1時間で溶接部より破断した。
- FS材は、応力 $14\text{kg}/\text{mm}^2$ では、182.9時間で破断し、破断位置は溶接部であった。
応力 $13.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、397.1時間でネジ部より破断し、応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ では、
984.1時間でネジ部より破断した。
- PS材は、応力 $14\text{kg}/\text{mm}^2$ では、158.9時間で破断し、破断位置はネジ部であった。
応力 $13.5\text{kg}/\text{mm}^2$ では、296.9時間でネジ部より破断し、応力 $12\text{kg}/\text{mm}^2$ では、
440.7時間でネジ部より破断した。

表-10 単軸クリープ試験結果 (レーザ)

溶 接 法	材 質	処理条件	試 験 片 番 号	破断時間 (Hr)	応 力 (kg/mm ²)	載荷重 (kg)	破断位置
レーザ溶接	61FS	熱処理有	10-92	182.9	14.0	12.5	溶 接 部
			20-96	397.1	13.5	12.0	ネ ジ 部
			8-99	984.1	12.0	10.7	ネ ジ 部
		熱処理無	103-76	205.8	15.0	13.4	ネ ジ 部
			36-93	496.7	14.0	12.5	ネ ジ 部
			33-66	254.4	13.0	11.6	ネ ジ 部
			* 11-64	547.0	12.0	10.7	ネ ジ 部
	61FK	熱処理有	14-73	202.2	13.5	12.0	溶 接 部
			31-71	487.2	12.5	11.1	溶 接 部
			30-81	816.1	11.0	9.8	溶 接 部
		熱処理無	43-88	186.8	14.0	12.5	ネ ジ 部
			39-72	430.9	12.5	11.1	ネ ジ 部
			53-77	557.5	12.0	10.7	ネ ジ 部
			* 45-56	1154.6	11.5	10.2	ネ ジ 部
	61FSF	熱処理有	32-3	158.9	14.0	12.5	ネ ジ 部
			50-40	296.9	13.5	12.0	ネ ジ 部
			44-19	440.7	12.0	10.7	ネ ジ 部
		熱処理無	9-65	168.8	14.0	12.5	ネ ジ 部
			12-52	434.8	13.0	11.6	ネ ジ 部
			21-74	982.5	12.5	11.1	溶 接 部



7. ま と め

- 外観検査において3溶接法とも溶接金属部表面にクラック等の欠陥は発生しなかった。
- ビード外径は、鋼種及び溶接法によって異なり比較的ビード外径が大きくなるのは、FK材、FSF材で小さくなり易いのは、FS材である。また溶接法から見るとTIG<パルスTIG<レーザの順に大きくなった。
- X線検査において3溶接法とも空孔、溶け込み不良等の溶接欠陥は、観察されなかった。
- 断面金相では、溶接法・鋼種・熱処理有無によって溶接金属部の組織は異なり溶接法から見るとレーザ溶接の場合、溶接金属部表面及び内部にすじ状に伸びた組織が観察されたが、TIG溶接では、この様な組織は、観察されなかった。また、組織的にTIG溶接の方が結晶粒は、大きくなり易い。

次に鋼種から見ると、FK材は、結晶粒の成長が著しく現れ易くFS材、FSF材は、FK材に比べその変化は小さい。

注1)

熱処理を行うと溶接法及び鋼種に関係なく溶接金属部内部に白い部分が観察された。この現象はTIG溶接の場合おもに熱影響部に多く観察され、溶接金属部内部にも若干観察された。また、レーザ溶接についても溶接金属部内部に観察された。レーザ溶接で熱処理無
注2)
の際、すじ状の組織が溶接金属部表面及び内部に観察されたが、この現象は熱処理を行うことにより溶接金属部表面にのみ観察された。

- ビッカース硬さ試験については、TIG及びレーザ溶接を比較すると、熱処理無への場合はTIG溶接よりもレーザ溶接の方が溶接金属部の硬度は、3鋼種ともに低く、鋼種別では、FK材は、他の2鋼種に比べて溶接法に関係なく低い値を示した。また、熱処理を行うと、若干ではあるがレーザ溶接よりもTIG溶接の方が溶接金属部の硬度は低くなった。熱影響部の大きさについては、TIG溶接よりもレーザ溶接の方が狭い。

注1) 白色の組織とは、 δ フェライトが凝集し、粗大化したものである。

注2) すじ状の組織とは、冷却によるクラックである。

- 引張試験については、TIG・パルスTIG・レーザ溶接を比較すると、熱処理無の場合、溶接法に関係なく常温及び650℃とも同じ様な強度値を示した。また、鋼種別から見るとFK材、FSR材は、同じ様な強度値を示すものの、FS材は、他の2鋼種よりも強度は低下する。しかし、母材強度と比較すると、溶接法及び鋼種に関係なく強度は上回っている。

次に熱処理有の場合については、溶接法に関係なく常温及び650℃とも同じ様な強度値を示すものの、鋼種別から見ると、FK材は、他の2鋼種に比べ低い強度値を示した。また、熱処理無と比較すると熱処理有の方が強度は低下し母材強度と比較しても強度が下回るものも発生した。

- 単軸クリープ試験については、破断位置による破断時間のバラツキはあるものの溶接法及び鋼種、熱処理有無にさほど関係なく同じ様な強度を示した。

8. 考 察

高強度フェライト／マルテンサイト鋼は、溶接時に焼き入れ硬化を引き起こし、溶接金属部及び熱影響部の延性、じん性等が母材に比べ著しく劣ってしまうため、それを補う目的で、熱処理を施す必要がある。

溶接部及び熱影響部の硬さが増加するのは、溶接時の入熱により溶融した金属が急冷されマルテンサイトの組織になったためである。

焼き入れ硬化部の熱処理は、母材と同等の硬さを目標に行うが、今回行ったものの中には、母材の硬さより軟化してしまったものが一部あった。

これは、加熱温度が高すぎることや、加熱時間が長すぎることによると思われ、各鋼に適した熱処理条件を今後の試験によって見い出すことが課題となる。

溶接後の断面金相試験では、特に61FK、61FS材の結晶粒の粗大化が、どの溶接法においても観察されたが、これは δ フェライトの再結晶化により生じたものと考えられる。61FK、61FS材は、2相鋼種であり、A点以上で組織の一部が α 相になり、冷却途中にそれがマルテンサイトの組織に変態する一方、フェライト粒は高温で粗大化してしまう。

マルテンサイトは、溶接後の熱処理によって消失させることが可能であるが、いったん粗大化したフェライト粒は微細化しない。

粒大化した粒は、鋼のじん性等に悪影響を及ぼすため、溶接時の入熱量をできるだけ少なくし、粒の成長をおさえることが望ましいが、TIG溶接法などの融接法では困難である。

また、熱処理の再にも同様のことがいえ、熱処理温度は焼き戻しが可能な範囲において、できる限る低い温度で行うべきである。

引張り試験においては、熱処理無の場合は、母材の引張強さ以上の強度を示すものの熱処理を行うと母材の強さを下回るものが発生した。これは、熱処理を行うことにより、 δ フェライトが粗大化し鋼の硬度が軟化したためであると思われる。

9. あ と が き

高強度フェライト／マルテンサイト鋼を溶接する場合、現段階においては、強度的に溶接法にあまり左右されないと言う結果が出ているものの、溶接部組織等の観点から今後も継続した試験を実施し評価して行かなければならないと思われる。また、今回熱処理を行った目的としては、硬度の軟化、延性及びじん性の回復、組織の均整化を担ったものであるが、熱処理を行うことによって、母材の強度を下回るものも発生しているため、熱処理方法の確立と溶接方法の確立を合わせて実施して行かなければならないと判断する。

10. 謝 辞

本試験の各種試験検査については、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で行った。関係各位に感謝の意を表する。