

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]

酸化物分散強化型フェライト鋼材の溶接試験(1) (MA956, MA957 板材の溶接試験)

1988年6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

配下布限定期
PNC-SN8430 88-002
1988年6月



酸化物分散強化型フェライト鋼材の溶接試験(1)

(MA 956, MA 957 板材の溶接試験)

三島 肇* ; 乗田 典幸* ; 関 正之*
篠木 浩一* ; 千田 茂久* ; 鹿倉 正栄**

要　　旨

(目的)

酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼の品質の安定性、合金設計及び溶接手法については確立されていないため、溶接を行い溶接手法の選択、溶接特性、機械的性質等に関するデータを取得する。

(方法)

ODSフェライト鋼(以下MA956及びMA957に分類して称す)を板状に圧延した試験片を利用し、パルスTIG溶接法及びレーザ溶接法により溶接試験を行った。

(結果)

パルスTIG溶接法 ①溶接金属部にマイクロクラック、気孔が観察され、断面には、多数の
注)ブローホール、結晶粒の成長が観察された。②イットリウム(以下「Y」と称す)の分散状態については溶接金属部表面、ブローホールの発生位置にピークが観察された。③引張強度については母材よりも50%低下した。(常温)。

レーザ溶接法 ①溶接金属部にマイクロクラックは観察されなかつたがMA957の溶接金属部断面にブローホールが観察された。②Yの分散状態については溶接金属部表面、断面、端部に検出された。また、溶接金属部断面にはTiが集まっている。③引張強度は常温でSUS316相当鋼とほぼ同じ値を示し母材強度ともさほど変わりはなかった。またパルスTIG溶接法よりも高い値を示した。

(結論)

分散強化型フェライト鋼を溶接する場合は、クラック、ブローホール等の欠陥が発生しやすいパルスTIG溶接法では、殆ど不可能であると思われる。レーザ溶接法についても溶接欠陥は生じたが欠陥形状が微小なので今後の試験方法次第で改善出来る可能性がある。

* プルトニウム燃料部設計開発課
** 核燃料部計画課

目 次

要 旨

1. 序	1
2. 試験方法	2
2.1 板材の特性	2
2.1.1 化学成分	2
2.1.2 顕微鏡写真	2
2.1.3 Na浸漬面のSEM像	2
2.1.4 硬さ測定結果	2
2.1.5 引張試験結果	2
2.2 溶接方法	2
2.2.1 溶接装置	2
2.2.2 試験片形状	3
2.2.3 溶接条件	3
2.3 検査項目	3
3. 試験結果及びまとめ	4
3.1 試験結果概要	4
3.2 MA956 溶接試験結果	6
3.2.1 断面観察結果	6
3.2.2 引張試験	7
3.2.3 まとめ	8
3.3 MA957 溶接試験結果	9
3.3.1 断面観察結果	9
3.3.2 X線検査	10
3.3.3 引張試験結果	10
3.3.4 疲労試験結果	10
3.3.5 Na腐食試験結果	11
3.3.6 まとめ	11

4. 考 察	12
4.1 溶接の難易性	12
4.2 溶接金属部の性質	13
5. 結語・謝辞	14

写真リスト

写真-1	MA956 鋼組織の光学顕微鏡写真	16
写真-2	MA957 鋼組織の1t板受領材の電顕写真	17
写真-3	MA956 Na浸漬面のSEM像	18
写真-4	MA957 Na浸漬面のSEM像	19
写真-5	MA956 溶接金属部断面金相写真(レーザ溶接)	20
写真-6	MA956 溶接金属部断面金相写真(パルスTIG溶接)	21
写真-7	MA956 EPMA解析結果・溶接金属部表面(レーザ溶接)	22
写真-8	MA956 EPMA解析結果・溶接金属部断面	23
写真-9	MA956 EPMA解析結果・溶接金属部表面(レーザ溶接)	24
写真-10	MA956 EPMA解析結果・溶接金属部表面(パルスTIG溶接)	25
写真-11	MA956 EPMA解析結果・溶接金属部表面(パルスTIG溶接)	26
写真-12	MA956 「Yのライン分析」結果	27
写真-13	MA957 (7M) 溶接金属部断面金相写真(レーザ溶接)	28
写真-14	MA957 (8M) 溶接金属部断面金相写真(レーザ溶接)	29
写真-15	MA957 (9M) 溶接金属部断面金相写真(レーザ溶接)	30
写真-16	MA957 (7M) 溶接金属部断面金相写真(パルスTIG溶接)	31
写真-17	MA957 (8M) 溶接金属部断面金相写真(パルスTIG溶接)	32
写真-18	MA957 (9M) 溶接金属部断面金相写真(パルスTIG溶接)	33
写真-19	MA957 (7M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(レーザ溶接)	34
写真-20	MA957 (8M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(レーザ溶接)	35
写真-21	MA957 (9M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(レーザ溶接)	36
写真-22	MA957 (7M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(パルスTIG溶接)	37
写真-23	MA957 (8M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(パルスTIG溶接)	38
写真-24	MA957 (9M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(パルスTIG溶接)	39
写真-25	MA957 X線検査結果	40
写真-26	MA957 (7M) Na腐食試験結果(レーザ溶接)	41
写真-27	MA957 (8M) Na腐食試験結果(レーザ溶接)	42

写真 - 28 MA957 (9 M) Na腐食試験結果 (レーザ溶接)	43
写真 - 29 MA957 (7 M) Na腐食試験EPMA解析結果 (レーザ溶接)	44
写真 - 30 MA957 (8 M) Na腐食試験EPMA解析結果 (レーザ溶接)	45
写真 - 31 MA957 (9 M) Na腐食試験EPMA解析結果 (レーザ溶接)	46
写真 - 32 MA956 溶接金属部表面状態 (レーザ溶接)	47
写真 - 33 MA956 溶接金属部表面状態 (パルスTIG溶接)	48
写真 - 34 MA957 (7 M) 溶接金属部表面状態 (レーザ溶接)	49
写真 - 35 MA957 (8 M) 溶接金属部表面状態 (レーザ溶接)	50
写真 - 36 MA957 (9 M) 溶接金属部表面状態 (レーザ溶接)	51
写真 - 37 MA957 (7 M) 溶接金属部表面状態 (パルスTIG溶接)	52
写真 - 38 MA957 (8 M) 溶接金属部表面状態 (パルスTIG溶接)	53
写真 - 39 MA957 (9 M) 溶接金属部表面状態 (パルスTIG溶接)	54

図 リ ス ト

図 - 1 MA956 鋼の硬さ測定	56
図 - 2 MA957 鋼の硬さ測定	56
図 - 3 MA956、MA957 鋼の引張強度	57
図 - 4 試験片形状	58
図 - 5 溶接方法	59
図 - 6 MA956 溶接金属部の引張強度	60
図 - 7 MA957 (7 M) 母材の元素分析 (レーザ溶接)	61
図 - 8 MA957 (7 M) 溶接金属部の元素分析 (レーザ溶接)	62
図 - 9 MA957 (7 M) 溶接金属端部の元素分析 (レーザ溶接)	63
図 - 10 MA957 (7 M) 母材の元素分析 (パルスTIG 溶接)	64
図 - 11 MA957 (7 M) 溶接金属部の元素分析 (パルスTIG 溶接)	65
図 - 12 MA957 (7 M) プローホール部の元素分析 (パルスTIG 溶接)	66
図 - 13 MA957 溶接金属部の引張強度	67
図 - 14 MA957 (7 M) Na腐食による母材の元素分析 (レーザ溶接)	68
図 - 15 MA957 (7 M) Na腐食による溶接金属部内の元素分析 (レーザ溶接)	69
図 - 16 MA957 (7 M) Na腐食による溶接金属部の元素分析 (レーザ溶接)	70
図 - 17 MA957 (8 M) Na腐食による母材の元素分析 (レーザ溶接)	71
図 - 18 MA957 (8 M) Na腐食による溶接金属部内の元素分析 (レーザ溶接)	72
図 - 19 MA957 (8 M) Na腐食による溶接金属部の元素分析 (レーザ溶接)	73
図 - 20 MA957 (9 M) Na腐食による母材の元素分析 (レーザ溶接)	74
図 - 21 MA957 (9 M) Na腐食による溶接金属部内の元素分析 (レーザ溶接)	75
図 - 22 MA957 (9 M) Na腐食による溶接金属部の元素分析 (レーザ溶接)	76
図 - 23 MA956 溶接金属部の硬さ測定	77
図 - 24 MA957 溶接金属部の硬さ測定	78

表 リ ス ト

表 - 1 MA956 化学成分	80
表 - 2 MA957 化学成分	80
表 - 3 溶接条件	81
表 - 4 検査項目	82
表 - 5 検査方法及び条件	83
表 - 6 MA957 疲労試験結果	84

1. 序

将来の大型高速炉では、経済性の観点から、炉心材料の長寿命化が望まれている。オーステナイト系ステンレス鋼を使用する場合、高速中性子照射によるスエリングから長寿命化には限界があると考えられ、耐スエリング性の優れた高強度フェライト系鋼が長寿命燃料被覆管材料として注目されている。

しかし、オーステナイト系ステンレス鋼に比べ、クリープ破断強度が著しく低いため、クリープ強度の改善が重要なポイントになる。そのクリープ強度をオーステナイト系ステンレス鋼と同等までに改善したODSフェライト鋼が米国、ベルギーで開発されたが、合金設計、品質の安定および溶接特性について不明な点が多い。

本試験研究では、ODSフェライト鋼の溶接特性を調査することを目的として溶接手法の選択、溶接金属部の特性及び機械的性質等に関する基礎的データを取得するために溶接試験を行った。

本試験はまずODSフォライト鋼であるMA956*及びMA957*板材を使用した。

溶接法は、通常のTIG溶接法に比べ溶接時の入熱量が少ないので、且つ燃料要素加工工程に容易に組込むことができるパルスTIG溶接法及びレーザ溶接法を採用した。

その他の溶接法としては、電子ビーム溶接法も考えられたが、溶接雰囲気に制約があり、今回の試験項目から削除した。

* INC0から購入したものである。

2. 試験方法

今回の溶接試験で使用した試験片の形状は、板材であり、二枚の板を付き合わせて溶接を行った。

溶接雰囲気は、パルスTIG溶接法ではヘリウムガス雰囲気内で行い、レーザ溶接法では、アルゴンガスを吹き付けて行った。

試験順序としては、MA956の板材で基本的な溶接特性を評価し、その後、MA957板材の溶接特性を分析評価した。

2.1 板材の特性

2.1.1 化学成分

MA956の化学成分を表-1に示す。

MA957の化学成分を表-2に示す。

2.1.2 顕微鏡写真

写真-1にMA956鋼組織の光学顕微鏡写真を示す。

写真-2にMA957鋼組織の電顕写真を示す。

2.1.3 Na浸漬面のSEM像

写真-3にMA956のSEM像写真を示す。

写真-4にMA957のSEM像写真を示す。

2.1.4 硬さ測定結果

MA956板材の硬さ測定結果を図-1に示す。

MA957板材の硬さ測定結果を図-2に示す。

2.1.5 引張試験結果

MA956、MA957板材の引張試験結果を図-3に示す。

2.2 溶接方法

2.2.1 溶接装置

一般的に溶接時の入熱量が少ないレーザ溶接装置及びパルスTIG溶接装置を使用した。

(1) レーザ溶接装置

- ① 型式 : LAY-603型(東芝製)
- ② 発振素子 : Nb³YAGロッド
- ③ 発振光波長 : 1.06 μm
- ④ 最大出力エネルギー : 30 (J/P)
- ⑤ 発振パルス数 : 2 (PPS)

(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)

2.2.2 試験片形状

大洗工学センタ、ADSより支給された板材(20mm×50mm×1t mm)を図-4の形状にワイヤカッタで切断して使用した。

2.2.3 溶接条件

本溶接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-5に示す。

溶接条件を決定するに当り、以下に示す溶接試験を行った。

(1) レーザ溶接試験

出力(電圧)、ディフォーカスにパラメータを振り、溶け込み状態を確認する試験を行った。尚、選択する条件としては、溶け込み量を被覆管肉厚の0.47mmと想定し0.5mm以上溶け込むものとした。

溶け込み量及び外観を考慮した結果、電圧：500V、ディスフォーカス：2mmが最良の溶接条件であった。

(2) パルスTIG溶接試験

アーキギャップを0.4mmにし10Aから順に電流を上げて行き、溶け込み状態を確認する試験を行った。

その結果12.5Aで溶け込み量が0.5mm以上になったため条件を決定した。

2.3 檜査項目

表-4に溶接特性データを取得するための検査項目を示す。

表-5に検査項目に対する検査方法及び検査条件を示す。

3. 試験結果及びまとめ

3.1 試験結果概要

以下の表に試験結果概要を示す。

	レーザ溶接法		パルスTIG溶接法	
	MA956	MA957	MA956	MA957
外観検査	<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部両端にマイクロクラックが観察された。 	<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部両端にマイクロクラックは観察されなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部表面にマイクロクラック及び気孔が多数観察された。 溶接金属部表面が酸化した。 	
寸法検査	<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部は、アンダーカットになつた。 		<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部は、盛り上がつた。 	
X線検査		<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部内に $\phi 0.2 \text{ mm}$ 以下のプローホールが 1 ~ 2 個観察された。 		<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部内にプローホールが観察され大きいもの ($\phi 0.3 \text{ mm}$ 程度) は、溶接金属部両端に集まっていた。
断面金相	<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部断面にプローホールは観察されなかつた。 	<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部断面にプローホールが観察された。 熱影響部に黒い点の集まりがあつた。 	<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部断面にプローホールが多數観察された。 溶接金属部断面には、結晶粒の成長が発生していた。 	
ビッカース硬さ		<ul style="list-style-type: none"> 母材に比べ溶接金属部は、硬さが減少した。 MA956、MA957は共にレーザ溶接法の方が硬さの減少は少なかつた。 		

	レーザ溶接法		パルスTIG溶接法	
	MA956	MA957	MA956	MA957
元素分析	<ul style="list-style-type: none"> Yの分散状態は溶接金属部表面(端部)に凝集していた。 <p>(7M, 注)</p> <ul style="list-style-type: none"> 微量のYが溶接金属部断面に検出された。 <p>(8M, 9M, 注)</p> <ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部(両端)にYが集まっていた。 <ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部表面にYのピークが観察された。 	<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部断面にTiが集まっていた。 	<ul style="list-style-type: none"> Yの分散状態は溶接金属部表面(端部)に凝集し、熱影響部にも凝集が観察された。 	<ul style="list-style-type: none"> Fe、Crの量が溶接金属部で減少しTiの量が増加した。 ブローホール部は、Ti、Yが検出されCrの量が減少した。
引張試験	<ul style="list-style-type: none"> 室温の場合は、ほぼSUS316相当鋼と同じ値を示した。(MA957については、7Mのみ) 		<ul style="list-style-type: none"> レーザ溶接法に比べ強度は減少していた。 	
疲労試験	<p>7M, 8M, 9Mは共に破断しなかった。</p>			
Na腐食試験		<ul style="list-style-type: none"> 溶接金属部：Feの含有量が低下。 Yは、溶接金属部両端に集まつた。 Naは、溶接金属部両端に集まり溶接金属部内にはほとんど含まれていなかった。 		

注) 7M : 冷間加工を施していない部材

8M : 10% 冷間加工材

9M : 20% 冷間加工材

3.2 M A 9 5 6 溶接試験結果

3.2.1 断面観察結果

(1) 工学顕微鏡による観察

レーザ溶接法の観察写真を写真 - 5 に示す。

またパルスTIG溶接法の観察写真を写真 - 6 に示す。

観察結果

(レーザ溶接法)

1) 結晶粒の成長はなくクラック、ブローホール等の欠陥も観察されなかった。

(パルスTIG溶接法)

1) 溶接金属部断面には、ブローホールが多数観察された。

2) 热影響部及び溶接部断面には、結晶粒の成長が観察された。

3) 溶接金属部表面には、レーザ溶接法に比べて入熱が多いためか金属粉末が浮遊した。

(2) E P M A 観察

レーザ溶接法の観察写真を写真 - 7 ~ 写真 - 9 ・ 12 に示す。またパルスTIG溶接法の観察写真を写真 - 8 ・ 10 ~ 写真 - 12 に示す。

またレーザ溶接及びパルスTIG溶接後のYの分散状態をEPMAを使用し観察した結果を以下に示す。

観察結果

(レーザ溶接法)

1) 溶接金属部表面及び断面のYの状態を広域スキャンにて観察した結果、ビード部及びボンド部にYの凝集が観察された。（写真 - 7 ・ 12 参照）

特にボンド部に多く凝集している。

2) レーザは、スポット溶接の連続であるためかスポット径（ウェビング）の外周にYが凝集している。

3) Yのピークは溶接金属部表面に観察された。

(パルスTIG溶接法)

1) 溶接金属部表面では特に溶接ビード部に多くのYの凝集が観察された。（写真 - 8 ・ 10 ・ 11 ・ 12 ）

また断面では、表面と同様であるが熱影響部にもYの凝集が観察された。

3.2.2 引張試験

(1) 引張強度

引張試験結果を図-6に示す。

試験結果

1) レーザ溶接法では、常温強度 80kg/mm^2 と、SUS316相当鋼と同等の強度を示した。

2) パルスTIG溶接法では、常温強度 40kg/mm^2 とレーザ溶接法の1/2程度しかない。

3) 母材強度と比較すると以下の表のようになる。

温度	R T	500°C	600°C	700°C	単位 : kg / mm ²
母 材	8 5	5 3	3 5	2 3	
レーザ 溶接法	8 0	4 5	3 1	1 9	
パルスTIG 溶接法	4 0	3 8	2 0	1 1	

3.1) レーザ溶接法では、常温(R T)及び高温強度ともに母材とほぼ同じ様な値を示した。500°Cを超えると、常温強度の1/2に強度が低下してしまうことから材料と共に高温強度に問題があると思われる。

3.2) パルスTIG溶接法では、常温強度で 40kg/mm^2 であり母材の1/2に強度が低下してしまう。高温強度についてもレーザ溶接法より強度が低下する。

4) レーザ溶接法では、良好な延性を示したがパルスTIG溶接法では、脆性破壊が生じた。

5) パルスTIG溶接法の常温での大幅な強度低下の原因は、溶接金属部にマイクロクラック及びブローホールが生じているためと思われる。

6) 破断位置は全て溶接金属部から破断した。

3.2.3 まとめ

レーザ及びパルスTIG溶接法は共に、溶接金属部表面にマイクロクラックが発生し
Yも溶接金属部表面に凝集していることが判明した。

パルスTIG溶接法では、溶接金属部表面に金属粉末が付着し気孔も発生した。また
断面金相に関しては結晶粒の成長及びプローホールが発生しそれにより、金属間結合
力が減少し引張強度の低下に影響していると考えられる。

レーザ溶接法では溶接金属部断面にプローホール、クラック等の欠陥はなく引張強
度は、パルスTIG溶接法よりも高い値を示している。

以上のことからMA956の溶接は、レーザ溶接法が優れていると思われる。

3.3 MA 957 溶接試験結果

3.3.1 断面観察結果

(1) 工学顕微鏡による観察

レーザ溶接法の観察写真を写真-13～写真-15に示す。またパルスTIG溶接法の観察写真を写真-16～写真-18に示す。

観察結果

(レーザ溶接法)

- 1) 溶接金属部断面は結晶粒の成長はない。
- 2) 溶接金属部断面にブローホールが発生している。
- 3) 冷間加工度が増すにつれ溶接ビート部のアンダーカットが増加している。
- 4) 母材表面の硬さが増加するとレーザ光のエネルギーが母材内に進入できず表面の金属を削ってしまうために、アンダーカットができると考えられる。

(パルスTIG溶接法)

- 1) 溶接金属部断面には、ブローホールが多数発生している。
- 2) 熱影響部及び溶接金属部断面には、結晶粒境が発生している。
- 3) ブローホールは、溶接金属部表面及び両端に集まる傾向がある。

(2) EPMA観察結果

レーザ溶接法の観察写真を写真-19～写真-21に示す。またパルスTIG溶接法の観察写真を写真-22～写真-24に示す。

観察結果

(レーザ溶接法)

- 1) 溶接金属部両端にYは集まっている。(8M, 9M)
(7Mについては観察されなかった)
- 2) 溶接金属部断面にTiが集まりYのピークは7Mではなく、8M, 9Mについて
は溶接金属部表面に観察された。

(パルスTIG溶接法)

- 1) 7M, 8M, 9Mは共に溶接金属部表面及びブローホールの発生位置にYのピ
ークが観察された。またFeは減少している。

(3) 元素分析結果

レーザ溶接法の元素分析結果を図-7～図-9に示す。またパルスTIG溶接法の元
素分析結果を図-10～図-12に示す。

分析結果

(レーザ溶接法)

1) 溶接金属部では、母材に含まれているTiの量が増加している。

(パルスTIG溶接法)

1) 母材に比べてFe、Crの量が溶接金属部で減少しTiの量が増加した。また母材で検出できなかったYが溶接金属部で検出された。

2) ブローホール部はTi、Yが検出されCrの量が減少した。

レーザ溶接法及びパルスTIG溶接法共に溶接金属部は母材とかなり性質が異なっている。

3.3.2 X線検査

レーザ溶接法及びパルスTIG溶接法のX線検査結果を写真-25に示す。

(検査結果)

レーザ溶接法では、溶接金属部内にφ0.2mm以下のブローホールが1試料につき1個～2個発生した程度であるがパルスTIG溶接については溶接金属部内にブローホールが多数発生し大きいものはφ0.3mm程度であった。またφ0.3mmのブローホールは、溶接金属部両端に集まっている。

3.3.3 引張試験結果

(1) 引張強度

引張試験結果を図-13に示す。

試験結果

1) レーザ溶接法がパルスTIG溶接法より常温、高温ともに優れている。また引張強さは、冷間加工度にあまり関係はない。

2) パルスTIG溶接法では、結晶粒の成長及び多数のブローホールの発生により結晶間結合が低下し、常温での強度差が生じたと考えられる。

3.3.4 疲労試験結果

疲労試験結果を表-5に示す。

試験温度 : 600°C

応力 : 9 kgf/cm²

サイクル時間 : 20sec/cycle

サイクル数 : 約1000回

以上の試験条件で行った結果、7M、8M、9Mは共に設定荷重により伸び率は異なるものの全数破断はしなかった。

3.3.5 Na腐食試験結果

Na腐食後の試験片を写真-25～写真-27に示す。またEPMA元素分析結果を、写真-28～写真-30に、分布測定結果を図-14～図-22に示す。尚、腐食試料片の腐食前後の重量変化を示さないことからNaによる腐食はなかったと考えられる。

EPMA観察

高速定性分析を行いFe、Ti、Cr、Na、Yの5元素が主成分であることが判明した。

5元素の内Fe、Ti、Crは同じような分布をしているためFeを代表とし、Na、Yの3元素について分布測定を行った。

その結果

- (1) 溶接金属部ではFeの含有量が著しく低下している。
- (2) Feとは逆にYは、溶接金属部に多く集まる。
- (3) Naについては、溶接金属部両端に多く集まり溶接金属部内では、ほとんど含まれていない。

以上のことことが判明した。

3.3.6 まとめ

パルスTIG溶接法は、溶接金属部表面にマイクロクラック及び気孔が観察された。

また溶接金属部断面には、多数のブローホール及び結晶粒の成長が観察された。

Yに関しては、溶接金属部表面及びブローホールの発生位置にピークが観察された。

レーザ溶接法については、溶接金属部表面にマイクロクラックは観察されず溶接金属部断面には、Tiが集まっている。Yに関しては、7Mの場合溶接金属部断面に微量検出され、8M、9Mについては溶接金属部表面及び端部に検出された。

引張強度については、レーザ溶接法が高い値を示しており7Mについては、SUS316相当鋼とほぼ同じ値を示した。

以上のことからMA957の溶接はパルスTIG溶接法では、健全な溶接ができないと思われる。

4. 考 察

4.1 溶接の難易性

(1) MA956

溶接金属部表面状態を写真-32～写真-33に示す。

溶接試験片をパルスTIG溶接法で溶接すると、溶接金属部表面に多くの金属粉末が発生するが、レーザ溶接法では、このような現象は無かった。また溶接ビード部には、両溶接法とともにマイクロクラックが生じた。

断面金相試験結果については、パルスTIG溶接法で溶接すると溶接金属部の結晶粒の成長が著しくまたブローホールも見受けられるが、レーザ溶接法では発生していない。

しかし、レーザ溶接法では、レーザ集光部の溶接金属が蒸発し溶接ビード部がアンダーカット状になってしまふ。

(2) MA957

溶接金属部表面状態を写真-34～写真-39に示す。

溶接特性は、MA956とほぼ同様な形態を示したが違う点は以下の通りである。

- ・パルスTIG溶接法で溶接すると微小ブローホールが多数発生する。
- ・レーザ溶接法では、冷間加工度が増すにつれ溶接ビード部のアンダーカットが大きくなる。

溶接金属部表面のマイクロクラックは、急激な入熱又は、冷却により発生すると考えられるため入熱条件を変えることにより対処可能であると思われる。またレーザ溶接法で発生したアンダーカットについても端栓の形状を考慮することにより改善可能と思われる。しかしパルスTIG溶接法で発生した金属粉末の浮遊及びブローホールは、改善が困難である。発生したブローホールの部分をEPMAにて元素分析を行った結果、分散材であるYのピークが現れておりこの現象は、入熱により母材に分散している Y_2O_3 が凝集したためと考えられる。そのため、入熱量の大きいパルスTIG溶接法では、分散強化型フェライト鋼の溶接は困難である。

4.2 溶接金属部の性質

(1) 硬さ測定結果

1) M A 9 5 6

硬さ測定結果を図-23に示す。

- ・レーザ及びパルスTIG溶接法は、共に母材の硬さ約300(Hv)に対して溶接金属部の硬さは、220(Hv)に低下する。

2) M A 9 5 7

硬さ測定結果を図-24に示す。

- ・レーザ溶接法は、母材の硬さ約470(Hv)に対して溶接金属部の硬さは220(Hv)に低下する。パルスTIG溶接法の溶接金属部の硬さは、140(Hv)に低下する。
(この溶接金属部の硬さは、冷間加工度に関係ない)

硬さ低下の違いの要因は、パルスTIG溶接試料の溶接金属部に結晶粒の成長が生じ金属が脆くなつたためと考えられる。

(2) 引張試験結果

1) M A 9 5 6 , 9 5 7

- ・レーザ溶接法がパルスTIG溶接法より常温、高温ともに優れている。また、引張強さは、冷間加工度に関係ない。

- ・破断位置は、全て溶接金属部から破断している。

- ・パルスTIG溶接法の大幅な強度低下の原因是、

イ) 溶接金属部にマイクロクラック及びブローホールが生じたため。

ロ) 結晶粒の成長、イ)により、結晶間結合が低下したため(常温強度差)と考えられる。

- ・レーザ溶接法では、良好な延性を示したが、パルスTIG溶接法では、脆性破壊が生じた。

5. 結語・謝辞

溶接特性を調査する試験は終了していないので、結論は、述べにくいが現在得られている試験データを参考にすると次のようになる。

- ・分散強化型フェライト鋼の溶接は、パルスTIG溶接法等の入熱量が多い融解法では、殆ど不可能である。（クラック、プローホール等の溶接欠陥が発生し易い。）
- ・レーザ溶接法においても溶接欠陥は生じるが、欠陥形状が微小なので今後の試験方法次第で改善出来る可能性がある。
- ・MA957は、MA956より溶接性が良くない。

今後は、溶接金属部の元素組成の変化などの問題点の洗い出しを行う。また、MA957棒材を管形状に加工し、レーザ溶接法にて溶接試験を行う。その後各種検査（内圧バースト試験、引張試験、内圧クリープ試験等）を行い溶接強度を測定、評価しMA957製被覆管の溶接に反映せん。

尚、試験片の試験・検査にあたっては、品質管理課部材検査係、Na腐食試験については、大洗：材料開発室、そしてレーザ溶接については、大洗：照射課所有のものを借用して試験を行った。関係各位に感謝の意を表する。

引用参考文献

- ・P N C Z N 9 4 5 0 8 7 - 0 0 4 酸化物分散強化型フェライト鋼
INCOLOY MA957、MA956 材料データ集

写真リスト

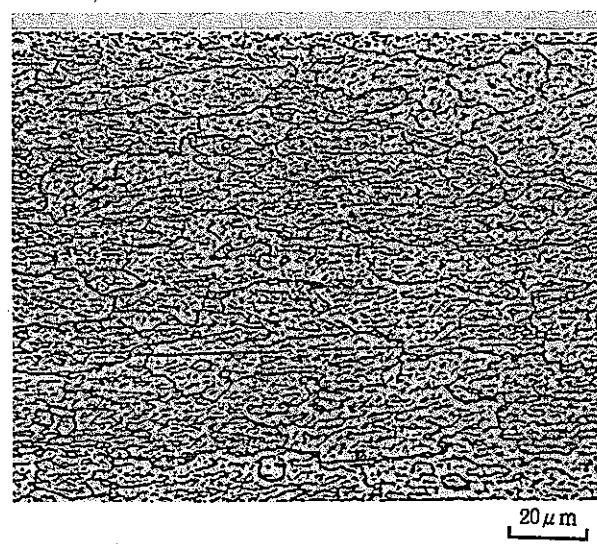
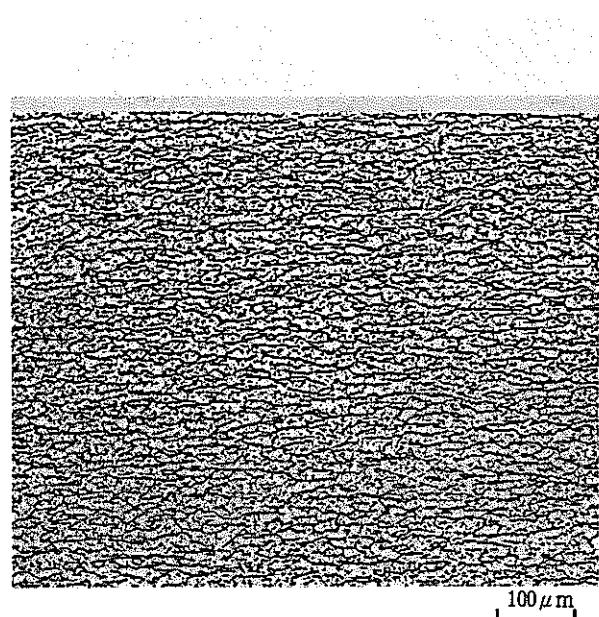
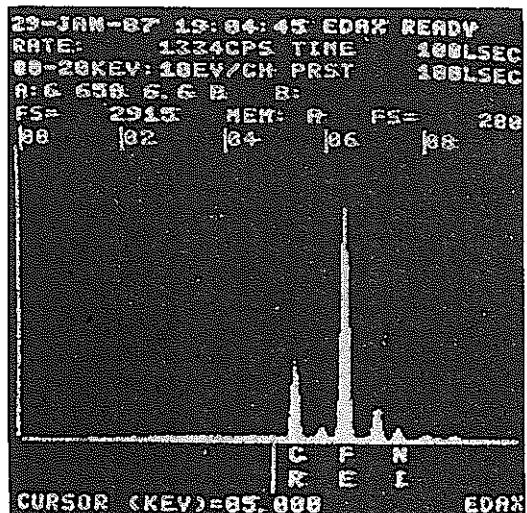
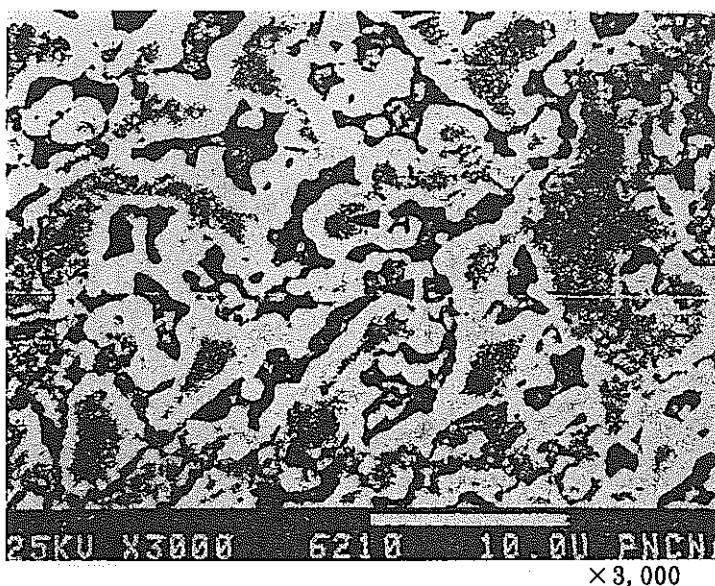
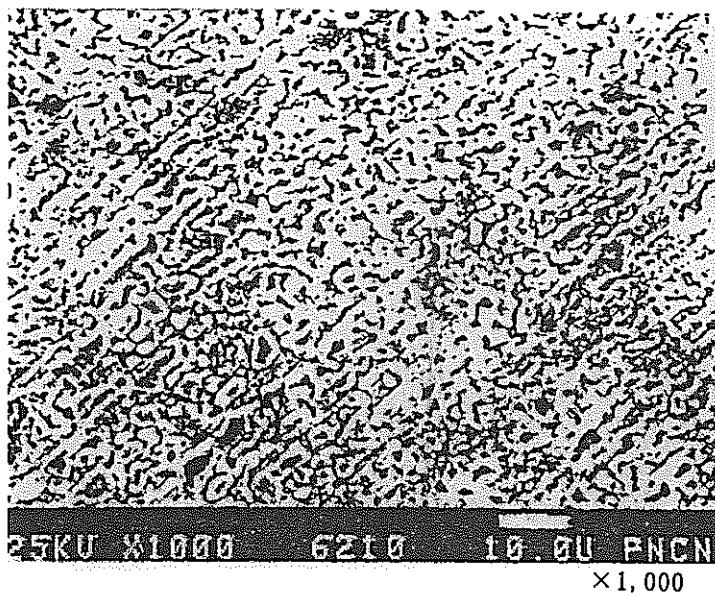


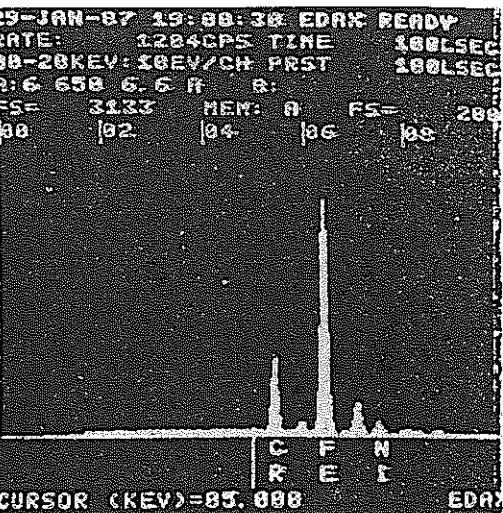
写真 - 1 MA 956 鋼組織の光学顕微鏡写真 (T断面)



写真-2 MA957鋼組織の1t板受領材の電顕写真



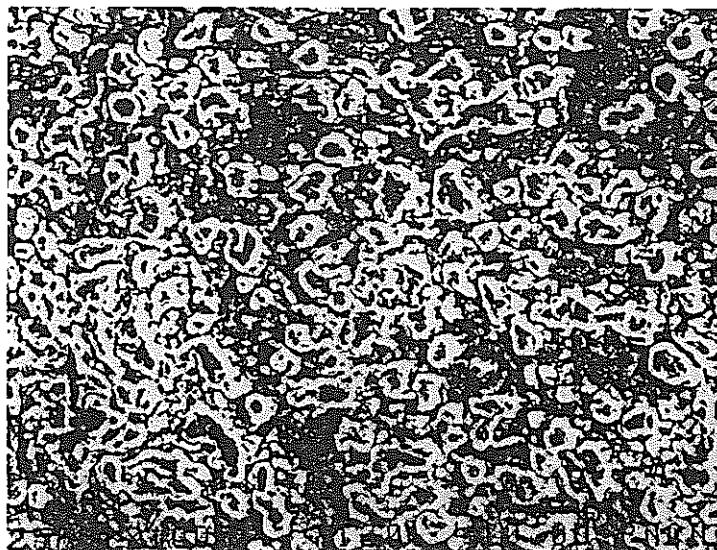
A



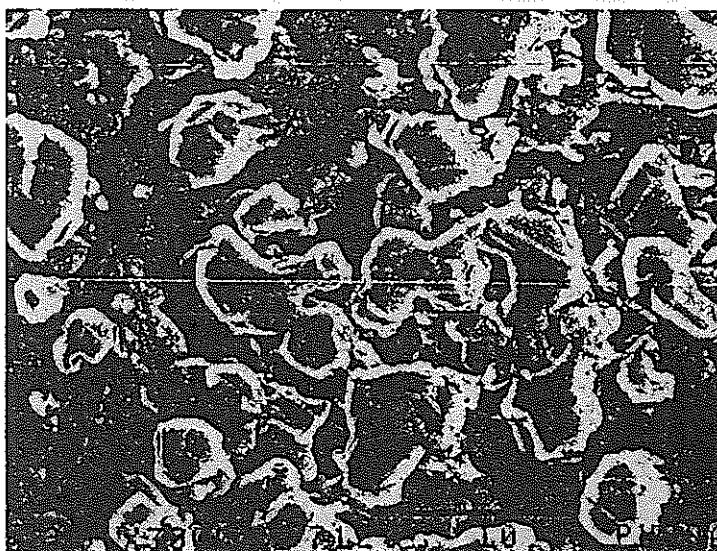
B

ED分析結果

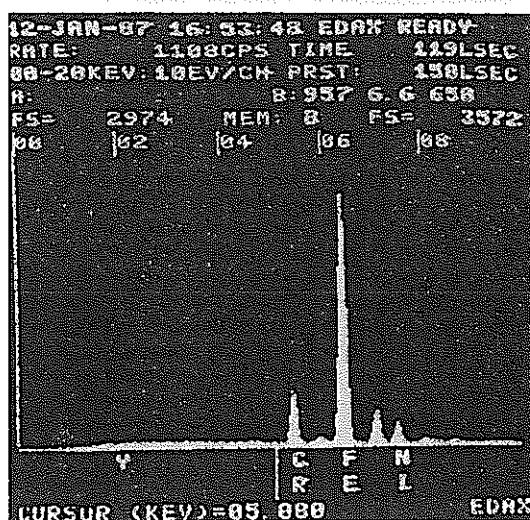
写真-3 MA956Na浸漬面のSEM像



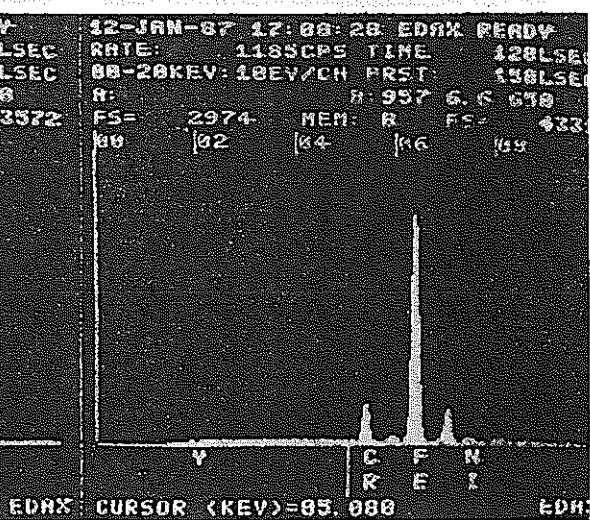
× 1,000



× 3,000



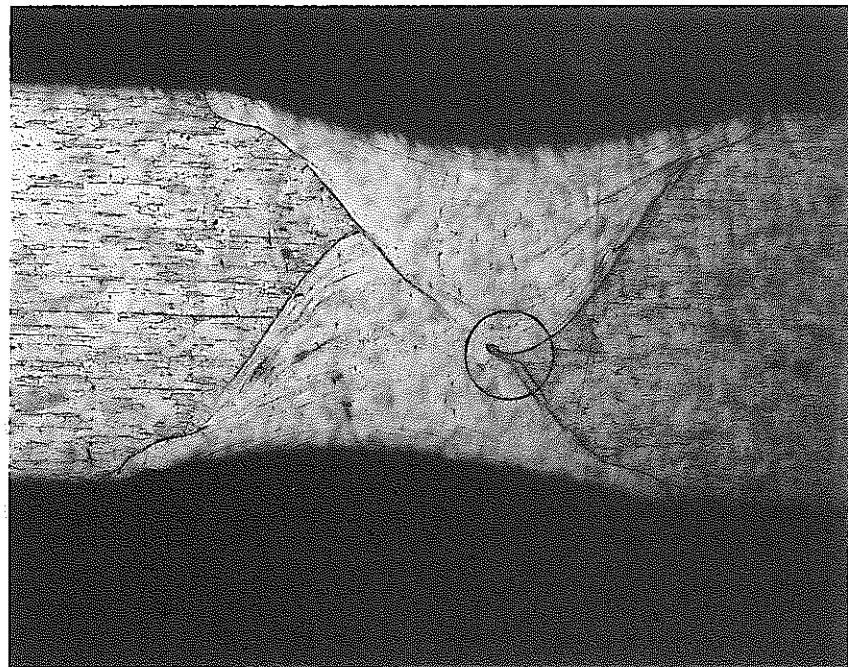
A



B

腐食断面

写真 - 4 MA957Na浸漬面のSEM像



×50
200 μm



×200
50 μm

写真-5 MA956溶接金属部断面金相写真(レーザ溶接)

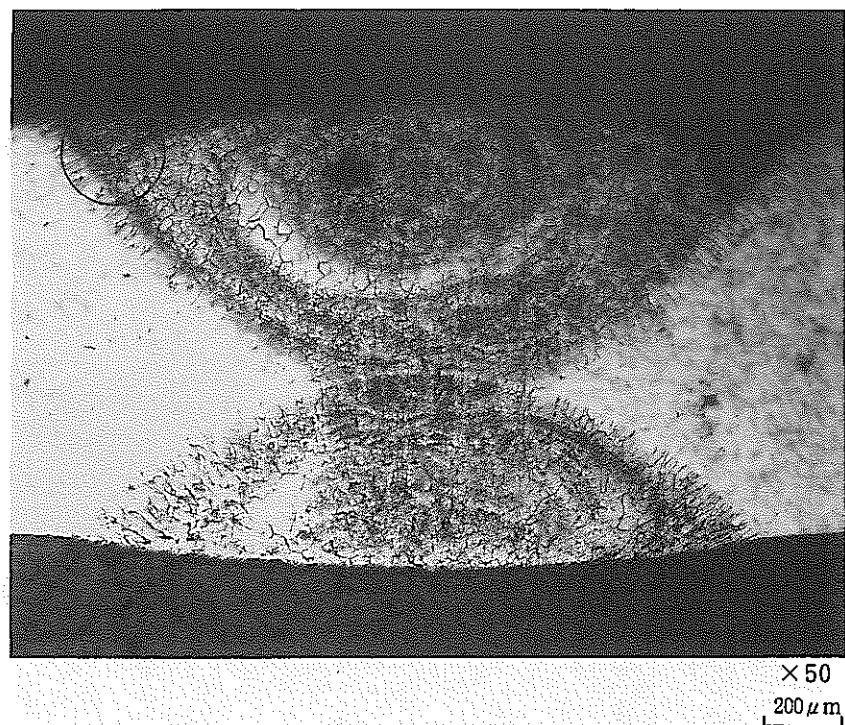
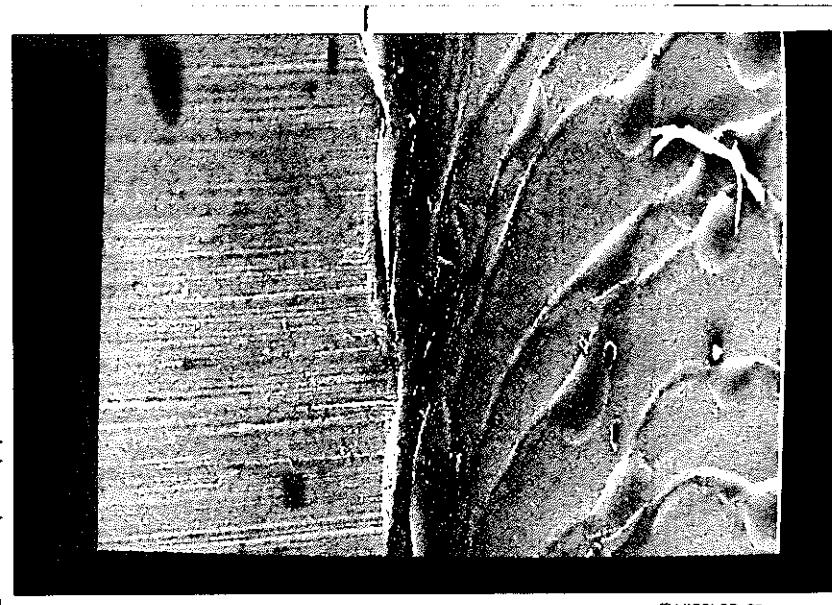


写真-6 MA 956 溶接金属部断面金相写真（パルスTIG溶接）

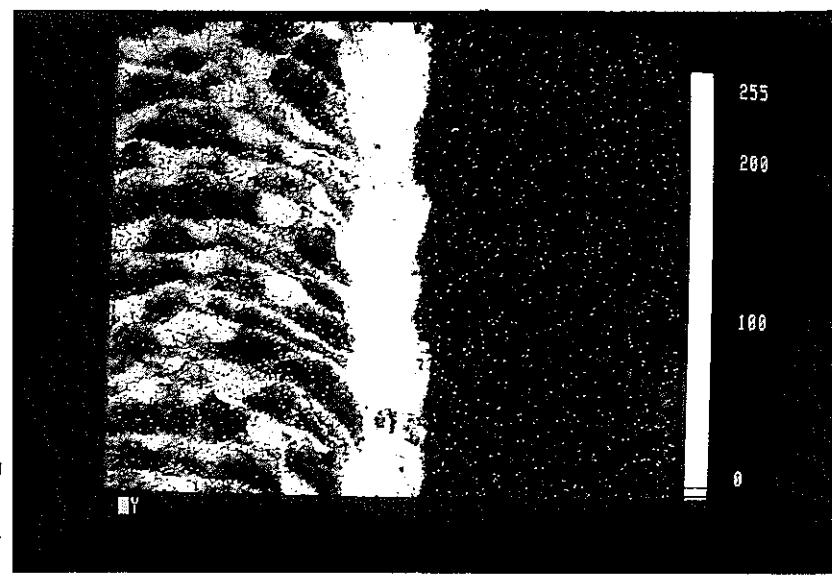
2次電子線像



FUJICOLOR 86
×100

溶接部 母材

X線像 (Y)

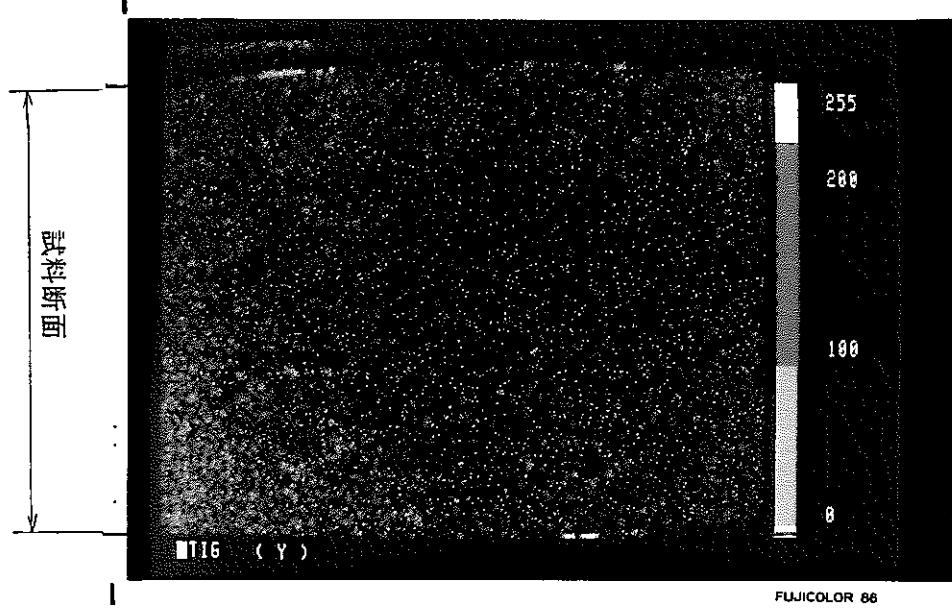


FUJICOLOR 86
×100

溶接部 母材

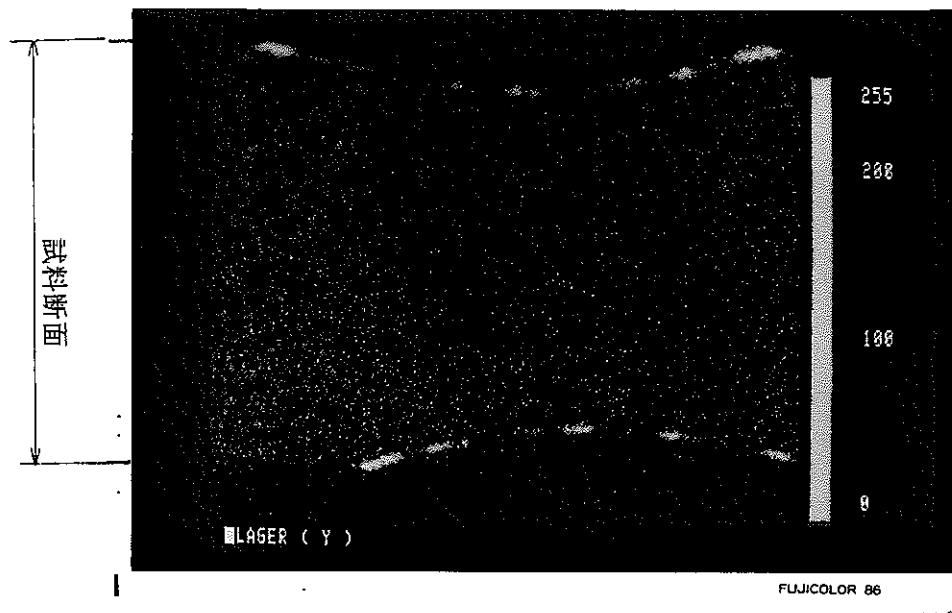
写真-7 MA956EPMA解析結果・溶接金属部表面（レーザ溶接）

パルス T I G



×60

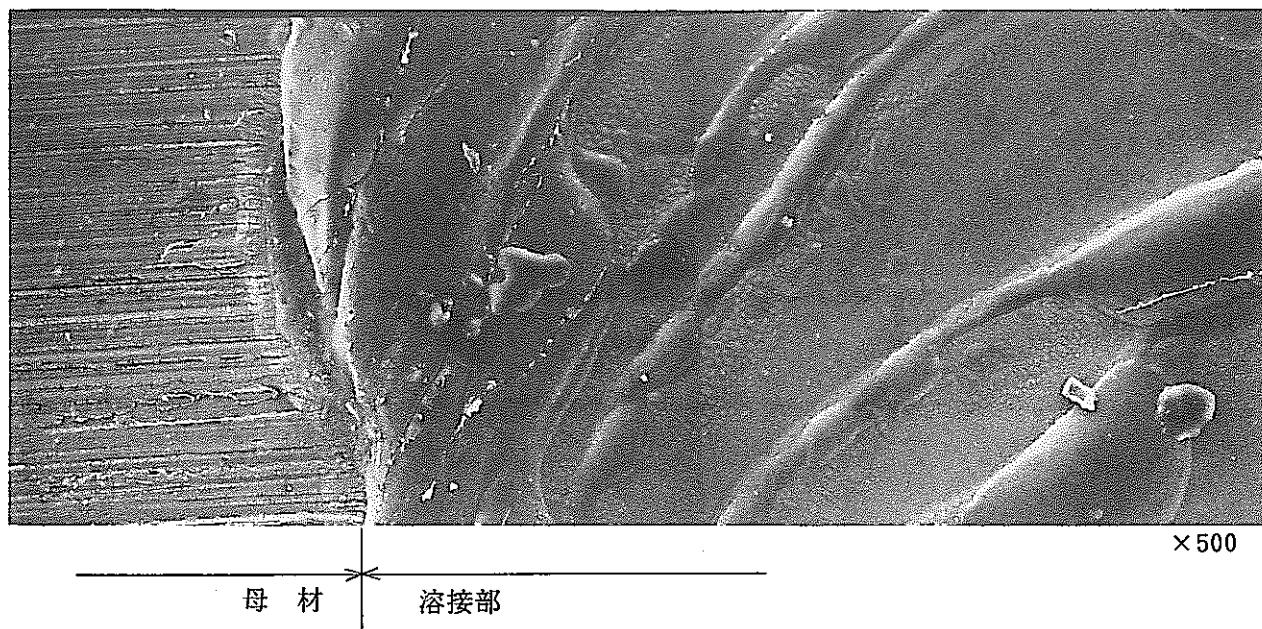
レーザー



×60

写真-8 MA956 E P M A 解析結果・溶接金属部断面

2次電子線像



X線像

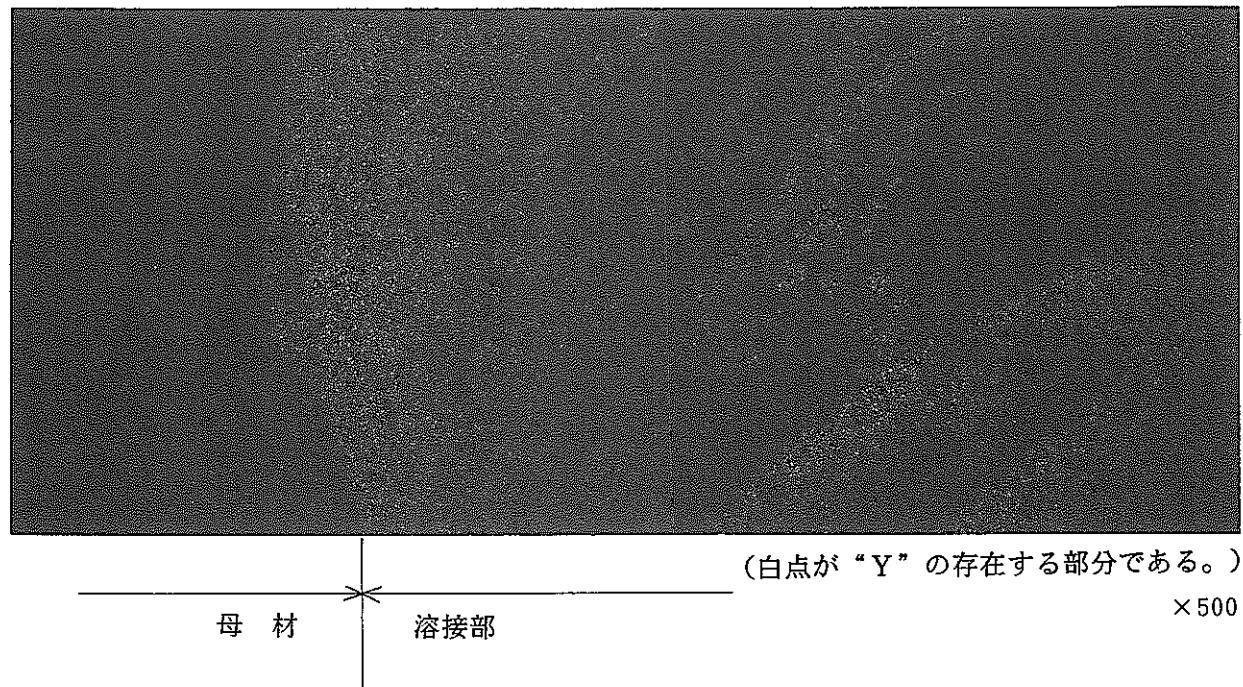
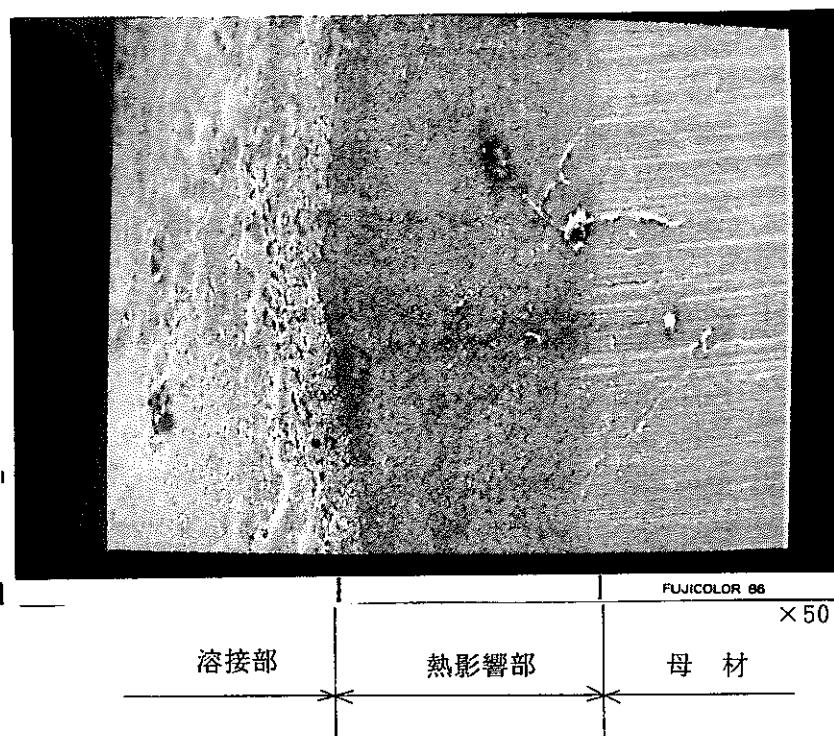


写真 - 9 MA956BPMA解析結果・溶接金属部表面（レーザ溶接）

2次電子線像



X線像 (Y)

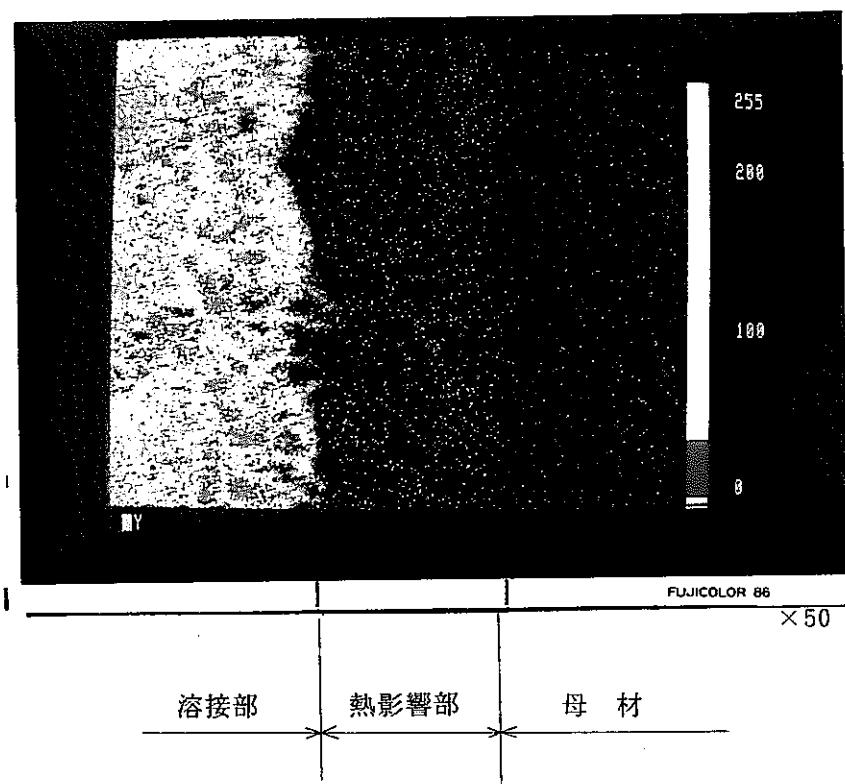
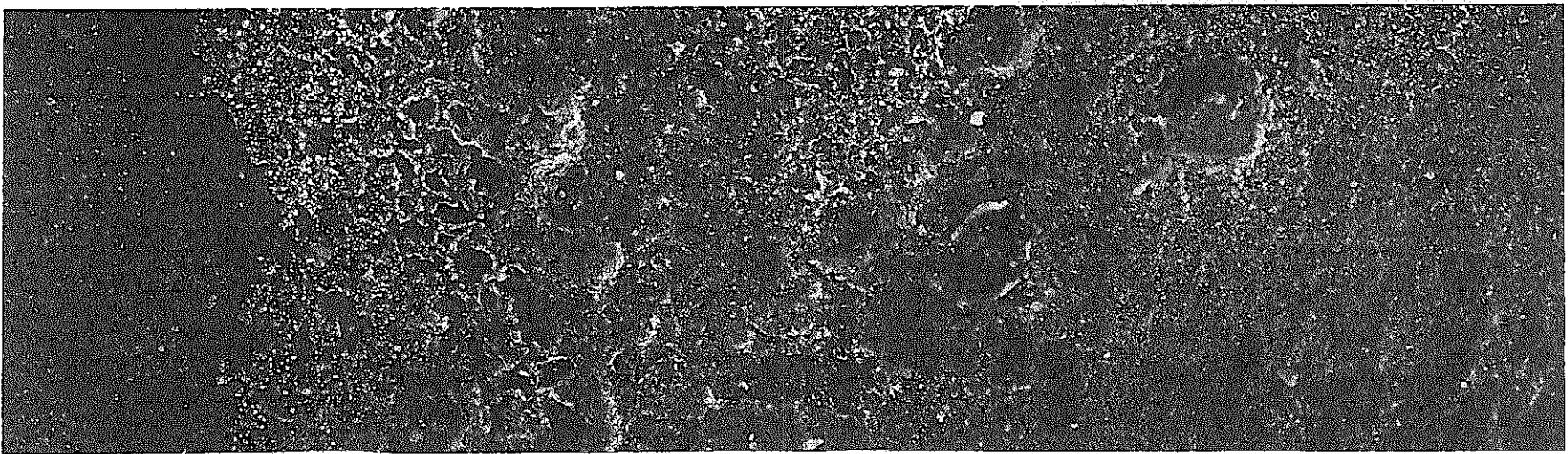


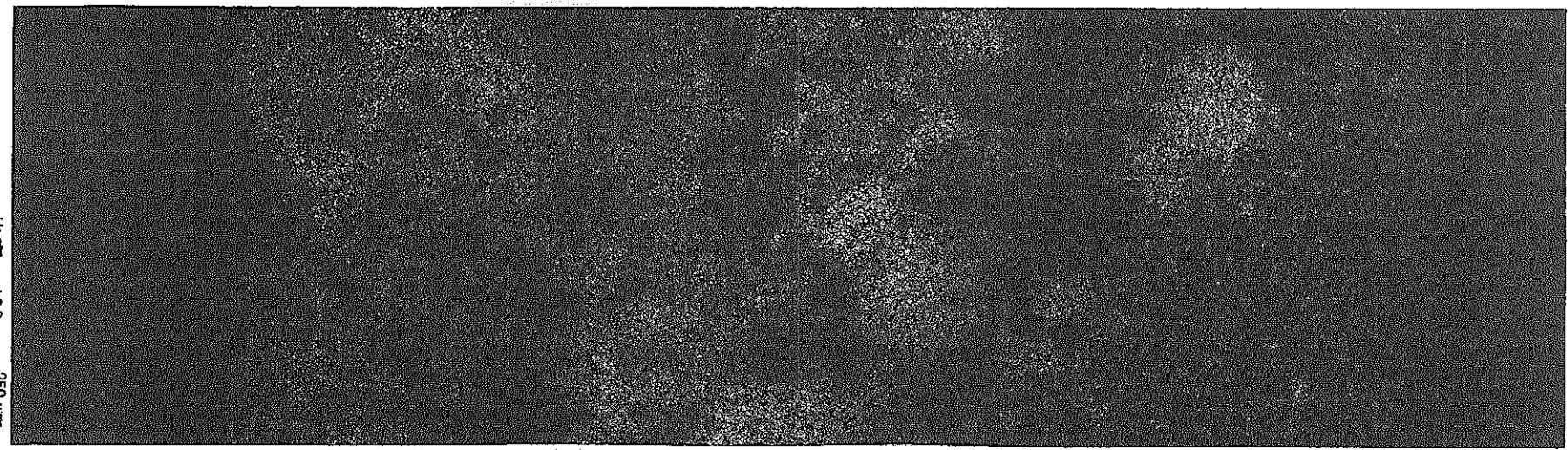
写真-10 MA956EPMA解析結果・溶接金属部表面(パルスTIG溶接)

2次電子線像



熱影響部 溶接部

X線像 (Y)

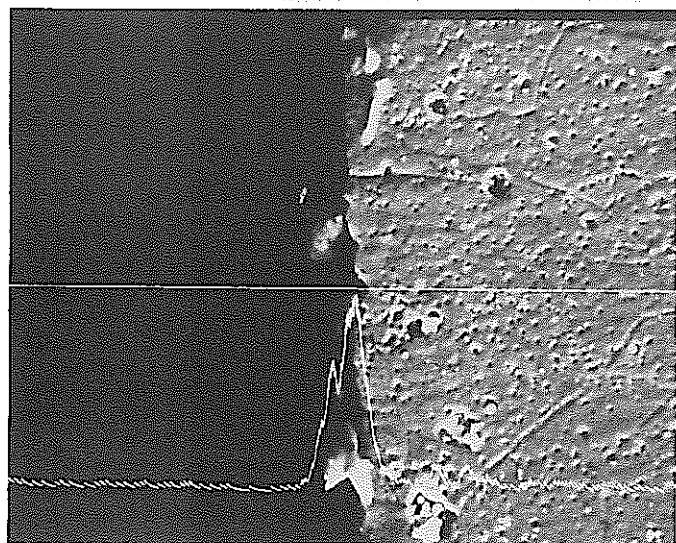


倍率 : 400

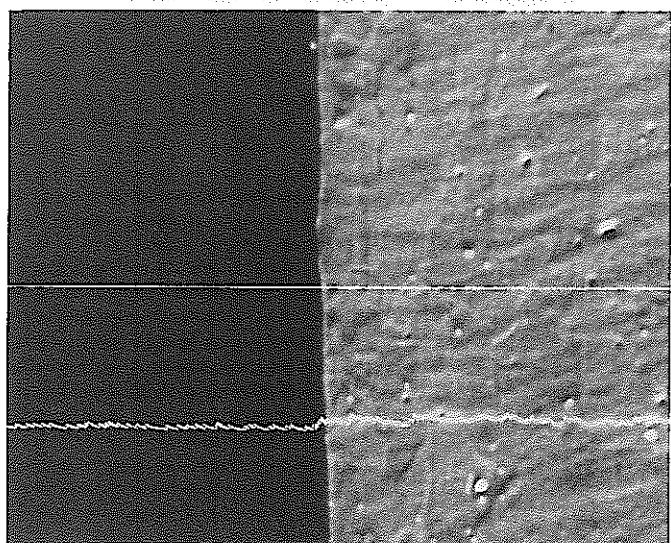
$250 \mu\text{m}$

写真 - 11 MA956EPMA解析結果・溶接金属部表面（パルスTIG溶接）

パルスTIG



(溶接部)



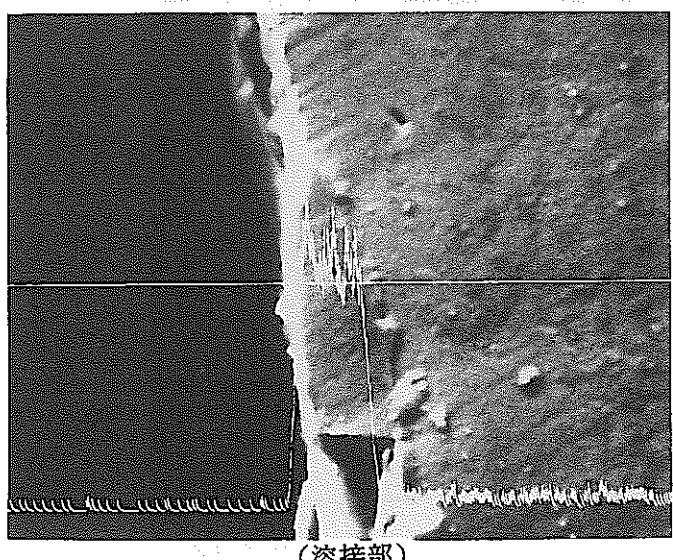
(母材) ×1,000



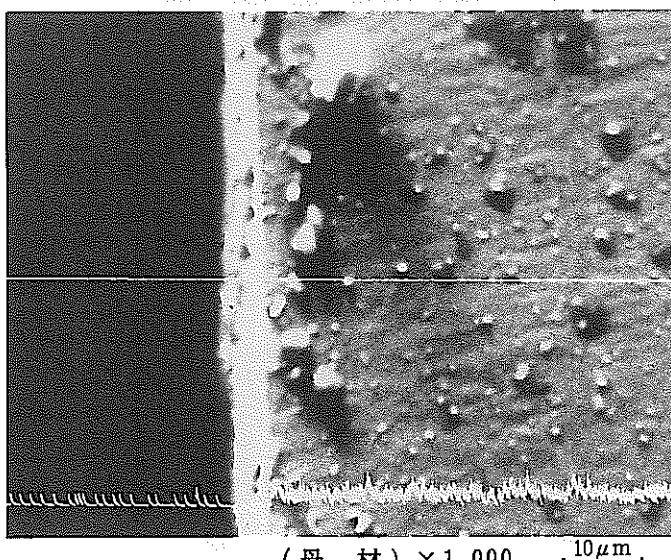
分析位置

分析位置での“Y”の強度

レーザー



(溶接部)



(母材) ×1,000

10 μm

写真-12 MA956「Yのライン分析」結果

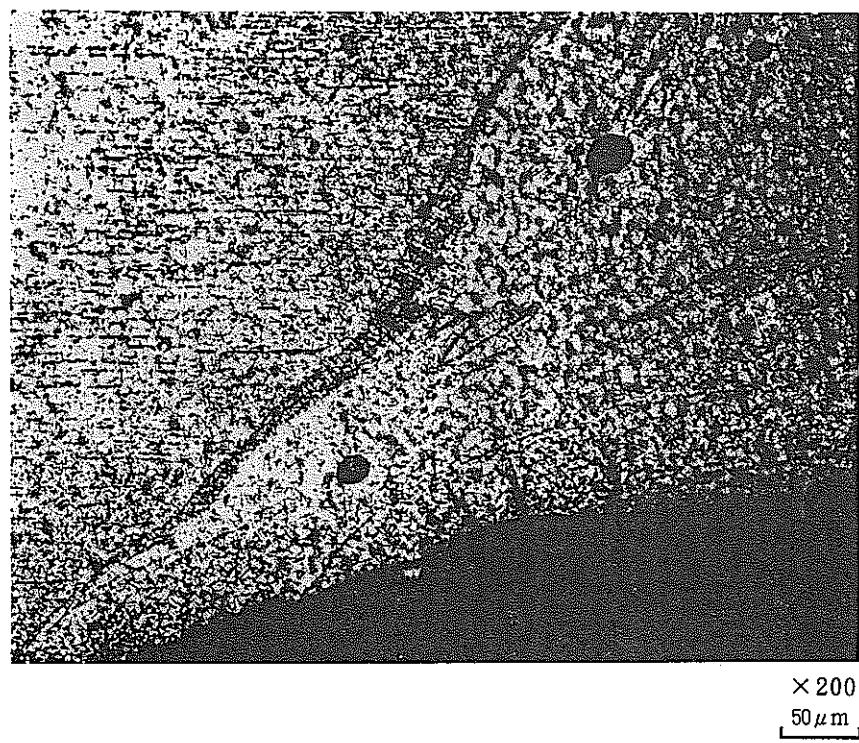
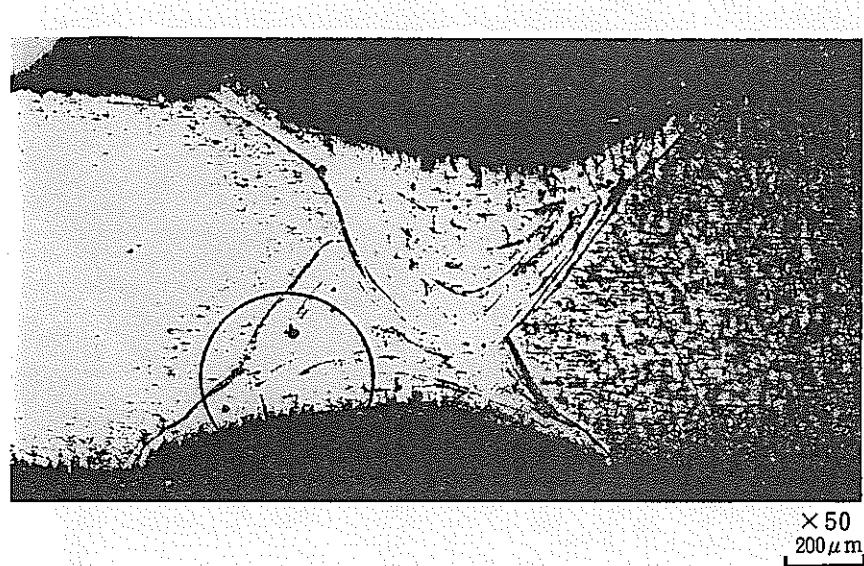
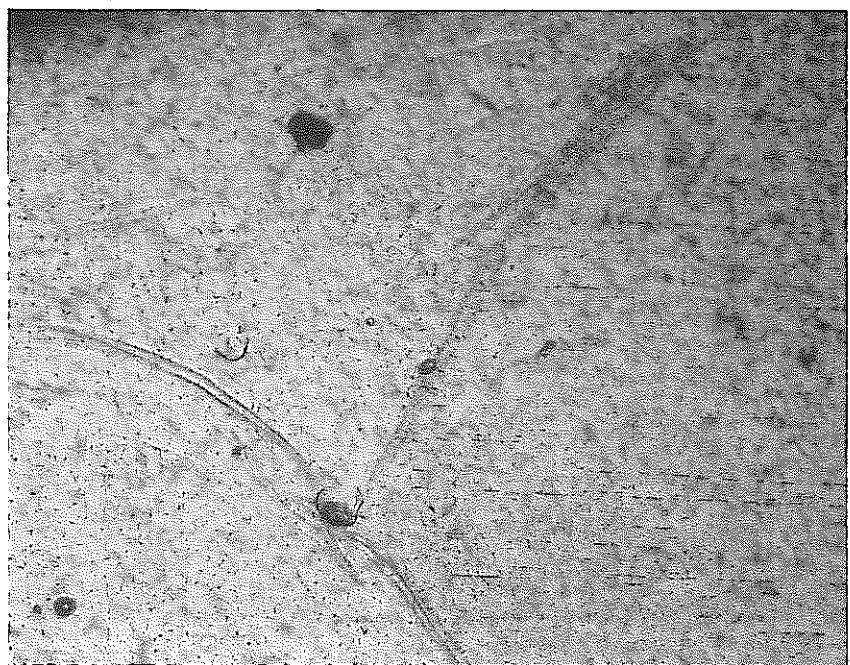


写真-13 MA957(7M)溶接金属部断面金相写真(レーザ溶接)

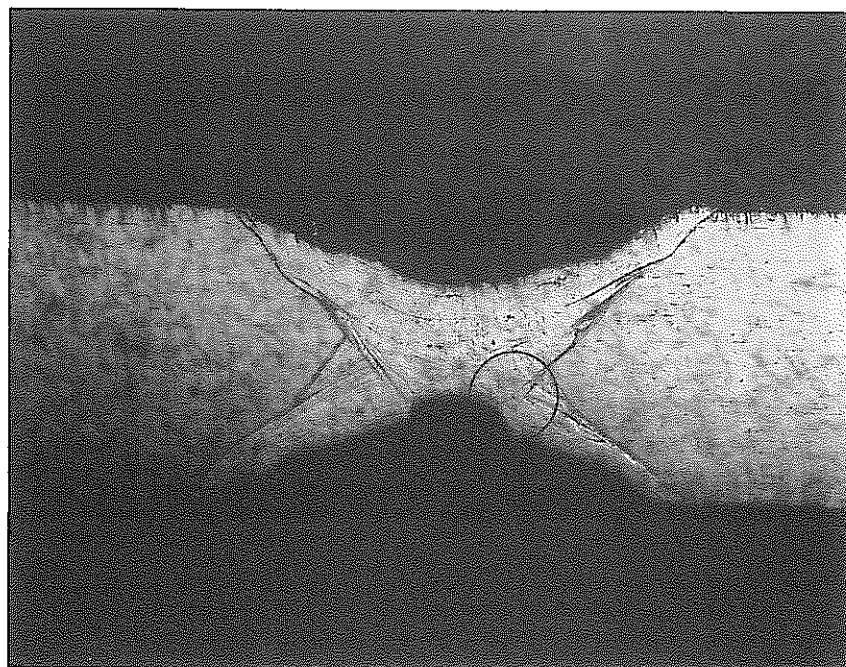


×50
200 μm

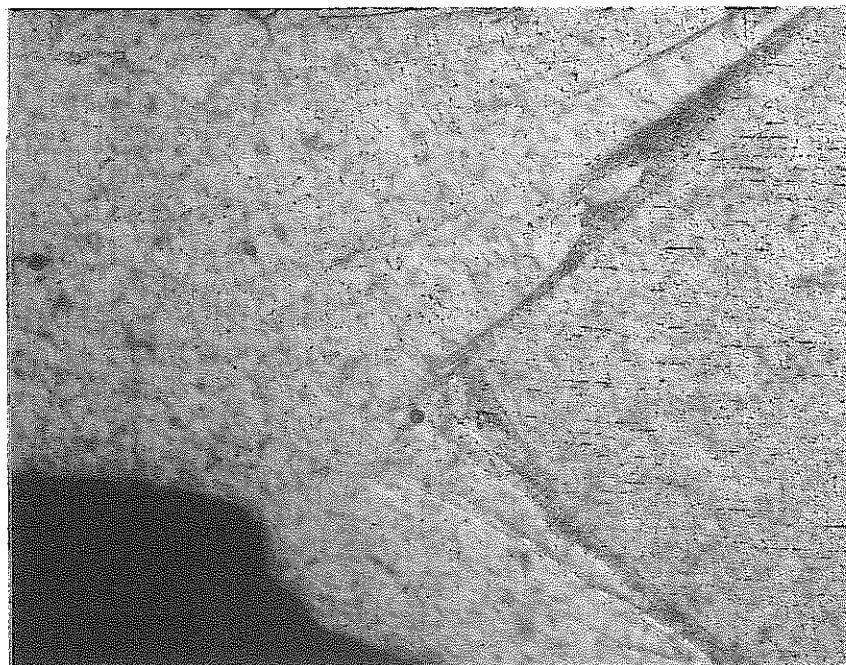


×200
50 μm

写真-14 MA957(8M)溶接金属部断面金相写真(レーザ溶接)



×50
200 μm



×200
50 μm

写真-15 MA957(9M)溶接金属部断面金相写真(レーザ溶接)

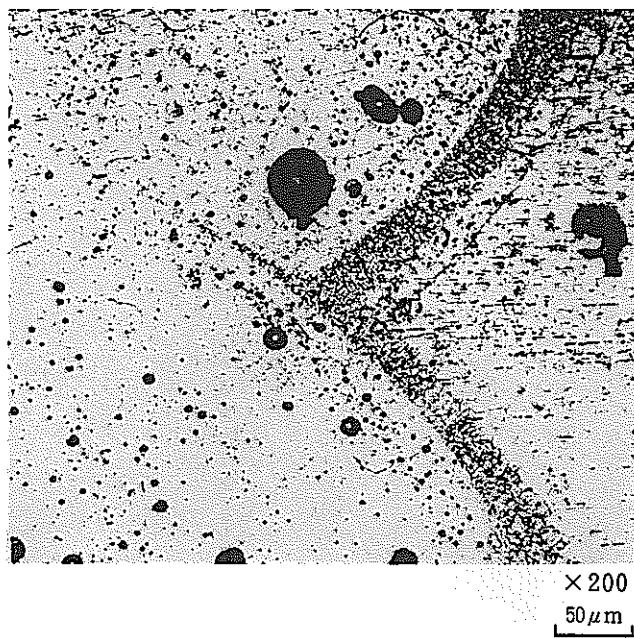
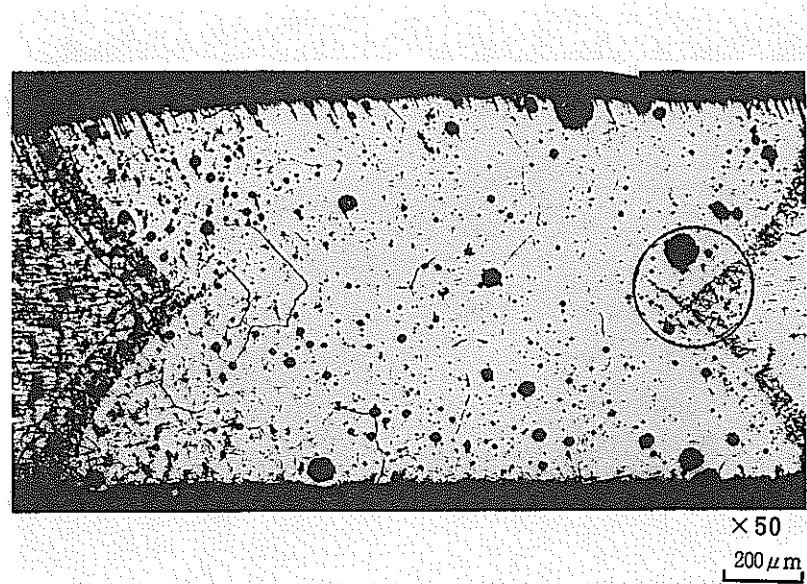


写真-16 MA957 (7M) 溶接金属部断面金相写真 (パルスTIG溶接)

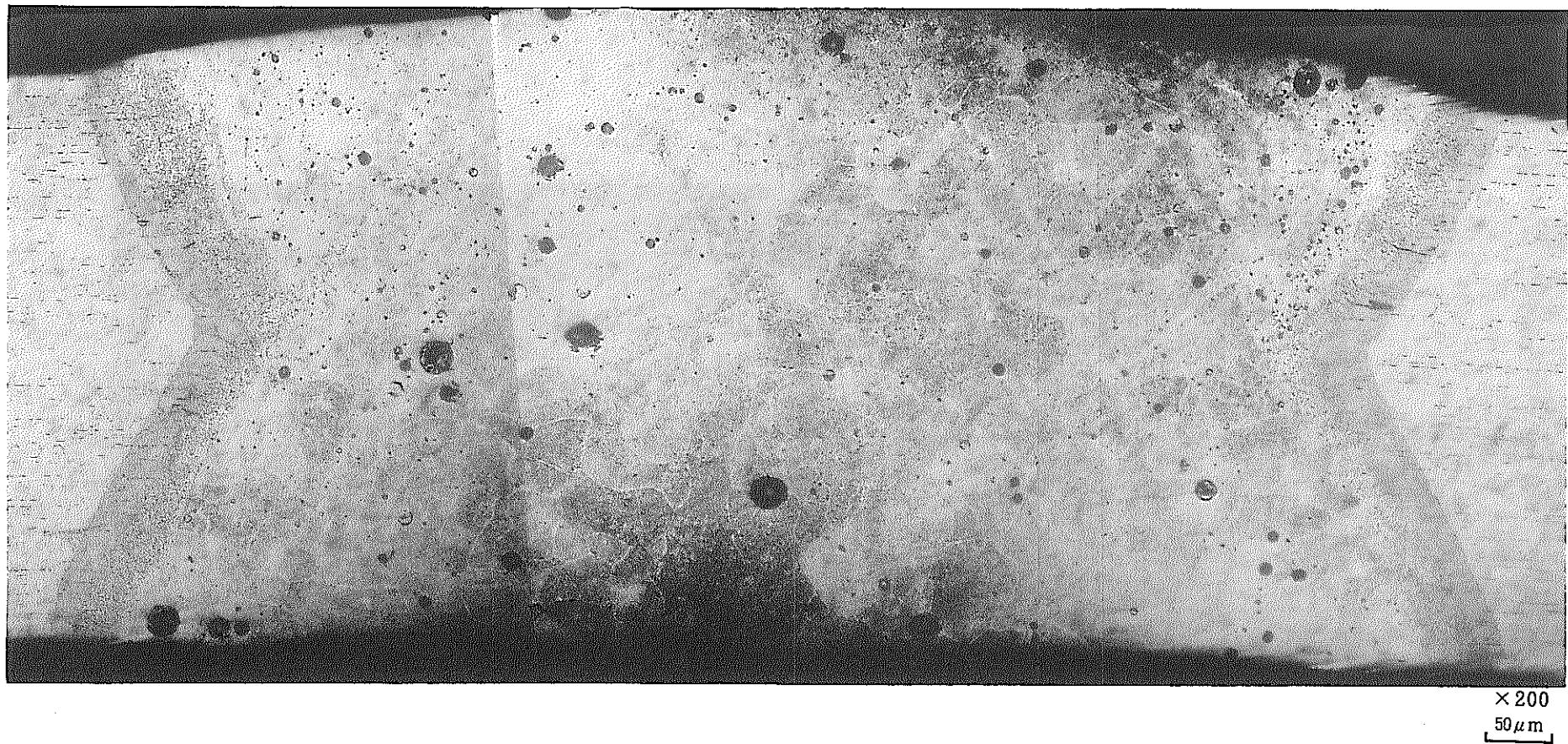


写真-17 MA957 (8M) 溶接金属部断面金相写真 (パルスTIG溶接)

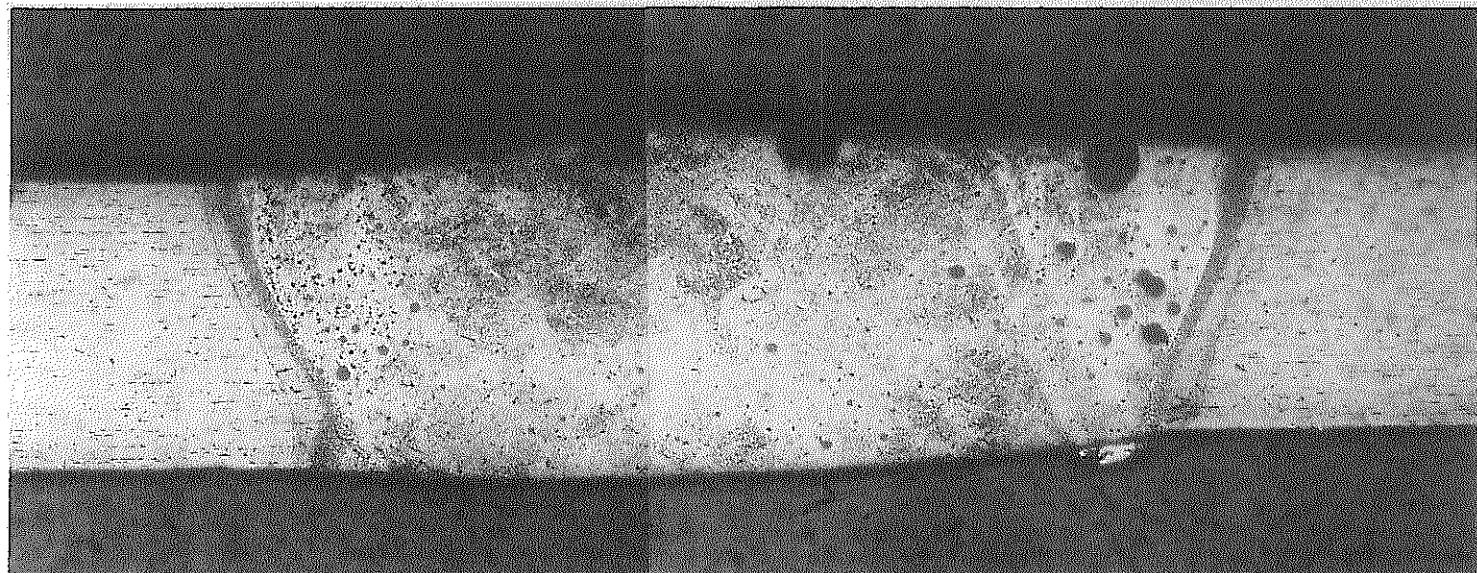


写真-18 MA957(9M)溶接金属部断面金相写真(パルスTIG溶接)

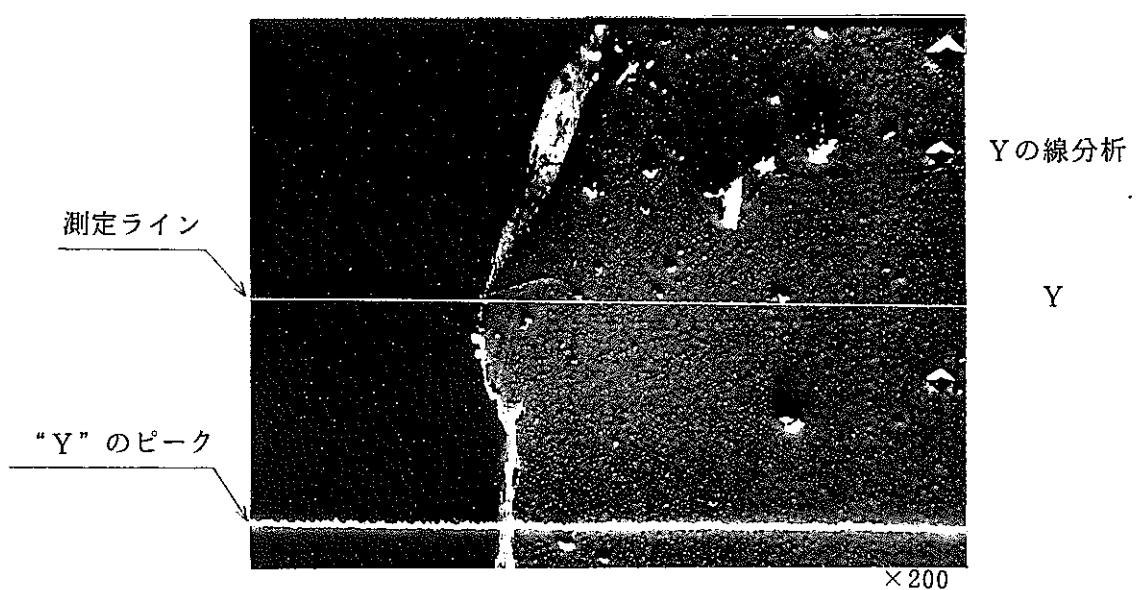
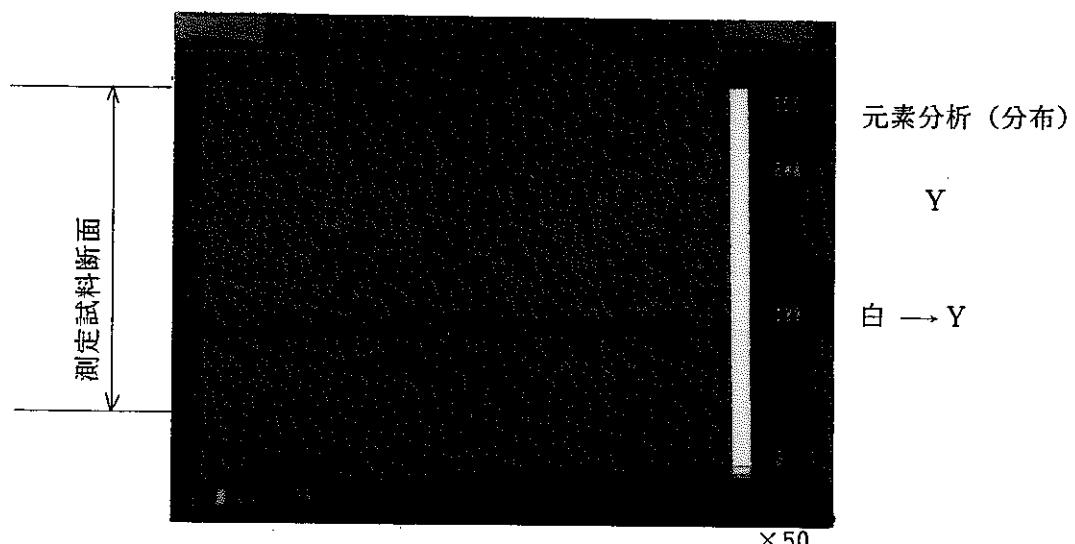


写真-19 MA957 (7M) EPMA解析結果・溶接金属部断面（レーザ溶接）

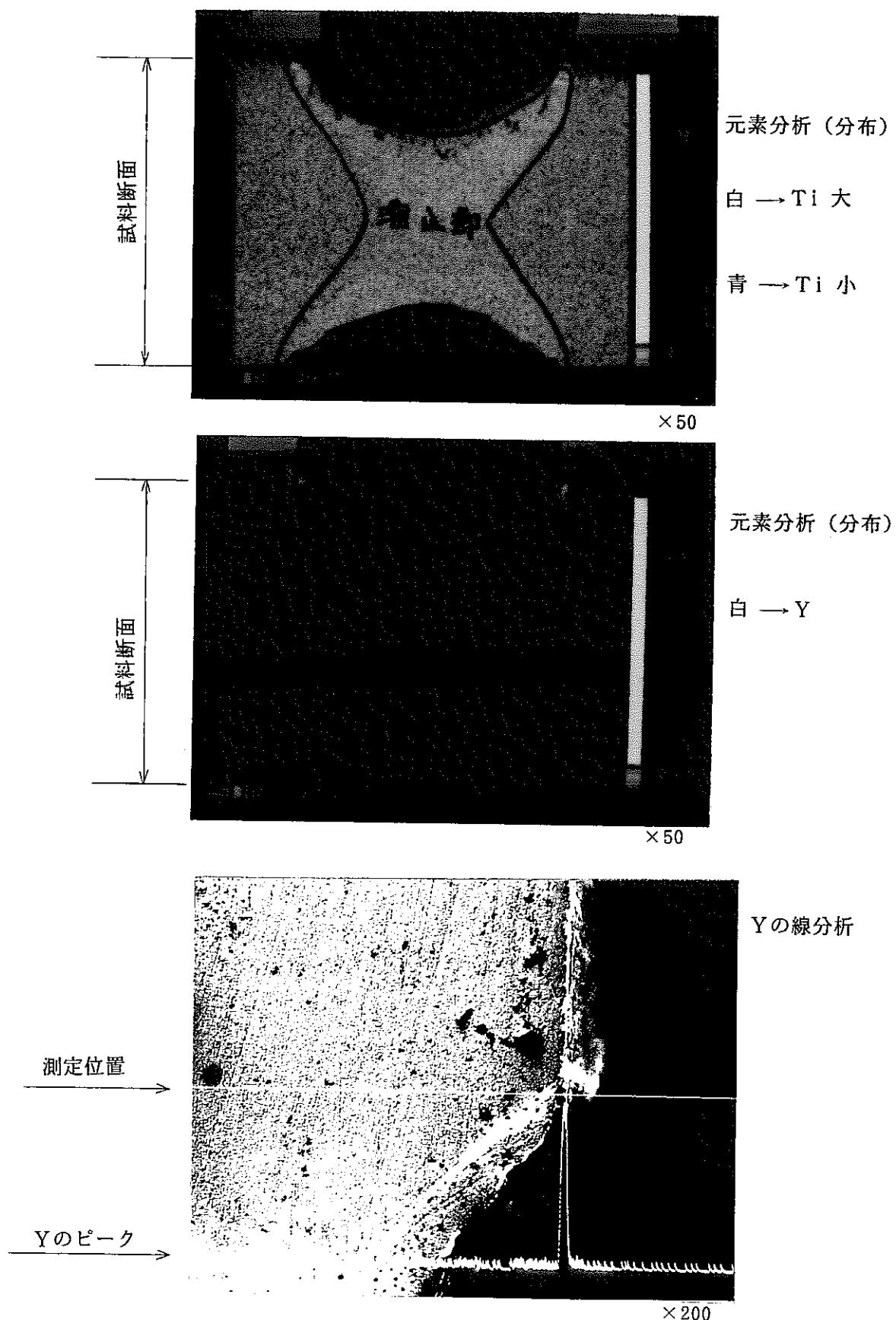


写真-20 MA957 (8M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(レーザ溶接)

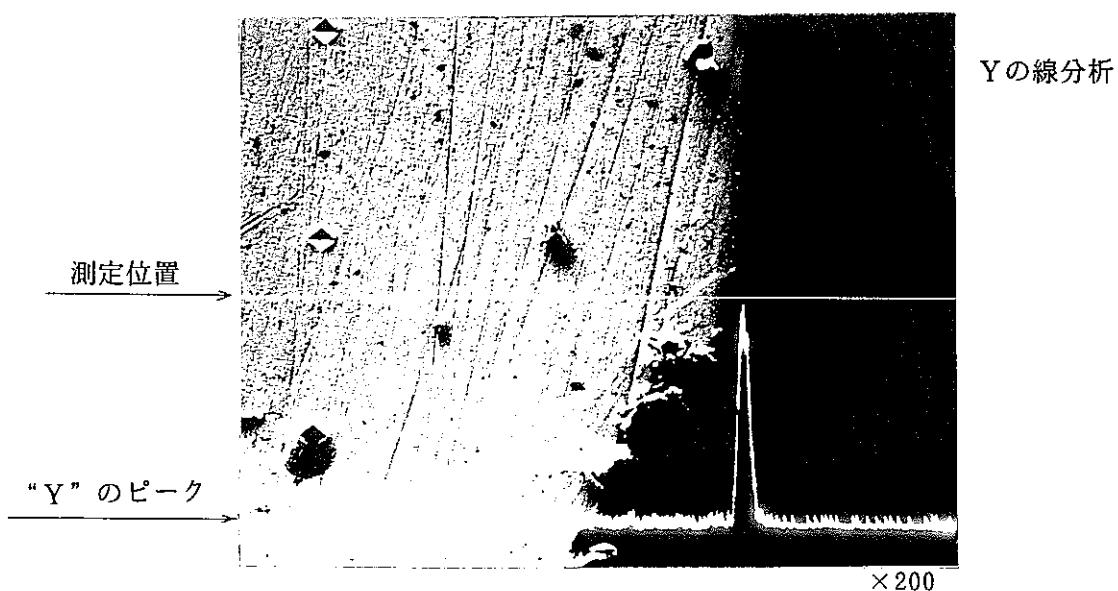
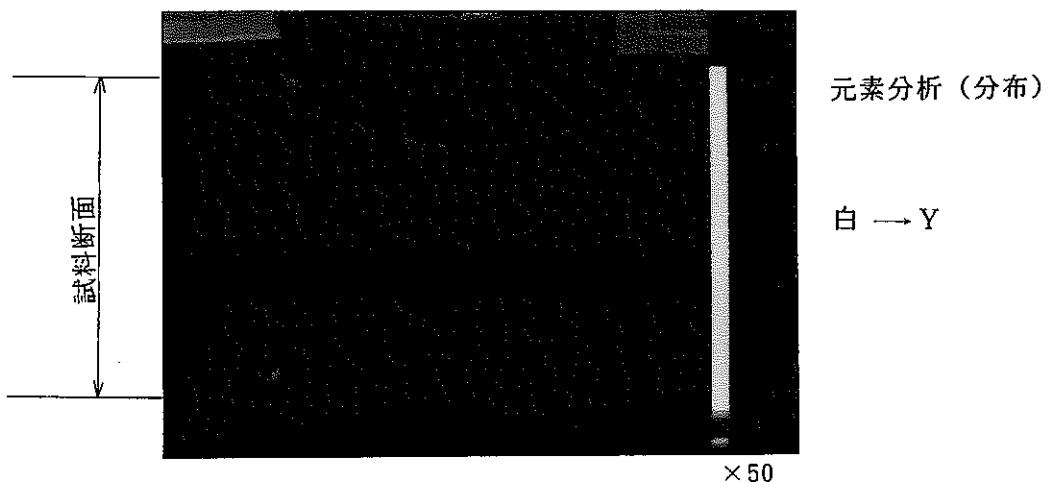
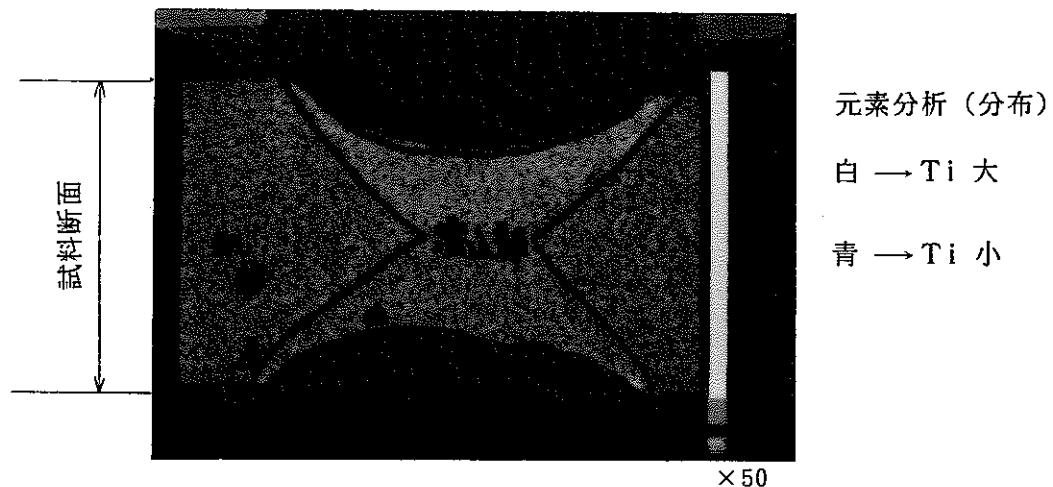


写真 - 21 MA957 (9 M) EPMA解析結果・溶接金属部断面（レーザ溶接）

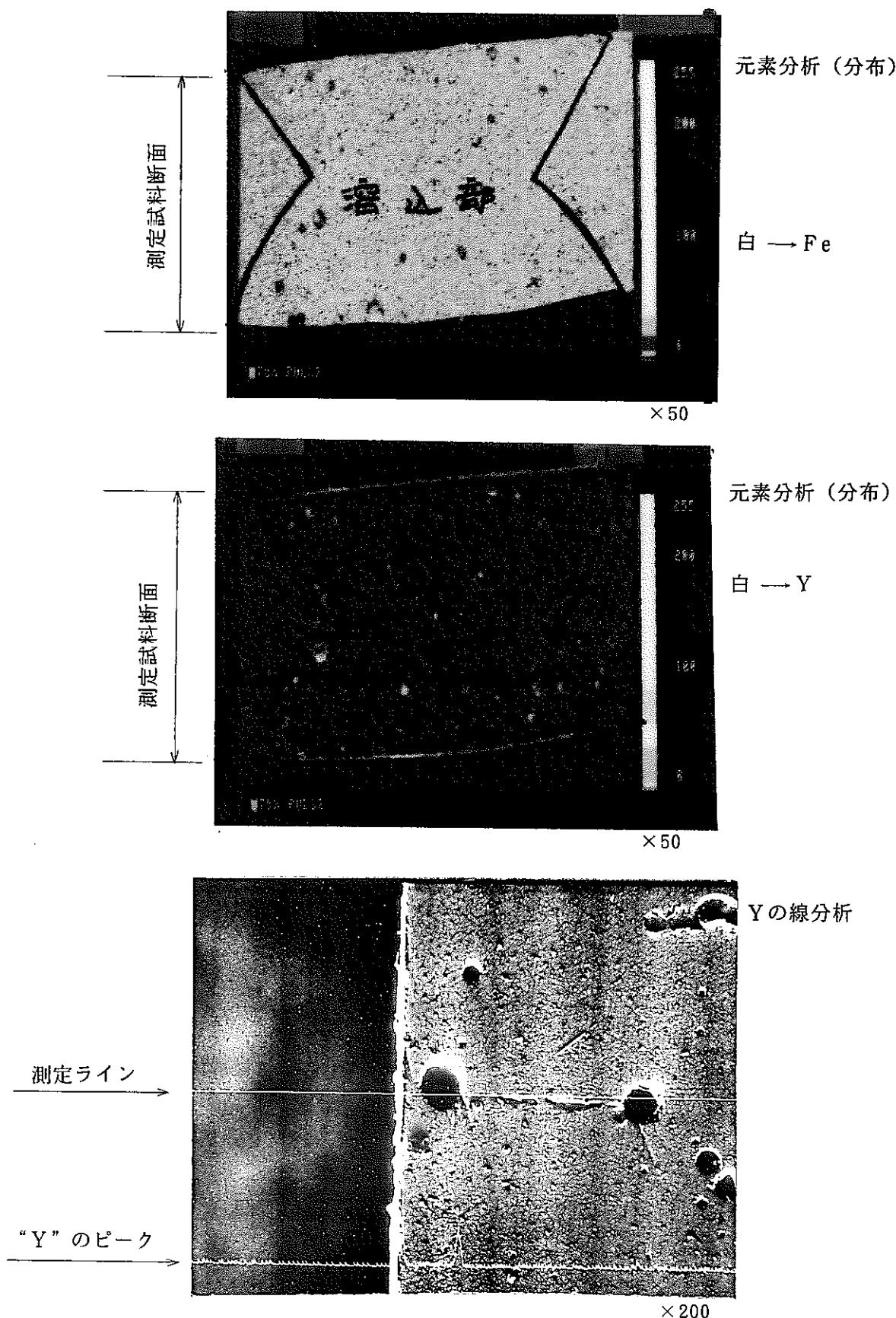


写真-22 MA957 (7M) EPMA解析結果・溶接金属部断面（パルスTIG溶接）

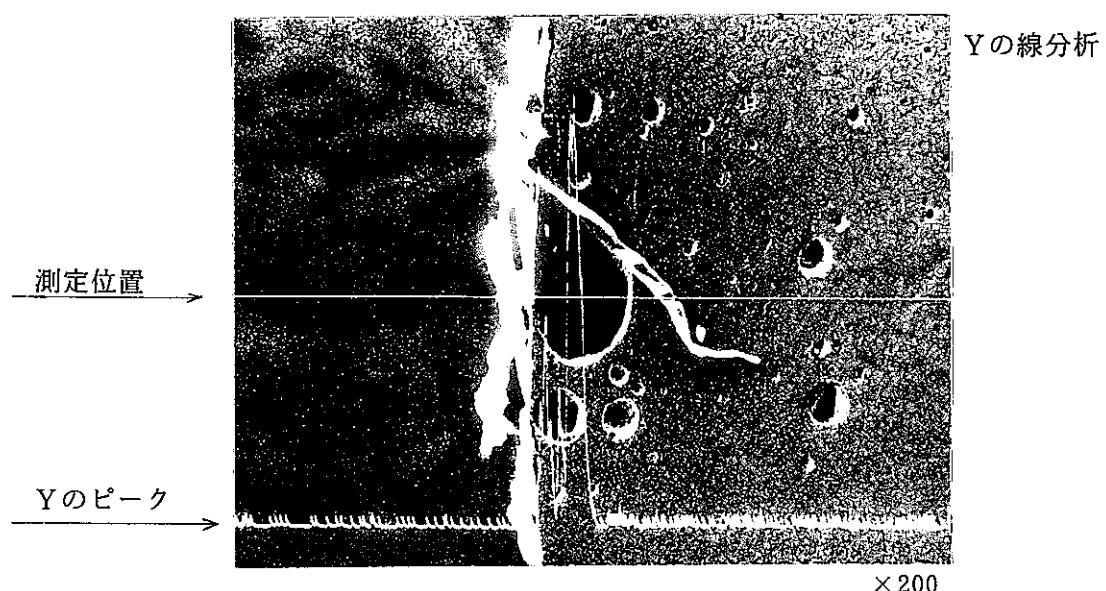
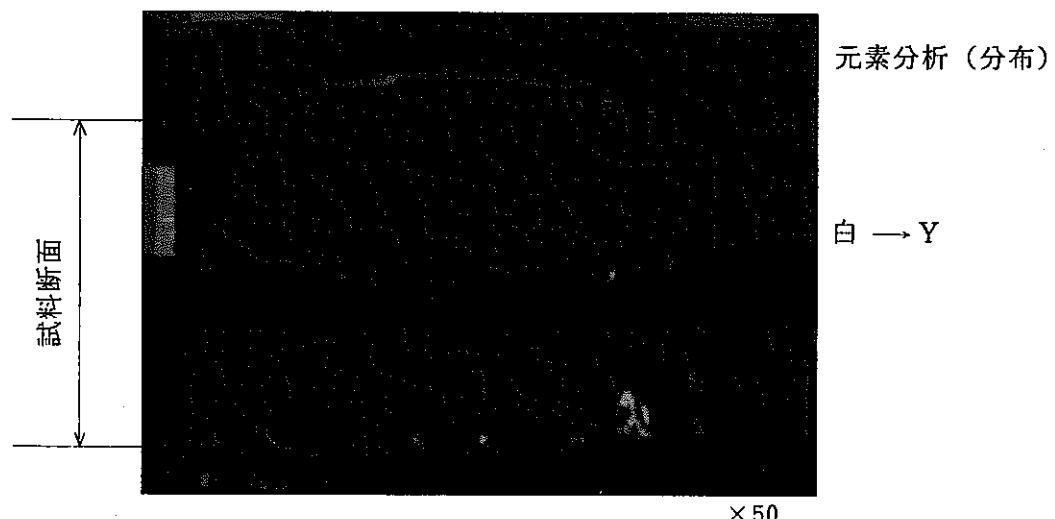
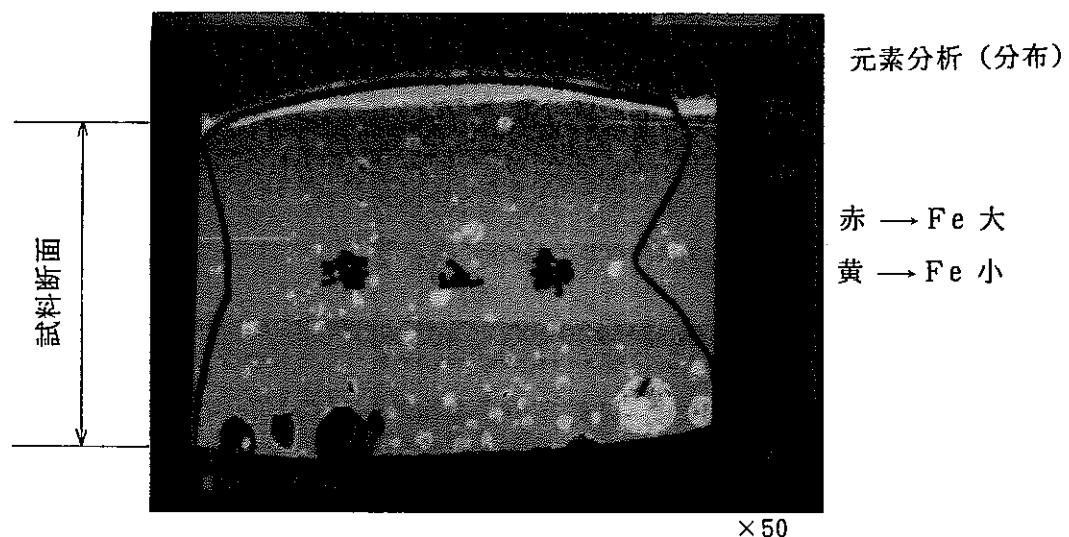


写真-23 MA957(8M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(パルスTIG溶接)

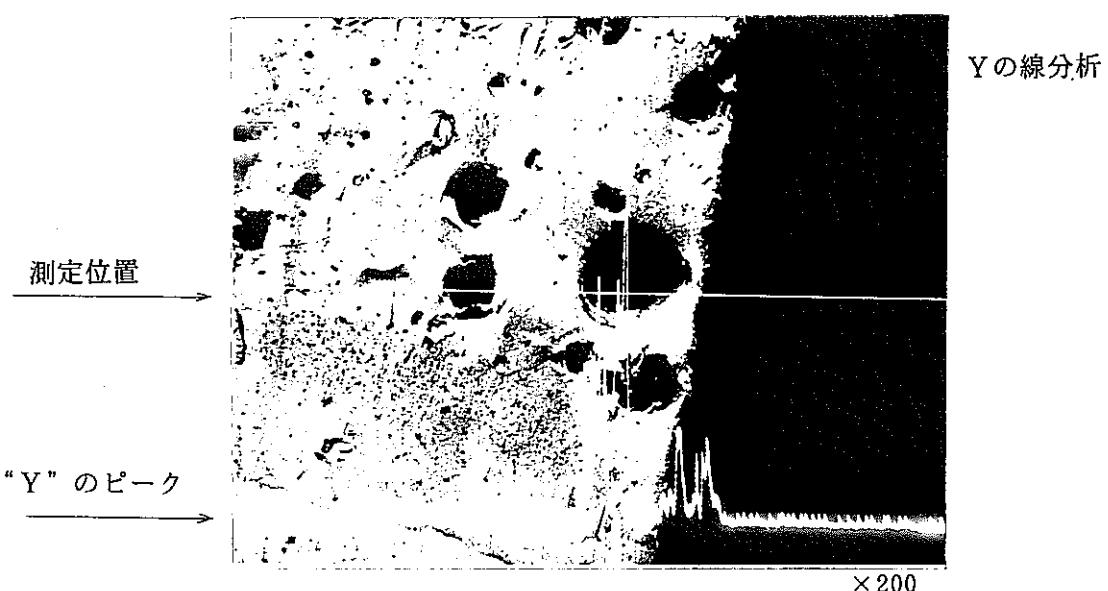
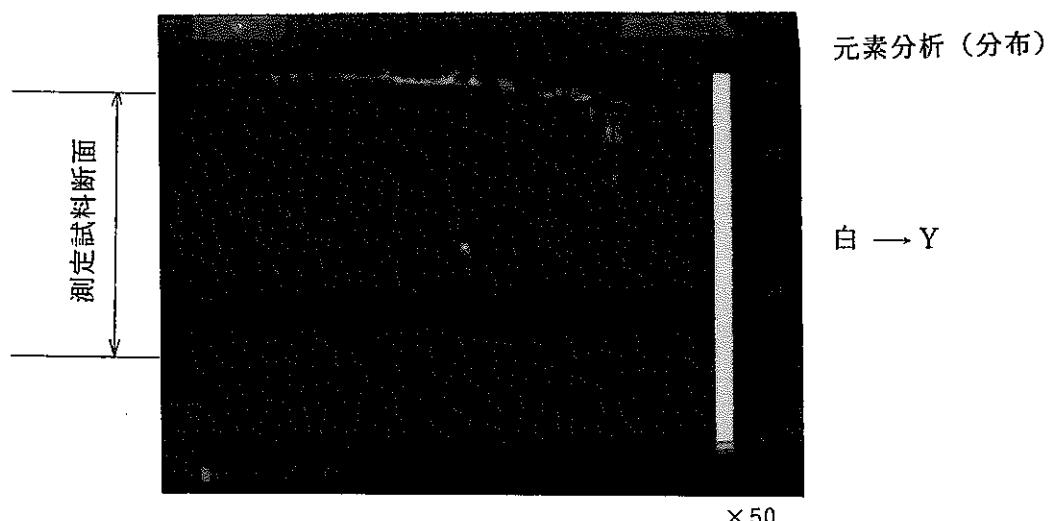
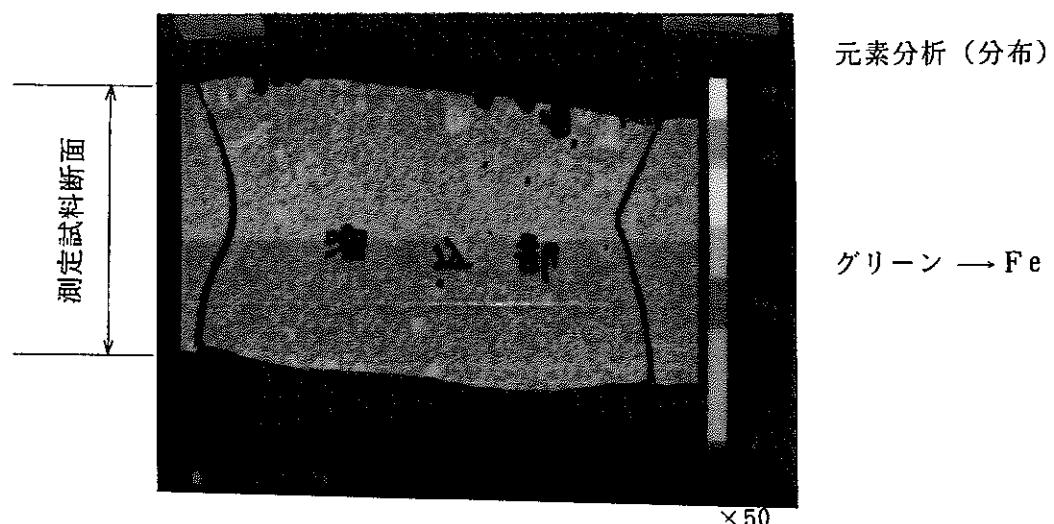
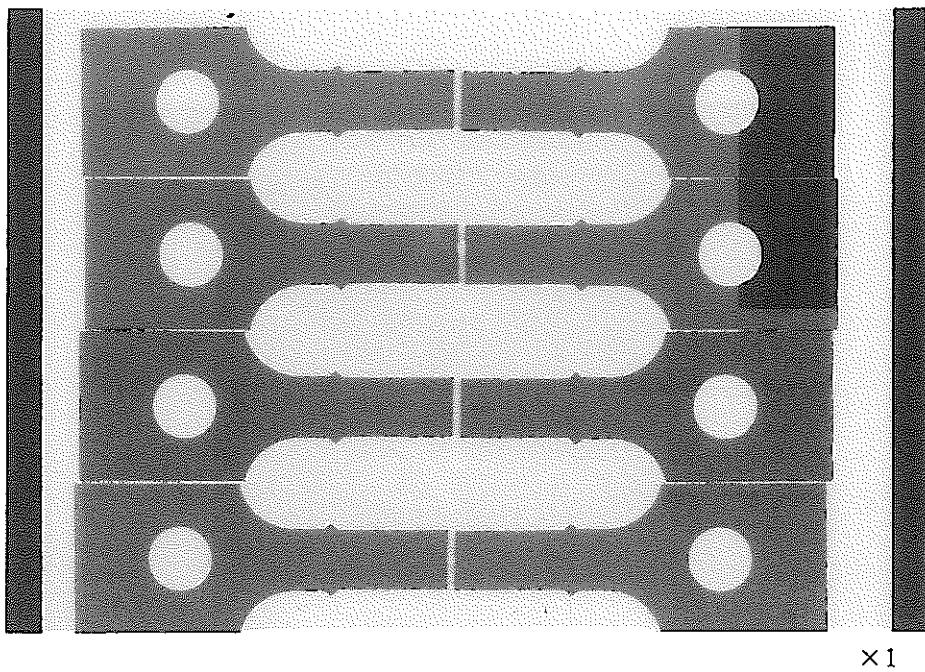
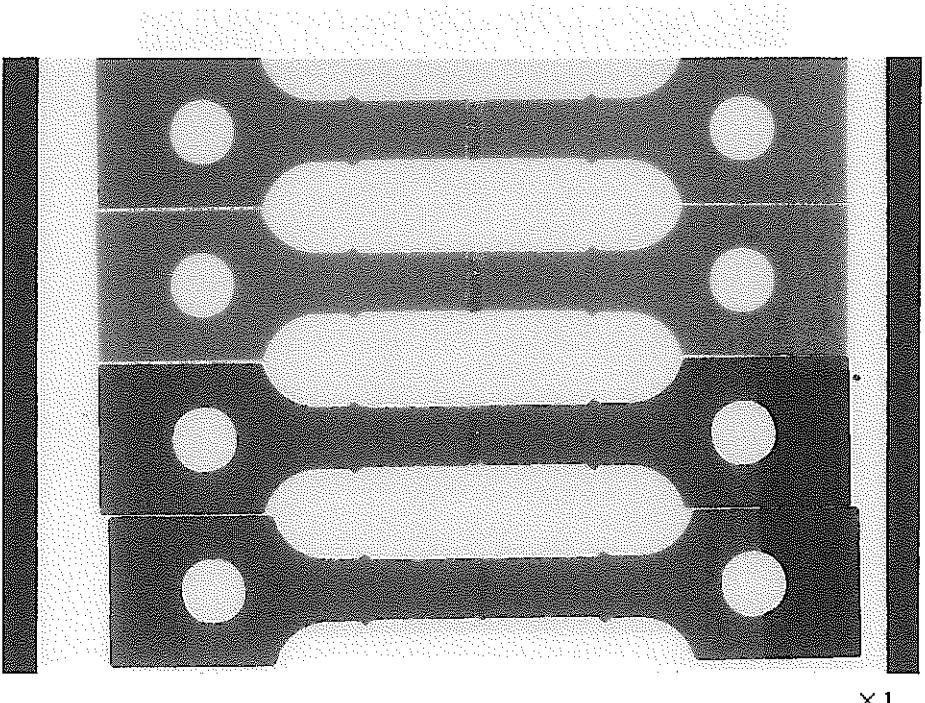


写真-24 MA957 (9M) EPMA解析結果・溶接金属部断面(パルスTIG溶接)



×1

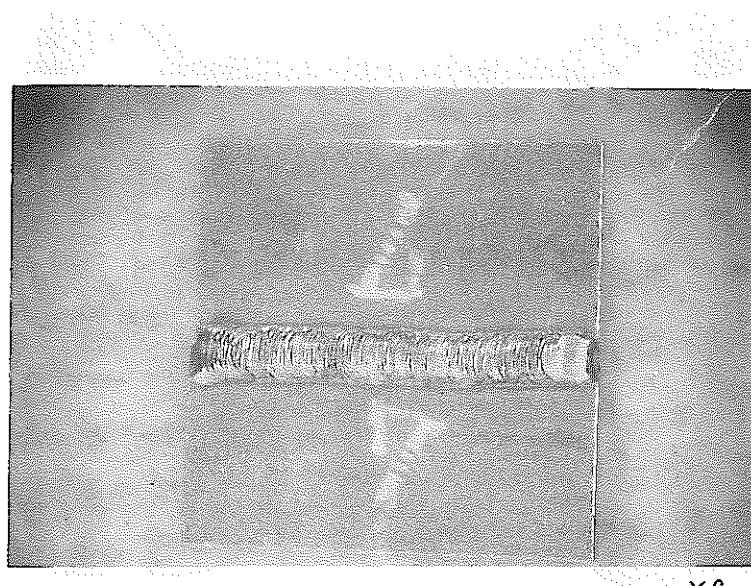
レーザ溶接試料片



×1

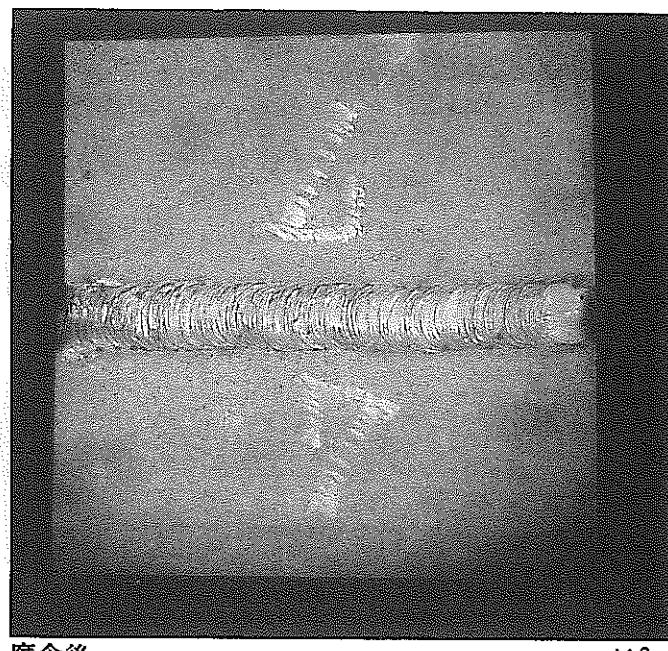
パルスTIG溶接試料片

写真-25 MA957X線検査結果



腐食前

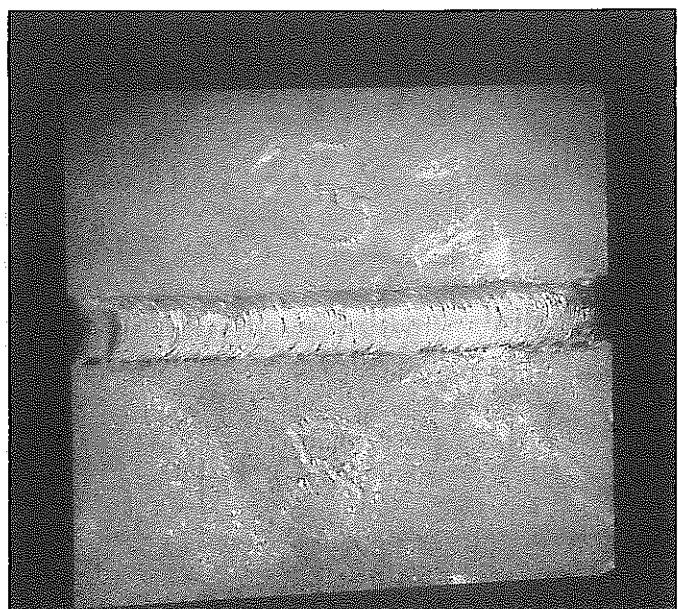
×6



腐食後

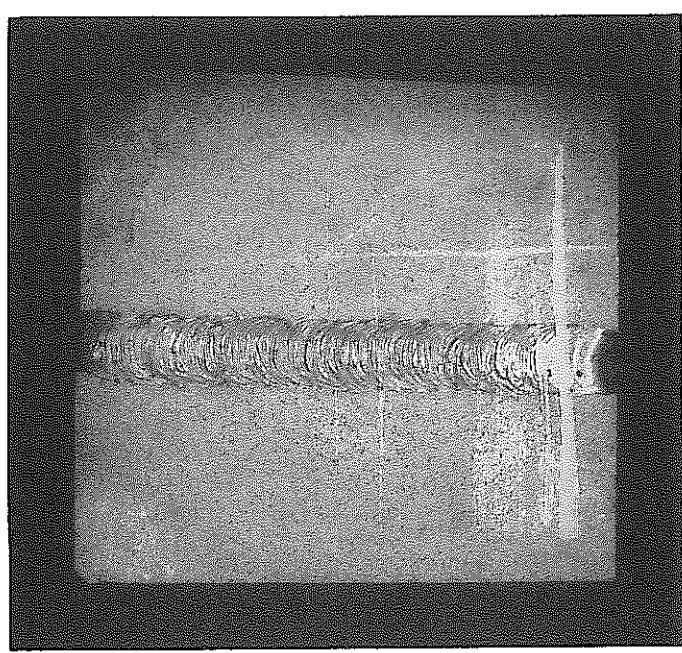
×8

写真-26 MA957 (7M) Na腐食試験結果 (レーザ溶接)



(表)

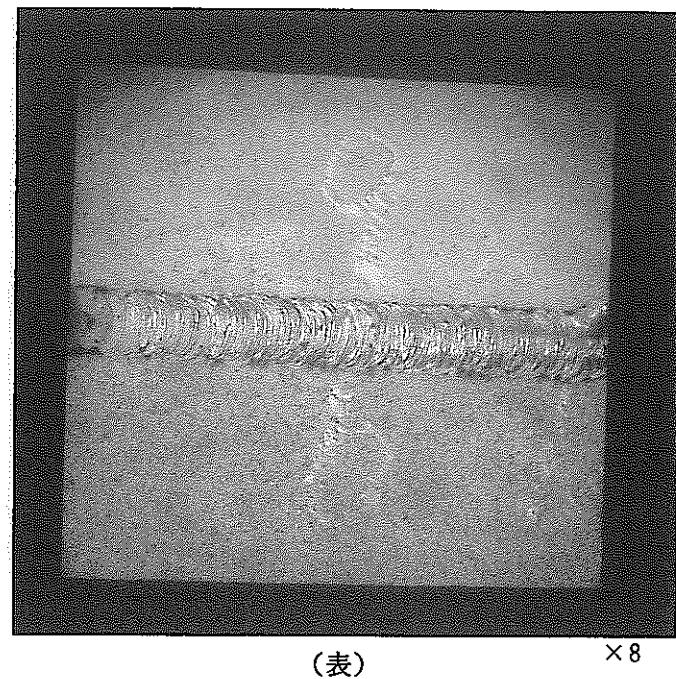
×8



(裏)

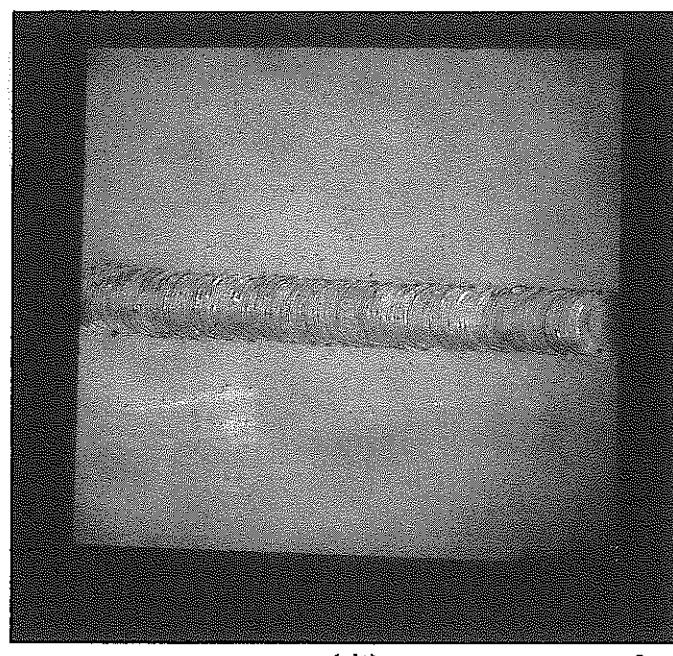
×8

写真 - 27 MA957 (8 M) Na腐食試験結果 (レーザ溶接)



(表)

×8



(裏)

×8

写真-28 MA957 (9M) Na腐食試験結果 (レーザ溶接)

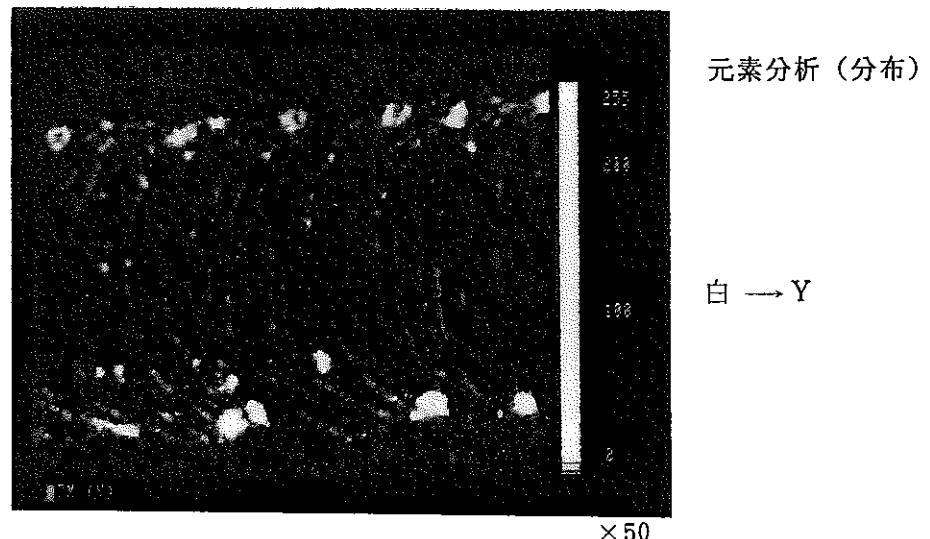
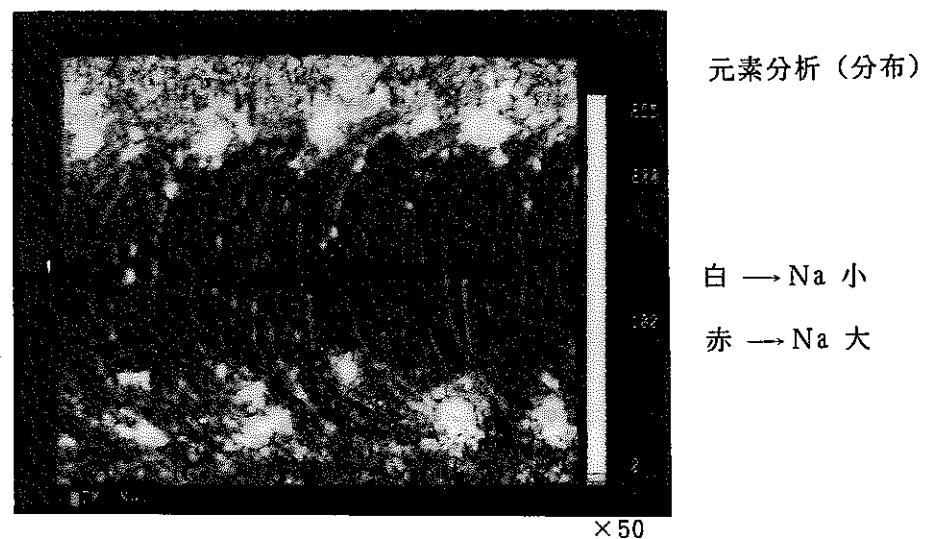
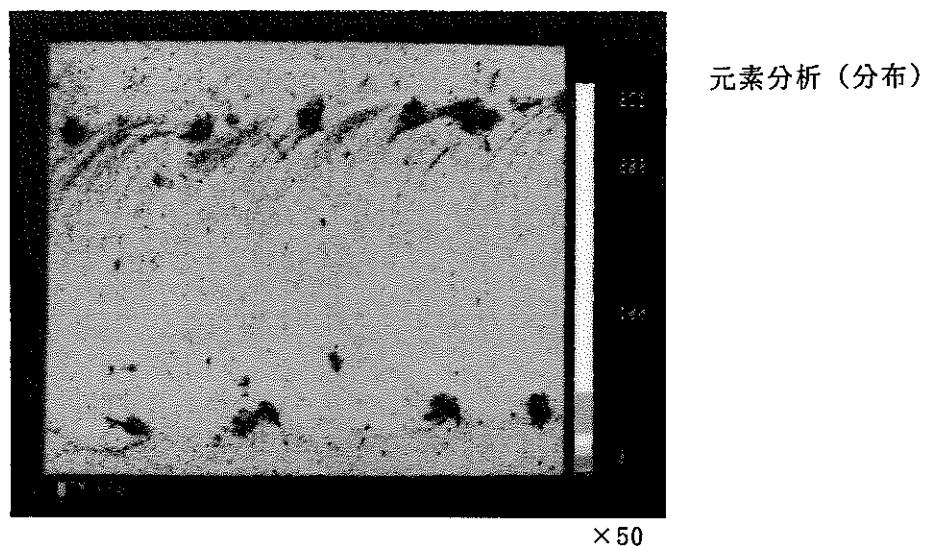


写真 - 29 MA957 (7 M) Na腐食試験EPMA解析結果 (レーザ溶接)

元素分布測定

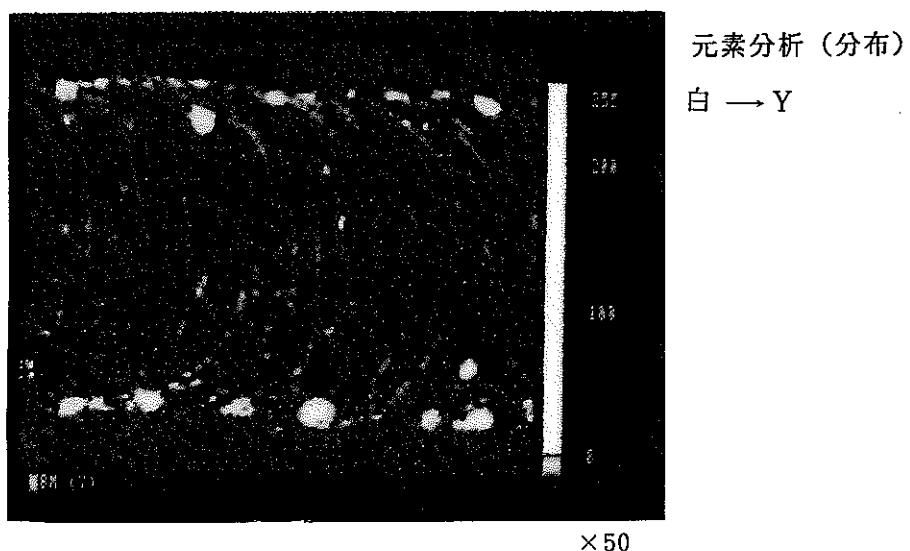
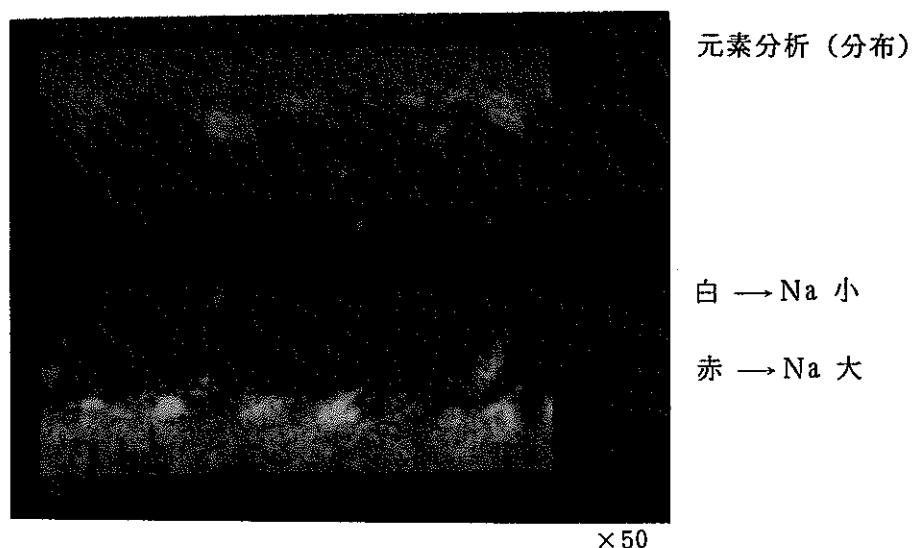
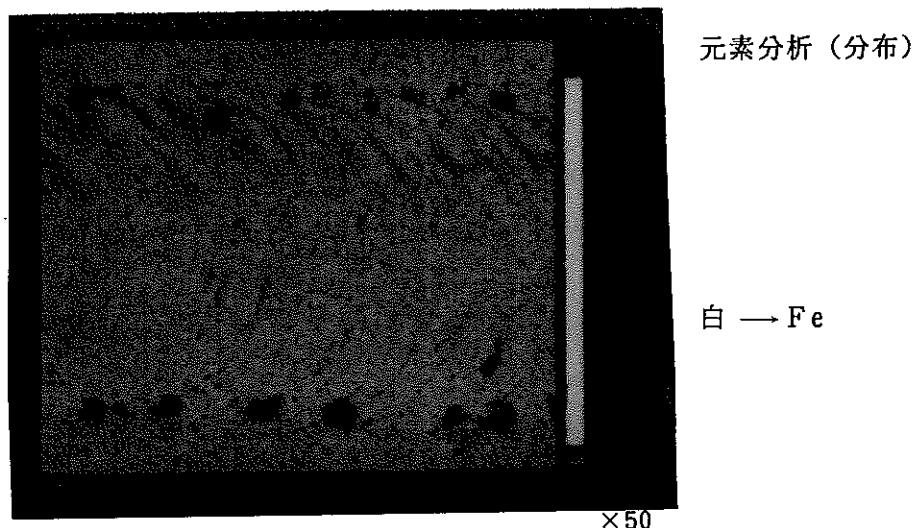
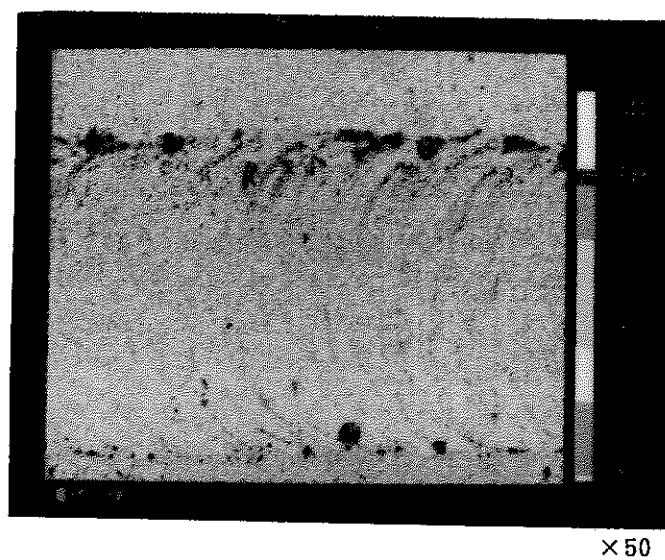


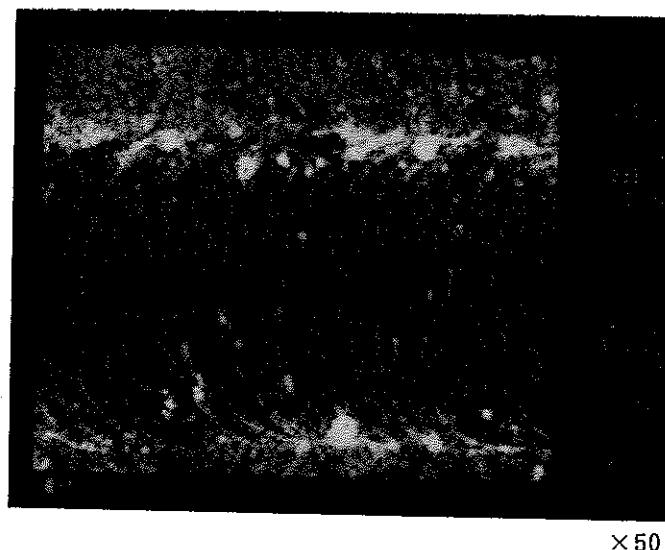
写真-30 MA957 (8M) Na腐食試験EPMA解析結果(レーザ溶接)



元素分析（分布）

白 → Fe

×50

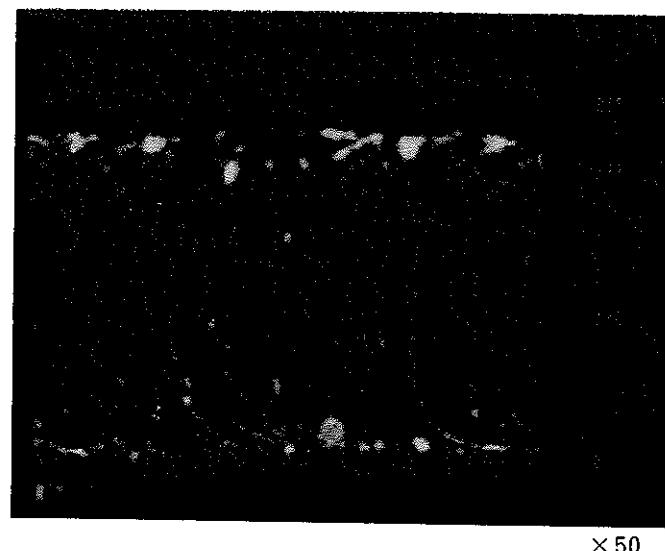


元素分析（分布）

白 → Na 小

赤 → Na 大

×50

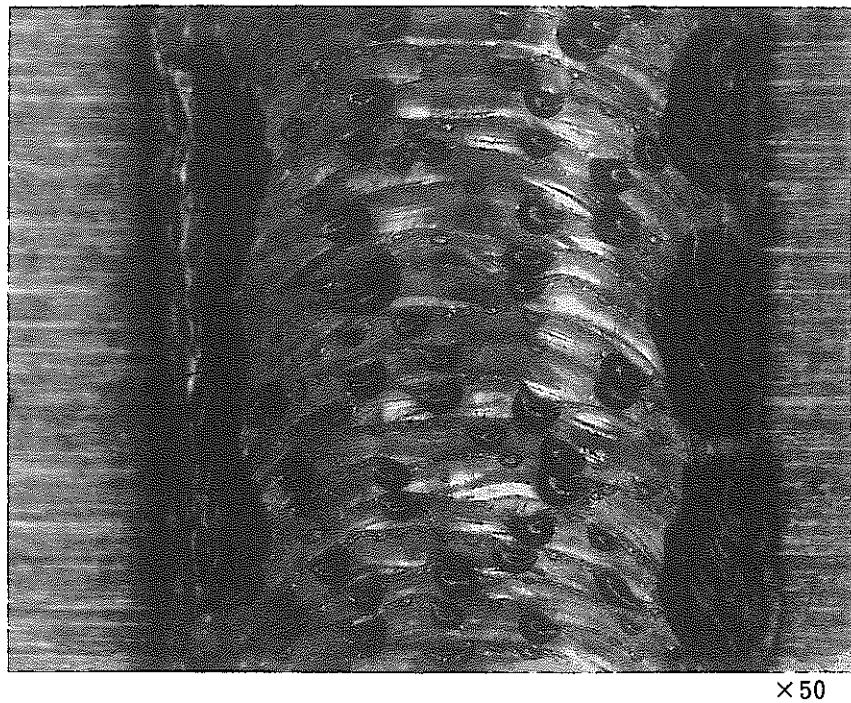


元素分析（分布）

白 → Y

×50

写真 - 31 MA957 (9M) Na腐食試験EPMA解析結果（レーザ溶接）

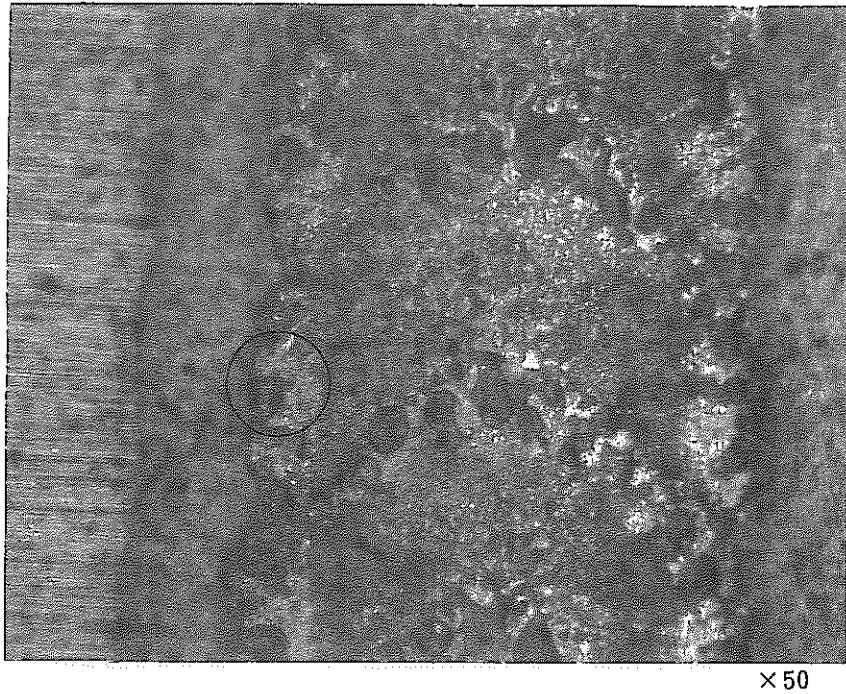


×50

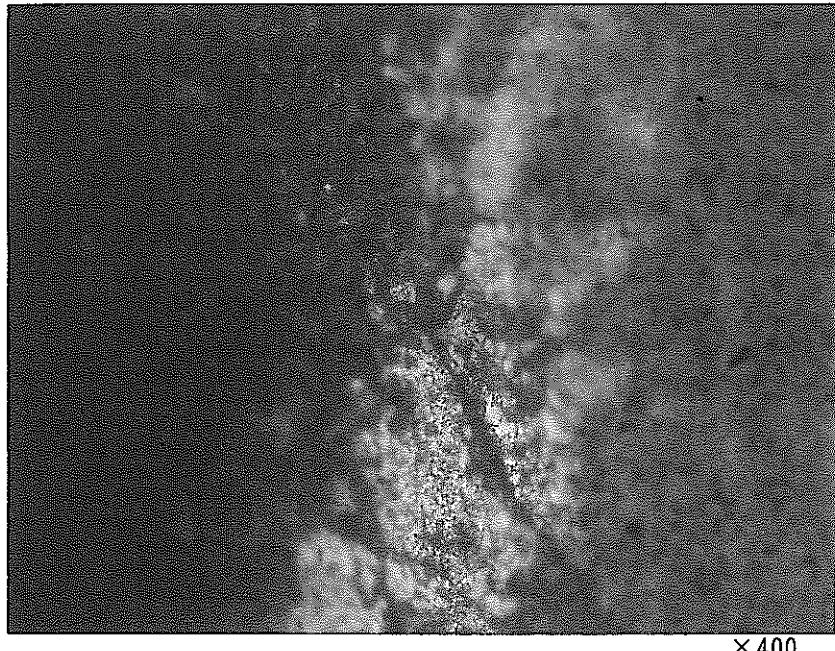


×400

写真-32 MA956溶接金属部表面状態（レーザ溶接）



× 50



× 400

写真-33 MA956溶接金属部表面状態（パルスTIG溶接）

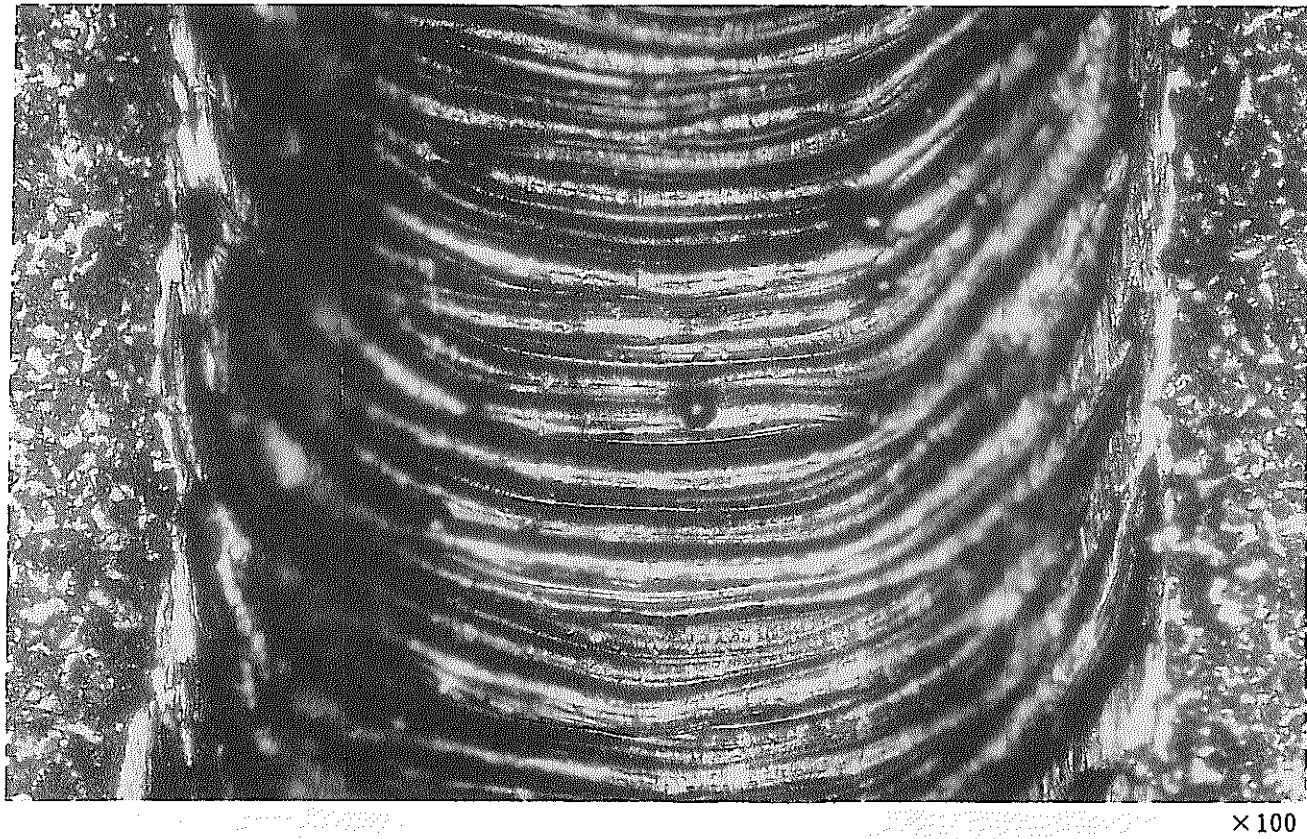


写真-34 MA957 (7M) 溶接金属部表面状態（レーザ溶接）

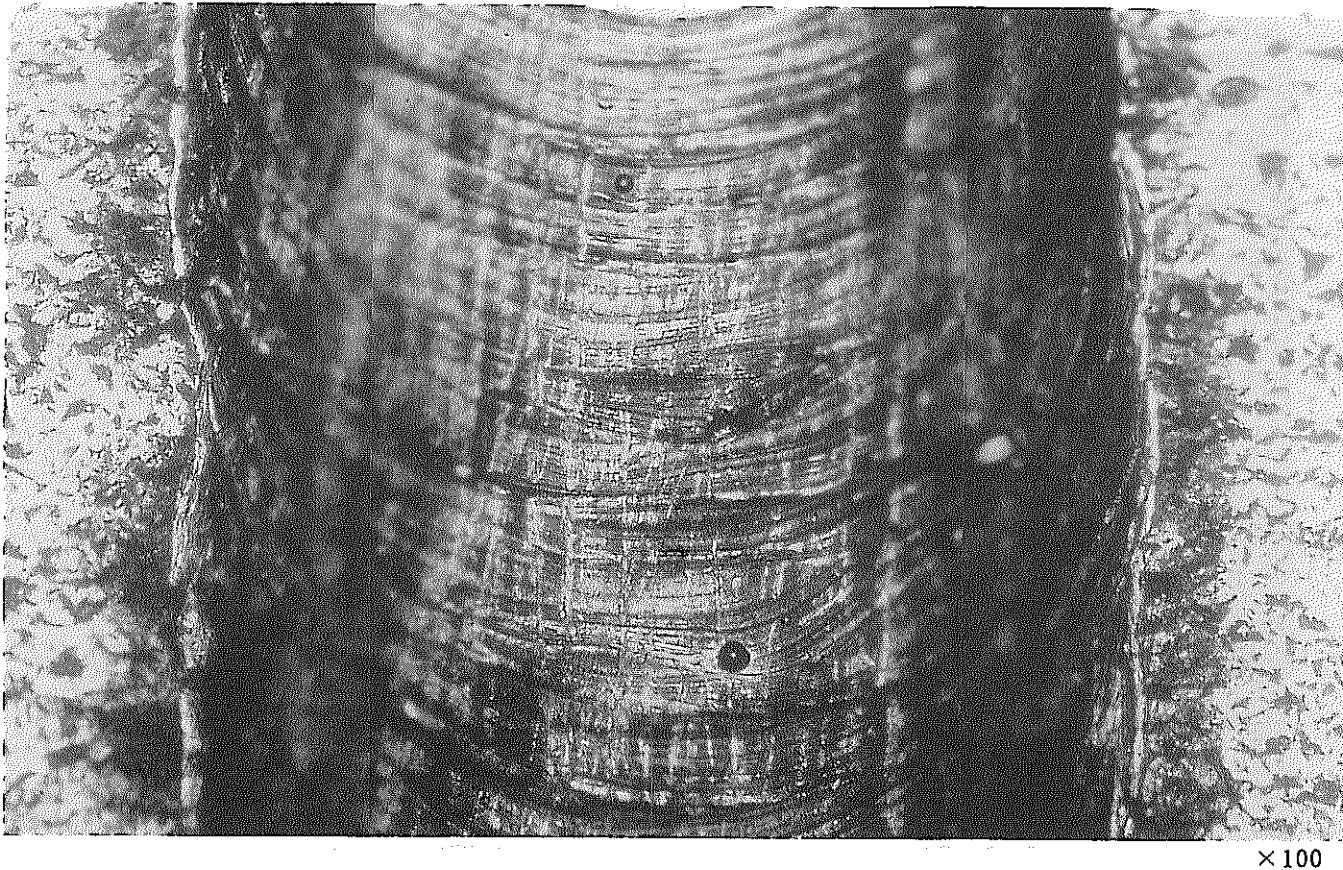


写真-35 MA957(8M)溶接金属部表面状態(レーザ溶接)

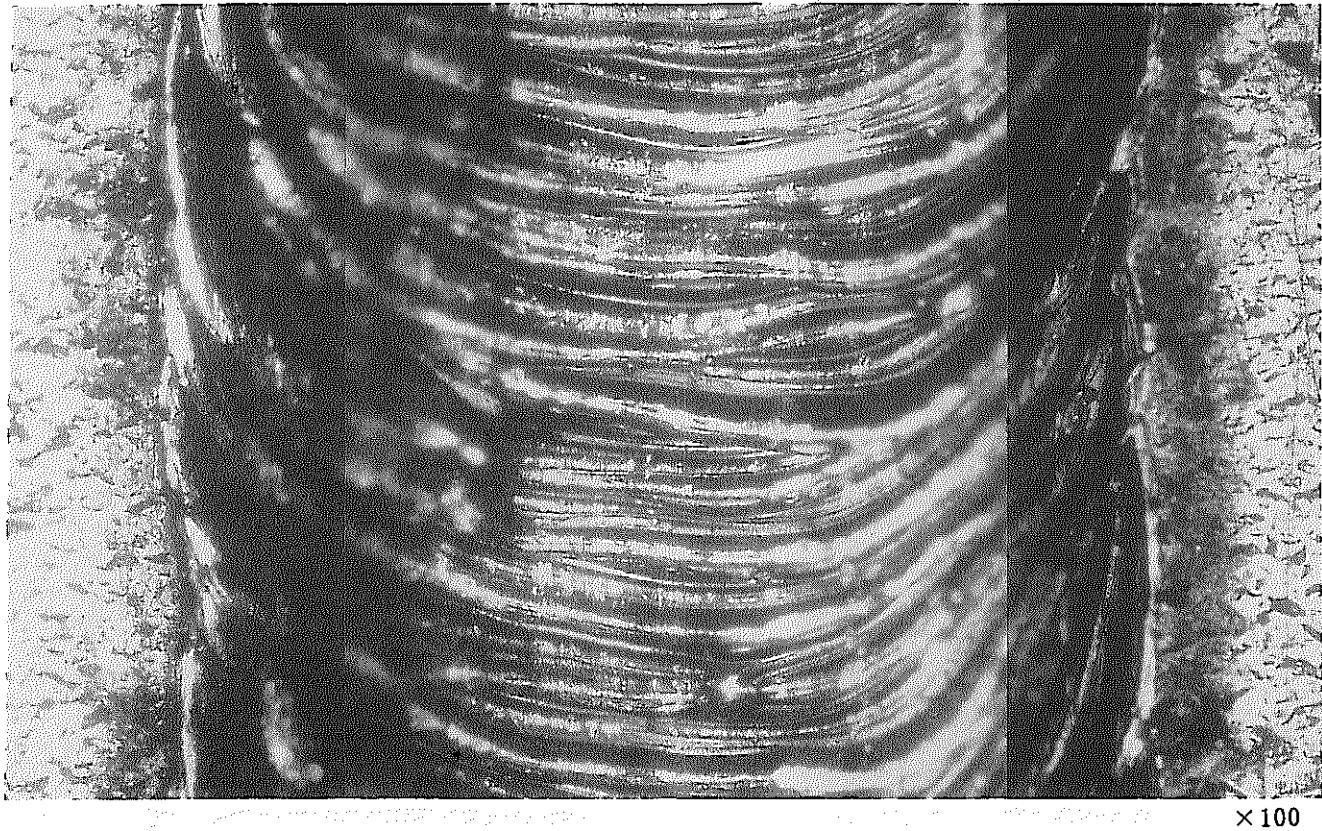
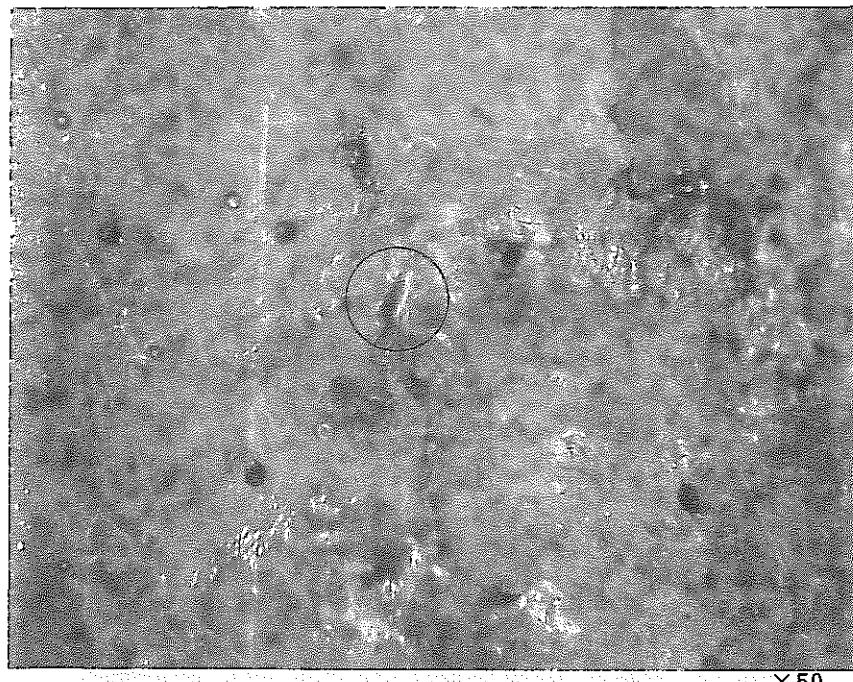
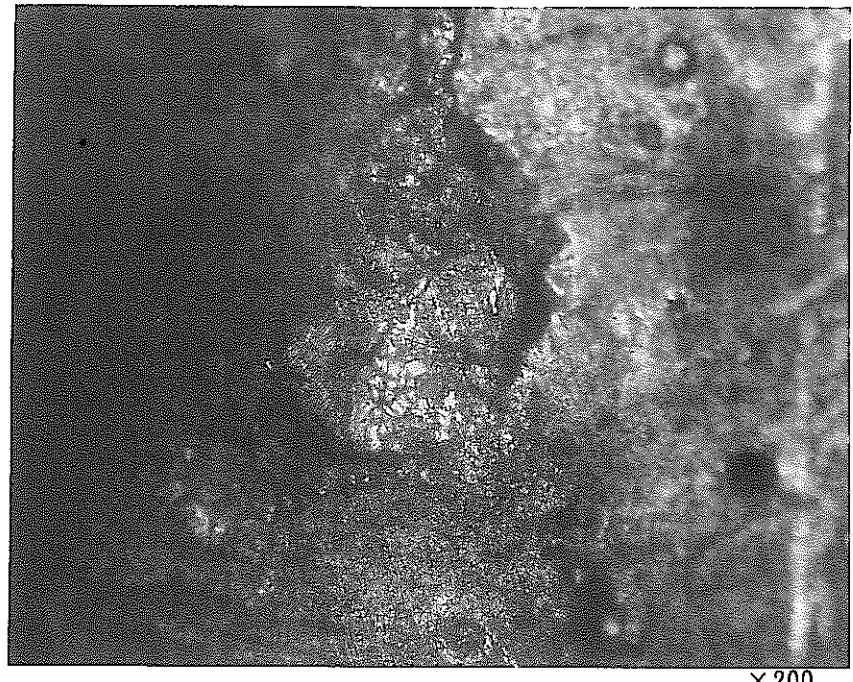


写真-36 MA957(9M)溶接金属部表面状態(レーザ溶接)

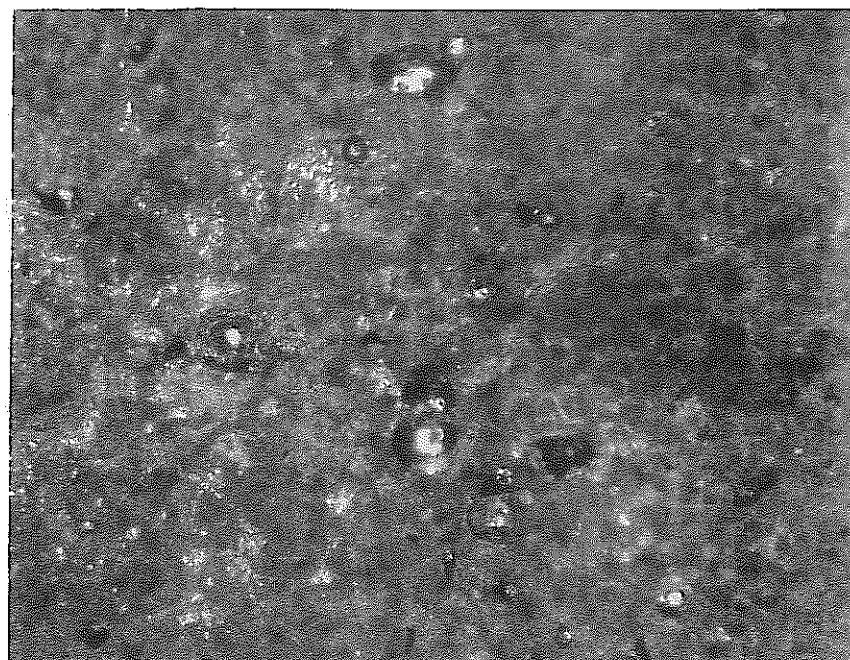


×50

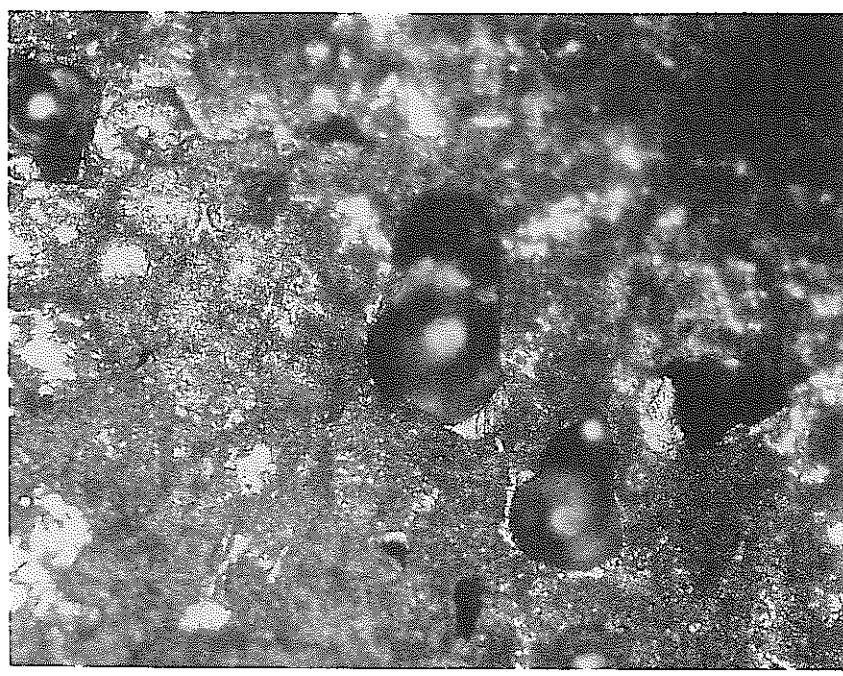


×200

写真-37 MA957(7M)溶接金属部表面状態(パルスTIG溶接)

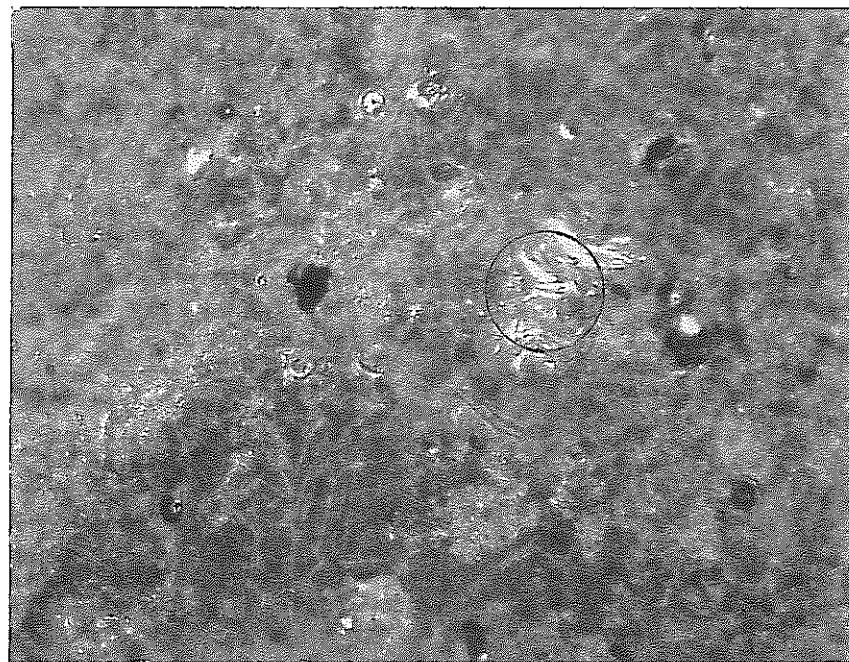


×50

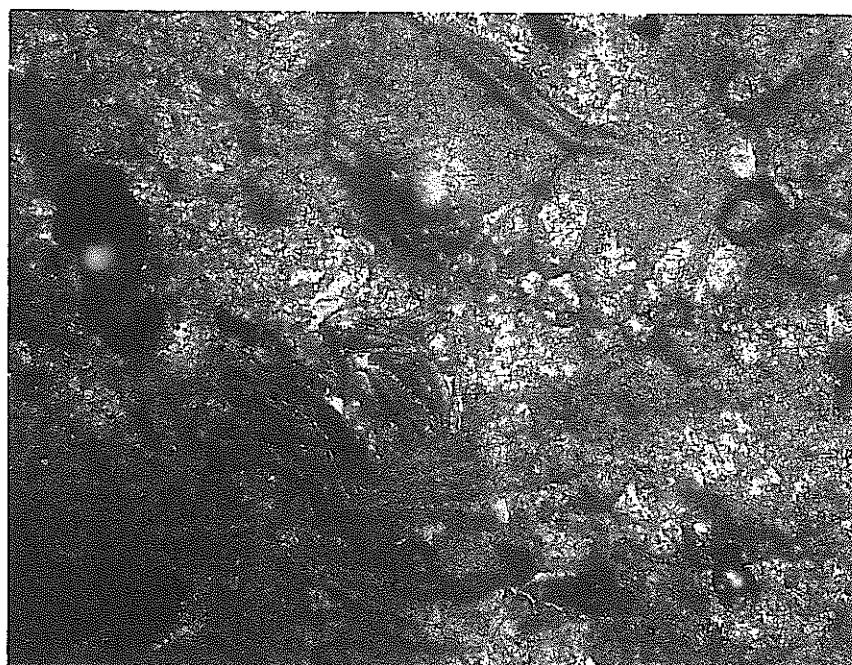


×200

写真-38 MA957(8M)溶接金属部表面状態(パルスTIG溶接)



×50



×200

写真-39 MA957 (9M) 溶接金属部表面状態 (パルスTIG溶接)

図 リ ス ト

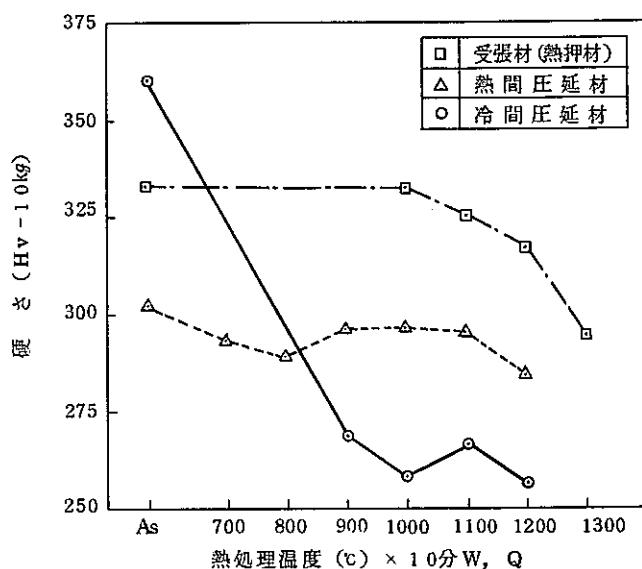


図-1 MA 956 鋼の硬さ測定

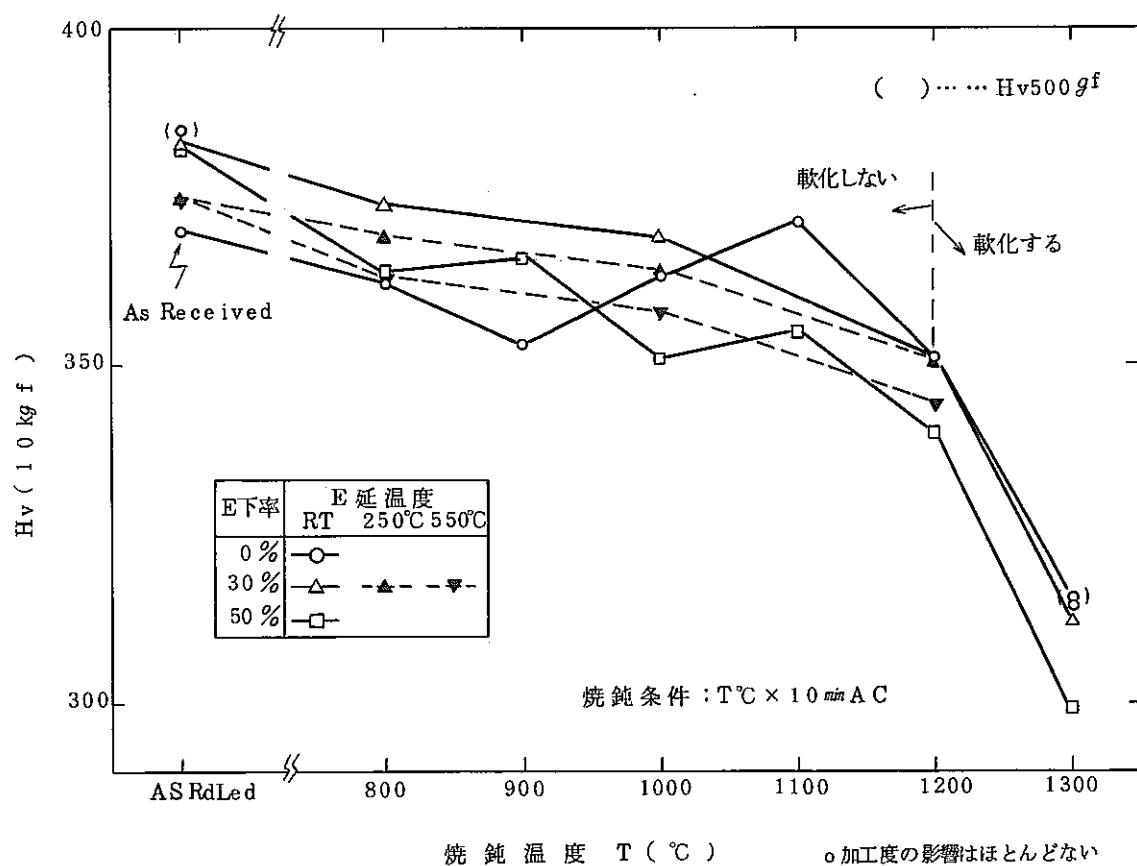


図-2 MA 957 鋼の硬さ測定

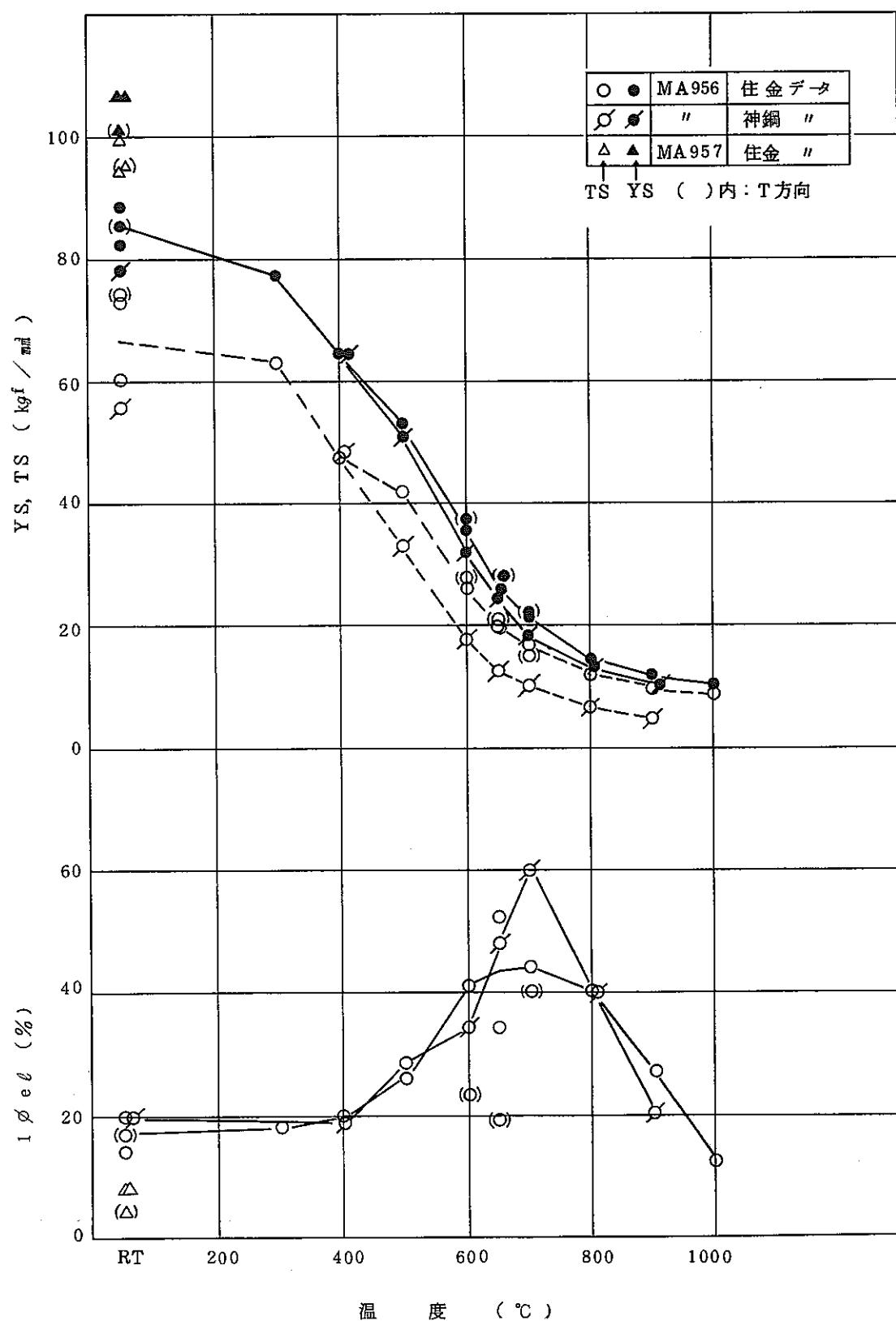
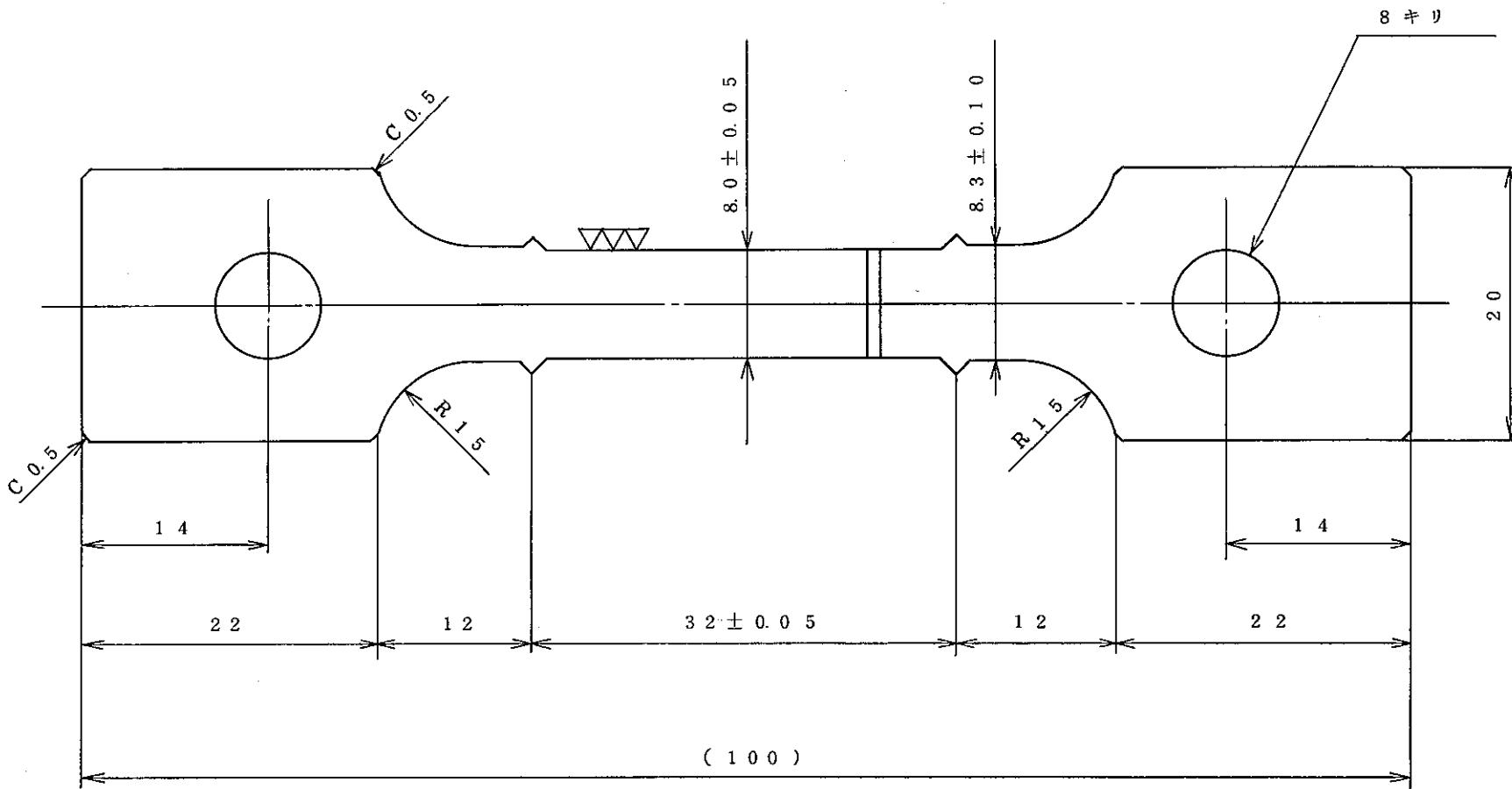
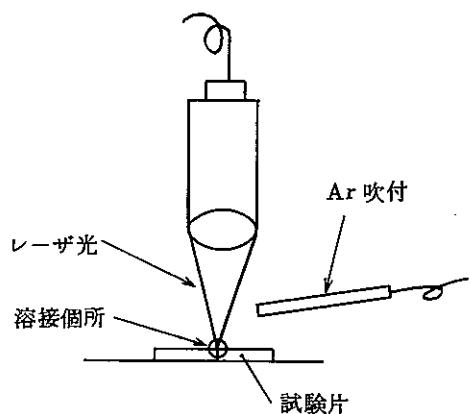


図-3 MA 956, MA 957 鋼の引張強度

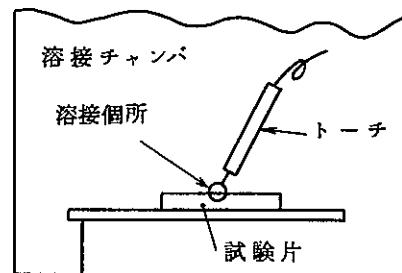


单位 : mm

図-4 試験片形状



[レーザー溶接]



[パルスTIG溶接]

図-5 溶接方法

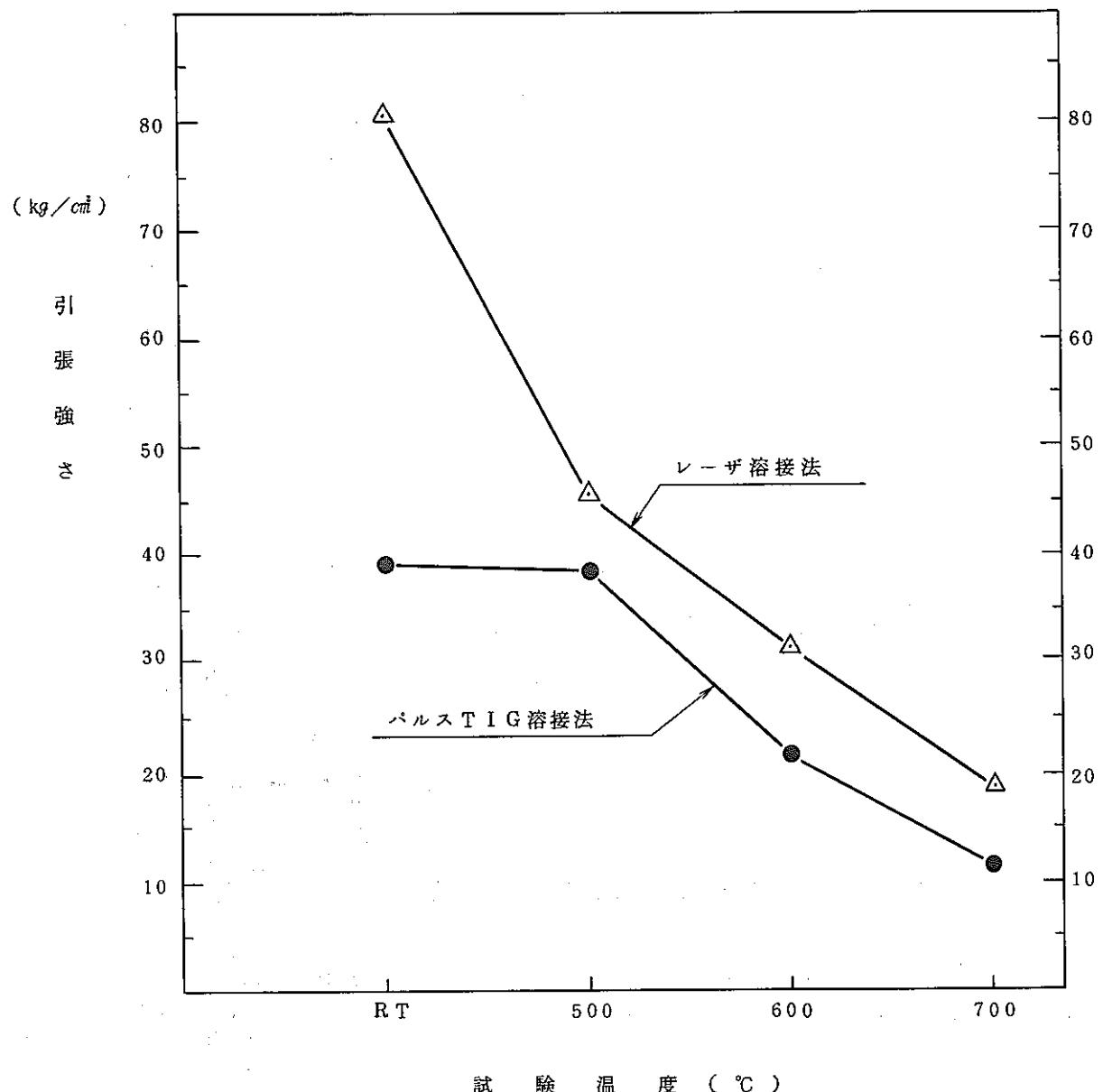


図-6 MA 956 溶接金属部の引張強度

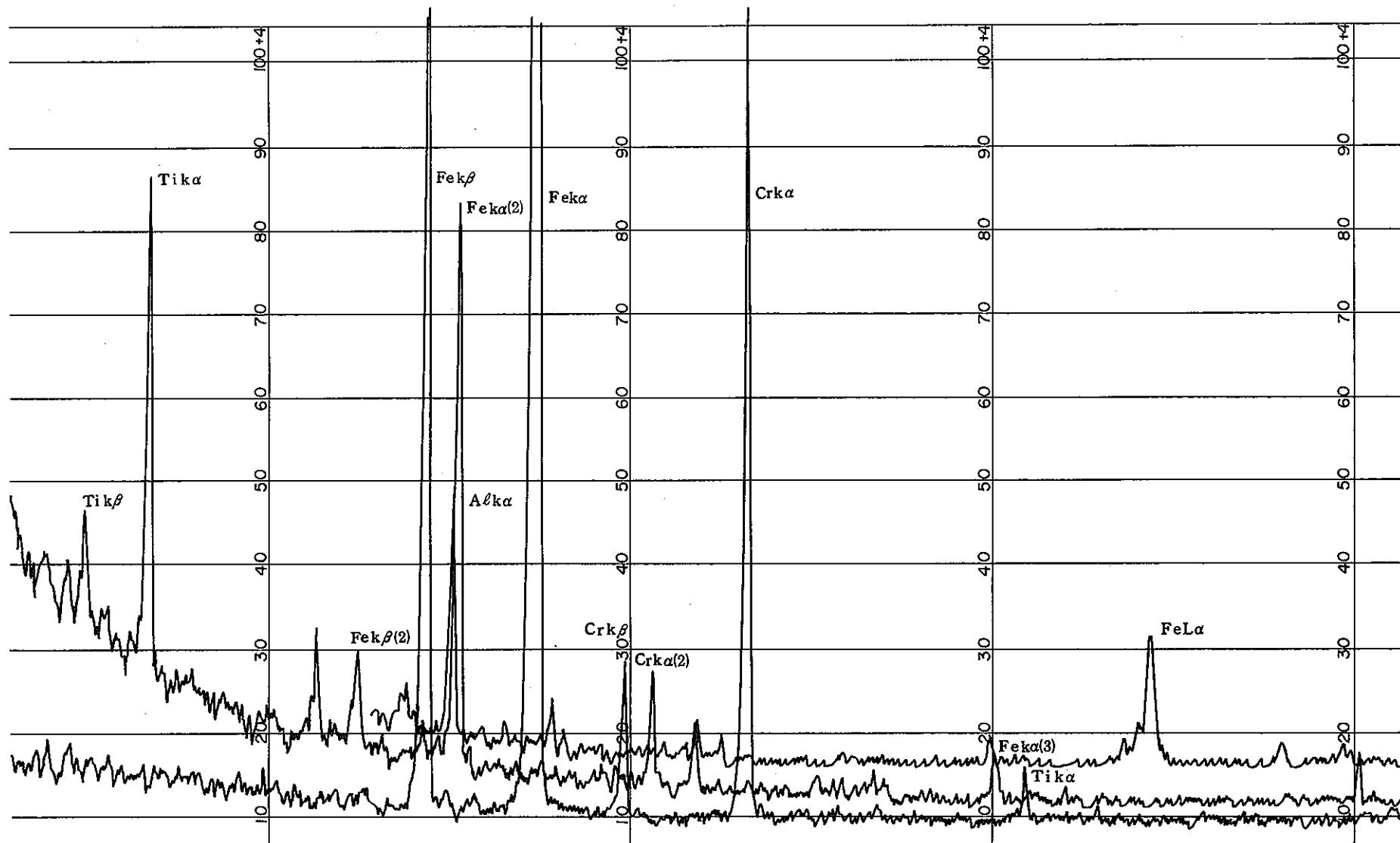


図-7 MA 957 (7M) 母材の元素分析 (レーザ溶接)

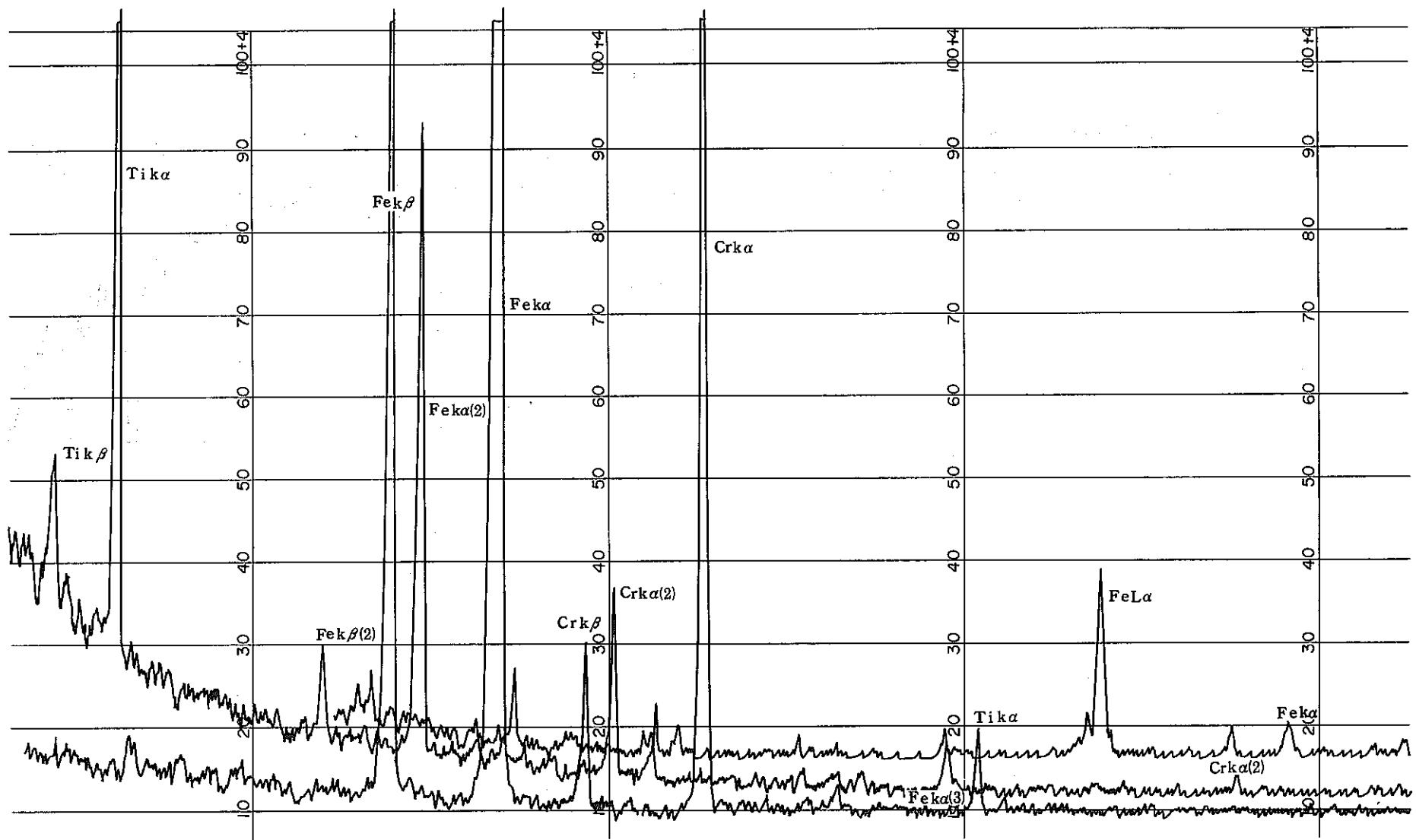


図-8 MA 957 (7M) 溶接金属端部の元素分析（レーザ溶接）

- 3 -

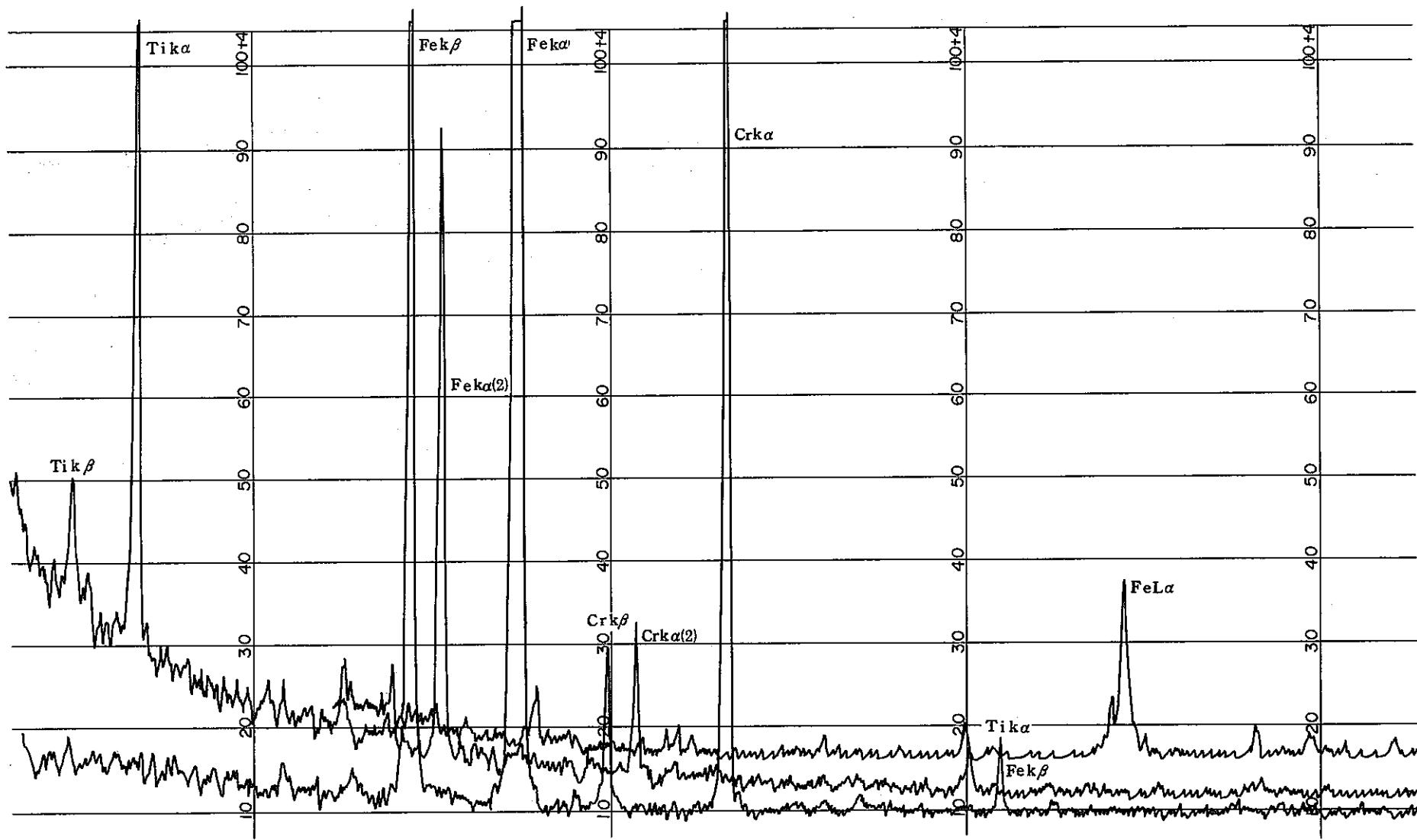


図-9 MA 957 (7M) 溶接金属端部の元素分析（レーザ溶接）

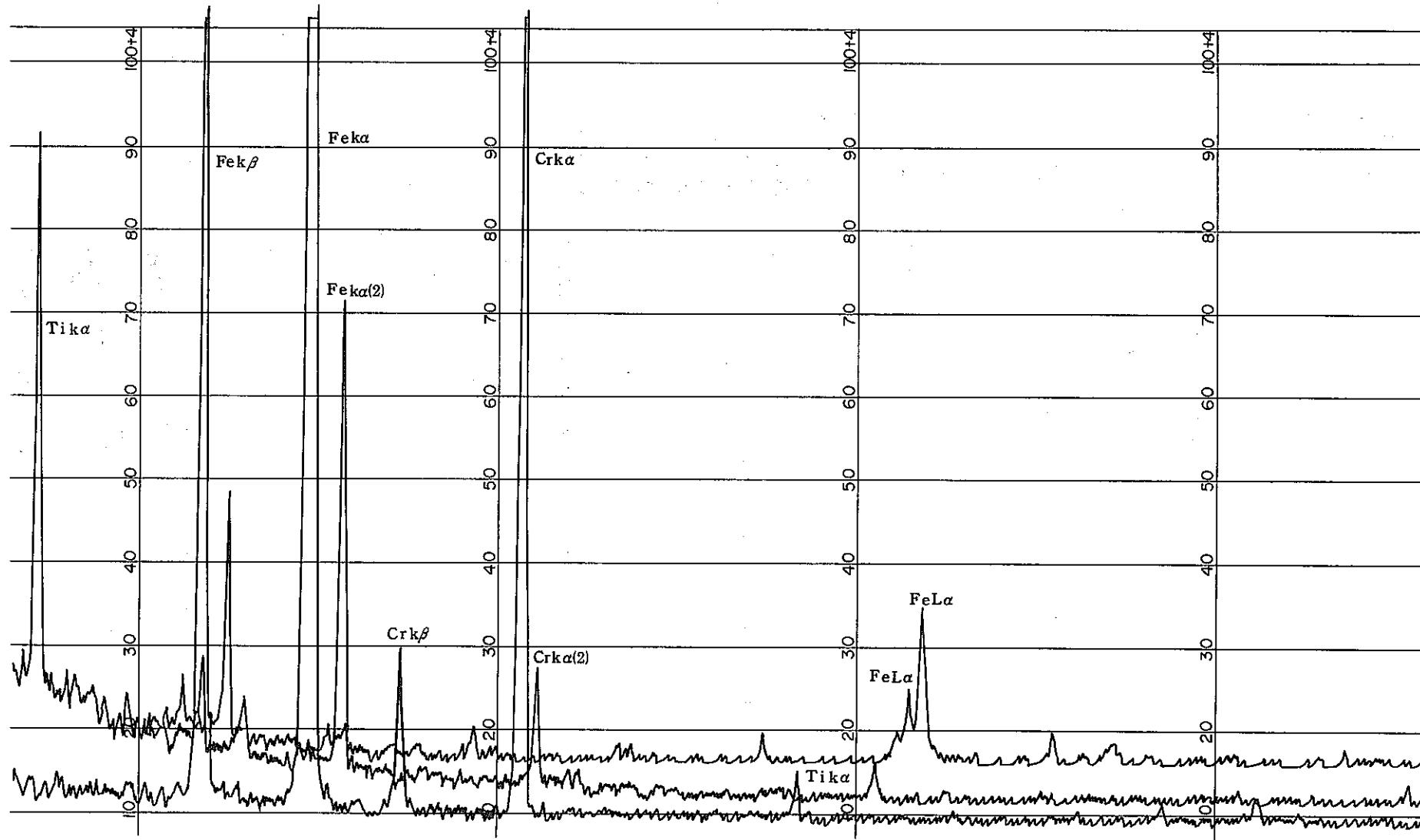


図-10 MA 957 (7M) 母材の元素分析 (パルスTIG溶接)

- 9 -

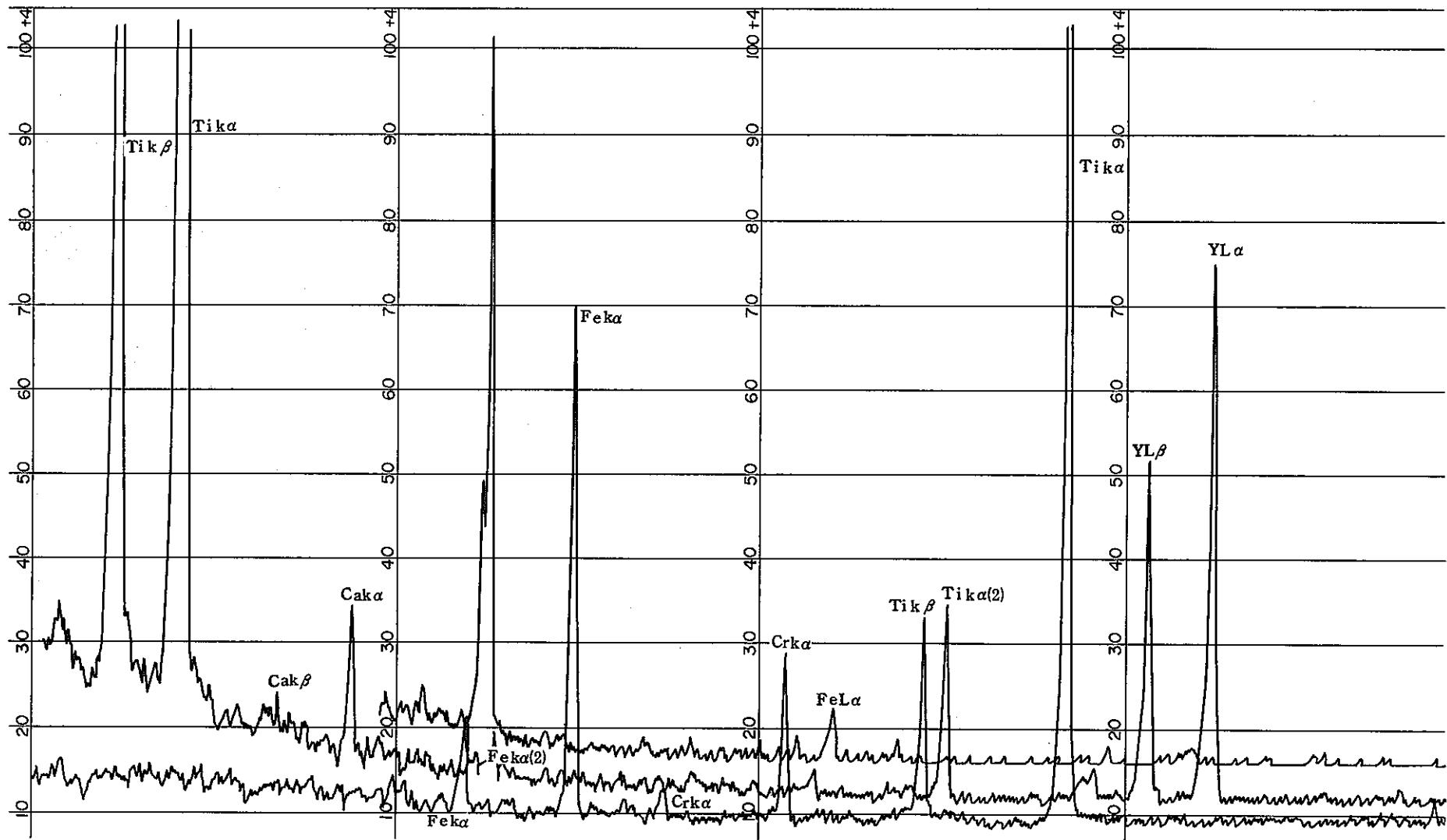


図-11 MA 957 (7M) 溶接金属端部の元素分析（パルスTIG溶接）

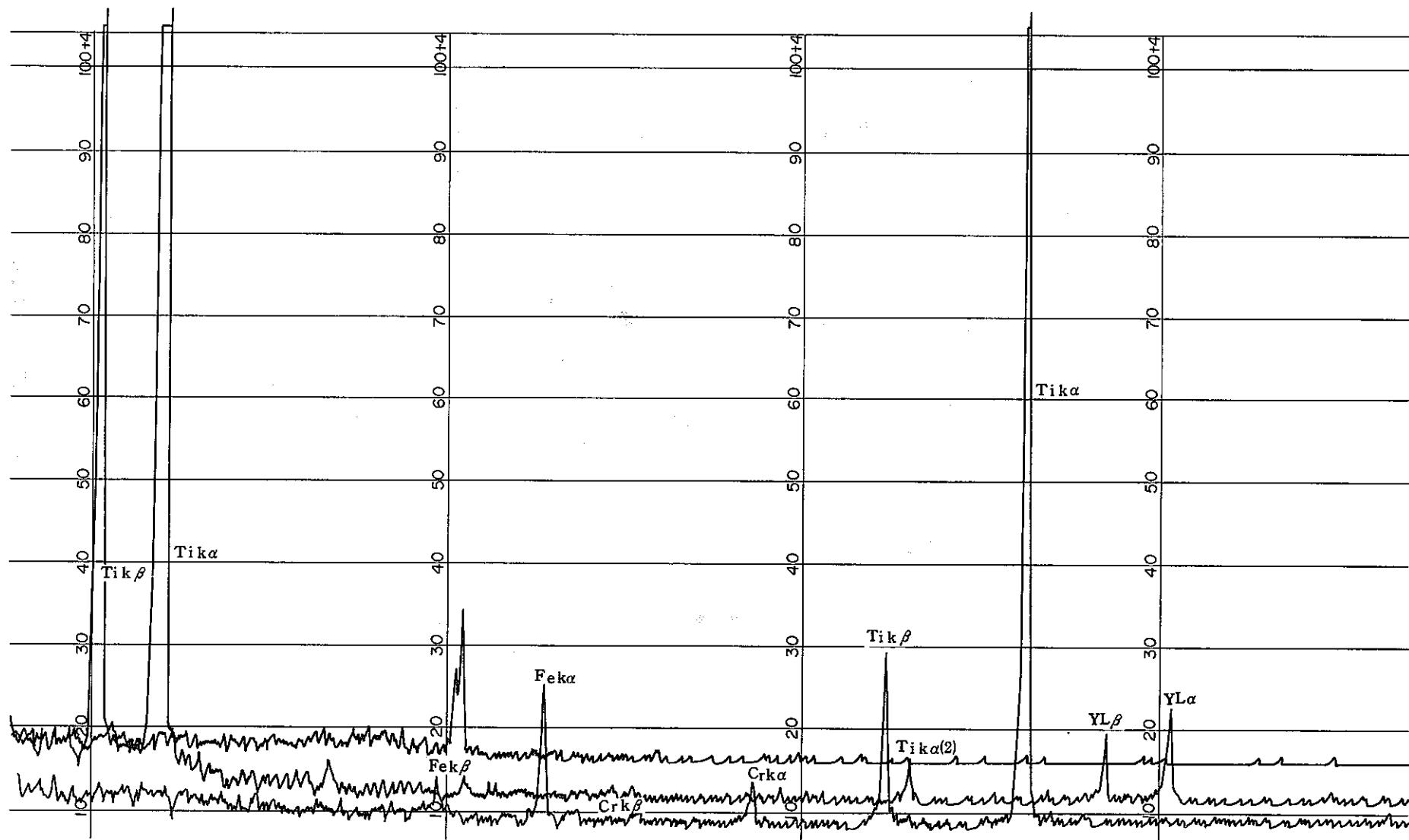


図-12 MA 957 (7M) プローホール部の元素分析 (パルスTIG溶接)

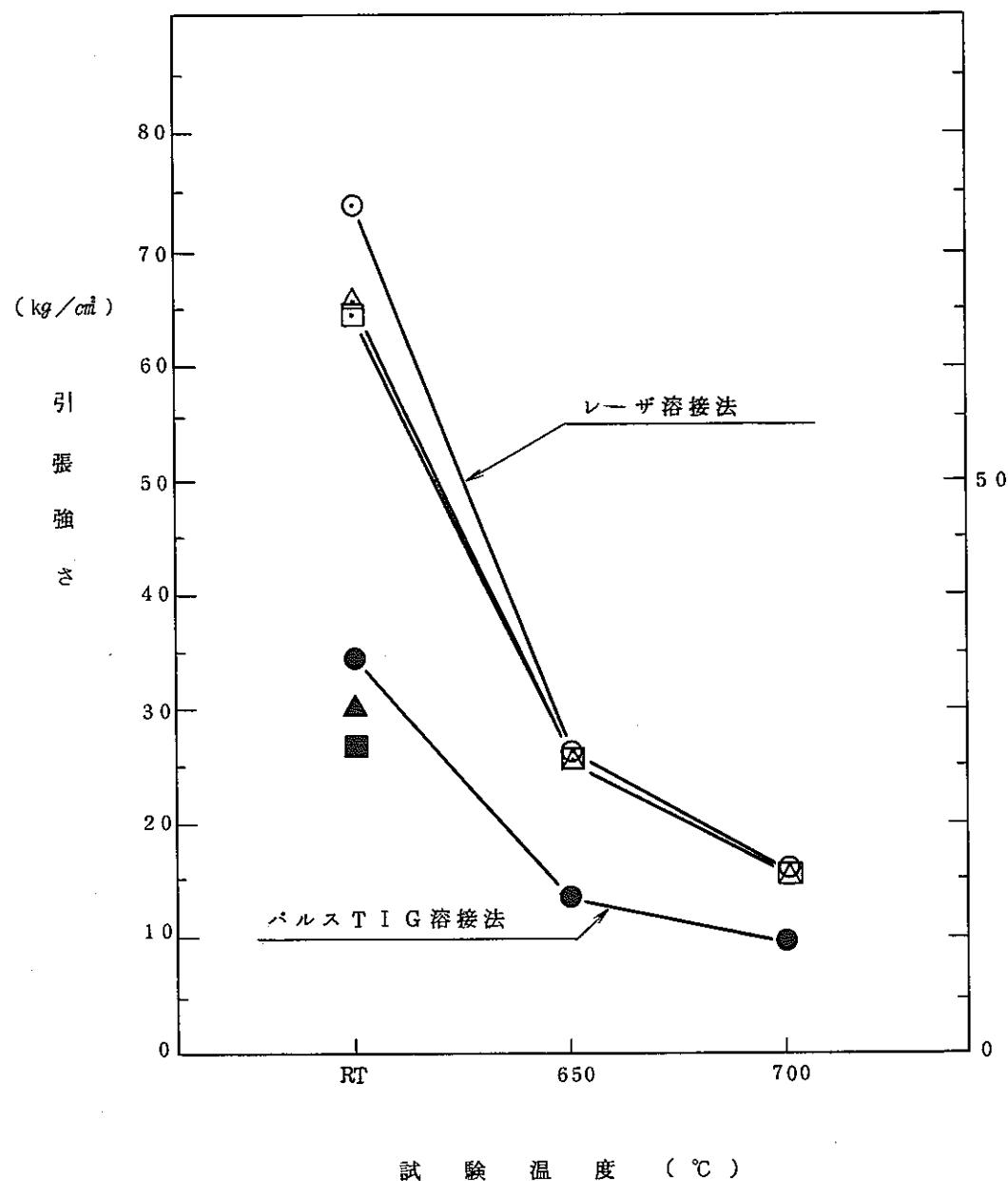


図-13 MA 957 溶接金属部の引張強度

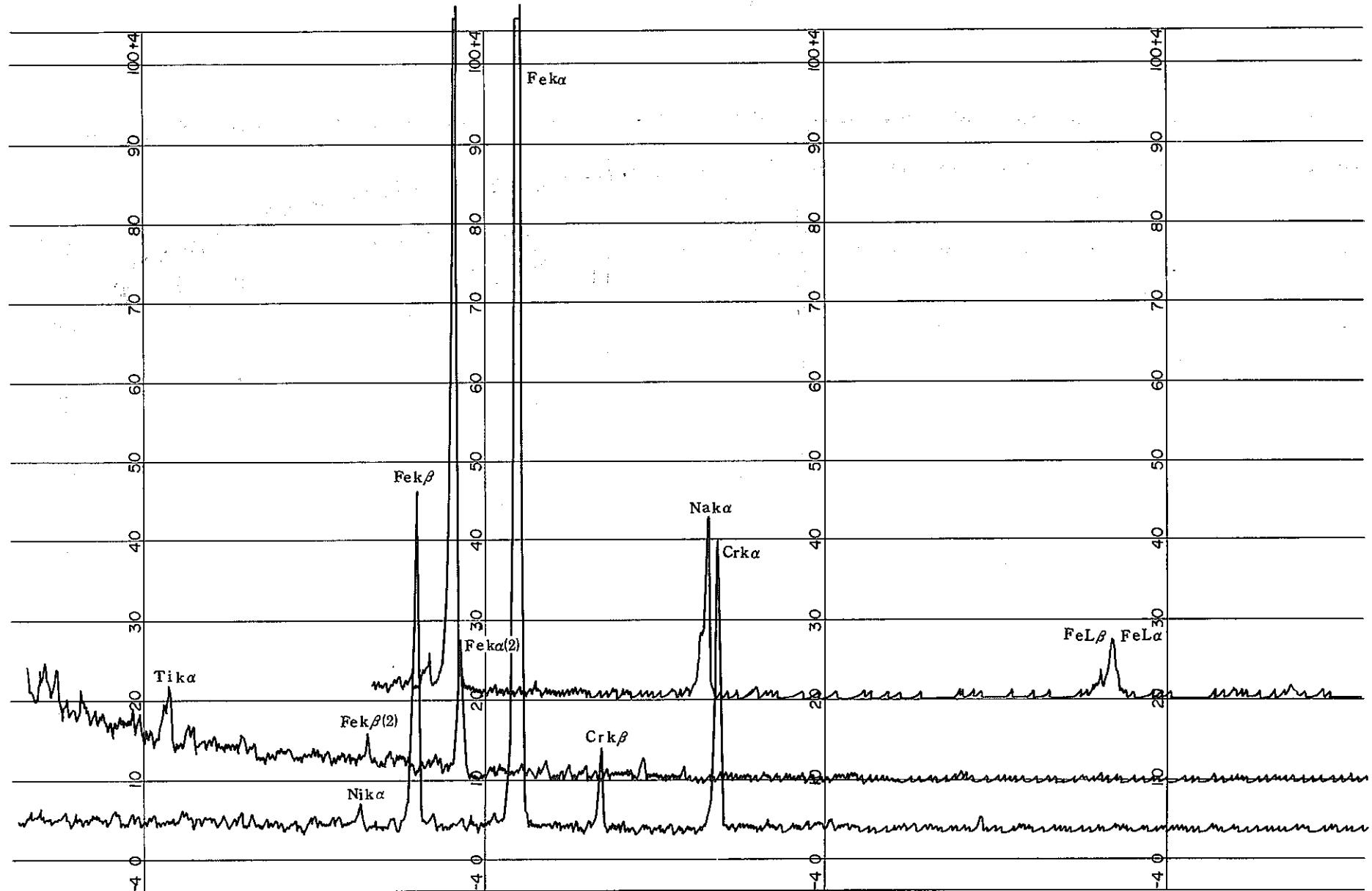


図-14 MA 957 (7M) Na 腐食による母材の元素分析（レーザ溶接）

- 69 -

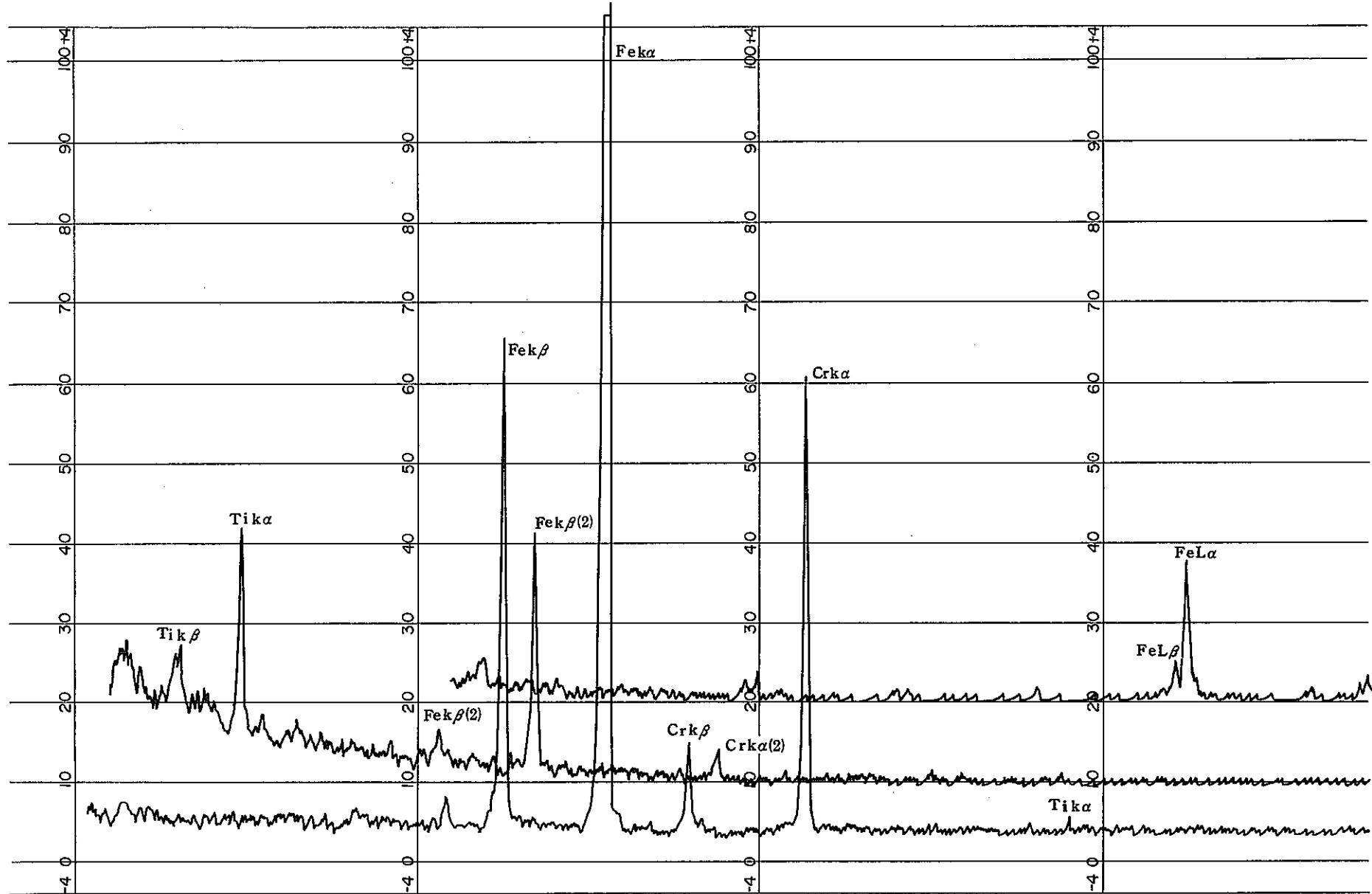


図-15 MA 957 (7M) Na腐食による溶接金属端部内の元素分析（レーザ溶接）

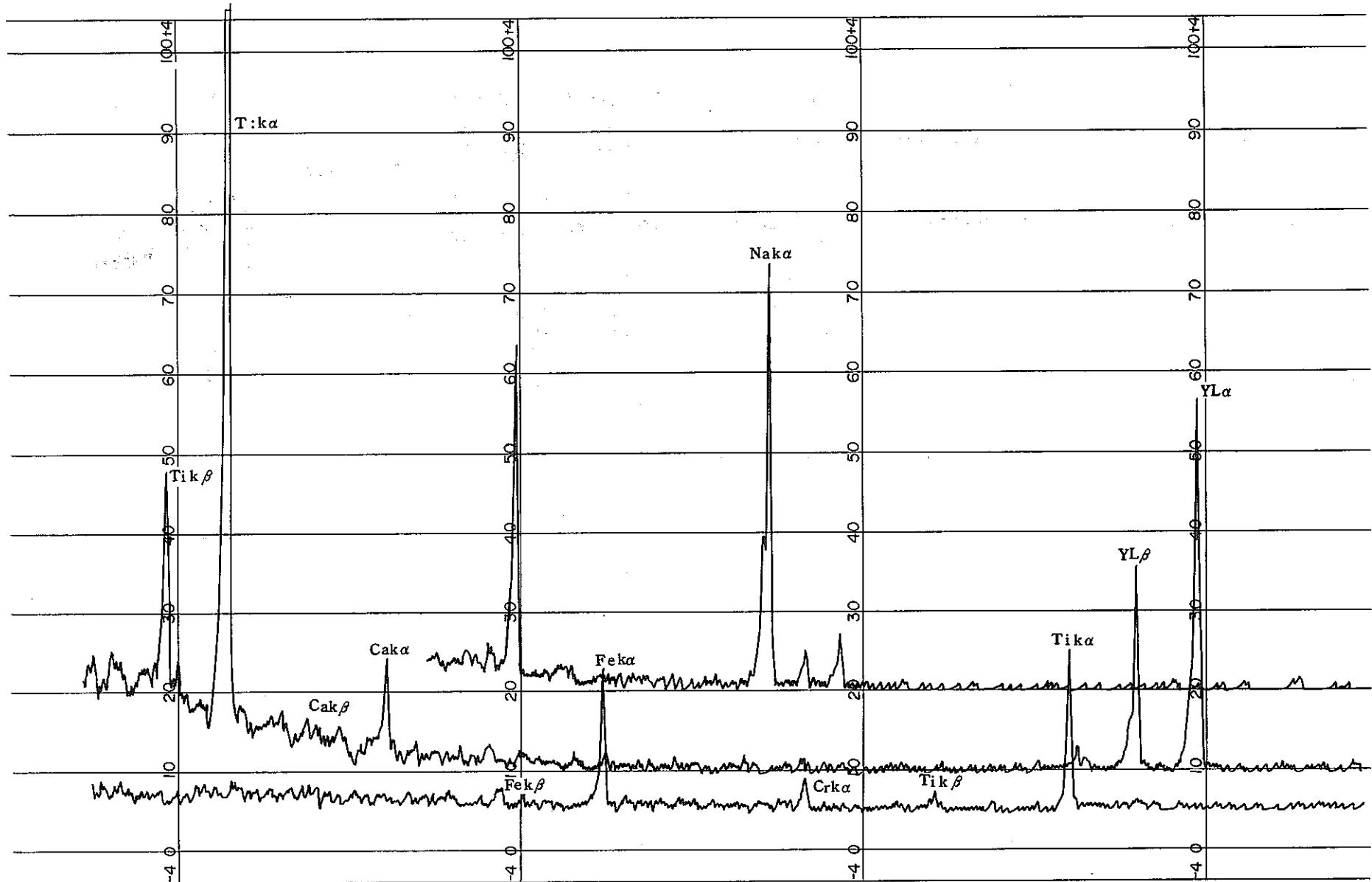


図-16 MA 957 (7M) Na 腐食による溶接金属端部の元素分析（レーザ溶接）

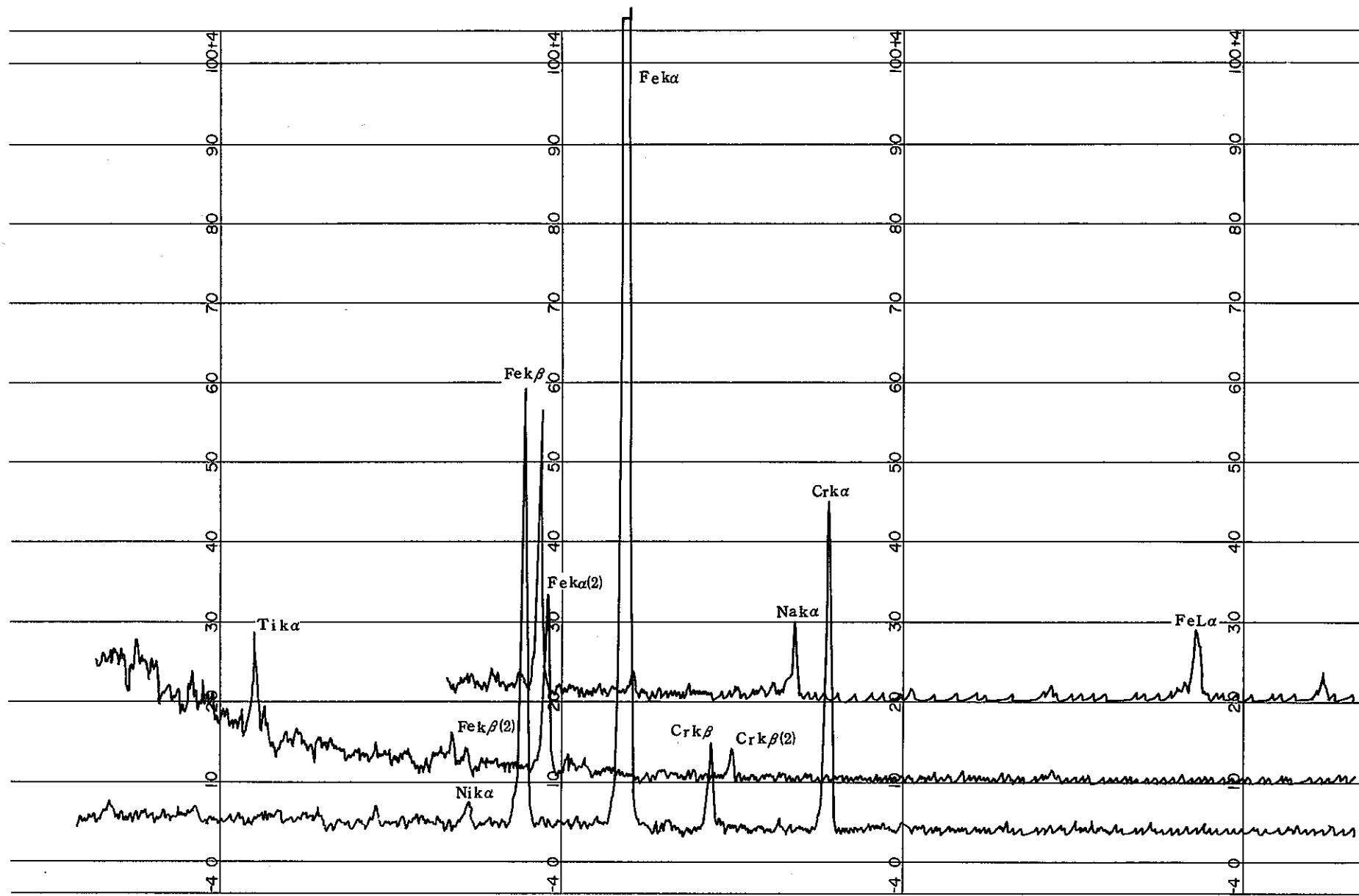


図-17 MA 957 (8M) Na 腐食による母材の元素分析（レーザ溶接）

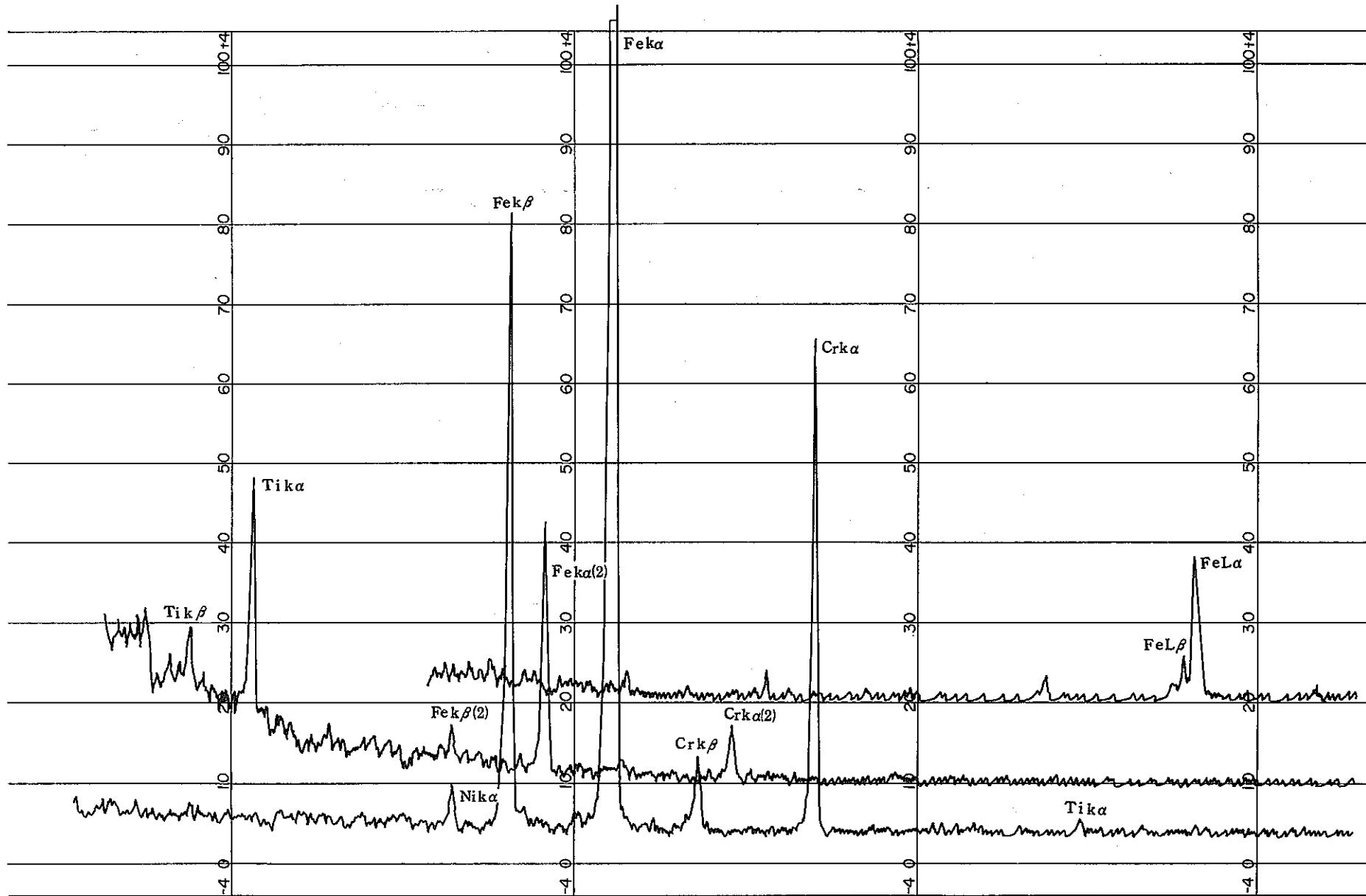


図-18 MA 957 (8M) Na 腐食による溶接金属端部内の元素分析 (レーザ溶接)

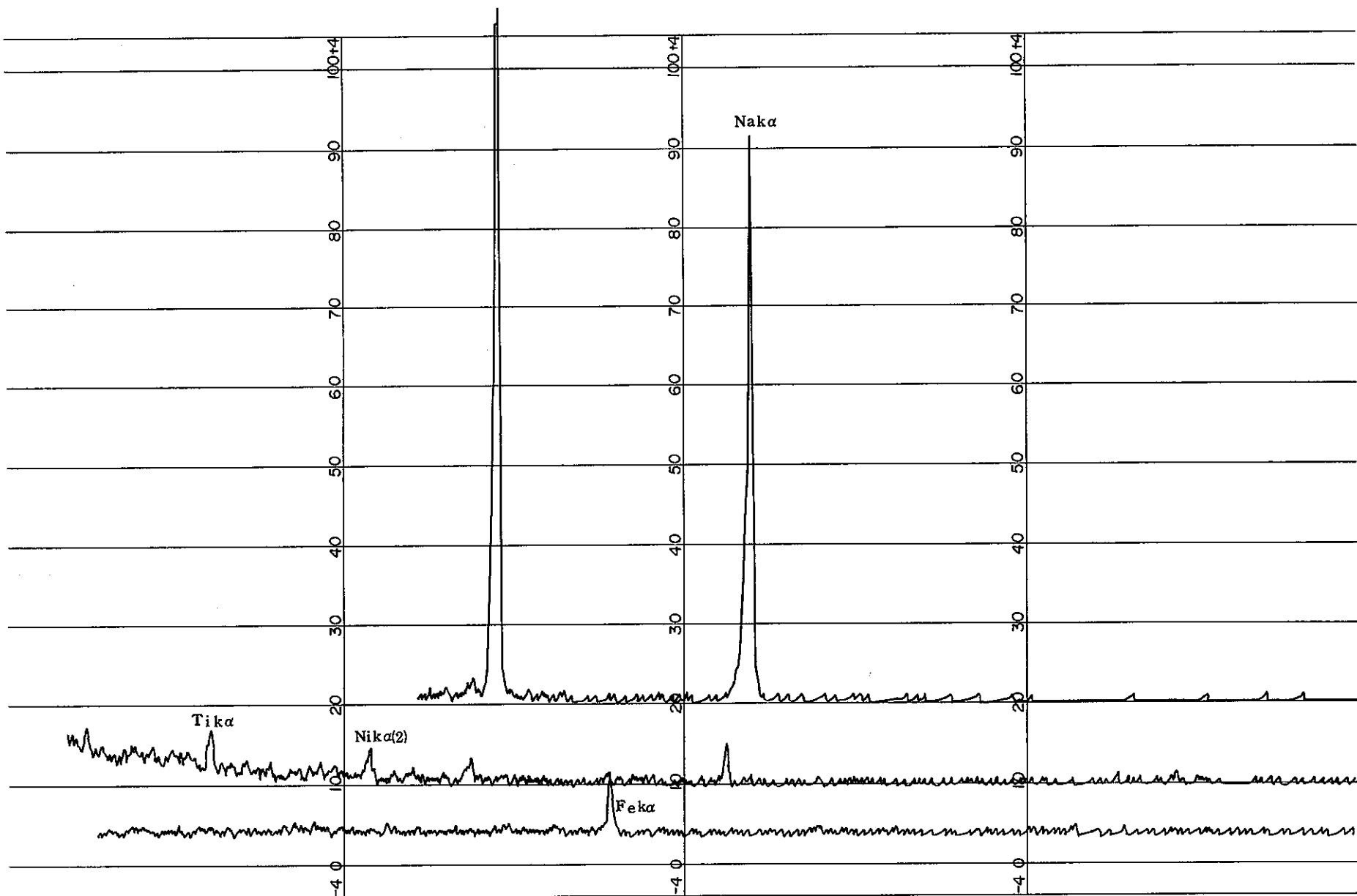


図-19 MA957 (8M) Na腐食による溶接金属端部の元素分析（レーザ溶接）

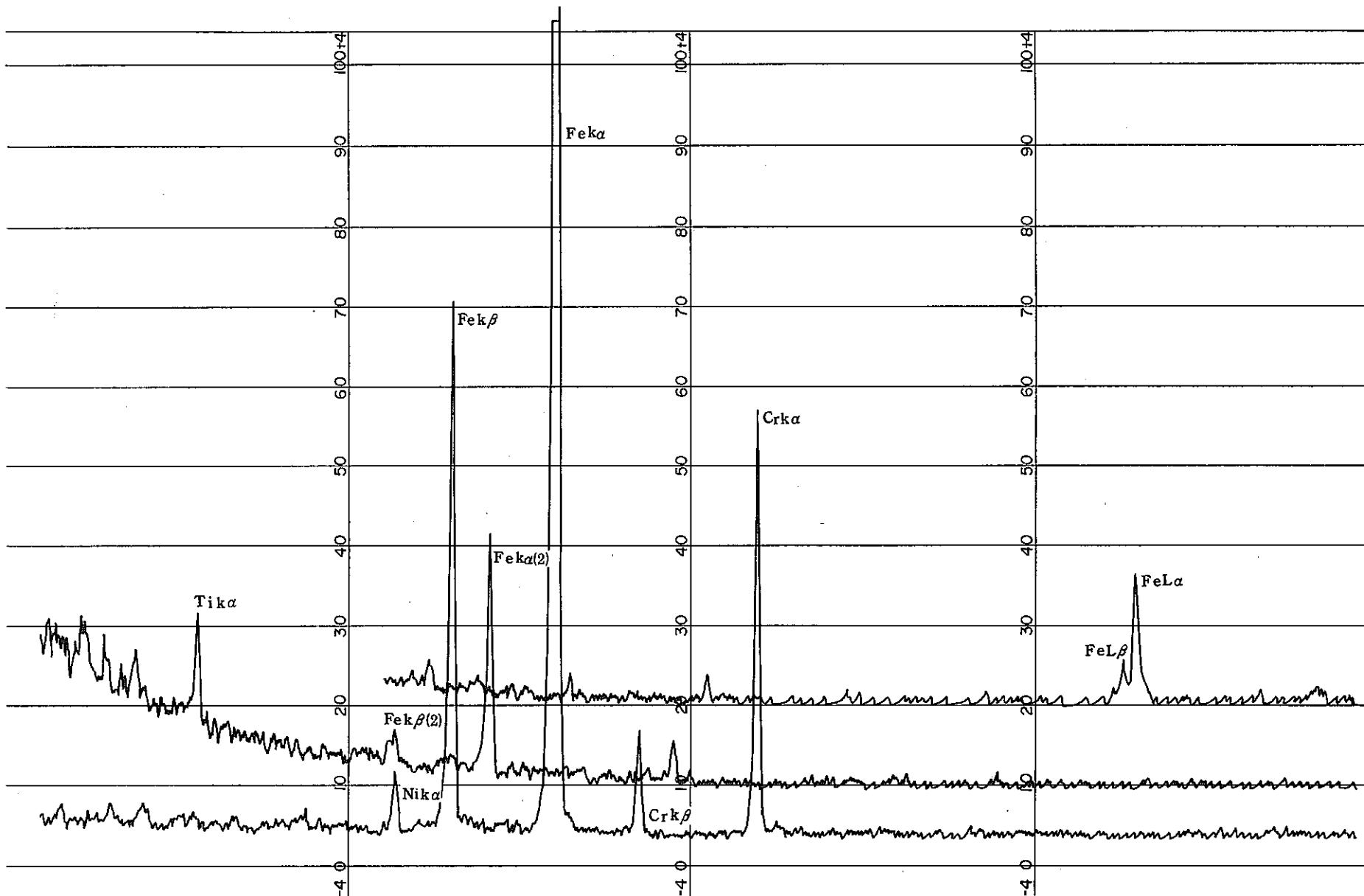


図-20 MA 957 (9M) Na腐食による母材の元素分析（レーザ溶接）

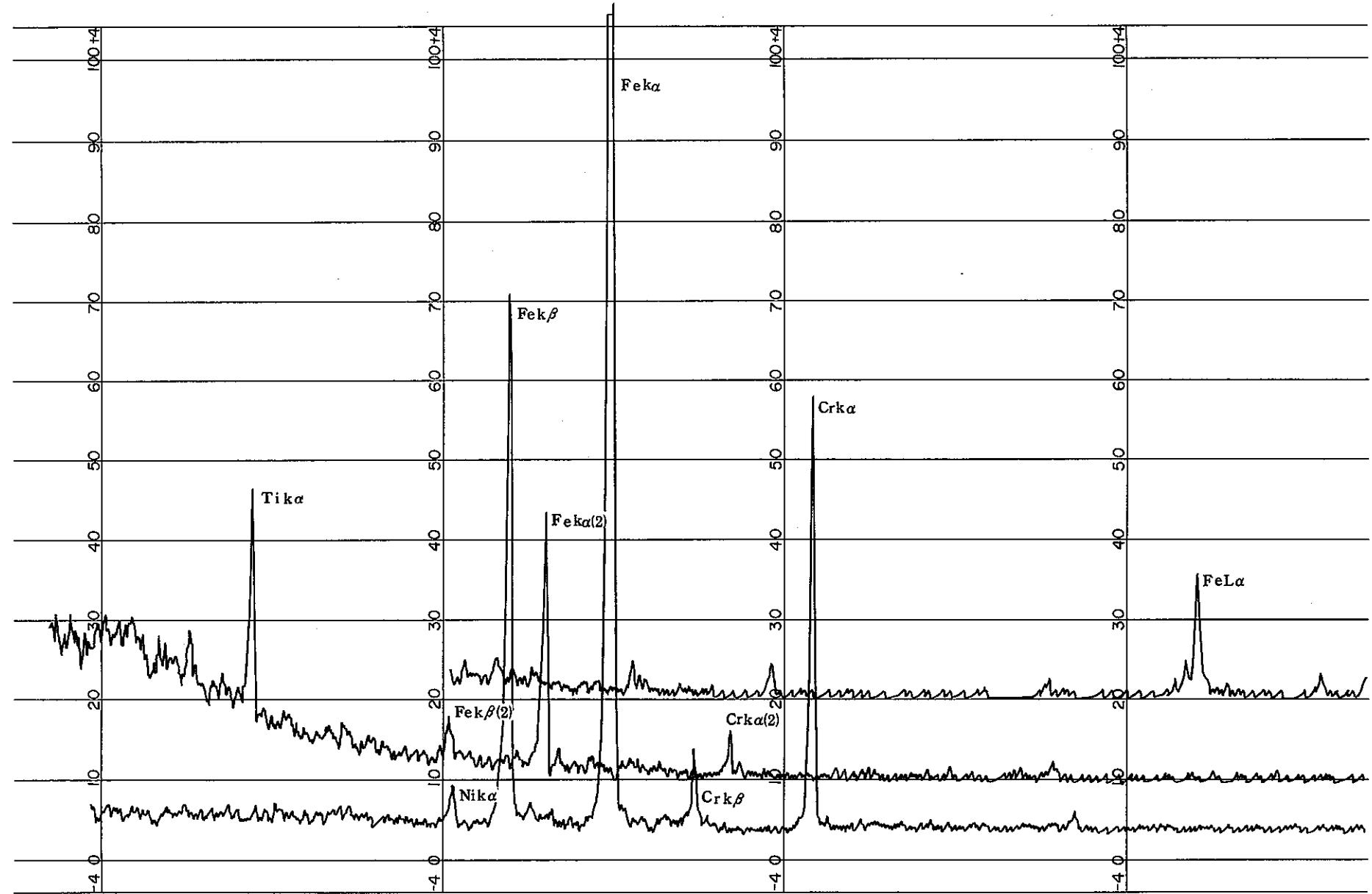


図-21 MA 957 (9 M) Na 腐食による溶接金属端部内の元素分析（レーザ溶接）

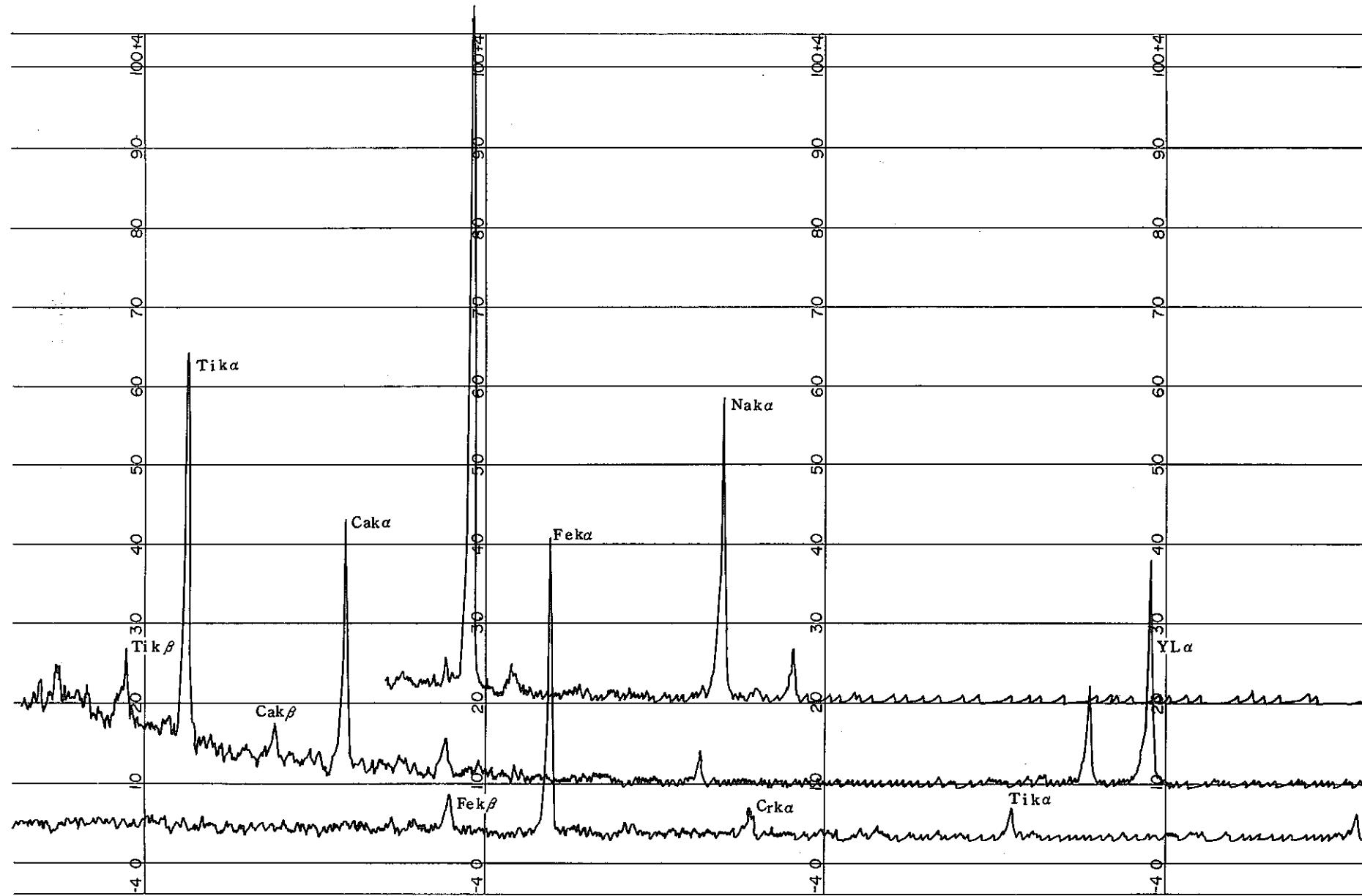


図-22 MA 957 (9 M) Na 腐食による溶接金属端部の元素分析（レーザ溶接）

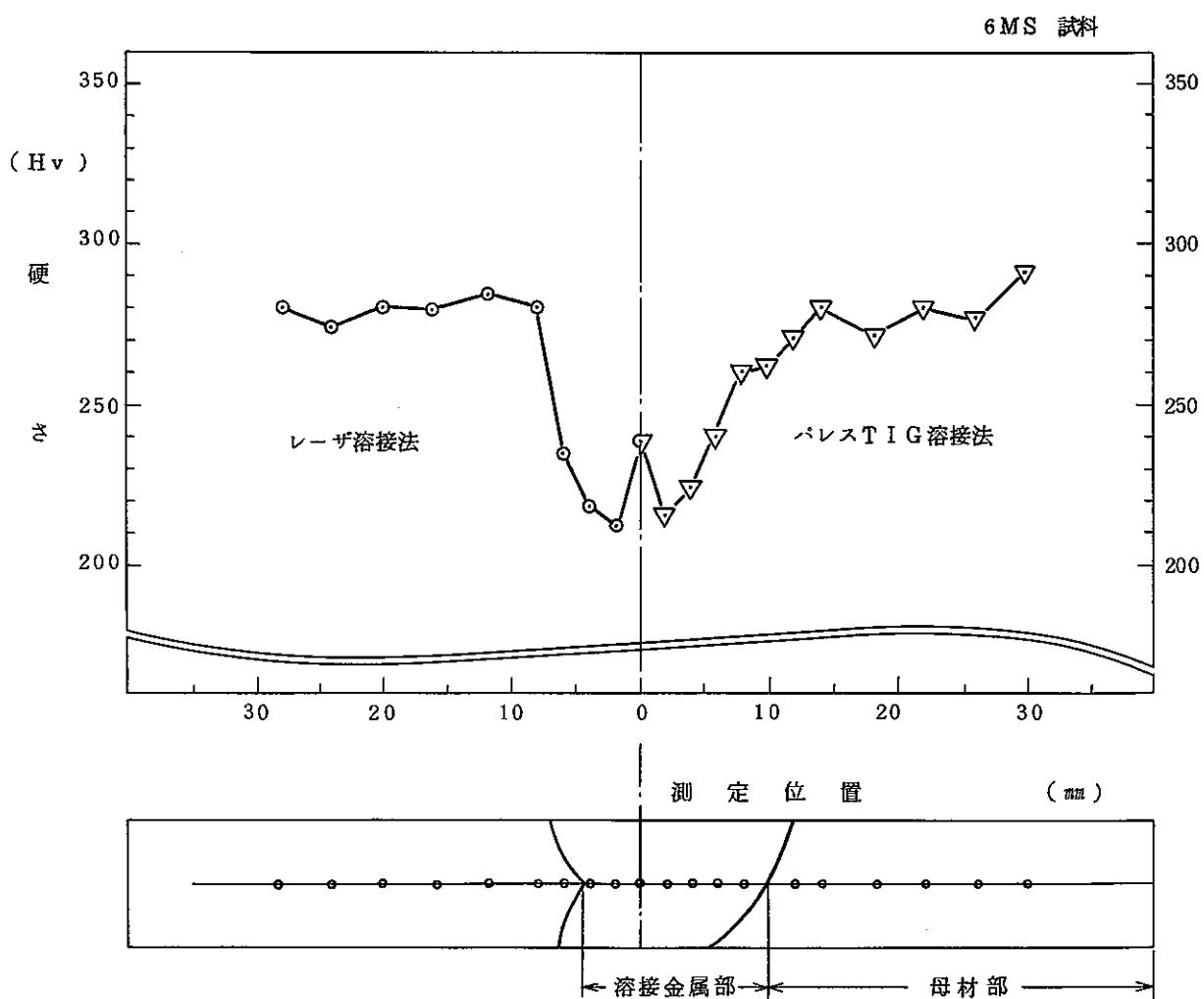


図-23 MA956 溶接金属部の硬さ測定

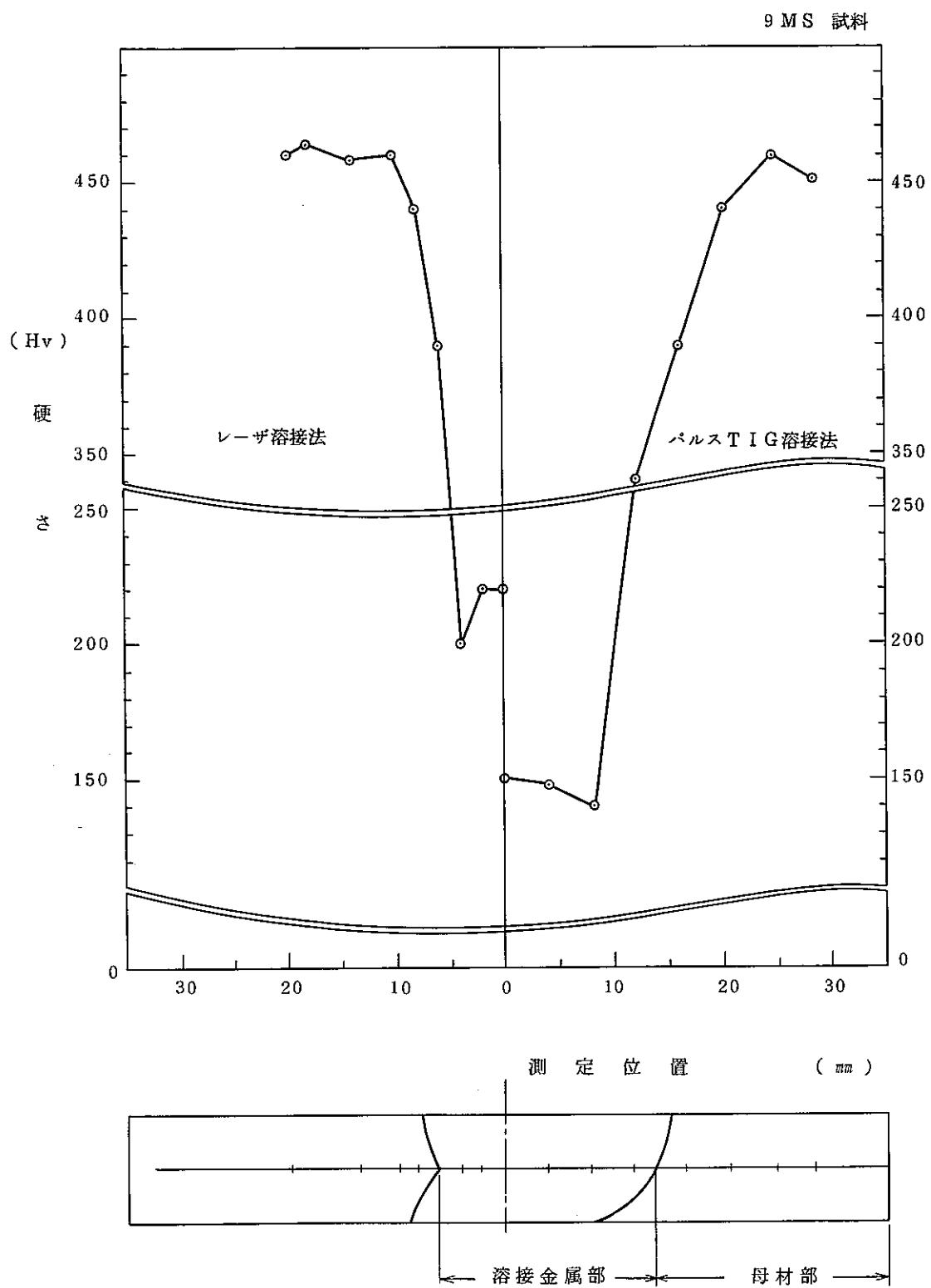


図-24 MA 957 溶接金属部の硬さ測定

表 リ ス ト

表 - 1 M A 9 5 6 の 化 学 成 分

(W t %)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al	Ni	Mo	Co	Y	B	N	O
注) 分析値	0.019	0.14	0.11	0.011	0.003	20.08	0.38	4.21	0.10	0.003	0.028	0.34	0.0004	0.039	0.204

注) 住友金属工業㈱測定(昭和61年6月19日)

表 - 2 M A 9 5 7 の 化 学 成 分

(W t %)

元 素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	Ti	Y	O	N
ミルラート値	0.015	-	-	-	-	-	14.36	0.31	-	0.99	Y_2O_3 0.27	0.19	0.05
注) 分 析 値	0.016	0.04	0.03	0.003	0.006	0.13	13.40	0.33	0.03	1.09	* 0.22	0.18	0.041

* Y_2O_3 換算 $0.22 \times 1.27 = 0.28\%$ 注) 住友金属工業㈱測定
(昭和61年6月19日)

表 - 3 溶接条件

レーザ溶接	パルスTIG溶接
○出力 : 4.5	○電流 : 12.5 A
○電圧 : 500V	○パルス数 : 3 ^r /s
○パルス数 : 2 ^r /s	○溶接速度 : 2 ^{mm/sec}
○ディフォーカス : 2 mm	○トーテ角度 : 30°
○溶接速度 : 5.2 ^{mm/sec}	○アーキギャップ : 0.4 mm
○焦点距離 : 50 mm	○溶接雰囲気 : Heガス 100%
○溶接雰囲気 : Arガス吹付 5 l/min	

表 - 4 検査項目

	検査項目	レーザ		パルスTIG	
		MA956	MA957	MA956	MA957
非破壊検査	外観検査	○	○	○	○
	寸法検査	○	○	○	○
	X線検査	×	○	×	○
破壊検査	断面金相	○	○	○	○
	硬さ測定	○	○	○	○
	元素分析	×	○	×	○
	引張試験	○	○	○	○
	疲労試験	×	○	×	×
	Na腐食試験	×	○	×	×

○印データ採取

表 - 5 検査方法及び条件

検査項目	検査方法	記録項目
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。	・外観写真
	寸法検査 ・マイクロメータ(X, Y 2方向) ・拡大鏡	・ビード外径 ・ビート巾
	X線検査 ・X線装置	・X線写真
破壊検査	断面金相試験 ・電解エッチング 30%硝酸	・断面写真
	硬さ測定 ・マイクロビックカース	・硬さ ・位置と硬さの対応
	元素分析 ・EPMA	・Y, Ti, Fe, Cr元素の状態
	引張試験 ・試験温度：室温 ・引張速度：0.5 mm/min	・破断荷重 ・破断位置 ・伸び、耐力 ・破断部写真
	疲労試験 ・試験温度：600°C ・応力：9 kgf/mm ² ・サイクル時間：約20sec/cycle ・サイクル数：約1000回	・破断 ・伸び
	Na腐食試験 ・ナトリウム温度：650°C ・ナトリウム流速：1.5m/sec ・ナトリウム中酸素濃度： ～1ppm(C/T120°C) ・浸漬時間：2051時間	・Na腐食後の表面状態 ・Na腐食後の元素状態

表 - 6 M A 9 5 7 疲労試験結果

試験片No.	テススピード (mm/min)	サイクル時間 (sec/cycle)	応力 (kgf/mm ²)	設定荷重(kgf)		サイクル数 (回)	試験温度 (°C)	伸び (mm)	伸び率 (%)	備考
				M I N	M A X					
7 M	0.9	21.0	9.0	0	49.455	1000	600	0.173	0.558	破断せず
	1.0	23.5	9.0	0	90.306	1000	600	0.080	0.258	
8 M	13サイクルまで 0.85以降1.2	21.5	9.0	0	82.854	1013	600	0.123	0.397	
	6サイクルまで 1.0以降0.8	20.0	9.0	0	42.048	1006	600	0.160	0.516	
9 M	4サイクルまで 0.7以降1.0	22.0	9.0	0	66.564	1004	600	0.210	0.677	
	0.7	22.0	9.0	0	36.846	1000	600	0.216	0.697	↓ 破断せず