



Title	原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接に関する基礎的研究
Author(s)	清水, 茂樹
Citation	大阪大学, 1977, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1426
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接 に関する基礎的研究



昭和 52 年 10 月

清 水 茂 樹

目 次

第 1 章 総 論	1
第 2 章 溶接ビード特性におよぼす溶接諸元の影響	3
2.1 概 説	3
2.2 溶 接 装 置	3
2.3 供 試 材 料	3
2.4 実験方法およびビーム形状	4
2.5 実験結果および考察	8
2.5.1 α_b 値と溶込み深さ, アクチュアルビーム径 (Actual Beam Diameter) およびビードビーム径 (Bead Beam Diameter) の関係	8
2.5.2 ビード断面に発生する欠陥	9
2.6 要 約	21
第 3 章 溶接割れ感受性と材料の高温延性および Trans-Varestraint 試験結果との 相関性	24
3.1 概 説	24
3.2 供 試 材 料	24
3.3 実験装置および実験方法	24
3.3.1 高温延性試験	24
3.3.2 Trans-Varestraint および Varestraint 試験	25
3.3.3 材料の融点の測定	26
3.4 実験結果および考察	26
3.4.1 材料の融点に関する検討	26
3.4.2 加熱および冷却途上における材料の高温延性に関する検討	27
3.4.3 溶接割れ感受性と材料の高温延性試験結果より得られた指標との相関性	31
3.4.4 材料の Trans-Varestraint および Varestraint 試験結果に関する検討	33
3.4.5 Trans-Varestraint および Varestraint 試験結果より得られた指標と 高温延性試験結果より得られた指標との相関性	36
3.4.6 溶接割れ感受性と材料の Trans-Varestraint および Varestraint 試験 結果より得られた指標との相関性	37

3.5	要 約	38
第4章	溶接割れに関する冶金学的検討	39
4.1	概 説	39
4.2	供 試 材 料	39
4.3	実 験 方 法	39
4.4	実験結果および考察	40
4.4.1	溶接部の走査型電子顕微鏡による組織観察	40
4.4.2	析出物およびマイクロ割れ部の成分分析	42
4.4.3	マイクロ割れの発生機構に関する考察	51
4.5	要 約	57
第5章	溶接過程における温度および応力分布に関する検討	58
5.1	概 説	58
5.2	解 析 方 法	58
5.3	解析結果および考察	59
5.4	要 約	63
第6章	マイクロ割れ防止に関する検討	65
6.1	概 説	65
6.2	供 試 材 料	65
6.3	実 験 方 法	66
6.4	実験結果および考察	66
6.4.1	材料の融点の測定	66
6.4.2	溶接部の走査型電子顕微鏡による観察	66
6.4.3	析出物の成分分析	68
6.4.4	合金元素(Nb)が材料のマイクロ割れ感受性におよぼす影響	68
6.4.5	効果的なマイクロ割れ防止法に関する考察	72
6.5	要 約	72
第7章	溶接継手の機械的特性に関する検討	74
7.1	概 説	74
7.2	供 試 材 料	74

7.2.1	母材	74
7.2.2	TIG 溶加棒	74
7.3	溶接試験板製作要領	74
7.3.1	溶接条件	74
7.3.2	検査方法	75
7.4	溶接部の顕微鏡組織	75
7.5	溶接部の硬さ試験	75
7.6	溶接継手の静引張特性	80
7.6.1	試験片形状および試験方法	80
7.6.2	実験結果および考察	80
7.7	溶接継手の高温低サイクル疲労特性	80
7.7.1	実験方法	80
7.7.2	実験結果および考察	85
7.8	溶接継手のクリープおよびクリープ破断特性	93
7.8.1	実験方法	93
7.8.2	実験結果および考察	94
7.9	要約	104
第 8 章	溶接継手の環境効果に関する検討	106
8.1	概説	106
8.2	He 雰囲気中における溶接継手の腐食挙動	106
8.2.1	供試材料および溶接要領	106
8.2.2	実験方法	106
8.2.3	実験結果および考察	110
8.3	He 雰囲気中における溶接継手のクリープ破断特性	123
8.3.1	供試材料および溶接要領	123
8.3.2	実験方法	123
8.3.3	実験結果および考察	125
8.4	要約	128
第 9 章	総括	130

謝 辞	134
参 考 文 献	135
本論文に関する著者の発表論文	138

第 1 章 総 論

最近における原子力発電の大規模な実用段階への移行に対応して、原子炉の製鉄、化学工業関係などに対する多目的利用への関心が国際的に高まっており、わが国においても国家的なプロジェクトとして基礎的な調査研究が広範囲に推進されている。現在、多目的利用の原子炉としては、よく知られているように、He を冷却材とする高温ガス炉が最も期待され、調査研究の対象となっている。多目的高温ガス炉用機器については、He 雰囲気中最高1000°Cという苛酷な条件下にさらされるために、現在、Hastelloy 系、Inconel 系および Incoloy 系などの耐熱合金の使用が検討されている。そして原子炉用機器特有の安全性確立のために、構造的に極めて厳重な寸法精度が要求され、また、溶接部の高温強度についても厳しい要求がある。

筆者は、高温ガス炉用耐熱合金の溶接研究に着手していたが、従来より使用されているTIG 溶接法では、機器に要求される寸法精度および溶接部に要求される高温強度、とくに延性を満足せしめることが極めて困難であった。

最近、実用化の分野を拡大している電子ビーム溶接法は、エネルギー密度が極めて高く、出力は必要に応じて任意に制御し得るため小入熱で深い溶込みが得られるとともに、溶接部の幅が狭く、溶接変形が小さいために高精度の溶接が可能である。また高真空中で溶接が行なわれるために、溶接部は大気の汚染を受けず良質の溶接部を得ることができる。

筆者は、電子ビーム溶接法の上述の特性に着目し、これを高温ガス炉の機器用材料として有効と思われる耐熱合金の溶接に適用することにより、その寸法精度および高温強度に関する問題点の解決が可能であると考え本研究を企図した。

さて、このような電子ビーム溶接の特性を有効に適用できる反面、溶接条件が適正でないとポロシティ、コールドシャット、スパイク現象および溶接割れなどの電子ビーム溶接特有の諸欠陥が発生すると考えられる。従来、オーステナイト系ステンレス鋼、炭素鋼、アルミニウム合金などに対してポロシティ、コールドシャット、スパイク現象に関する諸欠陥の発生機構およびこれらの特性に関する基礎的研究結果が報告されている^{1)~3)}が、耐熱合金については未だ究明されておらず、欠陥の発生機構や特性に関する系統的な研究成果は国内および海外においても報告されていない。

また、耐熱合金の電子ビーム溶接部の高温強度、とくにクリープ、高温疲労などに関する報告も極めて少なく、溶接部の環境効果に関する報告も殆んどない。

筆者は、Hastelloy 系、Inconel 系および Incoloy 系耐熱合金の電子ビーム溶接に対し、ポロシティおよび溶接割れなどの諸欠陥に及ぼす溶接諸元の影響について検討を行ない、これら諸欠陥の発生しない適正溶接条件を設定した。とくに溶接割れについては、従来の割れ試験方法が電子ビー

ム溶接における材料の割れ感受性の評価にも適用できることを明らかにした。また、割れ部の冶金学的検討およびその近傍の溶接過程における温度および応力分布を解析し、割れ発生機構およびその特性を解明するとともに、これらの結果に基づいて、耐割れ感受性の良好な耐熱合金を試作した。さらに電子ビーム溶接部の高温強度およびHe雰囲気中の環境効果について検討を行ない、従来のTIG溶接部に比較して格段に優れていることを明確にした。

本論文はこれらを取りまとめたものであるが、その構成は第1章～第9章よりなり、その各章における諸検討事項の概略は次の通りである。

第1章においては、原子炉用耐熱合金の溶接上の問題点とその解決策として、電子ビーム溶接法適用の理由、さらにその問題点について述べ、本研究の必要性を明示した。

第2章においては、溶接諸元を変化させた場合の材料の溶接ビード特性、とくに溶込形態および欠陥特性などについて調査し、これらと溶接諸元との関連性について論じた。

第3章においては、電子ビーム溶接による割れ感受性を示す指標と材料の高温延性試験およびTrans-Varestraint試験より得られた割れ感受性に関する指標との相関性について論じた。

第4章においては、割れ発生部である凝固線近傍熱影響部の析出物について、冶金学的検討を行ない、溶接割れ発生機構について論じた。

第5章においては、有限要素法により解析したネイルヘッド部の溶接過程における温度および応力分布について論じた。

第6章においては、Nb含有量を変化させた耐熱合金を試作し、Nb含有量の耐割れ性におよぼす影響について検討し、Nbの有効性について論じた。

第7章においては、電子ビーム溶接継手の機械的特性、とくに高温強度特性について母材およびTIG溶接継手と比較して論じた。

第8章においては、電子ビーム溶接継手のHe雰囲気中における環境効果が冶金学的および機械的特性におよぼす影響について論じた。

第9章は総括であって、以上の各章で論考した原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接に関する諸問題について明らかにした点を取りまとめた。

第 2 章 溶接ビード特性におよぼす溶接諸元の影響

2. 1 概 説

電子ビーム溶接においては、その熱源的特性により、ポロシティ、コールドショット、スパイク現象および溶接割れなどの電子ビーム溶接特有の諸欠陥が発生する。現在、これらの欠陥に関する二三の報告^{1)~3)}があるが Hastelloy 系, Inconel 系, および Incoloy 系などの原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接の欠陥については、未だ十分な解明がなされていない。

本章では、溶接諸元を変化させた場合の各材料の溶接ビード特性、とくに溶込み形態および欠陥特性などについて調査し、これらと溶接諸元との関連性について論じ、各材料について適正溶接諸元の範囲を設定した。

2. 2 溶 接 装 置

本研究を通じて使用した電子ビーム溶接装置は、Fig. 2-1 に示すような、150 KV - 40 mA 型 6 KW 高電圧型電子ビーム溶接機であり、電子銃は固定式である。本溶接機のチャンパーは、高真空および低真空のいずれにおいても溶接が可能なるように設計されている。また、各種形状の溶接を可能にするための治具を具備している。

Fig. 2-2 および Table 2-1 に溶接機の構成概略および能力を示す。

その他、オプション類としては、電子ビームと溶接線を一致させるための光学的システム、電子ビーム溶接部始端部、終端部でのビードの盛り上がりおよびクレータ形成を抑止するためのビーム電流スロープコントロール、パルス発生装置およびビームオッシレート形成装置なども具備している。

2. 3 供 試 材 料

高温ガス炉用耐熱合金の候補材として一般に考えられている Hastelloy 系, Inconel 系および Incoloy 系の耐熱合金および比較のためにオーステナイト系ステンレス鋼を供試材料として本研究を通じて使用した。

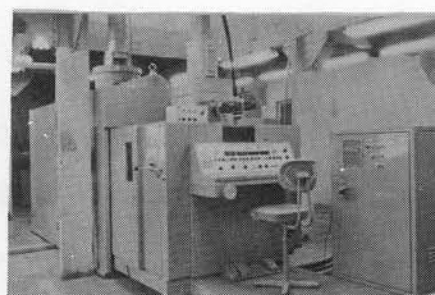


Fig.2-1 150kV-40mA, 6kW Electron Beam Welder

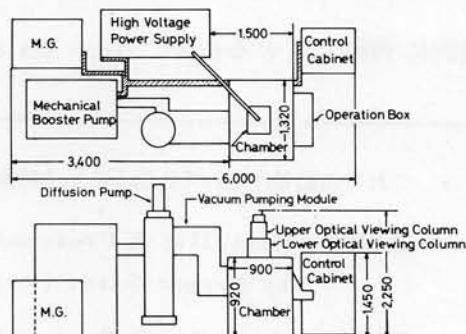


Fig.2-2 Schematic Diagram of 150kV-40mA, 6kW Electron Beam Welder

Table 2-1 Component and Capacity of 150kV-40mA,6kW Electron Beam Welder

Components			Capacity
Optical Viewing Column	Upper Column	Electron Beam Gun High Voltage Cable Connector	_____
	Lower Column	Focusing Coil Deflection Coil Microscope	Min. Diameter at Object Distance of 225mm:0.4mm Max. Amplitude of Deflection at Object Distance of 225mm:10mm
High Voltage Power Supply	Beam Accelerating Power Supply Filament Power Supply Beam Current Control Circuit	_____	6kw (150kVx40mA)
Control Equipment	Beam Deflection Power Supply Vacuum Deflector Power Supply Magnetic Coil Power Supply Motor Control Power Supply	_____	_____
Work Chamber and Attachments	Chamber Operation Box Table	Capacity Moving Range Velocity : X Direction Y Direction Accuracy of Moving	900x920x1320mm X:600mm, Y:400mm 100~3000mm/min 100~2500mm/min 0.05mm/300mm
	Motor and Gear Box		
Vacuum System	Roughing Pump	3000l/min. Rotary 12000l/min. M. Booster	10min. to 5×10^{-4} Torr
	High Vacuum Pump	6800l/min. Diffusion	
Motor Generator			_____

供試材料の溶解法，最終熱処理条件，結晶粒度，機械的性質および化学成分をTable 2-2 に示す。なお，Hastelloy X の各材料については，以下の本論文においてはこれらの製法，製造会社によってHAEN，HAEM，HVEN，HVERNなる記号によって区別して示す。*

2. 4 実験方法およびビーム形状

Table 2-2 に示した20mm厚さの供試材料を使用し，Fig. 2-3 に示す斜面溶接法を採用し，電子ビーム溶接法にてビード置き試験を行なった。試験片を斜面角 $\theta_s = 30^\circ$ となる様にテーブルに設置して，電子銃を固定，テーブルを移動し，図の矢印の方向に溶接を行なった。

この場合，Fig. 2-3 および Fig. 2-4 に示す様にビームの焦点距離（Focal Length）を D_F ，対物距離（Object Distance）を D_O とし， $a_b = D_O / D_F$ で定義⁴⁾されるパラメータ a_b は電子ビームの活性変数（Beam Active Parameter or Active Parameter）と呼ばれ，電子ビーム溶接の特性を支配する重要な変数である。 $a_b \approx 0.9$ の位置で最大の溶込み深さが得られることが実験的に判明しているので， $a_b = 0.9$ の位置が常にFig. 2-3の試験片中央C-C線上に存在する様

* これらの記号はそれぞれ以下に示す略称である。

HAEN ; Hastelloy X Produced by means of Air Melting and Electroslag Remelting
by Nippon Steel Corporation

HAEM ; Hastelloy X Produced by means of Air Malting and Electroslag Remelting
by Mitsubishi Metal Corporation

HVEN ; Hastelloy X Produced by means of Vacuum Induction Melting and Electroslag
Remelting by Nippon Steel Corporation

HVERN ; Reformed Hastelloy X Produced by means of Vacuum Induction Melting and
Electroslag Remelting by Nippon Steel Corporation

Table 2-2 Chemical Composition and Mechanical Properties of Superalloys Used

Material	Mark	Thickness (mm.)	% Melting Process	Final Heat Treatment	Grain Size (ASTM)	Mechanical Properties				Chemical Composition (%)														Gaseous Contents (ppm)						
						0.2%PS (kg/mm ²)	T.S. (%)	El. (%)	RA (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb-Ta	Al	Ti	B	Zr	Ce	Fe	O	Sol.	Insol.	Total
Hastelloy X	HAEN	20	AE	1120°Cx18Min W.Q.	1-4	30.4	71.1	59.0	65.0	0.066	0.48	0.88	0.016	<0.002	Bal.	2136	177	9.05	0.45		0.07	0.15	0.002			19.09	30	405	42	447
	HAEM			1150°Cx50Min W.Q.	5-6	38.7	75.0	47.6		0.068	0.37	0.59	0.012	<0.002		2074	103	8.70	0.50		0.21	0.02	0.001			18.23	20	248	20	268
	HVEN		VE	1120°Cx18Min W.Q.	1-6	34.3	73.8	49.3	56.9	0.084	0.17	0.84	0.001	<0.002		2070	159	9.20	0.55		0.22	0.19	0.002			18.53	50	306	16	322
	HVERN			1170°Cx30Min A.C.	1-4	32.4	74.0	54.3	52.2	0.065	0.35	0.72	0.001	<0.002		2140	145	8.93	0.51	0.05	0.05	0.06	0.002	0.009	<0.005	19.08	40	121	22	143
Inconel 625	Inl 625AE	20	AE	1000°Cx1Hr W.Q.	6	45.5	90.1	46.8		0.053	0.28	0.24	0.003	<0.002	22.09	0.06	8.81	0.69	3.53	0.24	0.13				2.54	30	44	211	255	
Inconel 617	Inl 617V		V	1177°Cx1Hr W.Q.	3-4	30.0	74.6	70.0	57.0	0.066	0.17	0.02	0.004	<0.002	2124	12.60	9.00			0.93	0.52				1.45	40	244	180	424	
Incoloy 800	Iny 800V		V	1100°Cx15Hr W.Q.	2.5	22.1	58.2	52.0	72.1	0.056	0.37	0.77	0.010	0.002	32.13	21.21	0.50	0.18		0.51	0.59					60	32	93	125	
Incoloy 807	Iny 807A		A	1230°Cx3Hr W.Q.	1	25.7	54.1	52.2	60.3	0.057	0.50	0.70	0.002	0.002	40.10	20.58	8.28	0.20	4.85	0.99	0.47	0.24			Bal.	70	68	144	212	
SUS 316	S 316			A	1100°Cx13Min W.Q.	3-5		60.3	61.4		0.045	0.79	1.26	0.028	0.004	11.51	17.52		2.58							130	257	32	289	

X AE: Air Melting followed by Electroslag Remelting. VE: Vacuum Induction Melting followed by Electroslag Remelting.
V: Vacuum Induction Melting. A: Air Melting

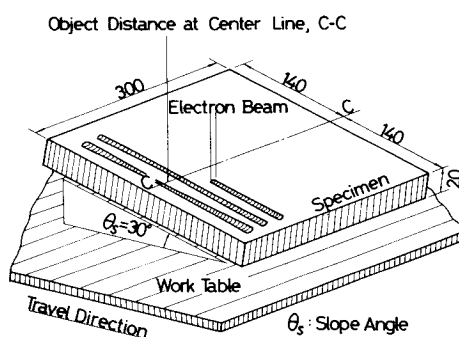


Fig. 2-3 Bead-on-plate Welding Method by Slope Welding

に設置し、斜面溶接法を用いて a_b を約 0.6～1.2 のかなり広範囲にわたるよう変化させた。このような電子ビームのビーム形状は、Fig. 2-5 に示すよう形状を有する試験片に SUS 316 および Hastelloy X を選び、AB-test^{5),6)} (Arata Beam test method) によって決定した。その結果を Fig. 2-6 および Table 2-3 に示した。

これらより判るように、ビーム活性域 (Beam Active Zone or Active Zone) の長さ ℓ_b はビーム出力が増大するにしたがって大きくなる傾向がある。ビーム活性域においてはビームのエネルギー密度 w_b ($= \frac{W_b}{\pi r_b^2}$, W_b : ビーム出力, r_b : ビーム半径) がきわめて大きくなるために溶込深さ h_p (Penetration Depth) が大となり、逆にビード幅 d_B (Bead Width) が小になる。しかしながら、ビーム活性域においては電子ビーム溶接特有の欠陥が発生しやすいために、実際の溶接にあたっては活性域より下の部分で溶接を行なう場合が多い。ここで、ビーム活性域の長さ ℓ_b は次のように定義されている。⁷⁾

$$\ell_b = 4.46 \frac{\sigma}{\tan \theta_b}$$

ここで、 σ : ガウス分布ビームの標準偏差

θ_b : ビーム収束角

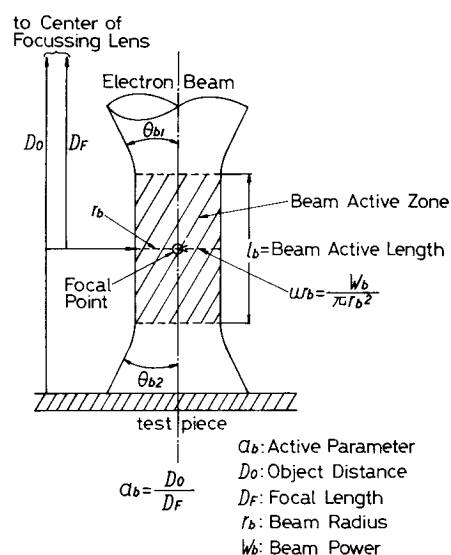
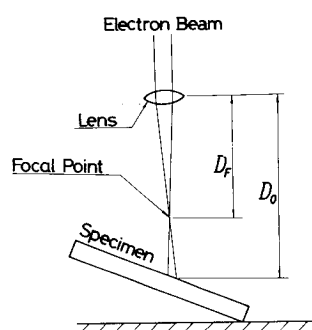


Fig. 2-4 Schematic Explanation of Electron Beam Shape and Important Beam Parameters

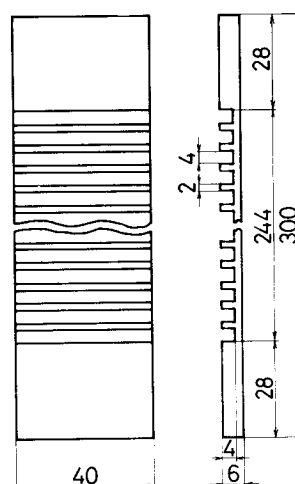


Fig. 2-5 Configuration of Test Specimen with Edge Shape for AB-test

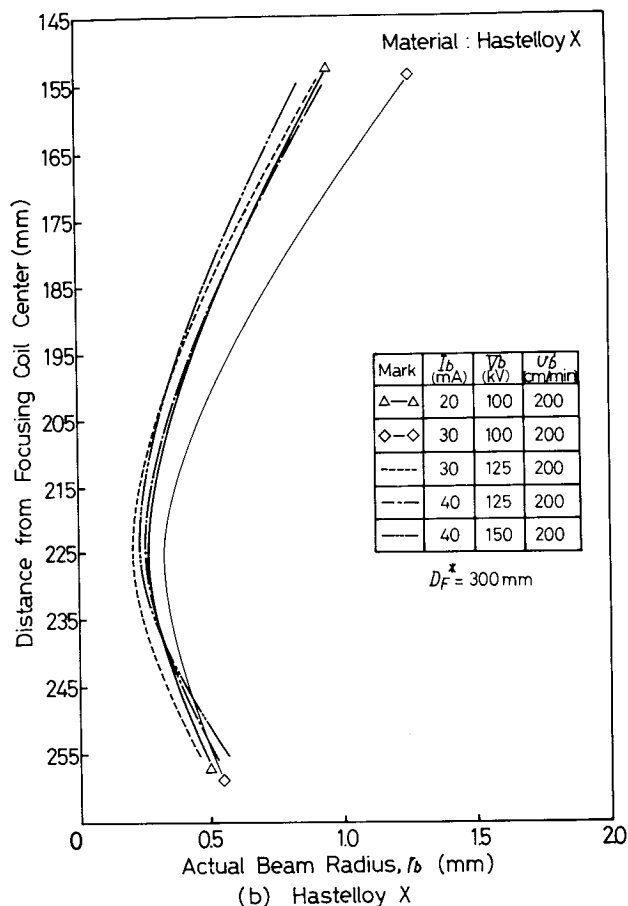
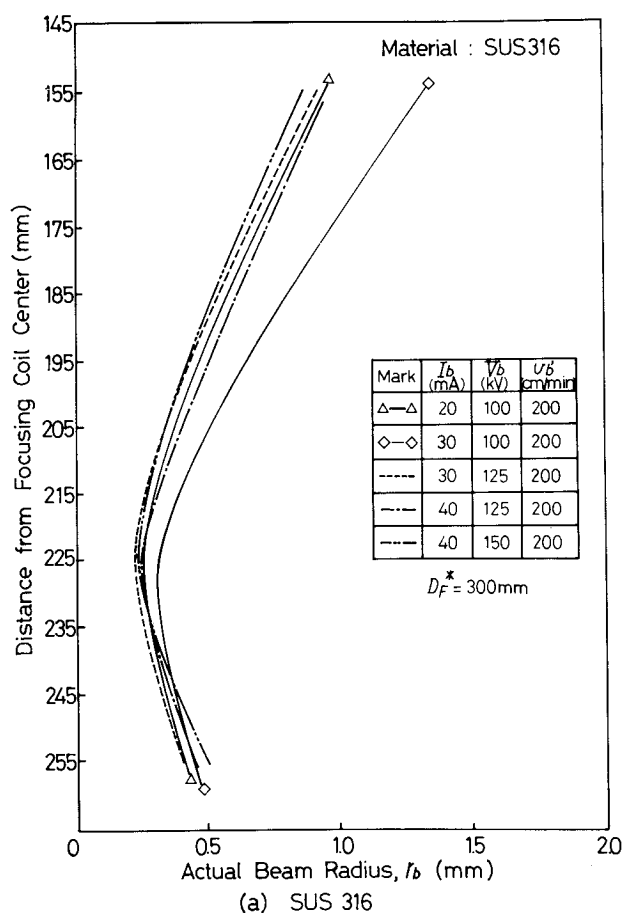
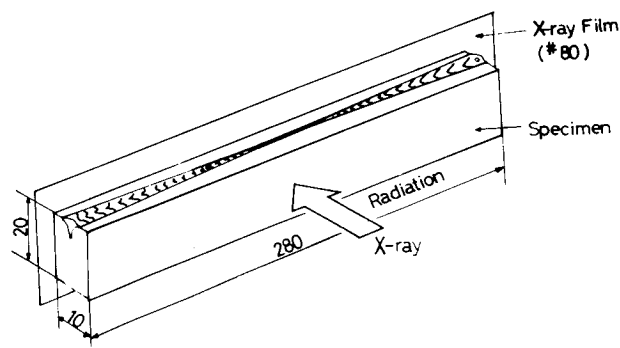


Fig.2-6 Relation between Actual Beam Radius and Distance from Focusing Coil Center

Table 2-3 Beam Shape Obtained by AB-test

Welding Conditions				Beam Shape		
V_b (kV)	l_b (mA)	D_F^* (mm)	U_b (cm/min)	d_b (mm)	l_b (mm)	θ_b (°)
100	20	300	200	0.50	31.93	20
100	30	300	200	0.60	33.45	2.29
125	30	300	200	0.44	27.64	20.3
125	40	300	200	0.48	37.56	1.63
150	40	300	200	0.46	39.46	1.49

Notes; V_b : Accelerating Voltage
 l_b : Beam Current
 D_F^* : Visual Focal Length
 U_b : Welding Speed
 d_b : Beam Diameter at Focal Point
 l_b : Beam Active Length
 θ_b : Beam Convergence Angle toward Focal Point



Notes

1. Specimen is machined from bead-on-plate welds.
2. #80 means film sensitivity.
3. X-ray film is apart from X-ray Source by 600mm approximately.

Fig.2-7 X-ray Inspection Method of Bead-on-plate Welds

溶接後はFig. 2-7に示すような要領でX線透過試験を実施し、溶接部の欠陥について調査した。X線透過試験後、溶接部より試験片を採取し、溶接部横断面を研磨腐食後、溶込深さ、ビード幅を測定した。また、顕微鏡により溶接部に発生したマイクロ割れについて調査した。

Fig. 2-3のように単なる斜面溶接によっても実際のビーム形状にある程度対応したビード形状

が得られる。これは後述するように、実際のビーム形状よりもかなり広がった形状を持っており、溶接速度の減少につれて大きくなる。このような斜面溶接によって得られたビード形状を AB - test で用いたように実際のビーム軸上に投影すると、これに対応した仮想のビーム形状が得られる。仮にこのような仮想のビームをビードビーム (Bead Beam) と呼ぶことにすれば、先程 AB - test によって得られたビームはこれに対応してアクチュアルビーム (Actual Beam) が適当である。したがって、ここで単にビーム形状と呼ぶときはアクチュアルビーム形状のことである。

2. 5 実験結果および考察

2. 5. 1 a_b 値と溶込み深さ、アクチュアルビーム径 (Actual Beam Diameter), ビードビーム径 (Bead Beam Diameter) の関係

各材料について、溶込み深さ、ビードビーム径およびアクチュアルビーム径と a_b 値 の関係を Fig. 2-8 に示す。材料および溶接条件にかかわらず a_b が 0.9 ~ 0.95 において溶込み深さは最大

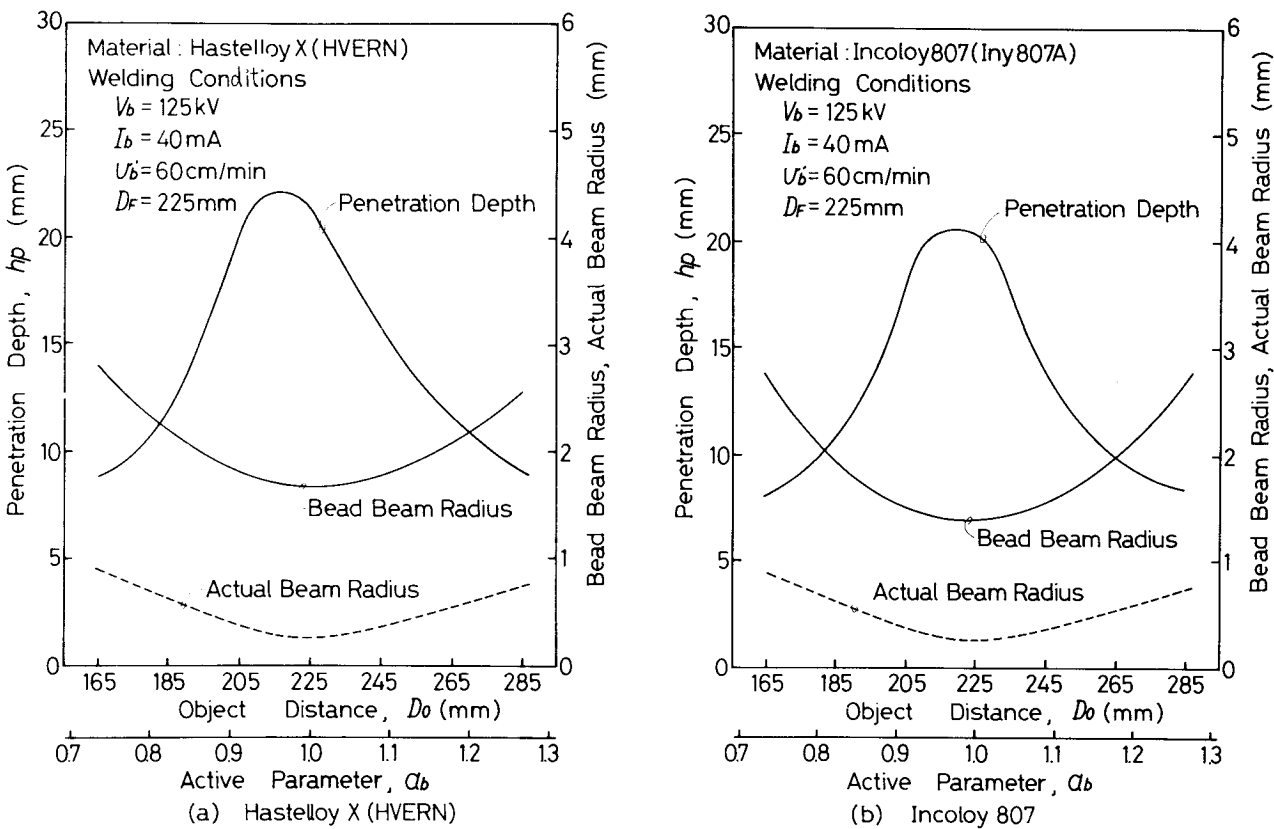


Fig.2-8 Effect of Active Parameter on Penetration Depth, Bead Beam Radius and Actual Beam Radius

となっている。いっぽう、ビードビーム径およびアクチュアルビーム径は $a_b \approx 1.0$ において最小となっている。このように溶込み深さが最大となる a_b 値とビードビーム径およびアクチュアルビ

ーム径が最小となる a_b 値が相違している。また、ビードビーム径はアクチュアルビーム径に比しかなり広がった形状を有している。

2.5.2 ビード断面に発生する欠陥

溶接部のX線透過試験および顕微鏡組織観察の結果、ポロシティおよびマイクロ割れが認められた。以下にそれぞれの特性について述べる。

(1) ポロシティ

溶接部のX線透過試験の結果認められたポロシティは、いずれも溶込み深さの先端、すなわち、ルート部近傍に発生するRポロシティ (Root Porosity or R-Porosity) である。発生した代表的なRポロシティの一例をFig. 2-9に示す。

Rポロシティの発生は、溶接入熱に依存すると報告¹⁾されているが、本研究においては、各材料についてRポロシティの発生範囲を a_b と w_B ($= \frac{I_b V_b}{2 r_b v_b}$, I_b : ビーム電流, V_b : 加速電圧, r_b : アクチュアルビーム半径, v_b : 溶接速度) を用いて整理した。ここで w_B は電子ビームのビードエネルギー密度 (Bead Energy Density) として定義されるものである。すなわち、溶接入熱をアクチュアルビーム径で除した数値であり、溶接過程中で材料の表面に与えられる電子ビームのエネルギー密度である。

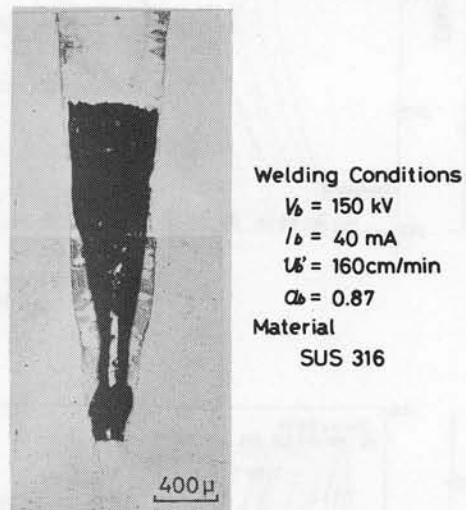


Fig.2-9 Typical R-porosity

電子ビーム溶接については、同一型式の装置でも溶接諸元によりビーム径が異なるために、ビーム径を考慮に入れた w_B で整理しておけば、溶接装置の如何にかかわらず適正溶接条件の推定および材料の欠陥発生度の比較が可能である。

Fig. 2-10 および Fig. 2-11 は各材料について $w_B - a_b$ 図中にRポロシティ発生範囲を記入したものである。図中の溶接入熱の曲線上にRポロシティ発生箇所を記入し、Rポロシティの発生点を求めると、Rポロシティは同一入熱の曲線上の a_b 値のある範囲において発生する。図の斜線の部分はこれらのポロシティ発生限界の a_b 値を各入熱曲線上に記入し、溶込み深さおよび入熱がそれぞれ 15 mm および 5000 joule/cm ($I_b = 40 \text{ mA}$, $V_b = 125 \text{ kV}$, $v_b' = 60 \text{ cm/min}$) 以下の場合のRポロシティ発生範囲を示したものである。図において溶込み深さはある曲線上で一定となる。すなわち、図中の $h_p = 15 \text{ mm}$ は溶込み深さがこの曲線上では常に 15 mm であるということを示している。

各材料におけるRポロシティ発生度は、Fig. 2-12に示すポロシティ発生範囲の面積 S_P , ポロ

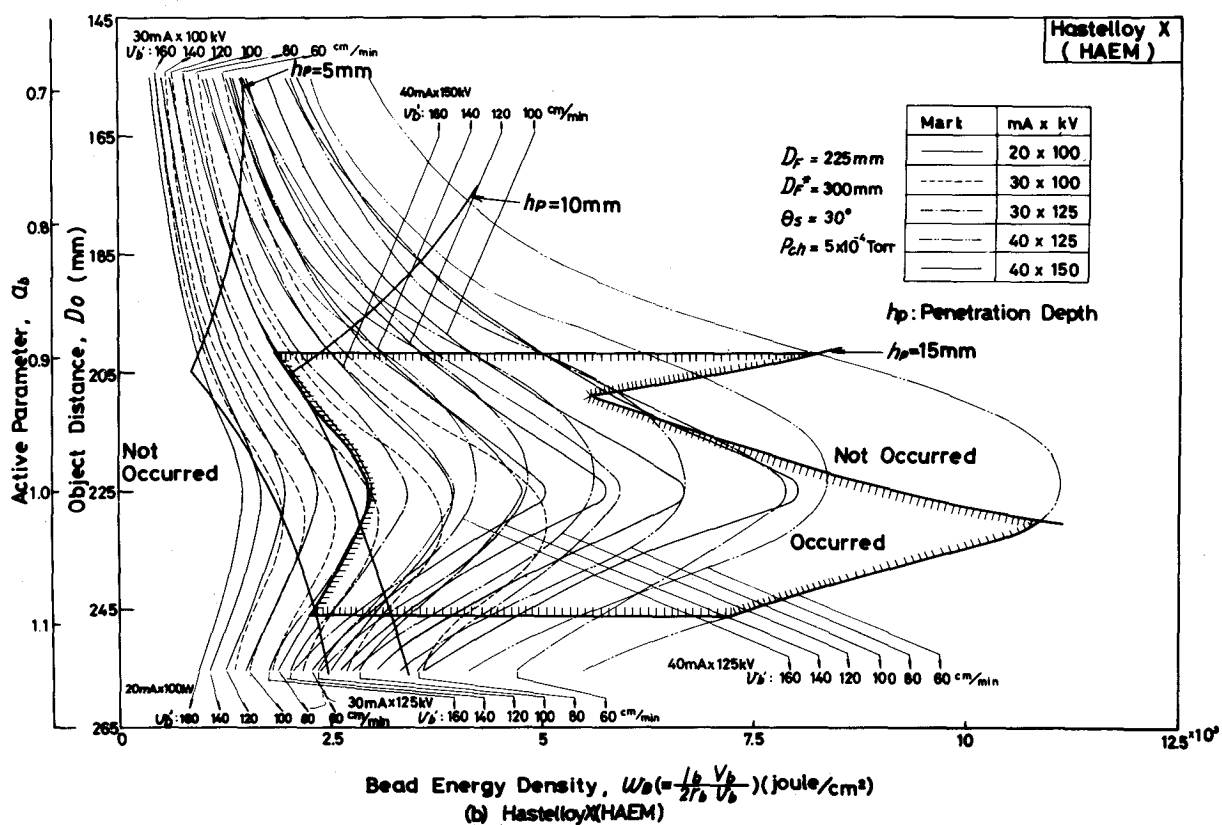
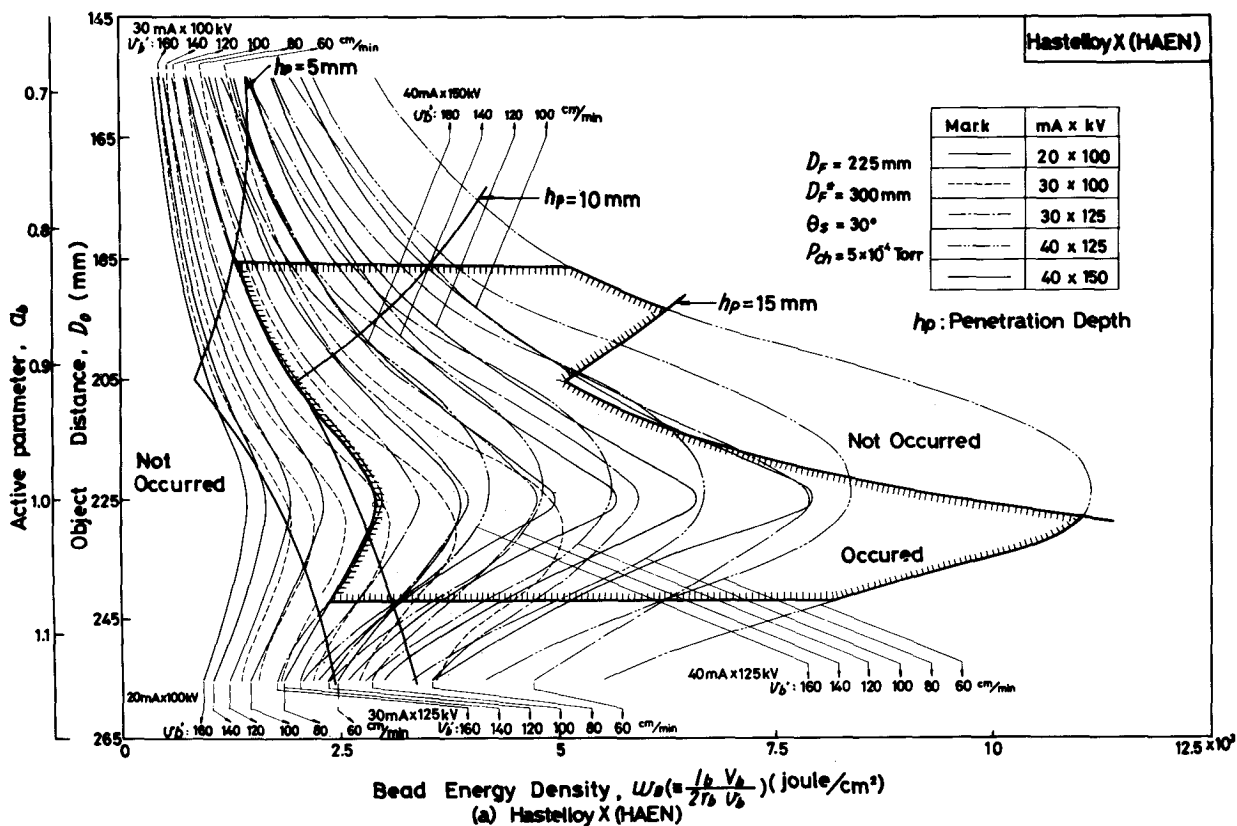


Fig.2-10 Effect of Bead Energy Density and Active Parameter on R-porosity (Ni-base Superalloys)

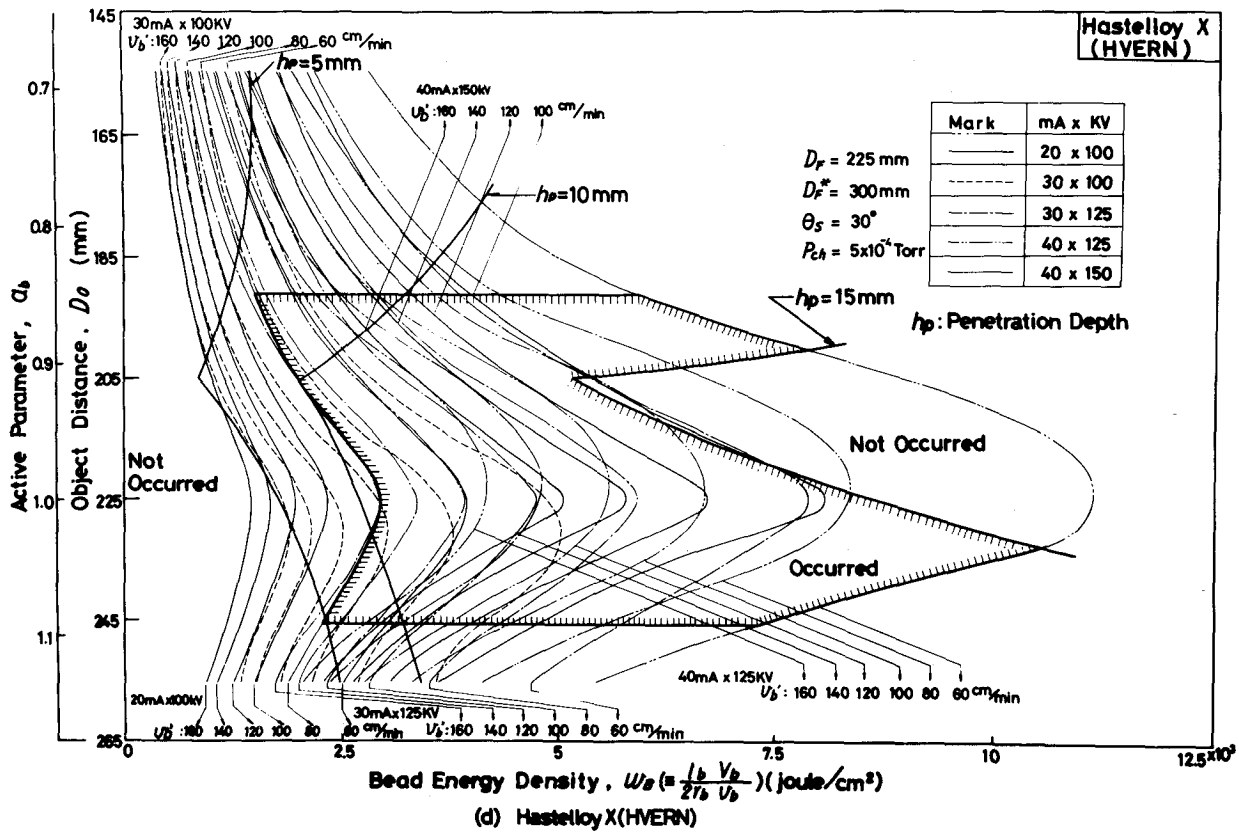
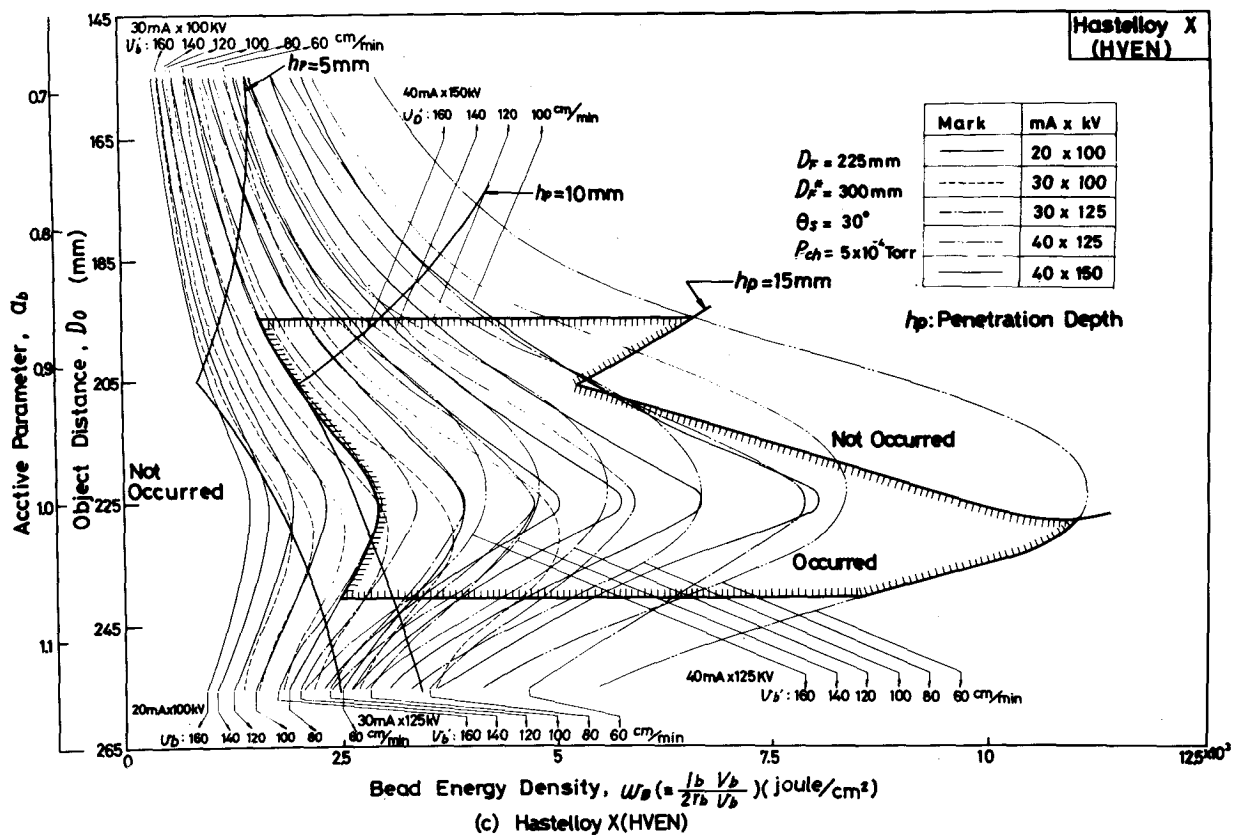


Fig.2-10 Effect of Bead Energy Density and Active Parameter on R-porosity (Ni-base Superalloys)

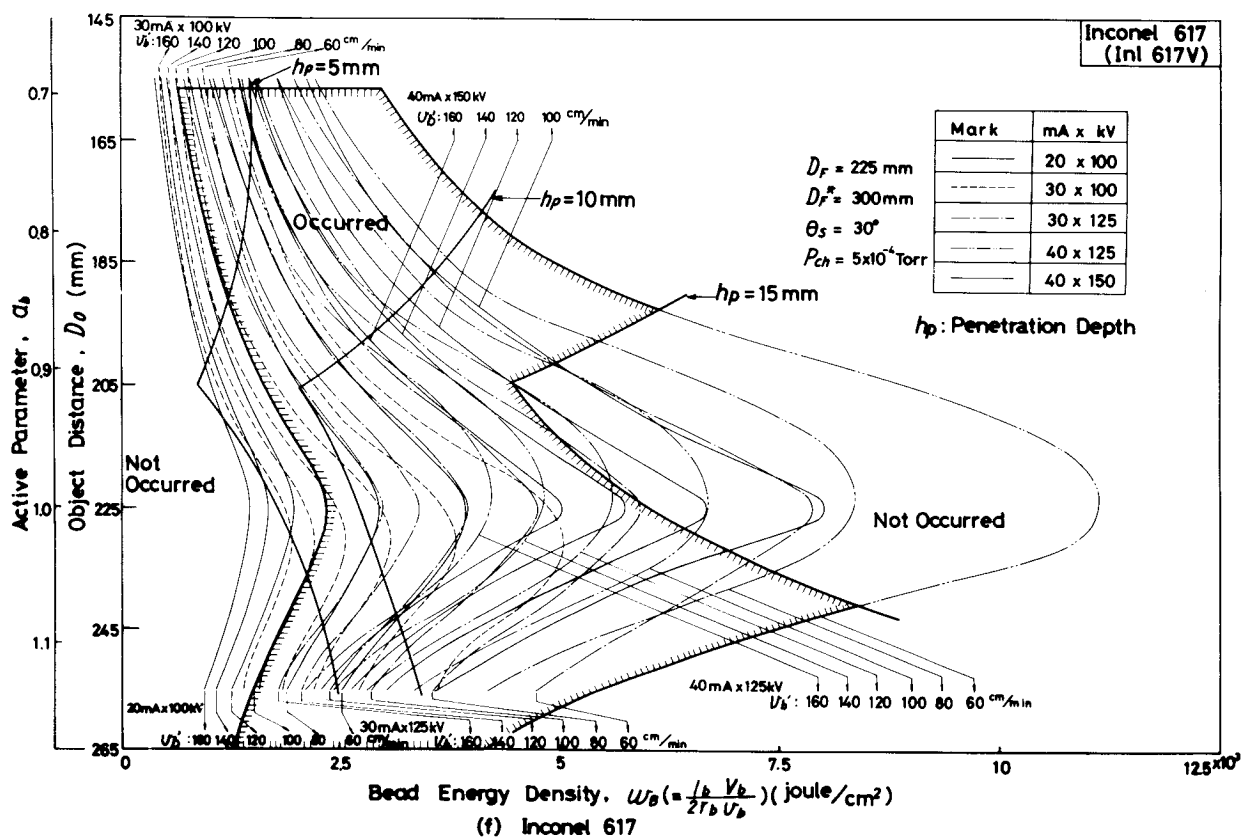
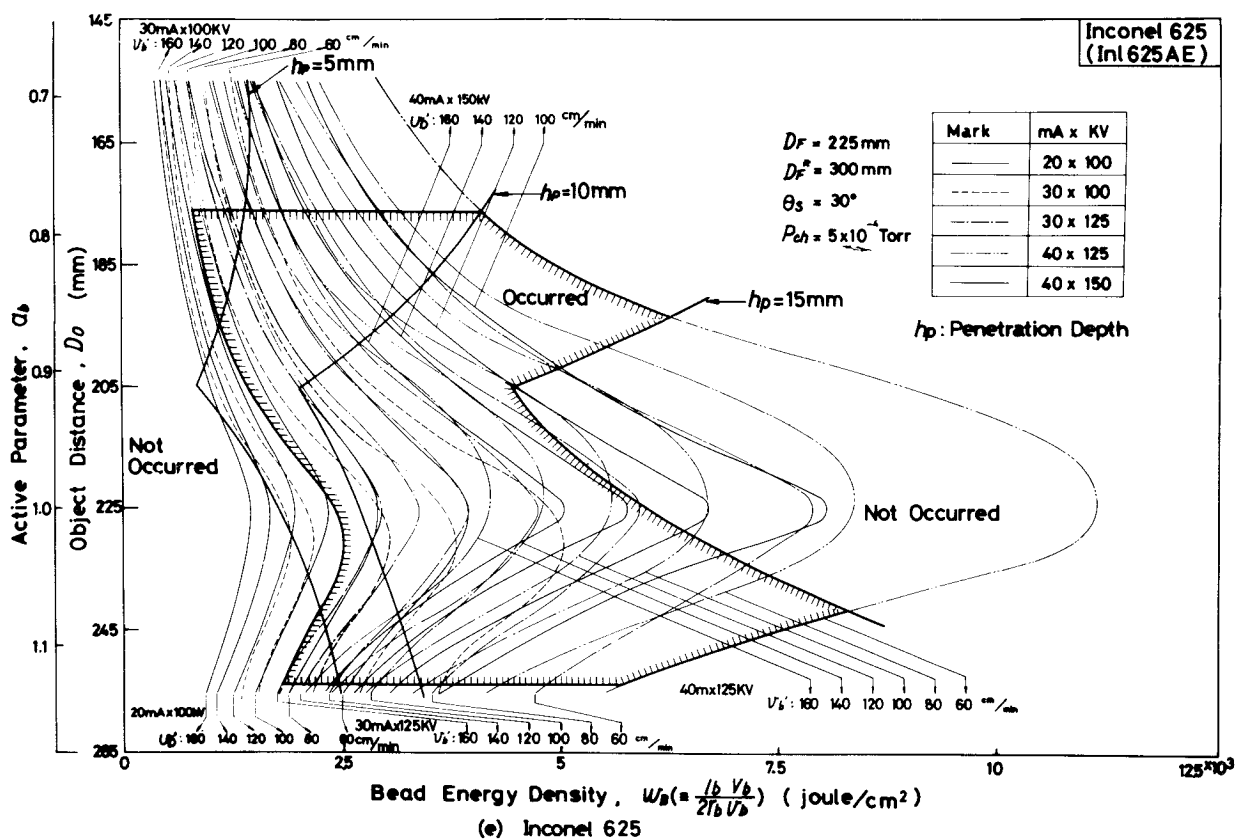


Fig.2-10 Effect of Bead Energy Density and Active Parameter on R-porosity (Ni-base Superalloys)

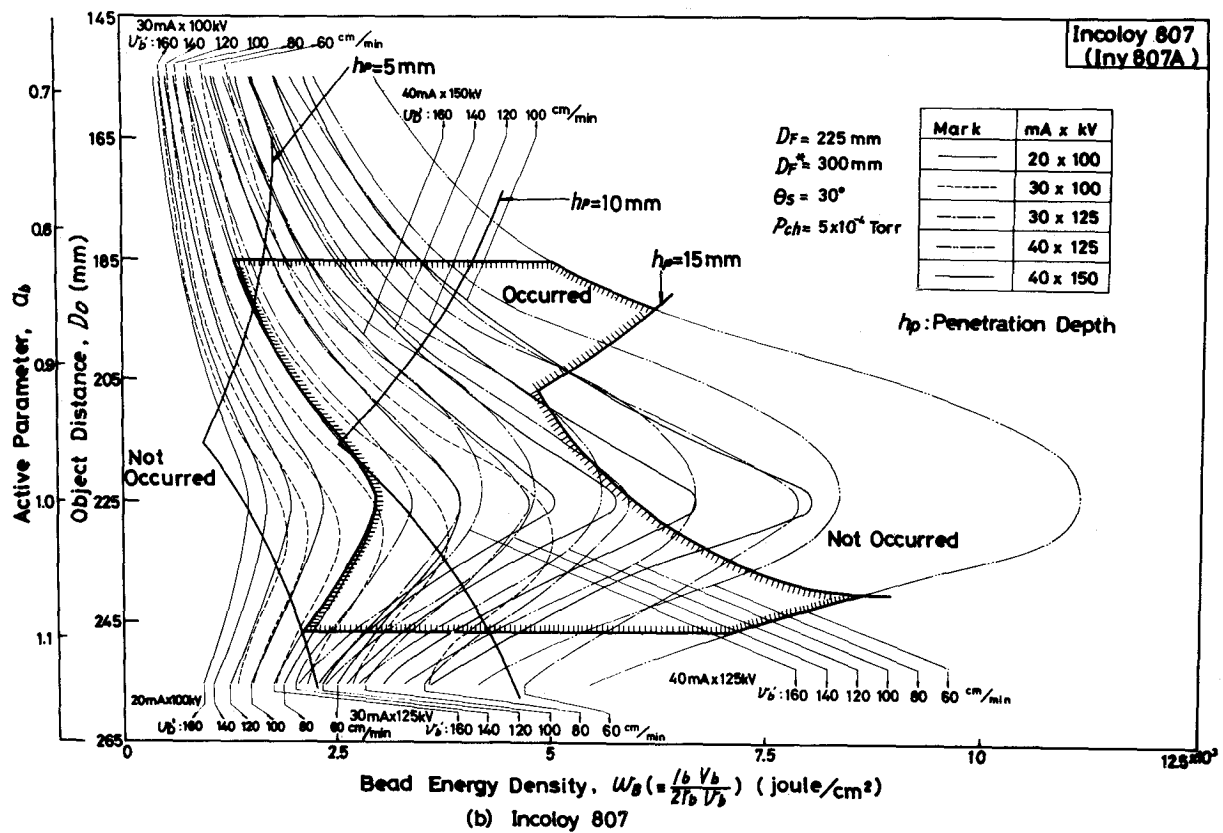
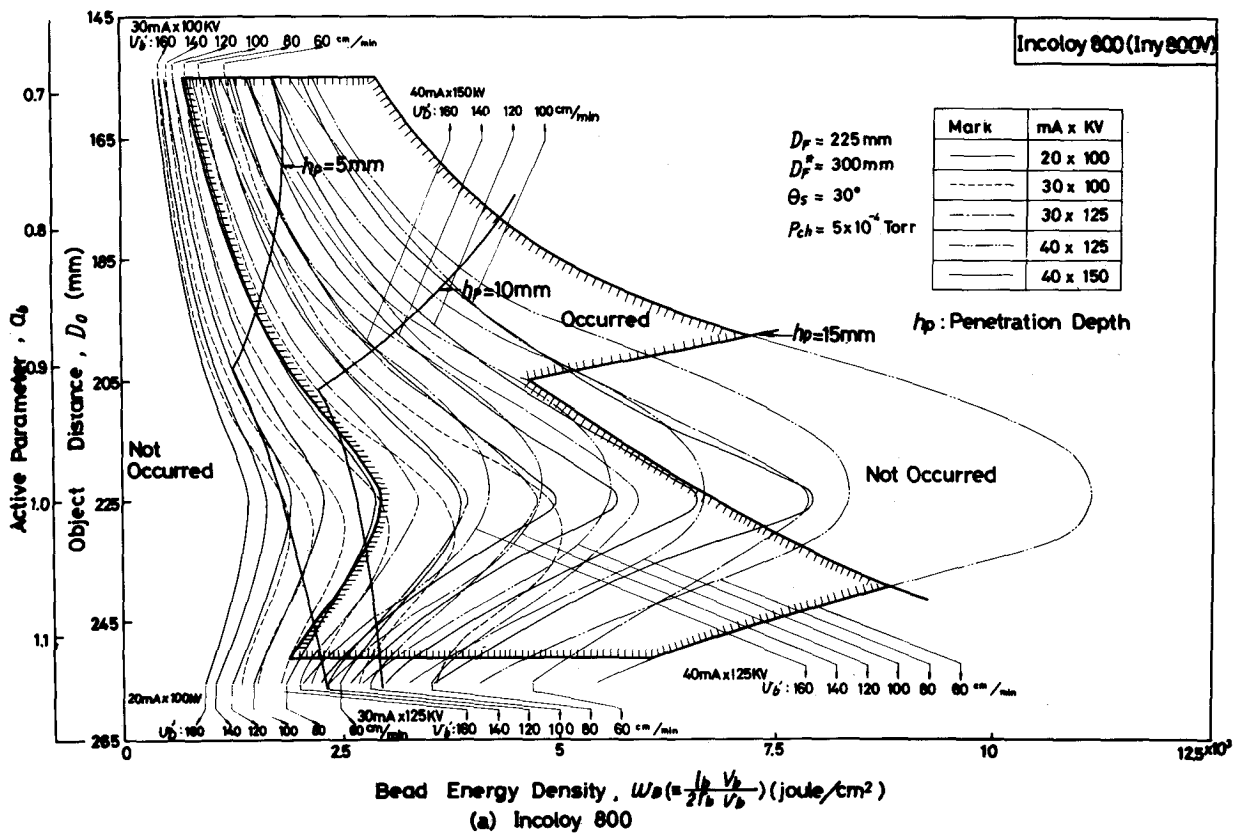


Fig.2-11 Effect of Bead Energy Density and Active Parameter on R-porosity (Fe-base Superalloys)

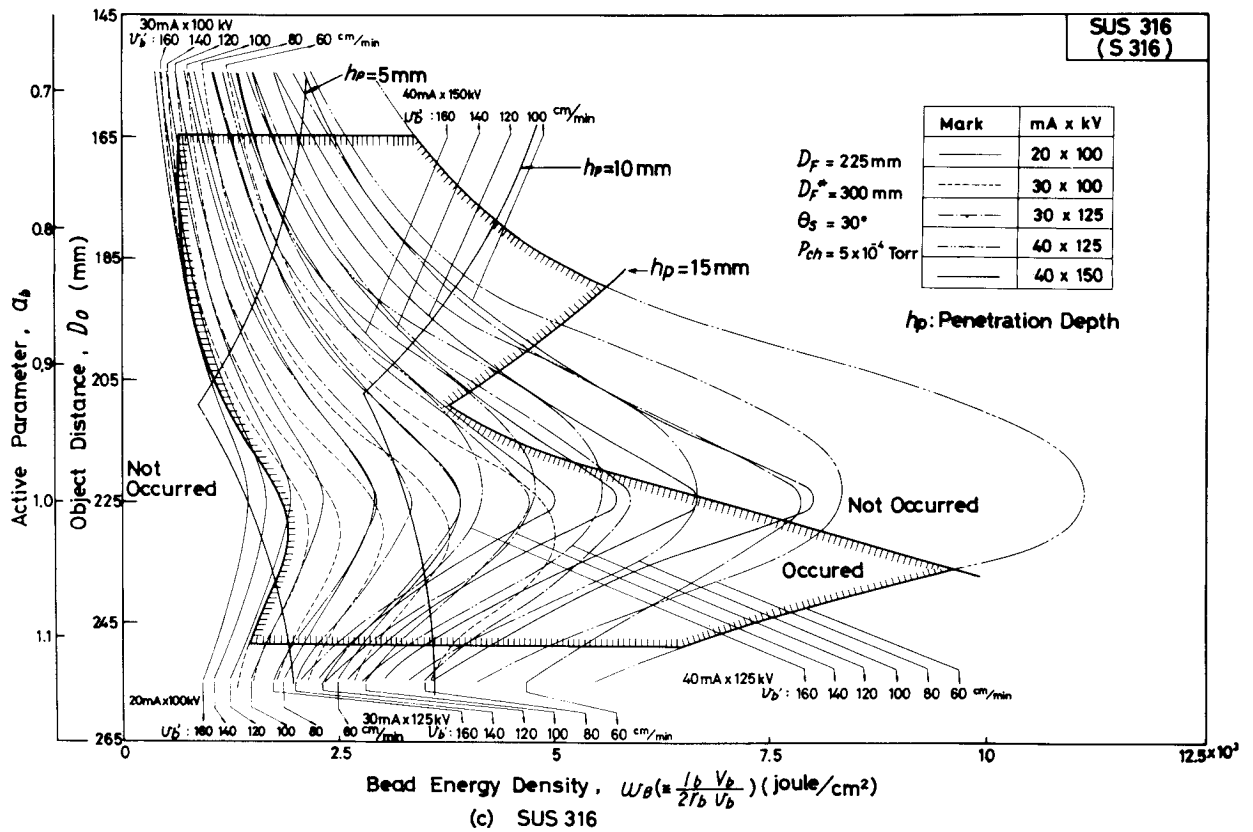


Fig.2-11 Effect of Bead Energy Density and Active Parameter on R-porosity (Fe-base Superalloys)

Table 2-4 Criteria Obtained for Evaluation of Susceptibility to R-porosity

Material	$S_p/S_{p,m}$	$W_{B,m}$ (joule/cm ²)	Δb_1	Δb_2	$\Delta \Delta b$
Hastelloy X (HAEN)	0.71	2.95	0.83	1.08	0.25
Hastelloy X (HAEM)	0.61	2.95	0.89	1.09	0.20
Hastelloy X (HVEN)	0.62	2.95	0.87	1.07	0.20
Hastelloy X (HVERN)	0.70	2.95	0.85	1.09	0.24
Inconel625 (Inl625AE)	0.75	2.35	0.78	1.13	0.35
Inconel617 (Inl617V)	1.00	2.32	0.71	1.16	0.45
Incoloy800 (Iny800V)	0.91	2.95	0.69	1.12	0.43
Incoloy807 (Iny807A)	0.55	2.95	0.81	1.09	0.28
SUS 316 (S 316)	0.91	1.89	0.71	1.16	0.45

Notes: S_p means the area schematically shown in Fig.2-12 where R-Porosity occurs.

$S_{p,m}$ means max. S_p in this experiment.

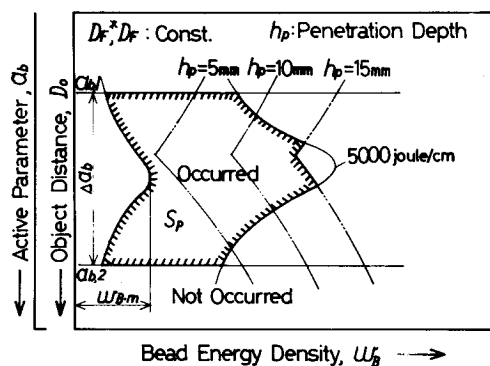


Fig.2-12 Evaluating Method for R-porosity

シテ発生範囲における最大ビードエネルギー密度 $w_{B.m}$ およびポロシテ発生限界の a_b の差、すなわち Δa_b ($\equiv a_{b,2} - a_{b,1}$) により評価することが可能であると考えられる。ここで、 S_P が小なるほど、 $w_{B.m}$ は大なるほど、また Δa_b については小なるほど材料の耐Rポロシテ性が優れていると評価できる。

Table 2-4 は各材料について、 S_P 、 $w_{B.m}$ および Δa_b を指標としてRポロシテの発生度を評価したものである。この表から判るように、各材料におけるRポロシテの発生度の差異は S_P または Δa_b において明瞭に判別できる。また、 S_P と Δa_b の間に良い相関性が認められ、Rポロシテの発生度は S_P または Δa_b により評価するのが妥当であると考えられる。

S_P または Δa_b で評価した場合、一般にSUS316、Incoloy 800などの鉄基合金は S_P 、 Δa_b が大でRポロシテ発生度が大きく、Hastelloy X、Inconel 625などのニッケル基合金は鉄基合金に比して S_P 、 Δa_b が小さく耐Rポロシテ性において優れている。

なお、真空溶解を行なったInconel 617、Incoloy 800の S_P 、 Δa_b が大きく、真空溶解により材料の耐Rポロシテ性は改善されない様である。

(2) ミクロ割れ

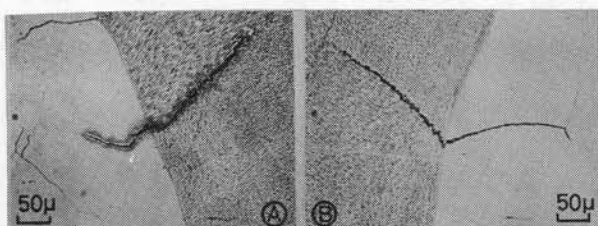
溶接部横断面を混合液（電解液として1.5%過塩素酸、5.7%ロダンソーダ、7.1%くえん酸、7.5.5%エタノール、9.4%ノルマルプロパノールおよび0.8%オキシキノリン）を使用して電解研磨後、10%しゅう酸溶液を使用して電解腐食し、各材料について溶接部断面の顕微鏡組織を観察し、溶接部のミクロ割れについて調査した。

SUS316およびInconel 625の溶接部にはミクロ割れは認められなかったが、他の材料にはいずれも発生した。ミクロ割れの一例をFig.

2-13に示すが、凝固線近傍の熱影響部および溶接金属部において、いずれも凝固線にほぼ直角に発生し、熱影響部では結晶粒界、溶接金属部ではデンドライトの境界に認められる。

(a) ビーム出力および溶接速度がミクロ割れにおよぼす影響

Fig. 2-14 はミクロ割れの発生した各材料について、ビーム出力 W_b ($\equiv I_b \times V_b$) と溶接速度 v_b' がミクロ割れ感受性におよぼす影響を示したものである。この $W_b - v_b'$



Welding Conditions

$V_b = 150$ kV
 $I_b = 30$ mA
 $v_b' = 120$ cm/min
 $\alpha_b = 1.09$

Material

Hastelloy X (HAEN)

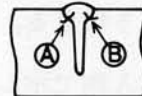


Fig.2-13 Microstructure of Typical Microcrack

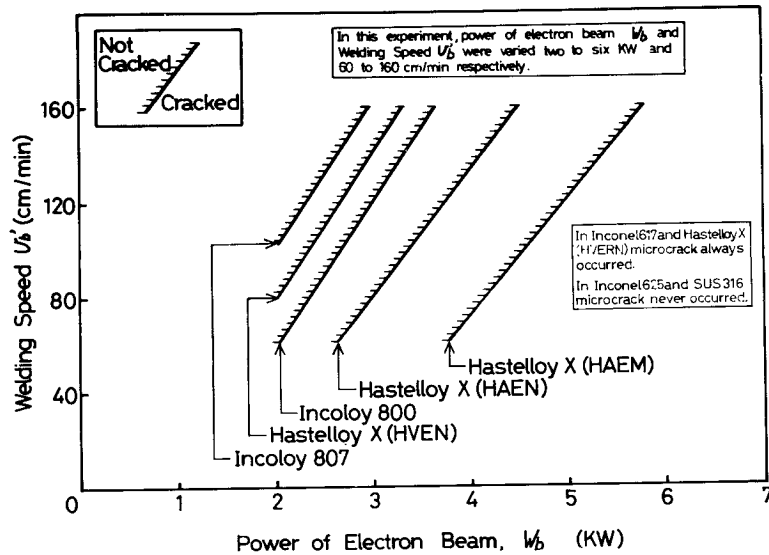


Fig.2-14 Effect of Power of Electron Beam and Welding Speed on Microcrack

ダイアグラムの中には割れ発生域と非発生域があり、図示したように各材料について割れ発生限界線を設定することができる。すなわち、各材料について溶接条件をこの限界線以下に抑えれば割れ発生を防止することが可能であることを示している。

また、図から判るように各材料の割れ限界線が互にほぼ平行であるために、この図から各材料の割れ感受性を評価することが可能である。すなわち、非発生域が大なるほど耐割れ性が優れていると考えられる。非発生域の範囲を基準にして耐割れ性の良好なものから順に示すと次のようになる。

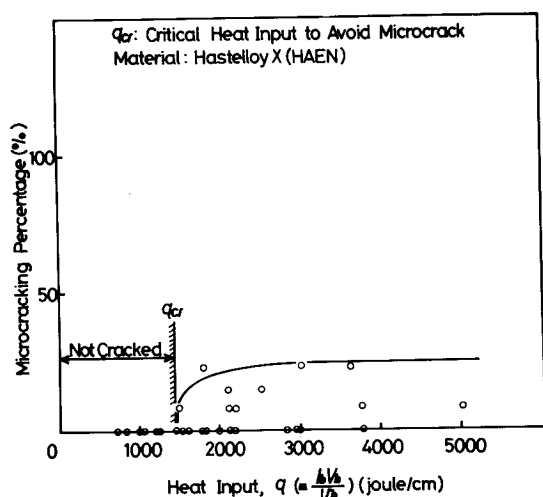
(SUS 316, Inconel 625), HAEM, HAEN, Incoloy 800, HVEN, Incoloy 807,
(HVERN, Inconel 617)

(b) 溶接入熱がマイクロ割れにおよぼす影響

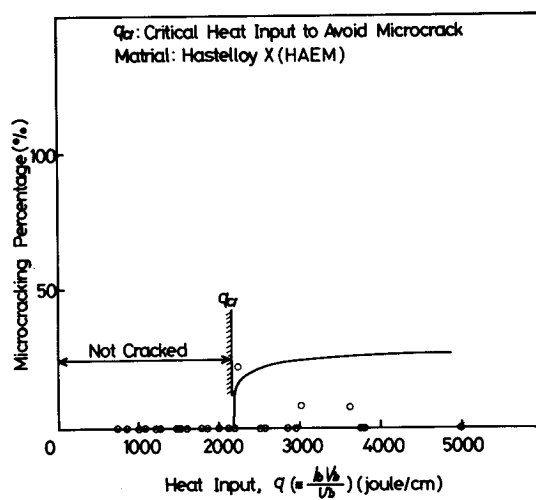
Fig. 2-15 および Fig. 2-16 は溶接入熱とマイクロ割れ発生率(同一入熱において割れの認められた試験片数と全試験片数の比率)の関係を示したものである。図より入熱が増大するにつれて割れ発生率は増大する傾向を示しており、入熱がある値以下になると割れの発生がまったく認められなくなる。この値を材料のマイクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} と定義すると、この q_{cr} は材料のマイクロ割れ感受性を評価する適切な指標の一つであると考えられる。各材料についてこのような q_{cr} を求めると Table 2-5 に示すようになる。なお、割れの発生しなかった SUS 316, Inconel 625 については本実験で行なった最大入熱で示し、割れが停止しなかった HVERN, Inconel 617 については最小入熱にて示した。 q_{cr} を基準にして各材料を比較すると耐割れ性の良好なものから順に次のようになる。

(SUS 316, Inconel 625), HAEM, HAEN, (HVEN, Incoloy 800), Incoloy 807,
(HVERN, Inconel 617)

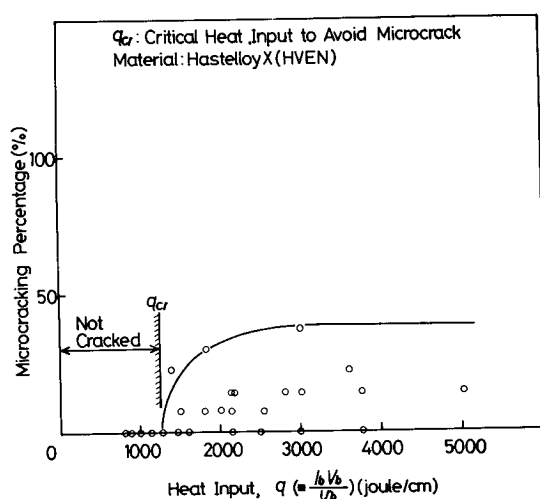
なお、この q_{cr} による各材料の割れ感受性の評価結果は前述の評価結果とほぼ一致している。



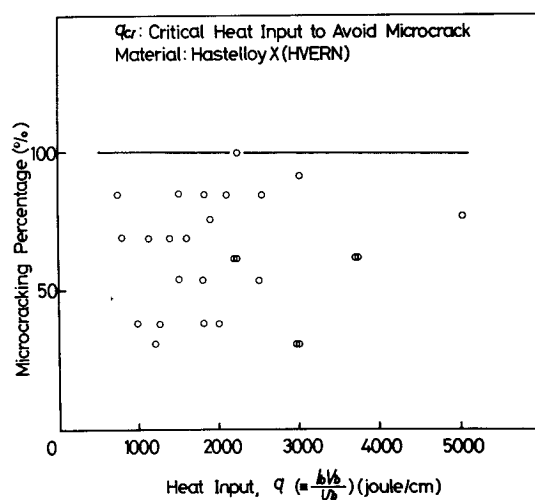
(a) Hastelloy X (HAEN)



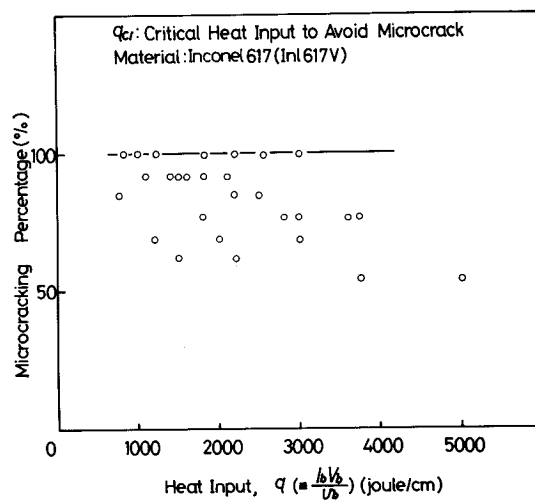
(b) Hastelloy X (HAEM)



(c) Hastelloy X (HVEN)



(d) Hastelloy X (HVERN)



(e) Inconel 617

Fig.2-15 Effect of Heat Input on Microcracking Percentage (Ni-base Superalloys)

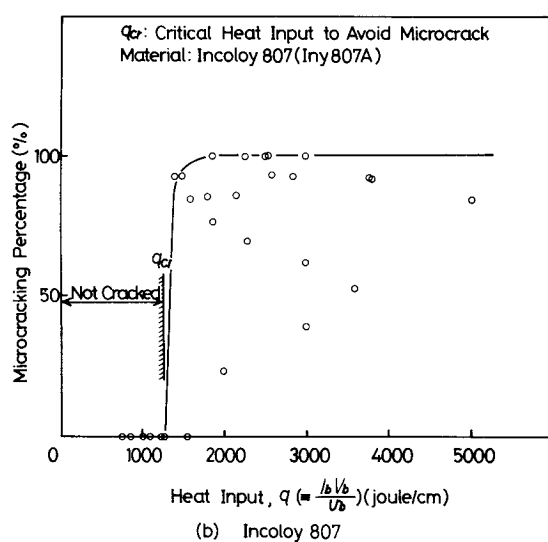
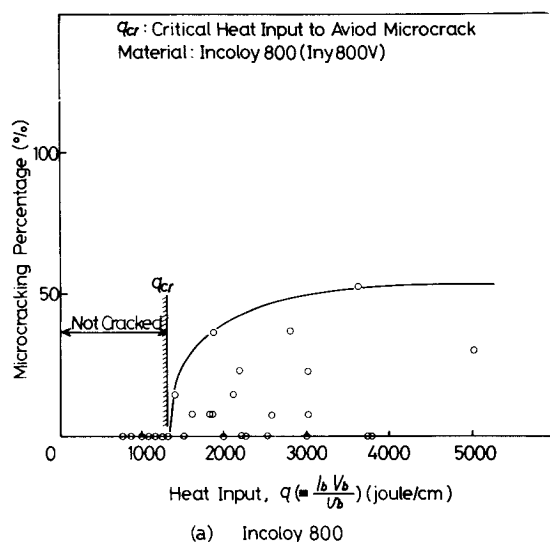


Fig.2-16 Effect of Heat Input on Microcracking Percentage (Fe-base Superalloys)

w_B および a_b とマイクロ割れの関係については、割れ発生位置が $a_b - w_B$ 曲線においてかなり不規則に分布しており、割れ発生域と非発生域を明確に区分することは困難であるが、 a_b が 0.9 近傍において割れが発生し難くなり、また、 w_B が小さくなるほど割れが発生し難くなる傾向を示している。

Table 2-5 Critical Heat Input to Avoid Microcrack

Material	q_{cr} (joule/cm)
Hastelloy X (HAEN)	1406
Hastelloy X (HAEM)	2143
Hastelloy X (HVEN)	1286
Hastelloy X (HVERN)	< 750
Inconel625 (Inl625AE)	> 5080
Inconel617 (Inl617V)	< 750
Incoloy800 (Iny800V)	1286
Incoloy807 (Iny807A)	1200
SUS316 (S316)	> 5080

q_{cr} : Critical Heat Input to Avoid Microcrack

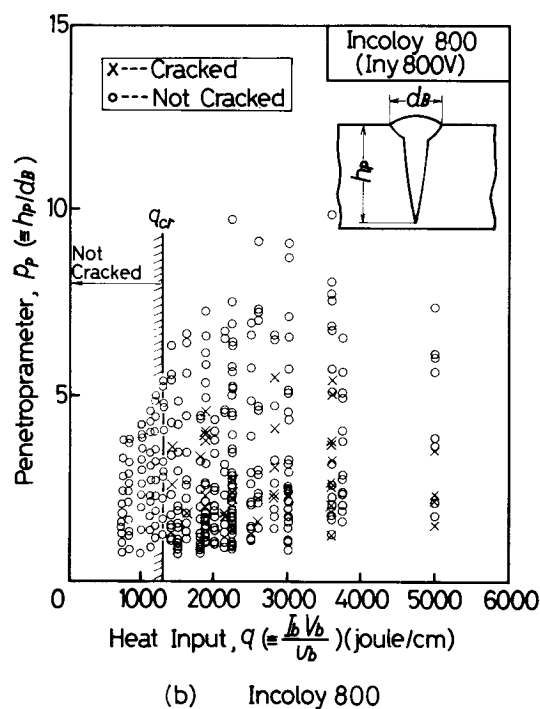
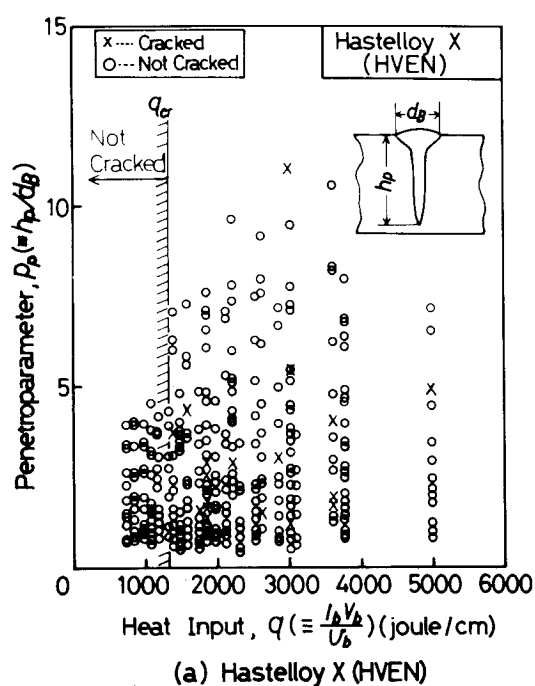


Fig.2-17 Effect of Heat Input and Active Parameter on Microcracking

(c) ミクロ割れとペネトロパラメータ (Penetroparameter) との関係

Fig. 2-17 は溶接入熱とペネトロパラメータ $P_P \equiv h_p/d_B$ (h_p : 溶込み深さ, d_B : ビード幅) がミクロ割れにおよぼす影響の一例を示したものであるが, 割れの発生したいずれの材料についても P_P 値と割れの間には相関性は認められない。しかし, 割れと入熱とは相関性があり, 図示した様に割れが発生しない限界入熱が存在するが, これは前項で述べたミクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} に相当する。

(d) ミクロ割れと発生位置の関係

溶接部のミクロ割れとその発生位置の関係を明確にするために, ビード断面形状の各部の寸法を Fig. 2-18 に示すように規定し, 割れ発生位置とビード断面形状の各部の寸法について調査した。

Fig. 2-19 および Fig. 2-20 は各材料において発生した割れをその発生位置 h_c/h_N [h_c : ミクロ割れ発生個所と表面との距離, h_N : ネイルヘッド (Nailhead) の深さ] および h_N/h_p (h_p : 深込み深さ) をパラメータとして整理したものである。

割れ発生のとくに著しい HVERN, Inconel 617 および Incoloy 807 はいずれも割れ発生位置については類似の傾向を示しており, 割れは $h_c/h_N \approx 1.0$ 近傍に集中しており, いわゆるネイルヘッドクラック (Nailhead Crack) が割れの大部分を占めている。また同図に測定した全溶接部および割れ発生溶接部の h_N/h_p の度数と h_N/h_p の関係を示した。測定した全溶接部の h_N/h_p の度数を実線, 割れ発生溶接部の度数は点線で示した。 h_N/h_p とこれらの度数の比, すなわち割れ発生の比率の間にはとくに相関性は認められなかった。

Hastelloy X の HAEN, HAEM および HVEN については, 図に示すように測定した全溶接部の h_N/h_p の度数に対する割れ発生溶接部の度数の比はいずれの h_N/h_p についても小さいが, この場合も $h_c/h_N \approx 1.0$ 近傍に発生する割れが多い。

なお, Incoloy 800 については Fig. 2-20 (a) に示すように割れ発生位置はかなり不規則に分布している。

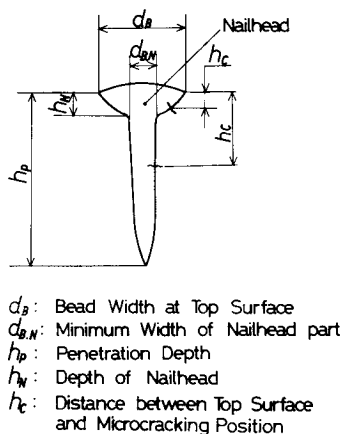


Fig.2-18 Electron Beam Weld Geometry Defined

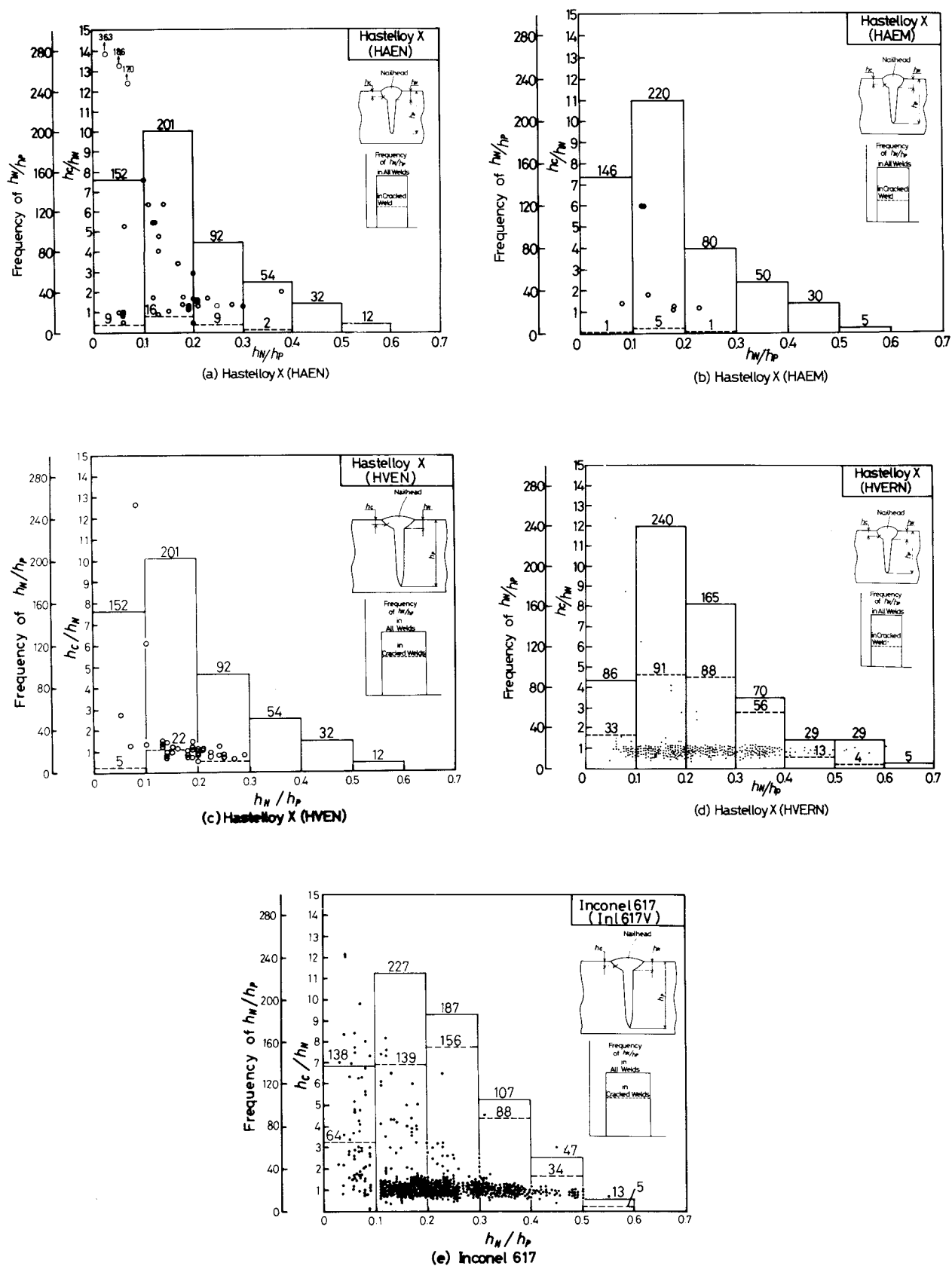


Fig.2-19 Effect of h_N/h_p and h_c/h_N on Microcracking (Ni-base Superalloys)

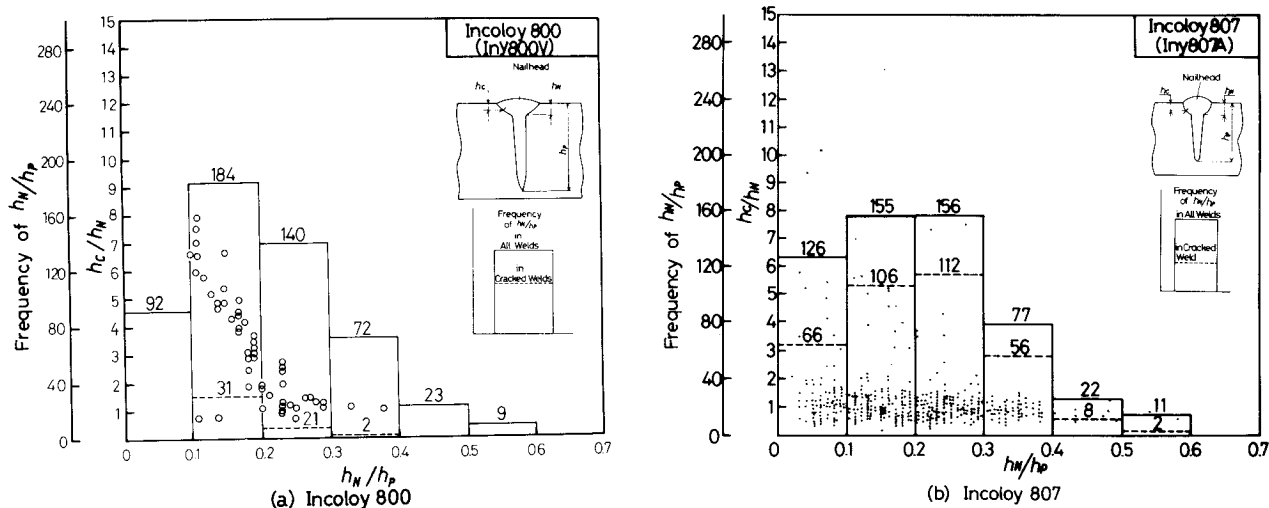


Fig.2-20 Effect of h_N/h_p and h_C/h_N on Microcracking (Fe-base Superalloys)

Fig. 2-21 および Fig. 2-22 は各材料について h_p と h_C/h_p の関係を h_N/h_p の分布と対応させて示したものである。ニッケル基合金については Fig. 2-21 に示すように、いずれの場合においてもマイクロ割れ発生位置を示すパラメータ h_C/h_p は h_p が大になるにしたがって小さくなる傾向を示し、また大部分のマイクロ割れは h_N/h_p の分布範囲内に集中している。すなわち、マイクロ割れが溶込深さに無関係にネイルヘッド部近傍に集中しているためにこのような分布を呈している。いっぽう、鉄基合金の場合については Fig. 2-22 に示すように、Incoloy 807 はニッケル基合金と同様の傾向を示しているが、Incoloy 800 の場合には溶込深さに無関係に h_C/h_p は 0.1～0.9 の範囲に分散し、むしろ 0.5 以上のものが多く、大部分のマイクロ割れは h_N/h_p の分布範囲外に認められる。すなわち、Incoloy 800 の場合に認められるマイクロ割れは溶込深さの中央部近傍に発生するものが多いことを示している。

2. 6 要 約

原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接の適正溶接条件を決定するために、溶接ビード特性におよぼす溶接諸元の影響について検討した。得られた結果を要約すると次の通りである。

- 1) 溶接ビード断面に発生する欠陥は、ルート部近傍に発生する R ポロシティおよび凝固線近傍の熱影響部および溶接金属部において、凝固線にほぼ直角の方向に発生するマイクロ割れである。
- 2) R ポロシティの発生範囲を a_b とビードエネルギー密度 w_B で整理した場合、ポロシティ発生度は、ポロシティ発生範囲の面積 S_p 、 a_b のポロシティ発生限界の差（発生域） Δa_b により評価できる。一般に鉄基合金はニッケル基合金に比してポロシティ発生度が大きい。

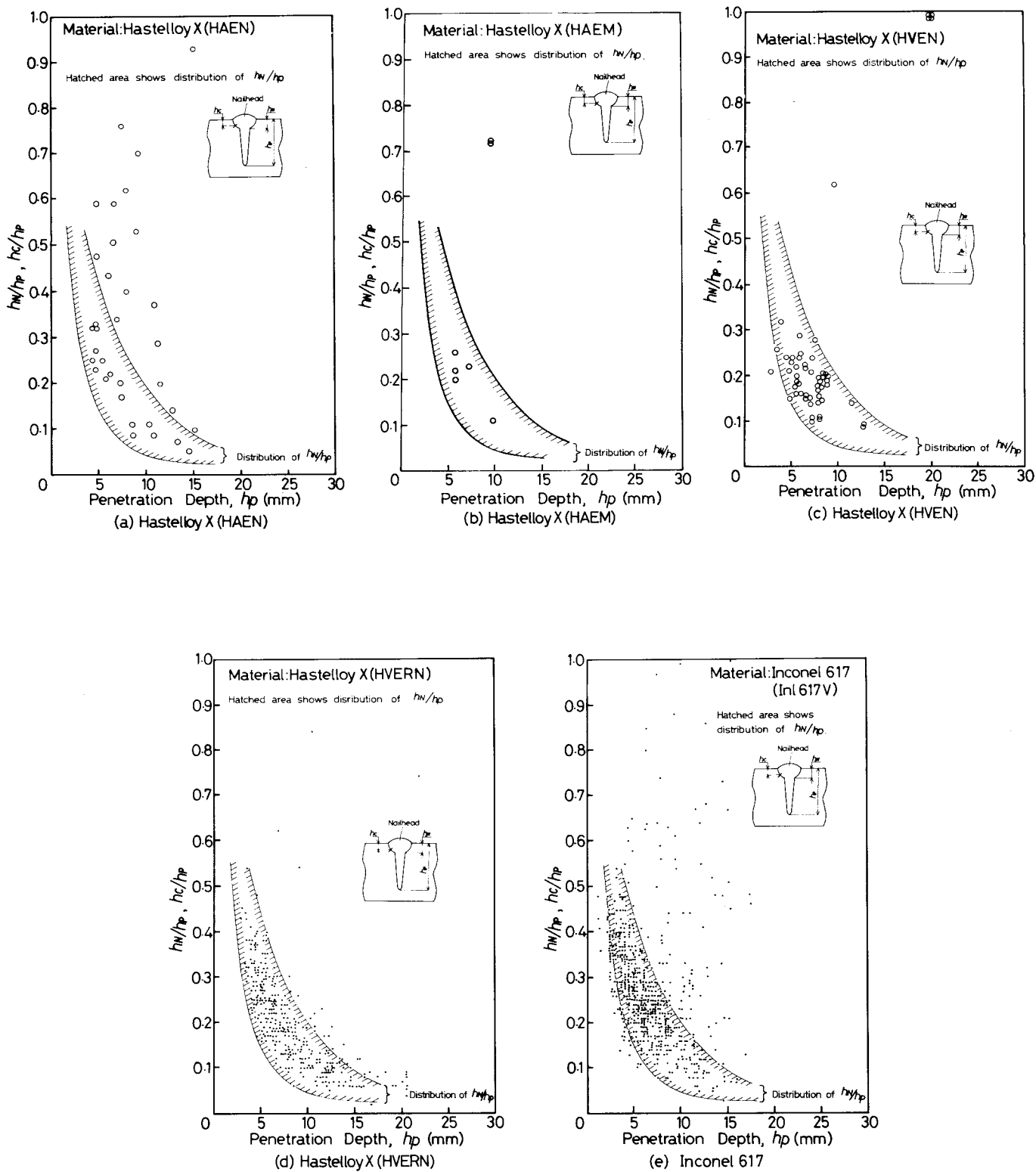


Fig.2-21 Relation between h_p , h_c/h_p and h_N/h_p (Ni-base Superalloys)

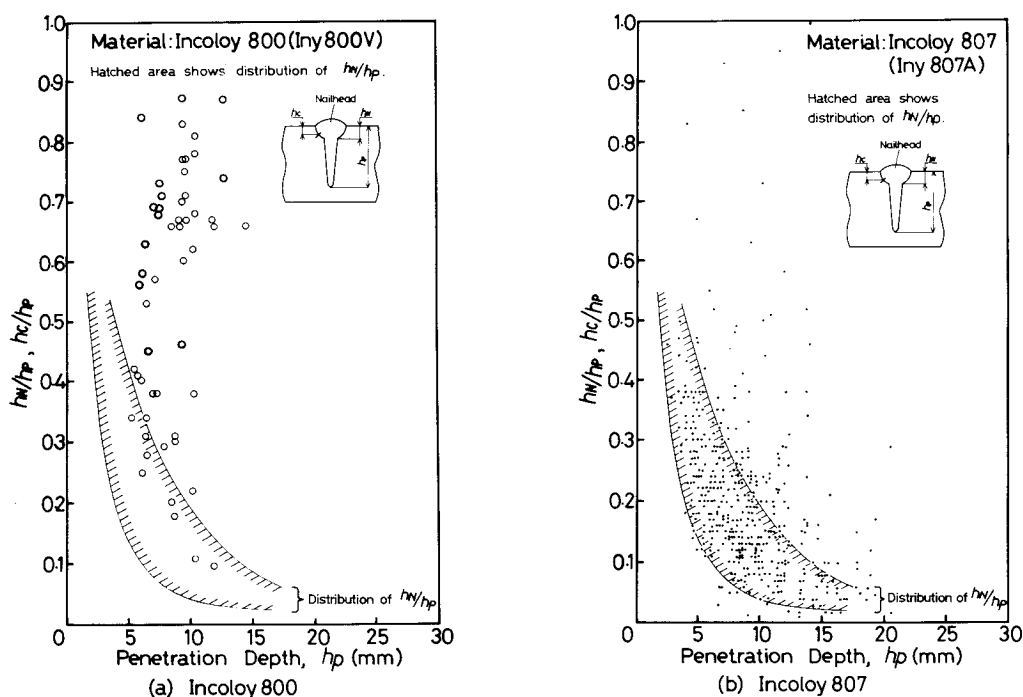


Fig.2-22 Relation between h_p , h_c/h_p and h_N/h_p (Fe-base Superalloys)

- 3) ミクロ割れ感受性をビーム出力 W_b および溶接速度 v_b' で整理するとこのダイアグラムの中に各材料の割れ発生限界線を設定することができ、溶接条件をこの限界線以下に抑えれば割れ発生を防止することができる。
- 4) 溶接入熱とミクロ割れ発生率の関係図より、割れ発生が認められなくなる入熱が存在し、この入熱をミクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} と定義し、この q_{cr} により各材料の割れ感受性を比較すると耐割れ性の良好なものから順に次のようになる。

(SUS316, Inconel 625), HAEM, HAEN, (HVEN, Incoloy 800), Incoloy 807, (HVERN, Inconel 617)

SUS316 と Inconel 625 には割れの発生は認められなかった。なお、 q_{cr} は材料のミクロ割れ感受性を評価するための適切な指標の一つであると考えられる。

- 5) ミクロ割れとペネトロパラメータの間には相関性は認められない。大部分のミクロ割れの発生位置は $h_c/h_N \approx 1.0$ 近傍に集中している。ミクロ割れ発生位置を $h_p - h_c/h_p$ の関係図で示した場合には、Incoloy 800 を除いたいずれの材料においても、概して h_c/h_p は h_p が大きくなるにしたがって小さくなる傾向を示し、 h_N/h_p の分布範囲内に集中している。しかし、Incoloy 800 の場合には、溶込深さに無関係に h_c/h_p は 0.1 ~ 0.9 の範囲に分散し、むしろ 0.5 以上のものが多く、ミクロ割れは溶込深さの中央部近傍に発生するものが多い。

第 3 章 溶接割れ感受性と材料の高温延性および Trans—Varestraint 試験結果との相関性

3. 1 概 説

第 2 章において、Hastelloy 系、Inconel 系、および Incoloy 系 の耐熱合金の電子ビーム溶接を行ない、溶接諸元を変化させた場合の溶接ビード断面の溶込形態および欠陥特性などについて調査した。その結果溶接部に発生する欠陥としてポロシティおよびマイクロ割れ（高温割れ）が認められた。このマイクロ割れ感受性は溶接入熱と相関性があり、各材料の割れ感受性はマイクロ割れ阻止限界入熱により評価できることを明らかにした。

このマイクロ割れについては、その特性を明確にし、また、割れに対する材料の効果的な評価方法を確立しておくことが、材料の割れ防止対策および新材料の開発にとって極めて重要なことである。

本章においては、電子ビーム溶接による割れ感受性と材料の溶接熱サイクル途上における高温延性、通常の高温溶接割れ試験法である Trans—Varestraint 試験および Varestraint 試験結果との相関性について検討を行ない、これらの各試験法が、電子ビーム溶接による各材料の割れ感受性の評価に極めて有効であることを明らかにした。

3. 2 供 試 材 料

Table 2—2 に示した Hastelloy 系、Inconel 系および Incoloy 系 の耐熱合金および比較のためにオーステナイト系ステンレス鋼を使用した。

なお、Hastelloy X の各材料については、以下の本文においては HAEN、HAEM、HVEN および HVERN にて示す。

3. 3 実験装置および実験方法

3. 3. 1 高温延性試験

実験装置として、高周波誘導加熱方式を採用し、油圧サーボによる荷重制御方式を用いた熱応力サイクル再現装置を使用した。最大荷重および最大引張速度はそれぞれ 5 ton および 30 mm/sec である。

Fig. 3—1 に示す高温延性試験片を使用し、Fig. 3—2 に示す熱サイ

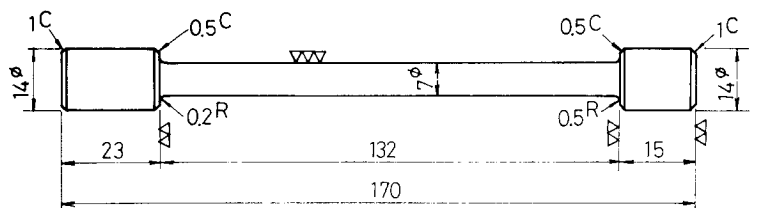


Fig.3-1 Hot Ductility Test Specimen

クルを試験片に再現させ、加熱途上（on Heating）および冷却途上（on Cooling）における任意の温度において、急速引張試験（引張速度、 30 mm/sec 、一定）を実施し、試験片の破断絞りおよび破断時の荷重を測定した。破断絞りについては破断部の直交する二方向の直径を測定し、この平均値を直径とすることにより算出した。

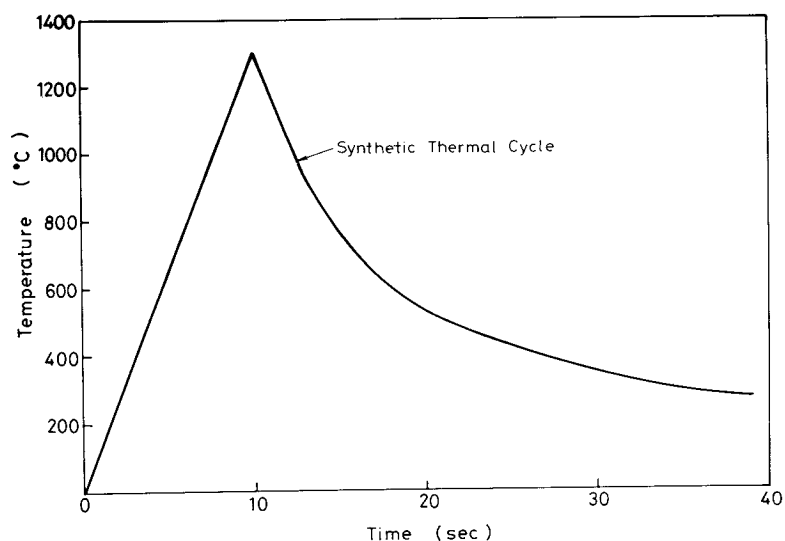


Fig.3-2 Simulated Weld Thermal Cycle

3.3.2 Trans-Varestraint および Varestraint 試験

試験方法の概略図を Fig. 3-3 に示す。図に示すように $5\text{ t} \times 100 \times 100\text{ mm}$ の試験板を使用し、これを曲げブロック上に設置し、 100 A 、 8.5 V 、 100 mm/min の溶接条件にて、試験板の A 点より TIG 溶接を開始し、 30 mm トーチ移動後、B 点にて 300 mm/sec の曲げ速度でヨークにより試験板を曲げ、所定の曲げ半径を有するダイブロックに試験板を圧着させ所定の曲率に変形させた。その後 20 mm トーチを移動させて C 点でアークを消失させた。これはクレータ割れの影響を除去するためである。また、Varestraint 試験においては、溶接方向が Trans-Varestraint 試験の場合と直交し、曲げひずみの付加は電極が曲げブロックの頂点を通過する瞬間に行なった。

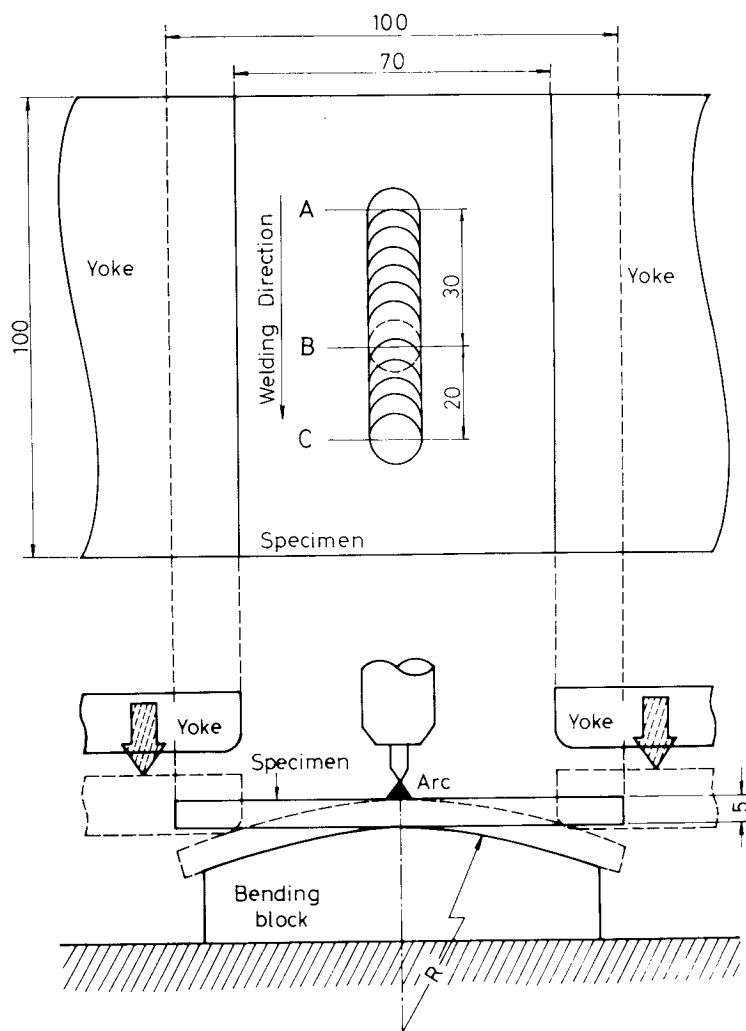


Fig.3-3 Schematic Explanation of Trans-Varestraint Test

曲げブロックによって試験板が曲げられたとき、板表面の付加ひずみ ε は次式で与えられる。

$$\varepsilon \approx \frac{t}{2R} \times 100 (\%)$$

t : 試験板板厚 (mm), R : 曲げブロックの曲率半径 (mm)

したがって、曲げブロックの R を変化させることにより、任意の付加ひずみ ε を試験板表面に与えることができる。

なお、溶接金属中央部の熱サイクルを計測するために、曲げひずみ付加時に $0.25\text{mm}\phi$ の W・5% Re - W・26% Re の熱電対をアーク直後の熔融池のビード中央へ瞬間的に投入し、溶接金属の凝固、冷却の過程の熱起電力を電磁オシログラフで記録した。

溶接後、溶接部に発生した割れの状況を実体顕微鏡により 80 倍に拡大して観察し割れの長さを測定した。

3.3.3. 材料の融点の測定

実験には熱分析装置を用いた。試料の形状は $4\phi \times 7\text{mm}$ の円柱状であり、その底部に孔をあけ、

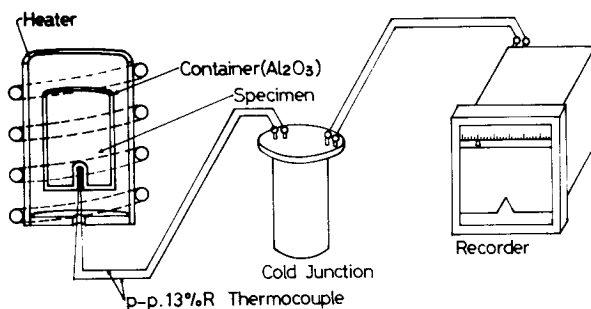


Fig.3-4 Measuring Method of Melting Temperature

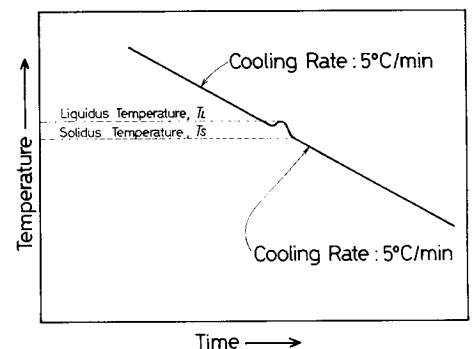


Fig.3-5 Schematic Explanation of Time vs Temperature Curve on Cooling in Measuring Melting Temperature

Fig. 3-4 に示すようなアルミナルupp 中に挿入して昇温し、 1500°C まで加熱して熔融させてから、 1260°C までは $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の冷却速度で温度を下降せしめた。その際に温度-時間曲線において、Fig. 3-5 に示すような凝固潜熱による微小な変化から、凝固開始温度 T_L と凝固終了温度 T_S を求めた。

3.4 実験結果および考察

3.4.1 材料の融点に関する検討

Table 3-1 は各材料について凝固開始温度

Table 3-1 Melting Temperature Measured

Material	Mark	Melting Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		
		T_L	T_S	$\Delta T (= T_L - T_S)$
Hastelloy x	HAEN	1337	1316	21
	HAEM	1367	1345	22
	HVEN	1347	1329	18
	HVERN	1352	1334	18
Inconel 625	Inl 625AE	1321	1305	16
Inconel 617	Inl617V	1375	1349	26
Incoloy 800	Iny800V	1417	1382	35
Incoloy 807	Iny807A	1394	1366	28
SUS 316	S 316	1417	1396	21

Notes: T_L : Liquidus Temperature
 T_S : Solidus Temperature

T_L および凝固終了温度 T_S を示す。なお、凝固開始温度は溶融終了温度、凝固終了温度は溶融開始温度とほぼ同一と考えて良い。

Table 3-1 から判るようにHastelloy X でもチャージにより T_L および T_S が異なっており、また、鉄基合金はニッケル基合金に比して T_L および T_S が高くなっている。また凝固範囲の幅は鉄基合金の方がニッケル基合金に比して広がっている。

3. 4. 2 加熱および冷却途上における材料の高温延性に関する検討

(1) 加熱途上における高温延性

加熱途上における材料の高温延性試験結果をFig. 3-6 およびFig. 3-7 に示す。いずれの材料についても図に示すように、温度が上昇するにしたがって絞りは増大するが、ある温度から急激に減少し、脆性破壊においてみられるような延性の全くない様相を呈するようになる。この加熱途上において絞りが零となる温度 $NDTH$ (Nil Ductility Temperature on Heating) を材料の高温延性の指標として各材料を評価することができる。 $NDTH$ が高いほど材料の高温延性が優れていると考えると、ニッケル基合金についてはHAEMが最も優れ、 Inconel 617, (HAEN, HVEN), HVERN, Ioconel 625の順になり、鉄基合金についてはSUS316が最も優れ、 Incoloy 800, Incoloy 807の順になっている。

なお、破断強度については、温度が上昇するにしたがって漸次減少し、絞りが零になる温度

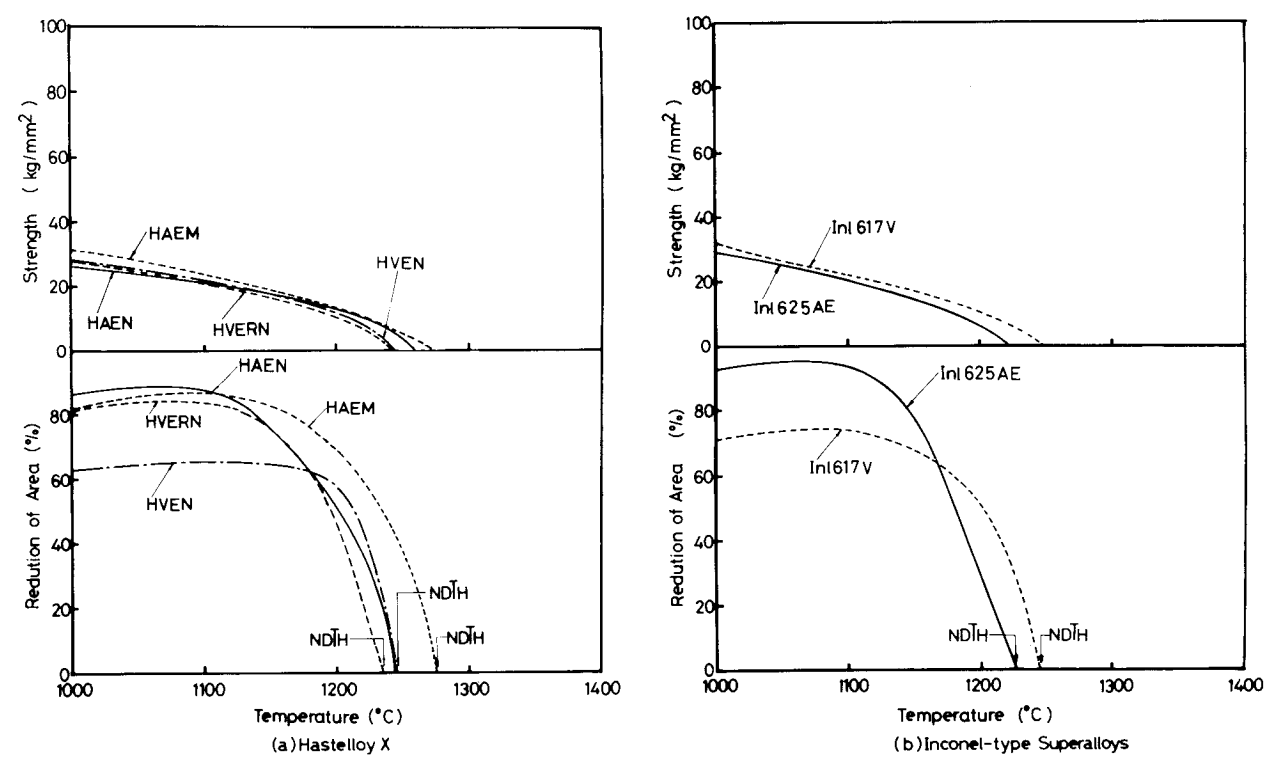


Fig.3-6 Effect of Temperature on Hot Ductility Characteristics on Heating (Ni-base Superalloys)

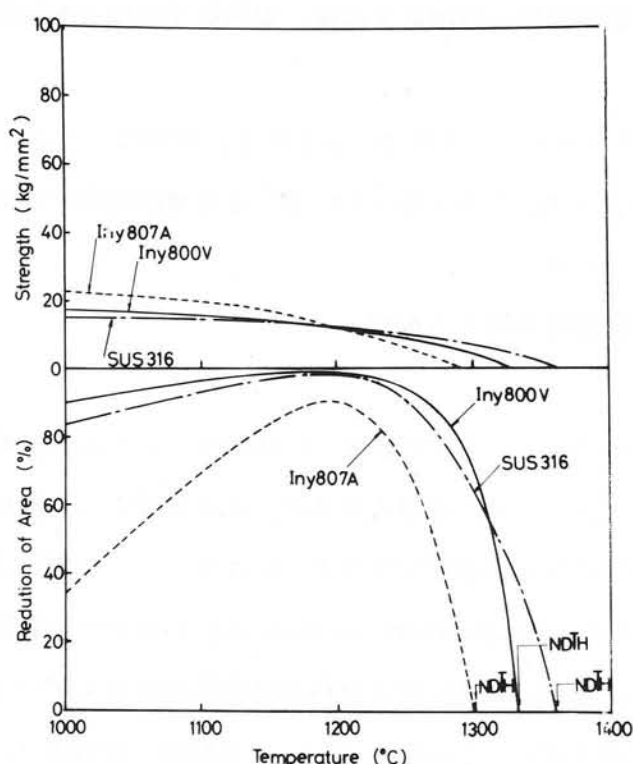


Fig.3-7 Effect of Temperature on Hot Ductility Characteristics on Heating (Fe-base Superalloys)

ている。冷却途中における高温延性によって各材料の凝固線近傍に発生するマイクロ割れ感受性を評価するためには最高加熱温度を凝固線近傍の温度に設定しなければならない。しかし、凝固線近傍の温度を計ることは極めて困難である。

最高加熱温度を T_S より NDT_H 近傍迄の温度範囲として、Fig. 3-2 に示した熱サイクルを负荷した各最高加熱温度における試験片の走査型電子顕微鏡組織の一例をFig. 3-8 に示す。この試験片の顕微鏡組織を観察し、この組織と凝固線近傍熱影響部の走査型電子顕微鏡組織を比較し、析出物の状態より凝固線近傍熱影響部の温度を推定した。Table 3-2 に凝固線近傍の走査型電子顕微鏡と類似の組織を示す熱サイクルを负荷した高温延性試験片の組織を示し、その際の最高加熱温度を示す。このようにして得られた析出物の熔融状態から推定した凝固線近傍熱影響部の温度を各材料の

NDT_H においては破断強度もきわめて小さくなっている。

(2) 冷却途中における高温延性

最高加熱温度が冷却途中における高温延性におよぼす影響についてはすでに報告⁸⁾されており、最高加熱温度が高くなるにしたがって延性が低下する傾向が認められている。したがって各材料の電子ビーム溶接における割れ感受性と冷却途中における高温延性との相関性について検討するためには、最高加熱温度について十分考慮しなければならない。

(a) 適正最高加熱温度

前章において述べたように、電子ビーム溶接部の割れは凝固線近傍において発生し

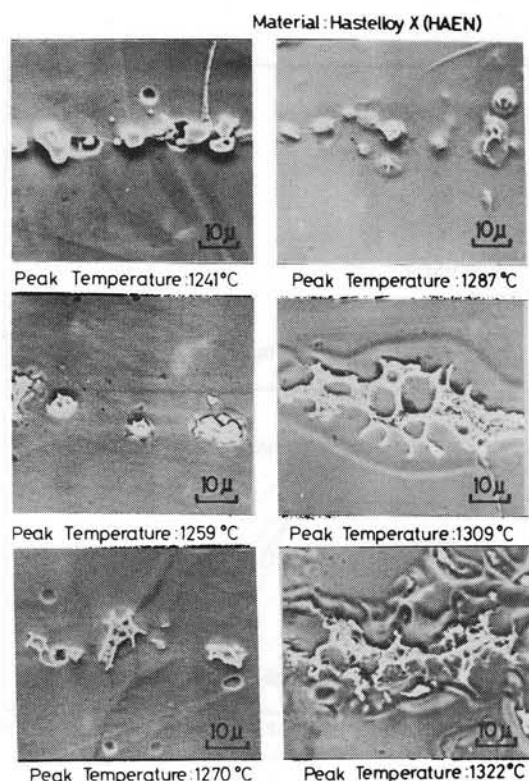
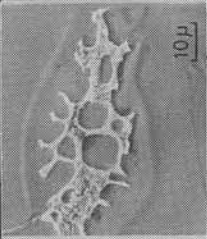
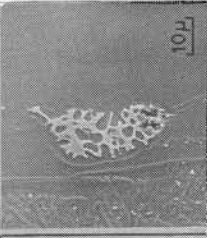
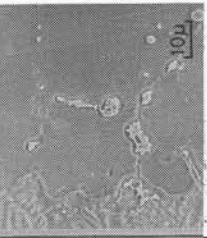
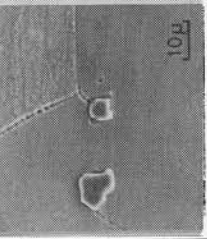
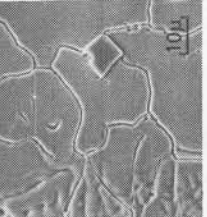
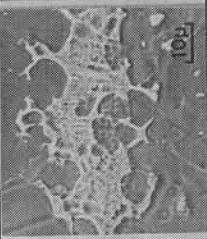
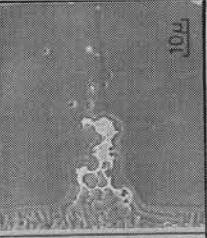
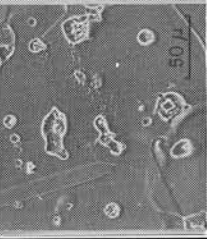
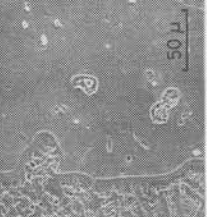
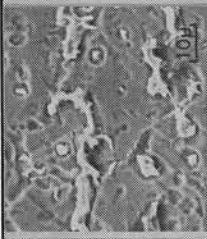
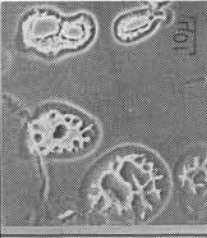
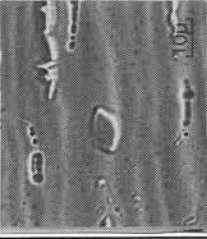


Fig.3-8 Effect of Peak Temperature on Scanning Electron Micrograph of Hot Ductility Test Specimen

Table 3-2 Comparison of Scanning Electron Micrograph between Hot Ductility Test Specimen and Heat Affected Zone Adjacent to Fusion Line

Material	Scanning Electron Micrograph of Hot Ductility Test Specimen	Scanning Electron Micrograph of Heat Affected Zone in Electron Beam Welding	Material	Scanning Electron Micrograph of Heat Affected Zone in Electron Beam Welding	Scanning Electron Micrograph of Hot Ductility Test Specimen	Scanning Electron Micrograph of Heat Affected Zone in Electron Beam Welding
HAEN	 Peak Temperature : 1309 °C	 HVERN	Iny800V	 Peak Temperature : 1350 °C	 Peak Temperature : 1350 °C	 Peak Temperature : 1350 °C
HAEM	 Peak Temperature : 1280 °C	 In625AE	Iny807A	 Peak Temperature : 1320 °C	 Peak Temperature : 1320 °C	 Peak Temperature : 1320 °C
HVEN	 Peak Temperature : 1305 °C	 In617V	SUS316	 Peak Temperature : 1370 °C	 Peak Temperature : 1370 °C	 Peak Temperature : 1370 °C

適正最高加熱温度として冷却途上における高温延性試験を行なった。

なお、Table 3-2 に示す最高加熱温度域における走査型電子顕微鏡組織から判るように、HAEN、HAEM、HVEN、HVERN、Inconel 617 および Incoloy 807 については、いずれも析出物が完全溶融後凝固し、Incoloy 807 を除いた4種類の材料はスケルトン状（Skelton-like）の様相を呈している。HVERN については析出物が存在したと思われる範囲にくぼみが生じている。これは微細な析出物が溶融凝固後、研磨および腐食などにより脱落したものと考えられる。Inconel 625 の場合は析出物が部分的にわずかに溶融したことを示すにすぎない。Incoloy 800、SUS 316の析出物については変化は認められない。

(b) 高温延性

冷却途上における材料の高温延性試験結果をFig. 3-9 およびFig. 3-10 に示す。加熱途上における高温延性試験の場合と同様に、ある温度から急激に絞りが増加している。

なお、加熱途上における高温延性試験結果に比して全体的に絞りが増加している。冷却途上において絞りが零から有限となる温度 NDT_C （Nil Ductility Temperature on Cooling）を高温延性の指標として各材料を評価することができる。 NDT_C が高いほど材料の高温延性が優れていると考え、ニッケル基合金については、HAEM が最も優れ、Inconel 625、HVERN、HAEN、HVEN、Inconel 617 の順になる。

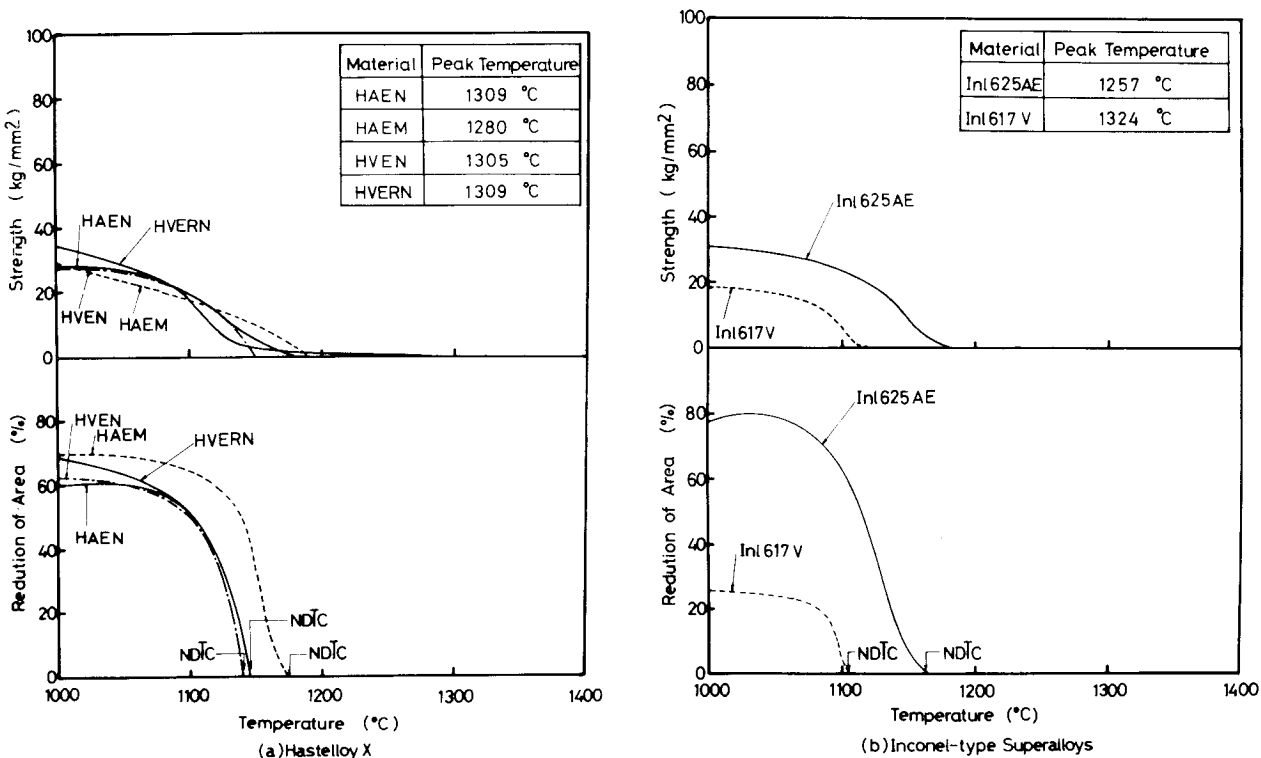


Fig.3-9 Effect of Temperature on Hot Ductility Characteristics on Cooling (Ni-base Superalloys)

鉄基合金についてはSUS 316 が最も優れ、Incoloy 800、Incoloy 807 の順になる。

なお、破断強度については、温度が上昇するにしたがって漸次減少し、 NDT_C の温度ではきわめて小さくなる。

3. 4. 3 溶接割れ感受性と材料の高温延性試験結果より得られた指標との相関性

前章において述べたように、各材料の斜面溶接法によるビード置き試験において、溶接金属部および熱影響部にマイクロ割れが発生した。この割れは溶接入熱と関係があり、各材料において溶接入熱をある値以下に抑えれば、割れ発生を防止することが可能であり、この限界をマイクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} とすると各材料の割れ感受性はこの q_{cr} により評価できる。

いま、高温延性試験結果および融点測定結果から求められる材料の割れ感受性を示すと考えられる指標は次のようであり、Fig. 3-11 に示すような性質がある。

NDT_H ：加熱途上において高温延性が零になる温度であり、大なるほど割れ感受性が小である。

NDT_C ：冷却途上において高温延性が零から有限になる温度であり、大なるほど割れ感受性が小である。

$\Delta T_{H,C}$ ： NDT_H と NDT_C の間の温度範囲（ $= NDT_H - NDT_C$ ）であり、大なるほど割れ感受性が大である。

BTR^* ：凝固開始温度 T_L （溶融終了温度）と NDT_C の間の温度範囲（ $= T_L - NDT_C$ ）であり、

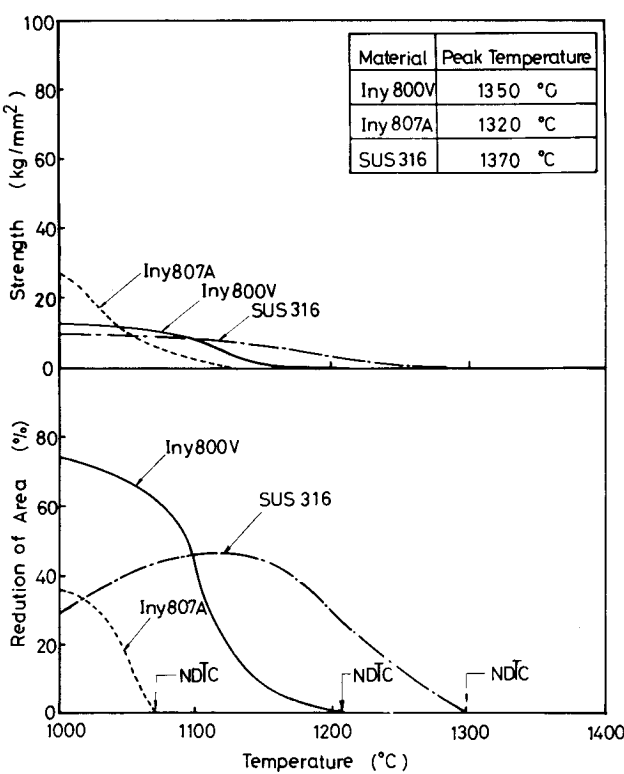


Fig.3-10 Effect of Temperature on Hot Ductility Characteristics on Cooling (Fe-base Superalloys)

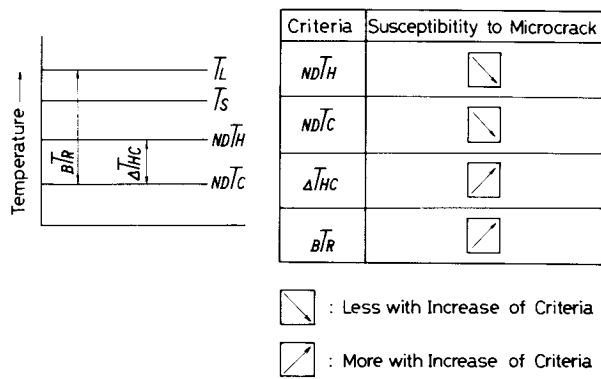


Fig.3-11 General Effect of Criteria Obtained in Hot Ductility Test on Susceptibility to Microcrack

* Borlandによる“Generalized Theory”⁹⁾において、凝固割れは残留融液がヒーリング(Healing)を起しえなくなる温度以下において発生するものであると説明されている。この温度は明確ではないが、近似的には T_L と考えてさしつかえない。したがって、ぜい性温度範囲の上限値を T_L とした。

大なるほど割れ感受性が大である。

上述した割れ感受性に関する指標とマイクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} の関係を Table 3-3 に示す。

Fig. 3-12 および Fig. 3-13 に示すように $\Delta T_{H,C}$ および BTR と q_{cr} の間にはとくに良い相関性が認められる。すなわち、各材料について $\Delta T_{H,C}$ および BTR が大になるほど q_{cr} が小になり材料の割れ感受性が大となる傾向を示している。

Table 3-3 Criteria Obtained in Hot Ductility Test

Material	Mark	$ND\bar{T}_H$ (°C)	$ND\bar{T}_C$ (°C)	$\Delta\bar{T}_{H,C}$ $(ND\bar{T}_H - ND\bar{T}_C)$ (°C)	$B\bar{T}_R$ $(\bar{T}_L - ND\bar{T}_C)$ (°C)	q_{cr} (joule/cm)
Hastelloy X	HAEN	1244	1142	102	195	1406
	HAEM	1275	1175	100	192	2143
	HVEN	1244	1136	108	211	1286
	HVERN	1235	1143	92	191	<750
Inconel 625	Inl625AE	1225	1163	62	158	>5080
Inconel 617	Inl617 V	1245	1110	135	265	<750
Incoloy 800	Iny800V	1330	1210	120	207	1286
Incoloy 807	Iny807A	1300	1070	230	324	1200
SUS 316	S 316	1360	1300	60	117	>5080

Notes; $ND\bar{T}_H$: Nit Ductility Temperature Heating
 $ND\bar{T}_C$: Nit Ductility Temperature Cooling
 $\bar{T}_L$: Liquidus Temperature
 q_{cr} : Critical Heat input to Avoid Microcrack

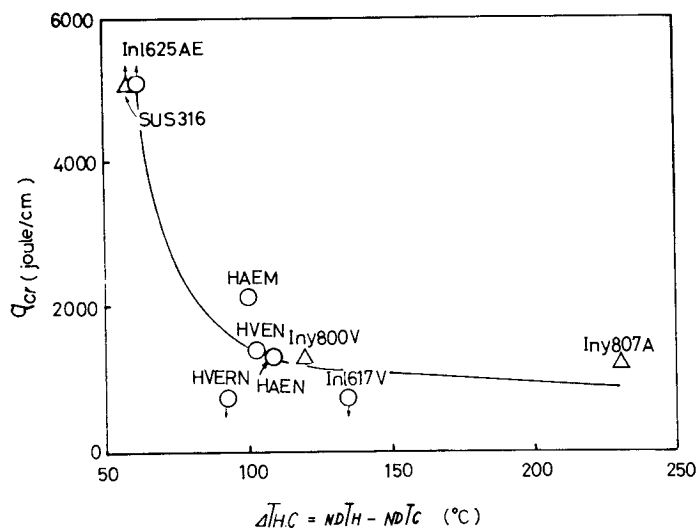


Fig.3-12 Correlation between $\Delta T_{H,C}$ and q_{cr}

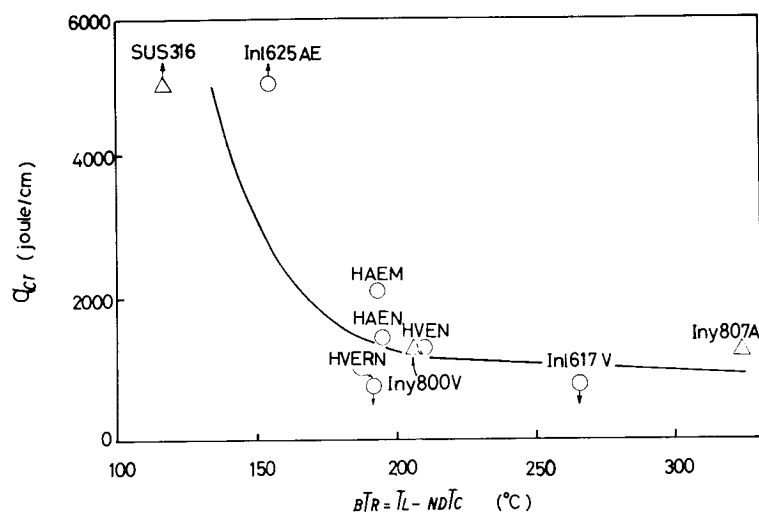


Fig.3-13 Correlation between $B\bar{T}_R$ and q_{cr}

3.4.4 材料のTrans-Varestraint およびVarestraint 試験結果に関する検討

(1) Trans-Varestraint 試験

実体顕微鏡により割れを観察した結果、割れはFig. 3-14に示すように溶接金属部に発生する凝固割れおよび母材熱影響部に発生する液化割れに大別できる。割れの形態の一例をFig. 3-15に示す。凝固割れについては、割れはある特定のリップル間にあらわれ、最大割れはビードのほぼ中央に認められた。いっぽう、液化割れについても同一リップルより母材に向かって発生している。

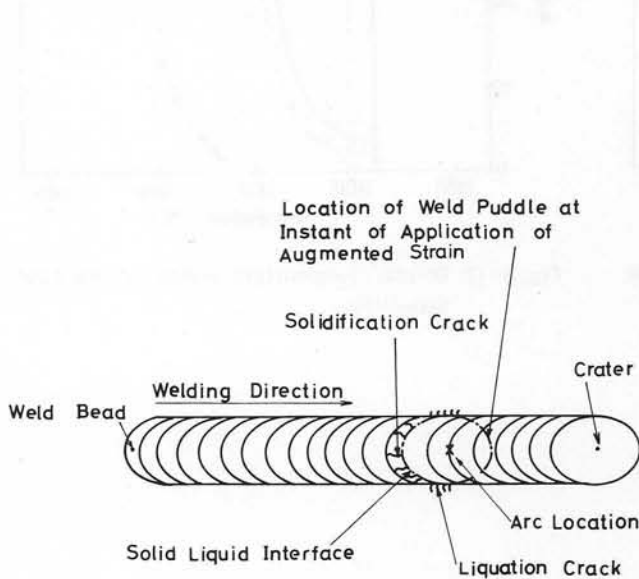
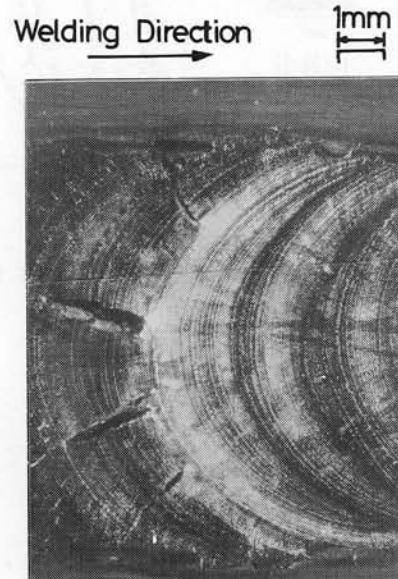


Fig.3-14 Schematic Representation of Cracks Observed in Trans-Varestraint Test



Welding Conditions:
8.5V-100A-100mm/min
Material : Inconel 617 (Inl617V)
Augmented Strain : 245%

Fig.3-15 Typical Cracks Observed in Trans-Varestraint Test of Ni-base Superalloys

高温割れは、凝固直後の材料の延性が極めて低くなる温度領域で発生する。この温度領域をぜい性温度領域 $TVTR$ (Brittle Temperature Range in Trans-Varestraint Test) と定義すると、この値の大なるほど割れ感受性が大である。

溶接ビード中央部の温度曲線と最大凝固割れの長さの関係より、温度、付加ひずみ座標で $TVTR$ を図示することができる。¹⁰⁾ Fig. 3-16 および Fig. 3-17 は各材料について、ニッケル基合金および鉄基合金に区別して示した。

図に示した斜線部が割れ発生の $TVTR$ に相当する。付加ひずみ量が5%の場合の $TVTR$ を $TVTR_{.5\%}$ とし、この $TVTR_{.5\%}^*$ により評価すると Table 3-4 に示すようになる。ニッケル基合金について

* Trans-Varestraint 試験におけるぜい性温度範囲 $TVTR$ は付加ひずみ量に依存する。したがって、ひずみ量が5%の場合のぜい性温度範囲を $TVTR_{.5\%}$ として各耐熱合金の割れ感受性を評価した。

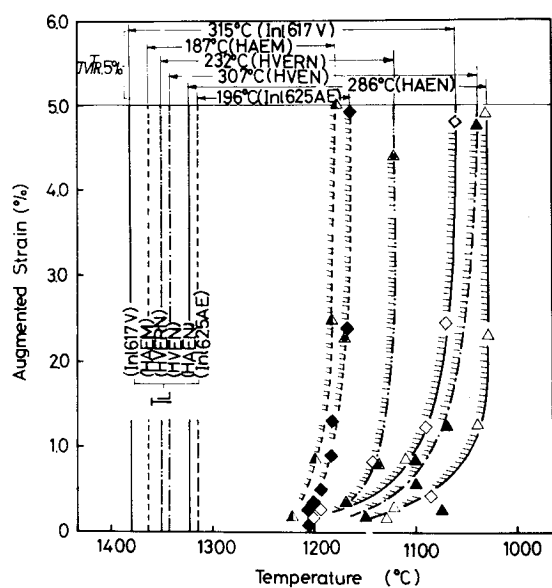


Fig.3-16 Brittle Temperature Range of Ni base Superalloys

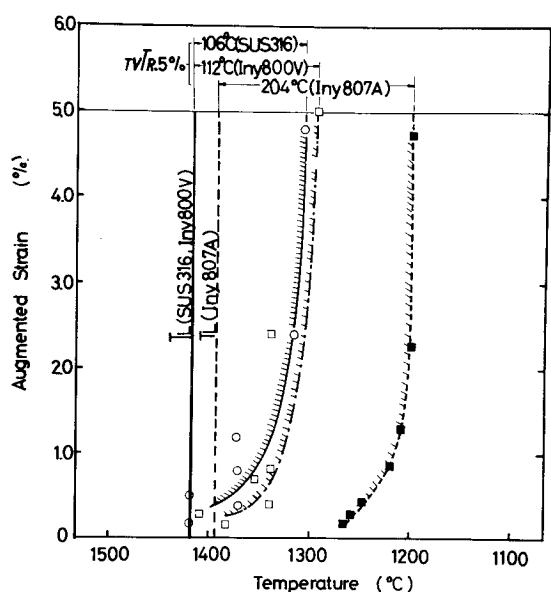


Fig.3-17 Brittle Temperature Range of Fe-base Superalloys

Table 3-4 Criteria Obtained in Trans-Varestraint and Varestraint Test

Material	Mark	TVR5% in Trans-Varestraint Test (°C)	VCM.1% (mm) in Varestraint Test (mm)	q _{Cr} (joule/cm)	Hot Ductility Test	
					ΔTHC(°C)	BTR(°C)
Hastelloy X	HAEN	286	0.26	1406	102	195
	HAEM	187	0.42	2143	100	192
	HVEN	307	0.19	1286	108	211
	HVERN	232	0.46	< 750	92	191
Inconel 625	Inl 625AE	196	0.16	> 5080	62	158
Inconel 617	Inl 617 V	315	0.55	< 750	135	265
Incoloy 800	Iny 800V	112	0.06	1286	120	207
Incoloy 807	Iny 807A	204	0.17	1200	230	324
SUS 316	S 316	106	0.04	> 5080	60	114

Notes; TVR5%:Cracking Temperature Range at Augmented Strain of 5% in Trans-Varestraint Test

VCM.1%(mm):Max. Length of Liquation Crack for 1% Augmented Strain in Varestraint Test

q_{Cr} :Critical Heat Input to Avoid Microcrack

ΔTHC :NDTH-NDTC

BTR :TL-NDTC

は、Inconel 617 が最も割れ感受性が大きく、HVEN, HAEN, HVERN, Inconel 625, HAEM の順に小さくなる。鉄基合金については Incoloy 807, Incoloy 800, SUS 316 の順に小さくなる。

(2) Varestraint 試験

Varestraint 試験は溶接ビードに対し、長手方向に曲げる試験であり、熱影響部に発生する液化割れの評価に有効であると考えられる。

実体顕微鏡により割れを観察した結果、Trans-Varestraint 試験の場合と同様に、溶接金属部に凝固割れ、熱影響部に液化割れが認められ、凝固割れは特定のリップル間に、液化割れについては同一リップルより母材に向かって発生している。Fig. 3-18 に割れの形態の一例を示す。

Fig. 3-19 は各材料について付加ひずみ量と最大液化割れ長さの関係を示したものである。割れを誘発する最小付加ひずみは SUS 316 およびその他の材料に対して、それぞれ約 0.8 % および約 0.2 % である。Inconel 617, HVERN および SUS 316 の最大割れ長さは付加ひずみが約 1 % までは急激に増大するが、その後は一定値に近づく。いっぽう、Incoloy 807, Inconel 625, HVEN および Incoloy 800 については、付加ひずみが 2.5 % 以上になってもなお増大する傾向を示している。材料の割れ感受性の評価法として、付加ひずみ量 1.0 % のときの最大割れ長さ $vC_{m.1\%}$ により評価すると、Table 3-4 に示すようになる。

最大割れ長さの大なるものほど割れ感受性が大である。ニッケル基合金については、Inconel 617 が最も割れ感受性が大きく、HVERN, HAEM, HAEN, HVEN, Inconel 625 の順に小

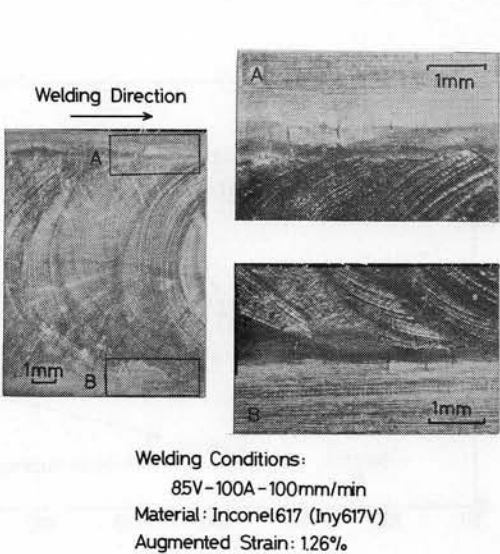


Fig.3-18 Typical Cracks Observed in Varestraint Test

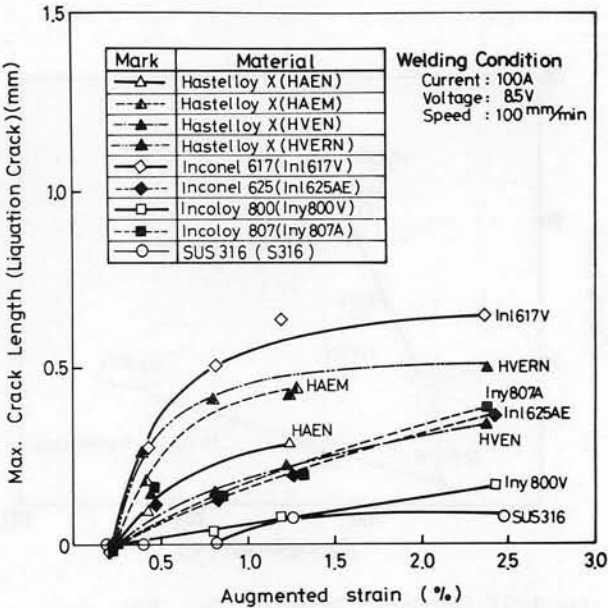


Fig.3-19 Relation between Augmented Strain and Max. Liquation Crack Length in Varestraint Test

さくなる。鉄基合金については、Incoloy 807、Incoloy 800、SUS 316 の順に小さくなる。

3.4.5 Trans-Varestraint および Varestraint 試験結果より得られた指標と高温延性試験結果より得られた指標との相関性

Trans-Varestraint および Varestraint 試験結果より得られた割れ感受性に関する各指標、すなわち、 $TVTR_{.5\%}$ および $VC_{m.1\%}$ と前項の高温延性結果から求めた $\Delta T_{H,C}$ および BTR との関係を示す。これらの各指標の間にはいずれも相関性が認められる。

Hastelloy X については Trans-Varestraint および Varestraint 試験において得られた指標は製造法によって少し異なっている。これらの図より、材料の $\Delta T_{H,C}$ および BTR が同一であっても

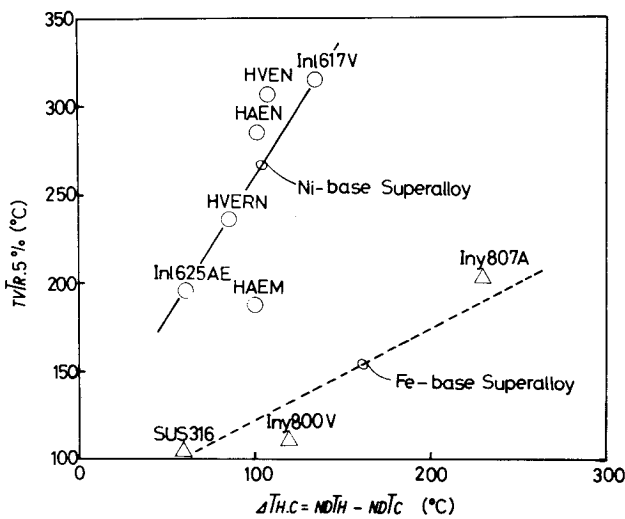


Fig.3-20 Correlation between $\Delta T_{H,C}$ and $TVTR_{.5\%}$

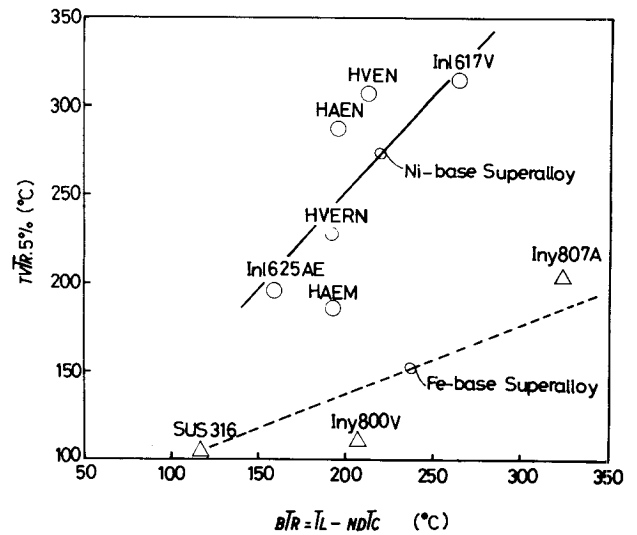


Fig.3-21 Correlation between BTR and $TVTR_{.5\%}$

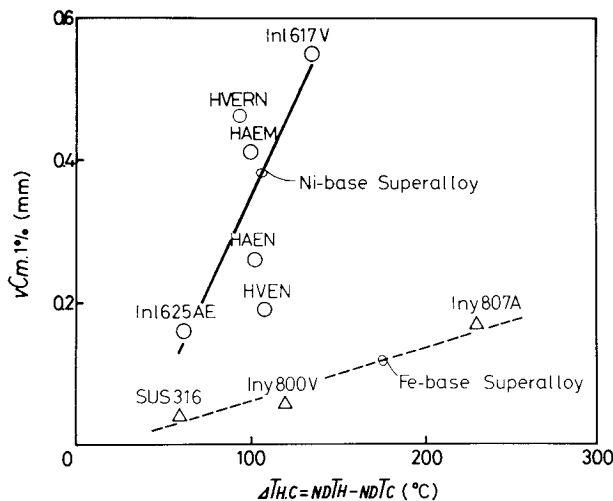


Fig.3-22 Correlation between $\Delta T_{H,C}$ and $VC_{m.1\%}$

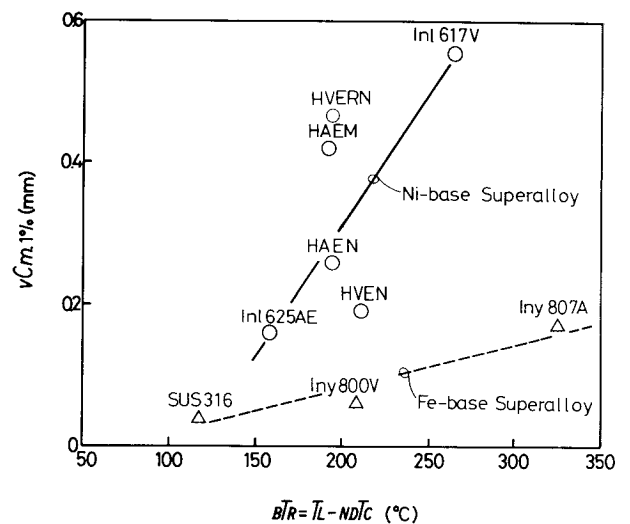


Fig.3-23 Correlation between BTR and $VC_{m.1\%}$

$TVTR_{.5\%}$ および $VC_{m.1\%}$ で評価すると、Ni 基合金は Fe 基に比較してマイクロ割れ感受性が大であることが判る。

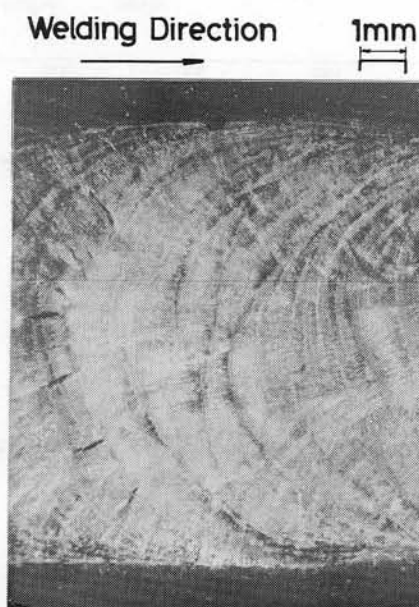
Trans-Varestraint 試験における割れの形態を観察すると、ニッケル基合金の場合には、ひずみ付加の瞬間に Fig. 3-15 に示したような大きな割れが発生し、この割れによりひずみ付加部の応力の大部分が解放され、特定のリップル間に発生する割れがきわめて少ない。いっぽう、鉄基合金については Fig. 3-24 に示すようにリップル間に小さい割れが散在している。このようにニッケル基合金と鉄基合金の Trans-Varestraint 試験における割れの形態が異なるが、 $TVTR_{.5\%}$ を求めるためには最大割れ長さによって評価しなければならない。このために材料の $\Delta T_{H,C}$ および BT_R が同一であってもニッケル基合金の最大割れ長さが鉄基合金に比して大きく現れるために、ニッケル基合金の $TVTR_{.5\%}$ が鉄基合金のそれに比して大なる値を示すものと考えられる。なお Vares-tstraint 試験も Trans-Varestraint 試験と同様の傾向を示した。

3. 4. 6 溶接割れ感受性と材料の Trans-Varestraint および Varestraint 試験結果より得られた指標との相関性

前項において述べたように割れ感受性評価の指標として Trans-Varestraint 試験結果より得られる $TVTR_{.5\%}$ および Varestraint 試験結果より得られる $VC_{m.1\%}$ が考えられる。

上述した割れ感受性に関する指標とマイクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} の関係を Table 3-4 に示す。Fig. 3-25 および Fig. 3-26 はこれらの各指標と q_{cr} の関係を示したものである。ニッケル基および鉄基合金に区分して示したが、いずれの指標についても q_{cr} との間に相関性が認められる。

Fig. 3-25 に示した Trans-Varestraint 試験における $TVTR_{.5\%}$ と q_{cr} の関係図において、HVERN が曲線よりはずれているが、Fig. 3-26 に示した液化割れ最大長さと q_{cr} の関係図上にある。これは電子ビーム溶接における HVERN の割れの大部分が液化割れであったためであろう。



Welding Conditions:

8.5V-100A-100 mm/min

Material : Incoloy 800 (Iny800V)

Augmented Strain : 240 %

Fig.3-24 Typical Cracks Observed in Trans-Varestraint Test of Fe-base Superalloys

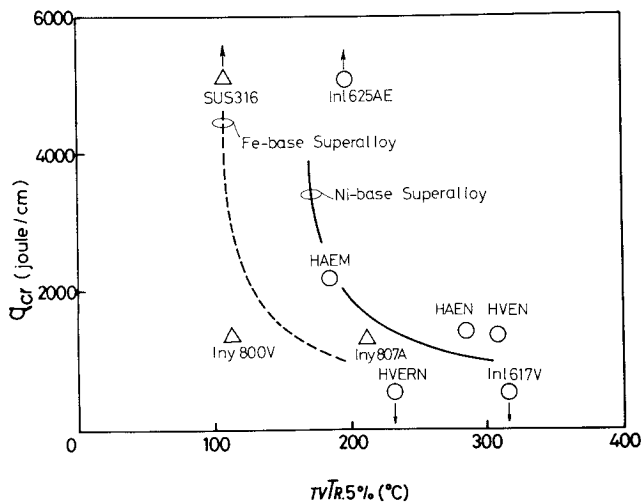


Fig.3-25 Correlation between $TVTR.5\%$ and q_{cr}

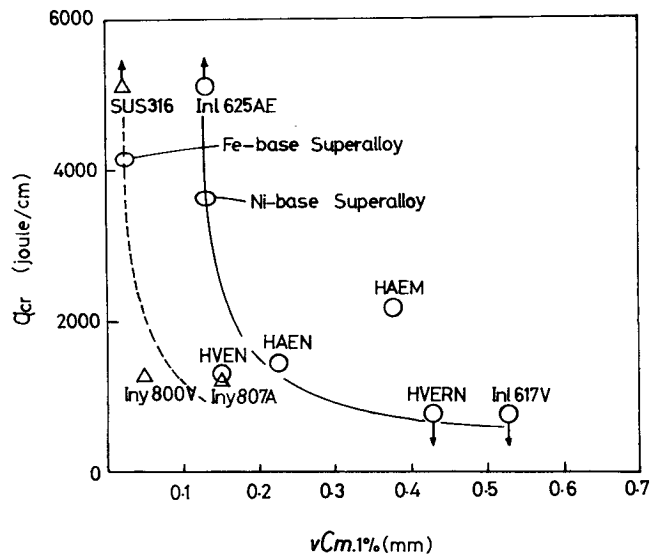


Fig.3-26 Correlation between $vC_{m.1\%}$ and q_{cr}

3.5 要 約

原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接による溶接割れ感受性と材料の高温延性および Trans - Varestraint 試験結果との相関性について検討した。得られた結果を要約すると次の通りである。

- 1) 高温延性試験結果から求められる材料のマイクロ割れ感受性を評価する指標として、 NDT_H 、 NDT_C 、 $\Delta T_{H,C}$ ($\equiv NDT_H - NDT_C$) および BTR ($\equiv T_L - NDT_C$) が考えられ、 NDT_H 、 NDT_C が小なるほどおよび $\Delta T_{H,C}$ 、 BTR が大なるほど割れ感受性が大であると考えられる。電子ビーム溶接による割れ感受性の指標であるマイクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} と $\Delta T_{H,C}$ および BTR の間にはとくによい相関性が認められる。
- 2) 高温延性試験において得られた $\Delta T_{H,C}$ および BTR と Trans - Varestraint 試験における $TVTR.5\%$ および Varestraint 試験における $vC_{m.1\%}$ の間にはきわめてよい相関性が認められる。
- 3) Trans - Varestraint 試験において得られた $TVTR.5\%$ および Varestraint 試験において得られた $vC_{m.1\%}$ はそれぞれマイクロ割れ感受性評価の有効な指標である。また、これらの指標と q_{cr} の間にはよい相関性が認められる。

第 4 章 溶接割れに関する冶金学的検討

4.1 概 説

第 2 章において電子ビーム溶接部に発生する欠陥はポロシティおよびマイクロ割れ（高温割れ）であることを明らかにした。

耐熱合金のマイクロ割れに関する報告^{11)~13)}は多いが、加熱溶融現象が他の溶接方法と著しく異なる電子ビーム溶接部のマイクロ割れについて、冶金学的に検討したものは少ない。¹⁴⁾ 本章においては、割れ発生機構を冶金学的に究明するために、電子ビーム溶接部の凝固線近傍熱影響部の走査型電子顕微鏡による組織観察および析出物の成分分析を行ない、このようなマイクロ割れが凝固線近傍熱影響部の析出物の溶融現象ときわめて密接な関係があることを明確にした。

4.2 供 試 材 料

Table 2-2 に示した Hastelloy 系, Inconel 系および Incoloy 系の耐熱合金および比較のためにオーステナイト系ステンレス鋼を使用した。なお, Hastelloy X の各材料については、以下の本文においては HAEN, HAEM, HVEN および HVERN にて示す。

4.3 実 験 方 法

上述の供試材料の電子ビーム溶接部を電解研磨し、10% しょう酸水溶液による電解腐食（腐食条件は一定）後、走査型電子顕微鏡による組織観察を行ない、さらに凝固線近傍熱影響部の析出物について EPMA（X 線マイクロアナライザ）による成分分析を実施した。この場合のビーム電流および加速電圧はそれぞれ 0.01 μA および 20 kV とした。なお、割れ部および母材についても成分分析を行なった。

また、凝固線近傍熱影響部の析出物の同定を行なうために、各材料の凝固線近傍熱影響部における析出物の状態を熱サイクル再現装置にて再現させた。最高加熱温度を T_S より $ND T_H$ 近傍迄の温度範囲として、Fig. 3-2 に示した熱サイクルを負荷した試験片の走査型電子顕微鏡組織を観察して、この組織と溶接熱影響部の走査型電子顕微鏡組織と同一組織であることを確認した。この試験片より、電解抽出にて得られた残渣の X 線回折による同定を行なった。電解抽出を行なう際の電流密度および電解液はそれぞれ 20 mA/ cm^2 およびメタノール + 10% HCl (Vol%) + 1% 酒石酸 (wt%) であり、X 線回折の際のターゲットは Cu とした。電子ビーム溶接部から一定量以上の残渣が抽出できないためにこのような方法を採用した。

4. 4 実験結果および考察

4. 4. 1 溶接部の走査型電子顕微鏡による組織観察

溶接部の走査型電子顕微鏡による組織観察結果を Fig. 4-1 ~ Fig. 4-9 に示す。Fig. 4-1 ~

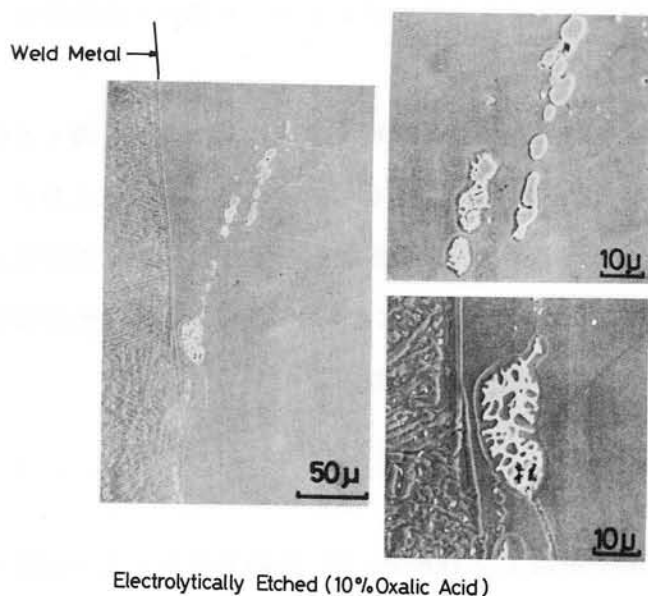


Fig.4-1 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of Hastelloy X (HAEN) Electron Beam Welds

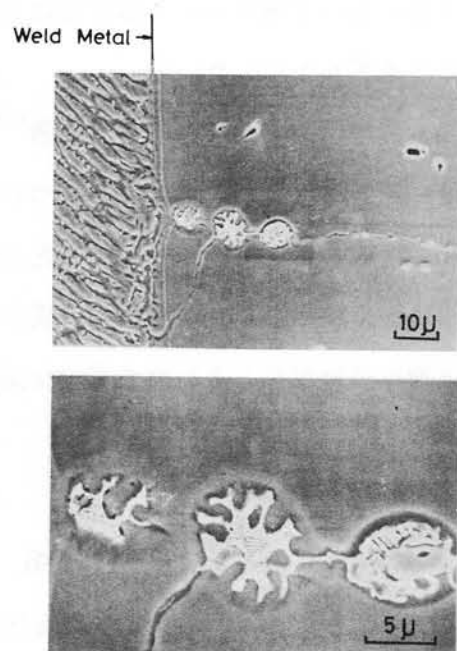


Fig.4-2 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of Hastelloy X (HAEM) Electron Beam Welds

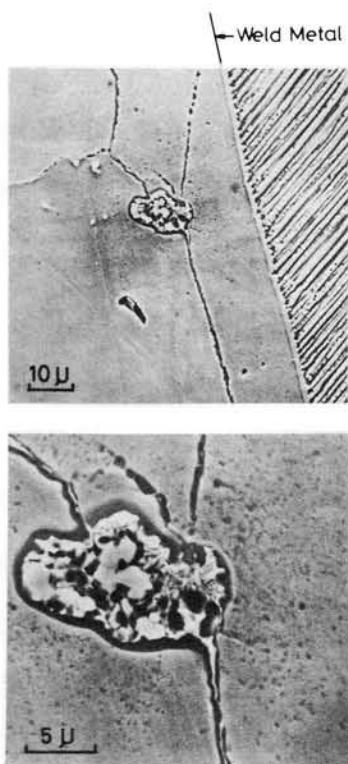


Fig.4-3 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of Hastelloy X (HVEN) Electron Beam Welds

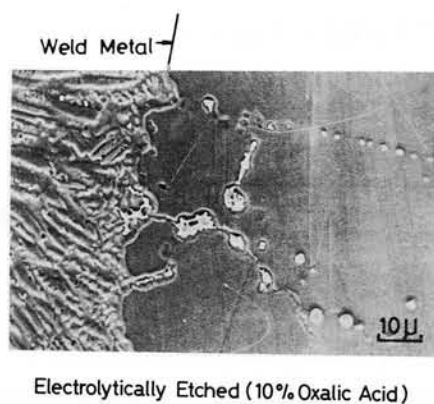
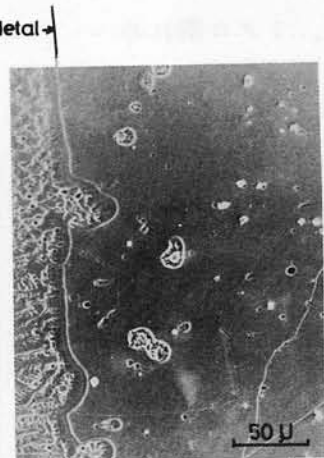
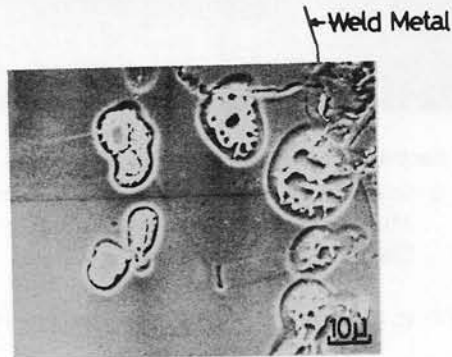
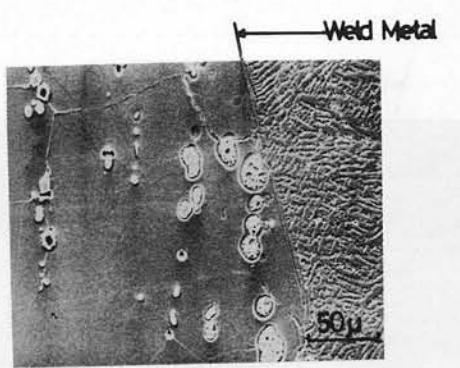


Fig.4-4 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of Hastelloy X (HVERN) Electron Beam Welds

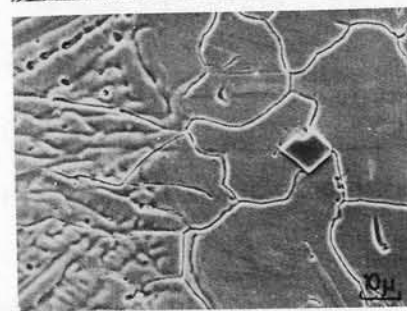
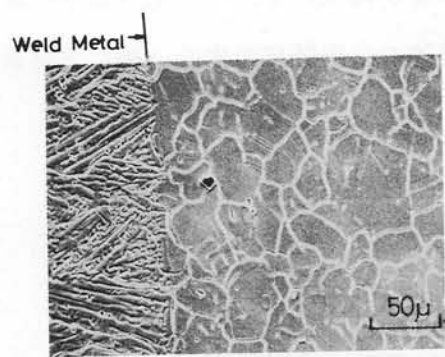


Electrolytically Etched (10% Oxalic Acid)

Fig.4-6 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of Incoloy 807 Electron Beam Welds

Electrolytically Etched (10% Oxalic Acid)

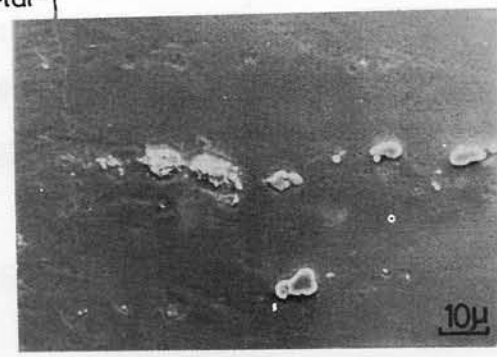
Fig.4-5 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of Inconel 617 Electron Beam Welds



Electrolytically Etched (10% Oxalic Acid)

Fig.4-7 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of Incoloy 800 Electron Beam Welds

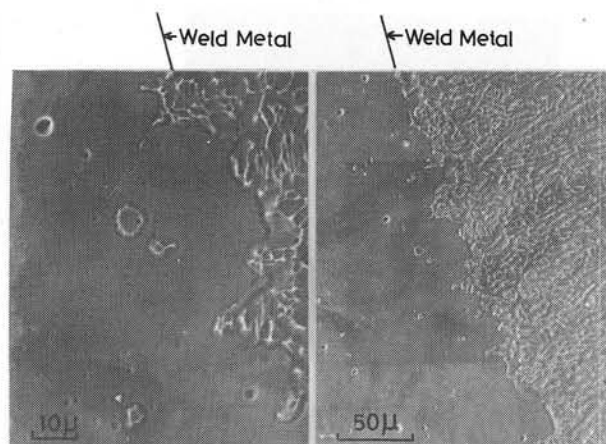
Weld Metal



Electrolytically Etched (10% Oxalic Acid)

Fig.4-8 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of Inconel 625 Electron Beam Welds

Fig. 4-6 より判るように、マイクロ割れの認められた Hastelloy X, Inconel 617 および Incoloy 807 の熱影響部については境界より約 30μ 以内において析出物の溶融現象が認められ、凝固線に近づくにつれてその程度は顕著になり、部分溶融から完全溶融状態に変化している。しかし、Inconel 617 および Incoloy 807 の凝固線近傍熱影響部に認められる小型で角ばった析出物には溶融現象は認められない。Hastelloy X および Inconel 617 の溶融した析出物



Electrolytically Etched (10% Oxalic Acid)

Fig.4-9 Scanning Electron Micrograph in Heat Affected Zone of SUS316 Electron Beam Welds

には典型的なスケルトン状 (Skelton-like) 組織が認められる。また、Incoloy 800 についてはマイクロ割れが発生したけれども、Fig. 4-7 に示すように析出物は原形をとどめている。マイクロ割れの発生しなかった Inconel 625 および SUS 316 については、Fig. 4-8 および Fig. 4-9 に示すように明瞭な溶融現象が認められない。Inconel 625 には丸味を帯びた小型の析出物と比較的大型の析出物が認められ、小型の析出物は大型の析出物のごく近傍に散在している。

なお、熱影響部における析出物の状態を再現熱サイクル法により再現させ、その走査型電子顕微鏡組織を Table 3-2 に示すが、析出物の形態については、前述の熱影響部の場合と殆んど差異は認められない。

4.4.2 析出物およびマイクロ割れ部の成分分析

(1) EPMA による成分分析

(a) 母材析出物の成分分析

母材析出物の EPMA の線分析による成分分析の結果を Fig. 4-10 ~ Fig. 4-14 に示す。EPMA による成分分析結果より、母材析出物に含まれている成分を各材料ごとに示したものが Table 4-1 である。表より判るように、Hastelloy X の場合はいずれも Mo, W, C, Si, Inconel 625 の場合の丸味を帯びた小型の析出物には Mo, Nb, C, 大型の析出物には Ti, Nb, C, Inconel 617 の小型の角ばった析出物には Ti, C, N, 大型の析出物には Mo, C, が富化している。Incoloy 800 の場合は Ti, C, N, Incoloy 807 の角ばった析出物および大型の析出物のいずれにも Ti, Nb, C, SUS 316 の場合には Cr, C が増量している。

(b) 熱影響部析出物の成分分析

凝固線近傍熱影響部の析出物について、EPMA の線分析による成分分析を行なった結果を Fig.

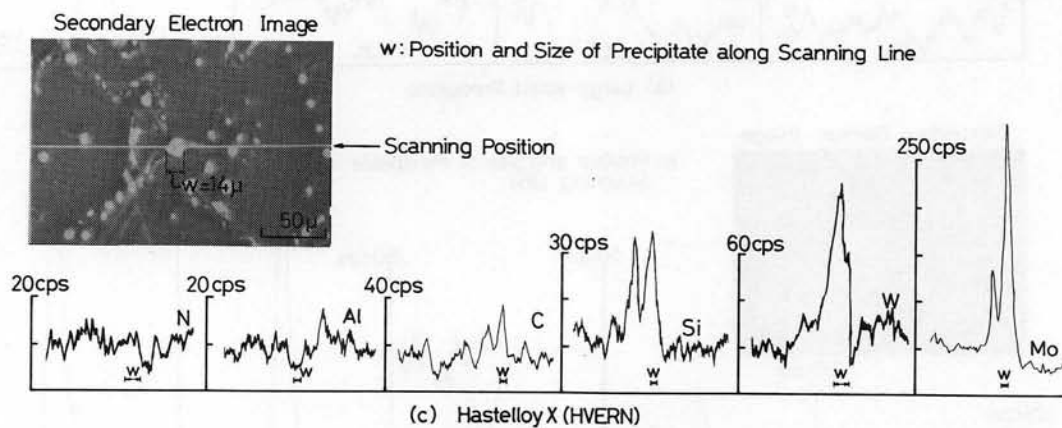
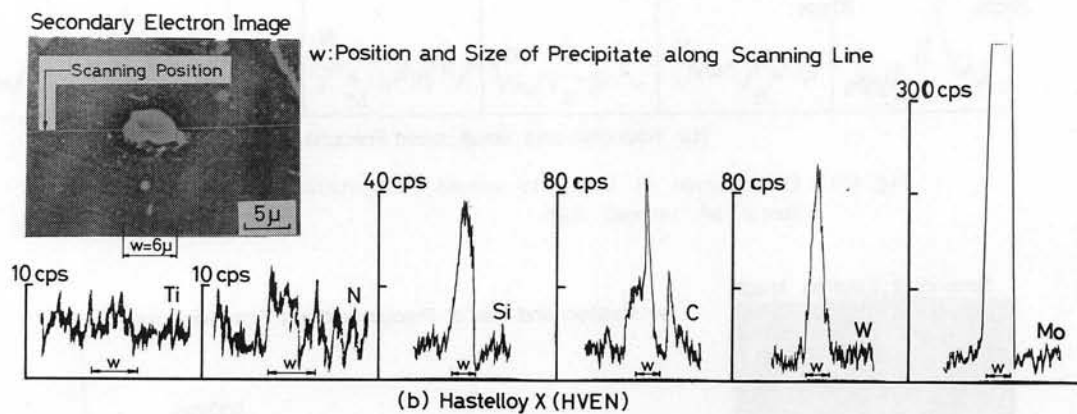
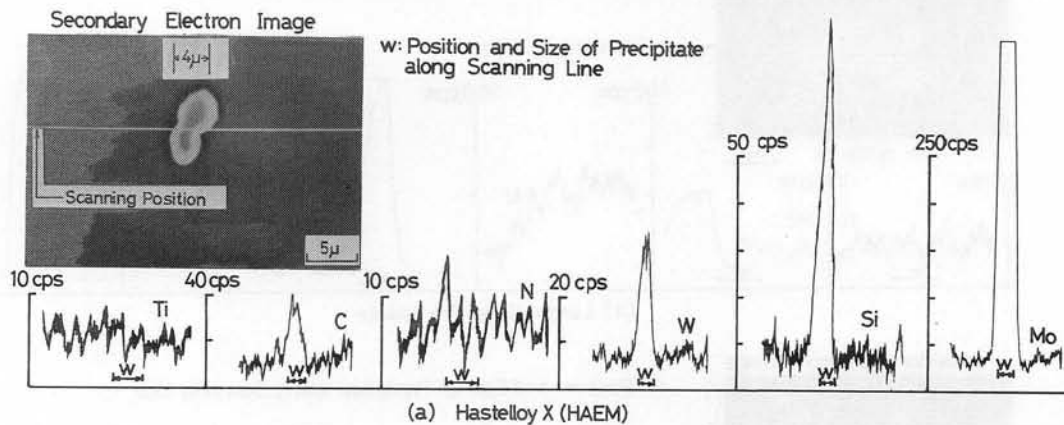


Fig.4-10 Distribution of Elements across Precipitate Observed in Base Metal of Hastelloy X

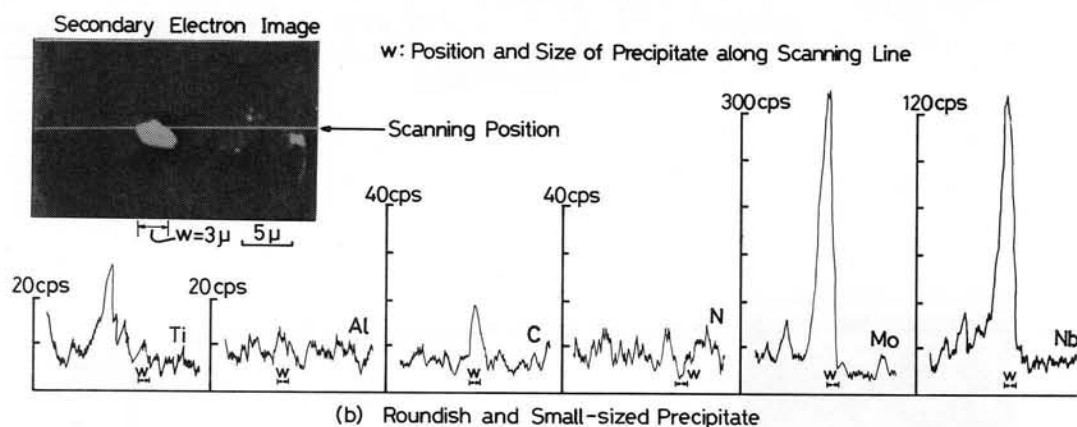
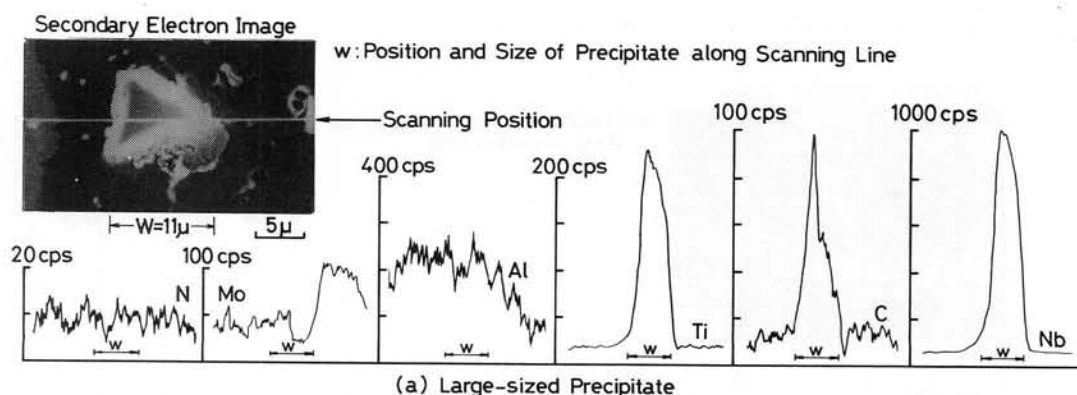


Fig.4-11 Distribution of Elements across Precipitate Observed in Base Metal of Inconel 625

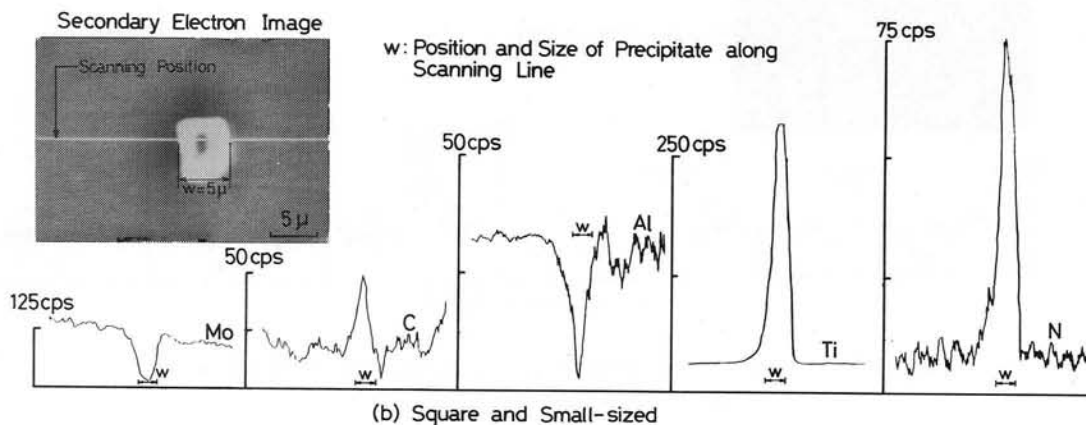
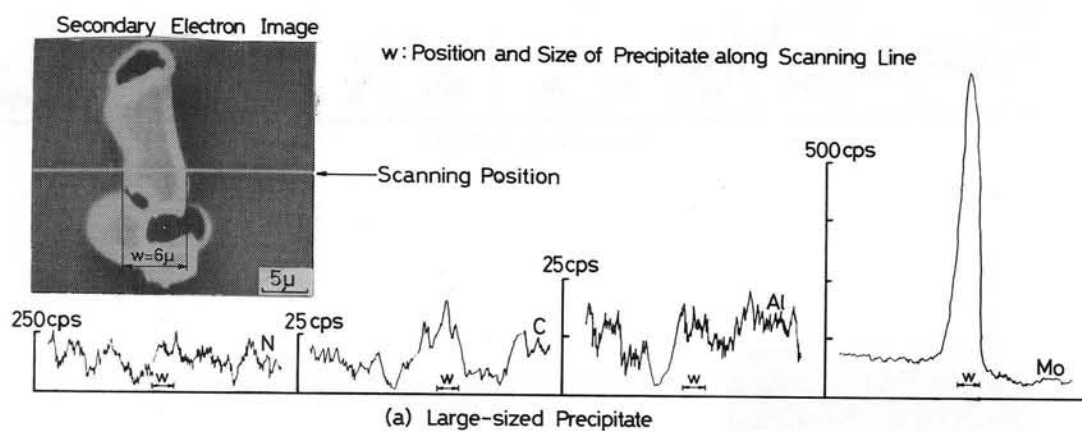


Fig.4-12 Distribution of Elements across Precipitate Observed in Base Metal of Inconel 617

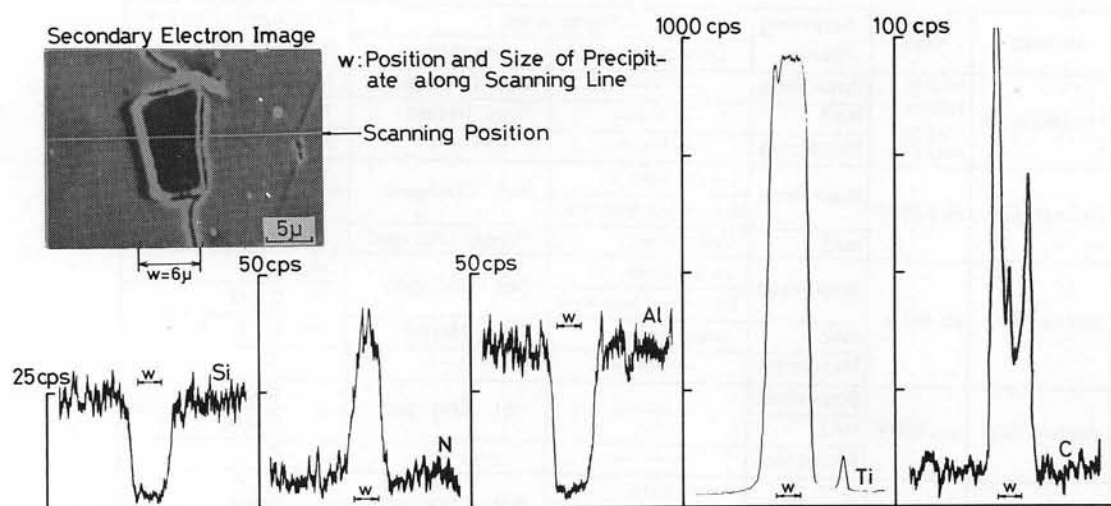


Fig.4-13 Distribution of Elements across Precipitate Observed in Base Metal of Incoloy 800

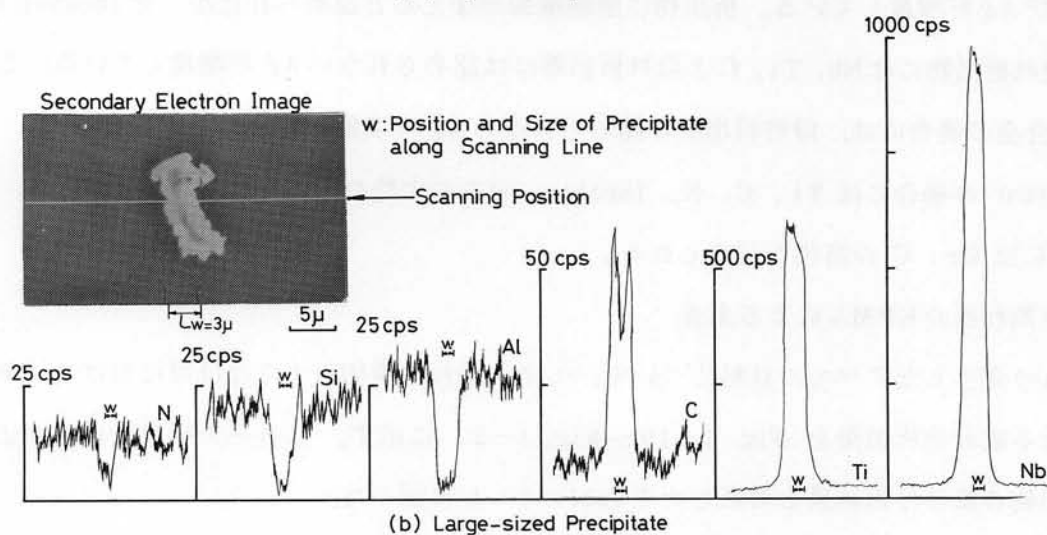
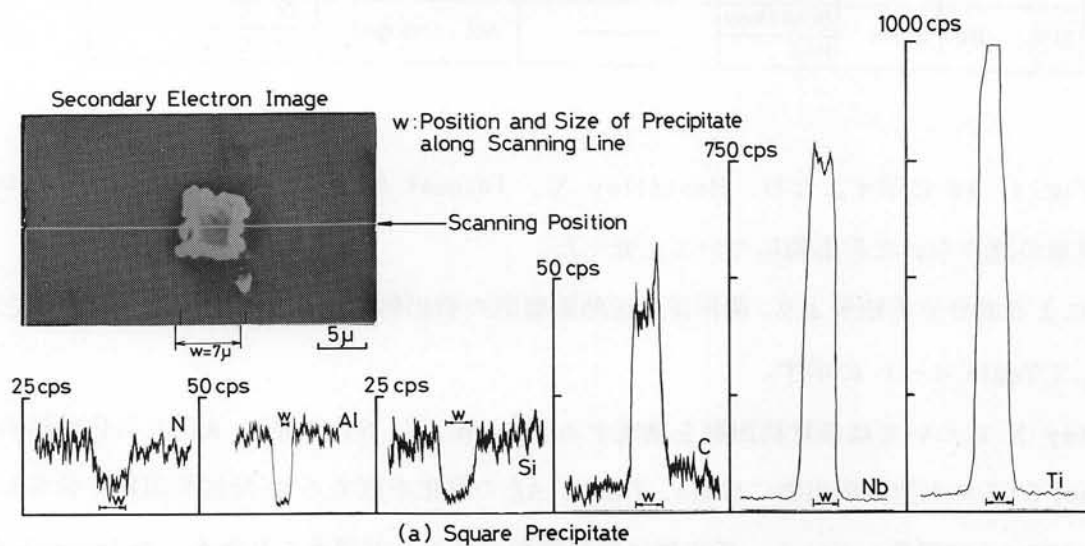


Fig.4-14 Distribution of Elements across Precipitate Observed in Base Metal of Incoloy 807

Table 4-1 Scanning Result by Means of EPMA

Material	Mark	Scanning Position	Precipitates		Constituent Elements of Precipitates
			Characteristics	Condition	
Hastelloy X	HAEN HAEM HVEN HVERN	Base Metal	————	Not Changed	Mo, W, C, Si
		HAZ	————	Fully Melted	Mo, W, C, Si, Al
		Microcrack	————	————	Mo, W, C, Si, Al
Inconel 625	Inl 625AE	Base Metal	Large-sized	Not Changed	Ti, Nb, C
			Roundish and Small-sized		Mo, Nb, C
		HAZ	Large-sized	Hardly Changed	Nb, Ti, C, Al
Inconel 617	Inl 617 V	Base Metal	Large-sized	Not Changed	Mo, C
			Square and Small-sized		Ti, C, N
		HAZ	Large-sized	Fully Melted	Mo, Ti, C, Al
Incoloy 800	Iny800V	Microcrack	————	————	C, Al
		Base Metal	————	Not Changed	Ti, C, N
		HAZ	————		Ti, C, N
Incoloy 807	Iny807A	Base Metal	Large-sized	Not Changed	Ti, C
			Square		Nb, Ti, C
		HAZ	Large-sized	Fully Melted	Nb, Ti, C
		Microcrack	————	————	Nb, Ti, C, Si, S
SUS 316	S 316	Base Metal	————	Not Changed	Cr, C
		HAZ	————		Cr, C

4-15～Fig. 4-18 に示す。なお、Hastelloy X, Inconel 617 および Incoloy 807 については溶融現象の認められた析出物について走査した。

EPMA による成分分析結果より、凝固線近傍熱影響部の析出物に含まれる成分を各材料ごとに母材と比較して Table 4-1 に示す。

Hastelloy X については母材析出物を構成する Mo, W, C, Si の他に Al の富化が認められる。Inconel 617 の大型の析出物には Mo, Ti, C, Al の富化が認められ、母材析出物に含有していない Ti および Al が増量している。析出物に溶融現象がほとんど認められなかった Inconel 625 の場合の大型の析出物には Nb, Ti, C と母材析出物には認められない Al が増量している。このように、Ni 基合金の場合には、母材析出物に認められない Al の増量を随伴している。

Incoloy 800 の場合には Ti, C, N, Incoloy 807 の大型の析出物には Nb, Ti, C, SUS 316 の場合には Cr, C の富化が認められる。

(c) ミクロ割れ部の EPMA による走査

ミクロ割れの発生したすべての材料について、ミクロ割れを横切るような位置における EPMA の線分析による成分分析結果を Fig. 4-19～Fig. 4-22 に示す。これらの結果を母材および熱影響部の析出物の成分分析結果と対応させて Table 4-1 に記した。

Hastelloy X については Mo, W, C, Si, Al の増量が認められ、これらはいずれも溶融現象の生じた析出物に含まれていたものである。Inconel 617 の場合には C と Al のみに増量が認め

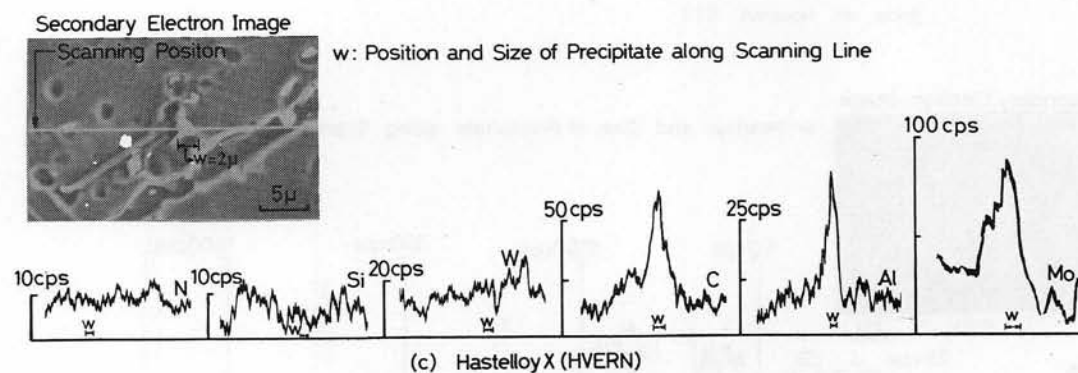
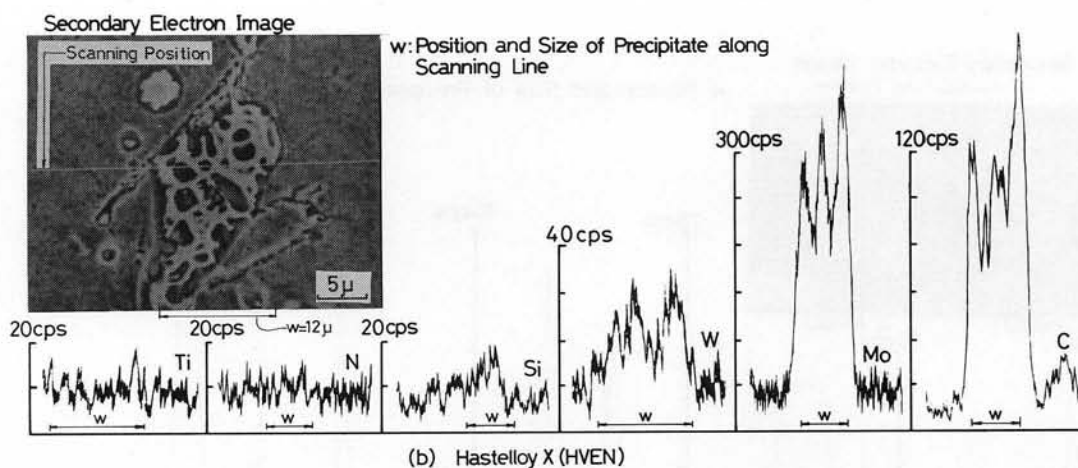
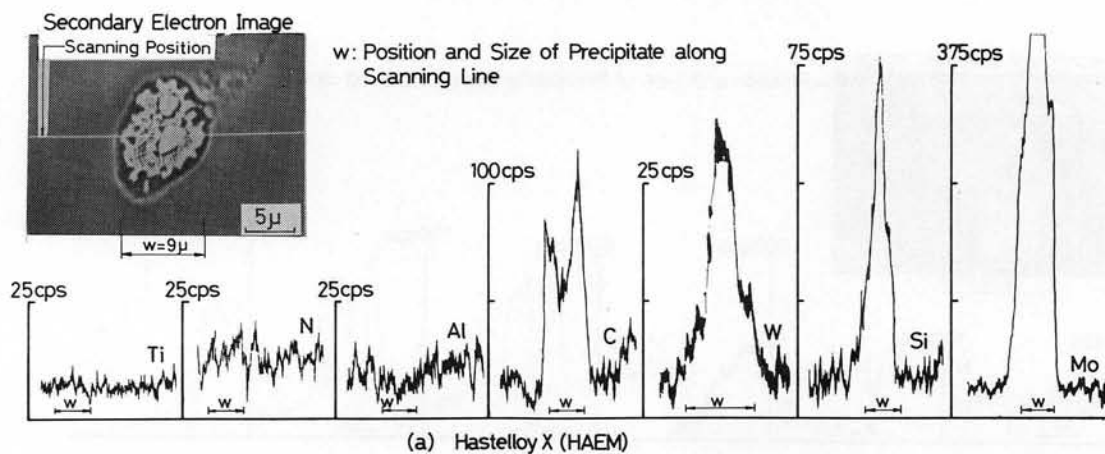


Fig.4-15 Distribution of Elements across Melted Precipitate Observed in Heat Affected Zone of Hastelloy X

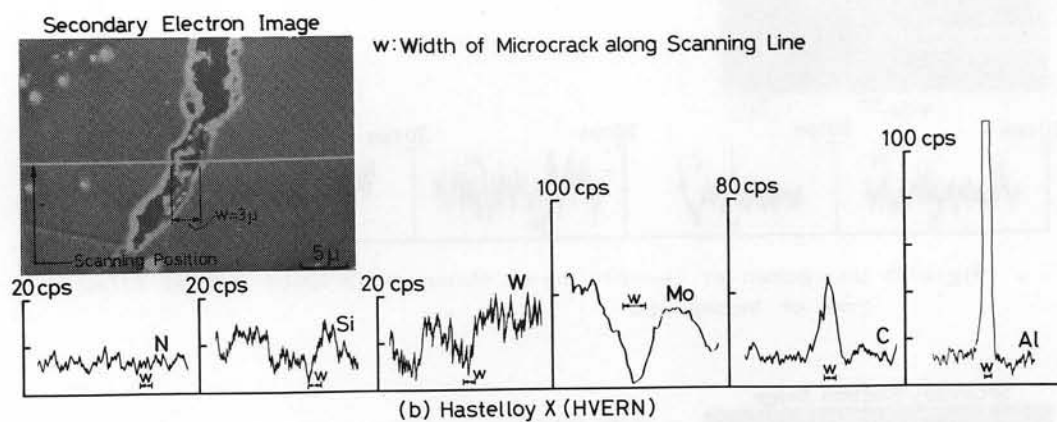
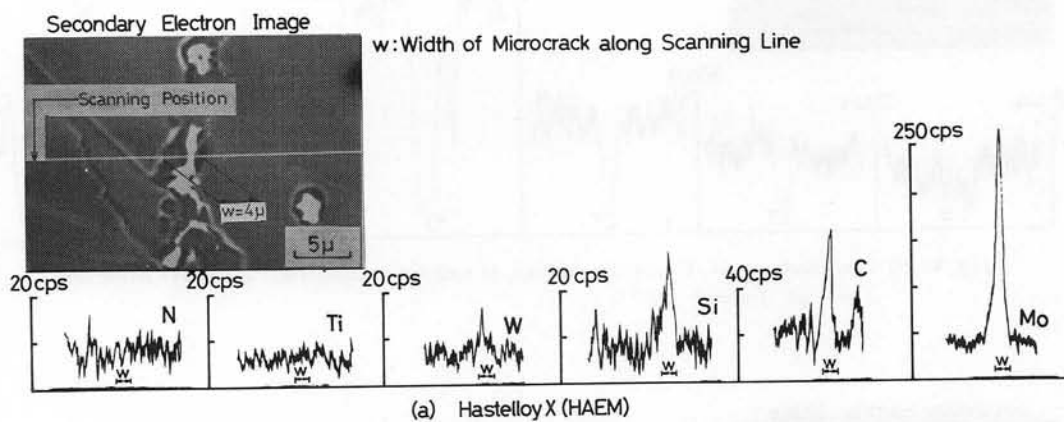


Fig.4-19 Distribution of Elements across Microcrack Observed in Heat Affected Zone of Hastelloy X

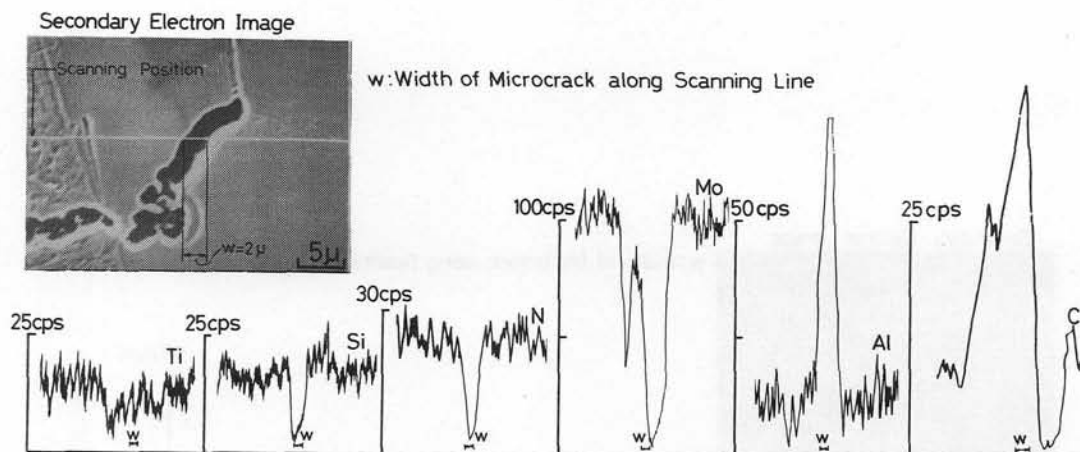


Fig.4-20 Distribution of Elements across Microcrack Observed in Heat Affected Zone of Inconel 617

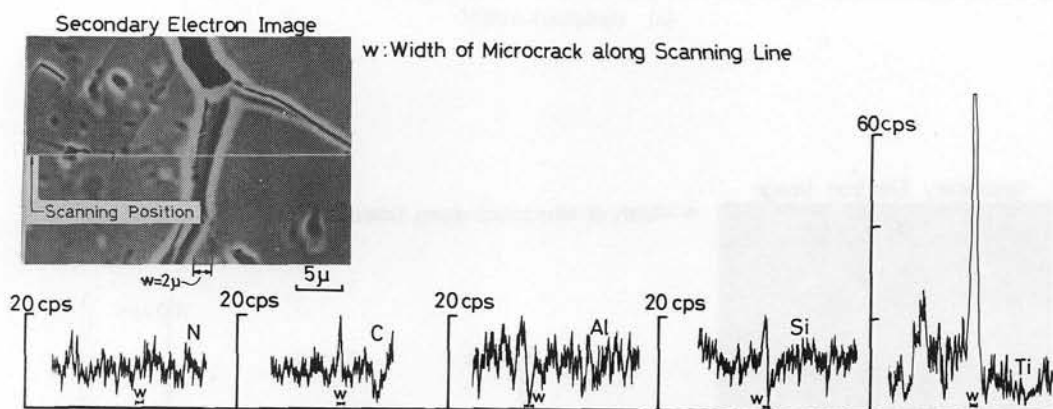


Fig.4-21 Distribution of Elements across Microcrack Observed in Heat Affected Zone of Incoloy 800

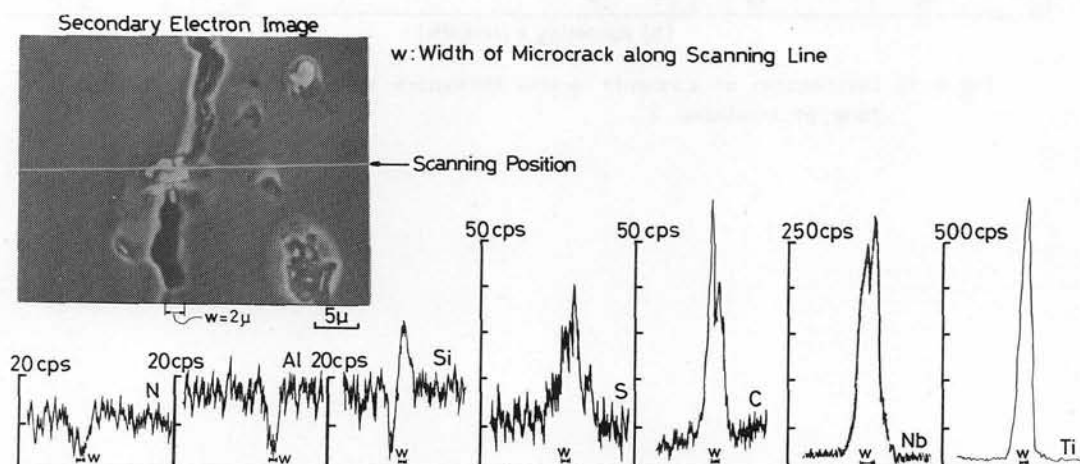


Fig.4-22 Distribution of Elements across Microcrack Observed in Heat Affected Zone of Incoloy 807

られる。

Incoloy 800 の場合は熱影響部の析出物を形成する元素、すなわち、Ti と C が増量し、Incoloy 807 の場合には熱影響部の析出物に含まれていた Nb, Ti, C の他にさらに Si および S の富化が認められる。

以上のように、ミクロ割れ部において増量する元素は、概して、熱影響部において溶融現象の認められる析出物に含まれる元素である。したがって、耐熱合金の凝固線近傍に発生するミクロ割れは熱影響部における析出物の液化現象と密接な関係があるように思われる。

(2) X線回折による析出物の同定

Table 3-2 に示したような凝固線近傍熱影響部の状態を再現させた試験片より抽出した残渣の X 線回折結果の一例を Fig. 4-23 ~ Fig. 4-27 に示す。Hastelloy X (HAEM) の場合には、 M_6C と $M_{23}C_6$ のピークが認められ、 $M_{23}C_6$ のピークがかなり顕著である。Inconel 625 の場合には、NbC, M_6C および $M_{23}C_6$ のピークがあり、NbC が多く認められる。Inconel 617 の場合には、 M_6C および Ti (C, N) のピークが認められ、 M_6C については顕著なピークを示し、Ti (C, N) については微弱である。Incoloy 800 については、Ti (C, N) および $M_{23}C_6$ のピークが認められ、Ti (C, N) についてはきわめて顕著である。Incoloy 807 の場合には、NbC, Ti (C, N) および $M_{23}C_6$ のピークが認められ、NbC については顕著なピークを示し、 $M_{23}C_6$ についてはきわめて微弱である。

このような X 線回折による同定結果をとりまとめたものが Table 4-2 である。各材料に認められた主な析出物については、Hastelloy X は $M_{23}C_6$ および M_6C 、Inconel 617 は M_6C 、Incoloy 807 は NbC および Ti (C, N)、Inconel 625 は NbC、Incoloy 800 は Ti (C, N)、SUS 316 は $M_{23}C_6$ である。

4.4.3 ミクロ割れ発生機構に関する考察

(1) 析出物の液化現象

凝固線近傍熱影響部の析出物の形態および主な析出物の変化を一括して Table 4-3 に示す。Hastelloy X、Inconel 617 および Incoloy 807 の析出物には溶融現象が認められたが、Inconel 625、Incoloy 800 および SUS 316 には溶融現象が認められない。

Hastelloy X については、析出物の EPMA による成分分析の結果、Mo, W および C の増量が認められ、また X 線回折においても微量であるが M_6C が同定されている。この M_6C はマトリックスの溶融開始温度に比較して溶融温度が低い¹⁵⁾ ために液化しやすく、Hastelloy X の凝固線近傍熱影響部に析出している M_6C が Fig. 4-1 ~ Fig. 4-4 に示したように溶融したものと考えられる。

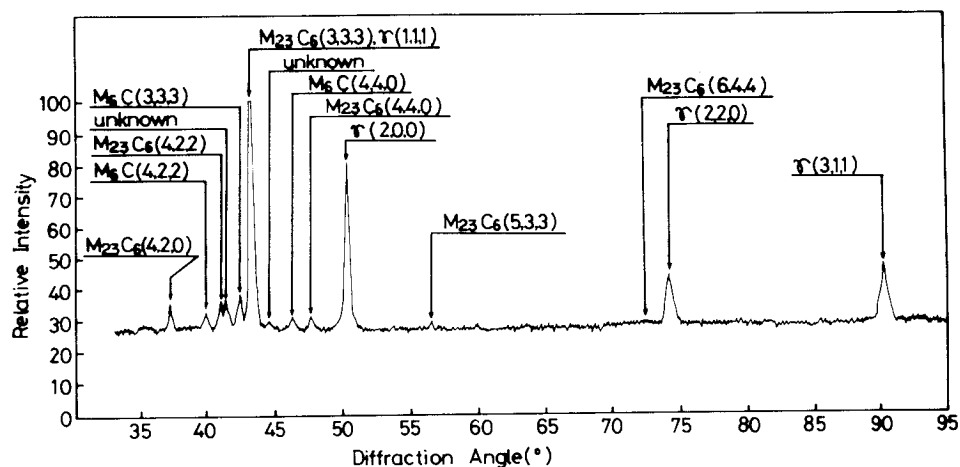


Fig.4-23 Identification of Precipitates by X-ray Diffraction (HAEM)

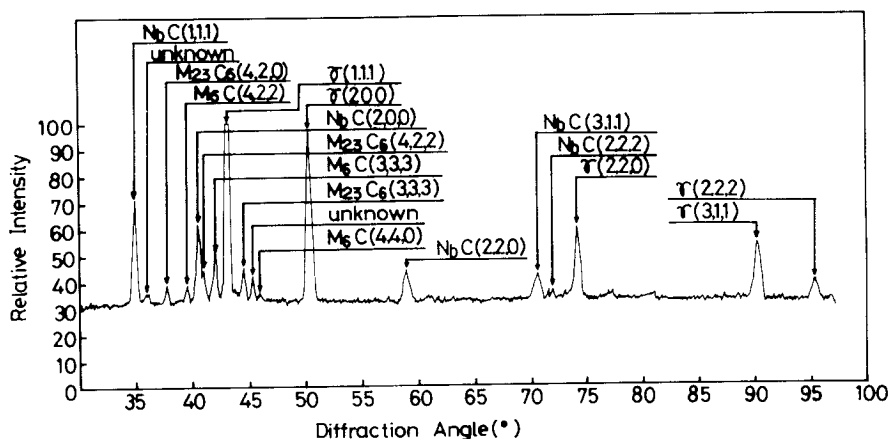


Fig.4-24 Identification of Precipitates by X-ray Diffraction (Inconel 625)

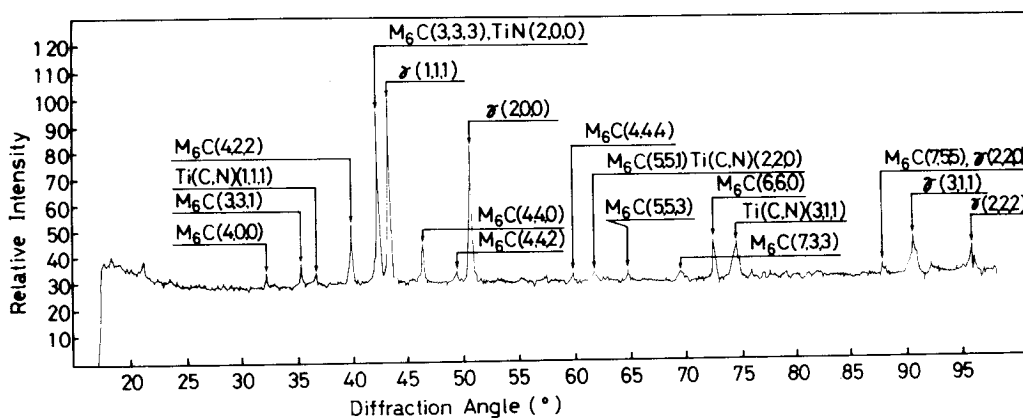


Fig.4-25 Identification of Precipitates by X-ray Diffraction (Inconel 617)

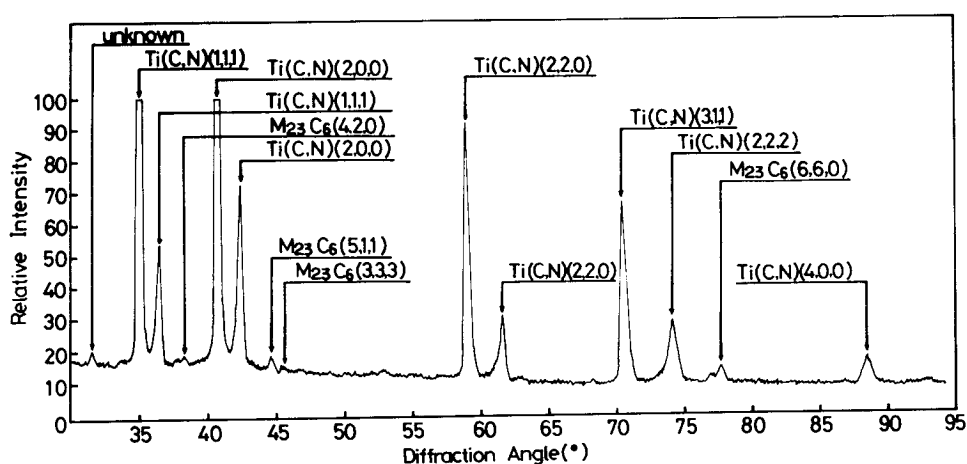


Fig.4-26 Identification of Precipitates by X-ray Diffraction (Incoloy 800)

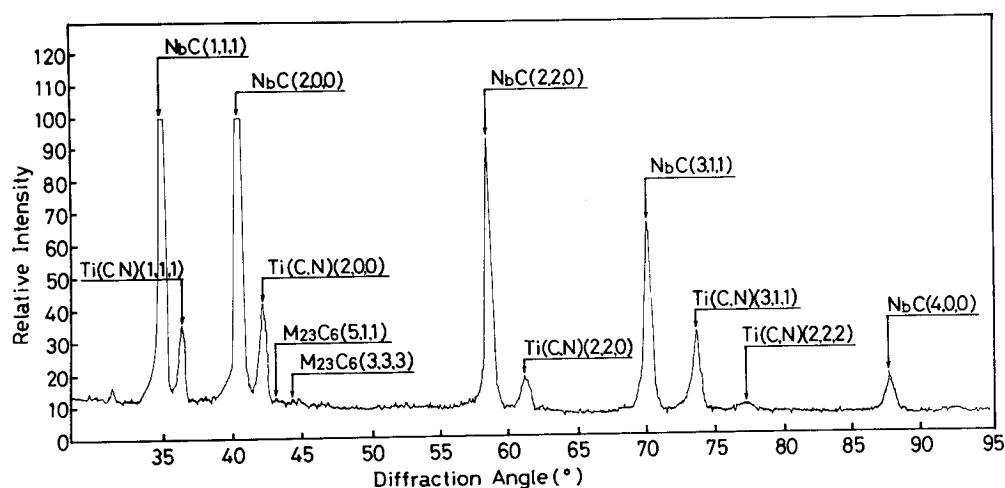


Fig.4-27 Identification of Precipitates by X-ray Diffraction (Incoloy 807)

Table 4-2 Precipitates' Identification Result by X-ray Diffraction

Material	Mark	Precipitates' Morphology	Relative X-ray Intensity	Lattice Constant (Å)
Hastelloy X	HAEN	M ₂₃ C ₆	S	10.60
	HAEM			
	HVEN	M ₆ C	W	10.92-11.00
	HVERN			
Inconel 625	Inl 625AE	NbC	S	4.43
		M ₆ C	M	11.13-11.15
		M ₂₃ C ₆	W	10.60
Inconel 617	Inl 617V	M ₆ C	S	11.05-11.06
		Ti(C·N)	VW	4.25
Incoloy 800	Iny 800V	Ti(C·N)	S	4.25-4.32
		M ₂₃ C ₆	VW	10.53
Incoloy 807	Iny 807A	NbC	S	4.45
		Ti(C·N)	M	4.28
		M ₂₃ C ₆	VW	10.60
SUS 316	S 316	M ₂₃ C ₆	S	10.60

Notes. S: Strong, M: Medium, W: Weak, VW: Very Weak

Table 4-3 Main Precepitates' Change in Heat Affected Zone

Material	Mark	Precipitates			Precipitates' Change	Effect of Precipitates' Liquation on Microcrack
		Type	T_M or T_E (°C) ΔT (°C)	Quantity		
Hastelloy X	HAEN HAEM HVEN HVERN	M ₂₃ C ₆	$T_M=1550$ $\oplus 205 \sim \oplus 234$	Large	Not changed	Nil
		M ₆ C of Mo and W	$T_M < 1400$ ---	Small	Partially and fully melted	Appreciable
Inconel 625	Inl625AE	NbC	$T_E=1315$ $\oplus 10$	Large	Not changed	Nil
		M ₆ C of Mo	$T_M < 1400$ ---	Medium	Changed only slightly	
		M ₂₃ C ₆	$T_M=1550$ $\oplus 235$	Small	Not changed	
Inconel 617	Inl617V	M ₆ C of Mo	$T_M < 1400$ ---	Large	Partially and fully melted	Appreciable
		Ti(C,N)	$T_E=1380$ $\oplus 31$	Very Small	Not changed	Nil
Incoloy 800	Iny800V	Ti(C,N)	$T_E=1380$ $\oplus 2$	Large	Not changed	Nil
		M ₂₃ C ₆	$T_M=1550$ $\oplus 158$	Very Small		
Incoloy 807	Iny807A	NbC	$T_E=1315$ $\oplus 41$	Large	Partially and fully melted	Appreciable
		Ti(C,N)	$T_E=1380$ $\oplus 14$	Medium	Not changed	Nil
		M ₂₃ C ₆	$T_M=1550$ $\oplus 174$	Very Small		
SUS 316	S316	M ₂₃ C ₆	$T_M=1550$ $\oplus 144$	Large	Not changed	Nil

Notes; T_M : Melting Temperature of Precipitate T_E : Temperature at Which Eutectic Reaction starts to occur between Carbide and Matrix (γ) ΔT : $T_M - T_S$ or $T_E - T_S$, $\oplus$; $\Delta T > 0$, $\ominus$; $\Delta T < 0$ T_S : Solidus Temperature of Superalloy

Inconel 617 については、析出物の EPMA による成分分析の結果、Mo および C の増量が認められ、X線回折においても大部分が M_6C であると同定されている。この M_6C が Fig. 4-5 に示すように溶融したものと思われる。なお、図中で液化現象の認められない小型の角ばった析出物が Ti(C,N) である。この Ti(C,N) の融点は 3140°C できわめて高いが、¹⁵⁾ γ と約 1380°C で共晶反応を起し、液化することが報告されている。¹⁶⁾ しかし、Inconel 617 のマトリックスの溶融開始温度は 1319°C で、Ti(C,N) と γ の共晶開始温度よりも低いためにこの Ti(C,N) が溶融しなかったものと考えられる。

Inconel 625 については、析出物の EPMA による成分分析の結果、Nb₆C および Mo の増量が認められ、X線回折においても Nb₆C、 M_6C が同定されている。しかし、 M_6C の量はきわめて少ない。このように、析出物の中で大部分をしめている Nb₆C の融点は 3500°C できわめて高いが、¹⁵⁾ この Nb₆C も γ と約 1315°C において共晶反応を生じ、液化することが報告されている。^{17),18)} しかし、Inconel 625 のマトリックスの溶融開始温度が 1305°C で、Nb₆C と γ の共晶開始温度よりも低いために、Fig. 4-8 に示すように析出物の中で大部分をしめる Nb₆C の液化現象が認められない。

Incoloy 800 については、析出物の EPMA による成分分析の結果、Ti, C, N の増量が認められ、X線回折においても Ti(C,N) が同定されている。Incoloy 800 のマトリックスの溶融開始

温度は1382°Cで、前述のTi(C,N)と γ の共晶開始温度とほぼ同じであるため、液化現象が起らず、Fig. 4-7 に示すように原形をとどめていたものと考えられる。

Incoloy 807 については、析出物のEPMAによる成分分析の結果、Nb, Ti, Cの増量が認められ、X線回折においてもNbC, Ti(C,N)が同定されている。Incoloy 807 のマトリックスの溶融開始温度は1366°Cであり、析出物の大部分をしめるNbCと γ の共晶開始温度よりもかなり高いために、図4-6 に示すようにきわめて顕著な析出物の液化現象が生じたものと考えられる。

SUS 316 については析出物のEPMAによる成分分析の結果、C, Cr の増量が認められ、X線回折においても $M_{23}C_6$ が同定されている。

(2) 析出物の液化現象がマイクロ割れにおよぼす影響

マイクロ割れの発生した凝固線近傍熱影響部の走査型電子顕微鏡による組織観察結果の一例をニッケル基および鉄基合金について、それぞれFig. 4-28 および Fig. 4-29 に示す。マイクロ割れの近傍には液化現象を生じた析出物が認められる。例えば、Inconel 617 について観察すると、溶融した M_6C はスケルトン状を呈しており、このような M_6C は粒界に析出するものが多く、MCは粒界および粒内に一様に分散している。

電子ビーム溶接法は従来の溶接法と加熱溶融現象がきわめて異なり、しかもビード幅も非常に小さいために、凝固線近傍は次章に

述べるような温度および応力分布状態にあるものと考えられる。

このような凝固線近傍熱影響部の結晶粒界に液化した析出物があれば、この部分が起点となってマイクロ割れが発生し、析出物に明瞭な液化現象が認められな

かった Inconel 625 および

SUS 316 にはマイクロ割れが発生していない。なお、主要な析

出物が溶融しなかった Incoloy 800 のマイクロ割れはFig. 2

-20 (a) に示したように溶接部の

全域に認められ、また Fig.

4-30に示すように高温延性試

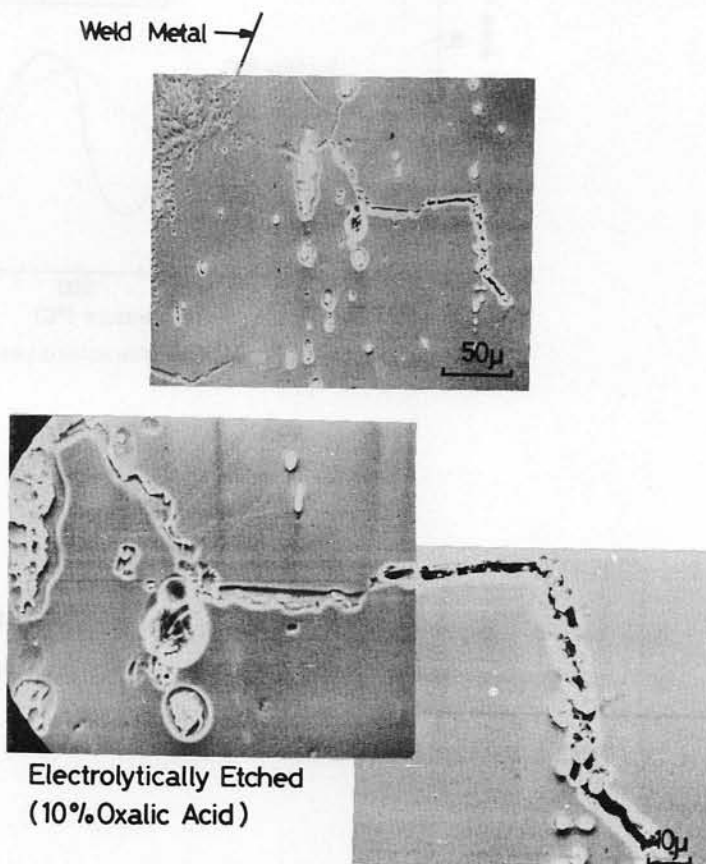


Fig.4-28 Nailhead Crack in Electron Beam Welds
Observed by Scanning Electron Microscope
(Inconel 617)

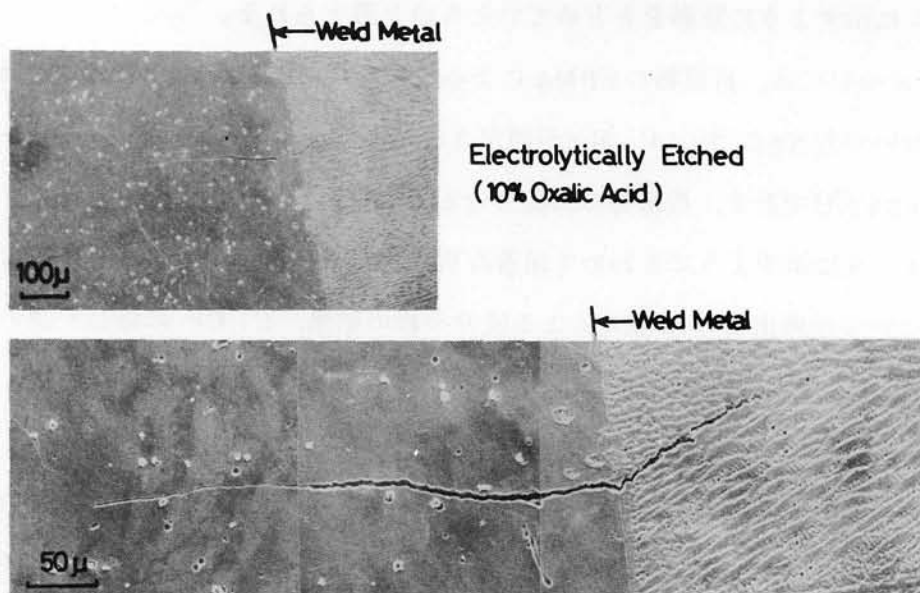


Fig.4-29 Nailhead Crack in Electron Beam Welds Observed by Scanning Electron Microscope (Incoloy 807)

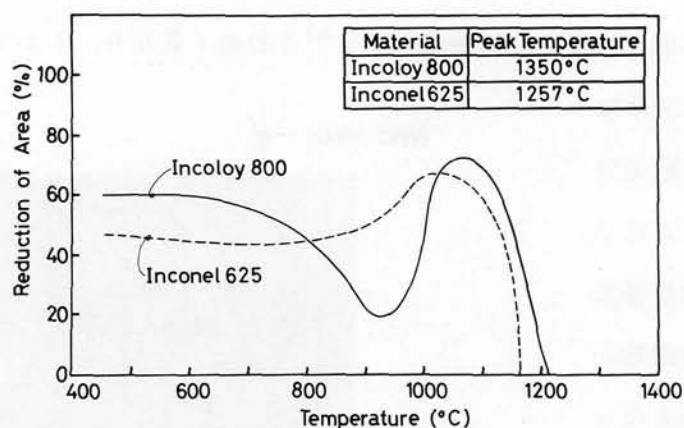


Fig.4-30 Hot Ductility Characteristics on Cooling

験における破断絞り¹⁹⁾が900°C付近で急激に低下することより、固相ぜい化による延性低下割れであろうと推定される¹⁹⁾が、ネイルヘッド部にも割れが認められることおよびTable 4-3からも判るようにTi(C,N)と γ の共晶開始温度がマトリックスの溶融開始温度よりもわずかに低いことより、析出物が溶融した可能性も十分考えられる。したがって、この割れの形態についてはさらに検討の必要があると考えられる。

4.5 要 約

原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接部に発生するマイクロ割れについて冶金学的検討を行なった。

得られた結果を要約すると次の通りである。

- 1) ミクロ割れの発生したHastelloy X, Inconel 617 および Incoloy 807 の凝固線近傍熱影響部の析出物には液化現象が生じ, ミクロ割れの認められなかった Inconel 625 および SUS 316 の析出物には明瞭な変化が生じなかった。ただし, ミクロ割れの発生した Incoloy 800 の析出物はほぼ原形をとどめていた。
- 2) 各材料に認められた主な析出物については, Hastelloy X は $M_{23}C_6$ および M_6C , Inconel 617 は M_6C , Incoloy 807 は NbC および $Ti(C,N)$, Inconel 625 は NbC , Incoloy 800 は $Ti(C,N)$, SUS 316 は $M_{23}C_6$ であった。
- 3) ミクロ割れ発生機構については, 次章で述べる温度および応力分布状態下にある凝固線近傍熱影響部の析出物の液化部が起点となって割れが粒界に沿って進展するものと考えられる。

第 5 章 溶接過程における温度および応力分布に関する検討

5. 1 概 説

前章において、原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接部には凝固線にほぼ直角にマイクロ割れが発生し、とくにネイルヘッド部に多く認められた。この割れは、凝固線近傍における熱影響部の析出物の液化部が主要な起点となり、発生したと推定した。しかし、その詳しい機構を知るためには、とくに溶接過程における熱影響部近傍の温度と応力分布の状態を解明する必要がある。

本章においては、電子ビーム溶接過程における状態に類似の溶接モデルを設定し、この溶接モデルの熱影響部近傍の温度と応力分布を有限要素法によって解析を行なった。この結果、高温域において凝固線近傍熱影響部に、割れ発生に必要な凝固線方向の引張応力が発生することを明らかにするとともに、このような割れに対するもっとも大きな要因である温度および応力の挙動を明確にした。

5. 2 解 析 方 法

有限要素法によって解析を行ない、非定常熱伝導解析は Zienkiewicz の方法²⁰⁾ に、弾塑性解析は山田の方法²¹⁾ に従った。

Table 5-1 に解析に使用した、マイクロ割れ感受性の高い Inconel 617 の材料定数を示す。この場合 1000℃における値を採用し、温度依存性は考慮しない。

Fig. 5-1 に解析の対象とした継手の各部の寸法ならびに座標系を示す。電子ビーム溶接部の断面形状は実際の溶接部の断面マクロの一例を計測して得たものである。通常、座標系は板の面内を x および y 方向にとり、板厚方向を z 軸にとるのが慣例ではあるが、ここでは断面の応力分布に注目しているので、図示の通り板幅方向を x 軸にとり、板厚方向を y 軸にとった。

熱伝導解析における初期条件は $t = 0$ (sec) で溶接金属部のみが 2000℃の熔融状態にあり、他の部分は 0℃と仮定した。境界条件は Fig. 5-1 の溶接部の x 方向（板幅方向）の両端が常に 0℃に保たれるものと仮定し、表面からの熱の放散な

Table 5-1 Material Constants of Inconel 617 at 1000℃

Young's Modulus (E)	14000 (kg/mm ²)
Poissons Ratio (ν)	0.307
Yield Stress (σ_y)	8.0 (kg/mm ²)
Mean Expansion Coefficient (α)	1.625×10^{-5}
Density (ρ)	8.01 (g/cm ³)
Specific Heat (c)	0.158 (cal/g.°c)
Thermal Conductivity (k)	0.0683 (cal/cm.sec.°c)

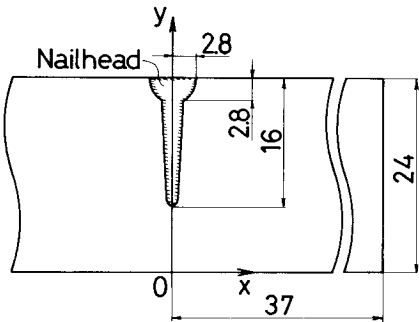


Fig.5-1 Model of Analysis for Actual Electron Beam Welds

らびに融解，凝固の潜熱を無視した。応力解析における初期条件は $t = 0$ (sec) では溶接金属および母材部に応力は生じないものとした。局部拘束によって生じる応力のみを解析するためなんらの外的拘束も与えなかった。溶接線方向の応力 σ_z は零とし，平面応力条件下で解析を行なった。

Fig. 5-2 に要素分割図を示す。要素内での温度および変位が線形に変化する三角形要素を用いた。

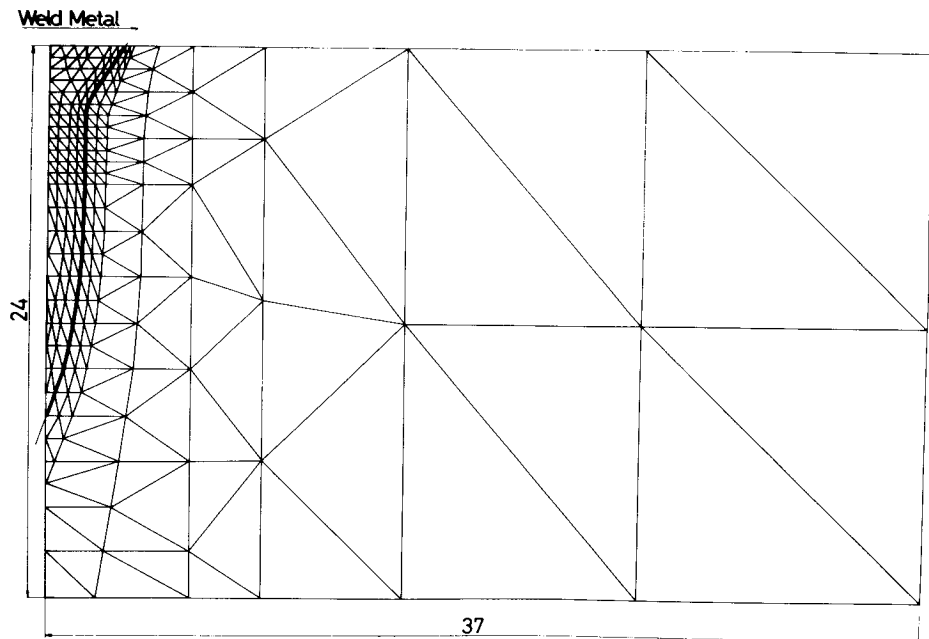


Fig.5-2 Finite Element Idealization

5. 3 解析結果および考察

溶接部の温度分布を Fig. 5-3 ～ Fig. 5-5 に示し，応力分布を Fig. 5-6 ～ Fig. 5-9 に示す。

Fig. 5-3 は溶融境界に隣接する熱影響部（溶融境界を一辺にもつ三角形要素）の温度分布を示したものである。この結果，最大の特徴は最高加熱温度がネイルヘッドのネック部にあることとそれからの冷却速度もきわめて小さいことである。Fig. 5-4 および Fig. 5-5 はそれぞれネイルヘッドのネック部および溶接金属中央部の温度分布を示している。これから両部での温度勾配を求めると，冷却初期の $t = 0.01$ (sec) ではその差があまり認められないが，時間が経過するにつれてネイルヘッドのネック部の方がゆるやかであることが判る。このように，ネイルヘッドのネック部の最高加熱温度が高く，冷却速度が小さく，かつ周辺の温度勾配がゆるやかであるというネイルヘッドのネック部の温度分布の特徴は，この部分の局部的形状に起因するものであり，電子ビームのビード特性の一つと言える。

Fig. 5-6 は熱影響部における溶融境界線方向の応力成分 (σ) の分布を示したものである。熱影

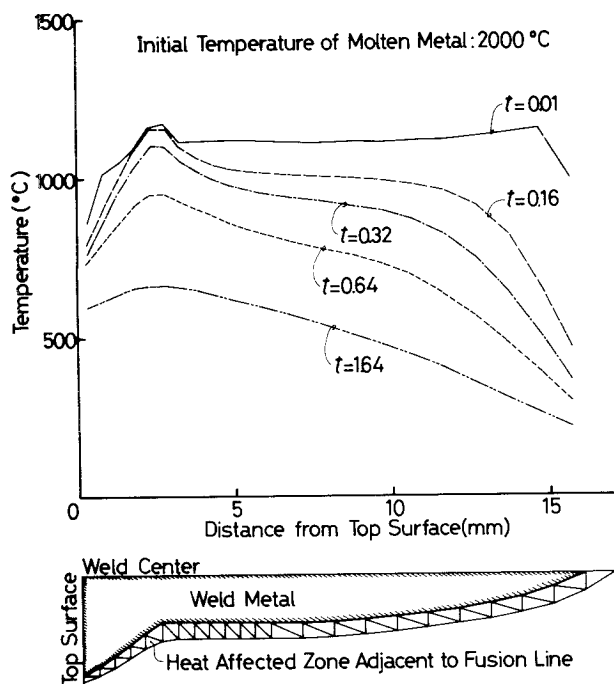


Fig.5-3 Temperature Distribution at Heat Affected Zone Adjacent to Fusion Line

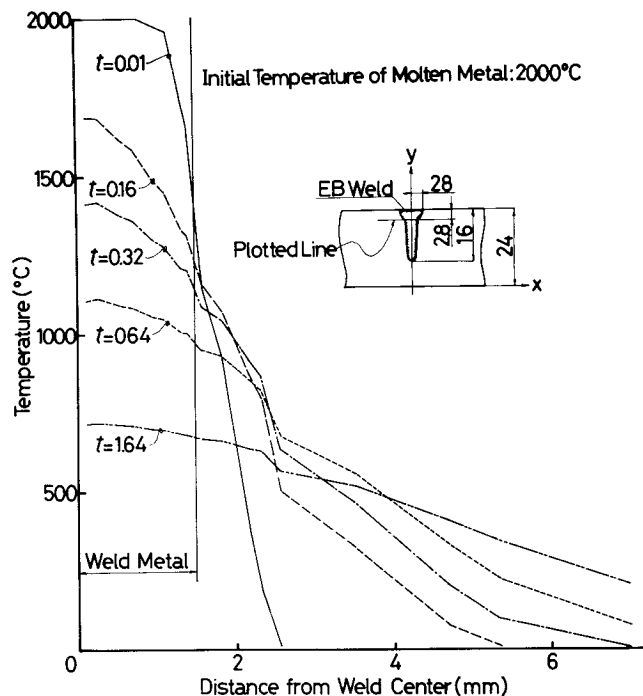


Fig.5-4 Temperature Distribution at around Nailhead Neck

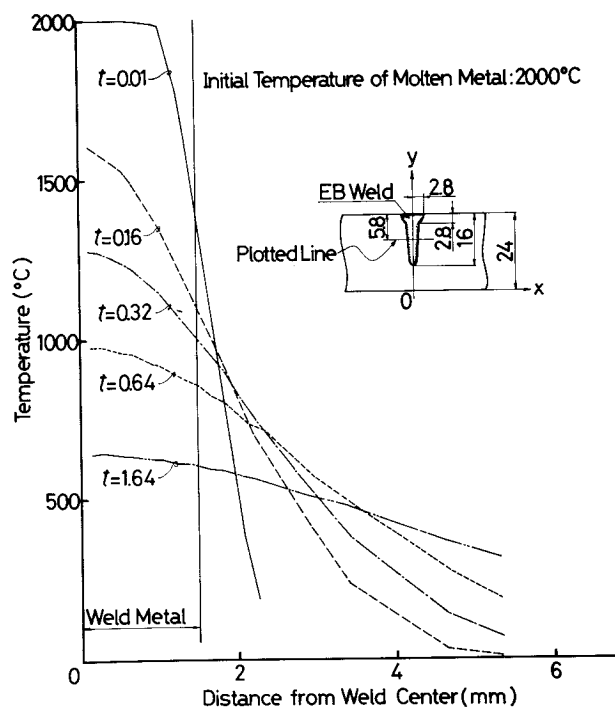


Fig.5-5 Temperature Distribution at around Middle Section of Welds

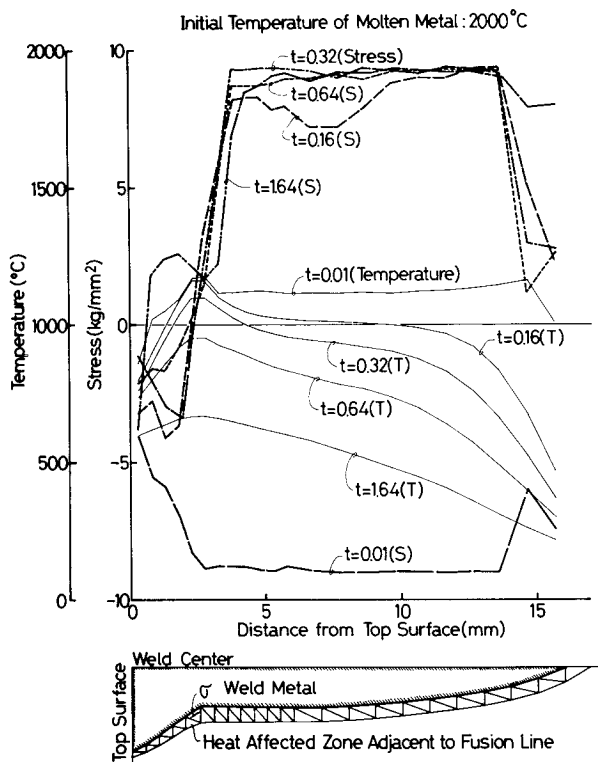


Fig.5-6 Stress Distribution at Heat Affected zone Adjacent to Fusion Line

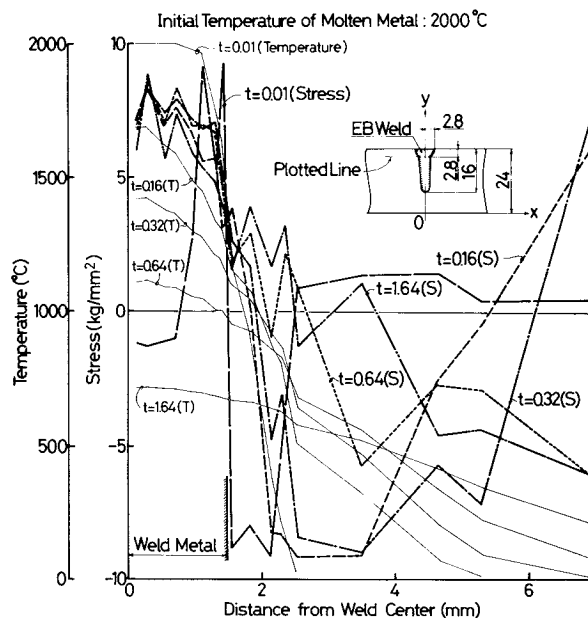


Fig.5-7 Stress Distribution at around Nailhead Neck

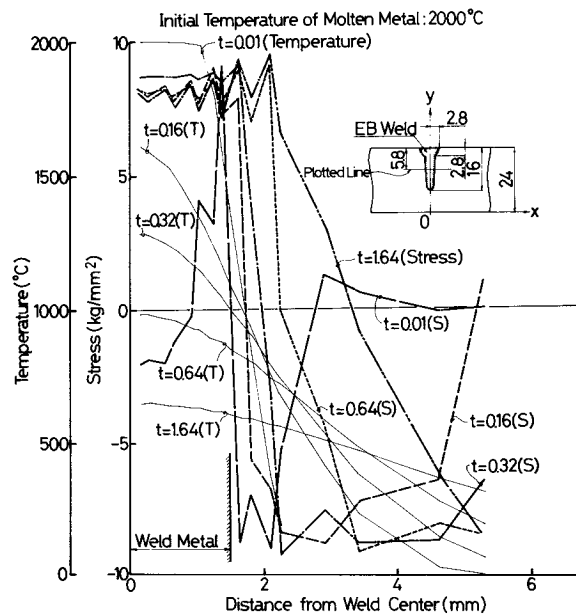


Fig.5-8 Stress Distribution at around Middle Section of Welds

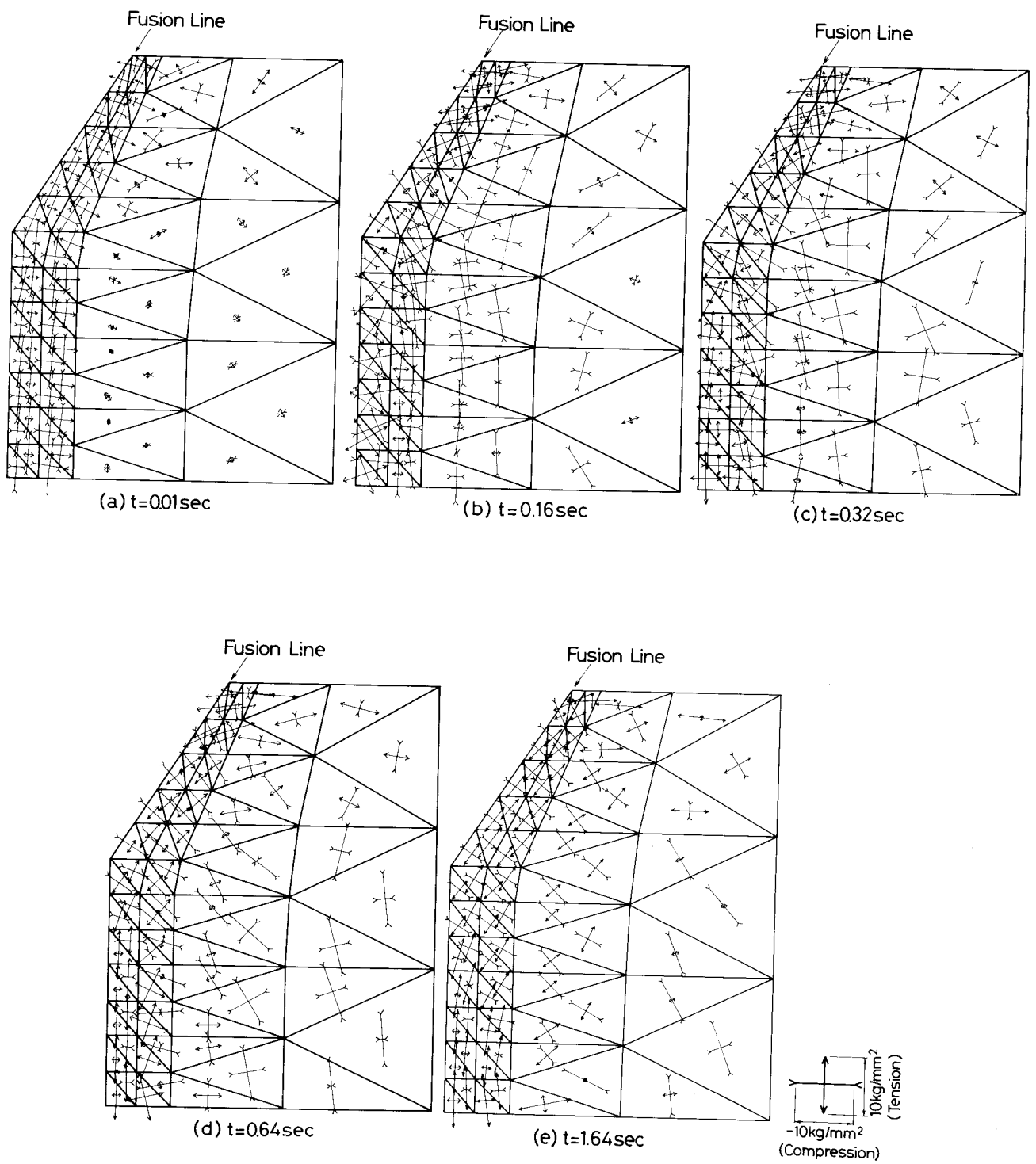


Fig.5-9 Principal Stress Distribution at around Nailhead Area

響部は最高加熱温度到達（ $t = 0.01 \text{ sec}$ ）までは一様に圧縮応力が作用し、溶接金属中央部では圧縮降伏を生じているが、ネイルヘッド部および溶接金属先端部の応力は溶接金属中央部より低い。いっぽう、最高加熱温度到達以降（ $t = 0.16 \text{ sec}$ 以降）では表面近傍を除いて引張応力が作用している。溶接金属中央部では引張降伏を生じているが、やはりネイルヘッドのネック部の応力は溶接金属中央部に比べて低い。Fig. 5-7 および Fig. 5-8 はそれぞれネイルヘッドのネック部および溶接金属中央部における σ_y の分布を温度分布と対応させて示したものである。 $t = 0.01 (\text{sec})$ では溶接金属および熱影響部の非常に限られた部分にそれぞれ引張および圧縮降伏が生じているが、時間が経過し熱の拡散が進むにつれて溶接金属部の引張降伏域が内部に拡大する。いっぽう、熱影響部においては、最初、最高加熱温度到達（ $t = 0.01 \text{ sec}$ ）までは圧縮であったものが引張応力に転じ、この引張応力域が拡大するとともにこれに続く圧縮降伏域も拡大し、かつ板端部に向って移行する。応力分布に鋸歯状の変動が見られるのは連続体を有限個の要素の集合に近似しているための誤差と推定され、解析結果を平滑化（例えば相隣る二要素間の応力値の平均をとる）すればこのような変動はなくなる。²²⁾ Fig. 5-7 と Fig. 5-8 を比較すればネイルヘッドのネック部は溶接金属中央部に比較して周辺の応力勾配がゆるやかである。Fig. 5-9 はネイルヘッド部近傍の主応力図を時間の経過にしたがって示したものである。熱影響部での主応力方向は溶融境界線方向とほぼ一致している。ネイルヘッド部におけるマイクロ割れ（高温割れ）は溶融境界線にほぼ直角方向に発生しており、この主応力にほぼ直角に割れが発生したものと考えられる。

電子ビーム溶接における温度および応力分布特性を総合すると、ネイルヘッド部における熱影響部マイクロ割れ発生原因としては、ネイルヘッドのネック部は熱影響部の他の部分と比較して相対的に発生応力は低いが、最高加熱温度が高く冷却速度も小さいために、 1000°C 以上で凝固線方向に引張応力が作用する時間が長いことおよび熱影響部周辺の応力勾配が他の部分と比較して相対的にゆるやかであるために、 1000°C 以上の温度において引張応力が負荷する範囲が大きいことが考えられる。

5.4 要 約

電子ビーム溶接について、溶接過程における温度および応力分布を有限要素法によって解析した結果を要約すると以下の通りである。

- 1) ネイルヘッドのネック部は熱影響部の他の部分と比較して最高加熱温度が高く、冷却速度も小さいために、 1000°C 以上の高温に保持される時間が長い。このようなネイルヘッドのネック部の温度分布の特徴はこの部分の局部的形状に起因するものであり、電子ビームのビード特性の1つと云える。

- 2) ネイルヘッドのネック部は熱影響部の他の部分と比較して発生応力は低い、 1000°C 以上で凝固線方向に引張応力の作用する時間が長い。また、この部分の熱影響部周辺の応力勾配が他の部分と比較して相対的にゆるやかであるために、 1000°C 以上の温度において引張応力が負荷する範囲が大きい。
- 3) 上述のようなネイルヘッドのネック部の温度および応力分布特性により、ネイルヘッド部にミクロ割れが発生しやすいものと推定できる。

第 6 章 ミクロ割れ防止に関する検討

6.1 概 説

第 2 章において、Inconel 625 および SUS 316 を除くすべての耐熱合金の電子ビーム溶接部にはミクロ割れが発生し、このミクロ割れは溶接入熱と関係があることを明確にした。第 4 章においてはこれらのミクロ割れに関する冶金学的考察を行ない、ミクロ割れは凝固線近傍熱影響部の析出物の液化現象ときわめて密接な関係があることを明らかにした。

本章においては Table 2-2 に示した供試材料の中でもっともミクロ割れ感受性の高い Inconel 617 に合金元素を微量添加した改良合金を試作し、主としてこの改良合金の電子ビーム溶接部の走査型電子顕微鏡による組織観察および EPMA の線分析による析出物の成分分析を行なうことにより、ミクロ割れの発生に支配的な影響を及ぼす析出物の状態およびミクロ割れの有無を調査した。その結果、ある種の合金元素たとえば Nb を添加することによってミクロ割れが防止できることを実験的に証明し、耐熱合金のミクロ割れ防止上きわめて有効かつ実用的な対策を提案した。

6.2 供 試 材 料

本実験においては、Inconel 617 のミクロ割れにおよぼす析出物 (M_6C) の影響を考慮し、C ときわめて結合力の強い Nb を段階的に変化させた改良合金を試作し、これを“改良 Inconel 617”とし、供試材料として使用した。

通常 Inconel 617 の熱間加工（たとえば鍛造、圧延など）時の最適加工温度範囲は $1000^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$ とされており、²³⁾ この範囲よりも高い温度で加工を実施すれば結晶粒の成長による粗大化、低い温度で行なう場合には割れ発生などの問題がある。本実験で試作した改良 Inconel 617 は熱間加工性を損なう Nb を含んでいるために、熱間加工温度は通常の Inconel 617 に比較して少し高くする必要がある。ここでは Nb 量としては 0, 1.0, 2.0 および 4.0 % を目標値として設定した。さらに、割れ感受性を評価するためには結晶粒度はできるだけ同程度にすべきであり、これらのことを考慮して試作した改良 Inconel 617 の化学成分および顕微鏡組織をそれぞれ Table 6-1 およ

Table 6-1 Chemical Composition of Inconel 617 Experimentally Produced

Material	Mark	Thickness (mm)	Final Heat Treatment	Grain Size (ASTM)	Chemical Composition (%)												
					C	Si	Mn	P	S	Cr	Co	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	Ni
Inconel 617	A	15	1177°Cx15Min W. Q	3~ 5	0.072	0.09	0.020	0.003	0.003	21.90	12.50	8.88	0.94	0.45	1.31	-	Bal.
Modified Inconel 617	B			5~ 7	0.068	0.13	0.020	0.005	0.003	21.17	12.60	8.83	0.96	0.46	1.23	0.95	
	C			5~ 7	0.072	0.13	0.021	0.007	0.005	21.92	12.28	8.73	0.92	0.45	1.29	1.95	
	D			5~ 7	0.066	0.19	0.021	0.007	0.005	21.92	12.30	8.85	0.90	0.46	1.36	4.10	

Manufacturing Process

Vacuum Melting — Forging (1150°C) — Hot Rolling (1150°C) — Polishing — Final Heat Treatment ($1177^{\circ}\text{C} \times 15\text{Min}$, W.Q)

び Fig. 6-1 に示す。

結晶粒度については Nb を含んだ改良 Inconel 617 (タイプ B～タイプ D) についてはほぼ同程度になっている。なお、各試作材料の非破壊検査結果はいずれの場合にも良好であり、欠陥は認められなかった。

6.3 実験方法

Table 6-1 に化学成分を示す試作した改良 Inconel 617 の電子ビーム溶接によるビード置き試験を第2章の2.4項で述べた方法で実施し、溶接部横断面の電解研磨および電解腐食(腐食条件は一定)後、走査型電

子顕微鏡による凝固線近傍熱影響部の組織観察を実施し、析出物の状態およびマイクロ割れの有無について調査した。また、熱影響部における析出物の EPMA による成分分析を行なうことによりその形態についても調査した。なお、比較のために母材の組織観察および析出物の成分分析も行なった。

また、試作した改良 Inconel 617 の凝固開始温度 T_L および凝固終了温度 T_S を第3章の3.3.3項で述べた方法で求めた。

6.4 実験結果および考察

6.4.1 材料の融点の測定

各材料の融点測定結果を Table 6-2 に示す。表より判るように、Nb 量が多くなるにしたがって凝固開始温度(溶融終了温度) T_L および凝固終了温度(溶融開始温度) T_S は低くなり凝固範囲の幅も Nb 量の増大にしたがって小さくなっている。

6.4.2 溶接部の走査型電子顕微鏡による観察

(1) 母 材

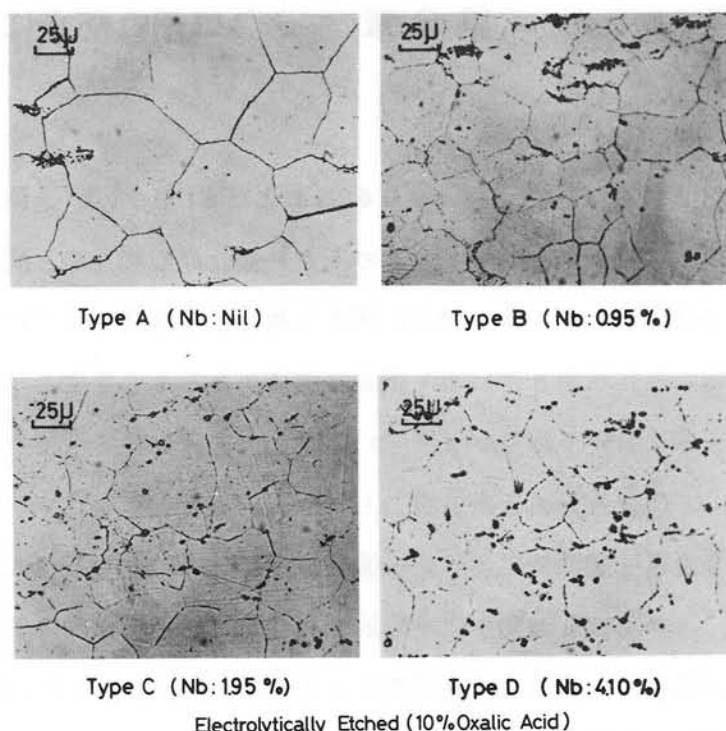


Fig.6-1 Typical Microstructure of Experimentally Produced Inconel 617 Base Metal

Table 6-2 Melting Temperature of Experimentally Produced Inconel 617 Measured

Material	Mark	Melting Temperature (°C)		
		T_L	T_S	$\Delta T (=T_L - T_S)$
Inconel 617	A	1350	1331	21
Modified Inconel 617	B	1344	1326	18
	C	1334	1321	13
	D	1315	1308	7

Notes: T_L : Liquidus Temperature
 T_S : Solidus Temperature

タイプA～タイプDの母材の走査型電子顕微鏡組織の代表例を一括してFig. 6-2に示す。

図より判るように、Nbを含まないタイプAおよび約1%含んだタイプBでは比較的大型の析出物と小型の析出物が認められ、大型の析出物の近傍に小型の析出物が集まっている。いっぽう、Nbをそれぞれ約2%および約4%含んだタイプCおよびタイプDでは比較的大型の析出物が多く認められる。

(2) 凝固線近傍熱影響部

タイプA～タイプDの凝固線近傍熱影響部の走査型電子顕微鏡組織の代表例をFig. 6-3に示す。

図より判るように、Nbを含まないタイプAでは析出物の顕著な溶解現象が認められ、溶解した部分はスケルトン状組織を呈しており、第4章のFig. 4-5に示したInconel 617のM₆Cときわ

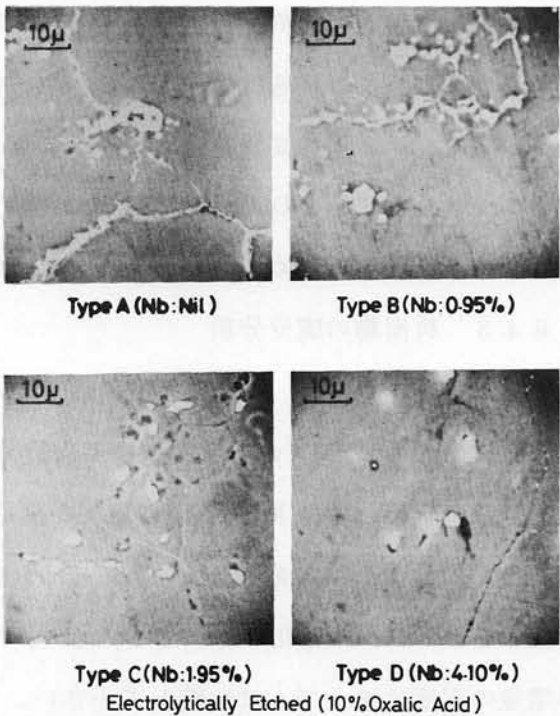


Fig.6-2 Typical Scanning Electron Micrograph of Experimentally Produced Inconel 617 Base Metal

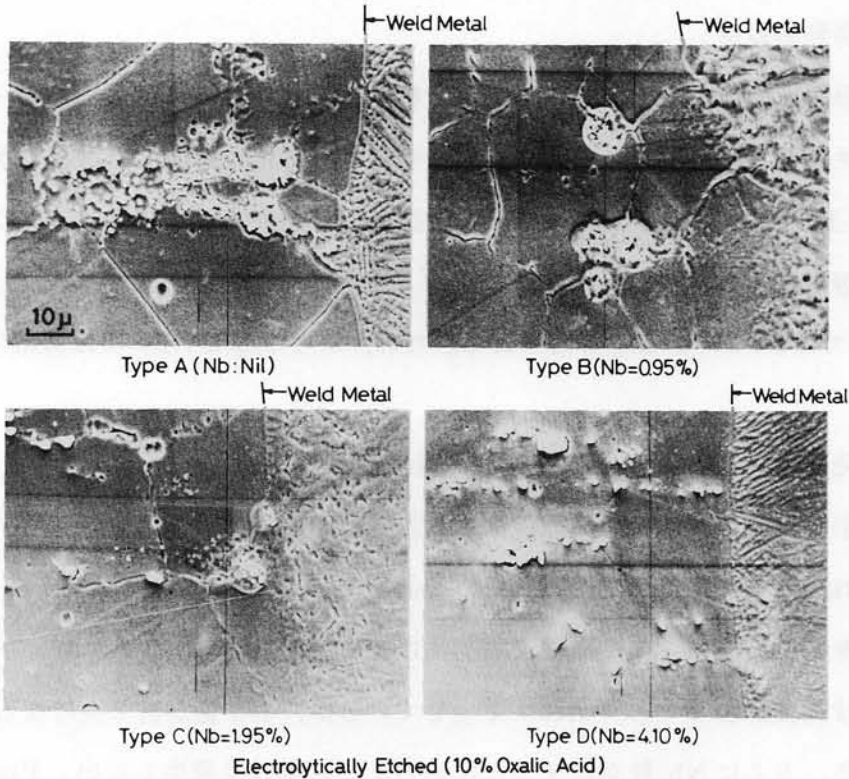


Fig.6-3 Typical Scanning Electron Micrograph of Electron Beam Welds of Experimentally Produced Inconel 617

めて類似している。また、溶融現象を生じた析出物のごく近くに原形をとどめている小型の析出物が認められる。Nb を約 1 % 含むタイプ B ではスケルトン状組織は認められないが、溶融した析出物が認められ、この状態は第 4 章の Fig. 4-6 に示した Incoloy 807 の NbC ときわめて類似している。また、Nb を約 2 % 含むタイプ C では部分溶融を生じた析出物が認められる。さらに、Nb を約 4 % 含んだタイプ D の場合には溶融現象を生じた析出物が認められず、図に示すように析出物はいずれも原形をとどめており、きわめて安定である。

6.4.3 析出物の成分分析

(1) 母 材

母材析出物の EPMA の線分析による成分分析結果を Fig. 6-4 に示す。図より、Nb を含まないタイプ A の析出物には Mo と C の富化が認められ、とくに Mo の富化が顕著であり、Ti もわずかなのであるが増量する傾向を示している。Nb を約 1 % 含んだタイプ B では、Mo, Nb, Ti, C の富化が認められ、Mo の富化がもっとも大きく、この順に増量の程度が小さくなっている。しかし Mo の増量の程度はタイプ A に比較して小さい。Nb を約 2 % 以上含んだタイプ C および D では、Nb, Ti, C の富化が認められ、Mo は逆に減少している。以上の結果より、それぞれの試作合金に認められる主要な析出物は、タイプ A では Mo の M_6C 、タイプ B では Mo の M_6C および NbC、タイプ C および D では NbC と考えられる。

(2) 凝固線近傍熱影響部

凝固線近傍熱影響部の析出物の EPMA の線分析による成分分析結果を Fig. 6-5 に示す。図より、タイプ A ~ タイプ D のいずれの場合においても元素の富化の傾向は母材析出物と同様の傾向を示している。以上の結果および走査型電子顕微鏡による熱影響部の観察結果より、凝固線近傍熱影響部において溶融現象を生じた析出物は、タイプ A では Mo の M_6C 、タイプ B では Mo の M_6C と NbC、タイプ C では NbC であると考えられる。なお、タイプ D の NbC には溶融現象は認められない。

6.4.4 合金元素 (Nb) が材料のマイクロ割れ感受性におよぼす影響

凝固線近傍熱影響部の走査型電子顕微鏡による組織観察の結果、認められたマイクロ割れの断面図およびマイクロ割れ部の走査型電子顕微鏡組織の一例をそれぞれ Table 6-3 および Fig. 6-6 に示す。Table 6-3 より判るように、溶接条件に無関係に Nb を含まないタイプ A および約 1 % 含んだタイプ B においては比較的多くマイクロ割れが発生しているが、Nb 量が約 2 % になるとマイクロ割れの発生は少なくなり、さらに Nb 量が約 4 % になるとマイクロ割れは発生しない。Fig. 6-7 は Nb 量とマイクロ割れ発生率（同一入熱において割れの認められた試験片数と全試験片数の比率）の関係を示したものであり、Nb 量が増大するにつれてマイクロ割れ発生率が減少し、Nb 添加の効果が明確

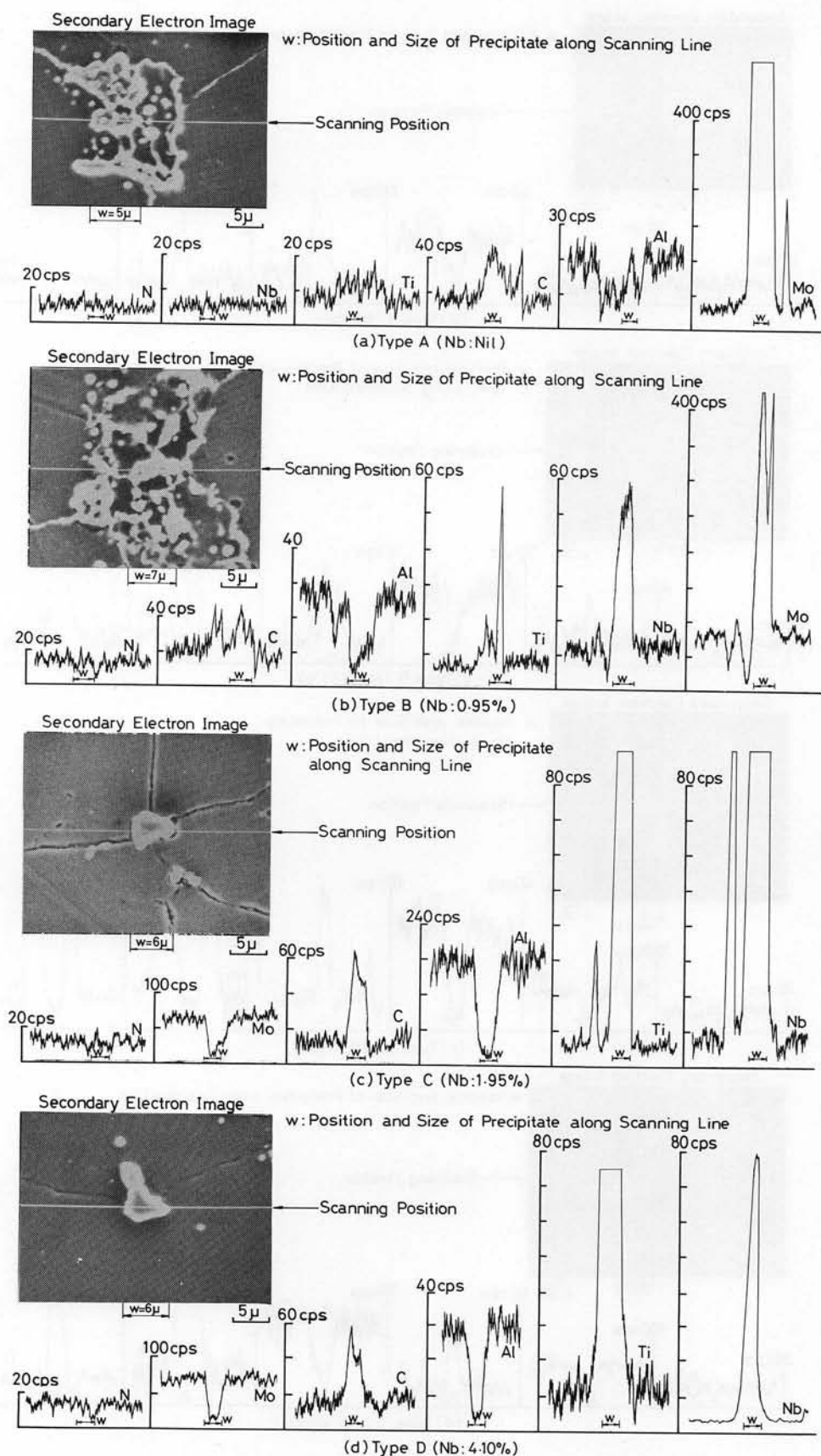


Fig.6-4 Distribution of Elements across Precipitate Observed in Base Metal of Experimentally Produced Inconel 617

Table 6-3 Schematic Explanation of Occurrence of Microcrack
in Transverse Cross-section
Cross-section

Welding Condition	Material	Mark	α_b									
			1.17	1.13	1.08	1.04	1.0	0.96	0.91	0.87	0.82	
$I_b = 30\text{mA}$ $V_b = 100\text{kV}$ $U_b = 100\text{cm/min}$	Inconel 617	A	—			—	—	—	—	—	—	
	Modified Inconel 617	B		—	—	—	—		—	—		
		C	—		—	—	—	—	—	—	—	
		D	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
$I_b = 40\text{mA}$ $V_b = 125\text{kV}$ $U_b = 160\text{cm/min}$	Inconel 617	A	—				—	—				
	Modified Inconel 617	B	—	—	—	—	—			—	—	
		C	—	—		—	—	—	—	—	—	
		D	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Note:—means that microcrack never occurred in this experiment

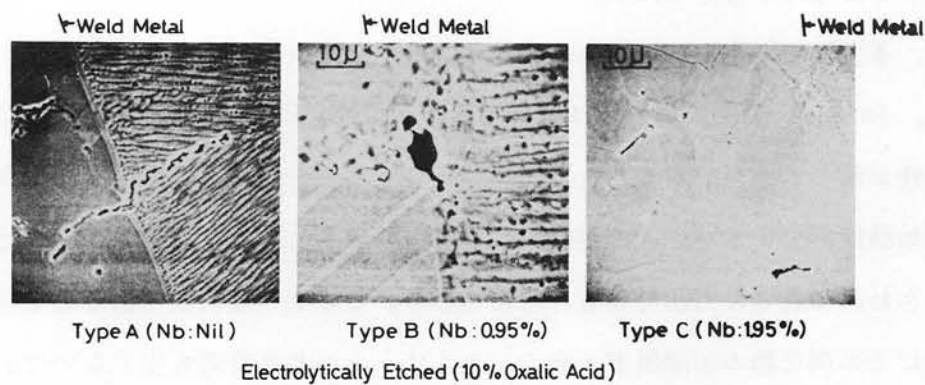


Fig.6-6 Typical Microcrack Observed in Electron Beam Welds of Experimentally
Produced Inconel 617

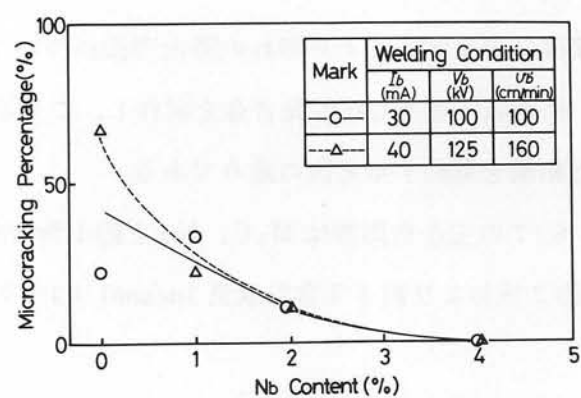


Fig.6-7 Effect of Nb Content on Microcracking Percentage

に認められる。

6.4.5 効果的なマイクロ割れ防止法に関する考察

前述したように、Nb を含まないタイプ A においては主な析出物は M_6C であり、この M_6C の融点がマトリックスの溶融開始温度 T_S より低いために溶融現象が生じ、マイクロ割れが発生したものと考えられる。Nb を含むタイプ B ～ タイプ D の場合には主な析出物は NbC である。この NbC の融点は 3500°C ときわめて高いが、¹⁵⁾ 1315°C で γ と共晶反応を生じ、その結果溶融することが報告されている。^{17) 18)} Table 6-2 の融点測定結果より各耐熱合金の T_S は Nb の増大とともに低くなるが、タイプ B およびタイプ C の T_S はいずれも NbC と γ の共晶開始温度よりも高いために溶融し、マイクロ割れが発生したものと考えられる。いっぽう、約 4 % の Nb を含むタイプ D の場合は T_S が 1308°C で NbC と γ の共晶開始温度よりも低いために析出物は溶融せず、マイクロ割れが発生しなかったものと思われる。このような析出物の溶融現象とマイクロ割れの関係は第 4 章の 4.4.3 項で述べた関係と同様であるものと考えられる。

以上のように、本実験で試作した耐熱合金のうち、Nb を約 2 % 以上含む場合にはマイクロ割れ感受性が低くなり、Inconel 617 の場合には合金元素として Nb を適当に添加することによって材料の耐マイクロ割れ性が著しく改善できることが明らかになった。一般的に、析出物の融点および析出物と γ の共晶開始温度がマトリックスの溶融開始温度 T_S よりも高くなるような合金元素を適当に添加することはきわめて有効な方法であると考えられる。このような合金元素としては本実験で添加した Nb の他にその炭化物の溶融温度が高く、さらに γ との共晶反応も生じない Ta などが挙げられる。²⁴⁾ なお、耐熱合金には優れた高温強度特性が要求されるために、高温強度に対する配慮も十分払う必要がある。

6.5 要 約

耐熱合金の電子ビーム溶接部に発生するマイクロ割れの防止方法について検討するために、Inconel 617 に合金元素として Nb を適当に添加した改良合金を試作し、この試作材料の電子ビーム溶接部の冶金学的調査を行なった結果を要約すると次の通りである。

- 1) Nb を含まない Inconel 617 の主な析出物は M_6C 、Nb を約 1 % 含んだ改良 Inconel 617 は M_6C および NbC、Nb を約 2 % および約 4 % 含む改良 Inconel 617 の主な析出物はいずれも NbC である。
- 2) 凝固線近傍熱影響部におけるこれらの主要析出物は、Nb を約 4 % 含んだ改良 Inconel 617 を除いて、いずれの場合にも溶融現象を生じた。Nb が約 4 % の改良 Inconel 617 の NbC が溶融しなかった理由としては、NbC と γ の共晶開始温度がマトリックスの溶融開始温度 T_S よりも

高かったためである。

- 3) Nb 量が増大するにしたがってマイクロ割れ感受性は低くなり，約 2 % 以上ではその効果も顕著になり，約 4 % でマイクロ割れの発生は認められなくなる。
- 4) 析出物の溶融現象に起因した耐熱合金のマイクロ割れを防止する一般的な手段としては，析出物の融点および析出物と γ の共晶開始温度がマトリックスの溶融開始温度 T_S よりも高くなるように適当な合金元素を添加することであって，これはきわめて有効な方法であると考えられる。

第 7 章 溶接継手の機械的特性に関する検討

7. 1 概 説

原子炉用耐熱合金電子ビーム溶接継手の機械的特性、とくに高温強度特性に関する報告は極めて少なく、未だ十分な究明が行なわれていないのが現状である。

本章においては、上記耐熱合金の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手について、静引張特性、高温低サイクル疲労特性、クリープおよびクリープ破断特性について調査し、電子ビーム溶接継手の機械的特性を明確にし、TIG 溶接継手に比較して優れていることを示した。

7. 2 供 試 材 料

7. 2. 1 母 材

Table 2-2 に示した Hastelloy 系、Inconel 系および Incoloy 系の耐熱合金を使用した。なお、Hastelloy X の各材料は、ここでは HAEN、HAEM、HVEN である。

7. 2. 2 TIG 溶加棒

TIG 溶接に使用した溶加棒の化学成分を Table 7-1 に示す。

Table 7-1 Chemical Composition of Filler Metal for TIG Welding Used

Material	Chemical Composition (%)															
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb+Ta	Al	Ti	B	Fe	Cu
HastelloyX	0.07	0.42	0.35	0.013	<0005	Bal.	21.56	100	8.97	0.51	—	—	—	0.002	17.80	—
Inconel625	0.015	0.32	0.32	0.004	<0005		21.53	Tr.	8.86	—	3.74	0.16	0.14	—	2.62	—
Inconel617	0.08	0.16	0.03	—	<0007		22.27	12.45	9.13	—	—	0.89	—	—	0.50	—
Inconel82	0.01	0.17	2.92	—	0.007		19.77	—	—	—	2.59	—	0.35	—	0.38	0.03
Incoloy800	0.09	0.14	3.55	0.002	0.007	34.17	20.25	—	—	—	—	0.24	0.27	—	Bal.	—
Incoloy807	0.06	0.38	0.75	0.002	0.009	39.16	20.62	7.93	—	4.89	—	0.39	0.46	—		—

Notes; Melting Process: Vacuum Induction Melting

7. 3 溶接試験板製作要領

溶接継手の機械的試験片を採取するに必要な溶接試験板は以下の要領によって製作した。

7. 3. 1 溶 接 条 件

各耐熱合金について 15 mm 厚さに切削後、Table 7-2 に示す電子ビーム溶接条件および Table 7-3 に示す TIG 溶接条件にて溶接を行なった。

Table 7-2 Electron Beam Welding Conditions

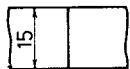
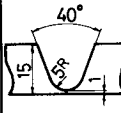
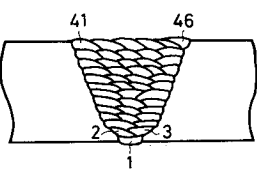
Joint Configuration	Welding Conditions					
	Pch (Torr)	Df (mm)	ab (mm)	Ib (mA)	Vb (kV)	Ub (cm/min)
	5×10^{-4}	225	104	40	150	60

Table 7-3 TIG Welding Conditions

Joint Configuration	Built-up Sequence	Welding Conditions						
		Pass	Dia. of Filler Metal (mm)	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Shield Gas Flow (l/min)	
							Torch	Back-up
		1~3	12	60~70	9~10	50~60	6	10
		4~46	12	70~80	10~11			—

7.3.2 検査方法

溶接部のX線透過試験を行ない、無欠陥であることを確認した。

7.4 溶接部の顕微鏡組織

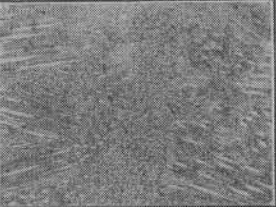
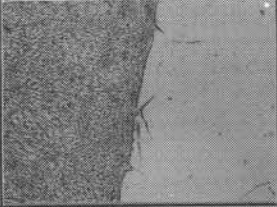
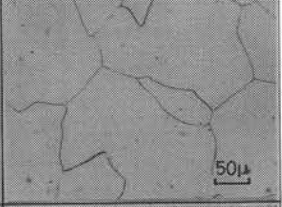
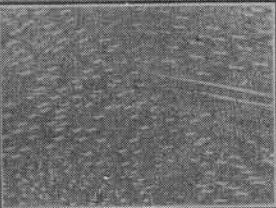
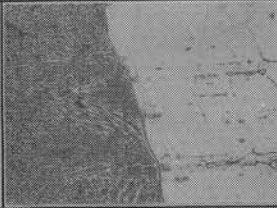
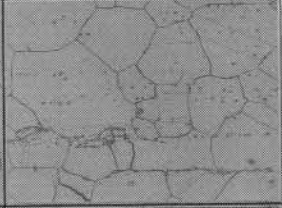
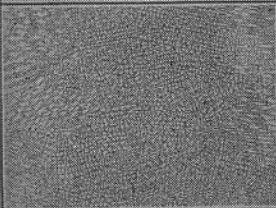
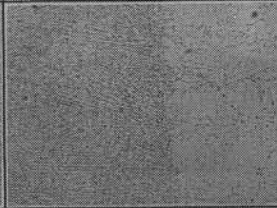
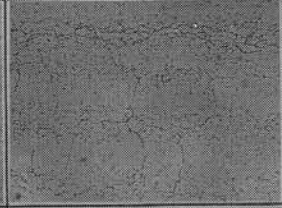
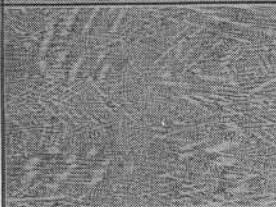
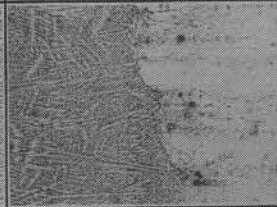
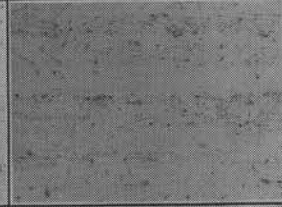
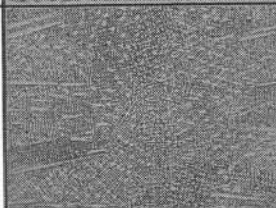
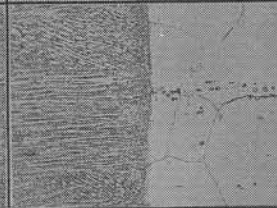
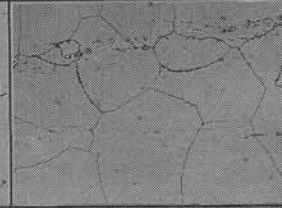
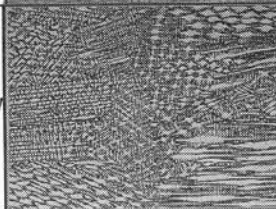
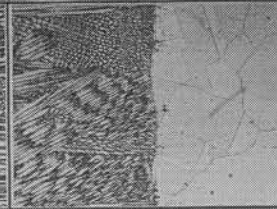
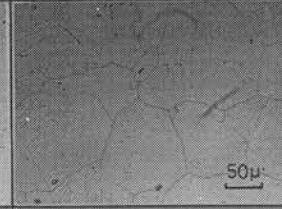
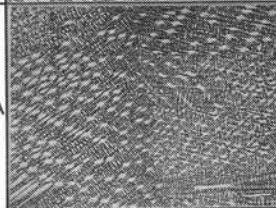
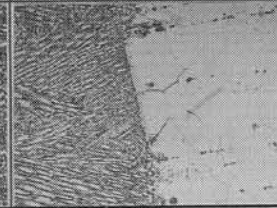
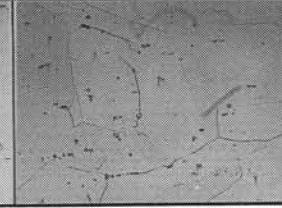
溶接部の顕微鏡組織をTable 7-4 およびTable 7-5 に示す。いずれも正常な組織である。

7.5 溶接部の硬さ試験

溶接部の硬さ試験結果をFig. 7-1 およびFig. 7-2 に示す。Inconel 625を除く各材料の母材はHv 200～220の値を示しているが、Inconel 625はHv 250 前後の値を示しやや高い。溶接部については、Hastelloy X、Incoloy 800、Incoloy 807の硬さはHv 250 前後を示すが、Inconel 625、Inconel 617についてはHv 300 前後のかなり高い値を示している。

一般に、電子ビーム溶接部硬さはTIG溶接部とほぼ同程度の値を示しているが、溶接部硬さは母材硬さに比して高くなっている。

Table 7-4 Microstructure of Electron Beam Welds

Material	Mark	Weld Metal	Boundary	Base Metal
Hastelloy X	HAEN			
	HAEM			
	HVEN			
Inconel 625	Inl 625AE			
Inconel 617	Inl617V			
Incoloy 800	Iny800V			
Incoloy 807	Iny807A			

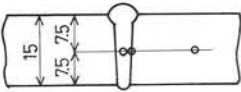
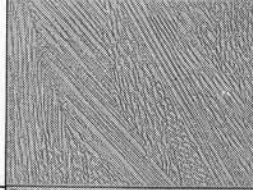
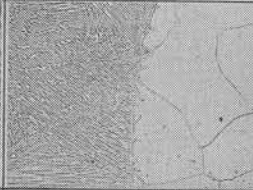
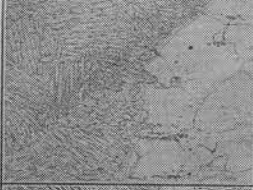
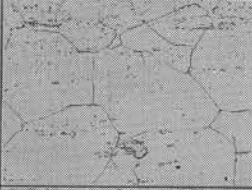
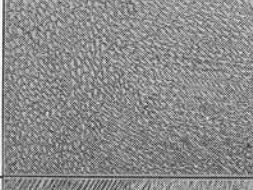
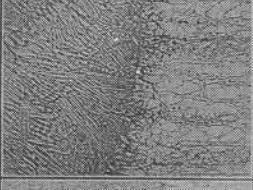
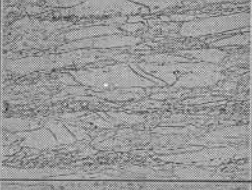
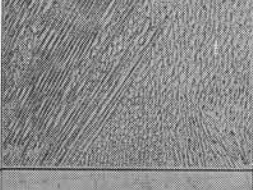
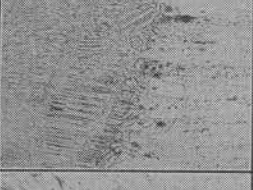
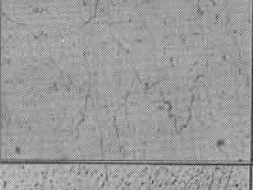
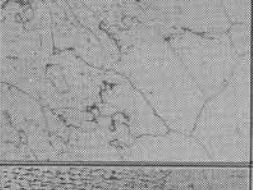
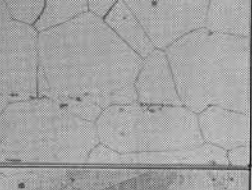
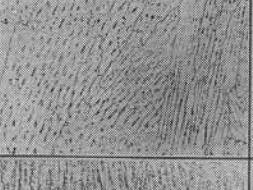
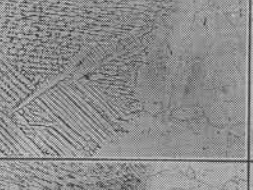
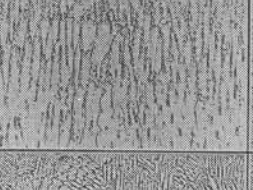
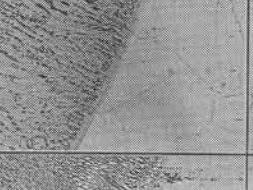
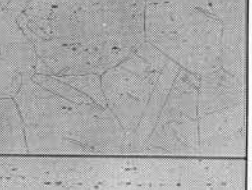
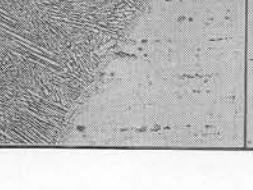
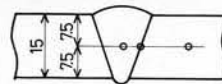


Table 7-5 Microstructure of TIG Welds

Material	Mark	Weld Metal	Boundary	Base Metal
Hastelloy X	HAEN			
	HAEM			
	HVEN			
Inconel 625	Inl 625AE			
Inconel 617	Inl 617V			
Incoloy 800 (Filler Metal: Incoloy 800)	Iny800V			
Incoloy 800 (Filler Metal: Inconel 82)	Iny800V			
Incoloy 807	Iny807A			



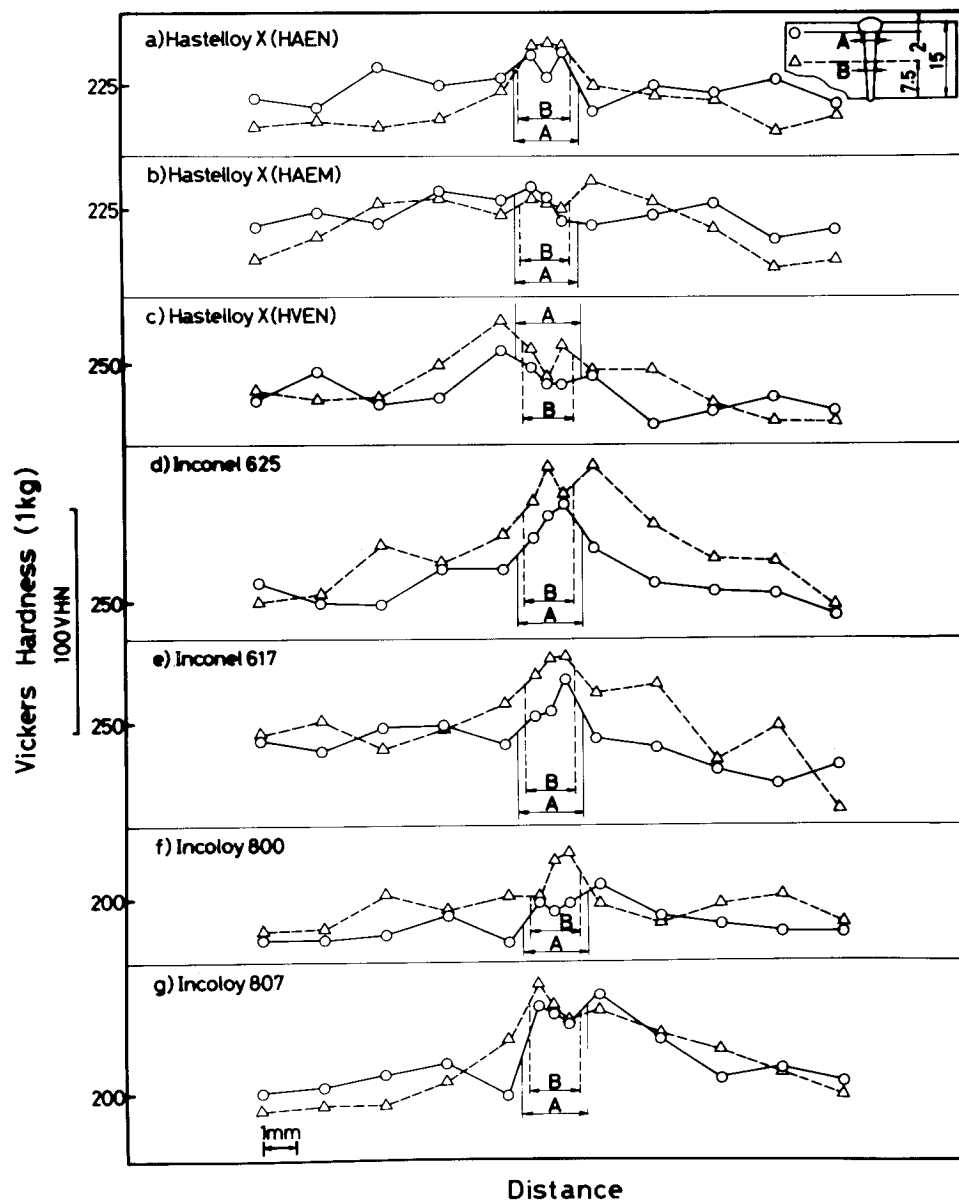


Fig.7-1 Hardness Distribution of Electron Beam Welds

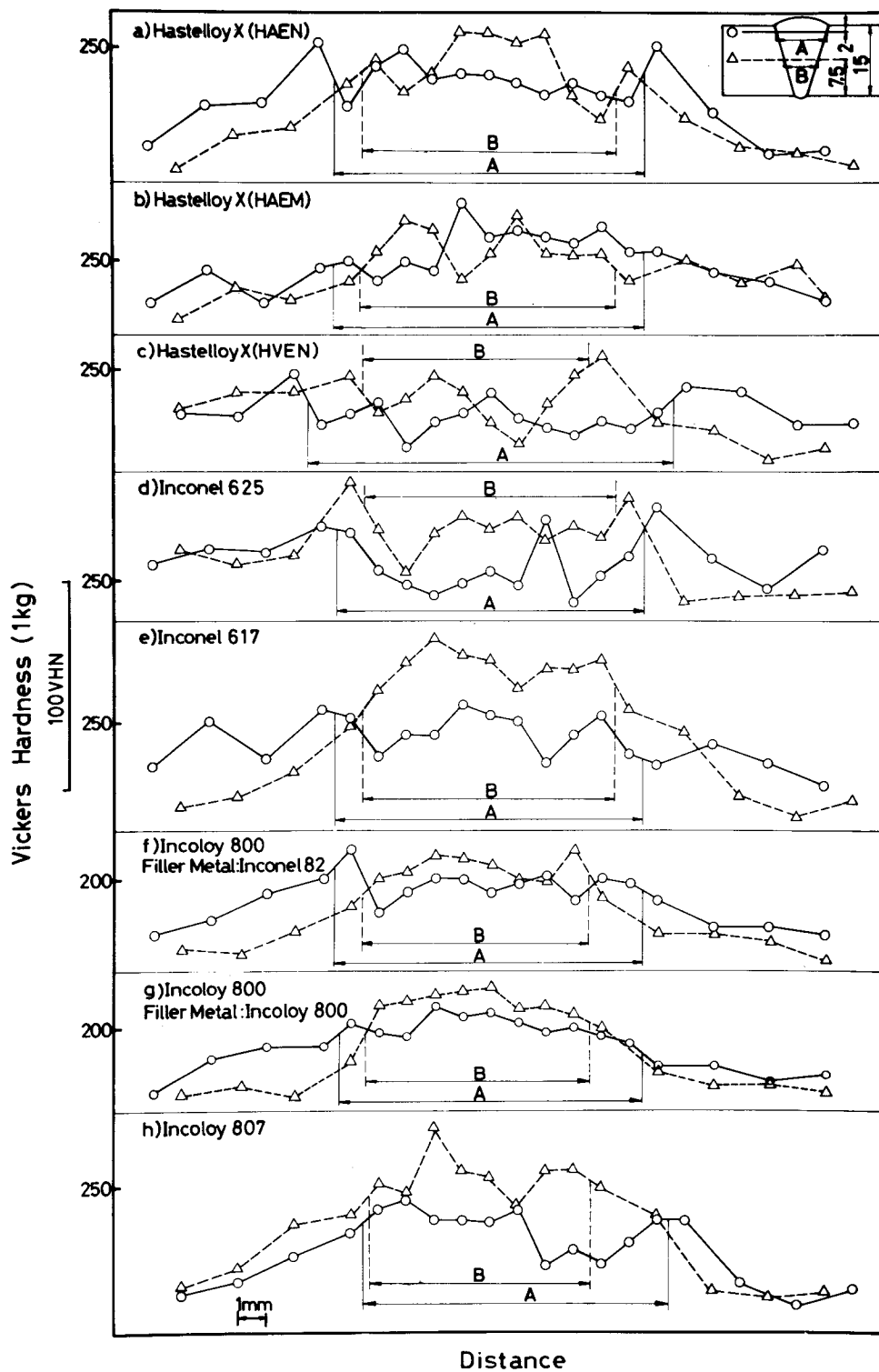


Fig.7-2 Hardness Distribution of TIG Welds

7. 6 溶接継手の静引張 特性

7. 6. 1 試験片形状および試験方法

試験片形状をFig. 7-3に示す。溶接継手試験片については、溶接部が平行部の中央に位置するようにし、板厚中央部から圧延方向に採取した。試験装置は、島津オートグラフ（容量10 ton）を使用し、金属材料引張試験方法（JIS Z 2241）および鉄鋼材料の高温引張試験方法（JIS G 0567）に準拠し、ひずみ速度は耐力まで0.3%/min、耐力以降7.5%/minにて常温、600℃、700℃、800℃、900℃および1000℃の各温度にて静引張試験を行なった。

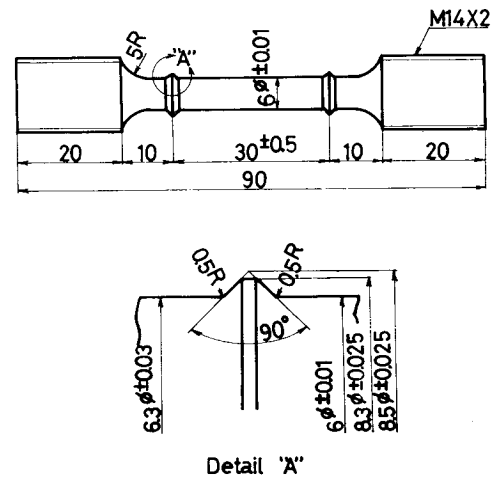


Fig.7-3 Configuration of Tensile Test Specimen

7. 6. 2 実験結果および考察

母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手に対し、常温、600℃、700℃、800℃、900℃および1000℃にて静引張試験を行い、その結果をFig. 7-4～Fig. 7-6に示す。

引張強さおよび0.2%耐力については、母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手の間には殆んど差異は認められない。母材、溶接継手の引張強さおよび0.2%耐力は、温度が上昇するにしたがい低下するが、引張強さおよび0.2%耐力の温度依存性はほぼ等しい。

伸びおよび絞りについては、電子ビーム溶接継手は母材に比較してかなり低下しているが、TIG溶接継手に比較して優れている。なお、母材および溶接継手ともに700～800℃でほぼ最小値を示している。Table 7-6は、各材料の電子ビームおよびTIG溶接継手について、800℃、900℃および1000℃における伸びおよび絞りの母材に対する比率を示したものである。この表からも電子ビーム溶接継手の延性はTIG溶接継手に比して優れていることが判る。

7. 7 溶接継手の高温低サイクル疲労特性

7. 7. 1 実験方法

(1) 試験片形状

試験片形状をFig. 7-7に示す。溶接継手試験片については、溶接部が平行部の中央に位置するようにし、板厚中央部から圧延方向に採取した。

(2) 試験装置

試験装置は、電子油圧サーボ方式による負荷系（±10 ton）と高周波誘導加熱方式による温度

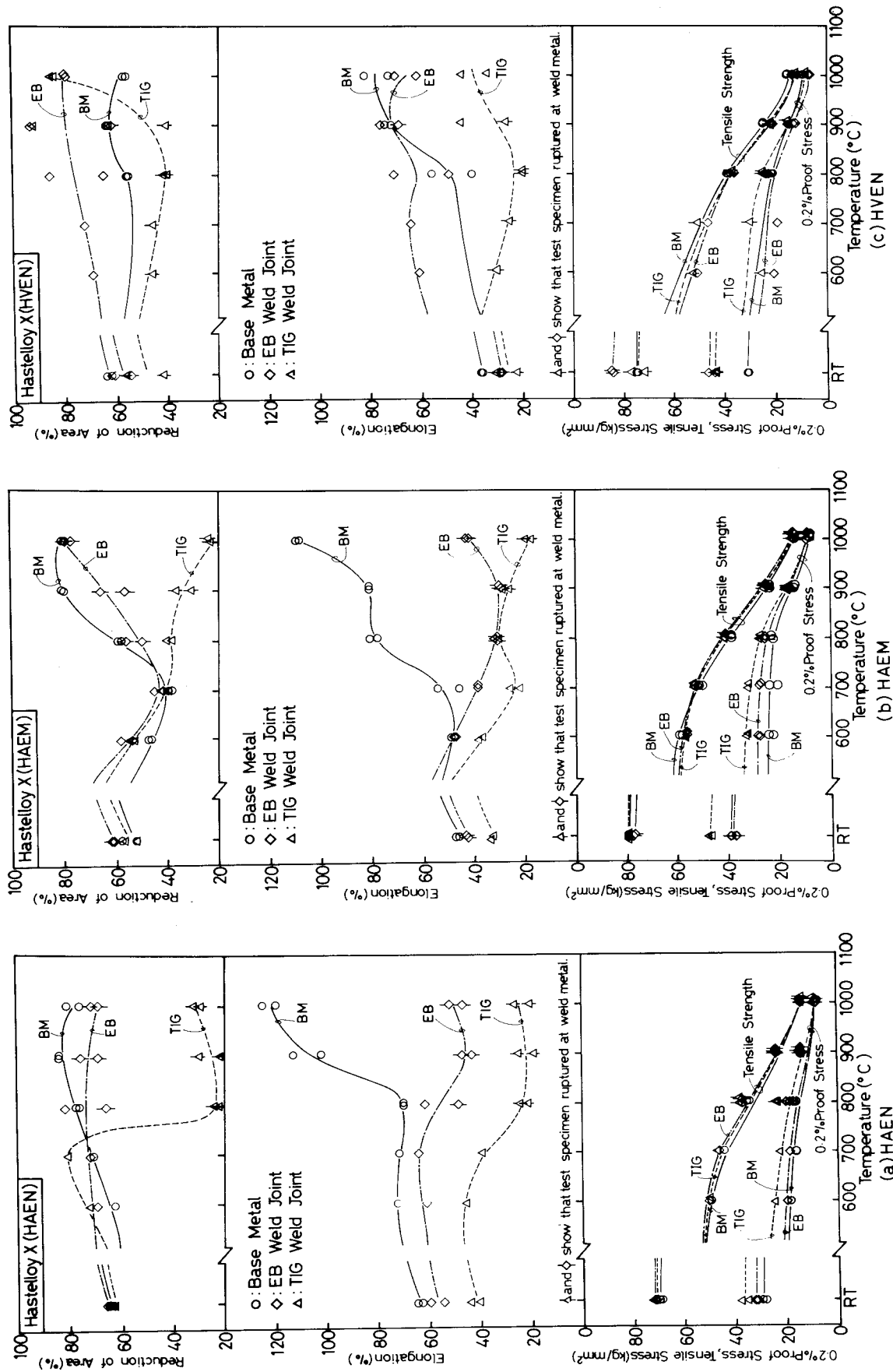


Fig.7-4 Tensile Properties of Base Metal and Weld Joint at Room and Elevated Temperature (Hastelloy X)

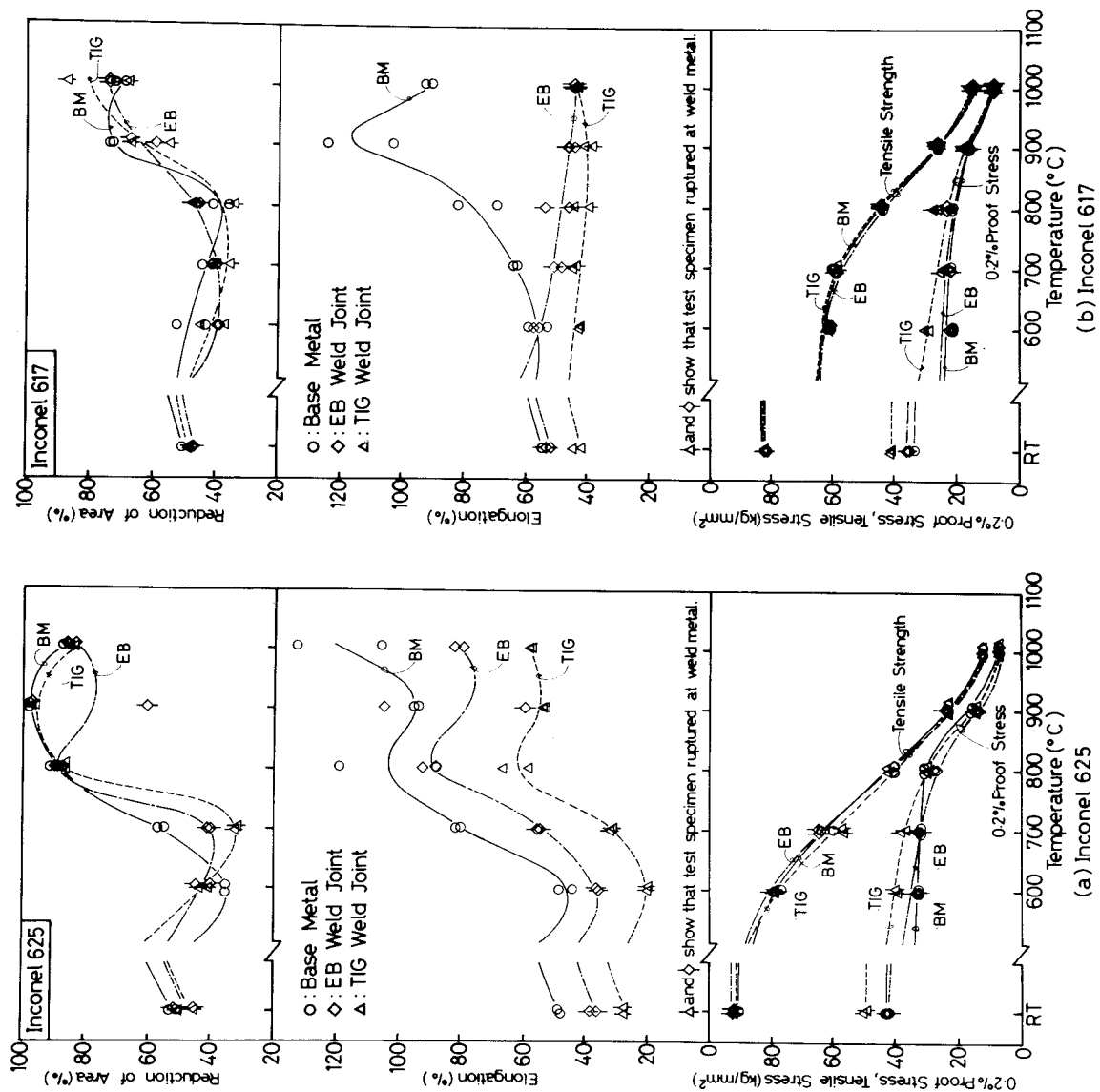


Fig.7-5 Tensile Properties of Base Metal and Weld Joint at Room and Elevated Temperature (Inconel - type Superalloys)

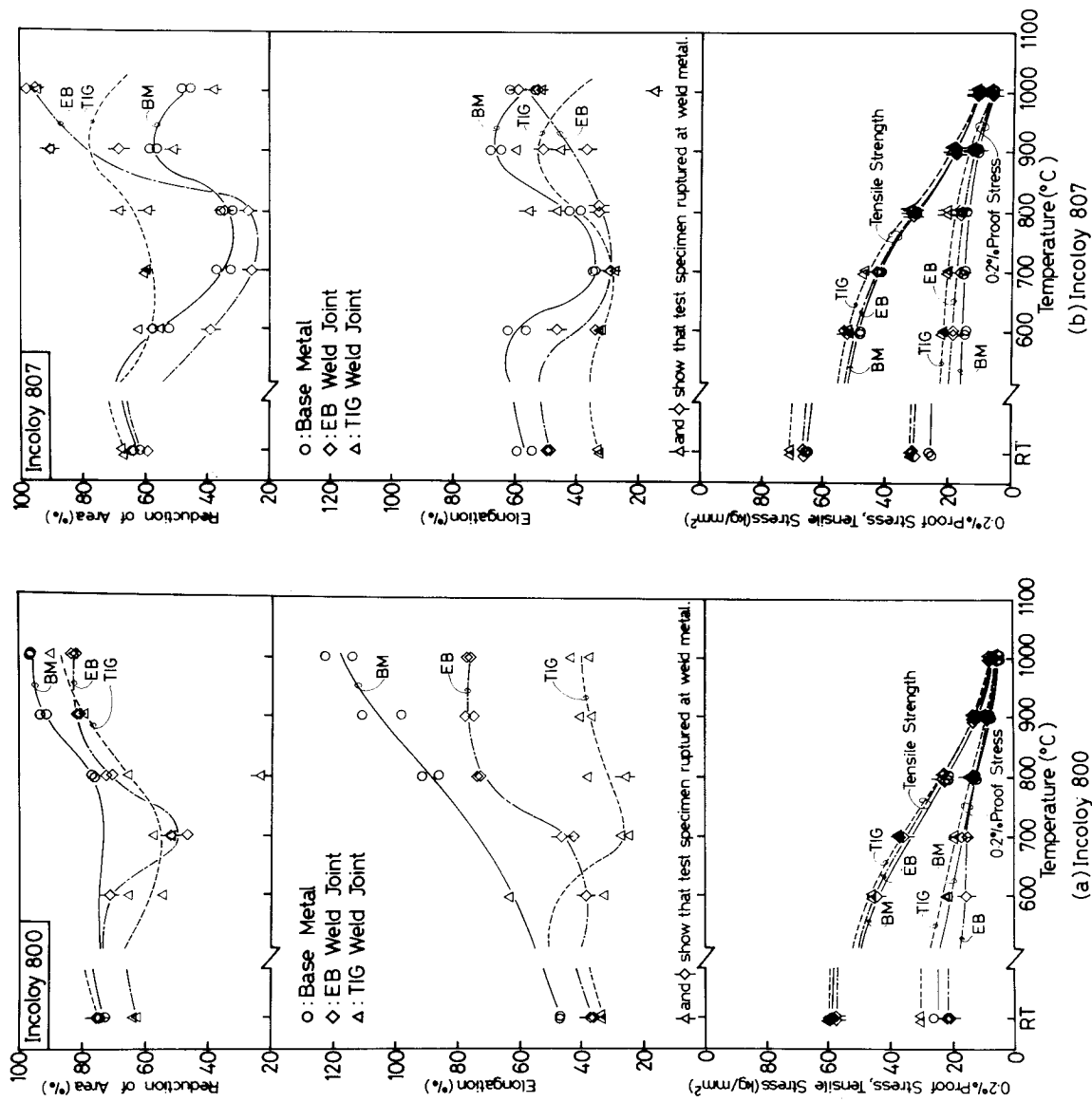


Fig.7-6 Tensile Properties of Base Metal and Weld Joint at Room and Elevated Temperature (Fe-base Superalloys)

Table 7-6 Comparison of Ductility between
Electron Beam and TIG Weld Joint

Material	Mark	Welding Process	800 °C		900 °C		1000 °C	
			A	B	A	B	A	B
HastelloyX	HAEN	EB	0.79	0.96	0.42	0.85	0.40	0.89
		TIG	0.33	0.31	0.21	0.31	0.20	0.40
	HAEM	EB	0.39	0.91	0.36	0.75	0.72	0.96
		TIG	0.39	0.67	0.33	0.42	0.31	0.29
	HVEN	EB	1.23	1.37	0.98	1.22	0.84	1.41
		TIG	0.42	0.75	0.49	1.04	0.50	1.51
Inconel625	Inl625AE	EB	0.87	1.00	0.79	0.80	0.68	0.98
		TIG	0.61	0.97	0.55	0.98	0.45	0.99
Inconel617	Inl617V	EB	0.66	1.19	0.40	0.87	0.47	1.06
		TIG	0.55	0.92	0.35	0.84	0.48	1.11
Incoloy800	Iny800V	EB	0.81	0.90	0.72	0.87	0.54	0.96
		TIG	0.36	0.53	0.37	0.88	0.34	0.90
Incoloy807	Iny807A	EB	1.00	2.37	0.68	1.39	0.99	2.08
		TIG	1.27	1.88	0.80	1.22	0.90	2.00

Notes; A: Elongation's Ratio, Weld Joint to Base Metal
B: Ratio of Reduction of Area, Weld Joint to Base Metal

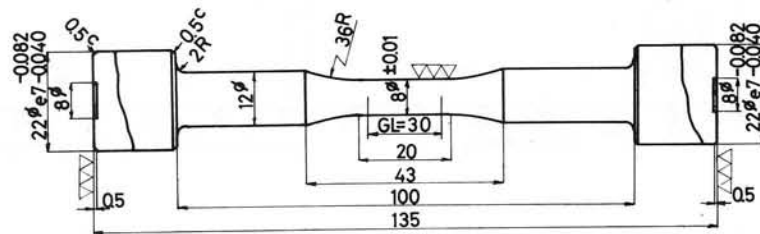


Fig.7-7 Configuration of Fatigue Test Specimen

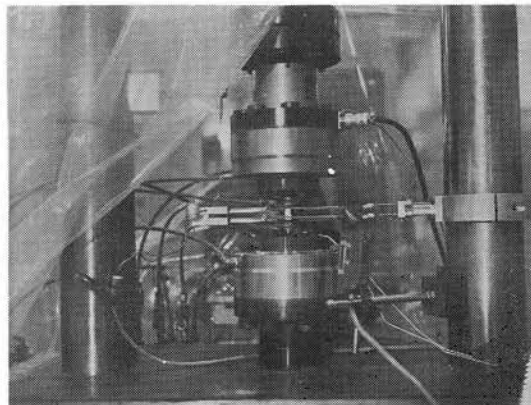


Fig.7-8 Close-up View of Attachment of
Fatigue Test Specimen

制御系（10 kVA，100 kHz）から成っている。Fig. 7-8 に試験片取付部周辺の構造を示す。試験片の伸びは、石英ガラスの一端を試験片表面に押し当て、挺子で拡大し、他端のDTF方式接触子型変位計を用いて検出している。温度検出は、試験片中央部にPR熱電対（Rh 13%，0.3φ）を抵抗溶接して行なっている。温度の変動は設定値に対して $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内である。試験片温度分布は、中央部が常に最高温度となるが、標点間の温度差は 10°C 以内であり、均熱を十分満足している。

(3) 試験条件

試験温度 900°C ， 1000°C ，ひずみ速度 $0.1\% \text{ sec}^{-1}$ にて，完全両振対称波形の三角波を使用し，ひずみ制御試験を行なった。

7.7.2 実験結果および考察

(1) 疲労強度

Fig. 7-9 は以下に述べる実験結果のグラフに使用されるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ ，全ひずみ範囲域 ϵ_{tR} ，その塑性ひずみ範囲域 ϵ_{pR} を図解したものである。

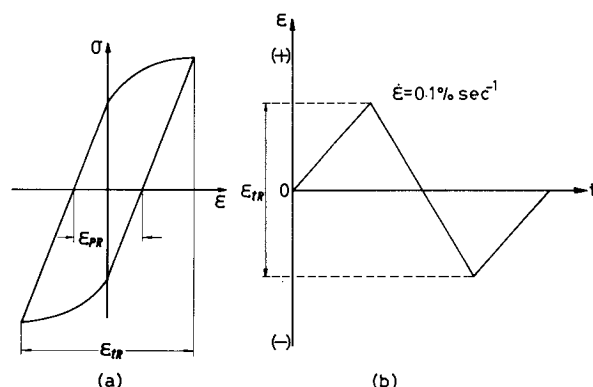


Fig.7-9 Schematic Explanation of ϵ_{tR} , ϵ_{pR} and Strain Pattern

Fig. 7-10 および Fig. 7-11 は各材料についての実験結果であり， 900°C ， 1000°C における $\epsilon_{tR}-N_{50}$ 線図および $\epsilon_{pR}-N_{50}$ 線図としてまとめたものである。 N_{50} は引張荷重が初期値の $1/2$ に低下した場合の繰返数であり，破損繰返数と定義している。

母材および溶接継手について， $\epsilon_{tR}-N_{50}$ 線図は曲線関係であるが， $\epsilon_{pR}-N_{50}$ 線図には直線関係が認められ，長寿命側のデータは直線外挿より推定できる。この線図より，電子ビーム溶接継手の寿命はTIG溶接継手よりかなりすぐれており，母材と同等のものが多。また， 900°C の線図と 1000°C の線図の間には大きい差異は認められない。

なお，TIG溶接継手はすべて溶接金属部破断，電子ビーム溶接継手については母材破断または

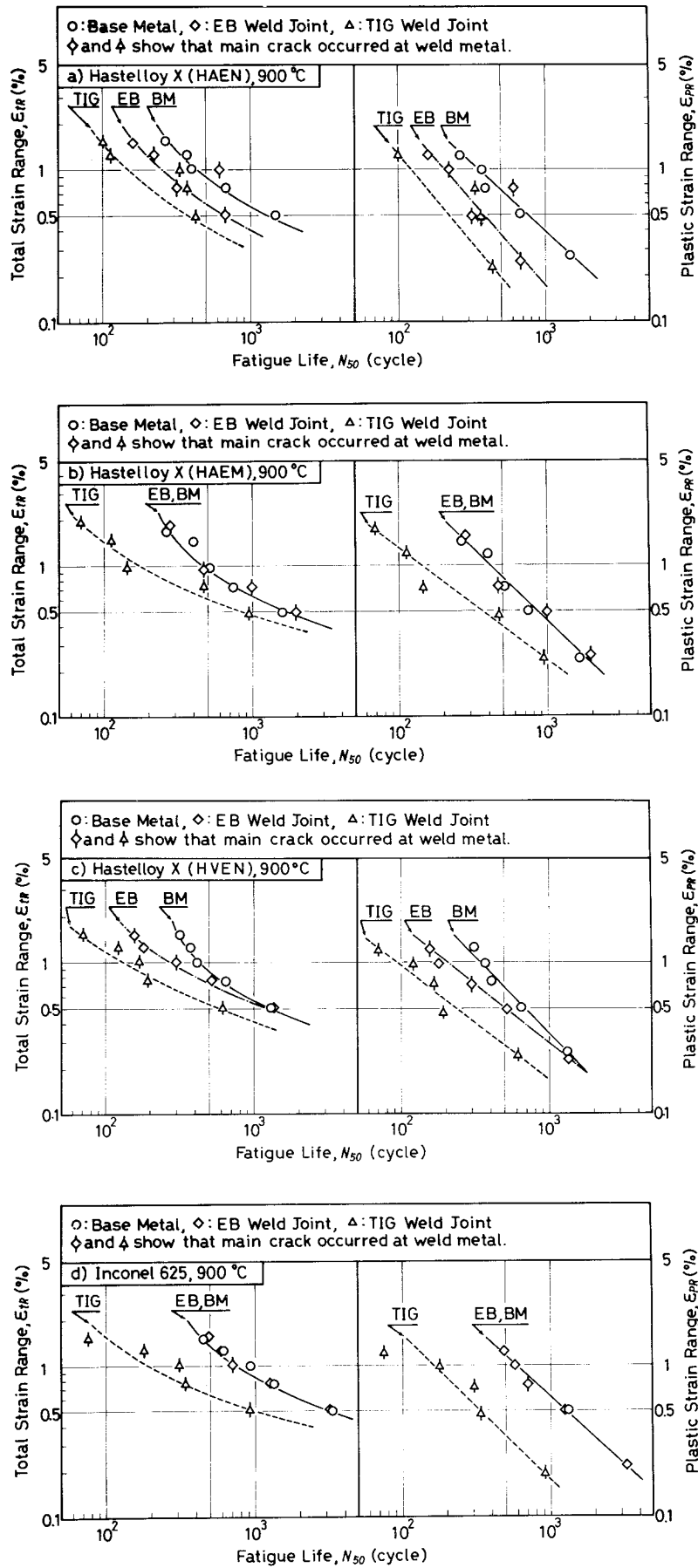


Fig.7-10 Fatigue Properties of Base Metal and Weld Joint at 900°C

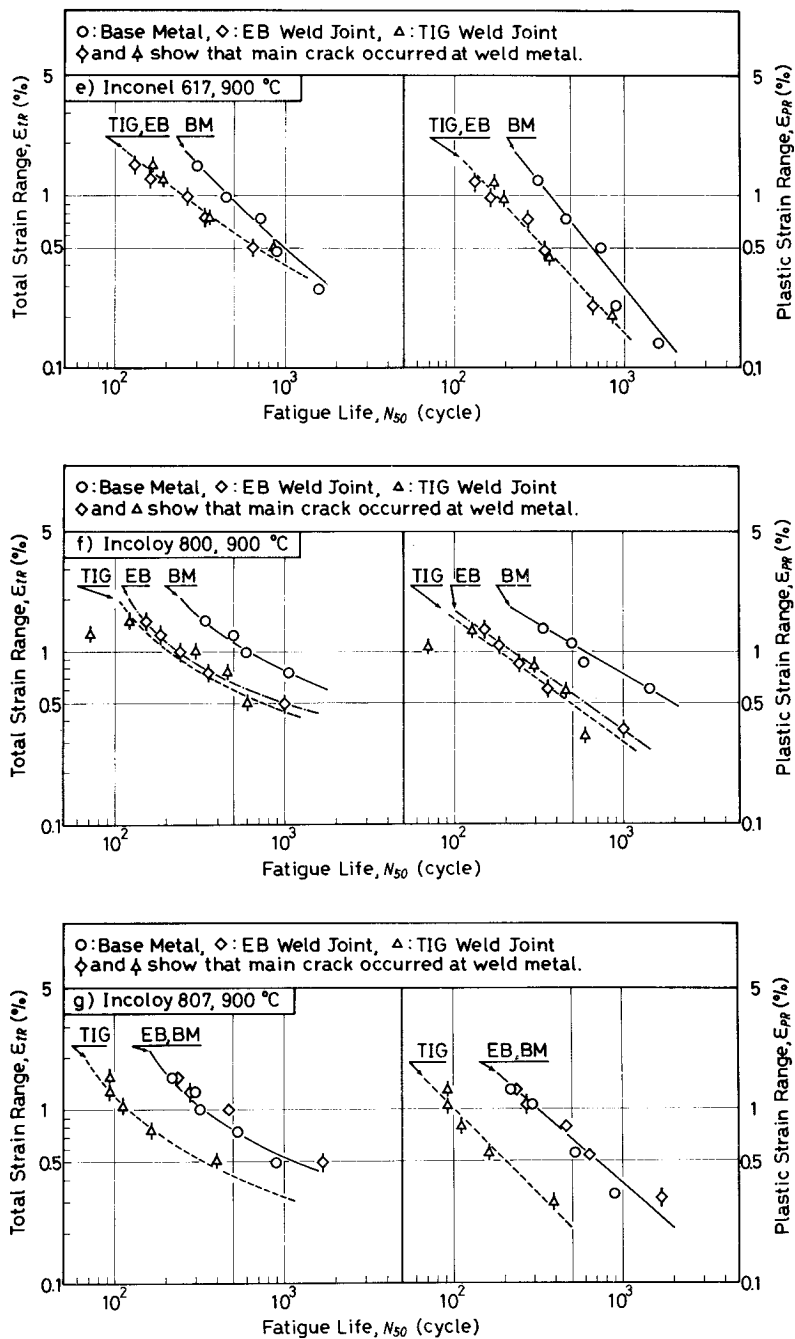


Fig.7-10 Fatigue Properties of Base Metal and Weld Joint at 900°C

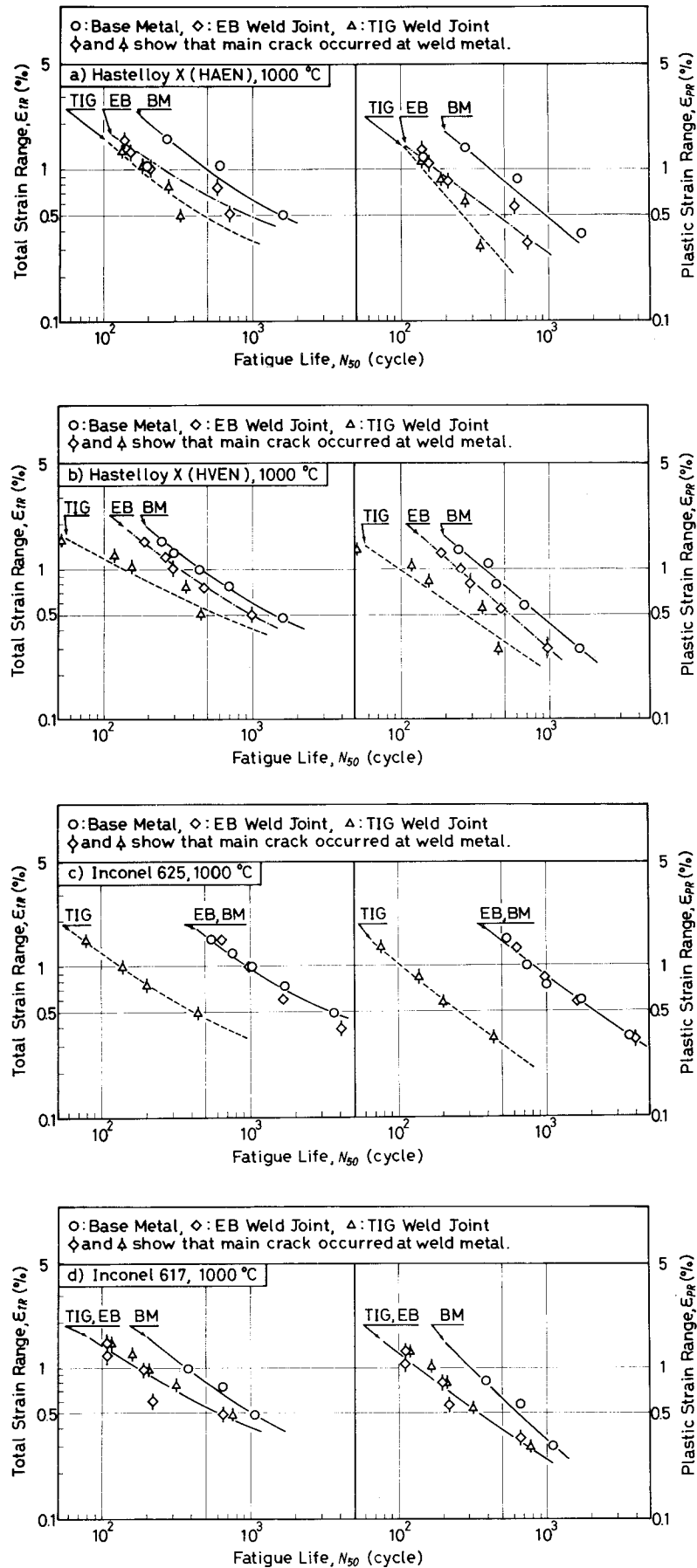


Fig.7-11 Fatigue Properties of Base Metal and Weld Joint at 1000°C

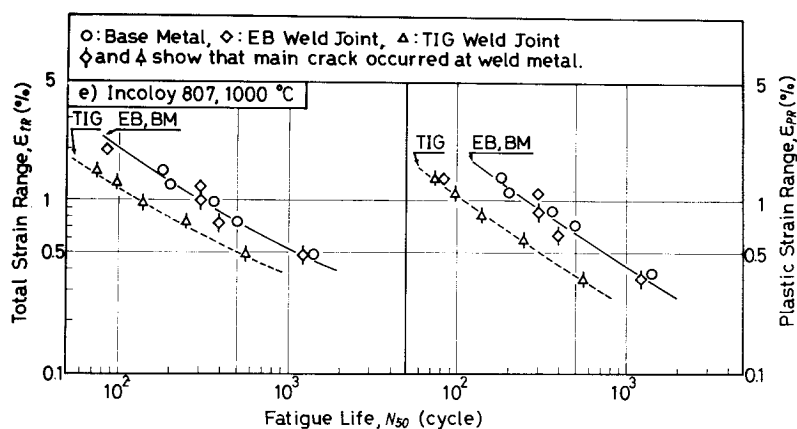


Fig.7-11 Fatigue properties of Base Metal and Weld Joint at 1000°C

溶接金属部破断である。一般に溶接金属部破断は母材に比して寿命が低下している。

Table 7-7 は 900 °C および 1000 °C における $\epsilon_{tR} = 0.5\%$ のときの N_{50} を各材料の母材および溶接継手について比較し、また、溶接継手については母材に対する寿命の比率を示した。なお、1000 °C の場合は表中 () 内にその数値を示した。

900 °C においては、電子ビーム溶接継手に関しては、HAEM, HVEN,

Inconel 625, Incoloy 807 は母材と同等の寿命を示すが、HAEN, Inconel 617, Incoloy 800 については母材に対する寿命の比率は約 0.5 以下、TIG

溶接継手に関しては、各材料について約 0.5 以下である。また、1000 °C においては、電子ビーム溶接継手に関しては、

Inconel 625, Incoloy 807 は母材と同等の寿命を示すが、HAEN, HVEN,

Inconel 617 については母材に対する寿命の比率は約 0.6, TIG 溶接継手に関しては、各材料について約 0.5 以下である。

上述したように、電子ビーム溶接継手

Table 7-7 Comparison of Fatigue Life between Electron Beam and TIG Weld Joint at 900°C (1000 °C)

Material	Mark	$N_{50}(\epsilon_{tR}=0.5\%)$			$N_{50,WJ}/N_{50,BM}$	
		BM	EB	TIG	EB	TIG
Hastelloy X	HAEN	1400	680	390	0.49	0.28
		(1500)	(900)	(440)	(0.60)	(0.29)
	HAEM	1700	1700	800	1	0.47
	HVEN	1300	1300	620	1	0.48
		(1450)	(1000)	(580)	(0.69)	(0.40)
Inconel 625	Inl625AE	3300	3300	1000	1	0.30
		(3300)	(3300)	(420)	(1)	(0.13)
Inconel 617	Inl617V	1000	670	880	0.67	0.88
		(1050)	(660)	(660)	(0.63)	(0.63)
Incoloy 800	Iny800V	5000	1000	680	0.20	0.14
Incoloy 807	Iny807A	1250	1250	350	1	0.28
		(1200)	(1200)	(550)	(1)	(0.46)

Notes: N_{50} Fatigue Life defined as Number of Cycles at which Load decreases to half of Initial one

$N_{50,WJ}$: Fatigue Life N_{50} of Weld Joint

$N_{50,BM}$: Fatigue Life N_{50} of Base Metal

BM: Base Metal

EB: Electron Beam Weld Joint

TIG: TIG Weld Joint

は母材と同等の値を示す材料が多いが、TIG 溶接継手は各材料について母材に対する寿命の比率は約 0.5 以下であり、電子ビーム溶接継手の高温疲労強度は TIG 溶接継手に比して優れていることは明らかである。

7.6 項において述べたように、静引張試験における延性は、母材が最も大きく、電子ビーム溶接継手、TIG 溶接継手の順に低下している。定性的には、定ひずみ型高温低サイクル疲労強度は、静引張試験における延性への依存度が大であると言われている²⁵⁾が、前述した高温低サイクル疲労試験から得られた結果でも疲労強度は静引張試験の延性と同様の傾向を示している。

(2) 破断部の組織

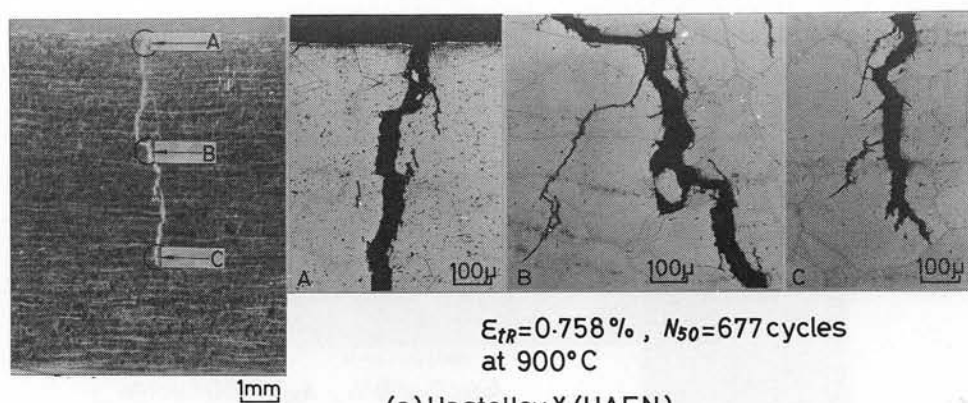
Fig. 7-12 ~ Fig. 7-14 はき裂断面の顕微鏡写真の代表例である。900 °C で行なった各材料の試験片断面のき裂の様相を 10 倍の倍率にて示し、また起点および先端部については 100 倍の倍率で示した。

母材試験片に関しては、Fig. 7-12 の代表例に示すようにき裂は結晶粒内または粒界を起点とし、粒内または粒界を横切って伝播している。主き裂の近傍に多数の微細なき裂が認められ、また主き裂の先端に多数の微小き裂の発生が認められる。この事実から、先づ試験片の表面にき裂が発生すると、そのき裂の先端近傍に微細なき裂が粒内および粒界に多数発生し、これらのき裂が連結、合体して主き裂に成長すると考えられる。なお、後述の電子ビーム溶接および TIG 溶接試験片の伝播機構に関しても、き裂の形態より母材と同様であると考えられる。なお、Incoloy 800 については、Fig. 7-12 (c) に示すように、試験片表面に主き裂以外の多くの微小き裂の存在が認められるが、他の材料については殆んど認められない。

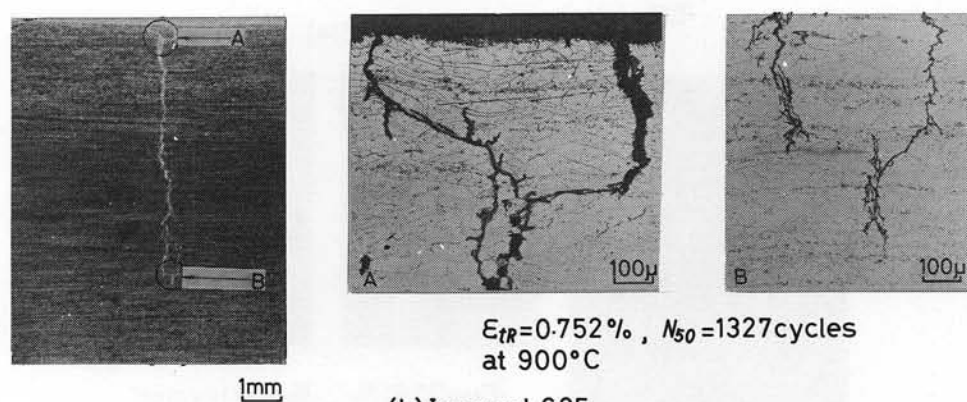
電子ビーム溶接試験片に関しては、き裂は母材または溶接金属を起点として発生している。HAEN および HAEM の溶接金属に認められるき裂は、一例として Fig. 7-13(a) に示すように柱状晶界に沿って発生した微細なき裂を連結、合体して主き裂に成長し、柱状晶を横切って応力軸に対してほぼ直角に伝播している。Incoloy 800 の溶接金属に認められるき裂は、Fig. 7-13 (c) に示すように溶接金属の中央部（柱状晶が相接する部分）を直線的に伝播している。HVEN, Inconel 625 および Incoloy 807 に関しては、一例として Fig. 7-13 (b) に示すように主き裂は母材に発生している。

TIG 溶接試験片に関しては、き裂は溶接金属において、柱状晶の粒内および粒界を起点として発生している。Incoloy 800 を除く各材料については、Fig. 7-14(a) の代表例に示すように主き裂は、溶接金属内を応力軸に対しほぼ直角方向に、柱状晶の粒内および粒界を通り伝播している。

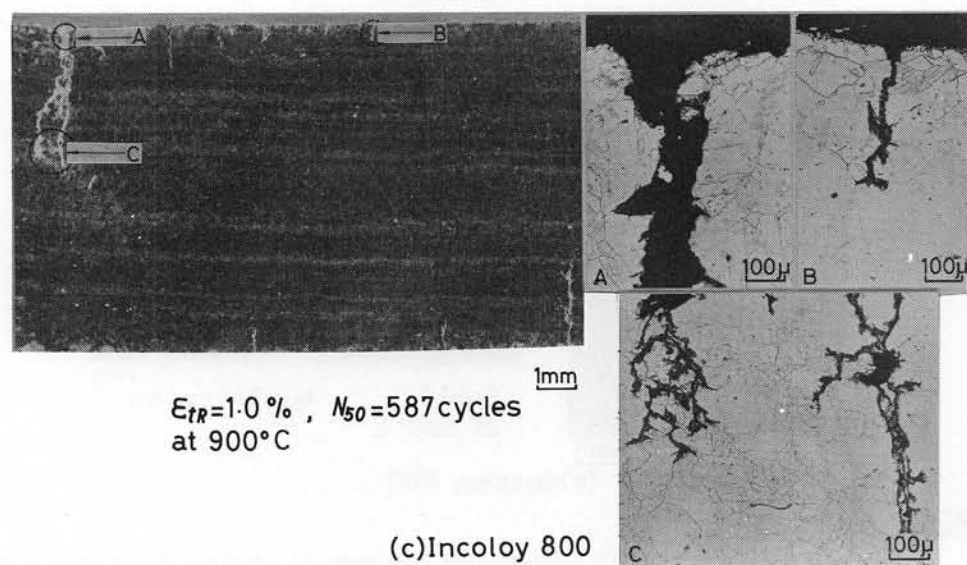
Incoloy 800 については、Fig. 7-14 (b) に示すように凝固線近傍の溶接金属の柱状晶境界に微細なき裂が発生し、これらが連結、合体して主き裂に成長している。



(a) Hastelloy X (HAEN)

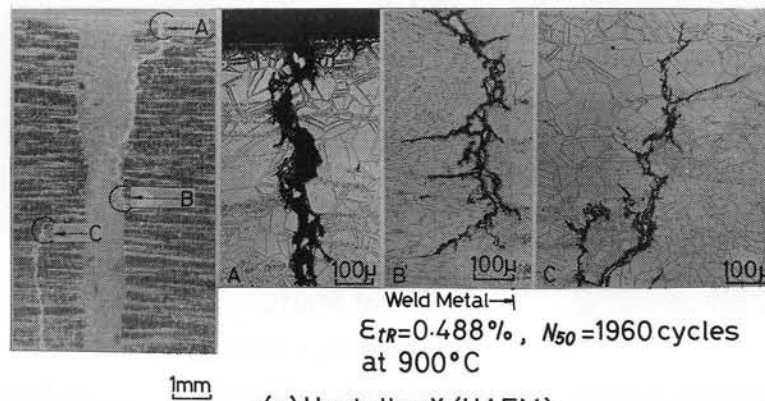


(b) Inconel 625

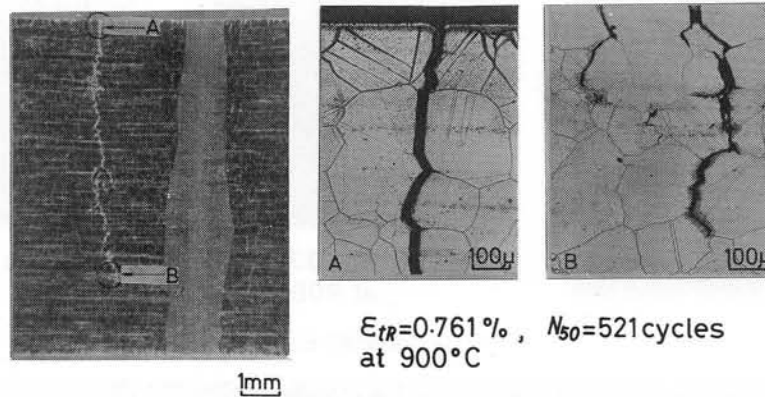


(c) Incoloy 800

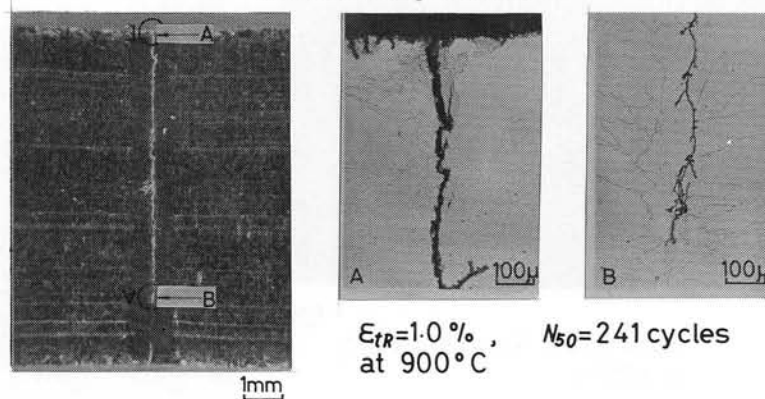
Fig.7-12 Microstructure of Fatigue Test Specimen of Base Metal



(a) Hastelloy X (HAEM)



(b) Hastelloy X (HVEN)



(c) Incoloy 800

Fig.7-13 Microstructure of Fatigue Test Specimen of Electron Beam Weld Joint

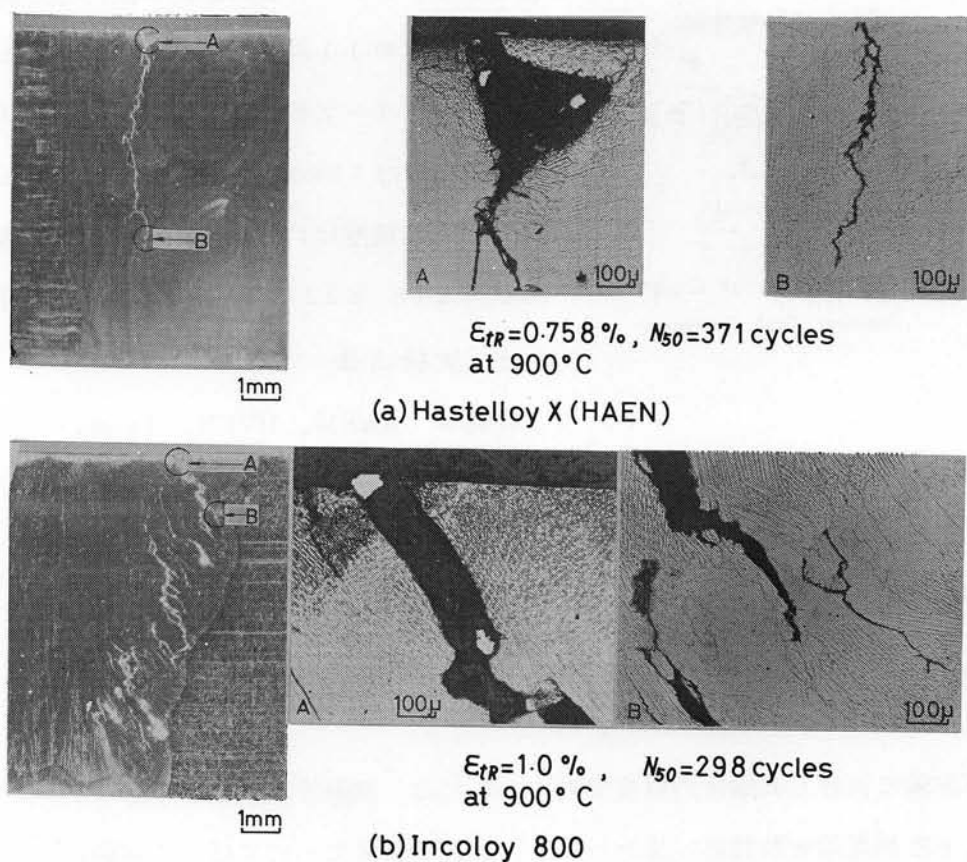


Fig.7-14 Microstructure of Fatigue Test Specimen of TIG Weld Joint

7.8 溶接継手のクリープおよびクリープ破断特性

7.8.1 実験方法

(1) 試験片形状

クリープおよびクリープ破断試験片形状を、Fig. 7-15 および Fig. 7-16 に示す。溶接継手試験片については溶接部が平行部の中央に位置するようにし、いずれも板厚中央部から圧延方向に採取した。試験片の平行部は $6\text{ mm}\phi$ に仕上げ、表面あらさは 6S とした。

(2) 試験装置

クリープ試験に使用した試験装置は、試験片平行部の左右伸びの測定が可能である 10 対 1 のレバー比を有する通常のレバー式シングル型クリープ試験

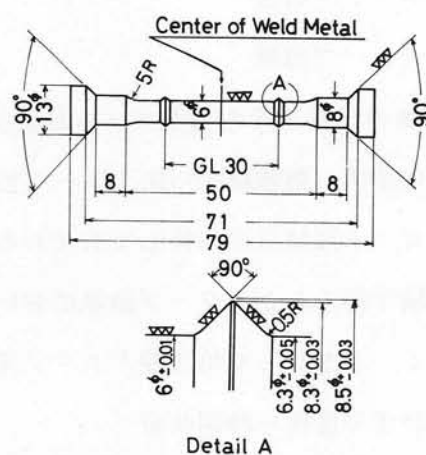


Fig.7-15 Configuration of Creep Test Specimen

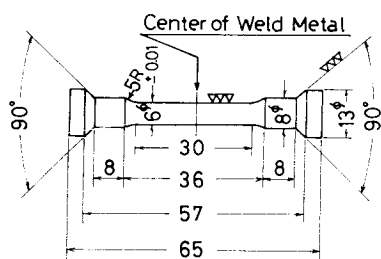


Fig. 7-16 Configuration of Creep Rupture Test Specimen

機である。クリープ破断試験に使用した試験装置は 3 本吊り、6 連の 10 対 1 のレバー比を有するレバー式マルチプル型クリープ破断試験機である。両試験装置とも最高使用温度は 1100℃、最大荷重は 1 ton であり、温度および荷重精度はいつでも金属材料の引張クリープ試験方法（JIS Z 2271）に規定された範囲内にある。

(2) 試験方法

HAEN, HAEM, HVEN, Inconel 625, Inconel 617, Incoloy 800, Incoloy 807 の母材および HAEM の TIG および電子ビーム溶接継手についてクリープ試験を行ない、また、各材料の TIG および電子ビーム溶接継手についてクリープ破断試験を行なった。クリープおよびクリープ破断試験はそれぞれ金属材料の引張クリープ試験方法（JIS Z 2271）および金属材料の引張クリープ破断試験方法（JIS Z 2722）に準拠し、大気中、900℃において定荷重下で行なった。

クリープ試験における試験片の温度管理については、試験片標点間（GL = 30 mm）の両端および中央部に PR 熱電対を取付け、また、クリープ破断試験については、各試験片に PR 熱電対を取付けて、それらの温度値を温度記録紙上に記録させると共に、原則として 1 日 2 回デジタル温度計にて温度測定を行なった。いずれの試験においても試験片の温度分布は ± 3℃以内に制御した。

クリープ試験におけるクリープ伸びの測定については、試験片標点間（GL = 30 mm）の左右の伸びを治具を用いて、1/100 mm 目盛のダイヤルゲージにて行ない、その平均値をクリープ伸びとした。測定は原則として 1 日 2 回行なった。

7.8.2 実験結果および考察

(1) クリープ特性

(a) クリープ曲線

HAEM の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の 900℃におけるクリープ曲線を Fig. 7-17 に示す。溶接継手の耐クリープ性はいずれも母材に比して大であり、また、TIG 溶接継手は電子ビーム溶接継手に比して大である。

本実験で得られたクリープ曲線においては、第 1 期、第 2 期および第 3 期クリープ段階が明りょうでなく、したがって第 2 期クリープ開始点および第 3 期クリープ開始点の決定が困難である。

(b) ひずみ速度－時間曲線

本実験における HAEM の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手のクリープ曲線では前項で述べたように、各期のクリープ段階が不明りょうなため、両対数表示のひずみ速度－時間曲線から 3

段階の状態を確認し、第2期クリープひずみ速度、第3期クリープ開始時間を求めた。この場合任意の時間 t_n (n 回目の計測までの試験時間) におけるクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_n$ は、時間 t_n のクリープひずみ ϵ_n の実測値および時間 t_{n-1} ($n-1$ 回目の計測までの試験時間) のクリープひずみ ϵ_{n-1} の実測値から

$$\dot{\epsilon}_n = \frac{\epsilon_n - \epsilon_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}$$

として算出した。Fig. 7-18 は母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手のひずみ速度-時間曲線を示したものである。時間の増大に従ってひずみ速度の減少する部分が第1期クリープ段階、時間が増大してもひずみ速度のほぼ一定している部分が第2期クリープ段階、時間の増大に伴いひずみ速度が増大する部分が第3期クリープ段階に相当する。この曲線によると、第1期、第2期および第3期クリープ段階は比較的明りょうに判別できる。

(c) 第2期クリープひずみ速度

ひずみ速度-時間曲線より求めたHAEMの母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手の第2期クリープひずみ速度と負荷応力の関係を両対数表示で整理してFig. 7-19に示す。いずれも第2期クリープひずみ速度と負荷応力の間には直線関係が認められる。実験した範囲内ではいずれの応力においても母材の第2期クリープひずみ速度が最も大きく、電子ビーム溶接継手、TIG溶接継手

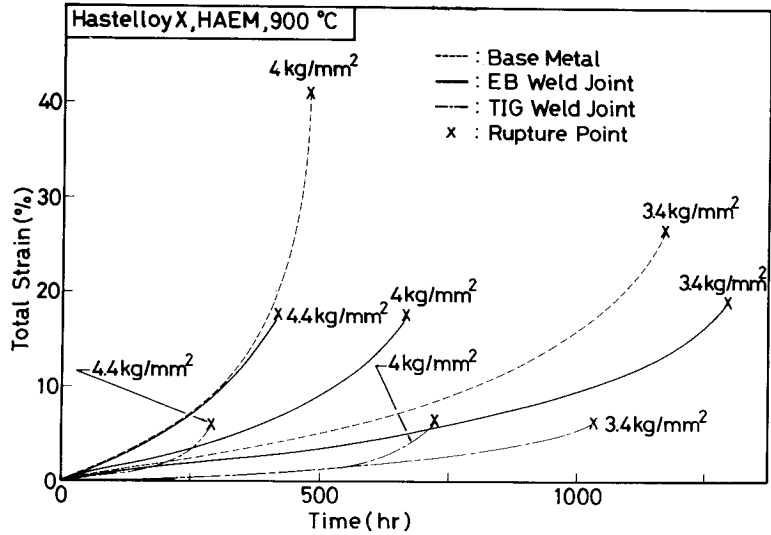


Fig.7-17 Creep Curves for Base Metal and Weld Joint of Hastelloy X (HAEM)

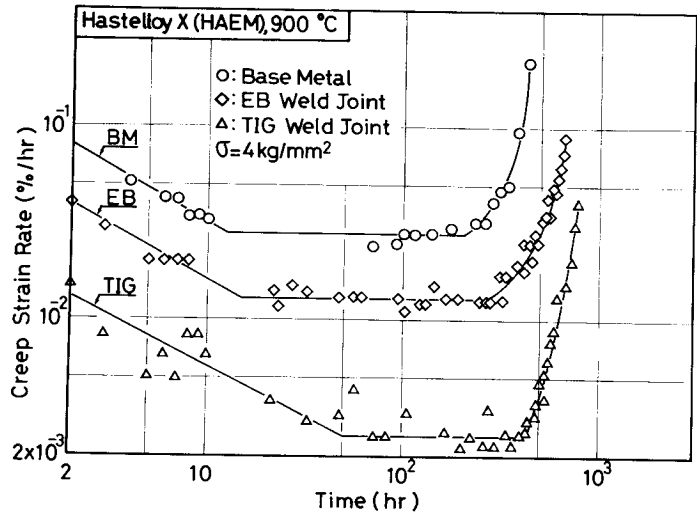


Fig.7-18 Creep Strain Rate Curves for Base Metal and Weld Joint of Hastelloy X (HAEM)

の順に小になる。

(d) 第3期クリープ開始時間

HAEMの母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手の第3期クリープ開始時間と負荷応力の関係を両対数表示で整理してFig. 7-19に示す。いずれも第3期クリープ開始時間と負荷応力の間には直線関係が認められる。実験した範囲内では、いずれの応力レベルにおいても第3期クリープ開始時間は電子ビーム溶接継手が最も長く、TIG溶接継手と母材はほとんど差異は認められない。

Fig. 7-20 は第3期クリープ開始時間と破断時間の関係を示したものである。電子ビームおよびTIG溶接継手の間には殆んど差異は認められない。

(e) Larson-Miller Parameter

HAEMの母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手の第2期クリープひずみ速度および第3期クリープ開始時間をLarson-Miller Parameterで整理した結果をそれぞれFig. 7-21に示す。Parameter定数は、Hastelloy Xのような耐熱合金については15が良く一致すると報告²⁶⁾されているので15とした。

図中に製造履歴の異なるHastelloy Xについて求めた一次回帰直線および95%信頼限界²⁷⁾を示してある。本実験において得られた母材とその電子ビー

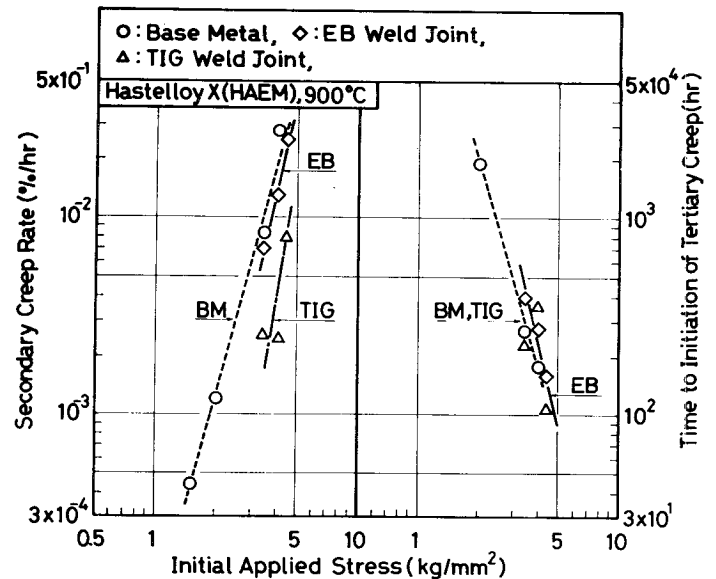


Fig.7-19 Initial Applied Stress vs Secondary Creep Strain Rate and Time to Initiation of Tertiary Creep for Hastelloy X (HAEM)

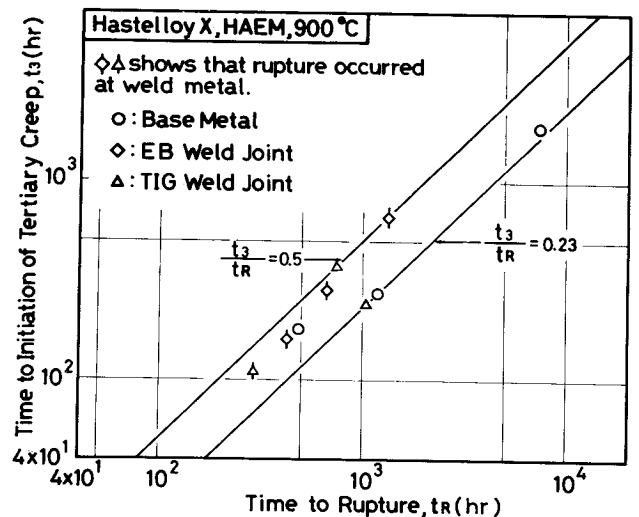


Fig.7-20 Relation between Time to Rupture and Time to Initiation of Tertiary Creep for Hastelloy X (HAEM)

ムおよび TIG 溶接継手の第 2 期クリープひずみ速度の Larson-Miller Parameter による整理の結果はいずれも 95 %信頼限界内に入っており、かつ、母材はほぼ一次回帰直線上に、また電子ビームおよび TIG 溶接継手は一次回帰直線と上側 95 %信頼限界内にある。いっぽう、第 3 期クリープ開始時間の Larson-Miller Parameter による整理においては、母材は Hastelloy X の一次回帰直線と下側 95 %信頼限界の間に、電子ビームおよび TIG 溶接継手は一次回帰直線と上側 95 %信頼限界の間にある。

(2) クリープ破断特性

(a) 破断強度

各材料の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手に対するクリープ破断試験より得られた破断時間と負荷応力の関係を Fig. 7-22 に示す。

HAEN と HAEM の電子ビームおよび TIG 溶接継手の破断強度については、母材強度と殆んど差異は認められない。HVEN については、電子ビーム溶接継手は、母材とほぼ同等の破断強度を示すが、TIG 溶接継手の破断強度は母材に比して低下しており、とくに長時間側で低下が著しくなっている。TIG 溶接継手の破断位置はすべて母材であり、母材との破断強度の差異の原因については明らかでない。

Inconel 625, Inconel 617 および Incoloy 807 については、電子ビームおよび TIG 溶接継手の破断強度は母材の破断強度と殆んど差異は認められない。Incoloy 800 については、電子ビーム溶接継手は母材破断であり、母材の破断強度と殆んど差異が認められないが、TIG 溶接継手はすべて溶接金属部破断であり、母材のクリープ破断強度よりも低下している。

(b) Larson-Miller Parameter

HAEN, HAEM および HVEN の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手について得られた破断時間を Larson-Miller Parameter, $T(15 + \log t_R)$ で整理した結果を Fig. 7-23 に示す。なお、それぞれの図中に製造履歴の異なる Hastelloy X について求めた一次回帰直線および

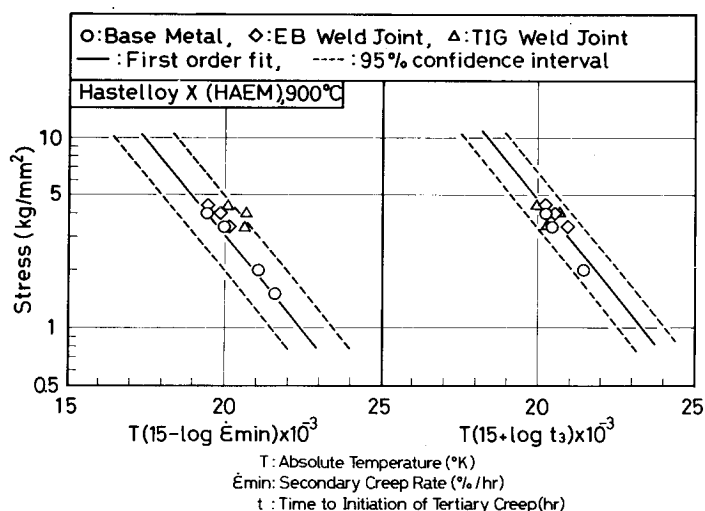


Fig. 7-21 Larson-Miller Plots of Stress vs Secondary Creep Rate and Stress vs Time to Initiation of Tertiary Creep for Hastelloy X (HAEM)

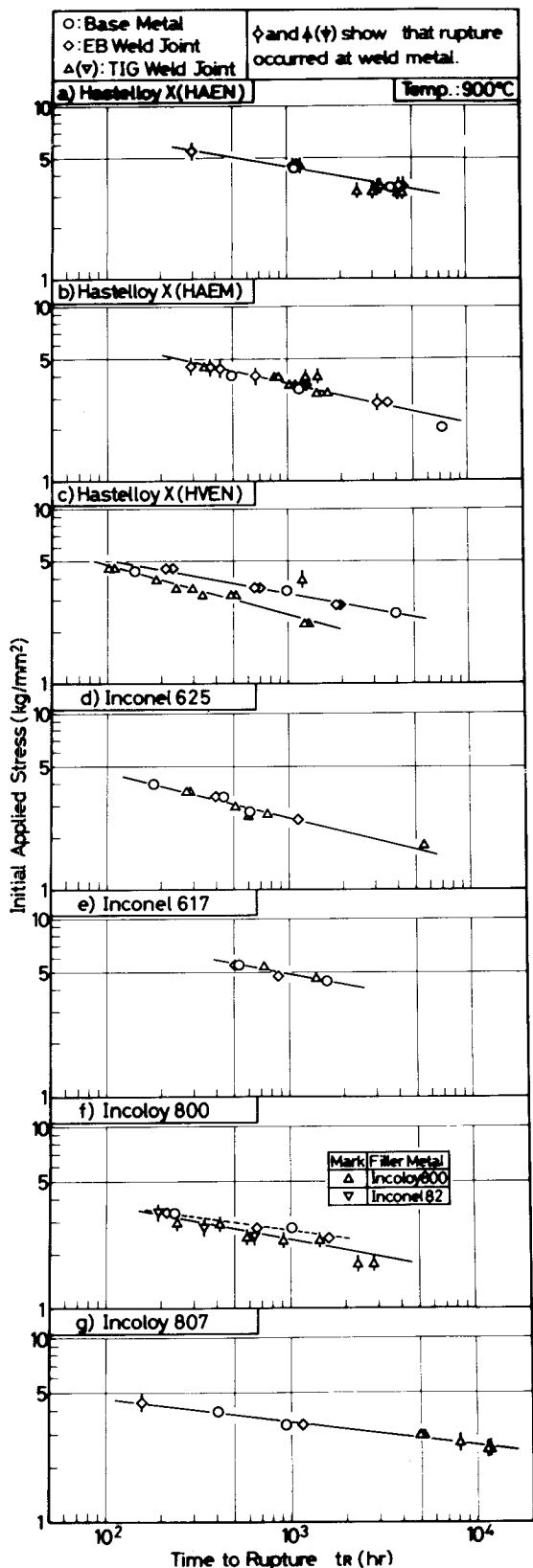


Fig. 7-22 Initial Applied Stress vs Time to Rupture for Base Metal and Weld Joint

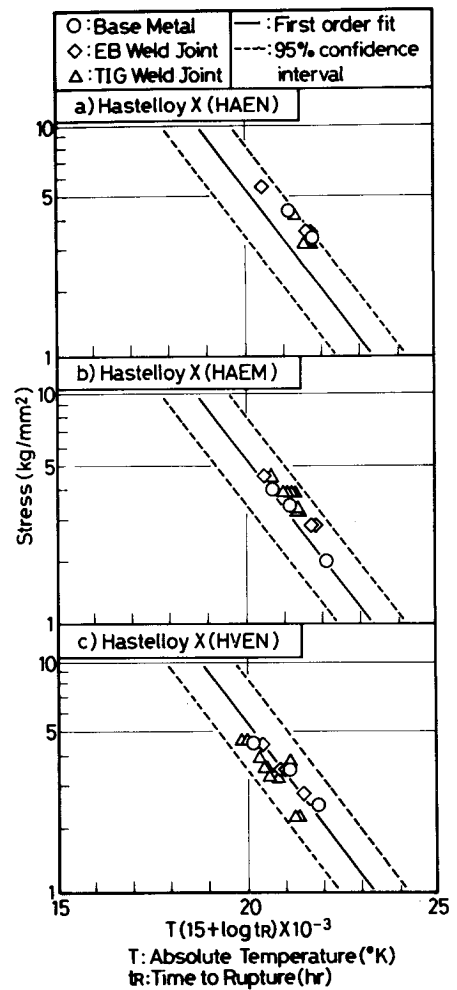


Fig. 7-23 Larson-Miller plots of Stress vs Time to Rupture for Base Metal and Weld Joint of Hastelloy X

95%信頼限界²⁷⁾を示してある。

HAENの母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手はいずれも上側95%信頼限界線近傍であり、HAEMについては、母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手とも一次回帰直線から上側95%信頼限界内にあり、またHVENについては、母材および電子ビーム溶接継手はほぼ一次回帰直線上にあるが、TIG溶接継手は一次回帰直線と下側95%信頼限界内にある。

(3) 破断延性

各材料の母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手に対するクリープ破断試験より得られた破断伸びと破断時間の関係をFig. 7-24に、破断絞りと破断時間の関係をFig. 7-25に示す。各材料の母材および溶接継手の破断伸びおよび破断絞りについては、母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手ともに破断時間が大になるにしたがい減少する傾向が認められる。また破断伸びおよび絞りについては、母材が最も大きく、電子ビーム溶接、TIG溶接の順に小さくなっている。しかし電子ビーム溶接継手の延性は一般に母材に近い。

なお、溶接金属部で破断したものの伸びおよび絞りは母材破断に比して低い値を示している。

(4) クリープおよびクリープ破断特性の評価

円周継手を有する円筒の内圧によるクリープ破壊について考察すると、溶接金属のクリープひずみ速度、主として第2期クリープひずみ速度が母材に比して小なる場合はFig. 7-26に示すように、クリープひずみ速度の不適合から異変形を生じようとする。その結果、適合条件を満足しようとして、溶接金属部および熱影響部にせん断力およびそれに伴う曲げモーメントが発生し、周方向にはせん断力によるフープ応力および軸方向には曲げモーメントによる引張および圧縮応力が内圧によるフープ応力と軸方向応力にそれぞれ

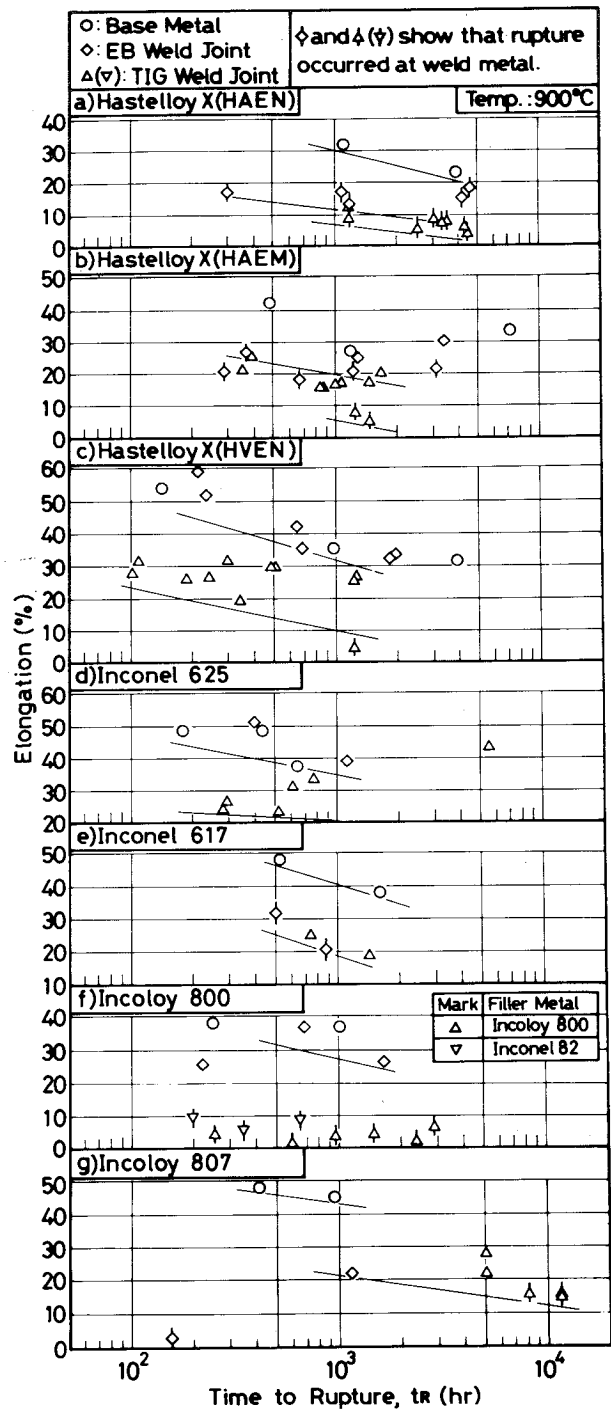


Fig.7-24 Relation between Time to Rupture and Elongation for Base Metal and Weld Joint

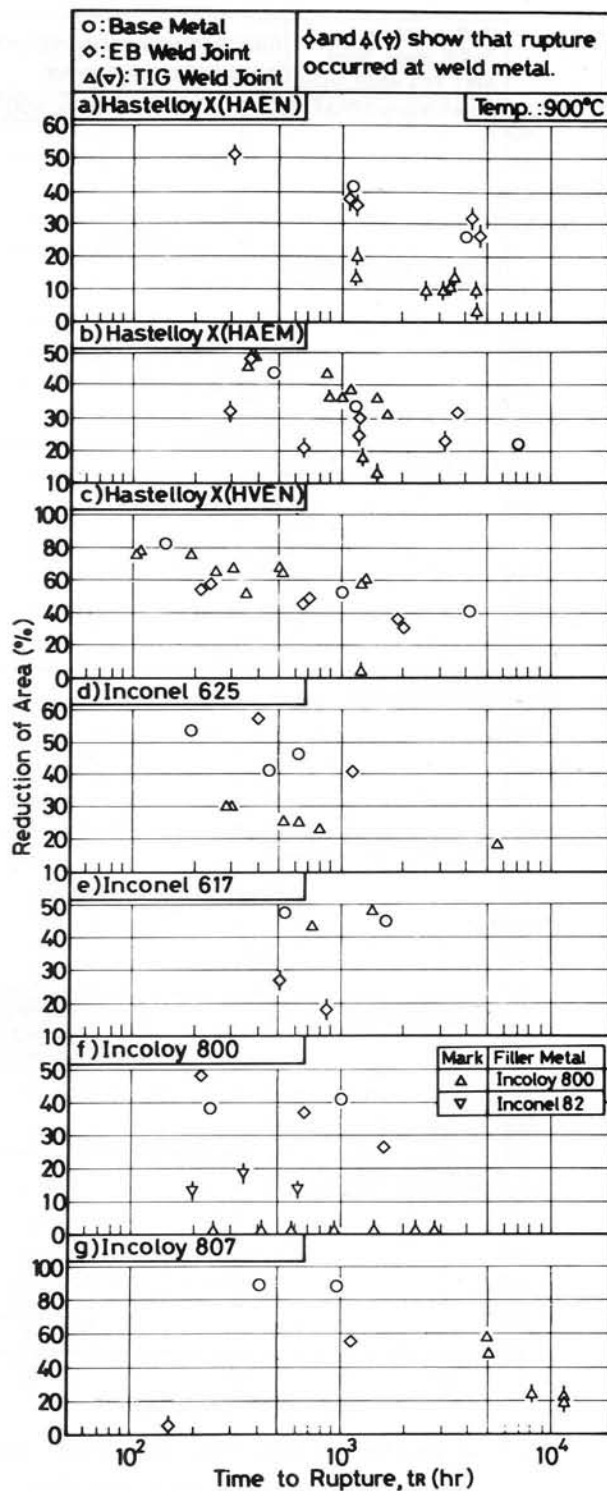


Fig.7-25 Relation between Time to Rupture and Reduction of Area for Base Metal and Weld Joint

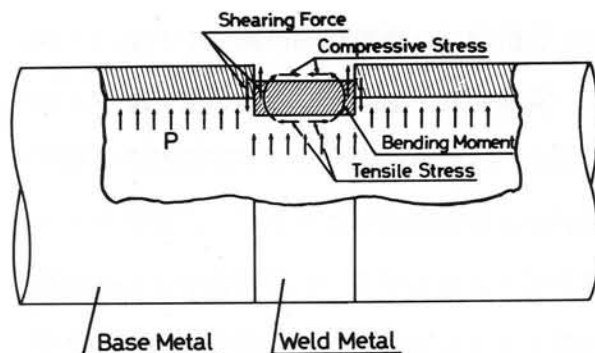


Fig.7-26 Schematic Explanation of Creep Deformation of Structure With Circumferential Weld Joint under Internal Pressure

付加され高い局部応力となり破壊に至る。このため溶接金属の第2期クリープひずみ速度は母材と同等であることが望ましい。

電子ビーム溶接の円周継手を有するHAEMの円筒 ($62^{0.D.} \times 3^t$) について、900°C、45.5 kg/cm²G および 34.5 kg/cm²G で内圧クリープ破断試験を行なった。破損後の外観写真を Fig. 7-27 に示すが、図から判るように、電子ビーム溶接金属は母材とほぼ同等の変形を示しており、クリープひずみ速度の不適合から生ずる異変形の傾向は

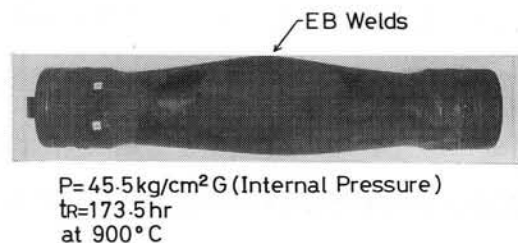


Fig.7-27 Biaxial Creep Rupture Specimen With Circumferential Electron Beam Weld Joint of Hastelloy X (HAEM)

認められない。HAEM の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の単軸クリープ試験から得られた第 2 期クリープひずみ速度を Fig. 7-19 に示したように、TIG 溶接継手の第 2 期クリープひずみ速度は母材に比して極めて小さいが、電子ビーム溶接継手のそれは母材に近い。

このように、溶接継手の単軸クリープ試験結果より得られる溶接継手の第 2 期クリープひずみ速度が母材に近ければ、周溶接継手を有する円筒の場合も、その溶接金属部の円周伸びは母材に近くなり、異変形による高い局部応力は発生しないと考えられる。いっぽう、TIG 溶接継手のように、第 2 期クリープひずみ速度が母材に比して極めて小さい場合、その溶接円筒は溶接継手部に異変形を生じ、高い局部応力が発生し、短時間で破壊に至ると考えられる。したがって、溶接継手の単軸クリープ試験結果からクリープ特性を評価することができ、その場合第 2 期クリープひずみ速度が母材と同等であることが最も望ましい。

また、Fig. 7-28 に示すように、第 2 期クリープひずみ速度と破断伸びの間に相関関係が認められる²⁷⁾ことから、クリープ特性は破断伸びで評価することが可能である。すなわち、溶接継手の破断伸びが母材と等しいならばその継手

の第 2 期クリープひずみ速度はほぼ母材に等しいと考えられる。なお、前述したクリープ破断強度についても溶接継手の評価の対象にしなければならない。

第 2 期クリープひずみ速度、破断伸びおよびクリープ破断強度について各材料を評価すると Table 7-8 に示すようになる。ここで第 2 期クリープひずみ速度については負荷応力 3.4 kg/cm^2 に対する値、破断伸びについては 1000 hr における

最小値および強度については 1000 hr

における平均値にて評価した。この表から判るように、第 2 期クリープひずみ速度および破断伸びについては、電子ビーム溶接継手は TIG 溶接継手に比して母材に近い。また破断強度については、電子ビームおよび TIG 溶接継手のいずれも母材に比して大きな差異は認められない。したがって溶接構造物のクリープ変形による破壊を考慮した場合、上述した理由から、電子ビーム溶接継手は TIG 溶接継手に比して破壊に対する抵抗が大きいクリープおよびクリープ破断特性を有するものと考えられる。

(5) 破断後試験片の観察

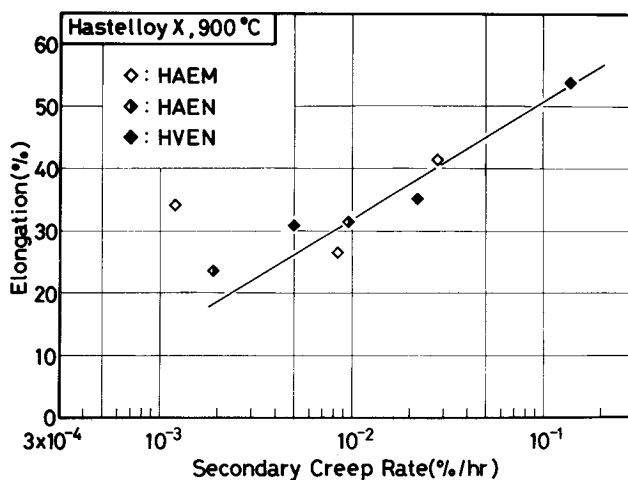


Fig.7-28 Relation between Secondary Creep Rate and Elongation

(a) 外観観察

破断部の形態の特徴は各材料について共通しており、代表例として、HAENの母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の破断後の外観写真を Fig. 7-29 に示す。

破面については、母材は方向性のない凹凸のある破面、TIG 溶接金属は柱状晶組織に沿ったと考えられる方向性を有する凹凸のある破面、また電子ビーム溶接金属については、溶接中央部の柱状晶が相接する部分に沿ったと考えられる凹凸の少ない破面を呈している。

表面き裂については、母材は破断部近傍に若干認められるが、電子ビームおよび TIG 溶接金属については殆んど認められない。

(b) 顕微鏡組織観察

溶接継手の破断部の顕微鏡組織よりき裂の形態を観察すると、母材、電子ビーム溶接金属および TIG 溶接金属破断部において、材料にかかわらず特徴のある形態を示している。以下に各破断部におけるき裂の形態について述べる。

溶接継手の母材破断部および破断部近傍における代表例を Fig. 7-30 に示す。これより判るように、母材の結晶粒界に多数のボイドが観察され、このボイドが任意に連結、合体して破断に至ったものと推定される。このため、Fig. 7-29 に示すように破面のマクロ写真は凹凸の激しい様相を呈している。

電子ビーム溶接継手の溶接金属部破断について

Table 7-8 Evaluation of Creep and Creep Rupture Properties for Base Metal and Weld Joint

Material and Specimen		Secondary Creep Rate at 34 kg/mm ² (%/hr)	Minimum Value of Elongation at Fracture of 1000 hr (%)	Mean Rupture Strength at 1000hr (kg/mm ²)
HAEN	Base Metal	—	30	4.4
	EB Weld Joint	—	12	"
	TIG Weld Joint	—	7	"
HAEM	Base Metal	1×10^{-2}	20	3.6
	EB Weld Joint	7×10^{-3}	"	"
	TIG Weld Joint	5×10^{-4}	5	"
HVEN	Base Metal	—	31	3.4
	EB Weld Joint	—	"	"
	TIG Weld Joint	—	10	2.4
Inconel 625	Base Metal	—	35	2.6
	EB Weld Joint	—	"	"
	TIG Weld Joint	—	17	"
Inconel 617	Base Metal	—	41	5.0
	EB Weld Joint	—	18	"
	TIG Weld Joint	—	"	"
Incoloy 800	Base Metal	—	28	2.8
	EB Weld Joint	—	"	"
	TIG Weld Joint	—	1	2.3
Incoloy 807	Base Metal	—	43	3.4
	EB Weld Joint	—	21	"
	TIG Weld Joint	—	"	"

Gauge Length: 30mm

Base Metal
 $\sigma = 32 \text{ kg/mm}$
 $t_r = 1465 \text{ hr}$
 at 900°C
 EB Weld Joint
 $\sigma = 2.8 \text{ kg/mm}$
 $t_r = 3175 \text{ hr}$
 at 900°C
 TIG Weld Joint
 $\sigma = 3.9 \text{ kg/mm}$
 $t_r = 1274 \text{ hr}$
 at 900°C

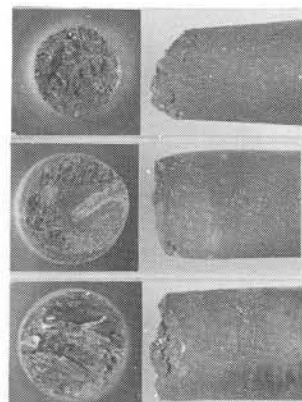


Fig.7-29 Macro-view of Ruptured Specimen of Hastelloy X (HAEM)

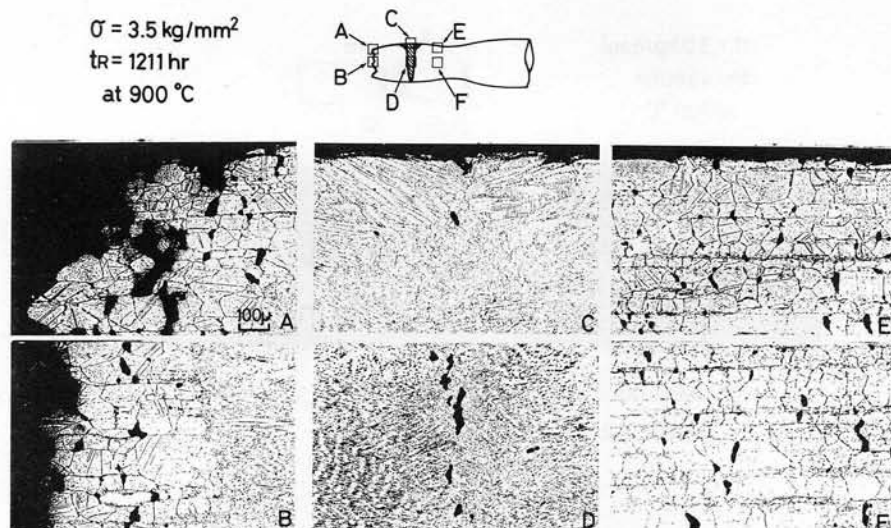


Fig.7-30 Microstructure of Electron Beam Weld Joint Specimen of Hastelloy X (HAEM) Ruptured at Base Metal

は、溶接金属の柱状晶は応力軸方向に成長しているために、応力軸方向の柱状晶境界に発生するボイドの数は極めて少なく、応力軸に垂直な溶接金属中央部の柱状晶が相接する部分に発生するボイドが多い。この溶接金属中央部にボイドが見られるが、これは Fig. 7-30 の C, D に代表例を示すように、応力軸に垂直な直線上の位置に発生しており、このボイドが連結、合体して、Fig. 7-31 に代表例を示すようにき裂が直線的に進行している。このため、破面のマクロ写真は平坦な様相を呈している。

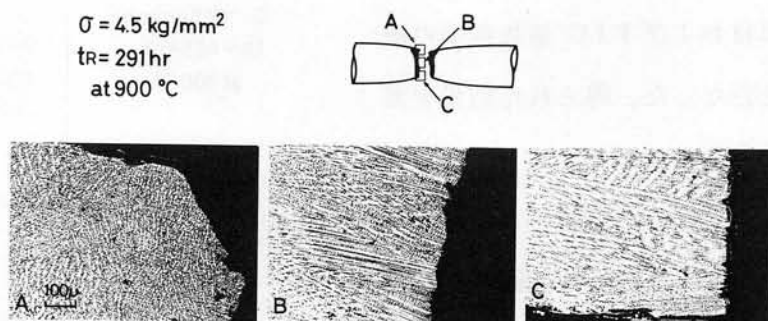


Fig.7-31 Microstructure of Electron Beam Weld Joint Specimen of Hastelloy X (HAEM) Ruptured at Weld Metal

TIG 溶接継手の溶接金属破断部については、まず、Fig. 7-32 に代表例を示すように溶接金属部表面にき裂が発生し、また、柱状晶の境界にボイドが発生する。TIG 溶接金属の柱状晶は応力軸に対してほぼ 45° 以上の角度にて成長しているので、図に示すように柱状晶の境界にはすべり

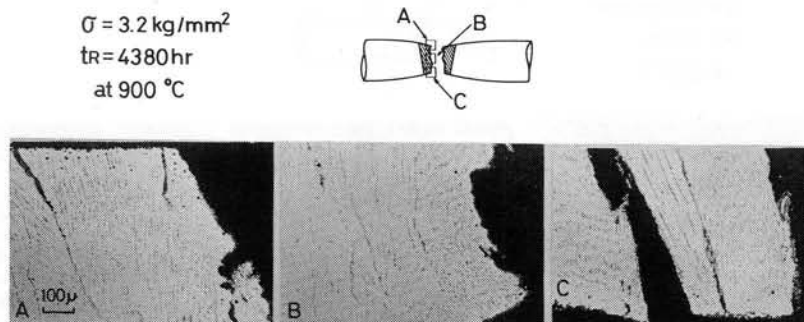


Fig.7-32 Microstructure of TIG Weld Joint Specimen of Hastelloy X (HAEM) Ruptured at Weld Metal

によるボイドが発生し易く、表面よりのき裂がこのボイドに沿って進展し、破断に至ると考えられる。き裂は柱状晶の境界に沿って進展するために、Fig. 7-29 に示すように破面のマクロ写真はいちじるしい方向性を示している。

また、炭化物の析出状態について観察すると、ニッケル基合金については、母材および溶接金属の結晶粒内および粒界に析出しており、長時間になるにしたがって炭化物が凝集を始めている。鉄基合金については、母材および溶接金属に析出する炭化物の量はニッケル基合金に比して少ない。Fig. 7-33 に代表例を示す。

7.9 要 約

原子炉用耐熱合金について、電子ビーム溶接継手の機械的特性と母材および TIG 溶接継手の機械的特性との比較を行なった。得られた結果を要約すると次の通りである。

- 1) 常温および高温における引張強さおよび 0.2 %耐力については、電子ビーム溶接継手、母材

および TIG 溶接継手の間には殆んど差異は認められないが、伸びおよび絞りについては、電

子ビーム溶接継手は TIG 溶接継手に比して優れている。

- 2) 高温低サイクル疲労特性については、電子ビーム溶接継手は TIG 溶接継手よりかなりすぐれており母材とほぼ同程度のものが多い。

- 3) Hastelloy X (HAEM) の第 2 期クリーブひずみ速度は母材が最も大きく、電子ビーム溶接継手、TIG 溶接継手の順に小さくなるが、電子ビーム溶接継手はむしろ母材に近い。第 3 期ク

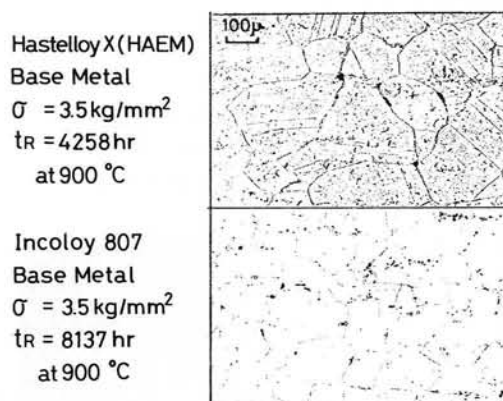


Fig.7-33 Typical Change of Precipitate under Creep Rupture Test

リープ開始時間と破断時間の比については，電子ビーム溶接継手と T I G 溶接継手の間には殆んど差異は認められない。

- 4) 各材料のクリープ破断強度については，電子ビーム溶接継手，母材および T I G 溶接継手の間には殆んど差異は認められない。クリープ破断延性については，母材が最も大きく，電子ビーム溶接継手，T I G 溶接継手の順に小さくなるが，電子ビーム溶接継手は母材に近い。
- 5) 周溶接継手を有する円筒構造物のクリープ破壊を考えた場合，溶接継手のクリープおよびクリープ破断特性の評価は第 2 期クリープひずみ速度，クリープ破断伸びおよび破断強度により行うべきである。クリープ破断強度が大なるほど，第 2 期クリープひずみ速度およびクリープ破断伸びが母材に近似するほど破壊に対する抵抗が大きいと考えられる。このような観点から評価すると，電子ビーム溶接継手は T I G 溶接継手に比べてかなり優れており，母材に近似している。

第 8 章 溶接継手の環境効果に関する検討

8.1 概 説

Hastelloy 系, Inconel 系および Incoloy 系の原子炉用耐熱合金は, 高温 He 雰囲気中で使用されるが, He 中の微量の不純物 (O_2 ならびに H_2O , CO_2 が分解して生じた O_2) が材料の結晶粒界に沿って優先酸化を起し, He 中での長時間強度に悪影響をおよぼすことが知られている。しかし, これに関する耐熱合金母材およびとくに溶接継手については系統的な研究報告は極めて少ない。

本章においては, 上記耐熱合金の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手について, 高温 He 雰囲気中における腐食挙動, 長時間浸漬後の高温疲労特性および He 雰囲気中におけるクリープ破断特性を明確にし, かつ比較検討も行なった。

8.2 He 雰囲気中における溶接継手の腐食挙動

8.2.1 供試材料および溶接要領

本試験に用いた供試材料の化学組成ならびに機械的性質を Table 8-1 に示す。

腐食試験に供した電子ビームおよび TIG 溶接継手における開先形状ならびに溶接条件を Table 8-2 および Table 8-3 に示す。また腐食時効後の高温低サイクル疲労試験に供した溶接継手については Table 7-2 および Fig. 7-3 に示してある。なお, TIG 溶接には Table 7-1 に示す溶加棒を使用した。

8.2.2 実験方法

(1) He 中における腐食試験

本腐食試験装置の概略図を Fig. 8-1 に示す。

本腐食試験に使用した時効炉は横置型であり, 高温長時間加熱により時効炉内壁と He 中の不純物との反応を防止するためアルミナ製の炉心管を用いた。炉心管の内径は 105 mm , 均熱範囲は $100^\circ\text{C} \times 300\text{ mm}^L$ である。試験片は $1^t \times 20 \times 10\text{ mm}$ の短冊型試験片を用いた。溶接継手については, 試験片長手方向の中央部に溶接ビードが位置するように加工した。試験片は, He の流通を良くするため側面に穴をあけたアルミナ製ルツボに 1 個ずつ挿入した。これらのルツボを炉心管の内径に合わせたアルミナ製治具にならべ, 炉心管の均熱範囲内に取付けた。均熱チェックは試験中連続的に行い, 炉心管長手方向 3 個所, 管径方向 2 個所 (中心および管壁) の計 6 個所の均熱チェックの結果, いずれも目標試験温度の $\pm 2^\circ\text{C}$ の誤差内に入っていることを確認した。

本実験に用いた雰囲気は HTR 近似 $He^{28)}$ である。He 中の不純物元素の分析には, モリキュレーションまたは活性炭を用いたガスクロマトグラフにより, H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 の分析を行

Table 8-1 Chemical Composition and Mechanical Properties of Superalloys Used

Material	Thickness (mm)	* Melting Process	Final Heat Treatment	Grain Size (ASTM)	Mechanical Properties				Chemical Composition (%)														Objective	
					0.2%PS (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	El. (%)	R.A (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb+Ta	Al	Ti	B		Fe
Hastelloy X	2	AE	1100°C x 9Min A.C	5-7	5035	86.2	356	—	0.087	0.47	0.87	0.018	0.003	Bal.	21.61	153	900	0.40	—	—	—	0.003	1883	Corrosion Test in He
Inconel 625		AE	1000°C x 30Min W.Q	7-9	638	100.4	36.4	—	0.05	0.33	0.33	0.004	<0.005		22.26	010	911	—	329	0.23	0.14	—	278	
Inconel 617		V	1150°C x 6Min W.Q	4-6	405	81.2	526	456	0.07	0.15	0.07	—	0.007	21.99	12.53	906	—	—	0.98	—	—	—	0.22	
Incoloy 800		V	1100°C x 10Min W.Q	25	216	585	52.4	736	0.05	0.31	0.80	0.012	0.005	31.31	2150	—	—	—	0.57	0.59	—	Bal.	Fatigue Test	
Incoloy 807		A	1150°C x 6Min W.Q	7-8	350	800	301	—	0.006	0.33	0.83	0.003	0.009	40.13	2065	840	—	4.88	0.96	0.48	0.30	—		
Hastelloy X	15	AE	1150°C x 1Hr W.Q	5-6	38.7	750	47.6	—	0.068	0.37	0.59	0.012	<0.002	Bal.	2074	103	870	0.50	—	0.21	0.02	0.001	18.23	

‡ AE: Air Metting followed by Electroslag Remelting, V: Vacuum Induction Metting, A: Air Metting

Table 8-2 Elcetron Beam Welding Conditions

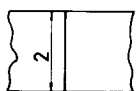
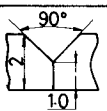
Joint Configuration	Welding Conditions					
	P_{ch} (Torr)	D_F (mm)	a_b	I_b (mA)	V_b (kv)	U_b' (cm/min)
	5×10^{-4}	225	1.04	20	100	160

Table 8-3 TIG Welding Conditions

Joint Configuration	Built-up Sequence	Welding Conditions						
		Pass	Size of Filler Metal (mm)	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Shield Gas Flow Rate (l/min)	
		1-2	1.2	60-70	9-10	50-60	Torch	Back-up
							6	10

Interpass Temperature: Max. 100°C

ない、 H_2O の分析には露点式水分計を用いた。分析は時効炉の入口と出口で行い、炉内ガス成分の変動を調べた。Table 8-4 に分析結果を、Fig. 8-2 に時効炉出口における He 中組成の変動の一例を示す。

炉内圧力は $1 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ とし、He 流量は試験初期の 100 hr 程度は試験片とガスとの反応が激しく、ガス組成の変動が著しいため 500cc/min 流したが、その後は 100cc/min とした。したがって炉内はほぼ静止状態（対流は起っている）であるが、100 hr 以降のガス成分の変動はあまり見られず、比較的安定な試験状態が維持された。

試験開始にあたっては、炉心管内を $1 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ 以下にした後、HTR 近似 He と置換し、所定の試験温度に加熱

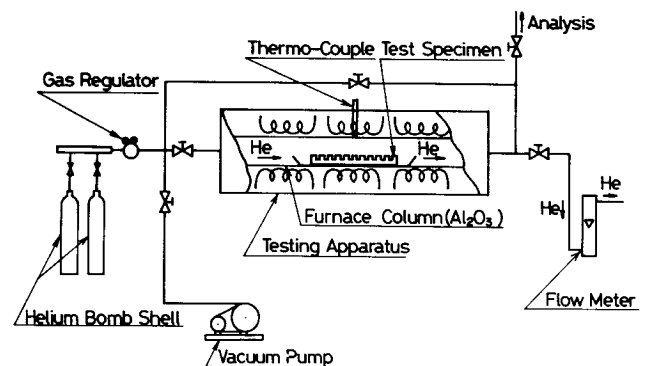


Fig.8-1 Schematic Diagram of Horizontal-type Electric Furnace

Table 8-4 Impurity Composition in He Gas

	H_2	CO	H_2O	CO_2	CH_4	O_2	N_2
Specification	200	100	2	1	<0.5	<1	<5
Analysis (Inlet)	190 ~230	92 ~110	1-2	<2	<5	<1	<5
Analysis (Outlet)	200 ~260	90 ~140	1-2	<5	Nil	<3	<6

$CO/CO_2, H_2/H_2O \approx 100/1$ ($H_2(CO_2)/(CO)(H_2O) \approx 1$)

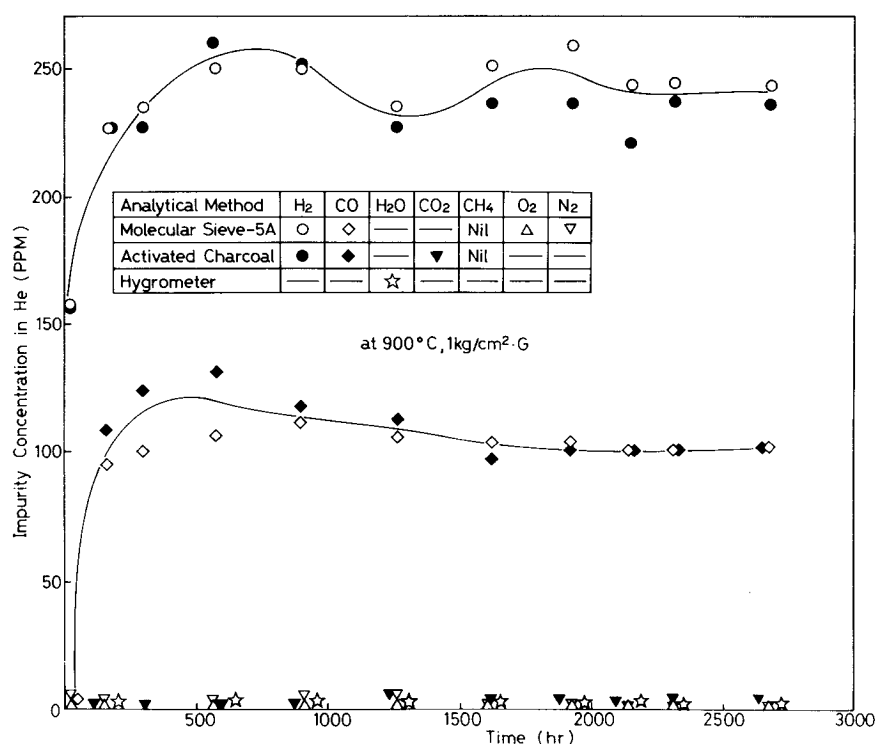


Fig.8-2 Impurity Fluctuation in He Gas

した。試験条件として、800°Cにて500, 1000 hr, 900°Cにて500, 1000, 3000 hr, 1000°Cにて500, 1000 hrとし、各々の時効材につき表面腐食部の性状、重量変化、組成変化ならびにマトリックスの組織変化、硬さ変化等を調べ、非時効材と比較検討した。

(2) He 中時効後の高温低サイクル疲労試験

疲労試験片を HTR 近似He 中にて900°C×3000 hr 腐食時効させた後、高温低サイクル疲労試験を行い、非時効材と比較検討した。試験片の形状および溶接継手の採取要領は7.7.1(1)項で述べた通りである。

腐食試験装置の概略図をFig. 8-3 に示す。本腐食試験に使用した時効炉は縦型であり、炉心管材質、内径および均熱範囲は(1)項に示した横置型と同じである。高温長時間加熱によるクリープ変形にもとづく試験片軸心の変位を防止するため、試験片はアルミナ製治具に垂直に取付けた。均熱チェックは(1)項に示した横置型の場合と同様に行ない、目標試験温度900°Cにおいて

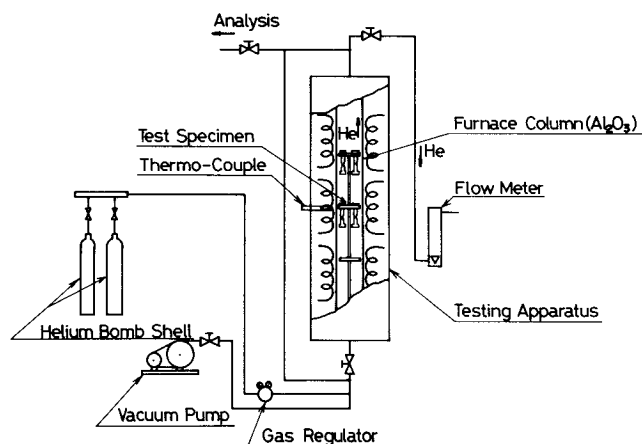


Fig.8-3 Schematic Diagram of Vertical-type Electric Furnace

± 2℃の誤差内に入っていることを確認した。また本縦型炉では、He を下方から上方に流した。炉内He の圧力、流量ならびに分析要領は(1)項の場合と同様であり、出口の分析の結果、He 中の組成はTable 8-4 に示した範囲に入っていることを確認した。

腐食時効後の疲労試験には、電子油圧サーボ方式による負荷系(± 10 ton)と高周波誘導加熱方式による温度制御系(10 kVA, 10 kHz)からなる低サイクル疲労試験機を使用した。試験温度の検出は、ふつう疲労試験片中央部にPR 熱電対を抵抗溶接して行うのであるが、本試験における腐食時効後の試験片については、試験片中央部の腐食代を抵抗溶接により破損すると、腐食時効による効果を正確に把握することが不可能になると考え、予備試験により高周波誘導加熱による試験片の温度分布を求め、熱電対取付け位置を試験片中央部から10.4 mm離れたところとした。なお、温度の変動は設定値に対して± 2℃以内であることを確認した。

疲労試験の雰囲気は、腐食時効試験と同じHTR 近似He 中にて行なったが、チャンバー内の圧力は $0.4 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 、流量は 100 cc/min とし、ガスクロマトグラフおよび露点計を用いて雰囲気の設定と管理を行なった。He 中の組成分析の結果、Table 8-4に示した範囲内に入っていることを確認した。試験温度は腐食時効試験に合わせ900℃とした。また、繰返し波形は完全両振対称波形の三角波を用い、ひずみ制御方式を採用した。

8.2.3 実験結果および考察

(1) He 中時効による溶接部の腐食および材質変化

(a) 時効後の重量変化

本試験雰囲気は、He 中に微量の H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 O_2 、 CH_4 等の不純物を含み、弱酸化性雰囲気になっており、酸化ポテンシャル $\log(P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}})$ は、 $P_{\text{H}_2} = (200 \sim 260) \times 2 \text{ kg/cm}^2$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}} = (1 \sim 2) \times 2 \text{ kg/cm}^2$ として $\log(P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}}) \approx 2.0 \sim 2.4$ となっている。Fig. 8-4 は金属の酸化物生成の境界を示したものであり、各線図において上側、すなわち $\log(P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}})$ が高い側ではその金属は酸化されず、下側、すなわち $\log(P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}})$ が低い側では金属が酸化されることを示している。したがって、本試験雰囲気の場合、供試材の成分のうちAl, Ti, Si, Mn およびCrがこの順に優先的に選択酸化され、主成分であるNi, Feは酸化されないことになる。選択酸化される成分のうちではCrを除いた他は供試材料中の微量成分であり、したがって本試験条件にてマトリックスと酸化反応の結果、形成される酸化皮膜の主成分はCr酸化物であることが予想されるが、これは後に述べる酸化スケールのEPMA 分析の結果からも明らかとなる。

800, 900, 1000℃における各耐熱合金母材とその電子ビームおよびTIG 溶接継手のHTR 近似He 中における最高3000 hr 時効後の重量変化をFig. 8-5～Fig. 8-7に示す。各データは

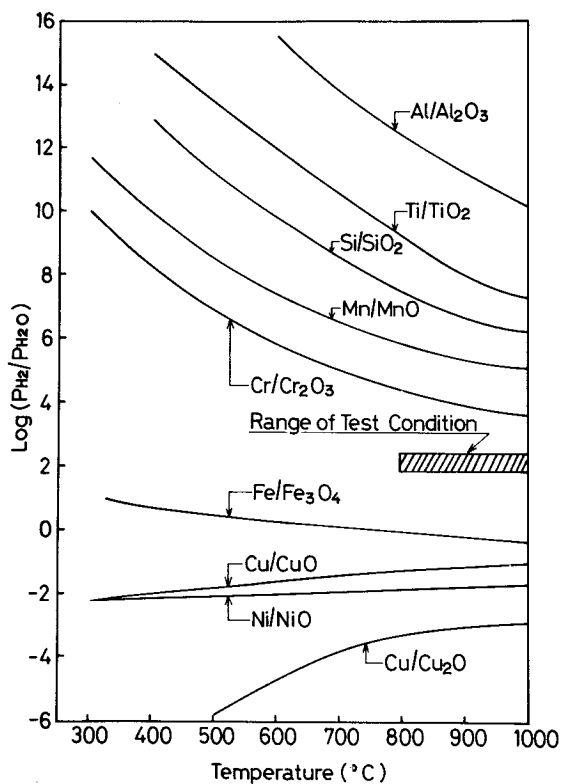


Fig.8-4 Relation between Temperature and Oxidation Potential for Various Elements

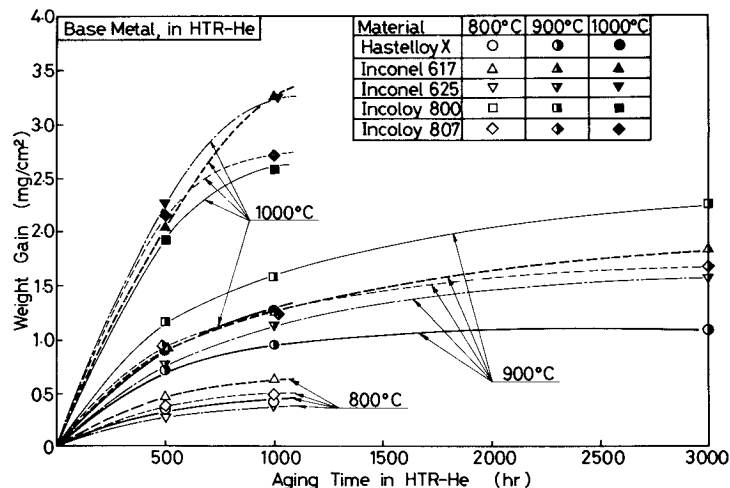


Fig.8-5 Weight Gain vs Aging Time for Base Metal

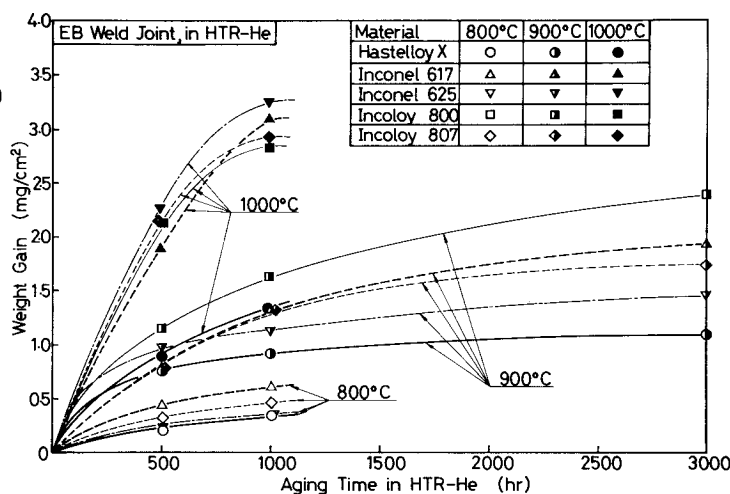


Fig.8-6 Weight Gain vs Aging Time for Electron Beam Weld Joint

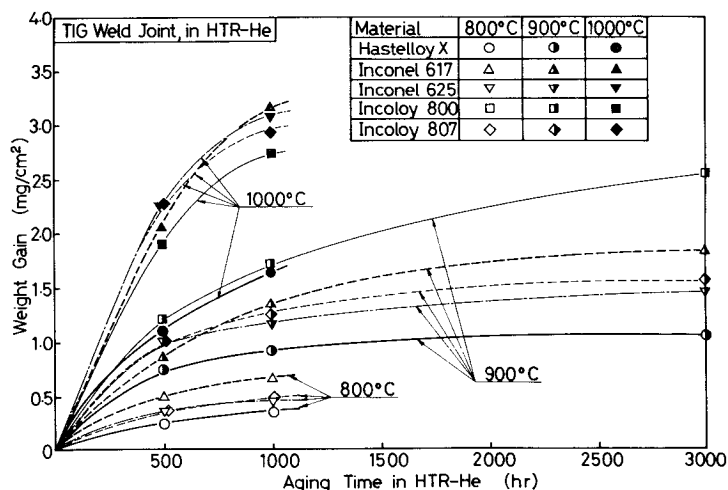


Fig.8-7 Weight Gain vs Aging Time for TIG Weld Joint

それぞれ試験片 2 個ないし 3 個の平均値を示している。結果はいずれも時効時間に対して放物線的な重量増加を示しているが、この重量増加は主として先に述べた Cr 酸化物の形成による重量増加に対応しているものと考えられる。

各材料について、電子ビームおよび TIG 溶接継手の重量増加を母材のそれと比較すると、本試験片の場合、電子ビーム溶接金属部の表面積は試験片全体の約 $\frac{1}{10}$ 、TIG 溶接金属部では約 $\frac{1}{5}$ であるため、溶接金属部自体の重量増加と母材との差異は明確にはできないが、継手全体

としては電子ビームおよび TIG 溶接継手の重量増加は母材のそれと差異は認められない。

材料別にみると、各試験温度とも固溶体強化型合金である Hastelloy X の重量増加が一般に最も小さく、これらの材料中では最も優れた性能をもっている。同じく固溶体強化型合金である Inconel 625 も 800, 900 °C では Hastelloy X について重量増加が小さいが、1000 °C では逆に他の材料よりも大になっている。いっぽう、Al, Ti による析出強化型合金である Inconel 617, Incoloy 800 および Incoloy 807 は Hastelloy X に比べると各試験温度の重量増加が大である。

各材料において、試験温度に対する重量増加速度を比較するため、Fig. 8-8 に試験温度と酸化速度定数の関係を示す。酸化速度定数 K_P は、試験時間 500 hr 以上で重量増加が放物線則にしたがうとして、次の関係より求めた。

$$\Delta W^2 = K_P \cdot t + C$$

ここに ΔW : 試験時間 t における

重量増加量 (mg/cm^2)

t : 試験時間 (hr)

K_P, C : 定数

K_P, C は所定の材料および試験温度において、500, 1000 hr の試験時間に対する重量増加量を連立させて求めた。

所定の材料に対する K_P の温度依存性は、アレニウス表示においてほぼ直線関係になっている。所定の材料に対する母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の K_P を比較すると、若干のばらつきはみられるがとくに差異は認められない。Fig. 8-5 ~ Fig. 8-7 から明らかなことであるが、Hastelloy X の K_P は各試験温度に対して他の材料よりも小さい。また、温度に対する勾配も緩やかであり、温度の上昇に伴う K_P の増加の割合が他の材料より小さいことを示している。

(b) 内部酸化

Inconel 617, Incoloy 800, Incoloy 807 のような γ' による析出強化型合金では、 Ni_3Al , Ni_3Ti などをマトリックスに析出させることによって高温強度を維持しているため、Al, Ti が微量元素として意識的に添加されている。Al, Ti は Fig. 8-4 に示したように高温 He 中の微量不

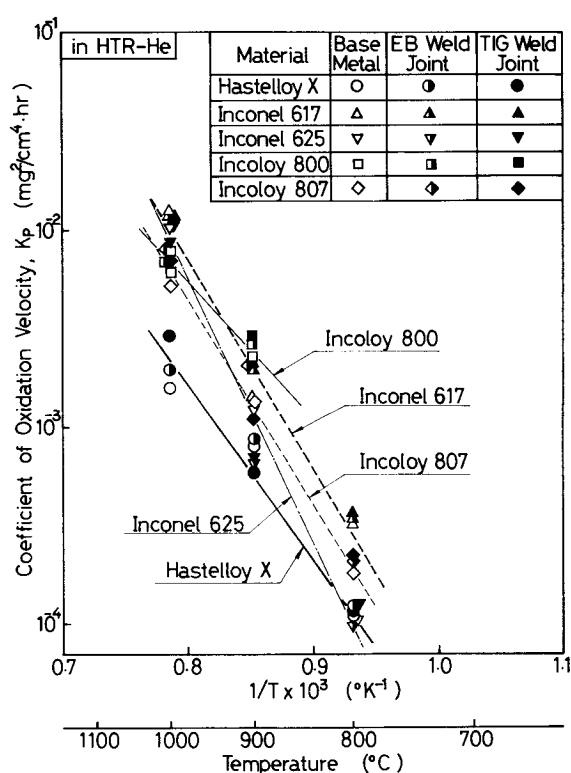
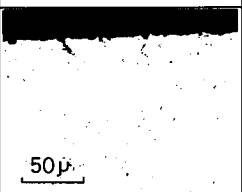
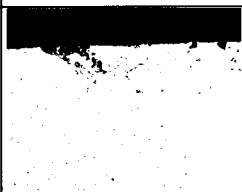
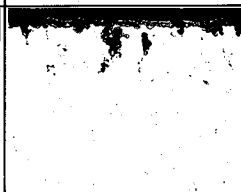
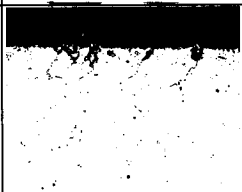
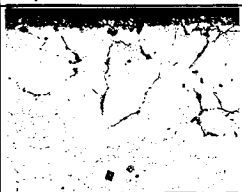
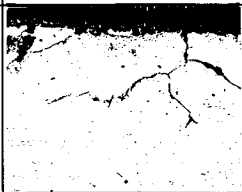
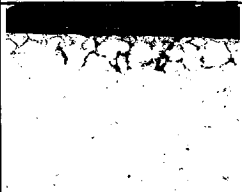
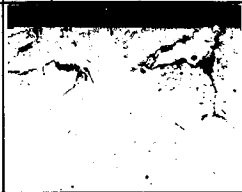
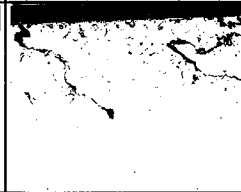


Fig. 8-8 Relation between Temperature and Coefficient of Oxidation Velocity

純物 O_2 と選択的に反応し、雰囲気ガスに接触した金属表面よりマトリックスの粒界に Al または Ti 酸化物として局部的に析出する。これが内部酸化といわれるものであるが、内部酸化は時間と共に進行性を有し、長時間クリープ強度や高温疲労強度を劣化させると考えられ、微量不純物元素を含む高温 He 中における耐食性を評価する場合、とくに重要な因子になると考えられる。

本試験における内部酸化の一例として、 $900^{\circ}C \times 3000\text{ hr}$ 時効の試験片断面の顕微鏡写真を Table 8-5 に示す。これらは主としてマトリックスの粒界を侵食しているが、固溶体強化型合金

Table 8-5 Internal Oxidation for Base Metal and Weld Joint Aged
at $900^{\circ}C$ for 3000hr

Material	Base Metal	EB Weld Metal	TIG Weld Metal
Hastelloy X			
Inconel 617			
Inconel 625			
Incoloy 800			
Incoloy 807			

である Hastelloy X、Inconel 625 の内部酸化の程度は、 Al 、 Ti を含む析出強化型合金である Inconel 617、Incoloy 800、Incoloy 807 に比べて小さい。これら内部酸化をおこした粒界の組成を調べるため、EPMA による面分析ならびに線分析を行なったが、結果の一例として Inconel 617 の $900^{\circ}C \times 3000\text{ hr}$ 時効材の分析結果を Table 8-6 および Fig. 8-9 に示す。面分析による二次電子線像に見られる粒界には、 O_2 、 Al 、 Ti の偏析が認められ、また線分析による結果でも粒界にこれらの組成が重なったピークが現れており、内部酸化が主として Al 、 Ti の

Table 8-6 Distribution of Elements in Cross-section of Inconel 617 Aged
at 900°C for 3000hr by EPMA

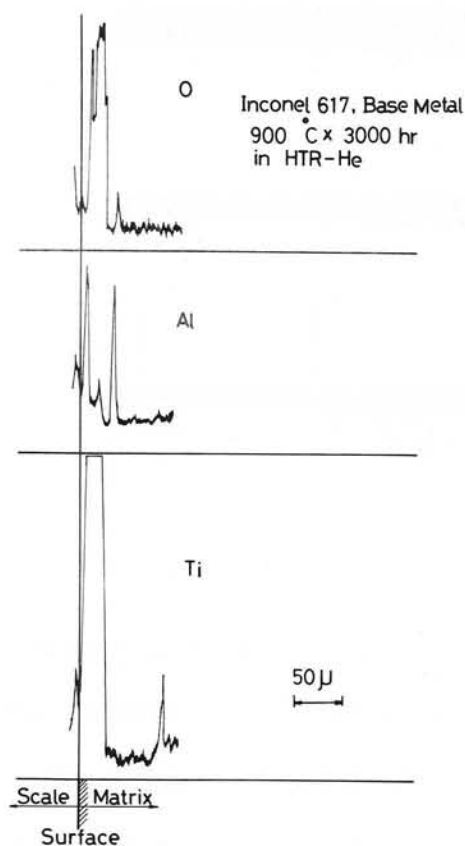
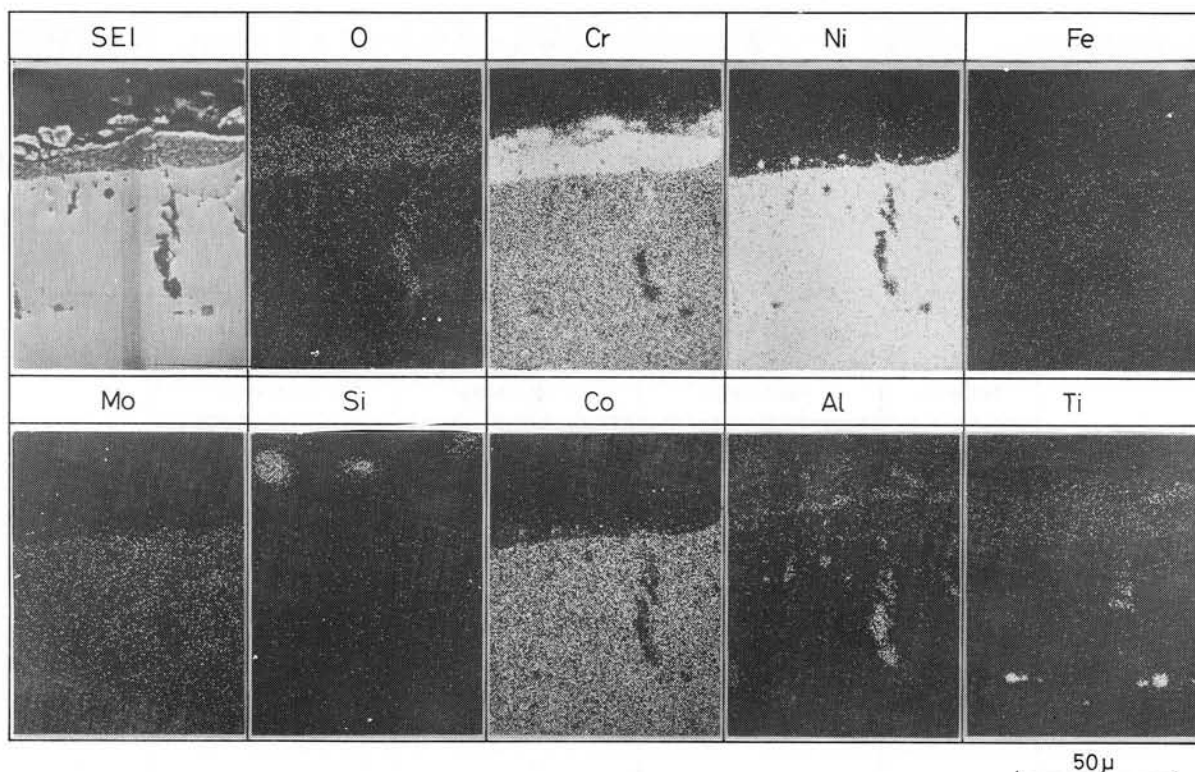


Fig.8-9 Distribution of Elements in Inconel
617 Base Metal Aged at 900°C
for 3000hr

酸化物より構成されていることを裏づけている。

内部酸化の程度を定量的に調べるため、本試験に供した材料の母材とその電子ビームおよびTIG溶接金属の内部酸化深さの最大値をFig. 8-10～Fig. 8-12に示す。これらはFig. 8-5～Fig. 8-7で述べた重量変化の場合と同様な傾向を示しており、時効時間に対して最大内部酸化深さは放物線的に増加している。また各材料の内部酸化に対する抵抗も、重量変化の場合と対応しており、Hastelloy Xは供試材料中最も優れた耐内部酸化性を示している。

それぞれの材料について、電子ビームおよびTIG溶接金属の最大内部酸化深さを母材のそれと比較すると、電子ビーム溶接金属の場合は母材とほとんど差異は認められないが、TIG溶接金属では、母材ならびに電子ビーム溶接金属より最

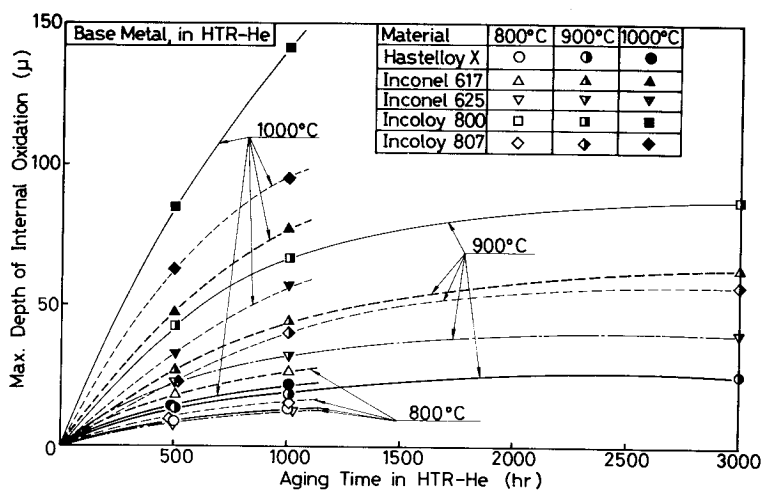


Fig.8-10 Relation between Aging Time and Max.Depth of Internal Oxidation for Base Metal

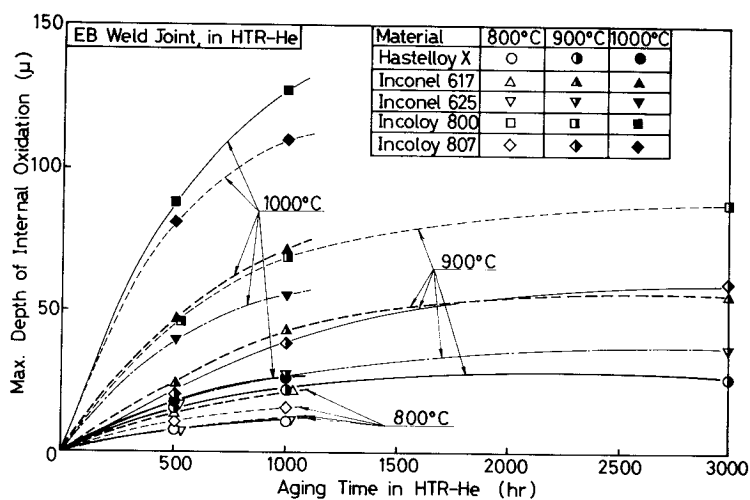


Fig.8-11 Relation between Aging Time and Max.Depth of Internal Oxidation for Electron Beam Weld Joint

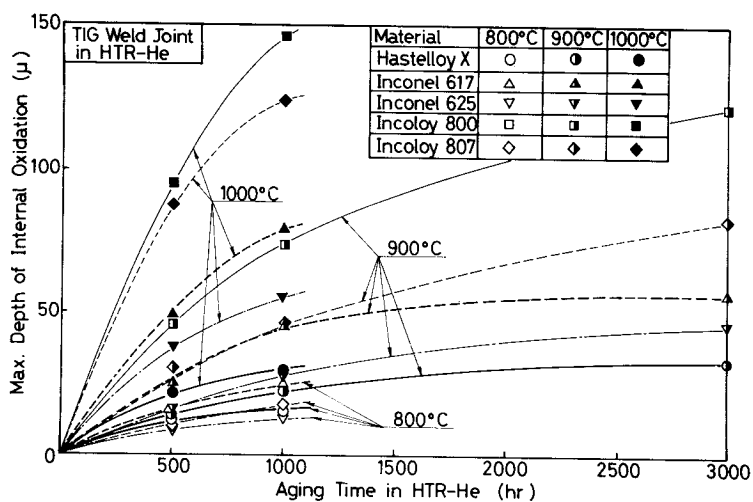


Fig.8-12 Relation between Aging Time and Max.Depth of Internal Oxidation for TIG Weld Joint

大内部酸化深さが一般に大になっている。とりわけ $900^{\circ}\text{C} \times 3000\text{ hr}$ 時効の場合にその差が比較的明瞭に認められる。溶接金属に発生する内部酸化は一般に柱状晶に沿って進展しているが、試験片表面と柱状晶のなす角度 θ が大きいところほど一般に内部酸化深さは大になるようである。この関係を $900^{\circ}\text{C} \times 500\text{ hr}$ 時効材について Fig. 8-13 に示すが、TIG溶接金属の θ は電子ビーム溶接金属に比べて一般に大であり、内部酸化深さも大になっているのが判る。

各材料において、試験温度に対する内部酸化速度定数を Fig. 8-14 に示す。内部酸化速度定数 K_{IP} は、最大内部酸化深さが時間に対して放物線則にしたがうとして、次の関係より求めた。

$$\Delta D^2 = K_{IP} \cdot t + C$$

ここに ΔD : 試験時間 t における最大内部酸化深さ (μm)

t : 試験時間 (hr)

K_{IP}, C : 定数

K_{IP}, C は所定の材料および試験温度において、500, 1000 hr の試験時間に対する最大内部酸化深さを連立させて求めた。

所定の材料に対する K_{IP} の温度依存性は、アレニウス表示においてはほぼ直線関係になっているが、所定の材料に対するTIG溶接金属の K_{IP} は、母材ならびに電子ビーム溶接金属のそれに比べて一般に大となっており、電子ビーム溶接金属の K_{IP} は母材のそれと同等もしくはそれ以下である。これは先に述べた溶接金属柱状晶の方向性にもとづくものと考えられる。

Hastelloy X では、 K_{IP} の温度に対する勾配は、他の材料に比べてきわめて小さく、また Fig. 8-8 における K_P の勾配よ

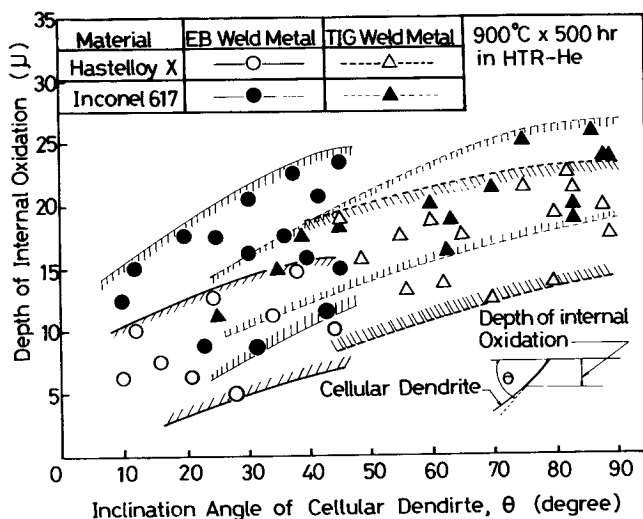


Fig.8-13 Relation between Inclination Angle of Cellular Dendrite and Depth of Internal Oxidation

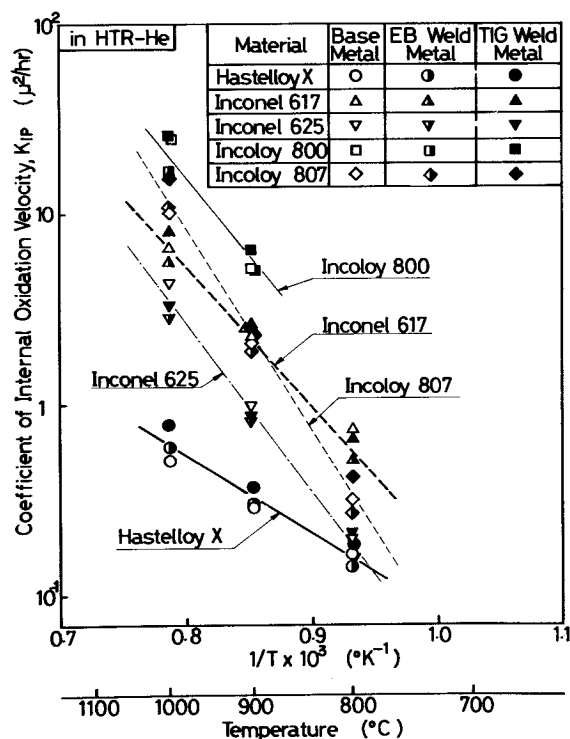


Fig.8-14 Relation between Temperature and Coefficient of Internal Oxidation Velocity

りもさらに緩やかになっている。すなわちHastelloy X では、時効温度の上昇に伴う腐食重量の増加に対する抵抗以上に内部酸化の進行に対する抵抗が大なることを示している。このことはHastelloy X と同様の固溶体強化型合金である Inconel 625 にもあてはまるが、Al, Ti による強析出強化型合金である Incoloy 800, Incoloy 807 では、 K_{IP} と K_P の温度に対する勾配はほぼ平行になっており、重量増加と内部酸化がほぼ同じ割合で進行することが判る。また弱析出強化型の Inconel 617 では、 K_{IP} の勾配が K_P のそれに対してやゝ緩やかになっているようである。

(c) スケールの性状

高温 He 中における材料の耐食性を評価するうえで、先に述べた表面酸化物による重量増加ならびに内部酸化の程度の外に、表面酸化スケールの密着性もまた重要な因子となる。なぜならスケールが剥離し易いと雰囲気とマトリックスが直接接触し、内部酸化等局所的な腐食が促進されること、ならびにスケールが剥離して He 中に混入すると炉心を汚染し、とくにスケール中に Co 等放射性物質が混入していると安全上重大な問題を引き起すためである。

本試験材料中ではHastelloy X が最もスケールの密着性に優れているようである。一例として Fig. 8-15 に $900^{\circ}\text{C} \times 3000 \text{ hr}$ 時効後におけるHastelloy X ならびに Inconel 617 の電子ビーム溶接部の走査型電子顕微鏡による観察結果を示す。Hastelloy X の表面スケールは堅固であり、スケールの剥離はまったく観察されないが、Inconel 617 の表面スケールには母材、溶接金属にかかわらず、ところどころ剥離したあとが見られる。

母材と溶接金属の性状を比較すると、低倍率の観察ではFig. 8-15 からも判るように、溶接金属では表面沈析物が溶接柱状晶を明瞭に浮き出しており、母材と形状的な相違が比較的明確に区別されるが、高倍率の観察ではFig. 8-16 に示すように両者にほとんど差異は見られず、形状、種類とも似かよった沈積物が堆積している。

Al, Ti を含む Inconel 617, Incoloy 800, Incoloy 807 では、表面にネットワーク状に

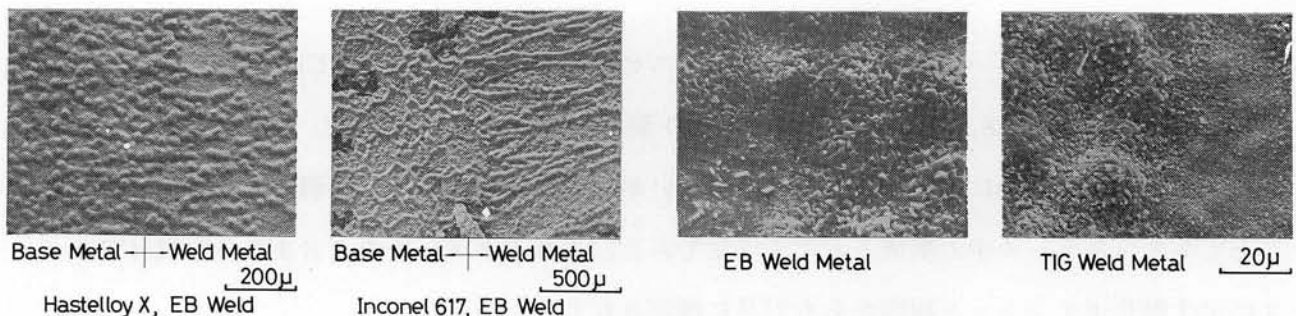


Fig.8-15 Scanning Electron Micrograph of Specimen's Surface for Electron Beam Welds of Hastelloy X and Inconel 617 Aged at 900°C for 3000hr

Fig.8-16 Scanning Electron Micrograph of Specimen's Surface for Electron Beam and TIG Weld Joint of Hastelloy X Aged at 900°C for 3000hr

粒界が観察されるが、これはAl, Ti による粒界の選択酸化の結果と思われる、例えば Inconel 617 では、Fig. 8-17 に示すように $800^{\circ}\text{C} \times 500 \text{ hr}$ の時効ですでに表面に粒界が明瞭に現れている。

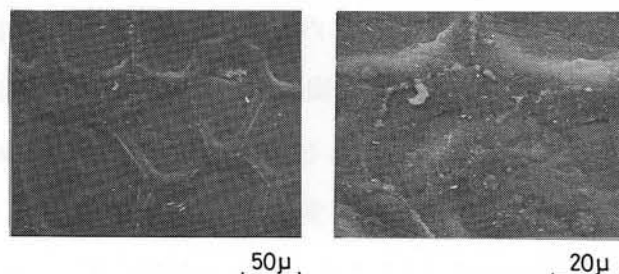


Fig.8-17 Scanning Electron Micrograph of Specimen's Surface for Base Metal of Inconel 617 Aged at 900°C for 500hr

(d) スケールの組成および質量移行

He 中時効後の各材料の断面について、マトリックスから表面スケールにかけて EPMA による線分析を行なった。Fig. 8-18 を

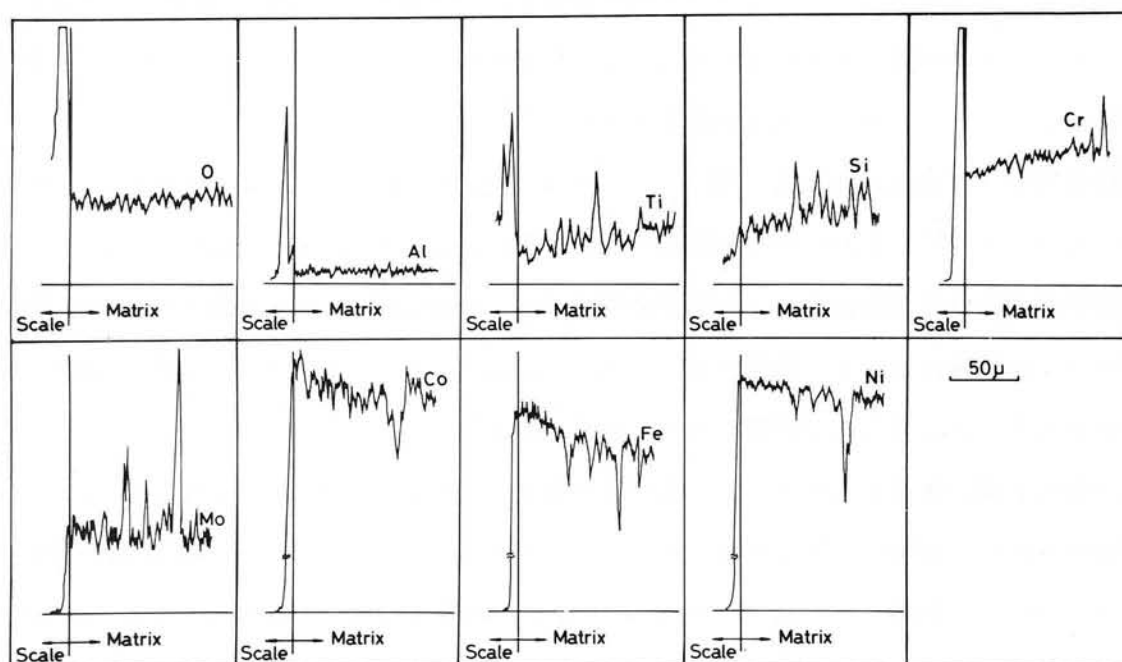


Fig.8-18 Distribution of Element for Electron Beam Weld Metal of Hastelloy X Aged at 900°C for 500hr

例にとり、組成分布の一般的な特徴を述べる。スケール中にはAl, Ti, Cr, O_2 が富化しており、スケールが主としてAl, Ti, Cr の酸化物より形成されていることを示している。Fe, Ni, Co, Mo, Siはスケール中にほとんど含まれていないが、このうち Si は分析個所によっては富化することもあり、スケール中の組成として不安定である。これらスケール中に含まれる組成はFig. 8-4に示す酸化ポテンシャル線図からも容易に推定される。

マトリックスから マトリックス/スケール 界面にかけての組成変化はCrが特徴的な様相を示している。すなわち、界面ではマトリックス中央部の平均相対強度に比べて7~10%程度減少しており、板厚方向に 50μ 程度の負の濃度勾配が生じている。そしてこれに対応してFe, Niはマト

リックスから界面にかけて正の濃度勾配が生じており、とくに Fe の濃度勾配が大となっている。

各材料について電子ビームおよび TIG 溶接金属を母材と比較すると、組成分布の傾向やばらつきにとくに差異は認められないようである。

スケール中における組成分布の時効条件による変化は、Cr および Al の相対強度の変化によく表われている。一例として Hastelloy X 電子ビーム溶接金属における Cr の分布を Fig. 8-19 に示すが、時効温度が高くなるにしたがい、また時効時間が長くなるほどスケール中の Cr の相対強度が大となり、かつスケール分布の幅も広がっているのが認められる。これは(a)項にて述べたスケール重量の増加に対応するものと考えられる。

マトリックス中央部からマトリックス/スケール 界面にかけての Cr の濃度勾配は、時効時間がある程度長くなると短時間時効のときよりもかえって緩やかになり、マトリックスの平均濃度に近づいてくる現象が認められる。一例として Hastelloy X 電子ビーム溶接金属の 900℃における結果を Fig. 8-20 に示す。500 hr から 1000 hr 時効にかけては、Cr の濃度勾配が大きくなっているが、3000 hr 時効すると濃度勾配は逆に緩やかになり、マトリックスの平均濃度に近づいている。これはマトリックス/スケール

界面近傍におけるマトリックス中の Cr の減少は、界面における Cr の酸化物形成のためであるが、この酸化物生成速度は時効時間の平方根に逆比例して小さくなるため、長時間時効ではマトリックス中央部より拡散により補充される Cr 量がマトリックス/スケール 界面近傍の Cr の減少量に追いつくためであると考えられる。

(e) 時効による材質変化

高温 He 中時効による材料の挙動は、前述の表面層近傍における腐食ならびに質量移行の他に、マトリックス中の炭化物の析出過程に伴う材質変化がある。

Table 8-7 および Table 8-8 にそれぞれ Hastelloy X, Inconel 617 について、母材およびその電子ビーム溶接金属の各時効条件に対する顕微鏡組織を示す。

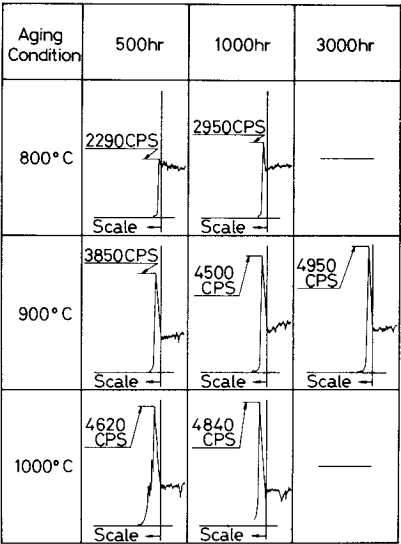


Fig.8-19 Distribution of Cr for Electron Beam Weld Metal of Aged Hastelloy X

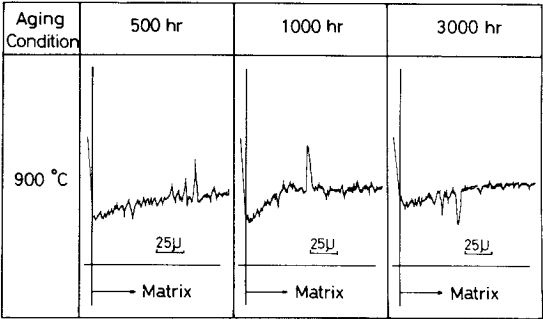


Fig.8-20 Effect of Aging Time on Distribution of Cr for Weld Metal of Hastelloy X Aged at 900°C

Table 8-8 Cross-sectional Microstructure for Base Metal and Weld Metal of Aged Inconel 617

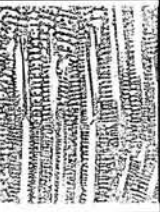
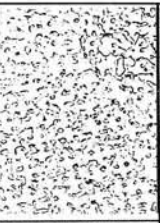
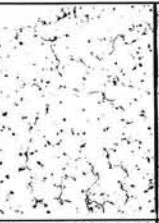
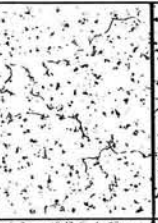
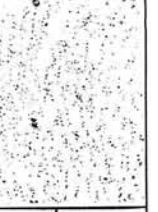
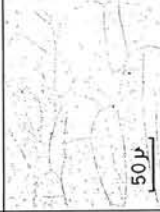
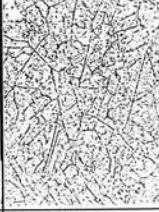
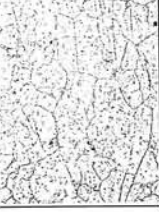
Aging Condition	Base Metal	EB Weld Metal	TIG Weld Metal
Not Aged			
800 °C	500 hr		
	1000 hr		
900 °C	500 hr		
	3000 hr		
1000 °C	1000 hr		

Table 8-7 Cross-sectional Microstructure for Base Metal and Weld Metal of Aged Hastelloy X

Aging Condition	Base Metal	EB Weld Metal	TIG Weld Metal
Not Aged			
800 °C	500 hr		
	500 hr		
900 °C	1000 hr		
	500 hr		
1000 °C	500 hr		
	1000 hr		

Hastelloy X については、非時効材の母材には未固溶の炭化物が粒界、粒内に散在しているが、電子ビーム溶接金属の柱状晶組織には残存炭化物はほとんど認められない。時効条件による炭化物の析出、凝集過程を次に述べるが、母材および電子ビーム溶接金属ともその過程に差異はない。

800℃×500hrにおいては、すでに粒界、粒内に細い粒状炭化物の析出が多数観察される。溶接金属では柱状晶のセル境界に多く析出している。900℃では析出炭化物の凝集化の兆候が見られ、長時間になるほどしだいに凝集化が進行する。1000℃×500hrでは炭化物の凝集粗大化の傾向が900℃×3000hrの条件のものよりさらに大になっている。また溶接金属では柱状組織がほとんど消滅している。1000℃×1000hrでは粒内炭化物の析出量がかなり少なくなり粗大な粒界炭化物の凝集が著しい。Hastelloy Xにおけるこれらの析出炭化物は、X線回析により M_6C であると報告されている。^{29),30)}

Inconel 617 の時効による析出過程も Hastelloy X の場合と類似している。ただ Hastelloy X に比べて析出炭化物の量は少ない。なお、Inconel 617 の析出物についても種々報告されているが、³¹⁾ 主析出物を $M_{23}C_6$ とするか M_6C とするかについては意見が分れているようである。

Hastelloy X、Inconel 617 の時効による硬さ変化をそれぞれ Fig. 8-21 および Fig. 8-22 に示す。これらはマトリックス中央部における7～10点のマイクロビッカース硬さ（荷重200g）の平均値を示している。

Hastelloy X、Inconel 617 の時効による硬さ変化の傾向はよく類似している。またそれぞれ

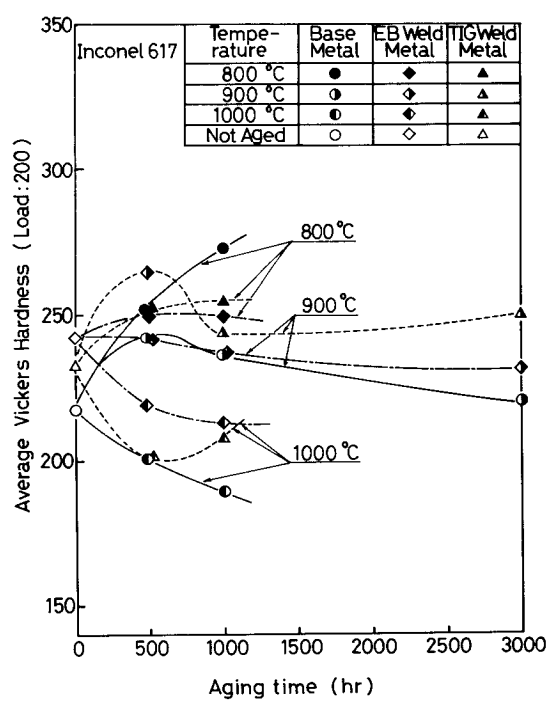


Fig.8-21 Effect of Aging Time on Average Vickers Hardness of Inconel 617

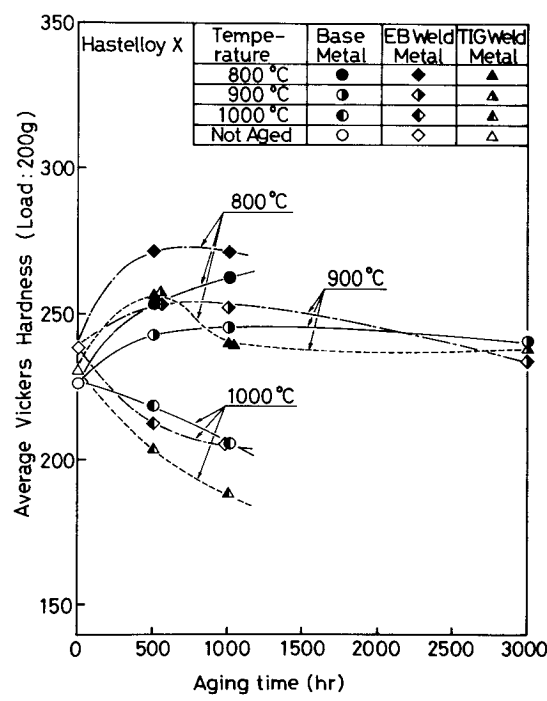


Fig.8-22 Effect of Aging Time on Average Vickers Hardness of Hastelloy X

の材料において母材とその電子ビームおよび TIG 溶接金属を比較しても、若干のばらつきはあるが傾向的には類似している。すなわち、800℃×500 hr または 900℃×500 hr では炭化物の析出に伴い非時効材に比べて硬さが上昇するが、時効時間がさらに長くなると軟化する傾向を示し、900℃×3000 hr では非時効材に近い硬さになっている。これは過時効による炭化物の粗大化、凝集化に対応しているものと考えられる。そして1000℃になると過時効状態がさらに著しくなり、500 hr ですでに非時効材に比べてかなり軟化している。

(2) He 中時効後の高温低サイクル疲労強度

Hastelloy X の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手を HTR 近似 He 中にて 900℃×3000 hr 時効した後、同雰囲気にてひずみ制御による 900℃の高温低サイクル疲労試験を行った。試験結果を非時効材の結果と対応させて Fig. 8-23 に示す。なお、破損繰返し数は、ひずみ振幅

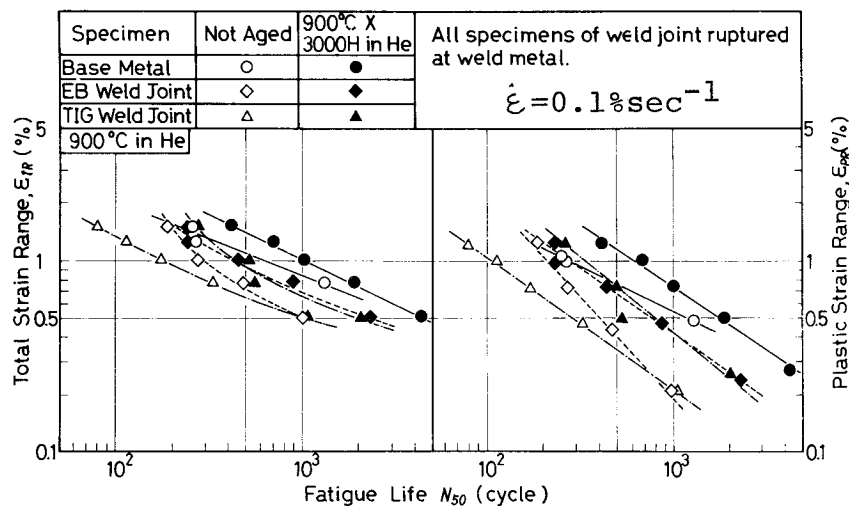


Fig.8-23 Fatigue Properties of Aged Hastelloy X at 900℃

に伴って発生する荷重が初期荷重の1/2になった時点として定義した。

電子ビームおよび TIG 溶接継手の破断位置はいずれも溶接金属であり、破損繰返し数は母材に比べて非時効材、時効材ともに小さい。また電子ビーム溶接継手と TIG 溶接継手では破損繰返し数に差異は認められない。

時効材は母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手ともにそれぞれの非時効材に比べて破損繰返し数が大になっている。このことは、本試験の場合、He 中時効により生じた腐食代が試験片平行部の径に比べて無視し得るほどに小さいため、腐食による疲労強度の低下よりも時効によるマトリックスの材質変化に伴う疲労強度の上昇の方が大きく影響したためと考えられる。すなわち、薄田らによれば³⁰⁾、Hastelloy X を 850℃にて最高 10,000 hr まで時効させたものにつき引張性質を調べているが、3000～10,000 hr 時効材では延性（伸び）が非時効材に比べて約 20 % 上

昇している。したがってこの条件に近い本時効条件のもとでも延性が上昇していることが考えられる。いっぽう、ひずみ制御による疲労試験では、同一材料であれば延性の大きいものほど疲労強度が一般に大になると言われており²⁵⁾、本試験において時効材の破損繰返し数が非時効材のそれより大きくなったことも理解できる。

破損部近傍の断面状況の一例として、電子ビーム溶接継手時効材の $\epsilon_{tR} = 0.758\%$ の条件のものを Fig. 8-24 に示す。き裂の発生数は非時効材よりも多く、時効材のき裂は内部酸化を生じたところを起点に発生しているようである。ただし、き裂は粒界、粒内にかかわらず進展している。

Hastelloy X
EB Weld Joint
Aged at 900°C for 3000hr

$\epsilon_{tR} = 0.758\%$
 $N_{50} = 886$ cycles
at 900°C

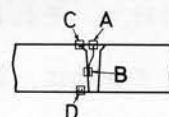
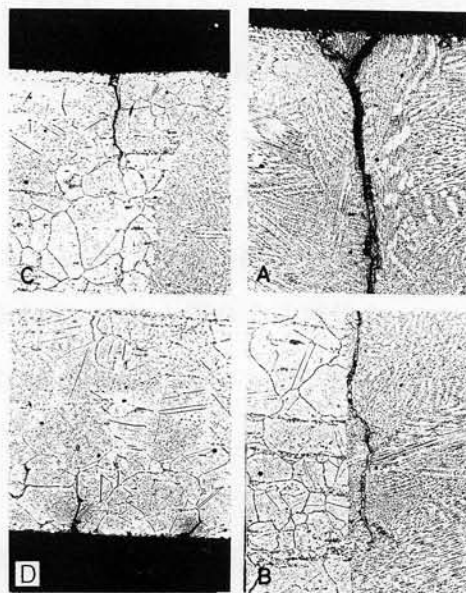


Fig.8-24 Microstructure of Fatigue Test Specimen

8.3 He 雰囲気中における溶接継手のクリープ破断特性

8.3.1 供試材料および溶接要領

Table 2-2 に示した Hastelloy 系, Inconel 系および Iocoloy 系の耐熱合金を母材として使用した。

なお, Hastelloy X の各材料は HAEN および HAEM である。

このような各耐熱合金を 15 mm 厚さに切削後, Table 7-2 に示した電子ビーム溶接条件および Table 7-3 に示した TIG 溶接条件にて溶接を行なった。なお, TIG 溶接には Table 7-1 に示した溶加棒を使用した。

8.3.2 実験方法

(1) 試験片形状

クリープ破断試験片形状は Fig. 7-16 に示した通りである。溶接継手試験片については、溶接部が平行部の中央に位置するようにした。試験片はいづれも板厚中央部から圧延方向に採取し、試験片の平行部は 6 mm ϕ に仕上げ、表面あらさは 6 S とした。

(2) 試験装置

He 雰囲気中のクリープ破断試験に使用した試験装置は、概略図を Fig. 8-25 に示すような、直荷重式クリープ破断試験機である。試験片の着脱が可能なように、炉内管および電気炉に昇降装置が付属し、チャンバーと分離可能な構造となっている。また、炉内管およびチャンバー内は油回転ポンプおよび油拡散ポンプにて排気され、ポンベに封入された He と置換できる。熱電対はハー

メチックシールを通して大気中に取り出している。入口側および出口側の He 中の不純物を測定するために、ガスクロマトグラフおよび露点計までステンレス鋼管にて配管されている。本装置の外観写真を Fig. 8-26 に示す。

なお、本装置の最高使用温度は 1100 °C、最大荷重は 1 ton であり、温度および荷重精度はいずれも JIS Z 2271 に規定された範囲内にある。

(3) 試験方法

HAEN, HAEM, Inconel 625, Inconel 617, Incoloy 800, Incoloy 807 の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手について、JIS Z 2272 に準拠し、He 雰囲気中、900 °C において定荷重クリープ破断試験を行なった。

試験中の温度管理については、各試験片に PR 熱伝対を取付けて、それらの温度値を温度記録紙上に記録させると共に、原則として 1 日 2 回デジタル温度計にて温度測定を行なった。いずれの試験においても試験片の温度分布は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内に制御した。

雰囲気ガスについては、実験開始に先立ち、真空排気とガス封入を 2 回繰り返し、空気の残存および混入を極力防いだ。真空排気の 1 回目は油拡散ポンプで 2×10^{-5} Torr で 12 hr 以上排気しつづけて水分の除去を行なった。真空排気停止後、真空度は 5 分後に 8×10^{-5} Torr に達した。本実験では真空排気停止後 5 分以内にチャンパー内圧力が $0.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ になるまでガス封入を行なった。雰囲気ガスは市販の高純度 (99.9999 %) He を使用し、約 100 cc/min の流量のもとで試験を行なった。He 中の不純物の分析はガスクロマトグラフと露点計を使用し、原則として週 1 回入口側と出口側のガス分析を行なった。分析結果を Table

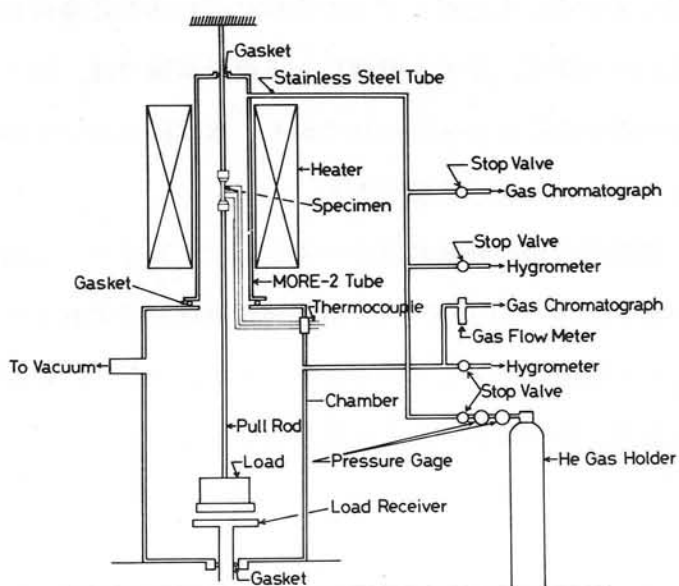


Fig.8-25 Schematic Diagram of Creep Rupture Testing Machine in He Atmosphere

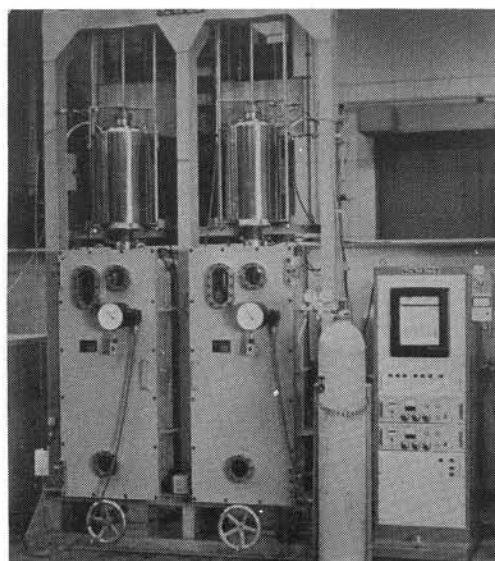


Fig.8-26 Overall View of Creep Rupture Testing Machine in He Atmosphere

Table 8-9 Range of Impurity Composition in He
Measured

		(ppm)						
		H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O
Inlet		nil	≤2	≤0.5	≤1.5	nil	nil	≤20
Outlet	max.	297	12	95	35	5	nil	200
	av.	150	5	25	10	2	nil	100

8-9 に示す。

8.3.3 実験結果および考察

(1) 破断強度

He 雰囲気中の各材料の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の 900°C における応力-破断時間曲線を Fig. 8-27 に示す。なお、比較のために大気中の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の応力-破断時間曲線を同図に示した。

各材料の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の He 雰囲気中におけるクリープ破断強度はいずれも殆んど差異は認められない。また、クリープ破断強度は破断位置により影響されない。また、大気中のクリープ破断強度と He 雰囲気中の結果を比較すると、He 雰囲気中のクリープ破断強度はいずれの場合も大気中のクリープ破断強度に比してわずかに低下し、低下の度合は一般に長時間になる程顕著になる傾向が認められる。

(2) 破断延性

He 雰囲気中の各材料の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の 900°C における破断伸びと破断時間の関係を Fig. 8-28 に、破断絞りと破断時間の関係を Fig. 8-29 に示

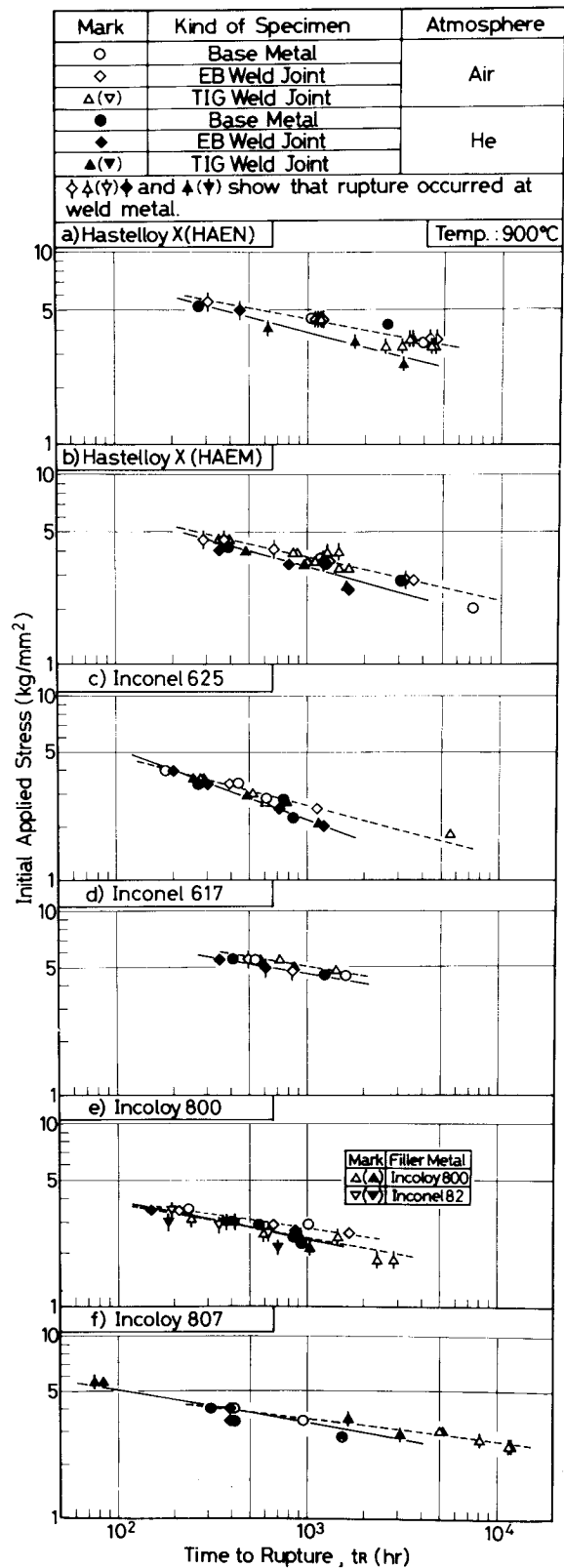


Fig.8-27 Initial Applied Stress vs Time to Rupture
in He for Base Metal and Weld Joint

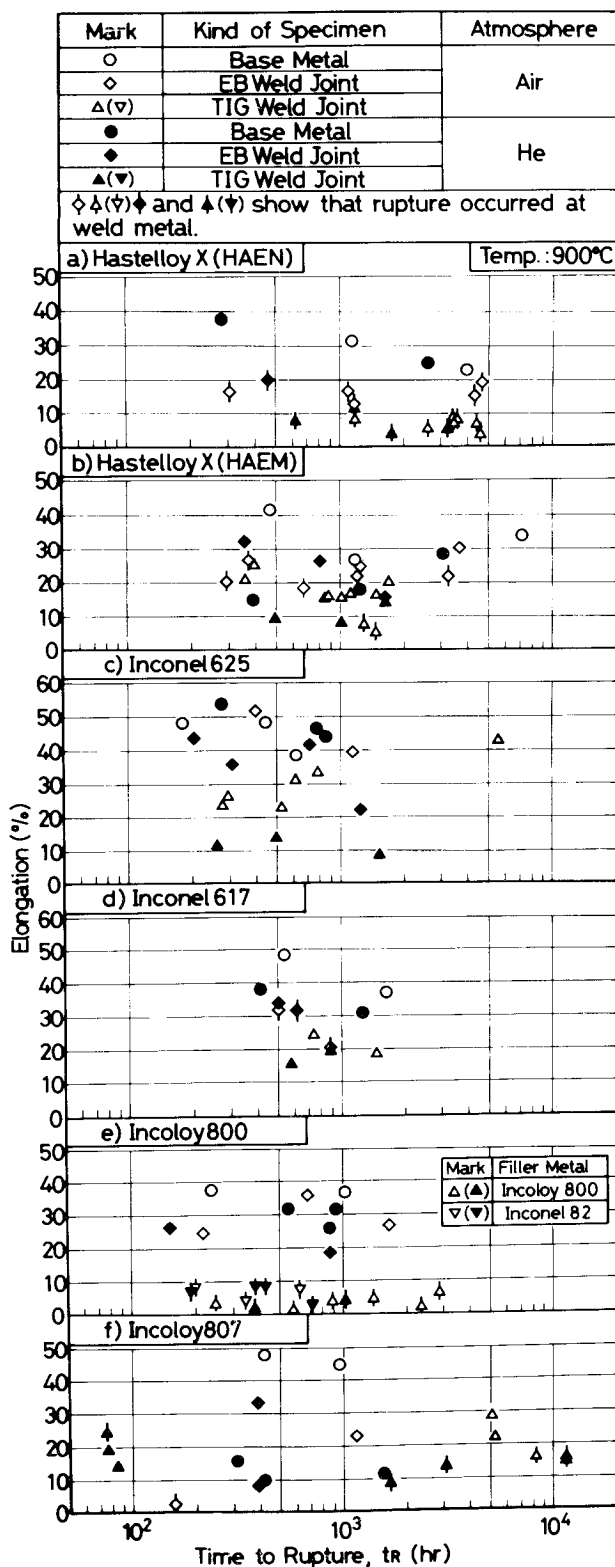


Fig.8-28 Relation between Time to Rupture in He and Elongation for Base Metal and Weld Joint

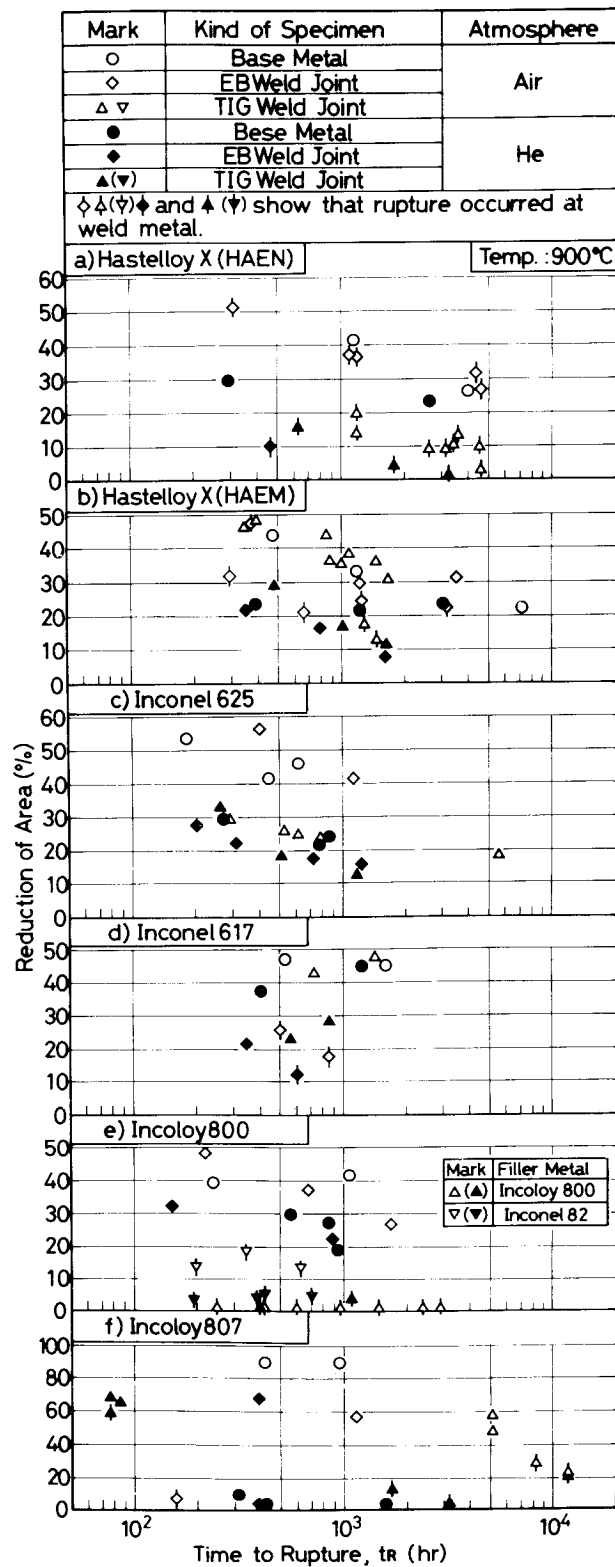


Fig.8-29 Relation between Time to Rupture in He and Reduction of Area for Base Metal and Weld Joint

す。なお、比較のために大気中における結果を同図に示した。

各材料の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の He 雰囲気中における破断伸びは、一般に母材が最も大きく、電子ビーム溶接継手、TIG 溶接継手の順に小さくなるが、電子ビーム溶接継手は母材に近い値を示している。これらの破断伸びを大気中における破断伸びと比較すると、Incoloy 807 を除き、一般に顕著な低下の傾向は認められない。Incoloy 807 については、He 雰囲気中の伸びは明らかに大気中に比して低下の傾向を示している。

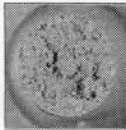
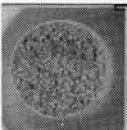
各材料の電子ビームおよび TIG 溶接継手の He 雰囲気中の破断紋りに関しては、母材破断の場合は、母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の間には差異は認められない。いっぽう、溶接金属部破断の場合は、電子ビームおよび TIG 溶接継手はいずれも母材に比して低下するが、電子ビームおよび TIG 溶接継手の間には殆んど差異は認められない。これらの破断紋りを大気中の破断紋りと比較すると、一般に大気中に比して低下している。なお、破断紋りは大気中と同様に、時間の増大に伴い低下の傾向を示している。

(3) 破断後試験片の観察

(a) 外観観察

He 雰囲気中における破断部の形態の代表例を大気中と比較して Table 8-10 に示す。

Table 8-10 Macro-view of Creep Rupture Specimen in He and Air

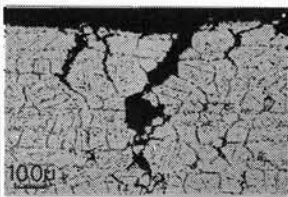
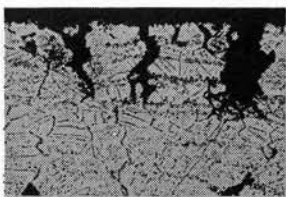
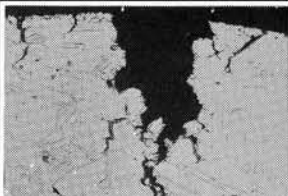
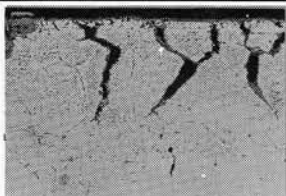
Atmosphere Conditions	He	Air
HAEM Base Metal at 900°C	 $\bar{\sigma}=2.5\text{kg/mm}^2$, $t_R=1634\text{hr}$	 $\bar{\sigma}=3.5\text{kg/mm}^2$, $t_R=1211\text{hr}$
HAEN EB Weld Joint at 900°C	 $\bar{\sigma}=5\text{kg/mm}^2$, $t_R=454\text{hr}$	 $\bar{\sigma}=3.5\text{kg/mm}^2$, $t_R=4591\text{hr}$
HAEN TIG Weld Joint at 900°C	 $\bar{\sigma}=2.6\text{kg/mm}^2$, $t_R=3097\text{hr}$	 $\bar{\sigma}=4.5\text{kg/mm}^2$, $t_R=1152\text{hr}$

破面については大気中の場合と殆んど差異は認められず、母材は方向性のない凹凸のある破面、TIG 溶接金属は方向性を有する凹凸のある破面、また、電子ビーム溶接金属については平坦な破面形態を呈している。

(b) 顕微鏡組織観察

大気中の場合は、Table 8-11に示すように、全面腐食による内部酸化により多くのき裂が発生しているが、長さは短い。He 雰囲気中の場合は、同図に示すように局部腐食による内部酸化によって大気中に比較してき裂の数は少ないが、き裂の長さは長くなっている。また、大気中の場合は

Table 8-11 Comparison of Surface Crack observed in Creep Rupture Specimen between in He and in Air

Atmosphere Conditions	He	Air
HAEM Base Metal at 900 °C	 $\sigma=2.8\text{kg/mm}^2$, $t_r=3017\text{hr}$	 $\sigma=3.4\text{kg/mm}^2$, $t_r=1173\text{hr}$
Incoloy 800 Base Metal at 900 °C	 $\sigma=2.2\text{kg/mm}^2$, $t_r=919\text{hr}$	 $\sigma=2.8\text{kg/mm}^2$, $t_r=1003\text{hr}$

き裂の先端は酸化によって鈍角化しているが、He 雰囲気中の場合は比較的鋭角化の傾向が認められる。

He 雰囲気中のクリープ破断強度および破断延性の低下の原因は、き裂先端の鋭角化およびき裂長さの増大によりき裂進行が促進したものと考えられる。なお、強度低下の要因と考えられる脱炭については雰囲気による差異は殆んど認められない。

8. 4 要 約

本章では、He 中における耐熱合金溶接部の環境効果について検討を行なった。結果を要約すると次の通りである。

- 1) He 中時効による生成酸化物の重量増加については、母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手では差異は認められず、時効時間とともに放物線的な増加の傾向を示した。しかし耐内部酸化性については電子ビーム溶接金属は母材と同等あるいはそれ以上に優れているが、TIG 溶接金属ではこれより一般に劣っている。なお、内部酸化深さについても時効時間とともに放物線的な増加の傾向を示した。

- 2) 表面酸化スケールの性状ならびにマトリックスの質量移行については、母材と電子ビームおよび TIG 溶接金属ではとくに差異は認められない。
- 3) 炭化物析出挙動については、時効温度の上昇ならびに時効時間が長くなるにしたがい、析出、粒状化、凝集の過程をたどり、硬さの変化もそれに対応するが、母材と電子ビームおよび TIG 溶接金属ではその傾向にとくに差異は認められない。
- 4) $900^{\circ}\text{C} \times 3000 \text{ hr}$ He 中時効後の高温低サイクル疲労強度は、時効によるマトリックスの延性増加に対応して非時効材より上昇した。電子ビームおよび TIG 溶接継手の破損位置はいずれも溶接金属であり、母材より疲労強度が低い、電子ビームおよび TIG 溶接継手では差異は認められない。
- 5) 各材料の母材とその電子ビームおよび TIG 溶接継手の He 雰囲気中におけるクリープ破断強度は、殆んど差異は認められない。破断伸びおよび絞りについては、電子ビーム溶接継手は母材よりも小さいが、TIG 溶接継手と同等またはそれ以上である。なお、大気中の結果と比較すると破断伸びは殆んど低下の傾向を示さないが、破断強度および絞りは低下の傾向を示している。この低下は、He 雰囲気中における内部酸化による表面き裂先端の鋭角化およびき裂深さの増大が原因であると考えられる。

第 9 章 総 括

本研究では、まず、Hastelloy 系、Inconel 系および Incoloy 系 耐熱合金の電子ビーム溶接の際に発生する欠陥、ポロシティおよび溶接割れについて、溶接諸元がこれらの欠陥におよぼす影響について検討を行ない、欠陥の発生しない適正溶接条件を設定した。溶接割れについては、従来より採用されている割れ試験方法が電子ビーム溶接における材料の割れ感受性の評価にも適用できることを確認した。つぎに、割れ部の冶金学的検討およびその近傍の溶接過程における温度および応力分布を解析し、割れ発生機構および生成原因を明らかにした。これらの結果に基づいて、耐割れ感受性の良好な耐熱合金を試作した。さらに溶接継手の高温強度および He 雰囲気中の環境効果について検討を行ない、TIG 溶接継手に比して優れていることを明確にした。

これらの内容を総括して記述すると次の通りである。

第 1 章では、原子炉用耐熱合金の溶接上の問題点と電子ビーム溶接法適用の理由、さらにその溶接法適用上の問題点について述べ、本研究の必要性を明示した。

第 2 章では、溶接諸元を変化させた場合の各材料の溶接ビード特性について検討し、溶接諸元の適正範囲を決定した。その結果を総括すると次の通りである。

- 1) 溶接ビード断面に発生する欠陥は、R ポロシティおよびマイクロ割れである。
- 2) R ポロシティの発生範囲を a_b とビードエネルギー密度 w_B で整理した場合、ポロシティ発生度は、ポロシティ発生範囲の面積 S_P 、 a_b のポロシティ発生域 Δa_b により評価できる。
- 3) ミクロ割れ感受性をビーム出力 W_b および溶接速度 v_b' で整理するとこのダイアグラムの中に各材料の割れ発生限界線を設定することができる。
- 4) 溶接入熱とマイクロ割れ発生率の関係図より、割れ発生が認められなくなる入熱が存在し、この入熱をマイクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} と定義すると、 q_{cr} は材料のマイクロ割れ感受性を評価するための適切な指標である。
- 5) 大部分のマイクロ割れの発生位置は $h_C/h_N \approx 1.0$ 近傍に集中している。マイクロ割れの発生位置を $h_p - h_C/h_p$ の関係図で示した場合には、Incoloy 800 を除いたいずれの材料においても、概して h_C/h_p は h_p が大きくなるにしたがって小さくなる傾向を示し、 h_N/h_p の分布範囲内に集中している。

第 3 章では、溶接割れ感受性と材料の高温延性および Trans-Varestraint, Varestraint 試験結果との相関性について検討した。その結果を総括すると次の通りである。

- 1) 高温延性試験結果から求められる材料のマイクロ割れ感受性を評価する指標として NDT_H , NDT_C , $\Delta T_{H.C}$ ($= NDT_H - NDT_C$) および BTR ($= T_L - NDT_C$) が考えられ、 NDT_H , NDT_C が小なる

ほどおよび $\Delta T_{H.C}$, ${}_B T_R$ が大なるほど割れ感受性が大であると考えられる。電子ビーム溶接による割れ感受性の指標であるマイクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} と $\Delta T_{H.C}$ および ${}_B T_R$ の間にはとくにより相関性が認められる。

2) 高温延性試験において得られた $\Delta T_{H.C}$ および ${}_B T_R$ と Trans-Varestraint 試験における

${}_{TV} T_{R.5\%}$ および Varestraint 試験における ${}_V C_{m.1\%}$ の間にはきわめてよい相関性が認められる。

3) Trans-Varestraint 試験において得られた ${}_{TV} T_{R.5\%}$ および Varestraint 試験において得られた ${}_V C_{m.1\%}$ はそれぞれマイクロ割れ感受性評価の有効な指標である。また、これらの指標と q_{cr} の間にはよい相関性が認められる。

第4章では、凝固線近傍熱影響部の析出物の形態とマイクロ割れとの関連性について検討し、マイクロ割れ発生機構を解明した。その結果を総括すると次の通りである。

1) ミクロ割れの発生した Hastelloy X, Inconel 617 および Incoloy 807 の凝固線近傍熱影響部の析出物は液化現象を生じ、マイクロ割れの認められなかった Inconel 625 および SUS 316 の析出物には明瞭な変化が生じなかった。ただし、マイクロ割れの発生した Incoloy 800 の析出物はほぼ原形をとどめていた。

2) 各材料に認められた主な析出物については、Hastelloy X は $M_{23}C_6$ および M_6C , Inconel 617 は M_6C , Inconel 807 は NbC および $Ti(C, N)$, Inconel 625 は NbC , Incoloy 800 は TiC , SUS 316 は $M_{23}C_6$ であった。

3) ミクロ割れ発生機構については、次章で述べる温度および応力分布状態下にある凝固線近傍熱影響部の析出物の液化部が起点となって割れが粒界に沿って進展するものと考えられる。

第5章では、電子ビーム溶接について、溶接過程における温度分布および応力分布を有限要素法によって解析し、割れ発生機構について考察した。その結果を総括すると次の通りである。

1) ネイルヘッドのネック部は熱影響部の他の部分と比較して最高加熱温度が高く、冷却速度も小さいために、 $1000^{\circ}C$ 以上の高温に保持される時間が長い。このようなネイルヘッドのネック部の温度分布の特徴はこの部分の局部的形状に起因するものであり、電子ビームのビード特性の一つといえる。

2) ネイルヘッドのネック部は熱影響部の他の部分と比較して発生応力は低い、 $1000^{\circ}C$ 以上で凝固線方向に引張応力の作用する時間が長い。また、この部分の熱影響部周辺の応力勾配が他の部分と比較して相対的にゆるやかであるために、 $1000^{\circ}C$ 以上の温度において引張応力が負荷する範囲が大きい。

3) 上述のようなネイルヘッドのネック部の温度および応力分布特性により、ネイルヘッド部にマイクロ割れが発生しやすいものと推定できる。

第6章では、Inconel 617 に合金元素としてNb を適当に添加した改良合金を試作し、耐熱合金の電子ビーム溶接部に発生するマイクロ割れの防止方法について検討した。その結果を総括すると次の通りである。

- 1) Nb を含まない Inconel 617 の主な析出物は M_6C 、Nb を約 1 % 含む改良 Inconel 617 は M_6C および NbC、Nb を約 2 % および約 4 % 含む改良 Inconel 617 の主な析出物はいずれも NbC である。
- 2) 凝固線近傍熱影響部におけるこれらの主要析出物は、Nb を約 4 % 含んだ改良 Inconel 617 を除いて、いずれの場合にも溶融現象を生じた。Nb を約 4 % 含む改良 Inconel 617 の NbC が溶融しなかった理由としては、NbC と γ の共晶開始温度がマトリックスの溶融開始温度 T_S よりも高かったためである。
- 3) Nb 量が増大するにしたがってマイクロ割れ感受性は低くなり、約 2 % 以上ではその効果も顕著になり、約 4 % でマイクロ割れの発生は認められなくなる。
- 4) 析出物の溶融現象に起因した耐熱合金のマイクロ割れを防止する一般的な手段としては、析出物の溶融温度および析出物と γ の共晶開始温度がマトリックスの溶融開始温度 T_S よりも高くなるように適当な合金元素を添加することであって、これはきわめて有効な方法であると考えられる。

第7章では、電子ビーム溶接継手の機械的特性を母材および TIG 溶接継手の機械的特性と比較しながら検討を行なった。その結果を総括すると次の通りである。

- 1) 常温および高温における引張強さおよび 0.2 % 耐力については、電子ビーム溶接継手、母材および TIG 溶接継手の間には殆んど差異は認められないが、伸びおよび絞りについては、電子ビーム溶接継手は TIG 溶接継手に比して優れている。
- 2) 高温低サイクル疲労特性については、電子ビーム溶接継手は TIG 溶接継手よりかなり優れており、母材とほぼ同程度のものが多い。
- 3) Hastelloy X (HAEM) の第2期クリープひずみ速度は母材が最も大きく、電子ビーム溶接継手、TIG 溶接継手の順に小さくなるが、電子ビーム溶接継手はむしろ母材に近い。第3期クリープ開始時間と破断時間の比については、電子ビーム溶接継手と TIG 溶接継手の間には殆んど差異は認められない。
- 4) 各材料のクリープ破断強度については、電子ビーム溶接継手、母材および TIG 溶接継手の間には殆んど差異は認められない。クリープ破断延性については、母材が最も大きく、電子ビーム溶接継手、TIG 溶接継手の順に小さくなるが、電子ビーム溶接継手は母材に近い。
- 5) 周溶接継手を有する円筒構造物のクリープ破壊を考えた場合、溶接継手のクリープおよびクリープ破断特性の評価は第2期クリープひずみ速度、クリープ破断伸びおよび破断強度により行な

うべきである。クリープ破断強度が大なるほど、第2期クリープひずみ速度およびクリープ破断伸びが母材に近似するほど破壊に対する抵抗が大きいと考えられる。このような観点から評価すると、電子ビーム溶接継手はTIG溶接継手に比してかなり優れており、母材に近似している。

第8章では、母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手について、高温He雰囲気中における腐食挙動、長時間浸漬後の高温疲労特性およびHe雰囲気中におけるクリープ破断特性について検討した。その結果を総括すると次の通りである。

- 1) He中時効による生成酸化物の重量増加については、母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手では差異は認められず、時効時間とともに放物線的な増加の傾向を示した。しかし、内部酸化については電子ビーム溶接金属は母材と同等あるいはそれ以上に優れているが、TIG溶接金属ではこれより一般に劣っている。なお、内部酸化深さについても時効時間とともに放物線的な増加傾向を示した。
- 2) 表面酸化スケールの性状ならびにマトリックスの質量移行については、母材とその電子ビームおよびTIG溶接金属ではとくに差異は認められない。
- 3) 炭化物の析出挙動については、時効温度の上昇ならびに時効時間が長くなるにしたがい、析出、粒状化、凝集の過程をたどり、硬さの変化もそれに対応するが、母材とその電子ビームおよびTIG溶接金属ではその傾向にとくに差異は認められない。
- 4) $900^{\circ}\text{C} \times 3000\text{ hr}$ He中時効後の高温低サイクル疲労強度は、時効によるマトリックスの延性増加に対応して非時効材より上昇した。電子ビームおよびTIG溶接継手の破損位置はいずれも溶接金属であり、母材より疲労強度が低い。電子ビームおよびTIG溶接継手では差異は認められなかった。
- 5) 各材料の母材とその電子ビームおよびTIG溶接継手のHe雰囲気中におけるクリープ破断強度は、殆んど差異が認められない。破断伸びおよび絞りについては、電子ビーム溶接継手は母材よりも小さいが、TIG溶接継手と同等またはそれ以上である。なお、大気中の結果と比較すると、破断伸びは殆んど低下の傾向を示さないが、破断強度および絞りは低下の傾向を示している。この低下は、He雰囲気中における内部酸化による表面き裂先端の鋭角化およびき裂深さの増大が原因であると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行および論文作成において、終始懇篤なる御指導、御鞭達を賜った大阪大学溶接工学研究所長荒田吉明教授に深甚なる感謝の意を表します。

また、有益な御検討ならびに御助言を賜った大阪大学井川博教授、円城敏男教授、菊田米男教授、佐野忠雄教授、西口公之教授、松田福久教授、丸尾大教授、山根寿己教授に厚く謝意を表します。なお、大阪大学溶接工学教室ならびに溶接工学研究所の諸先生および教官各位の深い御討論に深謝致します。

さらに、本論文に関連する研究委員会において有益な御教示と御鞭達を賜った大阪大学木原博名誉教授、寺沢一雄名誉教授、東北大学小林卓郎教授に深謝致します。

なお、本研究の遂行にあたり、川崎重工業株式会社吉田俊夫専務取締役、寺井精英部長、須清修造溶接研究室長には終始御援助と御協力をいただいた。また、実験の実施にあたり、川崎重工業株式会社技術研究所ならびにエネルギープラント事業部の方々より多大の御協力をいただいた。これらの方々に心から御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Y. Arata, K. Terai, S. Matsuda et al, "Study on Characteristics of Weld Defect and Its Prevention in Electron Beam Welding (Report I) — Characteristics of Weld Porosities —" IIW Doc. IV-112-'73 (1973)
- 2) Y. Arata, K. Terai, S. Matsuda et al, "Study on Characteristics of Weld Defect and Its Prevention in Electron Beam Welding (Report II) — Some Metallurgical Features of Weld Porosities —" IIW Doc. IV-147-'74 (1974)
- 3) Y. Arata, K. Terai, S. Matsuda et al, "Study on Characteristics of Weld Defect and Its Prevention in Electron Beam Welding (Report III) — Characteristics of Cold Shuts —" Trans. of JWRI, Vol.3 (1974), No 2, P 81 ~ P 88
- 4) Y. Arata, "Terms and Definitions Proposed from Japan" IIW, 1972
- 5) Y. Arata, M. Tomie, K. Terai et al. "Shape Decision of High Energy Density Beam" Trans. of JWRI, Vol.2 (1973), No 2, P 131 ~ P 146
- 6) 荒田, "電子ビーム熱源の特性とその溶接技術開発に対する展望" 溶接学会誌, Vol.41 (1972), No 11, P 88 ~ P 89
- 7) 荒田, "高エネルギー熱源による加工" 超高温研究会高エネルギー問題研究委員会資料 (1973)
- 8) D. S. Duvall and W. A. Owczarski, "Further Heat-Affected-Zone Studies in Heat-Resistant Nickel Alloys" Welding Journal, Vol.46 (1967), No 9, P 423S ~ P 432S
- 9) J. C. Borland, "Generalized Theory of Super-Solidus Cracking in Welds (and Casting)", British Welding Journal, Vol.7 (1960), No 8, P 508 ~ P 512
- 10) Tomio SENDA, Fukuhisa MATSUDA et al, "Fundamental Investigations on Solidification Crack Susceptibility for Weld Metals with Trans-Varestraint Test", Trans. of JWS, Vol.2 (1971), No 2, P 45 ~ P 66
- 11) W. A. Owczarski, D. S. Duvall, C. P. Sullivan, "A Model for Heat-Affected Zone Cracking in Nickel-Base Superalloys", Welding Journal, Vol.45 (1966), No 3 145S ~ 155S
- 12) D. S. Duvall and W. A. Owczarski, "Further Heat Affected Zone Studies in Heat-resistant Nickel Alloys", Welding Journal, Vol.53 (1974), No 11, 517S ~ 523S

- 13) J. A. Brooks, "Effect of Alloy Modifications on HAZ Cracking of A-286 Stainless Steel", *Welding Journal*, Vol.53 (1974), No 11, 517S~523S
- 14) J. A. Brooks and R.W. Krenzer, "Progress Toward a More Weldable A-286", *Welding Journal*, Vol. 53 (1974), No 6, 242S~245S
- 15) 今井, 増本, "オーステナイト系耐熱合金に現われる析出相およびその役割(1)", *金属学会報*, 第1巻(1962), 第6号, P 411~P 427
- 16) N. T. Williams, "Influence of Welding Cycles on the Ferrite Content of Type 321 Austenitic Stainless Steel", *British Welding Journal*, Vol.12 (1965), No 9, P 435~P 441
- 17) 中村, "ステンレス鋼の溶接性", *鉄と鋼*, 第63巻(1970), 第5号, P 872~P 881
- 18) F. E. Asbury, B. Mitchell and L. H. Toft, "Cracking in Welded Joints of Austenitic Steel in C.E.G.B. Power Stations", *British Welding Journal*, Vol.7 (1960), No 11, P 667~P 678
- 19) W. Yeniscavich, "A Correlation of Ni-Cr-Fe Alloy Weld Metal Fissuring with Hot Ductility Behavior" *Welding Journal*, Vol.45 (1966), No 8, 344S~356S
- 20) O. C., Zienkiewicz, Y. K., Cheung 原著(吉識雅夫監訳), "マトリックス有限要素法", 培風館(1970), P 162~P 184
- 21) 山田嘉昭, "塑性・粘弾性", コンピュータによる構造工学講座Ⅱ-2-A, 日本鋼構造協会編, 培風館(1972)
- 22) 山本善之, 山田善一, "マトリックス構造解析の誤差論", コンピュータによる構造工学講座, 日本鋼構造協会編, 培風館(1972)
- 23) 日本学術振興会第122-123委員会合同 高温ガス炉耐熱材料研究会編, "高温ガス炉耐熱材料研究会調査報告書(第2集)", 昭和49年3月, P 131
- 24) 長谷部, 小泉, 阿部, "溶接性のすぐれた安定化ステンレス鋼の開発", *住友金属技報*, Vol.27 (1975), No 1, P 1~P 11
- 25) 平修二, "熱応力と熱疲労—基礎理論と設計への応用—" 日刊工業新聞社(1974)
- 26) 日本学術振興会 第122-123委員会合同 高温ガス炉耐熱材料研究会編, "高温ガス炉耐熱材料研究会調査報告書(第2集)", 昭和49年3月, P 112~P 116
- 27) 清水, 佐藤, 清重, 村瀬, 藤岡, "Hastelloy Xのクリープ特性とその設計への適用", 日本学術振興会 耐熱金属材料第123委員会研究報告, Vol.16 (1975), No 3, P 319~P 338

- 28) 日本学術振興会第122-123委員会合同 高温ガス炉耐熱材料研究会編, “高温ガス炉耐熱材料研究会調査報告書(第2集)”, 昭和49年3月, P 21
- 29) 日本学術振興会第122-123委員会合同 高温ガス炉耐熱材料研究会編, “高温ガス炉耐熱材料研究会調査報告書(第1集)”, 昭和47年3月, P 69
- 30) 薄田, 辻, 河合, “固溶体強化型 Ni 基耐熱合金の高温長時間加熱過程の材質変化”, 日本学術振興会 耐熱金属材料 第123委員会研究報告, Vol.17 (1976), No. 3, P 319~P 329
- 31) W. L. Mankins, J. C. Hosier and T. H. Bassford, “Microstructure and Phase Stability of Inconel Alloy 617”, Metallurgy Transactions, Vol.5 (1974), No. 12, P 2579~P 2590

本論文に関する著者の発表論文

1. “Fundamental Studies on Electron Beam Welding of Heat-resistant Superalloys for Nuclear Plants (Report 1) — Effect of Welding Conditions on Some Characteristics of Weld Bead — ” Trans. of JWRI, Vol.5 (1976), No.2, P119 ~ P126 ; IIW Doc. N-230-‘77
2. “Fundamental Studies on Electron Beam Welding of Heat-resistant Superalloys for Nuclear Plants (Report 2) — Correlation between Susceptibility to Weld Cracking and Characteristics in Hot Ductility and Trans-Varestraint Test — ” Trans. of JWRI, Vol.6 (1977), No.1, P69 ~ P79
3. “Fundamentale Studien zum Elektronenstrahlschweißen von Hitzebeständigen Legierungen für Kernkraftanlagen (Bericht 3) — Metallurgische Betrachtungen über Mikroriß — ” Trans. of JWRI, Vol. 6 (1977), No.2, 投稿中
4. “原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接に関する基礎的研究 (第1報)” 高温学会誌, 投稿予定
5. “原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接に関する基礎的研究 (第2報)” 高温学会誌, 投稿予定
6. “原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接に関する基礎的研究 (第3報)” 高温学会誌, 投稿予定