

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

抵抗溶接に関する技術調査と試験片の製作

1993年1月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

この
転載、
い。TM

本書

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

さ

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

抵抗溶接に関する技術調査と試験片の製作

報告者 西山 元邦 関 正之

飛田 典幸 上村 勝一郎



要 旨

(目的)

酸化物分散強化型鋼（ODS鋼）を溶接するための新手法として、加圧抵抗溶接（PRW）法が適していると考え、抵抗溶接の装置、溶接部挙動等に関する情報を取得し、その調査結果をまとめ、今後の開発に資する。

(方法)

ベルギーのベルゴニュークリア社（BN社）に、抵抗溶接装置及び溶接方法に関する技術情報の提供及び溶接試験片の製作を依頼しその調査を行った。

(結果)

I. 抵抗溶接に関する技術コンサルテーション

- ・装置の機能上重要となるのは、溶接ヘッドの軽量化、被覆管を確実に固定するためのコレットチャック、溶接後のバリを取るための方法等である。
- ・抵抗溶接で溶接した試料の強度評価を行うためには、回転疲労試験が有効である。
- ・BN社では、抵抗溶接装置により製作したODS鋼の燃料要素を、SNR300、PHENIX等で照射試験を行い、溶接部から破損することは無く、健全であることを実証している。

II. 試験片の製作

- ・選定した溶接条件において、ODS鋼、高強度フェライト／マルテンサイト鋼を溶接した結果、金相試験及び回転疲労試験において良好な接合が得られていることが分かった。

(結論)

抵抗溶接法に関する詳細な情報が入手でき、国産の装置開発の実現の見通しが得られた。PNC支給のODS鋼試験片の溶接試験においては、良好な結果が得られ、抵抗溶接法はODS鋼を溶接するのに有望な手法であるとの実証データが得られた。

は じ め に

酸化物分散強化型鋼（ODS鋼）を従来のTIG溶接法等の溶融接合法で溶接すると、酸化物粒子が凝集して空孔を形成し、溶接部の強度が著しく低下してしまう。よってこの材料を溶接するための新手法として固相接合法の適用が必要であると考え、加圧抵抗溶接（PRW）法を調査した。

ヨーロッパ等ではすでにLWR等の燃料要素の組立に採用している、抵抗溶接に関する技術情報を収集するため、ベルギーのベルゴニュークリア社（BN社）に依頼しその調査を行った（契約番号030C0083、件名 抵抗溶接に関する技術コンサルテーション及び溶接試験片の製作）。

本報告書は、BN社より入手した抵抗溶接装置に関する技術情報を和訳した結果を第1章に、第2章には、技術情報に関する質問とその回答を示す。又、第3章には国産材であるODS鋼と高強度フェライト／マルテンサイト鋼試験片をBN社の抵抗溶接装置で溶接した過程及び結果を記す。第4章には、全体のまとめと考察、第5章には今回の調査を通しての結論を述べる。

目 次

1. 抵抗溶接に関する技術コンサルテーション	1
1.1 導 入	1
1.2 開発の経緯	1
1.3 抵抗溶接装置	2
1.3.1 メカニズムと装置特性	2
1.3.2 溶接の手順	3
(1) 真空中での溶接	4
(2) 加圧溶接	5
(3) バリの除去方法	6
(4) 装置の特殊な部分について	6
(5) 生じた問題とその対策	8
1.4 溶接に関して	10
1.4.1 接合の原理	10
1.4.2 接合部の観察	10
1.4.3 接合部の機械的強度測定結果	12
1.4.4 接合部の健全性の保証方法	14
1.4.5 照射試験の結果	20
1.4.6 汚染の程度	20
1.4.7 試験結果と議論	21
2. 「抵抗溶接に関する技術コンサルテーション」の質問事項に関する回答	33
3. 試験片の製作	48
3.1 溶接施工試験	48
3.1.1 溶接にあたっての準備	48
3.1.2 予備試験	49

3.1.3	試料の製作	49
3.1.4	終わりに	52
3.2	溶接試験片の製作	52
3.2.1	溶接に当たっての準備	52
3.2.2	予備試験	52
3.2.3	試験片の製作	52
3.2.4	解 説	53
3.2.5	終わりに	54
4.	ま と め	55
4.1	抵抗溶接装置に関して	55
4.2	抵抗溶接に関して	55
4.2.1	接合部の機械的強度	55
4.2.2	接合部の健全性の保証方法	56
5.	結 論	57

図 リ ス ト

〔抵抗溶接に関する技術コンサルテーション〕

図-1	初期の抵抗溶接装置	58
図-2	M2 溶接装置	59
図-3	M3 溶接装置	60
図-4	装置の機構	61
図-5	金相写真 (Austenitic Steels PFR-M2 Quarification Weld)	62
図-6	金相写真 (Ferritic Steels)	63
図-7	金相写真	64
図-8	金相写真	65
図-9	溶接曲線 (通常の曲線)	66
図-10	溶接曲線 (後半のサイクルに変位の無い場合)	67
図-11	溶接曲線 (加圧力が大変小さい場合)	68
図-12	溶接曲線 (変位、電圧、加速度の異常)	69
図-13	溶接曲線 (変位が無く、速度、加速度が0に近い値を示す場合)	70
図-14	溶接曲線 (電圧、速度、加速度曲線の異常)	71
図-15	溶接曲線 (電流と電圧の0点の異常)	72
図-16	R I P C E X II 試験で用いられたカプセル	73
図-17	装置の汚染	74
図-18	金相写真 (CFC4D, CIRCE6D Experiment)	75
図-19	金相写真 (CARAFE Experiment)	76
図-20	金相写真 (CARAFE Experiment)	77
図-21	金相写真 (CARAFE Experiment)	78
図-22	金相写真 (CARAFE Experiment)	79
図-23	金相写真 (CARAFE Experiment)	80
図-24	金相写真 (POUSSIX Experiment)	81

図-25	金相写真 (FETICHE Experiment)	82
図-26	金相写真 (FETICHE Experiment)	83
図-27	溶接曲線 (FETICHE Experiment-DY材の被覆管とDY材の端栓の溶接)	84
図-28	溶接曲線 (FETICHE Experiment-DT材の被覆管とDY材の端栓の溶接)	85
図-29	金相写真 (IDEFIX Production)	86
図-30	金相写真 (IDEFIX Production)	87
図-31	金相写真 (IDEFIX Production)	88
図-32	積算電流値 ($\int idt$) と回転曲げ疲労強度の関係	89
図-33	溶接にともなう電圧の変化	90
図-34	溶接にともなう積算電流値 ($\int idt$) の変化 (IDEFIX-DY 材第1端栓の溶接)	91
図-35	溶接にともなう積算電流値 ($\int idt$) の変化 (IDEFIX-DT 材第1端栓の溶接)	92
図-36	溶接にともなう積算電流値 ($\int idt$) の変化 (IDEFIX-DY 材第2端栓の溶接)	93
図-37	溶接にともなう積算電流値 ($\int idt$) の変化 (IDEFIX-DT 材第2端栓の溶接)	94
図-38	溶接にともなう変位の変化 (IDEFIX-DY 材第1端栓の溶接)	95
図-39	溶接にともなう変位の変化 (IDEFIX-DT 材第1端栓の溶接)	96
図-40	溶接にともなう変位の変化 (IDEFIX-DY 材第2端栓の溶接)	97
図-41	溶接にともなう変位の変化 (IDEFIX-DT 材第2端栓の溶接)	98
図-42	金相写真 (FARADET-Quarification Weld)	99
図-43	金相写真 (FARADET-Fabrication Sample)	100
図-44	金相写真 (OPTIMIX Test Weld)	101
図-45	金相写真 (CRAZY Production Control Weld)	102
図-46	ヒップ試験用の加圧カプセル	103

〔「抵抗溶接に関する技術コンサルテーション」の質問事項に関する回答〕

図-47 抵抗溶接装置の簡単な回路図	104
図-48 バリ取り装置の機構	105
図-49 回転曲げ疲労試験装置	106
図-50 単軸クリープ強度 (DT2203Y05 材)	107
図-51 クリープ試験片	108

〔溶接施工試験〕

図-52 端栓と被覆管の形状	109
図-53 金相写真 (M32(a))	110
図-54 金相写真 (M32(b))	111
図-55 金相写真 (M33(a))	112
図-56 金相写真 (M33(b))	113
図-57 金相写真 (M39(a))	114
図-58 金相写真 (M39(b))	115
図-59 金相写真 (M40(a))	116
図-60 金相写真 (M40(b))	117
図-61 金相写真 (M45(a))	118
図-62 金相写真 (M45(b))	119
図-63 溶接後の外観写真	120
図-64 H e リーク試験後の外観写真	121
図-65 H e リーク試験証明書	122

〔溶接試験片の製作〕

図-66 金相写真 (M70(a))	123
--------------------------	-----

図-67	金相写真 (M70(b))	124
図-68	金相写真 (M86(a))	125
図-69	金相写真 (M86(b))	126
図-70	溶接後の外観写真	127
図-71	Heリーク試験後の外観写真	128
図-72	金相写真 (M54(a))	129
図-73	金相写真 (M54(b))	130
図-74	Heリーク試験結果	132

表 リ ス ト

〔抵抗溶接に関する技術コンサルテーション〕

表－１	燃料ピンの照射試験に関して	132
表－２	加圧した燃料ピンの照射試験に関して	133
表－３	記録した溶接パラメータ	134
表－４	回転曲げ疲労試験結果（400N/mm ² ）	135
表－５	クリープ及び引張試験結果（1982年までのもの）	136
表－６	照射試験結果	137

〔溶接施工試験〕

表－７	予備溶接試験時のパラメータ	138
表－８	溶接施工試験時のパラメータ	139

〔溶接試験片の製作〕

表－９	予備溶接試験時のパラメータ	140
表－１０	試験片製作時の溶接パラメータ（ODS鋼）	141
表－１１	試験片製作時の溶接パラメータ（高強度F/M 鋼）	142

1. 抵抗溶接に関する技術コンサルテーション

1.1 導 入

抵抗溶接は、溶接するものを互いに突き合わせ、被溶接材に電流を流し、抵抗による発熱により溶接箇所の温度を上昇させ、加圧下で接合を行う方法である。溶融によって構造の壊れるODS鋼の溶接には、抵抗溶接法が適し、これによりCEN/SCKではODS鋼の溶接において成功を納めている。

1.2 開発の経緯

CEN/SCKにおいて、ODS鋼の開発は1965年に始められ、1967年にODS鋼の溶接技術開発を行うことが決まり、その後、電子ビーム、レーザー、超音波等を用いた溶接試験を行った結果、抵抗溶接法の導入を決定した。

一番始めに製作された装置は、溶接電源が40KVA、溶接HEAD（可動部）の重量が30kgというものであった。

その後、研究の結果、溶接HEADはできるだけ軽量で摩擦の少ないものが良いことが分かり、1972年には、図-1(a)に示す装置を製作した。この装置において、20～60gの溶接HEADの加速は容易に得られた。

さらにその後、PIPCEX-II照射試験（1979～1982年フランスのRAPSODIE炉において行われた）に用いる加圧カプセルを製作するため、図-1(b)に示す装置を1978年に製作した。加圧カプセルの製作は、抵抗溶接の場合、加圧した状態で端栓をダイレクトに溶接できるため、アーク溶接と比べ経済的なものとなった。尚、装置を製作する上で重要なことは、溶接HEADが軽量である、端栓と被覆管の位置決めが正確にできる、高圧ガスの封入ができるといったことである。

図-1(b)の装置

溶接HEAD重量：1.2kg（空気圧により動く）

端栓のクランプ：700bar（711.6kg/cm²）の油圧シリンダー

チャックはコレット式のものをを用い内側には銅、外側にはアル

ミニウムを使用している。

P I P C E X - IIでの照射試験で加圧カプセルの溶接部の健全性が証明された後、P u燃料を封入した燃料を用いC A R A F E照射試験（1981年R A P S O D I E炉）が行われた。P I P C E X - IIで用いた燃料ピンの外径は、5.85mmであったがこの試験の時は、7.6mmのものを用了。

この燃料ピンを製作するために2つの同じ抵抗溶接装置が、BNの助けて1978年に造られた。この二つの装置は、M 2、M 3と名付けられ、M 2はグローブボックスの中、M 3はそのまま実験室に置かれた（図- 2、3参照）。これらの装置の特徴は、溶接の軸加圧も含めて、すべての動きが油圧によって制御されることである。これらの装置はその後の照射試験に用いる加圧カプセルの製造に用いられた。主な照射試験については、表- 1、2に示す。

1.3 抵抗溶接装置

1.3.1 メカニズムと装置特性

M 2及びM 3装置を構成する各部分についての概略を以下に示す。

- ・溶接電源：75K V A -交流式（グローブボックスの外）
- ・可動部の移動範囲：溶接H E A D -10mm可動，溶接H E A Dを載せた台-150mm可動
- ・溶接軸加圧：0～300barの間で可変
- ・中空の溶接軸加圧用シリンダーを開発し，端栓のホールディングチャックを通してペレットの充填を行える様にした。
- ・被覆管側のコレットチャックは，締め付け力が高いこと，大きく広がること，被覆管に密着し漏れを無くすることが重要である。本装置のコレットチャックは，300barの加圧に耐えうる構造となっている。
- ・装置は，かプセル内のセシウムが液化した場合でも溶接が行える様に，5°～10°ほど傾く様になっている。
- ・M 3装置（ボックス外）の真空チャンバーは，プレキシガラスでできている。

これは、溶接の過程を観察するためである。

- 高圧のかかる容器は、被覆管コレット側にネジで固定される。
- 加圧時に、容器内のガスの純度を上げるならば、繰り返しガスの封入（バックフィリング）を行えば良い。
- 加圧容器の内容積は、75cm³である。
- 油圧システムは、装荷台の下の部分に備え付けてあり、2つのシリンダーポンプからなり、低速、高速の動きをそれぞれ行う様になっている。
- 溶接の状態は、溶接HEADに付けられた加速器により加速度、速度、変位を計測しそれより判断することができる。
- 溶接の際の2次電流を観察することも重要であり、（溶接電流のパルスが、セットした値より短いとか長いとかで）これより、溶接装置の不調が分かる。
- これらの溶接パラメーターは、UVオシログラフを用いて観察する。
- チャートのスピードは1m/sで記録され、1回の溶接時間は1/50秒、管がザクツしている時間は1/1000秒となる。
- 表-3に溶接の時に記録したパラメーターを示す（後の3つは、加圧カプセルの溶接の時のみ）。尚、主電圧はメーターから直接読み取って記録した。
- 溶接電流のパルスは、溶接コントロール装置のサイリスタによって制御される。それはスポット溶接機のコントローラーをベースとしているが、以下の2つの点で改良されている。1つは、非同期電流を即座にカットするシステムを有すること、もう1つは、点火時期を制御するサイリスタが2つ付いており、それぞれ独立して作動することである。

1.3.2 溶接の手順

本装置のシステム図を図-4に示す。これには、加圧機及びセンサー類を示す。

以下に、真空中及び加圧下で溶接を行う場合の溶接手順を示す。

(1) 真空中での溶接

その1 端栓の挿入及びクランプ

- ・クランプは、軽めの圧で行う。
- ・クランプの間、端栓はコレットと共に2mm程度動く。
- ・ある圧に達するとクランプは止まる。

その2 被覆管の挿入及びクランプ

- ・コレットは3つづめ及び4つづめのもの大きく広がる（最終的には3つづめのものを用いた）。
- ・被覆管は、コレットの端面にフラットにセットされる。この場合、平板を用いて位置合わせを行う（平板に当たるまで被覆管の後ろにあるストッパーを押しつける）。
- ・クランプは、クランプ圧が設定した圧に到達した時停止する。（Z1）

その3 容器内の排気

- ・メインテーブルが、MS1の作動するところまで移動し、その時、端栓と被覆管の間隔は約1mm程度となる。その後、プレキシガラスの容器で密封する。
- ・その後、真空排気がなされる。必要であれば、被覆管内を通して0.9barまでのガスの導入が行える。
- ・真空容器のオーバープレッシャーは禁物である。
- ・ 10^{-1} mbarに達するのには10秒かかる。

その4 端栓と被覆管の接続

- ・この操作では、メインテーブルは止まるところまで動き、溶接HEADはMS4が作動するところまで数mm押し返される。
この時の軸加圧は、最大の力で行う場合と抑えられた力で行う場合とがある。通常はフルの力で加圧するが、グローブボックスの中で、溶接を行う前に溶接の手順を確認する場合は、溶接直前にフルの加圧を行う。
- ・端栓と被覆管の接続の終了を見越すには、2つの方法がある。1つは、端栓と被覆管が完全に接続したと思われる時間が経過した後加圧をやめる。もう1つは、加圧したまま溶接に移る。

その5 溶接軸加圧及び接合の開始

- ・所定の圧力に達すると加圧がストップする。(Z 3)
- ・溶接は、以下の様な条件が揃わないと開始できない。
 - －溶接軸加圧が設定値以上になる。(Z 3)
 - －端栓及び被覆管コレットの締めつけ力が設定値以上になる。(Z 1, Z 2)
 - －メインテーブルの定められた位置に溶接HEADがある。(MS 4)
 - －被覆管のスリップが起こっていない。(MS 3)
 - －防護カバーが下りている。(MS 5)

その6 端栓コレットの開放

- ・溶接軸加圧がされている状態(Z 3)で、端栓のコレットにかかっている力が解除される(Z 2)と端栓は、アンクランプの状態になる。

その7 メインテーブルの後退

その8 被覆管コレットの開放

- ・Z 1の加圧が解除されると、コレットに内蔵されたスプリングとコレット自体の弾性力によりコレットが開く。

(2) 加圧溶接

ここでは、燃料ピンの加圧溶接の手順について説明する。

この場合、真空中での溶接と異なるのは、被覆管のクランプとメインテーブルの後退のところにおいてで、それ以外の操作は同じである。

加圧容器内が、高圧になるとより高いクランプ力が要求されるため、Z 1加圧機に加えZ 1' 加圧機を用いる。

その1 端栓の挿入及びクランプ

その2 被覆管の挿入及びクランプ

- ・Z 1により被覆管をクランプする。

その3 容器内の排気

- ・この時、加圧容器は被覆管固定部側にネジ止めする。

その4 容器内の加圧

- ・この時、被覆管のクランプ力を必要に応じてZ1'により増して行く。

その5 端栓と被覆管の接続

その6 溶接軸加圧及び接合の開始

その7 容器内の徐圧

- ・容器内排気ポンプにより徐圧した後で端栓と被覆管を開放する。
- ・Z4は、容器内の圧がある一定の値以下でない限り、メインテーブルを後退できない様に制御している。

その8 端栓コレットの開放

その9 メインテーブルの後退

その10 被覆管コレットの開放

(3) バリの除去方法

抵抗溶接の場合、溶接後に大きなバリが発生するためこれを取り除かねばならない。

当初は、旋盤やグラインディングマシンを用いてバ리를削っていたが、これらは研削粉が飛び散ることや、グローブボックス内での作業に適さないこともあって、最終的には円筒状のダイスを用いてバリの除去を行うこととなった。

この方法を用いるとバリは大変容易に取り去ることができ、除去後のバリはリング状になる。

(4) 装置の特殊な部分について

① 被覆管コレット

(a) 被覆管コレット全般

- ・被覆管コレットの主な役割は、被覆管の端に高電流を流す、被覆管を冷却する、被覆管のスリップを抑える、バ리를整形することである。
- ・溶接の際、被覆管コレットの寿命は1000回程度と思われ、I D E F I Xの場合は800回使用しても大丈夫であった。

- ・内側の銅と外側のアルミニウムの間の摩耗防止には、真空ポンプのオイル及びグリースを塗ると良い。
- ・被覆管をクランプしていない状態、異なる径の被覆管をクランプした状態、被覆管の端のストッパーをしない状態で端栓を押し付けたりすると、被覆管コレットがダメージを受けてしまうので注意せねばならない。端栓の径は、閉じた状態のコレットチャックよりやや大きめにつくられているのでこの様な問題は、永遠に起こってしまう。

(b) コレットの劣化、破損による溶接への影響

- ・コレットが劣化すると溶接部近傍に生ずる炭化物の量が増えてしまう。これは、溶接部以外に析出し、引張や疲労試験への影響は無い。この現象は、フェライト鋼よりオーステナイト鋼の方に顕著に見られる。
- ・端栓によってダメージを受けたコレットで溶接すると、被覆管の径や肉厚が通常のものより増してしまう。
- ・コレットに約0.3mm以上の破損があった場合、又、コレットの締め付け圧を解除した時、コレットがそれ自身の弾性力で開かなくなった場合は、コレットを交換しなければならない。

(c) コレットの補修

- ・コレットの内側の面は、機械加工により整形することができるが、外側の面は磨きをかけ補修する程度にしておく。

② 端栓コレット

- ・バリを通す必要が無いので広く広がらなくても良い。
- ・端栓は中実なので、被覆管に比べ比較的速く冷却されるため、固く締めつける必要は無い。
- ・コレットのつかみの部分は端栓をキズ付けない様に滑らかでなければならない。
- ・コレットの材質は、加熱、冷却の際、変形が起こりにくいものでなければならない。
- ・2つのコレットに同じ電流を流すため、コレットの面に付着した異物は取り

除かねばならない。

③ 変換器

- ・パルス溶接において変換器のバランスをとることは重要である。そうでないと、多くの溶接を行った後、効率良くエネルギーが供給されなくなる。
- ・この様子は、電流及び電圧曲線から判断することができる。バランスのとれた変換器の場合は、2つのパルスの間に電流（電圧）が流れない部分が存在する。アンバランスの状態であるとサイリスターがカットしても電流が流れ続けてしまう（図-15参照）。
- ・適切なバランスを保ためには後半のサイクルに高い電流を流すことが必要である。これは通常、自動的に起こるものである。前半のサイクルで溶融が起きているため、後半のサイクルでは抵抗が下がり、より高い電流が流れる。
- ・各々の半サイクルを独立して制御するコントローラーも備えている。

(5) 生じた問題とその対策

① 被覆管のスリップ

- ・被覆管の材質が軟らかいものの場合、溶接軸加圧の時コレットからずれてしまう。
- ・短い被覆管を溶接する場合は、被覆管の後ろにストッパーを設けスリップを防ぐ。
- ・長い被覆管を用いる場合は、被覆管の後ろにマイクロスイッチ（F I G - 4 M S 3）を取り付け、これが作動すると加圧を解除する様にしている。被覆管が長尺の場合は、弾性による収縮があるため、ストッパーを用いることができない。
- ・被覆管が硬い材質でできていて、コレットで被覆管を1/100mm程度（弾性力ギリギリのところまで）締め付けられればスリップは起こらない。
- ・外径にくるいのない被覆管と、それよりやや小さめのコレットを造る技術があれば、被覆管のスリップは起こらない。

② 被覆管と端栓の芯合わせ

(a) 被覆管コレットにおいて

- ・溶接前の芯合わせが正確な場合でも、溶接後に芯がずれてしまうことがある。始めのうちは、バリを通すために大きく広がる4つツメのものであったが、1つのツメが欠けたり短くなった場合、外側のリングと密接に接触していないため、芯ずれを起こす。
- ・これに対し、3つツメのコレットはツメが短くなった場合でも芯ずれの影響は少ない。又、3つツメのコレットでも大きく広がる。

(b) 端栓コレットにおいて

- ・端栓コレットは、重量を軽くするため50mmの短いものを用いている。
- ・端栓コレットは使用して行くうちに、ガイドの後ろがすり減り端栓の取り付け角度が悪くなってゆく。
- ・端栓のガイドに0.1mmの遊びがあれば、溶接部から50mmの被覆管のところにも0.1mmの振れが生じるが、溶接部においては、0.03mm以内の振れで納まっている。

③ 不十分なパワー（電流、加圧）での溶接

- ・高いパワー（電流、加圧）での溶接は良い接合が得られるが、接合部の内部、外部に大きなバリが出る。これは、被覆管のコレットを傷めることにもなる。しかし、パワーを減らし過ぎては不十分な接合となる。
- ・これまでに、単軸及び二軸クリープ試験において不十分な結果となったものがあつた。この場合、バリ欠陥を少なくするため、溶接電流を減らし、溶接軸加圧力を非常に高くした。
- ・バリ欠陥は、図－5(d)に示す様な最も高い電流のかかる部分に見られる。
- ・一度接合部が形成されると、そこから一気に電流が流れる（被覆管側から端栓側に）。この時の電流密度は非常に高いため、オーステナイト鋼の場合には炭化物を生じ、ODS鋼の場合には酸化物が若干凝集してしまうが、これらは問題とはならない。
- ・電流を減らし加圧力を増せばバリが大きくなり、電流を増し加圧力を減らせ

ば熱による影響が大きくなるといった問題は避けられない。

1. 4 溶接に関して

1. 4. 1 接合の原理

- ・溶接の際、電流の流れ方を分類すると以下の3つに分けられる。
 - 1) 通電を開始してから被覆管がザクツするまで
 - 2) 被覆管がザクツし端栓と被覆管のコレットが接近し電流の流れる経路が短くなる
 - 3) ザクツした被覆管が、被覆管コレットの面取りした部分に入り込み、電流の流れ方が変化する
- ・根元の部分の接合は、前半のサイクル中の1)と2)において起こる。3)のステップでは、接合面の拡散が促進し接合部表面のところで終了する。
- ・融点以下で接合面の拡散を十分に起こさせる温度において良い接合が得られる。その時、一部で溶融を起こす場合もあるが、それは、接合部の空孔と共に外側に押し出される。
- ・温度によって抵抗は変化するため、同じ電流を入力しても溶接部にかかるパワーは違ってくる。
- ・溶接は、電流が減少し被覆管のザクツが急激に停止したり、被覆管のザクツした部分がコレットと接触するといった不安定な状況の中で行われるため、詳細については解析しにくい。

1. 4. 2 接合部の観察

- ・抵抗溶接による接合の特徴は、接合面が斜めになる、熱影響部が少しある、溶融部分が存在しないこと等である。
- ・接合面はしばしば、くっきりと見えることもある（たとえばP E 16の被覆管とW. N r 1. 4981の端栓を溶接した場合の様に）が、通常ははっきり現れない。
- ・異材を溶接した場合の金相写真を図－5，6に示す。

(1) 接合部の傾斜

- ・接合部が傾くのは、抵抗溶接の特徴であり、そのことにより接合面積が広がる。
- ・その様な現象はテーパ付きの端栓よりフラットな端栓を用いた方が顕著に現れる。
- ・接合部が傾斜するのは、被覆管の外側はコレットの冷却効果により温度が低くなり、内側は熱がこもって温度が高くなるので、ザクツが被覆管の内側から優先的に起こるためである。
- ・溶接が一度終了した後再び溶接を行うと、元の接合面は影響を受けず、その上に新たな接合面が形成される。図-7(a)に2度の溶接を行ったものの写真を示す。

(2) 小さな熱影響部

- ・熱影響部は小さいが無視できない（熱影響部のサンプル写真を図-6(b)に示す。これは、焼きもどしマルテンサイト組織で、多量のC、0.4%のNiを含むAISI 4923材を溶接したものである。）。この場合、熱影響部の幅は被覆管側において0.2から0.3mm程度である。
入力パワーを少なくすれば熱影響部の幅は小さくなる。
- ・図-6(d)に示すAISI 405の溶接部近傍のknopp最高硬さは506であった。（母材の硬さは200である。）
- ・オーステナイト鋼の溶接では、熱影響部において相の変化は起こらないが、炭化物が凝集する。これは、接合部において多く見られ、最も高い応力がかかる部分においては割れが生ずる。
- ・予想では、抵抗溶接の方が高い応力下で溶接を行うため、TIG溶接よりも腐食しやすいと思われるが、応力腐食割れが問題となるかどうかは分からない。
- ・抵抗溶接機の場合、炭化物の凝集と微小欠陥を抑えるのに、より熱がかからない様にして溶接することができる。TIG溶接では、クラック無しで溶接できなかったオーステナイト鋼を、抵抗溶接では簡単に行えた。

(3) 溶融の無い接合面

- これは、バリの付いている溶接部の金相写真において、バリの中のマルテンサイト組織と接合部のマルテンサイト組織の構造を比較することによって分かる。しかし、厳密に言うとはマルテンサイト組織ではないので、その判別が 難しい。
- 溶接したODS鋼の溶接部に、 χ -phaseが存在する場合、それは溶融のなかったことを示す。
- ジルカロイをオーステナイト鋼に溶接した場合、液相は950℃程度で存在し接合部には、溶融した部分が図-7(b)の様に約1 μ の幅に渡り観察される。この様な薄い層の溶融であれば、強度もあり、引張試験においても溶接部からは破断しなかった。
- 図-7(b)と(c)と(d)には異材の溶接部の写真を示す。ジルカロイと鉄、オーステナイトとフェライト鋼の接合はとりわけ良好である。

1.4.3 接合部の機械的強度測定結果

- この様な方法で接合された良好な溶接部は、引張試験においてこわれることはない。幾可学的に見て、管と端栓の溶接において溶接部の肉厚が減少し、その部分から破壊する様なことは起こらない。
- ノッチ無しで衝撃試験を行ったが、失敗に終わった。いくつかの被覆管は小さなエネルギーで破断したが、他は破断せず、ホルダー部がダメージを受けた。その時、我々は、小さな衝撃試験装置を用いておらず、他のシステムを導入することになった。また、有用な衝撃試験装置の開発も望まれる。
- そこで、疲労試験を行うこととし特別な加工または、長さ調整をしないで試験を行なうのに十分な耐久性を持った操置を製作した。我々は、広範囲に渡り活用している。

それは、通常溶接部の本当の強度を表すものではない。それは、接合面において破断が進行せず、不十分な接合の場合を除いては、接合部の根本から破断が始まり、被覆管を横切る様に破断が進行するためである。

しかし、それは、完全な接合が得られたことを示す<<a>>強度というものを

簡単に示す。溶接していない被覆管は、その値が10倍になる。その値は、残留応力が高い程高くなる。溶接後に熱処理を加えたものは、溶接していない被覆管と同等の値となる。

図-6(a)と6(b)に示すマルテンサイト鋼は、管の中央部より短時間で破断する（被覆管内にキッチリときつく入る端栓を使用して、溶接した場合や、TIGで溶接した場合でも）。その傾向は硬い材料程顕著である。それは、溶接により、溶接部近傍が焼きなまされたためである。

- 様々な材料で溶接を行った場合の疲労寿命の一般的な見知を表-4に示す。

表-5には、ODS 鋼の被覆管を用いて行なった、単軸と多軸クリープ及び引張試験の結果を示す。それらの試験は、1980年代前後に行なわれたものである。

その試験の結果は間接的に溶接部の強度を示す。単軸クリープ試験用の端栓は、あらかじめ細い糸状の歯で機械加工されたもので、通常のものよりも長い。

引張試験においては、700℃と800℃の試験で1試料ずつ（計2本）溶接部から破断した。これは、端栓に強度の低い材料を用いたためと思われる。

そして、700℃及び750℃の単軸クリープ試験においては、多くの試料が溶接部から破断してしまい、その後より良い溶接条件を見い出すために試験が行なわれたが、700℃の温度においては、溶接部と管の強度が等しくなるという結論に至った。

しかしながら、750℃における単軸クリープ試験では、溶接部から破断した試料は、さほど多くはなかった。これは、700℃における試験に用いた試料は、十分な接合がされていなかったことを示す。図-8には、700℃で2700時間の単軸クリープを行った後のODS鋼の溶接部の金相写真を示す。

- 高温の引張試験において溶接部から破断するのは、接合面付近にあるデコエーション（decohesion）のためで、又、溶接部に非常に近い管部から破断した時、接合部から破断する様に見える場合もある。

後者は、端栓に沿って発生する曲げと亀裂により、特定の部分が破断することによって起こると思われる。それは、伸びが限界に達する以前に、管の強度の限界で破断し、一般的には、問題のない接合部ということになる。

前者は、典型的なもので、入力熱が少ない場合や、類似しない材料を用いたときに起こる。

ODSの管とAISI304の端栓を溶接し一連の多軸試験を行う中でこの様なケースに多く出くわした。これらは適切な溶接条件で溶接されたものとは限らない。室温で強固な接合を得ようとし、高い圧接力で溶接を行ったが拡散が不十分になってしまった。温度を上げようとする、デコエーションは大変素早く起こる。この様なことにより、多軸試験による接合部の破断が起こってしまった。行なった疲労試験の中で、いくらやっても破断しなかったものと、荷重をかけてすぐ破断をしてしまったものがあった。高速炉の試験計画との兼ね合いで我々は、結果の十分な解析が行なえなかった。

良い接合は、オーステナイト・フェライトどちらの端栓を用いても得られる。(一例を図-7(b)に示す。)しかし、オーステナイト鋼はフェライト鋼に比べ拡散しにくい。このことは、溶接パラメーターを決定する上で忘れてはならない。

1.4.4 溶接部の健全性の保証方法

抵抗溶接機で溶接した場合に発生する微少な欠陥は、X線や超音波では見つけれないことは良く知られている。よって他の品質保証方法を見つけることが必要となる。

試験を行っていく中、主な溶接パラメーターを管理することによって、溶接の品質保証が行なえることがわかった。またそれは、TIG溶接で行っている保証法よりも簡単である。

しかし、装置の操作だけが良い接合状態を決定するものではないということは知っておかねばならない。又、それにより、良い接合か悪い接合かを100%言い切ることはできない。金相試験における品質評価は必要である。

溶接パラメーターは、広い変動のある動作曲線として記録レンジに表すことができ、品質評価試験は、十分な拡散を得るために必要な最小(時としては最大)の電流値を決定するものである。

(1) $\int idt$ 曲線

- ・総合的な溶接品質を評価するのに最も良いパラメーターは、熱をもたらす電流を見ることである。電流の実行値や最大値を見るよりも、我々は、溶接時間中に流れる電流の積分値 $\int idt$ を見ている。

その理由は、電流の最大値は後半の半サイクルの方に流れ、前半と後半の半サイクルでは流れる電流が異なるためである。

しかし、変換機のバランスが保たれていない場合は $\int idt$ を評価しても意味はない。変換機のバランスは電流、又は、電圧曲線からチェックしておかねばならない。

- ・ $\int idt$ の値は、各溶接時につき読み取り、溶接部の品質評価の基礎として用いる。又読み取った値を確かめると、前半と後半のサイクルの相関を見るためにその曲線を記録しておく。
- ・一連の溶接を行っている期間は、 $\int idt$ は、一定に保たれていなければならない。

その値は、入力電圧又は一次電圧によって影響を受けるため、常に一次電圧を記録している。 $\int idt$ は、一次電圧の変動なしには変わらないため、一次電圧の値は、常に管理が必要である。もし、溶接を行っていく中で、あらかじめセットしておいた電圧の最小値に達したならば、溶接を中継するか、パラメーターを変化させるかなければならない。

(2) 動作曲線

- ・変位曲線は、実際ザクツがどの様に起こっているのかを見ることができ、溶接状態を把握するための重要なパラメーターの一つである。その始めの位置からは、端栓と管が正確な位置におかれているかを知ることができ、また、溶接加圧により、被覆管のスリップがなかったか、可動テーブルの移動がなかったか等が分かる。

前半の半サイクルの終りの時のその位置は、管の付き出し長さを示し、又、後半の半サイクルにおけるその間隔は、目的のエネルギーが入力されたことを

意図する様なものである。一般的には、良い接合は、後半のサイクルに、前半のサイクルの半分の変位があった場合に得られる。

加速度と速度曲線は、溶接状態の違いにより、非常に敏感に反応するため、各々の溶接時において、大きく異なったものとなる。溶接が開始され、熱が除々にかかってきている状態では、それらの曲線は、小さな変化しか示さないが、溶接部の温度がある値以上になると、非常に敏感に対応する様になり、その時管のザクツが始まる。

接合は、被覆管の非常に短い部分で起こり、又、溶接部に異物等が存在すれば溶接部にかかる温度は微妙に変化してしまう。例えば、IDEX試験の場合は、DT 2203Y05（の端栓）よりもDT 3911の方がより一定の速度と加速度が得られた。大部分の材料の場合値のバラツキが起こってしまい、一定した速度と加速度が得られたのは、限られた少数の材料の場合だけである。

これらのことは、速度と加速度が溶接部に加わる温度と関係があっても、良い溶接か悪い溶接かを判断する基準にはならないことを示す。

溶接を行うと、必ずマルテンサイト相が存在する。これは、極力排除されるべきもので、速度・加速度の値によってその量が決まる。

マルテンサイト相の析出量が抑えられたなら、一定の f_{idt} により良い接合が得られたことを証明できる。

(3) 電流と電圧曲線

- これらは、入力エネルギーを表す基本的な曲線であるが、我々は、通常、この入力エネルギーを表すためには、電流の積分値の方を用いている。

端栓と管の電圧を直接測定することはできないため、コレット間の電圧を測定しているが、こうするとコレットによる損失があるため、溶接部の電圧は、正確に表示できない。それゆえ、これらの曲線は、定性的な判断材料として使用すべきである。

又、これらから、不十分な接合状態、サイリスタの不調そして被覆管のスリップリング等の事柄が確認できる。例えば、管と端栓の付き出し長さが変化して

ない状態で、電流が低下したのに電圧が高くなった場合などは、コレットの抵抗値が変化したことが分かる。

そして、それらから、変換器のサチェレイションが分かる。その場合、サイリスタでカットしても、電流と電圧は流れ続けてしまう。

(4) 溶接加圧曲線

- ・溶接が行なわれていない（静的な）状態では、溶接部に加えられている力が、加圧測定器（フォースセル）によって測定される。溶接が行なわれている（動的な）状態では測定される加圧力の値は、加圧システム中のフォースセルの位置で変動する。

セルは、油圧ピストンと可動ヘッドの間にセットしている。

溶接中の加圧力の変動は、可動ヘッドの変位ではなく、油圧システムの圧が変化したことを示す。

- ・通常の溶接時の加速度では、油とピストンの移動量は非常に小さいため、加圧曲線に変化をもたらすことは困難である。

M3装置の場合は、管のザクツが起こる前、溶接部近傍が加熱され、加圧力が増加（端栓等が加熱されている間、軸方向へ伸びピストンを押す。）し、ザクツした時、加圧力が低下するといった現象が起こった。

これは、油圧ピストンの過度の反応である。このことについて、試験した結果、過度の使用と初期の加工の不備により、部品がすり減ったことが原因と分かった。

(5) 他の曲線

- ・上に示したものの以外に、ガス圧、ガスの温度、接触抵抗等の曲線を見ており、それらは、加圧カプセルを造る時に用いる。

測定した接触抵抗は、溶接モニターとしても使用できるが、このケース（低い抵抗）の場合は、正確に測定できない。特に、溶接中に変化する抵抗値については、我々の装置では測定できない。

接触抵抗を測定するのは、溶接前にガスをカプセル全体に充填されるように、端栓と管をガス充てんステージで接触しない様に監視するためのものです。

(6) 溶接曲線から見いだされる溶接の失敗

—図— 9 : 通常の曲線 —ID 866の溶接

- この曲線は、IDFIXプロダクションの末期のものです。加速度、速度曲線は、鋭いピークとなり、過剰のエネルギーをかけたせいで、変位がやや大きくなっているが、電流と電圧の曲線はスムーズなカーブになっている。

これらのことは、良い溶接状態を示す。

溶接加圧力は、各動作に対し、80から100N程度損失している。これらは、やや大きなロスである。

—図— 10 : 後半の半サイクルにおいて変位が無い状態 —TEP 10の溶接

- ここで問題となるのが、後半の半サイクルにおいて変位が無いことである。又、加速度のピークも鋭くなっていない。これらは、前半・後半のサイクル共にエネルギーが少なかったことを示す。

—図— 11 : 加圧力が非常に少ない場合 —TEP 6の溶接

- 前半の半サイクルにおいて、加速度曲線に2つのピークがあることを除いては動作曲線（変位、速度、加速度）に明瞭な変化はない。

このような場合は、マルテンサイトの組織が生じ質の悪い溶接になってしまうことがあるため、接合部の品質評価が必要である。

ピストンにかかる加圧力のロスがあまり大きくなければ、溶接状態は良いと思われる。この場合は、加速している間に、16%の加圧力の損失があった。

—図— 12 : 変位と電圧曲線 —TEP 15の溶接

- ここでは、パワー（電流又は電圧）と溶接加圧の増大があり、被覆管のスリッピングが起こった。その結果、変位曲線の始点に異状が見られ、溶接中にも妙な動作が観察された。電圧は、端栓が管コレットに近づいてくるか、又は、接触した時に短絡する。その時の電流の上昇は、目には見えない。

－図－13(a)と(b)：変位曲線が現れない場合 －TEP 57b の溶接

- ・これは、加圧カプセルの製造中に現れた奇妙な曲線である。

電流と電圧曲線は、通常のものほとんど変わらないが、変位曲線が現れて無く、さらに重要なことは、速度と加速度が非常に低い値しか示さないことである。

図－13(b)には、図－13(a)のカプセルを再び溶接した場合の溶接曲線を示す。良い溶接曲線と悪い溶接曲線を比較してみると、悪い溶接曲線の場合は、前半の半サイクルにおいて、電圧はやや低く、電流はやや高くなり、 $\int idt$ はやや高い値となる。

後半の半サイクルにおいては、速度、加速度の記録がなく、溶接加圧力のロスがないということ以外は、ほぼ曲線の形が似ている。

ここで、電圧が低い値になったということから、再び被覆管のスリッピングがあったと判断した。又、記録レンジの外側に変位の始点が出てしまうのは、端栓は、コレットと直接接触していて相対的な動きが無くても、コレットが、可動テーブルに対しわずかにシフトしてしまうことや、端栓の寸法が所定のものよりやや短いことによって起こる（フルスケールは1.5mm）。

－図－14：電圧、速度、加速度曲線 －ZFIの溶接

ここには、再び、予期もしない失敗（溶接曲線のみから判断して）を示す。これは、一連の試験の最初のころに起こったものであり、突然、妙な電圧曲線と正弦波の様な速度曲線が生じた。

又、加速度曲線も通常のものとは異なっていた。

この原因は、端栓を十分にクランプしてなかったため接触不良が生じたためである。後半のサイクルにおいては、端栓がふくらんだことによりその様な現象はなくなった。

－図－15：変換器のアンバランス －ID 102の溶接

これは、修正がきかない様な電流と電圧の異状を示す。この様な電流曲線の場合でも良好な接合が得られるが、放っておくと、溶接品質に重大な影響を与え、より悪い状態になってしまう。

それは、 $\int idt$ による溶接品質の管理ができなくなり、電流の溶接品質に与える影響が変わってしまうということになる。

(7) 終わりに

装置を操作する中で得られた情報による溶接モニタリングシステムは、溶接部の品質を評価するのに十分なものであり、溶接状態の微妙な変化も容易に推察できる。

これは、理想的な品質管理システムであるが、BN社では、それ以上の方法が無いと信じる。この品質管理においては、各溶接パラメーターの最高値と最小値を定めることが重要で、それは必ずしも容易ではない。

BN社は、本装置において、良好な接合を得る上で、信頼のおける変位と積分電流値の最低リミットを見い出した。また、それ以外の曲線は、定性的な判断材料として用いている。

1.4.5 照射試験の結果

- ・表-6には、抵抗溶接で溶接したカプセルの照射結果を示す。通常の場合、照射後の溶接部の金相写真は得られなかった。しかし、現在、終了したばかりのPFRの照射試験の場合は、少量ではあるが、照射後の試料が回収された。

図-16には、RIPCEX II試験で用いられたカプセルを示す。PAPSODIE炉で3年間照射された後、カプセルは、Mo1に戻され検査、解体が行なわれた。12個のカプセルは、PFR炉で再照射を行なうPORRIDGE試験のためDounreayに送られた。その後、いくつかの新しいカプセルが製作され、PORRIDGE IIでの6回目の照射試験が行なわれた。その結果も、<<PORRIDGE>>として表に載せてある。写真は、解体される前に、Mo1のLHMAホットセル内で撮られたものである。

表には、現在まで溶接部からの破壊がなかったことを示してある。

1.4.6 汚染の程度

- ・汚染の程度は、燃料を充填する過程で決まる。又、溶接方法が異なれば、汚染の大小は異なる。例えば、エクスパルション溶接の場合は、管の内側の長い部

分を洗浄せねばならず、汚染が高くなってしまい、又、フラッシュ溶接の場合は、管の一定の長さを加熱し、不純物を蒸発させるため、溶接部の汚染が高くなってしまう。

抵抗溶接機の場合は、その汚染を最小限に留めることができる。溶融時に端栓は汚染源を管の中や管の端の溶けた部分に押し込む様な動作をする。溶解部に含まれる汚染はあまり高くはない。外部にはき出された大変小さな部分（バリ）に、溶接部の汚染は集中し、それは、カッティングダイによって取り除かれる。IDEXの最初の試験では、そのチップの総量は1から2 cm³になる。

溶接を金属で行う場合、溶接部において、約1ミリグラムの1/10程度の材料の損失が起こる。もし、溶接チャンバーを使わない場合は、金属がグローブボックス全体に飛び散ることになる。

IDEXの被覆管（436被覆管）の溶接の後、BN社の装置の汚染検査を行なった。その結果を図-17に示す。検査は、1988年10月14日に行なわれた。その装置の以前の経歴も含め、汚染を測定した。最も高い線量は、溶接装置自体から検知された。溶接は、溶接チャンバーを用いて行なわれず、バリの除去は、グローブボックスの中で加工器具を用いて行なった。もし、バリの除去を（ダイス等の）せん断器具を用いて行なっていれば、汚染は非常に少なくなっていたと思われる。

この測定のみからでは、どうして、施盤等の他の部分より、溶接装置自体の線量が高くなったのか分からない。想定では、グローブの接触の多い部分に、グローブに付いている汚れが付着し、線量が高くなったと思われる。

しかし、すべての部分において全体の汚染は低い。少なくとも、アルゴンアーク溶接の同様の試験に比べては。

1.4.7 試験結果と議論

ここには、溶接試験を行ったなかで、主要なものの結果及び金相写真について示す。

(1) CFC 4D

—溶接日時

1st weld : 1973年10月25日

2nd weld : 1974年1月22日

—溶接施工試験 (Quarification welds)

図-18(a)

- ・これはBN社が始めに行った溶接であり、1つのサイクルで比較的高いエネルギーで行われた。後のものとの違いは、被覆管の材質が異なり品質が十分なものでなかった。そして、管の内側付近よりも外側付近の方に多くの拡散を観察した。内側には、十分な接合が見られなかった。
- ・管の内部には、室温では33.8barの圧がかかっているが、照射後には、98barになってしまう。

(2) CIRCE 6D

—溶接日時

1st weld : 1974年1月7日

2nd weld : 1974年9月25日

—溶接施工試験の予備試験 (Pre-Quarification welds)

図-18(b)

- ・溶接施工試験(Quarification welds)と溶接試料製作時(Puroduction control welds)の試料は入手できなかったが、同じ材料で、それよりも数日前に溶接された試料を図-18(b)に示す。これのおもしろいところは、大気中で（真空中でなく）溶接されたところである。
- 詳しくは検証されていないが、溶接部の若干の違いがあるだけである。（大気中には、真空中に比べかなりのスパッターがあるにもかかわらず。）

(3) CARAFE (MOL-1 のこと)

ー溶接日時

1st weld : 1978年 7 月28日

2nd weld : 1978年 8 月10～11日

ー溶接試料の製作 (Puroduction control welds)

1st weld : 図-19と図-20

2nd weld : 図-21と図-22

- ・金相写真による品質評価は、当初から行なわれてきており、一連の試料の製作の最後の項のものを図-19, 20 に示す。
- ・CARAFEは、グローブボックスの中で最初行なわれたものであり、図-23にある様なバリを取る装備をもったものであった。これは、単にするどいエッジを持ったリング状のものであったが、よく機能した。
- ・バリの汚染は比較的に高く、ボックスの外に出せるものではない。しかし、これはペレットをつめた後の管のまわりのよごれがこのバリの中へ入っていることになるので悪いことではない。
- ・BN社では2つの装置を成作したが、サイリスタのコントロール部にいくつかの問題があった。1st weldの電源コントロール部は、スポット溶接のものを改良して造ったものを用いたが、それは自動的に、変換器の飽和を防ぐために最初の半サイクルの電流を減らし、端栓の底部付近に拡散を集中させる。

この問題は、2nd weldの時には、解決することができた。そして、接合部分の外側付近においても拡散の欠乏はなくなった。

1st weldにおいて溶接の失敗が確認された。そして、その時、溶接曲線において異常が見られた。これは、管のポジショニングが悪くスリップセンサーがはたらかず、スリッピングを起こしたことが原因である。

原因がどうであろうとこのように、溶接曲線から異常を発見することができる。

(4) POUSSIX

—溶接日時

1st weld : 1984年 3 月 8 日

2nd weld : 1984年 3 月15日

—溶接試料の製作 (Puroduction control welds)

1st (lower end plug) weld : 図-24(a)

2nd (upper end plug) weld : 図-24(b)

- ・ 図-24を見ると割れが入っていることがわかる。これは金相する前に疲労試験を行なったために生じた割れである。図-24(a)以外は、 PuO_2 ペレットを充填したので疲労試験を行なってない。よってこのような割れは生じていない。このことはこのレポートの中のすべての試験において言えることである。

(5) FETICHE

—溶接日時

1st weld : 1983年 3 月 3 日

2nd weld : 1983年 2 月21日と1984年 2 月16～13日

—溶接施工試験

1st (lower end plug) weld : 図-25

2nd (upper end plug) weld : 図-26

- ・ 図-25に示した2つの金相写真は、同じ溶接パラメータにより溶接されたのにもかかわらず、その状態は異なっている（疲労試験は行っていない）。端栓材のDYと呼ばれる材料は、管材のDTよりも、すべての温度において強度がある。DY同士の接合は、DY材の端栓とDT材の管の接合よりもすぐれていることがわかる。

これらのことは予期できなかったが、私達は以下の様なことを考えた。

端栓は中実なので、被覆管よりも常に温度が低い。被覆管は端栓が拡散温度

に達する前に軟らかくなる。端栓の材料は被覆管のものより軟らかく、拡散温度の低いものを用いるのが良い。

- ・接合状態の違いは、図-27と28にある様な溶接曲線を比較することによって分かる。軟い材質の被覆管で溶接されたものは、後半の1/2 サイクルにおいて、遅い加速と速度を示す。加速のピークを4つの溶接試験において実測し、最初のピークの平均の加速は39.5ga（滑降速度）と求まった。1サイクルのうち後半のサイクルにおいてのDY-DYの加速は15.8ga, DY（端栓）-DT（被覆管）は6.3ga となった。

似た様な結果が、グローブボックスの中で行った2nd weldにおいてもみられたが、その傾向は小さい。

- ・そして、DY（強い材料）の被覆管と、DT（弱い材料）の端栓の接合は、大変良いものとなった。グローブの中で溶接された写真を図-26に示し図-26(b)にDT（端栓）-DY（被覆管）を溶接したものを示す。
- ・加速度センサーは、グローブボックスでは作動しないが、速度曲線は2nd weldの時は1st weldの時に比べ似た傾向を示した。

(6) IDEFIX

ー溶接日時

始まり：1986年1月7日

終わり：1986年3月13日

ー溶接施工試験

DY材による溶接～図-29（1st weld）

～図-30（last weld）

DT材による溶接～図-31（last weld）

- ・IDEFIXの試験の目的は、フェライト系 ODS鋼を用いた（フェライト鋼のラップ管に入る）2体のPHENIX燃料要素を製作し、その照射試験を行うことである。

DY, DTとそれぞれ呼ばれる異なった ODS鋼は、CEN/SCK のノウハウの元に

DOUR-METALで作られた。

- この時、可動ヘッドは中空のものに改良され、回転する工具を用いたバリの除去装置が使用された。バリの除去に関しては、この方法があまり良く機能しなかったため、ダイスによるカッティングに変えた。これは、大変良く機能した。
- IDEFIXは、大量の溶接が行なわれた最初のものである。

低い入力電圧の場合でも、十分な接合部の拡散が得られる様に、この時の溶接エネルギー（電流）は非常に大きなものが用いられた。f idt は、最終的に、最初のものより15%高い値を選んだ。この時の溶接は、大変スムーズに行き、ここで重要なことがわかった。

図-29から図-31に、これらの写真を示す。

この接合部には、通常現れる接合面とは異なり溶融の跡もない。そして、どの場合も拡散が不十分になったものはなかった。図-29と30を比較してみると1st weldとlast weld に差がないことがわかる。

- 重大な問題は、疲労試験の結果でその値が大変低くなったことである。通常は20000サイクル程度であるが、この時の破断は10000回となった（図-32）。これらのことは200回のテストにおいて観測され、それらの原因についてはわからなかったが、溶接部の外側付近の状態に関係があると思われる。図-32にf idt に対してプロットした疲労試験の結果を示す。その結果は、大変広い範囲に値が分散しており、又、不十分な接合のものも10000回近い値にしばしばになってしまうため、その原因をつきとめるのは難しい。この試験は、厳密に行なわれた。又、引張り試験は室温で行なわれ、常に管でキレツが発生した。

また、非常に少ない回転数で破断したものが2つあった。これは、管の内側の面取をし過ぎたため、管の肉厚が落ち、クラックが入り易くなったためである。

- この溶接試験の統計的な結果を図-33から41に示す。それらは、2種の材質及び装置について記してある。

—Current X Time Curves ($\int idt$)

- ・装置が異なっても、 $\int idt$ の値は、DYとDT材でそれぞれ等しい値となっていることがわかる。その半サイクルにおけるちょっとした違いは、溶接モニターの違いによるものである。それらの平均値は、ほぼ一定しており、少しの変化が入力電圧に関係して見られる。図-33と34を比較して見ると分かる。

—Displacement Curves (変位曲線)

- ・異なった2つの装置から得られる変位曲線を比較するとおもしろい。グローブボックスの外でDY材の第1 端栓を溶接した場合の変位（図-38）を見ると、最初に起こる変位は、一定の値になっている。これは、チューブティックアウト（管の突き出し長さ）によって決まる。溶接中に生ずる変位の総量は、溶接をこなすに従いコレットが消耗していくため徐々に増加する。
- ・DY材の第2 端栓の溶接をグローブボックスの中で行った場合の変位（図-40）を見ると最初に起こる変位の分散は大きい。これは、今回マニュアル操作で装置を動かしているため、管のポジショニングの際の操作は、 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内に納まっているが、自動で行う時と比べ精度が悪いことが原因であると思われる。
- ・溶接番号100番のものを見て見ると、大きな分散があるがこれはセンサーの不調によると思われるため、試験結果を考慮する際、そのデータは削除すべきである。また、溶接回数が増えるに従い、全変位が低下しているのはおかしい。

第2の変位で、すべての溶接において大きな分散がある。これは、変位の値が小さいため、小さな差しがなくても相対的に見ると大きな違いになってしまう。又、管（口の部分）の変形(forge)はなく、管やコレットの作用で端栓の一部が押し出された形となる。その大きさは、端栓の重さからいえば微々たるものであるが、一定はしていない。

- ・端栓の材料は、変位に大きく影響する。第2の変位は、グローブの中と外で、ほとんど等しいと思われ、DYよりDTの方が、その差がより少ない。
- ・グローブの中で、トータル600回の2nd welds が行なわれたが、装置のメンテナンスは1度も行なわなかった。first weldにおいては、グローブの外の装置

で行われ、被覆管と端栓のコレットは880回用いられ、100回の溶接のたびにグリースが塗られた。そして、被覆管コレットは機械加工で250回ごとに整形された。

- first welds での処理能力は1時間で30管であったが、1日に100管以上はだめだった。
- 操作上問題となったのが、真空排気時の被覆管末端の密封である。始めは、ゴムの栓をしたがだめで次に金属でOリングのついた栓を用いたがそれは小さいため扱いにくく、たびたびリークした。
- 最もよく機能したのが、バリ取りダイスである。150kgの力でチューブを押すだけで10秒もかからないでバリが除けた。600回用いた後も磨耗はなかった。
- 又、グローブの中で、充填作業や溶接を試みた最初の装置にもかかわらずアルゴンアーク溶接のものと同じぐらいに機能した。
- 溶接欠陥等は生じなかったが、ダイスによるバリ取りの際に、被覆管をキズつけてしまったことがいくつかあった。
- すべてのこの試験は成功に終わったが、この方法によって大量の溶接試験は行われなかった。

(7) FARFADET

—溶接日時

1st end plug : 1984年 4月11日

2nd end plug : 1984年 6月 6日

—溶接施工試験

1st end plug～図-42

2nd end plug～図-43

- (U, Pu)O₂ペレットをつめた16の管 (BR2 炉の照射のための) の溶接が行なわれた。被覆管と端栓の材質はW. Nr. 1. 4970 オーステナイト鋼でφ7.60とφ7.35mmの2つの径のものがある。

- 1st end plugの溶接は、最小のエネルギーで行なわれた。そしてそのうちのいくつかに、被覆管の根本の部分で拡散の欠乏が見られた。これを図-42に示す。2nd end plugの溶接は、それよりやや高いエネルギーで行なわれた。図-43に示す。
- 低いエネルギーでの溶接の場合、被覆管の肉厚以上の接合があるため、疲労試験において不合格にはならず、問題はない。
- 図において、これより、この時用いたエネルギーが下限ギリギリのものであることがわかる。根本の部分は、完全な未接合ではないが、ラインが見える。拡大しすぎるとこのラインは見えなくなる。我々は、これを不完全な接合と判断した。しかし、この様なものでも、室温の状態において非常に高い強度を示すことがある。

(8) OPTIMIX

—溶接日時

1st end plug : 1984年 3月21日

2nd end plug : 1984年 3月29日

—溶接施工試験

1st end plug : 1984年 3月14日

2nd end plug : 1984年 3月20日

- これは、CEAのための2つの異なったオーステナイト鋼を用いた試験である。これらは、アルゴンアーク溶接では接合できない。しかし、抵抗溶接では完全に接合できた。図-44にその結果を示す。私達は、ボイド部にさまざまな不純物のあることを確認したが、マイクロクラックを出さないための見通しは立った。(バリの所には出る。)

(9) CRAZY

ー溶接日時

溶接施工試験 : 1984年 4月18日

溶接試料の製作 : 1984年 5月 3日

- ・この試験ではジルカロイ-4の被覆管を用いたピンの照射が行なわれた。中にステンレス鋼を入れた2つのダミーピンが40barの加圧の下で製作された。そしてそれはジルカロイのクリープ強度を測るためのものであった。しかし、BR3炉の不調のため、照射はストップしてしまった。(この試験用のチューブの径は $\phi 5.9\text{mm}$ と $\phi 8.24\text{mm}$ のものであった。)
- ・図-45には、疲労試験後の断面を示す。その断面は(ステンレス)鋼の場合と似ている。しかし、疲労強度は鉄鋼の管が 400N/mm^2 で10000回以上であるのに対し、ジルカロイ-4は 300N/mm^2 で6000回である。室温の引張り試験で不合格となったものはなかった。腐食試験も満足な結果で終わった。

(10) 加圧力カプセルを用いた試験

- ・加圧力カプセルはM3機のテストをするために作られたもので、すべての照射試験には供給されなかった。
 - ・カプセルは、炉外でのクリープ試験に用いられた。又、照射試験も実施され、その結果を表Vに示す。
 - ・抵抗溶接機の特徴は、異なる材質のものでも接合できることと高圧ガスを中に封入できることである。
 - ・RIPCEX II 試験に用いられた材料はすでに[2]に示した。PFR-M2試験に用いられた材料は、これとほとんど同様の材料であり、多くの本数が溶接された。この試験では、全部で28の材料を用いて、702の加圧カプセルが造られた。被覆管の外径は3種類あり、被覆管は、最小の変形でクランプせねばならないため、コレットも3種類製作した。
- あるコレットは、一度もメンテナンスをせずに、1000回の溶接が行えた。

- OASIS と PORRIDGE の試験では、フェライト系 ODS 鋼の加圧カプセルが製作されたがこれは IDEFIX の時と同じ材料なので、特に記述しない。OASIS の場合は、 $\phi 4.6\text{mm}$ の被覆管を用いているところが、他と異なる。
- その後、我々は、FBR-M2 の場合の様な、オーステナイトカプセルに代わる材料や、PORRIDGE の場合の様な ODS 鋼の材料での加圧カプセルを多く造った。又、炉外での多くのクリープ試験と（図-46 に示す様な）数回の HIPPING 試験のためにも、加圧カプセルを製作した。
- 炉外の最終試験で興味深い問題が出た。BN 社では、耐リチウムセラミックスと様々な鋼の相互作用による溶融問題を研究するため、棒状の加圧カプセルを製作せねばならなかった。

又、数年前の RIPCEX- II 照射試験の時も、棒状の加圧カプセルを製作せねばならなかった。この時は、電子ビーム溶接法を用い（図-16 参照）、1st end plug のみを溶接したカプセルに、もう 1 つの 1st end plug のみを溶接したカプセルを溶接し、これを繰り返して長尺ものとした。この場合、端栓側のコレットの奥行きは深くして、長ものでもクランプできるようにした。

しかし、この方法の欠点は、1 つのカプセル（1 つの端栓と被覆管を溶接したもの）の全長が 60mm 以内のものしか用いることが出来なく、1 つのカプセルにリークがあった場合は、ロッドの半分の部分をすべて造り直さねばならないことである。利点は、使用する端栓の数が減らせることである。

我々は当初、6 つの加圧カプセルにより、全長が 320mm の 6 本のロッドをフェライト鋼とオーステナイト鋼で製作した。それぞれの材料を接合したカプセルには、フローラインに取り付けたマススペクトロメーターによりガスを検出し、どちらのカプセルが破裂したかを確認するため異なったガスを封入した。ロッドの製作が開始して間もなく、フェライト鋼のカプセルが破裂してしまった。これは、加圧をし過ぎたせいもあるが、溶接機に問題があった。しかし、幸いにもこれは、通常、加圧には用いられないキセノンを使用したことに原因があると判断された。使用温度で、必要な応力を得るためには、60bar の加圧が必要なことが計算で求められた。その後の調査の結果、60bar の加圧、室温

の状態でキセノンは、体積が3倍近くになることが分かった。試験温度でガスは液体に近い状態となり、繰り返し応力がかかると予想される。

しかし、抵抗溶接で製作された、カプセルはこのようなことはなかった。

2. 「抵抗溶接に関する技術 コンサルテーション」の質問事項に関する回答

ここでは、「抵抗溶接に関する技術コンサルテーション」における動燃側の質問に対するBNからの回答について記す。

(1) 抵抗溶接法、電子ビーム溶接法、レーザー溶接法、超音波溶接法の特徴について

<電子ビーム溶接法>

- ・メリット

- －接合プロセスが比較的良く知られている。
- －強力な接合状態が得られる。
- －ODS鋼とODS鋼でない材料を接合した時は、空孔等がほとんどない接合部が得られる。

- ・デメリット

- －コストが高い。ヘリウム中で溶接を行う場合問題となる可能性がある。
- －管の肉厚に沿って、空孔のない溶接部を得ようとする、溶接部の底部は、端栓側に深く入り込まねばならない。その時、底部には、大きな空孔ができてしまう。これらは、有害ではないが、NDT材の場合、このようなことがおきる可能性がある。
- －高温、高クリープの状態が伴う異材の溶接は、容易ではない。
- －マルテンサイト中には、酸化物の分散が見られない。

<レーザー溶接法>

- ・メリット

- －1967年以降に開発された新しい技術。
- －EBWと同じ様に、接合理論は解明されている。
又、溶接は、EBWと異なり、ヘリウム中に行なわなくとも良い。
- －溶金部に、含有物の偏析などは起こらない。

- ・デメリット

- ー新しい技術だけに問題が多い。
- ーCO₂ レーザーによる溶接では、溶接の不完全な部分があった。
- ーパルスレーザーでは、空孔が発生した。
- ーマルテンサイトの部分には、分散剤があまり存在しない。

<超音波溶接法>

- ・メリット

- ーヘリウム雰囲気中の溶接では、マルテンサイトを含まない溶接部が得られる。

- ・デメリット

- ー我々は、良い装置を得られなかった。
- ー接合面の仕上げは、精度を要するため、量産向けではない。

<抵抗溶接法>

- ・メリット

- ーCANDU-タイプ燃料の例の様に、核燃料分野では、広く知られている。
- ー運用は、安価で簡単で安全である。

- ・デメリット

- ー商業用として、生産されていない。

(2) 抵抗溶接とプロジェクション溶接の違いは何か。

基本的な違いはない。

抵抗（付き合わせ）溶接は、2本の棒材を比較的長い時間付き合わせて溶接し、プロジェクション溶接は、板材を瞬間的に接合するもの。

(3) 溶接headに加速度を与えるため、磁気加圧装置を使用している様だが、現在も同様の装置を使用しているのか。

現在は、使用していない。磁気加圧装置はlow inertia headには必要ない。

- (4) 端栓と被覆管の芯合わせ精度を向上させるために、ホールドチャックを被覆管側と端栓側のコレットに取り付けたと記載されているがこれはどういうものか。

この間については、意味がわからなかったので、次の様に解釈し直した。BN社の装置でないもので、「管側では、固く、正確に固定をするため、コレット式のものを採用し、端栓側では、コレット式のものを採用してない。これは、何故か。」

これは、装置を操作するには、シンプルで良いが、次の様な2つの問題がある。

a / 端栓の位置決めが正確でない。

b / 流れる電流の大きさが不安定：電氣的な接触を左右するのは、加圧力である。

この場合、加圧力が小さい時には、不規則な電流が流れてしまう。

これらの理由から、端栓側にもコレット式のチャックを採用した。

- (5) 端栓のコレットチャックは銅製、アウターリングはアルミ製と記されているが、被覆管のコレットも同様か。又、構造も同じか。

両方共、同じ材質のものを使っているが、構造は違う。端栓側コレットは、広く広がる必要がないためシンプルな構造となっている。

- (6) 被覆管コレットの形状、寸法は。

管側のコレット寸法は重要なことではない。コレットには、銅をできるだけ多く使い、予想されるピン内の最大加圧力、装置の大きさ、溶接頻度を考慮して決める。直径は全体で約120mmである。

- (7) アルミニウム合金は、どのような種類で、どのような表面处理（腐食対策）を施しているか、又、特殊なコーティングとは、どのようなものか。

アルミニウム合金には、Mg 5 タイプを用いている。我々は、アルミニウム材に

は、コーティングをしていないが、銅には、コーティングを試みた。

しかし、それは、結果が出る前に、やめてしまった。我々は、コーティングを施したコレットをいくつか所有している。

- (8) アルミニウム合金を使用しているが、電気抵抗のロス及びコレットチャックの冷却速度を考慮しているのか。

コレットに加わった熱が、銅のリードを通り、溶接変換器に伝わるため、これが、冷却効果をもたらす可能性がある。

加圧カプセルを用いた試験では、その中を一定の温度にしなければならず、この状態で溶接を行うと、溶接毎に0.1℃コレットの温度が上昇する。

しかし、これは、室温の変化に比べれば微々たるもので、我々の実験室では、夏は、(25から27℃)に、冬は(15から18℃)になる。

これらの温度変化は、電気抵抗に影響を与えない。

- (9) 図-2 ～4 (技術コンサルタントのレポート)では、装置がどの様に機能するのか不明である。溶接電源、装置本体及び装置制御がどの様に係わりあっているのか分かる様なブロックダイアグラムとその説明を提出して欲しい。

付け加えた図-47に示す。

- (10) 図-2 ～4 では機器の名称が分からない。機器名を明らかにして欲しい。

M1装置は、縦型のものである。それは、図-1(a)と図-1(b)に載せる。M2装置は、グローブボックスの中に設え付けたもので、ペレットを詰めた後、第2端栓を溶接するものである。

M3装置は、M2と同時に制作されたもので、ボックスは取り付けしていない。これは、上村氏が1991. 10. 17にMonsを訪れた時に見たものである。この装置

は、第1端栓の溶接及び加圧カプセルの製作に用いる。

- (11) ローリングメンブレン (rolling membrane) とは、どのようなものか、又、グローブボックス内で空気圧 (高圧) を使用すると、危険な理由を教えてください。

薄いラバー製のローリングメンブレンは、効率的に力を得る時に、圧縮空気を介するものである。

しかし、メンブレンには、最高6気圧までしかかけられない。実際用いる圧力は、それ以上になることがある。

圧縮空気、又はガスをグローブボックスの中で用いるのは危険である。なぜなら、小さな容量のボックスの中では、少量でもガスが残ってしまうと問題である。このような経緯で油圧によるものを最終的に用いた。

- (12) 照射試験中に燃料ピンから破損した燃料棒はなかったか。

なかった。

- (13) 溶接電源変換器は、75KVAの容量の物を使用している様だが、このような溶接電源を必要な理由は。又、この電源を使用するには一次側の電流及び電圧はどの程度必要か。

BN社で用いた最初の電源は、40KVAです。これは、管の径が8～10mm以上のものを溶接するのは困難である。新しい電源は、最高15mmの径のピンも溶接できるものである。ピン径に合わせて、パワーも増大させていく。

1次側の電流は、220Vの電源に接続しており、350Amp～500Ampまで可能である。各機器の影響を防ぐため、高電圧の変換器に直接ラインをつないでいる。

- (14) 被覆管のホールディングチェックはどのような点で複雑な構造となっているのか。

複雑な機構となっているというのは、以下の様なことからである。

高電流を流す。正確な心合わせを行う。バリの形状を整える。排気や、高圧中でのリークをなくす。管のすべりをなくす。バリを通す様に大きく広がる。

- (15) 短尺被覆管内部の真空度は、10秒で 10^{-1} mbarまで到達できると理解して良いか。

又、この値は、どこで位置で真空度を測定したものか。

真空度を測っているのは、容器とポンプの中間の部分においてで、それは、管内の真の真空度を測定しているとは言えない。

カプセルにおけるガスの純度の試験は、 10^{-1} mbarまで落としたヘリウムガスを3度封入して行い、これは供給容器自体のマス・スペクトロメーターの値と大きな異いはない。

管の末端で、 10^{-1} mbarになったという確信はない。

- (16) 真空排気のために使用しているロータリーポンプの排気能力はどの程度か。

システム内に残在した高圧ガスは、我々の所有している機械的なポンプで何のトラブルもなしに排気している。ゆっくりとバルブを開け、容器内を排気する。加圧容積は、 75cm^3 以下で、200mbar程度の気圧であり、数秒間の排気で、内部のガスは、再び 15ℓ 程度になる。

- (17) 2次溶接電流の測定方法は。

2次電流は、2次側への回線の周りに配したロゴスキューリングで計測している。それは、その時、流れた電流を積算し、つり合いがとれているかどうか、シグナルを送るものである。我々は、商業用のものを使っている。

- (18) パルス溶接電流のコントロール条件と接合状態の関連を説明して欲しい。

この部分の質問は $\int idt$ の溶接状態への影響と、変換器のサチュレーションの問題に関してと解釈する。

溶接中に流れた電流 ($\int idt$) は、入力された熱を表している。しかし、接合に用いられる熱を測定するのは困難である。これは、銅のコレットに熱が加わるのは、ほんの一瞬の間で、ダイナミックなプロセスであるためである。非常に高い電流だけが、ボンドエリアに熱をもたらし、低い電流は、コレット中に散るだけである。

- (19) 図-4 は、実機装置の構造を忠実に示しているか。

図-4 には、真空下と加圧下での溶接状態をそのまま図示してある。

真空下での溶接は、端栓の真上までスライドする左側のプレキシガラスの容器のみを用いて行う。

加圧溶接は、管のコレット側に、強く固定された右側の加圧容器を用いて行なう。

真空下での溶接の場合、容器は、管のコレットの所までスライドしてきて、溶接時に端栓側のコレットは、約0.5mm中に動く。

加圧溶接を行う時は、端栓が加圧容器に入り込んだ形で行なわれる。

- (20) バリ取りダイスの取り付け状態はどの様になっているのか。

図-48に示す。

- (21) ダイスの形状及び材質は。

材質は、通常ダイスに用いられているものです。その形状は、エッジが鋭く、管と適当なすき間を持った単純な構造のものである。

- (22) 被覆管コレットの役割として「バリを整える」とあるが、コレットがバリとどの様に影響しあうのか。

管コレットの先端部の内側は、加工を施し、角が取っており、バリはその部分で捕えられる。その角取りをしてある部分の角度は、最終的なバリの大きさを決める。また、その深さは、管のコレットからの付き出し長さを決める。付き出し長さの調整は、コレットの面に平板を当てて行なう。

コレットの形と、バリカットについての関連はない。

- (23) コレットとアウターリングの間に潤滑剤（真空グリス）を塗っているそうだが、電気抵抗の増加につながらないか。

グリースがコレットの抵抗に及ぶ影響はない。

- (24) 溶接電源は、交流式を採用している様だが、なぜ、直流式、又はコンデンサー式を採用しなかったのか。

直流の交換器（電源）は、十分パワーが得られないため、採用しなかった。

実際、今でも10K Aを超える電源は見つかっていない。多くの溶接の場合、15～20K Aの電源が必要である。しかし、最終的な結果としてはあまり大きな違いは生じなかった。なぜなら、私達は実際2パルスの直流電源を用いた。

- (25) 薄肉管溶接の様に、短時間に高密度の電流を接合部に供給する場合は、コンデンサー式の方が良いと思うが、コンデンサー式を採用しなかった理由はなぜか。

コンデンサー方式は、良い方法かもしれない。しかし、当初それは、大変高価なものであった。そして、それを調査する時間もなかった。

コンデンサー方式が良好な溶接をもたらすかどうかは、定かでない。それは、常

に連続した2つのパルス電流で良い結果が得られた。また、BNの用いた直流のパルスは、コンデンサーのパルスとさほど違いはない。コンデンサータイプの特徴は、変動のない大きなパワーが得られるということだけである。

(26) $\int idt$ により、なにが分かるか。

この点については、「技術コンサルタントレポート」のP13 2段目（英文）において答えてある。

もう一度簡単に述べれば、電流のバランスが保たれている場合は $\int idt$ で溶接状態を判断することはできる。

(27) 溶接電流をサイリスタで電流カットなしに1サイクル流した場合に、後半の半サイクルでどの程度の電流増加が認められるか。

過大なエネルギーがコレットを破損する恐れがあるため、サイリスタの制御なしに、溶接を行ったことはない。後半の半サイクルにおける電流の自動的な増加は、溶接時に管の長さが短くなり電気抵抗が減少することによるものである。もし、管のザクツが前半の半サイクルにおいて起これば、自動的な電流の増加も前半に確認されるであろう。

(28) 加圧カプセルを溶接する場合と、加圧をしないカプセルを溶接をする場合とでは被覆管の締めつけ力は各々どの程度か。

それは、加圧カプセルの内圧によって決まる。我々は100barの油圧のポンプを用いており、50barの状態からカプセルの内圧に合わせ、除々に加圧して行く。

(29) 炭化物の凝集、微小クラックを問題としない理由は。

・問題としないと決定づけた理由として、どの様な機械的試験にて評価したのか。

- ・炭化物の凝集は、粒界割れの原因となり、又、微小クラックは、応力集中による機械的強度の低下につながると思われるが。

溶接部の外側のバリの部分に出るクラックは、良いとしている。バリは、溶接後の加工により取り除くことができる。

炭化物の凝集は、ある環境下では問題となるかもしれないが、高速炉の中では、一般的に問題とならない。

機械的試験は、常温での疲労試験、単軸クリープ、2軸クリープを行った。

やや多くの炭化物が形成されたとしても、抵抗溶接による接合がTIG溶接より弱いとか、もろいといったことは我々の経験上ない。

腐食させながら、応力をかけて試験を行うと、おもしろい結果が得られるかもしれない。

オーステナイト鋼の溶接で、TIG溶接ではクラックが生じてしまったが、抵抗溶接では、生じなかったことを思い出して欲しい。

(30) χ 相とは。

χ 相は、12個のCr、3個のMo、7個のTi、36個のFeの58個の原子から成る、 α -マンガンタイプの相である。CEN/SCKのフェライト鋼において、 χ 相は、 α 粒のまわりに結合して並んでおり、その部分は大変強固である。それらは、約900°Cの熱処理で凝結（形成）する。

(31) 疲労試験機の概略図、試験方法を示して欲しい。

図-49に載せた。曲げ応力は、ボールベアリングで回転するリングに重力によって伝えられ、リングの中心には、試験片固定用のコレットチャックがある。上部のコレットは、モーターシャフトに接続されている。

この装置の特徴は、試料の長さ方向のどの部分を取って見ても、曲げ応力が一定

なことである。利点として、異なるパラメーターで溶接した2つの溶接部の試験を同時にできる。

(32) 疲労試験における試料の破断位置は。

図-21 Photo 12522, 又は, 図-24(a)にある様に, 溶接部付近のやや管側である。

(33) 疲労試験の応力 ($400\text{N}/\text{mm}^2$) はどの様にして決定したか。又, 試験時の温度及び雰囲気は。さらに, 高温の試験は行っているか。

$400\text{N}/\text{mm}^2$ の試験応力は, 比較的短い時間で破断することができ, 効率が良いことから選定された。モーターの回転は最高1300RPMまで可能で, 1回の試験時間は10分~15分である。

試験は, 常温, 大気中で行った。高温での試験を行わなかったのは, その試験がもたらす結果に比べ, 費用が多くかかってしまうためである。

(34) 母材と溶接強度が比較できるクリープ曲線 (温度, 時間-応力) を提出して欲しい。

試験して得られたクリープ曲線は, 溶接強度曲線のことである。

図-50に, DT2203Y05材について行った, 単軸クリープの結果を示す。

(35) 単軸及び二軸クリープ試験に用いた試験片形状はどの様になっているのか。

図-50に単軸クリープ試験片の寸法を示します。2軸クリープ試験片も同じ形状であるが, 端栓の部分が短くネジ山が切っていない。

(36) 溶接部の欠陥検査は、X線検査及び超音波探傷検査を用いて、どの様に検査及び合否の判定を行っているのか。

B N社では、X線および超音波探傷による検査は行っていない。

(37) 図－ 9 に示されている記号の意味は。

a^+ = 加速

a^- = 減速

F = 加圧力

P = 内部圧

E = 2次電圧

d = 変位

I = 2次電流

V = 速度

$\int idt$ = current $\times$ time (溶接中に流れた電流)

(38) 変圧機の飽和 (Transformer saturation) を防ぐために、始めの半サイクルの電流を減らすとなっているが、何故か。

短時間のパルスは、始めの半サイクルが小さいことが必要とされるということが装置の操作上知られており、装置には、始めの半サイクルにセットした値の15～25%をカットする機能が備わっている。

新しい装置で溶接を開始した時、それに気づかなかったため問題が生じた。

先に述べた、自動的な電流の増加は単に大きすぎた。

(39) Macine Setting(Heat)450/480の意味は。

450/480の意味は、前半の半サイクルでは、トータルヒートの45%を、後半の半サイクルでは、48%をかけるということです。

トータルヒートとは、サインカーブの最高値を意味する。

もちろん、この値は、正確なものではないが、10ターンのポテンシオメーターにより正確に再生は可能である。

(40) Forceとは、端栓と被覆管（溶接ヘッド）にかかる加圧力のことか。

そうです。

(41) チューブのスティックアウトとは。

チューブのスティックアウト (Tube stick-out) は、コレットからの被覆管の突き出し長さのことを言う。スティックアウトは、最初の電気抵抗値を決め、溶接後にその部分は、ザクツしてしまう。

(42) メインボルテージ(Mein Voltage)とは、変圧器にかかる電圧か。

そうです。メインボルテージは、他の用語でラインボルテージと言う。

(43) 端栓のテーパ角度を45°，幅0.50mmに決定した経緯及び根拠は。又これ以外の形状で溶接するとどのような現象が生じるか。

45° という角度は、被覆管と端栓のセンタリング，熱の均熱，加工の容易さ等の点から決定した。

0.5mmの幅は、被覆管の肉厚から決定した。他の形状の場合も、大変似た結果と

なった。

このことについては、技術コンサルタントレポートの<<Inclined Bond Line>>P 27（英文）で短く記載してある。

異なる角度でいくつかの試験を行ったが、あまり重要な結果はなかったので、報告はしなかった。

(44) 加工面（テーパ部）の表面仕上げの状態は、溶接性に影響を与えるか。

加工面の仕上げは、大変重要である。低エネルギーでの溶接では、加工の跡が見られる。十分なエネルギーで溶接した場合は、加工面の仕上げはあまり問題とならないが、それは多くのバリが出ることを意味する。

それゆえ、十分な仕上げが必要となる。

(45) 被覆管外径寸法精度は、 $\phi 7.50 \pm 0.03\text{mm}$ である。これに対して端栓外径の加工精度は、 $\phi 7.50 \pm 0.01\text{mm}$ である。これほど、端栓の加工精度を上げなければ良好な溶接は、得られないのか。

そうです。端栓の直径を均一にすることは、変位曲線の原点が同じ位置にくるため、都合が良い。

(46) 被覆管の内部に溶接バリが生じているが、溶接バリを発生させないようにするには、どの様にすればよいか。又、これらの影響について試験をしたか。

溶接バリを発生させなくする様な試みはしてない。なぜなら、その部分は材料を接合する上で重要な部分であるからです。長い間、我々は中心が直径 3 mm、高さが 1.5mm 付き出た端栓を用いており、その部分で、バリは捕えられる。

又、それにより、端栓の取り扱いが楽になる。

しかし、後になって、その様な端栓を用いることをやめた。

なぜなら、そうすることにより、あまり大きなメリットがなく、端栓を加工するための材料が多く必要になるためである。

- (47) 被覆管の内部に生じる溶接バリは、炉内照射において、異常局部加熱等の原因にならないのか。又、このバリは、燃料要素を組み立てるうえで邪魔にならないか。

あまり大きな影響は無い（端栓重量に比べ、無視できる位の大きさの場合）。B Nで製作したすべての加圧カプセルは、バリの多い状態で製作したが問題は起こらなかった。

- (48) 接合部界面の硬さ測定（PNC支給材）を実施したか。

このレポートを書いている時点では、行っていません。

しかし、私は、個人的に大変興味があります。

3. 試験片の製作

3.1 溶接施工試験

3.1.1 溶接にあたっての準備（BN社側で行った）

(1) 端栓

① 端栓の加工

端栓、被覆管の形状を図-52に示す。端栓のどちら側でも溶接できるように、対照的なものとした。今回のような試験の場合には、このような短い端栓を用いるのが普通である。

② 端栓の洗浄

端栓は、汚れを布で拭き取った後、アセトンの中に浸し、攪拌して洗浄を行う。溶接が終わるまでは、手で触れてはならない。

(2) 被覆管

① 被覆管の加工

被覆管は、25mmと172mmのものを用いた。25mmのものは予備試験のためのもので、172mmのものが、本試験用のものである。

それらは、正確に測定し切断したものではない。切断面は、旋盤にかけ軽くバリ取りを行った。

② 被覆管の洗浄

被覆管の中は、切断する前、アセトンに浸したティッシュを中につめ、それを吹き飛ばすことにより洗浄する。切断後、短尺のものは、全体をアセトンに浸し超音波で洗浄し、長尺のものは、両端の約30mmの部分をアセトンに浸し、超音波洗浄をかけた。溶接を行う時、管を運ぶ場合には、中央部を掴んだ。

3.1.2 予備試験

BN社では、PNCから部材が送られてくる前に、数回の予備試験を、CEN/SCKの寸法、材料を用いて行った。そして、PNCから部材が届いた後に、その内のいくつかを用いて、良い接合曲線が描け、疲労試験、金相試験を満足する様なおおよその溶接条件を検討した。マシーンセッティング（1サイクルの前半と後半のヒートバランス）を決定するため異なるパラメータで13回の試験を行った。この試験はODS鋼（DSB材）のみを用いて行った。それは、他の材料〔高強度F/M 鋼（FSO材）〕の場合も、溶接条件は、ODS鋼と類似しているためである。

選定した溶接条件と金相試験結果を表－7に示す。大部分の溶接は、良い接合面で、欠陥の無い状態となっているが、溶接エネルギーの最も低かったM21は、接合部において、未拡散と思われるところが若干見られた。しかし、これは、最低エネルギーのレベルを判断する基準となる。

これらのパラメータは、最終的な試料の溶接の場合も適用された。

3.1.3 試料の製作（溶接施工試験）

溶接施工試験は、上村氏がBNに滞在していた時（1991年10月17日）に行った溶接試験も含まれる。その日にいくつかの溶接が行われ、メインの溶接試験は、その後に行われた。

10月17日には、ODS鋼で6つの溶接試料を製作し、そのうちの2本は172mmの長さのヘリウムが封入された試験片である。短い試験片のうちの1本は、疲労試験を行った。その日に溶接を行ったすべての試験片は、上村氏に渡した。

10月18日に30本の試料（そのうちの24本は172mm、6本は25mmのもの）を製作した。この製作した試料は、必要以上の本数であるが、それは、Mons大学のヘリウムリーク試験装置は、設置したばかりなので、予備試験用の試料も含まれている。又、30本のうちの5本は、金相試験用の試料である。それに加えて、溶接状態を確認する意味で、その試験の1番始めと終わりに、短い試料での溶接を行った。又、高強度F/M 鋼の場合も同様である。

表－8には、試験を行った順番通りに、試料と溶接状態を示す。

その表には、2つのマシンセッティングで溶接を行ったことを示す。一般には、定常と低レベル、高レベルの3種において評価をする。定常のセッティングは、一連の試料の製作に用い、高/低のセッティングは、ラインボルテージの変化の時の、最高、最低のレベルに値するものである（スポット溶接装置は、しばしば、自動的に入力電圧に対応し、相変化を行うが、我々の溶接機の場合は、このようなことは起こらない）。

この試験において、 $170 < f_{idt} < 200$ といった非常に幅の広い電流で、満足する溶接が得られることが分かった。

作業員が、各々の溶接時に、同じ様な溶接曲線を得るために、後半の半サイクルのセッティングを若干変えることは問題とならない。

後半の半サイクルの動作曲線は、インプット電流の微妙な変化に対し、敏感に反応するが、溶接状態には、影響をおよぼさない。これは後半の半サイクルのセッティングはある程度の許容幅があることを意味し、又、異なった入力電圧でも、同様な溶接曲線を示した。予備試験の曲線に近いのは、前日に行ったものの方で、後の日に行ったもののセッティングは、2パーセント程度増加している。

（結果）

溶接した試料の金相試験は、1991年10月18日に行い、その写真を図-53から62に示す。図-63には、2つの試験片の外観写真、又、図-64にはヘリウムリーク試験を行った後の写真を示す。セッティングの異なる場合の金相写真を図-55, 56（ODS鋼）と図-59, 60（高強度F/M鋼）に示す。

・外観写真

溶接バリは、管の外径よりも大きくなり、それは、円周方向に不均一である。バリの形は、管コレットの内側の面取りをした部分の形によって決まり、その深さを増せば、バリの外径は小さくなる。その形状は、溶接状態にあまり影響を与えないが、バリの整形を行わないと、端栓が管に対してやや変芯してしまう（図-58）。

・金相写真

図-53と54には、一番初めの金相試験を行ったM32のものを載せる。M32bは、疲労試験の後の物であり、その破断回数は、 $400\text{N}/\text{mm}^2$ で18336回であった。これをCEN/SCK材と比較して見ると面白い結果が得られる。それについては、「1. 抵抗溶接に関する技術コンサルタント」の中に載せてある。

CEN/SCK材は、管の軸方向に対し、溶接部の根元から垂直に直線的に破断する。しかし、今回の場合は、溶接部の根元の部分から破断が開始し、接合面に沿って進行し、途中から、被覆管部を貫通し破断に至っている。PNCの部材は、延性が高く、図-53に示す写真では、管部の減肉が見られる。

どの場合も、完全な接合が得られている。ODS鋼の最も熱のかかる部分は、完全な再結晶が見られるが、非常に微量な、酸化物の凝集が観察される場合がある。酸化物の凝集が、溶接のどの過程で起こるのか、又、どうしたら起こらなくできるのか、細部に渡って検討する必要がある。

高強度F/M 鋼の場合は、ODS鋼に比べ、少量のエネルギーで良好な接合が得られ、熱影響部に関しては、ODS鋼と同様の挙動を示す。疲労試験においては、M45（高強度F/M 鋼）の場合、45000回以上の強度を持ち、これは、溶接欠陥の無いことを示す。この場合、管部から破断した。

・バリの除去

バリの除去は、各試料の(a)の溶接の場合にカッティングダイスを用いて行った。ダイスは、7.6mmの径のものを用い、溶接部の直径は、それを通すと7.7mmになる。

・ヘリウムの封入と試験

今回、製作した溶接試料は、0.8barのヘリウムガスが封入された状態にある。今回1.0barのヘリウムを封入したのは、ヘリウムリークテストを容易に、且つ、精度良く行うためである。

通常は、真空容器の密着度を高めるため、大気圧より、やや落ちる圧のガスが、封入される。今回、試験片内の圧力が、0.8barになったのは、このためである。

ヘリウムテストの証明書を英訳したものを図-65に載せる。このテストでは、バックグラウンドノイズとの大きな差は見られなかった。

3.1.4 終わりに

今回の溶接試験では、18本の試料が溶接された。今回選定した溶接条件で、すべての場合において良い溶接状態が得られた。バリの除去に関しては、被覆管に合ったダイスを用いてより良いものとしなければならない。

3.2 溶接試験片の製作

3.2.1 溶接に当たっての準備

端栓、被覆管の加工、洗浄は溶接施工試験の場合と同様である。

3.2.2 予備試験

装置をしばらく使っていなかったので予備試験を行った。

さまざまな溶接条件による溶接試験を行うため、 $\int i dt$ を減らしたが、それに伴い溶接電流（マシーンセッティング）が序々に減っていった。

溶接条件は、表-9に示す。前回の「溶接施工試験」の場合と違うのは、次の通りである。

1／溶接電流（マシーンセッティング）

2／ODSでない材料の溶接圧力を、1700Nから1600Nに下げた。

3／前回の「溶接施工試験」においては、コレットの芯合わせがあまかったが、今回はしっかりしている。

3.2.3 試験片の製作

予備試験の後、64本の溶接片が製作された（そのうち60本は172 mm、4本は30mmのもの）。

ODS鋼（DSB）、高強度F／M鋼（62FSO）各He雰囲気中と大気中で16本

ずつ（1本は金相用，残り15本はHeリーク試験用）。

表-10, 11において，(a)は大気中で溶接したもので，溶接後バリ取りを行った。また，(b)は次の方法でHe中で溶接を行った：0.015mbarまで真空排気し，0.5 barのHeを導入する。これを3回ほど繰り返す，Heが0.75barになったら溶接を開始する。

3.2.4 解説

金相写真を，図-66～69に載せる。

図-70には，ランダムに選んだ溶接片の外観写真を各鋼種，2つずつ示す。

図-71には，Heリーク試験を行った30の試験片を示す。

図-72, 73には，予備試験の試料（54番）の金相写真を示す。

Heリーク試験の結果を図-74に示す。

・金相写真

今回の試験では，全ての試験において完全な接合が得られた。ODS鋼の最も熱のかかる部分では，完全な再結晶が起こっている。しかし，若干のO₂の凝集しか見られなかった。接合ラインがはっきりするのは端栓と被覆管の材料が異なるからである。

高強度F/M 鋼の接合状態も良好である。ODSの様な接合ラインは，はっきりとは見られなかった。

「3.1 溶接施工試験」のところで述べてある様に，この様な接合は良好である。また，疲労試験では，いくつかの試料は溶接部から破断しないで管部から破断した。

又，熱影響部では，管部より硬さがやや硬くなった。

M51は疲労試験において，51584回で破断した。

・バリの除去

バリの除去は，(a)の溶接においてのみ，カッティングダイスを用いて行った。ダイスは，我々の所有しているもの（7.6mmの被覆管用に作られたもの）を用い，バリを取った最終的な径は7.7mmとなる。バリを取った状態の写真は，図-53, 54と59に示す。

- H e リーク試験

H e リーク試験の結果を図-74に示す。

試験片は、管状の容器に10本一度に入れる。標準的なリークは、空の容器で行った試験結果と同じになる。

次に、行った5つの試験について示す。

Test run 1 : 空の容器で行った、標準リーク状態。

Test run 2 : 高強度F / M鋼, 10本を容器に入れたときのリーク状態。

Test run 3 : 高強度F / M鋼, 5本, ODS 材, 5本を容器に入れたときのリーク状態。

Test run 4 : ODS 材, 10本を容器に入れたときのリーク状態。

Test run 5 : Test run 2 の再試験。

容器とmass supectrometerの間に、小さなバルブがあるので、平衡状態に達するまで非常に長い時間がかかる。平衡状態以上の時間が経過すると、decreaseing pressure line とdecrease Helium signal line が交差し、その箇所でリーク率が測定できる。

すべての試験において、標準リーク状態より低い値になっている様に見える。これは、バックグラウンド（標準リーク状態）とほぼ同等のリーク率であると判断できる。

3.2.5 終わりに

色々な、溶接条件で64の溶接片を製作したが、すべての場合において良好な接合が得られた。

特別な、問題も起こらず、試験はスムーズに終了した。

4. ま と め

4.1 抵抗溶接装置に関して

- ・ B N社が最初に用いた装置の電源は40 K V Aで、被覆管の直径が8～10mm以上のものを溶接するには困難であった。そこで、新たに70 K V Aの電源を用いた結果、最高15mmの径の被覆管の溶接が可能となった。

B N社は、交流式の電源を用いているが、必要な出力（2次電流で15～20 K A）が得られれば、コンデンサーやインバータタイプの電源が良いと思われる。これらは、入力電流に変動がないため、溶接パラメータの管理が容易で、又、短時間に電流を流すことが可能なため母材組織に極力影響を与えることなく、良好な接合が得られる。

- ・ B N社の被覆管コレットの寿命は1000回程度である。使用に際しては100回溶接するたびにグリースが塗られ、250回溶接するごとに機械加工で整形される。又、被覆管が硬い材質でできていて、コレットで被覆管を1／100mm程度（弾性力ギリギリのところまで）締め付けられればスリップは起こらず、外径にくるいのない被覆管と、それよりやや小さめのコレットを造る技術があれば、被覆管のスリップは起こらないということである。

我々が抵抗溶接装置を運用して行く際には、この様な使用に耐えられるコレットの材質及び被覆管のスリップを起こさない様なコレットの形状を検討することが重要な課題である。

4.2 抵抗溶接に関して

4.2.1 接合部の機械的強度

- ・ 抵抗溶接の場合、接合面の組織が外側に向き、曲げ方向の応力に対して脆くなることが懸念されるため、曲げ応力を繰り返しかけてその強度を見る回転曲げ疲労試験が接合部の強度評価に有効であると思われる。B N社では、 400 N/mm^2 の応力で試験を行っており、比較的短い時間で試験片を破断させることができるため、これは、効率の良い試験方法である。

また、接合部の組織が外を向くということに関しては、圧縮疲労強度の評価も重要であると思われる。

- 抵抗溶接の方が、TIG溶接より高い応力下で溶接を行うので、腐食し易いと思われる。今後我々は、Na中の腐食試験、さらに、Na中におけるクリープ試験を実施し評価する予定である。

4.2.2 接合部の健全性の保証方法

- 溶接品質を評価するのに最も良いパラメータは、熱をもたらす電流を観察することである。接合に用いられた熱を測定するのは、接合時間が非常に短いため、困難である。よって、それをかわりに示すものとして、BN社では溶接時間中に流れる電流の積算値 $\int idt$ を観察しており、十分な接合の得られる $\int idt$ の下限値と上限値を見出し（各溶接パラメータにおいても、下限値、上限値を決定することは重要である）、又、一連の溶接を行っている期間は $\int idt$ は一定に保つ様になっているとのことである。

我々は、このような溶接パラメータによる品質管理の他に、超音波探傷による方法も検討している。ただし、接合部の内側に生じるバリによる悪影響や、接合部の拡散状態の評価に関する問題の解決を行う必要がある。

- 溶接パラメータとしては電流の積算値（ $\int idt$ ）、電流、電圧、溶接加圧力、変位、被覆管のスティックアウト（突き出し長さ）等がある。

高いパワー（電流、電圧）での溶接は良い接合が得られるが、被覆管のコレットを傷めることとなり、溶接部の内部、外部に大きなバリを出す。又、高すぎる電流での溶接は、接合部の溶融を引き起こし好ましくない。

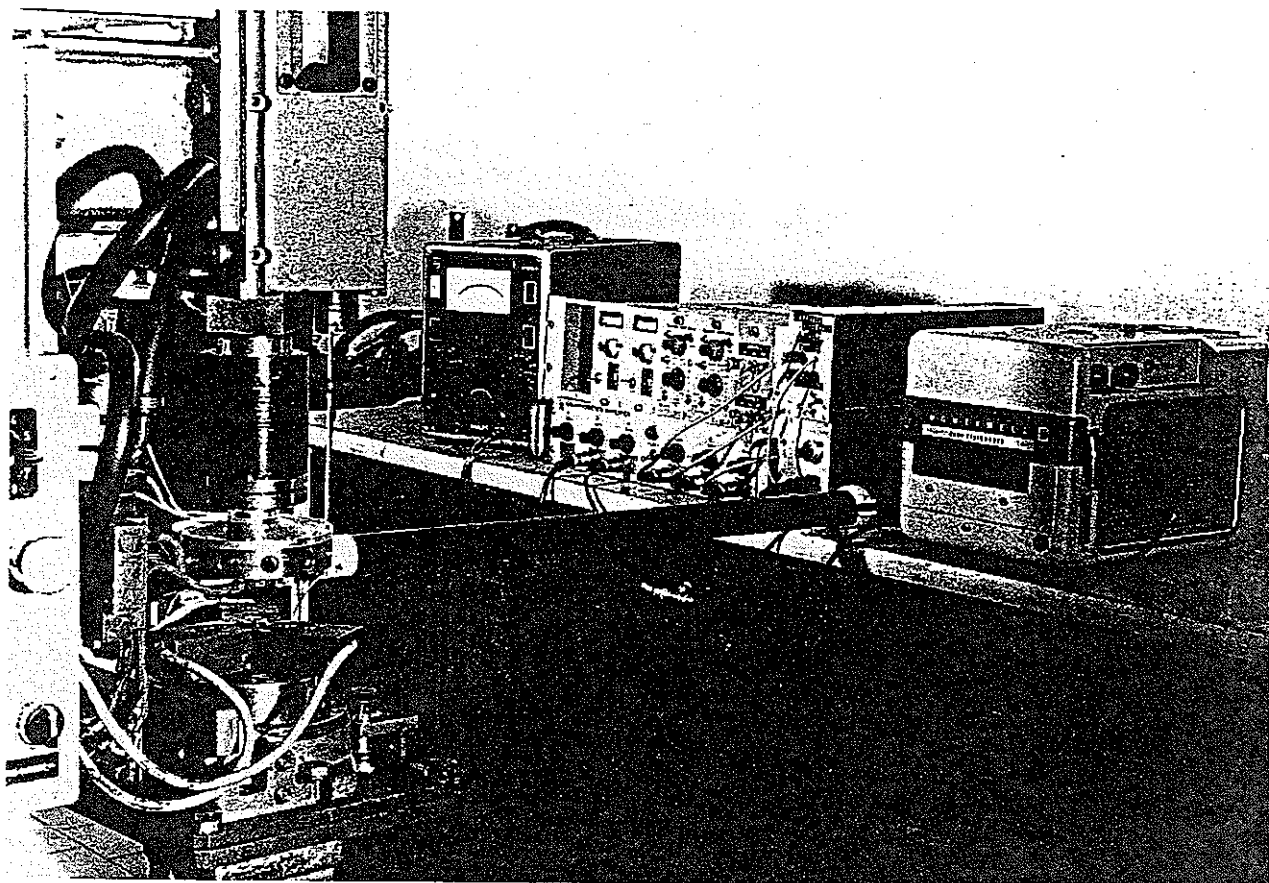
装置運用の際は、これら、多くのパラメータがあるため、適切なパラメータの選定に時間を要すると思われる。

5. 結 論

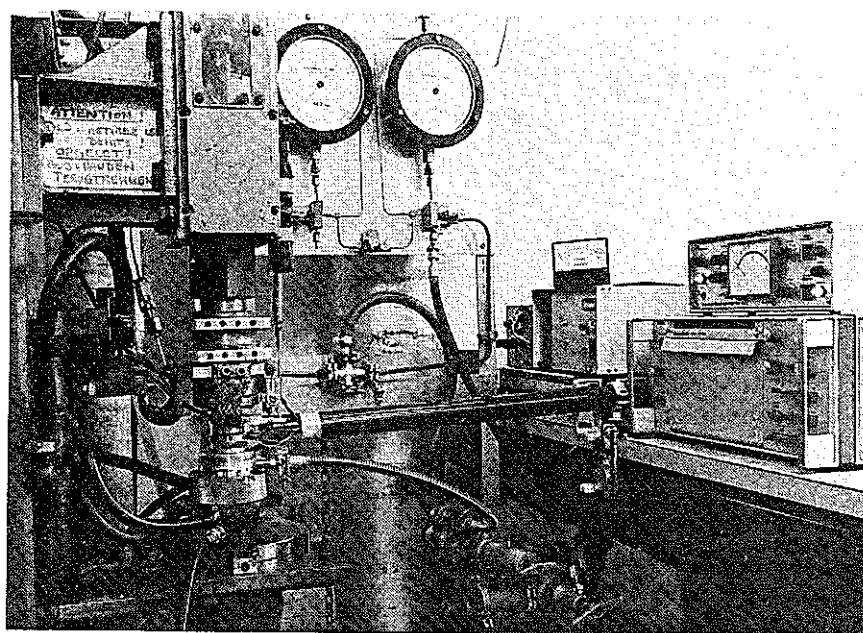
今回の技術情報を検討した結果、抵抗溶接法は溶接欠陥が生じにくい、運用が容易、ヨーロッパの核燃料分野ではすでに実用化されており、SNR300、PHENIX等の照射試験で燃料ピン溶接部からの破損が無い等のことが分かり、又、PNCより支給した部材で溶接を行った結果、金相試験、回転疲労試験において良好な接合が得られたことから、酸化物分散強化型鋼等の新材料を溶接するのに有望な手段であると考ええる。

今後、プルトニウム燃料開発室では、ベルゴニュークリアー社より返却された溶接試験片の強度評価を実施して行くと共に、H4年度中に製作が完了する抵抗溶接装置を用いた溶接技術開発を行う予定である。

又、ベルゴニュークリアー社では、抵抗溶接法の接合部の品質管理を溶接条件の管理のみで行っているが、我々は、それに加えて超音波探傷による検査方法の開発も行う予定である。



(a) 1972



(b) 1978 as Used for the RIPCEX II Experiment

図-1 初期の抵抗溶接装置

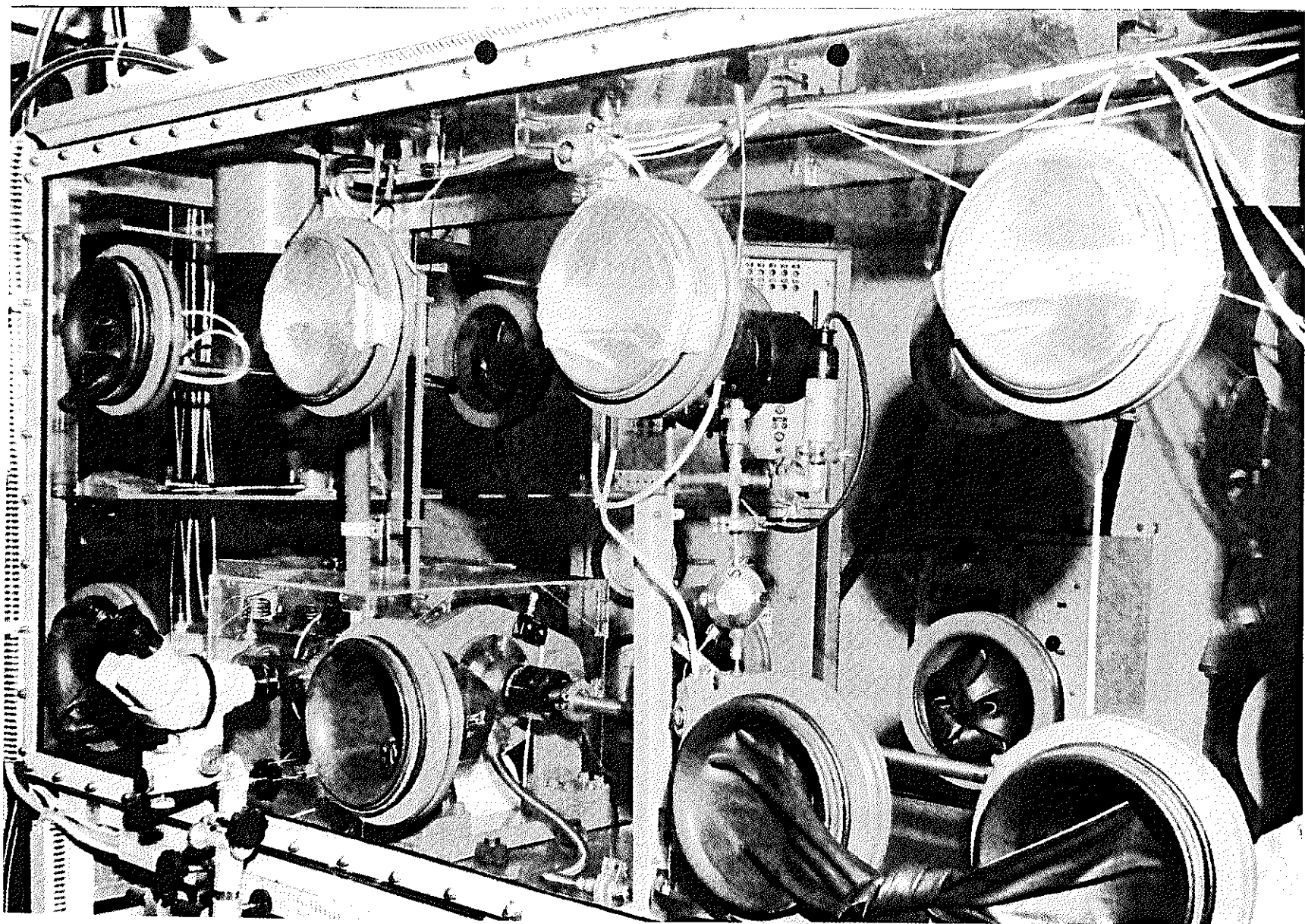


图-2 M2 溶接装置

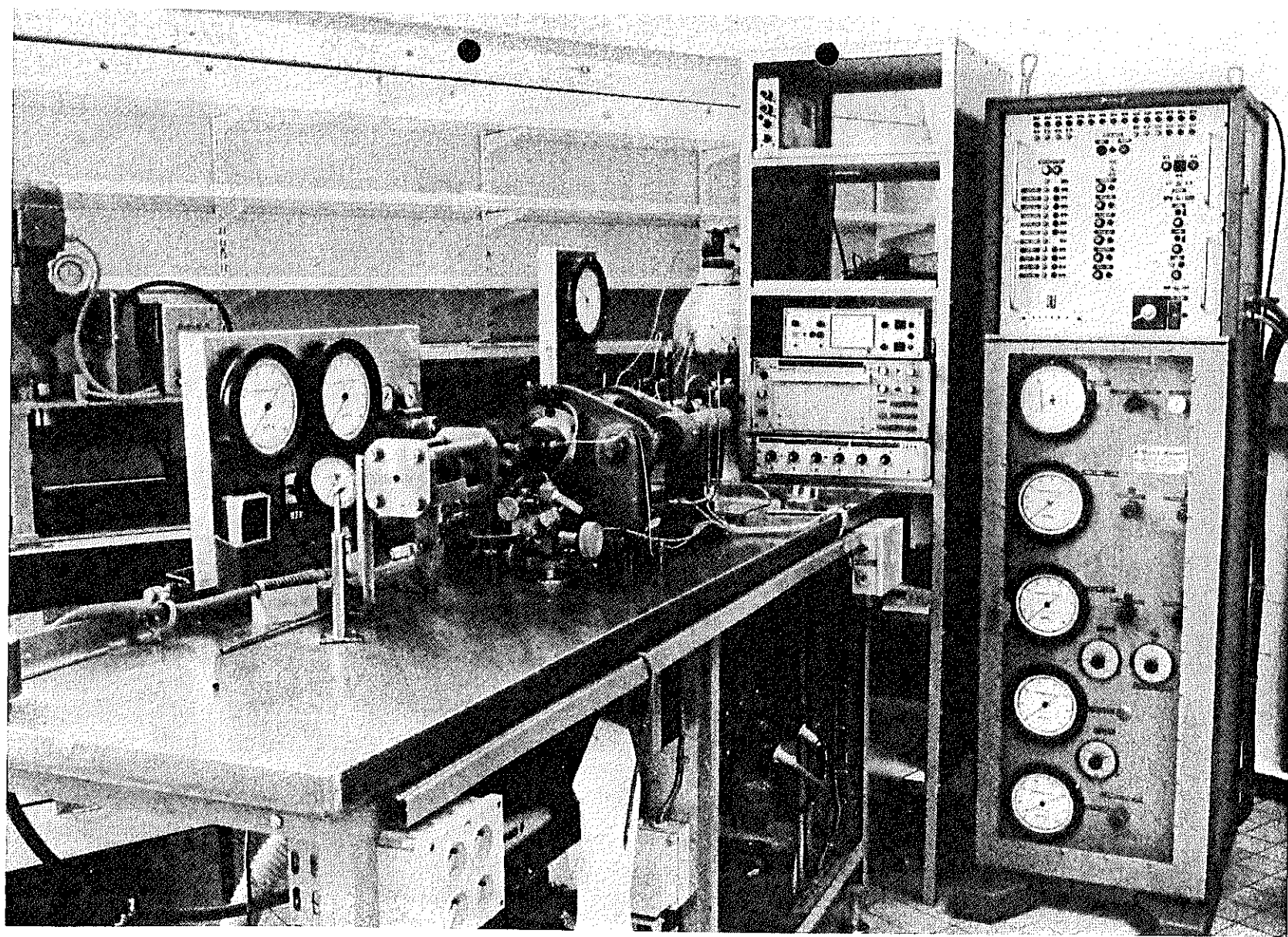


图-3 M3 溶接装置

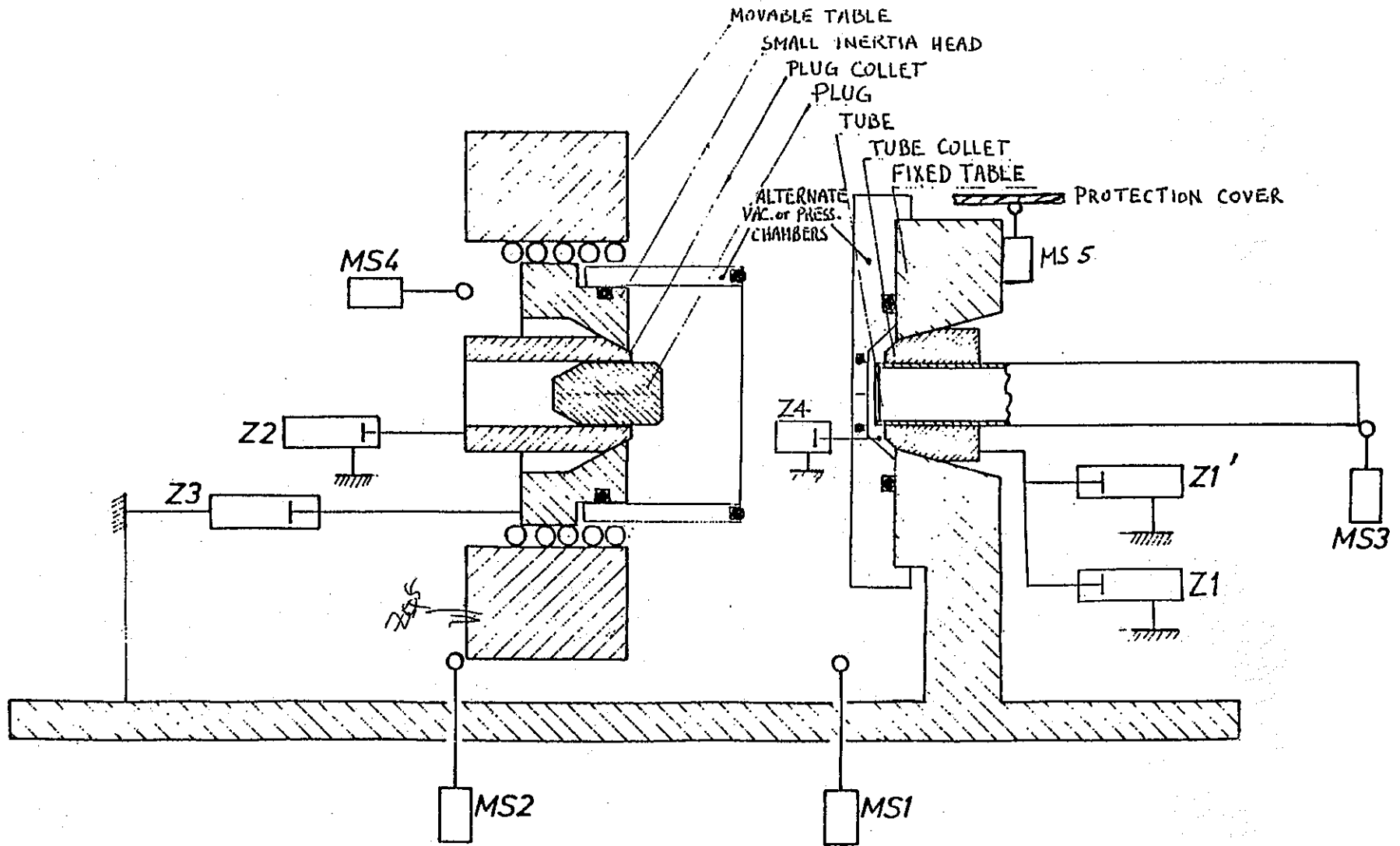
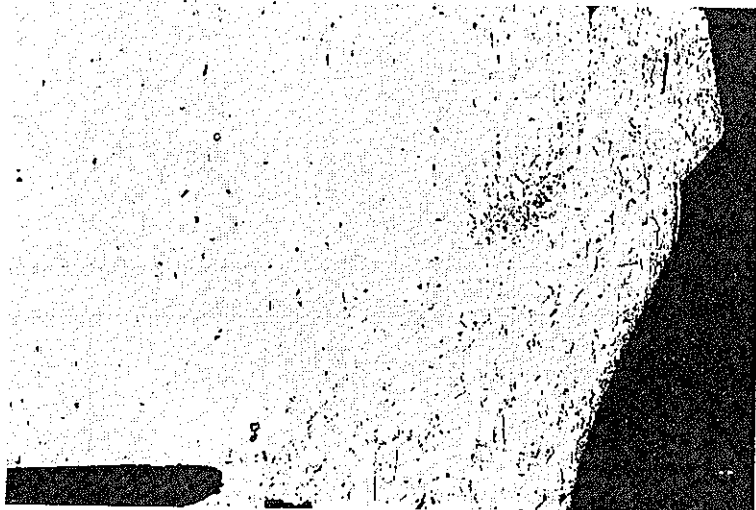


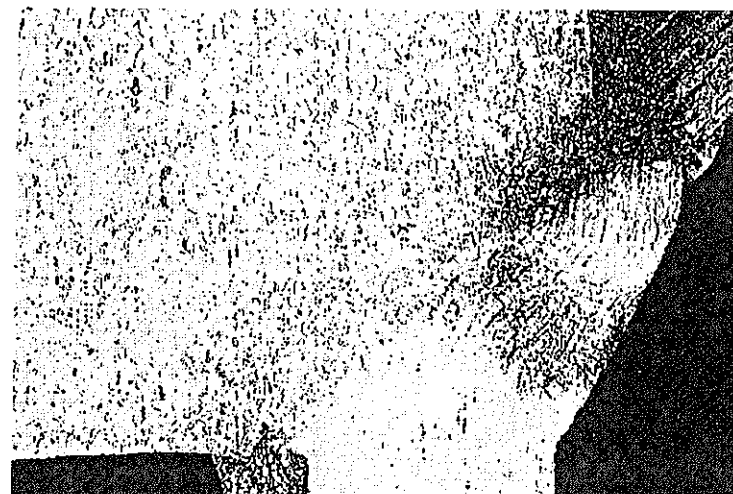
図-4 装置の機構

(a) IN 800 W. Nr 4876 Weld I 416b



Met 53600

(b) W. Nr 1.4970 Weld I 423b



Met 53606

(c) PE 16 Weld I 1194a



Met 55443

(d) AISI 316 Weld I 413b



Met 53614

图-5 金相写真 (Austenitic Steels PFR-M2 Quarification Weld)

(a) R8/EM12 Weld H20



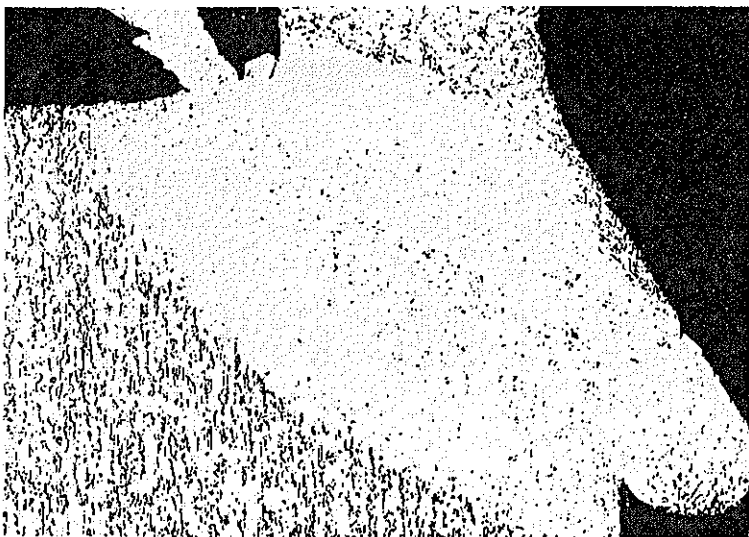
Met 36118

(b) W. Nr 4923 Weld I H63



Met 36619

(c) W. Nr 1.4914 Weld P7



Met 87285

(d) AISI 405 tube to AISI 410 plug Weld D296 b



Met 35916

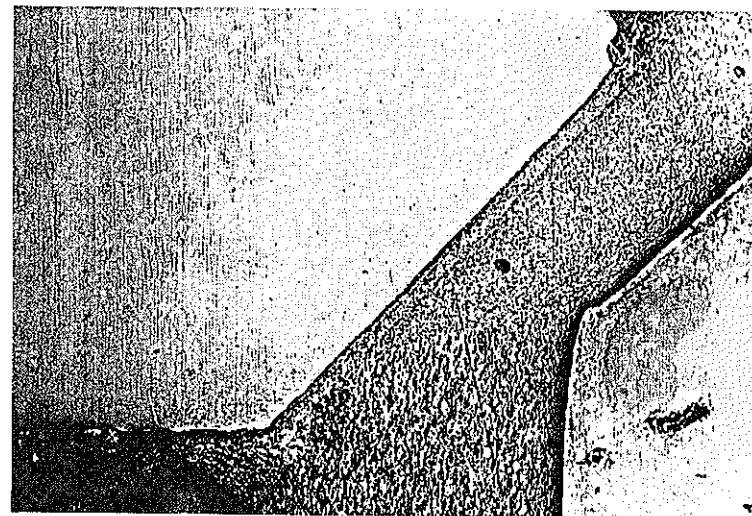
图-6 金相写真 (Ferritic Steels)

(a) Double successive weld in OPS ferritic steel



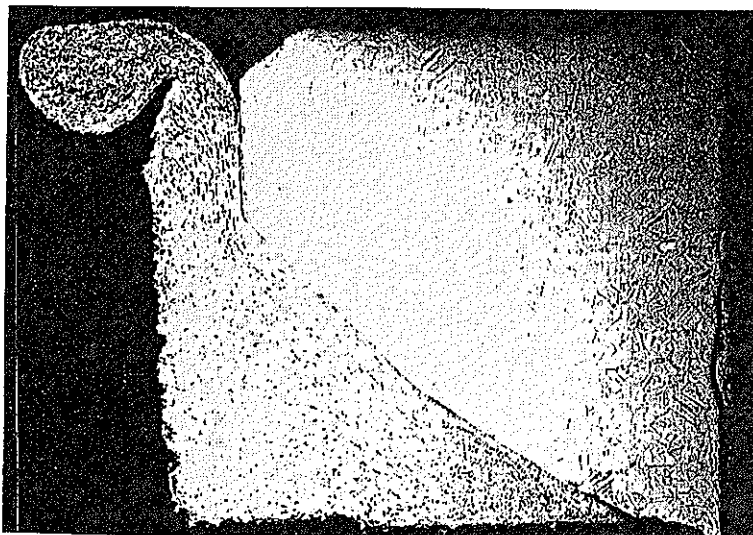
Met 77852

(b) AISI 316E plug to Zircaloy tube



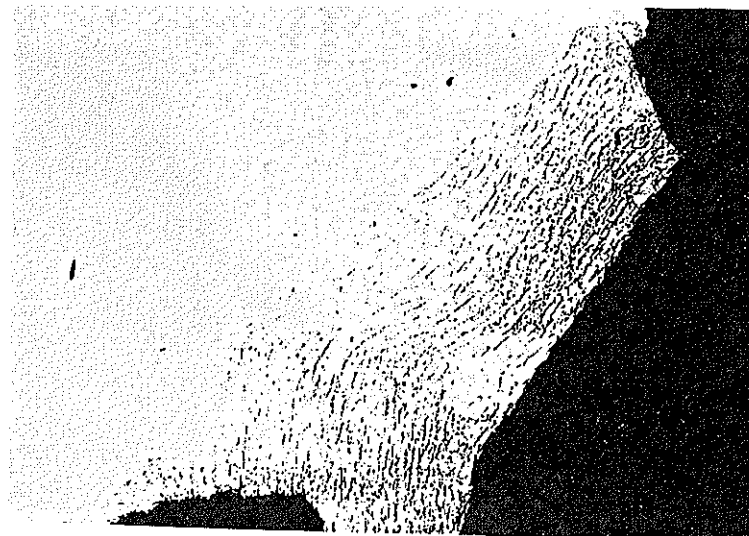
Met 82587

(c) Niobium plug to Zircaloy tube



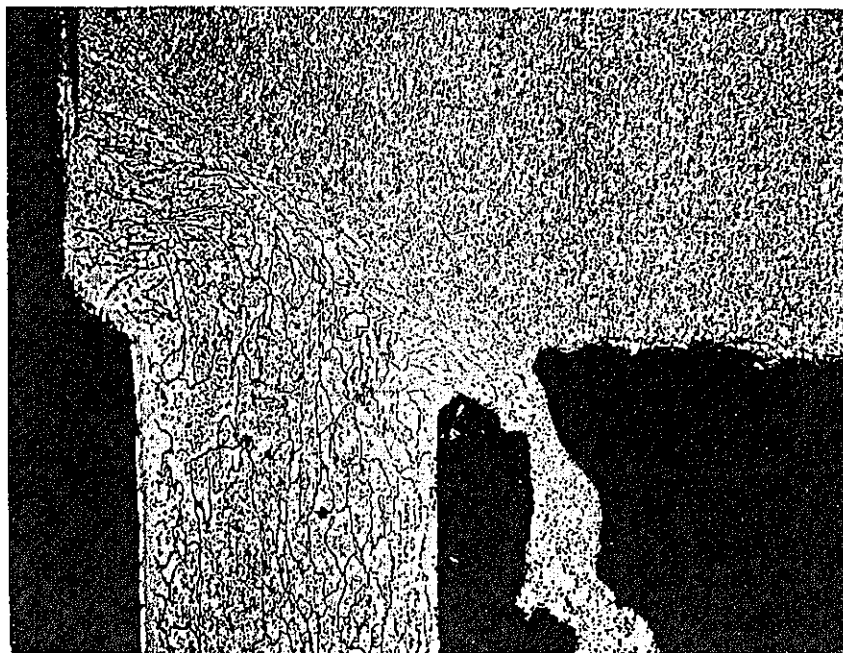
Met 92348

(d) AISI 316L TO DT 2203Y05 tube after 10 thermal cycles & fatigue test Weld U4

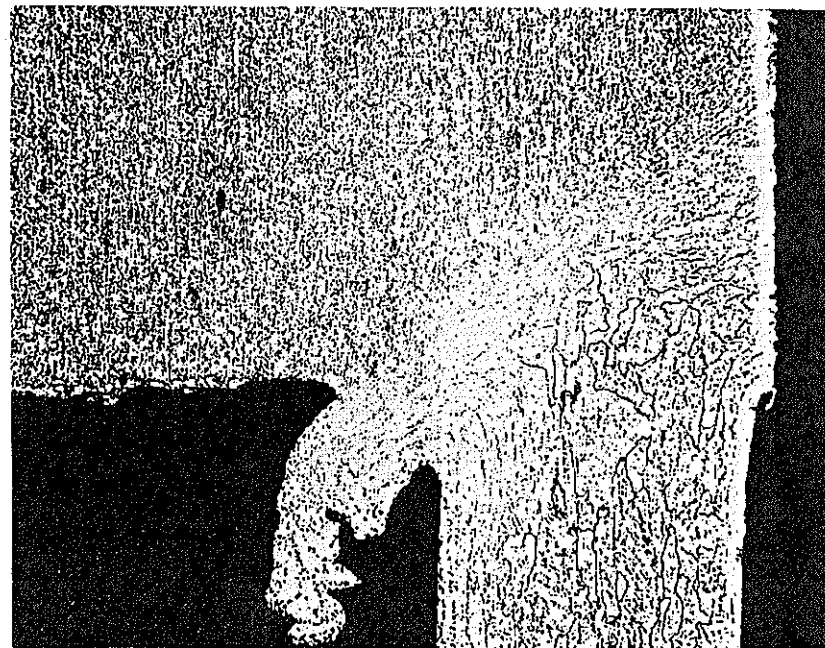


Met 89403

图-7 金相写真



Met 35732



Met 35731

DT01 Tube Welded to DT02 Plug - Weld D147
 Axial Creep Test, 2700 hours, 700 °C, 75 N/mm², Rupture in Tube

图-8 金相写真

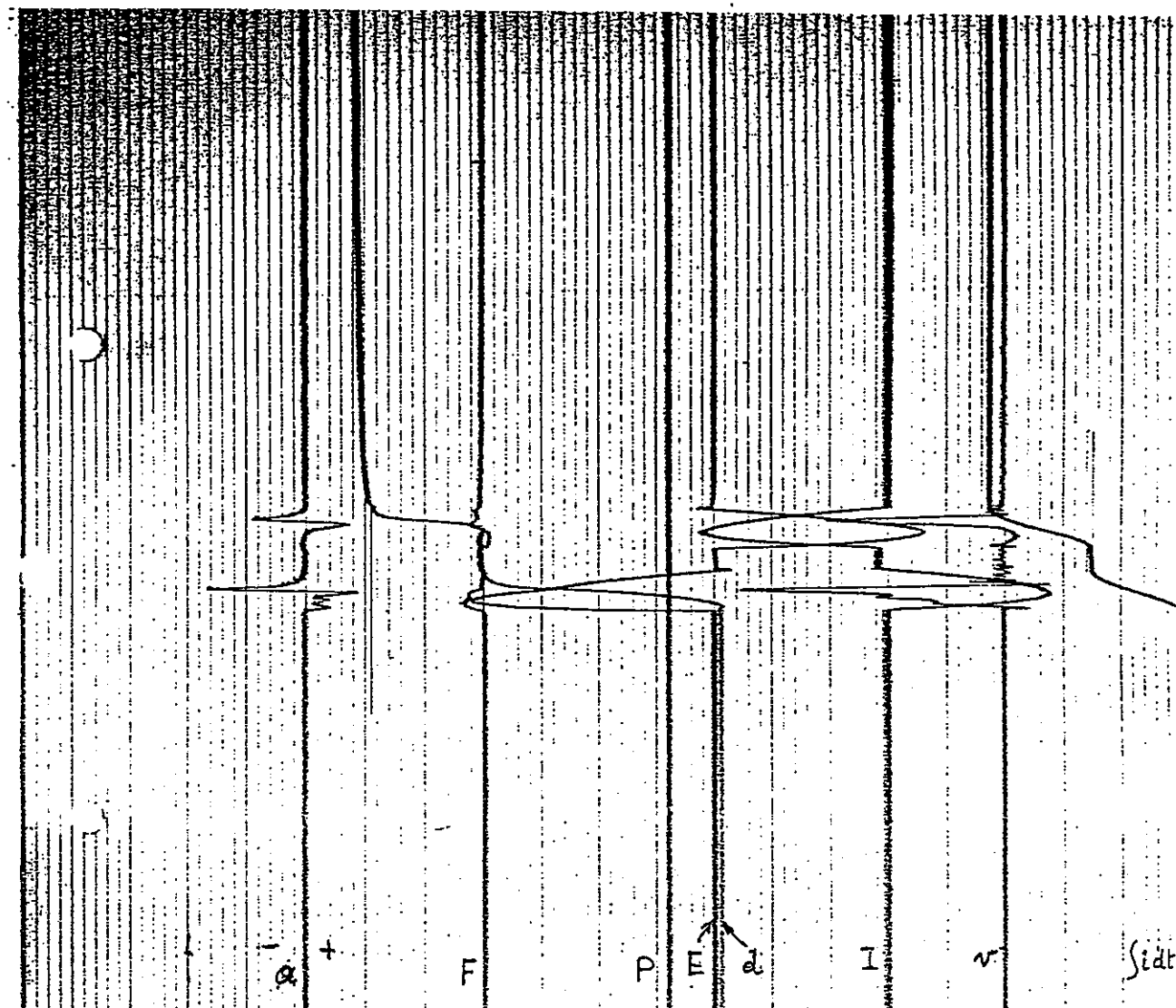


図-9 溶接曲線 (通常の曲線)

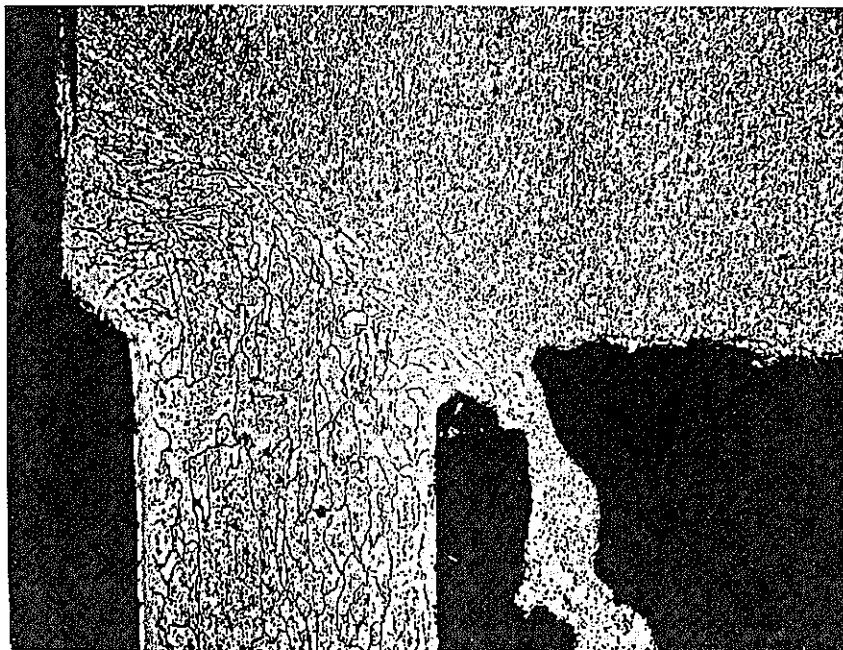
TYPE OF WELD : NORMAL WELD OF IDEFIX PRODUCTION

MATERIAL : DT 2203Y05

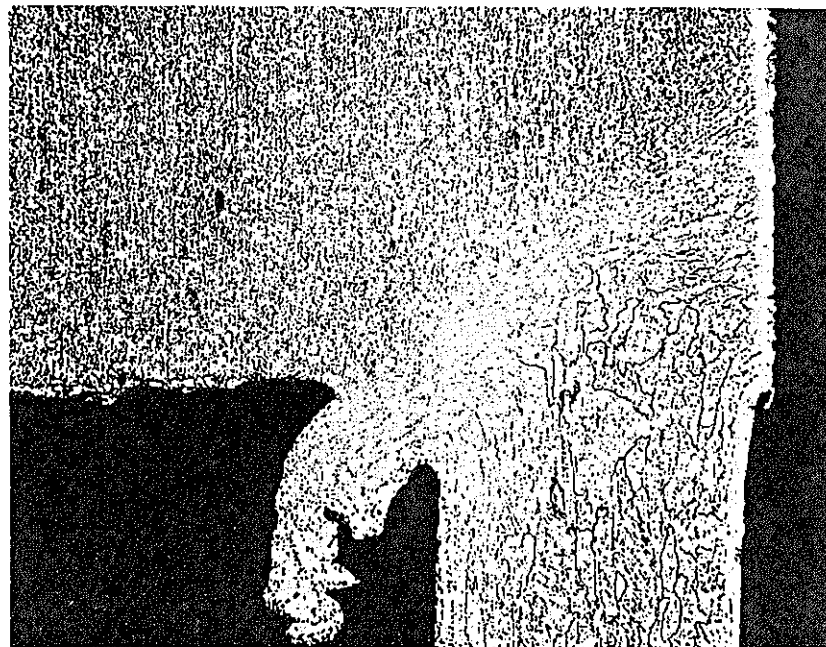
TUBE No. : 2268/7

WELD No. : ID 866

DATE : JANUARY 31, 1986



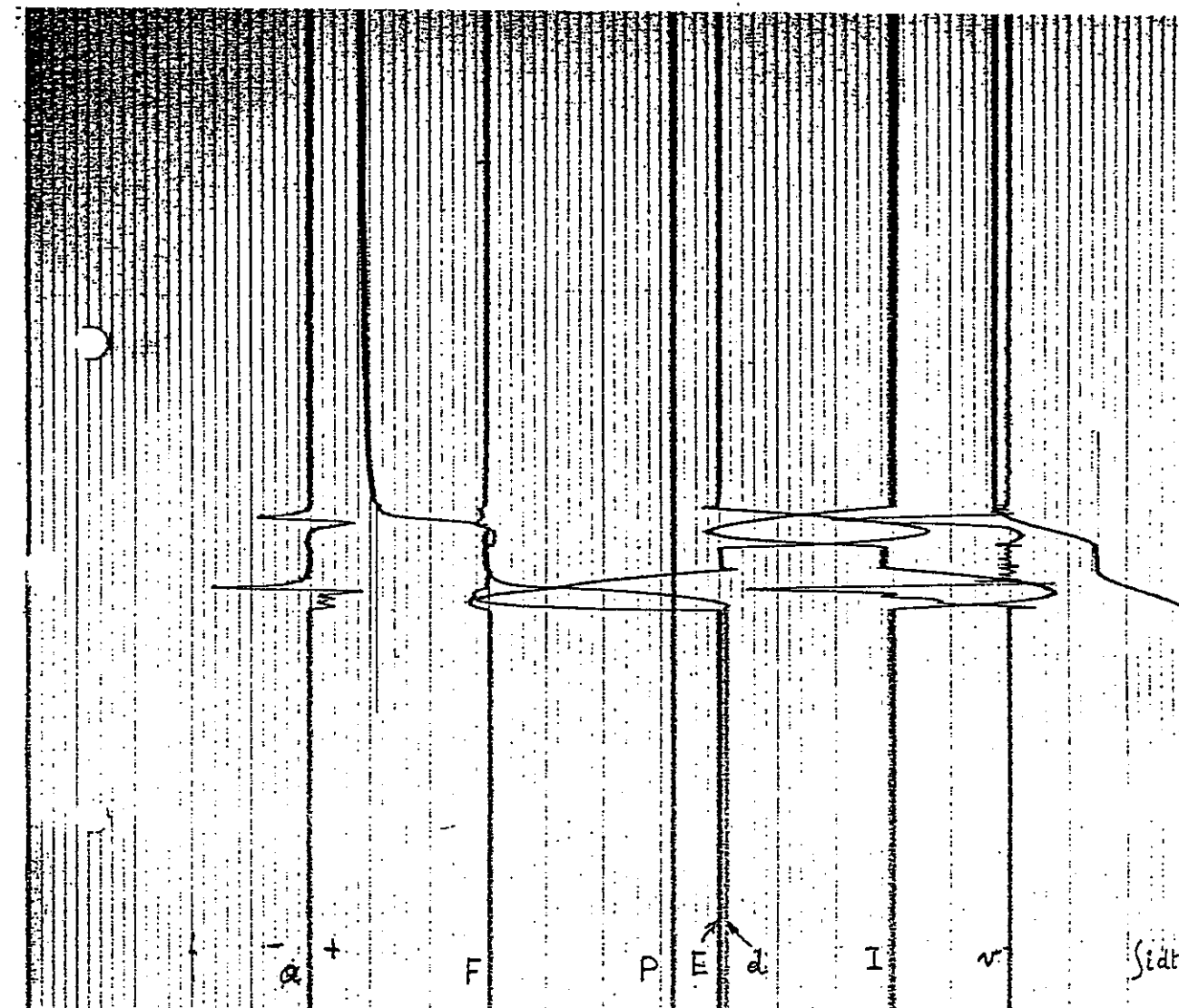
Met 35732



Met 35731

DT01 Tube Welded to DT02 Plug - Weld D147
Axial Creep Test, 2700 hours, 700 °C, 75 N/mm², Rupture in Tube

图-8 金相写真



図－ 9 溶接曲線（通常の曲線）

TYPE OF WELD : NORMAL WELD OF IDEFIX PRODUCTION

MATERIAL : DT 2203Y05

TUBE No. : 2268/7

WELD No. : ID 866

DATE : JANUARY 31, 1986

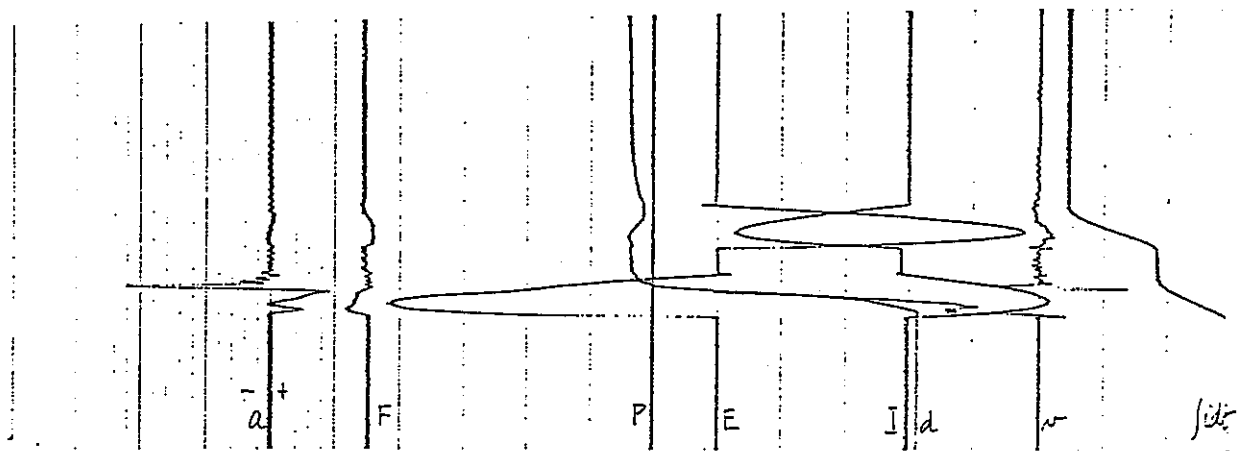


図-10 溶接曲線（後半のサイクルに変位の無い場合）

TYPE OF WELD : TEST WELD

ANOMALY : NO DISPLACEMENT IN 2nd HALF CYCLE

ACTION : INCREASE ENERGY AND FORCE

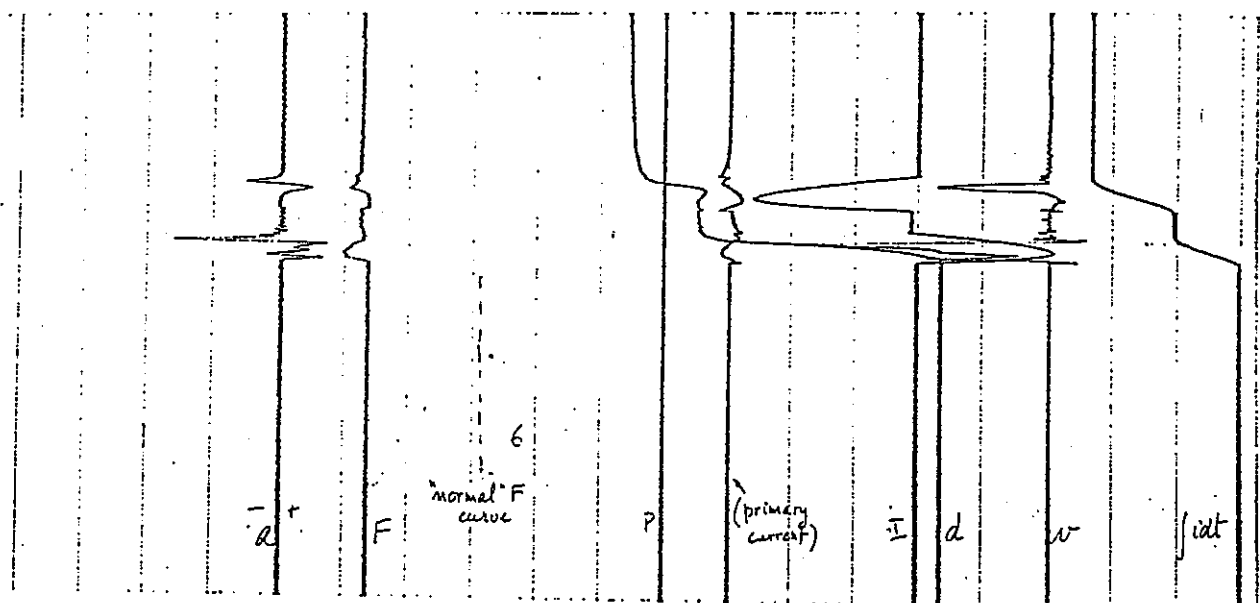


図-11 溶接曲線（加圧力が大変小さい場合）

TYPE OF WELD : TEST WELD

ANOMALY : UNSEEN, FORCE TOO LOW

RESULT : MOLTEN ZONE IN JUNCTION

ACTION : ADD FORCE AND POWER

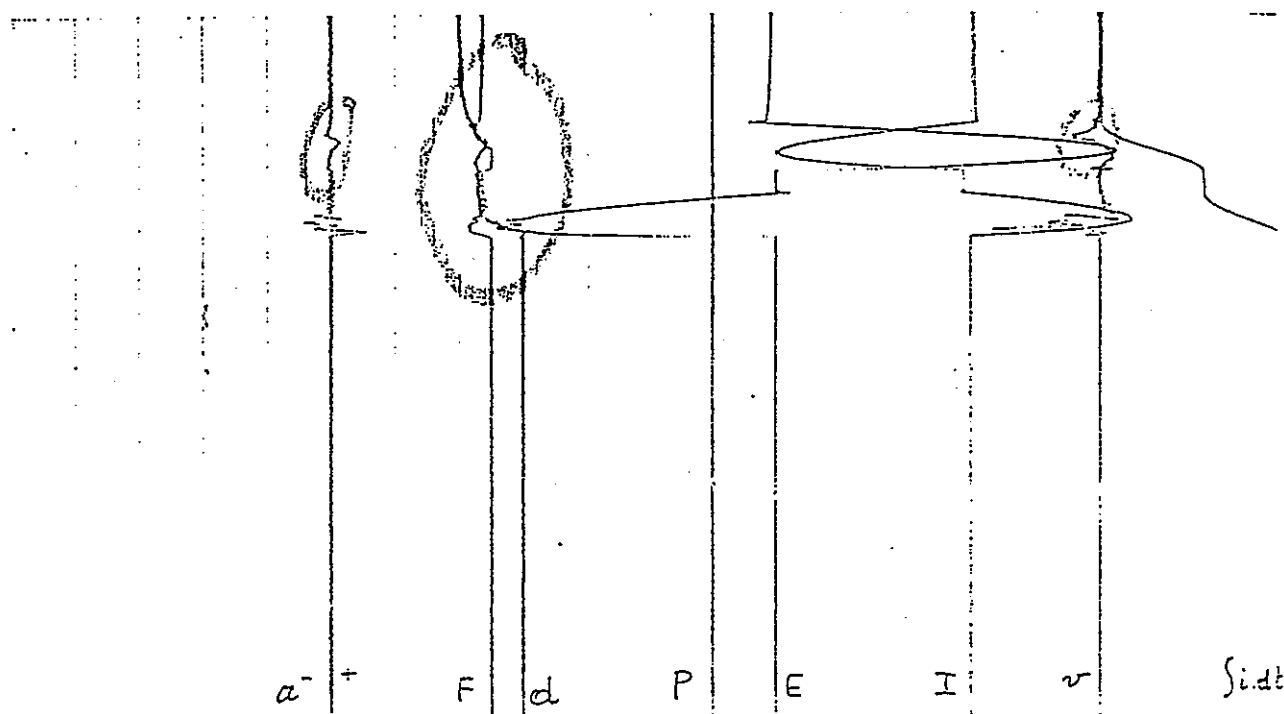


図-12 溶接曲線（変位、電圧、加速度の異常）

TYPE OF WELD : TEST WELD, PRESSURIZED CAPSULE

ANOMALY : DISPLACEMENT, VOLTAGE AND ACCELERATION

CAUSE : SLIGHT TUBE SLIPPING

ACTION : TIGHTEN BACK STOP BEFORE APPLYING WELD FORCE

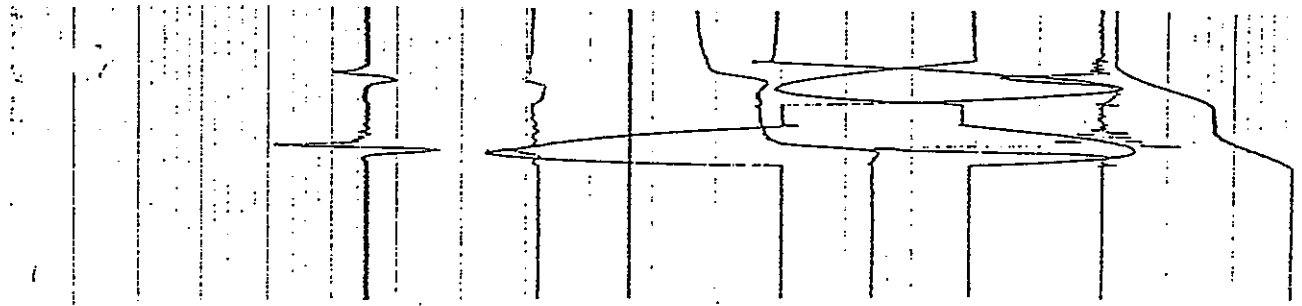


FIGURE 13(b) : WELD OF FIG. 13(a) AS DONE AGAIN

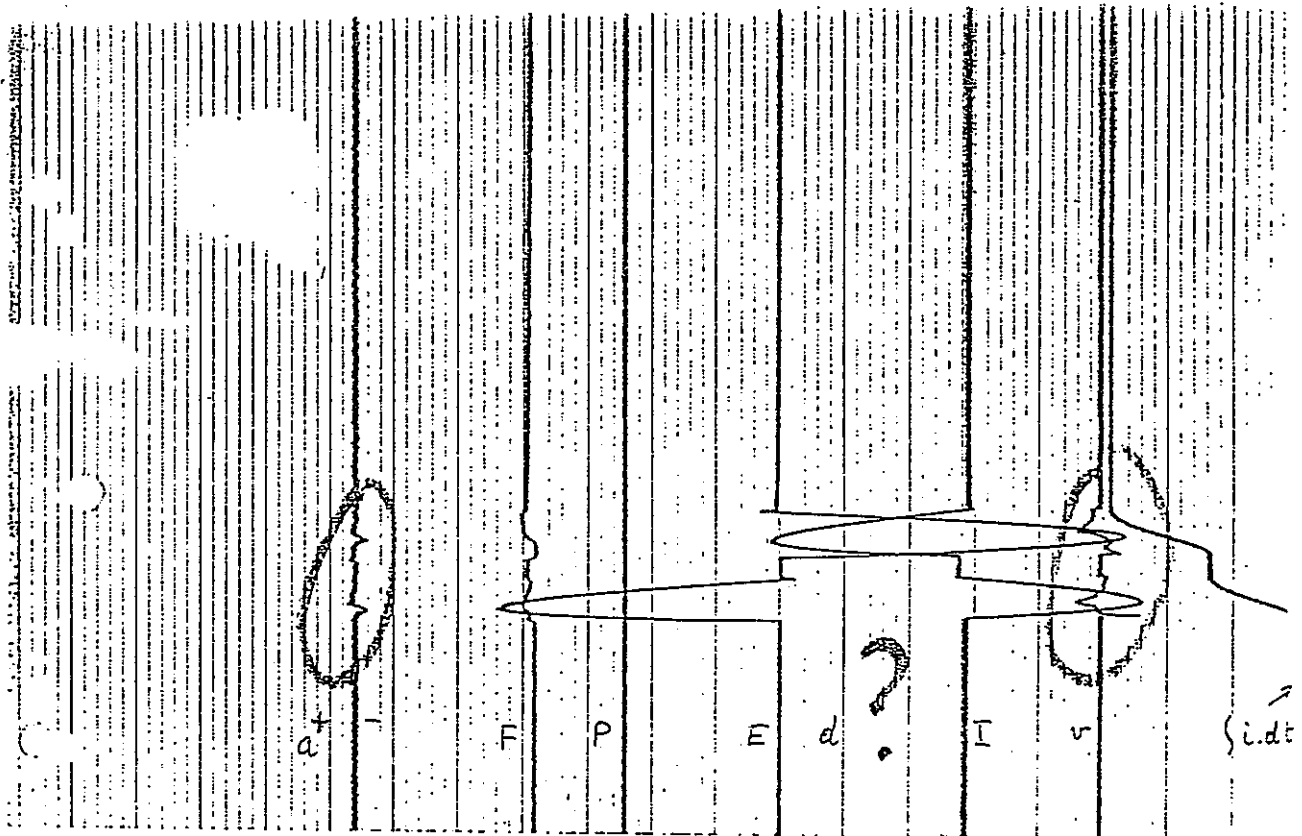


FIGURE 13(a)

図-13 溶接曲線（変位が無く、速度、加速度が0に近い値を示す場合）

TYPE OF WELD : PRODUCTION OF PRESSURIZED CAPSULES

ANOMALY : NO DISPLACEMENT CURVE, NEAR ZERO SPEED AND ACCELERATION

DISCUSSION : WELDING HEAD OUT OF MEASURING RANGE OF SENSOR

CONCLUSION : NO WELD SINCE ACCELERATION IS COMPLETELY INDEPENDENT OF TABLE POSITION

RESULTS : LEAK TIGHT IN BUBBLE TEST - PARTIAL COLLAGE IN FATIGUE RUPTURE TEST

ACTION : WELD DISCARDED, CAPSULE RE-MADE (Fig. 13(b))

PROBABLE CAUSE : TUBE SLIPPAGE COMBINED WITH EITHER WRONG TABLE POSITION OR PLUG MACHINED TOO SHORT

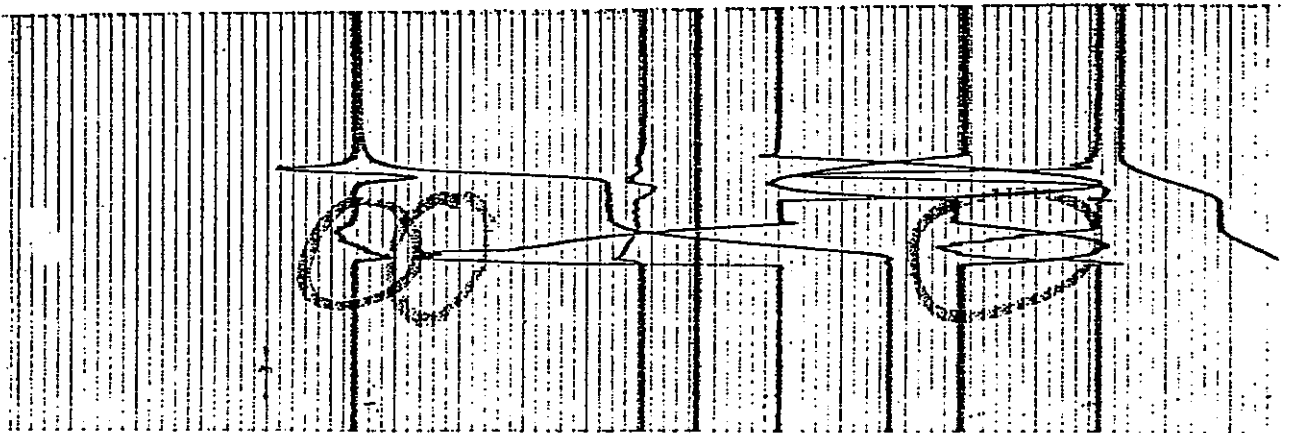


図-14 溶接曲線（電圧、速度、加速度曲線の異常）

TYPE OF WELD : TEST WELD .

ANOMALY : CURVES OF VOLT, SPEED, ACCELERATION

CAUSE : PLUG LOOSE IN COLLET (WRONG DIAMETER)

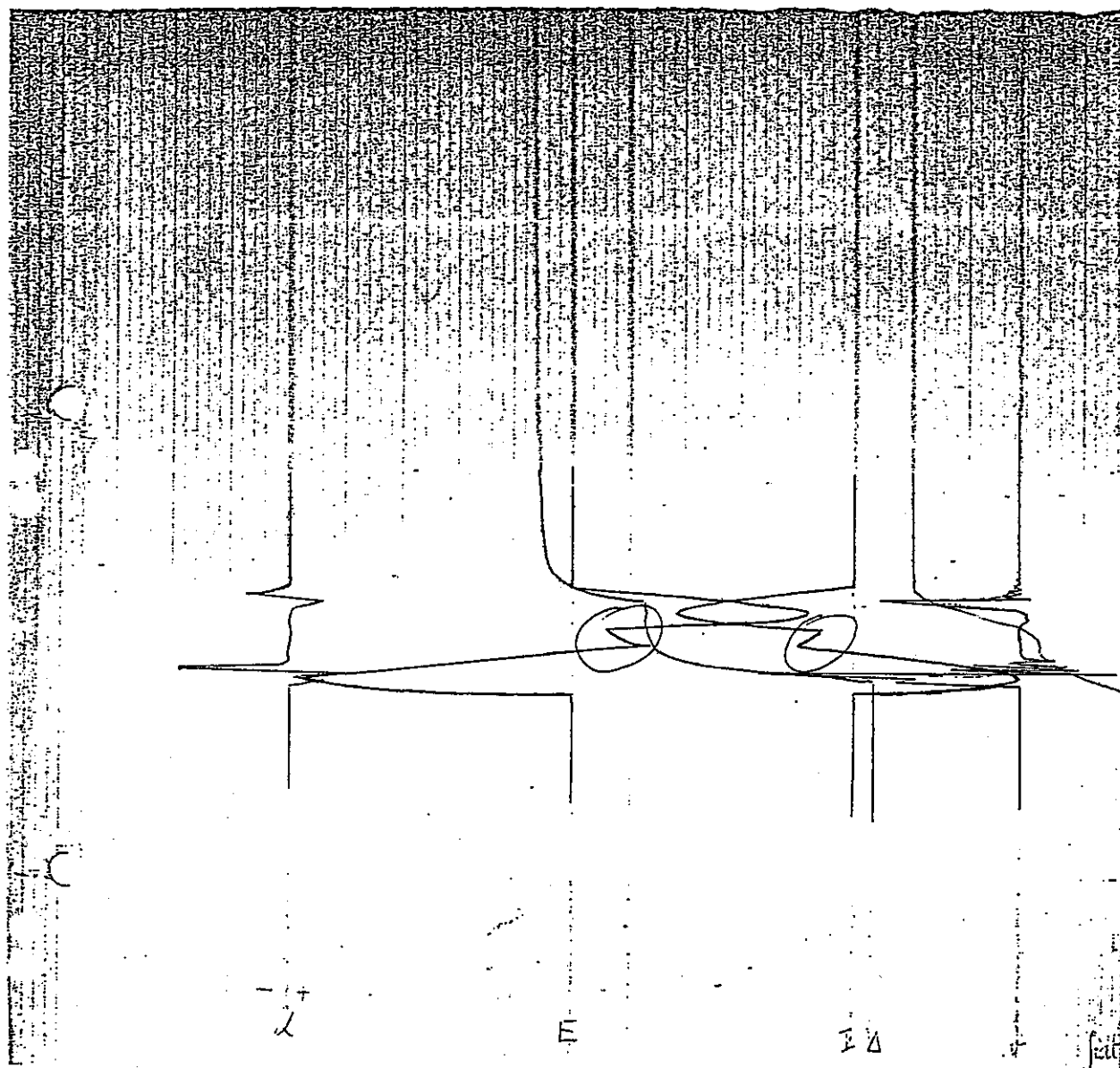


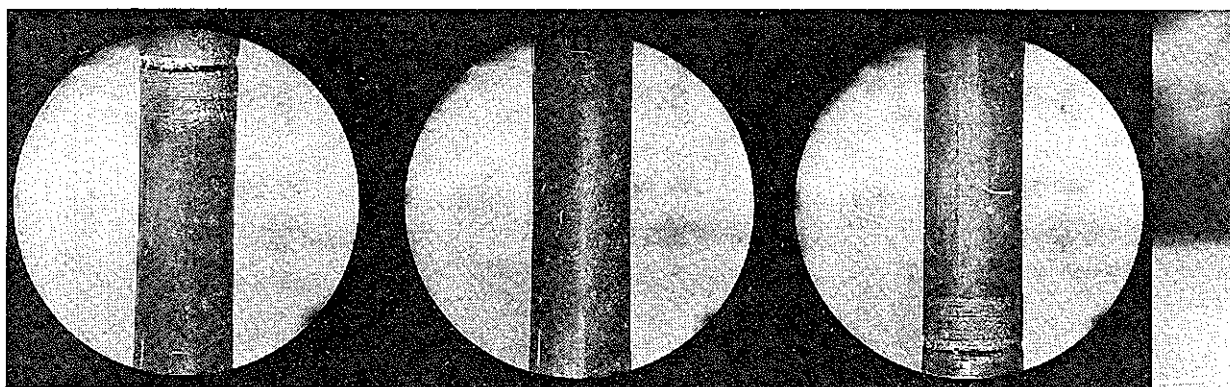
図-15 溶接曲線 (電流と電圧の0点の異常)

TYPE OF WELD : IDEFIX TEST WELD

ANOMALY : CURRENT AND VOLTAGE ZERO POINTS

CAUSE : TRANSFORMER UNBALANCED

ACTION : INCREASE POWER IN 2nd HALF-CYCLE



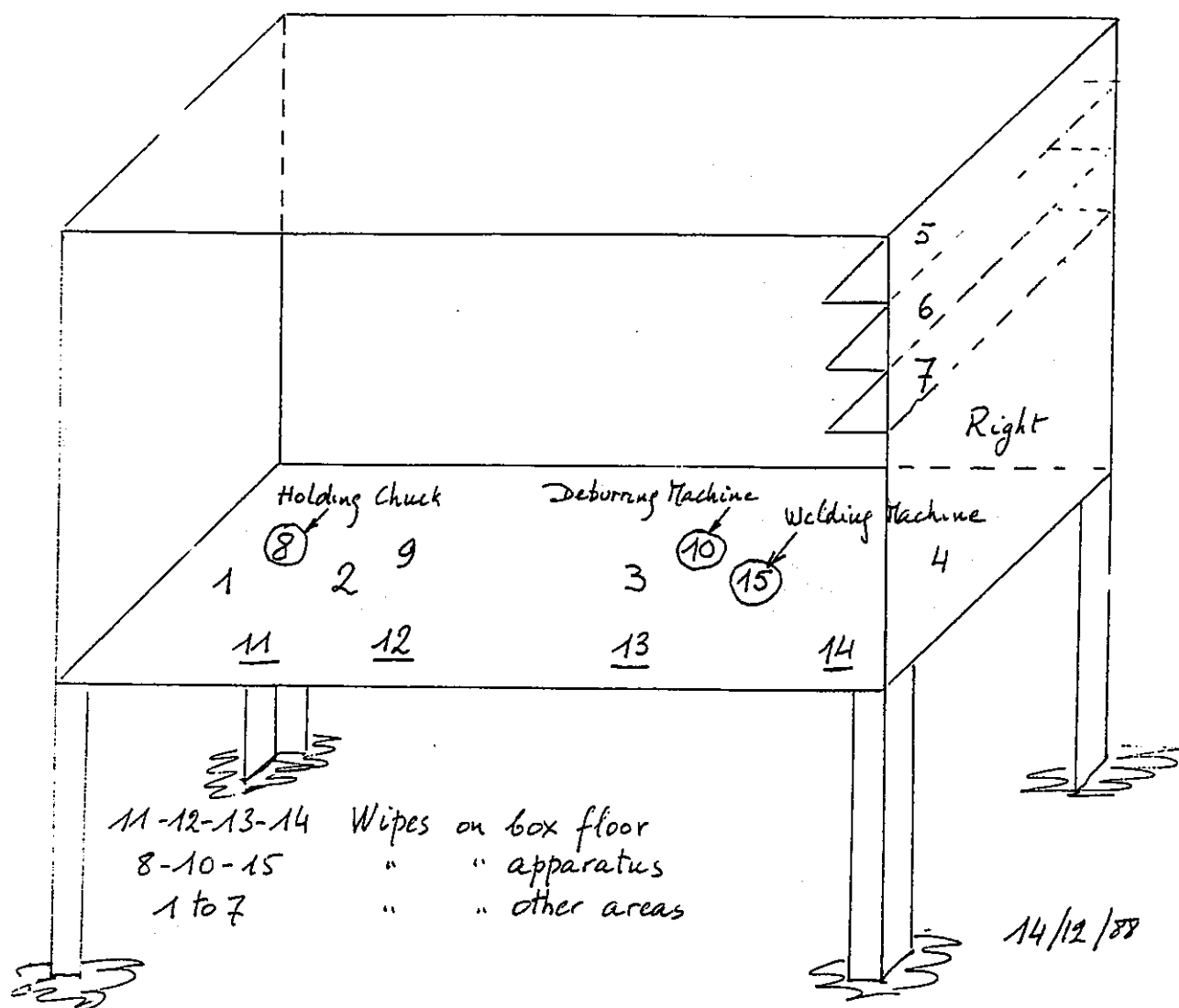
Film 1 0°

図-16 R I P C E X II試験で用いられたカプセル

RIPCEX II capsule C4, ODS material DY 05 pressurized at 125 bar photographed in Mo1/LHMA, in 1984.

The recess is the e-beam weld joining two capsules.

The plug is visible through the machining grooves, and its somewhat larger diameter.

α -box BN. 2095

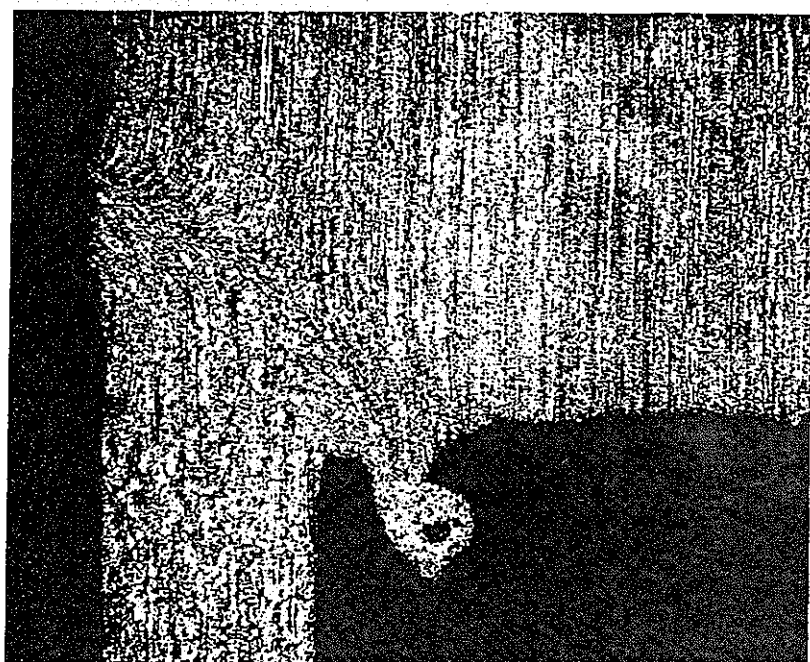
- (a) Wipes done with "Nu Con Smear" ϕ 40 mm.
 (b) Wipes taken over 1 dm².
 (c) Eff. of counter 10 % (Pu-239).
 (d) Background $\leq$ 10 Bq.

No. ==	Bq ==	No. ==	Bq ==	No. ==	Bq ==
1	50	6	40	11	50
2	70	7	60	12	150
3	150	8	40	13	30
4	250	9	70	14	50
5	200	10	200	15	3500

図-17 装置の汚染



(a) CFC 4D Qualification Weld B60 - Met 27044



(b) CIRCE 6D Pre-Qualification Weld D56 - Met 28875

图-18 金相写真 (CFC4D 、 CIRCE6D Experiment)

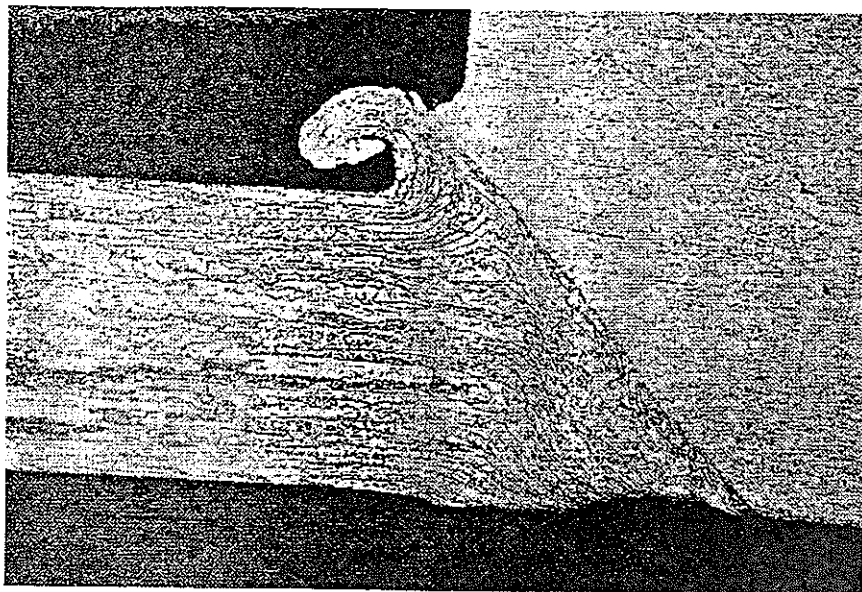


Photo N° 12400

Weld n° A85b

75 X

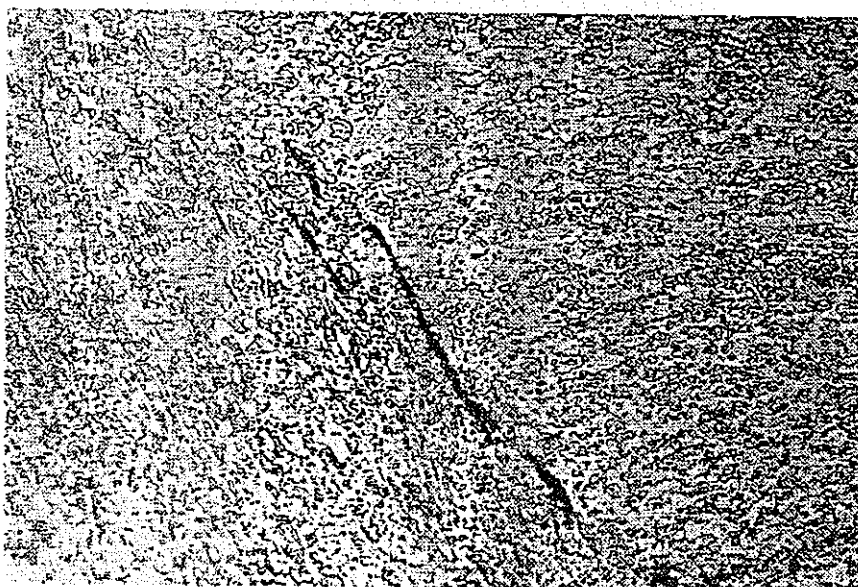


Photo N° 12406

Weld n° A85b

750 X

Lower end-plug witness weld on DT 3911 ferritic steel tube.

图-19 金相写真 (CARAFE Experiment)

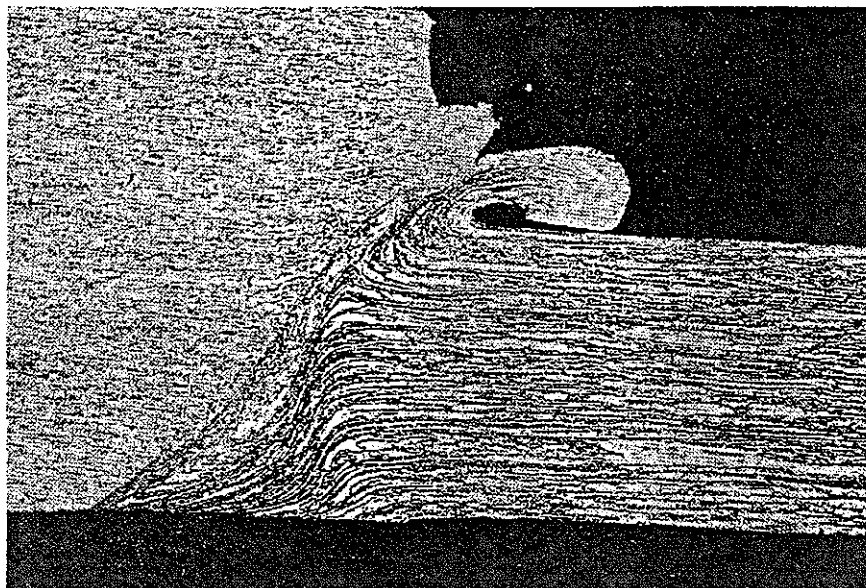


Photo N° 12394

Weld n° A92b

75 X



Photo N° 12396

Weld n° A92b

750 X

Lower end-plug witness weld on DT 2203 Y 05
ferritic steel tube.

图-20 金相写真 (CARAFE Experiment)



Photo N° 12522

Weld n° A118

75 X

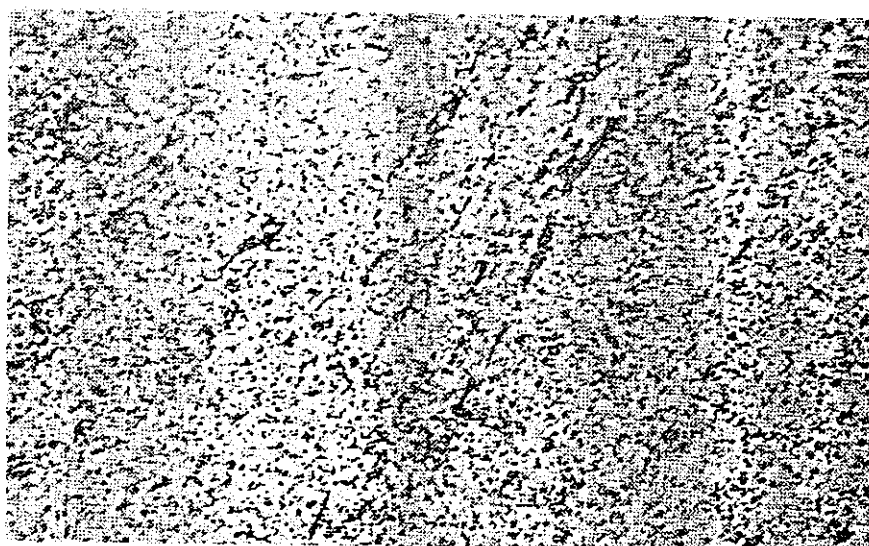


Photo N° 12526

Weld n° A118

750 X

Upper end-plug witness weld on DT 3911
ferritic steel tube.

图-21 金相写真 (CARAFE Experiment)



Photo N° 12501

Weld n° A120a

75 X

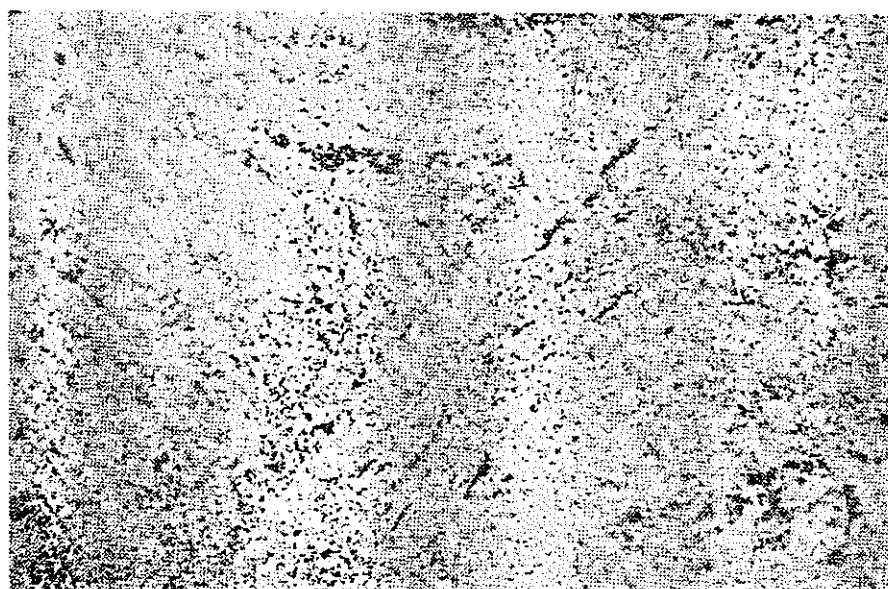


Photo N° 12503

Weld n° A120a

750 x

Upper end-plug witness weld on DT 2203 Y 05
ferritic steel tube.

图-22 金相写真 (CARAFE Experiment)

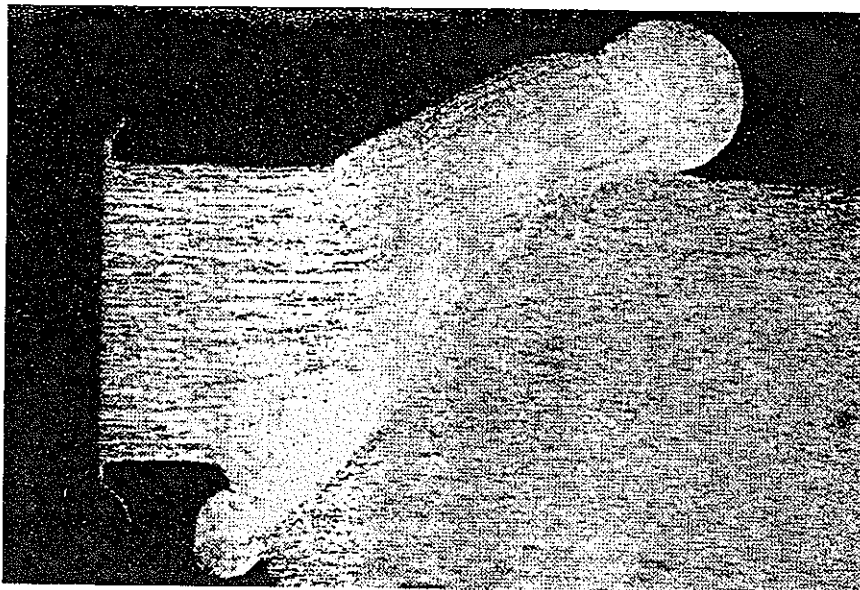


Photo N° 12530 Unstripped welding burr 75 X

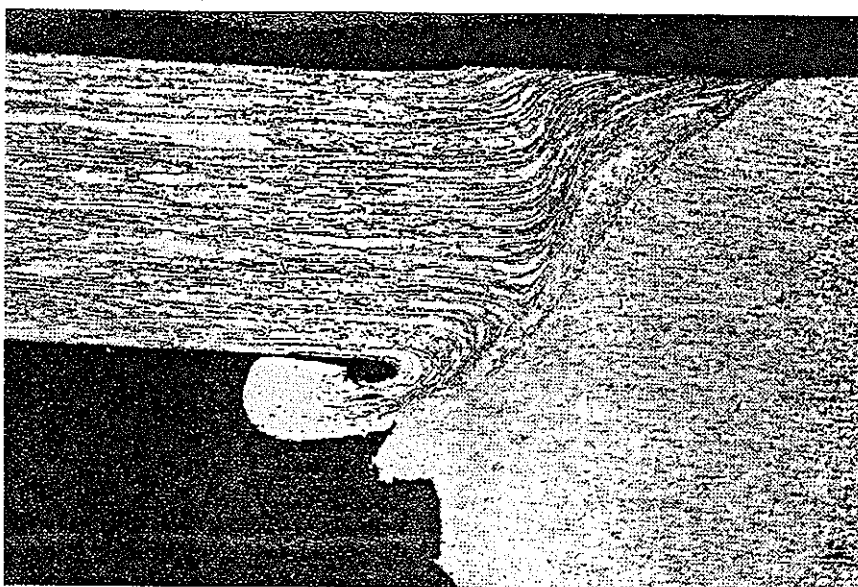


Photo N° 12394 Stripped welding burr 75 X

Welding burr stripping by annular cutting die.



(a) First weld, Production control weld P58 - met 70738



SCH 16077

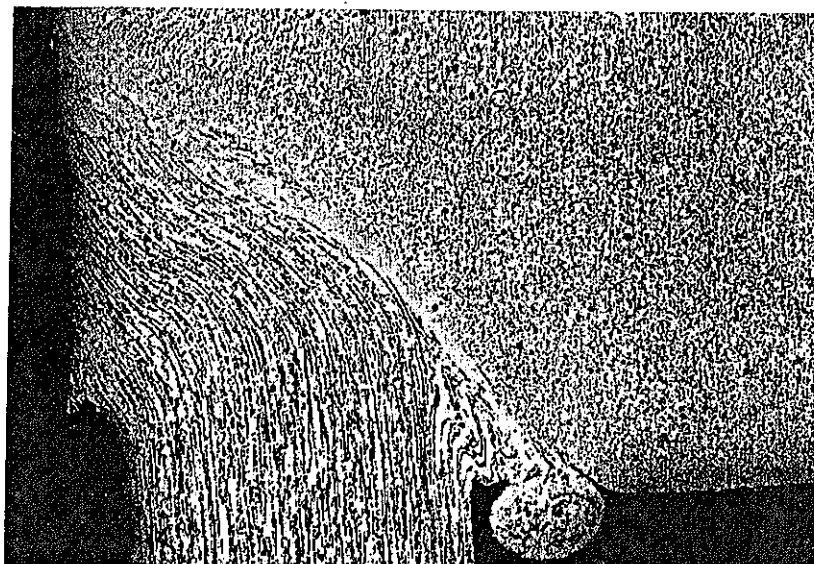


SCH 16078

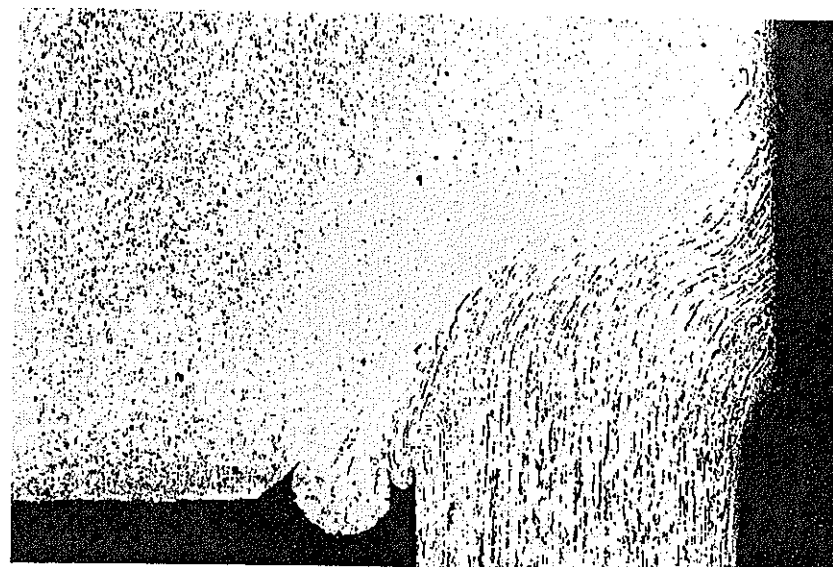
(b) Second weld, (in glove-box), Production control weld P69

图-24 金相写真 (POUSSIX Experiment)

(a) H 232 DT DT 2203Y05 Tube to DT 2203Y05 Plug

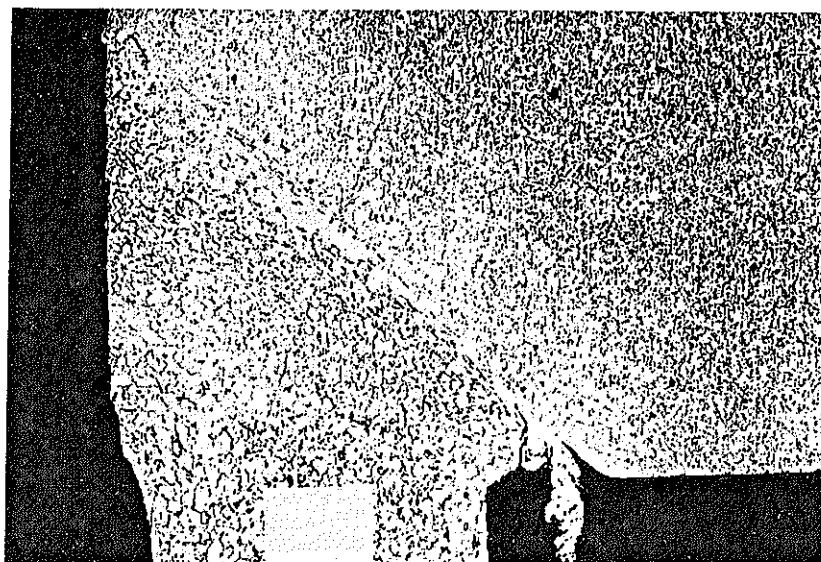


Met 66339



Met 66340

(b) H 236 DT 2906 Tube to DT 2203Y05 Plug

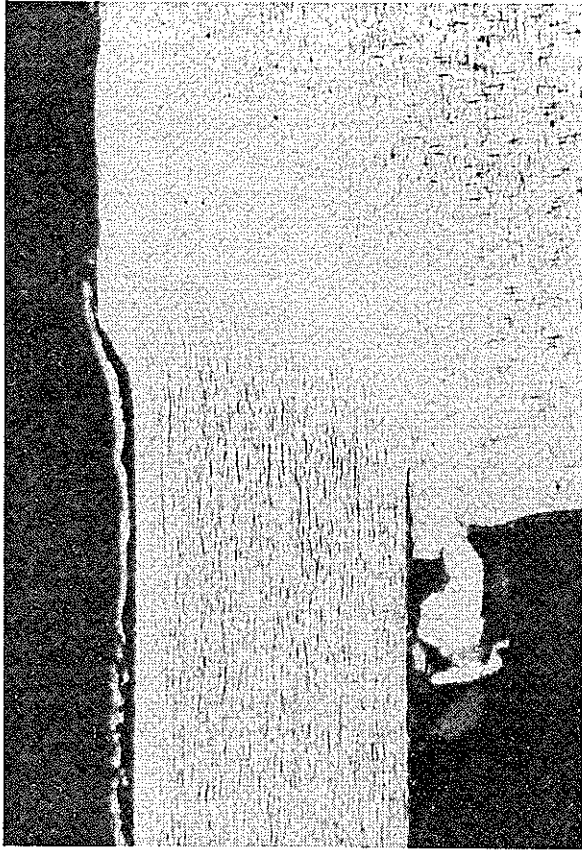


Met 66345

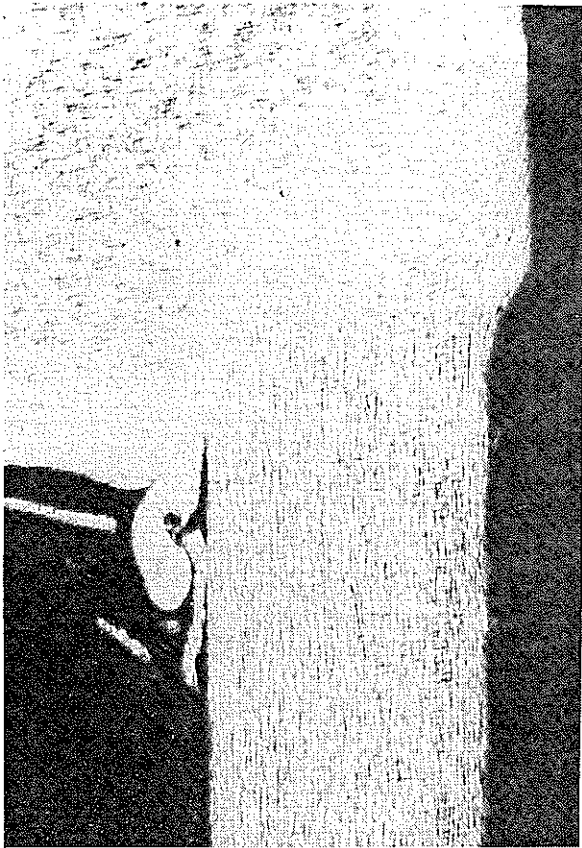


Met 66346

图-25 金相写真 (FETICHE Experiment)

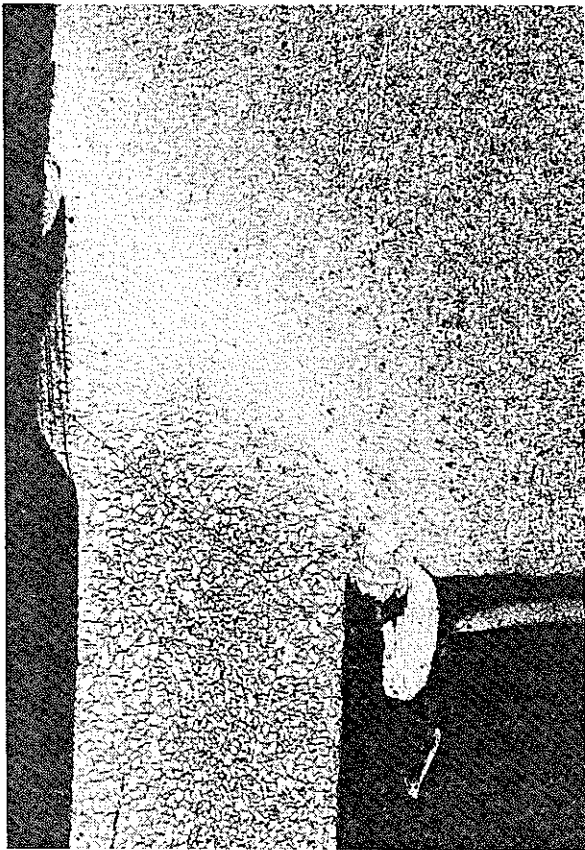


SCH 15530

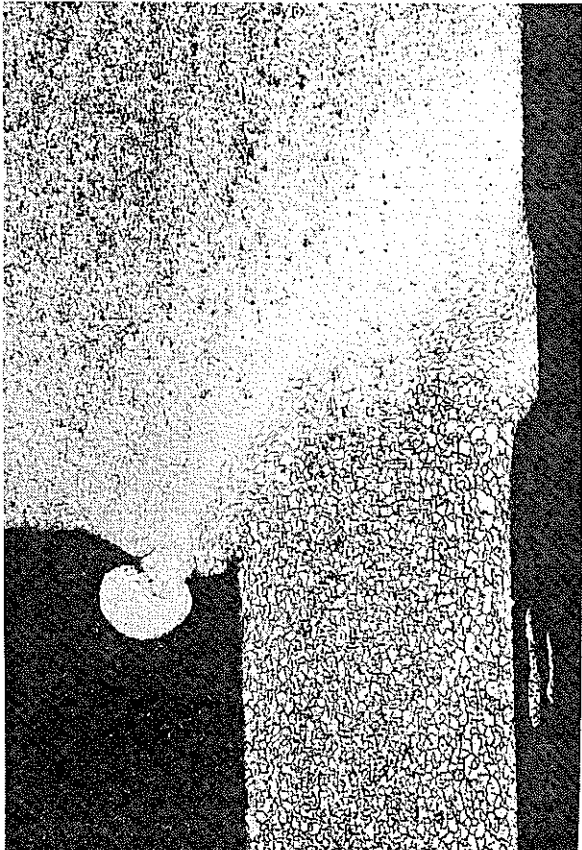


SCH 15531

(a) H 222 DT 2203Y05 Tube to DT 2203Y05 Plug



SCH 15532



SCH 15533

图-26金相写真 (FETICHE Experiment)

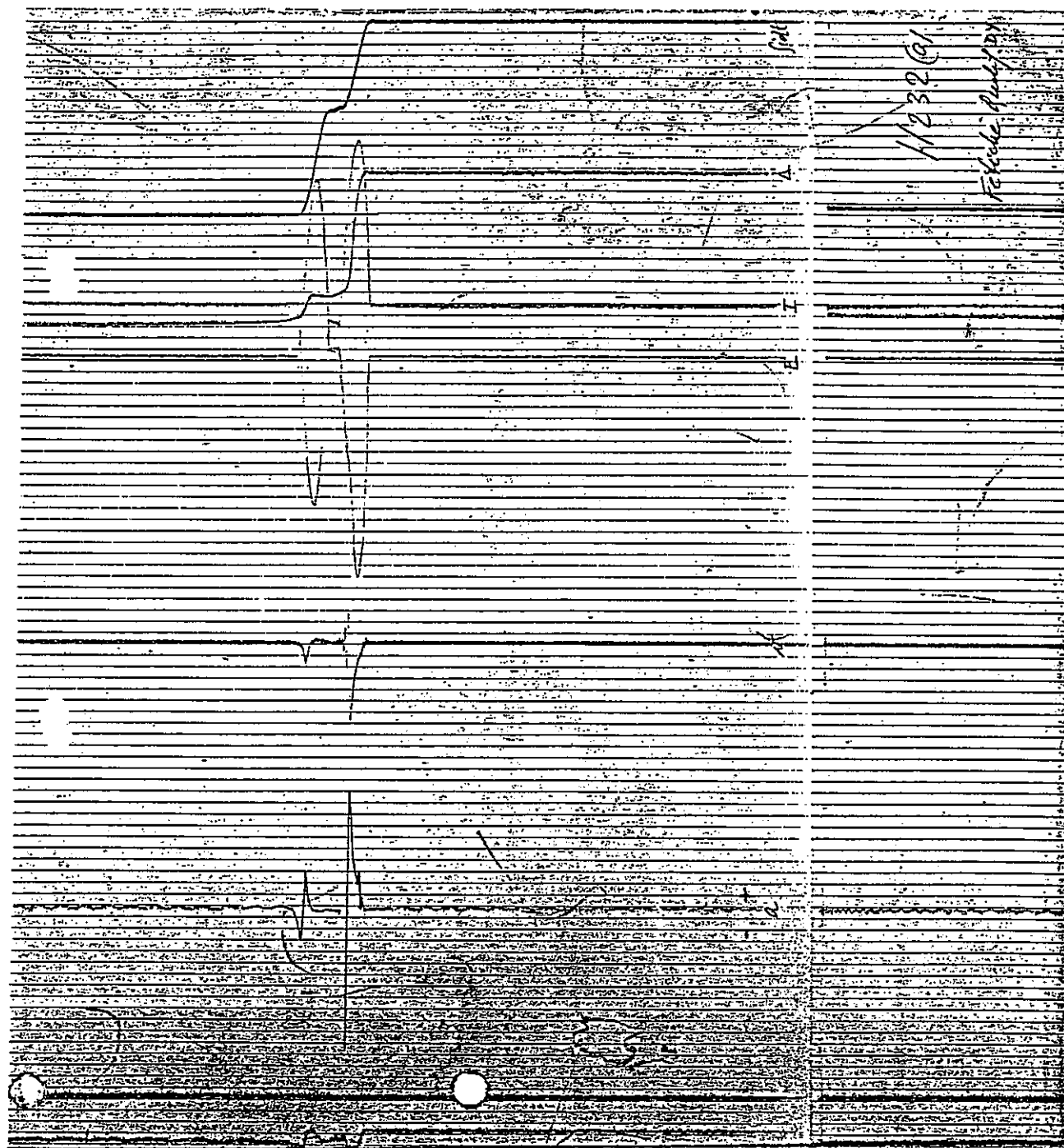


図-27 溶接曲線 (FETICHE Experiment - DY材の被覆管とDY材の端栓の溶接)

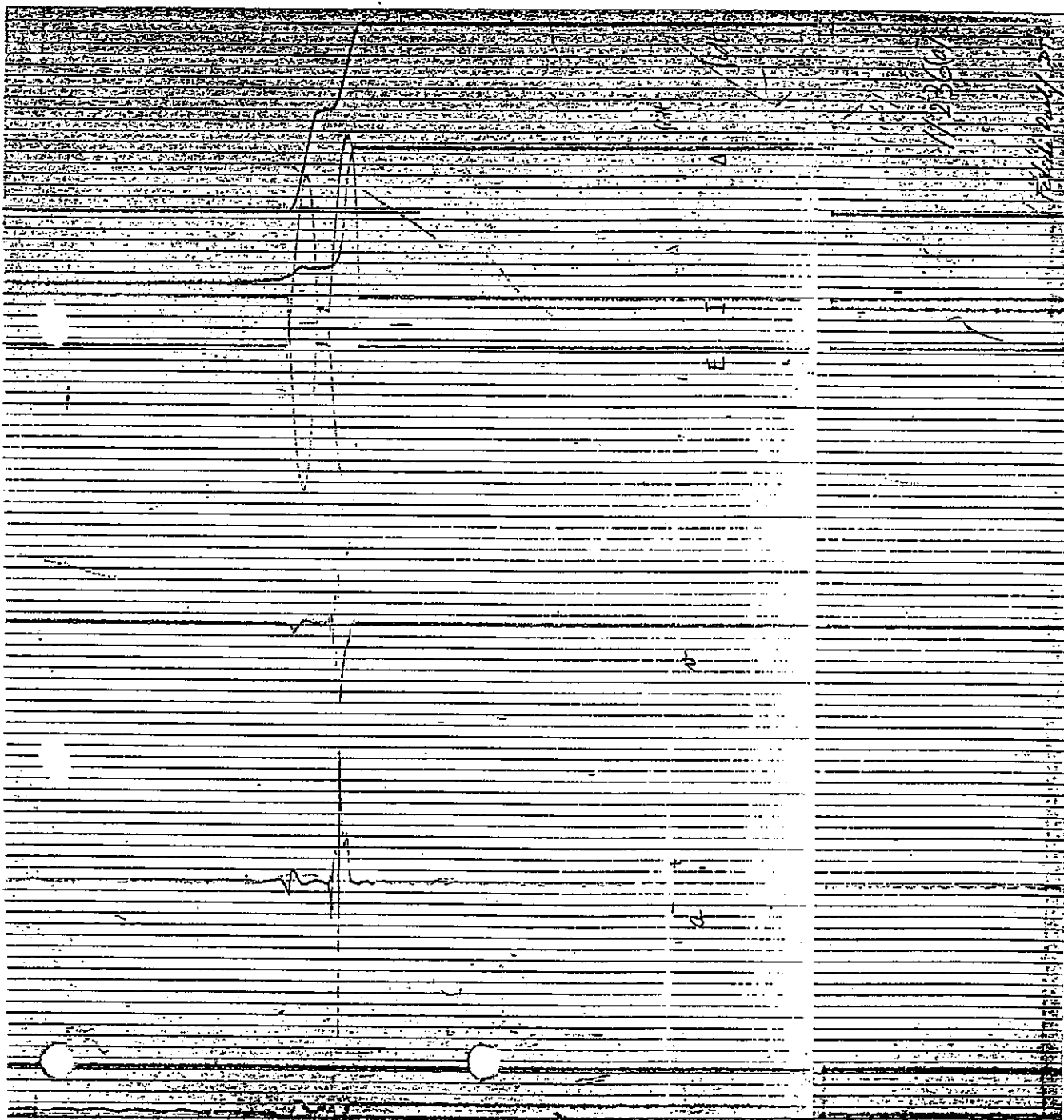
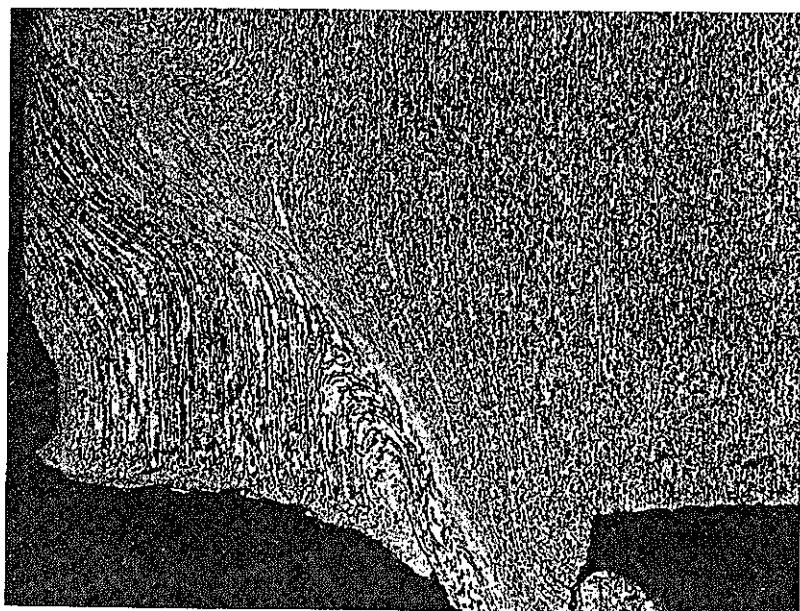


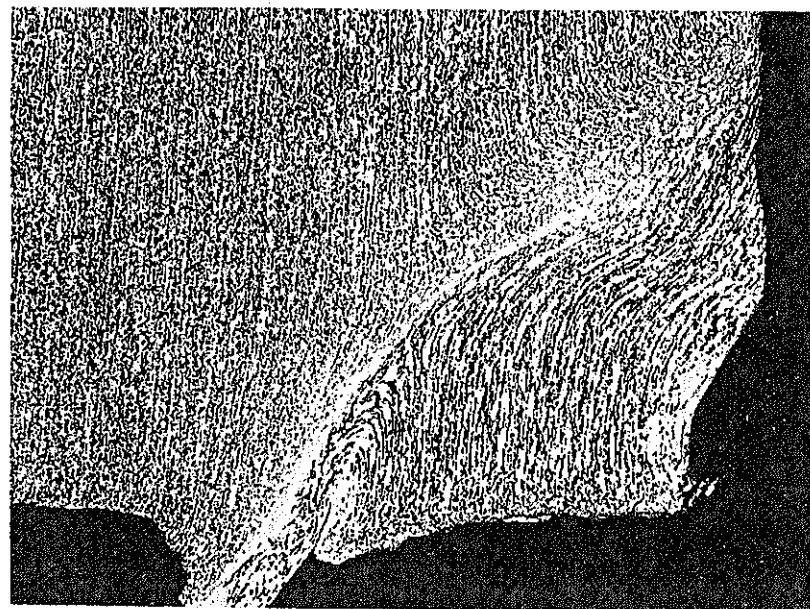
図-28 溶接曲線 (FETICHE Experiment-DT材の被覆管とDY材の端栓の溶接)

1st Weld DT 2203Y05 ID 293



Met 79061

x 100



Met 79026

x 100

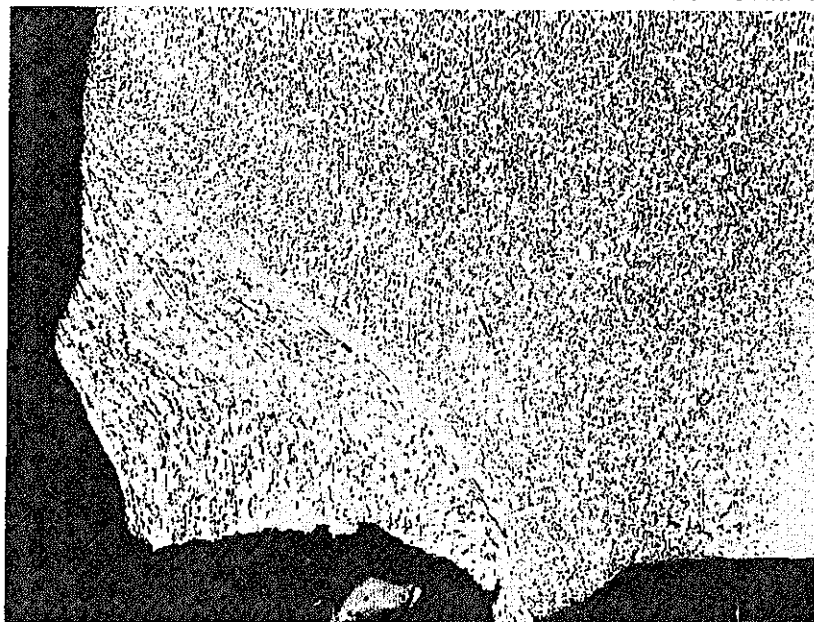


met 80528

x 100

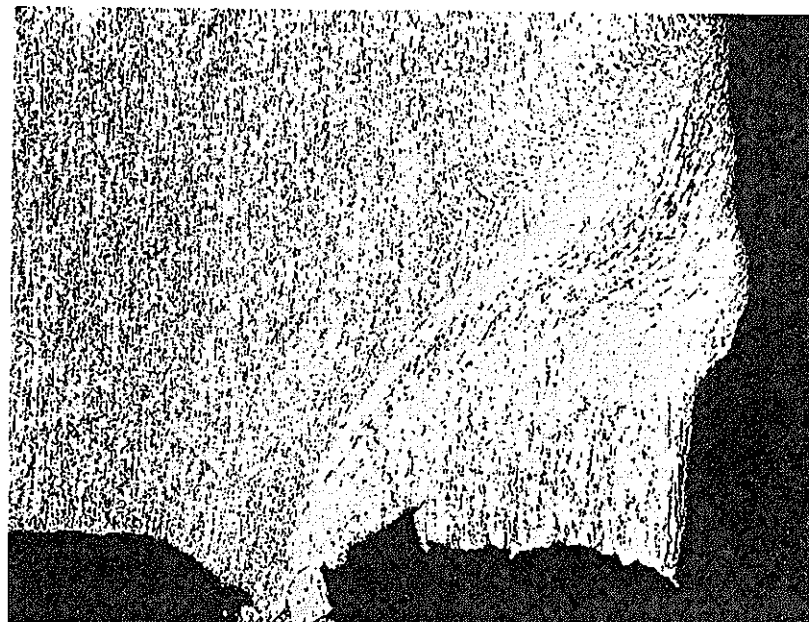
図-29 金相写真 (IDEFIX Production)

Last Welds DT 2203Y05 ID 877



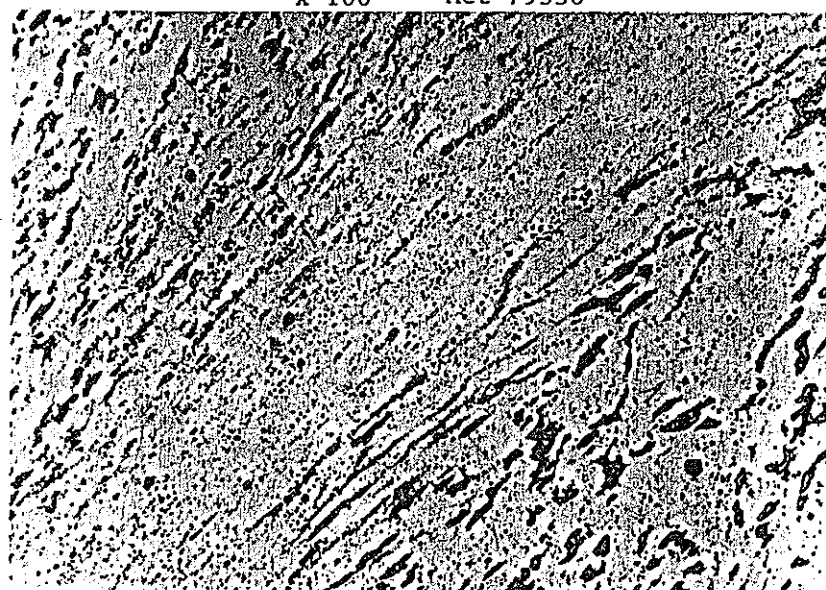
Met 79329

x 100



Met 79330

x 100

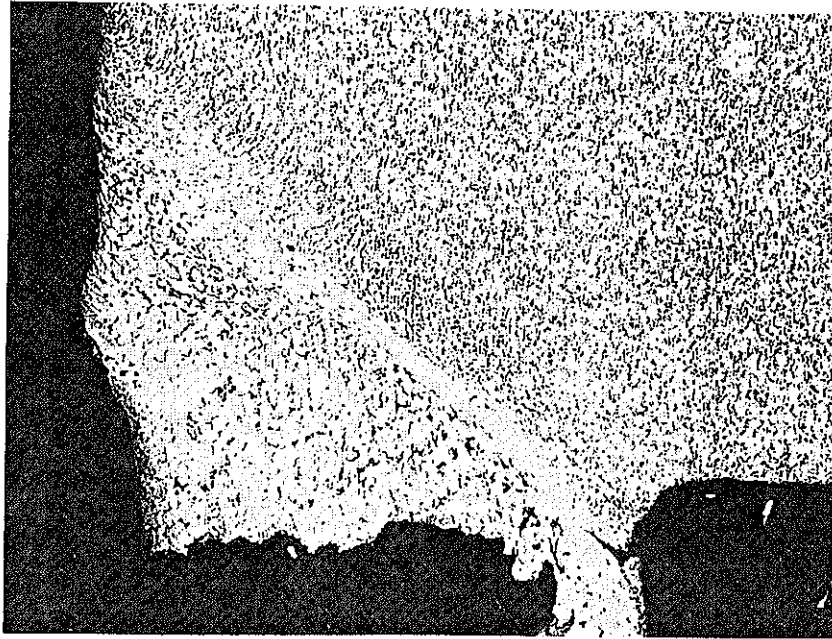


Met 80529

x 100

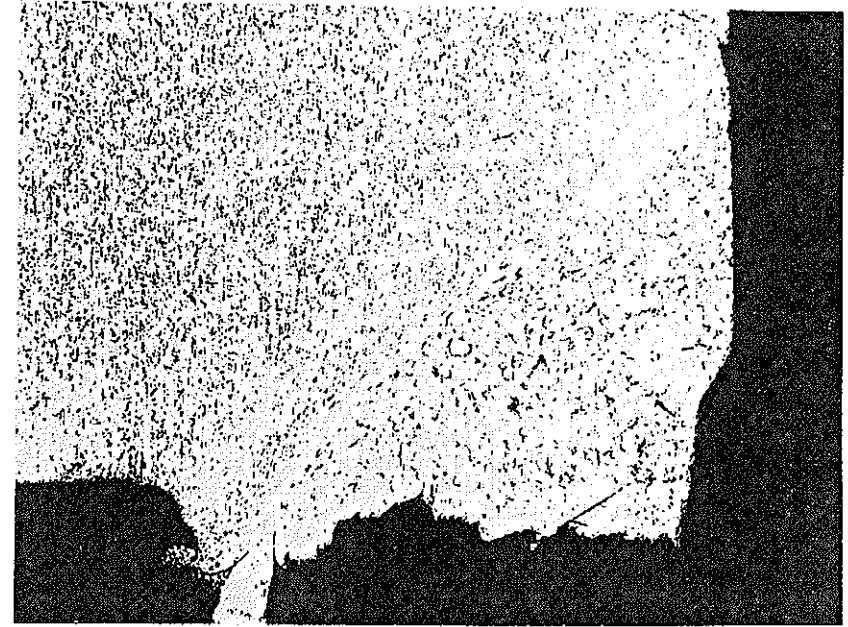
图-30 金相写真 (IDEFIX Production)

Last Weld DT 2906 1D 843



Met 79317

x 100



Met 79318

x 100

Welding Curve ED 843

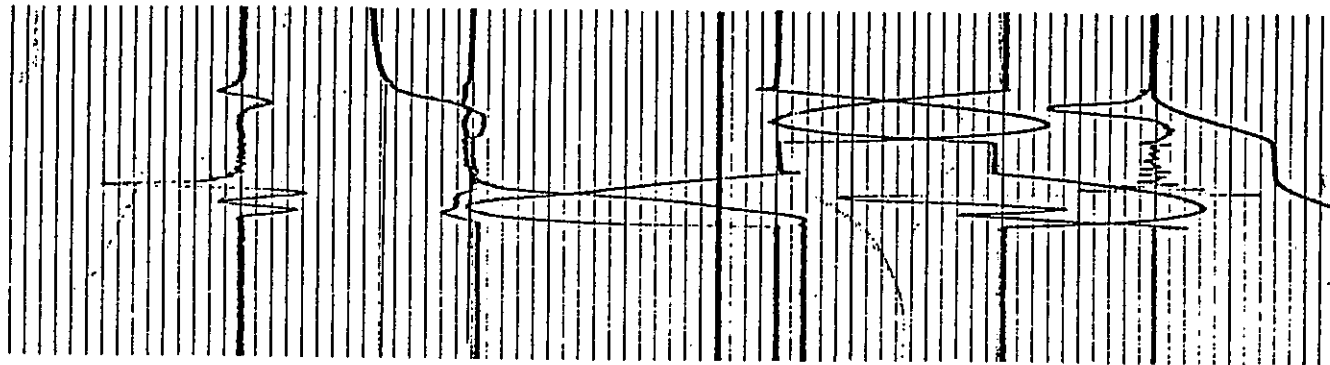


图-31 金相写真 (IDEFIX Production)

IDEFIX DY FIRST END PLUG WELD

Results of fatigue tests made before production

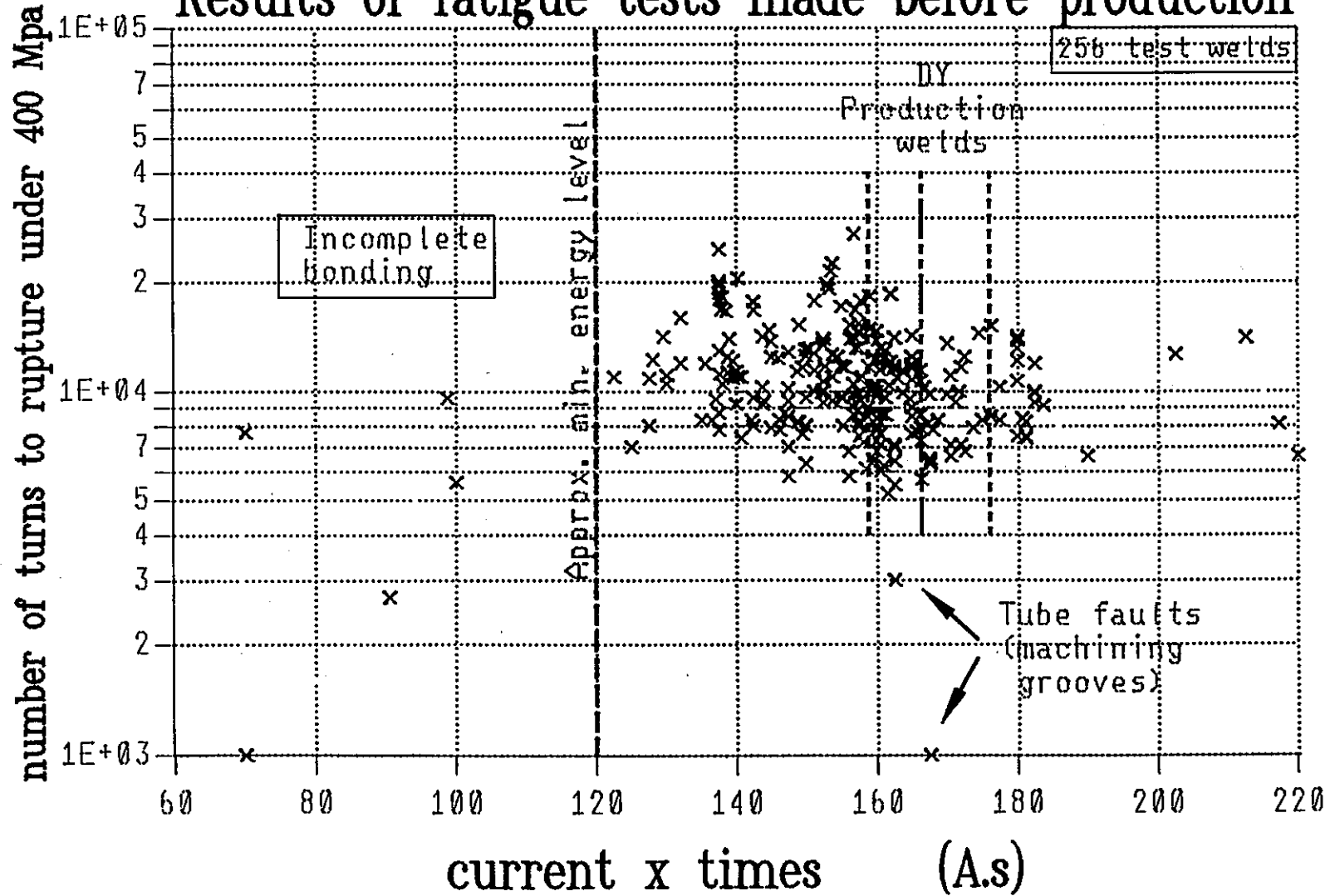


図-32 積算電流値 ($\int i dt$) と回転曲げ疲労強度の関係

IDEFIX DY FIRST END PLUG WELD

Primary voltage

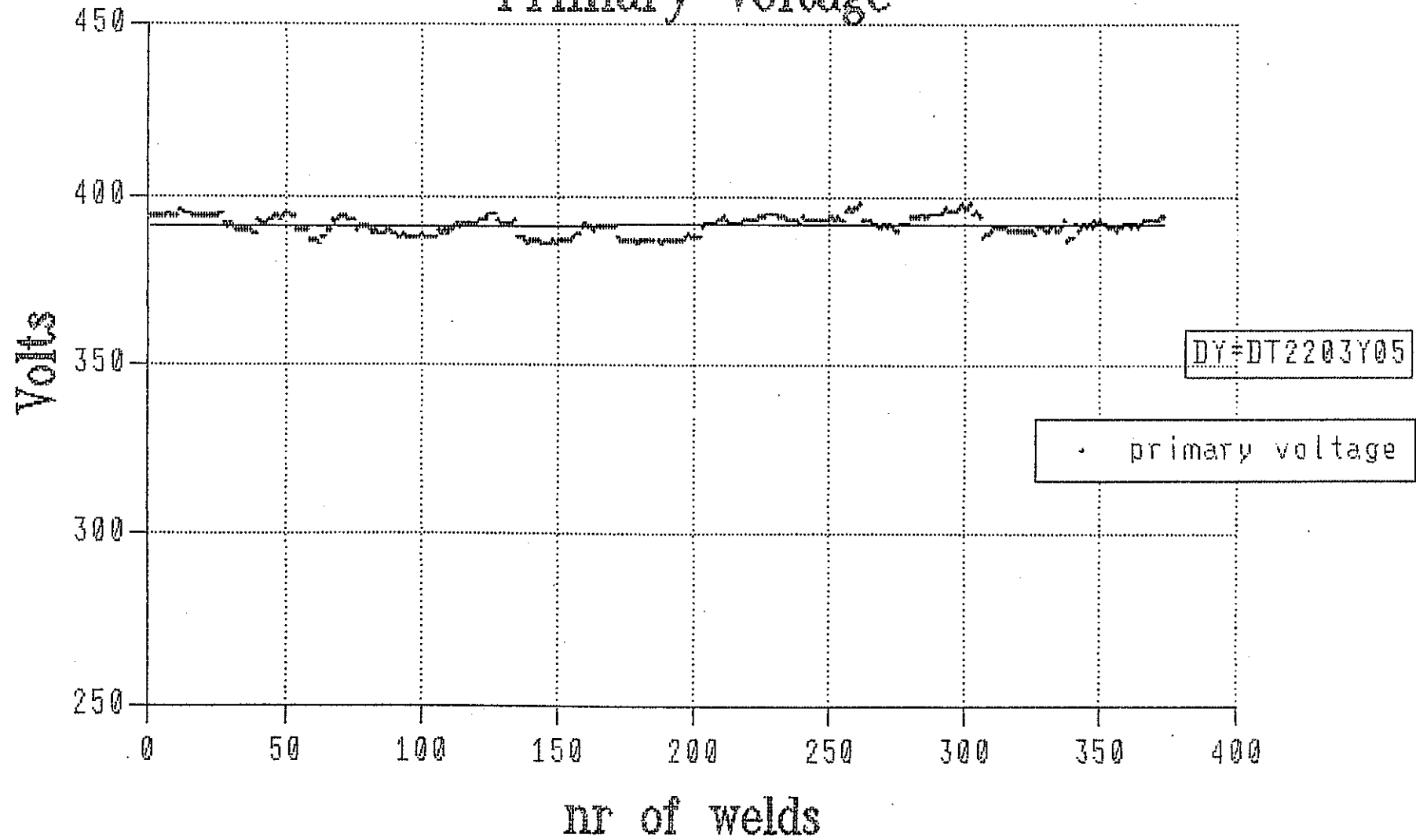
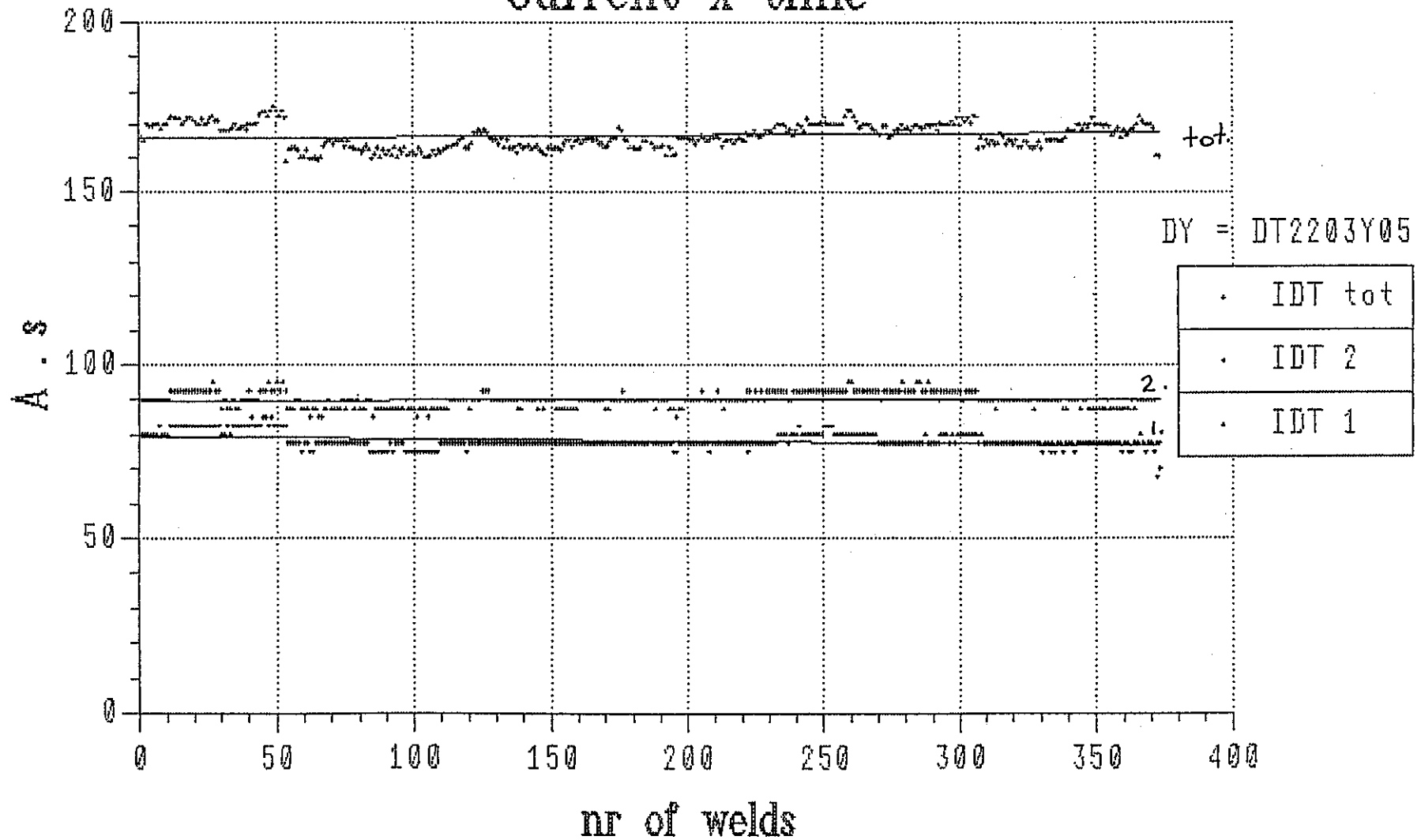


図-33 溶接にともなう電圧の変化

IDEFIX DY FIRST END PLUG WELD

Current x time

図-34 溶接にともなう積算電流値 ($\int idt$) の変化 (IDEFIX-DY 材第1端栓の溶接)

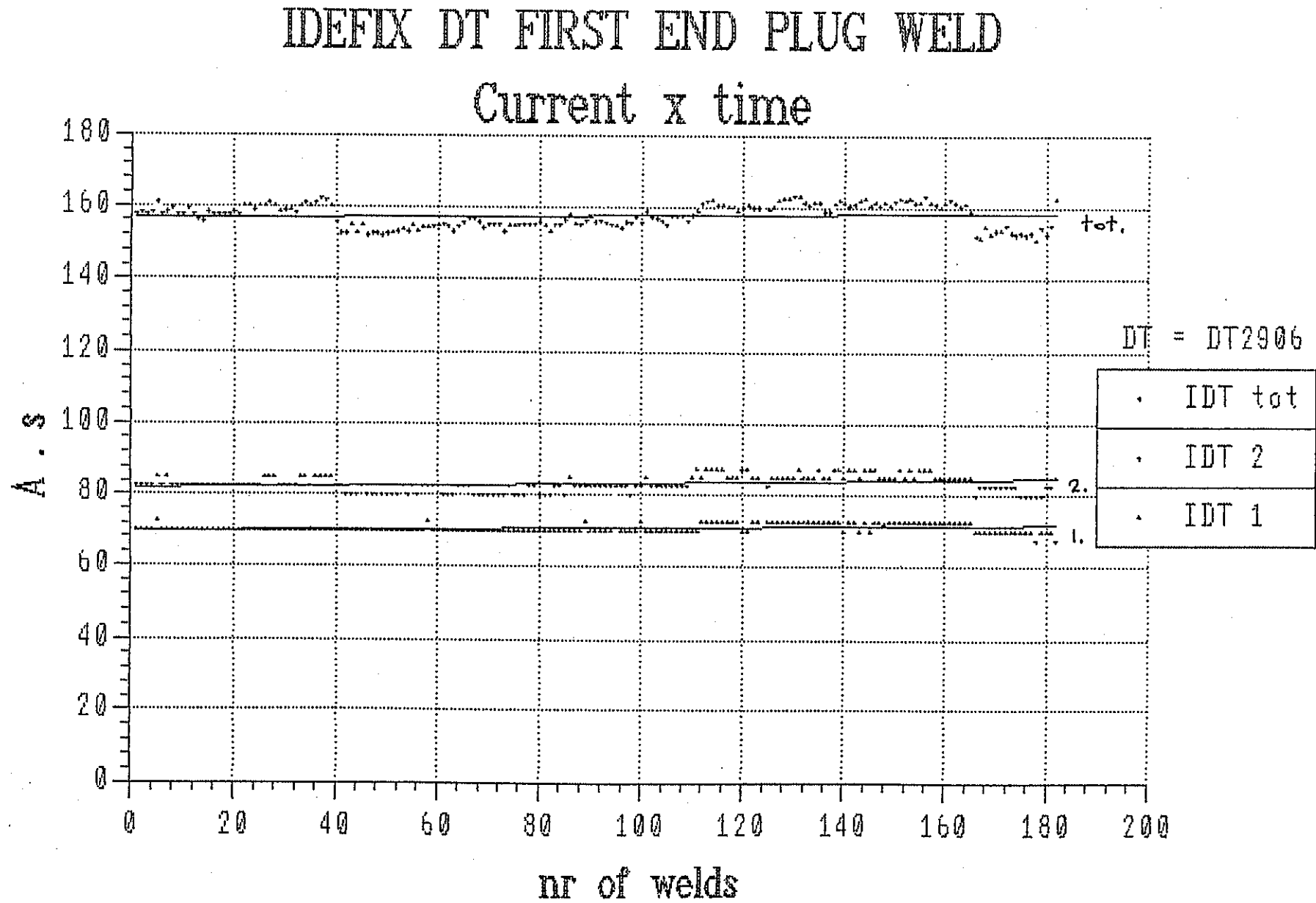
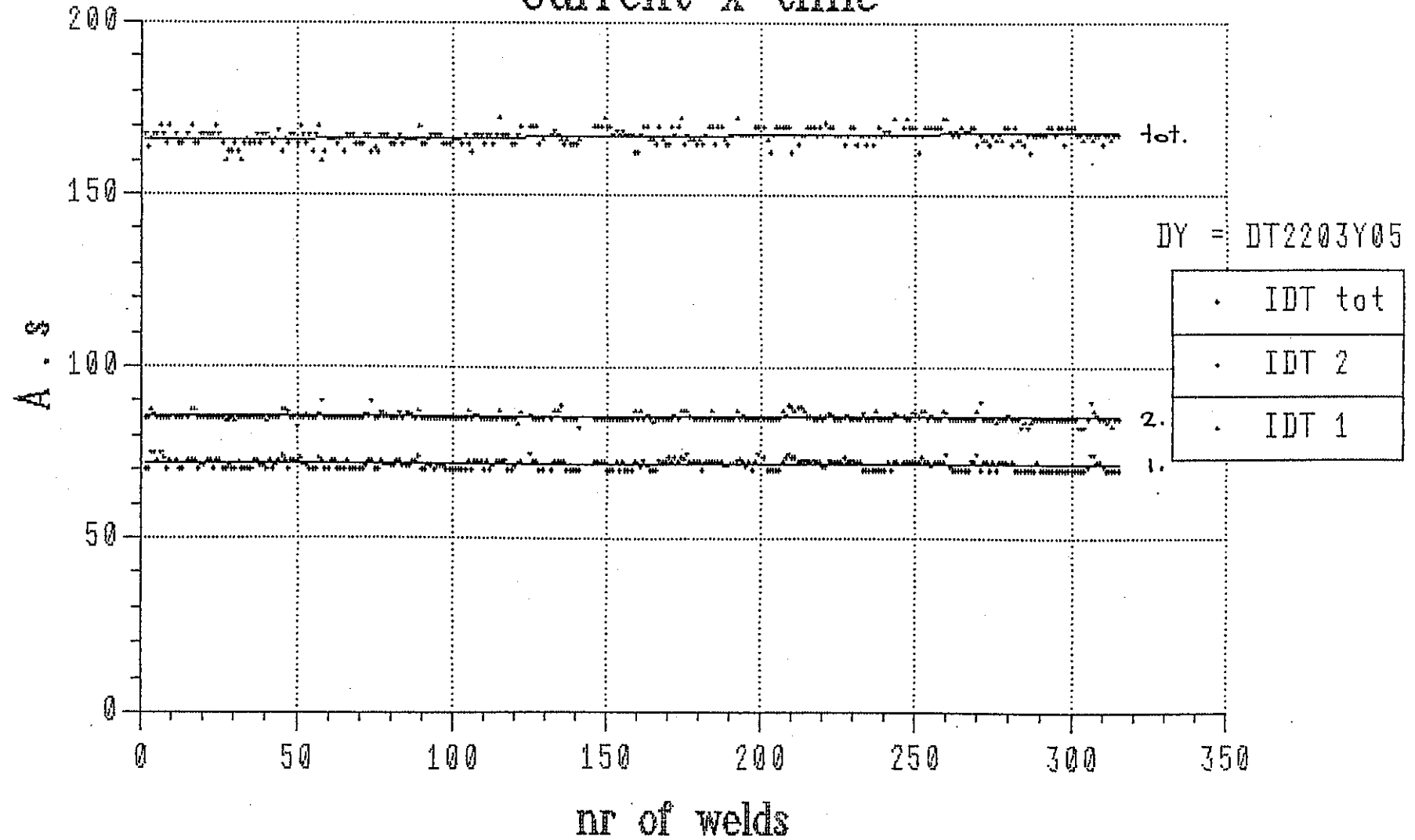


図-35 溶接にともなう積算電流値 ($\int idt$) の変化 (IDEFIX-DT 材第1端栓の溶接)

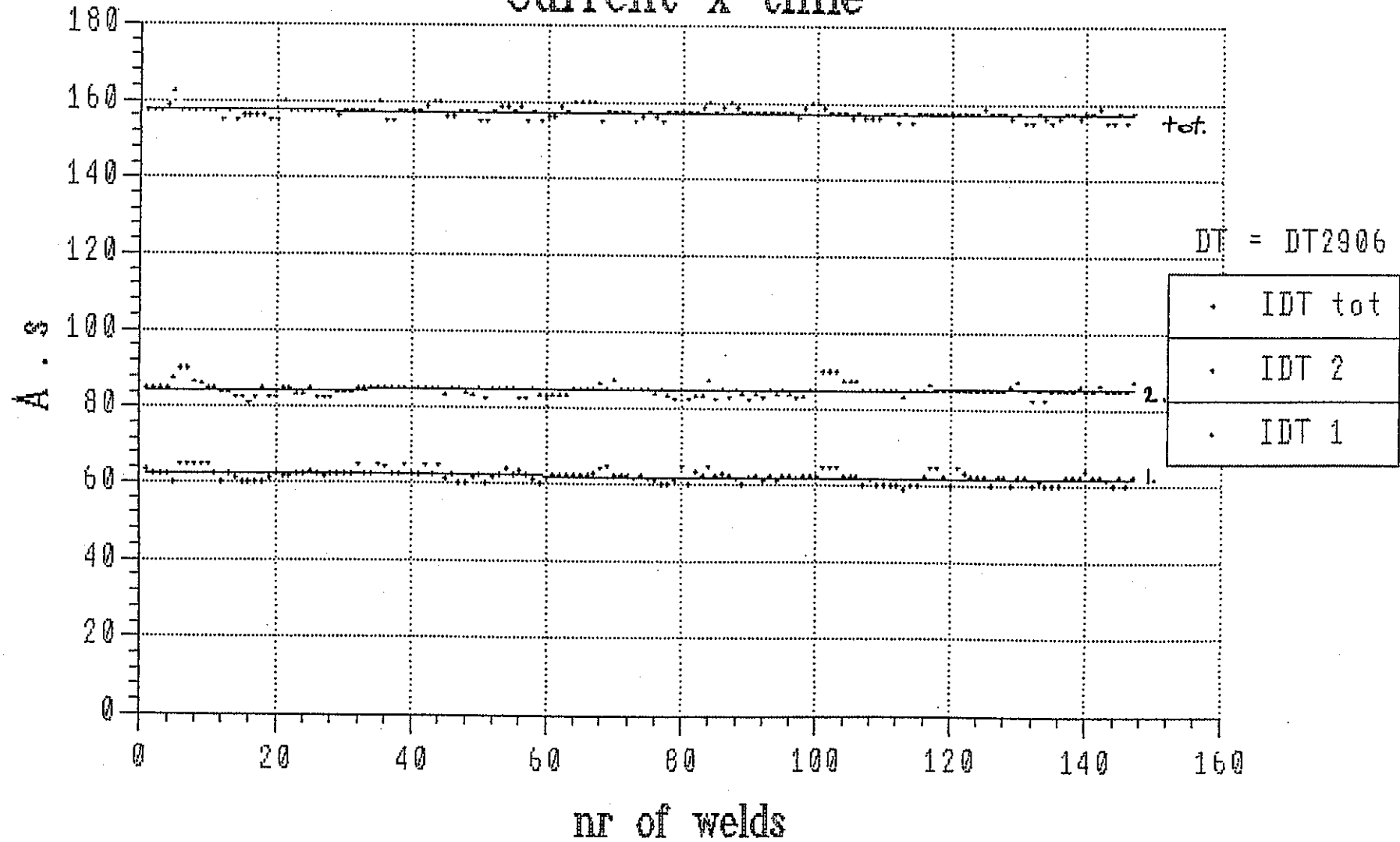
IDEFIX DY SECOND END PLUG WELD

Current x time

図-36 溶接にともなう積算電流値 ($\int idt$) の変化 (IDEFIX-DY 材第2端栓の溶接)

IDEFIX DT SECOND END PLUG WELD

Current x time

図-37 溶接にともなう積算電流値 (J_{idt}) の変化 (IDEFIX-DT 材第2端栓の溶接)

IDEFIX DY FIRST END PLUG WELD

displacement

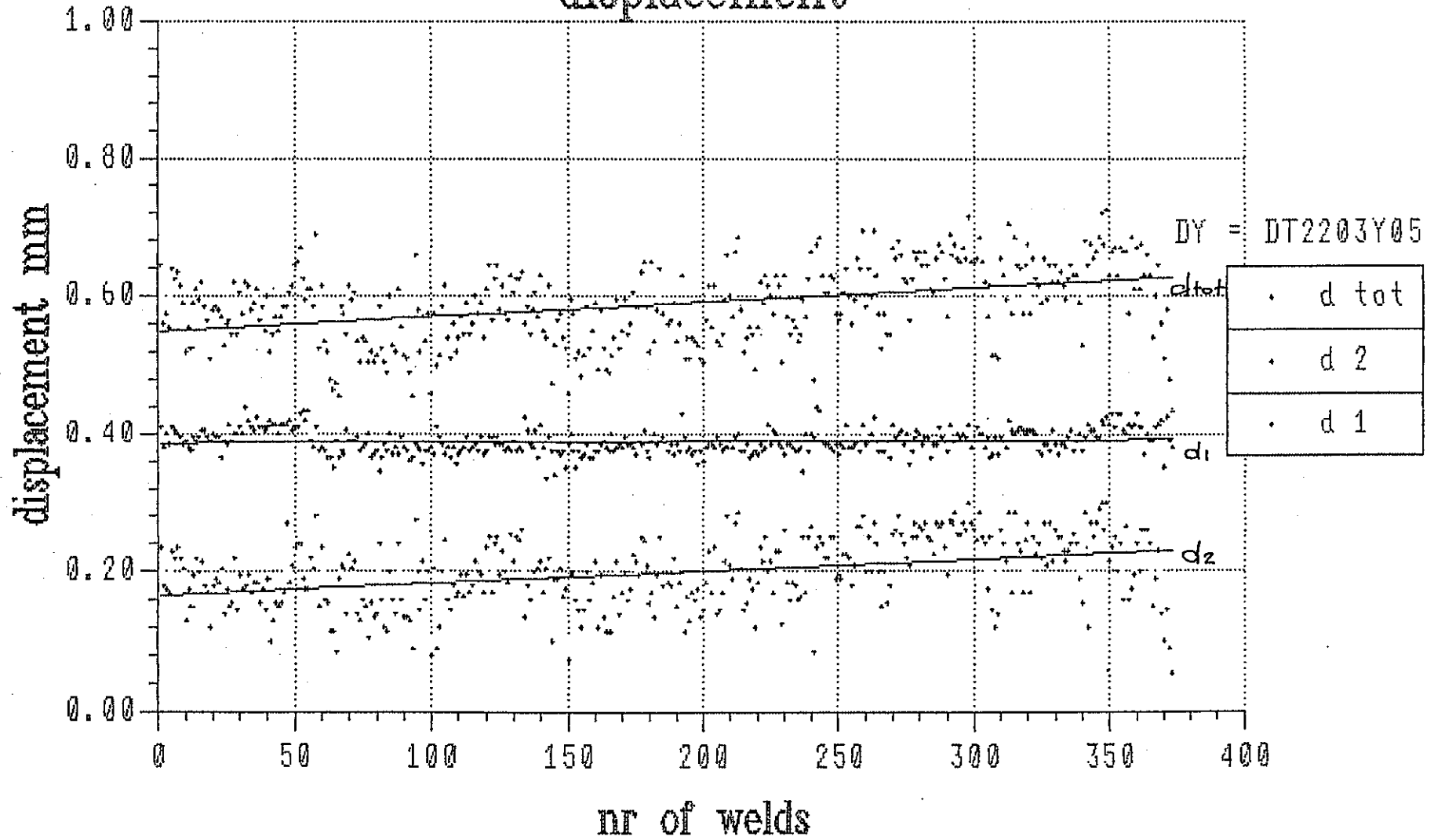


図-38 溶接にともなう変位の変化 (IDEFIX-DY 材第1端栓の溶接)

IDEFIX DT FIRST END PLUG WELD

displacement

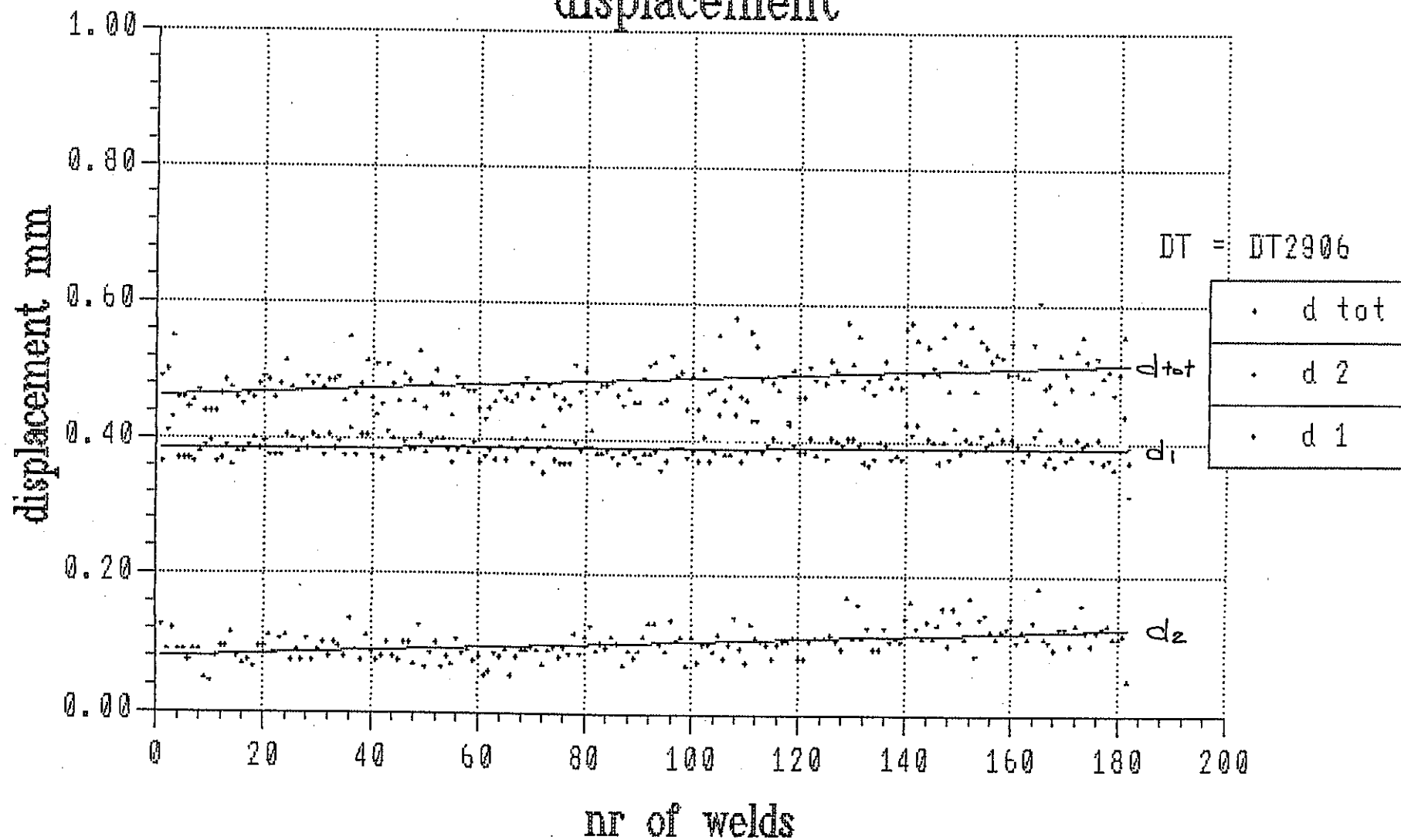


図-39 溶接にともなう変位の変化 (IDEFIX-DT 材第1端栓の溶接)

IDEFIX DY SECOND END PLUG WELD

displacement

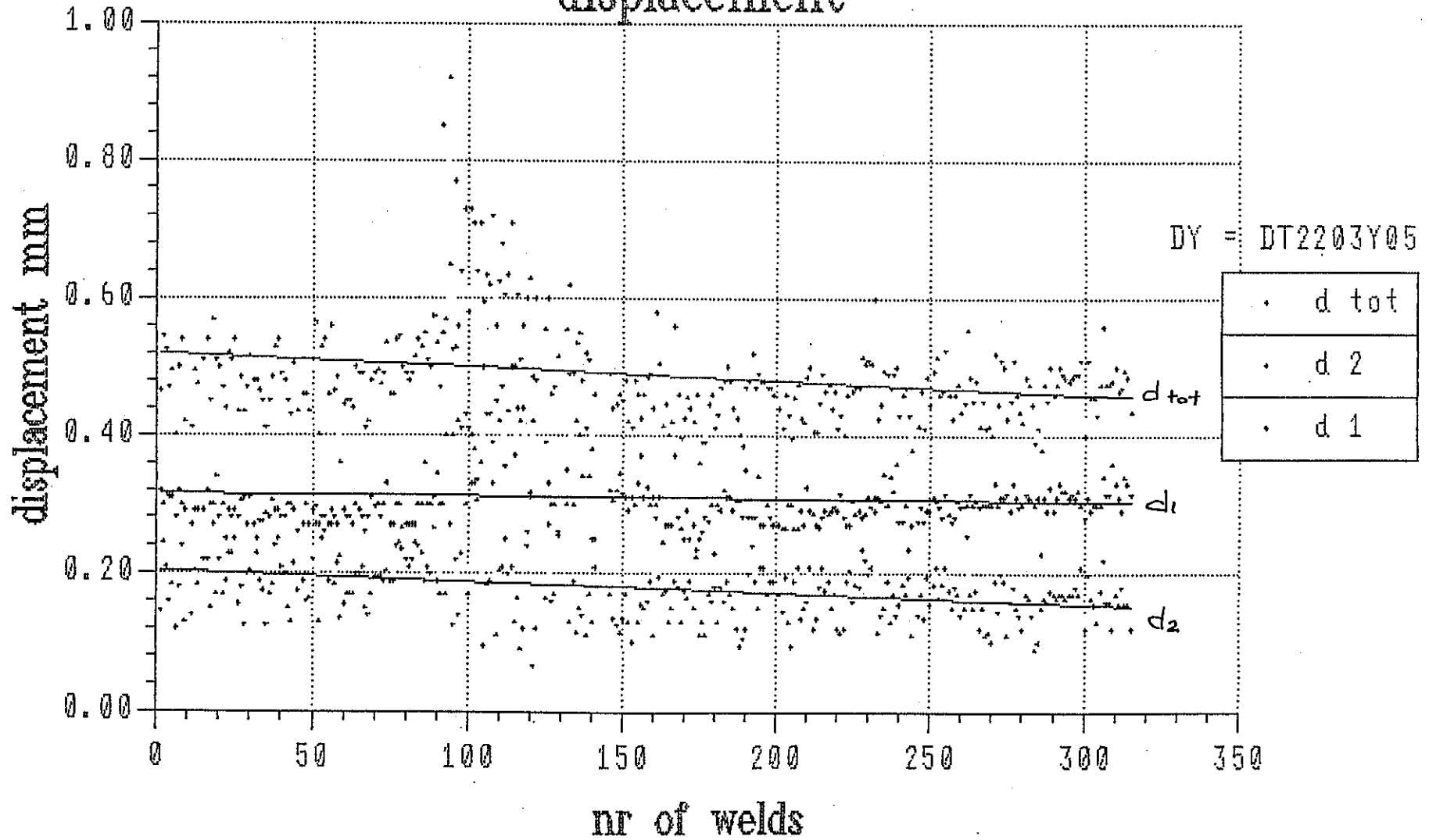


図-40 溶接にともなう変位の変化 (IDEFIX-DY 材第2端栓の溶接)

IDEFIX DT SECOND END PLUG WELD

displacement

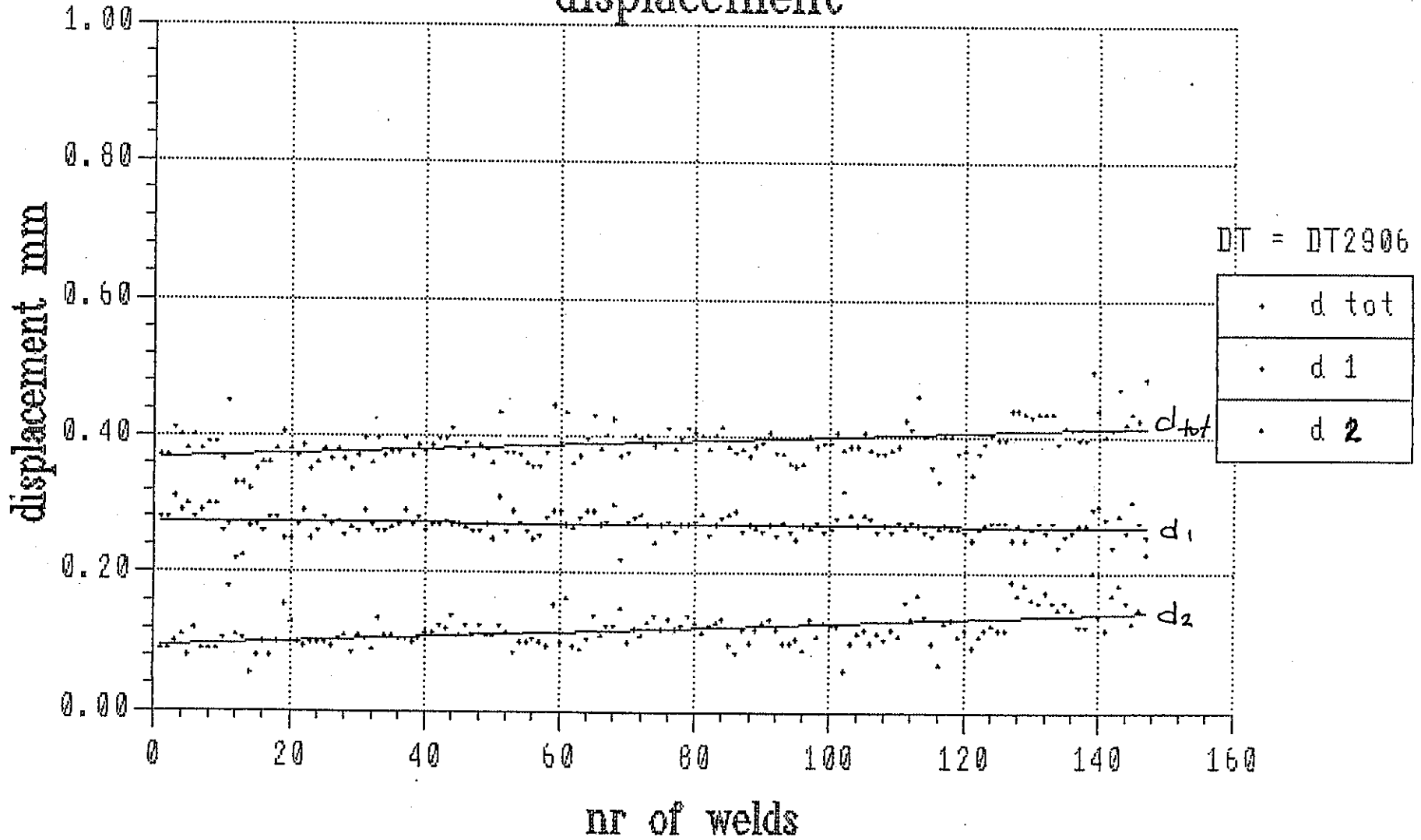
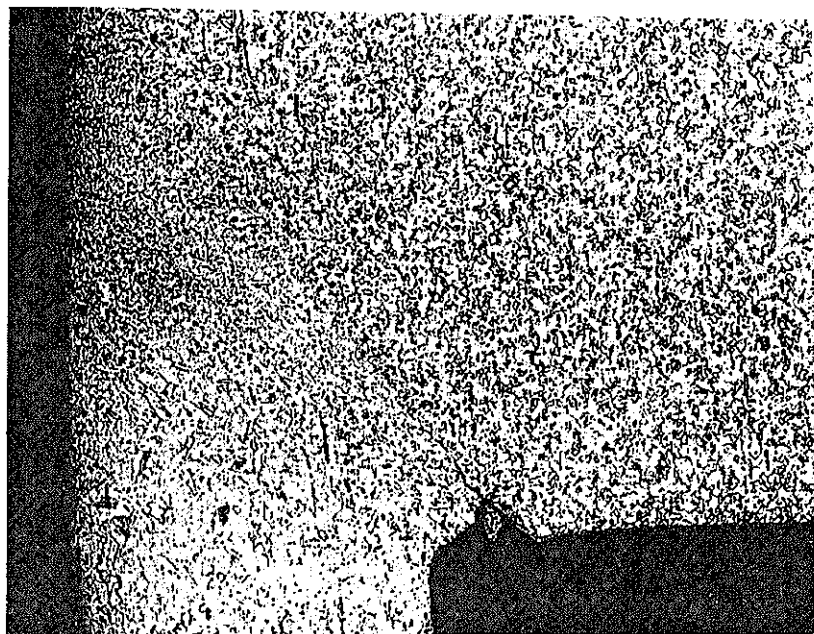
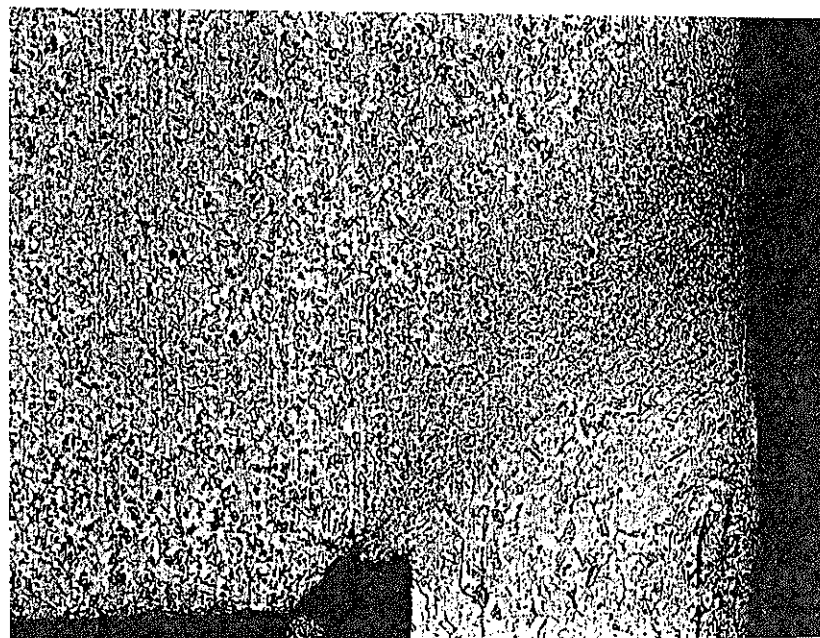


図-41 溶接にともなう変位の変化 (IDEFIX-DT 材第2端栓の溶接)



Met 70034



Met 70035

図-42 金相写真 (FARADET-Quarification Weld)

Weld n ° F64 (b)



SCH 16173
SCH 16177

x 80
x 800



SCH 16174
SCH 16178

x 80
x 800

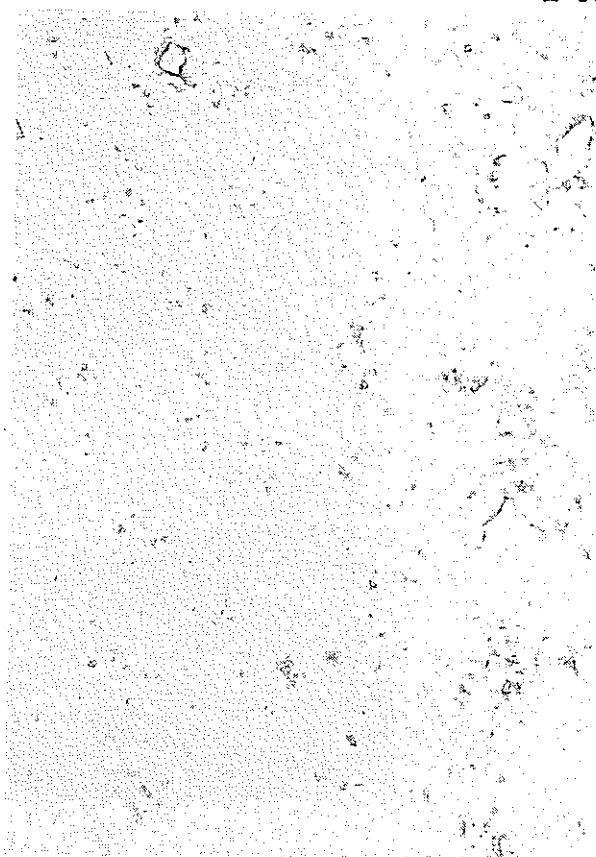
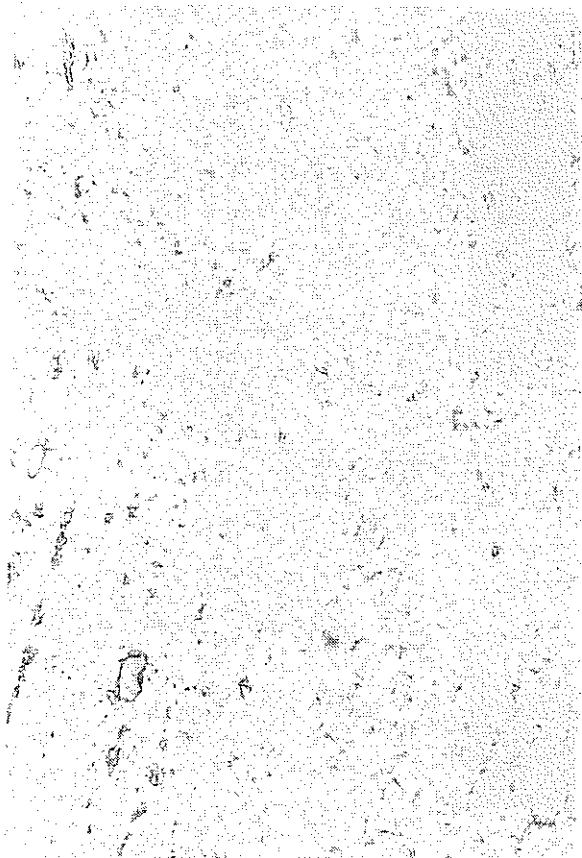
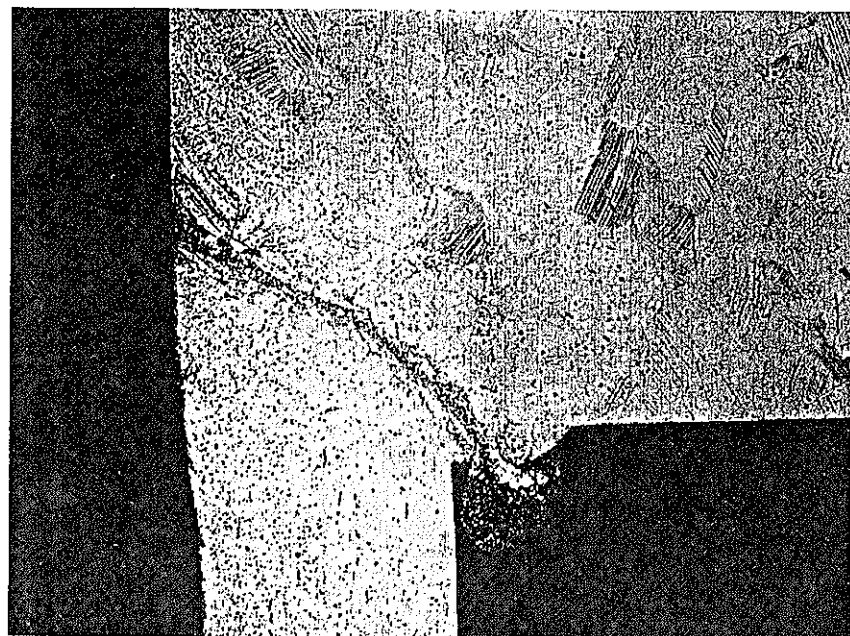
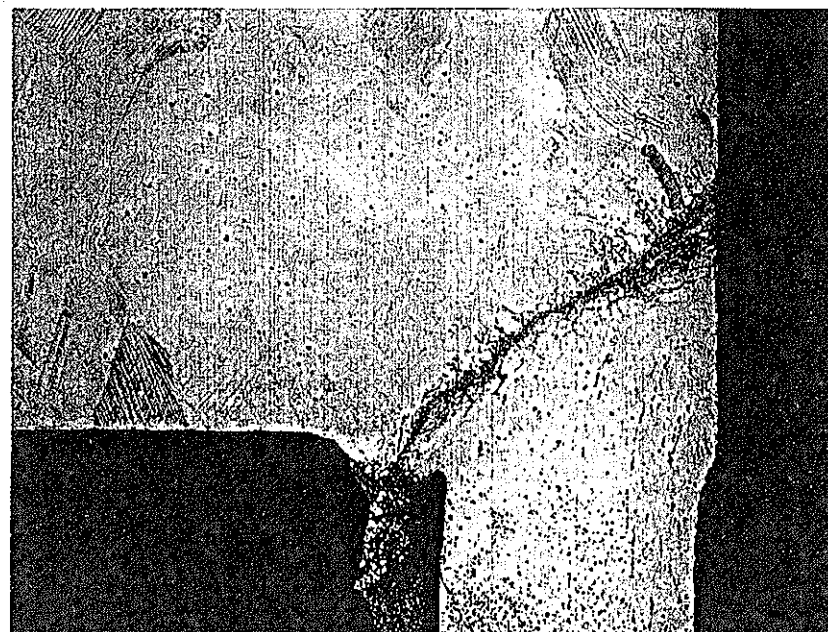


图-43 金相写真 (PARADET-Fabrication Sample)

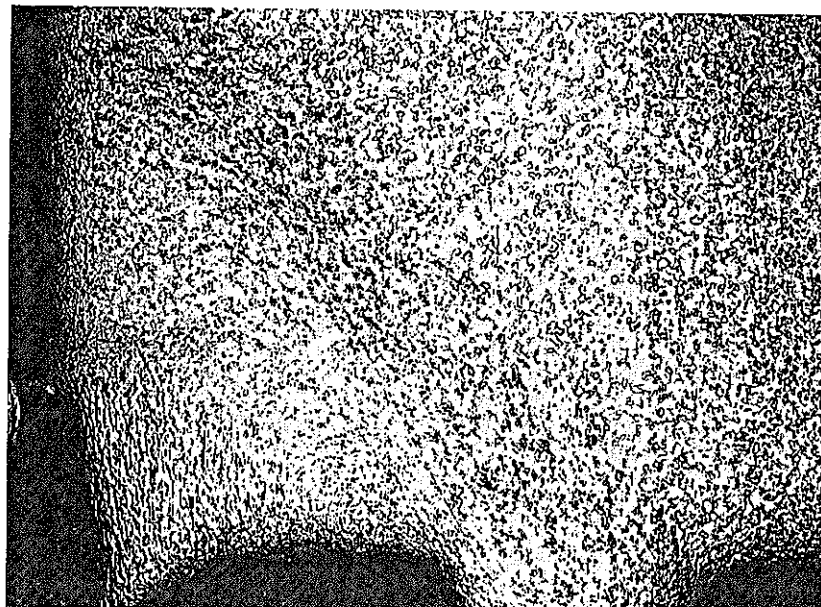


Met 68184

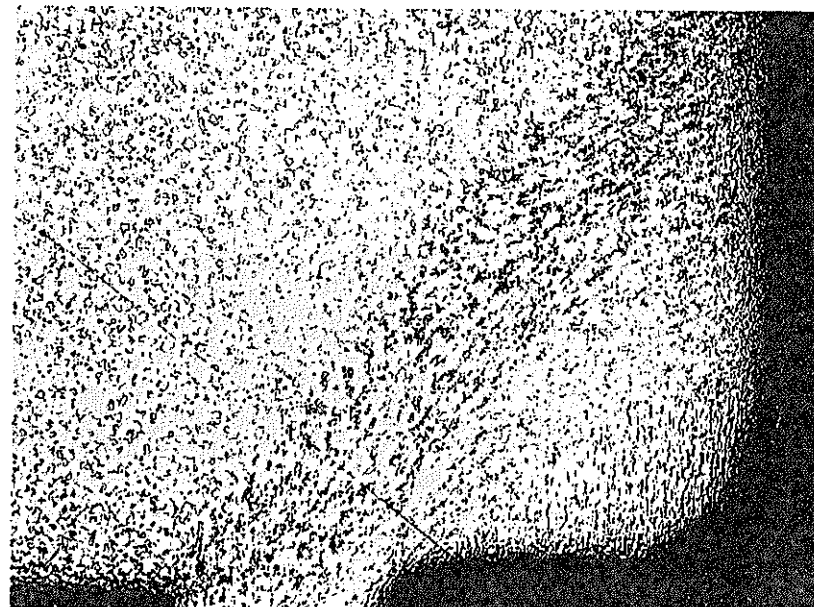


Met 68185

図-44 金相写真 (OPTIMIX Test Weld)

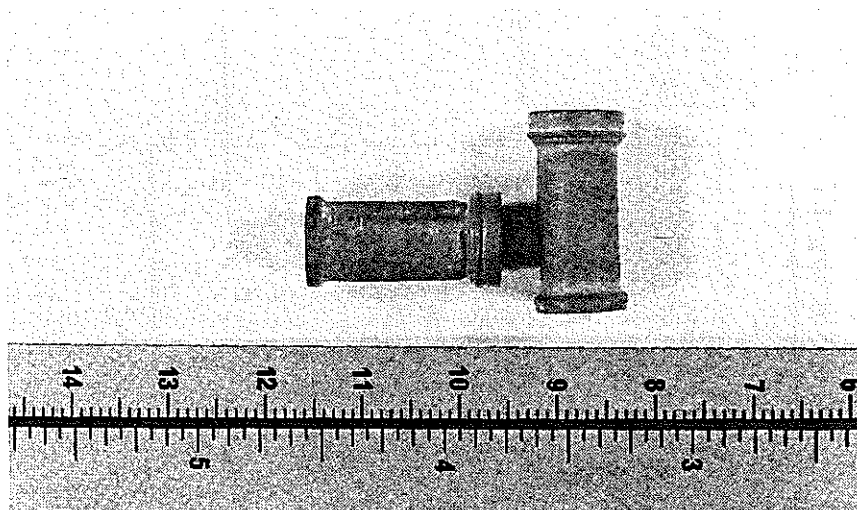


Met 71272



Met 71273

图-45 金相写真 (CRAZY Production Control Weld)



SCH 2035

図-46 ヒップ試験用の加圧カプセル

FIGURE 46 : Example of the Versatility of Resistance Welding
Tantalum Capsules Filled with Ceramic and Fine Powder after Hipping

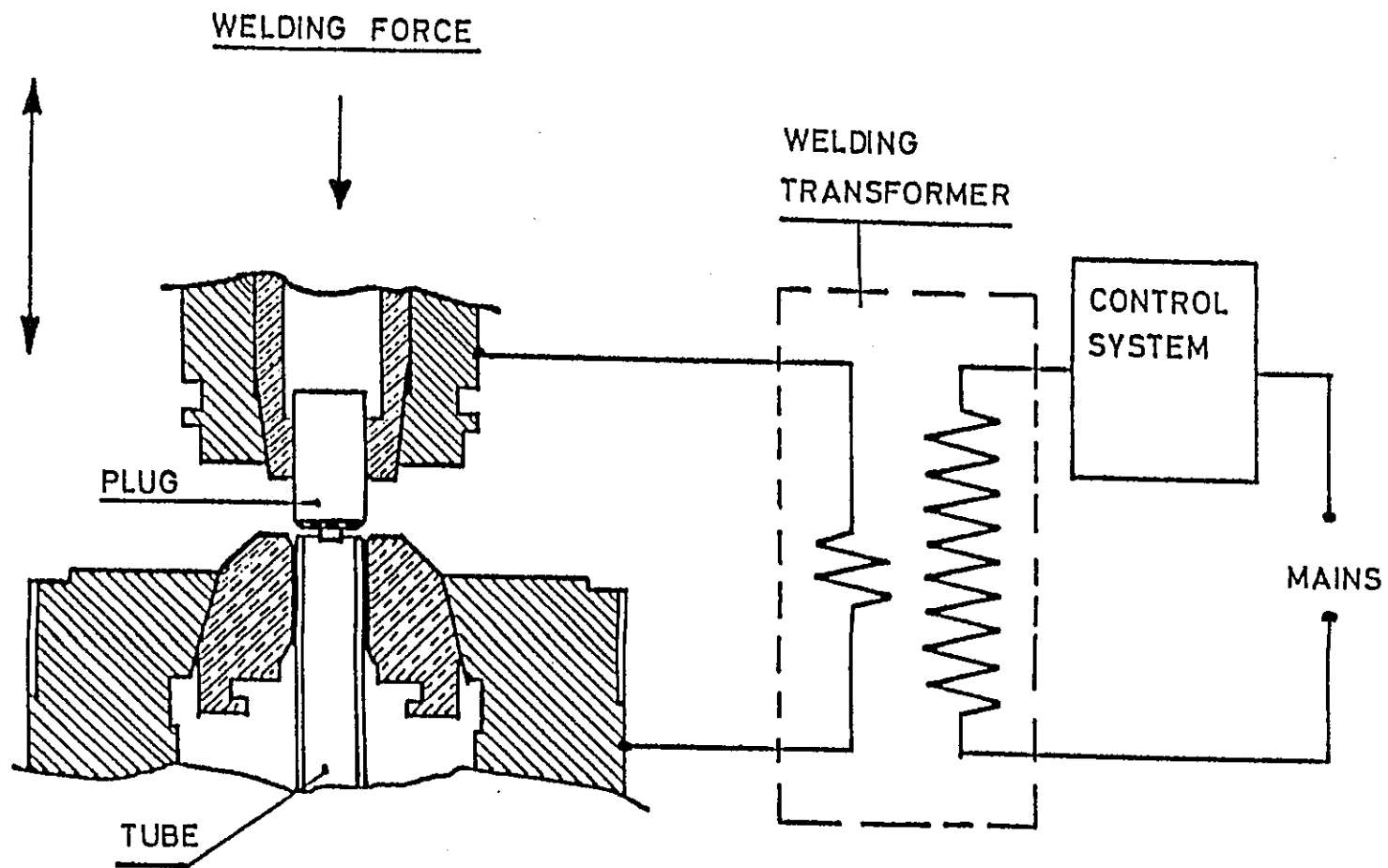


図-47 抵抗溶接装置の簡単な回路図

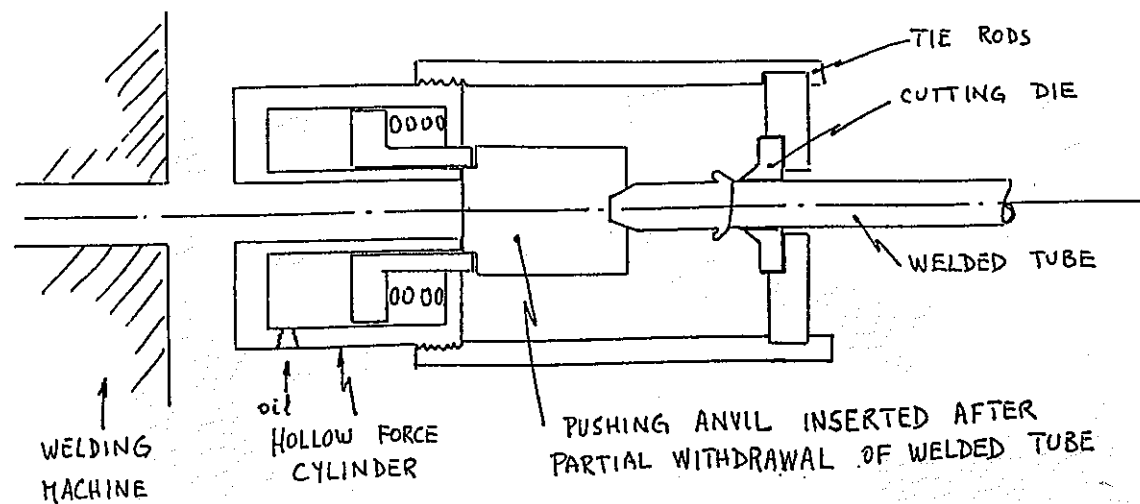


図-48 バリ取り装置の機構

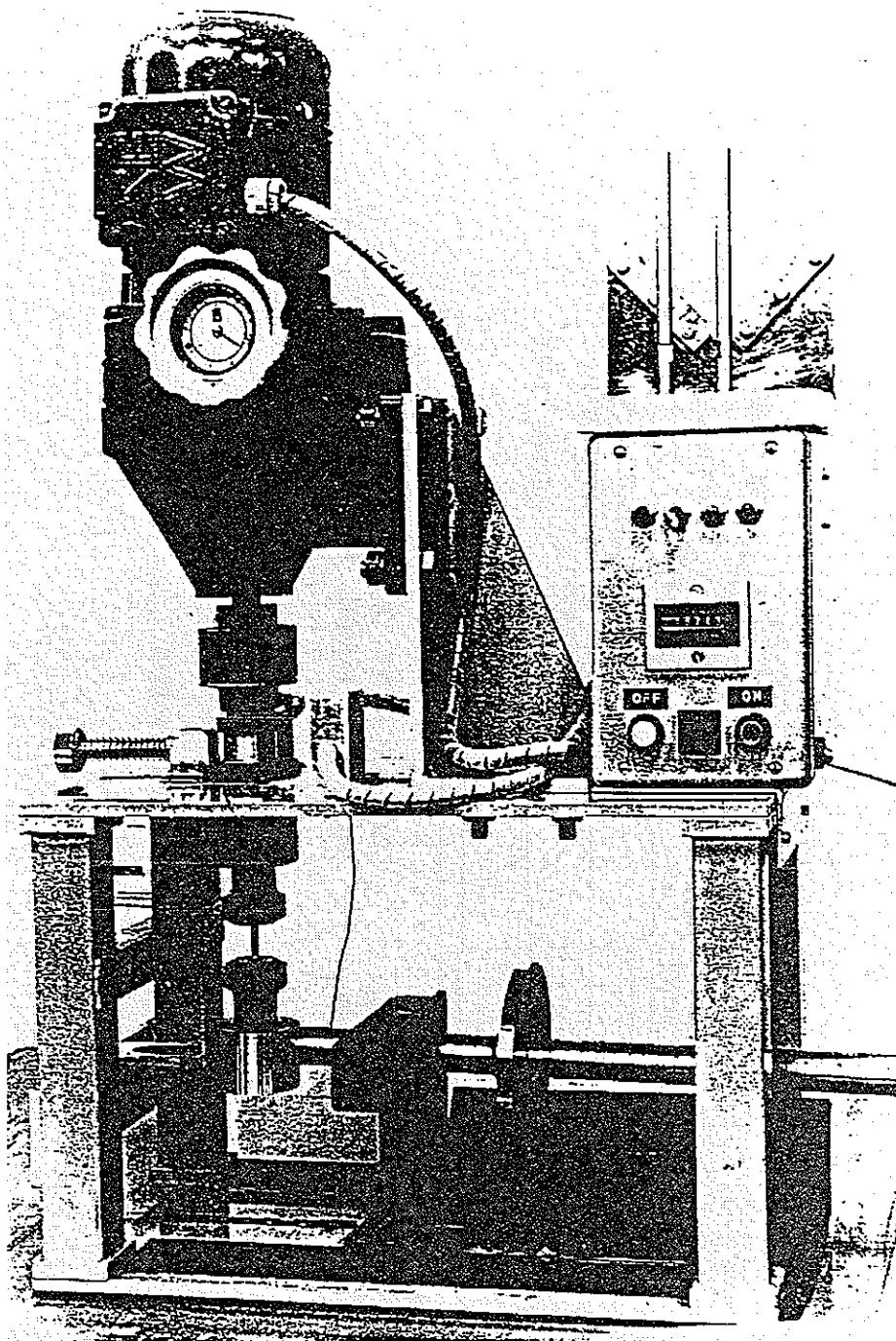


図-49 回転曲げ疲労試験装置

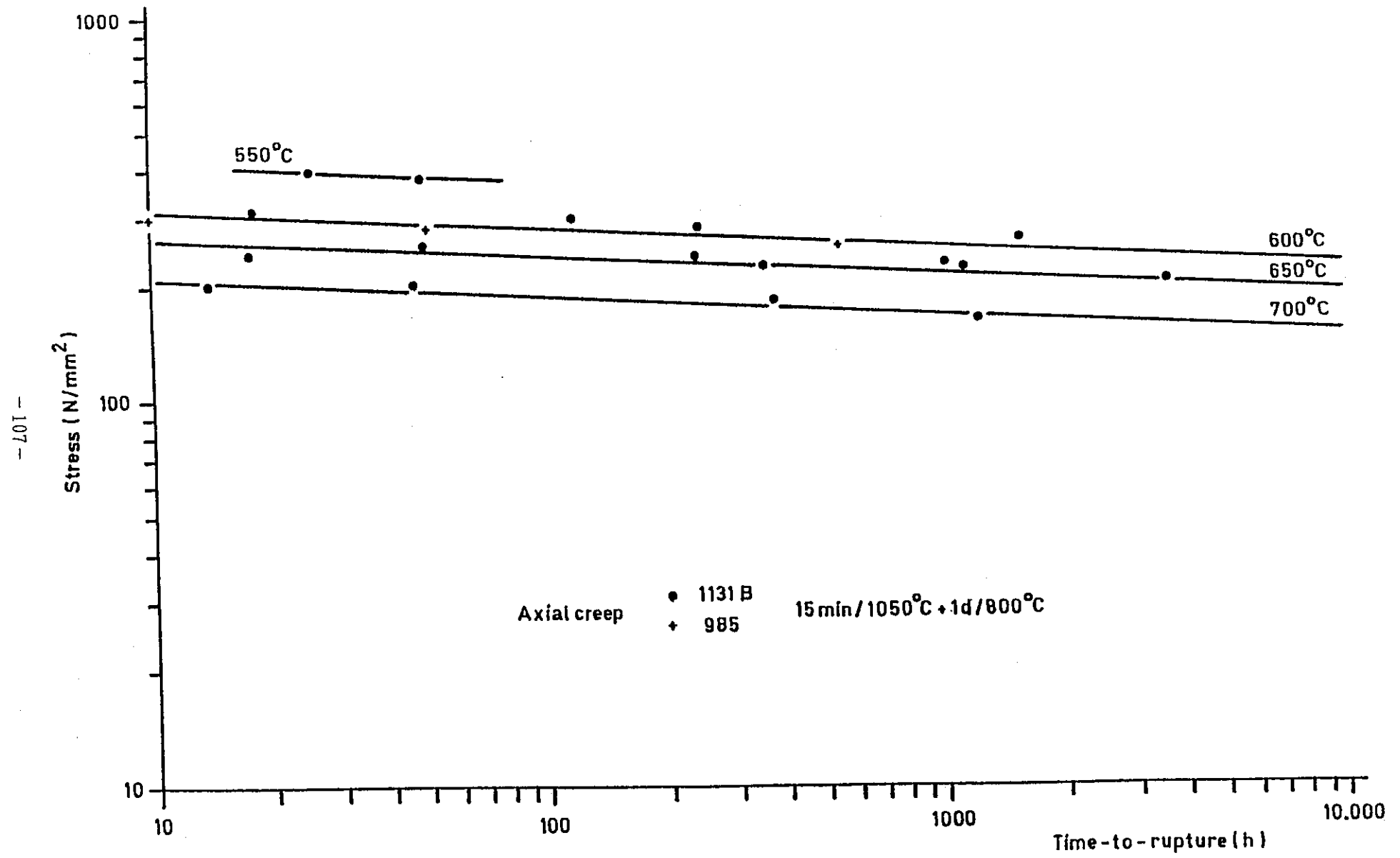


図-50 単軸クリープ強度 (DT2203Y05 材)

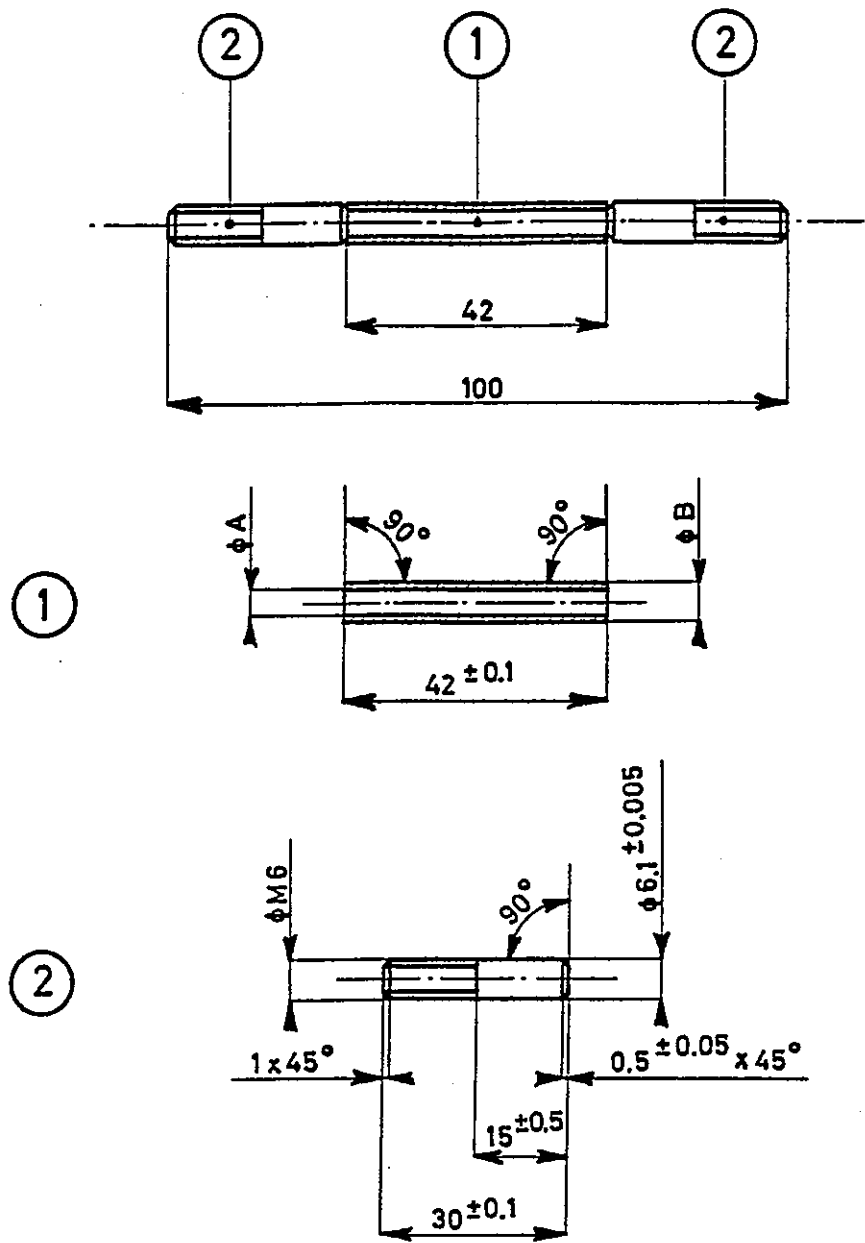
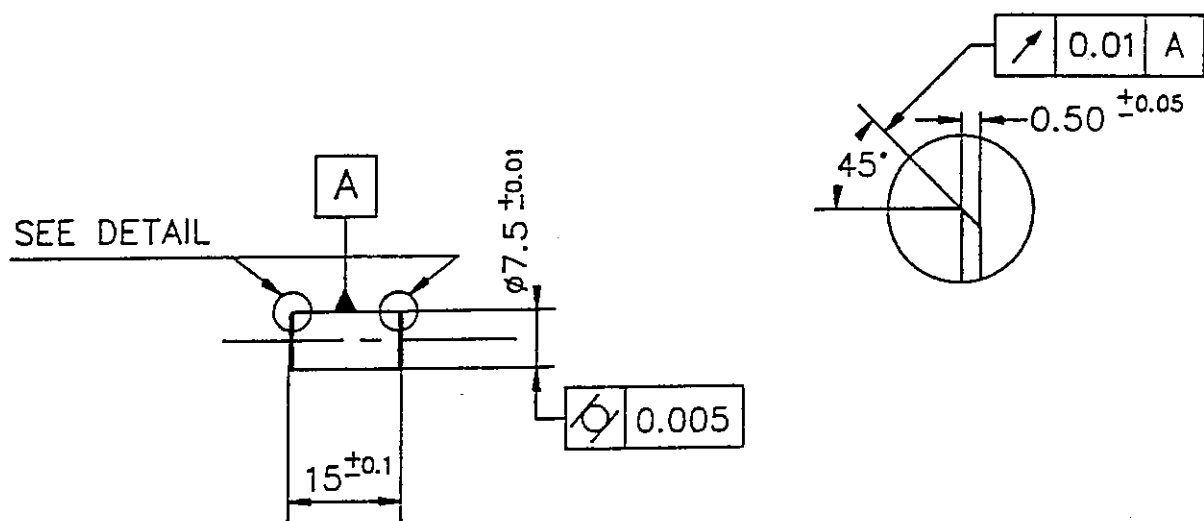
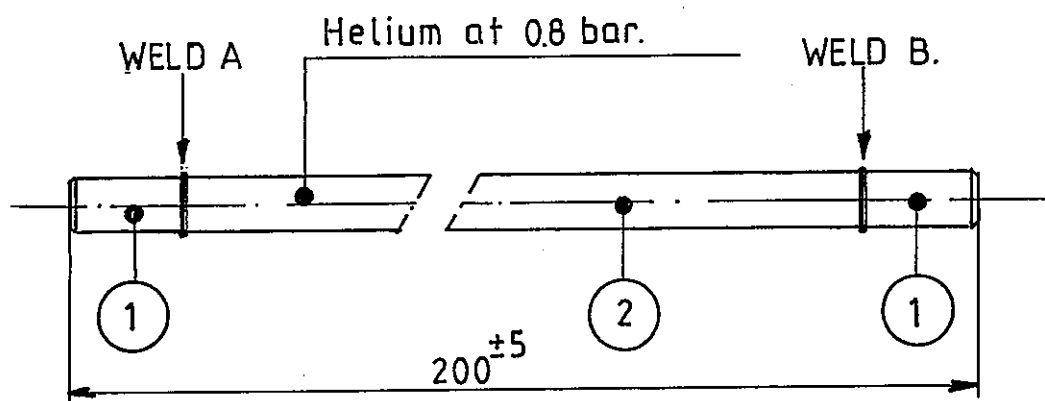


図-51 クリープ試験片



MATERIAL: 11Cr STAINLESS STEEL
SURFACE ROUGHNESS: N6

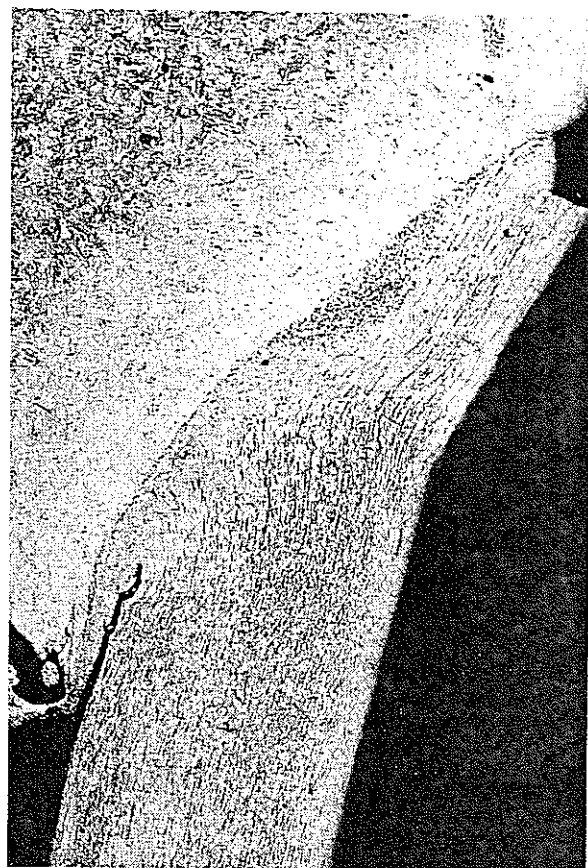
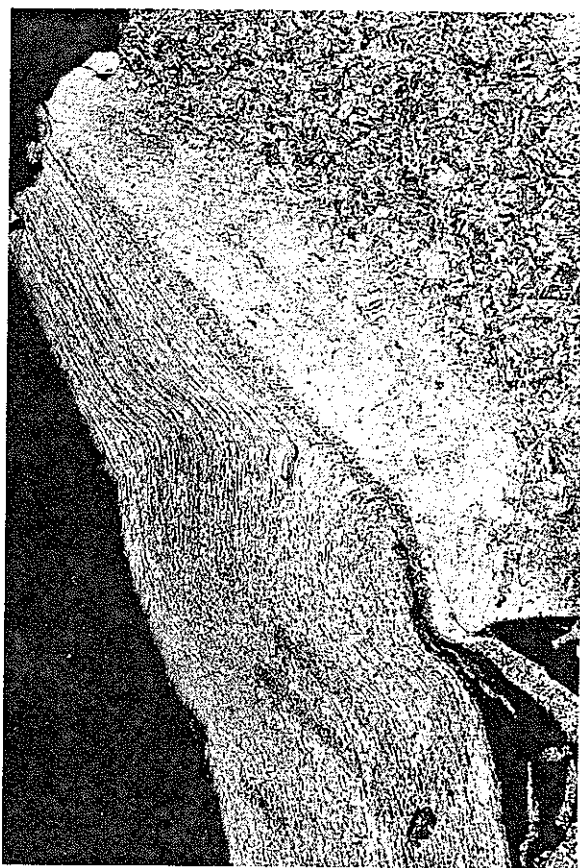


- ① End plug : see drawing n° 314.54.25.0069.
- ② Tube $\phi 7.5 / \phi 6.7$: 11 Cr stainless steel or ODS.

Weld A : welding burr removed at $\phi 7.7$

Weld B : welding burr not removed.

図-52 端栓と被覆管の形状

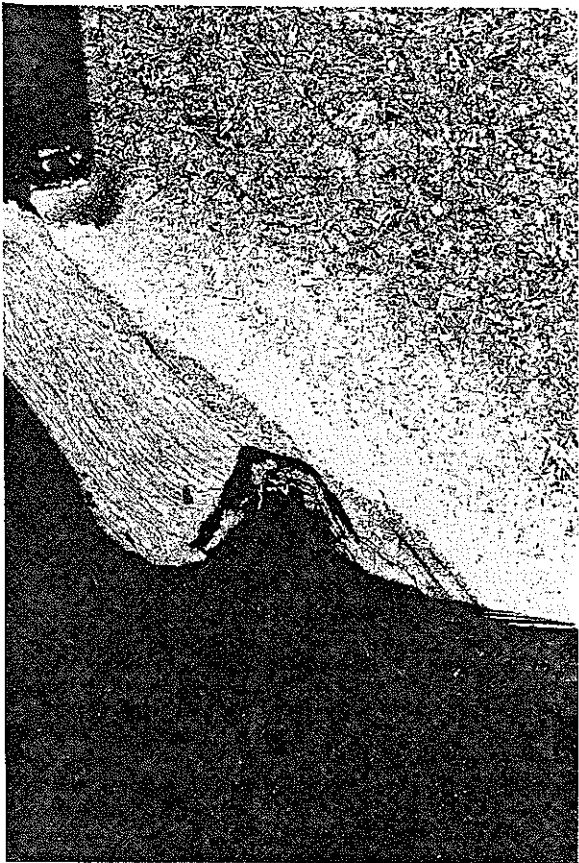


X 100



X 500

图-53 金相写真 (M32(a))

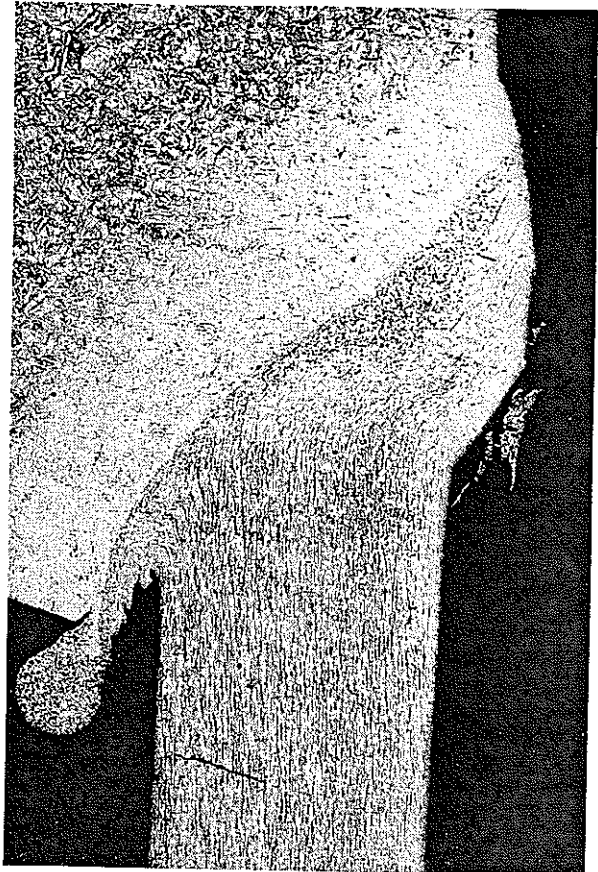


X 100

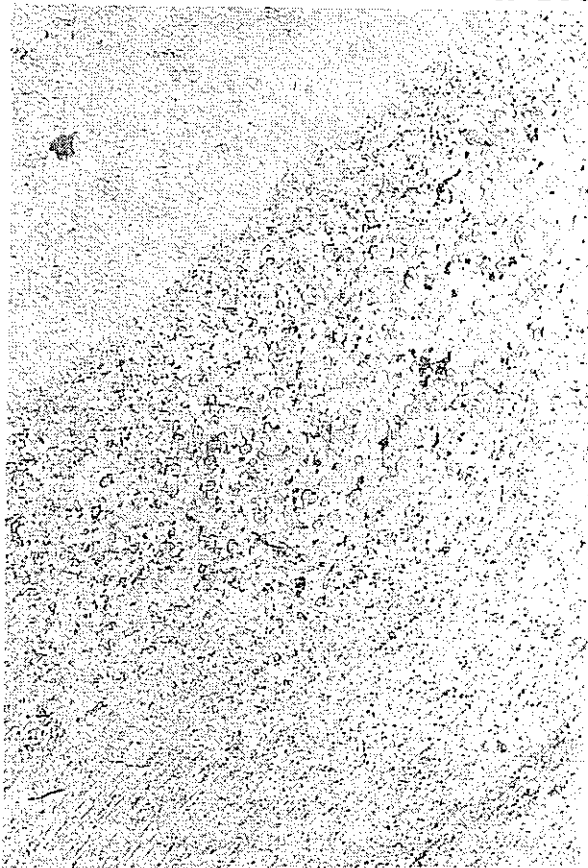


X 500

图-54 金相写真 (M32(b))

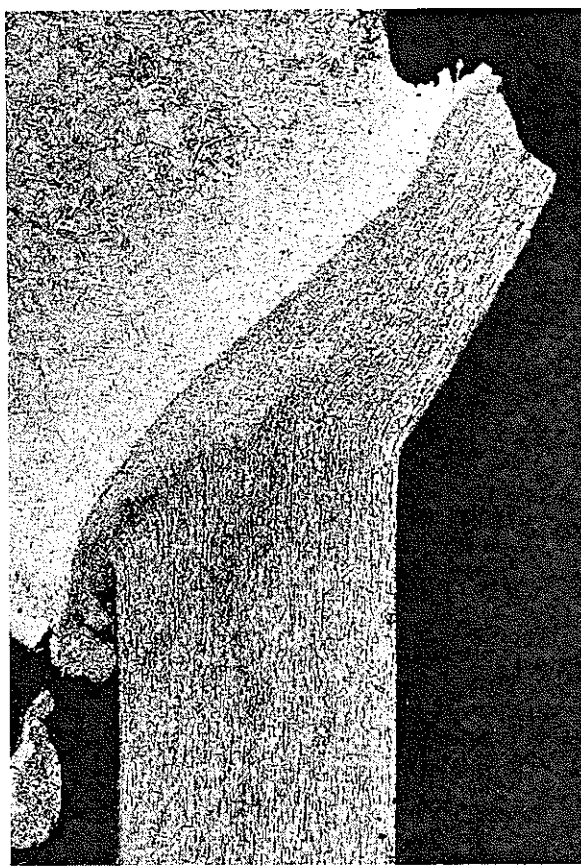


X 100

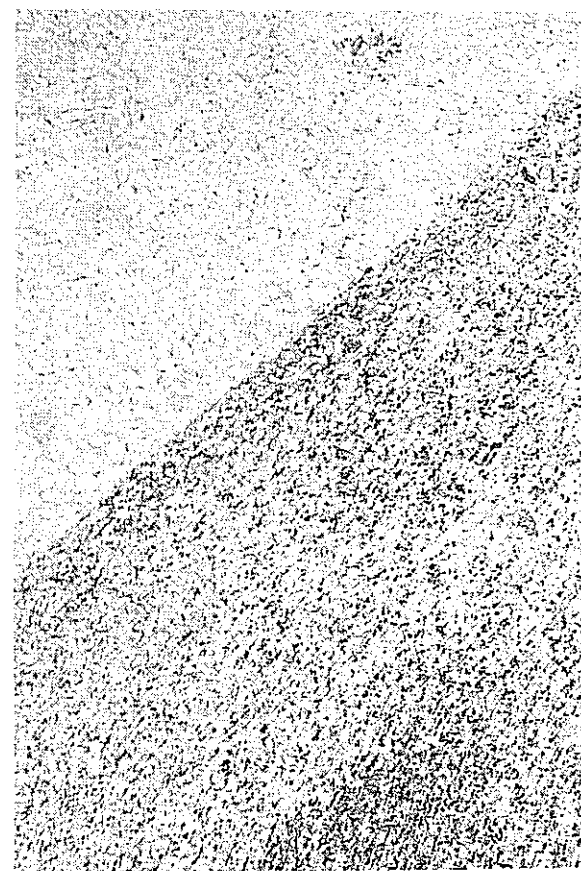


X 500

图-55 金相写真 (M33(a))

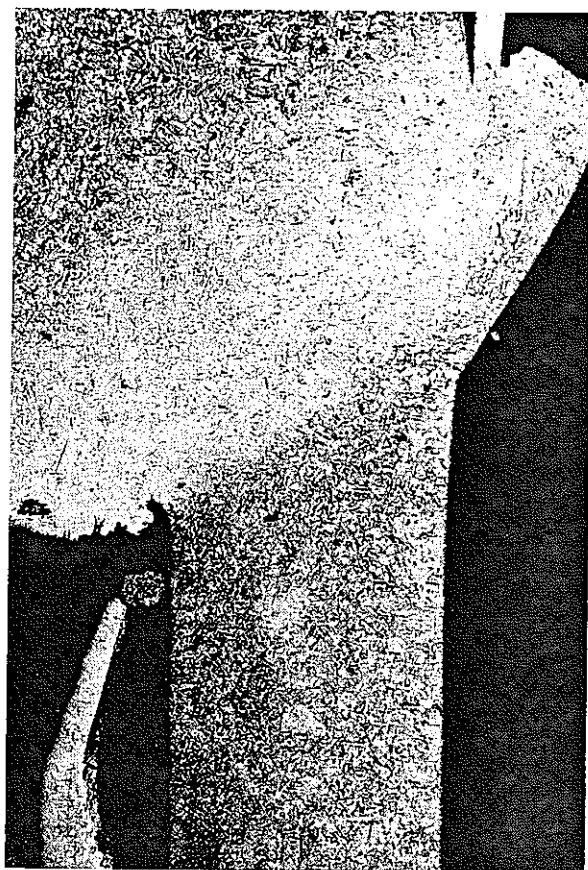


X 100

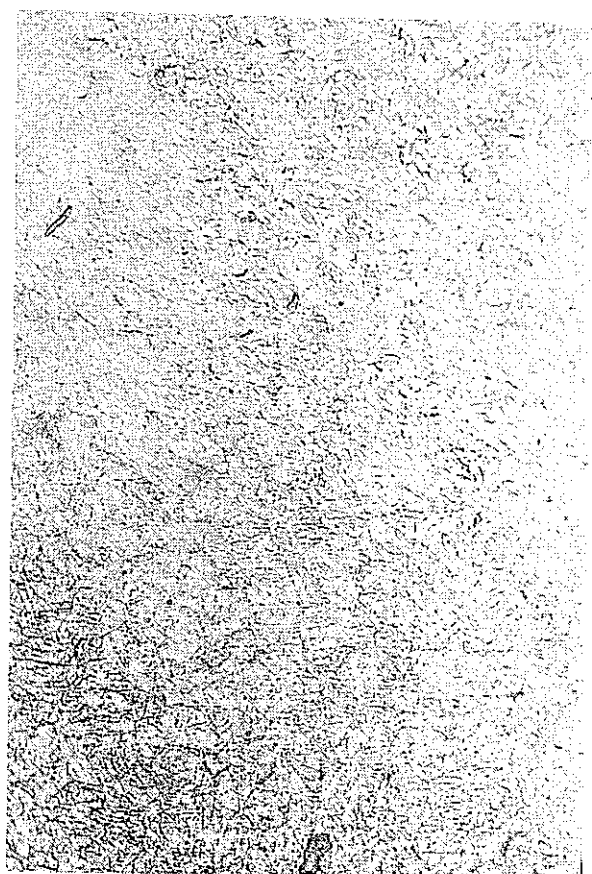


X 500

図-56 金相写真 (M33(b))

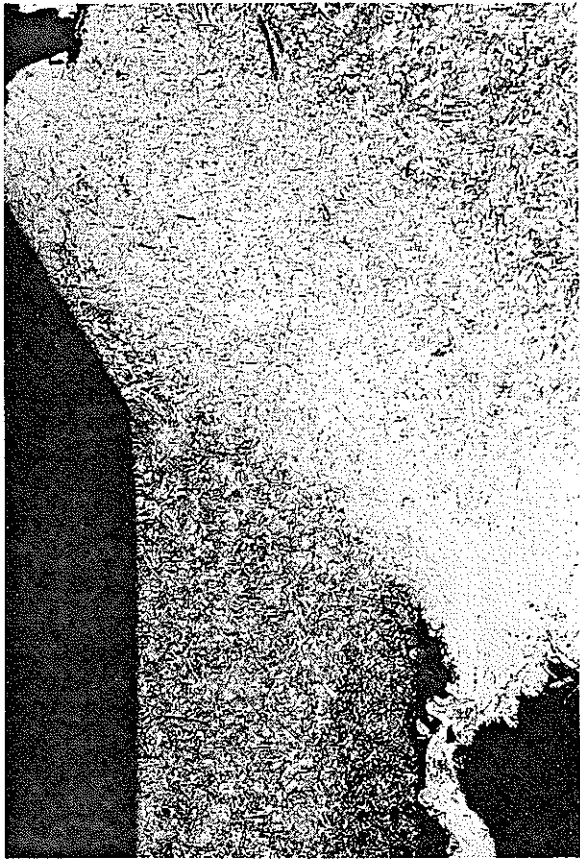


X 100

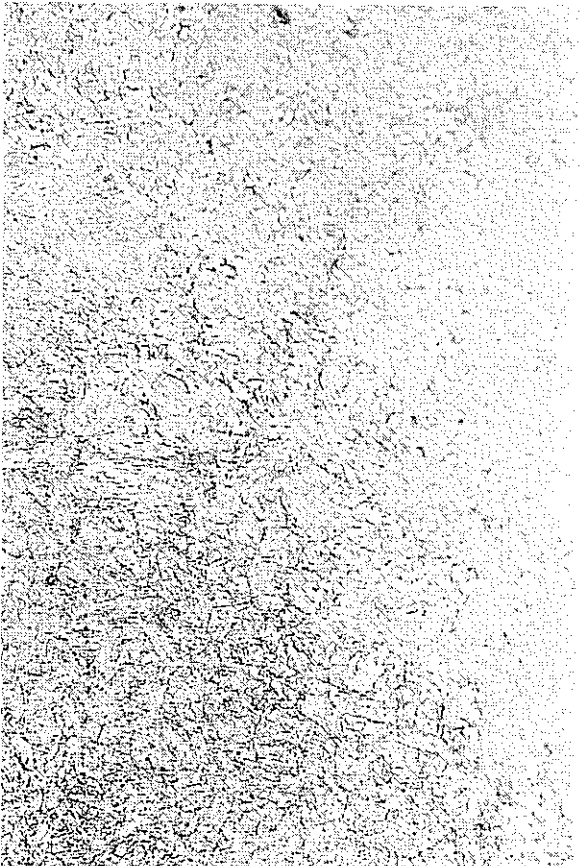


X 500

图-57 金相写真 (M39(a))

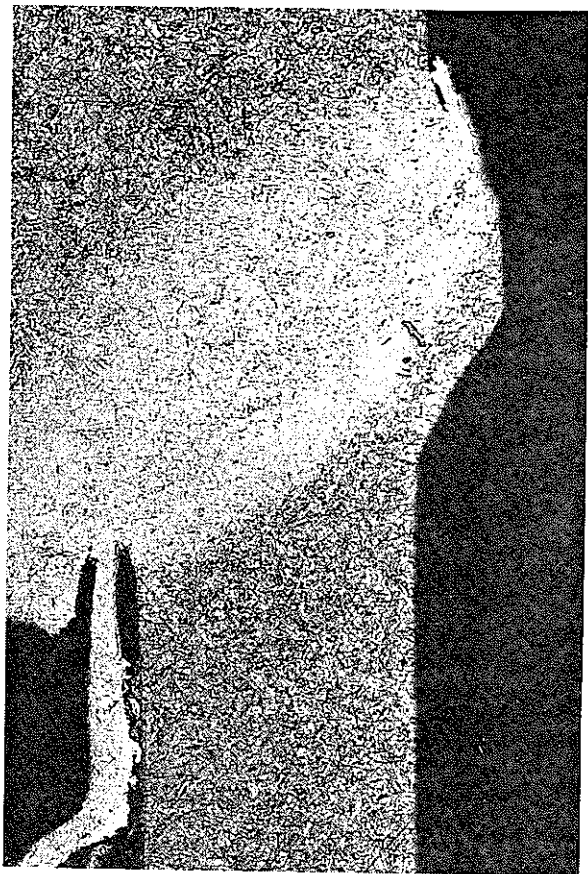
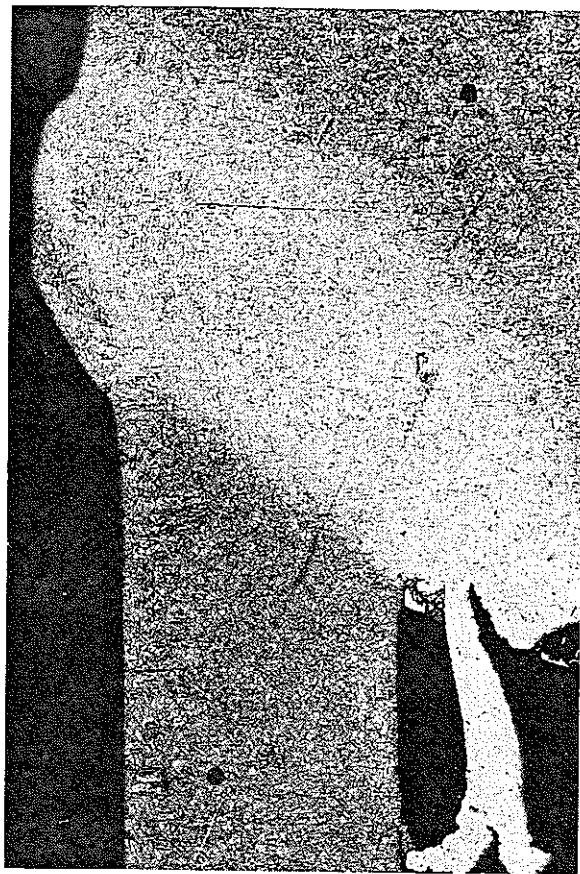


X 100

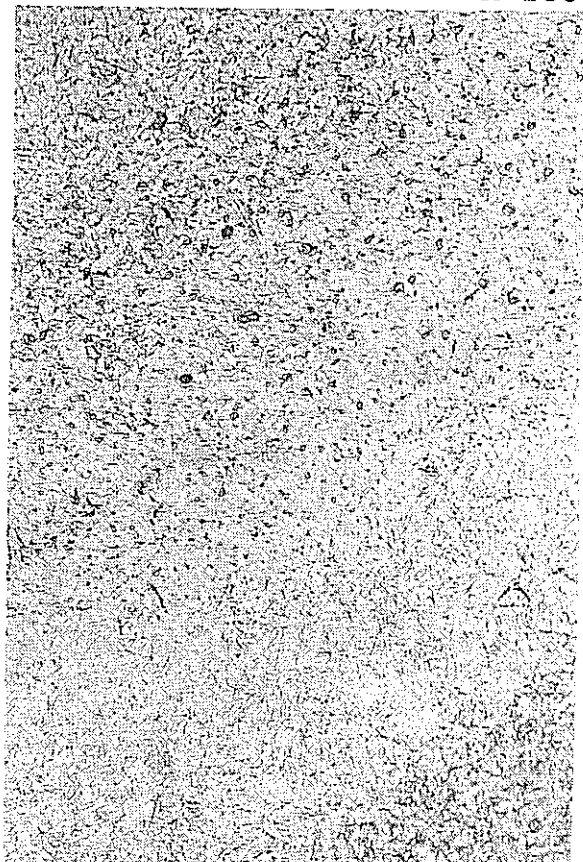
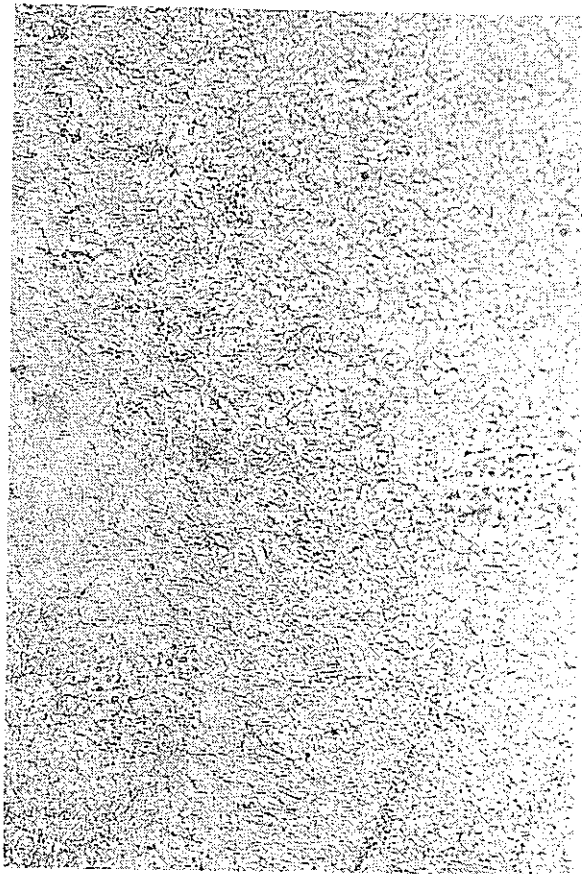


X 500

图-58 金相写真 (M39(b))

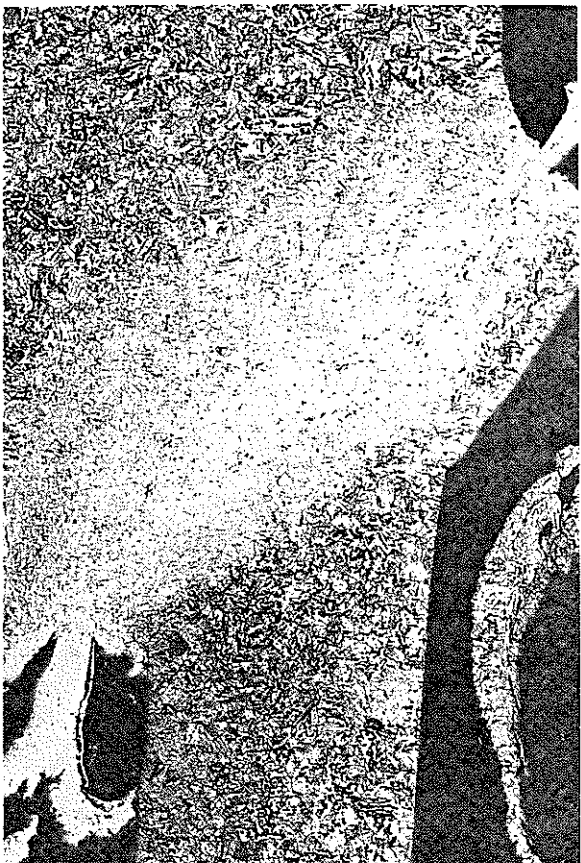
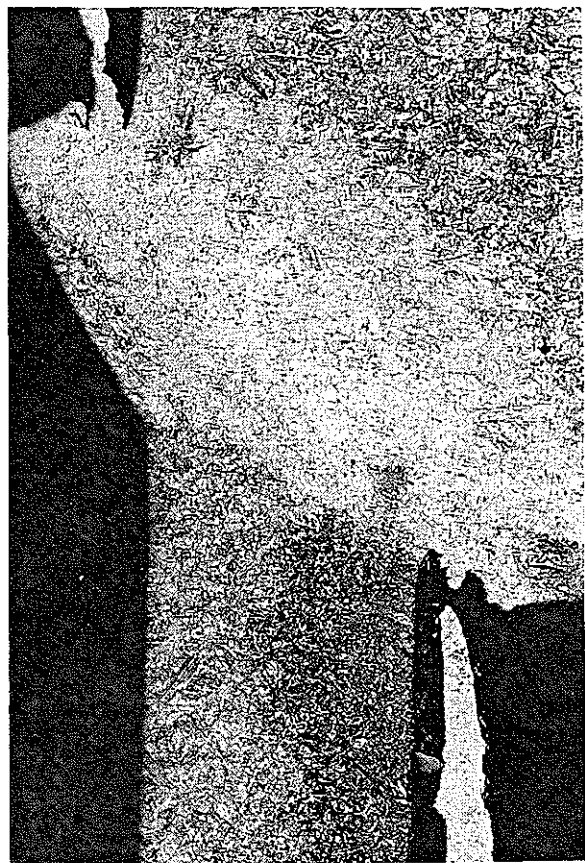


X 100

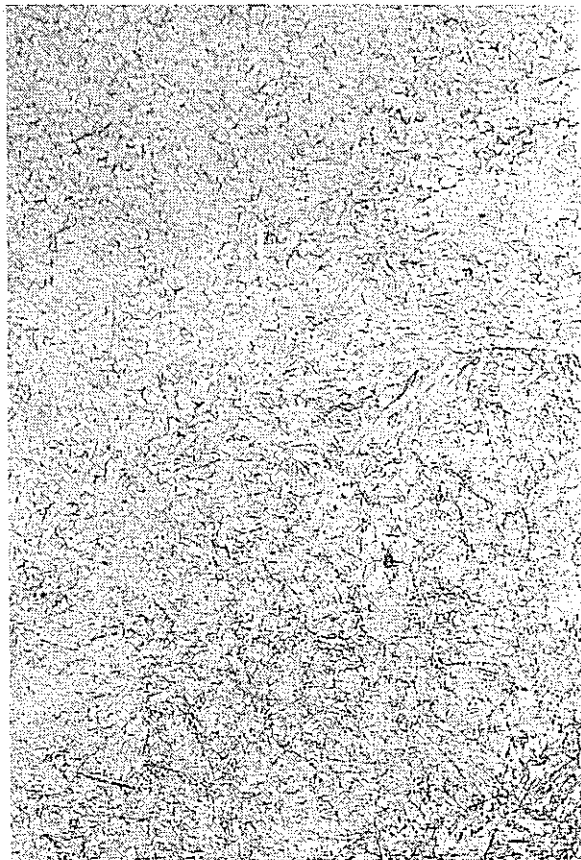
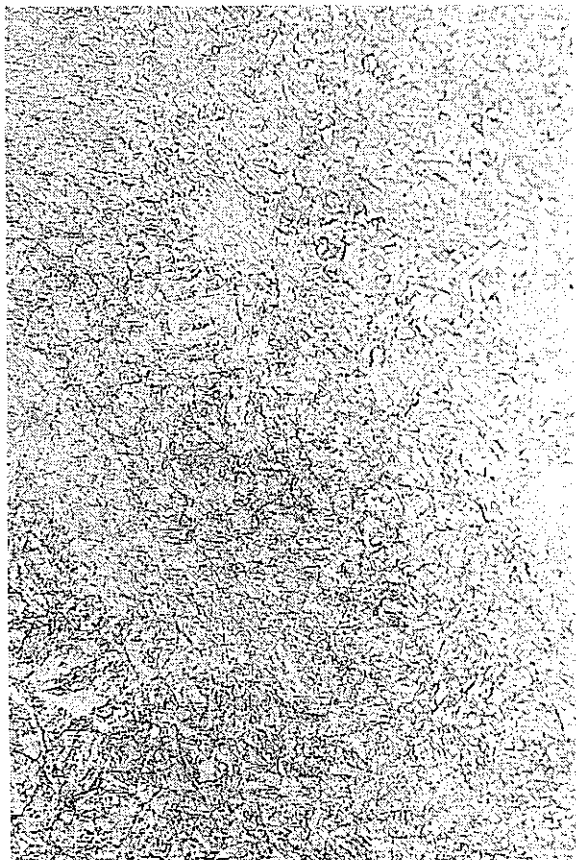


X 500

图-59 金相写真 (M40(a))

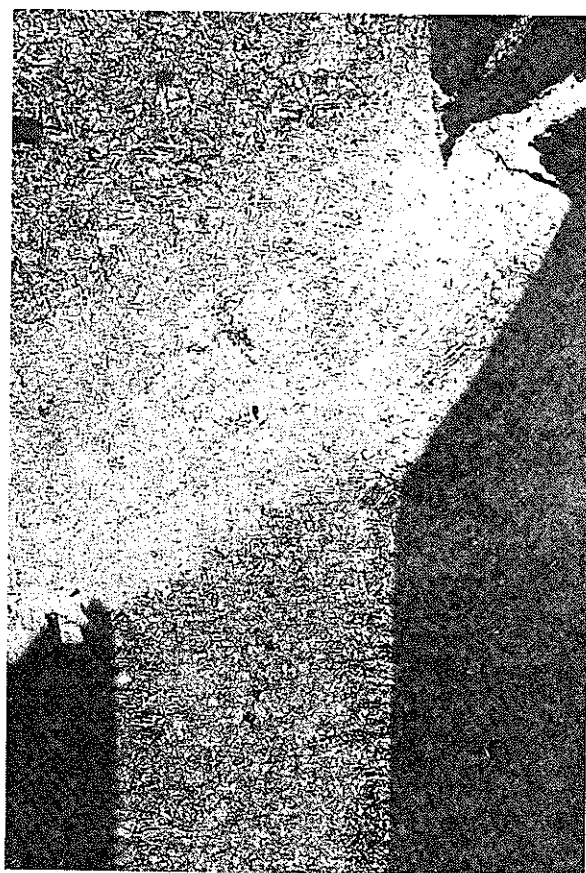
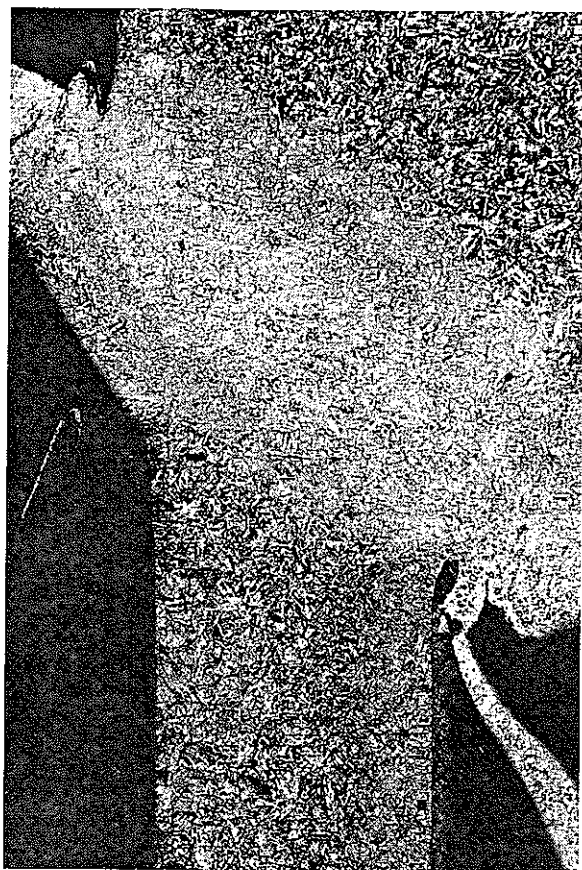


X 100

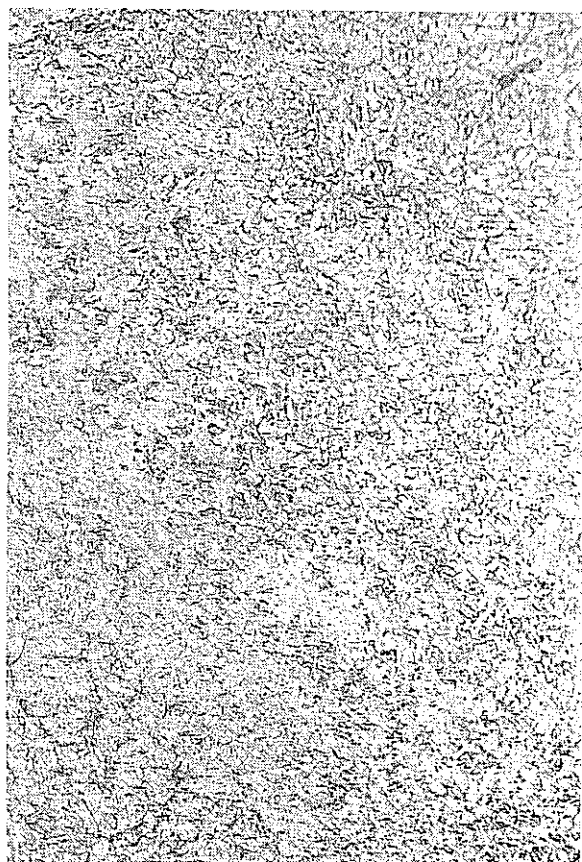


X 500

图-60 金相写真 (M40(b))

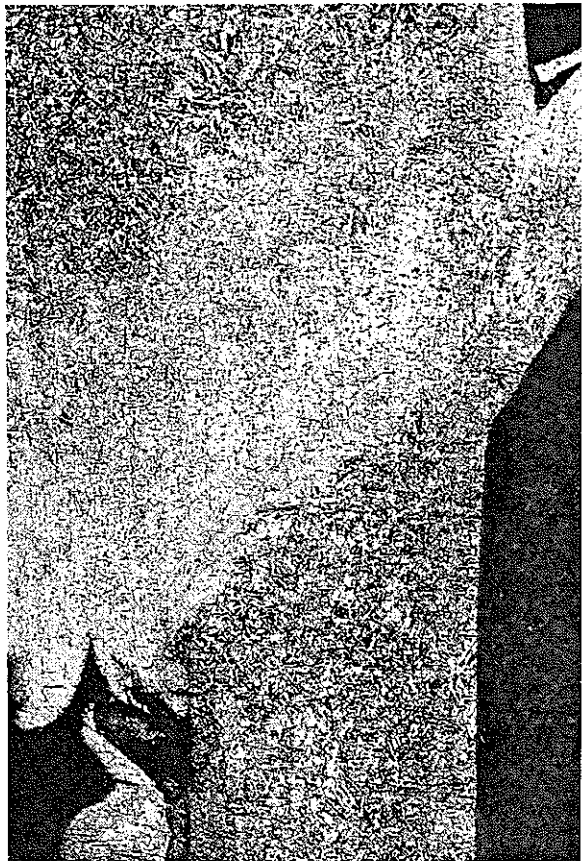


X 100

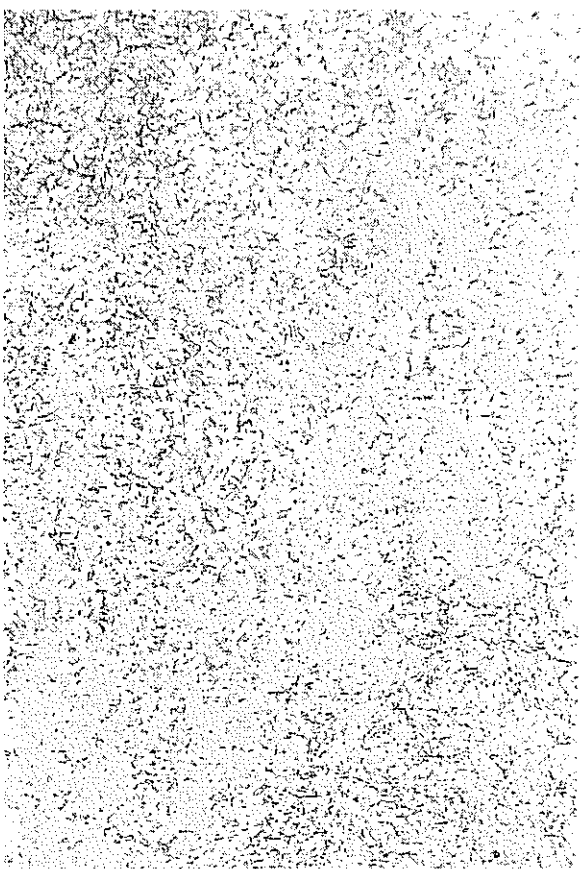
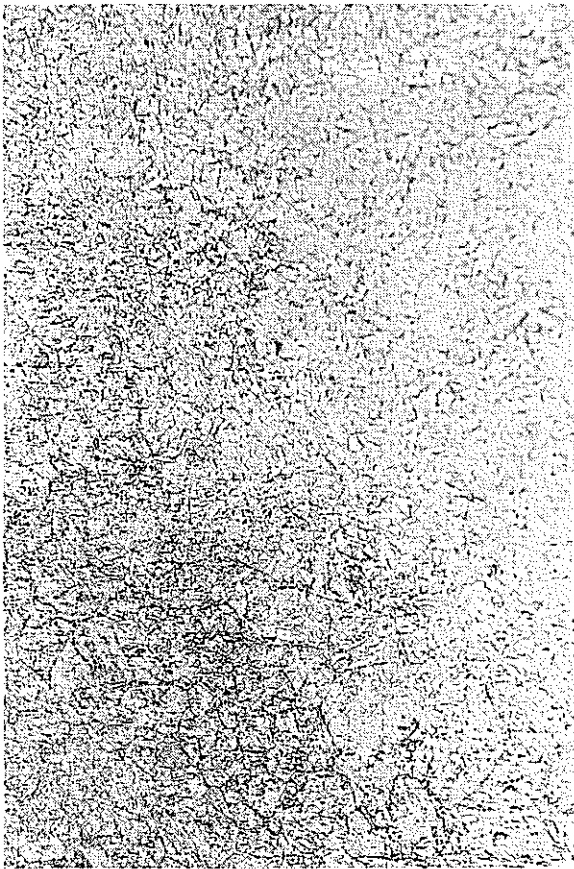


X 500

图-61 金相写真 (M45(a))



X 100

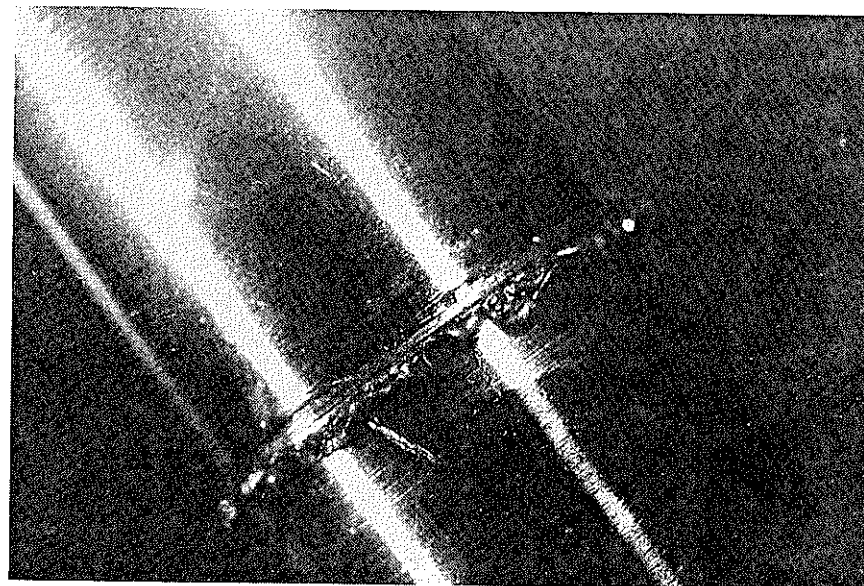
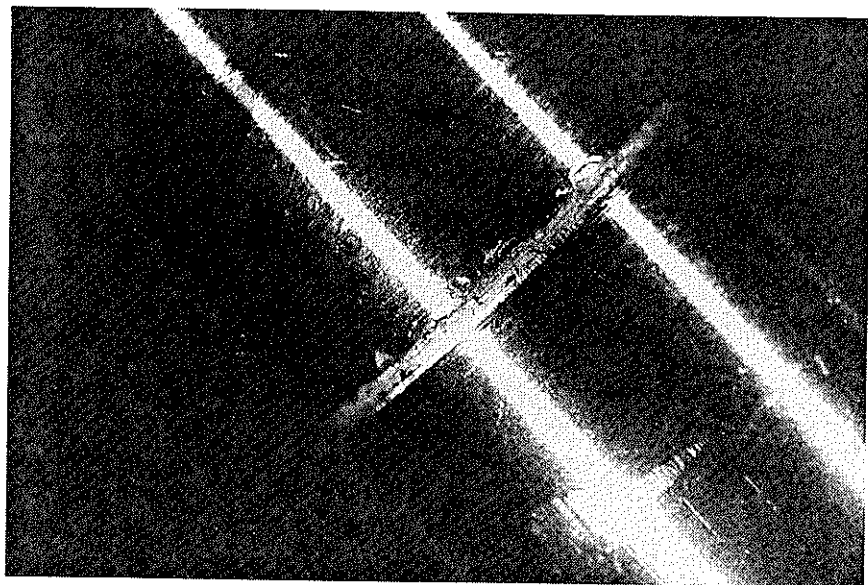


X 500

图-62 金相写真 (M45(b))

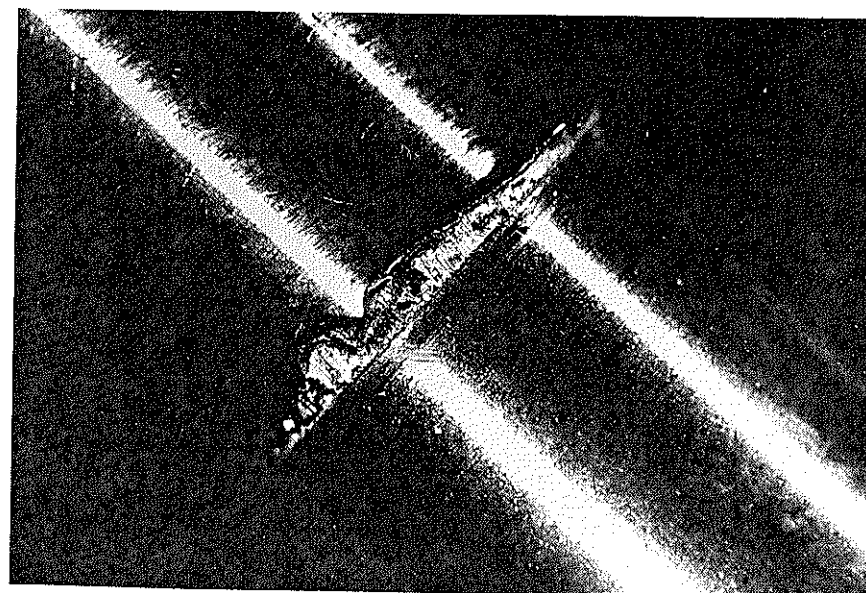
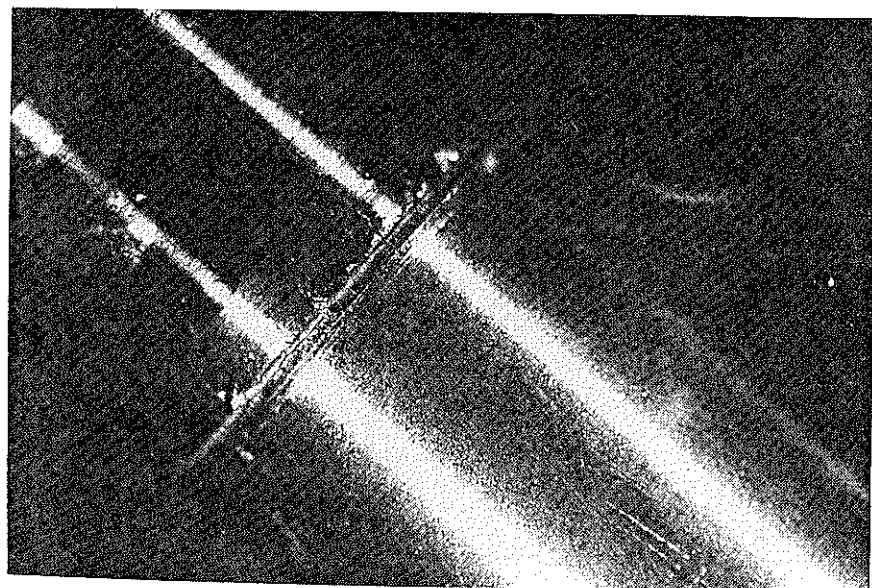
M 33

X I2



M 40

X I2



Deburred

As welded

図-63 溶接後の外観写真

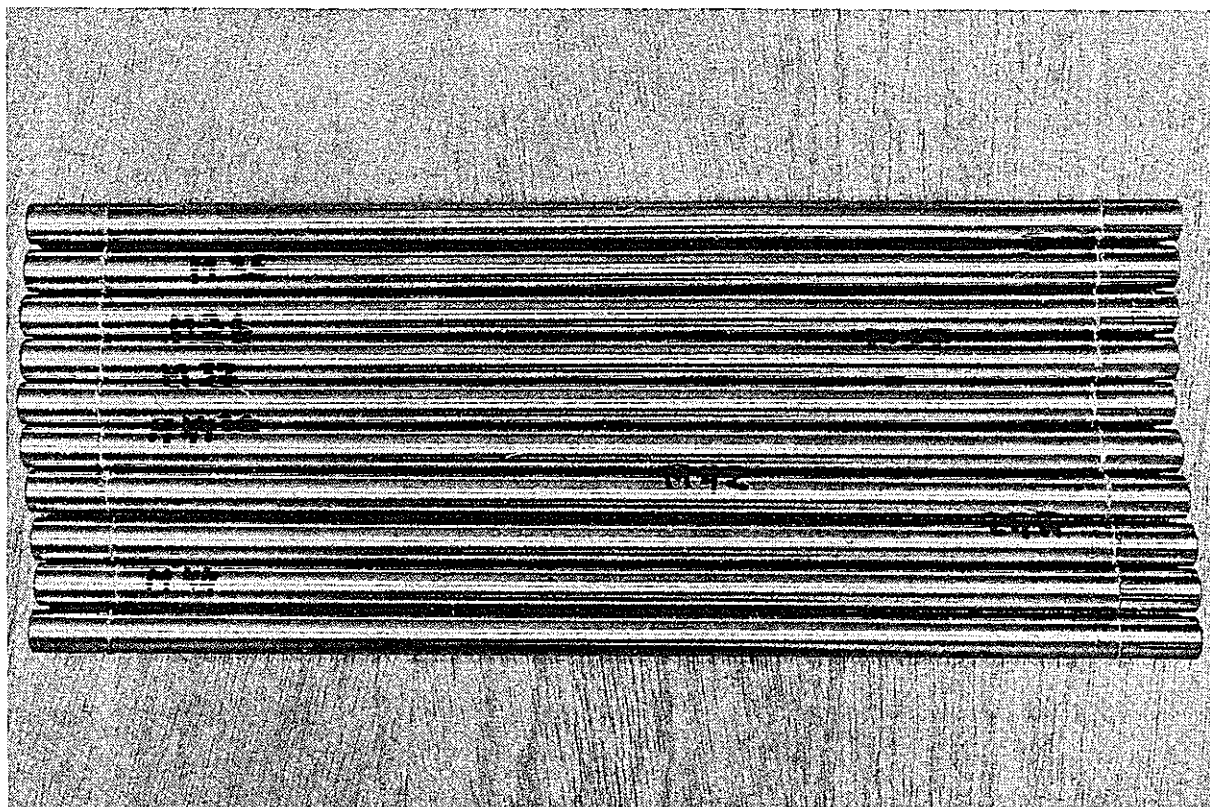


図-64 H e リーク試験後の外観写真

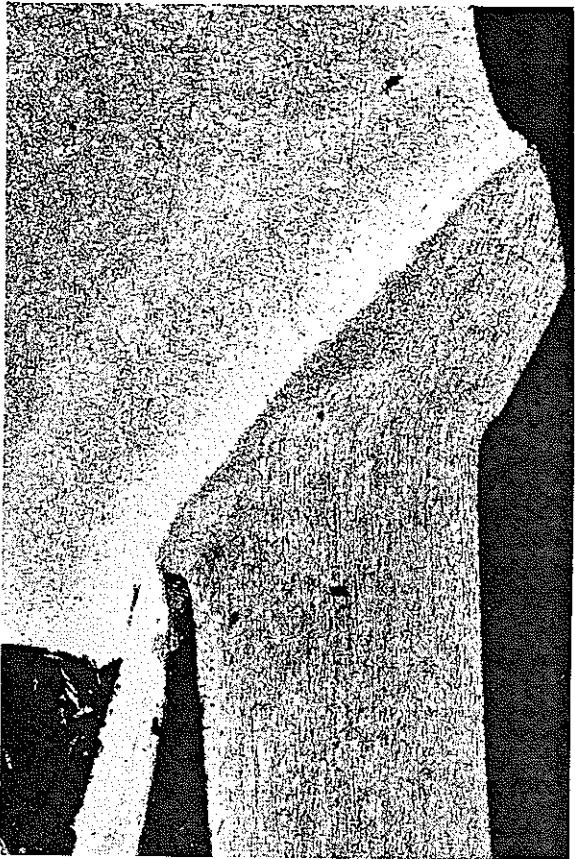
T R A N S L A T I O N

The Company *BALZERS* declares herewith to have verified and tested the test pieces with a helium leak test detector and certifies that the leakage rate is lower than $1.5 \cdot 10^{-9}$ mB/l/s.

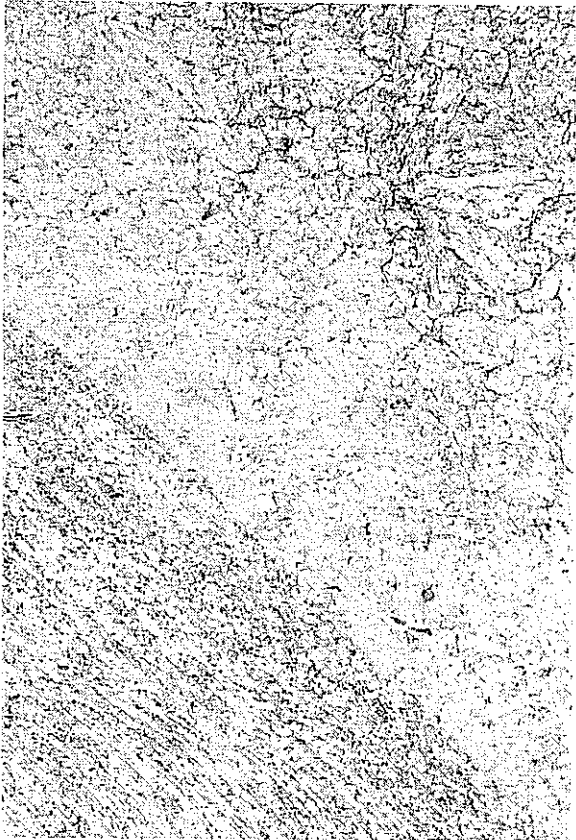
Made at Zaventem, October 28, 1991.

F. CLINCKEMAILLIE

S.A. BALZERS

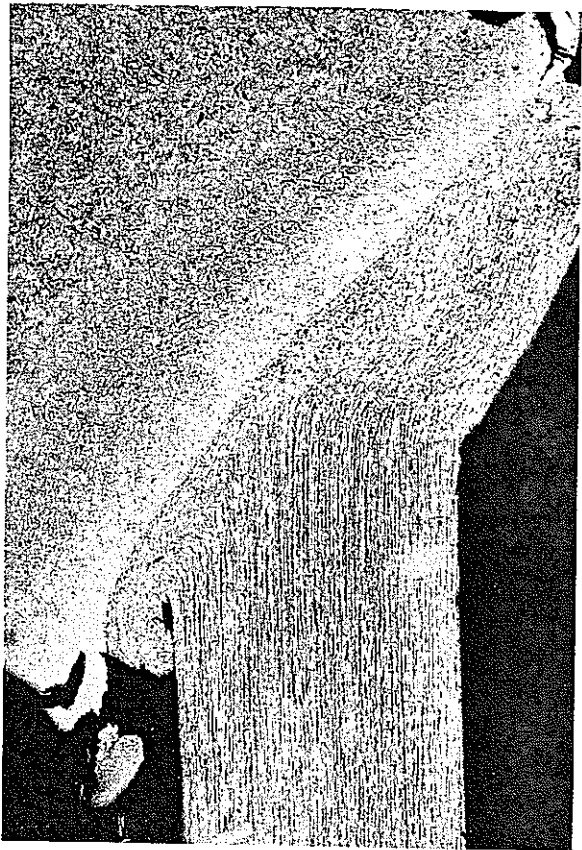
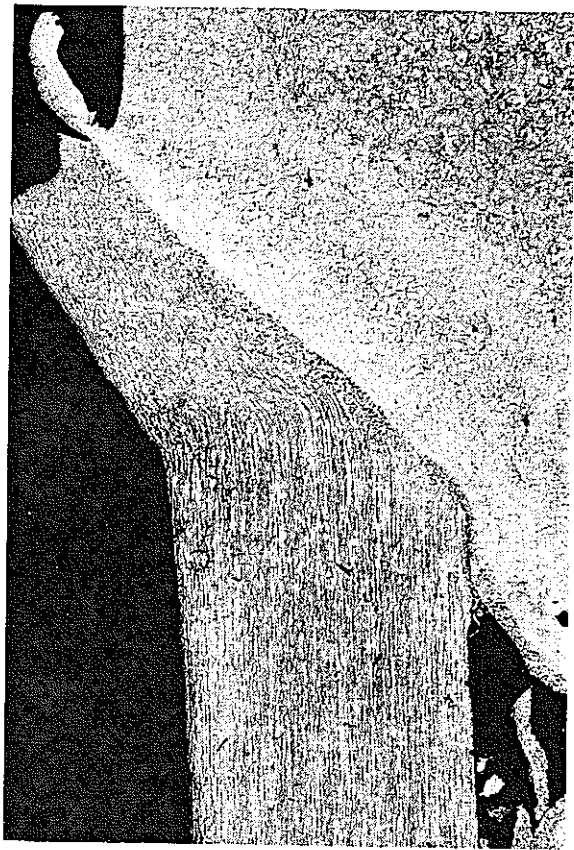


M 70 (a) x 100

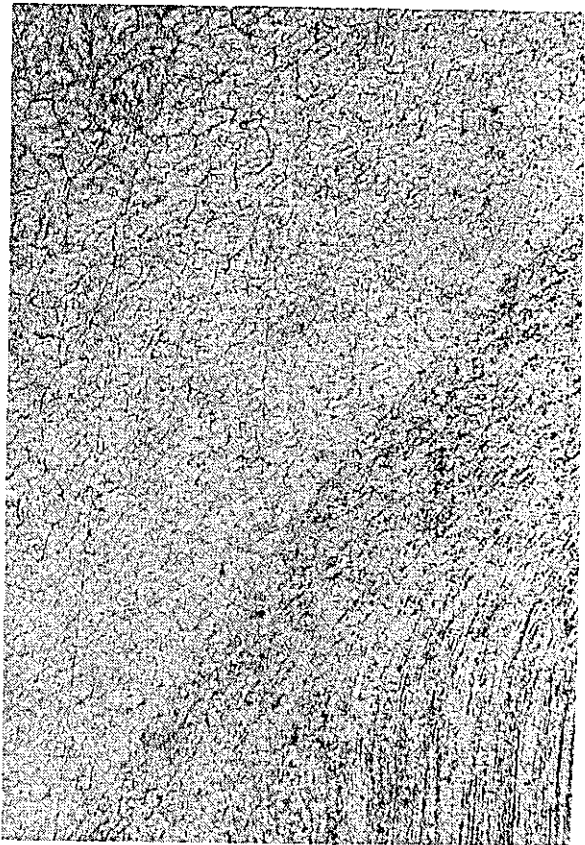


M 70 (a) x 500

图-66 金相写真 (M70(a))

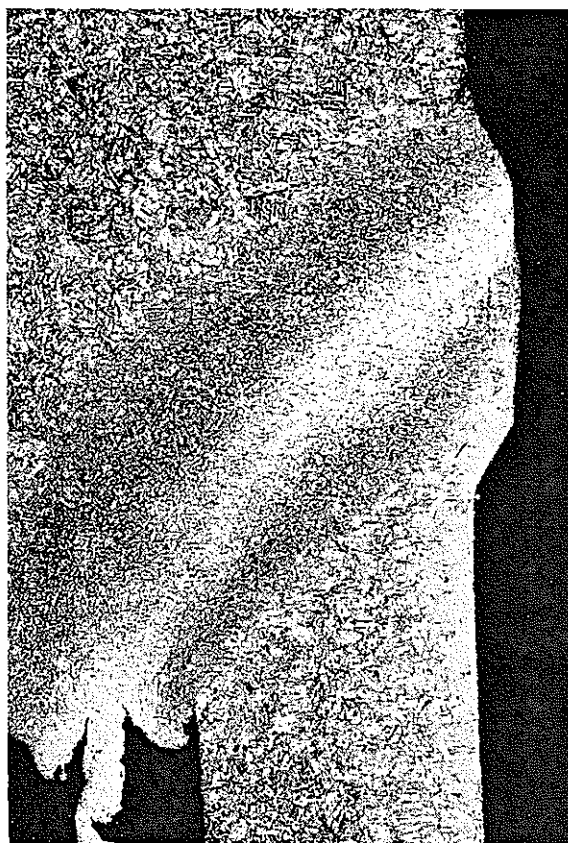


M 70 (b) x 100

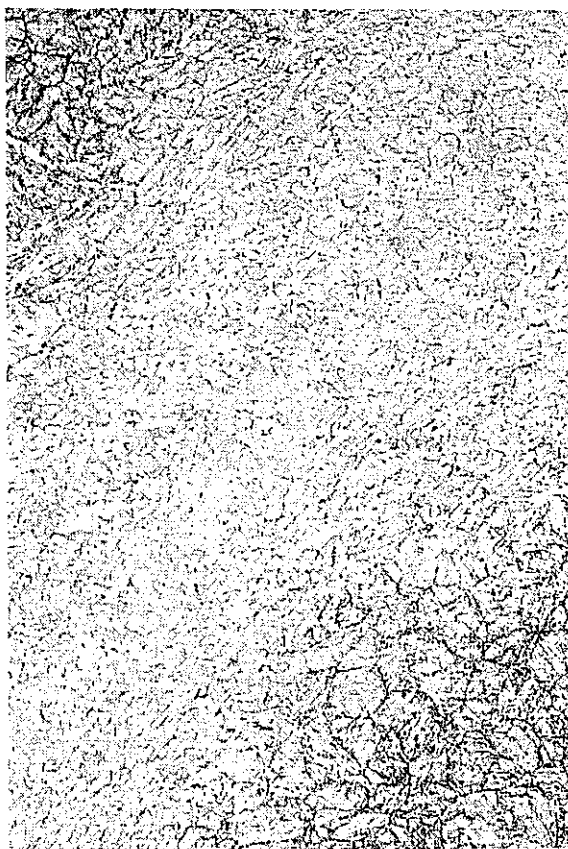
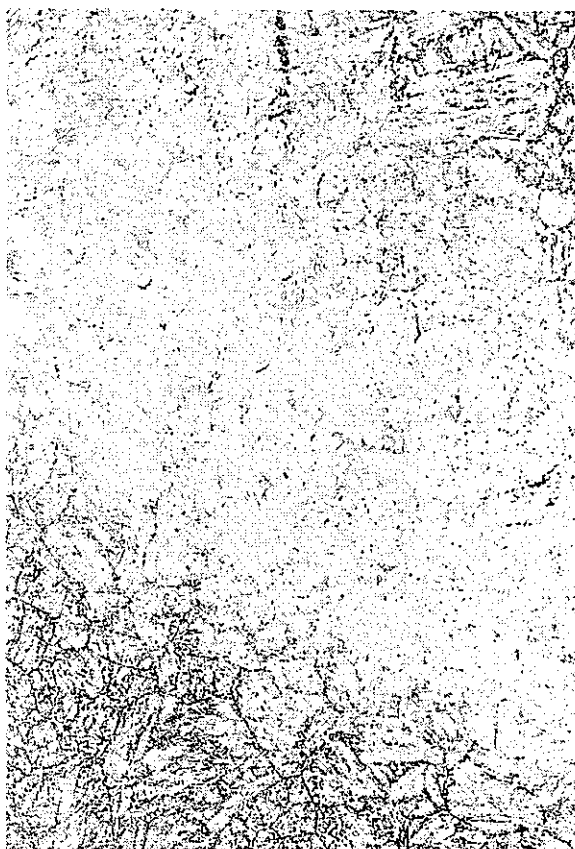


M 70 (b) x 500

图-67 金相写真 (M70(b))

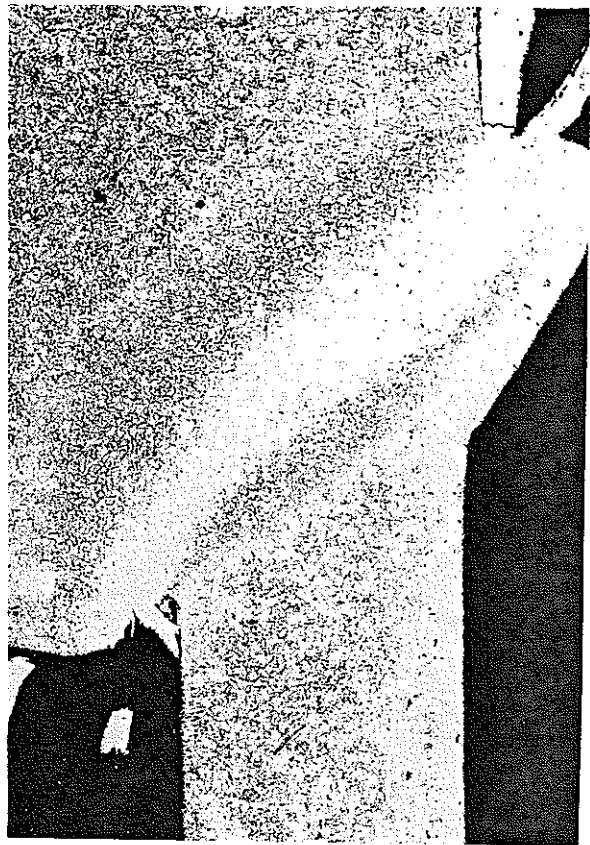


M 86 (a) x 100

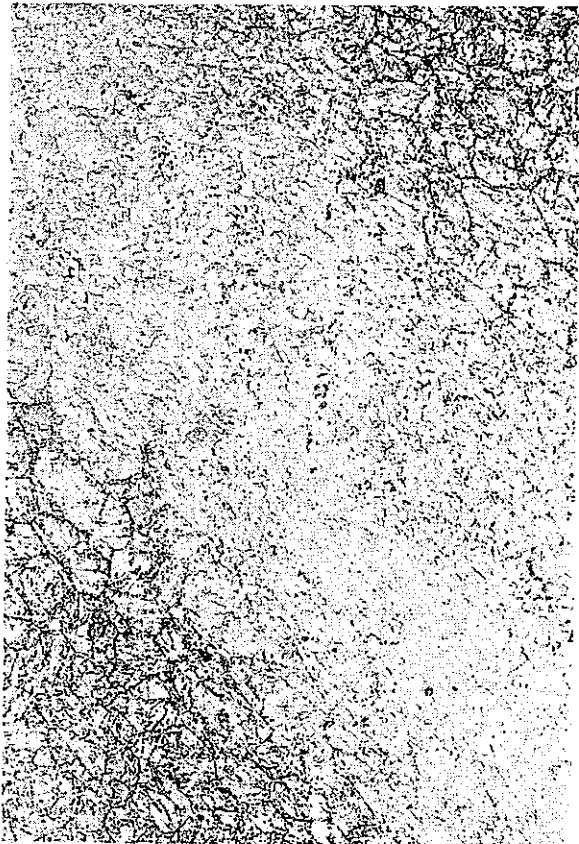


M 86 (a) x 500

图-68 金相写真 (M86(a))

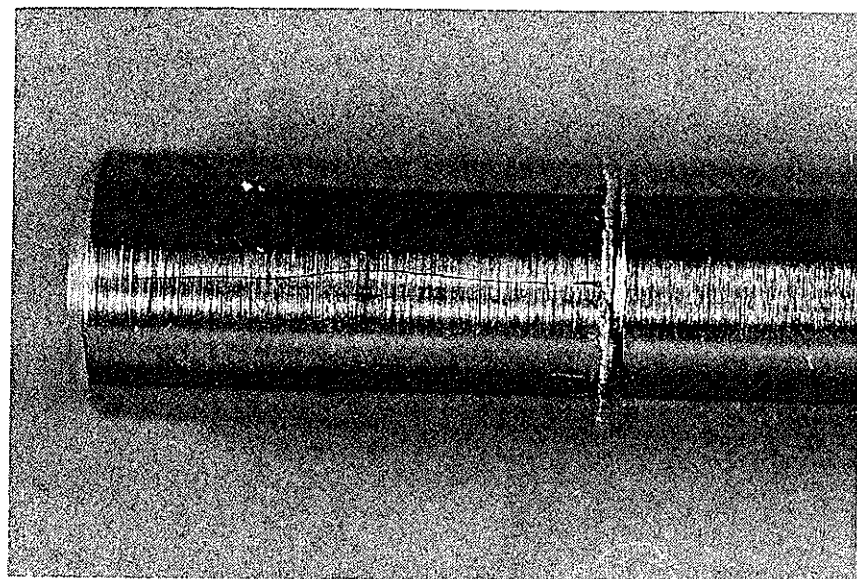


M 86 (b) x 100

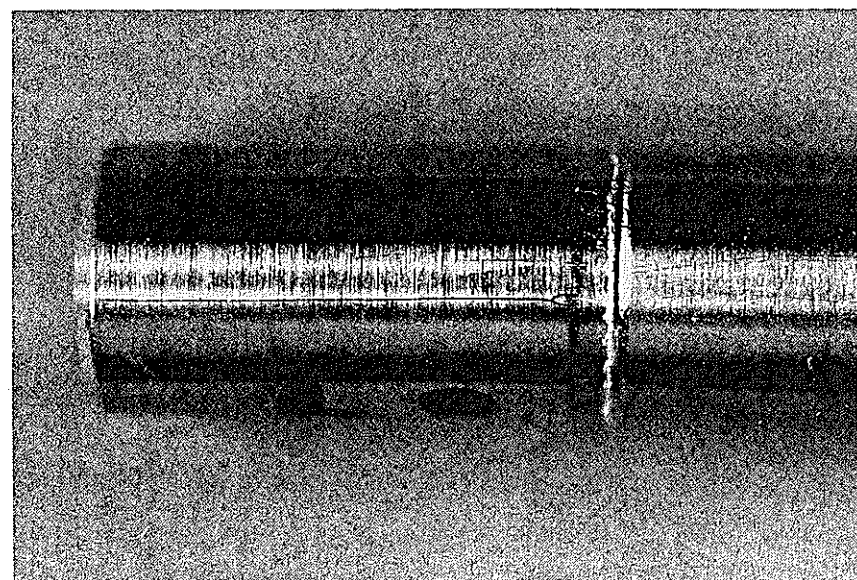
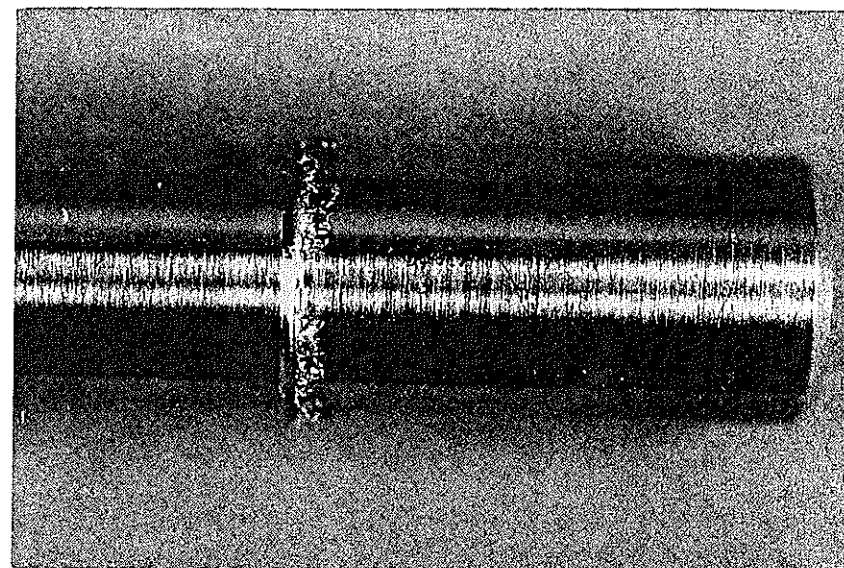


M 86 (b) x 500

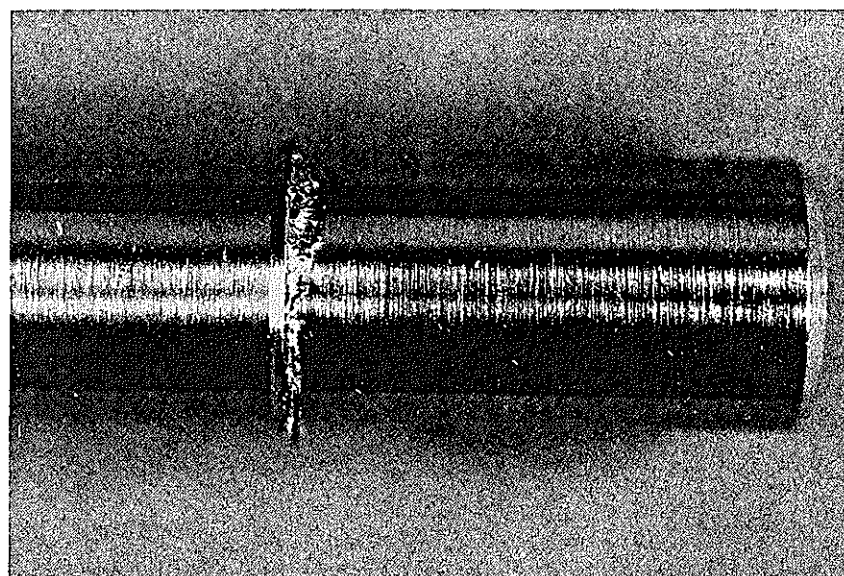
图-69 金相写真 (M86(b))



63DSB



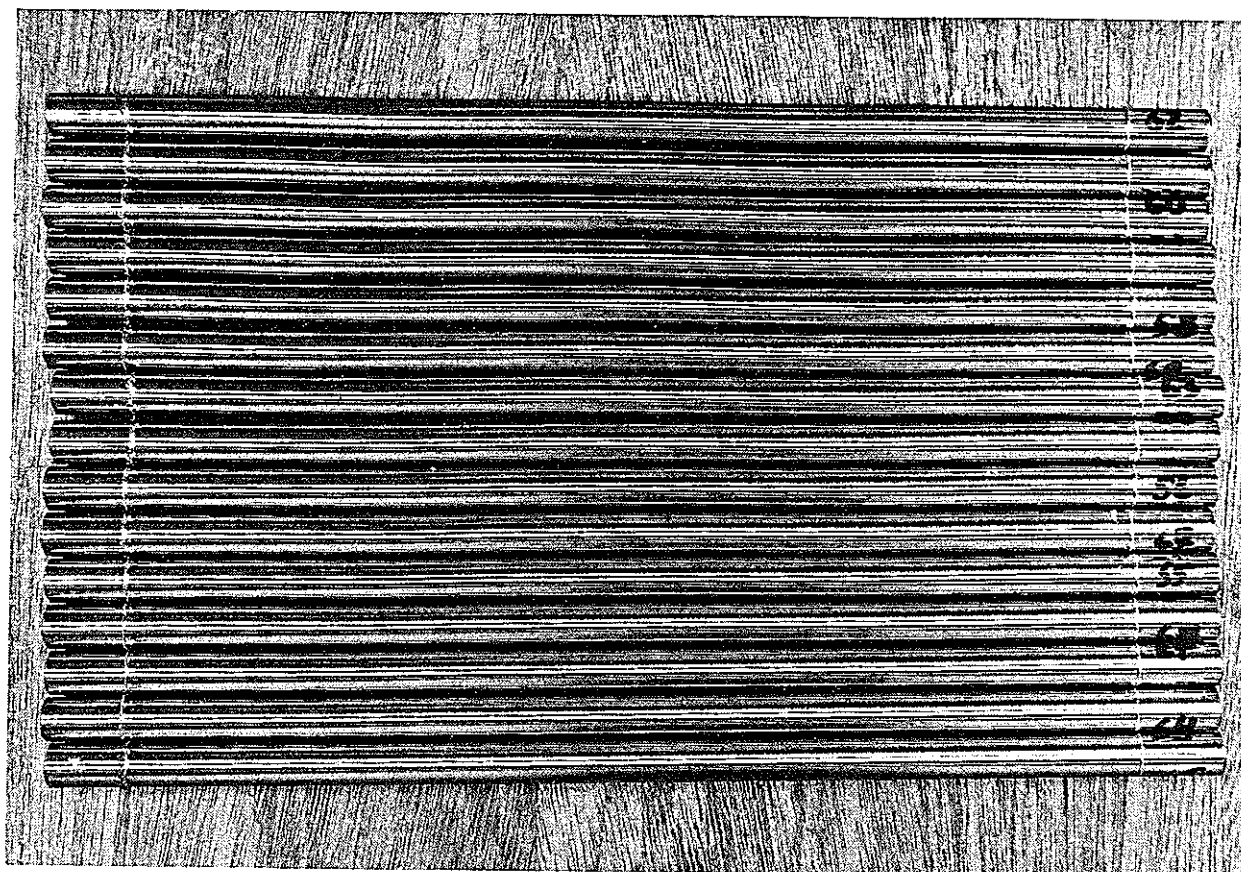
62FSO



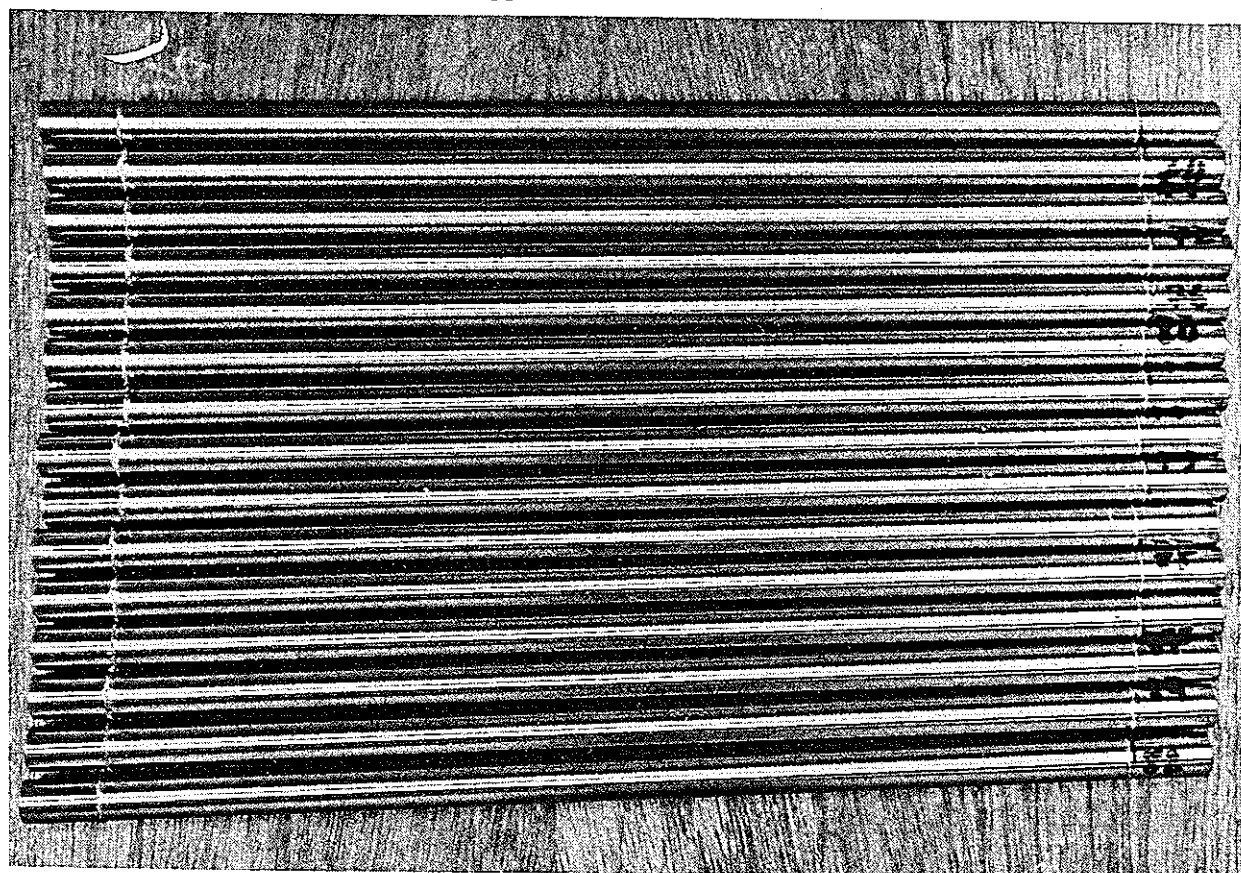
Deburred

As Welded

図-70 溶接後の外観写真

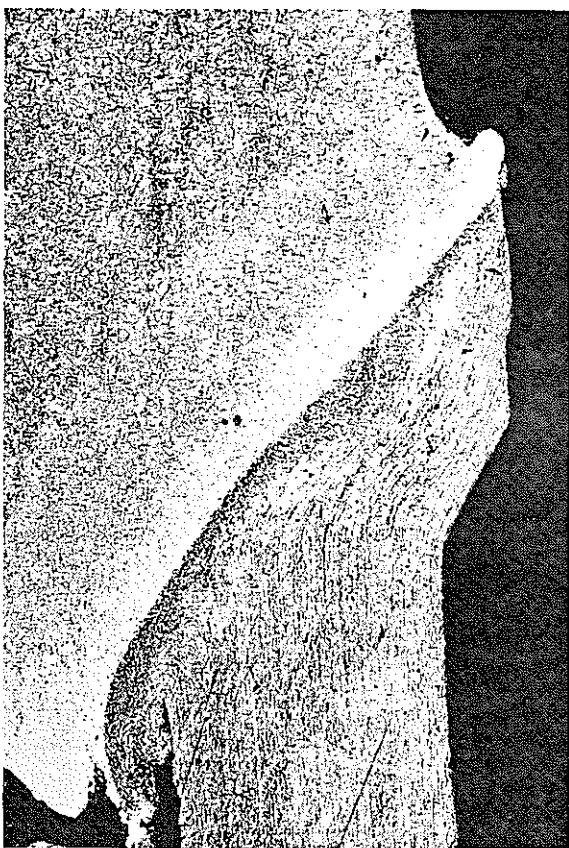
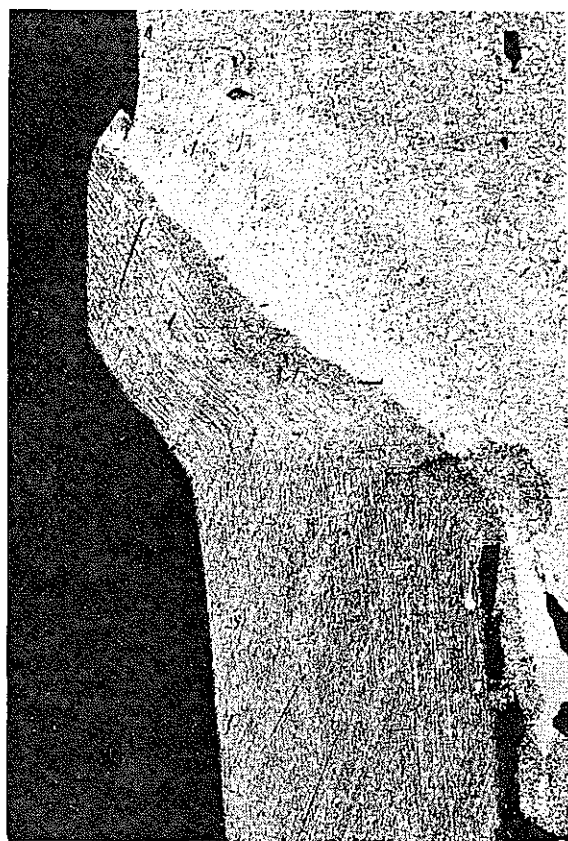


63DSB Material



62FSO Material

図-71 Heリーク試験後の外観写真

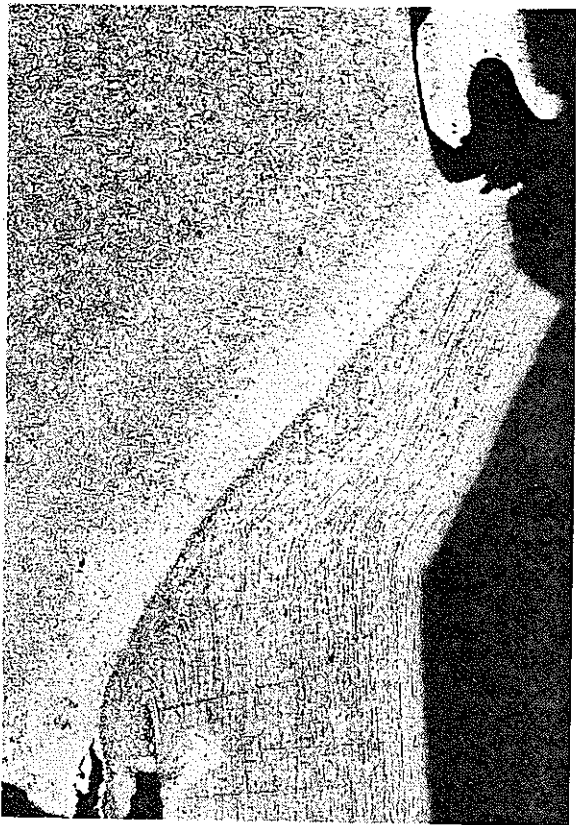
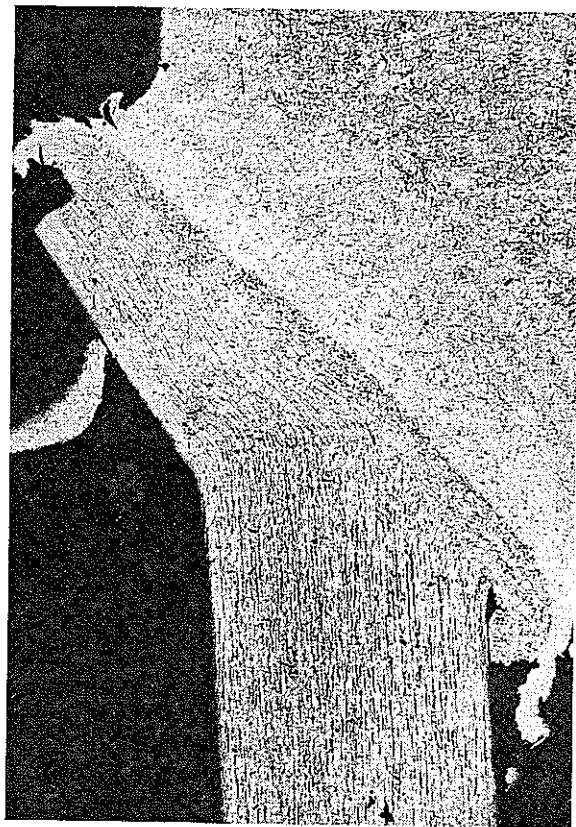


M 54 (a) x 100

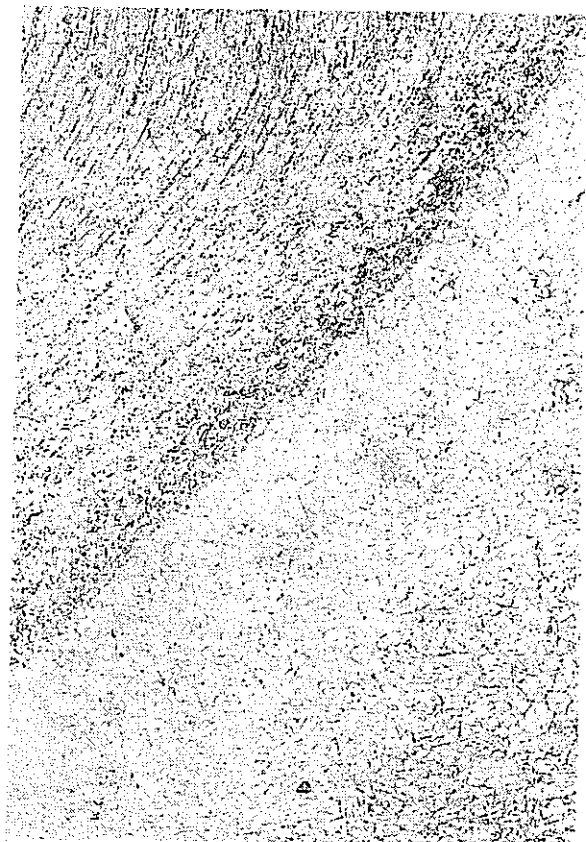
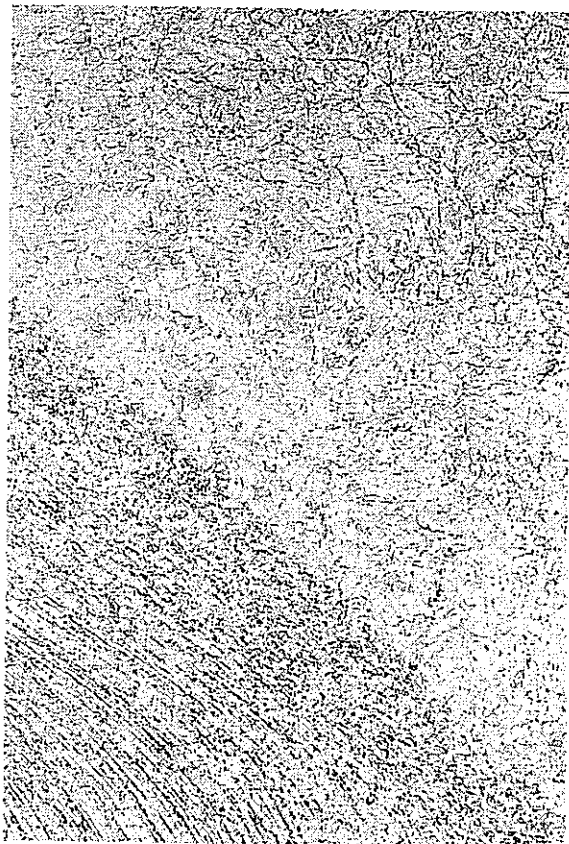


M 54 (a) x 500

图-72 金相写真 (M54(a))



M 54 (b) x 100



M 54 (b) x 500

图-73 金相写真 (M54(b))

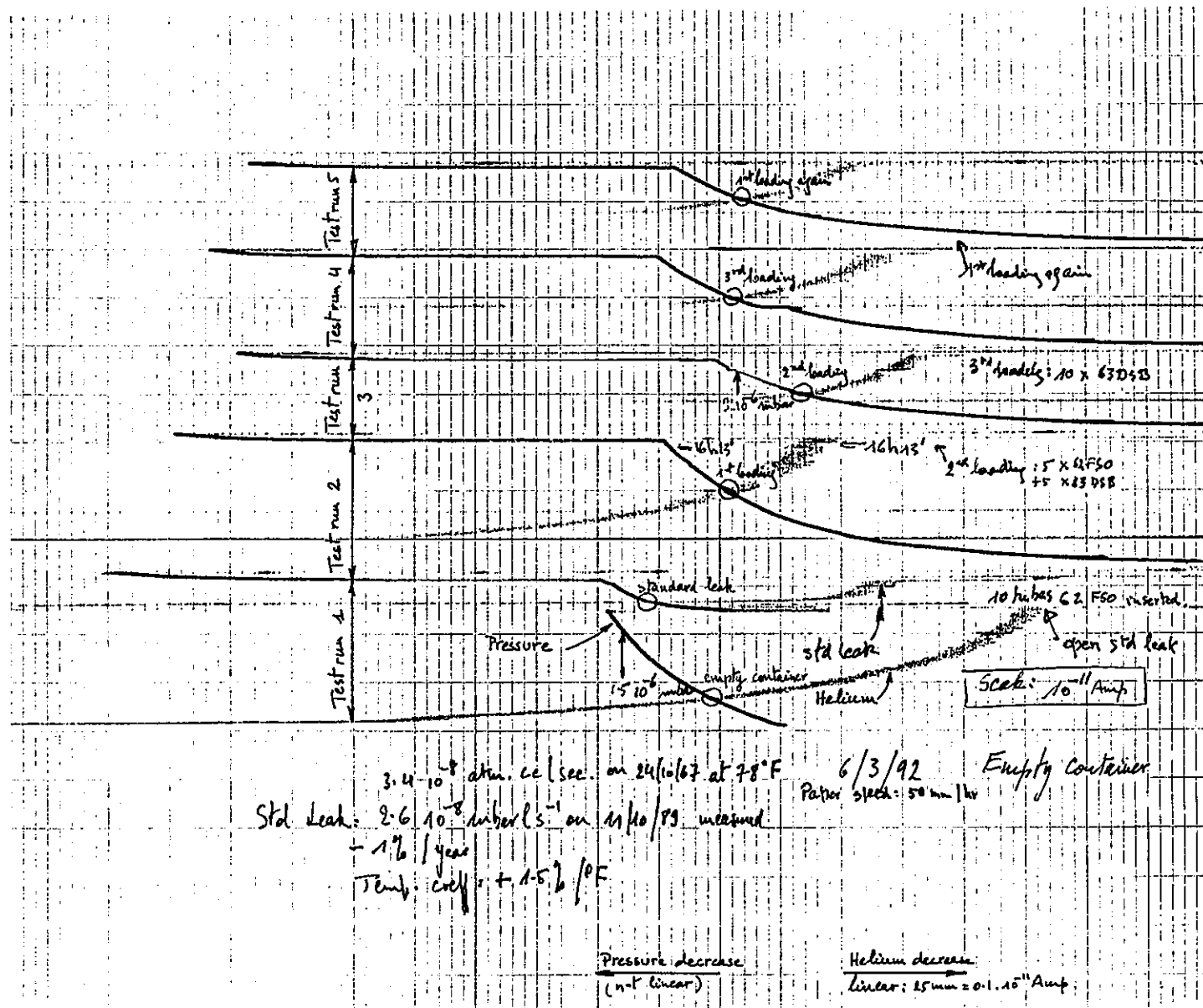


図-74 Heリーク試験結果

表-1 燃料ピンの照射試験に関して

NAME	REACTOR	MATERIAL	GEOMETRY	PERIOD IRRADIATION	REMARKS
CFC 4 D	BR2	DT02	Ø 5.2	1976	Thermal flux irradiation > 100.000 Kwd/t.
CIRCE 6 D	BR2	DT02	Ø 5.2	1976	Carbide fuel.
CARAFE	RAPSODIE	DT3911 DT2203Y05 Wire : DT02	3-pin bundle Clad : Ø 7.6 L=910 Wire : Ø 0.8	1981	Ended with reactor shut-down in August 1981.
CFC 06	BR2	Ferritic	Ø 6 x 80	1981 - 1982	Finished.
CFC 08	BR2	Austenitic	Ø 6 x 80	1981 - 1982	Finished.
POUSSIX	PHENIX	DT2203Y05	2 pins in 12-pin bundle Clad : Ø 7.6 L=1500 Wire : Ø 1.2	1984 - 1987	[PIE under way.
FETICHE	PHENIX	DT 2906(4) DT2203Y05(5) Wire : DT2203Y05	9-pin bundle Clad : Ø 6.55 L=1500 Wire : Ø 1.15	1984 - 1989	
TEP Mk 1a	SNR 300	DT2203Y05 (10)	10 pins in 1 assembly	-	Reactor abandoned.
FARFADET	BR2	W.Nr. 1.4970	Ø 7.6	1985	Finished.
OPTIMIX	PHENIX	«Unweldable» austenitic	Ø 6.55 L = 1500	1984	No information available.
CRAZY	BR3	Zircaloy	Ø 9.5	1985 - 1988	Finished : reactor stopped.
IDEFIX	PHENIX	DT2906 (1/3) DT2203Y05(2/3)	432 fuel pins stdt PHENIX fuel and geometry	1987 - 1990	

表-2 加圧した燃料ピンの照射試験に関して

NAME	REACTOR	MATERIALS	No. OF CAPSULES	DATES	STATUS
RIPCEX II	RAPSODIE	ODS ferritic + austenitic	88	1979 - 1982	Finished.
PORRIDGE	PFR	ODS ferritic	104	1984	In reactor.
PFR - M2	PFR	ODS ferritic + austenitic	273 + numerous new ones for each reload.	1981	In reactor.
OASIS 1	BR2	Ferritic + austenitic	12	1983 - 1984	Finished.
OASIS 2	BR2	Ferritic + austenitic	12	1983 - 1985	Finished.

表－3 記録した溶接パラメータ

PARAMETER	GENERAL FORM FOR A 1-CYCLE WELD
Displacement	3 levels with 2 steps
Speed	2 peaks
Acceleration - Deceleration	4 peaks
Current	2 sinusoidal
Voltage	2 sinusoidal
Integrated current	2 levels with 2 steps
Force	1 level
Pressure inside capsule	1 level
Temperature inside capsule	1 level
Contact resistance	1 level (could not record during welding)

表-4 回転曲げ疲労試験結果 (400N/mm²)Number of Cycles in Reverse Bending under 400/mm² Stress

MATERIAL	DEBONDING	POOR	USUAL RANGE
ODS	0 to 1000	< 10000	20000 to 40000
Work-Hardened Austenitic	0 to 1000	< 8000	20000 to 30000
Ferritic Martenstinitic	0 to 1000	< 8000	20000 to 60000
TIG-Welded Austenitic	-	-	3000 to 6000
Unwelded ODS Tubes	-	-	80000 to 300000
Unwelded Ferritic Tubes	-	-	60000 to 80000
Unwelded Aus- tenitic Tubes	-	-	80000 to 200000
Heat-Treated ODS Welds	-	-	80000 to 300000
Zircaloy Welds & Tubes	-	-	2500 to 7000

表-5 クリープ及び引張試験結果 (1982年までのもの)

Results of Creep and Tensile Tests on Tubes Welded on Both Sides
(up to 1982)

Test	Temperature (°C)	Time to Rupture (hours)	Number of Tests	Weld Ruptures
Axial Creep	500	13 - 10.000	39	0
	550	60 - 10.000	7	0
	600	10 - 7.000	58	0
	650	14 - 7.500	26	0
	700	3 - 6.000	160	16
	750	8 - 7.150	13	5
Biaxial Creep	500	60 - 1.830	46	0
	550	10 - 3.700	20	0
	575	30	4	0
	600	30 - 1.400	141	0
	650	50 - 14.000	82	0
	700	1 - 20.000	299	0
	750	7 - 5.000	47	0
Tensile	20		62	0
	100		4	0
	200		20	0
	300		4	0
	400		16	0
	500		27	0
	550		6	0
	600		19	0
	700		60	1
	750		2	0
	800		7	1

表－6 照射試驗結果

Name	Reactor	Material	Number of Welds	Max. Dose Received/Expected dpa _{NRT}	Results
CFC 4D	BR2	ODS Ferritic	4	A few	No weld failure
CIRCE 6D	BR2	" "	8	" "	" " "
CARAFE	RAPSODIE	ODS Ferritic	6	" "	" " "
CFC 06	BR2	" "	4	" "	" " "
CFC 08	BR2	Austenitic	4	" "	" " "
POUSSIX	PHENIX	" "	4	/ 80	" " "
FETICHE	PHENIX	" "	18	/ 120	" " "
FARFADET	BR2	"	16	A few	No weld failure
OPTIMIX	PHENIX	Austenitic	12	Unknown	No results available
IDEFIX	PHENIX	" "	868	/ 150	" " "
RIPCEX II	RAPSODIE	ODS Fer., Aust.	176	37	" " "
PFR-M2	PFR	ODS Fer., Aust.	488	90 / 150	" " "
OASIS	BR2	ODS Ferritic	48	14	" " "
CRAZY	BR3	Zircaloy	4	A few	" " "
PORRIDGE	PFR	ODS Ferritic	208	90 / 150	" " "

表-7 予備溶接試験時のパラメータ

Selection Tests

Material Identifica- tion	Weld No.	Machine Setting (Heat) 1000 = 100 %	Force (N)	Tube stick-out (mm)	Main Voltage (V)	idt W.s	Observations of Micrographs
63DSB12	M16	450/480	1400	0	232	198	Good
63DSB12	M17	450/480	1600	0	232	200	Good
63DSB12	M18	450/480	1800	0	231	197	Good
63DSB12	M19	450/480	2000	0	230	200	Good
63DSB12	M20	450/480	2200	0	230	200	Good
63DSB12	M21	400/420	1800	0	230	168	Probably slight lack of diffusion
63DSB12	M22	425/450	1800	0	230	184	Good
63DSB12	M23	450/480	1800	0	230	198	Good
63DSB12	M24	475/510	1800	0	231	212	Good
63DSB12	M25	500/540	1800	0	230	224	Good
63DSB12	M26	450/480	1800	0.1	232	197	Good
63DSB12	M27	450/480	1800	0.2	231	197	Good
63DSB12	M28	450/480	1800	0.3	232	198	Good

表-8 溶接施行試験時のパラメータ

Sequence of Welds for the Manufacture of Qualification Test Pieces

Date	Material Identification	Tube Length (mm)	Weld No.	Machine Setting (Heat) 1000 = 100 %	Force (N)	Main Voltage (V)	idt W.s	Fatigue Test Cycles $\sigma = 400 \text{ Mpa}$	Observations
10/17/91	63DSB12	25	M29a	450/480	1800	231	196	-	Test pieces given to Mr. Kamimura
	63DSB12	25	M29b	450/480	1800	231	197	-	
	63DSB12	172	M30a	450/480	1800	231	200	-	
	63DSB12	172	M30b	450/480	1800	230	199	-	
	63DSB12	25	M31a	450/480	1800	-	200	18109	
	63DSB12	25	M31b	450/480	1800	229	198	14631	
10/18/91	63DSB12	25	M32a	450/480	1800	229	194	> 18336	For metallography
	"	25	M32b	450/480	1800	229	193	18336	For metallography
	63DSB8/1	172	M33a	450/480	1800	229	196	-	For metallography
	No.2	172	M34a	450/480	1800	229	196	-	For He Test
	No.3	172	M35a	450/480	1800	228	196	-	For He Test
	No.4	172	M36a	450/480	1800	228	196	-	For He Test
	No.5	172	M37a	450/480	1800	228	197	-	For He Test
	63DSB12	172	M38a	450/490	1800	228	199	-	For He Test
	63DSB8/1	172	M33b	450/490	1800	228	196	-	For metallography
	No.2	172	M34b	450/490	1800	228	199	-	For He Test
	No.3	172	M35b	450/490	1800	228	198	-	For He Test
	No.4	172	M36b	450/490	1800	228	199	-	For He Test
	No.5	172	M37b	450/490	1800	229	200	-	For He Test
	63DSB12	172	M38b	450/490	1800	228	200	-	For He Test
	62FS078	25	M39a	450/490	1800	229	200	> 45000 > 45000	For metallography
	62FS078	25	M39b	450/490	1800	228	200		For metallography
	No.1	172	M40a	450/490	1700	229	200		For metallography
	No.2	172	M41a	450/490	1700	230	203		For He Test
	No.3	172	M42a	450/480	1700	230	201		For He Test
	No.4	172	M43a	450/480	1700	231	200		For He Test
	No.5	172	M44a	450/480	1700	229	200		For He Test
	No.1	172	M40b	450/480	1700	229	201		For metallography
	No.2	172	M41b	450/480	1700	230	200		For He Test
	No.3	172	M42b	450/480	1700	231	202		For He Test
	No.4	172	M43b	450/480	1700	230	201		For He Test
	No.5	172	M44b	450/480	1700	231	202		For He Test
	62FS078	25	M45a	450/480	1700	231	200		Unbroken
	62FS078	25	M45b	450/490	1700	231	204		Unbroken
	No.6	172	M46a	450/480	1700	231	201		For He Test
	62FS078	172	M46b	450/480	1700	231	201		For He Test

NB : All "b" welds of tube 172 mm long (= 200 mm length of test pieces) are made under 0.8 bar Helium.

All other welds are made under vacuum.

表－9 予備溶接試験時のパラメータ

Selection Tests

Date (M/D/Y)	Material Identifica- tion	Weld No.	Machine Setting (Heat) 1000 = 100 %	Force (N)	Mains Voltage (V)	idt W.s	Observations
3/2/92	63DSB8	M47 (a)	450/490	1800	230	219	--
3/2/92	63DSB8	M47 (b)	450/490	1800	230	220	--
3/2/92	63DSB8	M48 (a)	450/490	1800	230	225	Tested in fatigue : 25019 cycles
3/4/92	63DSB8	M48 (b)	450/490	1880	231	215	Tested in fatigue : 24722 cycles
3/4/92	63DSB8	M49 (a)	440/480	1800	230	218	--
3/4/92	63DSB8	M49 (b)	440/480	1800	230	219	--
3/4/92	63DSB8	M50 (a)	420/460	1800	231	210	--
3/4/92	63DSB8	M50 (b)	400/440	1800	231	202	--
3/4/92	62FS078	M51 (a)	400/440	1600	233	202	Tested in fatigue : 51584 cycles
3/4/92	62FS078	M51 (b)	400/440	1600	232	204	Tested in fatigue : 51584 cycles
3/5/92	62FS078	M52 (a)	400/440	1600	230	196	--
3/5/92	62FS078	M52 (b)	400/440	1600	230	196	--
3/5/92	63DSB12	M53 (a)	400/440	1800	230	196	--
3/5/92	63DSB12	M53 (b)	410/450	1800	230	205	--
3/5/92	63DSB12	M54 (a)	405/445	1800	230	199	For metallography
3/5/92	63DSB12	M54 (b)	405/445	1800	230	200	For metallography

表-10 試験片製作時の溶接パラメータ (ODS 鋼)

Sequence of Welds for the Manufacture of Production Test Pieces in 63DSB (ODS)

Date (M/D/Y)	Material Identifica- tion	Tube Length (mm)	Weld No.	Machine Setting (Heat) 1000 = 100 %	Force (N)	Mains Voltage (V)	idt W.s	Observations
3/5/92	63DSB9	172	M55a	405/445	1800	231	200	For He Test
"	63DSB9	172	M56a	405/445	1800	232	200	For He Test
"	63DSB9	172	M57a	405/445	1800	231	202	For He Test
"	63DSB9	172	M58a	405/445	1800	230	201	For He Test
"	63DSB9	172	M59a	405/445	1800	230	201	For He Test
"	63DSB10	172	M60a	405/445	1800	230	200	For He Test
"	63DSB10	172	M61a	405/445	1800	230	201	For He Test
"	63DSB10	172	M62a	405/445	1800	230	200	For He Test
"	63DSB10	172	M63a	405/445	1800	230	202	For He Test
"	63DSB10	172	M64a	405/445	1800	230	200	For He Test
"	63DSB11	172	M65a	405/445	1800	230	204	For He Test
"	63DSB11	172	M66a	405/445	1800	229	202	For He Test
"	63DSB11	172	M67a	405/445	1800	230	201	For He Test
"	63DSB11	172	M68a	405/445	1800	230	201	For He Test
"	63DSB11	172	M69a	405/445	1800	230	203	For He Test
"	63DSB11	172	M69b	405/445	1800	229	200	For He Test
"	63DSB11	172	M68b	405/445	1800	229	201	For He Test
"	63DSB11	172	M67b	405/445	1800	229	204	For He Test
"	63DSB11	172	M66b	405/445	1800	229	204	For He Test
"	63DSB11	172	M65b	405/445	1800	228	201	For He Test
"	63DSB10	172	M64b	405/445	1800	228	200	For He Test
"	63DSB10	172	M63b	405/445	1800	229	200	For He Test
"	63DSB10	172	M62b	405/445	1800	229	200	For He Test
"	63DSB10	172	M61b	405/445	1800	228	200	For He Test
"	63DSB10	172	M60b	405/445	1800	229	204	For He Test
"	63DSB9	172	M59b	405/445	1800	229	201	For He Test
"	63DSB9	172	M58b	405/445	1800	228	201	For He Test
"	63DSB9	172	M57b	405/445	1800	229	203	For He Test
"	63DSB9	172	M56b	405/445	1800	229	204	For He Test
"	63DSB9	172	M55b	405/445	1800	229	203	For He Test
"	63DSB11	30	M70a	405/445	1800	229	202	For Metallography
"	63DSB11	30	M70b	405/445	1800	229	200	For Metallography

NB : All "b" welds of tube 172 mm long (= 200 mm length of test pieces) are made under 0.75 bar Helium.

All other welds are made under vacuum.

表-11 試験片製作時の溶接パラメータ (高強度F/M鋼)

Sequence of Welds for the Manufacture of Production Test Pieces in 62FSO (Non ODS)

Date (M/D/Y)	Material Identifica- tion	Tube Length (mm)	Weld No.	Machine Setting (Heat) 1000 = 100 %	Force (N)	Mains Voltage (V)	Weld W.s	Observations
3/5/92	62FSO76	172	N71a	405/445	1600	229	201	For He Test
"	62FSO76	172	N72a	405/445	1600	228	202	For He Test
"	62FSO76	172	N73a	405/445	1600	229	203	For He Test
"	62FSO77	172	N74a	405/445	1600	230	203	For He Test
"	62FSO77	172	N75a	405/445	1600	228	203	For He Test
"	62FSO77	172	N76a	405/445	1600	229	204	For He Test
"	62FSO77	172	N77a	405/445	1600	229	203	For He Test
"	62FSO77	172	N78a	405/445	1600	229	203	For He Test
"	62FSO77	172	N79a	405/445	1600	230	204	For He Test
"	62FSO77	172	N80a	405/445	1600	230	204	For He Test
"	62FSO77	172	N81a	405/445	1600	230	204	For He Test
"	62FSO77	172	N82a	405/445	1600	229	204	For He Test
"	62FSO77	172	N83a	405/445	1600	229	205	For He Test
"	62FSO77	172	N84a	405/445	1600	229	204	For He Test
"	62FSO78	172	N85a	405/445	1600	229	204	For He Test
"	62FSO78	30	N86a	405/445	1600	230	204	For Metallography
"	62FSO78	30	N86b	405/445	1600	230	204	For Metallography
"	62FSO78	172	N85b	405/445	1600	231	204	For He Test
"	62FSO77	172	N84b	405/445	1600	230	204	For He Test
"	62FSO77	172	N83b	405/445	1600	231	204	For He Test
"	62FSO77	172	N82b	405/445	1600	230	204	For He Test
"	62FSO77	172	N81b	405/445	1600	230	204	For He Test
"	62FSO77	172	N80b	405/445	1600	230	204	For He Test
"	62FSO77	172	N79b	405/445	1600	230	204	For He Test
"	62FSO77	172	N78b	405/445	1600	231	204	For He Test
"	62FSO77	172	N77b	405/445	1600	231	205	For He Test
"	62FSO77	172	N76b	405/445	1600	231	206	For He Test
"	62FSO77	172	N75b	405/445	1600	232	204	For He Test
"	62FSO77	172	N74b	405/445	1600	231	204	For He Test
"	62FSO76	172	N73b	405/445	1600	231	204	For He Test
"	62FSO76	172	N72b	405/445	1600	231	204	For He Test
"	62FSO76	172	N71b	405/445	1600	231	206	For He Test

NB : All "b" welds of tube 172 mm long (= 200 mm length of test pieces) are made under 0.75 bar Helium.
All other welds are made under vacuum.