

抵抗溶接法の開発(1)

[抵抗溶接法の基本特性評価試験および
クミール5照射用試験片の製作]

1995年1月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:Technical Information Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome , Akasaka,Minato-ku,tokyo 107,JAPAN

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術情報室

© 動力炉・核燃料開発事業団
(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

抵抗溶接法の開発(1)

抵抗溶接法の基本特性評価試験およびクミール5照射用試験片の製作

実施責任者	上村 勝一郎 ^{*1}	関 正之 ^{*1}
報告者	西山 元邦 ^{*1}	石橋 藤雄 ^{*1}
	塙田 竜也 ^{*2}	
	井坂 和彦 ^{*2}	

要 旨

(目的)

抵抗溶接法は、接合面近傍の母材は溶融せず、軟化した状態で接合するため、熱影響部の幅はTIG溶接法等の融接法に比べ非常に小さくなる。

そこで、酸化物分散強化型鋼（以下「ODS鋼」と言う）を溶接するため、加圧抵抗溶接（PRW—Pressurized Resistance Welding）法の技術開発を行うこととし、本溶接法に関する基本特性の把握、クミール5照射試験（高速実験炉「常陽」にて実施する）のための試験片の製作を行い、その結果が得られたので報告する。

(結果)

(1) 今回13KA（電流）2cycle（通電時間）250kgf（加圧力）で溶接した試料は、未接合部は無く被覆管と端栓の接合状態は良好なものが得られたが、高温引張試験において接合部破断となった。また、熱影響部の幅は、1.0mmとBN社のものより若干大きい程度であった。

今後は、硬さ低下を少なくする、熱影響部の幅を狭くする等の溶接条件のさらなる検討（入熱パターンを変える・突き合わせ部の変更等）を行う必要がある。

(2) 今回、接合面の元素分析の結果、EPMAレベルではTi、Y等の耐熱元素の凝集は確認されなかった。今後は、接合部に溶融相が残っているかどうかをTEM等により解析を行う必要がある。

(3) 装置付属機器の改善について以下のことがらを実施した。

① 被覆管コレットチャックの隙間を0.3mmにすることにより、全体にわたり熱が均一にもたらされ、未接合部の無い接合部が得られた（今後はさらに狭くする）。

② 多分岐型の給電部にすることにより、チャックとホルダの接触面の電食を無くした。

(4) 今回は、常温・高温引張試験のみによる強度評価を行ったが、今後は、これらの試験に加えて内圧・単軸クリープ、回転曲げ疲労試験等のデータを採取し接合部の健全性評価を行う。

(5) 接合部の品質保証は、モニタリング機器による溶接条件の管理および超音波探傷法を用いた検査法の開発を行う予定である。

*1 核燃料技術開発部 ブルトニウム燃料開発室

*2 (株)原子力技術

目 次

I はじめに	1
II 試験概要	2
III 抵抗溶接装置	3
1.1 抵抗溶接法の原理	3
1.2 装置概要	3
IV 試験方法	7
1 供試材について	7
1.1 供試材	7
1.2 供試材の組合せ	7
1.3 供試材成分・強度	8
1.4 供試材形状	12
2 試験内容	13
2.1 装置特性評価試験	13
2.2 溶接特性評価試験	13
2.2.1 接合部の硬さ測定	13
2.2.2 接合部のSEM観察およびEPMA分析	13
2.3 溶接条件選定試験	13
2.4 BN社溶接試験片との比較	13
V 試験結果	15
1 装置特性評価試験	15
1.1 設定電流と溶接電流	15
1.2 被覆管スティックアウトについて	16
1.3 芯振れ測定	17

1.4 被覆管の外径収縮量の測定	18
1.4.1 溶接前の被覆管外径収縮量	18
1.4.2 溶接後の被覆管外径収縮量	18
1.5 低い加圧力による溶接不良	20
1.6 溶接電流と被覆管変位量および端栓変位量	21
1.6.1 溶接電流と変位量	21
1.6.2 溶接加圧力と変位量	21
1.6.3 溶接時間と変位量	21
 2. 接合部の挙動確認試験	23
2.1 溶接後の硬さおよび熱影響部幅	23
2.1.1 硬さおよび熱影響部幅測定結果	23
2.1.2 BN社溶接材との硬さおよび熱影響部幅の比較	29
2.2 接合部のSEM観察およびEPMA分析	30
 3. 端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 63DSB・1DS (ODS鋼) の溶接試験	32
3.1 溶接条件選定試験	32
3.1.1 金相結果	32
3.1.2 引張試験結果	32
3.2 選定した溶接条件	32
 4. 端栓 MA957 (ODS鋼) - 被覆管 F22・1DS (ODS鋼) の 溶接試験	35
4.1 溶接条件の選定試験	35
4.1.1 端栓スティックアウトと接合部の硬さ (MA957-F22)	35
4.1.2 溶接時間と接合状態 (MA957-F22)	35
4.1.3 溶接電流と接合状態 (MA957-F22)	35
4.1.4 常温・高温 (650°C) 引張試験-バリ無し-による確認試験 (MA957-1DS)	36

4.1.5 単軸クリープ試験(650°C)後の接合部破断面のSEM観察	36
4.1.6 まとめ	37
VI PNC、BN社溶接結果の比較	
1 62PFS(端栓) - 63DSB(被覆管)	49
VII クミール5照射試験片の製作	
1 溶接条件	50
2 金相結果	52
3 硬さ測定結果	53
3.1 端栓 MA957(ODS鋼) - 被覆管材 1DS(ODS鋼)	53
3.2 端栓 62PFS(F/M鋼) - 被覆管材 1DS(ODS鋼)	53
4 引張試験結果	54
4.1 管状試験片の引張試験結果	54
4.2 短冊型試験片の引張試験結果	55
5 試料寸法・重量	56
5.1 管状試験片の寸法・重量	56
5.2 短冊型試験片の寸法・重量	57
6 照射条件・装荷本数	58
6.1 管状試験片	58
6.2 短冊型試験片	58
VIII 装置付属機器の問題点とその改善	
1 記録計およびセンサ類の問題	59
1.1 パラメータ記録計の入力チャンネル数の不足	59
1.2 変位センサのノイズの問題	59
1.3 溶接ヘッドの動作の定量化	59
2 チャックの隙間による未接合部の発生	61
3 給電部の電食の発生	61

IX まとめ	65
1 装置特性評価試験	65
1.1 端栓スティックアウトと溶接電流の上限値	65
1.2 被覆管スティックアウトについて	65
1.3 芯振れ測定	65
1.4 被覆管外径収縮量の測定	65
1.5 低い加圧力による溶接不良	65
2 接合部の挙動	66
2.1 接合部の硬さ測定	66
2.1.1 62PFS (F/M鋼 端栓) - 62FS (F/M鋼 被覆管) の場合	66
2.1.2 MA957 (ODS鋼 端栓) - F22、1DS (ODS鋼 被覆管) の場合	66
2.1.3 溶接条件と接合部の硬さ	66
2.1.4 熱影響部の幅	66
2.2 接合部のSEM観察と元素分析	66
3 溶接条件の選定および強度試験	67
3.1 62PFS (F/M鋼 端栓) - 63DSB、1DS (ODS鋼 被覆管) の溶接	67
3.2 MA957 (ODS鋼 端栓) - F22、1DS (ODS鋼 被覆管) の溶接	67
4 クミール5照射試験片の製作	68
5 装置付属機器の改善	68
6 今後の試験について	69
7 参考文献	71

図一リスト

図一1 抵抗溶接の原理	4
図一2 抵抗溶接装置組立図	5
図一3 コレットチャックの形状	6
図一4 供試材形状	12
図一5 端栓スティックアウトと溶接電流	15
図一6 BN被覆管外径測定結果(62FS)	19
図一7 PNC被覆管外径測定結果(62FS)	19
図一8 PNC被覆管外径測定結果(63DSB)	20
図一9 溶接電流と被覆管変位置及び端栓変位置(MA957-F22)	22
図一10 端栓・被覆管の変位置測定方法	22
図一11 62PFS-62FS材硬さ測定結果	24
図一12 62PFS-1DS材硬さ測定結果	27
図一13 62PFS-63DSB材硬さ測定結果(BN社溶接材)	27
図一14 MA957-1DS材硬さ測定結果	28
図一15 硬さ測定位置	38
図一16 MA957-F22材接合部近傍の硬さ測定結果(端栓SO=5mm)	39
図一17 MA957-F22材接合部近傍の硬さ測定結果(端栓SO=2mm)	39
図一18 短冊型試験片の製作方法	51
図一19 MA957-1DS材硬さ測定結果	53
図一20 62PFS-1DS材硬さ測定結果	53
図一21 管状試験片寸法	56
図一22 短冊型試験片寸法測定部位	57
図一23 溶接パラメータ記録計の波形表示	60
図一24 チャック部隙間と未接合部	62
図一25-1 納電部の改良	63
図一25-2 納電部の改良	64

表－リスト

表－1	抵抗溶接装置性能	4
表－2	供試材	7
表－3	供試材の組合せ(1)	7
表－4	供試材の組合せ(2)	7
表－5	供試材の組合せ(3)	7
表－6	供試材成分(62FS 被覆管材)	8
表－7	機械的強度(62FS 被覆管材)	8
表－8	供試材成分(62PFS 端栓材)	9
表－9	機械的強度(62PFS 端栓材)	9
表－10	供試材成分(63DSB 被覆管材)	10
表－11	機械的強度(63DSB 被覆管材)	10
表－12	供試材成分(F22 被覆管材)	10
表－13	供試材成分(1DS 被覆管材)	11
表－14	機械的強度(1DS 被覆管材)	11
表－15	供試材成分(MA957 端栓材)	12
表－16	接合部評価試験一覧表	14
表－17	被覆管スティックアウトと接合状態	16
表－18	芯振れ量測定結果	17
表－19	溶接不良が発生した時の加圧力	20
表－20	溶接電流・端栓スティックアウトと熱影響部の幅	25
表－21	溶接加圧力と熱影響部の幅	25
表－22	溶接時間と熱影響部の幅	26
表－23	被覆管スティックアウトと熱影響部の幅	26
表－24-1	溶接後の硬さの変化および熱影響部の幅 端栓材 62PFS (F/M鋼) - 被覆管材 62FS (F/M鋼) ...	29
表－24-2	溶接後の硬さの変化および熱影響部の幅 端栓材 62PFS (F/M鋼) - 被覆管材 1DS (ODS鋼)	29

表-24-3 溶接後の硬さの変化および熱影響部の幅

端栓材 MA 957 (ODS鋼) - 被覆管材 1DS (ODS鋼)	30
表-25 常温引張試験-バリ無し (62PFS-1DS)	33
表-26 常温引張試験-バリ有り (MA 957-F22)	40
表-27 高温 (650°C) 引張試験-バリ有り (MA 957-F22)	40
表-28 選定した溶接条件 (MA 957-1DS)	44
表-29 常温・高温 (650°C) 引張試験-バリ無し (MA 957-1DS) ...	44
表-30 端栓 MA 957 (ODS鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼) の溶接 条件	50
表-31 端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼) の溶接 条件	50
表-32 管状試験片の引張試験結果	
端栓 MA 957 (ODS鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼)	54
表-33 管状試験片の引張試験結果	
端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼)	54
表-34 短冊型試験片の引張試験結果	
端栓 MA 957 (ODS鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼)	55
表-35 管状試験片重量	56
表-36 短冊型試験片の寸法・重量測定結果	57
表-37 管状試験片の照射条件・装荷本数	58
表-38 短冊型試験片の照射条件・装荷本数	58

写真リスト

写真一1 抵抗溶接装置	4
写真一2 接合部のSEM像 (MA 957-63DSB)	31
写真一3 接合面部の元素分析結果 (MA 957-63DSB)	31
写真一4 溶接試料断面金相写真 (62PFS-1DS)	34
写真一5 溶接時間を変化した場合の金相写真 (MA 957-F22)	41
写真一6 溶接試料断面金相写真 (MA 957-F22)	42
写真一7 高温引張試験 (650°C—バリ有り) 後の金相写真 (MA 957-F22)	
	43
写真一8 溶接試料断面金相写真 (MA 957-1DS)	45
写真一9-1 単軸クリープ試験後の接合部破断面 (端栓) のSEM像	46
写真一9-2 単軸クリープ試験後の接合部破断面 (端栓) のSEM像	47
写真一9-3 単軸クリープ試験後の接合部破断面 (端栓) のSEM像	48
写真一10 BN社とPNC溶接試料の金相写真の比較	
端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 63DSB (ODS鋼)	49
写真一11 端栓 MA 957 (ODS鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼) の溶接後 の溶接部の金相写真	52
写真一12 端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼) の溶接後 の溶接部の金相写真	52

I はじめに

酸化物分散強化型鋼（ODS鋼）の溶接に、従来のTIG溶接、レーザ溶接法等の溶融接合法を用いると、鋼中のチタンや酸化イットリウム等の耐熱元素が凝集し空孔を形成して欠陥となり、所定の強度が得られないことが判明した¹⁾。

そこで、溶融を起こさずに材料を接合させることのできる溶接法が必要となり、種々の溶接法を検討した結果、パルス磁気溶接法および抵抗溶接法が有用であることが分かり、ODS鋼等の新材料を溶接する手法として、パルス磁気溶接法については、1988年よりこれまで、溶接特性の把握、接合部の強度試験等^{2) 3)}を行ってきており、抵抗溶接法については、国産技術を用い1991年から、装置の開発に着手し⁴⁾、1992年12月に装置の製作を完了して技術開発を開始した。

抵抗溶接は、接合面近傍の母材は溶融せず、軟化した状態で接合するため、熱影響部の幅は、TIG溶接法等に比べて非常に狭くなることが特徴である⁵⁾。

本報告書は、抵抗溶接法によるODS鋼の溶接条件を確立するために装置・材料の基本的特性評価および溶接条件の選定、照射試験片の製作を行った結果について記述する。

II 試験概要

試験は、高強度フェライト／マルテンサイト鋼（以下「F／M鋼」と言う）を用い、本装置の基本的特性を把握するとともに各溶接パラメータの接合状態への影響を確認し、健全な接合部の得られる条件を金相試験、硬さ試験、機械的特性評価試験（常温・高温引張試験等）により見出し、次に、それらの試験で得られたデータを参考に、ODS鋼の溶接条件の絞り込みを同様の手順で行う。

III 抵抗溶接装置

1.1 抵抗溶接法の原理

抵抗溶接は、図-1の様に、溶接する部材同士（この場合は、被覆管と端栓）を突き合わせ、その両端に加圧力を加えながら、チャックより高電流を流すと、接合面の接触抵抗で材料が発熱し、その熱と圧力により材料が接合するというものである。

1.2 装置概要

ODS鋼等の新材料の溶接を行う目的で製作した、抵抗溶接装置を写真-1に、組立図を図-2に示す。

本装置の特徴は、インバータ方式の溶接電源を採用することにより、一定の電流が供給されるため、溶接パラメータの管理が容易で、また、短時間の溶接が可能であるため、材料の組織に極力影響を与えることなく溶接が行えることである。

溶接加圧用には、空気圧を用い、被覆管ザクツ時の溶接ヘッドのレスポンスを良くしている。また、被覆管のチャックには、締め付け力を高めるため、油圧のシリンダーを用いている。

なお、本装置は、将来は核燃料を封入したピンの溶接を行うことを考え、グローブボックスがそのまま取り付けられる様にステンレス製の厚板の上に乗っている。また、加圧した燃料ピンの溶接が行えるものとなっている。装置性能を表-1に、コレットチャックの形状を図-3に示す。

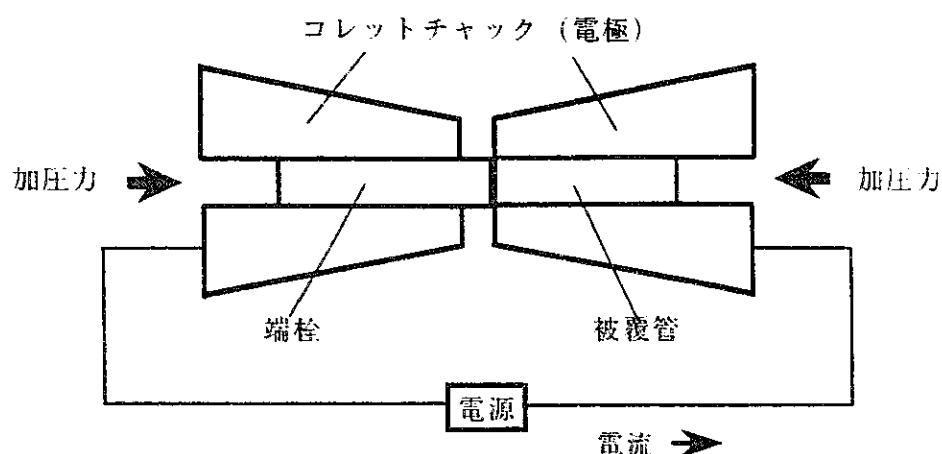


図-1 抵抗溶接の原理

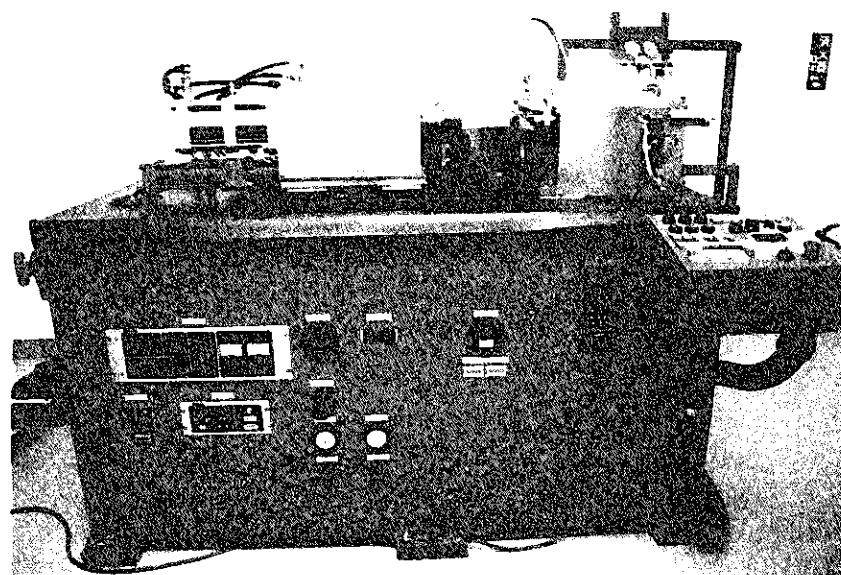


写真-1 抵抗溶接装置

表-1 抵抗溶接装置性能

使用電源	主開閉器 200 KVA 定格要領 150 KVA
溶接電流	0～25 KA (電圧5V)
通電時間	0から0.1 msec単位で設定可
加圧力	0～1200 kgf
真空排氣能力	5×10 ⁻⁴ torr (10分)

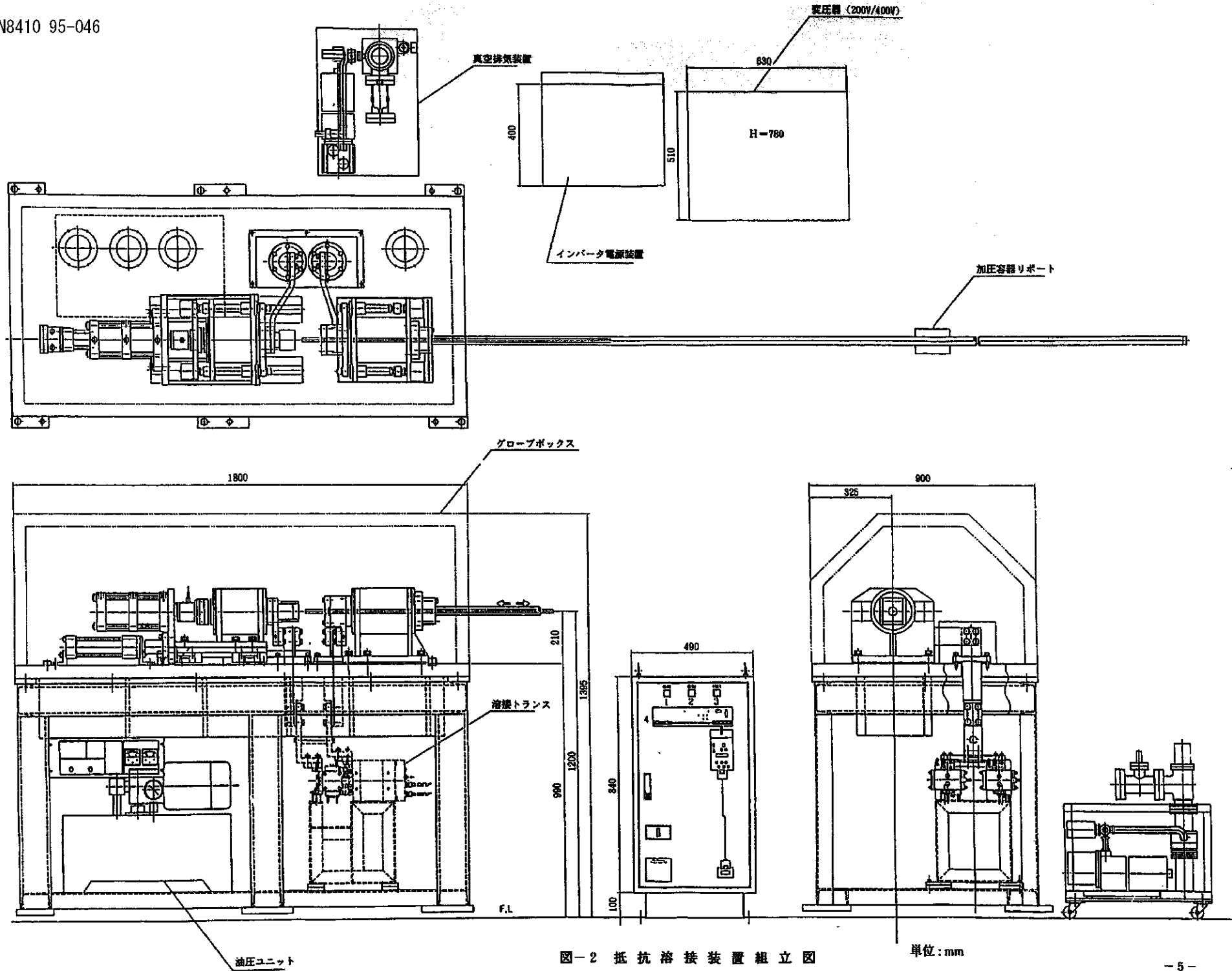
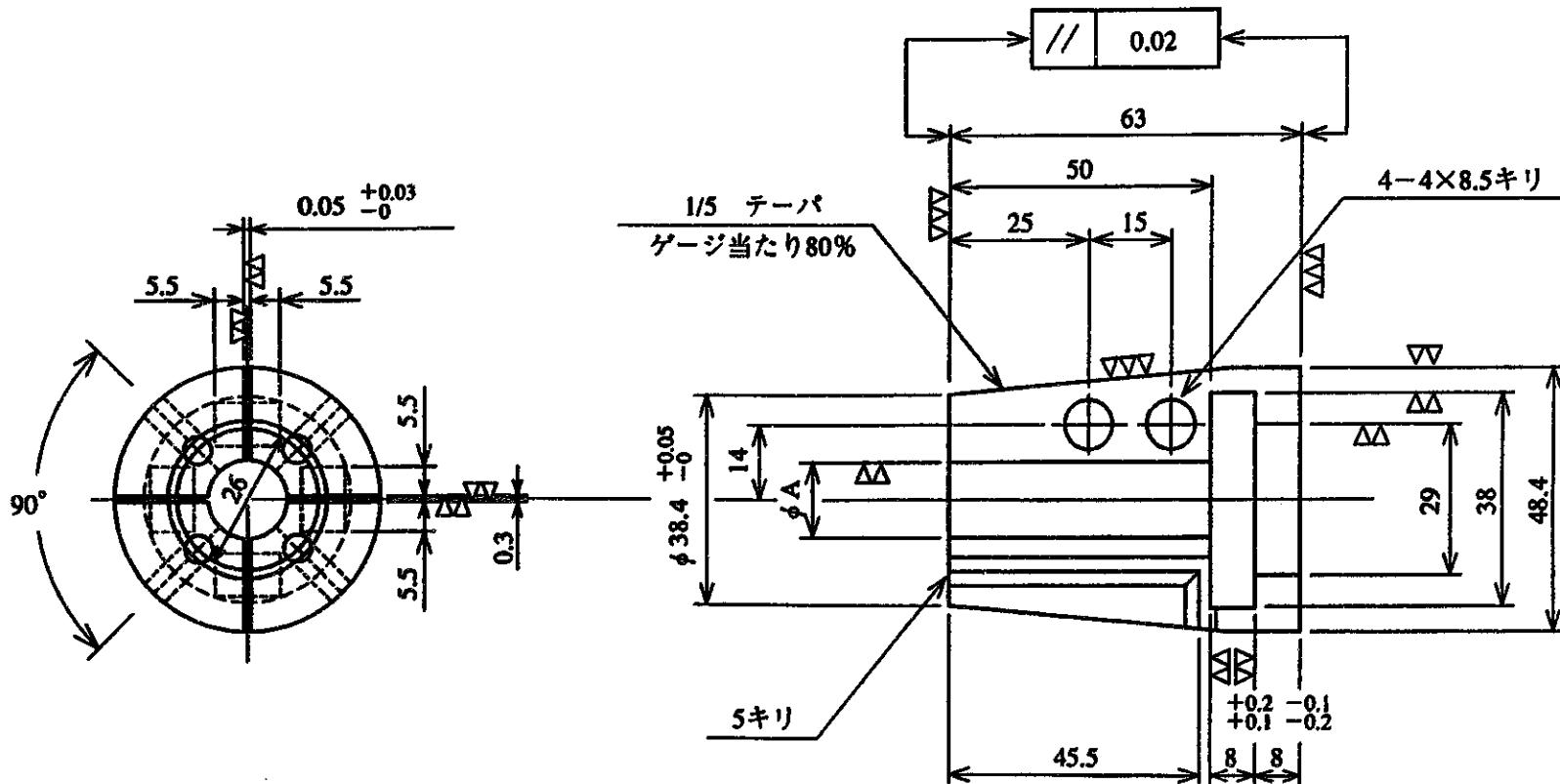


図-2 抵抗溶接装置組立図

単位:mm



単位 : mm

図-3 コレットチャックの形状

IV 試験方法

1 供試材について

1.1 供試材

表-2に溶接試験に使用した部材の種類を示す。

表-2 供試材

端栓		被覆管	
F/M鋼	ODS鋼	F/M鋼	ODS鋼
62PFS	MA957	62FS	63DSB F22 1DS

1.2 供試材の組合せ

表-3～5に供試材の端栓と被覆管の組み合わせを示す。

本来の試験の目的は、ODS鋼の端栓とODS鋼の被覆管の溶接であるが、ODS鋼材の端栓、被覆管が少ないため、抵抗溶接装置の基本特性の評価はF/M鋼の端栓、被覆管を用いて行った。

なお、F/M鋼の端栓とODS鋼の被覆管の組み合わせは、異種材同士の場合、どのような接合状態になるのかを把握するために行った。

表-3 供試材の組合せ(1)

	端栓	被覆管
鋼種	F/M鋼	F/M鋼
使用部材	62PFS	62FS

表-5 供試材の組合せ(3)

	端栓	被覆管
鋼種	ODS鋼	ODS鋼
使用部材	MA957	63DSB F22 1DS

表-4 供試材の組合せ(2)

	端栓	被覆管
鋼種	F/M鋼	ODS鋼
使用部材	62PFS	63DSB

1.3 供試材成分・強度

表-6～15に使用した部材の化学成分、機械的強度等を示す。

1.3.1 F/M鋼

(1) 62FS(被覆管材)

表-6 供試材成分(62FS 被覆管材)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
0.12	0.07	0.69	0.002	0.002	0.84	11.10	0.11	0.001

B	N	Cu	W	V	Nb	Fe
0.002	0.04	0.01	2.09	0.21	0.05	Bal

表-7 機械的強度(62FS 被覆管材)

常温引張試験			高温引張試験(650°C)		
引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)
77.3	65.4	16	27.5	19.9	33

内圧バースト試験		硬さ (Hv)
破裂内圧 (kg/cm ²)	降伏応力 (kg/cm ²)	
940	805	240

(2) 62PFS(端栓材)

表-8 供試材成分(62PFS 端栓材)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
0.12	0.07	0.69	0.002	0.002	0.84	11.10	0.11	0.001

B	N	Cu	W	V	Nb	Fe
0.002	0.04	0.01	2.09	0.21	0.05	Bal

表-9 機械的強度(62PFS 端栓材)

常温引張試験			高温引張試験(650°C)			硬さ (Hv)
引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	
78.2	61.2	16	30.4	20.5	30	250

1.3.2 ODS鋼

(1) 63DSB (被覆管材)

表-10 供試材成分 (63DSB 被覆管材)

C	Cr	W	Ti	Y ₂ O ₃	Fe
0.11	11.20	2.00	0.73	0.30	Bal

表-11 機械的強度 (63DSB 被覆管材)

常温引張試験			高温引張試験(650°C)		
引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)
123.0	109.8	14	56.8	49.4	15

内圧バースト試験		硬さ
破裂内圧 (kg/cm ²)	降伏圧力 (kg/cm ²)	(Hv)
1505	1395	365

(2) F22 (被覆管)

表-12 供試材成分 (F22 被覆管材)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Ti	Nb
0.052	0.018	0.012	<0.005	0.001	12.67	0.065	2.79	-	0.85

N	O	Y ₂ O ₃	Fe
0.0106	0.107	0.28	Bal

(3) 1 D S (被覆管)

表-13 供試材成分 (1 D S 被覆管)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
0.09	0.05	0.03	0.003	0.002	0.15	10.98	<0.01	<0.05

B	Ti	W	Y ₂ O ₃	N	O	Fe
0.0003	0.40	2.67	0.63	0.014	0.07	Bal

表-14 機械的強度 (1 D S 被覆管材)

常温引張試験			常温引張試験(650°C)		
引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)
151.43	134.89	10	67.35	60.94	14

内圧バースト試験		硬さ
破裂内圧 (kg/cm ²)	降伏圧力 (kg/cm ²)	(Hv)
1596	1450	433

(4) MA 9 5 7 (端栓)

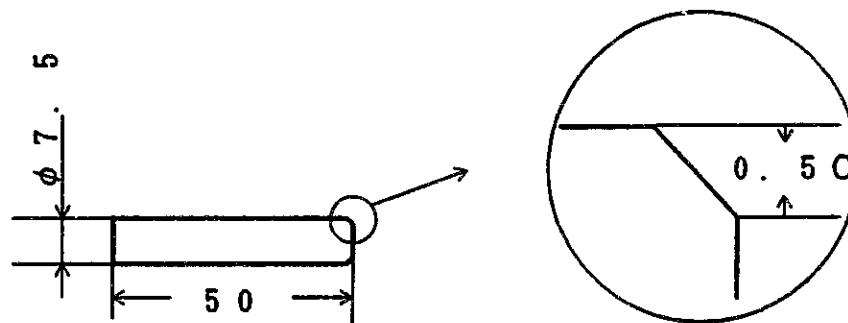
表-15 供試材成分 (MA 9 5 7 端栓材)

C	Si	Cu	Mn	Cr	Ti	Al	Co	Mo
0.017	0.04	0.04	0.06	14.17	0.99	0.06	0.03	0.30

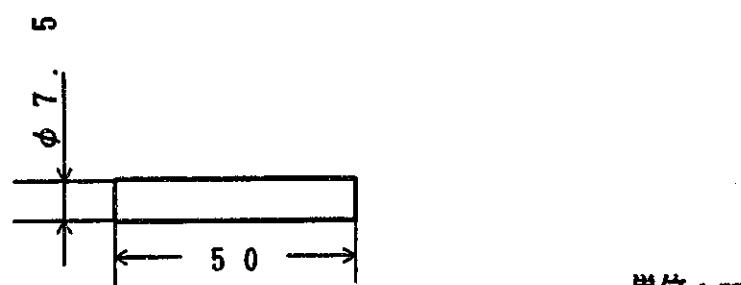
Ni	P	S	Y ₂ O ₃	N	O	Fe
0.13	0.005	0.006	0.27	0.045	0.22	Bal

1.4 供試材形状

以下に、溶接試験に使用した供試材の形状を示す。



端栓形状



被覆管形状

図-4 供 試 材 形 状

2 試験内容

各材料の適切な溶接条件を把握するために以下に示す試験を行い評価する。これらを一覧表にしたものと表-16に示す。

2.1 装置特性評価試験

装置および抵抗溶接の基本的特性を把握するために以下の様なことからについて、確認する。

(1) 溶接を行う上で重要となる、溶接電流の上限値の把握

- ① 端栓と被覆管のチャックからの突き出し長さによる上限値の変化
- ② 加圧力による上限値の変化
- ③ 溶接後の被覆管と端栓の芯振れ、被覆管の変形の度合い

2.2 溶接特性評価試験

2.2.1 接合部の硬さ測定

溶接時の入熱により、接合部の硬さがどのように変化するのか、また、熱影響部の幅はどの程度になるのかを確認する。

2.2.2 接合部のSEM観察およびEPMA分析

接合部のSEMによる観察を行い未接合の有無、接合状態を観察する。また、EPMAを用いて接合強度に影響を及ぼすTi、Y等の耐熱元素の分布状態を観察する。

2.3 溶接条件選定試験

接合状態を決める溶接パラメータは溶接電流、溶接時間、溶接加圧力、端栓スティックアウト（突き出し長さ）、被覆管スティックアウト等である。

以上のパラメータを変化させ金相試験、常温・高温引張試験により、その時の接合状態および強度を評価する。

また、SEMにより引張試験破断部の破断形態の観察も行う。

2.4 BN社溶接試験片との比較

我々の装置で溶接した試験片と、同材料をBN社の装置で溶接した試験片を比較し各々の接合部の特性について評価する。

表-16 接合部評価試験一覧表(1)

試験項目	目的	評価項目	方 法
1. 金相試験	各溶接パラメータの接合状態に及ぼす影響を、総合的に評価する。	<ul style="list-style-type: none"> ・接合長さ ・溶融の有無 ・熱影響部の幅 ・被覆管の端栓へのザクツの程度 ・バリの形状等 	溶接後試料を縦または横割にし、その断面を観察する(全試料)。
2. 硬さ測定	溶接時の入熱及び加圧により、材料の硬さがどの様に変化するのかを把握し、熱影響部の幅、残留応力、熱処理の必要性について検討する。	<ul style="list-style-type: none"> ・接合部硬さ分布 ・熱影響部の幅 	各パラメータ試験(溶接電流、溶接加圧力、端栓スティックアウト等)を行ったものの中から、数試料を抜粋し硬さ測定を行う。
3. 試料の外径測定	コレットの締め付けにより、被覆管がどの程度変形するかを確認する。	・被覆管外径寸法	レーザ寸法測定装置により0.25mm間隔で測定。
4. 元素分析	接合部において、溶融部に特定の元素の凝集が無いことを確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ・元素の定性、定量分析(母材との比較) 	EPMA、TEMを用い、接合が良好で、溶接電流の異なる2試料を調査する
5. 引張試験(常温) (高温-650°C)	接合部より破断しないことを確認し、接合部の健全性を評価する。	<ul style="list-style-type: none"> ・引張強度 ・破断伸び ・破断位置 	接合状態の良好な試料の中から、溶接電流、溶接加圧力の異なるもの数試料を用いて行う。
6. 破面観察	引張試験で破断した破面をSEMにより観察し、破断箇所の確認および破断形態の観察を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・破断部位 ・破断形態 	SEMを用い破断面の周上を低倍、高倍で観察する。

V 試験結果

1. 装置特性評価試験

1.1 設定電流と溶接電流

設定電流に対し、接合部にどの程度の電流が流れるかを端栓スティックアウトを変化させて調べた〔端栓材 62PFS(F/M鋼)と被覆管材 62FS(F/M鋼)〕。その結果を図-5に示す(この図でSPとはスパッタのこと)。

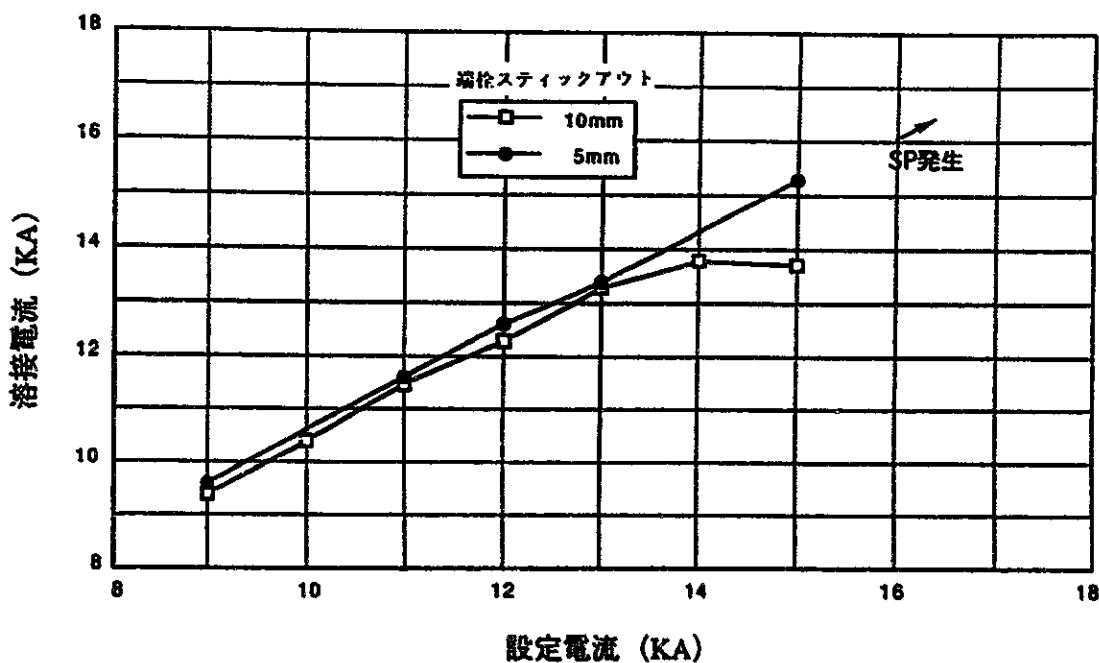


図-5 端栓スティックアウトと溶接電流 180kgf, 2cycle

この結果より分かることを示す。

- ① 端栓スティックアウト 10mmでは、溶接電流が 14 KAで飽和状態となる。
- ② 端栓スティックアウト 5mmでは 15 KAまで電流を流すことができるが、16 KA以上になると溶接不良が起きる(ただし、加圧力が 180kgf の場合は、加圧力を増せばより大きな電流が流すことが可能である)。
- ③ 端栓スティックアウトが短くなると、溶接電流は高くなる。

1.2 被覆管スティックアウトについて

被覆管スティックアウトを0、0.5、1mmと変化させ試料を溶接した。

溶接条件は表-17のとおりである。

その結果、スティックアウトを1mmにすると、被覆管の一部が溶融、飛散し溶接不良となる。このようなことから、被覆管スティックアウトは短いほうが良いと思われる。

表-17 被覆管スティックアウトと接合状態

電流 (KA)	時間 (cycle)	加圧力 (kgf)	端栓スティックアウト (mm)	被覆管スティック アウト (mm)	引張試験 破断部
1.2	2	180	1.0	0 0.5 1.0	被覆管 被覆管 接合部

1.3 芯振れ測定

本装置の端栓と被覆管の取付け角度（芯振れ量）を測定した結果を以下に示す。測定の方法は被覆管を水平な台上に置き被覆管を回転させながら、接合面から45mmの部分の端栓の上端の高さの最高値と最小値を測定し芯振れ量を決定した。

表-18 芯振れ量測定結果

	1回目	2回目	
MAX	23.858	23.882	単位 (mm)
MIN	23.720	23.713	
差	0.138	0.169	

芯振れ量の大きい2回目(0.169mm)の測定の場合は被覆管に対する端栓の振れ角は

$$\tan \theta = 0.169 / 45$$

$$\theta = 0.2152 (\text{°}) \quad \text{となる。}$$

これは燃料ピンの製作基準の25分以内に納まっている。

1.4 被覆管の外径収縮量の測定

1.4.1 溶接前の被覆管外径収縮量

被覆管をチャックでクランプした時点での外径収縮量は0.02mm程度である。

1.4.2 溶接後の被覆管外径収縮量

(1) BN社装置で溶接した場合¹⁾

① F/M鋼(62FS)

接合部より15mm程度の幅で0.05mm程度収縮している(図-6)。

② ODS鋼(63DSB)

接合部より15mm程度の幅で0.03mm程度収縮している(図-6)。

これらの結果からBN社のチャックの掴み幅は15mm程度であると思われる。

(2) PNC装置で溶接した場合

コレットチャックの形状を図-2に示す(前に記載)。このチャックの被覆管の掴み幅は45mmである。

① F/M鋼(62FS)

接合部より3mmのところまでは収縮が著しく0.02~0.03mm程度収縮しており、全体では0.01mm程度収縮している(図-7)。

② ODS鋼(63DSB)

接合部より3mmのところまでは0.025~0.05mm程度収縮しており、全体では0.02mm程度収縮している(図-8)。

BN社の装置で溶接したものに比べると外径の収縮量は小さいことが分かる。

被覆管の先端部が収縮するのは、溶接後の急冷により材料が熱収縮するためである。

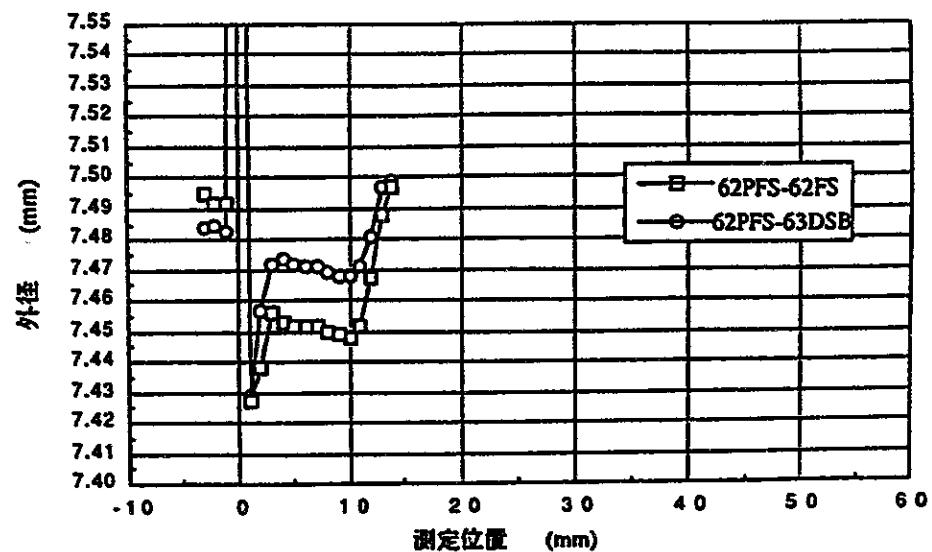


図-6 BN被覆管外径測定結果（62FS）

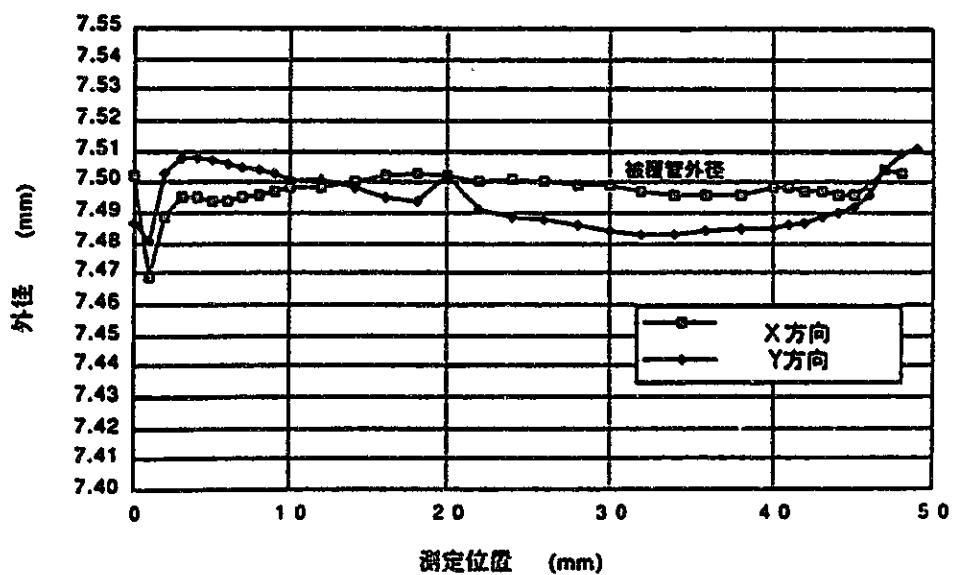


図-7 PNC被覆管外径測定結果（62FS）

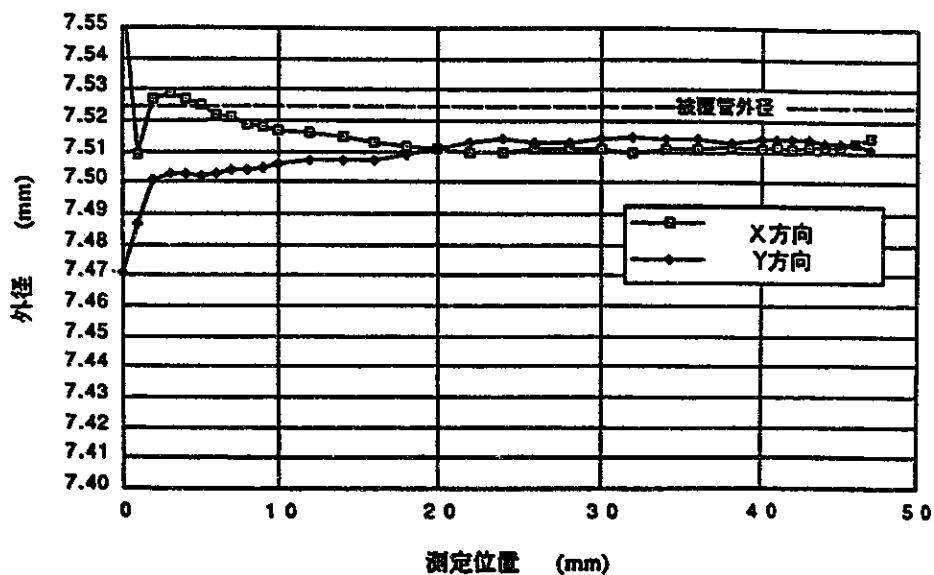


図-8 PNC被覆管外径測定結果(63DSB)

1.5 低い加圧力による溶接不良

溶接時に加圧力が低すぎると端栓と被覆管の接触部において溶融片が飛散し、不良な接合部となる。

表-19には溶接不良が発生した時の加圧力を示す。

表-19 溶接不良が発生した時の加圧力

端栓 MA957-被覆管 F22		
13KA	180kgf 200kgf 220kgf	溶接不良 溶接可 溶接可

1.6 溶接電流と被覆管変位量および端栓変位量

1.6.1 溶接電流と変位量

溶接電流およびその他のパラメータを変化させた時の被覆管、端栓の変位量を図-9に示す（ここで言う被覆管、端栓の変量とは図-10に示す部分である）。いずれの場合も溶接電流の増加とともに端栓、被覆管の変位量は増加していることが分かる。

1.6.2 溶接加圧力と変位量

加圧力による変位量の差を見てみると、加圧力が増すと被覆管の変位量は高くなる（0.1mm程度）ことが分かる。

1.6.3 溶接時間と変位量

溶接時間による変位量の差を見てみると、溶接時間を2.0 cycle より0.5 cycle ずつ低くすると被覆管の変位量は0.1mm程度ずつ減っている。

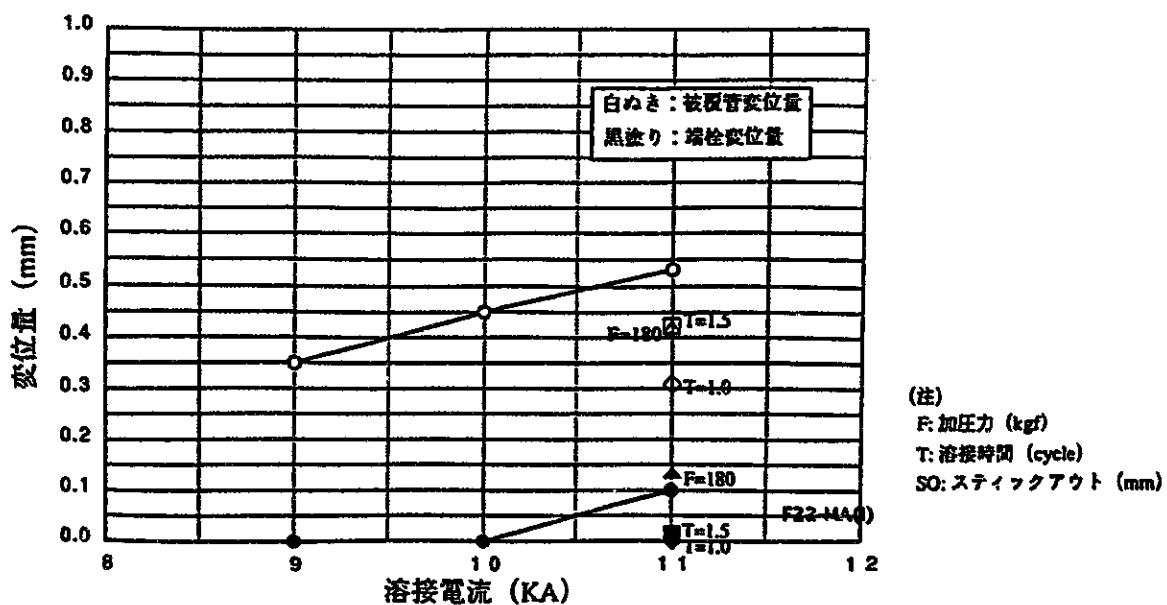
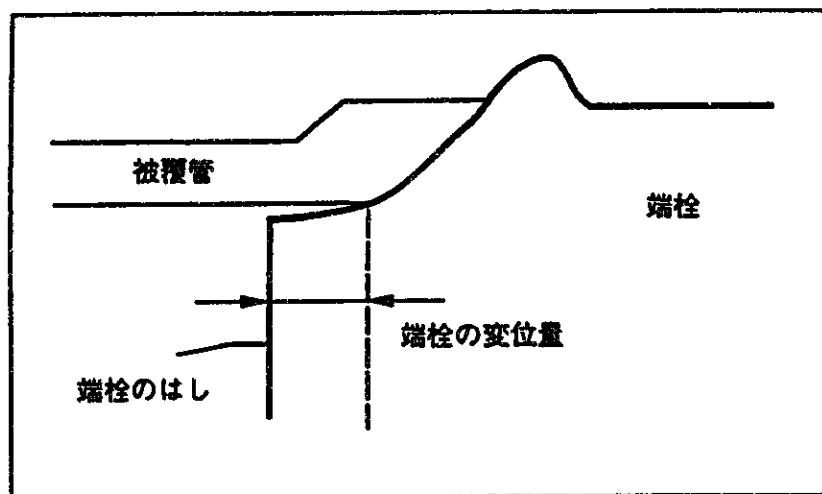


図-9 溶接電流と被覆管変位量及び端栓変位量

F 22-MA 957
 (F = 220kgf SO = 0 mm 開口有り)



被覆管の変位量 =
 全変位量 (ストレージスコープにて測定) - 端栓の変位量

図-10 端栓・被覆管の変位量測定方法

2 接合部の挙動確認試験

2.1 溶接後の硬さおよび熱影響部幅

2.1.1 硬さおよび熱影響部幅測定結果

(1) 端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 62FS (F/M鋼)

① 硬さ測定結果

12KA/13KA、2cycle、180kgf、被覆管スティックアウト0.5mm、端栓スティックアウト10mmで溶接した場合の硬さ測定結果を図-11に示す。

被覆管および端栓の、母材の硬さは250HV程度であったのに対し溶接後には500HV程度になる。

② 熱影響部の幅

各パラメータで溶接を行った場合において硬さを測定し熱影響部の幅を調べた。その結果を表-20~23に示す。

(2) 端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼)

① 硬さ測定結果

12KA、2cycle、250kgf、被覆管スティックアウト0mm、端栓スティックアウト3mmで溶接した場合の硬さ測定結果を図-12に示す。

端栓部の硬さは溶接により250HVから500HV程度に増加する。

B社の装置で62PFS (端栓) 材と63DSB (被覆管) 材を溶接した場合の硬さ測定結果を図-13に示す¹¹⁾。

この場合、熱影響部の幅はB社の場合は0.8mm (端栓側0.5mm被覆管側0.3mm)、我々の上記の条件の場合は1.0mm (端栓0.8mm、被覆管0.2mm) とやや大きくなった。

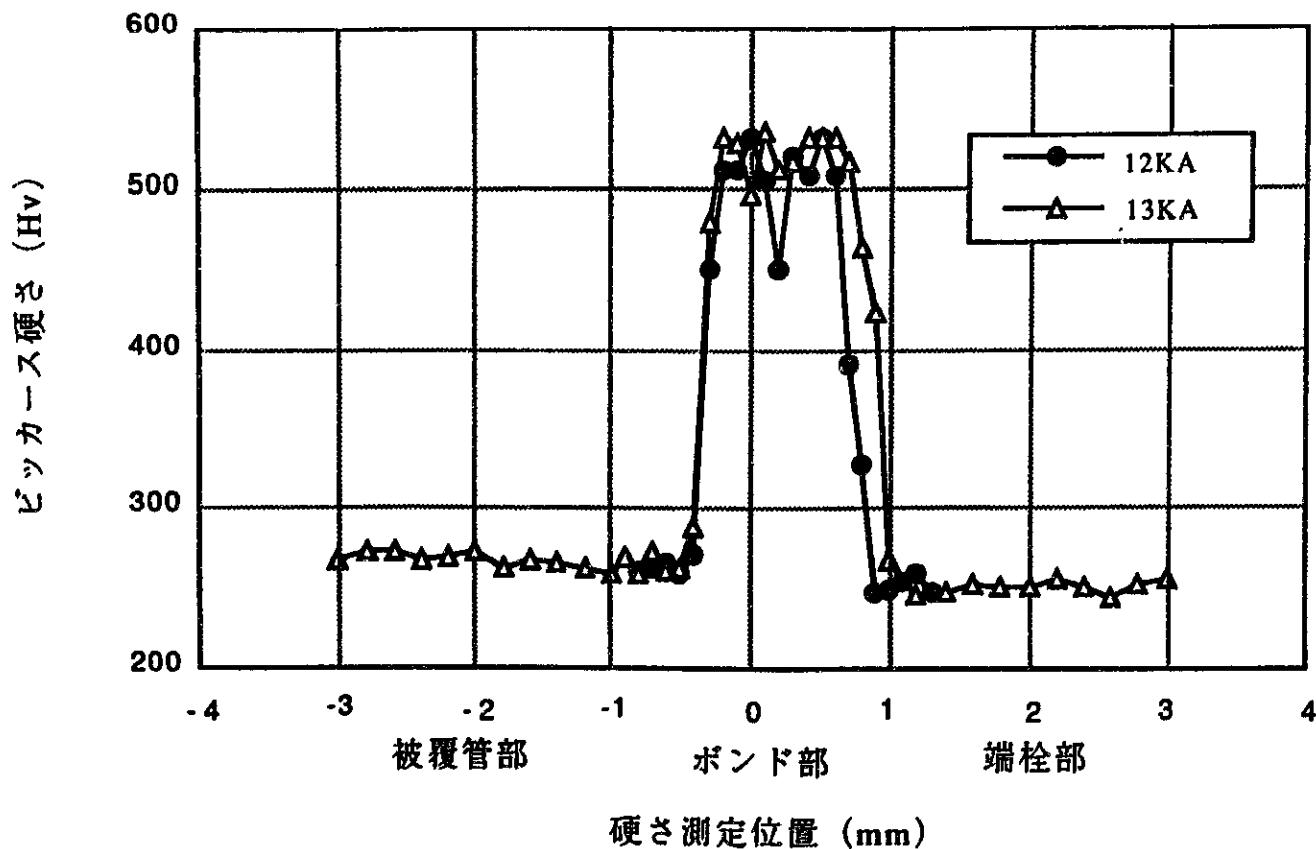
(3) 端栓 MA957 (ODS鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼)

① 硬さ測定結果

13KA、2cycle、250kgf、被覆管スティックアウト0mm、端栓スティックアウト3mmで溶接した場合の硬さ測定結果を図-14に示す。

端栓部の硬さは370HVの母材硬さから溶接後には280HV程度まで低下する。

熱影響部の幅は1.0mm (端栓側0.8mm、被覆管側0.2mm) となった。



12KA, 2cycle, 180kgf, 被覆管SO=10mm, 端栓SO=0.5mm 5.1.19-4

13KA, 2cycle, 180kgf, 被覆管SO=10mm, 端栓SO=0.5mm 5.1.19-5

図-11 62PFS-62FS材硬さ測定結果

表-20 溶接電流・端栓スティックアウトと熱影響部の幅

溶接電流 (KA)	被覆管 (mm)	端栓 (mm)
11	0.4	0.8
12	0.4	0.9
13	0.4	1.0
15	0.4	1.2

溶接時間 2 cycle
 溶接加圧力 180 kgf
 被覆管SO 0.5 mm
 端栓SO 10 mm

- ① 溶接電流が増加しても、被覆管側への熱影響部の幅は変わらない。
- ② 溶接電流の増加に伴い、端栓側への熱影響部の幅は長くなる。
- ③ BN社の溶接装置で溶接した場合の熱影響部の幅は0.9 mm（端栓側0.4 mm、被覆管側0.5 mm）程度となったが、我々の装置の場合は1.2～1.6 mm程度とやや広くなった。

表-21 溶接加圧力と熱影響部の幅

単位(mm)

		溶接加圧力 (kgf)												
		160		180		200		220		230		240		
溶接電流 (KA)		CL	EP	CL	EP	CL	EP	CL	EP	CL	EP	CL	EP	
		12			0.4	0.9	0.4	1.0	0.4	1.0			0.4	1.0
		13			0.4	1.0					0.5	0.9		

溶接時間 2 cycle

CL 被覆管

EP 端栓

溶接加圧力 180 kgf

被覆管SO 0.5 mm

端栓SO 10 mm

- ① 溶接電流が一定の場合、溶接加圧力により熱影響部の幅は、変化しない。

表-22 溶接時間と熱影響部の幅

	溶接時間 (サイクル)					
	1. 5		2. 0		2. 5	
	CL	EP	CL	EP	CL	EP
熱影響部の幅 (mm)	0.3	0.7	0.4	0.9	0.4	1.2

CL 被覆管 EP 端栓

溶接電流 12 KA
 溶接加圧力 180 kgf
 端栓SO 10 mm
 被覆管SO 0.5 mm

- ① 溶接時間を長くするに従って、端栓側の熱影響部の幅は大きくなる。

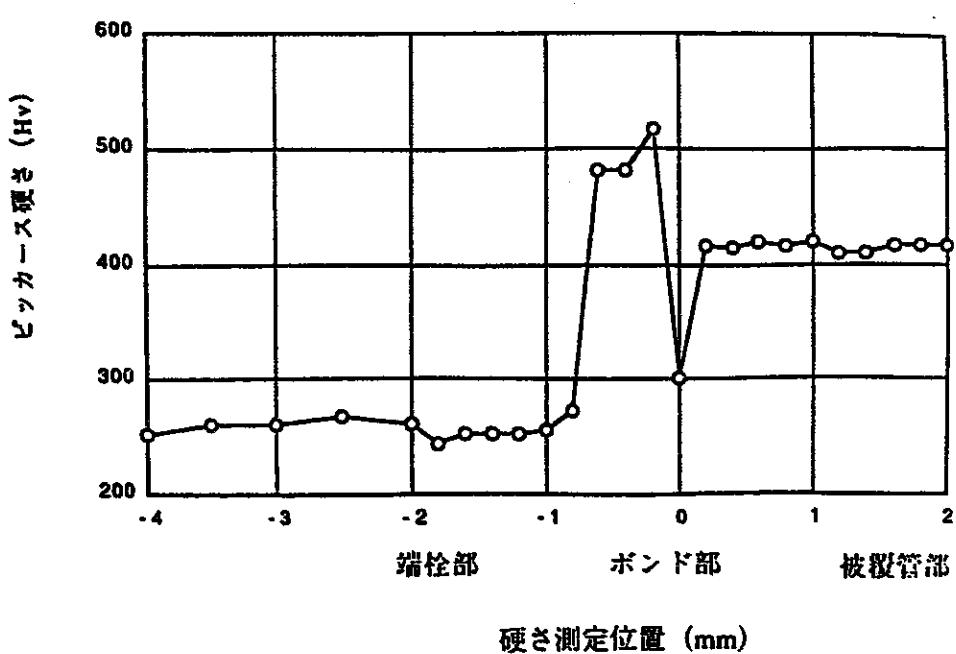
表-23 被覆管スティックアウトと熱影響部の幅

	被覆管スティックアウト (mm)			
	0		0.5	
	CL	EP	CL	EP
熱影響部の幅 (mm)	0.4	1.0	0.4	0.9

CL 被覆管 EP 端栓

溶接電流 12 KA
 溶接時間 2 cycle
 溶接加圧力 180 kgf
 端栓SO 10 mm

- ① 0.5 mmの被覆管スティックアウトの差では、熱影響部の幅にあまり影響しなかった。



12KA, 2cycle, 250kgf, 被覆管SO=0mm, 端栓SO=3mm FD-4

図-12 62PFS-1DS材硬さ測定結果

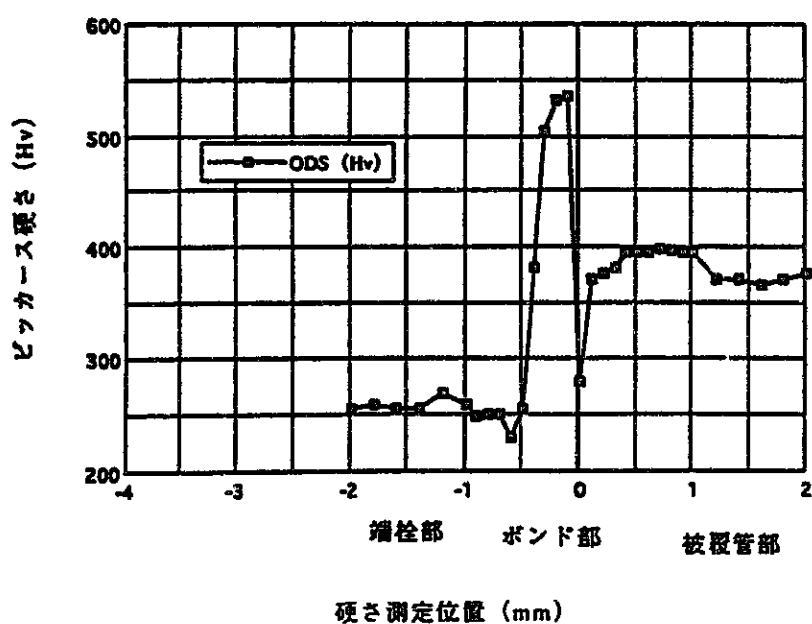
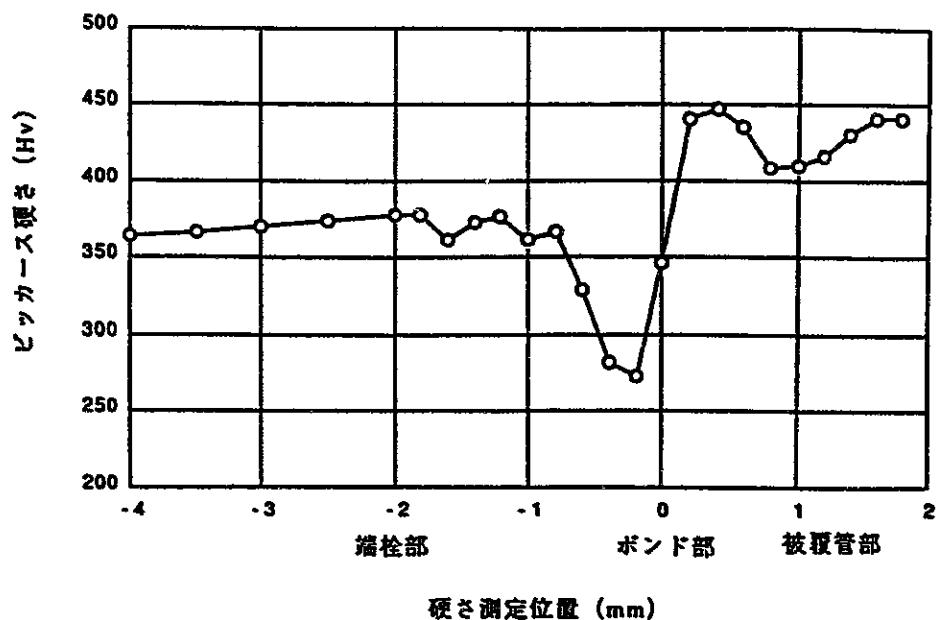


図-13 62PFS-63DSB材硬さ測定結果
(BN社溶接材)



13KA, 2cycle, 250kgf, 被覆管SO=0mm, 端栓SO=3mm 1DS-135

図-14 MA957-1DS材硬さ測定結果

2.1.2 BN社溶接材との硬さおよび熱影響幅の比較

表-24に各材料を溶接した場合の硬さおよび熱影響部の幅を示す。

BN社とPNCの溶接試験片の熱影響部を比べるとPNCの方が若干広くなるものほぼ同等の値を示す。

表-24-1 溶接後の硬さの変化および熱影響部の幅
端栓材 62PFS(F/M鋼)
被覆管材 62FS(F/M鋼)

PNC溶接材	
溶接条件	12KA 2cycle 180kgf 10mm 0.5mm
溶接後の硬さの変化	端栓母材部 250HV / 被覆管母材部 270HV 溶接後 ボンド部 530HVに硬化
熱影響部の幅	1.3mm (端栓側 0.9mm ^{*1} 、被覆管側 0.4mm)
BN社溶接材	
溶接条件	
溶接後の硬さの変化	端栓母材部 260HV / 被覆管母材部 260HV 溶接後 ボンド部 540HVに硬化
熱影響部の幅	0.9mm (端栓側 0.4mm、被覆管側 0.5mm)

* 1 端栓スティックアウトが10mmと大きかったため熱影響幅が広くなったと思われる

表-24-2 溶接後の硬さの変化および熱影響部の幅
端栓材 62PFS(F/M鋼)
被覆管材 1DS(ODS鋼)

PNC溶接材	
溶接条件	12KA 2cycle 250kgf 3mm 0mm
溶接後の硬さの変化	端栓母材部 250HV / 被覆管母材部 420HV 溶接後 ボンド部 300HVに軟化
熱影響部の幅	1.0mm (端栓側 0.8mm、被覆管側 0.2mm)
BN社溶接材 (被覆管材 63DSB)	
溶接条件	
溶接後の硬さの変化	端栓母材部 260HV / 被覆管母材部 390HV 溶接後 ボンド部 280HVに軟化
熱影響部の幅	0.8mm (端栓側 0.5mm、被覆管側 0.3mm)

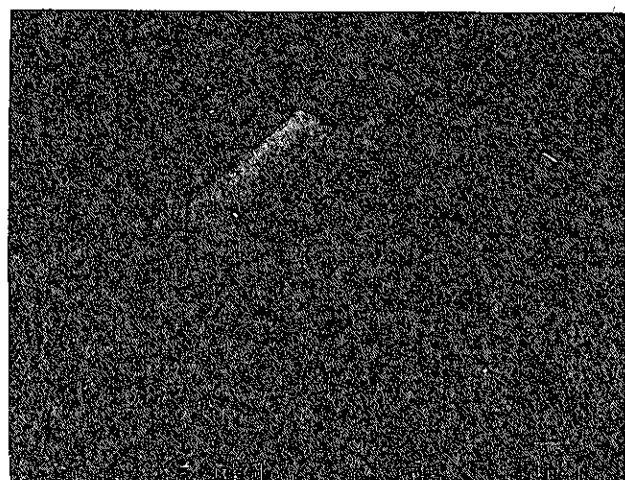
表-24-3 溶接後の硬さの変化および熱影響部の幅
 端栓材 MA 957 (ODS鋼)
 被覆管材 1DS (ODS鋼)

P N C 溶接材					
溶接条件	13KA	2 cycle	250kgf	3mm	0mm
溶接後の硬さの変化	端栓母材部 370 Hv / 被覆管母材部 420 Hv 溶接後 ボンド部 270 Hv に軟化				
熱影響部の幅	1.0 mm (端栓側 0.8 mm、被覆管側 0.2 mm)				

2.2 接合部のSEM観察およびEPMA分析

写真-2に、端栓材 MA 957 (ODS鋼) と被覆管材 63DSB (ODS鋼) を 11KA、2 cycle、224kgf で溶接した場合の接合部のSEM像を示す。これによると 5000 倍に拡大しても未接合部は無いことが分かる。

また、EPMAにより元素分析を行ったところ Y、Ti等の耐熱元素の凝集は起こっていないことが確認された(写真-3)。



(a)

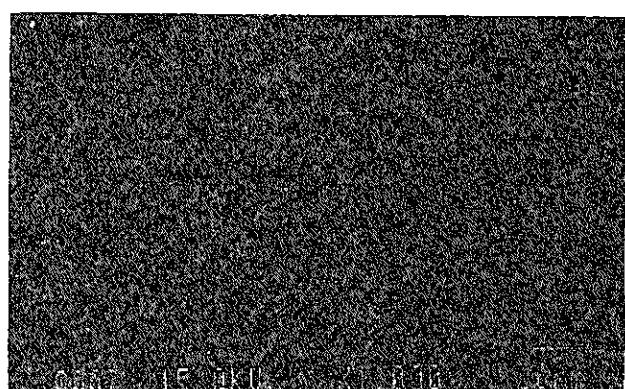
5. 4. 7-8

端栓(MA957) - 被覆管(63DSB)

11KA

2cycle 0mm

224kgf 10mm

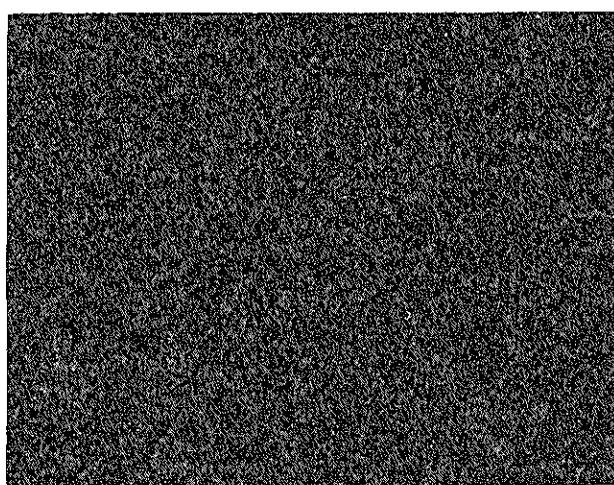


(b)



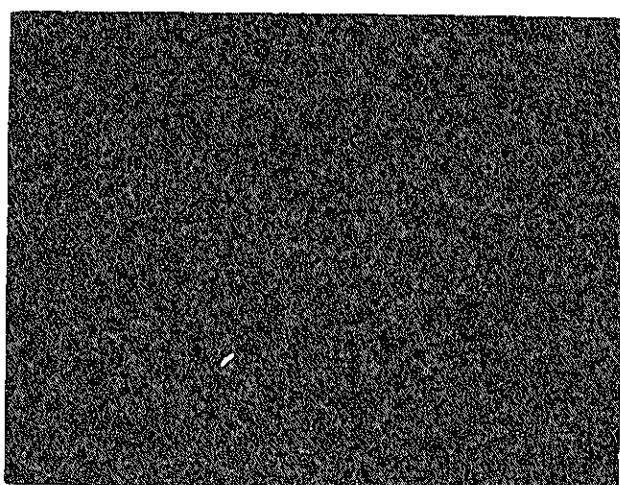
(c)

写真-2 接合部のSEM像 (MA 957 - 63DSB)



Yの分布状態

(写真-2(a)と対応)



Tiの分布状態

(写真-2(a)と対応)

写真-3 接合面部の元素分析結果 (MA 957 - 63DSB)

3. 端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 63DSB・1DS (ODS鋼) の溶接試験

3.1 溶接条件選定試験

端栓 62PFS (F/M鋼) と被覆管 63DSB・1DS (1DS鋼) の溶接条件の選定を金相、常温引張試験により行った。

試験条件を表-25に示す。これらは、端栓 62PFS (F/M鋼) と被覆管 62FS (F/M鋼) を用い、電流、時間、加圧力にパラメータを取り、溶接条件の選定のための先行試験を行い、その結果をもとに決定した。

3.1.1 金相結果

金相写真を写真-4に示す。その結果、11、12KAの溶接では未接合のない比較的良好な接合部が得られた。

3.1.2 引張試験結果

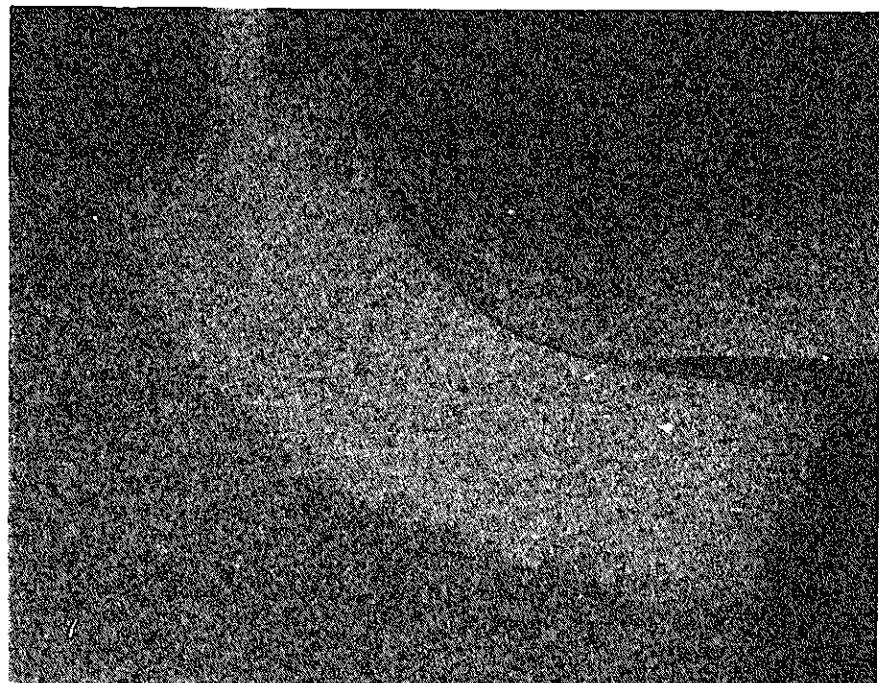
結果を表-25に示す。11KA以上で接合部破断となつたが、この場合接合部近傍の端栓部の硬さは500HV程度に硬化するため引張強度は必然的に高くなる。

3.2 選定した溶接条件

これまで試験を行つたなかで最良と思われる溶接条件は、溶接電流11~12KA、溶接時間2cycle、溶接加圧力250kgf、被覆管スティックアウト0mm、端栓スティックアウト3mmとなる。

表—25 常温引張試験—バリ無し
使用部材 62PFS（端栓）－IDS（被覆管）

試験項目／使用部材		試料No	設定電流	表示電流	通電時間	加圧力	変位量	ステイクアウト		強度	バリ除去後の外径
								被覆管	端栓		
(KA)	(KA)	(cycle)	(kgf)	(mm)	(mm)	(mm)				(kgf/mm ²)	(mm)
常温引張	バリ無 端栓 62PFS 被覆管 IDS	5.4.1-2 FD-1 -2	10 11 12	9.8 11.0 11.8	2.0 2.0 2.0	250 250 250	0.75 0.88	0 0 0	3 3 3	接合部 被覆管 被覆管	153.80 152.79
											7.57 7.55 7.53



× 50

写真-4 溶接試料断面金相写真（6.2 PFS - 1 DS）

端栓 6.2 PFS

被覆管 1 DS

溶接条件 12KA 2cycle 250kgf 0mm-3mm

4. 端栓 MA 957 (ODS鋼) — 被覆管 F 22・1 DS (ODS鋼) の溶接試験

4.1 溶接条件の選定試験

端栓 MA 957 (ODS鋼) と被覆管 F 22・1 DS (ODS鋼) の溶接条件選定を金相、常温、高温 (650°C) 引張試験により行った。

試験条件は、端栓 62PFS (F/M鋼) と被覆管 62FS (F/M鋼) の結果をふまえて決定した。

4.1.1 端栓スティックアウトと接合部の硬さ (MA 957—F 22)

端栓スティックアウトが 5 mm の場合は、最小硬さ 220 Hv であるが、2 mm の場合は 270 Hv 程度で硬さ低下は 5 mm のほうが多い (図-15~17 参照)。

ただし、2 mm の場合はバリが端栓チャックに接触し、その部分に電流が流れ接合状態に悪影響をおよぼす恐れがあるため、端栓スティックアウトは 3 mm が良いと判断した。

4.1.2 溶接時間と接合状態 (MA 957—F 22)

溶接時間を 1.5、1.0 cycle と変化させ試験を行った。溶接電流 11 KA、溶接加圧力 220 kgf、被覆管スティックアウト 0 mm、端栓スティックアウト 10 mm (表-26)。

(1) 金相結果

1.5 cycle は 2.0 cycle と変わらず、端栓材と被覆管材の拡散状態は良好である (写真-5)。1.0 cycle の場合は拡散が不十分であることが観察され、接合状態はあまり良くないと思われる。

(2) 引張試験

1.5 cycle では、被覆管母材部より破断した (1.0 サイクルでは行っていない)。

4.1.3 溶接電流と接合状態 (MA 957—F 22)

表-27 の様に 11 ~ 13 KA までパラメータを振り試験を行った。

(1) 金相結果

どの電流の場合も未接合部は無く、端栓材と被覆管材の拡散状態は良好であった (写真-6 参照)。

(2) 引張試験結果

「注）本試験においては、バリの除去を行わずに接合部の強度評価を行った。」

常温引張試験においては 11KA 以上で接合部破断となった。また、高温 (650°C) 引張試験では、12KA 以上で接合部破断となつたが、接合部に剥離部が生じた (写真-7)。

これらの条件の中で、最も接合状態の良好な条件は、13KA と思われる。

(補足)

接合部近傍の被覆管の硬さは、11~13KA の場合は 330HV、14KA の場合は 270HV と 14KA の場合は軟化度が大きいため、今回は 13KA が最良と判断した。

4.1.4 常温・高温 (650°C) 引張試験—バリ無し—による確証試験 (MA 957-1DS)

4.1.1~4.1.3までの試験を行った中で最も良好と判断した条件を表-28に示す。本条件において常温・高温 (650°C) 引張試験をバリを除去した状態で各数本ずつ行った。

(1) 金相結果

表-28の条件で溶接した試料の金相状態は、未接合部が無く、端栓材と被覆管材の拡散状態も良好であった (写真-8 参照)。

(2) 引張試験結果

結果を表-29に示す。

常温引張試験は 4 本を行い、3 本は被覆管母材部、1 本は接合部より破断した。ただし、接合部より破断した場合も、被覆管母材並の強度を示した。

高温 (650°C) 引張試験は、6 本を行い、全て接合部破断となつた。破断強度は、被覆管母材並の場合と、それをやや下まわる場合があった。

4.1.5 単軸クリープ試験 (650°C) 後の接合部破断面の SEM 観察

写真-9に MA 957 (端栓) と F 22 (被覆管) を 12KA で溶接した後、単軸クリープ試験を行つた試験片の破断面 (端栓) を示す。

* A は、脆性破壊 (粒界破壊) で接合面に残つた軟化層より破断した部分であると思われる。* B は延性を示す破面 (粒内破壊) で、端栓部より破断したものと思われる。この様に単軸クリープ試験による破面は、延性破壊、脆性破壊の入り混じつたものとなっており、軟化層が強度低下の原因であると思われる。

4.1.6 まとめ

これまでの試験の中で最も良好であると判断した溶接条件は、13KA 2cycle 250kgf であるが、高温引張試験においては接合部の破断となってしまった。これは、溶接時のフェライト粒の粗大化が原因であると思われる。

今後はさらなる溶接条件の検討により、高温引張試験において接合部より破断しない条件の選定を行う必要がある。

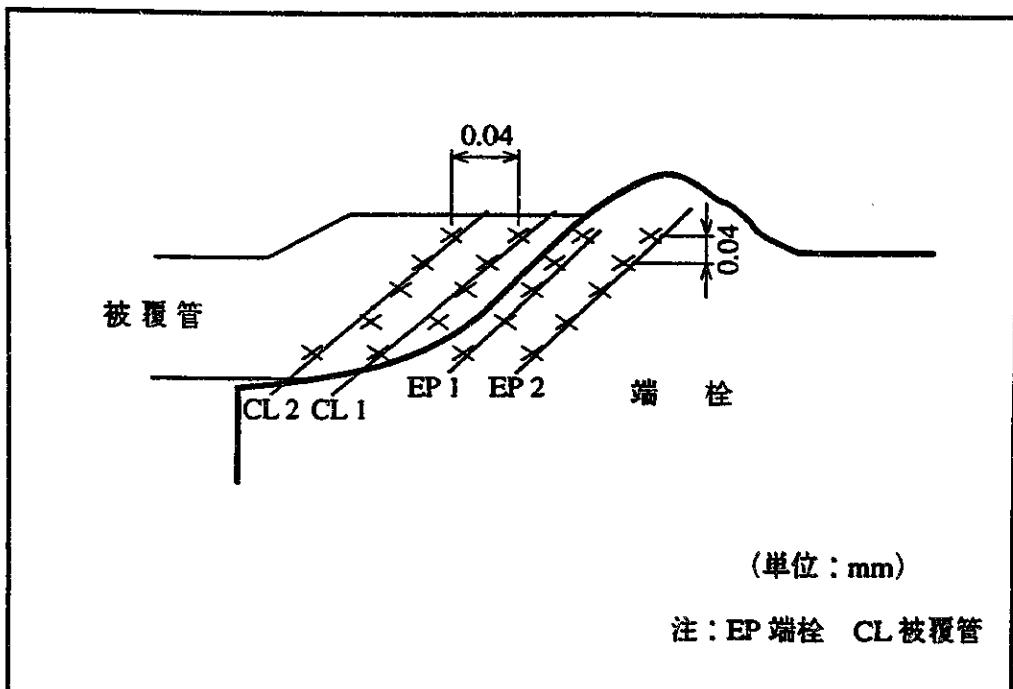
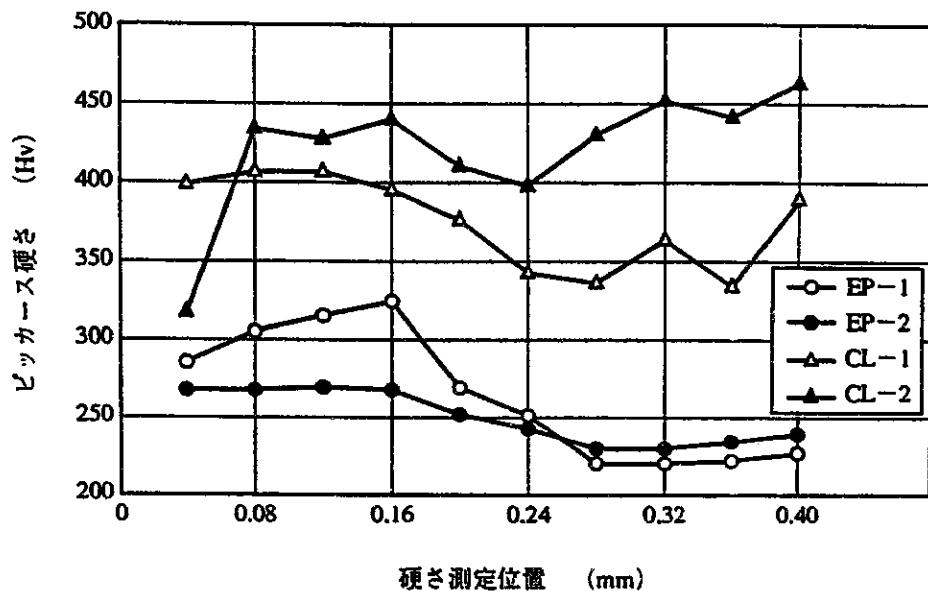
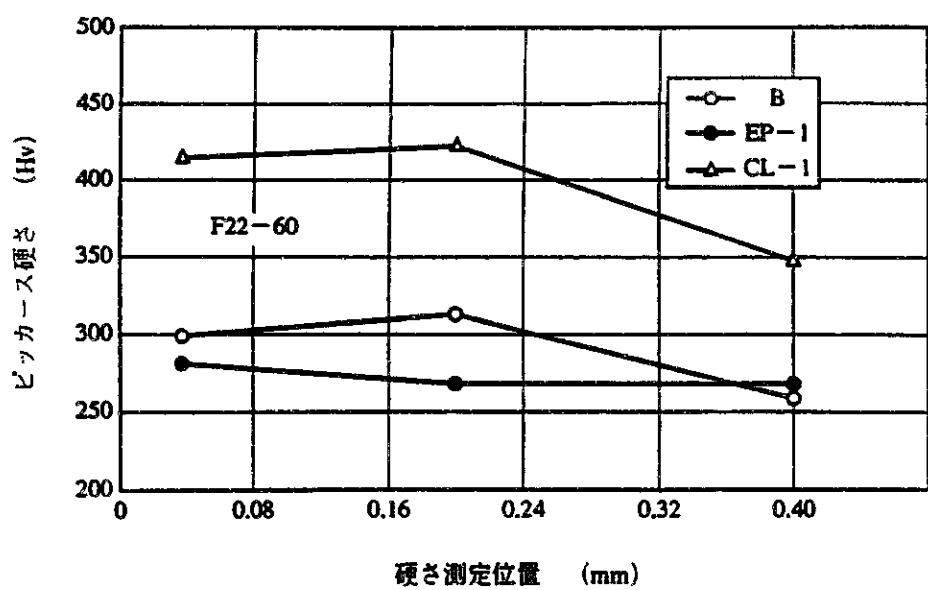


図-15 硬さ測定位置



13KA, 2cycle, 220kgf, 被覆管SO=0mm, 端栓SO=5mm F22-A7

図-16 MA957-F22材接合部近傍の硬さ測定結果 (端栓SO=5mm)



13KA, 2cycle, 220kgf, 被覆管SO=0mm, 端栓SO=2mm F22-60

図-17 MA957-F22材接合部近傍の硬さ測定結果 (端栓SO=2mm)

表-26 常温引張試験-バリ有り
使用部材 MA 957 (端栓) - F 22 (被覆管)

開口の有無	パラメータ	試料No	設定電流	測定電流	通電時間	加圧力	変位量		ステイクアウト		破断位置	強度
			(A)	(A)	(cycle)	(kgf)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
有り	時間	5.4.13-3 F22-5 F22-6	11000 11000 11000	10700 10600 9900	2 1.5 1.0	220 219 219	0.42 0.19 0.48	0.63 0.45 0.31	0 0 0	10.0 10.0 10.0	被覆管 被覆管 —	145.52

表-27 高温(650°C)引張試験-バリ有り
使用部材 MA 957 (端栓) - F 22 (被覆管)

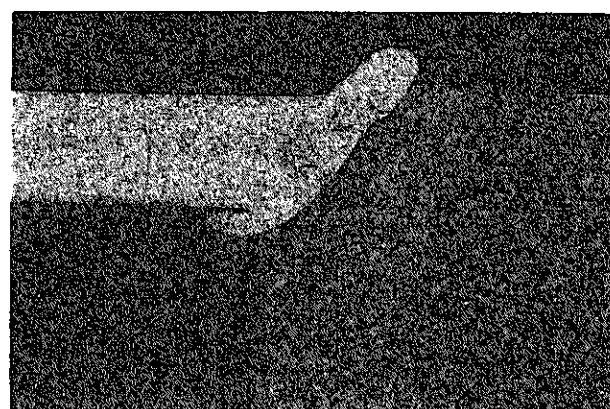
開口の有無	パラメータ	試料No	設定電流	測定電流	通電時間	加圧力	変位量		ステイクアウト		破断位置	強度
			(A)	(A)	(cycle)	(kgf)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
	電流	F22-31 -40 -41	11000 12000 13000	10600 11500 12000	2.0 2.0 2.0	220 220 220	0.69 0.65 0.88		0 0 0	10.0 10.0 10.0	接合部 被覆管 被覆管	67.73 67.50 67.63

溶接条件

MA 957(端栓) - F 22(被覆管)

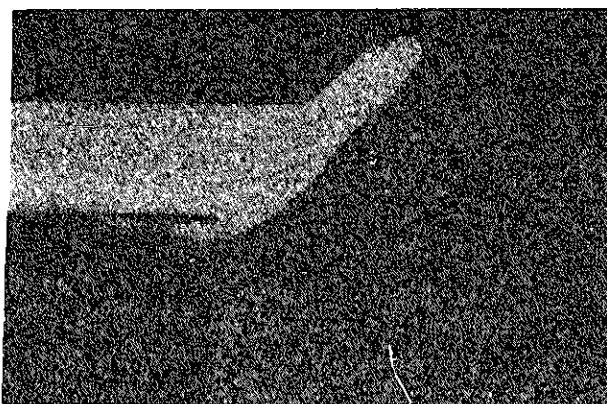
[溶接時間を変化／ 被覆管開口有り]	溶接電流 溶接時間 溶接加圧力 被覆管SO 端栓SO 開口	11KA 1.0、1.5、2.0 cycle 220kgf 0mm 10mm 有り
-----------------------	--	--

1.0 cycle



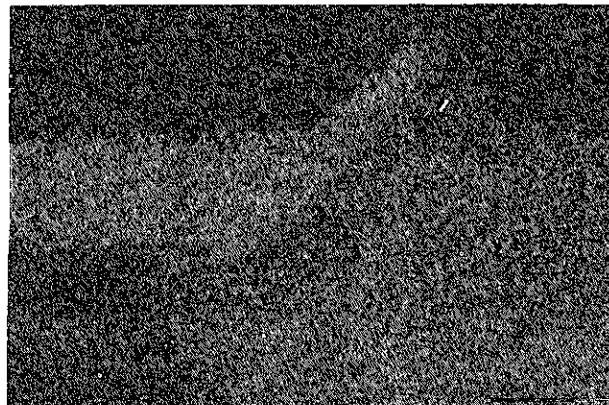
(a) × 35

1.5 cycle



(b) × 35

2.0 cycle



(c) × 35

写真-5 溶接時間を変化した場合の金相写真 (MA 957 - F 22)



× 50

写真-6 溶接試料断面金相写真 (MA 957-F22)

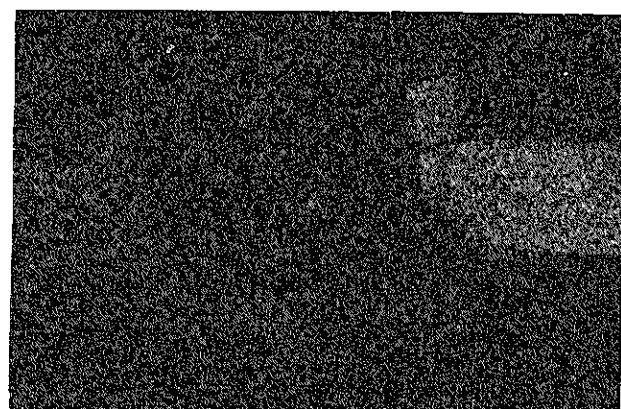
溶接条件 13KΑ 2cycle 220kgf 0mm-10mm

溶接条件

MA 957 (端栓) - F 22 (被覆管)

〔端栓外径を変化／ 被覆管開口有り〕	溶接電流	11KA
	溶接時間	2.0 cycle
	溶接加圧力	220kgf
	被覆管SO	0mm
	端栓SO	10mm
	開口	有り

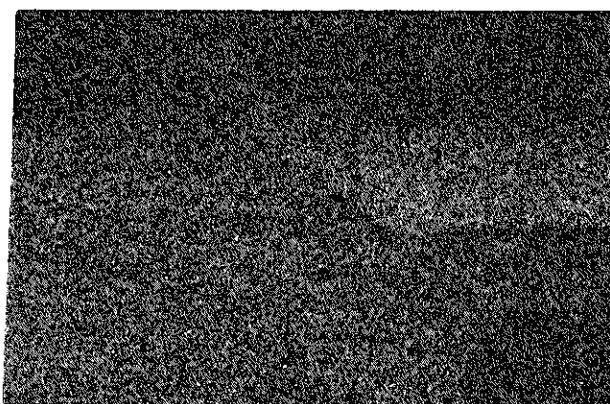
11KA



(a)

× 35

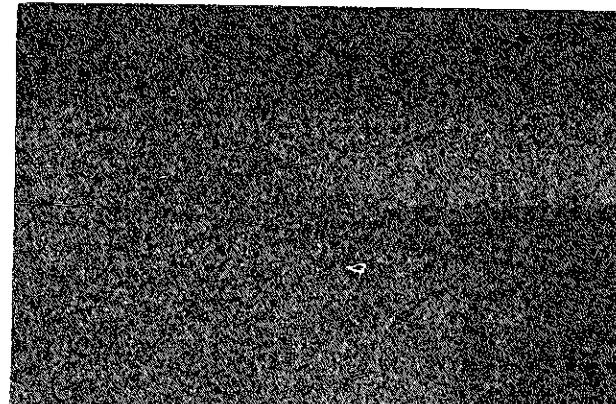
12KA



(b)

× 35

13KA



(c)

× 35

写真-7 高温引張試験(650°C-バリ有)後の金相写真(MA 957-F 22)

表-28 選定した溶接条件 MA 957 (端栓) - 1 DS (被覆管)

溶接電流 (KA)	溶接時間 (cycle)	溶接加圧力 (kgf)	端栓ステイクアウト(mm)	被覆管ステイクアウト(mm)
13	2	250	3	0

表-29 常温・高温(650°C)引張試験-バリ無し
使用部材 MA 957 (端栓) - 1 DS (被覆管)

試験項目／使用部材	試料No	設定電流	表示電流	通電時間	加圧力	変位量	ステイクアウト		破断位置	強度	バリ除去後の外径
							(KA)	(KA)	(cycle)	(kgf)	(mm)
常温引張試験 (バリ無) 端栓材 MA 957 被覆管材 1 DS	1DS-118	13	12.6	2.0	250	1.00	0	3	被覆管	146.51	7.52
	-119	13	12.5	2.0	250	1.00	0	3	掘み部	144.48	7.55
	-130	13	12.6	2.0	250	1.00	0	3	接合部	155.64	7.55
	MD-10	13	12.7	2.0	246	1.00	0	3	被覆管	146.17	7.55
										(kgf/mm ²)	(mm)
高温引張試験(650°C) (バリ無) 端栓材 MA 957 被覆管材 1 DS	-72	13	12.7	2.0	250	1.25	0	2	接合部	68.15	
	-74	13	12.6	2.0	247	1.00	0	3	接合部	54.83	
	-75	13	12.6	2.0	250	1.13	0	3	接合部	56.81	
	-78	13	12.6	2.0	250	1.38	0	2	接合部	63.06	
	-104	13	12.7	2.0	250	—	0	2	接合部	57.23	
	-120	13	12.6	2.0	250	1.13	0	3	接合部	66.04	



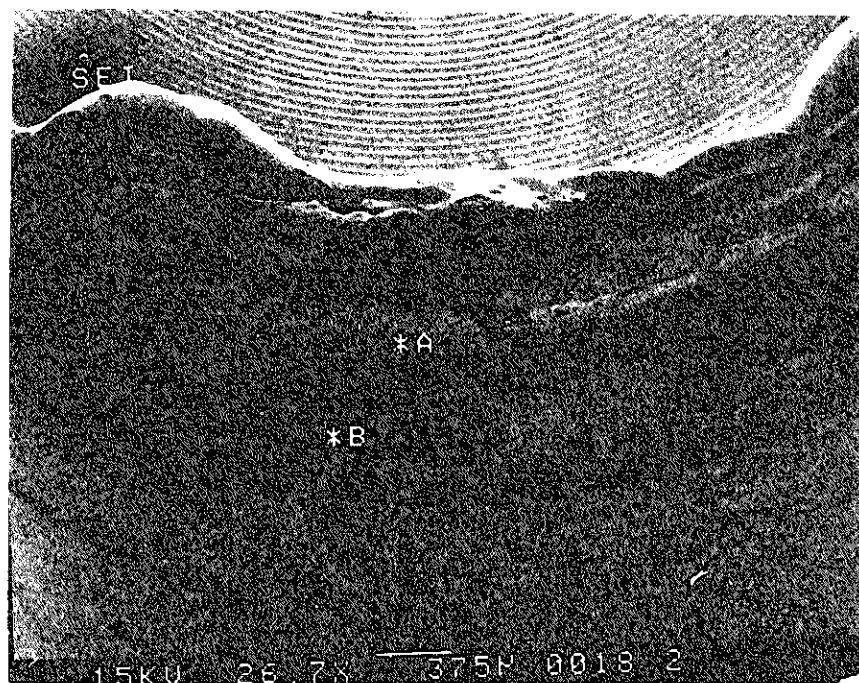
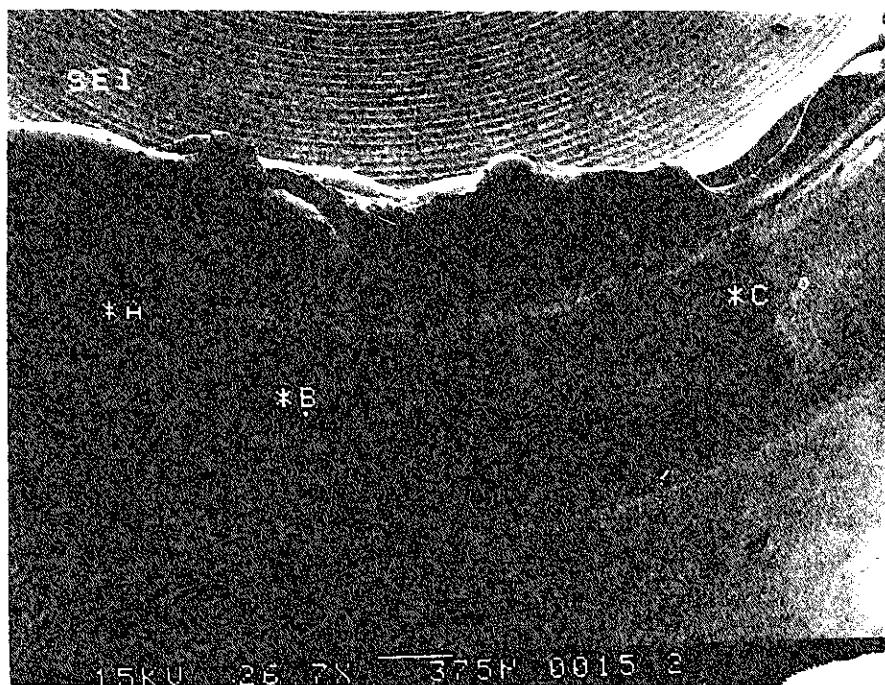
× 50

写真-8 溶接試料断面金相写真 (MA 957-1DS)

端栓MA 957

被覆管1DS

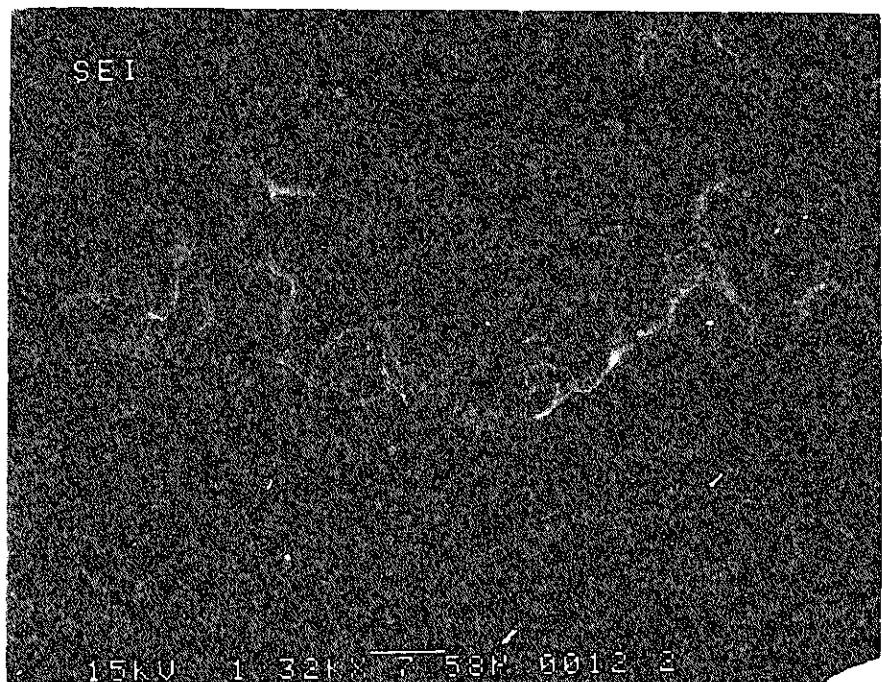
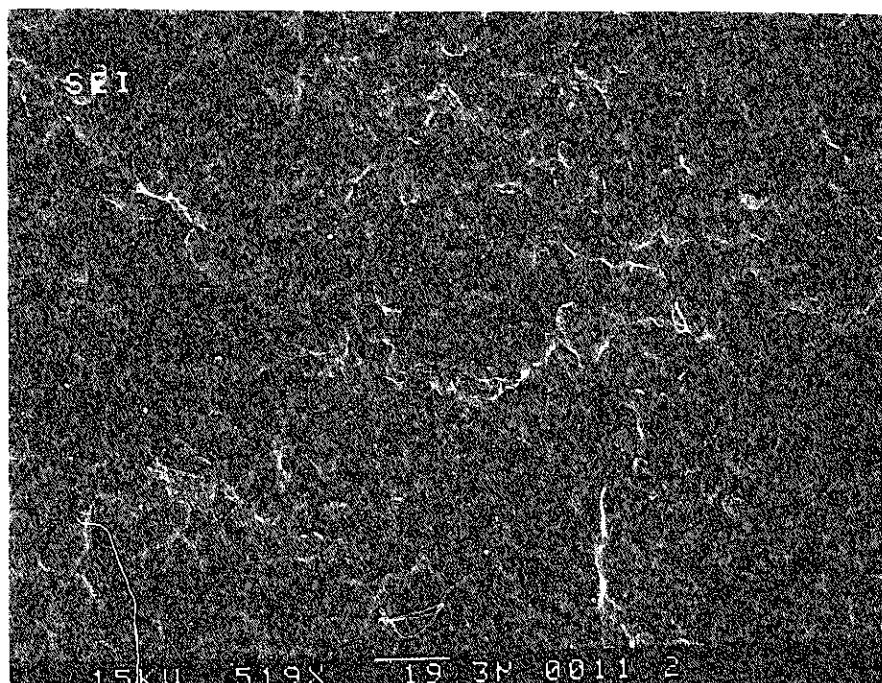
溶接条件 13K A 250kgf 2.0cycle 0mm-3.0mm



12KA (MA 957 - F 22)

写真-9-1 単軸クリープ試験後の接合部破断面（端栓）のSEM像

* A



写真－9－2 単軸クリープ試験後の接合部破断面（端栓）のSEM像

* B

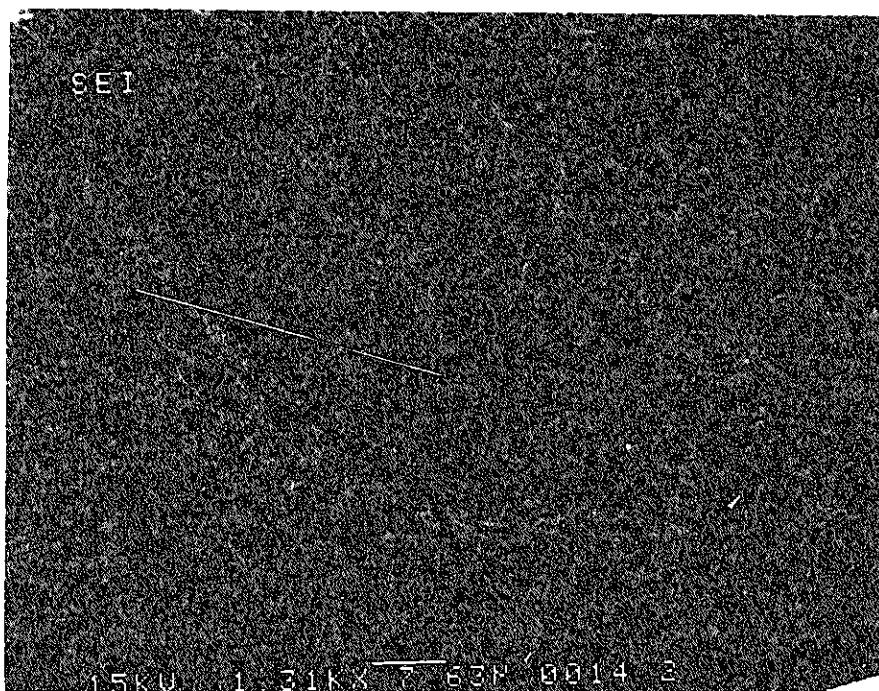
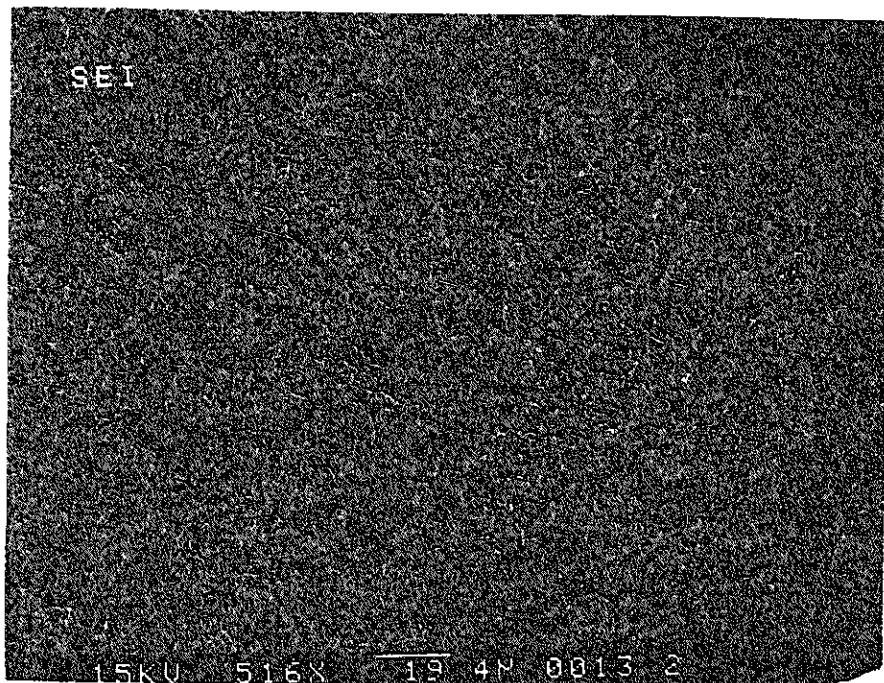


写真-9-3 単軸クリープ試験後の接合部破断面（端栓）のSEM像

VI PNC、BN社溶接結果の比較

1. 62PFS（端栓）－63DSB（被覆管）

BN社の装置で溶接した試験片を写真-10に示す。これとPNC溶接試験片を比べるとPNCの方はバリが厚く、大きな加圧力により押し広げられている様に見える。また、端栓のザクツ量も大きい。

BN社の方は薄いバリが出ており端栓のザクツ量も小さく、端栓と被覆管の軟化は表面層で起こっていることが分かる。

これらのことから、薄く大きなバリを出しザクツ量を小さくしBN社の溶接部に近づけるには、短時間、高電流で溶接を行い、加圧力をより小さくしそれらをうまくバランスさせる必要がある（加圧力が大き過ぎると接触抵抗が増し接合部の温度が上がりにくくなるためその意味でも下限ギリギリの加圧力で溶接を行う必要がある）。

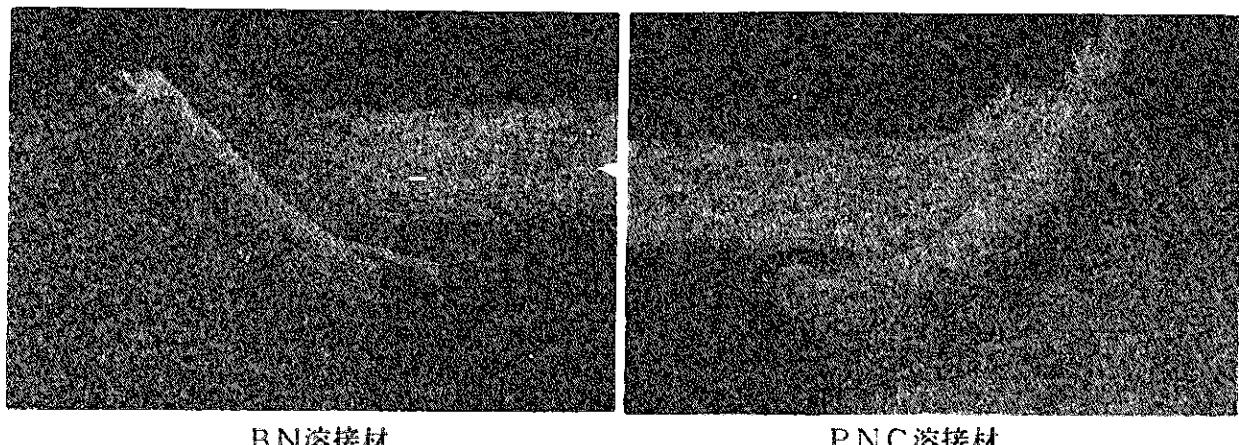


写真-10 BN社とPNC溶接試料の金相写真の比較

端栓 62PFS (F/M鋼)

被覆管 63DSB (ODS鋼)

VII クミール5照射試験片の製作

抵抗溶接で溶接した試験片の照射後の特性を評価するため高速実験炉「常陽」での照射試験を行う。照射は平成6年度より開始され、試験片の接合部の評価は常温・高温(650°C)引張試験で行う。

今回製作した試料は、管状(端栓と被覆管を溶接したもの)試験片と短冊型試験片(図-18参照)である。

短冊型試験片を用いるのは、高温、高照射量の部位には試料寸法の制約があり、小さな試験片しか入らないためである。

1. 溶接条件

これまで金相、常温・高温(650°C)引張試験による溶接条件の選定を行い、その中で最も良好な表-30、31に示す条件で試験片を製作した。管状試験片、短冊型試験片共に溶接条件は同じである。

ただし、端栓 MA957(ODS鋼)と被覆管材 1DS(ODS鋼)の場合は高温強度が若干、被覆管母材より低くなる場合があり、また、端栓 62PFS(F/M鋼)と被覆管材 1DS(ODS鋼)の場合は、焼き入れ硬化により、じん性の低下が予想されたため、今後、溶接条件のさらなる検討、熱処理の適用を行う必要がある。

表-30 端栓 MA957(ODS鋼)
被覆管 1DS(ODS鋼)の溶接条件

溶接電流	13 (KA)
溶接加圧力	250 (kgf)
溶接時間	2.0 (cycle)
端栓スティックアウト	3.0 (mm)
被覆管スティックアウト	0 (mm)

表-31 端栓 62PFS(F/M鋼)
被覆管 1DS(ODS鋼)の溶接条件

溶接電流	12 (KA)
溶接加圧力	250 (kgf)
溶接時間	2.0 (cycle)
端栓スティックアウト	3.0 (mm)
被覆管スティックアウト	0 (mm)

2. 金相結果

表-30、31の条件でそれぞれ溶接した試料の金相写真を写真-11、12に示す。
両材料の場合は、共に未接合部、溶接欠陥等は無かった。



写真-11 端栓 MA 957 (ODS鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼)
の溶接部の金相写真

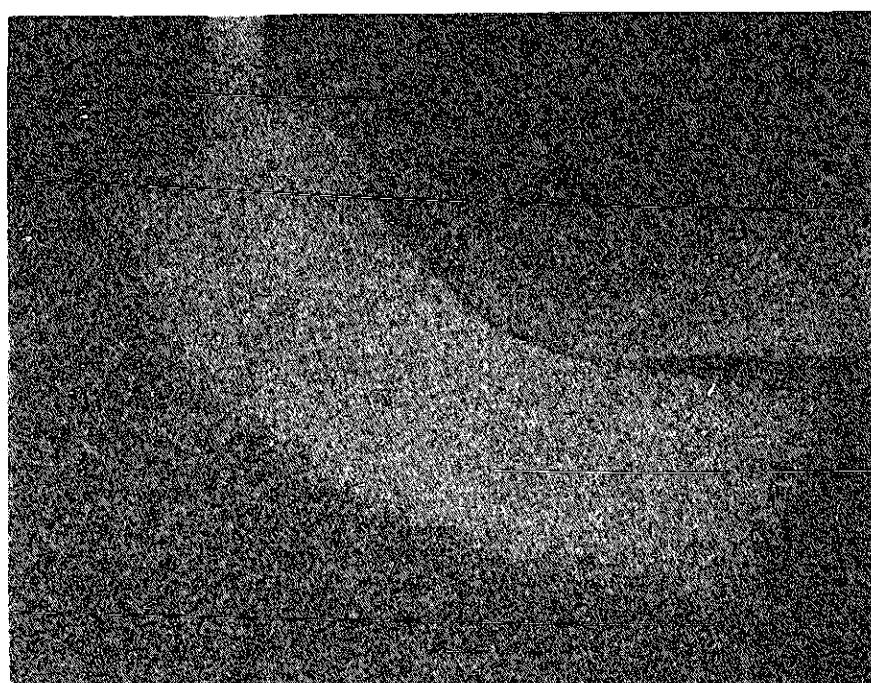


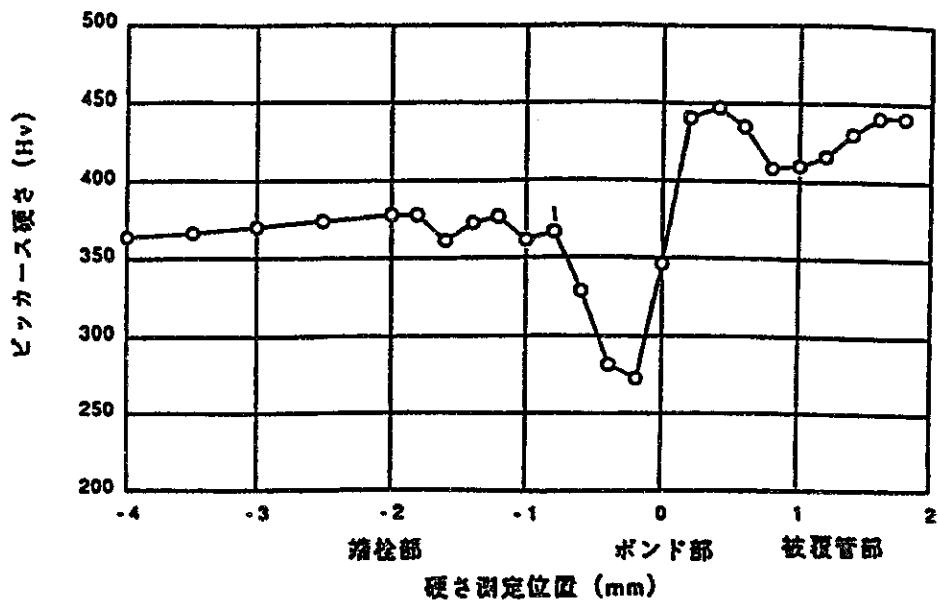
写真-12 端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管 1DS (ODS鋼)
の溶接部の金相写真

3. 硬さ測定結果

3.1 端栓 MA 957 (ODS鋼) - 被覆管材 1DS (ODS鋼)

接合部近傍の端栓部の硬さは 370 HV の母材硬さから溶接後には 280 HV 程度まで低下する。

熱影響部の幅は 1.0 mm (端栓側 0.8 mm、被覆管側 0.2 mm) となった。



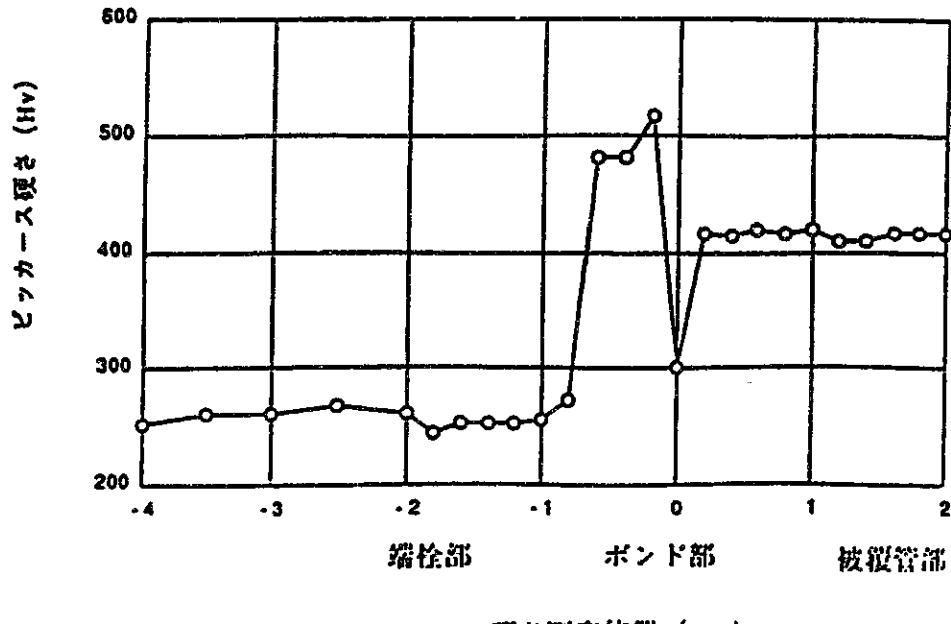
13KA, 2cycle, 250kgf, 被覆管 SO=0mm, 端栓 SO=3mm 1DS-135

図-19 MA 957 - 1DS 材硬さ測定結果

3.2 端栓 62PFS (F/M鋼) - 被覆管材 1DS (ODS鋼)

接合部近傍の端栓部の硬さは 250 HV の母材硬さから溶接後には 500 HV 程度まで増加する。

熱影響部の幅は 1.0 mm (端栓側 0.8 mm、被覆管側 0.2 mm) となった。



12KA, 2cycle, 250kgf, 被覆管 SO=0mm, 端栓 SO=3mm FD-4

図-20 62PFS - 1DS 材硬さ測定結果

4. 引張試験結果

4.1 管状試験片の引張試験結果

表-32 管状試験片の引張試験結果
 端栓 MA 957 (ODS鋼)
 被覆管 1DS (ODS鋼)

No	試験片No	試験温度(°C)	最大荷重(kg)	引張強さ(kg/mm²)	破断位置	引張速度(mm/min)
1	1DS-118	常温	1307.2	146.51	被覆管	1.0
2	1DS-120	常温	1289.1	144.48	被覆管	1.0
3	1DS-130	常温	1388.9	155.64	接合部	1.0
4	MD-10	常温	1304.1	146.17	被覆管	1.0
5	1DS-130	650	510.9	57.23	接合部	1.0
6	1DS-130	650	589.2	66.04	接合部	1.0

備考

母材強度

常温 151.43 kgf/mm²
 高温 (650°C) 67.04 kgf/mm²

これらの試験は、管状のままで行ったものである。

表-33 管状試験片の引張試験結果
 端栓 62PFS (F/M鋼)
 被覆管 1DS (ODS鋼)

No	試験片No	試験温度(°C)	最大荷重(kg)	引張強さ(kg/mm²)	破断位置	引張速度(mm/min)
1	FD-2	常温	1363.2	153.80	被覆管	1.0
2	FD-3	常温	1354.2	151.78	被覆管	1.0
3	FD-10	常温	1304.1	144.99	接合部	1.0

備考

母材強度

常温 151.43 kgf/mm²

高温 (650°C) での引張試験データは今後採取する。

4.2 短冊型試験片の引張試験結果

表-34 短冊型試験片の引張試験結果
 端栓 MA957 (ODS鋼)
 被覆管 1DS (ODS鋼)

No	試験片No	試験度 (°C)	最大荷重 (kg)	引張強さ (kg/mm ²)	破断位置	引張速度 (mm/min)
1	19-1	常温	119.5	157.0	被覆管	1.0
2	21-1	常温	124.3	163.3	接合部	1.0
3	22-1	常温	110.5	145.2	被覆管	1.0

備考

母材強度 常温 151.43 kgf/mm²

短冊型試験片の引張強さは、断面積を 0.76 mm² として計算した。

高温 (650°C) での引張試験データは今後採取する。

5. 試料寸法・重量

5.1 管状試験片の寸法・重量

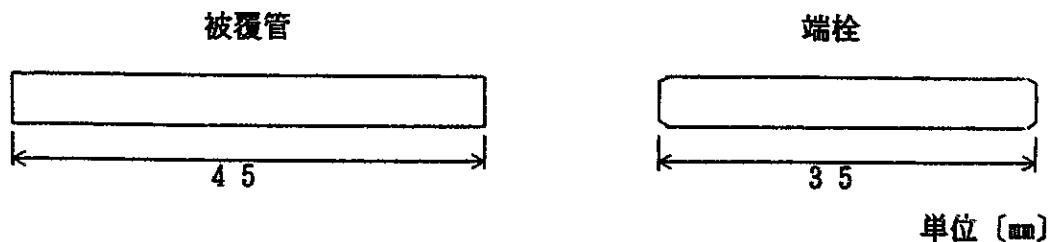


図-21 管状試験片寸法

表-35 管状試験片重量

鋼種	試験片番号	測定重量(g)
M A 9 5 7	891	14.94
	892	14.86
	893	14.95
	894	14.83
6 2 P F S	861	14.88
	862	15.32
	863	15.20
	684	15.22

5.2 短冊型試験片の寸法・重量

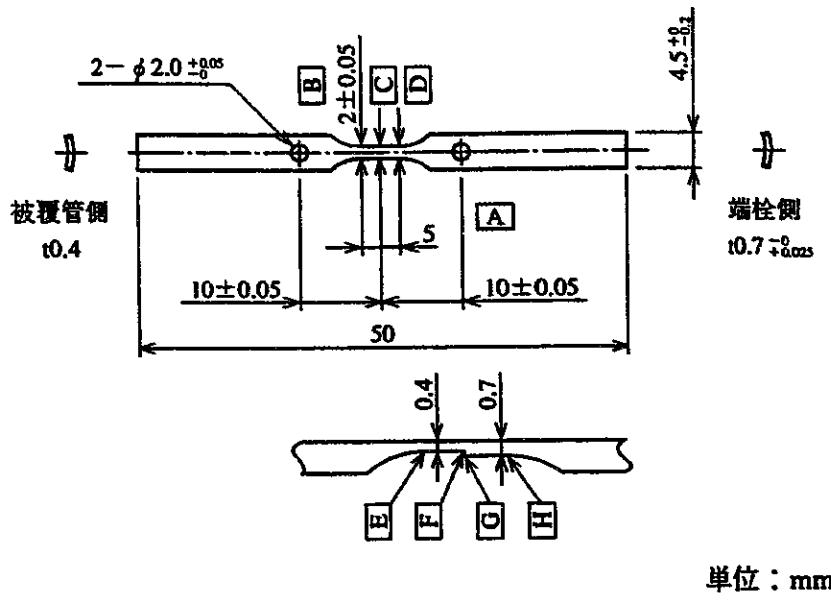


図-22 短冊型試験片寸法測定部位

表-36 短冊型試験片寸法・重量測定結果

試験片No	重量 (g)	寸法 (mm)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
8S1	0.850	5.0	2.03	2.01	2.00	0.41	0.41	0.68	0.70
8S2	0.851	5.0	2.04	2.03	2.00	0.41	0.41	0.71	0.71
8S3	0.853	5.0	2.03	2.02	2.00	0.42	0.42	0.69	0.70
8S4	0.855	5.0	2.02	2.01	1.98	0.40	0.40	0.70	0.71
8S5	0.853	5.0	2.01	2.00	1.98	0.41	0.41	0.71	0.70
8S6	0.845	5.0	2.00	2.00	1.98	0.41	0.41	0.71	0.71
8S7	0.864	5.0	2.02	2.02	2.00	0.41	0.41	0.71	0.71
8S8	0.850	5.0	2.02	2.02	2.00	0.40	0.41	0.71	0.71

本試験片は、外径 7.5 mm、肉厚 0.4 mm の被覆管と外径 7.5 mm の端栓を溶接し
1/4に分割後、短冊型に加工したものである。

なお、平行部の断面積は計算により 0.76 mm^2 と求まる。

6. 照射条件・装荷本数

6.1 管状試験片

表-37 管状試験片の照射条件・装荷本数

照射温度 (°C)	照射量 ($\times 10^{23}/\text{cm}^2$) $E > 0.1\text{MeV}$	端栓材	被覆管材	装荷本数 (本)
550	0.1	62PFS	1DS	2
		MA957	1DS	2
490	0.37	62PFS	1DS	2
		MA957	1DS	2

6.2 短冊型試験片

表-38 短冊型試験片の照射条件・装荷本数

照射温度 (°C)	照射量 ($\times 10^{23}/\text{cm}^2$) $E > 0.1\text{MeV}$	端栓材	被覆管材	装荷本数 (本)
680	0.60	MA957	1DS	8

VII 装置付属機器の問題点とその改善

抵抗溶接の基本特性評価試験およびクミール5照射試験片の製作を行っていく中で装置の付属機器にいくつかの問題点が生じた。

以下に、それらの問題点と改善策について記す。

1. 記録計およびセンサ類の問題

1.1 パラメータ記録計の入力チャンネル数の不足

記録している溶接パラメータは、電流、通電時間、加圧力、変位であるが、従来の記録計では入力チャンネルが2チャンネルであったため、図-23に示す様に、すべての値（アナログ値）が記録できなかった（ただし、パソコンによるデジタル表示はすべてのパラメータを表示できる様になっている）。

そこで、溶接中の各パラメータの変化を確認するため、入力チャンネル数8チャンネルの高サンプリング速度の記録計を導入した。

1.2 変位センサのノイズの問題

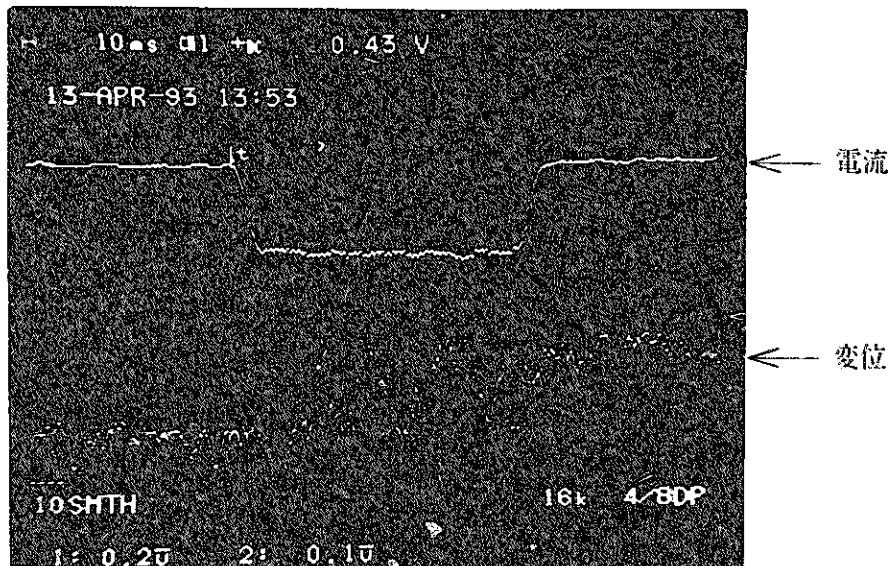
当初、使用していた変位計は図-23の様にノイズが大きく、詳細な波形の変化が確認できず、測定値の精度も不確かであった。そこで、ノイズが小さく、高性能な変位計を新たに導入した結果、ノイズはほとんど無くなり、溶接中の波形の微妙な変化が確認できる様になった。

1.3 溶接ヘッドの動作の定量化

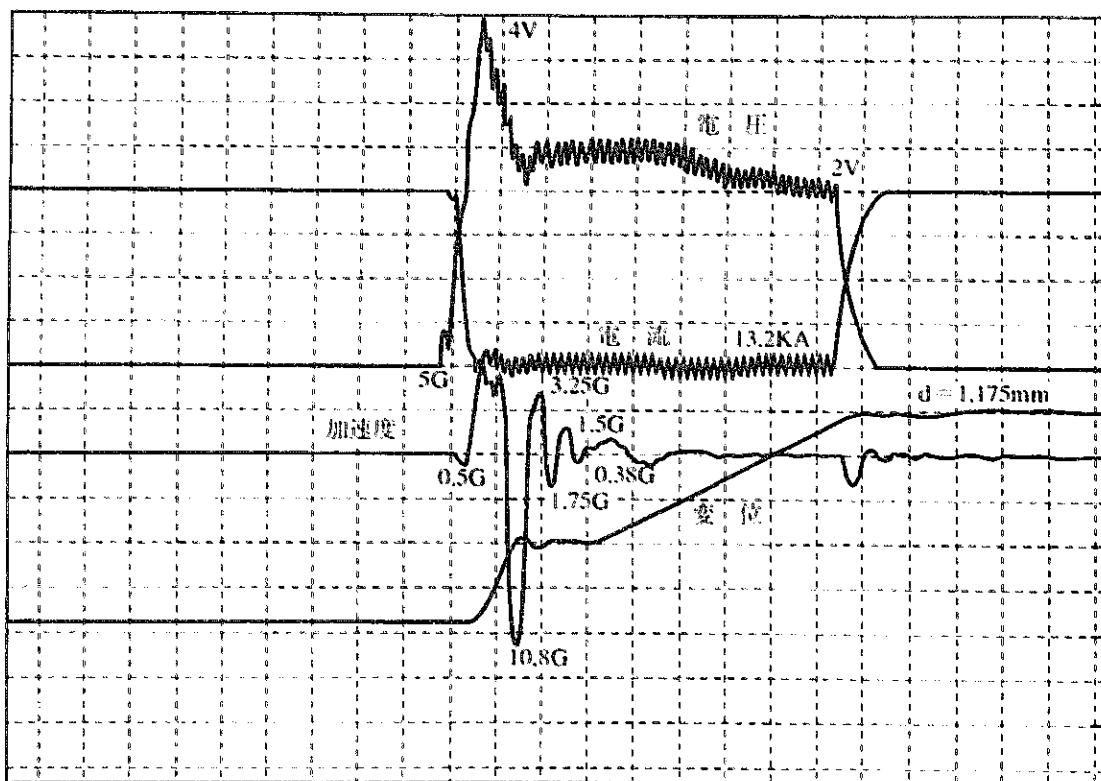
通電時に被覆管と端塗は溶融または軟化するため、溶接ヘッドは瞬間に加圧方向に移動し、また、この時のヘッドのレスポンスは接合状態に大きく影響する。

当初は、ヘッドがどの程度の速さで動いているのか、また、ヘッドの動きにバラツキが生じてないか等を確認できなかった。

そこで、ヘッドに加速度計を取り付けこれらを定量化できるようにした（図-23）。



(a) 改善前の記録波形



(b) 改善後の記録波形

図-23 溶接パラメータ記録計の波形表示

2. チャックの隙間による未接合部の発生

図-24にコレットチャックでの被覆管の保持状態を示す。コレットチャックは被覆管を十分に固定できる様に隙間を持たせてある。ところがこの隙間が大きいと、図-24（コレットチャック隙間が0.8mm）の様に、その部分に熱が十分伝わらず未接合部が生じてしまう。

そこで、この隙間をワイヤーカッタで切断できる最小寸法（0.3mm）とした。

その結果、コレットチャックの隙間部に未接合部は無くなり、円周方向全体に熱が均一にもたらされる様になった。

今後は、さらに隙間をせばめたコレットチャックを製作する予定である。

3. 給電部の電食の発生

数十回の溶接を行っていくうちに、チャックとホルダの接触部に電食が生じた（図-25参照）。これは、当初、1方向からの給電であったため、その部分に電流が集中して流れること、また、チャックとホルダの溶触部に抵抗があったこと等が原因として考えられる。

そこで、電流の供給を上下2方向から行うこととし、また、ホルダの内面に従来のクロム銅より硬度、抵抗の低い銀を張り付け、接触面の食いつき、電流の流れを良くした。

その結果、繰り返しの使用によっても電食は無くなった。

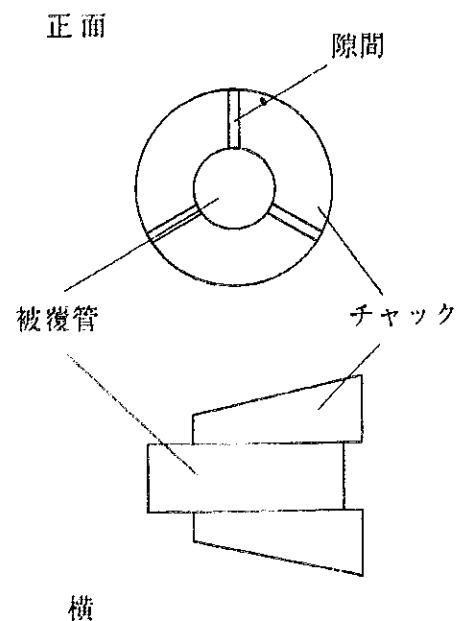
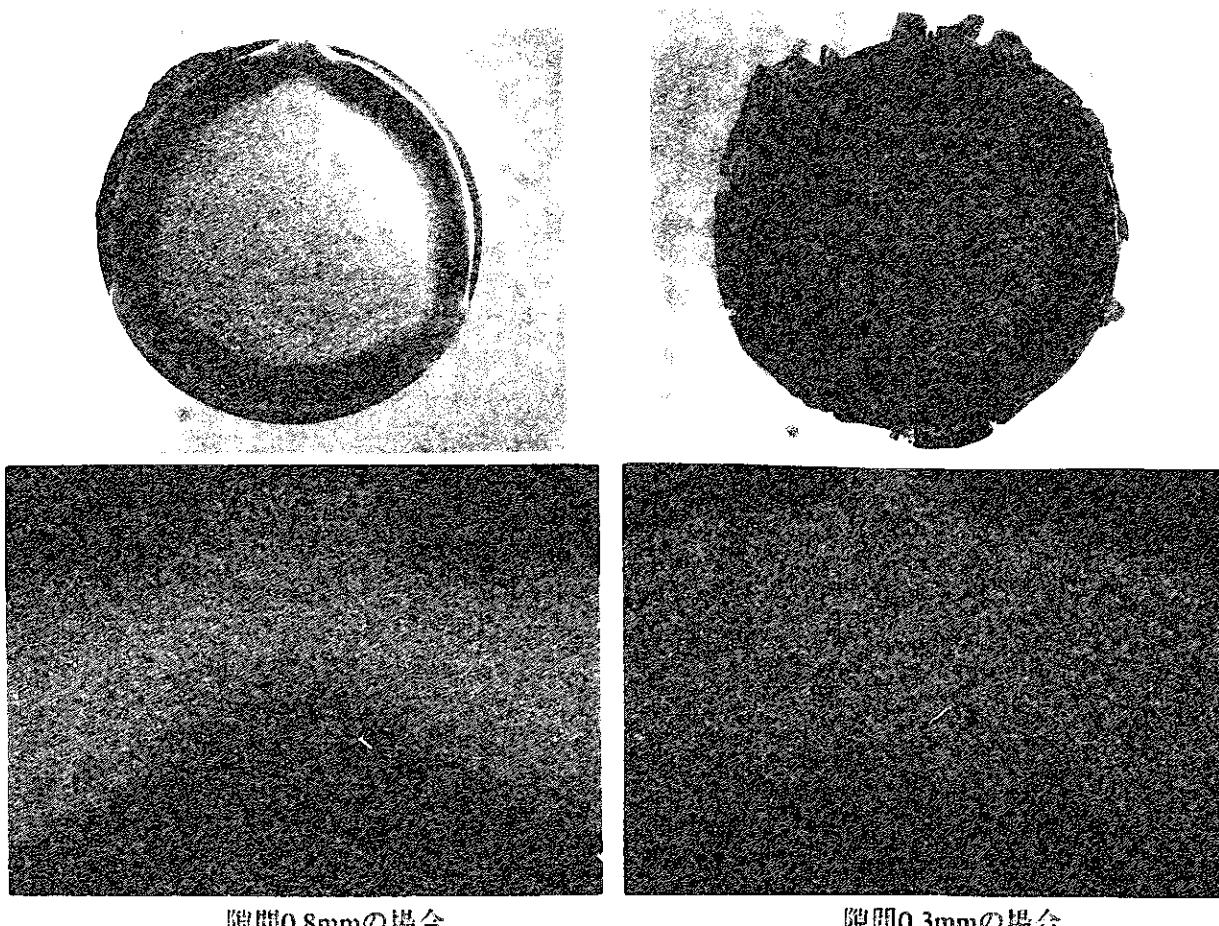
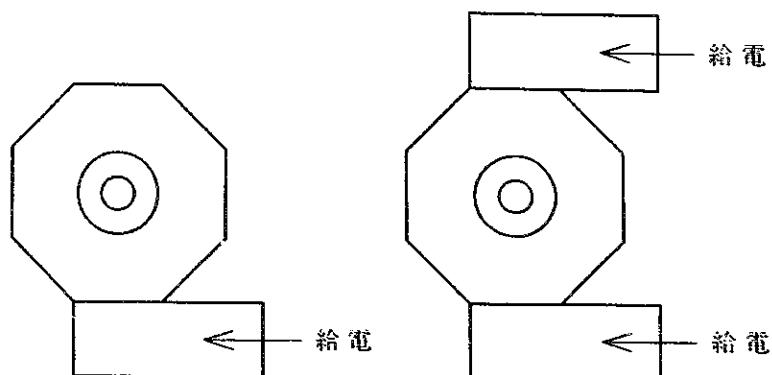


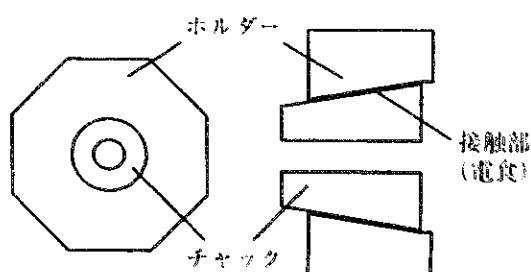
図 24 チャック部隙間と未接合部



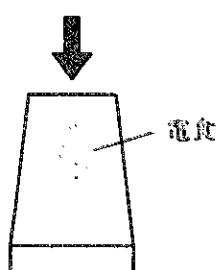
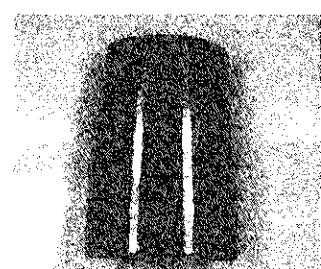
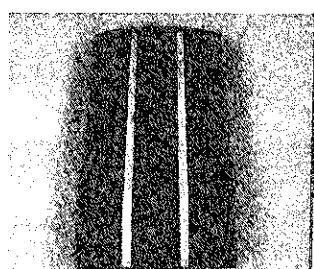
(a) 築來の給電方法
(1方向)

(b) 改造後の給電方法
(上下2方向)

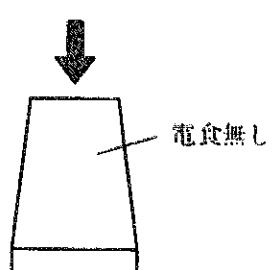
給電方法



給電部の概略図



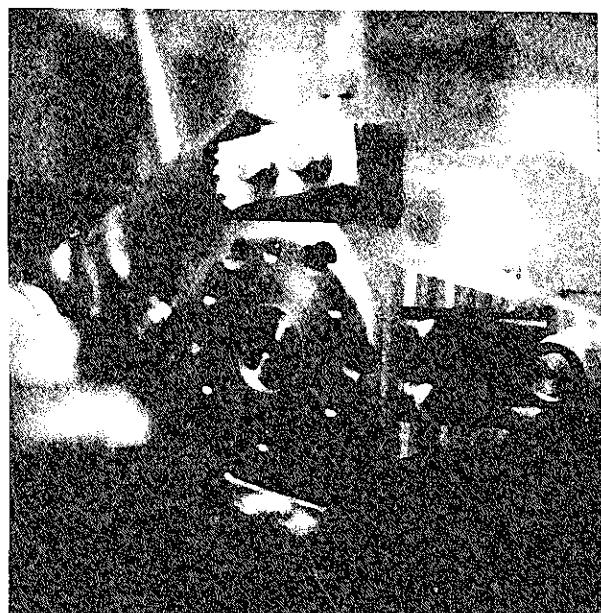
(a) 改善前



(b) 改善後

電食の状態 (30回の溶接後)

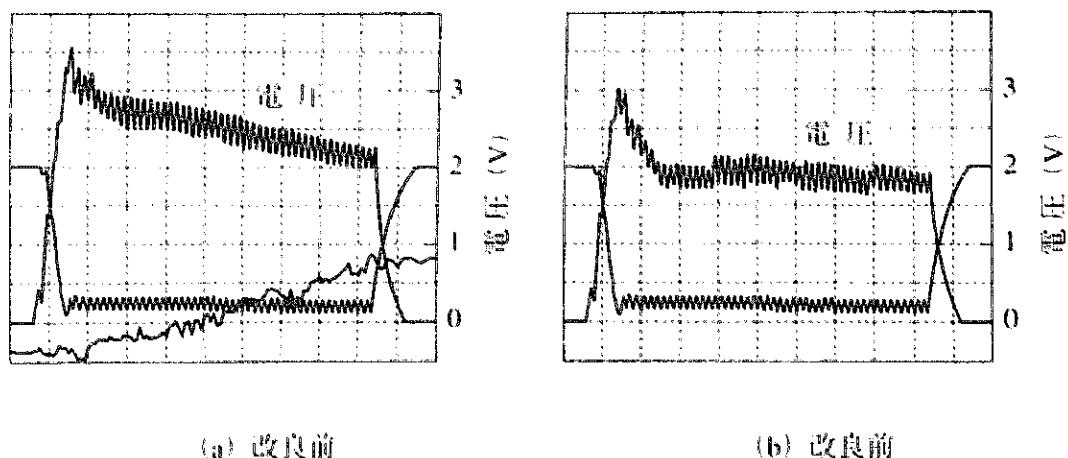
図-25-1 給電部の改良



ホルダーの上下
2方向からの給電

ホルダー内面
銀ばり

改良後の給電部



給電部改良前後の電圧の比較

図-25-2 給電部の改良

IX まとめ

1. 装置特性評価試験

1.1 端栓スティックアウトと溶接電流の上限値について

端栓スティックアウト 5 mm、加圧力 180 kgf の場合、流すことのできる最大の電流は 15 KA であった (F/M 鋼同士の場合)。

端栓スティックアウトは溶接に支障のない程度で短いほうが良いため、最終的には 3 mm とした。

1.2 被覆管スティックアウトについて

大きな電流を流すためには、被覆管スティックアウトは短いほうが良い (最終的には 0 mm とした)。

1.3 芯振れ測定

溶接後の被覆管と端栓の取付け角度を測定したところ最大で約 0.215° であった。これは燃料ピンの製作基準 0.417° (25 分) 以内に収まっている。

1.4 被覆管外径収縮量の測定

溶接後の被覆管外径収縮量は最大で 0.05 mm 程度で、被覆管外径 (7.5 mm) に比べるとこれは 1 パーセントに満たない量である。

1.5 低い加圧力による溶接不良

溶接電流に対し溶接加圧力が低いとスパッタが発生する。これは、加圧力が低い場合は、突き合わせ部の接触抵抗の増加、溶接ヘッドの追従性の低下等があるためであると思われる。

ODS 鋼材同士の溶接の場合は、13 KA の場合 180 kgf 以下でスパッタが発生する。

2 接合面の挙動

2.1 接合部の硬さ測定

2.1.1 62PFS [F/M鋼 端栓] — 62FS [F/M鋼 被覆管] の場合

溶接により接合部の硬さは 250 Hv の母材硬さから 500 Hv 程度まで増加する。

よってじん性を回復するため、溶接後の焼きもどしの適用を検討する必要がある。

2.1.2 MA957 [ODS鋼 端栓] —

F22、1DS [ODS鋼 被覆管] の場合

ODS鋼端栓材 (MA957) の場合溶接により硬さが 100 Hv 程度 (370 Hv から 280 Hv 程度になる) も低下しその部分の強度が弱くなってしまう。

2.1.3 溶接条件と接合部の硬さ

端栓スティックアウト 5 mm の場合は最も硬さの低下する部分 (接合部近傍の端栓部) では 220 Hv であるが 2 mm の場合は 270 Hv 程度である。

溶接加圧力 220 kgf と 250 kgf で溶接を行った場合の接合部近傍の端栓部の硬さには大きな差はなかった。

2.1.4 热影響部の幅

B N 社と P N C の溶接試験片を比べると若干端栓側の熱影響部の幅が P N C の方が広くなる (P N C 端栓側 0.8 mm、被覆管側 0.2 mm — B N 社端栓側 0.5 mm、被覆管側 0.3 mm ~ O D S 材同士の溶接)。また、熱影響部の幅は、電流、端栓スティックアウトの小さい方が狭くなり、溶接加圧力には影響されないことが分かった。

2.2 接合部の SEM観察と元素分析

MA957 と 1DS 溶接試験片の溶接部の SEM 像を観察した結果、未接合は無いことが明らかとなり、さらに元素分析を行ったところ EPMA レベルでは Ti、Y 等の耐熱元素の凝集も無いことが確認できた。

3. 溶接条件の選定および強度試験

3.1 62PFS [F/M鋼 端栓] —

63DSB、1DS [ODS鋼 被覆管] の溶接

(1) 溶接条件

異種材同士の溶接であるが 11~12KA、2cycle、250kgf、被覆管スティックアウト 0mm、端栓スティックアウト 3mm で未接合部が無く常温引張試験で接合部より破断しない比較的良好な接合が得られた。

(2) 引張試験試

常温引張試験(バリ無し)では、溶接により硬さが増加するため被覆管部破断となるがじん性の低下が予想されるため、今後、熱処理の適用を検討する必要がある。

3.2 MA957 [ODS鋼 端栓] —

F22、1DS [ODS鋼 被覆管] の溶接

(1) 溶接条件

今回試験を行った中で最も信頼性のある条件は 13KA、2cycle、250kgf、被覆管スティックアウト 0mm、端栓スティックアウト 3mm である(引張試験結果より)。金相試験においては未接合部が無く端栓材と被覆管材の拡散状態も良好であった。

(2) 引張試験

常温引張試験では 4 本中 1 本が、高温引張試験では 6 本すべてが接合部破断となった(ただし、接合部より破断した場合でも破断応力は被覆管母材並となつた)。

高温引張試験において接合部からの破断となったのは、溶接により接合面に粗大化したフェライト粒が偏析し、それが、高温強度に劣ることが原因であると思われる。また、EPMA では Y、Ti 等の耐熱元素の凝集は確認されなかったが、今後、TEM 等により接合部の耐熱元素の凝集を観察する予定である。

（機密文書）

4. クミール5 照射試験片の製作

照射後の特性を把握するための抵抗溶接試験片を製作した。今回選定した条件〔端栓 MA 957 (ODS鋼) と被覆管材 1DS (ODS鋼) の場合〕は、高温強度が被覆管母材よりも若干劣るため、今後さらなる改善が必要である。

なお、照射後の接合部の評価は、常温・高温 (650°C) 引張試験にて行う。

5. 装置付属機器の改善

5.1 記録計およびセンサ類の問題

記録パラメータが8チャンネルで高サンプリング速度の記録計および変位計、加速度計の導入により、溶接部の挙動を定量化することができた。

5.2 被覆管チャックの隙間による未接合部の発生

被覆管チャックの隙間を0.3mmにすることにより、未接合の無い接合部が得られた（今後さらに狭くする）。

5.3 給電部の電食の発生

多分岐型給電部への改造およびホルダ内面への銀張により、チャックとホルダの接触面の電食は無くなった。

6. 今後の試験について

6.1 装置・材料の特性評価試験

- (1) ODS鋼を用いた通電試験を行い溶接に用いることのできる最大電流を把握する。
- (2) 数多くのデータを採取し、溶接の再現性を確認し、再現性がとれない場合は、その原因を究明する。

6.2 溶接特性評価試験

(1) パラメータ試験

- ① 今回は溶接パラメータの水準がそれほど多くなかった(ODS鋼被覆管材の数量が限られていたこともある)が、今後は、パラメータを増やし広範囲にわたる一貫した試験を行う。
- ② 文献によると加圧力はチリの発生するギリギリの値が良いとされているが、その加圧力の選定を行い、金相、強度試験より接合状態を確認する。
- ③ 溶接パターンを変える、短時間高電流での溶接等により熱影響幅、硬さ低下の小さくなる様な条件の検討を行う。
- ④ 被覆管先端部の形状の違いによる接合状態の変化を詳細に観察する。

(2) 強度測定試験

常温・高温引張試験に加え内圧・単軸リープ、回転曲げ疲労試験^{*1}等のデータを採取し溶接部の健全性評価を行う。

6.3 接合部の挙動解析

今回、接合面の元素分析の結果、EPMAレベルではTi、Y等の耐熱元素の凝集は確認されなかったが、今後は、TEM等によりこれらの解析を行っていく予定である。

* 1 BN社によると抵抗溶接法で溶接した試料の接合部の強度を評価するのに回転曲げ疲労試験が有効であるとの報告がある。現在プルトニウム燃料開発室では、本装置の製作を終え、基礎特性の評価試験をおこなっており、今後、本試験機による強度評価をおこなっていく予定である。

6.4 品質保証方法の検討

(1) 溶接条件を管理しているセンサ類の測定精度を高めそれらで溶接状態を管理できる様にする。

(2) 超音波探傷法の開発

接合部に生ずる欠陥の検査を超音波探傷法により行う。抵抗溶接法で溶接した試料はバリの部分が生ずるため斜角探傷の開発が必要である。

7. 参考文献

- 1) 関正之、鳴木浩一、飛田典幸、三島毅：酸化物分散強化型フェライト鋼材の溶接試験
(1)-MA956, MA957 板材の溶接試験 PNC SN8430 88-002(1988)
- 2) 関正之、井坂和彦、飛田典幸、長井修一郎：PMW溶接装置の開発－基本特性評価試験の報告 PNC PN8410 91-099(1991)
- 3) 関正之、井坂和彦、西山元邦、飛田典幸、上村勝一郎：パルス磁気溶接装置の開発
(II)－接合強度測定試験結果の報告 PNC PN8410 93-022(1993)
- 4) 西山元邦、関正之、飛田典幸、上村勝一郎：抵抗溶接に関する技術調査と試験片の製作 PNC PN8420 93-001(1993)
- 5) 溶接学会編：溶接便覧 P175-180、P384-417(1992)
- 6) 関正之、井坂和彦、石橋藤雄、西山元邦、飛田典幸、上村勝一郎：抵抗溶接試験片の強度測定試験－BN社において製作した試験片の強度評価結果の報告 PNC PN8410 94-228(1994)