

JAERI-M

6 8 5 6

JMTR用国産Zry-2炉内圧力管の開発

1977年1月

村岡 進・伊丹 宏治・野村 末雄

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

J M T R 用国産 Z r y - 2 炉内圧力管の開発

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

村岡 進・伊丹宏治・野村末雄⁺

(1976年12月7日受理)

J M T R 水ループ用炉内圧力管を Z r y - 2 合金材で製作するための知見を得ると共に製作上の問題点を解決するために Z r y - 2 製圧力管の試作を行なった。Z r y - 2 合金材は国産品を用いたが、厚肉(3 mm t), 太径(55~60 mm ϕ) で且つ長尺(約4 m) で寸法精度の高い管材の製作経験は皆無であったため、先ず素管の製作、加工上の問題点を明らかにするための各種試験検査を実施した。次いで、炉内管の製作に先立って、溶接試験と曲げ加工試験を行ない、その結果をふまえ、炉内モックアップを製作した。なお、当開発研究は1967年から1968年にかけて行なわれたものである。

+）日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

JAERI-M 6856

Development of the Zry-2 Pressure Tube for JMTR In-pile Loops

Susumu MURAOKA, Hiroharu ITAMI and Sueo NOMURA*

Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

(Received December 7, 1976)

The Zry-2 pressure tube mock-up was constructed to study problems in fabricating the tubes with domestic Zry-2. It consists of in-pile and branch tubes operated under pressure 100 Kg/cm²G at temperature 310 °C. Before its construction welding and bending tests were carried out. Butt welding test for the Zry-2 plate was made to find a welding procedure for the Zry-2 pressure tube. Bending test of the Zry-2 pressure tube (O.D. 56.5 mm, wall thickness 2.9 mm) for In-pile loops was made with a pipe bending machine.

*) Present address; Division of Nuclear Fuel Research,
Tokai, JAERI

目 次

1 緒 言	1
2 Zry-2素管の製作	2
2.1 Zry-2素管の製造履歴	2
2.2 Zry-2素管製作仕様	2
2.2.1 規 格	2
2.2.2 尺 法	2
2.2.3 製作仕様	2
2.2.4 品 質	2
2.2.5 試験、検査	3
2.2.6 立会い検査	3
2.2.7 梱包、その他	4
2.3 試験、検査成績	4
2.3.1 尺 法	4
2.3.2 化学成分	4
2.3.3 機械的性質	4
2.3.4 非破壊検査	5
2.4 水素化物方向性係数 (Fn値) の測定	11
3 溶接試験	13
3.1 溶接施行法試験	13
3.1.1 供試材料	13
3.1.2 溶接前表面処理	14
3.1.3 電子ビーム溶接	14
3.1.4 アルゴン雰囲気内手動 TiG 溶接	15
3.1.5 大気中自動 TiG 溶接	17
3.2 溶接後試験	19
3.2.1 溶接ビードの外観及び表面の変色	19
3.2.2 溶接部の組織	19
3.2.3 溶接部の硬度分布	23
3.2.4 溶接部の機械的試験	27
3.2.5 溶接部の腐食試験	28
3.3. まとめ	30
4 曲げ加工試験	32
4.1 曲げ加工の計画値	32
4.2 曲げ加工法	33
4.2.1 芯金および金属充填材	33

4.3 曲げ加工試験結果	33
4.3.1 285Rの曲げ	33
4.3.2 200Rの曲げ	35
(1) 第一回曲げ試験	35
(2) 第二回曲げ試験	36
5 Zry-2 製炉内モック・アップの製作	39
5.1 概要	39
5.2 設計条件	39
5.3 適用法規	39
5.4 製作仕様	41
5.5 溶接	41
5.6 試験、検査	41
5.6.1 寸法検査	41
5.6.2 素材、材料検査	41
5.6.3 溶接検査	41
5.6.4 水圧試験	41
5.6.5 石けん水発泡試験	41
5.7 洗浄	41
5.8 梱包、輸送	41
5.9 据付	41
5.10 工事所掌範囲	44
5.11 支給残材に関して	44
5.12 提出書類	44
5.13 搬入場所	44
6 試験、検査成績	45
6.1 寸法検査	45
6.1.1 各部寸法	45
6.1.2 真直度	45
6.2 溶接検査	45
6.3 水圧試験	45
6.4 石けん水発泡試験	50
7 考察	51
8 結論	53
9 謝辞	54
Appendix I 引用計算式	55

1 緒 言

材料試験炉部においては、早くからインパイルループの炉内管として、Zry-2の圧力管を使用することを計画していたが、これは第一に材料試験炉自体の核特性を良くすること、第二にZry-2の圧力管製作、加工上の諸問題を明らかにすること、第三に実際に炉内管として、これらの圧力管を用い、ATRに近い使用条件で、圧力管の放射線損傷効果や高温高圧水（または沸騰水）下の耐用性などを検討することを目的としている。

我国において、軽水炉燃料被覆管としてZry-2小口径、薄肉管の製作経験は豊富で、既に多量に用いられているが、大口径、厚肉圧力管の製造経験は全くなく、Zr-Nb合金についてはやっと板材が得られる程度で、管については全く製作されていない。以上の現状から材料試験炉のループ用炉内圧力管としてまずZry-2材料を考え、これを製作、加工するまでの種々の問題点を検討することになった。我国でのZry-2圧力管製作加工経験が皆無であることから、まず炉内部のモックアップを製作し、圧力管の製作技術上の問題点と、その解決策について検討することになった。Zry-2の素管製作はZry-2管の国内最大メーカーである神戸製鋼KKが担当し、圧力管の製作加工はOWL-1及びOWL-2の炉内圧力管を製作した石川島播磨重工業KKが実施することになった。

Zry-2の圧力管をループ用炉内管として使用する場合の製作加工上の大きな問題点として次の3点があげられる。

(i) Zry-2大口径厚肉管の溶接法の問題

特に長大、複雑な炉内管になると、燃料被覆管のように溶接をグローブ・ボックスのような限られた場所内で行なうことは不可能で、現場溶接が必要となる。ところが、Zry-2は溶接中N₂やO₂の混入を極力避ける必要があり、常用のTIG法でも不十分とされている。

(ii) Zry-2圧力管の曲げ加工の問題

炉内管を炉内圧力容器から取り出して、炉外部と接続するには枝管の曲げ加工が必要となるが、Zry-2管の曲げ加工については国内では全く経験がない。

(iii) Zry-2圧力管と18-8ステンレス鋼の接続

ループの炉外部分の配管はすべて18-8ステンレス鋼から出来ているので異種金属材料との接続が必要となる。

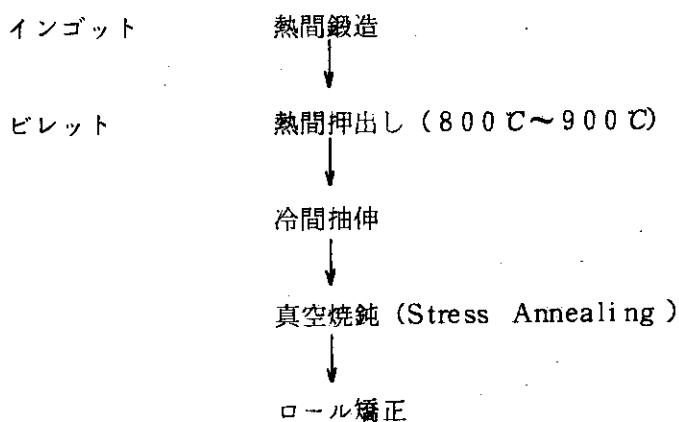
以上3点を解決することが必要となってくる。当報告書では炉内モック・アップ製作上の問題点を把握しその解決を図るために行なった開発研究の成果について、素管の製作、溶接試験、曲げ加工試験、モックアップの製作の4部に分けて報告する。

なお、前掲の3つの問題点のうち(iii)については諸般の事情により今回は対象外とせざるを得なかつた。

2 Zry-2 素管の製作

Zry-2 素管の製作は神戸製鋼KKが担当した。以下に素管の製造履歴、製作仕様および試験検査成績結果について述べる。

2.1 Zry-2 素管製造履歴



2.2 Zry-2 素管製作仕様

2.2.1 規 格

ASTM	B 353	64T	RA-1
------	-------	-----	------

2.2.2 寸 法

	①	②	③
外 径	60.0 mm	56.5 mm	55.5 mm
肉 厚	2.6 mm	2.9 mm	2.4 mm
長 さ	4000 mm	4000 mm	4000 mm
重 量		12.7 kg	

2.2.3 製作仕様

- (1) 管は熱間押出し後、冷間抽伸を施し、継目なく製作するものとする。
- (2) 冷間加工度は20%を越えないものとする。

2.2.4 品 質

- (1) 化学成分は次の値を満たすものとする。但し酸素については目標値とする。

Sn	1.20~1.70 W/o
Fe	0.07~0.20 W/o
Cr	0.05~0.15 W/o
Ni	0.03~0.08 W/o
Fe+Cr+Ni	0.18~0.38 W/o
O	1.000~1.400 ppm
Zr+不純物	Balance

(2) 不純物は次の値を越えないものとする。

A	75 ppm
B	0.5 ppm
H	25 ppm
C	500 ppm
Hf	200 ppm
N	80 ppm

(3) 機械的性質は下記の値を満足するものとする。

	室温	300°C	
引張強度	$\geq 52 \text{ kg/mm}^2$	$\geq 40 \text{ kg/mm}^2$	(目標値)
耐力 (0.2%オフセット)	$\geq 45 \text{ kg/mm}^2$	$\geq 30 \text{ kg/mm}^2$	(")
伸び (G. L. 50 mm)	$\geq 10\%$	$\geq 12\%$	(")

(4) 寸法公差は次の通りとする。

外 径	許容値	$\pm 0.45 \text{ mm}$
肉 厚	目標値	$+0.4 \text{ mm}$ -0.2 mm

真直度 局部について 1/1000 以下、全長について 1/2000 以下。

(5) 管表面は酸洗、脱脂を行なって清浄にし、光輝表面をもつものとする。表面粗さについては外面 JIS 6S 以下とする。内面は JIS 6S 以下を目標とする。

(6) 腐食性質は ASTM B353-64T の基準を満たすものとする。

2.2.5 試験、検査

(1) 化学分析はビレットについて実施する。ただし、H, O, Nについては完成品相当材について行なうものとする。分析法は JIS の規定に基づく。(U, Bについては原研で実施)

(2) 引張り試験は室温および 300°C で JIS の規定に基づき行なう。試験片は室温については JIS 12号 B 变形 (G. L. 50 mm, 巾 9.5 mm) とする。

なお、参考試験として横目方向引張り試験も実施する。

(3) 寸法測定は外径についてはマイクロメーター、肉厚については超音波法による go-no go test により行なう。また真直度の測定は定盤法により実施する。

(4) 腐食試験は完成品相当材について ASTM B353-64T に基づき実施する。

(5) 欠陥検査は超音波探傷法および蛍光探傷法により実施する。超音波探傷法の検査標準については肉厚の $\frac{1}{10}$ の欠陥が十分検出出来るものとする。また、蛍光探傷法は立会い検査時に実施するものとする。

(6) 管破壊試験は代表試験片 2 本について実施する。試験片長さについては特に規定しない。

(7) 製造履歴については別途報告するものとする。

(8) 試験用いた各種試験片は指示のあるまで保存し、求めに応じ提出するものとする。

(9) 試験検査成績書は 5 部提出するものとする。

2.2.6 立会い検査

下記の項目について、立会い検査を行なうものとする。

(i) 寸法（外径、肉厚、真直度）

(ii) 超音波試験（記録紙検査）

(iii) 融光探傷試験

2.2.7 梱包、その他

(1) 梱包は製品が輸送中に損傷をうけるおそれのないようなものとする。

(2) 製品が外部からでも識別できる表示をする。

2.3 試験、検査成績

前記仕様書に基づいて製作された素管の試験、検査結果の概略は次の通りである。機械的試験のうち高温引張り強さが若干目標値を下まわった以外は国産初の試作品としては満足すべきものである。

2.3.1 寸 法

		①	②	③
外 径	max	60.13 mm	56.76 mm	55.63 mm
	min	59.85 mm	56.28 mm	55.23 mm
肉 厚	max	2.94 mm	3.11 mm	2.60 mm
	min	2.30 mm	2.77 mm	2.32 mm
長 さ		4009 mm	4008 mm	4008 mm
真直度		1.0/1000	0.9/1000	1.0/1000

2.3.2 化学成分

Sn	1.40~1.40 W/o
Fe	0.123~0.144 W/o
Cr	0.090~0.097 W/o
Ni	0.058~0.066 W/o
Fe+Cr+Ni	0.271~0.306 W/o
Al	3.8~4.5 ppm
B	< 0.25 ppm
C	< 30 ppm
Hf	101~110 ppm
Zr + 他の不純物	Balance

2.3.3 機械的性質

(1) 引張試験結果

(a) 軸方向

	室 温	300°C
引張強度	59.5 kg/mm ²	33.3 kg/mm ²
耐力 (0.2%オフセット)	45.9 kg/mm ²	26.8 kg/mm ²
伸び	1.2%	1.3%

(b) 周方向

常温での引張強度は 56.9 kg/mm² であった。

(2) 管破壊試験

直径 56.5 φ, 肉厚 2.9 mm, 長さ 300 mm の管材 2 本について試験を行なった所、両者共 620 kg/cm² 以上の圧力に耐えた。なお、計算による破壊圧は 568.8 kg/cm² である。^(*) Photo. 1 に試験材の破壊後の外観写真を示す。

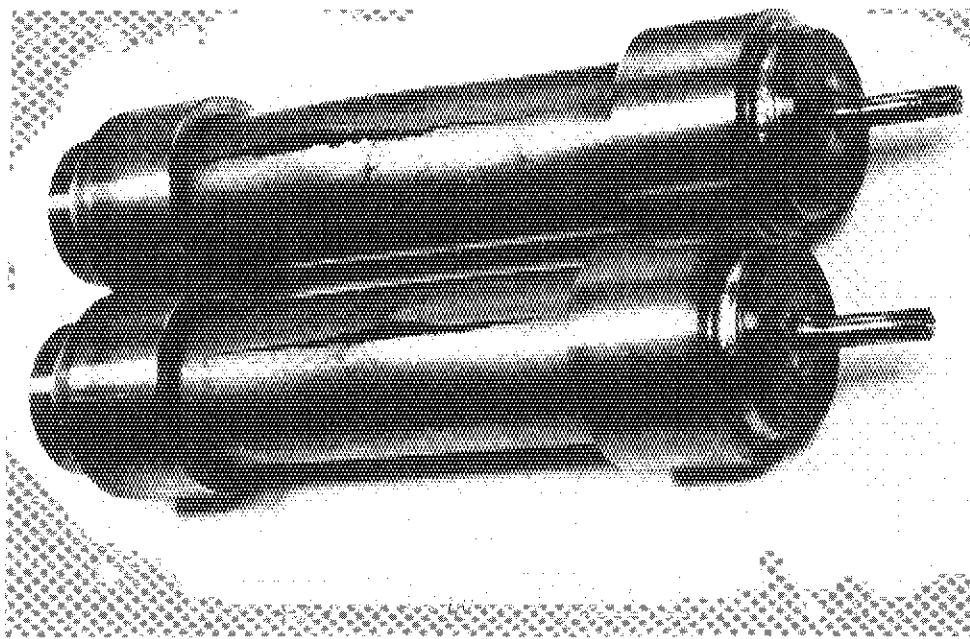


Photo.1 Burst test specimen

2.3.4 非破壊検査

(1) 超音波探傷検査

(i) 被検材

製番	寸	法	数 量
1) NP 105	60 mm OD	× 2.6 mm t × 4000 mm ℥	2 本
2) NP 106	56.5	× 2.9	× 4000
3) NP 107	55.5	× 2.4	× 4000

(ii) 探傷条件

- | | |
|--------------|----------------------|
| 1) 探傷装置 | クラウトクレーマー社製 RST-80 型 |
| 2) 探触子 | ラインフォーカス |
| 3) 周波数 | 4 MHz |
| 4) 入射角 | 27 度 |
| 5) オーバーラッピング | 50 % |
| 6) 管送りピッチ | 3.5 mm/回 |

(*) 引用した計算式については Appendix I に示す。

7) 回転数	NP 105	250 rpm
	NP 106	266 rpm
	NP 107	271 rpm

(III) 標準試験片

標準用の管を被検材と同一ロッドの管材より切り出し、切削加工によって、各々6種の人工欠陥を施したものを標準試験片とした。

NP 105	A	0.27 mm D × 2 mm W × 25 mm \varnothing	外	面
	B	0.13 × 2 × 25	外	面
	C	0.27 × 2 × 5	外	面
	D	0.13 × 2 × 5	外	面
	E	0.27 × 2 × 25	内	面
	F	0.13 × 2 × 25	内	面
NP 106	A	0.29 × 2 × 25	外	面
	B	0.15 × 2 × 25	外	面
	C	0.29 × 2 × 5	外	面
	D	0.15 × 2 × 5	外	面
	E	0.29 × 2 × 25	内	面
	F	0.15 × 2 × 25	内	面
NP 107	A	0.29 × 2 × 25	外	面
	B	0.15 × 2 × 25	外	面
	C	0.29 × 2 × 5	外	面
	D	0.15 × 2 × 5	外	面
	E	0.29 × 2 × 25	内	面
	F	0.15 × 2 × 25	内	面

(IV) 探傷結果

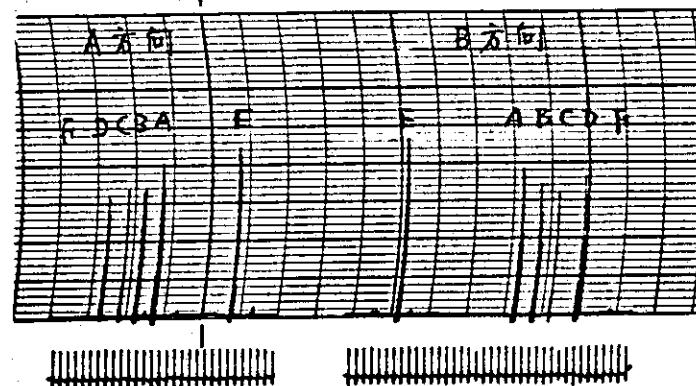
Fig. 1に探傷結果のチャートを示す。すべての管において肉厚の10%を越える欠陥は認められなかった。しかし、NP 107材の1本はそれに近い欠陥が数多く見られた。これには、引っかき疵に類する欠陥によることがわかった。図中、A. B方向とあるのは管送り方向のこと、一つの試験材について、送りの方向を逆にして、2回探傷を行なった。なお、モック・アップ実機には欠陥の最も少ない管材を採用した。

(2) 融光探傷検査

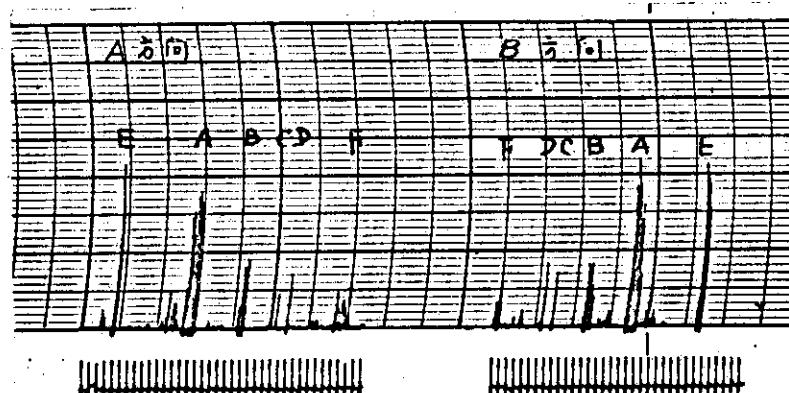
(1)の被検材について検査を行なった所、NP 105材の1本とNP 106材は無欠陥であったが、NP 107材については軸方向に500mmの長さの欠陥が認められると共に管端近くに円周方向、28mm長さの欠陥が見られた。

これは(1)の超音波探傷検査で見られた欠陥に相当するものである。なお、探傷条件は下記の通りである。

- 1) 浸透剤 マグナ・フラックス社製 ZL-22
- 2) 浸透時間 30分
- 3) 洗滌液 マグナ・フラックス社製 SKC-S
- 4) 現像剤 " ZP-4A
- 5) 現像時間 10分



NP 105用標準欠陥



NP 106・107用標準欠陥

Fig.1 Record of ultrasonic inspection

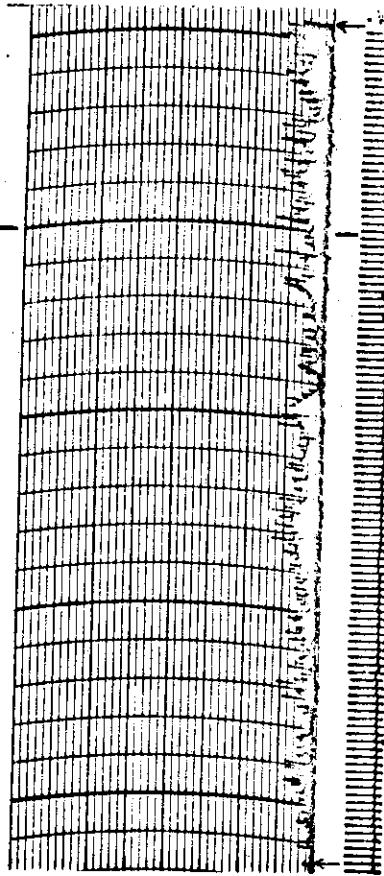
1-a Reference standard chart

4. 探傷結果

1) N P 1 0 5

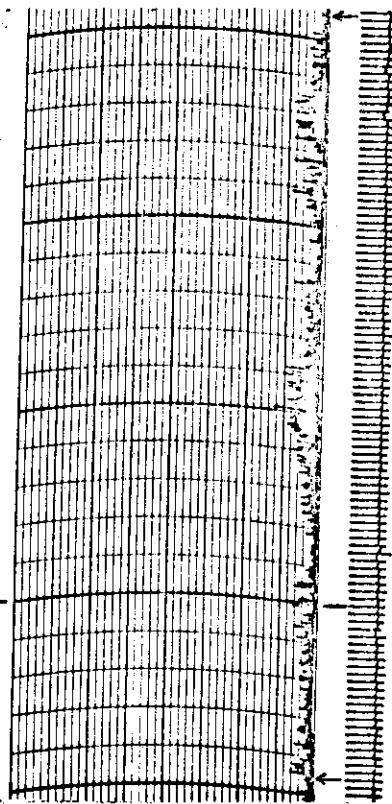
A方向

K1

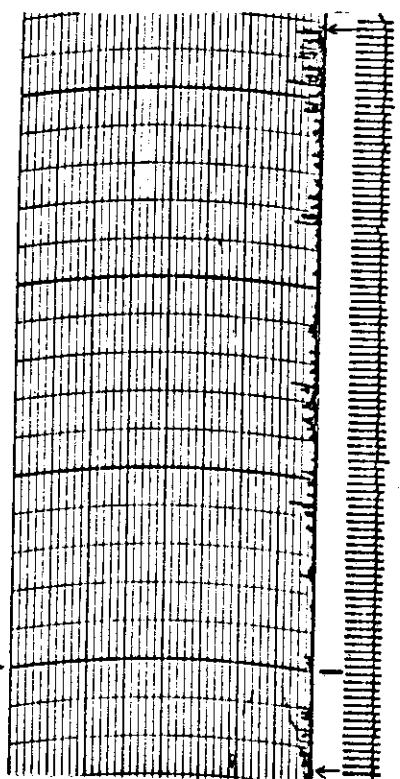


B方向

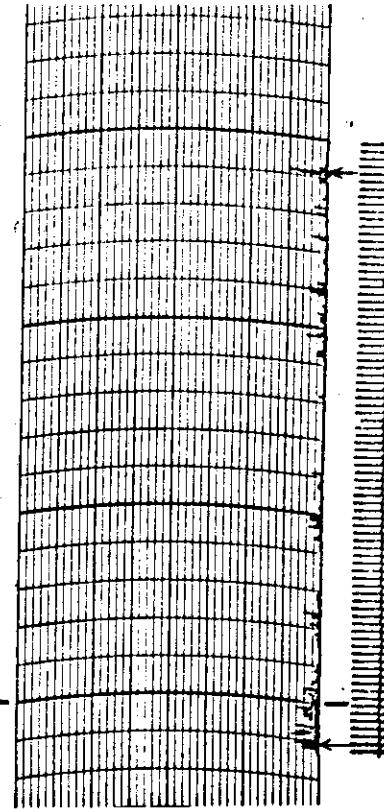
K1



K2



K2

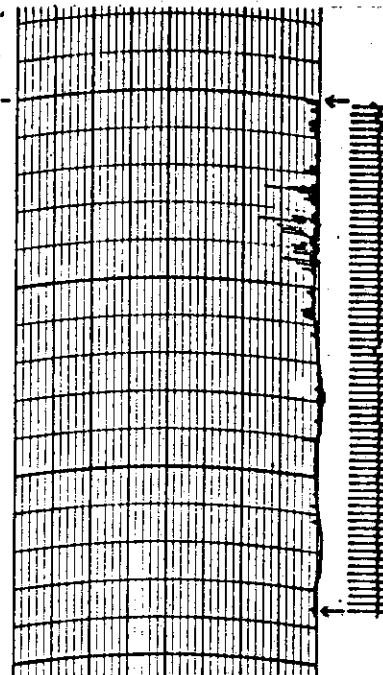


1-b Results of inspection

2) N P 1 0 6

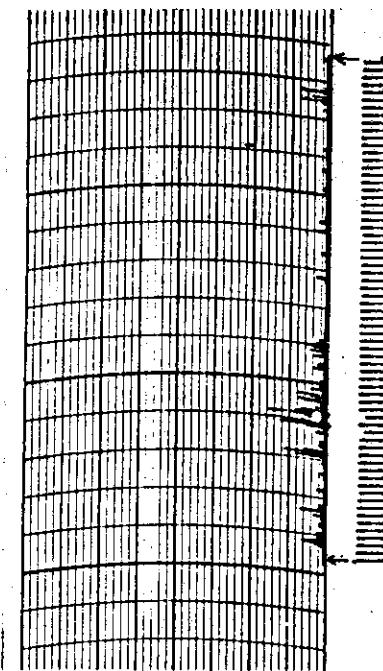
A 方 向

K 1



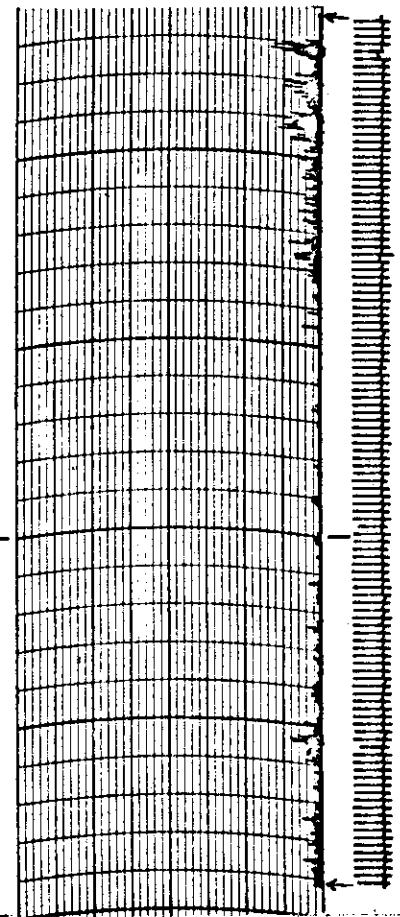
B 方 向

K 1

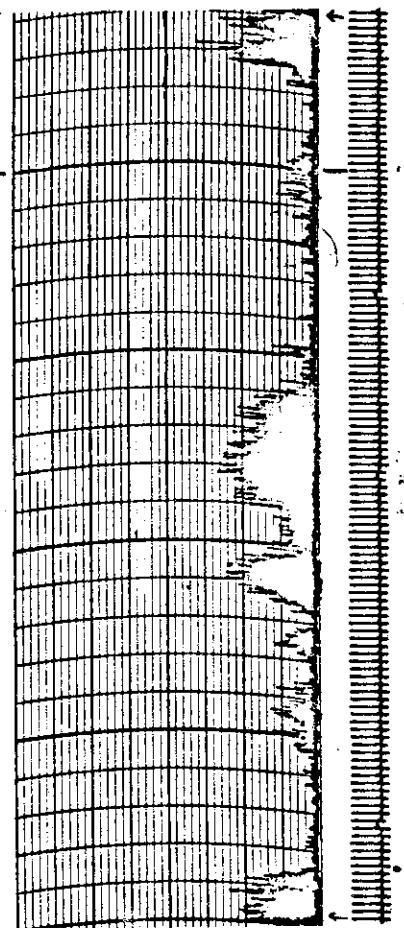


3) N P 1 0 7

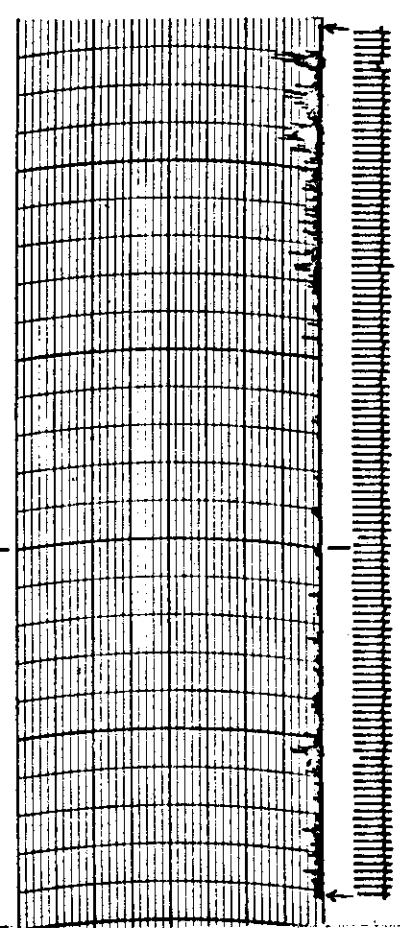
A 方向



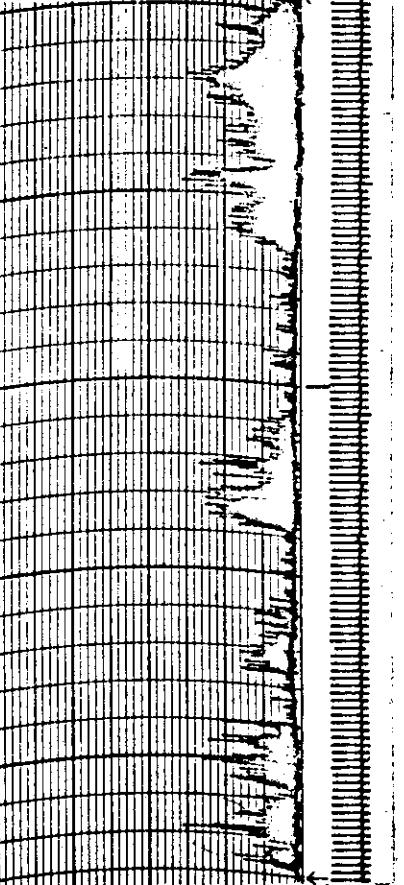
4 1



B 方向



4 2



JAERI-M 6856

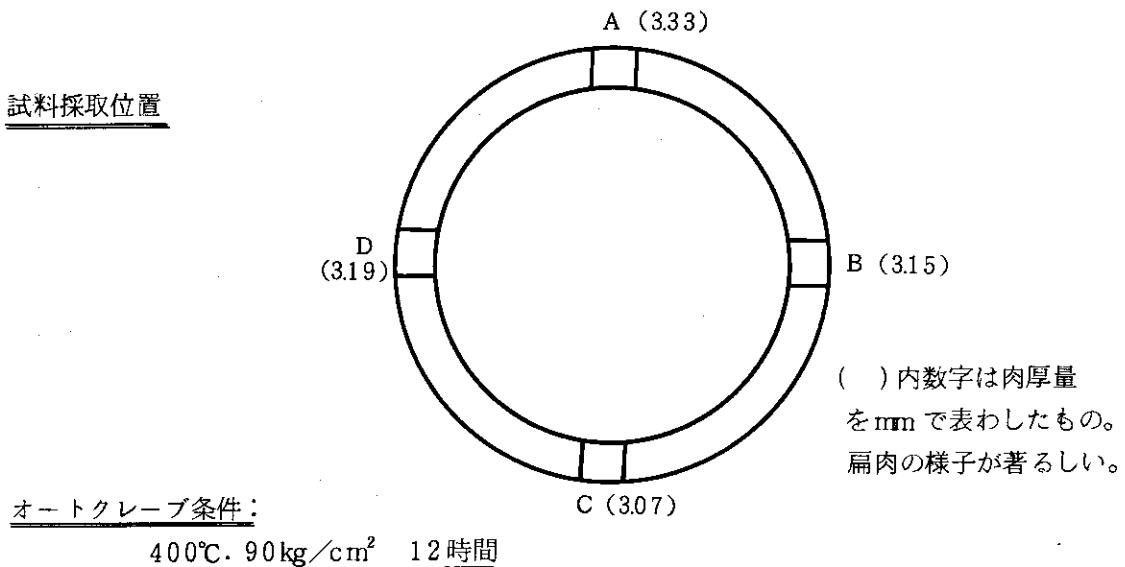
2.4 水素化物方向性係数 (Fn 値) の測定

Zry-2 管中に形成される水素化物 (ZnH_2) が方向性をもって現われる原因是その材料の応力の配向性と因果関係を有しているが、まだその機構は明らかにはなっていない。しかしながら管を製造する際の圧延や抽伸による変形のモードと水素化物の方向性の関連は現象的には明らかにされている。経験的に、管製造の際、径減少率よりも肉厚減少率を大きくとれば円周方向水素化物が多くなり、逆に肉厚減少率よりも径減少率を大きくとれば半径水素化物が多くなると言われている。我々は、3.3 の Zry-2 管と同一インゴットより製作した Zry-2 管について、400°C, 90 kg/cm² のオートクレーブ中で 12 時間浸し、水素富化を行ない、管の円周方向 90°ごとに 4 つの試験片を切り出し、各々について Fn 値の算出を金相写真より行なった。

ここで、Fn 値の算出は次式によった。

$$Fn = \frac{\text{基準方向と } 48\text{ }^\circ \text{ } \sim 90\text{ }^\circ \text{ をなす "水素化物" の個数}}{\text{"水素化物" の全個数}}$$

Fig. 2 に測定箇所などの条件と測定結果を、Photo. 2 に代表的な金相写真を示す。



エッティング条件

<u>エッティング液組成</u>	HF	8%
	HNO ₃	46%
	H ₂ O ₂	46%

時 間 数 秒

全体のFn 値 (A, B, C, D の合計)

$$Fn = 560 / 1396 = 0.40$$

Fig. 2 Experimental condition and result of hydriding test



Photo. 2 Preferential orientated hydride

3 溶接試験

Zry-2の圧力管をJMTRのインパイルループ炉内管として使用する場合に、Zry-2管の溶接が不可避となる。しかるに、Zry-2材を溶接する際に影響を及ぼすと考えられる諸性質および問題点をあげてみると

Zry-2材は

- (i) 熱膨脹係数が低いので、溶接時の変形が少なく、加熱による残留応力が少ない。
- (ii) 電気抵抗が大きいので、抵抗溶接が容易である。
- (iii) 融点が高いので、溶融溶接が難かしい。
- (iv) 加熱、溶融時に気体、特に窒素、酸素等を極めて吸収し易く、吸収によって耐食性の劣化、脆化を起こす。

などが考えられる。従って、Zry-2の溶接は厳重な雰囲気調節下でなるべく短時間に行なわねばならない。そこで筆者等は、石川島播磨重工業KKと協力して、Zry-2の圧力管について、電子ビーム(E.B.)溶接法、アルゴンガス雰囲気内タンクステンアーク手動溶接法(手動TiG)、大気中不活性ガスタンクステンアーク自動溶接法(自動TiG)の3つの方法による溶接比較試験を行なつて、最適の溶接法の確立を試みた。

試験は、1. 溶接施行法試験、2. 溶接後試験の2つに分けられる。

3.1 溶接施行法試験

Zry-2の溶接施行法として、(i)E・B溶接法、(ii)アルゴン雰囲気内手動TiG溶接法、(iii)大気中自動TiG溶接法を選び実施した。

3.1.1 供試材料

供試材料としてはZry-2の圧力管をそのまま使用することが望ましいが、時期的な必要性より圧力管完成前に溶接法を確立しておく必要があったことと、手持ちの圧力管が当時我国には全然なかつたことなどの理由から、1mmまたは2.6mm厚さのZry-2の圧延板を代わりに使用した。供試材料の化学成分はTable-1に示す。

Table 1 Chemical analysis of the specimen

	Sn	Fe	Cr	Ni	Fe Ni, Cr	Al	B	Cd	C	Cu
規 格	1.20%	0.07	0.05	0.03	0.18	max 75 ppm	0.5	0.5	500	50
	()	()	()	()	()					
	1.70%	0.20	0.15	0.08	0.38					
1.0mm材	1.39	0.17	0.099	0.06	0.33	-	-	-	40	-
2.6mm材	1.55	0.15	0.09	0.06	0.30	31	0.2	0.2	160	10

	Hf	H	Mn	N	Si	Ti	W	U	Co	O
規 格	max 200 ppm	25	0.5	80	200	50	100	3.5	20	-
1.0 mmt 材	-	10	-	28	-	-	-	-	-	770
2.6 mmt 材	125	4.2	0.1	46	105	15	25	0.5	5	1430

3.1.2 溶接前表面処理

溶接前の Zry-2 材料に厚い表面酸化膜が存在すると、溶接によって素材中へ酸素が溶解して、機械的性質、特に韌性を悪くすることが考えられるので、予め表面被膜を除き、表面を清浄にするために次の処理を行なった。

- (1) トリクロレン洗浄
- (2) 硝酸混液 (4.5% conc. HNO₃ + 5% HF + 50% H₂O) 中で攪拌しながら 20 ~ 40°C で 30 ~ 60 秒間浸漬し、金属光沢表面の出る迄、酸洗を行なった。
- (3) 酸洗後直ちに水直水中で 10 分間強く流洗し、PH 試験紙により PH 変化が ± 0.2 以内になることを確認した。
- (4) 次に、沸騰蒸留水中に 5 分間浸し、十分酸洗液を除去した。
- (5) 洗浄後表面検査を行ない、表面がさび、くもり、條痕、ふくれのない光沢面であることを確認した。

3.1.3 電子ビーム溶接

(1) 試片と処理

溶接試験用片は Fig. 3 のように切断したものを用い、溶接合わせ面を研削後、2.1.2 に従った酸洗洗浄を行ない、溶接直前にアセトンで脱脂洗浄を行なった。

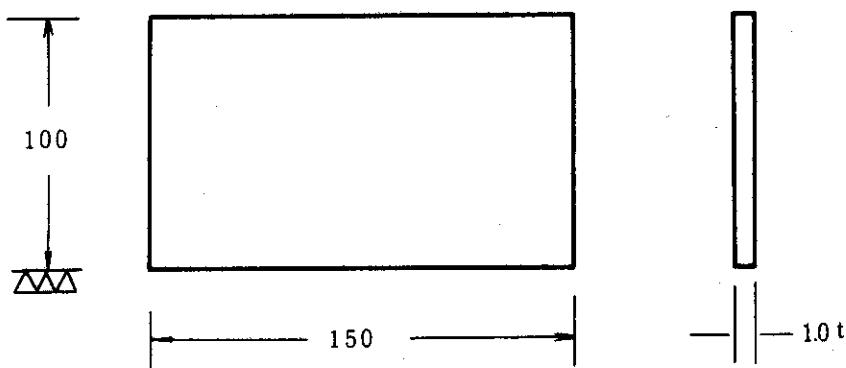


Fig. 3 Specimen for electron beam welding

(2) 溶接装置

型 式： CIAKY 社製	E. B. Welder
能 力： 最高 60 KV	最高 500 mA

真空チャンバー内容量: 50" × 30" × 42"

真空到達: 1×10^{-4} mmHg 迄 5 分

work 移動: X 軸台車走行 24", 速度 100 inch/min

Y 軸ガン移動, Z 軸ガン 6"

X, Z 軸は回転可能

(3) 溶接施行

溶接条件設定のために、初め 18-8 ステンレス板材を溶接治具に取り付け、ただ板上に溶接ビードを置いた。次に 1 mm 厚の Zry-2 材上に溶接ビードを置き、18-8 ステンレス材の溶接条件を修正した。そして最後に Zry-2 の突き合わせ溶接を試み、最適条件を見い出した。

突き合わせ溶接治具は SK 材の表面にニッケルメッキを行なったもので、試験片を取り付けた状態を Fig. 4 に示す。当治具を用いると溶接歪を制御することが可能で、溶接前および溶接中に起こるミスマッチを押え板によって防止できる。また、溶接部よりの熱の拡散が溶接方向に均一かつ迅速に行なわれ、スタート部よりクレーター部迄均一な溶接が得られる。試験片突き合わせ面には約 2 mm 離して試片と同じ Zry-2 材を置き、E. B. 照射によって異種金属の蒸気が溶融池に入ることおよび試片面に付着することを防いだ。

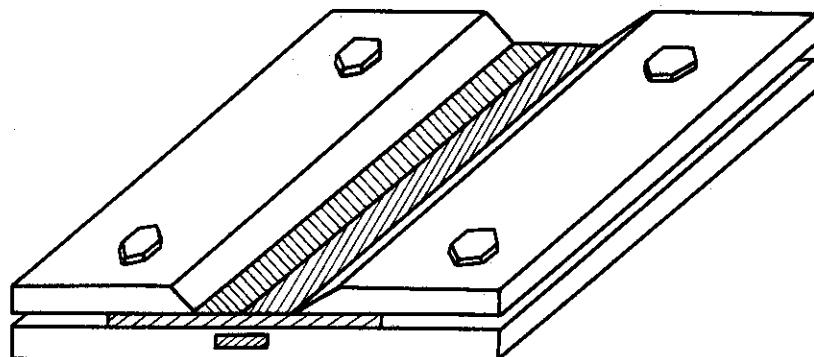


Fig.4 Diagrammatic arrangement of specimen for electron beam welding

Zry-2 材の溶接条件は

2 次電圧 25 KV

溶接電流 50 mA

溶接速度 90 inch/min

真 空 度 1×10^{-4} mmHg

溶接時の真空度は 1×10^{-4} mmHg 以上に保ち、大気汚染を極力防いだ。また、溶接後溶接部および近傍が 300°C 以下に冷却したと思われる迄、すなわち溶接後約 1 分間放置してから空気の流入を行なって溶接部の酸化および窒化を防いだ。

3.1.4 アルゴン雰囲気内手動 TiG 溶接

雰囲気を充分調節した条件で溶接できるように、グローブボックス（チャンバー）内に溶接トーチと治具を配し、外から手袋によって試片等を設定し、手動で溶接を行なった。

(1) 試片と処理

$100 \times 150\text{ mm}$ の大きさに切断した板材を、電子ビーム溶接の場合と同様の酸洗を行ない、溶接前にアセトンで脱脂洗净した。なお溶接棒は板材を 1.5 mm 巾に切断し、同様の酸洗、アセトン脱脂洗净を行なった。

(2) 溶接装置

グローブボックス（チャンバー）の容量： $1.000\phi \times 1.700\text{ mm}$

Workpiece positioning : X, Y 軸走行 Z 軸回転

可能溶接工法： TiG, MiG

溶接機：直流 22 KVA , 300 AMP

真空系統：最高到達真空 $5 \times 10^{-5}\text{ mmHg}$ 迄 20 分

使用可能雰囲気ガス：真空, Ar, O₂, N₂, CO₂, H₂ およびこれらの合成ガス

(3) 溶接施行

溶接板を電子ビーム溶接の場合と同様に、溶接治具（銅パッキングで 0.5 mm 深さ溝付……Fig. 5)に取り付け、溶接棒および必要工具類をチャンバー内に挿入した。チャンバー内を $5 \times 10^{-5}\text{ mmHg}$ まで排気し、直ちに液化アルゴンタンクから活性ガスを導入し、大気圧 + 0.1 気圧程度になる迄放置しておいた。この間約 $6 \sim 7$ 分であった。しかし後に操作窓より両手を挿入して、手動アルゴンアーク溶接を行なった。 1 mm 厚の Zry-2 の突き合わせ溶接条件は下記の通りである。

溶接電流 DCSP 40 A

溶接速度 150 mm/min

トーチガス なし

溶接棒 1.5 mm 巾の 1.0 mm 厚板材切断片

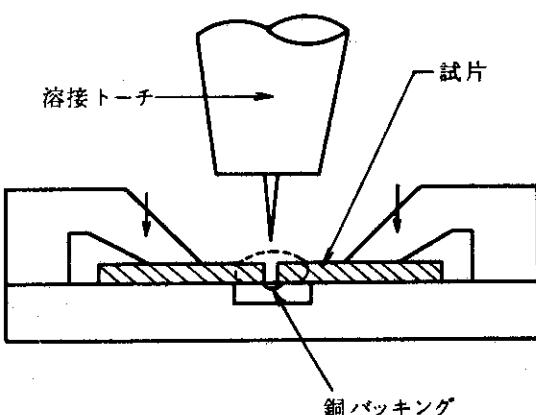


Fig.5 Diagrammatic arrangement of specimen for TIG welding in argon atmosphere

(4) 溶接雰囲気ガスおよび溶着金属中の不純ガス

手動 TiG 溶接に使用したアルゴンガスの純度を Table - 2 に示す。^{*} Zry-2 の溶接に先立って、Zr とよく似た材料である Ti を用い、溶接雰囲気ガスと溶着金属中のガス分析を行なった。

(1) 溶接雰囲気ガスの分析

上述のアルゴンガス雰囲気中でチタン KS 50 材の 1.0 mm 厚板材を溶接する際に発生したガスを集めて溶接雰囲気ガスの分析を行なった。その結果を Table - 3 に示す。なお分析には質量分析計アトラス CH 4 型を使用した。

Table 2 Specification of argon gas

ガス	Ar	N ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O
成 分	>99.99%	<100ppm	<5ppm	<10ppm	<露点 60°C

Table 3 Composition of the impurity gas in welding atmosphere

ガス	H ₂	N ₂	CO ₂	O ₂
第一回	0.004%	0.006	0.002	-
第二回	0.031%	0.022	0.002	-

(2) 溶着金属中のガス分析

(イ) の雰囲気ガス中で溶接した溶着金属中に含まれるガス量を分析した。分析は Fe - Sn Bath 法を用い、分析条件は抽出温度 2000°C、抽出時間 15 分であった。

この結果を Table - 4 に示す。

Table 4 Results of chemical analysis in weld metal

ガス	H ₂	N ₂	O ₂
第一回	0.0001%	0.0004	0.0028
第二回	0.0004%	0.0018	0.0155

3.1.5 大気中自動 TiG 溶接

Zry-2 インパイル圧力管は、場合によっては現場溶接の必要があり、また複雑な形状を持った部分や、工程によっては大気中で溶接を行なわねばならぬ場合が考えられるので、この方法について検討した。

* 溶接雰囲気中に空気ならば 10^4 ppm、窒素ガスでは 5×10^3 ppm 程度迄は溶接後の耐食性に影響はない」とされている。

(1) 試片と処理

2.1.4と同じ

(2) 溶接装置

溶接電流: D C S P 300 A

溶接電圧: 自動制御

溶接棒送り装置: 自動

Workpiece positioning: 長手突き合わせおよび円周溶接可能

溶接治具(長手方向突き合わせ溶接用):

寸法: 全長 1500 mm

治具: 溶接変形防止押えセグメント 銅およびガスパッキング

(3) 溶接施行

溶接試片を上記治具に Fig. 6 の如く取り付けた。銅パッキングおよび押え爪がぴったり当たって、試片ががっちりと挟まるように、銅薄板を上に載せた。

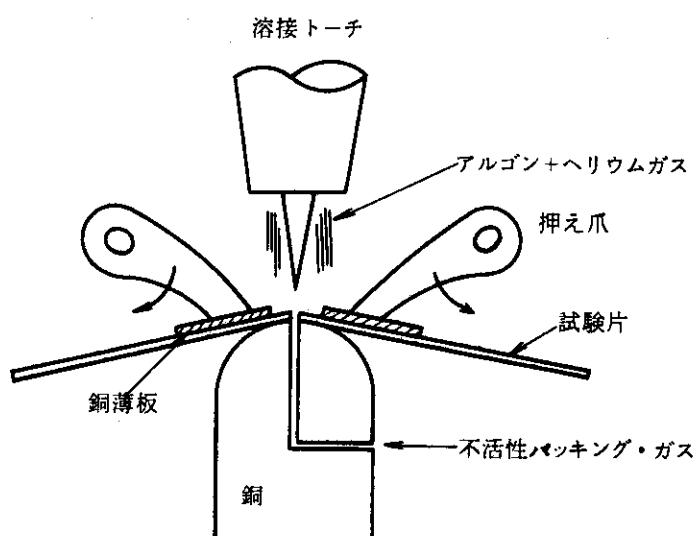


Fig. 6 Setting of the specimen for auto TIG welding in air

下部銅パッキングには 25 mm 間隔にアルゴンガス放出孔があり、アルゴン 10 cfh を流した。溶接時にはトーチからもヘリウム 20 cfh + アルゴン 30 cfh を放出した。溶接棒は spool wire がなかったので使用しなかった。

溶接条件は下記の通りである。

溶接電流 D C S P 30 A

溶接電圧 9.5 V

溶接速度 9 inch/min

雰囲気ガス(トーチ) ヘリウム 20 cfh + アルゴン 30 cfh

パッキングガス アルゴン 10 cfh

3.2 溶接後試験

2.1の溶接法に従って行なった溶接試験片について、溶接部の観察、組織の顕微鏡試験、硬度分布、引張りおよび曲げ試験を行なって、その機械的性質を調べ、更にオートクレーブ中で静的腐食試験を行なって溶接部の腐食性質を調べた。

3.2.1 溶接ビードの外観および表面の変色

溶接試験片の溶接部変色状態は、溶接時の酸化、窒化の指標となる。各々の溶接試験片の溶着部と熱影響部の着色の状況およびビード巾を Table-5 にまとめた。また各試験片の外観写真を Photo. 3 ~ Photo. 8 に示す。

Table 5 Color of the weld metal and width of bead

溶接方法	溶着部	熱影響部	ビード巾
電子ビーム溶接	銀白色	溶接中心から 2.5 mm の域に 2 mm 巾の薄茶色	2.0
自動 TiG 溶接	薄茶色	溶接部端から 1 ~ 1.5 mm 巾に薄茶色、その外側に濃青色 0.3 mm 巾	3.0
アルゴン雰囲気内 TiG 溶接	銀白色	溶接中心から 5.0 mm の域に 2.0 mm 巾の薄茶色	6.0

溶接ビード波形、ビード巾、裏面への溶け込みおよびその均一性については各溶接法により異なっている。自動溶接である電子ビーム溶接および大気中自動 TiG 溶接は波形、着色度、表面変色部の位置および巾はある程度均一になっている。特に電子ビーム溶接ではビード波形、巾、溶け込み量とも非常に均一性を示している。

自動 TiG 溶接において、充填金属を用いなかったことからかなり均一な溶着部が得られた。

一方、アルゴン雰囲気内手動 TiG 溶接では、溶接速度、溶接棒の送りあるいはアーク長の変化の為に自動溶接で得られたような均一性は望むことができない。しかし、さし当って問題となってくる程のものではない。当溶接による裏側への溶け込み量、巾も概して良好である。

次に溶接部の健全性について考察してみる。手動 TiG 溶接については溶接棒を用いた為に、溶着部は凸型になり、クレータ部は溶接棒を加えて、アークを消滅させたので、クラック等の欠陥は見られない。しかるに電子ビームおよび自動 TiG 溶接は溶接棒の使用が困難であったので、溶接表面に最大 0.3 mm のアンダーカットまたは low bead が表われている。特に、電子ビーム溶接の場合、スパッタとなったり溶着部裏側へ凸ビードとなって出る為にくぼみ量は大きい。しかしながら、凹型になったクレータにもクラックの発生は見られなかった。

次に溶接変形については、電子ビーム溶接、自動 TiG 溶接、手動 TiG 溶接の順に変形量が小さくなってしまっており、中でも電子ビーム溶接の場合には特に少ない。これは入熱密度が大きいので溶接速度が高速度であること、ビームが細かいことからビード巾が 2 mm と小さい為であろう。この変形量はビード巾と対応している。

溶接部およびその近傍について、蛍光探傷検査を実施した所、蛍光指示は全然見られず、Zry-2 材は鋼材に比べて weld sensitivity の低い材料であると考えられる。

3.2.2 溶接部の金属組織

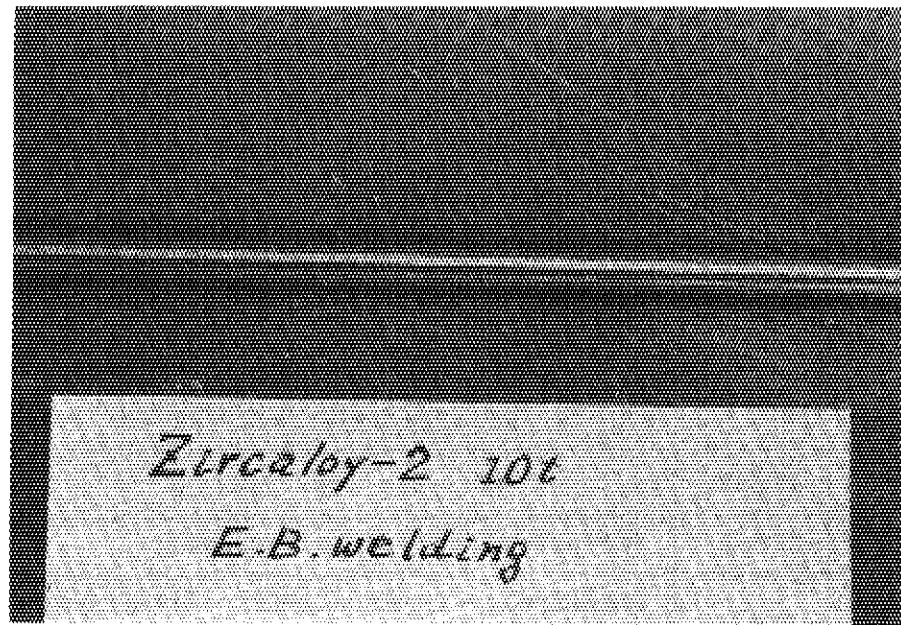


Photo.3 View of the metal welded by electron beam welding (surface side)

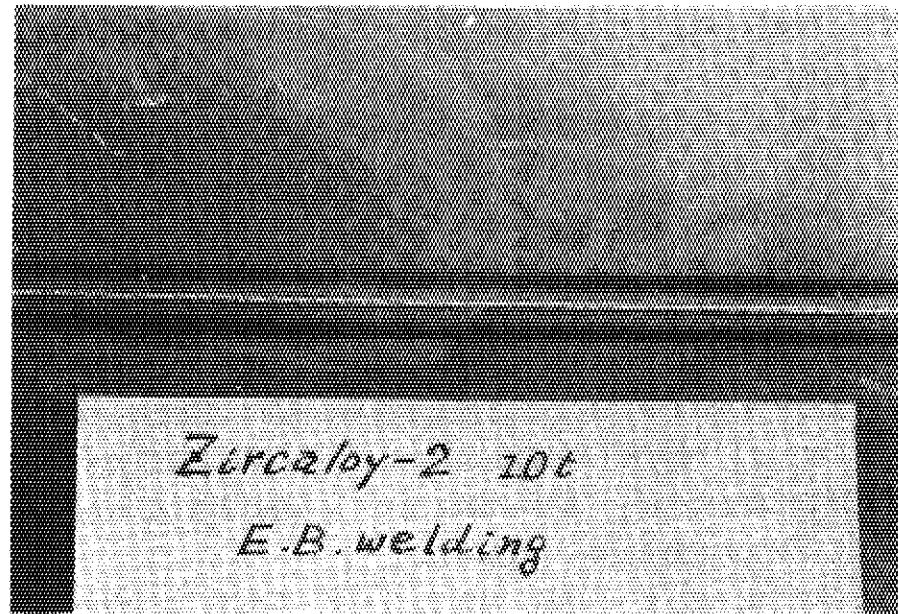


Photo.4 View of the metal welded by electron beam welding (back side)

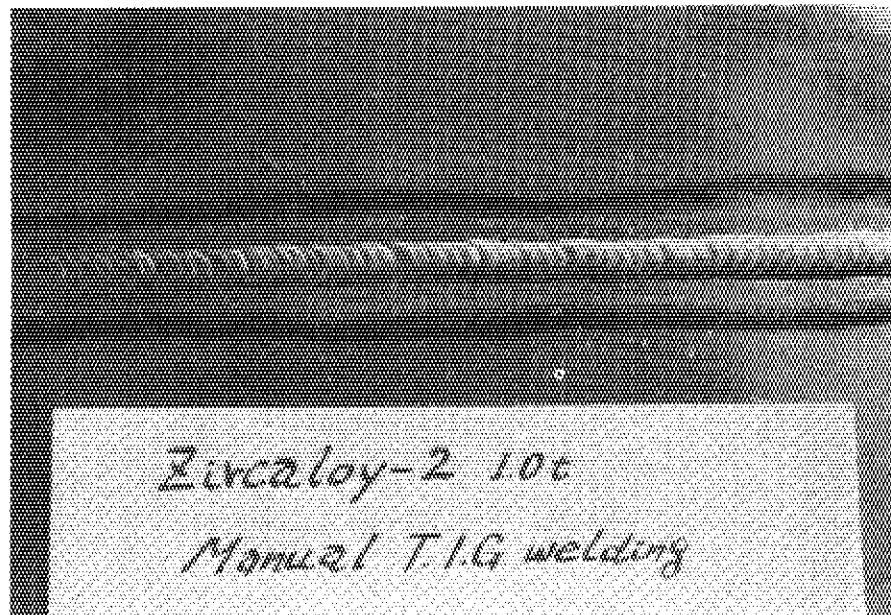


Photo.5 View of the metal welded by manual TIG welding in argon atmosphere (surface side)

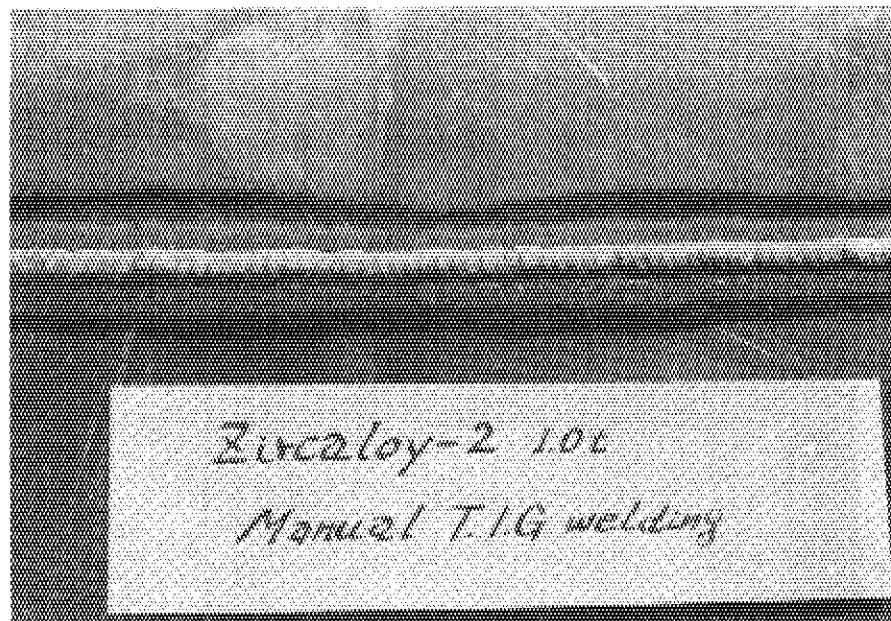


Photo.6 View of the metal welded by manual TIG welding in argon atmosphere (back side)

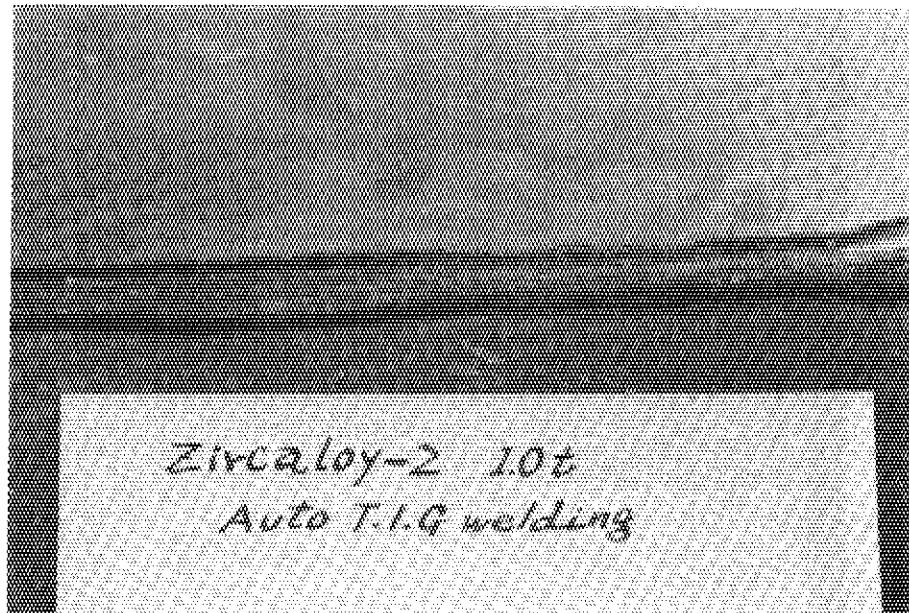


Photo.7 View of the metal welded by auto TIG welding in air (surface side)

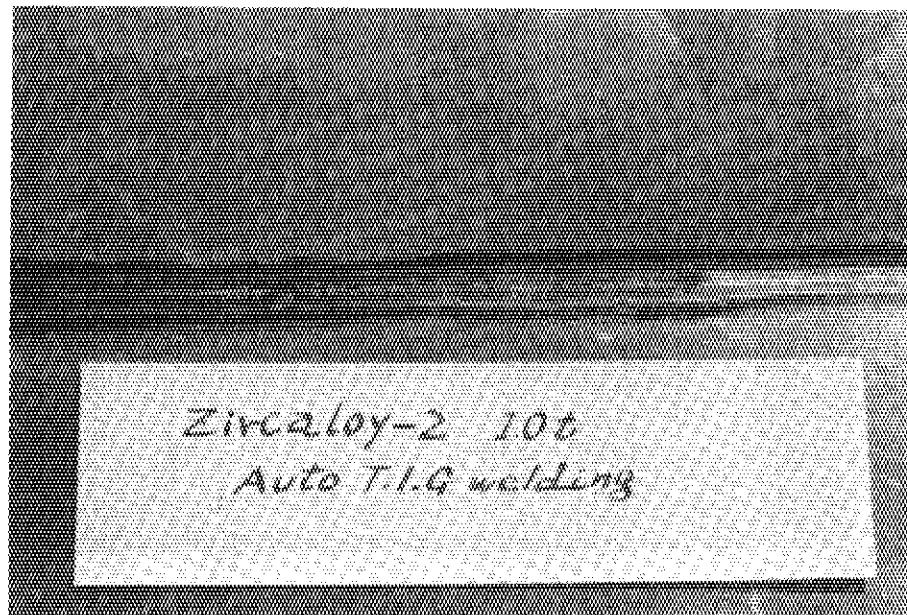


Photo.8 View of the metal welded by auto TIG welding in air (back side)

各溶接部の溶接横断面の概略図を Fig. 7 に示す。Fig. 7 および Photo. 3 ~ 8 で判るように、電子ビーム溶接および自動 TiG 溶接の溶着部は狭く且つ熱影響部も狭い。

参考の為に各溶接部の溶着部および熱影響部の巾と板厚の比をとって比較したのが Table- 6 である。

表で明らかなように、手動 TiG 溶接が、溶着部、熱影響部共に、他の溶接法に比べて、ビード巾は広く、電子ビーム溶接がもっとも狭いことがわかる。

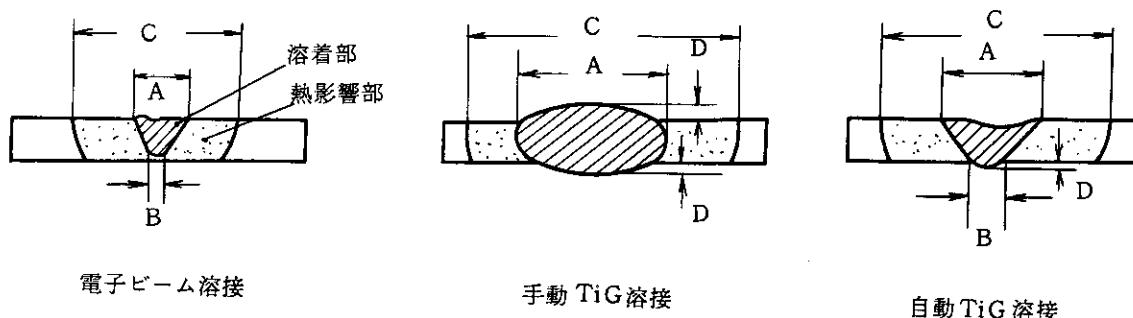


Fig. 7 Macro sketch of the cross-section of weld-joint

Table 6 The ratio of width of weld-metal zone and heat affected zone to specimen thickness and the value of undercut

溶接法	$A+B/2t$	C/t	D
電子ビーム溶接	1.25	4	0.2
手動 TiG 溶接	6.0	13	0
自動 TiG 溶接	2.25	5.5	0.2

但し、 A, B : 溶着部の巾（上部、下部）

C : 热影響部の巾

D : アンダーカットの値

t : 板 厚 (1 mm)

* Fig. 5 参照

次に、母材、各溶接部の溶着部および熱影響部の顕微鏡組織を Photo 9 ~ Photo 15 に示す。

溶着部、熱影響部とも $\alpha + \beta$ の針状の組織を示している。電子ビーム溶接部ではビード巾が狭い、つまり冷却速度が大きく、針状組織が他に比べてずっと小さい。

手動 TiG 溶接部は逆に冷却速度が非常に遅いため、 β 相は大きく、熱影響部迄およんでいるのがわかる。

3.2.3 溶接部の硬度分布

溶接部断面の硬度測定の結果を Fig. 8 に示す。ビッカースの硬度で、母材が 170 であるのに対し、溶着部は電子ビーム溶接、手動 TiG 溶接の場合 205、自動 TiG 溶接の場合は 220 となっ

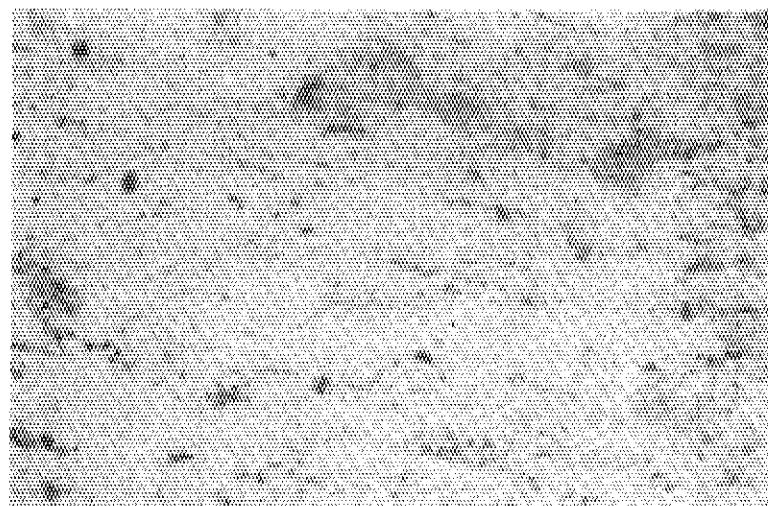


Photo.9 Microstructure of base metal (x200)

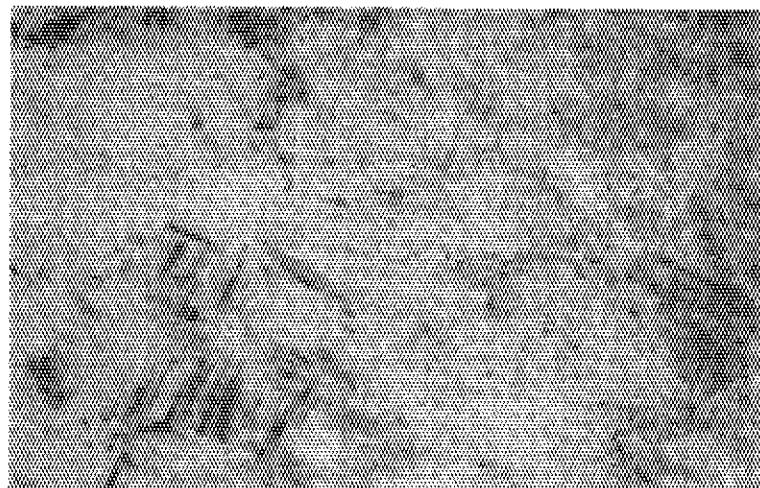


Photo.10 Microstructure of weld metal zone
by electron beam welding (weld zone)
(x200)

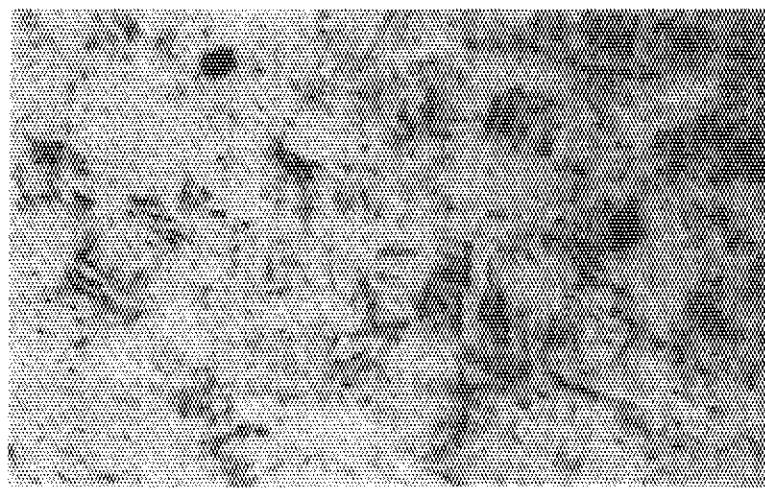


Photo.11 Microsturcture or weld metal zone by
electron beam welding
(heat affected zone) (x200)



Photo.12 Microstructure of weld metal zone by manual TIG welding in argon atmosphere (weld zone) (x200)



Photo.13 Microstructure of weld metal zone by manual TIG welding in argon atmosphere (heat affected zone) (x200)

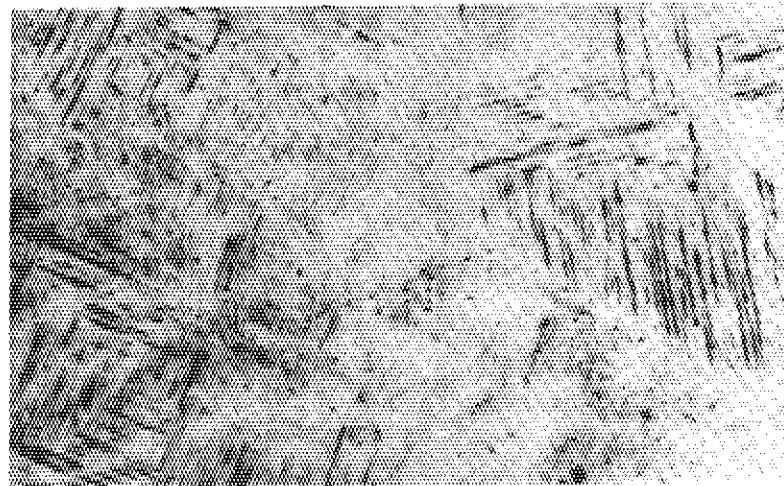


Photo.14 Microstructure of weld metal zone by auto TIG welding in air (weld zone) (x200)

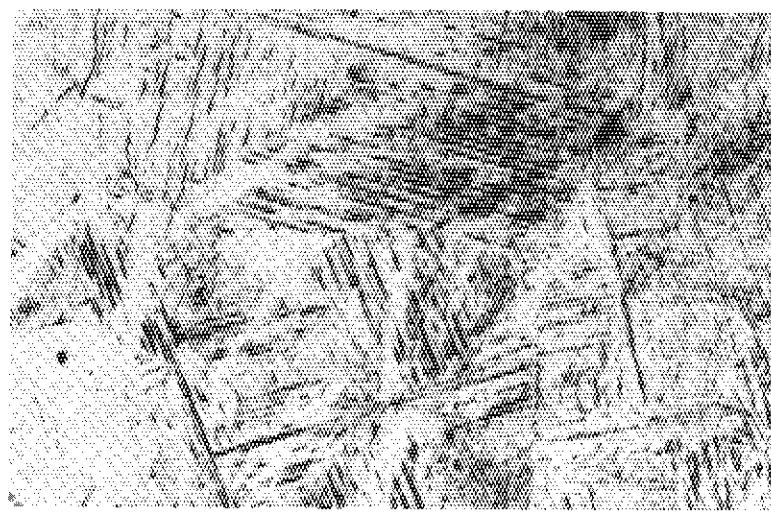


Photo.15 Microstructure of weld metal zone by
auto TIG welding in air (heat affected
zone) (x200)

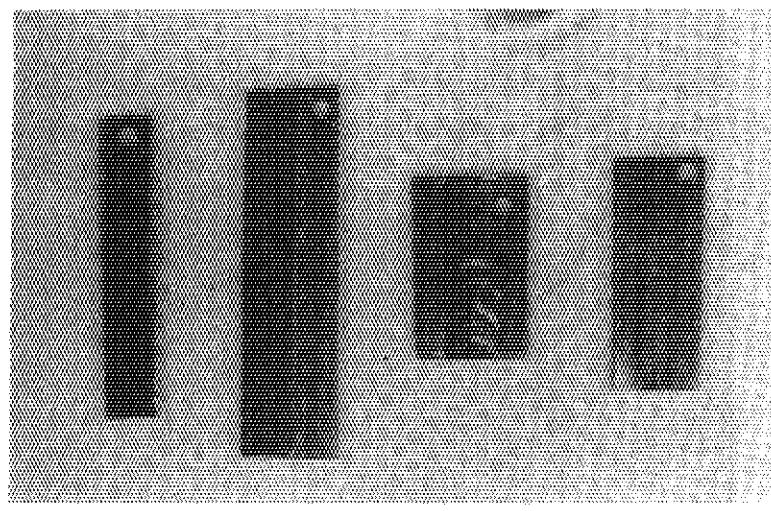


Photo.16 The view of corrosion test specimen
(corroded at 400 C for 72 hours in
autoclave)

ている。これは上述の $\alpha + \beta$ 組織が存在することで硬くなっていると考えられる。

自動 TiG 溶接の溶着部が他の溶着部に比べ大きくでているのは大気中での汚染によって硬化したものと思われる。

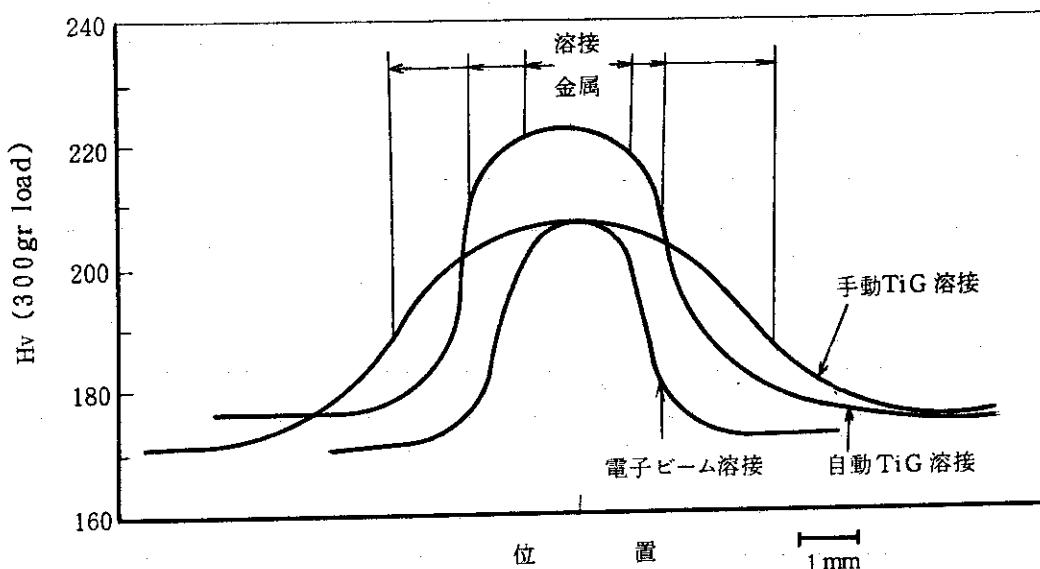


Fig.8 Vickers hardness distribution of weld-joint

3.2.4 溶接部の機械的試験

引張りおよび曲げ試験片の形状は Fig. 9 の如くで、試験片中央に溶接部があり、試験は手動 TiG 溶接試験片のみ溶接部表面を平滑に仕上げたものを用いた。常温の引張りおよび曲げ試験結果を Table - 7 に示す。なお試験片の破断位置はいづれの場合にも溶接部やその近傍ではなくて、母材部であった。つまり、当 Zry-2 については溶接部は母材部よりも引張り強度が大であり、溶接部を中心にしての伸び率は母材、電子ビーム、手動 TiG、自動 TiG 溶接法の順に小さくなっているが、各値とも ASTM の規格値を上まわっている。

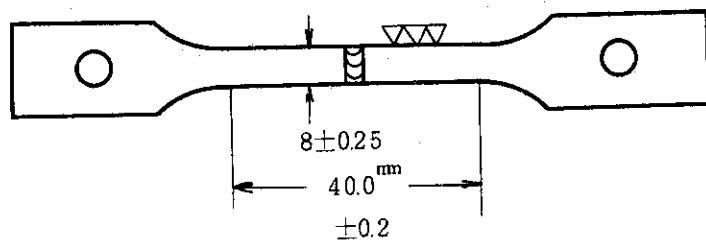


Fig.9 The specimen for tensile and bend test

Table 7 Results of mechanical test on weld-joint

溶接方法	機械的性質				
	引張強さ kg/mm ²	0.2%耐力 kg/mm ²	伸び*	破断位置	曲げ試験**
母材 (as rolled)	1 64.1	40.6	32.4	母材部	ナシ
	2 54.6	43.6	31.6		ナシ
	3 55.3	43.4	28.0		
	平均 58.0	42.5	30.7		
手動 TiG (余盛削除)	1 53.8	43.5	21.2	母材部	ナシ
	2 55.3	44.7	19.2	"	ナシ
	3 52.4	43.2	17.2	"	
	平均 54.0	43.8	19.2		
自動 TiG (as weld)	1 53.6	44.1	16.0	母材部	ナシ
	2 51.7	41.7	17.2	"	
	3 53.0	44.5	18.4	"	
	平均 52.8	43.4	17.2		
電子ビーム (as weld)	1 54.6	41.0	24.0	母材部	180°(アンダーカットあり)
	2 56.0	44.0	24.0	"	150°
	3 55.0	45.5	28.0	"	
	平均 55.2	43.5	25.3		
規格***	42.0	24.5	14.0		

* 標点間距離 = 25 mm

** 1) Bend factor = 5

2) 表曲げ

3) 割れの有無および割れが発生する角度を示す。

*** ASTA Designation: B 352-64 T, RA-1 (longitudinal) による。

次に曲げ試験の結果を見ると手動 TiG, 自動 TiG 溶接による試験片では、曲げ角度が 180°になつても割れは発生せず充分延性のあることを示している。しかし電子ビーム溶接試験片では曲げ角度が約 150°および 180°程度で割れが発生した。この割れの発生位置はアンダーカット部であった。ところが引張り試験の結果によると 3 つの溶接部のうち電子ビーム溶接部の伸び率がもっとも高い。このことより曲げには、溶接部の延性より溶接部の形状つまり、ビード巾やアンダーカットの形状が効いてくると考えられる。

3.2.5 溶接部の腐食試験

今迄述べてきた 3 種の溶接法が材料の耐食性におよぼす影響をみる為に、高温、高圧水蒸気中で各溶接材料についてオートクレーブによる静的腐食試験を行なった。

(1) 試験条件

(i) 試験片

用いた Zry-2 溶接片は本施行法試験で作成した溶接材を Fig. 10 のように切り出したものである。なお、自動 TiG 溶接片については表面を平削して供した。

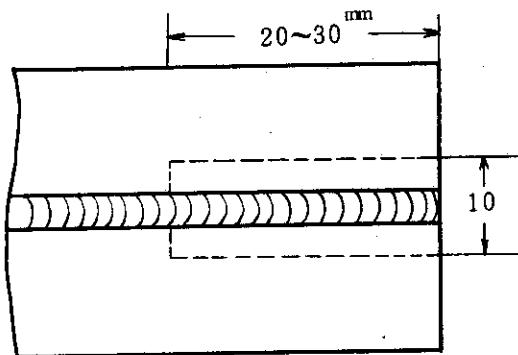


Fig.10 Preparation of specimen for corrosion test

(ii) 試験法

上記の試験片は一端に直径 1 mm の穴をあけた。そして溶接の際の酸化被膜を取り除く為、2.1.2 に従った酸洗処理を行ない、乾燥後重量変化の測定を行なう為、メトラー精密自動天秤で秤量して供試した。腐食試験に用いた装置は SUS 32 ステンレス鋼製のオートクレーブ装置である。方法は、比抵抗 $2 \times 10^6 \Omega \text{cm}$ の純水をボイラーの中で沸騰させて蒸気を作り、これをオートクレーブ装置中に送り込む。オートクレーブ中には試験片をステンレス鋼製の試料掛に懸吊し 30°C でブローによる脱ガスを行なった後、 400°C , $10 \text{kg}/\text{cm}^2$ および 500°C , $10 \text{kg}/\text{cm}^2$ の蒸気中で一定時間保持し、所定の時間後に試料を取り出し、外観の観察を行ない重量変化を測定した。

(2) 試験結果

(i) 外観

Photo 16 に溶接試験片の外観写真を示す。今回の腐食試験の条件では、各溶接試験片とも溶着部、熱影響部、母材部の間の差異はほとんど見られず、ただ自動 TiG 溶接片のみ熱影響部と母材部の境あたりにかなり早い時期に Break-away の現象が表われはじめている。これは先の Photo 5~6 で見られる特に着色の著しい個所に当たり、大気汚染による酸化、窒化の為に腐食性が劣化したものと思われる。他の溶接片および自動 TiG 溶接片の上記以外の部分の Break-away は母材片に比べて若干早く起こり始めるようだが各溶接試験片間の差異は見出せなかった。

(ii) 重量変化

今回の腐食試験では外観観察に主目的をおき、重量変化の測定は Break-away の現象をみる目安とした。腐食試験ははじめ 400°C , $10 \text{kg}/\text{cm}^2$ で 360 時間行ない試験片がまだ Break-away を起こしていないことを確認してから次いで 500°C に温度を上げて $10 \text{kg}/\text{cm}^2$ で 60 時間腐食した所、前述のように Break-away 現象が起こりはじめていることが認められた。

Fig. 11 に重量変化の測定結果を示す。これより各溶接片とも重量変化から見た限りでは溶接しな

い母材片の重量増加と比べてみてむしろ良好な耐食挙動を示しているといえる。そして、外観で Break-away 現象が認められたのは各溶接試験片共、殆んど変わらず重量増加が $60 \sim 80 \text{ mg/cm}^2$ 程度の値になったときで、これは従来の Zry-2 に比べてよい結果を示している。

3.3 まとめ

Zry-2 材は高温では酸素、窒素などのガスと極めて反応し易い材料である。そこで、Zry-2 材の溶接で問題となってくるのは、雰囲気による汚染をいかに抑えるかということである。しかるにループに使用する厚肉大口径の長大な Zry-2 管を溶接加工する場合には、すべての個所を真空あるいはアルゴンガス雰囲気中で溶接を施行することは不可能であり、場所によっては大気中での現地溶接も考慮せねばならない。

Zry-2 板材について、真空中の電子ビーム溶接法、アルゴンガス雰囲気内タンクステンアーク手動溶接法、大気中不活性ガスタンクステンアーク自動溶接法の 3 つの溶接法で、溶接比較試験を実施した。

その結果、電子ビーム溶接及び Ar 雰囲気内手動 TiG 溶接では雰囲気ガスによる汚染はほとんど見られなかつたが、大気中自動 TiG 溶接ではどうしても大気による汚染は避けられず、汚染による変色、硬化、耐食性の劣化が認められた。

溶接片の機械的試験はいずれの溶接も良好な結果を示しているが、電子ビーム溶接では、アンダーカットによる曲げ性の劣化がみられ、これを防止する為に、バッキングメタルを用いるなどの手段を講ずる必要がある。

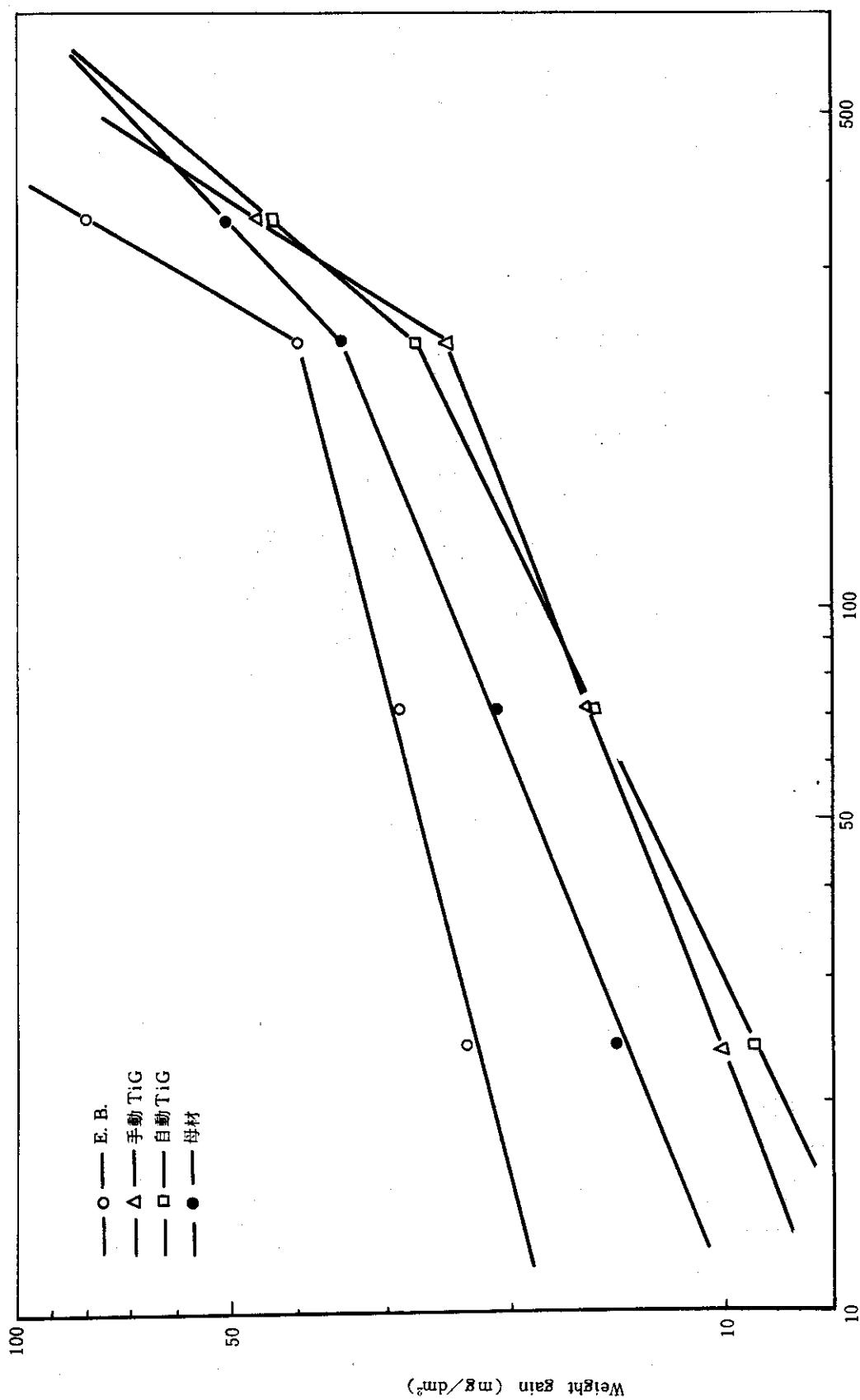


Fig.11 Results of corrosion test on weld-joint

4 曲げ加工試験

Zry-2耐圧管の曲げ加工は石川播磨重工業KKで、ステンレス鋼管や炭素鋼管の曲げ加工に用いている全運動油圧式パイプ・ベンダー（石川島芝浦タービン製）を使用して行なった。パイプベンダーの概略をFig. 12に示す。

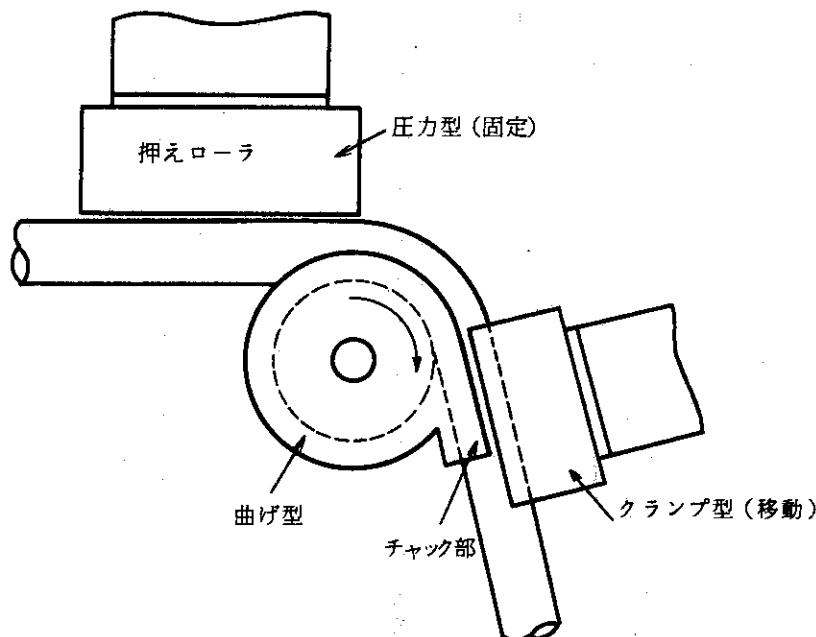


Fig.12 Pipe bending machine

曲げ型は汎用の曲げ半径285R用と200R用の2種を使用し、曲げ形状は直角曲げを目標とした。Zry-2管の場合、曲げ後のスプリング・バックの程度が予測できない為、95°の曲げを行なって様子をみるとことにした。曲げ加工数は285Rのものについて1回、200Rのものについて2回、合計3回行なった。なお、Rは曲げ半径である。

4.1 曲げ加工の計画値

炭素鋼の曲げ加工の実績値より、曲げ加工による変形度を求めこれを計画値とした。

曲げ半径	外表繊維伸び	肉厚減少率**	楕円化率***
285R (5.05D*)	9.9%	4.8%	6.8%
200R (3.54D)	14.1	8.9	8.8

* Dは管の直径を示す。

$$** \text{肉厚減少率} = \frac{\text{素管肉厚} - \text{曲げ後外側肉厚}}{\text{素管肉厚}} \times 100$$

$$*** \text{ 楕円化率} = \frac{\text{長径} - \text{短径}}{\text{曲げ前基準外径}} \times 100$$

4.2 曲げ加工法

曲げによる管の変形を緩和する目的で、285Rの曲げについては芯金を、200Rの曲げについては金属充填材を使用した。加工温度は常温、加工速度は装置の可能な最も遅い速度18~20sec/95°とした。

4.2.1 芯金および金属充填材

285Rの曲げには汎用の炭素鋼の芯金を使用した。

200Rの曲げは管外側の外表繊維の伸び率が14.1%で、管材料のもつ伸び率12%を考えるとかなり厳しい曲げ加工である。そこで、管の破損を防ぎ、また楕円化の傾向を緩和する目的で、金属充填材を使用して、加工を行なった。つまり75~80°Cの温水中でZry-2管内に金属充填材を充填し、管の温度が50°C以下になった所で加工を行なった。使用した国産の金の金属充填材の成分および主なる性質は次の通りである。

(1) 成 分

成 分	Bi	Pb	Sn	Cd
%	50	26.7	13.3	10

(2) 融 点

70°C

(3) 機械的性質

伸び率 140~200% (at. R. T.)

膨脹率 0.51~0.58% (at. R. T.)

4.3 曲げ加工試験結果

曲げ加工後の試験、検査は(i)外観検査、(ii)ダイチェック検査、(iii)外径測定、(iv)肉厚測定の4項目について行なった。ダイチェックには探傷液として栄進化学KK製のレッド・マークを使用した。外径測定はノギスを、肉厚測定は超音波厚み計(帝国通信KK製)およびマイクロメーターを使用して行なった。以下にその結果について述べる。

4.3.1 285Rの曲げ

285Rの曲げ加工芯金を用いる普通法によって行なったが、曲管外側には、伸びの不均一によると考えられる凹凸状のうねりが多少見られた。Fig. 13に外径、肉厚の測定位置を、Table-8、Table-9にそれぞれ楕円化率、肉厚減少率を示す。楕円化率は計画値より小さく、肉厚減少率は計画値を上まわった。曲がり半径はスプリング・バックが多く295Rとなった。

Photo. 17に曲げられた管の外観を示す。

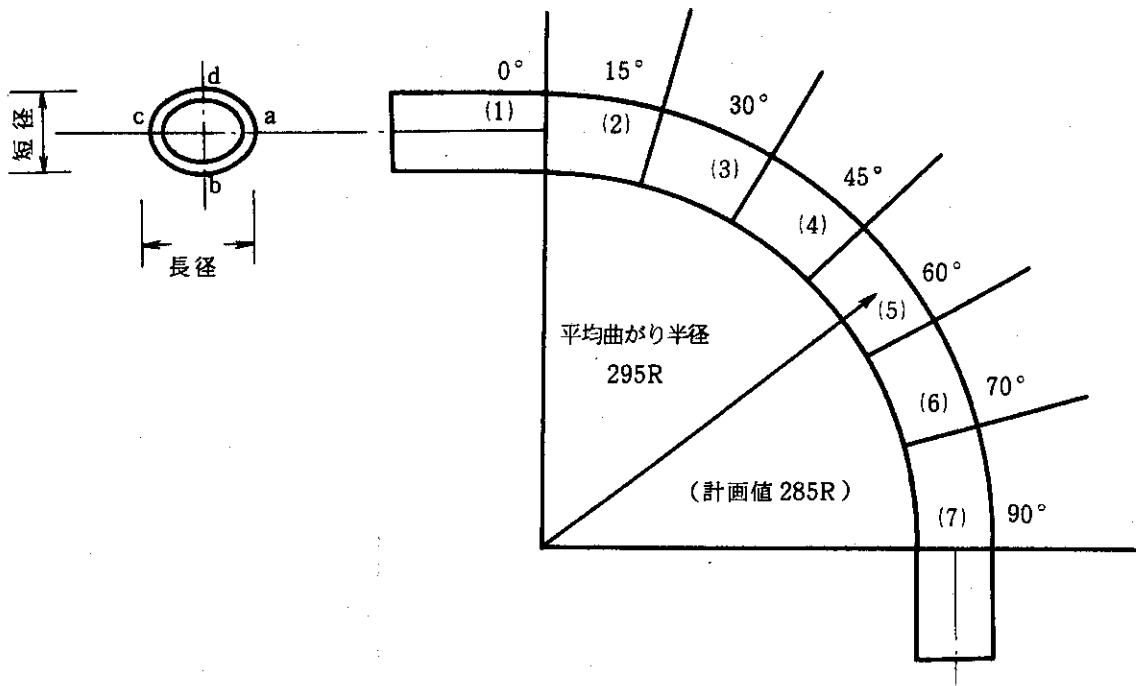


Fig.13 Location of the ovality and thickness measurement
(bending radius : 285R)

Table 8 The rate of ovality

計測位置	長径 (mm)	短径 (mm)	楕円化率 (%)
1	57.25	55.70	2.8
2	57.30	55.55	3.1
3	57.40	55.10	4.1
4	57.30	55.15	2.8
5	57.45	54.85	4.6
6	57.60	54.80	4.9
7	57.40	55.45	3.5

Table 9 The rate of decreasing of the thickness

計測位置	肉厚 (mm)				肉厚減少率 (%)
	a	b	c	d	
1	2.75	2.90	2.95	2.89	0.3
2	2.76	3.09	2.98	2.71	6.5
3	2.86	3.10	2.90	2.74	5.5
4	2.79	3.00	2.90	2.71	6.5
5	2.87	3.09	2.95	2.69	7.2
6	2.79	3.18	2.89	2.66	8.3
7	2.78	3.02	3.00	2.75	5.2

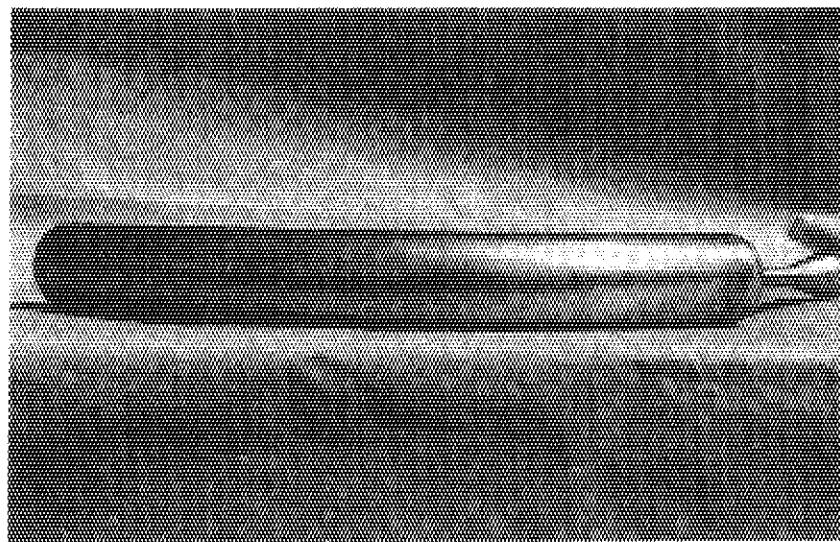


Photo.17 Bent tube (bending radius : 285R)

4.3.2 200Rの曲げ

先の285Rの曲げ結果からも、Zry-2管にとって200Rの曲げはかなりきびしいことが予想された。そこで、金属充填材を充填し、曲げ加工を行なったが、第一回目は曲げ途中破損した。そこで第二回目、加工条件を変えて行なった所、破損することなく曲げることができた。

(1) 第一回曲げ試験

第一回目の曲げでは、国産の曲げ用金属充填材を使用し、加工条件は充填材の予熱温度50°C曲げ速度は18sec/95°とした。加工開始後、10~20°曲げた所でまず充填材が大音響を発して破損した。装置を一旦止めZry-2管の外観を観察した所、クラック、割れなどの異常が認められなかつたので引き続き加工を行なった所、すぐにZry-2管が破損した。破損箇所を調べてみると、充填材の破損箇所とZry-2管の破損箇所が一致しており、このことから充填材の破損によって、この部分に該当するZry-2管に曲げ応力が集中し、Zry-2管を破損したものと思われる。破損したZry-2管およびその破損部をPhoto.18, 19に示す。

(2) 第二回曲げ試験

第一回の曲げ結果より、割れ発生の原因が曲げ用金属充填材の不良にあると考えられたので第二回目の曲げでは、米国 Mining & Chemical Products L. T. D. 製の金属充填材を使用した。成分は国産のものと同一であるが、Bi, Pb, Sn, Cd の他に延性を良くする為、若干の Mo, Na などが添加されていると言われている。加工条件も前回と若干変えて、充填材の予熱温度を 30~35°C、曲げ速度を 20sec/95° として行なった所、破損することなく曲げることができた。

加工後の管外側全面ダイチェック検査の結果、異常は認められなかった。しかし Photo. 20 に見られるように 285R の曲げよりはやや大きく曲管部外側に凹凸状のうねりが見られた。橿円化率は最大値 2.9% であり、芯金を用いた 285R の曲管（最大値 4.9%）より遥かに小さく、充填材の効果が如実に表われている。

スプリングバックは 285R の値に比べてかなり緩和され、曲がり半径は 240.5R となった。肉厚減少率は最大値 10.5% を示し、これは一般に言われている通り、外表繊維の伸び率の約 3/4 に当たる。

Fig. 14 に外径、肉厚の測定位置を、Table-10, Table-11 に 200R の曲管の橿円化率、肉厚減少率を示す。

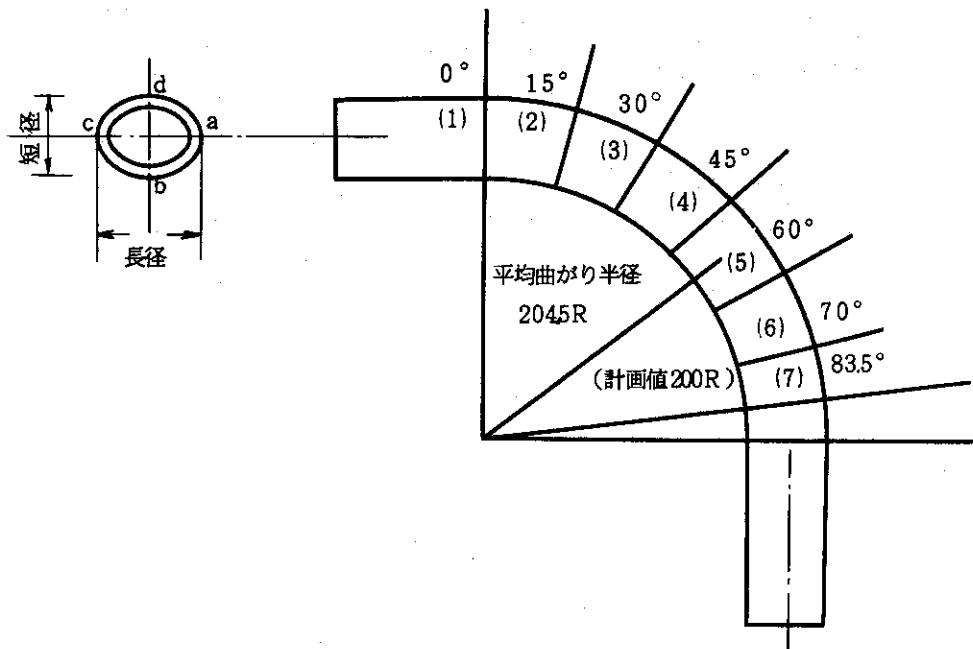


Fig.14 Location of the ovality and thickness measurement
(bending radius : 200R)

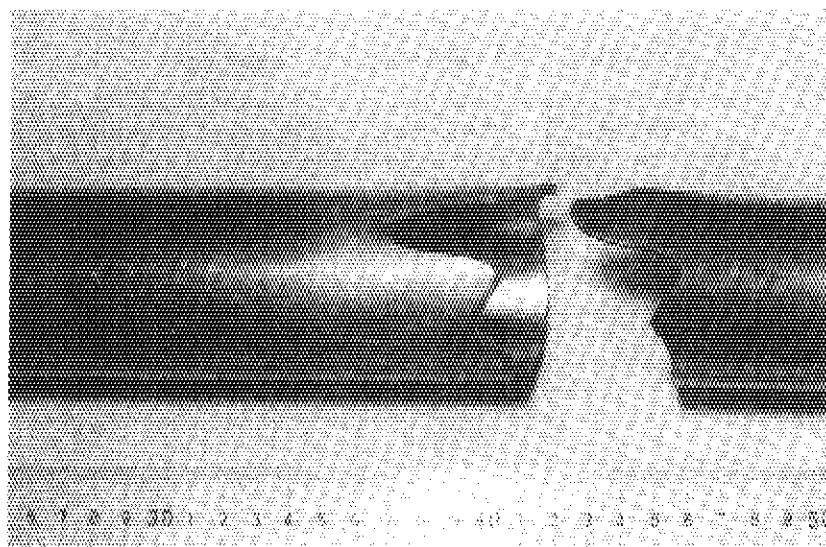


Photo.18 Broken part (bending radius : 200R)

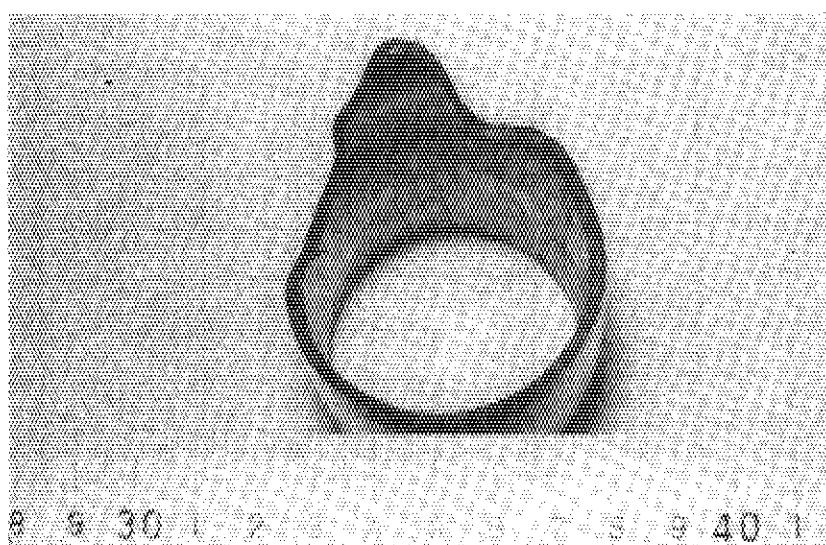


Photo.19 Broken part (bending radius : 200R)

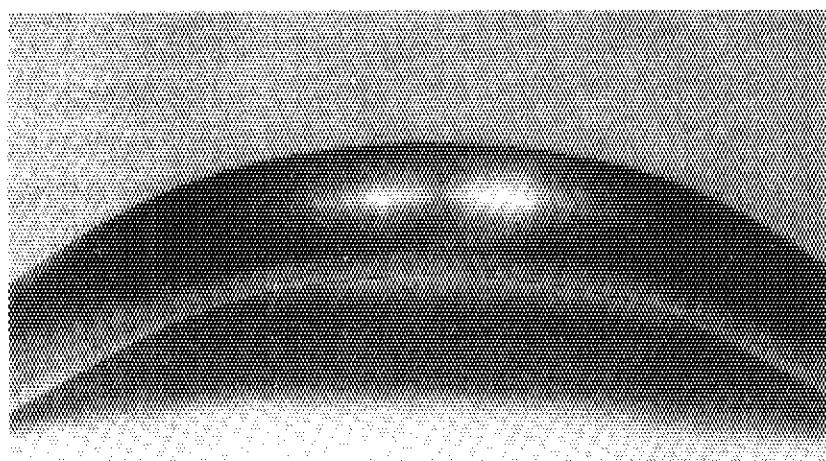


Photo.20 Bent tube (bending radius : 200R)

Table 10 The ratio of ovality

計測位置	長径 (mm)	短径 (mm)	橢円化率 (%)
1	57.25	56.50	1.3
2	57.15	56.30	1.5
3	57.45	55.95	2.7
4	57.40	56.05	2.4
5	57.40	56.15	2.2
6	57.50	55.85	2.9
7	57.10	56.15	1.7

Table 11 The rate of decreasing of the thickness

計測位置	肉厚 (mm)				肉厚減少率 (%)
	a	b	c	d	
1	2.95	3.15	2.92	2.77	3.2
2	2.95	3.27	2.80	2.61	8.8
3	2.93	3.22	2.87	2.58	9.8
4	2.92	3.22	2.90	2.67	6.7
5	2.92	3.22	2.87	2.59	9.5
6	2.92	3.22	2.90	2.56	10.5
7	2.93	3.06	2.92	2.74	4.2

4.4 まとめ

厚肉大口径 Zry-2 管の曲げ加工限度および曲げ加工後の機械的性質の変化は非常に問題であるが、我国ではまだこの種の問題の解決はなされていない。この問題の解決の第一歩として、我々は曲げ加工による肉厚減少率、橢円化率、スプリング・バック量などを測定することによって、厚肉大口径 Zry-2 管の曲げ加工の限度を明らかにすることを試みた。曲げ加工試験は市販のパイプ・ベンダーを使用して、285R, 200R の二種の曲げ半径について行なった。その結果 285R の曲げは汎用の炭素鋼の芯金を使用すれば充分可能であり、200R の曲げは良質の金属充填材を使用すると可能であることが判明した。

上記の方法で加工した 285R, 200R の曲管は共に、外周表面に凹凸状のうねりが見られた。また、スプリング・バックにより、曲げ半径は計画値 285R に対し 295R に、計画値 200R に対し 204.5R となった。

5 Zry-2 製炉内モック・アップの製作

Zry-2 製炉内モック・アップの製作は石川島播磨重工業（KK）が担当した。このモック・アップは圧力管、上部枝管の一部そして試料取出し用トップクロージャーからなるものである。炉内ループにおいては炉頂部において枝管貫通後、また下蓋貫通後において、ループキュービクルに至る配管に接続する必要がある。これらの接続は溶接などの方法で行なう必要があり、いわゆる現場溶接が必要となってくるが、ここではその為の有用なデータを得ることも合わせて、設計および製作上の問題点を検討、確認することを目的とした。

5.1 概要

本装置は JMTR の炉心格子位置 H-7 ループ用孔に挿入される予定の回転取出式 3 吋貫通ループ (Through-Loop) の炉内部モック・アップであって、概略図 (Fig. 15) に示してあるようにループの冷却水は炉心圧力容器頂部を貫通する枝管より入り、炉内管内の照射実験試料を冷却し、炉下部より圧力容器外に出る構造である。

このモック・アップは圧力管と枝管から構成されている。

5.2 設計条件

形 式：3 吋回転取出式貫通型炉内管

炉心插入予定位置：JMTR 炉本体格子位置 H-7

枝管取出孔 3 WC

ループ一次系冷却水：純 水

常用圧力：80 kg/cm² • G

常用温度：80 kg/cm² • G の飽和温度 249.5 °C

設計圧力：100 kg/cm² • G

設計温度：100 kg/cm² • G の飽和温度 310 °C

γ 熱発熱：20 W/g

耐圧管の真直度：全長に対し 1/2000 以上

材 質：Zry-2

腐 食 代：なし

5.3 適用法規

本装置の設計製作および試験検査にあたっては下記法規に準拠するものとする。

JIS (日本工業規格) 最新版

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III & VIII ; Latest Edition

AECL の設計基準参照

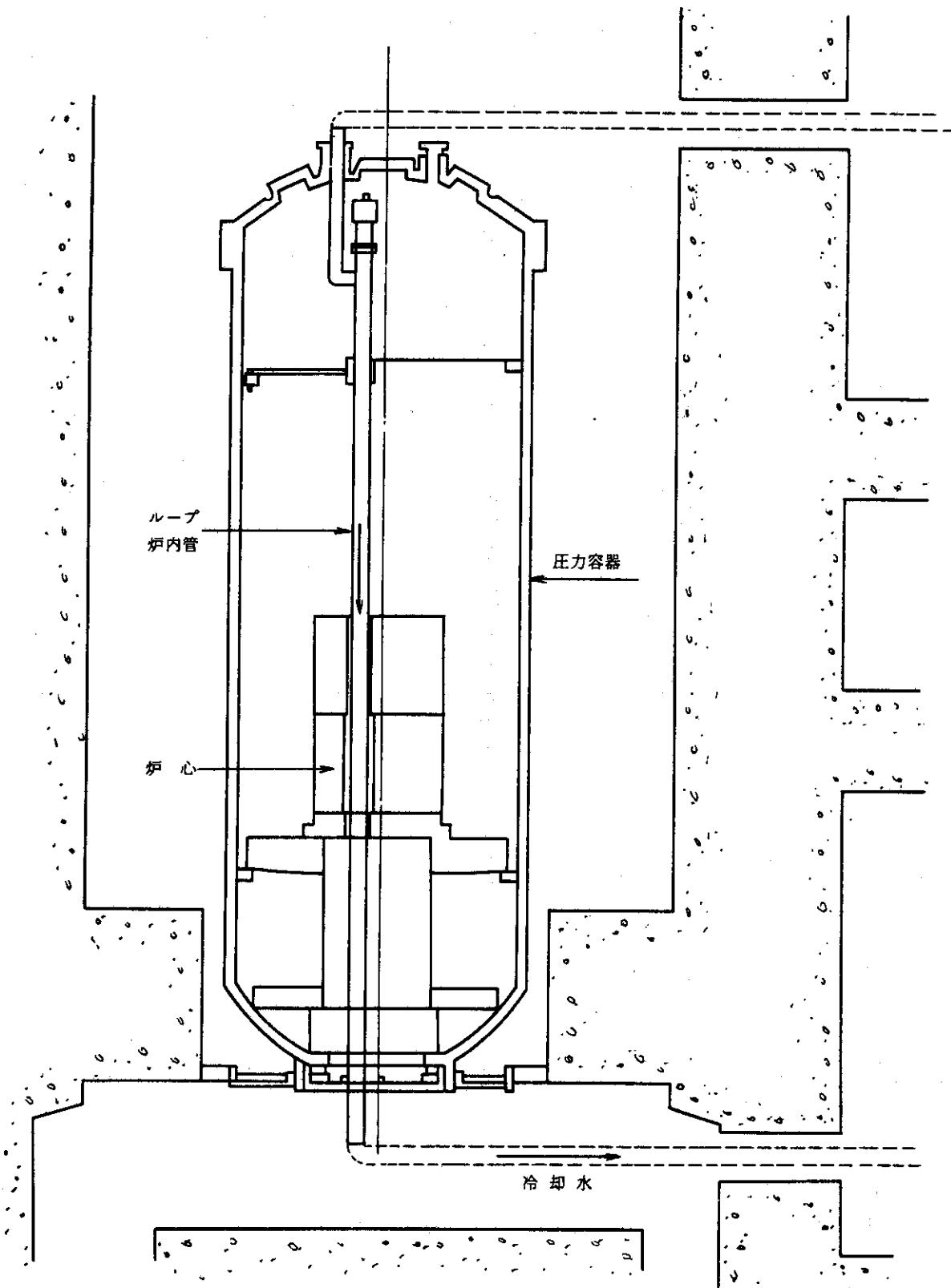


Fig.15 Inpile loop through the JMTR

5.4 製作仕様

2.3節に述べた設計条件を満たすモック・アップを製作する設計図面をFig. 16に示す。

5.5 溶接

溶接の詳細については別途協議して決めるが、先に実施した溶接試験の結果をふまえ各溶接部の工法を選定すると共に不明確、未確認の事項についてはその調査、試験を実施すること。特に溶接界囲気には留意し、エレクトロンビーム溶接法ができるだけ採用するものとする。Fig. 17に各部の溶接工法概略図を示す。

5.6 試験、検査

試験、検査は下記により行なう。

5.6.1 寸法検査

各部寸法と真直度について行なう。パイプの内径、外径は 60° づつ回して3方向について測定すること。真直度はモック・アップを専用架台に取りつけ、無理な力がかかるないように吊るし、主配管の周囲4箇所にはった、鉛直のピアノ線との距離を、スケールにて測定する。合格基準は $1/1000$ 、目標値を $1/2000$ とする。

5.6.2 素材・材料検査

ミルシートによる。

5.6.3 溶接検査

溶接施行法試験を行なうものとする。溶接部の検査としては、外観目視検査、蛍光探傷検査そしてX線検査を行なうものとする。

5.6.4 水圧試験

水圧試験は試験検査方案により行なう。すなわち試験圧力として 100 kg/cm^2 で保持時間は1時間とする。方法としては最初 50 kg/cm^2 で5分間保持した後、 100 kg/cm^2 迄昇圧する。検査は 50 kg/cm^2 、 100 kg/cm^2 共全体にわたって漏洩がないかどうかを確かめると同時にあらかじめ示す各箇所について、縦、横両方向の直径の寸法測定を行ない有害な歪を生じるか否かを測定する。

5.6.5 石けん水発泡試験

30 kg/cm^2 の空気あるいは窒素ガス加圧後、石けん水を被検物に塗布し、発泡の有無を確認する。

5.7 洗浄

洗浄に関しては別途洗浄方案を作成し、細心の注意をはらって、油、鉄分、酸化物等の異物の除去に努めること。

5.8 梱包、輸送

5.9 据付

本装置を支持台に据付け、指定の箇所に設置するものとする。

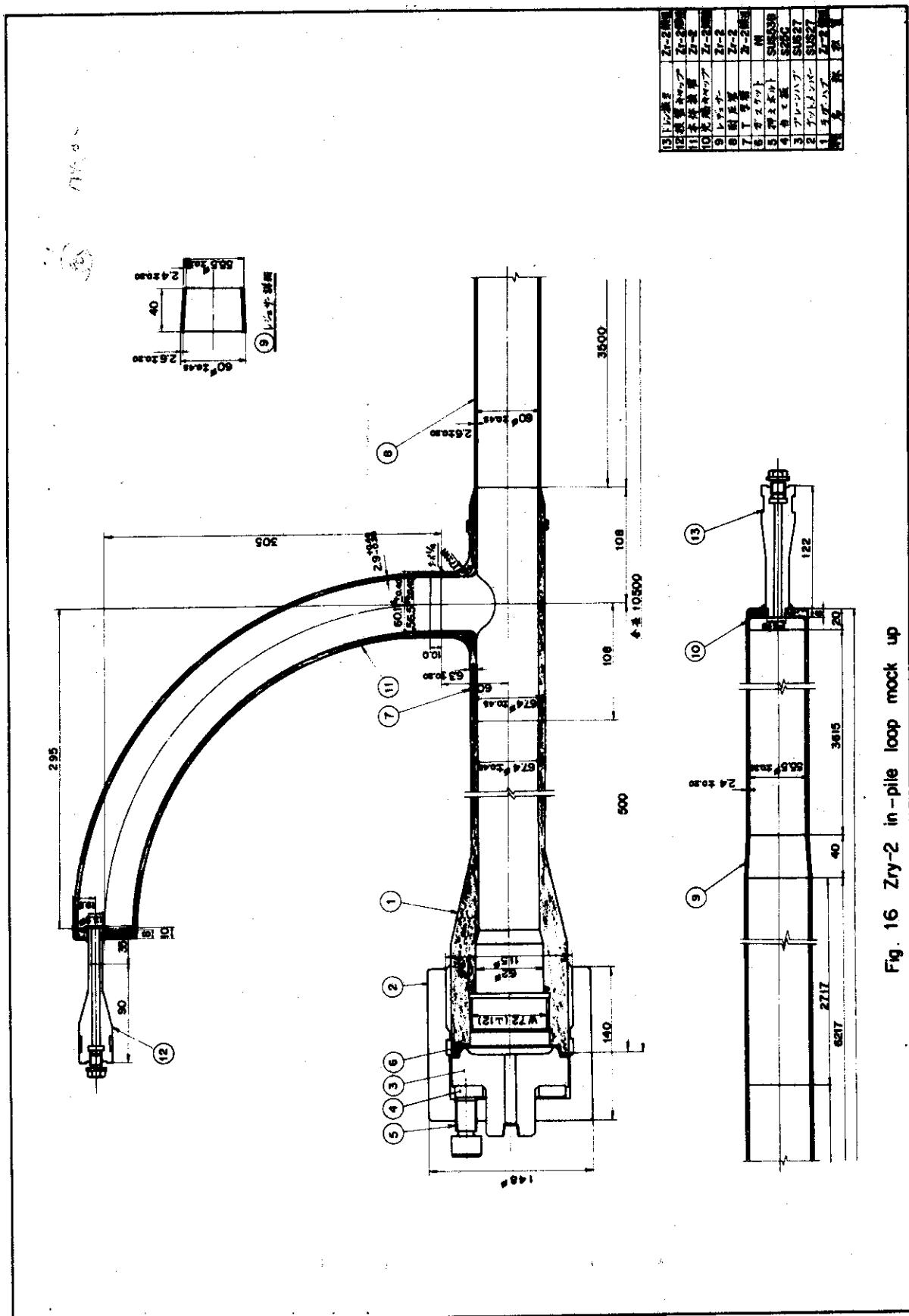


Fig. 16 Zry-2 in-pile loop mock up

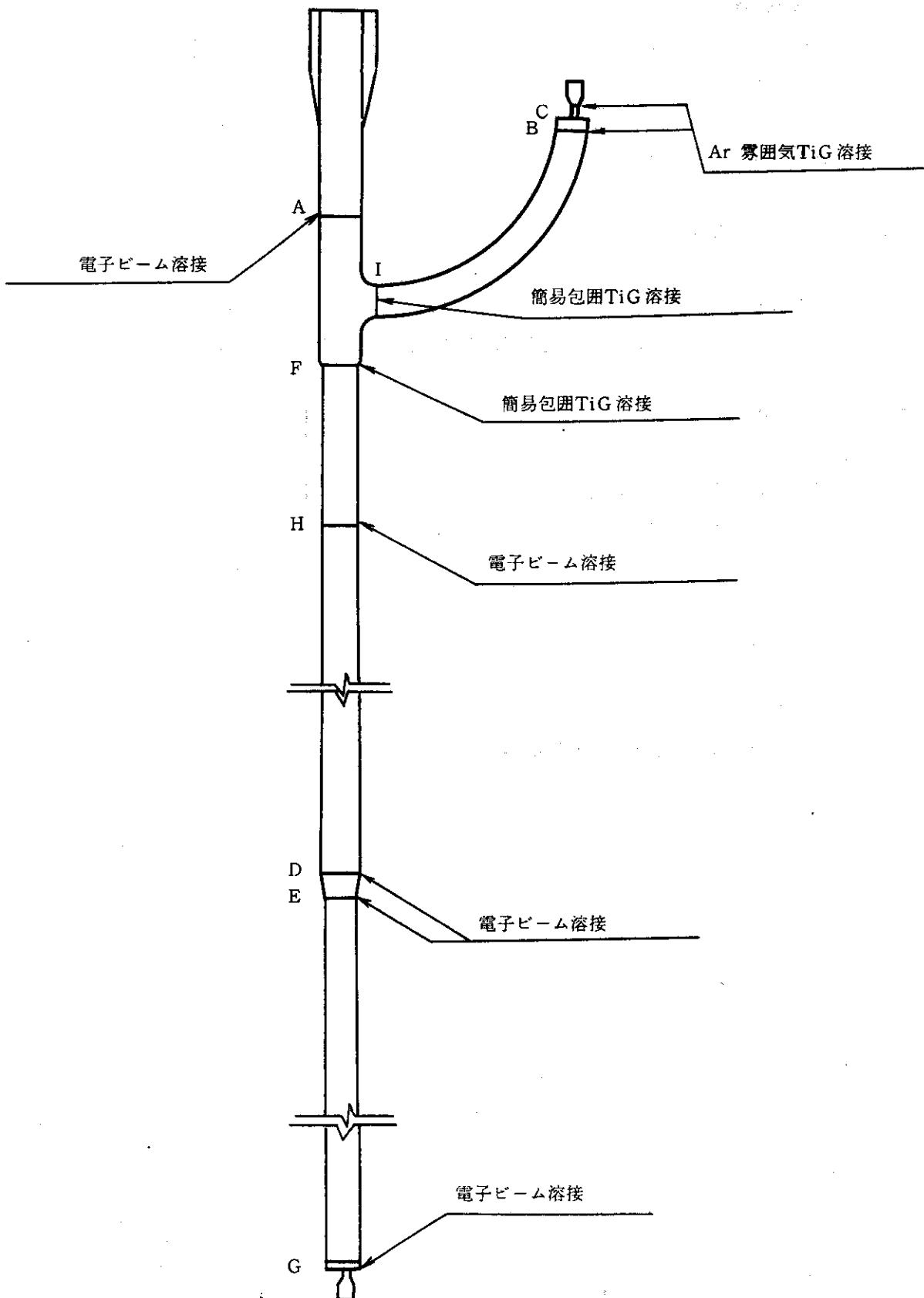


Fig.17 The figure of welding procedure for Zry-2 mock up

5.10 工事所掌範囲

- (1) 圧力管
- (2) トップクロージャー
- (3) 洗浄
- (4) 試験、検査
- (5) 梱包、輸送
- (6) 支持台の一部改造および据付

5.11 支給品残材に関して

支給品の残材に関しては原則として原研へ返還するものとするが溶接試験材を除く。

5.12 提出書類

- (1) 確定仕様書
- (2) 試験、検査方案および成績書
- (3) 設計データおよび計算書
- (4) 承認用図面
- (5) 工程
- (6) 提出部数は5部とする。

5.13 搬入場所

日本原子力研究所大洗研究所 材料試験炉部

6 試験検査成績

6.1 寸法検査

6.1.1 各部寸法

Fig. 18 に示す各個所について、寸法測定を行なった。図に示す数字が実測値で（ ）内の値は規格値である。

6.1.2 真直度

5.6 に記したピアノ線による方法で、あらかじめ規定した各個所について測定した結果を Fig. 19 に示す。その結果を仮想中心線に対する振れとして図示したのが Fig. 20 である。この検査により真直度が規格値を満足していることを確かめることができた。なお、参考に供するためにトランジット法による測定も合わせて行ない前述の結果を再確認した。

6.2 溶接検査

Fig. 17 に示す各溶接部について、溶接工程に準じ 3 回に分け溶接部検査を行なった。

A 部の電子ビーム溶接部はオーバラップ開先を採用し、裏側（管の内壁側）には裏当て金を使用した。この方法は管端近傍でのみ可能なことと溶接後に裏当て金を取り除く作業が加わり、手間がかかる難点はあるが、溶接部は極めて健全なものを得ることができた。

C 部は溶接により紫色の着色が見られた。これは溶接時の酸化によるためである。アルゴン雰囲気中とは言え充分に注意を払って溶接する必要がある。D 部の X 線検査の結果、若干のアンダーカットが認められ、スペッターも見られた。F 部に関しては初層溶接後の X 線による検査の結果、 $0.4 \text{ mm } \phi$ のタンクステンスポットが 3 個発見された。これは仮止めの為の点溶接を行なった際に生じたものと推測される。そして第 2 層溶接後はタンクステンスポットが増えることはなかった。また、ボア・スコープにより内面を調べた所、1 個所 $0.15 \sim 0.2 \text{ mm}$ の溶け込み不良が発見された。この部分については表面から溶接部を削りとり部分的に再溶接を行なった。H 部は $60 \phi \times 3500 \text{ mm} \ell$ と $60 \phi \times 2717 \text{ mm} \ell$ の長尺管同士の電子ビーム溶接であるため、管には厳しい真直度と真円度が要求される。溶接後、外観検査で若干アンダーカットが認められた。これは de focus path (*) を当てるこにより除去することができた。このように Zry-2 材は Ti 材と同様に電子ビーム溶接法ではアンダーカットが生じ易いことがわかった。これをどのように防ぐかは今後の課題であるが、我々は①裏あて金の可能な所はそれを使用すること、②表面については電子ビーム溶接後、薄く TiG 溶接でならすことで解決をはかった。

このように Zry-2 管の溶接は種々の困難な点を含んでいるが、上記のような対策、処置を講ずることにより、X 線検査、蛍光探傷検査において、満足すべき結果を得ることができた。

6.3 水圧試験

50 kg/cm^2 , 100 kg/cm^2 加圧時、水の漏洩は検知されなかった。Fig. 21 に測定箇所を、水圧試験前後の寸法測定

* 弱いビームで焦点をばかして電子ビーム溶接すること。

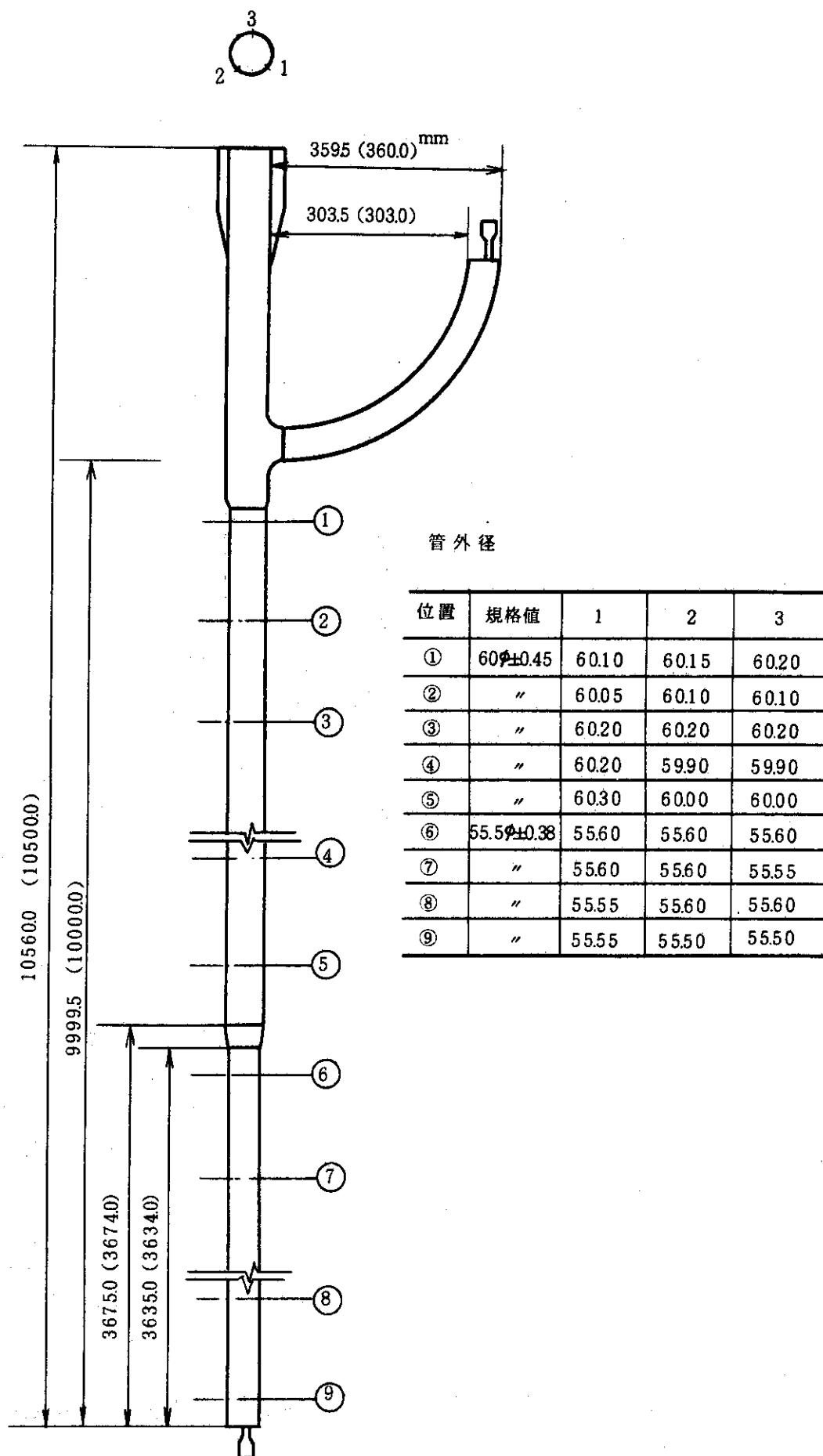


Fig.18 Result of dimension test

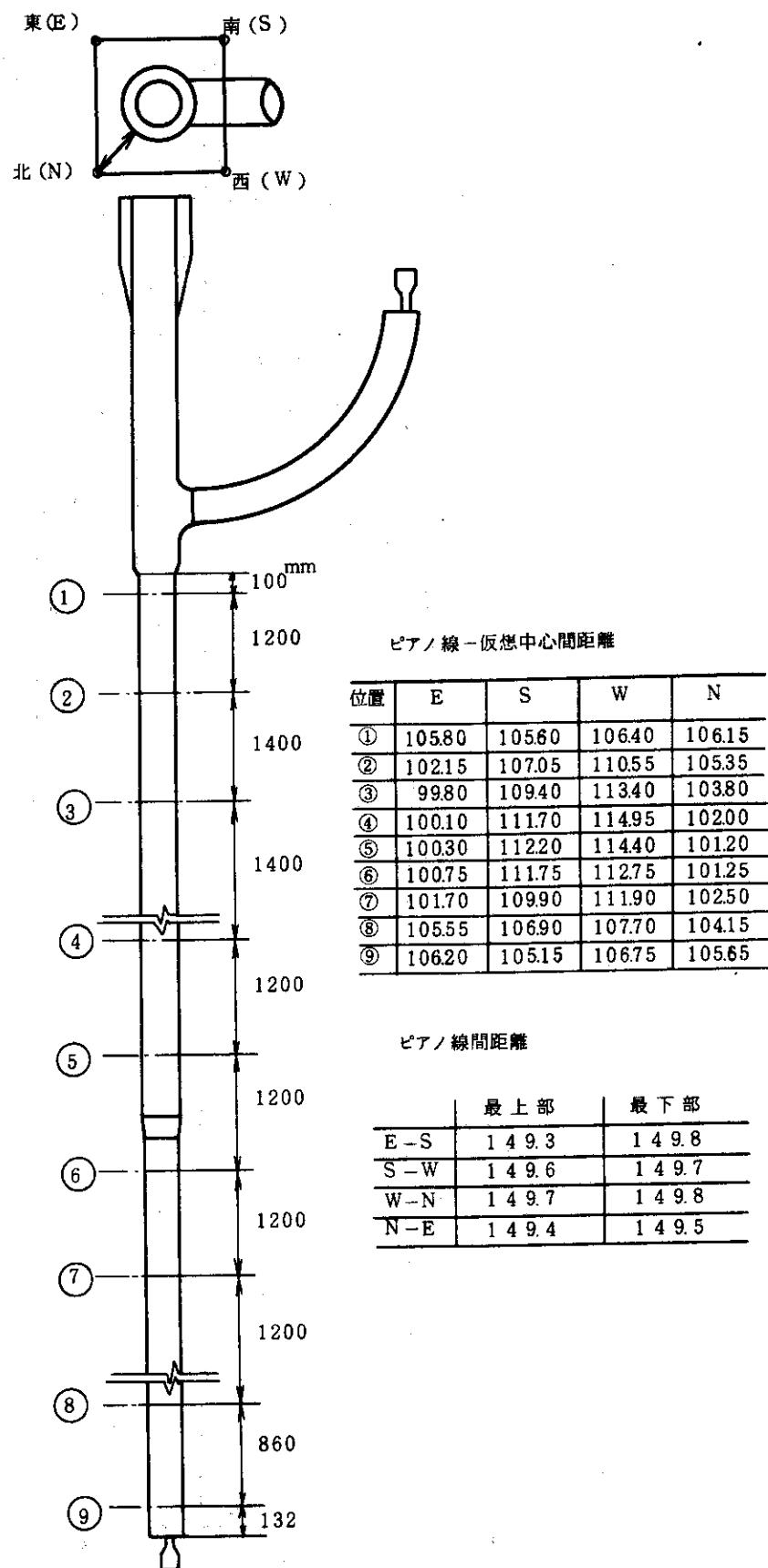
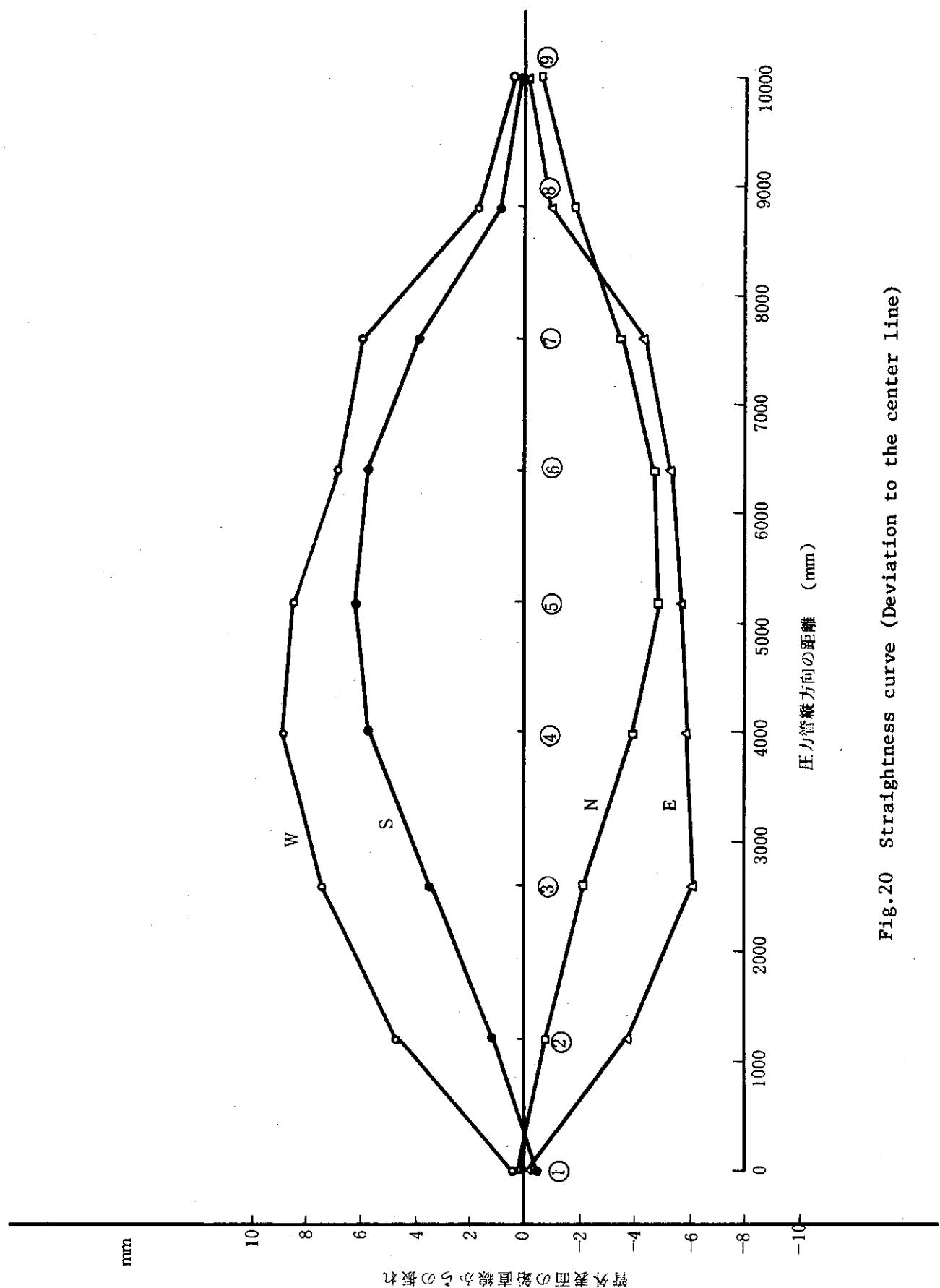


Fig.19 Result of straightness test



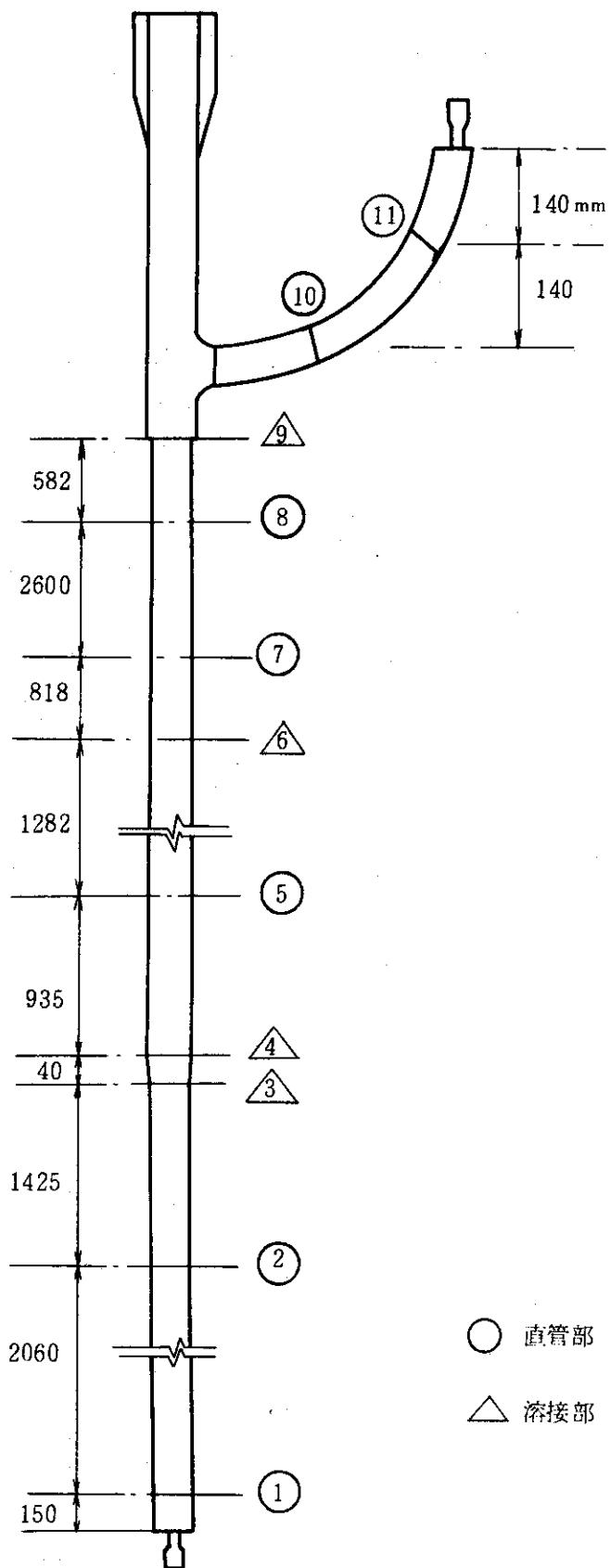


Fig. 21 Dimension measured parts at hydropressure test

結果をTable-12に比較して示す。No.10, No.11の曲管部に加圧に起因する歪の発生が顕著に見られる他は、直管部、溶接部のいづれにも有害な変形は生じていない、曲管部の歪の大きい部分は曲げ加工の結果、肉薄になった個所であると考えられる。

6.4 石けん水発泡試験

窒素ガスを使用して、発泡試験を行なったが、発泡は見られず合格であった。

Table 12 Result of hydropressure test

測定箇所・方向	常圧時	50kg/cm ² 加圧時	100kg/cm ² 加圧時
① ○ 横方向	5 5.5 0 mm		5 5.6 4 mm
	5.5.4 7		5 5.5 5
② ○ 横 " "	5 5.5 4	5 5.4 8	5 5.5 1
	5 5.6 0	5 5.6 5	5 5.6 5
△ ③ ○ 横 "	5 6.4 4		5 6.4 8
	5 6.9 3		5 6.8 9
△ ④ ○ 横 "	6 0.0 0	6 0.0 7	6 0.0 7
	6 0.0 7	5 9.9 0	6 0.0 3
○ ⑤ ○ 横 "	6 0.0 0		6 0.0 4
	6 0.1 1		6 0.1 7
△ ⑥ ○ 横 "	6 1.4 4		6 1.4 9
	6 1.0 8		6 1.0 2
○ ⑦ ○ 横 "	6 0.0 5	6 0.0 7	6 0.1 2
	6 0.1 2	6 0.1 3	6 0.1 4
○ ⑧ ○ 横 "	6 0.0 6		6 0.1 2
	6 0.1 0		6 0.1 5
△ ⑨ ○ 横 "	6 2.4 7		6 2.4 8
	6 2.2 7		6 2.3 3
○ ⑩ ○ 横 "	5 7.4 1		5 7.2 2
	5 5.2 3		5 5.5 5
○ ⑪ ○ 横 "	5 7.5 1		5 7.3 0
	5 4.8 3		5 5.1 6

*) ○ 直管部
△ 溶接部

7 考 察

国産の Zry-2 合金材で、 $60\phi \times 3\text{ mm t} \times 4000\text{ mm}$ と言った太径、厚肉、長尺の管をどの程度の寸法精度のものが製作できるか不安もあった。試験検査の項で述べたように寸法、品質について満足すべきものが得られたと言えよう。機械的性質の中で 300°C での引張り強さにおいて、目標値をいく分下まわったことに関しては今後の課題としたい。

Zry-2 は大気中の酸素、窒素と非常に反応しやすく、溶接施工で最も問題になってくるのは大気をいかに遮蔽するかということ、つまり溶接雰囲気の制御法である。

本試験では、 10^{-4} mm Hg の真空雰囲気中で行なう電子ビーム溶接、大気圧 + 0.1 気圧程度のアルゴンガス中での手動 TiG 溶接そして普通の大気中で行なう自動 TiG 溶接の三種の方法について検討した。

各溶接で得られる溶接部のビードの外観および表面の酸化、窒化による変色度合を比較してみると、 10^{-4} mm Hg の真空中およびアルゴン雰囲気中での溶接ではビード表面は全く着色せず銀白色の金属光沢を有しており、熱影響部がわずか薄茶色になっているが、大気中での溶接ではビード表面が薄茶色に、熱影響部表面は濃青から黒味がかった窒化、酸化膜が現われている。

溶接部の組織は各溶接試験片とも溶着部は粗大な粒界をもつ々相に α 相が取り囲まれたようになっており、熱影響部では上述の β 相が幾分細かく観察される。相の大きさは各溶接法で異なるが、組織は同じである。

硬度分布をみると、電子ビーム、手動 TiG の溶着部は $205 \sim 210\text{ Hv}$ 、自動 TiG 溶着部は $220 \sim 225\text{ Hv}$ で、各溶着部とも $175 \sim 180\text{ Hv}$ の母材と比べて硬化しており、雰囲気にかかわらず幾分硬化するが、自動 TiG では大気汚染による硬化が加わっていると思われる。

引張り試験に於いては破断箇所は溶着部でなく母材部である。各溶接共、引張り強さは母材より若干落ちるが母材以上の耐力を持っていることがわかる。

3つの溶接法を比べると引張り強さ、耐力、伸びとも自動 TiG が最も悪く大気汚染とくに窒素、酸素が悪影響をおよぼしているようである。

曲げ試験によると自動 TiG も母材と同等の特性をもち却ってアンダーカットの見られた電子ビーム溶接片が最も悪い結果を呈しているが、これはアンダーカットの形状に原因するものと思われる。そこで、溶接部の均一性、健全性について検討してみる。電子ビーム、自動 TiG 溶接のいわゆる自動溶接は手動溶接に比べ均一な溶接が可能な反面、アンダーカットの発生も不可避となってくる。特に薄板の溶接においてはノッチ効果のみならず、有効板厚の減少となる。これを防ぐ方法としては、溶接棒を挿入するか、アンダーカット部の表面削除である。電子ビームの溶接の場合、溶接棒を挿入することは困難で且つその応用範囲には限度があり、後者の方法が有力と思われる。Zry-2 の溶接部で発生した欠陥はアンダーカット以外ではなく、Zry-2 は非常に溶接性の良い材料と言える。

しかし高融点金属である為、従来の TiG 溶接ではなかなか溶融せず、アーク長さを短くしたり、溶接電流を大きくしたりせねばならず、そのためにタンゲステン電極が溶着部に混入する恐れがあるため、特に留意して溶接する必要がある。*

* Zr-W 合金の耐食性は Zry-2 材よりもかなり悪いことが知られている。

腐食試験結果から、溶接法によっては耐食性が著しく低下する場合があることが判った。つまり、大気中で行なった自動 TiG 溶接法による試片は、表面を削って平らに仕上げたものを使用したにもかかわらず、熱影響部と母材部の境付近が非常に早い時期に Break away 現象を起こした。これはあきらかに大気中の窒素が溶接中に Zry-2 を汚染したためである。自動 TiG 溶接片の上記以外の部分および他の溶接片は母材試験片に比べてやや早く Break away を起こすようだが、各溶接間の差異は見い出せない。

Zry-2 材は Quarter hard を目標にして冷間加工し、必要な強度を出している材料であり、降伏比が高く、伸びが少ない。しかし試験片で与えられる伸びを越えるきびしい加工をしても、適正な加工を行なえば破損することなく曲がり、相当延展性を示すことが証明された。しかし、今回は曲げ加工の限度を知ることを目的として行なったので、このような厳しい曲げ加工を受けた材料の諸性質（機械的性質、腐食性など）がどのように変わるかについては試験は行なっていない。また、加工技術に関しては、スプリングバック量を算出するための塑性曲線や実績データがなかったので曲げ後の形状、寸法をコントロールできなかった。今後、このような点を解決してゆく必要がある。

8 結 論

我が国においては、Zry-2による大口径、厚肉圧力管の製造経験がないため、その素管の製作から圧力管の製作加工にわたって、技術上の未知な点や解決すべき問題がいくつか出てきた。そこで、炉内圧力管開発の為、Zry-2製モックアップの製作を通じその問題点を把握すると共にその解決を目指して本開発試験を行なった。その結果、この経験をふまえ、充分に国産の技術レベルで大口径、厚肉圧力管の製作が可能であるとの見通しを得ることができた。しかし、例えばZry-2圧力管と18-8ステンレス鋼管の接続の問題など、今後解決していかなければならない、製作加工上の問題も残されている。

本開発試験で得た知見をまとめると、溶接に関しては1mm厚さおよび2.6mm厚さのZry-2板材について、電子ビーム溶接法、アルゴンガス雰囲気内タンクスチル手動溶接法、大気中不活性ガスタンクスチル自動溶接法の3つの溶接法で、溶接施工法を確立するため、溶接比較試験を実施した所、次のことが判明した。

- (1) 10^{-4} mmHg 以下に管理した真空中での電子ビーム溶接および大気圧 + 0.1 気圧程度のアルゴン雰囲気中で行なった手動 TiG 溶接では雰囲気ガスによる汚染は見られなかった。また、気孔、クラックの発生も見られず、良好な溶接性を示している。ただ、電子ビーム溶接に於いて、アンダーカットが発生し、これを防ぐ手段を考慮する必要がある。
- (2) 大気中の自動 TiG 溶接ではどうしても大気による汚染をさけることができない。汚染による溶接部の良否については、表面の着色状態、硬度などから判定することができる。
- (3) 各溶接とも、溶接部の組織は $\alpha + \beta$ 相で、硬度は高くなっている。
- (4) 溶接部の常温引張り試験では試験材の破断は溶接部以外の母材部で起こり、耐力は母材より高い。
- また、いづれの溶接においても曲げ特性は良好である。
- (5) 溶接時に激しい変形はなく、ステンレス鋼と同程度に取扱えば、溶接施行において大きな誤ちは起らない。
- (6) 腐食試験によれば、大気中の自動 TiG 溶接片は大気による窒化の為、他の溶接片に比べ早い Break away 現象が見られる。

曲げ加工に関しては、外径 56.50 mm、肉厚 2.9 mm の Zry-2 圧力管について行なった曲げ加工の主な結論は次の如くである。

- (1) 汎用パイプ・ベンダーを用いた場合、芯金を使用すれば 285 R の曲げ加工は可能である。
- (2) 285 R の曲管の横円化率、肉厚減少率は次の通りであった。

横円化率	最 大	4.9%
	最 小	2.8%
肉厚減少率	最 大	8.3%
	最 小	0.3%

- (3) 良質の充填材を用いれば、200 R でも曲げ加工は可能であり、横円化率は芯金使用の 285 R の曲げに比べ遥かに小さい。

(4) 200Rの曲管の楕円化率、肉厚減少率は次の通りであった。

楕円化率	最大	2.9%
	最小	1.3%
肉厚減少率	最大	10.5%
	最小	3.2%

(5) 285R, 200Rいずれの曲管にも、管外周表面に多少のうねりが見られた。

(6) スプリング・バック量は計画値285Rに対し平均曲げ半径が295R、計画値200Rに対し平均曲げ半径が204.5Rとなった。

以上の結果に基づいて、作製したZry-2製炉内圧力管の溶接については、電子ビーム溶接法、アルゴン雰囲気内手動TiG溶接法を採用した。

電子ビーム溶接でアンダーカットのはげしい所は更にうすく手動TiG溶接により余盛を行なった。また、管の中でパッキングメタルの挿入切断可能な個所には同じZry-2材のパッキングメタルを使用し、溶接後切削し平滑に仕上げた。また、電子ビーム法を適用出来ない枝管取付部についてはアルゴン雰囲気内手動TiG溶接法及び簡易包囲アルゴン雰囲気内の手動TiG溶接法を適用した。

9 謝 辞

本開発試験に当たり、大きな関心と熱意を示され、終始御協力いただきました、神戸製鋼（株）の長府工場の方々と石川島播磨重工業（株）の原子力第二課及び田無工場の方々に深く感謝致します。

(4) 200Rの曲管の橿円化率、肉厚減少率は次の通りであった。

橿円化率	最大	2.9%
	最小	1.3%
肉厚減少率	最大	10.5%
	最小	3.2%

(5) 285R, 200Rいずれの曲管にも、管外周表面に多少のうねりが見られた。

(6) スプリング・バック量は計画値285Rに対し平均曲げ半径が295R、計画値200Rに対し平均曲げ半径が204.5Rとなった。

以上の結果に基づいて、作製したZry-2製炉内圧力管の溶接については、電子ビーム溶接法、アルゴン雰囲気内手動TiG溶接法を採用した。

電子ビーム溶接でアンダーカットのはげしい所は更にうすく手動TiG溶接により余盛を行なった。また、管の中でパッキングメタルの挿入切断可能な個所には同じZry-2材のパッキングメタルを使用し、溶接後切削し平滑に仕上げた。また、電子ビーム法を適用出来ない枝管取付部についてはアルゴン雰囲気内手動TiG溶接法及び簡易包囲アルゴン雰囲気内の手動TiG溶接法を適用した。

9 謝 辞

本開発試験に当たり、大きな関心と熱意を示され、終始御協力いただきました、神戸製鋼（株）の長府工場の方々と石川島播磨重工業（株）の原子力第二課及び田無工場の方々に深く感謝致します。

Appendix I

引　用　計　算　式

内外圧を受ける厚肉円筒に関する下式を計算式として引用した。

$$\delta_t = \frac{p_1 r_1^2 (r_2^2 + r^2) - p_2 r_2^2 (r^2 + r_1^2)}{r^2 (r_2^2 - r_1^2)}$$

但し, δ_t : 円周応力

r : 応力を求める点迄の半径

p_1 : 内圧 } 壓縮を正とする。

p_2 : 外圧

r_1 : 内半径

r_2 : 外半径

ここにおいて,

$$\delta_t = 52.7 \text{ kg/mm}^2$$

$$r = r_1 = 25.35 \text{ mm}$$

$$p_2 = 0$$

$$r_1 = 25.35 \text{ mm}$$

$$r_2 = 28.25 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{\delta_t r_1^2 (r_2^2 - r_1^2)}{r_1^2 (r_2^2 + r_1^2)} \\ &= \frac{52.7 \times (28.25^2 - 25.35^2)}{(28.25)^2 + (25.35)^2} \\ &= 5.688 \text{ kg/mm}^2 \\ &= 568.8 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$