

JAERI - M

87-041

OWL-2炉内管の貫粒型応力腐食割れ対策

(THSI溶接残留応力改善法の確性試験報告)

1987年3月

池島 義昭・梅本 忠宏\*・阿部 弘  
鈴木 忍・伊丹 宏治

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 山田軽印刷所

OWL-2 炉内管の貫粒型応力腐食割れ対策  
(THSI溶接残留応力改善法の確性試験報告)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

池島 義昭・梅本 忠宏<sup>\*</sup>・阿部 弘

鈴木 忍・伊丹 宏治

(1987年2月12日受理)

OWL-2 炉内管のき裂発生原因は、沸騰水型原子炉のオーステナイト系ステンレス鋼管で一般的に生じている粒界型応力腐食割れと異なり、孔食を起点とした貫粒型応力腐食割れであった。

新炉内管の設計、製作及び運転・管理では、適切な貫粒型応力腐食割れ対策を実施した。特にき裂発生箇所などの溶接に当っては、溶接残留応力を改善する THSI 溶接施工技術を採用した。

---

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀 3607

\* 石川島播磨重工業㈱エネルギー事業本部原子力事業部工学博士

The Remedy for TGS SCC in the In-Pile Tube  
of Oarai Water Loop No.2 (OWL-2)

(The Confirmatory Tests for the THSI Welding Process)

Yoshiaki IKESHIMA, Tadahiro UMEMOTO\*, Hiroshi ABE,  
Shinobu SUZUKI and Hiroharu ITAMI

Department of JMTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 12, 1987)

Oarai Water Loop No.2 (OWL-2) in the JMTR has been operated for the irradiation tests of LWR's fuel and structural materials under the simulated coolant conditions like those of LWRs since January 1972.

In March 1983, during the 62nd JMTR operation cycle, the occurrence of small leaks from the in-pile tube made of type 316 stainless steel was detected and the cracking in the welded zone at the top closure of the pressure tube was revealed by inspection.

The metallurgical examinations identified the presence of transgranular stress corrosion cracking in the weld zone where the leaks took place.

The countermeasures such as employing THSI (Tig Torch Heating Stress Improvement) welding procedure, adopting type 316 NG stainless steel piping as the pressure tube and installing a chloride ion monitor on the primary system of the loop were taken in replacing the in-pile tube with the new one to prevent transgranular stress corrosion cracking.

This paper reports the countermeasures adopted in the fabrication of the new in-pile tube, particularly the confirmatory tests of THSI welding procedure.

---

\* D. Eng., Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

Keywords: Transgranular Stress Corrosion Cracking, In-Pile Water Loop,  
Tig Torch Heating Stress Improvement, Confirmatory Tests,  
Materials Testing Reactor.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. OWL-2 照射設備 .....	2
2.1 OWL-2 の概要 .....	2
2.2 炉内管 .....	3
3. 炉内管のき裂発生及び対策 .....	7
3.1 き裂発生の状況及び箇所 .....	7
3.2 き裂発生部の原因調査 .....	7
3.3 き裂発生の対策 .....	9
4. THSI 法の確性試験 .....	17
4.1 試験目的 .....	17
4.2 THSI 法の概要 .....	17
4.3 供試体 .....	17
4.4 温度分布測定 .....	19
4.5 残留応力測定 .....	25
4.6 MgCl <sub>2</sub> 沸騰溶液による応力腐食割れ試験 .....	33
4.7 機械試験 .....	33
4.8 まとめ .....	35
5. 新炉内管へのTHSI施工 .....	37
5.1 THSI溶接施工 .....	37
5.2 THSI施工後の非破壊試験 .....	37
5.3 THSI施工後の耐圧試験 .....	37
6. あとがき .....	44
謝 辞 .....	44
参考文献 .....	45

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. OWL-2 Irradiation Facility .....	2
2.1 General Description of OWL-2 .....	2
2.2 In-Pile Tube .....	3
3. Occurrence of Crack in the In-Pile Tube and Preventive Measures .....	7
3.1 Situation of Crack Occurrence and Crack Location .....	7
3.2 Examination in Cause of Crack .....	7
3.3 Preventive Measures against Crack .....	9
4. Confirmatory Test for THSI Welding .....	17
4.1 Objects of Test .....	17
4.2 Outline of THSI Welding .....	17
4.3 Specimen .....	17
4.4 Temperature Profile Measurement .....	19
4.5 Residual Stress Profile Measurement .....	25
4.6 Test on Stress Corrosion Cracking in Boiling MgCl <sub>2</sub> Solution .....	33
4.7 Mechanical Test .....	33
4.8 Summary .....	36
5. Application of THSI Welding to New In-Pile Tube .....	37
5.1 Execution of THSI Welding .....	37
5.2 Non-Destructive for THSI Welding .....	37
5.3 Pressure Proof Test for THSI Welding .....	37
6. Conclusion .....	44
Acknowledgement .....	44
Reference .....	45

## 表 目 次

Table 2.1-1 OWL-2 照射設備の性能 .....	3
" 3.2-1 試験検査項目及び結果 .....	11
" 4.3-1 供試体ミルシート .....	18
" 4.4-1 確性試験項目と溶接条件 .....	25
" 4.5-1 抵抗線ひずみ計その他使用機器 .....	26
" 4.7-1 機械試験の内容 .....	35
" 4.7-2 機械試験成績表 .....	36
" 5.1-1 THSI施工条件 (WS-3) .....	38
" 5.1-2 TIG溶接記録 (WS-2) .....	39
" 5.1-3 TIG溶接記録 (WS-3) .....	40
" 5.1-4 放射線透過検査記録 (WS-2) .....	41
" 5.1-5 放射線透過検査記録 (WS-3) .....	42

## 図 目 次

Fig. 2.1-1 OWL-2 フローシート .....	4
" 2.2-1 OWL-2 炉内管の詳細図 .....	5
" 2.2-2 OWL-2 炉内管の配置図 .....	6
" 3.1-1 炉内管のき裂発生箇所 .....	8
" 4.3-1 供試体の概念図 .....	19
" 4.4-1 冷却装置と熱電対取付位置 .....	21
" 4.4-2 温度分布採取試験状況図 .....	25
" 4.4-3 供試体各部の温度測定結果 .....	22
" 4.4-4 温度分布採取結果 .....	23
" 4.4-5 溶接時及びTHSI時の温度履歴の比較 .....	24
" 4.5-1 残留応力測定位置 .....	27
" 4.5-2 残留応力解放手順 .....	28
" 4.5-3 残留応力測定結果 .....	29
" 4.5-4 残留応力測定結果 .....	30
" 4.5-5 残留応力測定結果 .....	31
" 4.5-6 管内面の残留応力分布の比較 .....	32

## 写 真 目 次

Photo 3. 2 - 1	断面ミクロ・マクロ組織	.....	13
" 3. 2 - 2	き裂破面フラクトグラフィ	.....	15
" 4. 6 - 1	MgCl <sub>2</sub> 沸騰溶液による応力腐食割れ試験結果	.....	34
" 5. 1 - 1	THSI施工状況	.....	43

## 1. まえがき

J M T Rに設置されているOWL-2照射設備は、昭和47年1月から加圧水型及び沸騰水型原子炉の運転状態を模擬可能なインパイル水ループとして、各種の原子炉用燃・材料試料の照射実験ならびに炉工学的試験に使用されてきた。しかし昭和58年3月に炉内管頂部の耐圧管にき裂欠陥が発生したため照射運転を中止した<sup>1)</sup>。直に大洗研究所材料試験炉部内には、「OWL-2故障対策委員会」（委員長、神原忠則）\*が設置され、き裂原因の推定と当面の対策について提案がなされた。

一方、故障炉内管は、昭和59年10月に原子炉圧力容器から引抜き、き裂箇所から試験片を採取して、炉内管のき裂発生原因の究明を行った<sup>2)</sup>。調査の結果、打ち症部の孔食が起点となり、貫粒型応力腐食割れ（TGSCC；Transgranular Stress Corrosion Cracking）に進展したことが明らかとなった<sup>3), 4)</sup>。

新炉内管は、これらの調査結果をふまえ昭和60年1月から設計、製作を進め、昭和61年12月に完成して照射運転を再開した。

本報告書は、新炉内管に採用したTGSCC防止の諸対策及びき裂発生箇所などに施工したTHSI<sup>5)</sup>（TIG-torch Heating Stress Improvement）法の確性試験の概要と新炉内管への施工結果についてまとめたものである。

---

\* 材料試験炉部長、現日本钢管㈱重工事業部原子力部

## 2. OWL-2 照射設備

### 2.1 OWL-2 の概要

OWL-2 照射設備 (Oarai Water Loop-2) の構成は、大別して一次系、二次系、補助系、計測制御安全系からなる。

一次系は、炉内テストセクションに挿入した照射試料の発熱を除去し、さらに冷却器を介して二次系に伝える閉回路循環系である。本系は炉内部分と炉外部分に分かれる。(炉内部分は、2.2 炉内管を参照。)

炉外部分は、主循環系、蒸気系、圧力調節系、主冷却系、精製系などから構成されている。炉外部分全体は、高放射能となるためループキューピクル内に収めて、コンクリート厚さ約1mのキューピクル壁で放射線遮蔽を行っている。

二次系は、一次系からの発熱を除去する閉回路循環系として、循環系、圧力調節系、冷却系、精製系からなっている。

補助系は、給水系及びその他の系からなり、給水系は運転前及び運転中必要に応じて、一次系、二次系に脱ガス、脱イオン水を供給する系である。その他の系は、一次系の排気、排水を一時的に収容する排水タンク及びループ運転中試料水を採取したり、ループにガス添加を可能とするサンプリングボックスからなっている。

計測制御系は、OWL-2 の系全体を安全、確実、容易にして、かつ総合的に運転管理を行うもので、計測系、制御系、安全系からなっている。計測系は、OWL-2 の安全かつ正確な運転を目的として、運転状態を観測できるように各系の温度、流量、水位、水質、放射能などを計測している。制御系は、OWL-2 の安全かつ容易な運転を目的として、OWL-2 の起動、定常運転、停止の操作を十分考慮して、各系の温度、圧力、水位、流量、水質などの制御を行っている。安全系は、保護安全回路、安全弁からなっている。OWL-2 の性能を Table 2.1-1 に、フローシートを Fig. 2.1-1 に示す。

Table 2.1-1 OWL-2 照射設備の性能

項目		仕様・性能
炉内管 炉心位置		K・L-3・4
熱中性子束	最大	$5.4 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$
	平均	$4.1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$
高速中性子束	最大	$5.5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$
	平均	$4.2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$
$\gamma$ 加熱率(最大)		0.5 w/g
冷却材		軽水
冷却材流量(最大)		1100 kg/min
冷却材温度(最大)		270°C (285°C) *
冷却材圧力(最大)		7.3 MPa
運転モード		加圧水型・沸騰水型
蒸気含有率(最大)		20%
燃料発熱量(最大)		850 kw
炉心部有効寸法		$\phi 117.8 \times 750 \ell$

\* 沸騰水型の場合

## 2.2 炉内管

炉内部分は、Fig. 2.2-1 に示すとおり、照射試料を装荷する垂直管、炉外部分と垂直管を接続する枝管、炉心格子板に垂直管を保持する炉心周辺要素、垂直管を原子炉圧力容器内に固定し、原子炉運転による振動を防ぐための支持金具などからなっている。この内垂直管と枝管を含めて炉内管と称する。

垂直管は、耐圧管と外套管の二重管構造からなる全長約 11m の直管で、原子炉圧力容器上蓋、炉心格子位置 K・L-3・4 同圧力容器下蓋を貫通している。また耐圧管と外套管の間には、真空あるいは熱伝導率の小さいガス (OWL-2 の場合窒素ガスを使用。) を充填、加圧することにより熱的絶縁を確保して、高温の耐圧管が直接原子炉冷却水に触れるのを避ける方式としている。炉内管の配置図を Fig. 2.2-2 に示す。

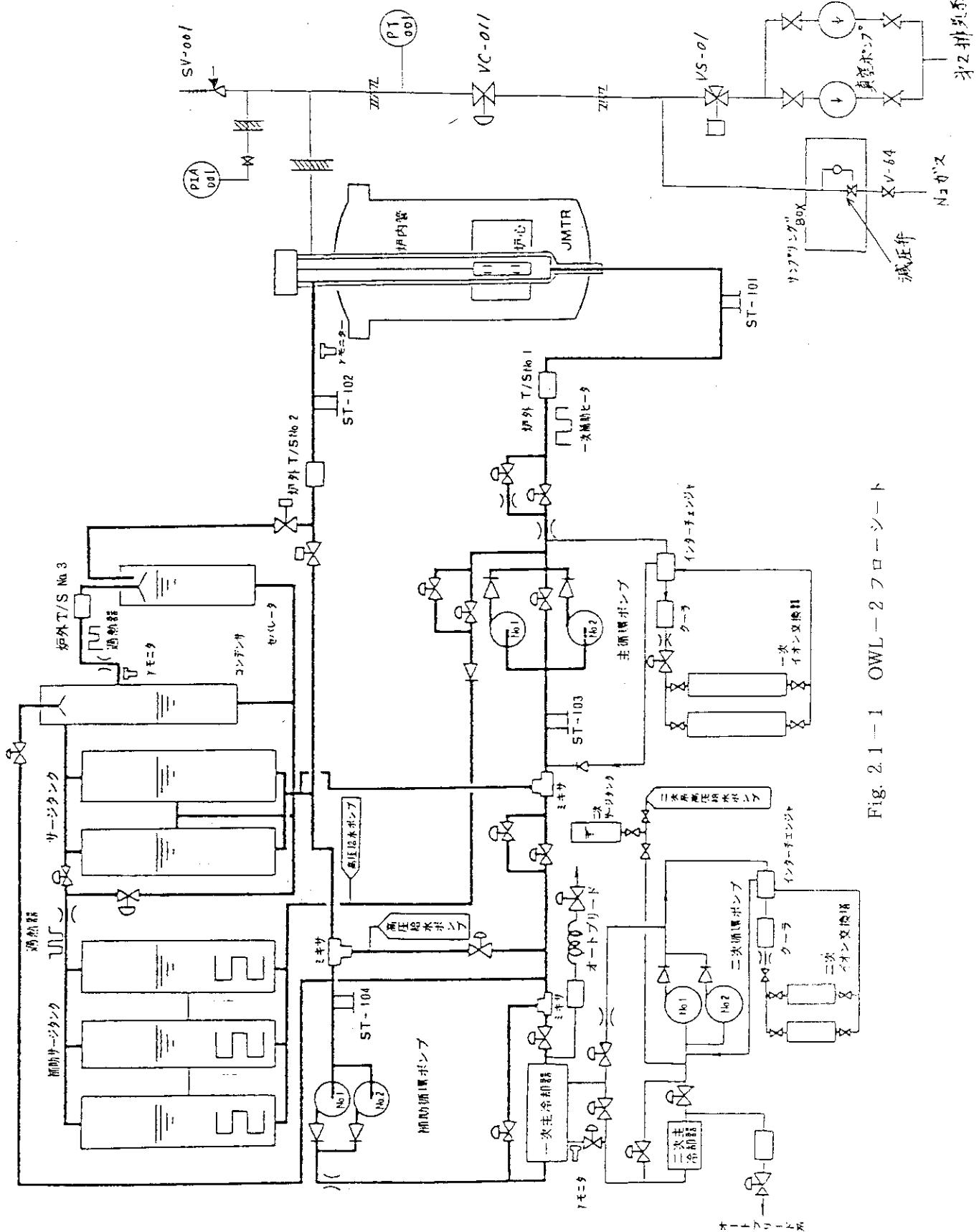


Fig. 2.1-1 OWL-2 フローレート

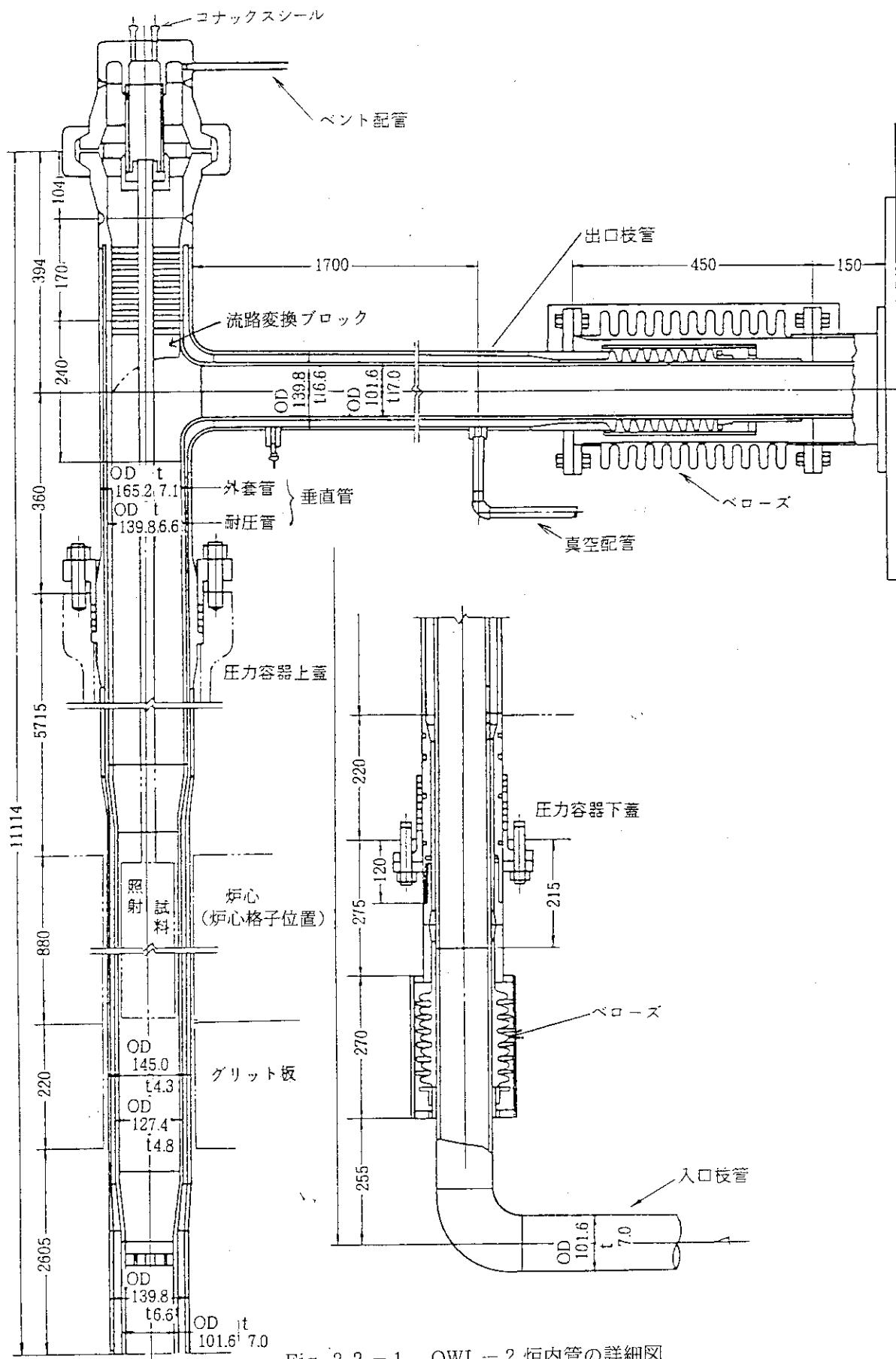


Fig. 2.2-1 OWL-2 炉内管の詳細図

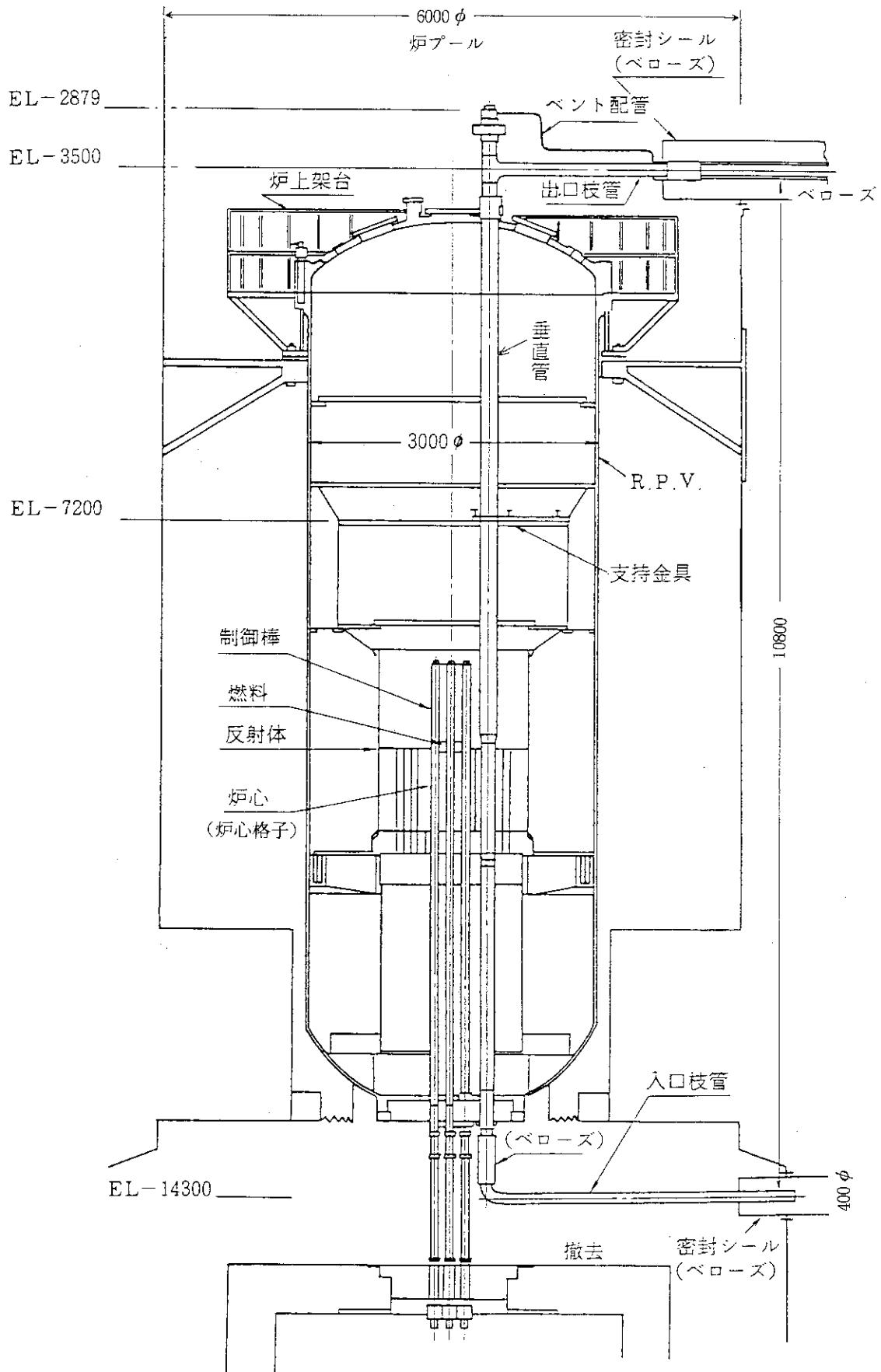


Fig. 2.2-2 OWL-2 炉内管の配置図

### 3. 炉内管のき裂発生及び対策

#### 3.1 き裂発生の状況及び箇所

OWL-2 炉内管は、昭和 47 年 1 月からき裂に伴う漏れ故障の発生した昭和 58 年 3 月まで約 24000 時間の運転を行い、この間加圧水型あるいは沸騰水型で多少の差はあるが、運転条件として圧力；7.0 ~ 7.3 MPa、温度；260 ~ 285°C の範囲で運転が行われてきた。

また、一次系冷却水の水質は、電気伝導率；0.3 ~ 0.36 μs/cm 以下、PH；約 7、溶存酸素濃度；約 50 ppb 以下に管理されてきた。

き裂発生箇所は、Fig. 3.1-1 に示すとおり、炉内管頂部の耐圧管のうち、グレイロック接続ピース（材質；SUS 32）と耐圧管ティー（材質；SUS 32 TP）との溶接部及びその熱影響部であった。この箇所は、原子炉圧力容器外にあたり、速中性子（ $E > 1 \text{ MeV}$ ）による金属材料上の照射脆化は全く受けない。しかし照射実験中は、熱遮蔽効果を兼ねた流路変換ブロックが、照射試料と一緒に挿入される方式となっているため、高温高圧の一次系冷却水が滞留し易い構造となり、溶存酸素濃度が高くなりやすい環境にある。（Fig. 2.2-1 参照。）

#### 3.2 き裂発生部の原因調査

##### (1) き裂発生部の設計及び製作

炉内管の設計、製作履歴によると使用素材は、材質；JIS G 3459 SUS 32 TP (SUS 316 TP 相当、炭素含有量などは特に指定していない。) であり、引抜成型法により成形後、溶体化熱処理を施したものである。溶接は TIG 溶接により行われ、溶体化処理や応力除去のための熱処理は行っていない。

溶接後は、非破壊試験（液体浸透探傷試験、放射線透過試験）を行い、溶接部の健全性を確認している。

さらにき裂箇所の設計条件に基づき、新たに強度計算、応力解析<sup>\*1</sup>を行い、材料強度上からの再評価を行った。その結果、き裂部の最小肉厚は 5.0 mm（設計肉厚； $6.6 \pm 0.3 \text{ mm}$ ）、1 次一般膜応力は 92 MPa（許容応力； 119 MPa）、2 次応力は 50 MPa（許容応力； 177 MPa）、1 次 + 2 次応力は 88 MPa（許容応力； 356 MPa）、1 次 + 2 次 + ピーク応力は許容繰返し応力強さ以内と、いずれも OWL-2 高温高圧運転による繰返し荷重に十分耐え得る設計、構造となっていることが明らかとなった。

\* 1 ; 応力解析は、通商産業省告示第 501 号に基づき、「ISAP-II」プログラムにより行った。なお、「ISAP-II」プログラムは、変位法に基づく有限要素法による 3 次元配管の応力、振動解析が可能であり、軽水炉などの応力解析に用いられている汎用コードである。

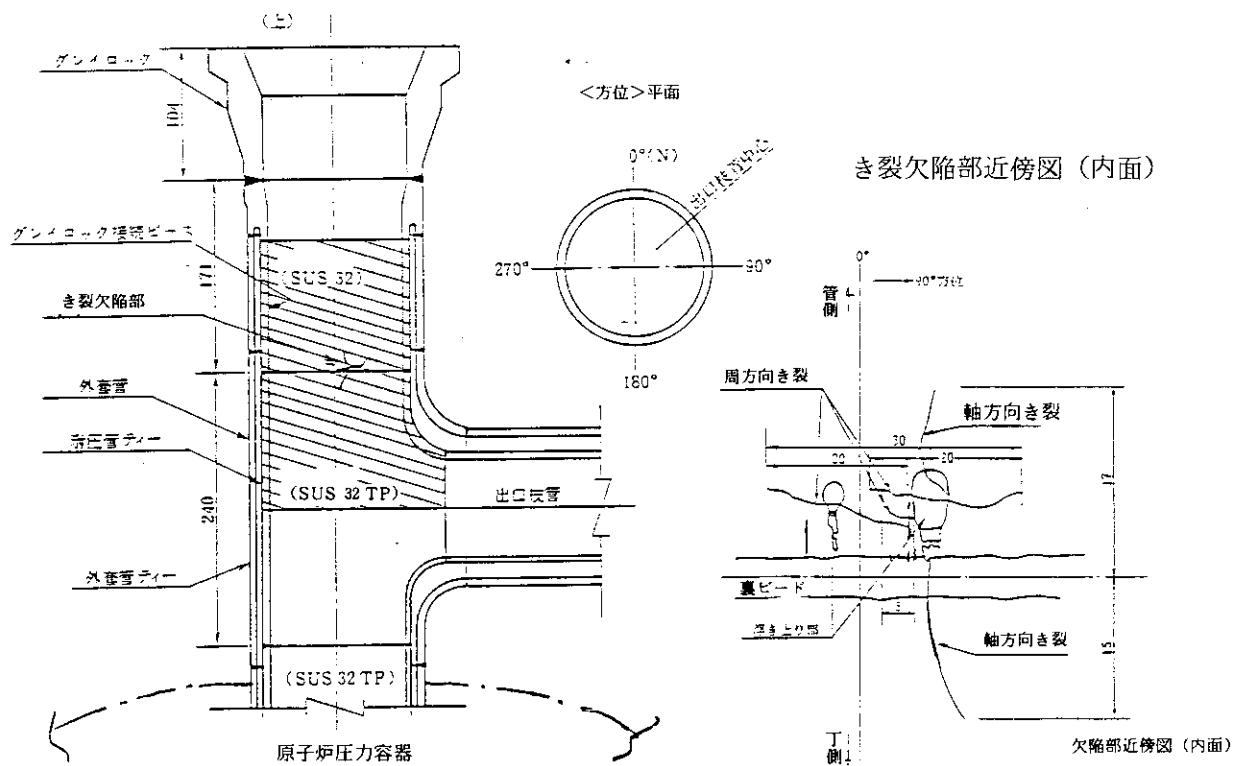


Fig. 3.1-1 炉内管のき裂発生箇所

## (2) き裂発生部の試験検査

原因調査は、き裂発生箇所から試験片を採取して、金属学的観察、非破壊試験、材料試験などを行った。試験検査項目と主要な結果をTable 3.2-1に示す。

炉内管内面には、多数の打ち疵がみられ、この疵の部分をさらに光学顕微鏡で観察した結果、疵を起点として大きな孔食の発生が認められた。この内、溶接継手部近傍の孔食部を起点としたき裂は、3次元的に軸方向及び周方向に分岐しながら管内面から外面へ向ってのびており、管壁を貫通していることが判った。そのようすをPhoto 3.2-1の断面ミクロ・マクロ写真に示す。さらにき裂破面を走査型電子顕微鏡で観察した結果、破面全体に亘ってTGSCCの形態を示していることが明らかとなった。破面フラクトグラフィの結果をPhoto 3.2-2に示す。

き裂発生箇所は、前述したとおり一次冷却水の滞留しやすい構造部に位置しており、冷却水の循環によって溶存酸素濃度が低減されにくく、また万一冷却水中に塩素イオンが混入した場合新しい水と置換され難く、塩素イオンの局部的濃縮による孔食などが生じ易い条件にあったものと推定される。その結果として打ち疵部を起点とした孔食が発生し、さらに応力の集中し易い孔食の底部にTGSCCによるき裂が起り、運転に伴う変動応力や溶接による残留応力によって、き裂が徐々に成長して外面まで貫通したものと考えられる。

### 3.3 き裂発生の対策

オーステナイト系ステンレス鋼に生じるTGSCCは、材料の鋭敏化（必要条件ではないが加速要因となる）、引張応力及び溶存酸素・温度の環境条件が同時に一定レベルを越えたときに発生すると言われている<sup>6)</sup>。この一般的な知見に加え、OWL-2のき裂発生の原因調査結果を加味して、新炉内管の設計、製作及び運転・管理では、残留応力分布改善、打ち疵防止、塩素イオンの混入防止などの諸対策を講ずることとした<sup>7)</sup>。

#### (1) 溶接部の残留応力分布改善

残留応力分布の改善（管内面を圧縮応力にする）を図る溶接施工法には、次の方法が挙げられる。

##### 1. IHSI<sup>8)</sup> (Induction Heating Stress Improvement)

管と管を周溶接した後、管外面に加熱コイルを巻き、管外面部を高周波誘導加熱により発熱させる。加熱と同時に管内には冷却水を流して、管内・外面に温度差を与える。

この温度差によって生じる熱応力をを利用して、管内面に圧縮残留応力を得る方法である。

##### 2. HSW (Heat Sink Welding)

水冷溶接といわれ、管と管を初層から2層目まで周溶接した後、管内に冷却水を流しながら3層目以降を溶接する。この方法は、溶接時の入熱を冷却水によって管内・外面に温度差を与えて、管内面に圧縮残留応力を得ることができる。

##### 3. THSI (TIG-torch Heating Stress Improvement)

管と管を最終層まで周溶接した後、管内に冷却水を流しながら、溶接部の外表面をTIGトーチにより加熱して、管内・外面に温度差を与え管内面に圧縮残留応力を得る方法である。（THSI法の詳細は第4章に記述する。）

以上の諸方法のうち、IHSI法は残留応力分布の改善策として最適であるが、施工上大がかりになることや新炉内管のように施工数の少ない場合は割高になる欠点がある。

HSW、THSI法は、管内面を水冷する方法であり原理的に似ているが、HSW法が水冷しながら溶接するのに対して、THSI法は溶接後、溶接部の健全性を確認したのち施工することができる特徴をもっている。このような理由からき裂箇所及び同様な環境下にあるグレイロック接続ピースの溶接部両端には、THSI法を採用することとした。

#### (2) 耐圧管内面の打ち疵防止

耐圧管内面にできる疵の原因是、照射試料の挿入・取出しの際ハンガーロッドに取り付けられている流路変換ブロックが当るためと考えられている。この対策として、流路変換ブロックの形状変更と同ブロックが耐圧管内面に当らないよう試料挿入用治具の改良を図った。

#### (3) 塩素イオンの混入防止

OWL-2への給水系には、新たに水質監視計を設置して、塩素イオン濃度の連続監視を行うこととした。また耐圧管内に挿入する照射試料及びその構成品は、塩素イオンの付着、混入し

ないように洗浄方法を含め作業管理の徹底に努める。

(4) 材料の銳敏化防止対策

TGSCCにとって材料の銳敏化は、必ずしも必要条件でないが銳敏化によってTGSCCの発生が加速されること、また将来沸騰水型原子力発電所と同じ条件でループを運転することなどを考え合せると、材料の銳敏化も防止しておく必要がある。

新炉内管は、圧力バウンダリィに使用する材料をオーステナイト系ステンレス鋼管 JIS G 3459 SUS 316 TP S-C(1978)として、可能な限り炭素含有量の低減を図った。(使用材料は、炭素含有量; C = 0.01 ~ 0.015 %, SUS 316 NG相当品とした。)<sup>9)</sup>

Table 3.2-1 試験検査項目及び結果

試験検査項目		確認事項	結果
外観検査	目視検査	変形、損傷	き裂欠陥部付近にかなりの打ち疵あり。
	顕微鏡検査	孔食の有無	打ち疵の部分には大きな孔食があり、疵のない部分にも小さな孔食が見られる。
	寸法測定	変形、減肉	異常なし。
非破壊試験	放射線透過試験	き裂欠陥の位置、大きさの把握	き裂欠陥は、1方向のみ。 他は異常なし。
	液体浸透探傷試験	き裂欠陥の位置、大きさの把握	き裂欠陥は、1方向のみ。 他は異常なし。
機械試験	硬度測定	母材、き裂欠陥部付近、溶接部の硬度分布	管側の熱影響部の硬度がやや高い。
	引張試験	引張強さ及び降伏強さ	ミルシートの値とほぼ同じ。
金属学的調査	断面マクロ	き裂欠陥部とその周辺の観察	—
	断面ミクロ	き裂欠陥の形状、鋭敏化の度合など	典型的な貫粒型SCCである。
	フェライト量測定	フェライト量分布状況	異常なし。
	破面フラクトグラフィ	き裂欠陥の破面パターンの観察	貫粒型SCCの破面である。
	金属成分分析	金属成分値	ミルシートの値とほぼ同じ。
	粒度測定	結晶粒度	異常なし。
応力測定	拘束応力	拘束状況の把握	小さい。
	残留応力	溶接による残留応力	SCC発生の可能性有。
銳敏化度測定	EPR法	銳敏化度	SCC発生の可能性有。

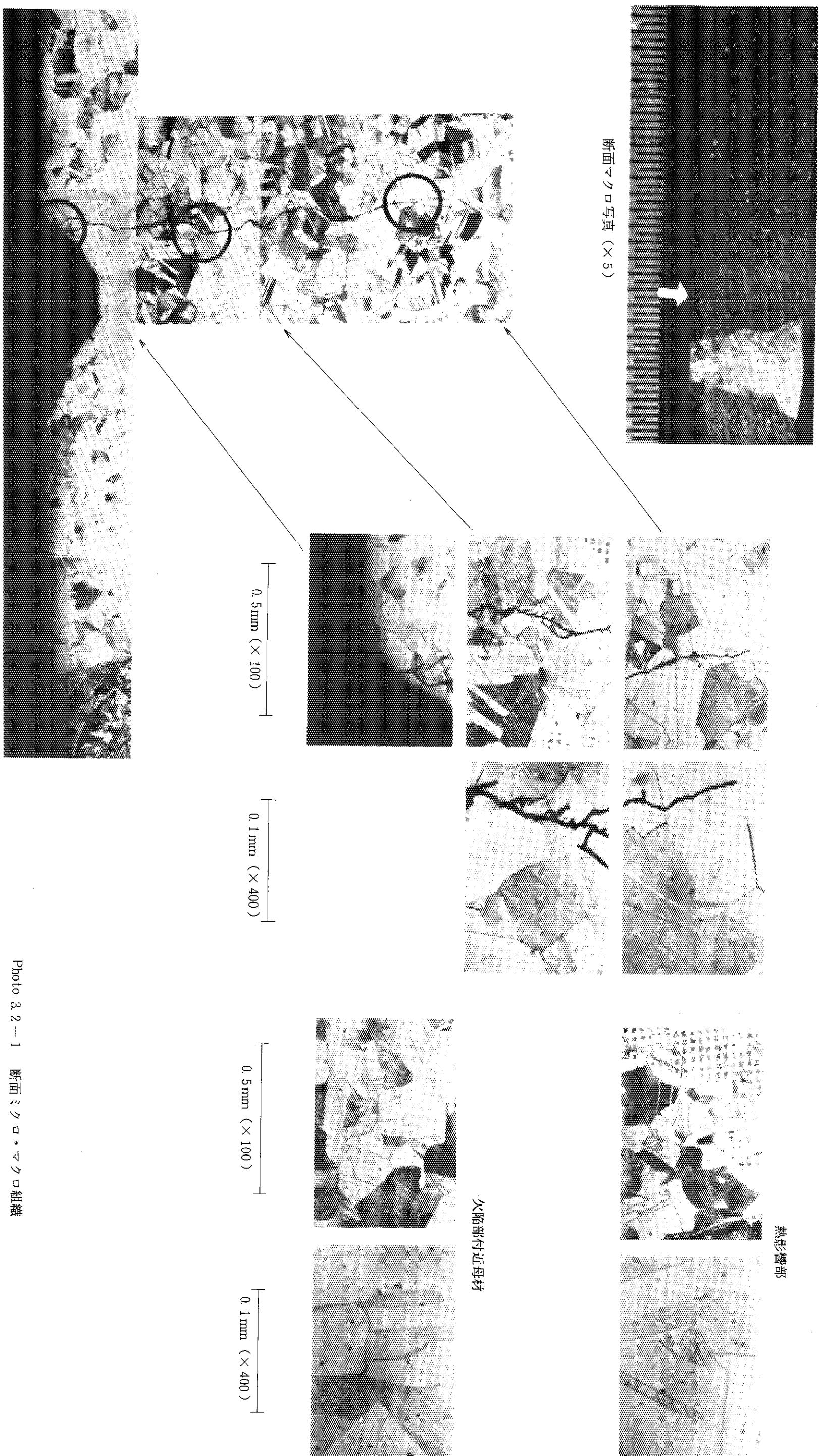


Photo 3.2-1 断面ミクロ・マクロ組織

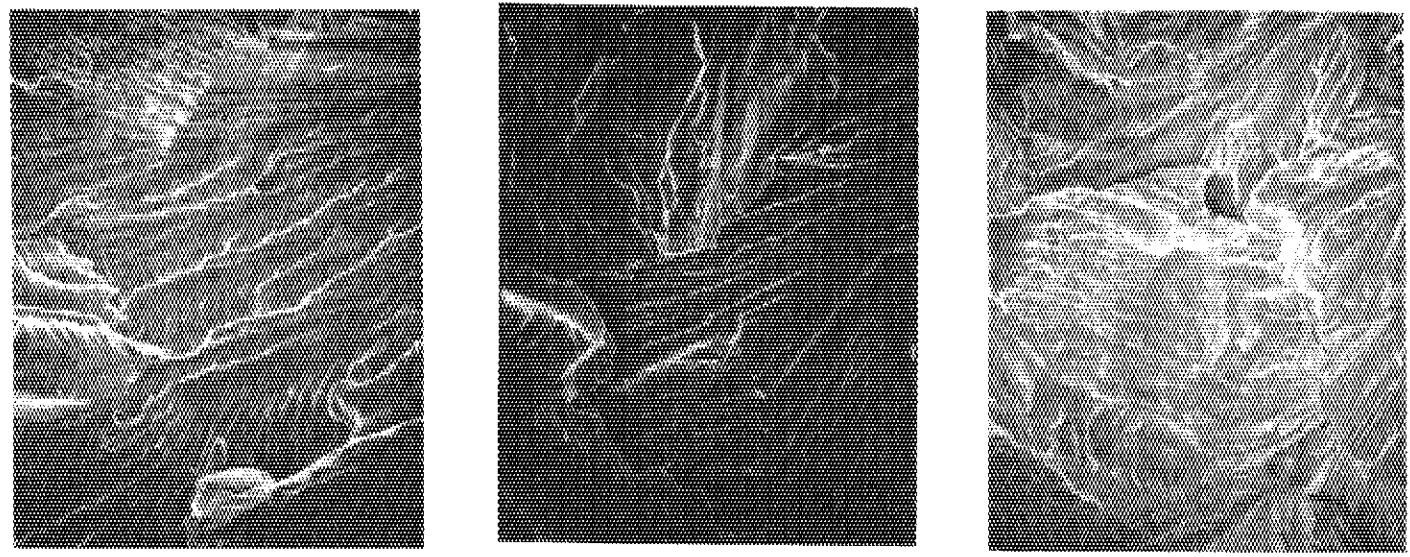
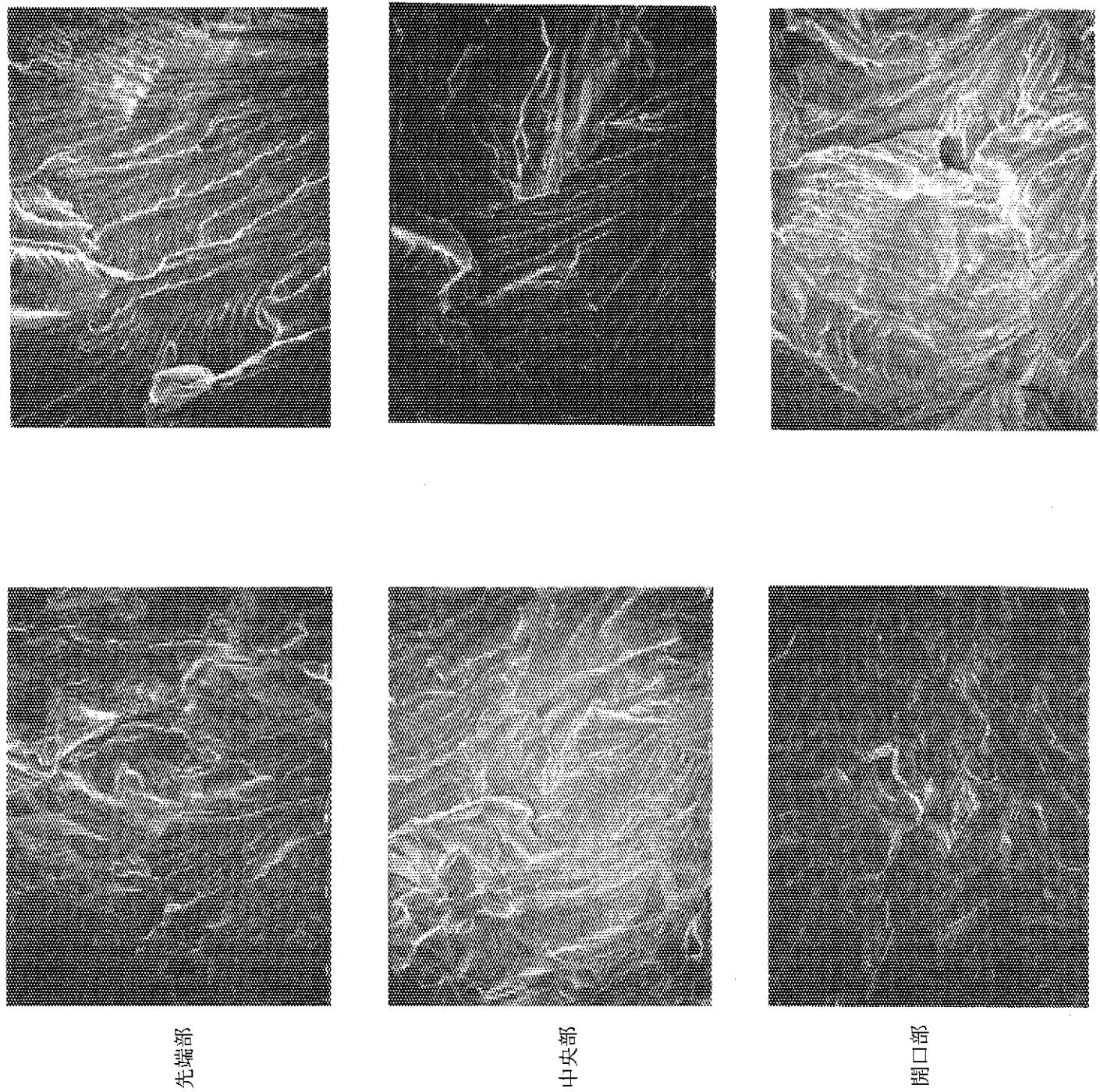
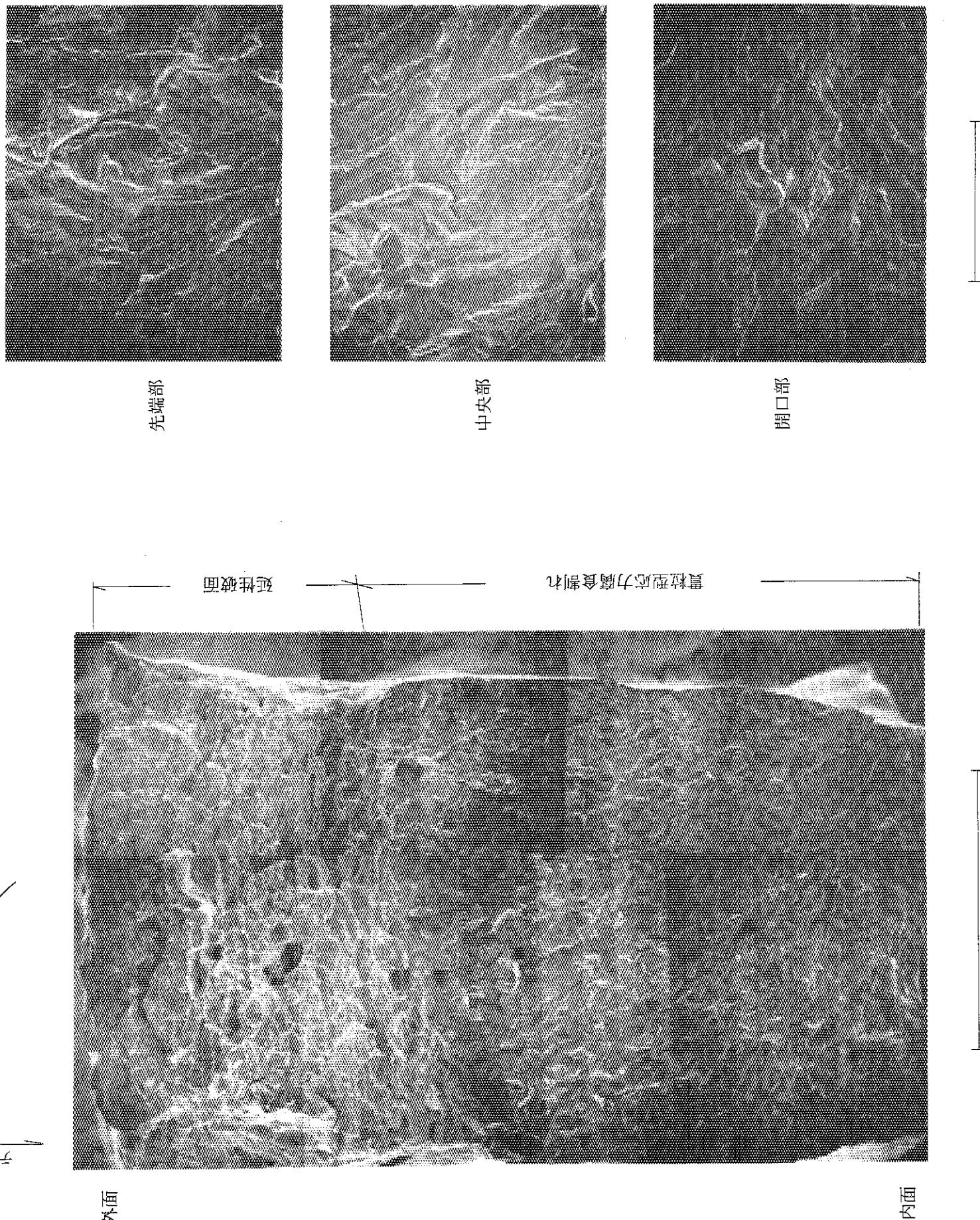
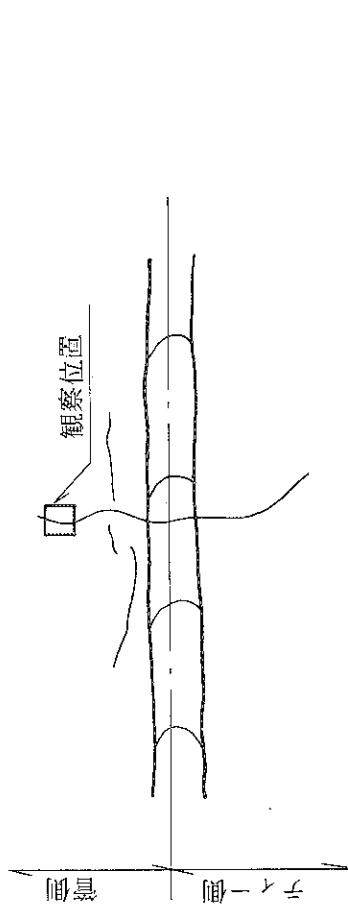


Photo 3.2-2 き裂破面フラクトグラフィ

## 4. THSI法の確性試験

### 4.1 試験目的

新炉内管は、TGSCC対策の一環としてグレイロック接続ピースの溶接部両端；WS-2, 3にTHSI法を施工した。

試験では、引張残留応力分布の改善が計られ、材質上への悪影響を及ぼさない状態での最適なTHSI施工条件の選定を行った。供試体は、新炉内管と同様にオーステナイト系ステンレス鋼管で、金属学的にも同じ性質をもっているJIS G 3446 SUS 304 TKA S-Hを使用した。

### 4.2 THSI法の概要

原子炉配管系の主材料であるSUS 304 TP及びSUS 316 TPのTGSCCの発生は、溶接時の引張残留応力が原因の一つと考えられている。

THSI法は、引張溶接残留応力の改善を計る目的で開発された施工法の一つである。即ち管と管をTIG溶接により、初層から最終層まで周溶接した後、管内に冷却水を流しながら溶接部の外表面をTIGトーチにより再加熱、溶触（溶加棒は不使用）して、管肉厚方向に大きな温度差を発生させ、温度差によって起る塑性変形により管内面の引張溶接残留応力を改善（圧縮側へ移行）する方法である。このようにTHSI法は、施工時の加熱条件を溶接に関係なく調節することが可能であり、溶接残留応力の制御ができます。さらに溶接部の健全性を確認したのちに施工できることなどの特徴をもっており、近年盛んに採用されようとしている方法である。

### 4.3 供試体

供試体は、市販のオーステナイト系ステンレス鋼管から任意に抽出したTable 4.3-1の組成をもつSUS 304 TP, 150 A Sch 160を機械加工して、新炉内管と同一寸法に調製したものである。供試体の形状及び主要寸法をFig. 4.3-1に示す。

供試体の有効長は、無限長管と同じ拘束条件となるように、THSI施工部を中心として両側に $8\sqrt{r+t}$  ( $r$  ; 管平均半径 mm,  $t$  ; 管肉厚 mm) 以上とした。

THSI施工前の各供試体の溶接部は、新炉内管と同一の溶接施工となるようにTIG溶接（下向自動）とした。施工層数は8層10パスとして、各パス毎の入熱は12000 J/cmを目標にして施工した。



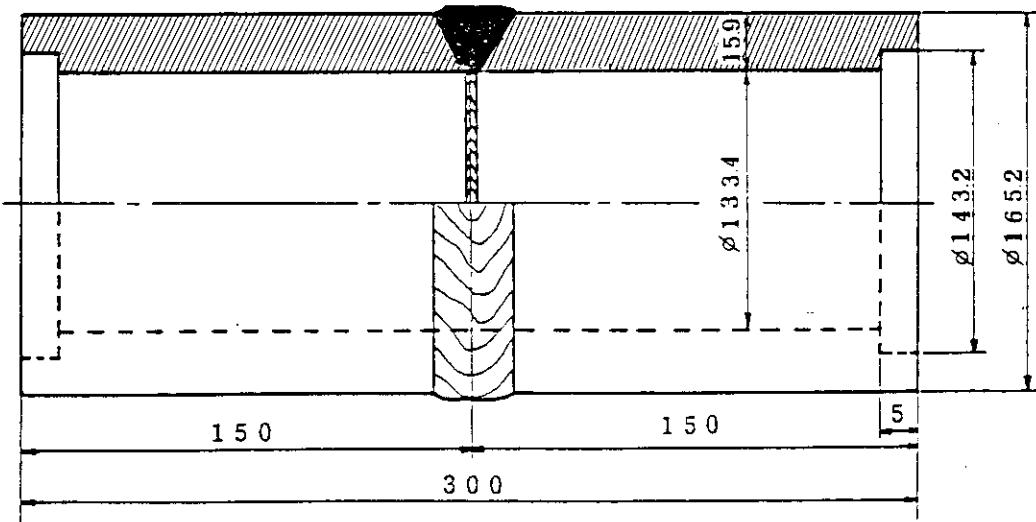


Fig. 4.3-1 供試体の概念図

#### 4.4 溫度分布測定

THSI法の施工条件は、管径や肉厚寸法によって異なるため、供試体；L-1により加熱条件と冷却条件の選定を行うこととした。各供試体とTHSI施工条件の関係をTable 4.4-1に示す。

##### (1) 測定方法

温度分布の測定は、再溶融ビード部から冷却方向側にクロメルーアルメル熱電対（内面； $\phi$  0.32 mm, エナメル被覆、外面； $\phi$  0.65 mm, グラスワール被覆）を管内・外面にパーカッション溶接<sup>\*1</sup>により取付けて、その出力信号を温度記録計で連続記録して行った。熱電対の取付位置をFig. 4.4-1に示す。

供試体へのTHSI施工時は、試験装置上に水平になるようにセットした状態で、少流量でも管内面の均一な冷却と冷却効果を高めるため、螺旋形ノズルより冷却水を供給して行った。温度分布の測定状況をFig. 4.4-2に示す。

##### (2) 試験条件

再加熱、溶融時は、加熱条件や冷却条件によって、供試体各部の最高温度や再溶融範囲に影響を及ぼす。

\* 1 Percussion Welding ; 衝撃溶接

加熱方法は、TIGトーチ自体を回転させながら厚肉管であることを考慮して、3段階に入熱を変化させて管外面から溶接部を再加熱、溶融して行った。この間供試体内部には、冷却条件が一定となるように冷却水（工水）を流しておくこととした。

加熱条件は次式で表わされ、Table 4.4-1のTHSI溶接条件を求めた。

$$H = 60 \times \frac{E \cdot I}{V}$$

ここで、

H ; 入熱量 (J/cm)

E ; 電圧 (V)

I ; 電流 (A)

V ; 加熱速度 (cm/min)

### (3) 試験結果

温度分布の計測結果をFig. 4.4-3～4.4-5に示す。結果の主要な点を下記に示す。

イ. Fig. 4.4-3より、計測位置⑦の温度が、①に比べて高い値を得た。これは供試体を固定して、TIGトーチ自体を回転する方式としたため、供試体の下側⑦で再溶融部がタレ込みとなって、ビード幅が広くなり熱電対に接近したことによる影響である。

また、加熱回数2回転目の⑦は1250°Cと高い値を示したが、TIGトーチの可動範囲を微調整した際熱電対⑦に接近しすぎたためである。

ロ. 供試体管内面の温度分布は、Fig. 4.4-4より80～100°Cと管外面に比べて低い温度で一定している。また溶接部の応力緩和に悪影響となる膜沸騰もみられず、冷却が有効に働いていることが明らかとなった。

一方、管外面の温度分布は、再溶融部から離れるに従い急速に低下して、全データがほぼ一つの曲線で表わされる。このことは入熱をさらに大きくしても、供試体の加熱幅（加熱幅の大きい方が、残留応力改善により効果的である。）を大幅に増加させることはできず、温度分布上からは今回の入熱が十分な大きさであったと言える。

ハ. Fig. 4.4-5は、THSI施工による結晶粒度への影響について考察する観点から、TIG溶接時とTHSI施工時の温度履歴の比較を行った。SUS 304、4B Sch 80溶接時の温度履歴(a図)と供試体；L-1によるTHSI施工時の温度履歴(b図)を示す。両図の間で入熱量、材厚、温度測定点は異なるが、TIG溶接に比べてTHSI施工の方が急速に温度下降しており、熱影響部での結晶粒の成長(粗大化)は、殆ど無いものと考えられる。

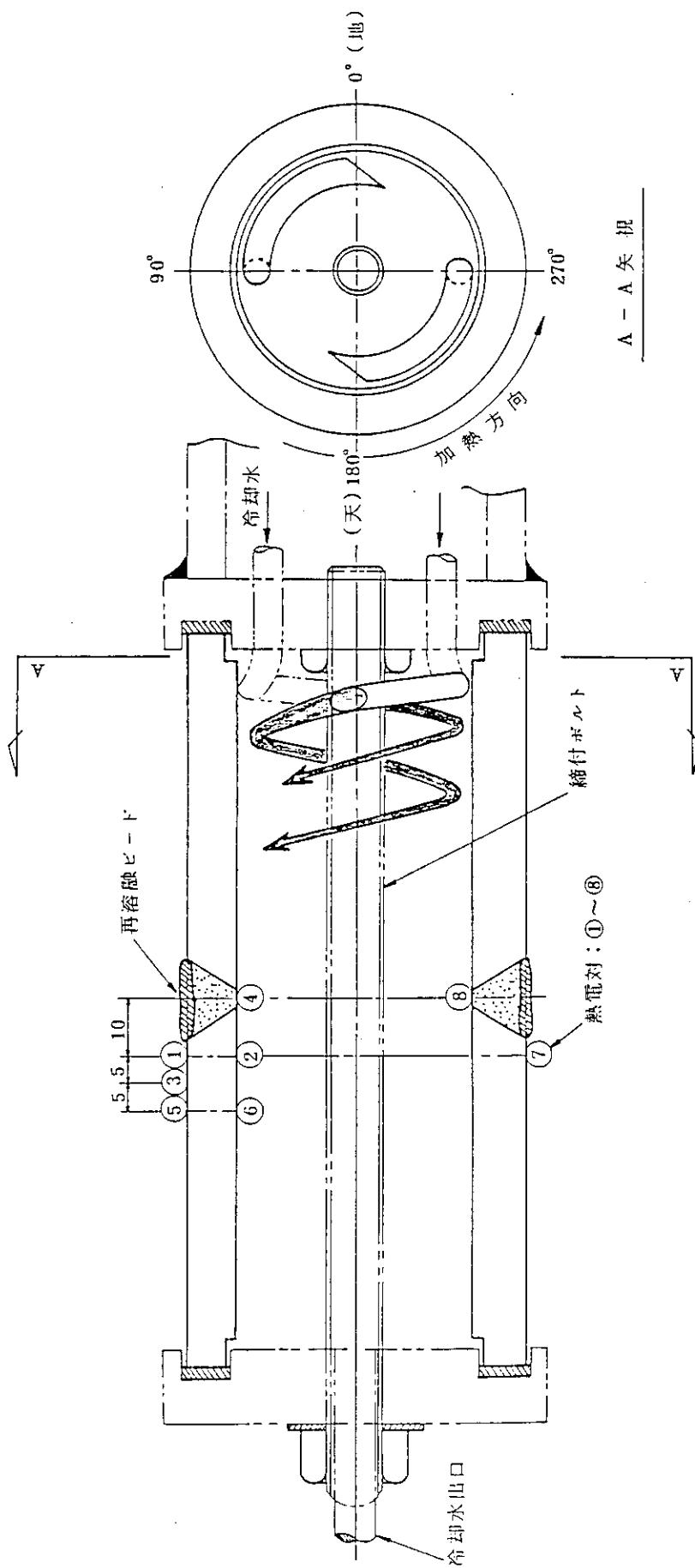
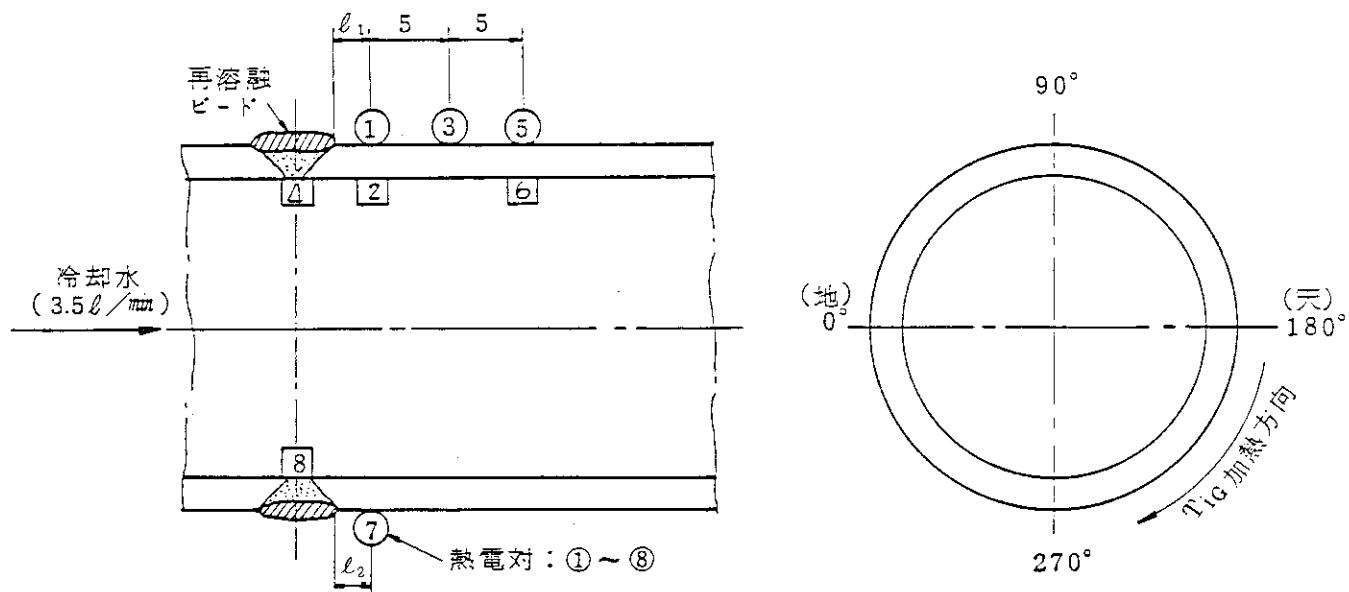
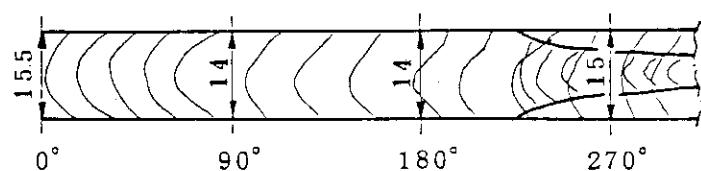


Fig. 4.4-1 冷却装置と熱電対取付位置



加熱回数	入熱 (J/cm)	$\ell_1$ (mm)	$\ell_2$ (mm)	温 度 测 定 值 (°C)							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1回転目	39600	5.5	2.5	590	110	365	110	264	83	875	110
2 "	39600	5.0	0.3 0.5	699	110	430	110	310	88	1250	110
3 "	30460	5.0	2.5	680	110	414	108	293	80	900	110
4 "	30460	4.5	2.0	716	110	430	110	304	80~85	953	110
最終1/4回転	15840	—	—	—	—	—	—	—	—	712	103

周方位の再溶融ビード幅(4回転目)



注 ; (1) 加熱回数毎の再溶融ビード幅は、TIG トーチの連続可動のため測定できなかった。

(2) 2回転目のT/C No.7の温度指示値が異常に高い。これはTIG トーチの可動範囲が微調整でT/C側へ寄せすぎたためである。

Fig. 4.4-3 供試体各部の温度測定結果

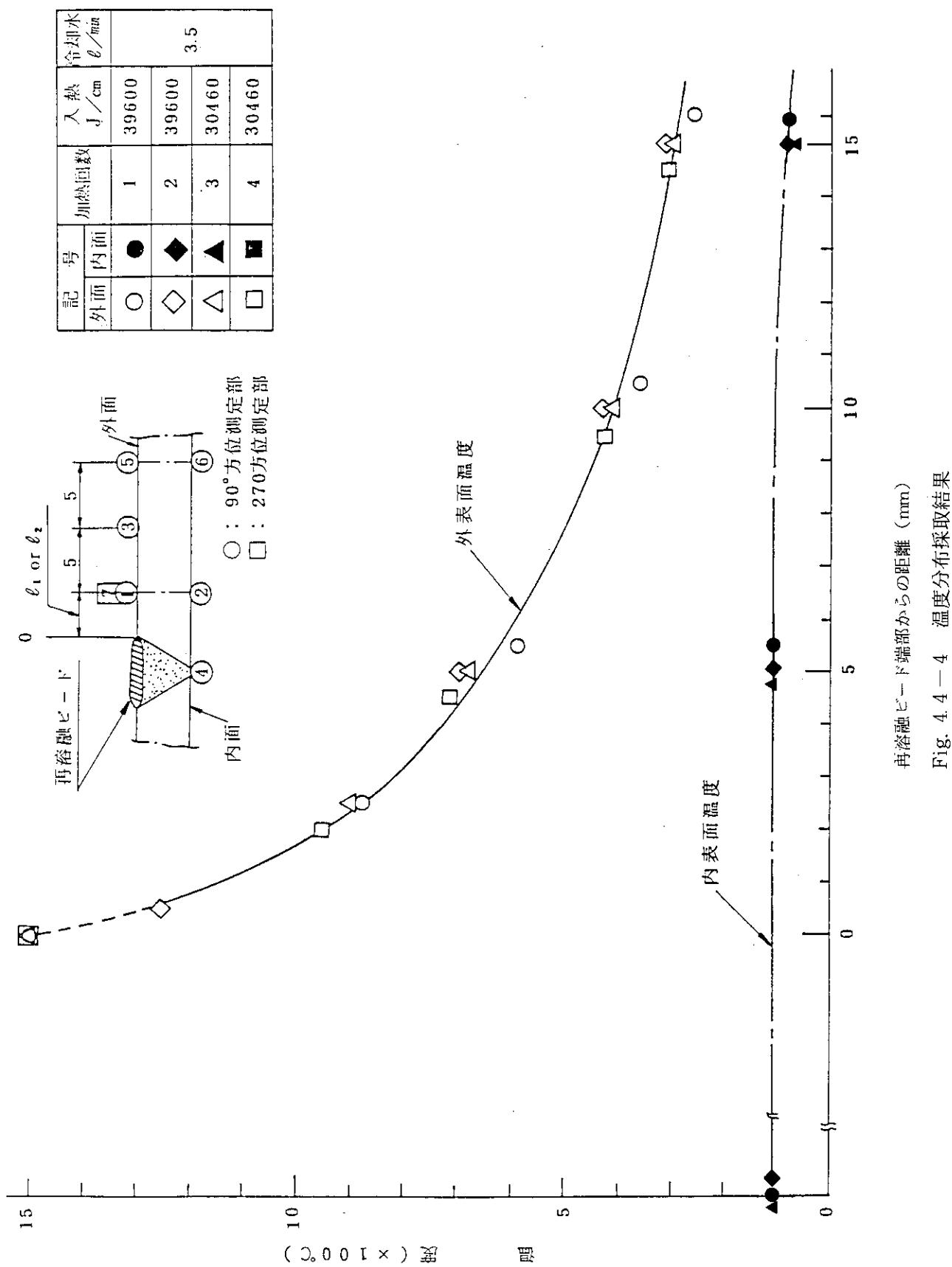
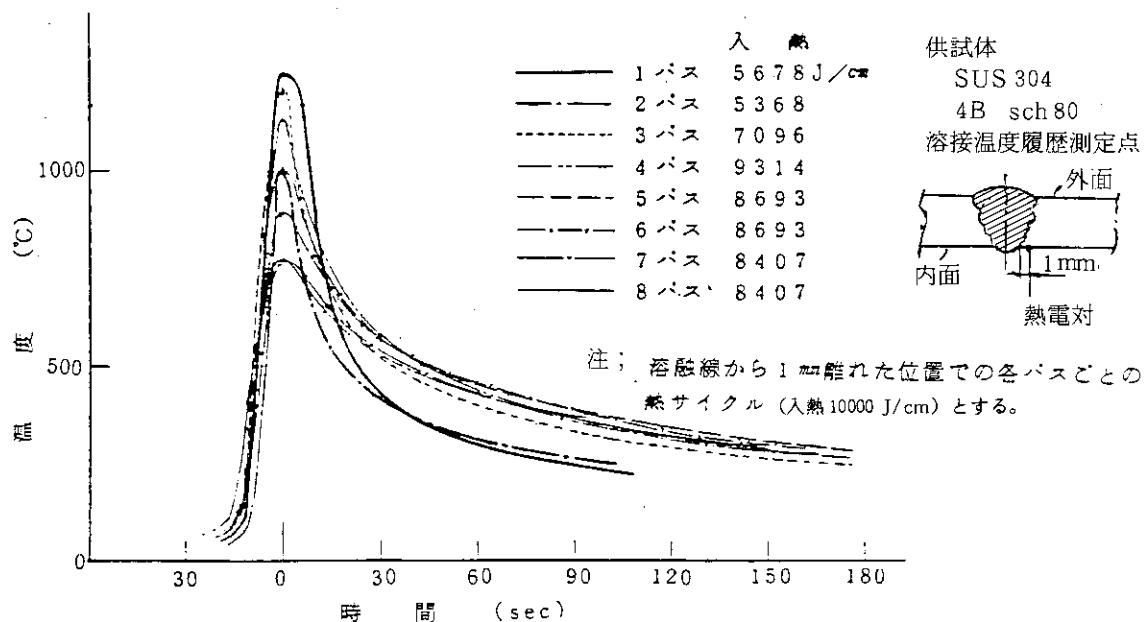
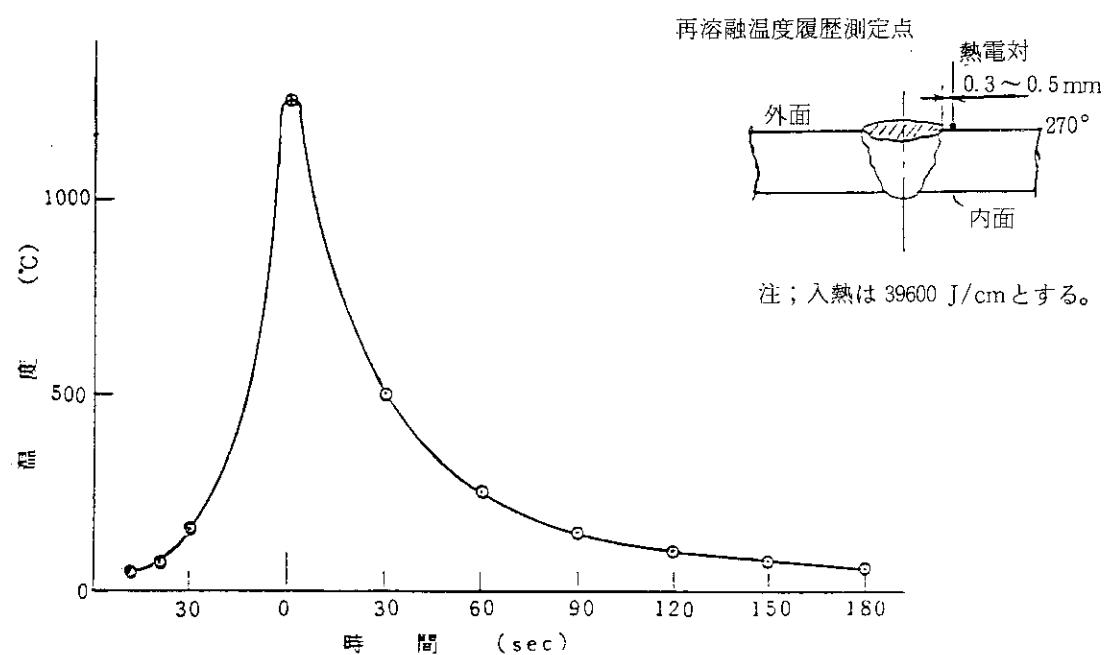


Fig. 4-4-4 温度分布採取結果

a図 TIG溶接時の温度履歴<sup>10)</sup>

b図 THSI施工時の温度履歴 (加熱2回転目, 热電対No.7)

Fig. 4.4-5 溶接時及びTHSI時の温度履歴の比較

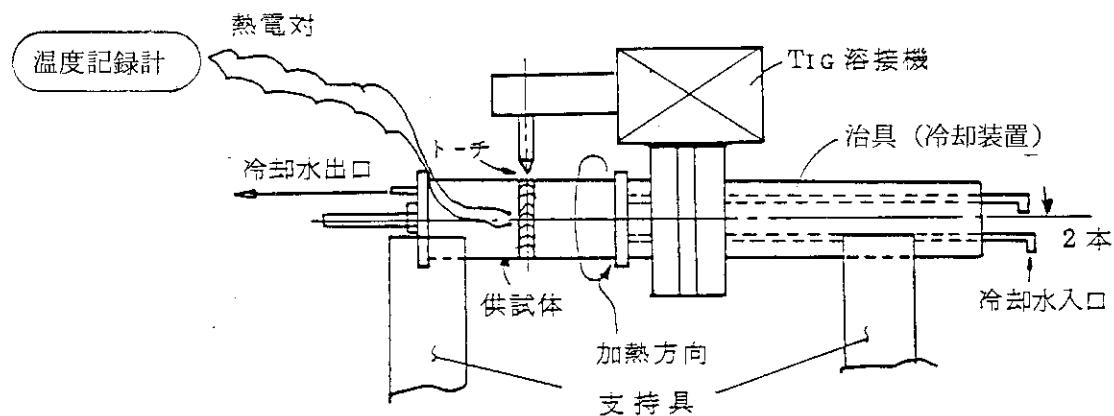


Fig. 4.4-2 温度分布採取試験状況図

Table 4.4-1 確性試験項目と溶接条件

* <sup>1</sup> 供試体 記号	冷却条件		加熱 回数	加熱条件					備考
	流量 $\ell/\text{min}$	流速 * <sup>2</sup> $\text{m/sec}$		入熱量 $\text{J/cm}$	電流 $\text{A}$	電圧 $\text{V}$	速度 $\text{cm/min}$	Arガス $\ell/\text{min}$	
L-1	3.5	1.03	1～2 回転目	39600	240	11	4	15	中間入熱
			3～4 回転目	30460	240	11	5.2	15	下限入熱
			最終 1/4周	15840	240	11	10	15	最下限入熱
L-2	3.5	1.03	1～2 回転目	39600	240	11	4	15	中間入熱
			3～4 回転目	30460	240	11	5.2	15	下限入熱
			最終 1/4周	10560	240	11	15	15	最下限入熱

\* 1 L-1 ; 温度分布測定用, L-2 ; 残留応力測定用, L-3 ; MgCl<sub>2</sub>試験, 機械試験用

\* 2 流速は、噴出ノズルからの速度を示す。

#### 4.5 残留応力測定

THSI施工後の供試体内・外面について残留応力分布の測定を行い、応力改善への有効性を調べた。

##### (1) 測定方法

応力測定は、抵抗線ひずみ計法により行い、Fig. 4.5-1に示す供試体内・外面の計18点を測定箇所とした。応力測定に使用する試験片の採取は、切断時の付加応力を避けるため、抵抗線

ひずみ計取付け部近くの切断をファインカッターにより Fig. 4.5-2 の手順で行った。

### (2) 測定条件

温度分布の測定結果を参考にして、供試体；L-2へのTHSI施工条件を求め応力測定を行った。試験の諸条件は Table 4.4-1 に、抵抗線ひずみ計その他使用機器は Table 4.5-1 に示す。

Table 4.5-1 抵抗線ひずみ計その他使用機器

	機 器 名	型 式	メー カ	備 考
歪測定機器	ストレイン・メータ	SM-60 D	共和電業(株)	
	バランスング・メータ	SS-24 R		
歪ゲージ その他の機器	2軸歪ゲージ	FCA-2-17	東京測器研究所	RESIST: 120 ± 0.5 Ω
	接着剤	CN		FACTOR: 2.07
	防湿剤	P-2	共和電業(株)	DRUG-A, -B 貼付後の表面coat用

### (3) 測定結果

応力測定の結果を Fig. 4.5-3 ~ 4.5-6 に示す。Fig. 4.5-3 のひずみ量は次式により残留応力に換算した。

$$\sigma_x = - \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y)$$

$$\sigma_y = - \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x)$$

ここで、

$\sigma_x$  ; 周方向残留応力 (MPa)

$\sigma_y$  ; 軸方向残留応力 (MPa)

E ; ヤング率 (1.9 GPa)

$\nu$  ; ポアソン比 (0.28)

$\varepsilon_x$  ; 周方向解放歪

$\varepsilon_y$  ; 軸方向解放歪

次に主要な結果を示す。

イ. Fig. 4.5-4 より管内面の残留応力は、周方向、軸方向で大差なく加熱部で最も大きい圧縮応力を示す。また加熱部から離れるに従い徐々に小さくなるがすべて圧縮応力を示す。

管外表面では、周方向に比べて軸方向の引張応力が大きく、加熱部からの距離に関係なく余り変化しない。

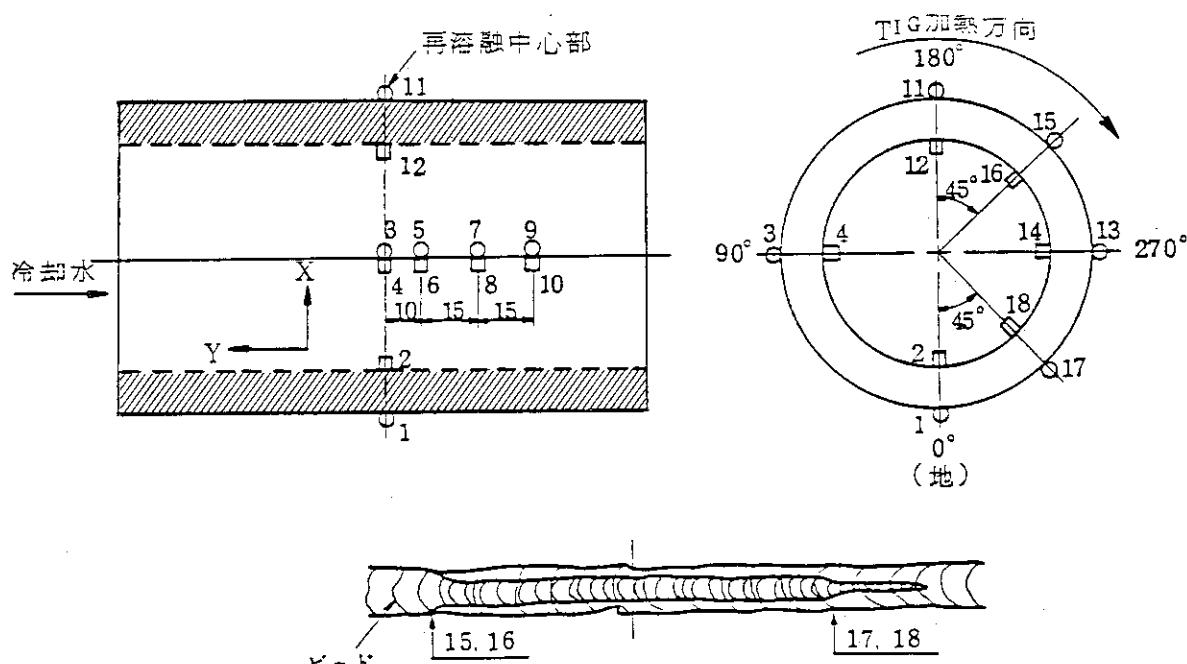
管内・外面は、加熱部からの距離約10mmで応力値が大きくなっているが、標準偏差約50MPaを考慮に入れると、加熱部からの距離に対して直線的な関係が成立する。この標準偏差は、ひずみ検出端自体の取付誤差や供試体を今回市販品としたことによる素材成型時の残留応力などが原因として挙げられ、通常計測される程度である。

ロ. Fig. 4.5-5は、加熱部の周方向及び軸方向の残留応力分布を示す。

管内面では、周方向と軸方向の間に差がなく一様に圧縮応力を示した。しかし180°の位置で軸方向、周方向とも圧縮応力が低下している。特に軸方向では、その低下割合が大きく管外面で変化しないことから、初層溶接時の局所的な残留応力によるものと思われるが明確ではない。

管外面は、軸方向に比べて周方向で引張応力が大きく、さらに225～315°の位置で周方向、軸方向とも引張応力が大きくなっている。特に周方向にその増加傾向がみられ、管内面で逆に圧縮応力が大きくなっている。この位置はTIGトーチによる加熱終了位置と一致しており、加熱時の入熱量と加熱速度に関係するものと考えられる。

ハ. Fig. 4.5-6は、管内面のTHSI施工で得られた残留応力と溶接のままの残留応力（計算値、実験値）の比較である。溶接のままである高い引張応力を示しているが、THSI施工により明らかに圧縮側に変化していることが判る。



注：(1) ○：外側  
□：内側 } の測定位置を示す。

(2) ⑯, ⑰の測定位置はTIG加熱の最終位置を示す。

Fig. 4.5-1 残留応力測定位置

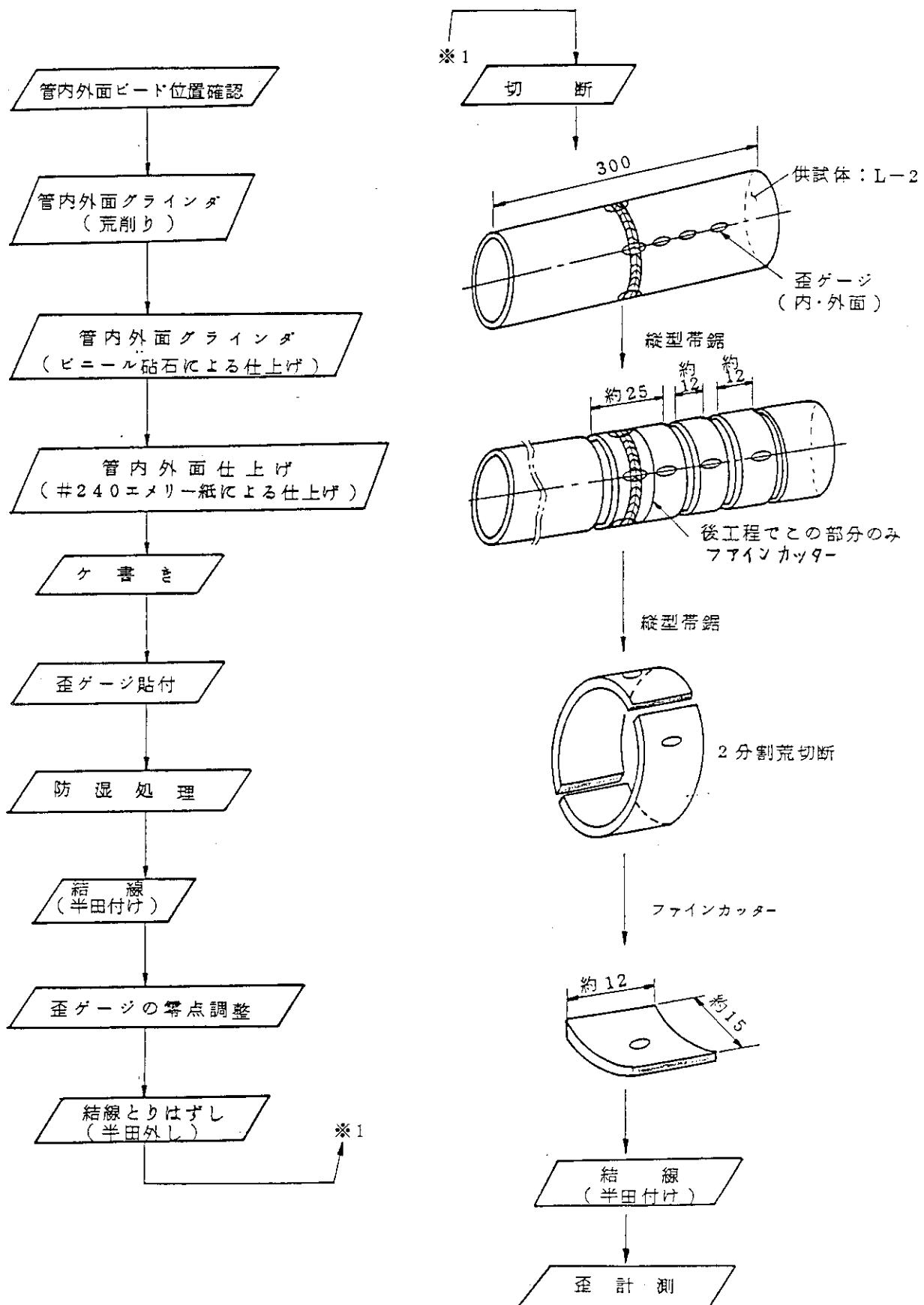
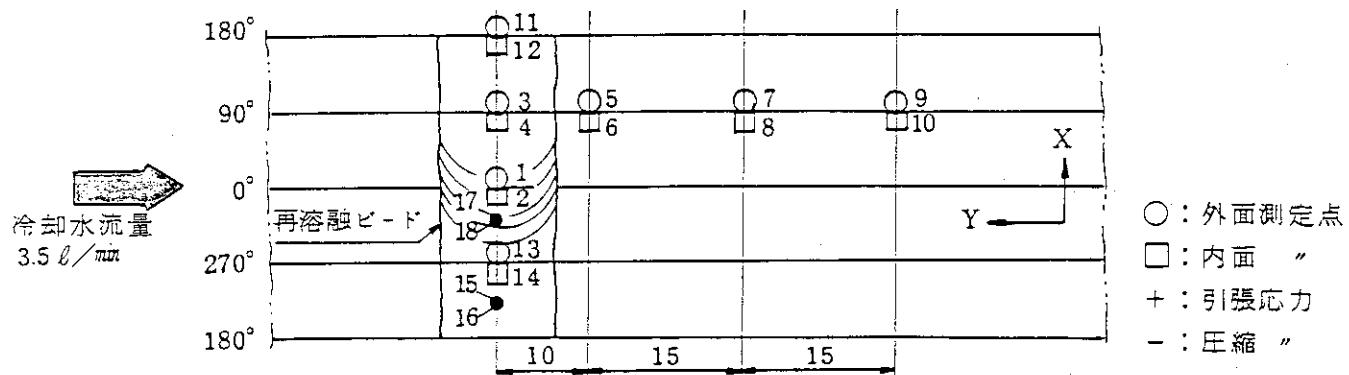


Fig. 4.5-2 残留応力解放手順



供試体符号	測定点	歪 値 ( $\times 10^{-6}$ )		残留応力 (MPa)	
		X	Y	X	Y
L-2	1	-1660	-905	399	285
	2	1150	700	281	-213
	3	-925	-1780	297	425
	4	920	1155	-259	-294
	5	-1530	-1115	384	322
	6	455	1070	-157	-250
	7	-450	-1753	196	392
	8	1060	545	-253	-175
	9	-440	-1685	190	377
	10	360	245	-89	-72
	11	-1815	-1280	453	373
	12	970	70	-206	-71
	13	-2355	-1150	558	377
	14	895	1345	-265	-333
	15	-1410	-1345	372	363
	16	865	775	-225	-212
	17	-2280	-1220	546	387
	18	1375	1295	-362	-350

注；周方位の再溶融ビード幅

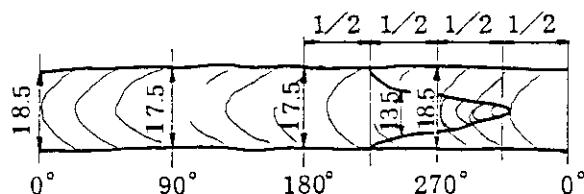
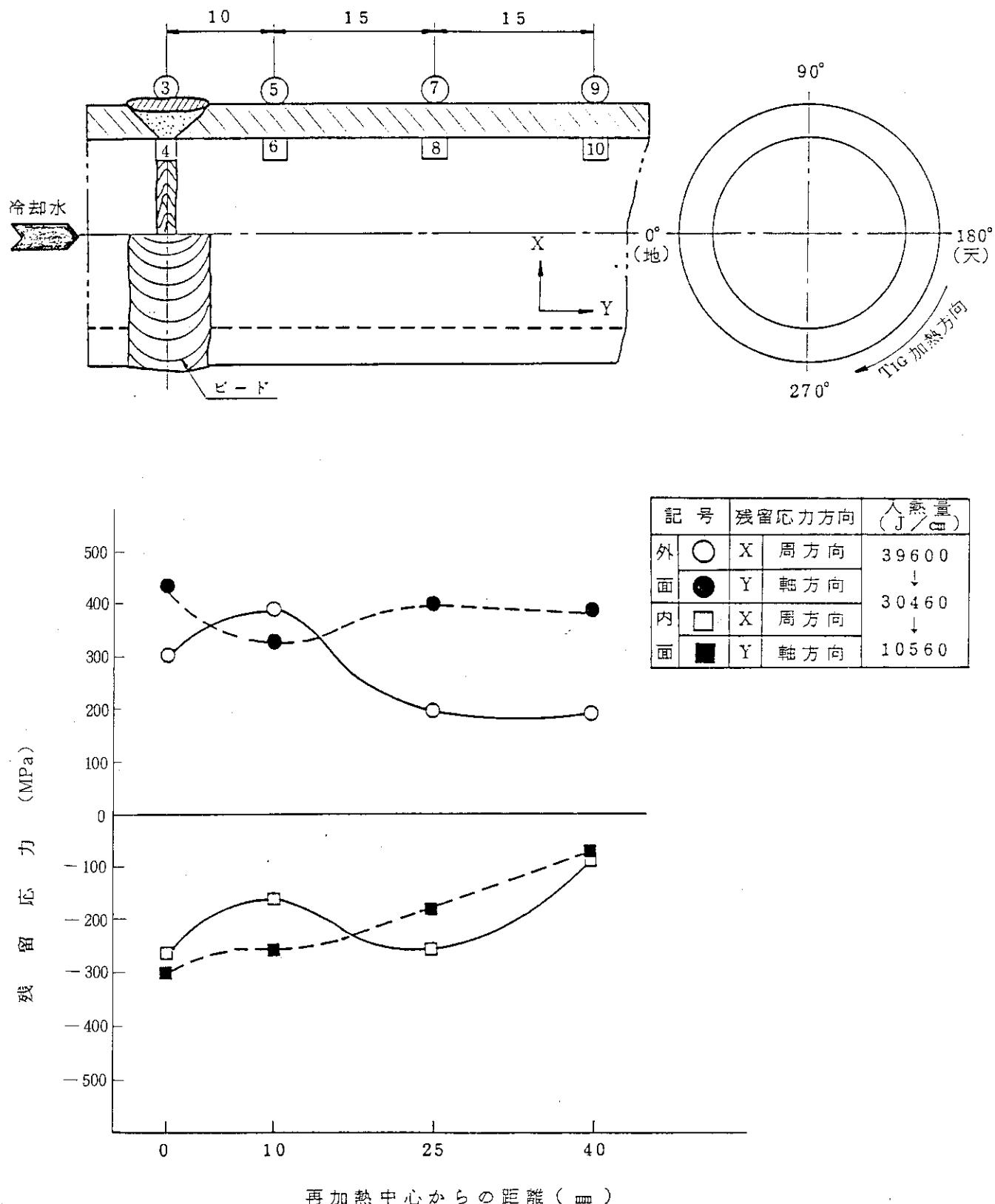


Fig. 4.5-3 残留応力測定結果



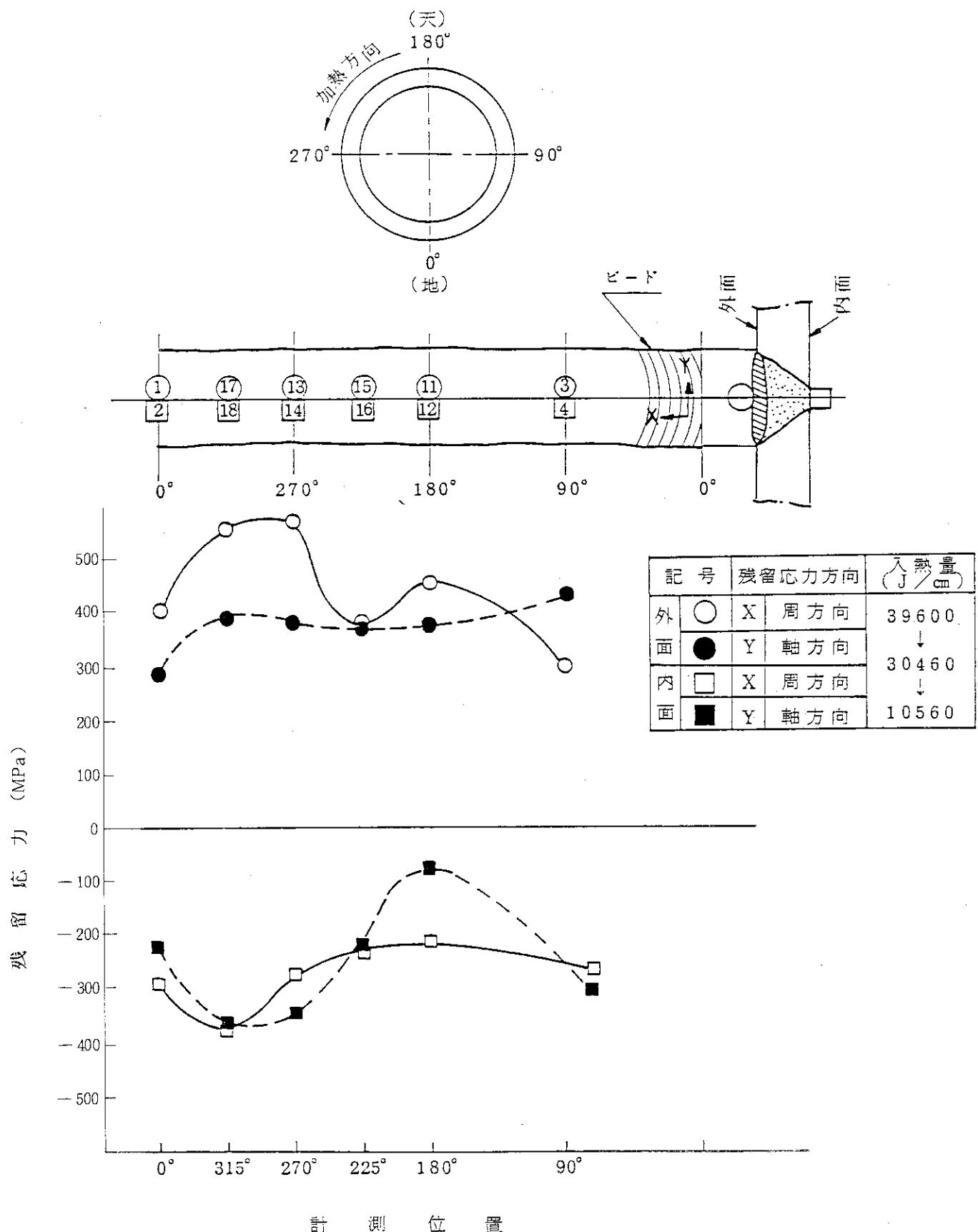
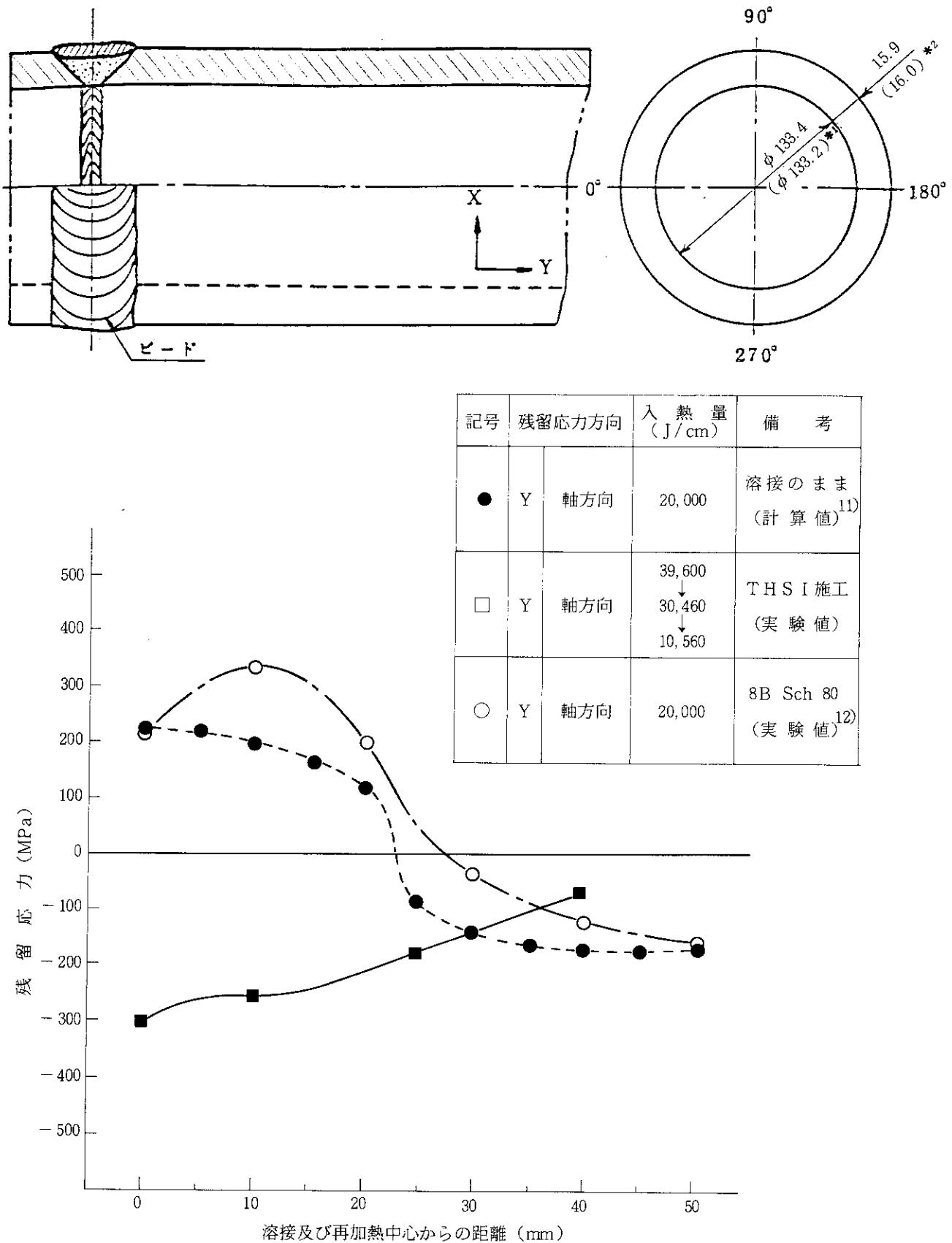


Fig. 4.5-5 残留応力測定結果



注 ; \* 1, 2 ( ) 内の数字は計算条件寸法を示す。

Fig. 4.5-6 管内面の残留応力分布の比較

#### 4.6 MgCl<sub>2</sub>沸騰溶液による応力腐食割れ試験

貫粒型応力腐食割れ抵抗性の評価試験として、最も汎用的な腐食試験法である42%MgCl<sub>2</sub>沸騰溶液による応力腐食割れ試験を行い、THSI法の有効性を確認した。

##### (1) 試験方法及び条件

供試体；L-3を42%MgCl<sub>2</sub>沸騰溶液中に24時間浸漬した後、供試体の管内・外面全域について液体浸透探傷試験を行い、応力腐食割れ発生の有無を検査した。<sup>\*1</sup>

##### (2) 試験結果

イ. 42%MgCl<sub>2</sub>沸騰溶液中に24時間浸漬した後の液体浸透探傷試験の結果をPhoto 4.6-1に示す。管内面には割れがなく、管外面上に無数の割れの発生していることを観察した。

ロ. 一般にオーステナイト系ステンレス鋼の場合、応力腐食割れを防止するための応力の閾値は、69 MPa程度であるといわれている。残留応力測定結果では、管内面に-71 MPa以上の残留応力を示しており割れないと予想される。

一方、管外面上は、190 MPa以上の引張残留応力であることから割れると予想され、液体浸透探傷試験の結果とよく一致し、管内面でのTHSI法の有効性が確認された。

#### 4.7 機械試験

THSI施工後の溶接部について機械試験を行い、その健全性を確認した。<sup>\*2</sup>

##### (1) 試験方法及び条件

腐食試験後の供試体；L-3を使って、継手引張試験、自由曲げ試験、裏曲げ試験の各試験を行った。

##### (2) 試験結果

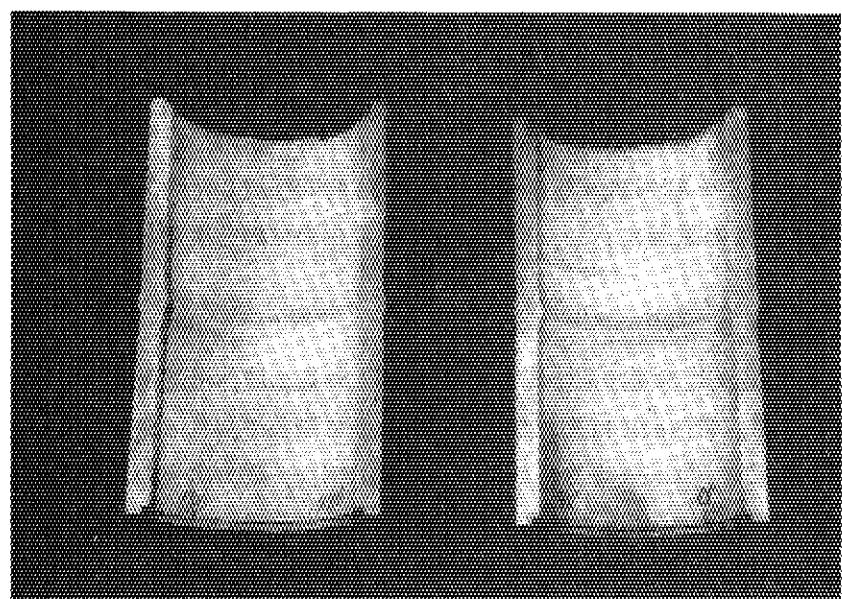
機械試験の詳細をTable 4.7-1に、試験結果をTable 4.7-2に示す。

イ. 溶接部の継手引張試験によると引張強さは、624 MPa(63.7 kg/mm<sup>2</sup>)と母材の規格値；519 MPa(53 kg/mm<sup>2</sup>)を上まわり満足している。またこの値は、供試体の引張強さ；617 MPa(63 kg/mm<sup>2</sup>)も上まわりTHSI施工による影響はないと言える。供試体のミルシートをTable 4.3-1に示す。

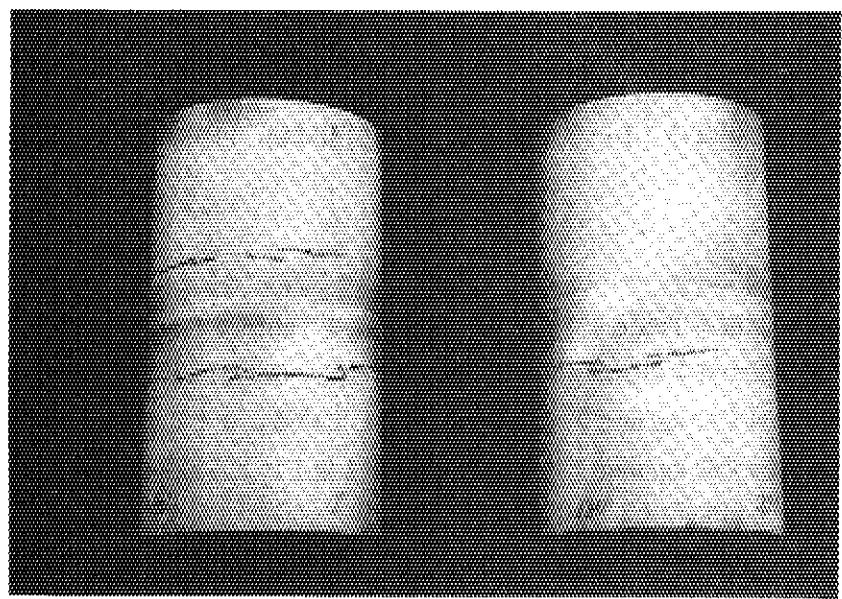
ロ. 自由曲げ試験及び裏曲げ試験の結果、溶接部に割れなどの表面欠陥がなく、THSI施工により機械的性質の低下していないことが判った。

\*1 試験は、JIS G 0576(1976)ステンレス鋼の42%塩化マグネシウム腐食試験方法による。

\*2 試験は、通商産業省省令第81号第26条の規定による。



切断後の内表面



切断後の外表面

Photo 4.6-1 MgCl<sub>2</sub> 沸騰溶液による応力腐食割れ試験結果

Table 4.7-1 機械試験の内容

試験の種類	試験片	試験の方法	合格基準
継手引張試験	形状及び寸法は、JIS Z 3121(1984)「突合せ溶接継手の引張試験方法」の4号試験片とする。	JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」により行い、引張強さを算定する。	試験片の引張強さが、母材の規格による引張強さの最小値以上であること。
自由曲げ試験	形状及び寸法は、JIS Z 3123(1984)「突合せ溶接継手の自由曲げ試験方法」の2号試験片とする。	JIS Z 3123の「試験方法」により、試験片の溶接部の標点間距離の伸びが20%以上になるまで曲げる。	溶接部に1.5mmを超える割れが生じないこと。
裏曲げ試験	形状及び寸法は、JIS Z 3122(1984)「突合せ溶接継手の型曲げ試験方法」の3号裏曲げ試験片とする。	JIS Z 3122の「試験用ジグ」を使用して、JIS Z 3122の「試験方法」により行う。	1. 長さ3mmを超える割れがないこと。 2. 長さ3mm以下の割れの長さの合計が7mmを超えないこと。 3. 割れ及びブローホールの個数の合計が10個を超えないこと。

#### 4.8まとめ

THSI確性試験の結果、次のことが明らかとなった。

- (1) THSI法の施工により、溶接継手内面の引張残留応力を圧縮側に改善することができる。
- (2) 再溶融ピート幅を一定に保つには、TIGトーチによる加熱姿勢を下向きで施工する必要がある。(THSI施工体を回転させる。)
- (3) MgCl<sub>2</sub>沸騰溶液による応力腐食割れ試験の結果、THSI法による溶接残留応力分布の改善が貫粒型応力腐食割れ対策に有効であることを確認した。
- (4) 機械試験の結果、準規格<sup>\*1</sup>を満足し材質上への影響ないことを確認した。

\* 1 規格は、通商産業省省令第81号第26条による。

Table 4.7-2 機械試験成績表

試験内容／材料仕様 TEST ITEM / MATERIAL DESCRIPTION		板厚 THICKNESS	試験片寸法 SIZE OF SPECIMEN	試験 TEST		試験 TEST		試験 TEST		判定 DECISION
溶接部機械試験本体付 Welded Joint Mechanical Test Specimen Body		16mm	SUS304	標査部寸法 Gauge length (mm)	幅 Width (mm)	断面積 Area (mm <sup>2</sup> )	引張り強度 TENSILE STRENGTH kg/mm <sup>2</sup>	伸び率 ELONGATION (%)	引断位置 BREAKING POINT	
試験項目 TEST ITEMS	試験片寸法 SIZE OF SPECIMEN	試験片寸法 Gauge length (mm)	幅 Width (mm)	断面積 Area (mm <sup>2</sup> )	引張り強度 TENSILE STRENGTH kg/mm <sup>2</sup>	伸び率 ELONGATION (%)	引断位置 BREAKING POINT	引張試験 TENSION TEST	引張試験 TENSION TEST	引張試験 Tension Test
規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.	規格 SPEC.
試験番号 SPECIMEN NO.	T	14.8	19.1	282.7	18,000	63.7	Weld Metal	Root Bend	Free Bend (min.20%)	合格 OK
備考 REMARKS	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	G.L. : Gauge Length A.L. : Actual Length E. : Elongation	横浜第一工場 品質管理部 QUALITY CONTROL DEPARTMENT YOKOHAMA NO. 1 WORKS
化 学 成 分 CHEMICAL COMPOSITION (%)										
規格 SPECIFICATION	C	Si	Mn	P	S					
分析 ANALYSIS										

## 5. 新炉内管へのTHSI施工

故障炉内管のき裂原因が、TGSCCであることから新炉内管の構造、運転方法などを考慮して、THSI法をグレイロック接続ピース溶接部両端（継手番号；WS-2,3）に施工した。

WS-2のTHSI施工条件は、確認試験の結果からTable 4.4-1とした。またWS-3は、WS-2に比べて薄肉管であるため、THSI法の施工経験よりTable 5.1-1とした。

### 5.1 THSI溶接施工

突合せ溶接部；WS-2, 3の開先角度（ $60 \pm 5^\circ$ ）及び食違い量（1.5 mm）が規定値内であることの確認後<sup>\*1</sup>、溶接はTIG溶接により材厚に応じて、Table 5.1-2, 5.1-3の溶接条件で行った。

溶接後は、THSI法をPhoto 5.1-1に示す方法により施工した。

### 5.2 THSI施工後の非破壊試験

THSI施工後は、溶接部の健全性を非破壊試験法により確認した。

#### (1) 液体浸透探傷試験

溶接部全周について、管外面から液体法による浸透探傷試験を行い、溶接部に円形状及び線状など表面欠陥のないことを確認した。<sup>\*2</sup>

#### (2) 放射線透過試験

溶接線全周について、撮影は透過厚さが最小となる位置にX線発生装置を置き、内部にフィルムを配する単壁法により10分割して行った。試験の結果、ポロシティ、プローホールなどの有害な内部欠陥のないことを確認した。<sup>\*3</sup> 放射線透過検査記録をTable 5.1-4, 5.1-5に示す。

### 5.3 THSI施工後の耐圧試験

炉内管内に最高使用圧力の1.25倍の試験圧力（水圧）を加え30分保持した後、WS-2, 3の溶接部全周について、肉眼により変形及び漏洩のないことを確認した。

\* 1 確認は、通商産業省省令第81号第24条による。

\* 2 通商産業省省令第81号第11条の規定による。

\* 3 JIS Z 3104-1968「鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」による。

Table 5.1-1 THSI 施工条件 (WS-3)

加熱回数	冷却条件		加熱条件				
	流量 $\ell/\text{min}$	流速 m/s	入熱 J/cm	電流 A	電圧 V	速度 cm/min	Arガス $\ell/\text{min}$
1 ~ 2 回転目	3.5	0.74*	20051	240	11	7.9	15
3 ~ 3 $\frac{3}{4}$ 回転目	3.5		16000	240	11	9.9	15
3 $\frac{3}{4}$ ~ 4 $\frac{1}{4}$ 周部分	3.5	0.74*	7543	240	11	21	15

\*噴出ノズルからの流速を示す。

Table 5.1-2 TIG溶接記録(WS-2)

自動TIG溶接記録表 WELDING RECORD FOR AUTOMATIC GTAW.						立会者 (Supervisor)	月日 (Date)	捺印 (Sign)			
工番 (Work No.)		5501-464				略図 / 備考 (Sketch) (Remarks)					
工事名称 (Work Name)		日本原子力研究開発機構 OWL-2									
接合部番号 (Joint Name.No.)		WS-2									
施行法番号 (Procedure No.)		E31-274P SSF-491									
材質 (Material)		SUS316 + SUS316									
寸法 (Dimension)		15.9t									
溶接機 (Type & Polarity)		電極側 (Electrode Side)	直流正極 (DCSP)	ワイヤ側 (Wire Side)	交流 (AC)						
溶接姿勢 (Welding Position)		F, V(U), V(D), H, OH, ALL									
インサート (Consum Insert)		添付 (Trade Name)	製造番号 (Charge No.)								
シールドガス (Shield Gas)		電極側 ワイヤ側	15 l/min	心線 (Electrode)	銘柄 (Trade Name) WFL MIG314C	φ 1.2 mm	製造番号 (Charge No.) X9457				
バックシールドガス (Back Shield Gas)		—	— l/min	電極径 (E-Dia)	φ 3.2 mm	—	—				
月日 (Date)	層数 (Layer)	パス (Pass)	溶接士 (Welder)	クロック番号、 資格 Clock No. & Qualification	電流 (Current)		電圧 (Voltage)		速度 (Welding Speed)	入熱 層間温度 (Preheating & Interpass Temp.)	
					電極側	ワイヤ側	電極側	ワイヤ側			
5/2	1	1	加藤孝三	1536	8	21.7A 22.110	1-0.8A 2-0.9	19.5V 12.7	V	10 cm/min	686.8 °C
	2	2				190		8.5			682.0 20
	3	3				120		8.5			712.0
	4	4				190		9			102.60
	5	5				220		10			132.00 38
	6	6									
	7	7									
	8	8									52
	9	9									
	9	10									
	10	11									20
	10	12									
	11	13									
	11	14									68
	12	15				↓	↓	↓	↓	↓	
5/4	12	16	加藤孝三	1536	N	220		10	10	132.00	73
											以下余白
検査課 (I.S)	課長 (Chief)	職長 (F)	班長 (A.F)	記録者 (By)	溶接士 (S)						
	61 5.15		61 5.15		61 5.15		61 5.15		61 5.15		

Ishikawajima-Harima  
Heavy Industries Co., Ltd.  
Yokohama No.1 Works

Table 5.1 - 3 TIG溶接記録 (WS-3)

自動TIG溶接記録表 WELDING RECORD FOR AUTOMATIC GTAW.						立会者 (Supervisor)	月日 (Date)	捺印 (Sign)	
工事番号 (Work No.)		5501-464			略図 / 備考 (Sketch) / (Remarks)				
工事名称 (Work Name)		日本原子力研究所 OWL-2							
継手名称、番号 (Joint Name, No.)		WS-3							
施行法番号 (Procedure No.)		原3カ-274P SSIG-491							
材質 (Material)		SUS316 + SUS316							
寸法 (Dimension)		8.9t							
溶接機 (Type & Polarity)		電極側 (Elect Side)	直流正極 (D.C.P)	ワイヤ側 (Wire Side)	交流 (AC)				
溶接姿勢 (Welding Position)		⑥ V(U), V(D), H, OH, ALL							
インサート (Consum Insert)		送柄 (Trade Name)	製造番号 (Charge No.)						
シールドガス (Shield Gas)		電極側	A <sub>r</sub> 7%Ar	15	ℓ/min				
		ワイヤ側	—	—	ℓ/min				
バックシールドガス (Back Shield Gas)		—	—	電極径 (E-Dia)	Φ 3.2 mm	φ mm	φ mm		
月日 (Date)	層数 (Layer)	パス (Pass)	溶接士 (Welder)	クロック番号、資格 Clock No. & Qualification		電流 (Current)	電圧 (Voltage)	速度 (Welding Speed) cm/min	入熱 (Preheating & Interpass Temp.) ℃
				電極側	ワイヤ側	I <sub>1</sub> -170A I <sub>2</sub> -80	V <sub>1</sub> -9.5V V <sub>2</sub> -7		
4.24	1	管穿孔行	S	3.06				10	7580
4.24	2	↑	↑	—	130	8.5	10	6630	25
4.24	3	↑	↑	—	200	10	10	12000	23
4.24	4	↑	↑	—	230	10.5	10	14490	27
4.24	5	↑	↑	—	230	10.5	10	14490	24
4.24	6	↑	↑	—	230	10.5	10	14490	26
4.24	7	↓	↓	↓	230	10.5	10	14490	29
4.24	8	管穿孔行	S	3.06	200	10	10	12000	29
以下空白									
$\bar{J} = \frac{(I_1 \times V_1 \times T_1) + (I_2 \times V_2 \times T_2) \times 60}{V(T_1 + T_2)}$									
I 電流									
V 電圧									
T 時間									
U 回転速度									

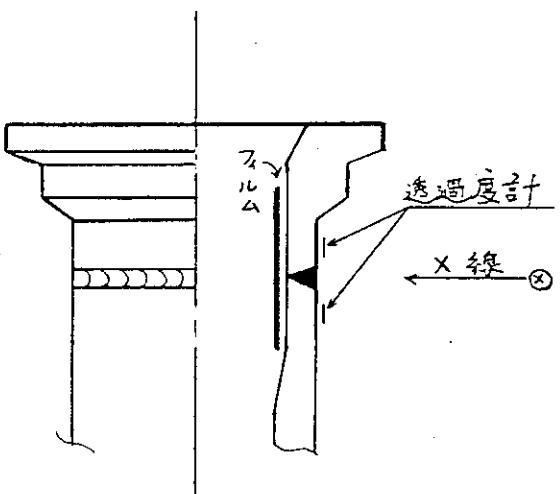
検査課 (I.S)	課長 (Chief)	職長 (F)	班長 (A.F)	記録者 (By)	溶接士 (S)
阿部	61.4.30 西村	61.4.30 宇喜多	61.4.25 沼	61.4.25 沼	61.4.25 沼

Ishikawajima-Harima  
Heavy Industries Co., Ltd.  
Yokohama No.1 Works

Table 5.1-4 放射線透過検査記録 (WS-2)

検査の対象		OWL-2ループ照射設備のうち炉内部分		
材質	SUSF316	径及び肉厚(材厚)	Φ168.3	15.9 (17.9)
図面番号	611A001	写真濃度	1.0~3.5	
撮影条件	撮影手番号	WS-2	露出時間	60 秒
	撮影年月日	S 61-5-27	焦点距離	800 mm
	写真枚数	10	使用フィルム名	Fuji #80
	X線電圧 (kVp)	(定格電圧) 260	増感紙	Fb0.03 / 0.1
	X線電流 (mA)	(定格電流) 5	透過度計	#15
	γ線容量 (Ci)	—	識別最小線径	—

## 1. 撮影位置及び方法



## 2. 現象条件

自動現像機 25°C / 11分

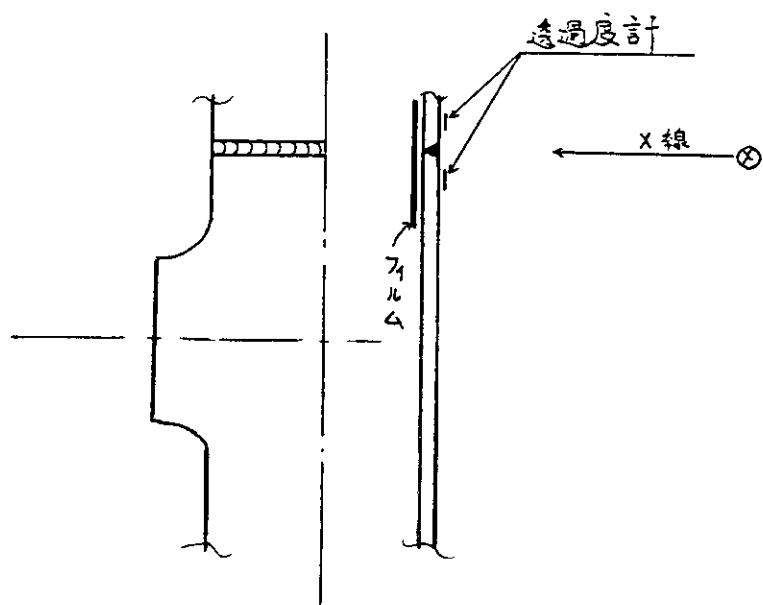
## 3. 検査結果

別紙のとおり。

Table 5.1-5 放射線透過検査記録 (WS-3)

検査の対象		OWL-2ループ照射設備のうち炉内部分	
材質	SUS316, SUSF316	径及び肉厚(材厚)	Φ139.8 8.9 (10.4)
図面番号	611AOO1	写真濃度	1.0 ~ 3.5
撮影手番号	WS-3	露出時間	60 秒
撮影年月日	S61-5-27	焦点距離	800 mm
写真枚数	10	使用フィルム名	Fuj. 80
X線電圧 (KVp)	(定格電圧) 200	増感紙	Pb 0.03 / 0.1
X線電流 (mA)	(定格電流) 5	透過度計	10
γ線容量 (Ci)	—	識別最小線径	—

## 1. 撮影位置及び方法



## 2. 現象条件

自動現像機 25°C/11分

## 3. 検査結果

別紙のとおり。

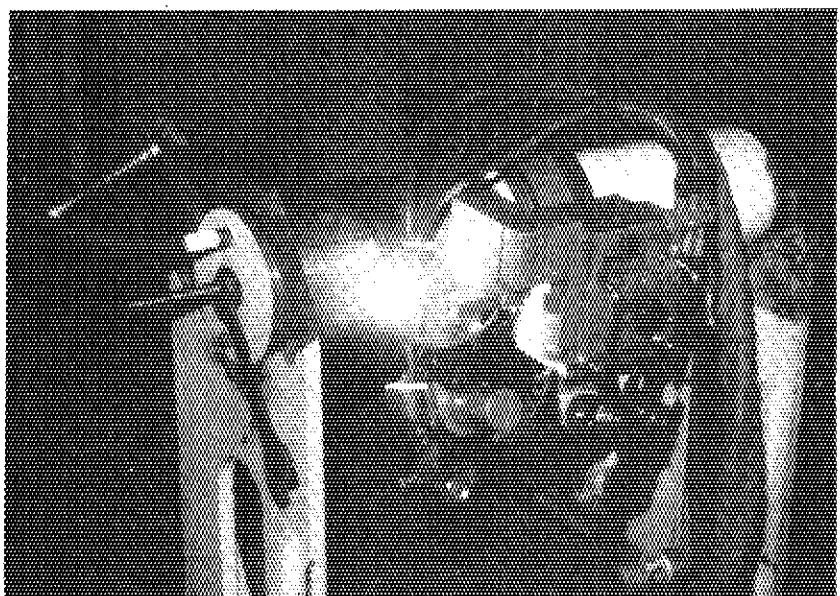
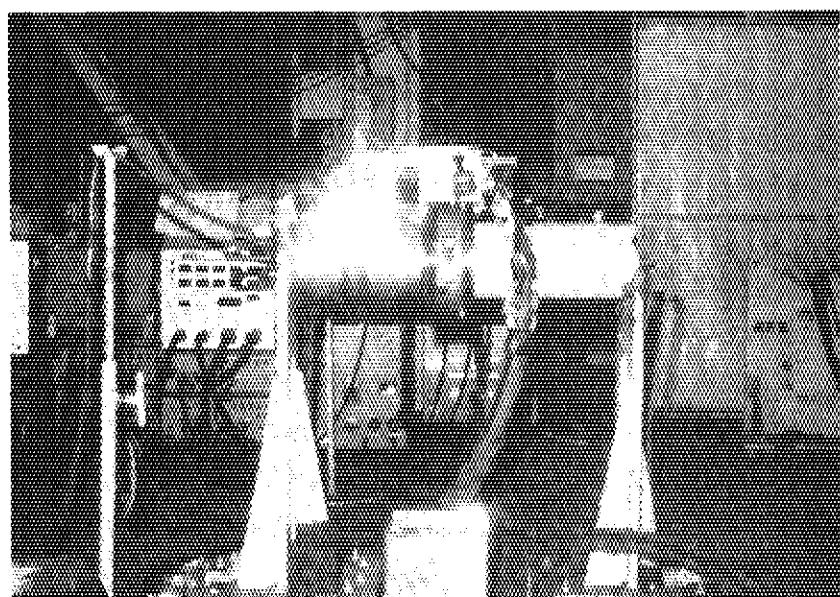


Photo 5.1-1 THS I 施工状況

## 6. あとがき

昭和 58 年 3 月き裂故障を起した炉内管に替わる新炉内管は、き裂原因の調査、究明後の昭和 60 年 1 月から設計・製作を開始して、昭和 61 年 12 月に完成した。

新炉内管の設計では、「OWL-2 の故障の原因及びその対策について（最終答申）」報告書で原因として挙げられている TGSCC 対策を重畠して行った。

材料の銳敏化防止対策は、高温領域での耐引張強度が SUS 316 と同等で、炭素含有量の低い応力腐食割れに優れているオーステナイト系ステンレス鋼の SUS 316 NG 材を使用した。

特に問題となる溶接施工については、新炉内管の構造上から全溶接線に実施することが困難であったため、故障炉内管のき裂発生部とそれに類似の環境にある溶接線についてのみ行った。

以上の TGSCC 諸対策を実施して設計・製作した新炉内管は、高温高圧のインパイル水ループとして、動力炉国産化技術の確立と発展に引き続き寄与できるものと期待する。

## 謝辞

新炉内管の設計・製作にあたり、多大な御協力と御指導を戴いた関係各位、特に青山功氏（現、研究炉管理部）、中田宏勝氏（現、企画室）、伊藤昇氏（現、リスク評価解析研究室）には、深く感謝の意を表します。

さらに、本製作を担当した石川島播磨重工業㈱の諸氏には、短い製作期間にもかかわらず全面的な御協力を戴き感謝の意を表します。

## 6. あとがき

昭和 58 年 3 月き裂故障を起した炉内管に替わる新炉内管は、き裂原因の調査、究明後の昭和 60 年 1 月から設計・製作を開始して、昭和 61 年 12 月に完成した。

新炉内管の設計では、「OWL-2 の故障の原因及びその対策について（最終答申）」報告書で原因として挙げられている TGSCC 対策を重畳して行った。

材料の鋭敏化防止対策は、高温領域での耐引張強度が SUS 316 と同等で、炭素含有量の低い応力腐食割れに優れているオーステナイト系ステンレス鋼の SUS 316 NG 材を使用した。

特に問題となる溶接施工については、新炉内管の構造上から全溶接線に実施することが困難であったため、故障炉内管のき裂発生部とそれに類似の環境にある溶接線についてのみ行った。

以上の TGSCC 諸対策を実施して設計・製作した新炉内管は、高温高圧のインパイル水ループとして、動力炉国産化技術の確立と発展に引き続き寄与できるものと期待する。

## 謝 辞

新炉内管の設計・製作にあたり、多大な御協力と御指導を戴いた関係各位、特に青山功氏（現、研究炉管理部）、中田宏勝氏（現、企画室）、伊藤昇氏（現、リスク評価解析研究室）には、深く感謝の意を表します。

さらに、本製作を担当した石川島播磨重工業㈱の諸氏には、短い製作期間にもかかわらず全面的な御協力を戴き感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 材料試験炉部照射第2課 “OWL-2 照射設備のトラブル報告”  
内部資料, Nov. 1983.
- 2) 飯村勝道, 伊藤昇他 “OWL-2 照射設備炉内管撤去作業” 内部資料, Aug. 1985.
- 3) OWL-2 故障対策委員会 “OWL-2 の故障の原因の究明及びその対策について”  
(最終答申) 内部資料, Apr. 1983.
- 4) 飯村勝道, 伊藤昇他 “OWL-2 炉内管き裂の発生原因に関する調査報告”  
内部資料, Feb. 1986.
- 5) 梅本忠宏, 田中保博 “TIG トーチ加熱による配管溶接残留応力の改善” IHI技報, 26,  
No.4, 230, 1986.
- 6) 文部省科学研究費総合研究B報告書 “原子力発電所における応力腐食割れ対策に関する総合  
研究” 昭和50年度
- 7) 日本原子力研究所 “JMTTRの設計及び工事の方法の認可申請書” (OWL-2 ループ照射  
装置の一部更新その2), Nov. 1985.
- 8) 梅本忠宏, 田中伸治 “高周波加熱法を利用した残留応力の改善” IHI技報, 18, No.1,  
29, 1978.
- 9) Seminar On Countermeasures For BWR Pipe Cracking Palo Alto,  
California. Jan, 1980.
- 10) 安藤良夫他 “原子炉配管系の局部的構造挙動と安全性評価に関する試験研究(その2)”  
社団法人, 日本溶接協会出版 Dec. 1977.
- 11) 梅本忠宏, 田中伸治 “管の溶接残留応力の簡便な計算方法” IHI技報, 23, No.6, 527,  
1983.
- 12) 安藤良夫他 “原子炉配管系の局部的構造挙動と安全評価に関する試験研究(その3)”  
社団法人, 日本溶接協会出版 Nov. 1978.