

現地補修溶接継手および経年化溶接継手の  
健全性評価技術の開発（第1報）  
光学顕微鏡による組織観察と硬さ試験  
（研究報告）

2004年3月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122 (代表)  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2004

## 現地補修溶接継手および経年化溶接継手の健全性評価技術の開発（第1報）

### 光学顕微鏡による組織観察と硬さ試験

#### （研究報告）

桐山 孝\*、若井隆純\*、  
青砥紀身\*

#### 要旨

高速炉の実用化に向けて、軽水炉と競合できる経済性達成の一方策として、プラントを長寿命化し、トータルコストを低減することが検討されている。将来に向けて長寿命プラントの健全性を確保するためには、現地補修溶接継手および経年化継手の健全性確認技術を確立することが重要である。本研究では、現地補修溶接時の入熱が経年化した材料の健全性に及ぼす影響を把握することを目的として、機器試験用ナトリウムループから採取した構造材に新しい構造材を溶接して製作した模擬補修継手、同ループから採取した経年化継手、Phenixの2次冷却系配管から採取した経年化補修継手および経年化継手に対する光学顕微鏡による金属組織観察とビッカース硬さ試験を実施し、それらの結果に基づいて、以下の結論を得た；

- (1) 現地補修溶接継手、経年化継手の両者で結晶粒界に炭化物の析出が観察されたが、現地補修溶接継手 HAZ に、経年化継手 HAZ と比較して炭化物の凝集・粗大化は見られず、現地補修溶接入熱によると考えられる炭化物の再固溶が見られた。このことから、今回の観察の範囲では、現地補修溶接の入熱は、結晶粒界に析出した炭化物の補修溶接後の挙動に悪い影響を及ぼさないことが示唆された。
- (2) 現地補修溶接継手において経年化材側の母材から HAZ にかけて硬さの増加が見られたのに対し、経年化継手における硬さの分布はほぼ平坦であった。
- (3) 現地補修溶接模擬継手および経年化継手の母材において、長時間使用によると考えられる硬さの変化が見られた。

---

\*大洗工学センター 要素技術開発部 新材料研究グループ

Development of integrity assessment methods for aged and on-site repair welds  
(1) Metallurgical examination using optical microscopy and hardness test

T.Kiriyama\*、T.Wakai\*、  
K.Aoto\*

**Abstract**

For the enhancement of the economic competitiveness of the fast breeder reactor (FBR), it is investigated that total cost reduction by elongation of plant service period. It is essential to establish the structural integrity assessment method of on-site repair welds in the future FBR components. This study examines an aged and a new on-site welds and some aged welds using optical microscopy to clarify the influence of heat input of the on-site welding process on the integrity of the aged materials. Vicker's hardness tests are also performed for these welds. As a result, the following conclusions are obtained :

- i) Carbides precipitate on grain boundaries both of the on-site weld and aged weld. There are no significant difference between their shape and dimensions. In the heat affected zone (HAZ) of aged material in the on-site weld, the carbides are fused due to welding heat input. It can be concluded that there is little harmful effect of heat input of the on-site welding process on the integrity of the aged materials as far as this study examines.
- ii) In the on-site weld, the hardness of HAZ is slightly larger than that of base metal for the aged material side. In contrast, the hardness distributes flatly in the aged weld.
- iii) Obvious increase of hardness due to long term service is observed both for the on-site weld and the aged weld.

---

\*Advanced Material Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

## 目 次

1. 緒言	1
2. 供試材	2
2.1 ナトリウム試験ループサンプリング材	2
2.2 Phenix 2 次系配管サンプリング材	3
3. 観察および試験の目的と方法	4
3.1 光学顕微鏡による金属組織観察の目的と方法	4
3.2 ビッカース硬さ試験の目的と方法	4
4. 観察および試験の結果	5
4.1 光学顕微鏡による金属組織観察結果	5
4.2 ビッカース硬さ試験結果	7
5. 考察	9
6. 結言	12
7. 謝辞	14
8. 参考文献	15
参考資料	53
参考資料1 SITR 模擬補修継手の Na 接液面近傍のミクロ組織	53
参考資料2 SITR 経年化継手の Na 接液面近傍のミクロ組織	54
参考資料3 PBTL 模擬補修継手の Na 接液側面近傍のミクロ組織	55
参考資料4 PBTL 経年化継手の Na 接液面近傍のミクロ組織	56
参考資料5 Phenix 経年化補修継手の Na 接液面近傍のミクロ組織	57
参考資料6 Phenix 経年化継手の Na 接液面近傍のミクロ組織	58

## 表リスト

表 1	供試材の化学成分	.....	16
表 2	供試材の熱処理条件	.....	16
表 3	供試材の機械的性質	.....	17
表 4	供試材の溶接条件	.....	18
表 5	溶接金属の化学成分	.....	19

## 図リスト

図 1	SITR サンプルング材	20
図 2	PBTL サンプルング材	22
図 3	Phenix2 次系全体図	24
図 4	金属組織観察用図および硬さ試験用試料図	25
図 5	SITR 模擬補修継手新材側母材のミクロ組織	27
図 6	SITR 模擬補修継手新材側溶接部近傍のミクロ組織	28
図 7	SITR 模擬補修継手経年化材側溶接部近傍のミクロ組織	29
図 8	SITR 模擬補修継手経年化材側母材のミクロ組織	30
図 9	SITR 経年化継手経年化材(A)側母材のミクロ組織	31
図 10	SITR 経年化継手経年化材(A)側溶接部近傍のミクロ組織	32
図 11	SITR 経年化継手経年化材(B)側溶接部近傍のミクロ組織	33
図 12	SITR 経年化継手経年化材(B)側母材のミクロ組織	34
図 13	PBTL 模擬補修継手新材側母材のミクロ組織	35
図 14	PBTL 模擬補修継手新材側溶接部近傍のミクロ組織	36
図 15	PBTL 模擬補修継手経年化材側溶接部近傍のミクロ組織	37
図 16	PBTL 経年化継手経年化材(A)側母材のミクロ組織	38
図 17	PBTL 経年化継手経年化材(A)側溶接部近傍のミクロ組織	39
図 18	PBTL 経年化継手経年化材(B)側溶接部近傍のミクロ組織	40
図 19	Phenix 経年化補修継手新材側母材のミクロ組織	41
図 20	Phenix 経年化補修継手新材側溶接部近傍のミクロ組織	42
図 21	Phenix 経年化補修継手経年化材側溶接部近傍のミクロ組織	43
図 22	Phenix 経年化継手経年化材(A)側母材ミクロ組織	44

図 23	Phenix 経年化継手経年化材(A)側溶接部近傍のマイクロ組織	.....	45
図 24	Phenix 経年化継手経年化材(B)側溶接部近傍のマイクロ組織	.....	46
図 25	SITR 模擬補修継手の硬さ試験結果	.....	47
図 26	SITR 経年化継手の硬さ試験結果	.....	48
図 27	PBTL 模擬補修継手の硬さ試験結果	.....	49
図 28	PBTL 経年化継手の硬さ試験結果	.....	50
図 29	Phenix 経年化補修継手の硬さ試験結果	.....	51
図 30	Phenix 経年化継手の硬さ試験結果	.....	52



## 1. 緒言

高速炉の実用化に向けて、軽水炉と競合できる経済性達成の一方策として、プラントを長寿命化し、トータルコストを低減することが検討されている。この検討においては、配管材等を必要に応じて補修・交換することが想定され、その際、多くの場合、一定期間使用された構造材に新しい構造材を溶接する現地補修工事が発生する。このような工事で発生する現地補修溶接継手の健全性に関しては、Phenix（フランス）や EBR-II（米国）など欧米の高速炉において既に多くの事例があり、これまでに問題となったことはない。しかし、将来に向けて長寿命プラントの健全性を確保するためには、詳細な金属組織学的あるいは材料強度学的な知見を蓄積して、現地補修溶接継手の健全性確認技術を確立することが重要である。

そこで、本研究では、大洗工学センターにおいて解体された機器試験用ナトリウムループから構造材を採取し、これらに新しい構造材を溶接して現地補修溶接模擬継手（以下、「模擬補修継手」という。）を製作するとともに、Phenix の 2 次冷却系で実際に使用された現地補修経年化溶接継手（以下、「経年化補修継手」という。）を入手して、これらに対する光学顕微鏡による金属組織観察および硬さ試験を実施する。あわせて、機器試験用ナトリウムループおよび Phenix の 2 次冷却系における実際の使用で経年化した溶接継手（以下、「経年化継手」という。）も採取して、これらに対しても光学顕微鏡による組織観察と硬さ試験を実施し、経年化に伴って変化したと考えられる溶接継手部近傍の金属組織や硬さの分布を把握する。これらの結果を基に、現地補修時の溶接入熱が経年化した材料の結晶粒界に析出した炭化物等の成長挙動に及ぼす影響について考察し、現時点の知見に基づく現地補修溶接継手の健全性確認見通しについて検討する。

## 2. 供試材

本研究においては、以下の供試体に対して光学顕微鏡による金属組織観察およびビッカース硬さ試験を実施した。

### 2.1 ナトリウム試験ループサンプリング材

大洗工学センターにおいて解体された機器試験用ナトリウムループのうち、もんじゅ炉容器ナトリウム中試験装置（Structural Integrity Test for “Monju” Reactor vessel。以下、「SITR」という。）および配管ベローズ試験装置（Piping Bellows Test Loop。以下、「PBTL」という。）から経年化した構造材を採取し、それらに新しい構造材を溶接して、模擬補修継手を製作した。また、これらの試験ループにおける長時間の使用により経年化した溶接継手を採取した。SITRの全体図と採取した構造材の形状・寸法を図1に、PBTLの全体図と採取した構造材の形状・寸法を図2に、それぞれ示す。

#### (1) SITR 模擬補修継手

SITRにおいて529°C×約6,300h使用された構造材（厚さ50mm）に新しい材料を溶接して、模擬補修継手（以下、「SITR 模擬補修継手」という。）を製作し、次章以下の金属組織観察および硬さ試験に供した。

#### (2) SITR 経年化継手

SITRにおいて529°C×約6,300h使用された経年化継手（以下、「SITR 経年化継手」という。）を採取し、次章以下の金属組織観察および硬さ試験に供した。

#### (3) PBTL 模擬補修継手

PBTLにおいて530～560°C×約8,300h使用された構造材（厚さ5mm）に新しい材料を溶接して、模擬補修継手（以下、「PBTL 模擬補修継手」という。）を製作し、次章以下の金属組織観察および硬さ試験に供した。

#### (4) PBTL 経年化継手

PBTLにおいて530°C～560°C×約8,300h使用された経年化継手（以下、「PBTL 経年化継手」という。）を採取し、次章以下の金属組織観察および硬さ試験に供した。

## 2.2 Phenix 2 次系配管サンプリング材

フランスの高速炉 Phenix の 2 次系配管から、経年化補修溶接継手および経年化溶接継手を採取した。Phenix 2 次系の全体図を図 3 に示す。

### (1) Phenix 経年化補修継手

Phenix において一定期間使用されたオーステナイト系 304 ステンレス鋼（以下、「304SS」という。）に、オーステナイト系 316L ステンレス鋼（以下、「316LSS」という。）を現地溶接した継手（以下、「Phenix 経年化補修継手」という。）を採取し、次章以下の金属組織観察および硬さ試験に供した。304SS 部分が現地補修溶接前後あわせて 526～545℃で約 88,000h 使用されたことはわかっているが、補修溶接施工時期は明らかでないため、補修継手としての使用時間はわからない。

### (2) Phenix 経年化継手

Phenix において 526～545℃で約 88,000h 使用された経年化溶接継手（以下、「Phenix 経年化継手」という。）を採取し、次章以下の金属組織観察および硬さ試験に供した。

なお、本章で述べた供試体の化学成分、熱処理条件、機械的性質、溶接条件および溶接金属の化学成分を、表 1～5 にそれぞれ示す。

### 3. 観察および試験の目的と方法

#### 3.1 光学顕微鏡による金属組織観察の目的と方法

経年化した材料におけるクリープボイドの発生や炭化物の析出状況を確認し、その材料が受けたクリープ損傷や経年化の程度を推測するために、また、経年化した材料の結晶粒界に析出した炭化物等の成長挙動に及ぼす現地補修溶接時の入熱の影響について考察するために、光学顕微鏡による金属組織観察を実施した。

前章に述べた供試材から試料を作成した。試料の形状・寸法を図 4 に示す。試料は、常温硬化樹脂に埋め、エメリー紙による機械研磨およびバフ研磨により鏡面を得た後、化学エッチングを行った。化学エッチングは、王水（組成； $\text{HNO}_3 : \text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 3 : 1$ ）で行い、最初は軽く脱脂綿を用いてこすり、その後はオーバーエッチとならないよう注意しながらエッチング液の中に浸漬した。エッチング時間は、室温で 1~4 分とした。

#### 3.2 ビッカース硬さ試験の目的と方法

経年化に伴うと考えられる材料の硬さの変化を把握するために、また、前節で述べた金属組織観察の結果と総合して、現地補修溶接時の入熱が経年化した材料に及ぼす影響について考察するために、各溶接継手に対するビッカース硬さ試験を実施した。

硬さ試験は、前節に述べた金属組織観察用の試料に対し、板厚方向に大気側の表面から 1/4t、板厚中央部およびナトリウム接液側表面から 1/4t の 3 ラインについて行った。いずれのラインに関しても、両ボンド部から溶接金属側へ 1.5mm の位置を基準としてそれぞれ外側（母材の方向）へ金属組織が母材とみなせる領域まで 0.5mm ピッチで試験を行った。重錘の重量は、4.9N (=0.5kgf) とした。

## 4. 観察および試験の結果

### 4.1 光学顕微鏡による金属組織観察結果

#### (1) SITR 模擬補修継手

SITR 模擬補修継手の新材側母材の組織を図 5 に、HAZ およびボンド部の組織を図 6 に、それぞれ示す。これらの図において、新材側の母材から熱影響部（以下、「HAZ」という。）にかけて、炭化物等の析出は観察されなかった。SITR 模擬補修継手の経年化材側 HAZ およびボンド部の組織を図 7 に、母材の組織を図 8 に、それぞれ示す。これらの図において、ボンド部には補修溶接時の入熱による再固溶組織が観察され、HAZ や母材の結晶粒界にはわずかな炭化物の析出が観察された（たとえば図 7 の 2-2）が、結晶粒内への析出は見られなかった。また、SITR 模擬補修継手の経年化材側 HAZ および母材には、クリープポイドは観察されなかった。

また、新材側においては、母材から HAZ にかけての広い範囲で、マルテンサイト相が観察された（たとえば、図 5 の 6-2 および図 6 の 5-1）。他方、経年化材側においては、マルテンサイト相は母材で散見される（たとえば、図 8 の 1-2）程度であり、マルテンサイト相の観察頻度を比較すると、明らかに新材側の方が大きかった。なお、このようなマルテンサイト相は、SUS304 など室温でオーステナイト相が不安定なステンレス鋼が加工等による応力を受けるとき、オーステナイト相が剪断変形して生じる、いわゆる加工誘起マルテンサイト相<sup>[1]</sup>である可能性が高い。生成したマルテンサイト相は、500℃以上に加熱することで再びオーステナイト相に変態する<sup>[2]</sup>とされていることから、経年化材側では 529℃×数千時間の実機使用中に再変態した可能性がある。

#### (2) SITR 経年化継手

SITR 経年化継手の母材、HAZ およびボンド部の組織を図 9～12 に示す。これらの図において、母材から HAZ にかけての結晶粒界に、高温長時間使用に伴う炭化物のわずかな析出が観察された（たとえば図 10 の 2-2）が、結晶粒内への析出は見られなかった。また、クリープポイドも観察されなかった。これらの

特徴は、529°Cにおいて約 6,300 時間使用された SUS304 の組織としては通常の組織であると言える。

### (3) PBTL 模擬補修継手

PBTL 模擬補修継手の新材側母材の組織を図 13 に、HAZ およびボンド部の組織を図 14 に、それぞれ示す。これらの図において、新材側の母材から HAZ にかけて、炭化物等の析出は観察されなかった。PBTL 模擬補修継手の経年化材側 HAZ およびボンド部の組織を図 15 に示す。これらの図において、ボンド部には補修溶接時の入熱による炭化物の再固溶組織が観察され、HAZ の結晶粒界にはわずかな炭化物の析出が観察された（図 15 の 5-2）。クリープポイドは観察されなかった。

### (4) PBTL 経年化継手

PBTL 経年化継手の母材、HAZ およびボンド部の組織を図 16～18 に示す。これらの図において、母材から HAZ にかけての結晶粒界に、高温長時間使用に伴う炭化物のわずかな析出が観察された（たとえば図 16 の 1-2）。これは、530～560°Cにおいて約 8,300 時間使用された SUS304 の組織としては通常の組織であると言える。なお、クリープポイドは観察されなかった。

### (5) Phenix 経年化補修継手

Phenix 経年化補修継手の低経年化材（316LSS）側母材の組織を図 19 に、低経年化材側 HAZ およびボンド部の組織を図 20 に、高経年化材（304SS）側 HAZ およびボンド部の組織を図 21 にそれぞれ示す。これらの図において、低経年化材側の母材から HAZ にかけてクリープポイドの発生や炭化物等の析出は観察されず、今回の光学顕微鏡による観察の範囲では、ほとんど処女材と変らない状態と言えた。また、高経年化材側ボンド部近傍の HAZ には、補修溶接時の入熱による炭化物の再固溶組織が観察され、補修溶接後の使用でそれらの炭化物が再析出した様子はほとんど見られなかった（図 21 の 4-3）。一方、高経年化材側ボンド部から少し離れた HAZ の結晶粒界には、わずかな炭化物の析出が観察された（図 21 の 5-2）。低経年化材側および高経年化材側の HAZ、母材いずれにおいてもクリープポイドは観察されなかった。

#### (6) Phenix 経年化継手

Phenix 経年化継手の母材、HAZ およびボンド部の組織を図 22～24 に示す。これらの図において、母材から HAZ にかけての結晶粒界に、高温長時間使用に伴う炭化物の析出・成長が観察される（図 22 の 1-2、図 23 の 3-3）が、結晶粒内への析出は見られなかった。クリープポイドは観察されなかった。

#### (7) ナトリウム接液面近傍の金属組織観察結果

今回観察を行った供試材は、すべて高温のナトリウムと長時間接していた履歴を有する。そこで、高温ナトリウム環境が材料の組織に及ぼす影響を明らかにするために、これらの供試材のナトリウム接液面近傍の金属組織を観察した。使用時間が最も長い Phenix 経年化継手において、10～20 $\mu$ m 程度の変質層が確認できたが、母材、HAZ あるいは溶接金属部の間に表面変質における差異が認められなかった。これらの写真は参考資料として巻末に添付する。

### 4.2 ビッカース硬さ試験結果

ビッカース硬さ試験の結果を図 25～30 に示す。溶接金属部分の硬さはボンド部から 1.5mm の領域しか試験していないため、これらの図の横軸“0”近傍に試験点の空白領域が存在することに注意されたい。

#### (1) SITR 模擬補修継手

SITR 模擬補修継手に対するビッカース硬さ試験結果を図 25 に示す。この図から、母材の硬さは、新材側、経年化材側でほぼ同等であることがわかる。一方、HAZ の硬さは、新材側 HAZ の硬さが経年化材側 HAZ のそれに比較してわずかに大きく、継手における硬さ分布は左右非対称となっている。

#### (2) SITR 経年化継手

SITR 経年化継手に対するビッカース硬さ試験結果を図 26 に示す。この図から、経年化材 (A) 側および経年化材 (B) それぞれの母材から HAZ にかけての硬さの分布は、板厚中央部で経年化材 (A) の硬さがやや大きい傾向が見られるが、ほぼ左右対称となっている。

#### (3) PBTL 模擬補修継手

PBTL 模擬補修継手に対するビッカース硬さ試験結果を図 27 に示す。この図から、溶接部近傍での硬さの変化は、SITR 模擬補修継手に比較して小さいことがわかる。新材側の母材から HAZ にかけての硬さは、経年化材側母材のそれに比較してわずかに大きい傾向が見られる。

#### (4) PBTL 経年化材継手

PBTL 経年化継手に対するビッカース硬さ試験結果を図 28 に示す。この図から、溶接部近傍での硬さの変化は、SITR 経年化継手に比較して小さいことがわかる。経年化材 (A) 側および経年化材 (B) それぞれの母材から HAZ にかけての硬さの分布は、経年化材 (A) の硬さがやや大きい傾向が見られる。

#### (5) Phenix 経年化補修継手

Phenix 経年化補修継手に対するビッカース硬さ試験結果を図 29 に示す。この図から、低経年化材側 (316LSS) の母材から HAZ にかけての硬さが高経年化材側 (304SS) のそれに比較してわずかに小さく、継手における硬さ分布は左右非対称となっている。

#### (6) Phenix 経年化継手

Phenix 経年化継手に対するビッカース硬さ試験結果を図 30 に示す。この図から、溶接部近傍での硬さの変化は、Phenix 経年化補修継手に比較して小さいことがわかる。経年化材 (A) 側および経年化材 (B) それぞれの母材から HAZ にかけての硬さの分布は、ナトリウム接液側表面より 3/4t (大気側表面より 1/4t) のラインで経年化材 (A) の硬さがやや大きい傾向が見られるが、ほぼ左右対称となっている。



## 5. 考 察

### (1) 現地補修溶接後の使用が補修溶接部組織に及ぼす影響

今回、金属組織観察と硬さ試験を行った供試材のうち、実機運用途中で現地補修溶接され、その後も実機で使用された経歴を持つものは、Phenix 経年化補修継手だけである。この継手の低経年化材 (316LSS) 側 HAZ ならびに高経年化材 (304SS) 側 HAZ の組織の比較、および高経年化材と同じ熱履歴を受けた Phenix 経年化継手の HAZ の組織を比較することにより、経年化した材料における炭化物等の析出挙動に及ぼす現地補修時の溶接入熱の影響について考察する。

Phenix 経年化補修継手の低経年化材側 HAZ (図 20) と高経年化材側 HAZ (図 21) の組織を比較すると、低経年化材側の結晶粒界には析出物等が見られなかったのに対し、高経年化材側の結晶粒界には長時間使用に伴う炭化物の析出が観察された。次に、Phenix 経年化補修継手の高経年化材側 HAZ (図 21) と高経年化材と同じ熱履歴を受けた Phenix 経年化継手の組織 (図 24) を比較すると、前者は後者に比べて、結晶粒界に析出した炭化物密度が大幅に小さい。両者の総使用時間は同じであることから、ここで見られた違いは、いったん結晶粒界に析出した炭化物が、現地補修溶接の入熱によって再固溶したことによるものと考えられる。一般的に、炭化物が凝集・粗大化すると靱性や耐食性の低下が懸念されるが、今回実施した観察の範囲では、Phenix 経年化補修継手の高経年化材側 HAZ に、Phenix 経年化継手 HAZ と比較して炭化物の凝集・粗大化はなく、むしろ上述したような炭化物の再固溶が見られた。このことから、今回の観察の範囲では、現地補修溶接の入熱は、結晶粒界に析出した炭化物の補修溶接後の挙動に悪い影響を及ぼさないことが示唆された。

次に、硬さの変化に着目して、経年化材の健全性に及ぼす現地補修時の溶接入熱の影響について考察する。

Phenix 経年化補修継手の高経年化材側の母材から HAZ にかけて、母材の Hv ≒ 170 程度から HAZ の Hv ≒ 200 程度まで硬さの増加が見られる (図 29) のに対し、Phenix 経年化継手の母材から HAZ にかけての硬さは Hv ≒ 170~180 程度でほぼ平坦 (図 30) であった。Phenix 経年化補修継手において見られた HAZ にお

ける硬さの増加が、金属組織観察において見られた炭化物の溶接入熱による再固溶に起因するものであるのかについては現状では不明である。このような硬さ分布の違いの原因分析も含め、今後、電子顕微鏡等を用いたさらに詳細な金属組織観察や機械的試験等を実施し、それらの結果を踏まえて、経年化した補修溶接継手の健全性見通しに関する検討を行う必要があるといえる。

## (2) SITR 経年化継手母材の経年化前後の硬さの変化

今回、硬さ試験を行った供試材のうち、使用前の母材の硬さが分かっているものは SITR 模擬補修継手および SITR 経年化継手だけである。これらの継手について、長時間使用に伴う硬さの変化について考察する。

SITR 模擬補修継手の新材側母材および経年化材側母材のミルシートに記された硬さは、表3に示したとおり、ブリネル硬さでそれぞれ HB=152 および HB=135 であった。これを、ビッカース硬さに換算する<sup>[3]</sup>と、それぞれ Hv≒160 程度および Hv≒140 程度となり、新材側母材の使用前の硬さは、経年化材側母材のそれよりも大きいことがわかる。一方、図 25 から分かるように、SITR 模擬補修継手の新材側母材と経年化材側母材の硬さは、ほぼ同等で Hv≒170~180 程度であった。また、SITR 経年化継手の母材の硬さも、SITR 模擬補修継手の経年材側母材とほぼ同等であった。ブリネル硬さからビッカース硬さのような浅いくぼみをつけるタイプの試験値に換算するのは、くぼみの深さの少なくとも 10 倍の深さまで均一な硬さになっていることなどに留意する必要があるとされている<sup>[3]</sup>ものの、使用前には Hv で約 20 あった新材の硬さと差がなくなっていることを考えれば、経年化材側母材の硬さは、529℃×約 6,300 時間の使用により変化したことになる。経年化材の金属組織観察においてクリープボイド等は観察されておらず、SITR における 529℃×約 6,300 時間の使用期間中に構造材が受けたクリープ損傷が大きかったとは考えにくい。しかし、構造材の硬さは単純な熱時効によっては変化しないがクリープ損傷が重畳する場合に変化するとの例<sup>[4]</sup>もあり、今後さらに検討を要すると考えられる。

### (3) SITR 模擬補修継手における非対称な硬さ分布の原因

図 25 に示す SITR 模擬補修継手に対するビッカース硬さ試験結果において、HAZ の硬さは、新材側 HAZ の硬さが経年化材側 HAZ のそれよりもわずかに大きかった。この硬さの違いの原因として、以下が考えられる。すなわち、4.1(1) で述べたとおり、図 6 に示す新材側 HAZ の金属組織と、図 7 に示す経年化材側 HAZ のそれとを比較すると、新材側 HAZ には広い範囲でマルテンサイト相が見られたのに対し、経年化材側 HAZ ではほとんど見られなかった。観察視野数は限られるものの、新材側 HAZ におけるマルテンサイト相の出現頻度は経年化材側 HAZ におけるそれよりも小さいと考えることができる。このことが硬さの非対称な分布を生み出した可能性があるといえる。

### (4) PBTL 模擬補修継手の HAZ の硬さ

図 27 に示す PBTL 模擬補修継手の新材側の母材から HAZ にかけての硬さは、経年化材側のそれに比較してわずかに大きい傾向が見られる。図 14 の 2-1 に示す新材側の HAZ 組織と、図 15 の 5-1 に示す経年化材側の HAZ 組織の間に顕著な違いが見られないことから、ここで見られた硬さの違いは、木村ら<sup>14)</sup>の指摘のように、主として転位密度の変化によると考えられるが、今後、電子顕微鏡等を用いたさらに詳細な観察や分析を実施して確認する必要がある。

## 6. 結 言

機器試験用ナトリウムループから採取した構造材に新しい構造材を溶接して製作した模擬補修継手、同ループから採取した経年化継手、Phenix の 2 次冷却系配管から採取した経年化補修継手および経年化継手に対する光学顕微鏡による金属組織観察とビッカース硬さ試験を実施した。これらの結果に基づく考察の結果、現地補修溶接継手および経年化溶接継手の健全性について以下のことが分かった；

- (1) 実機運用途中で現地補修溶接され、その後も実機で使用された経歴を持つ Phenix 経年化補修継手の HAZ 組織を観察したところ、経年化補修継手、経年化継手の両方で結晶粒界に炭化物の析出が観察されたが、経年化補修継手 HAZ に、経年化継手 HAZ と比較して炭化物の凝集・粗大化は見られず、現地補修溶接入熱によると考えられる炭化物の再固溶が見られた。このことから、今回の観察の範囲では、現地補修溶接の入熱は、経年化した材料の結晶粒界に析出した炭化物の補修溶接後の挙動に悪い影響を及ぼさないことが示唆された。
- (2) SITR 模擬補修継手においては、経年化材側の母材から HAZ にかけて硬さの増加が見られたのに対し、経年化継手における硬さの分布はほぼ平坦であった。このような硬さ分布の違いの原因分析も含め、今後、電子顕微鏡等を用いたさらに詳細な金属組織観察や機械的試験等を実施する必要があると考えられる。
- (3) SITR 模擬補修継手および経年化継手の母材において、長時間使用によると考えられる硬さの変化が見られた。これらの組織にクリープボイド等は観察されていないことから、クリープ損傷は大きくなかったとは考えられるが、単純な熱時効による硬さ変化は小さいとの研究例もあり、今後さらに検討を要する。
- (4) SITR 模擬補修継手において新材側 HAZ の硬さが経年化材側 HAZ のそれよりもわずかに大きかった。この原因は、経年化材側に比べ新材側で多く観察されたマルテンサイト相である可能性が考えられる。

- (5) PBTL 模擬補修継手において新材側 HAZ の硬さが経年化材側のそれに比較してわずかに大きかった。これは、主として転位密度の変化によると考えられるが、今後、電子顕微鏡等を用いたさらに詳細な観察や分析を実施して確認する必要がある。

## 7. 謝辞

本研究を実施するに当たり、要素技術開発部・新材料研究 Gr.・安藤勝訓研究員および同 Gr.・富田正人氏（常陽産業株式会社）に多大の協力をいただきました。ここに、記して感謝の意を表します。

## 8. 参考文献

- [1] 小林俊郎、梶野利彦、“鉄鋼材料工学”、新日本鑄鍛造協会（1983）。
- [2] ステンレス協会編、“ステンレス鋼便覧（第3版）”、日刊工業新聞社（1995）。
- [3] SAE J 417（1983）。
- [4] 木村和成、藤山一成ほか、“改良 9Cr-1Mo 鋼部材のクリープ損傷評価（第1報、硬さ測定による母材の評価）”、機械学会論文集 A 編、Vol.66、No.647、pp.158（2000）。

表1 供試材の化学成分

サンプル	材質	種別	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	N	B
SITR 模擬補修継手 / 経年化継手	①SUS304	新材	0.05	0.51	0.9	0.033	0.004	18.05	8.08	—	—	—	—	—
		経年化材	0.06	0.55	0.94	0.031	0.008	18.38	8.93	—	—	—	—	—
PBTL 模擬補修継手 / 経年化継手	③SUS304	新材	0.02	0.44	1.04	0.031	0.004	18.13	9.16	—	—	—	—	—
		経年化材	0.05	0.42	1.63	0.034	0.008	18.75	9.13	—	—	—	—	—
Phenix 経年化補修継手 / 経年化継手	⑤316LSS	低経年化材	0.027	0.39	1.63	0.029	0.001	17.58	12.14	2.54	0.24	0.13	0.065	0.0005
		高経年化材	0.062	0.68	1.93	0.027	0.014	18.42	10.11	—	—	—	—	—

(wt. %)

注) 1. ①, ③, ④は、溶鋼分析値。

2. ②, ⑤, ⑥は、溶鋼分析値、製品分析値のいずれかば不明。

3. ⑥は、8個の素材分析値の平均値。

表2 供試材の熱処理条件

サンプル	材質	種別	熱処理
SITR 模擬補修継手 / 経年化継手	SUS304	新材	1100°C × 25.0min. × W.Q.
		経年化材	1100°C × 5h × W.Q.
PBTL 模擬補修継手 / 経年化継手	SUS304	新材	1100°C × 5min. × W.Q.
		経年化材	1100°C × 13min. × W.Q.
Phenix 経年化補修継手 / 経年化継手	316LSS	低経年化材	1120°C ± 15°C × 15min. × W.Q.
		高経年化材	不明



表3 供試材の機械的性質

サンプル	材質	種類	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%)	ブリネル硬さ (HB)	ビッカース硬さ (HV)
SITR模擬補修継手 ／経年化継手	SUS304	新材	256	626	66	152	160
	SUS304	経年化材	206	559	71	135	140
PBTL模擬補修継手 ／経年化継手	SUS304	新材	256	577	59	不明	不明
	SUS304	経年化材	284	617	48	不明	不明
Phenix 経年化補修継手／ 経年化継手	316LSS	低経年化材	270	574	69	不明	不明
	304SS	高経年化材	不明	不明	不明	不明	不明

注) HB(ブリネル硬さ)からHV(ビッカース硬さ)への換算は、SAE J 417<sup>[3]</sup>に基づく。

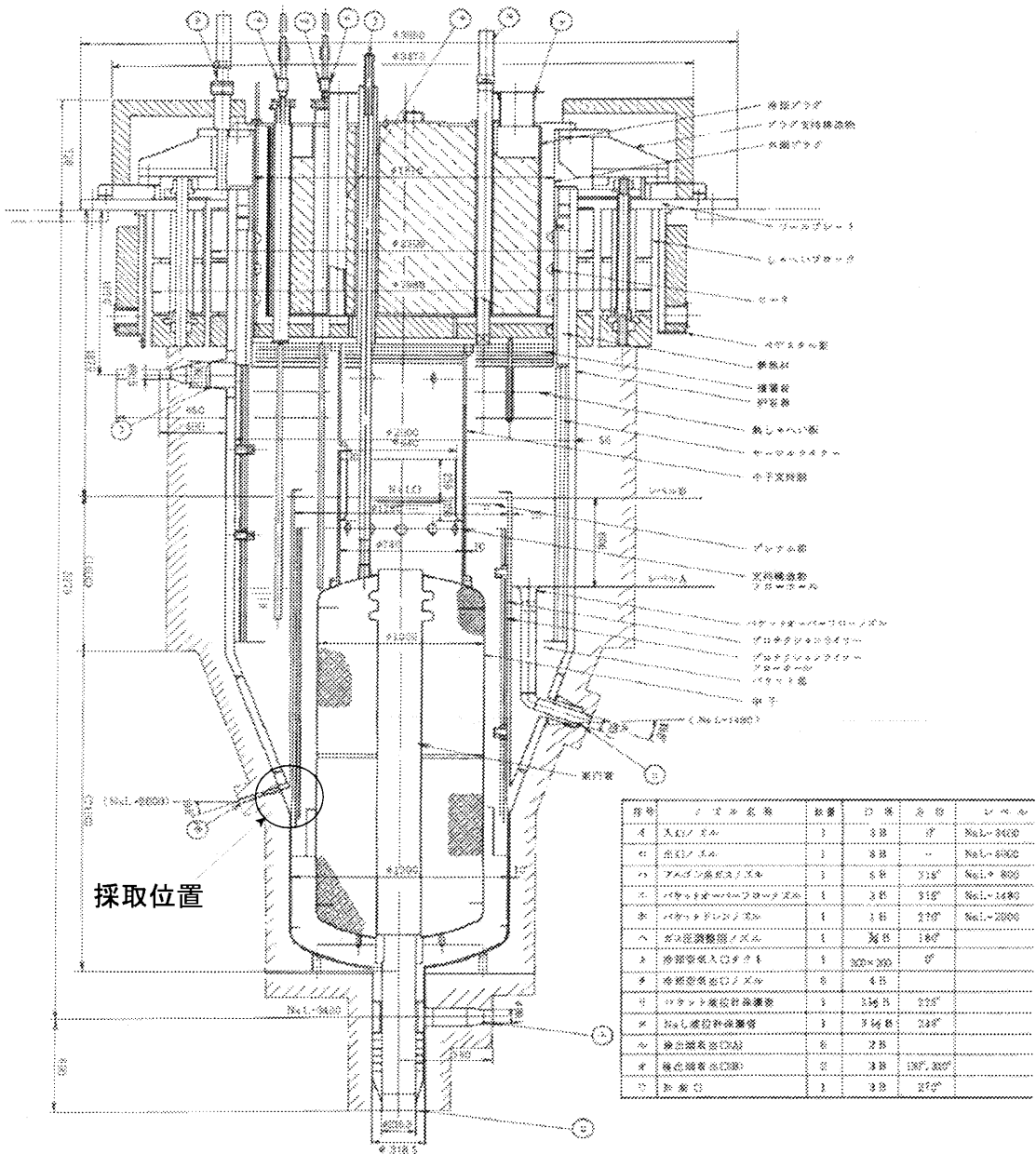
表4 供試材の溶接条件

サンプル 種類	SITR		PBTL		Phenix	
	模擬補修継手	経年化継手	模擬補修継手	経年化継手	経年化補修継手	経年化継手
溶接方法	自動TIG(ST)	不明	手動TIG(T)	不明	TIG	TIG
ワイヤ	YT-308V	不明	YT-308V	不明	16-8-2	16-8-2
ワイヤ径(mm)	Φ0.9	不明	Φ1.6、2.4	不明	2.5	2.5
インサート	—	不明	WELIR 308	不明	—	—
溶接機	直流TIG	不明	直流TIG	不明	不明	不明
シールドガス	アルゴン	不明	アルゴン	不明	不明	不明
ガス流量 (l/min)	10~20	不明	5~15	不明	不明	10
バックシールドガス	アルゴンガス	不明	アルゴンガス	不明	不明	不明
溶接姿勢	下向き	不明	全姿勢	不明	横向き	不明
極性	DC-SP	不明	DC-SP	不明	不明	不明
電極(タングステン)	Φ3.2	不明	Φ2.4	不明	不明	不明
電流(A)	120~240	不明	90~120	不明	不明	140~160
電圧(V)	8.3~8.5	不明	11	不明	不明	28~29
溶接速度(cm/min)	6~8(cm/min)	不明	6~8(cm/min)	不明	不明	不明

表5 溶接金属の化学成分

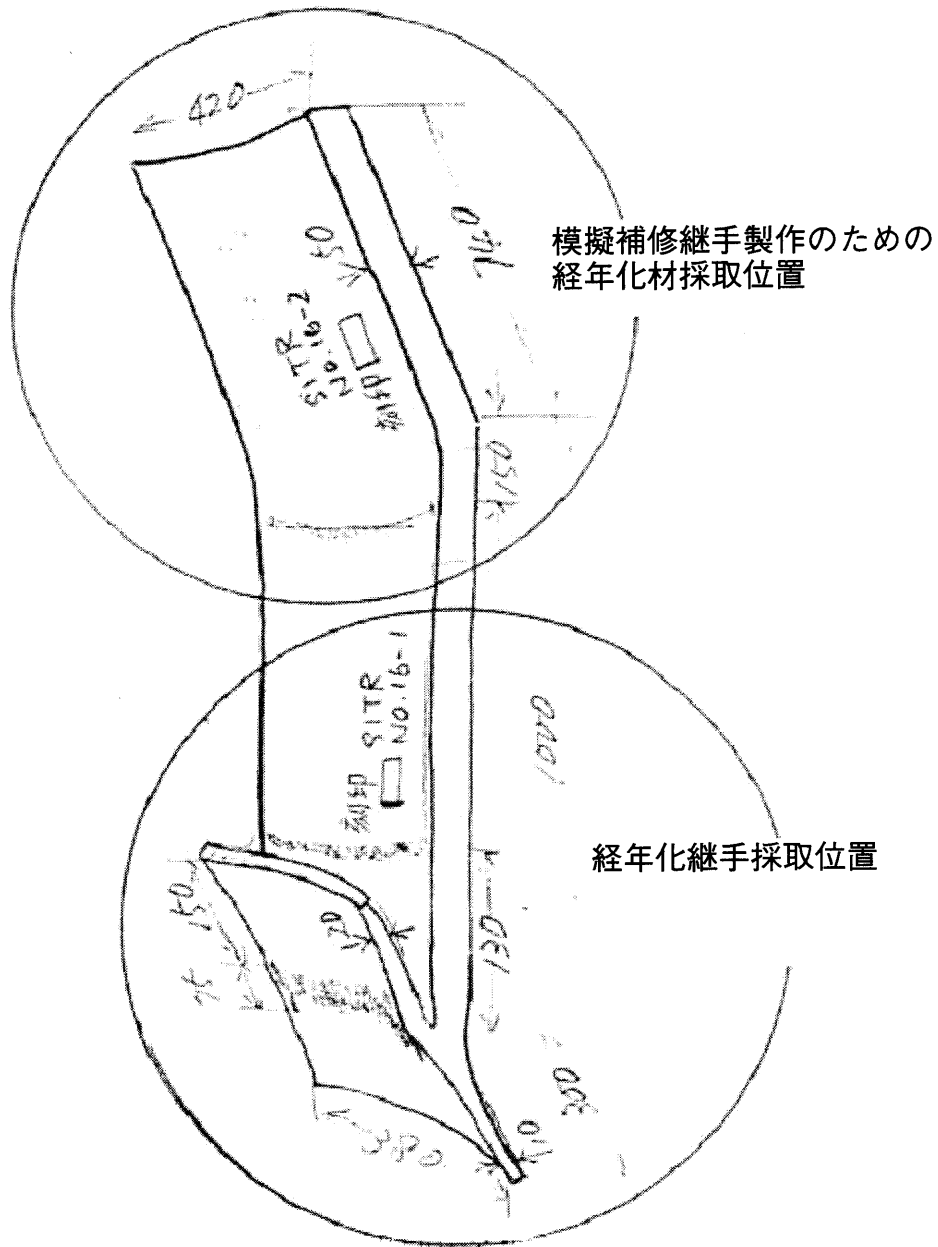
(wt. %)

サンプル	種類	溶接金属	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SITR	模擬補修継手	YT-308V	0.05	0.27	1.65	0.03	0.003	9.58	19.6	0.01
	経年化継手	YT-308V	-	-	-	-	-	-	-	-
PBTL	模擬補修継手	YT-308V	0.05	0.25	1.76	0.029	0.004	9.92	20.13	-
	経年化継手	YT-308V	-	-	-	-	-	-	-	-
Phenix	経年化補修継手	16-8-2	0.04~ 0.08	<0.5	<2	0.01	0.01	7.5~9	15~17	1.5~2
	経年化継手	16-8-2	0.04~ 0.08	<0.5	<2	<0.01	<0.01	7.5~9	15~17	1.5~2



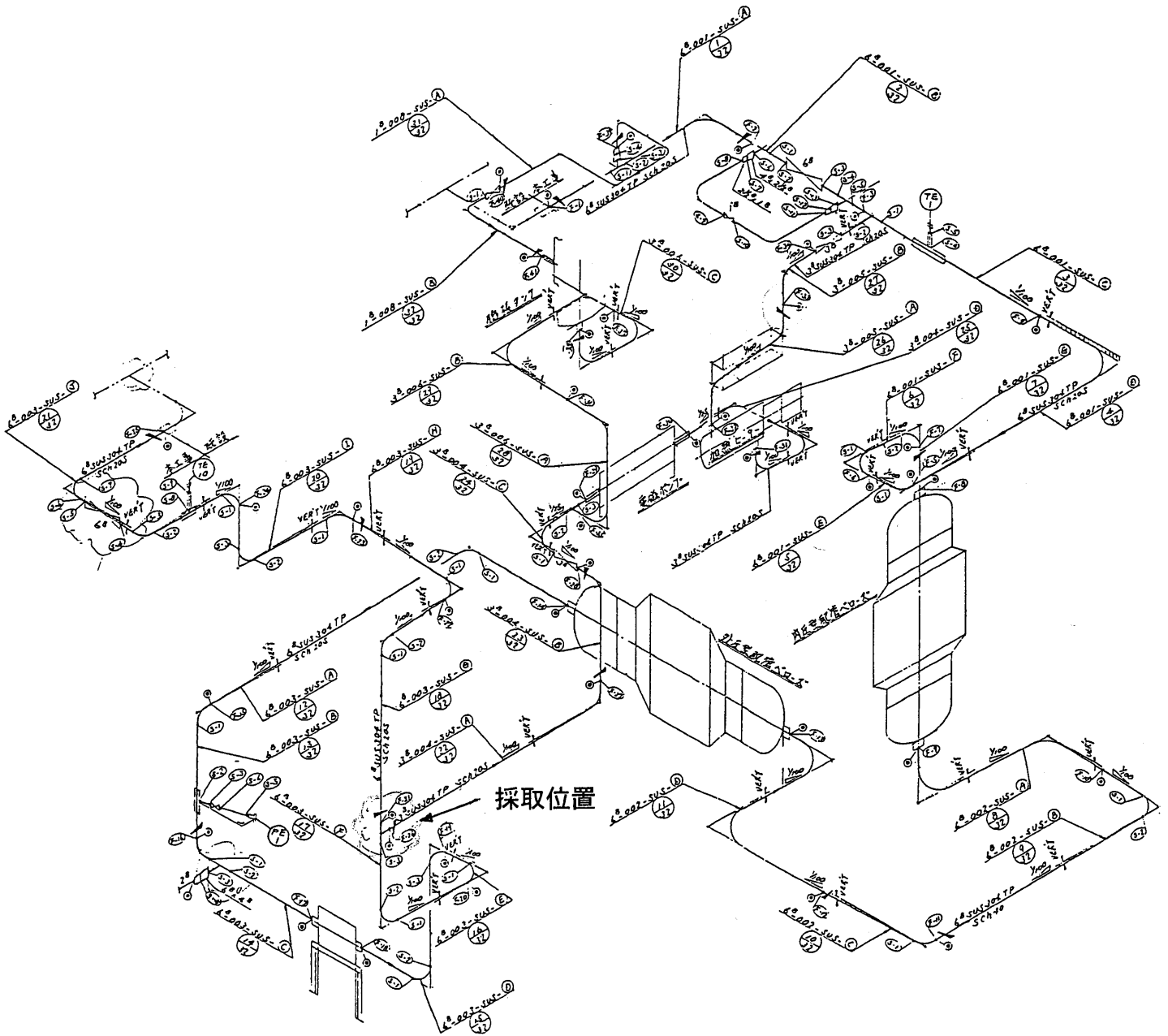
(a) SITR全体図

図1 SITRサンプリング材



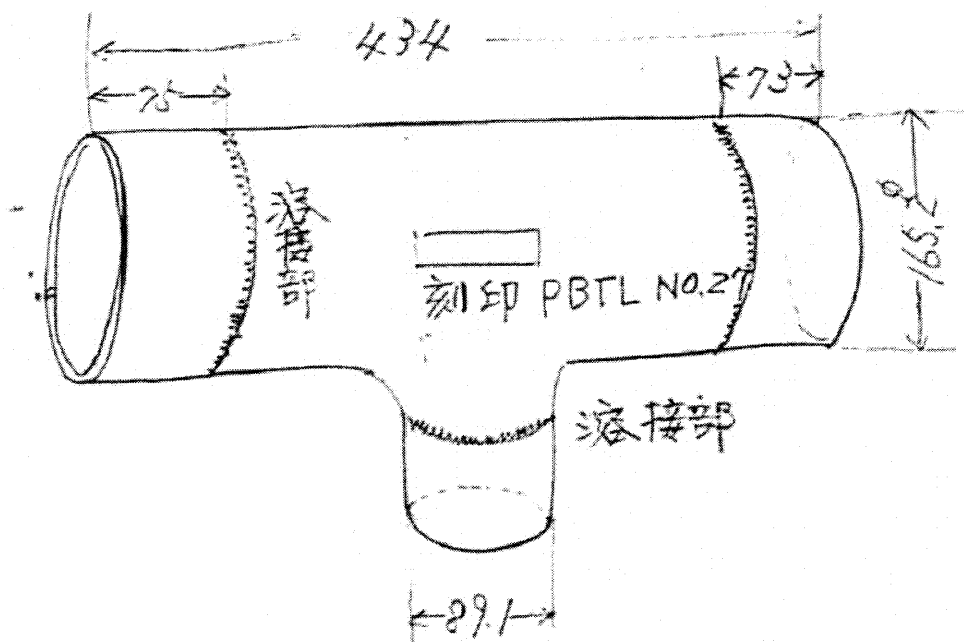
(b) サンプル材の形状・寸法

図1 (つづき) SITRサンプル材



(a) PBTL 全体図

図2 PBTL サンプルング材



(b) サンプルング材の形状・寸法

図2 (つづき) PBTLサンプルング材

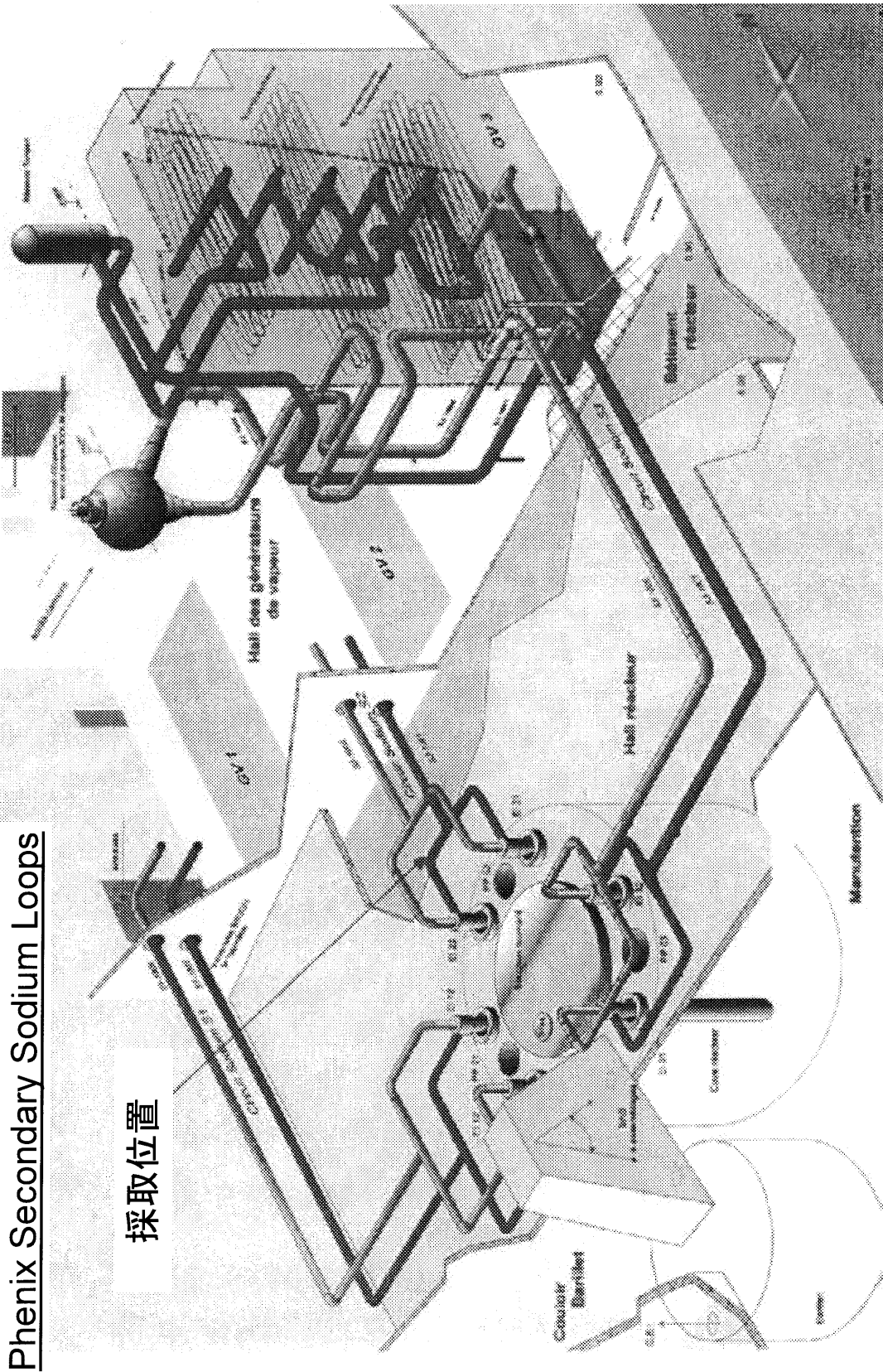
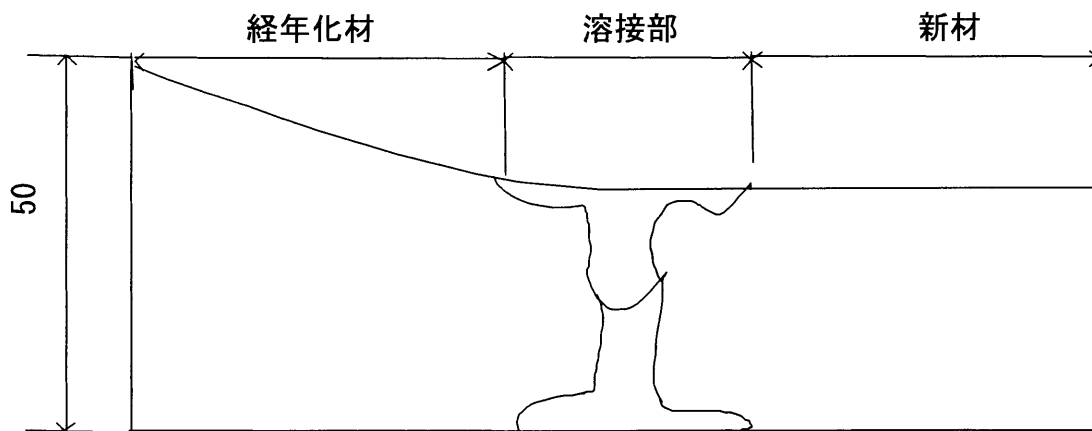


图3 Phenix 2次系全体图

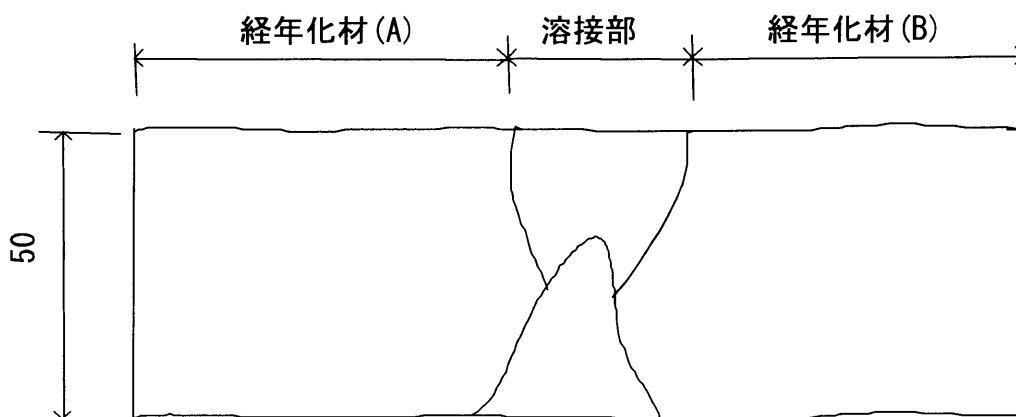
### Phenix Secondary Sodium Loops

採取位置

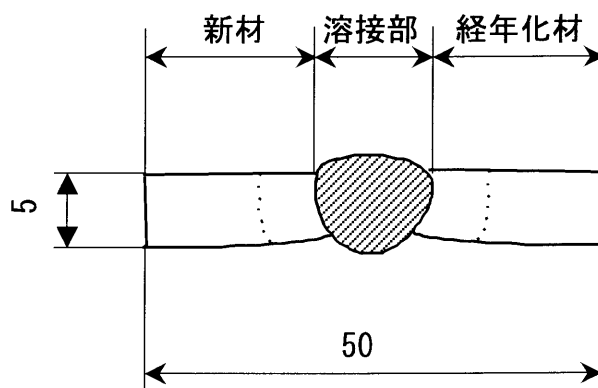




(a) SITR模擬補修継手

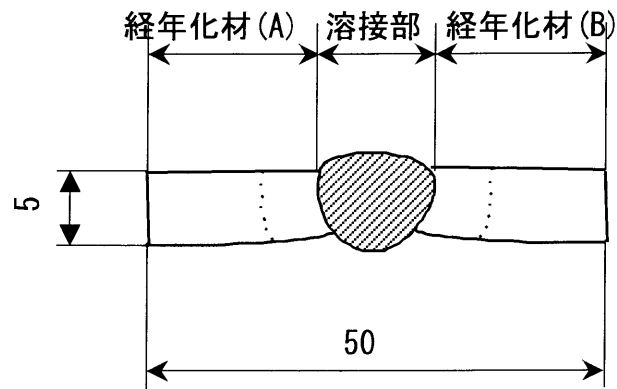


(a) SITR経年化継手

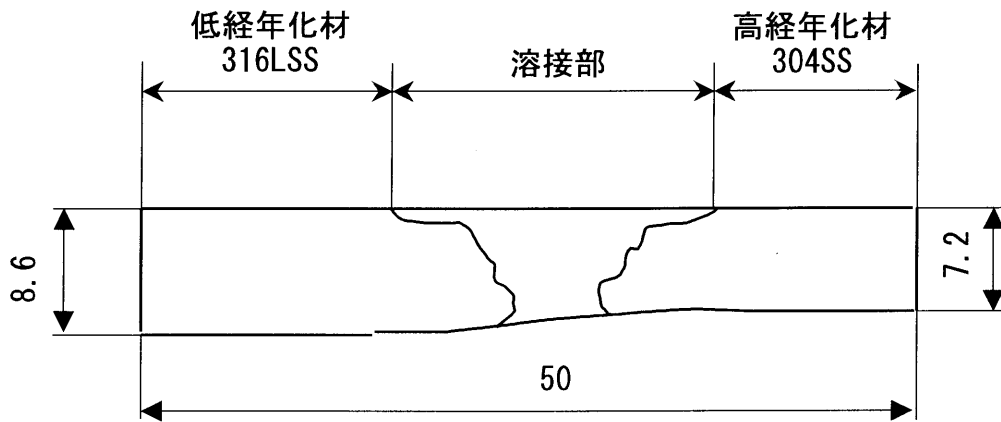


(c) PBTL模擬補修継手

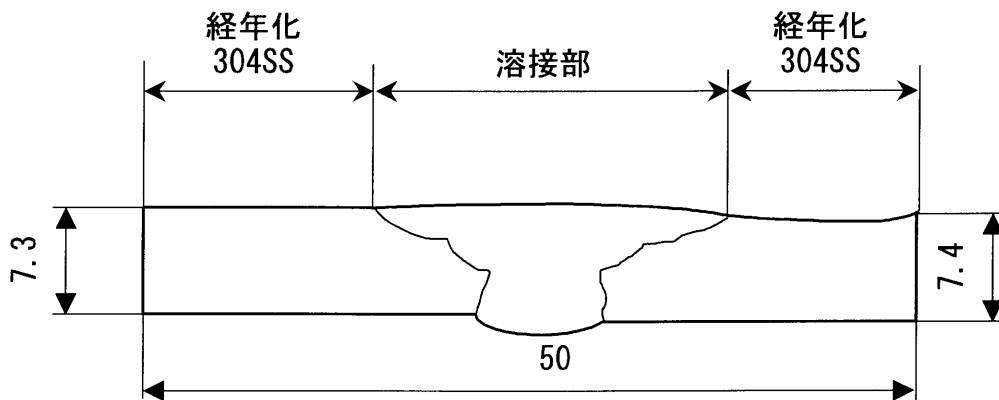
図4 金属組織観察および硬さ試験用試験片



(d) PBTL経年化継手

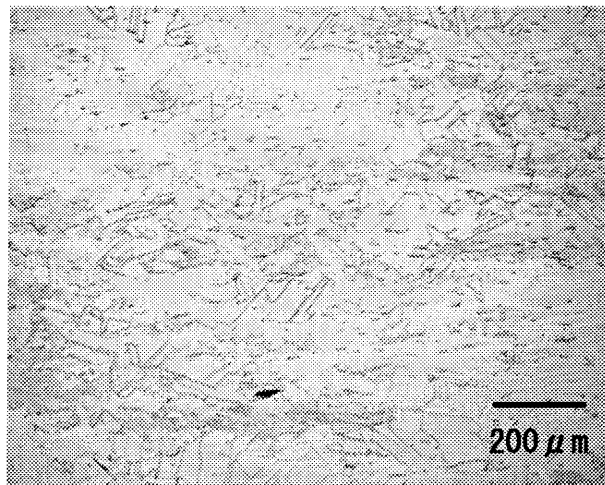
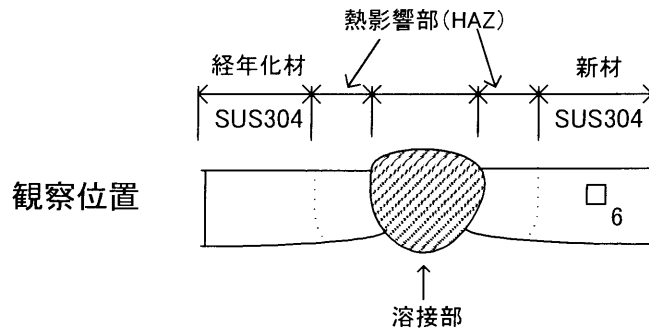


(e) Phenix経年化補修継手

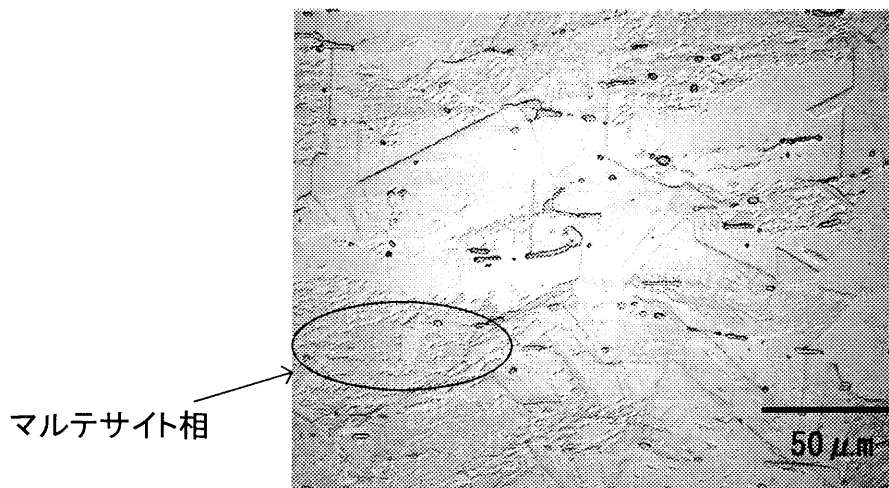


(f) Phenix経年化継手

図4 (つづき) 金属組織観察および硬さ試験用試験片

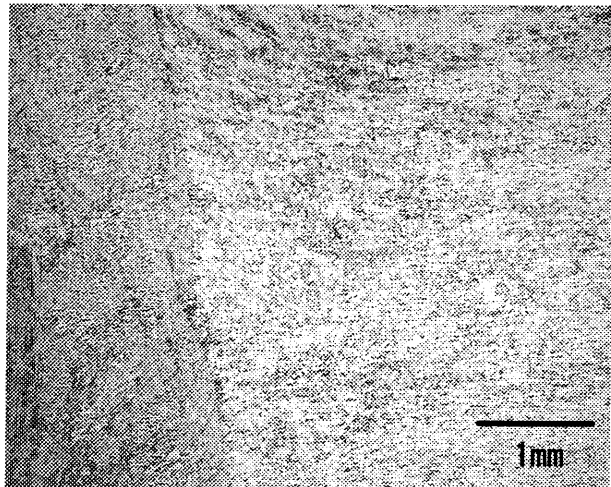


6-1 新材側母材

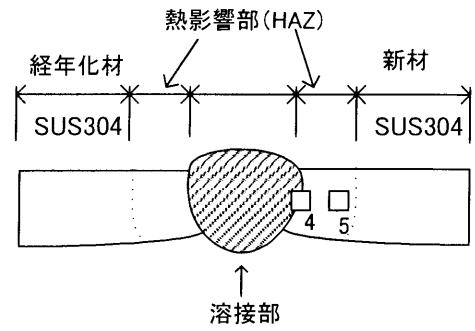


6-2 新材側母材

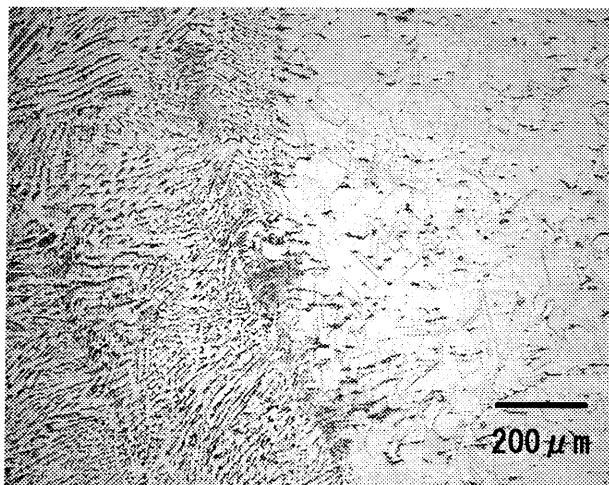
図5 SITR 模擬補修継手新材側母材のミクロ組織



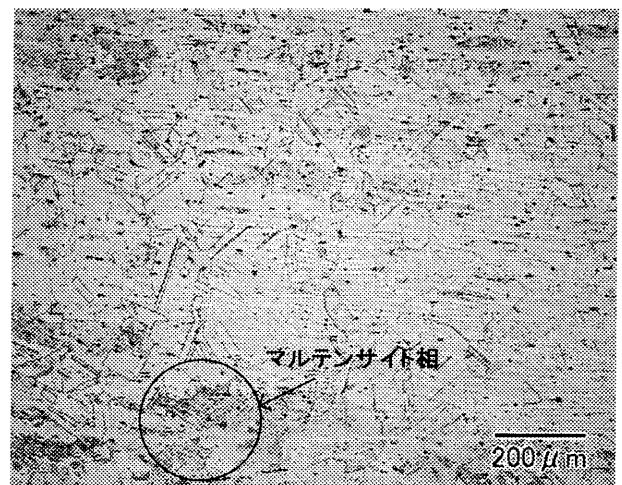
4-1 新材側ボンド部



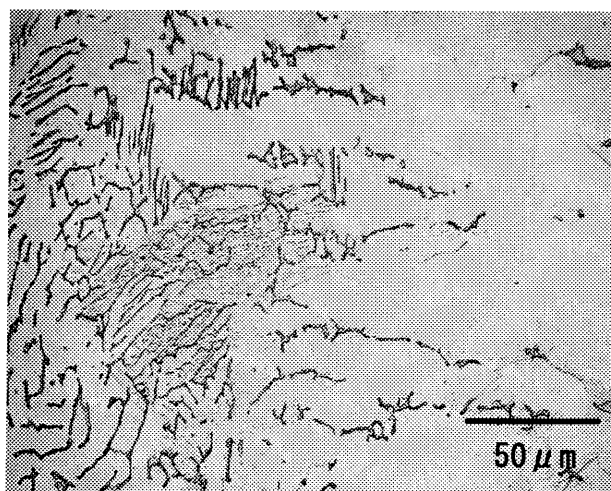
観察位置



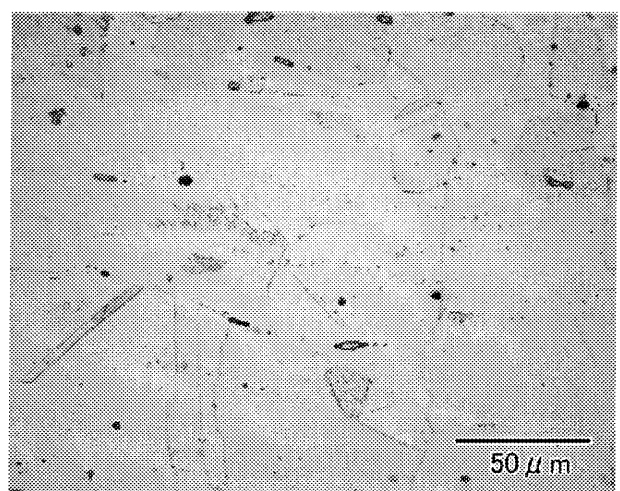
4-2 新材側ボンド部



5-1 新材側HAZ

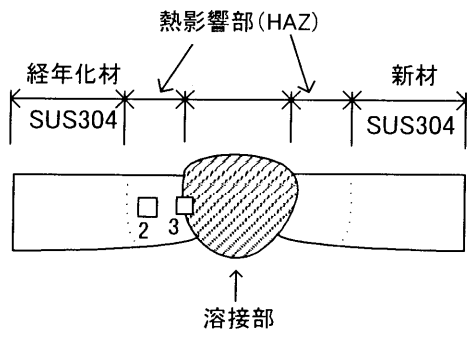


4-3 新材側ボンド部

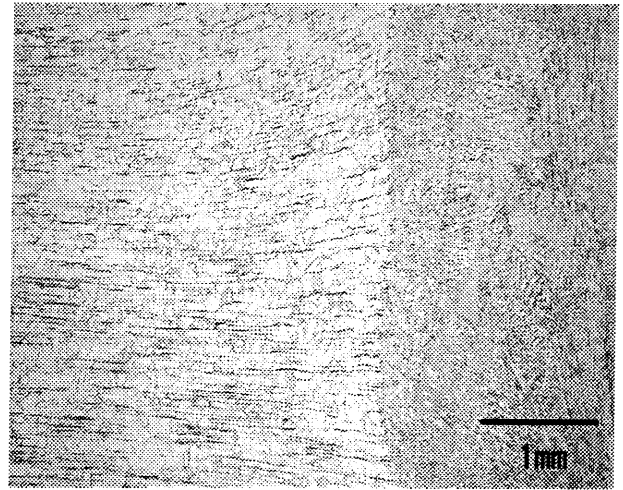


5-2 新材側HAZ

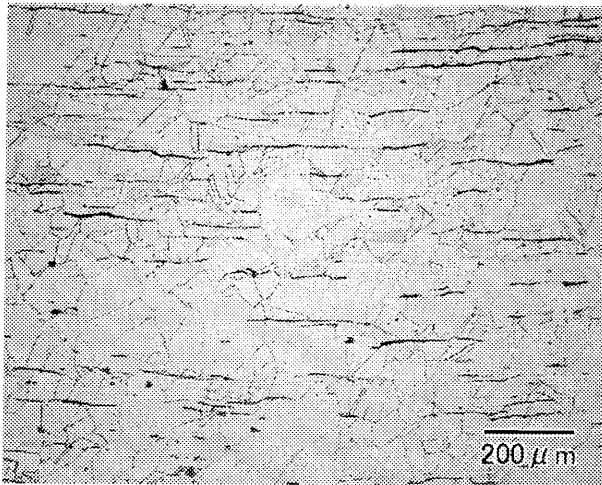
図6 SITR 模擬補修継手新材側溶接部近傍のミクロ組織



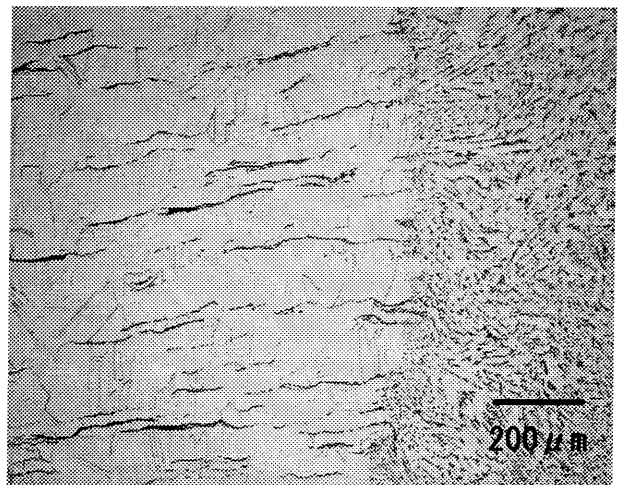
観察位置



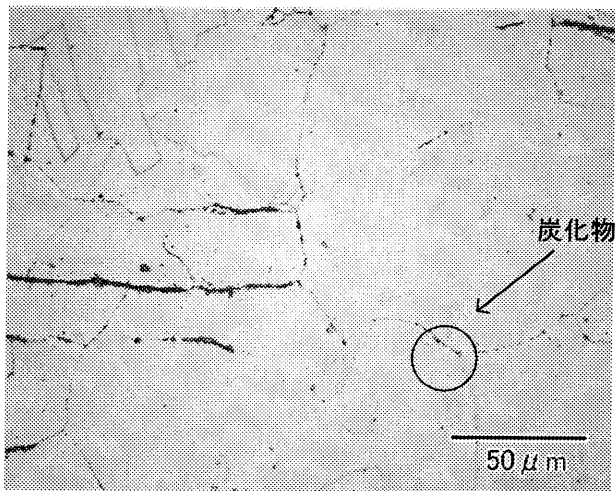
3-1 経年化材側ボンド部



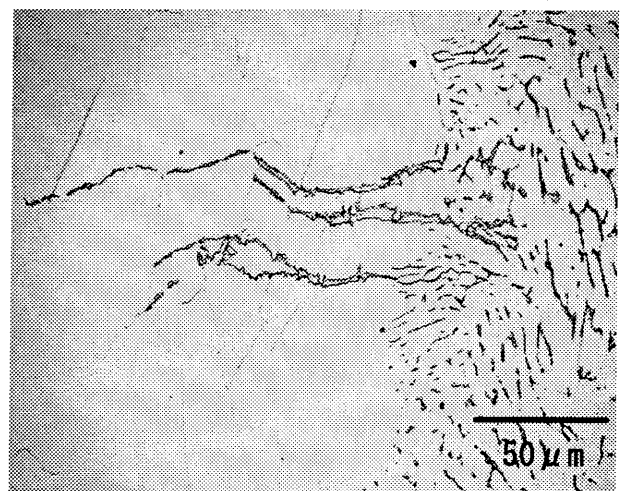
2-1 経年化材側HAZ



3-2 経年化材側ボンド部

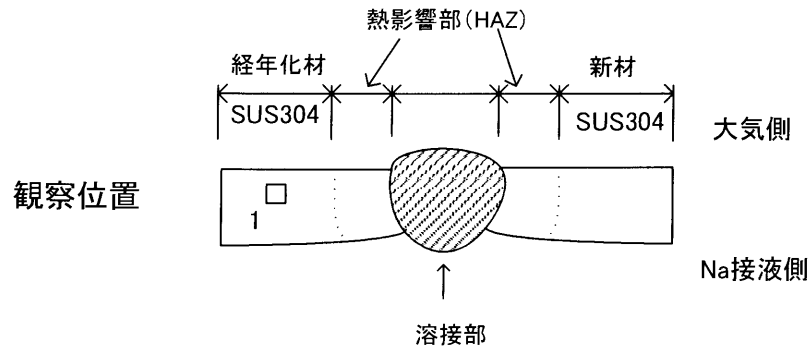


2-2 経年化側HAZ

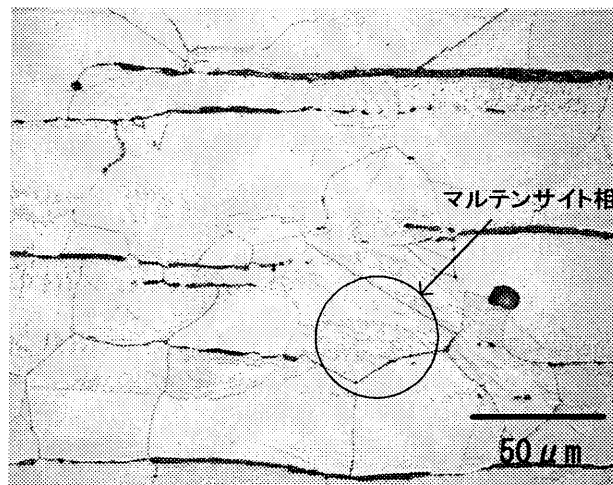


3-3 経年化材側ボンド部

図7 SITR 模擬補修継手経年化材側溶接部近傍のミクロ組織

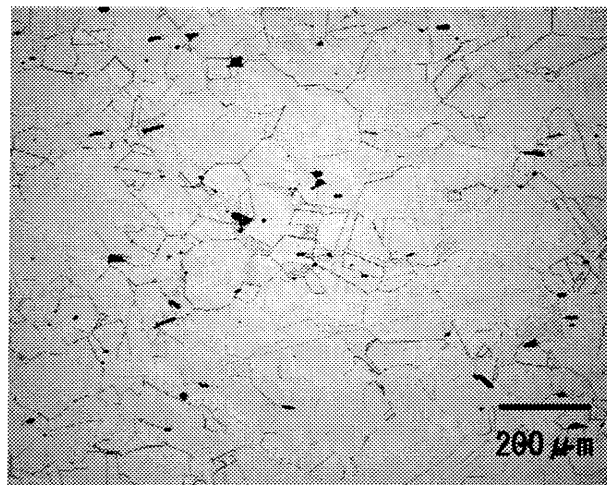
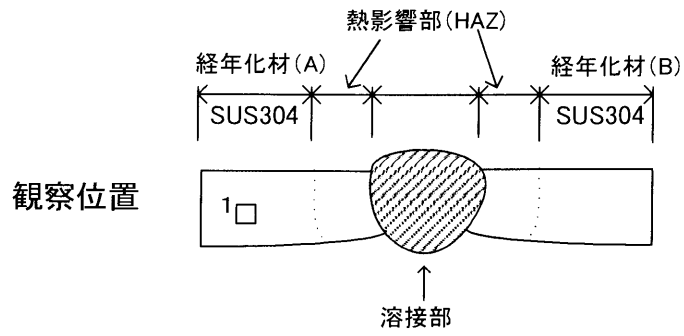


1-1 経年化材側母材

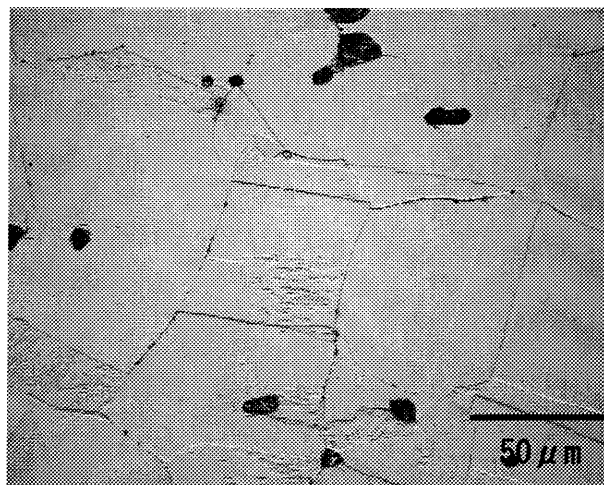


1-2 経年化材側母材

図8 SITR 模擬補修継手経年化材側母材のミクロ組織

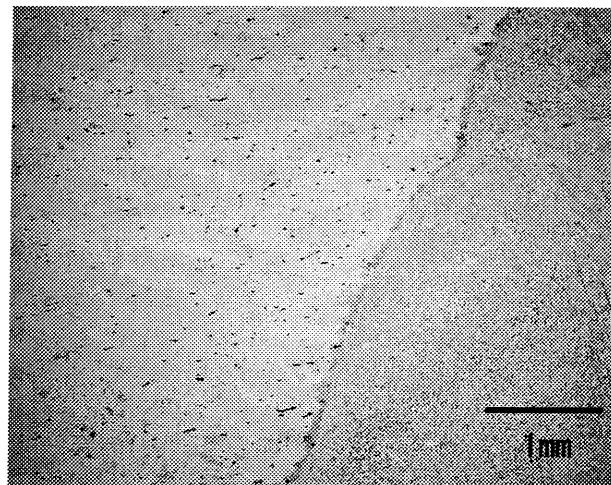
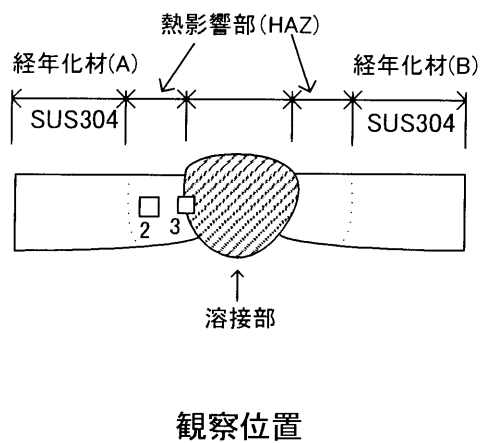


1-1 経年化材(A)側母材

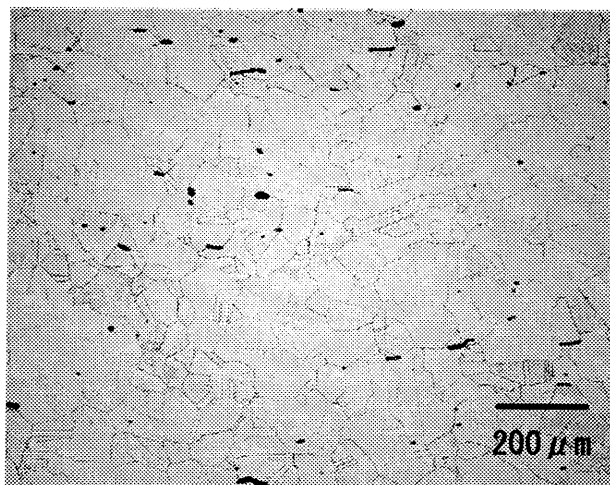


1-2 経年化材側(A)母材

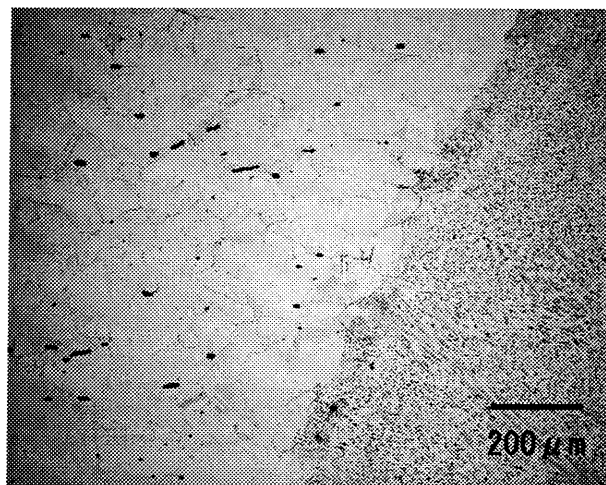
図9 SITR 経年化継手経年化材(A)側母材のミクロ組織



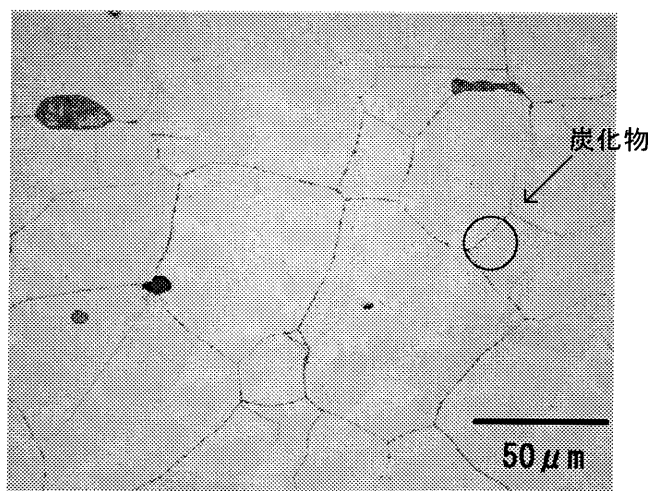
3-1 経年化材(A)側ボンド部



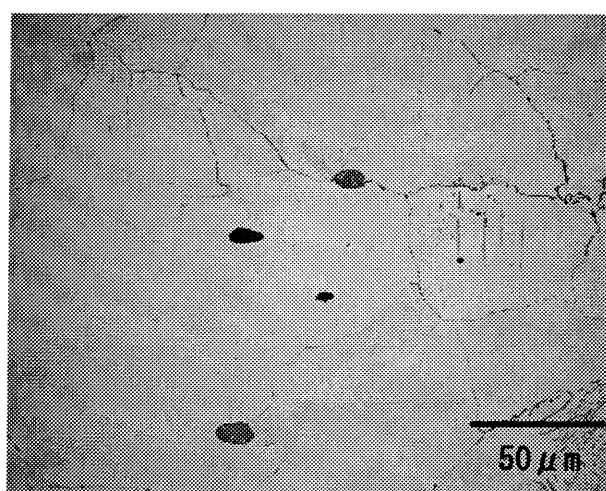
2-1 経年化材(A)側HAZ



3-2 経年化材(A)側ボンド部



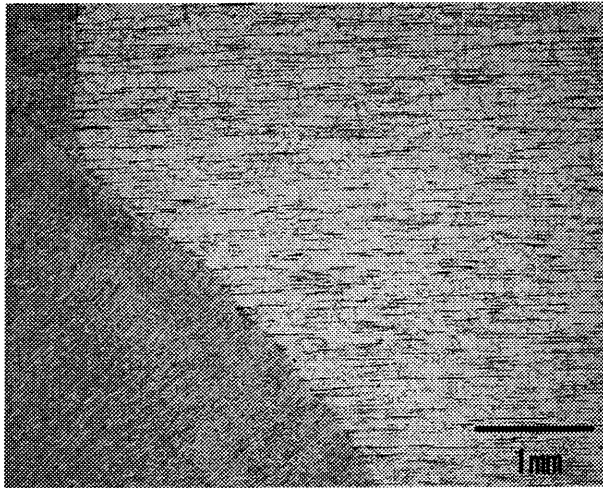
2-2 経年化材(A)側HAZ



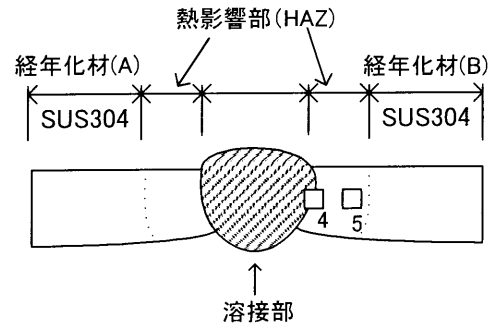
3-3 経年化材(A)側ボンド部

図10 SITR 経年化継手経年化材(A)側溶接部近傍のマイクロ組織

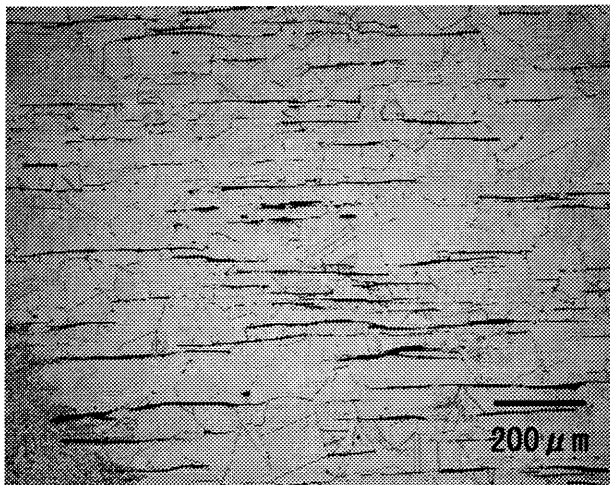




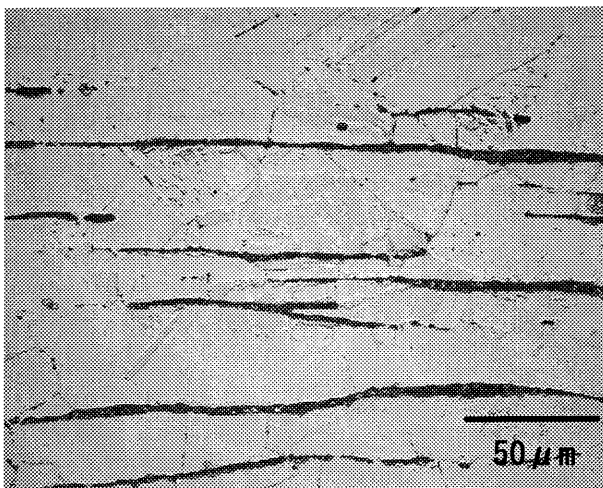
4-1 経年化材(B)側ボンド部



観察位置

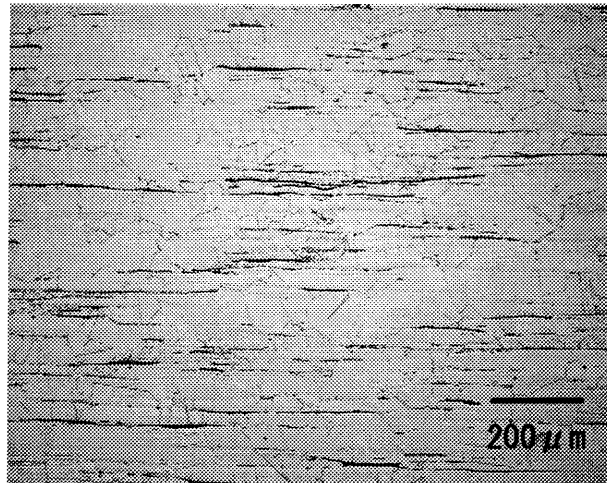
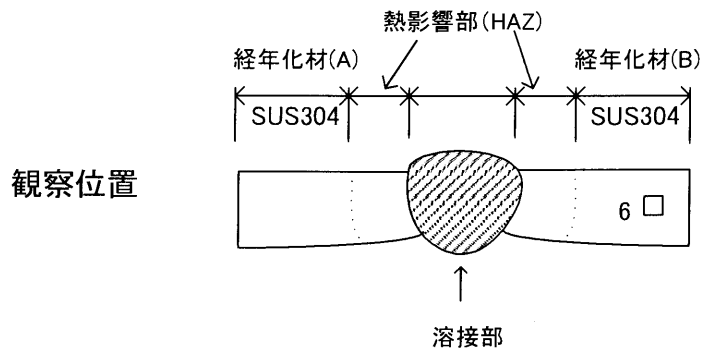


4-2 経年化材(B)側ボンド部

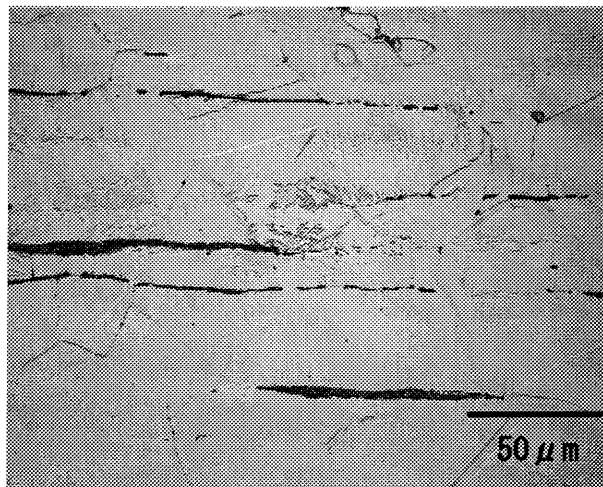


4-3 経年化材側(B)ボンド部

図11 SITR 経年化継手経年化材(B)側溶接部近傍のミクロ組織

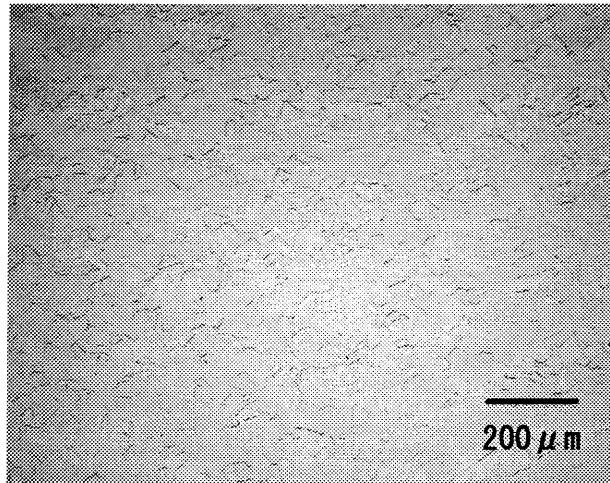
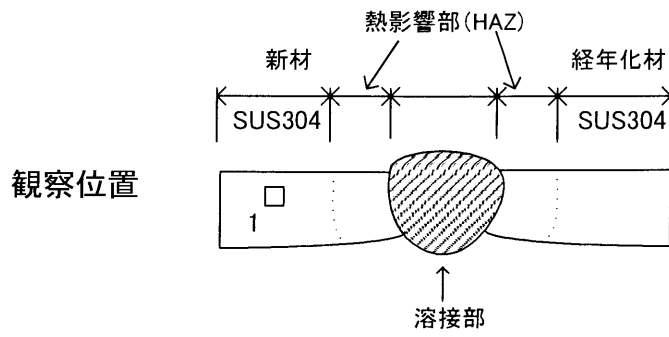


6-1 経年化材(B)側母材

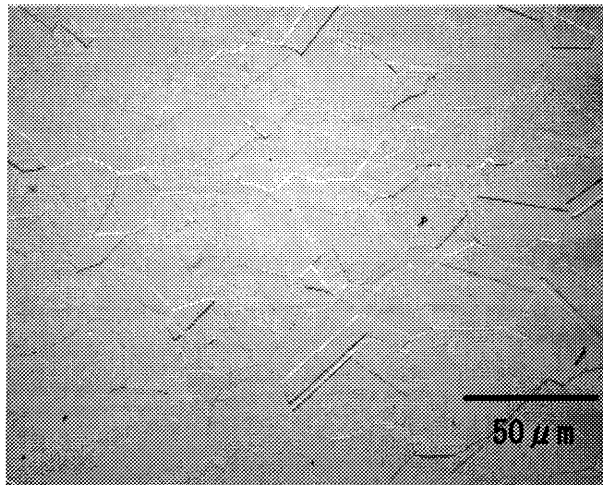


6-2 経年化材側母材

図12 SITR 経年化継手経年化材(B)側母材のミクロ組織

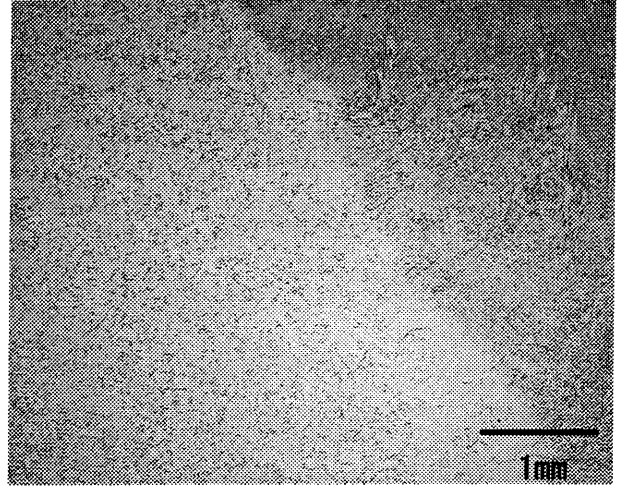
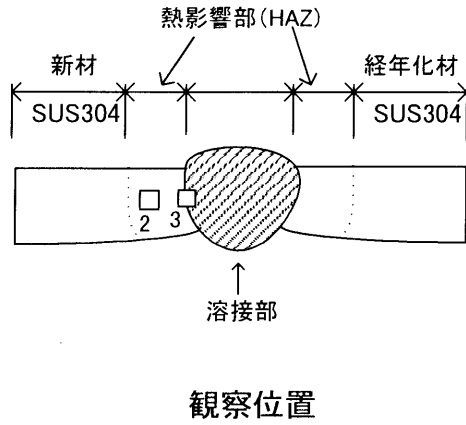


1-1 新材側母材



1-2 新材側母材

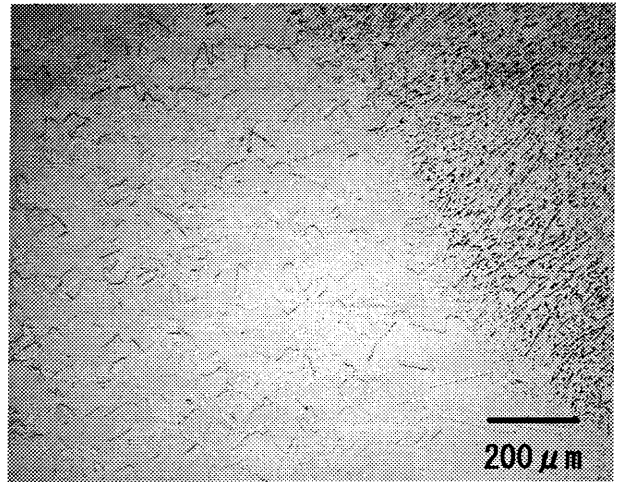
図13 PBTL 模擬補修継手新材側母材のミクロ組織



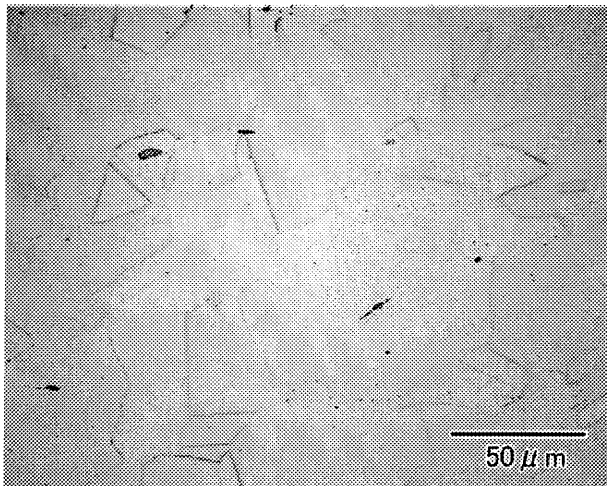
3-1 新材側ボンド部



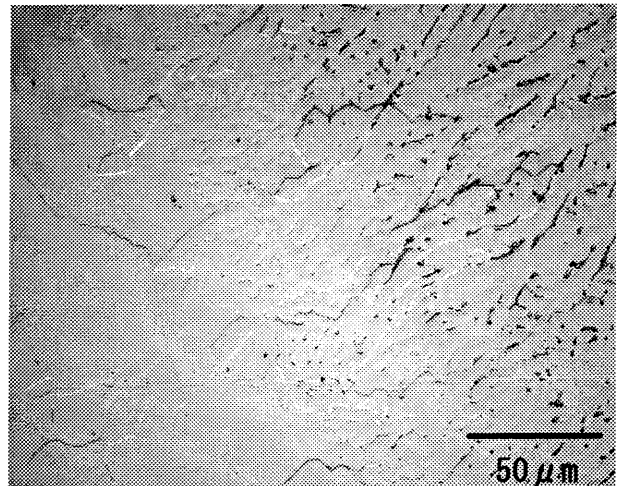
2-1 新材側HAZ



3-2 新材側ボンド部



2-2 新材側HAZ

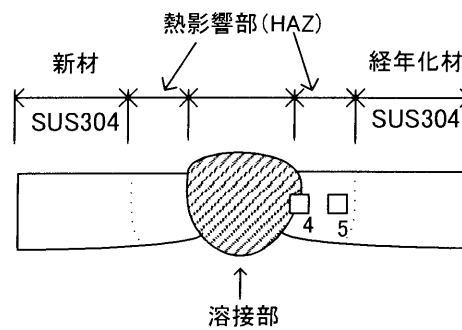


3-3 新材側ボンド部

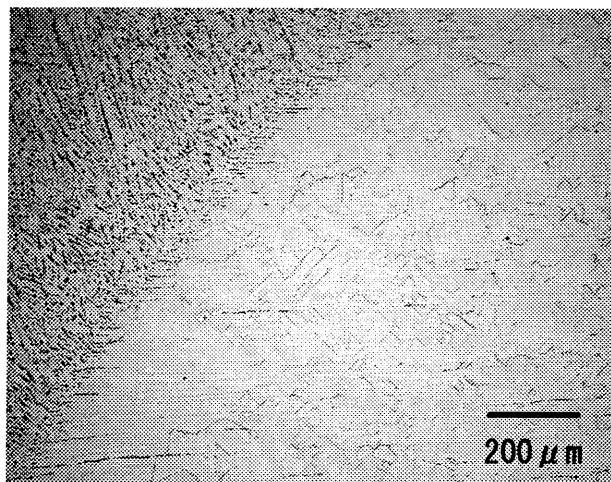
図14 PBTL 模擬補修継手新材側溶接部近傍のマイクロ組織



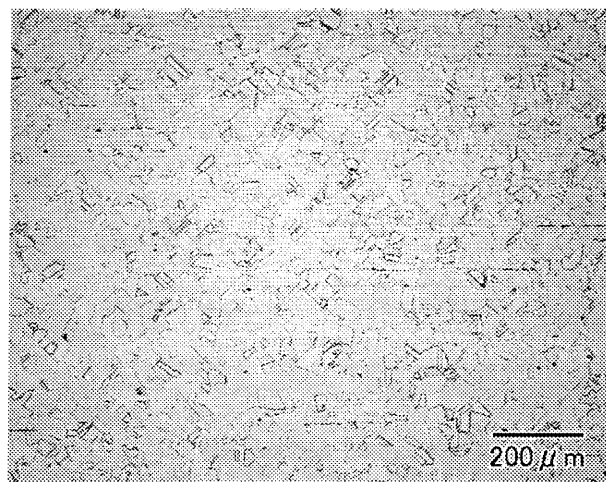
4-1 経年化材側ボンド部



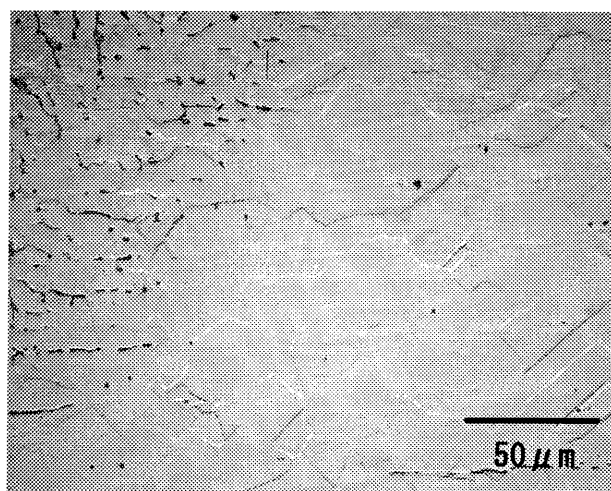
観察位置



4-2 経年化材側ボンド部

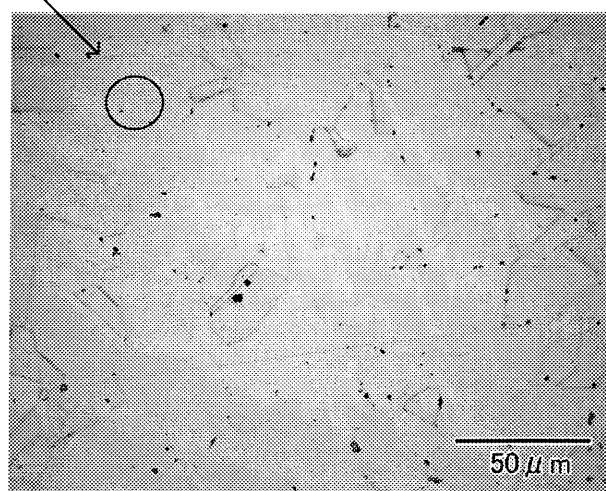


5-1 経年化材側HAZ



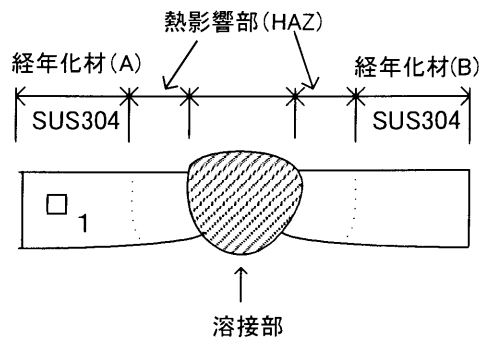
4-3 経年化材側ボンド部

炭化物

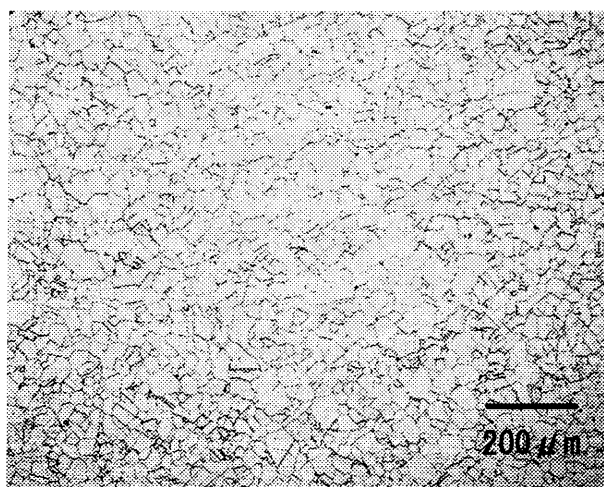


5-2 経年化材側HAZ

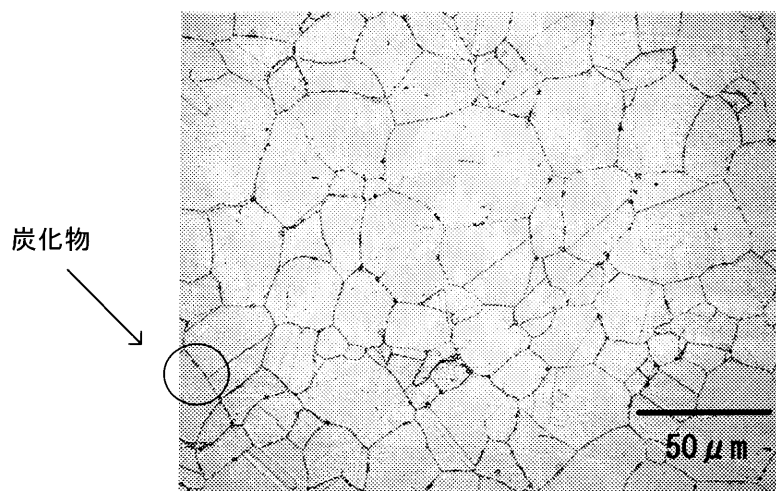
図15 PBTL 模擬補修継手経年化材側溶接部近傍のマイクロ組織



観察位置

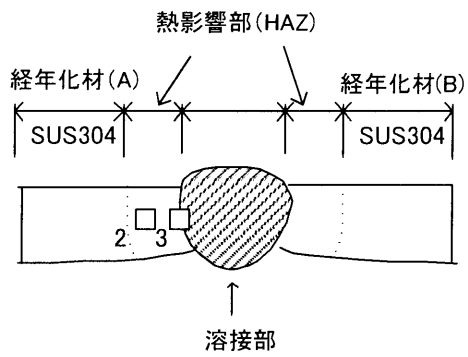


1-1 経年化材(A)側母材

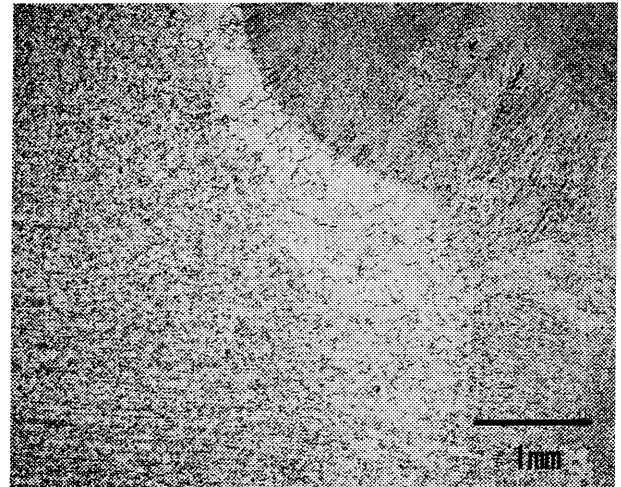


1-2 経年化材(A)側母材

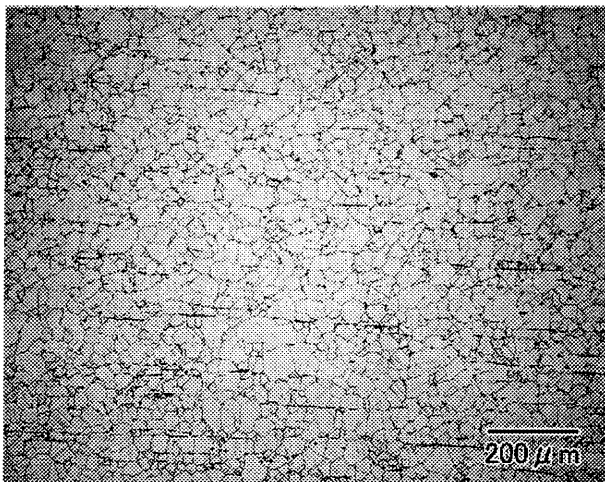
図16 PBTL 経年化継手経年化材(A)側母材のミクロ組織



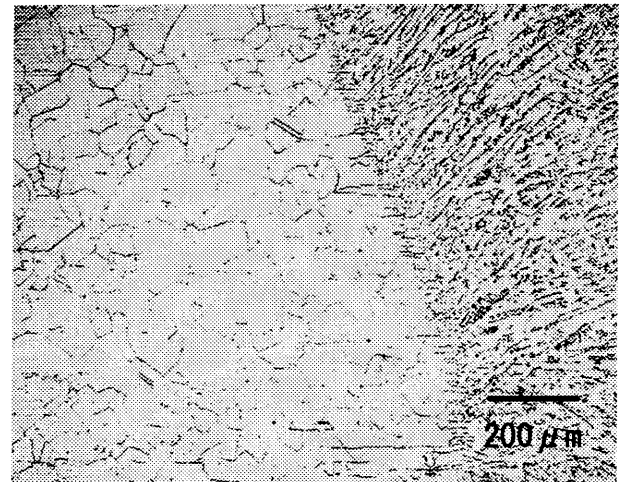
観察位置



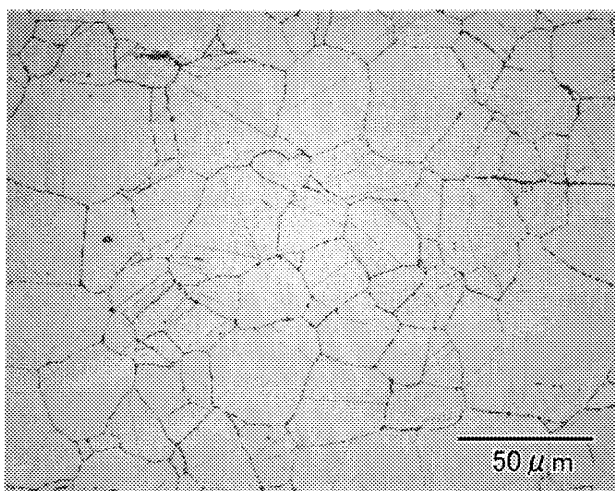
3-1 経年化材(A)側ボンド部



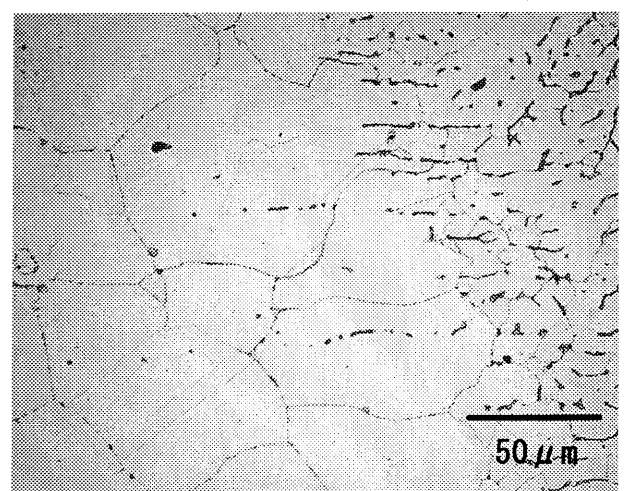
2-1 経年化材(A)側HAZ



3-2 経年化材(A)側ボンド部

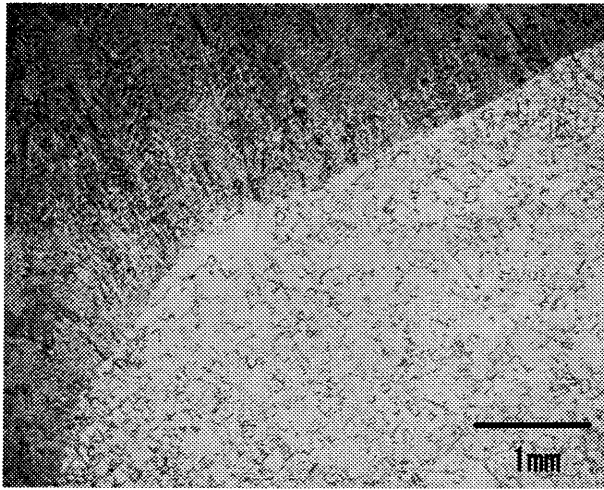


2-2 経年化材(A)側HAZ

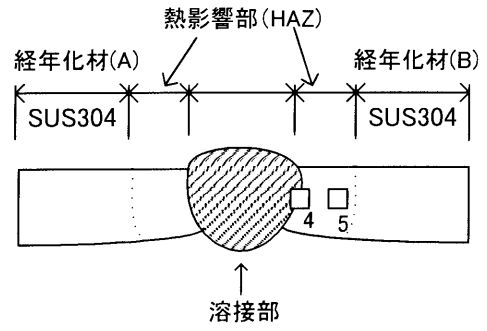


3-3 経年化材(A)側ボンド部

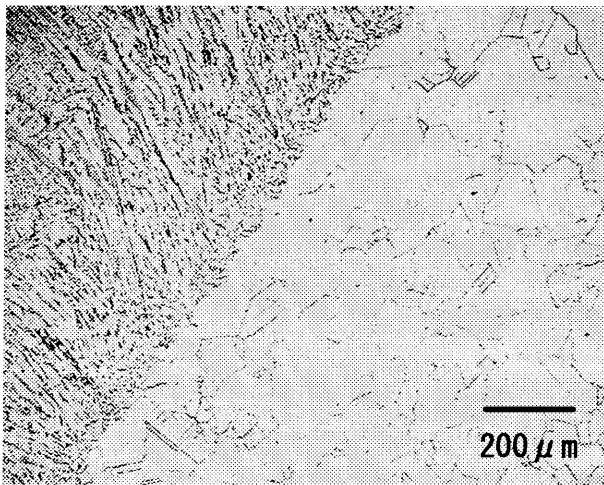
図17 PBTL 経年化継手経年化材(A)側溶接部近傍の組織



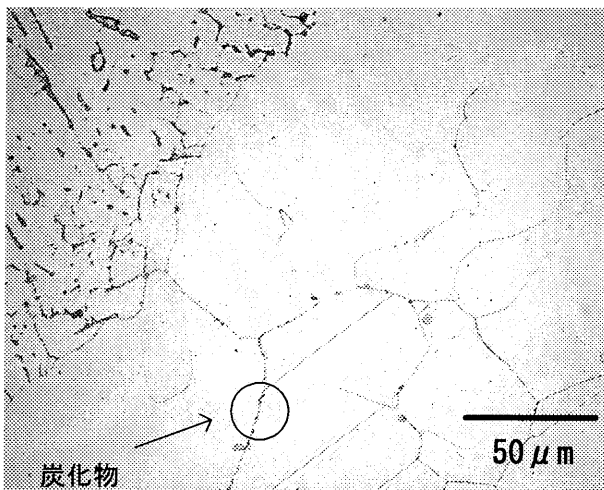
4-1 経年化材(B)側ボンド部



観察位置



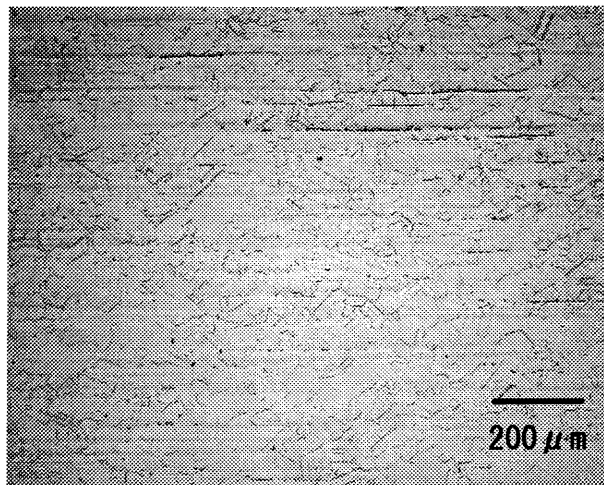
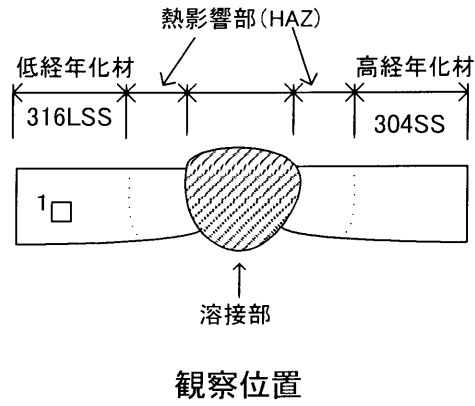
4-2 経年化材(B)側ボンド部



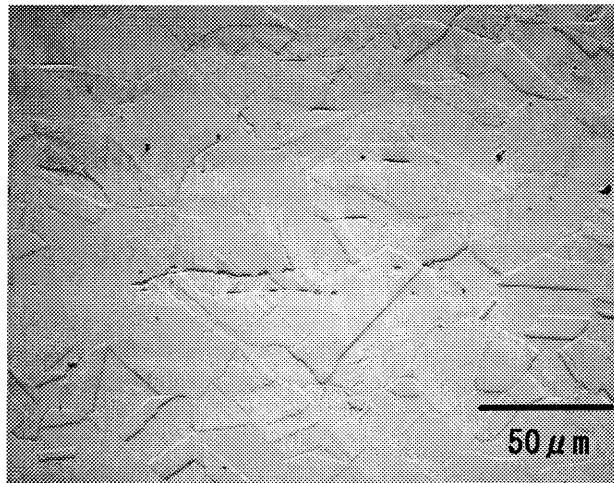
4-3 経年化材(B)側ボンド部

図18 PBTL 経年化継手経年化材(B)側溶接部近傍のマイクロ組織



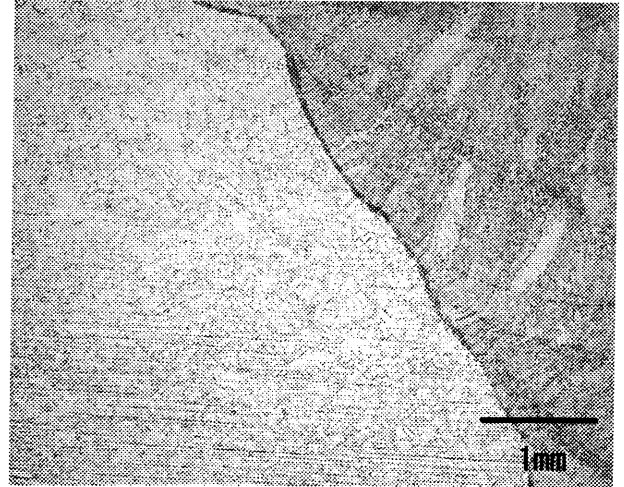
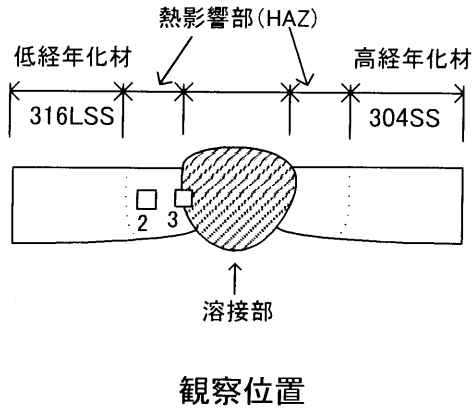


1-1 低経年化材側母材

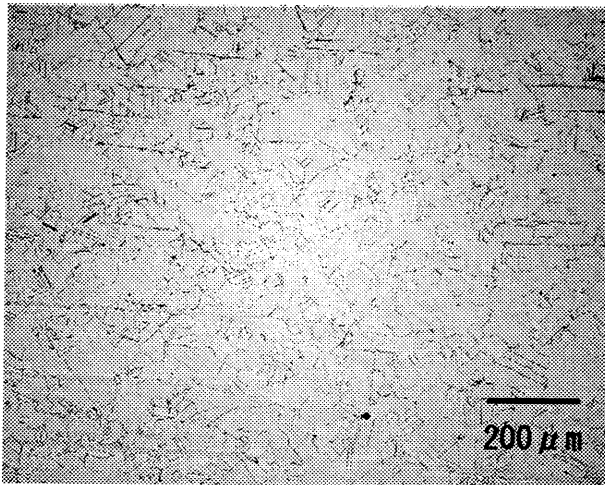


1-2 低経年化材側母材

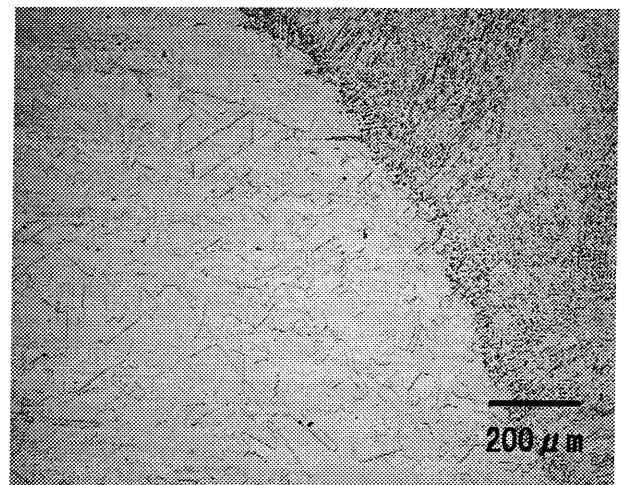
図19 Phenix経年化補修継手低経年化材側母材のミクロ組織



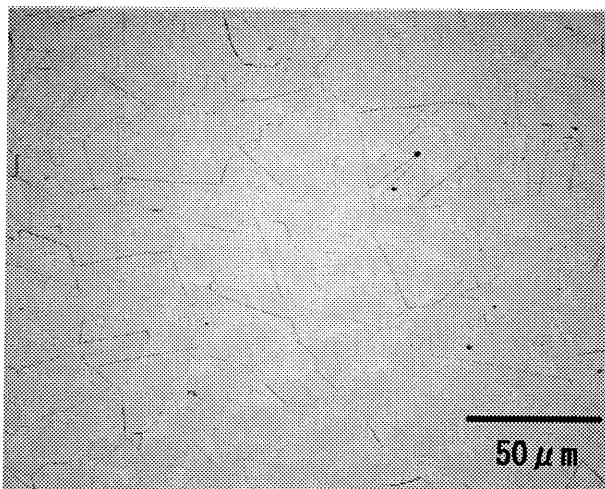
3-1 低経年化側ボンド部



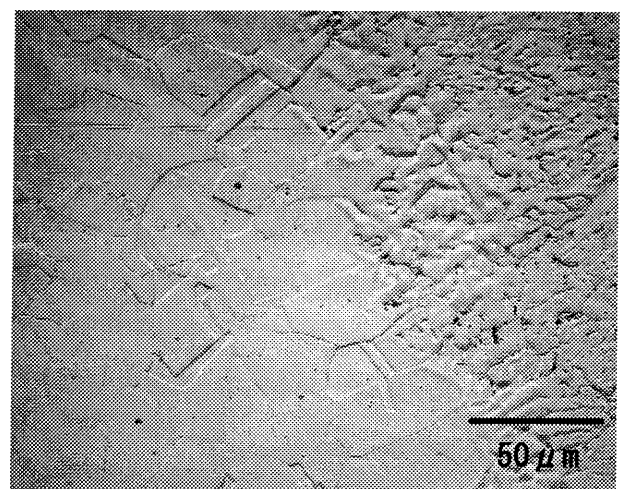
2-1 低経年化材側HAZ



3-2 低経年化材側ボンド部

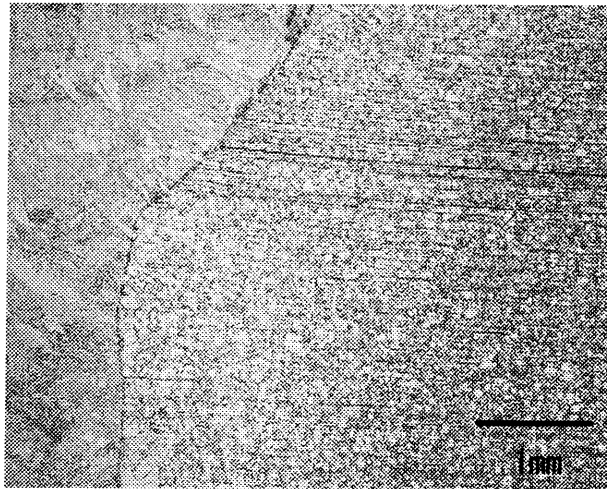


2-2 低経年化材側HAZ

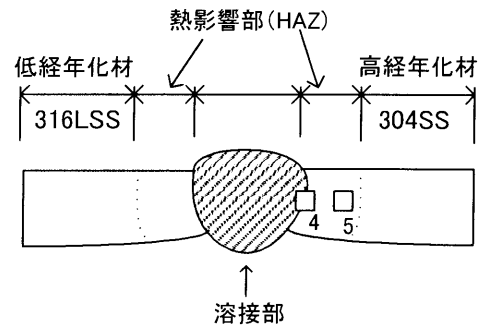


3-3 低経年化材側ボンド部

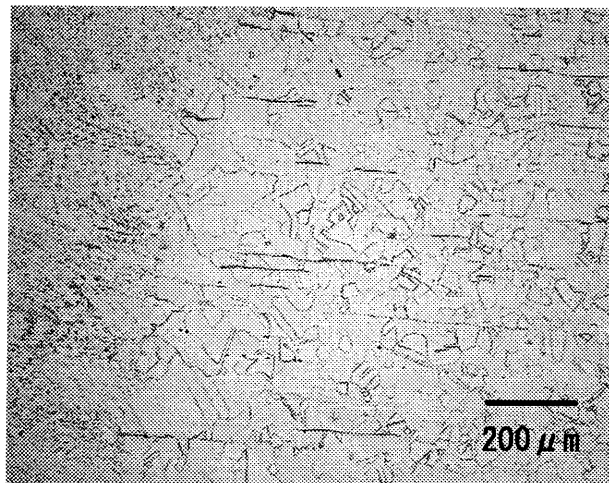
図20 Phenix経年化補修継手低経年化材側溶接部近傍のミクロ組織



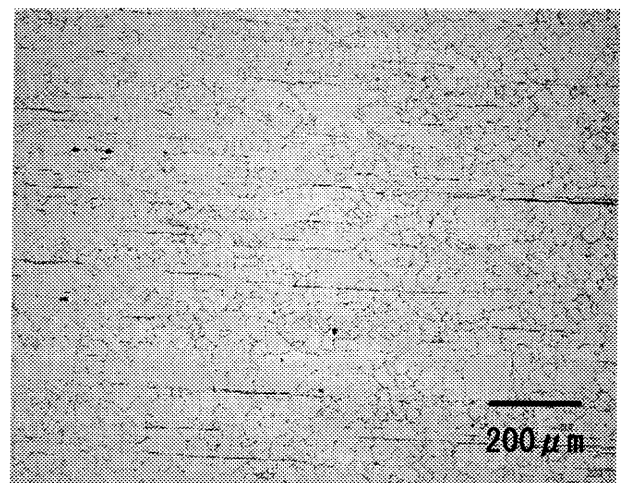
4-1 高経年化材側ボンド部



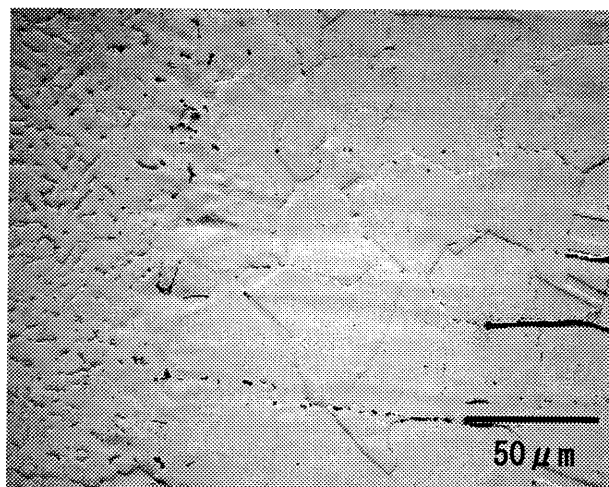
観察位置



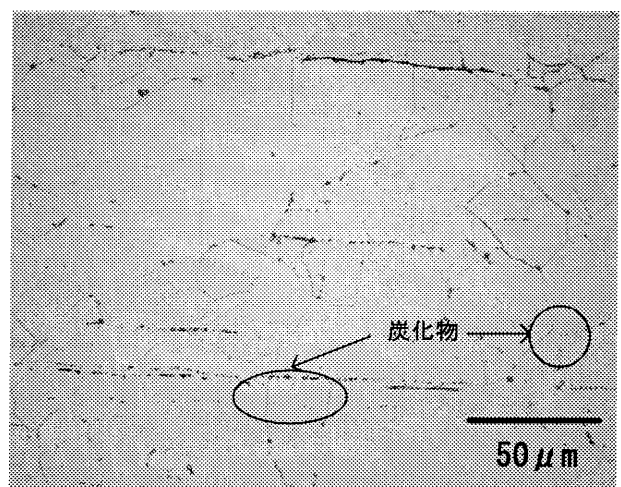
4-2 高経年化材側ボンド部



5-1 高経年化材側HAZ

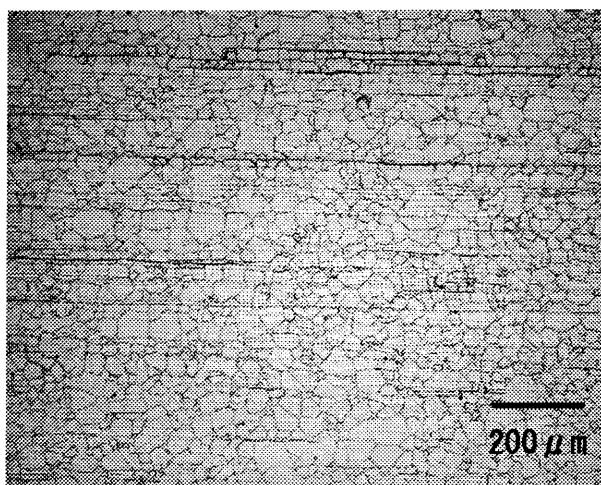
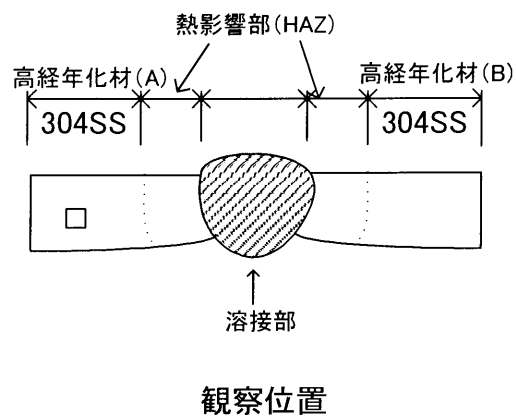


4-3 高経年化材側ボンド部

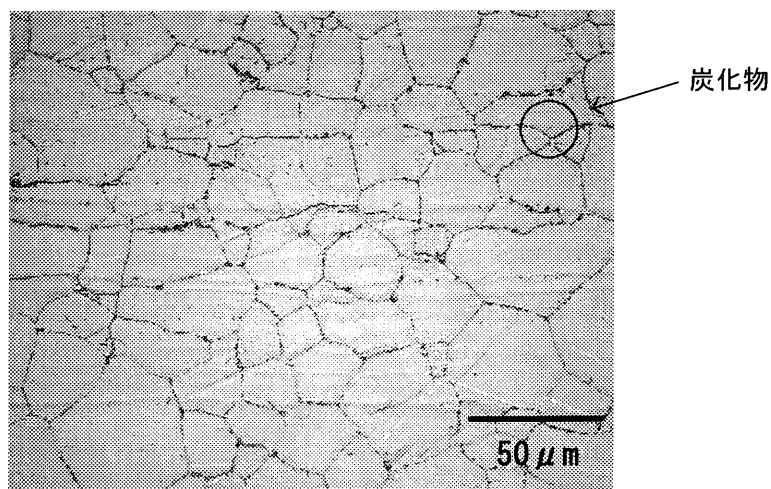


5-2 高経年化材側HAZ

図21 Phenix経年化補修継手高経年化材側溶接部近傍のミクロ組織

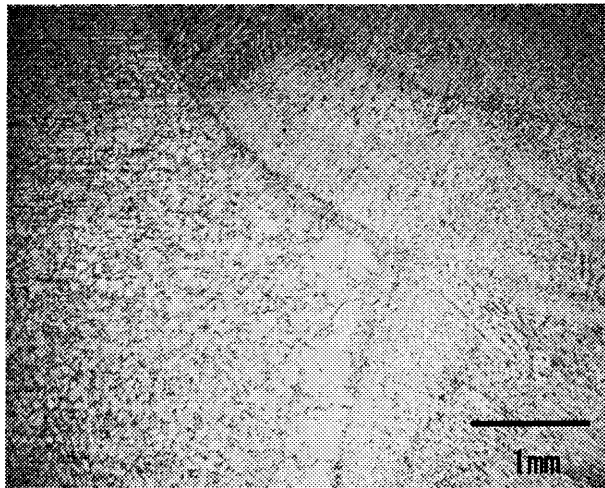


1-1 高経年化材(A)側母材

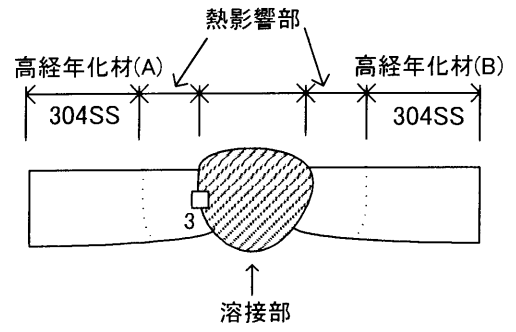


1-2 高経年化材(A)側母材

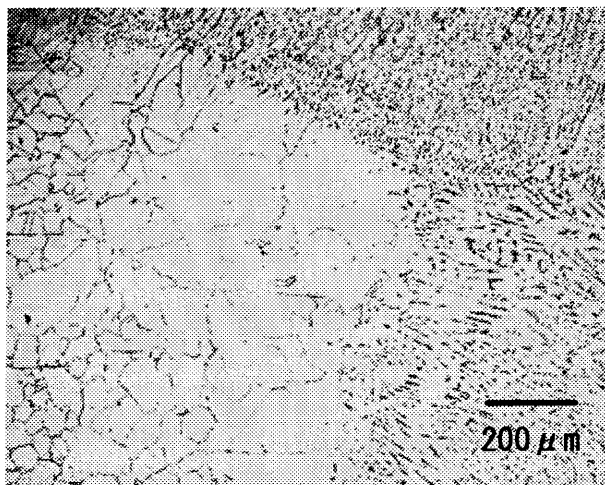
図22 Phenix経年化継手経年化材(A)側母材のミクロ組織



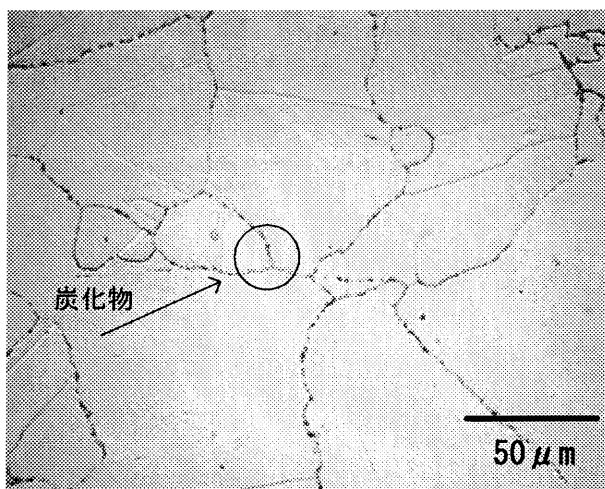
3-1 高経年化材(A)側ボンド部



観察位置

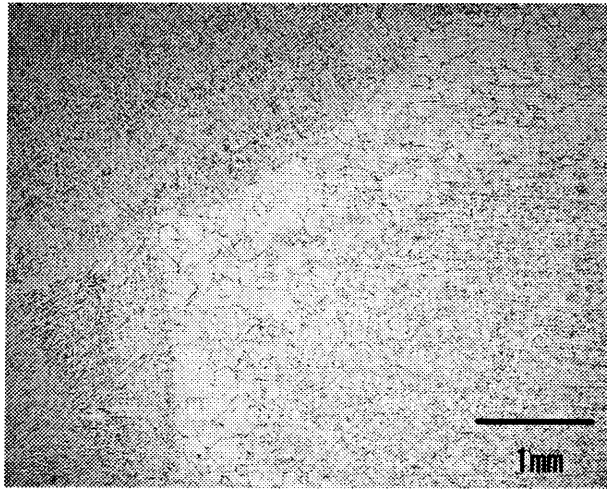


3-2 高経年化材(A)側ボンド部

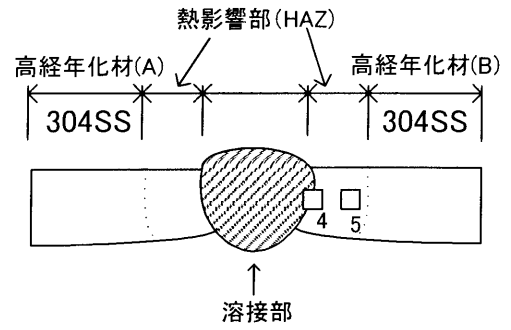


3-3 高経年化材(A)側ボンド部

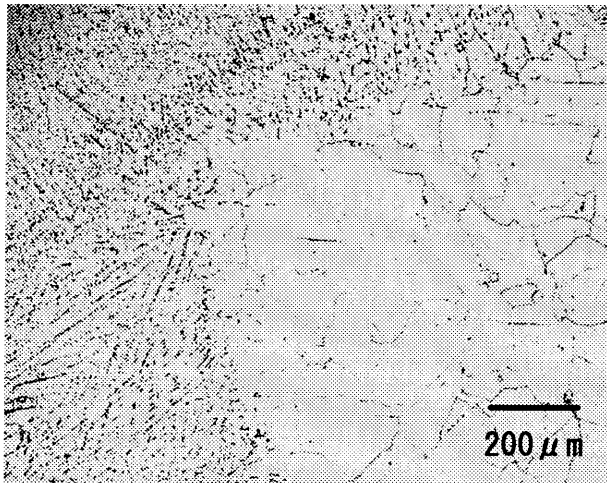
図23 Phenix経年化継手経年化材(A)側溶接部近傍のミクロ組織



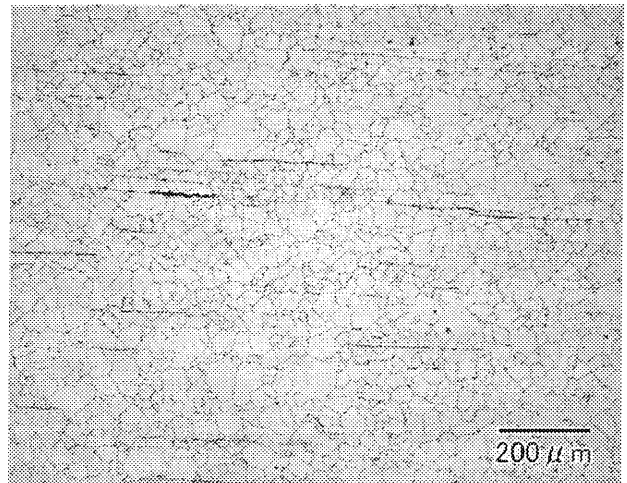
4-1 高経年化材(B)側ボンド部



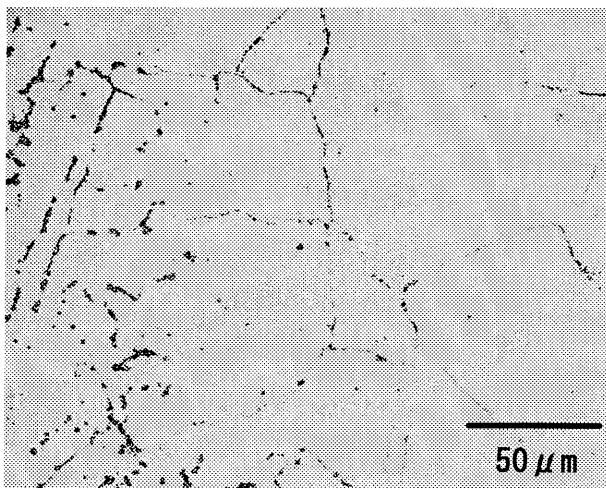
観察位置



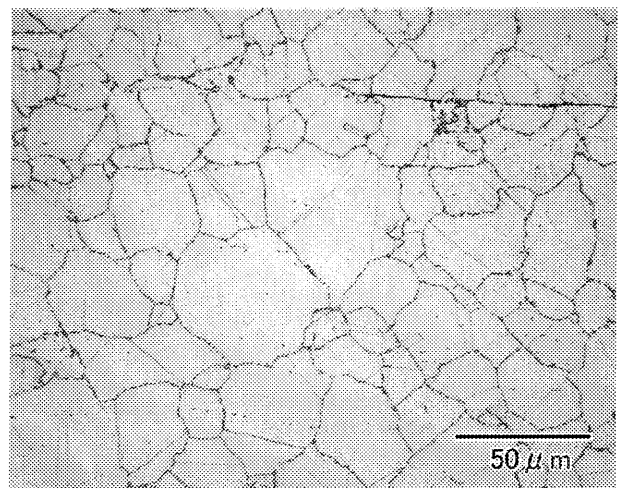
4-2 高経年化材(B)側ボンド部



5-1 高経年化材(B)側HAZ

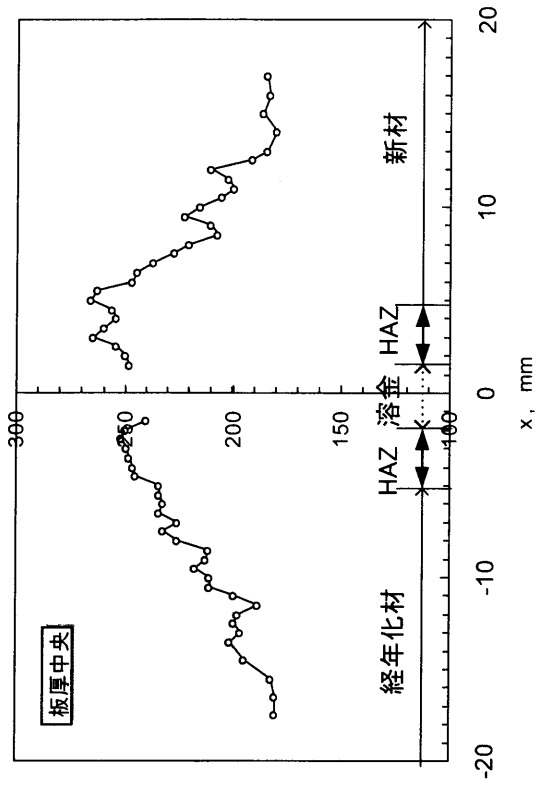


4-3 高経年化材(B)側ボンド部



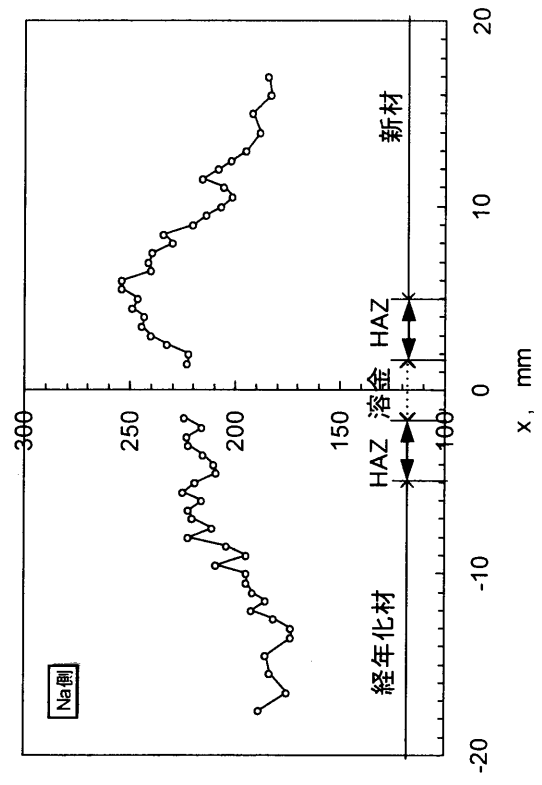
5-2 高経年化材(B)側  
HAZ

図24 Phenix経年化継手経年化材(B)側溶接部近傍のマイクロ組織



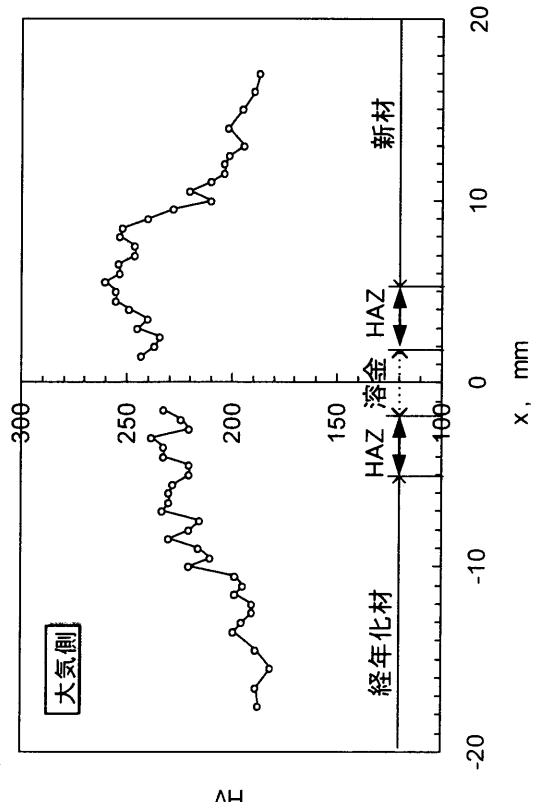
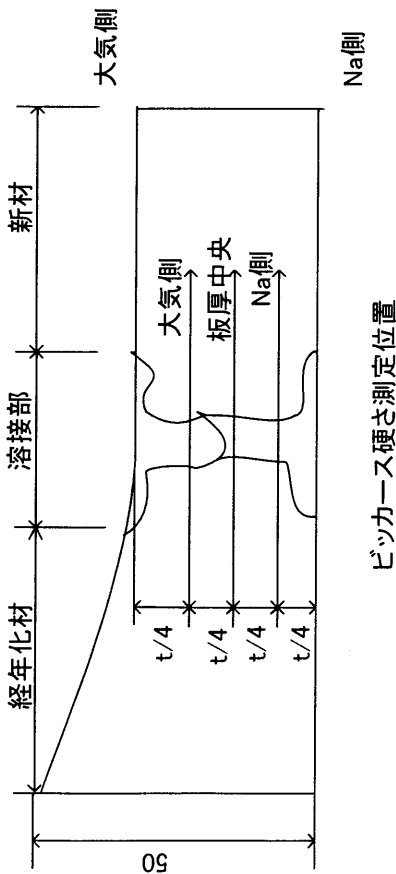
図

(B) 板厚中央



図

(C) Na側よりt/4



図

(A) 大気側よりt/4

図25 SITR 模擬補修継手の硬さ試験結果

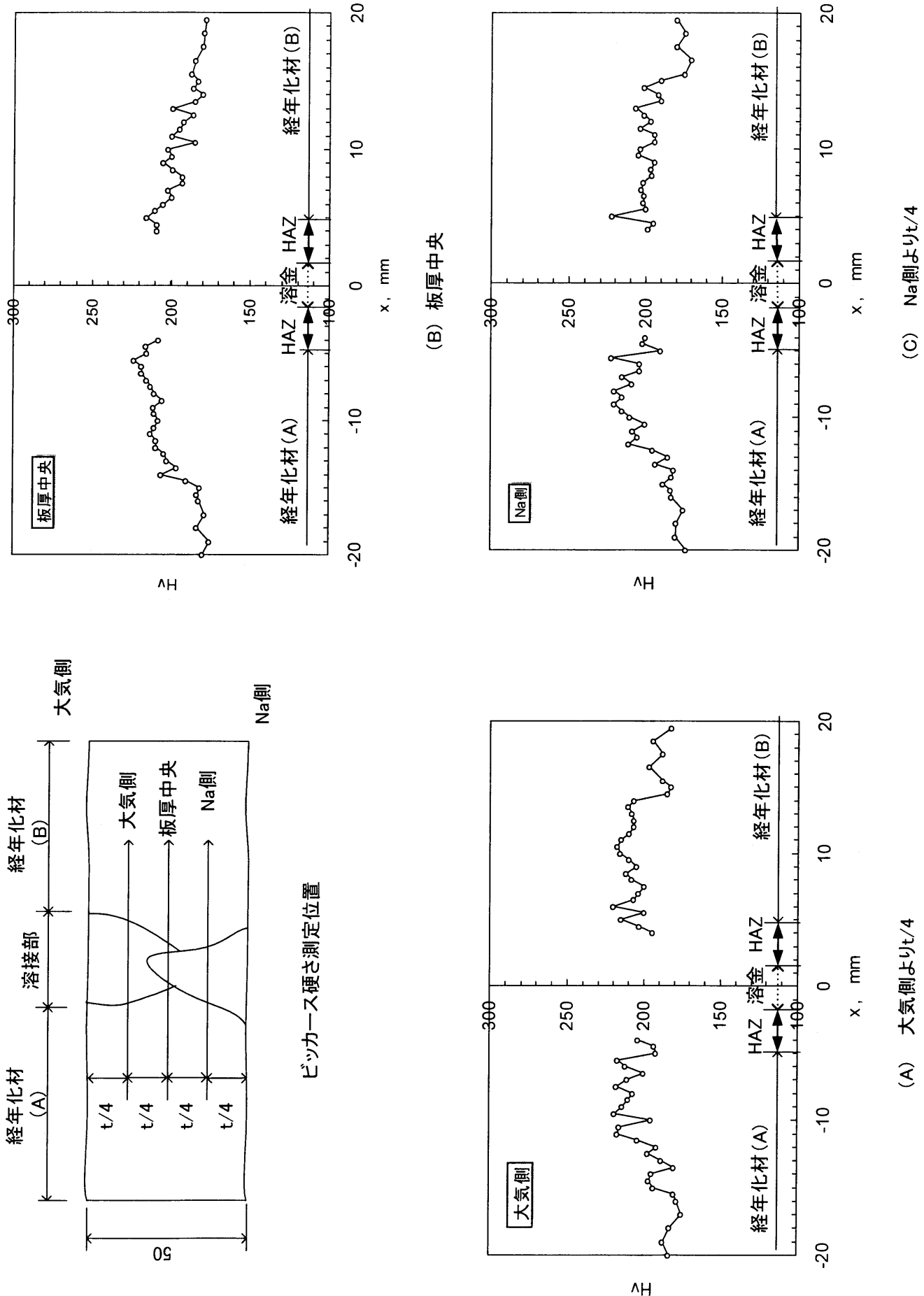
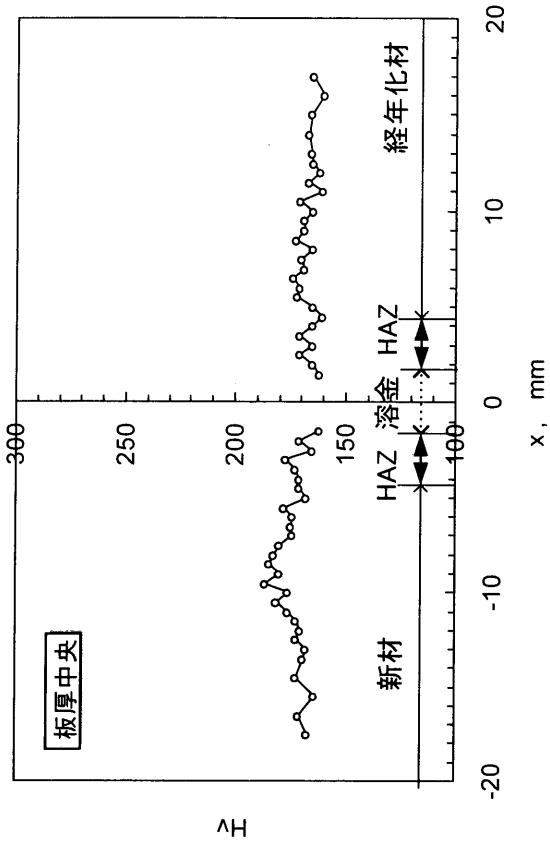


図26 SITR経年化継手の硬さ試験結果

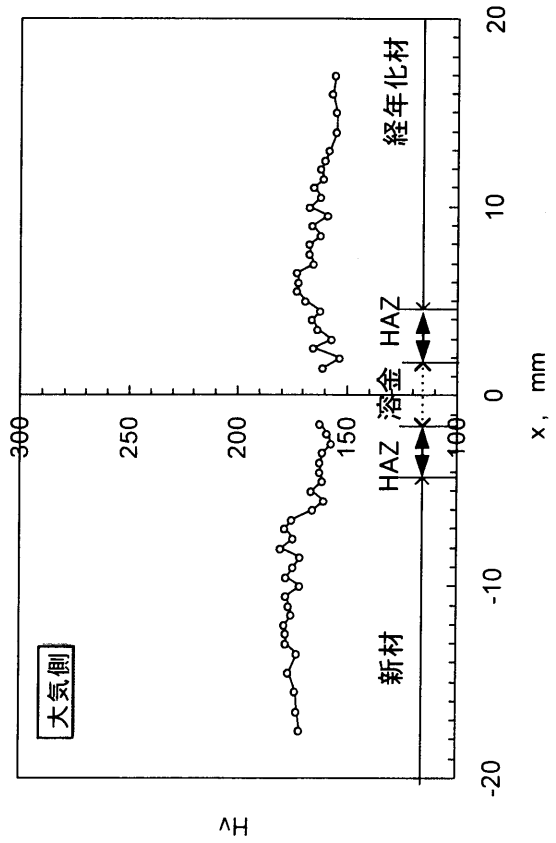
(A) 大気側よりt/4

(C) Na側よりt/4

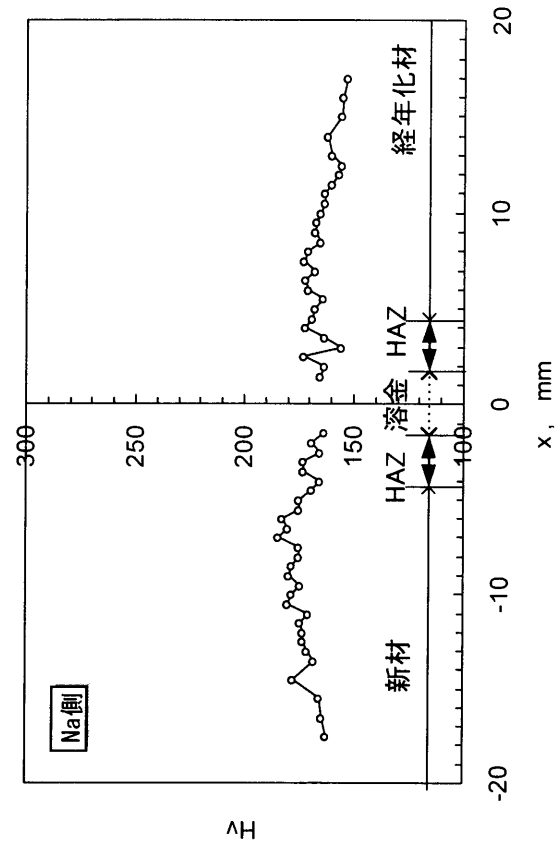




(B) 板厚中央



(A) 大気側よりt/4



(C) Na側よりt/4

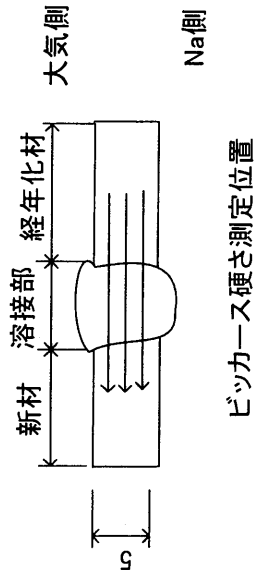
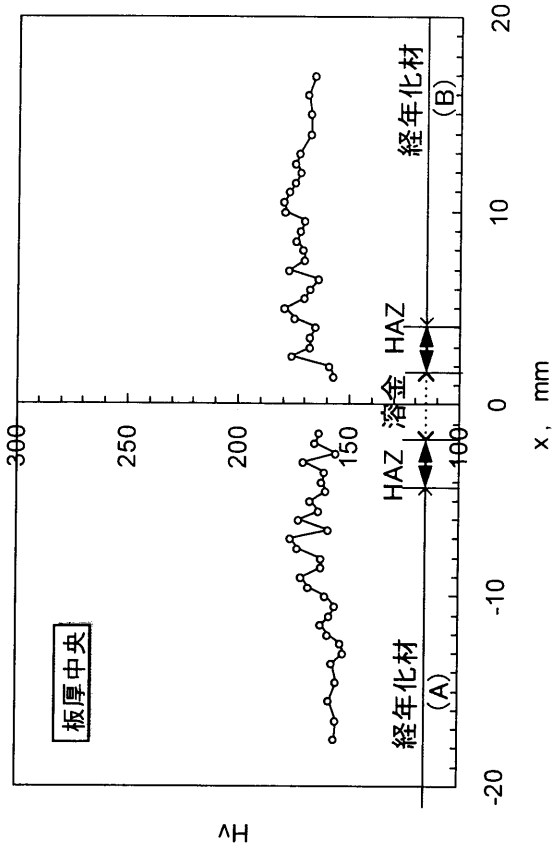
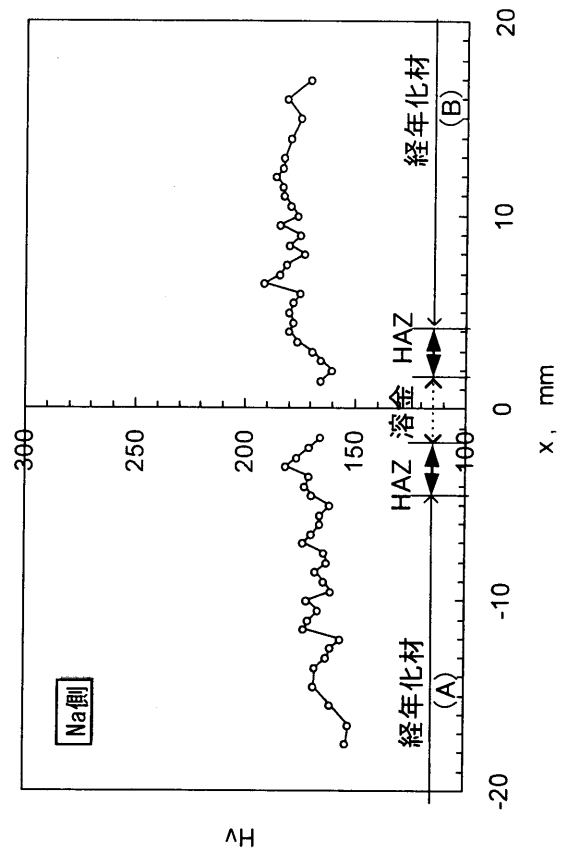


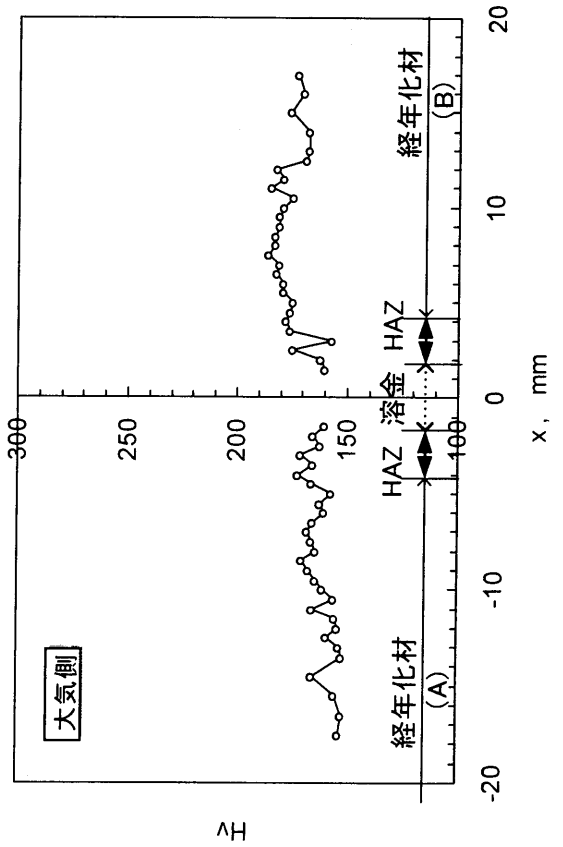
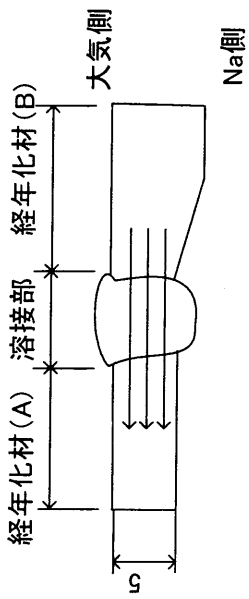
図27 PBTL 模擬補修継手の硬さ試験結果



(B) 板厚中央部

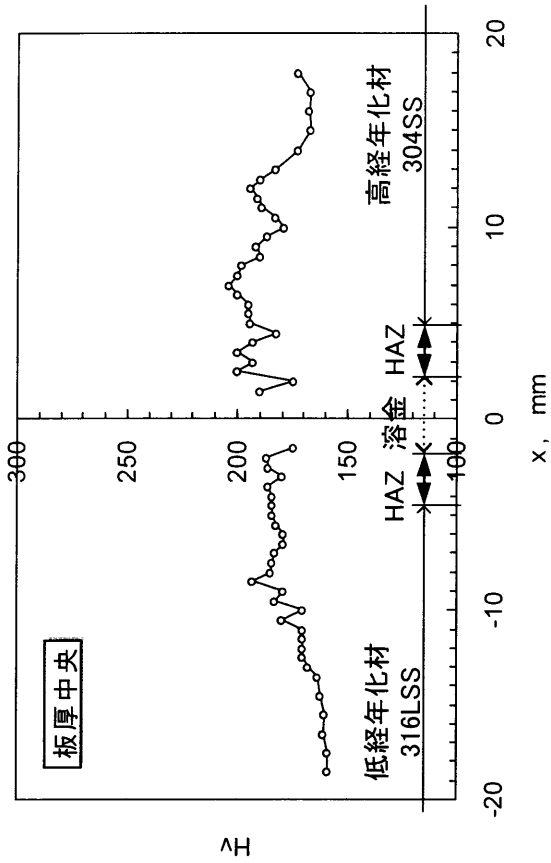


(C) Na側よりt/4

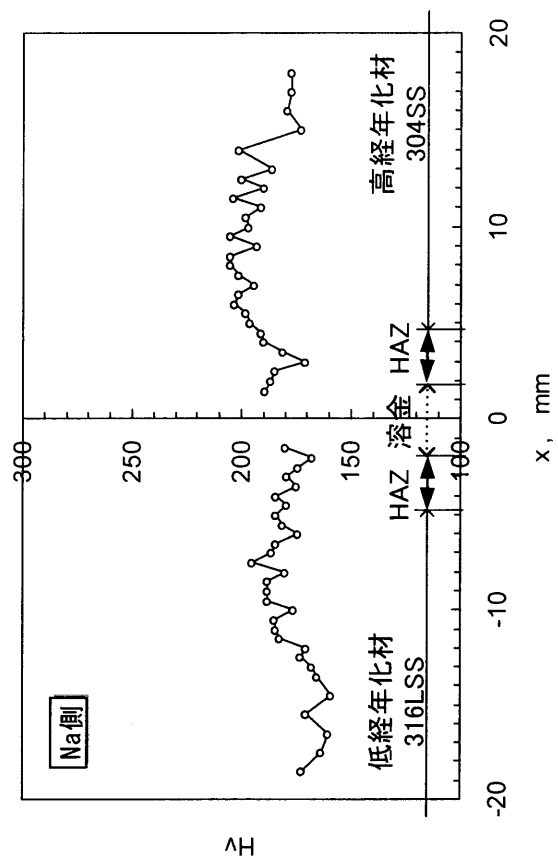


(A) 大気側よりt/4

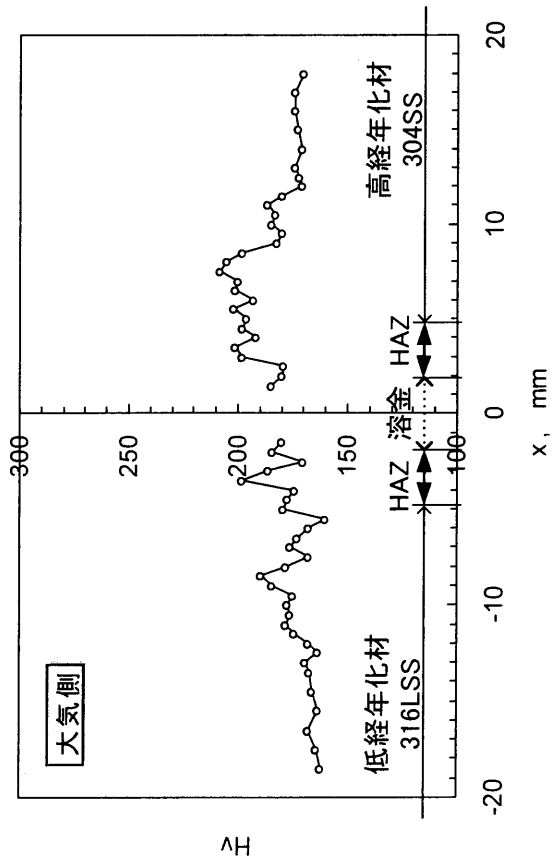
図28 PBTL 経年化継手の硬さ試験結果



(A) 大気側よりt/4



(B) 板厚中央



(C) Na側よりt/4

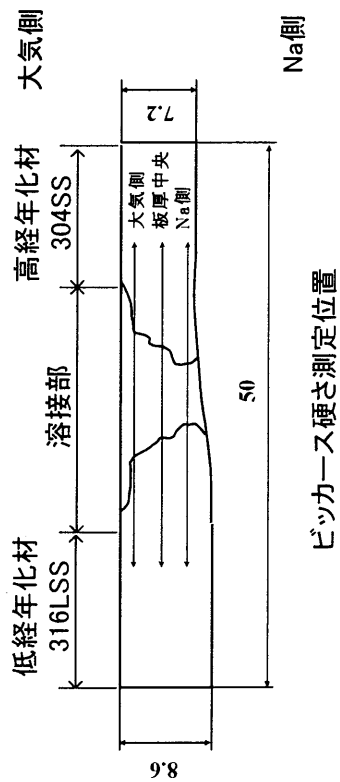
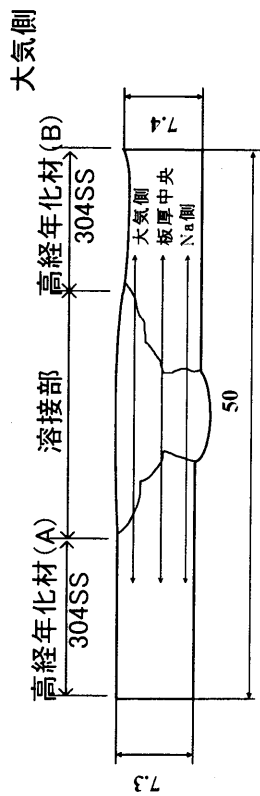
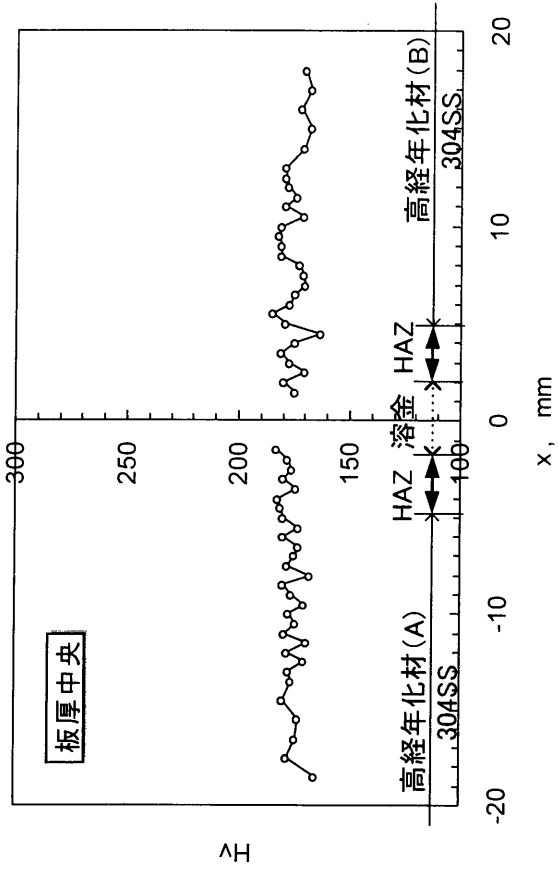


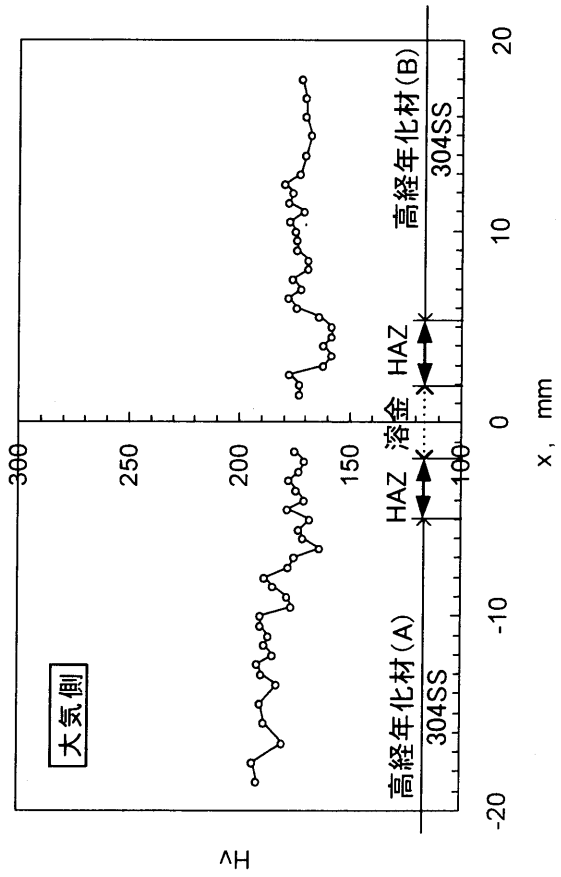
図29 Pnenix経年化補修継手の硬さ試験結果



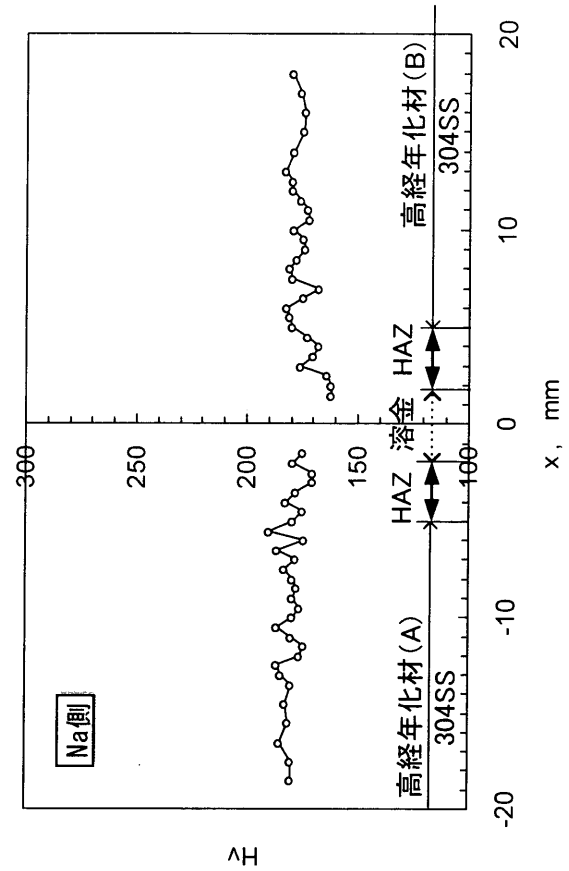
ビッカース硬さ測定位置



(B) 板厚中央

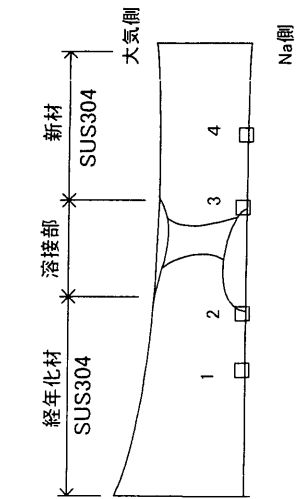


(A) 大気側よりt/4

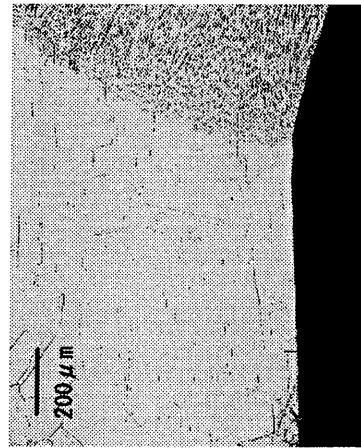


(B) Na側よりt/4

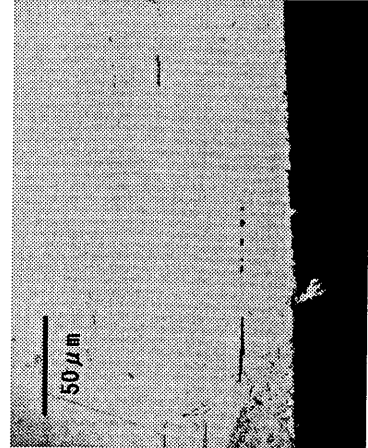
図30 Phenix経年化継手の硬さ試験結果



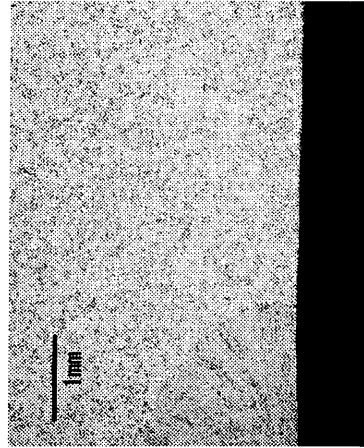
2-(a) 経年化材側ポンド部



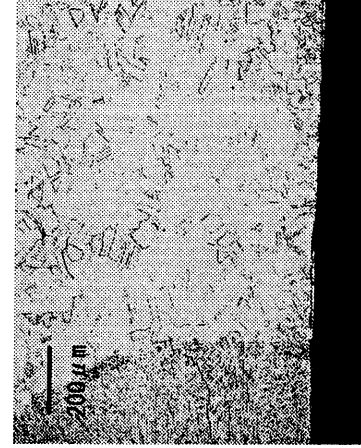
2-(b) 経年化材側ポンド部



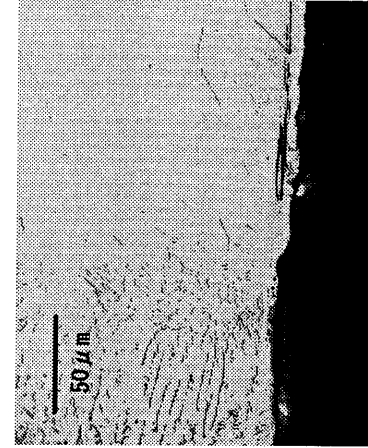
2-(c) 経年化材側ポンド部



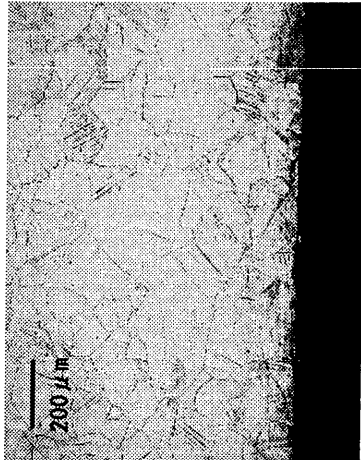
3-(a) 新材側ポンド部



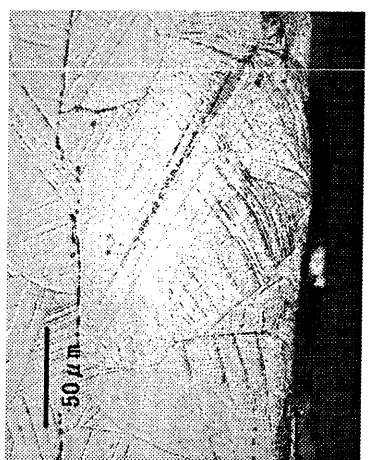
3-(b) 新材側ポンド部



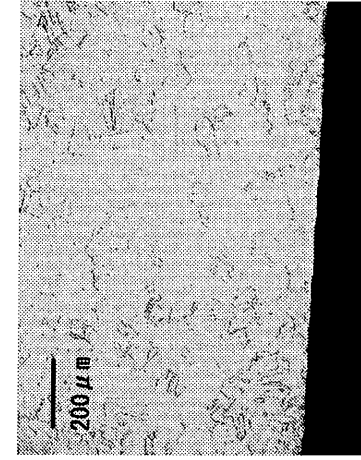
3-(c) 新材側ポンド部



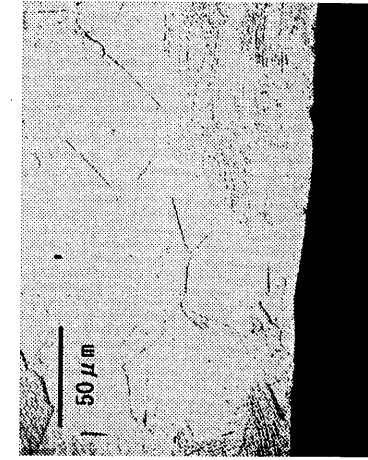
1-(a) 経年化材側母材



1-(b) 経年化材側母材

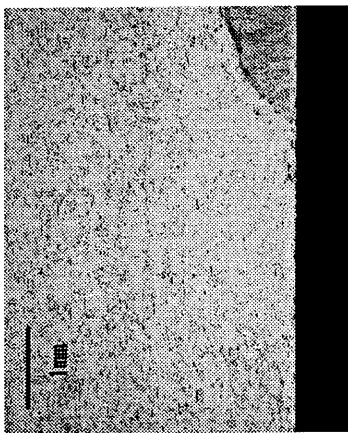
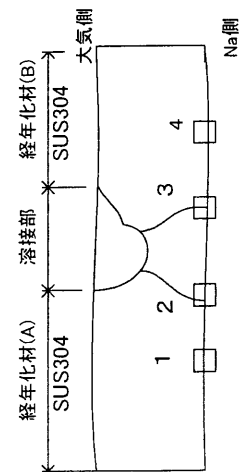


4-(a) 新材側母材

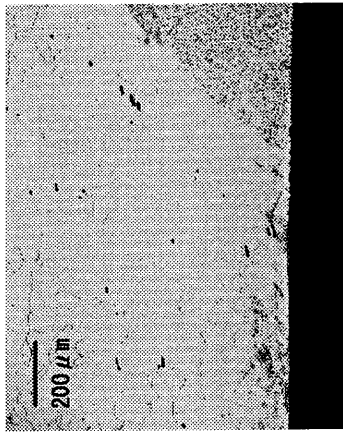


4-(b) 新材側母材

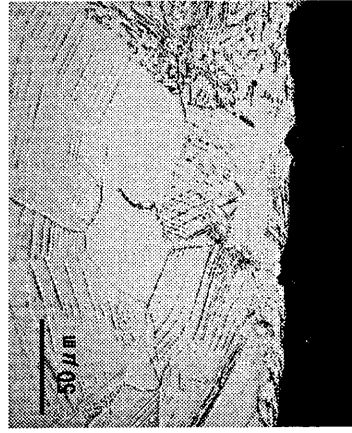
参考資料1 SITR 模擬補修継手のNa液液面近傍のミクロ組織



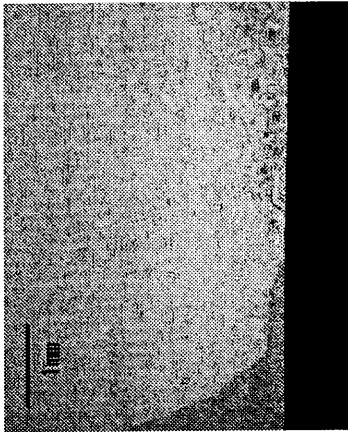
2-(a) 経年化材(A)側溶接部



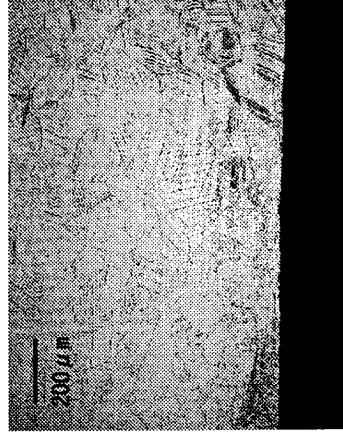
2-(b) 経年化材(A)側溶接部



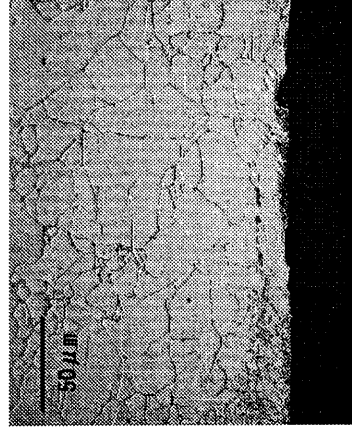
2-(c) 経年化材(A)側溶接部



3-(a) 経年化材(B)側溶接部



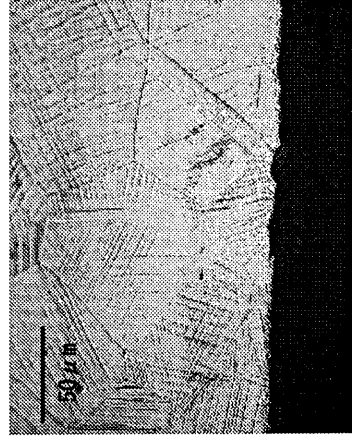
3-(b) 経年化材(B)側溶接部



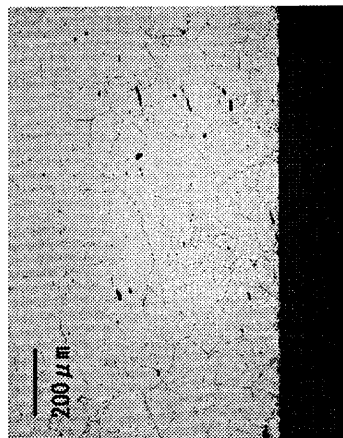
3-(c) 経年化材(B)側溶接部



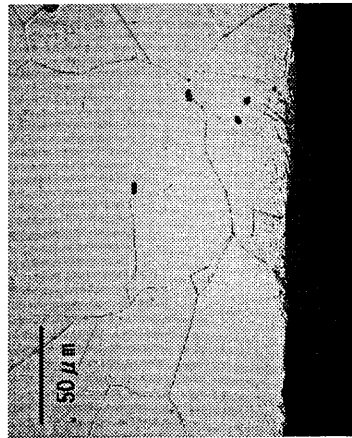
4-(a) 経年化材(B)側母材



4-(b) 経年化材(B)側母材

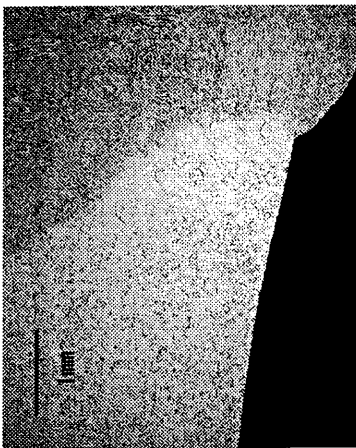
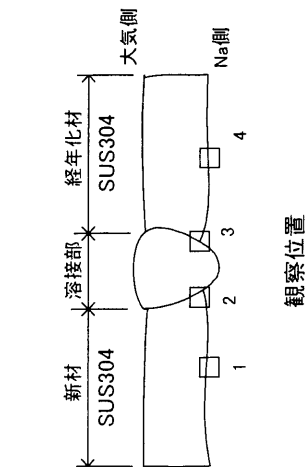


1-(a) 経年化材(A)側母材

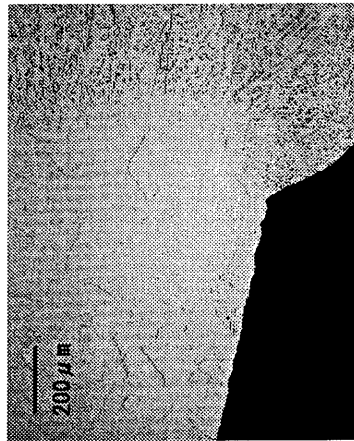


1-(b) 経年化材(A)側母材

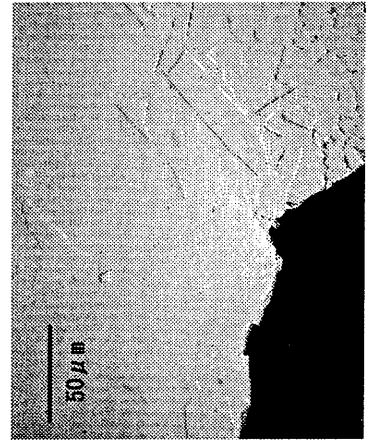
参考資料2 SITR 経年化継手のNa接液面近傍のミクロ組織



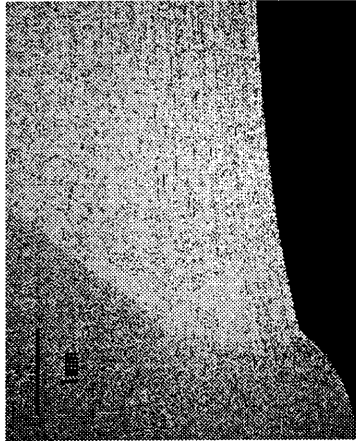
2-(a) 新材側溶接部



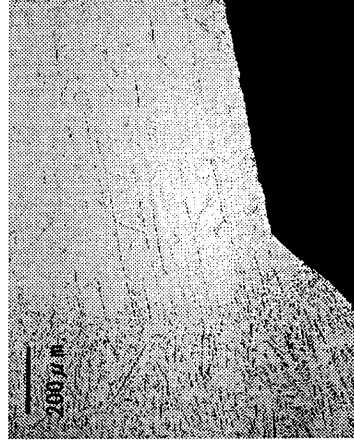
2-(b) 新材側溶接部



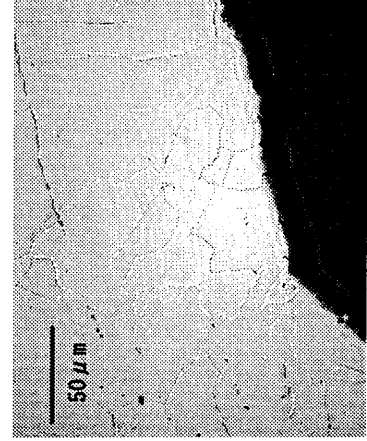
2-(c) 新材側溶接部



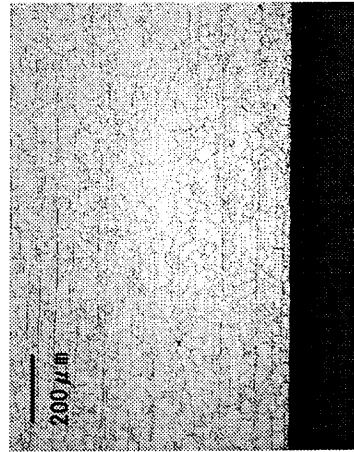
3-(a) 経年化材側溶接部



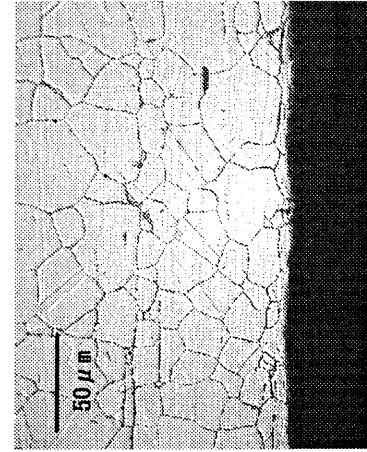
3-(b) 経年化材側溶接部



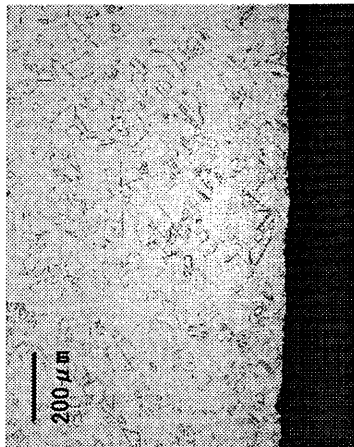
3-(c) 経年化材側溶接部



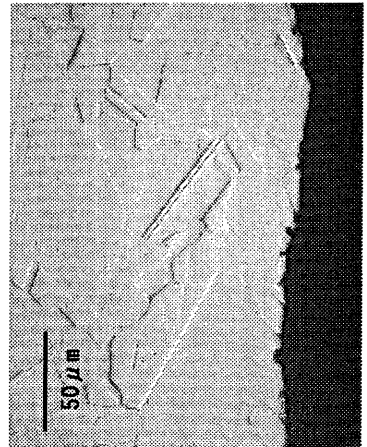
4-(a) 経年化材側母材



4-(b) 経年化材側母材

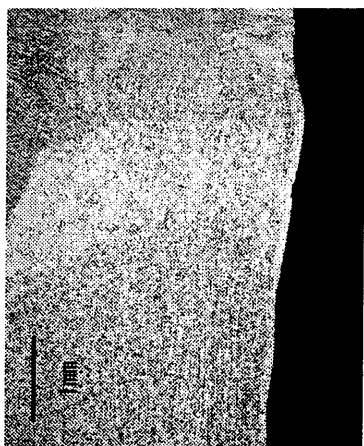
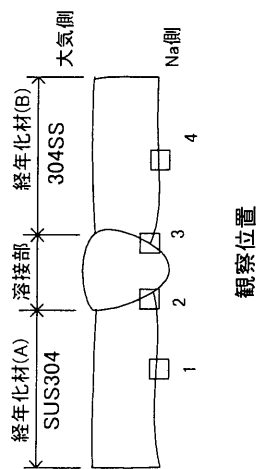


1-(a) 新材側母材

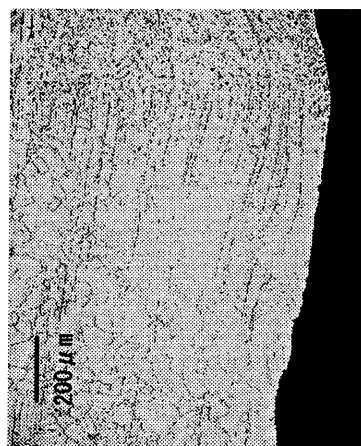


1-(b) 新材側母材

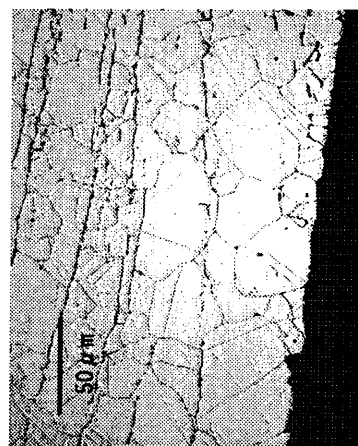
参考資料3 PBT 模擬補修継手のNa液液面近傍のミクロ組織



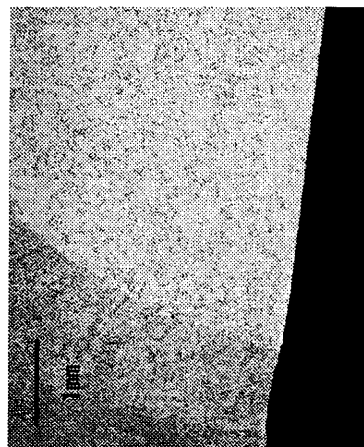
2-(a) 経年化材(A)側溶接部



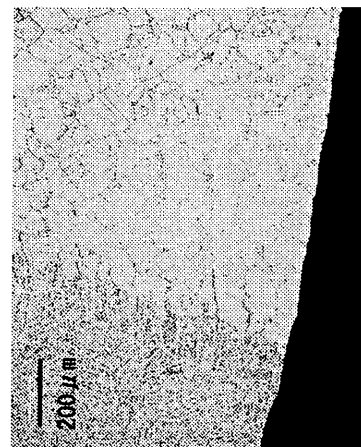
2-(b) 経年化材(A)側溶接部



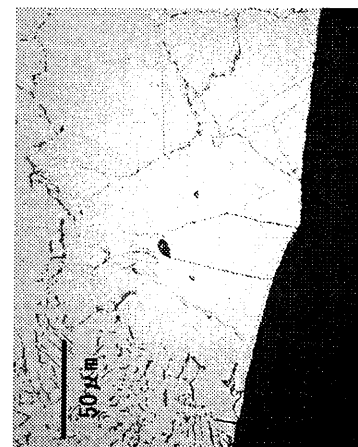
2-(c) 経年化材(A)側溶接部



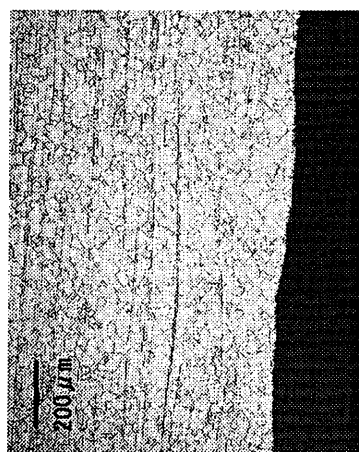
3-(a) 経年化材(B)側溶接部



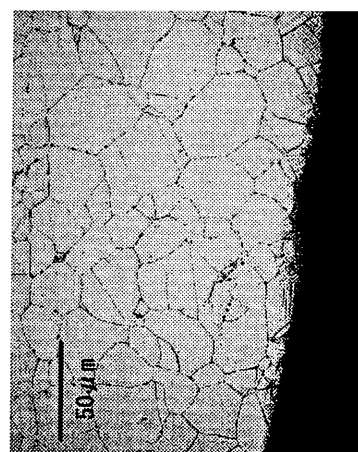
3-(b) 経年化材(B)側溶接部



3-(c) 経年化材(B)側溶接部



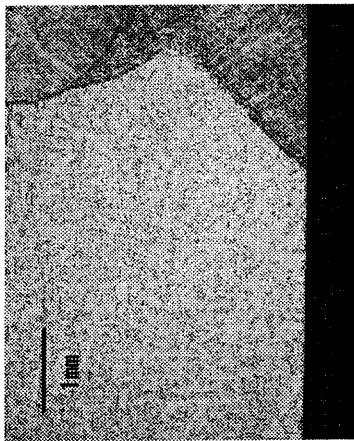
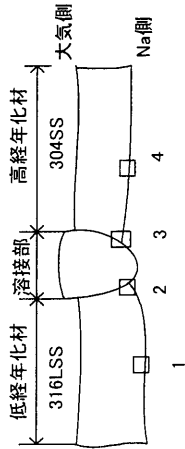
1-(a) 経年化材(A)側母材



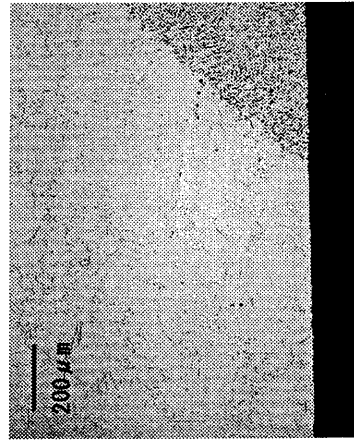
1-(b) 経年化材(A)側母材

参考資料4 PBTL 経年化継手のNa液液面近傍のミクロ組織

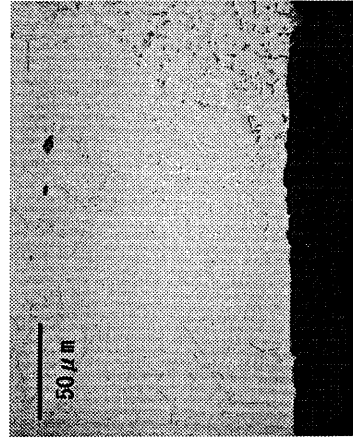




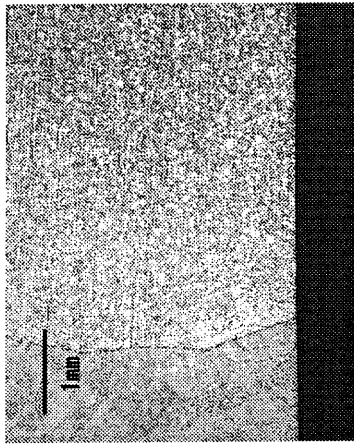
2-(a) 低経年化材側ポイント部



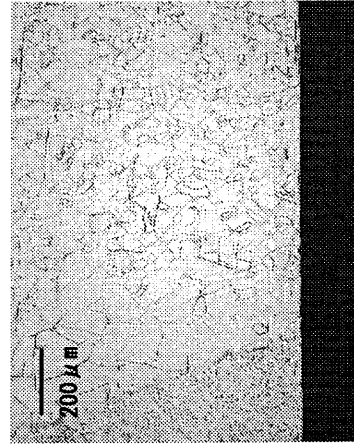
2-(b) 低経年化材側ポイント部



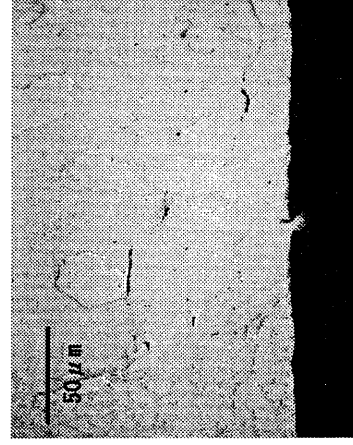
2-(c) 低経年化材側ポイント部



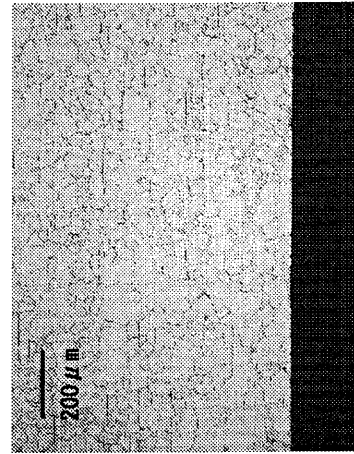
3-(a) 高経年化材側ポイント部



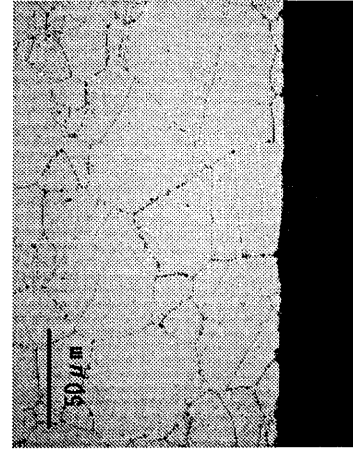
3-(b) 高経年化材側ポイント部



3-(c) 高経年化材側ポイント部

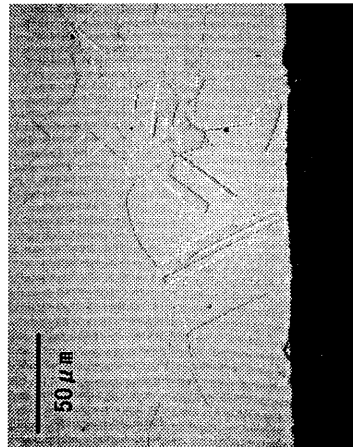


4-(a) 低経年化材側母材



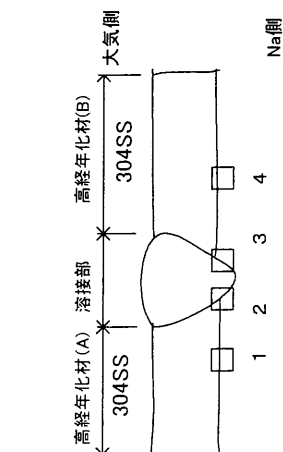
4-(b) 低経年化材側母材

1-(a) 低経年化材側母材

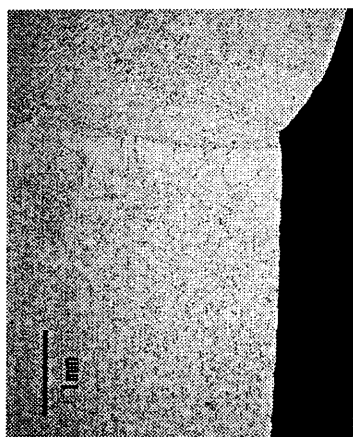


1-(b) 低経年化材側母材

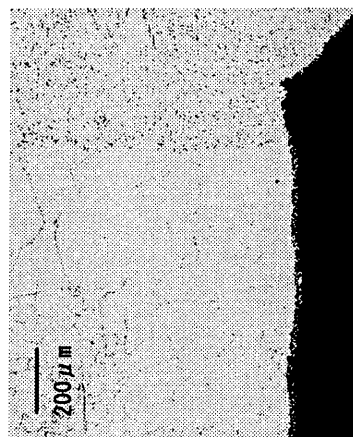
参考資料5 Phenix 経年化補修継手のNa接液面近傍のミクロ組織



観察位置



2-(a) 高経年化材(A)側ポイント部



2-(b) 高経年化材(A)側ポイント部



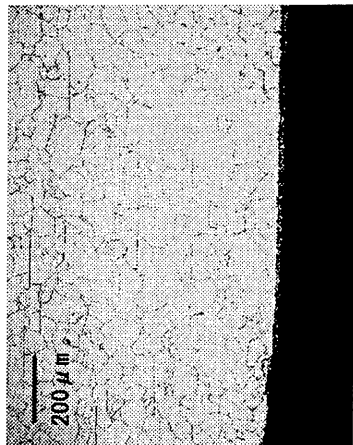
3-(a) 高経年化材(B)側ポイント部



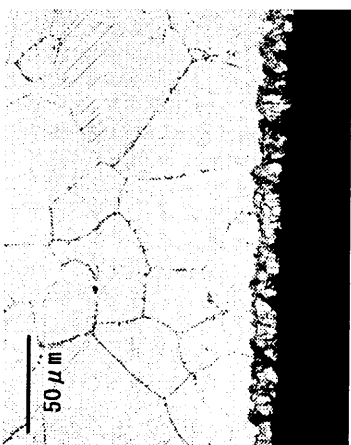
3-(b) 高経年化材(B)側ポイント部



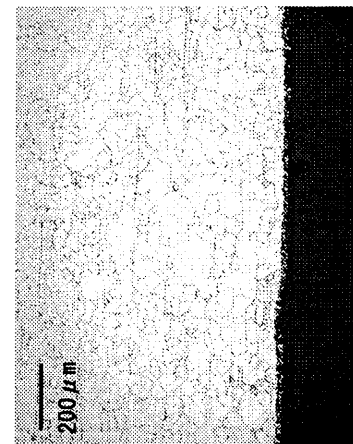
3-(c) 高経年化材(B)側ポイント部  
Phenix経年化継手のNa接液面近傍のミクロ組織



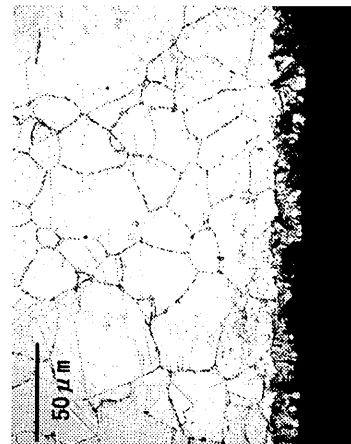
1-(a) 高経年化材(A)側母材



1-(b) 高経年化材(A)側母材



4-(a) 高経年化材(B)側母材



4-(b) 高経年化材(B)側母材