JNC TJ9400 99−009

分散強化型フェライト鋼被覆管用素管の製造評価

−強度及び再結晶特性評価試験−

核燃料サイクル開発機構　研究委託内容報告書

１９９９年６月

技術情報室
No.
2000.5.24
サイクル機構大洗工学センター

神鋼特殊鋼管（株）

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。

〒319-1194　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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Toukai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

C　核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

分散強化型フェライト鋼被覆管用素管の製造評価
－強度及び再結晶特性評価試験－
核燃料サイクル開発機構　研究委託内容報告書

奥田隆成*、原田誠*、安部勝洋*

要　旨

フェライト系およびマルテンサイト系ＯＤＳ鋼被覆管について、ミクロ組織、周方向引張、クリープ破断強度および再結晶粒の方位解析、酸化物粒子の分散状態の評価を行い、以下の成果が得られた。

（１）組織評価

フェライト系では横断面は等軸粒であるが、縦断面では管軸方向に伸張した結晶粒となり、Ｔｉ、Ｙ２Ｏ３量が増すほど伸張の程度は大きくなった。２０％冷間加工材では高密度の転位が観察され、組成によらずＨＶ５０程度の硬さ上昇が認められた。マルテンサイト系では縦、横断面とも微細等軸粒であった。Ｍ９１鋼の場合は転位密度の低いフェライト組織であった。焼きならし処理後の冷却が遅かったためと推定される。Ｍ９２鋼はマルテンサイト組織でＭ９１鋼より硬かった。

（２）周方向引張性質

フェライト系では一様伸びは４００℃で最も低かった。マルテンサイト系ではＴｉ量の高いＭ９２鋼の方が高い強度を示し、延性も目標値を十分満足した。

（３）クリープ破断強度評価

フェライト系ではＴｉ、Ｙ２Ｏ３量が増すほど７００℃の内圧クリープ破断強度は上昇した。マルテンサイト系ではＴｉ、Ｙ２Ｏ３量増加によって従来材より破断強度が上昇することが確認された。

（４）フェライト系ＯＤＳ鋼の再結晶特性評価

分散粒子量が多くなるほど、冷間圧延・熱処理（再結晶）の繰り返しによって、再結晶の起こりにくい｛ｈｋｌ｝＜１１０＞が安定方位として集合組織を形成する傾向が強くなることが明らかとなった。

（５）酸化物粒子分散状態の評価

組成から計算した粒子体積率と分散粒子の観察結果を組み合わせて求めた平均粒子表面間距離に基づき導出したしきい応力はほぼ妥当な値となった。

本報告書は神鋼特殊鋼管（株）が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。契約番号：０９０Ｄ０２８７

（＊）神鋼特殊鋼管（株）研究開発室

Fabrication and Evaluation of ODS Ferritoc Mother Tubes for FBR Fuel Cladding Tubes

- Evaluation of the Mechanical Properties and Recrystallization –

Takanari Okuda*, Makoto Harada*, Katsuhiro Abe*

Abstract

Micro-crystal direction analysis by electron back scattering pattern, oxide particle dispersion parameter analysis and the mechanical properties were evaluated. The main results were as follows:

(1) Microstructure

Although the ferritic steels were equi-axed grains in the transverse direction of tube,the aspect ratio increased with Ti and Y_2O_3 content of the steel. The 20% cold worked tubes were high densities of dislocation. The martensitic steels were equi-axed grains both in transverse and longitudinal directions. M91 steel was a ferritic structure and low dislocation density. M92 steel was a full martensitic.

(2) Tensile properties in the circumferential direction.

The uniform elongation of ferritic steel was lowest at 400 ℃. In the martensitic steels, M92 steel with high Ti content showed a high strength and good ductility.

(3) Creep rupture strength

For the ferritic steels, the internal creep rupture strength at 700 ℃ because higher as Ti and Y_2O_3 content increased. The martensitic steels showed high creep rupture strength by controlling the addition of Ti and Y_2O_3.

(4) Recrystallizaiton analysis of ferritic steels by EBSP

By the sequence of cold rolling and heat treatment, recrystallization became difficult. For a stable direction, {hkl}<110> tends to form a strong texture.

(5) Evaluation for distribution parameter of oxide particles

The threshold stress, which was calculated by the combination of the volume fraction of dispersoids and image analysis, exhibited reasonable results.

Work performed by Kobe Special Tube Co., Ltd. Under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute: Contract No. 090D0287

JNC Liaison: System Engineering Technology Division, Fuel Technology Research Group

*Research and Development Section, Kobe Special Tube Co.

目　　次

1．まえがき …… 1

2．試験内容 …… 2

3．試験方法 …… 3
3.1　供試材 …… 3
3.2　ミクロ組織観察 …… 4
3.3　リング引張試験結果 …… 4
3.4　内圧クリープ破断試験 …… 4
3.5　単軸クリープ破断試験 …… 4
3.6　再結晶特性評価試験 …… 5

4．試験結果および考察 …… 7
4.1　ミクロ組織観察、硬さ測定結果 …… 7
4.2　リング引張試験結果 …… 8
4.3　クリープ破断試験結果 …… 8
4.4　再結晶特性評価試験結果 …… 9
(1)　結晶方位解析結果 …… 9
(2)　酸化物粒子分散状態の調査結果 …… 12

5．評価のまとめ …… 16

6．あとがき …… 17

添付資料1 …… 130
添付資料2 …… 159

表、図、写真リスト

		頁
表1.	H9年度試作管試験材の内容	18
表2.	H9年度試作ODS鋼押出素管の化学成分分析結果　（mass%）	19
表3.	素管明細	20
表4.	製造条件概要	20
表5.	フェライト系ODS被覆管のEBSPによる結晶方位解析試料	23
表6.	H9年度試作ODS鋼被覆管の断面硬さ測定	34
表7-1	ODS被覆管（F91ST）のリング引張試験結果	47
表7-2	ODS被覆管（F91CW）のリング引張試験結果	48
表7-3	ODS被覆管（F92ST）のリング引張試験結果	49
表7-4	ODS被覆管（F92CW）のリング引張試験結果	50
表7-5	ODS被覆管（F94ST）のリング引張試験結果	51
表7-6	ODS被覆管（F94CW）のリング引張試験結果	52
表7-7	ODS被覆管（M91）のリング引張試験結果	53
表7-8	ODS被覆管（M92）のリング引張試験結果	54
表8.	H9年度試作ODS被覆管内圧クリープ試験片の寸法測定結果	57
表9.	H9年度試作ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験条件と結果	58
表10.	H9年度試作ODS鋼被覆管の単軸クリープ破断試験条件と結果	59
表11	押出、1回目圧延集合組織および1回目焼鈍後の再結晶集合組織	
表12	変形集合組織と再結晶集合体組織の関係	105
表13	粒径分布と粒子間距離（合金成分から体積率を求めた場合）	106
表14	表面間距離測定結果（画像処理で直接求めた結果）	110
表15	表面間距離測定結果（成分から体積率を求めた場合）	110
表16	画像データから求めたF91鋼のしきい応力	111
表17	画像データから求めたF92鋼のしきい応力	112
表18	画像データから求めたF93鋼のしきい応力	113
表19	画像データから求めたF94鋼のしきい応力	114
表20	画像データから求めたF95鋼のしきい応力	115
表21	成分データから求めたF91鋼のしきい応力（fmax）	116
表22	成分データから求めたF92鋼のしきい応力（fmax）	117
表23	成分データから求めたF93鋼のしきい応力（fmax）	118
表24	成分データから求めたF94鋼のしきい応力（fmax）	119
表25	成分データから求めたF95鋼のしきい応力（fmax）	120
表26	成分データから求めたF91鋼のしきい応力（fmin）	121
表27	成分データから求めたF92鋼のしきい応力（fmin）	122
表28	成分データから求めたF93鋼のしきい応力（fmin）	123
表29	成分データから求めたF94鋼のしきい応力（fmin）	124
表30	成分データから求めたF95鋼のしきい応力（fmin）	125
表31	酸化物粒子の分散状態から求めたしきい応力（700度）	126
表32	粒子分散画像処理ソフトを用いた測定データ	129
図1.	リング引張試験片	21
図2.	内圧クリープ破断試験片	22
図3.	菊池線の発生とその原理図	24
図4.	菊池線からの方位解析方法	24
図5.	OIM構成の模式図	25
図6	フェライト系ODS網被覆管のリング引張試験結果（引張強さ、一様伸び	55
図7	び）	56
図8	破断強度の比較	60
図9.	F94ST被覆管の650、700度における内圧クリープ破断強度	61
図10.	比較	62
図11.	マルテンサイト系M81.M82被覆管の内圧クリープ破断強度	63
図12	逆極点図のカラー表示	69
図13	F91鋼；最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング	70
図14	F92鋼；最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング	71
図15	F93鋼；最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング	72
図16	F94鋼；最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング	73
図17	F95鋼；最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング	74

図18　F95鋼；熱間押出材結晶面のカラーマッピング　76
図19　F95鋼；1回目CR後結晶面のカラーマッピング　78
図20　F95鋼；1回目焼鈍後結晶面カラーマッピング　80
図21　F95鋼；2回目CR後結晶面のカラーマッピング　82
図22　F91鋼最終焼鈍材の全極点図　83
図23　F92鋼最終焼鈍材の全極点図　84
図24　F93鋼最終焼鈍材の全極点図　85
図25　F91鋼最終焼鈍材のODF　86
図26　F92鋼最終焼鈍材のODF　87
図27　F93鋼最終焼鈍材のODF　88
図28　F94鋼最終焼鈍材の全極点図　89
図29　F95鋼最終焼鈍材の全極点図　90
図30　F94鋼最終焼鈍材のODF　91
図31　F95鋼最終焼鈍材のODF　92
図32　F95鋼熱間押出材の全極点図　93
図33　F95鋼1回目CR材の全極点図　94
図34　F95鋼1回目焼鈍材の全極点図　95
図35　F95鋼2回目CR材の全極点図　96
図36　F95鋼熱間押出材のODF　97
図37　F95鋼1回目CR材のODF　98
図38　F95鋼1回目焼鈍材のODF　99
図39　F95鋼2回目CR材のODF　100
図40　F91鋼1回目焼鈍材の全極点図　101
図41　F91鋼2回目CR材の全極点図　102
図42　F91鋼1回目焼鈍材のODF　103
図43　F91鋼2回目CR材のODF　104
図44　粒子分散状態解析ソフトによる画像処理　128

写真1-1　試作管の組織（符号F91ST:12Cr-2W-0.1Ti-0.08Y2O3 焼鈍材）　26
写真1-2　試作管の組織（符号F91CW:12Cr-2W-0.1Ti-0.08Y2O3 冷却加工材）　27
写真1-3　試作管の組織（符号F92ST:12Cr-2W-0.1Ti-0.13Y2O3焼鈍材 ）　28
写真1-4　試作管の組織（符号F92CW:12Cr-2W-0.1Ti-0.13Y2O3冷却加工材 ）　29
写真1-5　試作管の組織（符号F94ST:12Cr-2W-0.3Ti-0.24Y2O3焼鈍材 ）　30
写真1-6　試作管の組織（符号F94CW:12Cr-2W-0.3Ti-0.24Y2O3 冷却加工材）　31
写真2-1　試作管の組織（符号M91:0.12C-9Cr-2W-0.1Ti-0.34Y2O3）　32
写真2-2　試作管の組織（符号M92:0.12C-9Cr-2W-0.2Ti-0.30Y2O3）　33
写真3-1　フェライト系ODS鋼試作管F91STの組織-薄膜法による電顕観察結果（F91ST;12Cr-2W-0.1Ti-0.08Y2O3熱処理材）　35
写真3-2　フェライト系ODS鋼試作管F91CWの組織-薄膜法による電顕観察結果（F91CW;12Cr-2W-0.1Ti-0.08Y2O3冷却加工材）　36
写真3-3　フェライト系ODS鋼試作管F92STの組織-薄膜法による電顕観察結果（F92ST;12Cr-2W-0.1Ti-0.13Y2O3熱処理材）　37
写真3-4　フェライト系ODS鋼試作管F92CWの組織-薄膜法による電顕観察結果（F92CW;12Cr-2W-0.1Ti-0.13Y2O3冷却加工材）　38
写真3-5　フェライト系ODS鋼試作管F94STの組織-薄膜法による電顕観察結果（F94ST;12Cr-2W-0.3Ti-0.24Y2O3熱処理材）　39
写真3-6　フェライト系ODS鋼試作管F94CWの組織-薄膜法による電顕観察結果（F94CW;12Cr-2W-0.3Ti-0.24Y2O3冷却加工材）　40
写真3-7　マルテンサイト系ODS鋼試作M91の組織-薄膜法による電顕観察結果（M91；0.12C-9Cr-2W-0.1Ti-0.34Y2O3）　41
写真3-8　マルテンサイト系ODS鋼試作M92の組織-薄膜法による電顕観察結果（M92；0.12C-9Cr-2W-0.2Ti-0.30Y2O3）　42
写真4-1　察結果　43
写真4-2　察結果　44
写真4-3　顕観察結果　45
写真4-4　顕観察結果　46

写真5-1	F91綱　2回目CR→最終焼鈍後の組織	64
写真5-2	F92綱；2回目CR→最終焼鈍後の組織	65
写真5-3	F93綱；2回目CR→最終焼鈍後の組織	66
写真5-4	F94綱；2回目CR→最終焼鈍後の組織	67
写真5-5	F95綱；2回目CR→最終焼鈍後の組織	68
写真6	F95綱；熱間押出材の組織	75
写真7	F95綱；1回目CR後の組織	77
写真8	F95綱；1回目焼鈍後の組織	79
写真9	F95綱；2回目CR後の組織	81
写真10-1	画像処理に用いた薄膜TEM観察組織	107
写真10-2	画像処理に用いた薄膜TEM観察組織	108
写真10-3	画像処理に用いた薄膜TEM観察組織	109
写真11	粒子分散状態測定用電顕組織（薄膜）	127

１．まえがき

酸化物分散強化型（０ＤＳ）フェライト鋼は、高温強度（特にクリープ破断強度）に優れると共に、母相がフェライト相であることから耐スエリング性にも優れ、高速増殖炉大型炉用高性能被覆管として有望な候補材として位置づけられている。その目標性能として下記の項目が考えられている。

内圧クリープ破断強度：

７００℃、１００００ｈ破断強度→１１０ＭＰａ以上

内外面腐食減肉を校了した場合

７００℃、１００００ｈ破断強度→１５０ＭＰａ以上

周方向延性：周方向引張一様伸び→１％以上

ＯＤＳ鋼被覆管を実用化するためには、製管性能向上と強度・延性の改善を達成する必要があるが、基礎研究の結果、この実現には組織制御が不可欠であることが判明した。このため、下記の２種類の方法による製管技術開発に取り組んできた。

①フェライト系鋼の加工・再結晶制御

②マルテンサイト系鋼のα－γ相変態の利用

これまでの研究において、化学成分最適化の観点から、強度と加工性に大きな影響を及ぼす合金中のＴｉ添加量と酸化物粉末（Y_2O_3）混合量について下記の範囲で検討してきた。

・フェライト系→Ti：０．１０～０．４０％、Y_2O_3：０．１５～０．３５％

・ﾏﾙﾃﾝｻｲﾄ系　→Ti：０．０５～０．３０％、Y_2O_3：０．１０～０．３５％

一方、製管技術に関しては工業化に必要な冷間加工工程による製管試験に取り組んだ結果、現行の３１６ステンレス鋼被覆管と同様な冷間加工工程により、寸法精度を満足するＯＤＳフェライト鋼被覆管を製造することが可能であることを確認した。試作した被覆管の特性に関しては、再結晶あるいは相変態の導入により、強度異方性の改善効果がみられてきており、当初の目標は達成しつつあるが、現状の強度レベルおよびフェライト系鋼の再結晶率については若干の改善の余地が残され、とくにフェライト系鋼の再結晶特性に関しては加工・熱処理回数が多くなる程、再結晶率が低下すること、またマルテンサイト系鋼については相変態導入により異方性は小さくなるが、クリープ強度がフェライト系鋼よりやや低くなることが判明した。

平成９年度研究では、残された課題の中で、成分設計の観点から、フェライト系鋼については加工回数を減少させる工程を適用し、再結晶率の効果を系統的に調べるための被覆管試作が実施された。マルテンサイト系鋼については高強度化を狙った組成の被覆管試作が実施された。

本試験では、平成９年度試作において２回ＣＲ（冷間ピルガー圧延、以下ＣＲと略称）により製管したＯＤＳ鋼被覆管について、ミクロ組織観察（光学顕微鏡、透過型電子顕微鏡）および強度特性評価試験（硬さ、リング引張、内圧および単軸クリープ破断試験）を実施した。また、２回ＣＲを適用して試作したフェライト系ＯＤＳ鋼５鋼種について加工・集合組織の解析、粒子分散状態の評価を行った。

２．試験内容

2.1. 平成９年度試作被覆管の強度特性評価試験

平成９年度試作被覆管(フェライト系５鋼種、マルテンサイト系３鋼種)の内、フェライト系３鋼種(Ｆ９１、Ｆ９２、Ｆ９４)の熱処理仕上げ(ＳＴ)材および冷間加工仕上げ(ＣＷ)材とマルテンサイト系２鋼種(Ｍ９１、Ｍ９２)について以下の評価試験を行う。

(１)光学顕微鏡組織：ＬおよびＴ方向、倍率100および400、各２視野
(２)電子顕微鏡組織：薄膜…倍率10000および200000、各２視野
抽出レプリカ*…倍率1000および10000、各２視野
＊：抽出レプリカはＳＴ材のみについて実施する。
(３)硬さ(Hv１kg)　：各５点平均
(４)リング引張試験：室温、400、600、650、700℃　各温度２本
(５)内圧クリープ破断試験：温度／目標破断時間
Ｆ９１鋼(ＳＴ材)…700℃／100ｈ、1000ｈ
Ｆ９１鋼(ＣＷ材)…700℃／100ｈ、1000ｈ
Ｆ９２鋼(ＳＴ材)…700℃／100ｈ、1000ｈ
Ｆ９２鋼(ＣＷ材)…700℃／100ｈ、1000ｈ
Ｆ９４鋼(ＳＴ材)…650℃／100ｈ、1000ｈ、 2600ｈ＊＊
700℃／100ｈ、1000ｈ、10000ｈ＊＊
Ｆ９４鋼(ＣＷ材)…700℃／100ｈ、1000ｈ、 2600ｈ＊＊
Ｍ９１鋼　…700℃／100ｈ、1000ｈ
Ｍ９２鋼　…700℃／100ｈ、1000ｈ、10000ｈ＊＊
＊＊：目標破断時間10000ｈで応力設定するが、今年度の試験時間は1000ｈとする。
(６)単軸クリープ破断試験：温度／目標破断時間
Ｆ９４鋼(ＳＴ材)…700℃／100ｈ、1000ｈ
Ｆ９４鋼(ＣＷ材)…700℃／100ｈ、1000ｈ

2.2. 再結晶特性評価試験

熱処理後および冷間加工後の各結晶粒の方位測定を行い、再結晶しやすい方位、再結晶しにくい方位を以下の測定により解析する。

(1)測定試料

・５鋼種

(2)測定方法

・ＥＢＳＰ(Electron Back Scattering Patten)装置：加工組織の残る結晶方位

・透過電子顕微鏡観察：結晶方位と酸化物粒子の分布状態の観察

３．試験方法

3.1. 供試材

Ｈ９年度試作ＯＤＳ鋼被覆管は、フェライト系５鋼種（Ｆ９１、Ｆ９２、Ｆ９３、Ｆ９４、Ｆ９５）、マルテンサイト系３鋼種（Ｍ９１、Ｍ９２、Ｍ９３）の計８鋼種である。ミクロ組織観察と強度評価試験に供したのは、フェライト系Ｆ９１、Ｆ９２、Ｆ９４の３鋼種、マルテンサイト系Ｍ９１、Ｍ９２の２鋼種で、フェライト系については熱処理上りと冷間加工仕上げの２種類で、マルテンサイト系は熱処理上りのみである。これらの試験材の内容をまとめて**表１**に示す。合計８種類の試験材である。再結晶特性評価試験はフェライト系全鋼種（５鋼種）の途中工程材も含めた試験材について行った。参考としてＨ９年度に試作されたＯＤＳ鋼被覆管全鋼種の化学組成を**表２**に、素管の明細を**表３**に、また被覆管製造条件の概要を**表４**に示した。フェライト系は再結晶重視から強度重視まで広範囲にＴｉ量とY_2O_3量を変化させたものである。Ｆ９４とＦ９５は同組成であるが、メカニカルアロイング処理における雰囲気の影響を調べるためＨｅガス中とＡｒガス中で処理を行ったものである。さらに、熱処理上りと２０％冷間加工仕上げの影響を調べるため、各鋼種２種類の被覆管が試作された。

マルテンサイト系は強度向上のため、Ｔｉ、Y_2O_3量をこれまでより高めた３鋼種が試作された。

製造条件ではフェライト系の再結晶率を高めるため、２回圧延（冷間ピルガー圧延、ＣＲ）で２回目ＣＲを高加工率とした新工程が適用された。被覆管の目標寸法は、最終冷間加工仕上げで、外径８．５㎜、肉厚０．５㎜としている。従って、熱処理仕上げでは外径９．３㎜、肉厚０．６㎜となっている。

3.2. ミクロ組織観察

フェライト系ＯＤＳ鋼被覆管３鋼種（Ｆ９１、Ｆ９２、Ｆ９４）の熱処理上り材（ＳＴ）と冷間加工材（ＣＷ）の計６種、マルテンサイト系ＯＤＳ鋼被覆管２種（Ｍ９１、Ｍ９２）の熱処理上り材、合計８種類の試験材について実施した。

(１)光学顕微鏡組織

被覆管の縦方向(Ｌ)と横方向(Ｔ)の２視野について倍率100倍と400倍で観察した。

(２)硬さ

被覆管の縦横断面の肉厚中央部の硬さを荷重１kgfのビッカース硬度計にて５点測定し、平均値を算出した。

(３)電子顕微鏡組織

８種の被覆管から薄膜試料を採取し、倍率10000倍と200000倍の２視野の電顕(ＴＥＭ)組織観察を行った。また、フェライト系冷間加工材を除いた５種の被覆管から抽出レプリカ試料を採取し、倍率1000倍と10000倍の２視野のＴＥＭ組織観察を行った。なお、写真の焼付は１．５倍とした。

3.3. リング引張試験

被覆管から**図１**に示すリング状の引張試験片を加工し、周方向引張試験をＲＴ、４００、６００、６５０、７５０℃にて行い、引張強さ、０．２％耐力、一様伸び、全伸びを測定した。引張速度は０．１mm／minとし、繰り返しは２とした。

3.4. 内圧クリープ破断試験

８種の被覆管から長さ１００～１１０mmの試験片を切り出し、図２に示すように、片端に端栓、片端に圧力導入管を真空ろう付け法によって接続した試験片を加工し、７００℃における内圧クリープ破断試験を行った。Ｆ９４ＳＴについては６５０℃の試験も実施した。破断前後の試験片について外径寸法測定を行い、外径ふくれ率を求めた。

3.5. 単軸クリープ破断試験

フェライト系ＯＤＳ被覆管Ｆ９４ＳＴ、Ｆ９４ＣＷの２種について７００℃における単軸クリープ破断試験を行った。被覆管から長さ１６０mmの試験片を切り出し、両端につかみ治具を装着して軸方向の荷重を負荷した。

3.6. 再結晶特性評価試験

(1)ＥＢＳＰ法による結晶方位解析

フェライト系ＯＤＳ鋼被覆管５種(Ｆ９１、Ｆ９２、Ｆ９３、Ｆ４、Ｆ９５)の管表面における結晶方位解析を行った。Ｆ９５を中心に途中工程材についても調査した。試料の一覧を表５に示す。

表面結晶粒の方位測定方法として、電子線チャンネリングパターン法(Electron Channeling Pattern, ＥＣＰ)や電子線後方散乱法(Electron Back Scattering Pattern, ＥＢＳＰ)等がある。ＥＣＰ法は、１０μｍ程度の空間分解能であるのに対し、ＥＢＳＰ法では、０．２μｍ以下の微小領域の方位解析が可能で、表面結晶粒毎の方位解析や自動化によって結晶方位のカラー表示、集積度、極点図の作成が可能である。

本試験では、走査型電子顕微鏡（ＳＥＭ）に組み込んだ米国ＴＳＬ(TexSEM Laboratories)社製ＯＩＭ™アナライザーを用いてＥＢＳＰ法による結晶方位解析を行った。ＯＩＭの原理および装置の概要を以下に示す。

〈ＯＩＭ〉

ＯＩＭ(Orientation Imaging Microscope)は、電子ビームと結晶の相互作用によって得られるＥＢＳＰ(Electron Back Scattering Pattern)、即ち菊池線を自動的に処理、解析して、バルク試料中の結晶粒の局所方位、方位差およびミクロ組織等を、空間分解能０．２μｍ以下、方位差２°以内、測定時間１点１秒以内で解明でき、イメージできる極めて便利な顕微鏡である。

〈菊池線の発生とパターンの解析〉

菊池線の発生は、非弾性散乱を受けてエネルギーをわずかに失った電子が弾性散乱を受けるためと考えられている。図３のＰ点で非弾性散乱が起こるとすると、Ｐ点は球面波源となる。非弾性散乱された電子の角度分布は入射角方向ＯＰで最大である。回折図形のバックグラウンドの強度は主に非弾性散乱のために生じる。Ｐ点で散乱された電子線の中、ブラッグ角θにある１組の反射線によって、バックグランド強度の得失が起こり、９０°－θの半頂角の２つの円錐で与えられる。θが小さいために殆ど直線になり、蛍光板上には双曲線として一対の白黒の直線が得られる。これが菊池線である。

図４に方位解析法を示す。菊池線から結晶方位を決定するためには、その方位を囲む３つの既知方位の位置を見出せばよい。図４(ａ)中のＰおよびＯの各点は、それぞれ晶帯軸および面法線のステレオ投影図上の投影点である。図中の距離は各方位間の角度に対応する。図４(ｂ)に試料面法線と(ｈｋ１)面のトレースおよびその法線の極点との関係を示す。図中のＰ点は晶帯軸の投影点で、図より試料面法線の方位は、３つの平行線の面法線の極点との角度から求められる。

〈ＯＩＭ装置の構成および測定方法〉

図５にＯＩＭの構成を示す。装置はＳＥＭが主体で、電子銃、７０°に傾斜した試料、蛍光板、ファイバーオプテックス、カメラ、カメラ制御ユニット、パソコン、ＳＥＭ制御ユニット、ステージ制御ユニットなどによって構成されている。ＳＥＭの電子ビームと７０°に傾斜した試料中の都合よく配位した結晶面との相互作用による電子の後方散乱によってＥＢＳＰが得られる。
得られたＥＢＳＰは工学ファイバーを経て光増幅器を連結した蛍光スクリーンに集められたカメラに入る。ＥＢＳＰ像は映像に平均化され、イメージプロセッサでバックグラウンドが差し引かれ、デジタル化したパターンは操作盤で指数付けされ、試料のその領域の方位が決定される。格子の各点で方位を記述する３つのオイラー角は、位置を記述する座標に沿って記録される。イメージあるいはマップは、結晶方位を色のスケールでマッピングする等で視覚化することなどが容易に行われる。

明瞭なパターンが求められるが、試料の表面に凹凸がないこと、残留歪みがないこと、酸化皮膜がなく、汚れがないこと等が必要である。

測定手順は以下のようにした。被覆管を切断し、内外面両側から研磨し、管軸方向に平行にφ３ｍｍの電顕薄膜試料を採取し、最初に電顕直接観察を行い、再結晶の程度を観察して位置決めを行った後、ＳＥＭ－ＯＩＭ™アナライザーを用いてＥＢＳＰ法による結晶方位解析を行った。

（２）電子顕微鏡による酸化物粒子の分布状態の観察

フェライト系ＯＤＳ鋼被覆管５種（Ｆ９１、Ｆ９２、Ｆ９３、Ｆ９４、Ｆ９５）に平成７年度試作７Ａ（12Cr-1.5W-0.25Ti-0.23Y_2O_3）被覆管１種を加えた計６種の被覆管について、高倍率（倍）の薄膜法によるＴＥＭ観察を行い、微細酸化物粒子の分散状態を調査した。撮影したＴＥＭ写真の粒子について画像解析を行い、酸化物粒子の分散パラメータ（粒子数、粒径分布、平均粒子径、平均粒子中心間距離、平均粒子表面間距離）を求めた。平均粒子表面間距離からクリープのしきい応力の算定も試みた。酸化物粒子の表面間距離は、

①薄膜の厚さを無視して、写真上の粒子の表面間距離を画像解析により直接測定する方法
②厚さのわかる等厚干渉縞間の粒子数を測定し、単位体積当たりの粒子数密度に換算し、この値を粒径分布と組み合わせて表面間距離を求める方法
③化学組成から酸化物粒子の体積分率を換算し、粒径分布と組み合わせて表面間距離を求める方法

の３種類について検討した。

4．試験結果および考察

4.1. ミクロ組織観察硬さ測定結果

フェライト系ＯＤＳ鋼被覆管６種の組織を光学顕微鏡により観察した結果を**写真１－１～写真１－６**、マルテンサイト系２種の被覆管の組織を光学顕微鏡により観察した結果を**写真２－１～写真２－２**に示す。

フェライト系の場合、いずれも横断面はほぼ等軸粒であるが、縦断面では管の軸方向（加工方向）に伸長した結晶粒となっている。縦方向の結晶粒の伸長の程度（アスペクト比）は、Y_2O_3量が増す程大きくなっている。また、熱処理上り材より冷間加工仕上げ材の方がやや大きい。

マルテンサイト系の場合、縦、横断面ともほぼ等軸粒で、フェライト系の結晶粒よりかなり細かくなっている。

被覆管縦、横断面の硬さ測定結果を**表６**に示す。

フェライト系の場合、Y_2O_3量が増す程、硬さは上昇する。３鋼種とも２０％冷間加工によって硬さはＨｖ５０程度上昇する。加工硬化の大きさはY_2O_3量に依存しない。

マルテンサイト系の場合、Ｍ９２の硬さに比べて、Ｍ９１の硬さはかなり低くなっている。Ｍ９１、Ｍ９２の組成からこの硬さの差は説明できない。後述のＴＥＭ組織観察から、この硬さの差は組織の差による。

ＯＤＳ鋼被覆管８種の組織の薄膜法によるＴＥＭ観察結果を**写真３－１～写真３－８**に示す。フェライト系Ｆ９１ＳＴ（熱処理材）の場合、一部に転位密度の高い未再結晶粒もみられるが、大部分に転位のない再結晶粒が観察される。Y_2O_3量は０．０８wt％と低いが、微細酸化物粒子の分散が認められる。Ｆ９２ＳＴの場合も同様であるが、未再結晶粒はＦ９１ＳＴよりやや多い。Ｆ９４ＳＴの場合、Y_2O_3量は０．２４wt％と高いが大部分の領域は再結晶している。再結晶粒は管軸方向に細長い形状となっている。微細酸化物粒子よりやや大きい粒子が管軸方向に連なっているのが特徴的である。２０％冷間加工仕上げのフェライト系ＯＤＳ鋼被覆管の組織は転位密度が高く、再結晶状態および分散粒子の観察が難しい。

マルテンサイト系Ｍ９１の場合、結晶粒は細かいが転位密度の低いフェライト等軸粒となっている。焼戻しマルテンサイト組織ではない。これは１０５０℃焼ならし時の冷却速度が遅かったためと推定される。Ｍ９２の場合は転位密度が高く、ラス状マルテンサイト組織が観察される。

抽出レプリカ法によるＴＥＭ観察結果を**写真４－１～写真４－４**に示す。フェライト系の場合、Ｔｉ量の低いＦ９１ＳＴ，Ｆ９２ＳＴの場合、結晶粒界に炭化物の析出が認められる。Ｔｉ量の高いＦ９４ＳＴの場合は粒界炭化物はみられないが、微細酸化物粒子よりやや大きい粒子が筋状に連なっているのが観察される（写真４－１）。微細酸化物粒子の大きさはＦ９１ＳＴ，Ｆ９２ＳＴ，Ｆ９４ＳＴの順に小さくなるようであるが、その差は小さい（写真４－２）。粒子分散状態の詳細は４．４項に示す。

マルテンサイト系の場合はＣ量が多いため、粒界、粒内に粗大な炭化物の析出が観察される。酸化物粒子の大きさはＴｉ量の高いＭ９２の方がやや小さくなっている。

4.2. リング引張試験結果

０ＤＳ鋼被覆管８種（Ｆ９１ＳＴ，Ｆ９１ＣＷ，Ｆ９２ＳＴ，Ｆ９２ＣＷ，Ｆ９４ＳＴ，Ｆ９４ＣＷ、Ｍ９１、Ｍ９２）のＲＴ，４００，６００，６５０，７００℃におけるリング引張試験結果を表７－１～７－８に示す。試験数ｎ＝２の引張強さの平均値と試験温度の関係および一様伸びの最小値と試験温度の関係をフェライト系については図６、マルテンサイト系については図７に示す。

フェライト系鋼の場合、Ｔｉ，Y_2O_3量の低いＦ９１，Ｆ９２の室温引張強さは冷間加工材の方が熱処理材より高くなる。Ｔｉ，Y_2O_3量の高いＦ９４の室温引張強さは熱処理材より冷間加工材の方が低くなる。これは、冷間加工材の延性が低く、最大抗張力に達する前に破断するためである。Ｆ９４は高温でもこの傾向が認められる。一様伸びは、試験を実施した温度範囲では、４００℃が最も低くなる。とくに冷間加工材の一様伸びは低い。Ｆ９４冷間加工材は目標値（一様伸び１％以上）を下回る。熱処理材でも目標値に対する余裕は小さい。

マルテンサイト系の場合、Ｔｉ量の高いＭ９２の室温および高温の引張強さはＭ９１より高い。一様伸びは大きな差はなく、フェライト系より高く、目標値１％以上を充分に上回っている。ミクロ組織観察結果で示したごとく、マルテンサイト系は微細等軸粒の組織を有するため、周方向でも比較的高い延性を示すと考えられる。

4.3. クリープ破断試験結果

０ＤＳ鋼被覆管８種（Ｆ９１ＳＴ，Ｆ９１ＣＷ，Ｆ９２ＳＴ，Ｆ９２ＣＷ，Ｆ９４ＳＴ，Ｆ９４ＣＷ、Ｍ９１、Ｍ９２）について内圧クリープ破断試験を実施した。試験片製作前に、試験片の外径と両管端の肉厚を測定した。測定結果を表８に示す。平均径の式による圧力とフープ応力の換算には測定値の平均値を用いた。内圧クリープ破断試験結果を表９に示す。Ｆ９４ＳＴ，Ｆ９４ＣＷの２種類については７００℃の単軸クリープ破断試験も行った。結果を表１０に示す。試験前後の外径寸法測定から、外径ふくれ率を求めた結果は末尾の添付資料１に示した。

フェライト系Ｆ９１，Ｆ９２，Ｆ９４熱処理材、冷間加工材のフープ応力－破断時間関係を図８に示す。Ｔｉ，Y_2O_3量が高くなるほど内圧クリープ破断強度は高くなる。いずれも熱処理材の破断強度より冷間加工材の方が低くなる。Ｔｉ，Y_2O_3量の比較的高いＦ９４でも目標強度（７００℃・10,000ｈ破断強度１１０ＭＰａ以上）を満足しない。Ｆ９４熱処理材の６５０，

７００℃の応力－破断時間関係を図９に示す。近い組成の平成７年度試作フェライト系ＯＤＳ鋼被覆管Ｆ７１（再結晶率は新工程によるＦ９４の方が高い）の内圧クリープ破断強度と比較すると、高応力側ではＦ７１の方が高いが低応力、長時間側ではＦ９４の方が高くなる傾向が認められる。これは再結晶率の差によると考えられる。Ｆ９４熱処理材、冷間加工材の７００℃における内圧クリープ破断強度と単軸クリープ破断強度の比較を図１０に示す。いずれも内圧より単軸破断強度の方が高く、クリープ強度の異方性が認められ、とくに冷間加工材の方が大きい。

マルテンサイト系Ｍ９１，Ｍ９２熱処理材のフープ応力－破断時間関係を図１１に示す。Ｔｉ量の高いＭ９２の方がＭ９１より高い破断強度を示す。まだ試験時間が短いため目標強度達成の可能性は不明である。Ｍ９１，Ｍ９２よりＴｉ，Y_2O_3量の低い平成８年度試作マルテンサイト系ＯＤＳ鋼被覆管Ｍ８１，Ｍ８２の破断強度比較すると、ＴｉおよびY_2O_3量の増量によって内圧クリープ破断強度は確実に上昇している。２回ＣＲによる新工程はフェライト系ＯＤＳ鋼被覆管の再結晶率を高めることを狙ったものであるが、新工程によってＴｉ，Y_2O_3量の高いマルテンサイト系ＯＤＳ鋼被覆管の製作も可能となった。

4.4. 再結晶特性評価試験結果

(1) 結晶方位解析結果

写真５－１～５－５にＦ９１鋼～Ｆ９５鋼の最終焼鈍材（１１５０℃空冷）の電子顕微鏡組織（薄膜）を示す。Ｆ９１鋼、Ｆ９２鋼はほぼ全面再結晶組織、Ｆ９３鋼は一部未再結晶、Ｆ９４鋼、Ｆ９５鋼は再結晶と未再結晶部が混在する組織となっている。このＴＥＭ写真と同一視野について、ＥＢＳＰ解析を行った。

図１２は逆極点図を表しており、カラーグラデーションにより面の強度を表す。（１１１）面は紺色、（００１）面は赤色、（１０１）面は緑色となっており、これらの中間に位置する面は中間色で示めされる。

図１３～図１７にＦ９１鋼～Ｆ９５鋼の最終焼鈍後のカラーマッピングを示す。図の上下方向が圧延方向である。Ｆ９１～Ｆ９５鋼は若干圧延方向に伸びているが等軸粒に近い組織となっており、青色（１１１）面と赤色（００１）が若干強い傾向が認められる。図中の結晶粒界は、全て方位差１５° 以上の大傾角粒界であった。Ｆ９４鋼とＦ９５鋼では中間色が多くなっており、即ち高次の結晶面が多くなっている可能性がある。図中で黒い部分は歪みが高く、パターン解析できなかった領域であり、未再結晶粒に相当する。Ｆ９４鋼では一部認められ、Ｆ９５鋼では約５０％が再結晶していないことがわかる。Ｆ９４とＦ９５は同組成であるが、Ｆ９４の再結晶率の方が高い。

Ｆ９５鋼押出材のＴＥＭ像を写真６に、カラーマップを図１８に示す。(００１)面と(１１１)面が多く認められ、押出方向に伸びた結晶粒はいくつかのサブグレインの集まりであることがわかる。また隣り合った結晶の方位差は小さい。

Ｆ９５鋼の１回目ＣＲ材のＴＥＭ像を写真７に、カラーマップを図１９に示す。押出材よりも歪みが高かったが、カラーマップを取ることができた。圧延面に出ている結晶面は押出材と同じと判断される。

Ｆ９５鋼の１回目の焼鈍材(中間焼鈍)のＴＥＭ像を写真８に、カラーマップを図２０に示す。一部歪みが高いところもあるが、９０％以上再結晶しており、写真５の最終焼鈍材に比べて再結晶率は高い。色の偏りはなく、(１１０)に近い面も現れている。長く伸びた粗大粒と微細粒が混在している。微細粒は亜粒界ではなく、全て大傾角粒界となっている。

Ｆ９５鋼の２回目ＣＲのＴＥＭ像を写真９に、カラーマップを図２１に示す。１回目ＣＲ材に比べて結晶粒の幅は広いが、色調は１回目ＣＲ材と同様と判断される。

図２２～図２４にＦ９１鋼～Ｆ９３鋼の最終焼鈍後の全極点図とそこに現れる優先方位を、図２５～図２７にＯＤＦ（結晶方位関数；３つのオイラー角(ϕ、ϕ_1、ϕ_2)のうち、ϕ_2を固定して表示）を示す。全極点図から、Ｆ９１、Ｆ９２、Ｆ９３鋼ともに２回目の焼鈍後は{１１１}<２１１>集合組織となっていることがわかる。ＯＤＦからも{１１１}<２１１>を中心とした結晶方位分布となっている（ϕ_2＝４５°、ϕ_1＝９０°の位置に現れる）。

一方、図２８～図３１に示すＦ９４鋼とＦ９５鋼では{１１１}<２１１>方位は現れず、{１００}<０１１>方位となっている。Ｆ９５鋼では未再結晶部によると思われる{１１１}<０１１>方位も認められる。

図３２～図３９にＦ９５鋼の熱間押出材→１回目ＣＲ材→中間焼鈍材→２回目ＣＲ材の全極点図とＯＤＦを示す。押出材では{１１１}<０１１>、{２１１}<０１１>、{１００}<０１１>の３方位となっており、１回目ＣＲ後では{１１１}<０１１>、{２１１}<０１１>の２方位になっている。１回目の中間焼鈍では{１１１}<０１１>、{２１１}<０１１>方位で、１回目ＣＲ後と見かけ上同じ集合組織となっている。２回目ＣＲ後は{２１１}<０１１>以外に{１１１}<２１１>という新たな方位が認められる。

図４０～図４３にＦ９１鋼の１回目焼鈍材と２回目ＣＲの全極点図とＯＤＦを示す。１回目焼鈍後の優先方位は{１１１}<０１１>、{２１１}<０１１>で、この工程まではＦ９５鋼と同じである。２回目ＣＲ材では{１００}<０１１>と{１１１}<２１１>方位となっている。

各鋼種について押出→圧延(１回目ＣＲ)→焼鈍(１回目)→圧延(２回目ＣＲ)→焼鈍(２回目、最終)の各工程における集合組織変化を調べた結果を表１１に示す。

押出時の集合組織は{１１１}<１１０>、{２１１}<１１０>、{１００}<１１０>といった、<１１０>方位を晶帯軸とした３グループが形成されている。いずれもＢＣＣ金属を強加工した時に生ずる安定方位であるが、これを１回圧延すると{１００}面成分が消滅して変形集合組織として{１１１}<１１０>、{２１１}<１１０>の２グループとなっている。１回目の焼鈍後は見かけ上、同じく{１１１}<１１０>、{２１１}<１１０>の２グループからなる再結晶集合組織となっている。

表１２に示す鉄で見られる典型的な変形集合組織と再結晶集合組織の関係と比較してみると、{１１１}<１１０>はひずみ誘起粒界移動により{１１１}<１１０>となる。{２１１}<１１０>は通常、<１１０>軸のまわりに３５°回転して{１１１}<１１２>集合組織を作ることになっているが、１回目の焼鈍時は現れていない（正確には{５５４}<２２５>方位と思われるが、{１１１}<１１２>との判別が難しいので、便宜上{１１１}<１１２>のみ表示する）。{２１１}<１１０>方位は再結晶して{１１１}<１１２>になるはずであるが、おそらく粒子分散により結晶の回転が抑制されて、回復型の再結晶挙動になった結果、{２１１}<１１０>のまま残ったものと思われる。

１回目の焼鈍までは酸化物粒子量で最も差があるＦ９１鋼、Ｆ９５鋼ともに同じ集合組織が得られていることから、酸化物量に関わらず、他のＦ９２、Ｆ９３、Ｆ９４鋼でも同じ集合組織になっているものと推定される。

一方、２回目の圧延ではどの鋼種も１回目の圧延では現れなかった{１１１}<１１２>方位が現れている。これは２回目の圧延の方が加工率が大きかったことによると思われる。この方位からは{１１１}<１１０>再結晶方位が出やすいといわれている。圧延方向に<１１０>を持つ{ｈｋ１}<１１０>のグループは一般に冷延によって方位が変化しない安定方位であり、{１１１}<１１０>方位以外は非常に再結晶しにくいと考えられている。Ｆ９５鋼の２回目の圧延で{２１１}<１１０>方位が強く出ていることが、２回目の焼鈍時に再結晶率が低くなった原因の一つと考えられる。

１回目ＣＲ後に認められた{１１１}再結晶集合組織は、多結晶鉄では冷間圧延前の結晶粒径が小さいほど強く発達することから、１回目ＣＲ時の針状の細い結晶粒の段階では有利に働くが、一度再結晶した後の２回目ＣＲ後では１回目ＣＲほど結晶粒径が小さくならず、このことも焼鈍を繰り返すと再結晶しにくくなる原因の一つと考えられる。

これまで集合組織に関する研究結果では

（1）ＪＮＣの報告によると

・冷間圧延材：{１００}<１１０>

・再結晶材　：（１１０）が主体で（２２２）が出てくる。

（2）住金の報告によると

・圧延材：{１１２}<１１０>と{００１}<１１０>

・１２８０℃焼鈍：ランダム化。

（3）フランスの報告によると

・熱間押出：{１００}<１１０>

再結晶（核生成、成長）を阻害する要因になっている。

・冷間圧延材：{１００}<１１０>が保持される。<１１２>成分もわずかにある。

いずれの報告とも矛盾しないが、今回は鋼種別の傾向を比較した点、押出から２回目の焼鈍に至る過程での変化を明らかにした点で、これまでの報告よりも更に定量的な評価ができたと判断される。

いずれにせよ{１００}<１１０>方位が一度出てしまうと、その後の再結晶が難しくなることは確かである。

（2）酸化物粒子分散状態の調査結果

再結晶特性、クリープ強度に影響するＯＤＳ鋼の微細酸化物分散粒子を薄膜法ＴＥＭ観察により行い、フェライト系ＯＤＳ鋼被覆管の粒子分散データを採取した。

粒子分散強化鋼のクリープ速度εは、

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[(\sigma - \sigma_{th})^m \cdot (D / b^2) \right]$$

で表される。ここで、ε_0と有効応力指数mは単相材料の特性から決まる材料定数である。σ_{th}はその応力下でクリープ速度がゼロとみなせるしきい応力であり、外部応力に依存しない。つまりσ_{th}を大きくすれば、材料は強化される。

σ_{th}は粒子表面間隔λに逆比例する。λと粒子の直径d_pおよび粒子の体積比V_pの間に、球状粒子を仮定すると次の関係がある。

$$\lambda = d_p \left(\sqrt{(\pi / (6 V_p) - 1)} \right)$$

従って、細かい粒子（d_p小）を多量（V_p大）に分散すれば、σ_{th}が増大し、材料を強化できると考えられている。

しかしながら厳密には、オローワン機構(斥力型)、上昇運動、ボイド強化機構(引力型)などの粒子と転位の相互作用を考慮する必要がある。従来は転位と硬い分散粒子の相互作用は斥力型とされてきたが、最近では、高温では

粒子表面における転位の応力場の拡散緩和が起こり、斥力型から引力型に変化する場合があることが証明されている。

オローワン応力σ_{or}およびボイド強化応力σ_vを導き出すためには、分散粒子（＝酸化物粒子）の分散パラメータ（平均粒子中心間距離ℓ_sと平均粒子半径r_sを用いて、

$$\lambda = 1.25\ell_s - 2r_s$$

と表される。ここで、係数1.25は分散粒子が母相中に無秩序に分布していると仮定し、粒子の平面における規則正方形分布を無秩序分布に変換するときの変換係数である。ℓ_sとr_sは次式に従って導かれる。

$$\ell_s = \sqrt{(2\pi\bar{r}^3) / (3f\bar{r})}$$

$$r_s = (\pi/4) \cdot (\bar{r}^2/\bar{r})$$

ここで$\bar{r}$、$\bar{r}^2$、$\bar{r}^3$はそれぞれr、r^2、r^3の平均値であり、酸化物粒子の大きさの分布より求めた。fは粒子の体積分率で、(1)薄膜写真から求められる面積数密度Nsおよび薄膜の厚みも考慮した体積数密度Nvと、粒子径のヒストグラムから得られる平均粒子径rを組み合わせて求める方法と、(2)合金の化学成分から形成される酸化物の組成を予測して求める方法がある。

(2)の方法では、酸化物としてY_2O_3とY_2TiO_5の2種類を考え、合金組成とY_2O_3の密度(5.03g／cm^3)から体積率を求めた。

表13に合金成分から酸化物の体積率：fを求めた場合の、粒径分布と粒子間距離の関係を示す。Y_2O_3単独の場合がfの最小値、全て複合酸化物Y_2TiO_5になった場合がfの最大値となる。fはY_2O_3とTiO_2量に依存し、λはfだけでなく、rにも依存する。

写真10－1～写真10－3に用いた写真の例として、F91鋼～F95鋼のTEM組織(薄膜)を示す。見かけ上もF95鋼の方が粒子径が小さく、そのばらつきも小さい。単位面積当たりの粒子数も大きく、平均的に粒子間距離が短い。

表14に上記(1)の画像処理で直接fとλを求めた結果を、表15に上記(2)の成分からfとλを求めた結果を示す。画像処理で求めた方が、λが小さめになる傾向が認められるが、酸化物量が多く(粒子径が小さく)なるほどその差は小さくなる。おそらく酸化物量の多くなるほど均一分散化が進むものと思われる。

オローワン応力σ_{or}は、次式にλを代入して求められる。

$$\sigma_{or}/G = A_{or} \cdot Mb/(2\pi\lambda) \cdot [\ell n(D/r_o) + B] \quad (a)$$

$A = 1/(1-\upsilon)$, $B = 0.6$ ：らせん転位

$A = 1$, $B = 0.7$ ：刃状転位

ここで、Gは剛性率、υはポアソン比、Mはテーラー因子、bはバーガースベクトルの大きさ、r_oは転位芯のcut-off半径である。

ボイド強化応力σ_vは、(a)式と同形で係数Aのみが異なり、Aは次式で与えられる。

$A = (1+\nu\sin^2\phi)/(1-\upsilon)\cdot\cos\phi$ ：らせん転位

$A = [1-\upsilon/(1-\upsilon)\cdot\sin^2\phi]\cdot\cos\phi$ ：刃状転位

ここで、ϕは転位がボイドから離脱するときの臨界角でポアソン比に依存し、らせん転位に対しては$\phi = 47°$、刃状転位に対しては$\phi = 19°$である。

表１６～表２０に画像データから求めた体積率から導出した各鋼種のしきい応力を、表２１～表２５に成分データから求めた体積率（このときの体積率は酸化物粒子が全てY_2TiO_5と仮定した値＝fmaxである）から導出した各鋼種のしきい応力を示す。表２６～表３０に、酸化物粒子が全てY_2O_3と仮定した場合の体積率＝fminから導出した各鋼種のしきい応力を示す。

刃状転位よりらせん転位の方がしきい応力が高く、オローワン応力の方がボイド強化応力よりその差が大きい。また転位芯のcut-off半径を小さくした方が、しきい応力が高くなる。いずれの場合もオローワン応力の方がボイド強化応力よりも高い値となった。

以上、しきい応力を計算した結果をまとめると表３１のようになる。成分から体積率を求めた方が、画像データから直接求めた場合よりも、鋼種間でのしきい応力の差が大きくなっている。いずれの場合もＦ９１＜Ｆ９２＜Ｆ９３＜Ｆ９４＜Ｆ９５鋼の順にしきい応力が高くなる傾向が認められ、クリープ破断試験の傾向と一致している。但し、クリープ破断試験結果よりも高めのしきい応力となっており、分散状態から予測されるほど強度が高くないという結果になっている。

しきい応力以下での変形としては、拡散クリープや粒界すべりが考えられるが、これを検証するにはクリープ破断部近傍のミクロ解析が必要である。

Ｆ９４鋼とＦ９５鋼は合金成分は同じであるが、クリープ強度に差が認められ、これはＦ９４鋼の分散状態が良くないことが計算の結果からも確認できた。Ｆ９４鋼はＨｅ雰囲気でＭＡ処理しており、Ａｒ雰囲気で処理しているＦ９５鋼の場合に比べてＭＡ処理温度が低い（Ａｒではタンク温度１２０℃に対して、Ｈｅでは５０℃）。酸化物の微細化が起こっていることから、ＭＡ中に酸化物粒子の分解・固溶は起こっていると思われるが、素地金属粉末の温度が低いため、金属粉末の扁平化が進まないので、結果的に酸化物は偏在していると推定される。

平成７年度試作フェライト系７A被覆管(１２Ｃｒ－１．５Ｗ－０．２５Ｔｉ－０．２３Y_2O_3)についても、分散粒子のＴＥＭ観察を行い、画像データから粒子表面間距離を求めた。結果は添付資料２に示す。

参考までにＴＥＭ薄膜の厚みを考慮しないで、写真上に現れる像をそのまま処理するとどのような結果になるかを検討した。粒子の分散状態測定用電顕組織を写真に示す。これを粒子解析ソフトを用いて画像処理した結果を図４４に示す。このソフトは任意の２粒子間の際近接距離を数値解析により求めるものである。表３２に数値データを示す。厚みを考慮した場合に比べて、鋼種間の傾向は合っているものの、表面間距離：λの値が著しく小さくなっている。計算するまでもなく、この値から導かれるしきい応力は、実際の強度レベルとかけ離れた高い値になると思われる。薄膜の厚み(２０～１００nm)に比べて粒子サイズが小さい場合は、厚みの影響が大きく、粒子が近接して見える。写真から受ける印象だけで強度を云々することがいかに危険であるかが、この結果から確認された。

5．評価のまとめ

フェライト系ＯＤＳ鋼の再結晶率を高める目的で、２回ＣＲの新工程で製作された平成９年度試作被覆管(フェライト系５鋼種、マルテンサイト系３鋼種)の内、フェライト系３鋼種(Ｆ９１、Ｆ９２、Ｆ９４)の熱処理仕上げ(ＳＴ)材および冷間加工仕上げ(ＣＷ)材とマルテンサイト系２鋼種(Ｍ９１、Ｍ９２)についてミクロ組織、周方向引張性質、クリープ破断強度、およびフェライト系５鋼種について表面結晶粒の方位解析、粒子分散状態の評価を行った。得られた成果をまとめると以下の通りである。

（１）供試材

フェライト系ＯＤＳ鋼被覆管は、再結晶を重視してＴｉ，Y_2O_3量を低くしたＦ９１，Ｆ９２と強度重視でこれらを高めたＦ９４の３鋼種で、いずれも最終熱処理上がりと耐スエリング性向上のための２０％冷間加工材の２種類である。なお、Ｆ９４はメカニカルアロイング処理を従来のＡｒガス雰囲気からＨｅガス雰囲気に変更したものである。同組成のＡｒガス雰囲気中で処理した鋼（Ｆ９５）の強度特性は別の機関にて評価されている。

マルテンサイト系ＯＤＳ鋼被覆管は、強度向上を重視してＴｉ，Y_2O_3量を従来の検討より高めた２鋼種である。この組成では、従来の工程では製管が困難であったが、新工程の適用により被覆管製作が可能であった。

（２）組織評価

フェライト系の場合、横断面では等軸粒であるが、縦断面では管軸方向に伸張した結晶粒となり、Ｔｉ，Y_2O_3量が増すほど伸張の程度は大きくなる。いずれも、一部に未再結晶粒が残留するが大部分は再結晶した組織であった。２０％冷間加工材では高密度の転位が観察され、組成によらずＨＶ５０程度の硬さ上昇が認められた。

マルテンサイト系の場合、縦、横断面とも微細等軸粒であった。Ｍ９１の場合は転位密度の低いフェライト組織となっていた。焼ならし熱処理時の冷却速度が低かったためと推定される。Ｍ９２はマルテンサイト組織で、Ｍ９１より高い硬さであった。

（３）周方向引張性質

フェライト系の場合、一様伸びは４００℃にて最も低く、とくに２０％冷間加工材は目標値（１％以上）を下回る。２０％冷間加工は延性を著しく劣化させる。

マルテンサイト系の場合、Ｔｉ量の高いＭ９２の方が高い強度を示し、延性も目標値を充分に満足した。

（４）クリープ破断強度評価

フェライト系の場合、Ｔｉ，Y_2O_3量が増すほど７００℃の内圧クリープ破断強度は上昇する。冷間加工材のクリープ破断強は熱処理材より低くなる。評価した３鋼種とも目標強度は満足しない。

マルテンサイト系の場合、Ｔｉ，Y_2O_3量増加によって従来組成より破断強度

が上昇することが確認された。Ｔｉ量の高いＭ９２の方が高い強度を示した。目標強度達成の可能性もあるが、本試験では試験時間が短く、平成１１年度試験にて継続評価される。

（５）フェライト系ＯＤＳ鋼の再結晶特性評価

分散粒子量が多くなるほど、冷間圧延・熱処理（再結晶）の繰り返しによって再結晶の起こりにくい｛ｈｋｌ｝〈１１０〉が安定方位として集合組織を形成する傾向が強くなることが明らかとなった。

（６）粒子分散状態の評価

Ｔｉ，Y_2O_3量が増すほど、単位面積当たりの粒子数大、粒子径小、平均粒子間距離小の方向となることが確認された。しかし、同組成のＦ９４とＦ９５では差が認められた。確認のため、両被覆管についてＹ，Ｏ量の定量分析を行った結果、両者に差はなかった。

鋼種	Ｙ分析値	Ｏ分析値	過剰酸素量
Ｆ９４	０．１９	０．１２	０．０７wt%
Ｆ９５	０．１９	０．１１	０．０６wt%

従って、両者の分散状態の差は、メカニカルアロイング処理時の雰囲気の影響と推定される。分散状態の差が、クリープ強度Ｆ９５＞Ｆ９４、再結晶率Ｆ９５＜Ｆ９４の結果となっている。

薄膜ＴＥＭ写真の画像解析による平均粒子表面間距離は、薄膜厚みを考慮しても、小さい値となり、これから算定したしきい応力はかなり大きな値となる。組成から計算した粒子体積率と観察結果を組み合わせて求めた平均粒子表面間距離から導出したしきい応力はほぼ妥当な値となった。

６．あとがき

高温強度と耐スエリング性に優れた大型炉の長寿命燃料被覆管の候補として有望なＯＤＳ鋼被覆管の目標性能の達成と実用化推進のため、本試験では平成９年度に２回ＣＲ（冷間ピルガー圧延）の新工程により製管されたＯＤＳ鋼被覆管８鋼種のうちの５鋼種についてについて、強度特性と再結晶特性に関する評価を行った。新工程のメリット、フェライト系の再結晶特性、粒子分散状態の詳細がかなり明らかとなった。なお、残り３鋼種の被覆管については他の機関にて強度特性評価試験が行われ、本試験結果とともに総合的、系統的に評価される。

以上

表１　　Ｈ９年度試作管試験材の内容

・フェライト系ＯＤＳ鋼試作管

符号：［Ｆ91］12Ｃｒ－2Ｗ－0.13Ｔｉ－0.08Y_2O_3

［Ｆ92］12Ｃｒ－2Ｗ－0.13Ｔｉ－0.13Y_2O_3

［Ｆ94］12Ｃｒ－2Ｗ－0.30Ｔｉ－0.24Y_2O_3

ＳＴ→焼鈍上り、　　公称寸法：外径9.3㎜×肉厚0.6㎜

ＣＷ→冷間加工上り、公称寸法：外径8.5㎜×肉厚0.5㎜

・マルテンサイト系ＯＤＳ鋼試作管

符号：［M91］0.12Ｃ－9Ｃｒ－2Ｗ－0.12Ｔｉ－0.34Y_2O_3

［M92］0.12Ｃ－9Ｃｒ－2Ｗ－0.20Ｔｉ－0.30Y_2O_3

ＮＴ熱処理上り、公称寸法：外径9.3㎜×肉厚0.6㎜

・化学成分（mass%）

No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y_2O_3	Ex.O	N	Ar
Ｆ９１	0.065	0.03	0.048	0.003	0.004	0.029	11.79	1.92	0.13	0.08	0.08	0.01	0.0053
Ｆ９２	0.054	0.03	0.048	0.003	0.004	0.027	11.80	1.94	0.13	0.13	0.05	0.01	0.0042
Ｆ９４	0.058	0.03	0.049	0.004	0.004	0.025	11.78	1.93	0.30	0.24	0.04	0.01	0.0003
Ｍ９１	0.11	0.02	0.037	0.003	0.004	0.022	9.26	1.94	0.12	0.34	0.05	0.01	0.0033
Ｍ９２	0.13	0.02	0.036	0.003	0.004	0.022	9.00	1.94	0.20	0.30	0.04	0.01	0.0034

Y_2O_3＝Y分析値×1.27、　　Ex.O＝O分析値－（Y分析値×0.27）

表２　　Ｈ９年度試作ＯＤＳ鋼押出素管の化学成分分析結果（mass%）

No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y_2O_3	Ex.O	N	Ar
F91	0.065	0.03	0.048	0.003	0.004	0.029	11.79	1.92	0.13	0.08	0.08	0.010	0.0053
F92	0.054	0.03	0.048	0.003	0.004	0.027	11.80	1.94	0.13	0.13	0.05	0.010	0.0042
F93	0.065	0.03	0.046	0.004	0.004	0.028	11.82	1.93	0.22	0.22	0.09	0.012	0.0046
F94	0.058	0.03	0.049	0.004	0.004	0.025	11.78	1.93	0.30	0.24	0.04	0.010	0.0003
F95	0.056	0.03	0.048	0.003	0.004	0.025	11.72	1.92	0.31	0.24	0.04	0.010	0.0038
M91	0.11	0.02	0.037	0.003	0.004	0.022	9.26	1.94	0.12	0.34	0.05	0.010	0.0033
M92	0.13	0.02	0.036	0.003	0.004	0.022	9.00	1.94	0.20	0.30	0.04	0.010	0.0034
M93	0.12	0.02	0.036	0.003	0.004	0.022	8.99	1.94	0.20	0.35	0.06	0.010	0.0033

Y_2O_3＝Y分析値×１．２７，　Ｅｘ．Ｏ＝Ｏ分析値－（Ｙ分析値×０．２７）

表３　　素管明細

組織	符号	成分	硬さ (Hv、縦)	備考
フェライト系	Ｆ９１	12Cr-2W-0.1Ti-0.05Y_2O_3	237	Ar 中 MA
	Ｆ９２	12Cr-2W-0.1Ti-0.12Y_2O_3	280	Ar 中 MA
	Ｆ９３	12Cr-2W-0.2Ti-0.20Y_2O_3	313	Ar 中 MA
	Ｆ９４	12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y_2O_3	366	He 中 MA
	Ｆ９５	12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y_2O_3	379	Ar 中 MA
マルテンサイト系	Ｍ９１	9Cr-2W-0.1Ti-0.35Y_2O_3	270	Ar 中 MA
	Ｍ９２	9Cr-2W-0.2Ti-0.30Y_2O_3	285	Ar 中 MA
	Ｍ９３	9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y_2O_3	331	Ar 中 MA

表４　　製造条件概要

工程	内　容
素管	16 φ×2t（各鋼種３本）
熱処理	F95 の１本のみ　1250℃・AC
１回目 CR	12.28 φ×1.375t、Rd＝46.45%
中間焼鈍＊１	フェライト系→1100℃、マルテンサイト系→1050℃・FC
２回目 CR	9.3 φ×0.6t、Rd＝65.19%
最終焼鈍	フェライト系→1150℃、マルテンサイト系→1050℃・AC＋750℃・AC
HPTR	8.5 φ×0.5t、Rd＝20.0%（各鋼種１本）

＊１：F95 と M92 はさらに 1145℃再熱処理実施

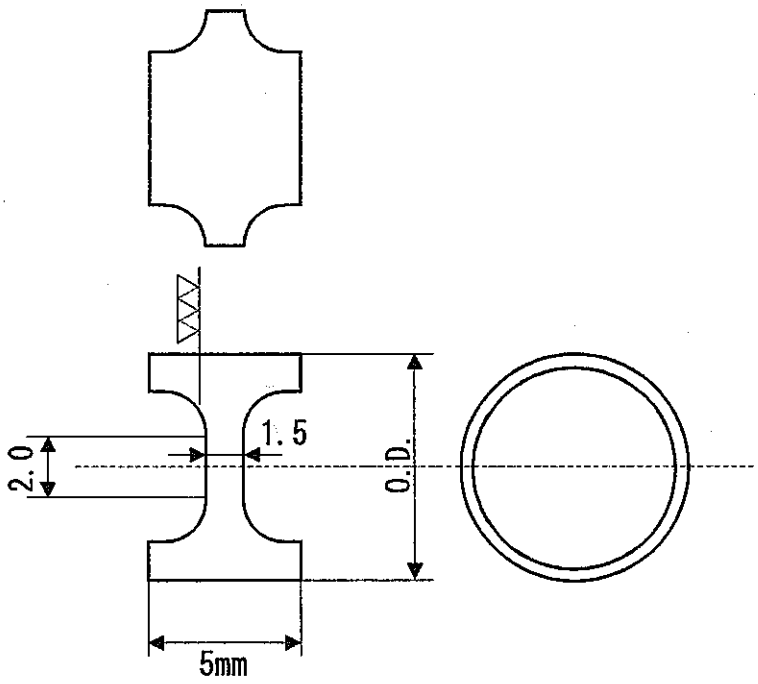


図 1　　リング引張試験片

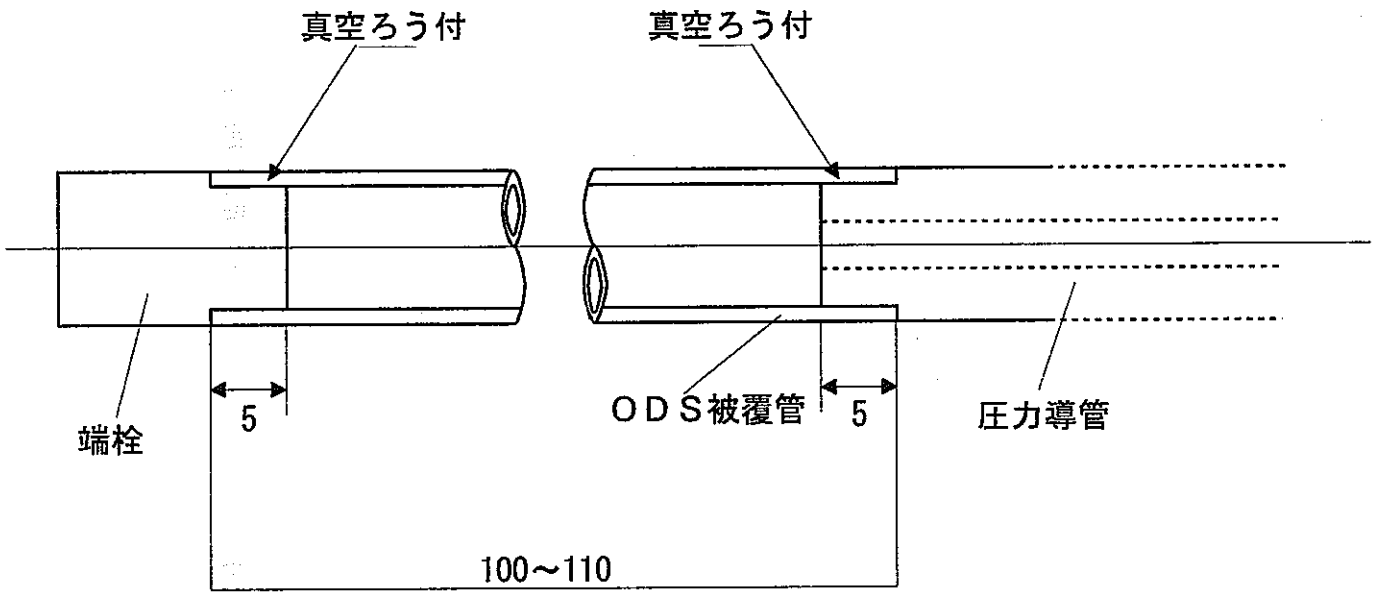


図 2　　内圧クリープ破断試験片

表５　　フェライト系ＯＤＳ被覆管のＥＢＳＰによる
結晶方位解析試料

鋼種	熱間押出	１回目ＣＲ	中間焼鈍	２回目ＣＲ	最終焼鈍
Ｆ９１			○	○	○
Ｆ９２					○
Ｆ９３					○
Ｆ９４					○
Ｆ９５	○	○	○	○	○

＊○：測定試料

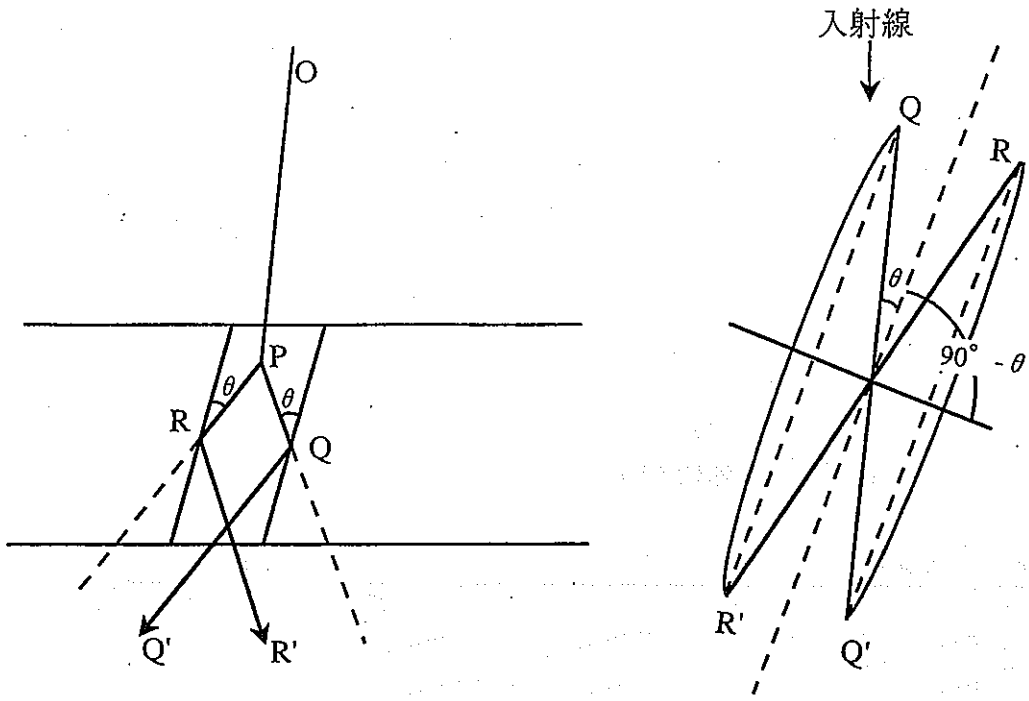


図 3　菊池線の発生とその原理図

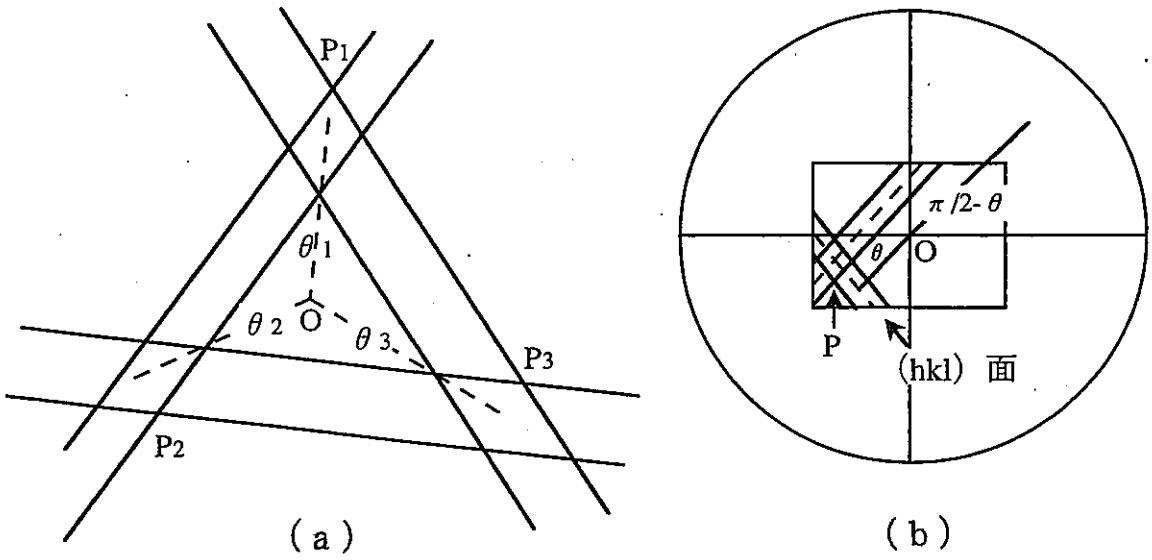


図 4　菊池線からの方位解析方法

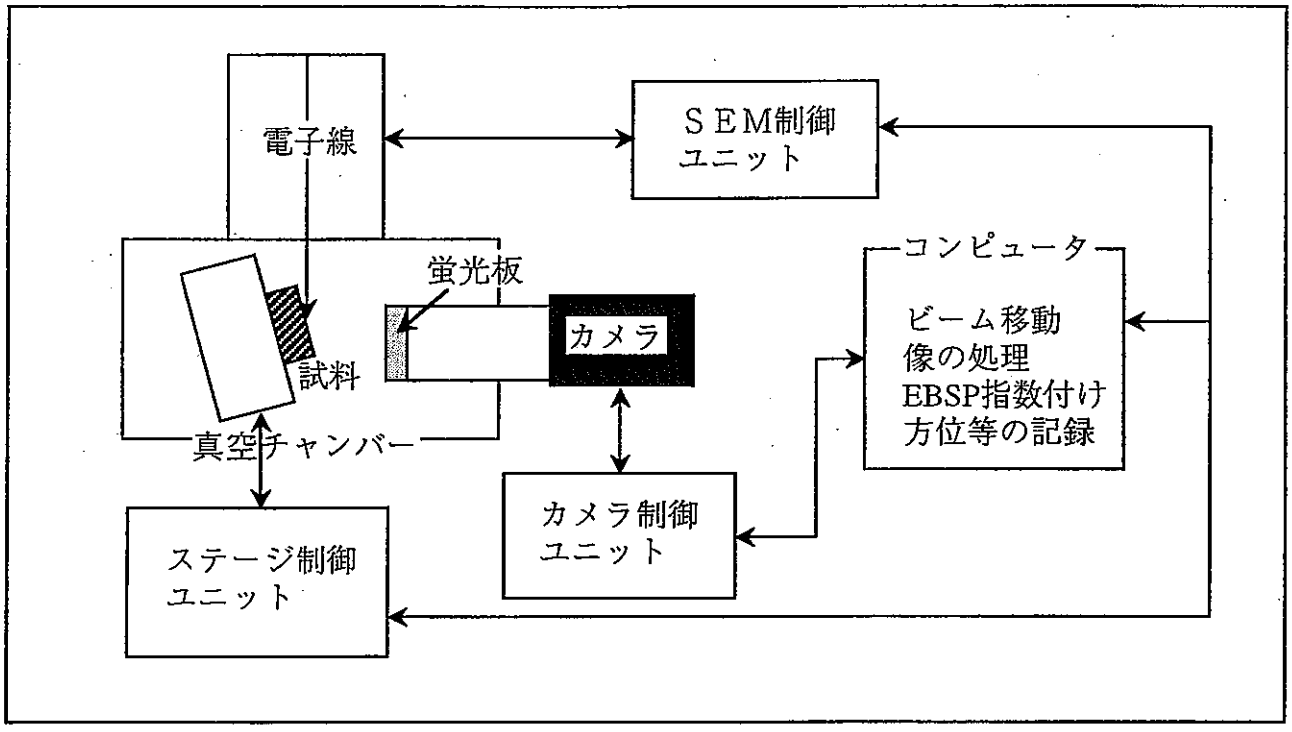


図５　ＯＩＭ構成の模式図

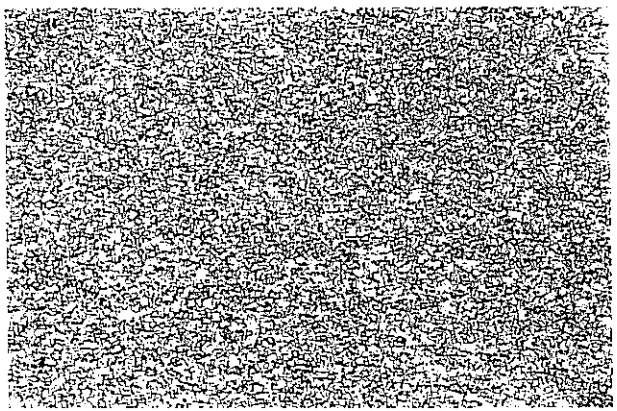
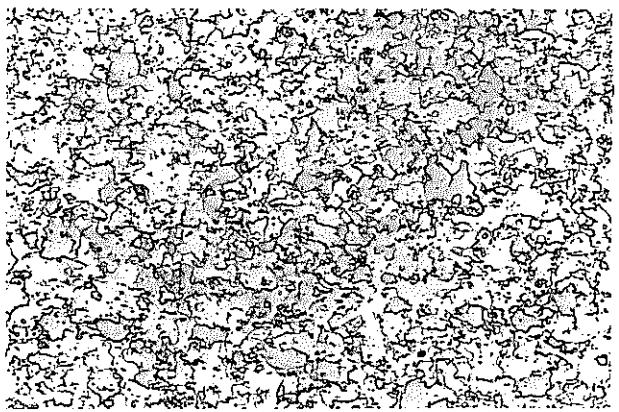
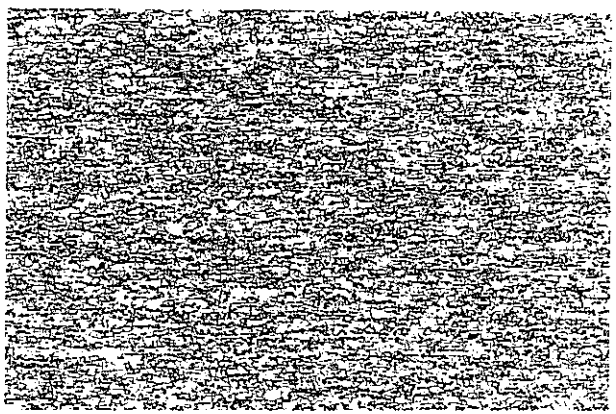
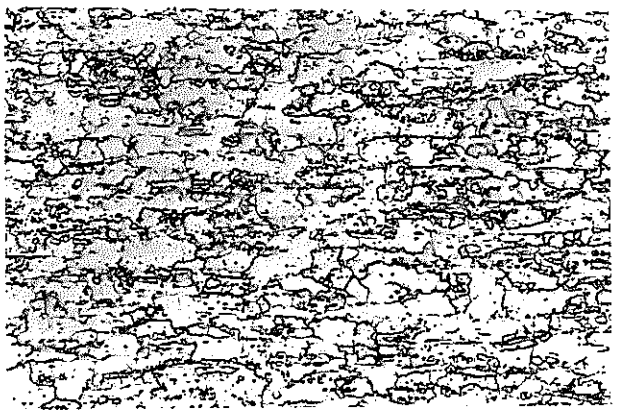
	×１００ 0.1mm	×４００ 25μm
横断面 ＨＶ２３４		
縦断面 ＨＶ２２５		

写真1-1　　試作管の組織

（符号Ｆ91ＳＴ：12Ｃｒ－2Ｗ－0.1Ｔｉ－0.08Ｙ$_2$Ｏ$_3$　焼鈍材）

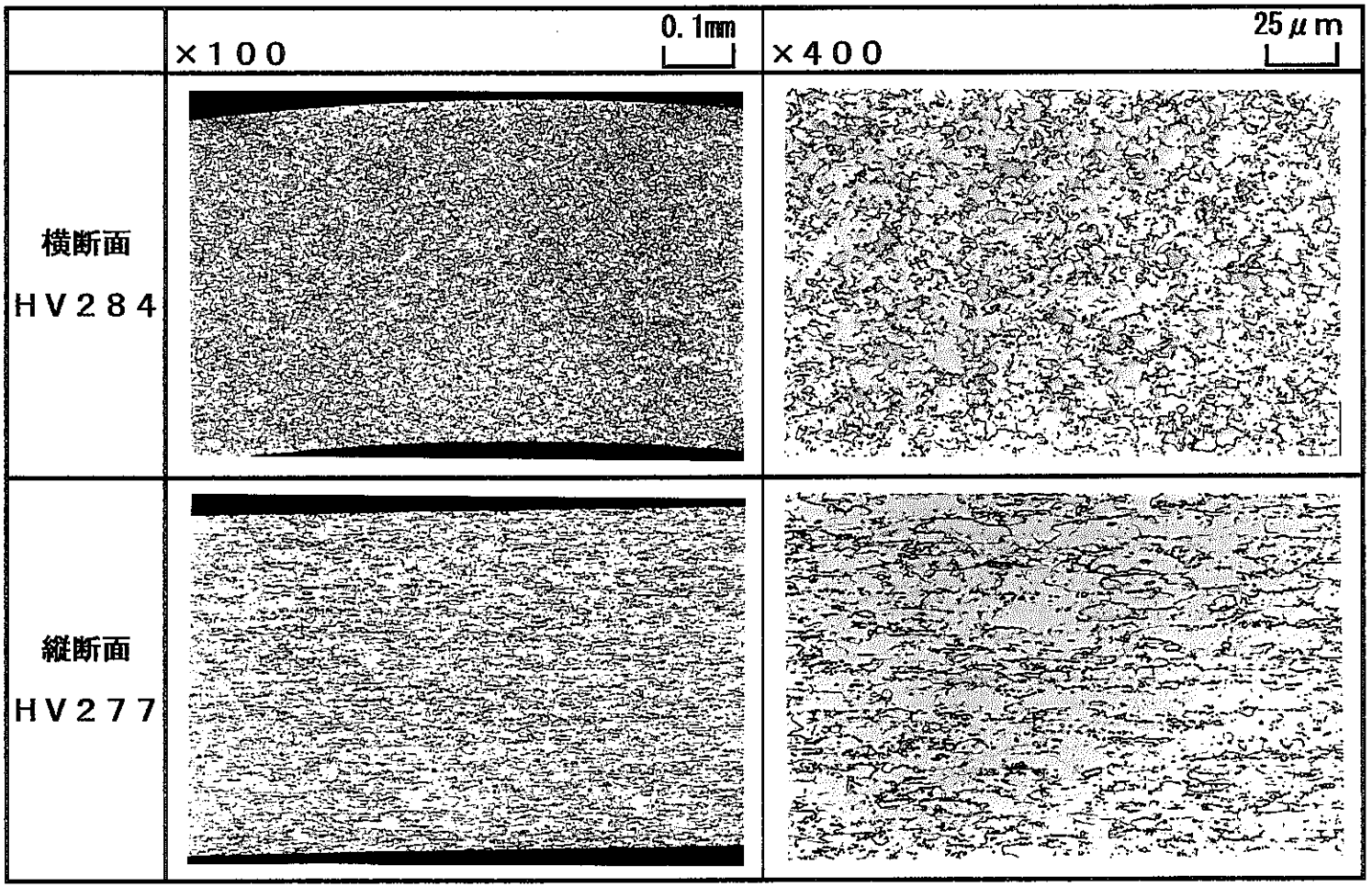


写真1-2　　試作管の組織

（符号F91CW：12Cr－2W－0.1Ti－0.08Y_2O_3　冷間加工材）

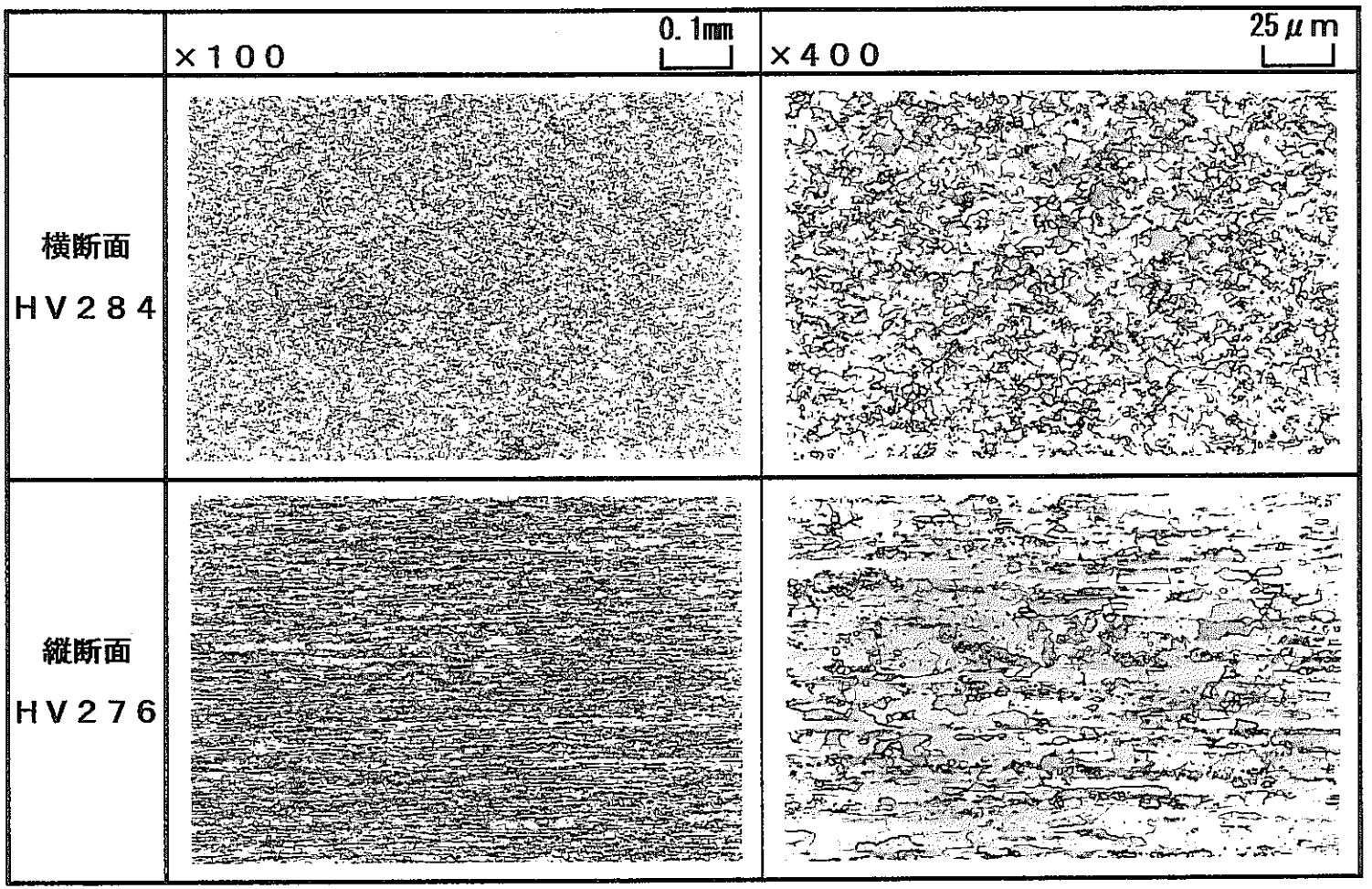


写真1-3　　試作管の組織

（符号Ｆ92ＳＴ：12Ｃｒ－2Ｗ－0.1Ｔｉ－0.13Ｙ $_2$Ｏ $_3$　焼鈍材）

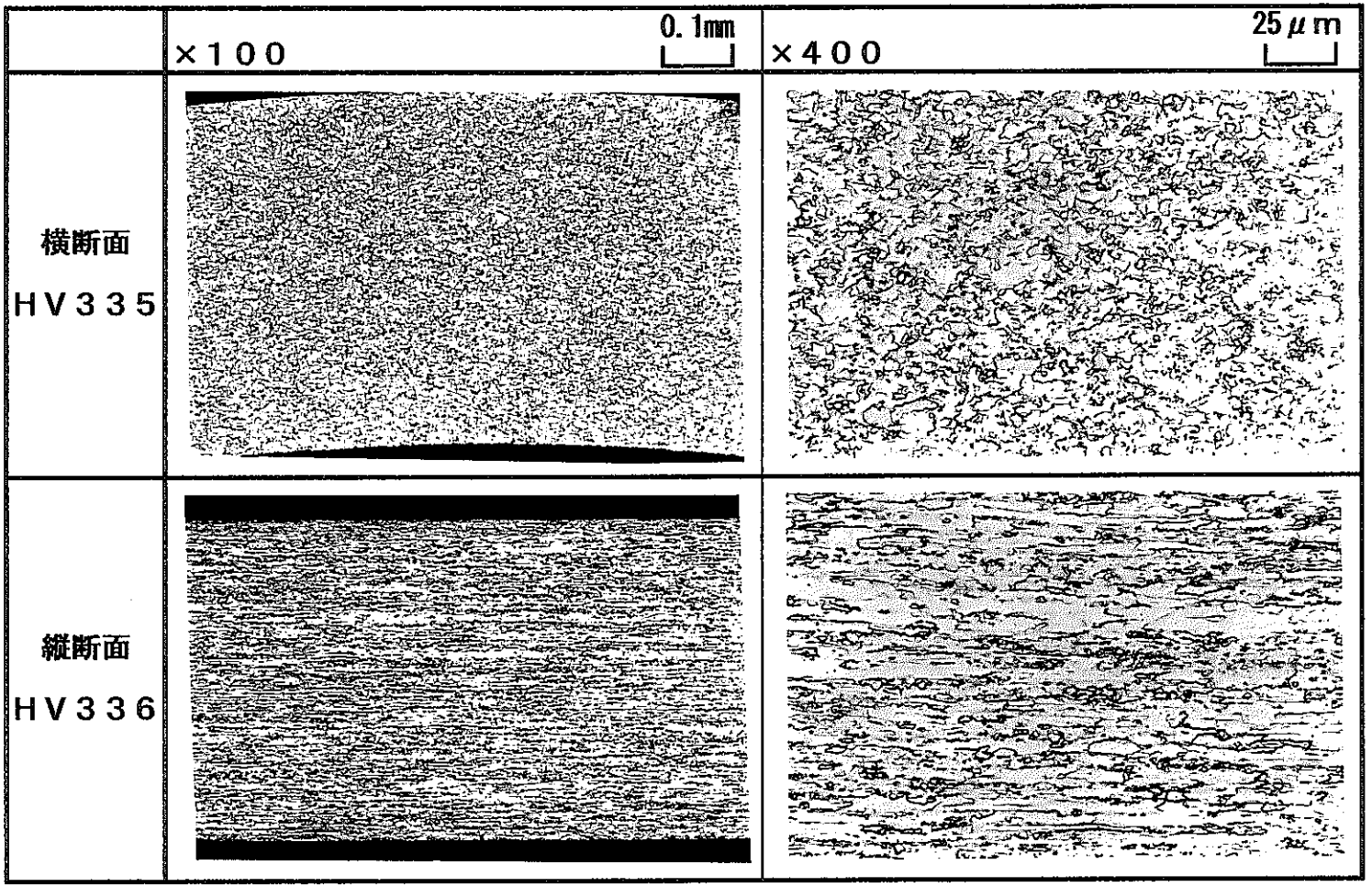


写真1-4　　試作管の組織

（符号Ｆ92ＣＷ：12Ｃｒ－2Ｗ－0.1Ｔｉ－0.13Ｙ$_2$Ｏ$_3$　冷間加工材）

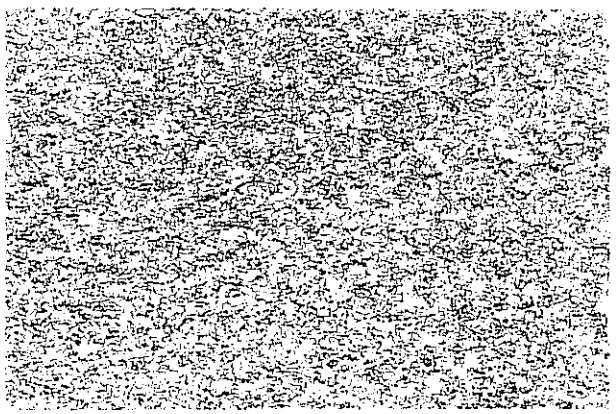
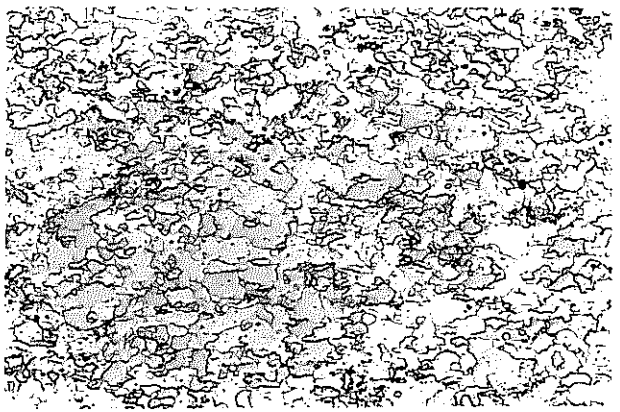
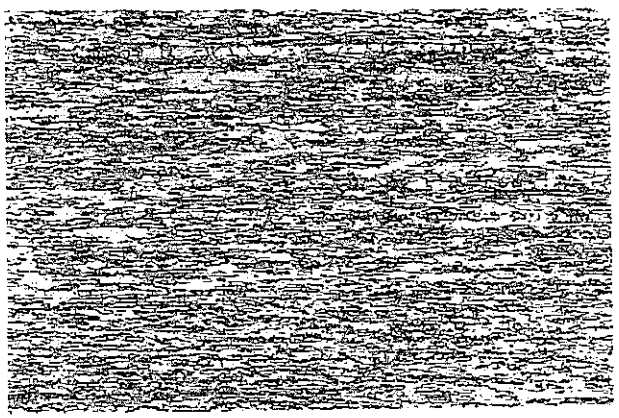
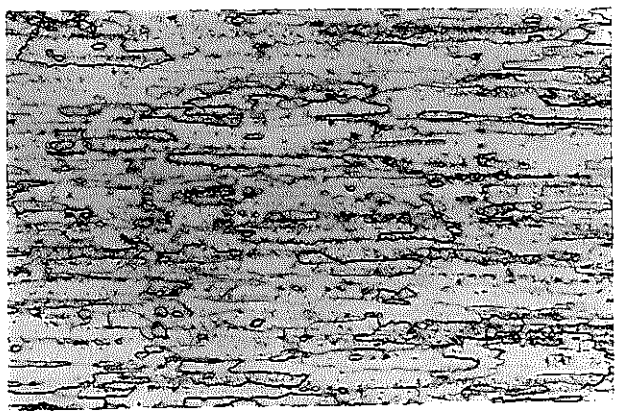
	×１００ 0.1mm	×４００ 25μm
横断面 ＨＶ３２２		
縦断面 ＨＶ３２４		

写真1-5　　試作管の組織

（符号Ｆ94ＳＴ：12Ｃｒ－2Ｗ－0.3Ｔｉ－0.24Y_2O_3　焼鈍材）

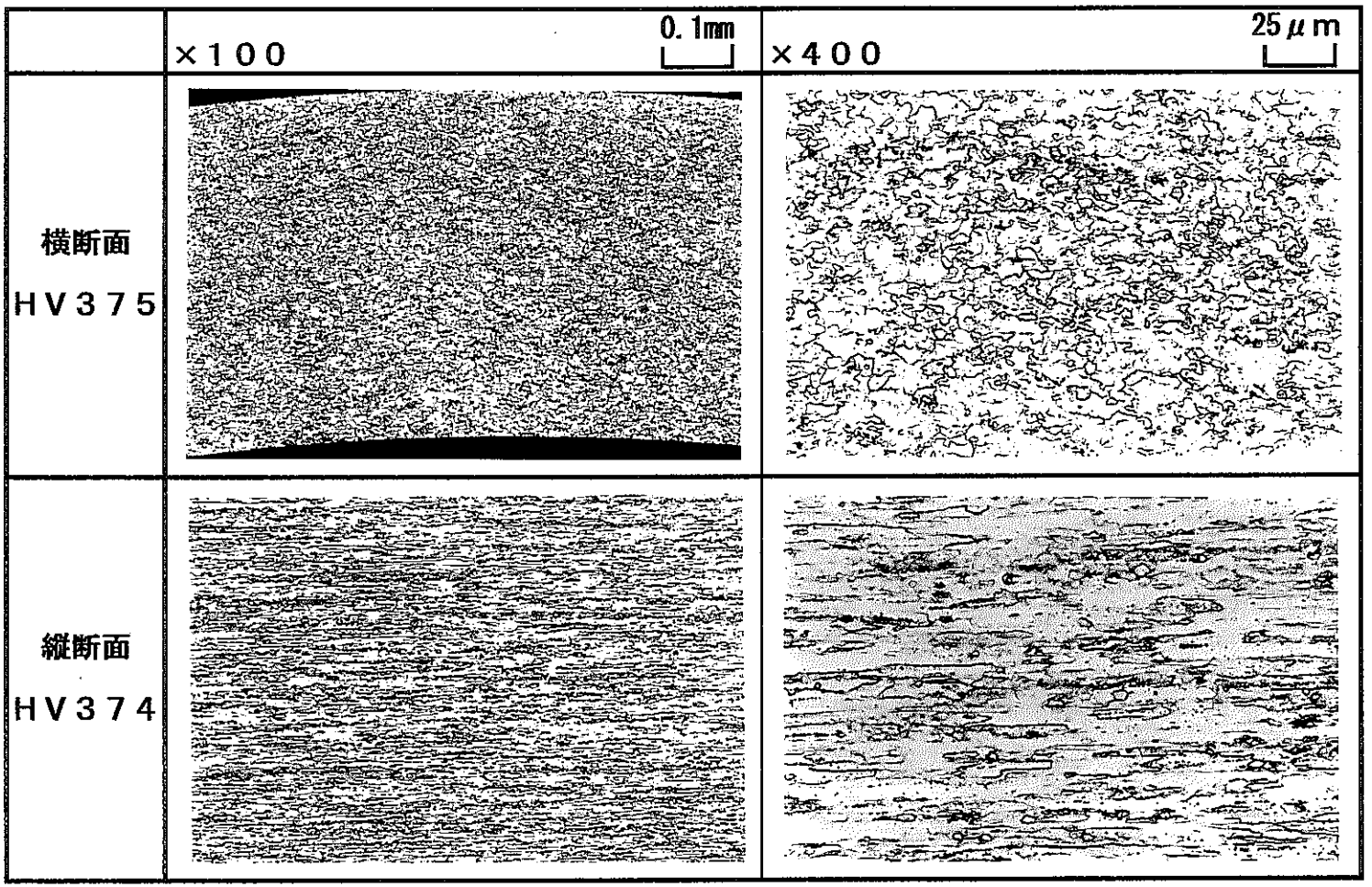


写真1-6　　試作管の組織

（符号Ｆ94ＣＷ：12Ｃｒ－2Ｗ－0.3Ｔｉ－0.24Ｙ$_2$Ｏ$_3$　冷間加工材）

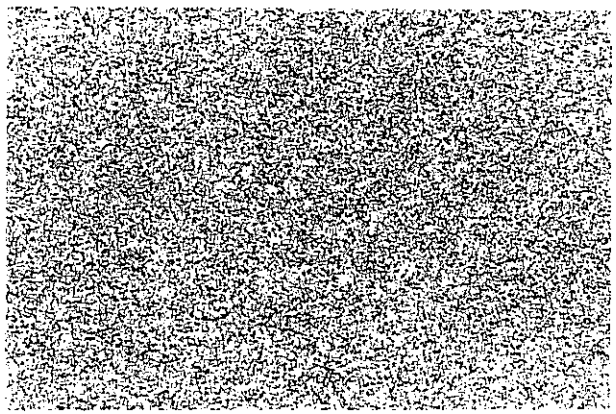
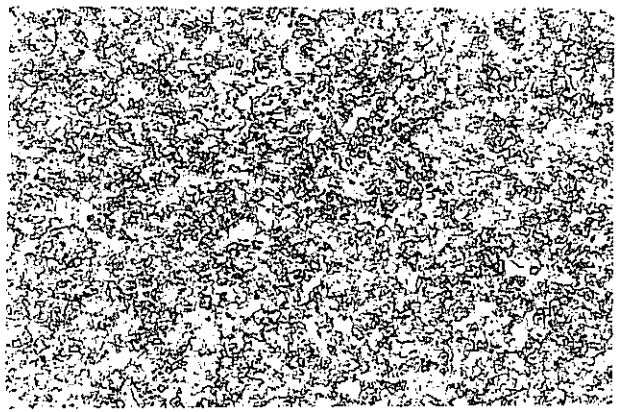
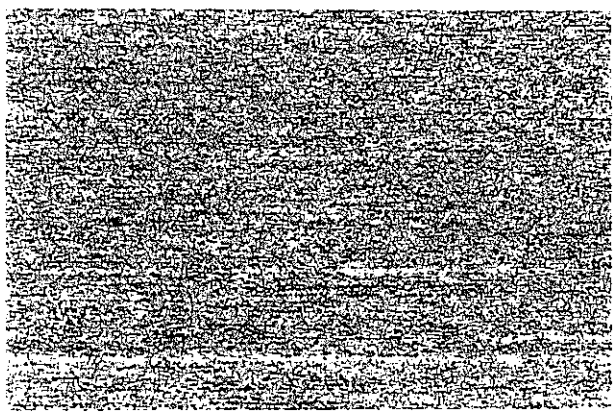
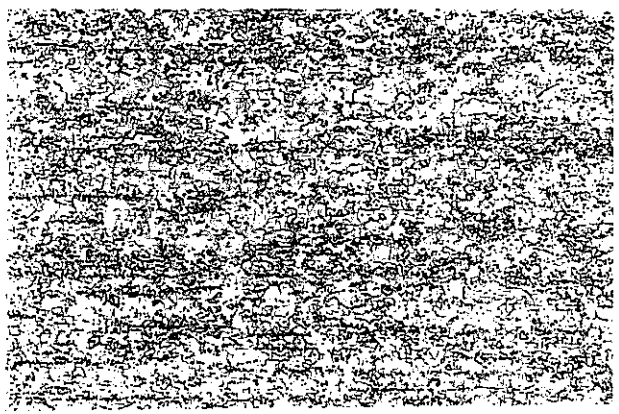
	×１００ 0.1mm	×４００ 25μm
横断面 ＨＶ３０９		
縦断面 ＨＶ３１４		

写真 2-1　　試作管の組織

（符号M91：0.12C－9Cr－2W－0.1Ti－0.34Y_2O_3　）

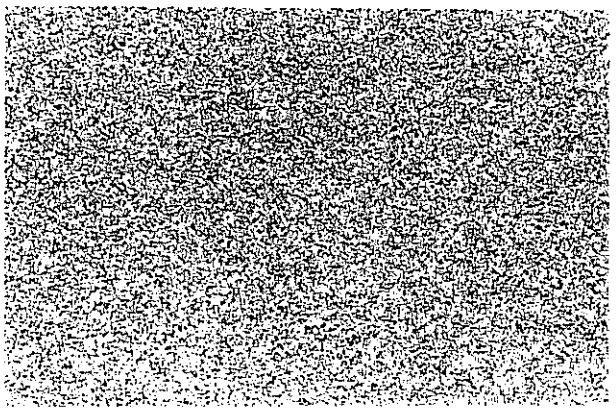
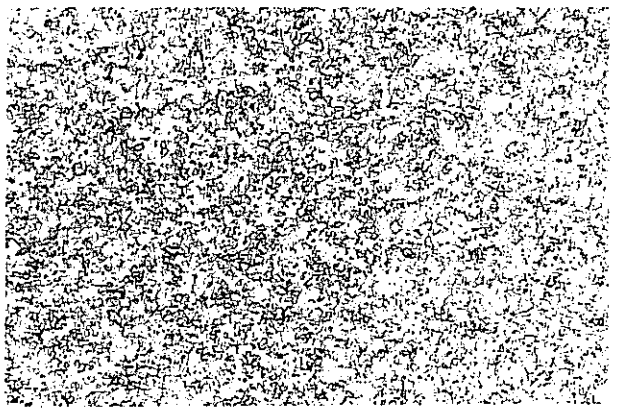
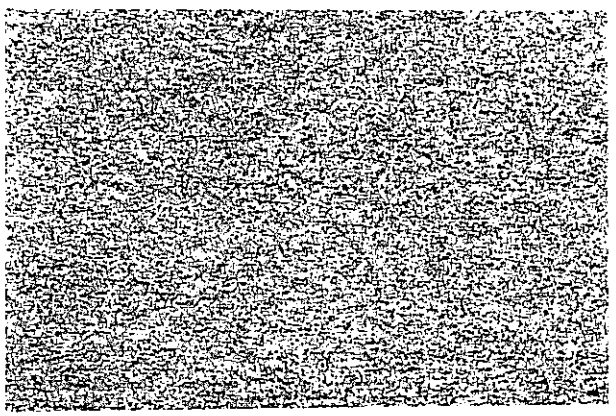
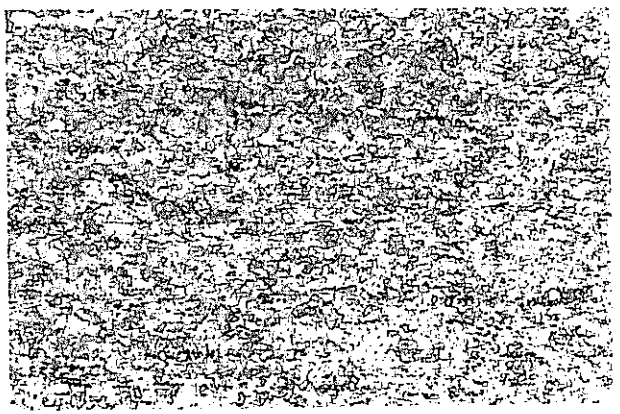
	×１００ 0.1mm	×４００ 25μm
横断面 ＨＶ３８７		
縦断面 ＨＶ３８５		

写真 2-2　　試作管の組織

（符号M92：0.12C－9Cr－2W－0.2Ti－0.30Y_2O_3　）

表６　　Ｈ９年度試作ＯＤＳ鋼被覆管の断面硬さ測定結果

種　類	位　置	硬さ測定値（Ｈｖ１kgf）					平均値
		1	2	3	4	5	
Ｆ９１ＳＴ	横断面	231	240	234	232	231	234
	縦断面	226	222	224	223	230	225
Ｆ９１ＣＷ	横断面	286	283	280	290	279	284
	縦断面	272	283	278	279	275	277
Ｆ９２ＳＴ	横断面	277	289	291	283	279	284
	縦断面	279	274	280	275	270	276
Ｆ９２ＣＷ	横断面	331	335	335	342	332	335
	縦断面	330	339	337	338	334	336
Ｆ９４ＳＴ	横断面	309	323	321	331	326	322
	縦断面	331	325	311	321	332	324
Ｆ９４ＣＷ	横断面	380	375	370	378	372	375
	縦断面	380	380	369	366	377	374
Ｍ９１	横断面	314	300	303	313	316	309
	縦断面	318	310	316	313	314	314
Ｍ９２	横断面	382	387	389	387	392	387
	縦断面	380	387	387	389	383	385

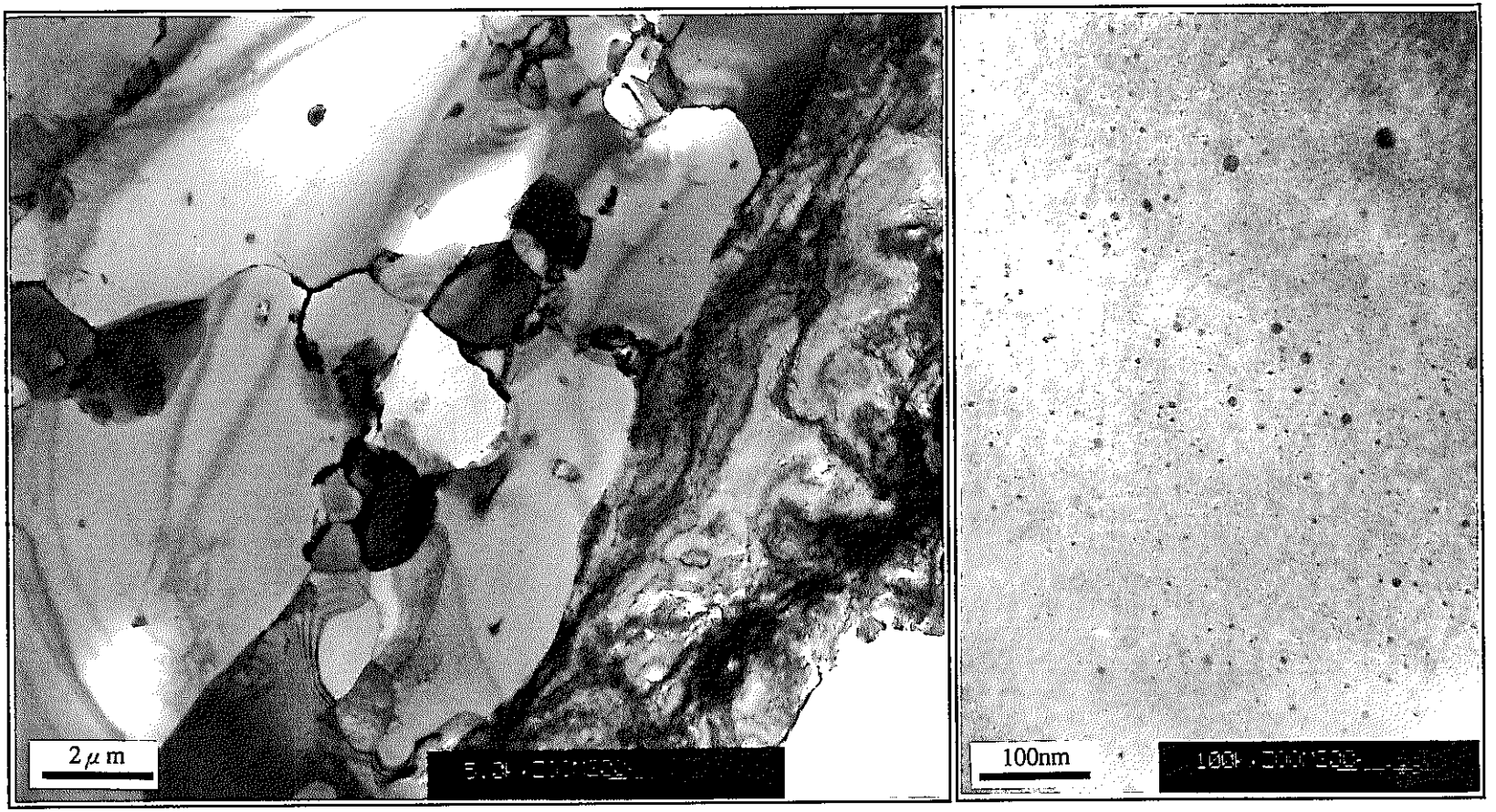


写真3-1　　フェライト系ODS鋼試作管F91STの組織-薄膜法による電顕観察結果
(F91ST; 12Cr-2W-0.1Ti-0.08Y_2O_3熱処理材)

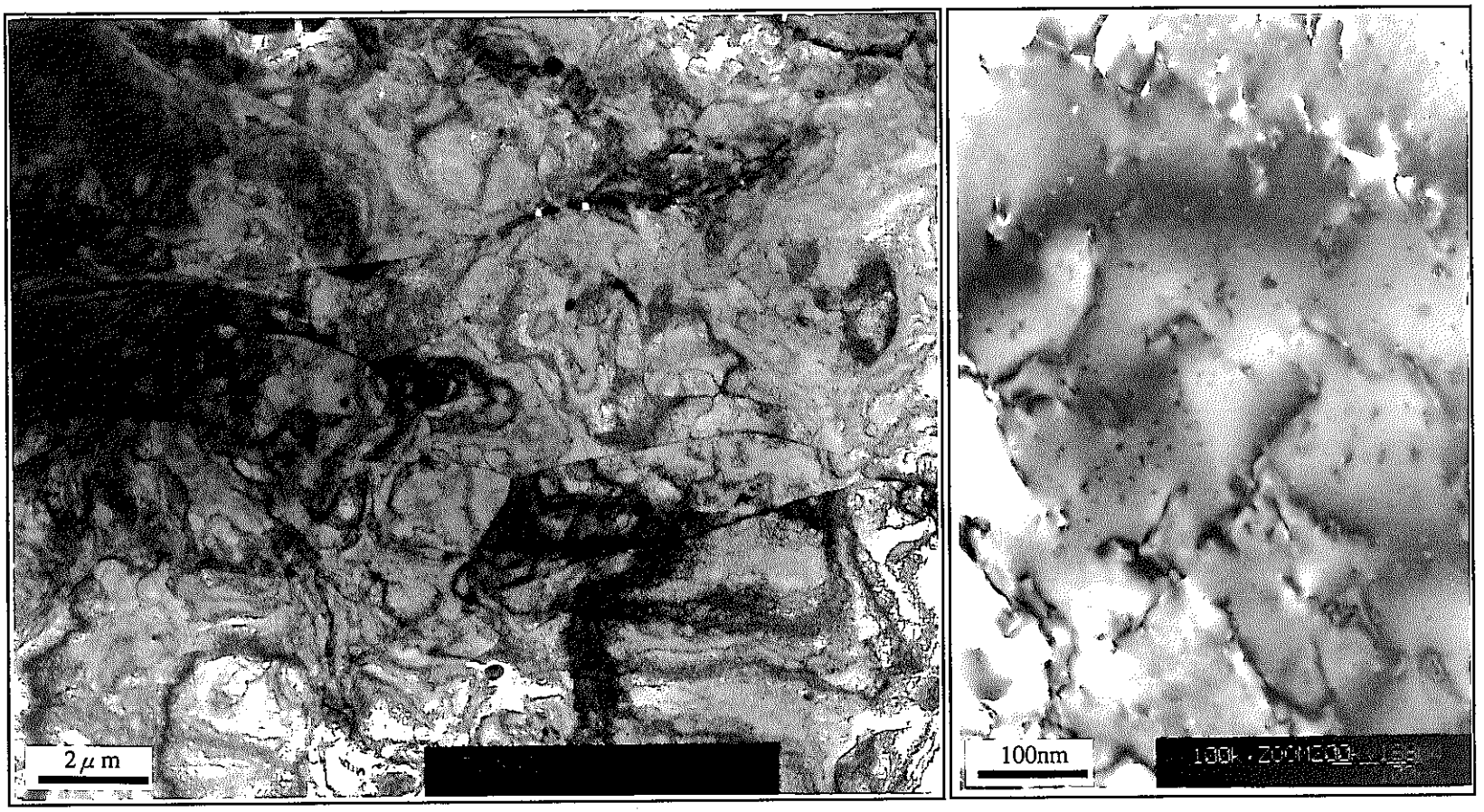


写真3-2　　フェライト系ODS鋼試作管F91CWの組織-薄膜法による電顕観察結果
(F91CW; 12Cr-2W-0.1Ti-0.08Y_2O_3冷間加工材)

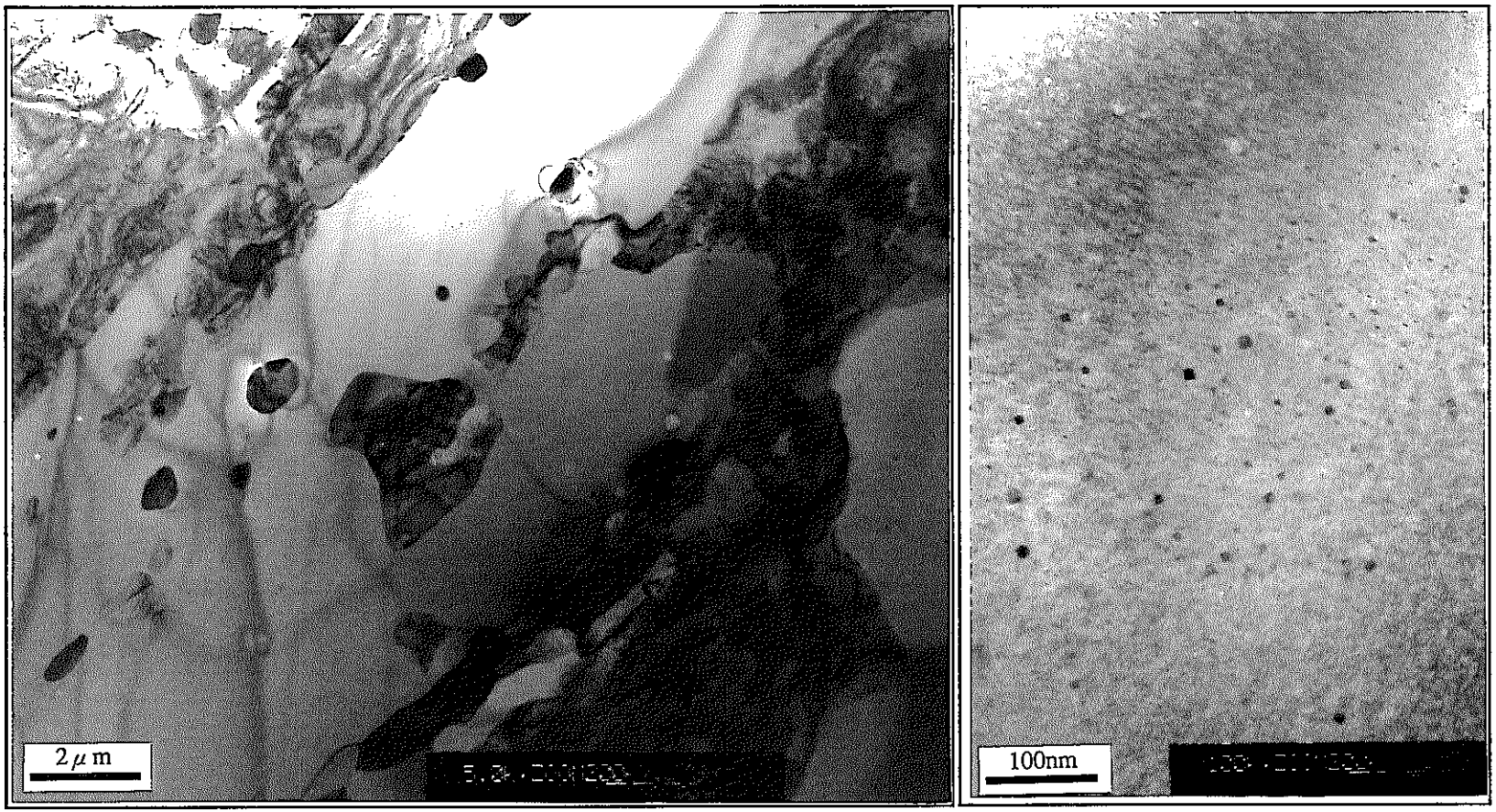


写真3-3　　フェライト系ODS鋼試作管F92STの組織-薄膜法による電顕観察結果
(F92ST; 12Cr-2W-0.1Ti-0.13Y_2O_3熱処理材)

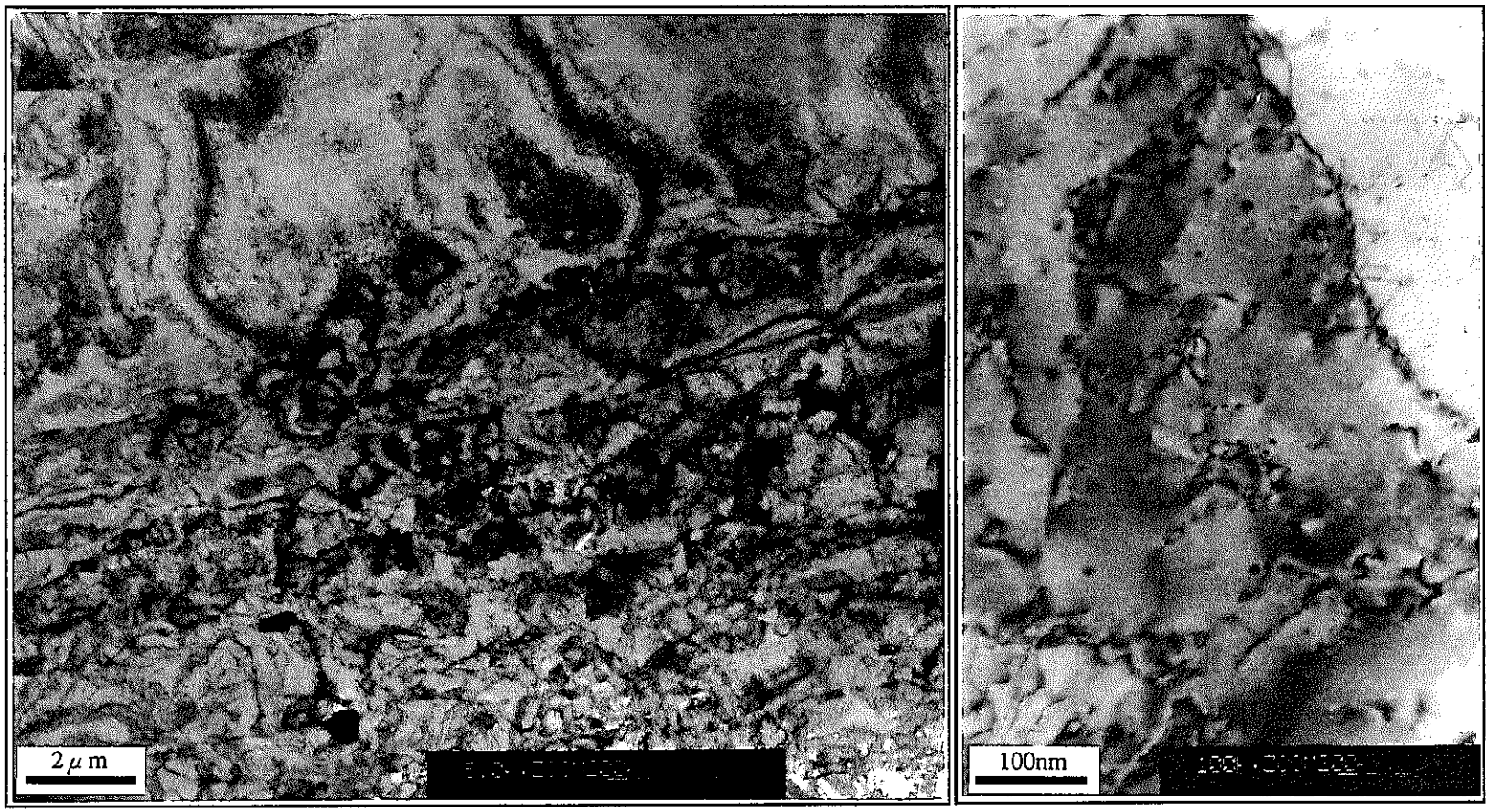


写真3-4　　フェライト系ODS鋼試作管F92CWの組織-薄膜法による電顕観察結果
(F92CW; 12Cr-2W-0.1Ti-0.13Y_2O_3冷間加工材)

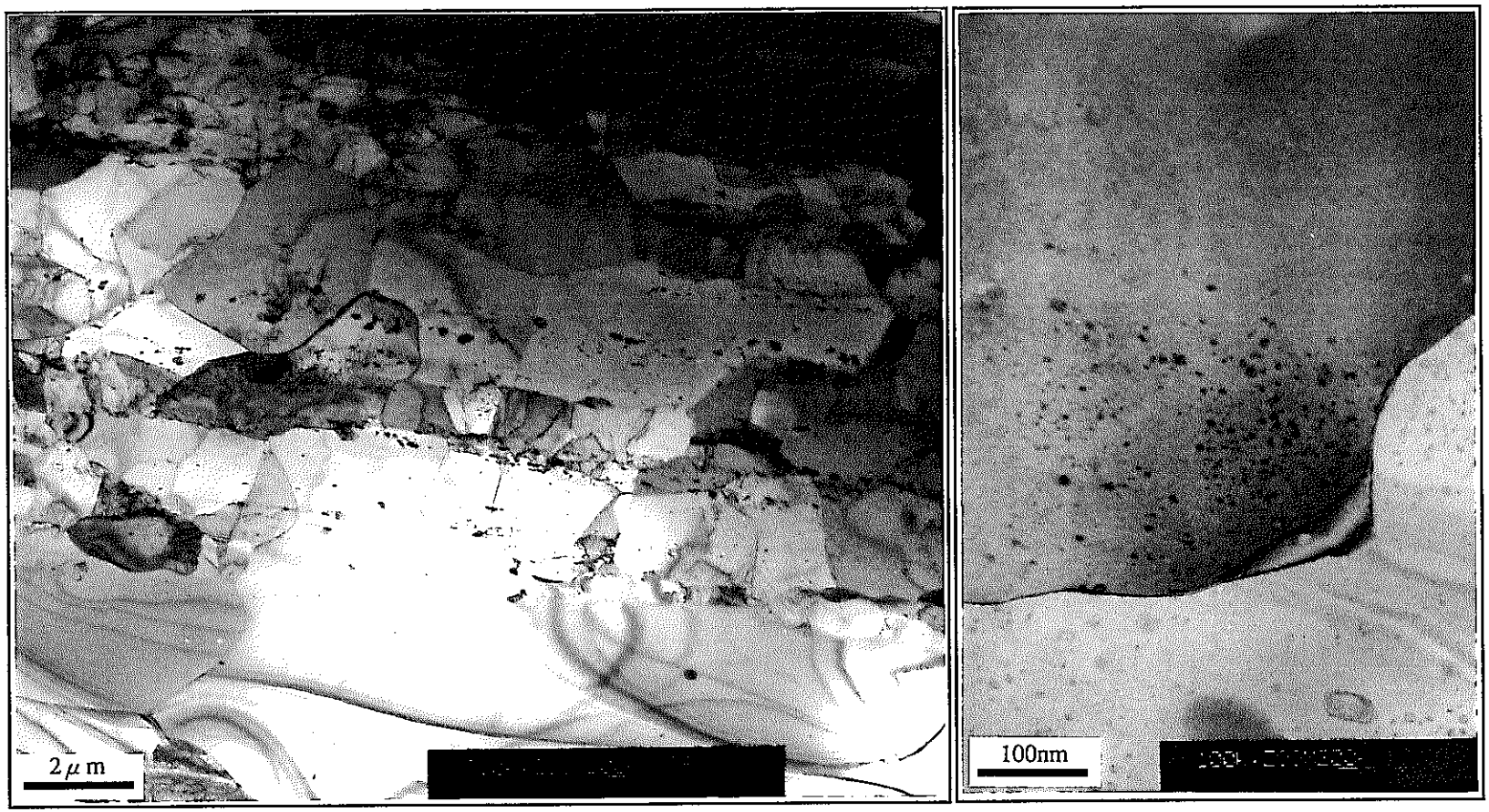


写真3-5　　フェライト系ODS鋼試作管F94STの組織-薄膜法による電顕観察結果
(F94ST; 12Cr-2W-0.3Ti-0.24Y_2O_3熱処理材)

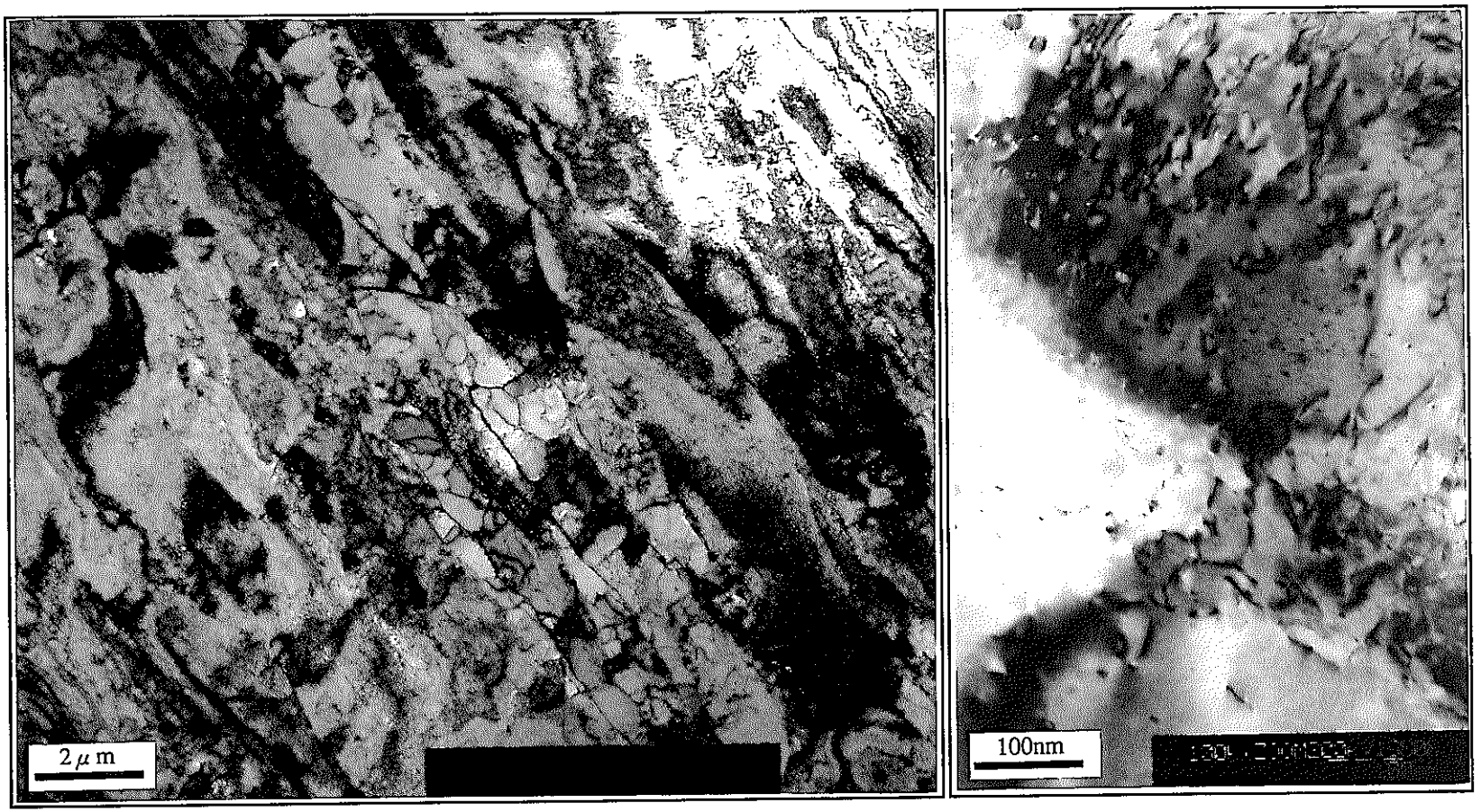


写真3-6　　フェライト系ODS鋼試作管F94CWの組織-薄膜法による電顕観察結果
(F94CW; 12Cr-2W-0.3Ti-0.24Y_2O_3冷間加工材)

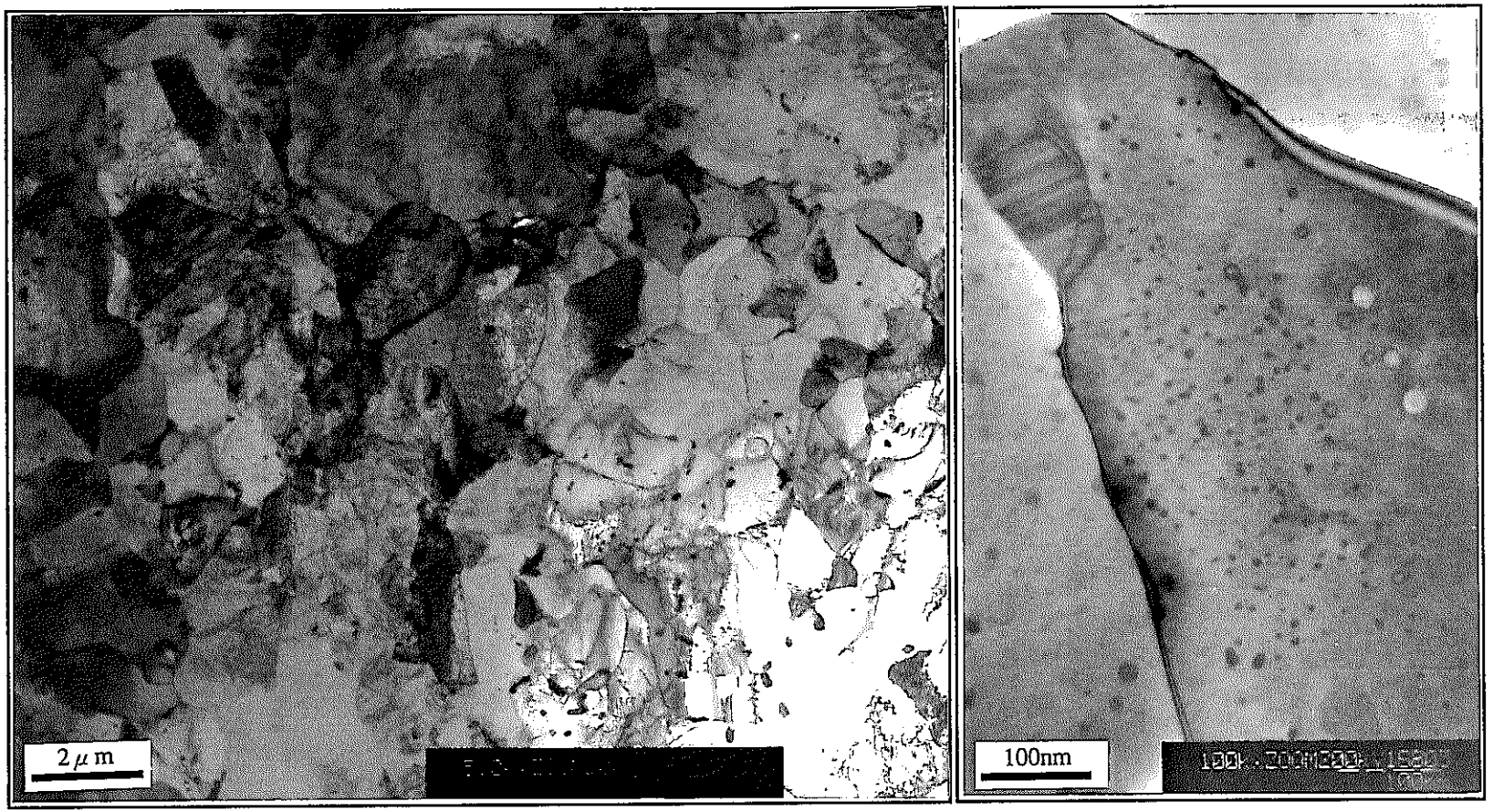


写真3-7　　マルテンサイト系ODS鋼試作管M91の組織-薄膜法による電顕観察結果
(M91; 0.12C-9Cr-2W-0.1Ti-0.34Y_2O_3)

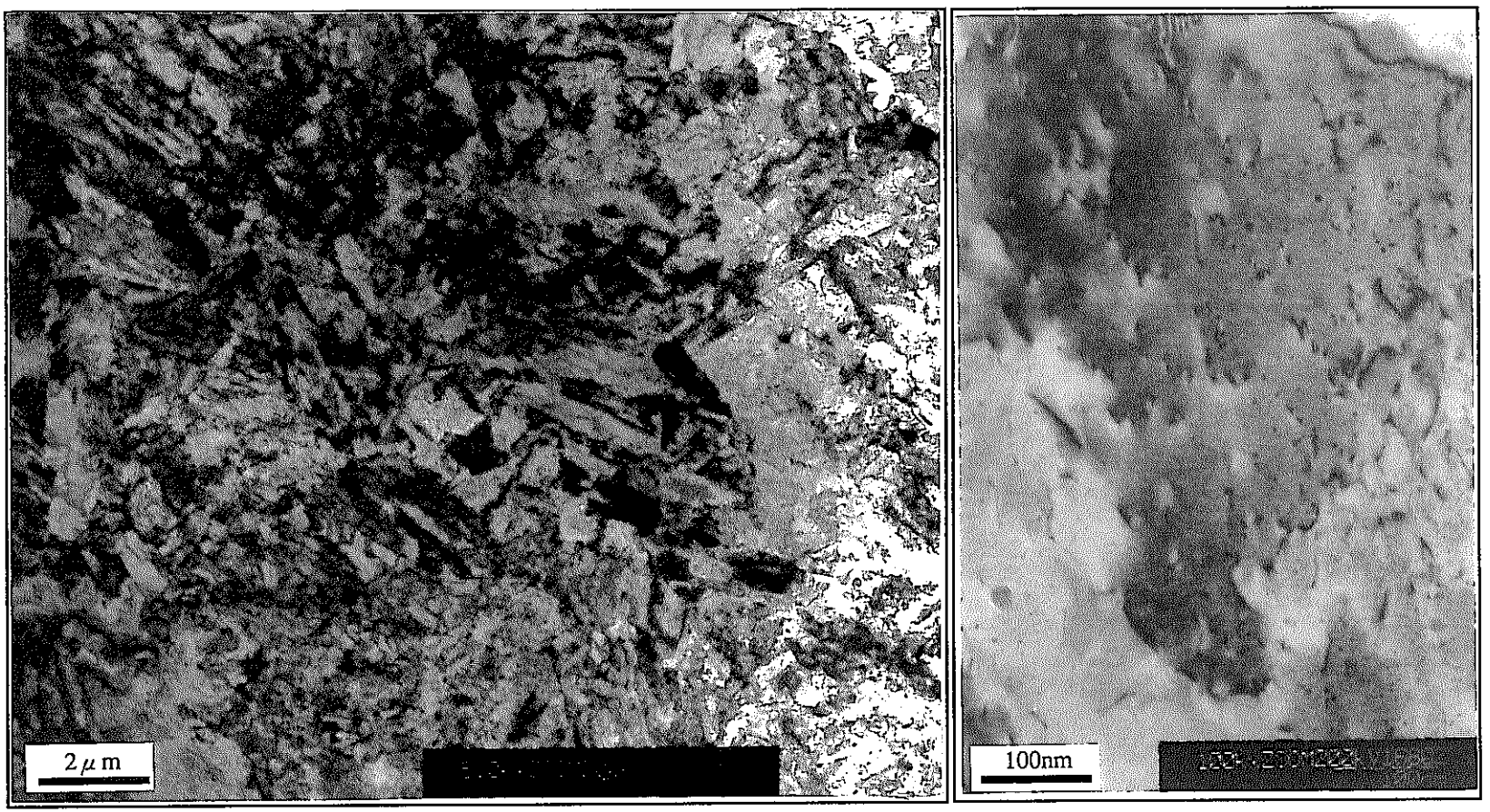
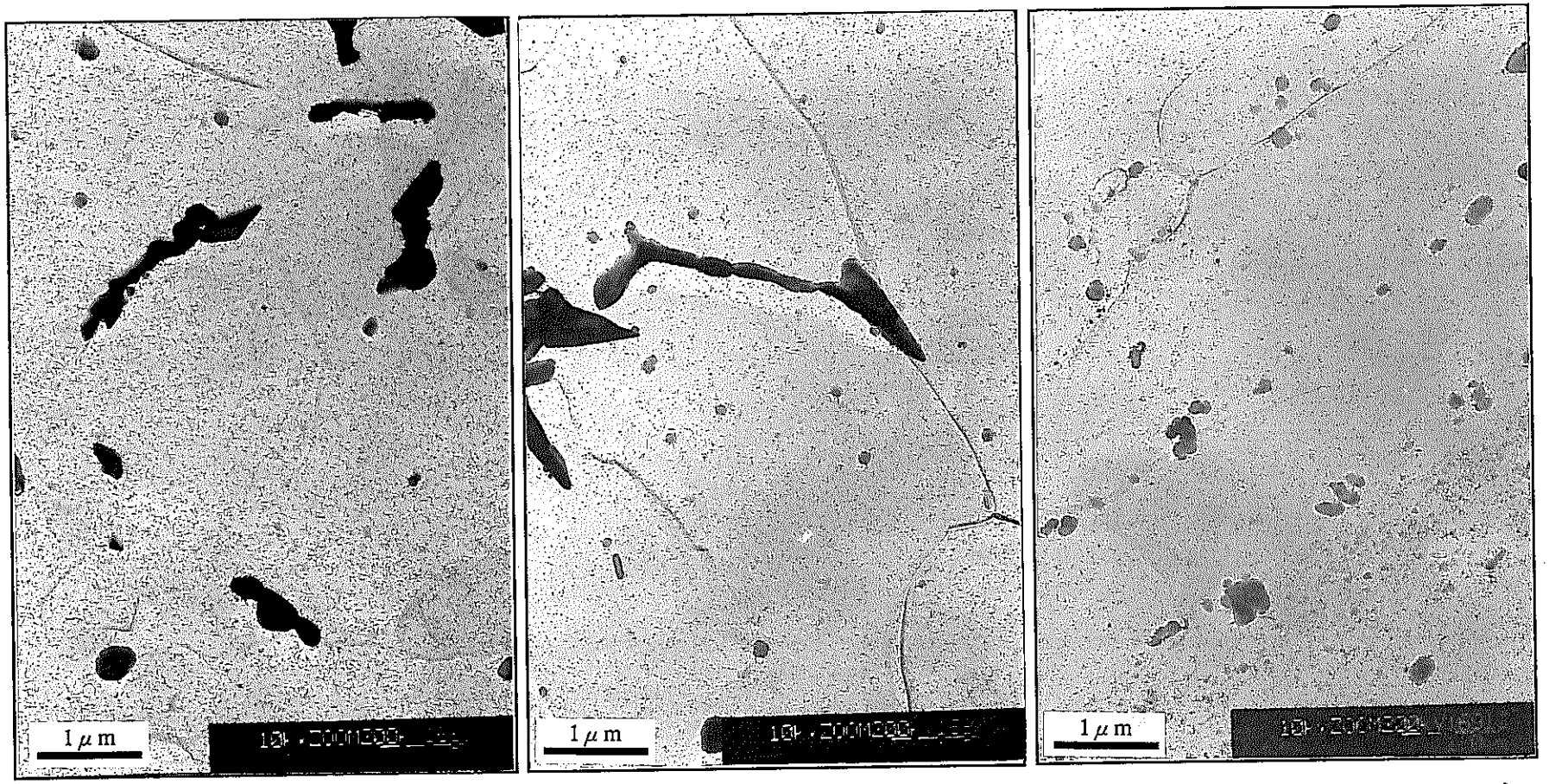
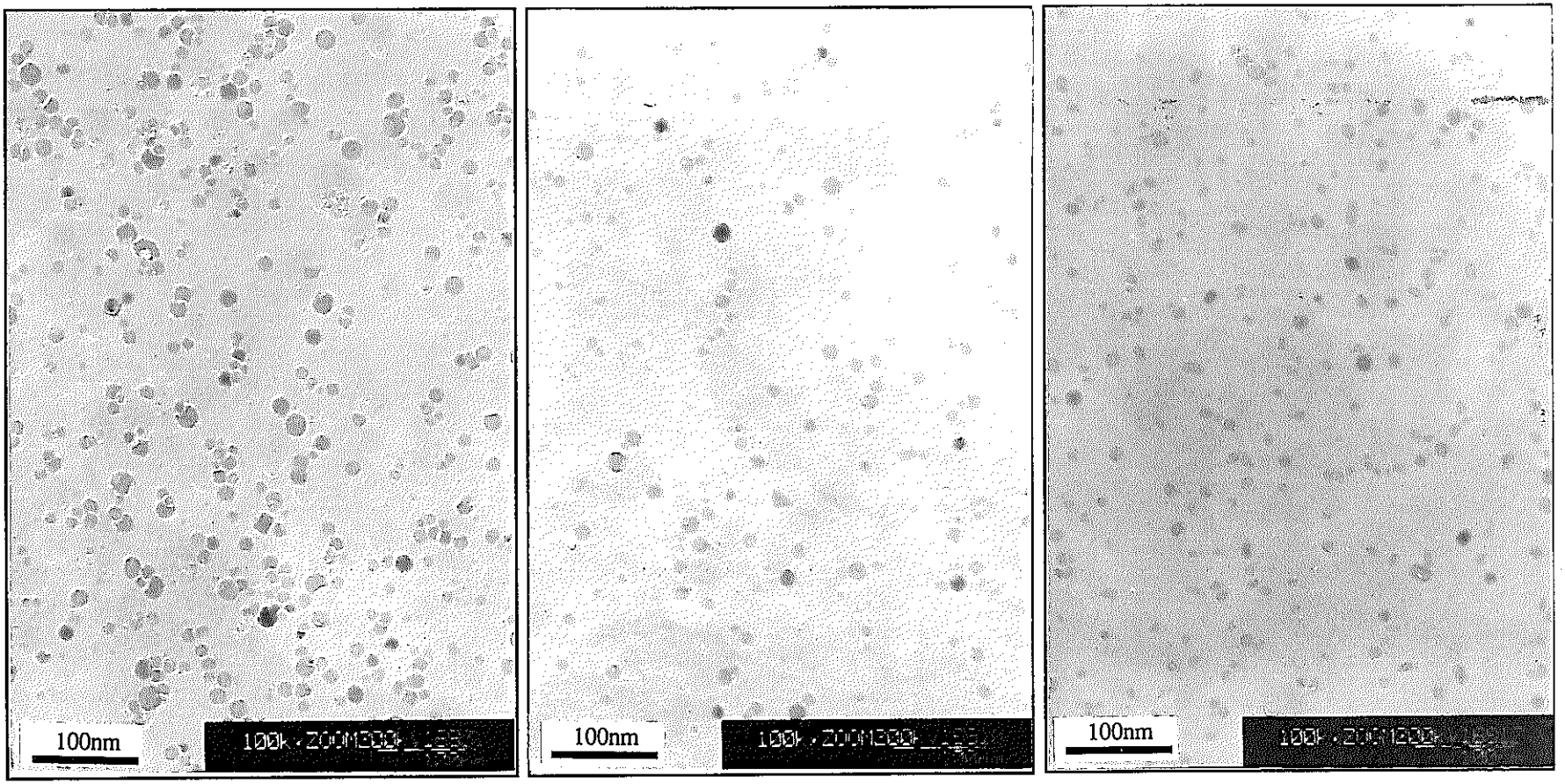


写真3-8　　マルテンサイト系ODS鋼試作管M92の組織-薄膜法による電顕観察結果
(M92; 0.12C-9Cr-2W-0.2Ti-0.30Y_2O_3)



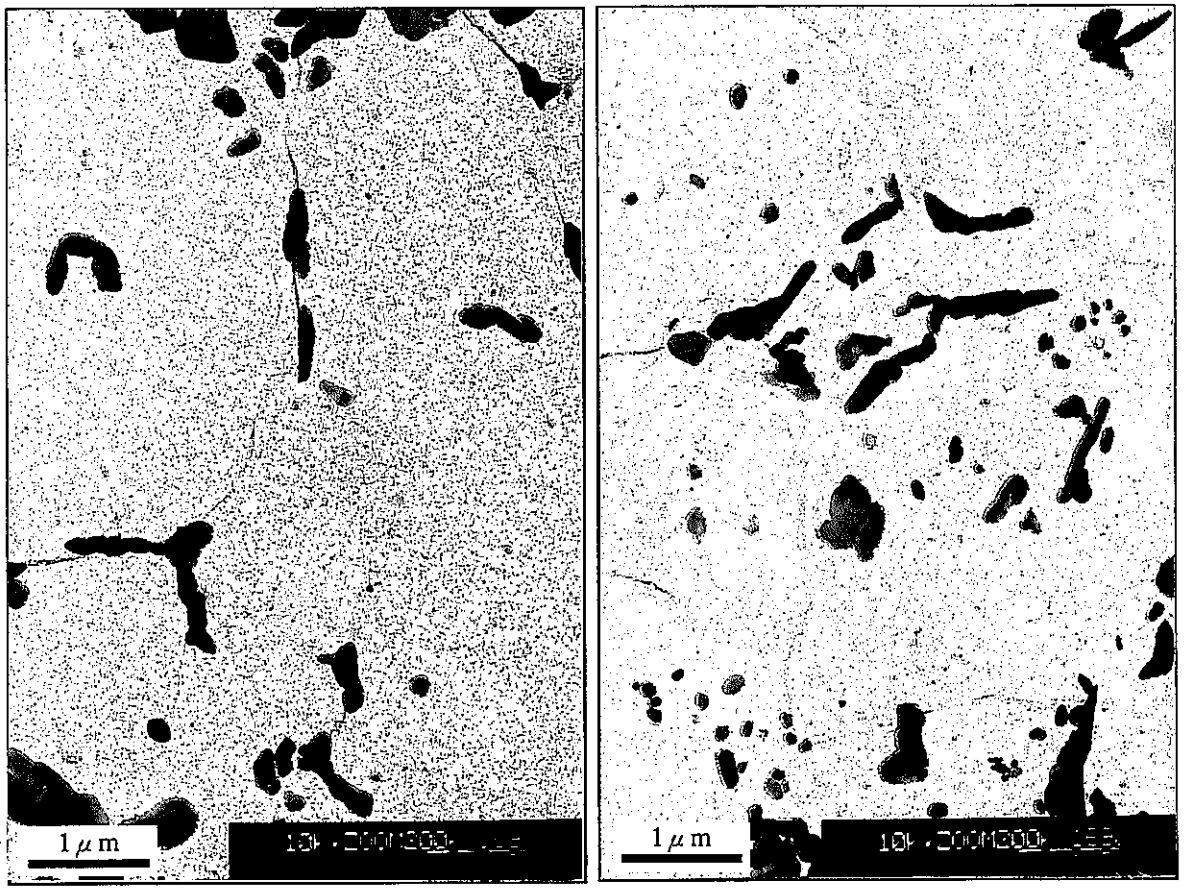
F91ST(12Cr-2W-0.1Ti-0.08Y_2O_3)　F92ST(12Cr-2W-0.1Ti-0.13Y_2O_3)　F94ST(12Cr-2W-0.2Ti-0.24Y_2O_3)

写真4-1　フェライト系ODS鋼試作管の析出,分散粒子-抽出レプリカ法による電顕観察結果



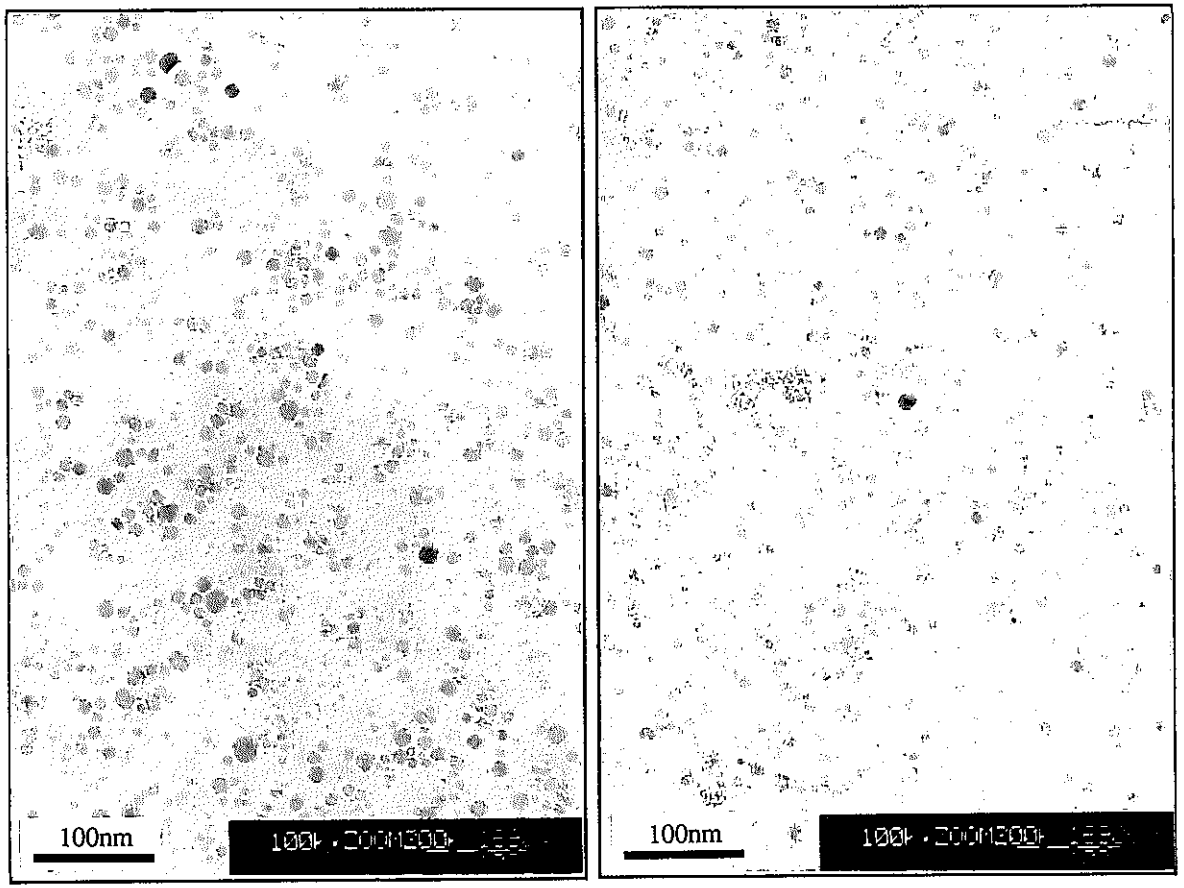
F91ST(12Cr-2W-0.1Ti-0.08Y_2O_3)　F92ST(12Cr-2W-0.1Ti-0.13Y_2O_3)　F94ST(12Cr-2W-0.2Ti-0.24Y_2O_3)

写真4-2　フェライト系ODS鋼試作管の酸化物分散粒子-抽出レプリカ法による電顕観察結果



M91(0.12C-9Cr-2W-0.1Ti-0.34Y_2O_3) M92(0.12C-9Cr-2W-0.2Ti-0.30Y_2O_3)

写真4-3　　マルテンサイト系ODS鋼試作管の析出,分散粒子-抽出レプリカ法による電顕観察結果



M91(0.12C-9Cr-2W-0.1Ti-0.34Y_2O_3) M92(0.12C-9Cr-2W-0.2Ti-0.30Y_2O_3)

写真4-4　　マルテンサイト系ODS鋼試作管の酸化物分散粒子-抽出レプリカ法による電顕観察結果

表　7-1　　ODS被覆管(F91ST)のリング引張試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法			0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)
	厚さ(mm)	幅(mm)	標点間(mm)				
RT	0.609	1.413	2.0	462	696	14.0	33.6
	0.619	1.479	2.0	423	685	11.2	34.8
400	0.616	1.388	2.0	315	478	8.8	16.2
	0.616	1.425	2.0	296	495	12.2	25.1
600	0.619	1.471	2.0	228	291	9.0	18.0
	0.613	1.483	2.0	215	321	18.0	28.0
650	0.616	1.479	2.0	118	276	32.2	39.6
	0.610	1.487	2.0	157	265	12.5	32.6
700	0.610	1.405	2.0	70	246	15.6	18.0
	0.610	1.396	2.0	72	197	16.6	21.0

表　7　-2　　ＯＤＳ被覆管（Ｆ９１ＣＷ）のリング引張試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法			0.2%耐力 (ＭＰａ)	引張強さ (ＭＰａ)	一様伸び (%)	全伸び (%)
	厚さ(mm)	幅(mm)	標点間(mm)				
ＲＴ	0.500	1.487	2.0	437	733	9.8	10.4
	0.500	1.487	2.0	474	753	9.2	10.8
４００	0.503	1.500	2.0	410	441	1.5	8.5
	0.500	1.487	2.0	420	474	2.0	3.0
６００	0.506	1.479	2.0	257	316	6.0	6.2
	0.490	1.496	2.0	218	331	7.8	8.6
６５０	0.500	1.500	2.0	160	267	12.2	13.2
	0.494	1.417	2.0	160	257	8.8	10.4
７００	0.497	1.405	2.0	94	195	14.4	16.8
	0.494	1.417	2.0	91	199	15.6	18.0

表　7-3　　ＯＤＳ被覆管(Ｆ９２ＳＴ)のリング引張試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法			0.2%耐力 (ＭＰａ)	引張強さ (ＭＰａ)	一様伸び (%)	全伸び (%)
	厚さ(㎜)	幅(㎜)	標点間(㎜)				
ＲＴ	0.616	1.479	2.0	480	837	12.0	26.6
	0.609	1.483	2.0	498	833	11.2	24.0
４００	0.613	1.409	2.0	480	625	7.4	18.6
	0.619	1.471	2.0	483	593	4.0	5.8
６００	0.610	1.409	2.0	267	389	5.6	11.0
	0.619	1.483	2.0	220	357	12.4	13.4
６５０	0.612	1.471	2.0	136	305	13.4	16.0
	0.619	1.479	2.0	158	299	10.6	12.2
７００	0.609	1.409	2.0	83	234	29.6	50.4
	0.603	1.417	2.0	88	217	15.0	17.0

表　7-4　　ＯＤＳ被覆管(Ｆ９２CW)のリング引張試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法			0.2%耐力 (ＭＰａ)	引張強さ (ＭＰａ)	一様伸び (%)	全伸び (%)
	厚さ(㎜)	幅(㎜)	標点間(㎜)				
ＲＴ	0.503	1.492	2.0	590	873	7.4	8.2
	0.497	1.496	2.0	572	898	8.2	9.4
４００	0.497	1.421	2.0	390	623	6.7	7.6
	0.503	1.422	2.0	433	597	3.2	3.6
６００	0.503	1.508	2.0	257	401	7.6	8.2
	0.494	1.483	2.0	263	418	8.4	9.0
６５０	0.497	1.500	2.0	201	335	7.6	8.0
	0.503	1.491	2.0	193	329	6.0	6.6
７００	0.500	1.413	2.0	93	246	12.4	14.0
	0.500	1.413	2.0	113	225	4.6	6.0

表　7-5　ＯＤＳ被覆管(Ｆ９４ＳＴ)のリング引張試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法			0.2%耐力 (ＭＰａ)	引張強さ (ＭＰａ)	一様伸び (%)	全伸び (%)
	厚さ(㎜)	幅(㎜)	標点間(㎜)				
ＲＴ	0.628	1.475	2.0	567	1012	14.4	16.2
	0.638	1.471	2.0	533	990	13.6	17.5
４００	0.635	1.438	2.0	468	657	4.8	5.6
	0.638	1.483	2.0	512	552	1.0	2.0
６００	0.642	1.413	2.0	276	431	9.2	10.8
	0.632	1.491	2.0	263	434	9.7	10.4
６５０	0.635	1.417	2.0	254	337	5.2	7.4
	0.645	1.483	2.0	199	357	10.8	15.0
７００	0.642	1.409	2.0	165	264	8.4	14.9
	0.636	1.409	2.0	125	250	9.2	11.2

表　7-6　ＯＤＳ被覆管(Ｆ９４CW)のリング引張試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法			0.2%耐力 (ＭＰａ)	引張強さ (ＭＰａ)	一様伸び (%)	全伸び (%)
	厚さ(mm)	幅(mm)	標点間(mm)				
ＲＴ	0.516	1.496	2.0	622	858	4.2	5.0
	0.516	1.500	2.0	646	807	1.6	2.3
４００	0.506	1.491	2.0	563	602	1.2	2.0
	0.513	1.421	2.0	554	575	0.6	0.6
６００	0.487	1.491	2.0	306	395	3.0	3.6
	0.507	1.425	2.0	325	383	1.4	2.8
６５０	0.510	1.496	2.0	260	305	1.6	4.0
	0.510	1.508	2.0	244	311	2.0	4.0
７００	0.500	1.413	2.0	174	229	1.8	5.2
	0.513	1.405	2.0	180	225	1.8	6.0

表　7-7　　ＯＤＳ被覆管(Ｍ９１)のリング引張試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法			0.2%耐力 (ＭＰａ)	引張強さ (ＭＰａ)	一様伸び (%)	全伸び (%)
	厚さ(㎜)	幅(㎜)	標点間(㎜)				
ＲＴ	0.690	1.483	2.0	489	928	18.7	29.8
	0.696	1.483	2.0	484	925	15.4	30.0
４００	0.700	1.483	2.0	482	676	9.2	11.3
	0.690	1.417	2.0	455	685	11.0	12.0
６００	0.690	1.471	2.0	276	501	18.0	30.4
	0.706	1.426	2.0	288	492	17.6	33.4
６５０	0.693	1.421	2.0	274	398	8.2	13.6
	0.690	1.500	2.0	237	414	15.0	22.0
７００	0.697	1.434	2.0	184	321	16.8	24.4
	0.694	1.421	2.0	185	287	6.4	10.0

表　7-8　ＯＤＳ被覆管(Ｍ９２)のリング引張試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法			0.2%耐力 (ＭＰａ)	引張強さ (ＭＰａ)	一様伸び (%)	全伸び (%)
	厚さ(mm)	幅(mm)	標点間(mm)				
ＲＴ	0.674	1.496	2.0	632	1066	18.8	19.4
	0.674	1.487	2.0	661	1108	20.4	23.0
４００	0.674	1.413	2.0	441	840	11.0	11.0
	0.672	1.415	2.0	542	852	9.8	10.2
６００	0.671	1.475	2.0	344	591	14.8	29.0
	0.677	1.476	2.0	350	572	12.0	12.8
６５０	0.674	1.483	2.0	340	485	7.8	9.6
	0.670	1.475	2.0	295	450	8.0	9.2
７００	0.681	1.401	2.0	220	398	16.0	28.0
	0.674	1.401	2.0	192	391	15.0	16.4

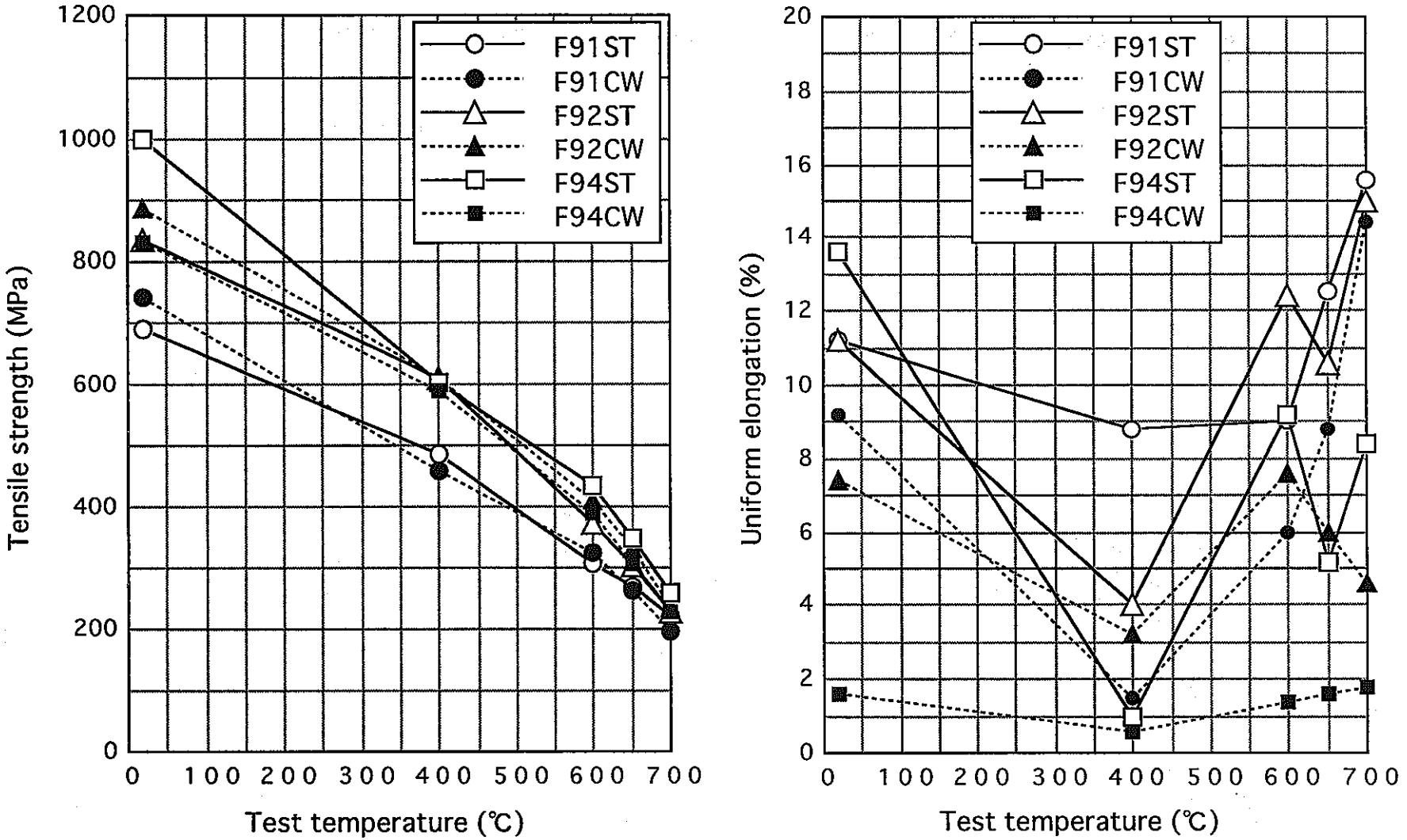


図 6　　フェライト系ODS鋼被覆管のリング引張試験結果（引張強さ、一様伸び）

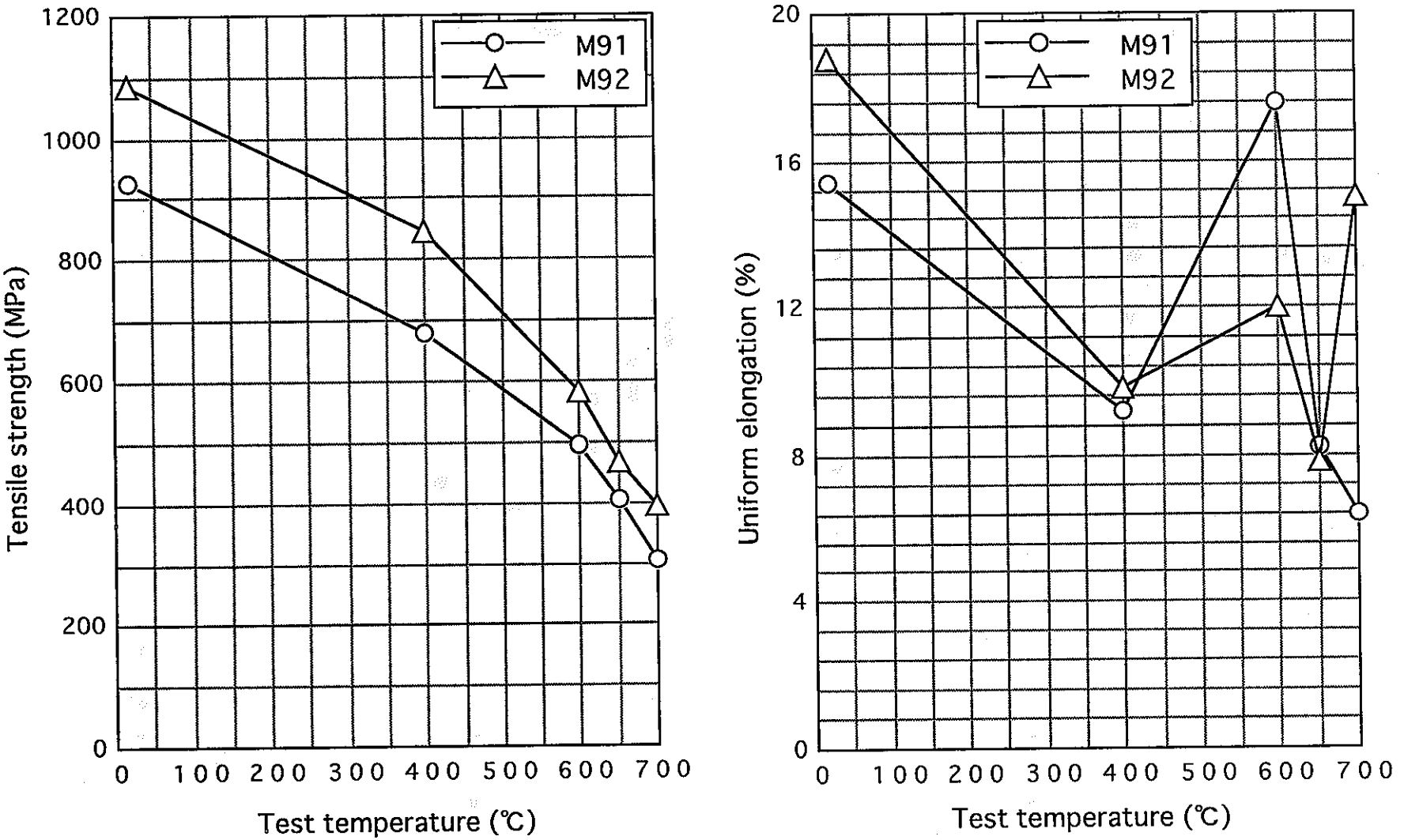


図 7　　マルテンサイト系ODS鋼被覆管のリング引張試験結果（引張強さ、一様伸び）

表８　Ｈ９年度試作ＯＤＳ被覆管内圧クリープ試験片の寸法測定結果

試験片番号	肉厚（mm）						肉厚平均値	外径（mm）				外径平均値
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	
F91ST-1	0.62	0.63	0.60	0.56	0.56	0.57	0.59	9.277	9.267	9.272	9.275	9.273
F91ST-2	0.62	0.63	0.58	0.56	0.55	0.58	0.59	9.274	9.268	9.280	9.269	9.273
F91CW-1	0.49	0.50	0.48	0.46	0.46	0.48	0.48	8.466	8.461	8.465	8.465	8.464
F91CW-2	0.49	0.49	0.46	0.46	0.47	0.48	0.48	8.465	8.466	8.467	8.466	8.466
F92ST-1	0.57	0.59	0.65	0.63	0.59	0.57	0.60	9.283	9.276	9.285	9.281	9.281
F92ST-2	0.61	0.64	0.62	0.59	0.57	0.56	0.60	9.280	9.282	9.282	9.281	9.281
F92CW-1	0.47	0.50	0.51	0.49	0.47	0.46	0.48	8.486	8.478	8.482	8.485	8.483
F92CW-2	0.50	0.51	0.52	0.51	0.47	0.46	0.50	8.486	8.483	8.485	8.485	8.485
F94ST-1	0.63	0.61	0.61	0.63	0.65	0.63	0.63	9.322	9.319	9.317	9.321	9.320
F94ST-2	0.63	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63	0.63	9.322	9.322	9.322	9.323	9.322
F94ST-3	0.63	0.62	0.62	0.62	0.64	0.63	0.63	9.319	9.321	9.321	9.321	9.321
F94ST-4	0.62	0.62	0.62	0.63	0.62	0.62	0.62	9.320	9.317	9.320	9.321	9.320
F94ST-5	0.57	0.56	0.63	0.68	0.66	0.60	0.62	9.316	9.318	9.315	9.319	9.317
F94ST-6	0.61	0.66	0.67	0.62	0.58	0.58	0.62	9.316	9.319	9.318	9.316	9.317
F94ST-7	0.62	0.63	0.66	0.65	0.59	0.61	0.63	9.314	9.316	9.315	9.318	9.316
F94CW-1	0.50	0.50	0.51	0.50	0.49	0.49	0.50	8.502	8.505	8.501	8.506	8.504
F94CW-2	0.48	0.51	0.51	0.48	0.48	0.50	0.49	8.506	8.504	8.508	8.502	8.505
F94CW-3	0.50	0.52	0.50	0.48	0.48	0.48	0.49	8.502	8.506	8.505	8.507	8.505
M91-1	0.64	0.68	0.72	0.72	0.68	0.65	0.68	9.437	9.430	9.407	9.428	9.426
M91-2	0.73	0.64	0.65	0.70	0.72	0.63	0.68	9.440	9.427	9.406	9.418	9.423
M91-3	0.64	0.67	0.72	0.69	0.63	0.64	0.67	9.428	9.440	9.418	9.430	9.429
M92-1	0.67	0.67	0.64	0.66	0.65	0.65	0.66	9.369	9.357	9.370	9.369	9.366
M92-2	0.67	0.65	0.64	0.66	0.64	0.67	0.66	9.370	9.356	9.357	9.372	9.364
M92-3	0.67	0.64	0.67	0.66	0.67	0.67	0.66	9.365	9.371	9.358	9.366	9.365

表 9　　Ｈ９年度試作ＯＤＳ鋼被覆管の内圧クリープ破断試験条件と結果

試験片No.	外径 (mm)	肉厚 (mm)	係数	試験温度 (℃)	目標破断時間(h)	応力 (ＭＰａ)	試験圧力 (kgf/cm2)	破断時間 (ｈ)	備考
F91ST-1	9.30	0.59	7.381	700	100	110	152	25.1	F
F91ST-2	9.30	0.59	7.381	700	1000	80	111	178.8	F
F91CW-1	8.50	0.48	8.354	700	100	100	122	27.2	V
F91CW-2	8.50	0.48	8.354	700	1000	70	85	101.8	F
F92ST-1	9.30	0.60	7.250	700	100	130	183	23.6	V
F92ST-2	9.30	0.60	7.250	700	1000	90	127	100.5	F
F92CW-1	8.50	0.50	8.000	700	100	120	153	24.3	V
F92CW-2	8.50	0.50	8.000	700	1000	80	102	64.2	F
F94ST-1	9.30	0.62	7.000	650	100	280	408	2.5	V
F94ST-2	9.30	0.62	7.000	650	1000	200	291	100.2	F
F94ST-3	9.30	0.62	7.000	650	2600				試験中止
F94ST-4	9.30	0.62	7.000	700	100	180	262	22.0	V
F94ST-5	9.30	0.62	7.000	700	1000	150	219	70.1	F
F94ST-6	9.30	0.62	7.000	700	10000	130	189	136.7	F
F94ST-7	9.30	0.62	7.000	700	予備	100	146	(983)	試験中
F94CW-1	8.50	0.50	8.000	700	100	160	204	10.5	V
F94CW-2	8.50	0.50	8.000	700	1000	100	127	306.0	F
F94CW-3	8.50	0.50	8.000	700	10000				試験中止
M91-1	9.43	0.68	6.434	700	100	160	254	22.5	F
M91-2	9.43	0.68	6.434	700	1000	100	158	(983)	試験中
M91-3	9.43	0.68	6.434	700	予備	80	127	(252)	試験中
M91-4	9.43	0.68	6.434	700	予備				予定
M92-1	9.36	0.66	6.591	700	100	160	248	213.2	F
M92-2	9.36	0.66	6.591	700	1000	120	186	(983)	試験中
M92-3	9.36	0.66	6.591	700	予備	100	155	(556)	試験中
M92-4	9.36	0.66	6.591	700	予備				予定

表１０　Ｈ９年度試作ＯＤＳ鋼被覆管の単軸クリープ破断試験条件と結果

試験片No.	外径 (mm)	肉厚 (mm)	長さ (mm)	試験温度 (℃)	目標破断時間(h)	応力 (ＭＰａ)	破断時間 (ｈ)	破断伸び (%)	備考
F94ST-1	9.30	0.62	160	700	1000	150	2845.8	0.0	試験中止
F94ST-2	9.30	0.62	160	700	100	250	9.9	8.3	B
F94ST-3	9.30	0.62	160	700	予備	210	(650)		試験中
F94CW-1	8.50	0.50	160	700	1000	150	2687.0	0.0	試験中止
F94CW-2	8.50	0.50	160	700	100	250	709.3	0.9	端部破断
F94CW-3	8.50	0.50	160	700	予備	270	(650)		試験中

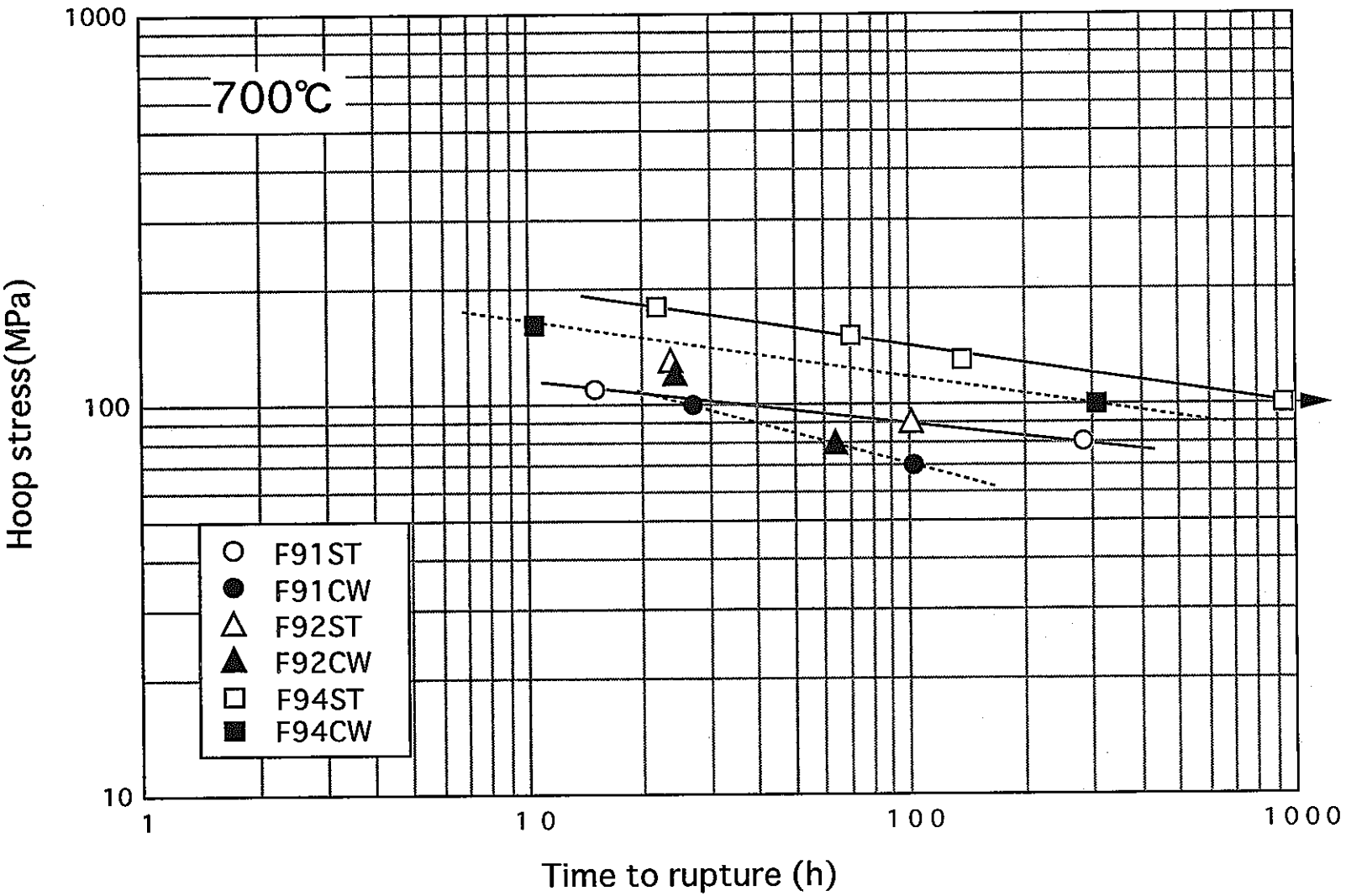


図 8　　フェライト系ODS被覆管F91,92,94熱処理材（ST）と冷間加工材（CW）の内圧クリープ破断強度の比較

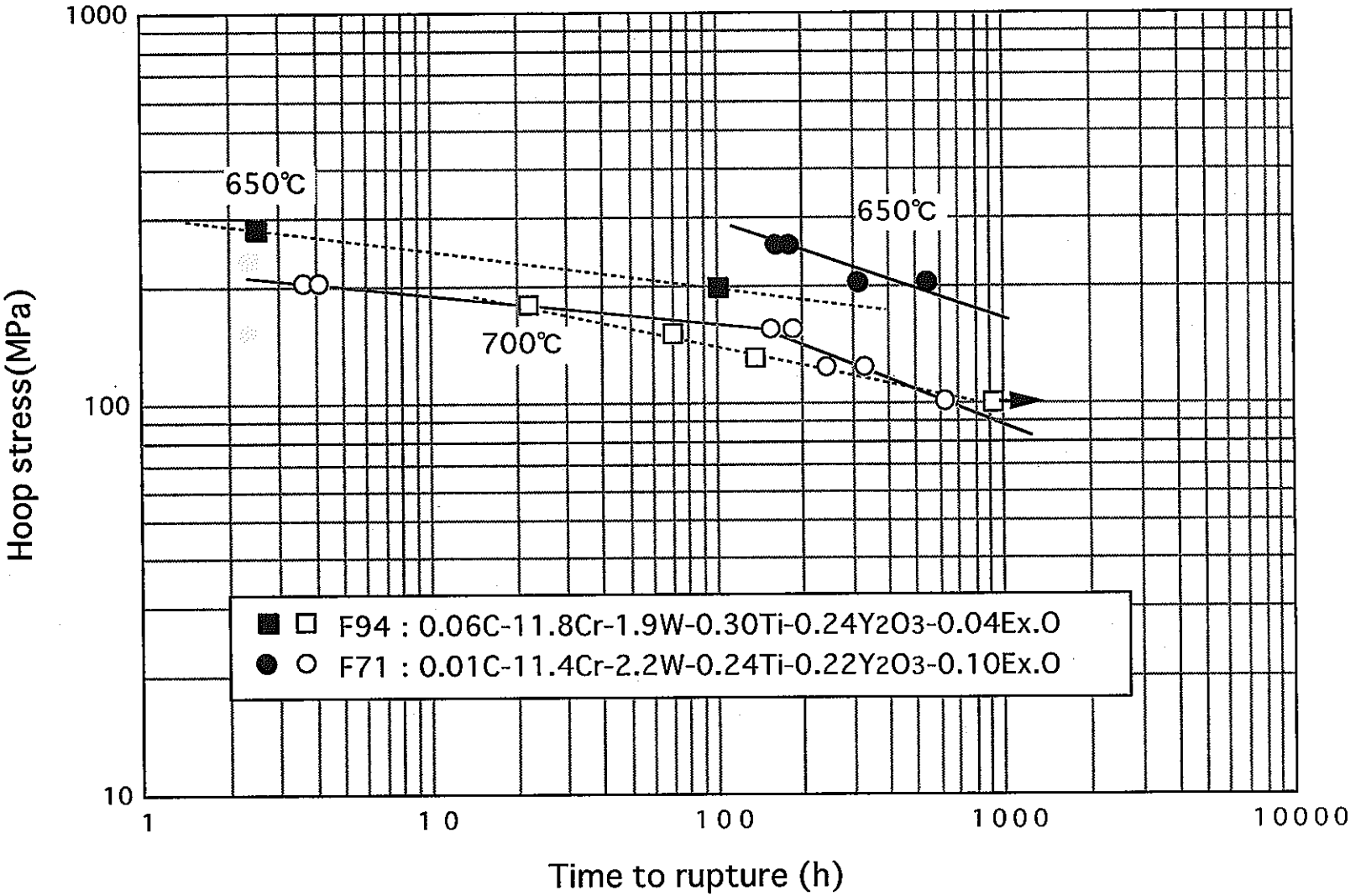


図 9　　F94ST被覆管の650,700℃における内圧クリープ破断強度

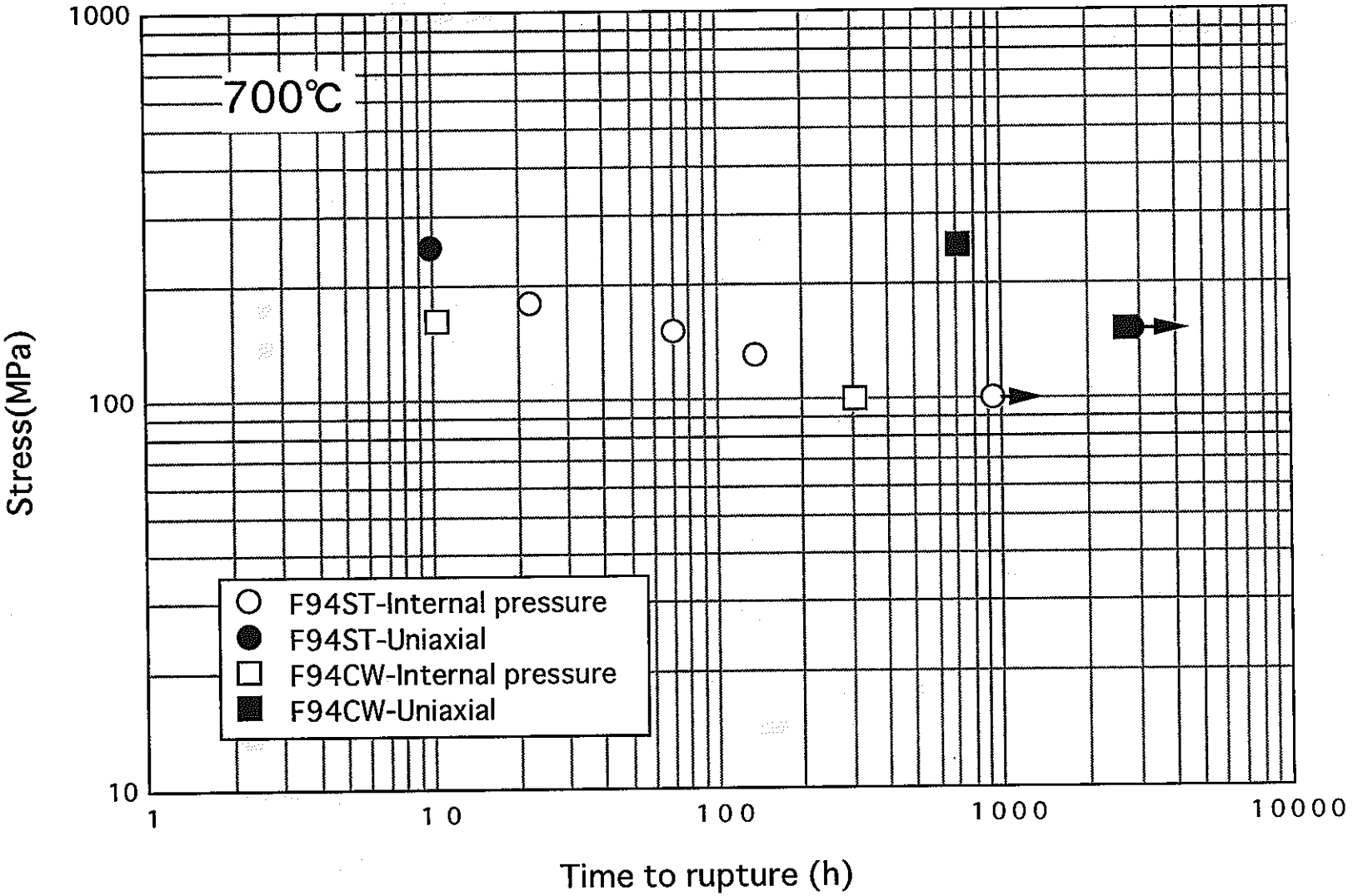


図10　　フェライト系F94熱処理材、冷間加工材の単軸、内圧クリープ破断強度の比較

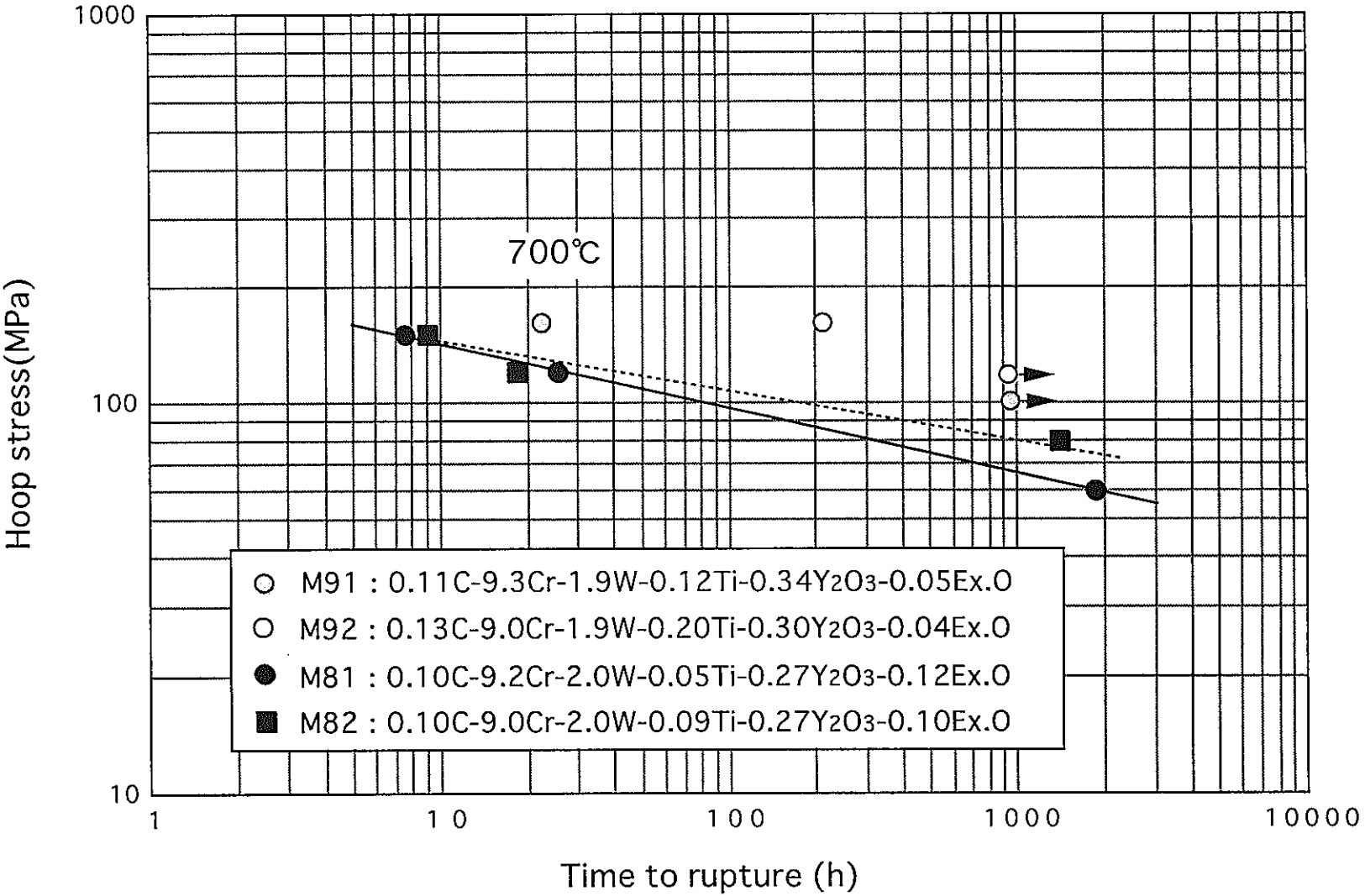
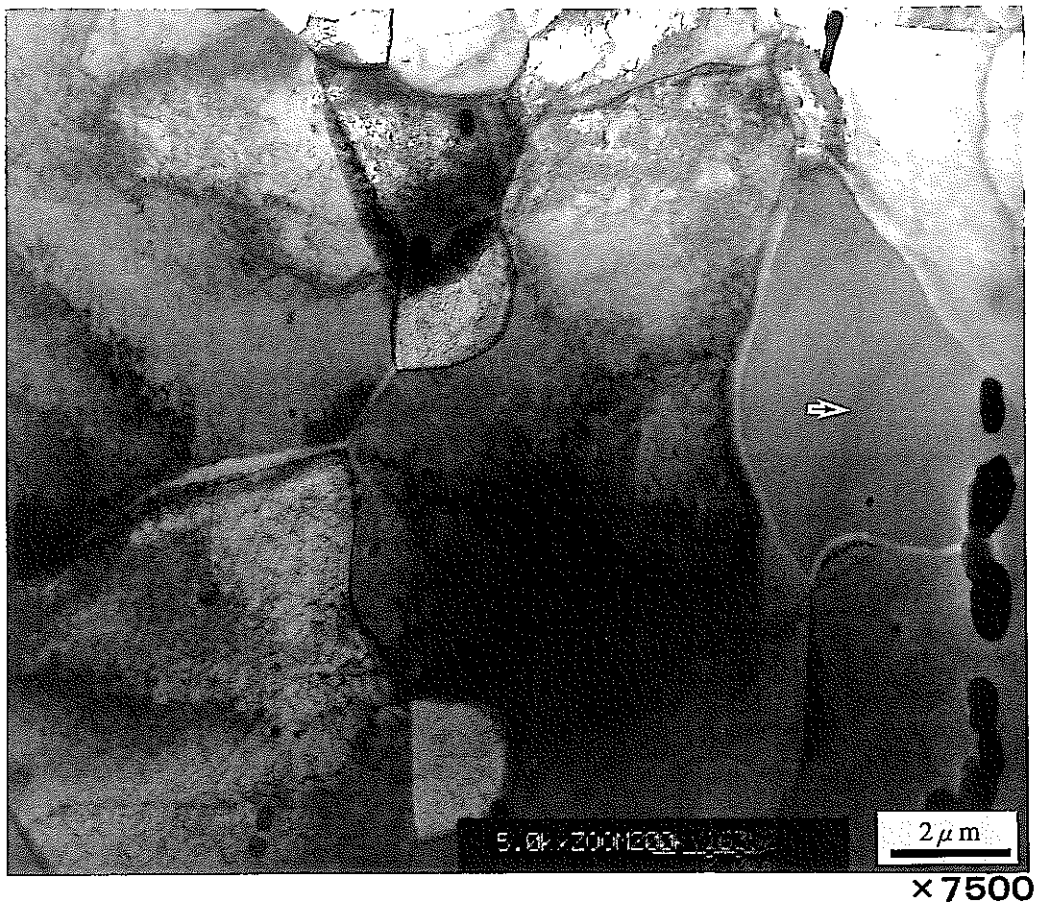


図 11　　マルテンサイト系M81,M82被覆管の内圧クリープ破断強度



Film No. = 6360

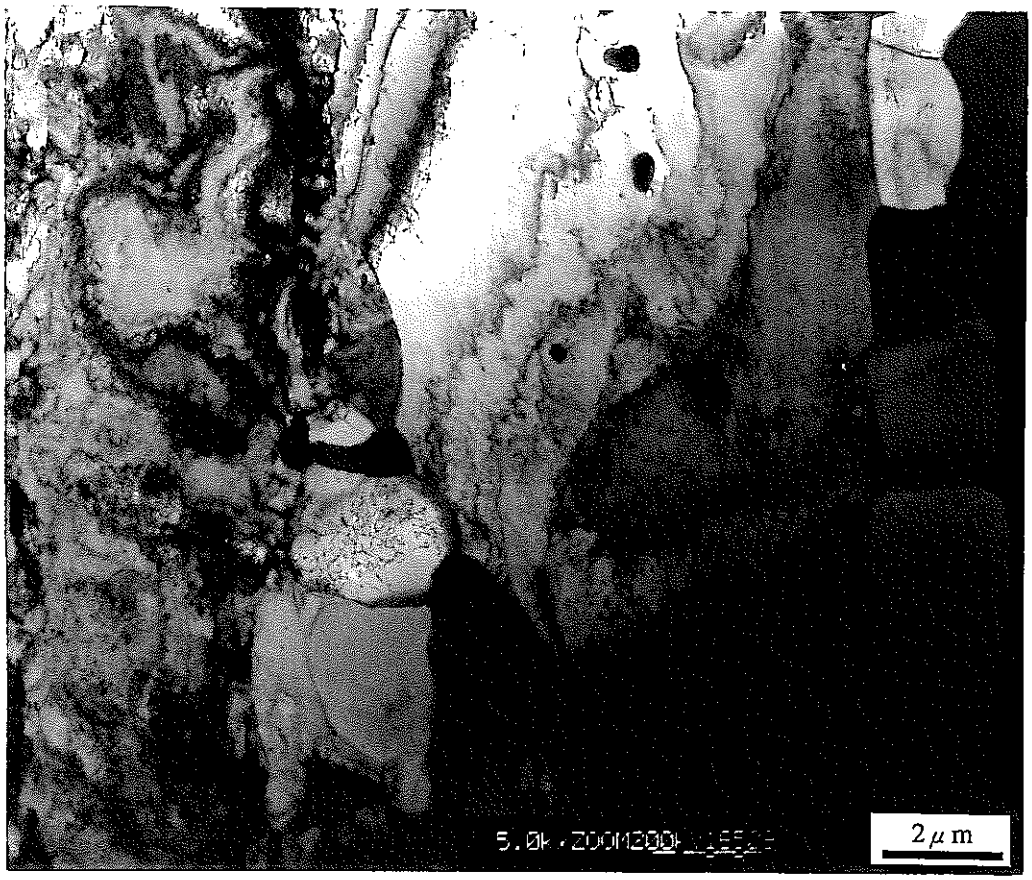
* phase name = Fe (alpfa) JCPDS 6-696

Cubic (Body-Centered)

Measured D.	Calculated D.	(h k l)
D1 = 2.026	D1 = 2.027	* (1 1 0)
D2 = 2.026	D2 = 2.027	* (1 0 1)
D3 = 1.178	D3 = 1.170	* (2 1 1)
Ang[1-2]= 61.4	Ang[1-2]= 60.0	< u v w >
Ang[1-3]= 30.7	Ang[1-3]= 30.0	< 1 -1 -1 >

写真5-1　Ｆ９１鋼：２回目ＣＲ→最終焼鈍後の組織

F91鋼　2回圧延+1150℃焼鈍材



×7500

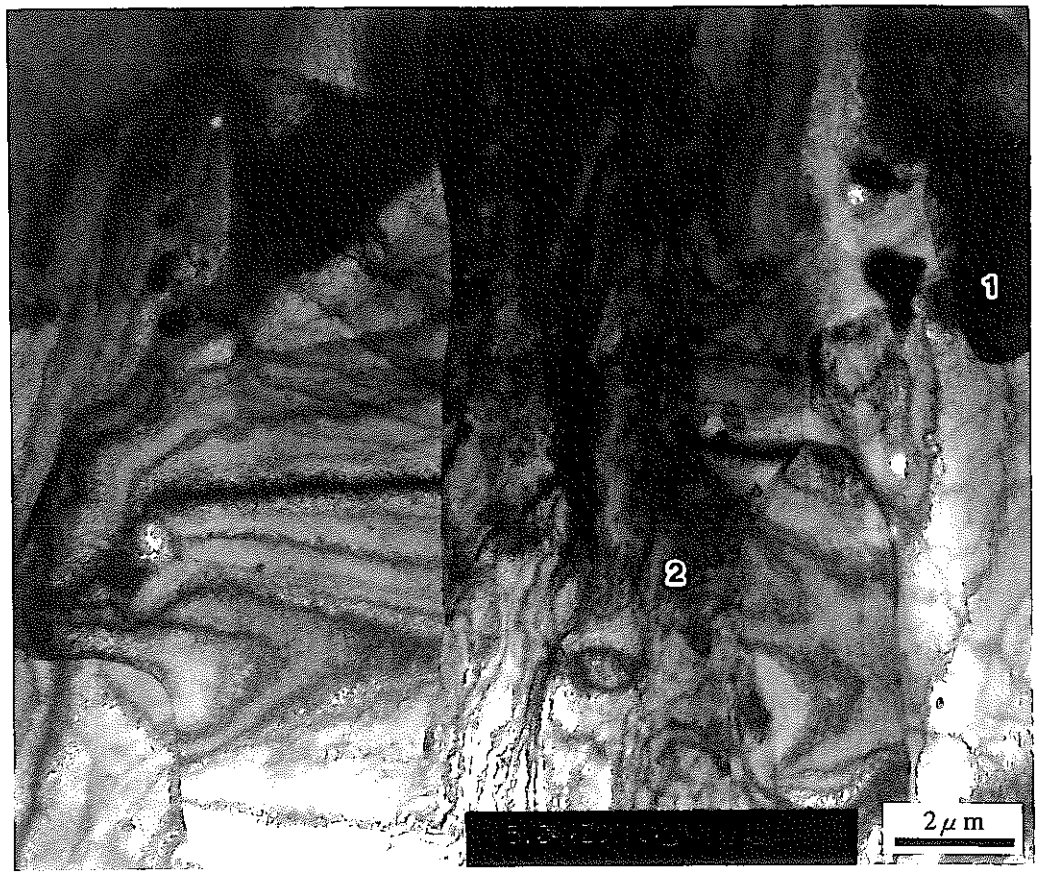


写真5-2　Ｆ９２鋼：２回目ＣＲ→最終焼鈍後の組織

F92鋼　2回圧延＋1150℃焼鈍材

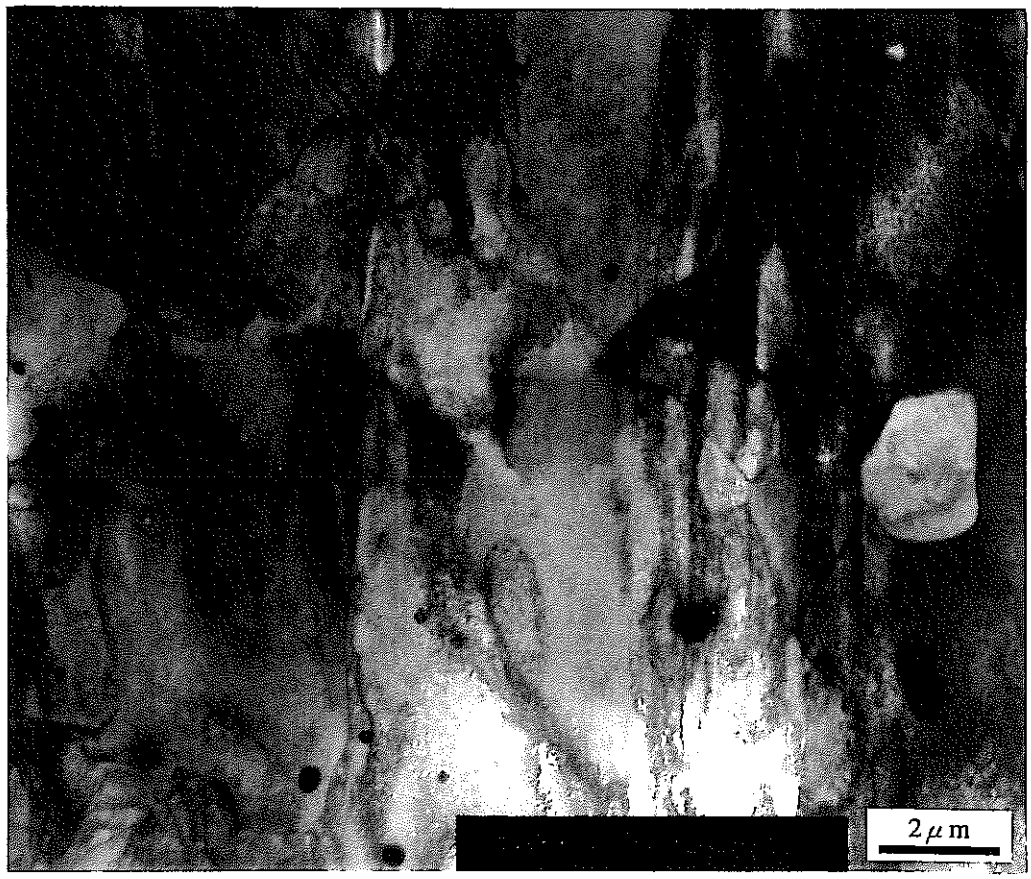


写真5-3　Ｆ９３鋼：２回目ＣＲ→最終焼鈍後の組織

F93　2回圧延＋1150℃焼鈍材

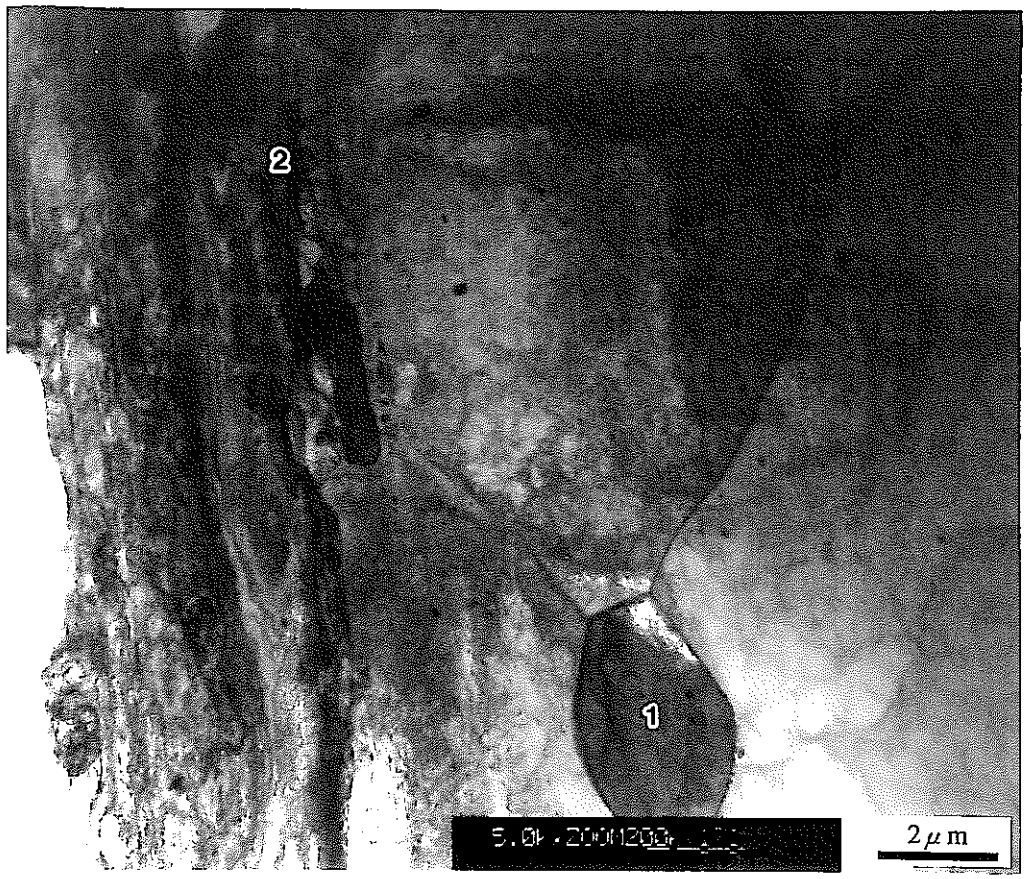


写真5-4　Ｆ９４鋼：２回目ＣＲ→最終焼鈍後の組織

F94－1　2回圧延＋1150℃焼鈍材

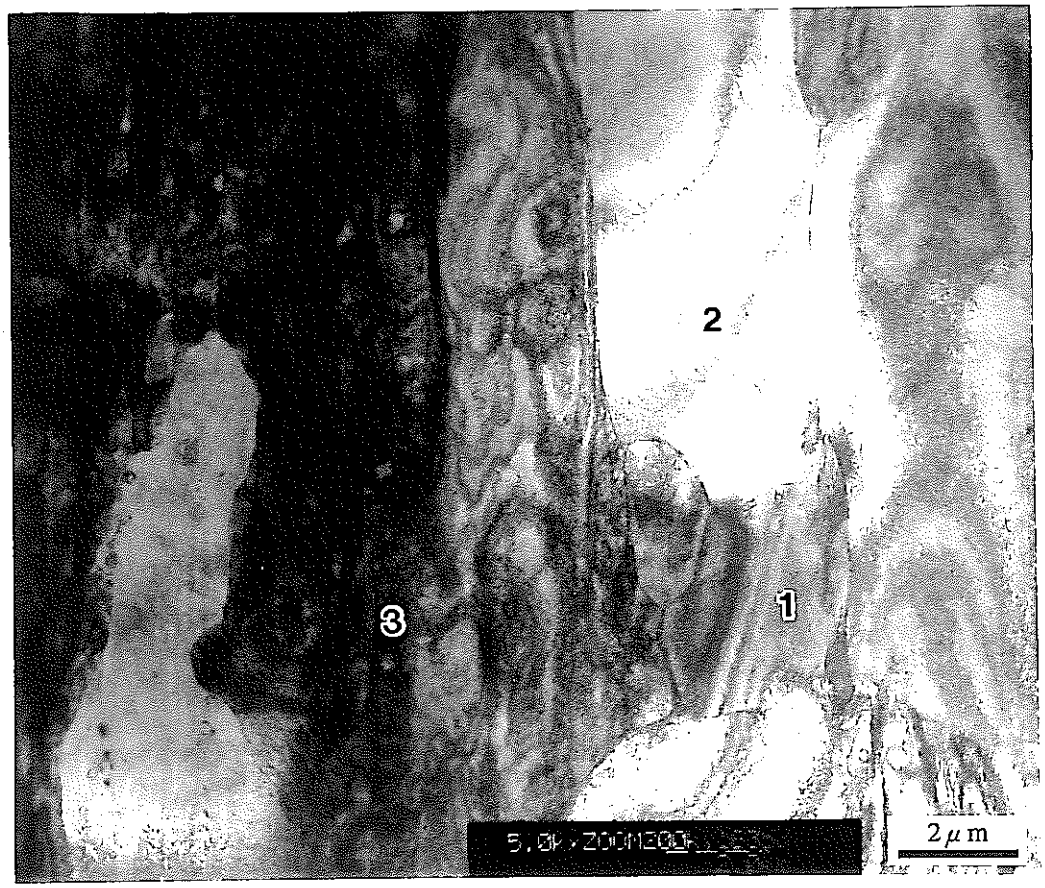
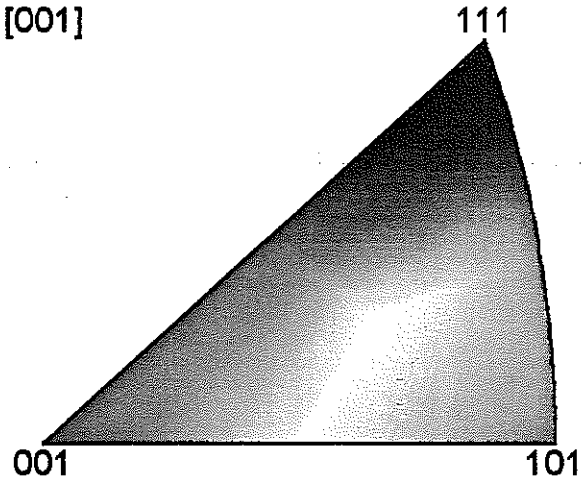


写真5-5　Ｆ９５鋼：２回目ＣＲ→最終焼鈍後の組織

F95鋼　2回圧延+1150℃焼鈍材



Color of Inverse Pole Figure

図１２　逆極点図のカラー表示

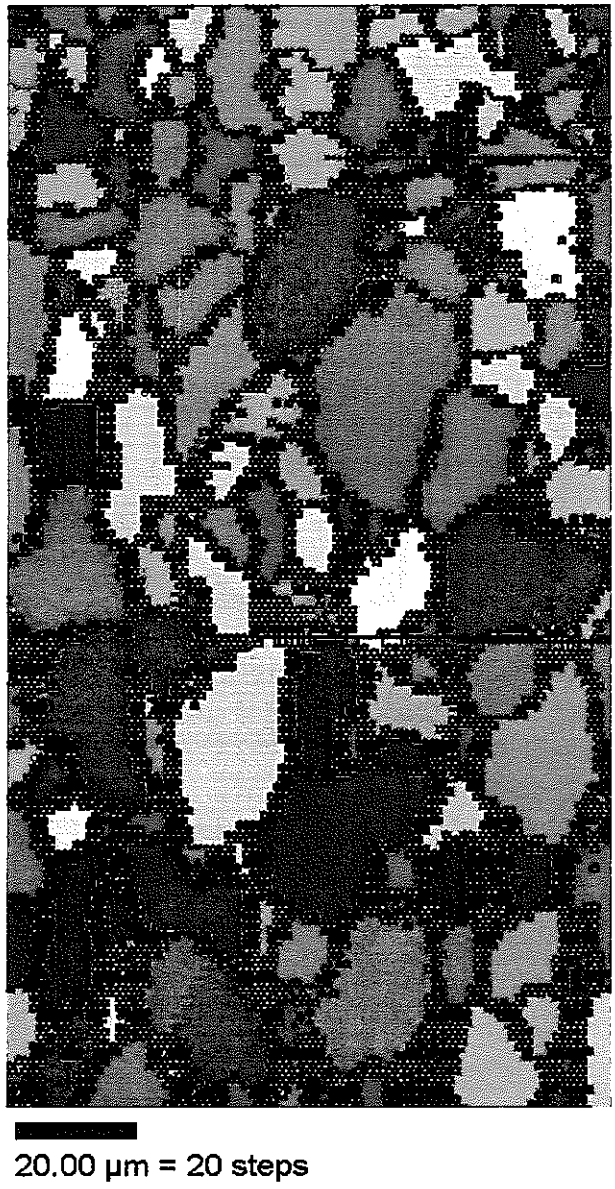


図１３　Ｆ９１鋼：最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング

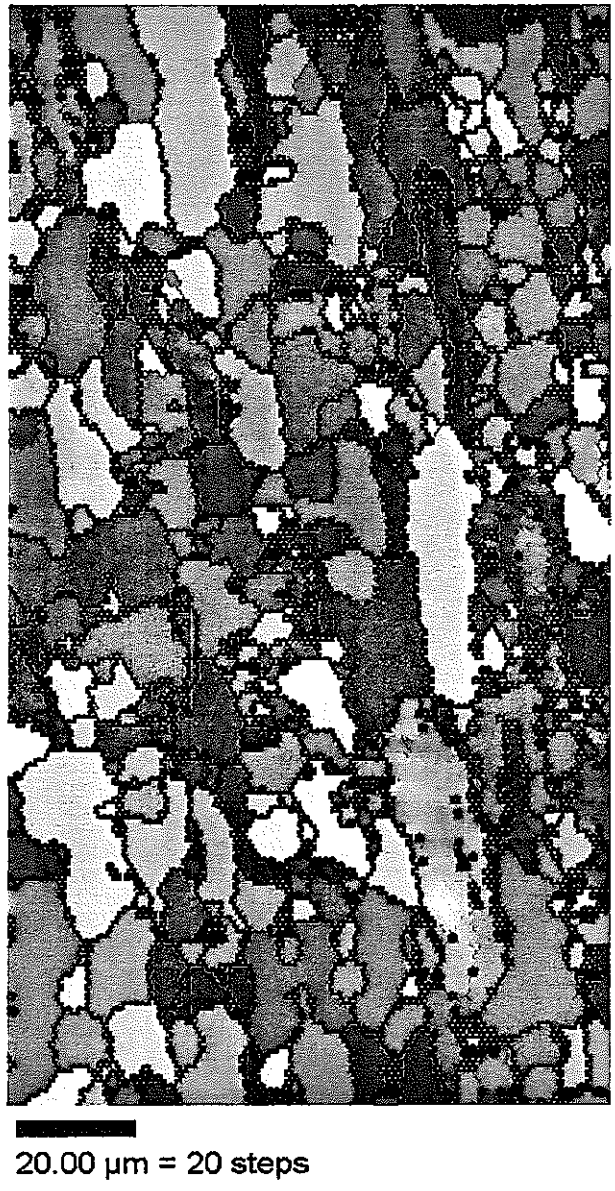


図１４　Ｆ９２鋼：最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング

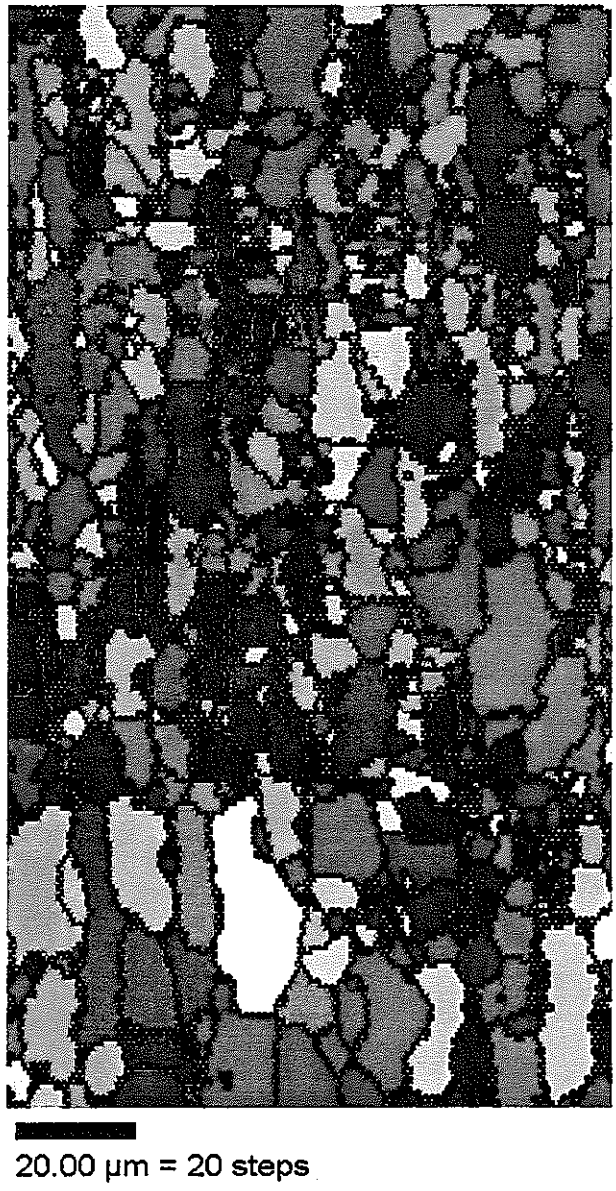


図１５　Ｆ９３鋼：最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング

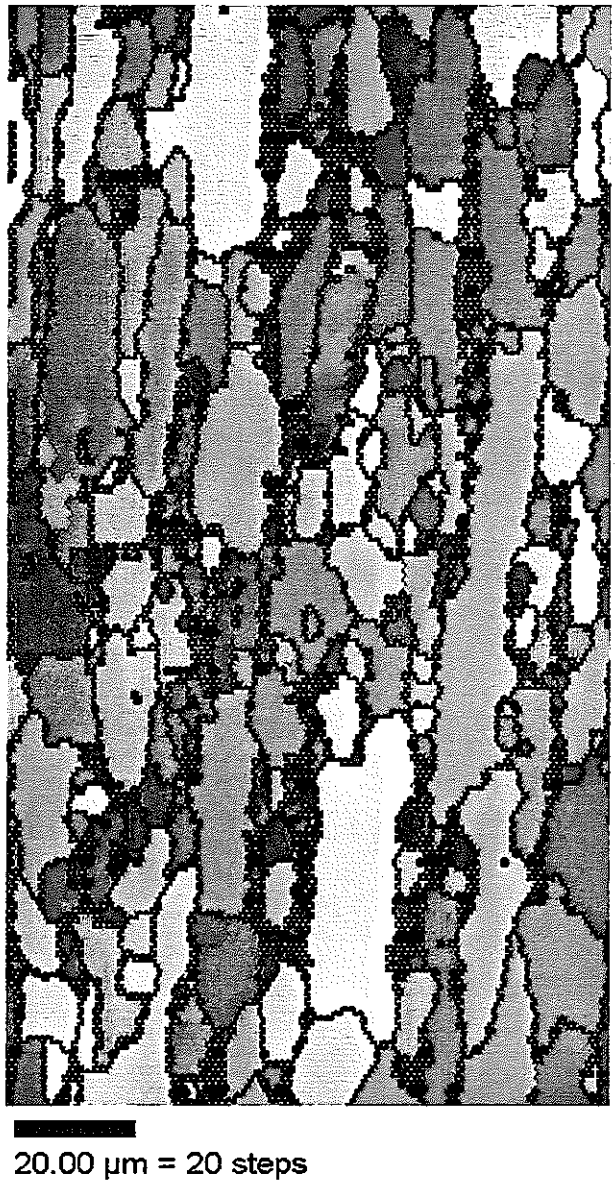
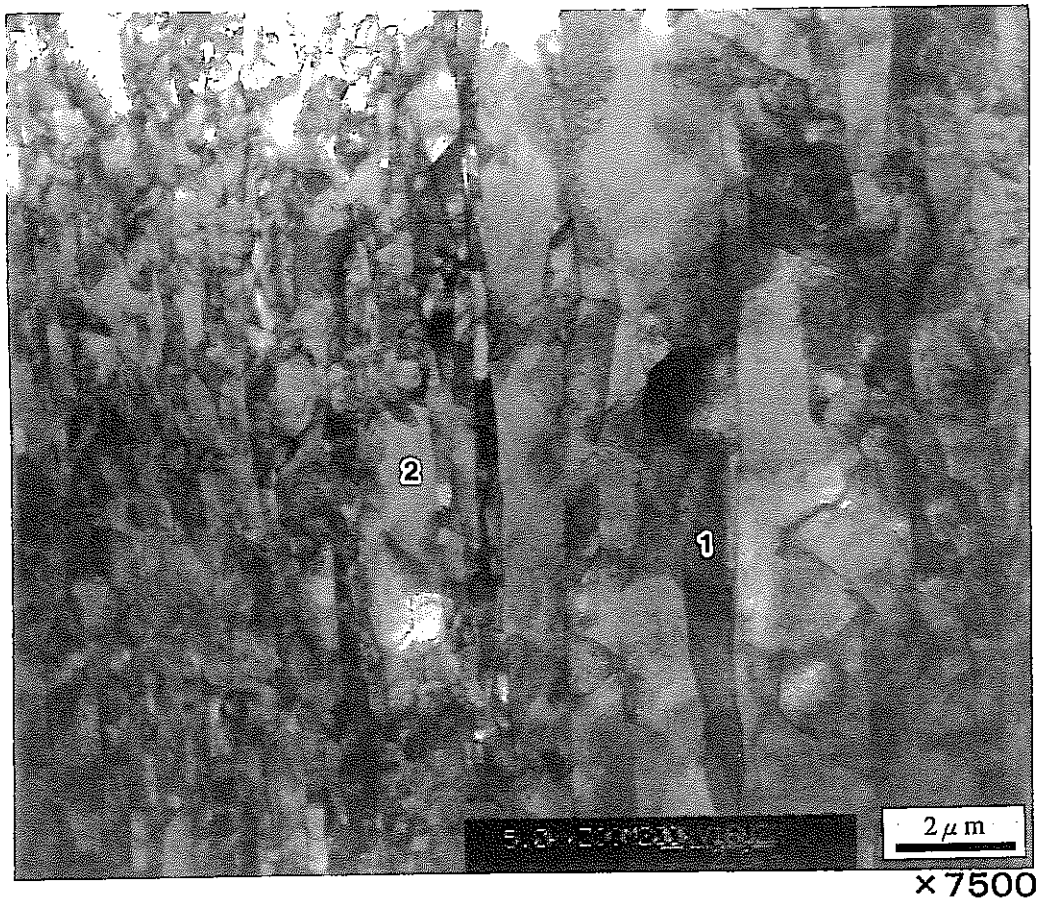


図１６　Ｆ９４鋼：最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング

図１７　Ｆ９５鋼：最終焼鈍後結晶面のカラーマッピング



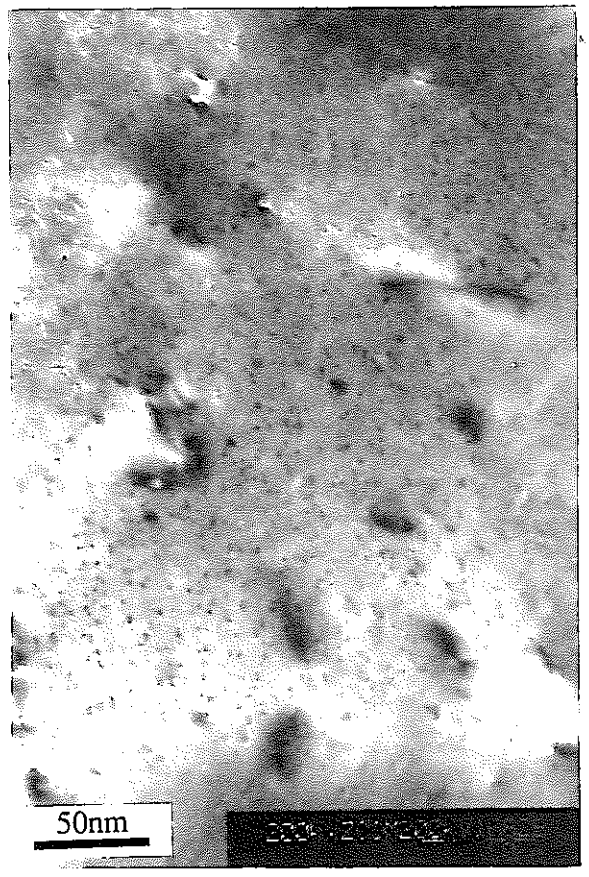


写真６　Ｆ９５鋼：熱間押出材の組織

F95押出しまま材

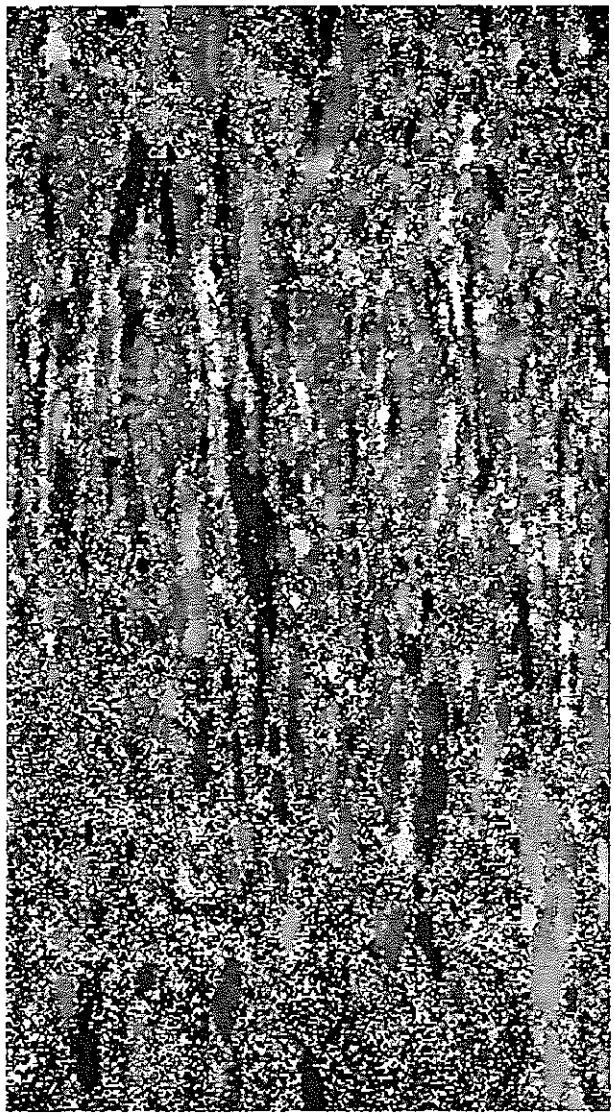
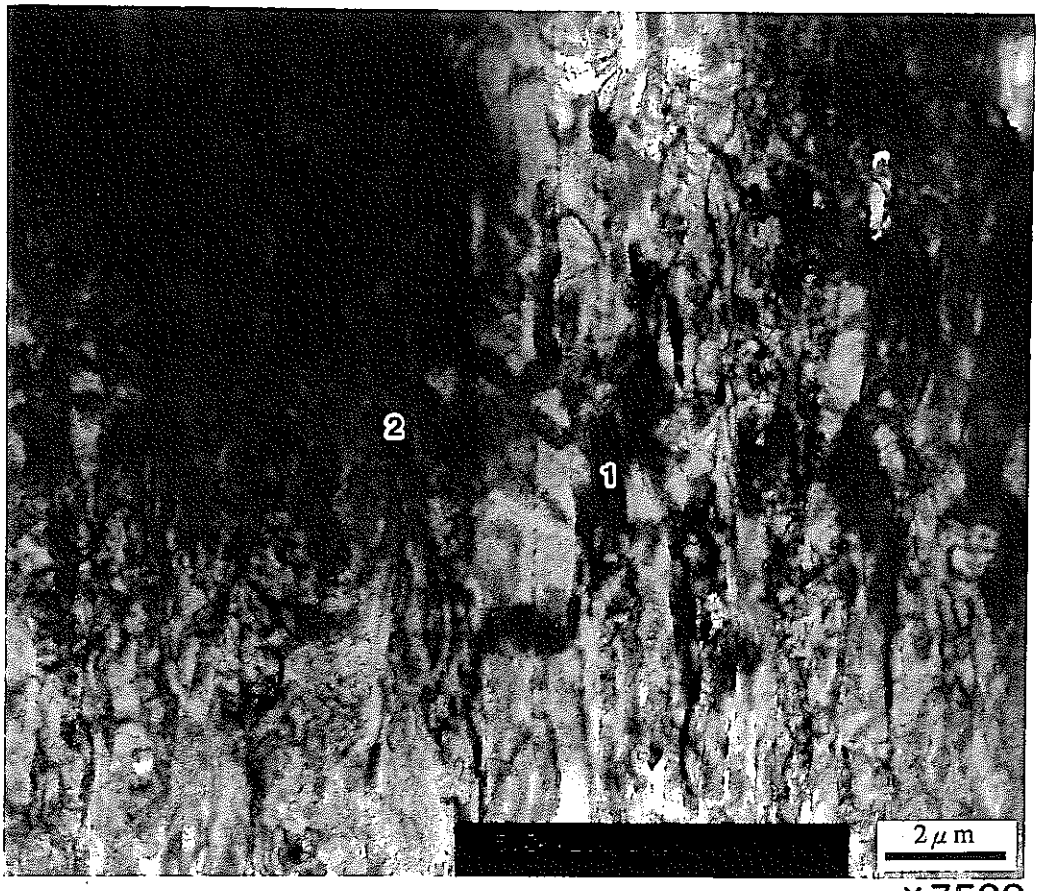


図１８　Ｆ９５鋼：熱間押出材結晶面のカラーマッピング



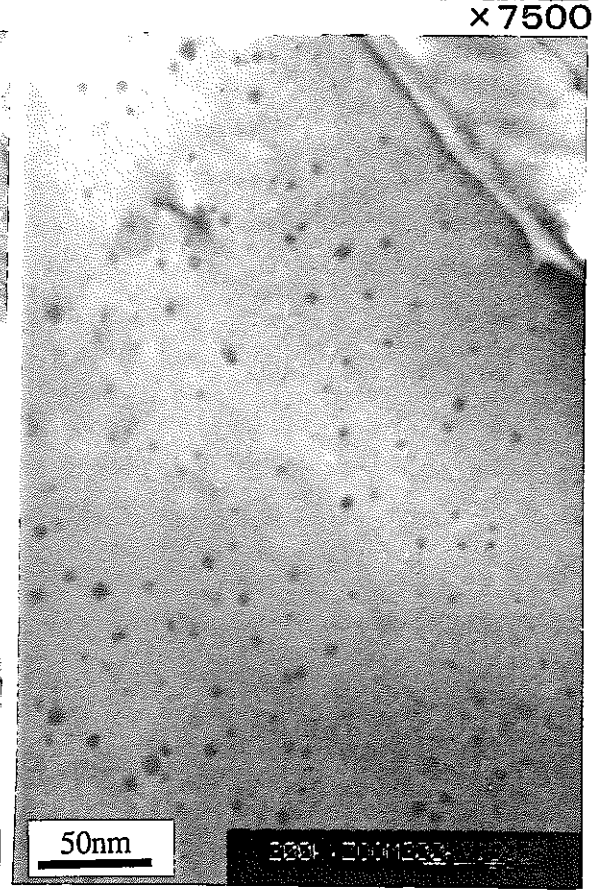
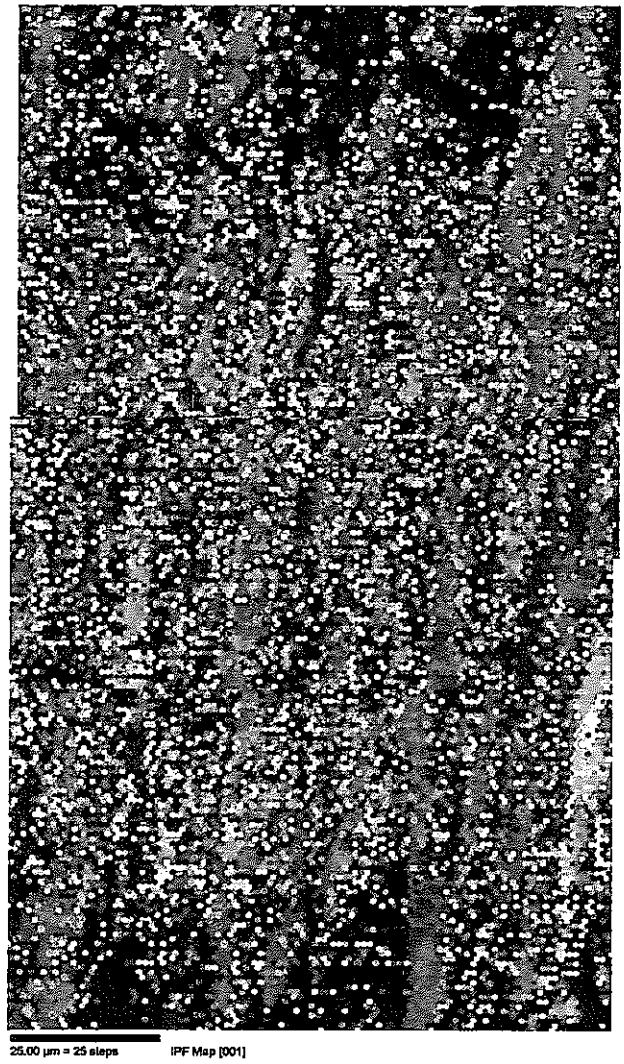


写真７　Ｆ９５鋼：１回目ＣＲ後の組織

F95—1　1R材



F95 1st Rolled

図１９　Ｆ９５鋼：１回目ＣＲ後結晶面のカラーマッピング

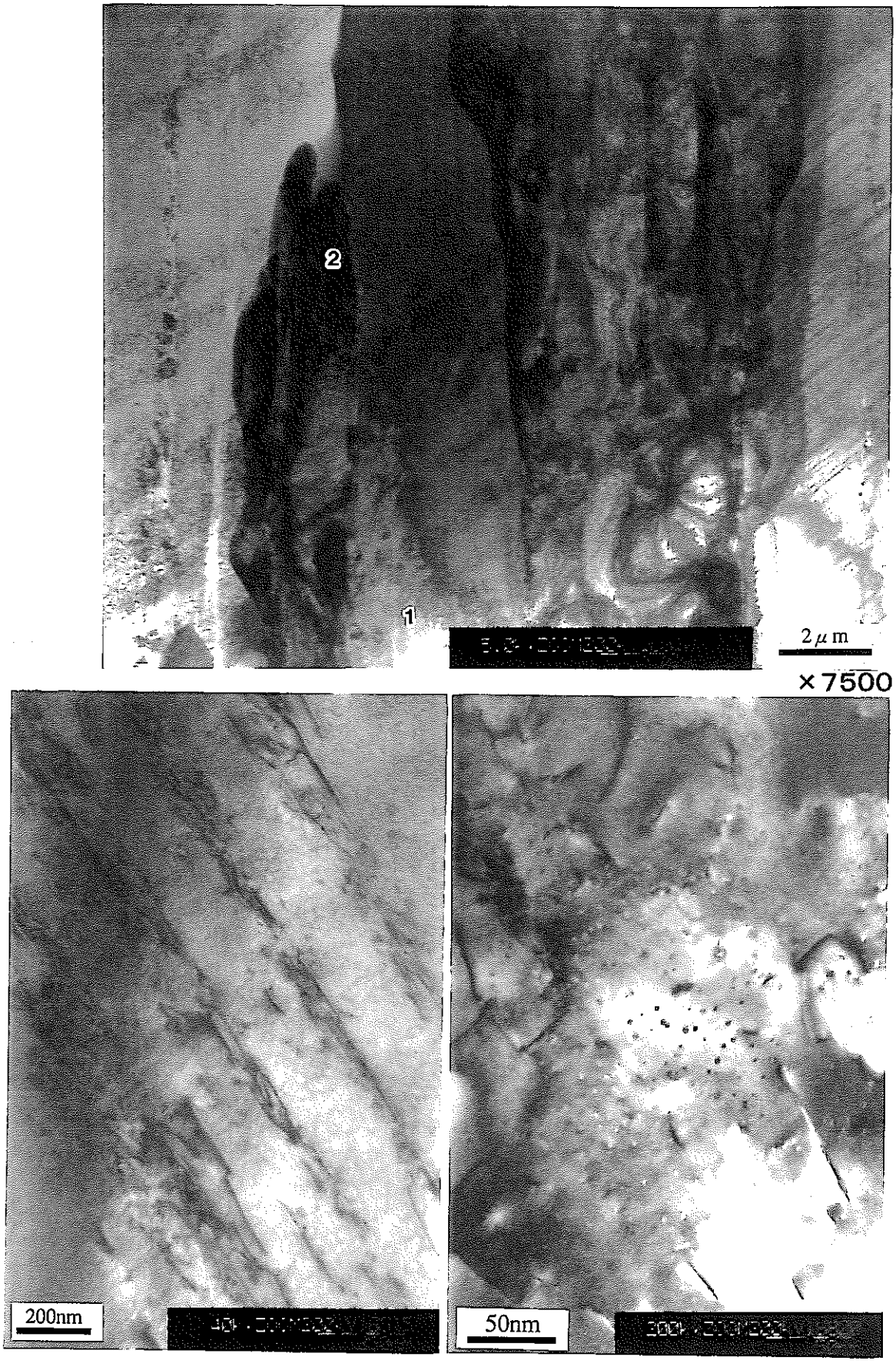


写真８　Ｆ９５鋼：１回目焼鈍後の組織

F95－2　1AN材

F95 1st Annealed

図２０　Ｆ９５鋼：１回目焼鈍後結晶面のカラーマッピング

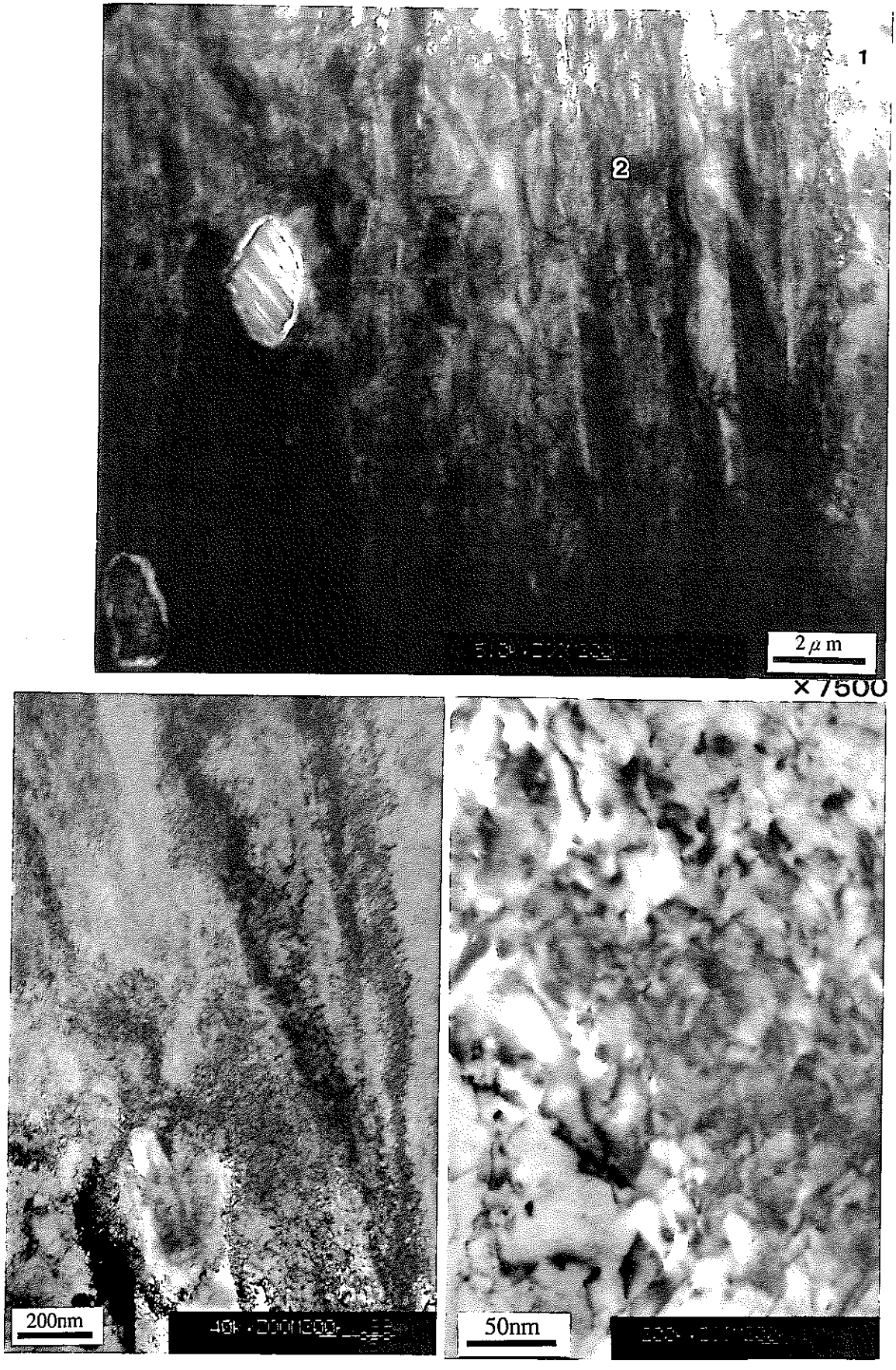


写真９　Ｆ９５鋼：２回目ＣＲ後の組織

F95—1　2R材

F95 2nd Rolled

図２１　Ｆ９５鋼：２回目ＣＲ後結晶面のカラーマッピング

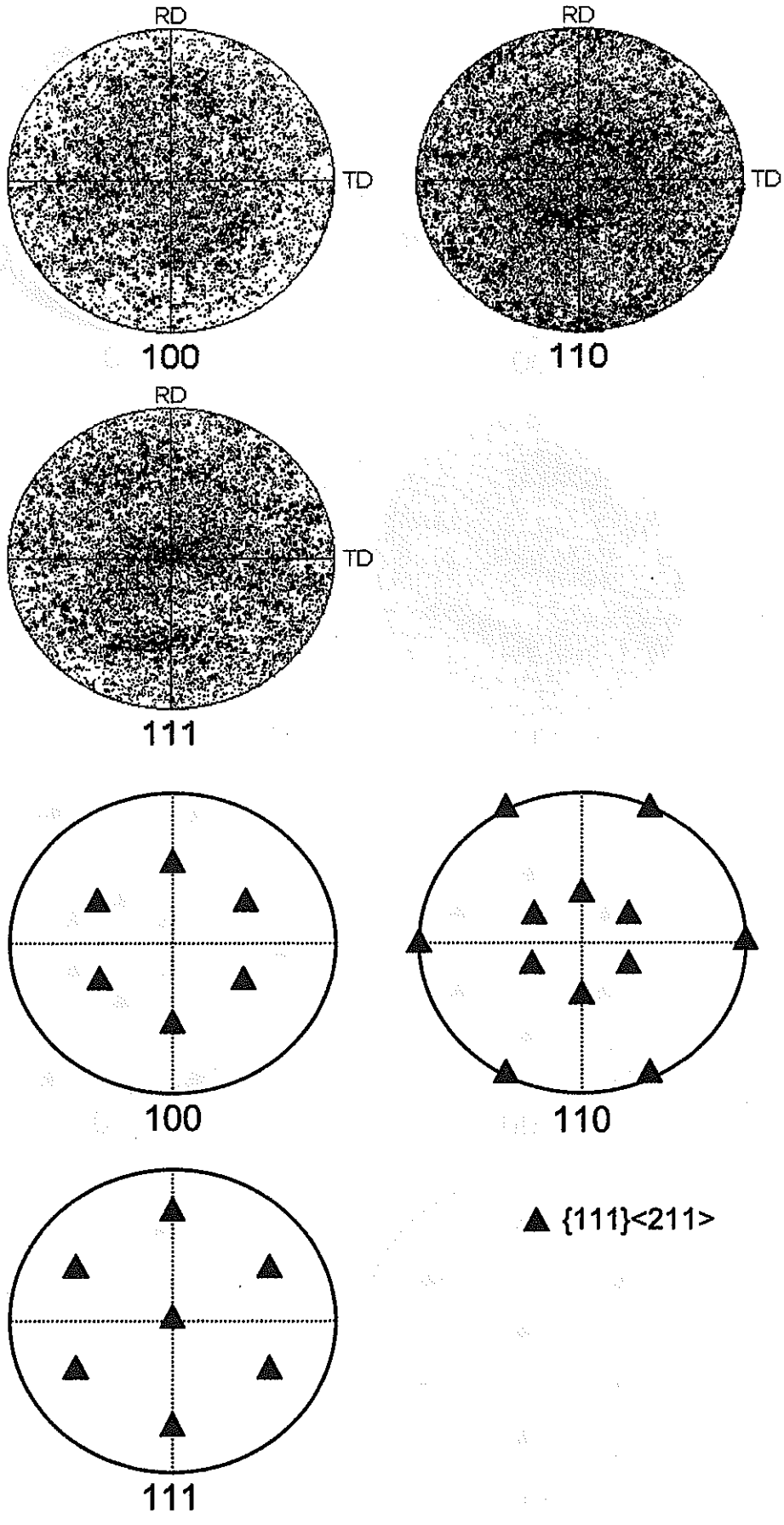


Fig. Pole Figures of F91 2nd Annealed

図２２　Ｆ９１鋼最終焼鈍材の全極点図

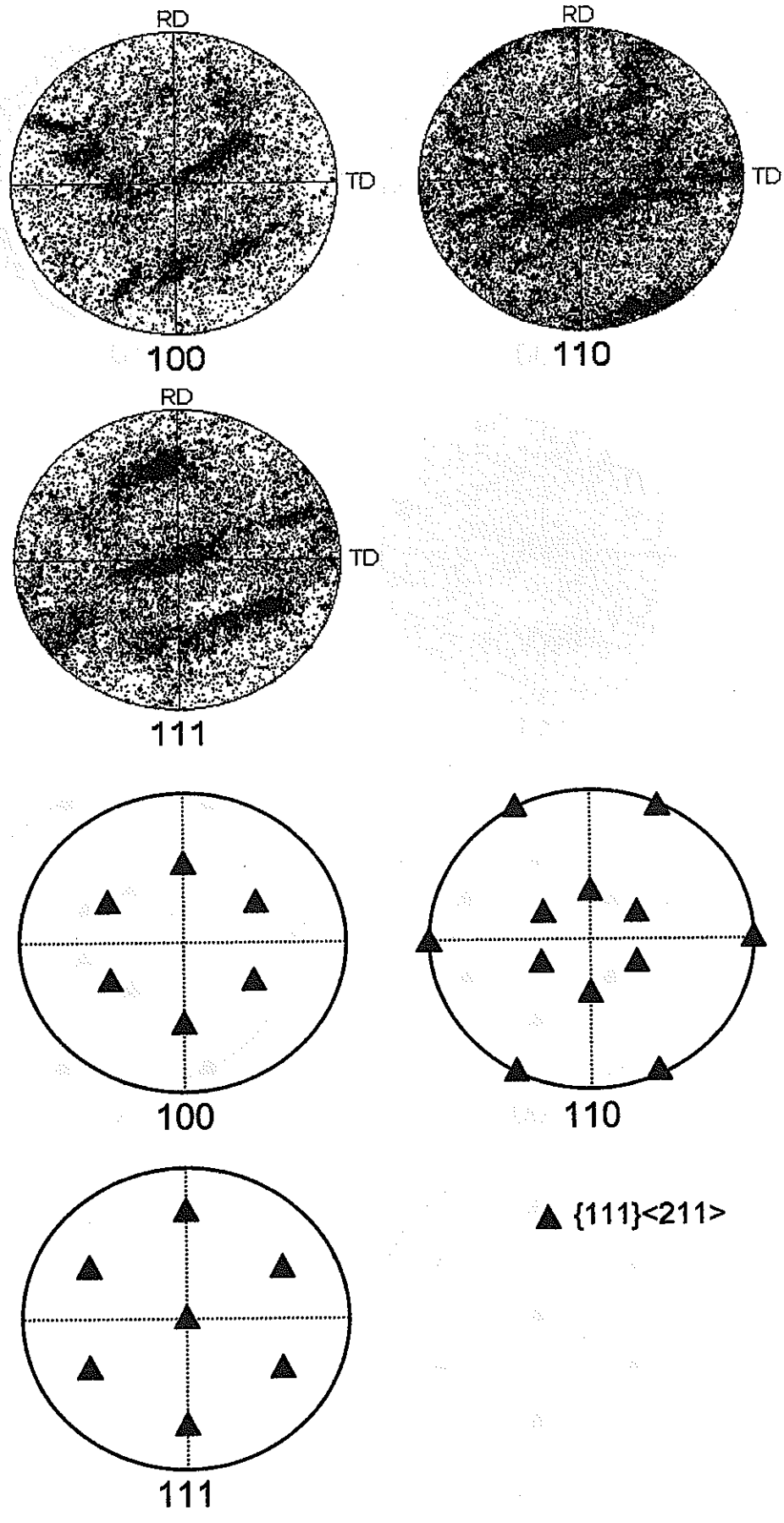


Fig. Pole Figures of F92 2nd Annealed

図２３　Ｆ９２鋼最終焼鈍材の全極点図

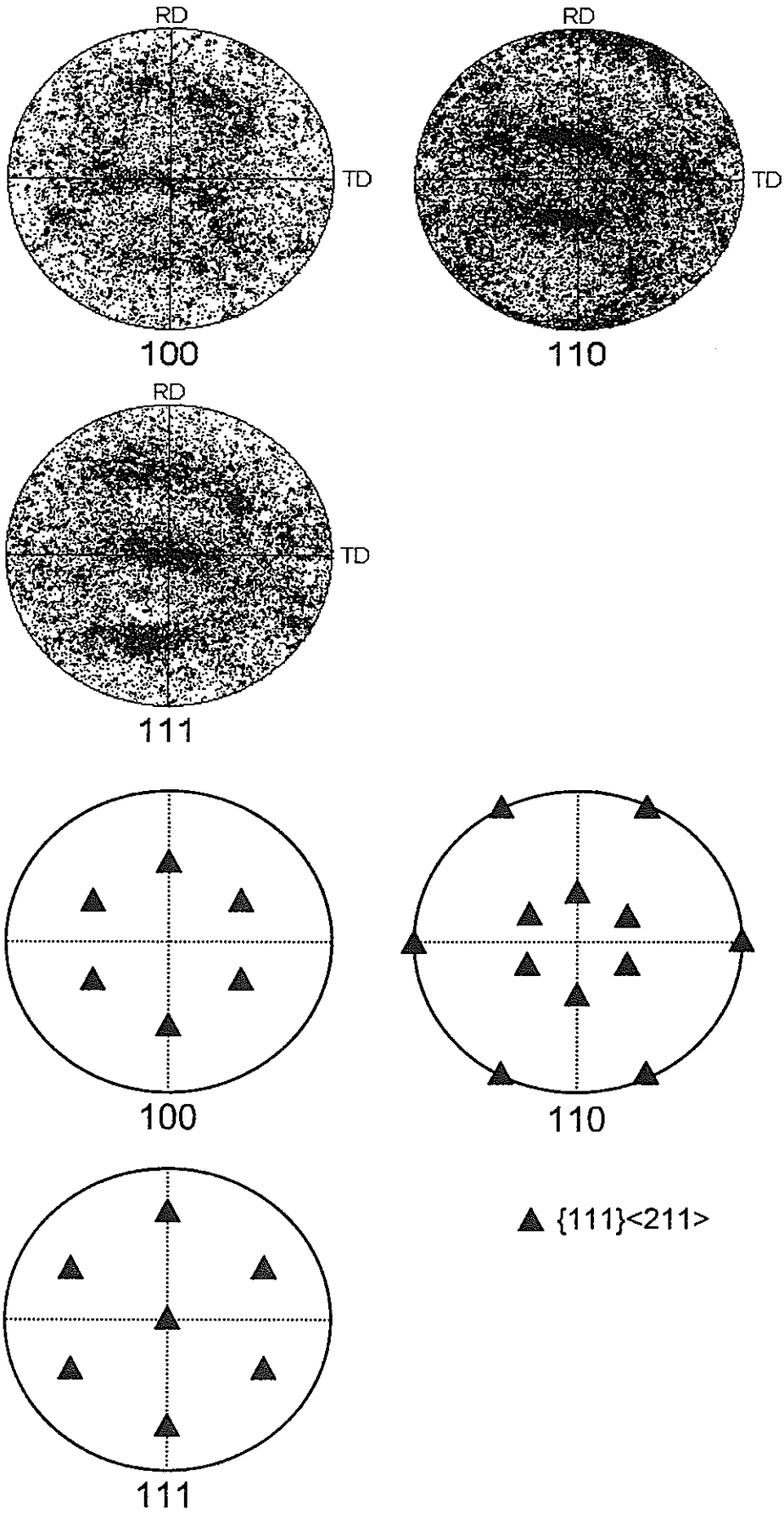


Fig. Pole Figures of F93 2nd Annealed

図２４　Ｆ９３鋼最終焼鈍材の全極点図

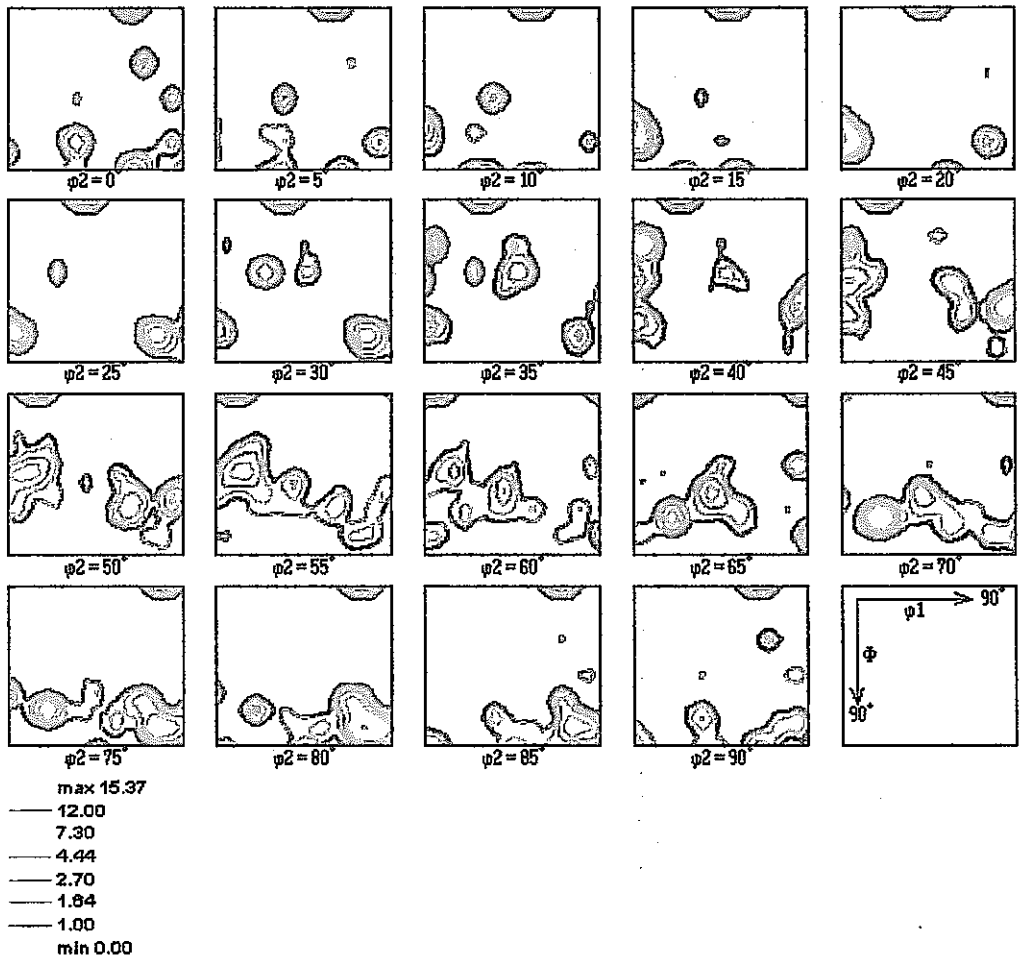


Fig. ODF of F91 2nd Annealed

図２５　Ｆ９１鋼最終焼鈍材のＯＤＦ

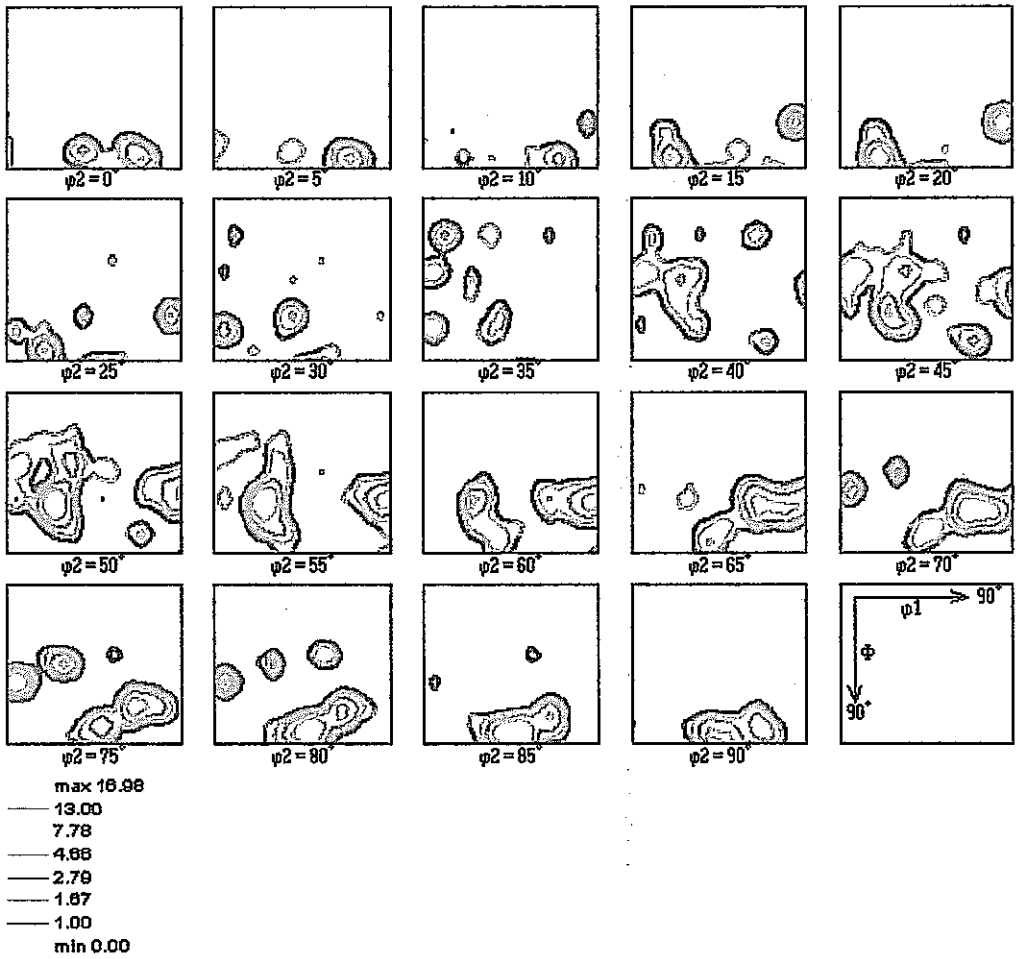


Fig. ODF of F92 2nd Annealed

図２６　Ｆ９２鋼最終焼鈍材のＯＤＦ

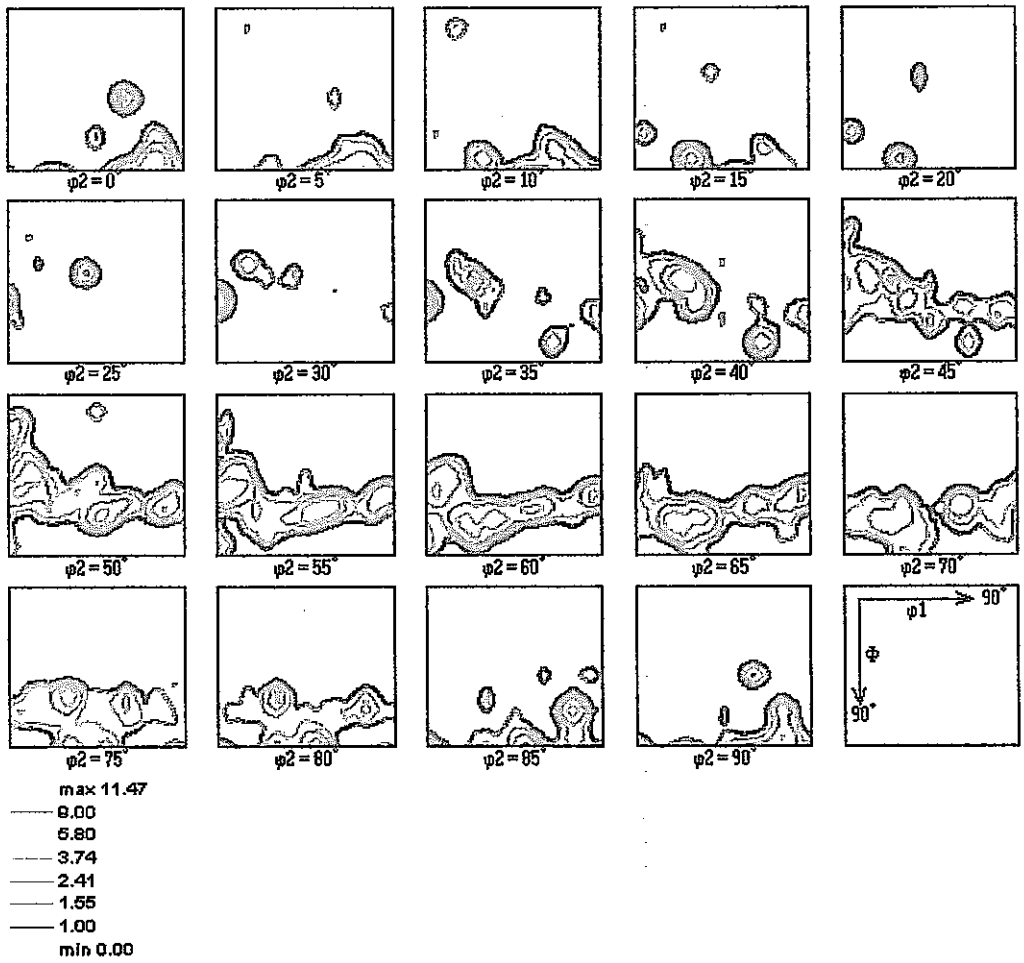


Fig. ODF of F93 2nd Annealed

図２７　Ｆ９３鋼最終焼鈍材のＯＤＦ

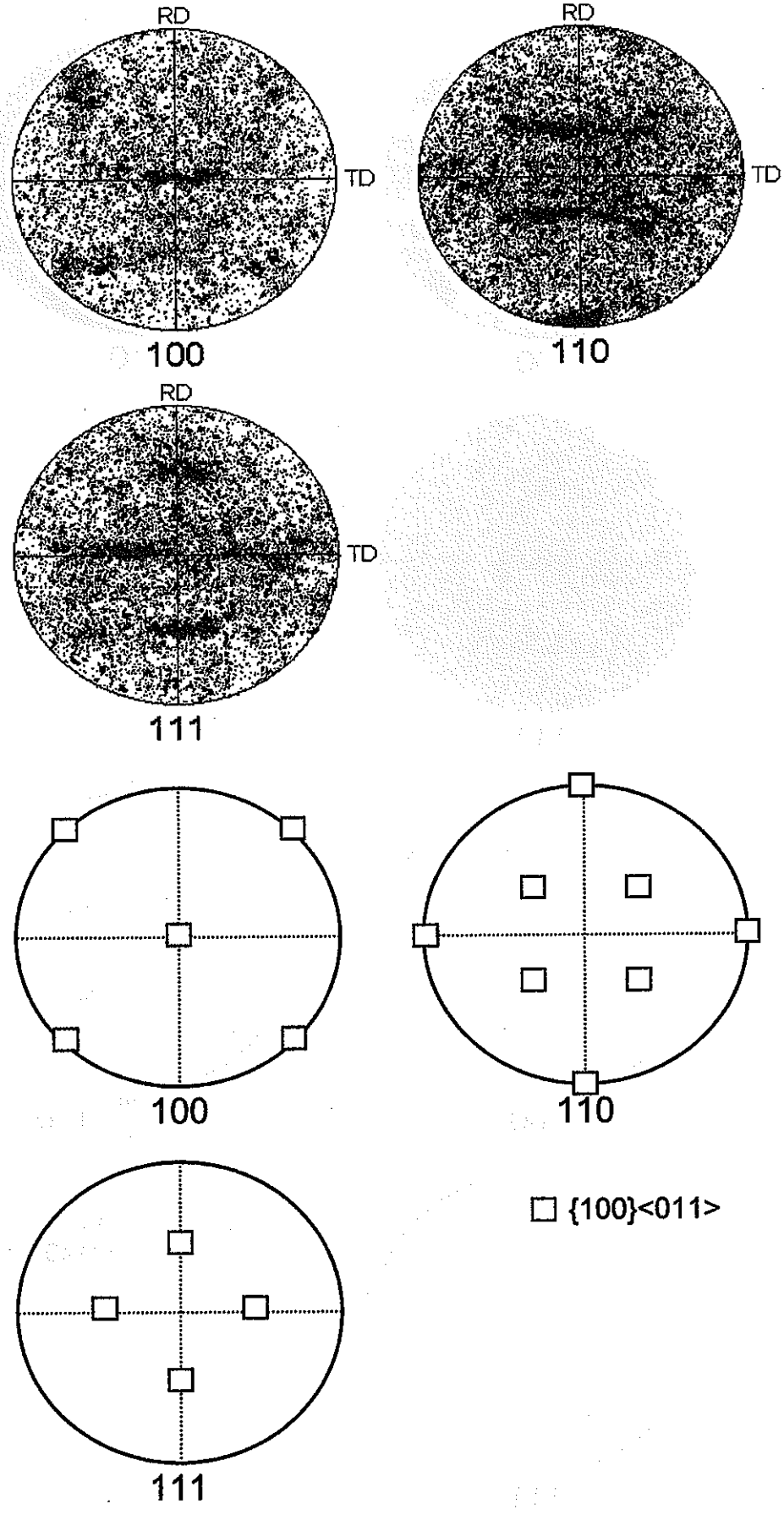


Fig. Pole Figures of F94 2nd Annealed

図２８　Ｆ９４鋼最終焼鈍材の全極点図

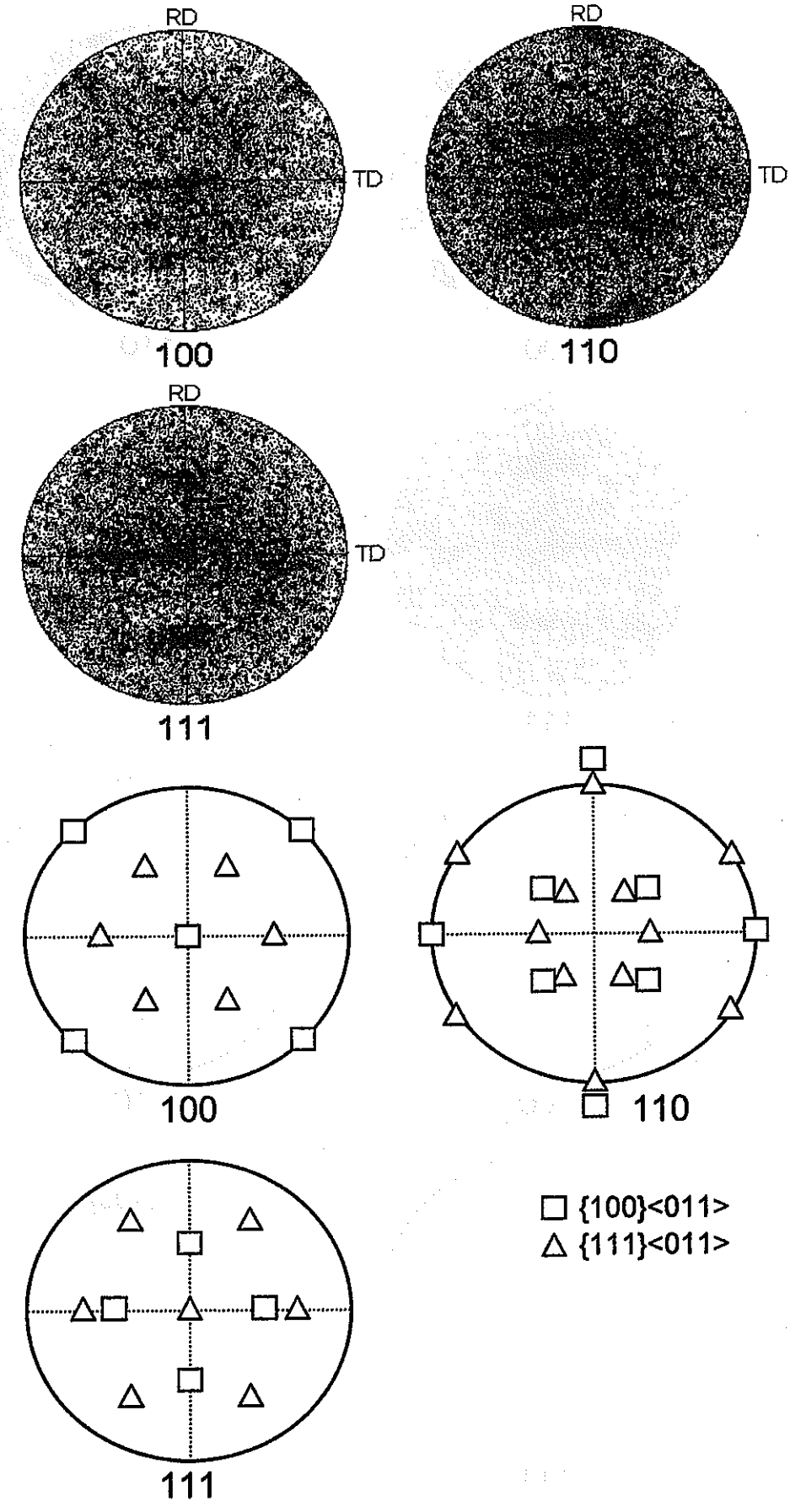


Fig. Pole Figures of F95 2nd Annealed

図２９　Ｆ９５鋼最終焼鈍材の全極点図

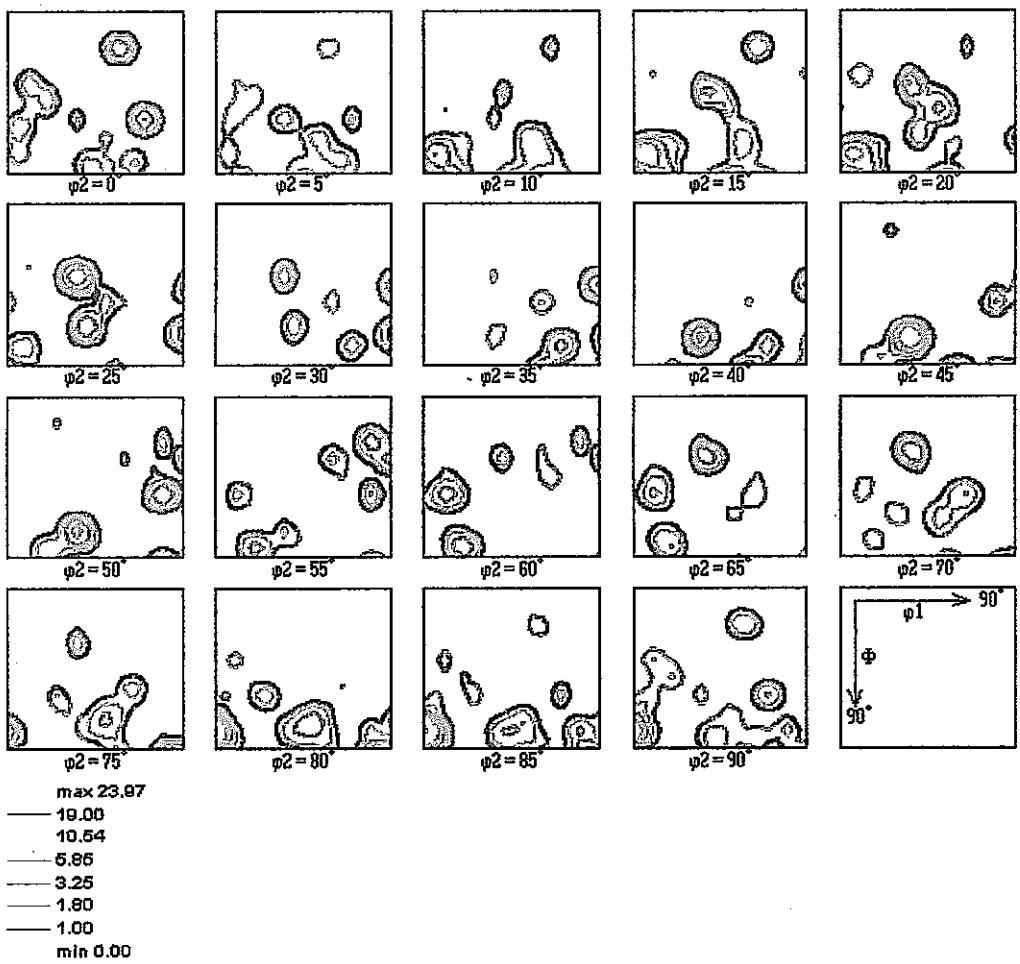


Fig. ODF of F94 2nd Annealed

図３０　Ｆ９４鋼最終焼鈍材のＯＤＦ

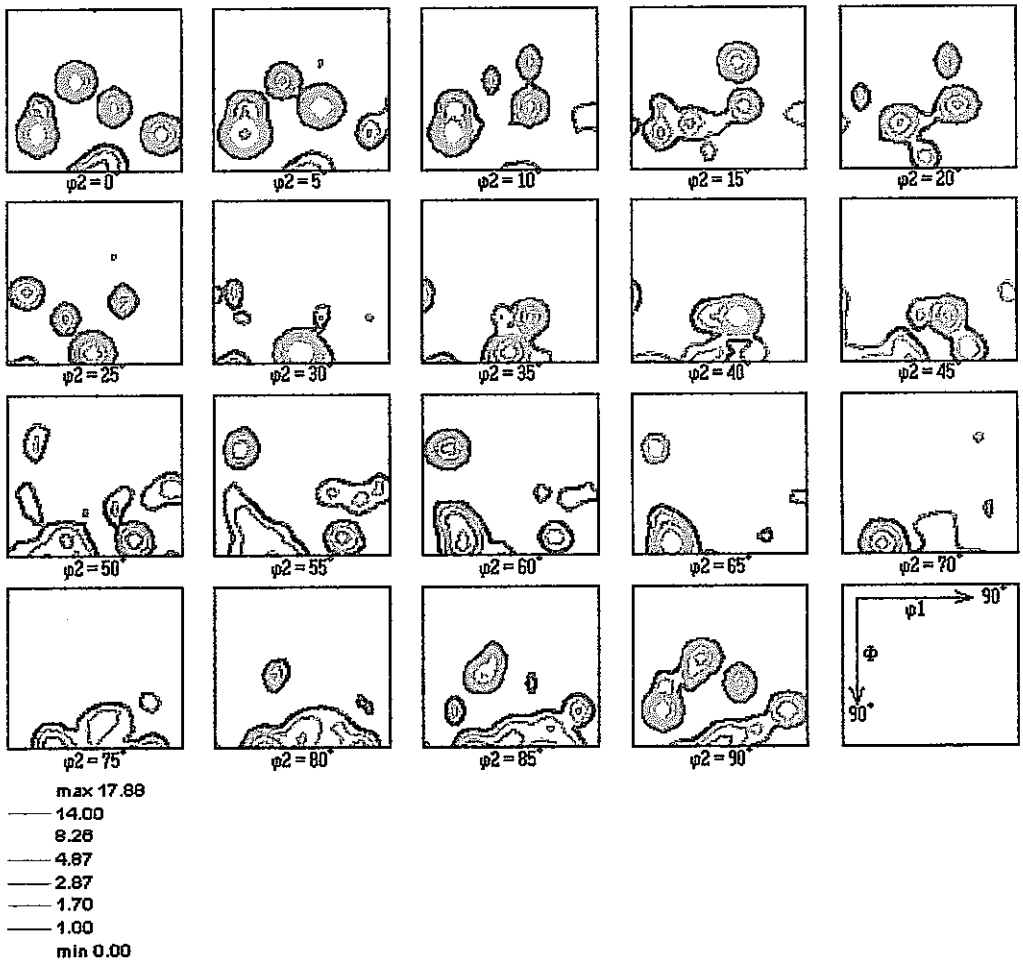


Fig. ODF of F95 2nd Annealed

図３１　Ｆ９５鋼最終焼鈍材のＯＤＦ

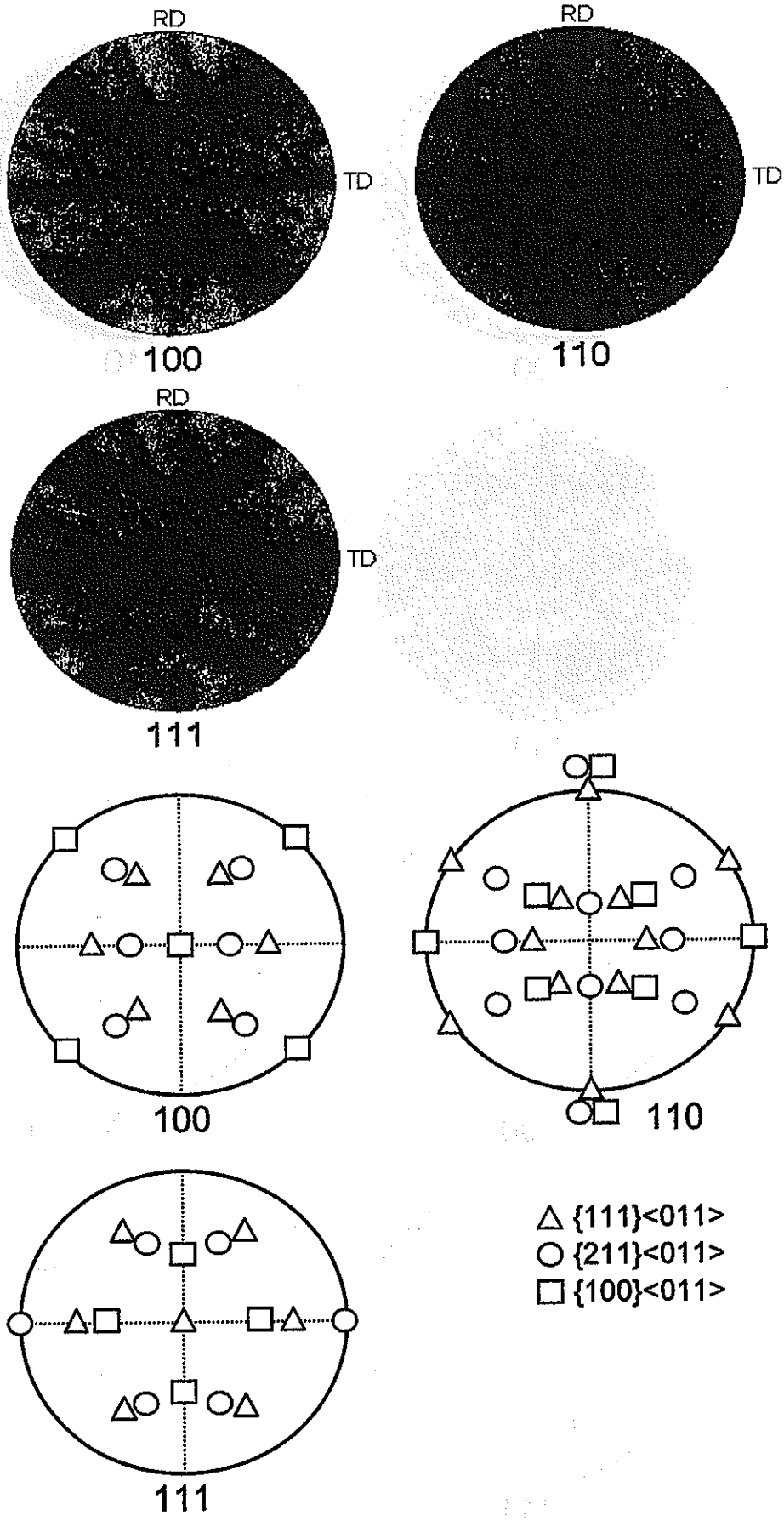


Fig. Pole Figures of F95 As Extruded

図３２　Ｆ９５鋼熱間押出材の全極点図

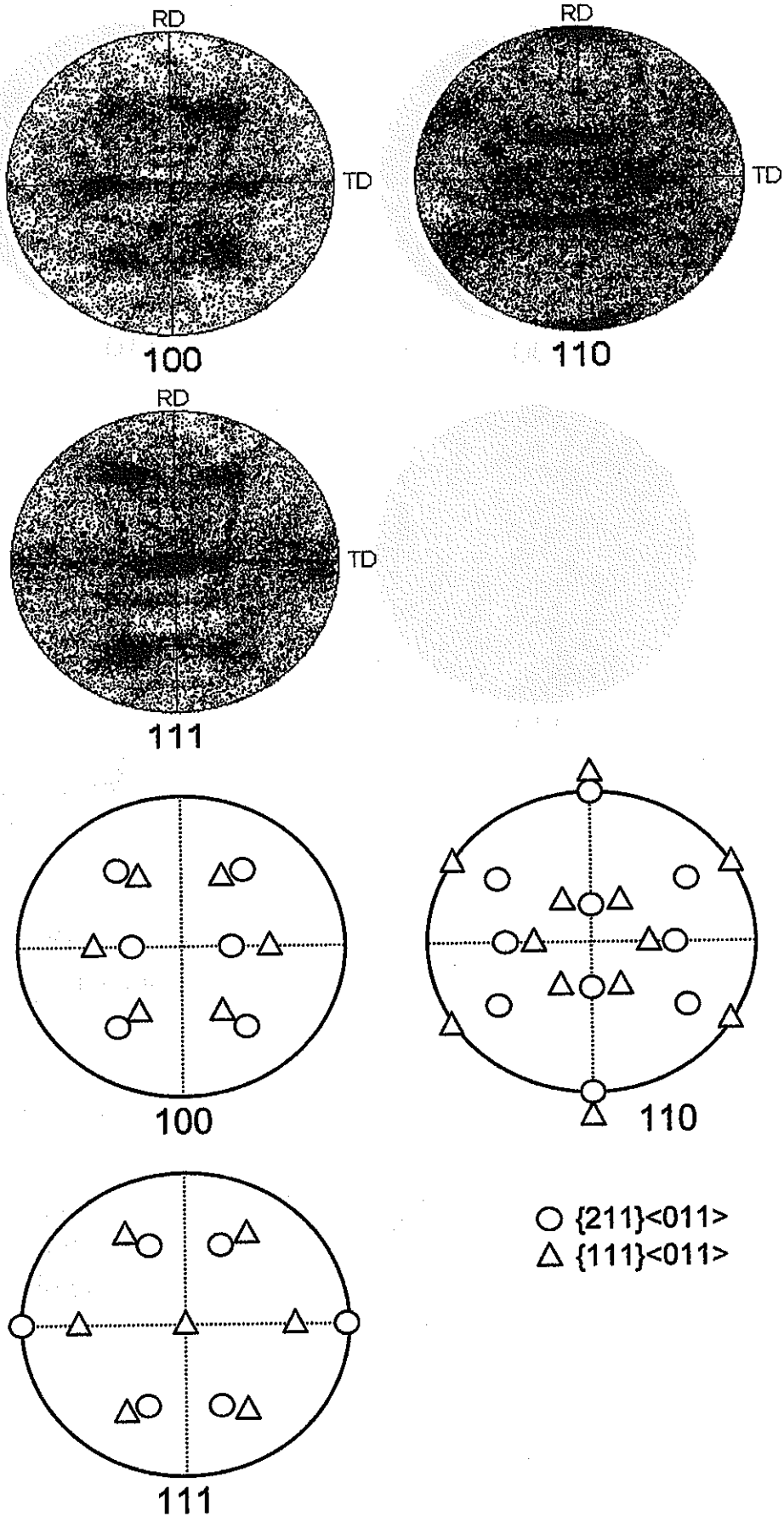


Fig. Pole Figures of F95 1st Rolled

図３３　Ｆ９５鋼１回目ＣＲ材の全極点図

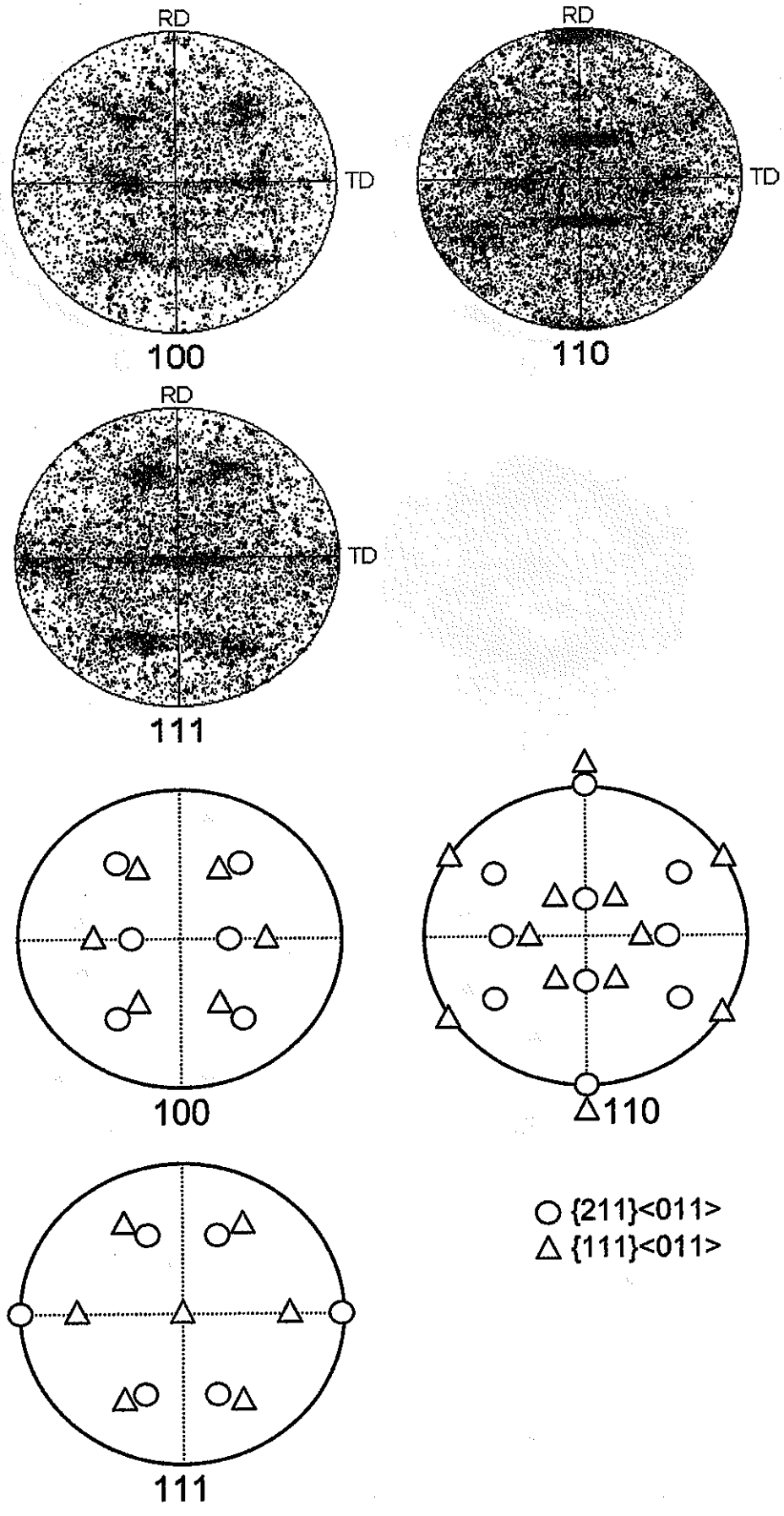


Fig. Pole Figures of F95 1st Annealed

図３４　Ｆ９５鋼１回目焼鈍材の全極点図

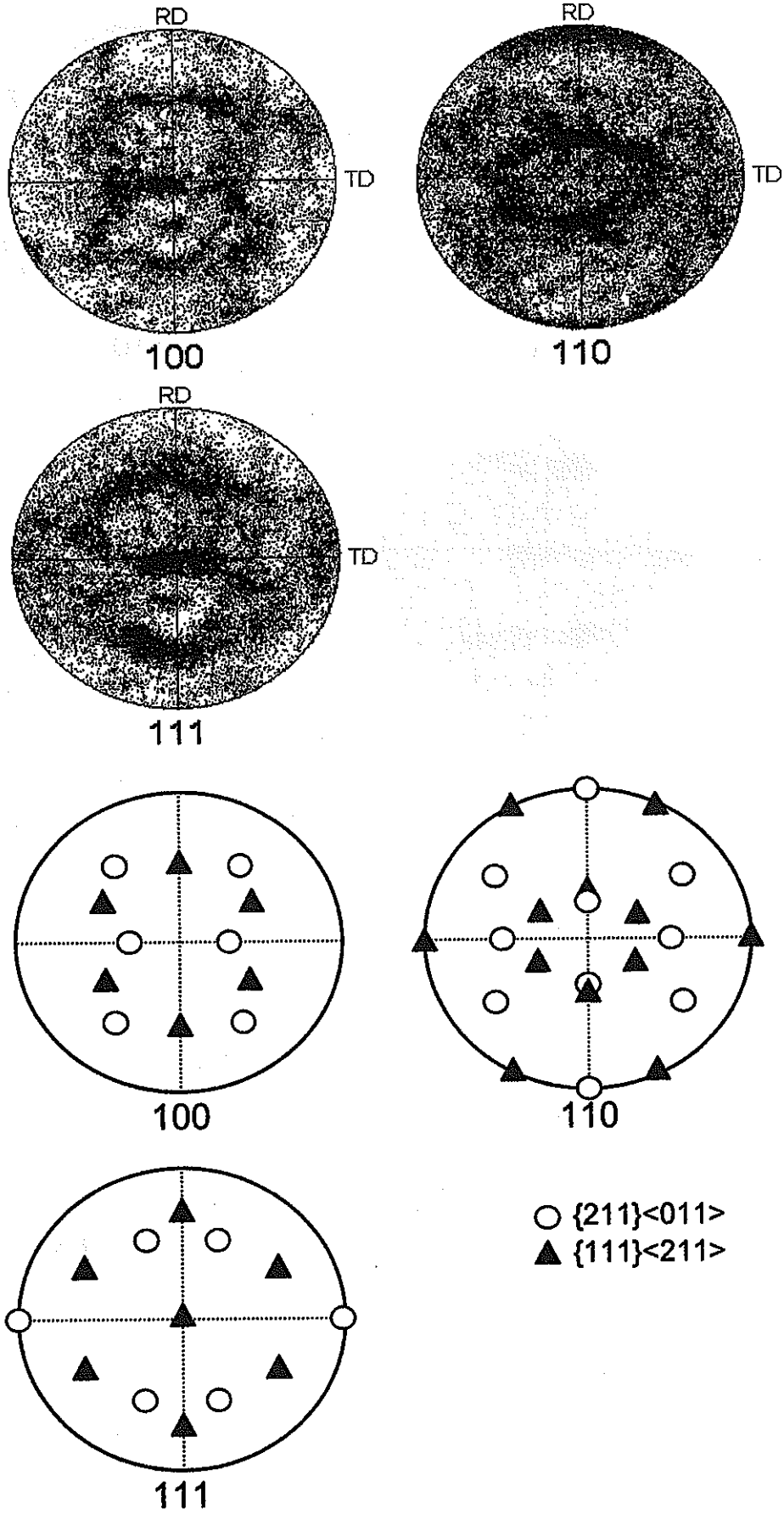


Fig. Pole Figures of F95 2nd Rolled

図３５　Ｆ９５鋼２回目ＣＲ材の全極点図

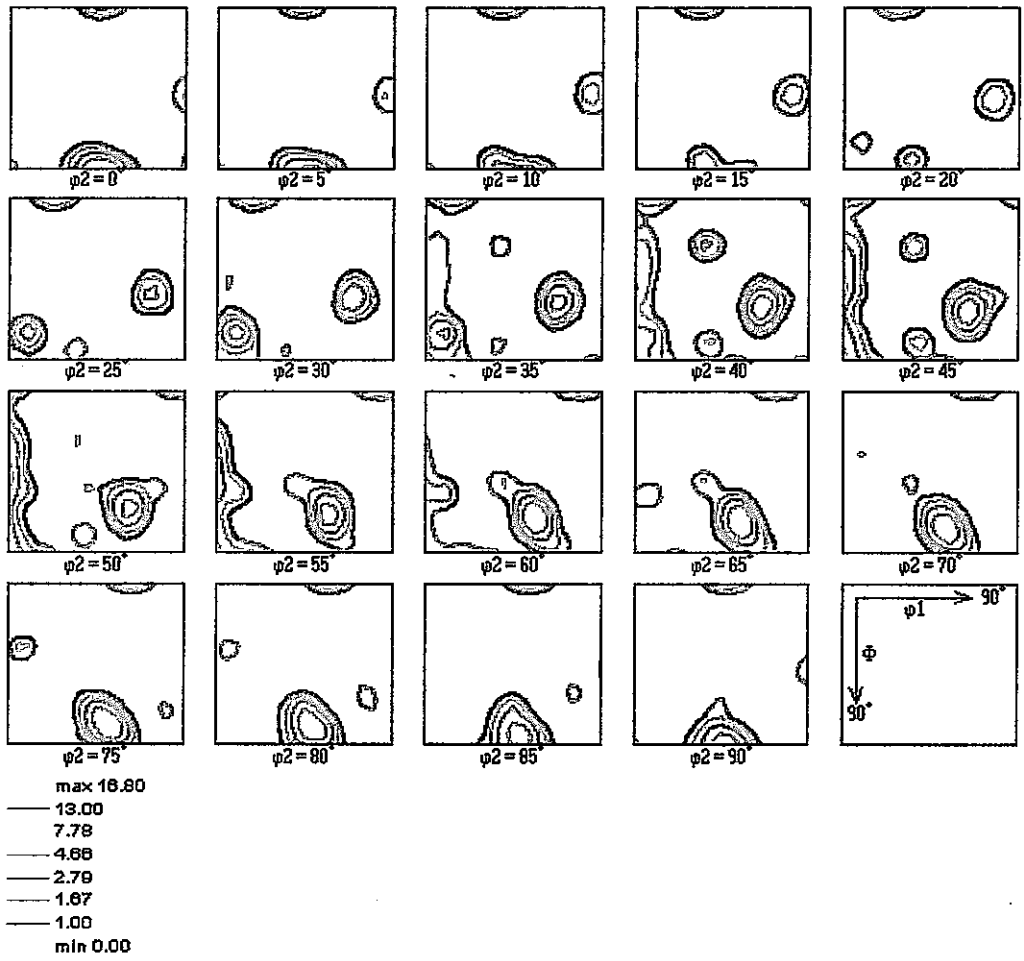


Fig. ODF of F95 As Extruded

図３６　Ｆ９５鋼熱間押出材のＯＤＦ

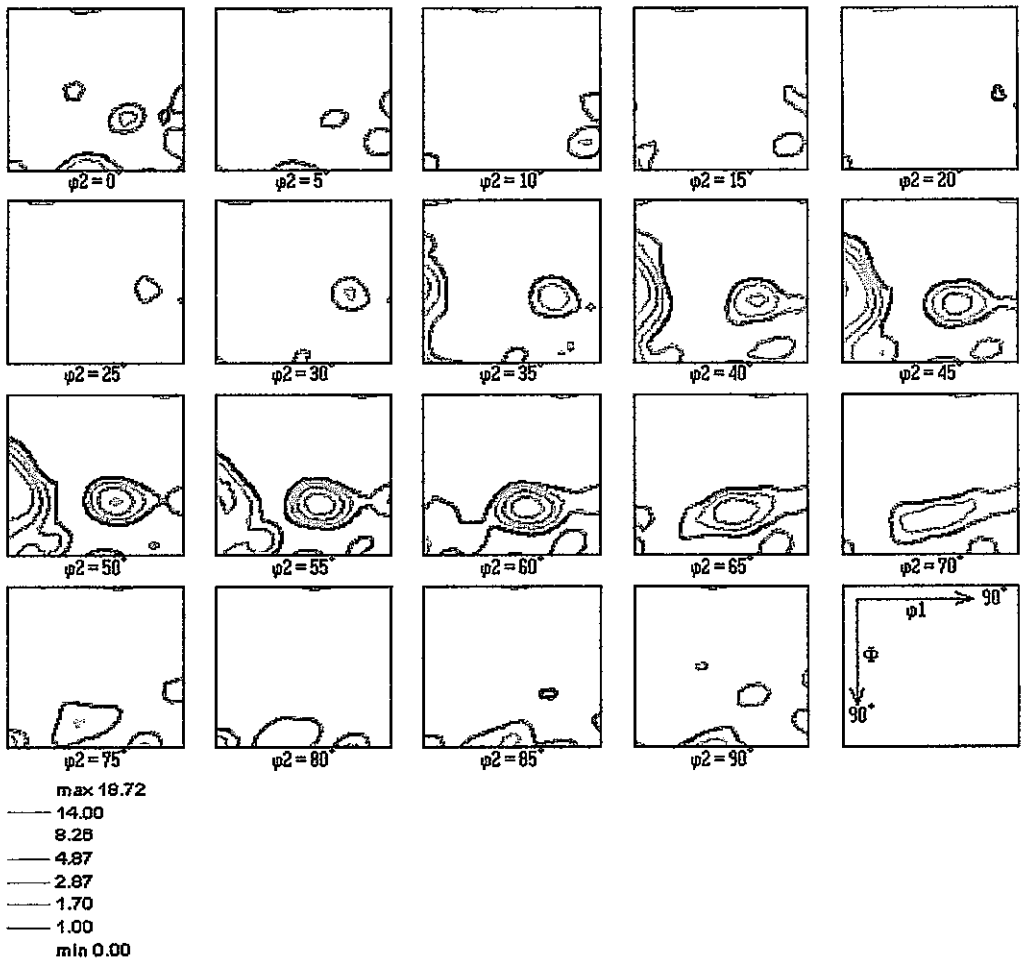


Fig. ODF of F95 1st Rolled

図３７　Ｆ９５鋼１回目ＣＲ材のＯＤＦ

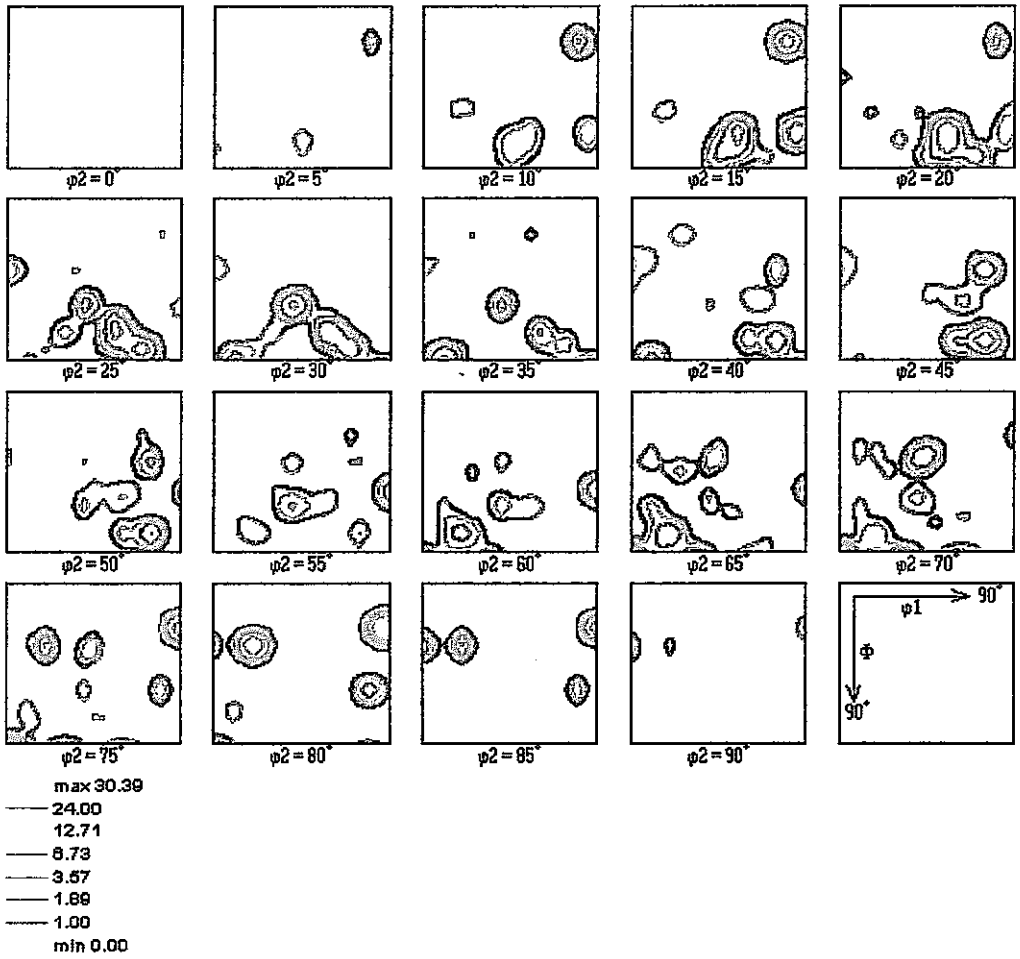


Fig. ODF of F95 1st Annealed

図３８　Ｆ９５鋼１回目焼鈍材のＯＤＦ

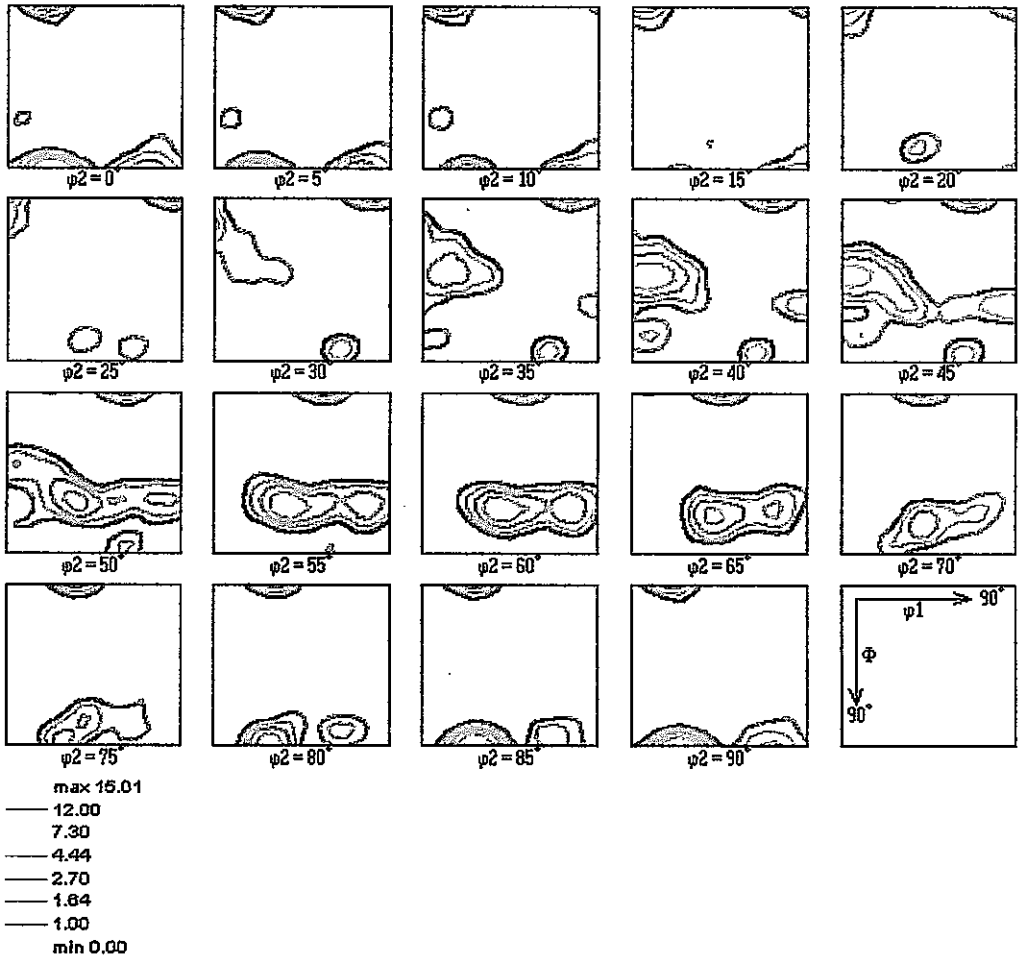


Fig. ODF of F95 2nd Rolled

図３９　Ｆ９５鋼２回目ＣＲ材のＯＤＦ

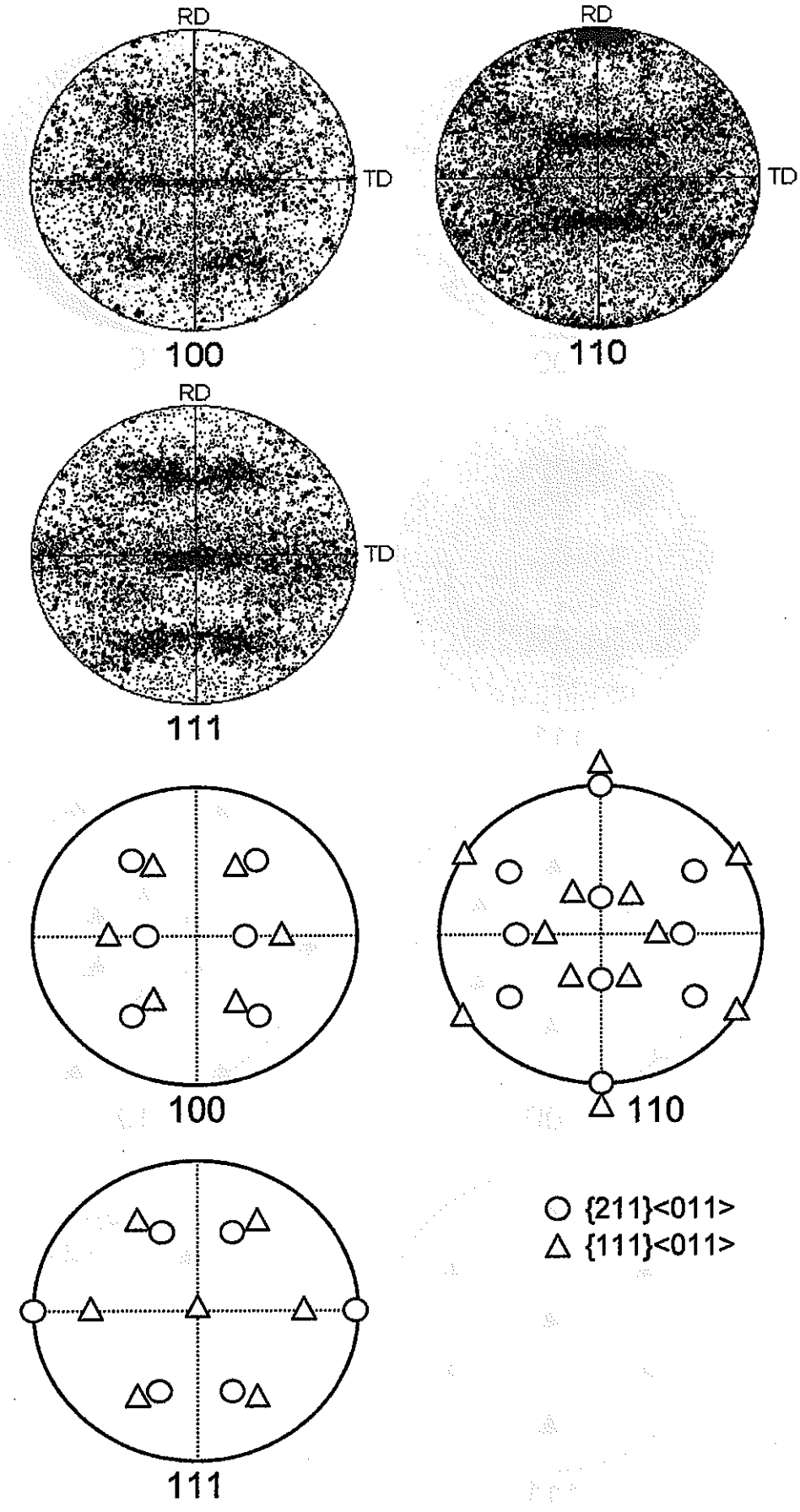


Fig. Pole Figures of F91 1st Annealed

図４０　Ｆ９１鋼１回目焼鈍材の全極点図

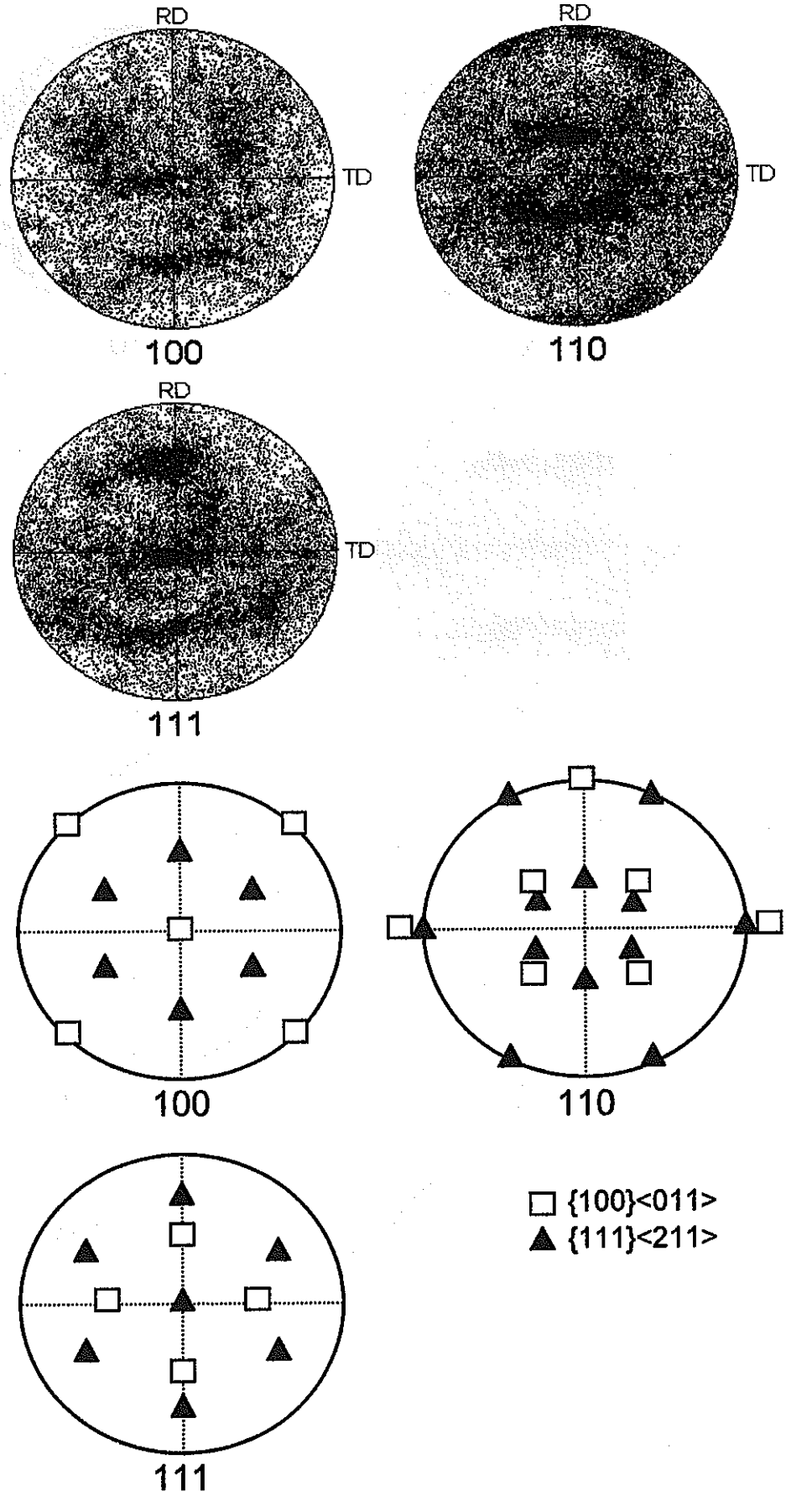


Fig. Pole Figures of F91 2nd Rolled

図４１　Ｆ９１鋼２回目ＣＲ材の全極点図

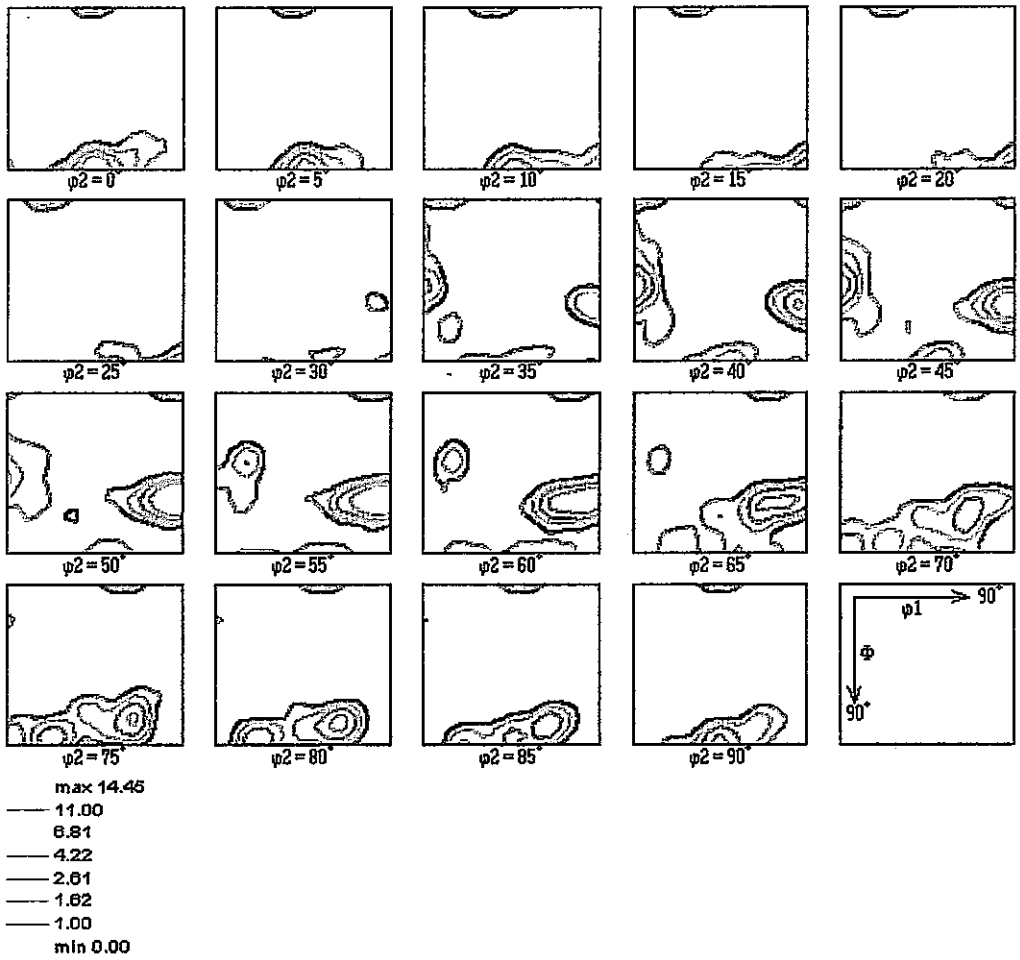


Fig. ODF of F91 2nd Rolled

図４２　Ｆ９１鋼１回目焼鈍材のＯＤＦ

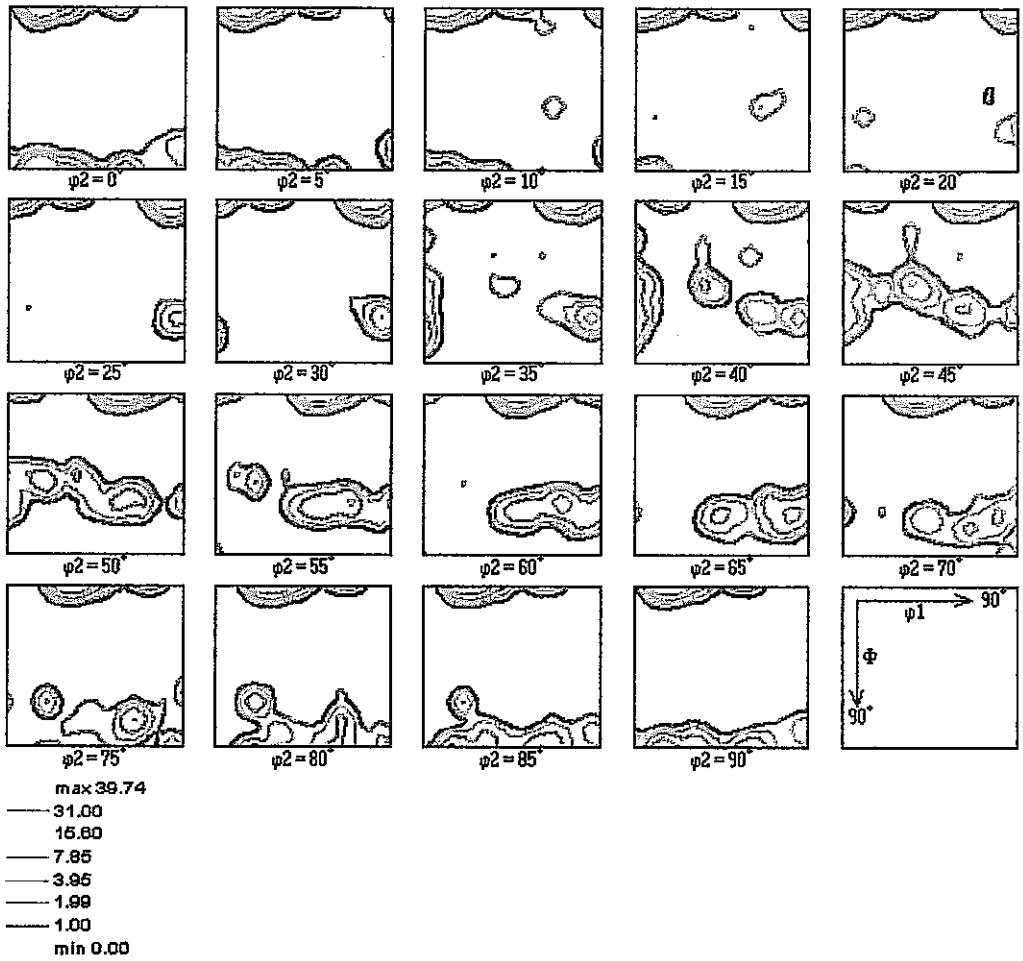


Fig. ODF of F91 1st Annealed

図４３　Ｆ９１鋼２回目ＣＲ材のＯＤＦ

表11　押出、１回目圧延集合組織および１回目焼鈍後の再結晶集合組織

	製　造　工　程		
鋼種	押出	圧延(１回目)	焼鈍(１回目)
Ｆ９１鋼	－	－	{111}<110> {211}<110>
Ｆ９５鋼	{111}<110> {211}<110> {100}<110>	{111}<110> {211}<110>	{111}<110> {211}<110>

	製　造　工　程	
鋼種	圧延(２回目)	焼鈍(２回目)
Ｆ９１鋼	{111}<112> {100}<110>	{111}<112>
Ｆ９２鋼	{111}<112>	{111}<112>
Ｆ９３鋼	{111}<112>	{111}<112>
Ｆ９４鋼	{111}<112>	{100}<110>
Ｆ９５鋼	{211}<110> {111}<112>	{111}<110> {100}<110>

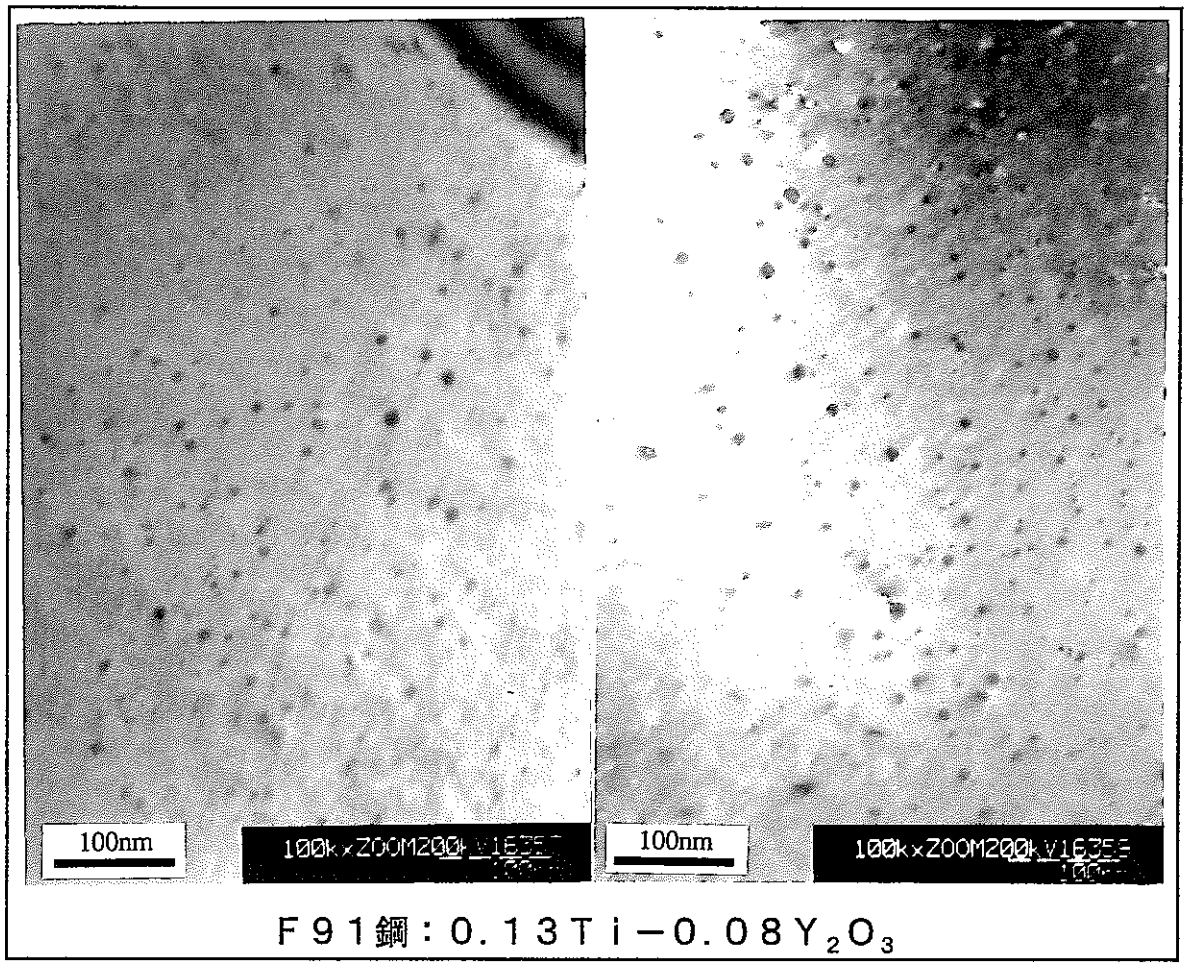
表12　変形集合組織と再結晶集合組織の関係

変形集合組織の方位成分	方位関係	再結晶集合組織の方位成分	分類
{111}<112>	<110>軸まわりに35°回転 <111>軸まわりに30°回転	(011)[100] {111}<110>	A B
{111}<110>	ひずみ誘起粒界移動	{111}<110>	B
{211}<110>	<110>軸まわりに35°回転	{111}<112>	C

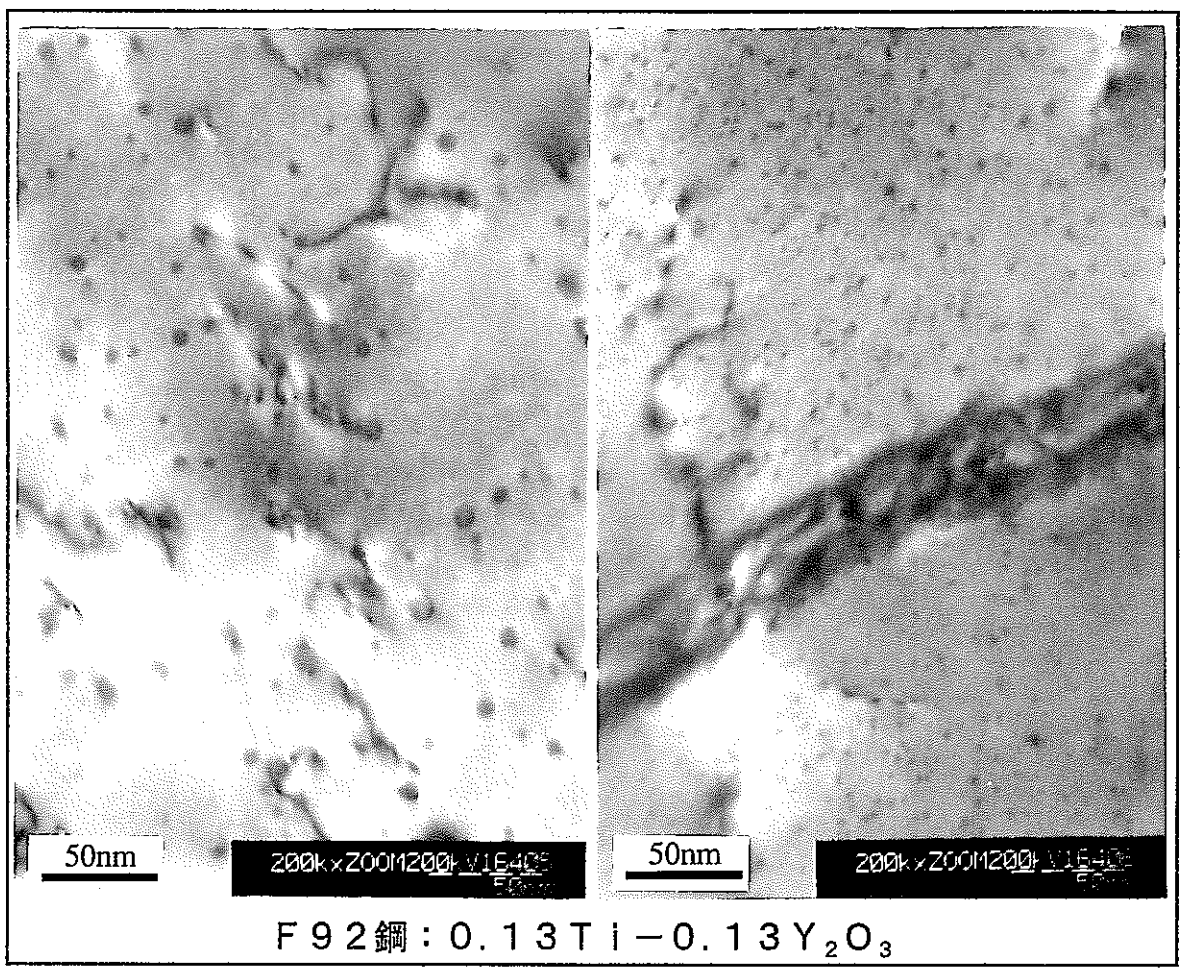
表13 粒径分布と粒子間距離（合金成分から体積率を求めた場合）

(m)

			fmin	fmax									
	Y_2O_3	TiO_2	Y_2O_3	$Y_2Ti_2O_5$	Nv min	Nv Max	r	r^2	r^3	ls max	ls min	λ min	λ max
	(wt%)	(wt%)	(vol%)	(vol%)	$\times10^{-21}$	$\times10^{-21}$	$\times10^{-9}$	$\times10^{-18}$	$\times10^{-27}$	$\times10^{-9}$	$\times10^{-9}$	$\times10^{-9}$	$\times10^{-9}$
F 9 1	0.05	0.1	0.077	0.103	0.63	0.85	5.93	39.8	292.6	367.5	316.3	448.8	384.8
F 9 2	0.12	0.1	0.184	0.248	2.22	2.99	5.25	30.7	198.4	207.6	178.7	250.3	214.1
F 9 3	0.20	0.2	0.306	0.413	4.38	5.91	4.33	24.9	167.5	162.7	140.0	194.3	166.0
F 9 4	0.23	0.3	0.352	0.475	34.92	47.15	2.73	7.9	24.1	72.5	62.4	86.1	73.5
F 9 5	0.23	0.3	0.352	0.475	74.61	100.72	2.08	4.6	11.3	56.8	48.9	67.6	57.7

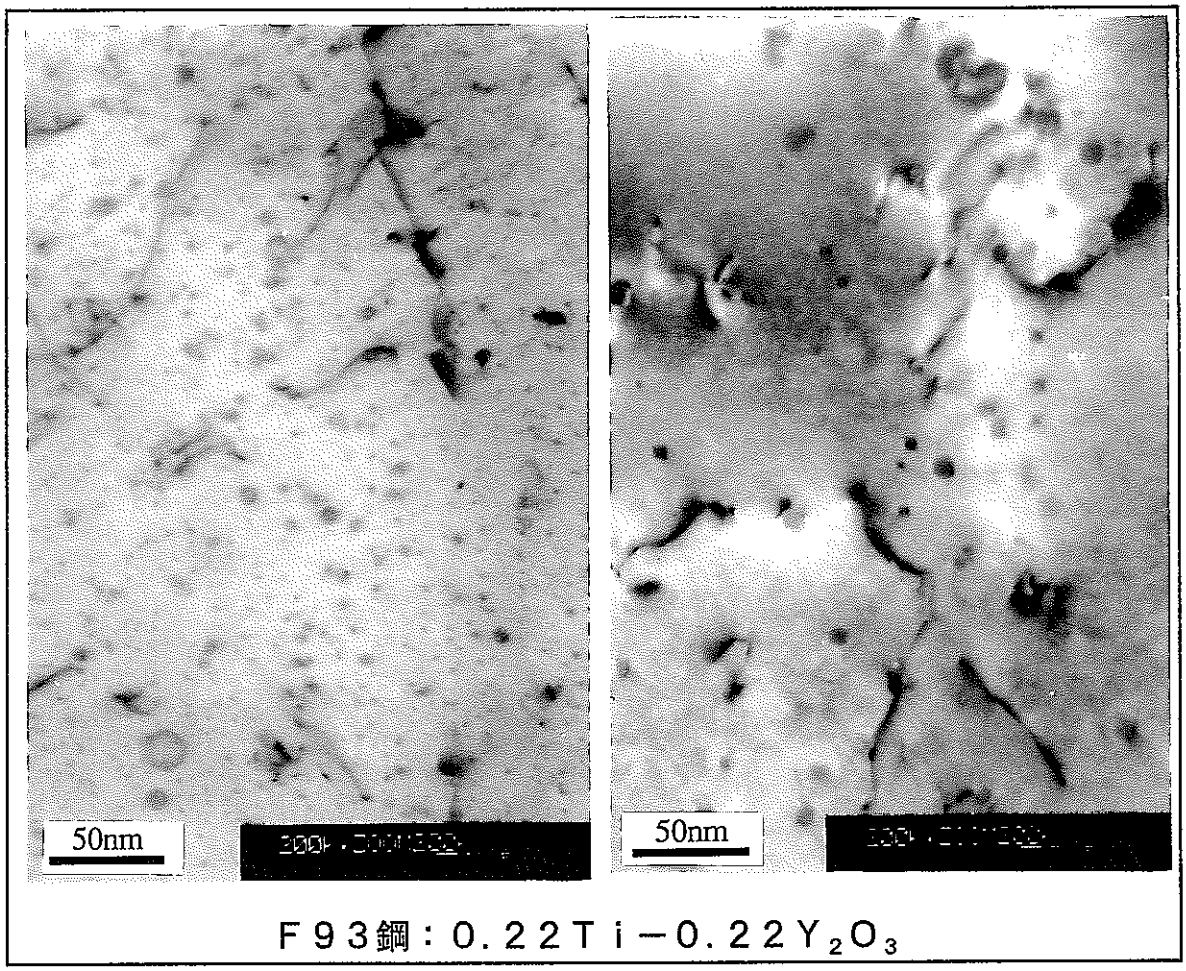


F91鋼：0.13Ti－0.08Y_2O_3

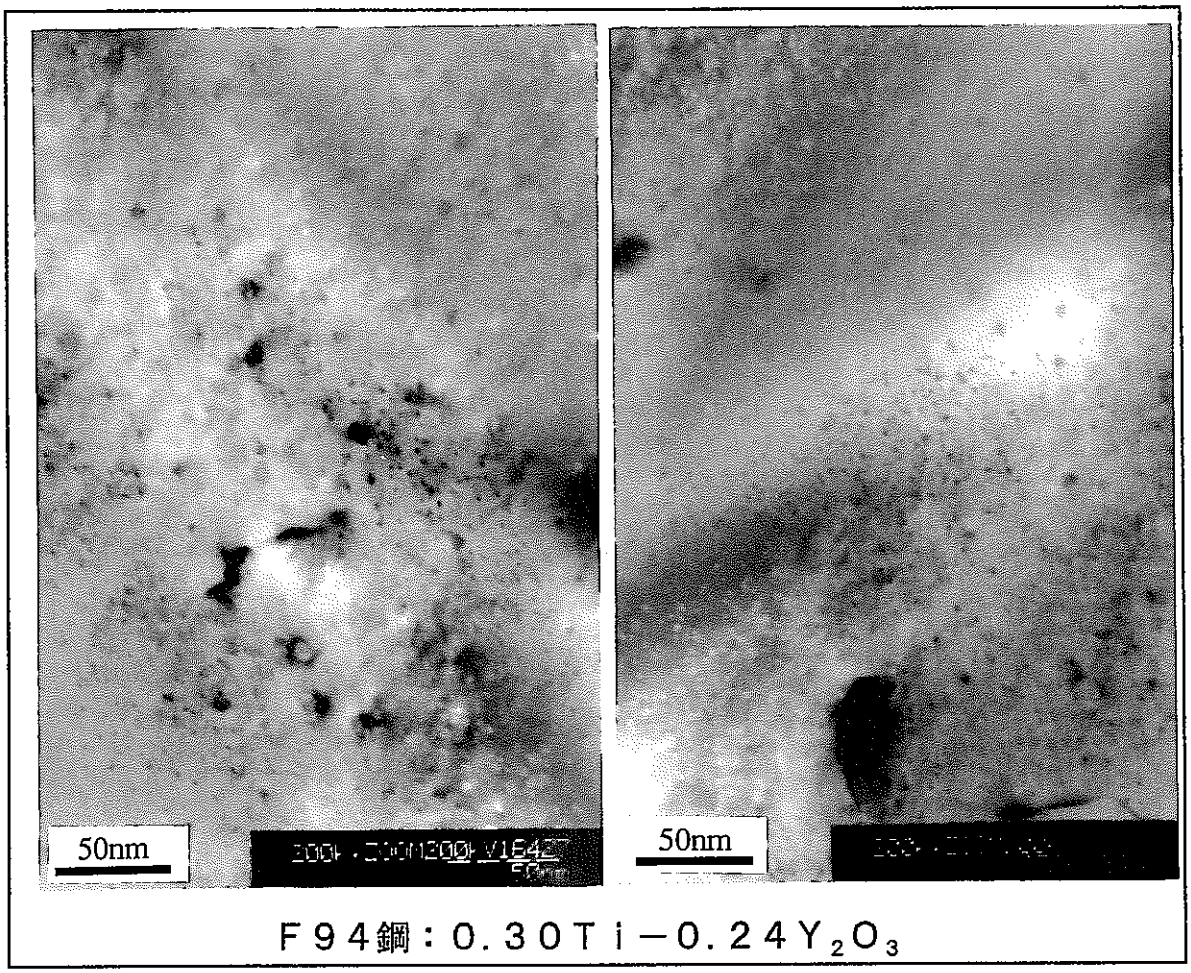


F92鋼：0.13Ti－0.13Y_2O_3

写真10-1　　画像処理に用いた薄膜ＴＥＭ観察組織

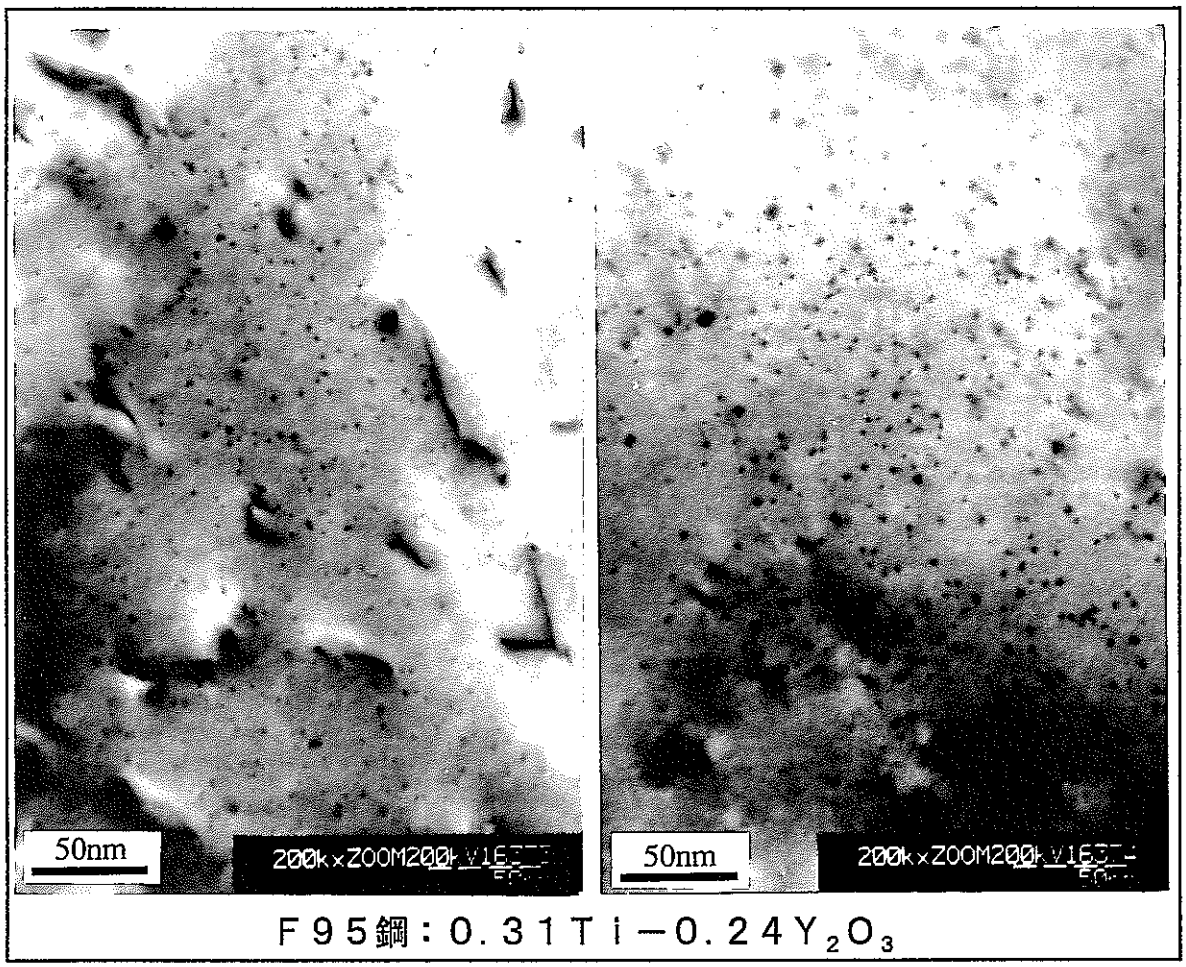


F９３鋼：０．２２Ｔｉ－０．２２Y_2O_3



F９４鋼：０．３０Ｔｉ－０．２４Y_2O_3

写真10-2　　画像処理に用いた薄膜ＴＥＭ観察組織



F95鋼：0.31Ti－0.24Y_2O_3

写真10-3　　画像処理に用いた薄膜ＴＥＭ観察組織

表14　表面間距離測定結果（画像処理で直接求めた結果）

試料名	試料膜厚	粒子数	視野面積	Ns	N v	r	r2	r3	f	l s	rs	λ
F91-1	89.70	25	87226	2.87E-04	3.20E-06	5.93	39.78	292.62	3.92E-03	162.45	5.27	192.52
F92-1	28.33	15	87226	1.72E-04	6.07E-06	5.25	30.74	198.44	5.05E-03	125.26	4.60	147.38
F93-1	73.33	65	87226	7.45E-04	1.02E-05	4.33	24.90	167.54	7.13E-03	106.60	4.52	124.21
F94-1	36.84	69	87226	7.91E-04	2.15E-05	3.63	15.48	75.84	6.82E-03	80.09	3.35	93.42
F95-1	97.50	303	87226	3.47E-03	3.56E-05	2.73	7.88	24.14	3.60E-03	71.70	2.27	85.09

表15　表面間距離測定結果（成分から体積率を求めた場合）

試料名	試料膜厚	粒子数	視野面積	Ns	N v	r	r2	r3	f	l s	rs	λ
F91-1	89.70	25	87226	2.87E-04	3.20E-06	5.93	39.78	292.62	1.03E-03	316.26	5.27	384.78
F92-1	28.33	15	87226	1.72E-04	6.07E-06	5.25	30.74	198.44	2.48E-03	178.67	4.60	214.14
F93-1	73.33	65	87226	7.45E-04	1.02E-05	4.33	24.90	167.54	4.13E-03	140.02	4.52	166.00
F94-1	36.84	69	87226	7.91E-04	2.15E-05	3.63	15.48	75.84	4.75E-03	95.95	3.35	113.24
F95-1	97.50	303	87226	3.47E-03	3.56E-05	2.73	7.88	24.14	4.75E-03	62.42	2.27	73.49

表16　画像データから求めたF91鋼のしきい応力

r の平均	r_2の平均	r_3の平均	rs	ls	λ
5.93.E-09	3.98E-17	2.93E-25	5.27.E-09	1.62E-07	1.92E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	9.99E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.35E-03	1.80E-03	6.84E+01	9.13E+01

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
1.97E-03	2.65E-03	9.97E+01	1.34E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
84	113

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.21E-03	1.62E-03	6.13E+01	8.17E+01
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.66E-03	2.21E-03	8.38E+01	1.12E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
73	97

表17　画像データから求めたF92鋼のしきい応力

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
5.25.E-09	3.07E-17	1.98E-25	4.60.E-09	1.25E-07	1.47E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	8.66E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
700	50600	1.69E-03	2.28E-03	8.55E+01	1.15E+02

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
2.46E-03	3.34E-03	1.24E+02	1.69E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
105	142

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
700	50600	1.51E-03	2.04E-03	7.66E+01	1.03E+02

As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
1.224	0.896	2.07E-03	2.79E-03	1.05E+02	1.41E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
91	122

表18　画像データから求めたF93鋼のしきい応力

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
4.33.E-09	2.49E-17	1.68E-25	4.52.E-09	1.07E-07	1.24E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	8.42E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.99E-03	2.68E-03	1.01E+02	1.36E+02

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
2.89E-03	3.94E-03	1.46E+02	1.99E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
123	167

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.78E-03	2.40E-03	9.00E+01	1.22E+02
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.43E-03	3.29E-03	1.23E+02	1.66E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
107	144

表19　画像データから求めたF94鋼のしきい応力

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
3.63.E-09	1.55E-17	7.58E-26	3.35.E-09	8.01E-08	9.34E-08

A	B	D	M	b
1	0.7	6.25E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.39E-03	3.32E-03	1.21E+02	1.68E+02

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
3.46E-03	4.86E-03	1.75E+02	2.46E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
148	207

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.14E-03	2.97E-03	1.08E+02	1.50E+02
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.92E-03	4.06E-03	1.48E+02	2.05E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
128	178

表20　画像データから求めたF95鋼のしきい応力

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
2.73.E-09	7.88E-18	2.41E-26	2.27.E-09	7.17E-08	8.51E-08

A	B	D	M	b
1	0.7	4.30E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.28E-03	3.30E-03	1.15E+02	1.67E+02

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
3.28E-03	4.81E-03	1.66E+02	2.43E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
141	205

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.04E-03	2.95E-03	1.03E+02	1.49E+02
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.79E-03	4.03E-03	1.41E+02	2.04E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
122	177

表21　成分データから求めたF91鋼のしきい応力(fmax)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
5.93.E-09	3.98E-17	2.93E-25	5.27.E-09	3.17E-07	3.85E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	1.03E-08	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
700	50600	6.81E-04	9.06E-04	3.44E+01	4.58E+01

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
9.91E-04	1.33E-03	5.02E+01	6.73E+01

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
42	57

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
700	50600	6.10E-04	8.11E-04	3.08E+01	4.10E+01
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
1.224	0.896	8.33E-04	1.11E-03	4.22E+01	5.61E+01

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
37	49

表22　成分データから求めたF92鋼のしきい応力(fmax)

r の平均	r_2の平均	r_3の平均	rs	ls	λ
5.25.E-09	3.07E-17	1.98E-25	4.60.E-09	1.79E-07	2.14E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	8.82E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.17E-03	1.57E-03	5.92E+01	7.97E+01

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
1.70E-03	2.31E-03	8.61E+01	1.17E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
73	98

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.05E-03	1.41E-03	5.30E+01	7.14E+01
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.43E-03	1.93E-03	7.24E+01	9.75E+01

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
63	84

表23　成分データから求めたF93鋼のしきい応力(fmax)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
4.33.E-09	2.49E-17	1.68E-25	4.52.E-09	1.40E-07	1.66E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	8.57E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
700	50600	1.49E-03	2.02E-03	7.56E+01	1.02E+02

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
2.17E-03	2.96E-03	1.10E+02	1.50E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
93	126

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
700	50600	1.34E-03	1.81E-03	6.77E+01	9.14E+01
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
		r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
1.224	0.896	1.83E-03	2.47E-03	9.25E+01	1.25E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
80	108

表24　成分データから求めたF94鋼のしきい応力(fmax)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
3.63.E-09	1.55E-17	7.58E-26	3.35.E-09	9.60E-08	1.13E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	6.32E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.98E-03	2.74E-03	1.00E+02	1.39E+02

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
2.87E-03	4.02E-03	1.45E+02	2.03E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
123	171

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.77E-03	2.46E-03	8.97E+01	1.24E+02
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.42E-03	3.36E-03	1.23E+02	1.70E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
106	147

表25　成分データから求めたF95鋼のしきい応力(fmax)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
2.73.E-09	7.88E-18	2.41E-26	2.27.E-09	6.24E-08	7.35E-08

A	B	D	M	b
1	0.7	4.27E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.63E-03	3.81E-03	1.33E+02	1.93E+02

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
3.78E-03	5.56E-03	1.92E+02	2.81E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
162	237

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.35E-03	3.41E-03	1.19E+02	1.73E+02
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		3.22E-03	4.66E-03	1.63E+02	2.36E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
141	204

表26　成分データから求めたF91鋼のしきい応力(fmin)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
5.93.E-09	3.98E-17	2.93E-25	5.27.E-09	3.66E-07	4.47E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	1.03E-08	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		5.87E-04	7.81E-04	2.97E+01	3.95E+01

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
8.55E-04	1.15E-03	4.33E+01	5.80E+01

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
36	49

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		5.26E-04	6.99E-04	2.66E+01	3.54E+01
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		7.18E-04	9.56E-04	3.64E+01	4.84E+01

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
31	42

表27　成分データから求めたF92鋼のしきい応力(fmin)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
5.25.E-09	3.07E-17	1.98E-25	4.60.E-09	2.07E-07	2.50E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	8.87E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.00E-03	1.35E-03	5.08E+01	6.83E+01

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
1.46E-03	1.98E-03	7.38E+01	1.00E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
62	84

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		8.99E-04	1.21E-03	4.55E+01	6.12E+01
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.23E-03	1.65E-03	6.21E+01	8.36E+01

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
54	72

表28　成分データから求めたF93鋼のしきい応力(fmin)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
4.33.E-09	2.49E-17	1.68E-25	4.52.E-09	1.63E-07	1.94E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	8.63E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.28E-03	1.73E-03	6.48E+01	8.73E+01

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
1.86E-03	2.53E-03	9.41E+01	1.28E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
79	108

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.15E-03	1.55E-03	5.80E+01	7.82E+01
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.57E-03	2.11E-03	7.92E+01	1.07E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
69	93

表29　成分データから求めたF94鋼のしきい応力(fmin)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
3.63.E-09	1.55E-17	7.58E-26	3.35.E-09	1.11E-07	1.33E-07

A	B	D	M	b
1	0.7	6.38E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σ or/G ; Edge		σ or (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.69E-03	2.35E-03	8.58E+01	1.19E+02

σ or/G ; Screw		σ or (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
2.46E-03	3.44E-03	1.24E+02	1.74E+02

σ or(MPa)	
r0=3b	r0=b
105	146

T (℃)	G (MPa)	σ v/G ; Edge		σ v (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		1.52E-03	2.10E-03	7.68E+01	1.06E+02
As	Ae	σ v/G ; Screw		σ v (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.07E-03	2.87E-03	1.05E+02	1.45E+02

σ v(MPa)	
r0=3b	r0=b
91	126

表30　成分データから求めたF95鋼のしきい応力(fmin)

r の平均	r2の平均	r3の平均	rs	ls	λ
2.73.E-09	7.88E-18	2.41E-26	2.27.E-09	7.25E-08	8.61E-08

A	B	D	M	b
1	0.7	4.31E-09	2	2.48E-10

T (℃)	G (MPa)	σor/G ; Edge		σor (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.25E-03	3.26E-03	1.14E+02	1.65E+02

σor/G ; Screw		σor (MPa) ; Screw	
r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
3.24E-03	4.75E-03	1.64E+02	2.41E+02

σor(MPa)	
r0=3b	r0=b
139	203

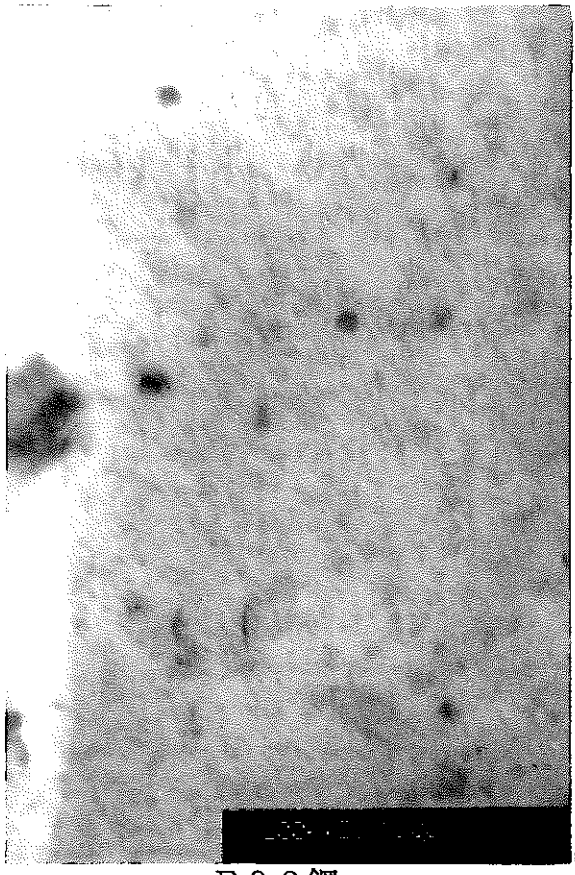
T (℃)	G (MPa)	σv/G ; Edge		σv (MPa) ; Edge	
700	50600	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.02E-03	2.92E-03	1.02E+02	1.48E+02
As	Ae	σv/G ; Screw		σv (MPa) ; Screw	
1.224	0.896	r0=3b	r0=b	r0=3b	r0=b
		2.75E-03	3.99E-03	1.39E+02	2.02E+02

σv(MPa)	
r0=3b	r0=b
121	175

表31　酸化物粒子の分散状態から求めたしきい応力（700℃）

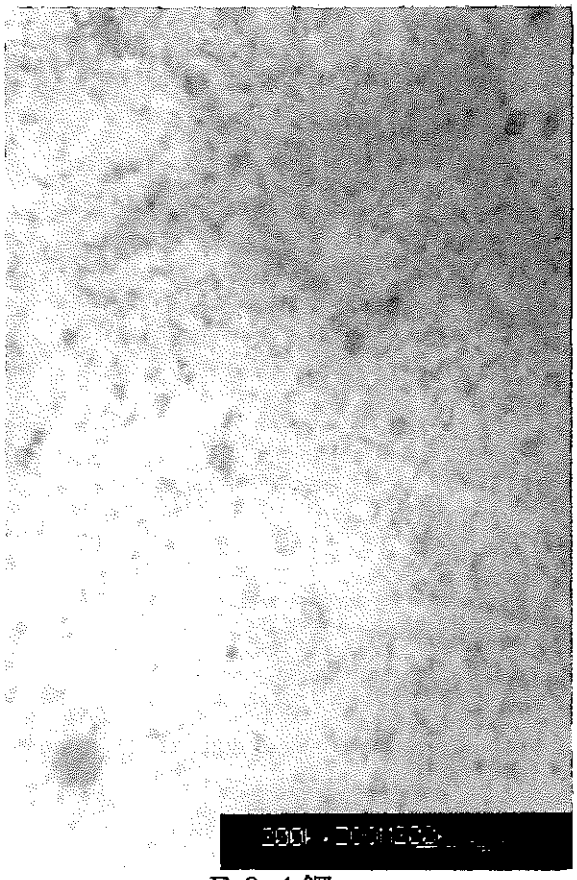
（ＭＰａ）

鋼種	画像データから		成分から（最大）		成分から（最小）	
	σor	σv	σor	σv	σor	σv
Ｆ９１	144-173	124-148	81-95	69-81	71-83	61-71
Ｆ９２	180-217	154-185	132-157	113-135	116-138	99-118
Ｆ９３	207-251	177-214	163-196	139-167	143-171	122-146
Ｆ９４	259-318	222-272	222-270	190-231	195-236	167-202
Ｆ９５	278-343	239-293	313-387	268-332	275-339	236-290



Ｆ９２鋼

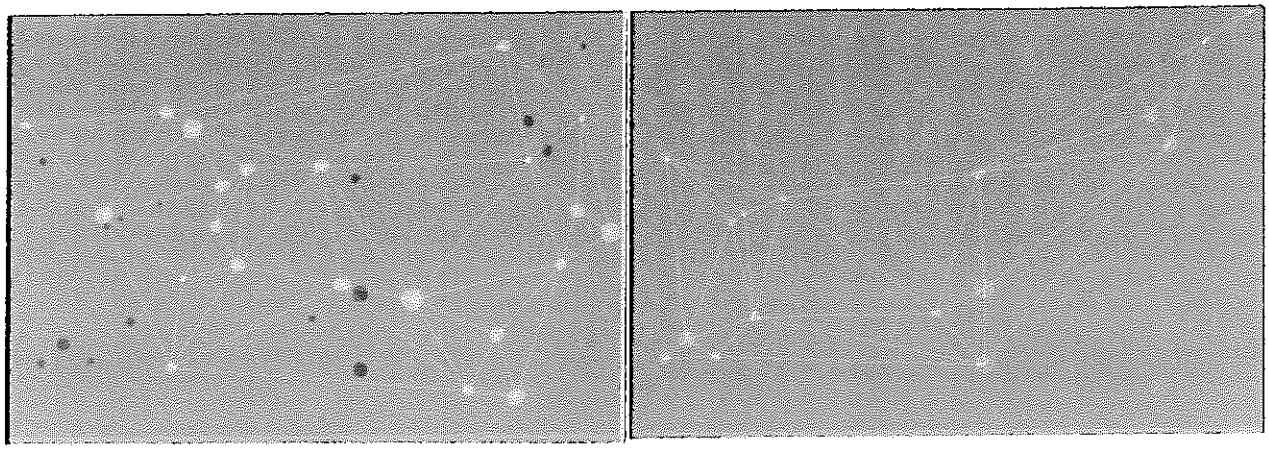
Ｆ９３鋼



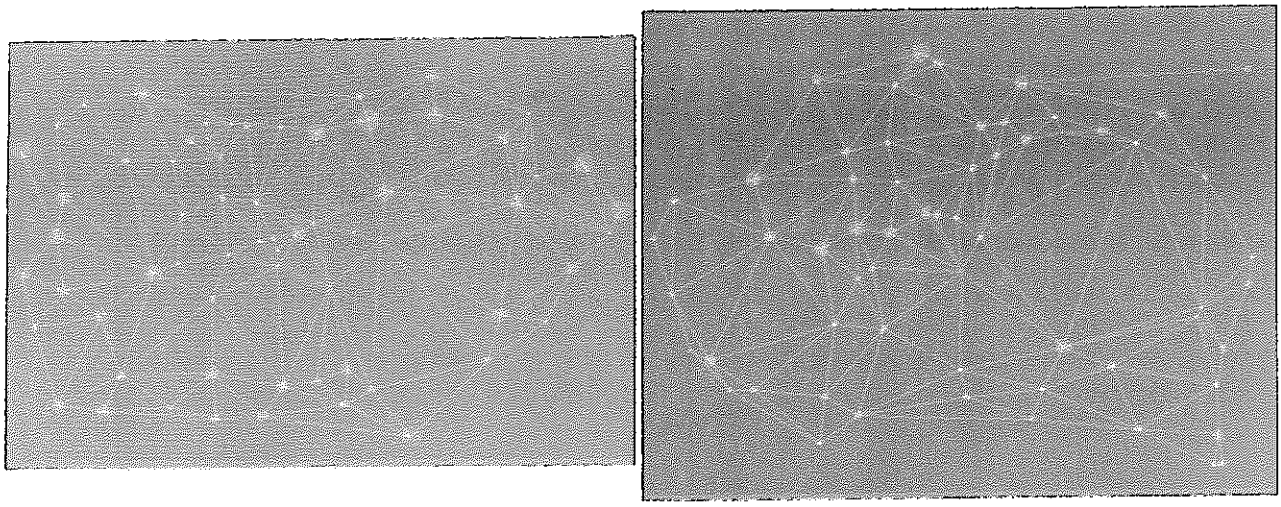
Ｆ９４鋼

Ｆ９５鋼

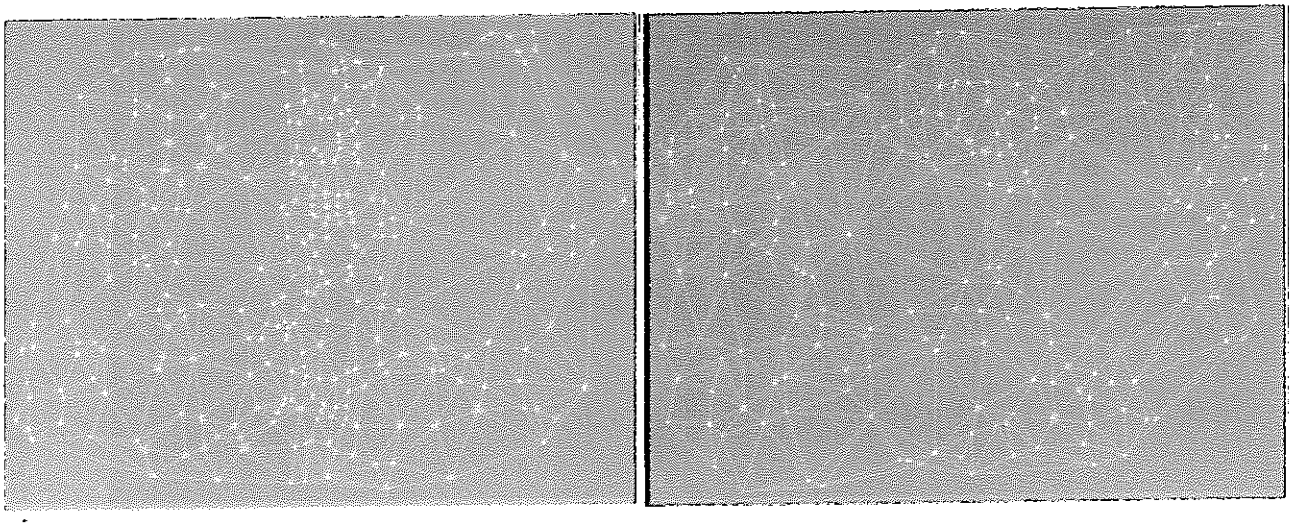
写真 **11** 粒子分散状態測定用電顕組織（薄膜）



Ｆ９１鋼　　Ｆ９２鋼



Ｆ９３鋼　　Ｆ９４鋼



Ｆ９５鋼　　７Ａ鋼

図44　粒子分散状態解析ソフトによる画像処理

表32　粒子分散画像処理ソフトを用いた測定データ

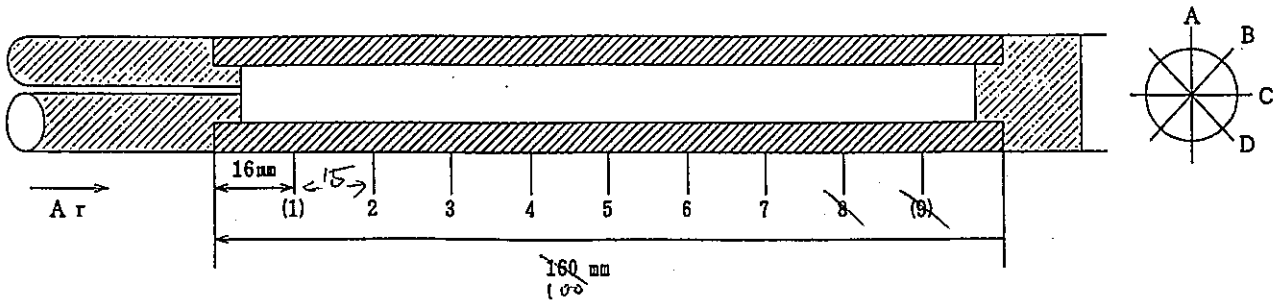
試料名	粒子径	全隣接重心間距離	全隣接表面間距離	Ｔｉ含有量
F91-1	6.55	60.75	43.52	0.1
F92-1	4.99	62.92	43.63	0.1
F93-1	4.23	34.20	30.67	0.2
F94-1	3.58	36.85	34.28	0.3
F95-1	2.66	16.45	14.42	0.3
7A	2.02	20.51	19.31	単位：ｗｔ％

単位：ｎｍ

添付資料１

内圧クリープ破断試験片の外径ふくれ率測定データ

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	FA91ST-1	試験圧力		152 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		110 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	年 月 日		累計時間	0 h

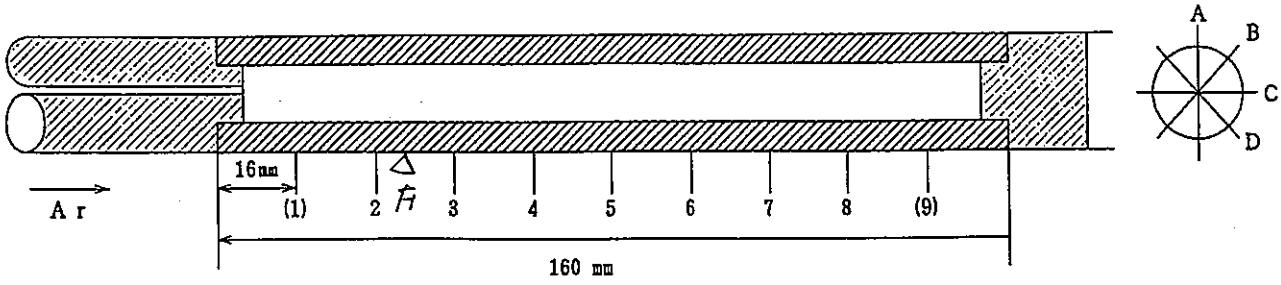
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.267	9.268	9.268	9.267	9.267	9.268	
	B	9.266	9.266	9.267	9.267	9.267	9.267	
	C	9.267	9.266	9.267	9.267	9.267	9.267	
	D	9.266	9.266	9.267	9.266	9.266	9.267	
	平均値	9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	
試験前平均値		9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片 No.	FA91ST-1	試験圧力		152 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		110 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年 3 月 18 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2 月 4 日		累計時間	251 h

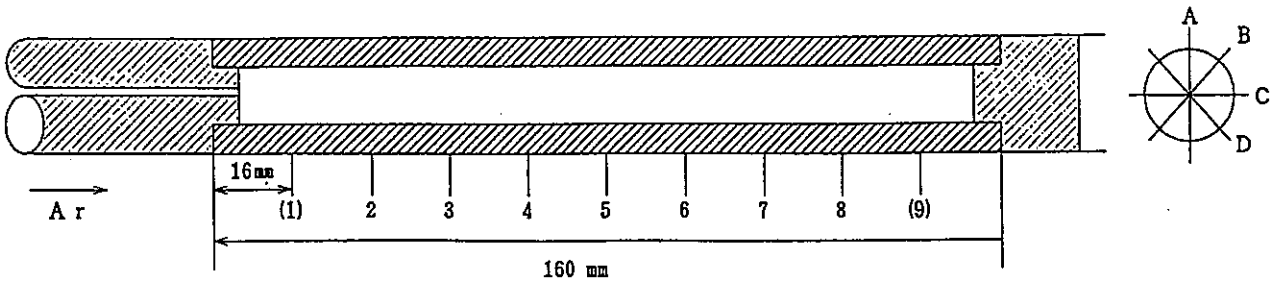
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.351	9.487	9.479	9.470	9.455	9.459	
	B	9.368	9.490	9.480	9.474	9.458	9.453	
	C	9.340	9.489	9.480	9.474	9.459	9.455	
	D	9.325	9.483	9.475	9.473	9.467	9.466	
	平均値	9.346	9.487	9.479	9.473	9.460	9.458	
試験前平均値		9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	
ふくれ量		0.079	0.220	0.212	0.206	0.193	0.191	
ふくれ率(%)		0.852	2.374	2.288	2.223	2.083	2.061	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	2.374	1.980	0.852

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向２～８のふくれ率より、「平均値」　は軸方向２～８のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A91ST-2	試験圧力		111 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		80 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月18日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	0 ~~1488~~ h

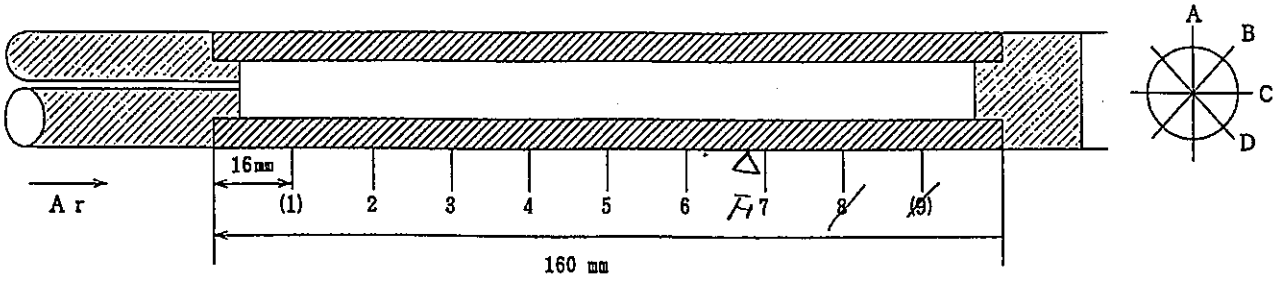
方向＼位置		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.268	9.267	9.266	9.267	9.268	9.267	
	B	9.270	9.267	9.267	9.267	9.267	9.268	
	C	9.268	9.267	9.266	9.267	9.267	9.267	
	D	9.268	9.267	9.267	9.267	9.266	9.266	
	平均値	9.268	9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	
試験前平均値		9.268	9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	F91ST-Z	試験圧力		111 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		80 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	年 月 日		累計時間	178.8 h

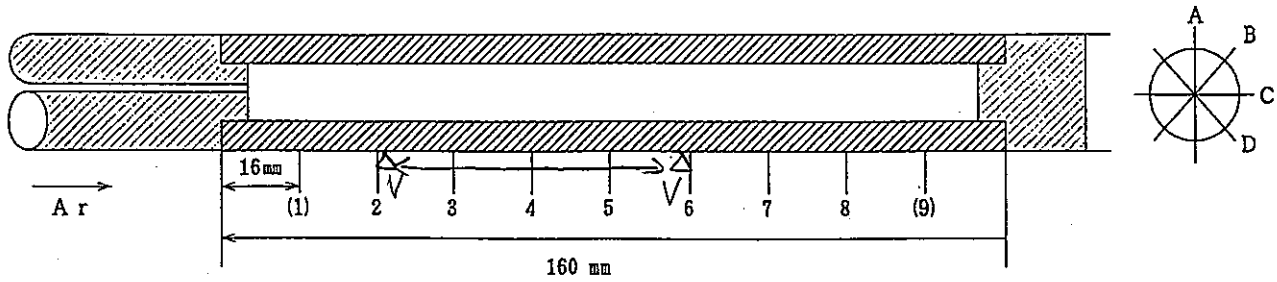
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.335	9.306	9.320	9.328	9.339	9.385	
	B	9.317	9.308	9.318	9.323	9.339	9.401	
	C	9.311	9.311	9.313	9.326	9.338	9.391	
	D	9.320	9.305	9.313	9.323	9.337	9.395	
	平均値	9.321	9.308	9.316	9.325	9.338	9.388	
試験前平均値		9.268	9.267	9.267	9.267	9.267	9.267	
ふくれ量		0.053	0.041	0.049	0.058	0.071	0.121	
ふくれ率(%)		0.572	0.442	0.528	0.625	0.766	1.305	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	1.305	0.706	0.442

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7\text{本}} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	F91CW-1	試験圧力		122 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		100 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	272 h

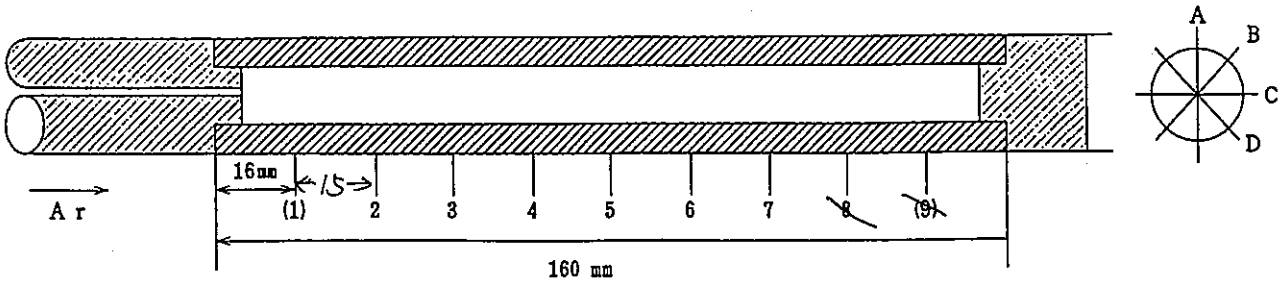
方向＼位置		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.495	8.496	8.496	8.496	8.496	8.498	
	B	8.496	8.496	8.495	8.496	8.496	8.495	
	C	8.497	8.496	8.496	8.496	8.496	8.496	
	D	8.496	8.496	8.496	8.495	8.496	8.496	
	平均値							
試験前平均値								
ふくれ量								
ふくれ率(%)		V破断により開口部大のため測定不可						

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片 No.	F91CW-2	試験圧力		85 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		70 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年 3月17日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月4日		累計時間	h

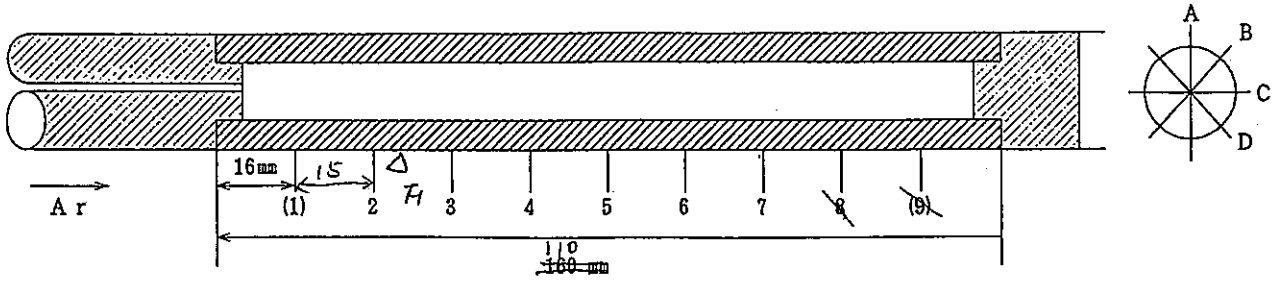
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.695	8.696	8.696	8.696	8.696	8.695	
	B	8.695	8.696	8.695	8.695	8.695	8.695	
	C	8.695	8.695	8.695	8.695	8.695	8.695	
	D	8.695	8.695	8.696	8.695	8.695	8.695	
	平均値	8.695	8.696	8.695	8.695	8.695	8.695	
試験前平均値		8.695	8.696	8.695	8.695	8.695	8.695	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A91CW-2	試験圧力		85 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		70 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月17日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	101.8 h

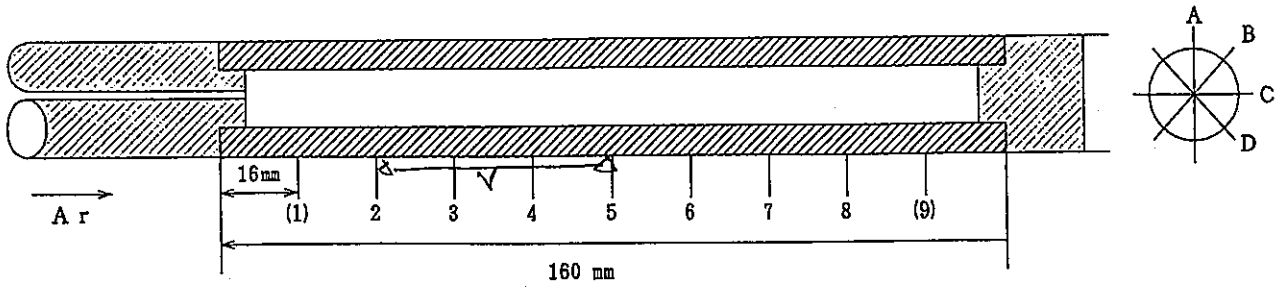
方向＼位置		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.488	8.664	8.679	8.670	8.647	8.501	
	B	8.498	8.688	8.658	8.670	8.641	8.501	
	C	8.499	8.678	8.641	8.680	8.647	8.501	
	D	8.499	8.685	8.655	8.687	8.660	8.501	
	平均値	8.499	8.679	8.658	8.677	8.649	8.501	
試験前平均値		8.498	8.496	8.695	8.495	8.495	8.495	
ふくれ量		0.001	0.187	0.163	0.182	0.154	0.006	
ふくれ率(%)		0.012	2.200	1.919	2.142	1.813	0.070	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	2.200	1.359	0.012

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{6} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A92 ST-1	試験圧力		183 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		130 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月6日	試験時間	累計時間	23.6 h

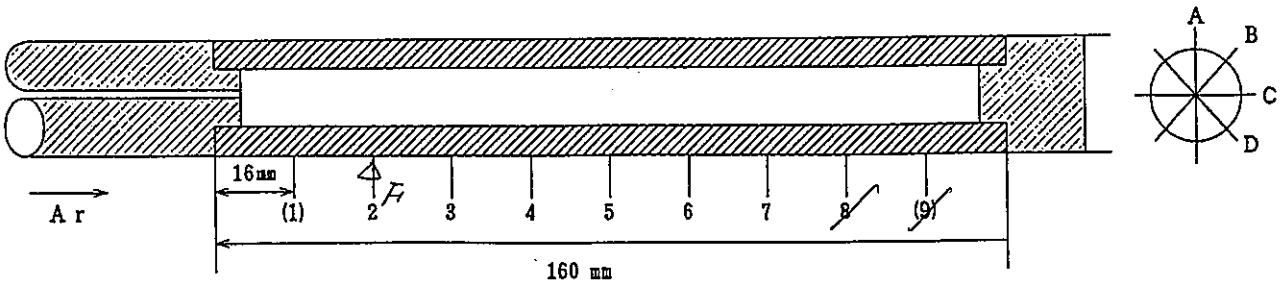
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.267	9.268	9.267	9.267	9.268	9.260	
	B	9.260	9.260	9.259	9.260	9.265	9.263	
	C	9.260	9.259	9.259	9.260	9.260	9.260	
	D	9.259	9.260	9.260	9.260	9.260	9.261	
	平均値							
試験前平均値								
ふくれ量								
ふくれ率(%)		V破断により開口部大のため測定不可						

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A92ST-2	試験圧力		127 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		90 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月17日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	100.5 h

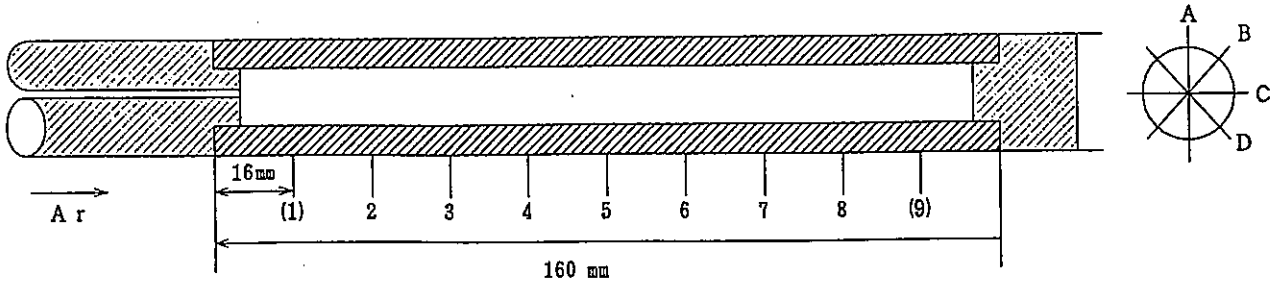
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.250	9.413	9.397	9.401	9.380	9.320	
	B	9.252	9.406	9.395	9.385	9.388	9.297	
	C	9.252	9.427	9.403	9.393	9.386	9.385	
	D	9.256	9.465	9.401	9.400	9.401	9.386	
	平均値	9.253	9.428	9.399	9.395	9.389	9.460	
試験前平均値		9.256	9.258	9.259	9.260	9.261	9.260	
ふくれ量		0	0.170	0.140	0.135	0.128	0.200	
ふくれ率(%)			1.836	1.512	1.458	1.382	2.159	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	2.159	1.391	0

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{6} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A92ST－2	試験圧力		127 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		90 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月4日		累計時間	h

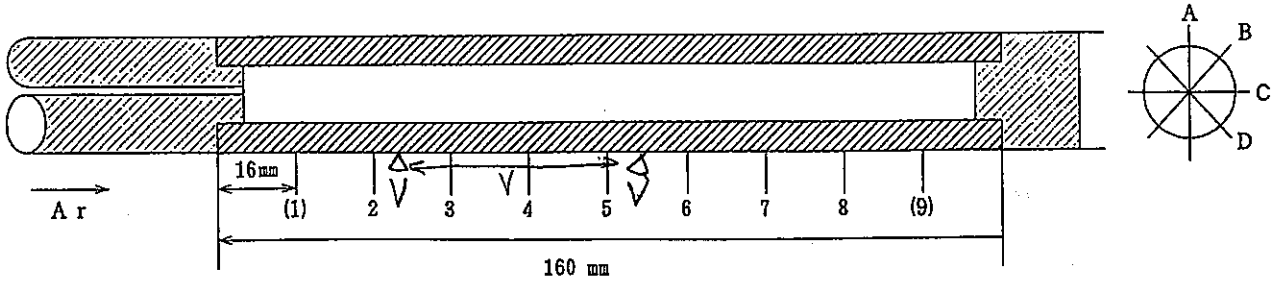
位置 / 方向		外径 (㎜) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.258	9.258	9.259	9.259	9.260	9.260	
	B	9.257	9.257	9.260	9.260	9.261	9.261	
	C	9.256	9.258	9.259	9.261	9.261	9.260	
	D	9.256	9.260	9.259	9.260	9.260	9.260	
	平均値	9.256	9.258	9.259	9.260	9.261	9.260	
試験前平均値								
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	AP2CW-1	試験圧力		153 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		120 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	24.3 h

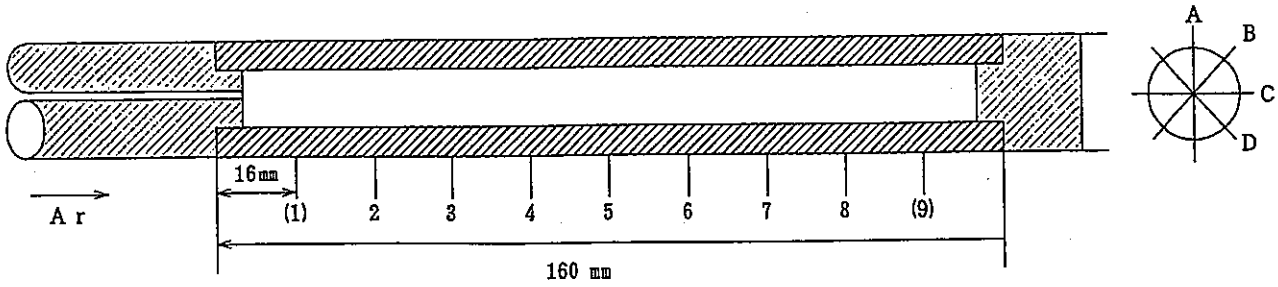
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.505	8.505	8.504	8.504	8.504	8.505	
	B	8.505	8.504	8.505	8.505	8.504	8.504	
	C	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	
	D	8.504	8.505	8.505	8.506	8.506	8.506	
	平均値	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	
試験前平均値								
ふくれ量								
ふくれ率(%)		V破断により開口部大のため測定不可						

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片 No.	F92CW-2	試験圧力		102 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		80 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月 4日		累計時間	h

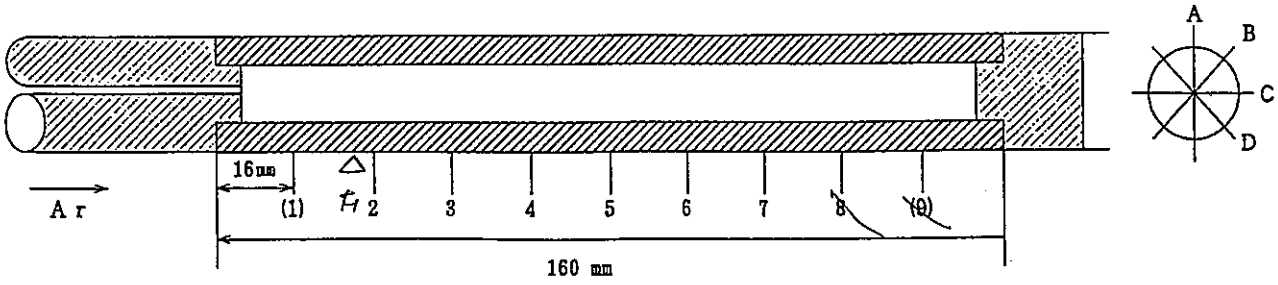
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.504	8.505	8.506	8.505	8.505	8.505	
	B	8.505	8.506	8.505	8.505	8.505	8.505	
	C	8.506	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	
	D	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	8.504	
	平均値	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	
試験前平均値		8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A92CW-2	試験圧力		102 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		80 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月17日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	642 h

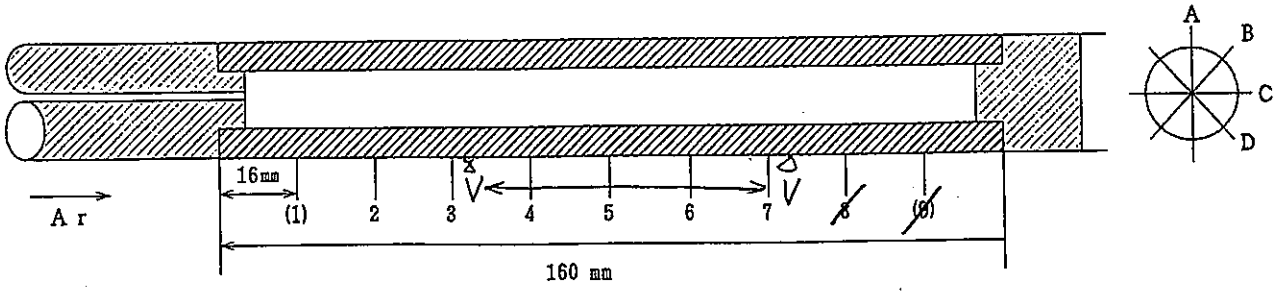
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.556	8.664	8.657	8.640	8.634	8.639	
	B	8.539	8.663	8.659	8.648	8.647	8.639	
	C	8.509	8.653	8.648	8.646	8.646	8.642	
	D	8.509	8.649	8.642	8.630	8.628	8.635	
	平均値	8.528	8.657	8.652	8.641	8.639	8.639	
試験前平均値		8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	8.505	
ふくれ量		0.023	0.152	0.147	0.136	0.134	0.134	
ふくれ率(%)		0.270	1.787	1.728	1.599	1.576	1.576	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	1.787	1.423	0.270

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A94ST－1	試験圧力		≥91 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		200 MPa
測定者		試験温度		650 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	2.5 h

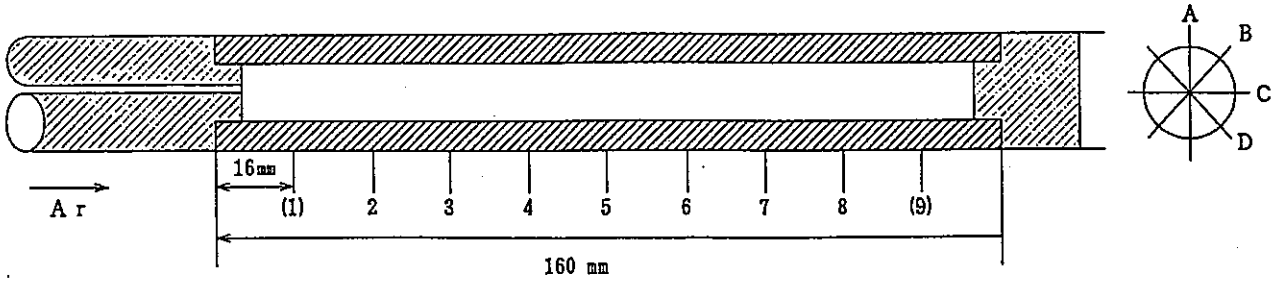
位置／方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.318	9.318	9.317	9.317	9.317	9.317	
	B	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
	C	9.317	9.317	9.318	9.316	9.317	9.316	
	D	9.317	9.316	9.316	9.316	9.316	9.317	
	平均値	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
試験前平均値								
ふくれ量								
ふくれ率(%)		V破断により開口部大のため測定不可						

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7-6} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	F94ST-2	試験圧力		291 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		200 MPa
測定者		試験温度		650 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月 4日		累計時間	100.2 h

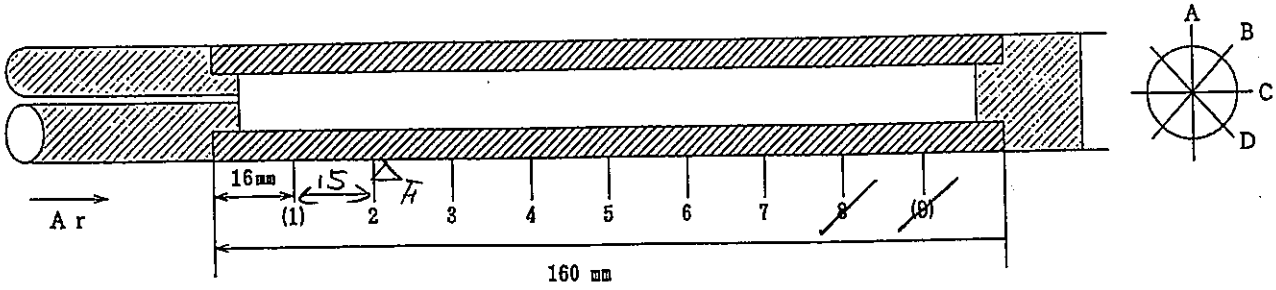
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.317	9.318	9.317	9.317	9.317	9.318	
	B	9.316	9.317	9.316	9.316	9.317	9.317	
	C	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.316	
	D	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
	平均値	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
試験前平均値								
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	HT9 ST 2	試験圧力		291 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		200 MPa
測定者		試験温度		650 ℃
測定日	99年 3月17日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月 4日		累計時間	100.2 h

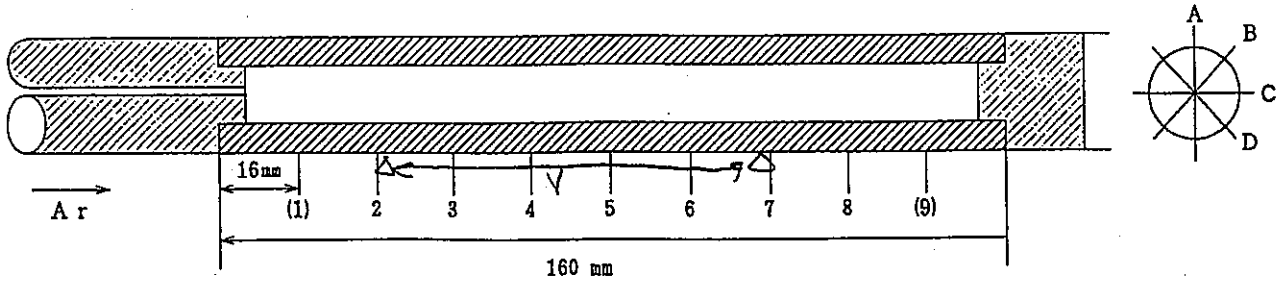
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.385	9.391	9.390	9.381	9.374	9.368	
	B	9.376	9.375	9.376	9.378	9.374	9.367	
	C	9.369	9.372	9.367	9.368	9.364	9.369	
	D	9.383	9.379	9.385	9.386	9.375	9.376	
	平均値	9.378	9.379	9.380	9.378	9.372	9.370	
試験前平均値		9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
ふくれ量		0.061	0.062	0.063	0.061	0.055	0.053	
ふくれ率(%)		0.655	0.665	0.676	0.655	0.590	0.569	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	0.676	0.635	0.655

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{6} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	ガラスT4	試験圧力		262 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		180 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月 4日		累計時間	22 h

位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.318	9.317	9.317	9.317	9.318	9.318	
	B	9.317	9.316	9.316	9.316	9.317	9.317	
	C	9.316	9.317	9.316	9.316	9.316	9.316	
	D	9.317	9.317	9.317	9.318	9.317	9.317	
	平均値							
試験前平均値								
ふくれ量								
ふくれ率(%)		V破断により開口部大のため測定不可						

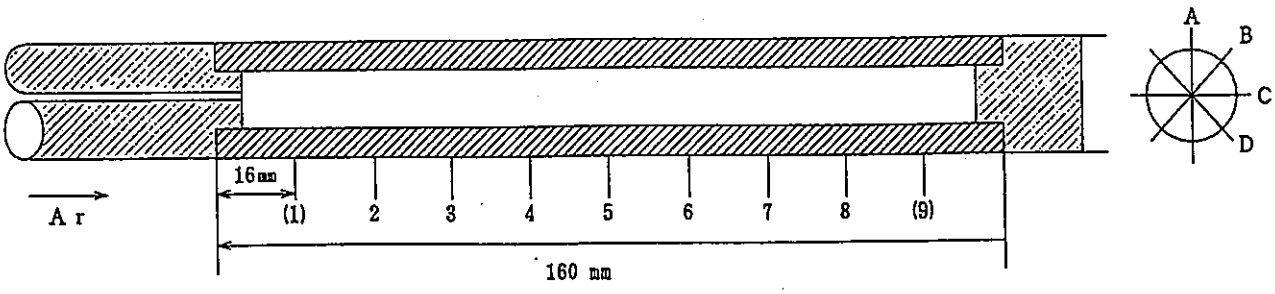
ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{} = \text{平均値}$$

7

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	F94ST-5	試験圧力		219 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		150 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	h

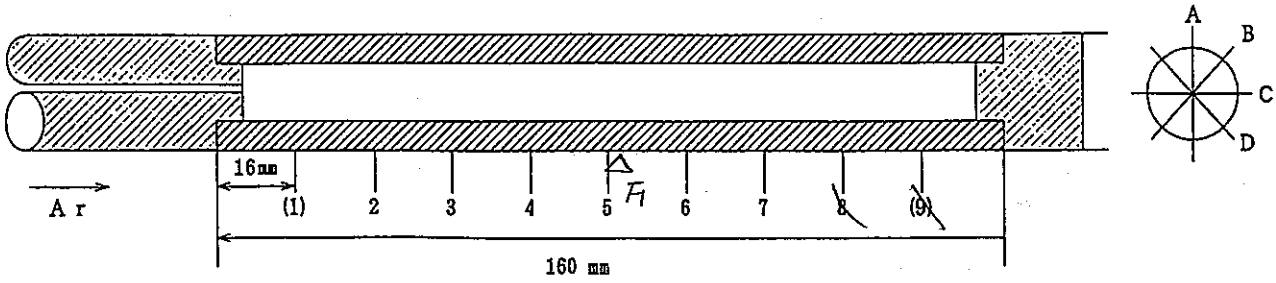
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.318	9.317	9.317	9.318	9.317	9.317	
	B	9.317	9.318	9.318	9.317	9.318	9.317	
	C	9.316	9.316	9.317	9.316	9.316	9.317	
	D	9.316	9.317	9.317	9.316	9.316	9.317	
	平均値	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
試験前平均値		9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A94ST-5	試験圧力		219 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		150 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月18日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月4日		累計時間	70.1 h

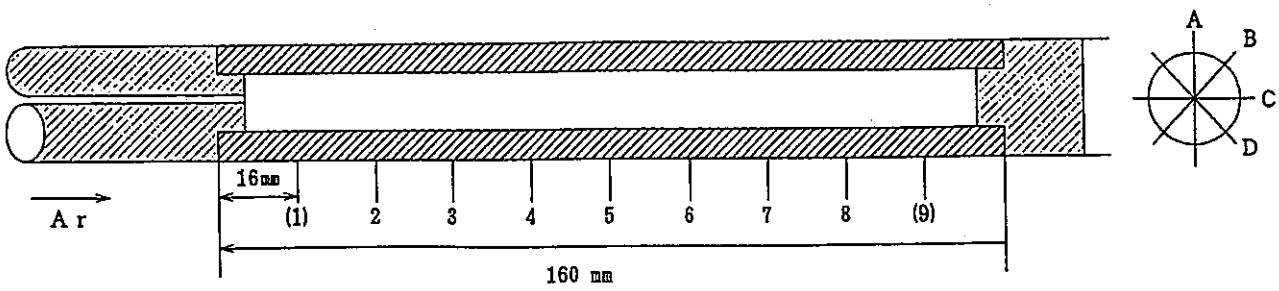
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.401	9.409	9.407	9.405	9.400	9.400	
	B	9.374	9.407	9.404	9.417	9.402	9.399	
	C	9.362	9.409	9.411	9.440	9.406	9.400	
	D	9.399	9.410	9.405	9.418	9.399	9.399	
	平均値	9.384	9.409	9.407	9.420	9.402	9.400	
試験前平均値		9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
ふくれ量		0.067	0.092	0.090	0.103	0.085	0.083	
ふくれ率(%)		0.719	0.987	0.966	1.444	0.912	0.891	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	1.444	0.986	0.719

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{\text{※6}} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	A96ST-6	試験圧力		189 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		130 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月18日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月6日		累計時間	136.7 h

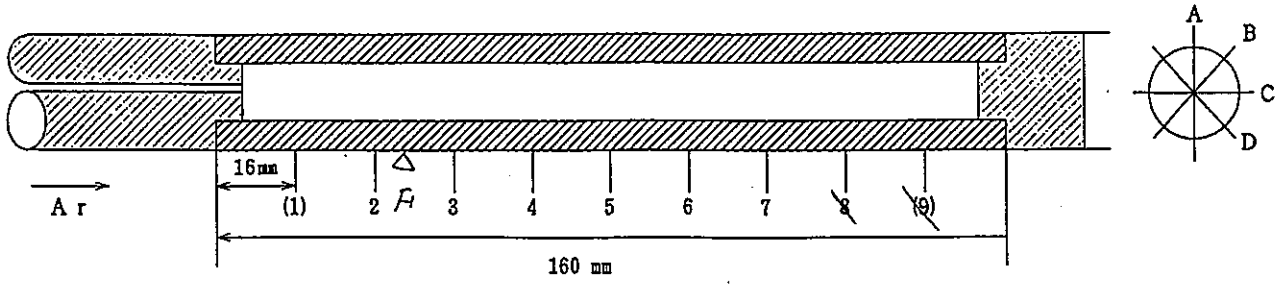
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.317	9.316	9.318	9.317	9.317	9.317	
	B	9.318	9.317	9.316	9.317	9.317	9.316	
	C	9.317	9.317	9.316	9.316	9.317	9.317	
	D	9.317	9.318	9.318	9.318	9.318	9.318	
	平均値	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
試験前平均値		9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片 No.	F 94ST-6	試験圧力		189 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		130 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年 3月18日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月 4日		累計時間	1367 h

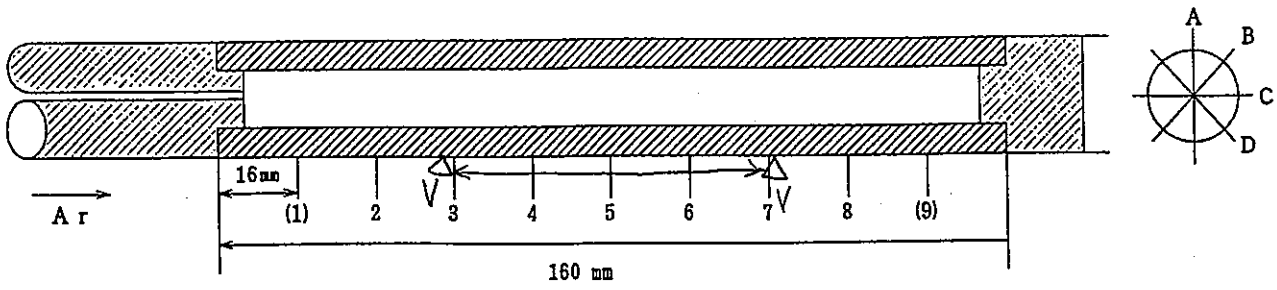
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.389	9.411	9.397	9.394	9.381	9.379	
	B	9.371	9.408	9.405	9.406	9.410	9.401	
	C	9.381	9.413	9.410	9.407	9.400	9.396	
	D	9.386	9.409	9.392	9.384	9.384	9.383	
	平均値	9.382	9.410	9.401	9.397	9.394	9.390	
試験前平均値		9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	9.317	
ふくれ量		0.065	0.093	0.084	0.080	0.077	0.073	
ふくれ率(%)		0.698	0.998	0.902	0.859	0.826	0.784	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	0.998	0.745	0.098

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	FAPCW-1	試験圧力		204 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		160 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月 4日		累計時間	1015 h

位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.487	8.488	8.687	8.486	8.487	8.686	
	B	8.686	8.687	8.487	8.486	8.486	8.487	
	C	8.486	8.487	8.686	8.686	8.486	8.486	
	D	8.486	8.686	8.686	8.486	8.487	8.686	
	平均値							
試験前平均値								
ふくれ量								
ふくれ率(%)		V破断により開口部大のため測定不可						

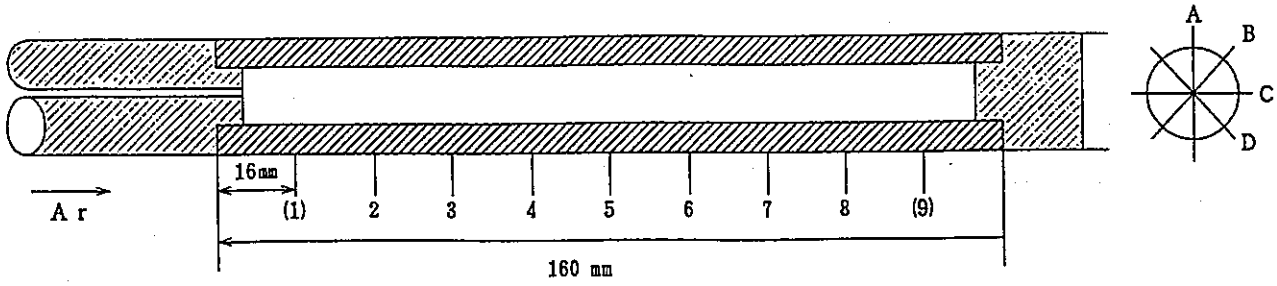
8.487

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」 は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	FQ6CW-2	試験圧力		127 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		100 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年 2月 5日		累計時間	0 h

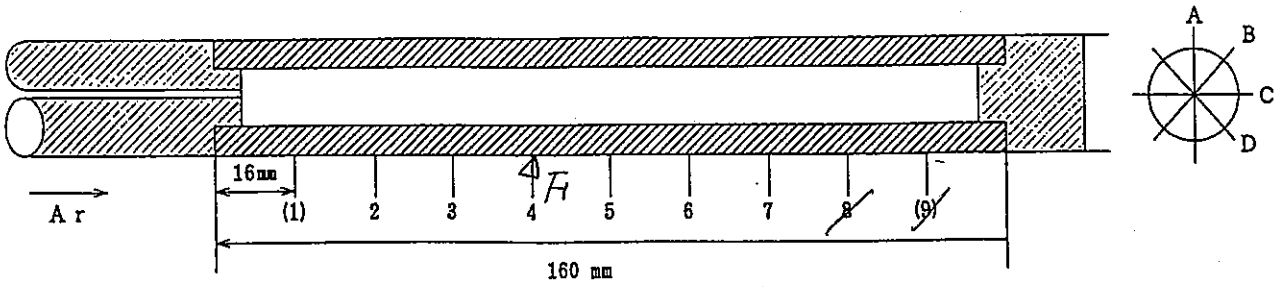
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.485	8.486	8.486	8.485	8.488	8.487	
	B	8.486	8.486	8.486	8.485	8.487	8.487	
	C	8.486	8.486	8.486	8.486	8.486	8.486	
	D	8.486	8.486	8.487	8.486	8.486	8.486	
	平均値	8.486	8.486	8.486	8.486	8.486	8.487	
試験前平均値		8.486	8.486	8.486	8.486	8.486	8.487	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	F94CW-2	試験圧力		127 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		100 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月18日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月5日		累計時間	306.0 h

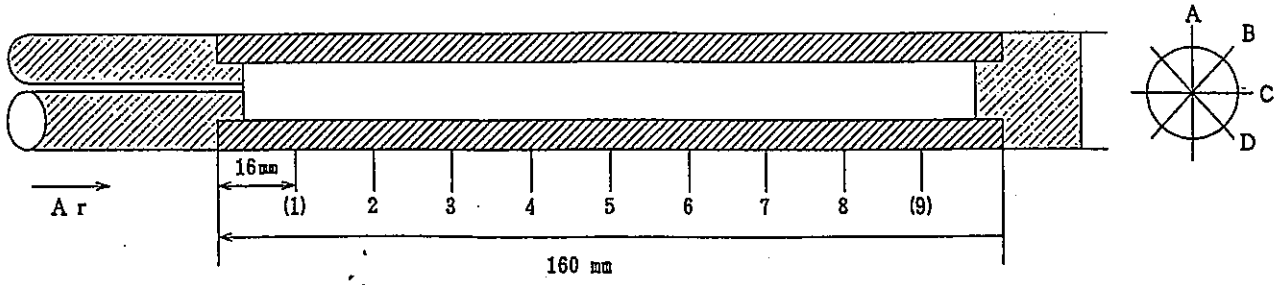
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	8.493	8.539	8.548	8.540	8.542	8.552	
	B	8.492	8.540	8.543	8.539	8.540	8.543	
	C	8.499	8.541	8.533	8.543	8.540	8.550	
	D	8.520	8.541	8.551	8.540	8.537	8.539	
	平均値	8.501	8.540	8.544	8.542	8.540	8.546	
試験前平均値		8.486	8.486	8.486	8.486	8.486	8.487	
ふくれ量		0.015	0.054	0.058	0.056	0.054	0.059	
ふくれ率(%)		0.177	0.636	0.683	0.660	0.636	0.695	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	0.695	0.581	0.177

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{6} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	M91-1	試験圧力		254 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		160 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月5日		累計時間	0 h

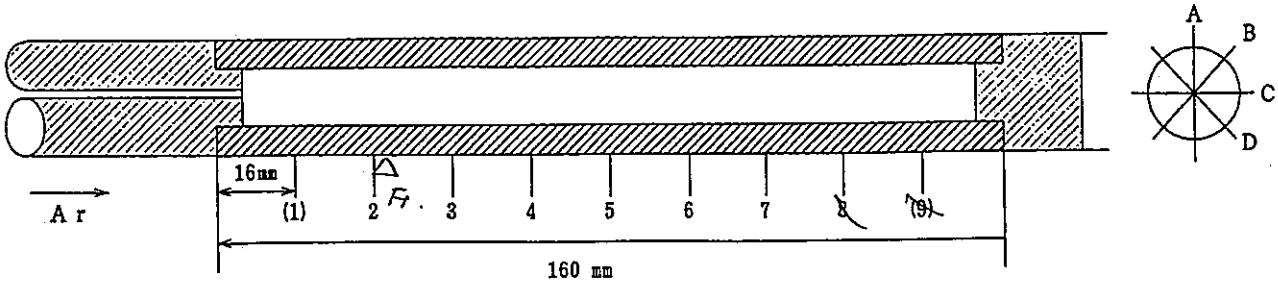
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.436	9.635	9.635	9.635	9.637	9.636	
	B	9.437	9.636	9.636	9.436	9.636	9.437	
	C	9.437	9.636	9.636	9.637	9.637	9.637	
	D	9.437	9.636	9.436	9.636	9.436	9.436	
	平均値	9.437	9.436	9.436	9.436	9.437	9.437	
試験前平均値		9.437	9.436	9.436	9.436	9.437	9.437	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	M91－1	試験圧力		254 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		160 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月18日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月5日		累計時間	≥2.5 h

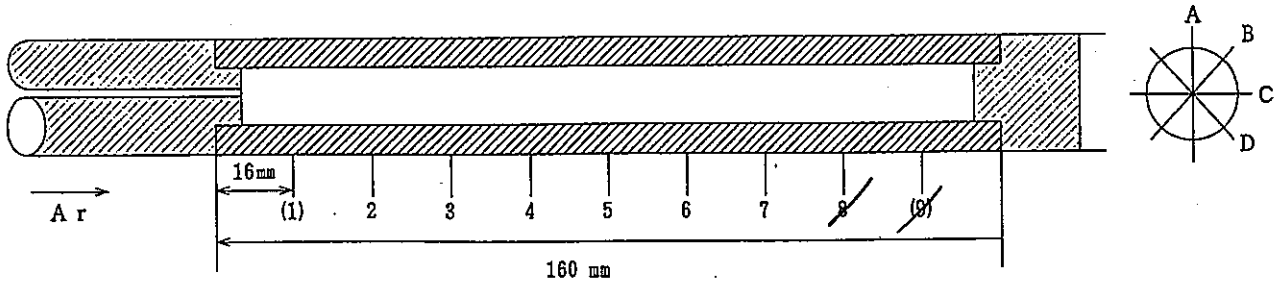
位置 ＼ 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.509	9.687	9.491	9.494	9.490	9.500	
	B	9.521	9.497	9.483	9.486	9.485	9.687	
	C	9.518	9.486	9.489	9.488	9.491	9.504	
	D	9.509	9.681	9.484	9.487	9.492	9.497	
	平均値	9.514	9.483	9.487	9.489	9.490	9.497	
試験前平均値		9.437	9.436	9.436	9.436	9.437	9.437	
ふくれ量		0.077	0.047	0.051	0.053	0.053	0.060	
ふくれ率(%)		0.742	0.502	0.540	0.562	0.562	0.636	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	0.742	0591	0.502

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+\cancel{(7)}+\cancel{(8)}}{6} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	M9z－1	試験圧力		248 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		100 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	年 月 日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	97年2月5日		累計時間	~~213~~ h

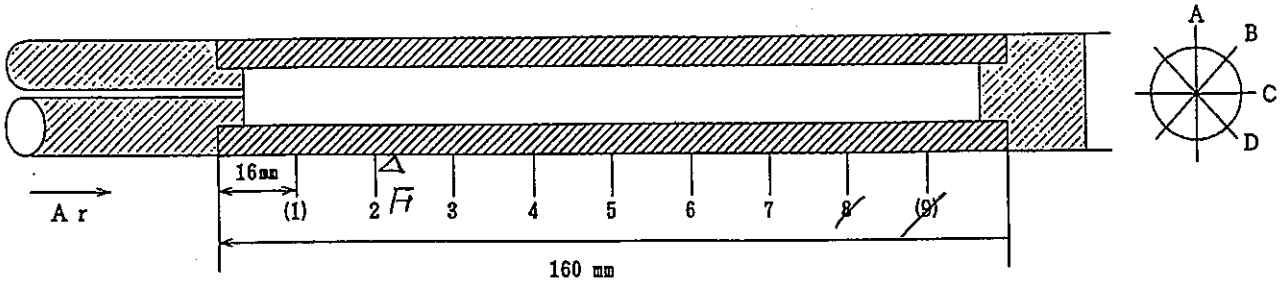
位置 / 方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.362	9.363	9.362	9.363	9.363	9.366	
	B	9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	9.366	
	C	9.366	9.366	9.363	9.366	9.363	9.362	
	D	9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	
	平均値	9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	
試験前平均値		9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	
ふくれ量								
ふくれ率(%)								

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{7\times 6} = \text{平均値}$$

被覆管外径測定データ記録用紙



項目	内容	項目		内容
試験片No.	M92－1	試験圧力		248 Kgf/cm²
測定機関	㈱コベルコ科研	フープ応力		160 MPa
測定者		試験温度		700 ℃
測定日	99年3月18日	試験時間	前回測定より	h
試験前測定日	99年2月5日		累計時間	213.2 h

位置／方向		外径 (mm) 2	3	4	5	6	7	8
測定値	A	9.408	9.410	9.409	9.409	9.420	9.434	
	B	9.395	9.421	9.420	9.428	9.413	9.417	
	C	9.416	9.425	9.420	9.411	9.410	9.407	
	D	9.366	9.413	9.420	9.413	9.415	9.415	
	平均値	9.396	9.417	9.417	9.415	9.415	9.418	
試験前平均値		9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	9.363	
ふくれ量		0.033	0.054	0.054	0.052	0.052	0.055	
ふくれ率(%)		0.352	0.577	0.577	0.555	0.555	0.587	

ふくれ率(%)	最大	平均値	最小
	0.587 ~~0.352~~	0.534	0.352 ~~0.587~~

但し、
ふくれ率の「最大」「最小」は軸方向2～8のふくれ率より、「平均値」　は軸方向2～8のふくれ率から、以下の式より求める。

$$\frac{(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)}{\times 6} = \text{平均値}$$

添付資料２

７Ａ鋼被覆管の分散粒子のＴＥＭ観察と平均粒子表面間距離λの測定

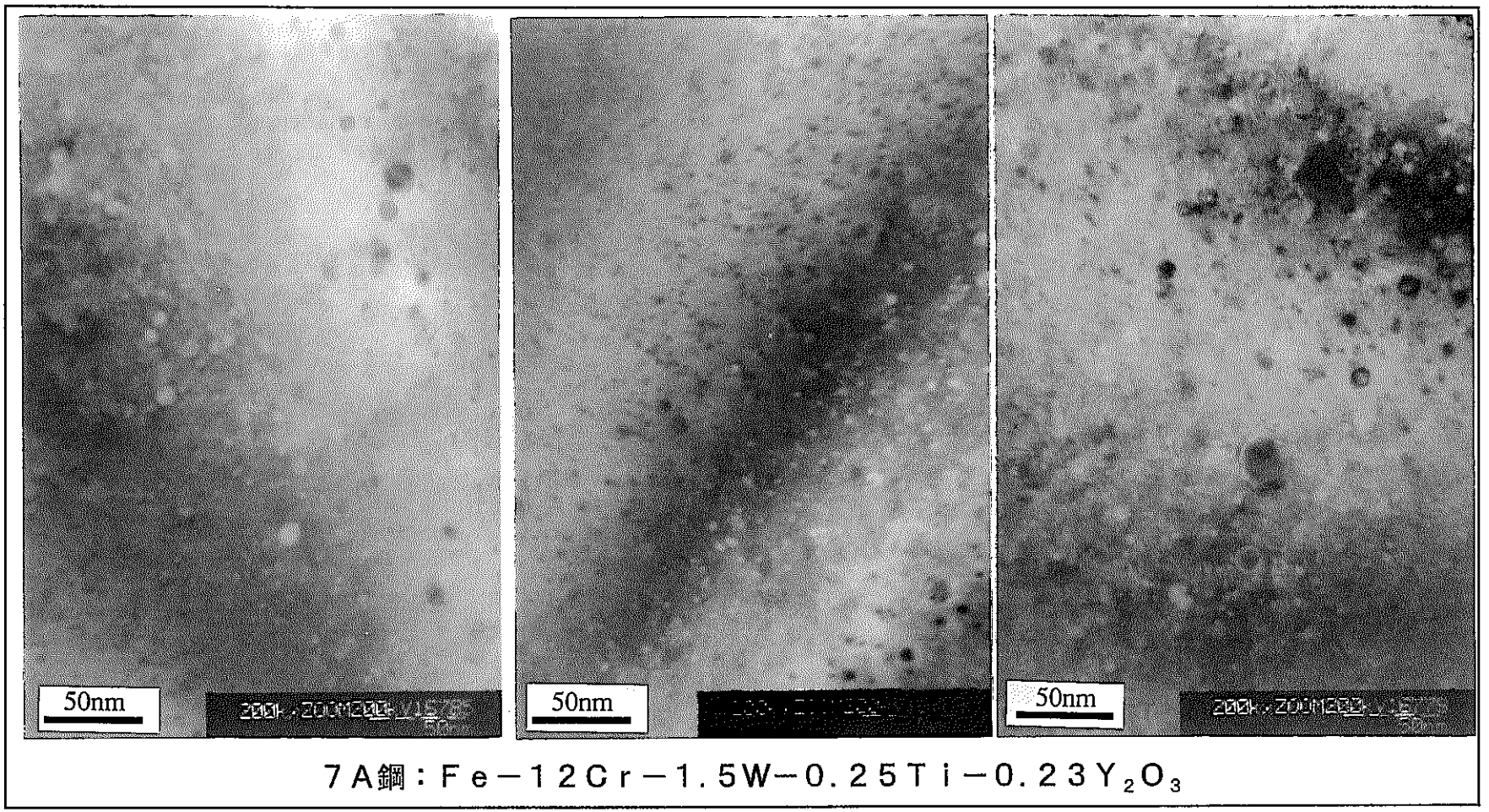


写真　　7A鋼の画像処理に用いた薄膜TEM観察組織

表　画像データから求めた７Ａ鋼被覆管の
平均粒子表面間距離λとオローワン応力

r の平均	r_2の平均	r_3の平均	rs	ls	λ
3.57.E-09	2.26E-17	2.43E-25	4.97.E-09	1.63E-08	1.04E-08

A	B	D	M	b
1	0.7	1.02E-08	2	2.48E-10

σ or/G ; Edge				σ or (MPa)	
r0=3b	r0=b	T (℃)	G (MPa)	r0=3b	r0=b
2.51E-02	3.35E-02	650	53800	1.35E+03	1.80E+03