



JAEA-Testing

2008-005

重照射された原子炉材料のための遠隔操作型 結晶方位解析装置の整備

Installation of Remote-handling Typed EBSD-OIM Analyzer
for Heavy Irradiated Reactor Materials

加藤 佳明 三輪 幸夫 高田 文樹 近江 正男
中川 哲也

Yoshiaki KATO, Yukio MIWA, Fumiki TAKADA, Masao OHMI
and Tetsuya NAKAGAWA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター
原子炉施設管理部

Department of JMTR Operation
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

June 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Testing

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

重照射された原子炉材料のための遠隔操作型結晶方位解析装置の整備

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター照射試験炉センター原子炉施設管理部

加藤 佳明・三輪 幸夫⁺・高田 文樹

近江 正男・中川 哲也

(2008 年 3 月 31 日受理)

本報告は、JMTR ホットラボ施設に設置した重照射された原子炉材料のための結晶方位解析装置に関するものである。同装置は、原子炉材料の照射後試験設備の 1 つとして世界で初めてホットセル内に設置され、IASCC (照射誘起応力腐食割れ)、IGSCC (粒界型応力腐食割れ) の研究に貢献している。その整備と運転経験についてまとめた。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 4002

+原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット

Installation of Remote-handling Typed EBSD-OIM Analyzer for Heavy Irradiated Reactor Materials

Yoshiaki KATO, Yukio MIWA⁺
Fumiki TAKADA, Masao OHMI and Tetsuya NAKAGAWA

Department of JMTR Operation, Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2008)

The remote-handling typed EBSD-OIM analyzer for heavy irradiated reactor materials was installed in the JMTR hot laboratory at the first time in the world. The analyzer is used to study on IASCC (irradiation assisted stress corrosion cracking) or IGSCC (inter granular stress corrosion cracking) in reactor materials. This report describes the measurement procedure, the measured results and the operating experiences on the analyzer in the JMTR hot laboratory.

Keywords: JMTR, Hot Laboratory, EBSD-OIM Analyzer, Remote-handling Typed, IASCC, IGSCC

⁺ Division of Fuels and Material Engineering, Nuclear Science and Engineering Directorate

目 次

1. はじめに -----	1
2. 遠隔操作型結晶方位解析装置の整備 -----	3
2. 1 遠隔操作型結晶方位解析装置の構成 -----	3
2. 2 材料試験用鉛セル No.7 の概要 -----	3
2. 3 後方散乱電子回折像(EBSD)解析法 -----	3
2. 4 方位像顕微鏡(OIM TM) -----	4
2. 5 ホットセル内への遠隔操作型結晶方位解析装置の設置について -----	4
3. 後方散乱電子回折像解析法の開発 -----	12
3. 1 従来の後方散乱電子回折像(EBSD)観察で得られる情報 -----	12
3. 2 新しい後方散乱電子回折像(EBSD)解析法の開発 -----	13
4. 結晶方位解析装置の運転経験 -----	45
4. 1 後方散乱電子回折像(EBSD)試料の作成及び注意点 -----	45
4. 2 照射電流の安定性 -----	45
4. 3 ミスオリエンテーション測定誤差の影響評価 -----	46
5. まとめ -----	48
謝辞 -----	48
参考文献 -----	48

Contents

1. Introduction -----	1
2. Installation of remote-handling typed EBSD-OIM analyzer -----	3
2.1 Constitution of remote-handling typed EBSD-OIM analyzer -----	3
2.2 Overview of lead-cell No. 7 for material examinations -----	3
2.3 Method of EBSD Analysis -----	3
2.4 OIM TM -----	4
2.5 Installation of remote-handling typed EBSD-OIM analyzer in hot cell -----	4
3. Analysis based on OIM TM -----	12
3.1 Information obtained from EBSD observations -----	12
3.2 Development of new analysis methods on EBSD -----	13
4. Operational experiences of the EBSD-OIM analyzer -----	45
4.1 Preparation of the specimens for EBSD analysis and notations -----	45
4.2 Stability of filament current -----	45
4.3 Influence evaluation of measurement errors -----	46
5. Conclusions -----	48
Acknowledgement -----	48
References -----	48

1. はじめに

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターの材料試験炉（JMTR）に付設されたホットラボ施設⁽¹⁾は、原子炉で照射した強い放射能を持つ試料の照射後試験を行う施設であり、照射済みキャップセルの解体や照射済み燃料等各種試験を行うコンクリートセル及び顕微鏡鉛セルがある。また、照射済み材料等の引張試験、IASCC 試験、疲労試験及び破壊靱性等を行う鉄セルと高温高圧水中 SSRT 試験、超高温引張試験、衝撃試験、クリープ試験等が行われる鉛セルがあり、これら強度試験後の破面を観察、解析するための設備もある。

ホットラボ施設では JMTR で中性子照射した原子炉材料の破面解析を行うため、走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope、SEM）をホットセル内で使用するため、遠隔で操作できるように改造し、Fig.1.1 に示す材料試験用鉛セル No.7 に設置して運用してきた。これにより、照射済み材料の強度試験（引張試験等）後の破面観察が可能になり、軽水炉構造材料の IASCC（照射誘起応力腐食割れ）、IGSCC（粒界型応力腐食割れ）の発生メカニズムの研究に役立てられてきた。なお、SEM 画像の判定にあたっては、これまで熟練技術者が実施してきた。

最近では、走査型電子顕微鏡を用いた材料強度の観測技術の向上により、観測被写体の後方散乱電子を CCD カメラで観測できるようになり、さらに、また結晶構造の解析においては、コンピュータによる画像処理技術が向上し、ソフトウェア（OIM™（Orientation Imaging Microscope; 方位像顕微鏡））により、粒界の特徴及び性格が自動判定できるようになっている。

そこで、軽水炉構造材料の高経年化対策に寄与することを目的として、軽水炉構造材料の IASCC（照射誘起応力腐食割れ）、IGSCC（粒界型応力腐食割れ）の発生メカニズムをさらに詳しく調査できるよう、2001 年に、これまで整備してきた走査型電子顕微鏡に方位像顕微鏡を追加した遠隔操作型結晶方位解析装置を整備した。

本装置は、後方散乱電子回折像(EDSD (Electron Back Scattering Diffraction pattern))の取得を可能とし、その画像を熟練技術者でなくとも容易に結晶方位の判定ができるよう観測画像信号を OIM™ により処理できるようにしている。

本装置を世界で初めてホットセル内に整備したことにより、従来は実施することのできなかつた中性子照射され強い放射能を持つ軽水炉構造材料等の試料の結晶方位解析ができるようになった。

本報告書は、世界初となる遠隔操作型結晶方位解析装置のホットラボへの設置、運用等について報告するものである。

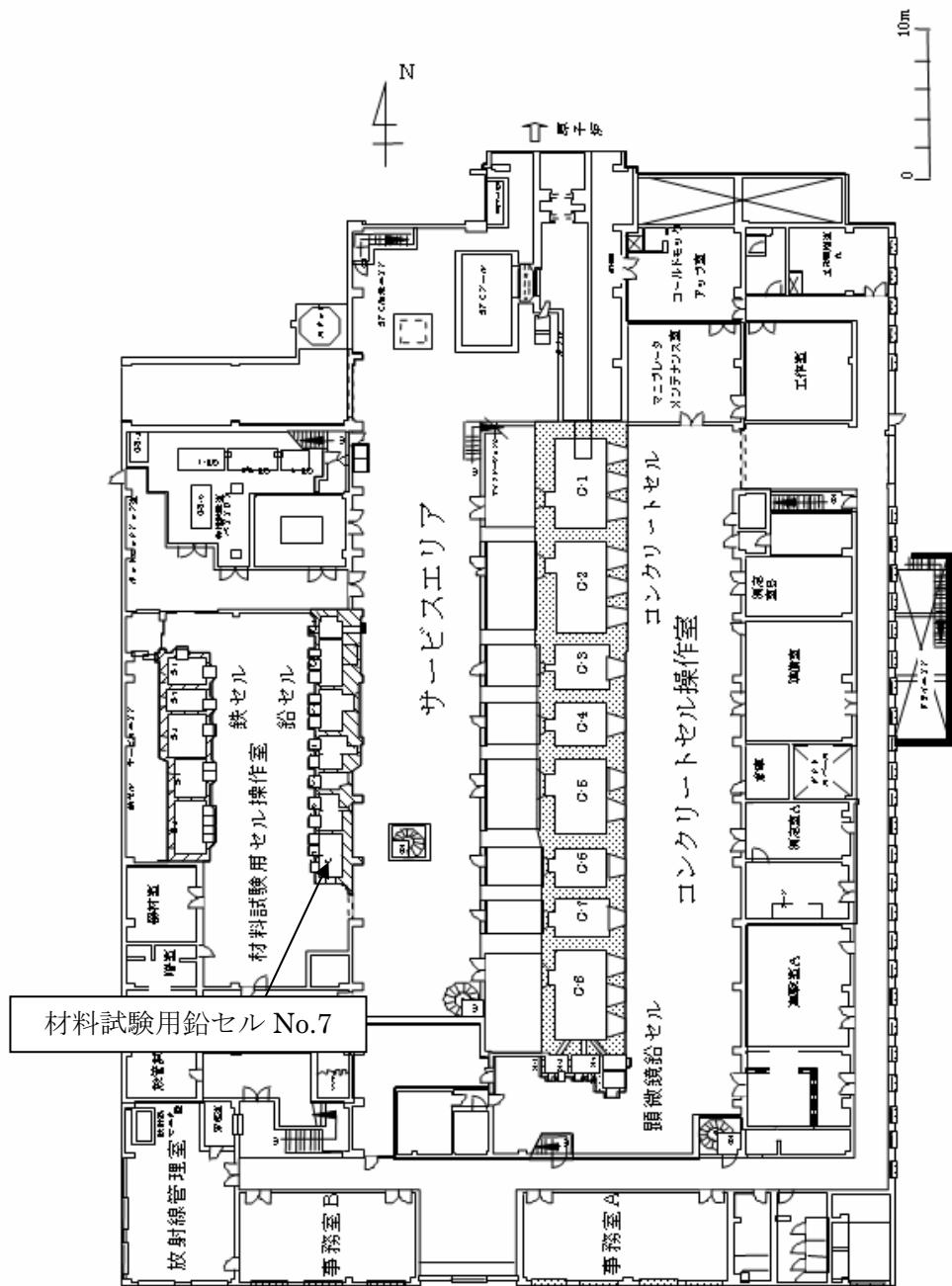


Fig. 1.1 ホットラボ平面図

2. 遠隔操作型結晶方位解析装置の整備

2.1 遠隔操作型結晶方位解析装置の構成

遠隔操作型結晶方位解析装置の概略を Fig.2.1 に示す。本装置は、走査型電子顕微鏡本体部、走査型電子顕微鏡観察操作部、画像収集・データ処理解析部から構成される。そのうち方位像顕微鏡は、操作型電子顕微鏡の仕様を Table 2.1 に、後方散乱電子回折像(EBSD)検出器、検出器コントロール盤及びデータ処理解析装置で構成される。方位像顕微鏡(OIMTM)のハードウェアとソフトウェアの仕様⁽²⁾を Table 2.2 に示す。

後方散乱電子回折像検出器は EBSD を検出するための蛍光スクリーンと高感度低速スキャン CCD カメラ及び蛍光スクリーンを SEM の試料室へ移動させるためのモータードライブ機構から構成される。検出器コントロール盤は、SEM に取付けた検出器の検出部を SEM 試料室内の試料に接近させるための操作をセル外から行うためのものである。データ処理解析装置は検出器で連続的に検出される菊池パターン (EBSD でバルク試料に電子線が入射したときに得られる電子回折パターンのこと) を本装置に取り込み測定、解析するものである。

2.2 材料試験用鉛セル No.7 の概要

遠隔操作型結晶方位解析装置を設置した材料試験用鉛セル No.7(L-7)は、Fig.2.2 に示すように、幅 2.7m 奥行き 1.25m、高さ 1.4m (セル内寸法) 鉛遮へい厚さ 15cm であり、硬質鉛+鉄枠で構成され、M7 型マニプレータ 1 台、トングマニプレータ 3 台を装備し、試料等を搬入、搬出するためのゲートがある。なお、本セルの放射能最大取扱量は 37GBq となっている。

また、本セルは他のセルとは異なり背面扉を持たず、セル内に立入る場合、セル壁面が移動する構造 (移動壁) になっており、セル及び機器等のメンテナンスは、この移動壁を開放して行う。

2.3 後方散乱電子回折像(EBSD)解析法

EBSD 解析法は、SEM の鏡筒内にセットした試料に電子線を照射した時に発生する後方散乱電子回折像により、金属等の多結晶材料を構成する個々の結晶粒の方位を解析する手法である。EBSD を検出する装置は、SEM に組み合わせ、試料に照射した電子ビームを走査しながら得た菊池パターンを解析することで、ミクロな領域の結晶方位や結晶系を同定する。EBSD 解析は、広い測定範囲 (例えば 2 mm × 2 mm) の平均情報が得られる X 線回折と異なり空間的な分解能が高いことから局所的 (例えば 100 nm × 100 nm) な結晶粒毎の情報を得ることができる。

EBSD 解析法は、ECP* (Electron Channeling Pattern) 解析法に比較して、後方散乱電子を利用する点は同じだが、特殊なハードウェアが不要であること、空間分解能が高いこと及び短時間に測定できるという利点がある。

* : ECP (Electron Channeling Pattern) 法は、走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて結晶解析を行う手法として開発されたもので、その原理は SEM の試料上的一点に向かって順次角度を変えて電子線ビームを照射し、その時の 2 次電子を捉えて画像として測定するもので、装置としては特殊な電子光学系を備える必要がある他、測定できる結晶面の空間分解能が粗く、また測定に要する時間が数分から数 10 分というオーダーになるという欠点があった。

2.4 方位像顕微鏡(OIMTM)

OIMTM(Orientation Imaging Microscope)では、SEM 試料室中で試料を 70° 傾斜させてセットし、各測定位置について、電子線を数ミリ秒停止しながら走査し、発生する菊池パターンを瞬時に解析することにより、結晶方位や結晶系を決定する。この測定では、1 秒間に 10~30 点程度処理することができる。この測定を連続的に行うことで方位マッピング像のデータとなり、さらに粒界構造、結晶粒分布、極点図等のデータとして定量的な解析も行うことができる。

2.5 ホットセル内への遠隔操作型結晶方位解析装置の設置について

既設の SEM に後方散乱電子回折像(EBSD)検出器を付加し、この検出器を操作するためのコントロール盤及び EBSD 信号を取り込み解析するためのデータ処理解析装置を付加したものが遠隔操作型結晶方位解析装置である。

本装置のホットセル内への設置にあたっては、次に示す手順で行った。なお、SEM に取付けられた EDSD 検出器の概略図を Fig.2.3 に示す。

- 1) EBSD 検出器の CCD 素子の放射線損傷を軽減する目的で、蛍光スクリーンとレンズ間に薄膜の鉛ガラスを設置した。
- 2) 放射線の外部への漏洩を防ぐため、EDSD 検出器の接続ケーブルのセル外取出し部に鉛遮蔽プラグを設置した。
- 3) 後方散乱電子をより多く得るには、試料と電子銃の距離が近くなるほど有利であるが、試験片が大きい場合には観察部の配置の仕方によっては、試料が電子銃に接触するため観察場所の移動ができなくなるため、接触しないよう、電子銃対物レンズ部と試料の間隔を 15mm に設定した。Fig. 2.4 に OIMTM と試料の配置を示す。
- 4) EBSDにおいては、菊池パターンを発生させるため、試料そのものを検出器に対し 70° 傾斜させてセットする必要があり、一般に予め 70° にカットされた試料台に貼り付ける方法が用いられている。しかし、取り扱う試料は、試料表面を研磨するため導電性樹脂で固めた円筒状のものであることから、試料そのものを 70° に傾斜させなければならず、そのため、試料台ごと 70° 傾斜させることができる専用のホルダーを作成した。試料ホルダーの設計図面を Fig.2.5 に示す。また、Fig.2.6 に試料台と試料ホルダーの写真を示す。
- 5) 解析上の要求事項として、試料と EBSD 検出器の距離も重要なパラメータである。結晶方位を正確に測定するには比較的広い領域の菊池パターンを測定する必要があるが、EBSD 検出器を試料から遠く離れた位置に設置すると、反射電子の密度が小さくなり、菊地パターンの画像検出が困難となる。そのため、試料ホルダーの設計においては、試料と EBSD 検出器の距離が最適になるに試料セット位置を調整した。

Table 2.1 走査型電子顕微鏡の性能及び仕様

本体部	加速電圧	最低加速電圧 : 0.5kV 最高加速電圧 : 30kV
	照射電流	$10^{-12} \sim 10^{-6}$ A
	二次電子像分解能	4.0nm (加速電圧 30kV, WD=8mm)
	電子銃	高輝度長寿命型電子銃 (LaB ₆ カソード)
	電子バイアス	連続可変
	レンズ系	3段
	軸合わせ方式	電磁式
	対物絞り	同径穴 3個、可動式、セルフクリーニング機能付
	非点収差補正	8軸電磁 X-Y 方式
	電子線検出器	二次電子線及び反射電子検出器
特殊試料ステージ	最大試料直径	125mm φ
	作動方式	ユーセントリック型
	水平移動	X=80mm, Y=40mm
	試料傾斜	-10° ~+90°
	回転角度	R=360° (エンドレス)
	試料駆動装置	電動モーター駆動式
観察操作部	観察像の種類	二次電子像、反射電子像
	倍率	最低倍率 15 倍、最高倍率 200,000 倍
	CRT	観察用及び写真撮影用各 1 本
	写真撮影装置	4 × 5 インチフィルム撮影用 1 式
	自動調節機能	コントラスト/明度、焦点合せ、非点収差補正
	走査モード	PIC/TV(面走査)、LSP (線走査)
	走査速度	観察用 : 0.27, 0.58, 2.88, 9.6s/frame 写真撮影用 : 28.8, 86.4s/frame
走査像撮影系	露出計	ラピッドエクスポージャ機構
	シャッター	オートシャッター
	露出モニター	液晶ディスプレーに表示
真空排気装置	排気方式	全自動高速排気型
	制御方式	電磁弁方式
	到達圧力	約 7×10^{-4} Pa
	排気ポンプ	油回転ポンプ 100Lit/min ターボ分子ポンプ 300Lit/min (磁気浮上型) イオンポンプ 20Lit/min
	排気時間	約 3 分
	安全系	- 停電、真空低下等に自動対応

Table 2.1 走査型電子顕微鏡の性能及び仕様（続き）

高精細画像 収集装置	走査方式	外部入力直接制御
	取込画素数	1280×960, 2560×1920, 5120×3840, 10240×7680(pixels)
	画像階調	4096 階調
	同時取込 チャンネル数	3ch
	出力画像ファイル 型式	BMP, TIFF

Table 2.2 方位像顕微鏡(OIM™)の仕様

EDSD 検出器（スロースキャン CCD カメラシステム）	
検出器本体	スロースキャン CCD カメラシステム
画像転送方式	IEEE1394 方式
パターン取込立体角	70° ~
蛍光スクリーン径	40mm φ
CCD 素子保護対策	蛍光スクリーン ⇔ レンズ間に鉛ガラスを設置
検出器コントローラー	
駆動方式	モーター駆動（検出位置と退避位置を移動）
OIM™ Data collection ソフトウェア	
検出器制御	ビンニング、ゲイン、ブラックレベル、露出時間 オートコントラスト、バックグラウンド除去
走査ピクセル	六角形ピクセルスキャン
走査領域	キャプチャーした SEM 像の任意の走査範囲を指定 (複数の領域の指定が可能)
傾斜角補正	試料傾斜角を自動補正してデータを収集
指数付の精度評価	Hough 変換を用いた 3 バンド法による自動指数付及びマニュアルによる指数付

Table 2.2 方位像顕微鏡(OIMTM)の仕様（続き）

材料データベース	TSL データベースより選択、未登録ものは結晶構造データをもとにメニュー形式で作成可能
保存データ	各測定ポイントの X・Y 座標、オイラー角 Image Quality, Confidence Index, Phase, SEM 像強度 Hougha ピーク, EBSD パターン
OIM TM Analysis ソフトウェア	
グレースケール表示 (マップ)	Image Quality(IQ), Confidence Index(CI), Grain Average IQ, Grain Average CI, Grain Size(GS), Taylor Factor, Schmid Factor
カラー表示 (マップ)	Image Quality(IQ), Confidence Index(CI), Grain Average IQ, Grain Average CI, Grain Size(GS), Inverce Pole Figure(IPF) Grain Orientation Spread, Grain Average Misorientation Phase, Taylor Factor, Schmid Factor
結晶粒界	傾角、軸方位、軸・回転角、対応粒界(CSL)、橢円近似による粒界表示
プロット「ODF 表示」	極点図、逆極点図、オイラー角とロドリゲスベクトル空間でのドット表示・強度表示・等高線表示 (強度計算は球面調和関数法と不連続分割法)
プロット「MDF 表示」	軸・回転、オイラー角とロドリゲスベクトル空間でのドット表示・強度表示・等高線表示 (強度計算は球面調和関数法と不連続分割法)
チャート	Image Quality(IQ), Confidence Index(CI), Grain Average IQ, Grain Average CI, Grain Size(GS), Grain Orientation Spread, Grain Average Misorientation, 結晶の方向と方位の分布、相境界の分布、Taylor Factor, Semid Factor, 結晶粒界傾角の分布、対応粒界(CSL)の分布、Pole Plot, Texture Profile, 方位差プロファイル
ファンクション	データのマージ（つなぎ合わせ）、データの抽出（マップ/プロット/チャートの条件から任意の抽出が可能） クリーンアップ、データ回転、予め作成しておいたテンプレートによる一括データ処理が可能

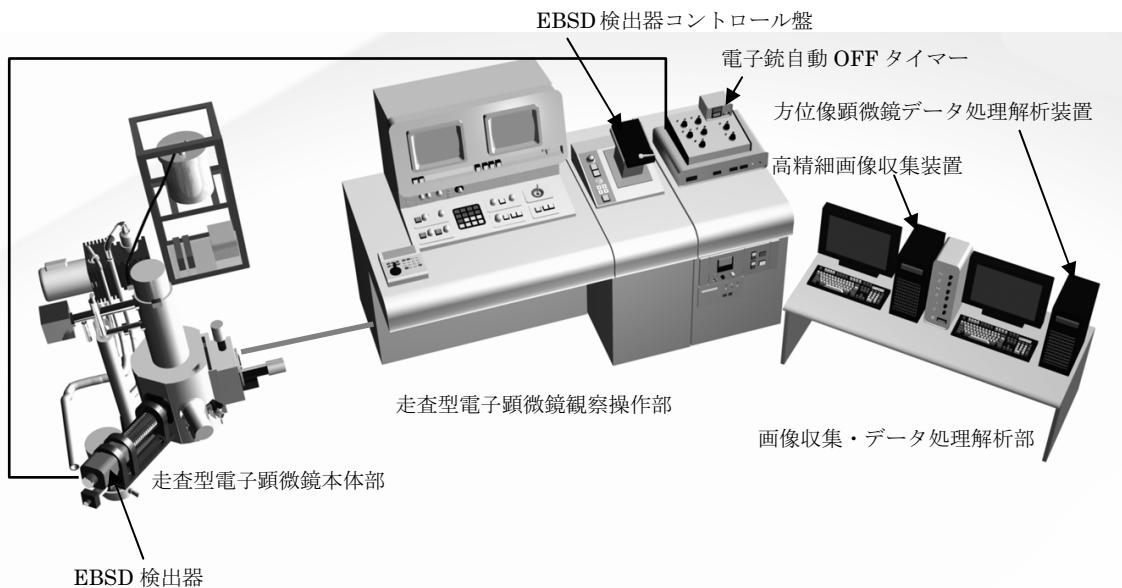


Fig.2.1 遠隔操作型結晶方位解析装置の概略

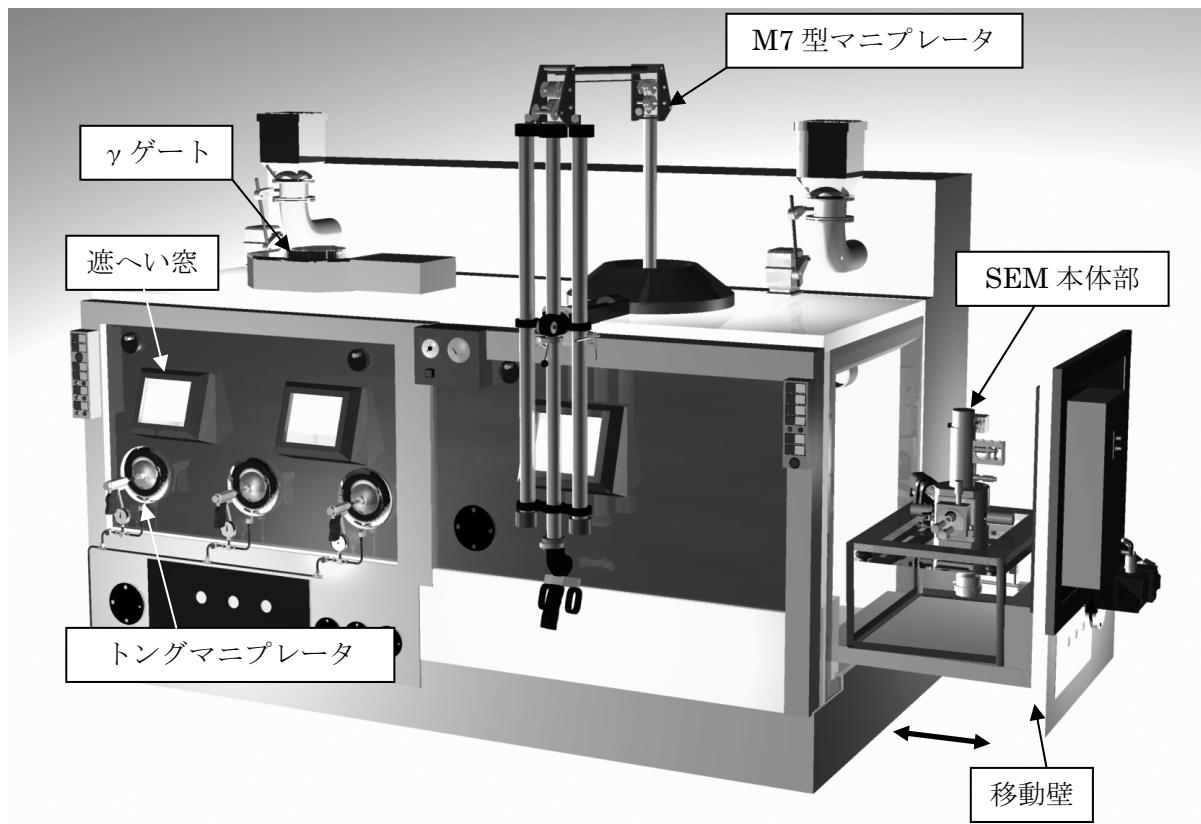


Fig.2.2 材料試験用鉛セル No.7 の概要

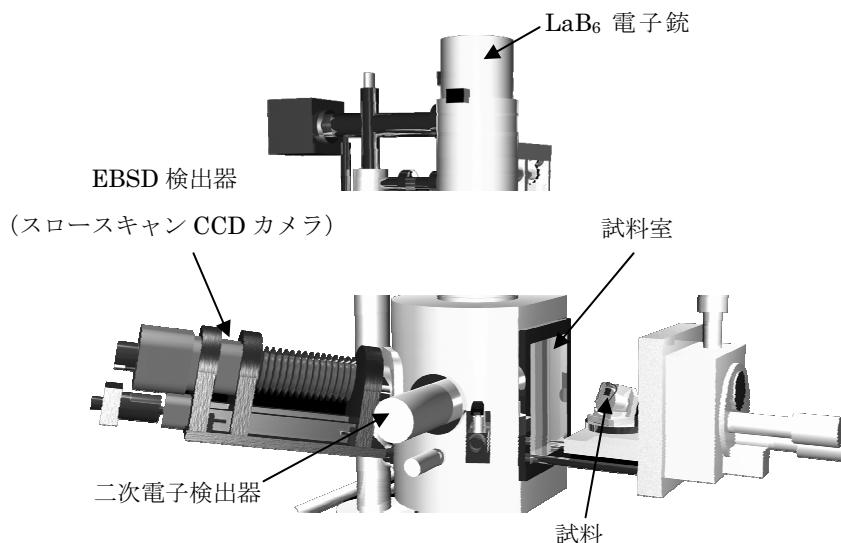


Fig.2.3 SEM に取付けられた EDSD 検出器の概略図

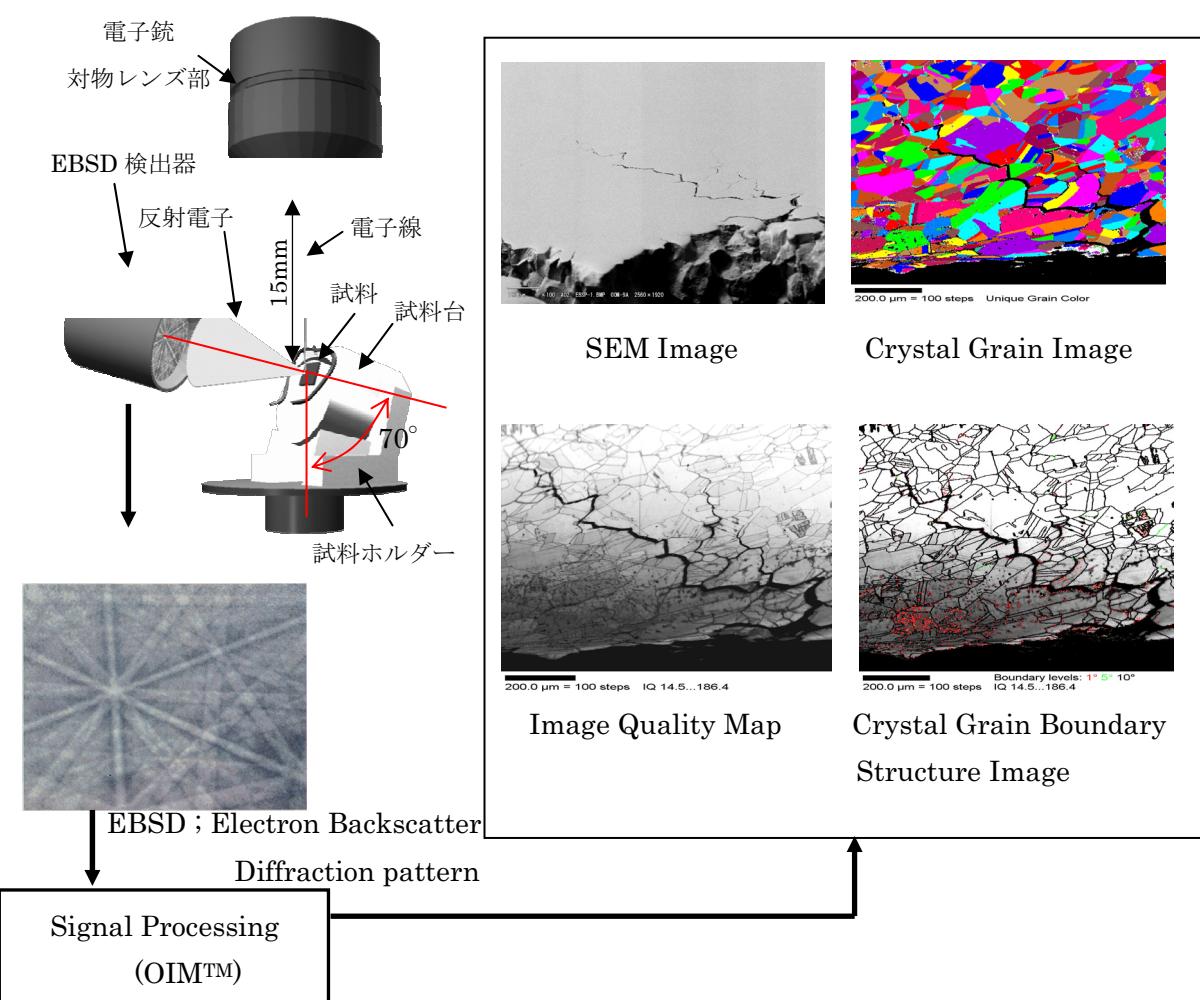
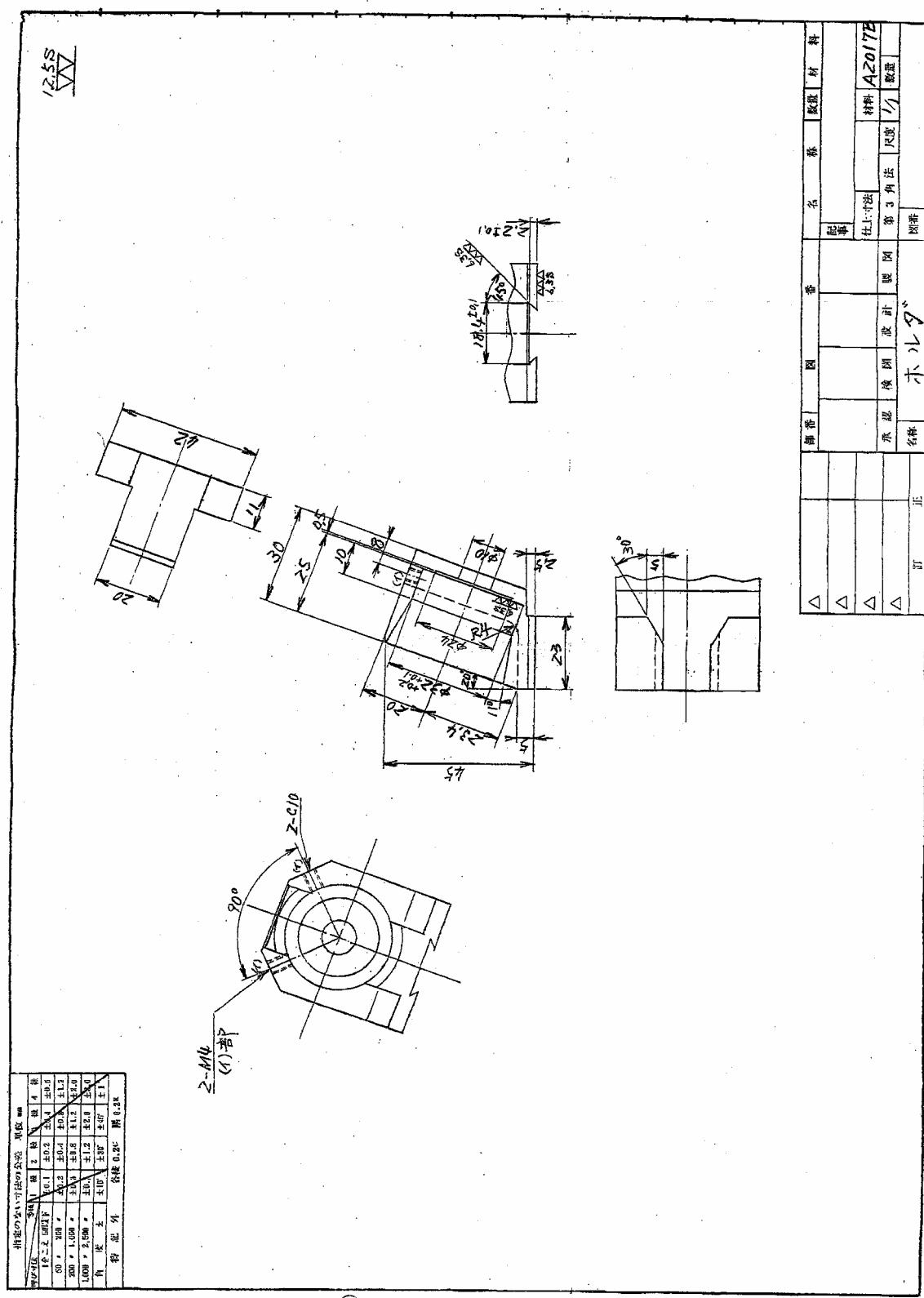
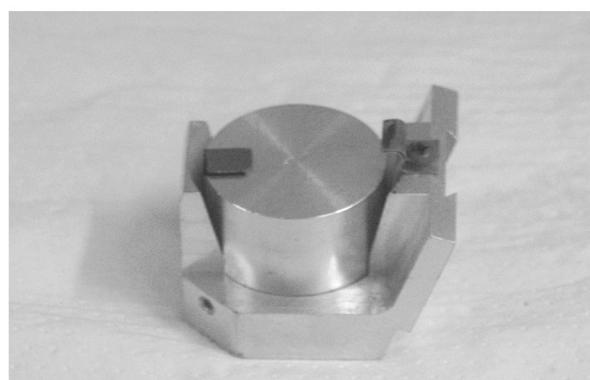
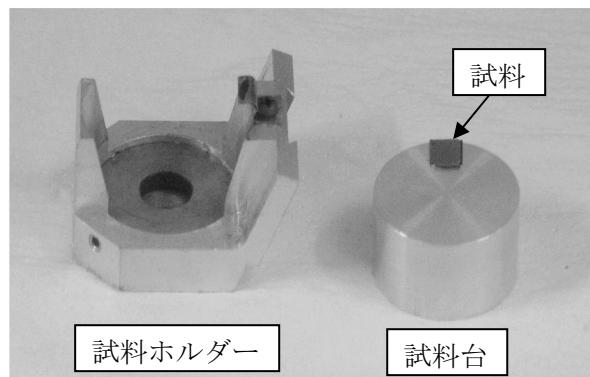
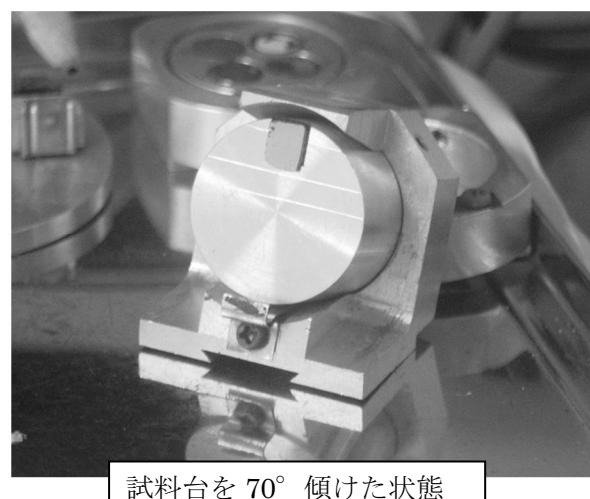


Fig.2.4 OIMTM と試料の配置





試料ホルダーに試料台をセットしたところ



試料台を 70° 傾けた状態

Fig.2.6 試料台及び試料ホルダーの写真

3. 後方散乱電子回折像解析法の開発

3.1 従来の後方散乱電子回折像(EBSD)観察で得られる情報

EBSD 観察で得られるデータを次に示す。また、2 章で整備した装置により多結晶試料（標準試料）を測定した結果を Fig.3.1 に示す。

(1) Image Quality 像

Image Quality 像は、Hough 空間上で得られたスポットの強度をその点の Image Quality 値 (IQ 値) としているため、パターンが鮮明であれば IQ 値は高くなりその点は明るく表される。従って IQ マップは、試料中の残留歪等を定性的に表示する。IQ 値に関連する要因として、試料自身が加工等による歪を持つ場合、表面の異質相（コンタミ、酸化皮膜等）がある場合、結晶粒界等で 2 つの粒にまたがった場合及び研磨歪等で試料表面の結晶性が悪くなっている場合などがある。

(2) 方位マッピング像 (IPF マッピング)

方位マッピング像は、逆極点図の 3 つの頂点に赤緑青の 3 原色を配置し逆極点図上の方位によって、この 3 原色の混色としてその点の色を決定していく方法である。この像は、各ピクセルの色が絶対値としての方位の情報を持っているため、方位の分布を概念的に把握しやすい。そのため、試料中の結晶粒が連續的に変形しているような場合においても連續的な色の変化として表示される。なお、この方位はきわめて表面層の情報であり、試料内部の情報は含まれていない。

(3) 結晶粒マッピング像

結晶粒マッピング像は、結晶粒を認識するにあたり、基準となる方位差を指定し、隣り合うピクセル同士の方位差が指定された基準値より大きければ異なる結晶粒として異なる色をつけるものであり、サブグレインの分布状況を見る場合に有効である。

(4) 結晶粒界像

結晶粒界像は、結晶粒を認識するにあたり、基準となる方位差を指定し、隣り合うピクセル同士の方位差が指定された基準値より大きければそこに粒界があると認識する。

(5) 極点図、逆極点図

極点図とは、ある結晶面がサンプルの中でどのような配向を持っているかを表した図であり、極ステレオ投影図に、注目すべき方位（これを極と呼ぶ）がどのような強度で分布しているかをプロットしたものである。従って、極点図を見れば、サンプル表面に対して注目する結晶面がどう配向しているかの情報が得ることができる。

逆極点図では、結晶方位データが 1 つのプロットとして示され、LD, TD と ND の 3 つの方向か

ら見た方位を組み合わせることで、1つの結晶方位を特定することができる。

3.2 新しい後方散乱電子回折像(EBSD)解析法の開発

上記の OIM™ に附属されているデータ解析に加え、日本原子力研究開発機構では OIM™ の結晶のミスオリエンテーションをミクロな空間分解能でマクロな領域まで測定することができるという特徴を利用した新たな2種類の解析方法を開発した。

- (1) き裂などが進展した両側の結晶のミスオリエンテーションの測定により、粒界型応力腐食割れ**が進展した粒界性格の分布などを解析する方法（粒界性格分布の測定方法）。

**：軽水炉構造材などで、長期間使用していることにより材料が劣化し、高温高圧の冷却水による腐食作用で、粒界に沿ってき裂が進展する割れである。

- (2) 結晶粒内のミスオリエンテーションを細かい測定間隔で測定することにより、すべり変形などが生じることで格子が僅かに歪むことと、測定されるミスオリエンテーション値と関連付け、き裂先端などでのひずみをミクロな空間分布で解析する方法（局所的なひずみの測定方法）。

以上の2種類の解析手法を用いた解析例を次に示す。

3.2.1 粒界性格分布の測定方法による測定及び結果の例

結晶粒界性格を得るために任意の測定間隔でミスオリエンテーションを測定する。その後、研究者の定義によりランダム粒界、対応粒界、双晶、小傾角粒界などを色分けした結晶粒界像を画像データとして作成する。

この像と Image Quality 像及び試験片各方位からの方方位マッピング像を比較し、汚れや研磨傷などによる実際の結晶粒以外の境界を、画像編集ソフトを用いて画像データ上から消す。そして、残った結晶粒界の長さを、専用の画像解析プログラムで測定する。その長さの相対比を用いて、粒界性格分布などを求める。

SUS304 鋼の粒界性格分布を測定した結果⁽³⁾を Fig. 3.2 に示す。Fig. 3.2(a)～(e)に示した測定領域の結晶粒界像の生データからは、多くの亜粒界と汚れや研磨によるひずみで生じた大きなミスオリエンテーション箇所を観察することができる。

Image Quality 像及び方位マッピング像から判断した結晶粒界部のみを抽出した像を Fig. 3.2(f)～(j)に示す。これらの図において、結晶粒界長さを測定することにより、Fig. 3.2(k)及び(l)に示すように領域毎の結晶粒界性格の分布を得ることができる。また、Fig. 3.3 に示す亜粒界を含む結晶粒界分布の結果から、SUS304 では双晶境界 (Σ 3 粒界) の割合が大きいことが分かる。一方、亜粒界を除いた場合にも粒界に Σ 3 粒界が観察されるが、その割合は少ない。

Fig. 3.2(m)及び(n)には、測定した領域で重み付けを行い平均化した粒界性格分布を示す。これらの分析結果から、1mm × 3mm 程度の視野での観察では平均的な粒界性格分布が得られないことが分かった。

SUS316 鋼の粒界性格分布⁽³⁾を Fig. 3.3 に示す。SUS304 の場合と同様に双晶境界が亜粒界と

して多く観察されることがわかる (Fig. 3.3(a)及び(b))。

亜粒界を含まない結晶粒界の粒界性格分布については、Fig. 3.3(c)に示すように大部分がランダム粒界であるということが分かる。

Fig. 3.2(n)と Fig. 3.3(c)の比較から、SUS304 と SUS316L では結晶粒界における Σ 3 粒界及び対応粒界 (Σ 5 ~ Σ 27 の粒界) の割合が異なる可能性が考えられるが、これは侵入型元素である炭素と置換型元素であるモリブデンが溶体化熱処理時の再結晶化のときに転位や粒界の移動に影響を与えた結果であり、EDSD 解析法を用いることで合金の添加元素の影響を定量的に評価することが可能である。

中性子照射した SUS304 鋼において、粒界型応力腐食割れが進展した粒界の性格分布を測定した例⁽³⁾を Fig. 3.4 に示す。なお、き裂が進展した粒界の測定に当たっては、き裂の開口によるミスオリエンテーションの誤差の影響を少なくするため、開口の小さいき裂の箇所で粒界性格分布を測定した。

Fig. 3.4(a)～(c)にはそれぞれ、照射後試験によりき裂を進展させた試験片と照射下試験によりき裂を進展させた試験片で測定した粒界性格マップを示す。このマップから、き裂は主にランダム粒界を進展していることが分かった。

Fig. 3.4(d)には、Fig. 3.2(n)に示したマトリックスの粒界性格分布と照射後試験及び照射下試験でき裂を進展させた粒界の粒界性格を比較した例を示す。き裂は、マトリックス中の小傾角粒界 (Σ 1 粒界) の割合よりも大きい割合で、小傾角粒界を進むことが分かった。しかし、粒内型き裂として進展している部位も観察されることから、小傾角粒界を優先して進展しているか否かの判断をする場合には注意が必要である。一方、 Σ 3 粒界や対応粒界をき裂が進展している割合がマトリックスに比べ低く、き裂はランダム粒界を優先的に進展していることが分かる。

照射後試験で進展させたき裂と照射下試験で進展させたき裂を比較すると、試験時の仮の応力拡大係数が小さい場合には、照射後試験と照射下試験で同様であることが分かった。照射下試験では大きな仮の応力拡大係数でもき裂を進展させており、この場合には粒界性格分布が仮の応力拡大係数が小さい場合と異なることが分かった。

一般に、粒界性格が小傾角粒界 (Σ 1 粒界)、双晶境界 (Σ 3 粒界)、対応粒界 (Σ 5 ~ Σ 27 粒界)、ランダム粒界と変わる毎に、粒界での析出や偏析が生じやすくなり、その結果、粒界近傍での化学組成濃度が変化しやすいことが知られている。例えば、ステンレス鋼の応力腐食割れの原因として知られている熱鋭敏化熱処理により、粒界で Cr が Cr 炭化物として析出し、その周囲で Cr 濃度が低下するため、耐食性を担保している Cr 濃度が粒界でのみ局所的に低下することで粒界の耐食性が低下し、粒界型応力腐食割れが起こりやすくなると考えられている。また、逆カーペンドール効果による照射誘起偏析により、粒界での Cr 濃度が粒界から数 nm の領域で非常に局所的に低下すると、粒界の耐食性が劣化し、照射誘起応力腐食割れが起こりやすくなると考えられている。

本解析手法を用いて粒界性格を調べることで、これらの機構の役割を検討することとなり、軽水炉構造材料の高経年化対策におけるメカニズム検討などに寄与できる。

3.2.2 局所的なひずみの測定方法とその結果の例

結晶の塑性変形により局所的すべり変形が生じる。そのすべり変形を挟む結晶粒内の部位間ではミスオリエンテーションが生じるため、その間のミスオリエンテーションを適切な測定間隔で測定することで、塑性変形量に関連した値が得られると考えられる。

そこで、一定値まで塑性変形させた SUS316L 鋼のミスオリエンテーションを測定し、塑性変形させた試験片の透過型電子顕微鏡観察を行い、すべり変形の両側での結晶の回転を観察しその量と EBSD 測定間隔の関係を調べた。これらの結果を評価し、塑性変形量とミスオリエンテーション量を関連させる構成方程式を作製し、局所的なひずみを測定した。

288°Cで低ひずみ速度 ($2 \sim 3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$) で塑性変形させた SUS316L を用いてミスオリエンテーションを測定した結果⁽⁴⁾を Fig. 3.5 に示す。塑性変形量が大きいほどミスオリエンテーションを生じる結晶部が増える様子が確認できた。また、塑性変形量が大きいほど、大きなミスオリエンテーション部（青線）が増えている。

これらのミスオリエンテーションが、結晶粒のどの様な変形挙動と対応しているかを Fig. 3.6 に示した。塑性変形量の増加と共に、転位のすべり変形やタングル化、転位セルの発達などが変化している様子が見られる。

すべり線を挟んで結晶が回転している様子を Fig. 3.7 に示す。この様な回転角の変化は、FCC 金属のようにすべり面が多い金属では測定面に対して比較的精度良く取得することが可能と考えられる。

これらの結果から、ミスオリエンテーション量と塑性変形量の関係をプロットした結果を Fig. 3.8 に示す。様々な測定点間のミスオリエンテーションを比較した結果、第3最隣接位置間のミスオリエンテーションを測定することで、塑性変形量の換算が行えることが分かった。

この場合は、測定点間隔は $2 \mu\text{m}$ であり測定は Hexagonal grid について行ったため、実質 $6 \mu\text{m}$ の測定点間隔で取得したミスオリエンテーションと同様であるが、測定点数を多くすることが重要であるため $2 \mu\text{m}$ の測定点間隔で測定した場合の方が精度に優れることが分かった。

この例から得られるミスオリエンテーションを塑性変形量に変換する構成方程式は下記の式で表される。

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{M - M_0}{0.0493}$$

$\Delta\varepsilon_p$: 塑性ひずみ変化量 (%)

M_0 : ひずみ量が既知の部位での misorientaion (°)

M : 測定部位での misorientaion (°)

注) 研磨加工傷による誤差を軽減するために、 $0 \sim 5^\circ$ misorientation の範囲にある測定点のみを用いて構成式を作製した。尚 $0 \sim 5^\circ$ 範囲にある測定点は、全測定点の約 92%以上であった。

Fig. 3.9 には、中性子照射した SUS304 鋼に進展させた応力腐食割れき裂の先端でのひずみ測

定結果を示す。き裂周囲で大きなミスオリエンテーションが生じているのが分かる。また、その他のミスオリエンテーションが大きい箇所では、Image Quality 像から汚れなどが生じている結果であることが分かる。

これらを考慮することにより、き裂の周囲でひずみが大きいことが分かる (Fig. 3.9(e))。但し、ここでは非照射材の塑性変形材で得た結果について、Fig. 3.9(f)及び(g)で比較すると、き裂の先端部を詳細に解析することにより、測定点間隔が小さい場合 (測定点間隔 $0.3 \mu\text{m}$) にミスオリエンテーションが大きくなることが分かる。これらの結果から、き裂先端での塑性変形挙動を定性及び定量評価できることが分かる。

この様に、き裂先端の変形挙動を比較的広範囲 ($1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 程度) に小さな空間分解能 ($0.3 \mu\text{m}$) で評価できることで、応力腐食割れなどのき裂進展挙動の機構論的研究を行うことができる。

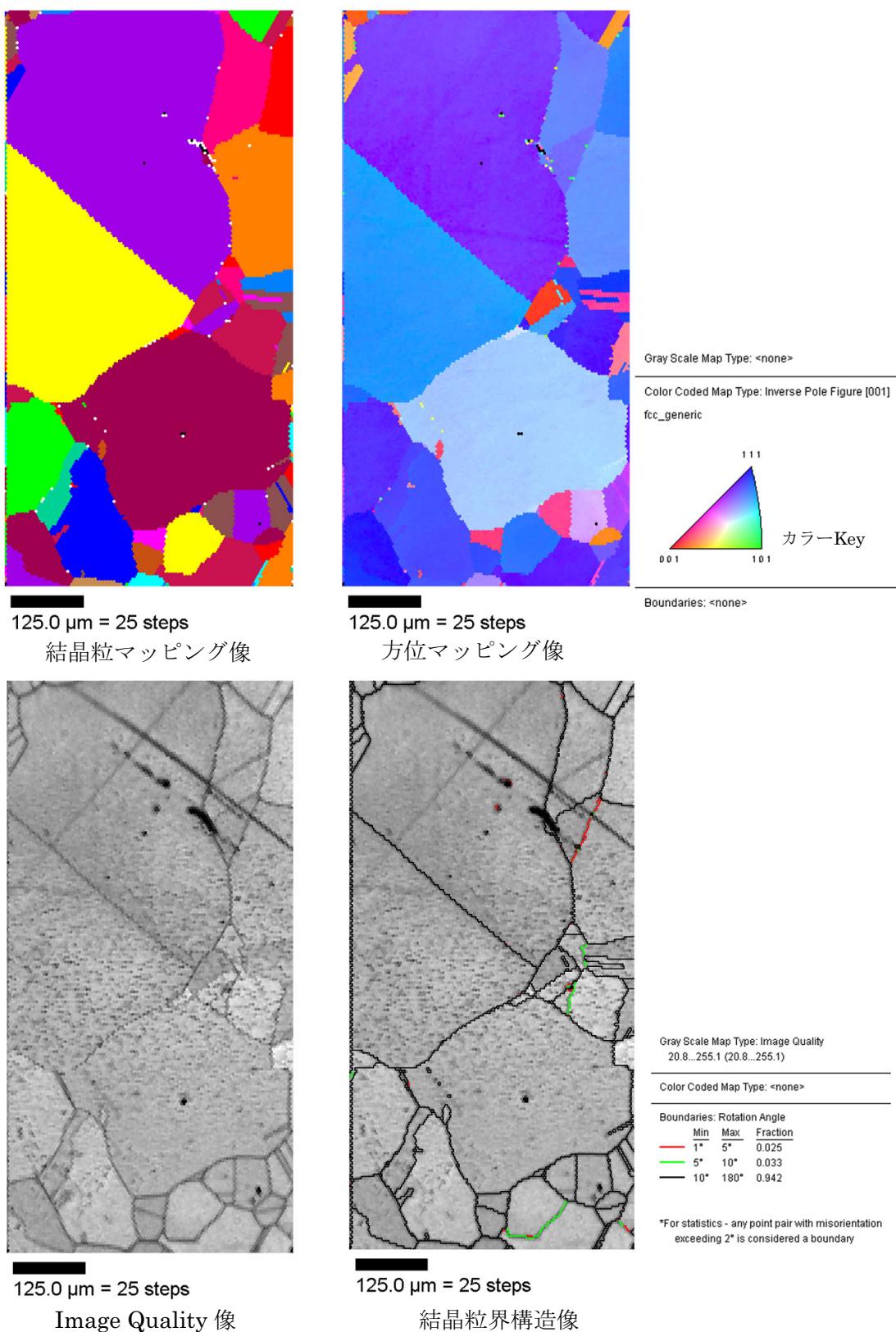
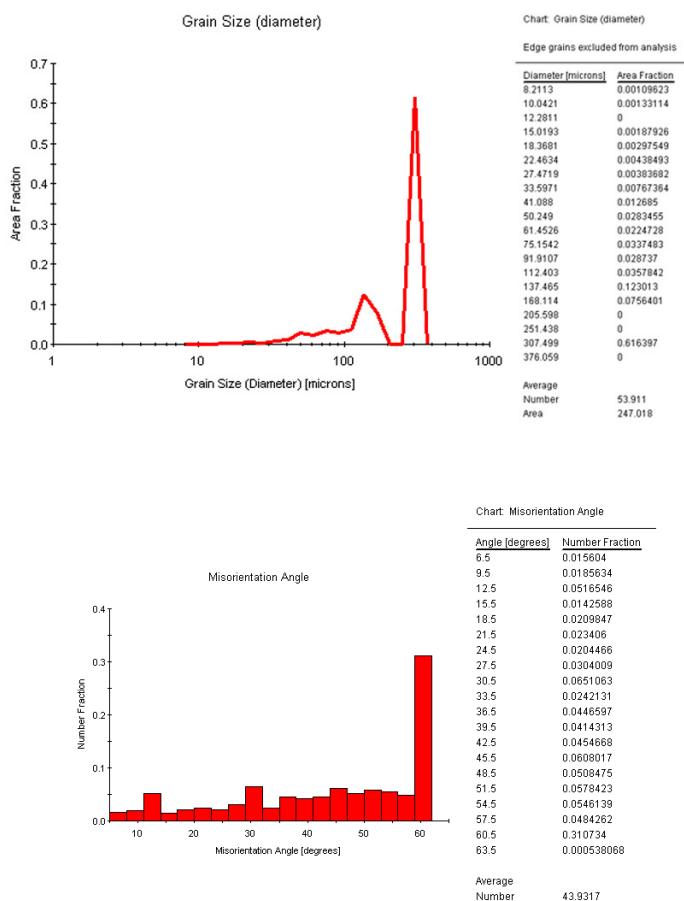
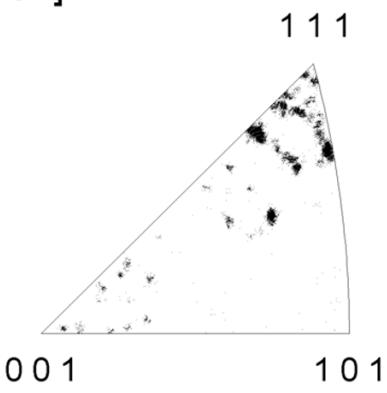
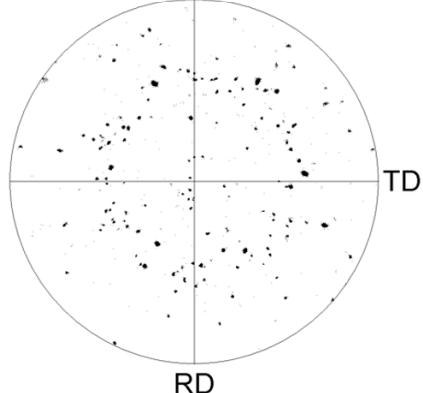


Fig.3.1 多結晶試料による取得データ例

**[001]**

逆極点図

001

極点図

Fig. 3.1 多結晶試料による取得データ例（続き）

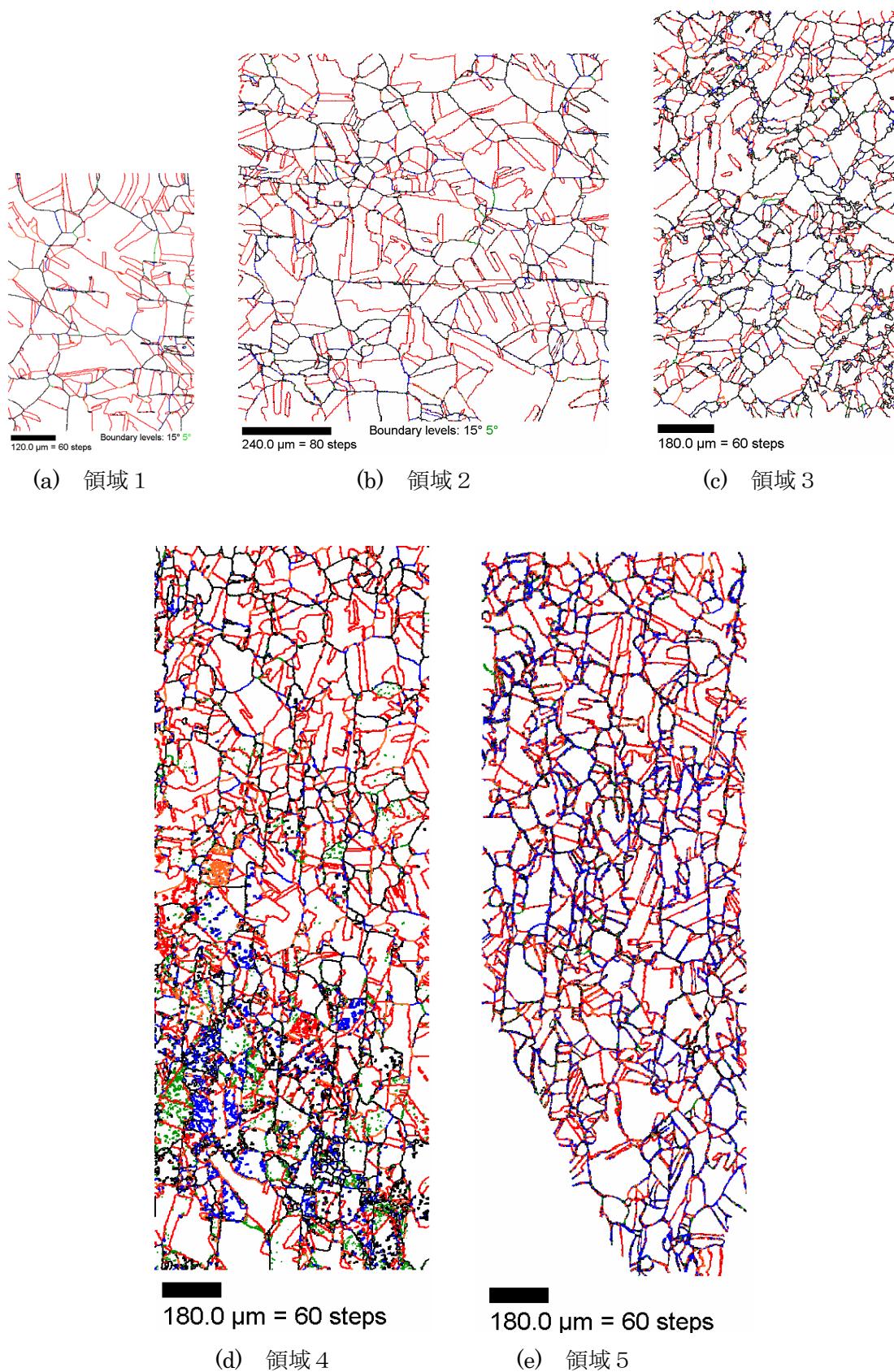


Fig. 3.2 SUS304 鋼の粒界性格分布測定例

This is a blank page.

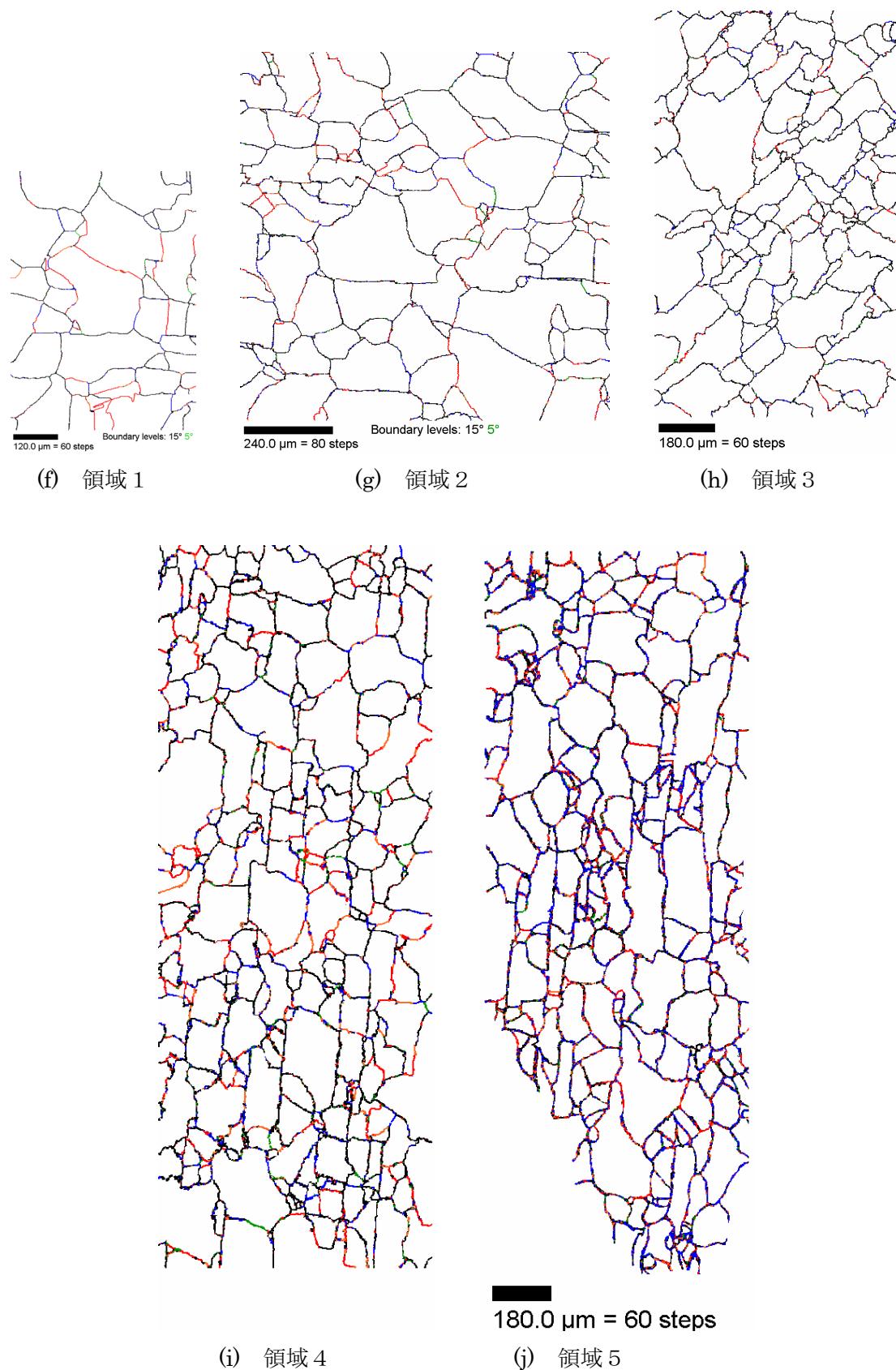
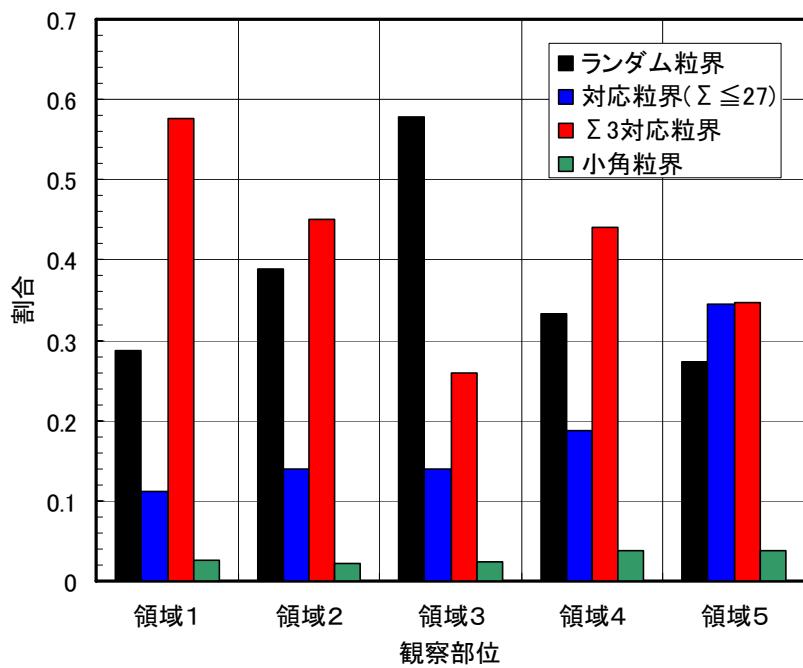
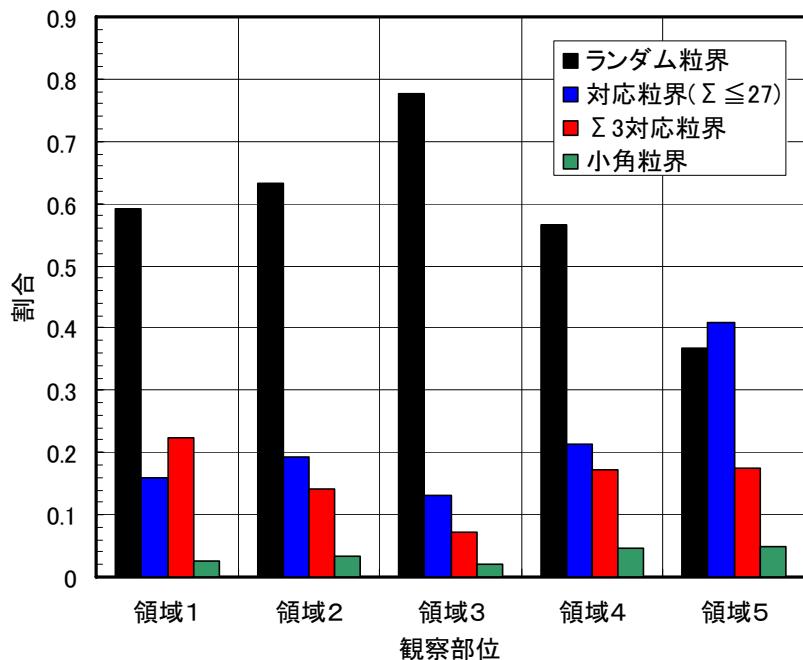


Fig. 3.2 SUS304 鋼の粒界性格分布測定例（続き）

This is a blank page.



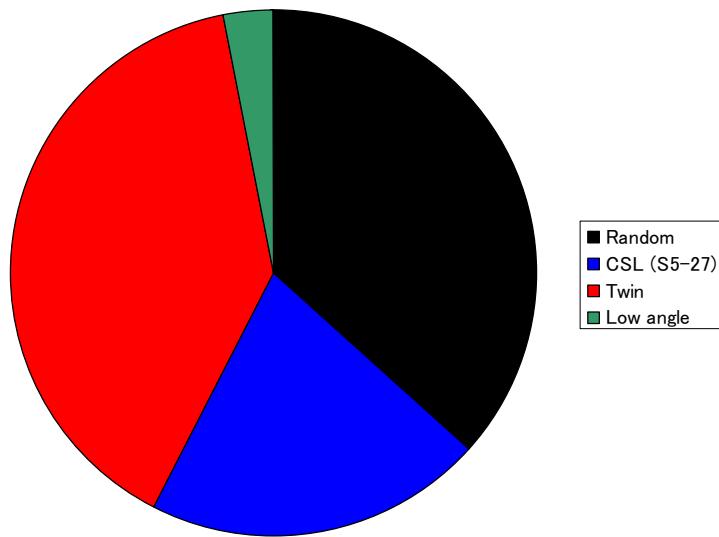
(k) 亜粒界を含む粒界性格分布



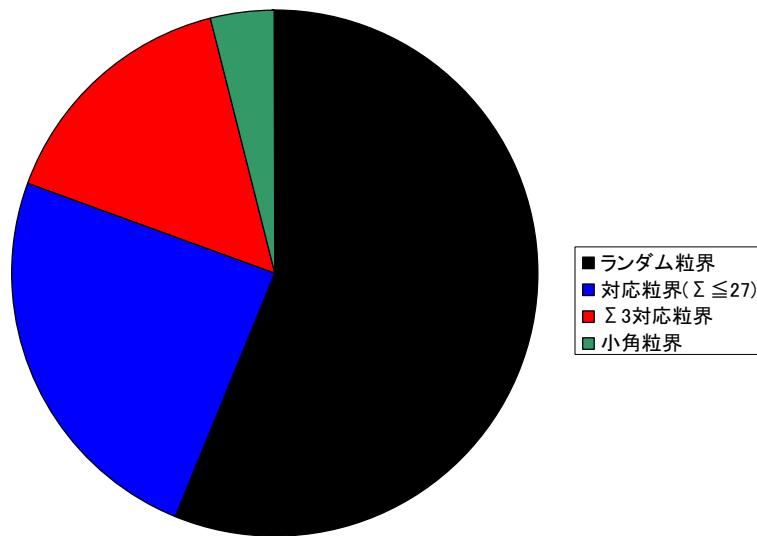
(l) 亜粒界を含まない粒界性格分布

Fig. 3.2 SUS304 鋼の粒界性格分布測定例 (続き)

This is a blank page.



(m) 領域で平均した亜粒界を含む粒界性格分布



(n) 領域で平均した亜粒界を含まない粒界性格分布

Fig. 3.2 SUS304 鋼の粒界性格分布測定例 (続き)

This is a blank page.

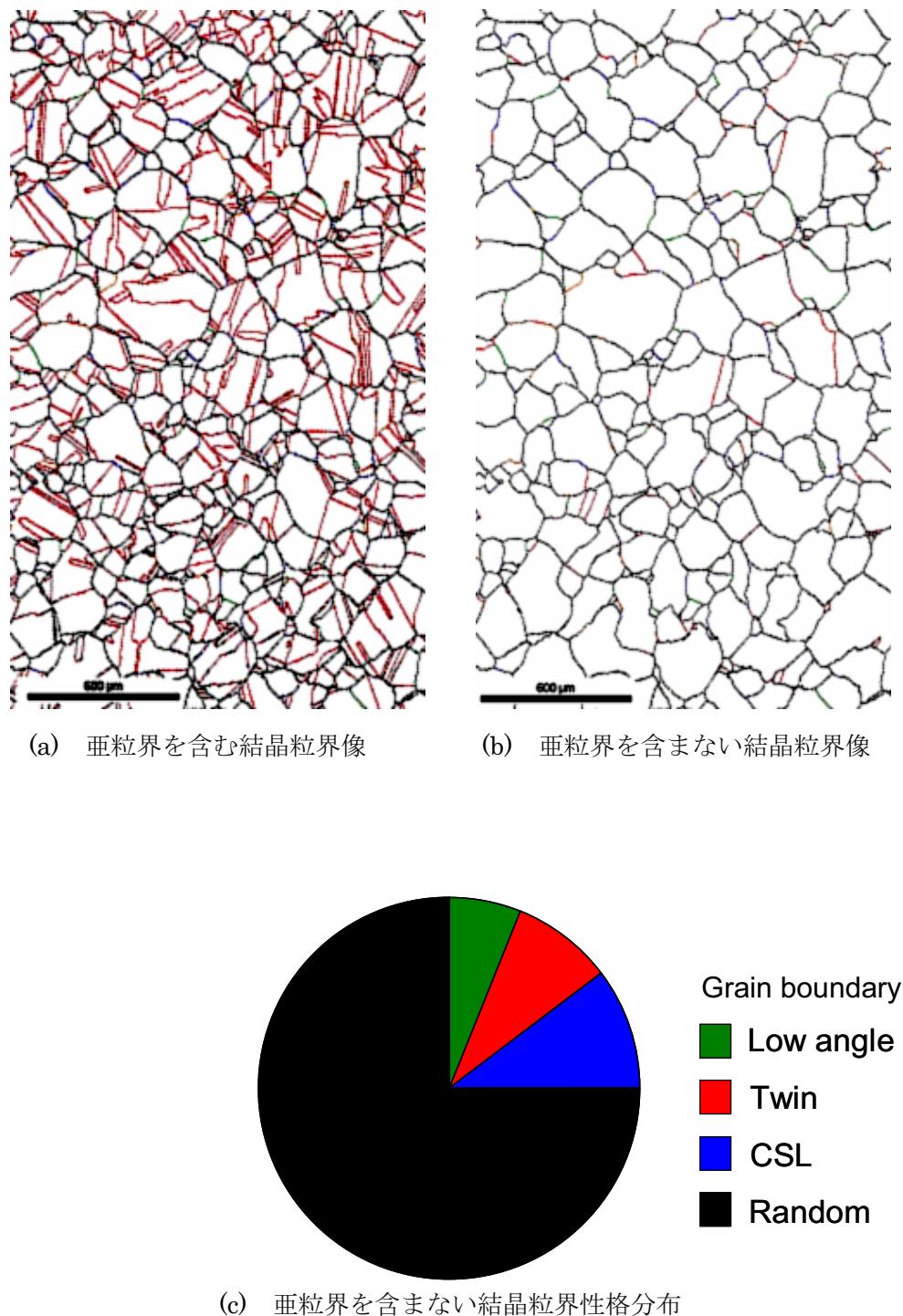
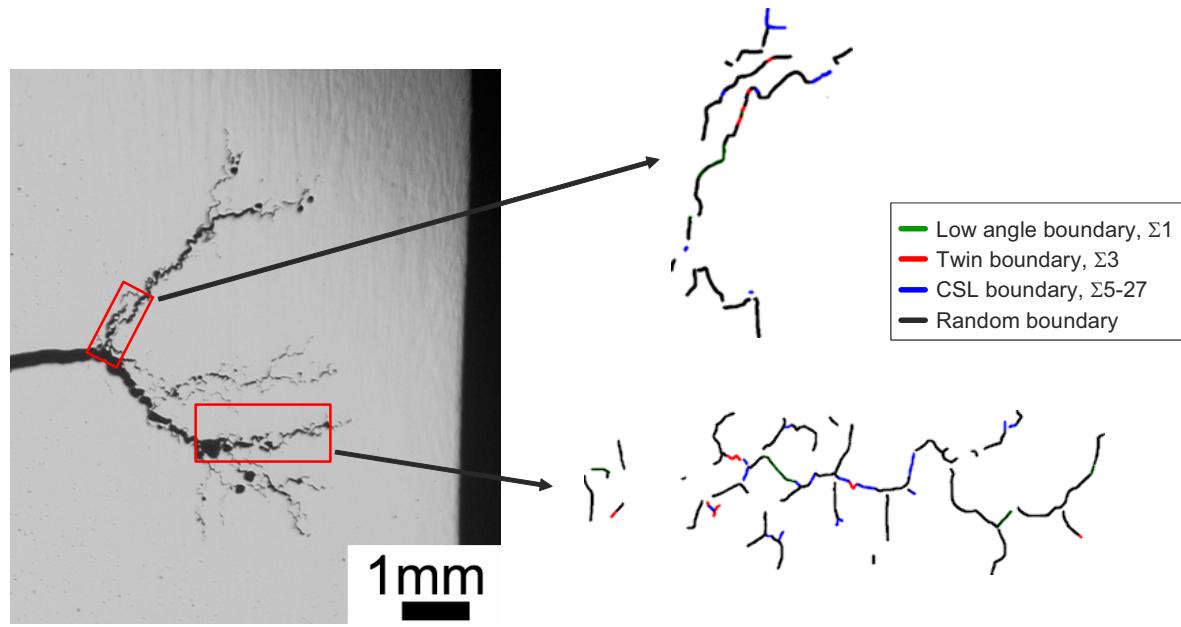
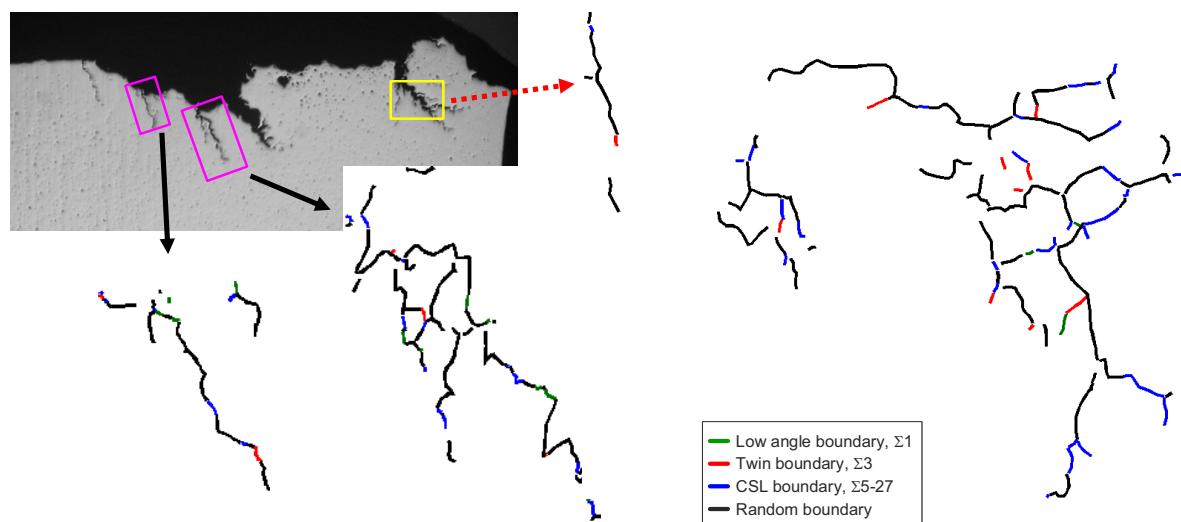


Fig. 3.3 SUS316L 鋼の粒界性格分布

This is a blank page.



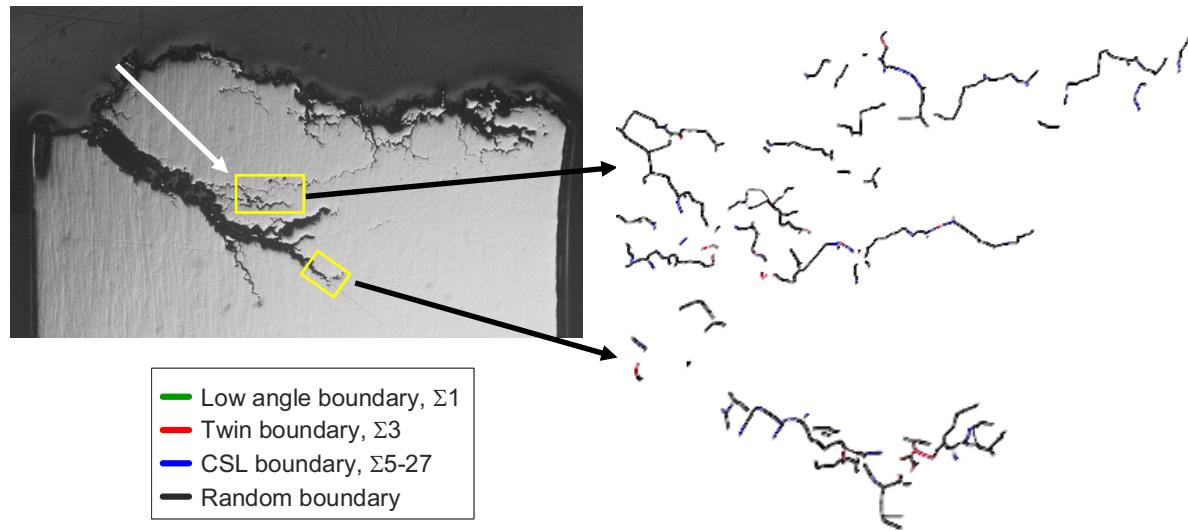
(a) 照射後高温水中応力腐食割れき裂進展試験により進展させたき裂



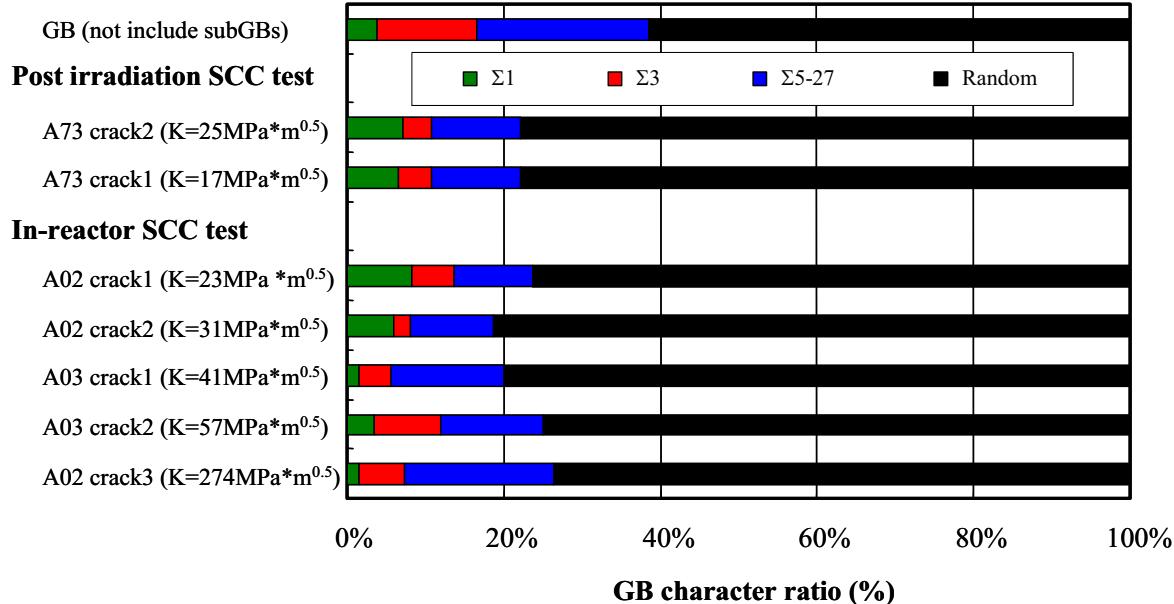
(b) 照射下高温水中応力腐食割れき裂進展試験により進展させたき裂

Fig. 3.4 中性子照射した SUS304 鋼に応力腐食割れにより進展した粒界き裂の粒界性格

This is a blank page.



(c) 照射下高温水中応力腐食割れき裂進展試験により進展させたき裂

Matrix

(d) 粒界性格分布の比較

Fig. 3.4 中性子照射した SUS304 鋼に応力腐食割れにより進展した粒界き裂の粒界性格（続き）

This is a blank page.

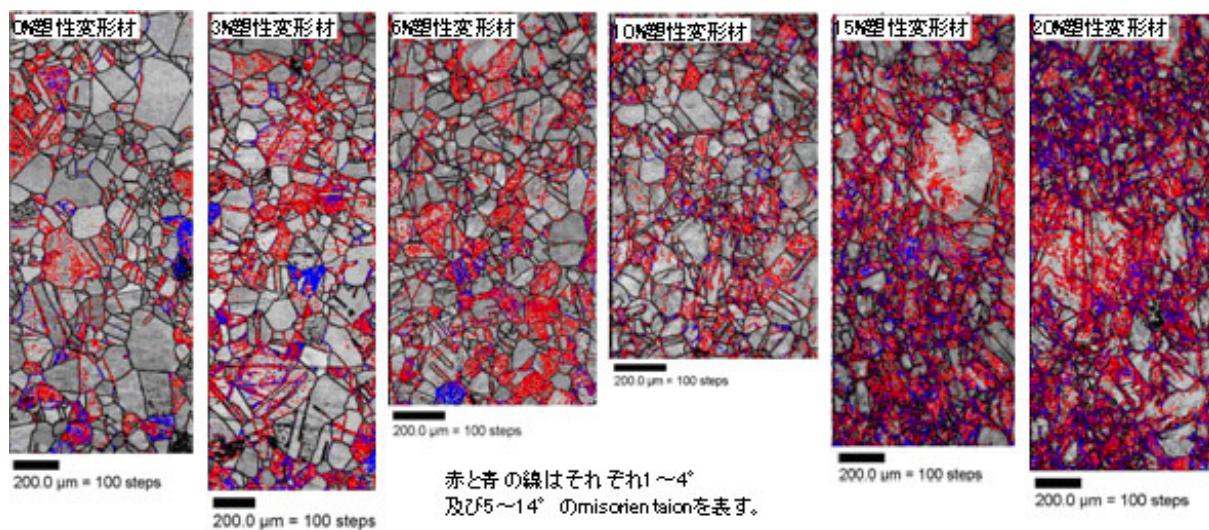


Fig. 3.5 塑性変形材のミスオリエンテーションマップ[5]

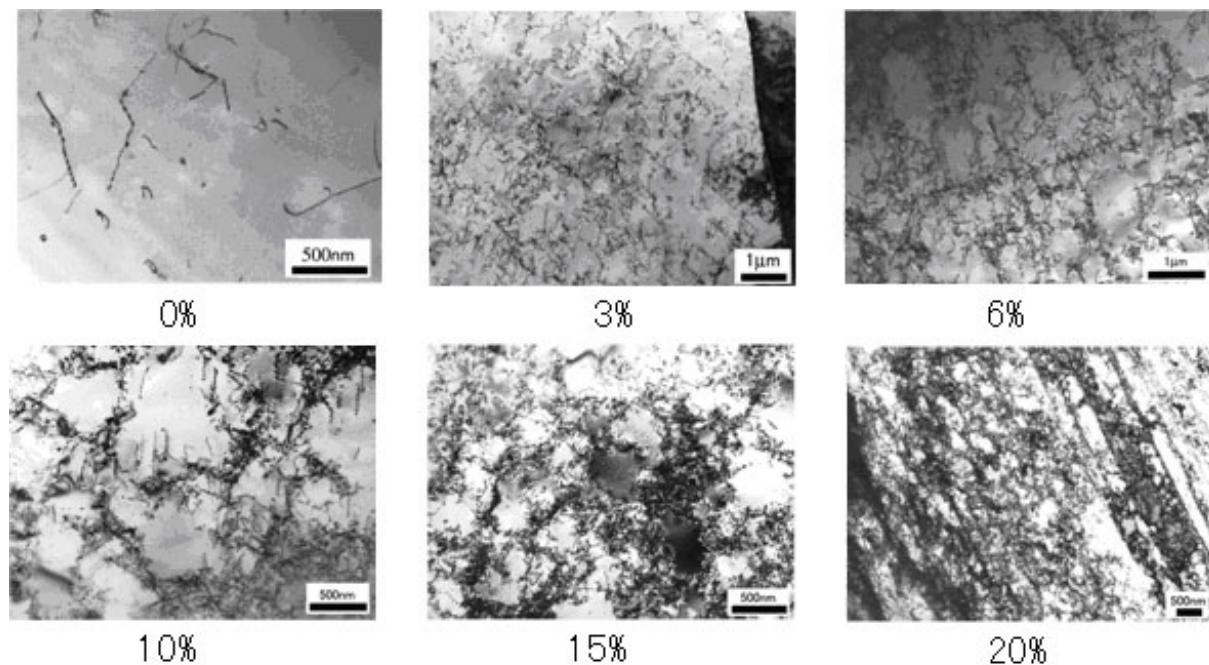
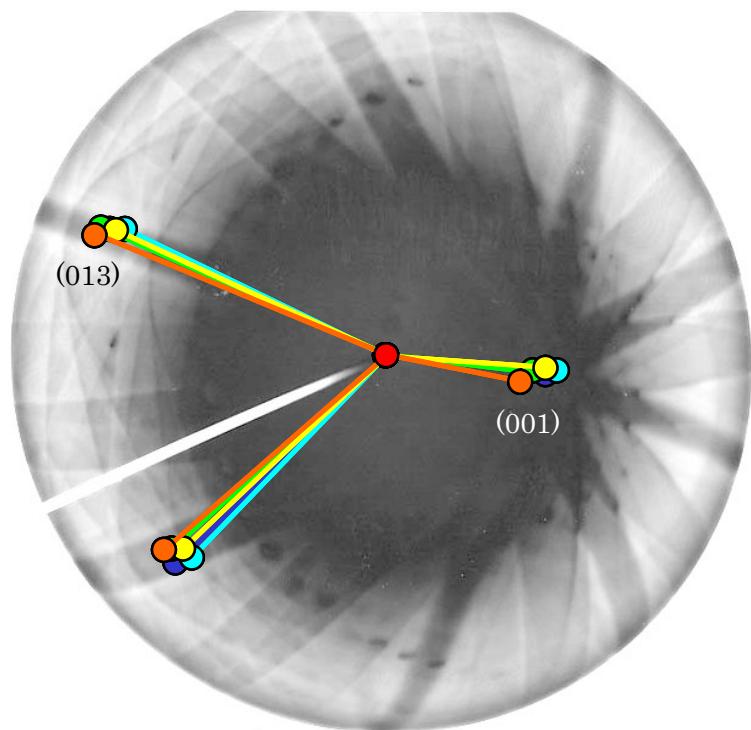
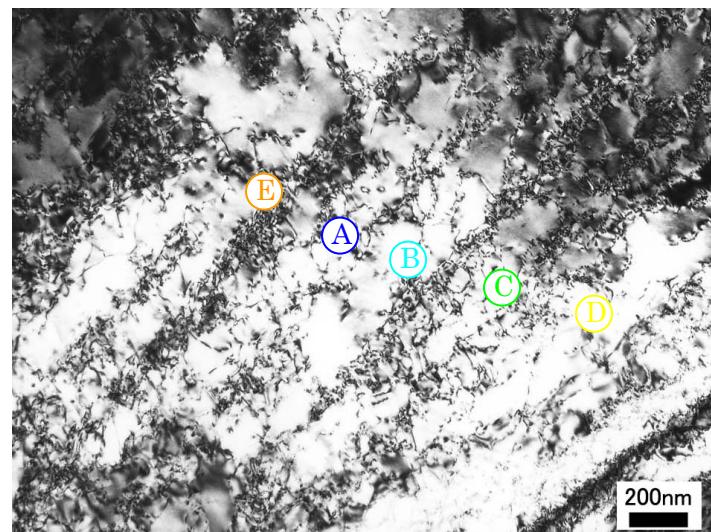


Fig. 3.6 塑性変形材の代表的なミクロ組織[5]

This is a blank page.

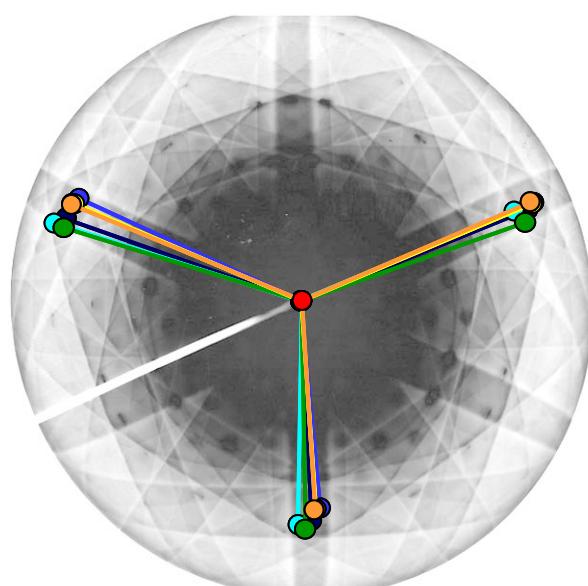
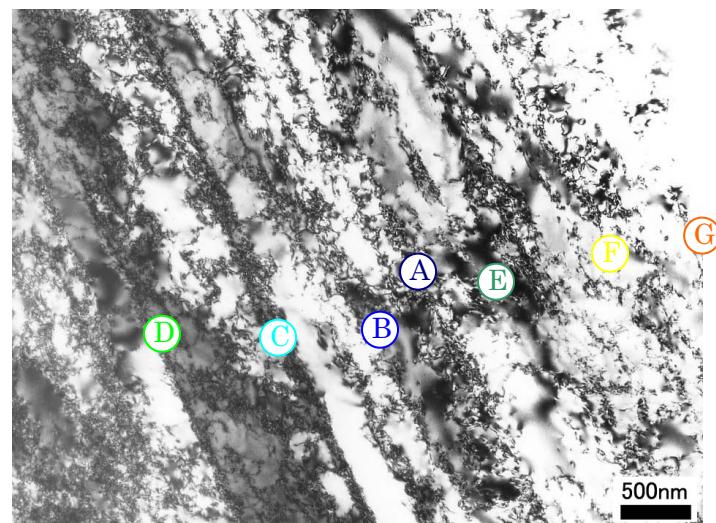


(a) 15%塑性変形材のすべり線を挟んで結晶方位が回転する様子

各色は写真の各位置での、ディフラクションパターンにおける共通結晶方位を結んだ関係である。
青色、水色、黄緑色、黄色、橙色はそれぞれ写真における A～E 位置であり、背景の菊池線パターンは C 位置でのディフラクションパターンである。

Fig. 3.7 結晶の回転の様子

This is a blank page.



(b) 20%塑性変形材のすべり線を挟んで結晶方位が回転する様子

各色は写真の各位置での、ディフラクションパターンにおける共通結晶方位を結んだ関係である。紺色、青色、水色、黄緑色、緑色、黄色、橙色はそれぞれ写真における A～G 位置であり、背景の菊池線パターンは F 位置でのディフラクションパターンである。

Fig. 3.7 結晶の回転の様子（続き）

This is a blank page.

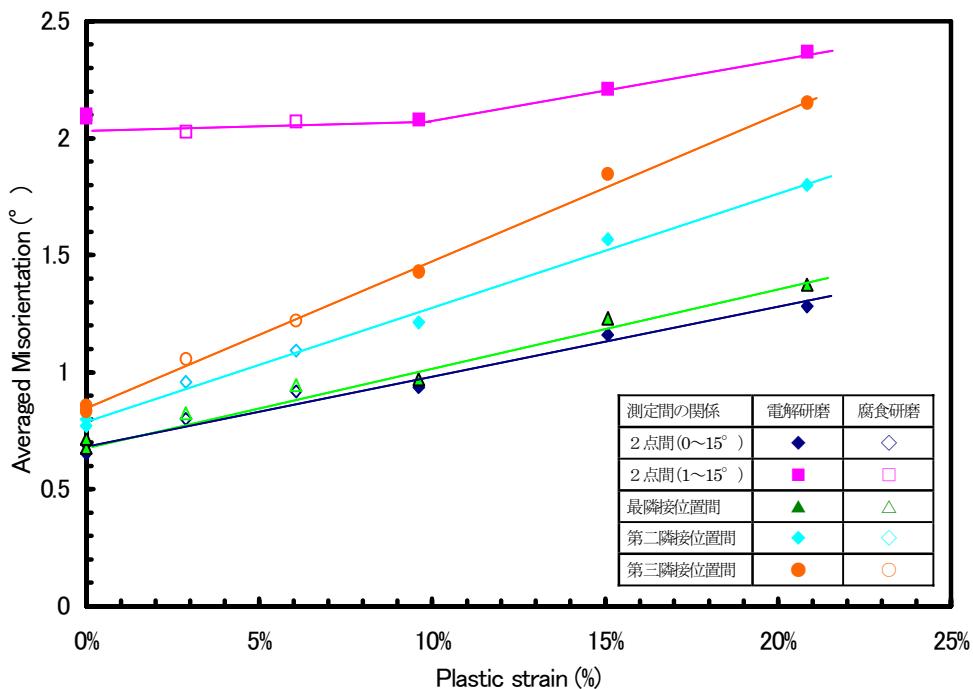
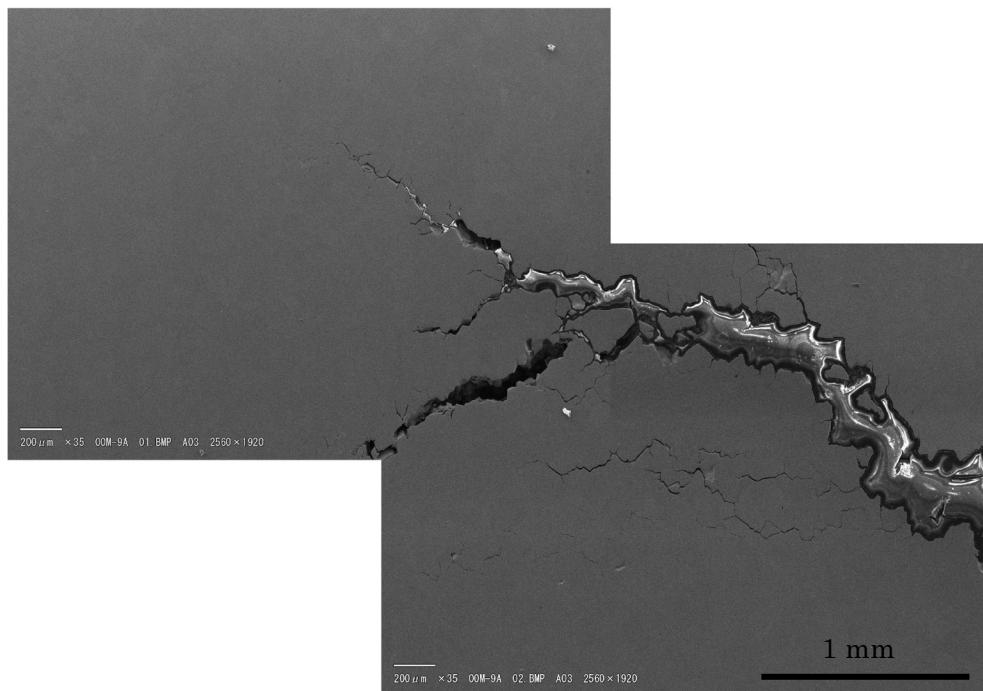


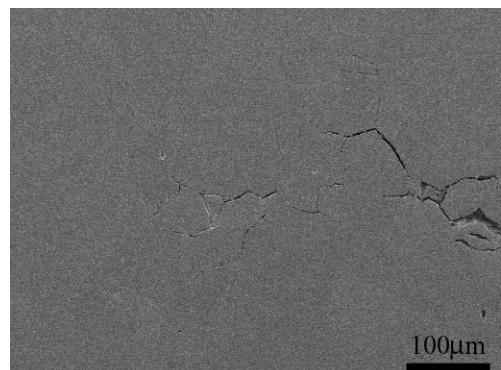
Fig. 3.8 塑性変形量とミスオリエンテーションの関係



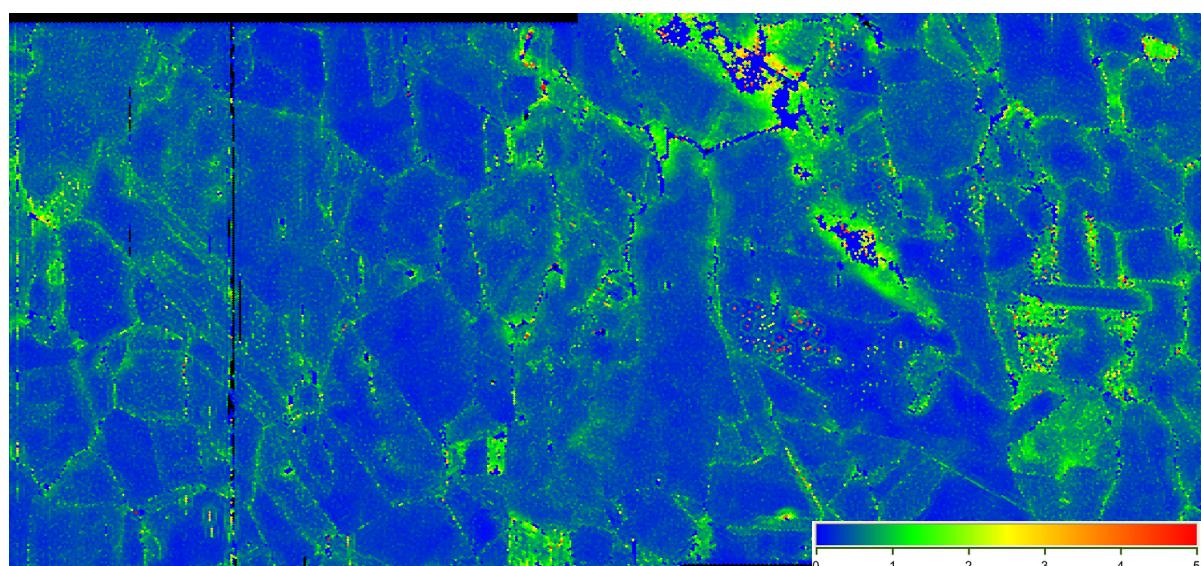
(a) 応力腐食割れき裂の様子

Fig. 3.9 中性子照射材に進展させたき裂でのひずみ測定結果の例

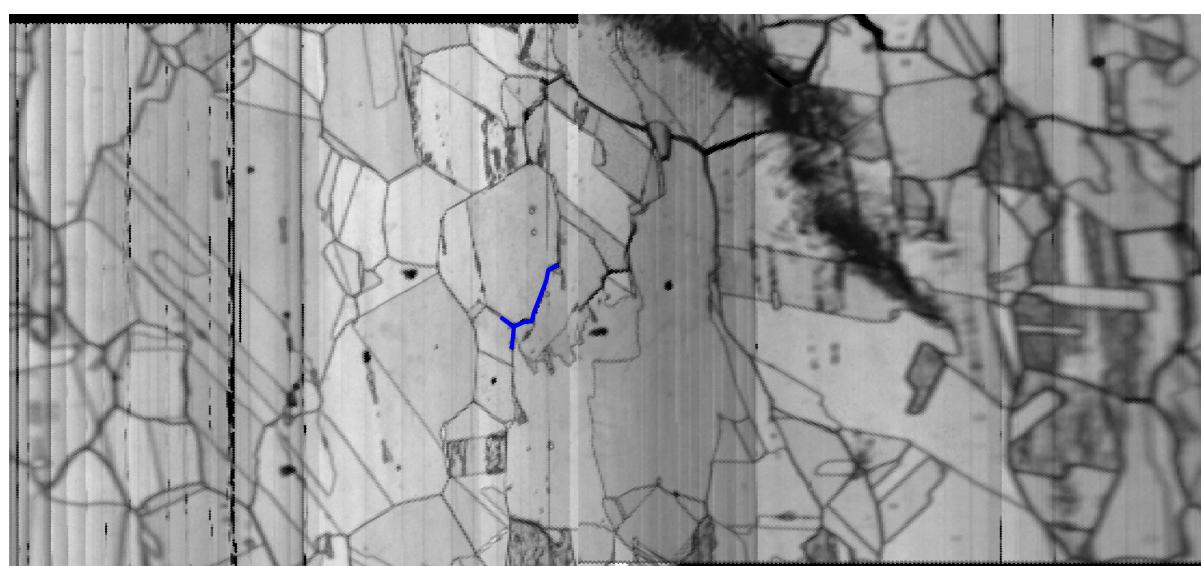
This is a blank page.



(b) き裂先端の拡大



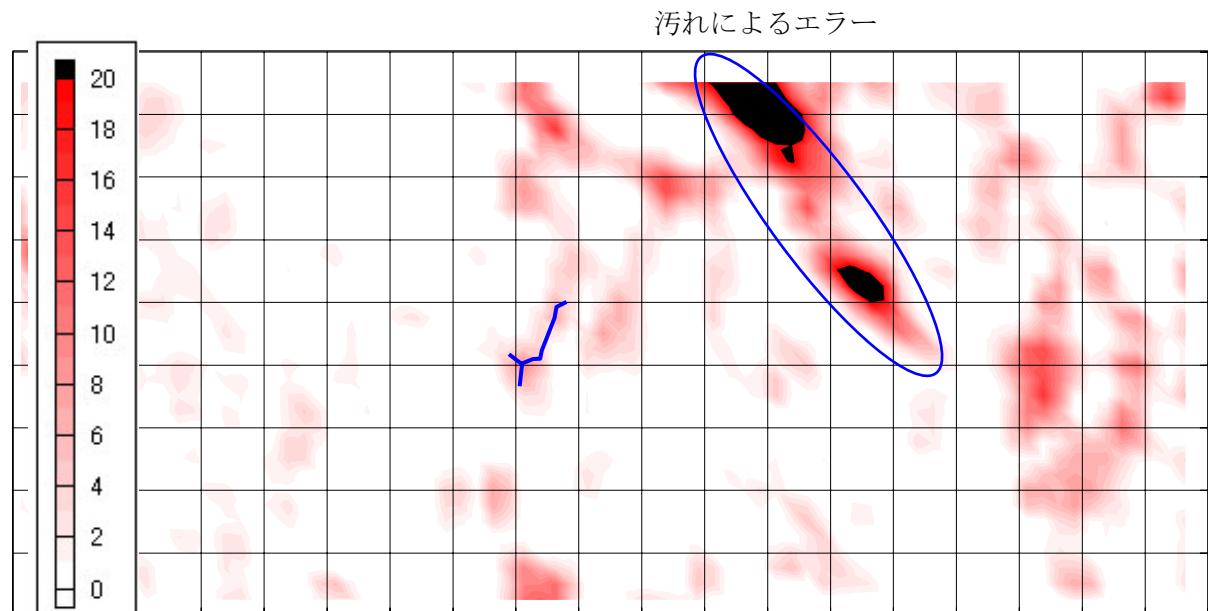
(c) き裂先端のミスオリエンテーションマップ



(d) き裂先端の Image Quality 像

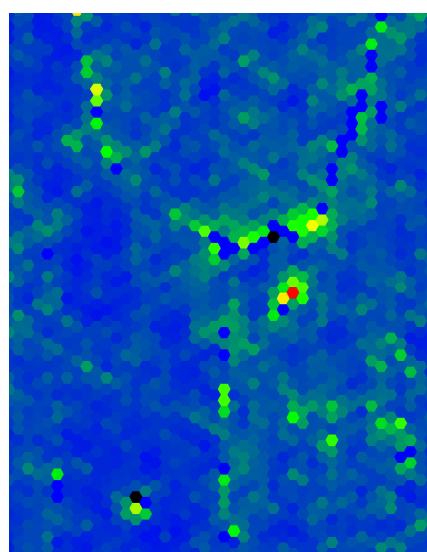
Fig. 3.9 中性子照射材に進展させたき裂でのひずみ測定結果の例（続き）

This is a blank page.

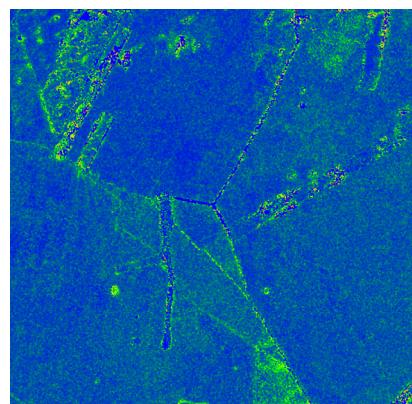


(e) き裂先端の塑性ひずみ分布

一マスは $50\mu\text{m}$ 四方を表す。



(f) 測定間隔 $2\mu\text{m}$ での
ミスオリエンテーションマップ



(g) 測定間隔 $0.3\mu\text{m}$ での
ミスオリエンテーションマップ

Fig. 3.9 中性子照射材に進展させたき裂でのひずみ測定結果の例（続き）

This is a blank page.

4. 結晶方位解析装置の運転経験

結晶方位解析装置の運転経験として、本試測定を成功させるうえで最も重要な事は試料調製であり、更に測定を時間内に行うための安定性である。運転経験として試料調製の手順、照射電流の安定性、ミスオリエンテーション測定誤差の影響評価について以下に述べる。

4.1 後方散乱電子回折像(EBSD)試料の作成及び注意点

EBSD の試料作成の手順はまずコンクリーセルにおいて試料の切断、埋め込み、粗研磨、精密研磨、腐食研磨、試料の研磨用樹脂からの取外し、電解研磨を行い、試料移送容器により材料試験用鉛セルへ移送し、専用の試料台に装着し、試料とする工程は、現在では確立している。

しかし、当初の試料作成は、試験片を切出し、試験片を研磨するため導電性樹脂に埋め込み EBSD 試料としたが、試料エッジ部がチャージアップし、データ収集に悪影響を及ぼした。これを解決するため、研磨後樹脂から試験片を取り外し電解研磨後、メタルの試料台にカーボンテープにより接着させ、試料とする方法を採用した。

EBSD の測定は、菊池パターンをもとに、結晶方位測定を行うため、試料から鮮明な菊池パターンを得ることが必要である。菊池パターンは試料表面から 10~50nm 程度の深さから発生する。従って試料表面は、調製によるひずみ層が残っていないこと、汚れなどがないこと、清浄であること、酸化膜等が生じていないことが必要であるため、遠隔操作による試料調製には細心の注意を要する。

EBSD 試料を SEM にセットするには、切断・研磨された試料を直径 32mm、高さ 25mm の円柱状アルミニウム製試料台にカーボンテープを使用し固定させる。EBSD 試料は、検出器に対し 70 度傾斜させてセットしなくてはならないため、遠隔操作性を考慮した専用の試料ホルダーに 70 度傾斜させたまま固定できる差し込み型ホルダーを作成して対処した。

当初、試料ホルダーは試料台を差し込むだけで完全に固定することができない構造であったため、SEM 試料室 (Fig.2.3) にマニプレータを使ってセットする際、試料台が移動してしまい、再度試料セットを行わなければならない場合が度々発生した。このことから試料台差込型で作成した試料ホルダーに試料の固定をより安定させるため固定スプリングを追加するなどの改良を行った。試料作成の流れを Fig.4.1 に示す。

4.2 照射電流の安定性

EBSD の測定を行うための SEM に必要な条件としては、照射電流量が 0.5nA 以上、及び長時間安定性があること（変動は 30% 以下）とされている。ホットラボ施設の SEM は電子銃に高輝度長寿命の LaB₆ を採用していることから、当初、これら条件は満足していると思われた。

しかし実際に測定を行うと、照射電流が安定しなかった。そのため、まず、SEM 本体の供給電源に安定化電源を導入して測定を行った。その結果、ある程度の改善は認められたが長時間自動測定となると不安定な部分が認められた。

そのため、解決手段として手動により監視しながら照射電流値の調整を行うこと及び長時間の連続測定は行わずに測定箇所を分割測定し、後でデータを結合させる方法を採用することで、デー

タを取得することができるようになった。

4.3 ミスオリエンテーション測定誤差の影響評価

EBSDでの測定については、入射ビームは視野の端で角度を持つため、Fig. 2.4に示すように幾何体系が変化すると、広範囲の領域を測定する場合には、ミスオリエンテーションの測定誤差が大きくなる。

そこで、Si 単結晶を用いて、視野内の測定誤差を評価した。Table 4.1にその結果を示した。その結果、視野が広い（観察倍率が低い）場合でも誤差は小さく、むしろ、高倍観察時にステップ間隔の問題が生じてミスオリエンテーションが大きくなる結果となった。これから、視野内のミスオリエンテーションはひずみ解析などにおいても影響を評価できると考えられる。

Table 4.1 ミスオリエンテーション測定誤差

倍率	測定範囲 (μm)		測定間隔 (μm)	平均誤差
	水平方向	垂直方向		
50	1700	4000	30	0.41
100	900	1800	20	0.54
200	450	900	10	0.40
500	200	400	3	0.46
1000	100	200	1	0.85

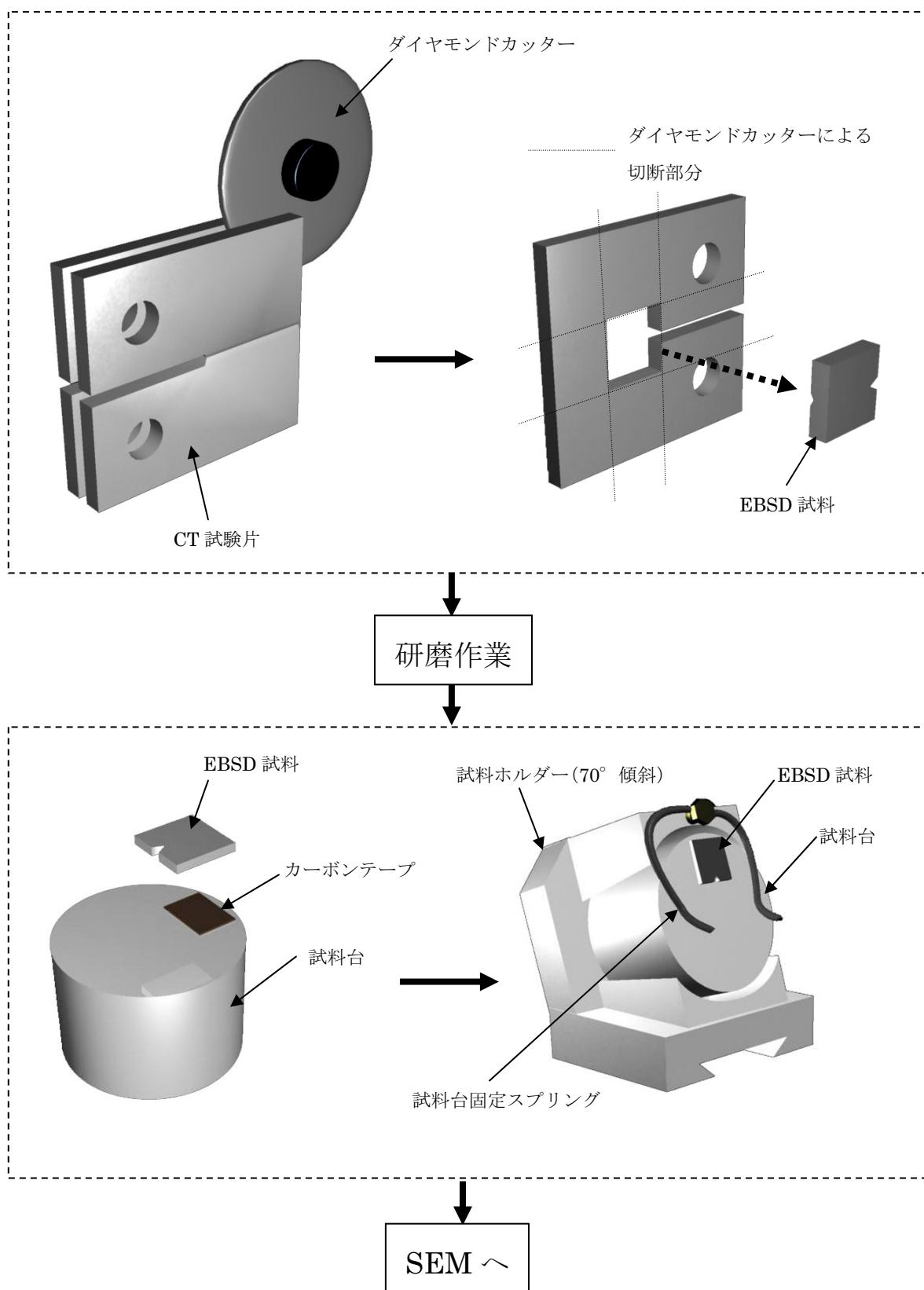


Fig.4.1 試料作成の流れ(例)

5.まとめ

2001年に世界で初めてホットセル仕様の結晶方位解析装置をセル内に設置して以来、測定手法、試料調整技術等を確立し、現在では照射後試験試料の結晶方位データの測定手法が実用化された。

本報告では、結晶方位解析装置をホットセル内に設置する場合の手順、手法をまとめ、新たに粒界性格分布の測定と局所的なひずみの測定を行うための解析手法を開発した。これにより、現在、軽水炉高経年化研究のためのIASCC、IGSCC等のメカニズム解明のための研究が行われている。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、有益な助言をいただいた河村弘照射試験炉センター長、新見素二原子炉施設管理部長、塚田隆研究主席（原子力基礎工学研究部門）、齋藤順市技術主幹（原子炉施設管理部）、長尾美春課長代理（照射試験炉センター計画調整課）、林光ニ技術副主幹（原子炉施設管理部ホットラボ管理課）、に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 材料試験炉部：“JMTR 照射ハンドブック”，JAERI-M 94-023(1994)
- (2) 株TSL ソリューションズ：OIM カタログ（2001 年）
- (3) Yukio Miwa, Yoshiyuki Kaji, Takashi Tsukada, Yoshiaki Kato, Takeshi Tomita, Nobuaki Nagata, Kouji Douzaki, Hideki Takiguchi, "Grain boundary character of cracks observed in IASCC and IGSCC", Proc. 13th Int. Conf. on Environmental degradation on Materials in Nuclear Power System - Water Reactors -, CNS, 2007.
- (4) 加治芳行、三輪幸夫、塚田隆、早川正夫、長島伸夫、松岡三郎、SCC き裂先端における変形挙動のマルチスケール解析（受託研究）、JAERI-Research 2005-029、2005 年 9 月

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm \cdot m^{-2}$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	lm/m^2
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ポアソン	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m/s$
ガウス	G	$1 G \triangleq 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx \triangleq 10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 γ=1 nT=10^{-9} T$
ジャニスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリヨン	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 μ = 1 μm = 10^{-6} m$

