



JAEA-Technology

2009-029

遠隔操作によるEBSD及びTEM用試験片の 調製技術開発

Development on Preparation Technique of Small-sized Irradiation Test Specimens by a Remote-handling for EBSD and TEM Observations

田口 剛俊 加藤 佳明 相沢 静男

Taketoshi TAGUCHI, Yoshiaki KATO and Shizuo SOZAWA

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

July 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Technology

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

遠隔操作による EBSD 及び TEM 用試験片の調製技術開発

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

田口 剛俊・加藤 佳明・相沢 静男

(2009 年 4 月 15 日受理)

照射済みの照射誘起応力腐食割れ試験用 CT 試験片および低ひずみ速度引張試験片から電子線後方散乱回折観察および TEM 観察用の試験片を採取・調製する技術を開発した。本報告書は、これらの試験片調製に関する技術開発についてまとめたものである。

Development on Preparation Technique of Small-sized Irradiation Test Specimens by
a Remote-handling for EBSD and TEM Observations

Taketoshi TAGUCHI, Yoshiaki KATO and Shizuo SOZAWA

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

(Received April 15 , 2009)

Two types of test-specimen preparation techniques were developed for the electron beam backscatter diffraction and TEM observation. Specimens for those observations were sampled from the compact tension (CT) and the slow strain rate technique (SSRT) test specimens used in the irradiation-associated stress-corrosion cracking (IASCC) test. In this report development of the preparation technique of test-specimens for these post-irradiation examinations is described.

Keywords : Preparation Technique, EBSD, TEM, Remote-handling, Hot Laboratory, JMTR, IASCC Specimen

目 次

1. はじめに	1
2. 試験片調製方法の検討	1
2.1 EBSD用試料調製方法の検討	1
2.2 TEM用試料調製方法の検討	3
3. ホットセル内試験	4
3.1 EBSD用試料の調製	4
3.2 TEM用試料の調製	5
4. まとめ	5
謝辞	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Consideration on preparation method for irradiated specimens	1
2.1 Examination of EBSD specimens preparation method	1
2.2 Examination of TEM specimens preparation method	3
3. In-cell test	4
3.1 Preparation of EBSD specimens	4
3.2 Preparation of TEM specimens	5
4. Conclusions	5
Acknowledgement	6
References	6

This is a blank page

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、照射済キャプセルの解体や照射済燃料等の試験を行うコンクリートセル及び顕微鏡鉛セル等が設置されている。また、照射済材料の引張試験、IASCC (Irradiation-Associated Stress-Corrosion Cracking) 試験、疲労試験及び破壊靭性試験等を行う鉄セルと高温高圧水中 SSRT (Slow Strain Rate Technique) 試験、超高温引張試験、衝撃試験、クリープ試験等を行う鉛セルがあり、これら強度試験後の破面を観察、解析するための設備も設置されている。近年、これら強度試験後の破面観察や塑性ひずみ分布等を測定・解析するため電子線後方散乱回折像 (Electron Back Scattering Diffraction Pattern) の測定が照射損傷機構解明の観点から行われるようになりつつある¹⁾。このため、試験片を薄片化及び小形化にする調製するための技術開発が必要となった。そこで、ホットセル内での遠隔操作によって EBSD 及び TEM (Transmission Electron Microscope) 用の試料調製を正確に行うこと、事業所外輸送を考慮して可能な限り試料を小さくすることを技術開発として行った。本報告書は、これらの技術開発についてまとめたものである。

2. 試験片調製方法の検討

試験片の調製に関しては、結晶方位を正確に測定する必要があること、き裂部を確実にサンプリングできること、事業所外輸送を考慮して可能な限り試料を小さくする必要があることから、放射化した試料の調整を行うホットセル内試験の前にセル外で試験片調製方法の検討を行った。

2. 1 EBSD 用試料調製方法の検討

EBSD 用試料は、正確な測定を行うために試料と装置の導通が良いことが必要である。これまでに導電性樹脂を用いて調製を行い試料としたが、試料と装置間の電気抵抗が大きくチャージアップによって正確な測定が出来ないため、チャージアップ防止が技術的課題であった。このため、本開発では、試験片を直接セットする方法を検討した。

(1) 試 料

CT 試験片 (30 mm × 24 mm × 5.6 mm) に見立てたコールドの SUS 板材

(2) 切 断

き裂状態が複雑な部分より最小限の大きさを採取するのは従来のスケール等を用いた方法では位置出しが困難であるため、高倍率観察装置で切断位置をマーキングしてから切断する方法を

採用することにより正確な位置の切断が可能となった。また、切断厚さ目標は、最小限の大きさにすることを考慮して 0.2 mm に設定し、以下の方法により切断を検討した。

① 樹脂に埋込後切断する方法

試料を半分まで切断した段階で、試料が樹脂から剥がれて大きな反りが生じた。(Fig. 2.1 参照)

② 試料を特殊治具に固定して切断する方法

試料を最後まで切断できたが、試料に僅かな反りが観察された (Fig. 2.2 参照)。

③ 切断と研磨による組み合わせ調製方法

試料を薄片に切断時、変形しない最小の厚みを調べた結果、厚さが 0.5 mm 以上であれば変形しないことが明らかとなった。これにより、研磨時の試料の固定方法を検討することにより 0.5 mm 以下の厚さの試料を得られることが解った。以上の結果から、試料の切断には「切断と研磨による組み合わせ調製方法」を採用することとした。なお、切断刃回転数は 200 rpm であった。

使用した切断機は、市販品の精密切断機を遠隔操作型に改造したもので、主な仕様を以下に示す²⁾。また、試料を挟み込む特殊治具を Fig. 2.3 に示す。

- ・名 称 : 遠隔操作型精密切断機 (100 V 電源、約 10 kg)
- ・切断刃回転数 : 14 – 200 rpm
- ・使用切断刃 : ダイヤモンド切断ホイール (外径 127 mm、刃厚さ 0.3 mm)
- ・切断負荷方法 : 錘による自重バランス調製
- ・切断位置設定方法 : マイクロメータ
- ・試料固定寸法 : 最大外径 34 mm、最小外径 1 mm

(3) 研 磨

従来の試料研磨は、樹脂に埋め込んで実施してきたが、樹脂からの試料取出しが困難である。このため、新しい方法として、容易に取り外せかつ横方向の接着力に着目して低溶融点性のエレクトロンワックスで試料を固定して研磨する方法を採用した。以下に開発した作業手法を示す。

- 1) 遠隔操作型回転研磨機の金属試料ホルダーに約 0.02 g の低溶融点ワックスを載せ、ヒーターで約 70°C まで温めてワックスを溶かす。
- 2) ワックスの上に 0.5 mm 厚さに切断した試料を載せて、ピンセットで押しつけて密着させる。
- 3) 粗研磨は、試料面積が小さく摩耗速度が速くなるために、研磨代を考慮して 600 番の研磨紙で様子を見ながら数回繰り返す。
- 4) ダイヤモンドペースト 6 μm、3 μm、1 μm の順で仕上げ研磨を行った後、金属顕微鏡で傷等を確認する。

- 5) 金属試料ホルダーを温めてワックスを溶かし、試料を取り外してアセトンで超音波洗浄する。

上記方法で試料を研磨した結果、良好な EBSD 用試料が得られた。本方法で用いたワックス溶融ヒーター、金属試料ホルダー及び試料固定用ワックスを Fig. 2.4 から Fig. 2.6 に示す。

以上の検討の結果、開発した EBSD 用の試料調製に関する工程を Fig. 2.7 の(1)に示す。

2.2 TEM 用試料調製方法の検討

TEM 試験及び事業所外輸送を考慮して試料を小さくする必要があることから、厚さ調製により体積を減らし放射能量を小さくする方法を検討した。

(1) 試 料

引張試験片（長さ：55 mm、平行部外径：4 mm）に見立てた外径 4 mm のコールドの SUS 丸棒

(2) 切断

TEM 用試料は厚みが不均一であったりバリ等が発生すると、その後の試料調製や TEM 觀察に支障があるため、厚みが均一で極力バリがでない切断方法としなければならない。そこで、以下の作業手順を検討した。

① 試料を直接固定し切断する方法

切断時に大きなバリが発生し、その後の調製に支障があることが明らかになった。

② バリ防止カバーを被せて固定し切断する方法

2 つ割のステンレス管を被せることにより大きなバリの発生を極力抑えることができた。

以上の結果から、試料の切断には「バリ防止カバーを被せて固定し切断する方法」を採用することとし、以下に開発した作業手法を示す。

- 1) 試料と同じ内径を有する 2 つ割のバリ防止カバー（SUS 製）を試料に被せて固定する。
- 2) 最初に試験に使用しない部分を切斷して基準面とする。
- 3) ダイヤモンド切斷ホイールをたわませない程度に負荷を加える。
- 4) 切断開始時は、徐々にダイヤモンド切斷ホイールに接触するようにゆっくりチャック部をおろす。
- 5) 切断終了時には、バリが発生しないようにチャック部を浮かしながらゆっくり切斷する。
- 6) 発生したバリは、バリ取り治具で除去する。

上記手順で試料を研磨した結果、良好な TEM 用試料が得られた。なお、この時の切斷刃回転数は 200 rpm とした。本方法で用いたバリ防止カバー、バリ取り治具を Fig. 2.8 及び Fig. 2.9 に示す。以上の検討の結果開発した TEM 用の試料調製に関する工程を Fig. 2.7 の(2)に示す。

3. ホットセル内試験

開発した試験片調製方法の検討を基に、照射済試験片からの試料調製をコンクリート No. 7 セル内で実施した。試料調製は、マスタースレーブマニプレータを使用して遠隔操作で行い、使用した装置及び治具は、試験片調製方法の検討で使用したもの用いた。

3.1 EBSD 用試料の調製

試料調製工程を Fig. 3.1 に示す。金相試験後の樹脂埋込試料を厚さ約 2.5mm の輪切り状に切断した後、粗切断、細切断、研磨、電解腐食処理の順で試料調整を行った。樹脂埋込試料から切断した試料の外観を Fig. 3.2 に示す。

(1) 試料

CT 試験片：SUU304 製 (30 mm × 24 mm × 5.6 mm)、高速中性子照射量は $6.2 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ 。CT 試験片の外観を Fig. 3.3 に示す。

(2) 切断

粗切断に関しては、き裂先端近傍部が残り、かつ最小の大きさとなる様に切断位置を決めて切断した。切断位置は、マクロ観察写真を用いてき裂方向や長さを確認して決定した。切断位置を決定するために使用した写真を Fig. 3.4 に示す。細切断は、試料面に傷が付かないようにピンセットで精密切断機に固定して行った。この際、切断時のバリが基準面側（研磨時に金属試料ホルダーに固定する面。ここでは、金相面側の反対側の面。）に出ないように取り付けた。切断に際しては、試料が小さくき裂が進展した脆い部位をもつたため、いつでも試料から切断ホイールを離せる様に注視しながら実施した。また、切断終了時の切断ホイールの回転で試料が飛散しないようマニプレータで保持しながら切断した。切断後の外観を Fig. 3.5 に示す。厚さ調製のための切断は、反基準面部の 1mm 部分をチャックして行った。厚さ調製後の外観を Fig. 3.6 に示す。切断後の試料は、基準面の面出しを行なうためにマニプレータトング爪先でつまんで研磨紙上で研磨しバリ取りを行った。バリ取り前の状態及び除去後の外観を Fig. 3.7 及び Fig. 3.8 に示す。

(3) 研磨

切断した試料は、模擬試験と同じ要領で金属試料ホルダーにワックスで固定した。固定は、試料表面に傷がつかないように側面をピンセットで摘んで行った。固定した状態の写真を Fig. 3.9 に示す。この後、試料の研磨状態を確認しながら、約 1 分間の粗研磨を数回行った。仕上げ研磨は、それぞれダイヤモンドペースト $6 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ を使用して行った。研磨終了後、金属顕微鏡で傷等がないことを確認した。

(4) 電解腐食

EBSID は、結晶粒界を明確に析出させて試験を行う必要があることから、研磨した試料の電解腐食を行った。使用した電解腐食装置は、遠隔操作用に設計・製作されたものであり、これまでにも多くの実績がある装置である。本装置に試料を取り付けた状態及び電解腐食液に浸した状態を Fig. 3.10 及び Fig. 3.11 に示す。腐食電流は、き裂部分以外の場所に点接触させて流した。電解腐食は、10% シュウ酸（液温：約 16 度）溶液中にて、3 回行った。電圧及び電流は、それぞれ 4V 及び 1A で実施し、通電時間は 1 回目が 20 秒、2 回目が 13 秒、3 回目が 30 秒であった。電解腐食後、腐食状態が EBSD 観察に適した状態になっていることを金属顕微鏡で確認した。電解腐食後の観察結果を Fig. 3.12 に示す。試料は、ワックスを溶かして取り外し、アセトン及び蒸留水でそれぞれ約 15 分間の超音波洗浄を行った。この後、試料に傷等が生じていないことを高倍率観察装置にて確認した。洗浄後の状態を Fig. 3.13 及び Fig. 3.14 に示す。

3.2 TEM 用試料の調製

試料は事業所への輸送等を容易にすることを考慮して切断厚さを 1.0 mm に設定した。切断終了後の試料は、輸送の際必要とされる放射能量を正確に算出するため重量等の測定を行った。

(1) 試料

引張試験片（SSRT 試験終了後）SUS304HP 製（長さ：55 mm、平行部外径：4 mm）、高速中性子照射量は $6.7 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ 。引張試験片（SSRT 試験終了後）の外観を Fig. 3.15 に示す。

(2) 切断

SRRT 試験終了後の各試験片は、破断位置や絞りがそれぞれ異なるため、拡大写真から平行部分を確認して切断位置を決定した。切断は、模擬試験と同じ方法で行った。切断後の外観を Fig. 3.16 に示す。また、切断の際に生じたバリ取り作業を Fig. 3.17 示す。なお、切断厚さは、目標値 1.0mm に対して $\pm 0.2\text{mm}$ 以内であった。

4. まとめ

ホットラボでの遠隔操作による EBSD 及び TEM 試料調整に関する技術開発を行った。以下に主な成果を示す。

(1) EBSD 用試料の調製

- ・ 試験片の厚さ調製に関しては、切断と研磨による組み合わせ調製方法により厚さ 0.2 mm の試料の採取ができる手法を開発した。これにより、これまで樹脂埋込試料で問題となっていた試料のチャージアップを防止することが可能となった。

- ・ 微小試料の研磨については、金属製試料ホルダーにワックスで固定して行う方法により解決した。
- ・ 電解腐食については、小さい試料でも点接触法にて処理できた。

(2) TEM用試料の調製

- ・ 2つ割のステンレス管や切断条件を調整して、バリを極力低減した切断法を開発した。これにより、目標値1.0mmに対して±0.2mm以内の精度で均一な厚さの試料調整が可能となった。本技術開発により、照射済み試料を用いた EBSD 及び TEM 観察が可能となり、照射損傷機構の解明に係る研究開発の推進に大きく貢献することができる。

謝　　辞

報告書をまとめるにあたり、河村 弘照射試験炉センター長、新見泰二原子炉施設管理部長及び石原正博照射試験炉副センター長、石塚悦男照射試験開発課長（照射試験炉センター）からご助言、ご指導を頂きました。また、試料調製の技術的に関する情報を故三輪幸夫氏（原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット）から頂きました。以上を記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 加藤佳明、三輪幸夫、高田文樹、近江正男、中川哲也、”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”、JAEA-Testing 2008-005、(2008).
- 2) リファインテック社製カタログ.

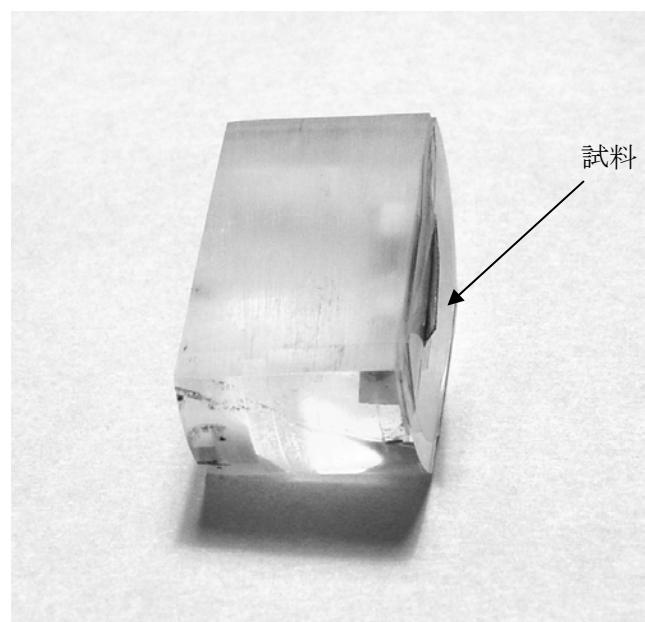


Fig. 2.1 樹脂から剥がれて大きな反りが生じた試料

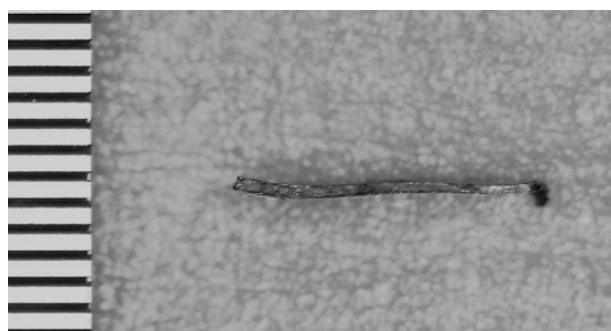


Fig. 2.2 僅かな反りが観察された試料（厚さ方向より）

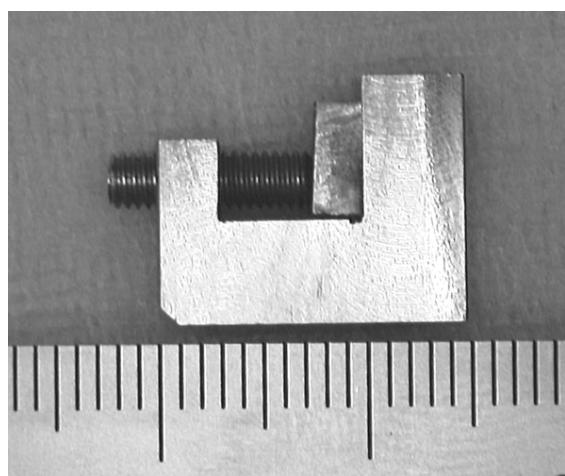


Fig. 2.3 試料を挟み込む特殊治具

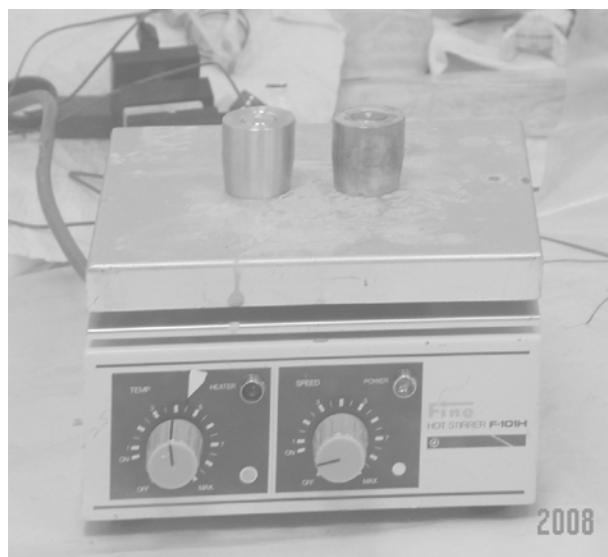


Fig. 2.4 ワックス溶融ヒーター



Fig. 2.5 金属試料ホルダー

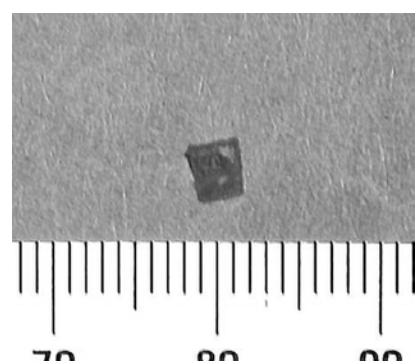


Fig. 2.6 試料固定用ワックス
(約 0.02g)

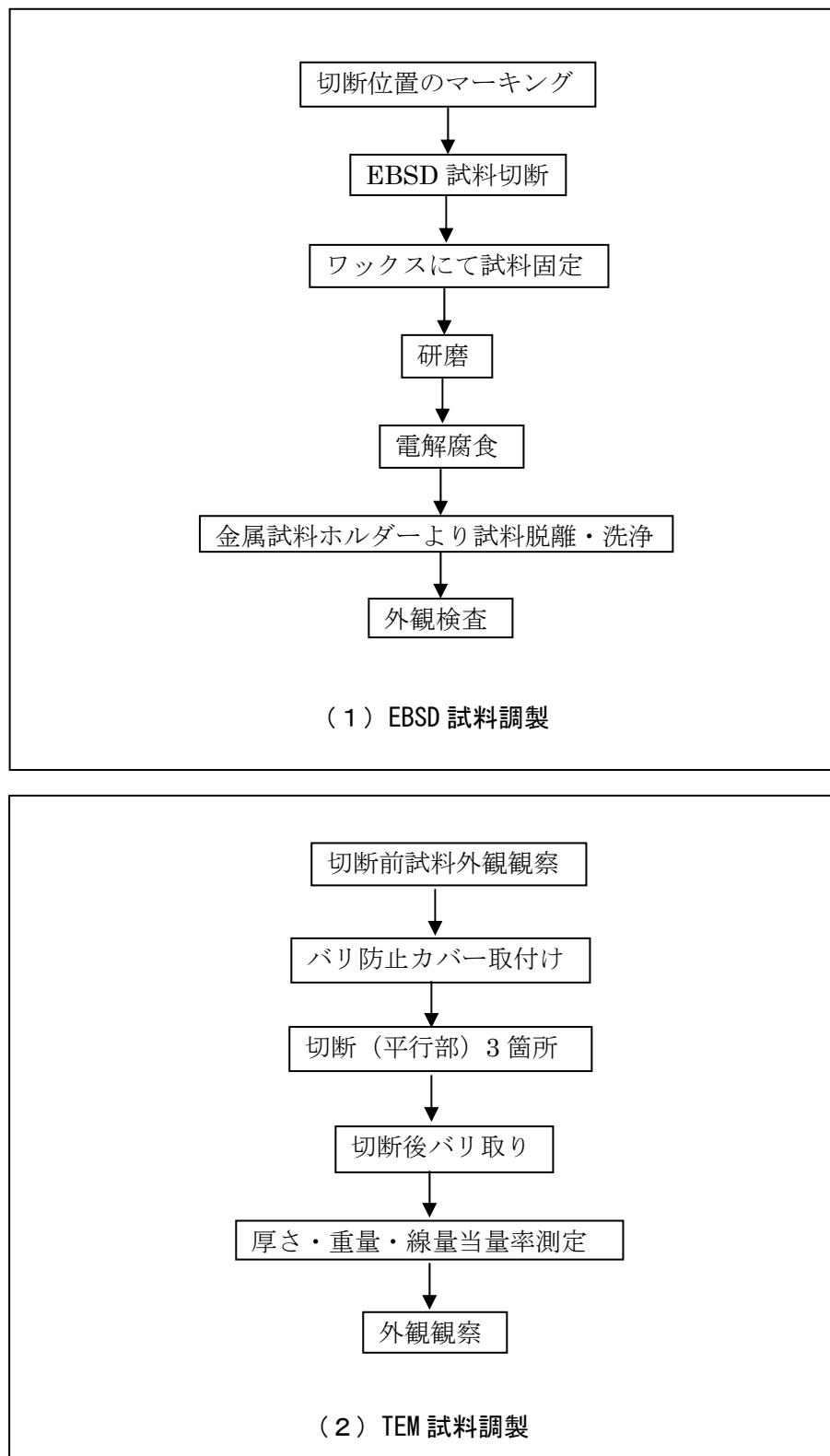


Fig. 2.7 EBSD 及び TEM 用の試料調製に関する工程

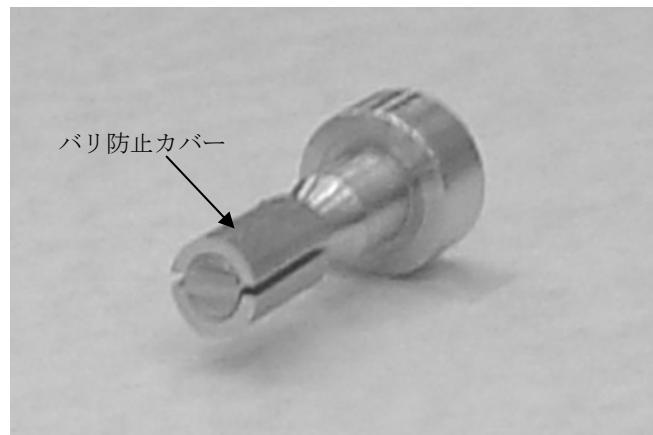


Fig. 2.8 バリ防止カバー



Fig. 2.9 バリ取り治具

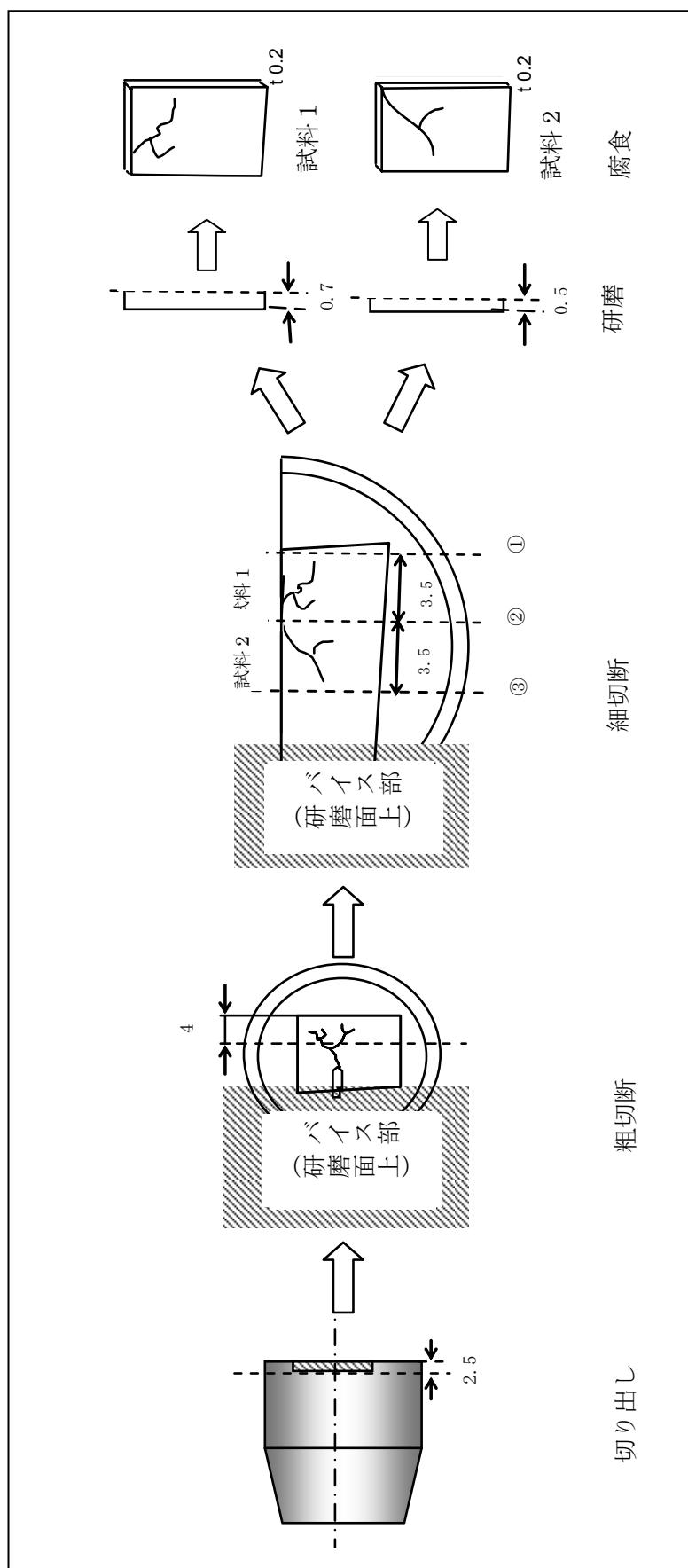


Fig. 3.1 試料調製工程

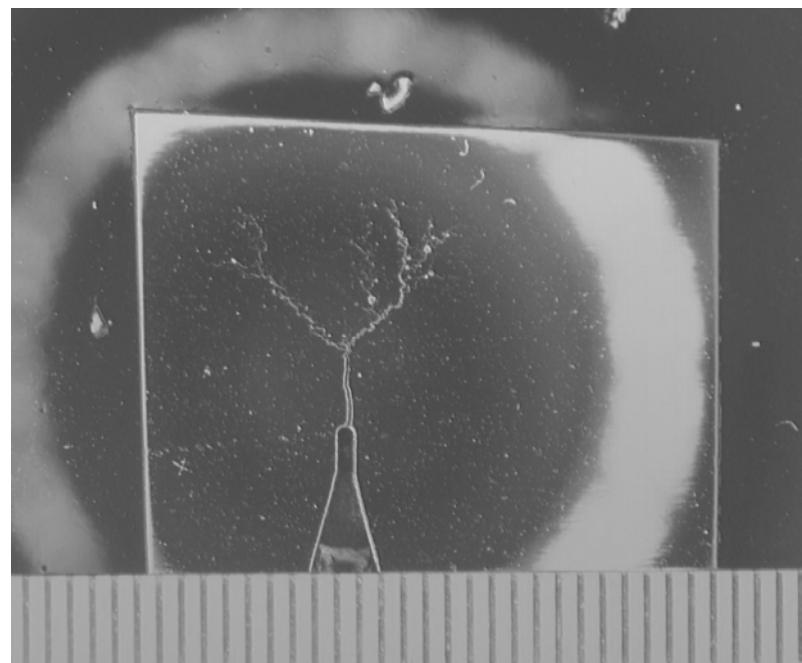


Fig. 3.2 樹脂埋込試料から切断した試料の外観

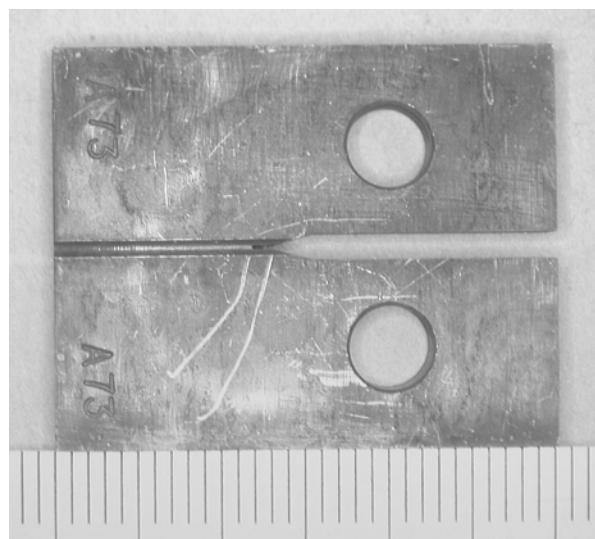


Fig. 3.3 CT 試験片の外観

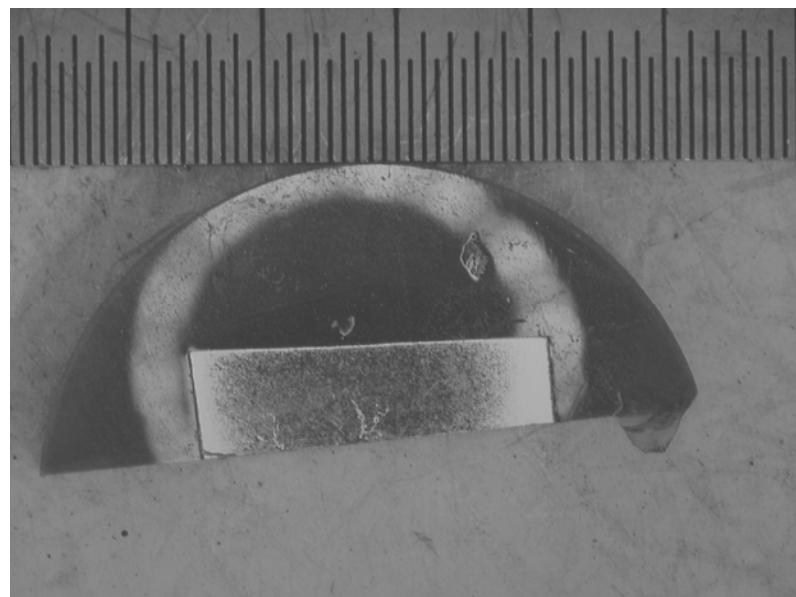


Fig. 3.4 切断位置を決定するために使用した写真

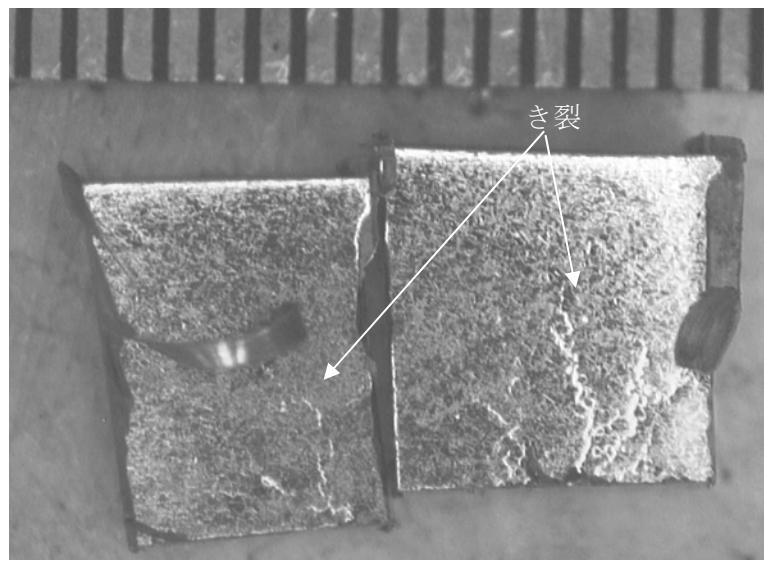


Fig. 3.5 切断後の外観

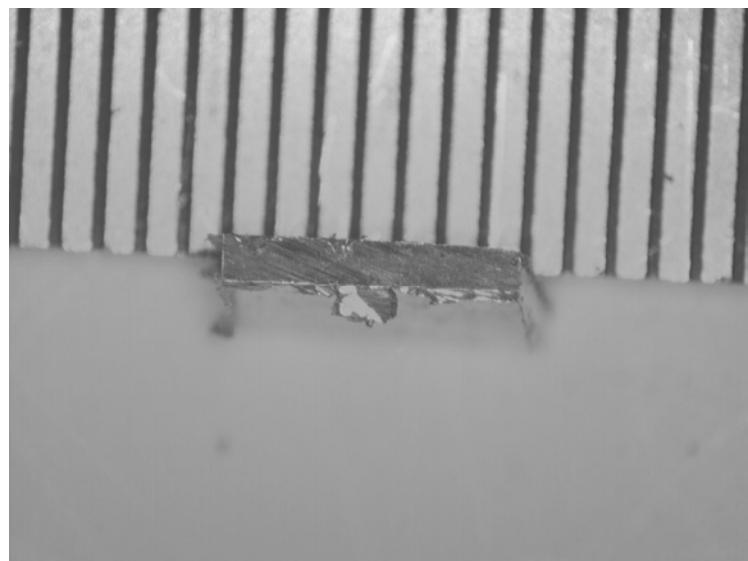


Fig. 3.6 厚さ調製後の試料外観

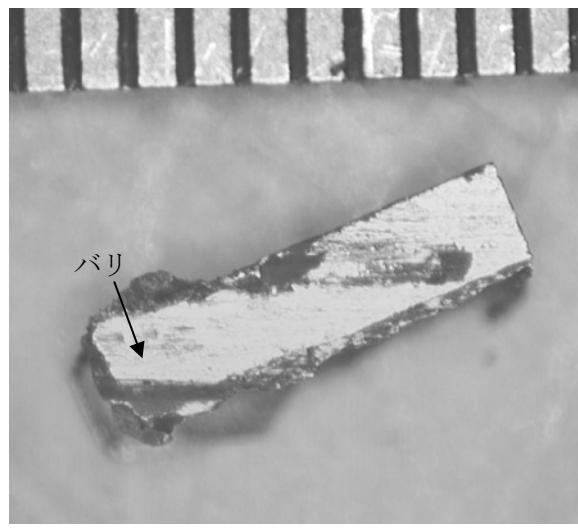


Fig. 3.7 切断調製後バリ取り前外観

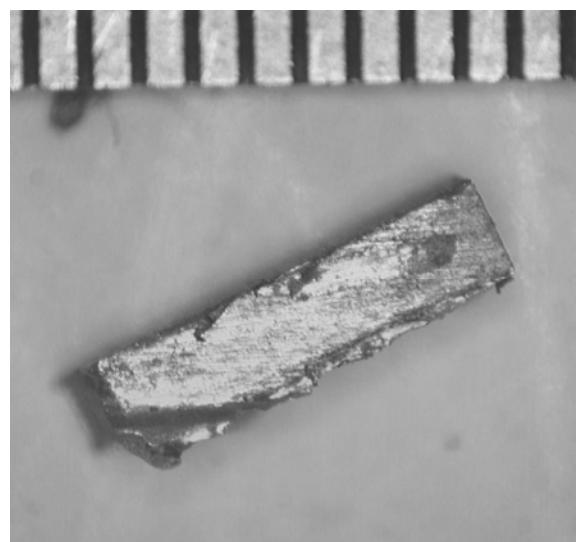


Fig. 3.8 切断調製後バリ取り後外観

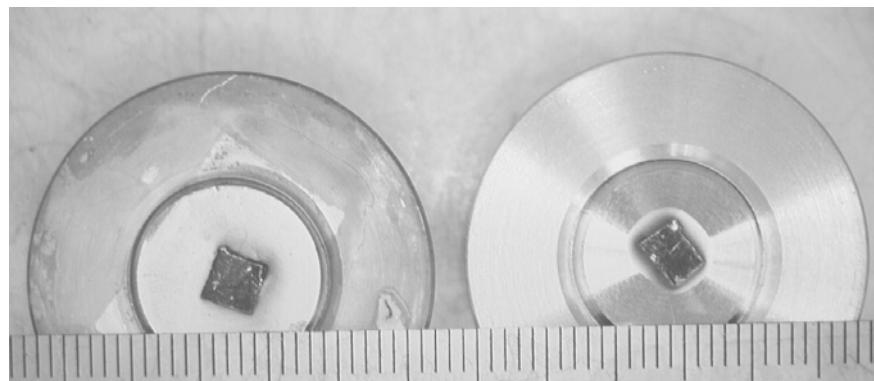


Fig. 3.9 試料をワックスにて固定した状態の写真

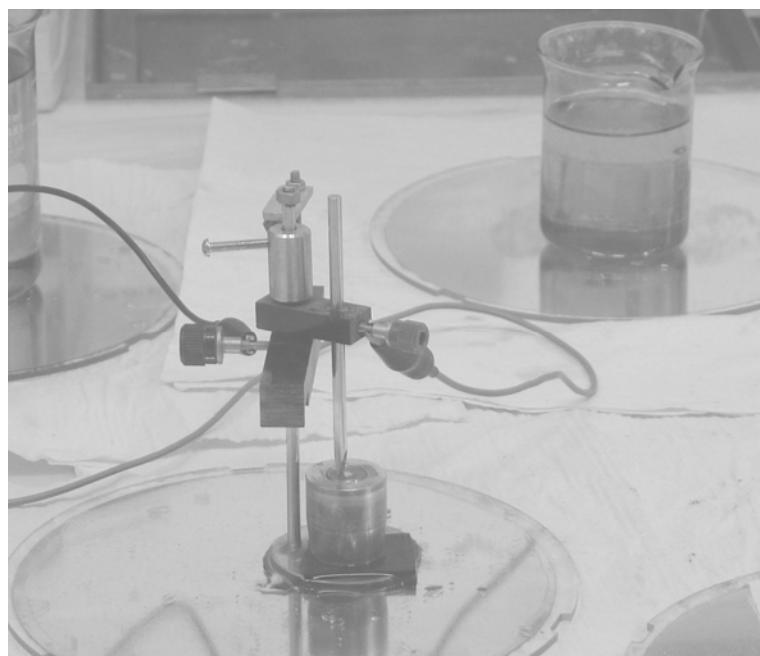


Fig. 3.10 電解腐食装置に試料を取付けた状態

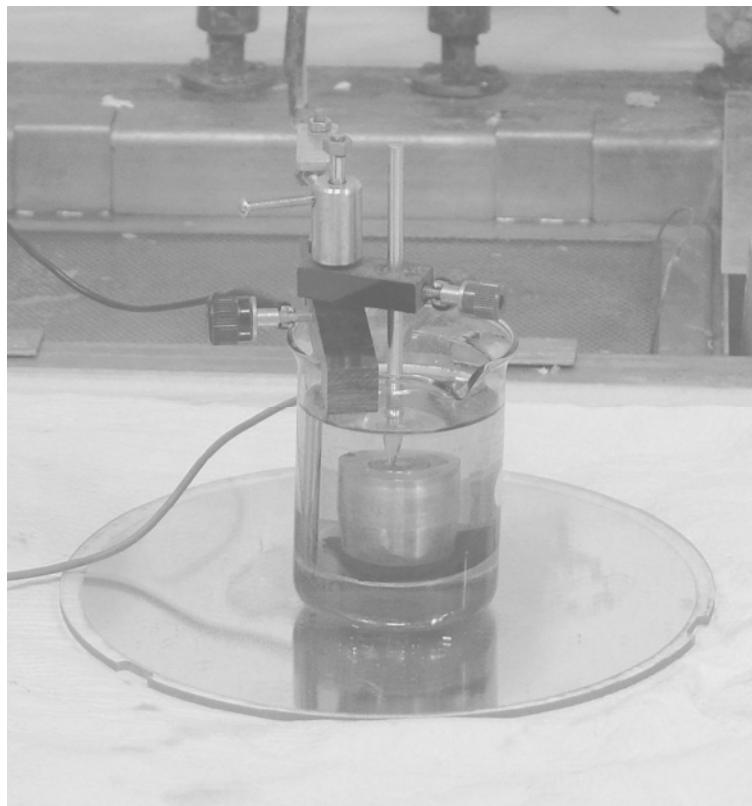


Fig. 3.11 電解腐食液に浸した状態

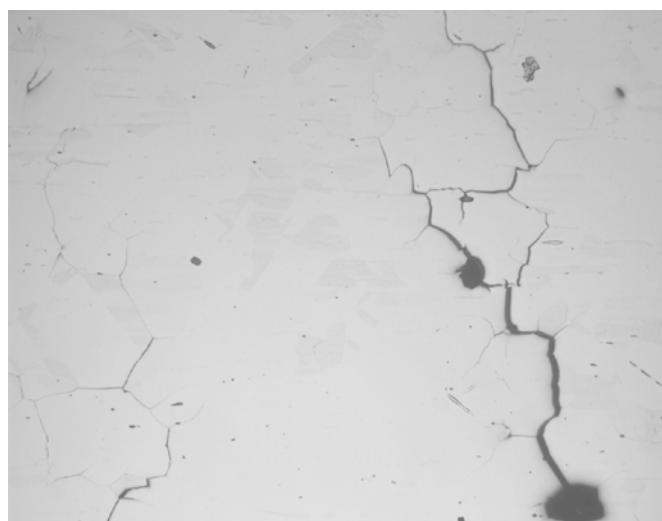


Fig. 3.12 電解腐食後の観察結果

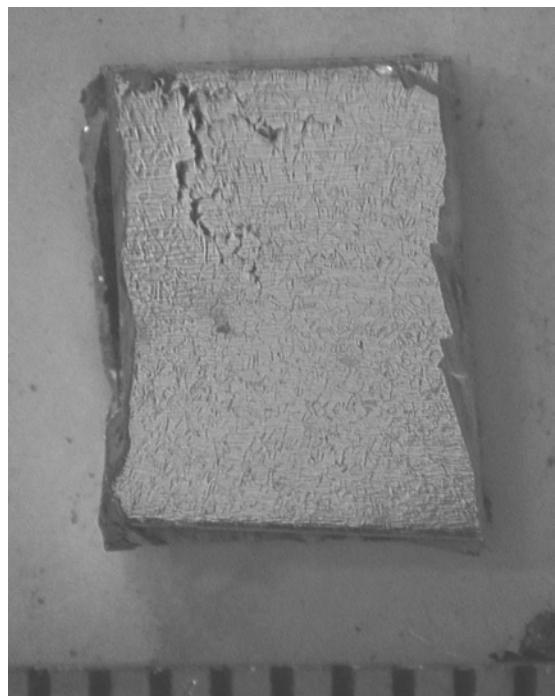


Fig. 3.13 洗浄後の状態（試料 1）

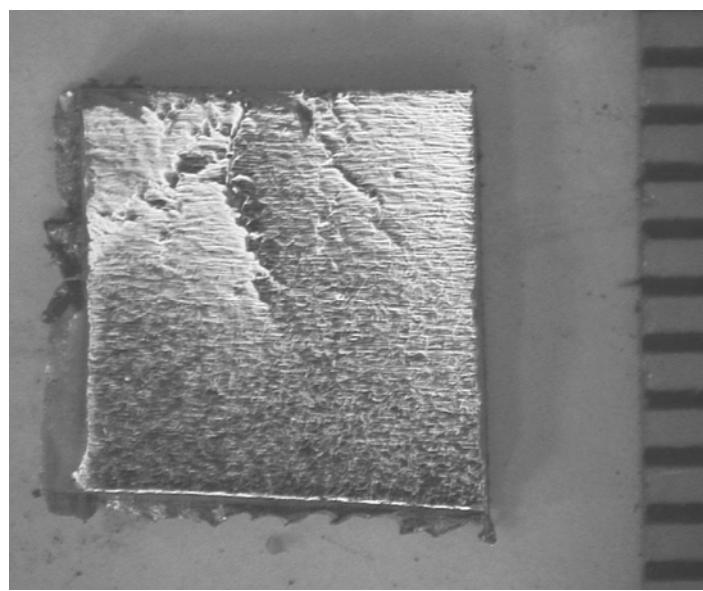


Fig. 3.14 洗浄後の状態（試料 2）

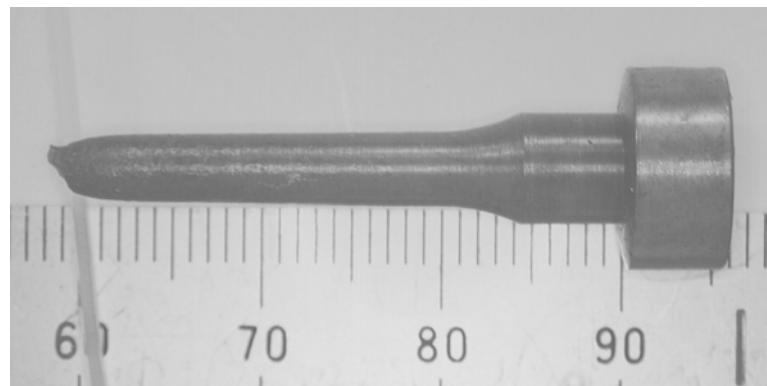


Fig. 3.15 引張試験片(SSRT 試験終了後)の外観

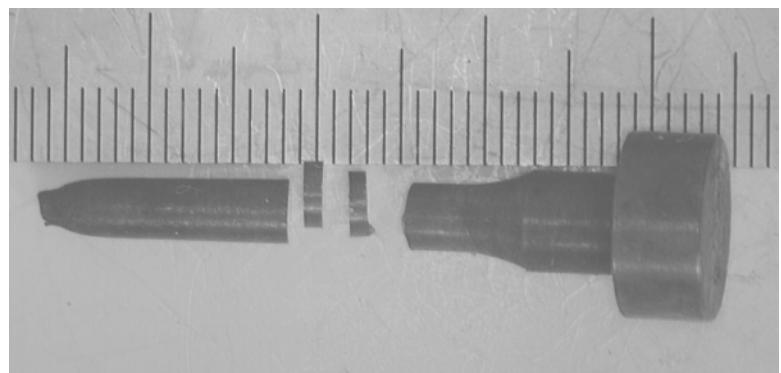


Fig. 3.16 切断後(TEM 試料)の外観



Fig. 3.17 TEM 試験片の切断後のバリ除去作業

国際単位系 (SI)

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

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
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比體積	立方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
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 ^(b)	rad	$1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(b)	$\text{sr}^{(c)}$	$1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	m^2/m^2
力	ニュートン	N	s^{-1}
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	$\text{m}^2/\text{kg s}^3$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$\text{m}^2/\text{kg s}^{-3}\text{A}^2$
コンダクタンス	シーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs A
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m^2
セルシウス温度	センチリュー	H	Wb/A
光束密度	ルーメン	lm	$\text{cd sr}^{(c)}$
放射性核種の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m^2
吸収線量, 比エネルギー, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq	s^{-1}
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	グレイ	Gy	J/kg
酸素活性	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
			m^2/s^2

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもやはヨーロピアンではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際にには、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である数字の 1 は表示されない。
 (c) 調光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度範囲を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) については CIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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	バスカル秒	Pa s	$\text{m}^{-1}\text{kg s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$\text{m}^2/\text{kg s}^2$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$\text{m}^{-1}\text{s}^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s^{-3}
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$\text{m}^2/\text{kg s}^2 \text{K}^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール每キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$\text{m}^2/\text{s}^2 \text{K}^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2/s^2
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$\text{m kg s}^{-3} \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1}\text{kg s}^2$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\text{m kg s}^3 \text{A}^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m^{-3}sA
表面電荷密度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m^{-2}sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m^{-2}sA
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$\text{m}^3/\text{kg s}^2 \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\text{m}^2/\text{kg s}^2 \text{A}^2$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$\text{m}^2/\text{kg s}^2 \text{mol}^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$\text{m}^2/\text{kg s}^2 \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1}sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2/s^3
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$\text{m}^4/\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	$\text{m}^2/\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} = \text{kg s}^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$\text{m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{mol}$

国際単位系 (SI)

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{-24}	ヨクタ	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5. SI接頭語

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1\text{ha}=1\text{hm}^2=10^4 \text{m}^2$
リットル	L	$1\text{L}=1\text{dm}^3=10^3 \text{cm}^3=10^{-3} \text{m}^3$
トン	t	$1\text{t}=10^3 \text{kg}$

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1\text{ha}=1\text{hm}^2=10^4 \text{m}^2$
リットル	L	$1\text{L}=1\text{dm}^3=10^3 \text{cm}^3=10^{-3} \text{m}^3$
トン	t	$1\text{t}=10^3 \text{kg}$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1\text{eV}=1.602 176 53(14) \times 10^{-19} \text{J}$
ダルトン	Da	$1\text{Da}=1.660 538 86(28) \times 10^{-27} \text{kg}$
統一原子質量単位	u	$1\text{u}=1\text{Da}$
天文単位	ua	$1\text{ua}=1.495 978 706 91(6) \times 10^{11} \text{m}$

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\text{bar}=0.1\text{MPa}=100\text{kPa}=10^5 \text{Pa}$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1\text{mmHg}=133.322 \text{Pa}$
オングストローム	Å	$1\text{\AA}=0.1\text{nm}=100\text{pm}=10^{-10} \text{m}$
海里	M	$1\text{M}=1852\text{m}$
バイン	b	$1\text{b}=100\text{fm}^2=(10^{-12}\text{cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	$1\text{kn}=1852/3600\text{m/s}$
ネバ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	$1\text{dB}=10\log_{10}(P/P_0)$

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「=」は対応関係を示すものである。

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\text{erg}=10^{-7} \text{J}$
ダイナ	dyn	$1\text{dyn}=10^{-5} \text{N}$
ボアズ	P	$1\text{P}=1\text{dyn s cm}^{-2}=0.1\text{Pa s}$
ストークス	St	$1\text{St}=1\text{cm}^2 \text{s}^{-1}=10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
スチール	sb	$1\text{sb}=1\text{cd cm}^{-2}=10^4 \text{cd m}^{-2}$
フォト	ph	$1\text{ph}=1\text{cd sr cm}^{-2} 10^4 \text{lx}$
ガル	Gal	$1\text{Gal}=1\text{cm s}^{-2}=10^{-2} \text{ms}^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\text{Mx}=1\text{G cm}^2=10^{-8} \text{Wb}$
ガウス	G	$1\text{G}=1\text{Mx cm}^{-2}=10^{-9} \text{T}$
エルステッド	Oe	$1\text{Oe} \triangleq (10^3/4\pi)\text{A m}^{-1}$

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「=」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリ	Ci	$1\text{Ci}=3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$
レントゲン	R	$1\text{R}=2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラド	rad	$1\text{rad}=1\text{cGy}=10^{-2} \text{Gy}$
レム	rem	$1\text{rem}=1\text{cSv}=10^{-2} \text{Sv}$
ガンマ	γ	$1\gamma=1\text{nT}=10^{-9} \text{T}$
フェルミ	fm	$1\text{フェルミ}=1\text{fm}=10^{-15} \text{m}$
メートル系カラット	Torr	$1\text{Torr}=(101 325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1\text{atm}=101 325 \text{ Pa}$
カロリー</td		

