

JAERI-Tech  
2003-083



JP0350711



ITER真空容器溶接部のすきま腐食感受性評価

2003年11月

中平 昌隆

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、  
お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡  
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,  
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-  
gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

ITER 真空容器溶接部のすきま腐食感受性評価

日本原子力研究所那珂研究所 ITER 開発室

中平 昌隆

(2003年9月10日受理)

ITER 真空容器は、二重壁構造となっており、二重壁内部に冷却水を使用することが想定されている。この二重壁の外壁と補強リブの溶接継手には、部分溶け込み溶接が採用される予定であるが、この継手の冷却水に接する部分に、溶接に起因する、長さ 5mm 以下、すきま 0.5mm 以下のすきまが生じる。冷却水の水質などの環境条件によっては、このすきま部にすきま腐食の発生が懸念されている。したがって、この溶接継手すきま部の、すきま腐食感受性を評価する必要がある。

ここでは、すきま腐食臨界電位概念に基づき、ITER の通常運転中の冷却条件である 150°C の運転温度、200°C でのベーキング温度および異常時点検用の乾燥後の通水プロセスなどの環境を模擬し、加速のために濃度を高めた複数の塩化物イオン環境下において、実機溶接すきま部のすきま腐食感受性を評価した。具体的には、SUS316L 材から金属すきま試験片を作成し、上記条件のもとで、腐食すきま再不動態化電位 ( $E_{R,CREV}$ ) の測定を実施した。得られた塩化物イオン濃度依存性データと、当該環境の定常腐食電位の推定値から局部腐食臨界電位概念に基づき、ITER 溶接部のすきま腐食感受性を評価した。

## Evaluation of Susceptibility on Crevice Corrosion for ITER Vacuum Vessel

Masataka NAKAHIRA

Department of ITER Project  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 10, 2003)

The ITER Vacuum Vessel has a double-walled structure and cooling water is filled in between inner and outer shells. It is planned to apply T-welded joints with partial penetration at the connection between outer shell and rib. The length and gap of non-penetrated part are controlled and limited to less than 5mm and 0.5mm respectively. Although it can be considered to be low susceptibility, crevice corrosion can possibly occur, because the water is stagnant in the crevice and impurities will condense.

In this report, the corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , was experimentally measured under the several density of NaCl solution, and compared to the steady-state corrosion potential in the pertinent environment, to evaluate the susceptibility. Simulated conditions are normal operating condition with water temperature of 150°C, baking operation with water temperature of 200°C and impurity condense by cyclic wet and dry condition.

Keywords: ITER, Vacuum Vessel, Crevice Corrosion, Partial Penetration, Corrosion-crevice Repassivation Potential, Steady-state Corrosion Potential, Baking, Wet and Dry, 150°C, 200°C

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. ITERの概要 .....	2
2.1 環境条件 .....	2
2.2 すきま腐食発生が懸念される溶接部 .....	3
3. 局部腐食の基礎 .....	3
3.1 不働態と局部腐食 .....	3
3.2 局部腐食機構 .....	5
3.3 局部腐食対策 .....	6
4. 試験方法 .....	6
4.1 供試材 .....	6
4.2 塩化物濃縮を模したSUS316L金属すきま試験片 .....	7
4.3 試験溶液および試験温度 .....	7
4.4 試験手順 .....	8
5. 試験結果および考察.....	9
5.1 溶接すきま試験片の品質確認 .....	9
5.2 溶接すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定(通常運転条件) .....	9
5.3 Metal/Metalすきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定(通常運転条件) .....	11
5.4 Metal/Metalすきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定(ベーキング運転条件) .....	12
5.5 塩化物濃縮型すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定(ベーキング運転条件) .....	13
5.6 定常腐食電位( $E_{SP}$ )の推定 .....	14
6. すきま腐食感受性評価 .....	14
7. まとめ .....	16
謝辞 .....	17
参考文献 .....	17

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of ITER .....	2
2.1 Environmental Condition .....	2
2.2 Weld Joint Considerable to Cause Crevice Corrosion .....	3
3. Basic Information of Localized Corrosion .....	3
3.1 Passivity and Localized Corrosion .....	3
3.2 Mechanism of Localized Corrosion .....	5
3.3 Measures against Localized Corrosion .....	6
4. Method of Test .....	6
4.1 Test Pieces .....	6
4.2 Test Pieces Simulating Condense of Chloride .....	7
4.3 Solutions and Temperature .....	7
4.4 Test Steps .....	8
5. Results of Tests and Considerations .....	9
5.1 Result of Test Piece Check .....	9
5.2 Measurement of Corrosion-crevice Repassivation Potential of Welded Crevice (Normal Operation Condition) .....	9
5.3 Measurement of Corrosion-crevice Repassivation Potential of Metal/Metal Crevice (Normal Operation Condition) .....	11
5.4 Measurement of Corrosion-crevice Repassivation Potential of Metal/Metal Crevice (Baking Operation Condition) .....	12
5.5 Measurement of Corrosion-crevice Repassivation Potential of Condensed Chloride Test Piece (Baking Operation Condition) .....	13
5.6 Interpolation of Corrosion Ppotential in the Pertinent Environment ( $E_{sp}$ ) .....	14
6. Evaluation of Susceptibility on Crevice Corrosion .....	14
7. Conclusion .....	16
Acknowledgment .....	17
References .....	17

## 1. はじめに

ITER 真空容器は、二重壁構造となっており、二重壁内部に冷却水を使用することが想定されている。この二重壁の外壁と補強リブの溶接継手には、部分溶け込み溶接が採用される予定であるが、この継手の冷却水に接する部分に、溶接に起因する、長さ 5mm 以下、すきま 0.5mm 以下のすきまが生じる。冷却水の水質などの環境条件によっては、このすきま部にすきま腐食の発生が懸念されている。したがって、この溶接継手すきま部の、すきま腐食感受性を評価する必要がある。

金属材料の局部腐食については、特定の環境／材料の組み合わせごとに孔食、すきま腐食、応力腐食割れのそれぞれの局部腐食の生起に対する臨界電位( $V_c$ )が存在し、これよりも高い(貴な)電位域では局部腐食生起の可能性があるが、より低い(卑な)電位域ではその可能性がない。したがって、当該材料／環境系における局部腐食臨界電位( $V_c$ )と定常腐食電位( $E_{SP}$ )とを比較することにより、局部腐食に対する材料の可使用条件範囲を定量的に明らかにすることができる。すなわち、 $E_{SP}$  が  $V_c$  よりも高い領域(高塩化物イオン濃度領域)では局部腐食生起の可能性があるが、 $E_{SP}$  が  $V_c$  よりも低い領域(低塩化物イオン濃度領域)ではその可能性がない。

局部腐食臨界電位( $V_c$ )は、定電位保持試験で局部腐食が発生しなくなる下限界の電位として本来定義される。したがって、局部腐食の発生／進展に対応して腐食電流が急激に立ち上がる電位としての動電位法局部腐食発生電位( $V'_c$ )とは区別される。ただし、孔食の場合には、動電位法における電位送り速度が十分遅ければ、 $V_{c,PIT}=V'_{c,PIT}$  が成立するから、通常は  $V'_{c,PIT}$  で代表できる。一方、すきま腐食の場合は、定常法(定電位保持法)で求めたすきま腐食臨界電位( $V_{c,CREV}$ )と、動電位法で求めた  $V'_{c,CREV}$  とが一致しない( $V'_{c,CREV}>V_{c,CREV}$ )が、すでに進展しつつあるすきま腐食の進展が停止する電位としての腐食すきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )は  $V_{c,CREV}$  と一致する( $E_{R,CREV}=V_{c,CREV}$ )から、 $E_{R,CREV}$  をもって臨界電位を代表できる<sup>1)</sup>。

ここでは、すきま腐食臨界電位概念に基づき、ITER の通常運転中の冷却条件である 150°C の運転温度、200°C でのベーキング温度および異常時点検用の乾燥後の通水プロセスなどの環境を模擬し、加速のために濃度を高めた複数の塩化物イオン環境下において、実機溶接すきま部のすきま腐食感受性を評価した。具体的には、SUS316L 材から金属すきま試験片を作成し、上記条件のもとで、腐食すきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )の測定を実施した。得られた塩化物イオン濃度依存性データと、当該環境の定常腐食電位の推定値から局部腐食臨界電位概念に基づき、ITER 溶接部のすきま腐食感受性を評価した。

## 2. ITER の概要

### 2.1 環境条件

#### 2.1.1 構造材料

ITER 真空容器の構造材料としては、低炭素オーステナイト系ステンレス鋼 Type316-IG 材の使用が検討されている。その化学組成例を Table 1 に示す。一般的に低炭素オーステナイト系ステンレス鋼は腐食に対する耐性が高く、特に 316L 系は応力腐食割れ(SCC)に対する感受性が低いとされている。しかし、すきまが存在する場合は不純物濃度が局所的に極めて高くなる可能性があり、その局所腐食感受性については別途評価する必要がある。

#### 2.1.2 水質条件

ITER の真空容器冷却系加圧水の水質は BWR と同程度に厳しく管理されることが予定されている。想定されている水質条件を Table 2 に示す。

#### 2.1.3 冷却水温度/圧力及び流速条件

Table 3 に ITER の冷却水運転条件を示す。通常運転時は水温 100~150°C となるが、一般的に温度が高くなるに連れて  $E_{R,CREV}$  は卑化する(下がる)ので、試験としてはより高い温度を設定する。

#### 2.1.4 ベーキング条件

ベーキングは 2.4MPa の入口圧力下で 200°C の水を使用して実施される。20 年間の運転期間について下記条件が定められている。

ベーキング回数: 10 回/年で合計 200 回

ベーキング時間: 10 日(wall condition)/回

このベーキング運転において、溶接すきまのすきま腐食感受性に最も関わりと想定されるのは温度条件であり、一般的に温度が高くなるに連れて  $E_{R,CREV}$  は卑化する(下がる)ことから、通常運転よりは、すきま腐食が生起しやすい条件と考えられる。したがって、通常運転時の 150°C 条件と併せて、200°C 条件における種々の塩化物イオン濃度環境での  $E_{R,CREV}$  測定によって、そのすきま腐食感受性を評価する必要がある。

#### 2.1.5 乾燥後の通水プロセス

ITER システムに何らかの異常が認められた場合に実施することが想定されている数種のプロセスがある。まず水抜きプロセスにおいては、ITER 冷却水はを室温の乾燥窒素(あるいは空気)で置換される。また、乾燥プロセスでは、同様に約 160°C の窒素ガスで置換される。また、リークテストの際には、室温のヘリウムガスが充填される。

このようなプロセスが実施された場合、考えられるケースとしては、乾湿繰り返しによる塩化物イオンの濃縮である。すなわち、乾湿繰り返しにより溶接すきま内部には高濃度塩化物イ



オン溶液、接するバルク溶液としての冷却水は低濃度塩化物イオン溶液という環境が成立する可能性がある。一般の室温環境においては、 $E_{R,CREV}$  はすきま内ではなくバルク溶液の塩化物イオン濃度によって支配されるから、すきま内塩化物イオン濃縮の影響は小さいものと考えられる。しかしながら、200℃条件下でのこれらの検討例はないから、人為的にすきま内塩化物イオン濃度を濃縮させたすきま付与試験片について  $E_{R,CREV}$  測定を実施し、通常のすきま付与試験片での結果と比較検討することによって、その影響の有無を確認しておく必要がある。

### 2.1.6 真空容器の中性子照射条件と核発熱条件

真空容器の中性子照射条件と核発熱条件を Table 4 にまとめる。腐食現象として注意しなければならないのは照射誘起応力腐食割れ(IASCC)であるが、これは軽水炉と同程度の水質で低炭素ステンレス鋼においては中性子フラックスが  $10^{24}$  n/m<sup>2</sup> 以下では著しく感受性が低くなり、ほとんど発生しないと見て良い。

## 2.2 すきま腐食発生が懸念される溶接部

すきま腐食発生の可能性が懸念されている外壁-リブ間の溶接継手の構造図を Fig. 1 に示す。継手の冷却水に接する部分には、長さ約 5mm、すきま 0.5mm 以下の金属すきまが存在する。

## 3. 局部腐食の基礎

### 3.1 不働態と局部腐食

ここでは、ステンレス鋼を例として、代表的な局部腐食形態としての孔食及びすきま腐食について述べる。ステンレス鋼あるいは Ti 合金のように、通常の水環境で不働態域にある金属、合金を耐食金属材料と呼ぶ。すなわち、耐食金属材料は不働態にあるような環境を選んで、保護皮膜(不働態皮膜)との複合体として使用されるべきものであって、材料/環境の組み合わせを誤れば、耐食材料といえども激しい侵食を受けることがある。

このような適切な使用においても、なおかつ現れる環境側の攻撃が、孔食、すきま腐食、応力腐食割れなどの「局部腐食(localized corrosion)」である。自然水環境に必ず含まれる塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)はステンレス鋼にこのような局部腐食をもたらす代表的な有害イオンである。

金属材料の局部腐食については、特定の環境/材料の組み合わせごとに孔食、すきま腐食、応力腐食割れのそれぞれの局部腐食の生起に対する臨界電位、 $V_c$  が存在し、これよりも高い(貴な)電位域では局部腐食生起の可能性があるが、より低い(卑な)電位域ではその可能性がない。したがって、Fig. 2 に模式的に示すように、当該材料/環境系における

局部腐食臨界電位( $V_c$ )と定常腐食電位( $E_{SP}$ )とを比較することにより、局部腐食に対する材料の可使用条件範囲を定量的に明らかにすることができる。すなわち、 $E_{SP}$ が $V_c$ よりも高い領域(高塩化物イオン濃度領域)では局部腐食生起の可能性があるが、 $E_{SP}$ が $V_c$ よりも低い領域(低塩化物イオン濃度領域)ではその可能性がない。

自然水環境である中性付近の水溶液中では、孔食臨界電位の pH 依存性は小さいから、Fig. 3<sup>2,3)</sup>では横軸を pH の代わりに塩化物イオン濃度とした電極電位-[Cl<sup>-</sup>]濃度図上に室温の 304 鋼の孔食臨界電位を  $V'_{c,PIT}$  として描いた。孔食はすきまの内自由表面に生じる孔あき腐食であるが、実環境では往々にして構造上の、あるいは付着物下のすきま部における“すきま腐食”が問題になる。そのすきま腐食臨界電位も  $V'_{R,CREV}$  として併掲した。このように、一般にすきま腐食臨界電位は孔食臨界電位に比べてはるかに低い。そのうえ、実際の構造物にあっては、特殊な場合を除いて構造上の、あるいは付着物下のすきま構造の存在は不可避であるから、孔食よりもすきま腐食が問題になる。

局部腐食臨界電位( $V_c$ )は、Fig. 4(a)に模式的に示すように、定電位保持試験で局部腐食が発生しなくなる下限界の電位として本来定義される。したがって、Fig. 4(b)に示す動電位分極曲線において、局部腐食の発生/進展に対応して腐食電流が急激に立ち上がる電位としての動電位法局部腐食発生電位、 $V'_c$ とは区別される。ただし、孔食の場合には、動電位法における電位送り速度が十分遅ければ(例えば 20mV/min)、 $V_{c,PIT}=V'_{c,PIT}$  が成立するから、通常は  $V'_{c,PIT}$  で代表できる。一方、すきま腐食の場合は、定常法(定電位保持法)で求めたすきま腐食臨界電位( $V_{c,CREV}$ )と、動電位法で求めた  $V'_{c,CREV}$  とが一致しない( $V'_{c,CREV}>V_{c,CREV}$ )。しかし、すでに進展しつつあるすきま腐食の進展が停止する電位として定義される腐食すきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )は  $V_{c,CREV}$  と一致する( $E_{R,CREV}=V_{c,CREV}$ )ため、 $E_{R,CREV}$  により臨界電位を代表できる<sup>1)</sup>。

腐食すきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )は Fig. 5 に示すように、すきま試験片の往復分極実験から求められる。すなわち、ポテンシオスタット(定電位電解装置)を用いて試験片を、自然浸漬状態からアノード方向(貴方向)に適当な電位送り速度(例えば 30mV/min)で分極し、腐食すきまの発生、進展に対応する腐食電流が観察されれば、定電位あるいは定電流保持により腐食すきまを適当に(例えば 200  $\mu$  A で 2h 保持)進展させる。その後は、逆のカソード方向(卑方向)に十分遅い速度で階段状分極(例えば 10mV/2h)する。この際、腐食すきまの進展に対応する電流の再増が認められたときは直ちに次の電位に移り、所与の保持時間(例えば 2h)の間に電流増加が認められなくなる電位をもって腐食すきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )と決定される。腐食すきま再不働態化電位測定は、複雑な電位操作の繰り返しであることから、マイクロコンピュータによる自動測定が広く行われている。腐食すきま再不働態化電位の意義、測定法などについては腐食防食協会の文献<sup>4)</sup>に詳しくまとめられている。

一方、ステンレス鋼の腐食電位は、局部腐食の発生がない限り時間と共に上昇し、長時間後に極めて貴な値の  $E_{SP}$  になり安定する。この  $E_{SP}$  は定常腐食電位と呼ばれるもので、その温度および pH 依存性を Fig. 6 に示しておく<sup>5)</sup>。  $E_{SP}$  は、室温で -0.059V/decade の pH 依存性を示すが、合金種あるいは温度依存性は小さい。

70°Cの中性塩化物水溶液環境における 304 鋼の腐食すきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )の測定例を Fig. 7 に示す<sup>6)</sup>。Figure 6 に示したように、中性(pH=7)におけるステンレス鋼の定常腐食電位は  $E_{SP}=0.32V$  vs SHE であるから、両者の比較から 70°Cにおける可使用限界塩化物イオン濃度は  $[Cl^-]_{CREV}=20\sim 30ppm$  と判定される。また、ステンレス鋼の腐食すきま再不働態化電位は本質的に環境の pH の影響を受けない<sup>7)</sup>。

### 3.2 局部腐食機構

水環境における不働態化ステンレス鋼の不働態皮膜は、塗覆装のような静的なものではなく、特に塩化物イオンなどの存在下では、局部的破壊と修復が繰り返されながら動的に維持されているものである。この皮膜破壊と修復による軽微な腐食速度は不働態保持電流として観察し得るが、通常は無視できるほど小さい。Figure 8 に概念図を示すように、すきま腐食の開始過程は(1)溶存酸素の消費、(2)これに伴う通気差電池の成立、(3)塩化物イオン濃度の上昇と pH の  $pH_d$ (脱不働態化 pH)以下への低下からなる。不働態保持電流に見合うカソード反応としての溶存酸素還元反応の進行は、当初はすきま内外とも同じであるが、狭い入口を通しての物質移動が制限されるすきま内部では沖合からの溶存酸素の補給が制限されるため、酸素は結局消費尽くされる。その後は、カソード反応はすきま外表面でのみ起こることになって、アノード(すきま内)とカソード(外表面)との場所的分離が成立する。これを必要条件として、すきま内塩化物イオン濃度が上昇すると同時に、すきま入口を通しての物質移動が制限されるために、金属イオンはすきま内にさらに蓄積し、加水分解反応を起こして水素イオンを放出し、すきま内溶液の pH を低下せしめる。これらが進行すると、ついにはすきま内で当該材料が脱不働態化するような高塩化物イオン濃度かつ低 pH の液性条件が達成され、すきま内における継続的アノード溶解を外表面のカソード反応が支えるという図式が成立し、すきま腐食と呼ばれる局部腐食が起きることになる。

結局、すきま内の脱不働態化条件の維持の成否は、すきま内への金属イオンの溶出速度としてのすきま内活性態溶解速度  $I_w$  とすきま入口を通しての沖合への物質移動との競合で決まることになる。 $I_w$  と電極電位とは単調な正の相関があるから、すきま構造(すきまの閉塞度)に応じて、必要な  $I_w$  を保証する電極電位としてのすきま腐食臨界電位が存在することになる。これらの様子を Fig. 9 の模型に示しておく。

上述の機構に従うと、すきま腐食臨界電位はすきまの閉塞度が緩いほど高くなり、無限に緩いすきまが自由表面の孔食ということになる。すなわち、孔食の生起過程では、自由表面における不働態皮膜が塩化物イオンの攻撃によって局部的に破壊されたときに生じる小孔がすきまとして働き得ることを保証するほどに高い電極電位を必要とすることになる。このように、すきまの閉塞度の観点から見ると、孔食は、幅広い閉塞度条件をもちうるすきま腐食の一つの特定な場合ということができる。

### 3.3 局部腐食対策

以上、ステンレス鋼を例にして局部腐食の概要を述べてきたが、Ti 合金<sup>8~11)</sup>あるいはアルカリ塩化物水溶液環境における炭素鋼<sup>12)</sup>の場合も同様である。

ひとたび局部腐食が生起すると、その進展速度は概して大きいから、局部腐食に対してはその発生の防止が肝要である。上述のように、 $E_{SP}$ と局部腐食臨界電位  $V_C$ との比較により可使用条件範囲を決定できるから、 $E_{SP} < V_C$ となるような材料/環境の組み合わせを選択することが第一義的に重要である。このために、高級材料の選定による高  $V_C$  化、脱気あるいはカソード防食による低  $E_{SP}$  化などの対策が現実にとられている。また、すきま腐食に対してはすきま構造、ガスケット材質の変更などによりすきまの閉塞度を軽減して、高  $E_{R,CREV}$  化を図る対策もとられている。

## 4. 試験方法

以下の条件で、腐食すきま再不働態化電位、 $E_{R,CREV}$  を測定する。この測定値が、定常腐食電位、 $E_{SP}$  より高い場合はすきま腐食が発生しないことに着目して、当該環境における、すきま腐食生起下限界[Cl<sup>-</sup>]濃度を明らかにして、ITER 溶接部のすきま腐食感受性を評価する。

### 4.1 供試材

供試材としては、市販の SUS316L 材を用いた。その化学成分を Table 5 に示す。すきま試験片としては、a)溶接すきま付き試験片、ならびに b)Metal/Metal すきま試験片の 2 種を試験に供した。

#### a) 溶接すきま試験片

下記の Metal/Metal すきま試験片(金属すきま試験片)による試験結果を検証するために、比較用試験片として溶接すきま試験片を試験に供した。上述の供試材について Fig. 1 に示した実機と同様の実物大の電子ビームによる部分溶け込み溶接継手を作製した後、機械加工により Fig. 10 に示すような  $20 \times 30 \times 10t$  (mm)の旗部を持ち、柄の長さが 200mm の旗型試験片を作製した。同図にみるように、本試験片は下面から 10mm の位置に  $20mm \times 5mm$  の溶接すきま部を有する。この溶接すきま付き試験片について、試験前に表面を #600 まで湿式研磨した後、アルコール脱脂を行い、柄の先端に SUS 製  $1\phi$ リード線を接続し、Fig. 11 に示すように、試験面以外を熱収縮チューブで被覆したものを試験に供した。なお、試験前には使用する試験溶液に浸し、すきま部に試験溶液を浸透させてから、試験セル(オートクレーブ)に設置した。

#### b) Metal/Metal すきま試験片(金属すきま試験片)

ごく一般的な Metal/Metal すきま試験片(金属すきま試験片)を試験に供した。すきま幅

の制御が困難な溶接すきま試験片に対し、本試験片はボルトで金属同士を閉め込むことにより、最も密着度が高い状態をつくることができる。一般的にすきま幅は小さいほど腐食感受性が高くなるため、すきまの幅に関しては最も保守的に評価が可能となる。供試材は Table 5 から切り出し、溶接すきま付き試験片と同材とした。機械加工により、Fig. 12 に示すような  $24 \times 30 \times 2t$  (mm) の旗部を持ち、柄の長さが 180mm の旗型試験片を作製した。また、同じ供試材から Fig. 13 に示すような  $20 \phi \times 3t$  (mm) の SUS316L 製ワッシャを機械加工により作製した。これらの、旗型試験片およびワッシャを試験前に #600 まで湿式研磨およびアルコール脱脂した後、試験溶液で濡らした状態で Fig. 14 に示すように Ti-Gr.1 製の M4 六角ボルト・ナットで両者を締め付け、旗部/ワッシャ間にすきまを形成させた。締め付けトルクについては、その値にかかわらず安定な  $E_{R,CREV}$  が測定でき、かつ十分に保守的な評価となる設定値として  $0.4\text{kgf}\cdot\text{m}^{13)}$  を選定した。柄の先端に SUS316L 製  $1 \phi$  リード線を接続し、試験面以外を熱収縮チューブで被覆したものを試験に供した。

#### 4.2 塩化物濃縮を模した SUS316L 金属すきま試験片

乾燥後の通水プロセス条件でのすきま腐食感受性を評価するための、塩化物濃縮を模した SUS316L 金属すきま試験片は次のようにして作製した。

4.1 b) の Metal/Metal すきま試験片と同様に、供試材から SUS316L 旗型試験片ならびに SUS316L ワッシャを切り出し、#600 まで湿式研磨した後アルコール脱脂した。室温において、飽和 NaCl 水溶液を別途作製し、マイクロピペットを使用して、旗型試験片試験面とワッシャとの併せ部分に  $10 \mu\text{L}$  塗布した後、ワッシャを併せた。次いでもう一方の併せ面にも同様に飽和 NaCl 水溶液を  $10 \mu\text{L}$  塗布してワッシャを併せ、Ti-Gr.1 製の M4 六角ボルト・ナットで両者を締め付けることにより、旗部/ワッシャ間に塩化物濃縮を模したすきまを形成させた。これを一旦乾燥させた後、オートクレーブにセットした。締め付けトルクは 4.1 b) 項と同様に  $0.4\text{kgf}\cdot\text{m}$  とした。

#### 4.3 試験溶液および試験温度

試験溶液は塩化ナトリウム(NaCl)水溶液とした。

塩化物イオン濃度は 5, 100, 1000, 10000ppm の 4 種類で試験を実施した。試験溶液はイオン交換水に試薬特級塩化ナトリウム(NaCl)を所定量加えることにより作製した。なお、5ppm[Cl<sup>-</sup>]条件については、電気化学測定に必要な電気伝導度を試験溶液に付与するために、支持塩として Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>を[SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]=1000ppm となるように添加した。

試験温度は 150°C 及び 200°C とし、静水型のオートクレーブを用いて試験を実施した。試験中はオートクレーブを密封するが、150°C におけるオートクレーブ内の内圧は  $5\text{kgf}/\text{cm}^2$  程度、200°C におけるオートクレーブ内の内圧は  $15\text{kgf}/\text{cm}^2$  程度である。

## 4.4 試験手順

試験は基本的に以下の手順で実施した。

- ① すきま付き試験片を、対極としての白金電極と共に、オートクレーブ蓋部ホルダーにセットする。
- ② オートクレーブ釜部に、所定の濃度の試験溶液を 425mL 注入した後、オートクレーブ蓋部と接続し、ボルト締めをする
- ③ オートクレーブ内の試験溶液に、窒素ガスを 2 時間吹き込むことにより溶液の脱酸素(脱気)を行う。
- ④ オートクレーブを密封して 200℃まで加熱する。
- ⑤ 自然腐食電位を所定時間測定した後、試験片の電位を自然腐食電位からアノード方向(貴な方向)に所定の電位送り速度(例えば 30mV/min)で、動電位分極する。(以下、phase1と称する)
- ⑥ 腐食すきまの発生、進展に対応する電流が観測され、その電流値が所定の値(例えば 200  $\mu$  A)に達したら、その電流値で定電流保持(例えば 200  $\mu$  A/2h 保持)することにより、腐食すきまを進展させる。(以下、phase2と称する)
- ⑦ その後は、逆のカソード方向(卑な方向)に、十分遅い速度で階段状分極(例えば 10mV/2h)する。この際、腐食すきまの進展に対応する電流の再増が認められたときは直ちに次の電位に移り、所与の保持時間(例えば 2h)の間に電流増加が認められなくなる電位をもって腐食すきま再不働態化電位、 $E_{R,CREV}$ と決定する。(以下、phase4と称する)
- ⑧ 終了後の試験片を観察し、目的とする溶接部すきま以外に腐食が生起していないことを確認し、 $E_{R,CREV}$  値を確定する。

なお、一般的に試験の種類や条件によっては、phase2 の定電流保持の後に、試験片の電位をカソード方向(卑な方向)に所定の電位送り速度(例えば 10mV/min)で、動電位分極する(phase3と称する)こともあるが、本試験においてはphase3は使用していない。また、本試験での phase1~4 は、予備検討により各々を適切な設定にして試験を実施した。

Figure 15 に腐食すきま再不働態化電位測定に用いた試験装置概要図を示す。

## 5. 試験結果および考察

### 5.1 溶接すきま試験片の品質確認

はじめに作製した溶接すきま試験片についての調査を実施した。作製した試験片は計 26 本(A-1～A-13, B-1～B-13)である。A,B の区別は、板をT字型に電子ビーム溶接した際にリブの左右にすきまが出来るが、この左右のすきまを区別したものである。

まず、試験片のすきま部の目視および光学顕微鏡観察を実施した。すきま部の明瞭さに関して、明瞭な順に○△×で Table 6 に示した。表に見るように、大半の試験片は初期状態ではすきま部が確認できず、すきま部がつぶれてしまっているものが多かった。しかしながら、粗めの研磨紙(#320 程度)によって再度研磨をしていくことにより、徐々にすきま開口部が確認されるようになった。代表例として、No.A-8 の試験片を再研磨し、すきま開口部を明瞭にした状態外観写真を Fig. 16 に示した。また、すきま開口部の拡大写真(x50)を Fig. 17 および 18 に示した。すきま開口幅は 60～100  $\mu\text{m}$  程度であった。

なお、Table 6 で初期状態で表面および側面のいずれにもすきま開口部が確認されなかったものは、加工不良のためすきま開口部が存在しないと判断し、試験には用いなかった。また、A-7 および B-12 は、初期状態でわずかにすきま開口部が確認されたものの、再研磨してもそれ以上明瞭になることはなかったため、試験には用いなかった。試験に用いなかった試験片は Table 6 に網がけの上 NG と表記した。

### 5.2 溶接すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定(通常運転条件)

まず、溶接すきま試験片について、150℃、1000ppm 条件での腐食すきま再不働態化電位測定を実施した。Figure 19 に、脱気した 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]水溶液環境での溶接すきま試験片(A-9)の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を併せて示す。測定操作としては、まず、試験片の電位を自然腐食電位からアノード方向(貴な方向)に 30mV/min の電位送り速度で、動電位分極した(phase1)。腐食すきまの発生、進展に対応する電流が観測され、その電流値が 200  $\mu\text{A}$  に達したら、直ちに定電流モードに切り替え、200  $\mu\text{A}$  で 5h の定電流保持を施して、腐食すきまを進展させた(phase2)。次いで、再び定電位モードに切り替え、定電流保持(phase2)終了時の電位で 2h の定電位保持を施した。2h 経過後、保持電位を 10mV 下げて、再び 2h の定電位保持をした。以後、電流値が 20  $\mu\text{A}$  を下回るまで、この操作を繰り返した(phase4)。以上の試験条件をまとめて Table 7 に示す。

Figure 19 にみるように、-0.280V で電流は 200  $\mu\text{A}$  に達し、その後 200  $\mu\text{A}$ /5h の定電流保持状態では、電位は 0.1～0.2V 程度を推移した。電流の挙動を見やすくするために、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 20 に示した。図にみるように、0.069V までの電流挙動は、上下動を繰り返しているが、0.059V 以下になると電流は緩やかに減少傾向に入った。

若干不明瞭ではあるが、本試験での電流増加が認められなくなった腐食すきま再不働態化電位、 $E_{R,CREV}$ としては、上述の 0.059V と決定した。

試験終了後の、試験片表面の外観、および溶接すきま内部の写真を Fig. 21 に示す。外観写真にみるように、溶接すきま開口部に多くのさび汁の発生が見られている。すきま内部は、全体的に褐色の様相を呈しており、所々に侵食跡(中央部および右端部など)が見られた。これらの侵食跡について、初期状態におけるすきま内部表面の仕上げ状態が明らかではないため、すきま腐食によるものと断定することは難しいが、さび汁の発生などから考えてもすきま腐食が生起していたものと思われる。なお、これらの観察中におけるすきま内のさびの色は、時間と共に薄緑色→褐色→茶褐色の順に変化していった。すきま腐食の機構の章でも述べたように、すきま内は溶存酸素が消費尽くされて還元性雰囲気となっており、その結果、試験中は還元雰囲気ですきま内に緑さびが生じており、その後、試験片を切断してすきま内が大気に触れると、さびは酸化するため、褐色→茶褐色と変化していったものと思われる。

Figure 19 に示した電流挙動が若干不明瞭であったため、同じ 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]条件で再現試験を実施した。試験条件を Table 8 に示す。脱気した 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]水溶液環境での溶接すきま試験片(A-11)の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を Fig. 22 に示す。また、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 23 に示す。

Figure 22 にみるように、-0.312V で電流は 200  $\mu$  A に達し、その後の 200  $\mu$  A/24h の定電流保持状態では、1 回目測定と同様に、電位は 0.1~0.2V 程度を推移した。Fig. 23 にみるように、30~40h の範囲での電流挙動には、<電流が徐々に上昇→10mV ステップダウン→電流が一旦下降後、再び徐々に上昇>といったすきま腐食の進展に特有の電流挙動が観測された。その後、0.034V 保持以降は電流の再増は見られなくなり、電流は緩やかに減少していった。すなわち、 $E_{R,CREV}$ は 0.034V と決定され、1 回目測定の 0.059V とほぼ一致し、良い再現性を示した。

試験終了後の、試験片表面の外観、および溶接すきま内部の写真を Fig. 24 に示す。外観写真にみるように、溶接すきま開口部にはさび汁の発生が見られている。また、すきま内部は、全体的に褐色で、所々に侵食跡が確認された。すなわちすきま腐食が生起したものである。

次に、溶接すきま試験片について 10000ppm[Cl<sup>-</sup>]条件での試験を実施した。試験条件を Table 9 に示す。脱気した 10000ppm[Cl<sup>-</sup>]水溶液環境での溶接すきま試験片(A-2)の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を Fig. 25 に示す。また、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 26 に示す。

Figure 25 にみるように、0.052V で電流は 200  $\mu$  A に達し、その後の 200  $\mu$  A/24h の定電流保持状態では、電位は-0.1~0V 程度を推移した。Fig. 26 にみるように、25~35h の範囲での電流挙動には、すきま腐食の進展に特有の電流の上下動が明確に観測された。-0.144V 保持において、電流は急激に減少し、すきま腐食の進展が止まったことを示した。したがって、 $E_{R,CREV}$ は-0.144V と決定された。

試験終了後の、試験片表面の外観、および溶接すきま内部の写真を Fig. 27 に示す。外観写真にみるように、溶接すきま開口部にはさび汁の発生が見られている。また、すきま内



部については、開口部から 2~3mm 程度の範囲にすきま腐食による深い侵食が確認された。

次に、溶接すきま試験片について 100ppm[Cl<sup>-</sup>]条件での試験を実施した。試験条件を Table 10 に示す。脱気した 100ppm[Cl<sup>-</sup>]水溶液環境での溶接すきま試験片(A-10)の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を Fig. 28 に示す。また、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 29 に示す。

Figure 28 にみるように、0.292V で電流は 500  $\mu$  A に達し、その後の 500  $\mu$  A/24h の定電流保持状態では、電位は 0.6V 程度を推移した。Fig. 29 にみるように、110~130h 程度の範囲での電流挙動には、すきま腐食の進展に特有の電流の上下動が明確に観測された。0.132V 保持以後は電流の再増挙動は見られなかった。したがって、 $E_{R,CREV}$  は 0.132V と決定された。

試験終了後の、試験片表面の外観、および溶接すきま内部の写真を Fig. 30 に示す。外観写真にみるように、溶接すきま開口部にはさび汁の発生が見られている。また、すきま内部については、全体的に黒褐色の様相を呈しており、開口部付近に若干の侵食が確認された。

### 5.3 Metal/Metal すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定(通常運転条件)

次に、溶接すきま試験片と同じ SUS316L 材からごく一般的な Metal/Metal すきま試験片を作製し、腐食すきま再不働態化電位測定を実施した。まず、Metal/Metal すきま試験片について 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]条件での試験を実施した。試験条件を Table 11 に示す。脱気した 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]水溶液環境での Metal/Metal すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を Fig. 31 に示す。また、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 32 に示す。

Figure 31 にみるように、0.346V で電流は 500  $\mu$  A に達し、その後の 500  $\mu$  A/24h の定電流保持状態では、電位は 0.5~0.6V 程度を推移した。Fig. 32 にみるように、70~110h の範囲での電流挙動には、すきま腐食の進展に特有の電流の上下動が明確に観測された。100h 付近で一旦電流が急増/下降をした後、120h 付近で再度電流は急増/下降し、0.043V 保持において電流は急激に減少した。したがって、 $E_{R,CREV}$  は 0.043V と決定され、溶接すきま試験片での値(1st:0.059V, 2nd:0.034V)と良く一致した。

試験終了後、Metal/Metal すきま試験片を解体した後のすきま面写真を Fig. 33 に表面、裏面を併せて示す。図にみるように、すきま内部には、明確なすきま腐食による侵食が確認された。

この Metal/Metal すきま試験片での結果と、同条件の溶接すきま試験片との結果を比較すると、腐食すきま再不働態化電位、 $E_{R,CREV}$  は、ほぼ一致していることに加えて、溶接すきま試験片の場合は、すきま内部の侵食状況の判別が難しかったが、Metal/Metal すきま試験片においては明確なすきま腐食が発生している。したがって、溶接すきま内の侵食はすきま腐食によるものだったと推測できる。

次に、Metal/Metal すきま試験片について 100ppm[Cl<sup>-</sup>]条件での試験を実施した。試験条件を Table 12 に示す。脱気した 100ppm[Cl<sup>-</sup>]水溶液環境での Metal/Metal すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を Fig. 34 に示す。また、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 35 に示す。

Figure 34 にみるように、0.114V で電流は 200  $\mu$  A に達し、その後の 200  $\mu$  A/24h の定電流保持状態では、電位は 0.8V 程度を推移した。Fig. 35 にみるように、170~200h の範囲での電流挙動には、すきま腐食の進展に特有の電流の上下動が観測されるが、0.110V 保持以降は電流は緩やかな減少傾向に転じた。したがって、 $E_{R,CREV}$  は 0.110V と決定され、同条件での溶接すきま試験片結果(0.132V)とほぼ一致した。

試験終了後、Metal/Metal すきま試験片を解体した後のすきま面写真を Fig. 36 に表面、裏面併せて示す。図にみるように、すきま内部には、明確なすきま腐食による侵食が確認された。

次に、Metal/Metal すきま試験片について 5ppm[Cl<sup>-</sup>]条件での試験を実施した。なお、本試験については電気化学測定に必要な電気伝導度を溶液に付与するために、支持塩として Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> を [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]=1000ppm となるように添加している。試験条件を Table 13 に示す。脱気した 5ppm[Cl<sup>-</sup>]水溶液環境での Metal/Metal すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を Fig. 37 に示す。また、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 38 に示す

Figure 37 にみるように、0.412V で電流は 200  $\mu$  A に達し、その後の 200  $\mu$  A/5h の定電流保持状態では、電位は 0.4V 程度を推移した。Fig. 38 にみるように、20~35h の範囲での電流挙動には、すきま腐食の進展に特有の電流の上下動が観測されるが、0.300V 保持以降は電流は緩やかな減少傾向に転じた。したがって、 $E_{R,CREV}$  は 0.300V と決定された。

試験終了後、Metal/Metal すきま試験片を解体した後のすきま面写真を Fig. 39 に表面、裏面を併せて示す。図にみるように、すきま内部には、明確なすきま腐食による侵食が確認された。

#### 5.4 Metal/Metal すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定(ベーキング運転条件)

まず、通常の金属すきま試験片について、10000ppm 条件での腐食すきま再不働態化電位測定を実施した。Fig. 40 に、脱気した 10000ppm[Cl<sup>-</sup>]水溶液環境での金属すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を併せて示す。測定操作としては、まず、試験片の電位を自然腐食電位からアノード方向(貴な方向)に 5mV/min の電位送り速度で、動電位分極した(phase1)。腐食すきまの発生、進展に対応する電流が観測され、その電流値が 3000  $\mu$  A に達したら、直ちに定電流モードに切り替え、3000  $\mu$  A で 2h の定電流保持を施して、腐食すきまを進展させた(phase2)。次いで、再び定電位モードに切り替え、定電流保持(phase2)終了時の電位で 2h の定電位保持を施した。2h 経過後、保持電位を 10mV 下げて、再び 2h の定電位保持をした。以後、電流値が十分に小さくなるまで、この操作を繰り返した(phase4)。以上の試験条件をまとめて Table 14 に示

す。

Figure 40 にみるように、 $-0.070\text{V}$  で電流は  $3000\ \mu\text{A}$  に達し、その後  $3000\ \mu\text{A}/2\text{h}$  の定電流保持状態では、最初は電位は  $-0.1\text{V}$  付近を推移したが、途中で若干上昇し、 $0.2\text{V}$  付近で安定した。電流の挙動を見やすくするために、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 41 に示した。図にみるように、 $0.067\text{V}$  までの電流挙動には、 $<$ 電流が徐々に上昇 $\rightarrow 10\text{mV}$  ステップダウン $\rightarrow$ 電流が一旦下降後、再び徐々に上昇 $>$ といったすきま腐食の進展に特有の電流挙動が観測された。その後、 $0.057\text{V}$  保持以降は電流の再増は見られなくなり、電流は緩やかに減少していった。したがって電流の上昇が認められなくなった腐食すきま再不働態化電位、 $E_{R,CREV}$  を  $0.057\text{V}$  と決定した。この値は、 $150^\circ\text{C}$  の同濃度  $[\text{Cl}^-]$  条件の結果 ( $-0.144\text{V}$ ) に比して  $0.2\text{V}$  ほど貴な値である。

試験終了後、金属すきま試験片を解体したすきま面の写真を Fig. 42 に表面、裏面を併せて示す。図にみるように、すきま内部には、明確なすきま腐食による変色が確認された。

次に、通常の金属すきま試験片について、 $1000\text{ppm}$  条件での腐食すきま再不働態化電位測定を実施した。Fig. 43 に、脱気した  $1000\text{ppm}[\text{Cl}^-]$  水溶液環境での金属すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を併せて示す。測定操作は Table 15 にまとめるように、 $10000\text{ppm}$  条件と同様である。

Figure 43 にみるように、 $0.617\text{V}$  で電流は  $3000\ \mu\text{A}$  に達し、その後の  $3000\ \mu\text{A}/2\text{h}$  の定電流保持状態では、電位は  $0.5\sim 0.6\text{V}$  程度を推移した。電流の挙動を見やすくするために、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 44 に示した。図にみるように、 $0.191\text{V}$  までの電流挙動には、すきま腐食の進展に特有の電流挙動が観測されたが、 $0.181\text{V}$  保持以降は電流の再増は見られなくなり、電流は緩やかに減少していった。したがって電流の上昇が認められなくなった腐食すきま再不働態化電位、 $E_{R,CREV}$  を  $0.181\text{V}$  と決定した。この値は、 $150^\circ\text{C}$  の同濃度  $[\text{Cl}^-]$  条件の結果 ( $0.04\text{V}$  程度) に比して  $0.14\text{V}$  ほど貴な値である。

試験終了後、金属すきま試験片を解体したすきま面の写真を Fig. 45 に表面、裏面を併せて示す。図にみるように、すきま内部には、 $10000\text{ppm}$  条件と同様の明確なすきま腐食による変色が確認された。

## 5.5 塩化物濃縮型すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定(ベーキング運転条件)

すきま内の塩化物濃縮を模した金属すきま試験片について、 $1000\text{ppm}$  条件での腐食すきま再不働態化電位測定を実施した。Fig. 46 に、脱気した  $1000\text{ppm}[\text{Cl}^-]$  水溶液環境での塩化物濃縮型金属すきま試験片の腐食すきま再不働態化電位測定操作時の電位挙動および電流挙動の経時変化を併せて示す。測定操作は Table 16 にまとめるように、これまでと同様である。

Figure 46 にみるように、 $0.08\text{V}$  で電流は  $3000\ \mu\text{A}$  に達し、その後の  $3000\ \mu\text{A}/2\text{h}$  の定電流保持状態では、試験片電位は最初に徐々に卑化していった後、上昇し  $0.4\sim 0.5\text{V}$  程度で推移した。電流の挙動を見やすくするために、phase4 の一部を拡大したものを Fig. 47 に示

した。図にみるように、0.193V までの電流挙動には、すきま腐食の進展に特有の電流挙動が観測されたが、0.183V 保持以降は電流の再上昇傾向があいまいになり、電流は緩やかな減少傾向を示している。したがって電流の上昇が認められなくなった腐食すきま再不働態化電位、 $E_{R,CREV}$  を 0.183V と決定した。この値は、通常の金属すきま試験片を用いた試験での結果とほぼ一致している。

試験終了後、金属すきま試験片を解体したすきま面の写真を Fig. 48 に表面、裏面を併せて示す。図にみるように、すきま内部には、明確なすきま腐食による変色が確認された。

## 5.6 定常腐食電位( $E_{SP}$ )の推定

局部腐食臨界電位概念に基づいてすきま腐食感受性を評価するためには、当該環境における定常腐食電位、 $E_{SP}$  データが必要である。しかしながら、現時点では 150°C および 200°C における同データは見当たらないため、ここでは、ほぼ同様な水質条件である BWR 一時冷却水系におけるステンレス鋼 SUS304 のデータを用いて、ITER 環境の定常腐食電位( $E_{SP}$ )を類推する。

Figure 49 に、288°C の模擬 BWR 環境において十分に不働態化させた SUS304 鋼の定常腐食電位測定結果<sup>14)</sup>を示す。伝導度は  $0.1 \mu S$  以下で、溶存酸素濃度は 0.25~0.35ppm 程度である。図にみるように、288°C における SUS304 鋼の定常腐食電位( $E_{SP}$ )は 0.08V 程度である。

一方、25°C での SUS304 の定常腐食電位( $E_{SP}$ )は主として溶液 pH に依存し、Fig. 50 に示すように pH=7 においては 0.319V 程度となる<sup>5)</sup>。

以上の 25°C および 288°C の定常腐食電位、 $E_{SP}$  データを Fig. 51 にアレニウスプロットとして示した。図から、150°C および 200°C におけるステンレス鋼の定常腐食電位を類推すると、それぞれ 0.168V および 0.130V 程度となる。そこで、本研究では、150°C および 200°C 条件下での SUS316L 鋼の定常腐食電位( $E_{SP}$ )を暫定的にそれぞれ 0.168V および 0.130V とし、すきま腐食感受性評価を実施した。なお、これらの定常腐食電位は、過酸化水素の溶存などにも影響を受けるが、これらの詳細な検討については今後の課題である。

## 6. すきま腐食感受性評価

Figure 52 に、本試験で求めたすべての条件下での腐食すきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )の値を塩化物イオン濃度条件に対してプロットした。図中には、比較のため、20~80°C の塩化物環境で測定された SUS304/ポリサルフォンすきま試験片の  $E_{R,CREV}$  データ<sup>15)</sup>、55°C の塩化物環境で測定された SUS316/ポリサルフォンすきま試験片の  $E_{R,CREV}$  データ<sup>14)</sup>を併せて示した。図で、同じ塩化物イオン濃度条件での  $E_{R,CREV}$  が高いということは、それだけすきま腐食が生起しにくいということ、すなわちすきま腐食感受性が小さいことを示している。

図にみるように、まず SUS304 と SUS316(L)の結果を比較すると、SUS316(L)の 55°C なら

びに 150°C の  $E_{R,CREV}$  は、それぞれ SUS304 の 20°C ならびに 80°C の  $E_{R,CREV}$  と同レベルであるから、SUS316(L) の方がよりすきま腐食感受性が小さいことがわかる。また、これらの温度条件範囲での  $E_{R,CREV}$  は温度の上昇とともに低くなる傾向が認められる。

しかしながら、本試験で求めた 200°C 条件での通常の SUS316L 金属すきま試験片の  $E_{R,CREV}$  は、いずれも 150°C 条件よりも高くなり、55°C 条件の水準程度まで上昇する。ステンレス鋼の不働態皮膜は、室温付近では薄い nm オーダーの不働態皮膜であるが、BWR 環境のような高温条件では、厚い  $\mu\text{m}$  オーダーの酸化物皮膜になることが知られている。したがって、本試験において、150°C 条件に比して 200°C 条件の  $E_{R,CREV}$  がむしろ高くなった実験事実は、この皮膜性状の違いに起因すると考えられる。この 150~200°C の挙動の詳細な検討については、今後の課題である。

より保守的に評価するため、測定された 150°C の  $E_{R,CREV}$  の最も卑な結果を結んだ場合の直線は次式；

$$E_{R,CREV} = 0.364 - 0.127\log[\text{Cl}^-] \quad (1)$$

で与えられる

また、200°C での 1000ppm 条件および 10000ppm 条件のプロットに直線をあてはめて、 $E_{R,CREV}$  の塩化物濃度依存性の実験式として次式；

$$E_{R,CREV} = 0.553 - 0.124\log[\text{Cl}^-] \quad (2)$$

を得た。

Figure 53 に、(1)、(2)式と、2.6.2 項で類推した 200°C における定常腐食電位、 $E_{SP}$  値との関係を、150°C 条件と併せてまとめた。

図にみるように、(1)式と、150°C の定常腐食電位、 $E_{SP}=0.168\text{V}$  との交点の塩化物イオン濃度  $[\text{Cl}^-]$  は 35ppm、(2)式と、200°C の定常腐食電位、 $E_{SP}=0.130\text{V}$  との交点の塩化物イオン濃度  $[\text{Cl}^-]$  は 2578ppm となり、これより  $[\text{Cl}^-]$  が大きいと  $E_{R,CREV}$  よりも  $E_{SP}$  の方が高くなるため、当該環境ですきま腐食が生じることが予想されるが、これより  $[\text{Cl}^-]$  が小さい場合は、 $E_{SP}$  は  $E_{R,CREV}$  に達しないため、すきま腐食は生じない。すなわち、当該環境におけるすきま腐食生起下限界  $[\text{Cl}^-]$  条件は 35ppm 程度と見積もられた。

Table 2 に示したように、ITER の水質条件としては 0.005ppm  $[\text{Cl}^-]$  程度での運転が想定されており、この濃度は上述した下限界  $[\text{Cl}^-]$  条件に比してはるかに小さい。すなわち実機 ITER 環境においては、すきま腐食が生起・進展する可能性はないものと結論される。

また、乾燥後の通水プロセスを模擬して、予めすきま内に塩化物を濃縮させた塩化物濃縮型金属すきま試験片の 1000ppm 条件での  $E_{R,CREV}$  は、0.183V であり、通常の金属すきま試験片のそれとほぼ一致した。したがって、初期状態におけるすきま内の塩化物イオン濃度は  $E_{R,CREV}$  に寄与せず、あくまでバルク溶液の塩化物イオン濃度が  $E_{R,CREV}$  を支配するものと考えられる。したがって、乾燥後の通水プロセスによって、初期状態で仮にすきま内に

塩化物が濃縮していたとしても、バルク溶液の塩化物イオン濃度が、運転条件どおりの 0.005ppm 程度であれば、すきま腐食が生起・進展する可能性はないものと結論された。

## 7. まとめ

ITER 真空容器溶接部に生じる金属すきまについて、150°Cの通常運転、200°Cで行われるベーキング運転、ならびに乾燥後の通水プロセスの環境条件でのすきま腐食感受性を評価するために、腐食すきま再不働態化電位測定を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- ① 溶接すきま試験片の  $E_{R,CREV}$  結果は、一般的な Metal/Metal すきま試験片のそれとほぼ同様であり、それは塩化物イオン濃度の対数と良い直線関係を示した。
- ② 実験で得られた  $E_{R,CREV}$  の塩化物イオン濃度依存性と、既存データから類推した当該環境における SUS316L の定常腐食電位、 $E_{SP}$  データから、150°C条件ですきま腐食が生起する下限界[Cl<sup>-</sup>]濃度は 35ppm 程度と見積もられた。
- ③ 200°C条件での通常の SUS316L 金属すきま試験片の  $E_{R,CREV}$  は、150°C条件に比してむしろ高い値となった。
- ④ 実験で得られた 200°C条件における  $E_{R,CREV}$  の塩化物イオン濃度依存性と、既存データから類推した当該環境における SUS316L の定常腐食電位、 $E_{SP}$  データから、すきま腐食が生起する下限界[Cl<sup>-</sup>]濃度は 2578ppm 程度と見積もられた。
- ⑤ ITER の水質条件としては 0.005ppm 程度での運転が想定されており、その濃度は上述した下限界[Cl<sup>-</sup>]条件 35ppm に比してはるかに小さい。したがって、実機 ITER がベーキング運転をしたとしても、すきま腐食が生起・進展する可能性は極めて少ないものと結論された。
- ⑥ 事前にすきま内に塩化物を濃縮させた塩化物濃縮型金属すきま試験片の  $E_{R,CREV}$  は、通常の金属すきま試験片の  $E_{R,CREV}$  とほぼ一致した。すなわち、200°C条件において、金属すきま試験片の  $E_{R,CREV}$  は、あくまでバルク溶液の塩化物濃度に依存すると考えられ、乾燥後の通水プロセスを行っても、すきま腐食が生起・進展する可能性はないものと結論された。
- ⑦ 150~200°Cの範囲での  $E_{R,CREV}$  の挙動については、ステンレス鋼表面に発生する不動態皮膜の温度依存性等の詳細な検討を実施することが今後の課題である。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、原子力安全協会における核融合実験炉構造基準案検討専門委員会(委員長 朝田泰英 東大名誉教授)(平成10年度～平成13年度)において学識経験者の方々に御審議を頂き、深く感謝致します。

また、試験の実施につきましては、石川島播磨重工業株式会社の深谷祐一氏ならびに明石正恒氏にご協力頂き、深く謝意を表します。

最後に本研究に多くのご支援を頂いた多田栄介安全設計室長ならびに羽田一彦主任研究員に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 辻川茂男, 久松敬弘 : 防食技術, 29, 37 (1980).
- 2) 塩原國雄, 森岡 進 : 日本金属学会誌, 36, 385 (1972).
- 3) 塩原國雄, 川口明廣 : 第48回腐食防食シンポジウム資料, 腐食防食協会, p.44 (1983).
- 4) 第48回腐食防食シンポジウム資料, “腐食すきまの評価法”, 腐食防食協会 (1983).
- 5) 中山 元, 福田敬則, 明石正恒 : 腐食防食'93講演集, p.415 (1993).
- 6) 明石正恒, 稲見英昭 : 第34回腐食防食討論会講演集, 腐食防食協会, p.173 (1987).
- 7) 腐食防食協会編 : “金属の腐食・防食 Q&A”, 丸善, p.160 (1988).
- 8) 壺岐史章, 辻川茂男 : 鉄と鋼, 72, 292 (1986).
- 9) 貴堂高德, 辻川茂男 : 鉄と鋼, 75, 1332 (1989).
- 10) S. Tsujikawa and Y. Kojima : Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 212, 261 (1991).
- 11) T. Fukuda and M. Akashi : CORROSION/92, NACE, Paper No.92 (1992).
- 12) G. Nakayama and M. Akashi : Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 212, 279 (1991).
- 13) 福田敬則, 明石正恒 : 腐食防食'96講演集, 腐食防食協会, p.083 (1996).
- 14) 深谷祐一, 明石正恒 : 未発表データ
- 15) M. Akashi, G. Nakayama, T. Fukuda : “Initiation Criteria for Crevice Corrosion of Titanium Alloys Used for HLW Disposal Overpack,” CORROSION/98, NACE International, Paper No. 158 (1998).

Table 1 Chemical composition of type 316 stainless steel planned to apply for ITER vacuum vessel

Material	Chemical composition (wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	N	Co
SUS316L-IG	<0.03	<1.0	<2.0	<0.045	<0.03	12.0- 15.0	16.0- 18.0	2.0- 3.0	-	0.06- 0.08	-

Table 2 ITER vacuum vessel cooling water chemical specifications

Parameters	Specification
pH (at RT)	neutral
Hydrogen (cm <sup>3</sup> /kg)	25
Oxygen (ppm)	< 0.1
Chloride and/or fluoride (ppm)	< 0.005
Hardness (Ca, Mg, etc.) (ppm)	< 0.005
Sulfate (ppm)	< 0.005
Iron (ppm)	< 0.005
Copper (ppm)	< 0.005
Conductivity ( $\mu$ Siemens/cm at 20°C)	< 0.3
Oil products, organic (ppm)	< 0.1

Table 3 ITER vacuum vessel cooling water operation conditions

Parameters	Specification
<b>1. Plasma operation</b>	
Inlet / outlet temperature (°C / °C)	100 / 150
Inlet pressure (MPa)	2
Flow speed (m/s)	0.001-0.005
<b>2. Backing</b>	
Inlet temp x duration (°C x hrs)	200×100
Inlet pressure (MPa)	2.5
Flow speed (m/s)	TBD



Table 4 Neutron irradiation and nuclear heating of ITER vacuum vessel

Neutron flux ( $E \geq 0.1$ MeV) (fluence)	$3 \times 10^{22}$ n/m <sup>2</sup> (3MWa/m <sup>2</sup> )
$\gamma$ - ray	$< 3 \times 10^5$ R/h
Nuclear heating	$< 1 \times 10^{-4}$ W/cc

Table 5 Chemical composition of material used for test

	Chemical composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS316L	0.013	0.47	0.89	0.023	0.001	12.07	17.54	2.14
Standard (JIS G4304-1991)	<0.030	<1.00	<2.00	<0.045	<0.030	12.00 - 15.00	16.00 - 18.00	2.00 - 3.00

Table 6 Result of quality check about welded test piece

Lot No.	Length (mm)	Visual check result of initial crevice opening on front surface	Visual check result of initial crevice opening on side surface	Remark
A-1	4.9	○	○	
A-2	5.0	△	○	
A-3	5.0	△	○	
A-4	4.9	○	○	
A-5	4.9	○	○	
A-6	4.9	○	○	
A-7	5.3	×	△	NG
A-8	5.4	×	○	
A-9	5.7	△	△	
A-10	5.7	×	△	
A-11	5.6	△	△	
A-12	-	×	×	NG
A-13	5.9	×	○	
B-1	-	×	×	NG
B-2	5.9	×	○	
B-3	-	×	×	NG
B-4	-	×	×	NG
B-5	5.1	×	○	
B-6	-	×	×	NG
B-7	-	×	×	NG
B-8	-	×	×	NG
B-9	5.0	×	△	
B-10	-	×	×	NG
B-11	-	×	×	NG
B-12	5.0	×	△	NG
B-13	-	×	×	NG

Table 7 Test condition on welded crevice test piece under 150°C, 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Welded crevice, A-9
Chloride water solution		1000 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
E <sub>R,CREV</sub> measuring condition	phase1	30 mV/min
	phase2	200 μ A/5h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 8 Test condition on welded crevice test piece under 150°C, 1000ppm[Cl<sup>-</sup>] as repeatability test

Test piece		Welded crevice, A-11
Chloride water solution		1000 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
E <sub>R,CREV</sub> measuring condition	phase1	30 mV/min
	phase2	200 μ A/24h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 9 Test condition on welded crevice test piece under 150°C, 10000ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Welded crevice, A-2
Chloride water solution		10000 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
E <sub>R,CREV</sub> measuring condition	phase1	30 mV/min
	phase2	200 μ A/24h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 10 Test condition on welded crevice test piece under 150°C, 100ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Welded crevice, A-10
Chloride water solution		100 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
E <sub>R,CREV</sub> measuring condition	phase1	30 mV/min
	phase2	500 μ A/24h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 11 Test condition on metal/metal crevice test piece under 150°C, 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Metal/metal crevice
Chloride water solution		1000 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
$E_{R,CREV}$ measuring condition	phase1	30 mV/min
	phase2	500 $\mu$ A/24h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 12 Test condition on metal/metal crevice test piece under 150°C, 100ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Metal/metal crevice
Chloride water solution		100 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
$E_{R,CREV}$ measuring condition	phase1	30 mV/min
	phase2	200 $\mu$ A/24h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 13 Test condition on metal/metal crevice test piece under 150°C, 5ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Metal/metal crevice
Chloride water solution		5 ppm[Cl <sup>-</sup> ] (+1000ppm[SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup> ])
$E_{R,CREV}$ measuring condition	phase1	1 mV/min
	phase2	200 $\mu$ A/5h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 14 Test condition on metal/metal crevice test piece under 200°C, 10000ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Metal/metal crevice
Chloride water solution		10000 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
E <sub>R,CREV</sub> measuring condition	phase1	5 mV/min
	phase2	3000 μ A/2h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 15 Test condition on metal/metal crevice test piece under 200°C, 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Metal/metal crevice
Chloride water solution		1000 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
E <sub>R,CREV</sub> measuring condition	phase1	5 mV/min
	phase2	3000 μ A/2h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

Table 16 Test condition on condensed chloride metal/metal crevice test piece under 200°C, 1000ppm[Cl<sup>-</sup>]

Test piece		Condensed chloride metal/metal crevice
Chloride water solution		1000 ppm[Cl <sup>-</sup> ]
E <sub>R,CREV</sub> measuring condition	phase1	5 mV/min
	phase2	3000 μ A/2h
	phase3	-
	phase4	10 mV/2h

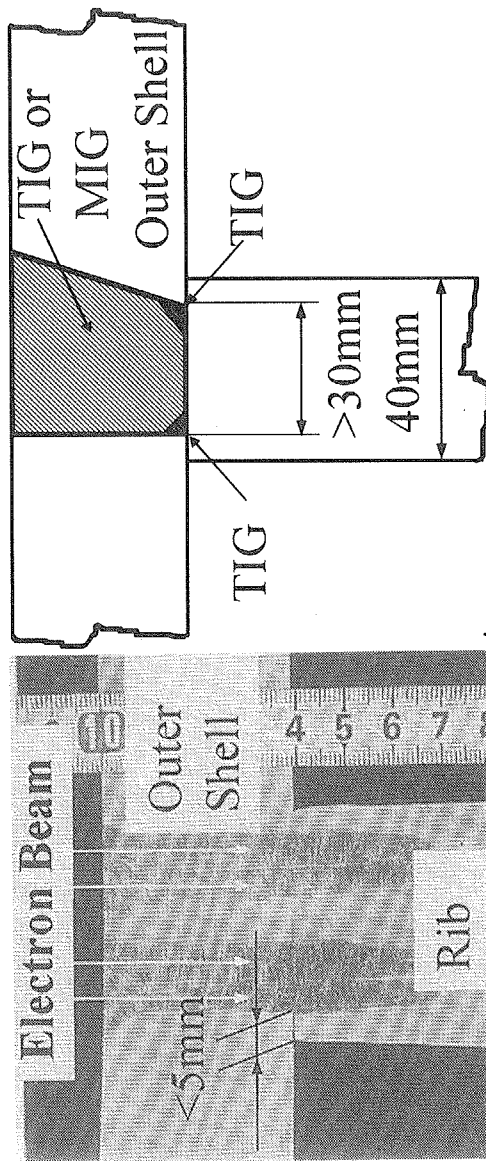


Fig. 1 Partial penetration joint having possibility to cause crevice corrosion

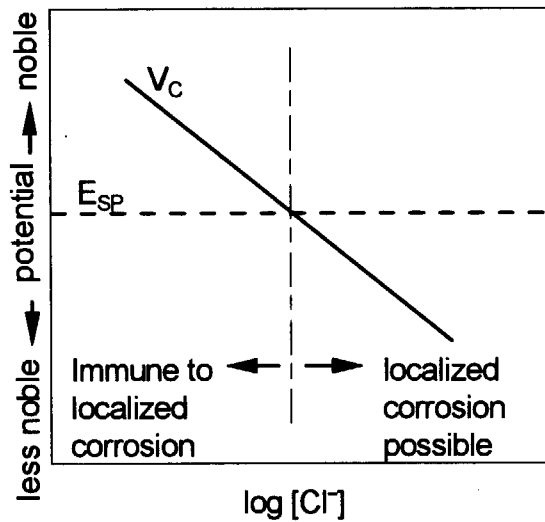


Fig. 2 Schematic view of localized corrosion immunity identification by comparison of critical potential for localized corrosion,  $V_c$ , and steady-state corrosion potential in the pertinent environment of the target material,  $E_{sp}$ .

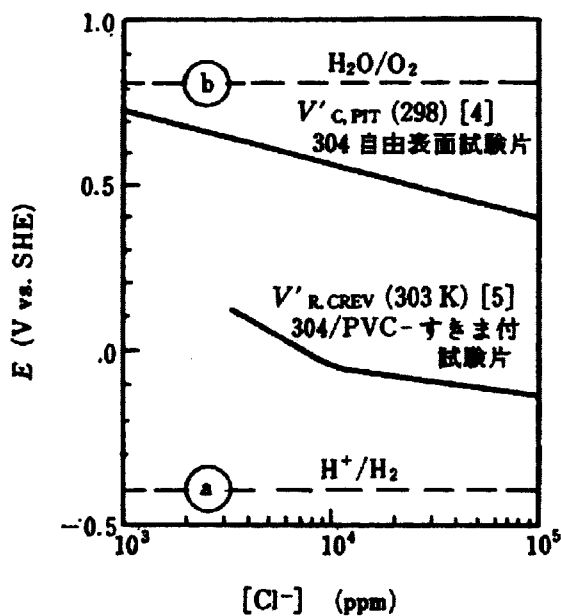


Fig. 3 Example of measured results of critical potential for pit,  $V'_{c,PIT}$ , and critical potential for crevice,  $V'_{r,CREV}$ , about type 304 stainless steel

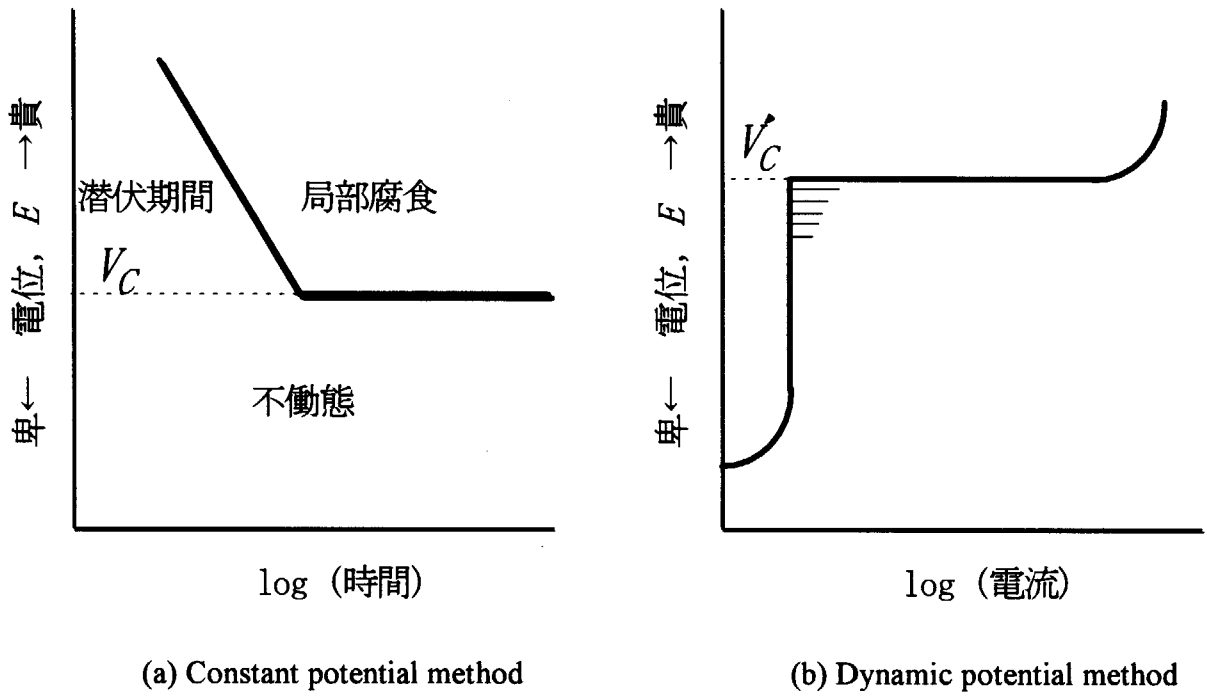


Fig. 4 Identification of critical potential for localized corrosion,  $V_C$

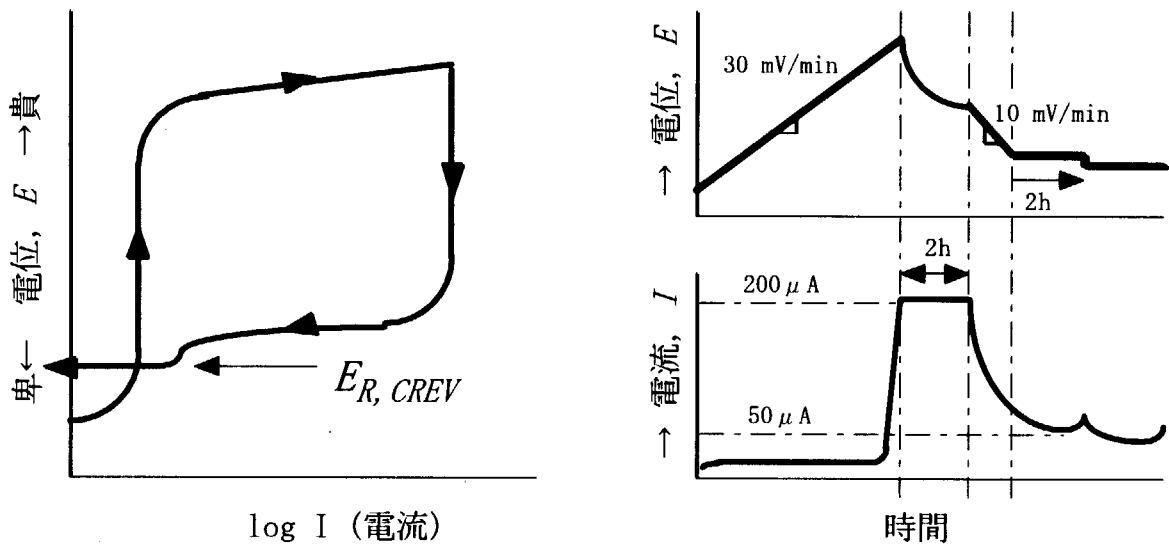


Fig. 5 Schematic view of identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R, CREV}$ , by bi-directional polarization test



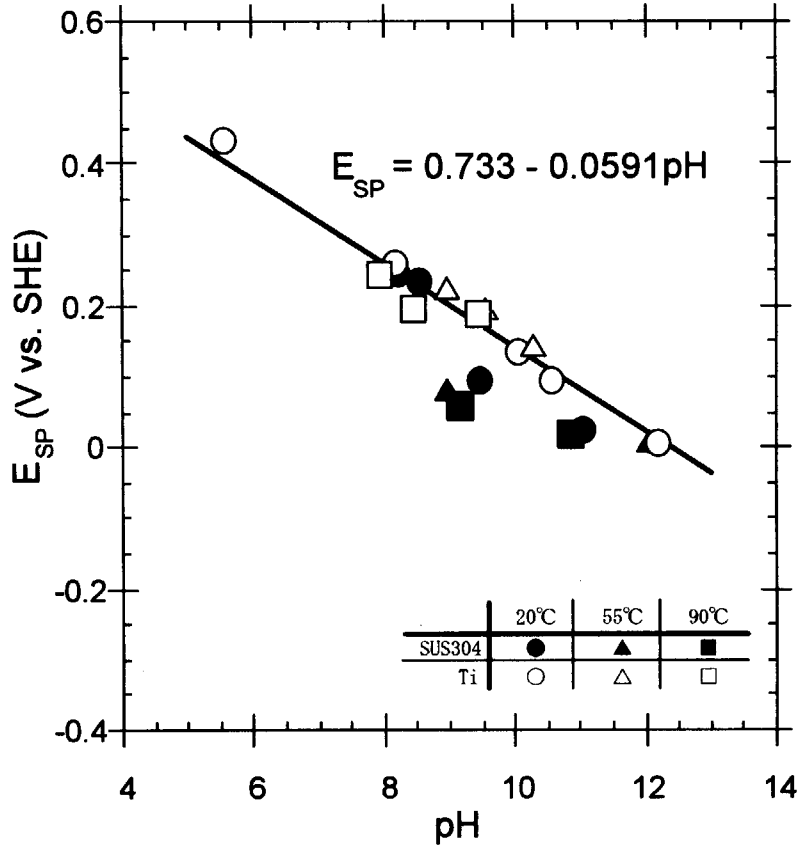


Fig. 6 Relation of  $E_{SP}$  of stainless steel and titanium to temperature and pH

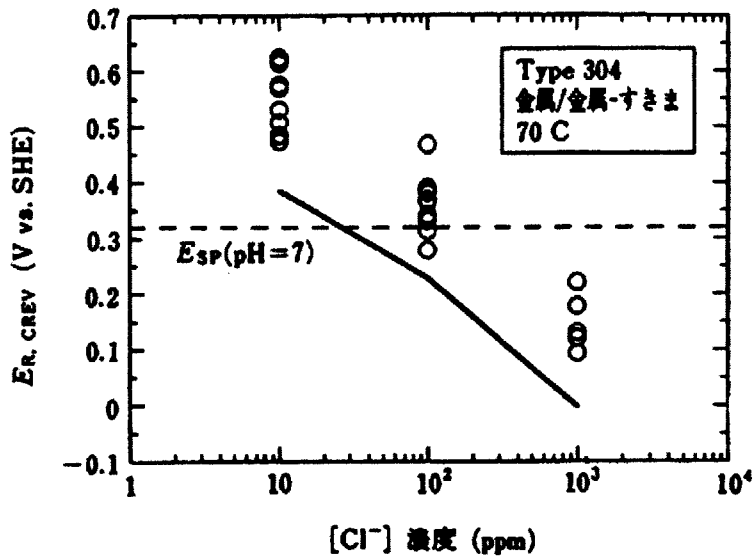
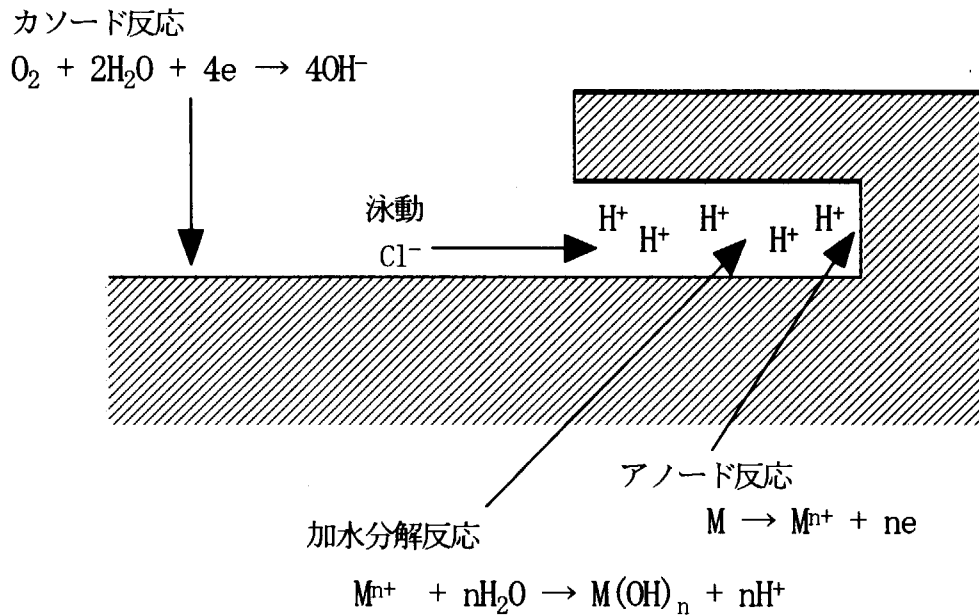


Fig. 7 Example of measured results of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , of type 304 stainless steel under the neutral chloride water solution of 70° C



- (1) すきま内でのO<sub>2</sub>枯渇
- (2) アノード/カソードの場所的分離
- (3) すきま内[Cl<sup>-</sup>]濃度の上昇とpH低下

Fig. 8 Schematic model of crevice corrosion process

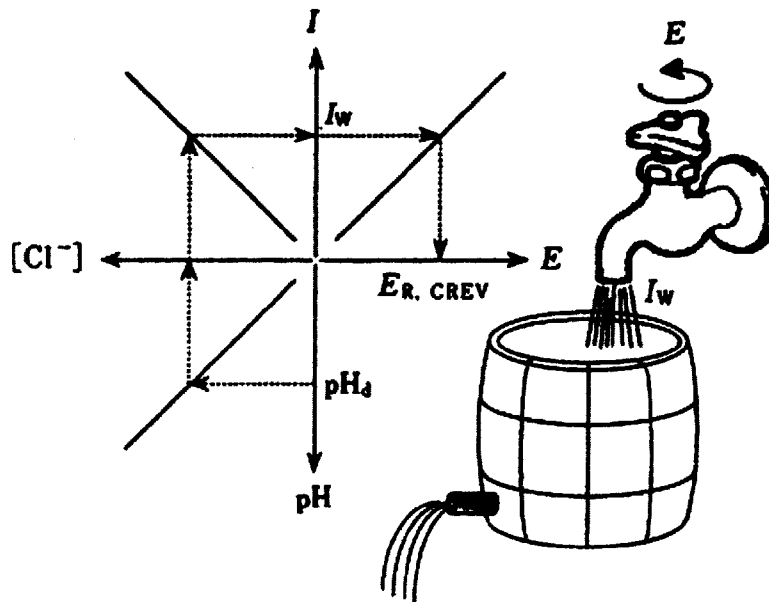


Fig. 9 Cartoon to simulate the crevice corrosion to explain critical potential

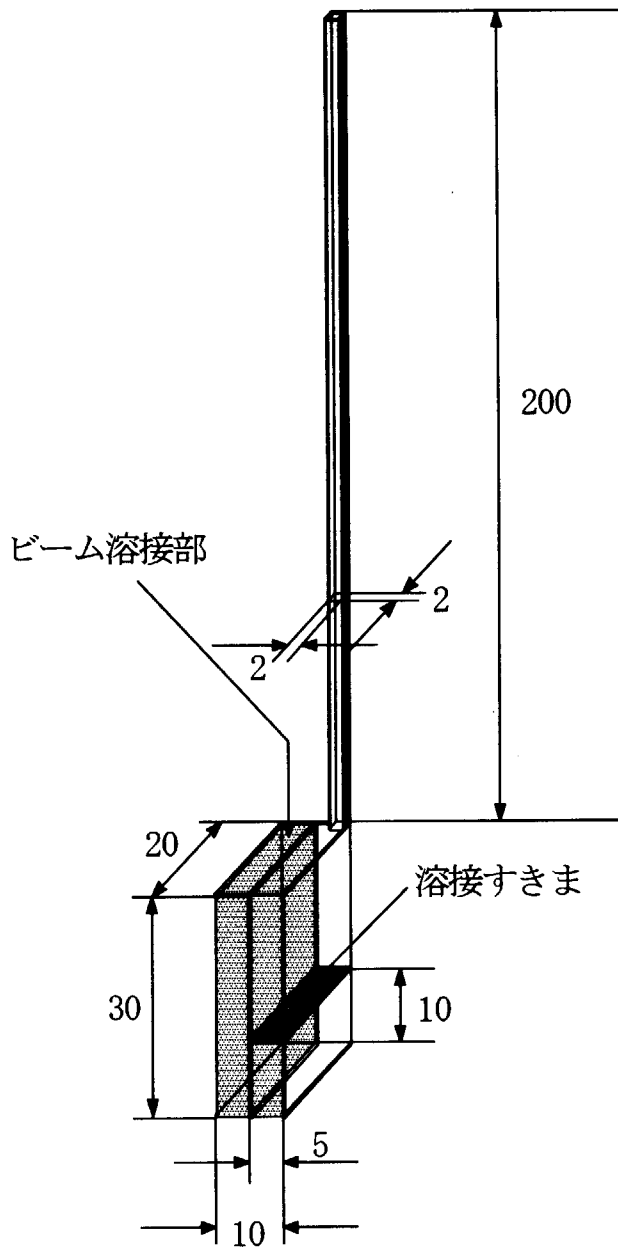


Fig. 10 Welded crevice test piece

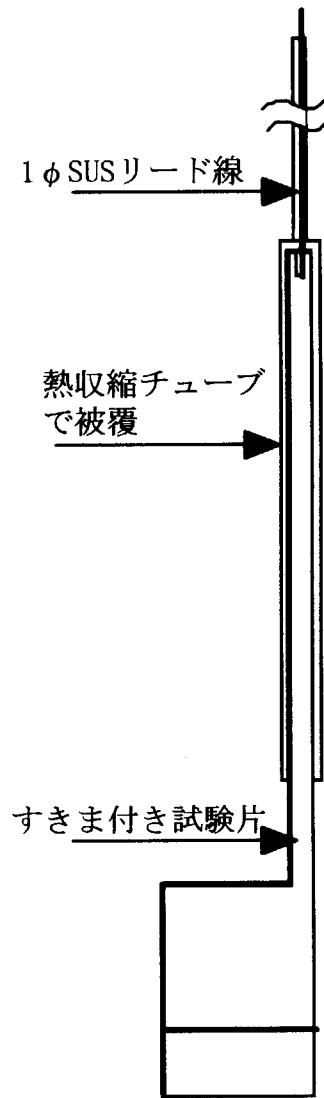


Fig. 11 Preparation applied to the test piece

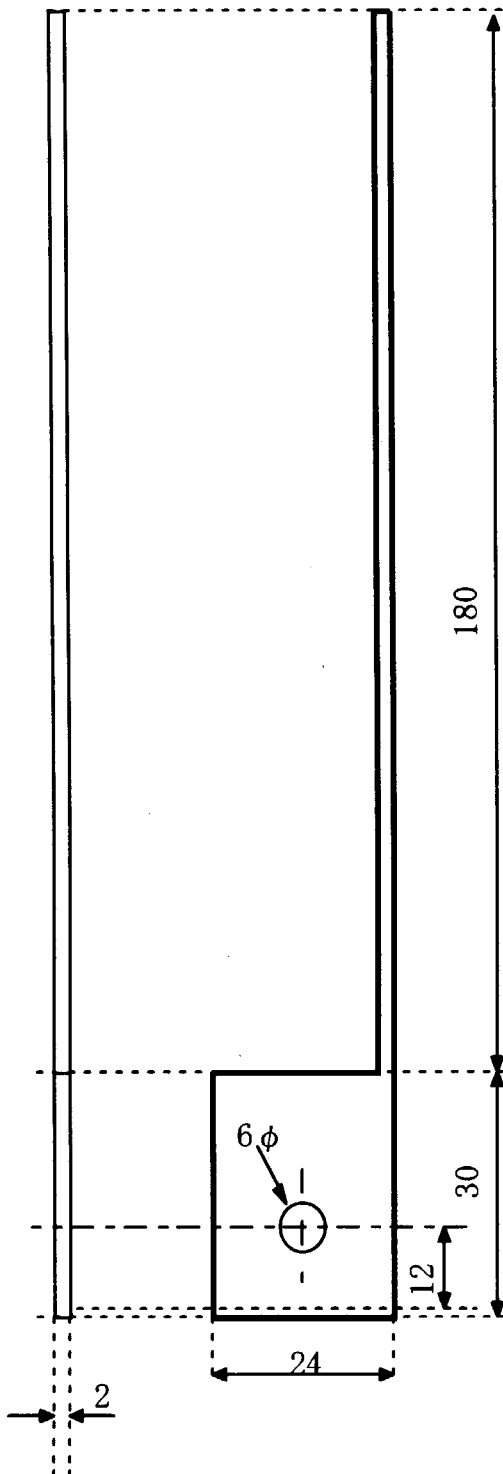


Fig. 12 Flag-shaped test piece as a part of metal/metal-crevice made of SUS316L

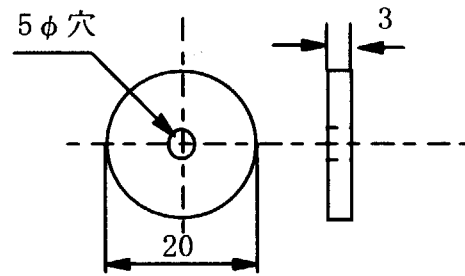


Fig. 13 Washer used as metal/metal-crevice test piece made of SUS316L

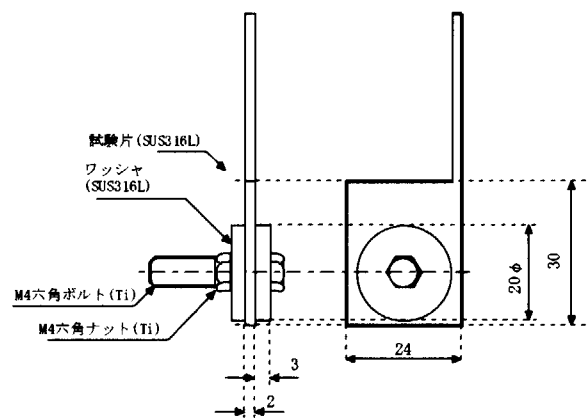


Fig. 14 Metal/metal-crevice test piece

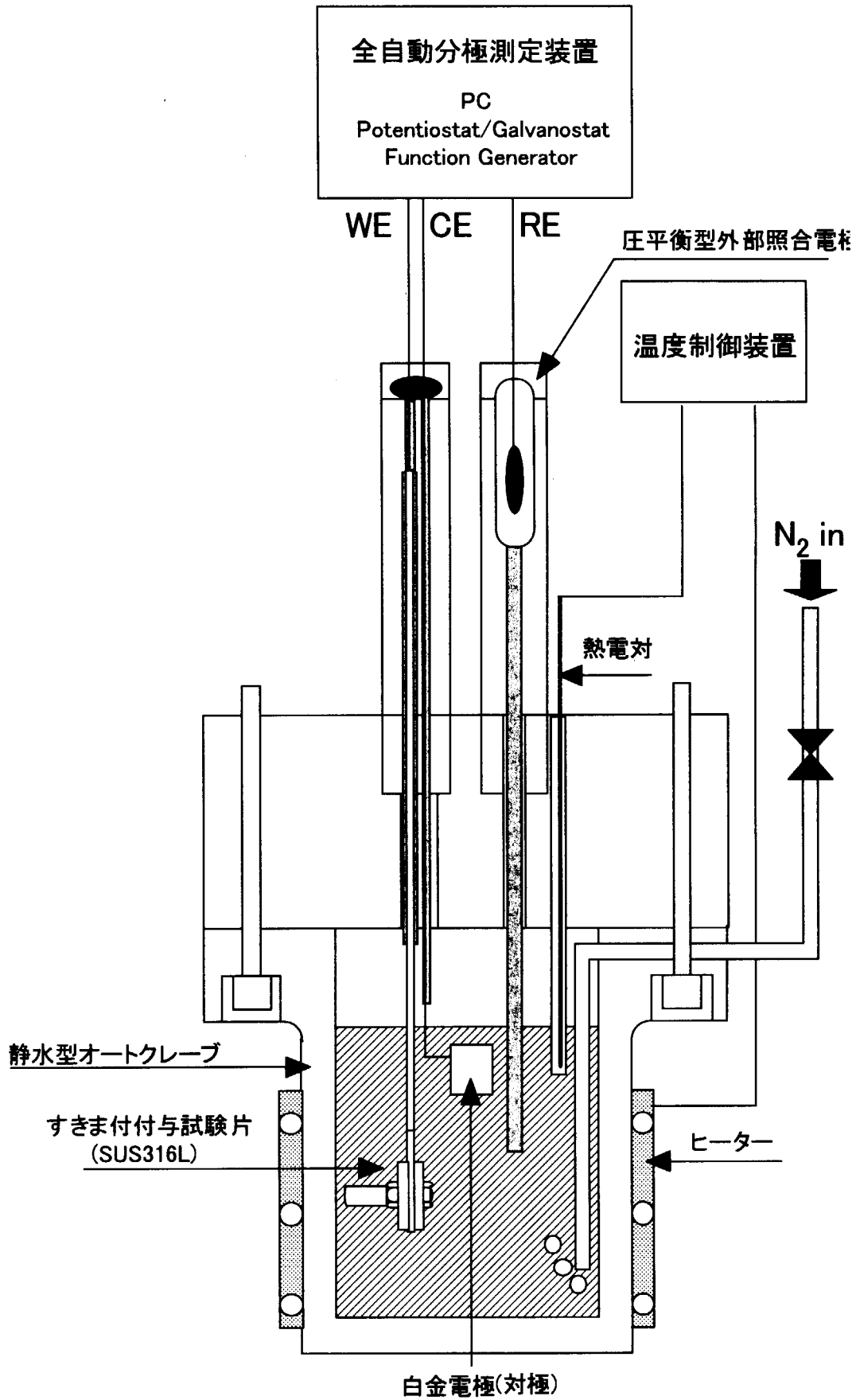
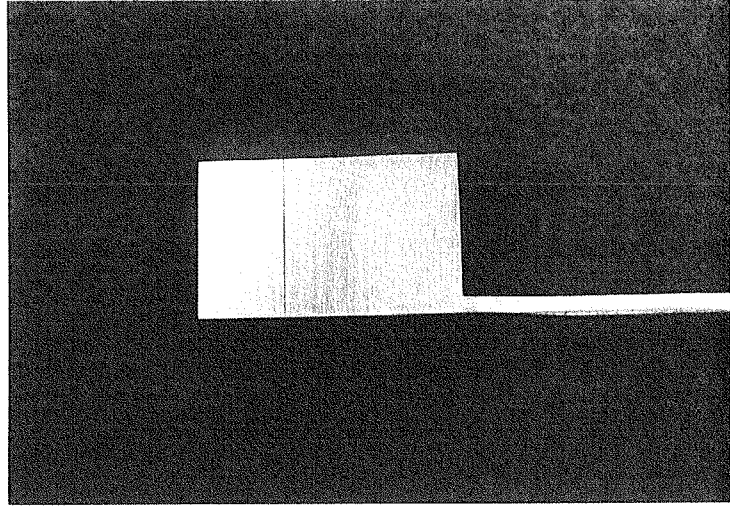


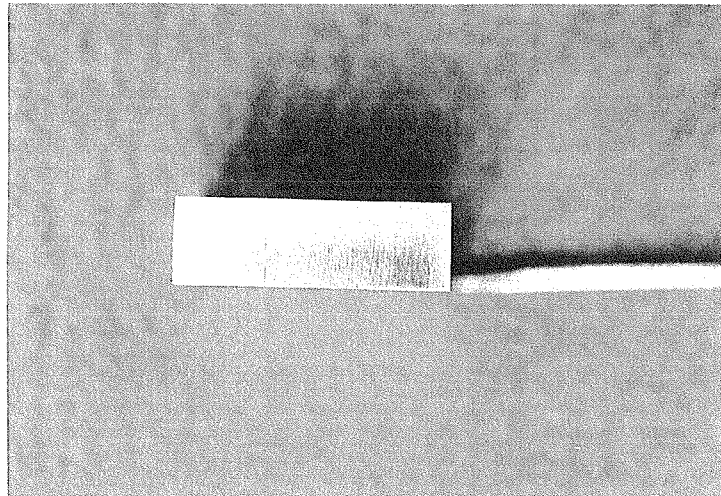
Fig. 15 Schematic view of test device for measuring corrosion-crevice repassivation potential

This is a blank page.

Front view



Side view 1



Side view 2

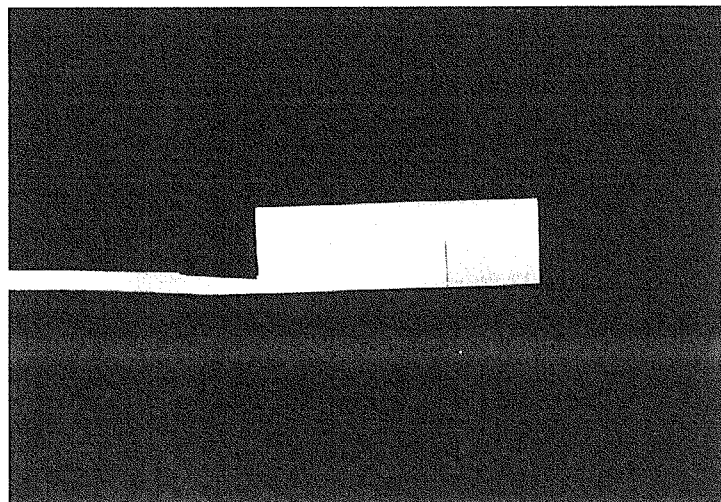


Fig. 16 Photo showing welded crevice test piece on opening surface (A-8, before test, polished with #600 paper)

This is a blank page.



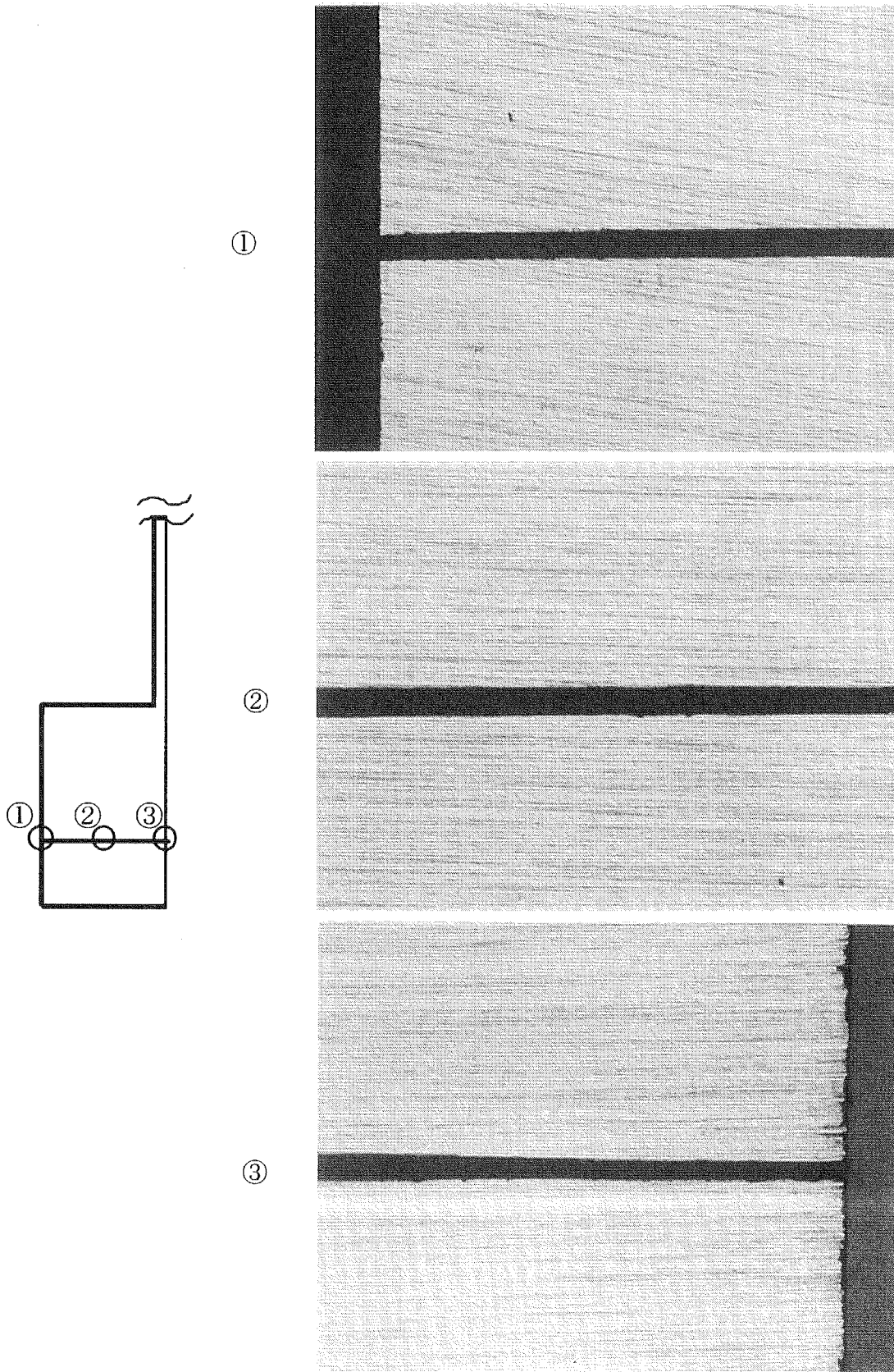


Fig. 17 Photo of magnified view of crevice opening on opening surface (A-8, x50)

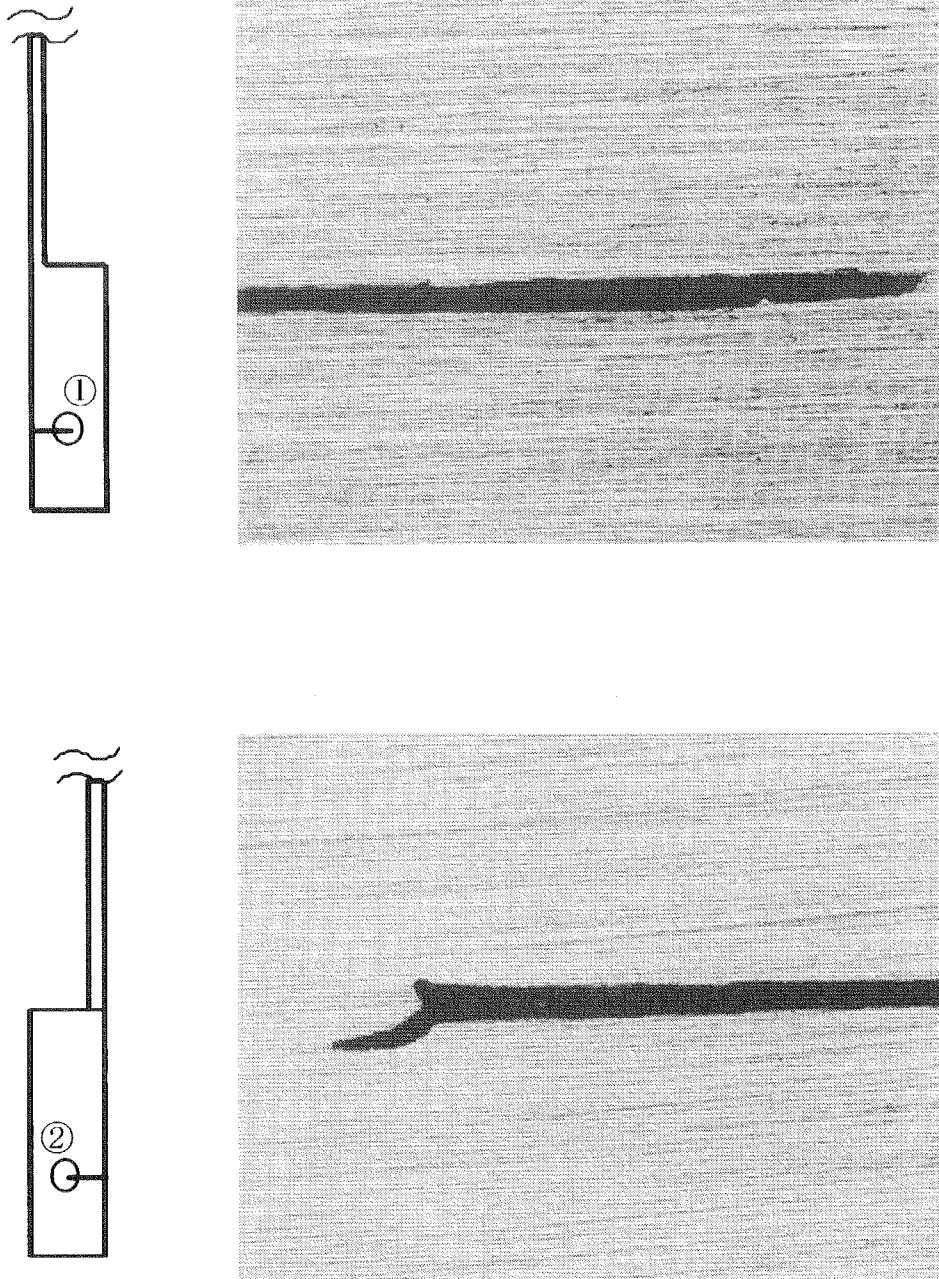


Fig. 18 Photo of magnified view of crevice opening on side surface (A-8, x50)

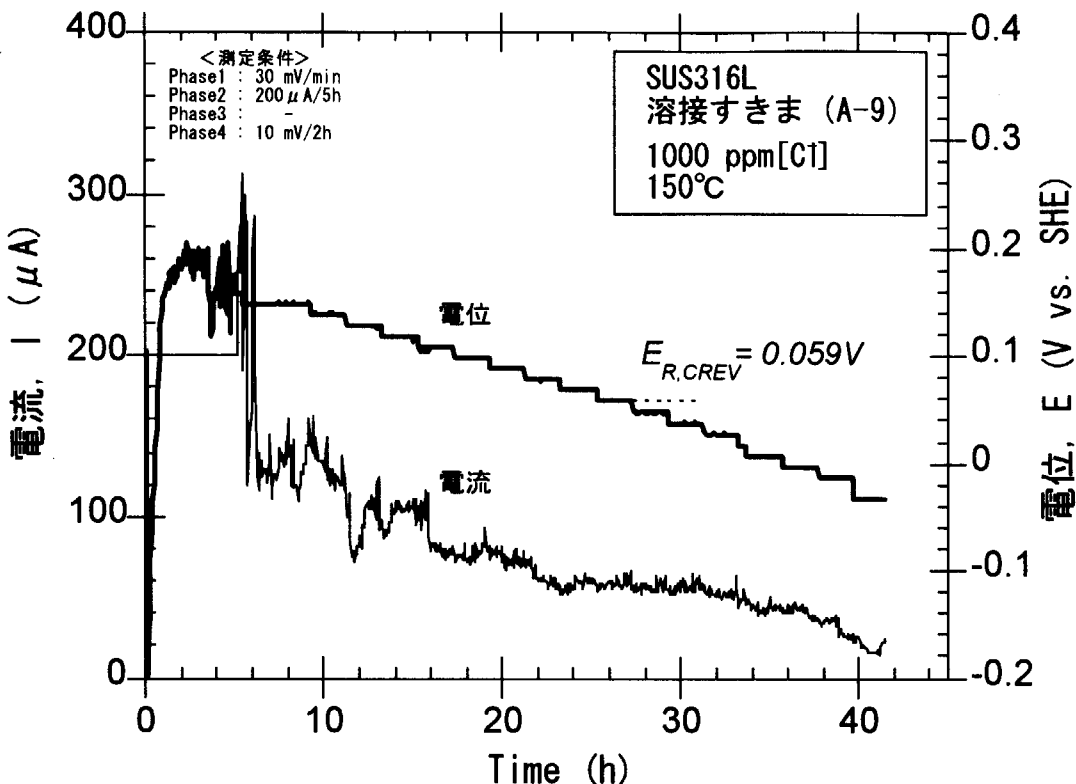


Fig. 19 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on welded crevice test piece A-9 under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 150° C

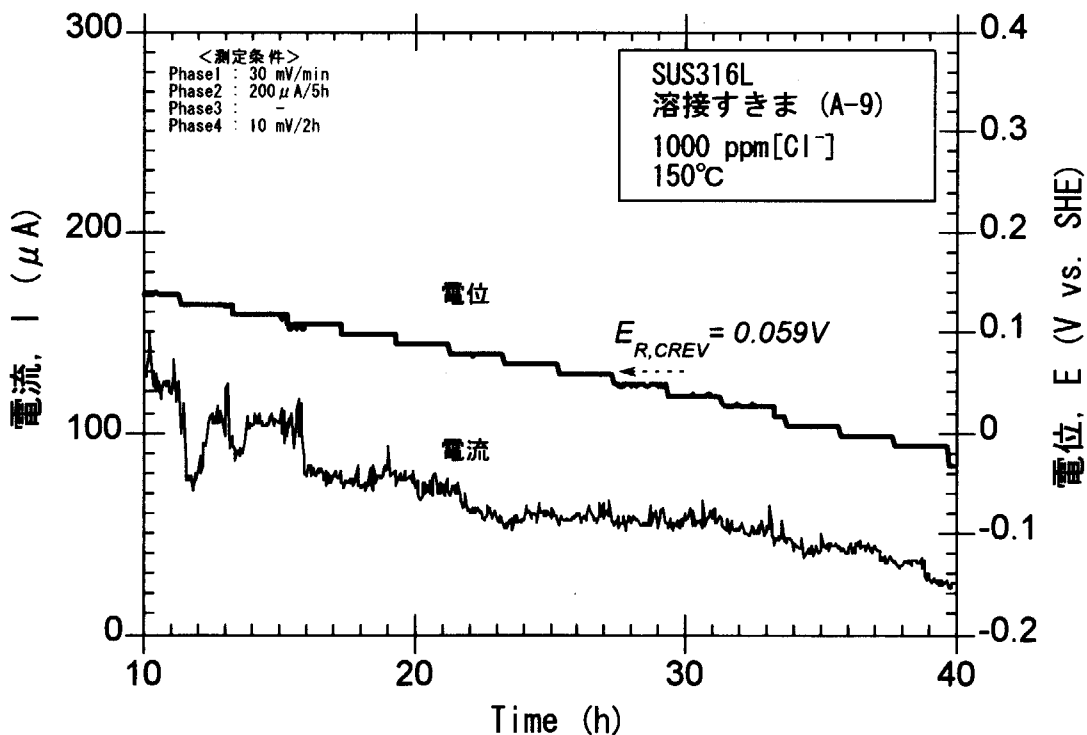


Fig. 20 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on welded crevice test piece A-9 under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 150° C

**This is a blank page.**

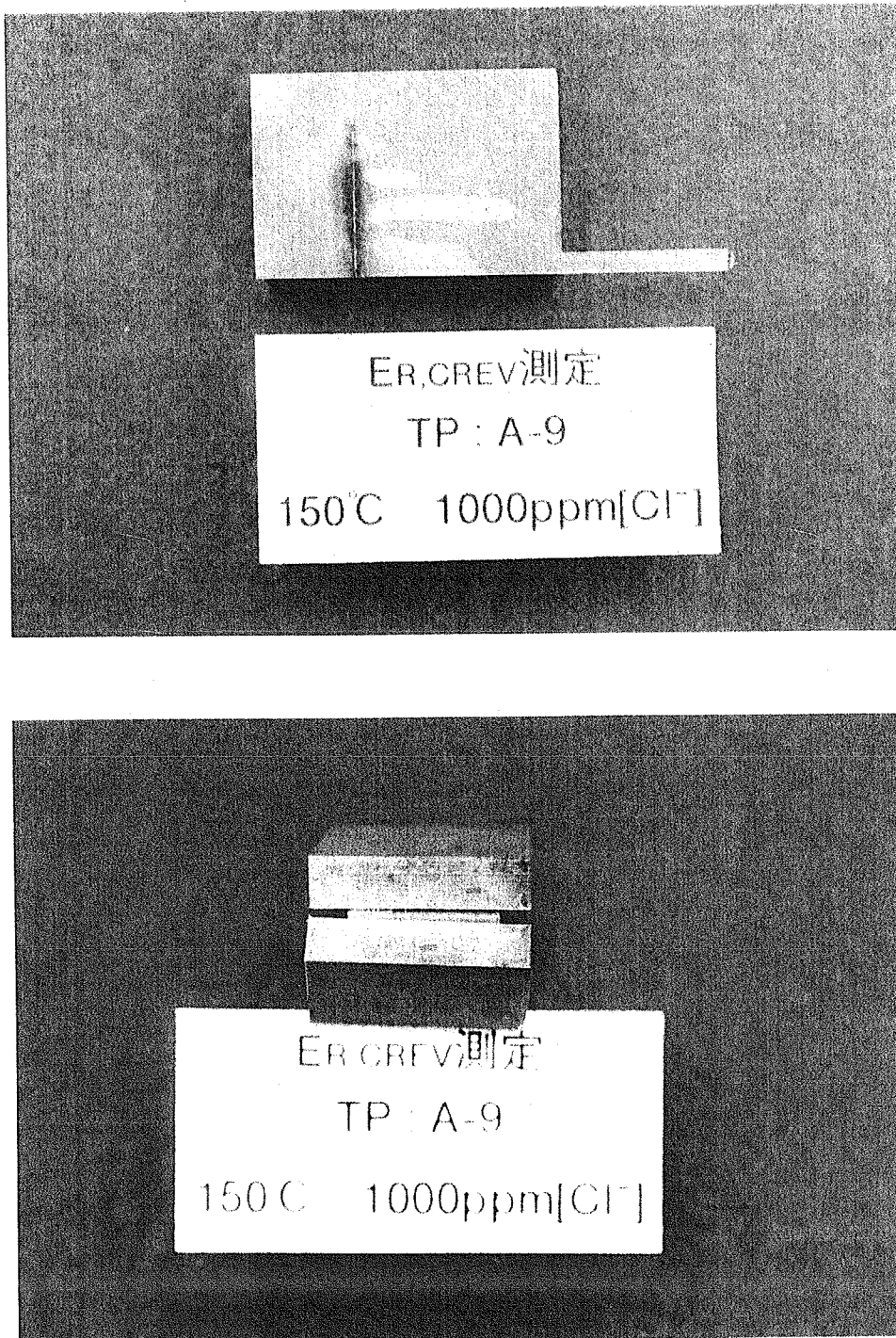


Fig. 21 Photo of crevice opening surface and internal surfaces of the crevice with cutting the test piece, about welded crevice test piece A-9 after test

**This is a blank page.**

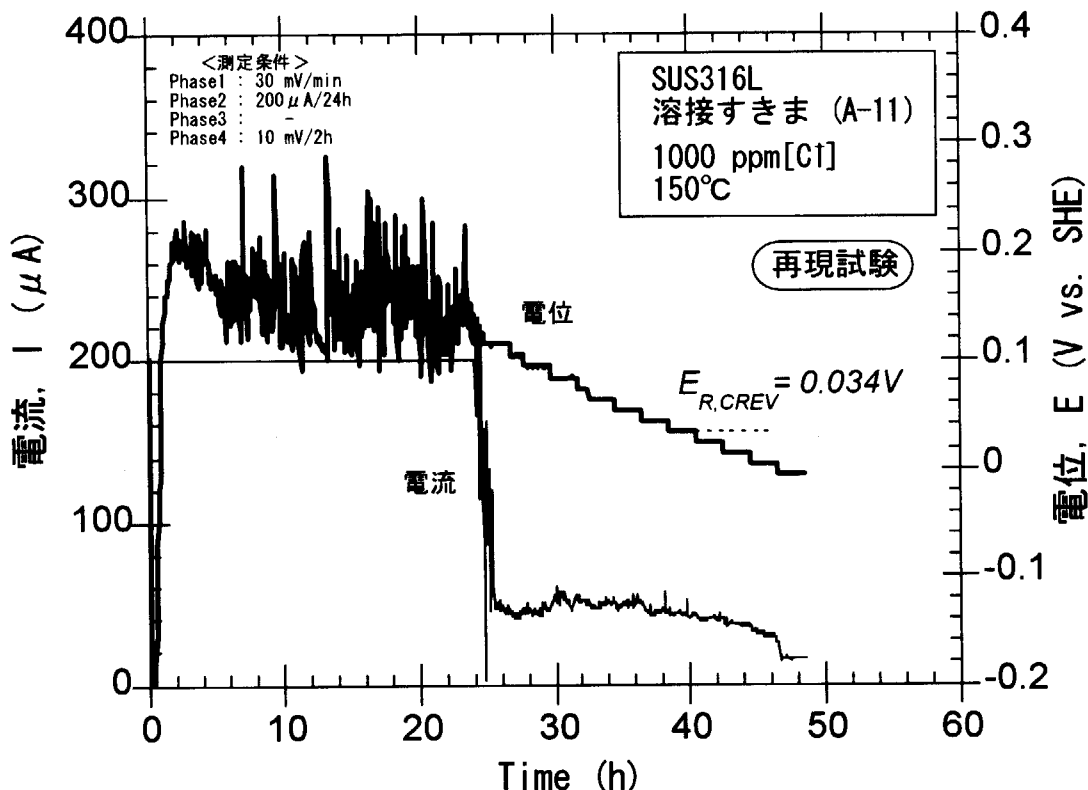


Fig. 22 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on welded crevice test piece A-11 under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 150° C (repeatability test)

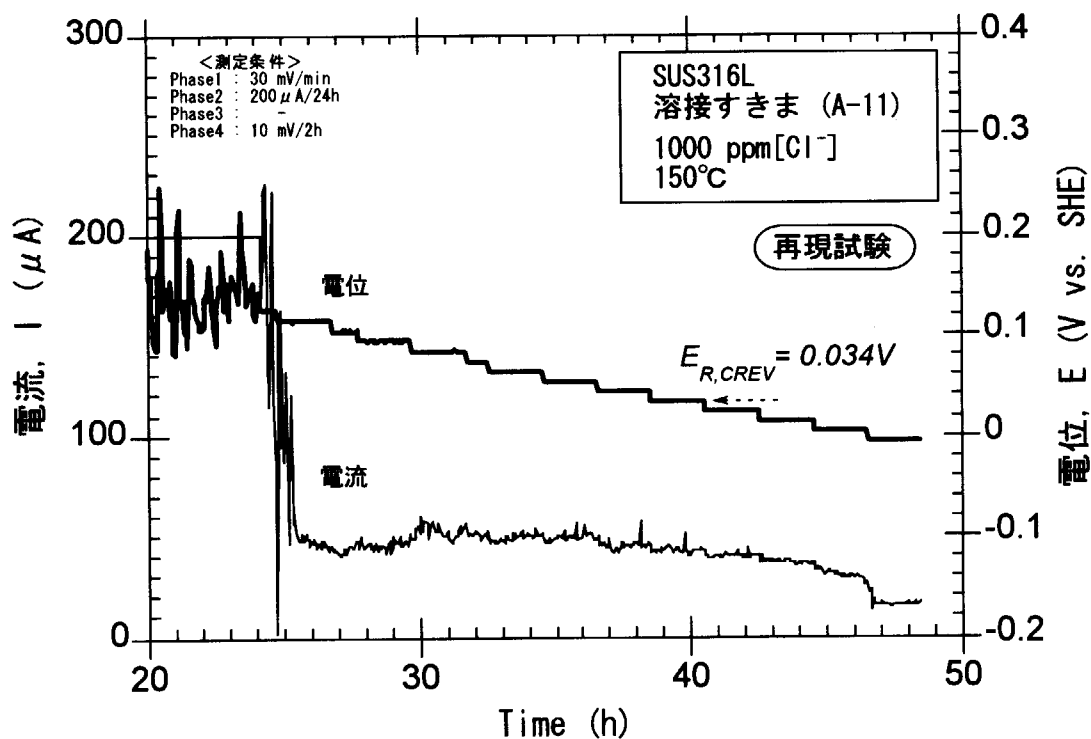


Fig. 23 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on welded crevice test piece A-11 under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 150° C (repeatability test)

This is a blank page.



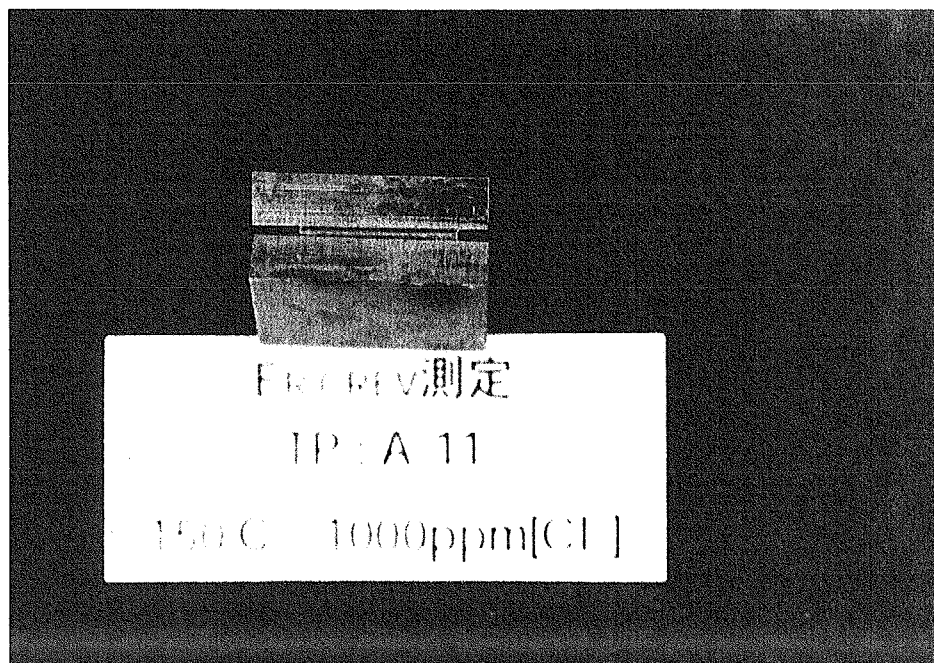
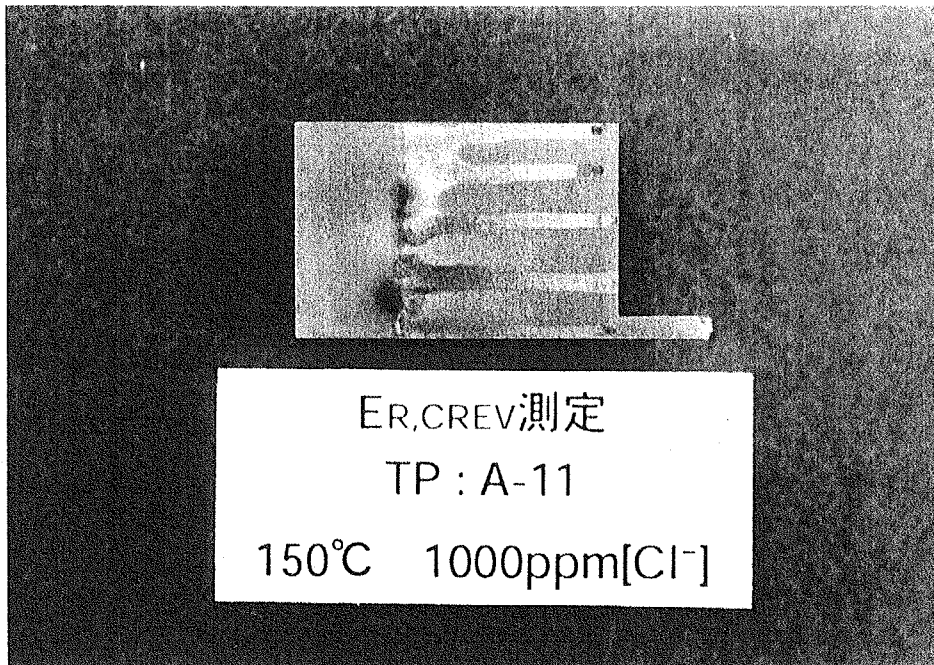


Fig. 24 Photo of crevice opening surface and internal surfaces of the crevice with cutting the test piece, about welded crevice test piece A-11 after test (repeatability test)

This is a blank page.

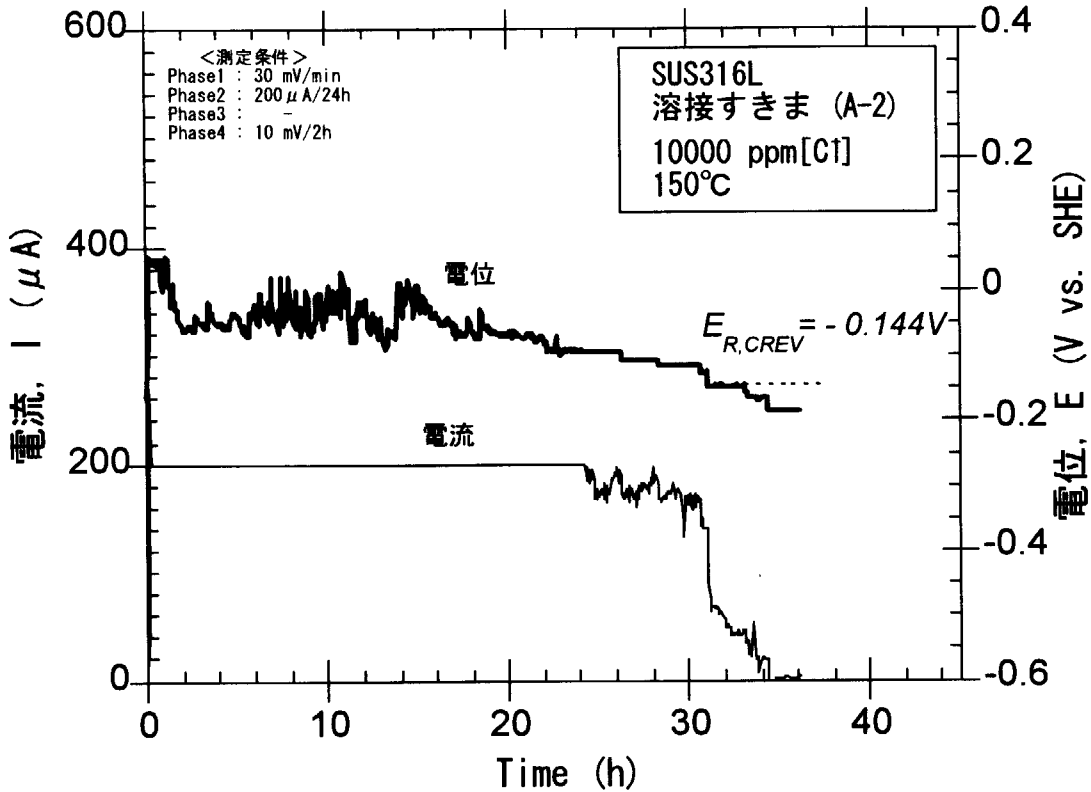


Fig. 25 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on welded crevice test piece A-2 under the degassed water solution with chloride of 10000ppm, 150° C

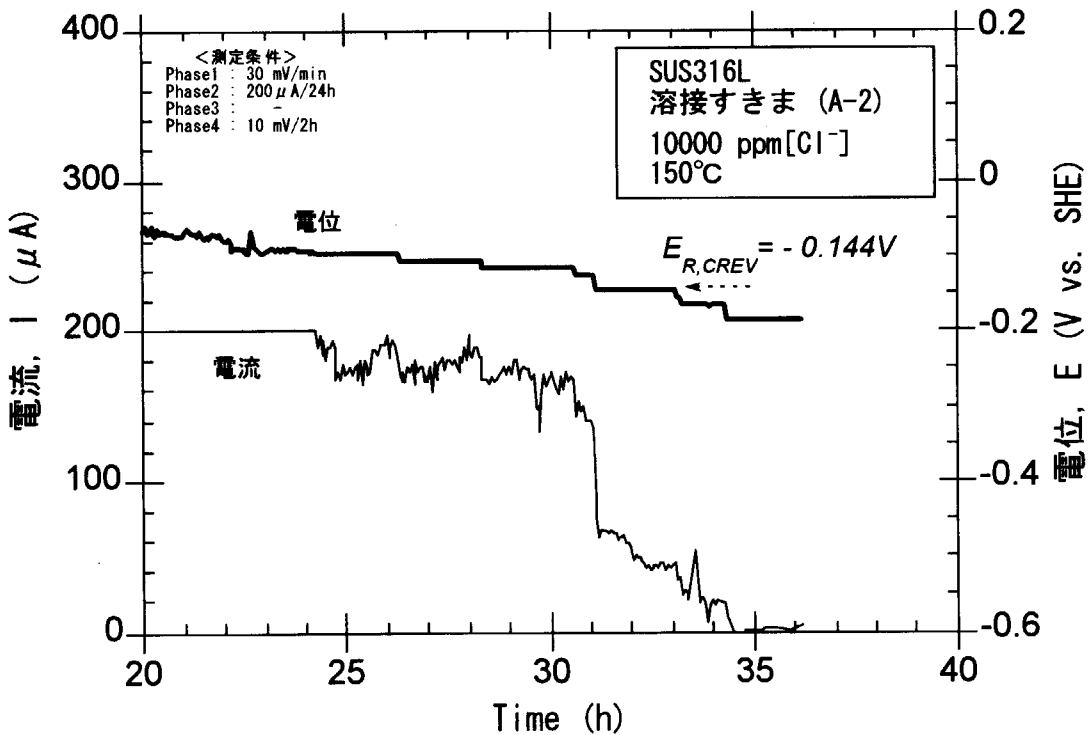


Fig. 26 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on welded crevice test piece A-2 under the degassed water solution with chloride of 10000ppm, 150° C

This is a blank page.

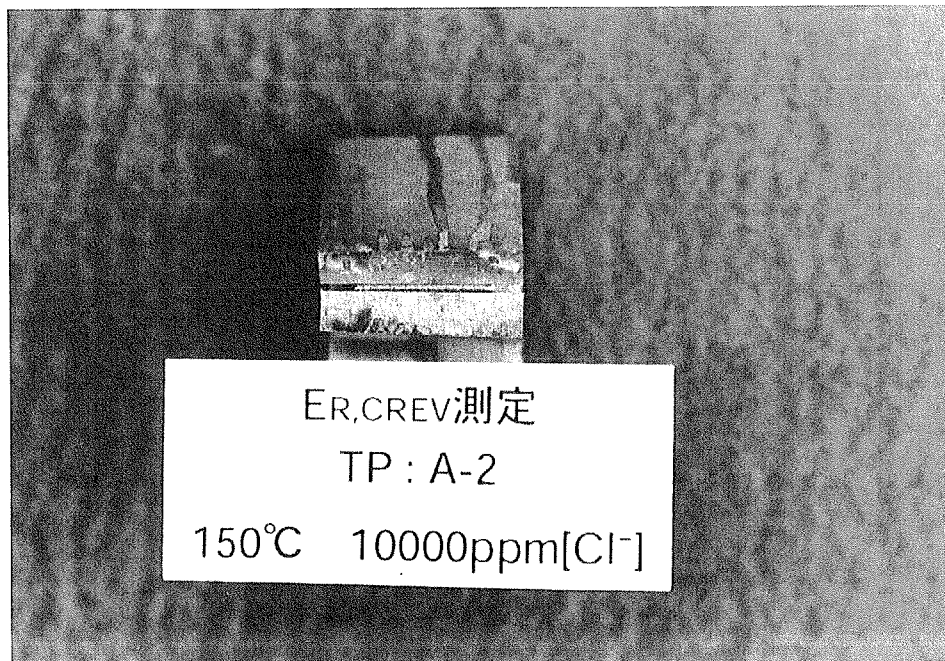
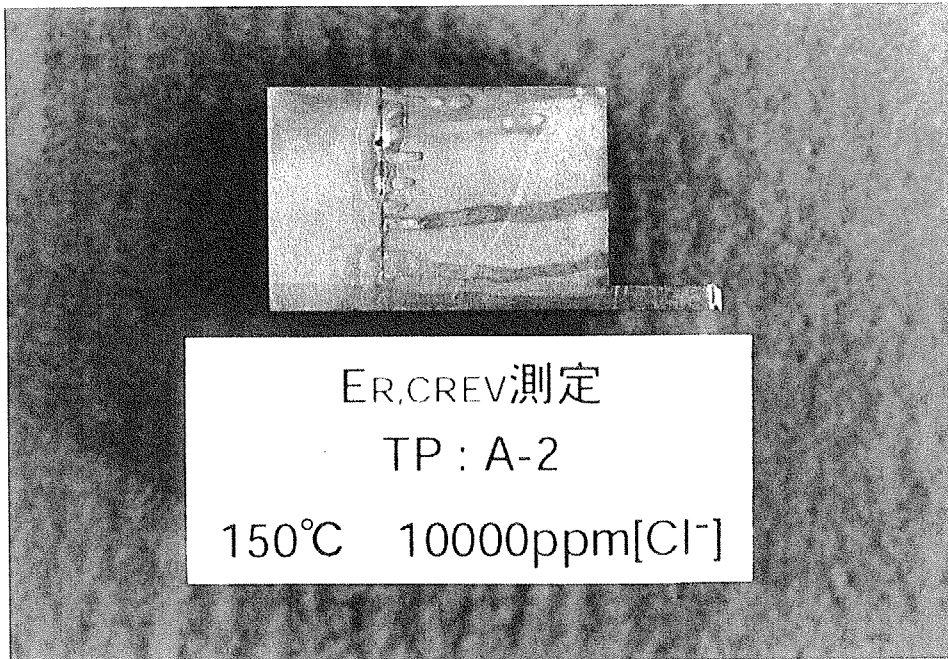


Fig. 27 Photo of crevice opening surface and internal surfaces of the crevice with cutting the test piece, about welded crevice test piece A-2 after test

This is a blank page.

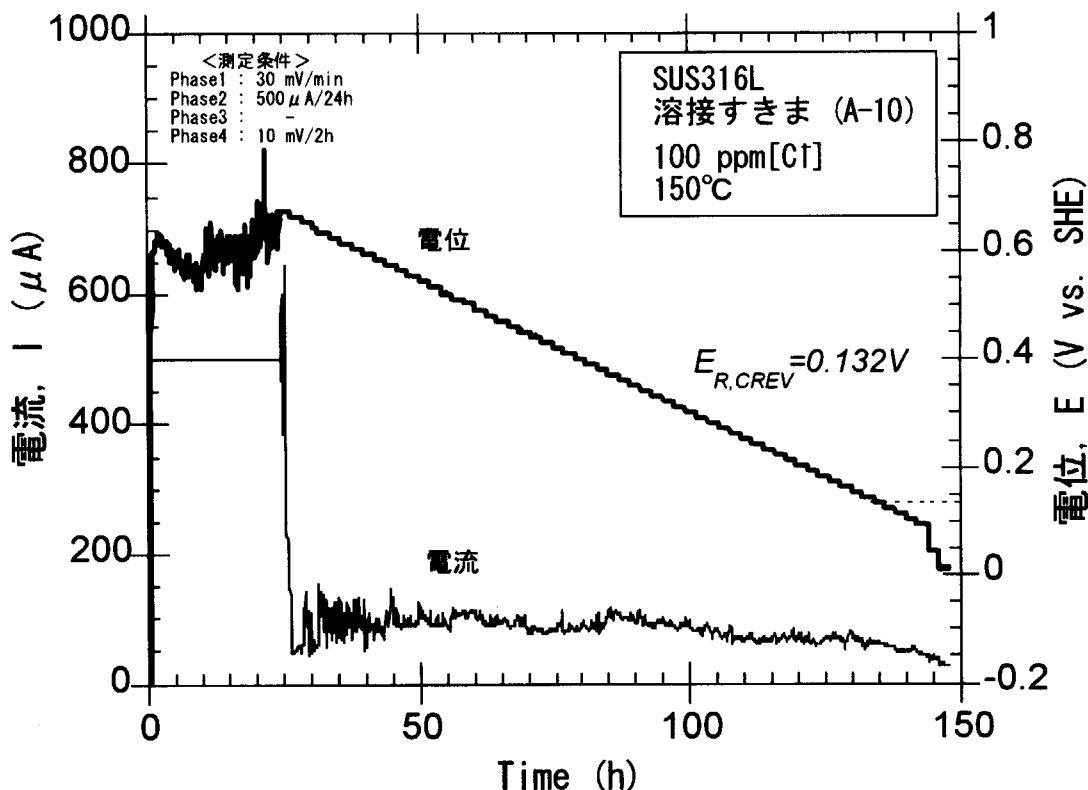


Fig. 28 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on welded crevice test piece A-10 under the degassed water solution with chloride of 100ppm, 150° C

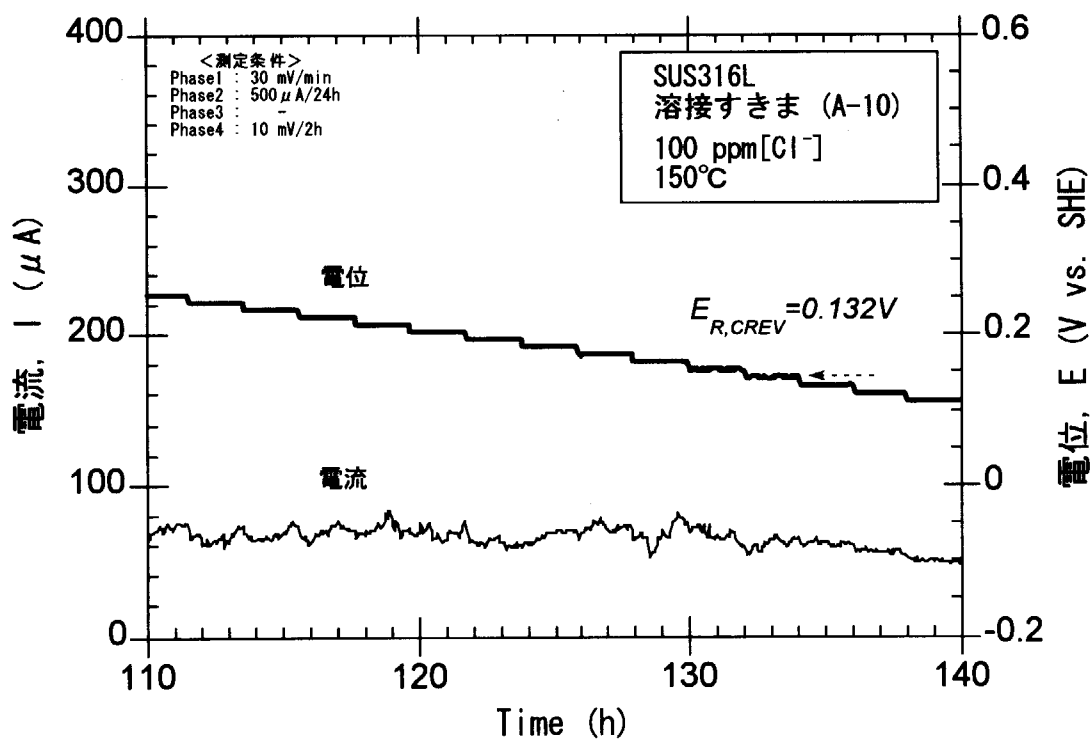


Fig. 29 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on welded crevice test piece A-10 under the degassed water solution with chloride of 100ppm, 150° C

This is a blank page.



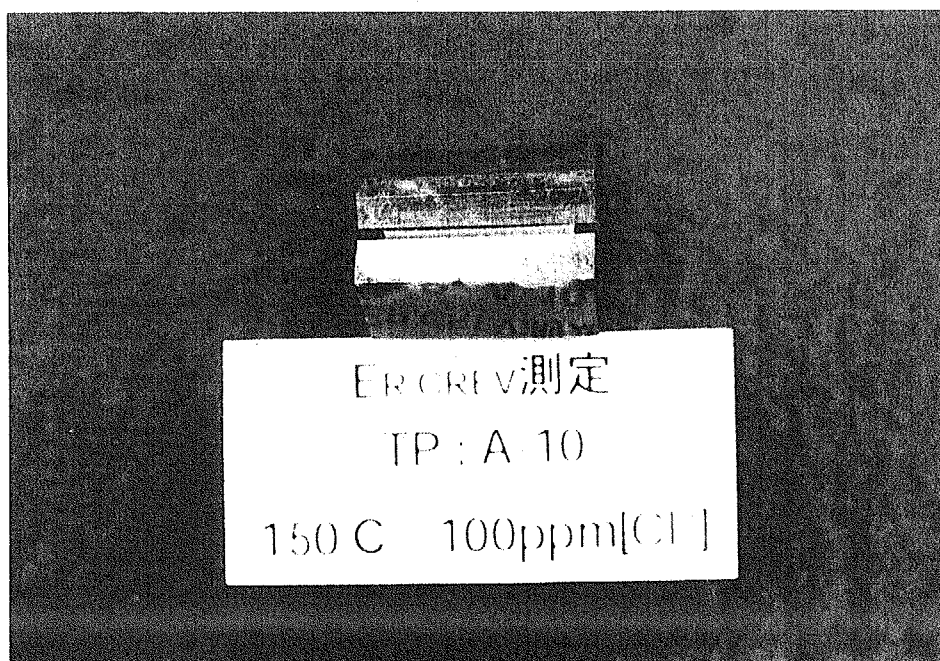
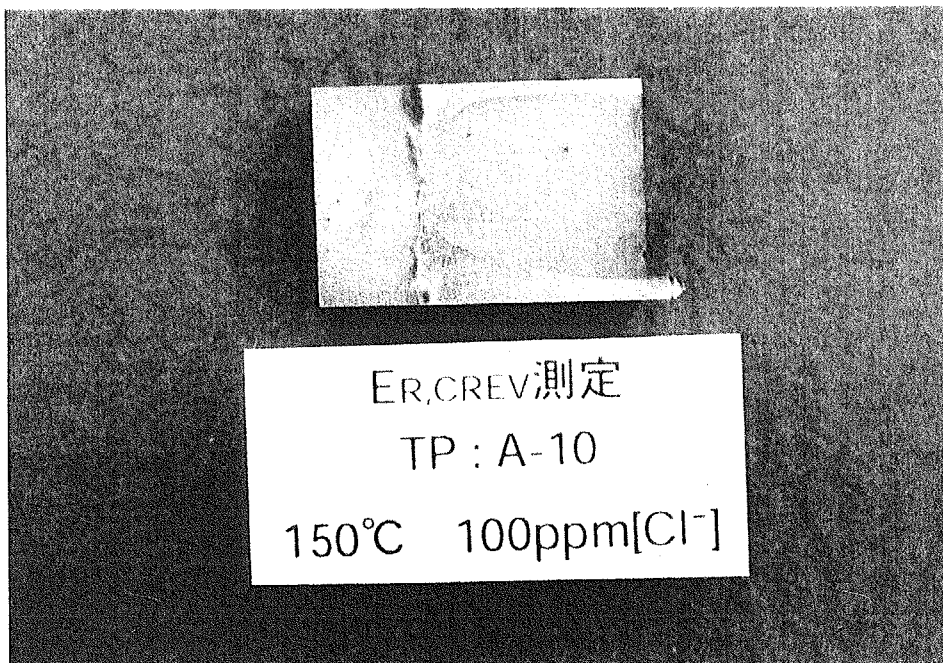


Fig. 30 Photo of crevice opening surface and internal surfaces of the crevice with cutting the test piece, about welded crevice test piece A-10 after test

**This is a blank page.**

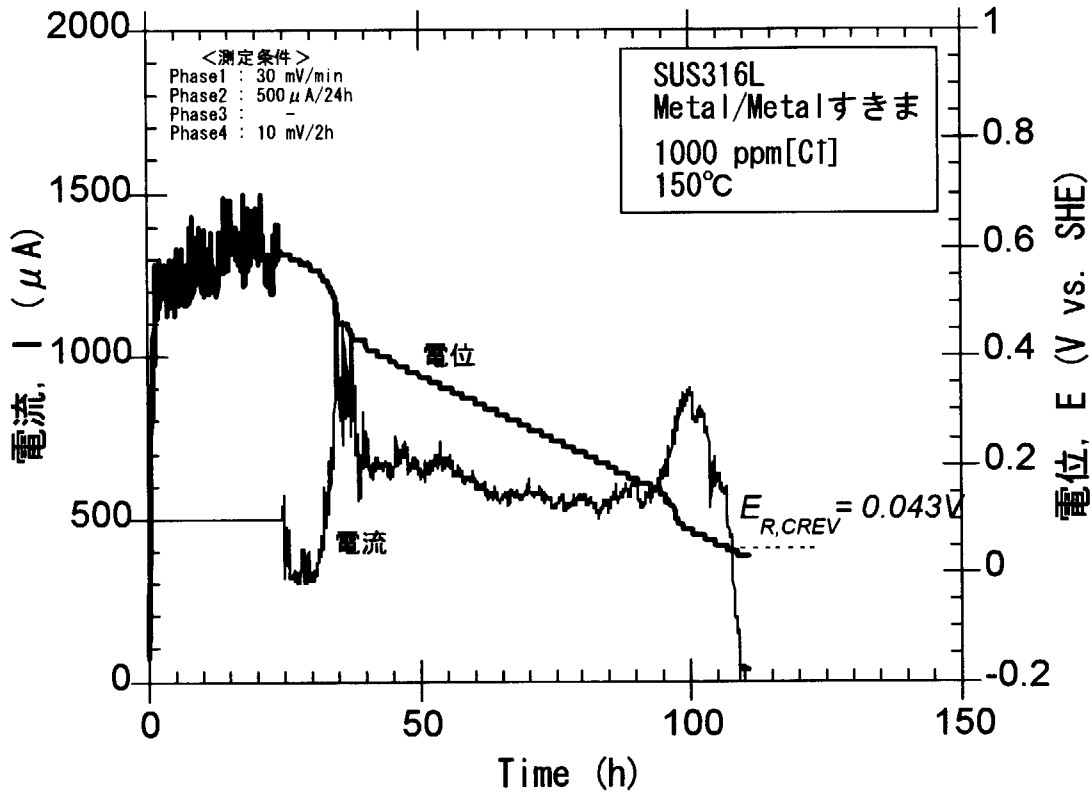


Fig. 31 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 150° C

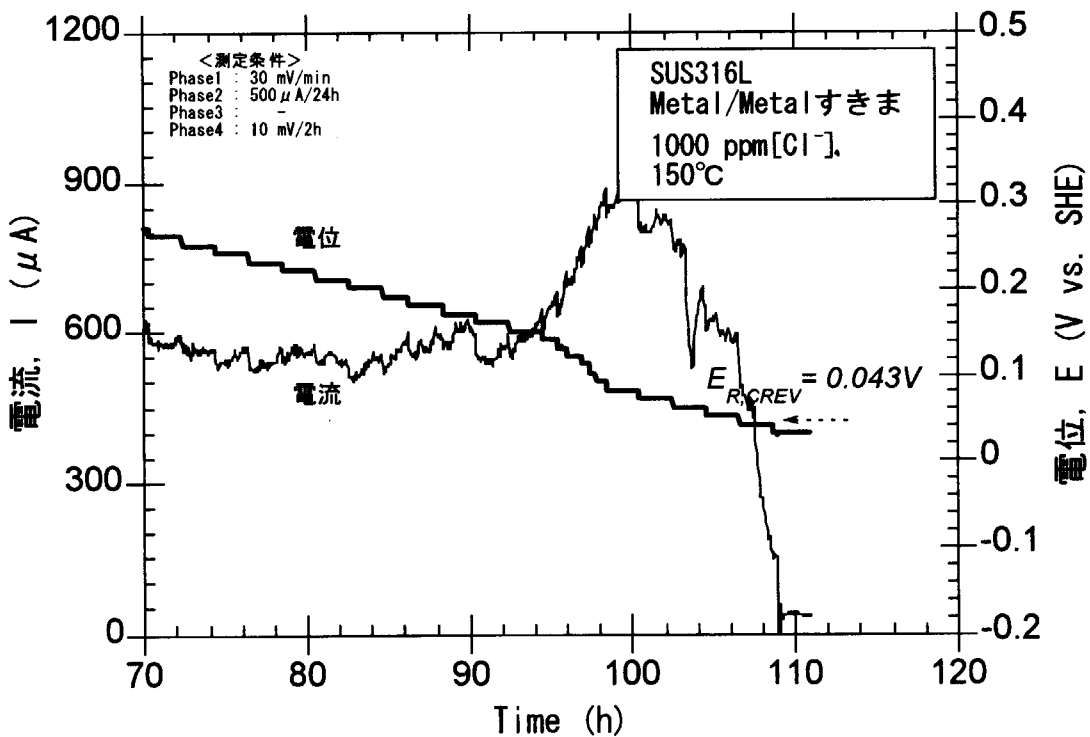


Fig. 32 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 150° C

This is a blank page.

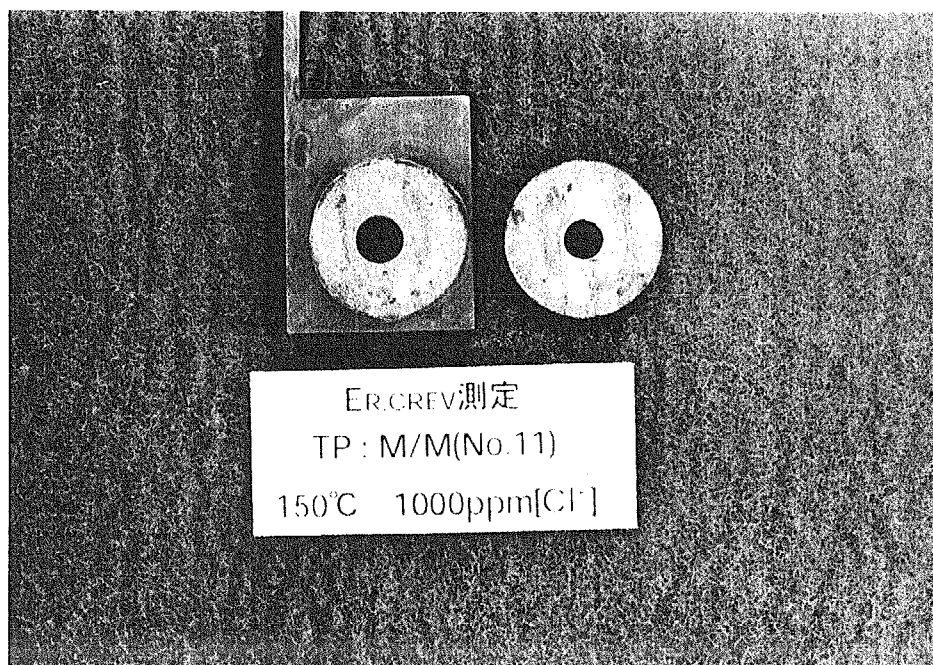
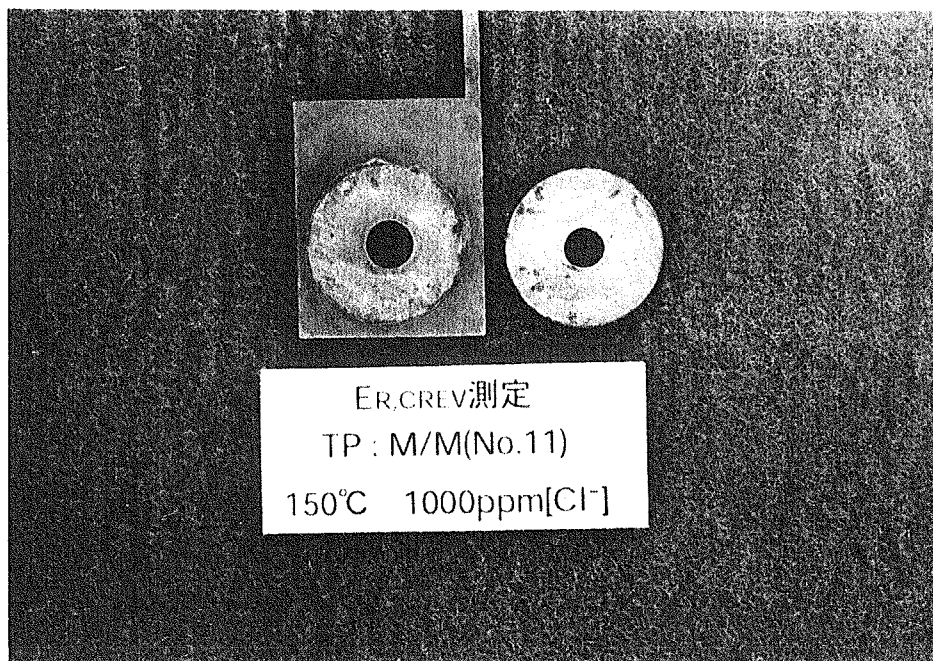


Fig. 33 Photo of internal surfaces of the crevice with disassembling the test piece, about metal/metal crevice test piece after test under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 150° C

**This is a blank page.**

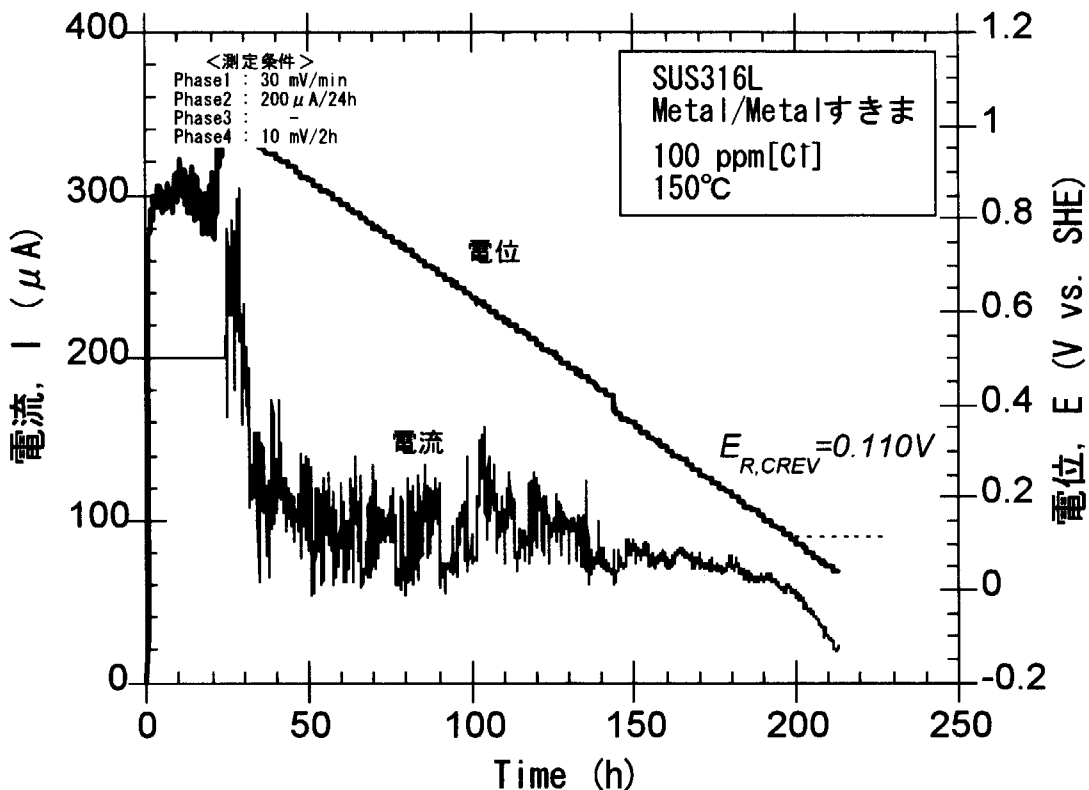


Fig. 34 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 100ppm, 150° C

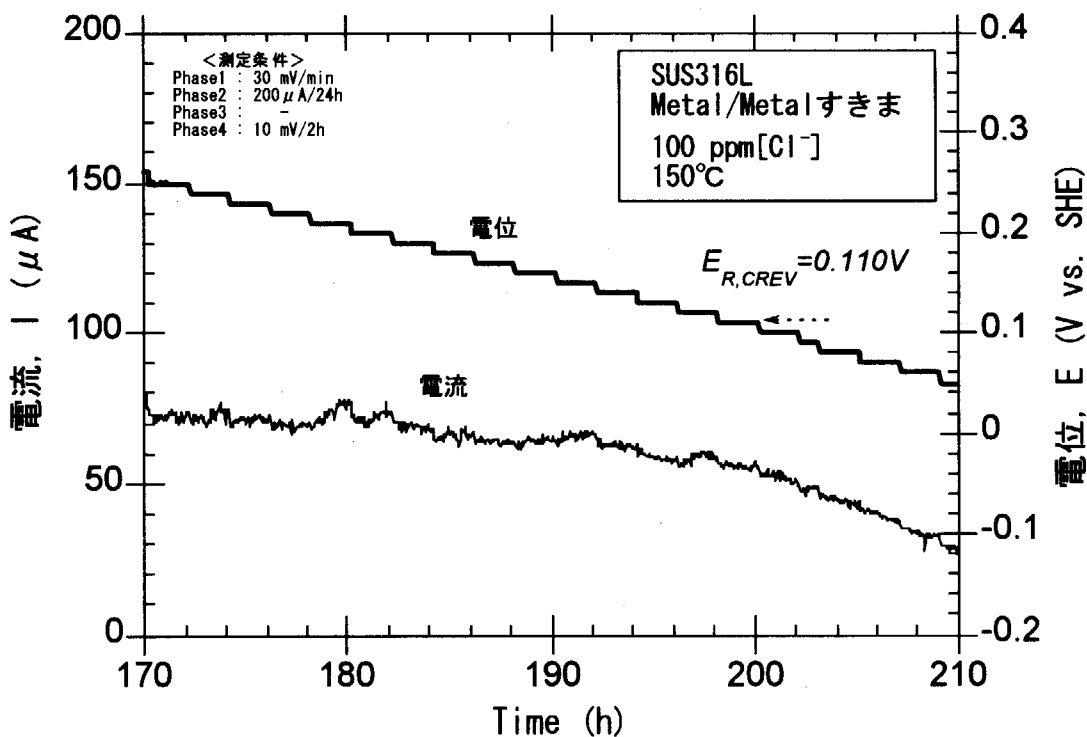


Fig. 35 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 100ppm, 150° C

**This is a blank page.**



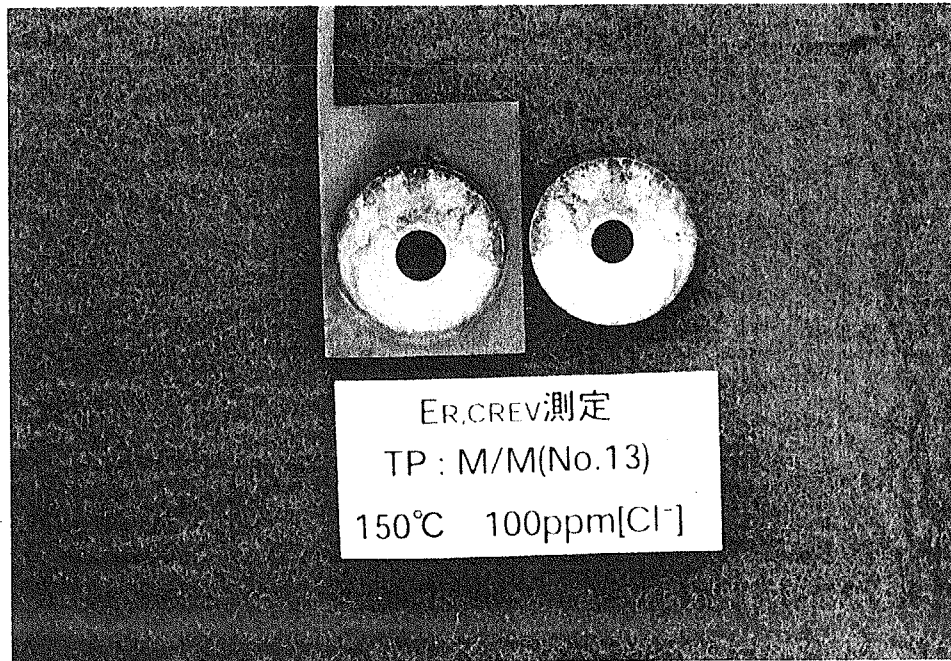
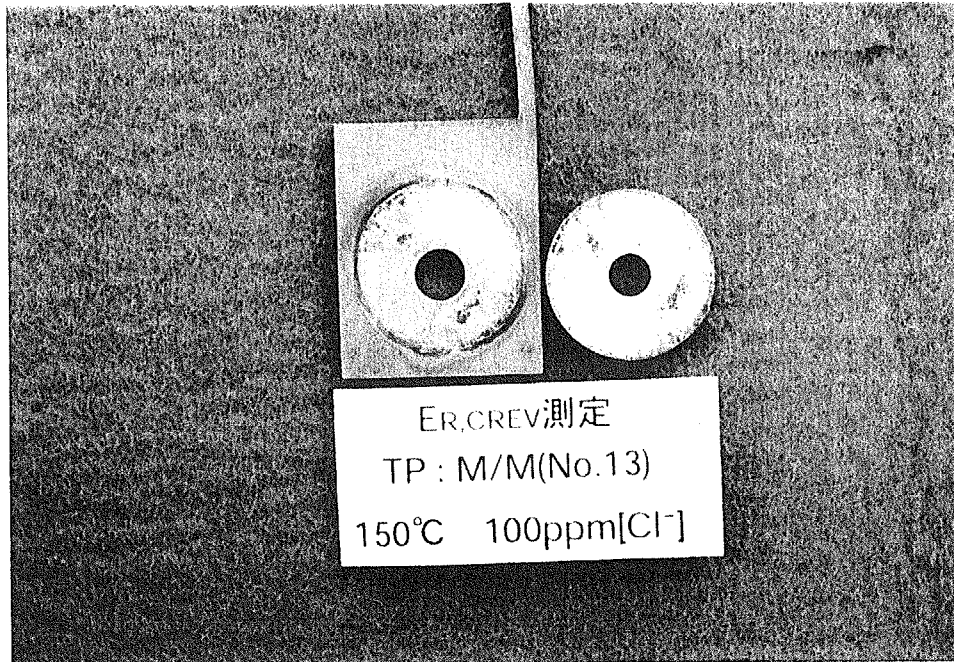


Fig. 36 Photo of internal surfaces of the crevice with disassembling the test piece, about metal/metal crevice test piece after test under the degassed water solution with chloride of 100ppm, 150° C

This is a blank page.

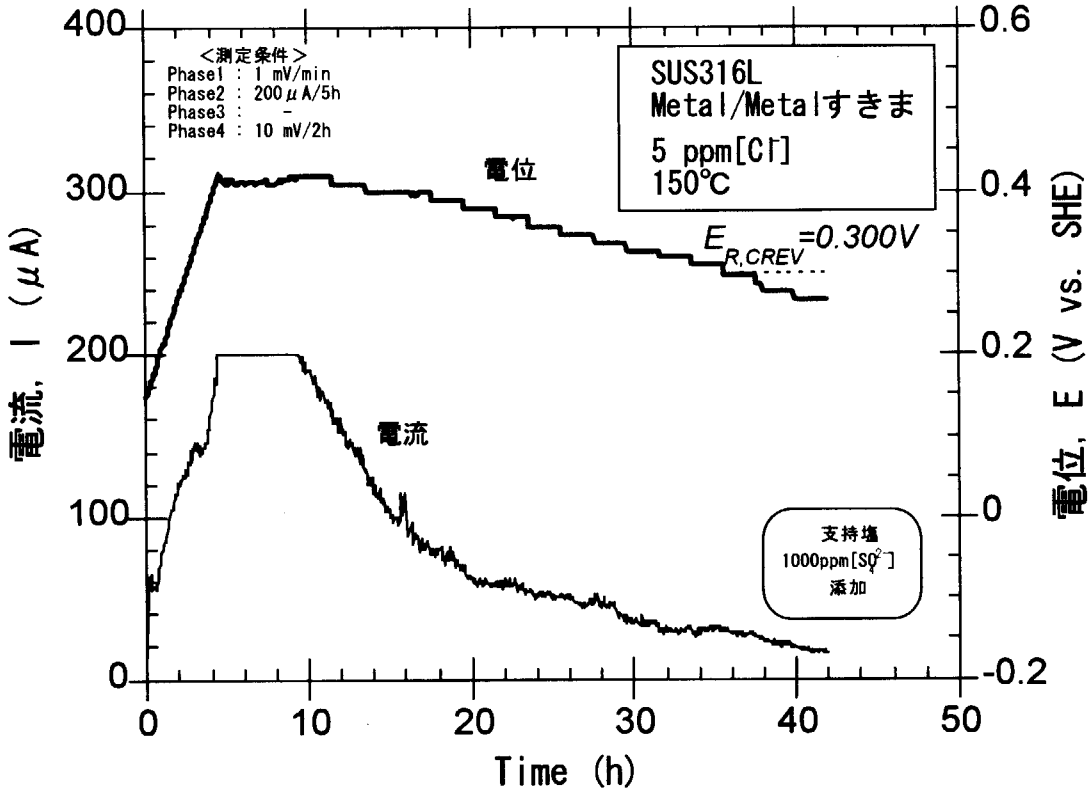


Fig. 37 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 5ppm, 150° C

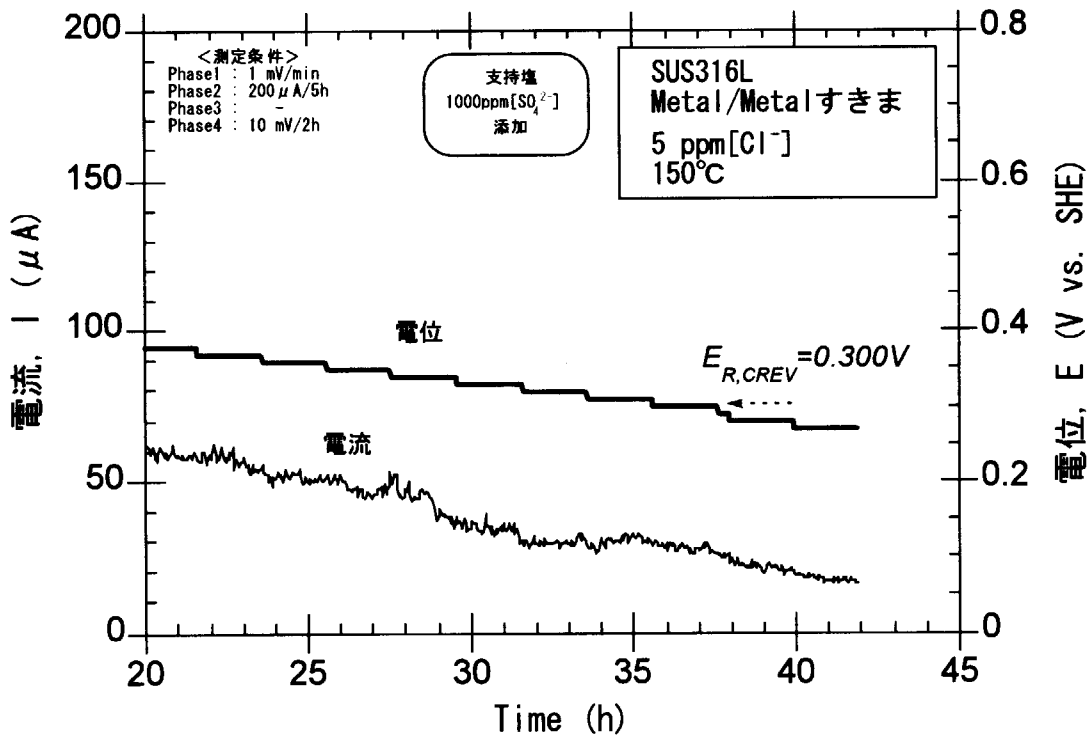


Fig. 38 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 5ppm, 150° C

**This is a blank page.**

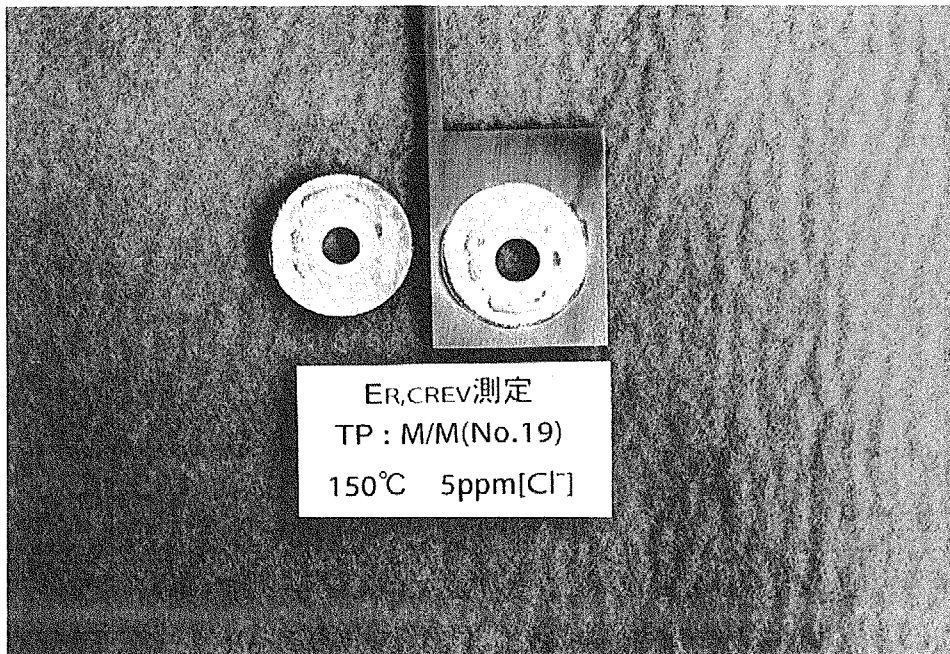
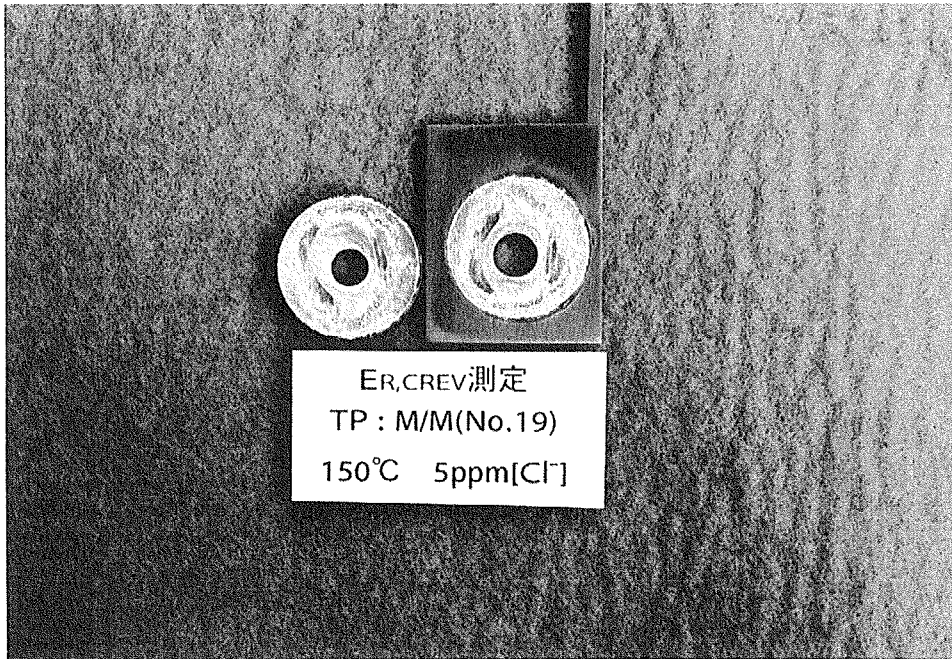


Fig. 39 Photo of internal surfaces of the crevice with disassembling the test piece, about metal/metal crevice test piece after test under the degassed water solution with chloride of 5ppm, 150° C

**This is a blank page.**

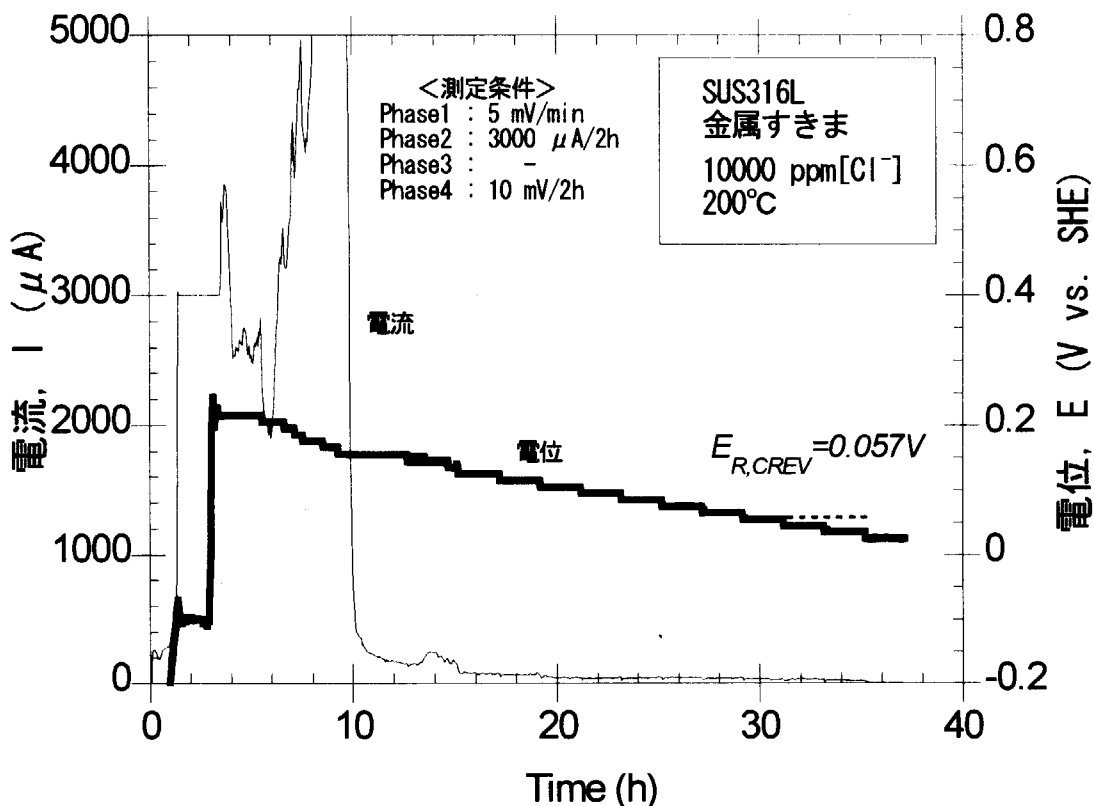


Fig. 40 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 10000ppm, 200° C

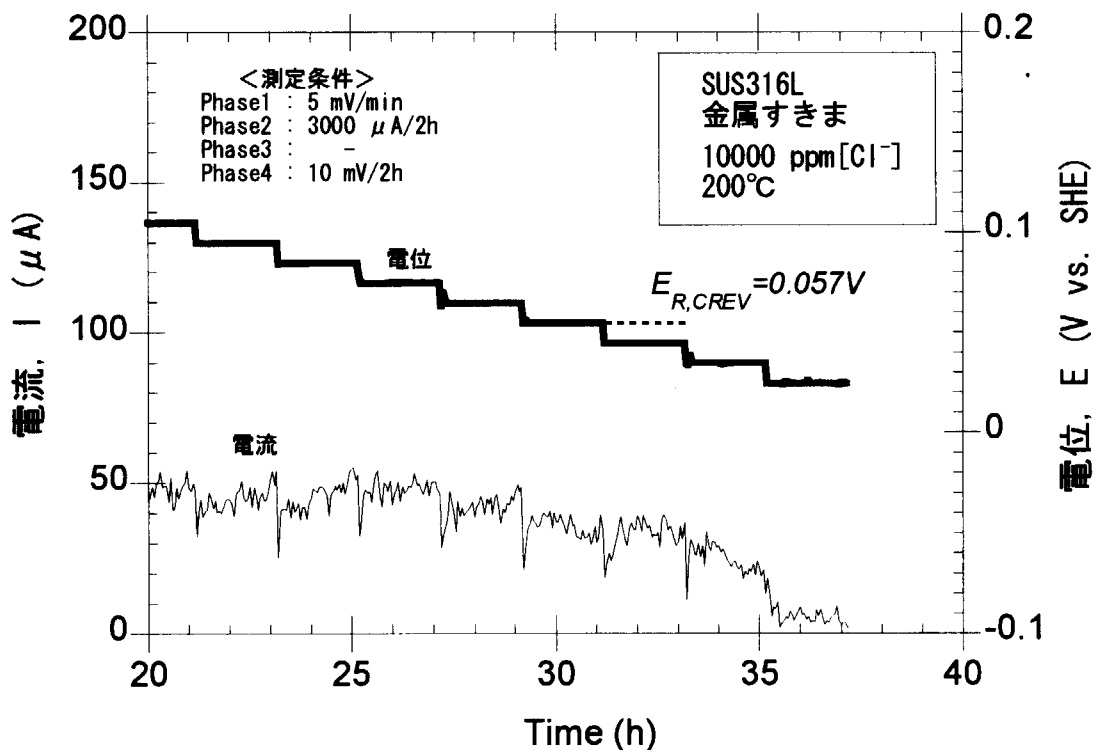


Fig. 41 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 10000ppm, 200° C

This is a blank page.



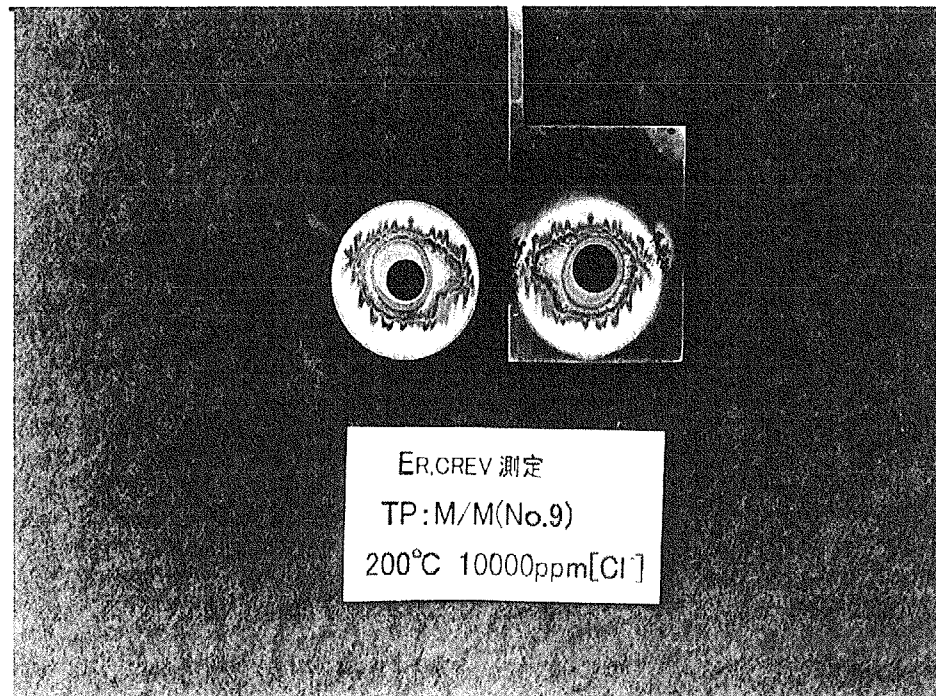
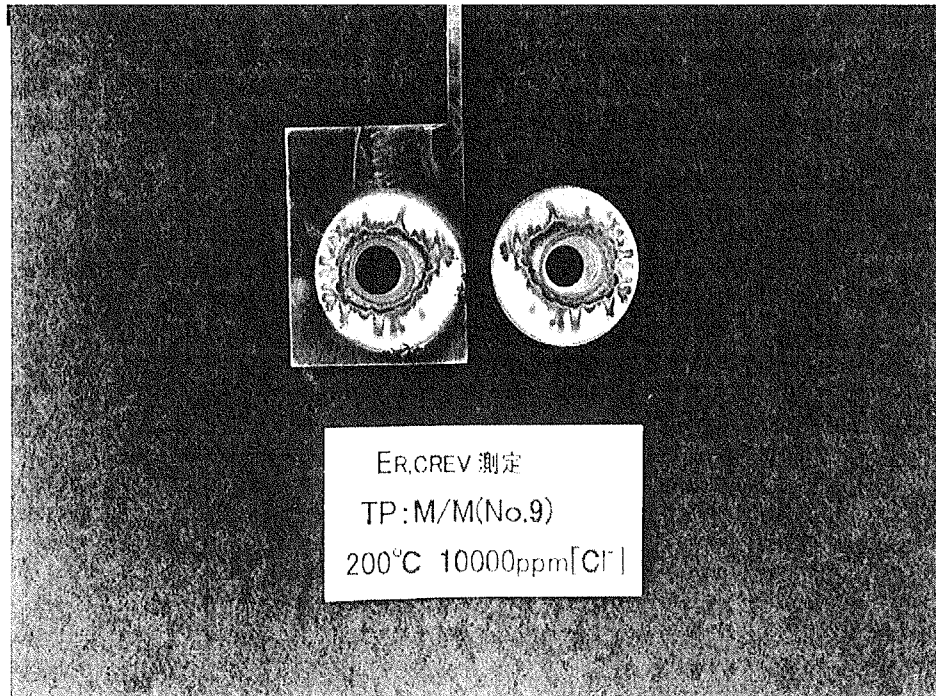


Fig. 42 Photo of internal surfaces of the crevice with disassembling the test piece, about metal/metal crevice test piece after test under the degassed water solution with chloride of 10000ppm, 200° C

**This is a blank page.**

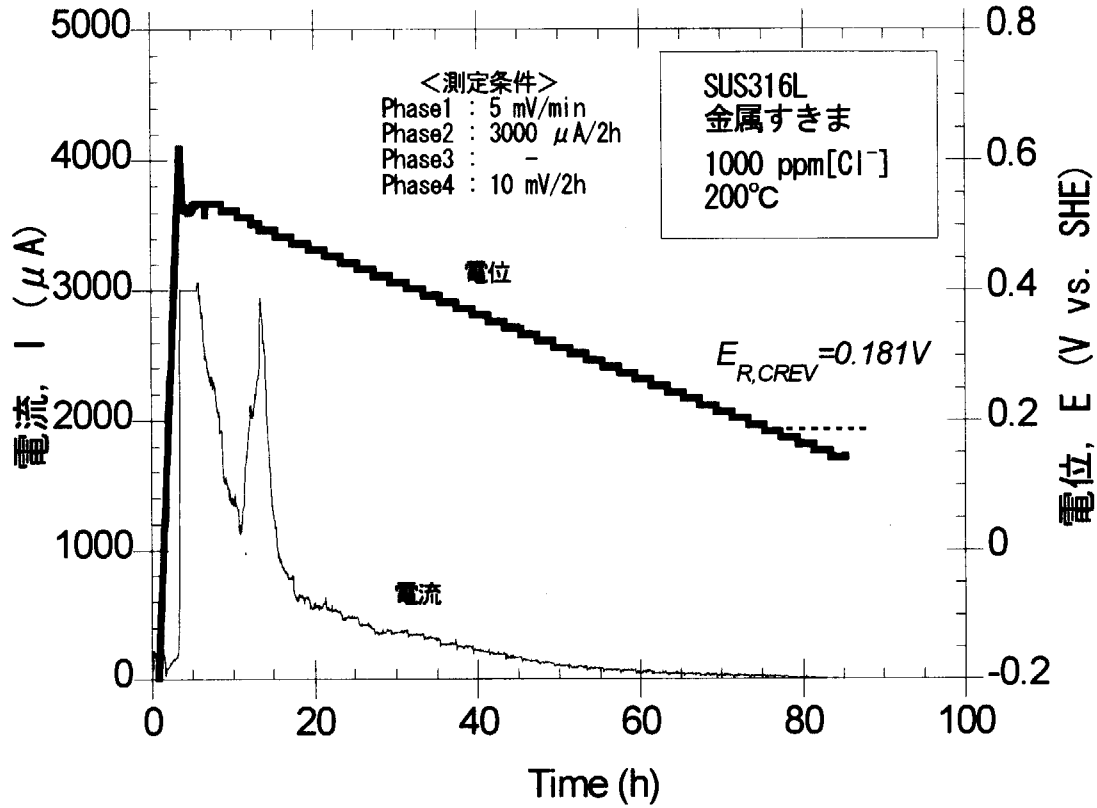


Fig. 43 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 200° C

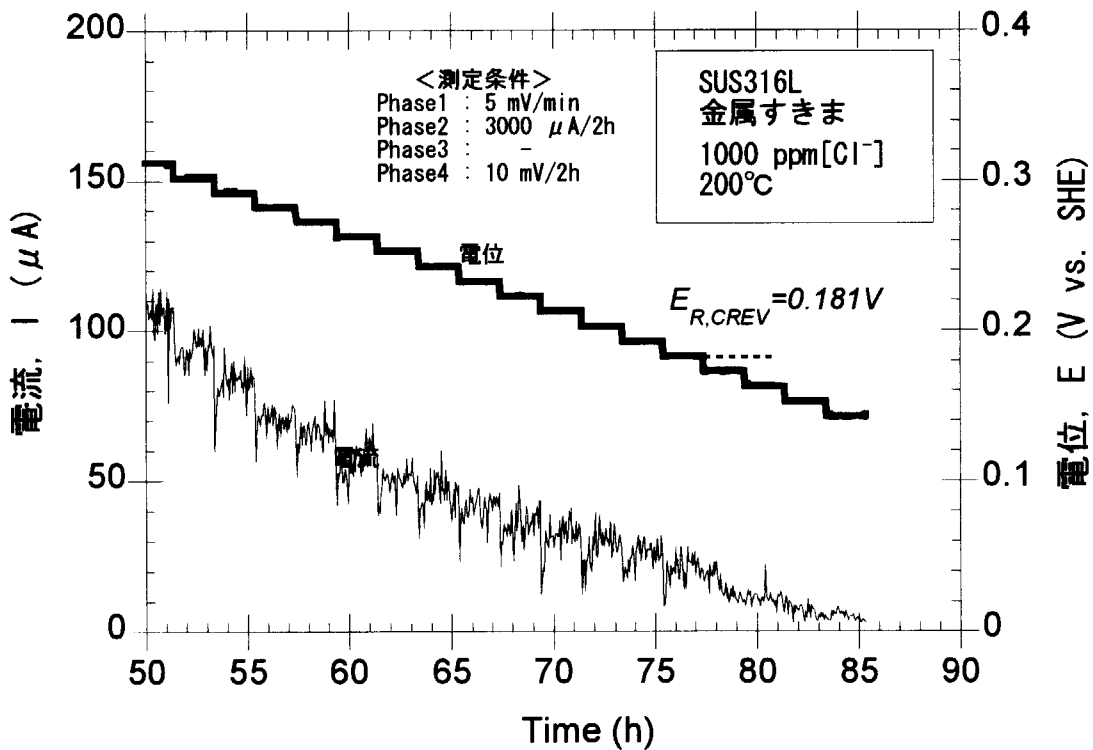


Fig. 44 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 200° C

**This is a blank page.**

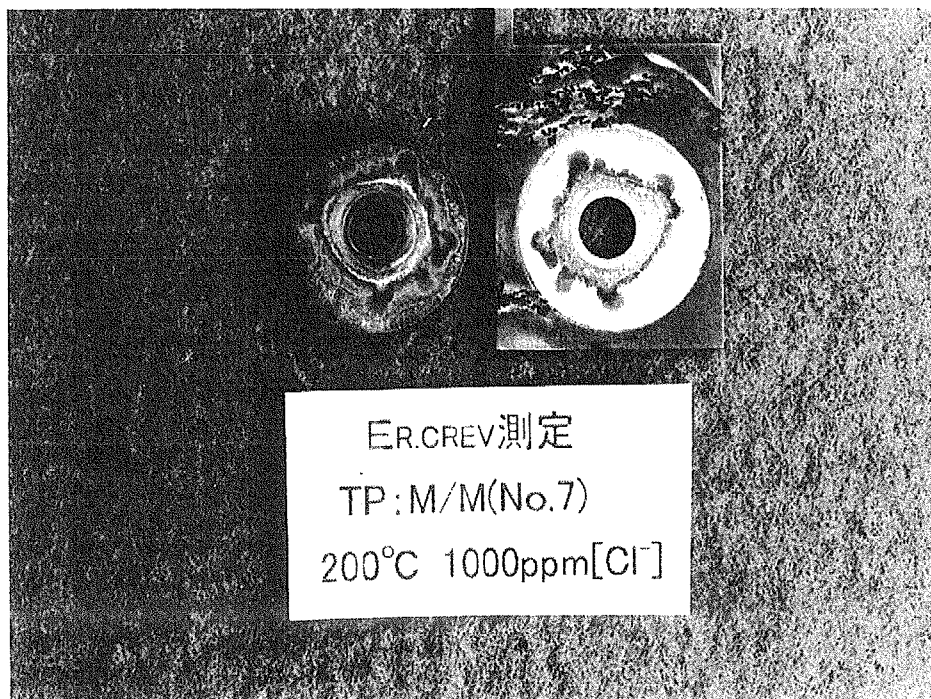
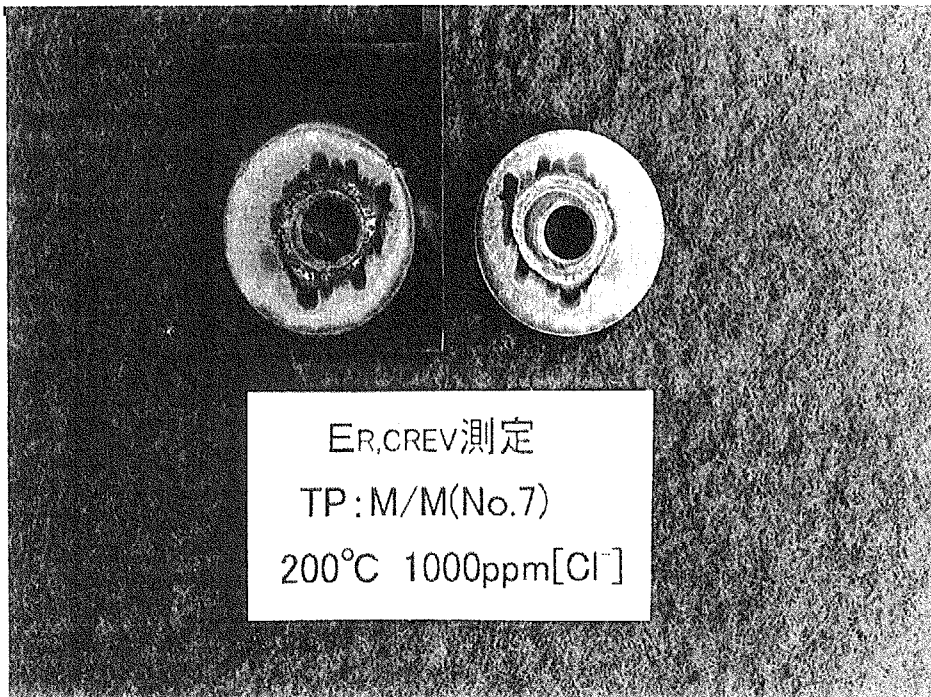


Fig. 45 Photo of internal surfaces of the crevice with disassembling the test piece, about metal/metal crevice test piece after test under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 200° C

**This is a blank page.**

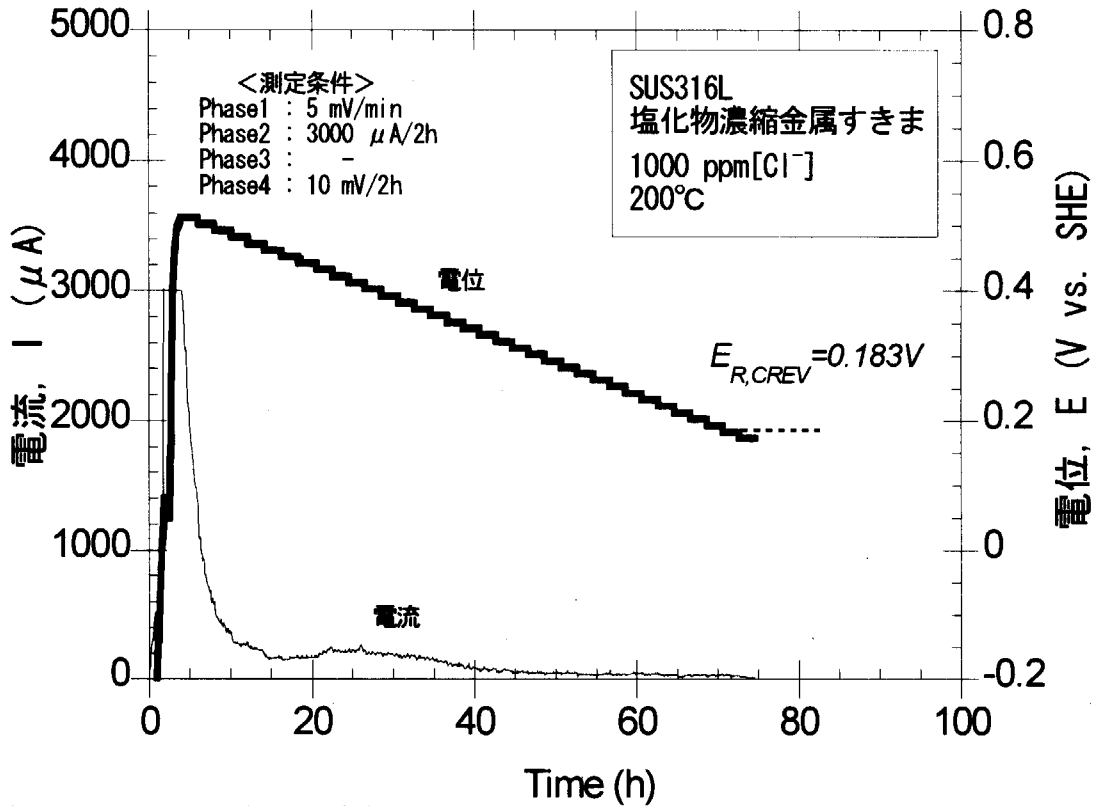


Fig. 46 Measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on condensed chloride metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 200° C

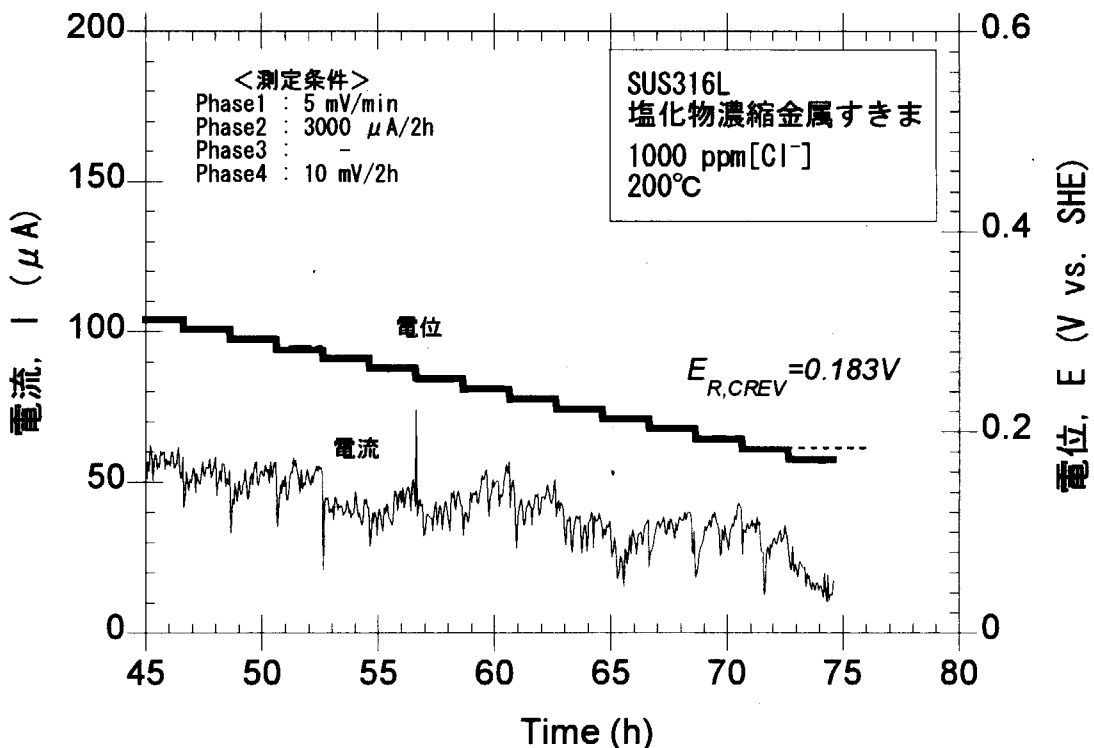


Fig. 47 Magnified view at phase 4 of measured potential and current for identification of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , on condensed chloride metal/metal crevice test piece under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 200° C

This is a blank page.



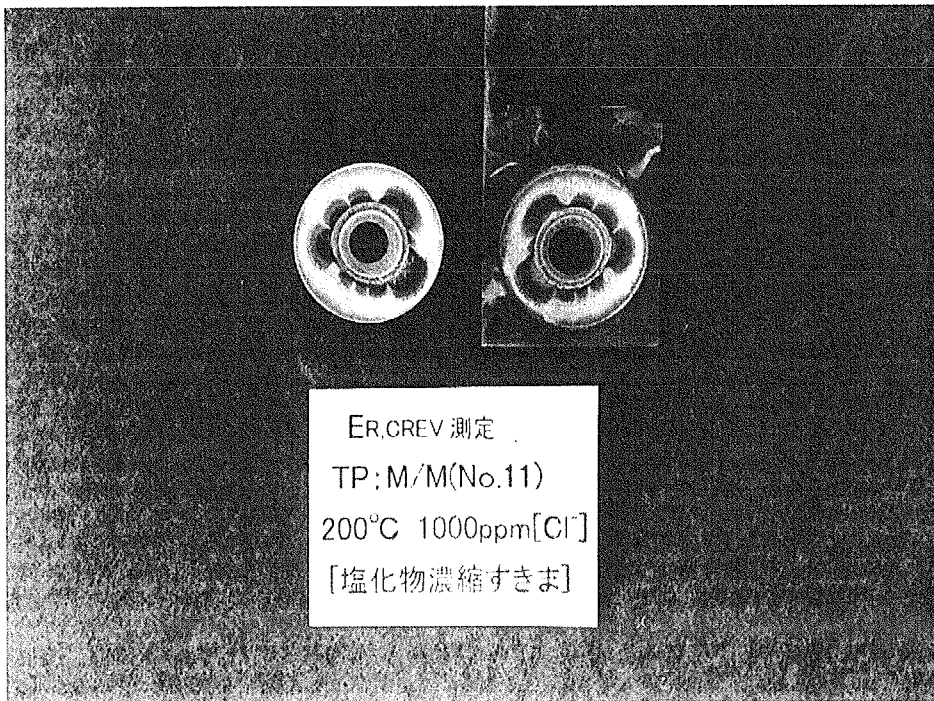
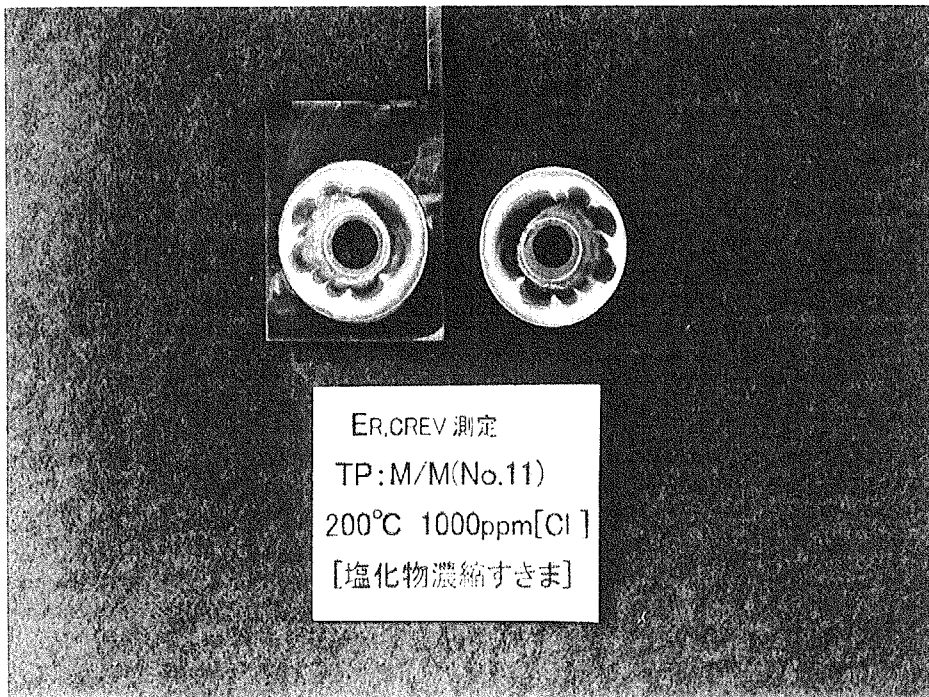


Fig. 48 Photo of internal surfaces of the crevice with disassembling the test piece, about condensed chloride metal/metal crevice test piece after test under the degassed water solution with chloride of 1000ppm, 200° C

**This is a blank page.**

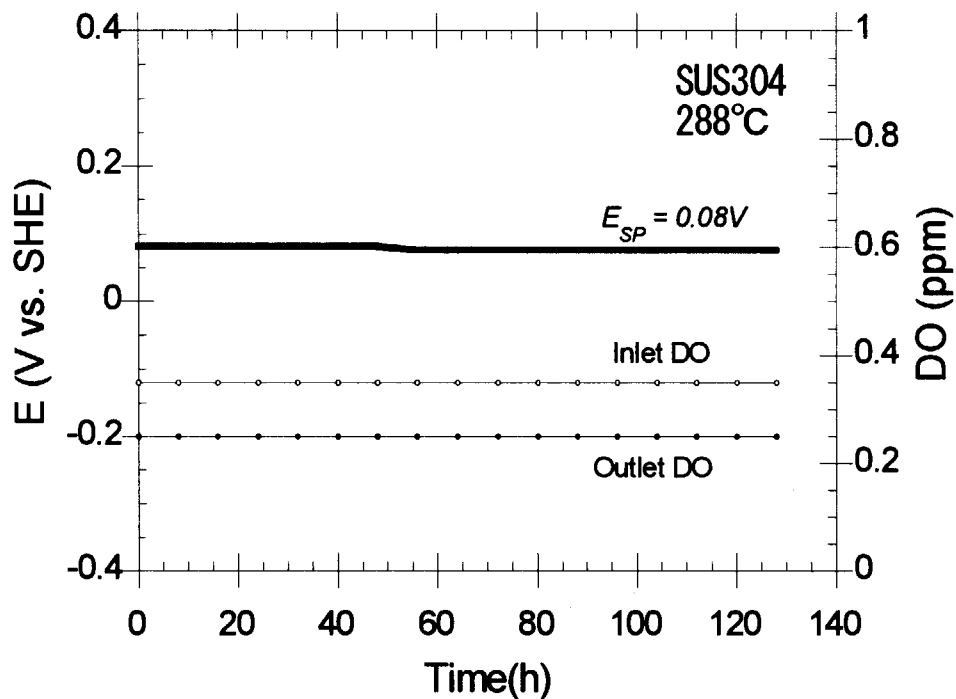


Fig. 49 Steady-state corrosion potential,  $E_{SP}$ , of type 304 stainless steel under the environment simulating boiled water reactor with 288° C

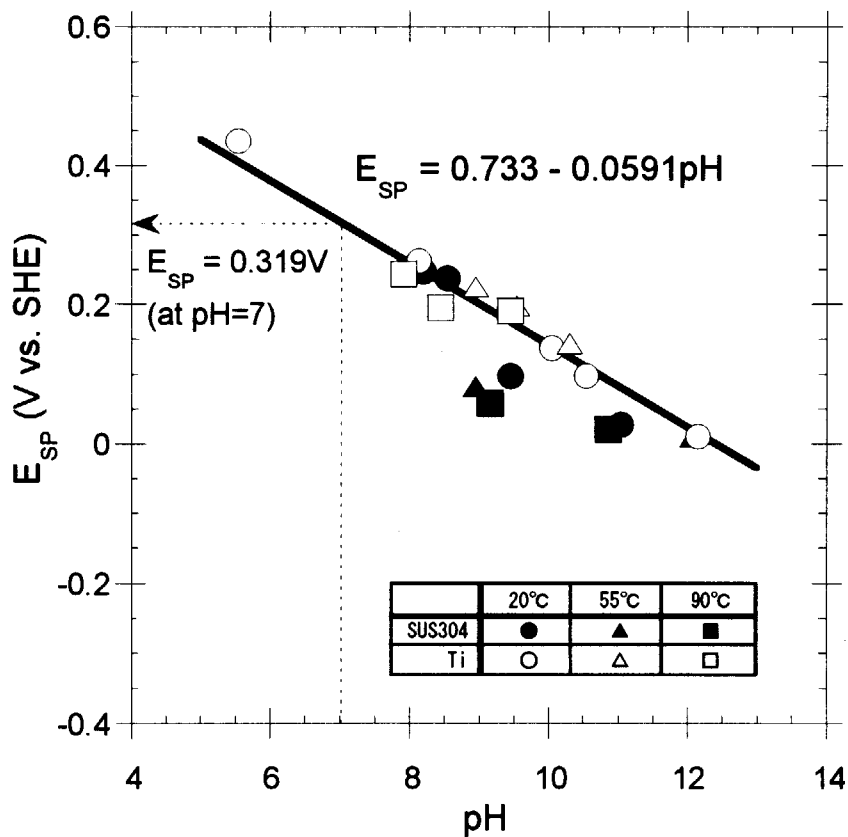


Fig. 50 Estimation of the steady-state corrosion potential,  $E_{SP}$ , of type 304 stainless steel under water temperature of 25° C

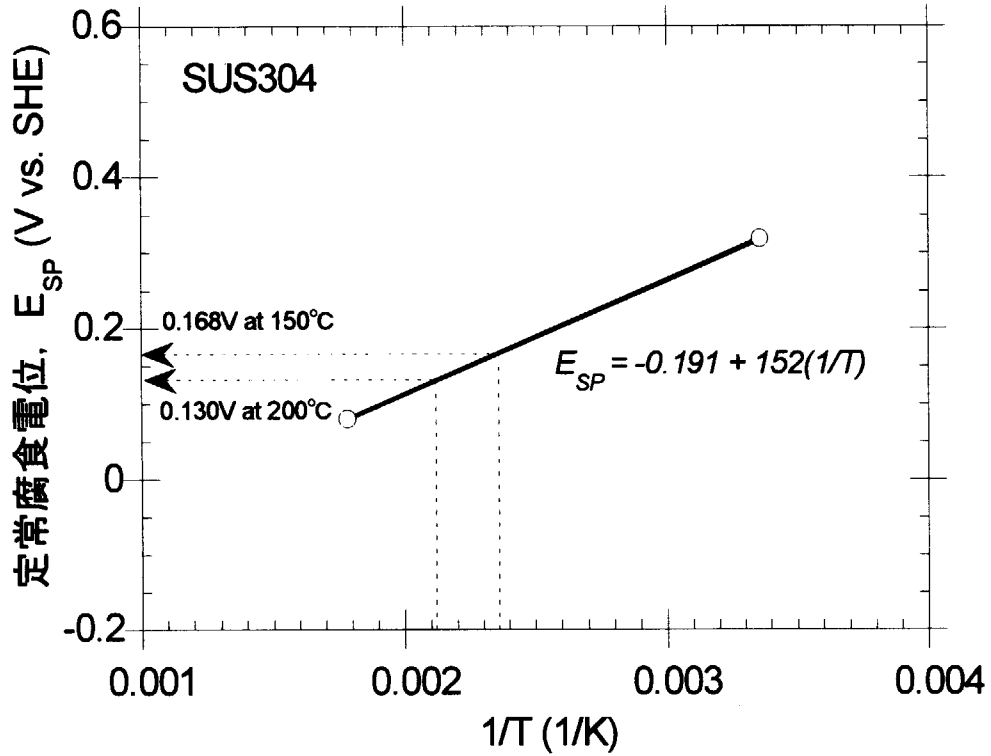


Fig. 51 Estimation of steady-state corrosion potential,  $E_{SP}$ , of type 316L stainless steel under water temperature of 150° C and 200° C

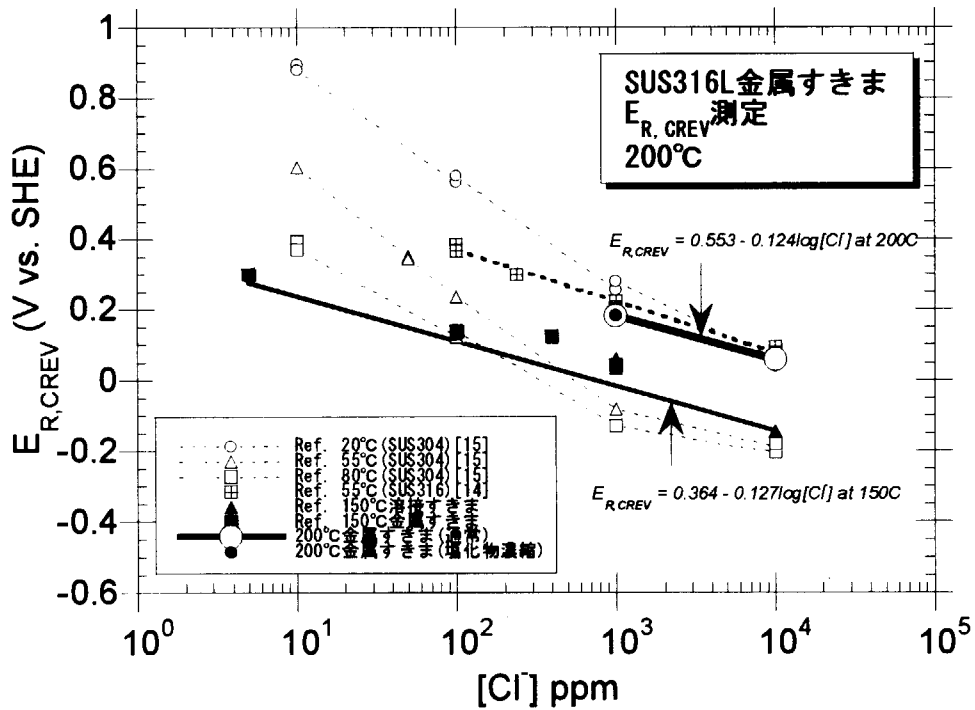


Fig. 52 Relation of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , to chloride ion density

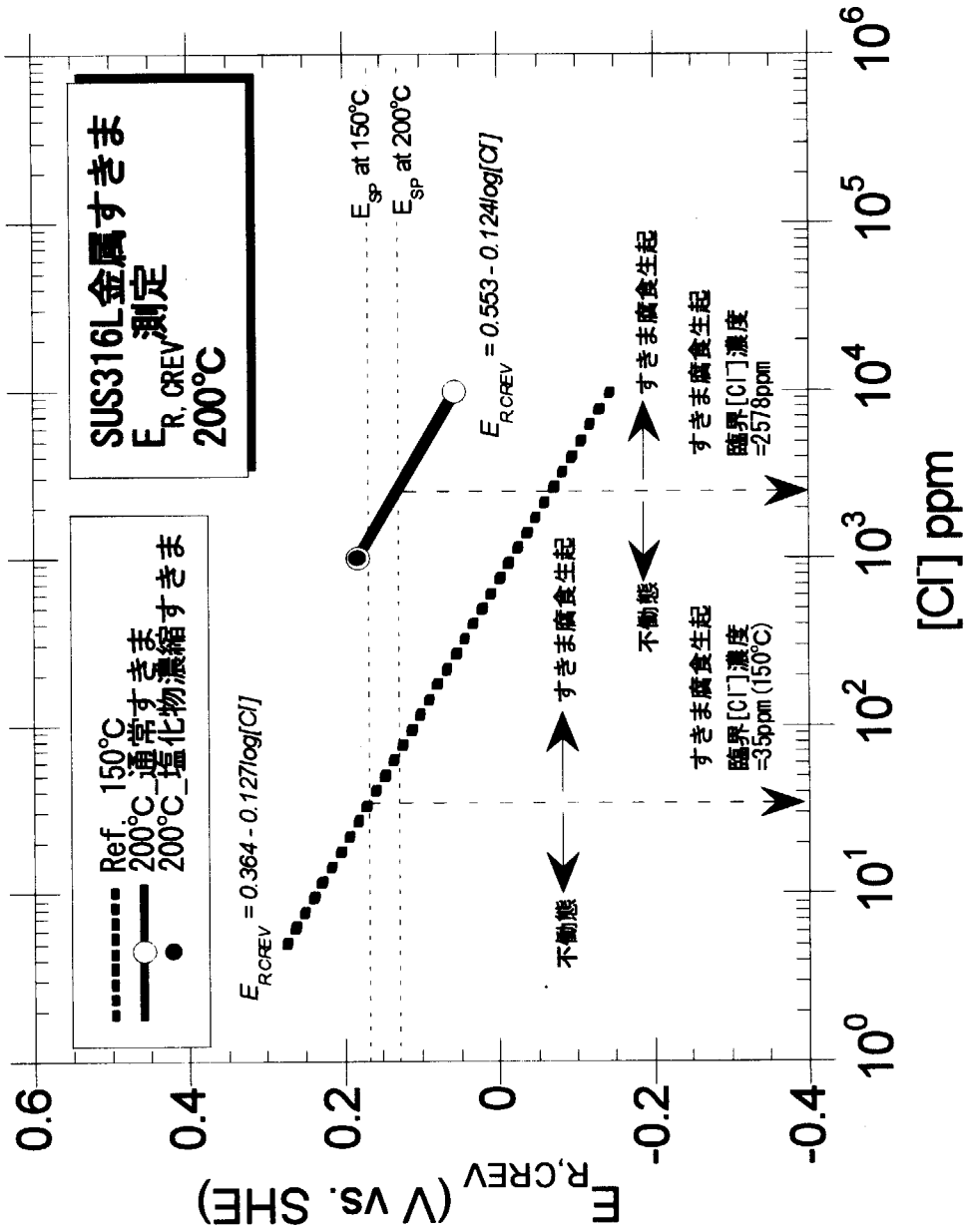


Fig. 53 Estimation of critical chloride ion density from comparison of corrosion-crevice repassivation potential,  $E_{R,CREV}$ , and steady-state corrosion potential,  $E_{SP}$

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

**表1 SI基本単位および補助単位**

量	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
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

**表3 固有の名称をもつSI組立単位**

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光照射度	ルーメン	lm	cd·sr
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線量当量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

**表2 SIと併用される単位**

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

**表4 SIと共に暫定的に維持される単位**

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

**表5 SI接頭語**

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」 mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

ITER真空容器溶接部のすきま腐食感受性評価



古紙配合率100%  
白色度70%の再生紙を使用しています