

# 放射線核種溶存溶液中での鋼の電気化学測定法及び イメージングプレートを用いた腐食試験片解析手法の開発

Development of an Electrochemical Measurement Method for Carbon Steels  
in Radiation Source Dissolved Solution and a Corroded Specimen Analysis Method  
Using an Imaging Plate

山下 直輝 青山 高士 加藤 千明 佐野 成人  
田上 進

Naoki YAMASHITA, Takahito AOYAMA, Chiaki KATO, Naruto SANO  
and Susumu TAGAMI

原子力科学研究部門  
原子力科学研究所  
臨界ホット試験技術部

Department of Criticality and Hot Examination Technology  
Nuclear Science Research Institute  
Sector of Nuclear Science Research

March 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課  
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

放射線核種溶存溶液中での鋼の電気化学測定法  
及びイメージングプレートを用いた腐食試験片解析手法の開発

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所  
臨界ホット試験技術部

山下 直輝、青山 高士<sup>+</sup>、加藤 千明<sup>+</sup>、佐野 成人、田上 進

(2023年12月4日受理)

現在廃止措置過程にある福島第一原子力発電所(1F)では、 $^{90}\text{Sr}$ や $^{137}\text{Cs}$ をはじめとする放射線核種が構造物の健全性に及ぼす影響への関心が高まっている。特に1F内で多くの箇所に用いられている炭素鋼は、溶液中の金属カチオンによって腐食挙動が変化することが知られているが、 $^{90}\text{Sr}$ や $^{137}\text{Cs}$ が腐食に及ぼす影響については未解明である。また、腐食挙動を理解するうえで、鍍層中の $^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ の分布を調査することが重要であるが、その手法は未だ確立されていない。本研究ではグローブボックス内で $^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ を含むNaCl中で炭素鋼の腐食試験を行えるよう、グローブボックスの整備を行った。加えて、溶液中に金属カチオンとして存在する $^{90}\text{Sr}$ や $^{137}\text{Cs}$ が炭素鋼の腐食挙動に及ぼす影響を明らかにするため、イメージングプレートを用いた鍍層中放射線核種の検出手法の確立を試みた。

**Development of an Electrochemical Measurement Method for Carbon Steels  
in Radiation Source Dissolved Solution and a Corroded Specimen Analysis Method  
Using an Imaging Plate**

Naoki YAMASHITA, Takahito AOYAMA<sup>+</sup>, Chiaki KATO<sup>+</sup>, Naruto SANO and Susumu TAGAMI

Department of Criticality and Hot Examination Technology  
Nuclear Science Research Institute  
Sector of Nuclear Science Research  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 4, 2023)

At the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), which is currently undergoing decommissioning, there is growing interest in the effects of radiation-emitting radionuclides such as  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  on the structural integrity. In particular, the corrosion behavior of carbon steel, which is used in many parts of 1F, is known to change depending on metal cations in solution, but the effects of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  on corrosion are not yet understood. In addition, it is important to investigate the distribution of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the rust layer in order to understand the corrosion behavior, but the method has not yet been established. In this study, a glove box was prepared to conduct corrosion tests of carbon steel in NaCl containing  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the glove box. In addition, in order to clarify the influence of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$ , which exist as metal cations in the solution, on the corrosion behavior of carbon steel, we attempted to establish a detection method for radioactive materials in the rust layer using an imaging plate.

Keywords: Corrosion, Steel, Radiation Source Dissolved Solution

---

+ Nuclear Science and Engineering Center

目 次

1. はじめに-----	1
2. 試験環境の整備-----	2
2.1 許可使用に係る変更許可申請-----	2
2.2 本試験に係る放射線業務従事者の実効線量の評価-----	2
2.3 グローブボックスの整備-----	3
2.4 $^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ の購入及び貯蔵-----	3
3. 試験方法-----	4
3.1 供試材-----	4
3.2 試験液の調整-----	4
3.3 電気化学試験-----	5
3.3.1 試験装置の準備-----	5
3.3.2 自然浸漬電位測定及び分極抵抗測定-----	5
3.3.3 試験終了後の操作及び試験片の洗浄-----	5
3.3.4 イメージングプレート解析-----	6
4. 試験結果-----	7
4.1 電気化学測定-----	7
4.2 イメージングプレート解析-----	7
5. まとめ-----	8
謝辞-----	9
参考文献-----	10

Contents

1. Introduction	1
2. Development of testing environment	2
2.1 Application for permission	2
2.2 Evaluation of exposure doses for this study	2
2.3 Glove box maintenance	3
2.4 Purchase and storage of <sup>90</sup> Sr and <sup>137</sup> Cs	3
3. Experimental	4
3.1 Sample	4
3.2 Test solutions	4
3.3 Electrochemical measurements	5
3.3.1 Preparation of test equipment	5
3.3.2 Corrosion potential measurements and polarization resistance measurements	5
3.3.3 Post-test manipulation and specimen cleaning	5
3.3.4 Imaging plate analysis	6
4. Results	7
4.1 Electrochemical measurements	7
4.2 Imaging plate analysis	7
5. Summary	8
Acknowledgements	9
References	10

## 表リスト

Table 3.1	炭素鋼の化学組成-----	11
-----------	---------------	----

## 図リスト

Fig.1	グローブボックスの整備作業写真-----	12
Fig.2	旗型試験片見取図-----	13
Fig.3	$^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 含有水溶液の pH 調整 (1)作業写真-----	14
Fig.4	$^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 含有水溶液の pH 調整 (2)作業写真-----	14
Fig.5	$^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 含有水溶液の pH 調整 (3)作業写真-----	15
Fig.6	$^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 含有水溶液の pH 調整 (4)作業写真-----	15
Fig.7	$^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 含有水溶液の pH 調整 (5)作業写真-----	16
Fig.8	$^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 含有水溶液の pH 調整 (6)作業写真-----	16
Fig.9	$^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 含有水溶液の pH 調整 (7)作業写真-----	17
Fig.10	参照電極、試料極及び Pt 対極の接続 作業写真-----	18
Fig.11	試験終了後の操作及び試験片の洗浄 (1)作業写真-----	19
Fig.12	試験終了後の操作及び試験片の洗浄 (4)作業写真-----	20
Fig.13	試験終了後の操作及び試験片の洗浄 (5)作業写真-----	20
Fig.14	試験終了後の操作及び試験片の洗浄 (6)作業写真-----	21
Fig.15	イメージングプレート解析 (1)作業写真-----	21
Fig.16	イメージングプレート解析 (2)作業写真-----	22

This is a blank page.



## 1. はじめに

現在廃止措置過程にある福島第一原子力発電所（以下「1F」という。）では、事故発生時に冷却機能が喪失したため、海水注入による炉心冷却措置が取られた。その後、循環冷却装置が導入され、原子炉建屋内の塩化物イオン濃度は低下しているが、循環冷却装置導入までの間に、建屋内部は高い塩化物イオン濃度に曝されていたと考えられる。1F内で多くの箇所に用いられている炭素鋼は、塩化物環境において全面腐食が生じ、腐食の進行とともに炭素鋼表面には錆層が形成される過程において、燃料デブリから放出された放射性カチオン（ $^{90}\text{Sr}^{2+}$ や $^{137}\text{Cs}^+$ 等）が錆層中に取り込まれ、炭素鋼の腐食挙動に影響を及ぼす可能性がある。炭素鋼は溶液中の金属カチオンによって腐食挙動が変化することが知られている<sup>1)</sup>が、 $^{90}\text{Sr}^{2+}$ や $^{137}\text{Cs}^+$ が炭素鋼の腐食挙動に及ぼす影響については未解明である。

本研究では、 $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  が溶存する溶液中で炭素鋼の腐食試験を行い、腐食試験片中の放射性核種の検出及び放射能解析を行うことで溶存放射性カチオンが炭素鋼の腐食挙動に及ぼす影響を解明することを試みた。炭素鋼の腐食を促進する目的で、試験溶液には  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  が溶存する NaCl 溶液を用いた。試験片中の放射性核種の検出及び放射能解析には RI イメージングプレートを用いた。イメージングプレートとは、輝尽性蛍光体という特殊な蛍光体を添付したプラスチックフィルムである。輝尽性蛍光体は、露光した放射線強度に比例したエネルギーを電子トラップとして蓄積する。イメージングプレートを放射線に露光した後にイメージングプレート表面にレーザー光を照射すると、蓄積されたエネルギーに対応した発光（輝尽）を生じる。この発光量を計測することにより試料の放射能を解析することが可能となる<sup>2)</sup>。

これまでに、原子力基礎工学研究センター防食材料技術開発グループと臨界ホット試験技術部ホット材料試験課では、ステンレス鋼の腐食挙動に及ぼす溶存放射性核種の影響に関して研究を行ってきた<sup>3-4)</sup>。その結果、溶存放射性核種による水の加水分解によって生じる過酸化水素の影響でステンレス鋼の腐食電位が上昇することが分かった。

原子力科学研究所廃棄物安全試験施設（以下「WASTEF」という。）では、放射性核種溶存溶液を用いた試験はコンクリートセルで実施してきた。しかし、コンクリートセルにおいてはセル外からのマニピュレータを用いた作業が必要となり、試験装置及び溶液を容易に取り扱うことはできない。そこで、本研究ではより簡便に試験を行うために WASTEF 内のグローブボックスを活用することとした。本研究においてはまずグローブボックス内で試験を行うための放射性同位元素の許可使用に係る変更申請及びグローブボックスの整備を行った。

本報告書では、試験に先んじて行ったグローブボックスの整備と、新たに開発した放射線核種溶存環境での鋼の腐食挙動を解明するための腐食試験手法及び腐食試験片の解析手法に関して報告する。

## 2. 試験環境の整備

### 2.1 許可使用に係る変更許可申請

本試験をグローブボックスで実施するには、使用方法を追加する必要があったため、放射性同位元素の許可使用に係る変更許可申請を令和4年2月28日に行い、令和4年6月3日に変更許可を取得した。

### 2.2 本試験に係る放射線業務従事者の実効線量の評価

本試験で使用する放射性同位元素である<sup>90</sup>Sr及び<sup>137</sup>Csを、グローブボックスで取り扱う際の実効線量について、以下のとおり評価を実施した。

#### (1) <sup>90</sup>Sr及び<sup>137</sup>Csの実効線量率の計算

##### 1) <sup>90</sup>Srの実効線量率

評価条件として、試験セルに入った<sup>90</sup>Sr (3.3 MBq) はNaClと精製水が混合しており、遮蔽体は水であるが、保守的に評価するため、遮蔽体がない場合で評価をした。また、グローブボックスでの取扱い時は、腕の長さを考慮し、線源と評価点までの距離を40 cmとした。

実効線量率について、<sup>90</sup>Srはγ線が放出されず、β線のみが放出されるため、β線の制動放射線の実効線量の評価を次の計算式により求めることができる。

$$\dot{E} = \Gamma_{20} \times K_{20}(Z) \times A \times (1/d^2) \times F_a$$

$\dot{E}$  : 実効線量率 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ )

$\Gamma_{20}$  : ターゲット物質が原子番号  $Z=20$  の実効線量率定数 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )  
(<sup>90</sup>Sr =  $2.81 \times 10^{-3}$ )

$K_{20}(Z)$  : 原子番号 20 を基準とした場合の制動放射効率比 (水 = 0.330)

$A$  : <sup>90</sup>Sr の放射能 (MBq)

$d$  : 線源と評価点までの距離 (m)

$F_a$  : 遮蔽体の透過率 (遮蔽を考慮しないので 1 とする)

上記の計算式により、実効線量率  $\dot{E} = 0.0191 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  となった。

##### 2) <sup>137</sup>Csの実効線量率

評価条件として、<sup>137</sup>Csは保守的に評価するため、遮蔽体がない場合の実効線量率を評価した。実効線量率は次式により求められる。

$$\dot{E} = \Gamma_E \times A \times (1/d^2)$$

- $\dot{E}$  : 実効線量率 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ )  
 $\Gamma_E$  : 実効線量率定数 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) ( $^{137}\text{Cs} = 0.0779$ )  
 $A$  :  $^{137}\text{Cs}$  の放射能 (MBq)  
 $d$  : 線源と評価点までの距離 (m)

上記の計算式により、実効線量率  $\dot{E} = 1.607 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  となり、 $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  合わせて実効線量率  $\dot{E} = 1.626 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  という結果となった。

## (2) 実効線量の評価

(1)の計算結果により、本試験で用いる放射性同位元素による実効線量率は  $1.626 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  である。

1日あたりの作業時間を2時間で  $4 \mu\text{Sv}$ 、1週間連続で作業をすると5日間で  $20 \mu\text{Sv}$  で  $0.02\text{mSv/週}$  となり、実効線量が放射線業務従事者に対する法令の基準値である  $1 \text{mSv/週}$  を十分下回ることから、本試験をグローブボックスで実施することは可能であると評価した。

## 2.3 グローブボックスの整備

本作業は、グローブボックス内の既存設備をボックス内で解体し、ビニルバッグを用いてバッグポートからバッグアウト方式により解体物を搬出、その後グローブボックス内の除染を実施した。既存でバッグポートに付属している気密端子を利用して入出力用の気密コネクタを整備することにより、グローブボックス外部からの装置制御によるグローブボックス内部での電気化学データ取得が可能となった。本作業写真を Fig. 1 に示す。また、放射性核種溶存溶液調製を実施するために自動滴定装置を搬入し、グローブボックス内での溶液調製を可能とした。

## 2.4 $^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ の購入及び貯蔵

本試験に用いるために日本アイソトープ協会から  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  放射能標準液を購入した。納入後は試験開始までの期間、ホット化学実験室貯蔵箱 (I) に保管した。

購入した放射性同位元素の詳細は以下のとおり。

品名等	核種	公称放射能
$^{90}\text{Sr}$ 放射能標準液 1 mL	$^{90}\text{Sr}$	3.3 MBq
$^{137}\text{Cs}$ 放射能標準液 1 mL	$^{137}\text{Cs}$	3.3 MBq

### 3. 試験方法

#### 3.1 供試材

本研究では、JIS 規格に規定される SGV480 鋼に準拠した PCV 構造材相当の炭素鋼を供試材として用いた。Table 3.1 に化学組成を示す。供試材は Fig. 2 に示すような旗型試験片に加工して試験に用いた。試験期間中の操作性向上のため、旗型試験片は、試験セルに固定可能なホルダーにセットして用いた。試験片は、全面を耐水研磨紙で#1000 まで研磨した後エタノール洗浄によって脱脂した。研磨の際は、炭素鋼の腐食を防ぐため、潤滑剤として水ではなくエタノールを用いた。また、腐食の進行を抑制するため、洗浄後の試験片は試験直前まで真空デシケーターで保管した。可能な限り炭素鋼の表面状態の条件を同一にするため、試験開始時間を調整し、試験片は研磨の 48 時間後に試験液に浸漬させた。

#### 3.2 試験液の調製

本研究では 3.3 MBq の  $^{90}\text{Sr}$  を含む 10 mM NaCl (以降、 $^{90}\text{Sr}$  含有 10 mM NaCl と記載)、3.3 MBq の  $^{137}\text{Cs}$  を含む 10 mM NaCl (以降、 $^{137}\text{Cs}$  含有 10 mM NaCl と記載) を試験液として用いた。全ての試験液は 0.1 M NaOH を用いて pH 5.5 に調製した。標準液の希釈によって液量が増えることで試験液の放射能が大きく低下することを避けるため、試験液量はそれぞれ 20 mL とした。また、試験液の調製については、グローブボックス内で実施した。下記に、詳細な溶液調製手順を示す。

- (1) 測定前の準備として、自動滴定装置の pH 電極を「pH 1.68→4.01→0.86」の順に校正した。電極洗浄の際は、先端部が繊細なため、触れないように慎重に行った。本作業写真を Fig. 3 に示す。
- (2)  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  標準液 1 mL を含むアンプル瓶の頭部中間にアンプルカッターで切り欠きを入れるための補助線を記入し、その上にアンプルカッターで切り欠きを入れる。ある程度切り欠きを入れた状態で切り欠きを押して折るようにして  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  標準液 1 mL を含むアンプル瓶を開封した。開封の際は、アンプル開封によって生じた鋭利な切断面でグローブを傷つけることを防止するため、グローブの上から保護手袋を着用し、切断面に触れないように注意して作業を実施した。本作業写真を Fig. 4 に示す。
- (3) 10 mM NaCl 20 mL を含む試験セルにピペットを用いて  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  標準液 1 mL を移し替えた。アンプル瓶に残存する標準液の量を可能な限り低減するため、アンプル瓶内部を 500  $\mu\text{L}$  の純水ですすぎ、試験セルに移し入れた。試験セル内の溶液の攪拌には攪拌子を用いた。本作業写真を Fig. 5 に示す。
- (4)  $^{90}\text{Sr}$  含有 10 mM NaCl 及び  $^{137}\text{Cs}$  含有 10 mM NaCl の試験セルを自動滴定装置のステージに設置し、滴定ノズル、温度電極及び pH 電極を所定の箇所に挿入した。挿入の際は、電極先端が溶液に浸かるようにして、底に接触しないように注意した。本作業写真を Fig. 6 に示す。
- (5) セット完了後、測定前の pH を確認してから調製後の pH が 5.5 となるように pH 調製を開始した。pH の値が 5.5  $\pm$  0.5 の範囲内に収まっていることを確認して調製を終了した。

本作業写真を Fig. 7 に示す。

- (6) pH 調製後、電極を取り外し、純粋で洗浄、保管場所へ戻した。本作業写真を Fig. 8 に示す。
- (7) 試験セル内の溶液の揮発を防ぐため、試験セルにシールテープを巻いて試験開始時まで保管した。本作業写真を Fig. 9 に示す。

### 3.3 電気化学試験

#### 3.3.1 試験装置の準備

シールテープを外した試験セルを恒温槽に設置し、参照電極 1 本、試料極（炭素鋼試験片）3 本、Pt 対極 1 本をセットした。また、各電極にケーブルを接続し、グローブボックス内と外側で通電していることを確認した。本作業写真を Fig. 10 に示す。

#### 3.3.2 自然浸漬電位測定及び分極抵抗測定

2.2 記載のとおり整備したグローブボックスの気密コネクタを経由してグローブボックス内外で導線を接続することにより電気化学データを取得した。ポテンショスタットを使用して自然浸漬電位を 7 日間測定した。また、試験片を浸漬後 24 時間ごとに分極抵抗測定を行った。分極抵抗は自然浸漬電位から  $\pm 5$  mV の範囲でアノード方向に電位を掃引し、得られた電流-電位曲線から算出した。自然浸漬電位及び分極抵抗は炭素鋼の腐食状況を知る指標となる<sup>5)</sup>。<sup>90</sup>Sr 含有 10 mM NaCl 及び <sup>137</sup>Cs 含有 10 mM NaCl にそれぞれ 3 本ずつ浸漬した試験片は浸漬開始後 1、3、7 日後にそれぞれ取り出した。以降、<sup>90</sup>Sr 含有 10 mM NaCl に 1、3、7 日浸漬した試験片をそれぞれ W1、W2、W3 と記載する。また、<sup>137</sup>Cs 含有 10 mM NaCl に 1、3、7 日浸漬した試験片をそれぞれ W4、W5、W6 と記載する。

#### 3.3.3 試験終了後の操作及び試験片の洗浄

- (1) 試験開始から 24 時間後、分極抵抗を測定した後 W1、W4 をホルダーごと取り外し、エタノールで試験片をすすぎ、エタノール溶液入りの 50 mL メスフラスコに差し替え、エタノール中で保管した。本作業写真を Fig. 11 に示す。
- (2) 試験開始 3 日後、試料極 W2、W5 をホルダーごと取り外し、エタノールで試験片をすすぎ、エタノール溶液入りの 50 mL メスフラスコに差し替え、エタノール中で保管した。
- (3) 試験開始 7 日後、試料極 W3、W6 をホルダーごと取り外し、エタノールで試験片をすすぎ、エタノール溶液入りの 50 mL メスフラスコに差し替え、エタノール中で保管した。
- (4) <sup>90</sup>Sr と <sup>90</sup>Y の放射平衡を成立させるため、エタノール中に保管した W1～6 は、W3、W6 をエタノール溶液入りの 50 mL メスフラスコに移し替えてから 3 週間静置した。本作業写真を Fig. 12 に示す。
- (5) W3、W6 をエタノール中に移し替えてから 3 週間経過後、50 mL メスフラスコのエタノールを廃棄し、50 mL メスフラスコ中で試験片を 1 日乾燥させた。本作業写真を Fig. 13 に示す。
- (6) 乾燥後、グローブボックスから試験片をメスフラスコごと搬出し、フード内へ移動した。

本作業写真を Fig. 14 に示す。

#### 3.3.4 イメージングプレート解析

- (1) 試験片表面に生成した錆を落とさないように試験片を薄いプラスチックフィルムで包装（マイラー処理）した。本作業写真を Fig. 15 に示す。
- (2) W1～6 からの放射線に対するイメージングプレートの露光時間を等しくするため、マイラー処理をした W1～6 をマイラーごとイメージングプレート（IP）カセット内のイメージングプレート上に移動した。本作業写真を Fig. 16 に示す。
- (3) 試験片 W1～6 を IP カセットに設置し、指定時間静置した。本試験では露光時間を 48 時間とした。
- (4) 指定時間静置後、イメージングプレートの汚染を防止するため、試験片をアクリル板の上に移動した。移動後、試験片及びイメージングプレートを IP カセットから取り出した。
- (5) 他施設でイメージングプレート解析をするために IP カセットを施設外に搬出した。

## 4. 試験結果

### 4.1 電気化学測定

整備したグローブボックスを利用することにより、放射性核種溶存溶液中での電気化学データを取得することに成功した。自然浸漬電位測定の結果、 $^{90}\text{Sr}$  含有 10 mM NaCl 中での試験片の自然浸漬電位は  $^{137}\text{Cs}$  含有 10 mM NaCl 中での自然浸漬電位とほぼ同様の値を示すことが分かった。また、両放射性核種溶存溶液中において、浸漬 7 日後の分極抵抗は浸漬開始直後と比較して低下することが分かった。また、両溶液中での分極抵抗には試験期間を通して大きな差はみられなかった。

### 4.2 イメージングプレート解析

48 時間の試験片の露光により、イメージングプレートで放射能分布を視覚化することに成功した。錆が生成した箇所において高いエネルギー強度が確認されたため、炭素鋼上に生成される錆層中に溶液中からの放射性核種の取り込みあるいは吸着が生じていると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、廃止措置過程にある福島第一原子力発電所（1F）で課題となっている放射線核種溶存環境での鋼の腐食挙動を解明するための腐食試験手法及び腐食試験片の解析手法を確立した。

廃棄物安全試験施設（WASTEF）ホット化学実験室のグローブボックスにおいて、 $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  を含む溶液の調製及び電気化学測定を実施できるよう、以下の整備を行った。

- ・ホット化学実験室のグローブボックス有効利用に伴う、許可使用に係る変更許可申請
- ・本試験に係る  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  を含む溶液使用時の遮蔽計算及び評価
- ・グローブボックス内の既存設備の解体撤去
- ・気密コネクタを用いたデータ取得に係る試験環境の整備

これらにより、グローブボックスで試験を行うことで、コンクリートセルと比較して試験装置及び溶液の取扱いが容易になり、簡便に試験を行うことが可能となった。また、気密コネクタを利用することでグローブボックス外部からの装置制御によるグローブボックス内部での電気化学データ取得が可能となった。その結果、放射線核種含有水溶液中で分極抵抗測定を繰り返し行いつつ、自然浸漬電位測定を行うことに成功した。試験の結果、 $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  溶存 10 mM NaCl 中では放射性核種による炭素鋼の自然浸漬電位の違いはほとんどないこと、時間経過とともに分極抵抗が低下することが分かった。

また、フード内でイメージングプレート測定を行った。 $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  溶存 10 mM NaCl 中にそれぞれ 1、3、7 日間浸漬した試験片をイメージングプレートに露光させた。その際、イメージングプレート測定から試験片取出し時にマイラー処理した試験片をアクリル板の上に移動したことでイメージングプレートを汚染させることなく搬出し、解析することに成功した。解析の結果、炭素鋼上に錆が生成した箇所において高いエネルギー強度が確認された。

本開発手法によって得られた放射性核種を含む溶液中での電気化学データ及び放射性核種を含む錆層の解析結果は世界的にも極めて前例の少ない非常に貴重なものである。今後も、廃止措置に資する腐食試験データの取得を目指して試験を行えるように設備の改良や許認可手続きを継続して行っていく必要がある。また、今回整備したグローブボックスでは、今後 Pu 及び Am を使用した試験も検討している。今後も WASTEF グローブボックスの有効活用を進め、研究活動を支援していく必要がある。



謝辞

本試験技術の開発にあたり、千代田メンテナンス株式会社テクニカル統括部東海施設課 WASTEF グループ臼庭直利氏、吉成広行氏、宮崎雅弥氏には、多大なるご尽力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Otani K. and Sakairi M., Effects of metal cations on corrosion of mild steel in model fresh water, *Corrosion Science*, vol. **111**, 2016, pp.302-312, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.020>
- 2) 細井雄一, IP による放射線イメージングの特徴と応用例, *日本写真学会誌*, vol. **64** (2), 2001, pp.133-142, <https://doi.org/10.11454/photogrst1964.64.133>
- 3) 青山高士ほか,  $^{90}\text{Sr}$  標準溶液の滴下が SUS 316L の腐食電位に及ぼす影響の検討, *材料と環境*, **71** (4), 2022, pp.110-115, <https://doi.org/10.3323/jcorr.71.110>
- 4) 青山高士ほか, HCl 水溶液中の溶存  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  が SUS 316L の腐食電位に及ぼす影響, *材料と環境*, **72** (11), 2023, pp.284-288, <https://doi.org/10.3323/jcorr.72.284>
- 5) 杉本克久, 金属化学入門シリーズ第 4 巻 改訂 材料電子化学, 日本金属学会, 2006, pp. 109-110.

Table 3.1 炭素鋼の化学組成

C	Si	Mn	P	S	Fe
$\leq 0.28$	0.13-0.45	0.79-1.30	$\leq 0.035$	$\leq 0.035$	bal.



既存設備の解体作業



既存設備解体物の搬出作業



気密コネクタのボックス外部接続作業



気密コネクタのボックス内部接続作業

Fig. 1 グローブボックスの整備作業写真

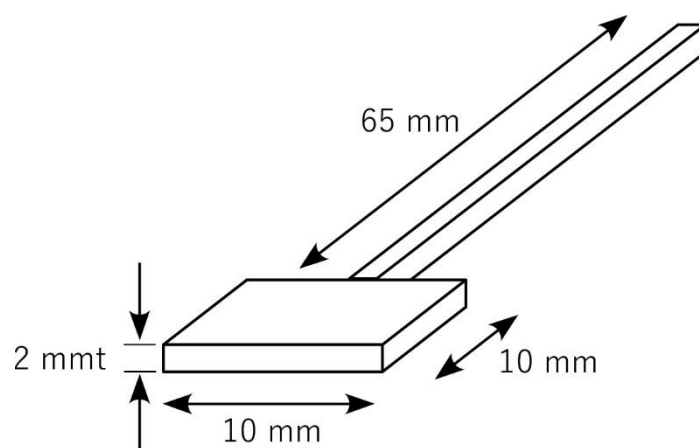


Fig. 2 旗型試験片見取図





Fig. 5  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  含有水溶液の pH 調整 (3)作業写真

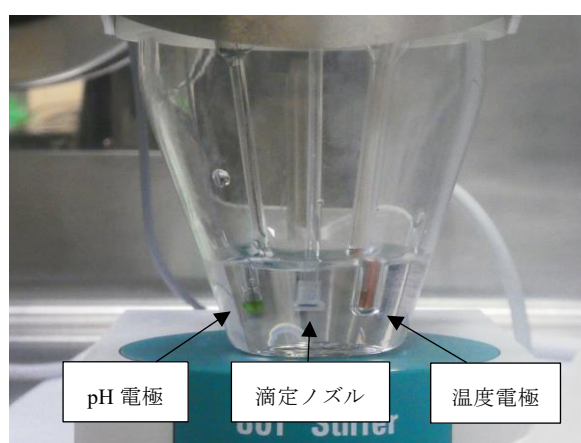


Fig. 6  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  含有水溶液の pH 調整 (4)作業写真

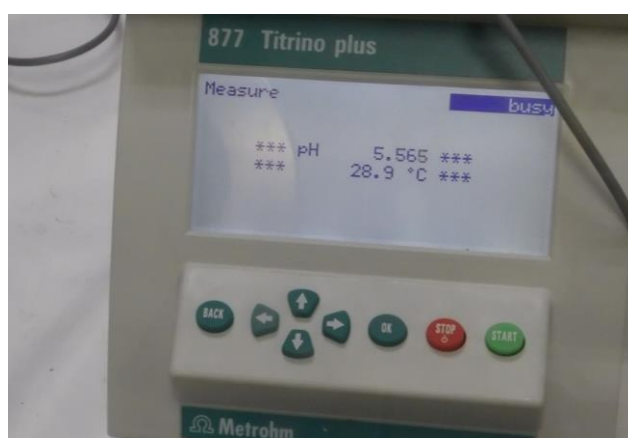
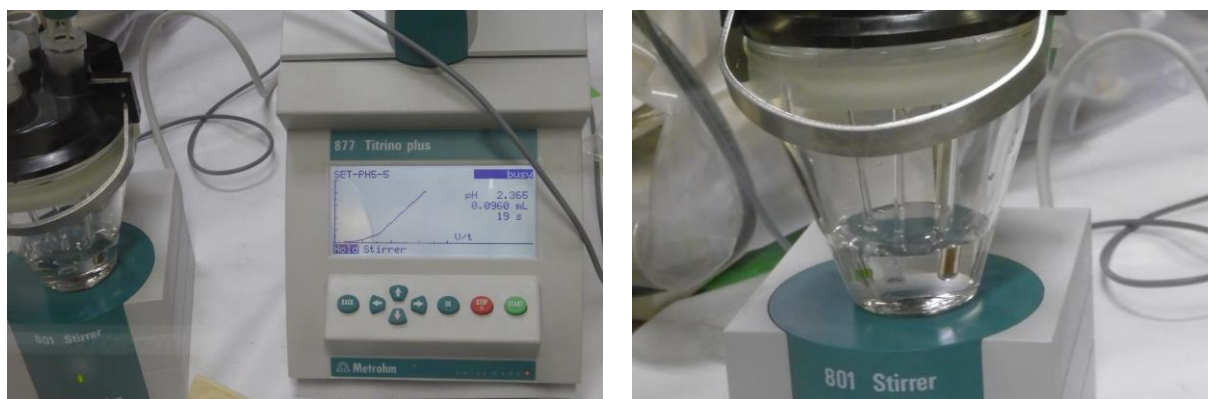


Fig. 7  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  含有水溶液の pH 調整 (5)作業写真

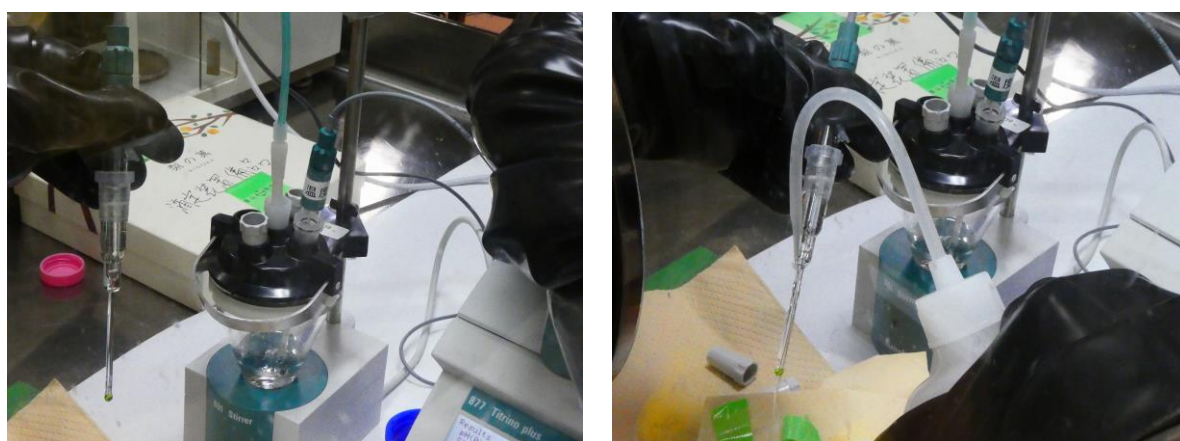


Fig. 8  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  含有水溶液の pH 調整 (6)作業写真



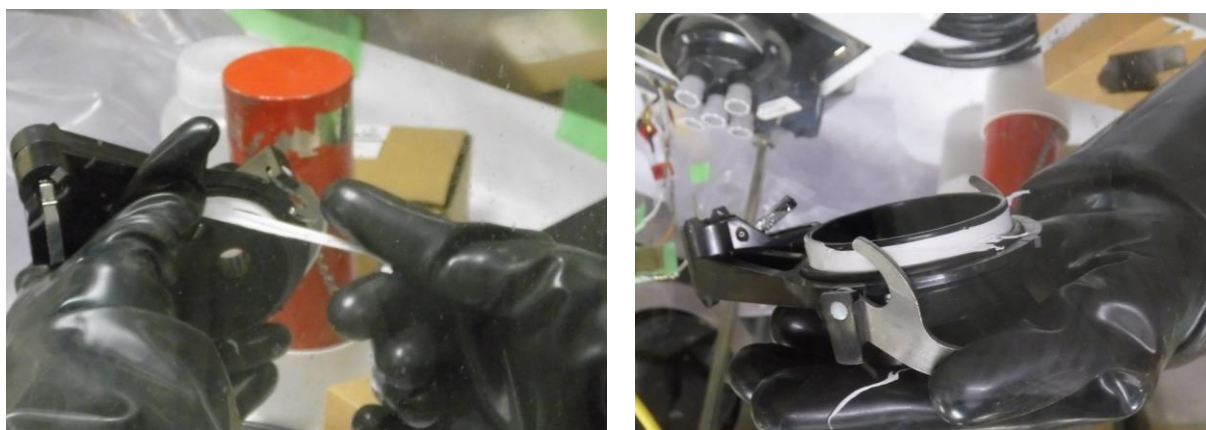


Fig. 9  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  含有水溶液の pH 調整 (7)作業写真

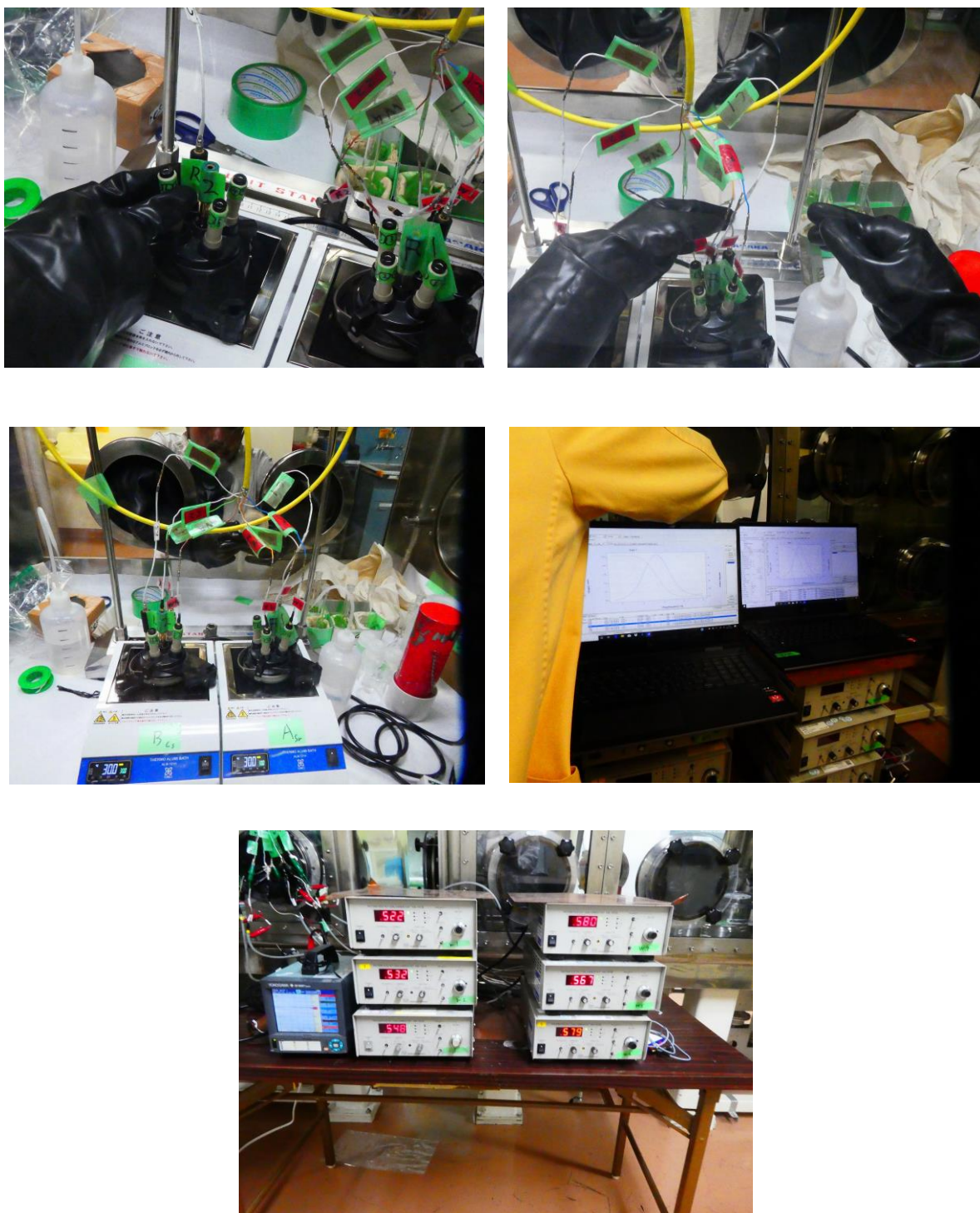


Fig. 10 参照電極、試料極及び Pt 対極の接続 作業写真

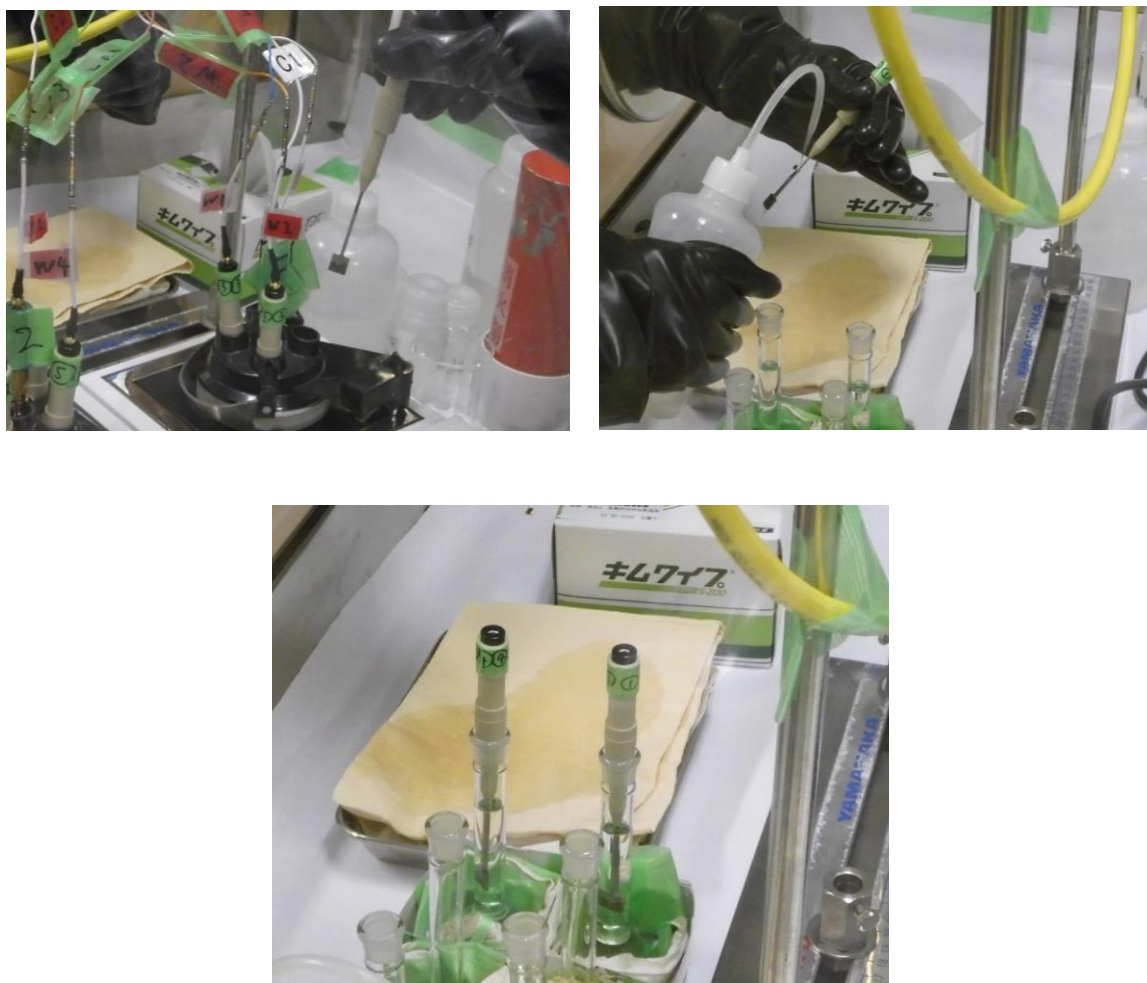


Fig. 11 試験終了後の操作及び試験片の洗浄 (1)作業写真



Fig. 12 試験終了後の操作及び試験片の洗浄 (4)作業写真



Fig. 13 試験終了後の操作及び試験片の洗浄 (5)作業写真



Fig. 14 試験終了後の操作及び試験片の洗浄 (6)作業写真

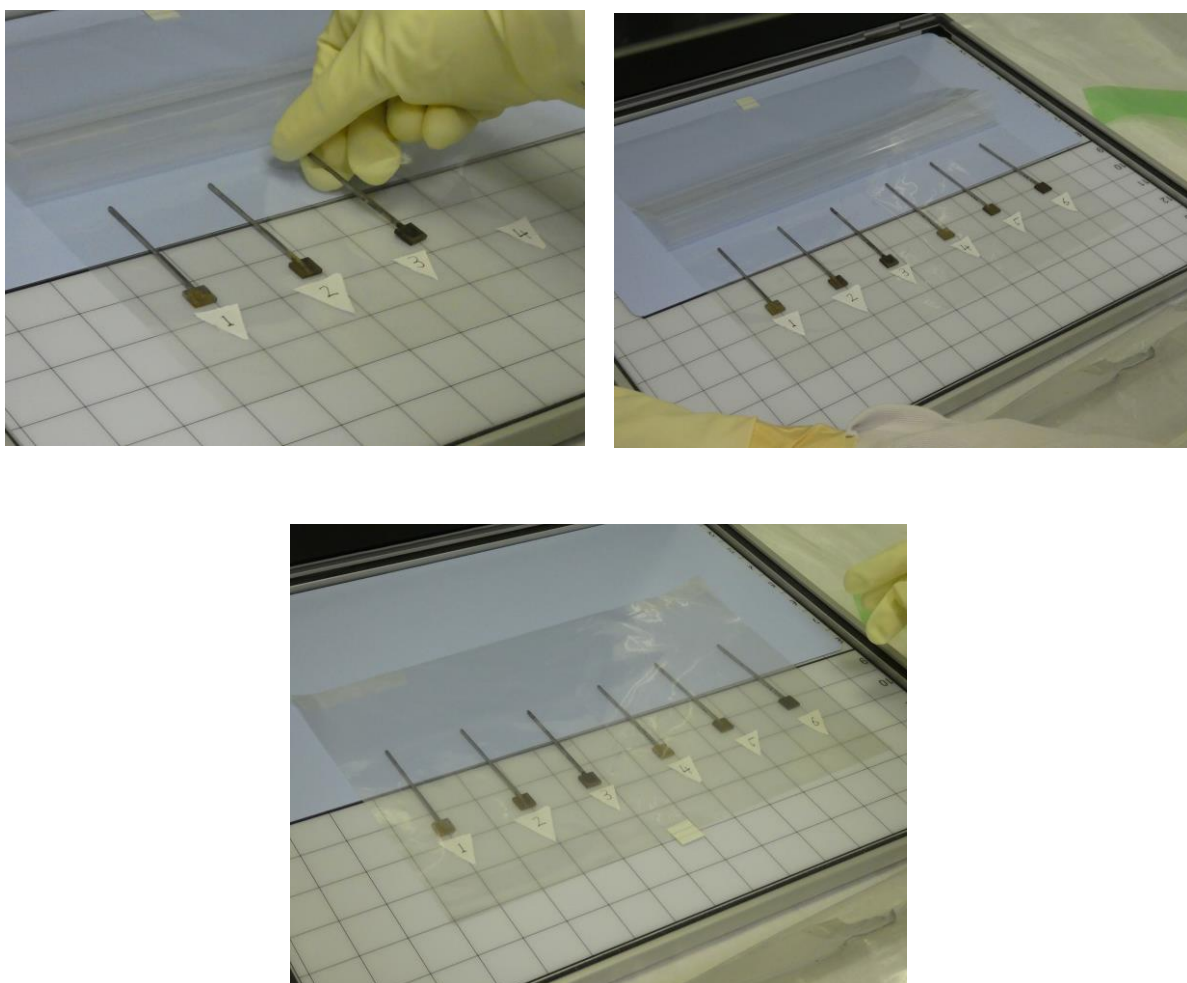


Fig. 15 イメージングプレート解析 (1)作業写真

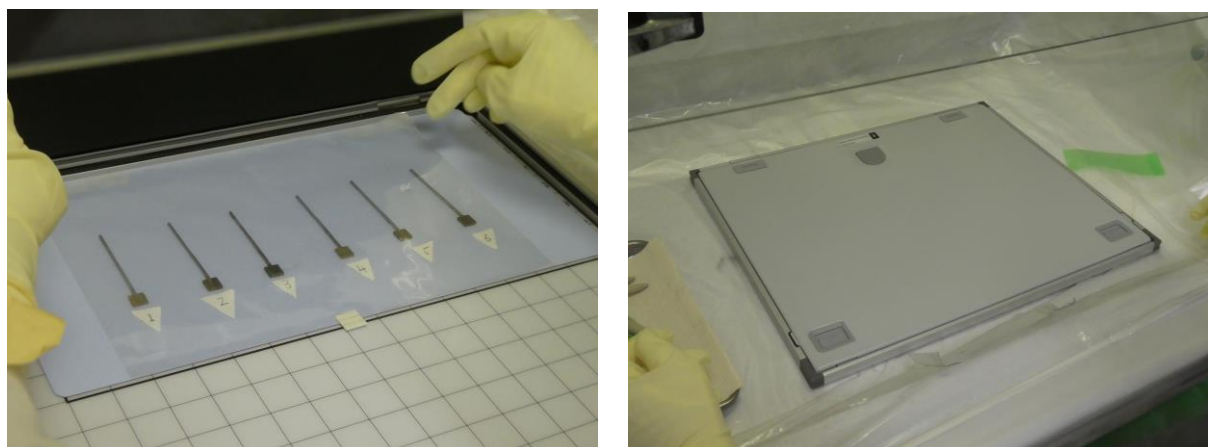


Fig. 16 イメージングプレート解析 (2)作業写真



