



## 照射済燃料被覆管の 孔食電位測定用試料作製技術の開発

Development of Specimen Preparation Techniques for Pitting Potential Measurement  
of Irradiated Fuel Cladding Tubes

鈴木 和博 本岡 隆文 塚田 隆 寺川 友斗  
市瀬 健一 沼田 正美 菊池 博之

Kazuhiro SUZUKI, Takafumi MOTOOKA, Takashi TSUKADA, Yuto TERAOKA  
Kenichi ICHISE, Masami NUMATA and Hiroyuki KIKUCHI

東海研究開発センター  
原子力科学研究所  
福島技術開発試験部

Department of Fukushima Technology Development  
Nuclear Science Research Institute  
Tokai Research and Development Center

March 2014

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

## 照射済燃料被覆管の孔食電位測定用試料作製技術の開発

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター  
原子力科学研究所 福島技術開発試験部

鈴木 和博、本岡 隆文<sup>+1</sup>、塚田 隆<sup>+1</sup>、寺川 友斗、  
市瀬 健一、沼田 正美、菊池 博之

(2014年1月9日 受理)

東日本大震災の影響により、東京電力福島第一原子力発電所の2号機、3号機及び4号機では、緊急冷却策として海水が冷却水として使用済燃料プールへ注入された。海水成分の塩化物イオンは金属材料に孔食を起こす原因物質であることから、使用済燃料プール内の燃料被覆管に孔食が発生・成長した場合、孔食部からの放射性物質の漏えいが懸念される。そこで、海水成分を含む使用済燃料プール水における燃料被覆管の閉込機能の健全性を評価するため、照射済燃料被覆管の孔食発生条件を孔食電位測定により調査することとした。

本報告では、高放射性の使用済燃料から孔食電位測定用の試料を作製する技術の開発について報告する。専用機器の開発と作製手順の確立により、専用施設でのマニプレータによる遠隔操作によって、照射済燃料被覆管の孔食発生条件の調査を可能とした。

## **Development of Specimen Preparation Techniques for Pitting Potential Measurement of Irradiated Fuel Cladding Tubes**

Kazuhiro SUZUKI, Takafumi MOTOOKA<sup>+1</sup>, Takashi TSUKADA<sup>+1</sup>, Yuto TERAOKA  
Kenichi ICHISE, Masami NUMATA and Hiroyuki KIKUCHI

Department of Fukushima Technology Development,  
Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center,  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 9, 2014)

By the effect of the Great East Japan Earthquake, seawater was injected into spent fuel pools in unit 2, 3 and 4 at Fukushima Daiichi nuclear plant in order to cool spent fuels. It is known that chloride ion contained in seawater could cause pitting corrosion for metallic materials. It was concerned that radioactive products inside of fuel cladding tubes might be escaped through the pits. Therefore we have investigated the pit initiation condition of fuel cladding tubes by measuring pitting potential in order to evaluate stability of the enclosure function of fuel cladding tubes in spent fuel pools containing sea salt.

In this report, we describe the development of specimen preparation techniques for pitting measurement of spent fuel cladding tubes having high radioactivity. By accomplishing of the development of the specimen preparation techniques, we could evaluate pit initiation condition of spent fuel cladding tubes in water containing sea salt.

**Keywords:** Pitting Potential Measurement, Spent Fuel Cladding Tube, Spent Fuel Pool, Spot Welding, Coating

---

+ 1 Fukushima Project Team

目 次

1. 緒言	1
2. 孔食電位測定用試料作製技術の検討	1
2.1 孔食電位測定の概要	1
2.2 供試する燃料被覆管の概要	2
2.3 孔食電位測定用試料作製方法の選定	2
2.4 孔食電位測定用試料作製における課題	2
3. 孔食電位測定用試料作製専用機器の開発	3
3.1 スポット溶接機の開発	3
3.2 コーティング治具の開発	3
4. モックアップ試験	4
4.1 スポット溶接	4
4.2 コーティング	5
5. 孔食電位測定用試料作製の手順	6
5.1 照射済被覆管の外観確認	6
5.2 照射済被覆管の洗浄	6
5.3 洗浄後の外観確認	6
5.4 信号線の取り付け	6
5.5 絶縁塗料のコーティング	7
6. 作製した試料を用いた孔食電位測定	8
7. まとめ	8
謝辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Investigation of specimen preparation techniques for pitting potential measurement	1
2.1 Outline of pitting potential measurement	1
2.2 Outline of the fuel cladding used for measurements	2
2.3 Selection of specimen preparation methods for pitting potential measurement	2
2.4 Problems in the specimen preparation method for pitting potential measurement	2
3. Development of specimen preparation specialized apparatus for pitting potential measurement	3
3.1 Development of the spot welder	3
3.2 Development of the coating apparatus	3
4. Mock-up test	4
4.1 Spot welding	4
4.2 Coating	5
5. Procedure of the specimen preparation methods for pitting potential measurement	6
5.1 Appearance confirmation of the irradiated fuel cladding tube	6
5.2 Cleaning of the spent fuel cladding tube	6
5.3 Appearance confirmation after the cleaning	6
5.4 Spot welding of the signal line	6
5.5 Coating of the insulation paint	7
6. Pitting potential measurement of the spent fuel cladding tube	8
7. Summary	8
Acknowledgements	8
References	8

図リスト

Fig.1	アノード分極曲線の模式図	9
Fig.2	孔食電位測定用試料の概略図	9
Fig.3	スポット溶接機の概略図	10
Fig.4	被覆管固定台周囲の構造概略図	10
Fig.5	コーティング治具の概略図	11
Fig.6	コーティング方法の概要	11
Fig.7	取得した室温人工海水でのアノード分極曲線の例	12

写真リスト

Photo.1	照射済被覆管の外表面及び内面	13
Photo.2	X-Y ステージの遠隔操作性確認状況	14
Photo.3	ラボジャッキの遠隔操作性確認状況	14
Photo.4	被覆管固定台への未照射被覆管の固定状況	15
Photo.5	セル内モックアップ試験で信号線を取り付けた未照射被覆管の内面状態	15
Photo.6	コーティング治具の遠隔操作性確認状況	16
Photo.7	コーティングを施した未照射被覆管の外表面及び内面	17
Photo.8	被覆管外表面中央部にマーキングが施された照射済被覆管の外表面及び内面	18
Photo.9	超音波洗浄状況	19
Photo.10	内面洗浄状況	19
Photo.11	超音波洗浄後の照射済被覆管の外表面及び内面	20
Photo.12	内面洗浄後の照射済被覆管の内面	21
Photo.13	被覆管固定台への照射済被覆管の載置状況	22
Photo.14	円筒型アース電極による被覆管固定台ストッパーへの押し付け操作状況	22
Photo.15	被覆管固定台ストッパーへの照射済被覆管の押し付け状態	23
Photo.16	円筒型アース電極と照射済被覆管内面の密着状態確認状況	23
Photo.17	信号線付き電極ホルダの取り付け状況	24
Photo.18	スポット溶接位置の最終確認状態	24
Photo.19	スポット溶接直後の状態	25
Photo.20	スポット溶接機からの取り外し状況	25
Photo.21	スポット溶接により信号線を取り付けた照射済被覆管の外表面及び内面	26
Photo.22	スポンジへの絶縁塗料の浸透作業状況	27
Photo.23	絶縁塗料浸透スポンジへの照射済被覆管の載置状況	27
Photo.24	電極ホルダの固定状況	28
Photo.25	照射済被覆管内面の押し付け状況	28
Photo.26	コーティングを施した照射済被覆管の外表面及び内面	29

This is a blank page.



## 1. 緒言

東日本大震災の影響により、東京電力（株）福島第一原子力発電所（以下、「福島第一原発」と略す）の2号機、3号機及び4号機では、緊急冷却策として海水が冷却水として使用済燃料プールへ注入された<sup>1)</sup>。海水成分の塩化物イオンは金属材料に孔食を起す原因物質であることから、使用済燃料プール内の燃料被覆管に孔食が発生・成長した場合、孔食部からの放射性物質の漏えいが懸念される。

そのため、海水成分を含む使用済燃料プール水における使用済燃料被覆管（以下、「照射済被覆管」と呼ぶ）の閉込機能の健全性を評価するため、燃料被覆管の孔食発生条件を孔食電位測定により調査することとした。福島第一原発の使用済燃料プール内には使用済燃料及び未使用燃料が混在している<sup>2)</sup>。

我々は、照射済被覆管を用いた孔食電位測定の先行試験として、未照射の燃料被覆管（以下、「未照射被覆管」と呼ぶ）を用いた孔食電位測定を実施し、海水成分を含む水溶液中における未照射状態での燃料被覆管の孔食発生電位を明らかにした<sup>3)</sup>。

照射済被覆管には、原子炉運転時にその表面に酸化ジルコニウムの皮膜が形成されている。酸化皮膜は腐食性の液から母材を遮蔽することから、海水成分を含む水溶液中では、照射済被覆管は未照射被覆管よりも腐食の発生が困難となる可能性もある。

しかし、これまでに、海水成分を含む水溶液中で照射済被覆管に孔食が発生する条件については明らかにされていない。従って、照射済被覆管の孔食発生特性を明らかにするためには、高放射性であることから、放射線の被ばくを避けるため直接的な取扱いを避け、専用施設（ホットセル）でのマニプレータにより遠隔で取扱わなければならない。

本報告では、原子力科学研究所のホット試験施設である廃棄物安全試験施設(WASTEF)において、照射済被覆管の孔食電位測定を遠隔で実施するために開発した孔食電位測定用試料作製技術を報告する。

## 2. 孔食電位測定用試料作製技術の検討

### 2.1 孔食電位測定の概要

孔食電位測定は、試験対象溶液に試料を浸漬し、電気化学測定装置により、試料のアノード分極曲線を取得し、電流が急上昇（孔食が発生・成長）に至った電位を求めるものである。測定は、JIS G 0577「ステンレス鋼の孔食電位方法」<sup>4)</sup>に準拠することとした。即ち、試験対象溶液に試料を浸漬し、10分放置後、自然電位から電位を速度 20mV/min で掃引し、アノード分極曲線を取得する。本試験では、試験対象溶液は海水成分を含む水溶液となる。Fig.1 にアノード分極曲線の模式図を示す。JIS 規格では電流密度が  $10 \mu A/cm^2$  または  $100 \mu A/cm^2$  に相当する電位を孔食電位としている。

## 2.2 供試する燃料被覆管の概要

孔食電位測定に供する燃料被覆管は、日本原子力研究開発機構が(独)原子力安全基盤機構からの受託研究として実施した「高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証」<sup>5)</sup>において、試験研究用として譲渡受けされた、東京電力(株)福島第二原子力発電所 1 号機で 5 サイクル照射した燃料より採取したものである。上記燃料は、福島第一原発と同じ原子炉形式(沸騰水型軽水炉)で照射されており、燃料被覆管の材質(ジルカロイ-2)も同じである。

照射済被覆管を対象とする孔食電位の目的は、被覆管表面に形成された酸化皮膜が、海水成分を含む水溶液中での孔食発生に及ぼす影響を明らかにすることであり、下記の調製作業を行った。

- (1) 燃料要素の粗切断、(2) 被覆管内部の燃料の除去、(3) 被覆管内面の研削、(4) 細切断

本作業の目的は、試料の放射線量を低減し、放射線分解による水質変化を小さくすることにより、水質変化の孔食発生への影響を小さくすることである。一連の作業では、被覆管外面の酸化皮膜への傷が最小となるように留意した。Photo.1 に照射済被覆管の外面及び内面を示す。外寸は、未照射被覆管を用いた孔食電位測定用試料と同一サイズ(全長: 約 14mm、幅: 約 8mm、肉厚: 約 0.6mm)とした。

## 2.3 孔食電位測定用試料作製方法の選定

試料調製された照射済被覆管は、1 個あたり約 10mSv/h の線量当量率であり、人が直接取り扱うと多大な被ばくが伴う。従って、孔食電位測定用試料作製は、取り扱い時の被ばくを回避するため、ホットセルでマニプレータにより遠隔で実施しなければならない。孔食電位測定用試料作製の開発にあたっては、未照射被覆管での試料作製の際に得た知見より、以下の作製方法を選定した。

- (1) スポット溶接による信号線の取り付け

照射済被覆管に、電流測定用のジルコニウム製の信号線(φ0.5mm)を取り付ける。

- (2) 孔食発生部を限定する絶縁塗料によるコーティング

孔食を強制的に発生させる部位を被覆管外面に限定するため、照射済被覆管の内面及び側面を絶縁塗料によりコーティングする。

Fig.2 に作製する孔食電位測定用試料の概略図を示す。

## 2.4 孔食電位測定用試料作製における課題

- (1) スポット溶接による信号線の取り付け

未照射被覆管で使用したスポット溶接機((株)近藤生産性技術所製 超小型スポット溶接装置 KTH-MWS)は、信号線を被覆管内面に重ね、トーチ電極及びアース電極で挟み込んで溶接する方法である。マニプレータによる遠隔操作でこの方法により溶接を実施するには、被溶接材である照射済被覆管と信号線が小さく非常に困難である。また、照射済被覆管の酸化皮膜は絶縁体であり導通不良によって溶接が不可能である。なお、外面は測定に供する部位であるため、酸化皮膜除去して導通を確保することは、被覆管外面に傷を付ける可能性があり好ましくない。更に、側面は金属面が露出しているが、スポット溶接するには幅が小さく適さない。

## (2) 絶縁塗料によるコーティング

未照射被覆管での絶縁塗料のコーティング方法は、刷毛等を用いた手作業により、被覆管の内面及び側面にコーティングを施した。マンプレータによる遠隔操作で同作業を実施することは非常に困難である。また、照射済被覆管の外面にマスキングを行い、絶縁塗料を塗り、乾燥後、マスキングを剥がす等の緻密さを要求される方法も同様に困難である。

## 3. 孔食電位測定用試料作製専用機器の開発

上述の検討結果を踏まえ、課題を解決するホットセル専用機器としてスポット溶接機及びコーティング治具を開発した。

### 3.1 スポット溶接機の開発

Fig.3 に開発したスポット溶接機の概略図を、Fig.4 に被覆管固定台周囲の構造概略図を示す。測定用信号線は、広い面積及び内面研削により導通を有する被覆管の内面に取り付けることとし、未照射被覆管で使用したスポット溶接機に以下に示す改良を加えた。

- (1) 被覆管の内面の一方にアース電極、もう一方に信号線を重ね、トーチ電極で信号線と被覆管を挟み込むことにより、スポット溶接による信号線の取り付けを可能にした。
- (2) アース電極は、被覆管内面に面接触する円筒型にすることにより、確実な導通を確保した。
- (3) 遠隔操作による溶接位置決め調整を考慮し、被覆管固定台は X-Y ステージに、信号線付き電極ホルダの固定台はラボジャッキに搭載した。
- (4) これらに操作用のハンドルを付加することにより、遠隔操作性を向上させた。
- (5) 押付機構を付加した段付きの円筒型アース電極と被覆管固定台に設けたストッパーにより、被覆管がストッパーに常時押し付けられることで、定位置での固定を可能にした。
- (6) 被覆管固定台のストッパーには信号線のガイド溝を設け、被覆管内面への信号線の位置決めを容易にした。

### 3.2 コーティング治具の開発

Fig.5 に開発したコーティング治具の概略図を、Fig.6 にコーティング方法の概要を示す。遠隔操作による絶縁塗料のコーティングを可能にするため、トグルクランプにより、絶縁塗料が浸透したスポンジに被覆管内面を押し付ける方法を採用した。以下にその特徴を示す。

- (1) 信号線を取り付けた被覆管の内面を、絶縁塗料が浸透したスポンジに押し付けることにより、被覆管の内面及び側面へのコーティングを可能にした。
- (2) 被覆管押し付部には押し付量の調整機構を付加することで、押し付け時のスポンジと被覆管の高さを調整し、絶縁塗料が被覆管を覆う範囲を限定するとともに、被覆管外面の中央部を除くその他の部分へのコーティングを可能にした。

#### 4. モックアップ試験

モックアップ試験は、(1)一般区域における専用装置の仕様確認、各条件の選定及び作製手順の確立を目的としたコールドモックアップ試験と、(2)ホットセル内における専用装置の仕様確認、マニプレータによる遠隔操作性確認、並びに作製手順の習熟を兼ねたセル内モックアップ試験、の2つであり、(1)、(2)の順序で実施した。

##### 4.1 スポット溶接

###### 4.1.1 試験材

スポット溶接に供する被覆管は、酸化皮膜の絶縁性を模擬するため、未照射被覆管外面に絶縁テープを貼り付けた被覆管を使用した。

###### 4.1.2 コールドモックアップ試験

モックアップ試験用被覆管を用いて溶接位置決め調整に関する一連の操作を行い、被覆管固定台を搭載したスポット溶接の位置決め調整用 X-Y ステージ及び電極ホルダ固定台を搭載したラボジャッキが正常に動作することを確認するとともに、ストッパー等を設けた被覆管固定台に被覆管を取り付けて定位置に固定されることを確認した。

次に、円筒型アース電極を用いた溶接条件を見いだすため、信号線のスポット溶接を繰り返し実施した。本装置を用いると、未照射被覆管で実施した溶接条件では適切に溶接できなかったため、溶接電流、溶接時間を少しずつ増加させて溶接を行ったところ、溶接電流 1.4kA、溶接時間 40msec で溶接できることを見いだした。この溶接条件は、未照射被覆管で実施した信号線のスポット溶接条件より、溶接電流においては約 2 倍、溶接時間においては約 3 倍高い値であったが、これは未照射被覆管の溶接時には無かった被覆管固定台等への熱拡散が著しく最適溶接温度に達するまでに多くの電流と時間が費やされたためである。

###### 4.1.3 セル内モックアップ試験

本装置をホットセル内へ搬入し、マニプレータによる遠隔操作によりスポット溶接を実施した。X-Y ステージ及びラボジャッキによるスポット溶接の位置決め調整、被覆管固定台へ取り付けた被覆管の定位置への固定を確認した。この後、最適溶接条件でスポット溶接を実施し、コールドモックアップ試験と同様にスポット溶接による信号線の取り付けが可能であることを確認した。

Photo.2 に X-Y ステージの遠隔操作性確認状況、Photo.3 にラボジャッキの遠隔操作性確認状況、Photo.4 に被覆管固定台への未照射被覆管の固定状況、Photo.5 にセル内モックアップ試験で信号線を取り付けた未照射被覆管の内面状態を示す。

作製手順の習熟として、スポット溶接による信号線の取り付けを繰り返し実施したところ、スポット溶接時にスパッタが発生し、被覆管固定台より被覆管を取り外す際に信号線が外れる事象が発生した。状況確認を行ったところ、円筒型アース電極が被覆管内面に完全に密着していないことを確認した。被覆管及びアース電極の取り付け状態確認は、双眼鏡等による装置正面からの確認と当該セルに設置されているペリスコープによる上方からの被覆管固定台周辺の確認を行っ

ているが、円筒型アース電極の取付け状態確認を行うには不十分であった。そのため、装置を移動させる等により側方等の様々な方向から取付け状態の確認を行うこととし、作業手順に反映した。これにより同様の事象の発生は皆無となった。なお、信号線が外れた被覆管については、内面に变色等の溶接痕が確認されたが、ダイヤモンドブラシ等を取り付けたハンドグラインダーによる内面研磨を実施することにより、溶接痕は完全に除去され、スポット溶接を再度実施しても信号線の取付けが良好に実施できることを確認した。

## 4.2 コーティング

### 4.2.1 コールドモックアップ試験

#### (1) 絶縁塗料の選定

絶縁塗料は、75℃まで昇温させた希釈人工海水に浸漬させても状態等が変化せずに密着している必要がある。また、絶縁塗料をスポンジに浸透させている間の乾燥が少ないこと、セルの遮へい窓越しでもコーティング状態が容易に確認できることが必要である。これらを勘案して、以下の塗料を選定した。

- ・ メーカー及び品名 : 古藤工業(株)製 フロンテックス TX-1 (青色)
- ・ 用途 : メッキ用ラックの防錆塗料
- ・ 耐薬品性 : 60℃の10%塩酸等に24時間浸漬後も変化無し
- ・ 乾燥時間(15℃) : 12分(指触) 90分(完全)
- ・ 絶縁抵抗(体積抵抗)値 :  $4.9 \times 10^{14} \Omega \text{cm}$

#### (2) スポンジの選定

スポンジは、絶縁塗料の浸透性が良いこと、押し付け時に被覆管内面に気泡が付着しないこと等を勘案し、以下のものを選定した。なお、被覆管内面に均等なコーティングを施す目的でスポンジに綿布を巻き付けた。

- ・ スポンジ種類 : 気孔径約0.5mm(食器洗い用)
- ・ スポンジサイズ : 30mm×25mm×15mm
- ・ 絶縁塗料使用量 : 1回のコーティングあたり約10cc

#### (3) コーティング手順の確立

コーティングは、厚く均等に施せた方が希釈人工海水の浸透による孔食が発生するおそれが高いと考え、被覆管内面を複数回スポンジへ押し付けることを試みたが、スポンジに巻き付けた綿布の効果が減少し、コーティングされた絶縁塗料中の気泡が多く均等なコーティングが施せなかった。そのため、スポンジへの押し付け1回(ひと押し)を試みたが、1度塗りのコーティングでは、コーティングに薄膜の部位が存在した。これを受け重ね塗りを実施してみたところ、2度塗りで十分にコーティングが施されていたので、塗り回数は2度とした。また、外面中央部にコーティングが施されないよう、押付量調整機構で押し付け時の高さを調整した。

### 4.2.2 セル内モックアップ試験

本治具をホットセル内へ搬入し、信号線を取り付けた被覆管を用いて、絶縁塗料のコーティングを実施した。絶縁塗料のスポンジへの浸透作業、電極ホルダの治具への固定及び信号線を取り

付けた被覆管の絶縁塗料浸透スポンジへの押付等の作業が容易であり、コールドモックアップ試験と同様に被覆管外面中央部を除く部分にコーティングされることを確認した。

Photo.6 にコーティング治具の遠隔操作性確認状況、Photo.7 にコーティングを施した未照射被覆管の外面及び内面を示す。

## 5. 孔食電位測定用試料作製の手順

前述のモックアップ試験結果より確定した孔食電位測定用試料作製の手順を以下に記載する。なお、被覆管外面の酸化皮膜への傷を最小限にするため、樹脂製のピンセットを用いて照射済被覆管の取り扱いを行った。

### 5.1 照射済被覆管の外観確認

- (1) セル内に設置されている外観観察装置を使用し、照射済被覆管の傷等の有無及び炉心方向マーキング状況等を確認する。
- (2) 同装置を使用し、照射済被覆管の外面及び内面について写真撮影を実施する。Photo.8 に被覆管外面中央部にマーキングが施された照射済被覆管の外面及び内面を示す。

### 5.2 照射済被覆管の洗浄

- (1) 照射済被覆管外面中央部にマーキングが施されているものについては、アセトンに浸漬させ約 10 分間の超音波洗浄を実施する。なお、超音波洗浄では被覆管外面の酸化皮膜が剥離することはない。Photo.9 に超音波洗浄状況を示す。
- (2) その他の照射済被覆管については、信号線を取り付けるためスポット溶接を実施する内面を、アセトンを含ませた綿棒で洗浄する。Photo.10 に内面洗浄状況を示す

### 5.3 洗浄後の外観確認

- (1) 超音波洗浄を実施した照射済被覆管のマーキング除去状態の確認及び内外面の写真撮影を外観観察装置により実施する。Photo.11 に超音波洗浄後の照射済被覆管の内面を示す。
- (2) 内面の洗浄を実施した照射済被覆管は、内面の状態確認及び写真撮影を外観観察装置により実施する。Photo.12 に内面洗浄後の照射済被覆管の外面及び内面を示す。

### 5.4 信号線の取り付け

- (1) 照射済被覆管内面を上向きにし、スポット溶接機の被覆管固定台へ載置する。Photo.13 に被覆管固定台への照射済被覆管の載置状況を示す。
- (2) X-Y ステージによる信号線取り付位置の調整及び溶接電極による照射済被覆管の仮固定を実施した後、押付機構を付加した円筒型アース電極を前進させ照射済被覆管内面に密着させると同時に、被覆管固定台のストッパーへ押し付ける。Photo.14 に円筒型アース電極による被覆管固定台ストッパーへの押し付け操作状況を示す。

- (3) 溶接電極を上昇させ、被覆管固定台のストッパーに照射済被覆管が押し付けられていることを確認する。Photo.15 に被覆管固定台ストッパーへの照射済被覆管の押し付け状態を示す。
- (4) 溶接電極を下降させ、円筒型アース電極の押付用クランプによる照射済被覆管内面への確実な密着を行った後、側方等の様々な方向から密着状態を確認する。Photo.16 円筒型アース電極と照射済被覆管内面の密着状態確認状況を示す。
- (5) 溶接電極を上昇させ、信号線付き電極ホルダのラボジャッキへの取り付け及び溶接電極直下への調整を実施する。Photo.17 に信号線付き電極ホルダの取り付け状況を示す。
- (6) 溶接電極を下降させ、溶接電極及び信号線が照射済被覆管内面の溶接位置に調整されていることの最終確認を実施する。Photo.18 にスポット溶接位置の最終確認状態を示す。
- (7) スポット溶接機の電源を投入し溶接する。Photo.19 にスポット溶接直後の状態を示す。
- (8) 円筒型アース電極の押付用クランプの取り外し及び後退、並びに溶接電極の上昇を行った後、ラボジャッキを操作し照射済被覆管が取り付けられた電極ホルダを取り外す。Photo.20 にスポット溶接機からの取り外し状況を示す。
- (9) 溶接状態を双眼鏡等により確認する。Photo.21 にスポット溶接により信号線を取り付けた照射済被覆管の外表面及び内面を示す。

#### 5.5 絶縁塗料のコーティング

- (1) 絶縁塗料 10cc を専用容器に移し、綿布を巻き付けたスポンジに浸透させる。この際に、スポンジを押し付けると絶縁塗料中に気泡が混入するため、押し付けずに絶縁塗料を浸透させる。Photo.22 にスポンジへの絶縁塗料の浸透状況を示す。
- (2) 絶縁塗料を浸透させたスポンジをコーティング治具に取り付け、照射済被覆管を取り付けた電極ホルダの被覆管内面を下向きにし、スポンジへ載置する。Photo.23 に絶縁塗料浸透スポンジへの照射済被覆管の載置状況を示す。
- (3) 電極ホルダ部をクランプによりコーティング治具に固定する。Photo.24 に電極ホルダの固定状況を示す。
- (4) 被覆管押し付けクランプを操作し、調整した押し付け位置まで照射済被覆管内面をスポンジに押し付ける。Photo.25 に照射済被覆管内面の押し付け状況を示す。
- (5) コーティング治具より電極ホルダを取り外し、コーティングが施された照射済被覆管を 90 分以上乾燥させる。
- (6) (1)～(5)の作業を行い、2 度目のコーティングを施す。
- (7) 照射済被覆管内面、側面への均一なコーティングと外面中央部へコーティングが施されないことの確認及び被覆管内・外面の写真撮影を外観観察装置により実施する。Photo.26 にコーティングを施した照射済被覆管の外表面及び内面を示す。

## 6. 作製した試料を用いた孔食電位測定

開発した機器を用いて、照射済被覆管から孔食電位測定用試料を作製した。これを用いて、人工海水中での孔食電位測定を実施し、分極曲線が取得可能であることを確認した。また、測定後の試料にはコーティングの剥がれはなく、問題なくデータ取得できたことがわかった。Fig.7に取得した室温人工海水でのアノード分極曲線の例を示す。この試料では、約 0.2 V (vs.Ag/AgCl 飽和 KCl 電極) で電流が急上昇して、孔食が発生、成長することがわかった。

## 7. まとめ

照射済被覆管に信号線を取り付けるためのスポット溶接機と孔食発生部位を限定するコーティング治具を製作し、これらの機器を用いた試料作製技術を確立した。これにより、マニプレータによる遠隔操作で照射済被覆管から孔食電位測定用試料の作製が容易になるとともに、照射済被覆管の孔食発生条件の調査を可能とした。

## 謝辞

開発した専用機器であるスポット溶接機及びコーティング治具の設計・製作にあたりましては、(株)関東技研の方々に多大なご協力を頂きました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 東京電力 (株) : “福島第一原子力発電所事故後の取り組みと今後の計画について～滞留水の処理及び使用済燃料プールの冷却・浄化～”、available from <http://www.aesj.or.jp/~wchem/3gennkou%20.pdf> (accessed 2013-12-05).
- 2) 澤井正子 : “福島第一・第二原子力発電所の核燃料の保管状況について”、原子力資料情報室通信、第 465 号 (2013) .
- 3) 本岡隆文、佐藤智徳、塚田隆、山本正弘 : “ガンマ線照射下での人工海水におけるジルカロイ 2 の孔食挙動”、日本原子力学会「2013 年春の年会」予稿集、F47 (2013) [CD-ROM].
- 4) JIS G 0577-2005 : “ステンレス鋼の孔食電位測定方法” , (2005) .
- 5) (独)原子力安全基盤機構、 “高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書 (総合評価編)”、07 基炉報-0002 (2007).



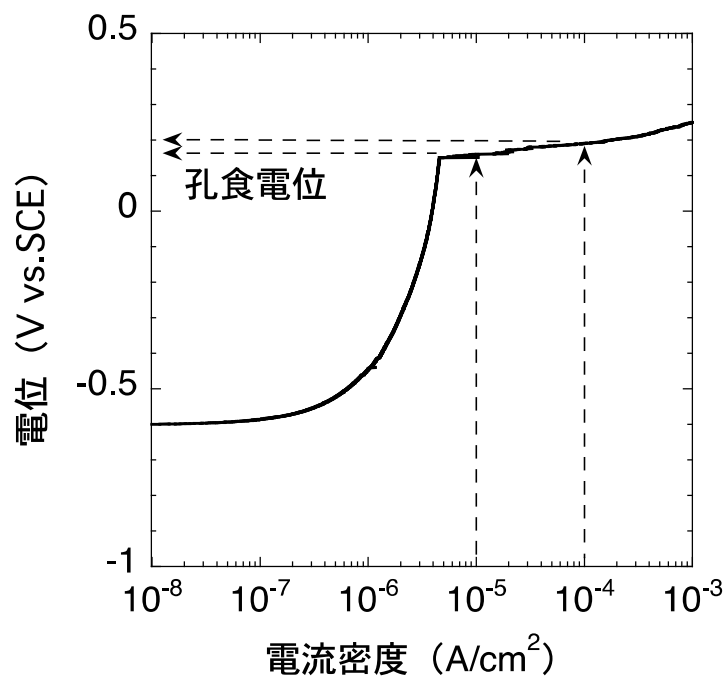


Fig.1 アノード分極曲線の模式図

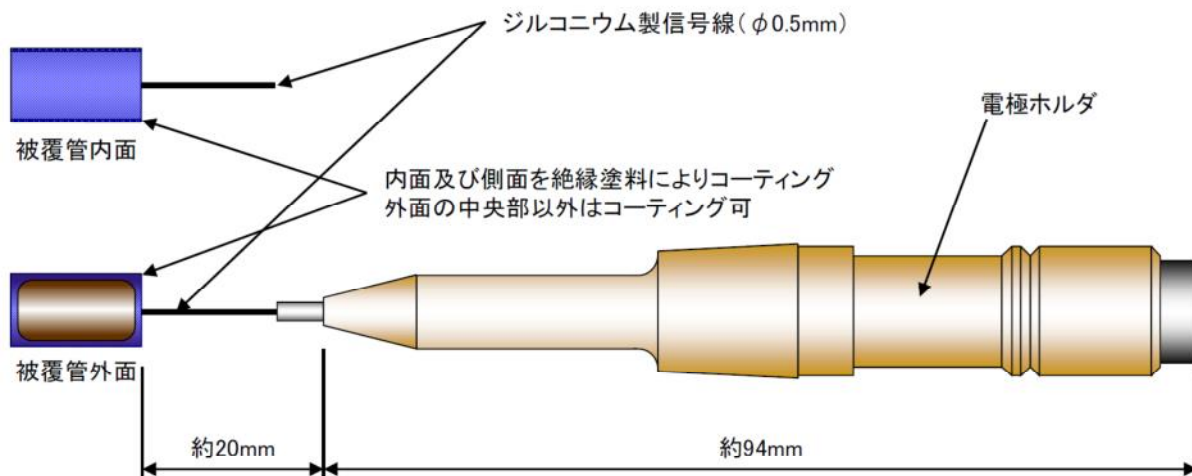


Fig.2 孔食電位測定用試料の概略図

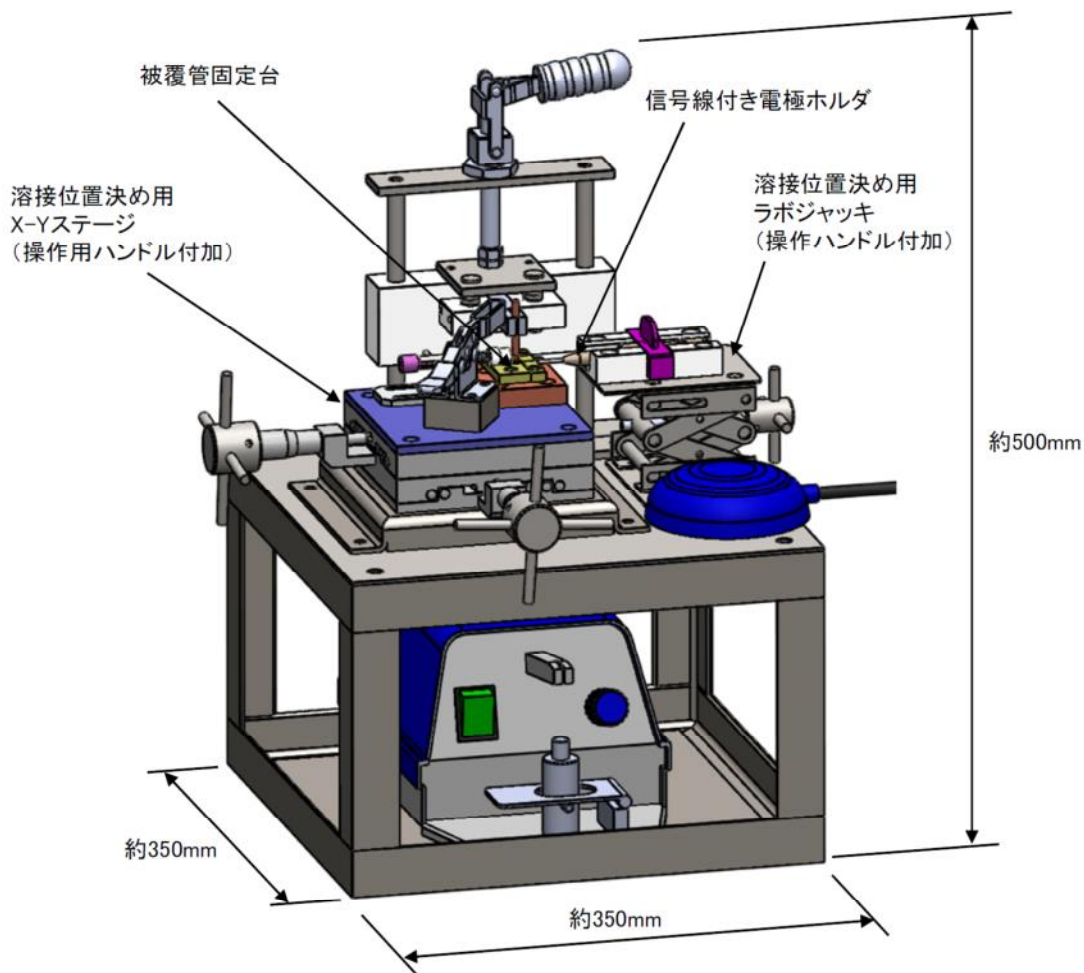


Fig.3 スポット溶接機の概略図

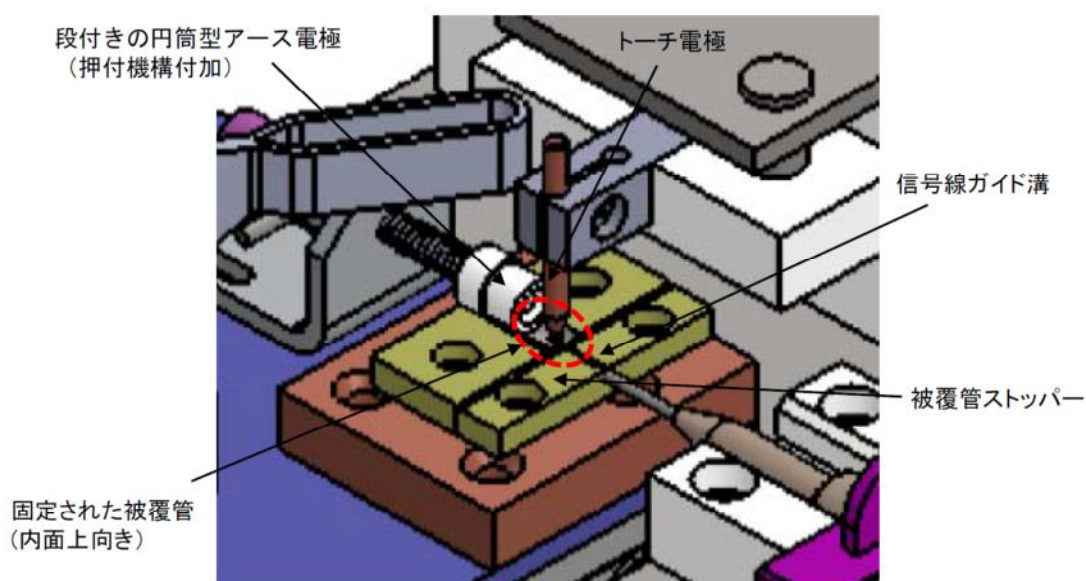


Fig.4 被覆管固定台周囲の構造概略図

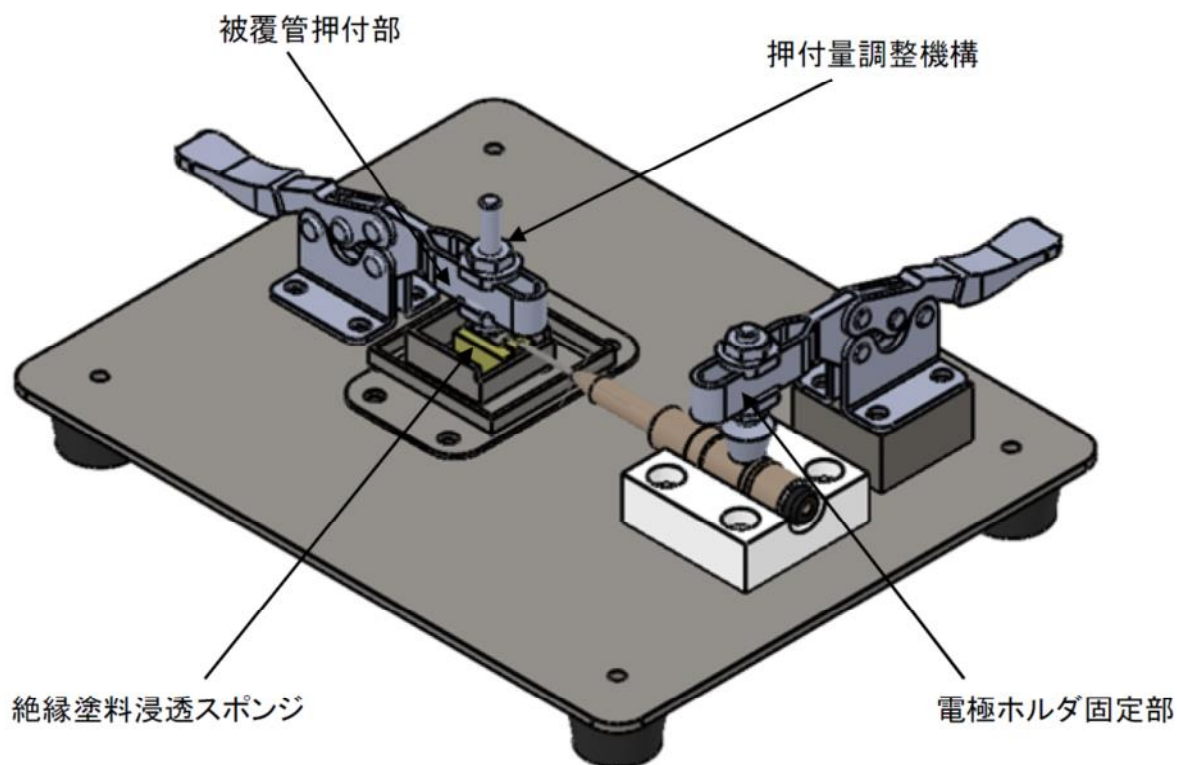


Fig.5 コーティング治具の概略図

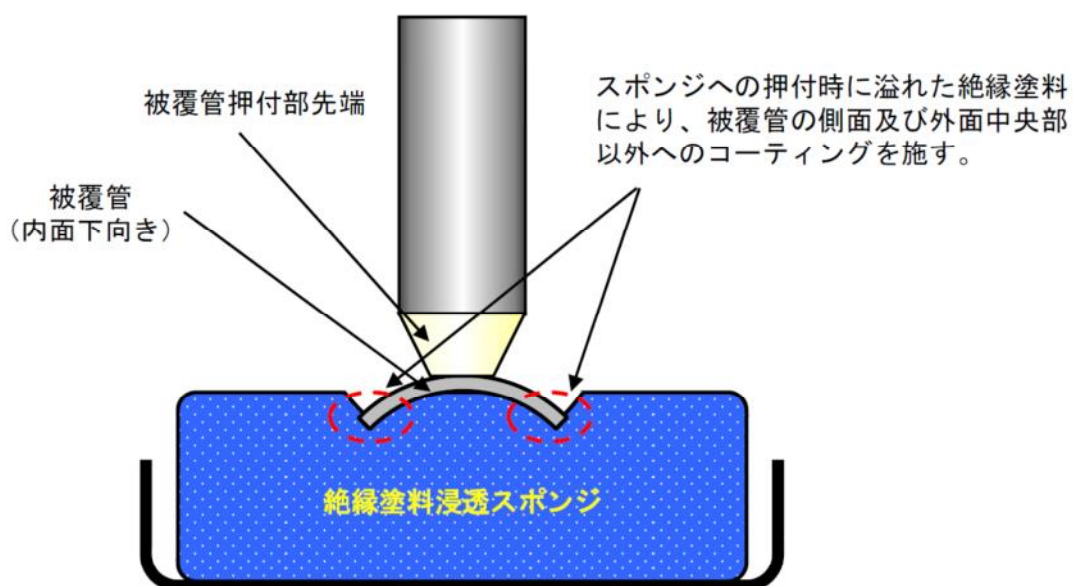


Fig.6 コーティング方法の概要

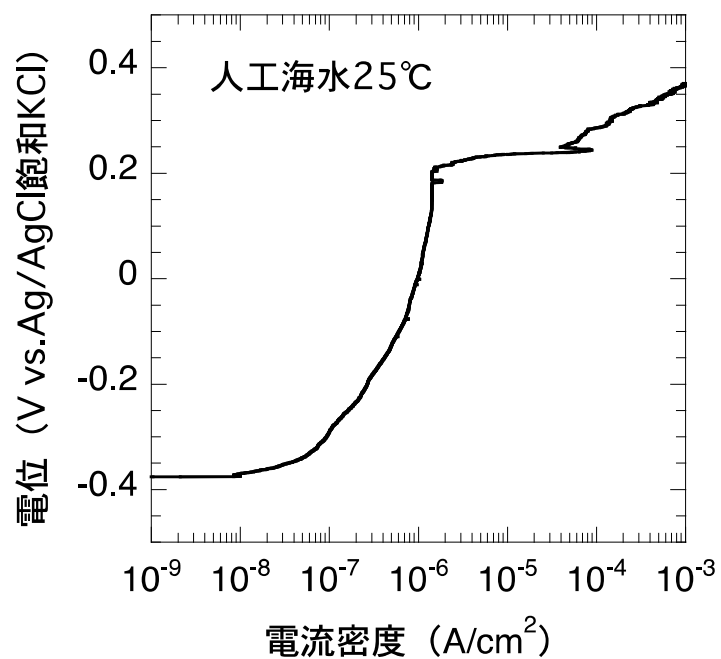
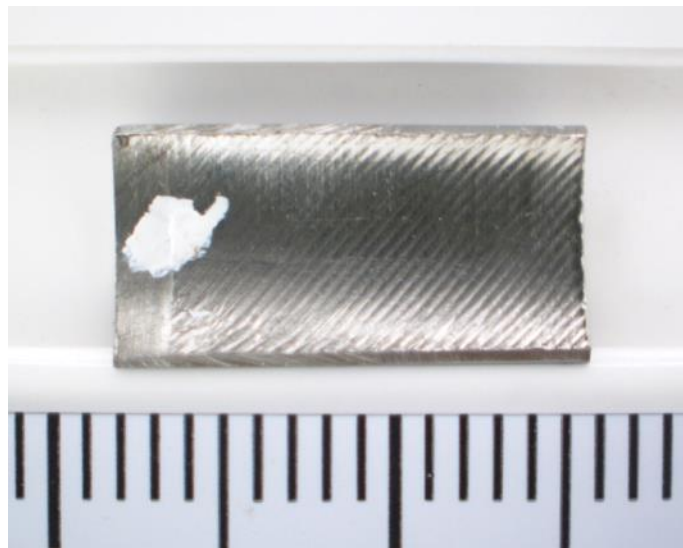


Fig.7 取得した室温人工海水でのアノード分極曲線の例



照射済被覆管の外表面



照射済被覆管の内表面

Photo.1 照射済被覆管の外表面及び内表面

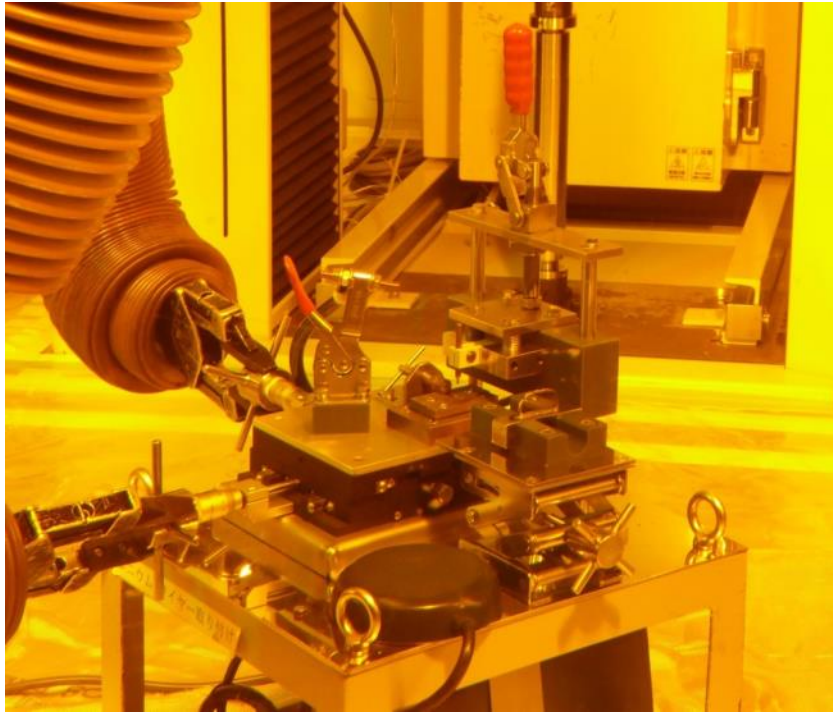


Photo.2 X-Y ステージの遠隔操作性確認状況

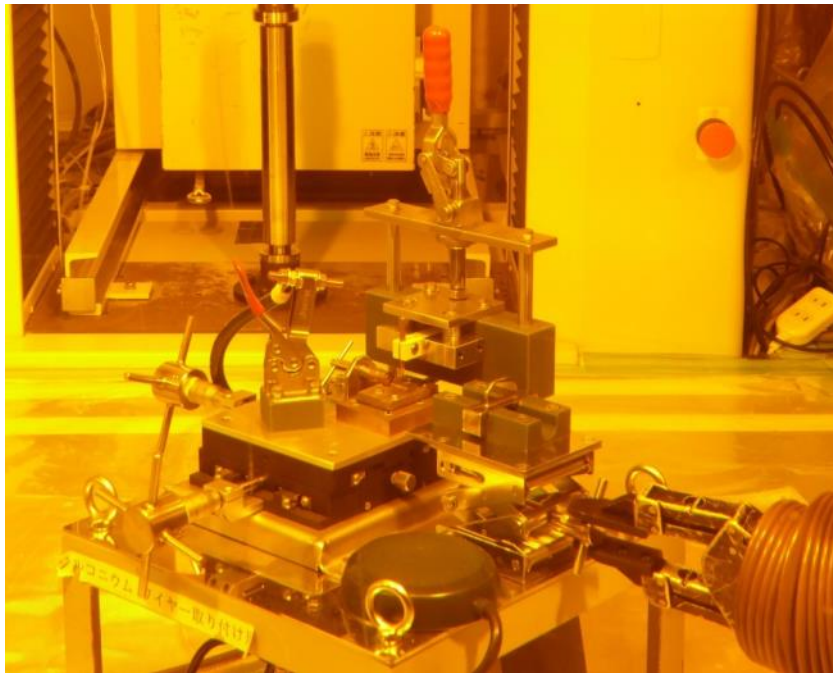


Photo.3 ラボジャッキの遠隔操作性確認状況



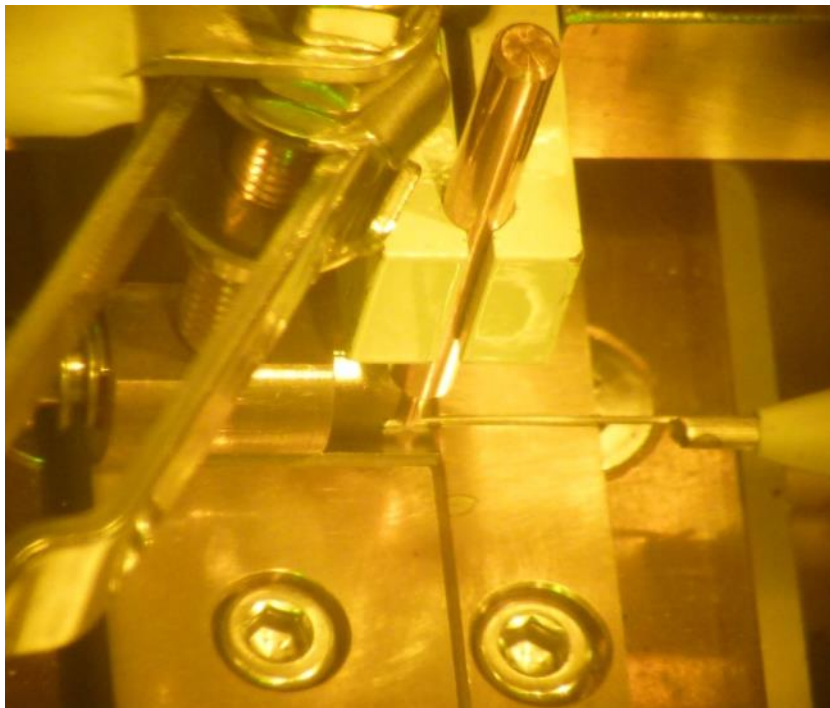


Photo.4 被覆管固定台への未照射被覆管の固定状況

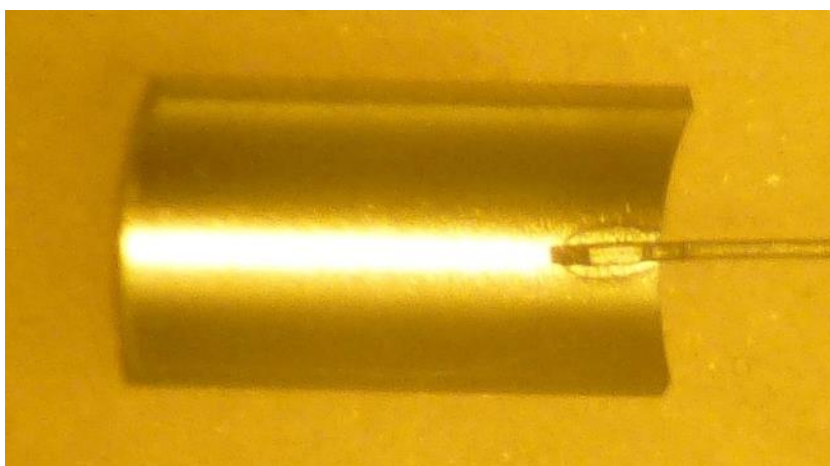


Photo.5 セル内モックアップ試験で信号線を取り付けた未照射被覆管の内面状態

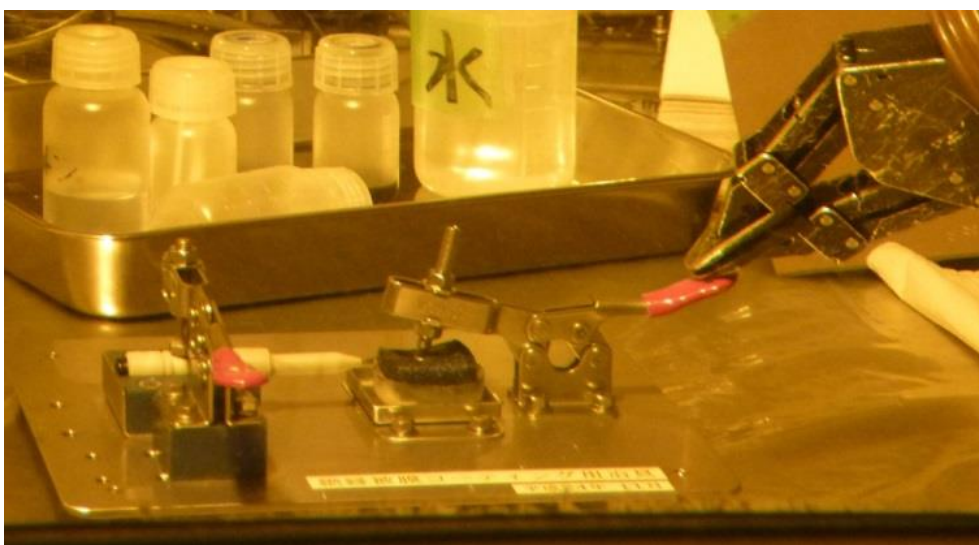
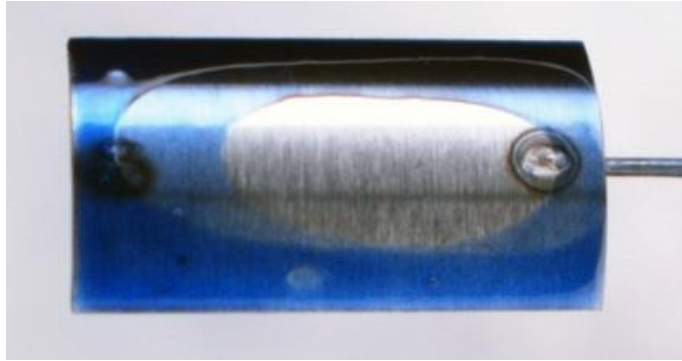


Photo.6 コーティング治具の遠隔操作性確認状況



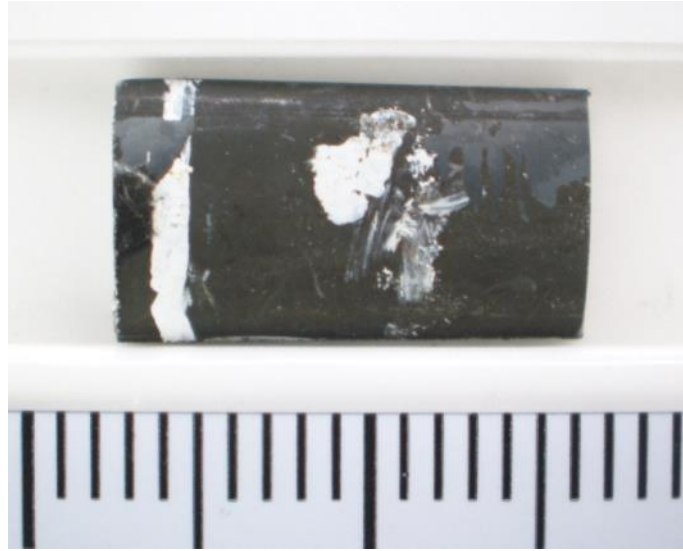


未照射被覆管の外表面

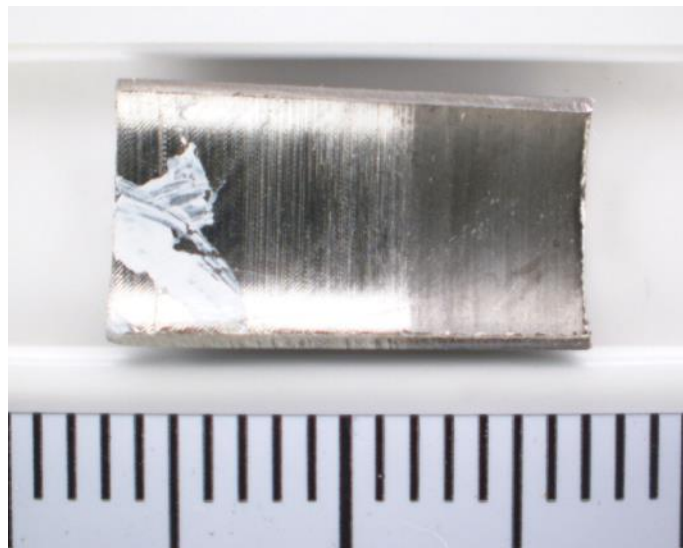


未照射被覆管の内表面

Photo.7 コーティングを施した未照射被覆管の外表面及び内表面



照射済被覆管の外表面



照射済被覆管の内表面

Photo.8 被覆管外表面中央部にマーキングが施された照射済被覆管の外表面及び内表面

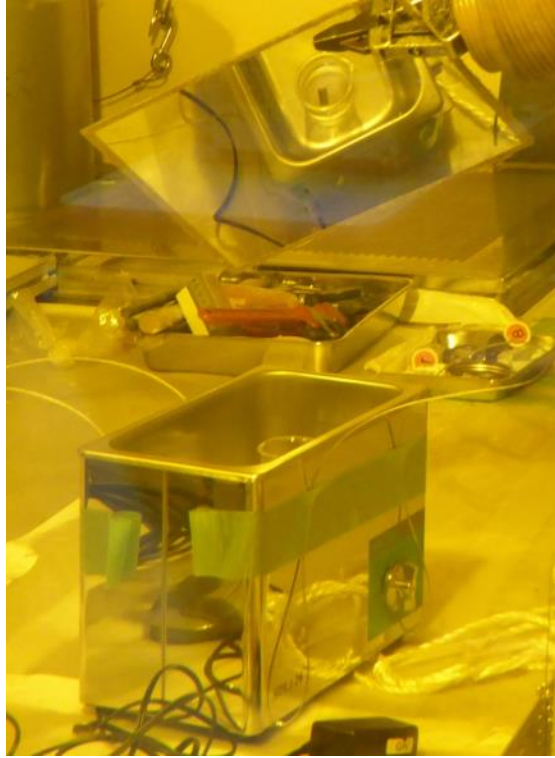


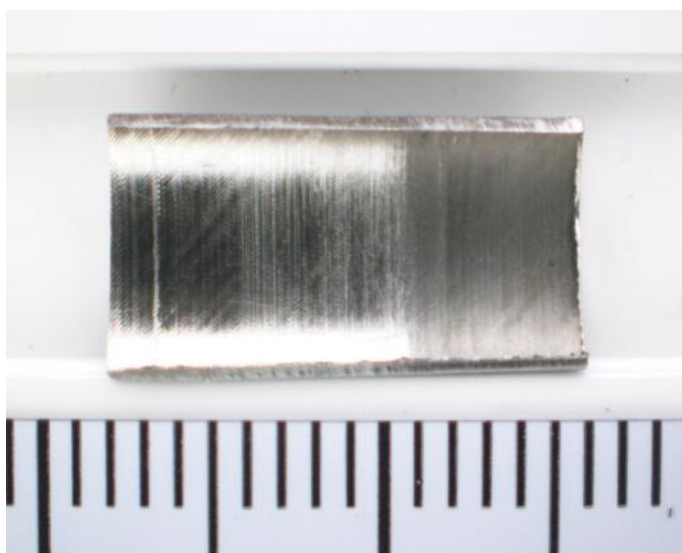
Photo.9 超音波洗浄状況



Photo.10 内面洗浄状況



照射済被覆管の外表面



照射済被覆管の内表面

Photo.11 超音波洗浄後の照射済被覆管の外表面及び内面

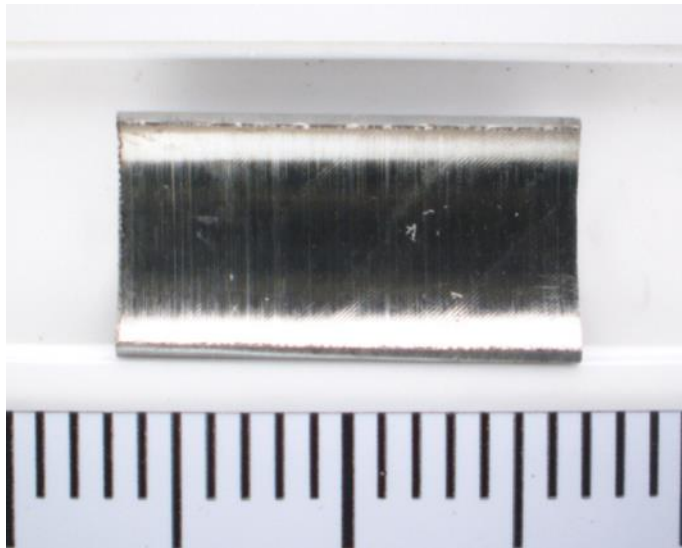


Photo.12 内面洗浄後の照射済被覆管の内面

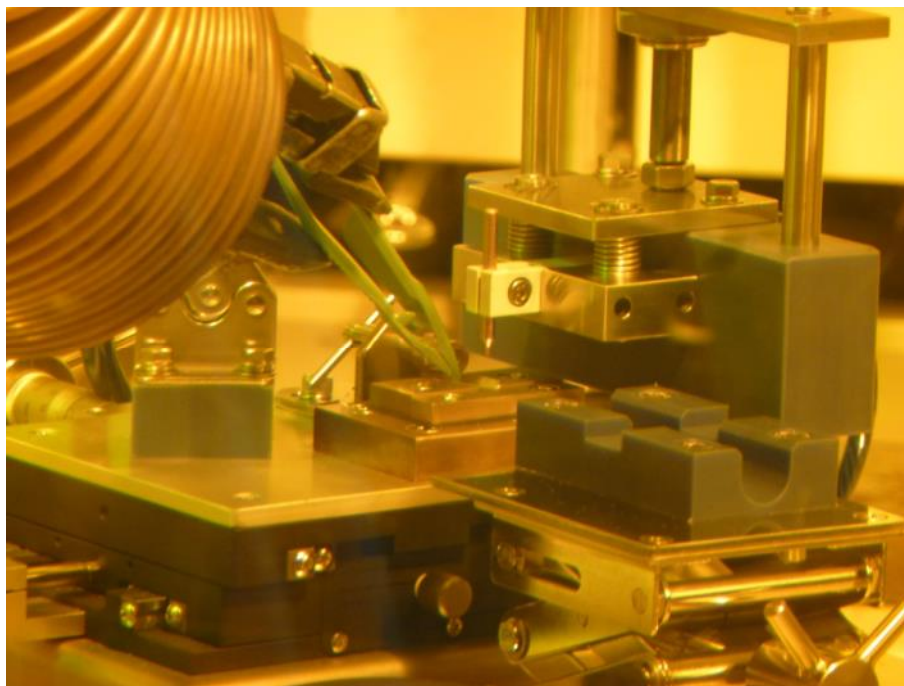


Photo.13 被覆管固定台への照射済被覆管の載置状況

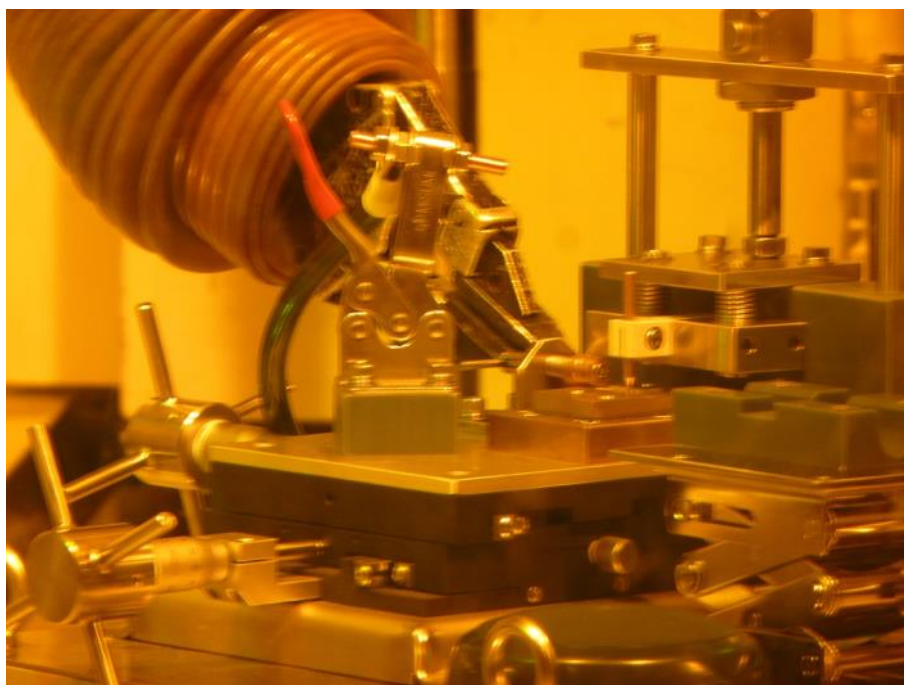


Photo.14 円筒型アース電極による被覆管固定台ストッパーへの押し付け操作状況



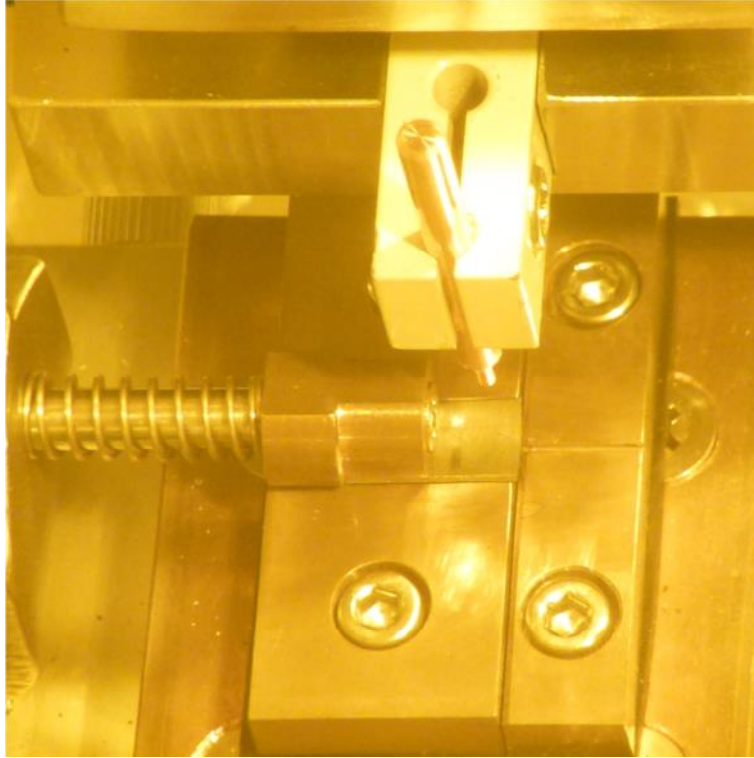


Photo.15 被覆管固定台ストッパーへの照射済被覆管の押し付け状態

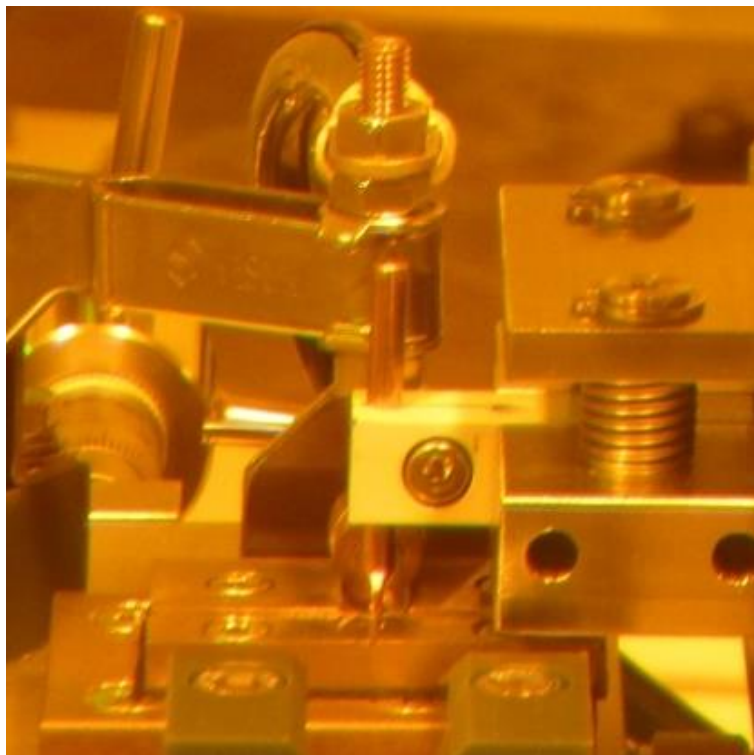


Photo.16 円筒型アース電極と照射済被覆管内面の密着状態確認状況

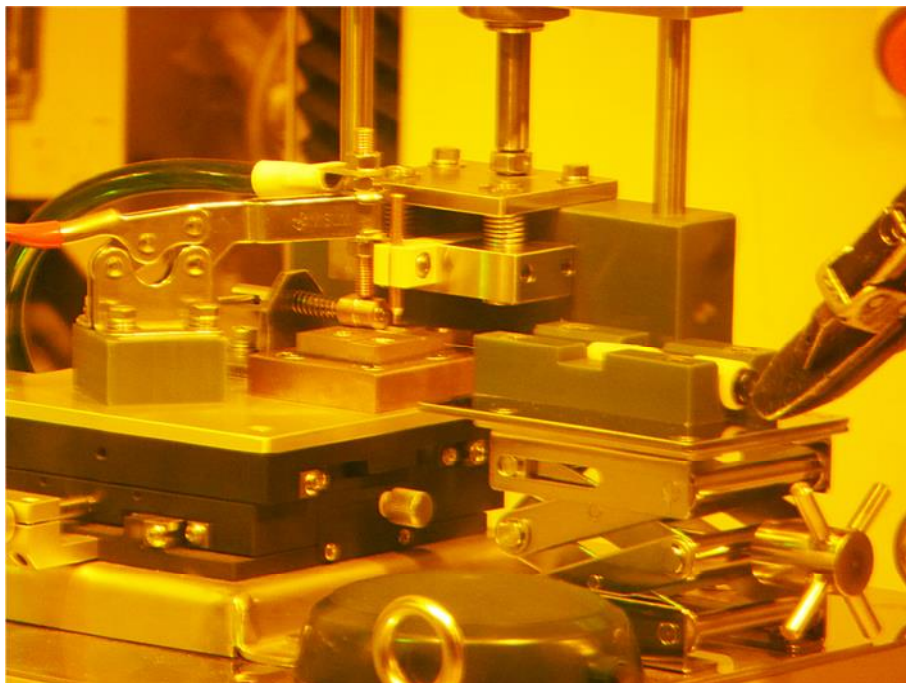


Photo.17 信号線付き電極ホルダの取り付け状況

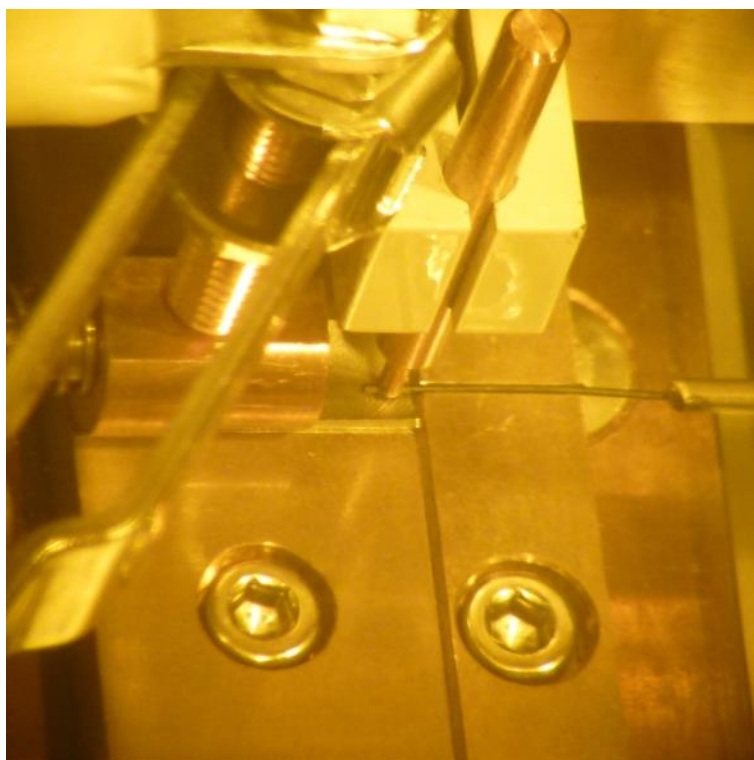


Photo.18 スポット溶接位置の最終確認状態



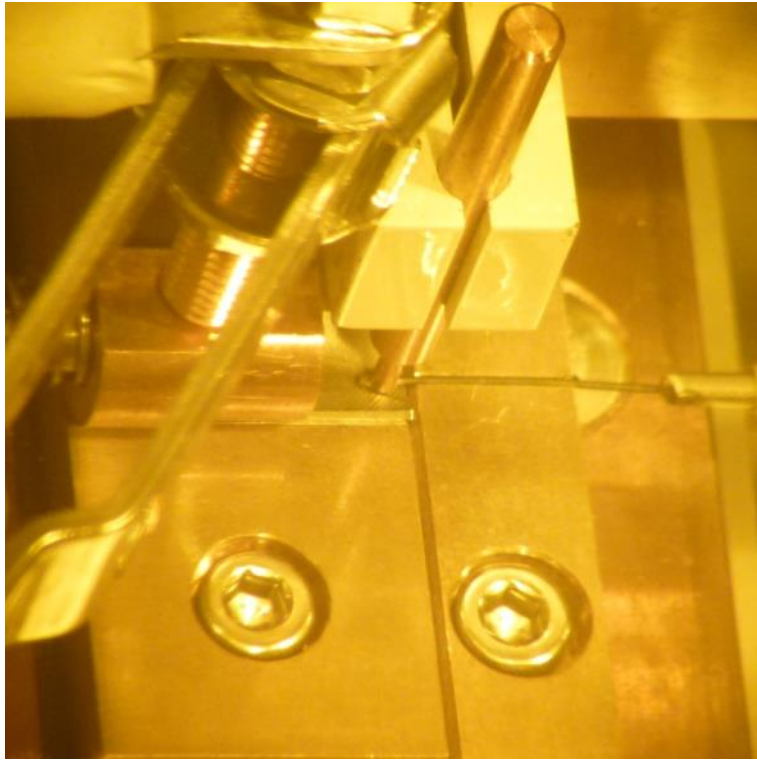


Photo.19 スポット溶接直後の状態

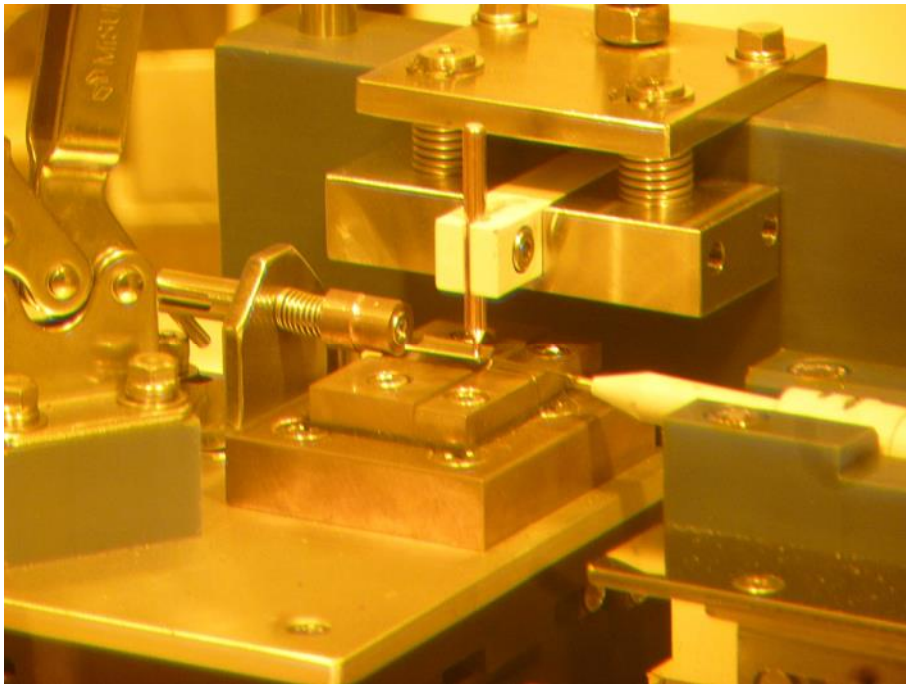
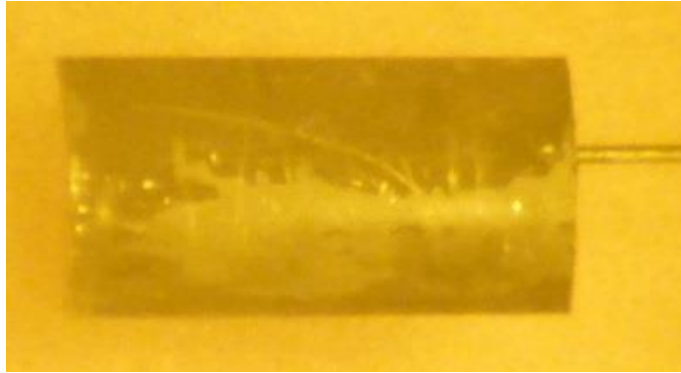
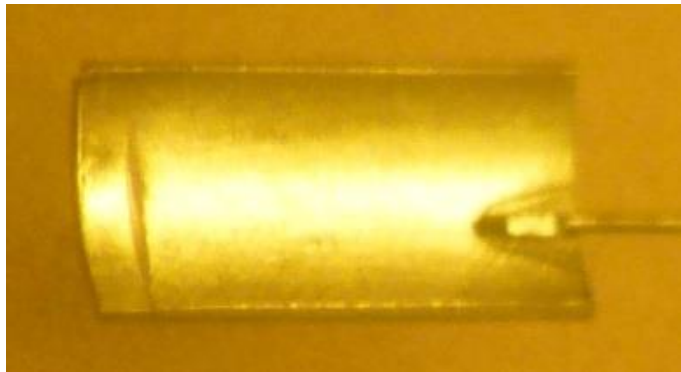


Photo.20 スポット溶接機からの取り外し状況



照射済被覆管の外表面



照射済被覆管の内表面

Photo.21 スポット溶接により信号線を取り付けた照射済被覆管の外表面及び内面

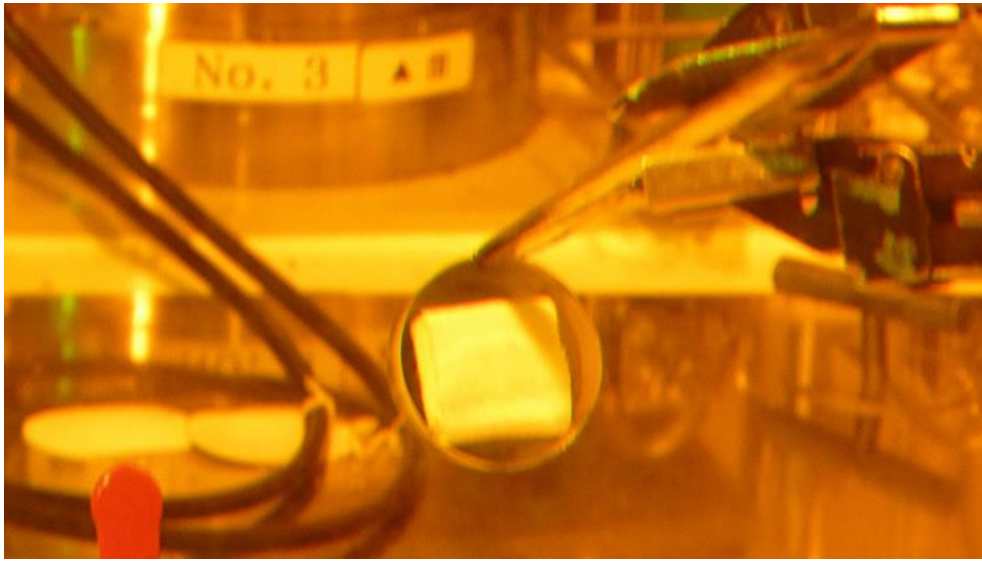


Photo.22 スポンジへの絶縁塗料の浸透作業状況

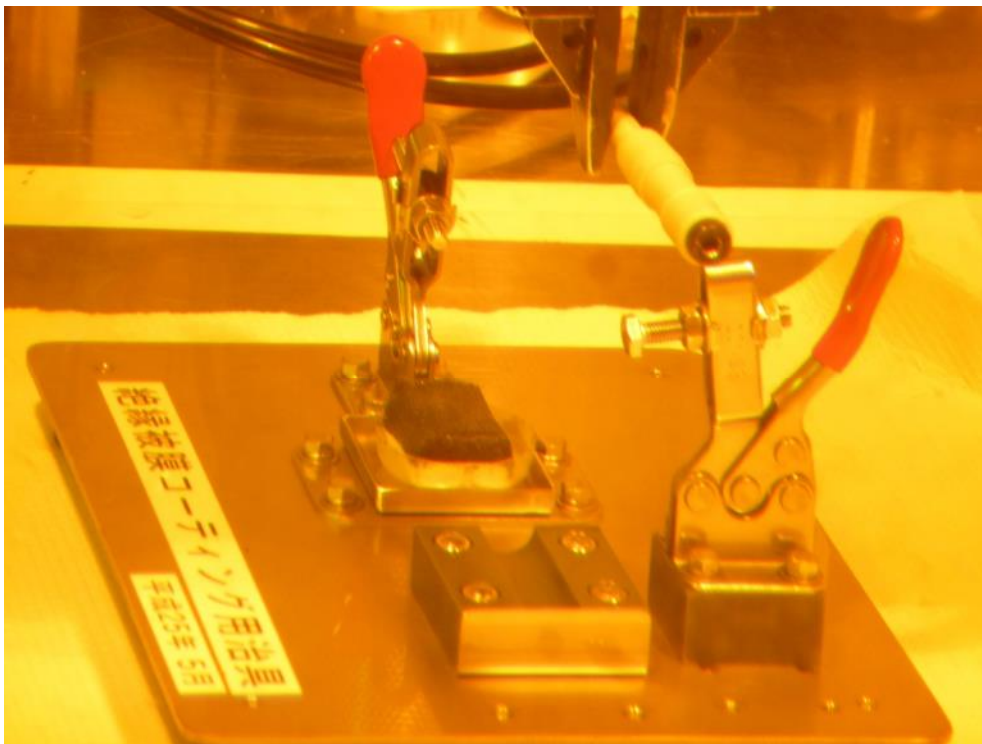


Photo.23 絶縁塗料浸透スポンジへの照射済被覆管の載置状況

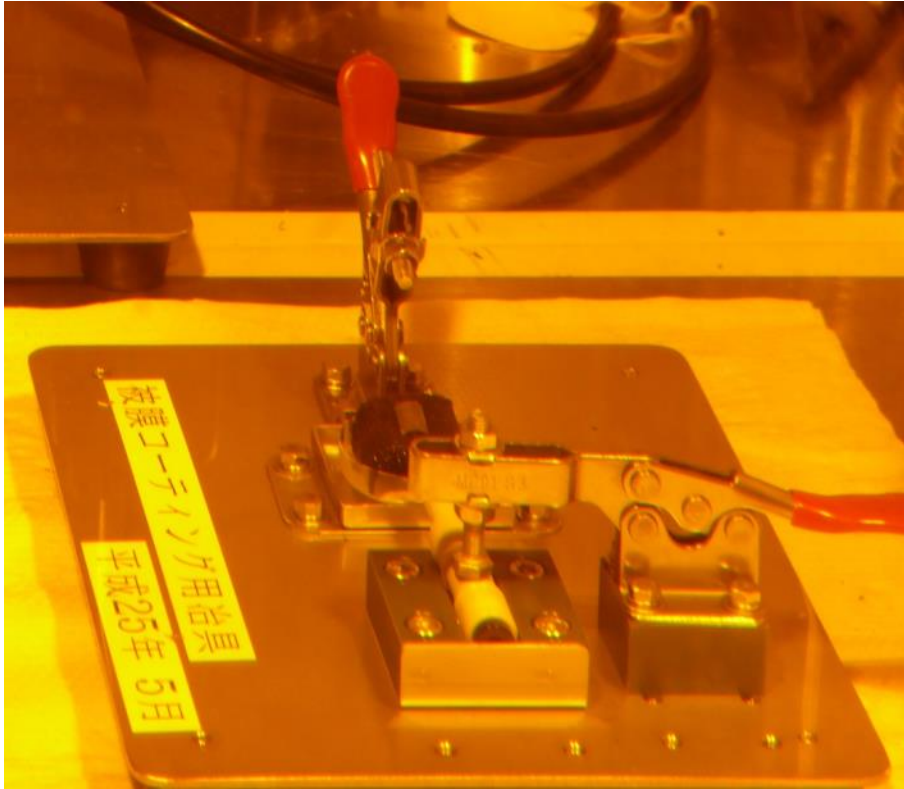


Photo.24 電極ホルダの固定状況

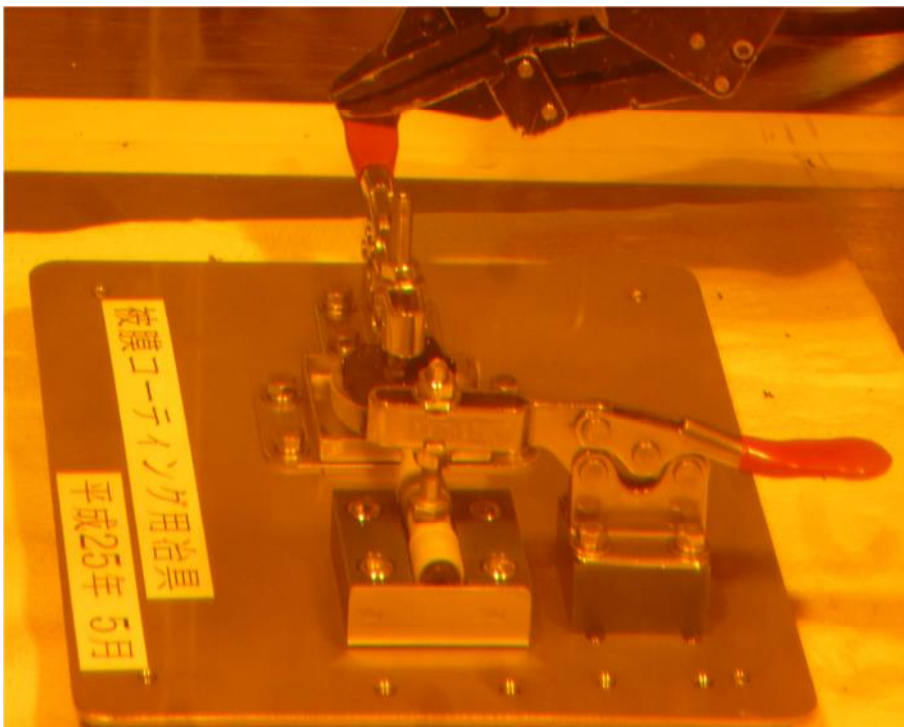
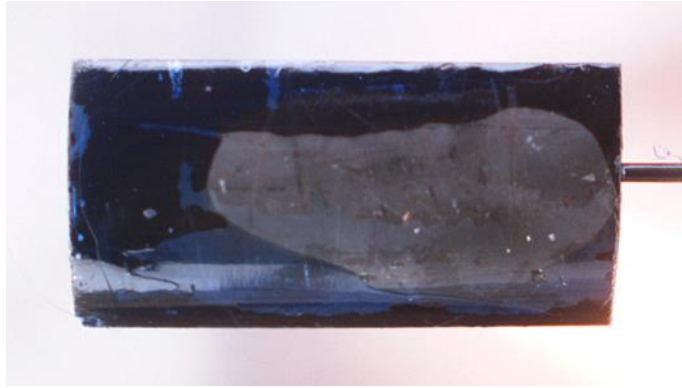


Photo.25 照射済被覆管内面の押し付け状況



照射済被覆管の外表面



照射済被覆管の内表面

Photo.26 コーティングを施した照射済被覆管の外表面及び内表面

This is a blank page.



# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	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
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (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	S	A/V
磁束	ウエーバ	Wb	Vs
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 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s <sup>-1</sup> mol

(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はやコヒーレントではない。  
 (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は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、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間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電表面電荷	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
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)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	J/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

表5. SI 接頭語

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

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=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

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 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

