

**福島第一原子力発電所の使用済燃料プールにおける
特異な環境履歴を経験した使用済燃料集合体部材の
長期健全性に及ぼす腐食の影響評価**

Influence Evaluation of Corrosion on Long-term Integrity of Spent Fuel Assembly
Component Materials Exposed to Unusual Corrosive Environment at Unit 1-4
Spent Fuel Pools of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Stations

大洗研福島技術開発特別チーム
福島燃料材料試験部

Fukushima Project Team
Fukushima Fuels and Materials Department

大洗研究開発センター
Oarai Research and Development Center

July 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2014

福島第一原子力発電所の使用済燃料プールにおける特異な環境履歴を経験した 使用済燃料集合体部材の長期健全性に及ぼす腐食の影響評価

日本原子力研究開発機構
大洗研究開発センター
大洗研福島技術開発特別チーム
福島燃料材料試験部

(2014年4月4日 受理)

東京電力福島第一原子力発電所事故においては、使用済燃料プールを緊急に冷却するため海水注入が行われ、使用済燃料プールに保管されていた使用済燃料は、事故により通常の使用済燃料とは異なる特異な環境(高温、海水注入、瓦礫コンクリートの混入)にさらされた。使用済燃料は、中間貯蔵/処理施設が定まるまでの期間、福島第一原子力発電所サイト内の共用プールに保管される計画であることから、共用プール保管中の燃料集合体健全性に及ぼす腐食の長期的な影響を把握する必要がある。

本研究では、燃料集合体の長期健全性評価上重要かつ優先的に評価すべき部位・腐食事象を基礎的観点から独自に選定するために、使用済燃料プールで経験した特異な環境により FA 構成部材において発生が懸念される腐食事象を幅広く抽出し、優先的に評価すべき部位及び腐食事象の絞り込みと対応する長期健全性評価手法案について検討した。その結果、燃料集合体健全性については、「燃料被覆管の密閉性」と「燃料集合体の構造健全性」の二つの観点からそれらの性能が維持・担保されているかを確認することとし、「燃料被覆管の密閉性」に関しては、ジルカロイ-2 被覆管材料の海水腐食による強度低下が無いことを実証し、プール内で長期保管した場合でも「燃料被覆管の密閉性」が保たれる見込みを示した。一方、「燃料集合体の構造健全性」については、ジルカロイ-2 とステンレス鋼の異種金属接触箇所(「上部結合端栓とロックナット」及び「下部結合端栓と下部タイプレート」に対応)を対象として、長期的な腐食挙動を実験的に予測する手法の概念を検討した。また、予測手法の妥当性検証のために異種金属接触模擬材を用いた塩水浸漬試験により本手法の妥当性を予備的に検討し、ステンレス鋼とジルコニウム合金で構成されかつすきま構造を有する異種金属接触部位では、高温(90℃)・高塩化物イオン濃度(10,000ppm)の水質環境に 100 時間程度さらされた場合、孔食が主たる腐食形態であり、温度が高温になるほど腐食進展の可能性が高まることを確認した。

**Influence Evaluation of Corrosion on Long-term Integrity of Spent Fuel Assembly
Component Materials Exposed to Unusual Corrosive Environment at Unit 1-4 Spent Fuel
Pools of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Stations**

Fukushima Project Team
Fukushima Fuels and Materials Department

Oarai Research and Development Center,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 4, 2014)

In the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station (1F-NPS) accident, the spent fuel pools (SFPs) had lost their functions of decay heat removal and water supply due to the station blackout. Since fresh and sea waters were injected into and concrete fragments by hydrogen explosions fell into the SFPs, the fuel assemblies (FAs) have been exposed to much more corrosive environments than usual ones. It is planned to transport the FAs in SFPs of Units 1-4 to a common pool set up on the 1F-NPS site where they will be stored for a long time. Therefore, it is necessary to comprehend the long-term influence of corrosion on integrity of the FAs during wet storage.

In this study, a screening study on corrosion phenomena and a preliminary investigation for an evaluation method on long-term integrity of FAs experienced unusual corrosive environment were carried out in views of fundamental features of corrosion. The screening study have led to the following two features of FAs from the viewpoint of the integrity as important phenomena to be further investigated; “fission product confinement of cladding tube” and “structural integrity of FA”. In terms of “fission product confinement of cladding tube”, it was shown experimentally that influence of the exposure to an unusual corrosive environment was low. On the other hand, in terms of “structural integrity of FA”, a concept of experimental methodology for predicting long-term corrosion behavior was preliminary studied for preferentially selected FA local parts composed of different metals (zircaloy-2 and stainless steel). The basic test utilizing simulated specimens composed of different metals was performed for the preliminary verification of appropriateness of the present experimental methodology. The basic test result indicated that crevice was main corrosion morphology and that the possibility of crevice progress seemed to be high with increasing test temperature in the simulated specimen which was composed of stainless steel and zirconium alloy in the case of the exposure to the condition of 90°C and 10,000ppm Cl⁻ for 100 hours.

Keywords: Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, Spent Fuel Pool, Sea Water, Long-term Integrity, Fuel Assembly, Corrosion, Prediction Methodology

目次

1. 緒言	1
1.1 背景	1
2. 燃料集合体の長期健全性に及ぼす腐食事象の同定と絞り込み	3
2.1 使用済燃料プールの環境履歴に関する調査	3
2.2 使用済燃料プールの環境履歴において懸念される腐食現象についての考察	3
2.3 福島第一原発燃料集合体の長期健全性に及ぼす腐食に係る重要な事象の抽出	4
3. 使用済燃料被覆管を用いた塩水浸漬試験及び強度特性評価	14
3.1 試験目的	14
3.2 試験方法	14
3.2.1 供試材	14
3.2.2 浸漬試験	14
3.2.3 重量測定及び組織観察	15
3.2.4 強度試験	15
3.3 試験結果	15
3.3.1 重量測定	15
3.3.2 組織観察	16
3.3.3 強度試験	16
3.4 考察	16
3.4.1 使用済燃料被覆管の閉じ込め性能に及ぼす海水成分の影響評価	16
3.4.2 使用済燃料被覆管の閉じ込め性能に及ぼす特異環境履歴の影響評価	16
3.5 使用済燃料被覆管の閉じ込め性能評価に係る今後の課題	16
4. 異種金属接触模擬材を用いた塩水浸漬試験による長期的な腐食挙動評価手法の検討	26
4.1 はじめに	26
4.2 燃料集合体の構造健全性劣化予測に資する局部部位での腐食事象予測方法論の検討	26
4.3 異種金属接触模擬材の人工海水浸漬による腐食試験	27
4.3.1 すきま腐食試験用試験片調製	27
4.3.2 試験溶液調整	27
4.3.3 重量測定・寸法測定	27
4.3.4 試験溶液の観察・分析	28
4.3.5 試験片のマクロ観察	28
4.4 異種金属接触模擬材の人工海水浸漬による腐食試験結果	28
4.4.1 重量測定・寸法測定結果	28
4.4.2 試験溶液の観察・分析結果	28
4.4.3 試験片のマクロ観察結果	28
4.5 考察	29
4.5.1 燃料集合体の異種金属接触部位における腐食形態と腐食因子との関連	29
4.6 燃料集合体の構造健全性評価に係る今後の課題	29
5. まとめ	51
参考文献	52

Contents

1. Preface	1
1.1 Background	1
2. Identification and Ranking of Corrosion Phenomena on Long-term Integrity of Spent Fuel Assembly	3
2.1 Accident Progression at Unit 1-4 Spent Fuel Pools	3
2.2 Concerning Corrosion Phenomena for the Materials of Spent Fuel Assembly Stored at Unit 1-4 Spent Fuel Pools during Accident	3
2.3 Extraction of Important Phenomena on Long-term Integrity for the Corrosion of Spent Fuel Assemblies of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station	4
3. Immersion Test and Evaluation of Strength Property utilizing Irradiated Fuel Cladding Tubes	14
3.1 Objective	14
3.2 Experimental Procedure	14
3.2.1 Testing Materials	14
3.2.2 Immersion Test Procedure	14
3.2.3 Weight Measurement and Microstructural Observation	15
3.2.4 Tensile Test	15
3.3 Results	15
3.3.1 Weight Measurement	15
3.3.2 Microstructural Observation	16
3.3.3 Tensile Test	16
3.4 Discussions	16
3.4.1 Evaluation of the Influence of Seawater Constituents on the Fission Product Confinement Capability of Spent Fuel Claddings	16
3.4.2 Evaluation of the Influence of Unusual Environment History on the Fission Product Confinement Capability of Spent Fuel Claddings	16
3.5 Remaining Subjects on the Evaluation of Confinement Capability of Spent Fuel Claddings	16
4. Study on Evaluation Method of Long-term Corrosion Behavior due to Immersion Test of Simulated Specimens Composed of Different Metals in Diluted Seawater	26
4.1 Introduction	26
4.2 Study of Prediction Methodology of Local Corrosion Phenomena for Degradation Prediction of Structural Integrity of Spent Fuel Assemblies	26
4.3 Experimental Procedure for the Verification of Prediction Methodology	27
4.3.1 Specimen Preparation	27
4.3.2 Test Solution Preparation	27
4.3.3 Measurement of Weight and Dimension	27
4.3.4 Observational Analysis of Test Solution	28
4.3.5 Macroscopic Observation	28
4.4 Experimental Results	28
4.4.1 Measurement of Weight and Dimension	28

4.4.2 Observational Analysis of Test Solution	28
4.4.3 Macroscopic Observation	28
4.5 Discussions	29
4.5.1 Relation between Corrosion Behavior and Factor at Different Metal Contacting Parts of Spent Fuel Assemblies	29
4.6 Remaining Subjects on the Evaluation of Structural Soundness of Spent Fuel Assemblies during Wet Storage	29
5. Summary	51
References	52

表リスト

表 2.1	保管 FA の水環境履歴の調査結果	5
表 2.2	SFP 内に存在する主な金属材料の種類	6
表 2.3	FA における金属間接触による構造部品の例	7
表 2.4	SFP 保管集合体において発生可能性のある腐食現象と環境要因(材料単体)	9
表 2.5	SFP 保管集合体において発生可能性のある腐食現象と環境要因(構造部品)	11
表 3.1	ジルカロイ-2 燃料被覆管の化学組成及び製造条件	18
表 3.2	供試材の照射情報	18
表 3.3	人工海水の化学成分	19
表 3.4	リング引張試験条件	19
表 3.5	ジルカロイ-2 被覆管の浸漬前後における重量変化	20
表 4.1	Zircaloy-4 板材と SUS304L 板材の接合試験片のすきま腐食試験条件	30
表 4.2	pH 測定の方法および機器	30
表 4.3	導電率測定の方法および機器	30
表 4.4	異種金属接合試験片における SUS304L 板材の浸漬前後の重量および寸法	31
表 4.5	異種金属接合試験片における Zircaloy-4 板材の浸漬前後の重量および寸法	32
表 4.6	異種金属接合試験片の浸漬前後の重量および寸法	33
表 4.7	試験溶液の浸漬試験前後における pH と導電率	34

図リスト

図 2.1	SFP における γ 線線量率の解析例	13
図 3.1	脱ミート(燃料除去)前後の被覆管外観	21
図 3.2	浸漬試験体系	21
図 3.3	浸漬試験用治具取付状態	22
図 3.4	リング引張試験片取付状況	22
図 3.5	ジルカロイ-2 照射材の浸漬試験前後の外観	23
図 3.6	ジルカロイ-2 照射材の浸漬前後における表面近傍断面組織	23
図 3.7	ジルカロイ-2 被覆管の浸漬前後における引張強さ	24
図 3.8	ジルカロイ-2 被覆管の浸漬前後における破断伸び	24
図 3.9	ジルカロイ-2 照射材のリング引張試験後の破断面組織	25
図 4.1	異種金属接触試験片を用いた人工海水浸漬試験(模式図)	35
図 4.2	浸漬試験の外観(左:浸漬試験 No.5,6、中央:浸漬試験 No.3,4、右:浸漬試験 No.1,2)	35
図 4.3	浸漬 24 時間後の外観(浸漬試験 No.1, 2 条件 90°C 10,000ppm Cl ⁻)	36
図 4.4	浸漬 24 時間後の外観(浸漬試験 No.3, 4 条件 50°C 10,000ppm Cl ⁻)	36
図 4.5	浸漬 24 時間後の外観(浸漬試験 No.5, 6 条件 50°C 100ppm Cl ⁻)	37
図 4.6	浸漬試験終了後の試験溶液内の外観	38
図 4.7	100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.1)	39
図 4.8	100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.2)	40
図 4.9	100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.3)	41

図 4.10	100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.4)	-----42
図 4.11	100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.5)	-----43
図 4.12	100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.6)	-----44
図 4.13	100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.1)	-----45
図 4.14	100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.2)	-----46
図 4.15	100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.3)	-----47
図 4.16	100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.4)	-----48
図 4.17	100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.5)	-----49
図 4.18	100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.6)	-----50

This is a blank page.

1. 緒言

1.1 背景

2011年3月11日に発生した地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所(以下、「福島第一原発」)事故においては、使用済燃料プール(以下、「SFP」)の冷却機能が失われ、緊急措置的に海水等が注入された。また、1、3、4号機原子炉建屋においては、水素爆発が発生し、SFP内にコンクリート瓦礫が混入した。海水注入後、SFP循環冷却システムが再稼働し塩分除去が開始されるまでの期間、SFP内の使用済燃料(以下、「SF」)は、高温での希釈海水中で、かつ一部燃料については瓦礫コンクリートと共存した状態にあり、高温、高塩化物イオン濃度、高pHという、通常のSFとは異なる特異な環境を経験した。

SFP内のSFは、燃料デブリ取出しに先立ち安全にSFPから取り出して福島第一原発サイト内の共用プールに移送する必要がある。また、共用プールにおいては、次の移送先が決まるまでの期間(～数十年間)SFを健全に保管する必要がある。このため、これまでに経験のない特異な環境を経験したSFの長期保管中における健全性評価技術を開発する必要があり、国の研究開発プロジェクト「1-1 使用済燃料プールから取り出した燃料集合体の長期健全性評価」(以下、「国プロ1-1」)が立ち上げられた¹⁾。国プロ1-1は、燃料集合体の長期健全性を評価するための視点として「被覆管密閉性」と「構造健全性」の担保に着目しており、以下に示す3項目の研究開発からなる。このうち、項目1.及び2.については、メーカー((株)東芝及び(株)日立製作所/日立GEニュークリア・エナジー(株))を中心としたエンジニアリング研究として、項目3.については、日本原子力研究開発機構(以下、機構)を中心として項目1.及び2.を基盤的に支える基礎研究として、それぞれ研究開発が進められている²⁾。

- 1) 燃料集合体の長期健全性評価技術開発
- 2) 燃料集合体移送による水質への影響評価技術開発
- 3) 長期健全性に係る基礎試験

本報告書は、国プロ1-1「使用済燃料プールから取り出した燃料集合体の長期健全性評価」のうち、「3.長期健全性に係る基礎試験」に関連する研究について記載したものである。

国プロ1-1の研究開発は、デブリ取出しに先立って効率的かつ迅速に進められていくものであるが、同時に腐食に係る長期健全性評価手法開発というこれまでに類のない挑戦的な内容でもある。このことは、「3.長期健全性に係る基礎試験」においては、長期的な腐食挙動等をメカニズム面まで含めた基礎基盤的側面から評価・検討し、これを踏まえて考え得る技術・手法について網羅的に検討した上で様々なオプション・バックアップとして提示し、項目1.及び2.の研究開発を基礎基盤的側面からサポートすることが重要であることを示していると考えられる。このため、改めて、想定される事故シナリオと発生可能性のある腐食事象を洗い出して長期健全性評価における重要事象を抽出し、対応する長期健全性評価手法案について検討した。本検討は、今後の「3.長期健全性に係る基礎試験」の具体的課題・実施項目設定に資することを企図した機構の自主的検討と位置付けられる。以下に本検討の概要及び目的を示す。尚、「(2)使用済燃料被覆管を用いた塩水浸漬試験及び強度特性評価」については、国プロ1-1事業として位置付けて実施した内容である³⁾。

(1) 燃料集合体の長期健全性に及ぼす腐食事象の同定と絞り込み

FAの長期健全性評価上重要かつ優先的に評価すべき部位・腐食事象を選定することを目的に、SFPで経験した特異な環境によりFA構成部材において発生が懸念される腐食事象を幅広く抽出し、優先的に評価すべき部位及び腐食事象を絞り込む。

(2) 使用済燃料被覆管を用いた塩水浸漬試験及び強度特性評価

SFPで経験した特異な環境が燃料被覆管の核分裂生成物等の閉じ込め性能に与える影響

の有無を確認することを目的として、使用済燃料被覆管を用いた腐食試験、強度試験を実施する。

(3) 異種金属接触模擬材を用いた塩水浸漬試験による長期的な腐食挙動評価手法の検討

(1)の検討で絞り込まれた異種金属接触部について、温度等を変化させて異種金属接触部模擬試験材の塩水浸漬による腐食試験を行い、長期的な腐食挙動の予察に資するための実験的手法についての検討を行う。

2. 燃料集合体の長期健全性に及ぼす腐食事象の同定と絞り込み

2.1 使用済燃料プールの環境履歴に関する調査⁴⁾

2011年3月11日に発生した事故により、1～4号機のSFPは冷却機能と補給水機能を喪失した。そのため、燃料プール冷却浄化設備(FPC)配管以外に、コンクリートポンプ車等による応急処置的な注水が併用された。応急措置的な注水には、海水が一時的に使用された。なお、1号機には海水は注入されなかった。給水は継続されたが、プール水温は上昇し、70～90℃の高温度水準で推移した。代替循環冷却システムが稼働するまでに最長約5箇月を要した。また、1、3、4号機のSFPには、水素爆発によって飛散したコンクリート片等が混入した。これら1～4号機のSFPにおいてSFが経験した特異な水環境履歴を時系列的に以下の5段階に整理した。

- ①事故発生から代替循環冷却システム稼働まで
- ②代替循環冷却システム稼働からSFPの脱塩処理終了まで
- ③脱塩処理終了から共用プール移送までのSFPにおける保管中
- ④SFPから共用プールへの移送過程
- ⑤共用プールにおける保管中あるいは移送過程

号機毎の水温、時間、塩化物イオン濃度、pH等の変遷履歴を表2.1に示す。表2.1中の段階①と段階②の情報は、公開資料から収集した実測値あるいは評価値に基づいている(詳細は参考文献4)を参照)。一方、段階③④⑤は報告書作成時点における想定である。特に、1～3号機のSFPからのFAの取り出し開始時期は最速プラン⁵⁾、所要期間は1年半を想定した。

2.2 使用済燃料プールの環境履歴において懸念される腐食現象についての考察

2.1節で調査・整理した1～4号機のSFP水環境履歴における保管FAの構成部品あるいは構成材料の長期健全性に対する懸念として腐食現象が挙げられる。FAの構成材料はジルカロイ、ステンレス鋼、インコネル等の耐食性の高い合金が使用されており、通常の使用においては腐食が問題になることはない。しかしながら、2.1節で述べたとおり、事故時に1～4号機のSFPに保管されていたFAは、冷却機能喪失(水温の上昇)、海水注入(塩化物イオンの濃度上昇等)、コンクリート片混入(pHの上昇)等により、熱的・化学的に厳しい特異な水環境にさらされた。

SFPで経験した特異な環境により、FAの各構成材料においては、「自由表面における不動態皮膜の局所的破壊による孔食」、「部品同士の狭隙部におけるすきま腐食」、「瓦礫落下に伴うコンクリート成分混入による高アルカリ腐食(3、4号機)」、「瓦礫落下に伴う変形や応力負荷状態の部位における応力腐食割れ(SCC)」等の発生が予想される。さらには、海水注入によって保管プール内の導電率が上昇し、異種金属接触部位におけるガルバニック腐食も懸念される。また、FA構成材料の冷却水接触面では、SFからの放射線による水の放射線分解(ラジオリシス)が常に生じている環境下にある。図2.1⁶⁾は、代表的な放射線である γ 線を例に吸収線量率と集合体の距離の関係、及びラジオリシスにより生成する過酸化水素(H_2O_2)濃度と集合体の距離の関係を計算により求めた結果を示したもので、 γ 線の影響はFAから10cm離れた距離でも 10^3 Gy/hrを超えており、ラジオリシスの影響を十分に考慮して評価を行う必要がある。

1～4号機に共通し、応急措置的に海水、真水、淡水が放水あるいは注水されたが、これらの水質に関する情報は現在のところ収集できていない。推測の域を出るものではないが、仮に真水と淡水がろ過処理済の工業用水や水道水でなかった場合については、懸濁物質の付着によるすきま腐食の可能性も考慮する必要があるかもしれない。

一方、1～4号機SFPは70～90℃程度の高水温状態が長時間続いており、微生物を死滅させる効果があったと予想される。また、燃料集合体付近では高 γ 線量率と高水温の影響により、ほとんどの微生物は生存できず、FA構成材料における微生物腐食の可能性は非常に低いと予想される。

2.3 福島第一原発燃料集合体の長期健全性に及ぼす腐食に係る重要な事象の抽出

SFP 内に存在する材料の種類を表 2.2⁷⁾に示す。FA の大部分は、ジルコニウム合金(ジルカロイ-2、ジルカロイ-4)で構成されており、次いで多いのがステンレス鋼となっている。比較的高価なインコネルは、スプリング等の特定部品にのみ使用されている。また、FA 中の金属間接触を伴う構造部品を表 2.3^{8, 9)}に例示する。表 2.3 では FA が SFP 内で保管されている状況(FA が燃料貯蔵ラックに着座している状況)を想定し、1~4号機での金属間接触箇所を考えた。表 2.3 に示したように、金属間接触の組み合わせは異種金属、同種金属全てを考慮すると 14 通りとなった。

これらの表 2.2 と表 2.3 に示した材料単体及び金属間接触を伴う構造部品について、2.2 節で考察した SF が経験した特異な水環境下において発生可能性のある腐食形態を挙げ、それら腐食が発生する場合の環境(外的要因)及び想定事象について検討した。さらに、腐食発生時の影響及び関連データ有無についても考慮した。発生時影響については、被覆管開口による周辺水環境への影響、集合体落下による廃炉工程への甚大な影響など、国プロ長期健全性評価における視点である「被覆管密閉性」及び「構造健全性」の担保がなされず、福島第一原発廃炉措置において重篤な影響を及ぼすと考えられる場合を「大」とし、それ以外の場合は想定度合いに応じて「中」または「小」とした。関連データについては、平成 26 年 3 月時点での入手可能な公開情報の中から類似事象に関する試験データ有無を調査した。これら検討結果を表として整理したもののについて、材料単体については表 2.4 に、構造部品等金属間接触箇所については表 2.5 に示す。材料単体については 15 通り、構造部品については 14 通りの部材/部位とその腐食事象を抽出した。以下に抽出にあたっての検討のうち、発生時影響が「大」であるものについての概要を記す。

表 2.4 に示す材料単体に対する検討においては、特に核分裂生成物等の閉じ込め性能の観点から重要であるジルカロイ 2 燃料被覆管に対する想定事象として、「ピンホールの発生」、「瓦礫落下時のキズによる被覆管新生面の露出」、「重量物落下に伴う変形・損傷」等を検討し、腐食形態としては「孔食」、「すきま腐食」、「高アルカリ腐食」、「応力腐食割れ」を考えた。いずれも被覆管が開口した場合の影響は大きく、発生時影響は「大」と判断した。また、燃料被覆管以外の部材に対する検討の結果、FA 吊り上げ時の構造健全性の観点でハンドル部を含む上部支持板で発生時影響を「大」とした。一方、表 2.5 に示す構造部品について、特に FA 吊り上げ時の構造健全性担保の観点で想定される事象を考えた。浜岡原発 5 号機の調査では異種金属接触部位での腐食が確認⁹⁾されていることから、FA 吊り上げ時の荷重経路である「下部支持板と下部結合端栓」(表 2.5 の No.7)及び「ロックナットと上部結合端栓」(表 2.5 の No.8)についての発生時影響を「大」とした。

以上に示した発生時影響「大」の部材/部位のうち、関連データ「無」のもの、及び関連データが「有」であってもデータ拡充が必要なものを優先的に評価すべき部材/部位とした。その結果、材料単体については「ジルカロイ-2 被覆管」及び「上部支持板(ハンドル含む)」、構造部品については「上部結合端栓とロックナット」及び「下部結合端栓と下部タイプレート」の計 4 種類を選定し、それぞれに対応する腐食事象としては計 7 種類となった。

選定した 4 種類の部材/部位のうち、「上部支持板(ハンドル含む)」を構成するステンレス鋳鋼の腐食については、過去に多くの腐食試験データが体系的に取得されていること¹¹⁾から、本検討の対象外とした。このため、残る 3 種類の部材/部位のうち、「ジルカロイ-2 被覆管」に対する核分裂生成物等の閉じ込め性能に関する試験評価について第 3 章に記述した。また、「上部結合端栓とロックナット」及び「下部結合端栓と下部タイプレート」についてはいずれもジルカロイ-2 とステンレス鋼の異種金属接触箇所であるため、ジルカロイ 2 / ステンレス異種金属接触材に対する長期的な腐食挙動の予察に資する実験的手法について第 4 章に記した。

表 2.1 保管 FA の水環境履歴の調査結果

- ① 事故発生から代替循環冷却システム稼働まで
- ② 代替循環冷却システム稼働から SFP の脱塩処理終了まで
- ③ 脱塩処理終了から共用プールへ移送までの SFP における保管中
- ④ SFP から共用プールへの移送過程
- ⑤ 共用プールにおける保管中あるいは保管後移送時

号機		パラメータ	①	②	③*1	④	⑤
1	i	温度(°C)	約 70*2	< 50	←	未定	< 50
	ii	保持時間(hr)	約 3,642	無	~70,000	未定	> 10,000
	iii	塩化物イオン濃度(ppm)	< 10	←	←	←	*4
	iv	pH	8~13	~8	←	←	*5
	v	放射線の影響	有	←	←	←	←
2	i	温度(°C)	約 70*2	< 50	←	未定	< 50
	ii	保持時間(hr)	約 1,946	~10,000	~60,000	未定	> 10,000
	iii	塩化物イオン濃度(ppm)	< 2,500*3	< 20	←	←	*4
	iv	pH	7~9	~9	←	←	*5
	v	放射線の影響	有	←	←	←	←
3	i	温度(°C)	約 70*2	< 50	←	未定	< 50
	ii	保持時間(hr)	約 2,668	~15,000	~40,000	未定	> 10,000
	iii	塩化物イオン濃度(ppm)	< 7,300*3	< 10	←	←	*4
	iv	pH	8~13	~9	←	←	*5
	v	放射線の影響	有	←	←	←	←
4	i	温度(°C)	約 90*2	< 50	←	未定	< 50
	ii	保持時間(hr)	約 3,405	~10,000	~20,000	未定	> 10,000
	iii	塩化物イオン濃度(ppm)	< 10,200*3	~60	←	←	*4
	iv	pH	8~13	~9	←	←	*5
	v	放射線の影響	有	←	←	←	←

*1: 1~3号機の SFP からの燃料集合体取り出し開始時期は最速プランとし、所要期間は1年半を想定

*2: 評価値

*3: 予想される最大濃度

*4: 保安規定制限値 < 100ppm (従来管理値 0.5ppm)

*5: pH7~9 程度と予想

表 2.2 SFP 内に存在する主な金属材料の種類

製品名	部品・要素名	部材名	材質	出典
燃料集合体	燃料棒	燃料被覆管	ジルカロイ-2	※1
		上部端栓	ジルカロイ-2	※2
		下部端栓	ジルカロイ-2	※2
	冷却材チャンネル	ウォーターロッド	ジルカロイ-2	※2
		チャンネルボックス	ジルカロイ-4	※2
		管状のセル管	ジルカロイ-2	※2
		スプリング	インコネル	※2
	支持格子(スペーサー)	下部タイプレート	ステンレス鋳鋼	※1
		ハンドル	ステンレス鋳鋼(CF8 相当)	※1
		上部タイプレート	ステンレス鋳鋼(CF8 相当)	※1
	燃料棒固定	ロックナット	ステンレス鋳鋼(CF8 相当)	※1
			ステンレス鋼(SUS304L 相当)	※1
		膨張スプリング	インコネル	※2
			ジルカロイ-2	※2
集集体構造	結合燃料棒(タイロッド)	ジルカロイ-2	※2	
	上部結合端栓	ジルカロイ-2	※1	
	下部結合端栓	ジルカロイ-2	※1	
	キャップスクリュウ	ステンレス鋼(XM-19 相当)	※1、※2	
チャンネルファイナ	チャンネルファイナ	インコネル	※2	
		インコネル X-750	※1	
		インコネル X-750	※1	
		インコネル	※2	
		インコネル	※2	
燃料貯蔵ラック	1~3号機	ステンレス鋳鋼(CF3 相当)	※1	
	4号機	アルミニウム合金	※3	
	側壁面・床面	ステンレス鋼(SUS304)	※3	
プールライナー		ステンレス鋼(SUS304)	※3	

※1: 参考文献 3) 添付資料-24(1/7)、添付資料-25(11/12)別図13

※2: 参考文献 7) pp.30-34

※3: 参考文献 8) pp.2-14

表 2.3 FA における金属間接触による構造部品の例

通番	部品名	材質	備考
1	チャンネルファスナー	ステンレス鋼(XM-19 相当)	B
	上部タイプレート	ステンレス鋳鋼(CF8 相当)	
2	キャップスクリュー	ステンレス鋼(XM-19 相当)	B
	スプリングワッシャ	インコネル X-750	
3	キャップスクリュー	インコネル X-750	B
	スプリングワッシャ	インコネル X-750	
4	スプリングワッシャ	インコネル X-750	B
	ガード	ステンレス鋳鋼(CF3 相当)	
5	ガード	ステンレス鋳鋼(CF3 相当)	B
	上部タイプレート	ステンレス鋳鋼(CF8 相当)	
6	スプリングワッシャ	インコネル X-750	B
	板バネ	インコネル	
7	板バネ	インコネル	B
	ガード	ステンレス鋳鋼(CF3 相当)	
8	ガード	ステンレス鋳鋼(CF3 相当)	B
	チャンネルボックス	ジルカロイ-4	
9	ロックナット	ステンレス鋼(SUS304L)	S
	上部結合端栓	ジルカロイ-2	
10	燃料被覆管	ジルカロイ-2	C
	支持格子	ジルカロイ-2	
11	燃料被覆管	ジルカロイ-2	C
	支持格子	インコネル	
12	下部タイプレート	ステンレス鋳鋼	S
	下部結合端栓	ジルカロイ-2	
13	下部タイプレート	ステンレス鋳鋼	A
	燃料貯蔵ラック	アルミニウム合金	
14	下部タイプレート	ステンレス鋳鋼	A
	燃料貯蔵ラック	ステンレス鋼	

S: 引張試験による健全性対象(燃料集合体吊り上げ時健全性評価対象)
参考文献 9)添付資料-24(4/7)

A: 燃料集合体と燃料貯蔵ラック接触部

B: チャンネルボックス支持構造

C: 燃料棒スペーサー(支持格子)

This is a blank page.

表 2.4 SFP 保管集合体において発生可能性のある腐食現象と環境要因(材料単体)

No	対象部材/部位	構成材料	腐食形態	環境(外的主要因)	想定事象	発生時影響※1	関連データ有無	備考
1	燃料被覆管	ジルカロイ-2	孔食	•*1, *2, *3, *4 •内圧	ピンホール	大 (被覆管開口)	有(JAEA)	1~4号機
2	燃料被覆管	ジルカロイ-2	すき間腐食 (被覆管/酸化被膜)	•*1, *2, *3, *4	•がれき落下による新生面の露出 •重量物落下に伴う燃料被覆管湾曲による新生面の露出 (表面酸化皮膜の破壊)	大 (被覆管開口)	無	1/3/4号機 •破損燃料を想定
3	燃料被覆管	ジルカロイ-2	高アルカリ腐食	•*1, *2, *3, *4	重量物落下に伴う燃料被覆管湾曲によって表面酸化皮膜が破壊された部分が腐食貫通し、FP(Cs)を高濃度に溶解した水溶液(高アルカリ)腐食によって開口部が拡大する。	大 (被覆管開口)	無	1/3/4号機 •破損燃料を想定
4	上部支持板 (ハンドル含む)	ステンレス鋳鋼	応力腐食割れ (SCC)	•*1, *2, *4 •応力、塑性変形	ガレキ落下による損傷	大 (集合体落下)	無※2	主に3号機
5	上部支持板 (ハンドル含む)	ステンレス(鋳)鋼	通気差腐食	•*1, *2, *3, *4	コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ/低溶存酸素濃度、非接触面が大気飽和の溶存酸素濃度になり、非接触面が優先的に腐食される。塩化物イオンによる不働態の破壊効果も加わる。	大 (集合体落下)	無※2	主に3号機
6	下部支持板	ステンレス鋳鋼	応力腐食割れ (SCC)	•*1, *2, *3, *4	重量物落下に伴い、材料の局所箇所に応力集中し SCC が発生することで、構造健全性が損なわれる。	中	無	主に3号機
7	下部支持板	ステンレス鋳鋼	通気差腐食	•*1, *2, *3, *4	コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ/低溶存酸素濃度、非接触面が大気飽和の溶存酸素濃度になり、非接触面が優先的に腐食される。塩化物イオンによる不働態の破壊効果も加わる。	中	無	1/3/4号機
8	ロックナット	ステンレス(鋳)鋼	通気差腐食	•*1, *2, *3, *4	コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ/低溶存酸素濃度、非接触面が大気飽和の溶存酸素濃度になり、非接触面が優先的に腐食される。塩化物イオンによる不働態の破壊効果も加わる。	中	無	主に3号機
9	上部結合端栓	ジルカロイ-2	高アルカリ腐食	•*1, *2, *3, *4	コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ条件になり、過不働態腐食を起こす。	中	無	1/3/4号機
10	上部結合端栓	ジルカロイ-2	孔食	•*1, *2, *3, *4 •内圧	ピンホール	中	有(浜岡5号機)	1/3/4号機
11	下部結合端栓	ジルカロイ-2	高アルカリ腐食	•*1, *2, *3, *4	コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ条件になり、過不働態腐食を起こす。	中	無	1/3/4号機
12	下部結合端栓	ジルカロイ-2	孔食	•*1, *2, *3, *4 •内圧	ピンホール	中	有(浜岡5号機)	1/3/4号機
13	燃料貯蔵ラック	アルミニウム合金	高アルカリ腐食	•*1, *2, *3, *4	コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ条件になり、アルカリ腐食を起こす。	小	有	1/2/3号機
14	燃料貯蔵ラック	ステンレス鋼	通気差腐食	•*1, *2, *3, *4	コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ/低溶存酸素濃度、非接触面が大気飽和の溶存酸素濃度になり、非接触面が優先的に腐食される。塩化物イオンによる不働態の破壊効果も加わる。	小	無	4号機
15	燃料貯蔵ラック	ステンレス鋼	SCC	•*1, *2, *3, *4	ガレキ・重量物落下による変形・損傷	小	無	4号機

*1:塩化物イオン、*2:pH、*3:温度、*4:放射線

※1:周辺環境への影響や廃炉工程の大幅遅延など福島第一原発廃炉措置において重篤な影響を及ぼすと考えられる場合を「大」、「中」と「小」については影響度合いを主観的に判断

※2:変形データ有(東電自主研究¹⁰)、腐食データ無

表 2.5 SFP 保管集合体において発生可能性のある腐食現象と環境要因(構造部品)

No	対象部材/部位	構成材料	腐食形態	環境(外的主要因)	想定事象	発生時影響※1	関連データ有無	備考
1	燃料被覆管と上部結合端栓	ジルカロイ-2/ ジルカロイ-2	すきま腐食	•*1, *2, *3, *4	接合箇所劣化	中	無	1~4号機
2	燃料被覆管と上部結合端栓	ジルカロイ-2/ ジルカロイ-2	SCC	•*1, *2, *3, *4	湾曲による応力負荷	中	無	1~4号機
3	燃料被覆管と上部結合端栓	ジルカロイ-2	高アルカリ腐食		コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ条件になり、過不働態腐食を起こす。	中	無	1/3/4号機
4	燃料被覆管と下部結合端栓	ジルカロイ-2/ ジルカロイ-2	すきま腐食	•*1, *2, *3, *4	接合箇所劣化	中	無	1~4号機
5	燃料被覆管と下部結合端栓	ジルカロイ-2/ ジルカロイ-2	SCC	•*1, *2, *3, *4	湾曲による応力負荷	中	無	1~4号機
6	燃料被覆管と下部結合端栓	ジルカロイ-2	高アルカリ腐食		コンクリート破砕粉粒接触面が高アルカリ条件になり、過不働態腐食を起こす。	中	無	1/3/4号機
7	下部支持板と下部結合端栓	ステンレス鋳鋼/ ジルカロイ-2	異種金属接触腐食	•*1, *2, *3, *4 •異種金属接触	接合箇所劣化	大 (集合体落下)	有※2	1~4号機
8	ロックナットと上部結合端栓	SUS304L 鋼/ ジルカロイ-2	異種金属接触腐食	•*1, *2, *3, *4 •異種金属接触	接合箇所劣化	大 (集合体落下)	有※2	1~4号機
9	下部支持板と燃料貯蔵ラック	ステンレス鋳鋼/ アルミニウム合金	異種金属接触腐食	•*1, *2, *3, *4 •異種金属接触	異種金属接触箇所の卑側金属が優先腐食して腐食生成物による固着が起こる。	小	無	1~3号機
10	下部支持板と燃料貯蔵ラック	ステンレス鋳鋼/ ステンレス鋼	すきま腐食		接触箇所ですきま腐食が進行して腐食生成物による固着が起こる。	小	無	4号機
11	上部支持板と燃料貯蔵ラック	ステンレス鋳鋼/ アルミニウム合金	異種金属接触腐食	•*1, *2, *3, *4 •異種金属接触	燃料交換機の落下によって変形した燃料集合体頂部の上部タイププレートが燃料貯蔵ラックに接触し、異種金属接触箇所の卑側金属が優先腐食して腐食生成物による固着が起こる。	小	無	主に3号機
12	上部支持板と燃料貯蔵ラック	ステンレス鋳鋼/ ステンレス鋼	すきま腐食		燃料交換機の落下によって変形した燃料集合体頂部の上部タイププレートが燃料貯蔵ラックに接触し、接触箇所ですきま腐食が進行して腐食生成物による固着が起こる。	小	無	4号機

*1:塩化物イオン、*2:pH、*3:温度、*4:放射線

※1:周辺環境への影響や廃炉工程の大幅遅延など福島第一原発廃炉措置において重篤な影響を及ぼすと考えられる場合を「大」、「中」と「小」については影響度合いを主観的に判断

※2:浜岡5号機⁹⁾:引張データ有、腐食データ無

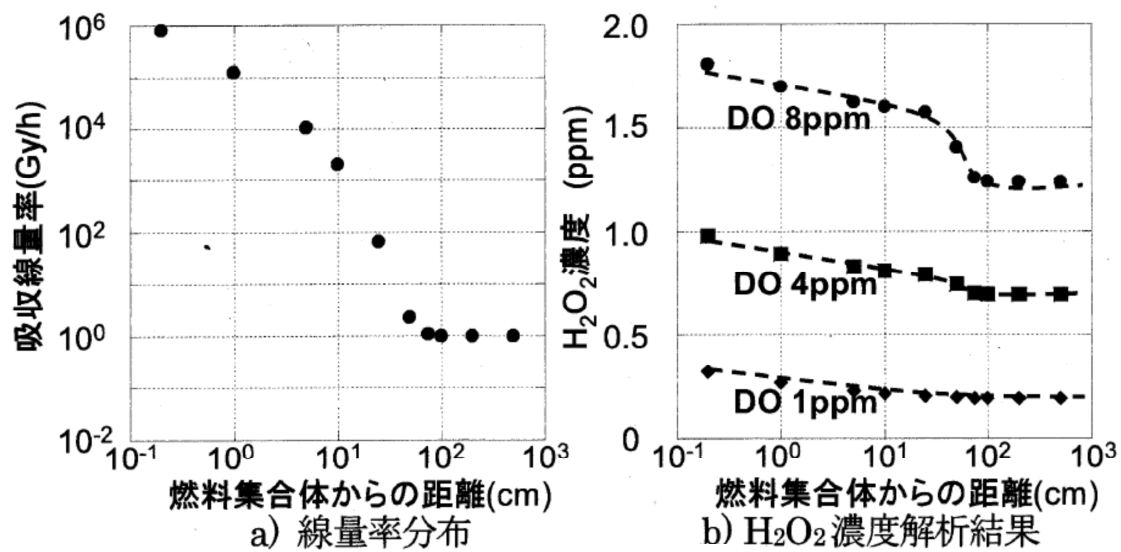


図 2.1 SFP における γ 線線量率の解析例⁶⁾
 (DO:溶存酸素)

3. 使用済燃料被覆管を用いた塩水浸漬試験及び強度特性評価

3.1 試験目的

第2章における燃料集合体の長期健全性に及ぼす腐食事象の同定と絞り込みから、核分裂生成物等の閉じ込め性能の観点で重要であるジルカロイ-2 被覆管については、事故初期におけるSFPでの冷却機能喪失(水温の上昇)、海水注入(塩化物イオンの濃度上昇等)という特異な環境にさらされていたことにより、腐食の発生と腐食の発生に伴う閉じ込め性能への影響が懸念されていた。そこで、SFPにおける特異な環境履歴により燃料被覆管の閉じ込め性能が維持されているかどうかを確認するために、SFPへの海水注入環境を模擬した溶液を用いてジルカロイ-2 被覆管の浸漬試験を実施した。供試材としては、新型転換炉「ふげん」で照射されたジルカロイ-2 被覆管試験片を用い、SFPの模擬水については人工海水及び実海水により調製し、塩水浸漬によるジルカロイ-2の腐食挙動や強度特性を検討することで、閉じ込め性能への影響を評価した。

3.2 試験方法

3.2.1 供試材

新型転換炉「ふげん」で照射されたE09燃料集合体から、ジルカロイ-2被覆管が用いられている燃料要素(要素番号M-7及びM-10、燃焼度44.0~44.8GWd/t)より供試材を採取した(以下、「照射材」という)。化学成分及び照射情報等を表3.1、表3.2にそれぞれ示す。比較のために照射材と製造ロットが同じ製造予備材(以下、「非照射材」という)も試験に供した。また、E09燃料集合体について、全照射期間中の定格出力運転時における冷却材温度は、炉心入口で274℃、炉心出口で284℃であった¹²⁾。

照射材は、燃料ピンを切断したままの内部に燃料が詰まっている状態であったため、燃料の除去(脱ミート)及び内面研磨を行った。脱ミート前後の外観を図3.1に示す。

3.2.2 浸漬試験

浸漬試験条件は、SFPに海水が注入された事故当時の状況を記した公開情報¹³⁾を参考に、人工海水2倍希釈の溶液で浸漬温度80℃、浸漬時間336時間で試験を実施し、浸漬前後における腐食挙動や強度特性に変化が生じていないことを確認した¹⁴⁾。しかしながら、実機のFAでは接合部や狭隘部など局部的に海水の希釈が進行しにくい箇所が存在することが推測され、より保守的な条件における影響評価も必要と考えられる。そこで、より厳しい腐食環境での浸漬試験として、人工海水原液を用いて、浸漬時間を1,000時間まで延長した浸漬試験を行うこととした。これらの浸漬試験により、人工海水濃度等がジルカロイ-2被覆管の腐食挙動や強度特性に及ぼす影響を評価することとした。

また、実海水に含まれる人工海水以外の微量成分や混濁物等の腐食挙動への影響を確認するために実海水を用いた浸漬試験も併せて実施した。

浸漬試験に用いた人工海水の化学成分を表3.3に示す。また、実海水については、茨城県東茨城郡大洗町の大洗港付近から採取したものを用いた。浸漬試験の体系を図3.2に示す。試験片については、内部に浸漬液が浸入しないよう、樹脂製のパッキンと治具を用いて管の両端を密閉した状態(図3.3参照)で浸漬液中に吊るすようにした。また、セパブルフラスコの上部にトラップ球や冷却管を接続することで、浸漬液中の水分蒸発を抑制し、浸漬試験期間中の浸漬液成分の変化が有意なものとならないよう、数日に1回程度の頻度で精製水を約10ml補給した。

浸漬試験終了後は、速やかに試験片を取り出し、精製水中で超音波洗浄を行い、十分に乾燥させてから重量等の測定に供した。

3.2.3 重量測定及び組織観察

照射材に対する浸漬試験前後の外観について、大洗研究開発センター第2照射材料試験施設のホットセルに設置されているペリスコープを用いて観察を行った。試料断面の金相試験については、照射燃料集合体試験施設に試料を輸送し、試料の切断、機械研磨及び光学顕微鏡による観察を実施した。

浸漬前後の試料重量測定は、ホットセル内に電子天秤(最小秤量 $10\mu\text{g}$)を搬入して実施した。測定方法は、試験片を精製水中で2回超音波洗浄を行い、十分乾燥させた後、電子天秤で小数第5位($10\mu\text{g}$ 単位)までの秤量を3回実施した。なお、測定値の平均値 $\pm 100\mu\text{g}$ 以上ばらついた場合は、電子天秤の内蔵分銅で校正を行った後再測定し、最大値と最小値を除いた測定値の平均値を用いることとした。

3.2.4 強度試験

浸漬試験前後における強度特性評価のため、ジルカロイ被覆管を輪切りにして $\phi 14.5\times$ 幅 3.0mm のリング試験片を調製した。リング引張試験の引張速度は、予備試験により強度特性に及ぼす引張試験速度の影響が小さいことを確認¹⁴⁾した上で、引張方向以外の曲がりによる影響を抑えるために、試験可能な範囲で遅く($0.1\text{mm}/\text{min}$)設定した。照射材の引張試験は、照射材料試験施設の被覆管試験セル内に設置されている島津製作所社製AG-50kND型の引張試験機及びインテスコ社製遠隔操作型引張試験機を用いて実施した。一方、非照射材については、コールド試験室Iにあるインテスコ社製引張試験機を用いて実施した。なお、非照射材については、上記セル内の引張試験機においても試験を行い、試験機間で強度特性に差が生じないことを確認している。試験条件等を表3.4に示す。リング試験片を治具に取り付けた状況を図3.4に示す。

引張試験結果については、チャート紙の荷重-変位曲線から、引張強さ、破断伸びを算出した。0.2%耐力及び引張強さについては、非照射材については公称断面積(5.40mm^2)、照射材については試料厚さをマイクロメータ(最小目盛 0.01mm)、試料長さをノギス(最小目盛 0.02mm)を用いて測定し、算出した断面積を用いて評価した。なお、本試験における一様伸び、破断伸びについては、試料公称内径(12.7mm)をゲージ部長さ(G.L.)として、以下の換算式を用いて算出した。

$$(\text{伸び値}) = (\text{変位量}) / \text{G.L.} \times 100(\%)$$

3.3 試験結果

3.3.1 重量測定

浸漬試験前後の重量測定結果を表3.5に示す。照射材、非照射材ともに浸漬試験によってわずかに重量増加する傾向が見られたが、照射材の実海水浸漬試験後のみ重量減少していた。これら重量変化の原因については明らかとなっていないが、塩水浸漬によって試料表面での酸化層の形成や海水成分の付着、あるいは照射材については照射時に形成された酸化層の剥離等が発生している影響等が推測されるが、3.3.2項で述べる浸漬前後の組織観察結果においても大きな変換は認められていないことから、明確な腐食発生を示すほどの重量変化量ではないと考えられる。

3.3.2 組織観察

照射材の浸漬試験前後の外観を図 3.5 に示すが、浸漬前後において明確な差は認められなかった。また、図 3.6 に表面近傍の酸化物層に着目して断面を観察した写真を示すが、未浸漬材と浸漬材において酸化物層の厚さや母相との界面に明確な変化は見られず、顕著な腐食の進行はないと考えられる。

3.3.3 強度試験

浸漬材及び未浸漬材のリング引張試験結果について、引張強さ、破断伸びをそれぞれ図 3.7～図 3.8 に示す。照射材は非照射材に対して照射硬化により強度が高くなっており、伸びが小さくなる傾向が見られた。この傾向は照射材一般にみられる現象である^{15, 16)}。浸漬材と未浸漬材の強度特性を比較すると、照射材、非照射材ともにばらつきはあるものの顕著な変化は見られず、塩水浸漬による有意な強度特性変化はないと評価される。また、リング引張試験後の破断面の状況を図 3.9 に示すが、いずれも延性的な破面を示しており、水素化物で剥離したと思われる黒いコントラスト部分の周辺においても延性的な破面となっており、破壊の起点となる様子も見られていないことから、塩水浸漬により強度に影響を及ぼすような組織は生じていないと考えられる。

3.4 考察

3.4.1 使用済燃料被覆管の閉じ込め性能に及ぼす海水成分の影響評価

海水に含まれる成分において、塩化物イオンは金属材料の腐食に及ぼす影響が大きい、塩化物イオン濃度の観点で本試験の結果を見ると、人工海水 2 倍希釈及び人工海水原液での浸漬試験における重量変化、組織及び強度特性に有意な差異は見られていない。また、人工海水以外の成分や混濁物等が含まれている実海水での浸漬結果においても、人工海水の試験結果と異なる挙動は認められていない。これらのことから、ジルカロイ-2 被覆管については、海水成分が被覆管の強度特性に及ぼす影響は小さく、閉じ込め性能への有意な影響はないと推測される。なお、2.2 節において高γ線量率と高温水の影響により生存する微生物は少ないことを述べたが、微生物が含まれる実海水を用いた浸漬試験についても、人工海水の試験結果と有意な差を生じていないことから、海水に含まれる微生物による腐食挙動への影響は小さいと考えられる。

3.4.2 使用済燃料被覆管の閉じ込め性能に及ぼす特異環境履歴の影響評価

SFP においては、2.2 節に述べたように通常の使用時とは異なる熱的・化学的に厳しい特異な水環境にさらされた。本試験にて実施された高温かつ塩化物イオン濃度の高い状態は腐食の観点で非常に厳しい条件であると考えられるが、試験結果はいずれも明確な腐食の発生を示すものではなく、また、塩水浸漬前後の強度特性にも有意な変化は生じていなかった。これらのことから、ジルカロイ-2 被覆管材料の海水腐食による強度低下が無いことを実証し、プール内で長期保管した場合でも「燃料被覆管の密閉性」が保たれる見込みと考えられる。

3.5 使用済燃料被覆管の閉じ込め性能評価に係る今後の課題

本試験で実施した人工海水及び実海水を用いた浸漬試験により、海水によるジルカロイ-2 被覆

管の腐食挙動や強度特性に及ぼす影響は認められず、被覆管の閉じ込め性能は十分に担保されることを示す結果となった。共用プールにて長期保管されるFAについて、被覆管の健全性を確認するためには、実際に長時間の浸漬試験を行い、保管中の材料挙動をモニタリングしつつ健全性を確認することも重要である。しかしながら、試験結果が確認できるまでの期間とコストが掛かる上、試験の精度を高めるためには、浸漬液の成分や温度などの試験条件を詳細に検討することが必要である。

その一方で、塩化物イオン濃度等をパラメータとして浸漬試験を行った試料の微細組織観察や浸漬液の電気化学測定による腐食環境の評価や、被覆管表面の酸化物層やジルカロイ母相のマイクロ組織安定性評価等を通じて、腐食を発生させる、あるいは抑制する要因を検討する必要がある。

表 3.1 ジルカロイ-2 燃料被覆管の化学組成及び製造条件¹²⁾

製造時ロット No.	被覆管主成分(wt%)				熱処理条件		冷間 加工度(%)
	Sn	Fe	Cr	Ni	熱処理 温度 (°C)	熱処理 時間 (h)	
S7889	1.44-1.53	0.15-0.17	0.11-0.12	0.05	515	2	66.0
規格値	1.20-1.70	0.07-0.20	0.05-0.15	0.03-0.08	-	-	-

表 3.2 供試材の照射情報¹²⁾

集合体名	要素 番号	被覆管製造 ロット番号	試料 No. (脱ミート後 試料 No.)	試料長さ (mm)	照射期間 (照射サイクル)	燃焼度 (GWd/t)
E09	M-7	S7889	XH13219 (XH13T00)	71.0	1990/6/5 ~1997/1/13	44.0
	M-10		XH14215 (XH14T00)	83.9	(第 16~第 25 サイクル)	44.8

表 3.3 人工海水の化学成分

成 分	重量(g) ^{*1}
塩化マグネシウム(6 水塩)	222.23
塩化カルシウム(2 水塩)	30.70
塩化ストロンチウム(6 水塩)	0.85
塩化カリウム	13.89
炭酸水素ナトリウム	4.02
臭化カリウム	2.01
ホウ酸	0.54
フッ化ナトリウム	0.06
塩化ナトリウム	490.68
硫酸ナトリウム(無水)	81.88

(八洲薬品株式会社人工海水「アクアマリン」説明書より引用)

*1 20L 調製時の含有量。

表 3.4 リング引張試験条件

1	試験片	外径 :14.5 mm, 内径 :12.7 mm 肉厚 :0.9 mm 長さ :3 mm ゲージ長さ:試験片内径(12.7 mm)とする。
2	試験条件	試験温度 :常温 試験速度 :0.1 mm / min 一定
3	試験機	被覆管試験セル引張試験機(島津製作所社製 AG-50kND 型) コールド試験室 I 引張試験機(INTESCO 社製)
4	試験本数	各浸漬条件で 5 本ずつ
5	取得データ	引張強さ、耐力、全伸び 応力-歪み線図 外観写真

表 3.5 ジルカロイ-2 被覆管の浸漬前後における重量変化

海水種類	浸漬液条件		試料			重量(g)			
	希釈	液温	浸漬時間 (h)	照射材 ／非照射材	長さ (mm)	表面積 (cm ²)	浸漬前	浸漬後	重量変化 ^{*1*2}
人工海水 ^{*3}	2倍	80°C	336	照射材	33.2	15.1	8.25942	8.26201	0.00259
			335	非照射材	30.0	13.7	7.57730	7.57760	0.00030
	原液		336	照射材	34.6	15.8	8.58255	8.58446	0.00191
			336	非照射材	34.3	15.6	8.55236	8.55335	0.00099
			1008	照射材	34.6	15.8	8.58255	8.58481	0.00226
			1008	非照射材	34.3	15.6	8.72433	8.72601	0.00168
実海水 ^{*4}	原液	1051	照射材	34.7	15.8	8.57543	8.57442	-0.00101	
		1050	非照射材	35.7	16.3	8.90437	8.90608	0.00171	

*1 : (株)A&D社製GR-202(最小秤量10 μg)にて測定。

*2 : (試験後重量) - (浸漬前重量) で算出。

*3 : 八洲薬品株式会社「アクアマリン」を使用。

*4 : 茨城県大洗港付近の海水を採取。

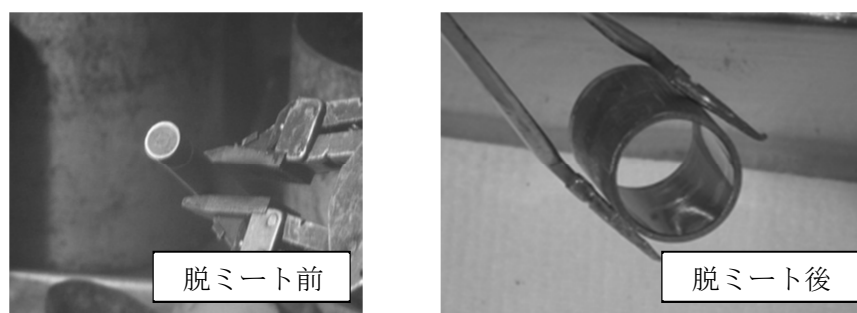


図 3.1 脱ミート(燃料除去)前後の被覆管外観

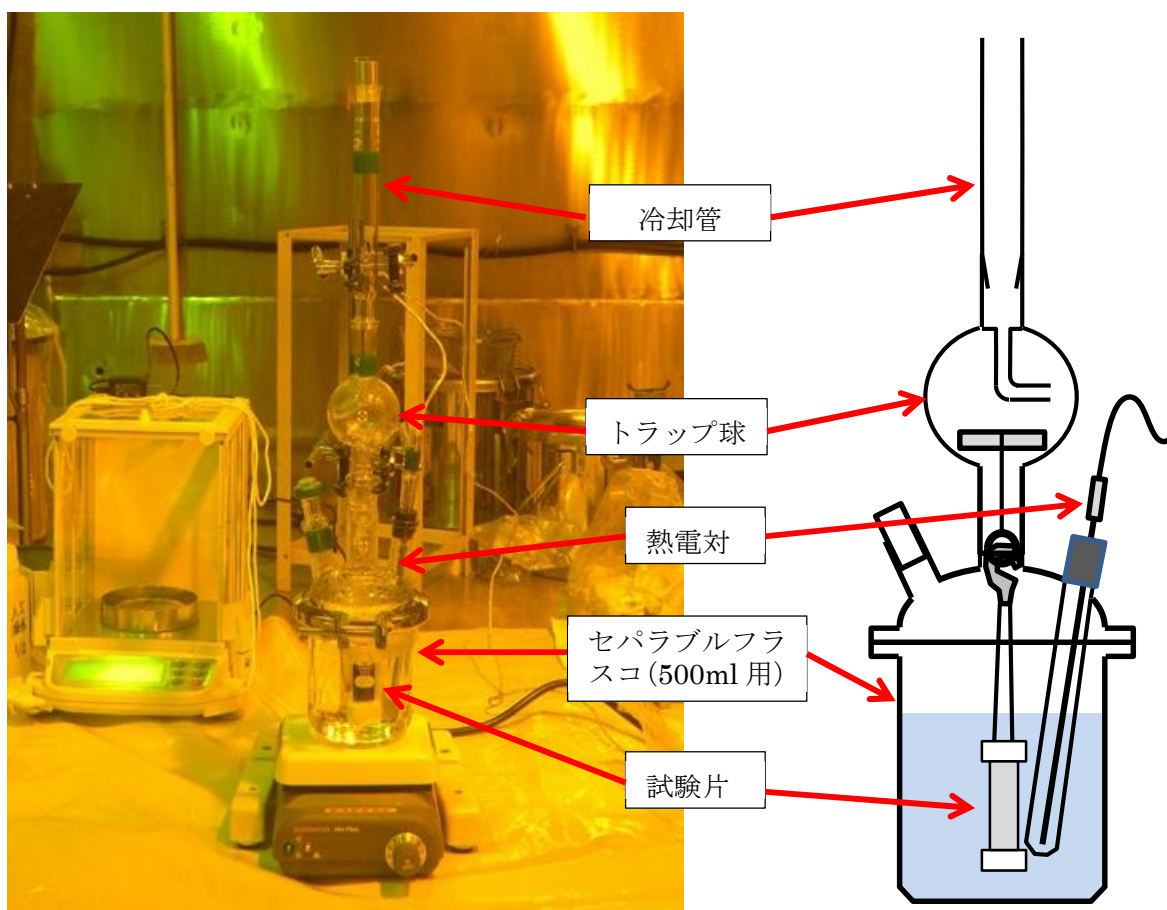
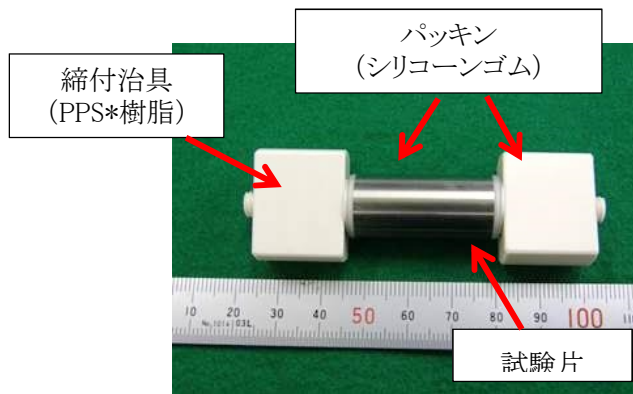


図 3.2 浸漬試験体系



*PPS: ポリフェニレンサルファイド

図 3.3 浸漬試験用治具取付状態



図 3.4 リング引張試験片取付状況

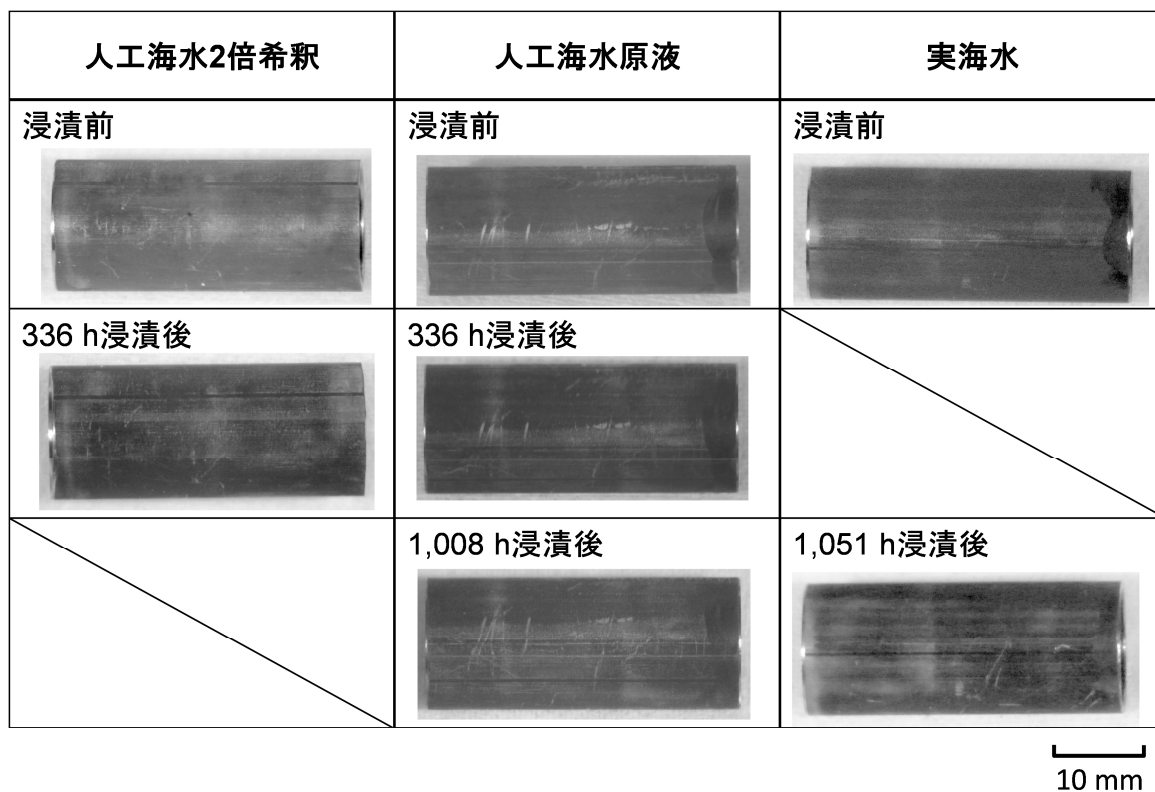


図 3.5 ジルカロイ-2 照射材の浸漬試験前後の外観

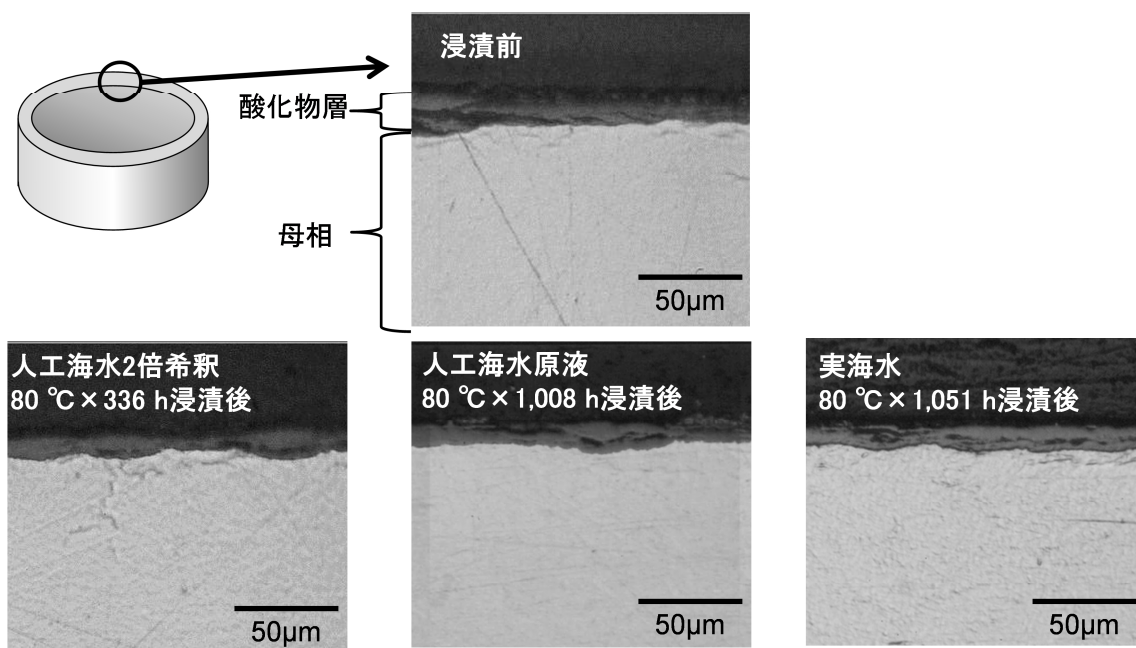
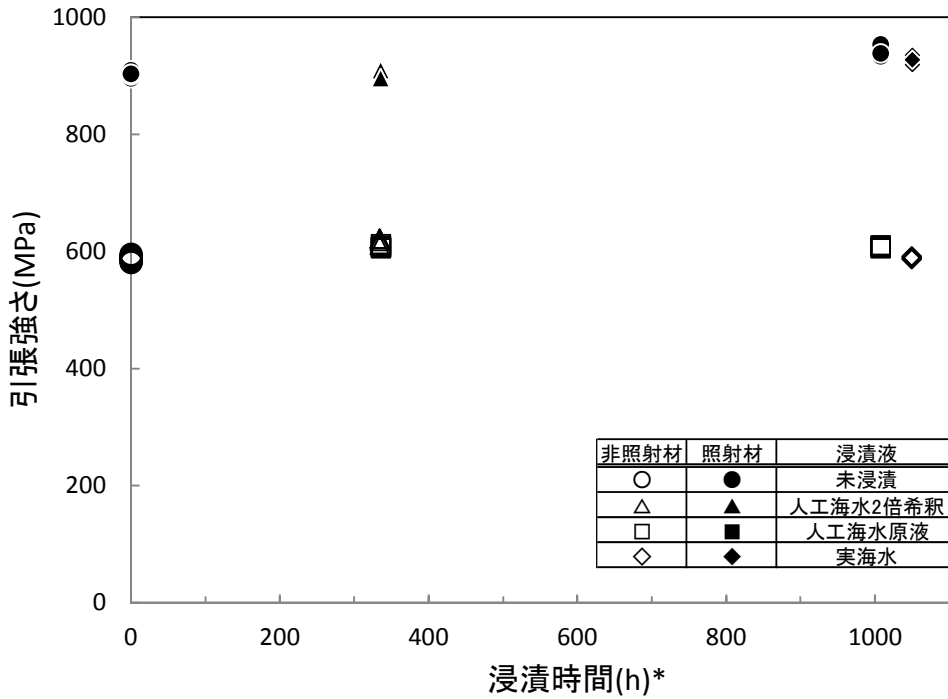
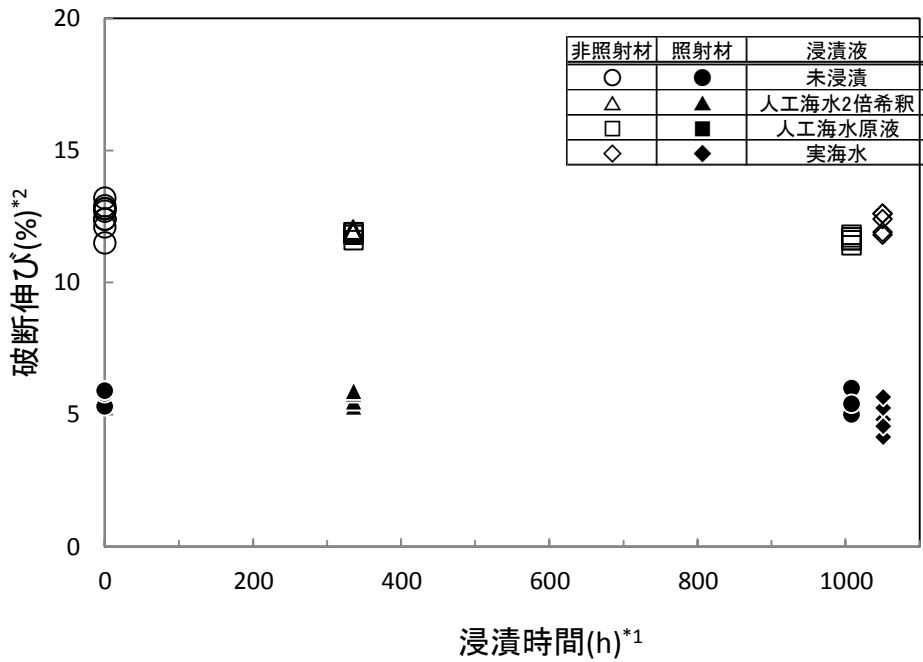


図 3.6 ジルカロイ-2 照射材の浸漬前後における表面近傍断面組織



* 未浸漬材は浸漬時間0hで示す。

図 3.7 ジルカロイ-2 被覆管の浸漬前後における引張強さ



*1 未浸漬材は浸漬時間0hで示す。

*2 リング試験片内径(12.7mm)をゲージ長さとして評価。

図 3.8 ジルカロイ-2 被覆管の浸漬前後における破断伸び

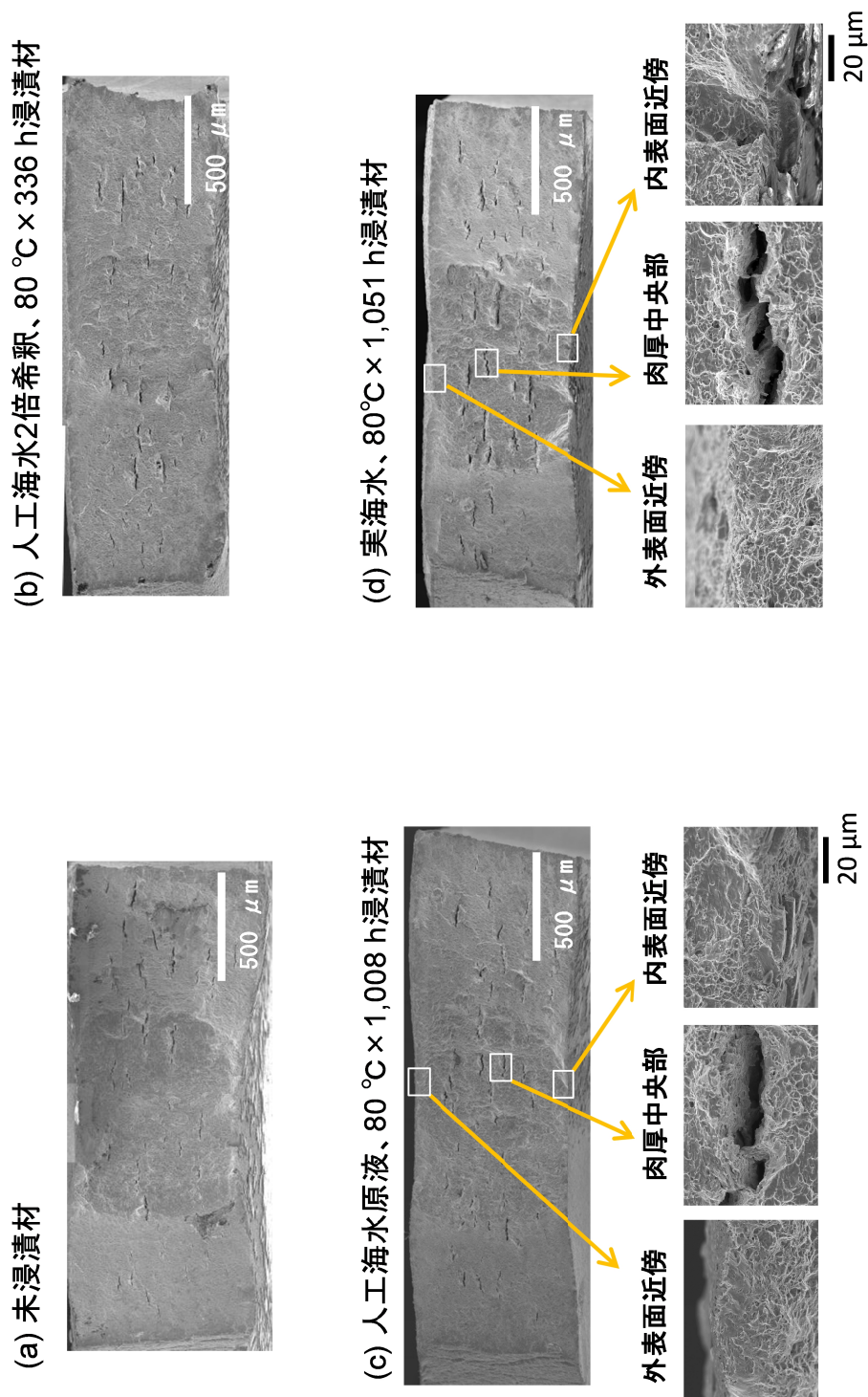


図 3.9 ジルカロイ-2 照射材のリング引張試験後の破断面組織

4. 異種金属接触模擬材を用いた塩水浸漬試験による長期的な腐食挙動評価手法の検討

4.1 はじめに

本章では、第2章で選定した評価対象部材／部位であるジルカロイ-2とステンレス鋼の異種金属接触箇所(「上部結合端栓とロックナット」及び「下部結合端栓と下部タイプレート」に対応)を対象として、長期的な腐食挙動を実験的に予測する手法の概念を検討した。また、予測手法の妥当性検証のためには実際に異種金属接触材を用いて腐食試験を行いデータを体系的に拡充整備していく必要があるため、異種金属接触模擬材を用いた塩水浸漬試験を予備的に実施し、本手法の妥当性を予備的に検討した。

4.2 燃料集合体の構造健全性劣化予測に資する局部部位での腐食事象予測方法論の検討

FAが長期水中保管された後に移送されることを考慮し、FAの荷重支持部(「上部結合端栓とロックナット」、「下部結合端栓と下部タイプレート」等)で局部的に発生した腐食の進展に伴い局部的に構造強度が低下し、FAの吊り上げ荷重を下回るというケースを想定した。本ケースにおけるFAの構造健全性劣化の予察に資するために、FA局部部位での腐食発生・進展を予測するための方法論を検討した。以下に方法論の概略を示す。

腐食進展の想定として、SFPでの特異な環境にさらされたことによりSFP保管中もしくは共用プール保管中に異種金属で構成されるすきま構造部位で腐食が発生し、共用プールからの次なる移送先にFAが移送されるまでの数十年間に腐食が進展する場合を想定している。当該部における数十年間の腐食進展挙動を予測するために、主たる腐食形態が「局部腐食」となるか「全面腐食相当」となるかを腐食試験後の組織観察から判別し、腐食形態に応じて適切な評価手法を選択する。「局部腐食」の場合については、最大孔食深さに着目して確率統計的手法による局部腐食の成長挙動を評価する。一方、「全面腐食相当」の場合については、予備的な腐食試験を行い腐食量を指標に試験パラメータ(温度、塩化物イオン濃度)の時間に対する加速割合を導出した後、予備的試験で導出した試験パラメータを用いた加速腐食試験によりFA局部部位における腐食挙動を評価する。

上述した予測方法論の妥当性検証として、以下に示す①～⑤の試験を行い、逐次、改良や修正を加えながら検証を進める。

①腐食の発生条件の電気化学的観点からの把握

FAを構成する金属材料は、数ある金属種の中でもとりわけ耐食性に優れた金属が使用されていることから、評価対象とする試験体系(金属単体／接触部位を形成する複数の金属の組合せ)における腐食の発生条件を電気化学的観点から把握するために、事故初期段階でのSFP内環境と共用プール内環境を包絡する保守的な評価が可能となる条件範囲で以下の電位を測定する。

- 自然腐食電位(E_{sp}):金属を電解質の溶液中に浸漬した際の水質(主にpH、溶存酸素濃度)に依存する金属固有の電位。
- 孔食電位($V'_{c, PIT}$):孔食が発生・進展する電位。
- 腐食すきま再不動態化電位($E_{R, CREV}$):すき間腐食の進展が停止する電位(すき間腐食が発生・進展する電位と一致)。

②様々な条件での腐食試験および表面組織観察

腐食が発生する電気化学条件範囲を把握したうえで、(i)温度(ii)塩化物イオン濃度、(iii)時間、(iv)pH、(v)溶存酸素等の条件を変えた希釈海水中において腐食試験を行い、表面組織観察により腐食の有無・腐食形態等を確認する。

③腐食分布の測定と腐食量の定量化

組織観察により有意な腐食が認められた場合については、腐食の発生状況、分布状態(数、大きさ、深さ)を測定するとともに、腐食量を定量化する。

④確率統計的手法による腐食挙動の予測(局部腐食の場合)

孔食等の局部腐食が主たる腐食形態である場合については、これまでに多数の評価実績がある確率統計的手法を採用し、最大孔食深さの測定から局部腐食成長挙動を予測する¹⁷⁾。

⑤腐食量評価による腐食試験パラメータの加速割合の導出(均一腐食相当の場合)

発生した腐食形態が均一腐食相当とみなせる場合(擬均一腐食)については、腐食量を指標に試験時間の関数としてデータを整理(時間依存性を評価)し、同一腐食量に達する時間とその時の腐食試験条件(温度、塩化物イオン濃度、pH等)との関係から、各試験パラメータの腐食事象に対する加速割合を評価する。

なお、方法論の概念検討において加速割合を評価するために選択した試験パラメータ(温度、塩化物イオン濃度)は、類似事象を経験した中部電力・浜岡原発5号機の原子炉構造材料の健全性評価で実験的にすきま腐食発生までの時間加速割合を評価された例⁹⁾があり、本研究の評価においても同様の評価手法を採用することとした。

4.3 異種金属接触模擬材の人工海水浸漬による腐食試験

腐食による構造健全性劣化を予測するための方法論の妥当性検証を行うための異種金属接触試験片(ジルコニウム合金-ステンレス鋼接合材)を用いた人工海水浸漬試験は、図 4.1 に模式的に示した試験体系において、表 4.1 の試験条件で実施した。なお、浸漬試験は、同一ビーカー内に2つの試験片を互いに影響を及ぼさないよう十分距離を置いて配置し、3つの試験条件を同時に実施(図 4.2)した。

4.3.1 すきま腐食試験用試験片調製

SUS304L 板材、Zircaloy-4 板材より試験片を切り出し、熱をかけた切断面をフライスで切削して板の重ね合わせ試験片(試験片形状:20×20×2[mm]、溶液接触面積比 1:1)を作成した。試験片は全面#600 番のサンドペーパーにて研磨を行い、表面を最終仕上げした。重ね合わせ試験片は、中心部に穴を開けて、上下からテフロン製ボルトで締め付け(締め付け圧力:3cN・m)で重ね合わせる構造とした。

4.3.2 試験溶液調整

試験溶液は、金属腐食用試験溶液(八洲薬品株式会社製アクアマリン)原液を蒸留水で希釈して用いた。希釈倍率は2倍と200倍とし、溶液のpHは、水酸化ナトリウムを用いて7(中性)近傍に調整した。試験溶液は、希釈倍率とpHの組み合わせで2種類調整した。

4.3.3 重量測定・寸法測定

浸漬試験前後の試料重量については、試験片を中性洗剤で洗浄した後に、アセトンでの脱脂、蒸留水での再洗浄・乾燥を行った後、電子天秤(最小秤量 10 μg)を用いて測定した。重量測定は、電子天秤で少数第5位(10 μg 単位)までの秤量を3回繰り返す、その平均値を算出した。また、浸漬試験前後の試験片の寸法についてはノギスを用いて測定し、重量測定と同様に、3回の測定値の平均値とした。

4.3.4 試験溶液の観察・分析

試験後溶液の着色の有無を観察し、浸漬終了直後の pH と導電率を測定した。pH 測定および導電率測定について、詳細を表 4.2、表 4.3 に示す。

4.3.5 試験片のマクロ観察

浸漬試験後試験片について、目視確認を行うとともに一部試験片については重ね合わせ試験片解体前のマクロ観察(デジタルカメラ撮影)を行った。また、重ね合わせ試験片の解体後について、接触面の状態をマクロ観察(デジタルカメラ撮影)し腐食発生の有無、腐食形態等を観察した。

4.4 異種金属接触模擬材の人工海水浸漬による腐食試験結果

4.4.1 重量測定・寸法測定結果

浸漬試験前後の重量および寸法(板材単体のみ)について、異種金属接合試験片を構成する SUS304L 板材単体、Zircaloy 板材単体、それらを接合させた試験片全体の測定結果を表 4.4～表 4.6 に示す。SUS304L 板材単体、Zircaloy 板材単体ともに、浸漬試験によって 0.1mg オーダでのわずかな重量増減が見られた。一方、これらの板材の接合試験片では、いずれの試験でも、浸漬後の重量は増加(最大で 11.1mg 増加)する結果となった。なお、寸法測定の結果から、浸漬試験前後で寸法変化は生じていなかった。

4.4.2 試験溶液の観察・分析結果

浸漬試験中の様子(図 4.3～図 4.5)から、90℃の浸漬試験では、50℃に比べて、水中に大きな気泡の形成が多数確認された。一方、塩化物イオン濃度の違いに起因した浸漬試験中の外観上の違いは見られず、試験溶液は終始無色透明で沈殿物等の形成も確認されることはなかった。

浸漬試験終了直後の各試験溶液内の様子を図 4.6 に、浸漬試験前後の試験溶液の pH と導電率の測定結果を表 4.7 に示す。

100 時間浸漬試験後の試験溶液は、試験前、試験中と同様に、無色透明で変色や沈殿物生成等外観上の変化は見られなかった。pH については、初期塩化物イオン濃度を 10,000 ppm にした試験溶液ではアルカリ側に、100ppm にした試験溶液では酸側に若干変化した。一方、導電率は高温・高塩化物イオン濃度の試験条件ほど導電率が大きく変化する(最大で 0.3 S/m 増加)ことが示された。

4.4.3 試験片のマクロ観察結果

各浸漬試験条件で 100 時間浸漬試験を行った後に、試験溶液から取り出した直後の異種金属接触試験片の外観写真を図 4.7～図 4.12 に示す。90℃、10,000ppm Cl⁻の条件で浸漬試験した異種金属接触試験片の一つの側面(図 4.7 の⑥)で、重ね合わせ面近傍に赤褐色の付着物が見られた。一方、同一浸漬条件で試験したもう一方の試験片(図 4.8)では、いずれの試験片側面にも同様の付着物は見られなかった。また、50℃の 10,000ppm Cl⁻(図 4.9、図 4.10)、50℃の 100ppm Cl⁻(図 4.11、図 4.12)については、いずれも図 4.7 で見られたような付着物は確認されなかった。

図 4.13～図 4.18 に解体後外観写真(いずれも除錆前)を示す。図 4.13 上の写真に示した接触面側の外観写真から、Zircaloy-4、SUS304Lともに重ね合わせ面に膜状の付着物形成が確認された。また、図 4.13 下写真の外面には締付トルクで覆われていた部分に試験片素地と異なる変色が確認された。同一条件で浸漬試験を行った図 4.14 では、図 4.13 で見られた膜状の付着物形成はなく、重ね合わせ面の縁部に若干の付着物の形成が見られた。なお、外面については図 4.13 と同様の変色が確認された。

50°Cの 10,000ppm Cl⁻(図 4.15、図 4.16)、50°Cの 100ppm Cl⁻(図 4.17、図 4.18)では、図 4.13 で見られたような試験片中央部周辺での膜状付着物の形成は確認されず、図 4.14 と同様に重ね合わせ面の縁部に若干の付着物の形成が見られた。なお、外面については図 4.13、図 4.14 で確認された締付トルク接触箇所での変色は見られなかった。

4.5 考察

4.5.1 燃料集合体の異種金属接触部位における腐食形態と腐食因子との関連

FA 構成部材のうち、異種金属部材で構成されているナット(SUS304L 相当鋼)と上部結合端栓(ジルカロイ-2)の締結部、および下部支持板(ステンレス鋼)と下部結合端栓(ジルカロイ-2)の締結部では、それぞれの異種金属同士でネジを構成している。ネジ部では、完全に密着した箇所(異種金属接触腐食)に加え、部分的にすきま構造を呈した形で存在している箇所(すきま腐食)もあると考えられる。

異種金属腐食、すきま腐食に関しては、環境条件によって事象進展が大きく左右される現象として理解されてきている^{18, 19)}が、すきま構造を有する異種金属接触部のような実構造物では、腐食試験データそのものが殆どなく極めて限定的なデータが一部公開⁹⁾されているのみである。

本試験において実施した 90°C、10,000ppm Cl⁻の試験結果からは、SUS304L 試験片での孔食の発生が確認された。一方で、50°Cでは、塩化物イオン濃度を 10,000ppm Cl⁻と 100ppm Cl⁻と大きく濃度条件を変えた試験においても腐食の発生は見られなかった。

以上のことから、本試験の条件範囲では、孔食が主たる腐食形態であり、温度が高温になるほど腐食進展の可能性が高まることを確認した。なお、腐食因子の一つとして考えている塩化物イオン濃度の影響については、本試験条件範囲で影響の有無を確認するには至らなかったことから、今後試験パラメータの組み合わせ条件を変えて評価を実施する必要があると考える。

4.6 燃料集合体の構造健全性評価に係る今後の課題

使用済燃料からの放射線の作用が重畳する環境では、水の放射線分解により各種の酸化性物質が生成し、それにより燃料集合体のすきま部や瓦礫との接触部において局所的に水質が変化し燃料部材の腐食が加速される懸念がある。また、SFP 保管中に燃料部材内に取り込まれた塩化物イオンについては、すきま部や瓦礫との接触部において残留している可能性があり、十分に除去できなかった場合においては局所的な腐食を誘発する懸念がある。

以上のことから、今後の長期に亘る FA の構造健全性評価において課題として考え得る事象は、FA 内部の局部環境での腐食挙動⁹⁾が挙げられ、今後も継続的に試験評価を行い、将来的な振る舞いを予測すると共に、必要に応じて実行可能な防食対策措置が必要と考える。

表 4.1 Zircaloy-4 板材と SUS304L 板材の接合試験片のすきま腐食試験条件

材質	浸漬試験	温度	pH	溶存酸素	塩化物イオン濃度	時間
	No.	℃	室温	バブリング	ppm	hr
Zircaloy-4 SUS304L	1	90	7	空気	10,000	100
	2					
	3	50				
	4					
	5				100	
	6					

表 4.2 pH 測定の方法および機器

メーカー		東亜ディーケーケー株式会社
本体	型式	HM-50V
	測定方式	ガラス電極法
	pH 表示範囲	0.00～14.00
電極	品名	pH 複合電極
	型式	GTS-5421C
	測定範囲	pH0～14
	温度	100℃

表 4.3 導電率測定の方法および機器

メーカー		株式会社堀場製作所
本体	型式	ES-51
	測定方式	交流 2 電極法
	測定範囲	セル定数 100m ⁻¹ :0.000mS/m～19.99S/m
	分解能	フルスケールの 0.05%
	計器再現性	フルスケールの ±0.5% ±1digit
電極	品名	防水型汎用電気伝導率用セル
	型式	9382-10D
	測定範囲	0.1mS/m～10S/m

表 4.4 異種金属接合試験片における SUS304L 板材の浸漬前後の重量および寸法

SUS304L	No.	重量 (g)			寸法 (mm)					
		浸漬前	平均	浸漬後	平均	増減	測定方向	浸漬前	浸漬後	増減
90°C 10,000ppm	S11	5.7507	5.7507	5.7504	5.7504	-0.0002	縦	20.05	20.05	0.00
		5.7506		5.7505				20.00	20.00	0.00
		5.7507		5.7504				1.95	1.95	0.00
	S12	5.7282	5.7282	5.7285	5.7285	0.0003	縦	20.00	20.00	0.00
		5.7282		5.7285				20.00	20.00	0.00
		5.7282		5.7285				1.95	1.95	0.00
	S13	5.8250	5.8250	5.8247	5.8247	-0.0003	縦	20.05	20.05	0.00
		5.8250		5.8247				20.00	20.00	0.00
		5.8250		5.8247				1.95	1.95	0.00
S14	5.8317	5.8318	5.8317	5.8317	-0.0001	縦	20.05	20.05	0.00	
	5.8318		5.8316				20.05	20.05	0.00	
	5.8318		5.8317				1.95	1.95	0.00	
S15	5.8311	5.8312	5.8311	5.8311	-0.0001	縦	20.00	20.00	0.00	
	5.8312		5.8311				20.05	20.05	0.00	
	5.8312		5.8311				1.95	1.95	0.00	
S16	5.8306	5.8306	5.8303	5.8303	-0.0003	縦	20.05	20.05	0.00	
	5.8307		5.8303				20.05	20.05	0.00	
	5.8306		5.8304				1.95	1.95	0.00	

表 4.5 異種金属接合試験片におけるZircaloy-4 板材の浸漬前後の重量および寸法

Zircaloy-4	No.	重量 (g)			寸法 (mm)			増減	
		浸漬前	平均	浸漬後	平均	浸漬前	浸漬後		
90℃ 10,000ppm	Z11	4.7340	4.7339	4.7341	4.7341	縦	20.00	20.00	0.00
		4.7339		4.7341		横	20.05	20.05	0.00
		4.7339		4.7341		厚さ	1.90	1.90	0.00
	Z12	4.8410	4.8411	4.8414	4.8414	縦	20.00	20.00	0.00
		4.8411		4.8414		横	20.05	20.05	0.00
		4.8411		4.8414		厚さ	1.95	1.95	0.00
50℃ 10,000ppm	Z13	4.8583	4.8583	4.8584	4.8585	縦	20.00	20.00	0.00
		4.8583		4.8585		横	20.05	20.05	0.00
		4.8584		4.8585		厚さ	1.95	1.95	0.00
	Z14	4.7843	4.7843	4.7843	4.7843	縦	20.00	20.00	0.00
		4.7842		4.7842		横	20.00	20.00	0.00
		4.7843		4.7843		厚さ	1.90	1.90	0.00
50℃ 100ppm	Z15	4.6900	4.6900	4.6901	4.6901	縦	20.05	20.05	0.00
		4.6900		4.6900		横	20.05	20.05	0.00
		4.6900		4.6901		厚さ	1.90	1.90	0.00
	Z16	4.6044	4.6044	4.6045	4.6046	縦	20.05	20.05	0.00
		4.6044		4.6046		横	20.05	20.05	0.00
		4.6043		4.6046		厚さ	1.85	1.85	0.00

表 4.6 異種金属接合試験片の浸漬前後の重量および寸法

SUS304L+Zircaloy-4 ボルトナット含め	No.	重量 (g)					
		浸漬前	平均	浸漬後	平均	増減	
90℃ 10,000ppm	No.1 S11+Z11	12.0884	12.0884	12.0892	12.0893	0.0009	
		12.0884		12.0893			
		12.0884		12.0893			
	No.2 S12+Z12	12.1806	12.1806	12.1833	12.1834	0.0028	
		12.1806		12.1834			
		12.1805		12.1834			
50℃ 10,000ppm	No.3 S13+Z13	12.2864	12.2863	12.2921	12.2921	0.0057	
		12.2863		12.2921			
		12.2863		12.2920			
	No.4 S14+Z14	12.2165	12.2165	12.2276	12.2276	0.0111	
		12.2164		12.2276			
		12.2165		12.2276			
50℃ 100ppm	No.5 S15+Z15	12.1259	12.1259	12.1274	12.1274	0.0015	
		12.1259		12.1274			
		12.1258		12.1274			
	No.6 S16+Z16	12.0359	12.0359	12.0380	12.0381	0.0022	
		12.0359		12.0381			
		12.0358		12.0381			

表 4.7 試験溶液の浸漬試験前後における pH と導電率

浸漬条件	No.	pH		導電率, S/m (温度, °C)	
		浸漬前	浸漬後	浸漬前	浸漬後
90°C 10,000ppm Cl ⁻	No.1	7.00	7.77	2.60 (85.0)	2.90 (82.8)
	No.2			0.77	0.30
50°C 10,000ppm Cl ⁻	No.3	7.00	8.55	2.72 (46.7)	2.75 (46.1)
	No.4			1.55	0.03
50°C 100ppm Cl ⁻	No.5	7.06	6.67	0.0358 (45.5)	0.0383 (45.5)
	No.6			-0.39	0.0025

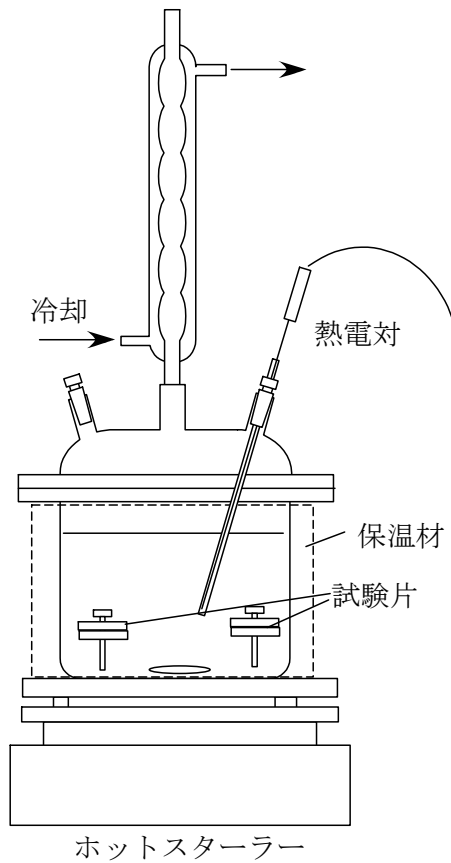


図 4.1 異種金属接触試験片を用いた人工海水浸漬試験 (模式図)



図 4.2 浸漬試験の外観(左:浸漬試験 No.5,6、中央:浸漬試験 No.3,4、右:浸漬試験 No.1,2)

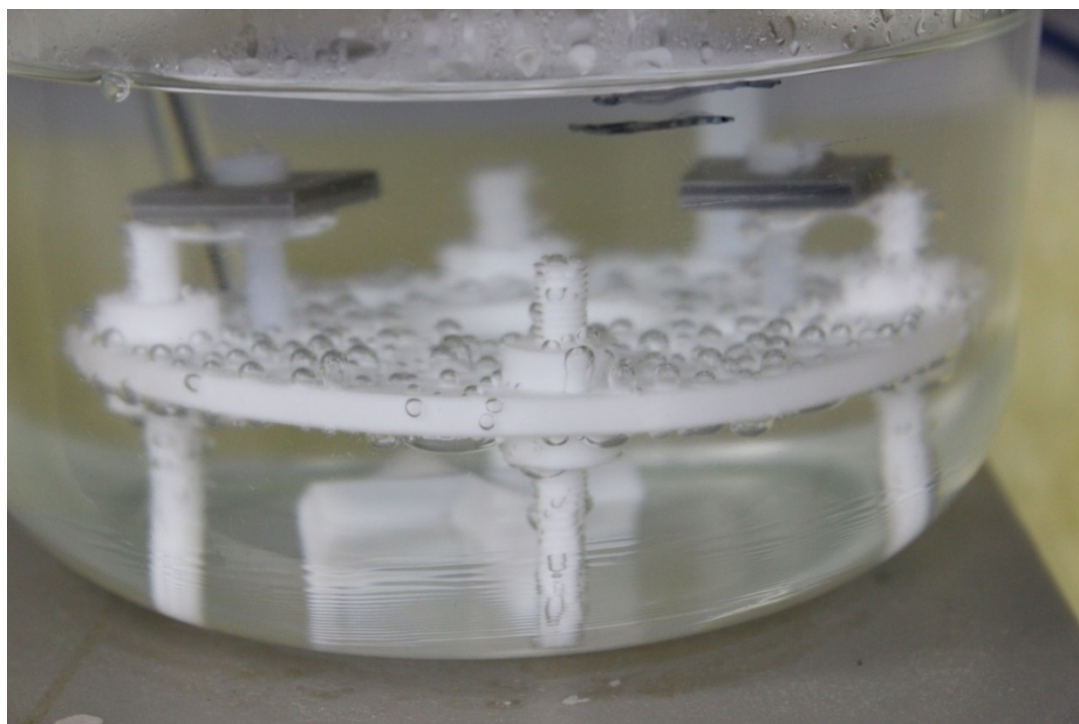


図 4.3 浸漬 24 時間後の外観(浸漬試験 No.1, 2 条件 90°C 10,000ppm Cl⁻)

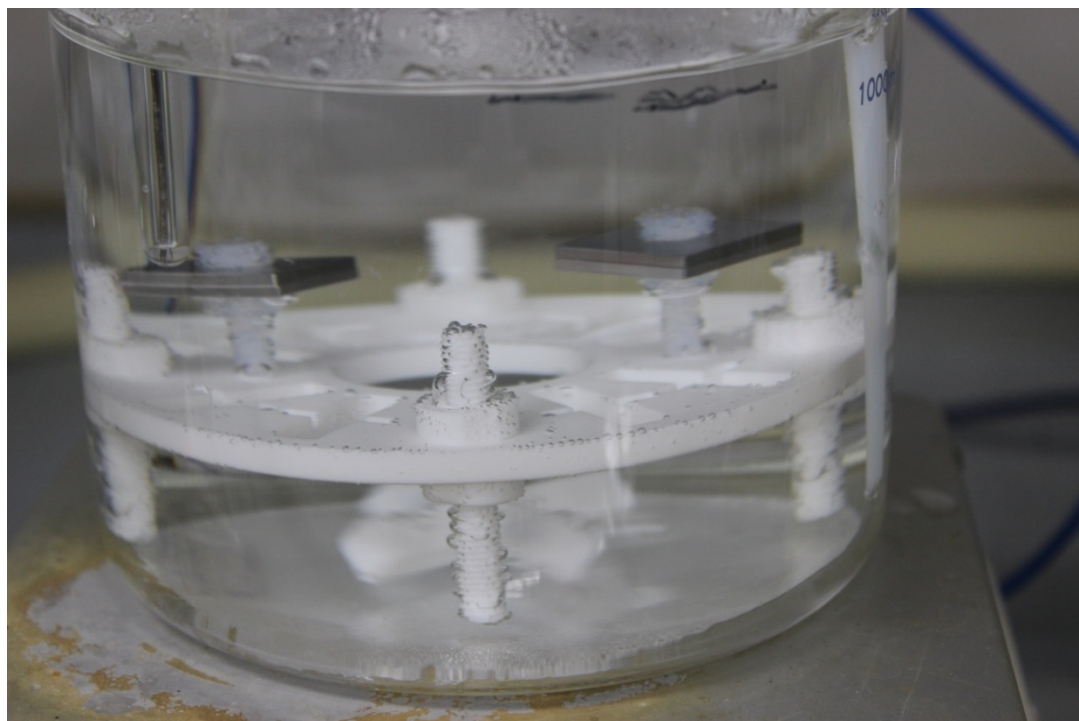


図 4.4 浸漬 24 時間後の外観(浸漬試験 No.3, 4 条件 50°C 10,000ppm Cl⁻)

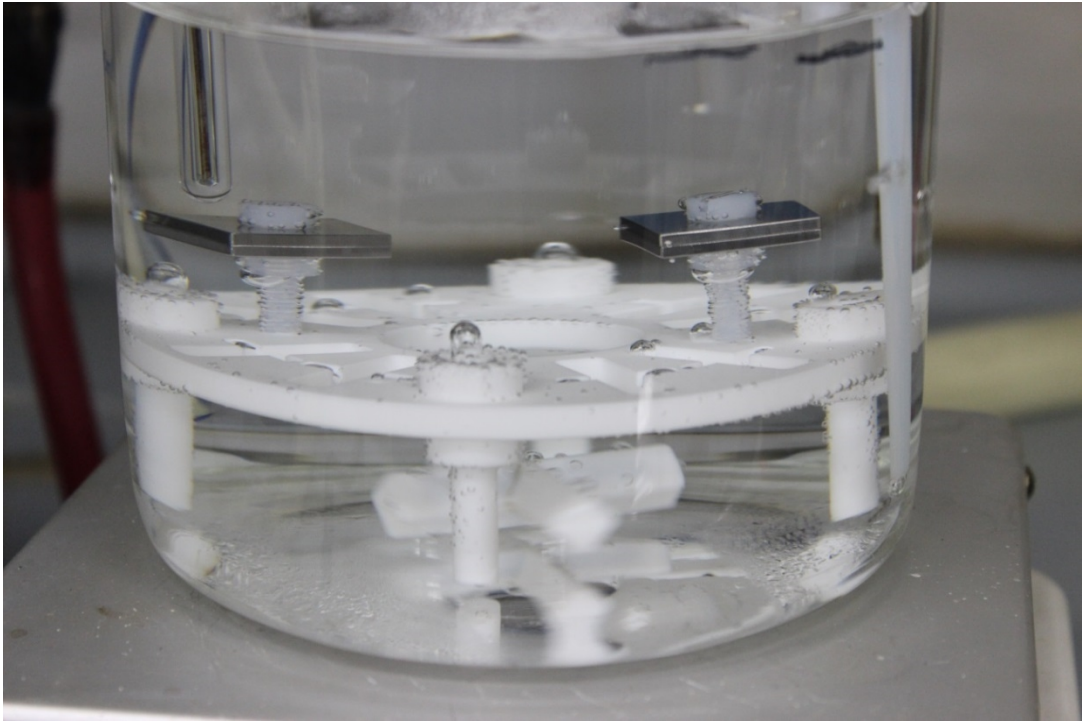


図 4.5 浸漬 24 時間後の外観(浸漬試験 No.5, 6 条件 50°C 100ppm Cl⁻)



図 4.6 浸漬試験終了後の試験溶液内の外観
(浸漬試験条件 上:90°C、10,000ppm Cl⁻、中:50°C、10,000ppm Cl⁻、下:50°C、100ppm Cl⁻)

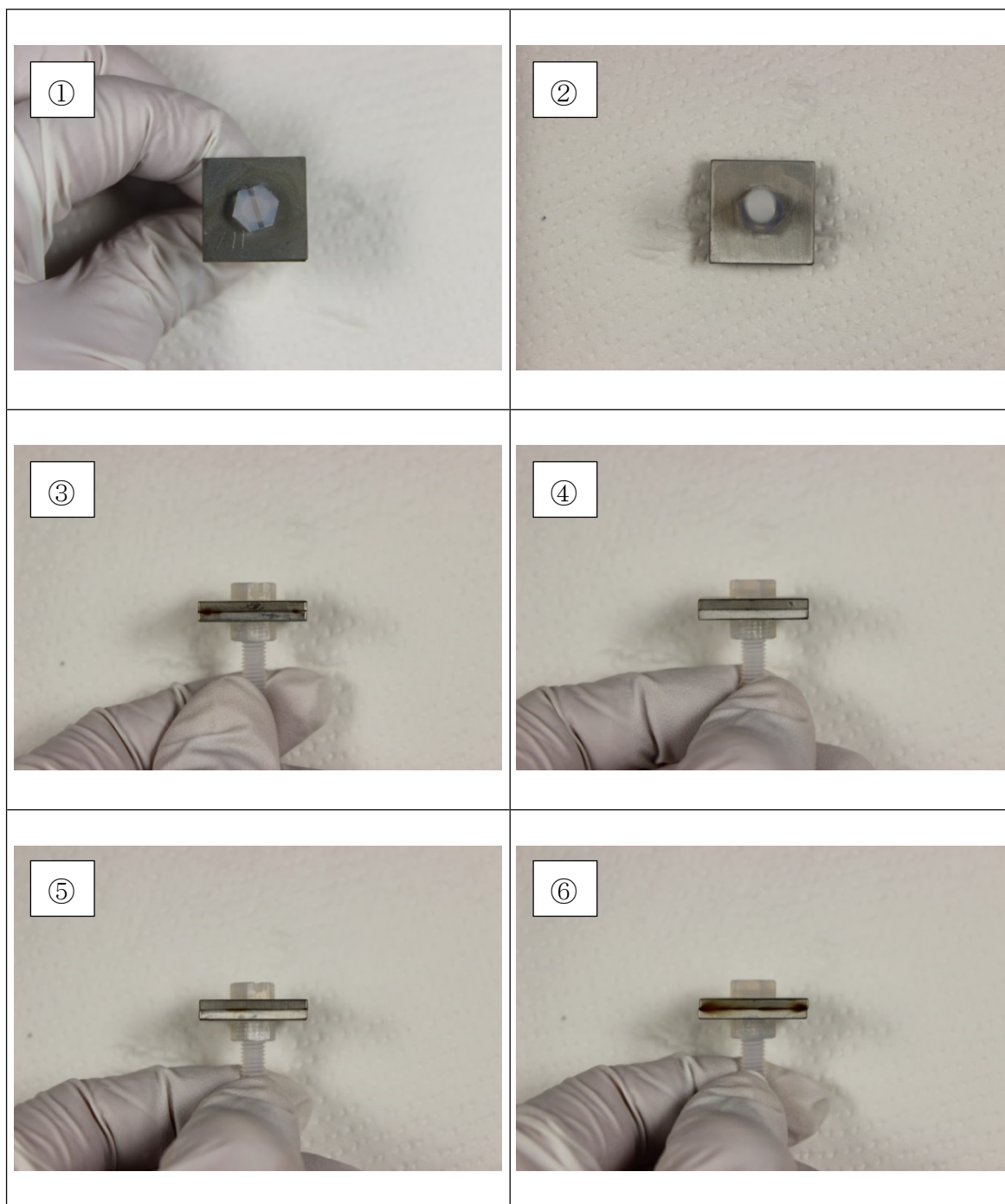


図 4.7 100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.1)

①Zircaloy-4 外側表面、②SUS304L 外側表面、③～⑥異種金属接触試験片の各側面(4 面)
 (試験条件 90℃ 10,000ppm Cl⁻ pH =7、上側:Zircaloy-4 下側:SUS304L)

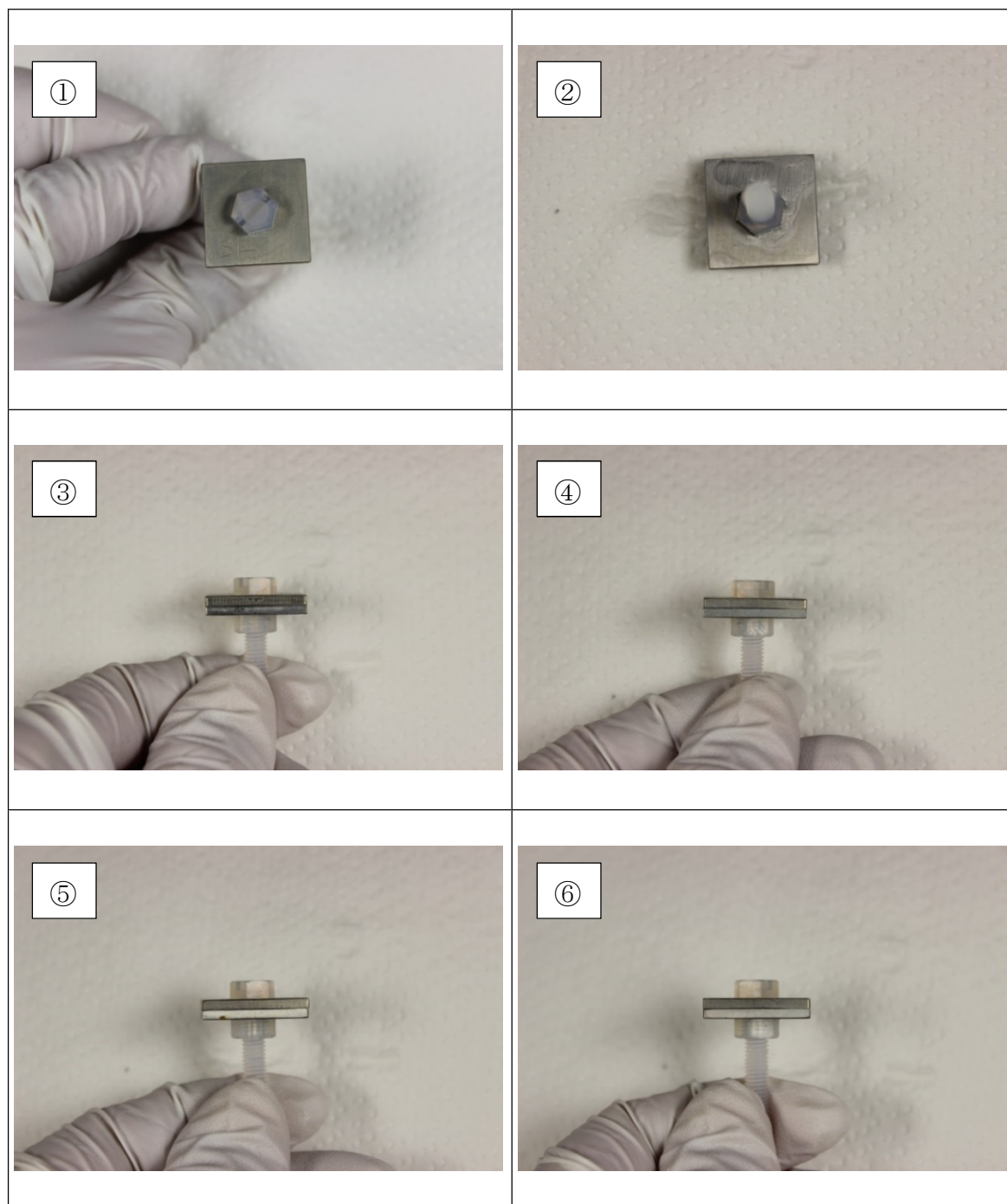


図 4.8 100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.2)
①Zircaloy-4 外側表面、②SUS304L 外側表面、③～⑥異種金属接触試験片の各側面(4 面)
(試験条件 90℃ 10,000ppm Cl⁻ pH =7、上側:Zircaloy-4 下側:SUS304L)

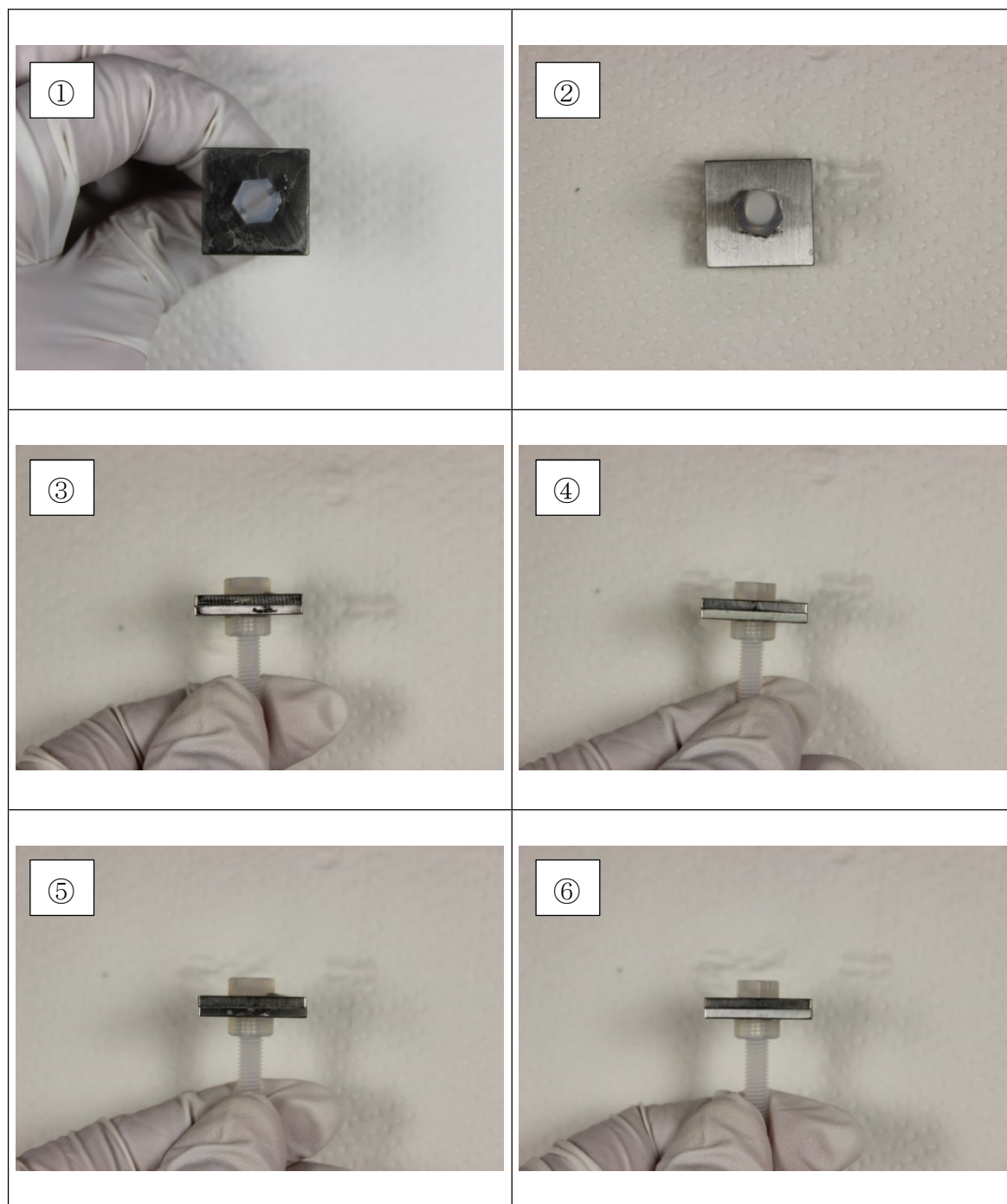


図 4.9 100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.3)
①Zircaloy-4 外側表面、②SUS304L 外側表面、③～⑥異種金属接触試験片の各側面(4 面)
(試験条件 50℃ 10,000ppm Cl⁻ pH =7、上側:Zircaloy-4 下側:SUS304L)

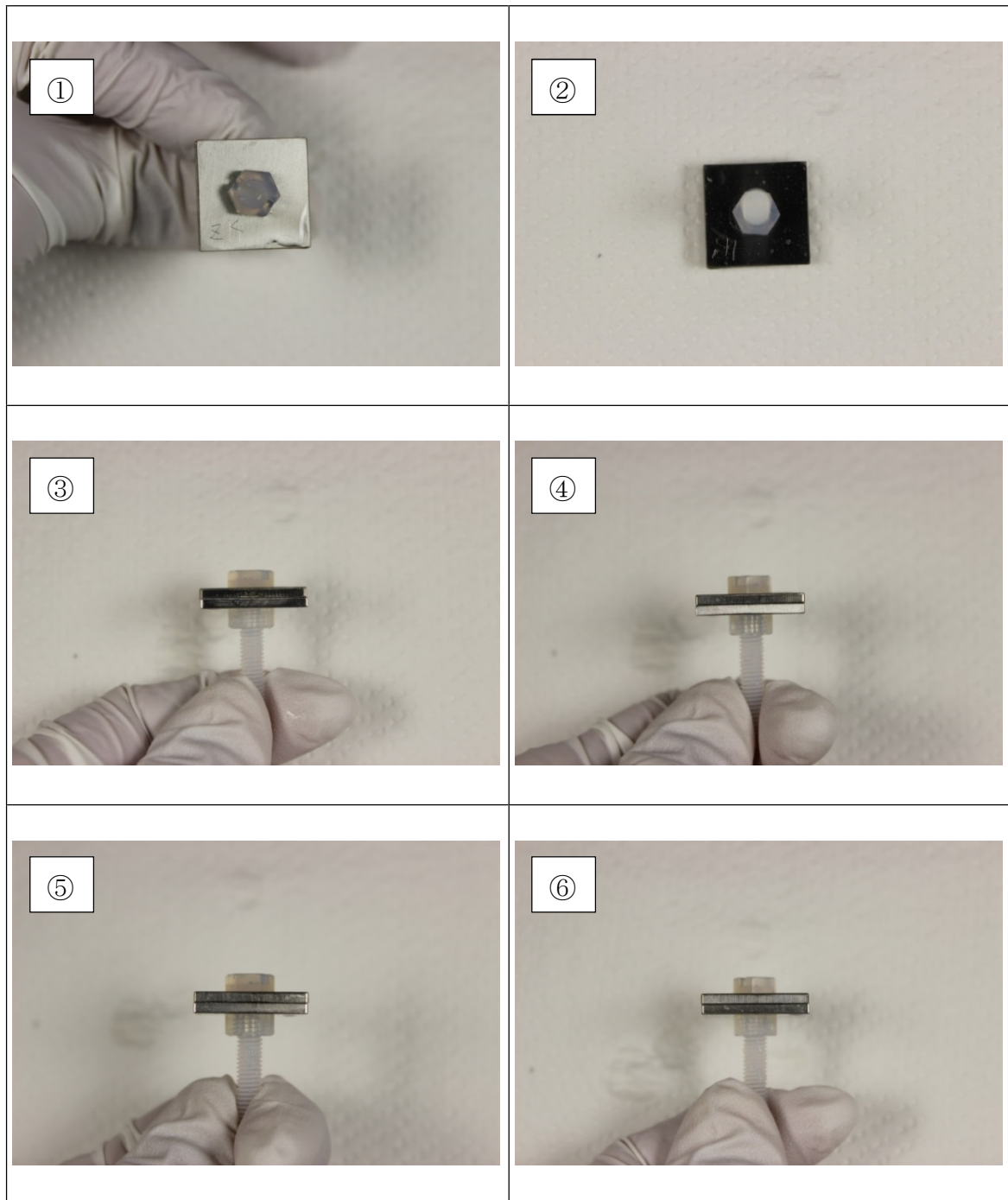


図 4.10 100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.4)
①Zircaloy-4 外側表面、②SUS304L 外側表面、③～⑥異種金属接触試験片の各側面(4 面)
(試験条件 50℃ 10,000ppm Cl⁻ pH =7、上側:Zircaloy-4 下側:SUS304L)

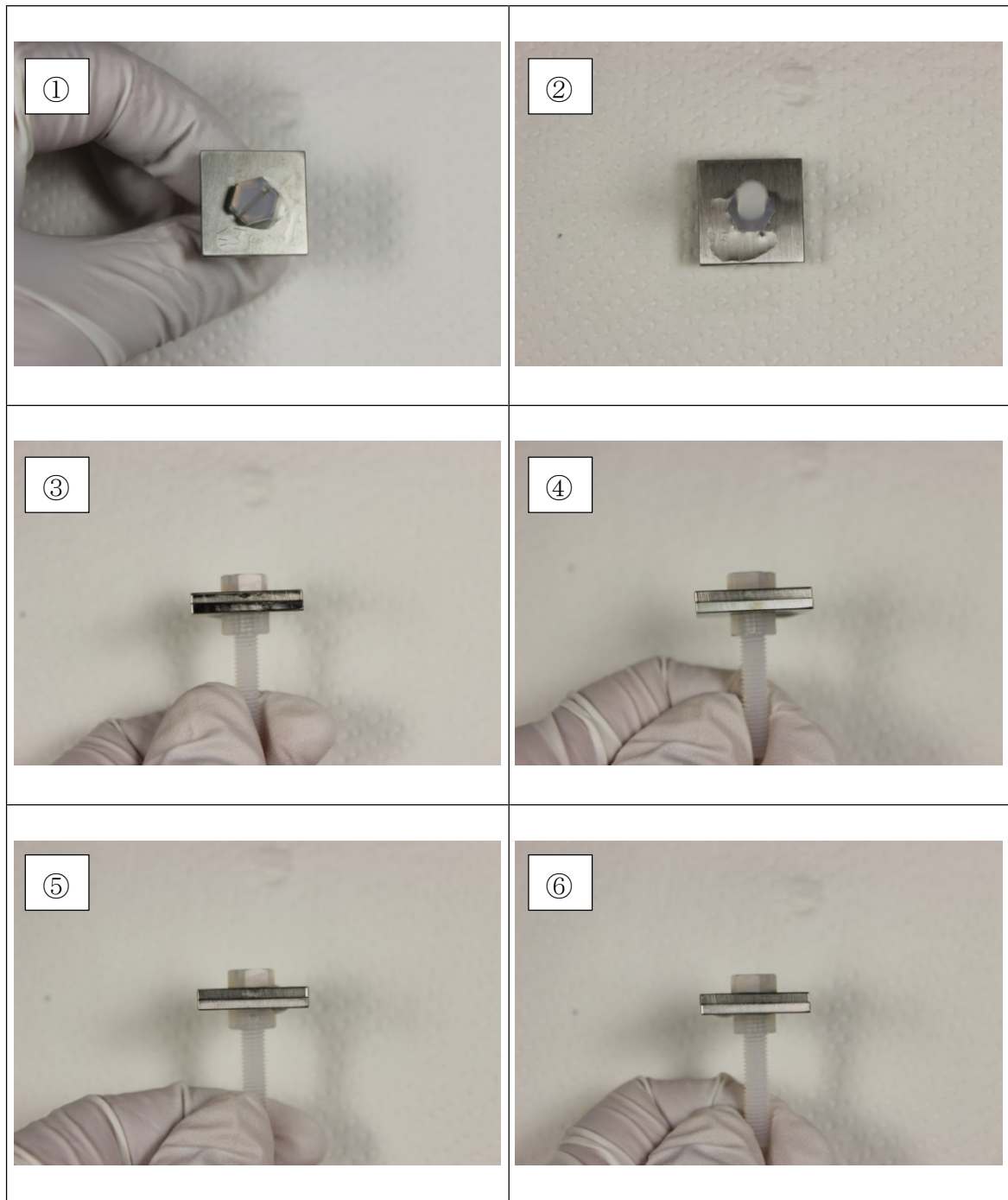


図 4.11 100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.5)
①Zircaloy-4 外側表面、②SUS304L 外側表面、③～⑥異種金属接触試験片の各側面(4 面)
(試験条件 50℃ 100ppm Cl⁻ pH =7、上側:Zircaloy-4 下側:SUS304L)

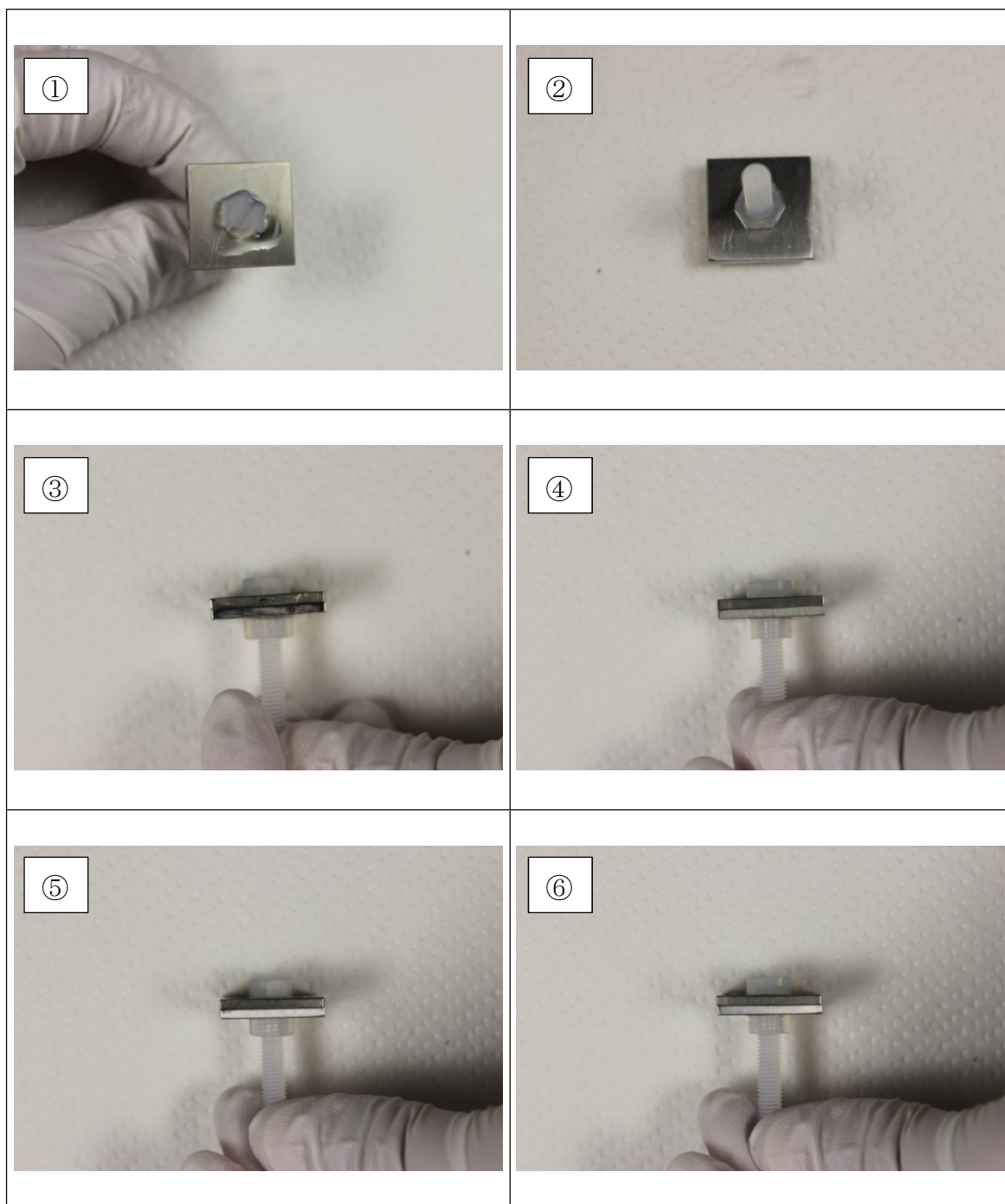


図 4.12 100 時間浸漬試験した試験片の取り出し直後の外観(浸漬試験 No.6)
①Zircaloy-4 外側表面、②SUS304L 外側表面、③～⑥異種金属接触試験片の各側面(4 面)
(試験条件 50°C 100ppm Cl⁻ pH =7、上側:Zircaloy-4 下側:SUS304L)



図 4.13 100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観（浸漬試験 No.1）

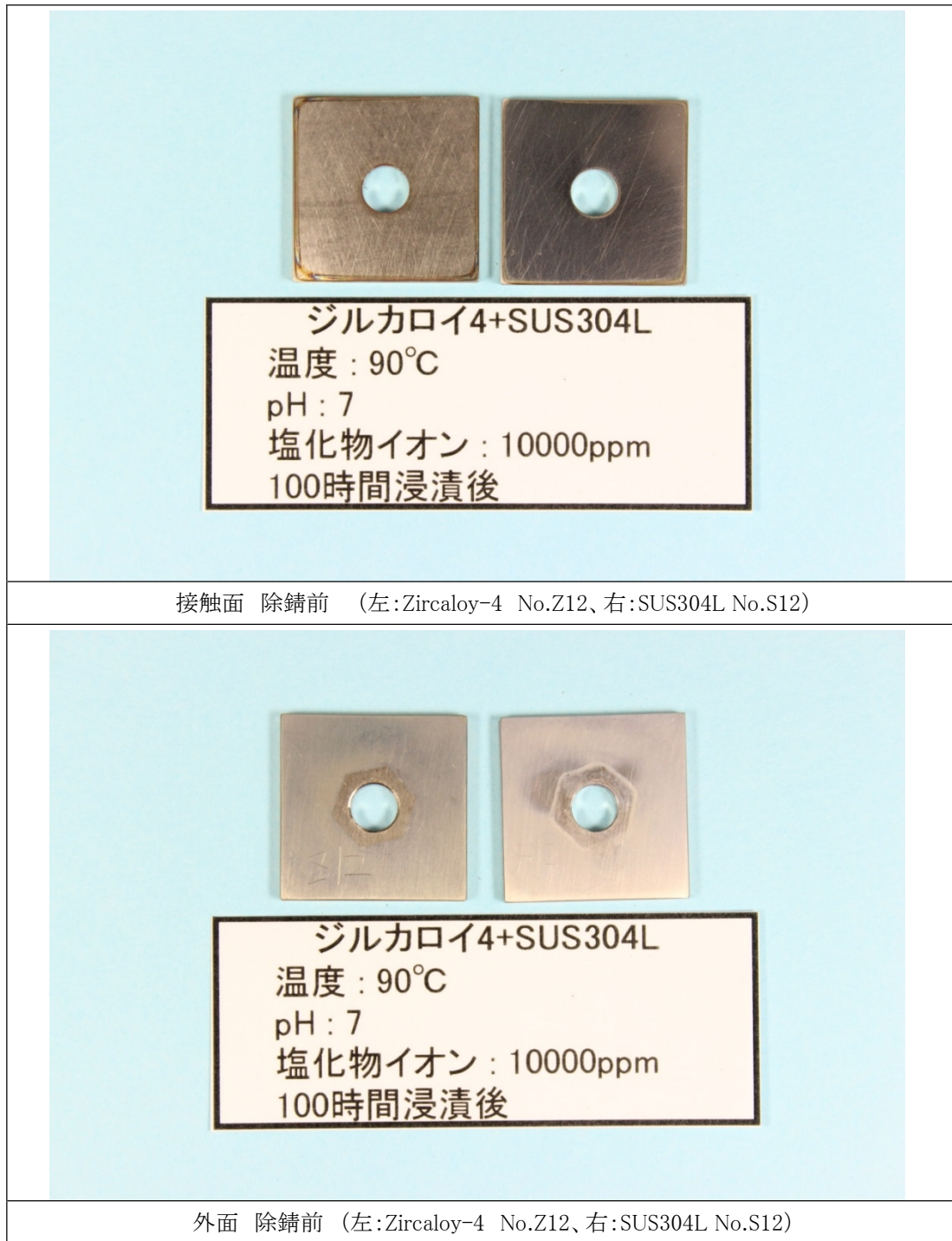


図 4.14 100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.2)

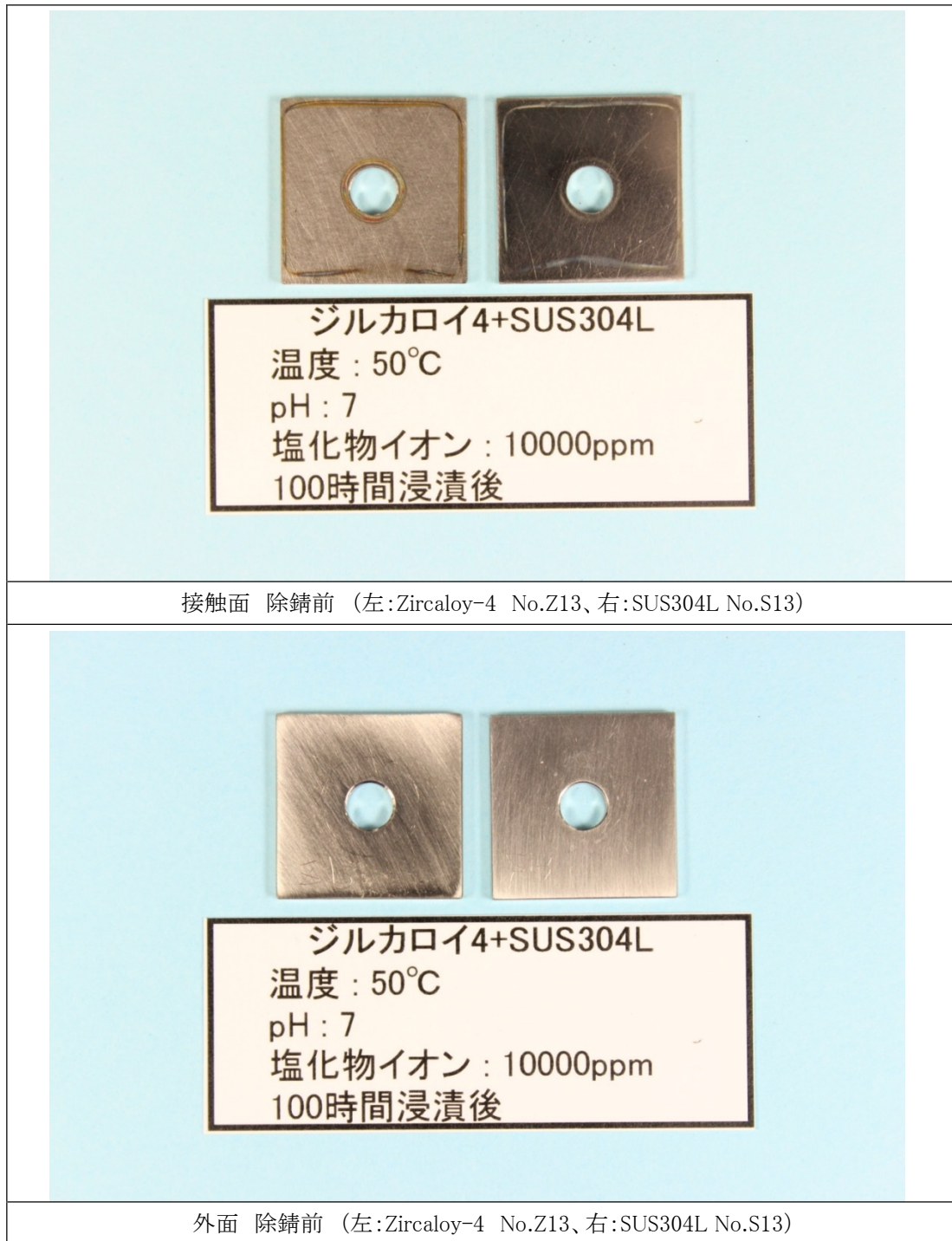


図 4.15 100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.3)

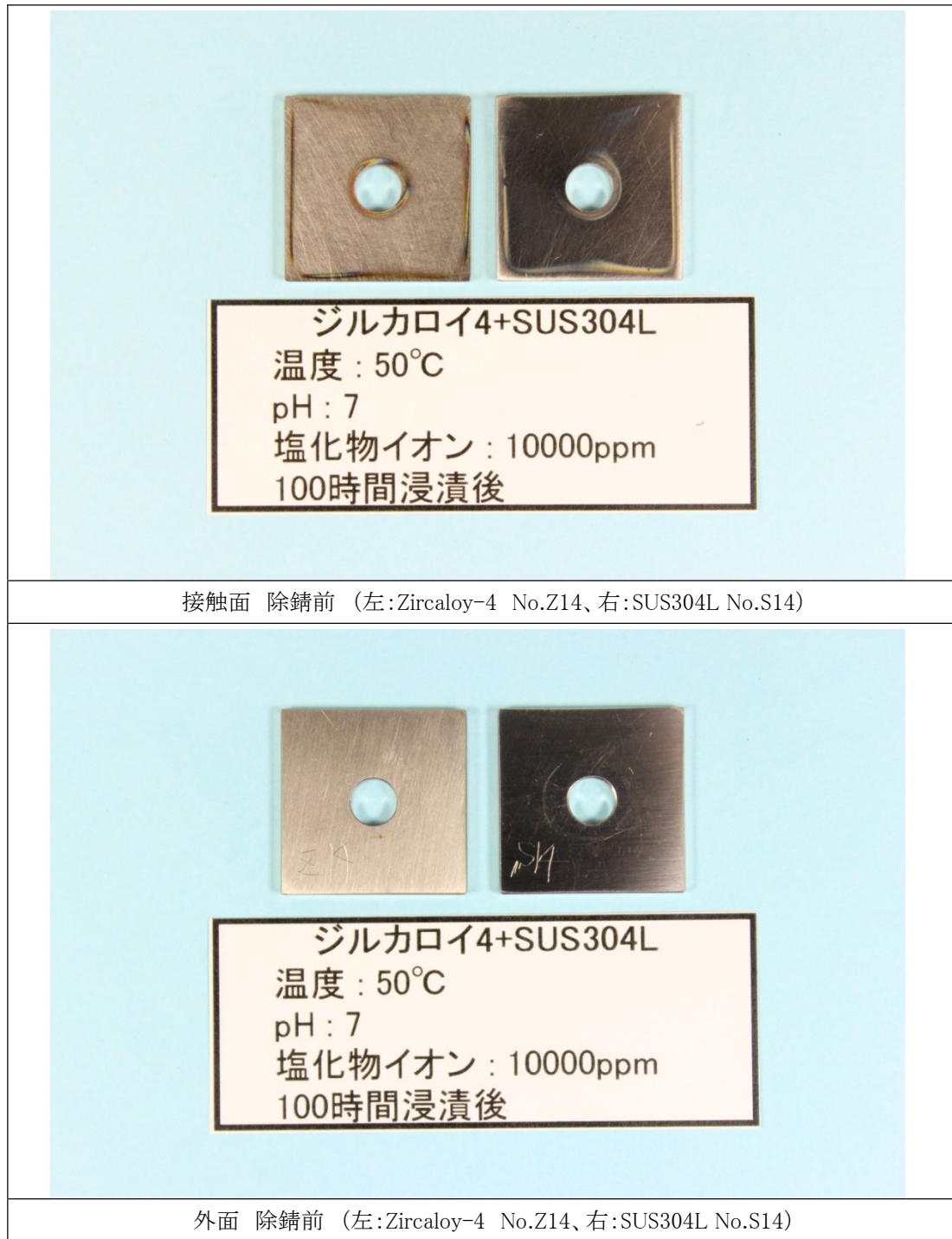


図 4.16 100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.4)

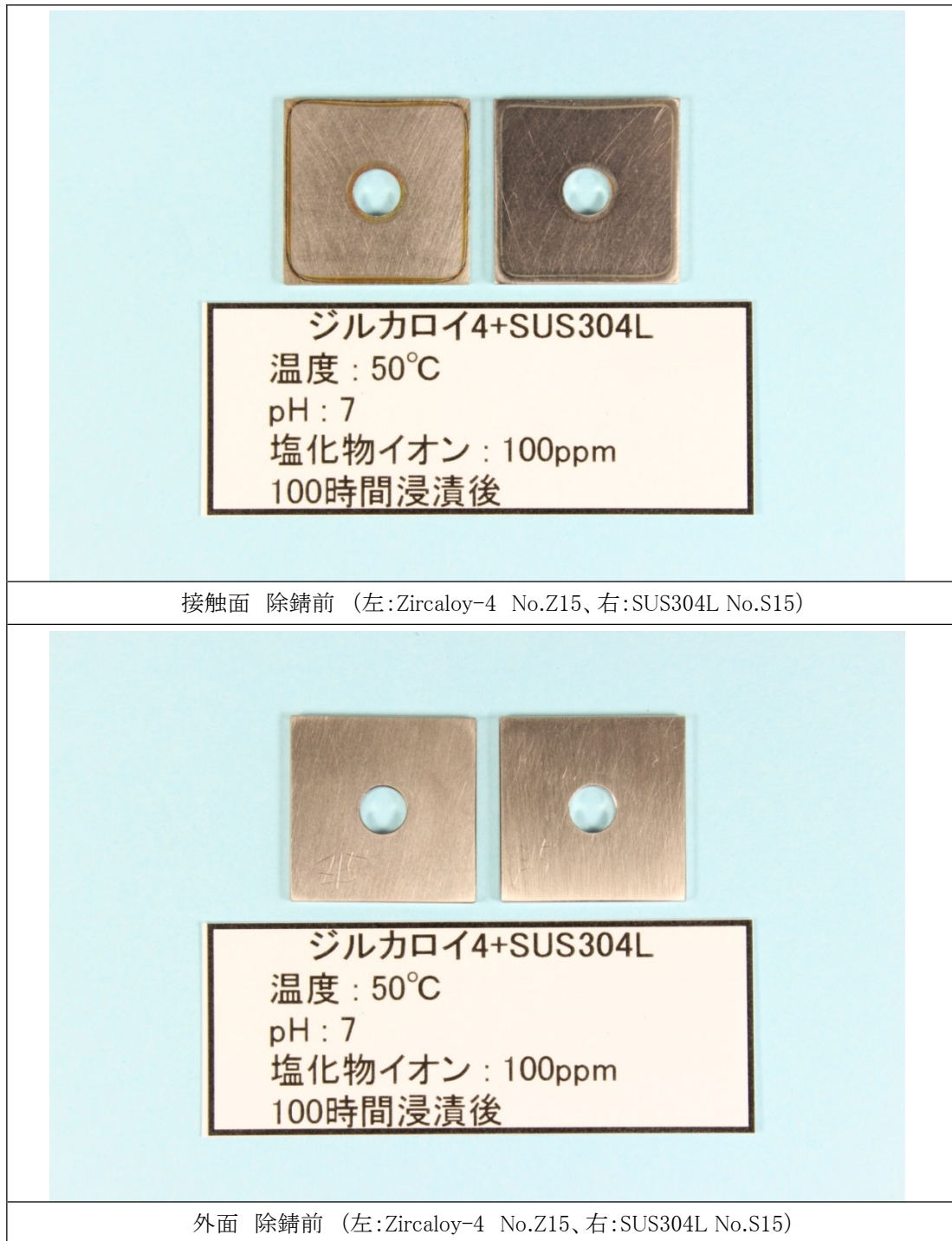


図 4.17 100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.5)

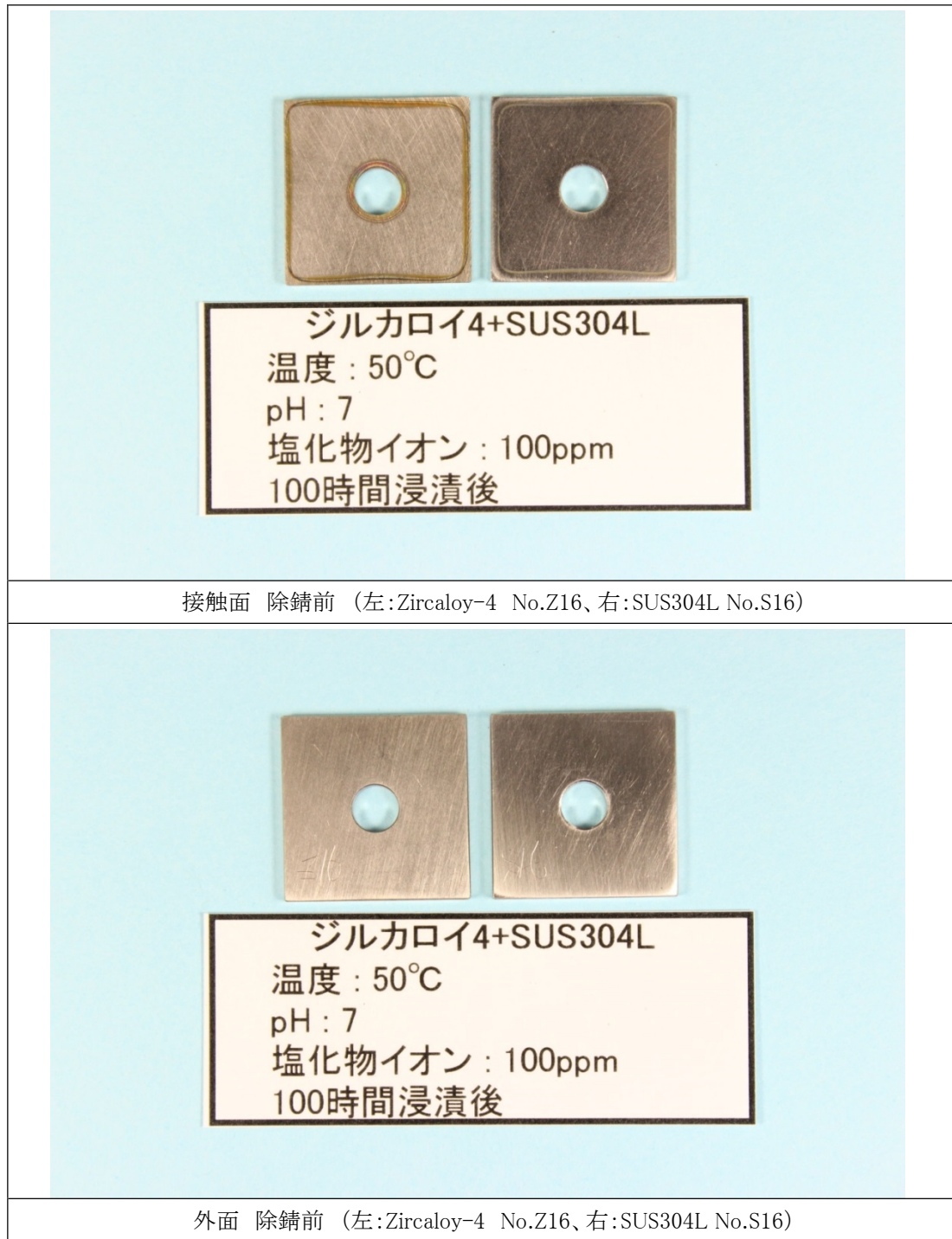


図 4.18 100 時間浸漬試験した後の試験片解体後の外観(浸漬試験 No.6)

5. まとめ

福島第一原発事故においては、SFP内のSFは、高温での希釈海水中で、かつ一部燃料については瓦礫コンクリートと共存した状態にあり、高温、高塩化物イオン濃度、高pHという、通常のSFとは異なる特異な環境を経験した。SFはSFPから取り出して共用プールに移送し長期保管される計画であることから、これまでに経験のない特異な環境を経験したSFの長期保管中における健全性評価技術を開発する必要が生じて、国プロ1-1が立ち上げられた。

国プロ1-1の研究開発は、腐食に係る長期健全性評価手法開発というこれまでに類のない挑戦的な内容であることから、機構を中心として実施する国プロ1-1の「3.長期健全性に係る基礎試験」においては、長期的な腐食挙動等をメカニズム面まで含めた基礎基盤的側面から評価・検討し、これを踏まえて考え得る技術・手法について網羅的に検討した上で様々なオプション・バックアップとして提示し、メーカーを中心としたエンジニアリング研究を基礎基盤的側面からサポートすることが重要であることを示している。このため、改めて、想定される事故シナリオと発生可能性のある腐食事象を洗い出して長期健全性評価における重要事象を抽出し、対応する長期健全性評価手法案について検討した。以下に本検討で得られた知見をそれぞれ纏める。

第2章の「FAの長期健全性に及ぼす腐食事象の同定と絞り込み」において、FAの長期健全性評価上重要かつ優先的に評価すべき部位・腐食事象を独自に選定することを目的に、SFPで経験した特異な環境によりFA構成部材において発生が懸念される腐食事象を幅広く抽出し、優先的に評価すべき部位及び腐食事象の絞り込みを行った。その結果、材料単体については「ジルカロイ-2被覆管」及び「上部支持板(ハンドル含む)」、構造部品については「上部結合端栓とロックナット」及び「下部結合端栓と下部タイプレート」の計4種類を対象とした計7種類の腐食事象について検討していくこととした。

第3章の「使用済燃料を用いた塩水浸漬試験及び強度特性評価」では、SFPで経験した特異な環境が燃料被覆管の核分裂生成物等の閉じ込め性能に与える影響の有無を確認することを目的として、使用済燃料被覆管を用いた腐食試験、強度試験を実施した。供試材は、燃焼度や被覆管材質が福島第一原発のものと同様のふげん照射ジルカロイ-2被覆管を用いた。塩水浸漬試験は、福島第一原発の使用済燃料被覆管が経験した環境条件よりも保守的と考えられる条件で実施し、試験後の各種評価から、被覆管材料の海水腐食による強度低下が無いことを実証し、プール内で長期保管した場合でも「燃料被覆管の密閉性」が保たれる見込みを示した。

第4章の「異種金属接触模擬材を用いた塩水浸漬試験による長期的な腐食挙動評価手法の検討」では、第2章で選定した評価対象部材/部位であるジルカロイ-2とステンレス鋼の異種金属接触箇所(「上部結合端栓とロックナット」及び「下部結合端栓と下部タイプレート」に対応)を対象として、長期的な腐食挙動を実験的に予測する手法の概念を検討した。また、予測手法の妥当性検証のために、異種金属接触模擬材を用いた塩水浸漬試験を予備的に実施し、本手法の妥当性を予備的に検討した。現在までに得られている試験の結果から、ステンレス鋼とジルコニウム合金で構成され、かつすきま構造を有する異種金属接触部位では、高温(90℃)・高塩化物イオン濃度(10,000ppm)の水質環境に100時間程度さらされた場合、孔食が主たる腐食形態であり、温度が高温になるほど腐食進展の可能性が高まることを確認した。これにより、腐食試験の加速条件パラメータとして、今回実施した90℃、10,000ppmの条件は概ね妥当な範囲にあり、同条件での長時間試験データの拡充により長期的な腐食挙動の予測が可能となる見込みが得られた。

参考文献

- 1) 東京電力(株)福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた研究開発計画について、available from http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/111221_01f.pdf (accessed 2013-06-14).
- 2) 東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議／事務局会議(第5回)、「資料4 中長期ロードマップ改定(案)」, 2013年6月(2013).
- 3) 東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議／事務局会議(第1回)、「(参考)平成24年度研究開発実績評価・レビュー」、2013年3月(2013),
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130328/130328_01vv.pdf
(資源エネルギー庁 HP) (ファイル名:130328_01vv.pdf、アクセス日:2013年4月13日).
- 4) 井上賢紀、浅賀健男、「福島第一原子力発電所1～4号機使用済燃料プール保管燃料集合体の水環境履歴に関する調査」, JAEA-Review 2014-020.
- 5) 廃炉・汚染水対策福島評議会(第1回)、「廃炉・汚染水対策の現況、対策の進捗状況」、2014年2月17日開催(2014).
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140217/140217_01g.pdf
(資源エネルギー庁 HP) (ファイル名:140217_01g.pdf、アクセス日:2014年2月26日).
- 6) 佐藤智徳、本岡隆文、加藤千明、山本正弘、「使用済み燃料貯蔵プール内の材料の腐食特性評価(1)ラジオリシス計算による腐食環境評価」、日本原子力学会「2012年春の年会」、福井大学文京キャンパス、2012年3月19日～21日(2012).
- 7) 軽水炉燃料のふるまい改訂第5版、公益財団法人原子力安全研究協会、2013、317p.
- 8) 一般財団法人電力中央研究所、「福島第一原子力発電所腐食対策検討会報告書—使用済燃料プールの腐食対策」、Q12801、2013年3月(2013).
- 9) 中部電力株式会社、「浜岡原子力発電所5号機における復水器細管損傷の影響の調査について(第2回中間報告)」, 2013年1月(2013),
http://www.nsr.go.jp/committee/youshikisya/hamaoka_5/20130201.html
(原子力規制委員会 HP) (ファイル名:0001_06.pdf、アクセス日:2013年9月2日).
- 10) 東京電力株式会社、「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 変更認可申請書」、2013年8月30日(2013),
http://www.nsr.go.jp/activity/earthquake/data/25/08/0830_01_02.pdf
(原子力規制委員会 HP) (ファイル名:0830_01_02.pdf、アクセス日:2013年10月11日).
- 11) J. E. Truman, The influence of chloride content, pH and temperature of test solution on the occurrence of stress corrosion cracking with austenitic stainless steel, Corrosion Science, 1977, Vol.17, pp.737-746.
- 12) 生澤佳久他, “「ふげん」照射用ガドリニア燃料集合体の照射後試験報告書(I)燃料集合体試験・燃料要素非破壊試験(技術報告)”, JNC TN8410 2003-004, (2003) 219p.
- 13) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 中間報告書, available from <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/post-1.html> (accessed 2014-03-06).
- 14) 山県一郎他, “「ふげん」燃料被覆管を用いた人工海水浸漬試験及び強度特性評価”, JAEA-Testing 2013-004, 2013, 23p.
- 15) 石野栞, “照射損傷”, 東京大学出版会, 1979, pp.202-206.
- 16) 日本金属学会, “原子力材料”, 社団法人日本金属学会, 1989, pp.101-115.
- 17) I. Muto et al, Proceedings of International Symposium on Plant Aging and Life Predictions of Corrodible Structures, NACE International (1995), pp.153-160.
- 18) 三浦健蔵, 腐食メカニズムと余寿命予測, コロナ社 2007, 158p.
- 19) 松島巖, 腐食防食の実務知識, オーム社 2002, 187p.

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량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
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	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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 ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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大きさは同一である。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	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	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 ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ 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 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 ¹¹ 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 ⁵ 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 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
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。
ベクレル	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	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ 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 ⁻⁶ m

