

平成26年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金

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

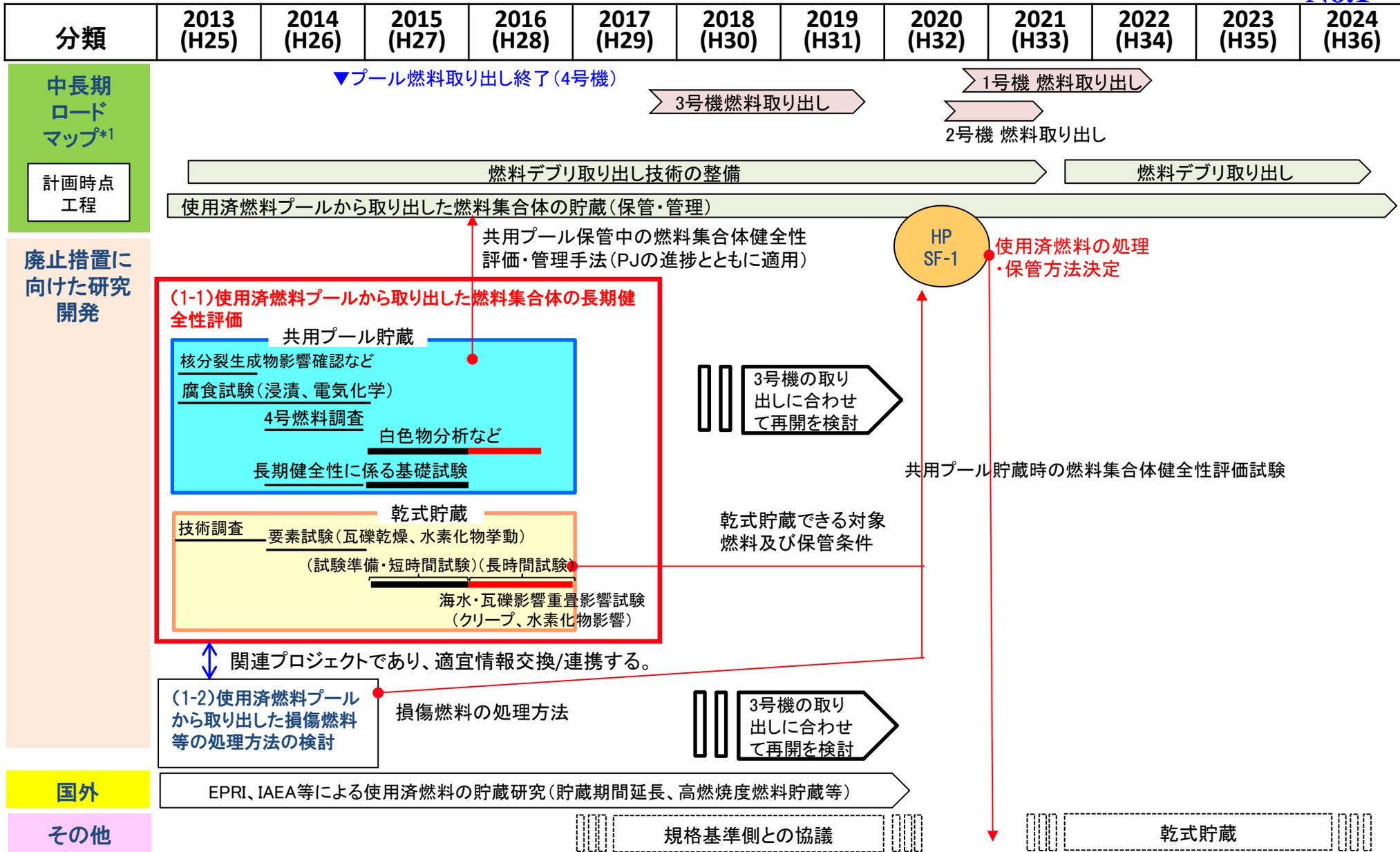
最終報告

平成29年7月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

1. 全体工程との位置づけ

No.1



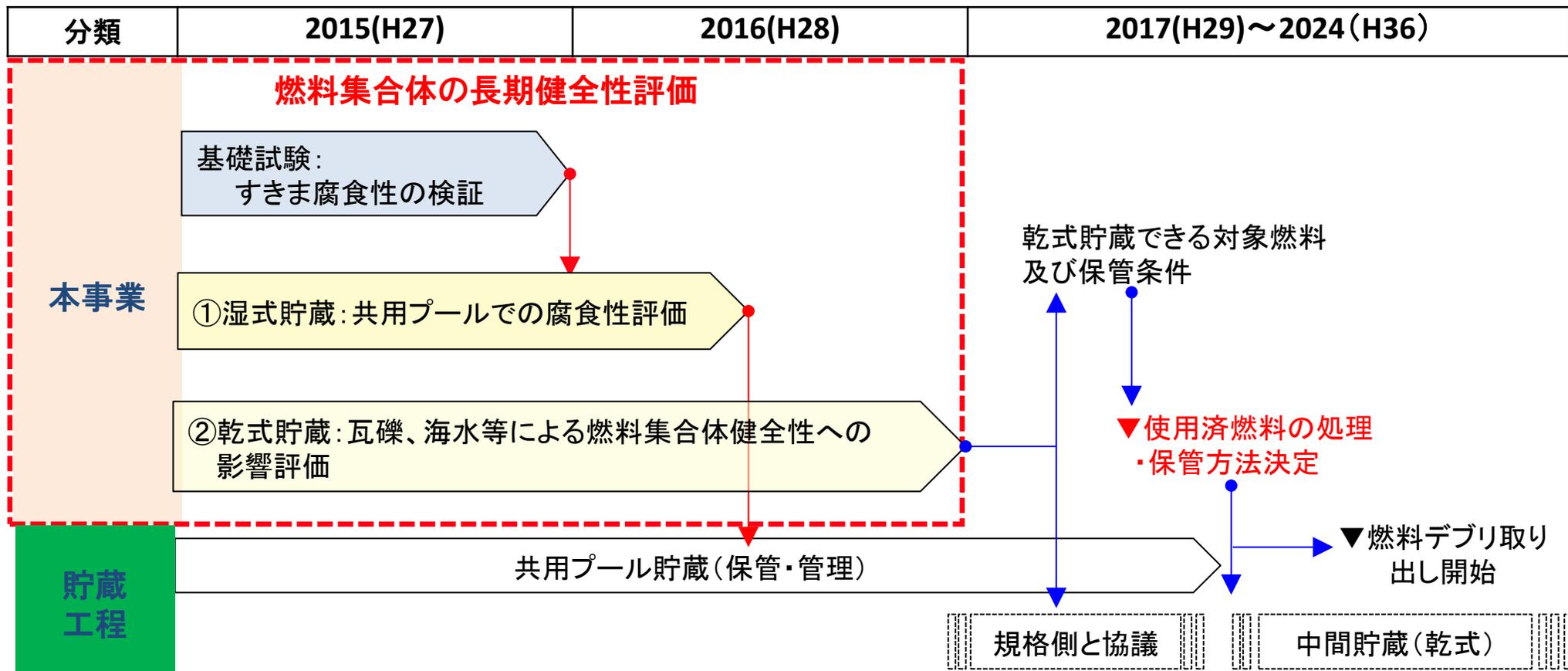
*1 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所1~4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(H27年6月)

開発内容

使用済燃料プールにおいて海水注入や瓦礫落下履歴のある燃料集合体の、共用プール(湿式)からキャスク貯蔵(乾式)に至る長期保管過程での健全性を評価する。

- ・湿式保管: 海水による白色堆積物の腐食性及び基礎試験での海水濃度変化推定に基づくすきま腐食性を評価し、共用プールで長期保管するための管理手法案を提示。
- ・乾式保管: 乾式保管時の影響因子として、水素化物析出挙動及び表面傷付与(傷、海水付着等)のクリープ特性影響を評価。また健全性確認に必要な検査手法および適用できる技術の提案。

実施スケジュール



湿式保管研究開発の目的

燃料取り出し作業に対して使用済燃料プール(SFP)の特異な環境（海水注入、瓦礫落下）の影響がないことは、4号機からの燃料取り出し作業に先立って、SFP内新燃料調査や水質模擬腐食試験等により確認されている。本研究開発の目的は、海水注入及び瓦礫混入の特異性を考慮した燃料集合体の**長期健全性評価及び長期保管方法に関する検討を行う**ことである。

1FサイトのSFPから取り出した燃料集合体の長期健全性

SFPから共用プールに移送した燃料集合体が、長期保管後に中間貯蔵／処理施設での受入れが可能であること。

- 構造健全性 ⇒ 荷重伝達経路が構造強度を満足。
- 被覆管密閉性 ⇒ 燃料被覆管からFP漏洩による影響評価（例えば乾式保管時の規格基準値以下）。

構造健全性

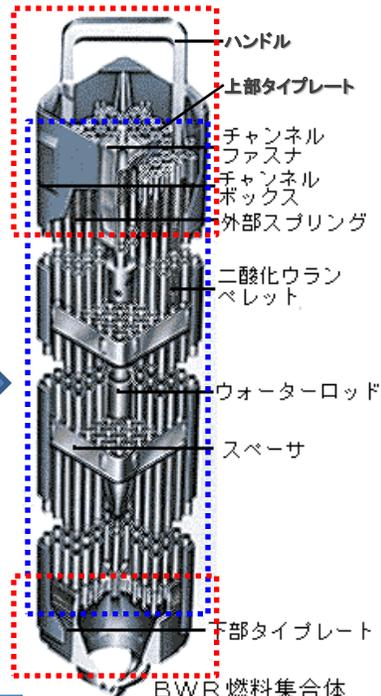
- ハンドル
- 上部タイプレート
- タイロッドボルト締結部

被覆管密閉性

- 燃料被覆管

構造健全性

- 下部タイプレート



BWR 燃料集合体

1Fサイトの燃料集合体長期健全性評価の課題

燃料集合体の長期健全性評価にあたり以下の特異性を考慮する必要がある。

- 海水注入によるSFP水質変化
 - 塩化物イオン等の海水成分混入、導電率増大
- SFPへの瓦礫混入
 - pH増加(アルカリ化)、燃料集合体の表面傷(キズ、変形等)

共用プール(湿式)保管時に懸念される事象

• 共用プール内での腐食

• 材料因子

• 炉内で使用中の照射履歴が材料特性に及ぼす影響

今後の課題: 材料の照射によるすきま腐食感受性への影響評価

• 瓦礫落下による新生面露出

模擬材を用いた試験により、新生面露出による腐食への影響はないことを確認

• 環境因子

• SFPから燃料とともに持ち込まれる瓦礫からの溶出

- 海水成分
- コンクリート成分

実燃料より採取した瓦礫の溶出試験を実施、共用プール環境で十分に希釈され、問題のないことを確認

今後の課題: SFPから取り出した燃料の白色堆積物、ねじ内面付着物の同定

• 燃料破損部からのFP溶出

FPであるハロゲン元素Iの溶出量評価を実施し、腐食に影響しない溶出量であることを確認

• 放射線による局所水質変化

基礎試験※としてγ線照射試験を行い、すきま腐食の感受性に影響のないことを確認

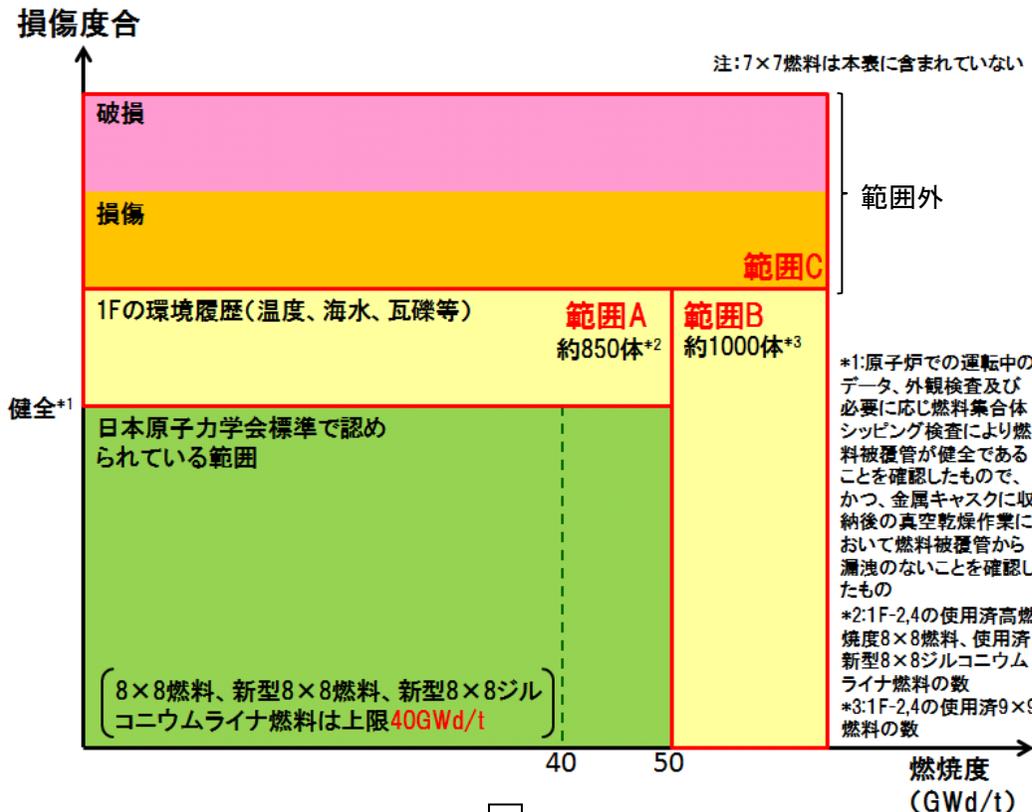
※文科省からの運営費交付金により、JAEAが実施(～平成25年度)

実機燃料等を用いた試験により実証的なデータを取得し、既存データと併せて条件を設定し1Fサイトの燃料集合体の長期健全性を評価する。また、すきま腐食感受性の各種基礎試験法の検討を行う。

3. 本プロジェクトの概要（乾式保管の長期健全性評価の考え方）

乾式保管研究開発の目的

1Fの環境履歴を有する燃料集合体を乾式保管する場合の燃料被覆管等の腐食、クリープ、水素化物再配向に及ぼす1F履歴の影響を評価する。



乾式保管の実施の際には、以下に対する検討が必要である。

1. 燃料集合体 — 研究
2. 容器 } 実工事
3. 貯蔵施設 }

このうち2. 3. の項目に関しては、具体的な計画がない状況であり、方式の決定などが判断される際に実工事の中で検討される必要がある。

燃料集合体長期健全性評価の課題

「日本原子力学会 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準2010」に示された劣化要因

	要因、因子	従来設計基準	1F特有環境の影響(推定)
附属書E (関連データ: 附属書F)	熱	附属書Nで許容される温度範囲で貯蔵する。	—
	照射	照射量が 10^{21}cm^{-2} 以上で飽和傾向を示すことから脆化の考慮は不要	—
	腐食	残留水分が10%以下(質量)の不活性ガス雰囲気にあるジルカロイは腐食を考慮不要	海水成分の影響
附属書N (関連データ: 附属書O)	クリープ	累積クリープひずみ1%を超えないように燃料被覆管温度を制限	瓦礫落下の影響 -被覆管に表面傷があった場合の影響
	水素吸収	一部仕様の材料以外は水素吸収量は400ppm以下で強度は維持される。	—
	水素化物再配向	ライナ* ¹ 有: フープ応力* ² 70MPa以下で300°C以下 ライナ* ¹ 無: フープ応力* ² 70MPa以下で200°C以下	瓦礫落下の影響 -被覆管に表面傷があった場合の影響
	照射硬化の回復	270°C以下では照射硬化の回復を考慮する必要はない。	—

*1: 燃料被覆管にジルコニウム層を内張りしたもの

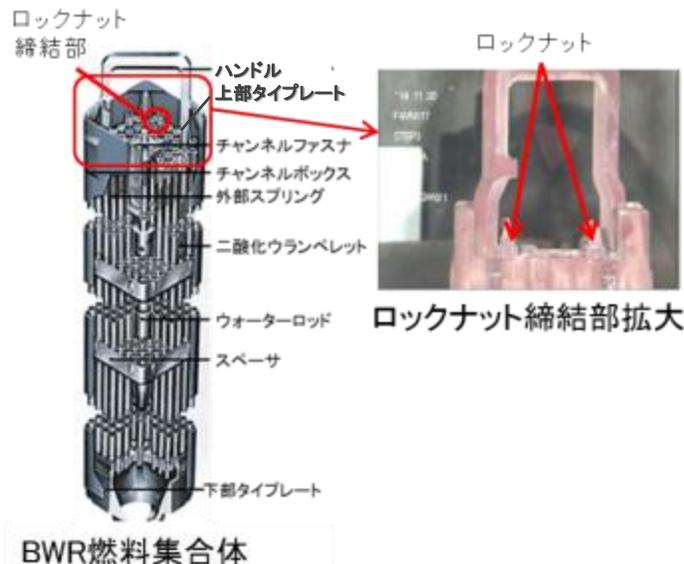
*2: 周方向応力

工程

H25	H26	H27	H28
乾式保管等に関する調査及び試験計画立案	影響確認要素試験 乾燥時瓦礫残留水分確認試験	海水・瓦礫重量影響試験 (クリープ、水素化物影響) 短時間試験	長時間試験
	水素化物析出挙動試験		

実施内容

- ・共用プールの長期保管における懸念事象である腐食について要因分析を行い、課題の抽出を実施した。抽出項目は、以下の通りであり、これらの項目に対して照射材材料調査を実施した。
 - 白色堆積物分析：燃料部材表面の堆積物の腐食影響を評価
 - 照射材を用いた電気化学的試験：中性子照射による材料特性変化が材料の腐食に与える影響の有無を評価（腐食すきま再不動態化電位測定）
 - ねじ内面付着物分析：海水成分のすきま部への取り込みの腐食影響を評価
- ・調査対象はロックナットとした。これはロックナットにも白色の堆積物が確認されていること、すきま構造を有し、かつ荷重伝達部である重要部材であることによる。平成28年度はロックナットを照射後試験施設に輸送し、上記評価試験を実施した。（全体実施内容を以下に示す。平成28年度はこのうちb、c、e、fを実施した。）



実施内容(平成28年度はb,c,e,fを実施、下線部a,dは平成27年度に実施済)

- 1.燃料部材輸送
- 【a.燃料部材輸送準備】
- a-1.1F管理区域内作業項目の検討
 - a-2.ロックナット採取/輸送容器積込作業手順の検討
 - a-3.共用プール作業のモックアップ
 - a-4.輸送計画書作成
 - a-5.輸送工程調整
- 【b.燃料部材採取、輸送容器積込】
- b-1.輸送容器搬入
 - b-2.共用プールでのロックナット採取
 - b-3.輸送容器へのロックナット積込
- 【c.燃料部材輸送】
- c-1.輸送容器(空)の1Fまでの輸送
 - c-2.輸送容器(収納物入)の照射後試験施設までの輸送

- 2.照射材材料調査
- 【d.照射後試験施設試験準備】
- d-1.材料試験条件検討
 - d-2.電気化学的試験の検討
 - d-3.試験要領書作成
 - d-4.試験工程調整
- 【e.照射材材料調査】
- e-1.白色堆積物分析
 - e-2.ねじ内面付着物分析
 - e-3.電気化学的試験（腐食すきま再不動態化電位測定）
- 【f.評価】
- f-1.各試験結果のまとめ/評価
 - f-2.共用プール水質基準案の策定

【b.燃料部材採取、輸送容器積込】(平成28年度)

b-1. 輸送容器搬入

・6/17にロックナット輸送に用いる輸送容器(空)を1Fまで輸送(c-1参照)した後、共用プール大物搬入口に移動し、キャスク搬送台車及び天井クレーンを用いて共用プール建屋3階の所定の場所に設置した。

b-2. 共用プールでのロックナット採取

・6/20～22にロックナット2個(燃料集合体番号:F4VN117)を採取し、輸送容器収納用バスケットに収納した。また、2014年(平成26年)に採取済の4個(燃料集合体番号:F4VN21,F4UN32)も合わせて、計6個を当該バスケットに収納した。

b-3. 輸送容器へのロックナット積込

・6/22に合計6個のロックナットが入った当該バスケットを輸送容器に積込んだ。輸送容器上蓋を封印した後、放管のサーベイを受け、輸送容器(収納物入*)の表面線量等が輸送上問題のないことを確認した。

【c.燃料部材輸送】

c-1. 輸送容器(空)の1Fまでの輸送

・6/17に日本核燃料開発(株)より、1Fまでロックナット輸送に用いる輸送容器(空)を輸送した。

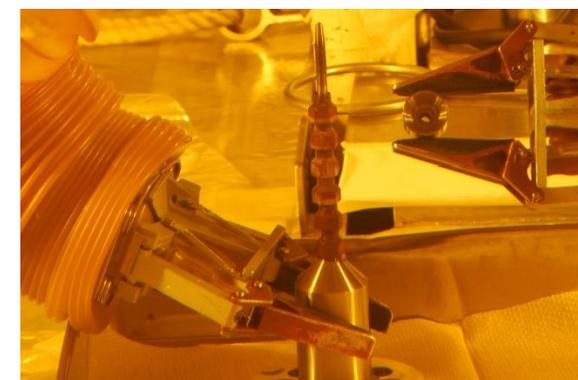
c-2. 輸送容器(収納物入)の照射後試験施設までの輸送

・6/23にロックナット6個が入った輸送容器(収納物入)を1Fから日本核燃料開発(株)まで輸送した。到着後、即日ホットラボにて輸送容器よりロックナットを取り出し、所定の個数(6個)が輸送されていることを確認した。

* 収納物: ロックナット6個

輸送したロックナット(6個)

燃料集合体番号	採取位置番号	ロックナット		外観	
		燃焼度GWd/t	採取時期		
F4VN21	J7	49.9	2014/11		
F4VN21	G9	49.9	2014/11		
F4UN32	A3	49.3	2014/11		
F4UN32	G9	49.3	2014/11		
F4VN117	C1	50.5	2016/6		
F4VN117	A7	50.5	2016/6		

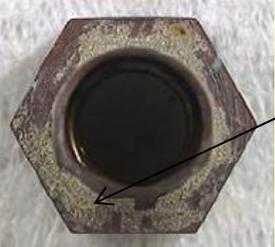
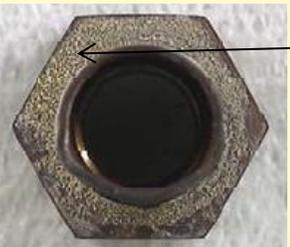
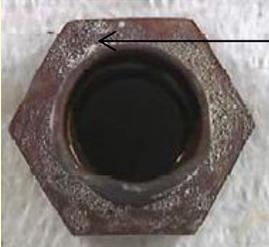
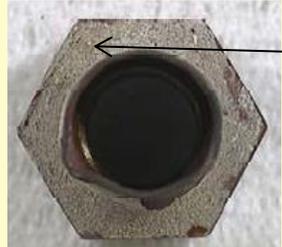


日本核燃料開発(株)ホットラボ内でのロックナット取り出し状況

【e.照射材材料調査】(平成28年度)

外観観察

- ・白色の堆積物の付着がいずれのロックナットでも観察された。
- ・付着量が多いF4VN21G9およびF4UN32A3について、白色堆積物の分析に用いた。

	上面	側面		上面	側面
F4VN21 J7		 白色堆積物	F4UN32 G9		 白色堆積物
F4VN21 G9		 白色堆積物	F4VN117 C1		 白色堆積物
F4UN32 A3		 白色堆積物	F4VN117 A7		 白色堆積物

4. 本事業の実施内容 (①燃料集合体表面の堆積物の評価)(4/11)

No.8

【e.照射材材料調査】(平成28年度)

照射材材料調査マトリックス

ロックナット				実施試験					
燃料集合体 番号	採取位置 番号	燃焼度 GWd/t	採取時期	外観		白色堆積物 の分析	ねじ内面 付着物分析	電気化学的 試験	備考
F4VN21	J7	49.9	2014/11						定常腐食電位 測定用
F4VN21	G9	49.9	2014/11			○			
F4UN32	A3	49.3	2014/11			○	○		
F4UN32	G9	49.3	2014/11					○	
F4VN117	C1	50.5	2016/6				○		
F4VN117	A7	50.5	2016/6					○	

【e.照射材材料調査】(平成28年度)

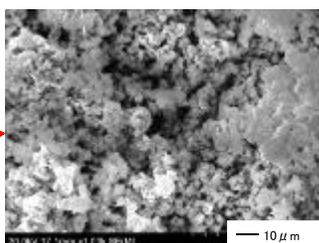
e-1. 白色堆積物分析

- 白色堆積物が目視で認められる部分の成分分析を実施。その結果、白色堆積物の構成成分としてMgが最も多く、Al、Siがその半分程度であった。Clは検出限界以下であった。Caは偏在しているのみであった。
- Fe、Oが検出されているが、これは材料表面に存在する鉄酸化物と考えられる。

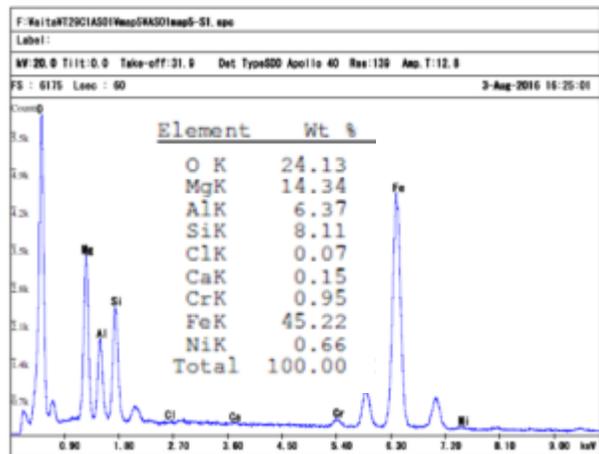
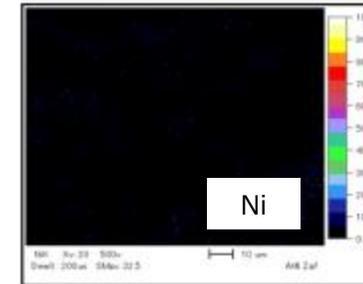
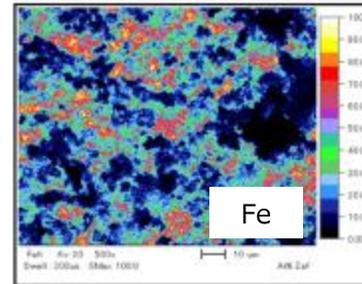
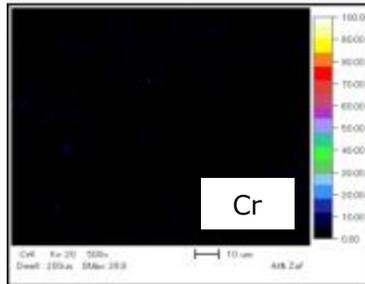
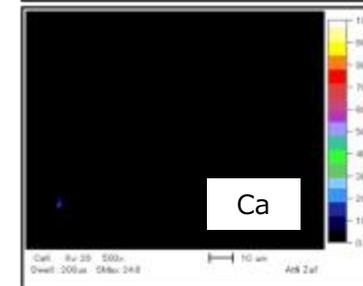
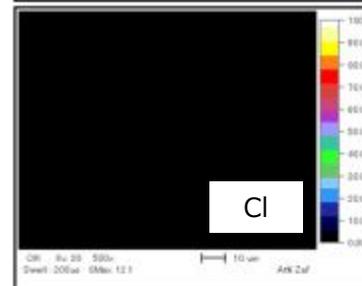
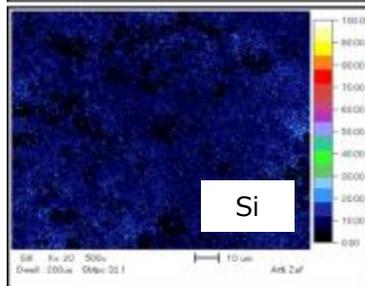
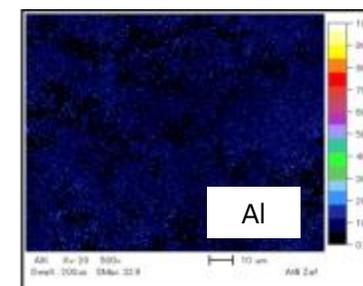
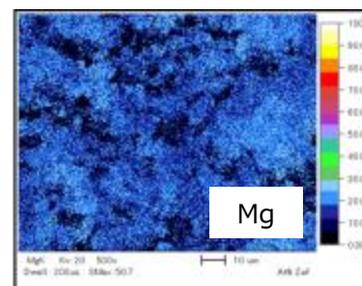
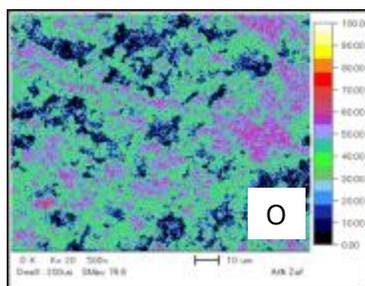


F4VN21 G9

白色堆積物が目視で認められる部分
(分析例)



SEM像



EDXによる定量分析結果

* EDX:エネルギー分散型X線分光法

元素マッピング

【e.照射材材料調査】(平成28年度)

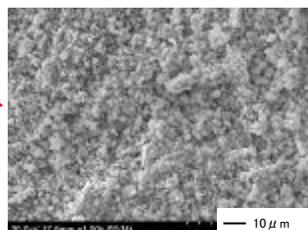
e-1. 白色堆積物分析

・白色堆積物が目視で認められない赤褐色の鉄酸化物に覆われている部分の成分分析を実施。その結果、白色堆積物が認められた部分とほぼ同様の傾向であり、Mgが主に検出された。その他にAl、Siが検出された。Caは偏在しているのみであった。Clは検出限界以下であった。

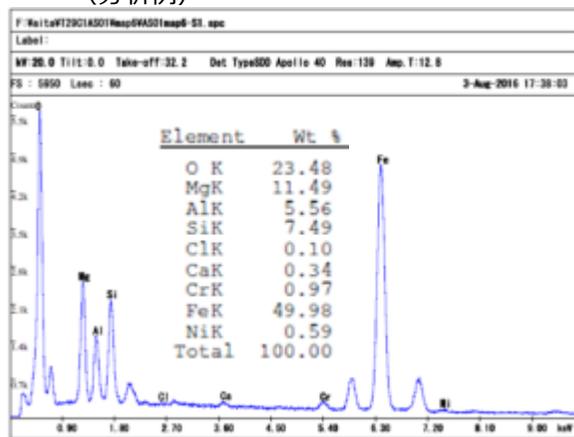
・当該部の分析結果から、目視で白色堆積物が認められない部分でも同様の堆積物の付着があると推定される。



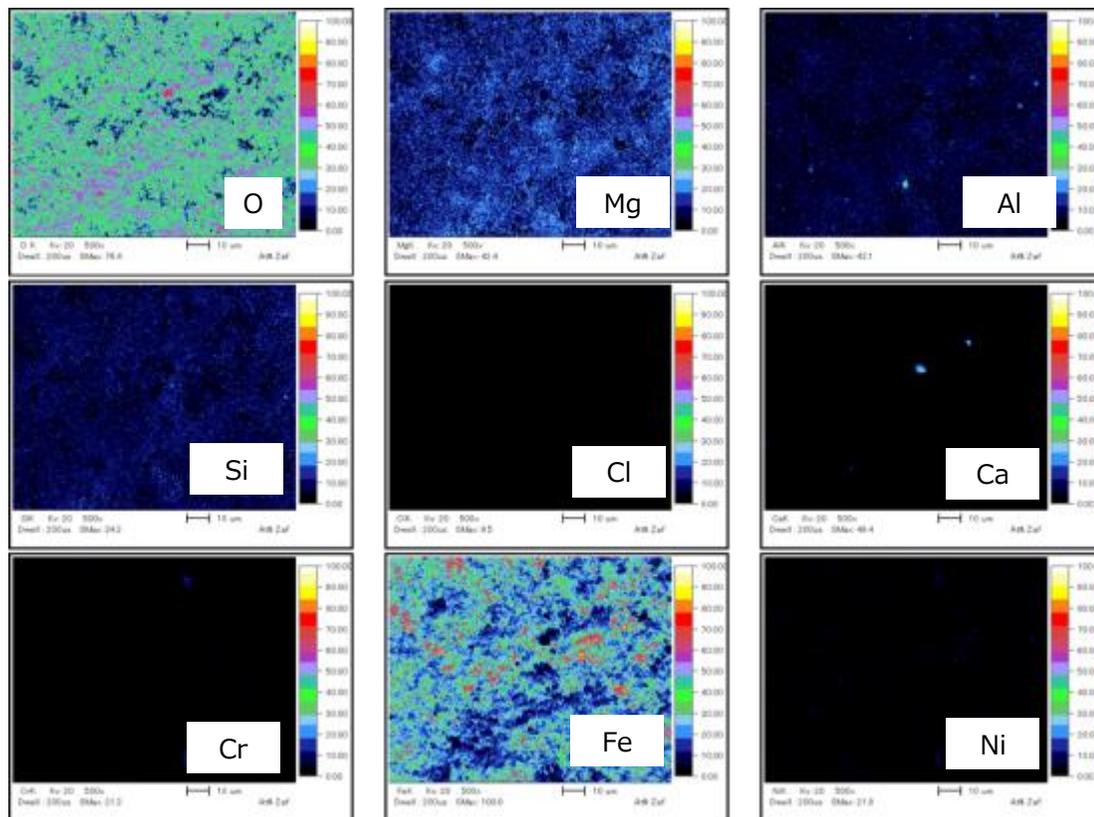
F4VN21 G9
白色堆積物が目視で認められない部分
(分析例)



SEM像



EDXによる定量分析結果
* EDX:エネルギー分散型X線分光法

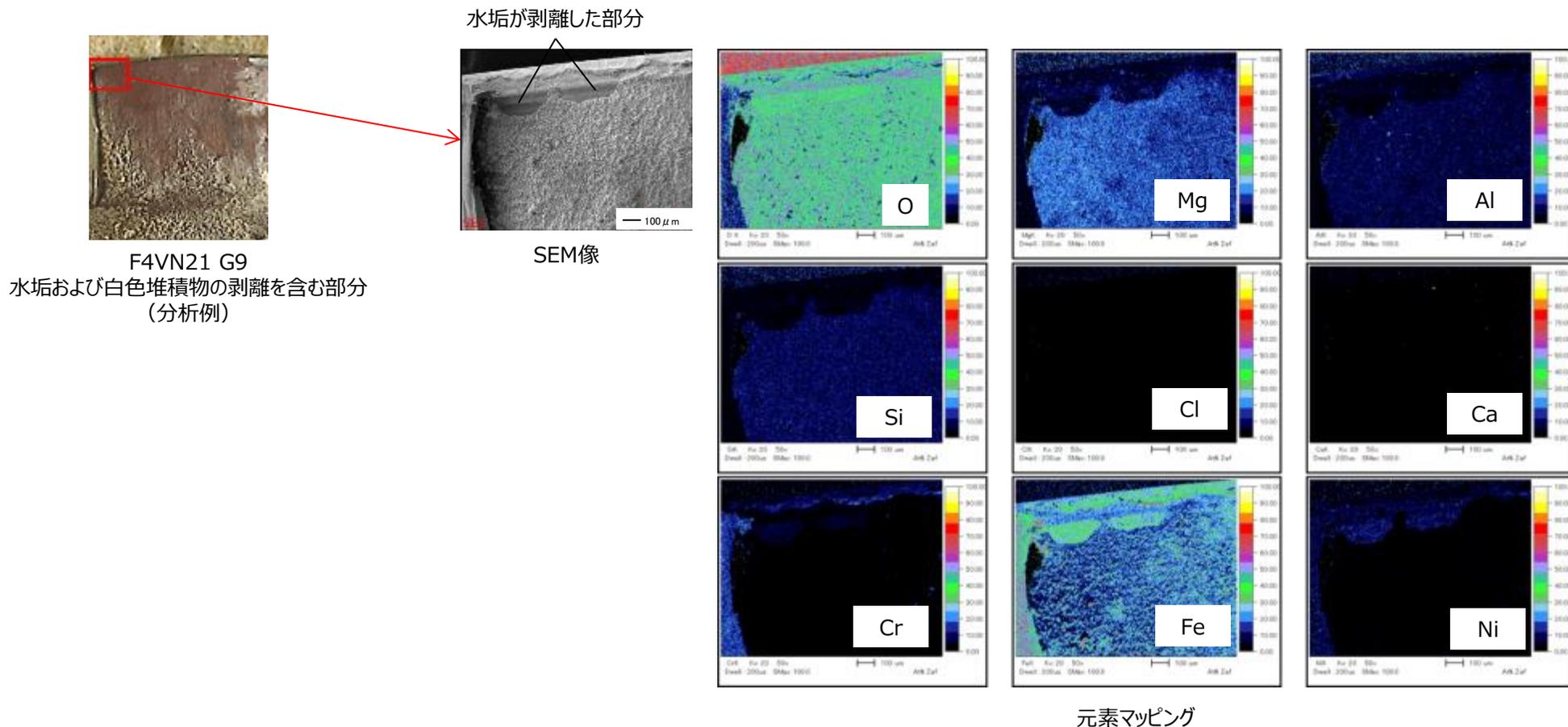


元素マッピング

【e.照射材材料調査】(平成28年度)

e-1. 白色堆積物分析

・取扱い時等に水垢および白色堆積物が剥離したと考えられる部分では、ステンレス鋼の成分であるFe、Cr、Niが検出された。一方でMg、Al、Siは認められなかった。

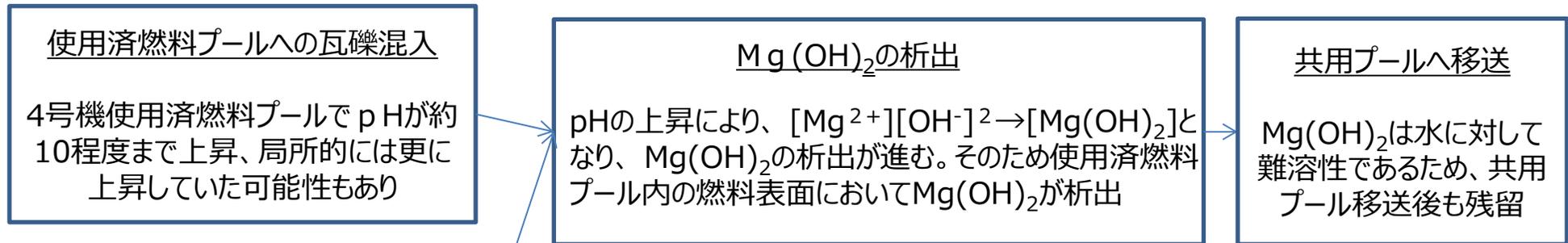


【e.照射材材料調査】(平成28年度)

e-1. 白色堆積物分析

・分析結果の考察

- －分析の結果、検出された主な成分はMgであった。Mgは海水に含まれる成分であり、白色であり、かつ難溶性である化合物としてMg(OH)₂が析出した可能性が考えられる(下記フロー)。
- －海水に多く含まれるNaClやMgCl₂等の塩化物は水に溶けやすく、白色堆積物に捕捉されることもなかったため、Clは検出されなかったものと考えらる。
- －Siについてはプール水、海水に含まれており、白色で難溶性の化合物としてSiO₂等の可能性が考えられる。Alについては白色で難溶性の化合物としてAl₂O₃、Al(OH)₃等の可能性が考えられる。

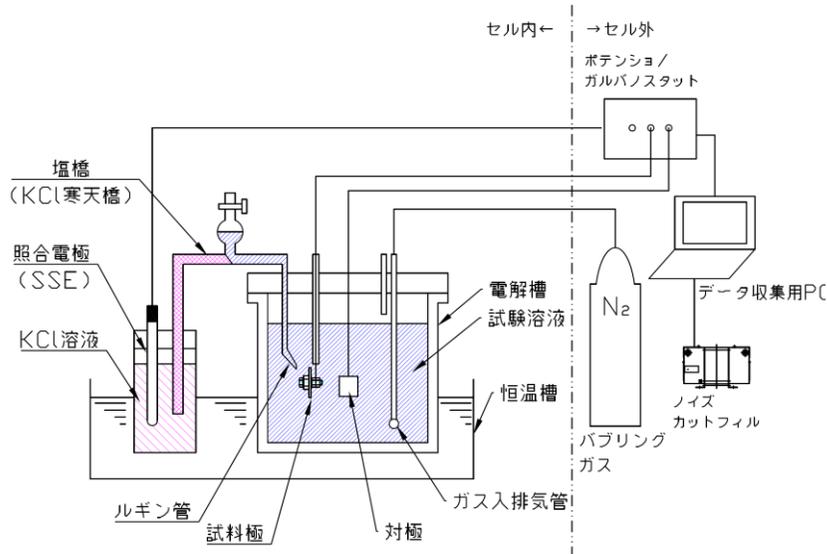


化合物	溶解度 (g / 100 g H ₂ O at 20℃)
Mg(OH) ₂	0.0009628
NaCl	35.89
MgCl ₂	54.6
SiO ₂	0.012
Al(OH) ₃	0.0001

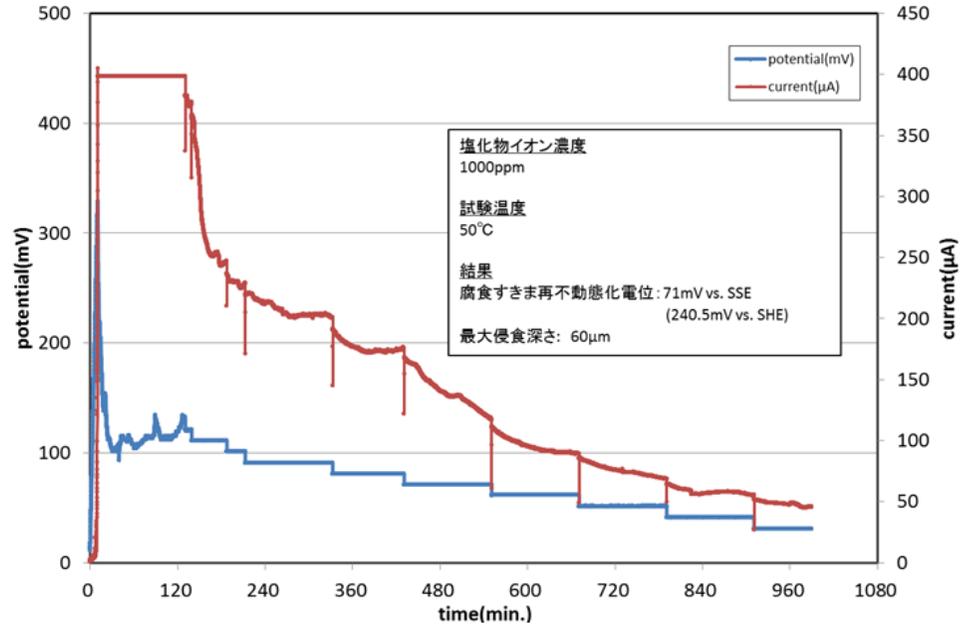
[e.照射材材料調査] (平成28年度)

e-3.電気化学的試験 (腐食すきま再不動態化電位測定)

・照射材ロックナットを用いた腐食すきま再不動態化電位測定 (塩化物イオン濃度1000、100、10ppm×3回) を実施。



試験装置構成(塩化物イオン濃度：1000ppm)



電流、電位の時間変化測定例

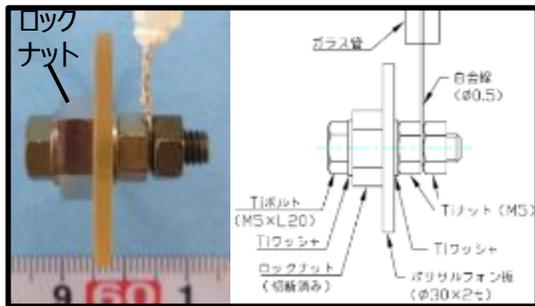
照射材ロックナット： F4VN117A7

塩化物イオン濃度： 1000ppm

試験温度： 50°C

腐食すきま再不動態化電位：

71mV vs.SSE (240.5mV vs.SHE)



ロックナットを用いた電極の組立後外観

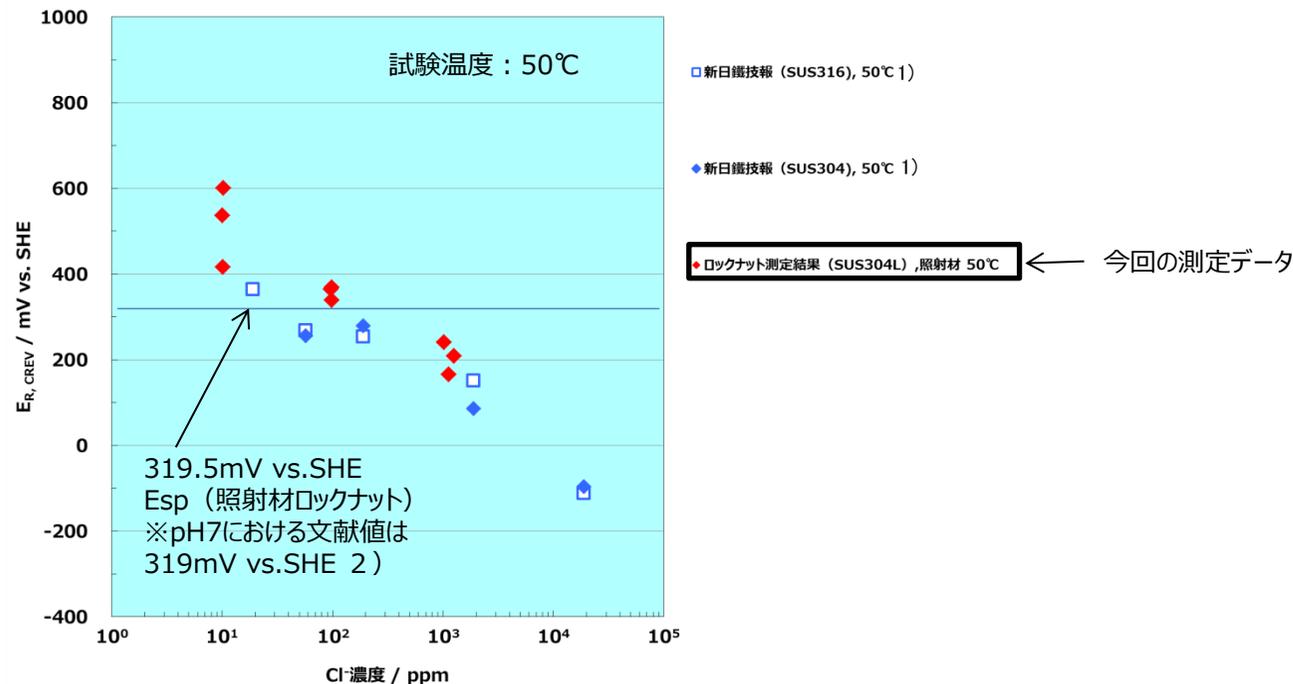
SSE：銀-塩化銀電極

SHE：標準水素電極

【e.照射材材料調査】(平成28年度)

e-3.電気化学的試験(腐食すきま再不動態化電位測定)

・照射材であるロックナットを用いた電気化学的試験により、すきま腐食感受性が発現するしきい値は、塩化物イオン濃度が100ppm程度であることが確認された。共用プールの塩化物イオン濃度は2014年度の測定結果から、1ppm以下であるため、腐食発生の可能性はない。



照射材ロックナットの腐食すきま再不動態化電位測定結果

出典:

- 1)松橋, 柘植, 田所, 鈴木, “海水系環境中におけるステンレス鋼のすきま腐食寿命推定”, 新日鐵技報第389号 (2009) 62-72.
- 2)M.Akashi, G.Nakayama, T.Fukuda: “Initiation Criteria for Crevice Corrosion of Titanium Alloys Used for HLW Disposal Overpack,” CORROSION/98 Conf., NACE International, Paper No.158(1988)

4. 本事業の実施内容（②乾式保管時の燃料集合体健全性評価（1/15））

No.16

「日本原子力学会 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準 2010」に示された劣化要因に対する現状の評価結果

	要因、因子	従来設計基準	1F特有環境の影響(推定)
附属書E (関連データ: 附属書F)	熱	附属書Nで許容される温度範囲で貯蔵する。	—
	照射	照射量が 10^{21}cm^{-2} 以上で飽和傾向を示すことから脆化の考慮は不要	—
	腐食	残留水分が10%以下(質量)の不活性ガス雰囲気にあるジルカロイは腐食を考慮不要	海水成分の影響 残留水分に対する瓦礫からの水分放出の影響
附属書N (関連データ: 附属書O)	クリープ	累積クリープひずみ1%を超えないように燃料被覆管温度を制限	瓦礫落下の影響 -被覆管に表面傷があった場合の影響
	水素吸収	一部仕様の材料以外は水素吸収量は400ppm以下で強度は維持される。	—
	水素化物再配向	ライナ*1有:フープ応力*270MPa以下で300°C以下 ライナ*1無:フープ応力*270MPa以下で200°C以下	瓦礫落下の影響 -被覆管に表面傷があった場合の影響
	照射硬化の回復	270°C以下では照射硬化の回復を考慮する必要はない。	—

* 1: 燃料被覆管に内張りしたジルコニウム層

* 2: 周方向応力

1. 目的

使用済燃料プール取り出し燃料の乾式保管適用性確認の一環として、使用済燃料プール特有の条件（海水付着、瓦礫影響）が保管時燃料集合体健全性へ及ぼす影響を、使用済燃料集合体を供試材とした模擬試験により評価する。

2. 実施内容

表面擦傷や表面付着物等の使用済燃料プール履歴由来の因子が、乾式保管時燃料集合体健全性に及ぼす影響のうち、

- ① 温度漸減過程における、水素化物の径方向への再配向等析出状態の変化およびき裂発生の有無等を調査する。→ **低延性条件試験：水素化物析出挙動確認試験**
- ② 被覆管のひずみが大きくなる条件（高温・高応力条件）下における、被覆管のクリープ破断ひずみおよびクリープ速度を調査する。→ **高ひずみ条件試験：クリープ試験**

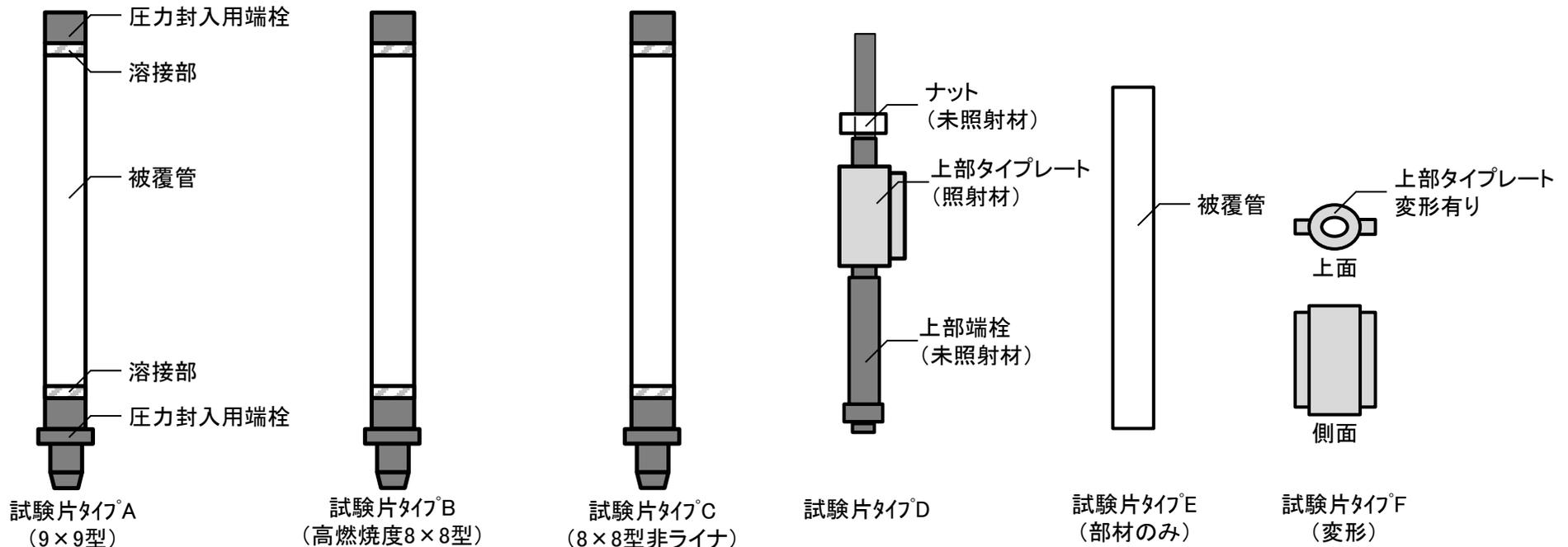
3. 実施方法

- i) 試験体製作（未照射材及び照射材採取、被覆管表面模擬表面傷加工、内圧封入等）
- ii) 加熱試験（例：400 °C等温、及び300 °Cから徐冷、等）
- iii) 加熱後材料挙動評価（腐食程度、水素化物析出挙動、クリープ挙動等、燃料集合体健全性に関する特性）

試験体製作: 試験片形状

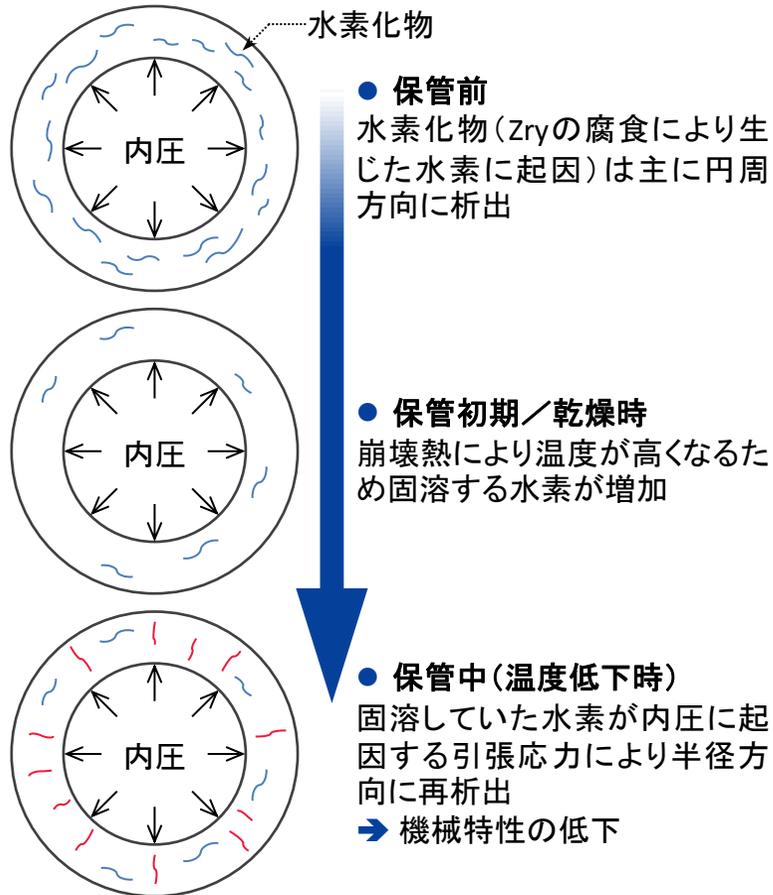
未照射	試験片タイプA	9×9型燃料被覆管
	試験片タイプB	高燃焼度8×8型燃料被覆管
	試験片タイプE	9×9型燃料被覆管(部材のみ)
照射済	試験片タイプA	9×9型燃料被覆管
	試験片タイプB	高燃焼度8×8型燃料被覆管
	試験片タイプC	8×8型非ライナ燃料被覆管
	試験片タイプD	9×9燃料上部タイププレート等
	試験片タイプF	9×9燃料上部タイププレート(変形)

9×9型燃料は8×8型燃料よりも高燃焼度化対応した燃料



低延性条件試験:水素化物析出挙動確認試験

燃料被覆管内の水素化物再配向



被覆管横断面

中間貯蔵時熱処理と被覆管中水素化物状態変化のイメージ

低延性条件試験A

目的

- 水素化物再配向における冷却速度および傷の影響調査
- 非ライナ被覆管における水素化物再配向の把握

供試材 : 9×9型被覆管, 高燃焼度8×8型被覆管, 8×8型非ライナ被覆管

冷却速度: (大), (中), (小)

付与条件: 傷A, 傷B

低延性条件試験B

目的

- 水素化物再配向における傷、海水および瓦礫固着の重畳影響調査
- 瓦礫による持込水分の影響調査
- 非ライナ被覆管における水素化物再配向の把握

供試材 : 9×9型被覆管, 高燃焼度8×8型被覆管, 8×8型非ライナ被覆管

冷却速度: (極小)

付与条件: 傷A+海水, 傷A+海水+瓦礫固着

【冷却速度および傷加工条件】

冷却速度(大): 300°C⇒室温(30°C/h)

冷却速度(中): 300°C⇒室温(3°C/h) (一部、250°Cから冷却条件を+αで実施)

冷却速度(小): 300°C⇒150°C(0.3°C/h)⇒室温まで炉冷

冷却速度(極小): 300°C⇒150°C(0.04°C/h)⇒室温まで炉冷(非ライナは200°Cから冷却)

傷A: 5kgf(燃料棒1スパン重量0.5kg×水平加速度10G)×10回(押付材:コンクリート材)

傷B: 25kgf×10回(押付材:コンクリート材)

低延性条件試験: 試験マトリクス

分類		低延性条件試験A					低延性条件試験B	
冷却速度		大		中		小	極小	
付与条件		傷A	傷B	傷A	傷B	傷A	傷A+海水	傷A+海水+固着
9×9型 ^{*1}	照射	● ^{*3}	● ^{*3}			● ^{*4}	●	●
	未照射	● ^{*3}	● ^{*3}	● ^{*3}	● ^{*3}	● ^{*4}	●	●
高燃焼度 8×8型	照射						●	●
	未照射					● ^{*4}	●	●
8×8型 非ライナ ^{*2}	照射	●				●	●	●
	未照射							

●: H27年度までに実施 / ●: H28年度に実施

*1 STEP IIよりも燃焼度の大きいSTEP IIIを中心に試験を実施

*2 ライナ被覆管と比較して水素化物析出挙動が表面傷付与の影響を受けやすいと推定される

*3 H26年度実施

*4 H27年度実施

冷却速度(大): 300°C⇒室温(30°C/h)

冷却速度(中): 300°C⇒室温(3°C/h) (一部、250°Cから冷却条件を+αで実施)

冷却速度(小): 300°C⇒150°C(0.3°C/h)⇒室温まで炉冷

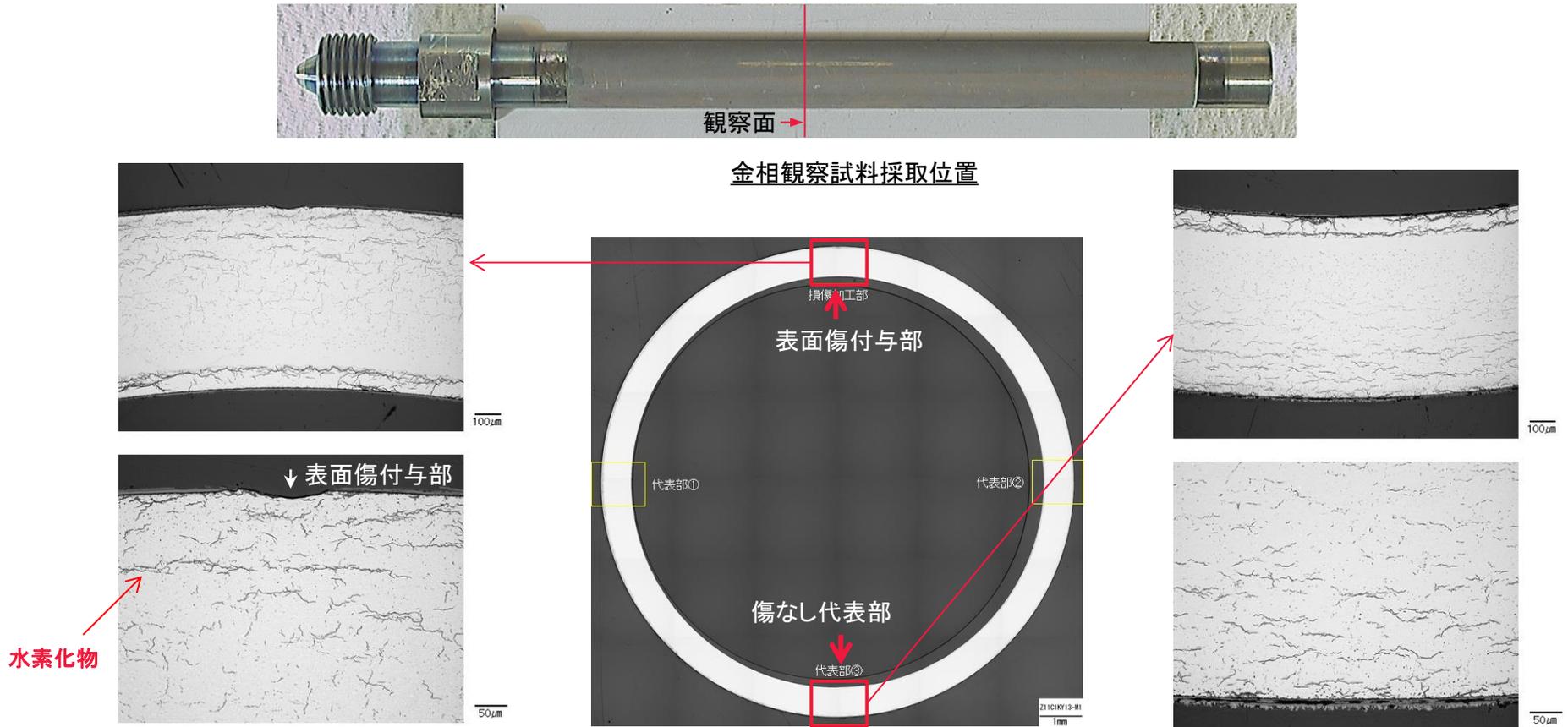
冷却速度(極小): 300°C⇒150°C(0.04°C/h)⇒室温まで炉冷(非ライナは200°Cから冷却)

傷A: 5kgf(燃料棒1スパン重量0.5kg×水平加速度10G)×10回(押付材:コンクリート材)

傷B: 25kgf×10回(押付材:コンクリート材)

低延性条件試験A:水素化物析出挙動確認試験結果例/平成27年度

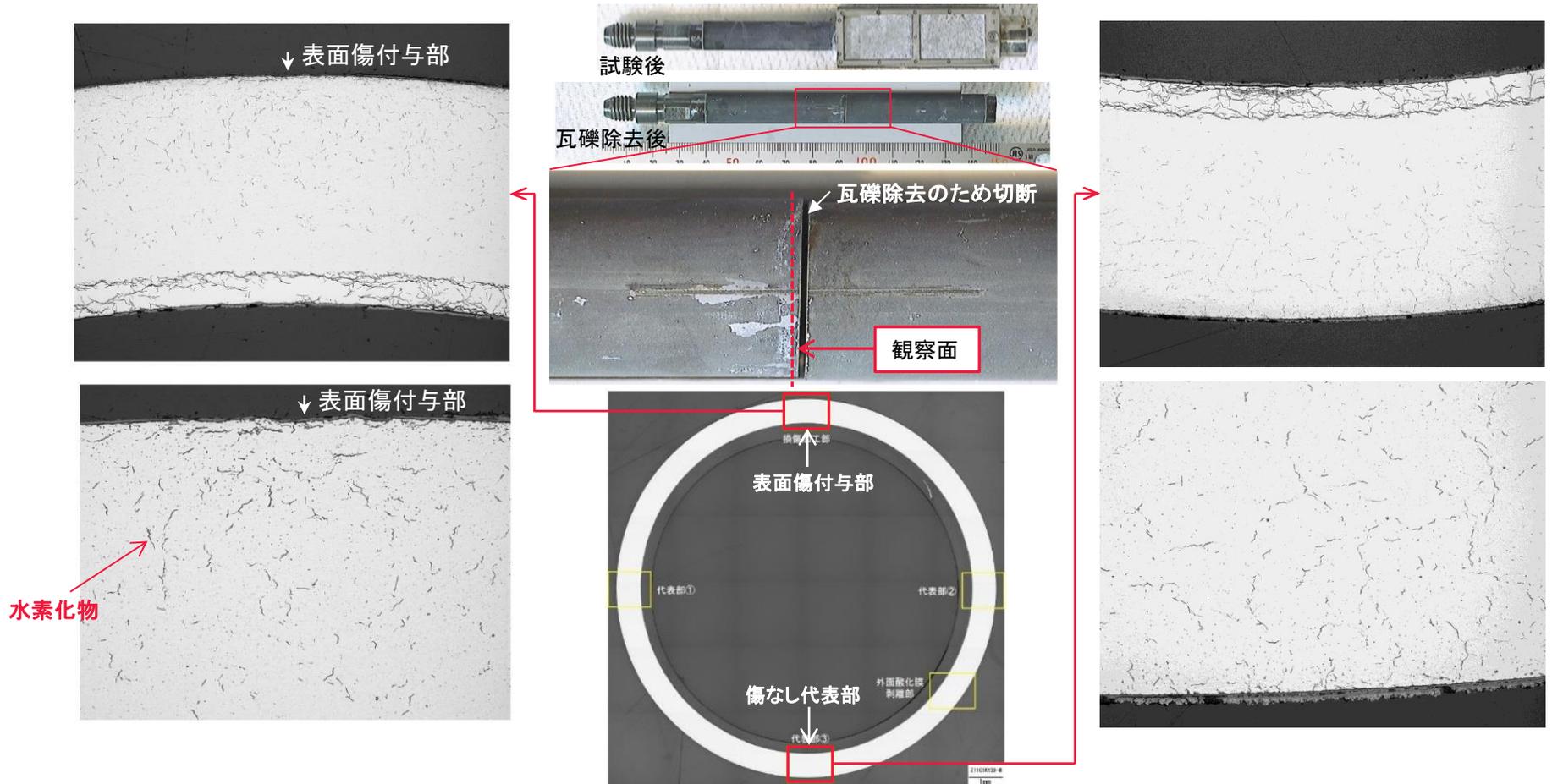
照射済試験片, 温度300°C, 冷却速度0.3°C/h, 周方向応力70MPa, 表面傷付与



- ▶ 表面傷有無による水素化物析出状態に明瞭な差異はなく、水素化物再配向への影響は認められなかった

低延性条件試験B:水素化物析出挙動確認試験結果例/平成28年度

照射済試験片, 温度300°C, 冷却速度0.04°C/h, 周方向応力70MPa, 瓦礫固着+海水+表面傷付与

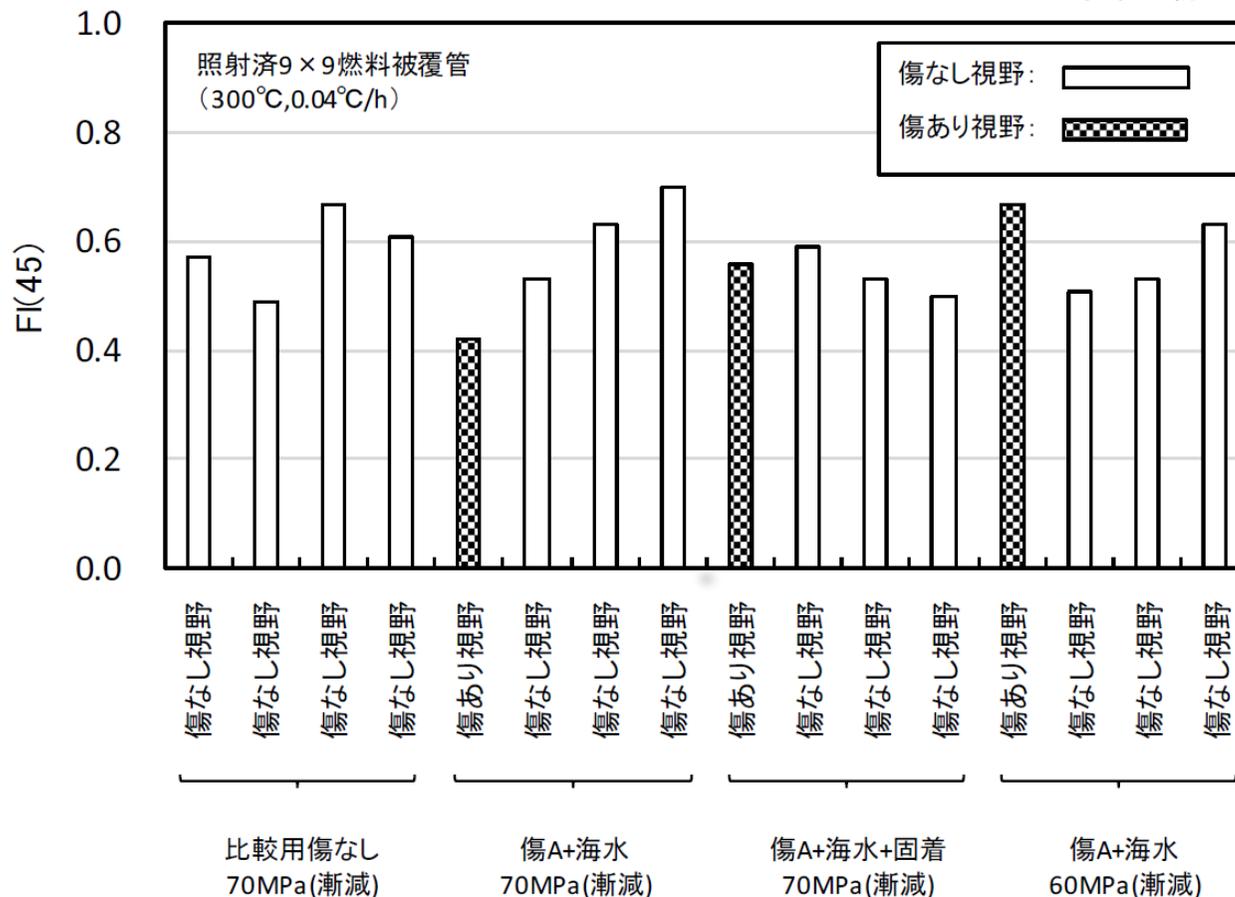


- ▶ 瓦礫固着+海水+表面傷付与有無による水素化物析出状態に明瞭な差異はなく、水素化物再配向への影響は認められなかった

低延性条件試験B:水素化物析出挙動確認試験結果例/平成28年度

照射済9×9燃料被覆管

$$FI(45) = \frac{\text{管半径方向に対し} \pm 45^\circ \text{以内に配向した水素化物の累計長さ}}{\text{水素化物の累計長さ}}$$

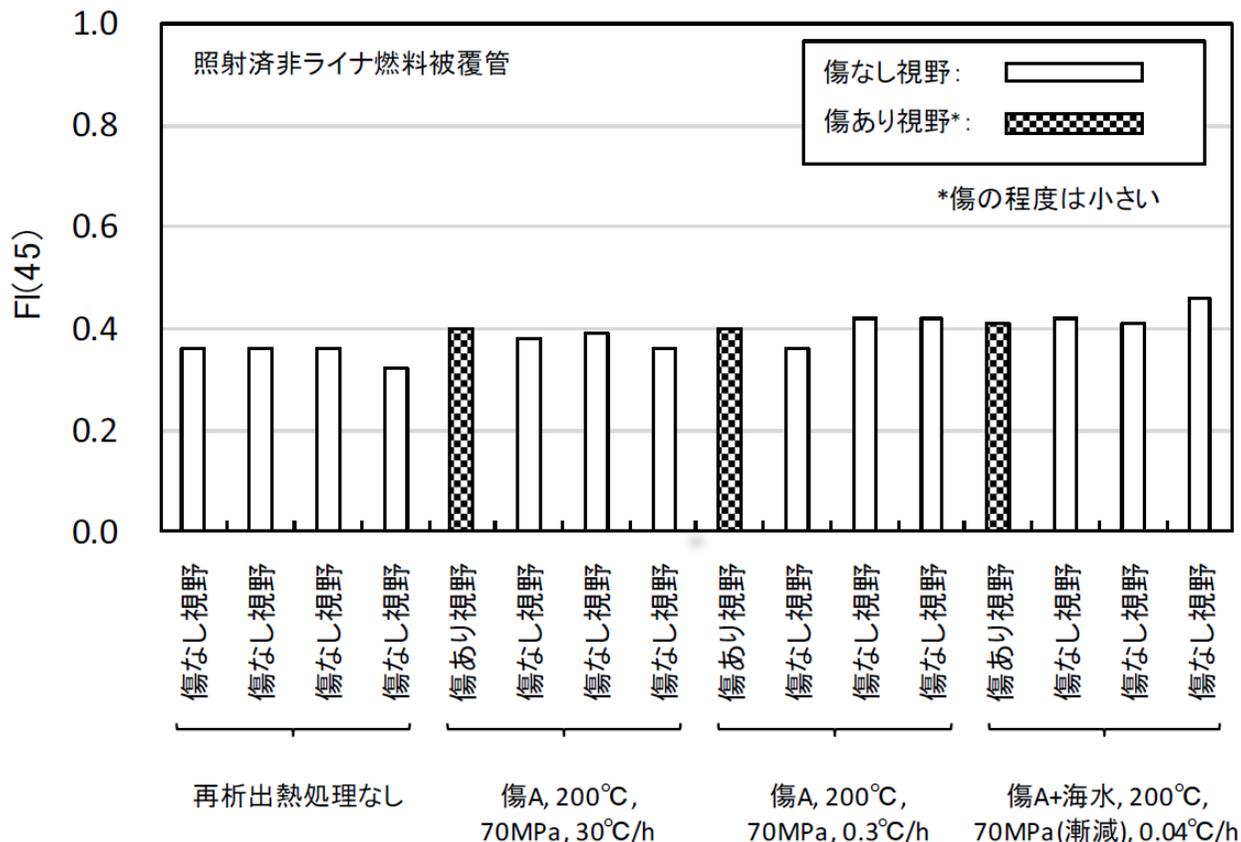


▶ 想定される表面傷は水素化物の再配向にほとんど影響しない

低延性条件試験B:水素化物析出挙動確認試験結果例/平成28年度

照射済非ライナ燃料被覆管

$$FI(45) = \frac{\text{管半径方向に対し} \pm 45^\circ \text{以内に配向した水素化物の累計長さ}}{\text{水素化物の累計長さ}}$$

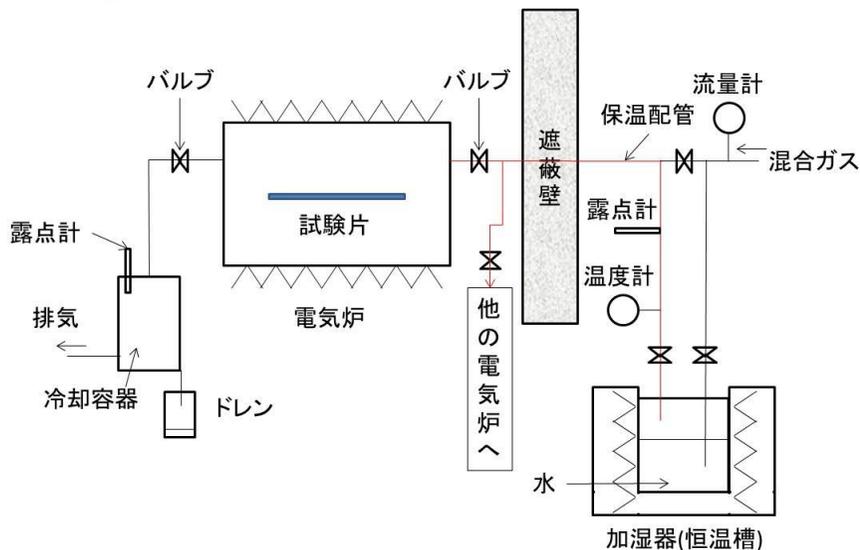


▶ 想定される表面傷は水素化物の再配向にほとんど影響しない

高ひずみ条件試験: クリープ試験

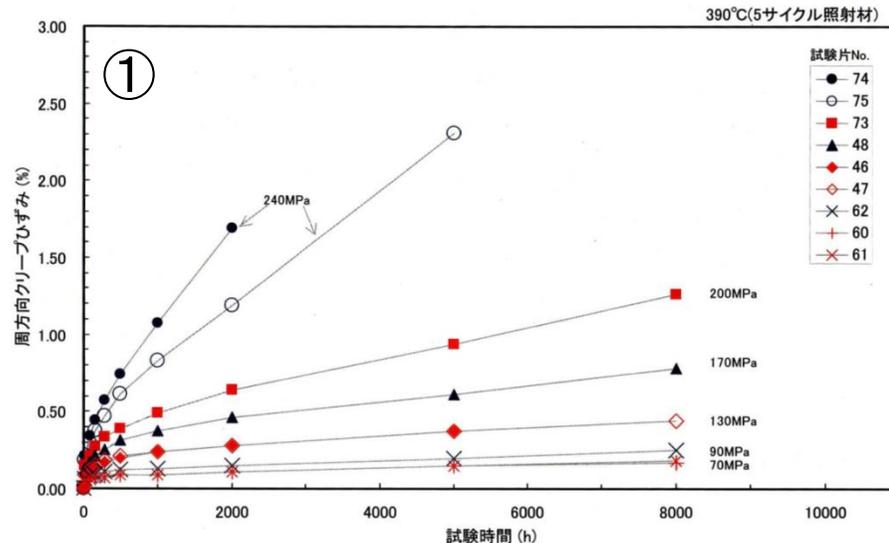
高ひずみ条件下での被覆管健全性評価のために、“**クリープ破断ひずみ**”および“**クリープ速度**”が、従来健全燃料被覆管について議論されてきたものと同様であるかを確認する。

- “**クリープ破断ひずみ**”については、破断ひずみが従来の基準である1%以上であることを確認するために、試験工程内で1%以上の周方向クリープひずみが期待できる条件(①を参考に設定)とする。
- “**クリープ速度**”については、二次クリープ領域まで含めて、使用済燃料プールでの表面傷等を模擬した本被覆管のクリープ変形量が、従来のクリープ速度式で予測できる範囲であることを確認するための条件(②を参考に設定)とする。

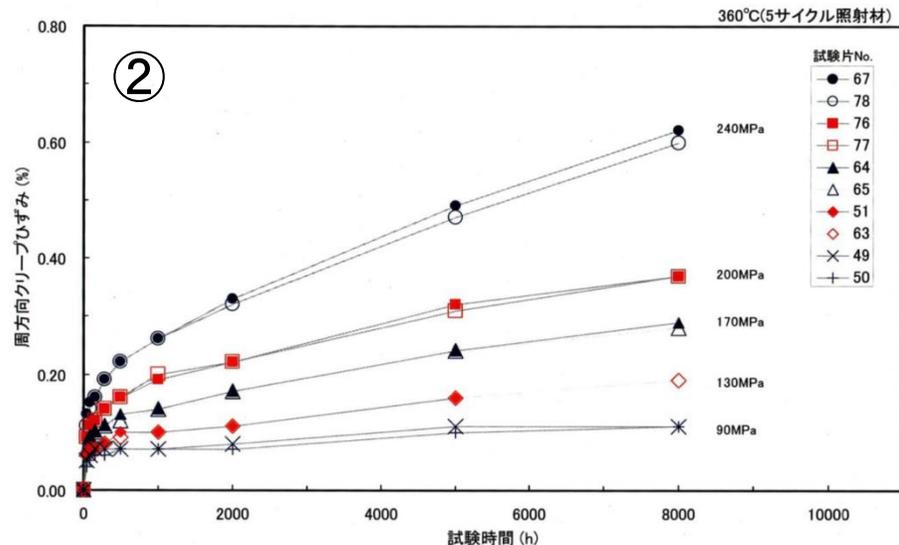


装置構成概略図

(a) 5サイクル照射材



(a) 5サイクル照射材



【出典】独立行政法人原子力安全基盤機構，“平成15年度リサイクル燃料資源施設安全解析コード改良試験(燃料の長期安全性に関する試験最終成果報告書)”，平成15年6月。

高ひずみ条件試験: 試験条件

試験条件	H27年度				H28年度								
	0h	-	-	1000h	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400°C-240MPa (照射/未照射)	0h	-	-	1000h	-	-	-	-	-	-	-	-	-
360°C-170MPa (照射/未照射)	0h	120h	500h	1000h	-	-	-	-	2000h	3000h	4000h	5000h	
360°C-130MPa (照射/未照射)	-	-	-	-	0h	120h	500h	1000h	2000h	3000h	4000h	-	

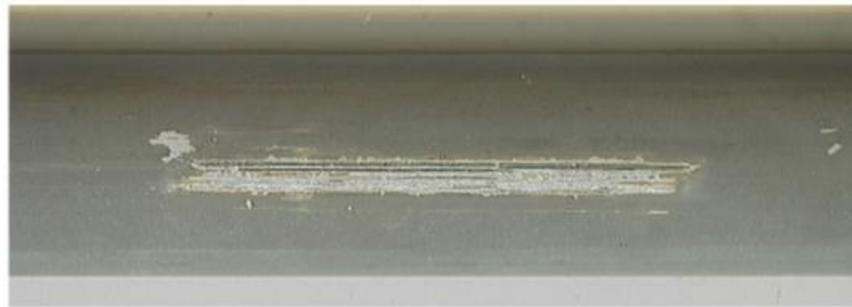
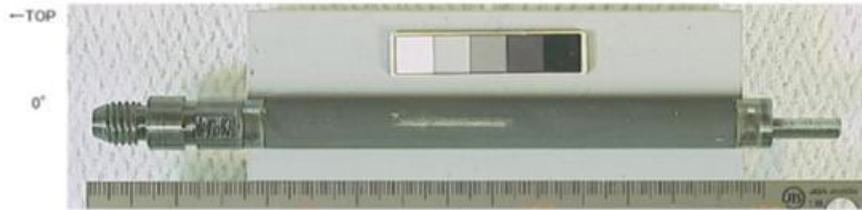
【平成28年度】

- ▶ 平成27年度に開始したクリープ速度試験を、最大5000hまで継続実施
- ▶ 最大4000hのクリープ速度試験を新規実施

高ひずみ条件試験: クリープ試験結果例(傷+海水付着の影響)/平成27年度

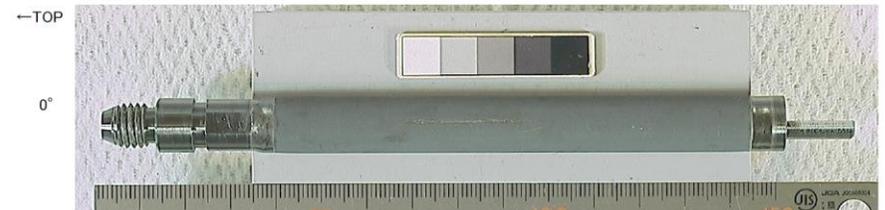
照射済試験片, 温度400 °C, 周方向応力240MPa, 試験時間1000h, 表面傷付与+海水付着

①クリープ破断試験



9×9型燃料被覆管(照射済)

周方向ひずみ:1.55 %



高燃焼度8×8型燃料被覆管(照射済)

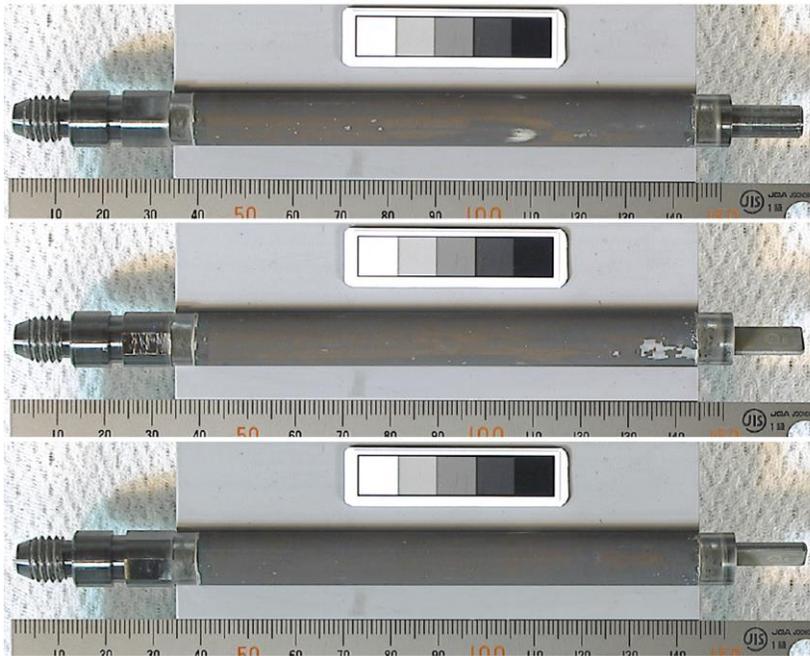
周方向ひずみ:2.21 %

- ▶ ひずみが従来の基準である1%を超えても破断せず、クリープ破断への傷+海水付着の影響は認められなかった

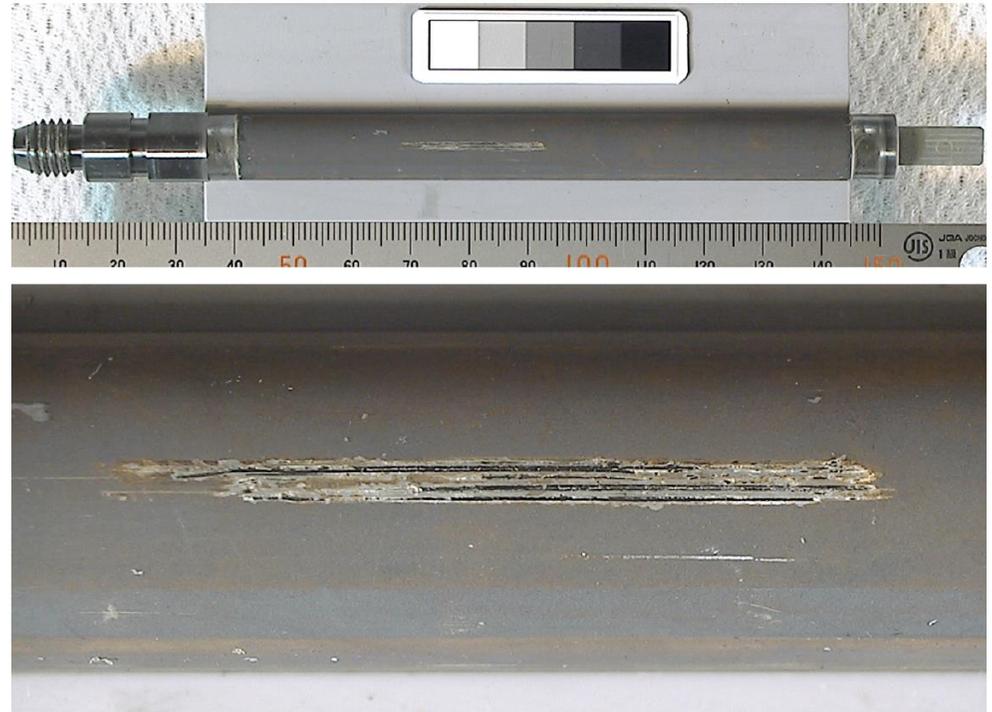
高ひずみ条件試験: クリープ試験結果例(傷+海水付着の影響)/平成27-28年度

照射済試験片, 温度360 °C, 周方向応力170MPa, 試験時間5000h, 表面傷付与+海水付着

②クリープ速度試験



9×9型燃料被覆管(照射済), 比較材



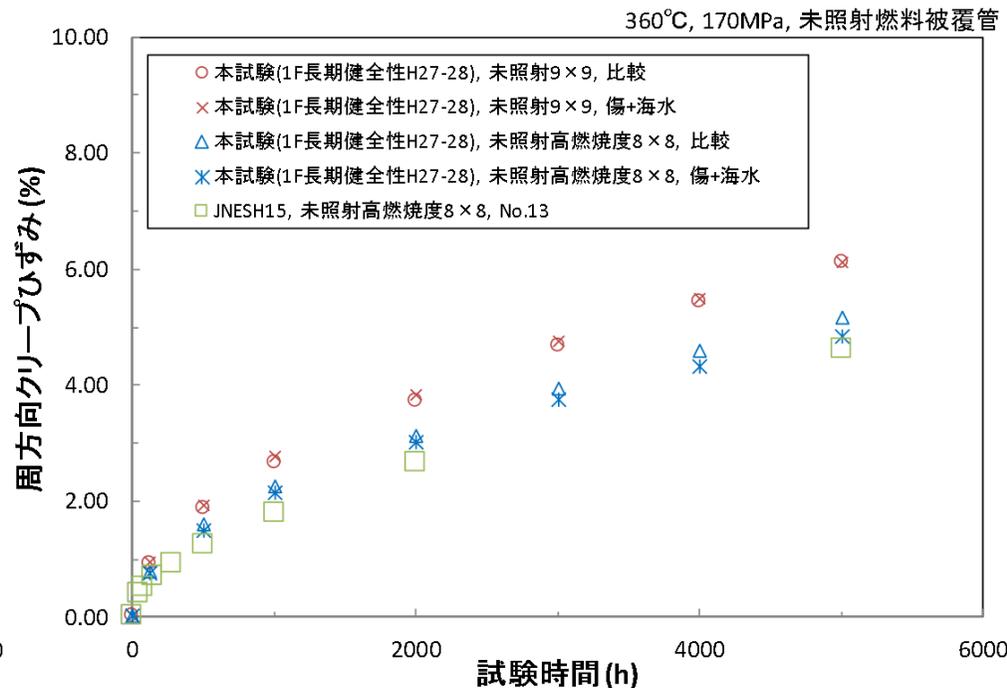
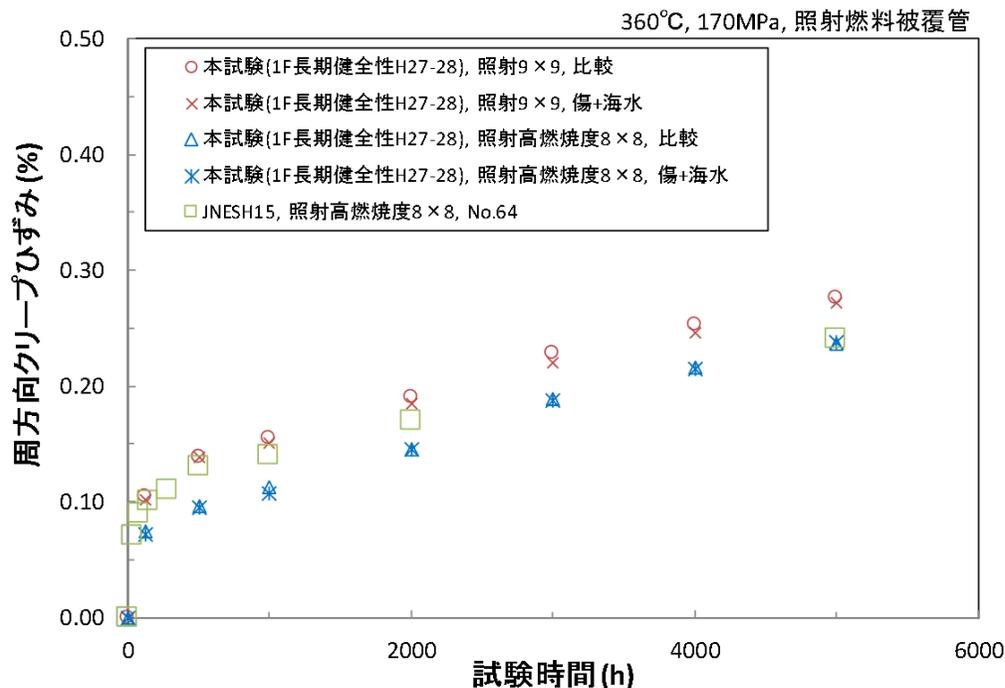
損傷加工部拡大

9×9型燃料被覆管(照射済), 表面傷付与+海水付着

- ▶ 5000h試験後においても異常な外観は見られなかった

高ひずみ条件試験: クリープ試験結果例(傷+海水付着の影響)/平成27-28年度

②クリープ速度試験



- ▶ 5000hまでの試験結果において顕著な傾向の変化はない
- ▶ 傷+海水付着の影響はほとんどない
- ▶ クリープ速度は従来の高燃焼度8×8データと同等

* 従来データ: 独立行政法人原子力安全基盤機構, “平成15年度リサイクル燃料資源施設安全解析コード改良試験(燃料の長期安全性に関する試験最終成果報告書)”, 04基炉報-0001, 平成15年6月.

乾式保管における燃料集合体健全性確認方法の調査/平成27-28年度

① 燃料集合体確認手法の調査(例)

取り扱い機能：使用済燃料プールから共用プールへの移送時に確認済

閉じ込め機能：**乾式保管開始前に確認**

使用済燃料プールに保管されたみなし健全燃料の閉じ込め機能検査に関する運用方法案

ケース	共用プール内検査	乾式保管開始前の検査	検査日数
1	—	金属キャスクに収納後に実施 (容器内検査で核種検出された場合はプールに返送)	少 (一度に61体を検査)
2	抜き取りで検査 【優先する燃料】 1) 上部タイププレートの変形量大 2) 高燃焼度燃料	—	中 【検査日数】 1) 漏えい検査: 数10体/日 2) 超音波検査: ~1体/日程度
3	全数検査	—	多

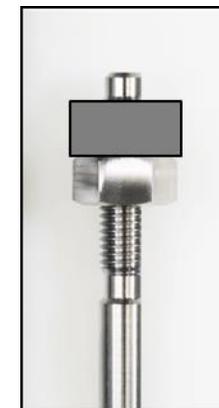
② 安全審査時の考慮事項に関する調査と課題の整理

使用済燃料プール保管燃料特有の環境履歴を考慮した際に、乾式保管のプロセスにおける課題の有無を、1F「特定原子力施設に係る実施計画」等を調査して考慮事項を整理し、課題となる可能性がある項目を抽出した。その結果、使用済燃料プール環境を経験した燃料の特性を考慮した燃料集合体健全性評価および燃料集合体健全性の考え方/確認手法等が課題となる可能性があることがわかった。

【背景および試験目的】

4号機使用済燃料プールに保管されていた新燃料集合体から採取した燃料部材の詳細 検査では、海水成分の部材表面への移行・付着が確認された。平成26年度には、燃料部材の水垢への海水成分の移行状況、取り込み量を評価した。

平成27年度は、燃料部材（上部端栓）のすきま構造部への海水成分移行挙動を評価するため、放射性トレーサを用いた基礎試験を行い、海水成分のすきま構造部への移行状況、取込み量を分析により評価した。

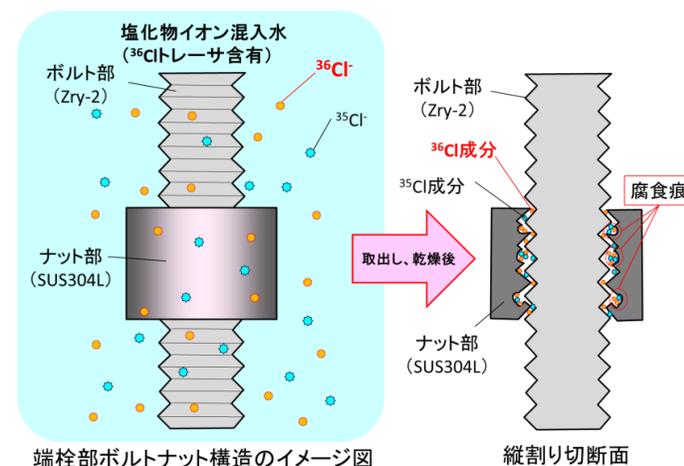


上部端栓部材（実機材）

【試験計画】

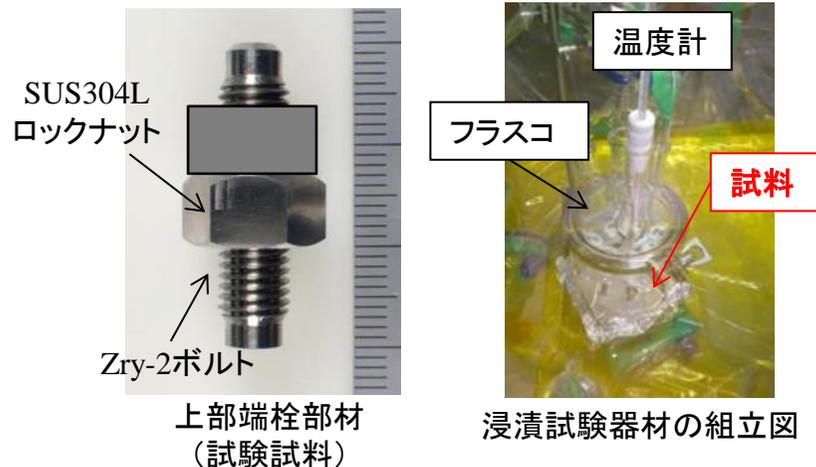
放射性トレーサ（Cl-36）を添加した温希釈海水中に上部端栓部材を一定時間浸漬して取り出した試料内表面の放射能分析により、すきま構造部に残留する海水成分量を定量し、海水成分の燃料部材への移行挙動を評価した。

なお、上部端栓部材におけるすきまの代表性確保の観点から、試験数を増やして評価した（N=3以上）。

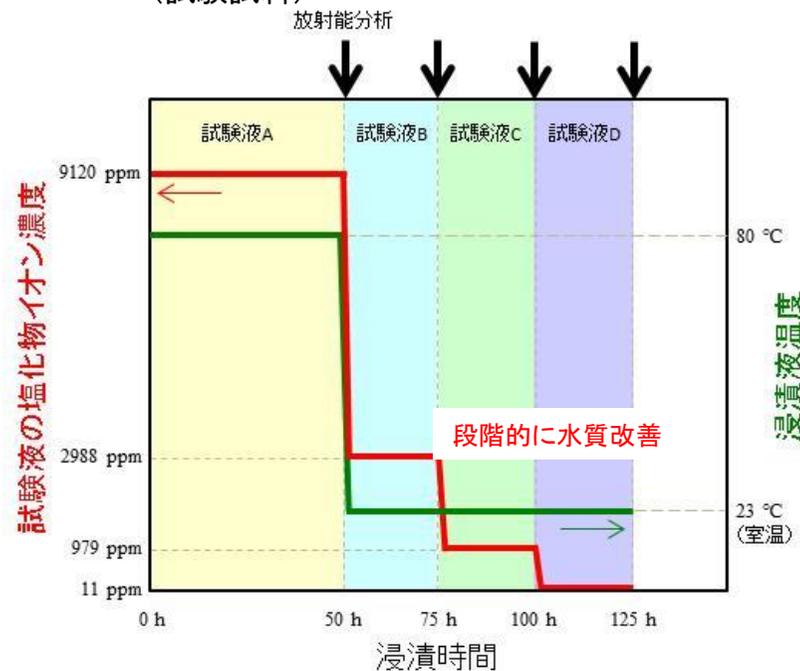


■ 浸漬試験

- 供試材：軽水炉用上部端栓部材（実機材）
（Zry-2ボルト+SUS304Lロックナット）
- 浸漬液：Cl-36トレーサ溶液+NaCl標準溶液
- 浸漬条件：4号機使用済燃料プールの水質改善を模擬
⇒浸漬時間125h、pH=7
⇒段階的に水質改善・温度低下（純水投入）



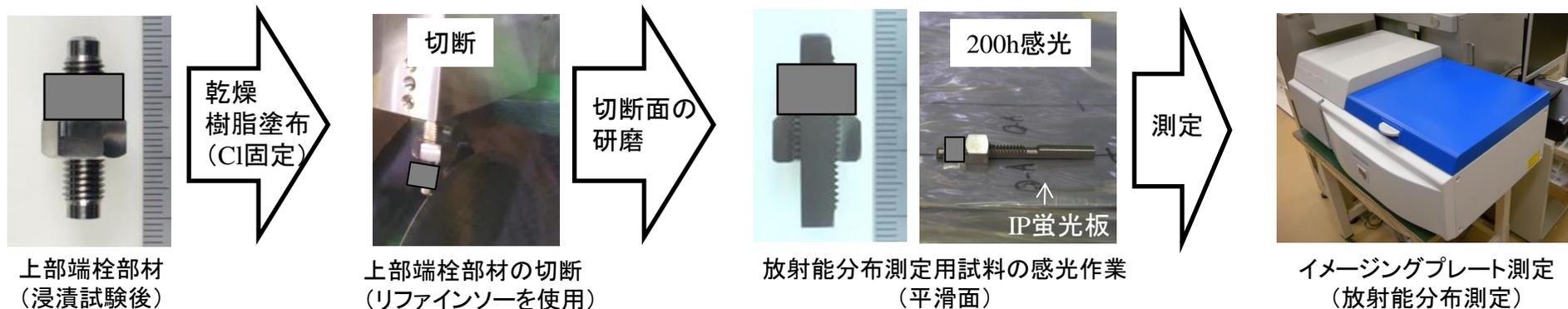
浸漬液（人工海水）		Cl濃度 [ppm]	温度[°C]
試験液A	2倍希釈	9462	80
試験液B	7倍希釈	3101	23
試験液C	20倍希釈	1016	23
試験液D	2000倍希釈	12	23



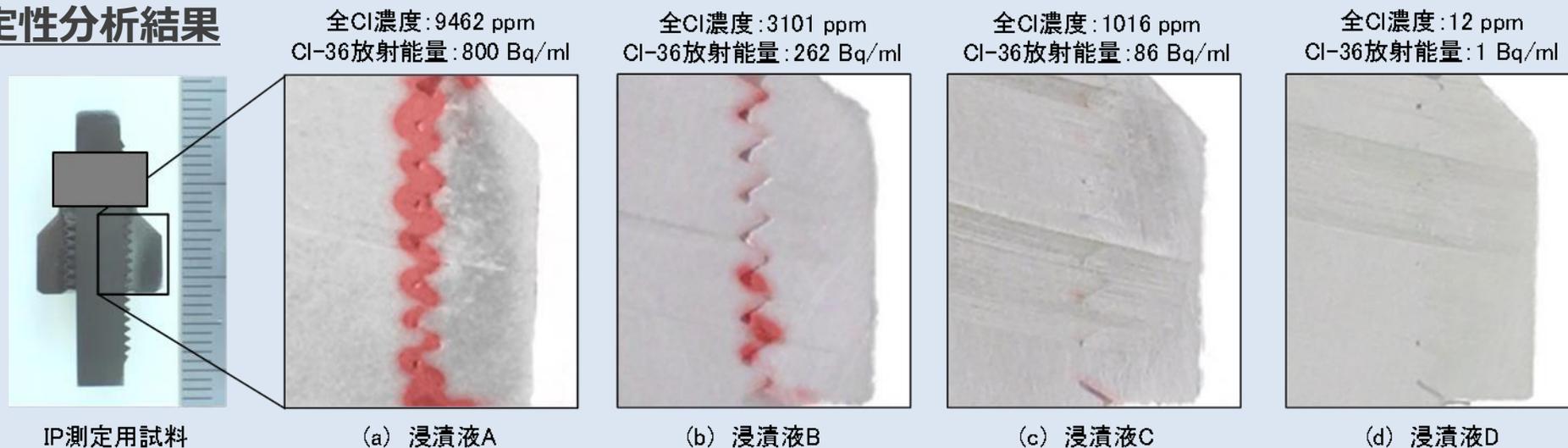
4. 本事業の実施内容（長期健全性に係る基礎試験（3/4））（平成27年度完了） No.33

■ 定性分析（放射能分布測定：IP測定）

浸漬試験後、すきま部のイメージングプレート(IP)測定を実施して、Cl-36の分布を測定した。



■ 定性分析結果



放射能分布測定結果 (IP測定結果と断面写真とを合成したもの)

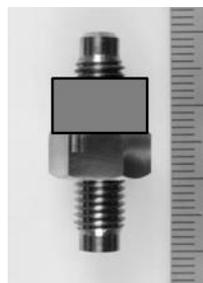
すきま部において海水成分は、濃縮することなく、浸漬液の希釈にともない明瞭に低下する。なお、本浸漬条件において、すきま部における有意な腐食はみられなかった。

4. 本事業の実施内容（長期健全性に係る基礎試験（4/4））（平成27年度完了）

No.34

■ 定量分析（放射エネルギー測定：β線測定）

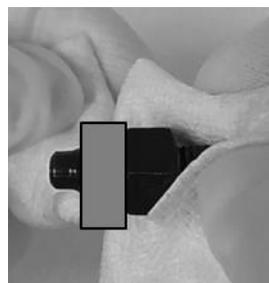
すきま部に付着するCl-36のβ線測定を実施し、海水成分（Cl）の移行挙動を評価した。



上部端栓部材
（浸漬試験後）



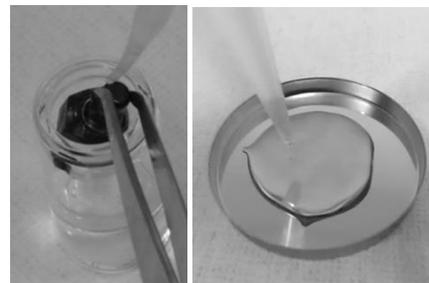
乾燥



表面汚染の除去



純水洗浄



純水へのCl-36成分の移行



蒸発乾固
測定



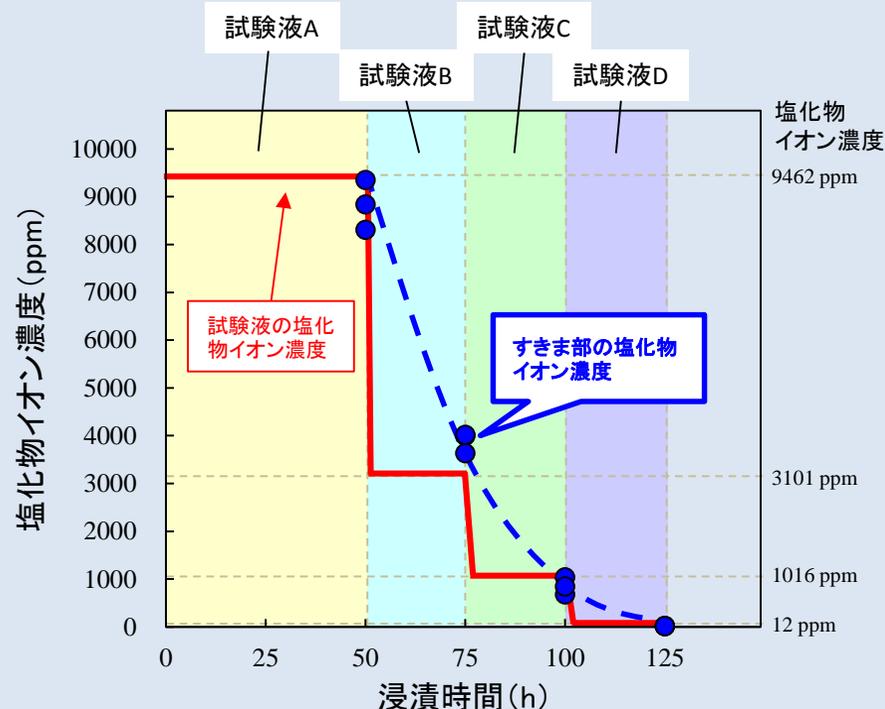
β線測定（10min測定）
（Model：LBC-4312B）

■ 定量分析結果

浸漬液（人工海水）		浸漬液 Cl濃度 [ppm]	すきま部 平均Cl濃度 [ppm]	温度[°C]
試験液A	2倍希釈	9462	8750	80
試験液B	7倍希釈	3101	3900	23
試験液C	20倍希釈	1016	850	23
試験液D	2000倍希釈	12	10	23

本試験条件では、すきま腐食はみられず、すきま部の海水成分は、濃縮せずに、希釈後の短時間で浸漬液の塩分濃度と同程度まで低下することから、すきま部の海水成分量の低下に対する浸漬液の水質改善効果は明瞭であった。

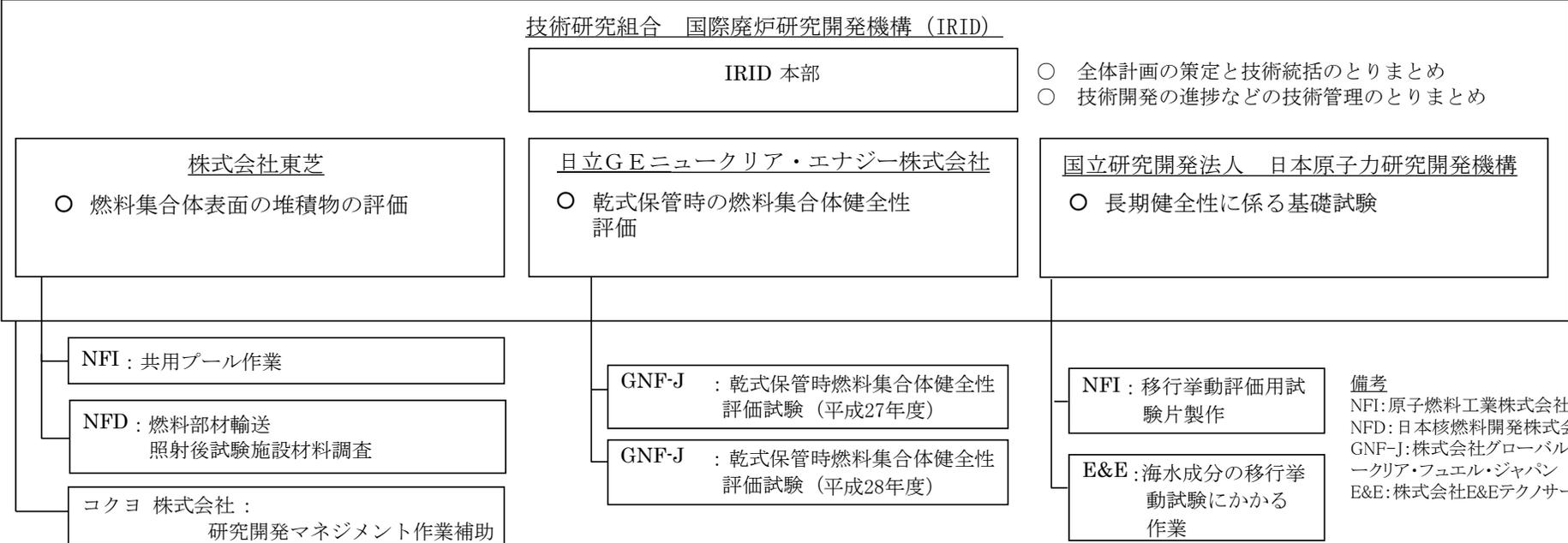
すきま部の海水成分の取り込み量は、プール水の水質改善によって少なくなり、プール水の海水成分量と同様の経時変化であったと推定される。



すきま構造部の塩化物イオン濃度評価結果

5. 本事業の実施体制

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID) 本部が全体のプロジェクト管理を行い、IRID組合員である日立GEニュークリア・エネルギー株式会社、株式会社 東芝、及び国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構と連携をなし、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を実施する。



体制図

8. 本事業の実施スケジュール

大分類	小分類	平成27年度												平成28年度												備考
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
(1) 燃料集合体の 長期健全性 評価技術開発	燃料部材輸送準備	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	燃料部材採取、 輸送容器積込	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	燃料部材輸送	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	照射後試験施設試験準備 (材料試験条件検討)	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	照射材材料調査 (堆積物分析、電気化学的試験)	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	評価	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
①燃料集合体 表面の堆積物の 評価	試験計画作成	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	試験準備・試験片製作	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	予備試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	水素化物析出挙動等 確認試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	破壊試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	クリーブ試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	破壊試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	評価	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
(2) 燃料集合体の 長期健全性 評価技術開発	試験計画作成	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	試験片製作	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	放射性同位元素受入	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	移行挙動評価試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	評価	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	②乾式保管時の 燃料健全性評価	予備試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]										
②乾式保管時の 燃料健全性評価	水素化物析出挙動等 確認試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	破壊試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	クリーブ試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	破壊試験	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	評価	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
	(2) 長期健全性に 係る基礎試験	試験計画作成	[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]										
試験片製作		[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
放射性同位元素受入		[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
移行挙動評価試験		[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
評価		[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了
主要なマイルストーン		[Gantt bar]												4月	[Gantt bar]											完了

- ✓ 当初計画どおりに事業を完了した。
- ✓ 湿式保管関連の試験については、白色の堆積物の分析に用いるロックナットを4号機の使用済燃料プールから取り出した燃料集合体から採取し、照射後試験施設へ輸送し、白色堆積物の成分分析を実施した。分析結果より腐食する可能性はないことを確認した。また、ロックナットを用いた電極の作製を行い、電気化学試験を実施した。試験結果では塩化物イオン濃度が100ppmよりも低い領域ではすきま腐食感受性がない結果となり、共用プールでの腐食の可能性はないことを確認した。
- ✓ 乾式保管関連の試験については、水素化物析出挙動確認試験およびクリープ試験を実施し、従来データとの比較などから、瓦礫による傷や海水付着など及びその重畳状態がこれらの特性に与える影響は小さいことを確認した。また、乾式保管における燃料集合体健全性確認方法の調査では、1F履歴を経験した燃料を乾式保管する際の課題等を抽出し、想定される運用方法案をまとめた。
- ✓ 基礎試験については、平成27年度に、すきま構造部の海水成分を定量した結果、海水成分は濃縮することがなく、希釈後の短時間で浸漬液の塩分濃度と同程度まで低下したことから、すきま構造部の海水成分の取り込み量は、浸漬液の希釈によって少なくなり、浸漬液の海水成分量と同様の経時変化であったと評価された。