

# 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出した燃料集合体の 長期健全性評価

### 中間報告

平成28年4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

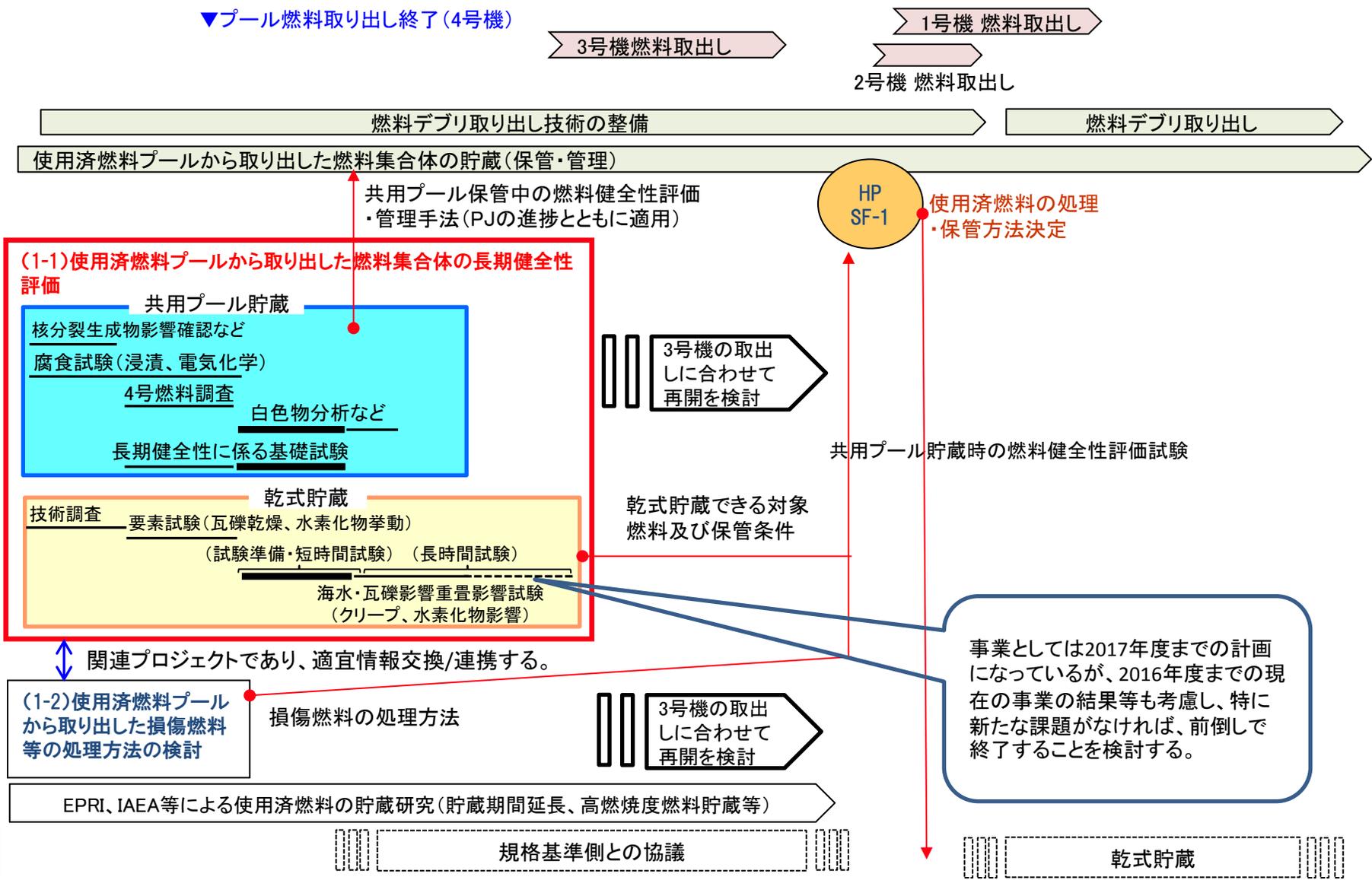
No.1

分類	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

中長期ロードマップ\*1  
計画時点工程

廃止措置に向けた研究開発

国外  
その他



\*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中長期ロードマップ

### 湿式保管研究開発の目的

燃料取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 ⇒ 燃料被覆管から核分裂生成物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

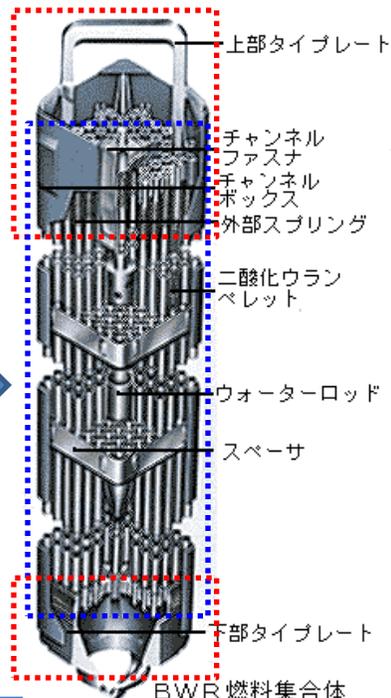
- ハンドル
- 上部タイプレート
- タイロッドボルト締結部

#### 被覆管密閉性

- 燃料被覆管

#### 構造健全性

- 下部タイプレート



### 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)、燃料集合体の損傷(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

本Pri.の課題:照射材を用いた中性子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  
本Pri.の課題:SFPから取出した燃料の白色堆積物、ねじ内面付着物の同定

• 燃料破損部からの核分裂生成物の溶出

核分裂生成物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※

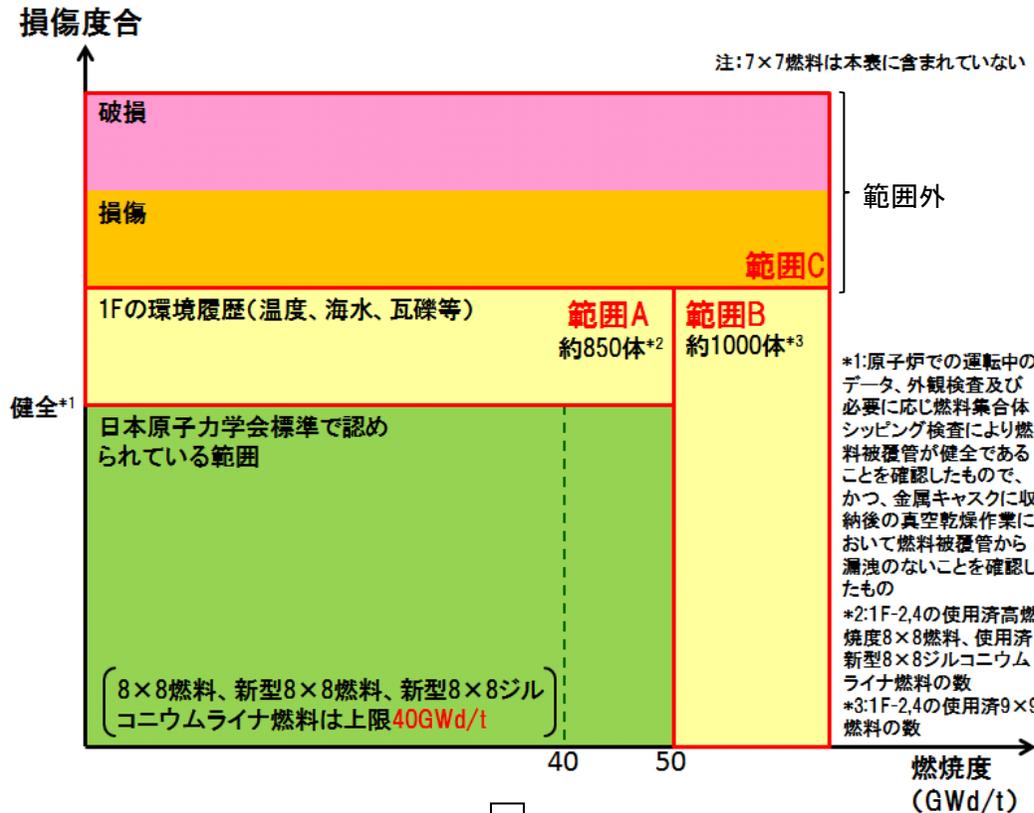
※文科省からの運営費交付金によりJAEAが実施(～2013)

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燃料の長期健全性を評価する。また基礎試験により照射影響及び加速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	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 $10^{21}\text{cm}^{-2}$ 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 -被覆管に損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 -被覆管に損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

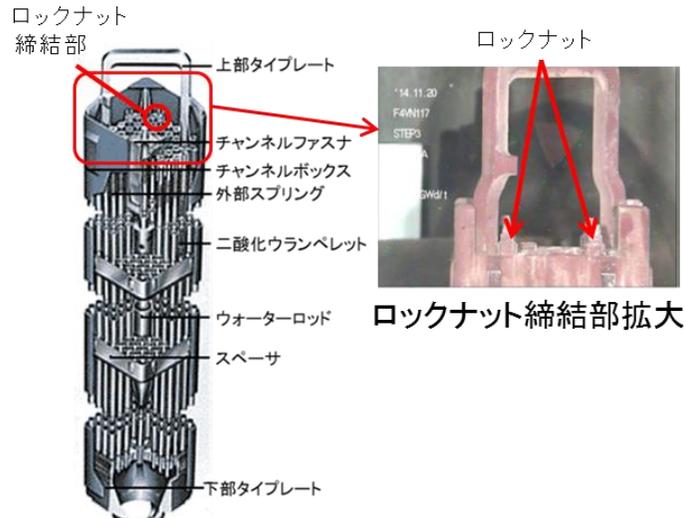
\*2:周方向応力

#### 工程

H25	H26	H27	H28
<p>乾式保管等に関する調査及び試験計画立案</p>	<p>影響確認要素試験 乾燥時瓦礫残留水分確認試験</p> <p>水素化物析出挙動試験</p>	<p>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</p>	<p>長時間試験</p>

## 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。抽出項目は以下であり、照射材材料調査として実施する。
  - －白色堆積物分析: 燃料部材表面の堆積物の腐食への影響を評価
  - －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の腐食への影響を評価 (腐食すきま再不動化電位測定)
  - －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への影響を評価
- ・調査対象は、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、ねじ部に海水成分の残留を示唆するデータがあることから、ロックナットを選定し、照射後試験施設に輸送し、上記評価試験を実施する。平成27年度はロックナット輸送に係る準備作業としてロックナット採取/輸送容器積込作業手順の検討, 輸送計画書案の作成を実施した。また, 照射後試験施設にて実施する試験の準備作業として、試験の実施要領の検討を実施した。全体実施内容を以下に示す。平成27年度はこのうちa、dを実施した。



BWR燃料集合体

## 実施内容(平成27年度はa、dを実施)

### 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. ねじ内部付着物分析
- e-3. 電気化学的試験 (腐食すきま再不動化電位測定)

#### 【f. 評価】

- f-1. 各試験結果のまとめ/評価
- f-2. 共用プール水質の管理基準案の策定

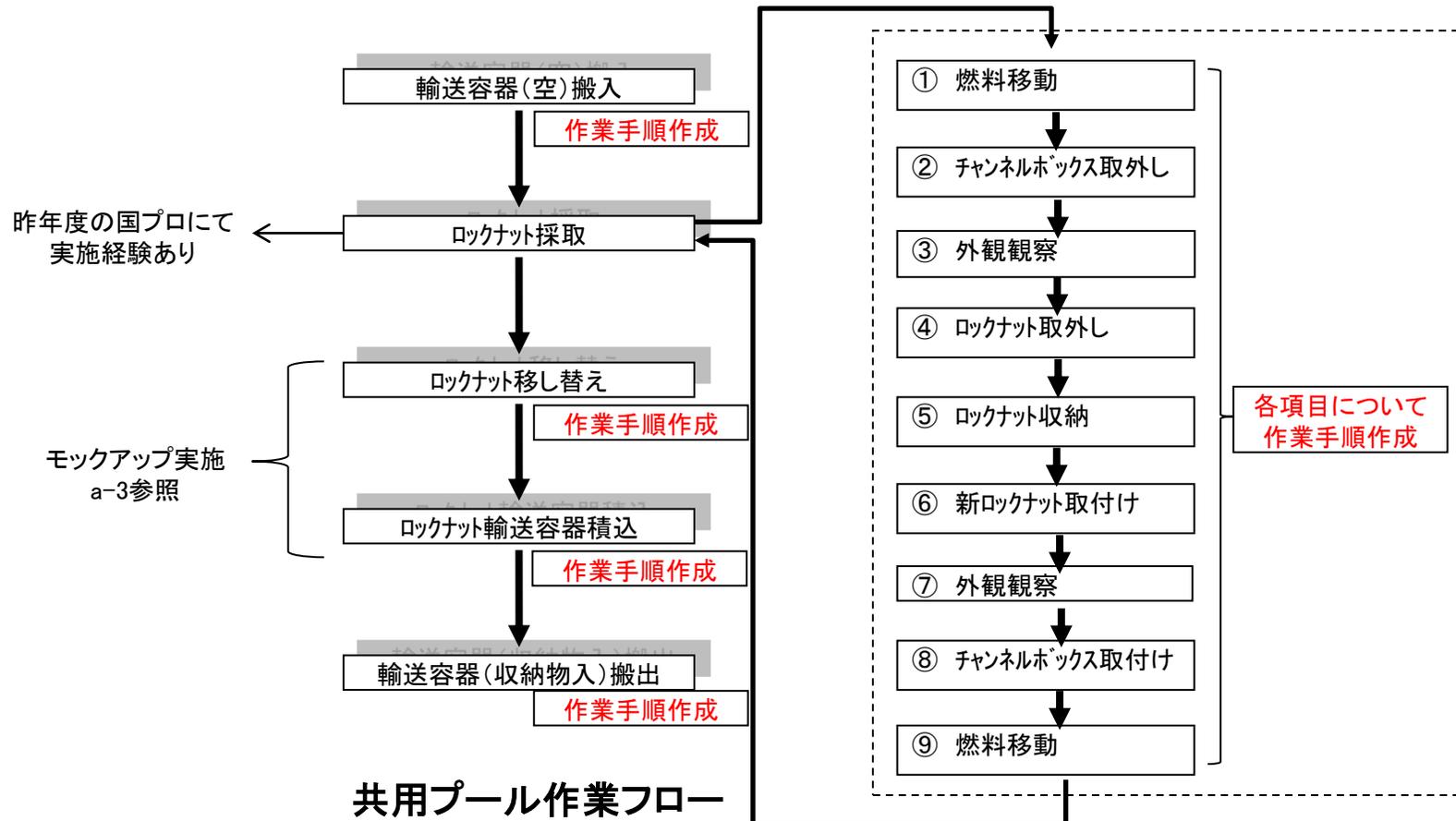
## 4. 本事業の実施内容（①燃料集合体表面の堆積物の評価（2/6））

### a-1. 1F管理区域内作業項目の検討

・1Fサイトの管理区域内における作業項目について検討を実施し、担当メーカ、使用設備、機器を明確にした。

### a-2. ロックナット採取/輸送容器積込作業手順の検討

・共用プールにおけるロックナット採取/輸送容器積込の各作業項目に対して、作業手順を作成した。  
また、共用プール内でロックナットを取扱う作業のうち、昨年度実施経験のあるロックナット採取を除いたロックナット移し替え、ロックナット輸送容器積込についてはモックアップを実施した。

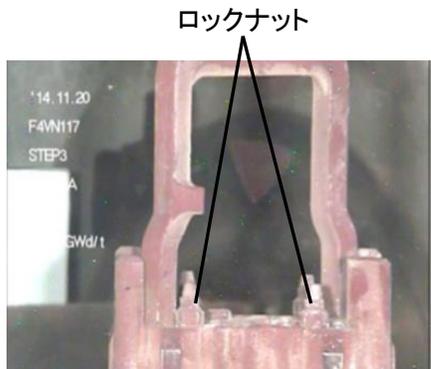


## a-2. ロックナット採取/輸送容器積込作業手順の検討(続き)

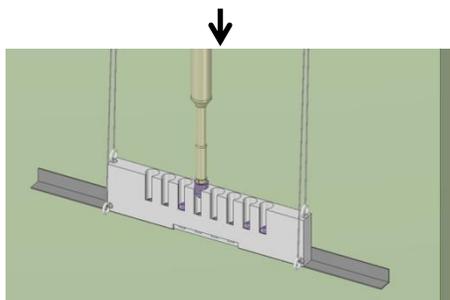
モックアップ実施(a-3参照)

### ロックナット採取

※昨年度の国プロにて実施経験あり



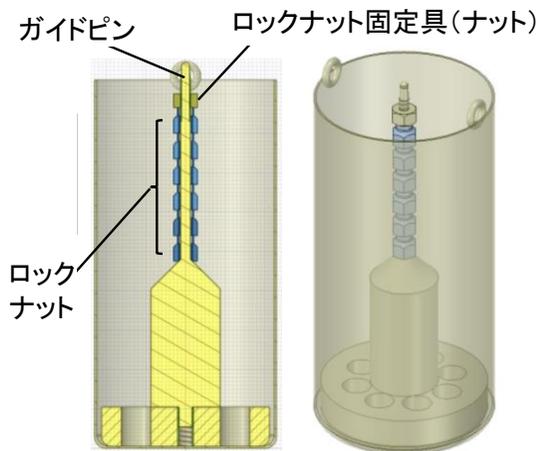
ロックナット取外し治具を用いてロックナットを取外す。



ロックナット内面観察ブロック

ロックナット内面観察ブロックに一時収納する。

### ロックナット移し替え



ロックナット収納バスケット

共用プール水中でロックナット内面観察ブロックに収納したロックナットを輸送容器積込用に設計したロックナット収納バスケットに移し替える。

### ロックナット輸送容器積込

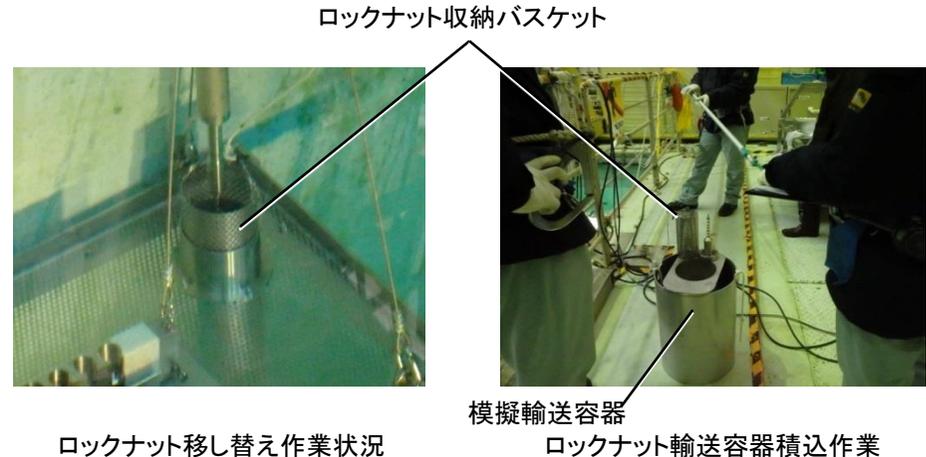


輸送容器

ロックナットの入ったロックナット収納バスケットを水中から吊り上げ、輸送容器に積込む。その際、気中にてできることになるが、気中では遮蔽体により放射線防護をしつつ作業を行う。

### a-3. 共用プール作業のモックアップ

共用プール内でロックナットを取扱う作業のうち、昨年度実施経験のあるロックナット採取を除いた、ロックナット移し替え、ロックナット輸送容器積込について、モックアップにより作業確認を行った。その結果、両作業とも問題なく実施できることを確認した。



### a-4. 輸送計画書の作成

#### 【L型輸送物輸送計画書案】

・1Fの共用プール内にある1F4号機使用済燃料集合体から採取したロックナットを、照射後試験施設へ輸送するために使用する輸送容器(空)をL型輸送物として1Fへ輸送する。そのため、L型輸送物の輸送計画書案を作成した。容器内は空の状態での輸送であり、内部に放射性物質は含まない。ただし、過去に汚染物を輸送した経験があるため、L型輸送物として取り扱う。

#### 【A型輸送物輸送計画書案】

・1Fの共用プール内にある1F4号機使用済燃料集合体から採取したロックナットを、輸送容器に積み込み、1Fから照射後試験施設へ輸送する。輸送するロックナットの放射エネルギーは、A型輸送物として運搬できる放射エネルギーの限界であるA<sub>2</sub>値以下であることから、A型輸送物の輸送計画書案を作成した。

### a-5. 輸送工程調整

1F4号機の使用済燃料のロックナットを1F共用プールから照射後試験施設まで輸送する工程について調整を実施した。共用プールにおける付帯設備の工事工程および受入れ側の照射後試験施設における定期検査時期を考慮し、輸送時期は平成28年6月とした。

## d-1. 材料試験条件検討

1F4号機の使用済燃料のロックナットを用いた照射材材料調査では、白色堆積物の分析、ねじ内部付着物分析、および電気化学的試験（腐食すきま再不動態化電位測定）を実施する。試験内容/条件と試験数は以下とした。

### 試験対象となるロックナット

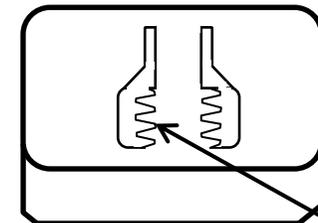
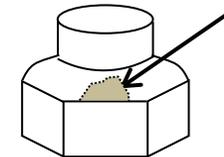
試験対象	試験片No.	燃料番号	燃焼度 (GWd/t)	取外し時期
ロックナット (照射材)	①	F4VN117	50.5	2016年6月(予定)
	②	F4VN117	50.5	2016年6月(予定)
	③	F4VN21	49.9	2014年11月
	④	F4VN21	49.9	2014年11月
	⑤	F4VN32	49.3	2014年11月
	⑥	F4VN32	49.3	2014年11月

### 各試験の試験内容/条件と試験数

試験項目	試験内容/条件	試験数	使用試験片※
白色堆積物の分析	ロックナット切断 エネルギー分散型X線分析装置による表面の元素分析	2個	④, ⑥ 受入れ確認時の白色化の確認状況によっては、試験片No.①～⑥のうち白色化が顕著なものを2個選択。いずれも付着が認められる場合は、④, ⑥を選択
ねじ内部付着物分析	ロックナット切断 埋め込み、研磨 エネルギー分散型X線分析装置による断面の元素分析	2個	①, ③ 取外し時期が異なる2試験片を選択。ねじ内部が解放されている期間の影響を考慮
電気化学的試験（腐食すきま再不動態化電位測定）	ロックナット切断 埋め込み、研磨、電極(右図)組立 電気化学測定（塩化物イオン濃度：10ppm, 100ppm, >100ppm以上（再不動態化電位( $E_{R,CREV}$ ) < 定常腐食電位( $E_{sp}$ )となる領域を狙う。))	3条件 (塩化物イオン濃度：3条件)	②, ⑤ いずれも燃焼度が高いグループではあるが、その中でも燃焼度の高い試験片と低い試験片からそれぞれ選択。

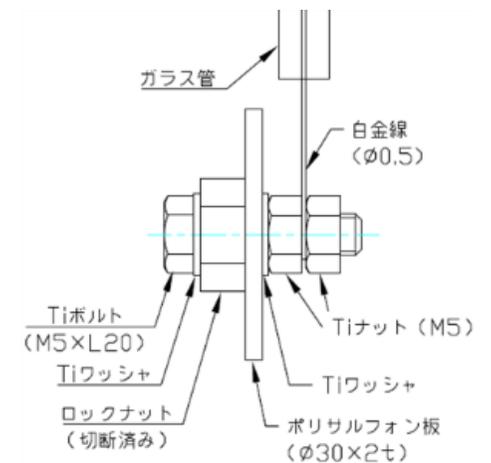
※: 使用試験片は現状の予定。受入れ時の白色堆積物の確認状況によって再検討する。

ロックナット  
白色堆積物  
表面分析



埋込試料

ねじ内部  
付着物分析

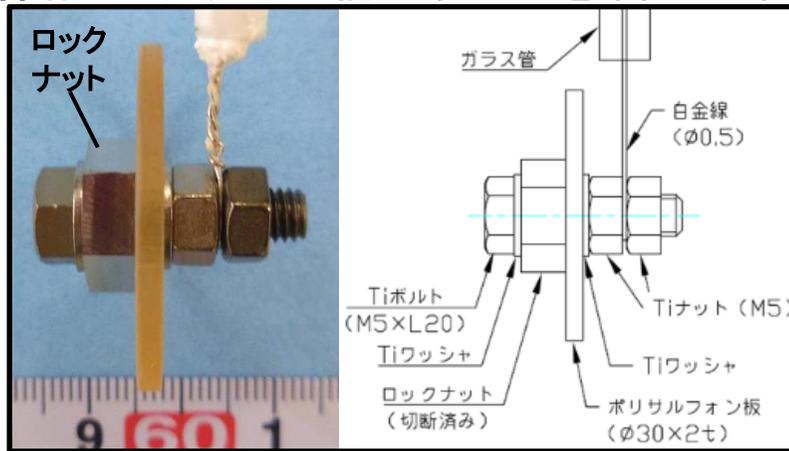


ロックナットを用いた電極組立図

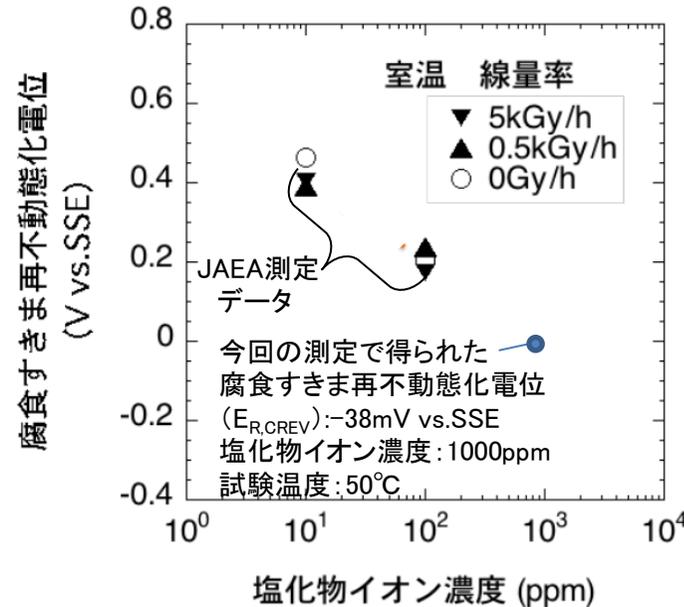
電気化学的試験  
(腐食すきま再不動態化電位測定)

## d-2.電気化学的試験の検討

照射後試験施設で実施する電気化学的試験の電極にはロックナットを用いるため、通常とは異なる形状とならざるを得ない。そこで、ロックナットを用いた電極が電気化学的試験に適用可能であることの確認を実施した。なお、本試験はホットセル内で実施する必要があるため、照射後試験施設を有するメーカーにて実施し、電極の作製、および試験実施についてホットセル内での遠隔操作での適用が可能であることの確認も行った。その結果、ロックナット電極で概ね妥当な腐食すきま再不動態化電位 ( $E_{R,CREV}$ ) が得られたこと、ホットセル内での遠隔操作での適用が可能であることを確認した。



ロックナットを用いた電極  
組立後外観



出典:本岡隆文, 上野文義(2015):“使用済燃料プールから取出した燃料集合体の長期健全性評価(3)ガンマ線照射下希薄人工海水での異材すきま試験片を用いた電気化学試験”, 日本原子力学会「2015秋の年会」D38, 2015年9/9~11

## d-3.試験要領の作成

ロックナットを用いて実施する表面白色堆積物の分析、ねじ内部付着物分析、および電気化学的試験(腐食すきま再不動態化電位測定)について、ホットラボで実施するための試験要領を作成した。

## d-4.試験工程調整

照射後試験施設で実施する1F4号機の使用済燃料のロックナットを用いた照射材材料調査の試験工程について、a-5の輸送工程を前提に調整を実施した。

## 4. 本事業の実施内容（②乾式保管時の燃料健全性評価（1/11））

No.10

「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	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 $10^{21}\text{cm}^{-2}$ 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 -被覆管に損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 -被覆管に損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

1F SFP取出し燃料の乾式保管適用性確認の一環として、1F SFP特有の条件（海水付着、瓦礫影響）が保管時燃料健全性へ及ぼす影響を、使用済燃料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1F SFP履歴由来の因子が、乾式保管時燃料健全性に及ぼす影響のうち、

- ①温度漸減過程での、水素化物の径方向への再配向等析出状態の変化、及びき裂発生の有無等を、試験により調べる。⇒低延性条件試験：水素化物析出挙動確認試験
- ②高温・高応力条件により被覆管のひずみが大きくなる条件下における、被覆管クリープ破断基準、及び被覆管クリープ速度を試験により調べる。⇒高ひずみ条件試験：クリープ試験

### 3. 実施内容概略

試験体製作：（未照射材及び照射材採取、被覆管表面模擬損傷加工、内圧封入等）



加熱試験：（例：400℃等温、及び300℃から徐冷、等）



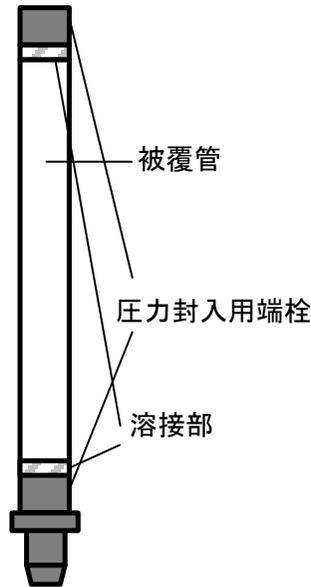
加熱後材料挙動評価：（腐食程度、クリープ破断ひずみ、他、燃料健全性に関する特性）

# 4. 本事業の実施内容（②乾式保管時の燃料健全性評価（3/11））

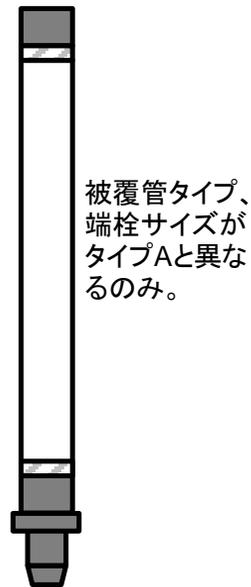
## 試験片

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

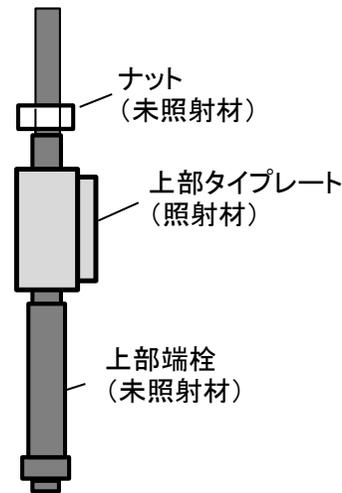
9×9燃料は8×8燃料よりも高燃焼度化対応した燃料



試験片タイプA



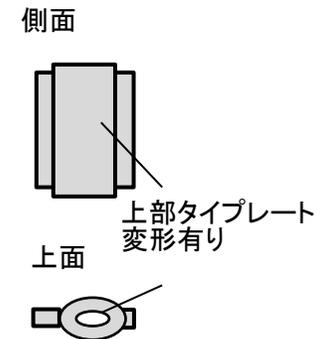
試験片タイプB



試験片タイプC



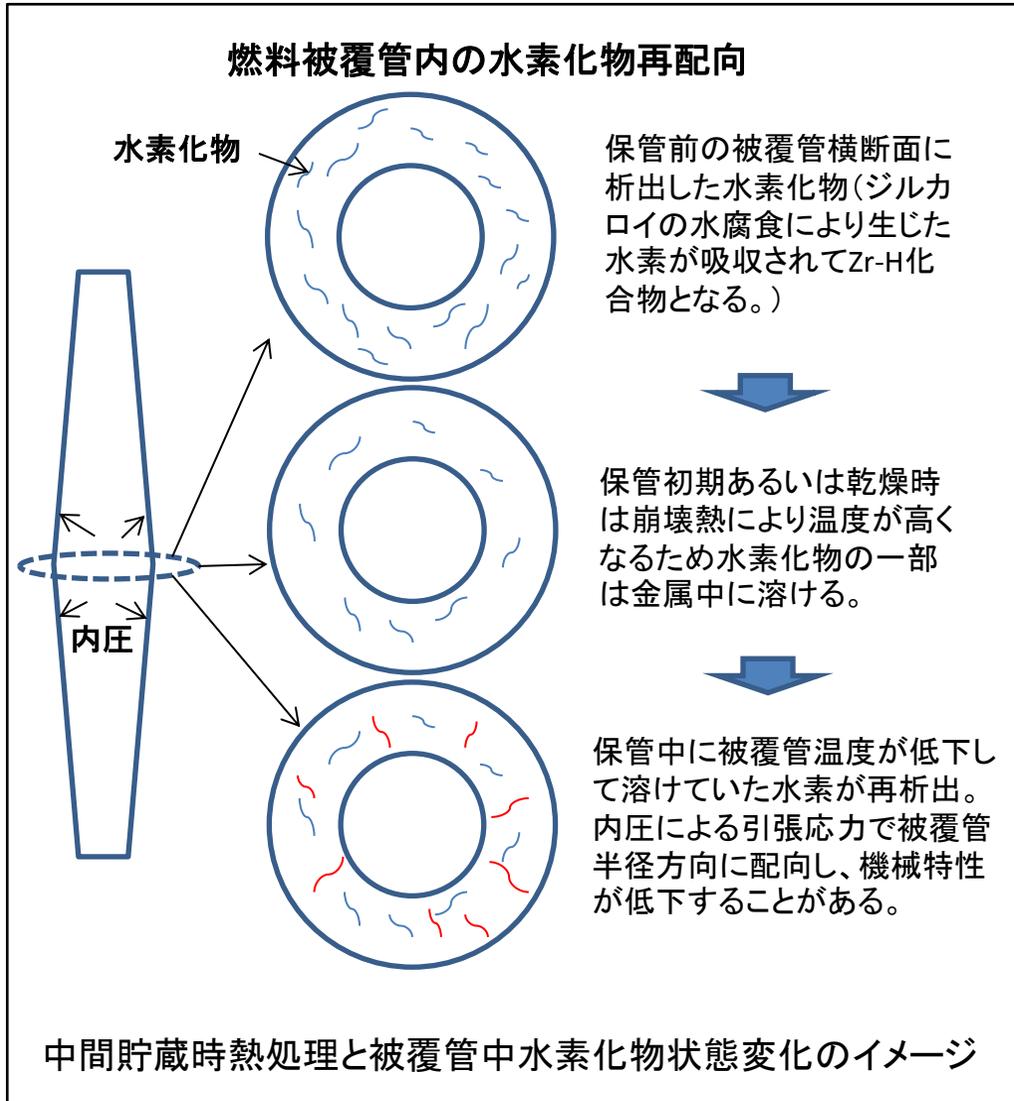
試験片タイプD  
（部材のみ）



試験片タイプE  
（変形）

## 低延性条件試験：水素化物析出挙動確認試験

表 平成27年度試験マトリクス(案)



試験条件	照射 有無	試験片 タイプ	付与条件	員数
温度：約300℃から 降温 冷却速度：0.3℃/h 程度 内圧封入：周応力 70MPa	未照射	タイプA	なし(比較)	タイプA:1
		タイプB		タイプB:1
	照射	タイプA	傷	タイプA:3*
		タイプB		タイプB:1
		タイプA	傷	1

\*一部、付与条件を重畳させた場合(傷+曲げ)で実施。

- ・H27年度は、H26年度に実施した「水素化物析出挙動に関する照射材試験」で実施したものと同様の手法(不活性ガス雰囲気中、配管方式による内圧加圧)で試験し、H26年度試験よりも冷却速度が小さい条件(0.3℃/h)でのデータを取得した。
- ・H28年度はさらに冷却速度の小さい条件で試験を実施する計画である。

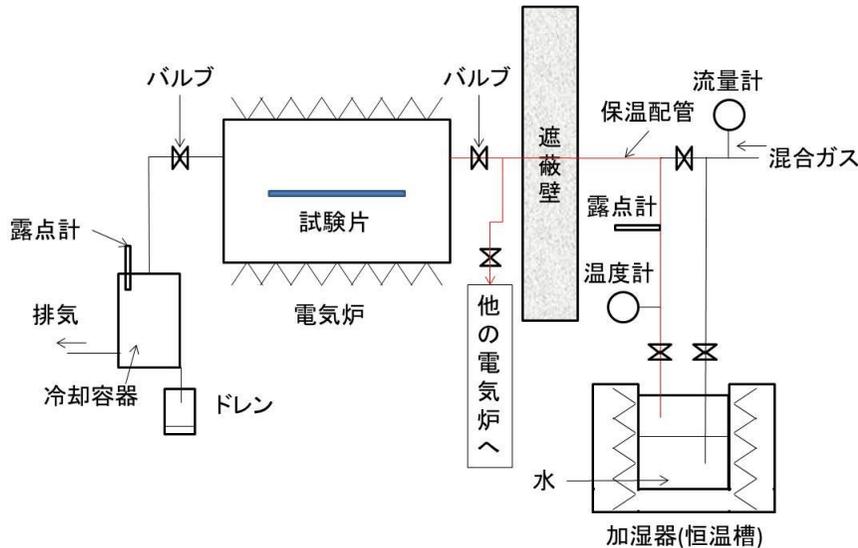
# 4. 本事業の実施内容（②乾式保管時の燃料健全性評価（5/11））

## 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基準**”、及び“**クリープ速度の評価**”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ことを確認する。

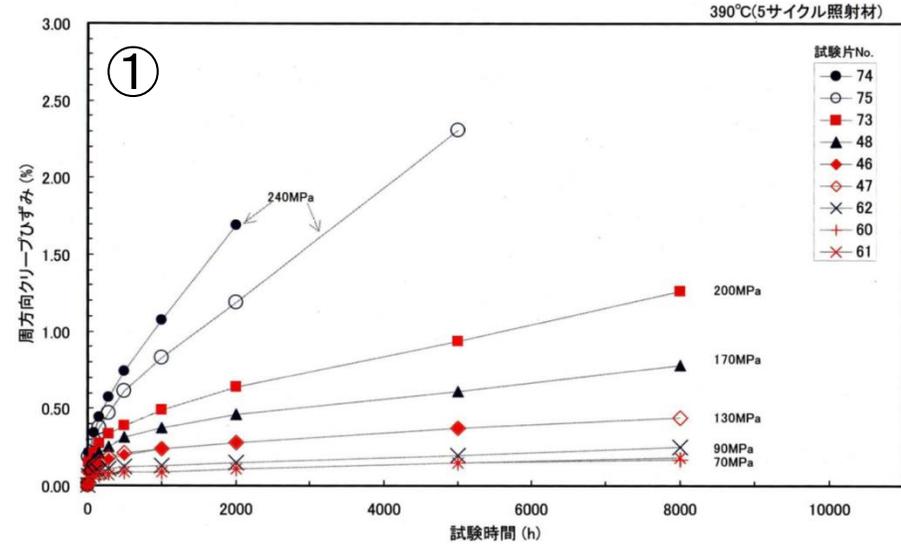
・“**クリープ破断ひずみ基準**”については、破断ひずみが従来の基準である1%以上であることを確認するために、試験工程内で1%以上の周方向クリープひずみが期待できる条件(①を参考に設定)とする。

・“**クリープ速度の評価**”については、二次クリープ領域まで含めて、1FSFPでの損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。

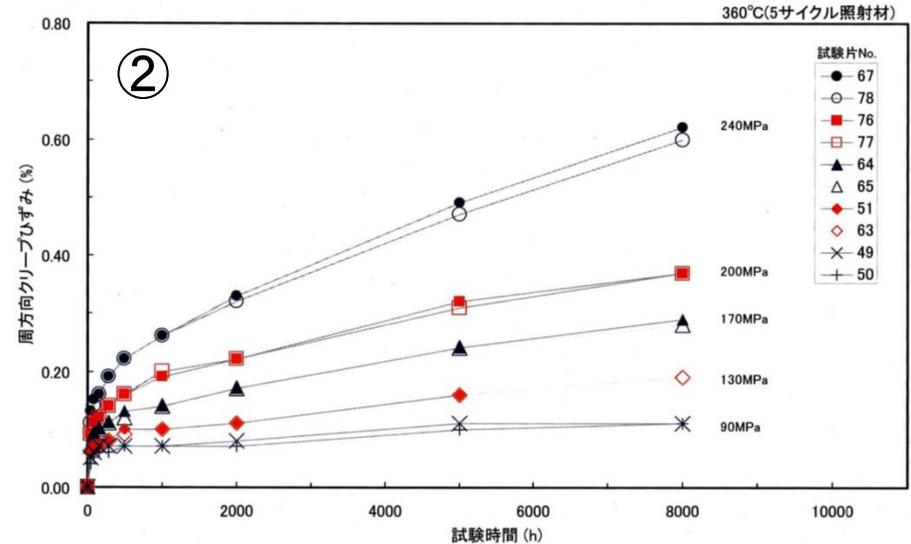


装置構成概略図

(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16年6月。

### 【試験計画策定】

従来知見や昨年度までの事業の成果を考慮し、試験計画を策定した。試験計画では、予備試験の必要性について検討を行い、予備試験の内容について決定した。

### 【試験準備・試験片製作】

予備試験用および本試験用（H27年度試験分）の試験片について製作が完了した。照射試験片は照射後試験施設に保管されていた使用済燃料集合体の部材から採取されており、燃料集合体から採取する試験片に関して集合体解体/脱ミート/切断と計画通りに加工した。

### 【予備試験】

以下の予備試験を実施し、所定の条件で試験が問題なく実施可能であることを確認した。また、予備試験結果から本試験条件を決定した。

### 予備試験内容

#### 傷付与モックアップ試験

目的: 瓦礫による傷付与条件を決定する。

#### 端栓溶接・内圧封入モックアップ試験

目的: 予備酸化後の未照射被覆管及び照射済被覆管を用いて、端栓溶接条件及び内圧封入溶接条件を確認する。

#### 海水付着モックアップ試験

目的: 予備酸化後の未照射被覆管及び照射済被覆管等を用いて海水付着試験条件及び海水成分の付着量を確認する。

#### 高ひずみ試験寸法測定モックアップ試験

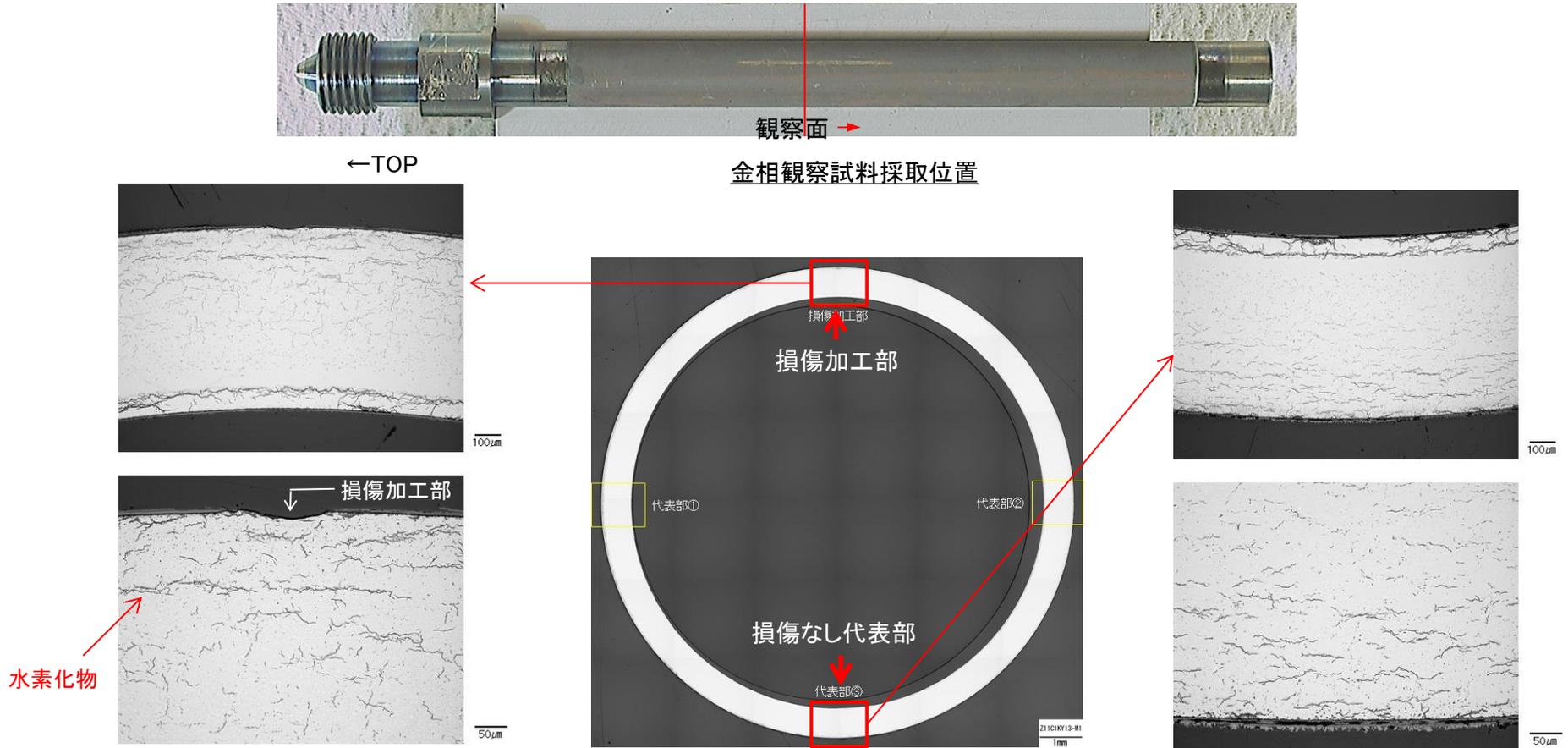
目的: 高ひずみ試験において、所定の精度（ $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度）で被覆管試験片の外径が測定できることを確認する。

#### 水分調整雰囲気調整モックアップ試験

目的: 要求される雰囲気条件を達成するための設定（キャリアガス流量、水温など）を決定する。

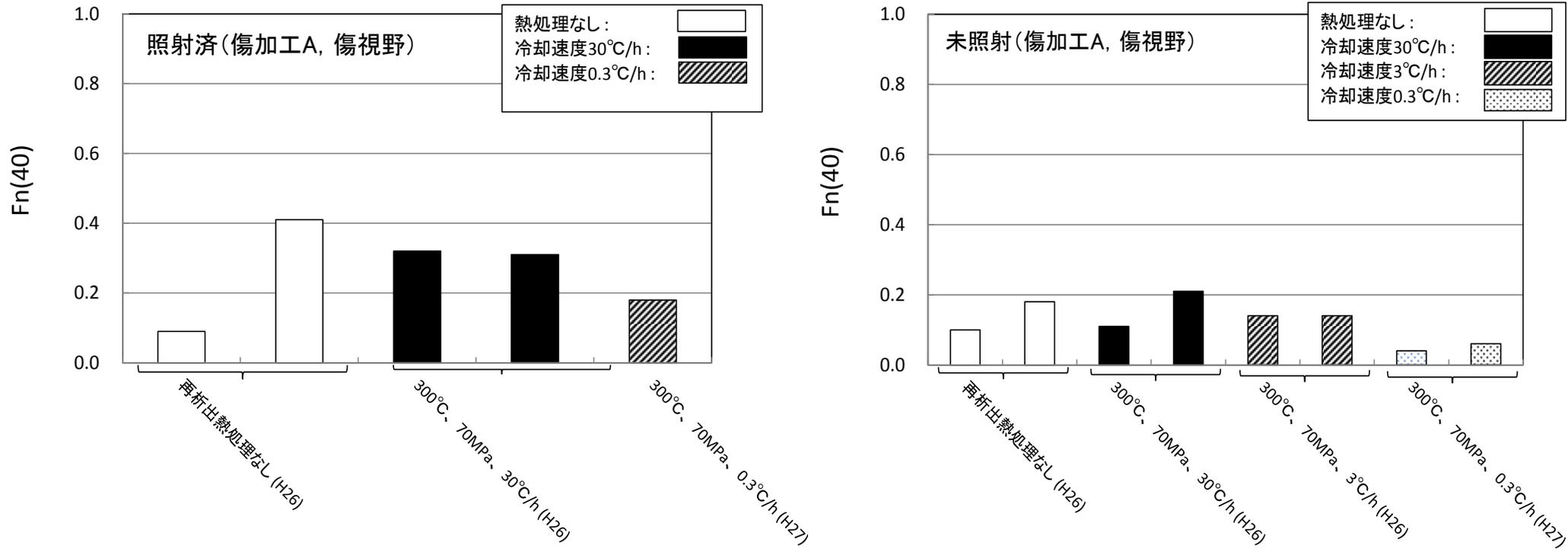
## 低延性条件試験: 水素化物析出挙動確認試験結果(例)

(試験片タイプA(照射材)、温度300°C、冷却速度0.3°C/h、周方向応力70MPa、傷付与)



水素化物は周方向に析出しており、水素化物再配向への傷付与の影響は認められなかった。

## 低延性条件試験：水素化物析出挙動確認試験結果（例）

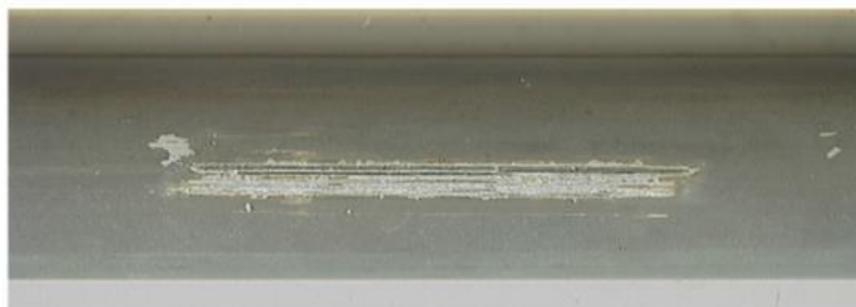


$$Fn(40) = \frac{\text{管半径方向に対し} \pm 40^\circ \text{以内に配向した水素化物の累積個数}}{\text{水素化物の累積個数}}$$

傷付与した照射済及び未照射試験片とも、冷却時に水素化物が径方向に再配向する可能性は低いと考えられる。

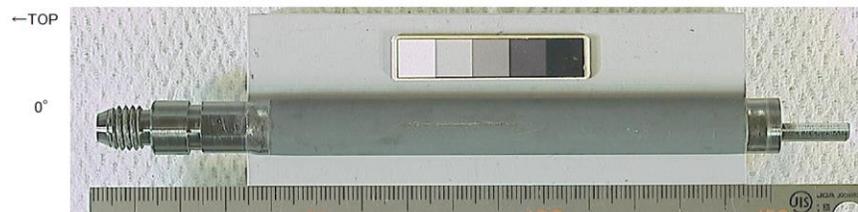
### 高ひずみ条件試験：クリープ試験結果（例）（傷+海水付着の影響）

#### ①クリープ破断試験



試験片タイプA（照射材）、温度400℃、  
周応力240MPa、傷+海水付着、1000h

周方向ひずみ：1.55%



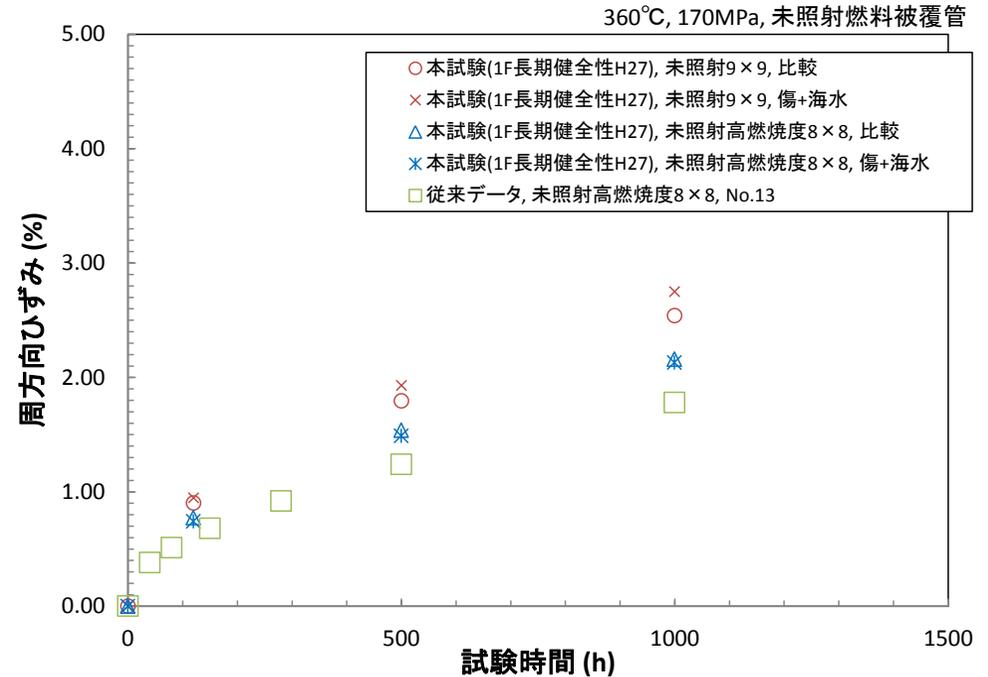
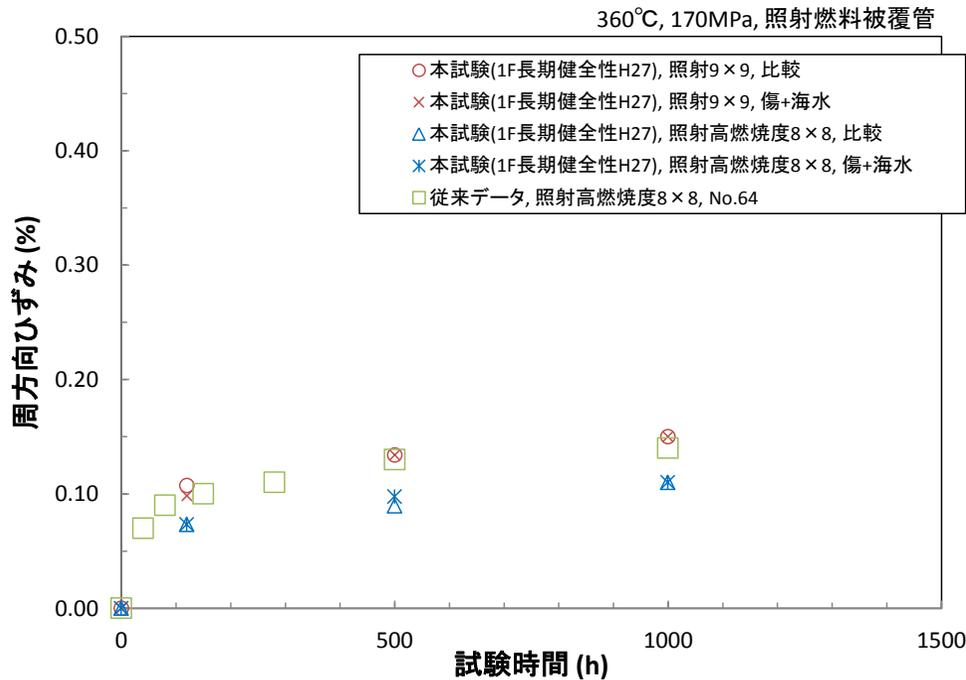
試験片タイプB（照射材）、400℃、  
周応力240MPa、傷+海水付着、1000h

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）

### ②クリープ速度試験



1000時間までの試験では、損傷付与有無による明瞭な差異はなく、クリープ速度への傷＋海水付着の影響は認められなかった。今後4000時間程度まで試験を継続する計画である。

\* 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16年6月.

## 乾式保管における燃料健全性確認方法の調査

## ①燃料集合体確認手法の調査

1F SFPに保管されていた燃料の健全性を確認する手段として、従来から用いられている非破壊検査などの手法を調査するとともに、その手法を検査対象の燃料に適用する際の課題を抽出した。

1F SFP保管燃料に非破壊検査手法を適用する際の運用性と課題(案)

検査項目	主な非破壊検査手法	通常燃料	瓦礫混入燃料(上部タイププレート把持可)
外観検査	外観目視検査	○	○
寸法検査	外観目視検査、変位センサ等	○	△(測定ツールと瓦礫の干渉)
シッピング検査	放射性核種測定、放射能強度測定	○	△～×(核種漏えい有無の判定が難しい等)
漏えい燃料棒検知	超音波法探傷試験	○	△(瓦礫の干渉、被覆管変形時の測定精度等)
燃料内部観察	ファイバースコープ	○	△(瓦礫の干渉、観察範囲の限定等)
酸化膜厚さ測定 (内外周燃料棒、支持格子)	渦流探傷試験	○	△(燃料棒等の付着物が強固な場合等、皮膜厚さ測定に影響を及ぼす可能性あり)
燃料棒付着クラッド調査	成分分析	○	△(燃料棒の付着物が強固な場合等、かき取り性に影響を及ぼす可能性あり)
被覆管等欠陥検出	ガイド波、X線CT、3Dカメラ計測、アコースティック・エミッション試験等	* 1	* 1

瓦礫混入燃料(上部タイププレート把持不可)および漏えい燃料は、乾式保管適用基準から外れるため対象外。

○:通常実施されている、あるいは実施可能と考えられる検査技術、△:実施にあたり、検討が必要と考えられる検査技術、×:適用が難しいと考えられる検査技術

\* 1:サイト燃料プールでの検査適用実績がなく、成立性についての検討が別途必要。

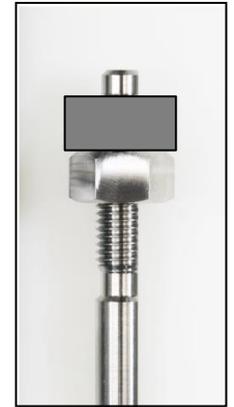
## ②安全審査時の考慮事項に関する調査と課題の整理

1F SFP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、1F SFP環境を経験した燃料の特性を考慮した燃料健全性評価および燃料健全性の考え方/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】

1F4号機のSFP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。H26年度には、燃料部材のクラッドへの海水成分の移行状況、取り込み量を評価した。

H27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する。

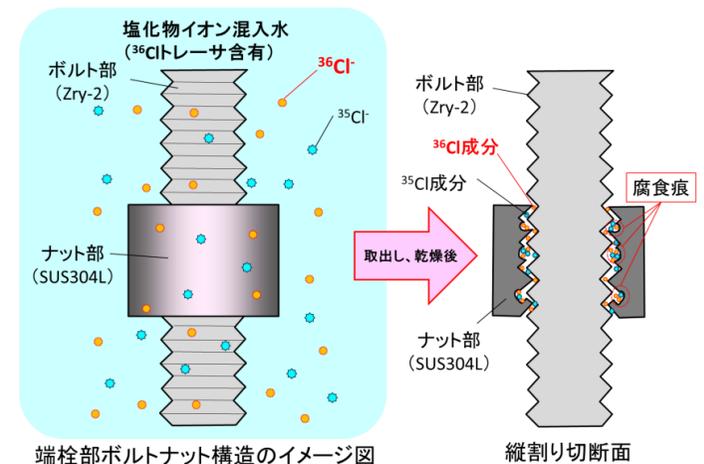


上部端栓部材 (実機材)

## 【試験計画】

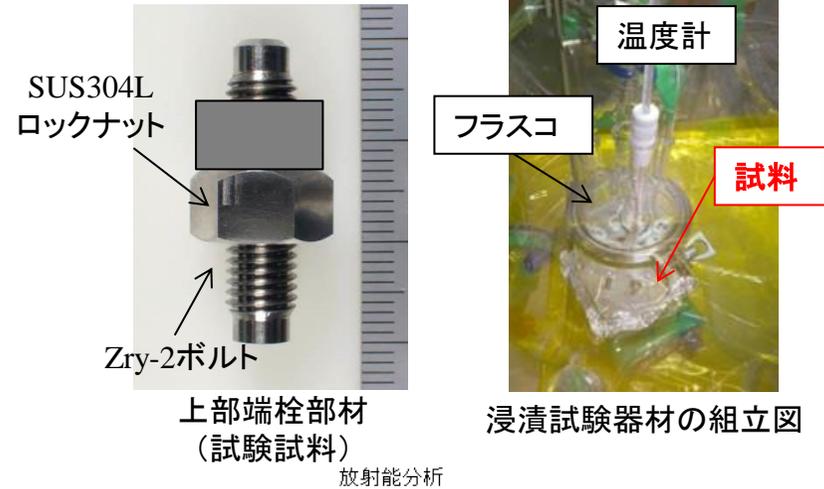
放射性トレーサ(Cl-36)を添加した温希釈海水中に上部端栓部材を一定時間浸漬して取出した試料内表面の放射能分析により、すきま構造部に残留する海水成分量を定量し、海水成分の燃料部材への移行挙動を評価する。

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する(N=3以上)。

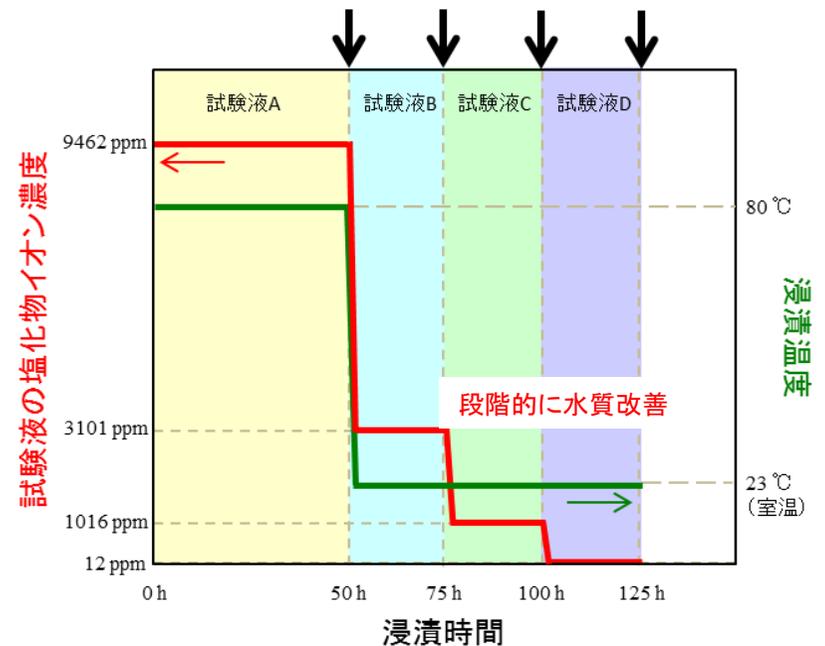


## ■ 浸漬試験

- 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: 1F4号機SFP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

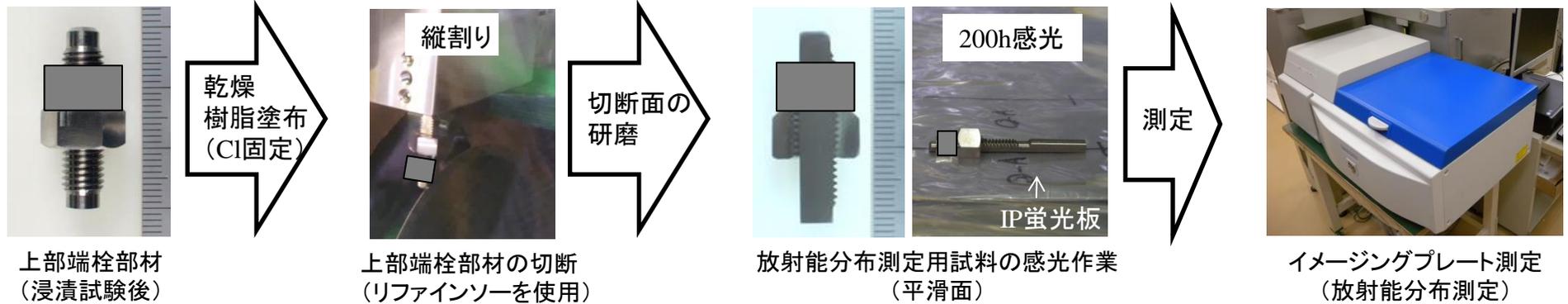


## 4. 本事業の実施内容 (2) 長期健全性に係る基礎試験 (3/4)

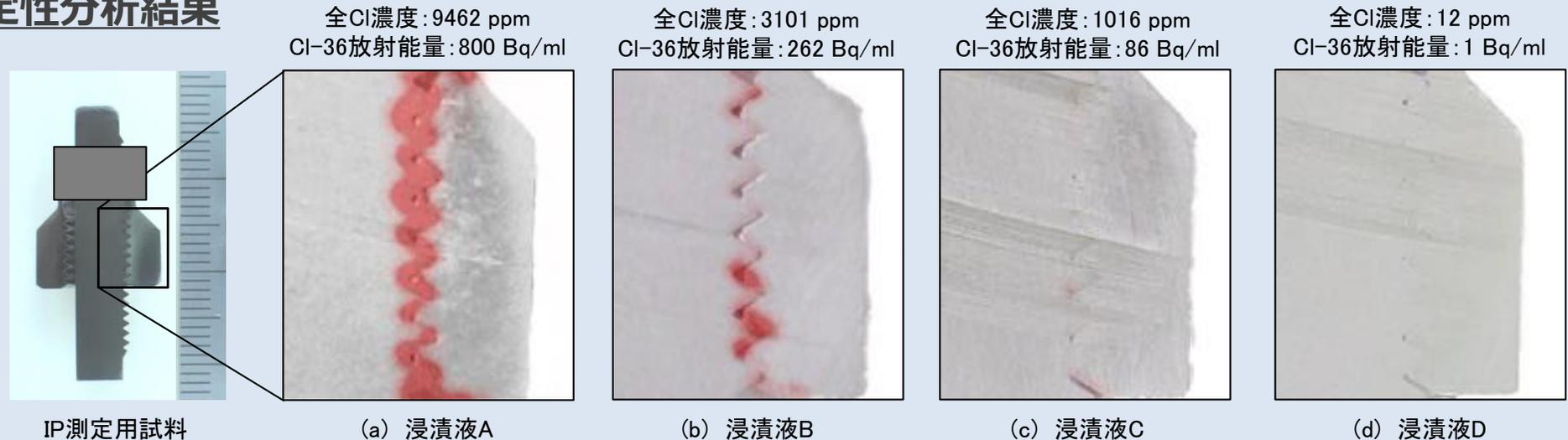
No.23

### ■ 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



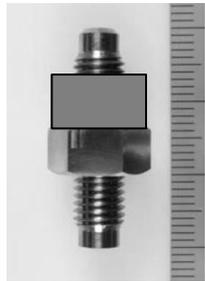
放射能分布測定結果 (IP測定結果と断面写真とを合成したもの)

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 (2) 長期健全性に係る基礎試験 (4/4)

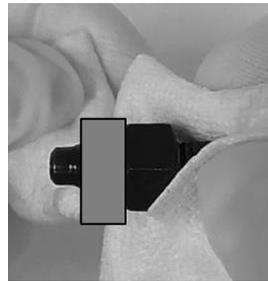
## ■ 定量分析 (放射エネルギー測定: β線測定)

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



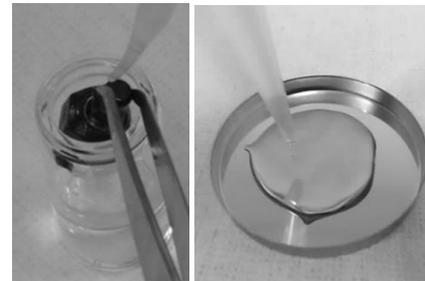
上部端栓部材  
(浸漬試験後)

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



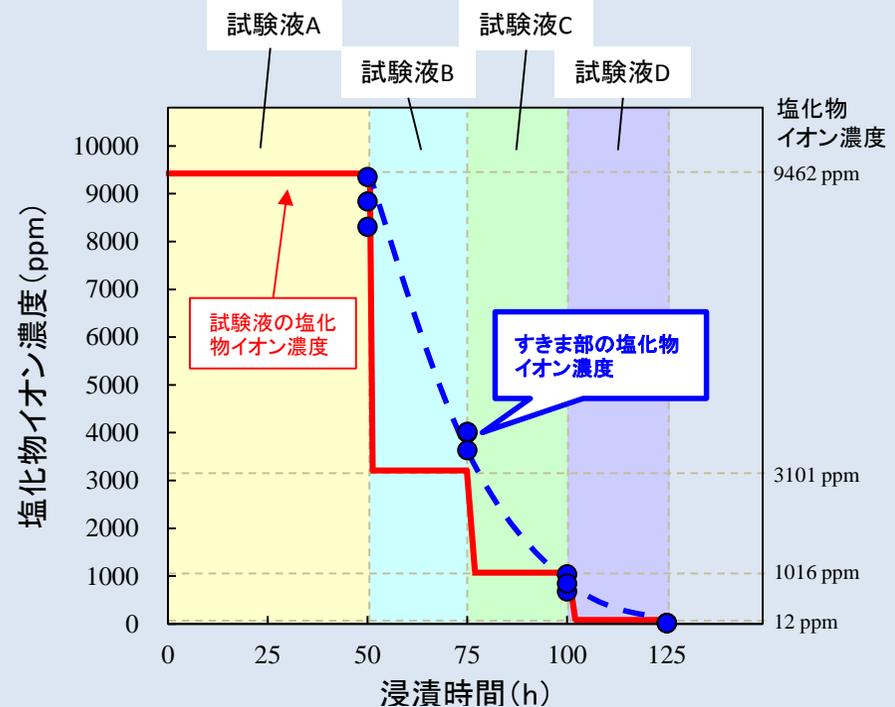
β線測定 (10min測定)  
(Model: LBC-4312B)

## ■ 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、すきま部の海水成分は、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。

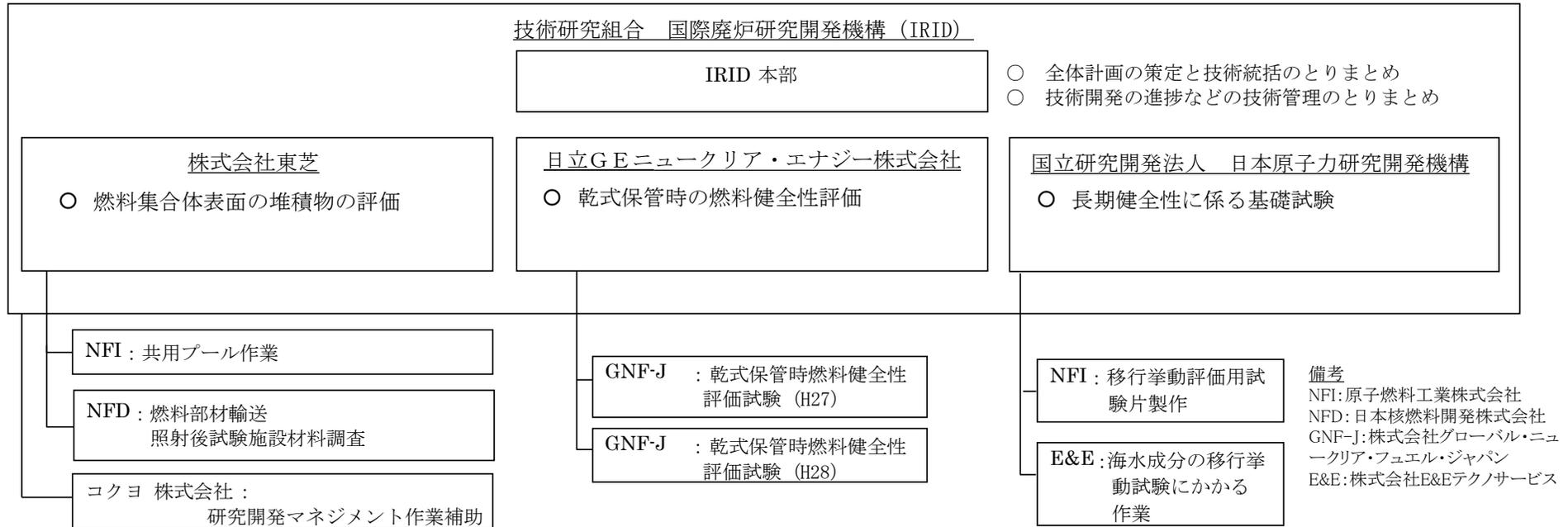
すきま部の海水成分の取り込み量は、プール水の水質改善によって少なくなり、プール水の海水成分量と同様の経時変化であったと推定される。



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出した燃料集合体の長期健全性評価を実施する。



体制図

### (1) 学会等を通じた報告・情報収集

中長期的視点での人材育成、国内外の叡智の結集及び情報発信の充実という複数の観点より、以下の学会発表及び当該学会等での情報収集を実施した。

- 日本原子力学会2015年秋の大会, 9月9-11日, 静岡大学  
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に関する以下6件の発表
  - 全体計画と平成26年度成果の概要
  - 共用プール移送後の福島第一原子力発電所4号機使用済燃料の状態調査
  - ガンマ線照射下希薄人工海水での異材すきま試験片を用いた電気化学試験
  - トレーサによる海水成分移行評価
  - 被覆管酸化皮膜の海水成分移行挙動評価
  - 湿式保管における使用済燃料の健全性評価状況と課題
- Top Fuel2015, 9月13-17日, Zurich, Switzerland  
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に関する以下2件の発表
  - Evaluation of corrosion behavior for fuel assembly materials in the diluted artificial seawater
  - Effects of scratch on hydride precipitation behavior of Fukushima spent fuel cladding in dry storage
- Extended Fuel Storage Collaboration Program, 12月1-3日, Charlotte, USA  
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に関する以下1件の発表
  - Fukushima Spent Fuel Defueling Status

### (2) 国内外の叡智の結集

- 「使用済燃料の長期健全性評価に関する専門委員による検討会」(平成27年7月17日)を設け、専門委員(渡邊 東北大学教授、明石 コンサルタント、亘 電力中央研究所)から、研究内容の方向性及び課題等に関する技術的な助言を受けた。
- 「使用済燃料の長期健全性評価に関する専門委員による検討会」(平成28年3月1日)において、平成27年度の成果を説明し、専門委員から、今後の評価等に関する技術的な助言を受けた。

### (3) 試験条件や開発仕様の明確化

- 「使用済燃料の長期健全性評価に関する専門委員による検討会」(平成27年7月17日)において、専門委員から、研究内容の方向性及び課題等に関する技術的な助言を受け、試験条件の策定を行った。

### (4) 廃炉作業や他の研究開発との連携及び研究の管理

- 東京電力株式会社の担当者と毎週定期的に計画の確認、進捗状況報告を実施、試験及び作業状況などの情報交換を実施し連携している。
- 廃炉・汚染水対策チーム会合事務局会議に毎回、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作業実績と予定を報告している。

### (5) 福島第一原子力発電所等における作業管理

- 東京電力株式会社現場担当者と「福島第一原子力発電所の廃炉に向けた取り組みに関わる覚書」に基づき、燃料集合体表面の堆積物の評価における共用プールでの試験片の取出し、搬送作業に関して、適切な安全管理体制を構築するよう協議している。

### (6) 事業の報告

- 事業の実施計画、進捗状況については原則毎月報告している。
- 事業成果等について、原則として半期毎に報告するとともに、事業終了時には実績報告書を作成し提出する。

### (7) 情報発信の充実

- IRIDの成果報告としてまとめた研究開発成果概要について、平成26年度版(英語版)及び平成27年度版(日本語版)を作成し、Webサイトへ掲載するなどを通じて、海外を含め一般の人を対象に分かりやすく情報の発信を行った。

### (8) 代替案の事前準備

- 燃料集合体表面の堆積物評価において、共用プール内設備点検などの工事期間変更に伴い共用プール内での本作業工程変更が必要となったため、早急に代替工程を検討し見直しを行った。また、その内容について事務局に報告を行った。

## 7. 本事業の運営方針

### 目標達成を判断する指標の設定

事業実施項目	目標達成を判断する指標	平成27年度成果の判定
燃料集合体表面の堆積物の評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・共用プールへ移送した4号機の使用済燃料の表面に認められた白色の堆積物の分析を行い、長期健全性に影響する成分の有無を確認すること。</li> <li>・共用プールへ移送した4号機の使用済燃料から採取したステンレス鋼部材を用いて、電気化学的試験を実施し、共用プールでの長期健全性を確認するための腐食すきま再不動態化電位を取得すること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・白色の堆積物の分析に用いるロックナットを1F4号機の使用済燃料から採取し、照射後試験施設へ輸送するための準備作業としてロックナット採取/輸送容器積込作業手順の検討、輸送計画書案の作成を行った。また、照射後試験施設で実施する試験の準備作業として、ホットセル内で試験を実施するための試験要領の作成した。</li> <li>・電気化学的試験において、ロックナット電極を用いた測定を行い、電気化学的試験に適用可能であることを確認した。</li> </ul>
乾式保管時の燃料健全性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海水や瓦礫等の重畳による乾式保管時の燃料健全性への影響を評価するため、水素化物析出の挙動およびそれに伴う強度評価とクリープ特性について試験を実施し、従来の健全燃料で取得されているデータと比較評価を実施すること。クリープ試験に関しては、平成28年度までに累積4000時間以上の試験データを取得し、評価を実施すること。</li> <li>・乾式保管における燃料健全性確認方法について机上検討を行い、成立性や課題について明確化すること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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、従来データ等と比較した。平成27年度に得られた結果では、瓦礫による傷や海水付着等がこれらの特性に与える影響は小さかった。平成27年度までに累計1000時間まで取得したクリープ試験データでは、従来の健全燃料のデータとの差異は小さかった。引き続き試験を継続し、平成28年度までに累計4000時間以上のデータを取得する予定。</li> <li>・既存知見の調査・整理を行い、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た。</li> </ul>
長期健全性に係る基礎試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・長期的な健全性を確保するためには、塩化物イオンの移行挙動を把握しておく必要があるため、放射性トレーサ(CI-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、放射能分析によりすき間構造部に残留する海水成分量を定量すること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基礎試験により、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。</li> </ul>

# 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 (最新状況)
		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燃料集合体表面の堆積物の評価	燃料部材輸送準備	→												▽輸送に関する手続き完了												燃料部材輸送準備完了 (H27年度)
	燃料部材採取、輸送容器積込	→												→												H28年度実施
	燃料部材輸送	→												▽輸送完了												H28年度実施
	照射後試験施設試験準備 (材料試験条件検討)	→												▽試験準備完了												照射後試験施設試験準備完了 (H27年度)
	照射材材料調査 (堆積物分析、電気化学的試験)	→												▽試験終了												H28年度実施
	評価	→												→												H28年度実施
②乾式保管時の燃料健全性評価	試験計画作成	▽試験計画の策定												完了												完了
	試験準備・試験片製作	予備試験用製作完了▽												▽平成27年試験開始用製作完了												本試験用の試験片を加工中 (H27年度分完了, H28年度分加工中)
	予備試験	→												→												予備試験完了
	水素化物析出挙動等確認試験	→												▽短時間試験終了												本試験完了 (H27年度分)
	破壊試験	→												→												破壊試験完了 (H27年度分)
	クリープ試験	→												▽短時間試験結果												本試験完了 (H27年度分)
	破壊試験	→												→												破壊試験完了 (H27年度分)
	評価	→												→												評価完了 (H27年度分)
(2) 長期健全性に係る基礎試験	試験計画作成	▽試験計画の策定												完了												完了
	試験片製作	契約手続き完了▽												▽試験片製作完了												"
	放射性同位元素受入	契約手続き完了▽												▽放射性同位元素受入れ完了												"
	移行挙動評価試験	試験準備												試験(全3回) →												試験終了
	評価	1回目 2回目 3回目 取得データ検討、評価												→												"
	主要なマイルストーン	▽中間報告												▽中間報告												▽最終報告

- ✓ 本事業の内容に関してこれまで当初計画どおりに進められている。
- ✓ 湿式保管関連の試験についてH27年度は、照射後試験施設へロックナット輸送するための準備作業、および照射後試験施設で実施する照射材材料調査の準備作業を実施した。H28年度は、H27年度に準備作業として作成した輸送計画、照射後試験施設での試験要領に従い、1F4の使用済燃料から採取したロックナットを用いて白色の堆積物分析、電気化学的試験等を実施し、得られた成果に基づき、SFPで海水注入や瓦礫落下の履歴のある使用済燃料を共用プールで長期保管するための管理手法案を提示する。
- ✓ 乾式保管関連の試験についてH27年度は、比較的短時間の試験を実施し、乾式保管時の燃料健全性に及ぼす影響を評価した。その結果、水素化物析出挙動及びクリープ特性に及ぼす損傷付与(傷、海水付着等)の影響は小さかった。H28年度は、H27年度より長時間の試験を実施し、これらが重畳した場合の影響について評価する。乾式保管における燃料健全性確認方法の調査では、既存知見等を調査し、1F SFP保管燃料特有の環境履歴を考慮した際の課題等を抽出した。
- ✓ 基礎試験については、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。