## **Nuclear Materials Letters**

(2018年3月)

(部会ホームページ <a href="http://www.aesj.or.jp/~material/">http://www.aesj.or.jp/~material/</a>)

#### 目 次

Ι.	2017年 秋の大会 企画セッション報告			1					
	「事故炉廃止措置時における機器材料のリスク管理技	術の検討」の開催にあ	たって						
		原子力機構	加治 芳行						
	(1) 事故炉廃止措置のために今後検討すべきこと,	実施すべきこと							
		東北大学	青木 孝行						
	(2) リスク管理の概念を取り入れた事故炉廃止措置	畳のアプローチ							
		IRID	清浦 英明						
	(3) 事故炉廃止措置時における腐食リスク	東北大学	渡邉 豊						
	(4) 事故炉廃止措置のハザードとリスクをテーマにした学生教育								
		京都大学	森下 和功						
	(5) パネルディスカッション	原子力機構	小川 徹						
		法政大学	宮野 廣						
ΙΙ.	第 9 回材料部会奨励賞受賞者のよろこびのことば			46					
Ш.	関連する国際会議のリスト			49					
IV.	運営委員会 委員名簿			51					
V.	寄稿のお願い			52					
VI	編集後記			52					

#### I. 2017年 秋の大会 企画セッション報告

原子力機構 加治 芳行

福島第一原子力発電所 1~3号機は事故後、高い放射線により接近することが容易でなく、原子炉圧力容器や格納容器、原子炉建屋の内部状況に事故後6年以上経過した時点でも不明な点が多い。このような困難な状況の中で廃止措置活動を着実的に進めていくには、「安全性」と「経済性」の観点からリスクを分析評価し、作業の優先順位を明確にするなど、多角的かつ本質的な検討と一貫したアプローチが求められる。また、不明な点の多い中で安全機能を担っている主要構造物の事故によるダメージやその後の経年劣化を考慮し、安全機能に対するクリティカル部位を抽出して保全活動を実施するなど、時間軸を意識したリスク管理を実施する必要がある。その様な観点で、福島第一原子力発電所 1~3号機の廃止措置を想定して、事故炉廃止措置時におけるリスク管理のあり方について議論する場を2017年の原子力学会秋の大会期間中の材料部会セッションとして開催した。

本セッションは、6名の講師によるショートプレゼンテーション後、パネリストディスカッションを行った。参加者は、70名近くであった。ショートプレゼンテーションにおける講師の方々は別途添付するスライドを用いて講演いただいた。

パネルディスカッションでは、現時点でも原子炉建屋内は高放射線量率と事故で発生した瓦礫等で立ち入ることが容易でなく、原子炉圧力容器や格納容器はもちろんのこと溶融した燃料デブリなどの分布や存在状態は不明であることから、構造材料のリスクについて確率論的に分析評価する新しいアプローチや、リスクの時間依存性という観点での整理が重要であること、原子力学会では燃料と材料、水化学などの研究者が連携して研究開発を進めることの重要性や原子力工学以外の分野の知識を取り入れる櫃必要があるなどのことが提案された。

また、数世代にわたって長い期間この問題に取り組むことになるので、大学における学生教育 や人材育成が重要であること、とりわけ、当該リスク研究の学問分野としての体系化行うことと 名称の付け方が大切であることなど、積極的な議論が交わされた。

下記に本企画セッションのプログラムと企画セッションの様子を示す。また、ここではより多くの部会員に情報を提供するため、講演資料(一部資料は抜粋)を掲載することで概要をご報告する。講演いただいた先生方の厚意に感謝いたします。

#### 「事故炉廃止措置時における機器材料のリスク管理技術の検討」

(9月14日(木) 13:00~14:30 C会場) 座長 原子力機構 山本 正弘

(1) 事故炉廃止措置のために今後検討すべきこと、実施すべきこと

(東北大) 青木 孝行

(2) 事故炉廃止措置リスク管理の現状で考えられるアプローチ

(IRID) 吉澤 厚文

(3) 事故炉廃止措置時における腐食リスク

(東北大) 渡邉豊

(4) 事故炉廃止措置のハザードとリスクをテーマにした学生教育

(京都大) 森下 和功

(5) 話題提供1

(原子力機構) 小川 徹

(6) 話題提供 2

(法政大) 宮野 廣

(7) パネルディスカッション

















日本原子力学会 秋の大会2017

会期:平成29年9月13日(水)~15日(金)

会場:北海道大学(北海道札幌市)

材料部会セッション 「事故炉廃止措置時における機器材料のリスク管理技術の検討」

# (1)事故炉廃止措置のために 今後検討すべきこと、実施すべきこと

平成29年9月14日(木) 東北大学 青木孝行

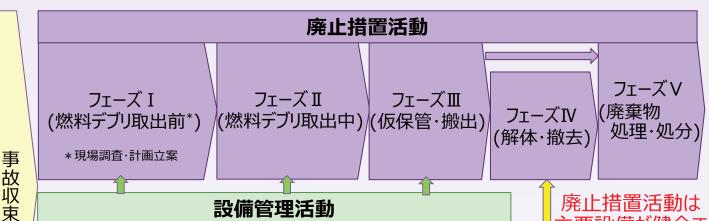
## 目次

- 1. 事故炉廃止措置時における 廃止措置活動と設備保全活動
- 2. 廃止措置活動に関するリスク管理方法の検討
- 3. 設備保全活動に関するリスク管理方法の検討
  - ①主要構造物の健全性維持活動
  - ②主要構造物の安全機能信頼性向上活動
- 4. まとめ

# 事故炉廃止措置時における 廃止措置活動と設備保全活動

2

# 廃止措置活動と設備保全活動の関係



#### 設備管理活動

#### ①主要設備の健全性維持

- •クリティカル部位の特定
- •検査
- •評価(長期健全性)
- •是正措置(補修等)
- ②安全機能の信頼性向上
- ・確率論的リスク評価 (内的事象、外的事象)
- •ストレステスト

経年変化を考慮し、どの程度、時間的余裕があるか?

廃止措置活動は 主要設備が健全で あることが大前提

#### 廃止措置の命題

- ◆ 如何に安全着実 に廃止措置活動 を進めるか。
- ◆ 如何に効率的効 果的に設備保全 活動を行うか。

#### 設備保全活動②

# 確保すべき安全機能と それを支える構造物

- ◆フェーズ I:燃料デブリ取出前(調査・計画立案)
  - ・「止める」機能 ⇒建屋/PCV / RPV /ペデスタルの<mark>構造保持機能</mark>の確保「要」
  - 「冷やす」機能 ⇒原子炉冷却系の構造保持機能とバウンダリ機能の確保「要」
  - 「閉じ込める」機能 ⇒PCV/建屋の閉じ込め機能の確保「要」
- ◆フェーズⅡ:燃料デブリ取出中
  - ・「止める」機能 ⇒建屋/PCV / RPV /ペデスタルの<mark>構造保持機能</mark>の確保「要」
  - 「冷やす」機能 ⇒原子炉冷却系の構造保持機能とバウンダリ機能の確保「要」
  - ・「閉じ込める」機能 ⇒PCV/建屋/新設バウンダリの閉じ込め機能の確保「要」
- ◆フェーズⅢ:燃料デブリ取出後(燃料デブリの一時保管·搬出)
  - ・「止める」機能⇒不要
  - 「冷やす」機能⇒不要
  - 「閉じ込める」機能⇒建屋/新設バウンダリの閉じ込め機能確保「要」
- ◆フェーズIV:設備解体・撤去
  - ・「止める」機能⇒不要
  - ・ 「冷やす」機能⇒不要
  - 「閉じ込める」機能→建屋/カバーの閉じ込め機能確保「要」
- ◆フェーズ V:処理・処分

基本安全機能は主要 設備が持つ機能で支 えられている。

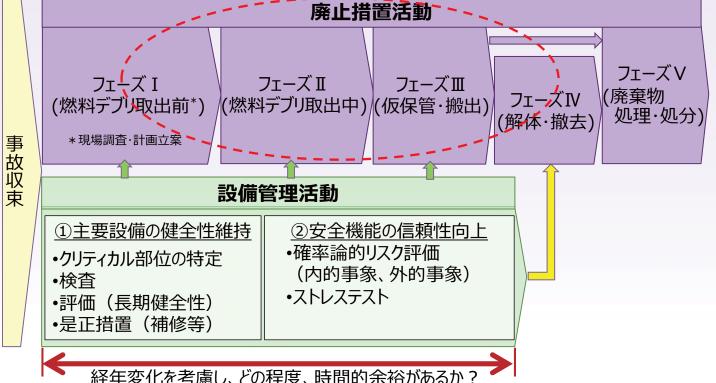
⇒主要設備の健全性 維持が不可欠。

2. 廃止措置活動に関する リスク管理方法の検討

4

# 戦略的な廃止措置活動の進め方

(必要不可欠な情報の厳選とそれに基づく計画立案)



栓牛変化を考慮し、との柱皮、時间的未給かめるか:

6

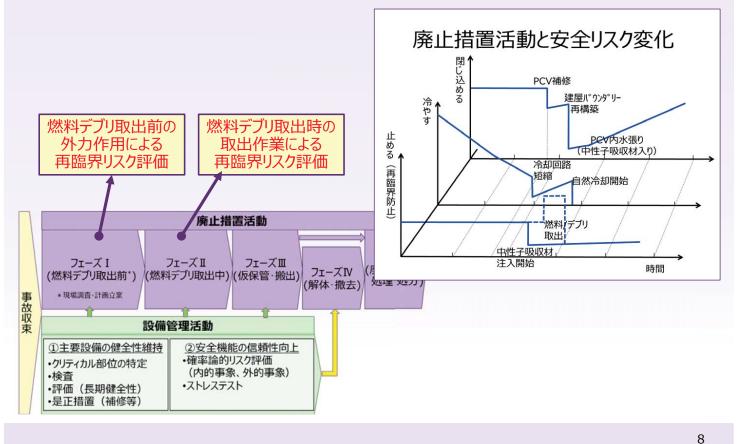
#### 廃止措置活動

# デブリ取出の必要条件と優先事項の抽出

	燃料/デブリ取出手順	必要条件	優先事項
1	燃料/デブリ取出方法の決定	燃料/デブリの位置情報(ペデスタル外にあるか否かが重要) 各種デブリ取出方法の利害得失検討結果	<ul><li>燃料/デブリのペデスタルタトの 有無調査(開口部、サンプ)</li></ul>
2	PCV補修 (PCV水張り工法を想定)	漏えい箇所/漏えい可能性箇所の特定(特に補修が難しい箇所) 補修方法の準備 長期健全性評価法の準備(経年劣化、耐震強度)	<ul><li>漏えい箇所/漏えい可能性箇所(補修難)の特定調査</li><li>補修方法/評価方法の確立</li></ul>
3	PCV内水張り	水張り方法、水張りライン、水源の確保 小漏えい発生時の補修方法、大漏えい時の緊急対応方法の準備	<ul><li>漏えい時の補修方法確立</li><li>緊急対応方法の確立</li></ul>
4	取出装置の仕様決定/設計製造	燃料/デブリの位置情報、デブリの形態/性状/特性情報 装置のサイズ、重量、強度、耐放射線性に関する制限情報	(現状の情報でも幅をもたせた 設計条件で設計可能。不可欠 な情報はない。)
5	取出装置等の搬入・設置のため の現場準備	搬入可能なルート確保(干渉物撤去)、作業場確保 設備(資機材)、作業員、作業要領書の準備 作業環境(線量率、照明、通信)の確保	4個検証す
6	取出装置等の搬入	搬入ルートの確保 設備(取出装置、揚重設備/搬入設備)、作業員、作業要領書の準備 作業環境(線量率、照明、通信)の確保	合後詳細検討
7		PCV内/RPV内の構造物状態情報、燃料/デブリの位置情報 設備(ルート確保用装置、揚重設備)、作業員、作業要領書の準備 作業環境(スペース、線量率、照明、通信)の確保 作業場の気密性/負圧確保(建屋カバー設置)	PCV内/RPV内構造物等による作業阻害要因の調査・燃料/デブリの位置/量調査
8	取出装置の設置 (直前に取出装置で燃料/デブ リへのアクセスルート確保?⇒前項)	<mark>設置可能なか° 刀状態/強度(床および建屋強度)</mark> 設備(取出装置、揚重設備)、作業員、作業要領書の準備 作業環境(スヘ°-ス、線量率、照明、通信)の確保	• 設置可能なオペフロ状態/強度 (床および建屋強度) 調査
9		設備(サンプリング/取出装置、収納容器)、作業員、作業要領書の準備作業環境(スペース、線量率、照明、通信)の確保、作業場の気密性確保作業場の気密性/負圧確保(建屋カバー設置)	
10	収納容器の搬出 取出装置の解体・搬出	作業場所、収納容器/取出装置の搬出可能なルト 設備(揚重設備/搬出設備)、作業員、作業要領書の準備 作業環境(線量率、照明、通信)の確保、作業場の気密性確保 作業場の気密性/負圧確保(建屋カバー設置)	7

### 廃止措置活動

## 事故炉廃止措置時における 安全リスク評価及び管理

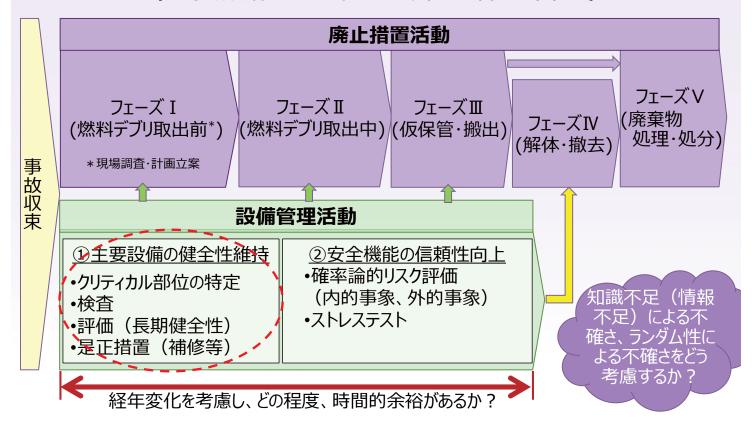


# 3. 設備保全活動に関する リスク管理方法の検討

- ①主要構造物の健全性維持活動
- ②主要構造物の安全機能信頼性向上活動

# 戦略的な設備保全活動の進め方

(主要設備クリティカル部位の保全管理)



設備保全活動①

# 設備健全性維持の戦略的検討

原子炉建屋等 RPV接続配管 PCVRPV安全機能上の重要部位の抽出 構造強度(耐震性)原子炉建屋/PCVバウンダリーの水密性/気密性 不明点を考慮した暫定的な長期健全性評価(耐腐食性など)

#### (必要に応じて現場調査・検査) 重要部位の現状把握

- 材料(過去の供用による劣化、事故時の劣化・損傷、事故後の状態)応力(過去、事故時および事故後の負荷状態)環境(過去、事故時および事故後のバルク環境、隙間環境かど)

必要に応じ 検査技術開発

10

#### 重要部位の長期健全性評価

- 過去の供用による劣化
- 事故時の劣化・損傷
- 今後の使用条件による劣化

必要に応じ 試験研究

### 重要部位の長期健全性評価結果からクリティカル部位を特定

クリティカル部位の監視/補修計画の立案・実施

クリティカル部位の 抽出が最優先

- 対象箇所
- 実施方法
- 実施頻度

必要に応じ 補修技術開発

### 設備保全活動①

# 建屋クリティカル部位抽出の観点

- ◆建屋内のハザード源
  - ・燃料/デブリから流出したFP(ホットスポット) ・床・壁に浸透した水和性の高いCs

  - 汚染水
- ◆確保する必要のある機能
  - 構造保持機能(構造強度)
  - 「閉じ込める |機能
- ◆建屋の損傷・経年劣化
  - ・事故前までの経年劣化
  - 事故時の損傷 (地震、爆発、海水、熱、放射線)
  - ・ 事故後の経年劣化 (解体が始まるまで)
- ◆ 建屋へ作用する新たな負荷
  - ・燃料デブリ取出し装置、建屋カバーの設置等
- ◆ 上記を考慮してクリティカル部位を抽出
  - ・クリティカル部位の決定事象:外的事象(地震荷重?)

12

#### 設備保全活動①

# 鋼構造物クリティカル部位抽出の観点

- ◆PCV、RPV、配管内のハザード源

  - ・燃料/デブリ(PCV、RPV内) ・燃料/デブリから流出したFP(ホットスポット)(配管内) ・汚染水(PCV、配管内)
- ◆確保する必要のある機能
  - 構造保持機能(構造強度)
  - 「閉じ込める |機能
- ◆鋼構造物の損傷・経年劣化
  - ・事故前までの経年劣化
  - ・ 事故時の損傷 (地震、爆発、海水、熱、放射線)
  - ・事故後の経年劣化(解体が始まるまで)
- ◆ PCVへ作用する新たな負荷
  - ・PCV内水、止水用材料等(PCV冠水工法の場合)
- ◆ 上記を考慮してクリティカル部位を抽出
  - ・クリティカル部位の決定事象:外的事象(地震荷重?)

# クリティカル部位の変化・移動

- ◆事故後の経年劣化進行
  - ・複数の重要監視部位における劣化進行程度が異なり、クリティカル箇所が移動する可能性
- ◆外的事象による劣化の進行
  - ・外部事象(地震、津波、火災、溢水等)が発生した場合、 重要監視部位の劣化進行に影響を与える可能性がある。
- ◆廃炉工程の進捗による環境変化による劣化進行
  - PCV開放や水質の変更などにより環境が変化し重要監視部位 の劣化進行に影響を与える
- ◆ 新設設備の設置等による新しい条件の発生

14

#### 設備保全活動①

# クリティカル部位を特定するための 戦略的検討表

	設計	事故前			事故	対時			事故後	
主要構造物	(高応力部、高 累積疲労部等)	点検実績 (劣化部位)	大地震	過大圧力 温度	爆発	デブリ (反応、熱)	放射線	海水	腐食	他
原子炉建屋	? (解析結果)	? (劣化部)	? (解析結果) (点検結果)		建屋上層階(点検結果)	RPV ペデスタル PCV床面		RPV ^°デスタル 建屋下層階水 没ひび割れ部	RPV ^゚デスタル 建屋下層階水 没ひび割れ部	
格納容器	PCVサント゛ クッション部 ? PCVサプチャ ンコラムサポート	? (劣化部)	? (解析結果) (点検結果)	フランシ゛シール部		PCV内面 (床面近傍)		PCV内面 (床面近傍)	PCV外面 (サンドウッション) PCV内面 (床面近傍)	
原子炉容器	主フランシ゛ 給水ノス゛ル RPVスカート アンカーホ゛ルト		アンカーボルト (ゆるみ)	給水ノズル S/E CSノズルS/E		RPVスカート アンカーボルト			アンカーボルト (ゆるみ)	
主配管	PCV内配管		大丰花		<b>系今される</b>	労のな			給水配管 CS配管 FPC配管	
本表を整理し、懸念される箇所を抽出する。その上で重要箇所の点を発表である。										

検・評価を行う。

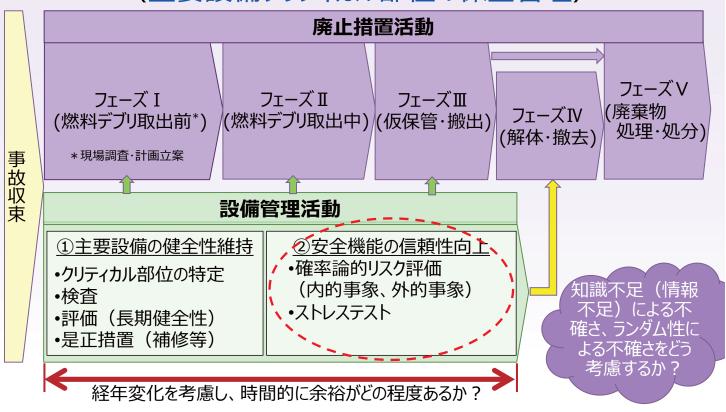
# 3. 設備保全活動に関する リスク管理方法の検討

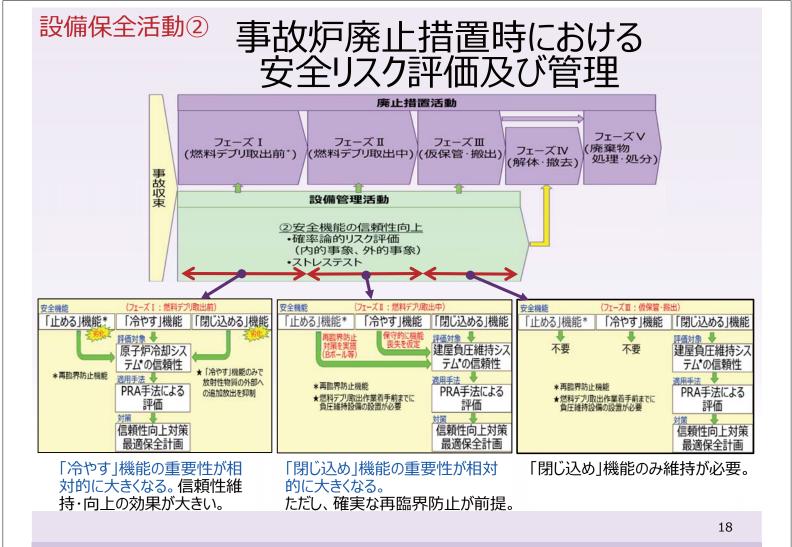
- ①主要構造物の健全性維持活動
- ②主要構造物の安全機能信頼性向上活動

16

# 戦略的な設備保全活動の進め方

(主要設備クリティカル部位の保全管理)





## 4. まとめ

### まとめ

- ◆事故炉廃止措置は不明な点が多いこともあり、安全リスクと 経済リスクの観点から戦略的な取り組みが必要
  - ・必要な安全対策をタイムリーに実施できるようにするため、 経済管理(コスト管理)も大変重要
- ◆事故炉廃止措置は、「廃止措置活動」と「設備保全活動」 の両方が必要
  - ・廃止措置活動だけでなく、設備保全活動も、安全性確保上、不可欠で、極めて重要
- ◆実動組織(NDF/IRID/東電)を支援するため、廃止措置及び設備管理の観点から基本検討\*を実施する、専門分野を横断した専門家検討組織が必要ではないか?

\*基本的考え方、目標、アプローチ方法、代替方法、盲点などの検討

20

# ご清聴ありがとうございました。

#### 謝辞

本検討の一部は、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された東北大学「廃止措置のための格納容器・建屋等信頼性維持と廃棄物処理・処分に関する基盤研究および中核人材育成プログラム」の成果である。

また、本検討を実施するにあたり、JAEA「事故炉廃止措置のためのリスク管理技術研究会」のメンバーの皆様および原電エンジニアリング㈱の関係の皆様にアドバイスいただいた。ここに謝意を表す。

### リスクという観点からのデブリ取出し

2017.9.14 リスク管理技術研究会 資料 IRID 清浦 英明 日本原電 吉澤 厚文

# 内容

- 1. 戦略プラン※におけるリスクの考え方
- 2. 廃炉における時間とリスクの概念
- 3. 時間的裕度への考察
- 4. 考察
- 5. まとめ

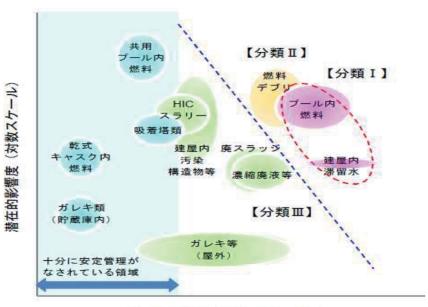
※原子力損害賠償・廃炉等支援機構が公表している「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン|を指す

### 戦略プランにおけるリスクの考え方 (総論)

- ・戦略プランでは廃炉の基本的考え方として下記5点を指摘
  - 安全、確実、合理的、迅速、現場指向
- 「迅速」の考え方には、「時間軸の意識」が重要であるが、これまでにないものを対象とするため、リードタイムを意識した検討が必要
- 放射性物質をリスク源とし、リスクアセスメントを行ったうえで、リスクを低減するプロセス(リスク対応)を実施する必要がある

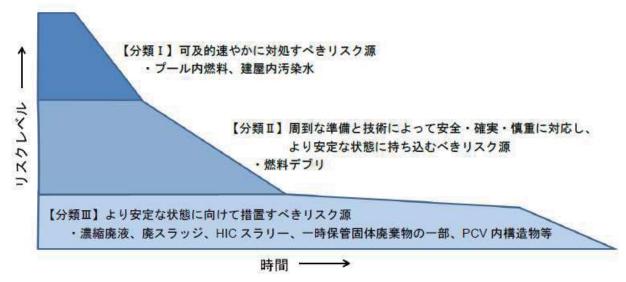
3

### 戦略プランにおける1Fリスク分析の例



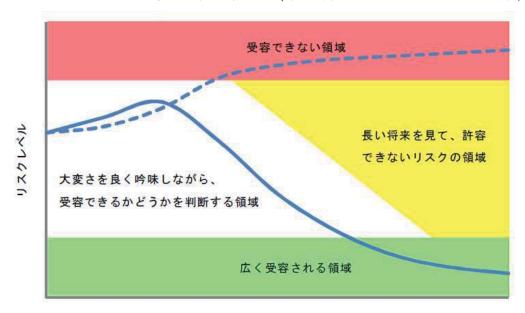
管理重要度 (対数スケール)

### 戦略プランにおけるリスク低減戦略



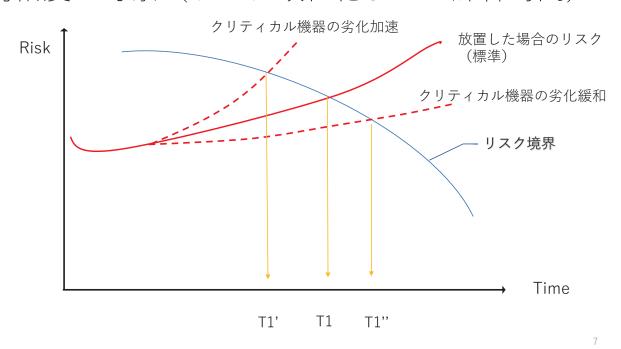
注意) 本図は、2017版ではなく、2016版より抜粋している

### リスクの時間変化 (戦略プランより抜粋)



時間

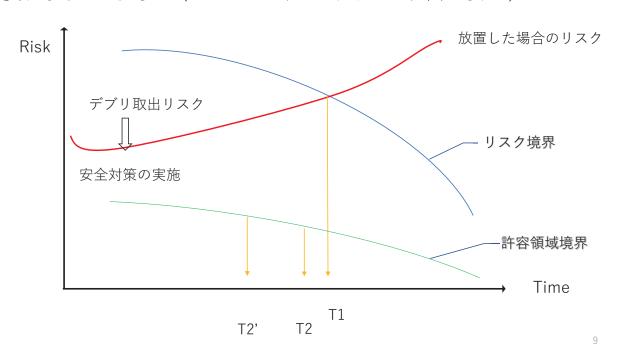
### 時間的裕度の考察(リスク顕在化までの許容時間)



許容時間はどのように考えるべきなのか

- 現在はRMが定められ、デブリ取出しの期間が定義されているが、これは特に技術的な裏付けがあって決められたものではない
- リスクの観点から議論するのであれば、リスク源である放射性物質のリスクを遮断している設備・機器の機能が劣化し、リスクが顕在化するまでの時間(T1)を、クリティカルな機器とともに同定する必要がある
- デブリ取出しが現在の状況を劣化させる可能性があれば、またはその他のリスクとして状況を劣化させる要因があれば、許容時間は短縮される(T1)
- 安全対策等で設備機能劣化を抑制し、時間を稼ぐことも可能 (T1")
- これらを"指標化"し、管理できないかはこれからの課題と認識

### 時間的裕度の考察 (デブリ取り出し許容時間)



考察:デブリ取出しにあたって

- 必要な関係性
  - T1>T2
  - これについてまだ具体的な議論は行われていない
- T1を大きくするためには(前出の議論)
  - ・リスクを決定する機器の同定、リスク要因の抽出
  - ・同機器の延命策実施(リスク要因の除去、緩和)
- T2を小さくするためには(T2')
  - 事前安全対策の充実
  - デブリ取出し時のリスク増要因の同定とその減少
  - デブリ取出しの早期完了
  - ・これらの指標化と管理

### まとめ:考慮すべき要因

- リスクの顕在化とデブリ取り出しの時間的裕度の概念について検討
  - リスクを閉じ込めている機能の同定、機能の担うクリティカル機器の寿命管理が重要
  - デブリ取り出し完了までの許容時間と行程の調和が課題
- 安全性と経済性の両立
  - これまでの議論は安全性に関してのもの
  - ここに経済性を入れた場合、リスク低減とコスト合理性のトレードオフの関係性を 指標に盛り込む必要が出てくる
  - これはデブリ取出しをどの程度工程感を持って進める必要があるのか、といった社会的合意に基づく社会技術システムとしての意思決定が必要
- 提言の実装に向けて
  - 学会等で議論を進め、考え方や方向性を確認
  - NDFの戦略プラン等に落とし込んで、実装してゆく必要がある

以上



材料部会セッション 「事故炉廃止措置時における機器材料のリスク管理技術の検討」

# 事故炉廃止措置時における 腐食リスク

東北大学 原子炉廃止措置基盤研究センター 渡邉 豊

# 事故炉廃止措置の検討プロセス

#### 基本方針

- ▶目指すべきエンドステートと取り組み方針 ▶中長期ロードマップ(政府方針)/技術戦略プラン(NDF)

#### クリティカル部位 はどこか?

#### 建屋・主要鋼構造物の現状調査

- 建屋・主要鋼構造物の設計・供用履歴情報
- 安全機能上重要部位の事故時情報、部材状態

#### 建屋·主要鋼構造物の 経年劣化 長期健全性評価

- ▶安全機能上重要部位の環境情報(水質、温度、 雰囲気ガス、放射線、荷重等.)
- ⇒クリティカル部位同定

#### 建屋・主要鋼構造物の検査と補修

#### デブリ取出のための現状調査

- 燃料デブリ位置、量
- 燃料デブリのサンプリング、性状分析
- 建屋内汚染水の量、性状分析
- 放射線環境(線量率、ダスト)
- 雰囲気ガス(水素、酸素、その他)、他

#### 燃料デブリの性状分析評価

燃料デブリ取出方法検討 処理·処分方法検討

### 燃料デブリ取出

建屋内/系統の除染、解体撤去

燃料デブリ処理

放射性廃棄物の処分

燃料デブリ処分

設備保全活動

廃止措置活動

# 1F『鋼構造物』の経年劣化

## - 最大要因は腐食

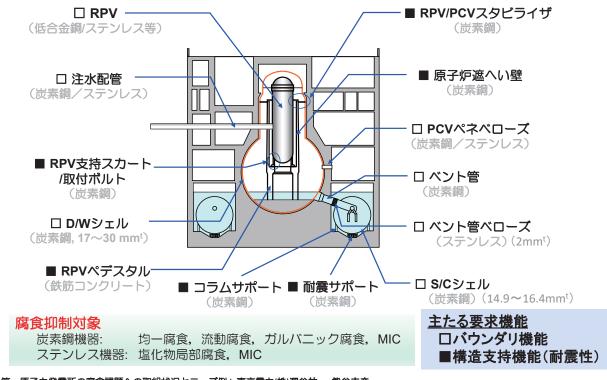
- ▶ 設計時の想定環境からの大幅な逸脱(不純物イオン、溶存酸素等)。
- ▶ 構造材の大半は化学的に不安定(酸化傾向大)。
- ▶ 腐食は避けられない(平衡論)。しかし、コントロールはできる(速度論)。

#### 必要な技術は、

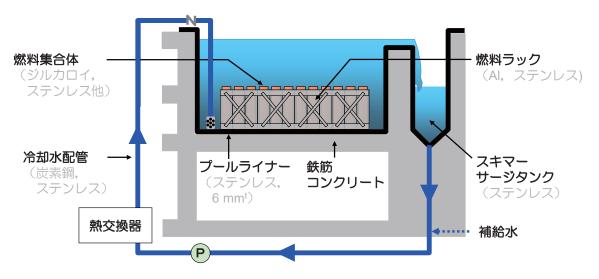
- □ 的確な腐食予測(どの機器の何処にどの程度の?)⇒影響度評価(安全機能への影響、事後保全可能性)
- □ 腐食抑制手段の準備と評価
- □ 予測に基づく効果的な検査と対応策(補修等)

2

### 1F原子炉の構造・材質と要求機能



### 使用済燃料プールの構造と材質



#### 腐食抑制対象

炭素鋼機器: 流動腐食,ガルバニック腐食, MIC

耐食材料機器: 塩化物局部腐食, MIC

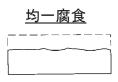
AI機器: アルカリ腐食

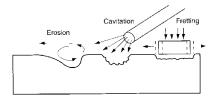
「福島第一原子力発電所の腐食課題への取組状況とニーズ例」東京電力(株)**深谷祐一・熊谷克彦** 東北大学「原子炉廃止措置事業」平成27年度第一回専門家会議(2015年6月)

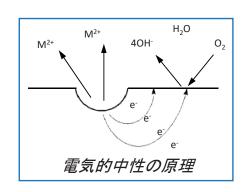
4

### 様々な腐食の形態

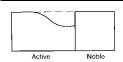
全面腐食系:溶存酸素の拡散により律速







#### 異種金属接触腐食



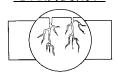
<u>局部腐食系</u>: アノードの局在化+大面積カソード(とくに電導度が高い場合)。 したがって、進行が速い。

孔食





応力腐食割れ



## 合金の種類と想定される腐食モード

RPV, PCV, 配管系: <炭素鋼、低合金綱>

- ▶ 全面腐食(均一、不均一)
- ▶ 流速下腐食
- > 異種金属接触腐食

#### 燃料プールライナー、配管系: <ステンレス鋼>

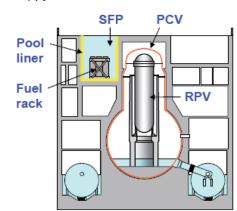
▶ 局部腐食(すきま腐食、孔食、応力腐食割れ)

#### 燃料被覆管: <ジルカロイ>

> 局部腐食(すきま腐食、孔食、応力腐食割れ)

#### 燃料ラック: <アルミニウム合金>

- ▶ 全面腐食(アルカリ腐食)
- > 異種金属接触腐食
- ▶ その他要因:微生物腐食



6

### 1F廃炉における腐食

#### 長期的に確保すべき機能

- 1. 閉じ込め機能:PCV等のバウンダリ
- 2. 冷却機能: 熱的安定性の確保→放射性物質の拡散抑制(閉じ込めに寄与)
- 3. 構造強度

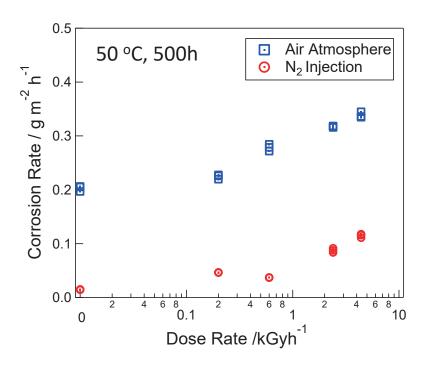
#### <u>特有の困難さ</u>

- 1. 腐食に関与する環境パラメーターが複雑かつ十分に把握できない。 酸化剤(酸素、放射線分解生成物) / 物質移動速度(単相流、混相流、 流路形状、液膜) / 温度 / pH / アニオン種 / 電気伝導率 / 鋼種(Cr含有量) **<これらの複合影響>**
- 2. 環境が経時的あるいは廃炉工程の進捗に伴って大きく変化し得る。
  - PCV負圧管理による大気流入
  - デブリ取り出し工程で発生する固液混相流による腐食加速
  - ホウ酸塩投入による水の電気伝導率や炭素鋼の不動態化傾向への影響
- 3. 点検・補修のためのアクセスに大きな制約がある。



的確な予測に基づいた腐食への計画的対応が極めて重要。

### 炭素鋼の腐食速度に及ぼすγ線照射線量率の影響



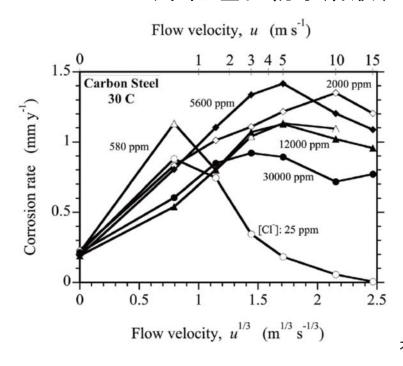
J. Nakano et al., J. Nucl. Sci. Technol., 51, (2014) 977-986

8

Corrosion of carbon steel pipes

JSCE Mat. & Env. 2012, A-111, Akashi

### <u>炭素鋼</u>腐食:流動下の腐食速度実測データ (中性塩化物水溶液、30°C)

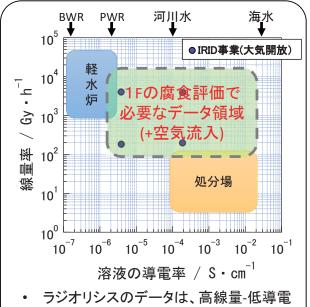


- □腐食速度は流速の 1/3乗に比例。ただし、 いずれ飽和。
- □低[Cl<sup>-</sup>]では、流動が 不動態化促進。
- □中庸の[Cl<sup>-</sup>]において 腐食速度が最大値。 高[Cl<sup>-</sup>]では、溶存酸 素濃度低下により腐 食速度低下。
- □実際の腐食速度上限 は1.5mm/y.

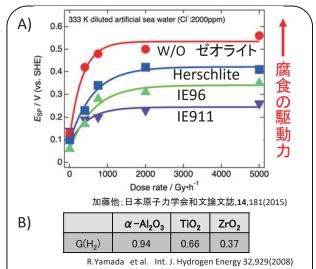
木下ら: 防食技術, 32 (1983).

9

### 放射線環境下での腐食データの現状



- ・ ラジオリシスのデータは、高線量-低導電 率と低線量-高導電率(低酸素)に偏って いる。⇒ニーズの違い
- 既存知見は離散的な大気開放データ



- A) ゼオライトの種類によって、 $\gamma$  線照射時の電位( $H_2O_2$ 生成量)が大きく異なる
- B) コロイドの種類で水素発生のG値が異なる (組成、粒形、表面電位等の影響が未解明)
- □ 系統的なデータ取得と整理、機構解明に基づいた予測手法構築が必要
- □ デブリコロイド粒子の影響を明らかにするには、機構論的なアプローチが不可欠

### 腐食現象の推定と評価手法の調査

#### 潜在的腐食影響に関する検討表の例

		31114 2013		, 0 154		17.5
機器		部位	放射線	酸化剤	流れ	温度
RPV	部位		腐食加	速因子	を整理	<u> </u> ⇒
PCV	位毎に	サンドクッ ション	×		×	
	にリ	内壁面				
冷却管	え	内面		既	存知見有	IJ
	化	•				
	↓	•				
原子炉建屋 RG		RC構造部	×			

- 損傷加速の潜在的要因とそれらの影響データの有無を評価
- 腐食データが存在する場合は、 収集・整理
- 放射線影響を含む1F特有の特 殊環境条件でのデータは、優先 的な取得が必要。



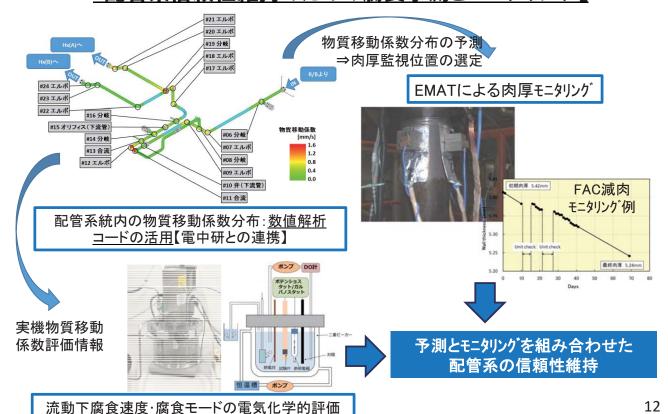
- 維持すべき機能(耐震健全性、冷却性能維持、放射線防護等)を整理
- ・機能低下をもたらし得る損傷モード(構造耐力低下、漏えい、錆による閉塞)を特定
- 今後の廃炉の工程状況を考慮した腐食影響評価を実施



#### 研究の重点項目

- 1. 影響が大きく、1F特有の特殊環 境条件は優先度が高い
- 2. 現場工程の順序やロードマップ 上の重要度も考慮

### 鋼構造物の腐食リスク管理 「配管系信頼性維持のための腐食予測とモニタリング」



# 1F鋼構造物の劣化(腐食)と対策

### <u>廃止措置工程における特殊条件</u>での腐食挙動

- 1. FP元素や核燃料物質等を含む<u>高放射線</u>の溶液環境
- 2. <u>負圧管理条件下における空気の流入</u>による酸素含有雰囲 気
- 3. 冷却水の<u>不均一な流れ</u>に伴う高流速部位や滞留部位の存 在
- 4. デブリのかけらや構造体腐食生成物の<u>コロイド粒子が混在</u>した環境
- 5. 構造物壁面は、蒸気結露による液薄膜や吃水面に接する<u>濡</u> れ渇き条件
- 6. 再臨界防止等を目的とした薬剤が投入された条件

\_\_

### 1F鋼構造物の腐食リスク管理

- □ 1F鋼構造物の経年劣化の最大要因はおそらく腐食である。
- □ 構造物の要求機能(構造強度あるいは閉じ込め)に応じて、留意すべき腐食モードも異なる(スローリークが問題となる機器かどうか)。
- 廃炉工程の進捗によって、大気の流入(格納容器の解放)、電気伝導率の上昇(ホウ酸塩等の添加)など、腐食環境の一時的過酷化も予想される。
- 変動要因の多い条件下での予測技術と要所のモニタリング技術が 求められる。
- □ 腐食抑制策は、有害な副次的影響が無いことが絶対的な必要条件 となる。カソード能力の抑制が肝要である。
  - 酸化剤濃度の低減
  - ・実効的カソード面積の低減(電気伝導率の低減)
  - ・微生物の不活性化

14

#### 日本原子力学会 2017年秋の大会 北海道大学工学部C棟C310講義室(I会場) 2017年9月14日(木) 13:00~14:30

#### 材料部会企画セッション

事故炉廃止措置時における機器材料のリスク管理技術の検討

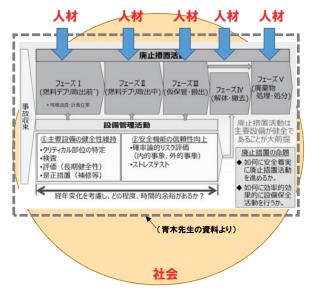
21\_PL04

# (4)事故炉廃止措置のハザードとリスクをテーマにした学生教育

京大工ネ理工研 森下和功 京大工ネ科 中筋俊樹(D3) 村吉範彦(D3) 阮 小勇(D2)

1

### 事故炉廃止措置活動を支える人材の育成



【特徴】事故炉廃止措置においては、現状把握や状況変化の予測が困難であり、想定外事象の発生等も懸念される。それらに対しても的確かつ柔軟に対応する必要がある。

【アプローチ】様々な不確実性(リスク)のなかにあっても種々の判断を下す必要があることから、全体を俯瞰し、リスクを評価し、それを適切に管理する必要がある(リスク最適化問題)。

#### 【課題】

- 人材をいかに育成するか?(今の原子力全体の課題)
- 廃止措置活動を着実に実施するには、社会からの信頼が不可欠である。
- 局所にとらわれずに全体を俯瞰するものの 見方やリスクテイクして実利を得るなどの考 え方を社会全体で醸成する努力も必要。

#### 文科省「原子力科学技術委員会」資料でも、 今後の原子力人材と社会の理解を求めている。

- 顕在化する原子力の課題に必要な人材
  - ✓ 福島第一原子力発電所の廃止措置
  - ✓ 既設プラントの安全性維持・向上
  - ✓ 既設炉の廃止措置
  - ✓ 放射性廃棄物の減容化・有害度低減の取組
  - ✓ 核不拡散、安全対策、プラント新設支援等の国際貢献
  - ✓ 2030年度の原子力依存度20~22%を実現するための取組
  - ✓ 核燃料サイクルへの取組
- 原子力分野の社会的受容性の確保に必要な人材
  - ✓ 社会との信頼関係の構築
  - ✓ 原子力エネルギーの役割や、その安全利用に関する丁寧な説明
  - ✓ 原子力について正しく理解し、社会に対して伝えていくこと

原子力分野の人材育成・確保は一朝一夕に成果が出るものでなく、…

3

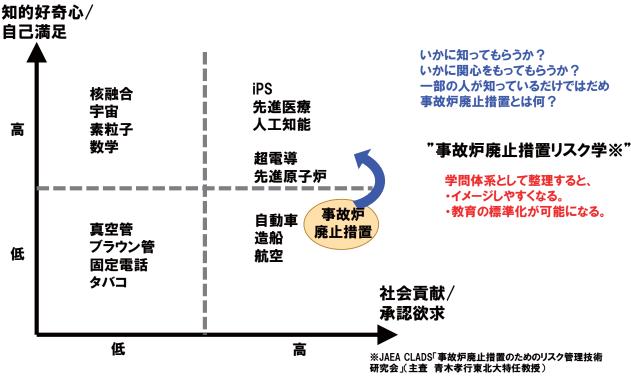
いずれも困難かつ長期にわたる取組

#### 原子力分野の人材育成

- 文部科学省 原子力人材育成作業部会資料(H28.7)
  - 原発事故を受けた国民の不信・不安の高まりを受け、原子力の人材確保が厳しい。 加えて、人材育成に重要な施設や教育現場についても多くの課題を抱えている。
  - ・ 原子力関連学科・専攻に入学する学生数は、事故前の平成22年度では317人であったのに対し、事故後の平成24年度では269人と減少した。平成27年度調査では298人に回復している。
  - ・ 原産協会等の合同企業説明会に参加する学生数は、事故前では1903人であった のに対し、事故後は388人と減少した。原子力・エネルギー系については150~ 200人で推移しているが、それ以外の分野については大きく減少したままである。
- 原子力学会員数の減少(学会誌ATOMO Σ Vol. 59, 2017年9月号, 理事会だより)
  - ・ 一時期7700名を超えていた会員数は、事故以降、毎年100名ずつ減っており(少子化や理科離れの影響も含むが・・・)、いまや7000名を割ろうとしている。
- 原子力関連企業の経営不安に関する報道



#### 自己実現の場として廃炉ビジネスを選択するか



### 事故炉廃止措置リスク学の必要性

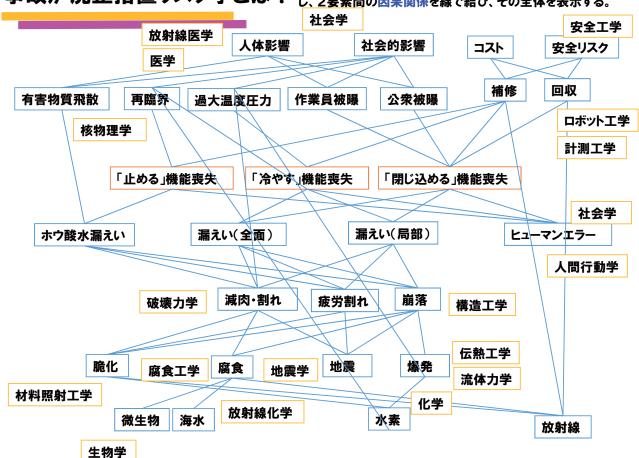
- 事故炉廃止措置を材料学から見ると、
  - > デブリに関する部分(デブリ性状、特に取り出しに関する材料特性)と
  - ▶ 周辺構造物(RPV, PCVなど)の構造健全性(閉じ込め機能を現状の程度に維持するのに重要)に関する部分がある。
- 廃止措置はいつまでに何をやるかが問題。デブリ取り出しの猶予時間は、主に周辺構造物の経年劣化により決まり、腐食等、現環境下の主たる損傷モードに支配される。
- 周辺構造物の経年劣化をいかに予測するか。そもそも、環境条件の不明瞭な材料の挙動などわかるはずもなく、予測の考え方を抜本的に変える必要がある。あいまいさ概念を取り込んだ確率論に基づく予測が必要になる。
- 最近の原子力安全では、従来の決定論評価を改め、確率論評価を行う流れがある。あいまいさが定量化され、リスク指標から保全を最適化する試みがなされる。この実施には、材料とシステムなどの異分野融合が必要になる。事故炉廃止措置も同様。
- そこで、ボーダーレスな研究者の養成、あるいは、その養成に必要な学術基盤の創成が 必要になる。本研究会(JAEA CLADS「事故炉廃止措置のためのリスク管理技術研究会」(主査 青木孝行東北大特任 教授))では、この新たな学術基盤を「事故炉廃止措置リスク学」と呼んでいる。

5

### 事故炉廃止措置リスク学の要件

- 事故炉廃止措置リスク学とは、事故炉廃止措置に必要な工学(状態監視技術、 デブリ性状予測、周辺構造物の経年劣化予測など)に、安全性や経済性の観点 を組み込んだ実学
- 廃止措置戦略策定の基本になるもので、「失敗しないこと」のほかに、「失敗しても、よりひどい状態にはならない、もしくは、元に戻せる」というミティゲーションやレジリエンスの観点も含まれる。
- リスクベースに物事を考える視点が重要。廃止措置シナリオの決定においては、 複数の選択肢からリスクの最小化もしくは少なくとも極小化を図ることで、ひと つのシナリオが必ず選択される。
- 具体的なイメージを研究会で議論 ⇒構造モデル分析(ISM、DEMATEL法など)

事故炉廃止措置リスク学とは? 研究会で議論された資料から、現象に関する構成要素を抽出し、2要素間の因果関係を線で結び、その全体を表示する。



7

### 「事故炉廃止措置リスク学」のイメージの構造モデル分析

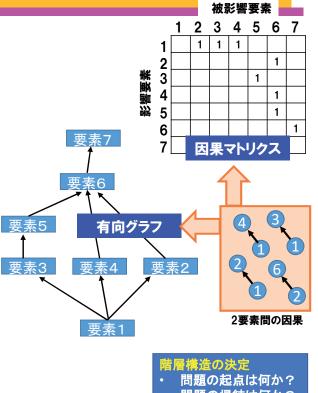
#### 構造モデル分析(ISM法、DEMATEL法)

- 複雑システムの構造を分析・理解するための社会システム工学で使われる技法
- 方法
  - ①事故炉廃止措置リスク学の基盤の考えに 関する意見交換(2017年4月13日)。そこで想 定された現象から、構成要素を抽出する。
  - ③要素間の直接関係(因果)を有向グラフ や因果マトリクスAで表現する。高次の関係は以下のように計算で求める。

 $B = A + A^2 + A^3 + \dots = A(I - A)^{-1}$ 

A: **因果マトリクス** B: **可到達行列** 

④可到達行列Bを使って構造モデルを可視 化する。原因度や中心度を用いて階層 化する。

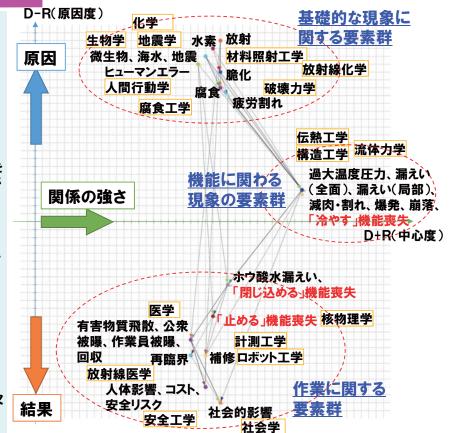


問題の帰結は何か?

### 事故炉廃止措置リスク学

- 3つの要素群(基礎的現象、機能 に関わる現象、作業)に分離した。
- 放射線、水素、地震等が原因となって、腐食、脆化等が起こる。そして漏洩、減肉、爆発等を引き起こす…など表現。
- 現状(フェーズ I)では、現状を維持する目的から異常現象の発生を抑えることが重要であり、冷やすが重視される。作業段階(フェーズII)になると、冷やすよりも閉じ込めるが重視される。
- 事故炉廃止措置リスク学を構成する学術分野が記されている。
- ・ 現状では、社会的影響はすべての 結果としか表現されていないが、 実は社会が原因となって作業を決 定することは今後大いにありうる。
- これは委員会メンバーの現在の理解をもとに整理したもの。抜けや欠けは?原則論との違いは?

構造モデル分析の行列計算を行い、 構造化したもの(ISM分析)。



### リスクの可視化(俯瞰マップ)

廃止措置シナリオの決定は、局所にとらわれず多様な視点で評価す べきであるから、問題全体を俯瞰することが必要になる。俯瞰マップ (Excel)により、作業の可視化を行う。

- 廃止措置に関するリスクを整 理し、俯瞰するための図
- ハザード(燃料デブリ)の位置 や状態変化に応じてリスクは 変化し、対応する作業や深 層防護も変化する。
- リスクの種類やそれを背負うではアメラクの種類やそれを背負うででである。 対象者も変化していくことがマップの中に明示される。 リスクとして、作業者被曝リスク、一般公衆の被曝リスク、一般公衆の被曝リスク、上会リスクなどが設けられている。
- 俯瞰マップの作成により、 「見える化」が行われ、現実 的な理解が進む。
- 空欄であっても枠を設けてお くことが重要。空欄は想像で きていないリスクの存在を気 づかせてくれる(抜けや欠け の可視化)。



### まとめ

- 事故炉廃止措置に関係して、人材育成に必要な「事故炉廃止措置リスク学」の 創成について述べた。このような学術基盤の整理により、人材育成の標準化が 図れることが期待される。こうした体系化は、一朝一夕になしえるものではなく、 様々な経験をもとに構築されていくべきものである。
- 事故炉廃止措置リスク学で扱う現象について、研究会委員の現在の理解をも とに、構造モデル分析を行った。基礎的現象、機能に関わる現象、作業に関わ る要素群の3つに分離された。
- 作業に関する俯瞰マップをExcelを使って作成した。ハザード(燃料デブリ)の位 置や状態変化に応じてリスクは変化し、対応する作業や深層防護も変化する。 リスクの種類やそれを背負う対象者も変化していくことがマップの中に明示され る。





2017年原子力学会秋の大会企画セッション 「事故炉廃止措置時における機器材料のリスク 管理技術の検討」

# 福島第一原子力発電所の廃炉 - 時間の中のリスク管理学

日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター JAEA/CLADS 小川 徹

## 中長期ロードマップの期間区分の考え方2017年9月1日(第4回廃炉・汚染水対策チーム会合資料より抜粋

- 【第1期】ステップ2完了(2011年12月)\*~初号機の使用済燃料プール内の燃料取り出し開始まで(目標はステップ2完了から2年以内)
- 【第2期】第1期終了~初号機の燃料デブリ取り出し開始まで(目標はステップ2完了から10年以内)
  - 当該期間中は、燃料デブリ取り出しに向けた多くの研究開発が本格化するとともに、 燃料デブリ取り出し方針に基づいて予備エンジニアリング等を実施する。(後略)
- 【第3期】第2期終了~廃止措置終了まで(目標はステップ2完了から30~40年後)
  - 燃料デブリ取り出しから廃止措置終了までの実行期間。
  - 第3期の当初においては、初号機の燃料デブリの小規模な取り出し作業に先行して て着手し、それと並行して、取り出し規模の拡大に向けた準備作業が進められる。

### IAEA 1999 Technical Report 395

FACTORS TO BE CONSIDERED IN THE SELECTION AND IMPLEMENTATION OF A DECOMMISSIONING STRATEGY 通常の廃止措置での考慮点

- National policies and regulations (public involvement etc.)
- Cost estimation and funding
- Planning and management

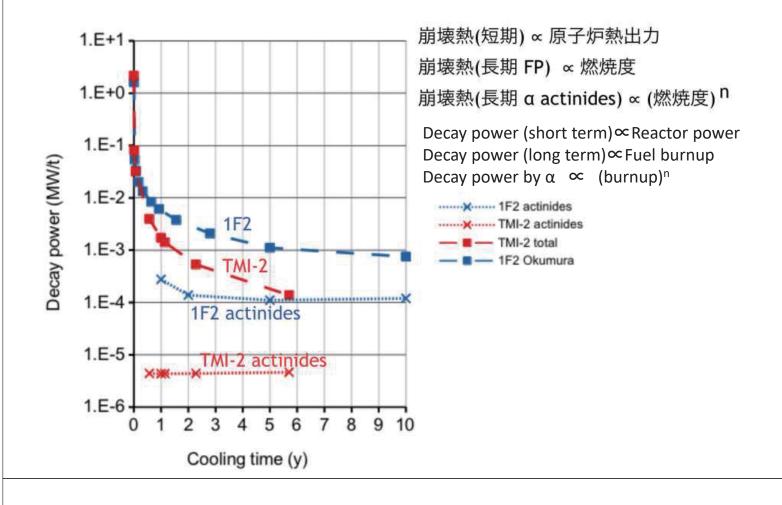
- 1F: 通常の廃止措 置を超えた要求
- Long term integrity of buildings and systems (potential degradation of buildings and systems)
- Waste classification
- Facilitation of decommissioning

### TMI-2**との**比較 - リスク管理における*時間のファクター*

	TMI-2	1F
燃料デブリのビデオ撮影	3年後	(6年後)~
燃料デブリ取出し開始	6年後	(10年後)~
燃料デブリ取出し終了	11年後	(~40)年後
トリチウム汚染水の蒸発処理開始	12年後	
トリチウム汚染水の蒸発処理終了 (クリーンアップ活動収束)	14年後	

× [*放射線のファクター*(β、γで約7倍、αで約20倍)]

### 崩壊熱の比較



### 原子力損害賠償·廃炉等支援機構 研究連携タスクフォース 重点課題

### 2016-2017年度に選定された6課題

(1) 燃料デブリの経年変化プロセス等の解明

(2) 特殊環境下の腐食現象の解明



- (3) 画期的なアプローチによる放射線計測技術
- (4) 廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明(αダスト対策を含む)
- (5) 放射性物質による汚染機構の原理的解明
- (6) 廃炉工程で発生する放射性物質の環境中動態評価

### 事故炉廃止措置のリスク管理「学」

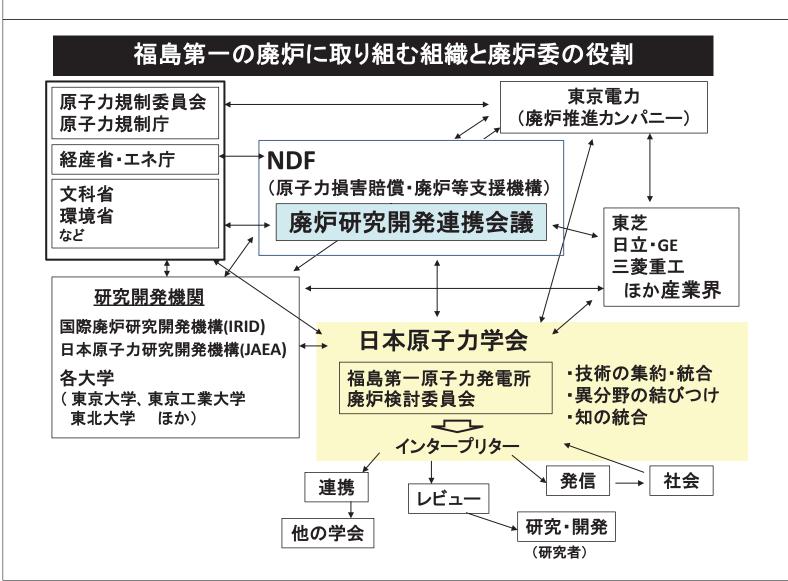
- 吉澤 厚文(原電)、清浦 英明(IRID): クリティカルな機器の劣化によって リスクが顕在化するまでの時間 – 人間の介在による可変性。
- 青木(東北大): クリティカル部位抽出の視点、抽出方法(抽出のための 戦略的検討表)。保全管理。
- 渡邉 豊(東北大): 環境条件が、経時的あるいは廃炉工程の進捗に 伴って大きく変化。
- 森下和功(京都大学): 表の空欄は想像できていないリスクの存在を気づかせてくれる。抜けや欠けが可視化されていることが重要である。

日本原子力学会「2017年秋の大会」9月14日@北海道大学 材料部会企画セッション 「事故炉廃止措置時における機器材料のリスク管理技術の検討」

### パネルディスカッションのために

日本原子力学会 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会 委員長 宮野 廣

- 各組織と原子力学会の関係、学会の役割
- 〇 学会の取り組み
- 〇 考えなければならないこと
- 〇 ロードマップでの課題・論点
- 機器・材料のリスク管理を考える



#### 日本原子力学会 福島対応の組織体制 福島復興・糜炉推進に貢献する 理事会 学協会連絡会(2016年5月発足) 部会 連絡会 福島特別プロジェクト 廃炉検討委員会 専門委員会 57名 協力機関・団体 委員長: 宮野 廣(法政大学) ・経産省資源エネルギー庁 副委員長: 関村直人 (東京大学) ・原子力賠償・廃炉等支援機構 (NDF) 岡本孝司 (東京大学) ・国際廃炉研究開発機構 (IRID) ·日本原子力研究開発機構(JAEA) 幹事会 東京電力ホールディングス 運営タスクチーム 18名 11名 20名 21名 33名 建屋の構造性能 ロボット 廃棄物 リスク評価 事故課題 検討分科会 分科会 検討分科会 分科会 フォロー分科会 主査:山口 彰 主査:山本章夫 主査:瀧口克己 主査:吉見 卓 主査:柳原 敏 (東京大学) (名古屋大学) (東京工業大学) (芝浦工業大学) (福井大学)

### 福島第一の廃炉の現在の論点

-現在解決が求められている事項 [学会の取り組み] -

14名

ロボット分科会WG

主查:小島史男(東北大学)

9名

(1) リスク低減:放射性物質のリスクなど全体リスクの低減

事故進展に関する未解明

事項フォローWG

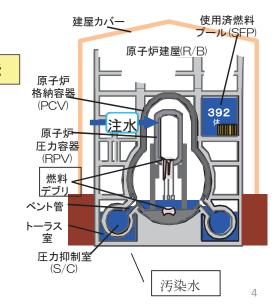
→ シナリオの見えない事象のリスク評価の在り方 使用済燃料の取り出し、不確かなシステムのリスク評価手法を開発

主查: 越塚誠一(東京大学)

- (2) 建屋・構造の長期健全性
  - 大きく損傷した構造物の健全性評価の在り方

原子炉建屋の構造健全性を評価、確認

- (3) 燃料デブリ取り出しでの遠隔操作技術
  - 高放射線場での作業ロボット・システムの開発 デブリ調査ロボットコンペを開催
- (4) 污染水对策、廃棄物処理処分
  - 長期間、場所の制限などの課題 エンドステートの議論を開始
- (5) 学として技術課題
  - 事故事象の未解明問題への対応 未解明事項73項目を抽出、約半数が解明



### 廃炉の工程で、何を考えなければならないか

- 〇 何を目標とすべきか
  - →「原子力安全」の確保では、現状を把握して、目指す管理値を明確にする。
  - → 環境への放出量(管理目標)を定め、管理する(なにを測定して管理するのか。) 作業者への放射線影響を把握し、管理する。(作業員の被ばく上限を決める。)
- リスク管理は、第一が、放射性物質の放出(住民への影響と環境への影響) 第二は、作業員の放射線被ばくと人身事故の可能性 第三は、コスト多大化の可能性 第四に、工期遅れ 第五に、人材供給不足
- 想定事故とその対応、「深層防護」をどのように考えるのか。
- 40年を超える運用への健全性評価と確保に対しての対応は考えるのか。
- 〇 廃棄物の処分方針を定めて、それに従い廃棄物の取り出し、処理方法を 考える。
- 放射性物質の放出の可能性の除去 高放射線下での作業者の被ばくリスクの低減

福島第一の廃炉の論点 方針決定「基本、気中横取り出し工法」 ロードマップ と その課題 分野 主な取組 現在 2017 2021 2040 **男(燃料デブリ取り出し開始まで)** 第3期(廃止措置完了まで) . . . . . . . . . ▼第2期終了(2021年12月) 汚染水対策 除去設備による 污染水浄化 等 地下水バイパスによる 地下水の汲み上げ 等 近づけない 課題:溜め込んだ水の処分 漏らさない / 高濃度汚染水を処理した水の貯水は全て溶接型タンクで実施 タンクの増設 等 各建屋の滞留水状況の調査 建屋水位の引下げ/循環注水ラインからの切り離し/滞留水 滞留水処理 燃料取り出し 出し完了(2014.12) 課題:ハードの健全性の確認 ▼取り出した燃料の処理・保管方法の決定 1号機 燃料取り出し 建屋カバー解体 等 ガレキ撤去 等 カバー設置等 課題:取り出し燃料の処分 建屋上部解体·改造等 2号機 プラン① コンテナ設置 等 燃料取り出し ブランの選択 解体·改造範囲 ブラン② カバー設置 等 燃料取り出し 課題:リスクへの対応 ガレキ撤去 等 カバー設置等 燃料取り出し 燃料デブリ 初号機の取り出し開始 取り出し方針の決定 内容器内の状況把握/燃料デブリ取り出し工法の検討 等 燃料デブリの取り出し/処理・処分方法の検討 取り出し 課題:取り出し工法の開発 廃棄物対策 課題:大量の放射性廃棄物の 線量率に応じた分類保管/ 保管管理計画は沿った保管管理の実施 処理処分 計画の策定 等 ガレキ等 エンドステートからの <sup>処理処分</sup> /処理・処分に関する基本的な考え方の取りまとめ 処理処分 バックキャストの考え方 

5

### 福島第一の廃炉での機器・材料のリスク管理の課題

- プロジェクト全体の体制と進め方(国際協力を含めて)
- 〇 ロードマップによる管理
- 〇 安全目標・性能目標・設計基準の設定
- 〇 課題・論点
  - 事故炉の構造健全性とは、なにか
  - 材料屋は、リスクにどのように向き合うのか
  - 現在の状況を把握することが必要
  - これから何年、持たせられるか
  - 様々な組成の燃料デブリへの対応は問題ないか

#### Ⅱ. 第9回材料部会奨励賞受賞者のよろこびのことば

材料部会奨励賞選考会議による審査の結果、第 9 回材料部会奨励賞に、福井大学の東郷 広一氏、室蘭工業大学の Yu Juhyeon 氏、東京大学の趙 子寿氏が選考されました。表彰式は、原子力学会 2017 年秋の大会期間中に開催する材料部会第 35 回全体会議 (2017年 9 月 14 日 12:00~13:00、北海道大学)にて行いました。各受賞者からよろこびのことばが届きましたので、以下に紹介させていただきます。

### 「TEM 内引張「その場」観察法を用いた転位 - 照射欠陥の動的相互作用に関する研究」 福井大学 東郷 広一

このたびは、第9回日本原子力学会材料 部会奨励賞を頂き、誠にありがとうござい ました。受賞頂きました研究は、材料中への 照射欠陥発生に伴う硬化を機構論的観点か ら評価することを試みた研究です。

従来の照射損傷の研究では、微細組織から機械的性質を説明するために、観察・分析評価による照射欠陥のサイズや数密度と、機械的特性試験から得られる降伏応力や硬さなどとの比較を行い、脆化に繋がる硬化の度合いを「障害物強度  $\alpha$ 」というパラメータを用いて調べる手法が用いられてきました。しかしながら、「障害物強度  $\alpha$ 」は機械的特性試験から得られる強度変化と、観察・分析評価により得られる微細組織に関するデータから計算される値の違いを吸収させるために用いられることもあり、信頼性に欠けていました。

本研究では、BCC 金属(V、Mo、Fe)に おけるキャビティや析出物を対象とし、透 過型電子顕微鏡(TEM)内で材料を直接変 形させる TEM 内引張「その場」観察法を用 いることで、運動転位(原子のズレ)とキャ ビティ・析出物との動的相互作用から、従来 の研究より高精度に「障害物強度  $\alpha$ 」を求めることに成功しました。また併せて、計算機シミュレーションなどで報告されている運動転位と照射欠陥 (キャビティ) の相互作用機構を初めて実験的に明らかにすることができました。TEM 内引張「その場」観察法により得られた「障害物強度  $\alpha$ 」を活用することで、観察・分析評価のみで照射欠陥による硬化量、ならびに欠陥種毎の硬化割合を把握することができるようになり、原子炉構造材料の照射硬化 (または照射脆化) に対する健全性評価の向上に寄与することができます。

現在は TEM 内引張「その場」観察法、電子線後方散乱回折 (EBSD) 法、ナノインデンテーション硬さ試験等を活用し、燃料被覆管を想定した Zr での $\delta$  水素化物発生に伴う硬化 (または脆化) を、転位のすべり面や転位密度、 $\delta$  水素化物の晶癖面 (結晶方位関係) の観点から解明することを試みています。

東日本大震災以降、原子炉の稼働が再開 されており、今まで以上に原子炉の高経年 化対策、ならびに健全性評価の向上が必要 不可欠であると考えます。今回頂きました 奨励賞を受け、今後も微力ながら、原子力材 料の観点から既存の原子炉、次世代原子炉 における保全技術の向上、ならびにそれに 伴う評価技術の開発、さらには新材料開発 等に寄与することができるよう、より一層 尽力して参ります。

最後になりますが、本受賞は博士後期課程における研究成果、ならびにその成果を応用・発展させたものです。これはご指導頂きました福井大学 福元謙一教授、鬼塚貴志特命助教、住友重機械工業株式会社 野

際公宏様をはじめ、ご助言・ご協力を頂いた 多くの皆さまの賜物であります。この場を 借りて、改めて深く感謝申し上げます。



### 「 強度特性異方性を有する原子力用セラミック複合材料の変形と破壊における 形状依存性の研究 」

室蘭工業大学 兪 周炫 (Yu Juhyeon)

この度、第9回日本原子力学会材料部会 奨励賞を頂きまして大変光栄に存じます。 この研究の為にこれまでご指導いただきま した室蘭工業大学の岸本 弘立教授、中里 直史助教に心より深く感謝申し上げます。 また、実験に対してご助言と支援をいただ き、大変お世話になりました室蘭工業大学 環境・エネルギーシステム材料研究機構の 朴 峻秀准教授にも深く感謝申し上げます。

本研究ではセラミック複合材料である SiC/SiC 複合材料を用い、従来の燃料被覆 管、あるいは核融合炉ブランケットの冷却 配管で必要とされる円筒形状での強度特性 評価法研究を進めました。

SiC/SiC 複合材料は強化繊維の配向に応じた強度特性に異方性を有し、均質に扱うことのできる金属材料と異なった取扱いが必要となります。セラミック複合材料では

最初に繊維構造を確定し、それに応じた成 形法を適用するため、たとえば平板と円管 で適用可能な成形技術やプロセス条件が異 なります。その結果、平板の評価結果と円管 の評価結果は、直接比較できる関係にはあ りません。よって最終部材形状の成形品に おける評価法は形状に応じた評価法を構築 する必要があります。また、開発した評価法 からの結果と他評価法からの結果との相関 関係を明確にし、評価法としての信頼度を 高める研究が必要となります。本研究では まず、SiC/SiC 複合材料のフープ応力評価 法として円周方向引張試験を選び、専用冶 具の作成や試験片のノッチの最適形状など を明確にしました。また、オープンエンドバ ースト試験から得られたフープ応力との相 関関係を明確にし、フープ応力換算式を導 出しました。この式によって簡単な試験か

ら材料設計に必要とされる最低フープ応力 を得ることが可能となりました。

今回の研究結果からは SiC/SiC 複合材料だけではなく、数多くのセラミック複合材料のフープ応力評価にも応用できると期待しております。私は原子力及び核融合分野に寄与したいと思いまして留学を始めましたのですが、まだ道が遠く感じております。皆様のご指導ご鞭撻をよろしくお願いいたします。



### 「水素化による **Zr-Nb** 系合金とジルカロイ-4 合金被覆管の機械特性劣化に関する研究」 東京大学 趙 子寿 (Zhao Zishou)

この度、第9回日本原子力学会材料部会 奨励賞を頂きまして大変光栄に存じます。 これまでご指導頂きました東京大学工学系 研究科原子力専攻の阿部弘亨教授を始め、 熱心に指導してくださった研究室の先生方 や常に励ましてくださった友人の皆様に心 より感謝申し上げます。

本研究では、被覆管材料の微細組織と環境劣化の双方による異方性を考慮に入れ、既存材料と次世代材料を研究対象とし、軸方向単軸引張試験と周方向強度評価のための改良型中子拡管(A-EDC)試験および最新の微細組織試験法を駆使し、材料-組織相関を基軸として材料評価と水素劣化評価を行いました。

研究成果に関しては、以下のようにまと められます。

現行軽水炉の被覆管に使用されている Zircaloy-4 を対象材料とし、単軸引張試験 により被覆管の長手方向の強度、及び A-EDC 法により周方向の強度を評価しまし た。また、軽水炉燃料の高燃焼度化を目指して開発された Zr-Nb 合金を対象材料とし、機械強度の異方性を微細組織の異方性と対応づけて考察しました。そして、水素化が微細組織と機械強度に与える影響について検討し、機械的強度の水素吸収量依存性を明確にしました。さらに破断後の破面観察から水素化物を起点とした割れの発生と進展や、水素吸収に伴い母相におけるすべり変形が抑制され双晶変形が進みやすくなる傾向を明らかにするなど破壊の機構に関する知見を取得しました。

本研究を通して、現行材との比較において次世代燃料被覆管ジルコニウム合金の機械強度と微細組織に基づく性能評価を行い、耐水素化性能などの新知見を取得できたとともに、新材料の工業的応用に対する見通しを得ました。今後、更に量子エネルギー工学の発展に貢献していきたいと考えております。

#### Ⅲ. 関連する国際会議のリスト

(1) Atom Probe Tomography and Microscopy 2018

会期: June 10-15, 2018

場所: Gaithersburg, MD, USA.

ホームページ: https://www.nist.gov/news-events/events/2018/06/atom-probe-

tomography-and-microscopy-2018

申込締切: January 31, 2018

アトムプローブを含めたナノサイエンスの分析技術に関する国際会議です。

(2) 21st International Conference on Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems

会期: September 9-14, 2018

場所: San Francisco, CA, USA.

ホームページ: https://www.epri.com/#/pages/product/3002010704/

申込締切: November 15, 2017

BWR、CANDU、PWR、PHWR、VVER を含めた水化学管理等が報告される国際会議です。

(3) FONTEVRAUD 9

会期: September 17-20, 2018

場所: Avignon, France

ホームページ: http://www.sfen-fontevraud9.org/

申込締切: October 15, 2017

フランス SFEN が主催して 4 年に一度開催される軽水炉の安全性と信頼性の向上のための材料研究に関する専門家会議で、フランス国外からの研究者も多く参加する会議です。

(4) 14th Japan-China Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering

会期: September 25-27, 2018

場所:仙台

ホームページ: https://web.tohoku.ac.jp/JCS-14/

申込締切: May 31, 2018

JCS-14 は先端エネルギーシステム・核分裂炉・核融合炉の材料に関する日中の専門家による会議で2年ごとに開催されています。今回は東北大学で開催されます。

#### (5) NuMat 2018: The Nuclear Materials Conference

会期: October 14-18, 2018

場所: Seattle, WA, USA

ホームページ: https://www.elsevier.com/events/conferences/the-nuclear-materials-

conference

申込締切: May 11, 2018

NuMat は核燃料・材料に関する総合的な国際会議として2年ごとに開催されています。 核分裂炉・核融合炉の構造・機能材料、モデリング等、計7つのトピックがあります。

#### (6) 14th International Workshop on Spallation Materials Technology

会期: November 11-16, 2018

場所:いわき市(いわき産業創造館),日本

ホームページ:

http://j-parc.jp/researcher/MatLife/en/meetings/IWSMT-14/index.html

申込締切: 31 July 2018

核破砕標的材料や加速器駆動核変換システム(ADS) 材料を主たるテーマに、隔年で開催される国際会合です。

今年は日本で開催され、照射効果、液体金属脆化、照射損傷の基礎基盤研究及び関連機器の技術開発等に関する最新成果が報告されます。

#### IV. 運営委員会 委員名簿

部会長 加治 芳行 (日本原子力研究開発機構)

副部会長 阿部 弘亨 (東京大学)

財務小委員長 橘内 裕寿 (日本核燃料開発株式会社)

編集小委員長 近田 拓未 (静岡大学)

編集小委員会委員 能登 裕之 (核融合科学研究所)

広報小委員長 中里 直史 (室蘭工業大学)

広報小委員会委員 丹野 敬嗣 (日本原子力研究開発機構)

国内学術小委員長 柴山 環樹 (北海道大学)

国内学術小委員会委員 知見 康弘 (日本原子力研究開発機構)

国際学術小委員長 藤井 克彦 (原子力安全システム研究所)

国際学術小委員会委員 大久保 成彰 (日本原子力研究開発機構)

庶務幹事 叶野 翔 (東京大学)

庶務幹事 石嵜 貴大 (日立製作所)

庶務幹事 福田 誠 (量子科学技術研究開発機構)

庶務幹事 生澤 佳久 (日本原子力研究開発機構)

#### V. 寄稿のお願い

材料部会では、部会員の皆さまのご寄稿を歓迎いたします。原子力関連材料についての最近の研究や研究機関・施設・研究会の紹介、会議の案内や報告、国際交流など、気楽に話題提供をお願いいたします。以下の電子メールアドレスあるいはお近くの運営委員までご連絡ください。

#### ○材料部会運営委員会宛メールアドレス

material-sc@material-aesj.sakura.ne.jp

#### VI. 編集後記

本年度 2 報目の材料部会報をお届けいたします。発行にあたり、多くの先生方のご支援 とご協力をいただきました。改めて感謝申し上げます。特に、年度末の慌ただしい時期にも かかわらず、迅速に原稿をお寄せいただき、無事年度内での発行に至りました。

今後も年 2 回の発行を目標に、材料部会の活動を報告していきたいと思います。ご寄稿はもちろんのこと、部会報に対するご意見、ご要望など、どのようなことでも結構ですので、お寄せいただければ幸いです。今後とも、どうぞよろしくお願いいたします。

(近田、能登)