

技術報告書概要紹介

「シビアアクシデント時の核分裂挙動」研究専門委員会編

シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動

「シビアアクシデント時の核分裂挙動」研究専門委員会

現「福島第一原子力発電所廃炉に係る核分裂挙動」研究専門委員会

■シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動

判型/総頁数：A4/295ページ

発行：（一社）日本原子力学会

発行日：2021年5月31日

定価：4,400円（税込・送料別）

ISBN：978-4-89047-179-9

<内容の一口紹介>

本研究専門委員会の準備会（水化学部会）から2017年に発行された「Phébus FP プロジェクトにおける核分裂生成物挙動のまとめ - 福島プラント廃炉計画及びシビアアクシデント解析への適用」の応用編ともいうべき位置づけです。

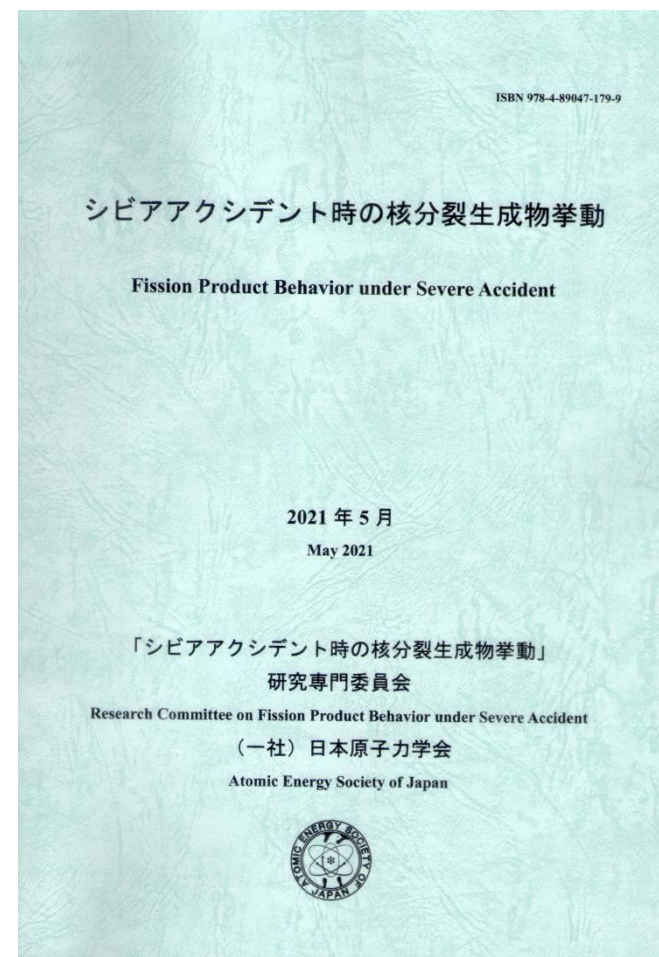
本研究専門委員会の3つのWGで、

- ①FP関連の基礎実験の在り方、
- ②シビアアクシデント解析コードのベンチマーク、そして
- ③実機データに基づく技術課題の抽出、

についての議論を進めてきた結果をまとめたものです。

大きく3つの編、すなわち、基礎編、応用編、そして将来課題編に分け、FPの基礎特性、基礎的挙動のまとめ、実機でのFP挙動の実態の紹介、そして次期研究専門委員会に引き継がれるべき課題についてまとめました。

事故時のFP挙動に関して、初心者から、研究あるいは福島で活動中の専門家まで幅広く役立つ情報を盛り込んでいると自負しています。



「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会は、

- 1) 「福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会」での、ソースタームの評価に、従来の評価ベースでは説明できない事象が散見され、新たな研究が必須という指摘と
 - 2) ソースターム関連研究の衰退とともに、技術を支えてきた研究者、技術者の多くが第1線を離れ、技術的な空洞化が顕著となっているという認識
- に応える形で発足した。

本研究専門委員会の設立に先立って、水化学部会の「FP挙動」研究専門委員会準備会でPhebus FPプロジェクト関連文献をサーベイし、技術報告書「Phébus FPプロジェクトにおける核分裂生成物挙動のまとめ - 福島プラント廃炉計画及びシビアアクシデント解析への適用-」として出版した。

本技術報告書は、上記技術報告書の応用編ともいうべき位置づけで、3つのWGで

- ①FP関連の基礎実験の在り方、
- ②シビアアクシデント解析コードのベンチマーク、そして
- ③実機データに基づく技術課題の抽出、

についての議論を進めてきた結果をまとめた。

内容は大きく3つの編、すなわち、基礎編、応用編そして将来課題編に分け、FPの基礎特性、基礎的挙動のまとめ、実機でのFP挙動の実態の紹介、そして本研究専門委員会では未消化で次期研究専門委員会に引き継がれるべき課題についてまとめた。

第I編 基礎編では、FPおよび燃料デブリの基礎特性、FPの現象把握、挙動評価、1F事故より顕在化した研究ニーズ・課題、FP挙動把握のための共通技術、およびシビアアクシデント解析コード、についてまとめた。

第II編 廃炉作業を念頭に、実機でのFP、燃料デブリ把握の現状、FP除去法、汚染水処理の実状、環境汚染の実状、そして廃炉のリスク評価をまとめた。

第III編 今後の課題として、議論の過程で新たに顕在化した課題や議論が十分ではなく今後に残された課題をまとめた。

“Research Committee on Fission Product (FP) Behaviors under Severe Accident” was established based on the following comment and understanding.

Lots of facts and phenomena, which had been learned from the nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (NPP) (1F), let us modify some of important preconceptions on FP behavior under severe accident (SA) (Atomic Energy Society of Japan. The Fukushima Daiichi Nuclear Accident - Final Report of AESJ Investigation Committee (2014)).

Since late 1990’s research activities related to source term of severe accident have gradually faded away and experts supporting the technologies related to FP behaviors have retired from the research fronts, which resulted in hollowing out of the FP related technology.

In order to prevent the hollowing, a preparation group for “FP behavior” Research Committee was organized in the Division of Water Chemistry in the Atomic Energy Society of Japan to prepare for suitable technical transfer based on discussion on FP behaviors and then to publish the previous technical report on FP behaviors “FP Behavior obtained from Phébus FP Projects – Application for Decommissioning Plans for Fukushima Daiichi Plants and Severe Accident Analysis”.

In the technical report, which followed the previous one as an application version, as a result of discussions in three Working Groups of the Committee,

- ①necessary basic research activities related to FP behavior, ②, benchmark evaluation of SV analysis codes and ③primary subjects on FP behaviors observed at the 1F were summarized.**

The technical report were divided into three terms; Basic, Application and Future subjects, where basic properties of FPs, actual behaviors of FPs in the plant and future subjects not sufficiently to be discussed at the committee and to be continued at the coming committee, which are as follows.

I. Basic term: Basic properties of FPs and fuel debris. Understanding and evaluations of the FP behaviors.

Newly proposed research needs and primary subjects related FP behaviors in the plant.

Common technologies to understand FP behaviors in the plant.SA analysis codes.

II. Application term: Actual FP and fuel debris behaviors to be applied for decommissioning. FP removal technologies. Contaminated water treatment. Environmental contamination. Risk evaluation related to decommissioning.

III. Future subject term: Newly obtained phenomena as future subjects. Primary subjects for further discussions

要旨 (ABSTRACT)

はじめに

I. 基礎編

1. 核分裂生成物の基礎特性
2. 燃料デブリの基礎特性
3. FPの現象・挙動評価に係る現状と今後の課題
4. 発電所におけるFP生成量、存在量の把握
5. シビアアクシデント解析コード

II. 応用編

1. 通常炉と事故炉の廃炉への対応の差異
2. FP分布の把握
3. 燃料デブリ分布の把握
4. FPの除去回収
5. 汚染水処理
6. 環境汚染状況
7. 廃炉作業に係るリスク評価

III. 今後の課題

IV. 付録

「はじめに

勝村庸介

I. 基礎編

1.核分裂生成物の基礎特性

宮原直哉、

内田俊介

2.燃料デブリの基礎特性

中村勤也

3.FPの現象・挙動評価に係る現状と研究課題

逢坂正彦

3.1ソースタームの経緯

三輪周平

3.2 軽水炉SA時のFP放出・移行挙動

宮原直哉

3.3 FP研究ニーズ・課題等

宮原直哉

3.4 FPの現象・挙動評価に係る課題、

関連事項等の調査

村上健太、

逢坂正彦

深澤 哲生、

宮原直哉

山下真一、

澤田佳代

町田昌彦、

岡根哲夫

樽松繁、

植田滋

園 田健、

佐藤勇

矢板由美、

木野千晶

牛尾典明

3.5 まとめと今後の課題

逢坂正彦

4.福島第一原子力発電所におけるFP挙動の把握

4.1はじめに

内田俊介

4.2 放射性核種のインベントリ評価

奥村啓介

4.3短/中/長期FP分布評価法

内田俊介

4.4 廃棄物として処理されるFP核種の評価法

駒義和

5.シビアアクシデント解析コード

5.1 SA 解析コードの概要

唐澤英年、

氷見正司

5.2 FP挙動モデル

中村康一

唐澤英年

日高昭秀、

西岡佳郎

藤原大資、

岡田英俊

三輪周平、

三輪周平

唐澤英年、

氷見正司

木野千晶、

奥村啓介

永井晴康、

日高昭秀

唐澤英年

5.3 Phébus実験ベンチマーク

5.4 1F事故解析

5.5 まとめ

II. 応用編

1.通常炉と事故炉の廃炉への対応の差異

内田俊介

2. FP 分布の把握

内田俊介

3. 燃料デブリ分布の把握

内田俊介

4. FPの除去回収

高木純一

5. 汚染水処理

高木純一

6. 環境汚染状況

永井晴康

7. 廃炉作業に係るリスク評価

江藤淳二

III. 今後の課題

内田俊介、

勝村庸介

逢坂正彦、

唐澤英年

高木純一、

和田陽一

おわりに

勝村庸介

研究専門委員会の活動(2017.6-2021.3)

1. Phébus FPプロジェクト(Phébus FPP)関連論文の調査報告書(本専門委準備会成果)をベースに、新たな技術サーベイを加え、FP挙動に関する情報の共有化を図り、共通技術基盤上に新たな技術者集団を構築する。
2. 福島第一原発事故(実機事故)で見られた過酷事故時のFP挙動をサーベイし、FP挙動評価の視点から、従来技術で予測されたものと、予測できなかった現象を区分し、新たな技術課題を整理する。
3. 上記1. 2. にFP挙動に係る新しい技術課題を加えて、技術報告書(応用編)としてまとめ、現場での実務者、若手技術者との協働をも通して、FP挙動に関する技術伝承に資する。
4. 上記3. をベースに、40年超の長期にわたる技術継続、継承に資する。

WG# 名称	主要検討内容	主要成果目標
WG1 FP実験	FP放出・移行・環境動態に係る現象を把握・理解し、把握・理解し、物理現象を適切に表現できるモデルを構築するための実験および解析を提案	①新たな実験の提案 ②新たなモデルの提案
WG2 ベンチマーク(BM)評価	主要SA解析コードのFPモデルをPhébus FPPのBM評価を通して理解し、Cs解析技術の課題を把握 実機事故の解析結果に基づき、モデル改善の技術課題を抽出	③Cs解析改善点の提案 ④FPモデル改善の提案
WG3 技術課題抽出	Phébus FPP実験と実機でのFP挙動を比較検討し、両者のFP挙動の相違を検討し、新たな技術課題を抽出	⑤実機FPマスバランス ⑥実機での測定対案 ⑦新たな実験の提案

成果をまとめ、技術報告書として出版(本研究専門委員会終了直後に出版)

第I編 第1章及び第2章概要

核分裂生成物の基礎特性、燃料デブリの基礎特性

FPの諸物性が紹介されているが代表的なものを下記に示す。

表1.1-4 主要核分裂生成物の物理特性

核種	半減期	β線 代表E _β (MeV) [放出割合(%)]	γ線 代表E _γ (MeV) [放出割合(%)]	実効線量率定数* (μSv m ² /MBq/h)
³ H(³ T)	12.32y	0.0186 [100]	—	—
⁸⁵ Kr	10.739y	0.687 [99.60]	0.514 [0.43]	3.14E-04
⁹⁰ Sr	28.79y	0.546 [100]	—	—
¹³¹ I	8.025d	0.606 [89.50]	0.365 [81.70]	0.0548
¹³² I	2.295h	2.14 [18.90]	0.688 [98.70]	0.301
¹³³ I	20.83h	1.241 [83.20]	0.53 [87.00]	0.0843
¹³³ Xe	5.2475d	0.346 [99.20]	0.081 [38.00]	0.00945
¹³⁴ Cs	2.0652y	0.658 [70.20]	0.605 [97.60]	0.211
		0.796 [85.50]		
¹³⁷ Cs	30.08y	0.514 [94.40]	0.662 [86.10]	0.0779

* 1MBqの線源から1mの距離での線量率(μSv/h)

表1.2-1 短期・中期・長期的な観点で重要となる主な核分裂生成物

短期		中期		長期	
FP	半減期	FP	半減期	FP	半減期
⁸⁸ Kr	2.84 h	¹⁰⁵ Rh	35.4 h	¹⁴⁴ Ce	285 d
¹⁰⁵ Ru	4.44 h	⁹⁹ Mo	65.9 h	¹⁰⁶ Ru	373 d
¹³⁵ Xe	9.14 h	¹³² Te	3.20 d	¹³⁴ Cs	2.06 y
⁹¹ Sr	9.63 h	¹²⁷ Sb	3.85 d	¹²⁵ Sb	2.76 y
⁹⁷ Zr	16.9 h	¹³¹ I	8.02 d	¹⁵⁴ Eu	8.59 y
¹³³ I	20.8 h	¹³¹ Xe	11.8 d	⁸⁵ Kr	10.7 y
¹⁴³ Ce	33.4 h	¹⁴⁰ Ba	12.8 d	³ H	12.3 y
		¹⁴¹ Ce	32.5 d	⁹⁰ Sr	28.8 y
		⁹⁵ Zr	64 d	¹³⁷ Cs	30.1 y
				^{110m} Ag	249 y
				¹²⁹ I	1.57x10 ⁷ y

実データではTMI2の燃料デブリの諸物性が紹介されている。
F1関連では下記サンプルの分析例を紹介。

表2.3-1 1Fサンプル分析結果の例

	1号機PCV底部堆積物	2号機PCV内部調査装置の付着物	2号機オベフロ養生シートの付着物	2号機TIP配管内の閉塞物	3号機PCV内部調査装置の付着物（ベデスタル下方の堆積物）
サンプル全体	- 鉄さび上にU含有粒子が分散 - 平均U濃度は極めて低い - 主成分はFe。ついで、Al、Cu、Zn、Pb、Uなど。Pu未確認	- 鉄さび上にU含有粒子が分散 - 平均U濃度は極めて低い	- 養生シート上にU含有粒子を確認 - 海水成分（Na、Mg）の他、Fe、Alが多く検出	- 構造材料、Mo、Cl等が存在 - Co-60がγ線支配	- 鉄さび上にU含有粒子が分散 - 平均U濃度は極めて低い
U含有粒子	- 立方晶(U, Zr)O₂ - 正方晶(Zr, U)O₂	- UとZrが同位置 - 近傍にFe、Cr、Niなど	- 立方晶(U, Zr)O₂ - 立方晶UO₂ - 近傍に、ガラス質SiO₂主成分微粒子	未確認	近傍にFeなどが存在

第I編 第3章概要

3.4節 FPの現象・挙動評価に係る課題、関連事項等の調査 (1)

表3.4-1-1 FPの現象・挙動評価に係る現状と研究課題のまとめ			
	調査結果概要	NDF 6課題との関連等	記載箇所
レベル2PRAの実施によるFP挙動研究課題の抽出	○規制要件ともなったPRAを実施し、原子力安全性向上に資する重要課題（セシウム特徴を踏まえたFP挙動・化学反応、より現実的なCV破損形態とその際のソースターム挙動）を抽出。 ○上記重要課題解決においては、PHEBUS実験、1Fデータ等の有効活用が重要。		
FP放出移行挙動について	○ソースターム評価高度化に向けて、FP化学挙動評価高度化が重要課題である。 ○セシウム、ホウ素等の化学挙動評価のための基礎基盤研究を実施し、化学吸着等に係る基礎知見を取得。	(1) FP付着物（エアロゾル、化学吸着生成物）やデブリ内FPの再浮遊、性状変化の挙動 (4) FP付着物（エアロゾル、化学吸着生成物）の切削やそれによる局所熱発生時の再浮遊挙動や再浮遊物の性状 (5) コンクリートへのFP付着形態と再浮遊・浸出挙動 (6) 格納容器領域等でのFP形態	3.2.1
論文 (Conclusion on severe accident research priorities) の紹介	○SARNETによるPIRT結果の紹介。酸化雰囲気でのRu挙動、FP高温化学吸着挙動、ヨウ素化学、SFPでの集合体挙動等が重要度高とされた。		3.3.1
ロードマップ (RM) 作成方法について	○熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ2017（熱水力RM2017）では、導入シナリオ、技術マップ（技術課題のリスト）、RM（時間軸を考慮、マイルストーン設置）に分けられる。 ○熱水力RMにおいては、2017年の改訂において「FP挙動の最適評価」が課題として追加されている等、本研究専門委員会の活動を進めていくにあたっては関連RM等の参照が重要。 ○水化学部会、原子力安全部会等での同様の活動についても参考とすることが重要。		3.4.1 (1)
放射性物質の環境動態研究 ー環境測定データからのFP放出源推定ー	○モデル改良等により福島の実環境線量を概ね良好に再現できるようになったものの、更なる放出源インプットの精緻化・高度化が必要。 ○特にヨウ素の放出源では化学形の考慮は重要。	(6) 環境での移行挙動とモデル化、シミュレーション技術 環境モニタリングデータからの逆解析により推定したソースタームであり、施設から環境への放出状況の情報として活用可能。推定の不確実性を低減するために、炉内・施設内のFP挙動解析による放出時の核種組成・化学形の情報が有効。	
再処理施設における対応を検討すべきシビアアクシデントの選定方法と影響評価手法	○日本原子力学会 再処理・リサイクル部会 核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究ワーキンググループ (SAWG) の活動概要の紹介。 ○再処理施設におけるSAは発生頻度とその影響を考慮して選定され、ソースターム評価に当たっては五因子法を使用。蒸発乾固時に放出されるRuO₄の影響が最も厳しく、沈着についてはメカニズムが良く分かっていない。	(1) Ruの沈着メカニズム、NO_x・～200℃での揮発性Ru高次酸化物挙動	3.4.2 (1)

第I編 第3章概要

3.4節 FPの現象・挙動評価に係る課題、関連事項等の調査 (2)

	調査結果概要	NDF 6課題との関連等	記載箇所
水相を介したコンクリートへの元素の化合物の挙動	○鉄鋼スラグからのリン除去等にかかわる研究とMCCI生成物からのFP溶出へのアナロジーが紹介された。 ○IFにおいて重要な水相を介した長期的なソースターム研究の重要性が認識された。	(1) デブリ内相ごとの表面の物理的（組織）・化学的（溶出・再沈着）挙動 (4) 微粒子の水中での挙動 (5) 水相を介した長期的なソースタームの拡散	3.4.3 (1)
軽水炉事故時の放射性物質放出移行挙動 モデル化の現状と課題	○現象把握・挙動評価を行ってモデル化するための参考例として、JAEAにおいて実施しているFP化学基礎基盤研究のうち、ホウ素の化学的影響とセシウムの鋼材との高温化学反応に関する実験評価とモデル化の現状が紹介された。	(1)(4)(5) 付着物（エアロゾル、化学吸着生成物）の再浮遊に係る実験設計・モデル例	
燃料・デブリからのFP放出・浸出挙動	○海水、ホウ酸水を用いた使用済燃料・デブリ長期冷却時の各元素の浸出挙動に係る研究の紹介。 ○コンクリート共存（pH）、試料表面状態、試料中のFP分布等が浸出挙動へ与える影響について議論がなされた。	(1) デブリからのFP溶出挙動 (4) 微粒子の水中での挙動 (5) コンクリート含有デブリ（LAVAなど）からのFP溶出挙動	3.4.3 (2)
福島第一原子炉建屋におけるボーリングコアコンクリートの汚染状況とコンクリートへのCsの浸透挙動	○福島第一原子炉建屋からボーリングされたコンクリートの分析結果と、Csの浸透挙動を評価した試験結果について紹介。 ○セシウムのコンクリートへの浸透継続、事故時の浸透状況（乾燥or濡れ）、セシウム拡散へ与える影響（液性や浸透経路）について議論がなされた。	(4) FPが浸透したコンクリート切削時発生する微粒子の性状 (5) コンクリートへの／からのFP浸透／溶出挙動	3.4.3 (3)
シビアアクシデント時の格納容器内ヨウ素化学に係る課題調査	○SA時の格納容器内ヨウ素化学評価の現状と課題について文献調査した結果の紹介。 ○モデル化における課題、ラジオリシスの影響等について議論がなされた。		3.4.2 (2)
SA時のFP挙動に関連した水のラジオリシスの研究	○事故時の水ラジオリシスに関する研究として、ハロゲン化物イオンの化学形態に与える影響や、気相への水素放出、界面におけるラジオリシスの影響等が紹介された。 ○沸騰時やナノ粒子が気相への水素放出量に与える影響、放射線種類やラジカルの影響について議論がなされた。	(1) デブリ表面におけるラジオリシスの基礎的な影響 (2) 発生した水素の不均一分布、ナノ粒子、ラジオリシスの影響	3.4.2 (3)
原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発 汚染状況調査を主とした成果の紹介	○燃料デブリ取り出し準備に係るIRID研究開発の一環として実施した、原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発についての紹介。 ○汚染性状（遊離性、固着性）、水素爆発等の影響、場所（高所・低所）による線量の違いの原因、除染方法、ホットスポットや汚染性状の経時変化等について議論がなされた。	(4) FPで汚染したコンクリート等切削時発生する微粒子の性状 (5) コンクリート汚染核種分布等実地データ、汚染の移行挙動と汚染形態による除染効果	3.4.3 (4)
Sr, Iの化学	○原子力分野以外の一般的な性質や分析方法を含む、Sr及びIの化学についての紹介。 ○Srの分析方法、環境中ヨウ素同位体比、ヨウ素化学形等について議論がなされた。	(1)(5) デブリマトリクスに存在するSrの基礎的的化学挙動	3.4.2 (4)

第I編 第3章概要

3.4節 FPの現象・挙動評価に係る課題、関連事項等の調査 (3)

	調査結果概要	NDF 6課題との関連等	記載箇所
SAMPSONによるFP放	○ SAMPSONにおけるFP挙動の取り扱い及びSAMPSONを用いた1F解析の内容の紹介 ○ 各モデルについて、計算対象としている核種や化学形態、SOARCA等モデル・パラメータの妥当性評価方法についての議論がなされた。	(1)(5) 解析によるFPソース（溶出源）の重要度や不確かさの評価 (4) エアロゾルモデルの微粒子挙動評価への適合性や改良のための課題抽出	3.4.3 (5)
非溶解性中性子吸収材の開発と1Fへの花王の	○ 花王(株)の取組である界面活性等の技術を応用した1F廃炉への貢献検討例として「非溶解性中性子吸収材の開発」が紹介された。 ○ 吸収材の耐放射線性、使用後の処理方法、デブリへの適用方法、液性変化の影響、特性制御等について議論がなされた。	(4) デブリ切削時の微粒子飛散防止策、再臨界防止策 (5) コンクリート付着（・浸透）FPの除染方法	3.4.3 (6)
FP研究の現状と課題（計算科学）	○ 計算科学（分子軌道計算、CFD等）によるFP研究の現状と課題として、気相中でのFPクラスターの生成や環境中のFP挙動（海洋拡散、土壤中Cs化学形態）研究の紹介。 ○ 計算科学手法で求めた結果のSAコードモデルへの応用等について議論がなされた。	各課題に関して取り組む際に、ベースとなる技術と考えられ、これら既存技術を適宜応用していくことが重要と考えられる。	3.4.2 (5)
FP実験のための施設 一国内施設の紹介とFP	○ FP挙動実験のために使用可能なNDC(株)所有のPIE装置、仏CEA所有のFP放出移行実験装置（VERDON装置）の紹介。 ○ 装置スペックやPIE結果への質問、VERDON装置様のものの導入可否等についての議論がなされた。	(1)(2)(3)(5)(6) 課題に関して取り組む際に、ベースとなる技術と考えられ、これら既存技術を適宜応用していくことが重要と考えられる。	3.4.2 (6)
放射光光電子分光を用いたセシウム吸着挙動研究	○ 顕微HAXPESによるセシウム吸着ステンレス表面層の断面分析より、吸着化合物を特定。また、FP放出移行実験サンプルの分析により、ヨウ化セシウムの移行挙動に及ぼすホウ素蒸気の影響を評価した。 ○ “その場観察”放射光光電子分析により、ステンレス基板上のセシウム吸着表面層の酸素ガス雰囲気下での酸化傾向の温度依存性を取得。	(1) デブリ表面の酸化状態等の直接測定技術 (4) 微粒子中に含まれる元素の化学状態評価 (2) 鋼材表面の腐食（酸化）状態測定技術 (5) コンクリート表面の化学状態評価	3.4.2 (7)
1F燃料デブリ取り出しに係る定量的リスク評価	○ 1F廃炉検討委員会・廃炉リスク評価分科会での検討結果の紹介。 ○ 落下の影響を受けての粉状デブリや構造物付着FPの舞い上がりによる放出量が不確かさも大きく、影響も大きいこと、燃料デブリ・構造物付着FPの分布とともに性状の把握も重要であること等が述べられた。	(2) 事故時に蒸発気化して配管等の構造物に付着したFPの挙動（経年劣化、腐食など） (4) 切削時の気中への移行割合、特に上部構造物等の切削時 (5) 1～3号機原子炉建屋内の線量分布、炉内調査時の線量率など (6) 事故後からの建屋内滞留水の経時変化など	
ソースタームにかかわる規制の現状と課題	○ ソースタームの経緯、設置許可における安全評価、新規規制基準におけるソースタームの適用（SA対策の有効性評価、安全性向上評価）、許認可におけるソースターム評価に係る課題について概説がなされた。		3.1.1

- ・ 1FでのFP挙動を理解するための課題をNDF提示の6課題と対応させて紹介
- ・ 個別研究課題の現状を詳細に紹介

3.4節 FPの現象・挙動評価に係る課題、関連事項等の調査 (4)

3.4.2 FP研究ニーズ・課題の調査結果 (SA 研究関連)

- (1) 再処理シビアアクシデントの選定方法と影響評価手法
- (2) 格納容器内ヨウ素化学
- (3) SA時のFP挙動に関連した水のラジオリシスの研究
- (4) Sr, Iの化学
- (5) FPに係る計算科学研究の現状と1F事故：分子論的計算科学手法を用いたFP挙動
- (6) FP実験のための施設
- (7) 高輝度放射光光電子分光を用いたセシウム吸着挙動研究

3.4.3 FP研究ニーズ・課題の調査結果 (1F 関連)

- (1) 多相酸化物における元素の濃縮と水溶液への溶出挙動
- (2) 燃料・デブリからのFP放出・浸出挙動
- (3) 福島第一原子炉建屋におけるボーリングコアコンクリートの汚染状況とコンクリートへのCsの浸透挙動
- (4) 1F原子炉建屋内の除染
- (5) SAMPSONによる放射性核種の放出・移行挙動解析および1F廃炉に向けた取り組み
- (6) 非溶解性中性子吸収材の開発と1Fへの花王の取組

1Fに深くかかわるFPの基礎挙動の研究状況の詳細な紹介

発電所におけるFP生成量、存在量の把握

4.2放射性核種のインベントリ評価

4.2.1 核種発生量評価のための基礎式とデータ

4.2.2 ORIGINコード

4.2.3 ORIGIN2による照射後試験解析

4.2.4 1Fの核種インベントリデータ

4.2.5 SA解析や廃炉評価などに用いられる主な元素、核種のインベントリデータ

事故時の炉心のFP、TRUインベントリ評価のためのORIGINコードと評価結果の紹介

4.3短/中/長期FP分布評価法

事故直後から廃炉評価に必要な長期経過後のFP量評価法の紹介

4.4 廃棄物として処理されるFP核種の評価法

4.4.1放射性廃棄物と分析

4.4.2土壌

4.4.3 瓦礫

4.4.4 汚染水

4.4.5 移行挙動のまとめ

事故後のプラント内各所でのFP、TRUなどの主要核種を ^{137}Cs を指標として評価可能な輸送比の概念とその適用例を紹介

5.1 SA解析コードの概要

5.1.1 安全評価とSA解析コード5.5.2 廃炉解析の提案

5.1.2 米国における最近の安全評価

5.1.3 SA解析コードとその活用例

(i) SA解析コードの種類と特徴 (ii) SA解析コードで扱うFP挙動

5.2 FP挙動モデル

5.2.1 燃料からの放射性物質放出モデルと放出後の化学形態

5.2.2 エアロゾル生成・成長モデル

SA解析コードの本来の役割とその特徴を紹介

5.3 Phébus実験ベンチマーク

5.3.1 Phébus実験の概要と実験で得られた知見

5.3.2 Phébus FPT-1ベンチマークで得られたFP挙動モデルの課題

5.3.3 Phébus FPT-3ベンチマークで得られたFP挙動モデルの課題

5.4 1F事故解析

5.4.1 BSAFの概要

5.4.2 環境放出量に基づくプラント状態の推定

5.4.3 大気拡散シミュレーションによるソースターム評価

5.4.4 PCV内の線量率分布評価

5.4.5 1F事故評価で得られたFP挙動モデルの技術課題

5.5 まとめ

5.5.1 SA解析コードFP挙動モデル高度化の課題

5.5.2 廃炉解析の提案

SA解析コードを廃炉時のFP分布評価に適用する方策を紹介

第II編 第1章概要

通常炉と事故炉の廃炉への対応の差異

表1.3-1 廃止措置の観点からの事故炉通常炉との相違点

	通常原子炉	事故炉
燃料	運転中と同様に取出し搬出して処理が可能	燃料デブリの形で回収して、当面保管（取扱いについては検討用要）
施設	建屋を遮蔽として活用することが可能	建屋、設備に破損がある
状況把握	汚染状況を事前に調査して廃止措置計画を立案することが可能。	汚染状況の事前調査は困難。進捗に応じて確認してゆく
環境	基本的には環境汚染はない。	土壌、草木、海浜砂などの環境汚染あり。
放射性核種	主な核種は原子炉周りの構造材の ^{60}Co	左記に加え、気中では揮発核種性（ ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr ）, 汚染水中に重金属FP核種および核燃料構成核種がある可能性がある。
浸透汚染	構造材への浸透はほとんどない。	破損施設や地下部への浸透を考慮する必要がある。
物量	放射性廃棄物となる物量はユニット当たり1~2万トン	放射性廃棄物となる物量はユニット当たり数10~数100万トン（推定値）
処分制度	現行法令で処分制度は整備済み	処分制度の整備が必要
汚染水	既存施設で処理	FP核種や塩分を含む多量の汚染水がある。

表1.3-2 通常原子炉の廃炉と事故炉（福島第一原子力発電所1-3号機）の廃炉の差異（1）基本手順

通常原子炉	事故炉
①燃料取出	①燃料プールの燃料取出 燃料デブリ取出（100%の取り出しは非現実的。どの程度の燃料デブリの残存を認めるかは今後の議論で決まる）
②放射能インベントリの調査（主として実測に基づく）	②放射能インベントリの調査（主として解析結果に基づく）
③必要に応じて洗浄、除染	③上記調査結果に基づき、廃炉計画
④解体手順の決定（被曝計画）	④解体手順案の決定（被ばく計画）
⑤廃棄物量の評価（種類別）	⑤廃棄物量の評価（案）（種類別）
⑥廃棄物処理方法の決定	⑥廃棄物処理方法案の決定
	まず上記案を作成し、R/B、PCVに実際にアクセス。 この間に線量率、汚染状況ほかを実測 上記実測結果に基づき、放射能インベントリの再調査 ⇒ ②に戻る これを繰返し、一歩ずつ確実に廃炉作業を進める。

第II編 第2章概要

No.15

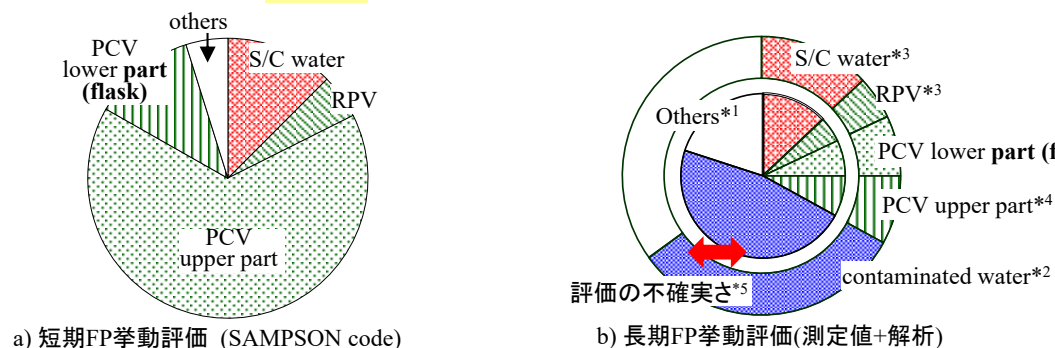
FP 分布の把握

表2.2-1 FP分布評価手法

被評価項目 部位	線量率測定	FP核種測定		短/中/長期FP挙動解析による評価
		汚染密度	総量・濃度	
原子炉容器	- (測定未着手)			
格納容器	・ D/W CAMS ・ PCV内調査機で測定		・ 採取	
圧力抑制室	・ S/C CAMS			
原子炉建屋	・ 保物用線量率測定 (1号機全体のFP分布図)	・ スミヤ測定		図2.2-16 SA解析コードによるFP分布評価結果例 SA解析コード+長期FP挙動解析
タービン建屋	・ 保物用線量率測定	・ スミヤ測定		初期炉心インベントリ に対する存在比率
汚染水			・ 汚染水核種解析	・ 汚染水核種解析コード
サイト内汚染物			・ 汚染土核種解析	・ 汚染土核種解析コード
サイト外環境	・ 空間線量率 モニタリングポスト 車、航空機での測定	・ 空間核種分布測定 モニタリングポスト	・ 土壌、河川からの サンプリング測定	DDI

： 廃炉・燃料デブリ取出し等長期にわたり最重要項目

： 同左重要項目



中・長期FP 挙動評価

図2.5-1 1号機の¹³⁷Csマスバランス

これまでに把握できたFP分布と
その外挿法および外挿結果
を紹介

- *1 WSPEEDIによる放出量評価
- *2 汚染水解析に基づく評価
- *3 SAMPSONコードの外挿
- *4 中期FP解析 (wash-out効果)
- *5 汚染水解析データの評価

第II編 第3章概要

燃料デブリ分布の把握

表3.2-3 燃料デブリ分布状態測定結果

年度／号機	1号機	2号機	3号機
～2015年 ^{4),5)}	・ペデスタル外側の線量率測定 ・D/W下部に堆積物確認 ・PCV内部のミュオン透視像	・PCV内部線量率：31-73Sv/h	・PCV気相部線量率：0.8-1Sv/h
2016年度 ⁶⁾	・PLRポンプ、PCV内壁面等に大きな損傷なし。 ・1Fグレーティング上の線量率：5-10Sv/h	・ペデスタル内のグレーティングに損傷確認 ・CRD交換用レールの線量率：～70Sv/h ・PCV内部のミュオン透視像	・グレーティング上に堆積物確認、水位確認
2017年度 ⁷⁾	・PCV底部に堆積物確認（化学/核種分析） ・グレーティング上の線量率：4-12Sv/h	・ペデスタル内堆積物、TIP閉塞物採取（化学/核種分析） ・気相部線量率への溶融物固化寄与確認	・PCV内部のミュオン透視像
ミュオン透視法、ラジオグラフィーによる燃料デブリ分布の評価 シビアアクシデン解析コードによる燃料デブリ分布の評価 上記ミュオンによる測定と、計算による評価を総合した燃料デブリ分布の評価			
2018年度 ^{8),9)}	・PCV底部に堆積物確認	・PCVペデスタル底部に燃料デブリと推定される堆積物確認	

燃料デブリの分布は、ミュオン測定、SA解析コードによる推定が主。
今後を廃炉作業の進展に伴い少しずつ明確化される

FPの除去回収

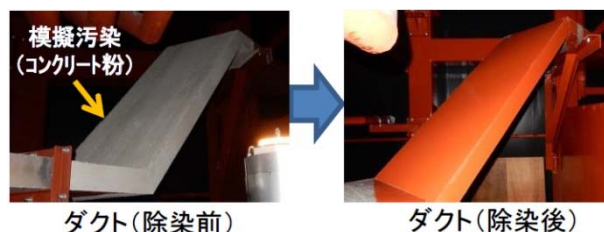


図4.1-1 高圧水ジェット除染の実施例¹⁾

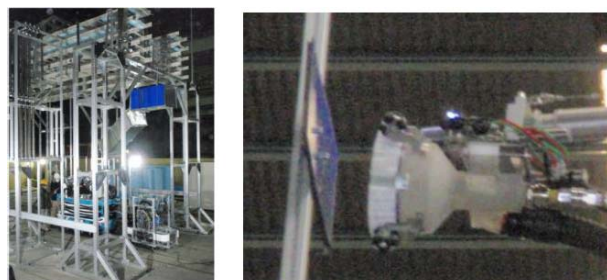
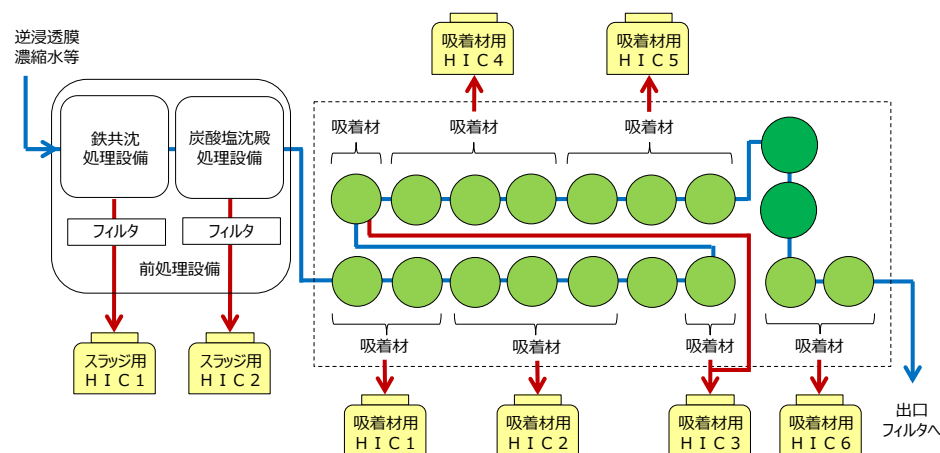


図4.1-2 ドライアイスブラスト除染の高所モックアップ
(高さ8mでのドライアイス噴射状況)

これまでに様々な放射性物質除去作業が実施されている。
放射性物質除去作業の現状と今後の課題を紹介。

汚染水処理



HIC: High Integrity Container (専用の廃棄物保管容器)

図 5-4 多核種除去設備（ALPS）のシステム構成

表11.6 既設(1号機)および増設(2号機)多核種除去設備における
主な核種の告示濃度及び告示濃度比の平均値²⁾

			Cs-134	Cs-137	Sr-90	I-129	Ru-106	Co-60	Sb-124
告示濃度限度[Bq/L]			60	90	30	9	100	200	600
告示濃度 限度比 [－]	既設	入口	11	71	15000	8.1	1.9	0.53	1.4
		出口	0.0038	0.004	0.0031	0.18	0.0077	0.0036	0.00079
	増設	入口	9	59	18000	6.4	1.8	0.75	1.2
		出口	0.0034	0.0017	0.0033	0.94	0.016	0.0038	0.00073

*2018年度（～2018/8/31）実績，平均値の計算に際し，検出限界未満(ND)の核種は検出限界値を採用，
平均値は単純平均であり，処理量は考慮されていない

多核種除去設備とその稼働実績の紹介

環境汚染状況

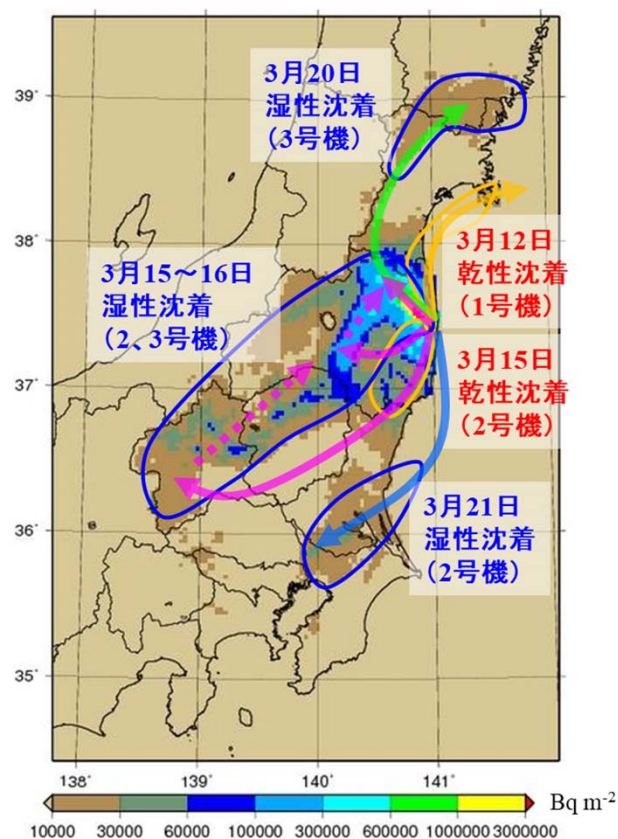


図6-1 ^{137}Cs 沈着分布を形成した大気拡散過程および
放出事象があったと考えられる原子炉

WSPEEDIを用いた環境汚染状況の評価とFPの主要発生源の推定

第II編 第7章概要

No.20

廃炉作業に係るリスク評価

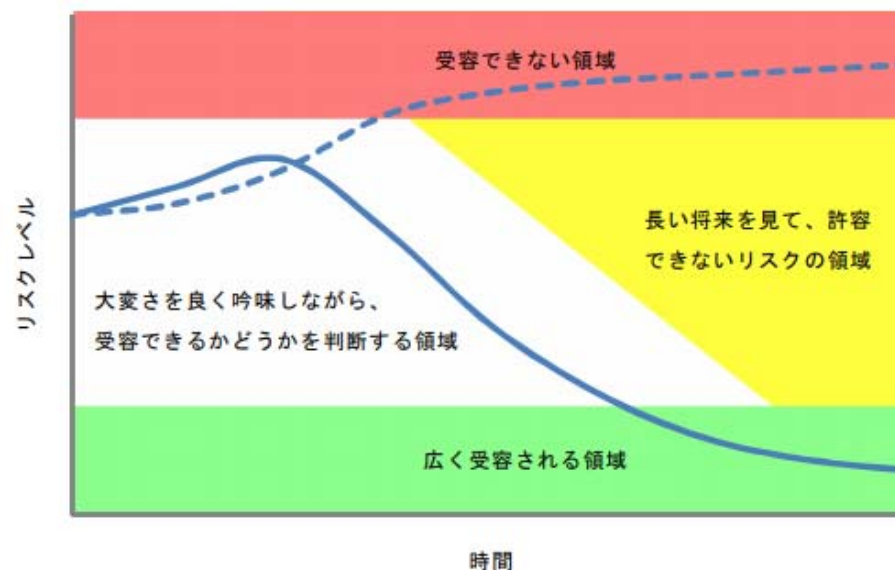


図7.1 リスクレベルの時間変化^{4)~6)}

廃炉作業におけるリスク評価手法の紹介
この考えをベースに今後の廃炉リスク評価が実施されてゆく予定。

今後の課題

- ・ 4年間の「シビアアクシデント時の核裂生成物移動」研究専門委員会を通して、
明らかにになった点を整理すると共に、
今後の残された課題、議論の過程で顕在化した新しい課題を整理し、
次期の「福島第一原子力発電所廃炉に係る核分裂生成物挙動」研究専門委員会
への展開法についてまとめた。
- ・ 本編の詳細は、日本原子力学会誌ATOMOSの7月号に解説記事として掲載
「シビアアクシデント時の核裂生成物移動」研究専門委員会著
「シビアアクシデント時の核裂生成物移動」研究専門委員会の活動実績と今後の展開