

# シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動

**Fission Product Behavior under Severe Accident**

2021年5月

May 2021

「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

Research Committee on Fission Product Behavior under Severe Accident

(一社) 日本原子力学会

Atomic Energy Society of Japan



## 要 旨

「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摘出、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。

## ABSTRACT

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

- 1) 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)).
- 2) 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

# 目次

要旨	i
ABSTRACT	i
はじめに	vii
委員リスト	viii
執筆者リスト	ix
<b>I. 基礎編</b>	<b>1</b>
1. 核分裂生成物の基礎特性	3
1.1 核分裂生成物の生成, 蓄積と物理特性	3
1.1.1 核の壊変	3
1.1.2 天然放射性核種	5
1.1.3 核反応と放射性核種の生成	6
1.1.4 核分裂生成物の生成, 壊変, 放射化及び蓄積	9
1.2 主要な核分裂生成物のカテゴリー分け	10
[参考文献]	11
2. 燃料デブリの基礎特性	12
2.1 シビアアクシデント事故時の燃料ふるまい	12
2.2 燃料デブリの性状	13
2.3 1F 燃料デブリの性状	16
[参考文献]	17
3. FP の現象・挙動評価に係る現状と研究課題	18
3.1 ソースタームの経緯	18
3.1.1 はじめに	18
3.1.2 設置許可における安全評価	18
3.1.3 新規制基準におけるソースタームの適用	19
3.1.4 許認可におけるソースターム評価に係る課題	20
3.2 軽水炉 SA 時の FP 放出・移行挙動	20
3.2.1 燃料からの FP 放出挙動	20
3.2.2 燃料から放出された FP の移行挙動	21
3.3 FP 研究ニーズ・課題等	22
3.4 FP の現象・挙動評価に係る課題、関連事項等の調査	26
3.4.1 調査の進め方	26
3.4.2 FP 研究ニーズ・課題の調査結果 (SA 研究関連)	32
3.4.3 FP 研究ニーズ・課題の調査結果 (1F 関連)	47
3.5 まとめと今後の課題	63
3.5.1 まとめ	63
3.5.2 今後の課題	63
[参考文献]	64
4. 発電所における FP 生成量、存在量の把握	70
4.1 はじめに	70
4.2 放射性核種のインベントリ評価	70
4.2.1 核種発生量評価のための基礎式とデータ	70
4.2.2 ORIGEN コード	71
4.2.3 ORIGEN2 による照射後試験解析	71
4.2.4 1F の核種インベントリデータ	72
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	72
4.3 短/中/長期 FP 分布評価法	72
4.4 廃棄物として処理される FP 核種の評価法	74
4.4.1 放射性廃棄物と分析	74
4.4.2 土壌	76
4.4.3 瓦礫	77

4.4.4	汚染水	78
4.4.5	移行挙動のまとめ	79
4.5	おわりに	79
	[参考文献]	79
5.	シビアアクシデント解析コード	81
5.1	SA 解析コードの概要	81
5.1.1	安全評価と SA 解析コード	81
5.1.2	米国における最近の安全評価	82
5.1.3	SA 解析コードとその活用例	82
5.2	FP 挙動モデル	85
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	85
5.2.2	エアロゾル生成・成長モデル	89
5.2.3	エアロゾル除去モデル	92
5.2.4	安全系での除去モデル	93
5.2.5	ヨウ素化学	96
5.2.6	熱水力の影響	98
5.3	Phébus 実験ベンチマーク	99
5.3.1	Phébus 実験の概要と実験で得られた知見	99
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	101
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	104
5.4	1F 事故解析	107
5.4.1	BSAF の概要	107
5.4.2	環境放出量に基づくプラント状態の推定	109
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	112
5.4.4	PCV 内の線量率分布評価	116
5.4.5	1F 事故評価で得られた FP 挙動モデルの技術課題	121
5.5	まとめ	124
5.5.1	SA 解析コード FP 挙動モデル高度化の課題	124
5.5.2	廃炉解析の提案	126
	[参考文献]	128
II.	応用編	135
1.	通常炉と事故炉の廃炉への対応の差異	137
1.1	はじめに	137
1.2	通常炉の廃炉	137
1.3	福島第一原子力発電所 1-4 号機（特定原子力施設）の廃炉	138
1.4	まとめ	139
	[参考文献]	139
2.	FP 分布の把握	140
2.1	はじめに	140
2.2	FP 分布評価の現状	140
2.2.1	FP 分布関連データへのアクセス	140
2.2.2	線量率データ	142
2.2.3	FP 核種分析データ	147
2.2.4	シビアアクシデント解析コードによる評価	148
2.3	短/中/長期 FP 挙動評価による推定	148
2.3.1	短/中/長期 FP 分布評価法	149
2.3.2	短期 FP 分布評価法	150
2.4	汚染水中の核種移行量評価	153
2.5	現状での FP マスバランス	157
2.6	おわりに	157
	[記号と略号の説明]	157
	[参考文献]	158

3. 燃料デブリ分布の把握	160
3.1 はじめに	160
3.2 測定値に基づく推定	160
3.2.1 主な測定法	160
3.2.2 具体的な測定手法	161
3.2.3 主な測定結果	162
3.3 SA 解析コードによる推定	166
3.3.1 主な燃料デブリ分布評価用 SA 解析コード	166
3.3.2 BSAF プロジェクトでの評価	166
3.3.3 国家プロジェクトでの評価	166
3.4 今後の課題とその対応	167
3.5 おわりに	167
[参考文献]	167
4. FP の除去回収	169
4.1 原子炉建屋内の遠隔除染	169
4.1.1 背景および目的	169
4.1.2 実施内容	169
4.1.3 今後の実機適用	170
4.2 X-6 ペネにおける局所除染	170
4.2.1 背景および目的	170
4.2.2 実施内容	170
4.2.3 建屋解体時の除染方法	170
[参考文献]	171
5. 汚染水処理	172
5.1 汚染水対策の概要	172
5.2 汚染水処理における FP 除去	172
5.2.1 汚染水処理の概要	172
5.2.2 第二セシウム吸着装置 (SARRY™)	172
5.2.3 多核種除去設備 (ALPS)	173
[参考文献]	173
6. 環境汚染状況	174
6.1 はじめに	174
6.2 事故進展と大気拡散過程	174
6.3 環境汚染の特徴	175
6.4 不溶性セシウム含有粒子	176
[参考文献]	176
7. 廃炉作業に係るリスク評価	178
7.1 はじめに	178
7.2 リスク評価にあたっての考え方	178
7.2.1 定量的リスク評価の目的	178
7.2.2 リスク指標	179
7.3 分析手法	180
7.3.1 分析の方針 <sup>2)</sup>	180
7.3.2 ハザード分析 <sup>2)</sup>	180
7.3.3 シナリオの定量化 <sup>2)</sup>	183
7.4 今後の課題	185
[参考文献]	186
III. 今後の課題	189
1. はじめに	191
2. 研究専門委員会全体としての成果と今後の課題	192
3. 「FP 実験」関連の主要成果と今後の課題	194
3.1 WG1 「FP 実験」の活動実績	194

3.2 WG1 の今後の技術課題.....	194
4. 「ベンチマーク評価」関連の主要成果と今後の課題.....	195
4.1 WG2 「ベンチマーク評価」の活動実績.....	195
4.2 WG2 の今後の技術課題.....	195
5. 「技術課題抽出」関連の主要成果と今後の課題.....	197
5.1 WG3 「技術課題抽出」の活動実績.....	197
5.2 1F の放射能データの現状.....	197
5.3 WG3 での今後の技術課題.....	197
6. 軽水炉の安全性向上に向けた活動の課題.....	199
7. 次期研究専門委員会での対応.....	200
[参考文献] .....	200
おわりに.....	203
IV. 付録.....	205
1. 「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 設立申請書.....	207
1-2. 「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 延長申請書.....	209
2. 「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会活動記録.....	211
3. 「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.....	227
4. 日本原子力学会 2018 年春の年会企画セッション 総合講演 報告 2.....	234
総合講演 報告 2M_PL01.....	235
総合講演 報告 2M_PL02.....	237
総合講演 報告 2M_PL03.....	239
総合講演 報告 2M_PL04.....	241
総合講演 報告 2M_PL05.....	243
総合講演 報告 2M_PL06.....	245
解説記事「事故時の核分裂生成物挙動解明への挑戦」.....	247
5. 日本原子力学会 2019 年春の年会企画セッション 部会合同セッション.....	253
合同セッション 2D_PL01.....	254
合同セッション 2D_PL02.....	256
合同セッション 2D_PL03.....	258
合同セッション 2D_PL04.....	260
解説記事「核分裂生成物と燃料デブリの比較」.....	262
6. 日本原子力学会 2020 年春の年会企画セッション 総合報告 3.....	268
総合講演・報告 3D_PL01.....	269
総合講演・報告 3D_PL02.....	272
総合講演・報告 3D_PL03.....	273
総合講演・報告 3D_PL04.....	275
7. 日本原子力学会 2021 年春の年会企画セッション 総合講演 報告 1.....	277
総合講演・報告 1H_PL01.....	278
総合講演・報告 1H_PL02.....	281
総合講演・報告 1H_PL03.....	284
総合講演・報告 1H_PL04.....	287
解説記事原稿「活動実績と次期研究専門委員会への展開」.....	289
8. 略号集.....	294

## はじめに

本報告書「福島第一原子力発電所における核分裂生成物の短期/長期挙動」は2017年から2021年までの4年間の「シビアアクシデント時の核分裂性生物挙動」研究専門委員会の活動に基づく技術報告書である。これに先立つ2015年からの2年間、水化学部会に「核分裂生成物挙動」研究専門委員会準備会を組織し、国際的なPWRのインパイルループによるベンチマーク実験「Phébus FPプロジェクト」の公開文献を精査する活動を行なった。この活動は、核分裂生成物の挙動の検討は福島第一原子力発電所の今後40年余に及ぶ廃炉に深く関わること、さらにはFP関連の技術を支えてきた研究者・技術者が第一線を退いてきたことから、若い年代に確実に技術伝承することが重要課題であるとの認識に基づいている。このような状況に鑑み「Phébus FPプロジェクトにおける核分裂挙動のまとめ - 福島プラント廃炉計画およびシビアアクシデント解析への適用」なる技術報告書を刊行した。今回も全く同じ認識のもとに活動し、その成果を技術報告書としてまとめたものである。

さて、「シビアアクシデント時の核分裂性生物挙動」研究専門委員会の活動は三つのWG(WG1:FP実験、WG2:ベンチマーク評価、WG3:技術課題抽出)と全体会議で行ない、3つのWGは目的、内容は相互に関連を持つよう心がけて行なった。このあたりの狙いについてはこの後に詳細に紹介する。主に水化学部会のメンバーが活動を担い、熱流動部会、核燃料部会、保健物理・環境科学部会、計算科学技術部会、原子力安全部会、バックエンド部会、再処理リサイクル部会からの支援も得た。この活動の間、福島プラント内の汚染分布やデブリの状況も少しずつわかってきた。これらについても最新のデータを取得するようしてきた。

本報告書はI.基礎編、II.廃炉におけるFP挙動とその対応、III.今後の課題からなる。さらに資料として、ATOMS解説記事、活動記録も収録している。本専門委員会の4年間の活動報告のまとめであり、今後の活動の一助になることを期待している。

2021年3月

「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 主査 勝村庸介

## 委員リスト

主査	勝村 庸介	日本 RI 協会、東大名譽教授	委員	坪田 陽一	原子力機構 (2019 年 4 月から)
幹事	内田 俊介	原子力機構 [水化学部会代表]	委員	富永 和生	日立=>日立 GE (2018 年 4 月から)
幹事	逢坂 正彦	原子力機構 [核燃料部会代表]	委員	永井 晴康	原子力機構 [保健物理・環境科学部会代表]
幹事	唐沢 英年	エネ総研=>原子力機構	委員	中野 純一	NDF
幹事	高木 純一	東芝 ESS [廃炉検討委員会代表]	委員	中野 祐介	原電 (2019 年 3 月まで)
委員	青木 政徳	関電 (2020 年 3 月まで)	委員	中村 勤也	電中研
委員	天谷 政樹	原子力機構	委員	中村 秀夫	原子力機構 [原子力安全部会代表]
委員	有田 裕二	福井大学	委員	中村 康一	電中研
委員	出光 一哉	九州大学	委員	西岡 佳朗	東芝 ESS (2019 年 4 月から)
委員	伊藤あゆみ	エネ総研 (2019 年 3 月まで)	委員	野滝 友博	NDC (2018 年 4 月から)
委員	植田 滋	東北大学 (2019 年 4 月から)	委員	埜 悟史	原子力機構
委員	牛尾 典明	花王 (2019 年 4 月から)	委員	林 弘忠	東芝 ESS (2019 年 3 月まで)
委員	宇埜 正美	福井大	委員	久宗 健志	原電=>WANO
委員	江藤 淳二	三菱総合研究所	委員	日高 昭秀	原子力機構 (2018 年 4 月から)
委員	大杉 武史	原子力機 [バックエンド部会代表]	委員	日高 政隆	日立 (2019 年 4 月から)
委員	岡田 英俊	IAEA (2018 年 4 月から)	委員	氷見 正司	アドバンスソフト (2018 年 4 月から)
委員	梶谷 幹男	RANDEC	委員	深澤 哲生	日立 GE=>NFD
委員	木野 千晶	エネ総研 [熱流動部会代表]	委員	福井 宗平	日立
委員	木下 幹康	東京大学	委員	藤原 大資	テプコンシステムズ
委員	樽松 繁	NDC	委員	古川 徹	東電 (2018 年 6 月まで)
委員	黒崎 健	大阪大学	委員	町田 昌彦	原子力機構 [計算科学技術部会代表]
委員	甲川 憲隆	NDC	委員	宮原 直哉	三菱重工 (2018 年 4 月から)
委員	駒 義和	原子力機構 (2020 年 4 月から)	委員	三輪 周平	原子力機構 (2019 年 4 月から)
委員	小松 祐哉	東電 (2018 年 6 月から)	委員	村上 健太	長岡技術科学大学
委員	酒井 幹夫	東京大学	委員	矢板 由美	東芝 ESS
委員	佐藤 勇	東京都市大学	委員	山下 真一	東京大学
委員	澤田 佳代	名古屋大学 [再処理リサイクル部会代表]	委員	和田 陽一	日立 (2018 年 3 月まで) (2020 年 10 月から)
委員	杉野 亘	原子力発電 (2019 年 4 月から)			
委員	鈴木 晶大	NFD			
委員	鈴木 俊一	東京大学 (2019 年 4 月から)			
委員	園田 健	電中研			

以上



## 執筆者リスト

はじめに	勝村庸介	5.シビアアクシデント解析コード	
I 基礎編		5.1 SA 解析コード	唐澤英年 氷見正司 中村康一
1.FP の基礎特性	宮原直哉 内田俊介	5.2 FP 挙動モデル	日高昭秀 唐澤英年 藤原大資
2.燃料デブリの基礎特性	中村勤也		西岡佳郎 三輪周平
3.FP 現象把握・挙動評価に係る 研究課題	逢坂正彦	5.3 Phébus 実験ベンチマーク	岡田英俊 唐澤英年 三輪周平
3.1 ソースタームにかかわる規制、 許認可の現状と課題	三輪周平	5.4 SA 解析コード	木野千晶 氷見正司
3.2 軽水炉 SA 時の FP 放出・移行挙動	宮原直哉		永井晴康 奥村啓介
3.3 FP 研究ニーズ・課題等	宮原直哉	5.5 まとめ	日高昭秀 唐澤英年
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 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 逢坂正彦	II 応用編 廃炉における FP の挙動とその対応	
3.5 まとめと今後の課題		1.通常炉と事故炉の廃炉への 対応の差異	内田俊介
4.福島第一原子力発電所における FP 挙動の把握		2. FP 分布の把握	内田俊介
4.1 はじめに	内田俊介	3. 燃料デブリ分布の把握	内田俊介
4.2 ORIGEN2 コードによる 炉心インベントリの評価	奥村啓介	4. FP の除去回収	高木純一
4.3 短/中/長期 FP 分布評価法	内田俊介	5. 汚染水処理	高木純一
4.4 廃棄物として処理される FP 核種の評価法	駒義和	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

---

「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  
シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動

Fission Product Behavior under Severe Accident

発行 2021年5月31日

定価 4,400円(税込)

発行所 一般社団法人 日本原子力学会

〒105-0004 東京都港区新橋 2-3-7 新橋第二中ビル

TEL: 03-3508-1261

FAX: 03-3581-6128

E-mail: [atom@aesj.or.jp](mailto:atom@aesj.or.jp)

URL: <https://www.aesj.net>

---

© 2021 Atomic Energy Society of Japan

ISBN: 978-4-89047-179-9