

企画セッション | 合同セッション：合同セッション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、核燃料部会、水化学部会）

■ 2019年3月21日(木) 13:00 ~ 14:30 | ■ D会場 共通教育棟2号館 1F 12番

[2D_PL] 核分裂生成物と燃料デブリの比較 — 廃炉作業時の影響比較の観点より

座長: 高木 純一 (東芝ESS)

[2D_PL01] 燃料デブリの基礎特性と事故時のふるまい

*中村 勤也¹ (1. 電中研)

[2D_PL02] 核分裂生成物の基礎特性と事故時のふるまい

*宮原 直哉¹ (1. JAEA)

[2D_PL03] 廃炉作業時に想定される燃料デブリと核分裂生成物の挙動の比較

*逢坂 正彦¹ (1. JAEA)

[2D_PL04] 廃炉作業時の放射性物質管理の留意事項

*高木 純一¹ (1. 東芝ESS)

「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，核燃料部会，水化学部会合同セッション

核分裂生成物と燃料デブリの比較 - 廃炉作業時の影響比較の観点より

Comparison of fission products and fuel debris - From the viewpoints of their effects on decommissioning work

(1) 燃料デブリの基礎特性と事故時のふるまい

(1) Basic properties of fuel debris and their behavior under severe accident

*中村勤也¹、高野公秀²

¹電力中央研究所、²日本原子力研究開発機構

1. はじめに

福島第一原子力発電所（1F）1～3号機の各建屋には、損傷燃料や溶融燃料が冷えた固まった燃料デブリが核分裂生成物（FP）とともに残存していると考えられている。FPと燃料デブリの性状、組成および分布等は事故進展によって変わり、また、事故進展はFPと燃料デブリの性状、組成および分布等を調査することによって明らかになるものがある。本講演では、廃炉作業時に留意すべきFPと燃料デブリを比較して議論するにあたっての予備知識として、燃料デブリの基礎特性と事故時のふるまいについて既存知見[1]をベースに解説する。また、廃炉作業を進めるうえでのデブリ性状に関する課題もあわせて報告する。

2. 事故進展時の燃料ふるまい

2.1 BWR 燃料の構造

事故時の1F1～3号機には、ステップⅢ燃料（9×9型）を中心に1号機ではステップⅡ燃料（8×8型）が68体、3号機ではMOX燃料が32体装荷されていた。BWR燃料は、集合体レベルで軸方向および径方向に濃縮度およびガドリニア濃度が異なるペレットを配置し、出力分布や燃焼度分布を調整している。また、部分長燃料棒（A型）や集合体中心にウオーターロッド／チャンネルを有し、集合体をチャンネルボックスで取り囲む構造をしている。

2.2 事故進展時の燃料ふるまい

シビアアクシデント（SA）時の燃料ふるまいの概念図を図1に示す。露出した燃料棒は次第に温度上昇し、被覆管は膨れて破裂しFPガスが放出される。温度上昇と時間経過とともに水蒸気酸化による被覆管の減肉が進行し、発生した水素の吸収または放出が起こり、延性の低下とともに脆性破壊しやすくなる。燃料／被覆管界面では、相互拡散により一部に低融点相が形成され、β-Zrの融点以上では被覆管が破損すると内部の液相が燃料棒の外側へリロケーションし炉心損傷が拡大する。下部プレナムに移行した溶融燃料は、圧力容器の貫通部等を破壊して一部はペDESTALに落下しコンクリートと反応したと推定されている。一部の燃料棒は、未溶融の切株状のまま直立または倒壊する場合がある。

制御棒は、顆粒状のB₄C中性子吸収材がステンレス鋼製の被覆管に充填され、この制御棒被覆管を十字型に集合した構造である。1200℃以上の高温に達すると共晶反応により鉄を主成分としホウ素を含有する低粘性融体が形成され、燃料棒に先行して制御棒の形状が喪失される。この融体は、水蒸気によって酸化されにくく、下部タイプレートを通して下部プレナムに排出されやすい特性が報告されている。

3. 燃料デブリの性状

1F1～3号機ともに炉心構造材料のうちUO₂が約62wt%、ジルカロイが約26wt%を占めることから、燃料デブリの主成分はU、Zr、Oと考えられよう。これまでに、TMI2号機やチェルノブイリ4号機の燃料デブリに加え、炉外SA模擬試験で得られた模擬デブリの性状が報告されている。国内では、未照射材を用いた実験室規模での溶融試験やTMI-2デブリとの比較等により、炉心溶融固化物やMCCI（炉心溶融物－コンクリート相互作用）生成物の生成相や微細組織、硬さ等の機械特性に関する性状データが蓄積されている。

*Kinya Nakamura¹, Masahide Takano², ¹CRIEPI, ²JAEA

炉心溶融固化物の主成分は $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ 系固溶体である。 $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ 擬二元系状態図[2]を図2に示す。立方晶($\text{U,Zr})\text{O}_2$ が全率固溶する温度領域は、融点直下の高温領域に限られ、温度低下とともに正方晶の($\text{Zr,U})\text{O}_2$ が新たに生成する。これは、急冷条件では立方晶($\text{U,Zr})\text{O}_2$ が単相のまま保持されやすいが、徐冷条件では U リッチの立方晶($\text{U,Zr})\text{O}_2$ と Zr リッチの正方晶(+単斜晶)($\text{Zr,U})\text{O}_2$ に相分離しやすくなることを示している。また、炉心溶融物が水中に落下して急冷されると、小規模では粒子状になり大規模では溶融固化物の表面が粉体化する。溶融状態の($\text{U,Zr})\text{O}_2$ には、炉心構造材料が一定量固溶し、Fe や Gd、Ca の溶解度が調べられている。今後、1F サンプル分析の結果から、事故時の到達温度や酸素ポテンシャルの評価が期待される。

一方、金属質デブリは、溶融進展時の酸化状況に応じて、Zr-(Fe,Cr,Ni)系金属間化合物あるいは(Fe,Ni)系合金等を形成する。実験と熱力学解析より、ホウ素は Zr または Fe と高硬度のホウ化物を形成して金属質デブリ中に析出する可能性が指摘されている。

MCCI では、炉心溶融物とコンクリート界面の近傍で大きな温度勾配が生じ、到達温度領域に応じて階層構造を形成する可能性がある。コンクリートは 1200°C 以上から液相が出始めてガラス化するとともに、($\text{U,Zr})\text{O}_2$ との反応生成物の固相線温度は約 2500°C から 2000°C 前後まで低下することが推測される。MCCI が進行しているとき、コンクリートから放出される水蒸気によって酸化雰囲気に近いと考えられ、酸化されずにリロケーションした Zr 等の溶融金属は水蒸気による酸化発熱反応が進行することが推測される。

4. 1F サンプル分析との比較

1F1～3号機の格納容器内から回収された固体サンプルを分析することにより、FPの化学的特性やデブリ分布、事故進展に関する知見が得られるため、分析作業が進められている。1号機PCVのペDESTAL外側の底部から回収された堆積物からは、立方晶($\text{U,Zr})\text{O}_2$ や正方晶($\text{Zr,U})\text{O}_2$ のU含有粒子が認められた[3]。また、2号機オペフロ養生シートからは立方晶($\text{U,Zr})\text{O}_2$ や立方晶 UO_2 のU含有粒子が確認された[3]。これらの結果は、既存知見と整合すると考えられる。

5. まとめ

廃炉作業時に留意すべき FP と燃料デブリを比較して議論するにあたり、予備知識として、燃料デブリの基礎特性と事故時のふるまいについて、既存知見をベースに解説した。今後、廃炉作業を進めるうえで、デブリ性状に関する主な課題として次の項目が挙げられる：デブリサンプルの代表性、マクロ性状、経年変化挙動、取出時の粉体化、臨界管理に重要な核種の分布。特に、チェルノブイリ事故で生じた溶岩状燃料含有物質（LAVA）では、自己照射損傷や熱応力による機械的破損等により、エアロゾルや二次鉱物の生成、水中への浸出等の性状変化が観測されており、経年変化挙動は大きな課題の一つであろう。

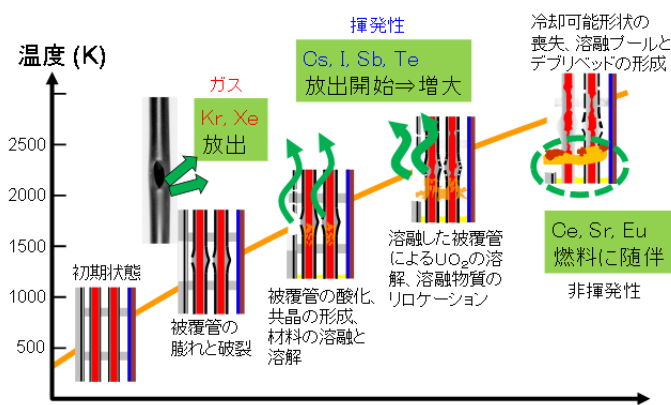


図1 SA時の燃料ふるまいの概念図

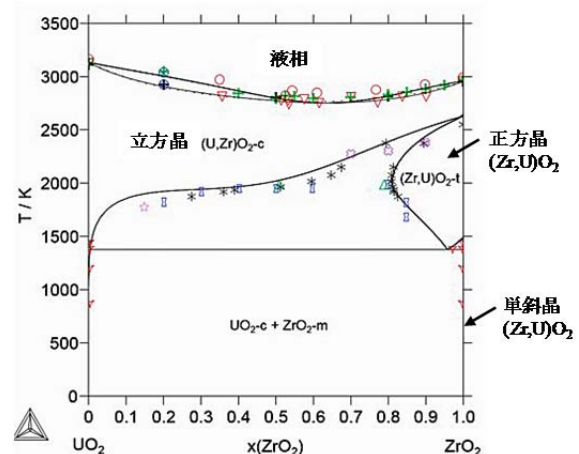


図2 $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ 擬二元系状態図[2]

<参考文献>

[1] 例えば、“福島第一原子力発電所の事故進展および燃料デブリ性状に関する検討,” 燃料デブリ研究専門委員会報告書(近日学会HPに公開予定), [2] A. Quaini, et al., J. Nucl. Mater. 501 (2018) 104-131. [3] 1～3号機原子炉格納容器内部調査関連サンプル等の分析結果、東京電力HD、2018/8/10.

http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2018/images2/handouts_180810_04-j.pdf,

「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，核燃料部会，水化学部会合同セッション

核分裂生成物と燃料デブリの比較 - 廃炉作業時の影響比較の観点より
Comparison of fission products and fuel debris - From the viewpoints of their effects on
decommissioning work

(2) 核分裂生成物の基礎特性と事故時のふるまい

(2) Basic properties of fission products and their behavior under severe accident

*宮原 直哉¹、逢坂 正彦¹

¹ 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

福島第一原子力発電所(1F)の炉内各所には未だ多くの核分裂生成物(FP)が残存しており、セシウム(Cs)等の γ 線放出核種は主に外部被ばく、ストロンチウム(Sr)等の β 線放出核種は内部被ばくの要因として、廃炉作業の妨げとなる可能性がある。1F炉内に残存するFPの分布や性状を把握し、廃炉作業時におけるFPの影響を予測あるいは低減するためには、FPの基礎特性及びシビアアクシデント(SA)時のふるまい(どのような放出・移行過程を経て、付着に至ったのか)を理解する必要がある。本講演では、廃炉作業時におけるFPの影響に係る議論を行うにあたっての予備知識として、FP(主にCs)の基礎特性やSA時のふるまいの概要を、既存知見をベースとして解説する。また、1F事故により明らかとなったFP関係の課題についても、その研究の動向を紹介する。

2. SA時におけるFPのふるまいの概要

図1に、SA時における炉心溶融及び燃料デブリ形成の過程と、それに伴って放出されたFPの炉内各所におけるふるまいの概念図を示す。燃料温度の上昇、炉心の溶融に伴い、Cs、ヨウ素(I)等の揮発性FPは大部分が炉内へと放出される(In-vessel放出)。一方、Sr等の非揮発性FPは、その大部分が溶け落ちた燃料に随伴して移行し、燃料デブリ内に残存する。Phèbus試験によれば、炉心インベントリに対するCsの放出割合は60~80%である一方、Srの放出割合は1%以下である[1]。炉内に放出されたFPは凝縮、化学反応等による物理化学変化を伴いながら一次冷却系を移行し、格納容器に到達する。一方、压力容器破損に伴って格納容器内に移行した燃料デブリからも、コア-コンクリート反応(MCCI)等に伴ってFPが放出される(Ex-vessel放出)。以下に、これら炉内各所におけるFP挙動の概要を記す。

2-1. 一次冷却系におけるFPの移行

炉内に放出されたFPは、気相中の化学反応によって化学形態を変えながら一次冷却系を移行する。一方、压力容器内のように比較的高温な領域においては、ステンレス鋼等の構造材とも化学反応を起こして吸着する(化学吸着)。これらの化学挙動には、燃料デブリ形成過程で溶融した制御棒材から放出されるホウ素(B)蒸気種が影響する可能性が指摘されている(後述)。また、FP蒸気種は低温部に移行するに伴って過飽和となり、壁面への凝縮、エアロゾル化といった物理形態の変化が生じる。これらの吸着または凝縮挙動は、FPの化学形態(揮発性)に依存し、また、温度や雰囲気の変化によっては再蒸発が生じる可能性もある。一次冷却系においては、これらの現象が同時に起こるため、FPのふるまいは非常に複雑である。

2-2 格納容器内におけるFP挙動

温度が400K前後である格納容器内においては、FP(I等、一部の高揮発性FPを除く)の大半はエアロゾルとして存在し、重力沈降、熱泳動等により壁面に付着する他、スプレー等の注水によって水相に移行する。通常、格納容器内のエアロゾル挙動は、これらの各メカニズムの理論式を解くことで求められる。Iについては格納容器内でも化学反応を起こし、それに伴って水相への溶解や再蒸発が生じる。

*Naoya Miyahara¹ and Masahiko Osaka¹

¹Japan Atomic Energy Agency.

2-3 压力容器破損に伴う Ex-vessel 放出

模擬燃料デブリの加熱試験である Phèbus FPT4 試験[2]では、燃料デブリ内の Cs の 80 %以上が放出され、モリブデン (Mo) 等の中揮発性 FP についても、In-vessel 放出と同等の放出が見られた。また、MCCI を模擬した ACE 試験[3]では顕著なテルル (Te) の放出が見られたが、その他の FP は殆ど放出されなかった。

3. 1F 事故により明らかとなった課題の例

3-1. Cs 化学挙動に対するホウ素の影響

1F においては制御棒材として炭化ホウ素 (B_4C) が使用されていたことから、そこから放出される B 蒸気種が一次冷却系内の Cs と結合して $CsBO_2$ を形成し、Cs 化学形態に影響を与える可能性が指摘されている。また、B 蒸気種は一次冷却系内に沈着した CsI と化学反応を起こし、結果としてガス状 I の再浮遊を引き起こすとされている。そこで、一次冷却系内の Cs 化学挙動評価の精度を向上させるため、Cs-I-B-Mo-O-H 系における化学反応速度データベースの構築等が行われている[4]。

3-2. 構造物への FP 吸着、付着、浸透メカニズム

1F の廃炉においては除染や廃棄物処理等の観点から、炉内に残存した FP の性状に係る情報が必要となる。そのため、FP の構造物への吸着、付着及び浸透メカニズムを解明するための研究が行われている。压力容器上部におけるステンレス鋼への Cs 化学吸着については、Cs がステンレス鋼中の微量成分である Si と結合して非水溶性の Cs-Fe-Si-O 系化合物を形成することが分かっている[5]。また、コンクリートへの Cs の付着・浸透メカニズムについても、現象把握及びモデル化が進められている。

3-3. 水相を介した FP の放出挙動

1F において、FP の大半は水相に存在しているとされている[6]。その要因としては、燃料デブリ内に存在する Sr 等の FP が浸出 (リーチング) によって水相に放出されていること、注水によって構造物に吸着又は付着した FP が水相に移行していることが考えられる。これらの水相を介した FP の放出挙動を解明するため、1F 燃料デブリからのリーチング挙動等に関する研究が実施されている。

4. まとめ

上述のように、本講演では炉内各所における FP の基礎特性及び SA 時のふるまいの概要を既存のデータに基づいて解説すると共に、1F 事故によって明らかとなった FP に関する課題を紹介する。本講演が廃炉作業時における FP の影響をより深く考えるきっかけとなること、廃炉作業を円滑に進めるための新たな研究課題等について議論する場となることを望む。

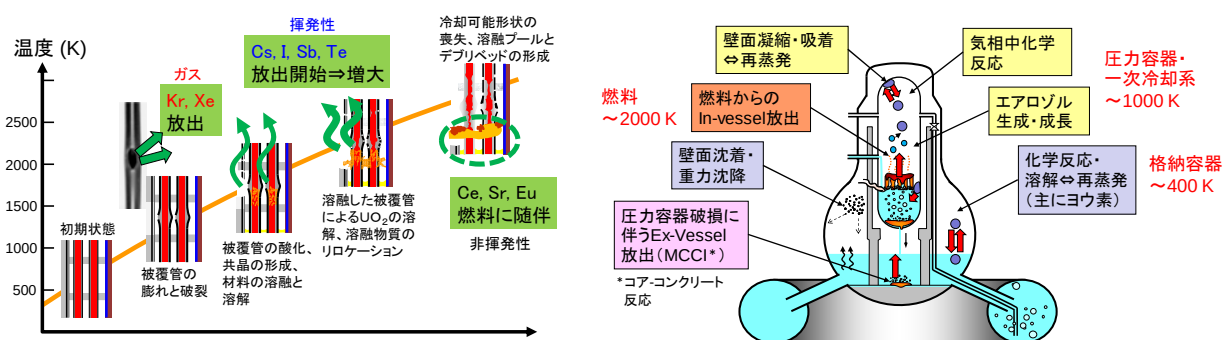


図1 SA時の燃料デブリ形成過程と炉内各所におけるFPのふるまいの概念図

<参考文献>

- [1] A.-C. Grégoire, et al., Ann. Nucl. Energy, 2013, 61, 63-74.
- [2] P. D. W. Bottomley et al., Nucl. Eng. Technol., 2006, 38, 163-174.
- [3] J. K. Fink, et al., OECD/CSNI Report NEA/CSNI/R(92)10, Forschungszentrum Karlsruhe, 1992.
- [4] N Miyahara, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 2019, 56, 228-240.
- [5] F. G. Di Lemma, et al., Nucl. Eng. Des., 2016, 305, 411-420.
- [6] S. Uchida, et al., Proc. of Int. Conf. on Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems (NPC2016), 2016, Oct 2-7, Brighton (UK).

「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，核燃料部会，水化学部会合同セッション

核分裂生成物と燃料デブリの比較 - 廃炉作業時の影響比較の観点より Comparison of fission products and fuel debris - From the viewpoints of their effects on decommissioning work

(3) 廃炉作業時に想定される燃料デブリと核分裂生成物の挙動の比較

(3) Comparison of fuel debris and fission products assumed under decommissioning work

*逢坂 正彦¹、宮原 直哉¹

¹ 日本原子力研究開発機構

1. 本比較の目的・ねらい

デブリ取出し作業等において不可欠なデブリの格納容器内分布の把握において、放射性セシウム等の FP による高放射線量が大きな阻害要因となるため、FP 分布の把握も極めて重要である。数十年にわたる作業期間中には、デブリ切削等の取出し作業の進展や雰囲気・放射線等格納容器内環境の影響により、デブリや FP の性状が変化し、ひいては分布の変化につながることから、デブリ・FP の分布とその長期的な変化をできるだけ正確・精緻に把握することが根源的な課題となる。本シリーズ発表(1)(2)においてそれぞれ報告されたデブリ及び FP の挙動を踏まえ、本報告においては、デブリ及び FP 両者の分布と変化を整理して比較することにより、特に今後必要となる研究課題案の抽出を試みる。抽出された研究課題案は、後報における廃炉時の管理面での考察に資するとともに、「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会等における今後の検討に反映する。

2. 「比較」の視点の整理

前 2 報から、主に、Sr 等の非揮発性の FP は燃料の溶融・移行と挙動を共にしてデブリに残留するためその分布はデブリ分布に準拠する一方、Cs 等の揮発性の FP は燃料から放出され格納容器内では構造材表面に付着物等として存在しデブリとは異なる分布状態となることが予想される。これらについては、事故後 TMI-2 の炉内、既往の SA 再現実験 PHEBUS 等において得られた FP 分布の評価結果に表されている(図 1、[1][2])。

これらを踏まえ、本報においてデブリ・FP の分布の比較を容易にするために、FP の分布状態として、主にデブリに随伴する FP が含まれるデブリと、主に揮発性 FP が含まれる構造材等への付着 FP の 2 種類の分布状態を考える。便宜上、前者を「デブリ随伴 FP (分布)」、後者を「付着 FP (分布)」と称することとする。

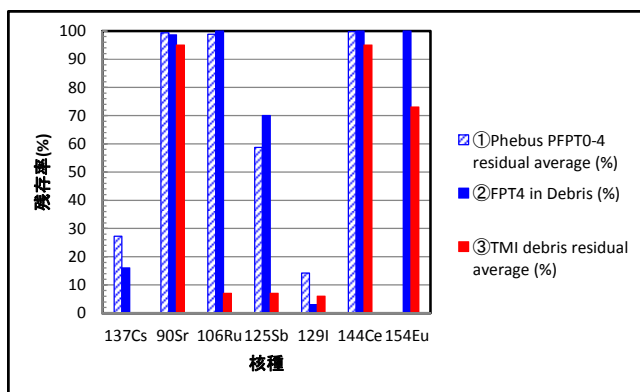


図 1 既往研究等における主な FP のデブリ内残存傾向

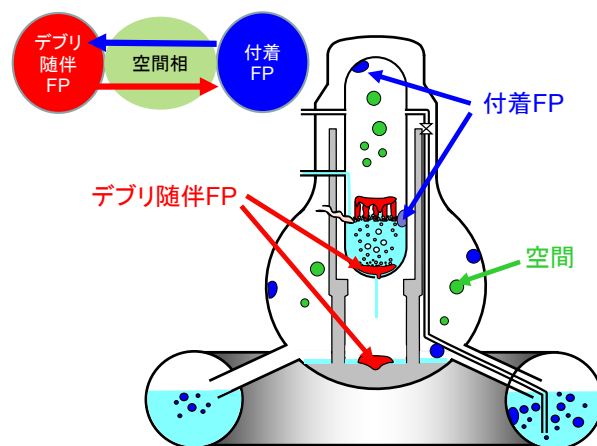


図 2 FP 分布状態の区分概念

* Masahiko Osaka¹ and Naoya Miyahara¹

¹ Japan Atomic Energy Agency.

以上の2種類のFP（分布）に加えて、両者の間に介在する気相や水相であって、短期・長期的に両者間をFPが移行することができる「空間（分布）」を加えた3種類のFP（分布）に区分した（図2）。本報では、多数のFPのうち、インベントリや人への被ばくに与える影響等を考慮して、FPのうち主にCs, I, Te, Ru, Sr等を対象とした。

3. FPの分配傾向の整理

表1に、主なFPについて、それらの挙動がデブリ随伴FPと付着FPに係る分布に与える影響を整理したものを示す。デブリ随伴FPと付着FPのうち、各FPが主に含まれるものに下線を付している。主な付着FPとしてはCs, I, Teが含まれ、これらは溶融に至るまでの高温状態で燃料から放出し、冷却系移行による温度低下に伴う凝縮やエアロゾル生成により配管等の構造物表面に付着して主要な外部放射線源となる。デブリ随伴FPとしては主に非揮発性のSr, Baがあり、これらはデブリ内の放射線源や熱源となる。

表1 付着FP／デブリ随伴FP分布状態への影響

核種	特徴	付着FP	デブリ随伴
Cs	γ線放出、揮発性、長期影響	<u>構造物等に物理的・化学的に付着</u>	デブリ表面等への再付着？
Sr	β線放出、非揮発性、長期影響	海水注入・還元雰囲気下での揮発性増大	<u>デブリ随伴(主要な放射線源)</u>
Te	β線放出、揮発性	<u>構造物等に物理的・化学的に付着(挙動に不明な点あり)</u>	被覆管に化学的にトラップされる影響？
Ba	β線放出、準揮発性	Moとの複合化合物形成による揮発性増大	<u>デブリ随伴(主要な熱源)</u>
Ru	γ線放出、可変揮発性	空気混入で揮発性増大	デブリ随伴
I	γ線放出、可変揮発性	<u>構造物等に物理的に付着</u>	デブリ表面等への再付着？

4. 研究課題案の抽出

3.で述べた各FPの基本的な分布状態に加えて、それらと異なる分布状態をもたらすFP挙動の考慮が重要であり、今後の研究課題である。例えば、Ruについては事故時空気混入条件において非揮発性であったものが揮発性となることが知られている。また、CsやTeについてはステンレスやジルカロイ等と高温で化学的に反応すること、Mo等他のFPや制御材B等はCs, I等と化学反応を生じることなど、これら化学的挙動についてはFP挙動全体に影響を及ぼす重要課題として認識されている[3,4,5]。さらに、数十年間に及ぶことが予想されるデブリ取出し作業期間中には、付着FPの水分への溶出や作業時の圧力変動による再浮遊、長期間の酸化等によりチェルノブイリ原発事故で生じたデブリ表面の変性とそれによる放射性物質の再浮遊等、空間へのFP放出を介して分布状態変化に与える挙動を考慮する必要がある。

これらの課題解決のためには、各々の現象・挙動評価とそれに基づくモデル化を継続的に行って炉内FP分布推測へ反映することが不可欠であり、1F事故により環境中や格納容器内に放出されたFPの詳細な分析結果はそれら継続的反映のための重要な検証材料となる。

<参考文献>

- [1] 日本原子力学会水化学部会、日本原子力学会水化学部会報告書#2017-0001(2017).
- [2] 永瀬文久、エネルギーと動力、2012年秋季号(279) 2-7(2012)
- [3] S. Suehiro, et al., Nucl. Eng. Des., 286 (2015) 163-174.
- [4] M. Osaka et al., Proc. ERMSAR 2017, 2017.
- [5] L.E.Herranz, et al., Nucl. Eng. Des., 288 (2015) 56-74.

「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、核燃料部会、水化学部会合同セッション

核分裂生成物と燃料デブリの比較 - 廃炉作業時の影響比較の観点より
Comparison of fission products and fuel debris - From the viewpoints of their effects on
decommissioning work

(4) 廃炉作業時の放射性物質管理の留意事項

(4) Remarks on radioactive material control under decommissioning work

*高木 純一¹、内田 俊介²

¹東芝エネルギーシステムズ、²日本原子力研究開発機構

1. はじめに

福島第一原子力発電所の廃炉作業は、まずは、燃料デブリの存在箇所を同定し、これらを安全かつ確実に取り出して、最終的に安全に保管することで終結する。長期にわたる燃料デブリ取り出し作業においては、環境への放射性物質の飛散を最小限に抑え、同時に廃炉作業に従事する作業者の放射線被ばく（外部被ばく、内部被ばく共）を最小に抑制することが必須である。

原子炉あるいは格納容器内の燃料デブリの分布位置は、シビアアクシデント解析コードによる予測とムーオンを用いた測定で推定はされているものの、その正確な位置は、今後の調査により少しずつ明らかになって行くものと考ええる。一方で、作業を進めて行く上で障害となるのが、セシウムを初めとする放射性の核分裂生成物（FP）である。もともと燃料体に存在したウラン他の核原料物質、超ウラン元素（TRU）とFPのうち、メルトダウンの過程で揮発性のFPは原子炉内、格納容器内に飛散し、燃料デブリ中にはウラン、TRUと不揮発性のFPなどが燃料被覆材や構造材の酸化物と混在して含まれる。

従って廃炉作業を進めるにあたっては、取り出し対象とする燃料デブリのみでなく、FPの挙動にも十分配慮し、放射性物質の飛散、被ばく抑制を図ることが必須である。

本セッションでは、前3報において、燃料デブリとFPの基礎特性と事故時のふるまいを述べた上で、両者の挙動を比較し、FPの分配傾向の整理を行った。

以下では、これらの発表に基づいて、マスバランスを含めた炉内でのFP分布の差異、廃炉作業時の燃料デブリ及びFPの取扱い、被ばく影響、環境影響についてまとめる。

2. 廃炉作業時の放射性物質管理の留意事項

廃炉作業の今後の進展においては燃料デブリ取り出しが主体となるが、放射線影響（被ばく管理）や汚染インベントリー（廃棄物管理）の観点からは、FP挙動及び分布を把握することが必須である。特に、燃料デブリ中に存在しているFPの存在について知見を深める必要がある。そこで、前報では、作業対象となる放射性核種を、“デブリ随伴FP”（燃料デブリ中のFP）、及び、“付着FP”（PCV内の構造材等への付着FP）に分類することとした。以下では、廃炉作業時の観点から両者の比較検討を行う。表1に放射性物質管理の留意事項を示す。

2.1 放射能分布

デブリ随伴FP：固体の表面線量率は¹³⁷Cs等の高γ線放出核種で決まるが、その残存率は小さいと考えられる。⁹⁰Sr等のβ線放出核種の残存率は比較的大きいと想定される。

付着FP：¹³⁷Cs等の高γ線放出核種の残存率は比較的大きいが、汚染水への移行割合は大きいと推定される。

2.2 存在形態

デブリ随伴FP：主として固体中に存在すると考えられる。取り出し作業中に一部粉体化する可能性がある。難溶性だが一部溶解性の場合がある。飛散性は比較的軽微だが、破碎作業時に一部飛散する可能性がある。

*Junichi Takagi¹ and Shunsuke Uchida²

¹Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation, ²Japan Atomic Energy Agency

付着 FP：粒子として壁面に付着していると考えられる。一部可溶性であり汚染水へ移行する。広範囲に分布していることが特徴である。揮発性の FP の飛散には注意が必要であり、ガス状の FP への対応も必要である。

2.3 作業対象

デブリ随伴 FP：燃料デブリは取り出しの主対象となる。ただし、残存する FP は阻害要因となる。

付着 FP：FP 自体は燃料デブリ取り出しの阻害要因であり対象外である。場合により作業前除染が必要となる。

2.4 臨界管理

デブリ随伴 FP：重点評価項目であり、厳密な臨界管理が必要となる。

付着 FP：FP 単独であれば、臨界評価は不要である。

2.5 被ばく影響

デブリ随伴 FP： α 核種、 β 核種を含み、内部被ばくへの配慮が必要である。外部被ばくは ^{137}Cs 、 ^{154}Eu 等の γ 線源が主要線源である。体積線源であり、線源強度に比較して線量率は小さいと考えられる。

付着 FP： β 核種（特に ^{90}Sr ）の内部被ばくへの配慮が必要である。外部被ばくは ^{137}Cs が主要線源である。面積線源であり、線源強度に比較して線量率が大きいと考えられる。

2.6 環境影響

デブリ随伴 FP：直接的な影響は比較的小さい。流出に対しての影響も比較的軽微と考えられる。ただし、粉塵や微粒子の挙動には注意が必要である。

付着 FP：ガス・粒子としての飛散、汚染水としての拡散に留意が必要である。特に、流出による汚染水への影響が大きいと考えられる。

表 1 廃炉作業時の放射性物質管理の留意事項

分類	項目		デブリ随伴 F P	付着 F P
F P 分布	1	放射能分布	固体の表面線量率は ^{137}Cs 等の高 γ 線放出核種で決まるが、その残存率は小さい。 ^{90}Sr 等の β 線放出核種の残存率は大きい。	^{137}Cs 等の高 γ 線放出核種の残存率は比較的大きいが、汚染水への移行が大きい。
	2	存在形態	主として固体中に存在。取り出し作業中に一部粉体化。難溶性だが一部溶解。飛散性は比較的軽微だが、破碎作業時に一部飛散の可能性あり。	粒子として壁面に付着。一部可溶性であり汚染水へ移行。広範囲に分布。揮発性の FP の飛散には注意が必要。ガス状の FP への対応も必要。
作業対象	3	取扱い方法	燃料デブリは取り出しの主対象。ただし、残存する FP は阻害要因。	FP は燃料デブリ取り出しの阻害要因であり対象外。場合により作業前除染が必要。
影響評価	4	臨界管理	重点評価項目であり、管理が必要。	臨界評価は不要。
	5	被ばく影響	α 核種、 β 核種を含み、内部被ばくへの配慮が必要。外部被ばくは ^{137}Cs 、 ^{154}Eu 等が主要線源。体積線源であり、線源強度に比較して線量率は小さい。	β 核種の内部被ばくへの配慮が必要。外部被ばくは ^{137}Cs が主要線源。面積線源であり、線源強度に比較して線量率が大きい。
	6	環境影響	直接的な影響は比較的小さい。流出に対しての影響も比較的軽微。	ガス・粒子としての飛散、汚染水としての拡散に留意。特に流出による汚染水への影響が大きい。

3. まとめ

以上より、燃料デブリ中の“デブリ随伴 FP”と構造物等への“付着 FP”について、FP 分布、作業対象、影響評価の観点から両者の挙動を比較評価し、以下の観点から今後の廃炉作業に資するものとする。

1. 廃炉計画時には、核種の存在量と存在場所を推定して計画する。
2. 廃炉作業の進捗とともに、存在量と存在場所の把握精度を向上させ、併せて、存在形態を把握する。
3. 廃炉作業時の影響評価として、被ばく影響、環境影響を適切に評価する。
4. 上記 2.、3. に則り、適宜、廃炉作業、工程の見直しを図る。