

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

福島第一原子力発電所デブリの計量管理技術の現状と今後

Status and Future Prospects on Technologies for Material Accountancy of Fuel Debris in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station

(1) 福島第一原子力発電所デブリの概況について

(1) Current understanding of fuel debris accumulated in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station

*倉田 正輝¹¹原子力機構 廃炉国際共同研究センター

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故により、核燃料を約 300 トン含有し、鋼材やコンクリートなどの構造材を含めるとその数倍の重量の燃料デブリが形成され、1～3号機の原子炉圧力容器（RPV: Reactor Pressure Vessel）や原子炉格納容器（PCV: Primary Container Vessel）内に堆積していると考えられている。現在、『試験的な燃料デブリ取出し（2021年見込み）』に向けて、様々な評価・検討が進められている。

計量管理は、燃料デブリの本格的な取出しに向けた重要課題の一つである。その検討には、燃料デブリの特徴をとりまとめ、データベースとして整備することが必要となる。本講演では、廃炉・汚染水対策事業「総合的な炉内状況把握の高度化（H28-H29年度）」において基本を整備し、東京電力において新たな知見を随時付記しながら高精度化を進めている『炉内状況推定図』等を用いて、現状で予想されている号機ごと領域ごとの燃料デブリの特徴およびその不確かさについて報告する。

2. 炉内状況推定図[1]

2-1. 評価の概要

上述の補助金事業では、コアチーム（BWRプラント、シビアアクシデント（SA）解析、先進的解析手法、伝熱、流体、核燃料や核分裂生成物（FP: Fission Products）のふるまい、模擬試験技術等の専門家集団）を結成し評価を行った。まず、現状で活用できる知見・データ（事故時プラントデータ、冷温停止以降の現場データ（温度変化等）、ミュオン観測や様々なSA解析コードによる評価結果、先進的解析手法や模擬試験による事故進展要素現象の評価、PCV内部観察の結果、1Fで取得されたサンプルの分析、従来実施されたSA模擬試験、TMI-2事故解析の結果、等）を網羅・整理し、燃料デブリが堆積している1～3号機について『情報集約図』を作成した。次に、各号機ごとに関連する情報を照らし合わせて、RPVおよびPCV内の状況（燃料デブリやその他堆積物・破損物の状況）を推定し、その推定根拠を示しつつ『炉内状況推定図』としてとりまとめた。『炉内状況推定図』は、東京電力による高精度化が継続されている。

2-2. 燃料デブリ等の堆積物の分布と分類方法

炉内状況把握に期待された役割は、燃料デブリが事故炉のどこにどの程度存在しているかを提示することであった。しかし、これまでに従来知見・データだけでは、燃料デブリの存在部位と物量を正確に評価することは困難であった。そこで、現状で最も確からしい燃料デブリの堆積状態を概念図として示すこととした。表1は堆積物の種類や破損状態を示す凡例である。まず、RPV内の炉心部では、燃料棒の一部が切り株状に残留、そこに崩落したルースデブリ（UO₂燃料ペレットや酸化したジルカロイ（Zry）被覆管等の混合物で、完全には熔融に至らなかったためポーラスな形状を維持しているもの）が付着している可能性を考慮し

表1 炉内状況推定図の凡例

	残留燃料棒及びその残骸
	酸化物デブリ(多孔質)
	粒子状デブリ
	燃料デブリ(金属を多く含む)
	コンクリート混合デブリ
	CRGT
	破損したCRGT
	CRD
	CRD(内部にデブリ)
	シュラウド
	ペレット
	RPV破損口
	上部タイプレート
	堆積物(材質不明)

た。RPV 内の下部プレナムでは、形状をほぼ維持した、あるいは破損・崩落した制御棒案内管 (CRGT: Control Rod Guide Tube) の残留、炉心から崩落したルースデブリの残留、ルースデブリと冷却水との反応で形成されると推定した粒子状デブリの堆積、さらにこれらのデブリが溶融・凝固して形成される稠密な酸化物デブリの堆積とその制御棒駆動機構 (CRD: Control Rod Drive) 内への侵入、金属系デブリ (合金あるいは化合物) の溶融・凝固物の堆積と CRD への侵入や下部ヘッドとの金属どうしの化学反応、等を考慮した。さらに RPV 下部ヘッドの外部に取り付けられた CRD の破損とその外表面への金属系あるいは酸化物系のデブリ付着の可能性を考慮した。PCV 内のペDESTAL (RPV 直下の円筒形の領域) とドライウェル (ペDESTALの外側の領域) については、酸化物系や金属系デブリの RPV からの移行と堆積、粒子状デブリの形成、1号機内部観察で観測された泥状の堆積物、2号機の内部観察で観測された一部未溶融の燃料集合体部材、SA 解析で予想されるコンクリートとの反応生成物の形成、等を考慮した。

2-3.1 1号機の事故進展の概要

図1に1号機の事故シークエンスの概要[2]を示す。1号機では、全電源喪失以降約3時間、非常用復水器 (IC: Isolation Condenser) による炉心冷却が行われたが、それ以降の注水は不可能となった。このため、比較的短時間で炉心溶融して RPV 破損し、ほとんどの燃料デブリがペDESTALに移行したと推定されている。ペDESTAL移行後にも、少なくとも数時間は消防車による注水がない状態が継続され、燃料デブリとコンクリートとの反応が進行した可能性が高い。しかし事故時のプラントデータがほとんど計測されておらず、またペDESTAL内部調査も行われていないため、他の号機に比べ、不確かさが大きい。

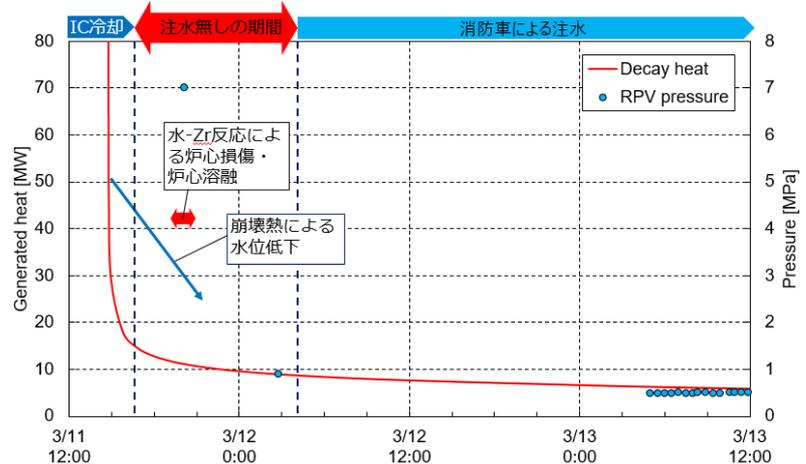


図1 1号機の事故シークエンスの概要

2-4.2 2号機の事故進展の概要

図2に2号機の事故シークエンスの概要[2]を示す。2号機では、原子炉隔離時冷却系 (RCIC: Reactor Core Isolation Cooling System) により、3月14日の10時ごろまで炉心冷却されたが、それ以降注水が不可能になり、炉心水位の低下と RPV 圧力上昇が起こった。同18時ごろに消防車による注水を行うために、RPV 内をいったん減圧する作業 (SRV 手動開) を実施した。これにより冷却水の急速な減圧沸騰が起こり、冷却水の水位は有効燃料底部 (BAF: Bottom of Activated Fuel) 以下にまでいったん低下し、炉心は極めて短時間で完全に露出された。このため、少なくとも数時間は、水蒸気がほとんど供給されない条件 (水蒸気枯渇条件) で燃料破損・溶融が進行した可能性が高いと考えられている。また、炉心溶融開始後に RPV の圧力上昇が3回観測され、大規模な炉心物質の崩落や、冷却水と炉心物質との化学反応が生じていると予想される。3回目以降では RPV と PCV の圧力がほぼ等しくなったことから、その段階で RPV が大きく破損した可能性が高い[3]。

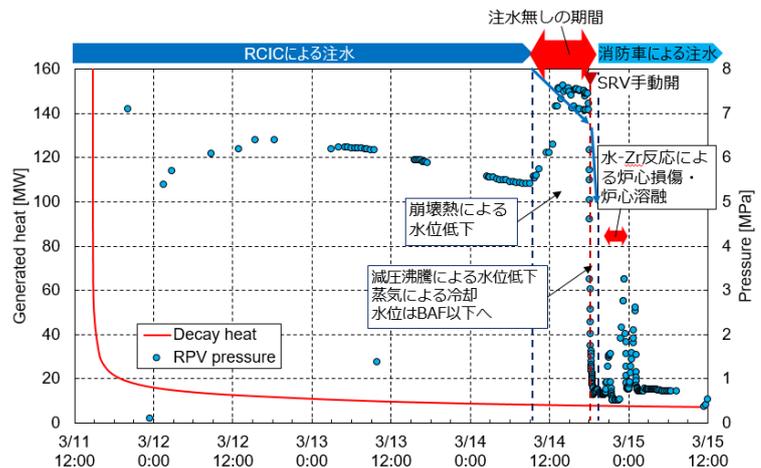


図2 2号機の事故シークエンスの概要

2-5. 3号機の事故進展の概要

図3に3号機の事故シークエンスの概要[2]を示す。3号機では、RCICと高圧炉心注水系（HPCI: High Pressure Coolant Injection）が3月13日の2時ごろまで稼働した後、消防車による注水が始まるまでの約8～10時間の間に炉心溶融が進んだと考えられている。従って、2号機と異なり、冷却水水位は少しずつ低下し、水蒸気が十分に供給される条件で燃料溶融開始したと評価されている。このため、燃料崩落前にZrの酸化がかなり進行した可能性がある。このことから、2号機と3号機では、燃料物質

が下部プレナムに崩落した段階で、未酸化の金属系成分の残留量と崩落物質の持っている熱エネルギー量がかなり異なっていた可能性が示唆されている[3]。これらは、下部プレナムでの炉心物質の堆積・除熱・再溶融現象や構造材との化学反応に影響した可能性が高く、ペDESTAL移行のメカニズムにも影響した可能性が高いと考えられている。

3. 燃料デブリ等の堆積物の特徴

ここでは、事故シークエンスやそれ以外の情報・知見を参考にとりまとめた『炉内状況推定図』を示し、領域ごとの燃料デブリの特徴について、現状での予測をまとめる。

3-1. 1号機の炉内状況推定図

図4に1号機の炉内状況推定図を示す[3]。1号機では、RPV内に残留する燃料デブリは最も少ないと考えられるが、切り株燃料、CRGT、様々なタイプの燃料デブリが少量残留している可能性を排除できない。CRDには燃料デブリの侵入や付着の可能性はある。

PCV内では、ペDESTALからドライウェルにかけて大量の燃料デブリが存在すると推定される。RPVから崩落してきた炉心物質とペDESTAL内のコンクリートや鋼材等との反応に係る知見が十分でないため、燃料デブリ等の堆積・分布の不確かさが大きい。現状では様々な可能性を並列して考慮しておくのが妥当であろう。溶融した炉心物質とコンクリートとの反応（MCCI: Molten Core Concrete Interaction）が十分に進んだシナリオでは、ペDESTAL底部のコンクリート内に燃料デブリが大きく広がったと予想される。これに対し、MCCIが大規模に発生しなかったシナリオ（後の3号機に類似）では、コンクリート面上に燃料デブリが堆積している可能性が考えられる。両シナリオでは、燃料デブリ中の核物質濃度や分布が大きく異なる。

また1号機のドライウェルには、最大1m以上の厚さで泥状物質が堆積していることがわかっている。サンプル分析結果によると、その主成分は鉄やシリコンなどの構造材に由来する物質である。核燃料物質は、数ミクロンサイズのU含有粒子として少量検出されている。

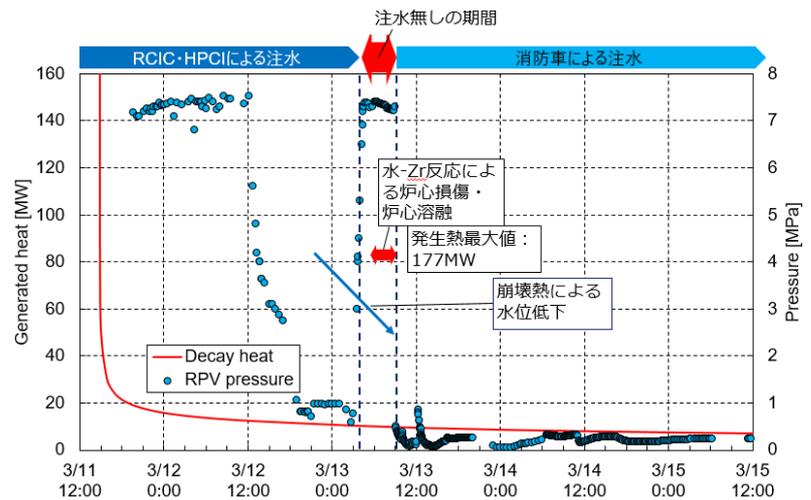


図3 3号機の事故シークエンスの概要

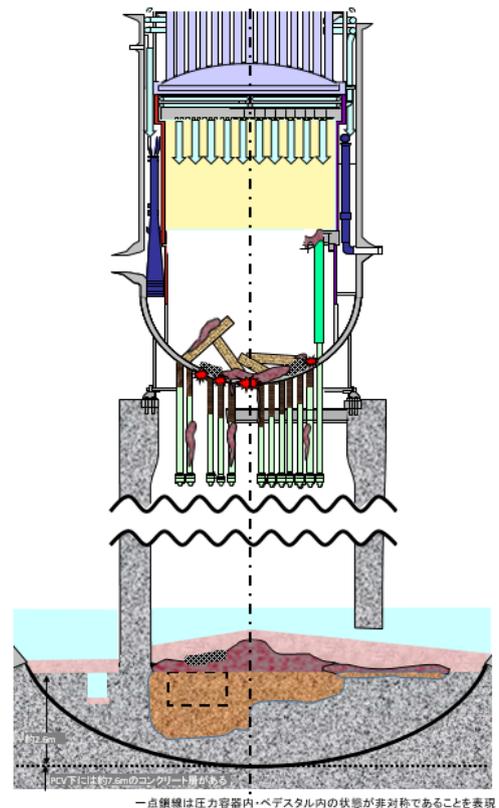


図4 1号機の炉内状況推定図

MCCI が進行したシナリオでは、表面クラストが形成されて除熱が進まず、熔融状態が一日以上継続した可能性がある。この場合には、燃料デブリ中に大量のコンクリート成分が混入する。さらにその凝固に時間がかかるため、凝固時に成分偏析した可能性も示唆される。チェルノブイリ原発事故で形成された LAVA は大量のコンクリートとの反応生成物であるため、計量管理について、その特性が参考になる可能性がある。LAVA 中には黒色層と褐色層が形成され、それぞれのウラン濃度は約 8wt%、約 4wt%であった[4]。MCCI が進行しないシナリオでは、3 号機の堆積状態が参考になる可能性があるが不確かさが大きい。泥状物質中の核物質濃度はあまり大きくないが、泥状物質の物量自体が多いため、含有される核物質総量の評価のためにはサンプル分析データの蓄積が不可欠である。

3-2. 2 号機の炉内状況推定図

図 5 に 2 号機の炉内状況推定図を示す。2 号機の RPV 炉心領域には、切り株状燃料やルースデブリ、いったん熔融して凝固した酸化物燃料デブリが残留している可能性がある。下部プレナム領域に、燃料デブリの大半が存在している可能性が高く、その形態はルースデブリ、熔融・凝固した酸化物デブリ、粒子状デブリ、金属系デブリ等と予想されている。また、CRGT が一部倒壊、一部未破損で残留していると予想される。計量管理に関しては、ルースデブリ中の核物質濃度が最も高いと考えられるが、いったん熔融する過程を経ていないと予想され、今後のサンプリングにより、かさ密度や Zry の混入量などを調査する必要がある。いったん熔融・凝固した酸化物系デブリについては、TMI-2 事故の燃料デブリや様々な SA 模擬試験の燃料デブリの分析値が参考になると考えられる。U₂:ZrO₂ のモル比として 1:3 (TMI-2 事故) から 2:3 程度 (VULCANO 試験) が一つの目安となる。粒子状デブリは、酸化物系デブリが破碎したものと考えられる。いずれもサンプル分析による確認が不可欠となる。CRD の根本部分には、燃料デブリとみられる物質が RPV から染み出すように付着しているのが PCV 内部観察で見られている。これはその外観から酸化物系デブリの可能性が高い。その一部がペDESTAL に崩落した可能性がある。

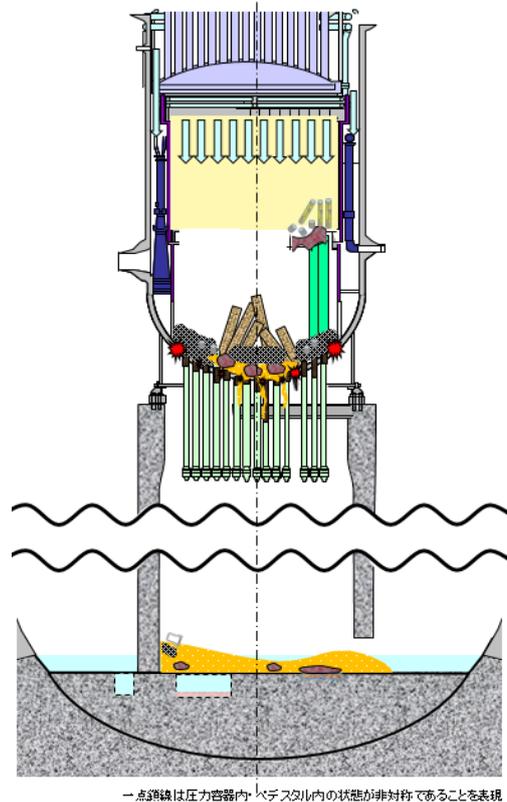


図 5 2 号機の炉内状況推定図

PCV 内ペDESTALには、主に RPV から崩落してきた金属デブリが存在すると予想されている。金属系物質中の核物質濃度はあまり高くなく不純物程度と予想されるが、事故シナリオによっては金属ウランが少量(最大で 1mol%程度)含有されている可能性があり、今後の確認が必要である。また、酸化物系デブリやルースデブリ等が金属系物質の移行に巻き込まれペDESTALに少量移行した可能性が高い。RPV 底部から崩落した物質は酸化物系デブリとなる可能性が高い。2 号機では MCCI はほとんど発生しなかったと考えられている。

3-3. 3 号機の炉内状況推定図

図 6 に 3 号機の炉内状況推定図を示す。3 号機の RPV 内炉心領域には、2 号機と同様の物質が残留していると予想されているが、炉心物質のペDESTAL移行が進んだため、その物量自体は少ないと考えられる。計量管理の考え方は、2 号機と同様になる可能性がある。

PCV 内のペDESTALには、主に RPV から崩落してきた炉心物質が鋼材系の構造物を巻き込むようにペDESTALコンクリート面に堆積していることがわかっている。堆積高さは最大で 3m 以上に及んでいる。破損した金属系の構造物が完全に熔融されずに形状を保っていること、堆積物の中央に小山のような状況が観測されること、等から、RPV から移行してきた燃料物質は完全に熔融した状態ではなく、固体と液体の混合状態

であった可能性が強く示唆される。また、炉心物質全体での理論密度を考量すると、ペDESTAL堆積物質はその2~3倍の体積を有しており、内部に空洞が多いと考えられる。

これらのことから、ルースデブリ、酸化物系デブリ、粒子状デブリ、金属系デブリ等と構造材がマクロに混在して堆積している可能性が高い。計量管理では、これらの多様な物質の混在状態を考慮する必要がある。ここでも、特に堆積物深さ方向の情報蓄積（サンプル分析や事故解析）が重要である。

4. まとめ

現時点で、原子力機構や東電の専門家により認識共有されている、最も確からしい事故シークエンスと炉内状況推定図を紹介し、それに基づいて燃料デブリ等の特徴を考察した。評価の不確かさはあるが、燃料デブリ中の核物質濃度はいくつかのカテゴリに分類できる可能性があること、各号機の領域ごとに燃料デブリの特徴と主要な堆積物の種類がかなり異なっていること、などが示唆される。本稿ではPuの分布については触れなかったが、その化学的な特徴を考慮するとマクロにはUに同伴していると考えられる。一方、化学的環境の違い（酸素ポテンシャル、温度等）による蒸発や偏析については、PuとUでやや挙動が異なるため、Puを含有するダスト等が少量形成され飛散した可能性は否定できない。この点も分析による確認が必要となろう。

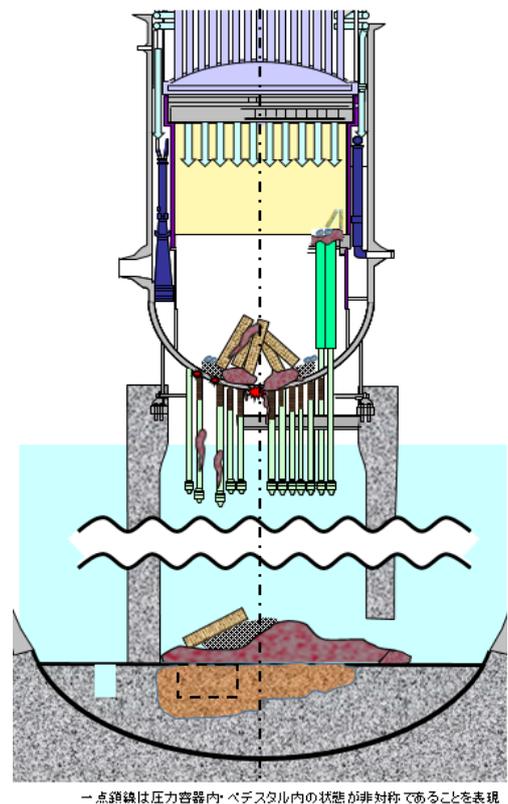


図6 3号機の炉内状況推定図

参考文献

- [1] 国際廃炉研究開発機構, “廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）” http://irid.or.jp/_pdf/20170000_01.pdf; (current as of Jan. 10, 2020).
- [2] S. Mizokami., “Current status and recent investigation result of Fukushima Daiichi,” PLENARY SESSION, ERMSAR2019, Prague, Czech Republic.
- [3] T. Yamashita et al., “Comprehensive Analysis and Evaluation of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2,” Nuclear Technology, DOI: 10.1080/00295450.2019.1704581. (in press)
- [4] B. Burakov, “Material study of Chernobyl ‘lava’ and ‘hot’ particles,” International Experts’ Meeting on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, Vienna, Austria, 28 January - 1 February 2013, <https://www-pub.iaea.org/iaeameetings/IEM4/30Jan/Burakov.pdf>

*Masaki Kurata¹

¹Japan Atomic Energy Agency, Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science

※2020 春予稿からの転載