

企画セッション | 部会・連絡会セッション：炉物理部会

■ 2020年9月18日(金) 13:00 ~ 14:30 | 会場 Zoomルーム8

[3H_PL] 福島第一原子力発電所の燃料取り出しに向けた研究開発状況

座長: 西山 潤(東工大)

[3H_PL01] 福島第一原子力発電所事故の特徴と廃炉作業から得られる燃料デブリの情報

*溝上 伸也¹ (1. 東京電力HD)

[3H_PL02] 燃料デブリ臨界管理に関する研究開発状況

*中野 誠^{1,2} (1. IRID、2 MHI)

[3H_PL03] 臨界安全の観点から見た課題

*外池 幸太郎¹ (1. JAEA)

炉物理部会セッション

福島第一原子力発電所の燃料取り出しに向けた研究開発状況
R&D status for Fuel Removal on Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants

(1) 福島第一原子力発電所事故の特徴と廃炉作業から得られる燃料デブリの情報

(1) Features of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants Accident and Information on Fuel Debris Obtained from Decommissioning Works

*溝上 伸也¹¹東京電力

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震とそれにより発生した津波により、定格出力運転中であった東京電力福島第一原子力発電所の1～3号機は冷却機能を喪失し、シビアアクシデントに至った。各号機の事故進展はそれぞれ異なるものの、いずれも、スクラムに成功し核分裂反応は停止させることができた。しかしながら、直流・交流電源喪失により最終的に冷却機能を喪失し、崩壊熱を冷やしきれなくなり、炉心損傷・炉心溶融に至ったものと推定されている。電源喪失は、計測系の機能喪失も伴ったため事故時の情報が限られており、正確な事故進展挙動は現時点でも未解明の事項が残っている。しかしながら、東京電力が廃炉作業の一環として進めている調査は格納容器の内部まで進んできており、事故炉の状況について情報が蓄積されてきている。本報告では、東京電力福島第一原子力発電所の1～3号機の事故進展を概観し、炉物理に関するトピックも含め、廃炉時に取り出される燃料デブリについて最新の情報をもとに説明する。

2. 各号機の事故進展

2-1. 1号機

1号機は地震スクラムに成功し、発生する崩壊熱をICを用いて冷却していたところ、地震から約50分後に発電所敷地に到達した津波により、直流・交流電源を喪失したため、一時的に弁を閉じて停止させていたICによる冷却を再開することができず、「冷やす」ことができなくなった。そのため、原子炉内の水が蒸発により失われ、燃料が露出して過熱するとともに、水—ジルコニウム反応による化学反応熱ともあいまって燃料が高温化し、3月11日の夜には炉心損傷・炉心溶融するに至った。直流電源を喪失し計測機器も機能喪失していたため、原子炉挙動を知るための圧力・水位等の情報が十分に得られていないが、原子炉圧力は高圧のまま炉心損傷・炉心溶融に至り、炉内が高温になったことに起因する原子炉圧力容器からの気相漏えいが発生し、原子炉圧力が低下するとともに格納容器圧力も増加したものと推定している。

2-2. 2号機

2号機も地震スクラムに成功し、発生する崩壊熱をRCICを用いて冷却していたが、津波による電源喪失の直前の15時39分にRCICを再起動させていたため、電源喪失後も「冷やす」機能が約70時間維持された。しかしながら、3月14日の午前中にはRCICは原子炉に注水できない状況になり、原子炉内の水が蒸発により失われていくこととなった。ただし、2号機の場合には燃料が露出する前に原子炉を減圧することができたため、原子炉圧力が低い状態で燃料が過熱し、炉心損傷・炉心溶融に至ったものと推定されている。なお、2号機において急激に炉心損傷・炉心溶融が進んだ3月14日夜から3月15日未明にかけて、検出限界程度の低い数値ではあるが原子炉建屋から1kmの距離にある正門にて線量測定していたモニタリングカーにおいて、中性子が検出されている。

2-3. 3号機

3号機も地震スクラムに成功し、発生する崩壊熱をRCICを用いて冷却していたが、津波による電源喪失は交流のみであり、直流電源は津波の被害を受けなかった。そのためその後はRCICおよびHPCIを制御しながら冷却を継続することができた。しかしながら3月12日の夜には直流電源が枯渇し、HPCIの制御ができない

状況となったことから、原子炉に水を注入できない状況になり、「冷やす」機能を喪失した。直流電源の枯渇後しばらくは水位を測定できない状況になっていたが、水位計測を再開できた3月13日未明には水位はすでに低下しており、この時間帯に燃料が過熱し、炉心損傷・炉心溶融に至ったものと推定している。なお、3号機において急激に炉心損傷・炉心溶融が進んだ3月13日早朝から朝にかけて、検出限界程度の低い数値ではあるが原子炉建屋から1kmの距離にある正門にて線量測定していたモニタリングカーにおいて、中性子が検出されている。

3. 各号機の燃料デブリに関する情報

3-1. 1号機

1号機は2020年2月現在において、燃料デブリが存在していると推定されている格納容器ペDESTAL内の内部調査を実施することができていない。また、ペDESTAL外の調査結果においては、図1に示す通り、砂状の物質が約20cm~1m程度積もっていることが確認されているが、その組成等についての情報は得られていない。

3-2. 2号機

2号機は格納容器ペDESTAL内の調査が最も進んだプラントであり、格納容器ペDESTAL内の各部について映像情報が取得されており、ペDESTAL床部には溶融物が固化したような堆積物や燃料集合体の上部タイプレートが形状を保ったまま落下しているのが見つかった。また、2019年2月には堆積物の可動性確認試験を実施し、堆積物が固い固形物であること、図2のように小石状、塊状の堆積物は容易に摘み上げることができることが確認されている。堆積物は40~70cm程度の高さでペDESTAL床面全体に広がっており、原子炉に注水された水が雨のように降り注いでいる状況であるが、堆積物自体は冠水していない。

3-3. 3号機

3号機は格納容器内の水位が他プラントと比較して高いため、水中ロボットをペDESTAL内で遊泳させることにより状況を確認している。3号機は2号機と比較して損傷状況が大きく、RPV内構造物である制御棒案内管が複数ペDESTAL内に落下していることが確認されている。また、堆積高さも2m以上となっており、運転時に炉心に装荷される約100tのウラン量から推定される体積に比較して、より多くの空間が堆積物により占められている。堆積物は完全に冠水しており、2015年の調査では気相部の温度は液相部よりも低いことがわかっていることから、熱源はペDESTAL内堆積物である可能性が高い。



図1 1号機格納容器床の堆積物



図2 2号機ペDESTAL内堆積物可動性調査

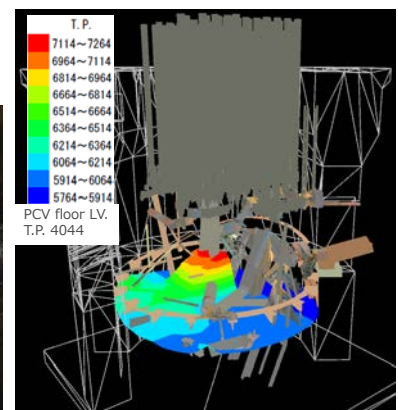


図3 3号機ペDESTAL内堆積物

※：本予稿は、2020 春予稿からの転載である。

*Shinya Mizokami¹

¹ Tokyo Electric Power Company, Incorporated.

福島第一原子力発電所の燃料取り出しに向けた研究開発状況 R&D status for Fuel Removal on Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants

(2) 燃料デブリ臨界管理に関する研究開発状況

(2) Overview of R&D status on Criticality Control Technique for Fukushima Daiichi Fuel Debris

*中野 誠^{1,2}、林 大和^{1,3}、森本 裕一^{1,4}

¹ IRID、² 三菱重工、³ 東芝 エネルギーシステムズ、⁴ 日立 GE

1. はじめに

福島第一原子力発電所(1F) 1-3 号炉において、今後の燃料デブリ取り出し時にも確実に未臨界状態を維持するため、IRID において臨界管理方法の検討及び必要な技術開発を進めている。本稿では、その状況及び今後検討すべき課題を紹介する。なお、本稿は 2020 春予稿からの転載である。

2. デブリ取り出し時臨界管理に向けた技術開発

2-1. 未臨界状態の維持 1F 1-3 号機の場合ごとの状況推定に基づいて、今後の状態変化に伴う臨界発生シナリオを検討し、リスクが高いと考えられるシナリオごとに臨界管理方法を検討している。図 1 にデブリ取り出し(加工)時の管理の考え方を示す。まず、未臨界状態の維持のため、下記の手段を検討している。

①デブリ加工制約： 1 回の加工で過度の反応度添加が生じないような加工サイズの評価(臨界評価)

②中性子吸収材の適用による未臨界維持： 状況に応じて中性子吸収材の使用を想定し、冷却材にホウ酸を添加する場合の必要濃度、使用時の影響、必要な設備の成立性を検討。また、代替技術として、取り出し対象のデブリ周辺に投入する非溶解性中性子吸収材を考え、候補材の選定、投入方法の検討、使用時の影響評価を進めている。

2-2. 臨界近接監視(臨界防止) 臨界近接が生じた場合でも、臨界に至る前に作業を停止させる手段として、未臨界度測定と組み合わせた中性子源増倍法による臨界近接監視方法を検討している。未臨界度測定には、炉雑音法(ファインマン- α 法)の適用を考え、必要な中性子検出器の仕様を検討するとともに、京都大学臨界集合体(KUCA)において、燃料デブリ模擬体系での未臨界度測定の成立性、測定の不確定さの評価を実施している。

2-3. 臨界終息・影響緩和 上記の対策で臨界を防止するが、万一の臨界の兆候が生じた場合、早期に検知し終息させることで作業員及び外部への影響を緩和する。臨界兆候検知には、2-2 の中性子検出器による監視とともに、PCV 内ガスサプリングシステムの FP ガスモニタを用いる。現状の監視対象である Xe に加え、検知時間短縮のため短半減期核種である Kr の監視を可能とする高度化モニタの開発を行っている。臨界兆候が検知されれば高濃度ホウ酸水の注入による終息を図るが、代表的な臨界シナリオについて挙動評価を行い、事象終息までの作業員・外部の一般公衆への影響(被ばく量)が十分低いことを確認している。

3. 今後の課題

現状の課題は大きく下記のものがあり、今後、取り出し工法の検討の詳細化を踏まえて、技術開発を継続していく。

①段階的取り出し規模拡大への対応

段階的に取り出し規模を拡大していく方針を踏まえ、各段階での状態・制約条件を考慮した管理方法の検討、各段階で得られる情報を反映した管理方法の合理化を検討する。

②各種技術の成立性確認：

デブリ体系での未臨界度測定の成立性確認など、各技術の成立性の確認を継続する。また、臨界管理に必要な機器や取り出し手順への要求と、取り出し設備や現場の制約との整合性を確認し、取り出し作業手順へ組み込んでいく。

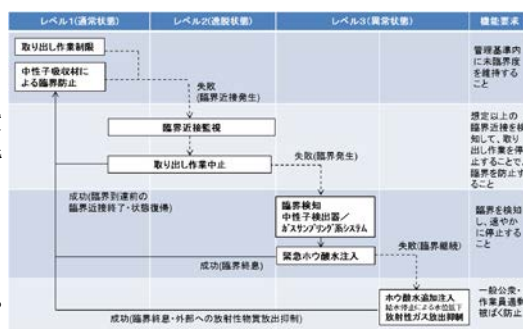


図 1 デブリ取り出し時臨界管理の考え方

謝辞

本件は、資源エネルギー庁「廃炉・汚染水対策事業費補助金」に基づく、一連の燃料デブリ取り出し時の臨界管理方法の確立のための技術開発の成果の一部を取りまとめたものである。

*Makoto Nakano^{1,2}, Yamato Hayashi^{1,3}, Yuichi Morimoto^{1,4}

¹ International Research Institute for Nuclear Decommissioning ² Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

³ Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation ⁴ Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

炉物理部会セッション

福島第一原子力発電所の燃料取り出しに向けた研究開発状況
R&D status for Fuel Removal on Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants

(3) 臨界安全の観点から見た課題

(3) Important Issues in terms of Criticality Safety

*外池 幸太郎¹¹ JAEA

1. 要旨

燃料デブリの組成分布は乱雑と考えられ、この乱雑さが臨界安全評価に与える影響を把握することが肝要である。その影響は、例えば、増倍率の不確かさとして表現できるかもしれない。その上で、不確かさを考慮した臨界安全管理が必要である。

2. 臨界安全管理

2-1. 従来からの方法

従来の臨界安全管理では、対象の核燃料物質の組成は常に把握されていることが前提であり、これに応じた質量や形状等が管理される。これらの量の管理は不確かさを伴うが、様々な核燃料物質（例えば異なる ^{235}U 濃縮度や工程条件のバリエーション）を扱う要求の幅広さが大きな影響を与えることが多い。このため、多くの場合、要求される幅の中で最も増倍率を高くする、核燃料物質組成（例えば ^{235}U 濃縮度の最大値）や最適減速条件（例えば水分量）を想定して、確実に臨界を防止できる質量や形状の制限を課す。このようにして、組成、減速、質量、形状等のプロセス量に対する核的制限値を明確に決定できる。

2-2. 組成が不確かな場合の課題

燃料デブリの組成は不確かである。このような場合、プロセス量に対する核的制限値の設定に工夫が必要となろう。1) 単純な方法は、従来の方法に倣って、あり得る最も保守的な条件を採ることである。 ^{235}U 濃縮度の最大値、最適減速条件となる水分量等に基づき、中性子毒物濃度や形状の制限値を設ける方法である。しかしながら、他の条件に照らして制限値が現実的でなくなる可能性がある。一方で、2) 組成の平均値等に基づき制限値を設け、組成の不確かさやバラツキの増倍率に対する感度を評価し、その結果に応じて臨界監視を設ける方法も考えられる。

2-3. 監視の位置付けとリスク評価の必要性

臨界事象を検知する監視は既に臨界警報装置として実績があるが、臨界への近接を検知・警報する装置の実用は技術開発課題である。監視を行う場合、どちらのタイプか明確にして性能要件を決める必要がある。

臨界事象のリスクの有無と受容可能性の評価も重要である。十分な遮蔽により線量影響がない、迅速な終息措置が可能等の理由によりリスクが受容可能であれば、臨界監視とあいまって、上記 2) の臨界安全管理方針が最適となる可能性もある。

3. 燃料デブリ取出によるリスク低減

廃炉の技術的な意義は、放射性物質閉じ込めに係るリスク低減と考えられる。燃料デブリ取出しも同様だが、核分裂性物質を含むことが本セッションの本質的な課題である。つまり、臨界安全管理に係るリスク低減も考えなければならない。目標設定の一例として、不確かな状況を確かな状況にすること、が考えられる。確かな状況とは、例えば、様々な組成の燃料デブリに対して管理の要・不要が弁別できていること、及び、管理が必要なものについて監視のような動的な管理に依らないことである。このような観点で、燃料デブリ取出準備や取出時の管理に併せて、取出後の保管に関しても考え方の整理を始めるべきであろう。

（本予稿は、2020 年春の年会予稿から転載したものである。）

*Kotaro Tonoike¹¹ Japan Atomic Energy Agency.