T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	粒子法及び中性子輸送モンテカルロ法の結合による燃料デブリ水中落下時の臨界性評価シミュレーション
Title(English)	
著者(和文)	村本武司
Author(English)	Takeshi Muramoto
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11997号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小原 徹,千葉 敏,赤塚 洋,相樂 洋,筒井 広明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11997号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

論 文 要 約

粒子法及び中性子輸送モンテカルロ法の結合による燃料デブリ水中落下時の臨界性評価シミュレーション

環境・社会理工学院　融合理工学系　原子核工学コース 村本武司

福島第一原子力発電所廃止措置における燃料デブリ取り出し作業において、未臨界の担保は安全な作業に重要である。これまでの臨界評価手法は、燃料デブリの水中挙動を正確に考慮していないため評価精度に改善の余地がある。本研究の目的は、粒子法と中性子輸送モンテカルロ法の結合による燃料デブリ水中挙動を考慮した臨界計算手法を確立し本手法の有効性を明らかにすることである。本研究ではまず粒子法シミュレーションの妥当性を実験と計算の比較によって評価した。また中性子輸送モンテカルロ法を組み合わせることで、水中挙動を考慮した臨界評価手法を確立し、さらに想定される取り出し作業条件下において本手法を適用することでその有効性を示した。

第 1 章では東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置における燃料デブリの臨界性評価の意義と現状の課題点を説明し、その解決策として粒子法と中性子輸送モンテカルロ法を組み合わせる手法を提案している。廃止措置において、安全な燃料デブリの取り出し作業を行うためには、作業時の未臨界の確保が重要である。一方、燃料デブリの臨界性評価に関する先行研究では、燃料デブリの水中挙動自体は考慮しておらず、それらの挙動を静的かつ保守的な条件でモデル化することで臨界性を評価している。そのためこれまでの評価手法は燃料デブリの水中での挙動を考慮していないという課題点がある。これをふまえ本研究の目的は、粒子法と中性子輸送モンテカルロ法の結合による燃料デブリの水中挙動を考慮した臨界計算手法を確立し本手法の有効性を明らかにすることとした。

第 2 章では粒子法の一つである MPS 法（Moving Particle Semi-implicit method）と連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード MVP を組み合わせた臨界計算手法を確立した。まず、燃料デブリの水中挙動シミュレーションに MPS 法が適用可能かどうかを実験と計算の比較によって検証した。はじめに、金属板の水中落下実験を行い、落下時の金属板の重心位置を実験と計算で比較することで計算の妥当性を評価した。その結果、金属板が左右に揺れながら水中落下する複雑な挙動を、定性的・定量的に MPS 法によって再現可能であることを確認した。次に物体同士の相互作用の計算の妥当性評価のために、金属ボルトを燃料デブリとした水中堆積実験を行った。実験と計算の堆積形状の比較の結果、実験結果の 95%信頼度区間に計算結果がほぼおさまることが明らかとなり、MPS 法計算の妥当性を確認した。最後に MPS 法でのシミュレーション結果で得られた各時刻の燃料デブリの位置情報を MVP のジオメトリに反映させる数値解析ツールをプログラミング言語 Python により開発した。これにより燃料デブリの水中挙動を考慮した実効増倍率の時間変化を計算することが可能となった。

第 3 章では、DEM（Discrete Element Method）に着目し、MPS-DEM による粒状燃料デブリの水中堆積シミュレーション手法を提案した。はじめに、多種多様な大きさ・形状を有する小石を燃料デブリサンプルとして水中堆積実験を実施した。次に実験結果を指標とし、実験を再現するような、計算上の DEM 粒子のすべり摩擦係数と転がり摩擦係数の二つの摩擦係数をベイズ最適化により効率的に調整した。これら二つの摩擦係数を調整することで、サンプルの複雑な形状効果を表現することが可能となった。最後に調整した二つの摩擦係数の一般性を確かめるために、別体系におけるサンプルの水中堆積実験と計算を実施し、結果を比較した。その結果、本手法が適用可能なのは、水流の影響よりも、粒状燃料デブリ間の相互作用が支配的である条件下、また逆に粒状燃料デブリ間の相互作用がほぼなく、水流の影響が支配的である条件下であることが明らかになった。一方、上記二つの条件の間の範囲、つまり粒状燃料デブリと水流との相互作用が支配的である条件下では、さらなる研究の余地があることも示されたことにより、本手法の有効な適用範囲が明らかとなった。

第 4 章では、確立した粒子法と中性子輸送モンテカルロ法の結合による臨界計算手法の有効性を示している。本手法を、実際の燃料デブリ取り出し作業に適用することを想定し、原子炉格納容器内のペデスタル内から燃料デブリを取り出す際の臨界性を、実規模体系で評価した。評価では、燃料デブリ・環境・作業の三つのパラメータに分け、それぞれのパラメータの臨界性への影響評価を行った。その結果、多数の燃料デブリ片が一度に水中堆積する過程では、反応度が急速に増加するので、水中落下過程で臨界に達するリスクが大きいことが示された。一方で、燃料デブリ片が徐々に水中堆積する過程では、最終的な堆積形

状がまとまって山となりやすいため、水中堆積後に臨界のリスクが高まる可能性が示された。作業時に未臨界を担保するためには、上記の状況を回避する必要がある。以上の結果より確立した計算手法の有効性を明らかにしたと同時に、臨界安全の観点から燃料デブリ取り出し作業時で避けるべき状況を示した。

第 5 章では本研究を総括し結論を述べている。