T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	燃料デブリによる臨界事故時の影響評価に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	福田航大
Author(English)	Kodai Fukuda
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11996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11996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 (Tokyo Institute Research Repository)

学位論文要約

燃料デブリによる臨界事故時の影響評価に関する研究

福田 航大
東京工業大学　環境・社会理工学院　融合理工学系　原子核工学コース

第 1 章
序論

第 1 章では、福島第一原子力発電所事故により生まれた燃料デブリについて現時点で判明している一般的な情報を整理し、同発電所の廃止措置における燃料デブリ取り出しの重要性を述べている。また、燃料デブリ取り出しの方針や取り出し時の臨界事故リスクに対する考え方を関係機関が公表している参考文献を基に述べ、燃料デブリによる臨界事故のリスクを適切に評価するためにその影響評価が重要であることを述べている。さらに、燃料デブリによる臨界事故の影響評価手法には燃料デブリ特有の効果を適切に取り入れることができる手法を用いるべきであることを述べ、そのような手法を用いた先行研究、課題や本研究における着目点を述べている。その上で、「燃料デブリによる臨界事故時の影響評価を行う上で重要な因子を明らかにすること」という本研究の目的及び位置づけを明確にしている。

第 2 章
燃料デブリによる即発超臨界事故時の線量評価

第 2 章では、燃料デブリ特有の体系である気中-水中弱結合体系における臨界事故時の水位と線量の関係を明らかにすることを目的とした解析を行い、得られた結果について考察を行っている。解析では燃料デブリ体系に適した空間依存動特性解析コード MIK と放射線輸送計算コード PHITS を組み合わせた評価を単純な燃料デブリ体系を対象にしている。燃料デブリ体系では、粒子状の燃料デブリがランダム充填に相当する体積充填率で球形状または円柱形状に集まり、その一部または全てが水没する場合を仮定している。燃料デブリ周囲の水位がある状態にステップ状に変化することで正の反応度が加わると仮定し、即発超臨界状態の解析を行っている。その結果、同体系における即発超臨界時の水位と線量の関係が明らかとなり、特に、燃料デブリが完全に水没して水位が高い場合に反応度が高く即発量臨界時の核分裂数が大きいにもかかわらず、燃料デブリの一部が気中に露出しているような場合に即発超臨界事故時の線量が最も大きくなることを明らかにしている。この結果より、福島第一原子力発電所において燃料デブリ取り出し時に水位が低い状態で臨界事故が発生した場合、総核分裂数は少ないものの直接線による線量が大きくなると考えられる一方で、水位が十分高い状態であれば、臨界事故が起きる可能性や臨界事故時の総核分裂数は多くなるものの直接線による線量は小さくなる可能性があることを明らかにしている。

第 3 章

燃料デブリを対象とした即発超臨界過渡解析における反応度フィードバック効果の影響

第 3 章では、臨界事故時の影響評価に大きな影響を与える「反応度フィードバック効果」を適切に取り扱うことの必要性を述べ、反応度フィードバック効果として知られている放射線分解ガス生成および減速材沸騰が燃料デブリ体系を対象とした即発超臨界過渡解析における放出エネルギー量予測に与える影響を明らかにすることを目的とした解析を行っている。まず、仮想的な燃料デブリ体系における即発超臨界過渡解析を行っている。解析体系は第 2 章においても用いられた球形状燃料デブリ体系を基準とし、燃料デブリ粒子径や組成による解析結果の差を明らかにするためにさらに 3 つの体系を作成している。解析には、燃料デブリ体系の特徴を適切に考慮することができる空間依存動特性解析コード MIK を用いている。そこで得られた超臨界時の出力変化を入力として、放射線分解ガス解析を行っている。解析には動特性解析コード AGNES2 内の放射線分解ガスモデルに対して、溶液燃料体系と燃料デブリ体系の相違点を考慮した修正を加えたものを用いている。同様に、熱伝達解析を行っている。解析には、オープンソフトウェアである CFD 計算ツールボックス OpenFOAM が備えるソルバーの一つである、共役熱伝達解析ソルバー chtMultiRegionFOAM を用いている。以上の解析の結果より、燃料デブリ体系における即発超臨界事故時の放出エネルギー予測時に、多くの場合で反応度フィードバック効果の中でもドップラー反応度効果が支配的であることが明らかとなっている。しかしながら、燃料デブリ粒子半径が 0.1 cm よりも小さいような場合には、水の沸騰による反応度フィードバック効果を取り入れなければ、過度に保守的な放出エネルギー評価を行ってしまう可能性があることも明らかとなっている。以上より、放射線分解ガス生成及び沸騰現象による反応度フィードバック効果が放出エネルギー量予測に与える影響はほとんどの条件下で無視可能であること及び影響に注意しなければならない条件を明らかにしている。

第 4 章

遅発中性子寄与を含まない解析手法によるランプ状反応度印加時の即発超臨界過渡解析

第 4 章では、燃料デブリの特性を適切に考慮することができる空間依存動特性コード MIK を使用した先行研究における臨界事故時の影響評価にステップ状の反応度印加のみが取り扱われてきた背景を述べ、MIK をはじめとした遅発中性子の効果を含まない解析手法によるランプ状反応度印加時の解析が可能な条件が存在することを明らかにすることを目的とした解析を行っている。そのために、同解析手法がランプ状反応度印加時に適用可能であるかどうかを放出エネルギーへの遅発中性子寄与の観点から一点炉動特性モデル PKM を用いて確認する手法を確立し、その手法を用いて単純な燃料デブリ体系における解析を行っている。解析体系には第 2 章においても用いられた円柱形状燃料デブリ体系を用いている。円柱形状燃料デブリ体系が即発超臨界状態となった場合の放出エネルギーを遅発中性子の効果を考慮する場合及び考慮しない場合について様々な印加反応度及び反応度印加時間を用いて評価している。ここで、印加反応度が大きくかつ反応度印加率が小さいような場合に、

遅発中性子を含まないことが即発超臨界過渡解析に無視することができない影響を与えることが明らかとなっている。したがって、そのような条件下では、遅発中性子の効果を含まない動特性解析手法をランプ状の反応度印加による即発超臨界過渡解析に適用することができないと結論付けている。一方、その他の条件下では、遅発中性子の効果を含まない動特性解析手法でもランプ状の反応度印加による即発超臨界過渡解析を行うことができることが明らかとなっている。また、実際に MIK コードを用いてランプ状反応度印加の場合の即発超臨界過渡解析を行っている。解析は円柱形状燃料デブリ体系にて水位が一定の速度で上昇する場合を想定して行われている。ここでは、即発超臨界過渡解析時にランプ状の反応度印加をステップ状の反応度印加に単純化せずに解析を行う必要があることを明らかにしている。

第 5 章
燃料デブリ水中落下による即発超臨界事故時の解析における中性子世代時間の影響

第 5 章では、燃料デブリ特有の臨界事故シナリオの一つである落下燃料デブリ体系における即発超臨界に着目した検討を行っている。具体的には、落下中に大きく変化し、かつ臨界事故時の過渡変化に大きな影響を与えると考えられる中性子世代時間に着目し、超臨界時の放出エネルギーを評価する場合に、中性子世代時間の変化を考慮する必要があるか否かを明らかにすることを目的とした解析を行っている。解析では、先行研究で示された燃料デブリ落下パターンを引用し、落下燃料デブリ体系として使用している。落下燃料デブリ体系において、中性子世代時間の変化を考慮する場合としない複数の場合の解析を行い、得られた放出エネルギーを比較している。その結果、濃縮度が高く反応度が大きい場合、体系が未臨界状態へと転じる際にドップラー反応度フィードバック効果による反応度変化が支配的となるため、中性子世代時間の時間変化が放出エネルギー評価に影響を与えないことが明らかとなっている。一方で、濃縮度が低く反応度が小さい場合、体系が未臨界状態へと転じる際に落下による燃料位置変化に起因する反応度変化が支配的となるため、中性子世代時間の時間変化が放出エネルギー評価に大きな影響を与えることが明らかとなっている。よって、中性子世代時間の時間変化を考慮すべき条件下であるにもかかわらず中性子世代時間に仮定的な一定値を使用した場合、極端に非現実的な放出エネルギー評価となる可能性があるため、落下燃料デブリ体系における放出エネルギーを評価する場合に中性子世代時間の変化を考慮する必要があると結論付けている。

第 6 章
結論

第 6 章では、各章で得られた成果を総括し、結論を述べている。