

## 審査の結果の要旨

氏名 酒井 幹夫

本論文は核燃料粉末の流動を考慮した臨界解析のための粒子法に関する研究で、6章より構成されている。

第1章は序論で、研究の背景と目的が述べられている。核燃料施設の臨界評価では、いかなる場合でも臨界にならないように設計しなければならない。しかしながら、これまでの臨界評価では、核燃料製造装置内における核燃料粉末の流動に伴って生じる諸現象が臨界評価へ及ぼす影響についてほとんど議論されていなかった。そこで、粉体が不連続体として振る舞う体系を精度良く評価できる離散要素法を粉体流動解析手法として用い、離散要素法と臨界解析を結合することで核燃料粉末の流動を考慮した臨界安全解析手法の開発をすることが研究の目的であるとしている。また、本研究で開発されるコードシステムは COARA (Coupled analytical method for the criticality evaluation considering the granular flow of Radioactive materials) と名付けられている。

第2章では臨界解析統合コードシステム COARA の開発について記述されている。離散要素法による粉体流動解析手法、モンテカルロ法による臨界解析手法、および可視化手法についてまとめられている。

第3章では回転円筒容器内で流動する核燃料粉末の臨界解析についてまとめられている。回転円筒容器内において単一粒径の  $\text{UO}_2$  粉末が流動する体系に COARA を適用し、容器の回転速度および注入粒子数をパラメータとして、 $\text{UO}_2$  粉末の流動を考慮した臨界解析がおこなわれている。注入粒子数をパラメータとした解析では、全てのケースにおいて回転開始から 0.3 秒から 0.6 秒程度で粉体層の崩壊が起こり、その後準定常状態になっている。実効増倍率は回転開始とともに減少し、粉体層の崩壊時にさらに減少し、その後ほぼ一定となっている。回転速度をパラメータとした解析では、準定常状態における粉体層の自由界面の形状は回転速度の増加に伴い、直線型、S字型、さらに粒子が容器壁に圧着して運動する O型へと変化している。実効増倍率は回転開始とともに減少し、粉体層の崩壊時にさらに減少している。回転速度が速くなると、初期状態と準定常状態の実効増倍率の差が大きくなっている。これらの解析結果から、粉体の運動によって粉体層が膨張するダイラタンシーが起こり、粉体層の表面積が増大して中性子の漏えいが促進されるとともに体系内の原子個数密度が減少することにより、実効増倍率が減少すると考察されている。

第4章は粒径分布のある核燃料粉末が回転円筒容器内で流動する体系にCOARAを適用したものである。さらに、マーチングキューブ法を導入して粉体層の表面積の時間変化を求め、体系からの中性子の漏えいと粉体層表面積との関係についても検討されている。単一粒径および粒径分布のある $\text{UO}_2$ 粉末を注入した体系について比較したところ、粒径分布のある場合において大きな粒径の粒子が環状外側に分布する粒度偏析が起こっている。実効増倍率は粒径分布の有無にかかわらずほとんど同じ傾向を示したが、粒径分布がある粉末の方が大きくなっている。これは、大きな粒子の間に形成される空隙に小さな粒子が入り込むため、粉体層の表面積が小さくなるとともに原子個数密度が大きくなるためであると考察されている。実効増倍率と粉体層の表面積とは相関関係があったが、粒度偏析の進展時に実効増倍率はほとんど変化しないことが明らかになったとされている。

第5章では大規模体系を扱うための改良型代表粒子モデルが提案されている。離散要素法において扱うことのできる粒子数には計算機性能から決まる限界があり、大規模体系のシミュレーションをおこなうことが実質的に不可能であった。そこで、本章で提案される改良型代表粒子モデルにおいては、オリジナル粒子よりも大きな代表粒子を用いる。そして、代表粒子の接触力に用いるべきパラメータをオリジナル粒子のものから理論的に導出している。改良代表粒子モデルを用いた数値実験をおこない、本モデルの妥当性を検証するとともに、適用範囲が検討されている。

第6章は結論であり、本研究のまとめが述べられている。

以上を要するに、本論文は核燃料製造工程の臨界安全において、核燃料粉末の流動を詳細に取り扱うことのできる手法を開発し、今後の臨界安全評価の精度を高めるものであるとともに、開発した手法を用いて核燃料粉体の流動が臨界評価へ及ぼす影響について解析し、新たな知見を見出している。こうした成果はシステム量子工学の進歩に貢献することが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。