

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 酒井 幹夫

原子力エネルギーは、供給安定性、経済性、環境負荷において、優れたエネルギー源であることから、日本国内の発電電力量の35%以上（1997年以降）を賄うまでに成長し、欠かすことの出来ない重要なエネルギー源となっている。日本は資源に恵まれないため、エネルギーの安定確保と資源の有効利用のために、安全確保を大前提に核燃料サイクルの確立を基軸にした原子力エネルギー政策が進められている。

核燃料サイクルとは、天然に存在するウラン、トリウム資源を採掘、精錬、転換、濃縮、加工して核燃料として原子炉で使用し、さらに原子炉から取り出した核燃料を再処理、再加工して再び原子炉で使用し、残りを廃棄物として処理処分するまでの一連の循環を意味する。核燃料サイクルの中核を担う施設の多くが青森県六ヶ所村に建設されている。これらの施設は、建設に際して、安全評価がなされている。

原子力施設の安全評価では、設計基準事象を選定して、万一の事故が起きた場合でも安全設計が妥当であることを確認する。評価結果の判断の基準は、公衆に対して著しい被ばくのリスクを与えないこととしている。このため、火災、爆発、臨界、漏洩、機器故障などに関する代表事象を設計基準事象に選定して、信頼性のあるデータおよび解析で評価する。特に、臨界評価については、1999年9月30日に（株）ジェー・シー・オー東海事業所転換試験棟で臨界事故が発生したのを受けて、重要性が再認識されている。

原子力施設の臨界評価では、いかなる事象であっても臨界にならないように設計する。そのため、臨界安全管理がなされており、核分裂性物質が臨界量に達しないようにする質量制限、核分裂性物質の濃度が一定値を超えないようにする濃度制限、核分裂性物質を含む物質またはそれを入れる容器の形状寸法がある値以上にならないようにする形状寸法制限などの技術手段が適用されている。その結果、臨界評価では、解析値に安全裕度が見込まれる。

これまでの臨界評価は、大きな安全裕度を設定したため、媒体の流れなどの現象を反映した評価はほとんど行われてこなかった。例えば、核燃料製造の粉体プロセスにおいて、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は、ほとんど議論されてこなかった。設計や運転の合理化が進められるため、核燃料製造工程などにおいて、核燃料粉末の流動をはじめ、媒体の流れなどの現象を考慮した臨界解析手法の開発が望まれている。なお、核燃料の製造工程の粉体プロセスでは、核燃料粉

末が不連続体として振る舞う体系が多いことが知られている。

本研究では、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、さらに粒径分布を比較的容易にモデル化できる離散要素法を粉体流動解析手法として選定した。離散要素法と臨界解析を結合する手法を開発し、本手法に基づく統合コードシステムを COARA (Coupled analytical method for the criticality evaluation considering the granular flow of Radioactive materials) と名付けた。COARA は、離散要素法による粉体流動解析機能、モンテカルロ法による臨界解析機能、中性子の体系からの漏えいの影響を評価するための粉体層表面積計算機能および粉体流動解析の可視化機能から構成されている。COARA を回転円筒容器内で UO_2 粉末が流動する体系に適用し、 UO_2 粉末の流動によって生じる諸現象が臨界評価へ及ぼす影響を検討した。一方で、離散要素法には、計算で取り扱うことのできる粒子数に限界があるため、通常の産業の粉体プロセスで取り扱われるような 10 億個以上の粒子を用いた大規模体系シミュレーションを行うことが実質的に不可能である。そのため、離散要素法を用いた大規模解析体系のシミュレーションを行うためのモデルも本研究において開発した。以下に、本研究で検討した内容について述べる。

回転円筒容器内において単一粒径の UO_2 粉末が流動する体系に COARA を適用し、粉体流動諸現象が臨界評価へ及ぼす影響を検討した。容器の回転速度および注入粒子数をパラメータとして、 UO_2 粉末の流動を考慮した臨界解析を行った。注入粒子数をパラメータとしたとき、回転速度を 60 rpm とし、注入粒子数を 3000 個、5000 個および 7000 個と変化させた。一方で、回転速度をパラメータとしたとき、注入粒子数を 7000 個とし、回転数を 30 rpm、60 rpm および 150 rpm と変化させた。注入粒子数をパラメータとした検討では、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た。注入粒子数が 3000 個のとき、回転円筒容器内で UO_2 粉末の揺動が観察された。このような UO_2 粉末の流動を考慮した臨界解析を行い、実効増倍率の時間変化を求めたところ、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た。また、 UO_2 粉末の揺動は、臨界評価にほとんど影響を及ぼさなかった。回転速度をパラメータとした検討では、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に依存した。粉体層の自由界面の形状は、30 rpm のとき直線型であり、60 rpm のとき S 字型であった。回転速度が臨界速度を超える 150 rpm になると、粒子は容器壁に圧着して運動し、粉体層の形状は O 型になった。このような UO_2 粉末の流動を考慮した臨界解析を行い、実効増倍率の時間変化を求めたところ、注入粒子数をパラメータとした場合と同様に、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た。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た。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、さらに体系内の原子個数密度が減少することにより、

実効増倍率が減少したものと考えられる。

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、粉体流動諸現象が臨界評価へ及ぼす影響を検討した。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した。単一粒径の UO_2 粉末を注入した体系と粒径分布のある UO_2 粉末を注入した体系について、両者の注入量を 8.68 kg、回転速度を 60 rpm に設定して、両者の解析結果を比較した。回転円筒容器内の UO_2 粉末の流動について、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た。粒径分布のある粉末が回転円筒容器内で流動すると、大きな粒径の粒子が環状外側に分布し、小さな粒径の粒子が環状内側に分布する粒度偏析が起こった。このような UO_2 粉末の流動を考慮した臨界解析を行い、実効増倍率の時間変化を求めたところ、上記の解析結果と同様に、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た。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た。これは、粒径分布がある粉末では、大きな粒子同士の間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、原子個数密度が大きくなるためである。実効増倍率と粉体層の表面積との関係を検討したところ、両者には相関関係があった。また、粒度偏析の進展時に実効増倍率はほとんど変化しなかった。これは、本解析体系では原子個数密度の分布の変化が臨界評価にほとんど影響を及ぼさないことを意味すると考えられる。これらの結果より、本解析体系では、粉体層の表面積の増加による中性子の漏えいが臨界解析に大きく影響を及ぼすことが示された。

離散要素法では、計算で取り扱うことのできる粒子数に限界があり、大規模体系シミュレーションを行うことが実質的に不可能である。既存の離散要素法の大規模解析体系モデルは、粒子-流体間相互作用が支配的な体系を対象としており、粒子-粒子間に作用する接触力のモデル化がなされていない。そこで、離散要素法の大規模解析体系において接触力を精度良く評価できるモデルとして、改良型代表粒子モデルを開発した。改良型代表粒子モデルでは、オリジナル粒子よりも大きな代表粒子を用いて、オリジナル粒子群を代表粒子としてモデル化した。改良型代表粒子モデルでは、相互作用時において、代表粒子に含まれるオリジナル粒子の速度に基づく並進運動および角速度に基づく回転運動のエネルギーの総和（計算上、代表粒子内に存在するオリジナル粒子の運動エネルギーの平均とオリジナル粒子数の積）が、オリジナル粒子径の1倍の大きさの代表粒子の運動エネルギーと一致するとしてモデル化した。数値実験を行い、改良型代表粒子モデルの妥当性を検証するとともに、適用範囲を検討した。

今後、これらの手法とモデルを用いて、実際の核燃料製造工程における臨界評価へ適用されることが望まれる。本研究で開発した詳細解析モデルを導入することによって安全裕度を減らすことができるため、効率的な設計および運転が可能になると考えられる。