

燃料デブリ取り出し戦略の構築：リスク管理と物理シミュレーションの融合

(受託者) 国立大学法人東京大学大学院工学研究科

(研究代表者) 山口彰

(研究期間) 平成28年度～30年度

1. 研究の背景とねらい

福島第一原子力発電所の廃炉の加速に資するため、世界でも例のない事故炉からの燃料デブリの安全かつ円滑な取出しに貢献する研究について、英国 Imperial College London (ICL) との協力により推進する。燃料デブリの取り出しにおいて、デブリの冷却や放射線の遮蔽において優れている冠水工法の実施が有力であると考えられているが、本工法には格納容器の止水、耐震性、臨界管理等に問題がある。他方、冠水工法の課題をクリアした気中工法も燃料デブリの取り出しにおいて有力な技術であると考えられているが、これまでに技術検討がほとんどなされていなかった。そこで、本研究では、ICL との共同研究により、気中工法に関する安全な燃料デブリの取り出しに係わるマルチフィジックスシミュレーションとその結果に基づくリスク評価により、燃料デブリを長期管理しつつ気中取り出し方法の問題点克服を検討する。

2. これまでの研究成果

(1) 固気液混相流-臨界連成手法の開発

1) 固気液混相流の数値解析手法

固気液混相流の挙動を模擬するため、気液連続相と固体分散相をそれぞれ計算し、流体抗力による運動量交換項を用いて連成する。以下、モデリングについて簡単に説明する。

連続体の気液二相流の運動を考える。固体相の影響を考慮した上、非圧縮性流体の運動は次の局所体積平均化 Navier-Stokes 方程式と連続の式に支配される。それぞれ、流体運動の運動量保存則と質量保存則を示す。

$$\varepsilon \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) \right) = -\varepsilon \nabla p + \varepsilon \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{u} + \varepsilon \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_p \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 \mathbf{u} は速度、 p は圧力、 μ は粘度、 \mathbf{g} は重力加速度を意味する。特別に、 ε は空隙率 (void fraction)、 \mathbf{f}_p は流体 - 固体相互作用力である。 E は固体相の空間分布を代表する。固体が存在しない場合、 ε の値が 1 となる。また、単一粒径の球状粒子によるランダムなパッキングは最密状態で約 0.36 の空隙率を有する。

流体 - 固体相互作用力は連続相と分散相の運動量交換を担う。本研究の取り扱う課題では、流体抗力 (drag force) にちなむ相互作用が支配的である。流体が空隙率 ε を有する固体粒子層に透過する際に受ける抗力は Ergun の式¹⁾に基づいて計算される。

気相と液相を分割する自由液面のモデリングを説明する。水 - 空気のような不溶性自由表面問題に対して、Volume-of-Fluid (VOF) 法が有効的な計算手法として知られている。VOF 法では、VOF 関数 ϕ を用いて液面を表現する。一般的に、VOF 関数 ϕ は検査体積内の液相の体積割合を表

す。その値は液相内部で1、気相内部で0、気液界面付近において0と1の間に連続的に変化する。水と空気のように、界面に分割された気相・液相の物性値が大いに異なる場合が多い。VOF法では、VOF関数 ϕ を用いて、密度・粘度などを連続的に補間し、気相・液相を「物性値が変化する同一流体」として捉える。VOF法では、界面運動はVOF関数 ϕ の時間発展に記述される。

$$\frac{d\phi}{dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

この方程式は、流体速度場に伴い、界面の純粋な移流挙動（VOF関数 ϕ の拡散項が存在しない）を表現するものである。このような移流方程式を通常の風上差分法で計算すると、全計算領域において数値拡散が発生し、界面があいまいになってしまう。この問題を解決するため、VOF法ではユニークな界面再構築手法が提案され、数計算セルの範囲で界面を捕獲し（interface capturing）、その鮮明さ（Sharpness）を保ちながら界面位置を更新できるようになっている。詳細は、文献²⁾に参照されたい。

最後に、固体相の計算モデルを述べる。本研究では、固体層の位置が変化しないため、速度ゼロの多孔質体としてモデル化する。この場合、固相の空間位置と内部の空隙率を設定し、気液二相流計算の入力パラメータとして与えることになる。

2) 臨界計算手法

臨界計算にはMCNP6.1を用いる。MCNP(Monte Carlo N-Particle)は連続モンテカルロ法を用いて中性子の輸送方程式を計算する手法である。中性子の散乱および吸収の評価には、核種ごとの断面積ライブラリが必要となる。本研究では、断面積のライブラリにENDF/B-VII.1を、熱中性子散乱データにENDF/B-VII.0を用いる。

MCNPでは計算セルにおける核種の粒子数密度をインプットとして用意する必要がある。粒子数密度の計算はDEM-VOF法によって得られた結果を基に行う。まず、対象とする固気液混相流をDEM-VOF法を用いて解析する。次に、計算結果からMCNPの計算格子において固体粒子が占める体積分率を求める。最後に、MCNPのセル内部では核種が均一に分布していると仮定し、それぞれの粒子数密度を求める。この手法を用いることで、既存の手法では実現できなかった k_{eff} の経時変化が計算可能となる。

(2) 固気液混相流モデルの妥当性検証

固気液連成項の計算および流体運動への影響を調べるために、本計算手法を水柱崩壊による波と多孔質構造物の相互作用問題に適用する。文献³⁾の実験データと比較を行い、計算モデルの妥当性検証を行う。計算体系の概要は図1に示す。計算領域は長さ89cm、高さ58cmの水槽である。奥行き方向の影響が小さいので、擬似的な二次元問題として扱える。水槽真ん中に厚さ29cmの多孔質壁を設置する。初期状態では、水槽の左30cmの部分に水柱を配置し、全体の床に2.5cm積水させる。多孔質壁が粉碎加工を施した碎石（空隙率0.49、平均粒径15.9mm）で、水柱の初期高さが25cmである。

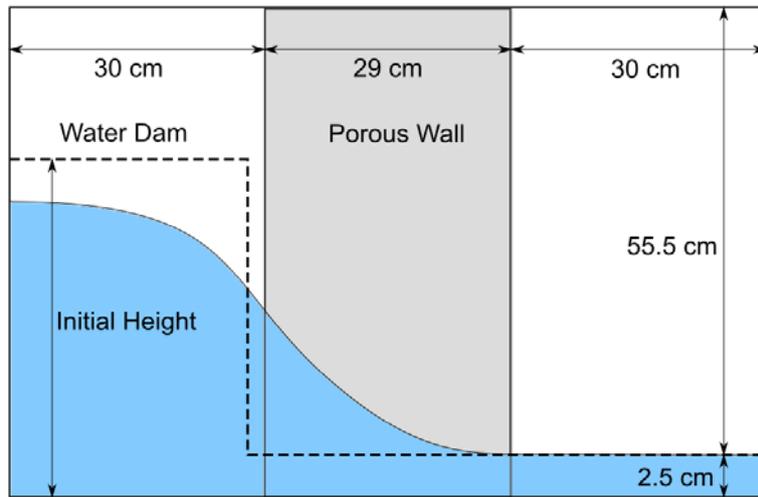
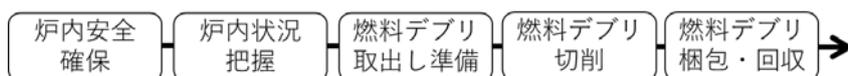


図1 解析体系

計算結果を図2に示す。これらのスナップショットに、赤い部分は水、青い背景は空気を示す。また、三角形のプロットは、文献³⁾の実験結果を示すものである。図に示されたように、0.0sから1.0sの全ての時刻において、計算結果と実験データが良好に一致したことが分かる。特に、0.8s以降、多孔質層から流出した水面が下流に入り、跳水 (hydraulic jump) 現象が観察され、実験を再現した (多孔質壁と右方水面の窪み)。これは、Case A の碎石層が比較的疎であるため、水柱の速度を十分に減衰させずに下流へ伝わったと考えられる。また、ICL 側も有限要素法を用いて同じ条件の数値解析を実行し、ほとんど同じ結果が得られ、本体系において両者の計算精度がほぼ同じであることを確認した。

(3) リスク管理

福島第一原子力発電所の燃料デブリの取出しに係る方針を決める時期にある。その作業は、以下の手順に従うこととされている。



廃炉作業を進めていく過程で留意すべき放射線リスク管理上の課題は、①再臨界防止 ②冷却機能確保 ③放射性物質の漏洩防止 ④水素爆発防止 ⑤原子炉建屋の耐久性確保 ⑥作業員の安全確保の6点であり、それらに焦点を当て、燃料デブリ取出しに関するリスク管理の基本的な方針を検討した。リスクとは、どのようなことが起きうるのか (シナリオ)、それはどれくらい現実的なのか (確からしさ)、その結果どのような被害あるいは影響があるのか (影響度) の三要素からなる。これまでに、定量的リスク評価のプロセス6ステップ (成功パスの記述、危険要因の抽出、シナリオの策定、尤度の定量化、影響の定量化、リスク管理意思決定) を明確化し、燃料デブリ取り出しのリスク構造を示した。

3. 今後の研究 (継続課題の場合)

引き続き、気中工法の検討の手助けとなるマルチフィジックスシミュレーション技術を開発していく。また、リスク管理プロセスを具体化、リスク構造を定量化することにより燃料デブリの

取出しのリスク管理に貢献する。

4. 参考文献

- 1) S. Ergun, “Fluid flow through packed columns,” Chem. Eng. Prog., vol. 48, pp. 89-94, 1952.
- 2) Yokoi, K., “Efficient implementation of THINC scheme: A simple and practical smoothed VOF algorithm,” J. Comput. Phys., vol. 226, no. 2, pp. 1985-2002, 2007.
- 3) P. L.-F. Liu, P. Lin, K.-A. Chang, and T. Sakakiyama, “Numerical Modeling of Wave Interaction with Porous Structures,” J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., vol. 125, No. 6, pp. 322-330, Nov. 1999.

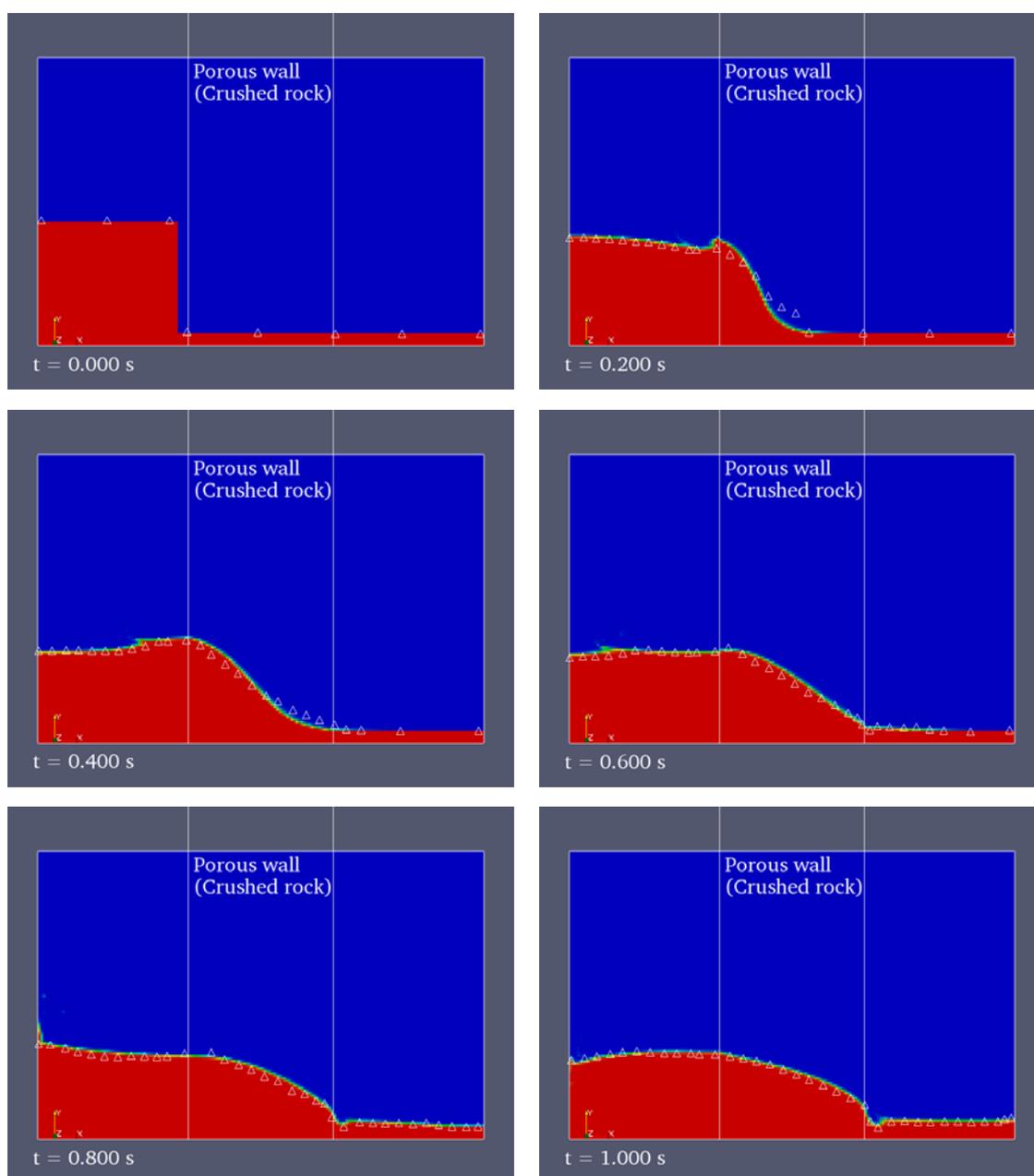


図2 解析結果