

下部プレナム制御棒支持管のジェットブレイクアップ挙動への影響解析

Influence of Control Rod Guide Tubes in Lower Plenum for Behavior of Jet Breakup

東京大学大学院	結城 喬	Takashi YUKI
東京大学大学院	近藤 雅裕	Masahiro KONDO
東京大学大学院	岡本 孝司	Koji OKAMOTO
東京大学大学院	韋 宏洋	Hongyang WEI

Abstract In 2011 at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, which was a boiling water reactor (BWR), core meltdown occurred. There are control rod guide tubes (CRGTs) in lower plenum of pressure vessel of BWR and it is considered that CRGTs influence behavior of jet breakup of corium. In this research, the experiment about difference of behavior of jet breakup with and without pillar, which simulate CRGTs, and mechanism of difference of behavior of jet breakup in [5] was simulated and analyzed by particle method.

Keywords: BWR, CRGTs, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, jet breakup, meltdown, particle method

1. はじめに

2011年に福島第一原子力発電所で原子炉の炉心溶融が起こった。しかし高濃度の放射線のため炉心溶融の過程を観測した計器やデータは存在していない。そのため炉心溶融の過程はほとんど明らかになっていない。

そこでシミュレーションすることで制御棒が臨海現象を起こして相変化し液化する、液化した炉心溶融物が原子炉の下部プレナムに溜まっている冷却水中に落下する、落下した炉心溶融物が自身の高熱によって原子炉自体を溶かしメルトダウンさせる過程を解明する試みがなされてきた。

中でも本研究においては炉心溶融物が下部プレナムに落下する際のシミュレーションを行った。先行研究には以下のような研究が存在する。表面張力を考慮したMPS法を用いた2次元のジェットブレイクアップ挙動に関する研究は柴田ら[1]のものが上げられる。RD-MS法を用いた3次元のジェットブレイクアップの研究はPark et al.[2]のものがあげられる。しかし、沸騰水型原子炉(BWR)の下部プレナムに存在する制御棒指示管の影響がどの様に

ジェットブレイクアップに反映されるかを数値的に評価する研究は存在していない。

そのため、本研究の目的は章ら[3]の実験を模擬したシミュレーション体系において、下部プレナムに存在する制御棒指示管のジェットブレイクアップに対する影響を、近藤ら[4]の表面張力モデルを3次元化したものを用い、3次元空間においてMPS法によって数値的に評価することとする。

2. MPS法の概略

2.1 MPS法とは

非圧縮流体の運動量保存に関する支配方程式はラグランジュ微分を用いると

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \mu \nabla^2 \vec{v} - \nabla p + \nabla F \quad (1)$$

と表すことが出来る。ここで ρ は密度、 \vec{v} は速度、 μ は粘性係数、 p は圧力、 ∇F は表面張力である。本研究では表面張力を粒子間ポテンシャル F の勾配で表現している。支配方程式に含まれる微分演算子を計算する際、重み関数

連絡先: 結城 喬、〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1 工学部8号館402B、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻
E-mail: yuki@vis.t.u-tokyo.ac.jp

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \frac{r_g}{r_{ij}} - 1 & (r_{ij} \leq r_g) \\ 0 & (r_{ij} > r_g) \end{cases} \quad (2)$$

を用いて計算コストを抑える。ただし、 r_g は影響半径、 r_{ij}

は粒子*i*と粒子*j*の間の距離である。

今、考える対象は非圧縮流体であるので、粒子数密度(加重平均の計算に用いる近傍粒子の重みの和)

$$n_i = \sum_j \omega_{ij} \quad (3)$$

は一定である。そのため、計算初期に粒子数密度の計算を行い、得られた値を n^0 とおき、その値を基準値として

常に計算に用いる。重み関数 ω_{ij} と粒子数密度 n^0 を用いて、

支配方程式中の微分演算子、勾配とラプラシアンは

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_j \frac{\phi_j - \phi_i}{|r_{ij}|^2} \vec{r}_{ij} \omega_{ij} \quad (4)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_j (\phi_j - \phi_i) \omega_{ij} \quad (5)$$

の様に離散モデルによって定式化される。ただし、 \vec{r}_{ij} は

粒子*i*から粒子*i*へのベクトル、 d は空間の次元を表す。また、

λ は規格化のためのパラメータで

$$\lambda = \frac{\sum_j |r_{ij}|^2 \omega_{ij}}{\sum_j \omega_{ij}} \quad (6)$$

のようにあらわされる。これらの微分演算子を用いて支配方程式を解くが、計算アルゴリズムは第一段階の陽的な計算で支配方程式の右辺第一項の粘性項と第三項の表面張力項を計算し、粒子を仮移動させる。そして第二段階の陰的な計算で支配方程式の右辺第二項の圧力項を計算し第一段階の計算で元の値とずれた粒子数密度を n^0 に

戻す。圧力の計算は質量保存の方程式および圧力勾配の方程式から得られるポアソン方程式

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i = - \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n_i^* - n^0}{n^0} \quad (7)$$

を用いて行う。ただし、 n_i^* は第一段階で粒子を仮移動さ

せた後の仮の粒子数密度である。

2.2 表面張力項の計算について

本研究では表面張力として近藤ら[4]のモデルを3次元に拡張したモデルを採用した。粒子間ポテンシャル力 F は

$$F(\mathbf{r}) = C f(\mathbf{r}) \quad (8)$$

$$f(\mathbf{r}) = \frac{1}{3} \left(r - \frac{3}{2} r_{\min} + \frac{1}{2} r_g \right) (r - r_g)^2 \quad (9)$$

のように粒子間ポテンシャルの大きさ定数 C と粒子間ポ

テンシャルの形状 $f(\mathbf{r})$ の積であらわされる。ただし、 \mathbf{r} は

粒子間距離、 r_{\min} は初期最近接粒子間距離、 r_g は粒子間ポ

テンシャルの影響半径である。本研究では $r_g = 3.1 r_{\min}$ と

した。粒子間ポテンシャルの形状 $f(\mathbf{r})$ は \mathbf{r} で微分可能で、

微分したとき近距離では斥力、近距離では引力となるように設定した近藤らのモデルに従っている。ここで、近藤ら[4]は表面張力係数と粒子間ポテンシャルの関係を導

いた。表面張力係数 σ が単位面積当たりの流体の表面に蓄

えられているエネルギーが等価であるということが知られている。つまり、ある面積の表面を作るためのエネル

ギーを求めることで、表面張力係数 σ と粒子間ポテンシ

ヤル力の関係を導くことが出来ると近藤ら[4]は主張した

(Fig.1)。しかし近藤ら[4]のモデルは2次元のみに適用されるものであった。そこで、本研究では近藤ら[4]のモデルを3次元に拡張した。以下のように、流体からその一部を引き離して表面を作る際に粒子間距離が大きく変わらないと仮定して、Fig.1の粒子の集合Aを粒子の集合Bから引き離すことを考える。

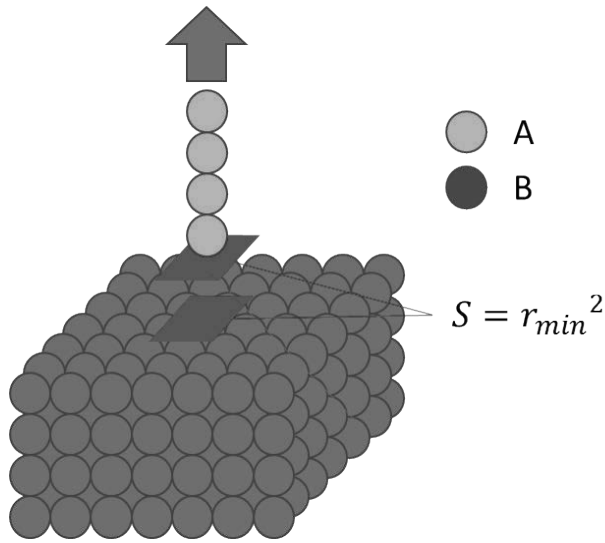


Fig.1 Ensembles of particle A, B

この時に形成される表面積は r_{min}^2 であるので、粒子間ポテンシャルに関する(10)式が成立する.

$$2\sigma r_{min}^2 = \sum_{i \in A, j \in B} F(r_{ij}) \quad (10)$$

この式によって粒子間ポテンシャルの大きさ定数 C を求

めることが出来る. よって表面張力 ∇F は粒子間ポテンシャルの勾配として,

$$\nabla F = \sum_j \frac{\partial F}{\partial r_{ij}} \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}} \quad (11)$$

と表される.

3. ジェットブレイクアップのシミュレーション

沸騰型原子炉の下部プレナムを模擬した環境を用意し、制御棒指示管(CRGTs)がない場合とある場合においてジェットブレイクアップの結果がどのように異なるかについて数値実験を通して検証した.

下部プレナムの中に溜められている水(water pool)の中に、原子核の崩壊熱によって溶け出した炉心溶融物を模擬した合金U-alloyに初速(3m/s)を与えジェットとし、パイプでもって注入(インジェクション)する環境とした.

3.1 パラメータなど諸条件

数値実験をする際の各種パラメータはTable 1のようにとった.

Table 1 Calculation conditions

Density of U-alloy	9.58×10^3 [kg/m ³]
Surface Tension of U-alloy	1.22 [N/m]
Density of water	1.0×10^3 [kg/m ³]
Kinematic Viscosity of water	7.28×10^{-2} [m ² /sec]
Surface Tension of water	1.0×10^{-6} [N/m]
Particle Number	244498
Initial Particle Distance	1.25×10^{-3} [m]
Time Step	2.0×10^{-3} [sec]

3.2 下部プレナムおよびCRGTsを模擬した図

以下のような下部プレナムを模擬したFig.2, Fig.3を用いて数値実験を行った.

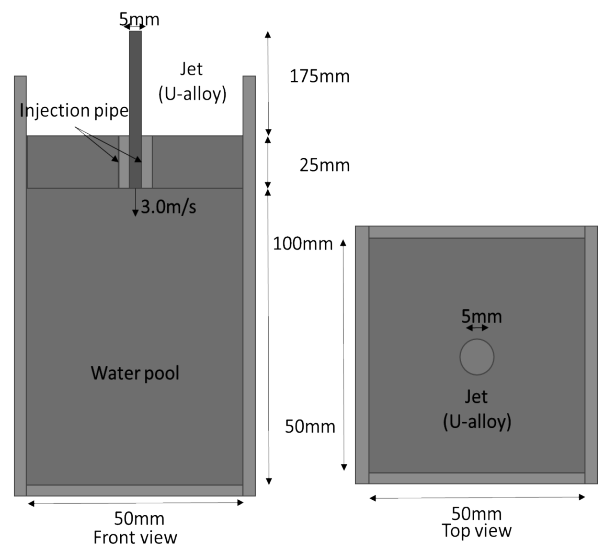


Fig.2 Conditions like lower plenum without CRGTs

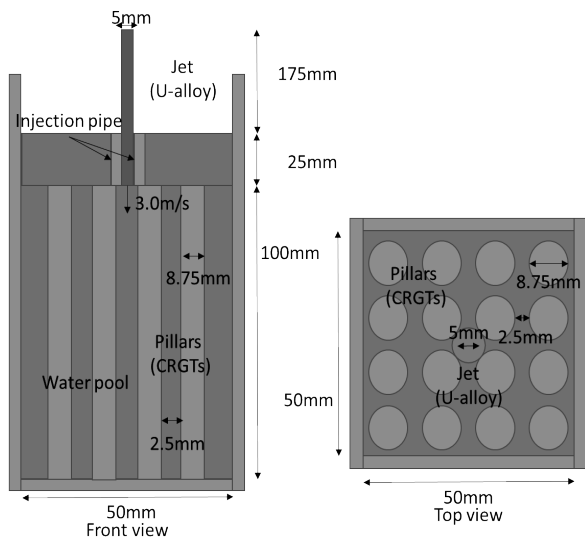


Fig.3 Conditions like lower plenum with CRGTs

それぞれの0.3秒後での断面図は Fig.4、 Fig.5 のようになった。

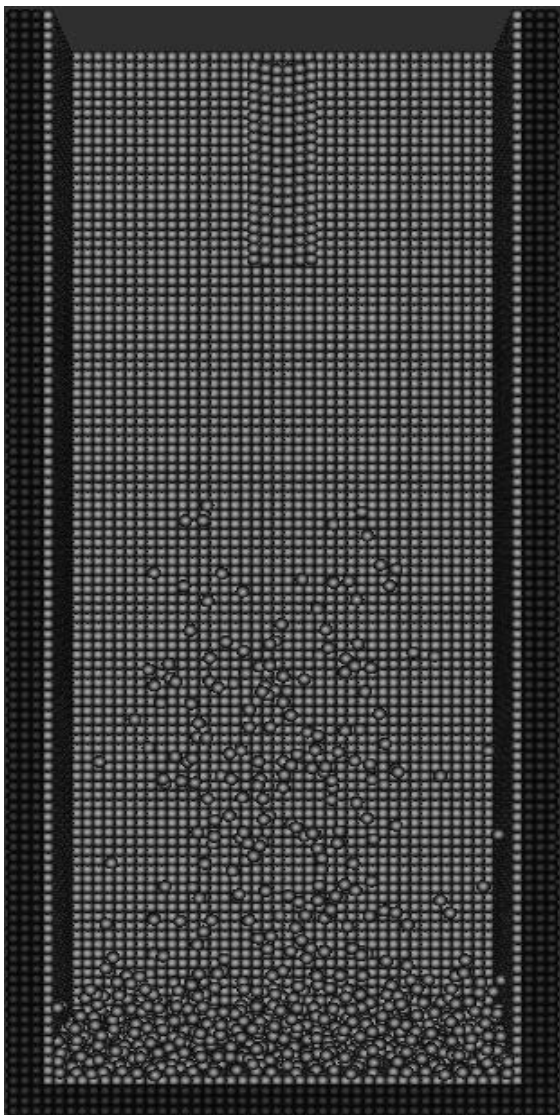


Fig.4 A Cross Section of Model without CRGTs in 0.3(s)

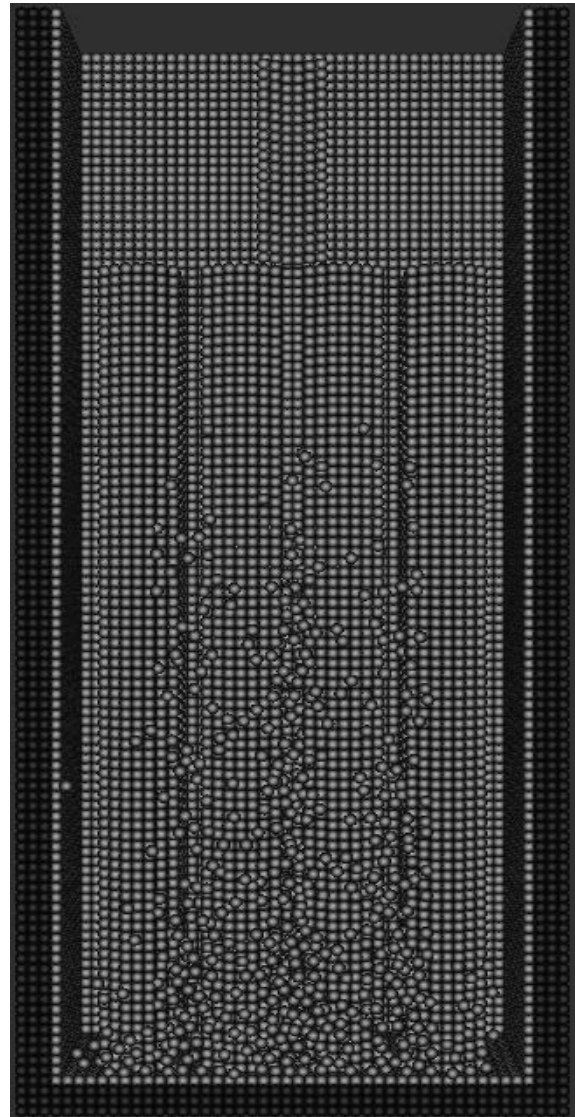


Fig.5 A Cross Section of Model with CRGTs in 0.3(s)

なお、水粒子は見やすさのため表示していない。U-alloyの粒子を水色で表示している。

0.3s 後における、粒子の中心軸からの距離と粒子の個数の関係を表すヒストグラムは Fig.6 のようになった。

ここで言う中心軸とは、初速を与えて注入した U-alloy が通る pipe の鉛直方向の直線ことであり、それぞれの粒子と中心軸との距離を計測した値を中心軸からの距離としている。

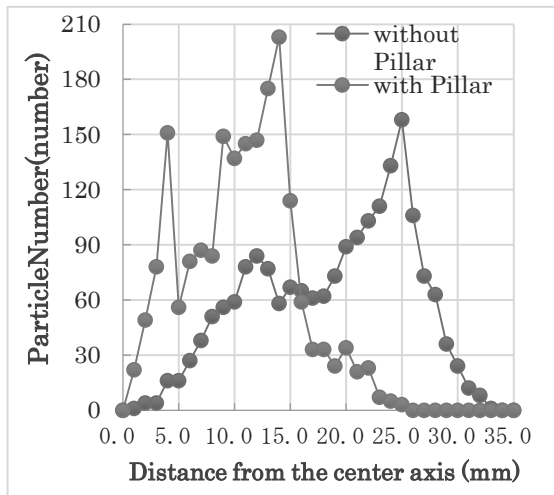


Fig.6 A Histogram of Particle Distance from the Center and Particle Number of Both Models

Fig.6を見ると、制御棒指示管がある場合においては、中心軸に最も近い4本の内側の制御棒指示管（中心軸との距離が3.8mmから12.3mm）と中心軸に2番目に近い8本の制御棒指示管（中心軸との距離が13.2mmから22.4mm）によってU-alloyの拡散する範囲が限定されていることが分かる。

4. おわりに

本研究の目的はBWRの下部プレナムに存在する制御棒指示管のジェットブレイクアップ現象に対する影響を考察することであった。

そのために、粒子間ポテンシャルを用いた3次元の表面張力モデルを導入した粒子法の一つであるMPS法を用いて、章ら[3]の実験を模擬したシミュレーション体系において数値的なシミュレーションを行った。

結論としては本研究のシミュレーションによって、制御棒指示管によってU-alloyの拡散(U-alloyのジェットブレイクアップ)する範囲がある一定の範囲内に制限されることがヒストグラムによって明らかにされた。

今後の展望としては、章ら[3]の実験との比較をし、本研究におけるシミュレーションが実際に正しいことを検証することである。

また、実験との検証の結果によっては、水とU-alloyとの相互作用を考えたモデルにすることも必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 柴田和也, 越塚誠一, 岡芳明, “粒子法によるジェット分散挙動の数値解析”, Transactions of JSCES, Paper No.20040013.
- [2] Shane Park, Hyun Sun Park, Byeong Il Jang, Hong Ju Kim, “3-D simulation of plunging jet penetration into a denser liquid pool by the RD-MPS method”, Nuclear Engineering and Design, 299, 2016, pp.154-162.
- [3] Hongyang WEI, Nejdet ERKAN, Kojo OKAMOTO, “Experimental investigation of the effect of control rod guide tubes on the breakup of a molten metal jet in the lower plenum of a boiling water reactor under isothermal conditions”, Doctoral thesis of the University of Tokyo, unpublished.
- [4] 近藤雅裕, 越塚誠一, 滝本正人, “MPS法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデル”, Transactions of JSCES, Paper No.20070021