冷却材中における高温溶融物質の分散クエンチ挙動に関する研究*

阿部 豊^{*1}, 木津 哲也^{*2}, 成合 英樹^{*3}
千歳 敬子^{*4}, 小山 和也^{*5}

Study on the Quench Behaviour of Molten Fuel Material Jetted into Coolant

Yutaka ABE^{*6}, Tetsuya KIZU, Hideki NARIAI,
Keiko CHITOSE and Kazuya KOYAMA^{*6} Doctoral Program in Engineering Mechanics and Energy Graduate School of
Systems and Information Engineering,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

In a core disruptive accident (CDA) of a Fast Breeder Reactor, the post accident heat removal (PAHR) is crucial for the accident mitigation. The molten core material should be solidified in the sodium coolant in the reactor vessel. In the present experiment, molten material is injected into water to experimentally obtain fragments and the visualized information of the fragmentation. The distributed particle behaviour of the molten material jet is observed with high-speed video camera. The distributions of the fragmented droplet diameter from the molten material jet are evaluated by correcting the solidified particles. The experimental results of the mean fragmented droplet diameter are compared with the existing theories. Consequently, the fragmented droplet diameter is close to the value estimated based on the Kelvin-Helmholtz instability. Once the particle diameter of the fragmented molten material could be known from a hydrodynamic model, it becomes possible to estimate the mass ratio of the molten particle to the total injected mass by combining an appropriate heat transfer model. The mass ratio of the molten fragment to total mass of the melted mixed oxide fuel in sodium coolant estimated in the present study is very small. The result means that most of the molten mixed oxide fuel material injected into the sodium coolant can be cooled down under the solidified temperature, if the amount of the coolant is sufficient.

Key Words: FBR, CDA, FCI, Quench, Kelvin-Helmholtz Instability

1. 緒言

Na 冷却高速増殖炉 (FBR) は、低圧高沸点などの冷却系の特徴から、炉心損傷事故 (Core Disruptive Accident, CDA) 時においてたとえ炉心燃料が全量溶融した場合においても、原子炉容器内での冷却保持 (Post Accident Heat Removal, PAHR) が可能であることが求められている。FBR の CDA における PAHR の評価は、①溶融燃料と冷却材の接触時において、溶融燃料が冷却材によってクエンチされて微粒化するかどうか、②この微粒子からなるデブリベッドが安定的に除熱できるかどうかの2つのステップに分けられる。ステップ1においては、クエンチ促進構造やジェット貫通防止構造を考えると、ステップ2においてはクエンチにより固化粒子となったデブリヘッドの長期

安定冷却保持に対する炉構造側での対策を考えることが、PAHR のサクセスシナリオを構築する上で必要不可欠な検討課題となっている。

これまで、CDA 時における安全性に関しては、蒸気爆発に関連する研究が多数おこなわれてきているものの、ジェットブレイクアップから微粒化を経てクエンチに至る過程における実験ならびに解析的な検討については、炉内構造物の設計に資することができる情報としては必ずしも十分に得られていないのが現状である^[1]。

本研究は、このステップ1における溶融燃料のプレナム内での挙動に注目し、(1) プレナム内に流出する溶融燃料を、流出形態に基づくその後の冷却・固化・微粒化挙動という現象として把握し、体系的な整理を行う、(2) 模擬物質を用いた伝熱流動挙動に対する分散・微粒化や伝熱などの物理モデルについての検討を行った上で、模擬物質を用いた実験を行うと共に、(3) 実機条件における冷却・微粒化を確実にするために必要となる炉内構造への要求条件を明らかにすることを目的とする。

* 原稿受付 2004 年 3 月 25 日。

^{*1} 正員、筑波大学システム情報工学研究科(☎ 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。^{*2} 学生員、筑波大学大学院理工学研究科。^{*3} 正員、原子力安全基盤機構(☎ 105-0001 東京都港区虎ノ門 3-17-1)。^{*4} 三菱重工業(株)(☎ 220-8401 横浜市西区みなとみらい 3-3-1)。^{*5} 新型炉技術開発(株)(☎ 108-0075 東京都港区港南 2-16-5)。

E-mail: abe@kz.tsukuba.ac.jp

2. ジェットブレイクアップ可視実験

2.1 実験装置および実験方法 溶融金属の分散挙動を把握するための実験装置を製作した。実験装置は大きくわけて①金属を加熱、溶融し射出する「射出装置」、②溶融金属を任意の速度でジェット状に射出させる「窒素加圧装置」、③溶融金属の分散・微粒化挙動を観測する、縦 1.5m 幅 0.2m の 1 枚ガラスを 3 面に取り付けた「水槽」、④水槽内を密閉するために、水槽上部をふさぐ「スライドゲート」からなる。実験の手順としては、まず水温調整用ヒーターにより水槽内の温度を調節する。同時に、射出装置の中に試験金属を入れ溶融させ、窒素加圧を行う。実験の準備が整った後、射出装置のプラグを引き抜くのと同時にスライドゲートを開け、水槽内に溶融金属を射出する。そのとき、スライドゲート上部に設置したフォトセンサーが溶融金属ジェットを感知すると同時に、高速ビデオカメラなどの計測が開始する。溶融物が水槽内で分散微粒化し固化した後、固化したフラグメントを水槽下部より回収し粒度分布を測定した。

実験は、溶融 MOX 燃料とナトリウムの液液の相互作用を模擬した溶融 U-alloy78 を水中に投入する実験と、その実験に対比することを目的として密度比の大きな気液の体系で、水ジェットを空气中に射出する実験とを行った。

2.2 水ジェット射出実験 まず、密度比の大きな気液界面での不安定波長の擾乱を把握するために、水ジェットの空气中への射出実験を行った。実験装置の概要を図 1 に示す。実験装置のテスト部水槽の 3 面には、縦 1.5m 幅 0.2m の 1 枚ガラスが取り付けられており、残りの 1 面には計測用の温度センサーや圧力センサーが取り付けられる構造となっている。水ジェット射出実験の場合、始め水槽内には空気のみがある。射出装置内に水を入れ窒素で加圧し、この加圧圧力を変化させることで、任意の速度で水ジェットをテスト部に射出した。加圧圧力は、加圧なしの自由落下から 4MPa まで 0.5MPa ごとに変化させた。可視観測には高速ビデオカメラを用いて、2000fps の速度で撮影を行った。照明は、メタルハライドランプをカメラ正面より半透膜を通して照射した。

2.3 溶融金属ジェット射出実験 FBR の CDA 事象時の模擬実験として、溶融 MOX 燃料（融点：2790℃、粘性係数 29×10^3 Pa·s、表面張力 0.494N/m）を、U-alloy78（成分構成：Bi・Sn・In、融点：78.8℃、粘性係数 2×10^3 Pa·s、表面張力 ~ 1.1 N/m）によって模擬することとし、溶融 U-alloy78 をジェット状に水中

に投入する実験を行った。模擬物質として U-alloy78 と水を用いたのは、本実験が対象とする分散微粒化の挙動に対する支配因子である密度や粘性や表面張力などが、溶融 U-alloy78 と水とで、溶融 MOX 燃料とナトリウムに近いためである。実験手順として、ヒーターで水槽内の温度を調節すると同時に、射出装置内に試験金属を入れ溶融させ、窒素加圧する。実験の準備が整った後、射出装置のプラグを引き抜くと同時にスライドゲートを開け、水槽内に溶融金属を射出した。撮影速度 10000fps で可視観測を行い、実験後、固化したフラグメントを水槽下部より回収した。

3. 実験結果

3.1 水ジェット射出実験結果 得られた実験画像を図 2 に示す。画像からジェット表面での不安定が増大し最終的には破断に至る現象が観測された。ジェットの速度は画像のピクセル数を数えることによって算出し、画像からジェット表面での波長も計測した。

Fig.1 Conceptual figure of experimental apparatus

Fig.2 Surface wave of water jet and atomized water droplets

3. 2 溶融金属射出実験結果 実験画像を図3に示す。溶融ジェットが蒸気膜に覆われて落下している様子が確認できる。また、蒸気膜に覆われたジェットの界面から蒸気泡および細かい破片が生成されていることも分かる。この画像から推定できるフラグメント径は約2mmであり、実験後回収したフラグメントの粒度分布の結果と良く一致する。また、実験によって得られた画像の内の連続した二枚の画像を用いてPIV解析を行い、溶融ジェットの分散挙動を検証した結果を図4に示す。その結果より、水中の溶融金属周辺の流動状況が定量評価できる可能性が示された。

3. 3 フラグメント計測実験 ジェットの射出速度が、フラグメント径に与える影響を調べるための実験を行った。実験後回収したフラグメントの画像を、図5に示す。図5中には、得られた固化粒子の粒径分布も示している。ジェットの速度は射出装置内の加圧を変えることによって調節し、実験から得られた画像からジェット速度を算出した。実験条件は、温度が300℃で100gのU-ally78を、温度70℃の水中に射出した。その結果、射出速度が速くなればなるほど、フラグメント径は小さくなる結果が得られた。

4. 既存の分散の式との比較

水ジェット射出実験と溶融金属ジェット射出実験から得られた実験結果を、既存の液-液界面での不安定理論と比較した。比較に用いた液-液界面での不安定挙動を表す式は、式(1)に示すRayleigh-Taylor不安定の理論式、式(2)に示すKelvin-Helmholtz不安定の理論式、式(3)に示す臨界Weber数の理論である^[2]。

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{3\sigma}{(\rho_j - \rho_w)g}} \quad (1),$$

$$\lambda = \frac{2\pi\sigma(\rho_j + \rho_w)}{U^2 \rho_j \rho_w} \quad (2),$$

$$d = \frac{18 \cdot \sigma_w}{\rho_w U^2} \quad We_c = 18 \quad (3)$$

式(1)から式(3)になる計算結果と実験結果を比較したものを図6、7に示す。図6は水ジェット射出実験との比較であり、図7はU-ally78による溶融物ジェット射出実験との比較である。水ジェットの場合、相対速度に依存しないというRayleigh-Taylor不安定理論に定性的に近い値となった。これは水ジェット

の不安定のなかで水と空気との密度比が大きいため二流体間のせん断が支配的ではなく、重力の影響が大きいためではないかと考えられる。また溶融金属ジェットの微粒化の場合、Kelvin-Helmholtz不安定理論にて定量的にも近い値となった。これは、U-ally78と水との密度比が小さいため、重力よりジェットと水の界面での不安定がフラグメント生成の大きく関係しているためと思われる。つまり、二流体の界面での不安定は、二流体の密度比が大きい場合はRayleigh-Taylor不安定理論が支配的であり、逆に二流体の密度比が小さい場合にはKelvin-Helmholtz不安定理論が支配的であると考えられる。これはBürgerら^[5]の提言と整合する結果となっている。

5. 粗混合伝熱モデルによる分散クエンチ計算

以上の実験より、密度比の小さい溶融金属と冷却材において、溶融金属をジェット状に射出した場合、生成するフラグメントの径はKelvin-Helmholtz不安定理論を用いて評価できることがわかった。

そこで、実機条件であるナトリウムプール内にMOX燃料がジェット状に落下した状況において、Kelvin-Helmholtz不安定理論より粒子径を評価した。その結果を図8に示す。図8の結果よりFBR条件の場合、相対速度が4m/sにおいて、フラグメント径は229μmと評価された。これは、R. H. Henry^[6]らによって行われたUO₂を用いた大規模実験の結果ともよく一致する結果となっている。

そこで、Kelvin-Helmholtz不安定理論によって評価された粒子径を入力値として、粗混合領域内での生成した粒子の伝熱クエンチ挙動の評価に当たっては、森山・丸山ら^[4]の粗混合伝熱モデルを用いて試みることにした。このモデルでは、円錐形で水中に注射したジェットが、Saito^[6]らのジェットブレイクアップ長さまで線形に減少し、減少したジェットの質量が、与えられた粒子径で素混合領域にまく沸騰状態で分散すると仮定するものである。粒子温度は、膜沸騰熱伝達を介して計算され、温度変化によって固化割合を計算評価するモデルとなっている。このモデルは、粗混合領域での分散微粒化挙動を最も単純なモデルによって見通しよく取り扱うことが出来ることから、粒子径などのパラメーターがクエンチに与える影響を物理的に見通し良く与えることができるものとする。ここで、膜沸騰熱伝達率に関しては、Liu-Theofanusの式を用いることとした^[7]。

(a) Original picture (b) Binary image (c) PIV result

Fig.4 PIV analysis

Fig.3 Experimental result of molten material jet ejection experiment

Fig.5 Photograph of solidified fragments and its size distribution

Fig. 6 Comparison between existing theories and experimental result of Water-Air system.

Fig. 7 Comparison between existing theories and experimental result of U-alloy78-Water system.

Fig. 8 Fragment diameter estimated by Kelvin-Helmholtz theory

6. FBR 条件での計算

図9に実機 FBR の CDA において想定される条件とその条件で行った計算結果を示す。計算条件は、MOX 燃料温度が 3300K、ナトリウム温度が 668K、初期ジェット径が 55mm、プール深さが 1.0m、ジェット進入速度が 4m/s、生成した粒子径は Kelvin-Helmholtz 不安定理論で評価した 229 μ m としている。また MOX 燃料の投入時間は 2 秒間とした。グラフ上の各線は、冷却材中に投入した溶融燃料の全質量を Total mass、床面を除くプール内に存在する粒子質量を All fragment、ジェットの幹の部分の質量を Jet column、全ての粒子の中で溶融している粒子の質量を Molten fragment と表している。この結果より、本条件下においては、粗混合領域に存在する All fragment のうち Molten fragment 粒子の量が極めて少ないことがわかった。このことより、投入

された溶融 MOX 燃料のほぼ全量がクエンチすることを示すものである。

次に、図9に示した FBR 条件と同一条件において、それぞれ溶融 MOX 燃料温度と冷却材温度ならびに分散粒子径だけパラメータとして変化させて計算を行った。図10が、溶融 MOX 燃料温度を変化させた計算結果。図11が、Na 冷却材温度を変化させた計算結果である。溶融 MOX 燃料温度ならびに冷却材温度は、想定される実機の CDA での条件を包含する範囲内で変化させている。図10ならびに図11は、All fragment ならびに Molten fragment の質量の時間変化を示している。実機で想定される温度範囲においていずれの温度を変化させた場合でも、All fragment ならびに Molten fragment には、大きな変化はなかった。この結果より、MOX 燃料温度と Na 冷却材温度の変化に対する Molten fragment の量への影響は小さく、また、その質量自体も All fragment に対して小さい値となっていることが分かる。次に、図12に粒子径をパラメータとして変えて計算を行った結果を示す。計算条件としては、生成する粒子の径として 0.5mm から 2.0mm の範囲で変化させたが、これは図8に示す相対速度として 1.0m/s 以上の範囲を想定したものである。この結果より、粒子径の変化は Molten fragment に対して、より影響が大きいことがわかる。粒子径が 2mm とした場合の All fragment に対する Molten fragment の量は、図10や図11に比較して大きいことが分かる。このことより、想定される実機条件の範囲内において、全ての粒子の量に対する溶融した粒子の量に対して、MOX 燃料

温度とナトリウム冷却材温度の影響は小さく、粒子径の影響が大きいことが分かった。

Fig. 9 Calculated results for FBR condition

Fig. 10 Effect of fuel temperature on molten fragment mass under FBR condition

Fig. 11 Effect of coolant temperature on molten fragment mass under FBR condition

Fig. 12 Effect of fragment diameters on molten fragment mass under FBR condition

7. 結言

模擬物質を用いた分散クエンチ実験、実機条件を模擬した伝熱解析を行うことによって、以下の結言を得た。ジェットブレイクアップ可視実験では、水ジェット表面の不安定波長や、熔融金属ジェットの分散微粒化挙動を実験画像より定量評価できる可能性が示された。

分散挙動の評価では、密度比が小さい2流体の分散粒子径は、Kelvin-Helmholtz不安定理論で評価できることが分かった。すなわち、FBR条件であるMOX燃料とナトリウム冷却材の密度比は小さいため、その粒子径をKelvin-Helmholtz不安定理論によって評価できることが示唆された。

以上の結果をもとに行った伝熱クエンチ挙動解析結果より、FBR条件ではナトリウムプール内の熔融した粒子の量は、全ての粒子に比べて少ない割合となることがわかった。熔融した粒子の量に対しては、粒子径の影響が最も大きく、逆にMOX燃料温度、ナトリウム冷却材温度による影響は小さいことがわかった。

以上の結果より、FBRのCDAにおけるPAHRにおいては、炉内構造として微粒化を促進する構造とすることが、熔融炉心のクエンチに有効であることが示唆された。

謝辞

本研究を遂行するに当たっては森山清史氏、丸山結氏（日本原子力研究所）に多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Spencer, B.W., et al. "Fragmentation and Quench Behavior of Corium Melt Streams in Water", NUREG/CR-6133, ANL-93/32, 1994.
 - [2] 日本機械学会編, "新編伝熱工学の進展第1巻", 養賢堂, pp.21-29, 1995.
 - [3] Bürger, M. et al., "Breakup of Melt Jets as Pre-Condition for Premixing: Modeling and Experimental Verification", Nuclear Engineering and Design, 155, pp. 215-251, 1995.
 - [4] K. Morioka, Y. Maruyama et al., "A Simple Evaluation Method of the Molten Fuel Amount in a Premixing Region of Fuel-Coolant Interactions", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.39, No.1, pp.53-58, 2002.
 - [5] R. E. Henry et al., "Large-Scale Vapor Explosion", ANS Conference of First Reactor Safety Meeting Program, Beverly Hills, Los Angeles, April, 1974.
 - [6] Saito, M. and Sato K., "Experimental Study on Penetration Behavior of Water Jet in Freon-11 and Liquid Nitrogen", ANS Proceedings of National Heat Transfer Conference, Houston, Texas, Vol.2, pp.173-183, 1998.
 - [7] Liu, C. and Theofanous, T.G., "Film Boiling on Spheres in Single and Two-phase Flow, Part I", ANS Proceedings of National Heat Transfer Conference, Portland, Washington, pp.34-47, 1995.
-