

落下形態と物性値の違いによる溶融金属の破碎挙動

The breakup behavior of molten metals with difference in penetration modes and physical properties

北大院工 面高俊哉 張智剛 杉山憲一郎

Syun-ya OMODAKA Zhi-gang ZHANG Ken-ichiro SUGIYAMA

電中研 西村聡 木下泉

Satosi NISIMURA Izumi KINOSITA

金属燃料高速増殖炉の炉心損傷事故の観点から重要である溶融金属燃料と冷却材ナトリウム (Na) の相互作用に関する知見を得るため、物性値の異なる2種類の金属(銅及びステンレス鋼)をNaプール中に溶融落下させ、その落下形態、瞬時接触界面温度、及び物性値が破碎挙動に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード: 高速増殖炉, 炉心損傷事故, FCI, 落下形態, 瞬時接触界面温度, 物性値

1. 緒言 万一、高速増殖炉炉心において炉心損傷事故が発生した場合、その事故推移は溶融燃料と冷却材であるNaとの相互作用(Fuel Coolant Interaction:以下FCIと呼ぶ)による燃料の分散挙動に大きく影響される。炉心損傷事故時に融点付近で溶融した燃料が炉心外に十分に排出されず、炉心領域で凝固し、流路閉鎖を起こした場合、再臨界に至る可能性がある。一方、FCIによって効率良く分散されれば、事故は終息し炉心の冷却性も確保できる。したがって、再臨界の防止と炉心冷却性の確保という観点から、溶融燃料が、Naとの相互作用によって微細化されて効率良く炉心部から排出されることが炉心損傷事故の事故終息評価上重要である。

この観点からのFCI基礎研究として、板垣らは瞬時接触界面温度が融点以下の条件で5gの銅を単一滴状で溶融落下させ、破碎挙動を検討した^①。平尾らは約50gの銅及びステンレス鋼(SUS304)を連続滴状で溶融落下させ、銅の落下形態の違い及び銅とステンレス鋼の物性値の違いによる破碎挙動の違いを検討した^②。

本研究では溶融銅を前述の研究で得られていない瞬時接触界面温度が融点以上の条件を中心に単一滴状で落下させる実験を行った。また、ステンレス鋼を瞬時接触界面温度が融点以下の条件で単一滴状で落下させる実験を行った。これらの結果をすでに報告されている銅単一滴および、銅およびステンレス鋼の連続滴実験と比較、検討した。併せて銅とステンレス鋼の物性値の違いによる破碎現象の違いについても検討した。

2. 実験 図1に銅実験で用いた実験体系を示す。本実験では溶融した銅と黒鉛が濡れにくい性質を利用して、外径50mm、中心に10.5mmの穴を設けた中空円筒黒鉛に、上面中心から20mm離れた位置より円筒中心底部に向けて斜めに穴をあけた黒鉛をつぼを製作した。このつぼを誘導加熱装置を用いて加熱し、斜めの穴に入れた銅を溶融させた後、栓の役割をしているW-Re熱電対を挿入したAl₂O₃保護管を引き抜くことで溶融銅を単一滴で、アルゴン雰囲気Naプール中に重力落下させた。ステンレス鋼は黒鉛と共晶反応を生じる。このためステンレス鋼実験では、下部に貫通孔がある黒鉛をつぼ内に設置した下部に貫通孔があるAl₂O₃るつぼ内でステンレス鋼を加熱溶融後、Al₂O₃保護管を抜き、Naプールへ自由落下させる方法を用いた。Naプール容器底部には、Na中で凝固した試料を回収するための回収皿を設置した。実験後、凝固物を回収し、粒径分布を求めた。実験条件を表1に示す。

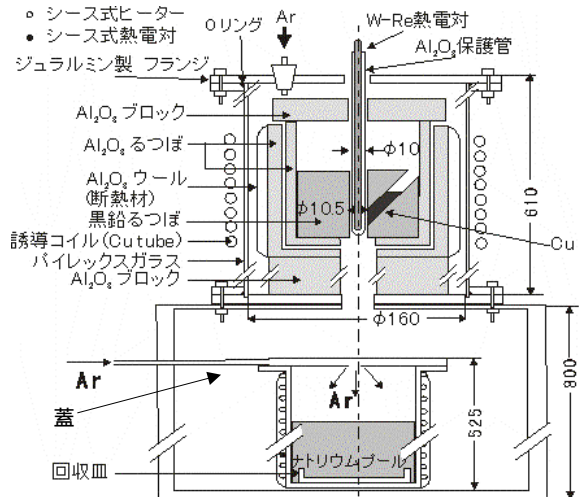


図1 実験装置

表1 実験条件

試料 (融点)	Cu (1084°C)	SUS304 (約1420°C)
落下量m	1~3g	1~5g
初期温度T _h	1237°C ~1697°C	1470°C ~1670°C
ナトリウム温度T _c	303°C ~323°C	202°C ~418°C
瞬時接触界面温度T _i	1049°C ~1331°C	952°C ~1120°C
周囲ウェーバー数We _a	54~86	56~89

3. 結果と考察 比較のため平尾ら^②の連続滴の凝固物の形態について検討した。銅、ステンレス鋼のどちらも溶融落下時は、直径7mm前後の溶融滴が50滴前後で落下しているのが確認されている。この直径から質量を計算すると1滴当り約1gである。瞬時接触界面温度が融点よりも低い銅の実験では、凝固物の形態は図2(a)に示す薄く引き伸ばされたシート状の形態が多数観察され、多いものでは全質量の約7割を占めていた。一方、瞬時接触界面温度が融点よりも高い条件での結果では、細かい粒子状及び、細い枝状の凝固物が確認され、図2(a)の形態は確認されなかった。ステンレス鋼の場合は図2(b)に示すような半球状に変形した凝固物が、瞬時接触界面温度が950以下の実験結果で多数観察され、多いものでは全質量の約8割を占めている。この半球状の形態は銅の実験では全く観察されていない。また、この形態は瞬時接触界面温度が995の結果では観察されず、銅の場合と

同じ細い枝状の凝固物が観察された。

次に本実験の単一銅滴実験の落下挙動及び凝固物の形態について述べる。本実験では完全な単一滴、または大きな1滴の後にごく小さな滴が1~2滴続く落下形態が観察された。これらのごく小さな滴の質量は小さく、粒径分布に影響しないと考えられるので、本研究ではこれらの実験も単一滴で落下と見做した。ステンレス鋼滴の実験においても、基本的に銅と同様である。しかし2つの実験で滴の大きさがほぼ同じで4滴の落下が観察された。この場合Naプール容器上部の蓋を急速に閉め、プール中に全ての滴を落下させることを防いだ。この操作により、実験後回収された凝固物の質量からNaプール中に2滴が落下したと判断した。凝固物の形態は、銅の場合、細い枝状が主に確認された。ステンレス鋼の場合、細い枝状の他、図2(b)の凝固物の内部が取り除かれた半球状殻及びその破片と推定される形態が確認された。

図3に銅の本実験結果と、周囲ウェーバー数のほぼ等しい板垣らの単一滴の結果、および平尾らの連続滴実験の結果を示す。横軸は瞬時接触界面温度 T_i 、縦軸は質量メジアン径 D_m である。本実験結果(○)では、 T_i が融点付近から破砕が効率よく進展して、 T_i が融点以上の全ての結果で D_m が0.5mm以下と、非常に効率よく破砕していることが確認された。平尾らの連続滴の実験結果(△)は、本実験結果とほぼ一致する破砕結果を示している。 T_i が全て融点以下である板垣らの実験結果(□)は、 $995 < T_i < 1045$ の範囲で約2mmから11mmまで D_m が大きく変化していることが確認できる。以上まとめると、 T_i が融点付近から非常に効率のよい破砕が起き始める。また、連続滴及び、単一滴の落下形態の違いにも係わらず、破砕の進展度はほぼ等しいと言える。

図4にステンレス鋼の本実験結果を、平尾らの連続滴実験の結果、及び約25g程度で行われたArmstrongらの実験結果⁽⁴⁾と比較して示した。Armstrongらの実験では落下形態がジェットと連続滴の混合状態であったとしている。また、周囲ウェーバー数についても明らかでない。本実験結果(○)は、 D_m にばらつきが生じている。図3に示すように、板垣らの銅滴実験でも T_i が融点以下の条件で、破砕の進展度に大きな開きが生じる。本実験も銅とステンレス鋼の差異は有るが、同様の事象が生じていると言える。連続滴実験結果(△)

は、 $T_i < 1100$ の領域では、本実験結果とほぼ同じ傾向を示し、 T_i が減少すると共に D_m は急激に大きくなっている。 T_i が950以下の平尾らの連続滴実験では、前述のように直径8mm前後の半球状凝固物が多数得られたために、大きな D_m 値を与えているが、 D_m の比較では本実験の傾向と差があるとは言えない。また、 $T_i=995$ の結果も本実験の傾向と一致している。今後さらにデータを取得すると共に水を用いた可視化実験により連続滴の挙動について検討する。Armstrongらの実験では、 T_i がステンレス鋼の融点である約1420よりも約260低い1150以上で、1.04mm以下の効率の良い破砕が起きている。

銅実験結果では効率の良い破砕が融点付近以上で発生しているのに対して、ステンレス鋼では融点より250以上低い T_i から効率の良い破砕が生じている。銅と比べてステンレス鋼は熱拡散率が低く、熱容量と潜熱が大きいいため、表面凝固を伴う条件下であっても滴内部が液相を維持しやすい。これらの物性値を反映して破砕現象の進展に大きな差が生じていると推測できる。

参考文献

(1)W.Itagaki et al., Proc.ICONE11, Paper No. 36468(2003). (2)平尾他, 日本原子力学会2005年秋の大会 G28. (3)杉山他, 日本原子力学会誌, Vol.42, No.12, pp.1311-1314 (2000) (4)D.R.Armstrong et al., ANL-7890 (1971)

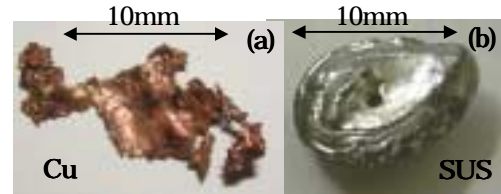


図2 連続滴実験の凝固物

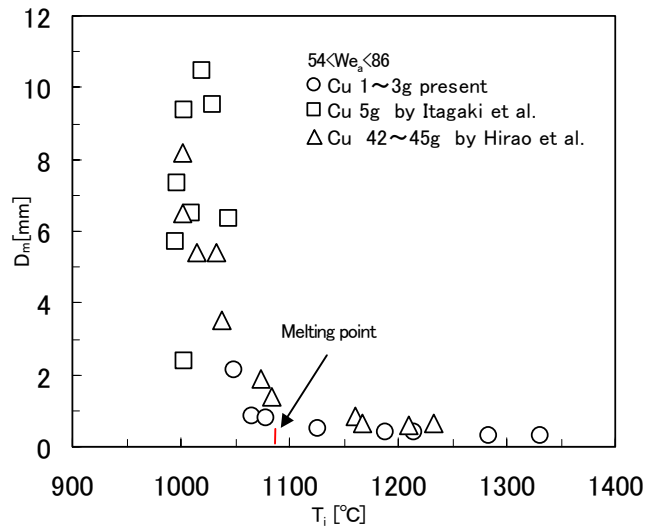


図3 D_m と T_i の関係 (Cu)

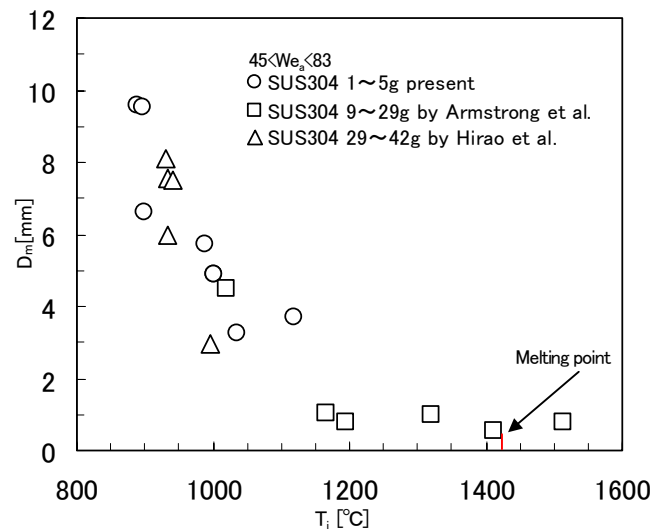


図4 D_m と T_i の関係 (SUS304)