

# 融体ジェット-冷却材相互作用の実験的研究

(平成 8 年11月29日 原稿受付)

|         |   |   |   |   |
|---------|---|---|---|---|
| 設計生産工学科 | 鶴 | 田 | 隆 | 治 |
| 設計生産工学科 | 畑 | 生 | 武 | 人 |
| 設計生産工学科 | 原 | 田 | 孝 | 二 |
| 設計生産工学科 | 増 | 岡 | 隆 | 士 |

## Experimental Study on Thermal Interaction between Melt Jet and Coolant

by Takaharu Tsuruta  
Takehito Hatabu  
Kouji Harada  
Takashi Masuoka

### Abstract

The purpose of this study is to obtain the experimental data concerning self triggering conditions for a thermal interaction between the melt jet and the coolant. Effects of the jet velocity on the explosive thermal interaction have been investigated using Wood's metal and distilled water. The thermal interaction zone was measured for different melt-jet velocities. The results for the low jet velocity show that the self-triggered interactions occur in a well defined zone by two characteristic boundaries. One is expressed as the condition that the instantaneous interface temperature at the time of contact of the melt jet with the cooling water is equal to the homogeneous nucleation temperature. The other is an empirical correlation on the minimum film boiling temperature by Dhir-Purohit. The thermal interaction zone for the larger jet velocities, on the other hand, shows some uniqueness in the region where the interface temperature is higher than the critical temperature of water. From the measured pressure pulse and the visual observation using a high speed video, it is found that the mild interaction occurs in this region.

### 1. はじめに

原子炉の安全性研究を背景に、熔融燃料-冷却材相互作用、いわゆる蒸気爆発の研究が古くから行われている。そのなかで、反応度事故における蒸気爆発現象に関しては、燃料棒破損時の熔融燃料噴出挙動とその後に生じる相互作用との関係を次のように要約している<sup>(1)</sup>。すなわち、①熔融燃料の噴出速度が大きいほど微粒子化が進む。②微粒子化とともに機械的エネルギーへの転換率が高くなり、粒子の体面積平均径に反比例する。③粒子は光沢表面を有する球形であり、噴出直後に形成される。④飛翔距離が制限されるほど微粒子化は抑制される。また、近年行われているシビアアクシデント研究<sup>(2)</sup>においても、軽水炉の熔融炉心が圧力容器を貫通して水中落下する場合や、高速炉の熔融燃料がナトリウム中に噴出する場合などには、熔融炉心

がジェット状に侵入するモードが考えられている。

このような蒸気爆発の発生環境下においては、高温融体の噴出速度が相互作用の発生条件にどのような影響を及ぼすのか、さらには、融体の微粒子化や機械的エネルギー発生メカニズムにどのように関連するのかを解明することが重要である。

そこで本研究では、ノズルから高温融体を噴出することによって融体ジェットと冷却水との相互作用実験を行い、高速度ビデオ撮影による相互作用の観察と発生圧力の測定を通して、融体ジェットのウェーバー数や二流体の温度条件などの初期混合状態と相互作用の自発的トリガリングとの関連性を調べるとともに、蒸気爆発の規模、ならびに微粒子化の程度に及ぼす影響について報告する。

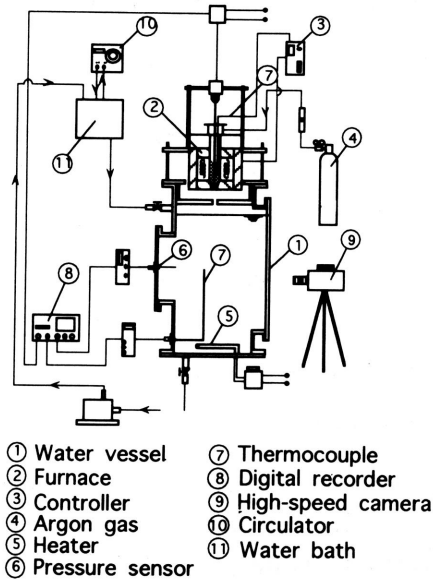


図1 実験装置

## 2. 実験装置および方法

実験装置は、図1に示すように、耐圧実験水槽とその上部に設置される溶融加熱炉から構成される。耐圧実験水槽は、内径240mm、高さ460mmのステンレス製円筒容器であり、側部に発生する圧力波を測定するための半導体圧力センサと現象観察のための観察窓を設置している。溶融加熱炉は、有効加熱高さが60mmの外熱方式電気炉で、その中心部に内径32mmのセラミック製のつぼを設置し、およそ900°Cまで加熱昇温することができる。つぼの下端には直径5mmのノズル孔を設けており、ノズルの開閉はストッパーをソレ

ノイドで上下することにより行う。つぼ内は、加熱昇温中の酸化を防ぐためアルゴンガス雰囲気とし、そのガス圧力を調整することによってノズルからの融体の噴出速度を変えることができる。本研究においては、ノズル内を加圧せず融体を自然流下させる条件と、58.8kPaの加圧を行って流下速度を上げる条件の2通りのケースについて行った。

実験は、融点が約70°Cの低融点合金であるウッズメタル(Bi:50%, Pb:25%, Sn:12.5%, Cd:12.5%)と蒸留水の組み合わせで行った。まず、つぼ内にウッズメタルを入れて密封し、毎分2L程度アルゴンガスを供給しながら所定の温度に加熱昇温する。ウッズメタルの量は、自然流下の場合に200g、流下速度を上げた場合には倍の400gを封入している。加熱昇温の間に、耐圧水槽内に温度調整された恒温水槽からの水を循環しながら下部の補助ヒーターを用いて水温を設定し、実験時には静水条件としている。ノズル先端から水面までの高さは102mmとし、ソレノイドを作動させて融体を噴出し、同時に高速度ビデオにて毎秒500または1000フレームの撮影を行う。圧力波形と温度信号は、10kHzのサンプリング周波数でデジタルレコーダーに記録される。融体ジェットの流れ速度は、アルゴンガスによる加圧を行わないで融体が液柱状に自然落下するモードでは1~2 m/s、58.8kPaの加圧を行った場合には3~3.3m/sであった。実験終了後には、水を容器下部より排出し、微粒子化した試料を回収して、その粒子径分布の測定を行った。使用したふるいのメッシュサイズは、75, 125, 250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7000, 8000  $\mu$ mの11種類であ

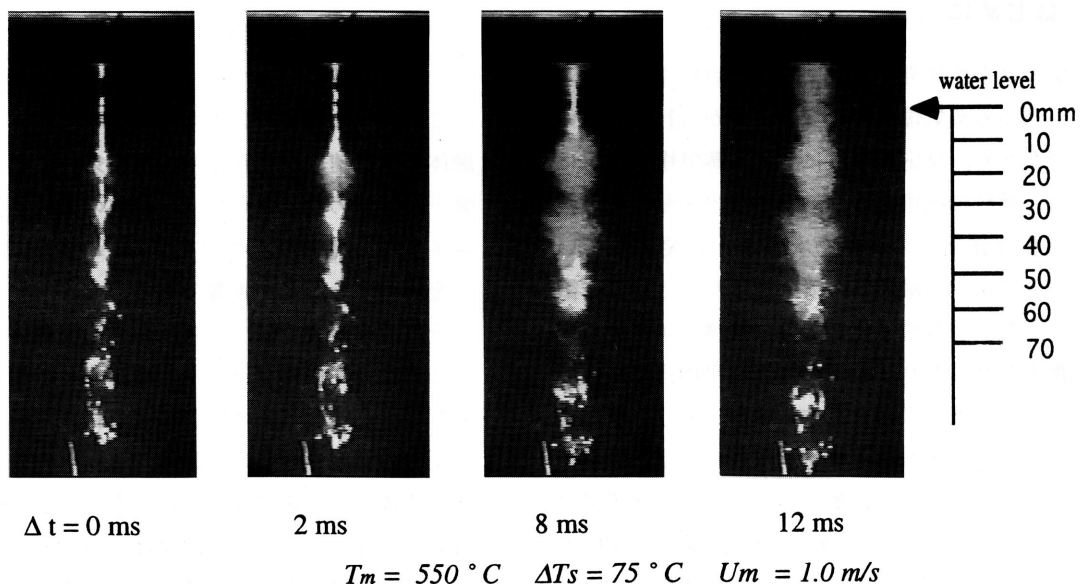


図2 相互作用の高速度ビデオ画像(自由流下)

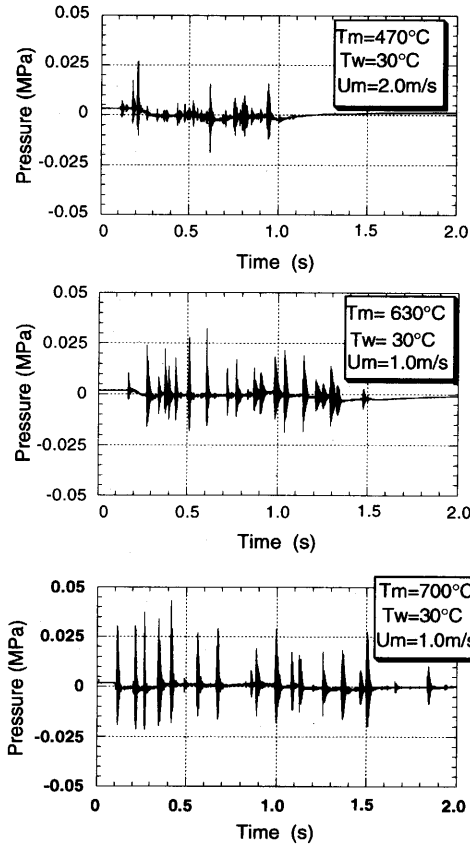


図3 圧力波に及ぼす融体温度の影響 (自由流下)

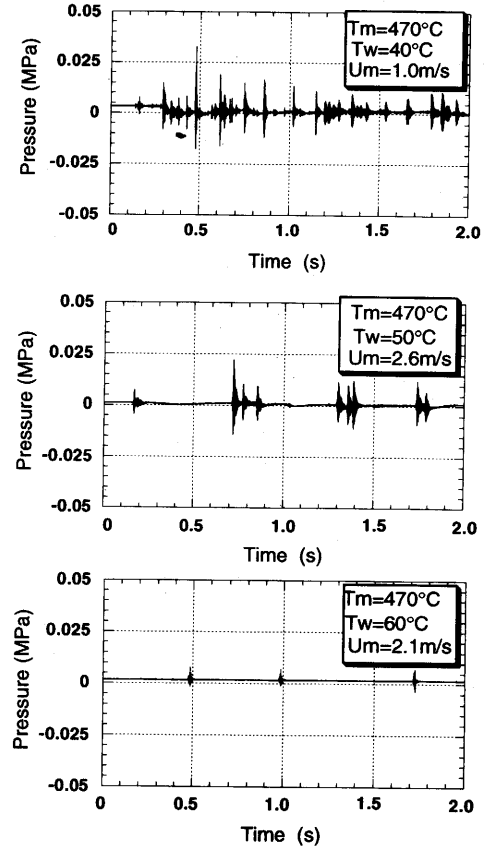


図4 圧力波に及ぼすサブクール度の影響 (自由流下)

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 相互作用領域および相互作用の様子

まず最初に、加圧を行わないで自然流下させた場合の結果から示す。図2は、高速度ビデオ撮影で捉えた映像を示すもので、相互作用発生の前後の様子を見ることができる。融体は、さほど大きな乱れもなく、液柱状に入水しており、気体の巻き込みはみとめられない。入水後にジェットの不安定化によって膨らみ部が形成され、その一つの膨らみから蒸気爆発が発生し、他の膨らみ部や水面直下の液柱部に蒸気爆発が伝播しているのがわかる。ジェットの不安定性が相互作用の発生条件に関与するものと考えられる。

相互作用によって発生する圧力波が、融体の温度、ならびに冷却水のサブクール度によって変わる様子を図3と図4に示す。図3の融体温度による変化をみると、融体の温度上昇とともに発生圧力が大きくなり、相互作用の規模が大きくなっていることがわかる。また、冷却水のサブクール度の影響は、図4にみられるとおり、水温が高くなるに連れて発生圧力が小さくなり、発生頻度も少なくなっている。

図5に、自然流下の実験における相互作用発生の温度条件を相互作用領域図(TIZ)として示す。融体温度は300°Cから700°C、水温は主に20°Cから80°Cの範囲で実験を行っており、図に示す温度はいずれも初期温度を示している。まず、相互作用の発生する下限界は、融体と水との接触界面温度

$$T_i = (T_c + \beta T_m) / (1 + \beta), \quad \beta = \sqrt{(\rho c \lambda)_m / (\rho c \lambda)_c}$$

が大気圧水の均質核生成温度  $T_{HN} = 575\text{K}$  となる条件にあるといえる。一方、高温側の境界には、融体温度の上昇とともに水温が下がる斜め境界のあることがわ

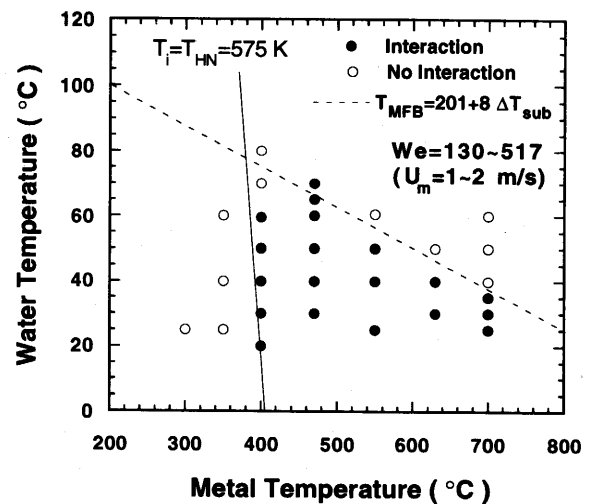


図5 相互作用領域図 (自由流下)

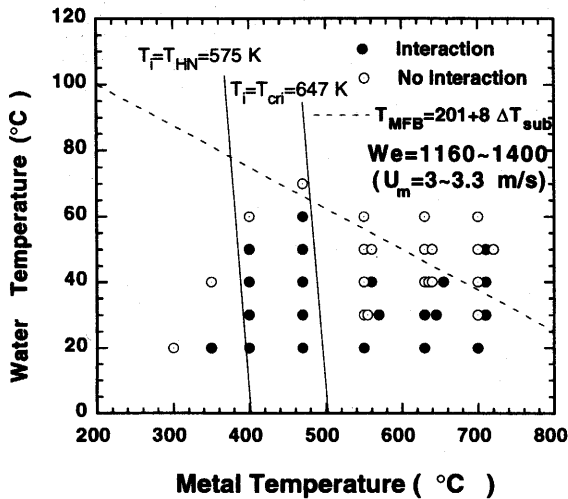


図6 相互作用領域図 (高速流下)

かる。図中に示す斜め境界線は、サブクール度への依存性を考慮した最小膜沸騰温度についての Dhir-Purohit の整理式<sup>(3)</sup>:  $T_{MFB} = 201 + 8\Delta T_{sub}$  (°C) を示したものである。実験結果はこれと非常に良く一致していることから、この斜め境界は最小膜沸騰温度との関連性が強いものと言える。

この斜め境界がジェットの流れによってどのように変化するかということが研究の一つの目的であるが、流速を約 3 m/s に上げて行った結果を図 6 にみれば、図 5 と比較して特に高温領域において顕著な差があり、明確な斜め境界線を引くことができないことがわかる。流速の増大によって蒸気膜の不安定化が進むとすれば、より高温側に斜め境界がシフトするはずであるが、その傾向は見られない。実際の相互作用の発生領域は、接触界面温度が水の臨界温度  $T_{crit} = 647.4$  K となる融体温度を境にして、その特徴が大きく異なっている。このことは、圧力波のデータにもあらわれており、図 7 に示すように、融体温度が高くなって接触界面温度が臨界温度に近づくにしたがって圧力値が小さくなり、これを越える融体温度では再び圧力値が大きくなっている。これらの原因を明確にするには至っていないが、融体の流下速度の増加が冷却性能を増すことや、融体まわりの蒸気膜内の流れが浮力に基づく上昇流から融体の流下による下降流へ変化することなどが要因として挙げられる。しかしながら、より詳細な議論が必要であり、ジェットの乱れと蒸気膜の挙動との関連性を検討するとともに、あわせて温度条件を加味した検討を行わなければならないと考えている。

図 8 に高速噴出時 ( $U_m = 3 \sim 3.3$  m/s) における相互作用の様子を代表的な映像を示す。高速噴出の場合も

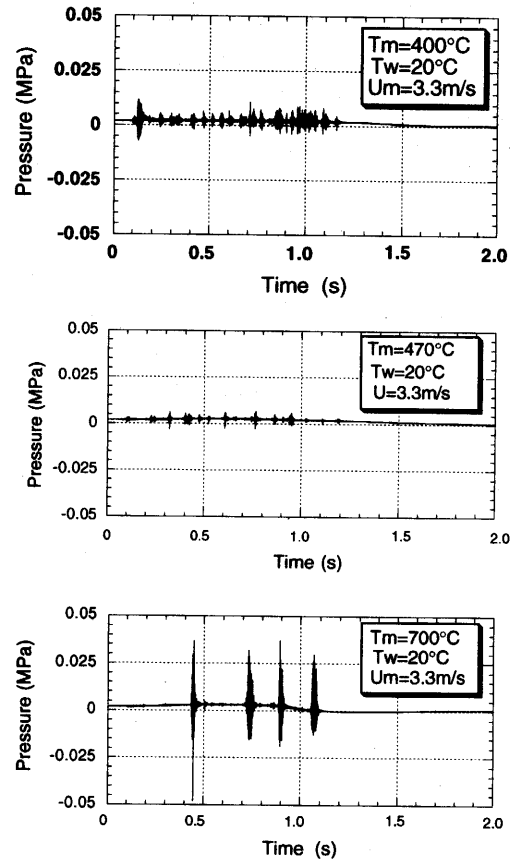
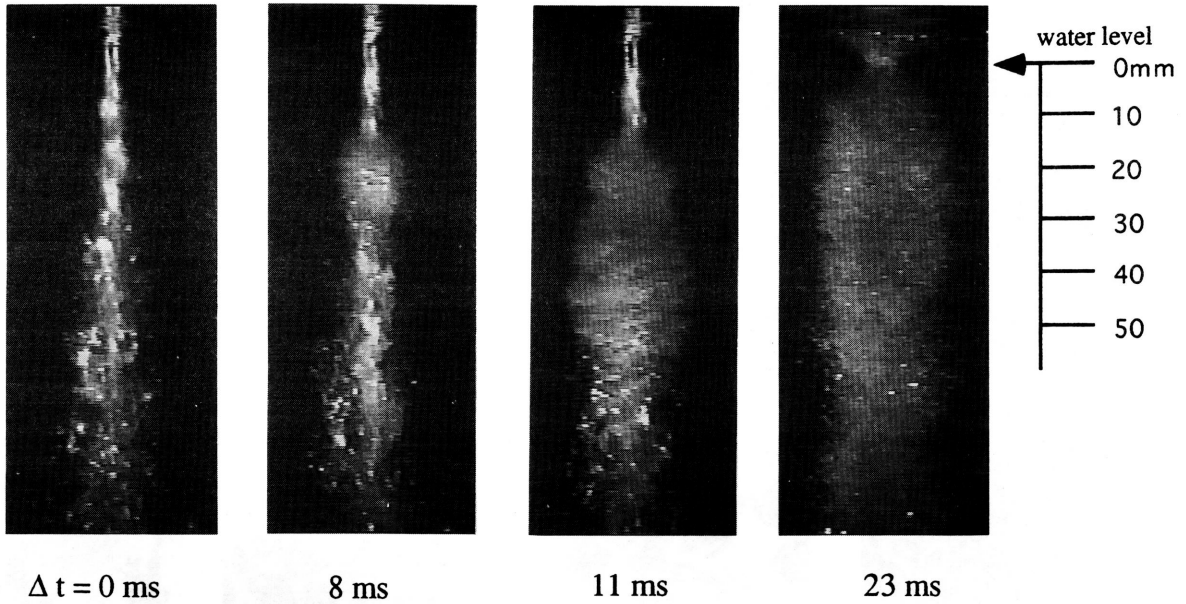


図7 圧力波に及ぼす融体温度の影響 (高速流下)

溶融金属は液柱状に入水しているが、液柱は自由落下の時に比べ多少太くなっており、幾分乱れの程度が大きくなっていることがわかる。

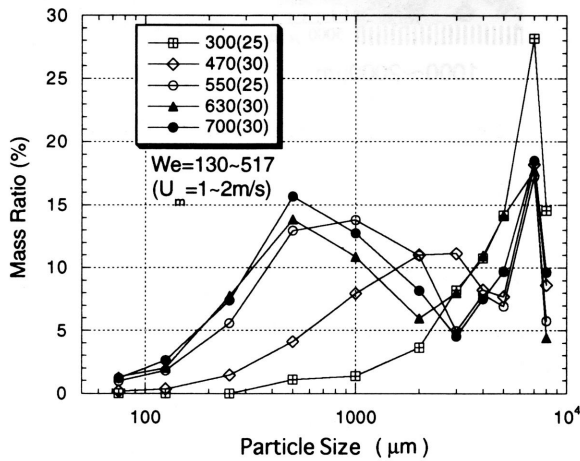
### 3.2 粒子径分布

実験後に微粒化した試料を回収し、粒径分布を取った結果を図 9 に示す。(a) は自然流下の場合、(b) は噴出速度を高めたときの結果であり、縦軸に質量割合、横軸に粒子径を取っている。回収率は 95% 以上であった。なお、冷却水温度の高いところでは、微粒子の分別が不可能であったため、ここでは冷却水温度の低い実験での結果を示している。(a) の自然流下条件において、融体温度 300°C、水温 25°C の粒径分布は、相互作用の生じなかった時の結果で、質量割合のピーク値は粒径が約 7 mm の所にある。これは、相互作用を起こすことなく冷却・凝固した金属片の大きさに対応しており、相互作用の生じた実験においてもこの粒径近傍に分布のピークがみられる。一方、相互作用が発生すると粒径分布にもう一つ別のピークが現れている。これは、相互作用による微粒子化をあらわしており、融体温度が高くなるほどそのピークは小径粒子域に移動している。融体温度が高いほど相互作用の規模が大きかったため、微粒子化も進んだ結果となっている。(b) の高速

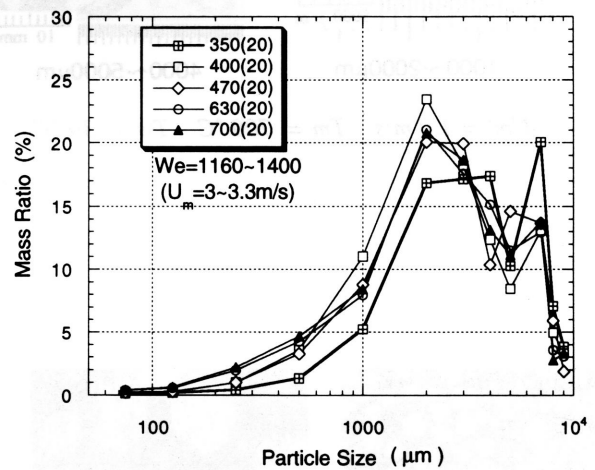


$T_m = 630\text{ }^\circ\text{C}$     $\Delta T_s = 80\text{ }^\circ\text{C}$     $U_m = 3.3\text{ m/s}$

図8 相互作用の高速度ビデオ画像 (高速流下)



(a)  $U_m = 1\sim 2\text{ m/s}$



(b)  $U_m = 3\sim 3.3\text{ m/s}$

図9 粒子径分布

噴出時においても二つのピークがみられるが、相互作用による微粒子化はあまり進んでおらず、融体温度による差も小さなものとなっている。

回収試料の観察写真の例を図10に示す。直径1 mm以下の微小粒子が相互作用によって形成されたものであり、分裂後に固化するため、光沢のある球形粒子となっているのがわかる。また、75 $\mu\text{m}$ 以下の粒子に自然流下の方がより細かい粒子が数多くみられ、微粒子化が進んでいることがうかがえる。なお、2 mm以上の粒子では、自然流下の場合には粒子形状が比較的丸くなっているのに対し、高速噴出では粒子が鋭利な形状になっている。これは、溶融液柱の分裂にジェットの

速度の影響があらわれた結果と思われる。

なお、図11に球形となった微小粒子の断面写真を示すが、ウラン燃料にみられたような中空粒子とはなっていないことがわかる。

#### 4. まとめ

融体ジェット-冷却材相互作用を実験的に調べ、相互作用の発生する温度領域の検討を行った。その主な結果は、以下の通りである。

(1)相互作用領域の下限界は、接触界面温度が水の均質核生成温度となる条件に近い。高温側の境界は、最小膜沸騰温度との関連性が強い。

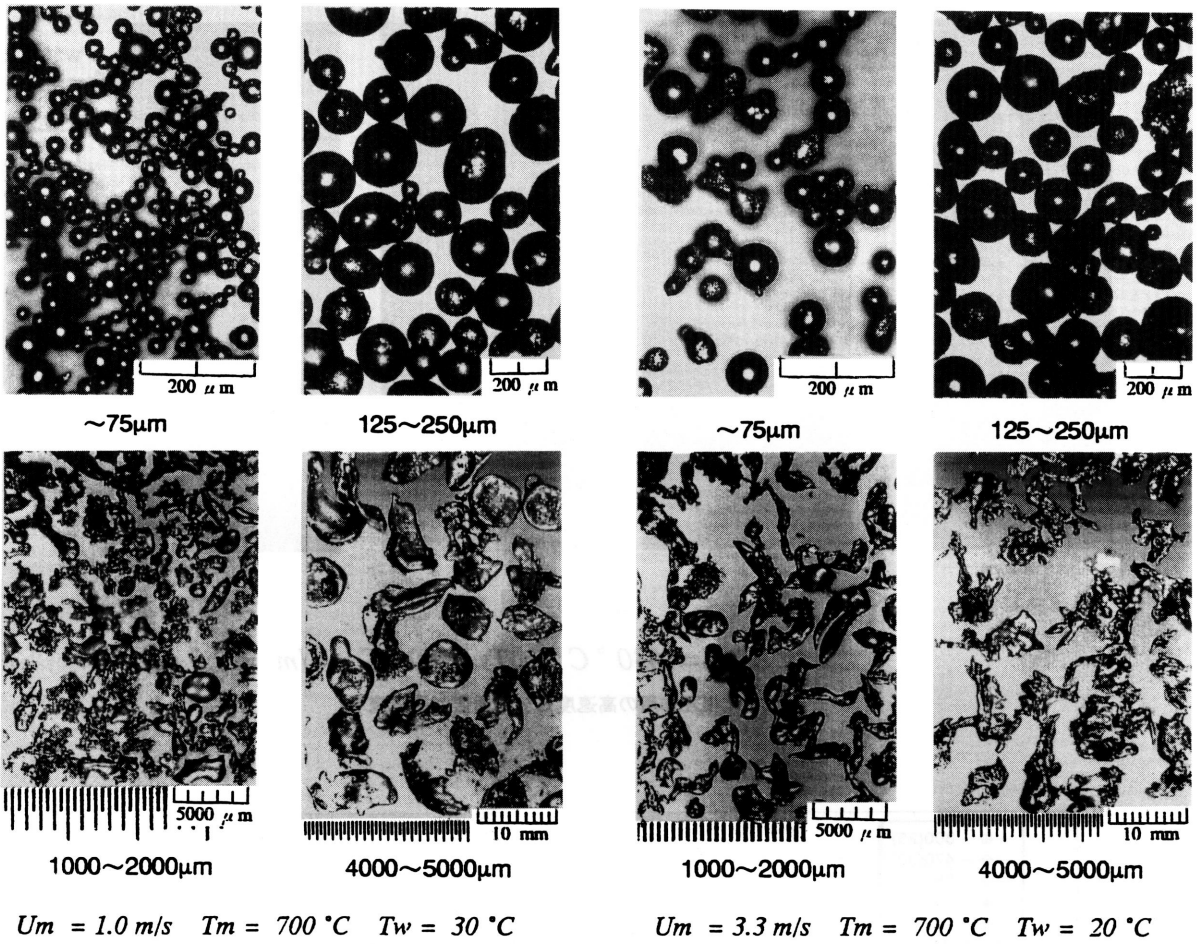


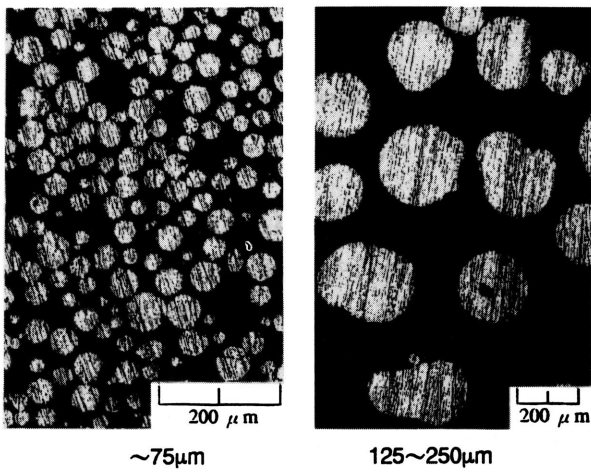
図10 回収粒子の形態

(2)融体の流下速度が増すと、高温側の斜め境界が明確でなくなり、接触界面温度が水の臨界温度となる条件を境に、異なる挙動を示す。

最後に、本研究は文部省科学研究費重点領域研究「蒸気爆発」(No.05246208,06237212)の援助を得たこと、および本学機器分析センターのハイスピードビデオを使用して実施したものであることを記し、感謝の意を表す。

参考文献

- (1) Tsuruta, T. et al., J. of Nucl. Sci. & Tech. 22-9 (1985)
- (2) 森山・他4名, JAERI-Review 94-010 (1994)
- (3) Dhir, V. K. and Purohit, G. P., Nucl. Engng Des., 47-1 (1978)



$U_m = 1.0 \text{ m/s}$     $T_m = 700 \text{ }^\circ\text{C}$     $T_w = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

図11 微小粒子の断面顕微鏡写真