

JAERI-Tech  
99-042



JP9950399



溶融炉心の原子炉下部ヘッド内堆積挙動に関する  
熱水力的基礎実験

1999年5月

柴本泰照・中村秀夫・安濃田良成・久木田豊\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

---

編集兼発行 日本原子力研究所

溶融炉心の原子炉下部ヘッド内堆積挙動に関する熱水力的基礎実験

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部

柴本 泰照・中村 秀夫・安濃田良成・久木田 豊\*

(1999年4月7日受理)

シビアアクシデント時の原子炉圧力容器下部ヘッドにおける溶融燃料/冷却材相互作用 (molten fuel and coolant interactions, MFCIs) に関連して、低融点鉛-ビスマス合金を模擬溶融燃料として用いた模擬基礎実験を行った。特に、溶融燃料の落下中および落下後の堆積挙動に注目し、複雑な固-液-気混相挙動を中性子ラジオグラフィ (neutron radiography, NRG) を用いて可視化した。また、固化を伴う溶融物の基本的な反応を明らかにするため、溶融物単相の落下実験も行った。これら NRG 実験の検証・補完のため、1). 耐熱ガラス容器を用いた流動の直接可視化観察実験、および、2). 赤外線ビデオカメラを用いた容器外表面における温度分布の測定も併せて行った。

本レポートは、これらの実験方法と観察結果をまとめたものである。

Fundamental Experiments on Accumulation Behavior of  
Molten Fuel in a Pressure Vessel Lower Head

Yasuteru SIBAMOTO, Hideo NAKAMURA,  
Yoshinari ANODA and Yutaka KUKITA \*

Department of Reactor Safety Research  
Nuclear Safety Research Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 7, 1999)

The molten fuel and coolant interactions (MFCIs) in a reactor vessel lower head during a severe accident was simulated using a small-scale experimental facility. Low temperature Pb-Bi eutectic alloy was used as simulant of the melt and was dropped into a small thin vessel. The complicated solid-liquid-gas multi-phase behavior was visualized by using neutron radiography (NRG). Single-phase melt dropping experiment was also performed to clarify the basic response of the melt including solidification. To verify the NRG observations, the two types of visualization experiments were performed; 1) direct visualization using a test section with glass-made side-walls and 2) temperature visualization for the metal test sections using an infrared light camera.

This report describes these experimental procedure and summarizes the results.

Keywords: Neutron Radiography, Flow Visualization, Tracers, Severe Accident, Lower Head, Liquid Metal, MFCIs

---

\* Nagoya University

## 目 次

1. 背景.....	1
2. 実験の目的およびアプローチ.....	3
3. 実験.....	4
3.1. NRG 実験.....	4
3.1.1. 実験装置と撮像システム.....	4
3.1.2. 実験手順.....	6
3.2. ガラス容器実験.....	7
3.3. TVS 実験.....	8
4. 実験結果.....	9
4.1. NRG 実験.....	9
4.1.1. 水／熔融金属相互作用実験.....	9
4.1.2. 熔融金属単相実験.....	10
4.2. ガラス容器実験.....	11
4.3. TVS 実験.....	13
5. まとめと課題.....	15
謝辞.....	17
参考文献.....	18
付録 A-1. 熱的スケーリング解析.....	36
A-1.1. 過渡変化の計算.....	37
A-1.2. 半円境界での熱伝達関連式.....	39
A-1.3. 熱損失計算.....	39
A-1.4. 記号表.....	40

## Contents

1. Background.....	1
2. Objectives and Experimental Approach .....	3
3. Experiment.....	4
3.1. NRG Experiment.....	4
3.1.1. Experimental Apparatus and Imaging System .....	4
3.1.2. Experimental Procedure.....	6
3.2. Experiment using Glass Wall Test Section.....	7
3.3. Experiment using Thermal Video System.....	8
4. Experimental Results .....	9
4.1. NRG Experiment.....	9
4.1.1. MFCIs Tests .....	9
4.1.2. Single-phase Tests .....	10
4.2. Experiment using Glass Wall Test Section.....	11
4.3. Experiment using Thermal Video System.....	13
5. Conclusions and Future Needs.....	15
Acknowledgments.....	17
Reference.....	18
Appendix A-1. Scaling Analysis .....	36
A-1.1. Transient State Calculations.....	37
A-1.2. Heat Transfer Correlations with Semicircular Lower Boundaries.....	39
A-1.3. Heat Loss Calculations.....	39
A-1.4. Nomenclature.....	40

## 1. 背景

TMI-2 事故時[18]に原子炉圧力容器の下部ヘッドが健全に維持された理由の一つとして、熔融燃料と下部ヘッド内壁間の狭隘流路形成と冷却材の熱伝達によるデブリ冷却 (In-vessel cooling) が提案されている。本研究はその様な冷却機構の成立条件に関わる、熔融燃料/冷却材相互作用 (molten fuel and coolant interactions, MFCIs) やデブリの堆積・固化挙動を含む熱水力現象につき、小型試験装置を用いて観察することを目的とする。

Henry ら[1]は、下部ヘッドに落下・固化した熔融燃料の冷却メカニズムについて以下の様に推定した。Fig. 1 に示す様に、熔融燃料が落下直後は上面で冷却材と接しながら自然対流する。やがて、上面に固化したクラストが形成されると、堆積物 (デブリ) の重量分布や固化時の体積収縮等によってクラストにひび割れが生じ、それに沿って冷却材が浸入する。デブリ固化後には、デブリ内部にひび割れが行き渡ると共に下部ヘッド壁面との間に狭隘流路が形成され (Fig. 2)、それら微小流路に侵入した冷却材による冷却効果のため、原子炉圧力容器 (reactor pressure vessel, RPV) の健全性が保たれたとしている。狭隘流路の形成については、RPV の内圧とデブリの重さによって高温に過熱された下部プレナムが延び (クリープ) を生じたと主張している。冷却水流入の前提としては、水中に高温デブリを投入した際、デブリは下部容器に固着しなかったという実験事実を挙げている[2]。これは、熔融燃料が圧力容器に接触した際、壁面クレビスに捉えられた水の急激な沸騰で押し上げられるためとしている。最近これらの実験的検証として、ALPHA 計画[19]や LAVA 計画[20]での超音波を用いた直接測定により、模擬熔融炉心 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) と半球容器壁の間に 1~2mm 以下程度の狭間隙が局所的に存在することが報告されている。

熔融燃料落下後の MFCIs については上記のほか、下部ヘッドを模擬した半球/半円型容器内での自然対流熱伝達に関する様々な研究がなされており、それらは主に Rayleigh 数によって熱伝達特性をまとめた実験整理式を提案している[3]。また流動の可視化においては、Jahn ら[10]はスライス状半円容器内での発熱流体 (水) の対流に伴う低速の流動を温度干渉縞による可視化写真を示している。最近では、半円断面容器内の傾きを考慮した密閉容器内自然対流について、実験とその相関式を報告した例や[16]、COPO 施設を用いた一連の実験では、内部発熱を模擬した作動流体 ( $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{ZnSO}_4$ ) により高 Ra 数下での熱流束分布データが提供され、実験相関式の開発が行われている[21]。

しかしながら、蒸気発生を伴って激しい流動となる MFCIs については、熔融燃料のような高温融体デブリの堆積挙動をはじめ、研究例は少ない。これは、MFCIs の結果激しい蒸気発生を伴う水・水蒸気・デブリ (固化及び融体) の複雑な 3 相流動が生じ、従来の可視光を用いた現象観察では大部分が微細な蒸気泡に隠されて観察が

困難で、現象の物理的イメージの構築すら充分行えないという、大きな実験上の困難があると思われる。三島らはこれらの問題点解決のため、中性子ラジオグラフィを用いた MFCIs の可視化実験を行っており、蒸気爆発の粗過程・物理モデル構築の研究に応用している[22][23]。

この様な背景を基にして、本研究は特に、冷却材中に落下したメルトの堆積・固化挙動についての可視化を模擬体系で行い、関与する熱水力挙動の探索と共に、現象把握を試みるものである。



## 2. 実験の目的およびアプローチ

本研究の目的は、

1. 落下溶融炉心の圧力容器内部冷却 (In-vessel cooling) メカニズムの解明に不可欠な、冷却材中での溶融炉心の堆積挙動と割れ等の固化後のデブリの状態を探るため、模擬体系を用いて大気圧下小型実験を行い、流動の可視化を中心に現象の観察を行う、および、
2. 外部冷却 (Ex-vessel cooling) の有効性を検証する、

ことである。このため、以下の様なアプローチで研究を行う。

実験では、水と溶融金属の流動や固化挙動、および溶融金属から周辺への熱移動挙動につき、定量的で相互に対応した観察・計測が必要である。そこで、MFCIsの結果生じる現象を Pb-Bi 合金と水の相互作用で模擬し、模擬圧力容器にスライス状半円形試験容器を用いて、生じる 2 次元的现象を中性子ラジオグラフィ (neutron radiography, NRG) [4][17] を用いて可視化観察する。さらに、NRG 可視化観察と同一の実験条件で、容器壁内外の温度分布の経時変化を熱電対や赤外線放射温度計 (Thermal Video System ; TVS) を用いて計測し、流動に対応した熱移動に関するデータを得る。また、NRG 実験での可視流動観察の検証のため、一对の側壁を透明な耐熱ガラスとした試験容器での可視化実験を行う。また、多次元流動数値解析コードを用いて上記の 2 次元的现象の結果を検証するとともに、3 次元的现象および実機現象への外挿模擬を行う。

熱移動挙動は実験装置の形状や溶融金属の物性等に大きく依存するため、装置の熱伝導や、Fig. 3 で示される溶融金属から下部ヘッドへの熱伝達については、溶融金属単体の落下挙動試験での温度分布計測を基に解析的に求める。In-vessel/Ex-vessel cooling を模擬する水/液体金属相互作用の実験では、沸騰熱伝達による熱移動量も考察する。

本レポートは、以上のアプローチに添った実験を中心とした研究のうち、これまでに実施した、主に NRG を用いた流動観察実験の結果をまとめる (第 3、4 章)。また、実機への模擬性を検証するため、熱的なスケーリングに関する考察を行った (付録)。

### 3. 実験

実験では、PWRの下部ヘッドに見立てた小型の2次元扁平容器に低融点の溶融合金を落下させ、生じる熱流動挙動を可視化観察した。計測パラメータおよび可視化方法に応じて、NRG可視化実験、ガラス容器実験、表面温度分布可視化実験の主に3種類の実験を行った。以下この順に、実験装置および実験手順をまとめる。

#### 3.1. NRG実験

##### 3.1.1. 実験装置と撮像システム

中性子ラジオグラフィ (neutron radiography, NRG) は、物質による中性子吸収特性の差を利用した放射線透過法の一つであり、X線ラジオグラフィ法とは相補的な情報が得られる。NRGに用いられる熱中性子は、水素原子による減弱が顕著である一方、多くの金属は透過しやすい特徴を持つため、金属管内の混層流や液体金属の流動などの可視化・計測に用いられてきている[4][5]。今回の実験では日本原子力研究所のJRR-3Mに設置されている熱中性子ラジオグラフィ装置 (TNRF、熱中性子束  $10^8$  n/cm<sup>2</sup>/s) を用いて、金属管内での水と溶融金属の大気圧下での相互作用を観察した。流動における水・水蒸気・金属の各流動成分の中性子吸収特性が異なるため、NRG画像にはそれに対応した濃淡が生じる。本実験では、実験後の画像処理によって、得られたNRG画像中の水・水蒸気・金属の各流動成分を分離、観察し、各々の動きを把握することを目的としている。

実験装置及び試験容器の概略図を各々Fig. 4、Fig. 5に示す。試験容器はステンレス (SUS-304) 製で、2次元スライス形状になっている。容器の大きさは、JRR3/TNRFの撮像可能領域 (約 250 x 250 mm) 内に全体を納めるため、圧力容器を模擬した半円形の部分の半径を 85 mm とした。TMI 炉 (下部ヘッド半径 2.20m) に対する形状縮尺は 1/26 である。半円壁の厚さは、炉の下部ヘッド壁厚を同縮尺比で単純に比例させ、6 mm とした。試験容器は、この半円壁で圧力容器の内部と外部に分割し、両空間で冷却材を独立して扱える様になっている。今後、内側の冷却水を内部冷却水、外側を外部冷却水と呼ぶ。容器の流路厚さは、水による中性子の減衰率から 10 mm とした。容器のステンレス製側壁は熱伝達によって熱流動現象に影響を及ぼすほか、中性子散乱の増加等で NRG 画像に悪影響を与えるため、薄いほど好ましいが、溶融金属の重量で変形しない強度が必要なので、厚さ 0.5 mm または 1.0 mm のステンレス薄板を使用した。試験容器は高温に昇温するため、溶接構造としたが、ステンレス薄板の接合は、大型オーブンをを用いた特殊接合を行った (株) ツクバリカセイキ製)。試験容器は

多数製作し、NRG 観察後もそのまま保管した。

実験では、低融点金属を試験容器上方のメルトポットで熔融し、内径 6 mm の落下ノズルを通して試験容器に落下させる。落下ノズルは二重円筒構造で、外側に冷却水を通し、冷却で固化した金属が栓を形成する構造とした。これは、動的なシャッターを用いた場合に試験容器が振動して NRG 画像がズレルことを避けるためである。溶融合金の落下は、この冷却水を停止し、二重円筒のさらに外側に巻き付けたヒータ (180 W) で固化栓を加熱・融解して行った。模擬デブリには低融点合金である鉛-ビスマス合金 (44.5 Pb - 55.5 Bi wt %, eutectic) を用いた。温度 500 °C における物性値 [12] を **Table 1** に示す。本合金は共晶の為、熔融と固化が同一温度 (~310 °C) で生じ、ヒステリシスが無い。融点は大気圧下での水の沸点より高く、固化後まで発生水蒸気の流動の影響を捕らえることができる。

鉛-ビスマス合金は熱中性子の透過性が高く、NRG 画像では透明に近い為、水中では水に対して高コントラストの NRG 画像が得られる。ところが、同時に発生する水蒸気や落下時に巻き込む空気も NRG 画像では透明に近いので、落下後の合金との判別は難しく、また、流速分布の計測を NRG 可視化観察で行うためにも以下の工夫が必要であった。つまり、Pb-Bi メルト中に、熱中性子の吸収率の大きいカドミウムを含む金-カドミウム合金 (AuCd<sub>3</sub>) をトレーサとして使用したことである。本合金は比重が 10.73 (実測、室温) で、鉛-ビスマス合金の比重 10.05 (500 °C) に近い。原子量は Au = 196.97、Cd = 112.41 で、成分は 63.13 wt% Cd in Au となるが、実験中に生じる加熱膨張の影響を考慮して、成分比の若干異なるもの 2 種類 (1 : 63.13 wt% Cd in Au (比重 10.77、室温)、1 : 65 wt% Cd in Au (比重 10.44、室温)) を用意した。トレーサは酸化皮膜に覆われると鉛-ビスマス合金から分離してしまうため、実験に先立って、ハンダ用のフラックス (還元材) を用いて鉛-ビスマス合金への濡れ性を持たせた状態で混入させ [5]、重量を計量したインゴットとして準備した。

金-カドミウム合金の二相状態図 (binary diagram) を **Fig. 6** に示す [14]。純粋な金属間化合物の場合、AuCd<sub>3</sub> の融点は 500 °C 付近 (e 相) であるが、Cd の組成が少しでも増加すると、固相線が 500 °C から 309 °C の共晶線まで急激に低下する。65 wt% Cd in Au (比重 10.44) の場合は、純粋な金属間化合物の組成より Cd の割合が少し多いため、融点が約 300 ~ 500 °C の幅を持った状態となる。

NRG の計測に用いた撮像システムを **Fig. 7** に示す。今回の様な高速流動の撮影には高速ビデオカメラが必要であるが、一般に高速度撮影では 1 フレームあたりの撮像時間が短いため、被写体を高輝度に照明する必要がある。ところが、試験容器を透過した熱中性子ビームによってイメージコンバータが生じる発光輝度は低く、得られる NRG 画像は月明かり程度の明るさしかない。この様な発光体の撮影では、受光するフォトンを増幅させる必要がある。そのため、光電子増倍器である micro channel plate (MCP) を内蔵したゲートタイプのイメージインテンシファイア (I.I.) をビデオカメラの撮像素子 (CCD) の前に設置して高速度撮像を行った。本システムでは、I.I. をストロボ同期出力信号に同期させ、1 フレームに必要な時間での動作 (ゲート開)

及び光電子像倍率（ゲイン）の組み合わせを調整することでブレの少ない画像データを記録できる。

高速ビデオカメラには nac HSV-1000 または Photoron fastcam ultima、I.I.には浜松ホトニクス社の C4274 (Gate type, SingleMCP type) を使用した。録画速度は 500 frames/s、I.I.のゲート時間を 1 msec とし、nac HSV-1000 の場合、カメラのメカニカルシャッターは開放にした。レンズには 105 mm (F1.8) 望遠レンズ (Nikon Micro-Nikkor) を絞り開放で用いた。撮像システムの主な仕様を **Table 2** にまとめる。

### 3.1.2. 実験手順

実験は、以下の様な手順で行った。

- (1) 試験装置の組み立てと JRR-3M TNRF への設置
- (2) 試験装置への試験容器の組み込み
- (3) メルトポットに鉛-ビスマス合金を投入
- (4) 暗電流及び NRG 画像シェーディング補正用の空容器画像データを記録
- (5) 落下ノズルを冷却水で冷却
- (6) メルトポットを昇温し、合金を熔融
- (7) 試験容器内の半円形容器外部に温水を外部注水し、試験容器を昇温
- (8) 半円形容器内部に温水を内部注水し、温度変化及び画像データの記録を開始
- (9) 熔融金属落下準備（ノズル冷却水を停止し、ヒータ入力）
- (10) メタル落下時+落下後の画像データの記録
- (11) 放射化した試験装置の冷却
- (12) 試験装置から試験容器を外し、TNRF 外へ搬出
- (13) 試験装置からメルトポットとノズルを外して掃除

### 実験での留意点

試験容器が交換可能な構造なので、試験中の作業は主に (1)→ (13)→ (2)→ (13)・・・という流れで行った。

TNRF 照射室内は人ひとり入るのがやっとの狭さなので、(1)では試験容器の交換等の作業に思いのほか手間がかかった。実験によって、容器内の雰囲気や冷却水温度をモニタするため、3~4本の熱電対を設置したものがある。

(4)では動画撮影以前の静止状態で輝度分布の積分平均画像を得ることが目的で、256画像程度（撮影時間は10秒）で十分である。

(5),(6)では、落下ノズル部で鉛-ビスマス合金を固化させ、メルトポット内で熔融する合金を固化栓によりせき止める。このときの固化状況は、ノズル内面の清浄度に依存した。内面の不純物が十分に除去された場合の固化状況は良好だが、掃除が不十

分の場合、不慮の落下が生じることがあった。また、トレーサ ( $\text{AuCd}_3$ ) をあらかじめ混入させた鉛-ビスマス合金を溶融すると、Au-Cd合金が完全な金属間化合物を形成している場合は問題ないが、Cdが、その比よりも多少でも多く混合されている場合は鉛-ビスマス合金内に溶け出してしまふ。Cdに対する熱中性子の質量減弱係数は水の約3.8倍 ( $\text{Cd} = 13.16 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $\text{H}_2\text{O} = 3.47 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) もあることから、NRG画像での鉛-ビスマス合金は全体が黒くなり、内部の流動が観察できなくなってしまう。

(7)では側面からの熱損失を補償するため、側面にドライヤー (1 kW、吐出風最高温度 480 °C) の熱風をあてた場合があった。

(8)では、テフロン製の耐熱チューブ (内径 8 mm) を介して試験容器に注水したが、チューブの長さが 5 ~ 6m と長いことや、試験容器全体の熱容量の為、沸騰水を 100 cc ほど入れても、30 °C 程度に大きく温度低下した。初期状態で容器内の冷却水を高温に保つためには、ドライヤーなどの外部ヒーターで加熱する必要がある。一方外部冷却水は、装置の構造上、空気抜きが非常に困難で、左右で偏ってしまいなかなかうまくいかなかった。

(9)では、落下開始までの時間が、ノズル内での鉛-ビスマス合金の固化状態に依存して、数 10 秒~2分と大きく変化した。ノズルの冷却/加熱の均一化を図るため、ノズルの材質をステンレスから熱伝導率の大きい銅に変更したが、結果は大差ないのであった。

1 run 終了後の (11)では、10 分程の照射で数時間の冷却が必要だった。銅を主要な材質とする電線など、放射化後の半減期の長い材料が中性子ビーム内に位置しない様にする事、さらに、鉛や Cd の板で遮蔽を行って放射化する部分を最小に押さえる工夫が冷却時間の短縮に有効であった。

### 3.2. ガラス容器実験

ここでは、Fig. 5 の試験容器のステンレス薄板でできた側面壁を耐熱性ガラス (バイコール) とした試験容器 (Fig. 8) を新たに製作し、可視光による直接可視化実験を行うとともに、NRG 観察で得られた流動観察の検証を試みた。以下、これを NRG 実験に対して、ガラス容器実験と呼ぶ。

側壁に用いたバイコールガラスは温度差約 1000 K の高耐熱衝撃性を持つ。ここでは、厚さ 5 又は 10 mm のものを用いた。ガラスは熱容量が大きいため、側面からの熱損失を補償すべく高温ドライヤーで熱しながら行った。試験容器内の冷却水と落下溶融合金は NRG 実験とほぼ同一の条件とし、流動の観察も NRG に用いたものと同じ高速ビデオカメラで行った。ただし、有効なトレーサが無いため、溶融合金の内部流動は観察困難である。なおこの実験は、実験終了後にガラス側板を外して試験容器を分解できるため、合金の固化状況を詳しく観察した。

### 3.3. TVS 実験

本実験では、容器外表面の 2 次元の温度分布を、日本 Avionics 社の Thermal Video System (TVS-8000 および TVS-2000) を用いて熱画像データとして計測し、溶融合金落下時の温度変化を求めた。試験容器は NRG 実験と同じものを用いた。以下、この実験を TVS 実験と呼ぶ。

TVS は、2 次元イメージレイの撮像素子を有する赤外線カメラとイメージプロセッサから構成され、物体表面から放射される赤外線エネルギーを検知して物体表面の温度分布を 50 フレーム/秒で記録・表示するものである。このとき、計測対象となる物体の放射率の値の設定に依存して計測結果は大きく変化する[13]。つまり同じ温度であっても、放射エネルギーの量はその材質や表面の状態によって測定結果が異なってくる。本実験では、試験容器が鏡面状のスレンレス平板 (SUS304) であるため、外部からの迷光・反射が誤差要因となって設定した放射率とは異なる結果を生じ、測定温度に大きな不確定要素をもたらす。このため、試験部全体を小型の暗室内に設置し、これらの誤差要因を抑えた。

TVS で得られる表面温度分布と内部温度との相関につき、装置側壁厚さの影響について、一次元の熱伝導方程式を用いて考察した。壁厚さ 0.5 mm についての結果を Fig. 9 に示す。これは、側壁の外表面を断熱と仮定し、初期温度 20 °C の側壁の内面が瞬時に 500 °C に昇温した場合の側壁内部の熱応答を示したものである。SUS304 では、内外壁温が等しくなるのには約 0.1 s 要するものの、1/100 s で既に影響が外表面温度に現れており、内部流動に伴う温度変化が、比較的リアルに容器外表面に表出する可能性を示している。

## 4. 実験結果

### 4.1. NRG 実験

実験パラメータとして、鉛-ビスマス合金と容器内冷却水の量と温度、およびトレーサの形態等を変化させ、大気圧下で実験を行った。水／溶融合金相互作用 (MFCIs) 実験および溶融合金単体の流動実験の条件を各々**Table 3**、**Table 4**にまとめる。なお、水／溶融合金相互作用実験では高温 (> 300 °C) の溶融合金を用いたため、トレーサは使用しなかった。これらのうち、代表的な実験結果について以下に述べる。

#### 4.1.1. 水／溶融金属相互作用実験

##### (1) Run 29 (Fig. 10)

第1回目のNRG観察実験として、溶融合金の体積(熱容量)を内部冷却水より多くして、長時間の相互作用の観察を試みた。**Fig. 10**に示す画像データは、記録したアナログビデオをデジタル変換し、シェーディング補正[4]したものである。使用したイメージインテンシファイアに焼き付きがあったため、画像中に円形のムラが生じた。これは、シェーディング補正でも完全に除去することはできなかった。

この実験では、ある程度合金が落下した時点で、冷却水が上方に吹き飛ぶような突沸が生じた。この様な現象は、落下開始後約2分で落ちついた。図からは判別しにくいですが、ビデオ映像では、冷却水との境界でクラストが形成され、その下に溶融合金の液面がある。発生する蒸気の反動で、液面は振動的に変動すると共に、クラストの中央部から上に向けて水蒸気が吹きあがる様子が確認された。溶融合金の落下開始初期には中央が盛り上がった山状に堆積(凝固)し始めたが、最終的には表面が平らな状態で凝固した(**No. 9~15**)。これは、落下中は蒸気発生のために溶融合金の冷却が妨げられ、引き続き落下した溶融合金が高温のまま落下し、一旦固化した合金を再溶融したものと考えられる。写真**No. 16**は、溶融合金凝固後のビデオ映像を積分平均したものである。

##### (2) Run 34 (Fig. 11)

Run 29と比較して現象を穏やかなものにするため、溶融合金の量を減らして内部冷却水の量を増すとともに、外部冷却水も取り入れた。

その結果、落下後の合金の固化形態はRun 29の前半で落下を停止した状況に近く、中央が盛り上がった山状に凝固した(**No. 10~12**)。端は落下直後に凝固

し、固合金の空間的広がりはその際に規定されたと思われる。合金の落下中は、冷却水を押しやるように中央を蒸気が立ち上り、合金の冷却を妨げる様に作用した。山の頂部には、ガサガサしたフレーク状のクラストが形成され、発生する蒸気が、冷却水の堆積合金内への侵入を妨げた。ただし、今回は溶融合金にトレーサを混入できなかつたため、堆積中の溶融合金と水蒸気の区別は、必ずしも十分でなかつた。そこで、長時間冷却がすすみ蒸気発生が停止した後に収録した 256 枚の画像の平均画像を作成し (No. 12)、No. 10 の画像から合金の形を抜き取る (商画像) ことで、合金落下終了後の水蒸気の流動の enhance を試みた。その結果、No. 11 の写真の様に蒸気は堆積合金と明快な区別が可能となり、水蒸気泡の動きを図中に白い部分として鮮明に捕らえることができた。

外部冷却水は、模擬下部ヘッドを通した加熱・昇温で密度が減少したため、自然対流が生じた。このとき、外部冷却系の配管内に滞留していた空気泡が、試験容器の底にある外部冷却水ノズルから冷却水と共に流入・上昇し、模擬下部ヘッドの外側を通過するのが確認された。なお、外部冷却系の空気抜き機構が不十分であり、外側キャビティの左側に空気溜まりが生じていた。このためか、落下直後の合金は左側 (外部冷却水の無い方) に偏った堆積をした。

ところでこの観察では、合金落下直後に 1 度だけ水面全体から液滴が pool entrainment 状に垂直上方に同時に放出されるのが観察された (No. 2)。この時、落下した溶融合金の量、水蒸気発生量は共に多くはなかつた。原因は十分に解明されていない。

### (3) Run 38 (Fig. 12)

Run 29 と比べ、落下溶融合金量を減らした。また、外部冷却水の無い状態で、内部冷却水量を Run 29 の 1.7 倍にした。落下中は激しい沸騰現象が生じ、溶融合金の量は少なくとも、上面が平らく堆積・凝固した。

これらの NRG 実験では、下部ヘッド底部で容器壁と合金の隙間に冷却水が侵入するという現象は見られなかつた。これは、本体系は大気圧実験のため、実機の様な高温+高圧条件でのクリープは生じないことや、落下した溶融合金の実機と比較して低温のため、壁面クレビスに捉えられた水の急激な沸騰により押し上げられるというモデル[2]が当てはまらないためと考えられる。

#### 4.1.2. 溶融金属単相実験

Table 1 に示す様に、鉛-ビスマス合金は熱容量が小さい。そのため、合金落下後、試験容器壁面で直ちに凝固しない様に、高温温風ヒーターの熱風を合金落下後も試験容器にあてつづけた。ただし、設置場所の制約から、加熱は中性子ビーム側片面に限



定され、容器全体にわたって温度ムラが生じた可能性がある。なお、温度分布の計測はできなかった。

**Table 4** に示す様にここでは5回実験を行ったが、トレーサの動きを鮮明に捕らえることができたのはその内1回だけだった (Run 15)。その他の実験ではトレーサの補足に失敗したが、その主な理由として以下が考えられる。

1. トレーサの量が多すぎた。
2. トレーサの粒径が小さすぎた (1 mm 以下程度)。
3. トレーサの Cd が溶融合金に溶け出した。

これらにより、トレーサそのものが確認できない、合金が薄黒くなってしまうという結果になった。3.については、溶融合金の温度がトレーサの融点以下でも、トレーサをメルトポット内で溶融合金中に長時間放置すると溶解することがあり、今後の実験では注意が必要である。そのため、実験を順調に進めるためには、トレーサは高融点の金属間化合物の使用が無難である。

#### (1) Run 15 (Fig. 13)

**Table 4** で示した様に、比重 10.7 で粒径が大きい (1.0~2.0 mm) トレーサを約 6 g 用いた。

この画像からはわかりにくいだが、模擬下部ヘッドの壁面近くでの合金の流れの向きは、落下中は中央から端へ、落下終了後は端から中央への循環に切り替わった。今回、観察に成功した理由として、1) 空間解像度 (~0.25 mm/pixel) に比べて、トレーサの粒径が十分大きかったこと、2) 溶融合金の融解温度を低くするとともに、メルトポットへの投入後短時間で実験したため、トレーサが合金中へ溶け出さなかったこと、等が挙げられる。問題点としては、1) トレーサの量が少なかつたので、トレーサが流れ場全体に行き渡っていないこと、2) 比重が重いので落下終了後短時間で底に沈み、低速の対流については観察できなかったことなどが挙げられる。

## 4.2. ガラス容器実験

実験パラメータを **Table 5** にまとめる。観察の結果、NRG で観察された流動は、同一の条件ではほぼ同様に観察され、側面壁の材質 (ガラス/ステンレス) の違いによる流動への影響は少ないことが確認できた。カラー画像による可視光観察は、蒸気/メルト/水の分離を行う点で、特に溶融合金の落下初期に優れているものの、照明の角度によって合金や気泡が反射してしまう場合があった。以下に、代表的な実験結果について概説する。

#### (1) Run 9, 10 (Figs. 14 and 15)

**Fig. 14** に示す画像データは、アナログ記録したビデオ画像 (nac-1000、500 frames/s) をデジタル変換し、0.4 s 毎に時系列に並べたものである。

合金落下初期においては、蒸気泡・溶融合金・冷却水が明確に識別可能である。ただし、堆積が進むと、合金がガラス壁に凝固して膜をつくり、視界を遮った。堆積の様子は NRG での観察結果と同様で、Run 9 では、外部に冷却水が存在し、除熱が大きいいため、容器の中央付に山状に堆積した。

**Fig. 15** は、外部冷却をしなかった Run 10 における落下終了直後の様子である。溶融合金は水を押しのけながら容器下部に堆積し、両側には、落下の際に吹き上がり、固化した溶融合金がクラストを形成した。クラスト内に侵入した冷却水の様子は、NRG 画像と同様に鮮明に観察することができた。

## (2) Run 11 (Fig. 16)

**Fig. 16** は外部冷却水のみを用いたときの系内の様子である。画像 No. 1 は、合金の落下終了後 3 s 経過した時の画像で、そこから 0.8 s 毎に外部冷却水の変化の様子を示す。

この実験では、模擬下部ヘッド外部壁面上で外部冷却水が沸騰 (subcool boiling) した。溶融合金を水中に落下させた場合は、その様な沸騰は生じなかったが、溶融合金単体の場合は沸騰が生じることが観察された。外部冷却水の初期温度は 50 °C、溶融合金の初期温度は 400 °C である。落下終了 3.8 s 頃から容器の頂底部において沸騰が開始し (No. 2)、その後気泡が半円容器の外側全体を被う様に広がっていく様子がわかる。蒸気膜の形状は、下向き沸騰熱伝達のため、いわゆる Rayleigh-Taylor 不安定型を示しており、沸騰開始から約 3.0 s で蒸気膜が半円容器壁全体を被った (No. 6)。これは、溶融合金が存在する容器壁全長に渡る下向き熱伝達により、容器壁は等温に保たれていることが予想される。この様な等温境界は、本報告書の付録にて述べる様々な熱伝達実験でもしばしば採用されている。この温度分布は、後述する TVS による観察結果からも確認できた。

NRG 実験と同様、この直接可視化実験でも、下部ヘッド底部で容器壁と合金の隙間に冷却水が侵入するという現象は見られなかった。実験終了後に、ガラス側壁を取り外して観察した結果、溶けた合金が底壁に達し、その後凝固した場合 (Fig. 15) は、壁との間に隙間そのものが存在しなかった。また、溶融合金が落下中に凝固し、その後壁 (半円容器壁) に付着した場合 (Fig. 14) は、壁と固合金の間に微小な穴が各所にできたていたが、やはり隙間はみられなかった。理由としては、NRG 実験の時と同様に、本体系は大気圧実験のため、実機の様な高温+高圧条件でのクリープは生じないことや、落下した溶融合金が低温のため、壁面 crevice に捉えられた水の急激な沸騰により押し上げられるというモデルが当てはまらないためと考えられる。

### 4.3. TVS 実験

容器外壁の 2 次元温度分布が時系列データとして得られる。ただし、温度のダイナミックレンジや放射率の設定が非常に煩雑であり、データそのものも、絶対温度の誤差評価等に問題があった。

温度絶対値は放射率に依存するが、本実験で用いた試験容器は SUS304 製で表面に光沢がある（バフ仕上げ）ため、放射率を 0.2 とした[13]。しかし、放射率は測定対象物の材質のみならず、測定装置のセンサの校正を行っている温度範囲に依存して、測定温度範囲によっても変更させる必要があり、それらの詳しいデータが十分に公開されていないこともあって、必ずしも精度のよい対応ができなかった。その他、容器全体の広い撮影面積で撮影角度が分布している点もあり、測定条件が限定された。

熔融合金固化後の定常状態（約 100℃）では放射率を 0.6 としたが、これは TVS による測定データが、別途熱電対で測定した値と一致する様に経験的に導き出した値である。しかし、100℃付近の温度では熱電対と TVS ではよく一致したが、それより温度が高くなると、TVS データが過大評価になった。

実験パラメータを **Table 6** にまとめた。以下に代表的な観察結果として、試験部内外で冷却水無しの条件で行った TVS8000-Run 5 と、試験容器外側に冷却水を満たした TVS2000-Run 2 の結果について概説する。

#### (1) TVS-8000-Run 5 (Fig. 17)

空の試験容器内に 200℃ の熔融合金を約 1.0 kg 落下させた。**Fig. 17** は、落下中の試験容器表面の温度を TVS で撮影し、その結果を 0.5 秒毎に 10℃ 間隔の等温線で表したものである。初期の試験容器温度が低かった（室温）ため、メルトポット内で 200℃ の熔融合金は、落下直後に融点（125℃）付近にまで冷却された。画像 **No. 7** の時点で熔融合金の落下はほぼ終了した。落下中／直後は、メルトジェットが通過する容器の中心線付近と、落下した熔融合金が最初に到達して流れる方向を変える容器の頂底部が最高温となり、端に行く程冷却された。この時、左右両端付近では、一部固化しつつ合金の先端部が前進した様である。この様に、いわゆるホットスポット的に中央下端に高温域が集中したのは、落下過程が周辺の固化と同時進行した結果と思われる。

落下終了後、中央の高温の流体塊が上部に移動する（**No. 12** 以降に矢印で図示）とともに、底部の温度勾配が徐々に大きくなった（**No. 10 ~ 15**）。このような等温線の変化は、合金落下後、模擬下部ヘッド壁の端から中央に向かう循環へと循環方向を逆転した NRG 観察結果と一致する挙動である（4.1.2 参照）。その結果、上部が密、底部が粗となる温度成層が形成された。

#### (2) TVS-2000-Run 2 (Fig. 18)

室温（~20℃）の外部冷却水を満たした容器に、350℃ の鉛-ビスマス合金を約

1.0kg 落下させた。Fig. 18 は、その結果を 1.0 秒毎に 50°C 間隔の等温線で表したものである。この実験でも、落下直後に約 100°C の温度低下が見られたものの、初期温度が高いことから、TVS-8000-Run5 の実験とは異なって温度勾配が急峻なものとなった。また、外部冷却水によって半円形の容器壁がほぼ等温に保たれているため、等温線は常に容器の半円と相似形を保つ様に推移した。これは、半円壁全体が蒸気膜で被われたことによって、等温境界が形成され、ガラス容器実験で見られた外部冷却水の沸騰観察に対応しているものと考えられる (4.2 参照)。この結果、高温の流体塊は容器中央付近に集中せず、容器内に均等に分布した。落下中の温度勾配は、冷却されている半円の容器壁に沿って急勾配となっており、それと比較して上面では緩やかな勾配となった。しかし、(1)の外部冷却なしの実験と比較すれば、上面の温度勾配も極めて急峻である。

溶融合金の落下は画像 No. 6 の時点でほぼ終了した。その後、半円容器壁からの除熱が続き、等温線は半円形を保ったまま容器内側へ、ほぼ均等にただし僅かに移動した (~No. 10)。No. 11 以降は、外部冷却無しの実験と同様、試験容器中央での高温プルームの上昇と共に、温度成層の状態へ緩やかに移行した。なお、左右の両端部では、温度勾配の変化は小さく、分布も左右対称のまま推移した。以上より、外部冷却による半円容器壁でのほぼ均等な熱伝達を確認され、実機で問題となる局所的な高温領域 (ホットスポット) の形成は見られなかった[18]。

## 5. まとめと課題

加圧水型原子炉（PWR）のシビアアクシデントで、圧力容器の下部ヘッドに模擬溶融炉心が落下した際の下部ヘッド内への堆積挙動に関して、小型の模擬装置、模擬溶融燃料（低融点の鉛-ビスマス合金）を用いて模擬実験を行い、NRGを中心とした流動可視化観察から得られた結果を以下にまとめる。

- 凝固の様子

冷却水のサブクール度が大きい場合、落下した溶融合金はすぐに固化し、模擬下部ヘッドの中央から山状に堆積した（Fig. 19-a）。一方、サブクール度小の場合、落下直後は溶融状態が続き、その後引き続き落下してくる溶融合金によって堆積物が端へ追いやられ、両端に吹き飛ばされたところで凝固が始まる（Fig. 19-b）。今回のNRG実験ではトレーサが無かった為、落下中の溶融合金と発生する水蒸気との明確な区別は難しかったが、落下・固化終了後の定常状態では堆積した合金を画像処理で取り除くことで、蒸気の流動が明確に識別できた。

- 冷却水／溶融金属相互作用

容器内で端に飛ばされた溶融合金は急速に温度が低下するため、合金の堆積後は中央付近からの蒸気発生が顕著に生じた。落下中の沸騰現象については、冷却水の温度が低い場合に、容器内全体で激しい突沸が周期的に繰り返される。

- トレーサを用いたNRG流動可視化実験

溶融合金単相の挙動を観察した。落下中トレーサは、溶融合金と共に容器の左右にできた対照的な渦を廻り、落下後は熱対流によって渦の回転方向が逆転する様子を良好に示した（Fig. 19-c）。

- 下部ヘッド外部冷却の効果

ガラス容器を用いた実験から、発生した蒸気膜が半円壁全体を被う様に広がっていく様子が観察された。また、TVSを用いた容器外表面の温度分布観察の結果、外部冷却水が有る場合、半円容器壁に沿って同心円状の等温線が形成された。なお、TVS可視観察実験では、トレーサを混入した単相溶融合金試験でも観察された、落下終了後に熱対流による回転渦逆転に伴う容器中央での高温流体の上昇が明確に観察された。

また、今後の課題として、

(i) 実機の模擬性

実験装置の大きさ、温度、圧力等をスケーリングを厳密に考慮して実機レベルにすると、大規模な実験にならざるを得ず、現状の小型実験装置では難しい。例えば熱対流を対象とした熱的スケーリングの考察では、代表長さの5乗で効くRayleigh数は、現在の小型装置では $10^8$ 程度で、TMI-2の $2.4 \times 10^{12}$ のレベルと比べると著しく小さい。さらに、鉛-ビスマス合金では、粘性・熱容量共に小さい上に自己発熱の模擬をしていないため、実機で想定される様な長期間にわたる緩慢な冷却過程は再現できない。なお、鉛-ビスマス合金は固化時に体積膨張することもあり、現在提案されている様なデブリと下部ヘッド内壁間の狭隘流路の形成は生じなかった。

しかしながら、冷却水と接触して発生蒸気のリアクションを生じ比較的高速の現象を伴う複雑な堆積挙動についての知見は今回新たに得られたものが多い。ポーラス状のクラストの形成、継続した溶融合金の落下に伴うクラストの再溶解と再生、発生蒸気による冷却水と溶融合金との直接接触の妨害挙動等、新たに見いだされた点につき、物性や圧力・温度条件での相違点を勘案して考察することで、実機現象での洞察が得られるものと期待される。

(ii) 狭隘流路

現在提案されている、下部ヘッドが高温・高圧状態でクリープ変形して隙間が出きるというメカニズムは、高温時に特有の現象であり、温度が低い大気圧下の実験では再現不可能である。中性子ラジオグラフィでは、比較的低温・大気圧実験に限定されてしまうため、可視化実験とは別とした高温条件下での実験が必要である。

(iii) その他

可視化の際には空間解像度が問題になる。デブリ内のクラック、デブリ/下部ヘッド間の狭隘流路共に非常に狭いため、NRGでの観察では、撮像系の最適化が必要である。現在の高速撮像システムでは空間分解能が約0.1 mm/pixel以上と粗く、I.I.による電気ノイズも問題であった。これらは、可視化対象によっては撮影速度を下げるか、2枚の光電子増倍器(double MCP)を用いることにより、さらに高輝度・鮮明な画像取得を期待できる。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、実験の実施、装置の整備・調整においてお世話になった、山田仁久氏をはじめとする（株）原子力エンジニアリングの方々に謝意を表します。

中性子ラジオグラフィを利用するにあたり、高速度撮像および画像処理の両面でお世話になった、京都大学原子炉実験所の三島嘉一郎教授、日引 俊助教授に深く感謝いたします。

中性子ラジオグラフィ施設（JRR-3M/TNRF-7R）を使用するにあたり、実験補助をはじめとする種々の援助をしていただいた、日本原子力研究所の松林政仁氏、安藤均氏に謝意を表します。

## 参考文献

- [1] Henry, R. E. and Dube, D. A. : "Water in the RPV : A Mechanism for Cooling Debris in the RPV Lower Head," Proc. of the Specialist Meeting on Selected Containment Severe Accident Management Strategies, NEA/CSNI/R(95)3, 93-104, Stockholm (1994).
- [2] Henry R. E. and Hammersley, R. J. : "Experiments on the Lower Plenum during a Severe Accident," Proc. of the 4th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, Taipei (1994).
- [3] Sonnenkalb, M. : "Summary of Previous German Research Activities and Status of GRS Program on In-Vessel Molten Pool Behavior and Ex-Vessel Coolability," Proc. of OECD/CSNI/NEA Workshop on Large Molten Pool Heat Transfer, Grenoble (1994).
- [4] 日引 俊, 三島嘉一郎 : "プローブとして中性子を用いた金属管内気液二相流の可視化と計測 (第3報、中性子ラジオグラフィ画像の定量化法)," 日本機械学会論文集 B 編, **62-595**, 87 (1996).
- [5] Takenaka, N., et al. : "Flow Visualization of Liquid Metal by Neutron Radiography," Fusion Engineering and Design, **27**, 607-613 (1995).
- [6] Theofanous, T.G. and Lui, C. : "Natural Convection Experiments in a Hemisphere with Rayleigh Number up to  $10^{15}$ ," ANS Proc. 1995 Natl. Heat Trans., 349-365 (1995).
- [7] Kymäläinen, O., Hongisto, O. and Theofanous, T.G. : "Heat Flux Distribution from a Volumetrically Head Pool with high Rayleigh number," Proc. 6th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-6), Grenoble, **1**, 47-53 (1993).
- [8] Turland, D. and Morgan J. : "Compendium of Accident Heat Removal Models for Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactor," European Applied Research Reports, **6-5**, 1183 (1985).
- [9] Steinberner, U. and Reineke, H.H. : "Turbulent buoyancy convection heat transfer with internal heat source," Proc. of 6th International Heat Transfer Conf., Toronto (1978).
- [10] Jahn, M. and Reineke, H.H. : "Free Convection Heat Transfer with Internal, Heat Source, calculation and measurements (and discussion)," Proc of 5th International Heat Transfer Conference, **3**, 74 (1974).
- [11] Mayinger, F., Jahn, M. and Reineke, H. : "Examination of Thermal hydraulic Processes and Heat Transfer in a Core Melt," Final Report BMFT RS 48/1. Technical University, Hanover, W. Germany (1975). As reviewed by F.A. Kulacki, Ohio State University, for the US NRC (1976).
- [12] 日本機械学会編 : 伝熱工学資料, 改訂第3版 (1975)
- [13] 日本アビオニクス株式会社 : サーマルビデオシステム TVS-8000 シリーズ取扱



## 説明書

- [14] Massalki, T.B. and Okamoto, H. : Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd ed., ASM International, **1**, 351 (1990).
- [15] Theofanous, T.G. et al. : "Natural convection for in-vessel retention at prototypic Rayleigh number," Proc. of 8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-8), Kyoto, **1**, 165-172 (1997).
- [16] 木村 照夫ら : "半円断面容器内の自然対流熱伝達," 日本機械学会 73 期全国大会, **1605** (1995).
- [17] Matsubayashi, M and Tsuruno, A, : "JRR-3 Neutron Radiography Facility," Proc. 4th World Conf. Neutron Radiography, 415, J.P.BARTON, Ed., Gordon and Breach Science Publishers (1994).
- [18] Wolf, J.R. et al. : "TMI-2 Vessel Investigation Project Integration report, " NUREG/CR-6197 TMI V(93)EG10 EGG-2734 (1994).
- [19] Maruyama, Y. et al. : "Ouench of Molten Alminum Oxide Associated with In-Vessel Debris Retention by RPV Internal Water, " Proc. of Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, NEA/CSNI/R(89)18, 243-250, Munich (1998).
- [20] Kang, K.H. et al. : "Experimental Investigation on In-Vessel Debris Coolability through Inherent Cooling Mechanism, " Proc. of Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, NEA/CSNI/R(89)18, 251-260, Munich (1998).
- [21] Helle, M. et al. : "Experimental Data on Heat Flux Distribution from a Volumetrically Heated Pool with Frozen Boundary," Proc. of Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, NEA/CSNI/R(89)18, 173-183, Munich (1998).
- [22] Mishima, K. et al. : "Visualization Study of Molten Metal-Water Interaction by using Neutron Radiography, " Proc. of International Seminar on Vapor Explosions and Explosive Eruptions, 101-109, Sendai (1997).
- [23] Mishima, K. et al. : "Visualization Study on Hot Particle-Water Interaction by using Neutron Radiography, " Proc. of the Workshop on Severe Accident Research in Japan, Tokyo (1998).

**Table 1** Physical properties of Pb-Bi alloy

温度 °C	密度 kg/m <sup>3</sup>	比熱 J/kg/K	粘性係数 Pa · s	動粘性係数 m <sup>2</sup> /s	熱伝導率 J/m/s/K	温度電導率 m <sup>2</sup> /s	表面張力 N/m
500	10050	146.5	$1.29 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-7}$	13.84	$9.44 \times 10^{-6}$	0.384

**Table 2** NRG imaging system

Camera	nac-1000	
	Gain	0 db
	Strobe	on
	Speed	500 frames/s
	Record	S-VHS
	Color	B&W
	Photoron fastcam ultima	
	Speed	500 frames/s
	Record	S-VHS
	Color	B&W
Lens	Nikkor 105 mm	
	iris	open
Image Intensifier	Hamamatsu Photonics C4274	
	Single MCP-type	
	Fluoresce face	P-20
	Gate time	1 ms
	Repetition frequency	500 Hz
	Gain	40~50%
Pulse generator	Model DG535	
	Gate time	1 ms
	Gate rising	25 ns
	Repetition frequency	500 Hz

**Table 3** Experimental parameters of NRG test (MFCIs test without tracer particles)

実験日	Run	Pb-Bi		内部冷却		外部冷却	
		温度(°C)	質量(g)	温度(°C)	容量(cc)	温度(°C)	容量(cc)
11/14	24	400	-	-	-	-	0
11/15	29	400	1000	49	60	-	0
11/16	34	400	515	52	100	52	あり
11/16	3	500	525	22	100	22	あり
11/17	1	300	505	56	100	56	あり
11/17	2	300	530	100	100	-	0
11/30	38	400	490	80	100	-	0

**Table 4** Experimental parameters of NRG test (sigle-phase test with tracer particles)

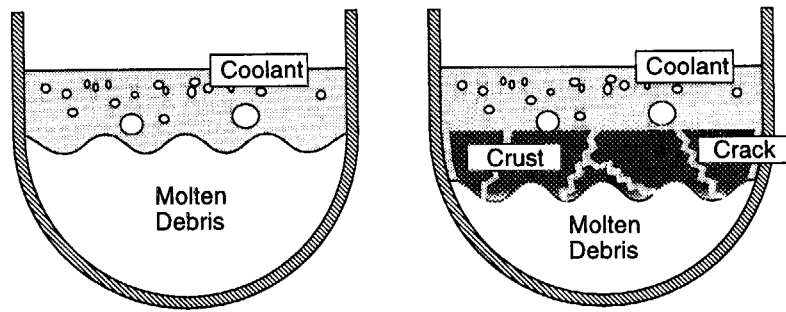
実験日	Run	Pb-Bi		トレーサ			容器温度(°C)		
		温度(°C)	質量(g)	粒径(mm)	比重	質量(g)	内部	外部	外壁
2/13	3	400	539.7	2.0	10.7	4	92.9	46.5	51.4
				1.0~1.5	10.7	38.1			
2/14	7	300	541.5	0.5~1.0	10.7	3.0	82.8	90.2	53.1
2/15	10	300	554.5	1.0~2.0	10.7	~6.0	-	-	-
2/16	15	300	542.5	1.0~2.0	10.7	~6.0	96.2	85.9	53.6
2/17	19	300	553.5	1.0~2.0	10.7	~6.0	77.5	88.8	80.4
				-	10.4	10.0			

**Table 5** Experimental parameters of glass wall test

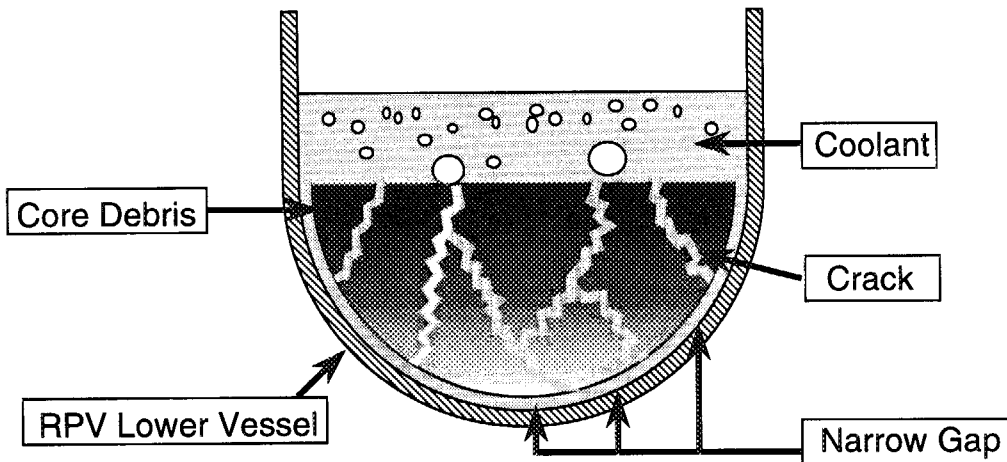
実験日	Run No	Pb-Bi		内部冷却		外部冷却	
		温度(°C)	質量(g)	温度(°C)	容量(cc)	温度(°C)	容量(cc)
1/10	1	400	526.8	-	0	-	0
1/11	2	400	537.25	35	0	-	0
1/11	3	400	500.4	60	0	-	0
1/11	4	400	500	50	0	-	0
1/12	5	400	500	60	0	-	0
1/12	6	400	517.1	75	0	-	0
1/12	7	400	553.6	80	0	-	0
1/16	8	400	570.5	80	100	-	0
1/16	9	400	512	70	100	50	あり
1/16	10	400	527.7	70	100	45	0
1/17	11	400	525.9	60	0	50	あり
1/17	12	400	522.8	90	0	45	0
1/18	13	400	508.7	120	0	60	0
1/19	14	200	527	90	100	80	あり
1/19	15	200	516.4	90	100	50	0

**Table 6** Experimental parameters of TVS test

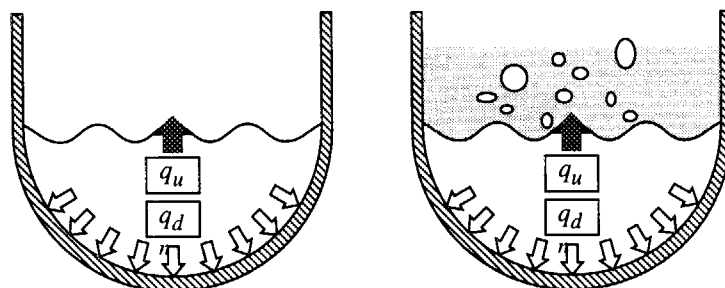
実験日	測定器	Run	Pb-Bi		冷却材		放射率
			温度(°C)	質量(kg)	外部	内部(cc)	
6/25	TVS8000	1	300	1.0	なし	なし	0.2
6/25		2	300	1.0	なし	なし	0.2
6/25		3	300	1.0	なし	なし	0.2
6/25		4	300	1.0	なし	なし	0.2
6/25		5	200	1.0	なし	なし	0.2
7/31	TVS2000	1	300	0.97	なし	なし	0.2
8/01		2	350	1.03	あり	なし	0.2
8/02		3	500	1.06	あり	100	0.6
8/02		4	500	1.03	あり	100	0.6
8/03		5	500	1.25	あり	なし	0.6
8/03		6	500	1.19	あり	なし	0.6
8/04		7	500	1.04	あり	100	0.6
8/04		8	500	1.06	なし	なし	0.6
8/04		9	500	1.11	なし	なし	0.6



**Fig. 1** Hypotheses mechanism for in-vessel debris cooling before solidification and configuration for crust formation [1].



**Fig. 2** Hypotheses mechanism for in-vessel debris cooling after solidification [1].



**Fig. 3** Heat transfer mechanism for debris cooling.

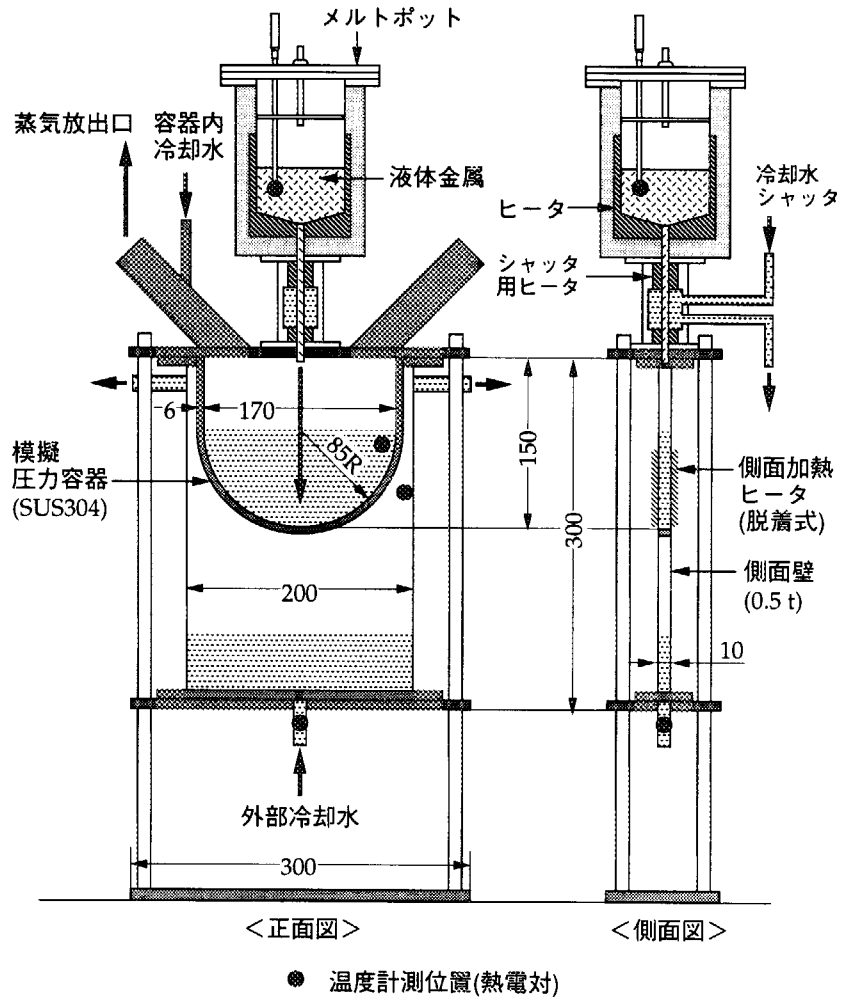


Fig. 4 Schematic view of experimental setup.

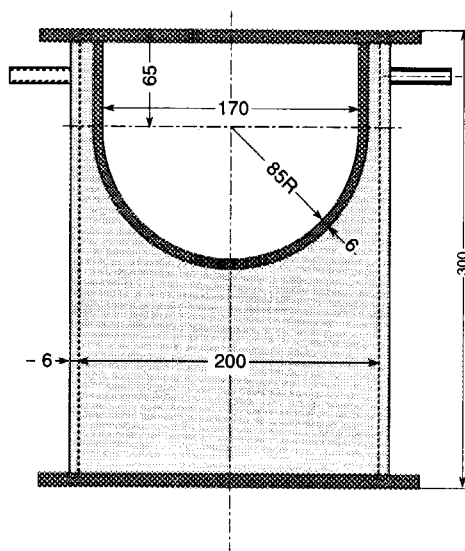


Fig. 5 Schematic view of test section for NRG experiment.

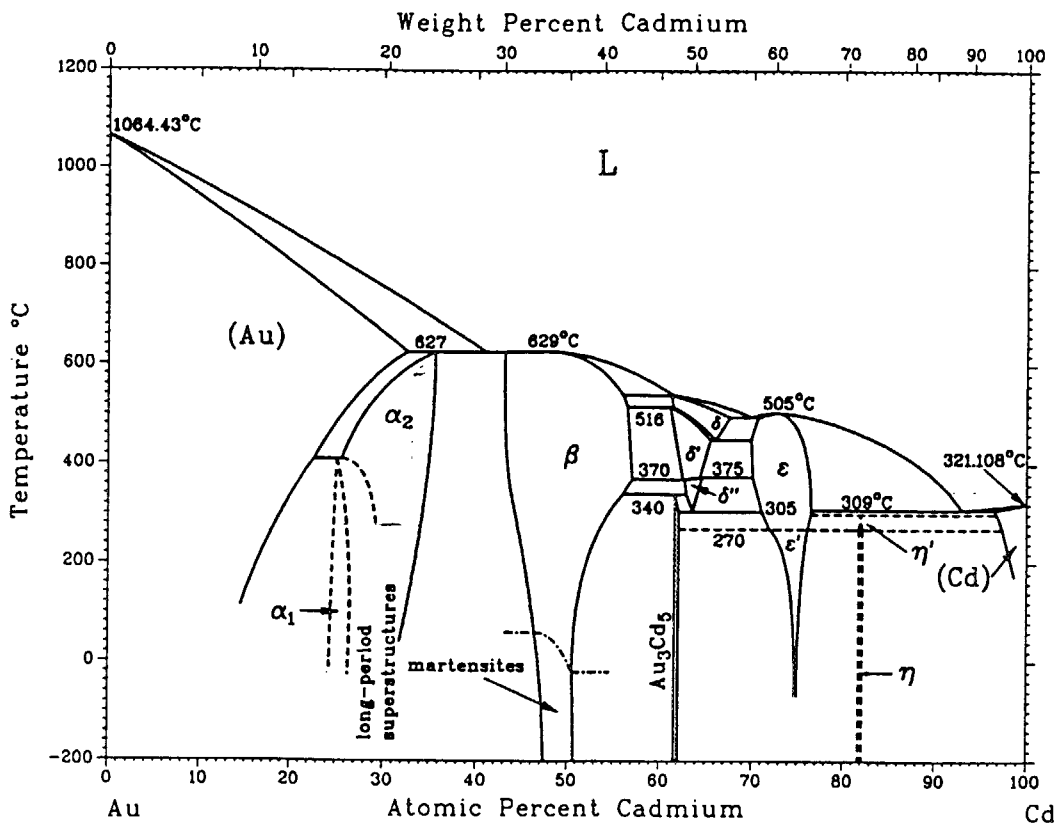


Fig. 6 Binary diagram of Au-Cd [14].

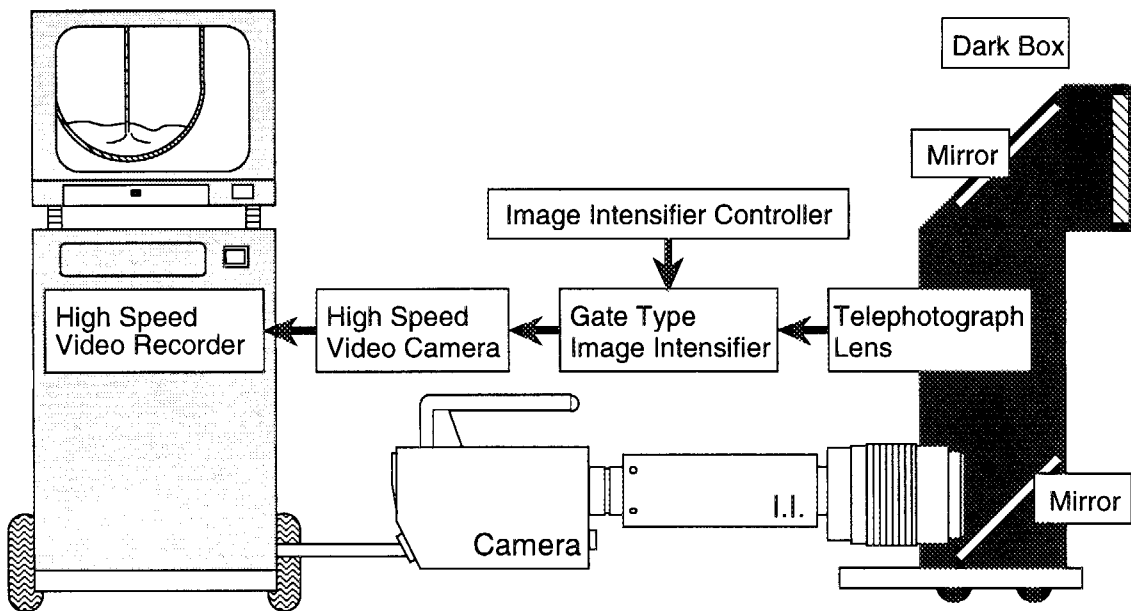


Fig. 7 Schematic diagram of the NRG imaging system.

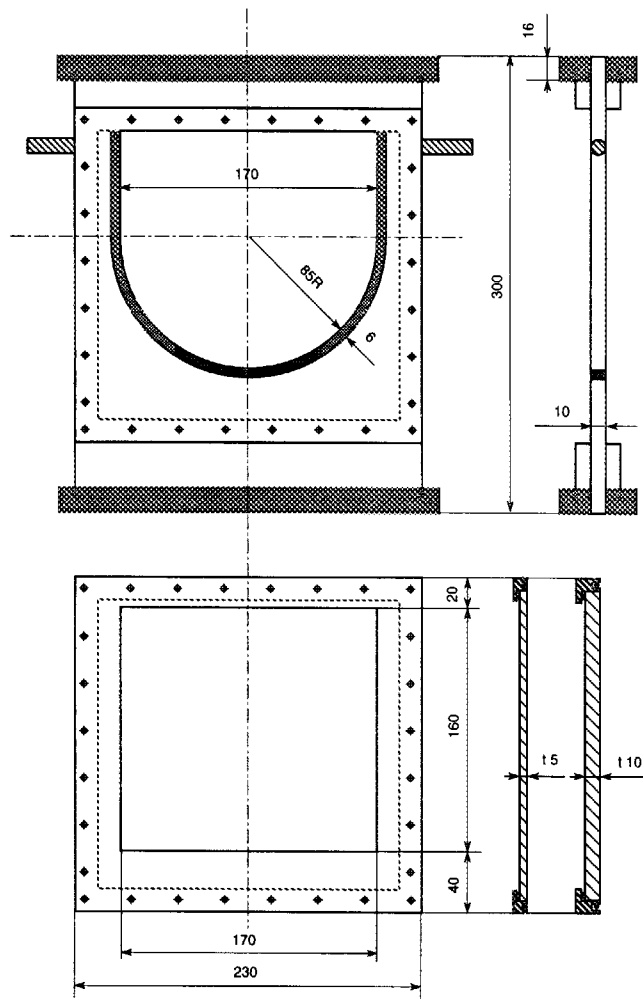


Fig. 8 Schematic view of test section made by glass side wall.

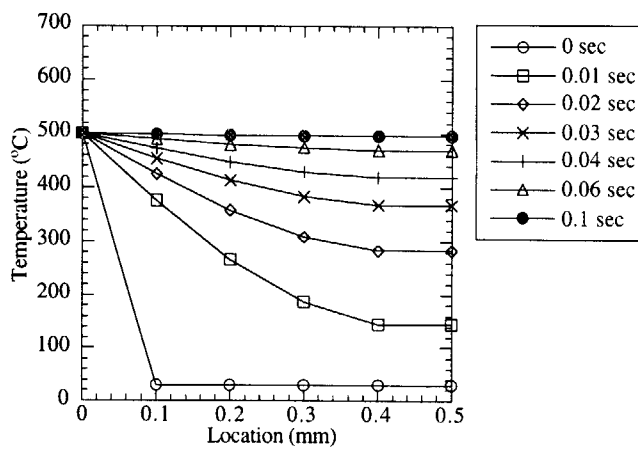
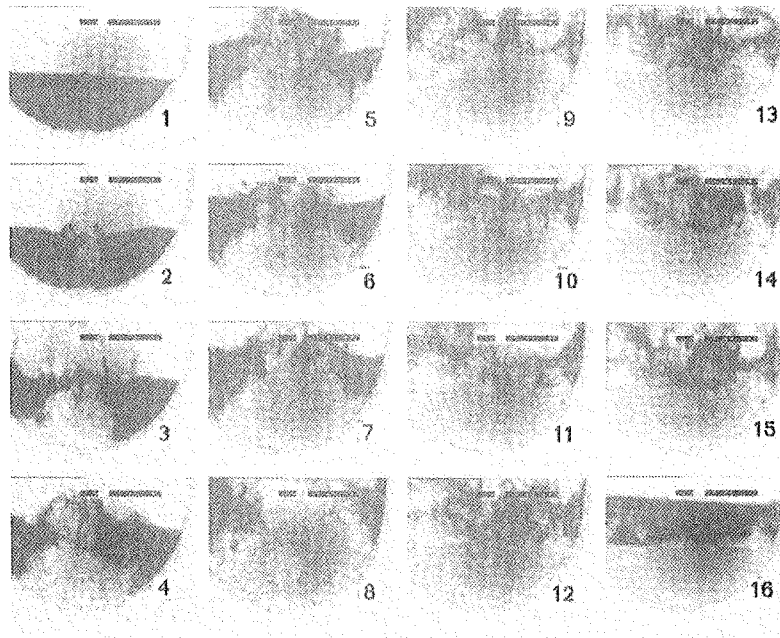
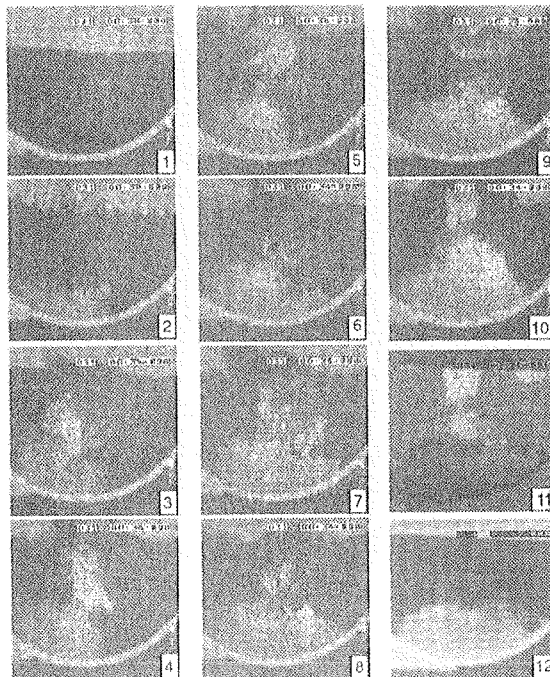


Fig. 9 Temperature transient estimation in thin wall.

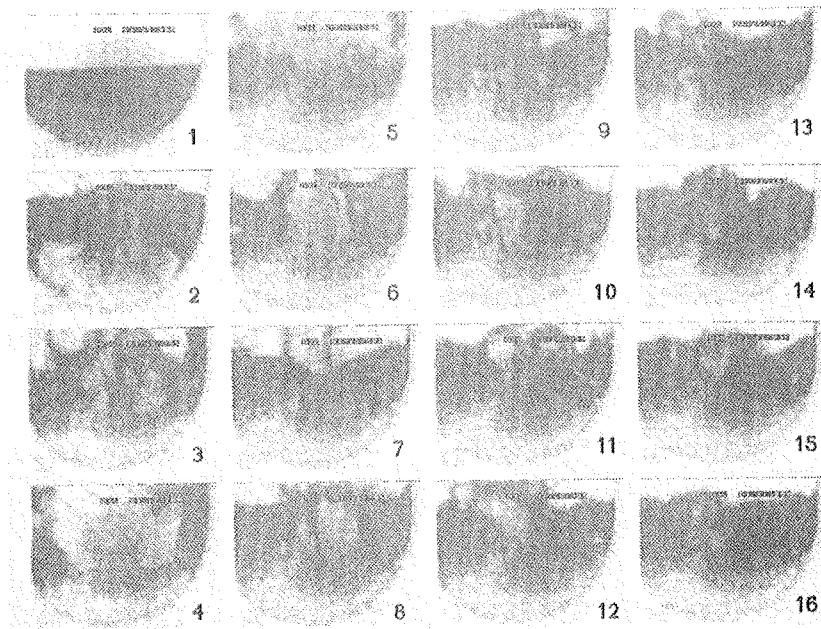




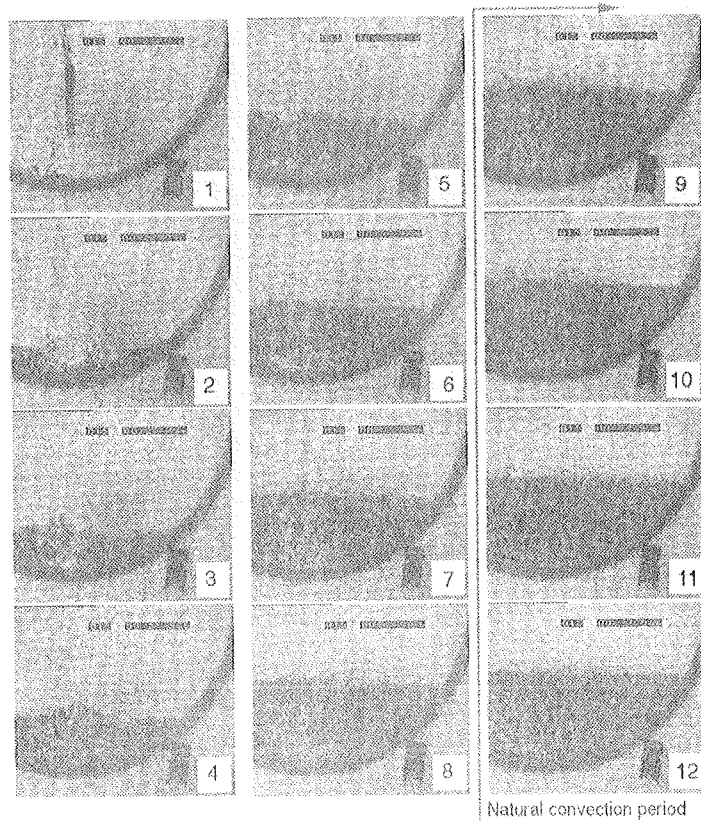
**Fig. 10** NRG video pictures of molten Pb-Bi dropped into pool water (Run 29 ; picture interval : 0.4 s). 1~15 : after shading correlation, 16 : average of 256 images taken after the end of solidification.



**Fig. 11** NRG video pictures of molten Pb-Bi dropped into pool water with ex-cooling (Run 34 ; picture interval : 0.3 s). 1~10 : after shading correlation, 11 : steam bubble enhancing for picture 10, 12 : average of 256 images taken after the end of solidification.



**Fig. 12** NRG video pictures of molten Pb-Bi dropped into pool water (Run 38 ; picture interval : 0.4 s ; after shading correlation).



**Fig. 13** NRG video pictures of molten Pb-Bi dropped with tracer particles into empty vessel (Run 15 ; picture interval : 0.4 s ; constant enhancement only).

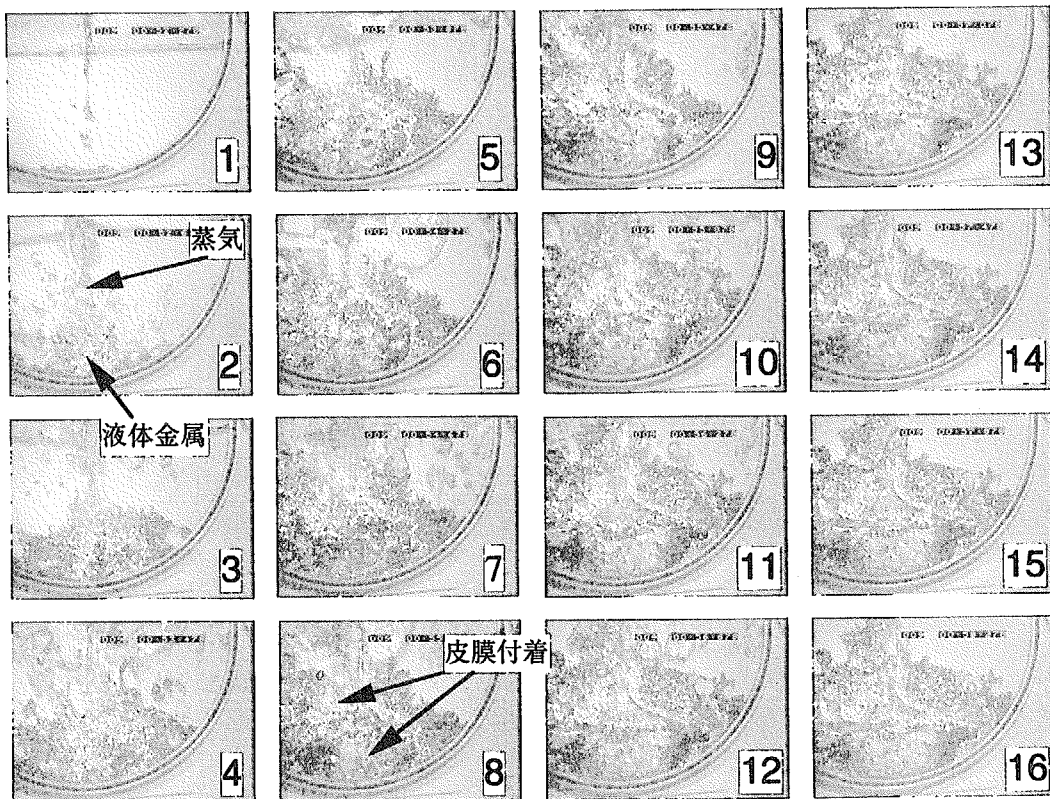
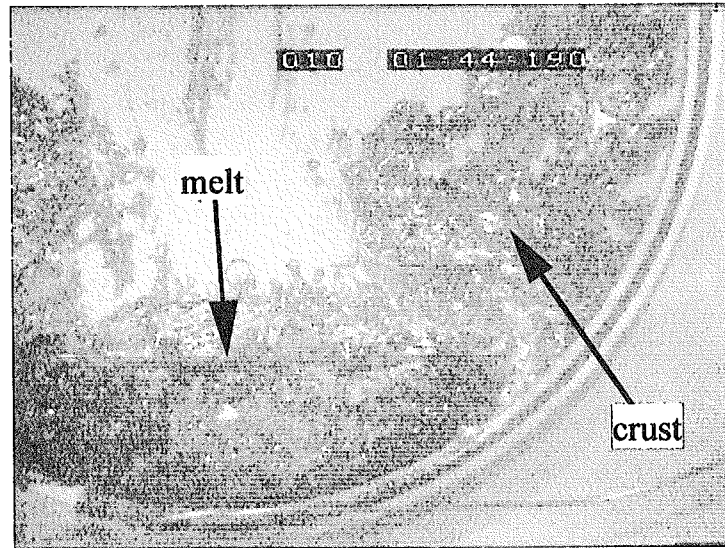
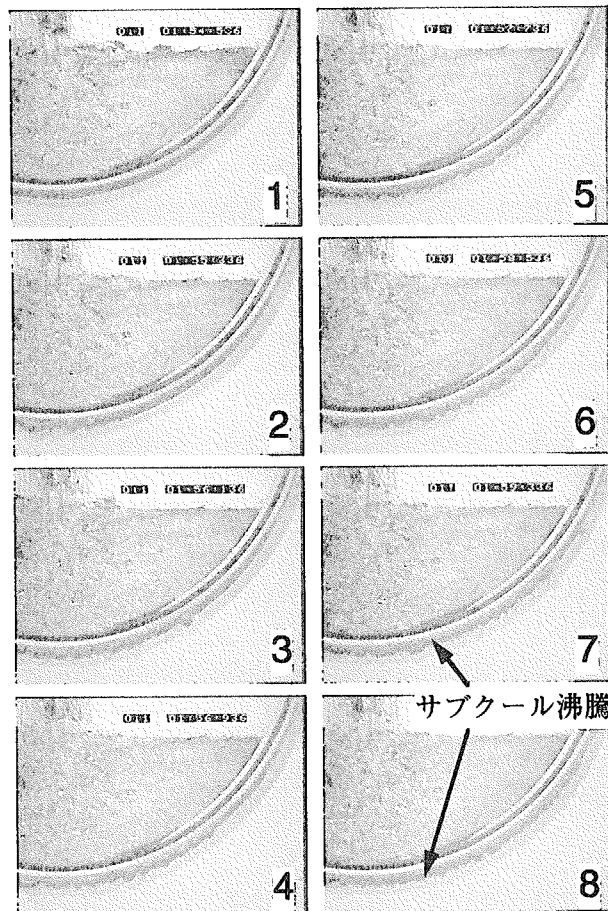


Fig. 14 Video pictures of molten Pb-Bi dropped into pool water with ex-cooling using glass wall test section (Run 9 ; picture interval : 0.4 s ).

This is a blank page.

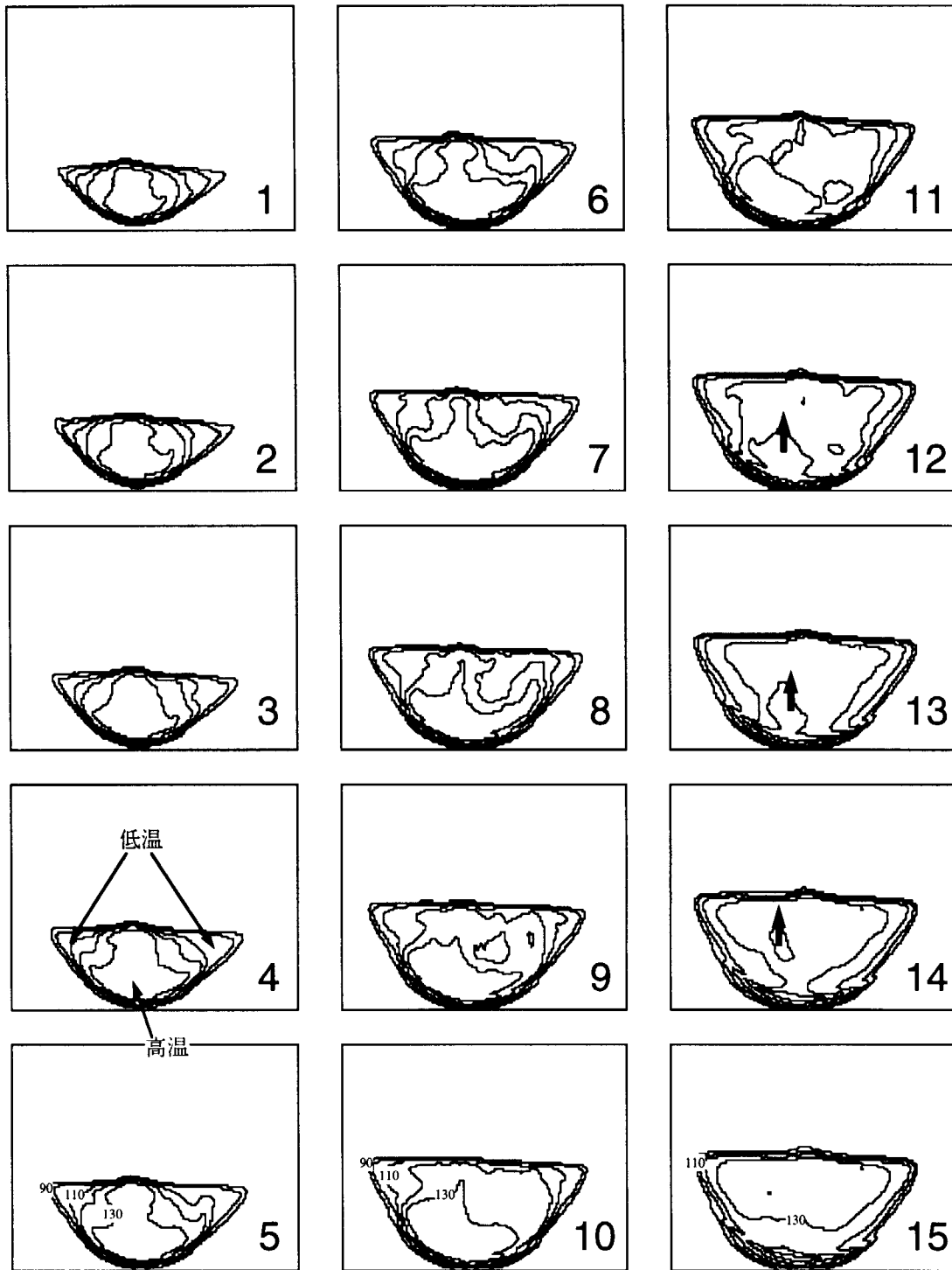


**Fig. 15** Video pictures of molten Pb-Bi dropped into pool water without ex-cooling using glass wall test section (Run 10 ; right after melt injection terminated).

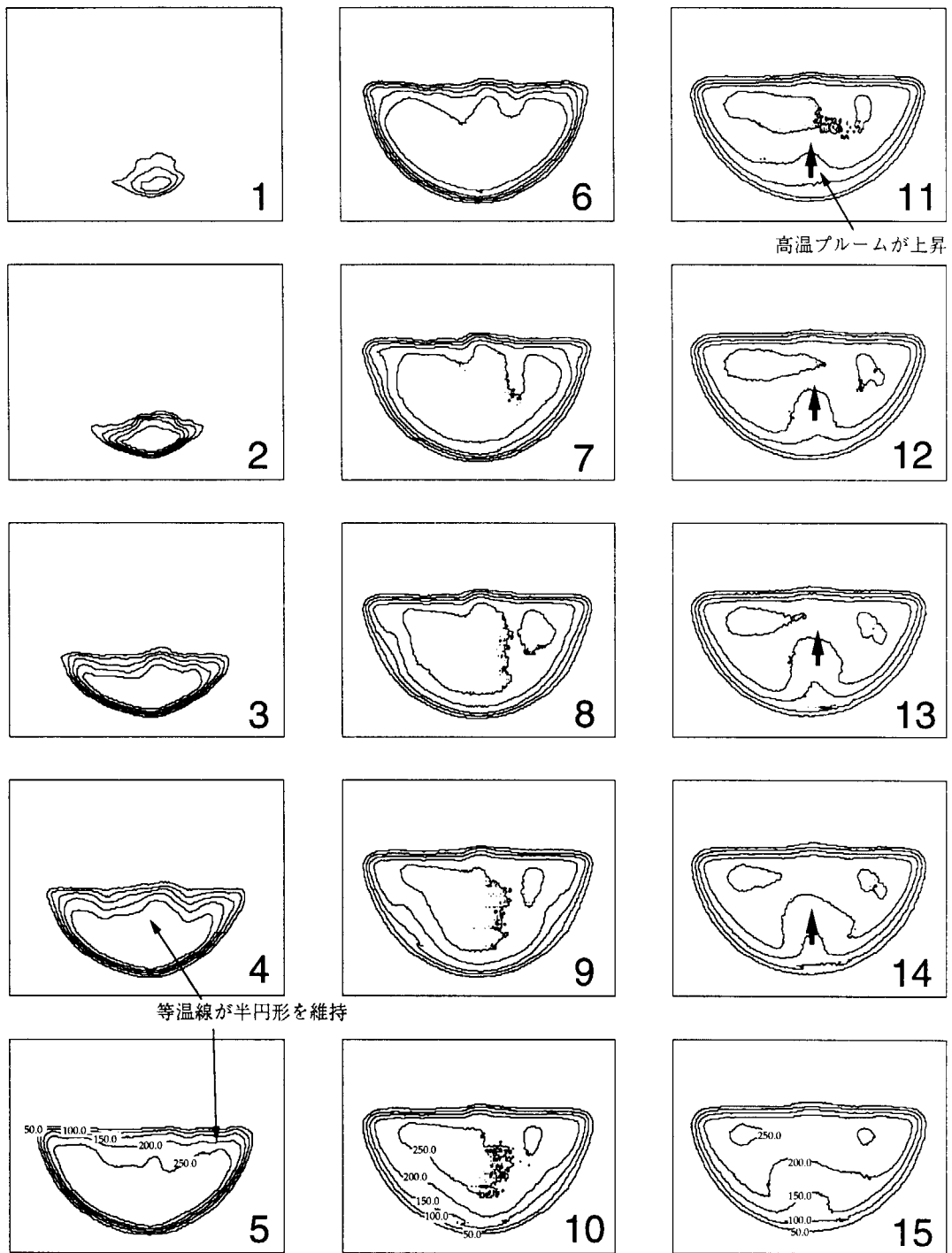


**Fig. 16** Video pictures of molten Pb-Bi dropped into vacant vessel with ex-cooling using glass wall test section (Run 11 ; picture interval : 0.8 s).

This is a blank page.

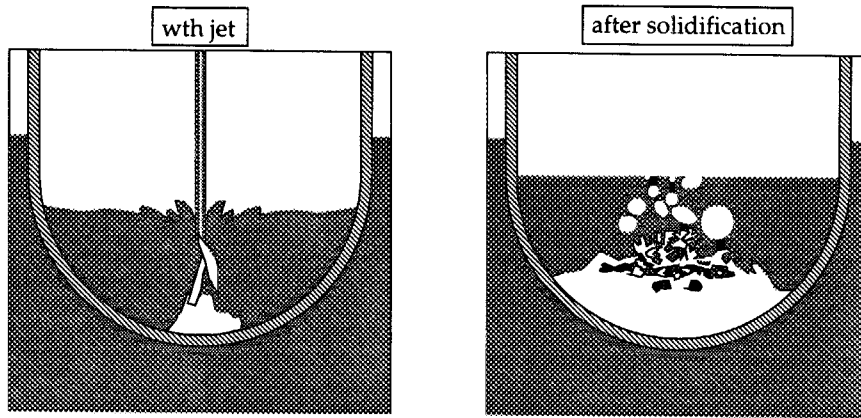


**Fig. 17** Temperature contours of wall surface on Pb-Bi injected into vacant vessel (TVS 8000-Run 5, image interval : 0.5 s, contour interval : 10 °C).

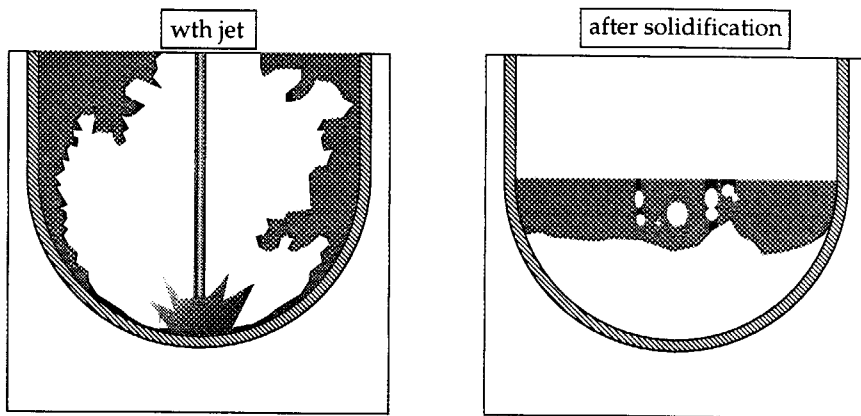


**Fig. 18** Temperature contours of wall surface on Pb-Bi injected into vacant vessel with ex-cooling. (TVS 2000-Run 2, image interval : 1.0 s, contour interval : 50 °C).

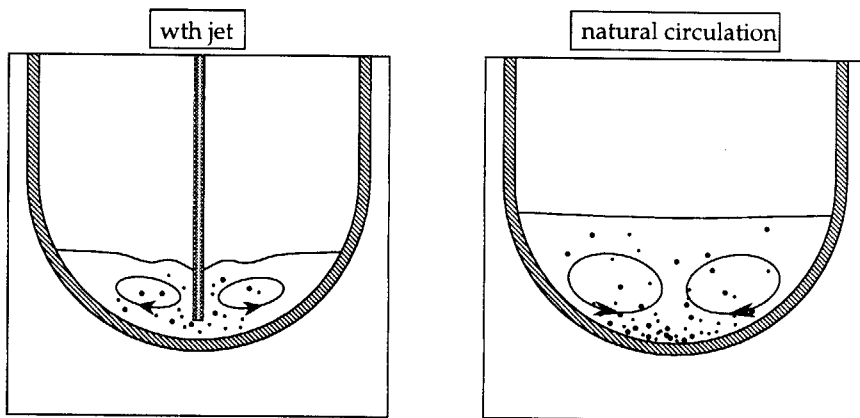




(a) Schematic of molten Pb-Bi injected into pool water (subcooling : 44 °C).



(b) Schematic of molten Pb-Bi injected into pool water (subcooling : 0 °C).



(c) Schematic of molten Pb-Bi injected into vacant vessel.

Fig. 19 Typical schematic view of molten Pb-Bi behavior.

## 付録

## A-1. 熱的スケーリング解析

実機への模擬性を検証するため、熱的なスケーリングに関する解析結果をここにまとめる。自然循環現象[6][7]を支配する代表的無次元数として、Grashof 数 ( $Gr$ 数) と Prandtl 数 ( $Pr$ 数)、Dammkohler 数 ( $Da$ 数) がある。 $Da$  数は内部発熱率に関する無次元数である。

$$Gr = \frac{g\beta(T_{\max} - T_i)H^3}{\nu^2} \quad (1)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2)$$

$$Da = \frac{\dot{Q}H^2}{\lambda(T_{\max} - T_i)} \quad (3)$$

また、熱伝達の表現に用いられる無次元数：Nusselt 数 ( $Nu$ 数) は

$$Nu = \frac{qH}{\lambda(T_{\max} - T_i)} \quad (4)$$

で、 $q$ が熱伝達境界での平均熱流束である。自然対流熱伝達の場合、 $Nu$ は、 $Gr$ 、 $Pr$ 、 $Da$ 数の関数として多くの相関式が提案されているが、ここでは、内部発熱を伴う液相プール内の Rayleigh 数を Internal Rayleigh 数として次の様に定義する。

$$Ra_H = Gr \cdot Pr \cdot Da = \frac{g\beta\dot{Q}H^5}{\nu\alpha\lambda} \quad (5)$$

$$Nu = f(Ra_H, Pr^n) \quad (6)$$

ここで、 $n$ は指数で値は小さいかゼロである。

自然対流熱伝達整理式については、非常に多くの実験的研究によってまとめられており、容器アスペクト比や  $Pr$  数、 $Gr$  数の適用範囲について様々な実験式が推奨されている[8]。以下、本実験体系の様な薄いスライス状の矩形容器について、文献[6][7]で推奨されている代表的な整理式をまとめる。薄いスライス状の矩形容器体系では、Steiberner-Reineke の整理式[9]、

$$Nu_{up} = 0.345Ra_H^{0.233} \quad (7)$$

$$Nu_{hr} = 0.85Ra_H^{0.19} \quad (8)$$

$$\therefore 10^7 < Ra_H < 3 \times 10^{13}, Pr \sim 7$$

が妥当性が高いとされている。ここで、添字  $up, hr$  は流体上面からと容器底部からの熱伝達を表す。ただし、流路に厚みのある容器には別の整理式が用意されている[8]。式(7)は、COPOの実験でも確認された[7]。スライス形状の半円容器では、Jahn-Reinekeの整理式[10]が推奨されている。

$$Nu_{up} = 0.36Ra_H^{0.23} \quad (9)$$

$$Nu_{dn} = 0.54 \left( \frac{H}{R} \right)^{0.26} Ra_H^{0.18} \quad (10)$$

$$\therefore 10^7 < Ra_H < 5 \times 10^{10}, Pr \sim 7$$

ここで、 $H$  は半円内に満たされたプールの深さで、 $R$  は半円の半径である。下向きの熱伝達を表す式(10)の妥当性も COPO の実験で妥当性が確かめられている[7]。式(9)は、矩形容器の上面熱伝達式(7)とほぼ同一であることに注意したい。半球形状については、Mayingerの整理式[11]が推奨されている。

$$Nu_{dn} = 0.55Ra_H^{0.2} \quad (11)$$

$$\therefore 7 \times 10^6 < Ra_H < 5 \times 10^{14}, Pr \sim 0.5$$

$Nu_{up}$  については、矩形と同じ相関式を用いることができるとされている。

以上挙げたものは、 $Ra$  数や  $Pr$  数において適用範囲が限られており、様々な範囲に置いて実験的検証が多くの研究者によって為されており、文献[8]が詳しくまとめている。最近の研究では、より高い  $Ra$  数 ( $\sim 10^{16}$ : 大型容器・高温体系)、かつ、より小さい  $Pr$  数 (溶融金属) での相関式の開発へと移行している[15]。

### A-1.1. 過渡変化の計算

内部発熱に基づく  $Nu$  数と  $Ra$  数の関係は、定常状態では温度差 ( $\Delta T = T_{max} - T_i$ : 過熱度) に基づく式に書き換えることができる。このため定常状態に対しては、内部発熱に基づく式も温度差に基づく式も同じ予測結果を与えることになる。しかし、温度差に基づく式は、プールから熱を除去するモデルが使われるべきであり、それゆえ、

プールに対する熱バランスは、時間と共にプール温度が変化する様子をあたえることになる。

定常状態の Nusselt 数を  $Nu_{ss}$  としして次の様に定義する[8]。

$$Nu_{ss} = ARa_H^\gamma \quad (12)$$

定常状態では、内部発熱量がすべて熱損失として逃げていくので、 $\dot{Q} = q/L$  とおけば  $Nu_{ss}$  は式(4)から書き換えて、

$$Nu_{ss} = \frac{\dot{Q}H^2}{\lambda\Delta T} \quad (13)$$

ここで、 $ss$  は 'steady state' を表す。これは、(3)式の  $Da$  数に等しい。これより Internal Rayleigh 数 ( $Ra_H$ ) は式(5)より、

$$Ra_H = \frac{g\beta\dot{Q}H^5}{\alpha\nu\lambda} = Ra \cdot Nu_{ss} \quad (14)$$

となる。また、温度差 (過熱度) で external Rayleigh 数 ( $Ra$  数) が  $Pr$  数と  $Gr$  数の積で定義され、

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{\max} - T_i)H^3}{\alpha\nu} \quad (15)$$

と示される。以上から、式(12)は次の様に書き換えられる。

$$Nu_{ss} = [ARa^\gamma]^{1/(1-\gamma)} \quad (16)$$

式(16)で、 $Nu_{ss}$  を  $Nu$  としして置き換えて、定常状態でないプール内にも拡張して適用する。つまり、内部発熱のある定常熱伝達式を内部発熱のない非定常熱伝達式に置き換えてみると、内部プールの温度変化は、非定常状態の熱バランスから、

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}H - q \quad (17)$$

と求まる。

### A-1.2. 半円境界での熱伝達相関式

本実験で用いている下部が半円形をしたスライス形状の容器内の自然対流熱伝達を良く予測するとされる Jahn-Reinecke の整理式を前節の關係を用いて書き換えてみる。定常状態の場合、式(15)で定義される external Rayleigh 数と式(16)の關係を、式 (9), (10)に代入すると、

$$Nu_{up} = 0.265 Ra^{0.2987} \quad (18)$$

$$Nu_{dn} = 0.472 \left( \frac{H}{R} \right)^{0.3171} Ra^{0.2195} \quad (19)$$

となる。式(18), (19)は本来、温度変化の無い定常状態での熱伝達の評価式であるが、ここでは、これを過渡状態の自然対流熱伝達の評価に拡張して用いる。

### A-1.3. 熱損失計算

実験体系のスケーリングを評価する予備解析として、下の様な単純化した体系を仮定し、式(18), (19)を用いて過渡自然対流熱伝達を計算した。なお、これらの式の適用範囲は  $Pr \sim 7$  であるが、本実験で用いる鉛-ビスマス合金は  $Pr \sim 0.014$  (Table 1) と小さく、大きな差がある。

流動条件は液体金属単相自然循環とし、境界条件として上部及び下部にはクラストが形成され、温度が融点で保持されると仮定した。つまり、Pb-Bi の凝固点温度 ( $T_s$ ) をプール外縁の境界温度、プールのバルク温度を  $T_m$  とし、過熱度 ( $\Delta T$ ) は  $T_m - T_s$  となる。計算に用いた物性値を Table A-1 にまとめる。

まず、本実験で用いた試験容器の幾何形状で、溶融合金の容量が 100 cc の時の温度をパラメータとした熱損失計算の結果を Table A-2 に示す。 $dT/dt$  は式(17)から求めた。Table A-1 内に\*を付した熱膨張係数については文献値が見つからなかったため、非圧縮性流体のブジネ (Bousinnesq) 近似を用い、次の式から見積もった。

$$\beta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho(T - T_0)} \quad (20)$$

ここでは、 $\rho_0$  に融点 100 °C の密度 10570 kg/m<sup>3</sup> [5]、 $\rho$  に 500 °C の密度 10050 kg/m<sup>3</sup> [12] を代入し、平均膨張率を推定した。 $dT/dt$  は境界条件に大胆な仮定を施しているので過大評価となっている。次に、溶融合金温度を 400 °C に固定し、容量を 100, 150, 200,

250 cc と変えた時の計算結果を **Table A-3** に示す。この時、 $Ra$  数の概算値は  $10^8 \sim 10^9$  のオーダーである。

過去の類似の実験例として、Kymäläinen の COPO の実験では作動流体に水を使用しているため、Rayleigh 数は  $10^{14} \sim 10^{16}$  という大きな値であった[7]。液体金属を使った Mayinger の実験では  $\sim 10^{11}$  である[11]。また、TMI-2 事故条件での同様の見積もりでは、 $2.6 \times 10^{12}$  であった。今回の実験の体系での概算値は、これらと比較すると小さいが、これは装置が小型であることや液体金属の温度・容量ともに小さいことが影響している。

#### A-1.4. 記号表

$\dot{Q}$	volumetric heat generation rate (W/m <sup>3</sup> )
$H$	characteristic dimension (m)
$T_{\max}$	maximum temperature in the pool (°C)
$T_i$	boundary temperature (°C)
$T_m$	melt temperature (°C)
$\lambda$	thermal conductivity (W/m/K)
$\alpha$	thermal diffusivity (m <sup>2</sup> /s)
$\beta$	fluid thermal expansion coefficient (1/K)
$\mu$	viscosity (Pa·s)
$\nu$	kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)

**Table A-1** Properties of molten metal using heat loss calculation  
(Pb-Bi, 44.5-55.5 wt%)

Molten Debris Temperature	$T_m$	(°C)	300, 400, 500
Solidification Temperature	$T_s$	(°C)	125
Density	$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	10050
Specific Heat	$c_p$	(J/kg/K)	146.55
Thermal Conductivity	$\lambda$	(W/m/K)	13.84
Thermal Diffusivity	$\alpha$	(m <sup>2</sup> /s)	$9.44 \times 10^{-6}$
Viscosity	$\mu$	(Pa s)	$1.29 \times 10^{-3}$
Kinetic Viscosity	$\nu$	(m <sup>2</sup> /s)	$1.29 \times 10^{-7}$
Volumetric Expansion Coeff.*	$\beta$	(1/K)	$1.38 \times 10^{-4}$
Prandtl number	$Pr$	(-)	0.014

**Table A-2** Results of heat loss calculation  
(melt volume: 100 cc / temperature parameters)

$R$ (m)	$L$ (m)	$\Delta T$ (°C)	$Ra$ (-)	$Nu_{up}$ (-)	$Nu_{dn}$ (-)	$q_{up}$ (MW/m <sup>2</sup> )	$q_{dn}$ (MW/m <sup>2</sup> )	$dT/dt$ (°C/s)
0.085	0.084	75	$4.93 \times 10^7$	52.62	22.96	0.65	0.28	0.63
0.085	0.084	175	$1.15 \times 10^8$	67.78	27.65	1.95	0.80	1.87
0.085	0.084	275	$1.81 \times 10^8$	77.57	30.54	3.51	1.38	3.33
0.085	0.084	375	$2.47 \times 10^8$	85.11	32.69	5.26	2.02	4.94

**Table A-3** Results of heat loss calculation  
(melt temperature : 400 °C / volume parameters)

$R$ (m)	$L$ (m)	$\Delta T$ (°C)	$Ra$ (-)	$Nu_{up}$ (-)	$Nu_{dn}$ (-)	$q_{up}$ (MW/m <sup>2</sup> )	$q_{dn}$ (MW/m <sup>2</sup> )	$dT/dt$ (°C/s)
0.085	0.084	275	$1.81 \times 10^8$	77.57	30.54	3.51	1.38	3.33
0.085	0.106	275	$3.63 \times 10^8$	95.55	38.31	3.43	1.38	3.26
0.085	0.135	275	$7.51 \times 10^8$	118.68	48.51	3.35	1.37	3.20
0.085	0.165	275	$1.37 \times 10^9$	142.06	59.00	3.28	1.36	3.15

This is a blank page.



# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>6</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>18</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

熔融炉心の原子炉下部ヘッド内堆積挙動に関する熱水力的基礎実験