

# 塩類添加による蒸気膜崩壊および蒸気爆発の促進効果

新井 崇洋<sup>†</sup> 古谷 正裕<sup>†</sup>

## Effect of Salt Additives to Water on the Severity of Vapor Explosions and on the Collapse of Vapor Film

Takahiro ARAI<sup>†</sup> and Masahiro FURUYA<sup>†</sup>

### Abstract

We proposed ultra rapid solidification and atomization technique, CANOPUS (Cooling and Atomizing based on NOble Process Utilizing Steam explosion), using small-scale vapor explosions to make an amorphous metal. The CANOPUS method is suitable for rapid cooling and atomization process, which utilizing sustainable small-scale vapor explosions. In order to apply the CANOPUS method to a high melting point metal, it is necessary to make a small-scale vapor explosion occur at a high temperature of the molten metal. Small-scale experiment is conducted to develop the vapor explosion promotor in which spontaneous vapor explosion can occur at a high temperature of a molten metal. Spontaneous vapor explosion do not occur when water at 80 °C is used as a coolant. However, spontaneous vapor explosion occurs when water at 80 °C with salt additives is used as a coolant. Specifically, lithium chloride solution generates spontaneous vapor explosions at the highest temperature of the molten tin in the experiment. In order to clarify the triggering mechanism of the spontaneous vapor explosion when the promotor is used as a coolant, a high-temperature solid stainless steel sphere is immersed into a coolant. The interfacial temperature of the stainless steel sphere is measured, and the behavior of a vapor film around the stainless steel sphere is observed with a digital video camera. As a result, salt additives resulted in an increase of quench temperature in all salt solutions. The quenching curves of each coolant indicate that the salt additives improve the film boiling heat transfer. The improvement of the film boiling heat transfer causes an unstable formation of the vapor film and a rise of the quench temperature. It is clarified that the salt additives to water promotes a vapor film collapse. Comparing two experiments, the quench temperature of each solution is in close agreement with the upper limit of the molten tin temperature that causes spontaneous vapor explosion. This result suggests that the vapor film collapse triggers spontaneous vapor explosion.

**Key Words:** Vapor explosion, Salt, Rapid quenching, Vapor film collapse, Film boiling

## 1 緒言

### 1.1 超急冷・微粒化技術 CANOPUS

半導体, 磁性体, 金属材料などの分野において近年, 非晶質(アモルファス)金属の利用が拡大している. 非晶質金属とは, ガラスのように, 元素の配列に規則性がなく全く無秩序な金属をさす. 非晶質金属の特徴として, 強靱性, 耐食性, 軟磁性が挙げられる. 一般に非晶質金属は化学的な活性が高いため,

高い耐腐食性を示す. 非晶質は均一性が高く, 腐食の起点となる粒界が存在しないことも耐腐食性の高さに寄与している.

このように非晶質金属は優れた特徴を有するものの, 通常は金属を溶融・冷却させる過程において結晶化が生じる. そのため, 非晶質相を得るために, 冷却速度の向上あるいは添加物を用いた非晶質化, いわゆる金属ガラスに関する研究がこれまで活発に行われてきた. 今後より多くの金属材料を非晶質化

受付日: 2006年3月14日, 第43回日本伝熱シンポジウムより受付, 担当エディター: 河村 洋

<sup>†</sup> 電力中央研究所 原子力技術研究所 (〒201-8511 東京都狛江市岩戸北 2-11-1)

させるためには、冷却速度を向上させた冷却手法が期待されている。

そこで筆者らは、小規模蒸気爆発を持続的に発生させることによる、安全かつ効率的な液体微粒化手法および超急冷手法である CANOPUS (Cooling and Atomizing based on Noble Process Utilizing Steam explosion)法を考案した[1]。CANOPUS 法では熔融材料と冷却材を少量ずつ混合して持続的に小規模蒸気爆発を発生させるため、大規模な蒸気爆発が発生することがない急冷微粒化手法である。CANOPUS 法の冷却速度は最大で  $1.5 \times 10^8$  K/s であり、従来手法の 280 倍以上である。この高い冷却速度を利用して、従来にない組成の非晶質化材料を作製することが可能となった。

### 1.2 蒸気爆発

CANOPUS 法として活用した蒸気爆発とは、熔融金属などの高温液体と水などの低温液体が接触する際に、両者を隔ている蒸気膜が崩壊することで両液体が直接接触し、急速な蒸気生成と微粒化が行われる現象である。

この蒸気爆発現象は、原子力、金属工業、そして製紙業などの産業分野においても発生しており、産業災害として認知されてきた。そのため、1960 年代以降、蒸気爆発に関する数多くの実験的研究ならびに理論的研究が行われ、大規模な蒸気爆発については、以下に示す一連の素過程からなることが研究者間の共通認識となっている[2]。Fig. 1 に大規模蒸気爆発素過程の概念図を示し、各段階について述べる。

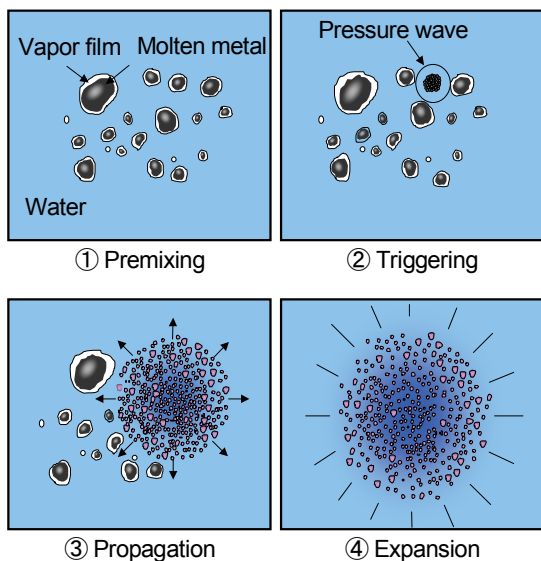


Fig. 1 Schematic of basic process on large scale vapor explosion [2].

- ① 粗混合(Premixing)  
高温液体と低温液体が蒸気膜によって隔てられている膜沸騰状態が形成される。
- ② トリガリング(Triggering)  
自発的あるいは外部からのトリガーによって膜沸騰が不安定化し、低温液体と高温液体が直接接触し、圧力波を生成する。
- ③ 伝播(Propagation)  
急速な熱伝達、蒸気発生、微粒化を伴いながら粗混合領域全体に圧力波が伝播する。
- ④ 膨張(Expansion)  
高圧領域が膨張することにより、機械的エネルギーを放出する。

また、Fig. 2 は、蒸気爆発のトリガリング過程の詳細を示した概念図である。

蒸気爆発のトリガリングにおいて必要とされる条件は以下の3つである。

- ① 熔融金属周囲に形成されている蒸気膜が崩壊する。
- ② 直接接触により自発核生成が発生する。
- ③ 接触界面温度が熔融金属融点以上であり(液液直接接触)、熔融金属の微粒化が発生する。

つまり、水中の熔融金属は、周囲に蒸気膜が形成されており、何らかの要因によって蒸気膜が崩壊する。その蒸気膜が崩壊した箇所で直接接触が発生し、その接触界面において水の自発核生成が生じる。自発核生成が発生する様相を高速度可視観測した結果によると、直接接触してから  $10 \mu\text{s}$  という極めて短い時間に、熔融金属表面上に自発核生成による気泡群が生成される[3]。この自発核生成により接触界面が不安定になり、熔融金属が微粒化する。それにより新たな接触界面が生成され、再び自発核生成が発生するという正のフィードバックが働く。

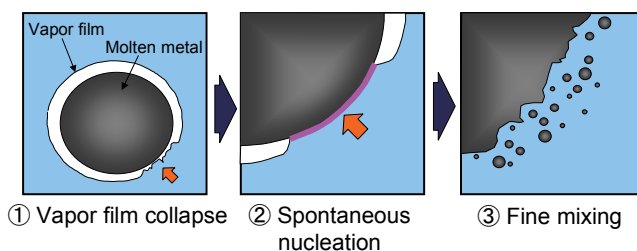


Fig. 2 Schematic of triggering process on vapor explosion.

### 1.3 高融点金属に対する CANOPUS 法の適用

実用的な金属材料は、融点が高い金属であるものが多い。そのため、それら融点が高い実用材料に CANOPUS 法を適用し、非晶質化を達成するためには、より熔融金属温度が高い条件下でも効率的に蒸気爆発を発生させる必要がある。

金属の融点が高いことは、より高い温度で固化する、つまり蒸気爆発トリガリングの必要条件である液液直接接触が発生しにくくなることを意味する。また、融点が高いために冷却材と接触する初期温度が高くなり、熔融金属周囲に形成される蒸気膜が、より安定して存在する。そのため、蒸気爆発トリガリングの必要条件である蒸気膜崩壊も発生しにくくなる。以上の点から、高融点金属に対して蒸気爆発を発生させるためには、より高温条件下で蒸気膜を崩壊させることが必要となる。

高温条件下で蒸気膜崩壊を促進させる方法としては、機械的に促進する方法と熱的に促進する方法の二つが考えられる。まず、機械的な促進手法は、蒸気膜に対して外力を加えることで機械的に蒸気膜を崩壊させることを指す。これを強制的蒸気膜崩壊促進効果と呼ぶこととする。次に、熱的な促進方法は、蒸気膜の凝縮を促進させることを指す。これを自発的蒸気膜崩壊促進効果と呼ぶこととする。本研究では、効率的に蒸気爆発を発生させるためには自発的蒸気膜崩壊が促進されることが重要であると考え、自発的蒸気膜崩壊による蒸気爆発の促進効果に着目することとした。

自発的蒸気膜崩壊促進に関する研究としては、冷却特性の向上のための研究が行われてきている。特に鋼の焼き入れなどの分野においては古くから研究されており、水に塩を添加することによって蒸気膜崩壊が促進されることが実験的に示されている。以下に代表的な実験について述べる。

多賀谷らは、銀細線浸漬実験を実施することによって、さまざまな水溶液に対する冷却能を比較し、水に塩を添加することによって冷却性能が向上することを示した[4, 5]。

Ohnaka らならびに本田らは、高温白金細線の水および塩類水溶液中に浸漬冷却させる実験を行い、塩添加による冷却特性の向上を示した[6, 7]。

松村らは、高温固体球を用いて浸漬実験を行い、塩化ナトリウム水溶液の冷却特性を検討した[8]。

また、塩の添加効果について、小規模蒸気爆発に対する実験的検討も行われており、自発的蒸気爆発

の発生が促進される結果が得られている。以下に代表的な小規模蒸気爆発実験について示す。

Takigahira, Sugiyama らは、塩化ナトリウム水溶液ならびに塩化カルシウム水溶液を冷却材として、亜鉛ならびに銅の液滴を落下させる自発的蒸気爆発実験を行った。その結果、水の場合では自発的蒸気爆発が発生しない条件下でも塩を添加した水溶液を用いることで自発的蒸気爆発が発生することを示した[9]。

著者らは、塩化ナトリウム水溶液ならびに塩化カルシウム水溶液を冷却液として、熔融金属プールに冷却液滴を滴下する実験を行い、蒸気爆発が発生する熔融金属温度領域が、水の場合よりも高温側に移行することを示した[10]。

以上のように、冷却材である水に対して塩を添加することにより、蒸気膜崩壊促進効果ならびに蒸気爆発促進効果が得られることが示されている。しかしながら、両者の関連性については定量的に明らかにされておらず、添加する塩の種類に対する見も不十分である。

本研究の目的は、水に種々の塩を添加した冷却材を用いて、高温で蒸気爆発が発生する蒸気爆発促進材を見出すとともに、自発的蒸気爆発の発生促進機構を明らかにすることとした。

## 2 熔融錫を用いた小規模蒸気爆発実験

### 2.1 実験目的

熔融錫を冷却プールに滴下させる実験を実施し、水に対する塩の添加が自発的蒸気爆発の発生温度範囲に与える影響を明らかにし、より高温で自発的蒸気爆発を発生させる蒸気爆発促進材を見出す。

### 2.2 実験装置ならびに実験手順

本実験では錫を試験金属として使用した。錫は融点が 231.9 °C と低く、小規模蒸気爆発実験においてよく使用される金属である。

Fig. 3 に実験装置の概要図を示す。試験部は加熱炉ならびに冷却材プールからなる。加熱炉は、真空チャンバー内にアルミナ坩堝が設置され、高周波誘導により加熱される体系である。加熱炉内は酸化を抑制するためにアルゴン雰囲気とした。試験金属である錫は、アルミナ坩堝内で、高周波誘導により加熱される。アルミナ坩堝底部には、熔融錫を液滴として冷却材プールに滴下するための穴がついている。

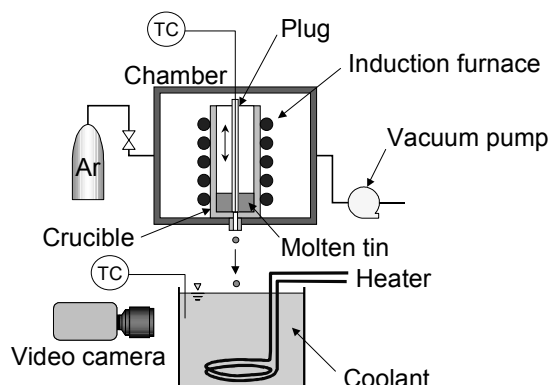


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus for small scale vapor explosion.

加熱時には、その穴をふさぐためにプラグが挿入されている。このプラグ内部に非接地型タイプ K シース熱電対を挿入されており、この熱電対の指示値を溶融錫温度とした。また、冷却材プールは一辺が 200 mm、水深は 450 mm とした。冷却材プールの温度制御にはマイクロヒーターを用いた。プール内温度を K 型シース熱電対によって計測し、その計測値に基づいてマイクロヒーターへの入力電圧を PID 制御することで、所定の温度を維持した。

実験手順を以下に示す。まず冷却材プールを所定の温度に保持する。その後、錫を加熱、溶融し、所定の温度に達して安定したところでプラグを引き抜き、冷却材プールに滴下させる。このときの溶融錫挙動はビデオカメラ(Panasonic 社製, SDR-S100)によってプール側面より観察した。撮影条件は、撮影速度 30 fps, シャッター速度 1/8000 s とした。

### 2.3 実験条件

Table 1 に実験条件を示す。冷却材温度は 80 °C 一定条件とし、溶融錫温度を 50 °C 間隔で変化させることによって、蒸気爆発が発生する溶融錫温度の上限値を求めた。溶融錫は直径 3 mm のノズルから落下距離 400 mm にて滴下される。なお、既存の知見との比較および水溶液の違いの影響を評価するために、既存の研究で用いられていた水溶液および類似した塩の水溶液を用いた。自発的蒸気爆発の発生の有無は、爆発音ならびに観測画像における急膨張の有無により判別した。なかでも、自発的蒸気爆発が発生する水深が 50 mm より浅い場合には自発的蒸気爆発ありと判別した。逆に、自発的蒸気爆発が水深 50 mm より深い位置で発生した場合は、初期温度条件が変化したものとして、自発的蒸気爆発なしと

Table 1 Experimental condition.

Test metal	Tin (m.p.:231.9°C)
Initial temperature of molten metal	280–1200°C
Mass of molten metal	50g
Coolant	CaCl <sub>2</sub> solution NaCl solution LiCl solution MgCl <sub>2</sub> solution Water
Concentration of solution	20wt%
Initial temperature of coolant	80°C
Falling distance	500mm
Nozzle diameter	Φ3mm

判別することとした。

### 2.4 実験結果ならびに考察

Fig. 4 は 80 °C の冷却プールに 500 °C の溶融錫を滴下した時の観測結果である。上段が水の場合であり、下段が 20 wt% 塩化ナトリウム水溶液の場合を示している。まず、水の場合には、時刻 0.03 s において溶融錫が冷却プール内に入ると、周囲に蒸気膜が生成した。時刻 0.07 s には溶融錫の形状は変化するものの、蒸気膜が安定して存在したまま落下し、蒸気爆発は発生しなかった。水温 80 °C においては 280-1100 °C の溶融錫温度に対して自発的蒸気爆発の発生は見られなかった。20 wt% 塩化ナトリウム水溶液の場合には、時刻 0.03 - 0.07 s は溶融錫が冷却プール内を蒸気膜に覆われながら落下し、時刻 0.10 s において自発的蒸気爆発が発生した。

Table 2 は各種水溶液に対して同様の実験を実施し、自発的蒸気爆発が発生する溶融錫温度の上限値を評価した結果である。水の場合には自発的蒸気爆発が 280-1100 °C の溶融錫温度範囲においては全く発生しなかったのに対して、塩を添加することにより、いずれの水溶液の場合においても自発的蒸気爆発が発生するようになることを確認した。添加する塩の種類によって溶融錫温度の上限値の上昇効果が異なることが分かった。本実験で用いた塩の中で、最も高い溶融錫温度に対して自発的蒸気爆発を発生させられるのは塩化リチウム水溶液であることが明らかになった。

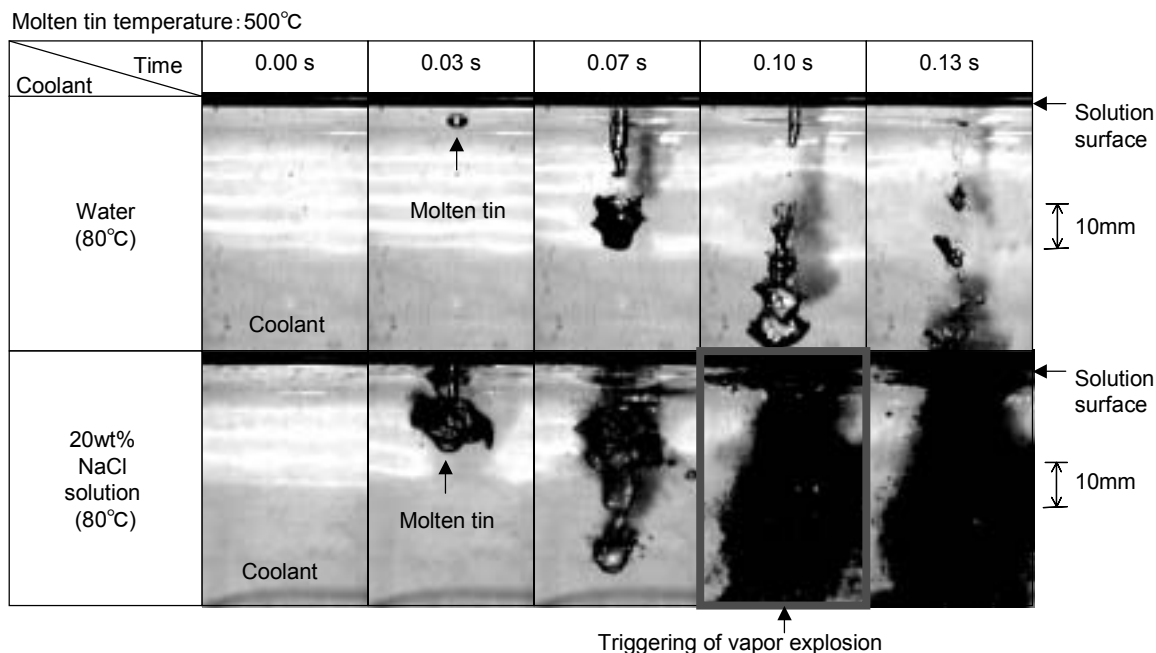


Fig. 4 Effect of salt additives to spontaneous vapor explosion.

Table 2 Upper limit of molten tin temperature on spontaneous vapor explosion.

Coolant (Concentration of solution: 20wt%) (Temperature of solution: 80°C)	Upper limit temperature range of spontaneous vapor explosion (°C)
Water	No explosion
MgSO <sub>4</sub> solution	450
MgCl <sub>2</sub> solution	550
NaCl solution	550
CaCl <sub>2</sub> solution	650
LiCl solution	700

### 3 溶融錫を用いた小規模蒸気爆発実験

#### 3.1 実験目的

塩添加により、高温で自発的蒸気爆発が発生する要因として、溶融金属周囲に形成する蒸気膜挙動に着目し、液体金属を模擬した高温固体ステンレス球を冷却材中に浸漬させる実験を実施することとした。固体球浸漬実験によって、塩添加が蒸気膜の生成ならびに崩壊過程に与える影響について明らかにする。

#### 3.2 実験装置ならびに実験手順

実験装置の概要図を Fig. 5 に示す。試験部は加熱部ならびに冷却材プールからなる。加熱部は内径 40 mm の円柱状電気炉である。試験固体球はこの電気炉内で大気加熱される。固体球中心にはφ1.6 mm 接

地型タイプ K シース熱電対を挿入した。この熱電対は、固体球の昇降および支持のためにも利用した。固体球は加熱炉上部に設置されたモーターによって上下に駆動される。

本実験で用いる試験固体球の詳細図を Fig. 6 に示す。直径 30 mm のステンレス(SUS304)製固体球表面温度を計測するために球中心にφ1.6 mm 接地型タイプ K シース熱電対を挿入した。本実験で使用した熱電対の時定数は約 0.1 s である。熱電対先端は固体球下部において TIG 溶接した後にバフ研磨を行うことで、球表面の凹凸を最小限に抑え、穴の貫通部分が気泡核となって蒸気膜の崩壊挙動に影響を与えないように配慮した。固体球表面温度の計測には、データロガー(Graphtec 社製, GL400)を使用し、計測間隔は 0.1 s とした。温度計測誤差に関して、タイプ K シース熱電対は JIS クラス 1 であり、許容差は測定温度の±0.4 % である。また、データロガー GL400 の計測誤差は測定温度の 0.05 % +1.5 °C である。よって、本実験におけるクエンチ温度測定位置の温度計測誤差は最大±3.7 K である。

冷却材プールは一辺が 200 mm、高さが 150 mm のガラス水槽に、とした。冷却材温度制御は、プール内温度を計測し、プール内に挿入したヒーターへの入力電圧を PID 制御することで行った。

実験手順を以下に示す。まず固体球を電気炉の中心部分で所定の温度まで加熱・保持し、モーター駆動装置によって冷却材プールにゆっくりと浸漬させ

Table 3 Experimental condition.

Coolant	CaCl <sub>2</sub> solution NaCl solution LiCl solution MgCl <sub>2</sub> solution MgSO <sub>4</sub> solution NaNO <sub>3</sub> solution Water
Concentration of solution	20wt%
Initial temperature of coolant	80°C
Initial temperature of stainless steel sphere	800°C
Immersion depth	15mm (0.5D)

る。このときの冷却に伴う固体球表面の温度変化を固体球に挿入した熱電対により測定することとした。浸漬時の沸騰様相はビデオカメラ(Panasonic 社製, SDR-S100)によって観察した。ビデオカメラの撮影条件は、撮影速度 30 fps, シャッター速度 1/8000 s とした。

本実験における固体球浸漬深さは、球直径  $D$  に対して浸漬深さ  $H$  を  $0.5D$  つまり 15 mm とし、熱電対挿入部が蒸気膜崩壊挙動に与える影響を排除した。また、固体球の初期表面性状を一定に保つため、実験前に球表面をエタノールにより脱脂洗浄を行い、実験毎に新品と交換することとした。

### 3.3 実験条件

Table 3 に実験条件をまとめた。本実験においてはステンレス球初期温度、冷却材初期温度ならびに浸漬深さを一定とし、冷却材の種類を実験パラメータとした。なお、ステンレス球初期温度は 800 °C とした。

### 3.4 実験結果ならびに考察

Fig. 7 は冷却材として水ならびに 20 wt%塩化ナトリウム水溶液を用いて、初期温度 800 °C のステンレス球を浸漬させたときの側面観測画像を時系列で示している。冷却材温度はいずれも 80 °C である。Fig. 8, 9 は、それぞれステンレス球表面の温度と冷却速度の時間変化を示している。冷却速度は、計測ノイズの影響を緩和するために、5 点の移動平均より算出した。Fig. 10 は、ステンレス球の過熱度に対する表面熱流束である。表面熱流束の算出に際して、ステンレス球全体の温度が一様であると仮定した。こ

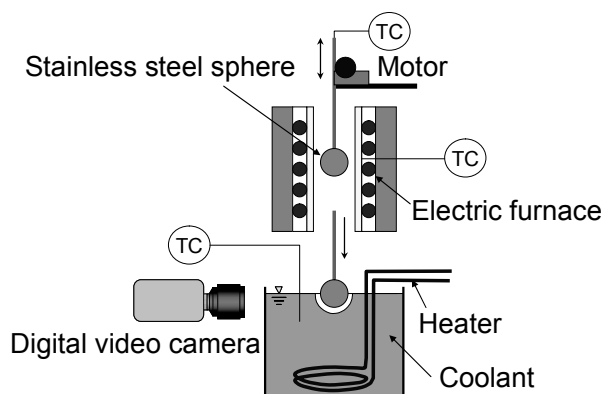


Fig. 5 Schematic of experimental apparatus for stainless steel sphere immersion experiment.

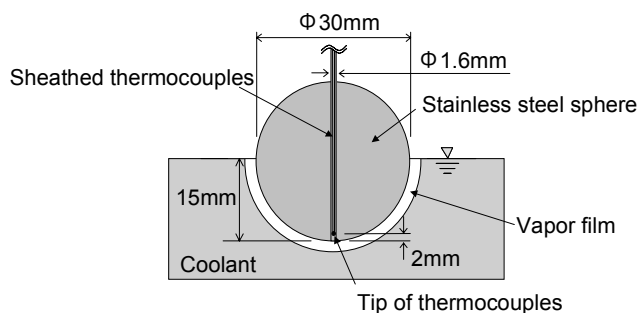


Fig. 6 Schematic of stainless steel sphere.

のステンレス球が、浸漬した下半球の表面から冷却されるとし、上半球は断熱されているものとした。計測ノイズの影響を緩和するために、5 点の移動平均より表面熱流束を算出した。Fig. 8, 9, 10 の点 A-E および点 A'-E' は、Fig. 7 の画像 A-E および画像 A'-E' に対応している。ステンレス球表面温度が 800°C に達した時刻を時刻 0 s とした。

まず水の場合について、画像 A : 0.0 s ではステンレス球周囲に蒸気膜が形成されており、画像 B : 40.0 s においても同様の蒸気膜が確認できる。この蒸気膜は、局所的に大量の蒸気が生成されるために、蒸気膜界面が波打っているものの、比較的厚く安定して形成されていた。この安定した膜沸騰段階における冷却速度は、浸漬開始時におよそ 10 K/s であり、蒸気膜崩壊直前には 3 K/s まで低下した。その後も安定した蒸気膜が形成され、画像 C : 86.0 s においてステンレス球下端左奥から蒸気膜の崩壊が始まった。画像 D : 87.0 s には蒸気膜の崩壊がステンレス球周囲に拡大しながら、微小な蒸気泡を大量に生成した。画像 E : 89.0 s にはステンレス球の輪郭が不明瞭になるほどの無数の蒸気泡が生成され、ステンレス球浸漬部分全域が核沸騰に移行した。ステンレス

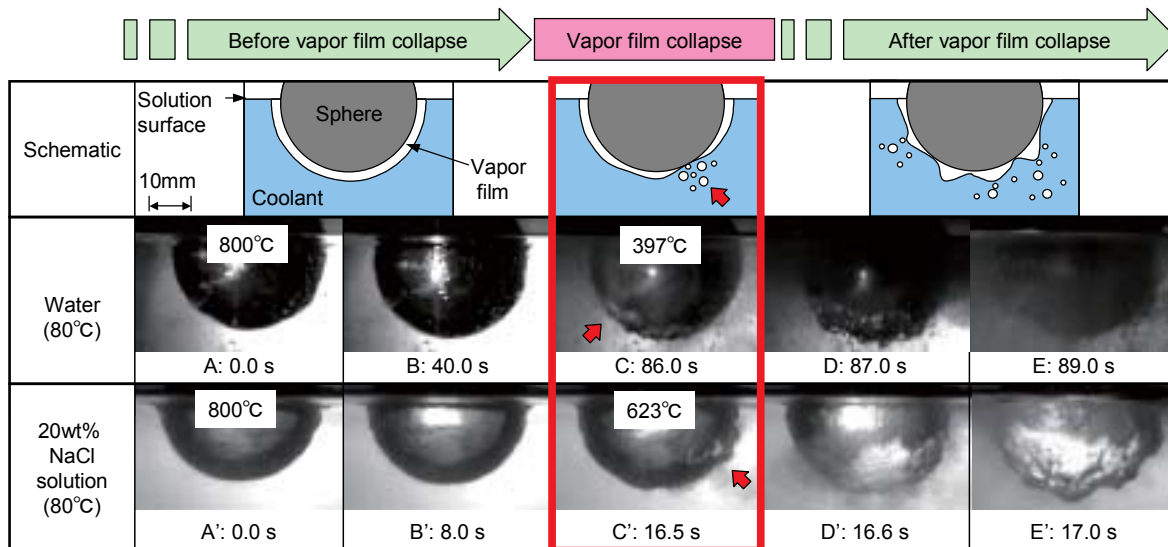


Fig. 7 Effect of salt additives on vapor film collapse.

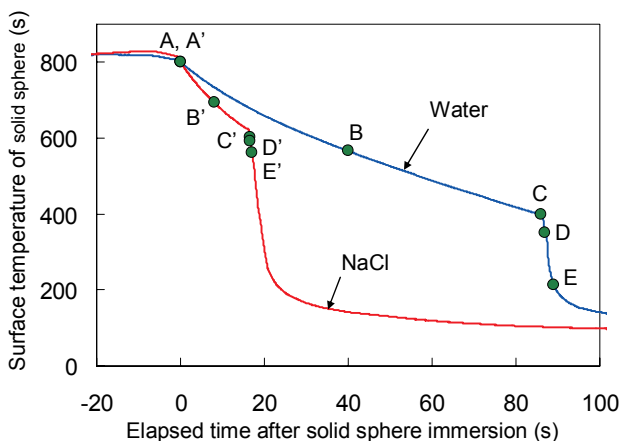


Fig. 8 Quenching curve of stainless steel sphere.

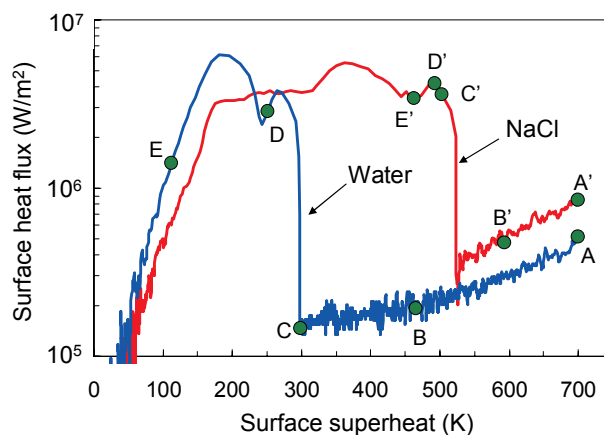


Fig. 10 Surface heat flux of stainless steel sphere.

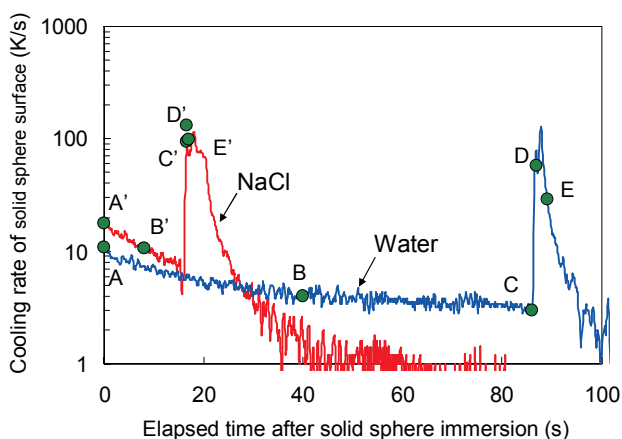


Fig. 9 Cooling rate of stainless steel sphere.

球表面が膜沸騰から核沸騰に移行するときには急激に温度が低下し始める。このときの温度をクエンチ温度と定義すると、397℃であった。また、冷却速

度はクエンチ開始時刻から1.7秒後に約130 K/sの最大値に達した。このステンレス球表面温度を、過熱度に対する表面熱流束変化としてみた場合、浸漬直後の過熱度が700 Kのときの表面熱流束は約 $4.9 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ であった。膜沸騰状態を形成しながら過熱度が減少するにつれて、表面熱流束も緩やかに減少した。そして、ステンレス球のクエンチ温度近傍で極小熱流束点を得られ、約 $1.6 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ であった。蒸気膜が崩壊することで、膜沸騰から核沸騰へ遷移し、急激に表面の熱流束が増大して極大熱流束点に至った。このときの極大熱流束は約 $5.5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ であった。

20 wt%塩化ナトリウム水溶液について、画像A' : 0 sではステンレス球周囲に安定した蒸気膜が形成されており、画像B' : 8.0 sまで同様の蒸気膜が形成されていた。この蒸気膜は、水の場合と比較すると

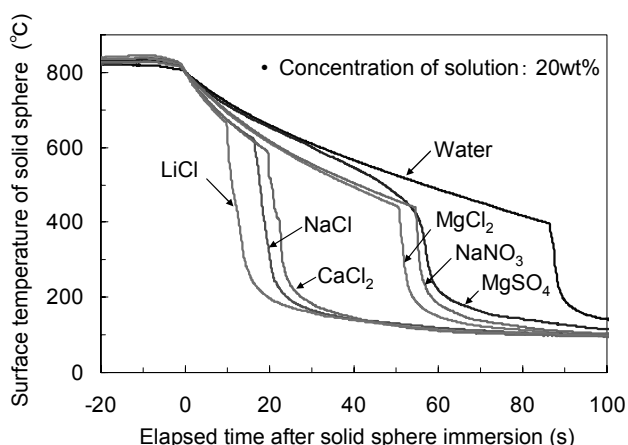


Fig. 11 Effect of salt additives on quenching curve.

比較的薄く、蒸気膜界面は揺らぎが少なく、均一な厚さを保っていた。この膜沸騰段階における冷却速度は、浸漬開始時に約 17 K/s であり、蒸気膜崩壊直前には約 7 K/s まで低下した。画像 C' : 16.5 s においてステンレス球先端右側面から蒸気膜の崩壊が始まり、0.1 秒後の画像 D' : 16.6 s には蒸気膜崩壊部分が浸漬部分の表面積の 3 分の 1 程度に達し、周囲に微小な蒸気泡も生成していた。画像 E' : 17.0 s には浸漬部分全域で蒸気膜が崩壊し、核沸騰に移行した。このときのクエンチ温度は 623 °C であった。最大冷却速度はクエンチと同時に於いて見られ、約 100 K/s であった。このステンレス球表面温度を、過熱度に対する熱流束変化としてみた場合、浸漬直後の過熱度が 700 K のときの熱流束は約  $8.2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  であった。水の場合と同様に、膜沸騰状態を形成しながら過熱度が減少するにつれて、表面熱流束も緩やかに減少している。そして、ステンレス球のクエンチ温度近傍で極小熱流束点を得られ、約  $3.3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  であった。蒸気膜が崩壊することで、膜沸騰から核沸騰へ遷移し、急激に表面熱流束が増大して極大熱流束点に至る。このときの極大熱流束は約  $6.2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  であった。また、ステンレス球がクエンチすることによって、蒸気膜に遮られることなく塩化ナトリウム水溶液と直接接触した直後に、ステンレス球表面が白くなる現象が観測された。観測された白い物質は塩であり、水溶液が直接接触することによって、水分が急激に蒸発したことで、ステンレス表面に析出したものと考えられる。ステンレス表面に析出した塩は、クエンチ後の核沸騰ならびに対流熱伝達に至る過程で再び水溶液中に溶解した。

両者を比較すると、水に 20 wt% の塩化ナトリウムを添加することによって、クエンチ温度が約 230 °C

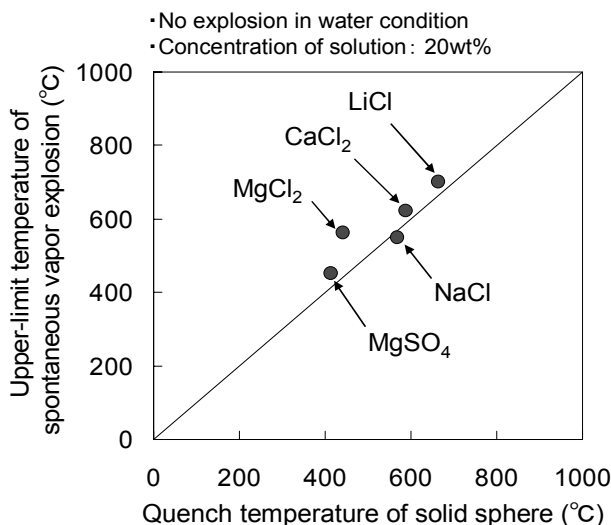


Fig. 12 Relationship of quench temperature to upper limit temperature range of spontaneous vapor explosion.

上昇することがわかった。また、クエンチ前の膜沸騰段階におけるステンレス球表面冷却速度も増大していた。表面熱流束を比較すると、20 wt% 塩化ナトリウム水溶液は、水に対して最大で約 2 倍であった。この結果から、水に塩を添加することによって膜沸騰熱伝達が向上することが判明した。また、膜沸騰時の蒸気膜挙動の観測結果から、水の場合には局所的に大量の蒸気が生成されることによって、蒸気膜界面が波打ちながら比較的厚い蒸気膜に覆われる様子が確認された。それに対して、20 wt% 塩化ナトリウム水溶液の場合には、比較的薄く均一な厚さの蒸気膜に覆われる様子が確認された。以上より、水に塩を添加することで、気液界面での蒸気生成が相対的に抑制され、蒸気膜厚さが減少し、膜沸騰熱伝達が向上したと考えられる。これによって、膜沸騰時にステンレス球と冷却材が直接接触する頻度が增大する可能性が高くなり、より高温で蒸気膜が崩壊しやすくなったと考えられる。

Fig. 11 はさまざまな塩に対するステンレス球表面温度の冷却曲線を示している。水に対して塩を添加することによって、いずれの水溶液においてもクエンチ温度が上昇する結果を得た。そして、膜沸騰時の冷却曲線の傾きが大きい、すなわち膜沸騰熱伝達が大きいほどクエンチ温度が高い傾向があることが分かった。本実験で使用した塩のなかで最もクエンチ温度が上昇したのは塩化リチウム水溶液であった。また、硫酸マグネシウム水溶液においては、他の水溶液と比較すると、ゆっくりと蒸気膜が崩壊したため、明確なクエンチ点はみられなかった。これは、



蒸気膜崩壊が開始した後、局所的には膜沸騰から核沸騰に遷移したものの、全体としては蒸気膜が比較的安定に保持し続けたためである。

以上のように、ステンレス球の浸漬実験においては、塩を水に添加することによってクエンチ温度が上昇することがわかった。蒸気膜崩壊は、蒸気爆発が発生するための必要条件であることから、塩の添加によって高温で蒸気膜崩壊を発生させることで、より高温で蒸気爆発を発生できる可能性が考えられる。ただし、固体球を用いた実験では、蒸気膜崩壊は発生するものの、液液直接接触ではないため蒸気爆発は発生しない。よって、固体球浸漬実験で得られたクエンチ温度のみから蒸気膜崩壊の発生条件および自発的蒸気爆発の発生条件の評価することは困難である。そこで、前述の溶融錫を用いた小規模蒸気爆発実験で得られた自発的蒸気爆発が発生する溶融錫温度の上限値を用いて、塩の添加によるクエンチ温度の上昇効果が、自発的蒸気爆発が発生する溶融金属温度条件に及ぼす影響を評価することとした。

Fig. 12はステンレス球のクエンチ温度と自発的蒸気爆発が発生する溶融錫温度の上限値の比較結果を示している。各水溶液におけるステンレス球のクエンチ温度とほぼ等しい溶融錫温度まで自発的蒸気爆発が発生していることが分かる。塩の添加によってクエンチ温度が上昇するとともに、蒸気爆発が発生する溶融錫温度の上限値も上昇することが明らかとなった。よって、蒸気爆発の発生には蒸気膜崩壊が起因となっており、塩の添加によってクエンチ温度を上昇させることで高温でも蒸気膜の崩壊が発生しやすくなり、それによって自発的蒸気爆発が発生する温度範囲が高温側に拡大したと考えられる。

#### 4 結論

溶融錫を冷却材に滴下する小規模蒸気爆発実験を実施し、自発的蒸気爆発が発生する温度範囲を検討した。80℃の水に様々な塩を20 wt%添加して実験を実施した結果、塩添加によって自発的蒸気爆発が発生する溶融錫温度の上限値が高温側に移行し、その効果は塩の種類によって異なることを確認した。本実験で用いた塩の中では塩化リチウム水溶液が最も高い溶融錫温度で自発的蒸気爆発を発生させることができ、蒸気爆発促進材として有用であることを明らかにした。

塩添加により高温で発生する自発的蒸気爆発の発生機構を明らかにするため、溶融金属周囲に形成する蒸気膜挙動に着目して高温溶融金属を模擬した高温ステンレス球を冷却材に浸漬する実験を実施した。浸漬したステンレス球表面温度を計測した結果、塩添加によって膜沸騰熱伝達が向上し、それに伴ってクエンチ温度が上昇することがわかった。また、蒸気膜崩壊挙動の観測画像より、水に塩を添加することによってステンレス球周囲に形成された蒸気膜の厚さが減少する様相が確認された。

溶融錫を用いた小規模蒸気爆発実験で得られた、自発的蒸気爆発が発生する溶融錫温度の上限値を用いて、塩の添加によるクエンチ温度の上昇効果が、自発的蒸気爆発が発生する溶融金属温度条件に及ぼす影響を評価した。その結果、各水溶液に対して得られた高温ステンレス球のクエンチ温度と、自発的蒸気爆発が発生する溶融錫温度の上限値により相関があることが判明した。

以上より、塩を添加することで気液界面での蒸気生成が相対的に抑制され、蒸気膜厚さが減少し、膜沸騰熱伝達が向上したと考えられる。これによって、膜沸騰時にステンレス球と冷却材が直接接触する頻度が增大する可能性が高くなり、より高温で蒸気膜が崩壊しやすくなったと考えられる。すなわち、水に対する塩の添加は、蒸気膜崩壊過程に対して寄与し、より高温で蒸気膜崩壊が発生することによって、より高温で自発的蒸気爆発が発生すると考えられる。

#### 謝辞

本研究の実験にあたっては、株式会社セレス 吉岡 武男 氏、齋藤 仁宏 氏、株式会社電力テクノシステムズ 鎌田 裕和 氏、西山 邦彦 氏にご協力いただいた。ここに記し感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] Furuya, M., "Development of Novel Rapid Cooling and Atomization Process Making the Best Use of Vapor Explosion Phenomenon", *Proc. 12th International Heat Transfer Conference* (2002), 705-709
- [2] OECD/NEA, "Meeting summary", *Proceedings of the CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions*, NUREG/ CP-0127, NEA/ CSNI/ R (98) 8 (1993), MS-1-11.

- [3] Furuya, M., "Vapor Explosions in the System of a Water Droplet Impinging onto a Molten Alloy Surface," *Proc. Seminar on Vapor Explosions in Nuclear Power Safety* (1996).
- [4] 多賀谷正義, 田村今男, "焼入冷却材の研究(第6報)濃厚塩水溶液の冷却能", *日本金属学会誌*, **B16-2** (1952), 652-655.
- [5] 多賀谷正義, 田村今男, "焼入冷却材の研究(第4報)水および水を主成分とする液体の冷却能", *日本金属学会誌*, **B16-2** (1952), 107-111.
- [6] Ohnaka, I. *et al.*, "Production of amorphous filament by in-rotating-liquid spinning method", *Proc. 4th International Conference on Rapidly Quenched Metals* (1981), 31-34.
- [7] 本田博司, 他3名, "白金細線の浸漬急速冷却過程の伝熱特性(塩化カルシウム水溶液による伝熱促進)", *日本機械学会論文集(B編)*, **58-554** (1992), 3135-3140.
- [8] 松村邦仁, 他2名, "高温固体球の冷却特性に関する研究(冷却材への塩類添加の影響)", *第40回日本伝熱シンポジウム講演論文集*, D143 (2003), 139-140.
- [9] Takigahira, Y., Sugiyama, K. and Ishikawa, M., "Spontaneous vapor explosion of molten materials in salt solutions", *Proc. 5th International Conference on Nuclear Engineering*, 2307 (1997) 1-5.
- [10] Furuya, M. *et al.*, "Effects of Polymer, Surfactant, and Salt Additives to a Coolant on the Mitigation and the Severity of Vapor Explosions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **26-2-4** (2002), 213-219.