

JAERI-Research

2004-014



JP0450786



溶液表面での気泡の破裂に伴う
ミスト放出挙動評価モデルの検討

2004年9月

阿部 仁・田代 信介・森田 泰治

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, Ibarakiken 319-1195, Japan.

溶液表面での気泡の破裂に伴うミスト放出挙動評価モデルの検討

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部
阿部 仁・田代 信介・森田 泰治

(2004年8月13日受理)

湿式再処理工程では、平常時や溶液燃料臨界等の異常事象時において、溶液表面での気泡の破裂によって溶液燃料の一部がミストとして気相中に放出される。したがって、放射性物質の放出挙動を評価するためには、ミストの放出挙動の定量的評価が重要である。そこで、ミスト放出挙動試験を実施するとともにミストの放出に関する評価モデルを作成した。

ミスト放出挙動試験では、 LiNO_3 水溶液中に微小な孔を開けた気泡発生管を介して窒素ガスを送り込むことで気泡を発生させ、溶液表面での気泡の大きさをビデオマイクロスコープシステムで計測した。ミストを溶液表面から決められた高さに設置したガラス繊維ろ紙に付着させ、付着した Li 量を蛍光分析によって同定し到達ミスト量を求めた。

破裂直前の気泡は、浮力と気泡が溶液表面を持ち上げることで新たに形成した溶液面の張力がつりあっているものと仮定し、この溶液面部分が破裂によってミストとなり、気相中に放出されるものと考え、ミスト放出挙動評価モデルを作成した。放出されるミストの粒子径分布は対数正規分布に従うと仮定し、幾何平均径及び幾何標準偏差をパラメータとして試計算を行うとともにミスト放出挙動試験との比較検討を行った。その結果、鉛直上方向へのミストの到達量を大きな矛盾なく評価できることを示した。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づき、原研が文部科学省から委託されて実施した「再処理施設臨界安全性実証試験」の研究成果を一部使用し取りまとめたものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Investigation of Evaluation Model of Mist Release Behavior
from Burst of Bubble on the Solution Surface

Hitoshi ABE, Shinsuke TASHIRO and Yasuji MORITA

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

(Received August 13, 2004)

In the wet reprocessing process, a part of the solution is released as a mist by bursting bubbles on the solution surface under the normal condition and the abnormal conditions such as the criticality accident in the fuel solution. To estimate released radioactive materials under the accident, quantitative evaluation model for the behavior of the mist is important. Experiment and evaluation model for evaluating the behavior of the mist were examined and investigated.

As the experiment, bubbles were generated in the LiNO_3 solution by injecting N_2 from a bubble generation tube with some minute pores and diameters of the bubbles on the surface were measured by a video microscope system. The released mist was trapped by a grass fibrous filter, set at respective heights from the surface, and the quantity of the mist was identified by determining the quantity of Li by the flame spectrochemical analysis.

The evaluation model was investigated on assumption that, the just before bursting, buoyancy of the bubble and surface tension, formed by lifting the surface by the bubble, are balanced and the volume of the lifted solution is released as the mist with a log-normal distribution. The reachable quantity of the mist to the respective heights was estimated by using geometric mean diameter and standard deviation of the mist as parameters and the estimated results were compared with the experiment results. By using the evaluation model, the reachable quantity of the mist to the respective heights, could be estimated without contradiction.

Keywords: Mist, Bubble, Burst, Criticality Accident, Fuel Solution,
Source Term, Safety Evaluation, Radiolysis Gas

This work includes the experimental results under the auspices of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

目 次

1. 緒言	1
2. 試験	2
2.1 ミスト放出挙動試験装置及び気泡径の測定	2
2.2 ミスト放出量の評価	2
3. 結果及び考察	3
3.1 気泡発生管の孔径と気泡個数中央径の関係	3
3.2 到達ミスト量に対する気泡径及びサンプリング高さの影響	3
3.3 ミストの放出挙動評価モデルの検討	7
4. 結言	11
謝辞	13
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
2.1 Experimental Devices and Measurement of Diameter of Bubbles	2
2.2 Measurement of Quantity of the Mist Particles	2
3. Results and Discussions	3
3.1 Relationship between Diameter of Pore of the Bubble Generation Tube and Diameter of the Generated Bubbles	3
3.2 Effect of the Bubble Diameter and Sampling Height of the Mist Particles on the Reachable Quantity of the Mist Particle	3
3.3 Investigation of the Evaluation Model for Release Behavior of the Mist Particles	7
4. Conclusion	11
Acknowledgment	13
References	13

This is a blank page.

記号の説明

(ローマ文字)

- C_c : カンニガム補正係数 (-)
 C_D : 抵抗係数 (-)
 D : ミストの移動距離 (m)
 d : 直径 (m)
 $d_{b50\%}$: 気泡個数中央径 (m)
 D_H : 溶液表面の水力等価直径 (m)
 d_{mg} : ミスト粒子の幾何平均径 (m)
 F_f : 気泡の浮力 (N)
 F_T : 気泡表面の張力 (N)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 h : 破裂直前の気泡によって溶液表面が持ち上げられる高さ (m)
 H_m : 粒子径 d_m を有するミスト粒子が到達し得る高さ (m)
 h_v : 鉛直方向高さ (m)
 i : ミスト粒子を対数正規分布で表した場合の粒子径分割メッシュ番号 (-)
 N^* : 無次元気体粘性係数 (-)
 m : 粒子径 d_m を有するミスト粒子の質量 (kg)
 M_T : 気泡 1 個が破裂することによって放出されるミストの質量 (kg)
 n : ミスト粒子を対数正規分布で表した場合の粒子径分割数 (-)
 r : 半径 (m)
 Re : レイノルズ数 (-)
 SH : サンプル高さ (m) あるいは (cm)
 t : 時間 (s)
 t_h : 粒子径 d_m を有するミスト粒子が H_m に到達するまでに要する時間 (s)
 U^* : 溶液中の気泡無次元流速 (-)
 U_t^* : 気泡流/チャーン流無次元遷移流速 (-)
 V : 体積 (m^3)
 v_f : ミストの終末速度 (m/s)
 v_{TS} : ミストの終末沈降速度 (m/s)
 v_0 : ミストの初速度 (m/s)
 W_T : ミスト粒子を対数正規分布で表した場合の粒子の頻度 (-)
 x : 破裂直前の気泡の破裂面積 (m^2)
 y : 溶液表面から持ち上げられた破裂直前の気泡部分の溶液面と交差する円の半径 (m)

(ギリシャ文字)

- α : 気泡1個の破裂に伴って気相中に放出されるミストの個数 (個)
- γ : 表面張力 (N/m)
- η : 粘度 (Pa·s)
- ρ : 密度 (kg/m³)
- σ_{mg} : ミスト粒子の幾何標準偏差 (-)
- τ : 緩和時間 (s)

(下付き記号)

- b : 気泡
- g : 気体
- L : 溶液
- m : ミスト
- SH : サンプル高さ

1. 緒 言

PUREX 法を用いる核燃料再処理工程は、使用済燃料を硝酸溶液中に溶解し、溶媒抽出法によってウラン、プルトニウムの回収・精製と核分裂生成物(以下、「FP」という。)を含んだ高レベル廃液の分離を行う湿式のプロセスである。同工程のうち、溶解槽や高レベル廃液貯槽等では、溶液に対する継続的かつ強制的な攪拌によって、放射性物質を含有した液滴エアロゾル(ミスト)が溶液表面から定常的に飛散している。また、何らかの原因により溶解槽における臨界や高レベル廃液貯槽に対する冷却機能の低下あるいは喪失等の事故が生じた場合には、放射線分解ガスの生成や溶液の沸騰によって、溶液中で大量の気泡が発生し、この気泡の溶液表面での破裂によって、ミストの気相への放出量が増大する。特に、臨界事故時には、比放射能が極めて高いFPが溶液中で生成する。このうち非揮発性FPは、ミストに含有されて気相へ放出され移行する。また、ヨウ素や希ガス等の揮発性を有するFPについても、溶液中での気泡の生成による気液界面積の増大と溶液内の攪拌効果及び気泡の破裂が、その放出挙動に影響を及ぼすことが予想される。このように、溶液中の放射性物質の気相への放出・移行挙動に対しては、溶液中での気泡生成や溶液表面からのミストの放出・移行が極めて重要な要因として係わっている。このため、溶液からの放射性物質の放出・移行挙動を定量的に評価するためには、ミストの放出・移行メカニズムを様々な溶液条件や気泡の特性等との関係で明らかにすることが重要である。

溶液表面での気泡の破裂によって放出されるミストの量及び粒子径分布は、気泡径によって大きく異なることが Garner らによって報告されている¹⁾。これまで、溶液表面での気泡の破裂にともなう気相へミストの放出量については、Azbel²⁾や Rosen³⁾または Kataoka-Ishii⁴⁾らによって評価式が報告されている。このうち Rosen や Kataoka-Ishii らは、気相を鉛直方向にいくつかの領域に分割し、それぞれの領域に到達するミストの量を求めるための評価式を提案している。このうち、ミストが気相流に同伴されていくと考えた領域に対する式では、気泡の破裂に起因して放出・移行するミストの量は、気泡の上昇速度の関数として表現されており、この上昇速度自身が気泡径の関数であることから、間接的にミストの放出・移行量は気泡径の関数として計算することができる。しかしながら、ミストの放出・移行量は、気泡の上昇速度に加えて、気泡の破裂時に個々のミスト粒子に付与される運動エネルギーや初速度等の関数となることが予想される。これらの値は、破裂する気泡表面の表面エネルギーの大きさとその表面エネルギーの個々のミスト粒子に対する分配のメカニズムに依存するものと考えられる。Rosen や Kataoka-Ishii らが提案している評価式では、ミストの放出・移行量の評価に対してこれらの因子の効果が考慮されていないため、破裂する気泡径の大きさが比較的大きく変化する場合、ミストの放出・移行量に対するその気泡径の大きさの影響を十分評価できない。

そこで本報では、気泡の破裂によって放出・移行するミストの量及び粒子径分布をより詳細に評価することを目的として、気泡の破裂による個々のミスト粒子に分配付与されるエネルギーの考察等を取り入れた評価モデルを導出するとともに、「ミスト放出挙動観察試験装置」を用いて得たミストの放出挙動試験結果をもとに感度解析を行い妥当性について検討した。

2. 試 験

2.1 ミスト放出挙動試験装置及び気泡径の測定

図1に試験装置の概要を示す。

硝酸リチウム 100 g/l 水溶液を入れた気泡挙動観察容器(内径:4.5 cm)に、複数個の微小な孔を開けた気泡発生管を介して窒素ガスを送り込み、溶液中に気泡を発生させた。NUCEF の TRACY を用いた溶液燃料の臨界実験では、臨界に伴って溶液中の広範囲に大量の極めて微小な気泡が生じることが確認されている⁵⁾。そこで気泡発生管には、機械的な開孔方法としては限界に近い微小な径の孔を開けることとし、100、150、200 及び 250 μm の均一の径の孔を開けた4種類を使用した。また、本試験では、気泡の破裂によるミストの放出量を測定することを目的としたため、気泡同士の干渉を極力防ぐため、溶液中での気泡が定常的かつ連続的に発生し、さらに、単独の気泡として観察が可能な条件として、気泡発生管を介して硝酸リチウム水溶液中に供給する窒素ガスの流量を 0.2 l/min とした。

溶液表面の気泡を、ビデオマイクロスコープシステムを用いて5倍から100倍程度まで拡大して撮影し、その撮影画像をもとに画像解析装置を用いて各気泡径を計測した。気泡径と頻度の関係が対数正規分布に従うと仮定することで気泡個数中央径(以下、「 $d_{b50\%}$ 」という。)を算出した。

2.2 ミスト放出量の評価

溶液表面から決められた高さ(以下、「サンプリング高さ」あるいは「SH」という。)に設置したミスト捕集板にガラス繊維ろ紙を取り付け、溶液表面での気泡の破裂に伴って飛散したミストをガラス繊維ろ紙に一定時間付着させた。その後ガラス繊維ろ紙を 0.1 mol/l 硝酸 15 ml 中で 20 分間超音波振してガラス繊維ろ紙に付着しているリチウムを溶解し、水溶液中のリチウム濃度を蛍光分析によって定量した。

ミストは溶液と同じ組成を有していると仮定することで、リチウムの定量結果から、ガラス繊維ろ紙に付着した全ミスト体積(以下、「 V_m 」という。)を求めた。また、各試験毎の測定時間等の条件の違いを補正するため、各 SH に到達し得たミスト量については、 V_m を溶液表面で破裂した気泡体積(=窒素ガス流量×測定時間)(以下、「 V_b 」とい

う。)で除することで、破裂した気泡体積当たりのミスト体積、すなわち「 V_m/V_b 」として表した。

3. 結果及び考察

3.1 気泡発生管の孔径と気泡個数中央径の関係

図2に気泡発生管孔径と $d_{b50\%}$ の関係を示す。 $d_{b50\%}$ は 1.9~3.5 mm となり、ほぼ、気泡発生管の孔径の大きさに比例して大きくなった。

媒質が水の場合、気泡の運動特性は以下の4つの気泡径の領域に分けることができると報告されている⁶⁾。

- ① 微小気泡(気泡径= ~ 0.5 mm) レイノルズ数(以下、「Re」という。) $\ll 1$: 真球形に近く媒質中を垂直に上昇。
- ② 小気泡(気泡径=0.5~2 mm) $1 < Re < 500 \sim 700$: やや扁平に変形するが、ほぼ球形。上昇経路は垂直と見なせる。
- ③ 中気泡(楕円状気泡、気泡径=2~10 数 mm) $500 \sim 700 < Re < 4000 \sim 5000$: バブルは楕円状となり、らせん状またはジグザグ状の上昇経路を示し、運動は極めて複雑となる。
- ④ 大気泡(キノコ状気泡、気泡径=10 数 mm) $Re > 4000 \sim 5000$: バブルはキノコ状を呈する。上昇に伴い振動するなど複雑な運動を行うが、上昇経路はほぼ垂直となる。

この分類に従うと、本試験で取り扱う気泡径範囲は、ほぼ中気泡径領域に相当する。

なお、TRACY 試験で観察される溶液燃料臨界時の溶液中に発生する気泡の大きさは定量的に計測されていないが、過渡臨界時の溶液表面の画像を見ると、図2に示した気泡径は、TRACY 試験での気泡径と比べてかなり大きいものと考えられる⁵⁾。溶液燃料臨界時の気泡径条件のもとでの試験を実施するためには、気泡発生の方法をより改良するなどの工夫が必要となり、今後の課題である。

3.2 到達ミスト量に対する気泡径及びサンプリング高さの影響

図3に $d_{b50\%}$ と V_m/V_b の関係を、また、図4に SH と V_m/V_b の関係をそれぞれ示す。 $d_{b50\%}$ が大きくなるに従って V_m/V_b は減少した。その減少割合は、SH が 10 cm までは比較的小さいが、SH が 13 cm 以上になると急激に大きくなった。また、SH が増加すると V_m/V_b も減少するが、その減少割合は、破裂する気泡の $d_{b50\%}$ が 3.1 mm より大きくなると急激に大きくなった。このように、気相における鉛直上方向へのミストの到達量が破裂する

気泡の径によって大きく異なることは、気泡の破裂によって気相中に放出されるミストの粒子径分布や初速度等の特性が気泡径の関数となっていることを示唆していると考えられる。

上述のように、中気泡領域に属する気泡は溶液中で楕円状となり、らせん状またはジグザグ状の上昇経路を示すなど極めて複雑な運動を行う。楕円体気泡の運動に関する理論は幾つか報告されているが、ここでは Saffman によって示された解析方法を用いて気泡の上昇速度を算出した⁷⁾。それによると、楕円体気泡の上昇運動は、 ζ 及び k をパラメータとした以下の式の連立によって計算できる。

$$\left(\frac{d_b}{2k}\right)^3 = \zeta(1+\zeta^2) \quad (1)$$

$$\frac{U^2}{gk} = \frac{Z^2}{2Y(Z-X)} \quad (2)$$

$$\frac{4\gamma}{\rho_L g k^2 (1+\zeta^2)^2} = \frac{1+\zeta^2}{2Y\zeta(Z-X)}^{-1} \quad (3)$$

$$X = \zeta + \frac{3\zeta \cot^{-1} \zeta - 3 + (1+\zeta^2)^{-1}}{(6\zeta^2 + 3)\cot^{-1} \zeta - 6\zeta - \zeta(1+\zeta^2)^{-1}} \quad (4)$$

$$Y = \{2 + \zeta^2 - \zeta(1+\zeta^2)\cot^{-1} \zeta\}^{-1} \quad (5)$$

$$Z = (1+\zeta^2)\{(1+\zeta^2)\cot^{-1} \zeta - \zeta\} \quad (6)$$

ここで、 U (m/s)は気泡上昇速度、 g (m/s²)は重力加速度、 γ (N/m)は表面張力、そして ρ_L (kg/m³)は溶液の密度は抵抗係数である。(1)~(6)式を連立させることで、図2に示した径を有する各気泡の U を計算した。計算結果を図5に示す。なお、これ以降の計算も含めて、本報においては、溶液の各物性値として 25℃の水の値を使用した。本試験での気泡径範囲では、 U は、約 13~15 cm/s の範囲にあり、それぞれ気泡径の増加とともに増加した。久保田らは 2~3.5 mm の径を有する気泡が通常の水の中を上昇する速度を約 18~20 cm/s と報告している⁸⁾。上述のように中気泡領域では、気泡はらせん状またはジグザグ状の上昇経路を示すなど、極めて複雑な運動を呈するため、この領域の気泡の運動を定量的に取り扱うのは非常に難しい。上述の Saffman の理論的考察でも、この領域の気泡の運動を定性的には説明しているが、計算結果と実測値は必ずしも定量的には一致していないとの指摘がなされている⁹⁾。図5に示した評価結果は、久保田らの測定結果より若干低く算出されているが、この両者の差は中気泡領域に属する気泡の運動の評価する上での不確かさによるものと考えられる。

溶液が加熱され沸騰状態となる場合や常温でも溶液中にガスを吹き込む場合、ミストの発生機構は、溶液中での気泡の上昇速度によって大きく異なる。気泡の上昇が低

速である場合(気泡流)には、溶液表面での気泡の破裂によってミストが発生するが、気泡の上昇が高速である場合(チャーン流)で連続気相柱をつくる場合は、溶液表面から気相の流れに引きずられて液膜が成長しこれが破断してミストが発生する機構が支配的となると報告されている⁴⁾⁸⁾。両領域間の境界は、以下の式で表される無次元遷移流速 U_i^* で表される³⁾⁴⁾。

$$U_i^* = 0.325 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_L}} \quad (7)$$

ここで、 ρ_g (kg/m^3)は気泡内気体の密度である。以下の式を用いることで U を無次元化し、 U_i^* と比較することでその気泡上昇現象が気泡流領域、チャーン流領域のいずれに属するのか評価できる⁴⁾¹⁰⁾。

$$U^* = \frac{U \sqrt{\rho_g}}{\{g\gamma(\rho_L - \rho_g)\}^{1/4}} \quad (8)$$

(1)~(6)式の連立によって求めた U を(8)式によって無次元化した値 U^* を、(7)式を用いて計算した U_i^* とともに図5に示す。 U^* は U_i^* を上回っており、このことから本試験での気泡の上昇挙動はチャーン流領域に属していることが分かる。なお、久保田らの U の実測値は本報での計算値より大きい値であるため、仮に U として久保田らの実測値を採用しても、本報の試験条件での気泡の上昇挙動がチャーン流領域に属していることに変わりはない。

チャーン流に属した気泡の破裂にともなうミスト放出量の評価としては、Rozen や Kataoka-Ishiiらが報告している。Kataoka-Ishiiらによると、放出されたミストの鉛直方向への移行に関して、以下のように鉛直高さ方向を3領域に分けて考えることができるとし、それぞれミスト放出量に関する評価式を示している³⁾⁴⁾。

① Near surface 領域

溶液表面から放出されたミストは全て気相流に同伴される。この領域でのミスト量については Rozen によって以下の関係式が示されている³⁾。

$$\frac{V_m}{V_b} = 4 \frac{\rho_g}{\rho_L} \quad (9)$$

② Momentum controlled 領域

ミストが有していた運動量によって到達し得る高さが決まる。この領域ではミストの到

達量は気相流速が大きい程増加し、鉛直高さが高くなるに従って減少する。

③ Far field 領域

この領域に達したミストは気相流に同伴されていく。ミスト量は鉛直高さに関係があるが実際には、壁への沈着等によって鉛直高さが高くなるに従って若干減少する。この領域におけるミスト量を表す式は Rozen 及び Kataoka-Ishii らによって報告されているが、ここでは Rozen によって示された式を採用する³⁾。

$$\frac{V_m}{V_b} = 7.6 \times 10^{-5} \left(U^* N^{*1/6} + 4870 U^{*4.2} N^{*0.7} \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{-0.23 h_v}{D_H} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right) \right) \quad (10)$$

$$N^* = \frac{\eta_g}{\sqrt{\frac{\rho_g \gamma^{1.5}}{g^{1/2} (\rho_L - \rho_g)^{1/2}}}} \quad (11)$$

ここで、 h_v (m)は鉛直方向高さ、 D_H (m)は溶液表面の水力等価直径、 N^* (-)は無次元気体粘性係数⁸⁾、 η_g (Pa·s)は気泡内気体の粘度である。

これらの式を用いて Near surface 領域及び Far field 領域に対応する V_m/V_b を計算し、図4に実験値とともに示す。計算に際しては、 D_H については、気泡挙動観察容器の直径を用いた。SH が低い領域では、いずれの気泡径の場合でも、 V_m/V_b の実測値は Near surface 領域と仮定した V_m/V_b の計算値に漸近しており、この領域では実測値と計算値はよく一致している。Far field 領域に対応する V_m/V_b の計算値は、破裂する気泡径が大きくなるのにしたがって減少する傾向が見られたが、その減少は比較的小さかった。そのため、図4には、 $d_{b50\%}$ が 1.9 mm の場合と 3.5 mm の場合の計算値を示したが、両方の場合の計算値は図上ではほぼ重なって示されている。 $d_{b50\%}$ が 3.5 mm の場合を除いて、 V_m/V_b の実測値は Far field 領域と仮定した V_m/V_b の計算値に近づいていく傾向を示している。 $d_{b50\%}$ が 3.5 mm の場合、 V_m/V_b の実測値は、Far field 領域と仮定した V_m/V_b の計算値よりも小さくなった。本報の試験では、溶液底部から溶液中に窒素ガスを吹き込んでおり、この窒素ガスによって気相中には鉛直上向きの気流が生じているものと考えられる。それにもかかわらず、SH が高い領域において V_m/V_b の実測値が急激に減少したことは、この鉛直上向きの気流のミストの同伴効果が小さいことを意味している。本報では3.3にて後述するように、破裂する気泡の特性と関連付けたミストの放出挙動評価モデルを検討している。このモデルでは単純化のため、気相部は静止流体であると仮定しており、ミストの到達し得る高さの評価においては、気流等の外力の影響を無視している。実測条件をこのような仮定に極力近づけるため、本試験においては、ミスト捕集板でのミストの捕集時にこの気流を考慮した等速吸引条件を

採用していない。このことから SH が高い領域において、 V_m/V_b の実測値が(10)式からの計算値よりも小さくなったものと考えられる。ちなみに図4には、等速吸引条件のもとで計測された V_m/V_b の値を併記した(図4中の破線参照)。このようにミストを等速吸引条件のもとで捕集した場合には、 V_m/V_b の実測値は(10)式からの計算結果よりも大きく、SH が高くなるにしたがって、計算値に近づいていく傾向が得られている。

3.3 ミストの放出挙動評価モデルの検討

Far field 領域におけるミスト量の評価式である(10)式では、溶液表面での気泡の破裂に起因して放出されるミスト量は U の関数として表現されている。 U 自身が気泡径の関数であることから、(10)式を用いることで結果的に気泡径の変化による放出されるミスト量の変化についても評価できる。しかしながら本試験のように、気泡径の増加に伴う U の変化が比較的小さい場合には、放出されるミスト量に対する気泡径の変化の影響は結果的に小さく評価されるため、図4に示したような SH の増加に伴う V_m/V_b の減少割合が、気泡径によって大きく異なる傾向は十分評価できない。このような傾向を評価するためには、さらに詳細なミスト放出機構の評価モデルを考察し導出する必要がある。そこで、気相における鉛直上方向への V_m/V_b の減少割合を気泡径や放出されるミストの径分布の関数として評価するモデルの作成を試みた。

3.3.1 放出されるミストの個数及び粒径分布のモデル化

気泡の破裂によるミストの放出機構としては、径の小さな気泡が破裂するときに溶液面の中央部が衝撃によって盛り上がり、比較的径の大きなミストが放出される場合 (Jet mechanism) と、気泡液膜の破裂によって比較的径の小さなミストが放出される場合 (Collapse of bubble dome) があると報告されている¹¹⁾。本報では、これら二つのミスト放出機構のうち、まず、後者の気泡液膜の破裂によるミストの放出挙動を取り上げ、評価モデルの検討を行うこととした。

溶液中に生じた気泡は自らの浮力によって溶液中を上昇し溶液表面で破裂する。ここでは、図6に示すように、破裂直前の気泡は球であり、気泡が溶液表面を持ち上げることで新たに形成された溶液面部分の溶液が破裂によってミストとなり、気相中に放出されるものと考えた。

破裂直前では、 F_f と F_T が釣り合っている(すなわち、 $F_f = F_T$)と考え、(12)～(15)式を収束計算することで、気泡半径 $r_b (=d_b/2)$ (m) に対する溶液表面が持ち上げられる高さ h (m)、破裂直前の気泡の破裂面積 x (m²) 及び溶液表面から持ち上げられた破裂直前の気泡部分の溶液面と交差する円の半径 y (m) を計算する。

$$F_f = \frac{g\pi\rho_L \left\{ 8r_b^3 - 3hr_b^2 \cos^2 \left(\sin^{-1} \left(\frac{r_b - h}{r_b} \right) - h^3 \right) \right\}}{6} \quad (12)$$

$$F_T = 4\gamma\pi = 4r_b\gamma\pi \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{r_b - h}{r_b} \right) \right) \quad (13)$$

$$x = 2r_b^2 \left(\pi - \sin^{-1} \left(\frac{r_b - h}{r_b} \right) \right) \quad (14)$$

$$y = r_b \cos \theta = r_b \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{r_b - h}{r_b} \right) \right) \quad (15)$$

気泡の破裂によって放出されるミストの径ごとの頻度は対数正規分布に従うものと仮定する。ミスト径範囲としてミスト粒子の幾何平均径 d_{mg} と幾何標準偏差 σ_{mg} を用いて、 $d_{mg}\sigma_{mg}^{-2.5}$ から $d_{mg}\sigma_{mg}^{2.5}$ までを考慮し、その間を n 区間に分割(メッシュ数 $i=1 \sim n$)し、各メッシュにおけるミスト粒子径 $d_m(i) (=2r_m(i))$ と頻度 $W_T(i)$ を計算する。さらに、 d_b を有する気泡1個の破裂に伴って気相中に放出されるミストの個数 α を、 $r_m(i)$ と $W_T(i)$ を用いることで以下のように計算する。

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{4\alpha W_T(i) \pi r_m(i)^3 \rho_L}{3} \right) = M_T \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{3M_T}{4\pi\rho_L \sum_{i=1}^n (W_T(i) r_m(i)^3)} \quad (17)$$

ここで、 M_T (kg) は、気泡1個が破裂することによって放出されるミストの質量である。

3.3.2 ミストの到達高さの評価モデル

溶液表面での気泡の破裂によって気相中に放出されたミスト粒子のある時刻 t (s) における速度 $v_m(t)$ と移動距離 $D(t)$ は以下の式から計算される。

$$v_m(t) = v_f - (v_f - v_0) \exp(-t/\tau) \quad (18)$$

$$D(t) = v_f t - (v_f - v_0) t \{1 - \exp(-t/\tau)\} \quad (19)$$

$$\tau = \rho_m d_m^2 C_c / (18\eta_g) \quad (20)$$

ここで、 v_f (m/s) はミストの終末速度、 v_0 (m/s) はミストの初速度、 τ (s) は緩和時間、 C_c (-) はカンニガム補正係数である。また、直径 d_m のミストの終末沈降速度 v_{TS} (m/s) は、以

下の式を連立し収束計算によって計算できる。

$$v_{TS} = \left\{ 4\rho_m d_m g / (3C_D \rho_g) \right\}^{0.5} \quad (21)$$

$$C_D = 24(1 + Re^{2/3}/6) / Re \quad (22)$$

$$Re = d_m v_{TS} \rho_g / \eta \quad (23)$$

ここで、 C_D (-)は抵抗係数である。本試験では気泡発生のための窒素ガスを溶液底面から溶液中に吹き込んでいるが、3.2で考察したように、窒素ガスの気相中の気流に対する影響は小さいと考えられるので、ここでは、気相部は静止流体であると仮定する。その場合 v_f は v_{TS} と等しくなり、(18)及び(19)は以下のように表すことができる。

$$v_m(t) = v_{TS} - (v_{TS} - v_0) \exp(-t/\tau) \quad (18)'$$

$$D(t) = v_{TS} t - (v_{TS} - v_0) t \{1 - \exp(-t/\tau)\} \quad (19)'$$

溶液表面から v_0 の初速度で気相中に鉛直上方向に放出されたミスト粒子は徐々に減速され、頂点で速度が0となった後、鉛直下向きに落下していく。このように考えると、 $d_m(i)$ の径を有するミスト粒子が到達し得る高さ $H_m(i)$ (m)は以下の式から計算できる。

$$H_m(i) = v_{TS}(i)t_h(i) - (v_{TS}(i) - v_0(i))\tau(i)\{1 - \exp(-t_h(i)/\tau(i))\} \quad (24)$$

$$t_h(i) = -\tau(i) \ln \{v_{TS}(i)/(v_{TS}(i) - v_0(i))\} \quad (25)$$

ここで $t_h(i)$ (s)は、 $d_m(i)$ の径を有するミスト粒子が高さ $H_m(i)$ に到達するまでに要する時間である。

3.3.3 放出ミストの初速度の評価モデル

本評価モデルでは、破裂直前の気泡によって新たに形成された溶液の溶液部分が破裂することで複数のミスト粒子が気相中に放出されるものと考えている。この新たに形成される溶液面部分の表面エネルギーが、各ミスト粒子の運動エネルギーと表面形成エネルギーの和として、各ミスト粒子に均等に分配されるものと仮定する。このような仮定に基づくと、以下の式が成り立ち、 i メッシュに対応するミストの初速度 $v_0(i)$ が計算できる。

$$\frac{2\gamma(x - y^2\pi)}{\alpha} = \frac{m(i)v_0(i)^2}{2} + 8\gamma r_m(i)^2 \pi \quad (26)$$

$$v_0(i) = \sqrt{\frac{\gamma \left(\frac{x-y^2\pi}{\alpha} - 4r_m(i)^2\pi \right)}{m(i)}} \quad (27)$$

ここで、 $m(i)$ (kg)は $d_m(i)$ の径を有するミストの質量である。

3.3.4 鉛直上方向へのミストの到達量の評価モデル及び試計算結果

現在のところ、気泡の破裂によって気相中に放出されるミストの径分布の d_{mg} と σ_{mg} の両方が不明である。本報では、 d_{mg} と σ_{mg} をパラメータとした上で、(12)～(27)式を連立し、 i メッシュに属するミスト粒子毎に到達高さ $H_m(i)$ を計算するとともに、以下の式から SH に到達し得るミスト量 $(V_m/V_b)_{SH}$ を計算した。

$$\left(\frac{V_m}{V_b} \right)_{SH} = \frac{3 \sum_{i=1}^n (Fm(i)\alpha W_T(i))}{4\pi r_b^3 \rho_L} \quad (28)$$

$H_m(i) \geq SH$ の場合: $F=1$
 $H_m(i) \leq SH$ の場合: $F=0$

なお、 M_T については、Near surface 領域におけるミスト放出量の評価式である(9)式から計算されるものとした。つまり(9)式から計算される V_m/V_b を $SH=0$ cm(すなわち溶液表面)におけるミスト到達量とする。また、気泡の破裂によって飛散するミスト粒子は、すべて鉛直上向きに放出されるものと仮定した。さらに、ミスト粒子径分布の分割数 n については、計算結果に分割数の影響が出ないことを確認した上で 400 とした。

d_b が 1.9 mm 及び 3.5 mm の場合の計算結果例を図7及び図8に示す。いずれの場合も、鉛直上方向の高さが増すとともに V_m/V_b が減少する傾向が計算できている。(9)式から計算される $SH=0$ cm における V_m/V_b の計算値と $SH=2$ cm に対する V_m/V_b の実測値の間には、比較的大きな差があるが、計算ではこの SH の区間における V_m/V_b の急激な減少が計算されており、これによって、計算値と実測値との連続性が評価できている。図9及び図10に、それぞれの d_b の条件において鉛直上方向の高さ毎に計算されているミスト粒子径分布の変化を示す。いずれの場合でも、SH の増加とともに到達し得るミストの粒子径の上限が、粒子径が小さい側にシフトしていることがわかる。特に粒子径 100 μm 以上の比較的大きな径を有するミスト粒子は、高さ 2 cm まで到達できず、溶液側へ沈降するとの評価となっている。このことは、SH が 2 cm までの V_m/V_b の急激な減少は、比較的大きな径を有するミスト粒子が到達し得ないことによって計算されていることを意味する。一方、図8に示したように、 d_b が 3.5 mm の場合では、SH が約 10 cm 付近で V_m/V_b が 0 となり、これ以上の高さへのミストの到達は計算できなかつ

た。この点は今後この評価モデルを改良していく上での課題である。

上述のように、気泡の破裂によるミストの放出機構としては、径の小さな気泡が破裂するとき溶液面の中央部が衝撃によって盛り上がり比較的径の大きなミストが放出される場合 (Jet mechanism) と、気泡液膜の破裂によって比較的径の小さなミストが放出される場合 (Collapse of bubble dome) があると報告されている。Garner らは、 d_b が大きくなるにつれて前者の機構によって放出されるミスト (Garner らは Droplet と表現している) の頻度が減少し、次第に後者の機構が支配的になっていくこと、また、 d_b が 5 mm 以上になると前者の機構によるミストの放出がなくなることを示し、さらに、前者の機構によって放出されるミスト径を約 450~750 μm (媒質: 水、 d_b : 約 2~3.5 mm)、後者の機構によって放出されるミスト径を約 15 μm (ほとんどの液滴が 25 μm 以下) と報告している¹⁾。これに対して Resch らは、高強度のレーザーを使用した光学測定系を用い、気泡径をパラメータとして、気泡液膜の破裂によって放出されるミストの粒子径分布を直接計測した¹⁾。それによると、本報の気泡径範囲に比較的近い 4 mm の径を有する気泡の破裂によって放出されるミスト径は約 8~140 μm であり (ただし 8 μm が測定下限値)、これ以前に報告されてきた値と比べてかなり大きいと述べている。また、気泡径が小さくなるにしたがって (Resch らの実験では気泡径を 4、6、8、10 mm としている。) 比較的大きな径を有するミストが測定されなくなり、気泡径 8 mm 以上の条件では測定された 140 μm 以上の径を有するミストが、気泡径 6 mm 以下では測定されなくなるとしている。

図7及び図8に示したように、本報で導出した評価モデルでの計算結果例においては、 d_{mg} を約 60~80 μm 程度と仮定すると実測値に近い値を算出することができた。この値は、Garner らによる2つの機構に基づくミスト径の間であり、Resch らが報告したミスト径とはほぼ一致する。また、今回の計算結果例では、 $d_{b50\%}$ が小さい場合に d_{mg} も小さくなっており、この傾向についても Resch らの報告と定性的にはあるが一致している。本報での評価計算では、 d_{mg} と σ_{mg} の両方をパラメータとせざるを得なかった点など、ミストの放出量及び粒子径分布に対して定量的な考察をするには至らなかった。しかしながら、Garner らは実験にカスケードインパクトを使用しミスト量を測定しているのに対して、Resch らは放出されたミストを直接観察している。このことを考慮し、仮に Resch らの実験結果の信頼性が Garner らの結果の信頼性より相対的に高いと考えれば、本報で導出した評価モデルは、気泡液膜の破裂によるミストの放出挙動を定性的にはあるが、良く表現しているものと考えられる。

4. 結 言

溶液燃料における臨界事故時の安全性評価に資するため、溶液表面での気泡の

破裂に起因するミストの放出について、破裂する気泡径と鉛直上方向へのミストの到達量との関係を試験的に観察した。また、溶液の物性値を因子としたミストの放出挙動の評価モデルを作成し、試験結果をもとに感度解析を行うことで本報で導出した評価モデルの妥当性について検討した。その結果、本報で導出した評価モデルを用いることで、鉛直上方向へのミストの到達量を良好に評価できることを示した。

今回の評価モデルの作成にあたっては、多くの仮定を設けている。そのうち特に以下については、今後の評価モデルの改良を進めていくうえでの課題と考えている。

①ミストの放出方向の仮定

本報で導出した評価モデルでは、溶液表面での気泡の破裂によって放出されるミストはすべて鉛直上向きに放出されるものと考えている。しかし実際には、Resch らが観察したように¹¹⁾、ミストは様々な方向へ放出されているため、各方位へ放出されるミストの運動については鉛直方向成分に分解した上でミストの到達高さを評価するなどの工夫が必要である。

また、ミストの鉛直方向への到達量に関しては、壁への沈着によるミスト量の損失の影響が大きいと考えられる。この損失の効果については、ミストのサンプリング高さが高くなるにしたがって大きくなることが予想される。鉛直方向へのミストの到達量をより高い精度で測定し、評価モデルの検証に供するためには、気泡挙動観察容器の内径を変えるなどにより、ミストの沈着面積をパラメータとするなどの実験的な工夫が必要であると考えられる。

②ミストの放出メカニズムの仮定

ミストの粒子径分布は、二つのピークを有する場合があるとの報告がなされている¹¹⁾。本報で導出した評価モデルを用いた試計算においては、ミストは一山の対数正規分布に従うものと仮定した。これは、本報での評価モデルでは、ミストを生成する二つのメカニズムのうち、液膜破裂によるミスト生成のみに着目した結果である。上記の二つのミスト放出メカニズムのうち、Jet mechanism によって放出されるミストは、液膜破裂に起因するものより粒子径はかなり大きい。この点では気相中での移行(鉛直方向への到達)には不利であるが、一方で、液膜破裂と比べて放出されるミスト個数が少なくミスト粒子一つ当たりには付与される運動エネルギーが大きいと、Jet mechanism に基づくミストの飛程は相対的に大きく、その結果、放出されるミストの粒子径分布に現れているものと考えられる。したがって、ミストの放出メカニズムを評価するためには、Jet mechanism に基づくミストの放出挙動についても評価しうるモデルを考察する必要がある。

③ミスト粒子径分布の定量的な把握

本報で導出した評価モデルを用いた試計算においては、ミストの d_{mg} と σ_{mg} の真値が

不明であるため、この両方の値をパラメータとして試計算を実施せざるを得ず、このことから評価モデルの定量的な検証を実施するまでには至らなかった。したがって、これからミストの粒子径分布特性を実験的に把握することが必要である。また、溶液燃料臨界事故時のミスト放出特性の評価解析に展開する観点からは、より小さな気泡径で、かつ、より気泡が懸濁した溶液条件でのミスト放出特性の実験的把握が必要である。その際には、気泡による溶液内の攪拌効果による溶液内の流動についても考察する必要があるであろう。

④ミスト放出に対する溶液内での気泡の運動の影響の評価

本報で導出した評価モデルでは、破裂直前の溶液表面での気泡について、気泡自身の浮力と気泡が溶液表面を持ち上げることで新たに形成された溶液面の張力がつりあっているものと仮定している。実際には、気泡は溶液中での上昇運動に伴う運動エネルギーを有していることが考えられ、気泡の破裂に伴って放出されるミストにはこの気泡の運動エネルギーが付与されることが考えられる。例えば、溶液中の気泡の上昇速度を気泡径及び液性の関数として評価し得る Saffman のモデル⁷⁾等を今回の評価モデルと組み合わせることにより、この気泡の運動エネルギーのミストへの付与メカニズムについても評価できるようにモデルの改良を進めていきたい。

このような検討に加えて、モデル全般にわたる仮定の妥当性についてより詳細に検討していき、モデルの検証と精度の向上を図っていく予定である。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、ご協力を頂いた千代田メンテナンス株式会社 田山拓治氏に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) F.H.Garner, et al., *Trans. Instin. Chem. Engrs.*, 32, 222(1954).
- 2) D.S.Azbel., et al., *Two-Phase Momentum, Heat and Mass Transfer in Chemical Process and Energy Engineering Systems*, 1, Hemisphere Publishing Company (1978).
- 3) 野村, *JAERI-M 91-091*(1991.6).
- 4) I.Kataoka and M.Ishii, *ANL-83-37*(1983).

- 5) K.Ogawa, et al., *J.Nucl.Sci.Technol*, 37, 1088(2000).
- 6) 日比野, "化学工学の進歩3 気泡・液滴工学", 日刊工業新聞社(1969).
- 7) P.G.Saffman, *J.Fluid Mech*, 1, 249(1956).
- 8) 久保田, 他, 化学工学, 31, 1074(1967).
- 9) 前田, 化学工学, 31, 438(1967).
- 10) T.Ginsberg, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 39, 654(1981).
- 11) F.J.Resch., et al., *J.Geophys.Res.*, 91, 1019(1986).

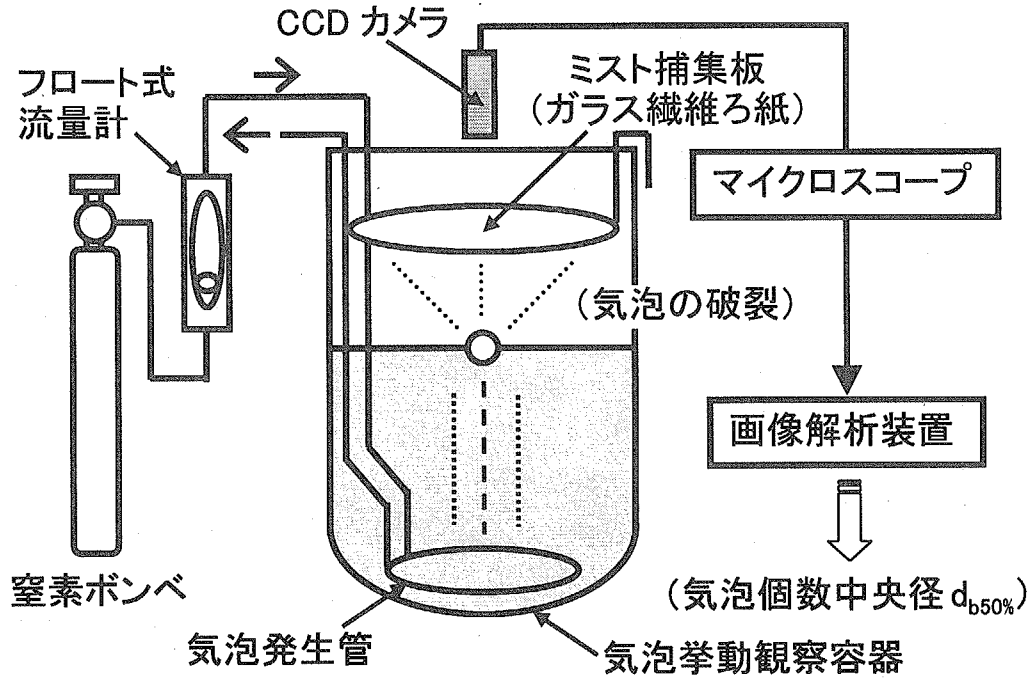


図1 試験装置の概要

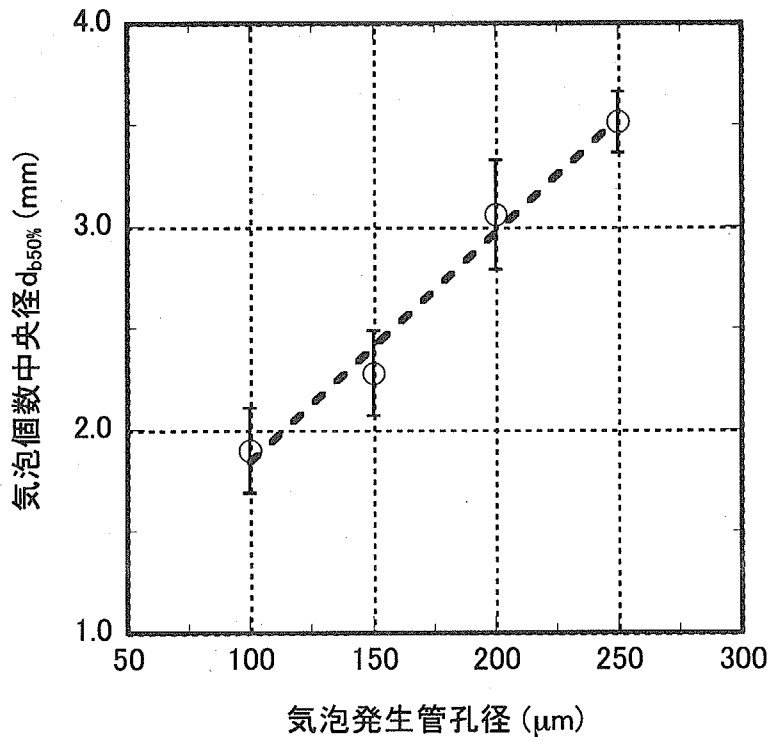


図2 気泡発生管孔径と気泡個数中央径 $d_{b50\%}$ の関係

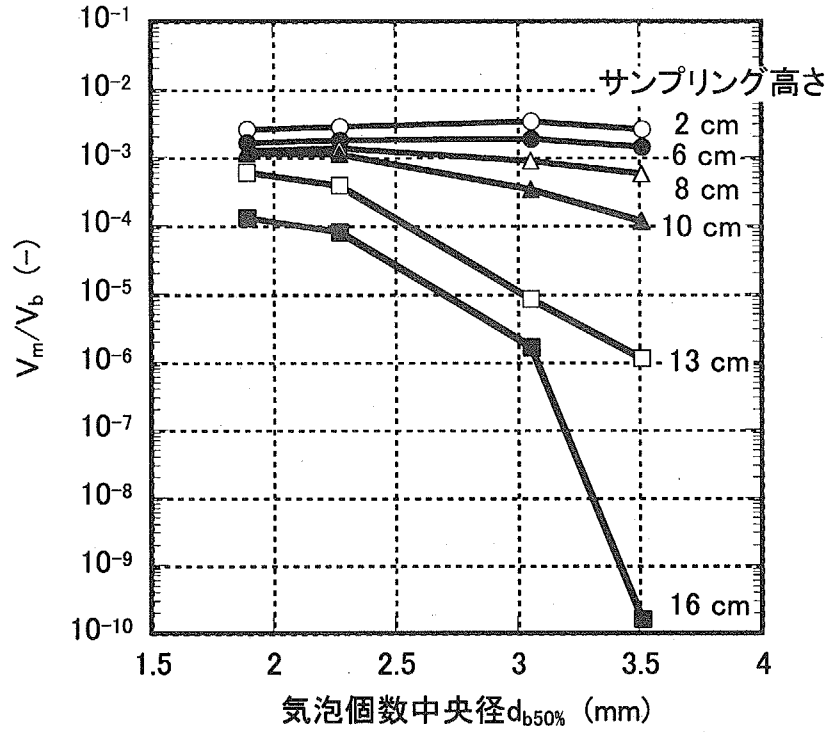


図3 到達ミスト体積と気泡個数中央径の関係

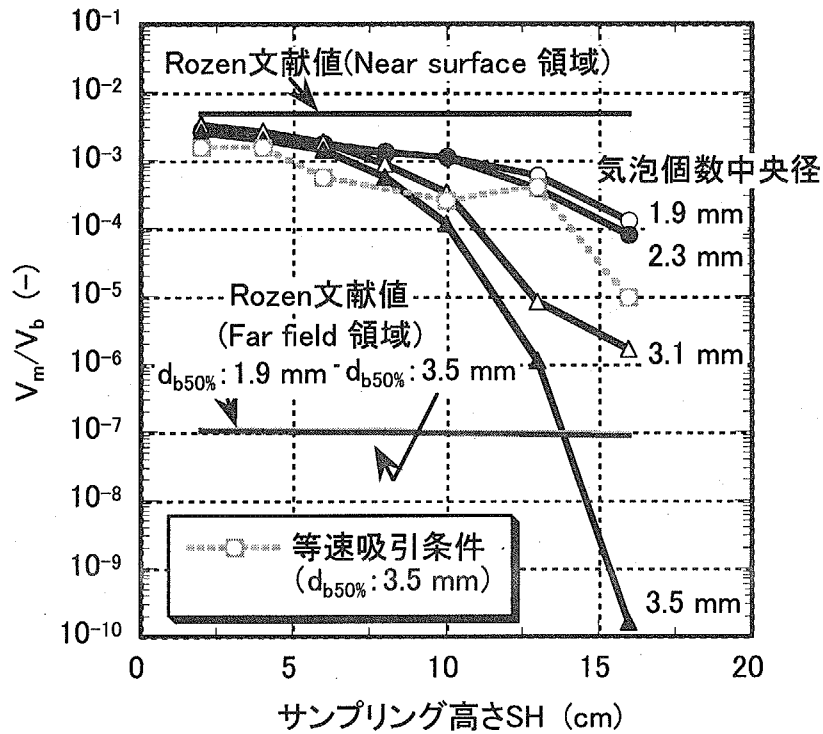


図4 到達ミスト体積とサンプリング高さの関係

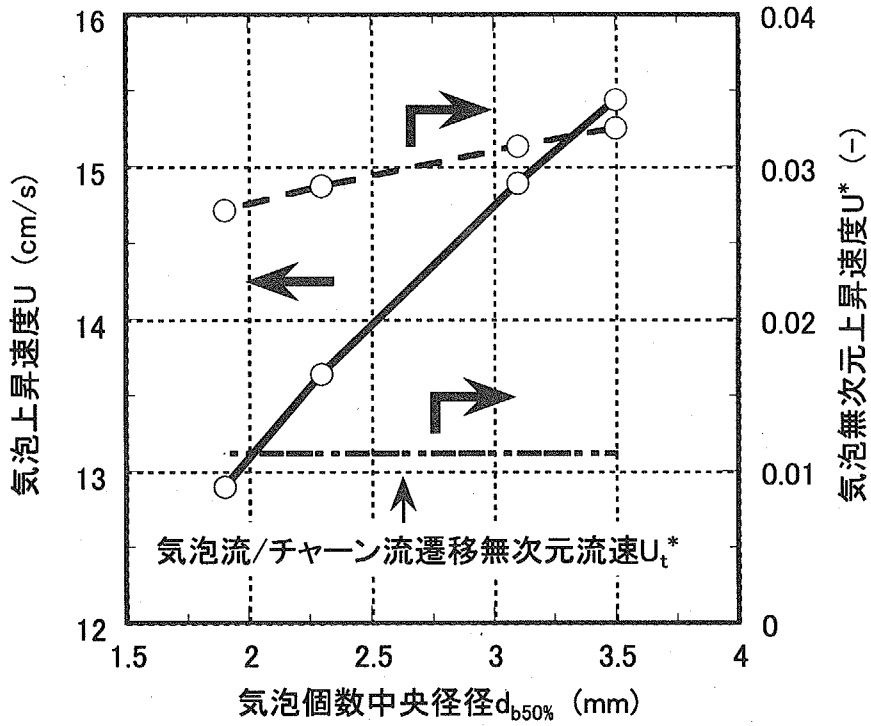


図5 気泡上昇速度(計算値)と気泡径との関係

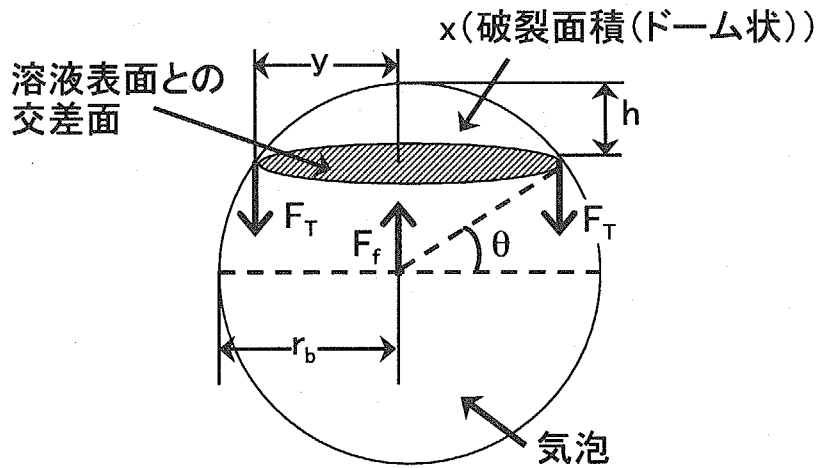


図6 ミスト放出挙動評価モデルにて仮定した破裂直前の気泡モデル

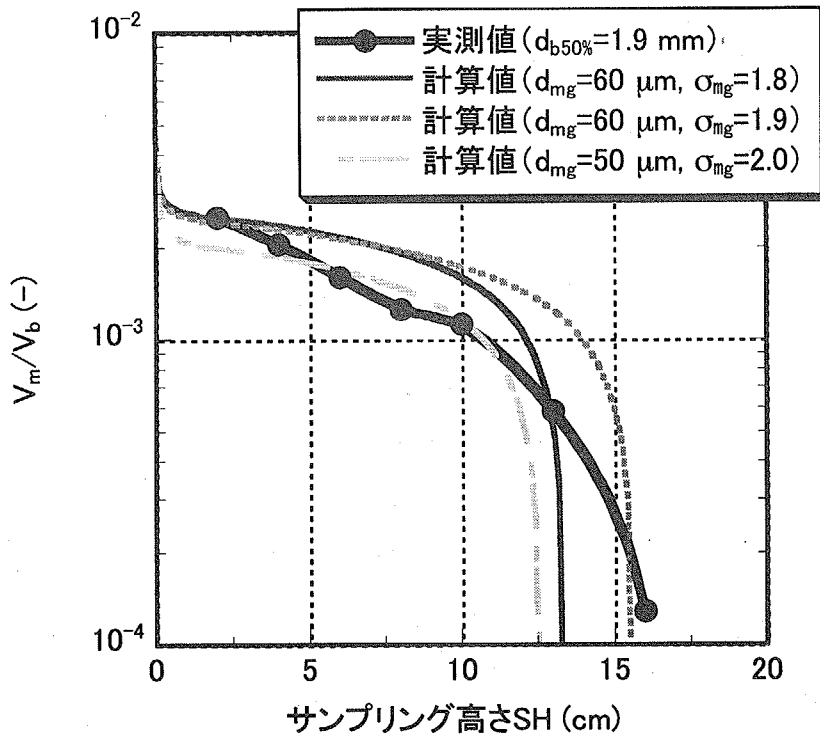


図7 V_m/V_b 計算結果例 ($d_{b50\%}=1.9$ mm)

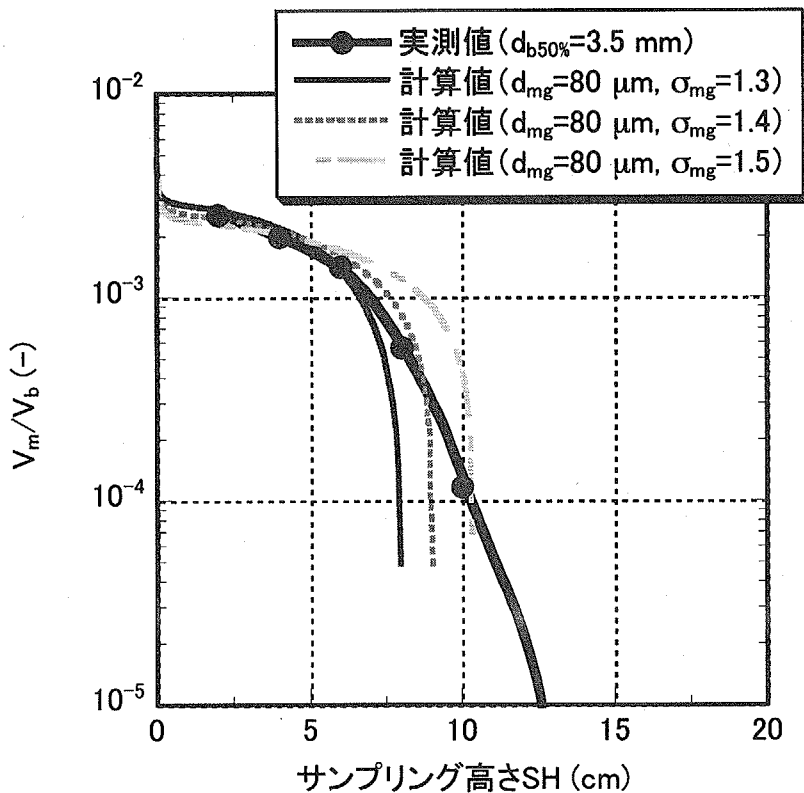


図8 V_m/V_b 計算結果例 ($d_{b50\%}=3.5$ mm)

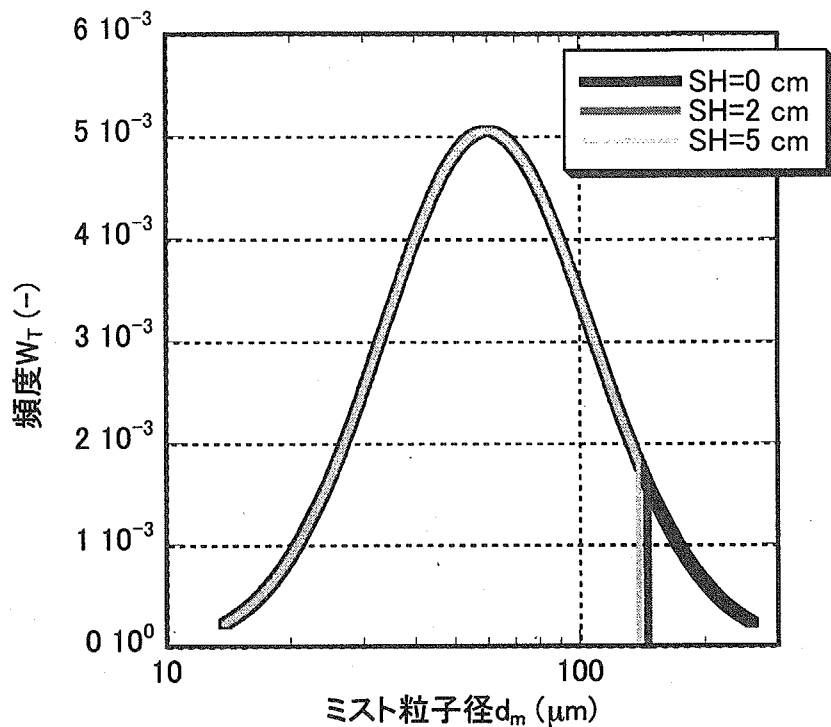


図9 ミスト粒子径分布の計算結果例 ($d_{mg}=60 \mu\text{m}$, $\sigma_{mg}=1.8$)

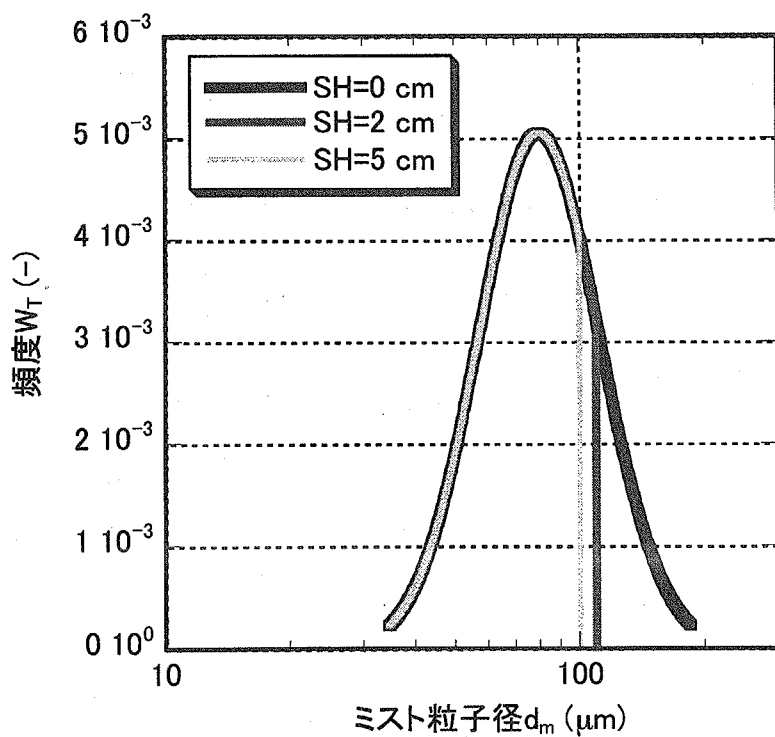


図10 ミスト粒子径分布の計算結果例 ($d_{mg}=80 \mu\text{m}$, $\sigma_{mg}=1.4$)

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
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 ²
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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
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 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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
バル	bar
ガリ	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	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のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ 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/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	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 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

溶液表面での気泡の破裂に伴うミスト放出挙動評価モデルの検討



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています