

極低速蒸気流での飛沫同伴率相関式の導出

Development of Entrainment Correlation for Very Low Gas Velocity

吉田 一雄

Kazuo YOSHIDA

安全研究センター

Nuclear Safety Research Center

February 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

極低速蒸気流での飛沫同伴率相関式の導出

日本原子力研究開発機構 安全研究センター

吉田 一雄

(2010 年 11 月 11 日受理)

原子力施設の事故解析において飛沫同伴現象は、炉心の冷却あるいは気液界面からの放射性物質の気相部への移行を評価する上で重要な現象の一つである。発電用原子炉施設で想定される冷却材喪失事故（LOCA : Loss of Coolant Accident）での炉心下部からの再冠水時に生成される飛沫による冷却、あるいは、沸騰水型原子炉の格納容器破損時のサブプレッションプールでの減圧沸騰に伴う飛沫同伴現象による放射性物質の移行解析のためには、飛沫同伴の機構論的なモデルに基づく汎用性の高い飛沫同伴率相関式として Kataoka-Ishii 式が提案されている。これに対して、核燃料施設の放射性物質を含む水溶液を内蔵する貯槽等での冷却機能喪失による沸騰現象は、原子炉施設での沸騰現象に比べ極めて緩やかで発生する蒸気流速も小さい。このため、放射性物質の気相部への移行評価には Kataoka-Ishii 式をそのまま適用できない。そこで Kataoka-Ishii 式の導出過程を参考に、極めて蒸気流速の遅い領域（Stokes 領域）での飛沫同伴現象の特徴を考慮して、これに適用可能な相関式を解析的に導出した。さらに新たに導出した相関式と既存の実験データとの比較も試みた。

Development of Entrainment Correlation for Very Low Gas Velocity

Kazuo YOSHIDA

Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 11, 2010)

Entrainment of liquid droplets from a bubbling or boiling pool surface is one of important phenomena for analysis of accidents postulated in nuclear installations. The Kataoka-Ishii correlation, which is based on a mechanistic modeling, has been developed for application to wide range of phenomena. These include heat and mass transfer processes during loss-of-coolant accidents, in particular, during the recovery phase of these accidents thorough reflooding of core and radioactive carryover from flashing water pool caused by depressurization induced by containment failure during a severe accident in light water reactors. In case of accident analysis of nuclear fuel facilities, radioactive material transport with liquid droplets entrained by very low steam flow velocity is also important in boiling event of radioactive solution storage tank caused by the loss of cooling function. Kataoka-Ishii correlation is however not applicable to such analysis directly because of out of range of gas velocity. Therefore, a correlation has been developed analytically with taking into consideration features of phenomena of entrainment with very low gas velocity (Stokes regime). It has been also tried to compare the developed correlation with some experimental data.

Keywords: Nuclear Installations, Entrainment, Liquid Droplets, Stokes Regime

目次

1. はじめに	1
2. 極低速蒸気流での飛沫同伴率式の導出	3
2.1 基本式	3
2.2 粒径が D_c より大きい飛沫の上昇高さの試算	4
2.3 臨界粒径以下の飛沫同伴率	5
3. 実験との比較	11
4. まとめ	15
5. 参考文献	15

CONTENT

1. Introduction	1
2. Development of entrainment correlation for very low gas velocity	3
2.1 Basic equation	3
2.2 Estimation of maximum height rising droplet whose diameters greater than critical diameter	4
2.3 Entrainment consisting of droplets whose diameters less than critical diameter	5
3. Comparison with experimental results	11
4. Summary	15
5. References	15

This is a blank page.

1. はじめに

原子炉施設の安全評価では、例えば冷却材喪失事故（LOCA : Loss of Coolant Accident）での炉心下部からの再冠水時に生成される飛沫による冷却、あるいは、沸騰水型原子炉の格納容器破損時のサプレッションプールでの減圧沸騰に伴う飛沫同伴現象による放射性物質の移行が重要な現象の一つである。また、核燃料施設の放射性物質を含む水溶液（以下、放射性溶液という）を内蔵する貯槽等では、放射性物質の崩壊熱を除去するため常時冷却している。この冷却機能が喪失すると、貯槽外面での自然対流による冷却が十分でない場合水溶液が沸騰し、気泡の破裂によって液面から放射性物質を含む飛沫が生成される。このような冷却機能喪失時の放射性物質の移行挙動解析にも、飛沫同伴率の評価が重要になる。

Kataoka らは、軽水炉の LOCA 解析等への適用を念頭にした飛沫の生成メカニズムを考慮した飛沫同伴率相関式を提案している⁽¹⁾。文献(1)では、飛沫同伴率は、上向蒸気流束 (j_g) [$\text{kg/m}^2/\text{sec}$] の関数であることが知られているとし、低蒸気流領域では、 j_g に比例し、中蒸気流領域では、 $j_g^3 \sim 4$ 、高蒸気流領域では、 $j_g^{7 \sim 20}$ に比例するとしている。また、気液界面からの距離 (h) の効果では、液面近傍領域（near surface region）、運動量支配領域（momentum controlled region）および沈着支配領域（deposition controlled region）の 3 つの領域に分けられるとしている。運動量支配領域では、距離の増加とともに飛沫同伴率は、 h^{-3} に比例して急速に低下するのに対して、沈着支配領域では、終端速度が上向蒸気速度より小さい飛沫のみが同伴され、飛沫同伴率は、沈着によって徐々に減少するとしている。

Kataoka らが提案する飛沫同伴率（上向き蒸気流束に対する飛沫流束の比）の相関式（以下、Kataoka-Ishii 式という）は、上向蒸気流束、気液界面からの高さ、流路直径の関数として提案されている。相関式は、上述した飛沫同伴現象の特徴を踏まえ、液面からの高さをもとに、上述の 3 領域毎に定義され、運動量支配領域では、さらに蒸気流束の大きさに応じて図 1-1 に示す 3 領域に分けて定義されている。

Kataoka らは、上向蒸気流中の飛沫の運動のメカニズムに着目し、解析的に相関式の基本となる式を求め、それを基にこれまでに実施された多くの実験データの整理を通して基本となる式に含まれる係数等を決定し相関式を導出している。このためこれまでの実験データに基づく相関式に比べ汎用性は高い。文献(1)に拠れば、上向蒸気流中を運動する飛沫が受ける抗力の抵抗係数が飛沫のレイノルズ (Reynolds) 数 (Re_D) の 0.5 乗に反比例するとして相関式の導出を行っている。これより、Kataoka-Ishii 式は、飛沫の Reynolds 数が $Re_D = 5 \sim 1000$ となる蒸気流の領域を対象とした式であるといえる。

一方、核燃料施設の放射性溶液貯槽の冷却機能喪失による大気圧での沸騰事象では、沸騰により溶液は徐々に濃縮し粘性が高くなり気泡の破裂によって生成される飛沫は、水の沸騰のそれとは異なってくるが、溶液の粘性、表面張力が水にほぼ等しい比較的濃度の薄い溶液の沸騰初期での飛沫の生成は、水の沸騰で近似できると考えられる。放射性溶液の発熱は、内包する放射エネルギーに依存する。たとえば、再処理施設の高レベル濃縮廃液貯槽での発熱は、約 $5[\text{W/l}]$ である⁽²⁾。貯

槽の直径を 7[m]と仮定し、貯蔵量を例えば 120[m³] ⁽³⁾と仮定すれば、溶液表面での蒸気流速は、約 1.2 [cm/sec]となる。終端速度がこれに等しくなる飛沫の最大径（以下、臨界粒径という）は約 17[μ m]であり、 Re_D は約 0.01 となる（第 2 章参照）。このように核燃料施設の放射性溶液貯槽の沸騰事象における飛沫同伴現象は、いわゆる Stokes 領域（ $Re_D \ll 1.0$ ）の現象であり、 $Re_D = 5 \sim 1000$ の領域を対象に導出された Kataoka-Ishii 式の適用範囲外と判断される。

文献(4)では、沸騰水型原子炉での活用を想定し、加圧条件下での実験データ、実験あるいは解析的に導出された気液同伴現象に係る研究成果をとりまとめているが、大気圧条件下での Stokes 領域での飛沫同伴率にかかる記述はない。

上記のような現状を踏まえ、文献(1)における機構論的な飛沫同伴率の相関式の導出過程を参考に、いわゆる Stokes 領域（ $Re_D \ll 1.0$ ）に適用可能な飛沫同伴率相関式の導出を試みた。本報告では、その結果を述べる。

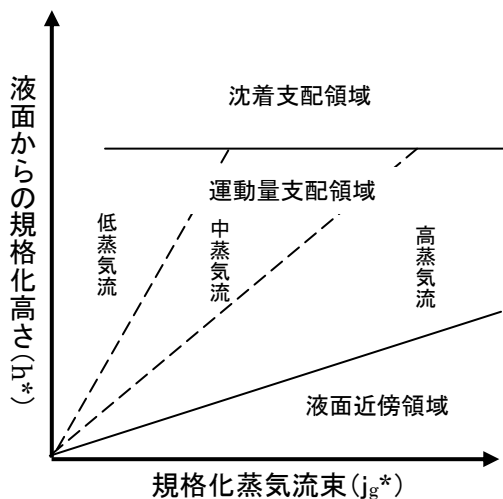


図 1-1 Kataoka らが提案する蒸気流束と液面高さによる相関式の領域分け

2. 極低速蒸気流での飛沫同伴率式の導出

本章では、Kataoka-Ishii 式の導出過程⁽¹⁾を参考に極低速蒸気流での飛沫同伴率相関式の導出を試みる。まず、文献(1)で提案する飛沫同伴率の基本式を示し、終端速度が上向蒸気流速に等しくなる粒径 (D_c [m]) (以下、臨界粒径という) について、それより粒径が大きい飛沫の同伴率と、それ以下の粒径の飛沫の同伴率に分けて取り扱うことができることを示す。次に、粒径が D_c より大きい飛沫が液面近傍に留まり落下に転じることからそれらの同伴率は実質的に考慮する必要がないことを示し、最後に径が D_c 以下の飛沫の同伴率を表す相関式を導出し、それをもって極低速蒸気流での飛沫同伴率式とできることを示す。

2.1 基本式

文献(1)では、以下のパラメータおよび関数を導入している。

- $\dot{\varepsilon}(j_g)$: 蒸気流束 j_g [kg/m²/sec] のときの気液界面での飛沫の質量流束 [kg/m²/sec]
- $f(D, j_g)$: 蒸気流束 j_g のときの飛沫径 D の分布関数
- $g(v_i, D, j_g)$: 蒸気流束 j_g のときの飛沫径 D の飛沫の初期速度 v_i の分布関数

関数 f および g は、それぞれ D および v_i の全区間についての積分値が、1 に等しくなる関数である。

上記の関数を用いて気液界面からの高さ h [m] での同伴率: $E_{fg}(h, j_g)$ は、次式で表される。

$$E_{fg}(h, j_g) = \frac{\dot{\varepsilon}(j_g)}{\rho_g j_g} \int_0^\infty \int_{v_h(D, j_g, h)}^\infty g(v_i, D, j_g) f(D, j_g) dv_i dD \quad (1)$$

ここで $v_h(D, j_g, h)$ は、高さ h に到達するための初速、 ρ_g は蒸気密度[kg/m³]である。

終端速度が蒸気流速 j_g に等しくなる飛沫径を D_c [m] とすれば、径がこれ以下の飛沫は、壁面への沈着を無視すれば、初速度 v_i に関係なく無限高さまで同伴される。従って(2)式が成り立つ。

$$\lim_{h \rightarrow \infty} E_{fg}(h, j_g) = E_{fg\infty}(j_g) = \frac{\dot{\varepsilon}(j_g)}{\rho_g j_g} \int_0^{D_c} f(D, j_g) dD \quad (2)$$

(2)を用いて(1)は、(3)のように書ける。

$$E_{fg}(h, j_g) = \frac{\dot{\varepsilon}(j_g)}{\rho_g j_g} \int_{D_c}^\infty \int_{v_h(D, j_g, h)}^\infty g(v_i, D, j_g) f(D, j_g) dv_i dD + E_{fg\infty}(j_g) \quad (3)$$

(3)式の右辺第1項は、径が D_c より大きい飛沫の同伴率、第2項は、 D_c より径の小さい飛沫の同伴率を表す。極低速蒸気流での飛沫同伴現象では、径が D_c より大きい飛沫は、液面近傍で落下に転ずると考えられるので、径が D_c 以下の飛沫の同伴率のみを考慮すればよいことになる。2.2 節では、まず粒径が D_c より大きい飛沫の上昇高さを試算し、大きい飛沫を考慮する必要がないことを示す。

2.2 粒径が D_c より大きい飛沫の上昇高さの試算

図 2-1 に示すような上向蒸気流中での飛沫の運動を考える。飛沫の絶対速度および相対速度をそれぞれ v および v_r とし、上向きを正とすると

$$v_r = v - j_g \quad (4)$$

$$\frac{dv_r}{dt} = -\frac{\Delta\rho}{\rho_f}g - \frac{3}{4}C_D \frac{1}{D} \frac{\rho_f}{\rho_g} v_r |v_r| \quad (5)$$

となる。ここで、液滴密度： ρ_f [kg/m³]、液滴と蒸気の密度差： $\Delta\rho$ [kg/m³]、飛沫径： D [m] および重力加速度： g [m/sec²]である。極低速蒸気流（Stokes 領域）（ $Re_D \ll 1.0$ ）での抵抗係数は、一般的に以下が用いられる（図 2-2 参照）。

$$C_D = \frac{24}{Re_D} \quad (6)$$

直径が D の飛沫の Reynolds 数は、蒸気の粘性係数： μ_g [Pa・sec]として以下で定義される。

$$Re_D = \frac{\rho_g |v_r| D}{\mu_g} \quad (7)$$

(5)式に(6)および(7)を代入して(8)を得る。

$$\frac{dv_r}{dt} = -\frac{\Delta\rho}{\rho_f}g - 18\frac{\mu_g}{D^2\rho_f}v_r \quad (8)$$

直径 D の飛沫の終端速度： $v_{r\infty}$ [m/sec²] は、(8)式の左辺をゼロとおいて

$$v_{r\infty} = -\frac{\Delta\rho D^2 g}{18\mu_g} \quad (9)$$

と求まる。 v の初速度を v_i として(8)式の微分方程式より v_r を求め (4)に代入して(10)式を得る。

$$v = v_r + j_g = (v_i - j_g - v_{r\infty})e^{-\frac{\Delta\rho}{\rho_f}t} + j_g + v_{r\infty} \quad (10)$$

次に飛沫の最高到達高さ： h_m [m] を求める。このためにまず、最高点に到達する時刻： T [sec] を求める。最高点に到達すると(10)で表される飛沫の速度はゼロになることから、時刻 T は、(10)式の右辺をゼロといて下式のように求まる。

$$T = \frac{\rho_f}{\Delta\rho} \ln \frac{v_{r\infty} - v_i + j_g}{v_{r\infty} + j_g} \quad (11)$$

h_m は(10)式を時刻 T まで積分することで、(12)式のように求められる。

$$h_m = v_{r\infty}^2 \frac{D^2 \rho_f}{18 \mu_g} \left[(v_{ri}^+ + j_g^+) - (1 - j_g^+) \ln \frac{1 + v_{ri}^+}{1 - j_g^+} \right] \quad (12)$$

ここで

$$v_{ri}^+ \equiv -\frac{v_i - j_g}{v_{r\infty}} \quad j_g^+ \equiv -\frac{j_g}{v_{r\infty}} \quad (13)$$

(12)式をもとに、 $j_g = 1.22 \times 10^{-2}$ [m] として、 v_i/j_g をパラメータに D/D_c に対して h_m を求めると図 2-3 のようになる。これより粒径が D_c ($j_g = 1.22 \times 10^{-2}$ [m/s] のとき $17.0 \mu\text{m}$) より大きい飛沫はほとんど液面近傍 (1cm 程度) に留まると言える。これより、蒸気流速が、 1.0×10^{-2} [m] 程度では、飛沫の同伴は、沈着支配であると判断され、径が D_c 以下の飛沫の同伴率のみを考慮すれば良いことが分かる。

図 2-3 では、 v_i が未知であるため、 j_g の 1 ～ 50 倍までに変化させて飛沫の到達高さの程度を把握した。ここで v_i がどの程度の大きさであるかを試算してみる。Newitt ら⁵⁾は、気泡が破裂する瞬間の気泡ドーム径： r に対する破裂時の飛沫初速度： v_i として以下を示している。気泡破裂時間： t を 3×10^{-5} とすると実験結果と良く一致するとしている。 p_0 は気泡破裂時の外圧 [Pa]、流体の表面張力： σ [N/m] である。

$$v_i = \frac{3(p_0 + 2\sigma/r)t}{4\rho_f} \quad (14)$$

(14)式をもとに気泡ドーム径をパラメータに v_i を求めると図 2-4 のようになり、図 2-3 で示した v_i/j_g の変化範囲は概ね適切であると判断される。

2.3 臨界粒径以下の飛沫同伴率

本節では、径が D_c 以下の飛沫の同伴率を表す相関式を導出する。文献(1)では気液界面での飛沫径分布と同伴率は、任意の高さ h での同伴率を決定する重要因子であるが、解析的にあるいは直接測定することは困難であるとしている。そこで、気液界面で径が D 以下の飛沫の同伴率(15)を導入する。

$$E_0(D, j_g) = \frac{\dot{\varepsilon}(j_g)}{\rho_g j_g} \int_0^D f(D, j_g) dD \quad (15)$$

たとえば

$$E_0(D_c, j_g) = E_{fg\infty}(j_g) \quad (16)$$

である。

ここで、(1)をもとに高さ h での粒径 D 以下の同伴率として以下を考える。

$$E_{fg}(h, j_g, D) = \frac{\dot{\varepsilon}(j_g)}{\rho_g j_g} \int_0^D \int_{v_h(D, j_g, h)}^{\infty} g(v_i, D, j_g) f(D, j_g) dv_i dD \quad (17)$$

ここで、 $v_h(D, j_g, h)$ は、定義に基づけば「高さ h に到達するための初速」であるので、径が D_c 以下の飛沫については、

$$v_h(D, j_g, h) = 0 \quad (D \leq D_c) \quad (18)$$

となる。これより、(17)は

$$E_{fg}(h, j_g, D) = \frac{\dot{\varepsilon}(j_g)}{\rho_g j_g} \int_0^D f(D, j_g) dD \quad (D \leq D_c) \quad (19)$$

となり、(15)および(19)の右辺同士が等しいので

$$E_0(D, j_g) = E_{fg}(h, j_g, D) \quad (D \leq D_c) \quad (20)$$

となる。文献(1)によれば $E_{fg}(h, j_g, D)$ は測定可能で Garner ら⁽⁶⁾が測定しているとしている。

次に $E_0(D, j_g)$ と D および j_g の関係を導出する。文献(1)に拠れば $E_0(D, j_g)$ は、飛沫同伴のメカニズムを考慮すると(21)のように関係付けられるとしている。

$$E_0(D, j_g) \propto N f_D p F_D \quad (21)$$

N : 飛沫密度 (droplet size density)

f_D : 平均頻度 (mean frequency)

p : のがれ確率 (escape probability)

F_D : 流動抵抗

F_D は(22)式で表される。

$$F_D = -\frac{1}{2} C_D \rho_g v_r |v_r| A_d \quad (22)$$

C_D : 抵抗係数

v_r : 飛沫の相対速度

A_d : 飛沫の投影面積

ここで参考文献(1)において、(21)で表される単純モデルでは、以下の近似式が使えるであろうとしている。

$$v_r |v_r| \propto j_g^2 \quad A_d \propto D^2 \quad (23)$$

(6)、(7)、(22)および(23)を(21)に代入すると

$$E_0(D, j_g) \propto j_g D \quad (24)$$

参考文献(1)によれば、Garner らの実験結果は図 2-5 のように $D^* j^*$ について整理できるとして、図 2-5 より、 $D \leq D_c$ について(25)が得られる。

$$E_{fg}(h, j_g, D) = 0.0095 D^* j_g^* \quad (25)$$

ここで定義より

$$D^* \equiv \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\sigma}} D$$

$$j_g^* \equiv \left(\frac{\rho_g^2}{\sigma g \Delta\rho} \right)^{\frac{1}{4}} j_g$$

(25)式を(19)に代入すると

$$\frac{\dot{\varepsilon}(j_g)}{\rho_g j_g} \int_0^D f(D, j_g) dD = 0.0095 D^* j_g^* \quad (26)$$

(26)式の両辺を D で微分すると(27)が得られる。

$$f(D, j_g) = \frac{\rho_g j_g}{\dot{\varepsilon}(j_g)} \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\sigma}} 0.0095 j_g^* \quad (27)$$

(16)、(19)、(20)および(27)より、径が D_c 以下の飛沫の同伴率として(28) (図 2-5 中の破線) が得られる。

$$E_0(D_c, j_g) = E_{fg\infty}(j_g) = \frac{\dot{\varepsilon}(j_g)}{\rho_g j_g} \int_0^{D_c} \frac{\rho_g j_g}{\dot{\varepsilon}(j_g)} \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\sigma}} 0.0095 j_g^* dD$$

$$= 0.0095 D_c^* j_g^* = 0.0095 \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\sigma}} \times \left(\frac{\rho_g^2}{\sigma g \Delta\rho} \right)^{\frac{1}{4}} D_c j_g = 0.04 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{\frac{3}{4}} (\mu_g \rho_g)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{g \Delta\rho} \right)^{\frac{1}{4}} j_g^{\frac{3}{2}} \quad (28)$$

図 2-5 中の左下隅の■印が、蒸気流速 1.22 [cm/sec]に対応する点であり、飛沫同伴率は 1.25×10^{-7} となる。

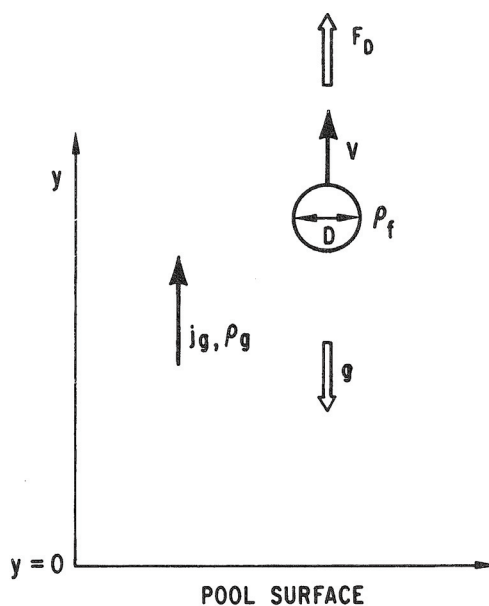


図 2-1 上向蒸気流に対する飛沫の運動（参考文献(1)より転載）

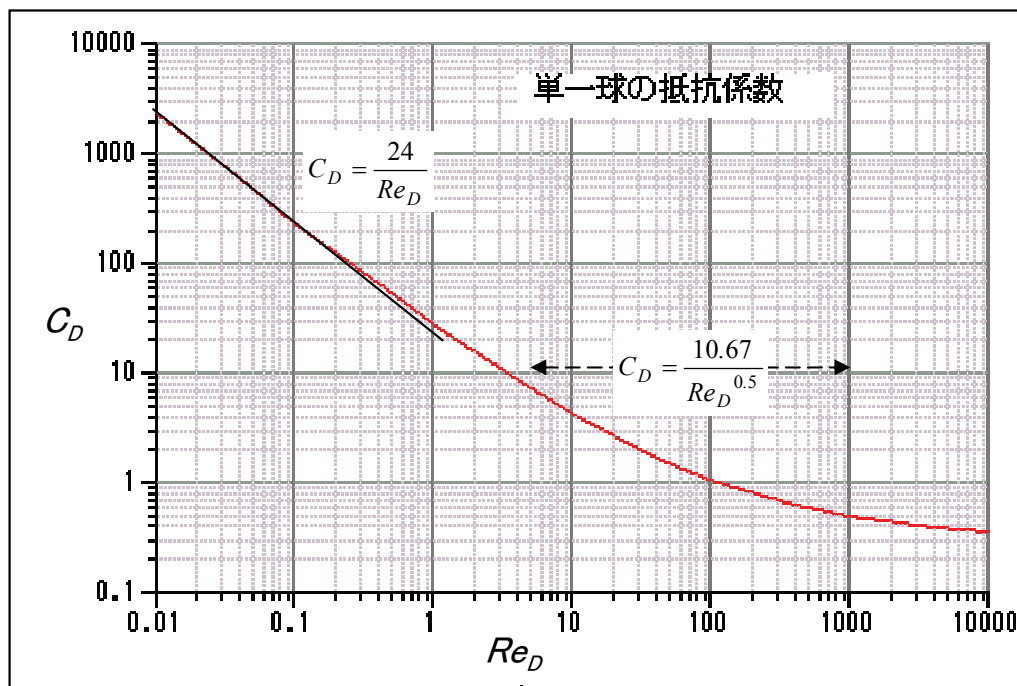


図 2-2 レイノルズ数と抵抗係数の関係

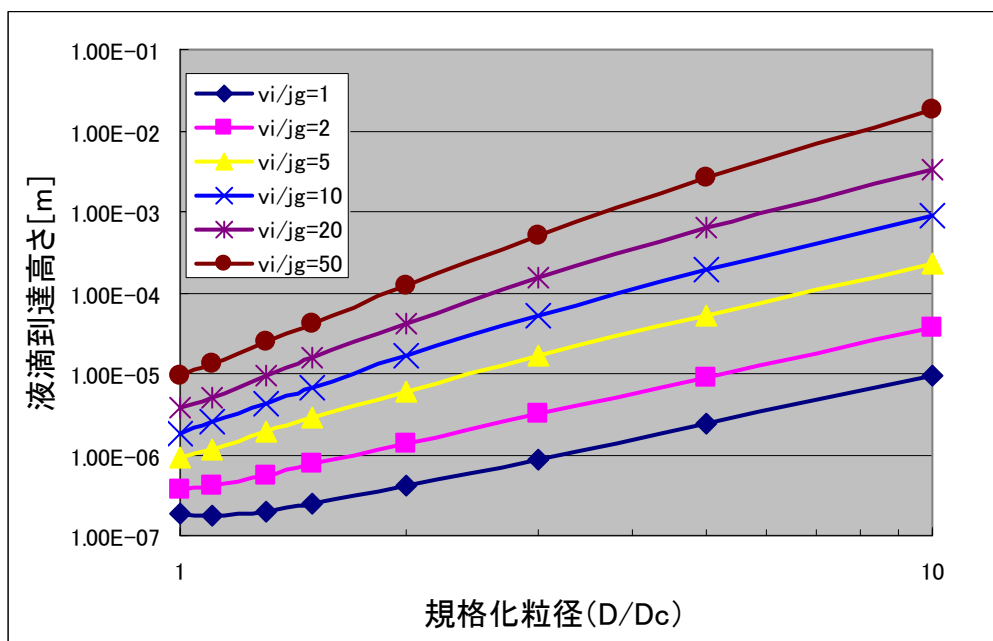


図 2-3 飛沫の初速度を変化させた時の飛沫径に対する飛沫到達高さ

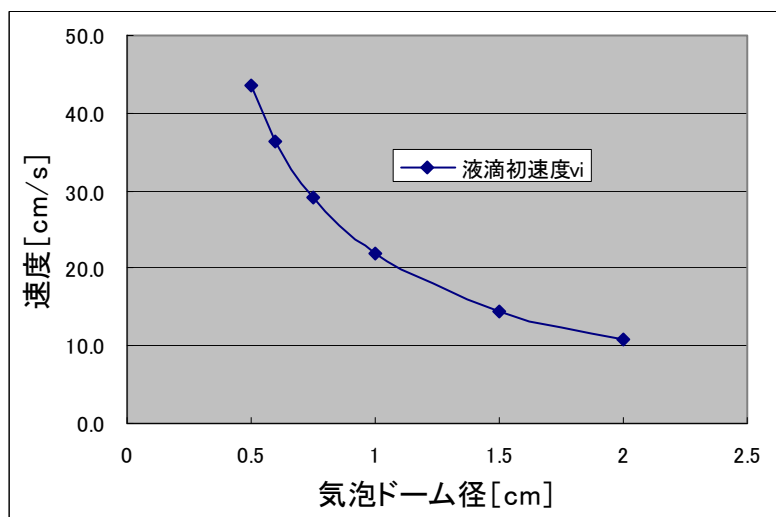


図 2-4 気泡ドーム径に対する飛沫の初速度

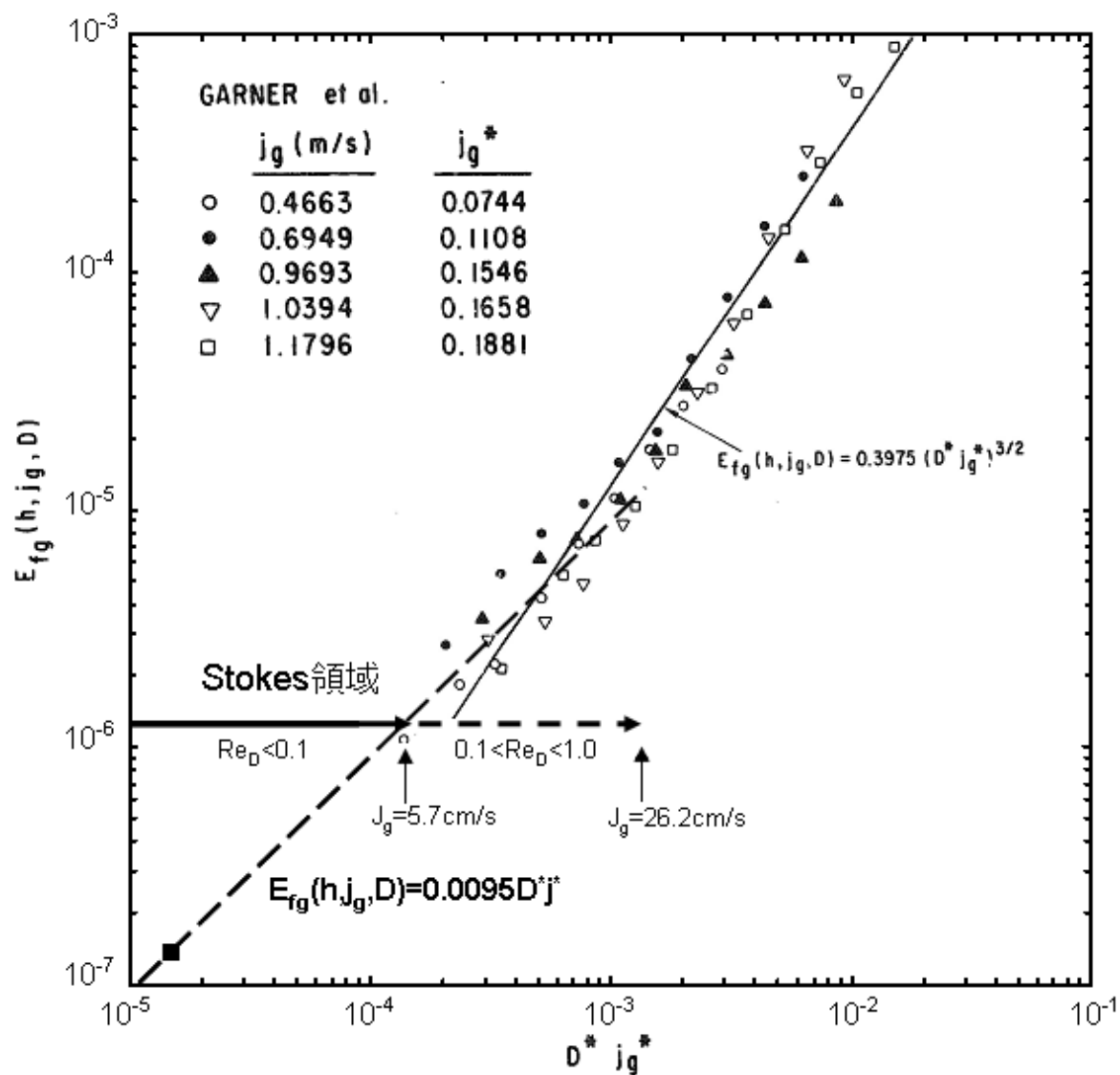


図 2-5 $D^* j_g^*$ で整理した Garner らが測定した同伴率
(参考文献(1)より転載し、Stokes 領域の相関式を追加)

3. 実験との比較

ここでは、2. で導出した相関式と実験データとの比較を試みる。参考文献(7)では、軽水炉の苛酷事故における核分裂生成物の再浮遊に関する多くの文献が調査され、分析・整理されている。その中に沸騰状態にある溶液からの上向蒸気流による飛沫の同伴現象に関する多くの実験データが、図 3-1 に示すように比較検討されている。

図 3-1 の比較図 A では、上向蒸気流速が 0.0～130cm/sec の範囲にある実験結果が示されている。蒸気流速が 15cm/sec を境に、飛沫同伴率と蒸気流速との関係が異なるとしている。放射性溶液貯槽等の溶液が停留した状態での飛沫の同伴では、蒸気流速が 15cm/sec 以下の実験が重要となる。比較図 B には、この条件に合う実験結果が整理されている。Mishima の実験および Heger の実験は未飽和状態でのデータを含むこと、Shor (22bar) のデータは高圧下の実験データであること、Garner(foam)のデータは発泡器を用いた実験データであるため、これらを除いた大気圧下の飽和状態での実験データのみを比較図 C に示している。データには、水蒸気空間の高さ、溶液体積と液面の比率、飛沫の捕集位置等の実験装置の相異に起因すると思われるデータ点のバラツキはあるもののデータ点の近似式が、図中の直線で示されている。この直線より、蒸気流速が 1.22 [cm/sec]のときの、飛沫同伴率は約 4.0×10^{-6} と算出され、2. で導出した相関式（以下、新相関式という）から求まる 1.25×10^{-7} とは大きく異なる。

比較図 C 中の Garner の実験は、参考文献(6)のデータである。文献(6)によれば、蒸気流速は、最も小さいケースで “1.53 [ft/sec] (0.4663 [m/sec])” であり、文献(1)でも文献(6)を参照しデータ整理されており、その結果を転載したのが図 2-5 であり、比較図 C の蒸気流速に疑義がもたれる。そこで、比較図 C 中で、最も小さい蒸気流速に係るデータである Shor の実験⁽⁸⁾を調べた。

Shor⁽⁸⁾らは、沸騰水型原子炉 Borax-III の沸騰による放射性物質の移行を把握するため、実験室規模の大気圧近傍（0～40psig）での実験、加圧沸騰ループを用いた高圧（150～600psig）での実験および Borax-III での多様な出力レベルの通常運転での放射性物質の移行実験を行っている。実験室規模での実験装置の沸騰容器は、直径 3 インチのガラス管を用い、その底部に長さ 9 インチ、太さ 0.5 インチの電気ヒータを内蔵し、ヒータに直径 2 インチで同じ長さのガラス管を被せて、ヒータと 2 インチガラス管で形成されるアニュラス部で水を加熱し、2 インチ管と 3 インチ管で形成されるアニュラス部を通して水を循環させる構造と成っている。液面はヒータおよび 2 インチ管の上端より 1 インチ高くなるように、予熱した水を給水して一定に保つよう制御される。水には、CsCl を溶解させ、トレーサとして Cs¹³⁷ を用いて凝縮水中の CsCl の量を測定し、除染係数を求めている。実験では、ヒータ出力を、0.5、1.0 および 1.3kW に変化させて、異なる蒸気流速で計測している。図 3-2 に除染係数から求めた異なる蒸気流速での飛沫同伴率を示す。文献(8)に記載の図から読みとった蒸気流速は約 0.28 [ft/sec] (8.5 [cm/sec])、0.55 [ft/sec] (16.7 [cm/sec]) および 0.71 [ft/sec] (21.6 [cm/sec]) であり、比較図 C の Shor のデータ点の流速（約 2.0、4.0 および 5.0 [cm/sec]）とは明らかに異なる。また、比較図 C 中の破線の円で囲った点は、原論文の図の中の凡例を実測点と間違えて記載したものである。これより、比較図 C を基にして蒸気流速と同伴率の関係を議論することはできないといえる。

図 3-3 に新相関式と Shor らの実験データの比較を示す。図中の◇が Shor らのデータ点を表す。Shor のデータと Garner らのデータとの一致は良いが、新相関式の対象とする領域の蒸気流速でないため、十分な検証を行えなかった。

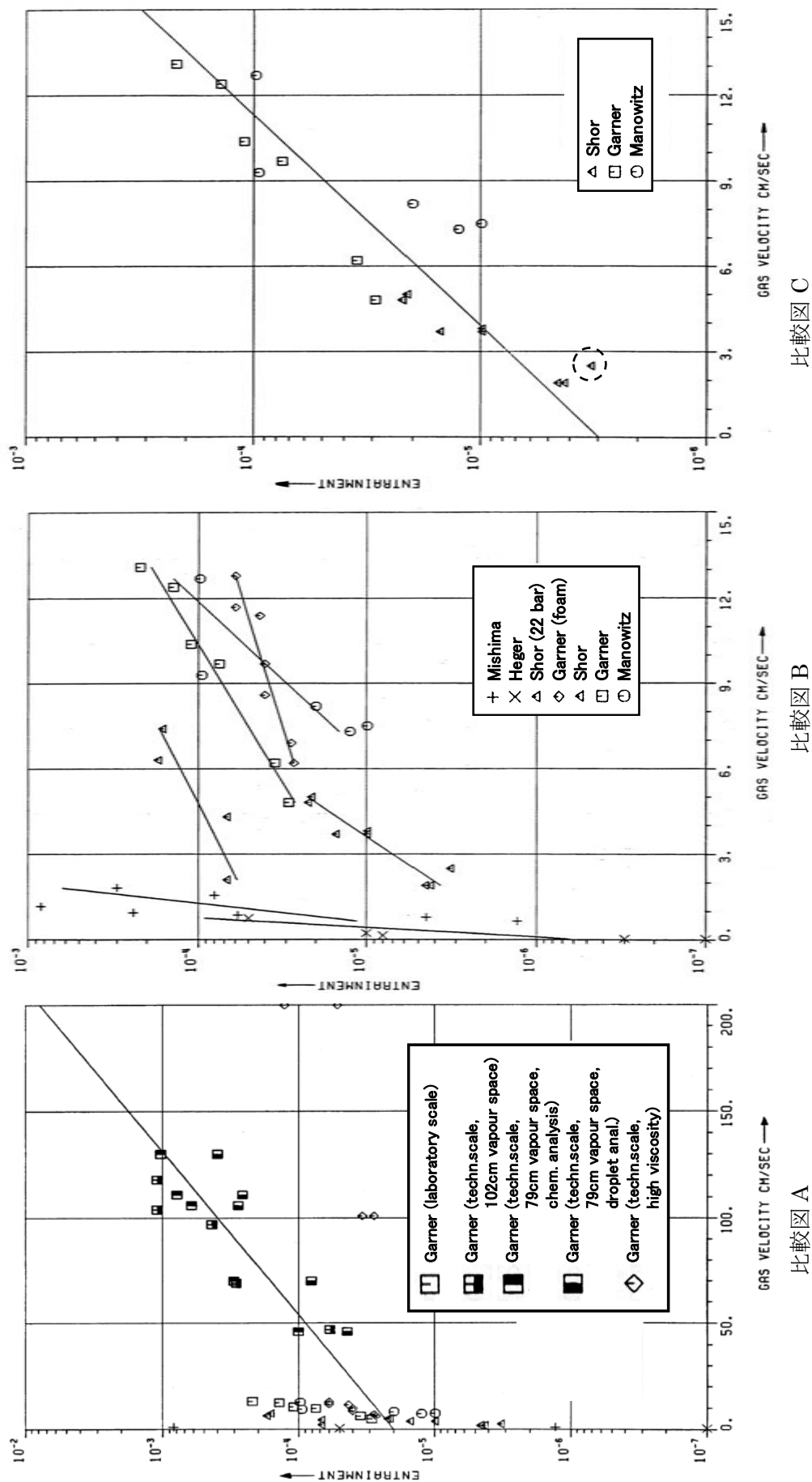


図 3-1 沸騰時の飛沫同伴に関する実験の比較 (参考文献(7)より転載)

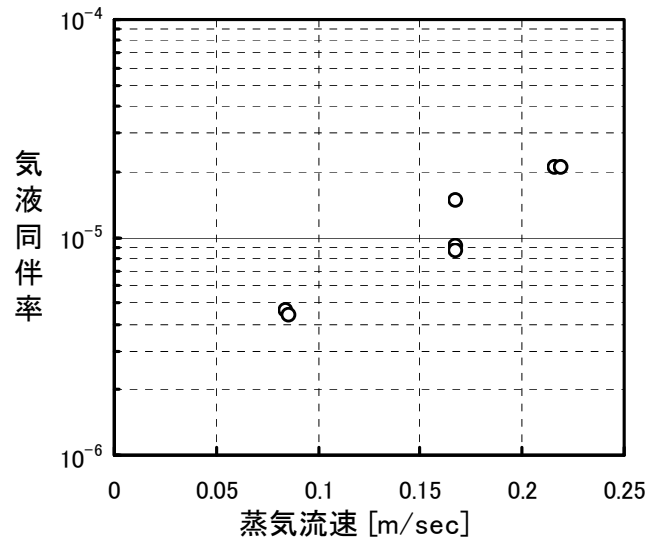
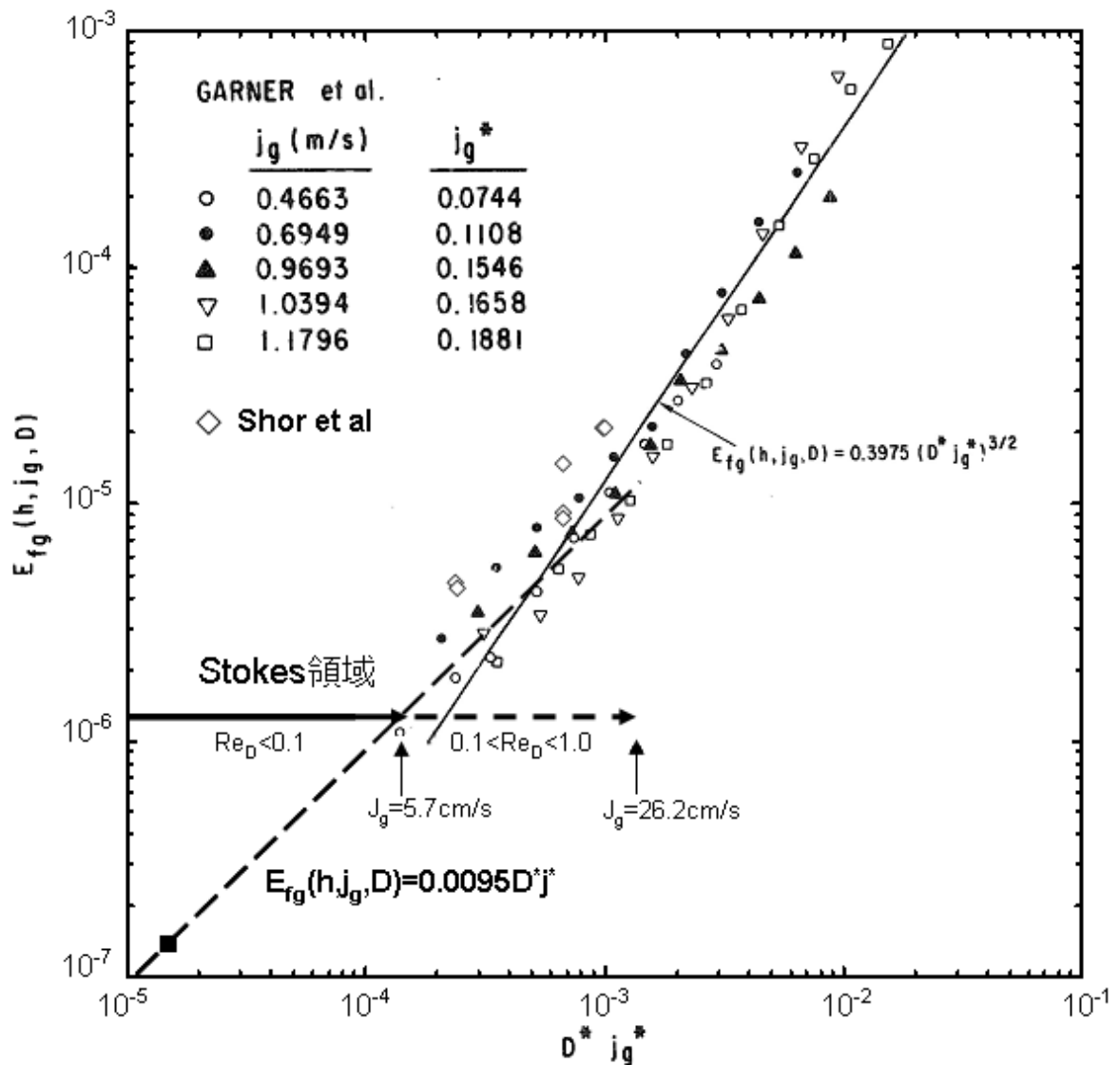
図 3-2 Shor らの実験結果⁽⁸⁾から求めた飛沫同伴率と蒸気流速の関係

図 3-3 Shor らの実験結果と新たに導出した相関式との比較

4. まとめ

文献(1)における機構論的な飛沫同伴率の相関式の導出過程を参考に、いわゆる Stokes 領域 ($Re_D \ll 1.0$) に適用可能な飛沫同伴率相関式の導出を試みた。その結果、核燃料施設の放射性物質を含む水溶液を内蔵する貯槽等での冷却機能喪失による沸騰現象で想定されるような蒸気流速では、臨界粒径より大きい飛沫は、液面近傍で落下すると考えられ、臨界粒径以下の飛沫のみの同伴現象となることを解析的に明らかにした。さらにそのときの飛沫同伴率は蒸気流速の 1.5 乗に比例する相関式を導出した。

実験データとの比較では、本報告で検討対象とする領域での実験データを見いだすことができず、十分な検証を行うことはできなかった。今後、化学プロセス分野での関連情報の有無等を調査し、検証に活用できるデータの入手に努めたい。

参考文献

1. Kataoka, I. and Ishii, M., "Mechanistic Modeling and Correlations for Pool-Entrainment Phenomenon," NUREG/CR-3304 (1983)
2. 宮田 敬士 他、「六ヶ所再処理工場の確率論的安全評価、(Ⅱ) 高レベル濃縮廃液沸とう事故の発生頻度評価 (内的事象)」、日本原子力学会論文誌、Vol. 7、 No. 2、 pp. 85-98 (2008)
3. 日本原燃(株)、「六ヶ所ウラン濃縮工場 核燃料物質加工事業変更許可申請書」、平成17年3月 (平成17年12月一部補正)
4. Yeh, G.C.K. and Zuber, N., "On the Problem of Liquid Entrainment," ANL-6244 (1960)
5. Newitt, D. M., Dombrowski, N., and Knelman, F. M., "Liquid Entrainment, 1. The Mechanism of Drop Formation from Gas or Vapor Bubbles," Trans. Inst. Chem. Engs., 32, p.245 (1954)
6. Garner, F. H., Ellis, S. R. M. and Lacy, J. A., "The Size Distribution and Entrainment of Droplets," tran. Inst. Cem. Engs. 32, p.222 (1954)
7. Borkowski, R., Bunz, H. and Schock, W., "Resuspension of Fission Products during Severe Accidents in Light-Water Reactors," KfK3087 (1986)
8. Shor, A.J., Ward, H.T., Miller, D and Rodger, W.A., "Radioactive Carry-Over form Borax-III and Test Systems," Nucl. Sci. and Eng. Vol.2, pp.126-142 (1957)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
物質モル	mol	
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	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	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエエネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報を付たえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガール	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≐ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フエルミ	f	1 フエルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ) 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ = 1 μm=10 ⁻⁶ m

