JAEA-Research
2013-008

JAEA-Research

# 液体金属流れ中の気泡・溶存ガス挙動解析コードの開発

Study on Numerical Simulation of Bubble and Dissolved Gas Behavior in Liquid Metal Flow

伊藤 啓　大野 修司　上出 英樹　粉川 広行
二川 正敏　河村 拓己　今井 康友

Kei ITO, Shuji OHNO, Hideki KAMIDE, Hiroyuki KOGAWA
Masatoshi FUTAKAWA, Takumi KAWAMURA and Yasutomo IMAI

次世代原子力システム研究開発部門
FBR 要素技術開発ユニット

FBR Systems Technology Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

October 2013

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, 2013

JAEA-Research 2013-008

# 液体金属流れ中の気泡･溶存ガス挙動解析コードの開発

日本原子力研究開発機構　次世代原子力システム研究開発部門　FBR 要素技術開発ユニット
伊藤　啓、大野　修司、上出　英樹、粉川　広行+、二川　正敏+、
河村　拓己*1、今井　康友*2

(2013 年 4 月 23 日　受理)

ナトリウム冷却大型高速炉では、1 次冷却系統内に存在する気泡・溶存ガスによる炉心反応度擾乱や熱交換器性能低下などが懸念されており、冷却系統内における気泡・溶存ガス挙動を把握することは、高速炉の安定運転を担保する上で重要である。また、J-PARC の水銀ターゲットシステムにおいては、キャビテーションによる構造材壊食を抑制するために微小気泡を注入しているが、熱交換器におけるガス蓄積を防止するため、微小気泡の挙動を評価することが課題となっている。原子力機構では、液体金属流れ（主として高速炉 1 次冷却材流れ）中の気泡・溶存ガス挙動を評価するため、フローネットワーク型の解析コード VIBUL の整備を進めており、本研究では、解析精度向上を目的とした VIBUL コードの改良と、水銀ターゲットシステムに適用するために必要なモデルの開発を行った。

VIBUL コードの改良としては、気泡挙動（モル保存等）が正しく計算できるように、陽解法による気泡モル保存式の離散化、核生成計算用配列の初期化処理、Na 中ガス飽和温度計算式の取扱い、IHX での圧力計算式、合流部における溶解度計算式についてコードの改良を行った。コード検証のため、JSFR 体系の解析を行い、各コンポーネントにおける気泡・溶存ガス挙動（IHX における気泡析出等）が計算でき、また、気泡ソース量の影響や Ar ガスと He ガスの挙動の違いについて評価できることを確認した。水銀ターゲットシステムのモデル開発としては、物性値関数、開ループ計算機能、大気泡放出モデル、サージタンクにおける気泡放出モデル、熱交換器における気泡合体・蓄積モデル、熱交換器におけるキャリーアンダー（ガス巻込み）モデルの開発・導入を行い、各モデルの動作確認を実施して各コンポーネントにおける気泡挙動が計算できることを示した。水銀ターゲットシステムを対象として、水-空気系および水銀-ヘリウム系の解析を実施し、各コンポーネントにおける気泡数密度分布について評価した。また、試験結果との比較によって気泡数密度が概ね再現できることを示した。

---

大洗研究開発センター（駐在）：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002
+ J-PARC センター　物質・生命科学ディビジョン
*1 株式会社 NESI
*2 株式会社エヌデーデー

JAEA-Research 2013-008

# Study on Numerical Simulation of Bubble and Dissolved Gas Behavior in Liquid Metal Flow

Kei ITO, Shuji OHNO, Hideki KAMIDE, Hiroyuki KOGAWA+, Masatoshi FUTAKAWA+,
Takumi KAWAMURA*1 and Yasutomo IMAI*2

FBR Systems Technology Development Unit,
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 23, 2013)

In a sodium-cooled fast reactor, inert gas (bubbles or dissolved gas) exists in the primary coolant system. Such inert gas may cause disturbance in reactivity and/or degradation of IHX performance, and therefore, the inert gas behaviors have to be investigated to ensure the stable operation of a fast reactor. In addition, small bubbles exist also in the mercury target loop in J-PARC to suppress cavitation erosion. Those small bubbles shold be removed immediately at the downstream of a target region because the small bubbles may accumulate at the upper plenum of a heat exchanger. However, it is difficult to investigate these inert gas behaviors in liquid metal flows experimentaly because measurement techniques apllicable to opaque liquid are quite limited.

The Japan Atomic Energy Agency has developed a plant dynamics code VIBUL to simulate the concentration distributions of the dissolved gas and the bubbles in a fast reactor. In this study, the VIBUL code is improved to achieve accurate simulations, e.g. rigorous mole conservation of inert gas. Moreover, new models are introduced to simulate the mercury target system. To validate the improved models and the newly developed models, the inert gas behaviors in the large-scale sodium-cooled reactor and the small bubble behaviors are simulated. As a result, it is confirmed that the complicated bubble dynamics in each component, e.g. core, IHX or surge tank, can be simulated appropriately by the VIBUL code.

Keywords: Fast Reactor, Inert Gas, Mercury Target, VIBUL

---

+ Materials and Life Science Division, J-PARC Center

*1 NESI.Inc

*2 NDD Corporation

目　次

1. 序論 ----1
2. VIBUL コードの概要 ----2
2.1 ナトリウム冷却高速炉における気泡・溶存ガス挙動 ----2
2.2 VIBUL コードの基礎式 ----2
3. VIBUL コードの改良 ----4
3.1 陽解法による気泡モル保存式の離散化 ----4
3.2 核生成計算用配列の初期化処理 ----5
3.3 Na 中ガス飽和温度計算式の取扱い ----5
3.4 IHX での圧力計算式の改良 ----5
3.5 合流部における溶解度計算式の修正 ----6
4. ナトリウム冷却高速炉における気泡・溶存ガス挙動の評価 ----10
4.1 解析条件 ----10
4.2 解析結果 ----10
5. 水銀ターゲットシステムの計算モデル開発 ----20
5.1 物性値関数の導入 ----20
5.2 開ループ計算機能の開発 ----20
5.3 大気泡放出モデルの開発 ----21
5.4 サージタンクにおける気泡放出のモデル化 ----21
5.5 熱交換器における気泡合体・蓄積のモデル化 ----23
5.6 熱交換器におけるキャリーアンダー（ガス巻込み）のモデル化 ----25
6. 水銀ターゲットシステムにおける微小気泡挙動の評価 ----34
6.1 水-空気系の解析 ----34
6.2 水銀-ヘリウム系の解析 ----35
6.3 試験結果と解析結果の比較 ----35
7. 結論 ----47
参考文献 ----48

付録 1　改良したプログラムのソースコード ----49
付録 2　3 次元気泡挙動解析 ----104

Contents

1. Introduction ----1
2. Brief Description of VIBUL Code ----2
2.1 Inert Gas Behavier in Sodium-Cooled Fast Reactor ----2
2.2 Basic Equation of VIBUL Code ----2
3. Improvement of VIBUL Code ----4
3.1 Explicit Discretization of Bubble Mole Conservation Equation ----4
3.2 Initialization of Calculation Array for Nucleation ----5
3.3 Examination on Saturated Temperature Calculation of Inert Gas in Sodium ----5
3.4 Derivation of Appropriate Prresure Calculation in IHX ----5
3.5 Corerction of Solutivity Calculaiton at Mixing Point ----6
4. Simulaiton of Inert Gas Behavior in Sodium-Cooled Fast Reactor ----10
4.1 Simulation Condition ----10
4.2 Simulation Result ----10
5. Model Development for Simulatin of Mercury Target System ----20
5.1 Introduction of Physical Property Function ----20
5.2 Extension to Open-Loop System ----20
5.3 Development of Large Bubble Release Model ----21
5.4 Modeling of Bubble Release in Surge Tank ----21
5.5 Modeling of Bubble Coalescence and Accumulation in Heat Exchnger ----23
5.6 Modeling of Carryunder (Gas Entrainment) in Heat Exchnger ----25
6. Simulation of Small Bubble Behavior in Mercuty Target System ----34
6.1 Simulation of Water-Air Loop ----34
6.2 Simulatin of Mercury-Helium Loop ----35
6.3 Comparison of Experimental Data and Simulation Result ----35
7. Concluding Remarks ----47
References ----48

Appendix 1 Source Code of Improved Program ----49
Appendix 2 Three-Dimensional Simulaiton of Dynamic Bubble Behavior ----104

表リスト

Table 4.1　高速炉 1 次冷却系統内気泡・溶存ガス挙動解析条件 ----------13
Table 4.2　Case-Ar-ref における Ar ガスのモル収支（mol/s） ----------14
Table 4.3　Case-Ar(1/10)における Ar ガスのモル収支（mol/s） ----------14
Table 4.4　Case-He-ref における He ガスのモル収支（mol/s） ----------15
Table 4.5　Case-He(1/10)における He ガスのモル収支（mol/s） ----------15
Table 4.6　各コンポーネントにおける Ar ガスのボイド率 ----------16
Table 4.7　Ar ガスの核生成パラメータ ----------16
Table 4.8　各コンポーネントにおける He ガスのボイド率 ----------16
Table 4.9　He ガスの核生成パラメータ ----------16
Table 6.1　水ループにおける各コンポーネントの体積および液面面積 ----------36
Table 6.2　水-空気系における解析ケース ----------36
Table 6.3　水銀-ヘリウム系における解析ケース ----------36

図リスト

Fig.3.1　IHX での核生成による気泡生成量（オリジナルコード） ----------8
Fig.3.2　IHX でのモル収支（オリジナルコード） ----------8
Fig.3.3　IHX での核生成による気泡生成量（改良コード） ----------9
Fig.3.4　IHX でのモル収支（改良コード） ----------9
Fig.4.1　高速炉 1 次系統内気泡・溶存ガス挙動解析モデル ----------17
Fig.4.2　Case-Ar-ref における Ar ガスの気泡個数分布 ----------18
Fig.4.3　Case-Ar(1/10)における Ar ガスの気泡個数分布 ----------18
Fig.4.4　Case-He-ref における He ガスの気泡個数分布 ----------19
Fig.4.5　Case-He(1/10)における He ガスの気泡個数分布 ----------19
Fig.5.1　大気泡放出部における気泡挙動 ----------27
Fig.5.2　大気泡放出モデルによる気泡個数密度の変化 ----------27
Fig.5.3　サージタンク外観図 ----------28
Fig.5.4　水-空気系における気泡放出割合関数 ----------29
Fig.5.5　水銀-ヘリウム系における気泡放出割合関数 ----------29
Fig.5.6　サージタンクからの気泡流出割合（D/P 無し） ----------30
Fig.5.7　サージタンクからの気泡流出割合（壁面と D/P の間隙 2.0 (mm)） ----------30
Fig.5.8　熱交換器における気泡挙動 ----------31
Fig.5.9　ガス蓄積量の時間変化（熱交換器高さ 1.0 (m)） ----------32
Fig.5.10 ガス蓄積量の時間変化（熱交換器高さ 15.0 (m)） ----------32
Fig.5.11 キャリーアンダーモデルによるガス蓄積量の時間変化 ----------33

Fig.6.1　水ループ全体図 ----------37
Fig.6.2　水ループ解析モデル ----------37
Fig.6.3　H2O-case01 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------38
Fig.6.4　H2O-case02 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------38
Fig.6.5　H2O-case03 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------39
Fig.6.6　H2O-case04 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------39
Fig.6.7　H2O-case05 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------40
Fig.6.8　サージタンク上流における気泡個数密度分布の比較（水-空気系） ----------41
Fig.6.9　サージタンク下流における気泡個数密度分布の比較（水-空気系） ----------41
Fig.6.10 水銀ループ試験装置 ----------42
Fig.6.11 Hg-case01 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------43
Fig.6.12 Hg-case02 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------43
Fig.6.13 Hg-case03 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------44
Fig.6.14 Hg-case04 における各コンポーネントの気泡個数密度 ----------44
Fig.6.15 サージタンク上流における気泡個数密度分布の比較（水銀-ヘリウム系） ----------45
Fig.6.16 サージタンク下流における気泡個数密度分布の比較（水銀-ヘリウム系） ----------45
Fig.6.17 試験結果と解析結果の気泡個数密度分布比較（サージタンク上流） ----------46
Fig.6.18 試験結果と解析結果の気泡個数密度分布比較（サージタンク下流） ----------46

# 1. 序論

ナトリウム冷却大型高速炉（JSFR）では、炉上部プレナム内の自由液面におけるカバーガス（Ar）巻込みや制御棒からの気泡（He）放出により、1 次冷却系統内に不活性ガス（気泡・溶存ガス）が混入している。これらの気泡・溶存ガスが 1 次冷却系統中を輸送されることにより、炉心における反応度擾乱や中間熱交換器（IHX）における熱伝達性能の低下などが懸念されているため、冷却系統内における気泡・溶存ガス挙動を把握することは、高速炉の安定運転を担保する上で重要である。そこで、原子力機構では高速炉一次冷却系統内の気泡・溶存ガス挙動を評価できる VIBUL コードの開発と検証を実施している。また、水銀中に陽子線を入射し中性子を発生させる水銀ターゲットシステムにおいて、陽子線入射によるキャビテーションが問題となっており、キャビテーション気泡崩壊時の圧力波を抑制して構造物の壊食を防止する目的で、水銀中にヘリウム微小気泡を注入している。その際、水銀ループ内における気泡蓄積挙動を定量的に評価することが構成機器の設計において必要不可欠であるが、水銀中の気泡挙動を観察することは困難であるため、VIBUL コードを用いた気泡挙動評価が有効であると考えられる。

本研究では、解析精度向上を目的とした VIBUL コードの改良を行い、その検証としてナトリウム冷却大型炉を対象とした評価を実施する。合わせて、水銀ターゲットシステムに適用するために必要なモデルの開発を行い、システム中における微小気泡挙動の評価を実施する。

# 2. VIBUL コードの概要

## 2.1 ナトリウム冷却大型高速炉における気泡・溶存ガス挙動

ナトリウム冷却大型高速炉 1 次冷却材中に含まれる不活性ガスのソースとしては、以下が想定される。

- 自由液面が加圧されていることによる Ar カバーガスの溶解
- 自由液面の流れ場による Ar カバーガス巻込み
- 制御棒にて生成された He の継続的な放出
- 溢流部などにおけるガスの連行（原子炉容器の設計による）

また、1 次冷却系統内における気泡・溶存ガス挙動として、以下が想定される。

- 冷却部（高速炉では中間熱交換器）における気泡核生成
- 気泡表面での溶存ガスの溶解・析出（気泡の溶解と溶存ガスの析出）
- 気泡の分裂（臨界気泡径を超える気泡の分裂）
- 冷却材の流れによる気泡・溶存ガスの連行
- 浮力による自由液面からの気泡放出
- 気泡の合体（ガス溜りなどが存在しない場合は無視できる）

したがって、ナトリウム冷却大型高速炉における気泡・溶存ガス挙動を評価するためには、これらの現象を正確にモデル化する必要がある。

## 2.2 VIBUL コードの基礎式

VIBUL コードは、ナトリウム冷却システムの溶存アルゴンガス挙動を評価するために開発され、開発元であるフランスの高速増殖炉実証炉 Superphenix（SPX1）のみを対象としていたが、もんじゅや JSFR への適用、他解析コードとの連携解析を実施するため、構造化プログラミングへの変更による任意体系のモデル化を可能とするなど、プログラム構造から現象モデル、離散化手法、解析アルゴリズムなど、解析コード全般に渡って抜本的な改良が実施されてきた [1)]。現在、VIBUL コードは多点近似フローパス型モデルを用いて、高速炉 1 次冷却系統内の気泡個数分布を解析することができる。基礎式は対象とするコンポーネント（機器）における気泡モル数及び溶解モル数の保存式である。その際、気泡半径に基づいて気泡を $i$ 群に分割し、各群について気泡の生成・消滅のプロセスを計算する。以下に VIBUL コードの基礎式を示す。

- 各機器における気泡数の保存式

$$V_{Na}\frac{d}{dt}N_{bi} = -\alpha_i V_{Na} N_{bi} - Q_{VNa} N_{bi} + Q_{VNae} N_{bie} + S_i \tag{2.1}$$

ただし、$V_{Na}$：プレナム体積 ($m^3$)、$N_{bi}$：$i$ 群の気泡個数密度、$N_{mi}$：$i$ 群の気泡 1 個あたりのモル数、$a_i$：$i$ 群の気泡のガス放出係数、$Q_{VNa}$：体積流量 ($m^3/s$)、$S_i$：ソース項、である。また、下付き添え字 $e$ は、上流側体積要素（流入）を表す。

・ 各機器における溶解モル数の保存式

$$V_{Na}\frac{d}{dt}N_d = -D\ \left(N_d - H\quad p_{libre}\right) -\ Q_{VNa}N_d + Q_{VNae}N_{de} - V_{Na}\sum N_{bi}\frac{d}{dt}N_{mi} \qquad (2.2)$$

ただし、$N_d$：溶解モル数、$H$：ヘンリー定数、$P_{libre}$：カバーガス圧力 (Pa)、であり、$D$ は液面流速などによって決定される実行拡散係数である。

オリジナルの VIBUL コードに関する詳細情報は、マニュアル [2)]に記載されている。

# 3. VIBUL コードの改良

オリジナルの VIBUL コードは、解析精度などの面において改良すべき点があるため、コードの改良を実施する。付録 1 に、改良した部分のソースファイルを示す。

## 3.1 陽解法による気泡モル保存式の離散化

（関連するソースファイル：vibul.f; echbul.f; nucleation.f; common.inc）

VIBUL コードでは、気泡数の保存式および溶解モル数の保存式を用いて気泡数 $N_{bi}$、気泡モル数 $N_{mi}$ と溶解濃度 $N_d$ を計算している。オリジナルの VIBUL コードでは $N_{bi}$、$N_{mi}$、$N_d$ を陰的に扱っている（陰解法）が、陰解法のアルゴリズムの不具合（気泡数定義の問題）によって系統内気泡・溶存ガスのモル保存が厳密に満たされていない。このため、基礎式を陽的に離散化（陽解法）し、モル保存性を満たす解析アルゴリズムを構築する。

気泡数の保存式および溶解モル数の保存式は、式 2.1 および 2.2 で表される。さらに、式 2.2 における気泡/Na 間のガス輸送は、以下の式で表される。

$$\frac{dN_{mi}}{dt} = -\,k\,4\pi\,r_i^2\left[N'_d - N_d\right] \tag{3.1}$$

ただし、$k$：気泡/Na 間のガス輸送係数、$r_i$：$i$ 群の気泡の代表半径、$N'_d$：単位体積あたりの飽和溶解ガスモル数、である。式 2.1、3.1 および 2.2 に対して陽的な離散化を適用し、以下の式 3.2、3.4 および 3.6 を用いて $N_{bi}$、$N_{mi}$、$N_d$ の時間変化を計算する。ただし、$n$ および $n$+1 は時刻を示す。

<u>気泡数 $N_b$</u>

$$V_{Na}\frac{{N_{bi}}^{n+1} - {N_{bi}}^{n}}{\Delta t} = -\alpha_i V_{Na}{N_{bi}}^{n} - Q_{VNa}{N_{bi}}^{n} + Q_{VNae}{N_{bie}}^{n} \tag{3.2}$$

$${N_{bi}}^{n+1} = \frac{\Delta t(-\alpha_i V_{Na}{N_{bi}}^{n} - Q_{VNa}{N_{bi}}^{n} + Q_{VNae}{N_{bie}}^{n}) + V_{Na}{N_{bi}}^{n}}{V_{Na}} \tag{3.3}$$

<u>各気泡クラスのモル数 $N_{mi}$</u>

$$\frac{{N_m}^{n+1} - {N_m}^{n}}{\Delta t} = -\;\;k\;\;4\pi\;\;(r_i^n)^2\;\;\left[N'_d - {N_d}^{n}\right] \tag{3.4}$$

$${N_{mi}}^{n+1} = -\,k\,4\pi\,(r_i^n)^2\left[N'_d - {N_d}^{n}\right]\Delta t + {N_{mi}}^{n} \tag{3.5}$$

溶解モル数 $N_d$

$$V_{Na}\frac{{N_d}^{n+1}-{N_d}^{n}}{\Delta t}=-D\left({N_d}^{n}-H\ p_{libre}\right)-Q_{VNa}{N_d}^{n}+Q_{VNae}{N_{de}}^{n}-V_{Na}\sum N_{bi}^{n+1}\frac{d}{dt}N_{mi} \tag{3.6}$$

$${N_d}^{n+1}=\left[-D\left({N_d}^{n}-H\ p_{libre}\right)-Q_{VNa}{N_d}^{n}+Q_{VNae}{N_{de}}^{n}-V_{Na}\sum N_{bi}^{n+1}\frac{d}{dt}N_{mi}\right]\cdot\frac{\Delta t}{V_{Na}}+{N_d}^{n} \tag{3.7}$$

ただし、式 3.6 右辺中の時間微分項に関しては、式 3.4 の右辺を代入する。

3.2　核生成計算用配列の初期化処理

（関連するソースファイル：echbul.f）

IHX における核生成によって発生する気泡量は配列 nb_nu()に保存されているが、オリジナルの VIBUL コード内では nb_nu()の初期化処理を行っていない。そのため、核生成の発生条件に満たさない場合でも、前時刻或いは他の不活性ガスの核生成で生成した気泡量が計算されてしまうことがある。この不具合を防止するため、nb_nu()の初期化処理を追加する。

3.3　Na 中ガス飽和温度計算式の取扱い

（関連するソースファイル：nucleation.f）

IHX での核生成を計算する際、Na 中のガス飽和温度 $T_{sat}$ を以下の式によって計算する。

$$T_{sat}=\frac{-4542}{\log\left(\frac{M_{Na}N_{de}}{P_L\rho_{Na}}\right)+2.13} \tag{3.8}$$

ただし、$M_{Na}$ : 冷却材 Na のモル質量、$N_{de}$ : IHX 入口の溶解濃度、$P_L$ : 流体圧力、$\rho_{Na}$ : Na 密度、である。VIBUL では、$T_{sat} > T_s$ の場合に核生成が発生すると判定される。ただし、$T_s$ は IHX 出口側の Na 温度である。IHX の内部では温度の変化に伴って体積流量（密度）と溶解濃度が変化するため、式 3.8 を正確に取扱うためには、よび$\rho_{Na}$に IHX 入口の値を用いる必要がある。しかし、現在のバージョンでは、$N_{de}$ は IHX 入口の溶解濃度を用いているが、$\rho_{Na}$ として IHX 内部にある計算点の密度を使用しているため、Na の飽和温度が正しく計算されていない。その影響で、核生成が発生すべき場合においても発生しないと判定することがあり、Fig.3.1（および Fig.3.2）に示すように核生成による気泡生成量が時間振動する。この問題を解決するため、$\rho_{Na}$ として IHX 入口の Na 密度を使用するようにコードを修正した。その結果、Fig.3.3（および Fig.3.4）に示すように気泡生成量の時間変動を抑制することができる。

3.4　IHX での圧力計算式の改良

（関連するソースファイル：nucleation.f）

IHX での核生成を計算する際、核生成によって生成した気泡の量は以下の式を用いて計算する。

$$\begin{aligned}\Delta N_d &= Q_{VNae} N_{de} - Q_{VNa}\, N_{dsat} \\ &= Q_{VNae} N_{de} - Q_{VNa}\,(H_s . P_s)\end{aligned} \tag{3.9}$$

オリジナルの VIBUL コードでは、IHX 出口圧力を $P_s = P_0 + \rho_{Na} gh$ と計算しており、IHX での圧損を考慮していない。ただし、$P_0$：カバーガス圧力、$h$：IHX 高さ、である。その結果、IHX 出口の溶解濃度（飽和濃度）や生成される気泡径が正確に計算されていない可能性がある。圧損 $P_{loss}$ の影響を考慮するため、Na 中のガス飽和温度を計算する際、流体圧力 $P_L$ を以下の式によって計算することとした。

$$P_L = P_0 + \rho_{Na} gh - P_{loss} \tag{3.10}$$

IHX 内部の計算点の圧力を計算する際は、IHX 内部で圧力損失が均一であると仮定する。

### 3.5　合流部における溶解度計算式の修正

（関連するソースファイル：ClcJoin.f）

オリジナルの VIBUL コードでは、合流部から流出する気泡数 $N_{bi_out}$ と溶解度 $N_{d_out}$ を以下の式によって計算する。

$$N_{bi_out} = \frac{\Sigma Q_{in}(k) N_{bi_in}(k)}{\Sigma Q_{in}(k)} \tag{3.11}$$

$$N_{d_out} = \frac{\Sigma Q_{in}(k) N_{d_in}(k)}{\Sigma Q_{in}(k)} \tag{3.12}$$

ここで、$Q_{in}$ 、$N_{bi_in}$ 、$N_{d_in}$ はそれぞれ合流部に流入する各流路パスの流量、気泡数と溶解濃度であり、$k$ は各流路パスの番号である。式 3.11 および 3.12 では、合流部に流入する総流量 $\Sigma Q_{in}(k)$ を用いた計算を行っているが、各流路パスから流入する流れの温度が異なる場合、合流部における流入流量と流出流量が等しくないため、気泡・溶存ガスのモル保存が満たされない。そのため、式 3.11 および 3.12 を以下のように修正する。

$$N_{bi_out} = \frac{\Sigma Q_{in}(k) N_{bi_in}(k)}{Q_{out}} \tag{3.13}$$

$$N_{d_out} = \frac{\Sigma Q_{in}(k) N_{d_in}(k)}{Q_{out}} \tag{3.14}$$

ただし、$Q_{out}$は合流部から流出する総流量であり、以下の式で計算する。

$$Q_{out} = \frac{\Sigma \rho_{Na}(k) Q_{VNae}(k)}{\rho'_{Na}} \tag{3.15}$$

ただし、$\rho_{Na}(k)$は各流路パスから流入する流れの密度であり、$\rho'_{Na}$は合流部から流出する冷却材の密度である。

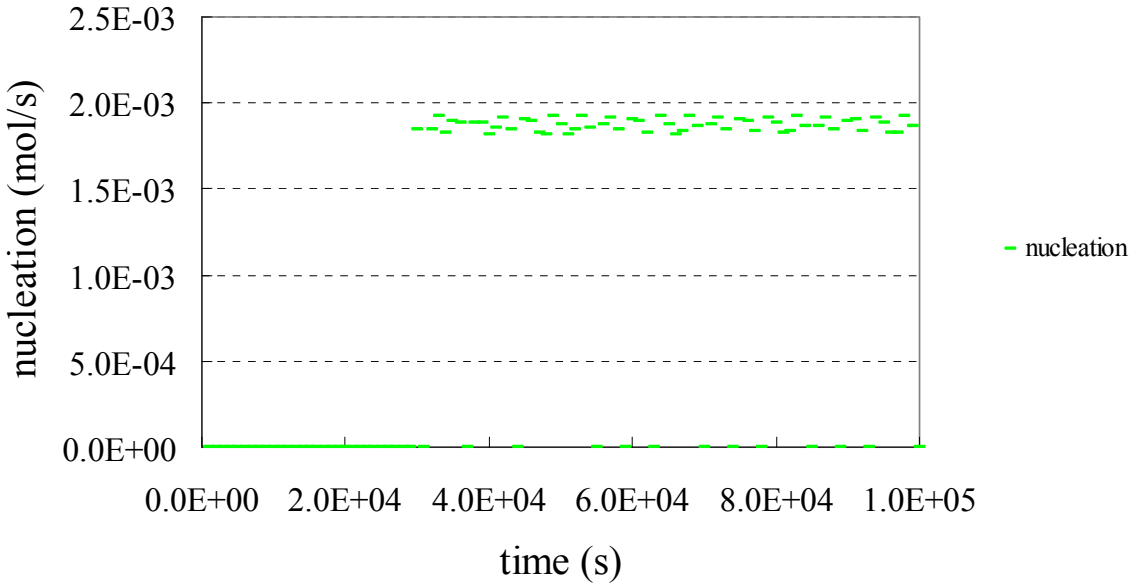



Fig.3.1　IHX での核生成による気泡生成量（オリジナルコード）

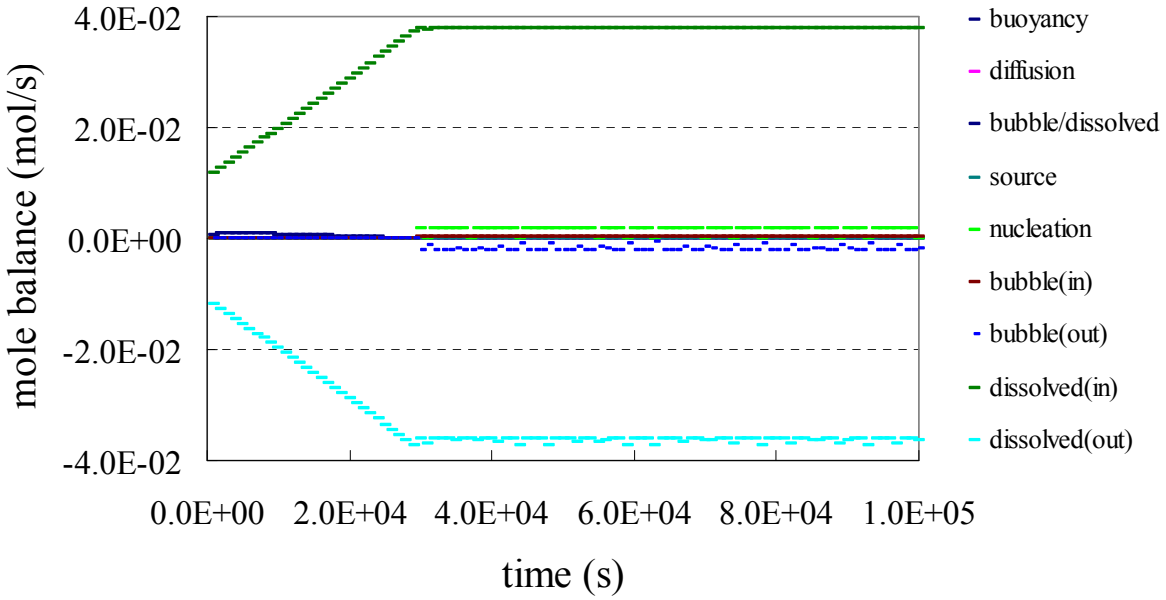



Fig.3.2　IHX でのモル収支（オリジナルコード）

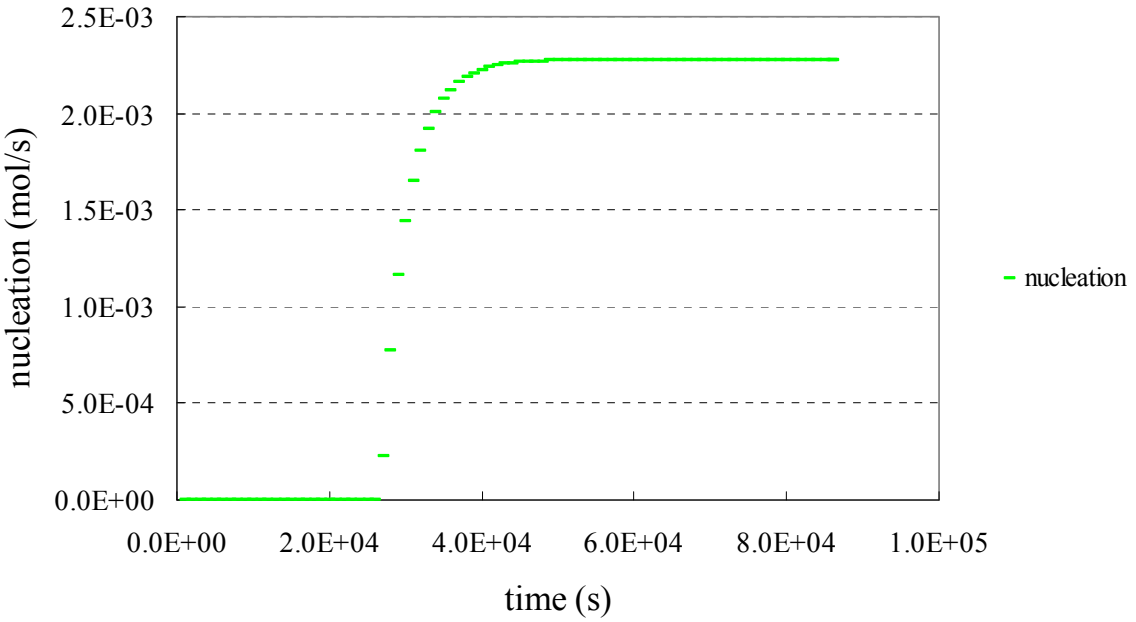



Fig.3.3　IHX での核生成による気泡生成量（改良コード）

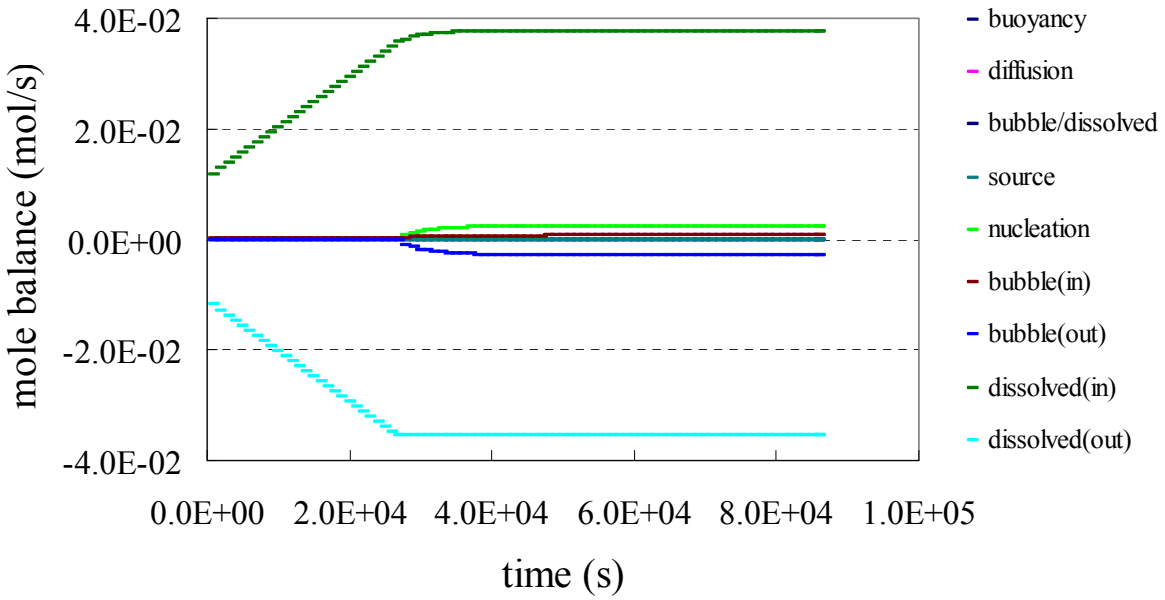



Fig.3.4　IHX でのモル収支（改良コード）

# 4. ナトリウム冷却大型高速炉における気泡・溶存ガス挙動の評価

3 章にて改良を行った VIBUL コードの検証として、ナトリウム冷却大型高速炉 1 次冷却系統内における気泡・溶存ガス挙動の評価を行う。ただし、本章で用いる VIBUL コードでは、3 章で実施した改良に加えて、炉上部プレナム内における気泡挙動の高精度評価手法 [3]（3 次元数値解析に基づいて、炉心から流入した気泡のカバーガス中への放出率、ホットレグ配管への流出率、および冷却材中への溶存率を無次元数による相関式の形で表すモデル）および IHX 伝熱管表面での気泡の生成・離脱モデル [4]（表面張力と成長力、揚力のバランスにより気泡離脱条件を与えるモデル）が採用されている。

## 4.1 解析条件

ナトリウム冷却大型高速炉体系の定常運転状態における気泡・溶存ガス挙動の解析を実施する。その際、全てのコンポーネントで気泡・溶存ガス量が 0 である初期状態において計算を開始し、各コンポーネントにおいて気泡・溶存ガス量の時間変化が十分に小さくなる（定常状態に達する）まで非定常計算を行う。

### 解析ケース

不活性ガスの発生量および不活性ガスの種類（Ar, He）をパラメータとして、Table 4.1 に示す 4 ケースの解析を実施する。Case-Ar(1/10)および Case-He(1/10)は、Case-Ar-ref および Case-He-ref から気泡ソース量を 1/10 倍にした解析である。

### 解析体系

Fig.4.1 に、ナトリウム冷却高速炉 1 次冷却系に基づいて構築した解析モデルを示す。本モデルは、①上部プレナム、②ホットレグ配管、③IHX、④ポンプ、⑤コールドレグ配管、⑥下部プレナム、⑦中間プレナム、⑧炉心の 8 個のコンポーネントによって構成される。冷却材である液体ナトリウムは、原子炉容器から流出した後、ホットレグ配管（1 本 ×2 ループ）、ポンプ組込み型 IHX、コールドレグ配管（2 本 × 2 ループ）を経て原子炉容器に戻る。冷却材中に混入する不活性ガスのソースは、炉上部プレナムの自由液面における Ar ガスの巻込みと溶解、制御棒（B4C）からの He 気泡放出を考慮する。

## 4.2 解析結果

解析結果に基づき、各コンポーネントにおける溶存ガスのモル収支、各測定位置における気泡個数密度分布及びそれらから算出されるボイド率に関して考察を行う。

### Ar ガスの挙動

Table 4.2 および 4.3 に各コンポーネントでのモル収支を、Fig.4.2 および 4.3 に各測定位置における気泡個数密度分布を、Table 4.6 に各コンポーネントでのボイド率を示す。また、Table 4.7 に、IHX での核生成パラメータを示す。

上部プレナムでは、液面からの気泡ソースが冷却材に溶解するため、溶存モル流量が急激に増加する。一方、IHX では冷却材の温度低下に伴う核生成によって溶存ガスが気泡として析出するため、IHX 出口における気泡モル流量は系統内で最大となり、逆に溶存モル流量は系統内で最小となる。IHX で生成された気泡は、ポンプでの圧力上昇によって気泡径が小さくなり、その下流側では圧力の緩やかな低下によって気泡径も緩やかに大きくなる。炉心及び中間プレナムでは、冷却材温度の上昇によってナトリウムへの溶解度が上昇（気泡が溶解）するため、気泡モル流量が減少し、溶存モル流量が増大する。

気泡ソース量が Ar ガス挙動に与える影響を調査するため、Case-Ar-ref と Case-Ar(1/10)の解析結果を比較する。両者は、冷却材流量、温度、圧力等の条件が同一であるため、各コンポーネントにおける気泡径の分布傾向に大きな違いは見られない。また、各コンポーネントで流入流出する溶存モル流量に関しても、核生成過程を経て飽和溶解状態となる IHX 出口から、気泡ソースが存在する上部プレナムの入口までは概ね一致する。気泡ソース量の違いは、気泡個数密度分布とそれから算出されるボイド率に対して明確な影響を与えており、Case-Ar(1/10)では気泡ソース量の減少に比例して Case-Ar-ref の約 1/10 となっている。

He ガスの挙動

Table 4.4 および 4.5 に各コンポーネントでのモル収支を、Fig.4.4 および 4.5 に各測定位置における気泡個数密度分布を、Table 4.8 に各コンポーネントでのボイド率を示す。また、Table 4.9 に IHX での核生成パラメータを示す。

炉心における制御棒からの放出が気泡ソースとして与えられる He ガスは、炉心と上部プレナムにおいて冷却材へと徐々に溶解する。IHX での核生成によって IHX 出口における気泡モル流量は系統内で最大となり、逆に溶存モル流量は系統内で最小となる。IHX で生成された気泡は、ポンプでの圧力上昇によって気泡径が小さくなり、その下流側では圧力の緩やかな低下によって気泡径も緩やかに大きくなる。

気泡ソース量が He ガス挙動に与える影響を調査するため、Case-He-ref と Case-He(1/10)の解析結果を比較する。両者は、気泡ソース量以外の条件はすべて一致しているため、気泡径の分布に大きな違いは見られない。また、各コンポーネントで流入流出する溶存モル流量も概ね一致している。結果的に、気泡ソース量の違いは、気泡個数密度分布とそれから算出されるボイド率に対してのみ明確な影響を与えており、Case-He(1/10)では気泡ソース量の減少に比例して Case-He-ref の約 1/10 となっている。

Ar ガス挙動と He ガス挙動の比較

同じ解析モデルおよび気泡ソース量条件において、Ar ガスと He ガスの挙動を比較する（例えば、Case-Ar-ref と Case-He-ref）。Ar ガスはナトリウムに対する溶解度が He ガスよりも小さいため、各コンポーネントにおける溶存モル流量は Ar ガスの方が 1 オーダー程度小さくなっている。一方、Ar 気泡ソース量は He 気泡ソース量よりも大きいため、各コンポーネントにおける気泡モル流量は Ar ガスの方が 1 オーダー程度大きくなっている。ただし、1 次系統内における気泡・溶存ガス挙動を比較すると、両者は定性的に一致しており、両者共に IHX で気泡が

析出し、炉心および上部プレナムで気泡が溶解するという傾向を示している。

以上の解析結果は、高速炉 1 次冷却系統内における気泡・溶存ガス挙動を定性的に正しく表しており、VIBUL コードを用いた評価は有効であると考えられる。

Table 4.1　高速炉 1 次冷却系統内気泡・溶存ガス挙動解析条件

| Case | Inert Gas | Gas Source (mol/s) |
|---|---|---|
| Case-Ar-ref | Ar | $1.7\times10^{-4}$ |
| Case-Ar(1/10) | Ar | $1.7\times10^{-5}$ |
| Case-He-ref | He | $1.08\times10^{-5}$ |
| Case-He(1/10) | He | $1.08\times10^{-6}$ |

Table 4.2　Case-Ar-ref における Ar ガスのモル収支 (mol/s)

| Component | Buoyant Release | Interfacial Dissolution | Bubble Dissolution | Bubble Source | Nucleation | Inlet Mole Flow Rate of Bubble | Outlet Mole Flow Rate of Bubble | Inlet Mole Flow Rate of Dissolved Gas | Outlet Mole Flow Rate of Dissolved Gas |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ①Upper Plenum | -1.65E-03 | 3.16E-06 | -1.29E-03 | 1.70E-03 | 0.00E+00 | 1.30E-02 | -1.17E-02 | 1.62E-03 | -2.91E-03 |
| ②Hot Leg Pipe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -5.10E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.17E-02 | -1.17E-02 | 2.91E-03 | -2.97E-03 |
| ③IHX | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -2.36E-06 | 0.00E+00 | 1.79E-03 | 1.17E-02 | -1.35E-02 | 2.97E-03 | -1.17E-03 |
| ④Pump | -4.82E-05 | -1.04E-09 | -8.91E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.35E-02 | -1.34E-02 | 1.17E-03 | -1.18E-03 |
| ⑤Cold Leg Pipe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -2.19E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.34E-02 | -1.34E-02 | 1.18E-03 | -1.18E-03 |
| ⑥Lower Plenum | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -5.35E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.34E-02 | -1.33E-02 | 1.18E-03 | -1.24E-03 |
| ⑦Core | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -3.85E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.32E-02 | -1.28E-02 | 1.22E-03 | -1.61E-03 |
| ⑧Core Bypass | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -1.91E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.48E-04 | -1.46E-04 | 1.37E-05 | -1.57E-05 |

Table 4.3　Case-Ar(1/10)における Ar ガスのモル収支 (mol/s)

| Component | Buoyant Release | Interfacial Dissolution | Bubble Dissolution | Bubble Source | Nucleation | Inlet Mole Flow Rate of Bubble | Outlet Mole Flow Rate of Bubble | Inlet Mole Flow Rate of Dissolved Gas | Outlet Mole Flow Rate of Dissolved Gas |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ①Upper Plenum | -1.68E-04 | 3.42E-06 | -1.53E-04 | 1.70E-04 | 0.00E+00 | 1.41E-03 | -1.26E-03 | 1.23E-03 | -1.39E-03 |
| ②Hot Leg Pipe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -6.21E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.26E-03 | -1.25E-03 | 1.39E-03 | -1.40E-03 |
| ③IHX | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -3.92E-07 | 0.00E+00 | 2.15E-04 | 1.25E-03 | -1.47E-03 | 1.40E-03 | -1.18E-03 |
| ④Pump | -4.94E-06 | -1.00E-09 | -1.03E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.47E-03 | -1.46E-03 | 1.18E-03 | -1.18E-03 |
| ⑤Cold Leg Pipe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -2.54E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.46E-03 | -1.46E-03 | 1.18E-03 | -1.18E-03 |
| ⑥Lower Plenum | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -6.38E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.46E-03 | -1.46E-03 | 1.18E-03 | -1.19E-03 |
| ⑦Core | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -4.42E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.44E-03 | -1.40E-03 | 1.17E-03 | -1.22E-03 |
| ⑧Core Bypass | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -7.01E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.62E-05 | -1.55E-05 | 1.32E-05 | -1.39E-05 |

Table 4.4　Case-He-ref における He ガスのモル収支 (mol/s)

| Component | Buoyant Release | Interfacial Dissolution | Bubble Dissolution | Bubble Source | Nucleation | Inlet Mole Flow Rate of Bubble | Outlet Mole Flow Rate of Bubble | Inlet Mole Flow Rate of Dissolved Gas | Outlet Mole Flow Rate of Dissolved Gas |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ①Upper Plenum | -9.54E-05 | 0.00E+00 | -7.75E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.41E-03 | -5.41E-04 | 4.28E-02 | -4.36E-02 |
| ②Hot Leg Pipe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -2.88E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.41E-04 | -5.12E-04 | 4.36E-02 | -4.36E-02 |
| ③IHX | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -3.67E-04 | 0.00E+00 | 1.57E-03 | 5.12E-04 | -2.14E-03 | 4.36E-02 | -4.20E-02 |
| ④Pump | -1.20E-05 | -4.51E-08 | -4.79E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.14E-03 | -2.08E-03 | 4.20E-02 | -4.21E-02 |
| ⑤Cold Leg Pipe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -1.19E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.08E-03 | -2.07E-03 | 4.21E-02 | -4.21E-02 |
| ⑥Lower Plenum | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -2.72E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.07E-03 | -1.79E-03 | 4.21E-02 | -4.23E-02 |
| ⑦Core | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -4.77E-04 | 1.08E-04 | 0.00E+00 | 1.77E-03 | -1.41E-03 | 4.19E-02 | -4.23E-02 |
| ⑧Core Bypass | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -1.35E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.99E-05 | -6.49E-06 | 4.70E-04 | -4.84E-04 |

Table 4.5　Case-He(1/10)における He ガスのモル収支 (mol/s)

| Component | Buoyant Release | Interfacial Dissolution | Bubble Dissolution | Bubble Source | Nucleation | Inlet Mole Flow Rate of Bubble | Outlet Mole Flow Rate of Bubble | Inlet Mole Flow Rate of Dissolved Gas | Outlet Mole Flow Rate of Dissolved Gas |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ①Upper Plenum | -9.00E-06 | 0.00E+00 | -7.39E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.34E-04 | -5.12E-05 | 4.21E-02 | -4.22E-02 |
| ②Hot Leg Pipe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -2.75E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.12E-05 | -4.83E-05 | 4.22E-02 | -4.22E-02 |
| ③IHX | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -3.53E-05 | 0.00E+00 | 1.50E-04 | 4.83E-05 | -2.04E-04 | 4.22E-02 | -4.21E-02 |
| ④Pump | -1.14E-06 | -4.57E-08 | -4.56E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.04E-04 | -1.98E-04 | 4.21E-02 | -4.21E-02 |
| ⑤Cold Leg Pipe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -1.14E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.98E-04 | -1.97E-04 | 4.21E-02 | -4.21E-02 |
| ⑥Lower Plenum | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -2.60E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.97E-04 | -1.71E-04 | 4.21E-02 | -4.21E-02 |
| ⑦Core | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -4.56E-05 | 1.08E-05 | 0.00E+00 | 1.69E-04 | -1.34E-04 | 4.16E-02 | -4.17E-02 |
| ⑧Core Bypass | 0.00E+00 | 0.00E+00 | -1.34E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.90E-06 | -5.57E-07 | 4.68E-04 | -4.69E-04 |

Table 4.6　各コンポーネントにおける Ar ガスのボイド率

| Component | Case-Ar-ref | Case3-Ar(1/10) |
|---|---|---|
| ①Upper Plenum | 2.41E-05 | 2.59E-06 |
| ②Hot Leg Pipe | 2.40E-05 | 2.58E-06 |
| ③IHX | 2.89E-05 | 3.16E-06 |
| ④Pump | 2.88E-05 | 3.14E-06 |
| ⑤Cold Leg Pipe | 2.88E-05 | 3.14E-06 |
| ⑥Lower Plenum | 2.87E-05 | 3.13E-06 |
| ⑦Core | 2.66E-05 | 2.90E-06 |
| ⑧Core Bypass | 2.83E-05 | 2.99E-06 |

Table 4.7　Ar ガスの核生成パラメータ

| Case | Nucleation Height (m) | Minimum Nucleation Bubble Radius (m) | Maximum Nucleation Bubble Radius (m) |
|---|---|---|---|
| Case-Ar-ref | 1.73 | 4.78E-05 | 5.56E-05 |
| Case-Ar(1/10) | 0.295 | 4.78E-05 | 5.14E-05 |

Table 4.8　各コンポーネントにおける He ガスのボイド率

| Component | Case-He-ref | Case3-He(1/10) |
|---|---|---|
| ①Upper Plenum | 1.04E-06 | 9.79E-08 |
| ②Hot Leg Pipe | 9.80E-07 | 9.25E-08 |
| ③IHX | 4.28E-06 | 4.07E-07 |
| ④Pump | 4.16E-06 | 3.96E-07 |
| ⑤Cold Leg Pipe | 4.13E-06 | 3.93E-07 |
| ⑥Lower Plenum | 3.59E-06 | 3.41E-07 |
| ⑦Core | 2.72E-06 | 2.59E-07 |
| ⑧Core Bypass | 1.17E-06 | 1.00E-07 |

Table 4.9　He ガスの核生成パラメータ

| Case | Nucleation Height (m) | Minimum Nucleation Bubble Radius (m) | Maximum Nucleation Bubble Radius (m) |
|---|---|---|---|
| Case-He-ref | 0.115 | 6.63E-05 | 7.27E-05 |
| Case-He(1/10) | 0.011 | 6.63E-05 | 7.22E-05 |

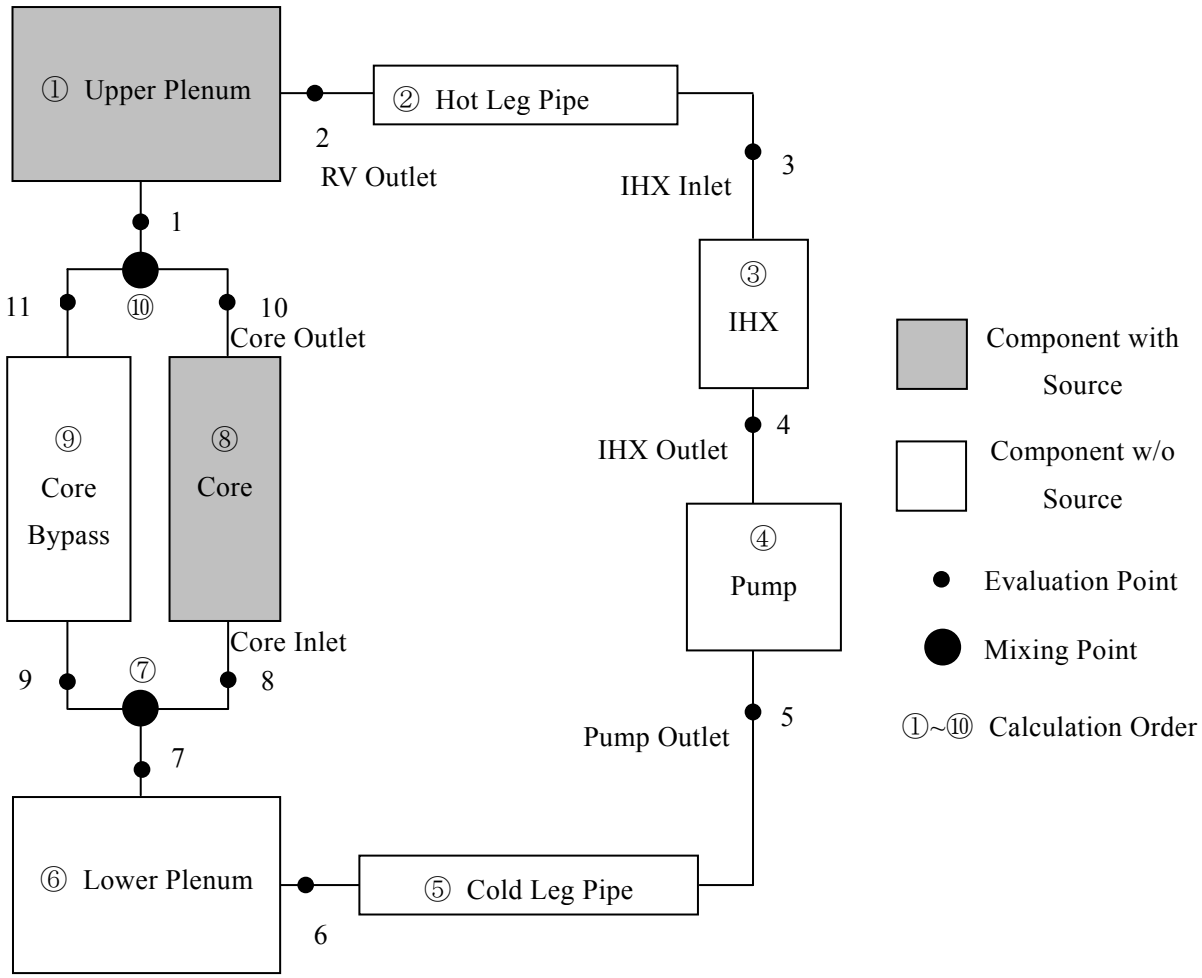



Fig.4.1　高速炉 1 次系統内気泡・溶存ガス挙動解析モデル

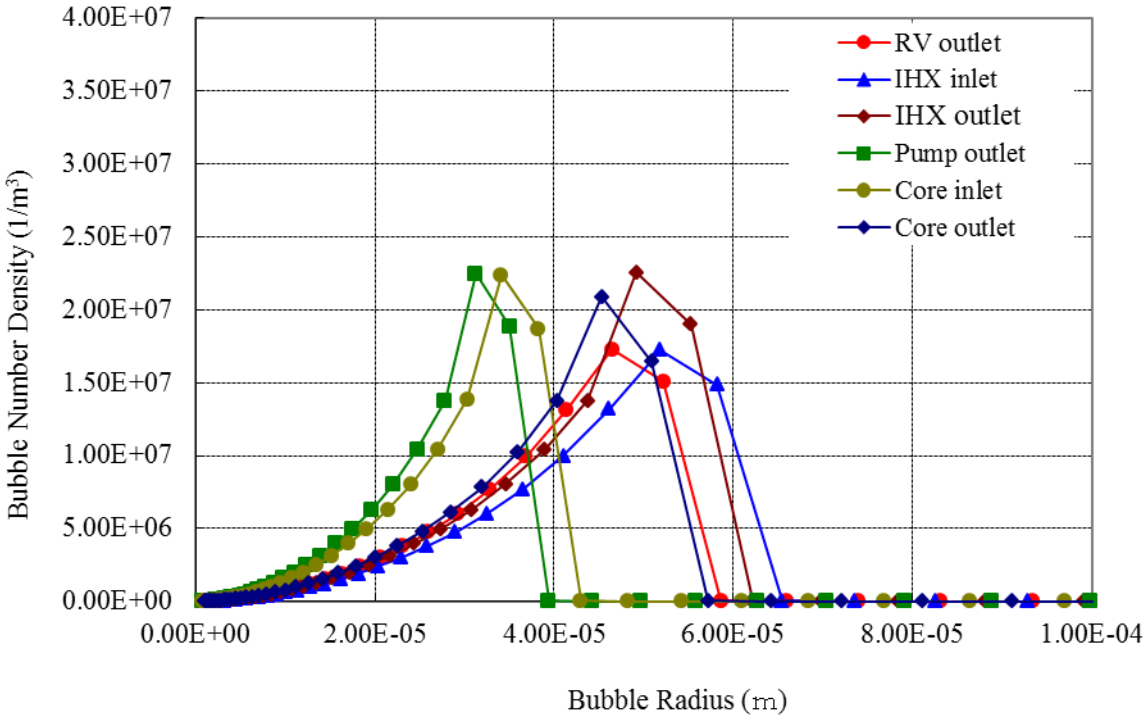



Fig.4.2　Case-Ar-ref における Ar ガスの気泡個数分布

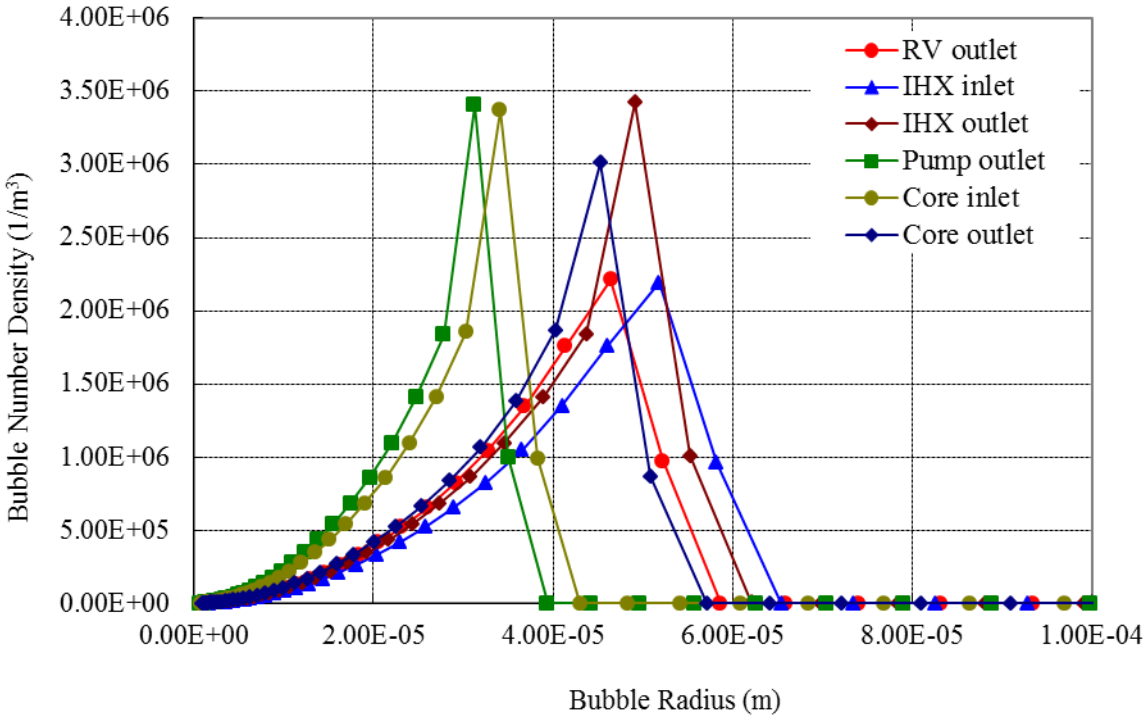



Fig.4.3　Case-Ar(1/10)における Ar ガスの気泡個数分布

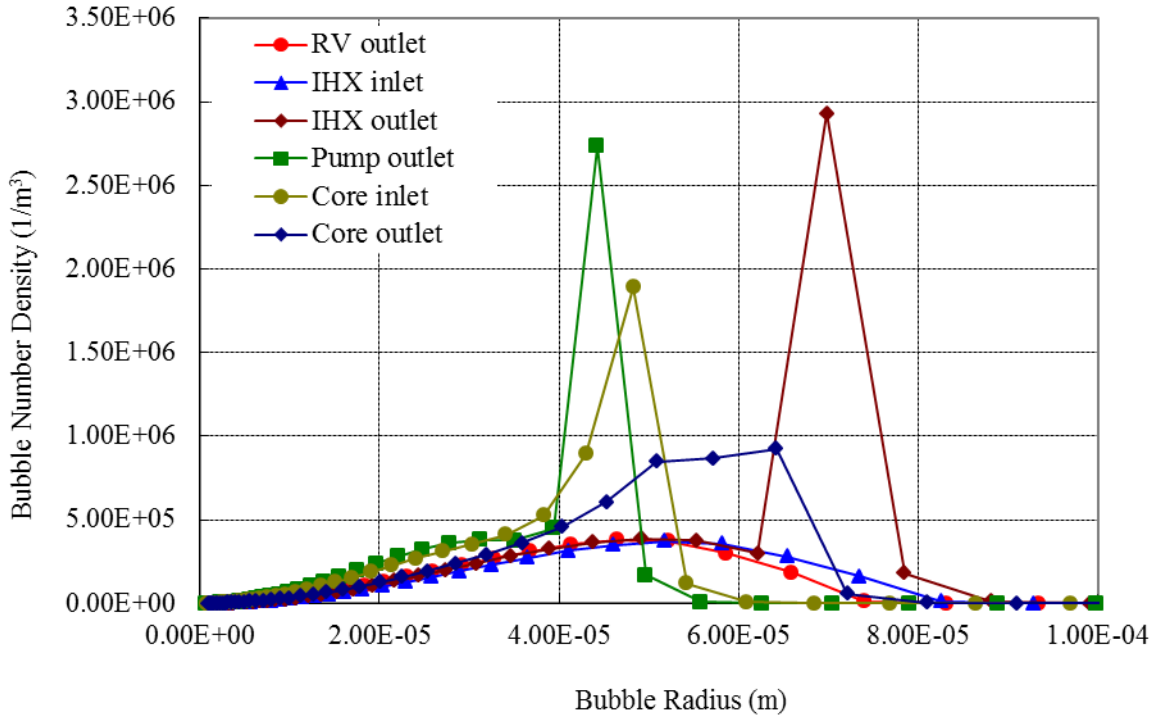



Fig.4.4　Case-He-ref における He ガスの気泡個数分布

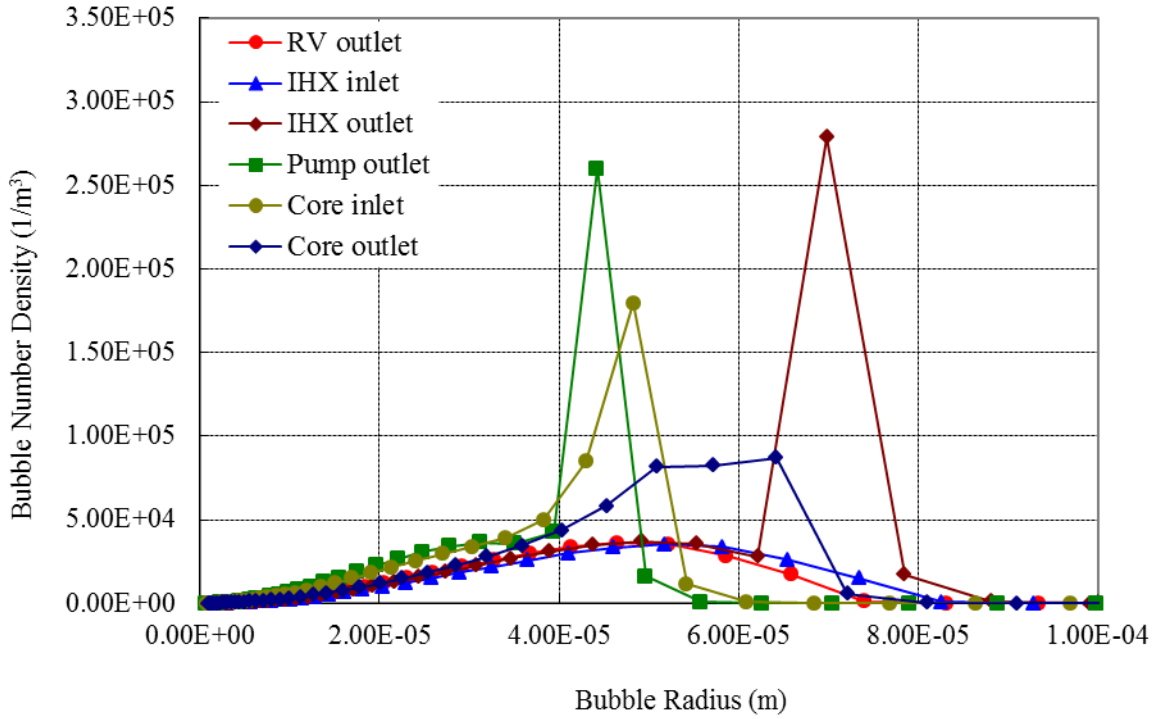



Fig.4.5　Case-He(1/10) における He ガスの気泡個数分布

# 5. 水銀ターゲットシステムの計算モデル開発

本章では、VIBUL コードによって水銀ターゲットシステム中の微小気泡挙動を評価するため、必要なモデルを開発する。

## 5.1 物性値関数の導入

VIBUL コードに、水銀の物性値を導入する。水銀の物性値関数は、文献[5)]の離散データを多項式近似することで、温度 $T$ の関数として以下のように定める。

密度$\rho$

$$\rho = 5.85714285714189\times10^{-4}\cdot T^2 - 2.83071428571419\cdot T + 1.43235714285714\times10^{4} \tag{5.1}$$

粘性係数$\eta$

$$\eta = 7.27272727276616\times10^{-14}\cdot T^4 - 1.51919191919784\times10^{-10}\cdot T^3 + 1.21696969697336\times10^{-7}\cdot T^2 - 4.52180375181325\times10^{-5}\cdot T + 7.64757575758196\times10^{-3} \tag{5.2}$$

表面張力$\sigma$

$$\sigma = -1.06666666665376\times10^{-13}\cdot T^5 + 2.13939393942393\times10^{-10}\cdot T^4 - 1.68303030312010\times10^{-7}\cdot T^3 + 6.45863636420736\times10^{-5}\cdot T^2 - 1.22364545467927\times10^{-2}\cdot T + 1.39866233778113 \tag{5.3}$$

水銀に対するヘリウムの溶解度については、温度別データの存在が確認できなかったため、文献[6)] に記載の 0.1 (MPa)、300 (K)における溶解度 $3.89\times10^{-7}$ (mol-He/mol-Hg)を用いる。さらに、拡散係数 $D$ ($m^2/s$)は、以下の Stokes-Einstein の式によって計算する。

$$D = \frac{RT}{N 6\pi\eta r_g} \tag{5.4}$$

ただし、$R$ は気体定数（= 8.3144 (J/mol*K)）、$N$ はアボガドロ数（ $=6.02\times10^{23}$）、$r_g$ は気体の粒子半径 (m)である。粒子半径は、ヘリウムの原子半径（$= 0.93\times10^{-10}$ (m)）[7)]を用いる。

## 5.2 開ループ計算機能の開発

VIBUL コードは（JSFR などの）閉ループ体系に対応した解析コードであるため、水銀ター

ゲットシステム（流入部から流出部までが解析対象であるため、解析上は開ループ）にそのまま適用することはできない。ここでは、開ループ機能の開発を行う。

閉ループでは液体がループ内を循環しているので、各プレナムに流入する気泡個数密度と溶解モル濃度の値は、上流プレナムからの流出値を参照している。一方、開ループでは液体がループ内を循環しないため、最初のコンポーネントにおける流入値が計算できない。そこで、ループの先頭となるコンポーネントを定め、先頭コンポーネントの流入値として入力データで指定する値を参照するようコード変更を行うことで、開ループを実現する。その際、新たにインプットとして 3 つの変数（iflgoplp：閉・開ループの選択、nbinp および ndinp：開ループの場合の先頭プレナムに流入する溶解モル濃度および各気泡クラスの個数密度）を導入する。

## 5.3 大気泡放出モデルの開発

水銀ターゲットループでは、配管上面にガス抜き孔（垂直管）を設置することにより、大気泡を放出している。Fig.5.1 に、大気泡放出部における気泡放出現象を示す。半径が大きい気泡は浮力の影響を強く受けるため、配管出口に到達する前に垂直管から配管外へ放出されると考えられる。対して、半径の小さな気泡は浮力の影響を受けにくいため、配管出口に輸送されると考えられる。

大気泡放出をモデル化するため、ガス抜き孔設置位置において、入力データで指定した気泡半径より大きな半径を持つ気泡の個数密度を 0 にする。なお、気泡個数密度を 0 にする処理は、気泡の再分配処理及び気泡の崩壊処理の後に行う。本モデルのために、新たにインプットとして 2 つの変数（iflgbubrel：モデル使用の選択、rrel：放出する半径の下限）を導入する。

大気泡放出モデルの動作確認として、プレナムを 2 つ並べ、上流プレナムから気泡を注入し、下流プレナムで大気泡放出モデルを使用する解析を行う。主な解析条件を以下に示す。

プレナム体積　：1.0 ($m^3$)
プレナム温度　：20 (℃)
圧力　　：$1.0 \times 10^5$ (Pa)
流体　　：水
気体　　：空気
流量　　：10 (kg/s)
ループ種別　：開ループ

解析は、放出半径（rrel）をパラメータとして、rrel = ∞（大気泡放出モデルを用いないケース）、$3.5 \times 10^{-3}$、$3.0 \times 10^{-3}$、$2.5 \times 10^{-3}$、$2.0 \times 10^{-3}$ (m)の 5 ケース実施する。解析結果を、Fig.5.2 に示す。各ケースにおいて、指定した放出半径を超える気泡個数密度は 0 となっており、大気泡放出モデルが正しく機能していることが分かる。

## 5.4 サージタンクにおける気泡放出のモデル化

水銀ターゲットシステムでは、気泡の除去を目的としてサージタンクを設置している。Fig.5.3

にサージタンク外観図（水銀ターゲットシステムを模擬した水ループにおけるサージタンク）を示す。サージタンク内では、浮力によって液面から気泡を放出させる。さらに、サージタンク内部の入口側の配管には曲管部が存在するため、サージタンク内に旋回流が形成され、気泡のサージタンク内滞留時間が増加し、液面からの気泡放出が促進される。この流動場の影響を考慮した気泡放出現象のモデル化を行う。

旋回流や構造物の影響を正確に評価するため、3 次元汎用熱流体解析コード（FLUENT）を用いて気泡挙動の解析を行い、解析結果に基づいて気泡放出割合のモデル化を行う。FLUENT を用いた 3 次元数値解析の結果を、付録 2 に示す。気泡放出割合の関数は、気泡の特性およびびディッププレート（D/P）形状の特性を表す無次元数を用いて導出する。具体的には、気泡にかかる浮力と効力の比を表す無次元数（$F_B/F_D$）と、サージタンク内径 $D$ に対するサージタンク壁面と D/P との間隙 $I$ の比を表す無次元数（$I/D$）を用いて定式化する。

浮力と抗力の比（$F_B/F_D$）

$$\frac{F_B}{F_D}=\frac{8rg}{3C_D{V_{in}}^2}\cdot\frac{\rho_l-\rho_g}{\rho_l} \tag{5.5}$$

ただし、$\rho_l$ および$\rho_g$ は、それぞれ液体および気体の密度、$C_D$ は抗力係数、$V_{in}$ はサージタンク入口流速である。ここで、抗力係数 $C_D$ については、文献 [8]より以下の式を用いる。

$$C_D=\max\left\{\min\left[\frac{24}{\mathrm{Re}}\left(1+0.15\,\mathrm{Re}^{0.687}\right),\frac{72}{\mathrm{Re}}\right],\frac{8}{3}\frac{Eo}{Eo+4}\right\} \tag{5.6}$$

ただし、$Re$ はレイノルズ数、$Eo$ はエトベス数であり、以下の式で定義される。

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho_l V_{in}2r}{\mu_l} \tag{5.7}$$

$$Eo=\frac{g(\rho_l-\rho_g)(2r)^2}{\sigma} \tag{5.8}$$

ただし、$\mu_l$ は液体の粘性係数である。

間隙 $I$ とサージタンク内径 $D$ の比（$I/D$）

サージタンク壁面と D/P との間隙 $I$ に関して、D/P が無い場合は $I=D$ とする。これにより、$I/D$ =1 となり、気泡放出割合に対する D/P の影響が無くなる。

以上の 2 つの無次元数を用いて、Fig.5.4 に示す通り、数値解析結果に基づく気泡放出割合関数

$f_{rel}$を以下の通り定める。

$$f_{rel} = 1 - \exp(-450.5X^{1.1515391} - 0.035) \tag{5.9}$$

ただし、

$$X = \left(\frac{F_B}{F_D}\right)\left(\frac{I}{D}\right)^{0.1} \tag{5.10}$$

である。

式 5.9 の気泡放出割合関数は、水-空気系における数値解析結果に基づいて定められているため、水銀-ヘリウム系への適用性確認を行う。水銀-ヘリウム系における 3 次元数値解析結果と式 5.9 の気泡放出割合関数による評価結果の比較を、Fig.5.5 に示す。気泡放出割合関数による評価結果は、数値解析結果を概ね再現できており、式 5.9 の気泡放出割合関数は水銀-ヘリウム系にも適用できると考えられる。

サージタンクにおける気泡放出モデルの導入にともなって、新たにインプットとして 4 つの変数（iflgstrel：モデル使用の選択、stVin：サージタンクへの流入流速、dpI：D/P とサージタンク壁面の間隙、stD：サージタンク内径）を導入する。

動作確認として、プレナムを 2 つ並べた解析体系において、上流プレナムから気泡を注入し、下流プレナムでサージタンクにおける気泡放出モデルを使用する解析を行う。主な解析条件は、5.3 節と同様である。解析は、D/P 無しと dpI = 0.002 (m)の 2 体系について実施する。気泡放出割合関数の基となる 3 次元数値解析では気泡の溶解を考慮していないため、気泡の溶解を無視するケース、流入液体中の溶存ガス濃度が 0 のケース、の 2 通りの解析を行う。Fig.5.6 および 5.7 に、D/P 無しおよび dpI = 0.002 (m)の解析結果（下流部への気泡流出割合の比較）を示す。サージタンクにおける気泡の液体への溶解を無視する場合、気泡流出割合関数値と解析結果が一致する。対して、サージタンク内の溶存ガス濃度 0 の場合、気泡の液体への溶解現象が支配的となり、流出割合が 0.2 以下となる。気泡の液体への溶解を無視した場合に、解析結果が気泡流出割合関数値と一致していることから、サージタンク気泡放出モデルが正しく動作していることが分かる。

## 5.5　熱交換器における気泡合体・蓄積のモデル化

水銀ターゲットシステムの熱交換器では、Fig.5.8 に示すように流入した気泡が浮力により上部プレナムに蓄積することで、次第にガス層が生成される。本現象をモデル化するため、以下の新たな計算機能を開発する。

ガス層体積の変化（$D_{glyr}$）

$$D_{glyr} = V_{rls} - V_{dssltn} \tag{5.11}$$

ただし、$V_{dssltn}$ ($m^3$)は液面からのガス溶解量、$V_{rls}$ ($m^3$)は液面からのガス放出量であり、オリジナルのVIBULコードのモデルを用いて計算する。

ガス蓄積量（$V_{glyr}$）

$$V_{glyr}^{n+1} = V_{glyr}^{n} + D_{glyr}^{n} \tag{5.12}$$

ただし、ガス蓄積量が負となる場合、ガス蓄積量を 0 とする。

修正ガス放出係数（$\alpha'_i$）

ガス放出係数は、液体体積によって変化するため、ガス蓄積量を用いて修正を行う。

$$\alpha'_i = \alpha_i \times \frac{V_{_ihx}}{V_{_ihx} - V_{glyr}} \tag{5.13}$$

ただし、$V_{_ihx}$ ($m^3$)は熱交換器上部プレナム容積である。

液体体積（$V_{na}$）

$$V_{na} = V_{_ihx} - V_{glyr} \tag{5.14}$$

ただし、$V_{na}$ が 0 以下になった場合は計算を中止する。

ガス層高さ（$H_{glyr}$）

$$H_{glyr} = \frac{V_{glyr}}{S_{na}} \tag{5.15}$$

ただし、$S_{na}$ ($m^2$)は液面面積である。

カバーガス圧力（$P_{lib_ihx}$）

$$P_{lib_ihx} = \rho g (H_{_ihx} + H_{glyr}) \tag{5.16}$$

ただし、$H_{ihx}$ は熱交換器高さ（静水圧計算の基準位置に対する熱交換器上端の高さ）である。

熱交換器における気泡合体・蓄積モデルの導入により、新たなインプットとして 3 つの変数（iflgbubacc：モデル使用の選択、v_ihx：熱交換器容積、h_ihx：熱交換器高さ）を用いる。

気泡合体・蓄積モデルの動作確認として、プレナムを 2 つ並べた体系において、上流プレナムから気泡を注入し、下流プレナムで気泡合体・蓄積モデルを使用する解析を行う。主な解析条件は、5.3 節と同様である。解析は、h_ihx をパラメータとして、h_ihx = 1.0 (m)と h_ihx = 15.0 (m)の 2 ケース実施する。一般的には、液面からの溶解量よりも気泡放出量が多いため、気泡合体・蓄積モデルを単独で使用した場合（次節のキャリーアンダーモデル等を用いない場合）、プレナム内液体体積が 0 となってしまう。実際、Fig.5.9 に示す通り、h_ihx = 1.0 (m)のケースでは時間とともにガス蓄積量がほぼ線形に増加し、プレナム内に液体が無くなってしまう。一方、これを避けるため、h_ihx = 15.0 (m)としてガス圧力を極端に増加させるケースでは、液面からの溶解量が大幅に増加するため、Fig.5.10 に示す通り、ガス蓄積量は一定値（$1.2\times10^{-7}$ ($m^3$)）に収束している。これらの解析結果から、熱交換器における気泡合体・蓄積モデルによって、現象が定性的に再現されていると考えられる。

## 5.6 熱交換器におけるキャリーアンダー（ガス巻込み）のモデル化

5.5 節にてモデル化を行ったように、熱交換器上部プレナムでは、気泡合体･蓄積現象によってガス層が形成される。液体は、上部から液面に垂直に流入するため、液面においてキャリーアンダー（ガス巻込み）が発生すると考えられる。キャリーアンダーをモデル化するため、以下の新たな計算機能を開発する。

単位時間当たりのガス巻込み量（$Q_A$）

単位時間当たりの巻込み量 $Q_A$ ($m^3$/s)は、を参考文献 [9]に基づき、以下の式で計算する。

$$Q_A = 0.04 F_{rj}^{0.28} \left( \frac{H_{glyr}}{ihxD_{in}} \right)^{0.4} Q_W \tag{5.17}$$

ただし、$ihxD_{in}$ (m)は熱交換器入口配管直径、$Q_W$ ($m^3$/s)体積流量である。また、$F_{rj}$ はフルード数であり、以下のように定義する。

$$F_{rj} = \frac{ihxV_{in}^{\ 2}}{g \times ihxD_{in}} \tag{5.18}$$

ただし、$ihxV_{in}$ (m/s)は熱交換器入口流速である。

ガス巻込み量（$V_{QA}$）

$$V_{QA} = Q_A \Delta t \tag{5.19}$$

ガス蓄積量（$V_{glyr}$）

$$V_{glyr}^{n+1} = V_{glyr}^{n} - V_{QA}^{n} \tag{5.20}$$

ただし、ガス蓄積量が負となる場合、ガス蓄積量を 0 とする。

巻込み気泡個数密度（$N_{bi_QA}$）

巻込れる気泡の半径はインプットとして与え、対象の気泡群に加算する個数密度を以下の式で計算する。

$$N_{bi_QA} = \frac{V_{QA}}{\frac{4}{3}\pi r_{QA}^3} \frac{1}{V_{na}} \tag{5.21}$$

ただし、$r_{QA}$ (m)は巻込み気泡半径である。

熱交換器におけるキャリーアンダーモデルの導入にともない、新たなインプットとして 4 つの変数（iflgcrryudr : モデル使用の選択、ihxVin : 熱交換器への流入流速、ihxDin : 入口配管径、rcrryudr：巻込み気泡半径）を導入する。

キャリーアンダーモデルの動作確認として、プレナムを 2 つ並べた体系において、上流プレナムから気泡を注入し、下流プレナムでキャリーアンダーモデルを使用する解析を行う。主な解析条件は、5.3 節と同様である。ただし、下流プレナムの初期蓄積ガス量を 0.1 ($m^3$)とする。本解析は、キャリーアンダーモデルを単独で使用するため、液面からの気泡放出はガス層に加算されず、蓄積ガス量は時間の経過とともに減少する。実際、Fig.5.11 に示す通り、下流プレナム内の蓄積ガス量は時間と共に単調に減少しており、キャリーアンダーモデルが正しく動作していることが分かる。

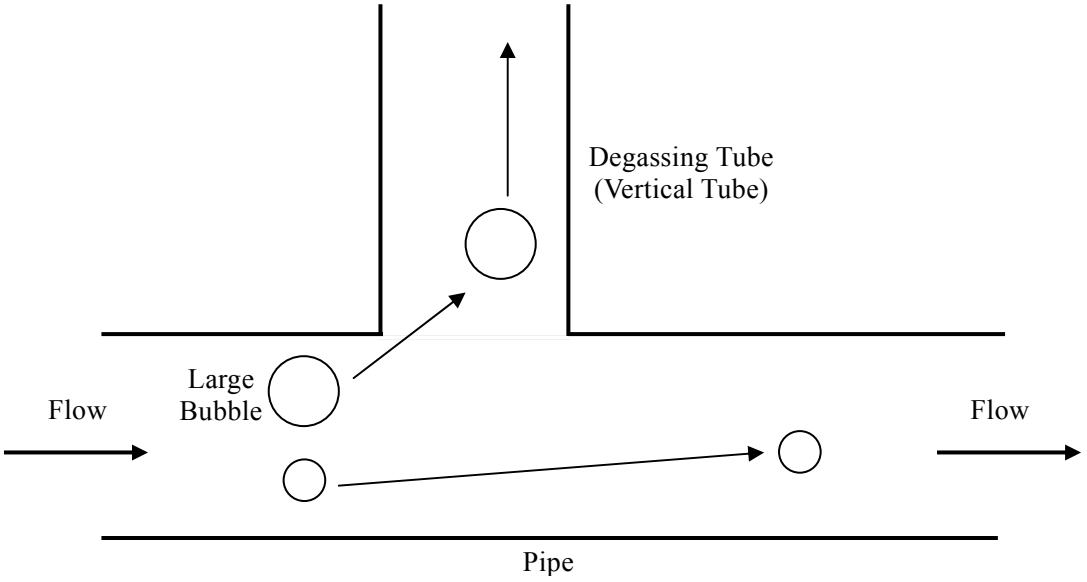



Fig.5.1　大気泡放出部における気泡挙動

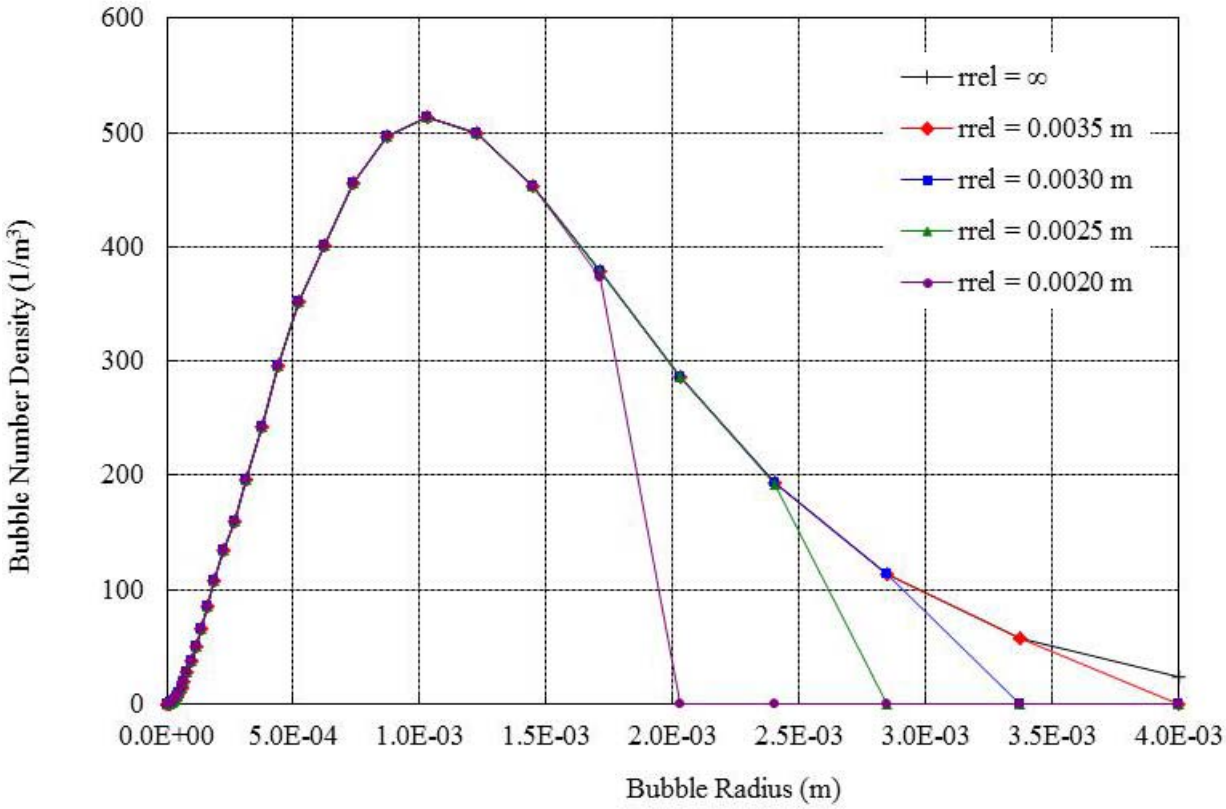



Fig.5.2　大気泡放出モデルによる気泡個数密度の変化

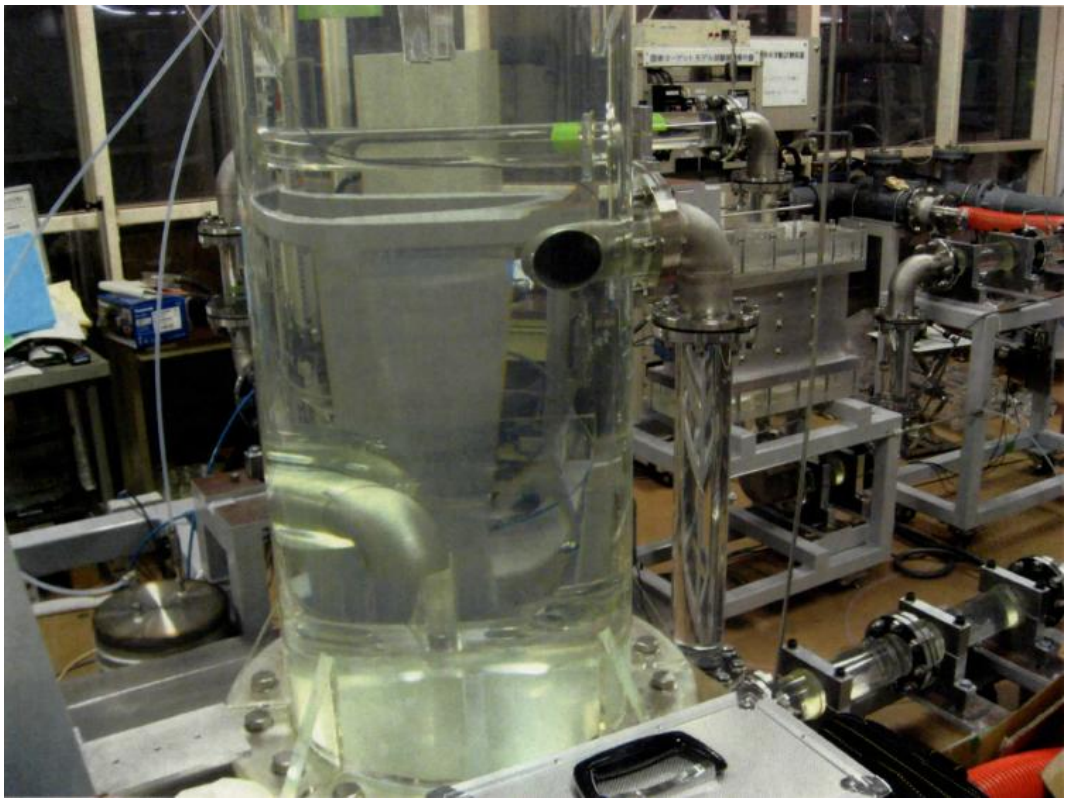


Fig.5.3　サージタンク外観図

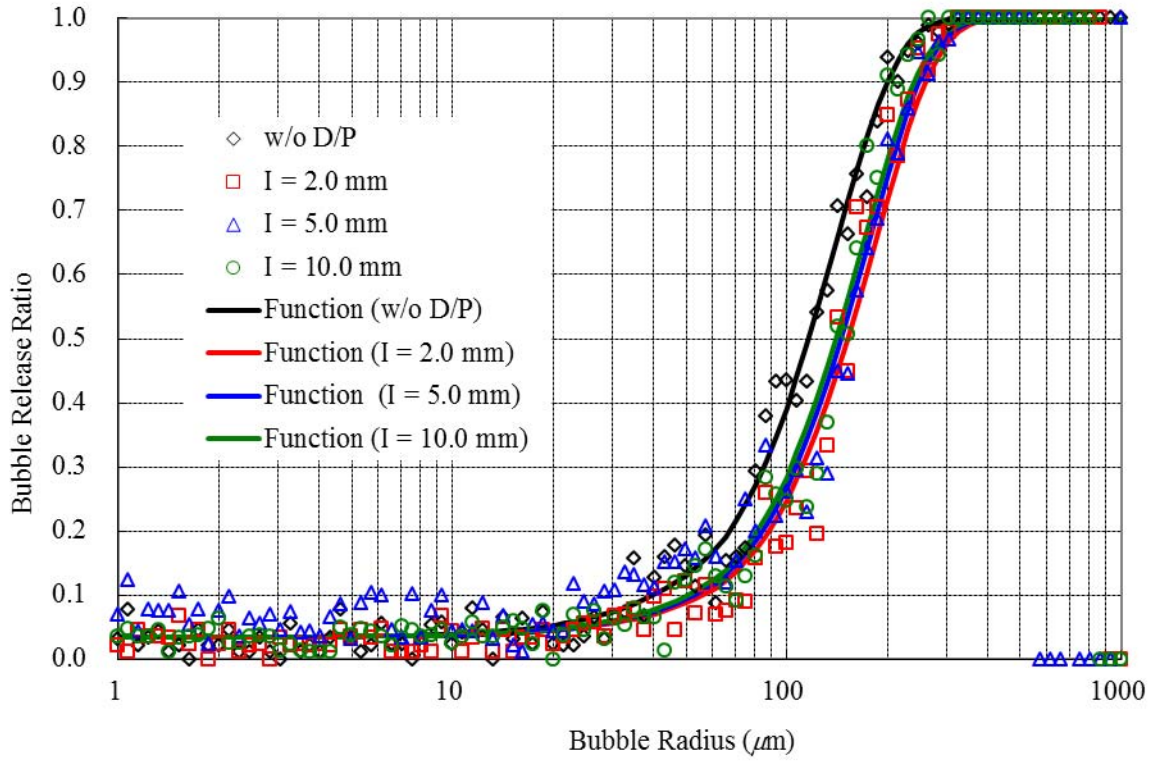



Fig.5.4　水-空気系における気泡放出割合関数

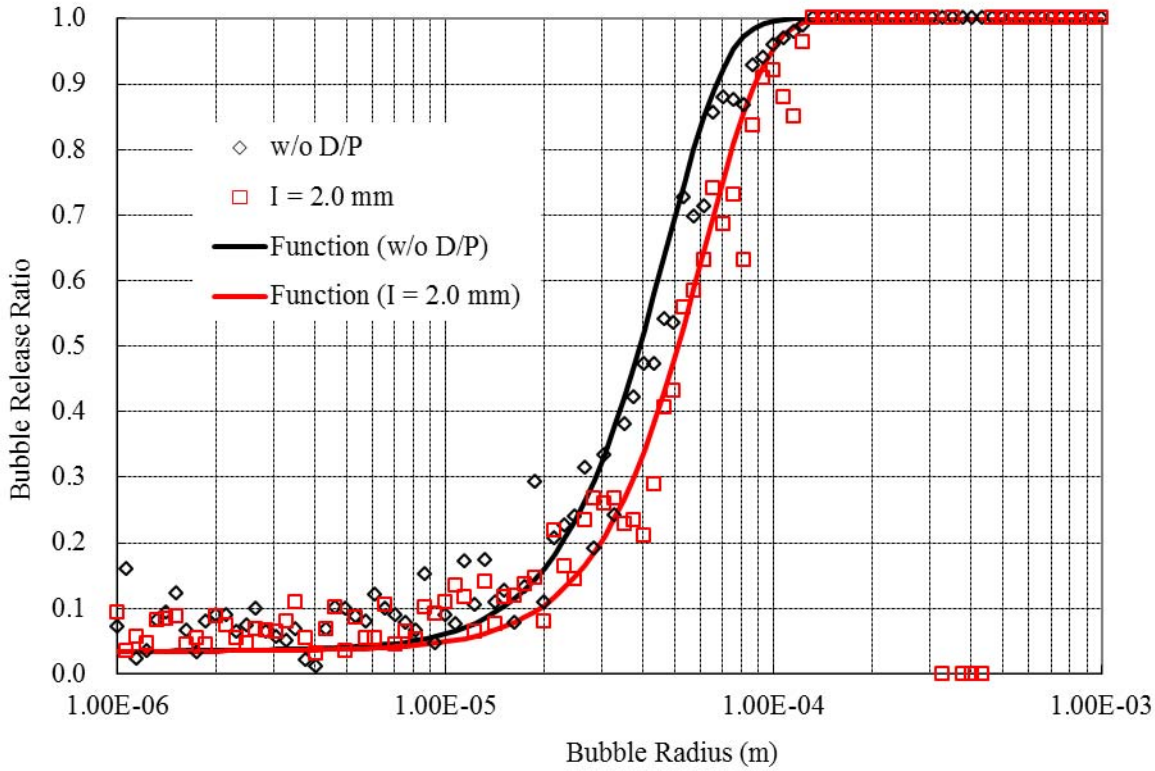



Fig.5.5　水銀-ヘリウム系における気泡放出割合関数

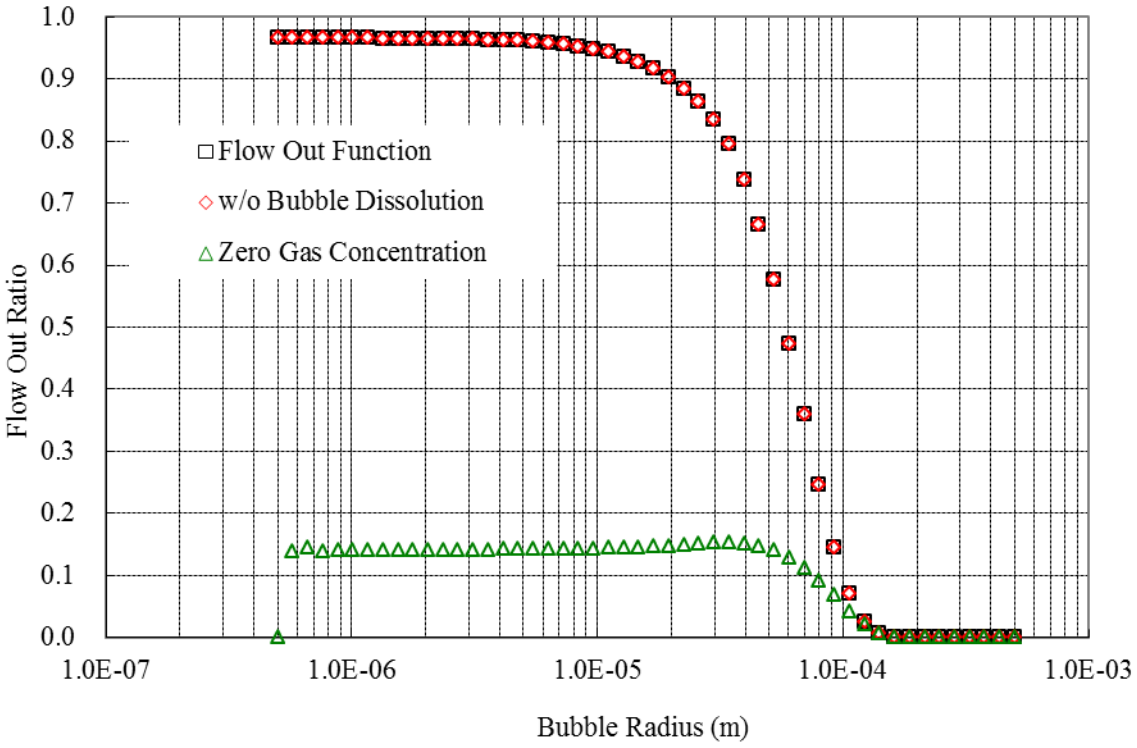



Fig.5.6　サージタンクからの気泡流出割合（D/P 無し）

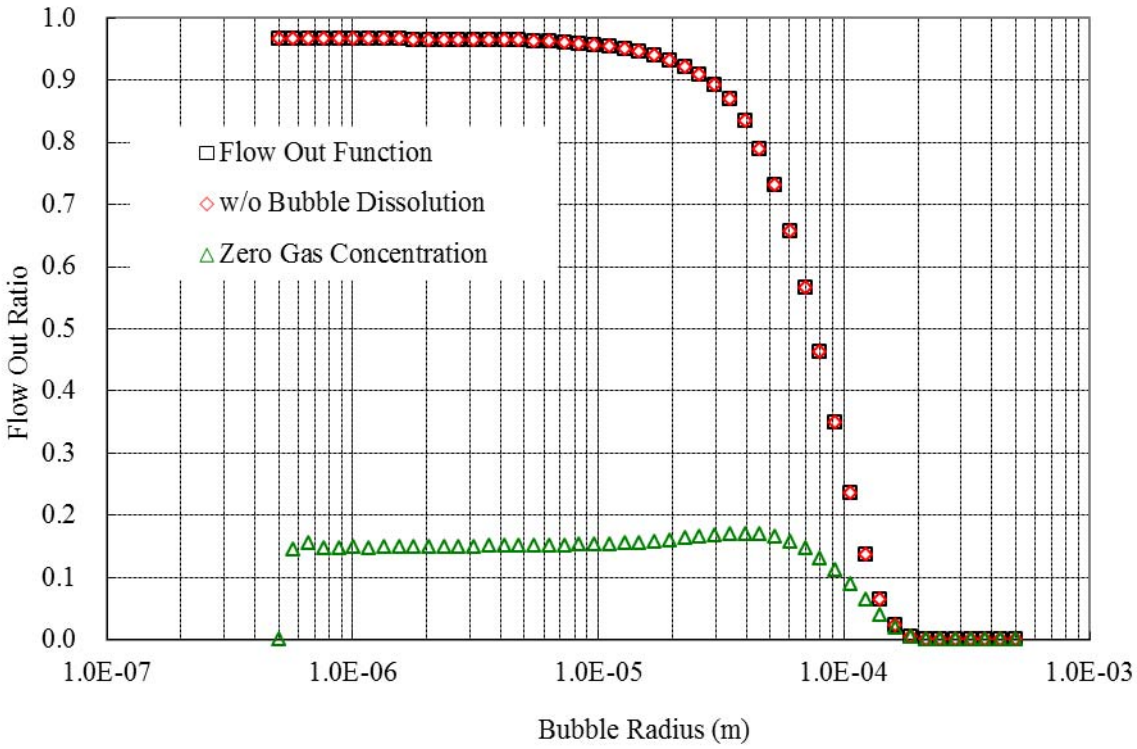



Fig.5.7　サージタンクからの気泡流出割合（壁面と D/P の間隙 2.0 (mm)）

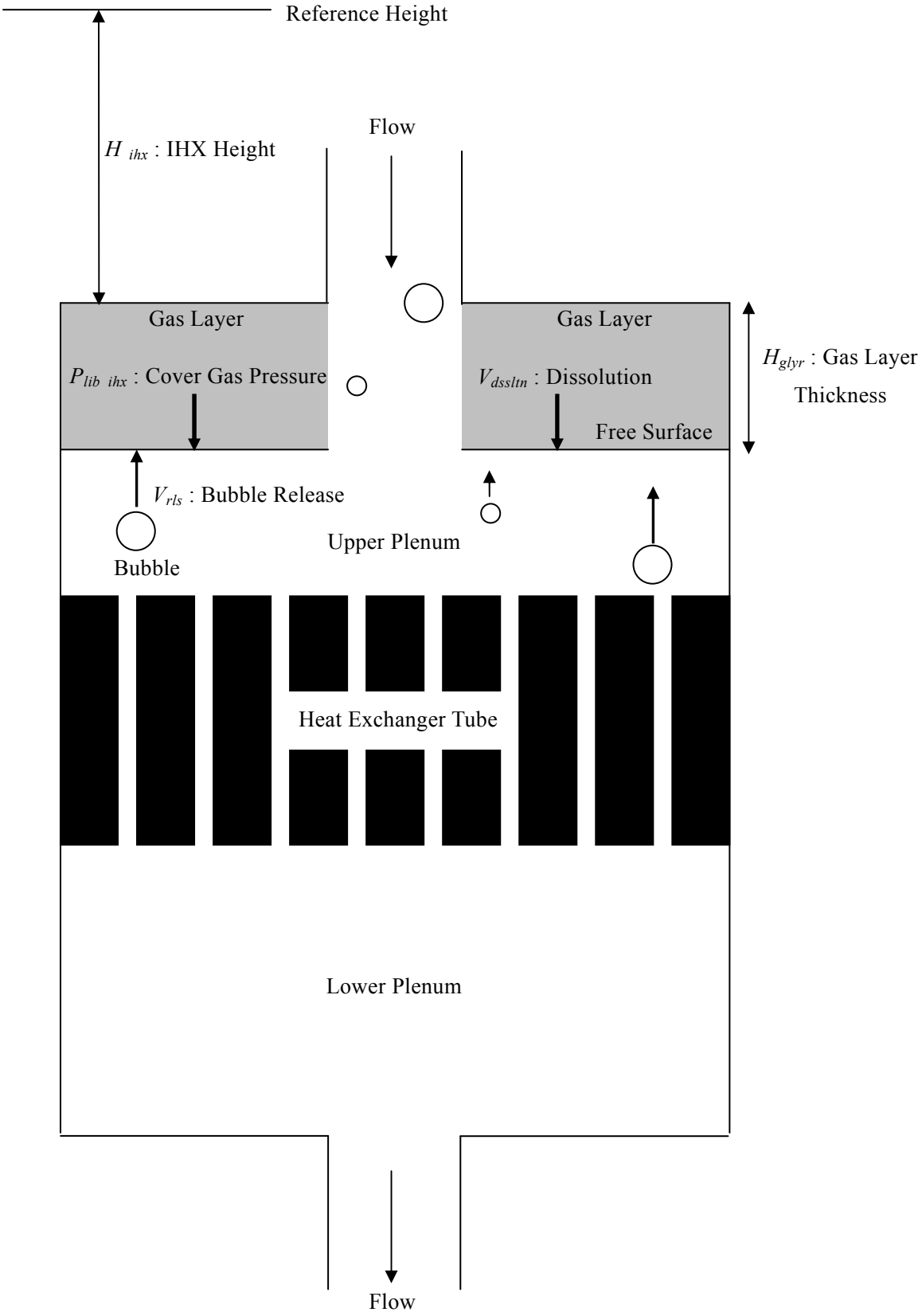



Fig.5.8　熱交換器における気泡挙動

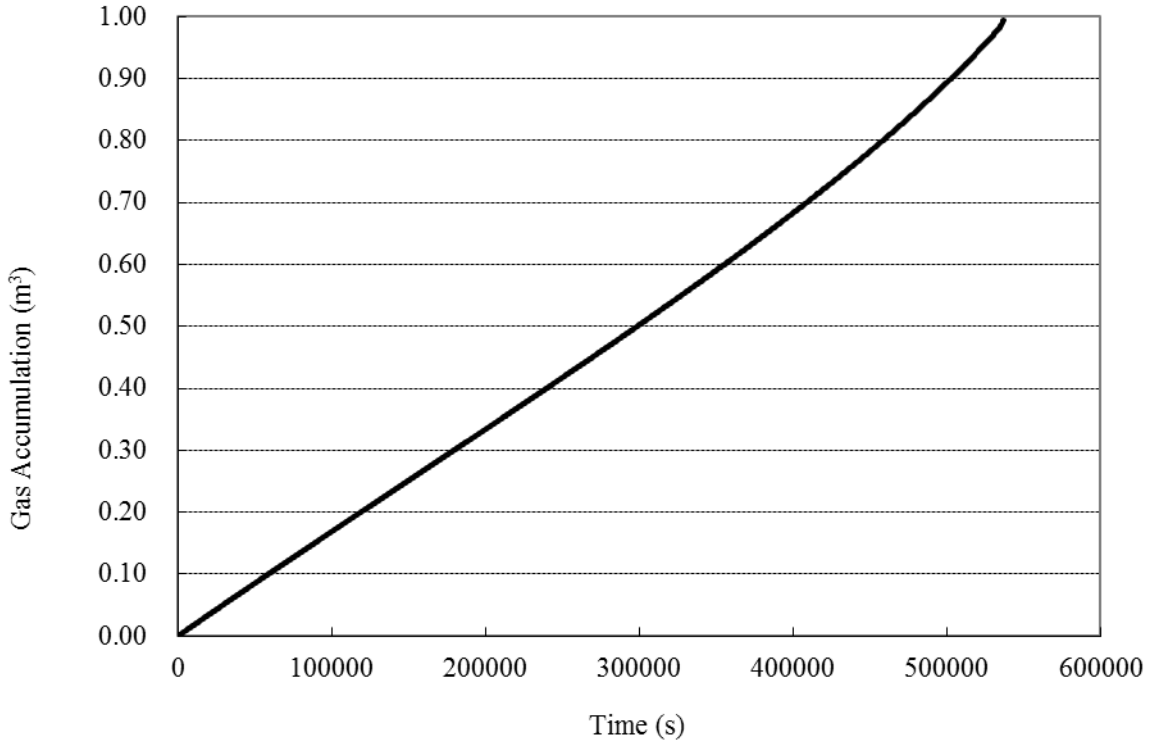



Fig.5.9　ガス蓄積量の時間変化（熱交換器高さ 1.0 (m)）

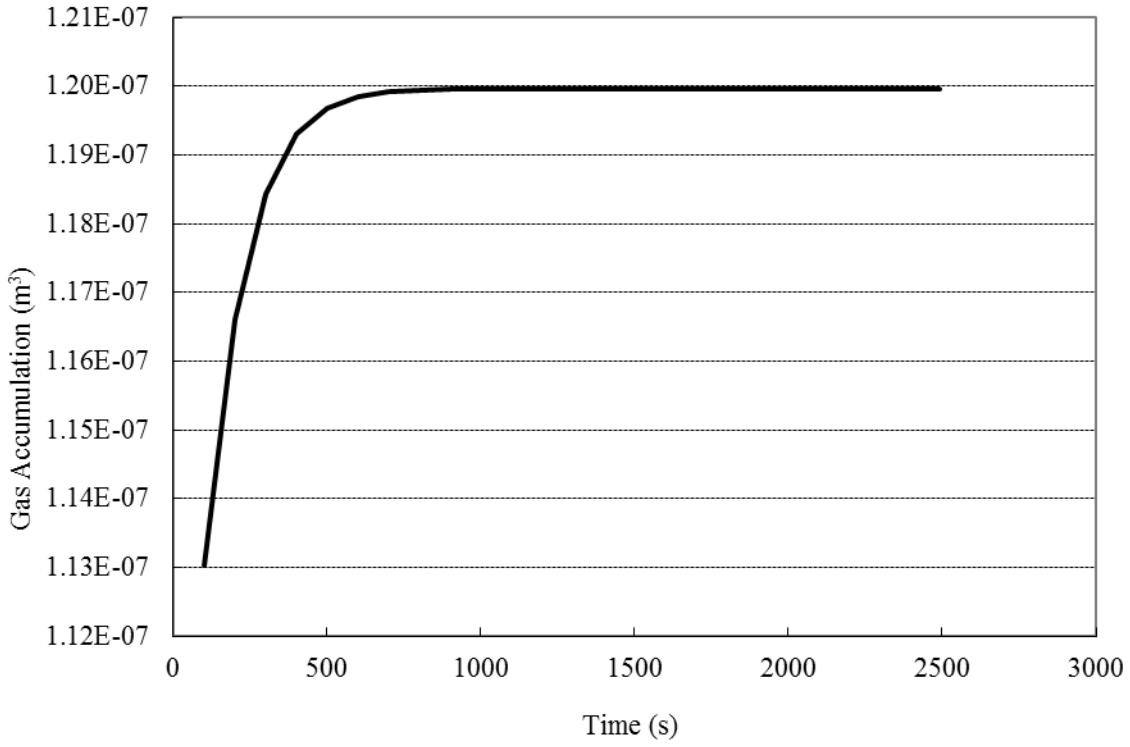



Fig.5.10　ガス蓄積量の時間変化（熱交換器高さ 15.0 (m)）

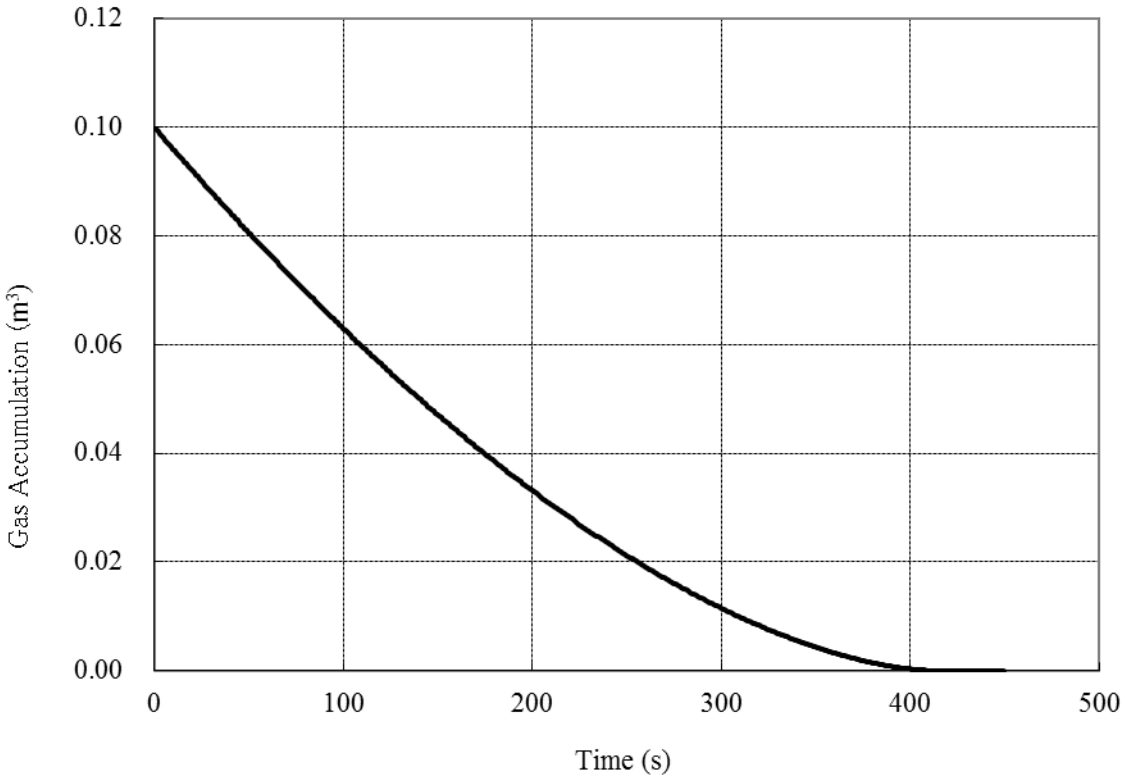



Fig.5.11　キャリーアンダーモデルによるガス蓄積量の時間変化

# 6. 水銀ターゲットシステムにおける微小気泡挙動の評価

5 章において開発したモデルを導入した VIBUL コードを用いて、水銀ターゲットシステムにおける微小気泡挙動の評価を行う。

## 6.1 水-空気系の解析

水銀ターゲットシステムを模擬した水ループを対象として解析を行い、各コンポーネントにおける気泡径分布について評価する。水ループの全体図を Fig.6.1 に、解析モデルを Fig.6.2 に示す。また、各コンポーネント内の液体体積及び液面面積を Table 6.1 に示す。解析ケースを Table 6.2 に示す。解析は、配管①における大気泡放出モデル使用の有無および D/P とタンク壁面との間隙をパラメータとして実施する。その他の解析条件を以下に示す。

| | |
|---|---|
| 配管内の断面平均流速 | : 0.7 (m/s) |
| 温度 | : 20 (℃) |
| 時間刻み | : 0.01 (s) |
| 気泡の溶解、成長 | : 考慮しない |
| 液面からのガスの溶解 | : 考慮しない |
| 巻込み気泡半径 | : 500 ($\mu$m) |

気泡ソースは、試験において計測したバブラー付近の個数密度分布データに基づいて与える。また、サージタンク及び熱交換器上部プレナムには液面が存在しているが、溶解度が小さいため、液面からのガスの溶解は考慮しない。

Fig.6.3-6.7 に、各コンポーネントの気泡個数密度を示す。まず、バブラー&ターゲットモデルと配管①の気泡個数密度を比較すると、H2O-case05 以外はほとんど変化していない。H2O-case05 は、200 ($\mu$m)以上の気泡が放出される大気泡放出モデルを使用しているため、200 ($\mu$m)を超える気泡の個数密度が 0 となっている。次に、配管①とサージタンクの気泡個数密度を比較すると、サージタンクにおける気泡放出モデルにより、気泡半径が大きくなるほど個数密度が減少し、配管①との差が大きくなっている。続いて、サージタンクと配管②の気泡個数密度を比較すると、ほとんど変化は見られない。最後に、配管②と熱交換器上部プレナムの気泡個数密度を比較すると、気泡の液面からの放出現象が起こることにより、気泡半径が大きくなるほど個数密度が減少し、配管②との差が大きくなっている。さらに、上部プレナムにおけるキャリーアンダーモデルによるガス巻込みにより、500 ($\mu$m)の気泡が存在している。

サージタンク上流から下流へかけての気泡個数密度及びボイド率の変化から、D/P の有無及び間隙の影響について評価する。サージタンク上流、下流における気泡個数密度をそれぞれ Fig.6.8、6.9 に示す。サージタンク上流では気泡半径 200 ($\mu$m)以上を除き、すべてのケースにおいて気泡個数密度は一致している。サージタンク下流では、D/P の無い H2O-case01 および H2O-case05 において気泡個数密度が小さくなっている。これは、D/P が無いため、より多くの気泡が放出されるためである。また、D/P とタンク壁面との間隙が大きくなるほど気泡個数密

度が減少している。D/P の無い H2O-case01 および H2O-case05 のボイド率は、他のケースよりも低い値となっており、ボイド率が最も高い H2O-case02 は H2O-case01 の 1.85 倍となっている。

### 6.2 水銀-ヘリウム系の解析

実際の水銀ターゲットシステムを対象として解析を行い、水-空気系の場合と同様に、各コンポーネントにおける気泡個数密度の評価を行う。水銀ループ試験装置の全体図を、Fig.6.10 に示す。解析モデルは、Fig.6.2 の水-空気系モデルと同じである。ただし、水銀ターゲットシステムは水ループの 1/3 スケールのため、各コンポーネント内の液体体積及び液面面積は Table 6.1 に示す水ループの値のそれぞれ 1/27、1/9 となる。解析ケースは、D/P とタンク壁面との間隙をパラメータとして設定する。また、本解析では大気泡放出モデルは使用しない。Table 6.3 に解析ケースを示す。その他の解析条件は水-空気系解析と同様であり、気泡ソースについても同じ分布を与える。

Fig.6.11-6.14 に各コンポーネントの気泡個数密度の比較をケース別に示す。定性的には、水-空気系解析と同様の結果となっており、バブラー＆ターゲットモデルと配管①、サージタンクと配管②の気泡個数密度には差が見られない。配管①とサージタンクおよび配管②と熱交換器上部プレナムの気泡個数密度を比較すると、液面からの気泡放出により、気泡個数密度が減少している。また、熱交換器上部プレナムにおいては、キャリーアンダーモデルによる巻込み気泡が存在している。

サージタンク上流、下流における気泡個数密度の比較をそれぞれ Fig.6.15、6.16 に示す。サージタンク上流、下流の気泡個数密度を比較すると、サージタンク上流ではすべてのケースにおいて気泡個数密度は一致しているが、サージタンク下流では、60 ($\mu$m)以下の半径の気泡個数密度が D/P とタンク壁面との間隙が大きくなるほど減少している。また、サージタンク下流におけるボイド率を見ると、D/P とタンク壁面の間隙が最も狭い Hg-case02 は D/P の無い Hg-case01 のボイド率の 1.5 倍となっている。

### 6.3 試験結果と解析結果の比較

水-空気系の解析結果について、サージタンク上流および下流における気泡個数密度の試験結果との比較を行う。比較対象となる試験は、大気泡放出箇所がなくサージタンクに D/P が無い条件において行われているため、同条件である H2O-case01 との比較を実施する。

サージタンク上流、下流における気泡個数密度をそれぞれ Fig.6.17、6.18 に示す。サージタンク上流においては、気泡半径 150 ($\mu$m)以上で若干のばらつきがあるが、試験結果と解析結果の気泡個数密度分布は概ね一致している。サージタンク下流では、解析結果の気泡個数密度は全体的に試験結果よりも低い値となっている。このことは、解析ではサージタンクにおける気泡放出量がやや多めに計算されていることを示している。

Table 6.1　水ループにおける各コンポーネントの体積および液面面積

| Component | | Volume ($m^3$) | Surface Area ($m^2$) |
|---|---|---|---|
| Bubbler ＆ Target Model | | $8.9889\times10^{-3}$ | |
| Pipe 1 | | $1.5005\times10^{-2}$ | |
| Surge Tank | W/o D/P | $1.3208\times10^{-1}$ | $1.4515\times10^{-1}$ |
| | D/P Diameter 410 (mm) ($I$ = 10 (mm)) | $1.3169\times10^{-1}$ | |
| | D/P Diameter 420 (mm) ($I$ = 5.0 (mm)) | $1.3167\times10^{-1}$ | |
| | D/P Diameter 426 (mm) ($I$ = 2.0 (mm)) | $1.3166\times10^{-1}$ | |
| Pipe 2 | | $9.9611\times10^{-3}$ | |
| Upper Plenum of Heat Exchanger | | $3.3900\times10^{-3}$ | $6.3920\times10^{-2}$ |

Table 6.2　水-空気系における解析ケース

| Case | Large Bubble Release Model | Gap of D/P and Tank Wall |
|---|---|---|
| H2O-case01 | N/A | W/o D/P |
| H2O-case02 | N/A | 2.0 (mm) |
| H2O-case03 | N/A | 5.0 (mm) |
| H2O-case04 | N/A | 10 (mm) |
| H2O-case05 | Release Radius 200 ($\mu$m) | W/o D/P |

Table 6.3　水銀-ヘリウム系における解析ケース

| Case | Gap of D/P and Tank Wall |
|---|---|
| Hg-case01 | W/o D/P |
| Hg-case02 | 0.667 (mm) |
| Hg-case03 | 1.67 (mm) |
| Hg-case04 | 3.33 (mm) |

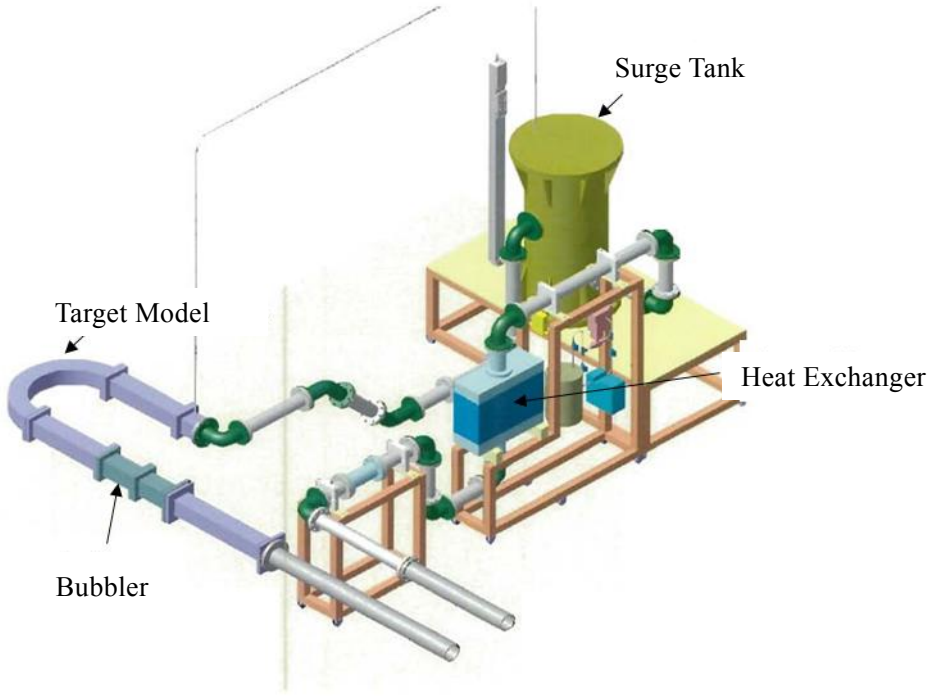



Fig.6.1　水ループ全体図

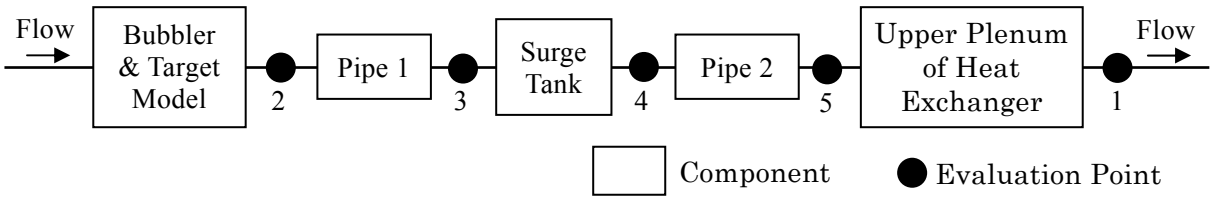



Fig.6.2　水ループ解析モデル

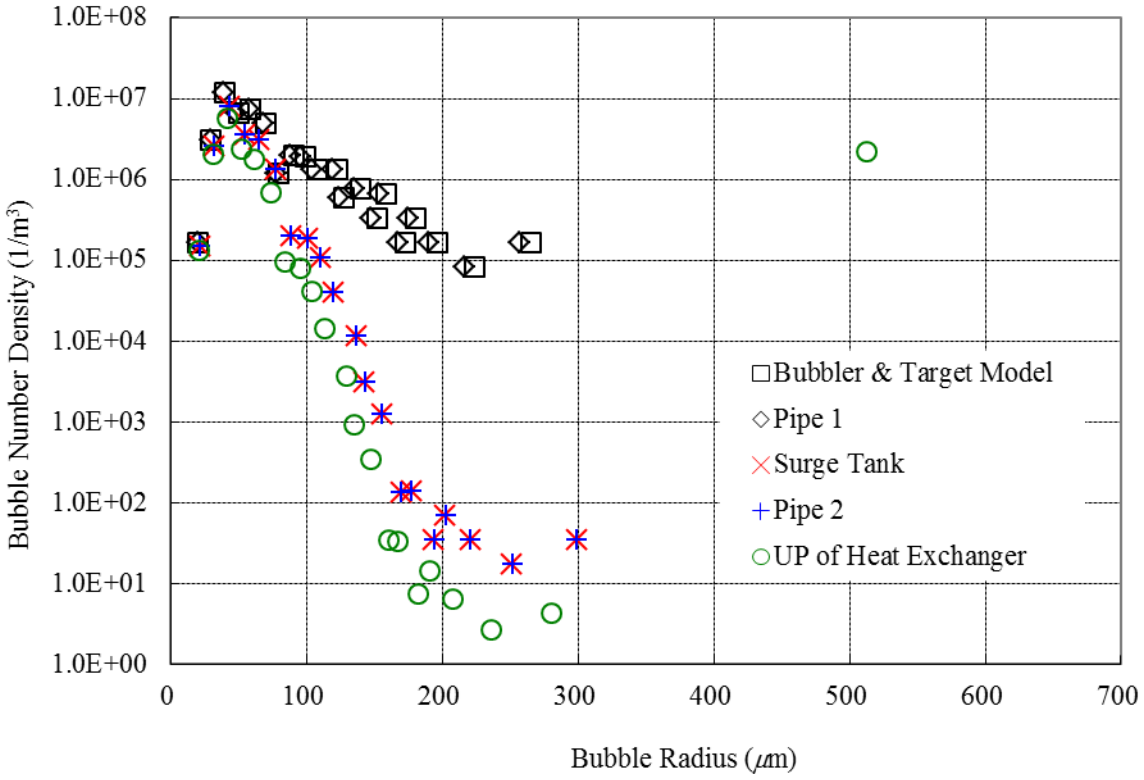



Fig.6.3　H2O-case01 における各コンポーネントの気泡個数密度

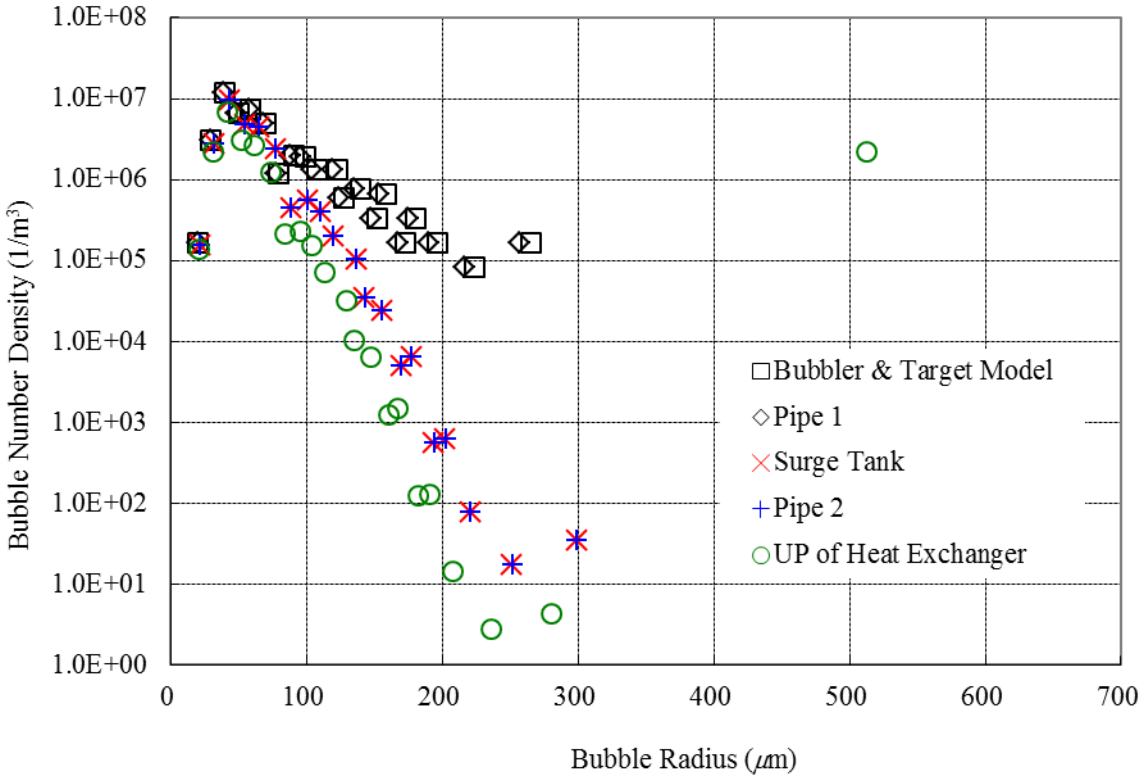



Fig.6.4　H2O-case02 における各コンポーネントの気泡個数密度

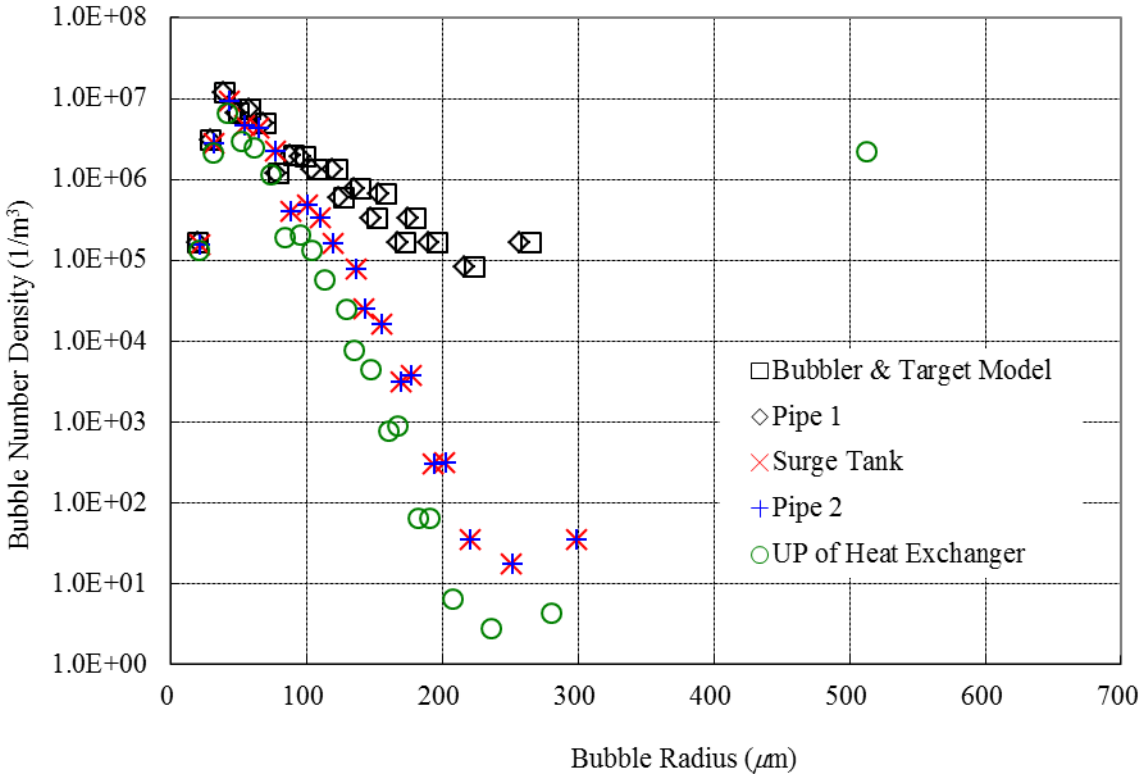



Fig.6.5　H2O-case03 における各コンポーネントの気泡個数密度

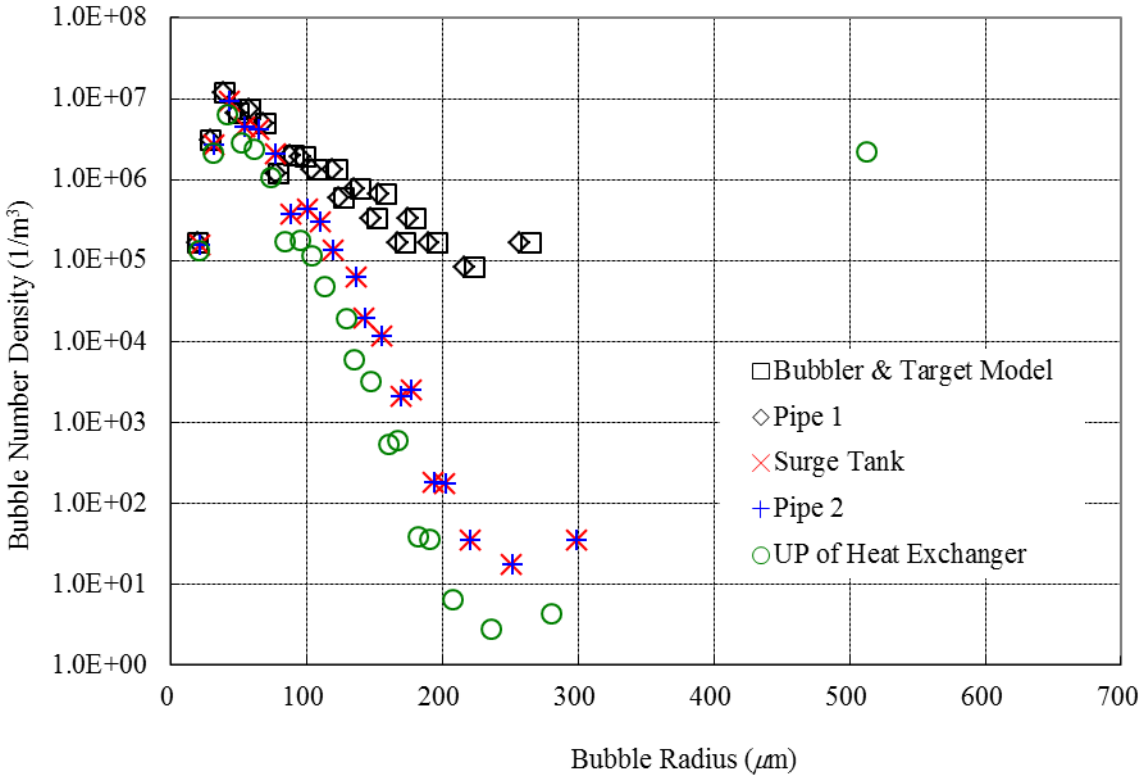



Fig.6.6　H2O-case04 における各コンポーネントの気泡個数密度

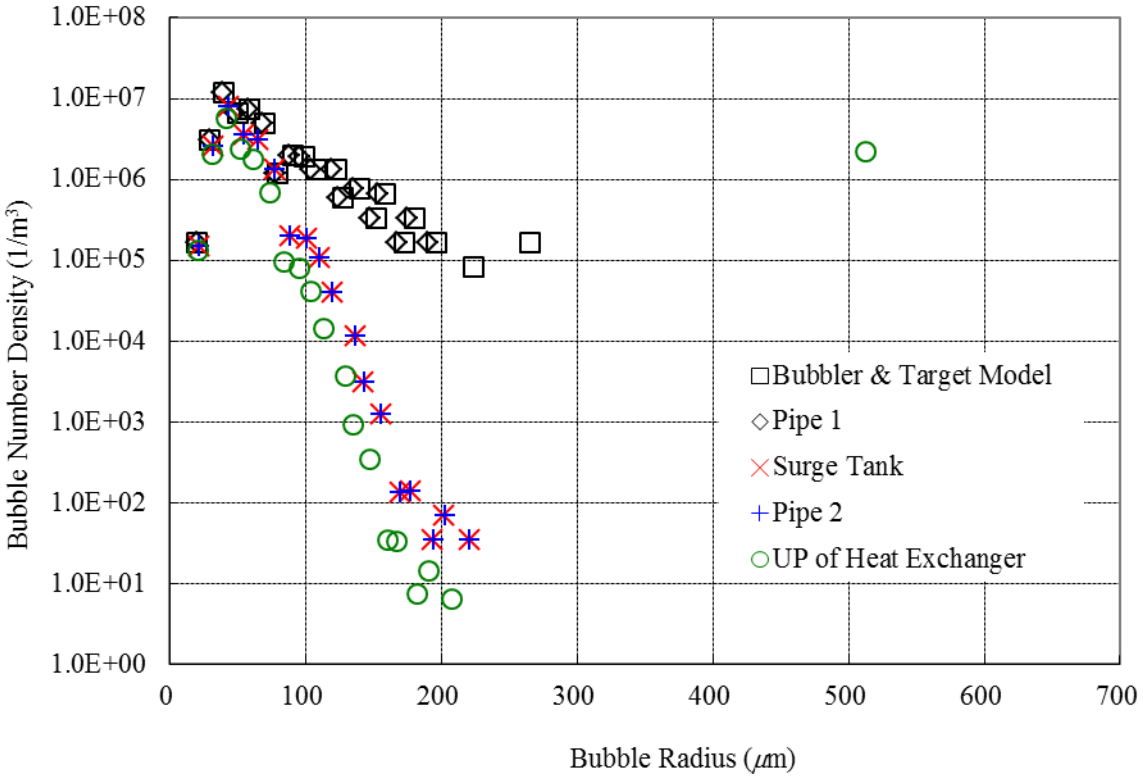



Fig.6.7　H2O-case05 における各コンポーネントの気泡個数密度

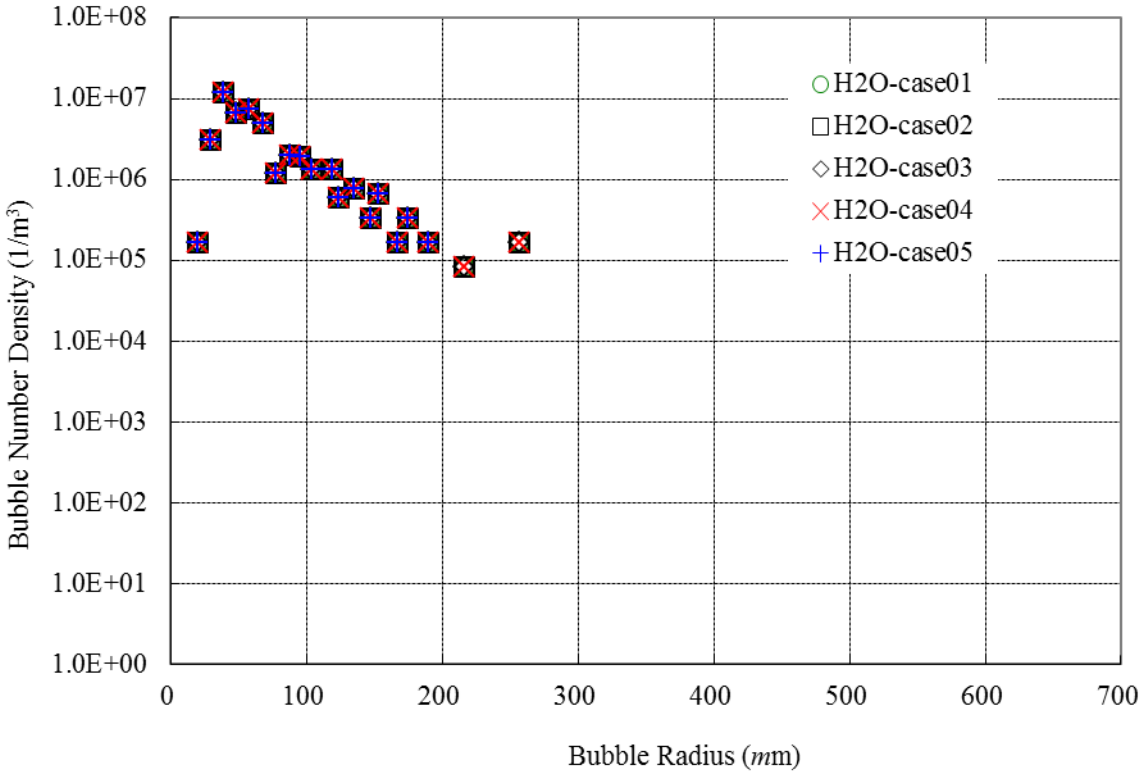



Fig.6.8　サージタンク上流における気泡個数密度分布の比較（水-空気系）

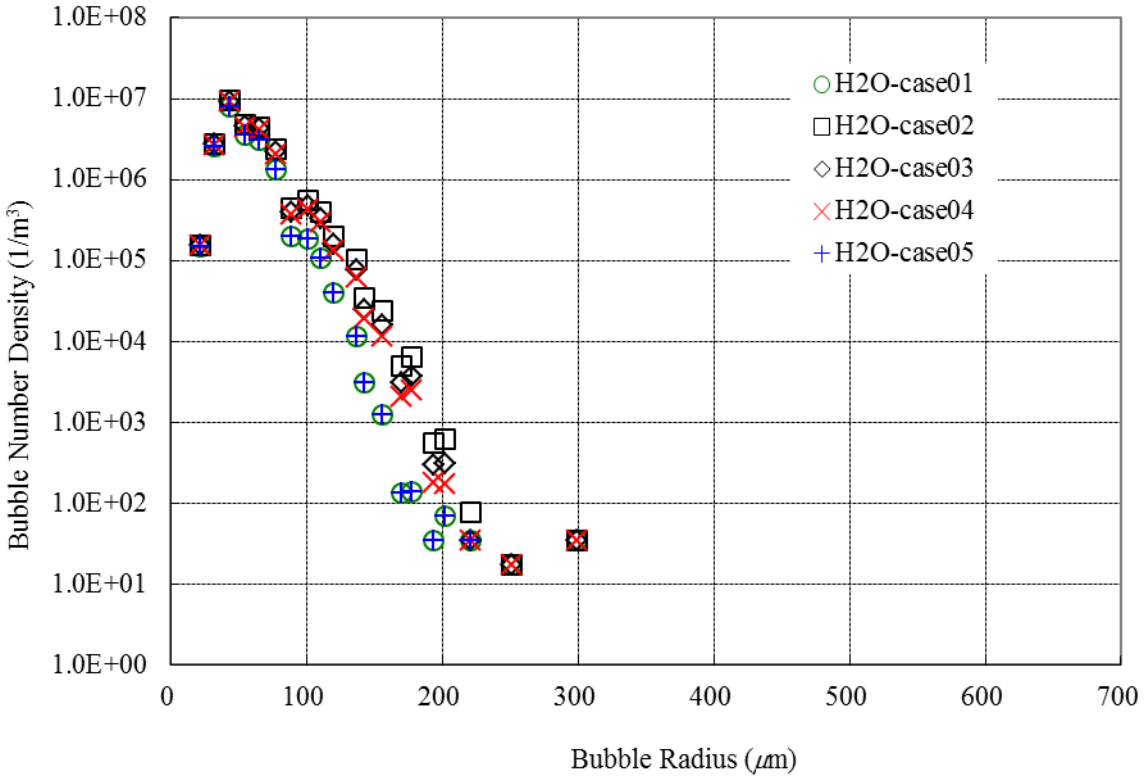



Fig.6.9　サージタンク下流における気泡個数密度分布の比較（水-空気系）

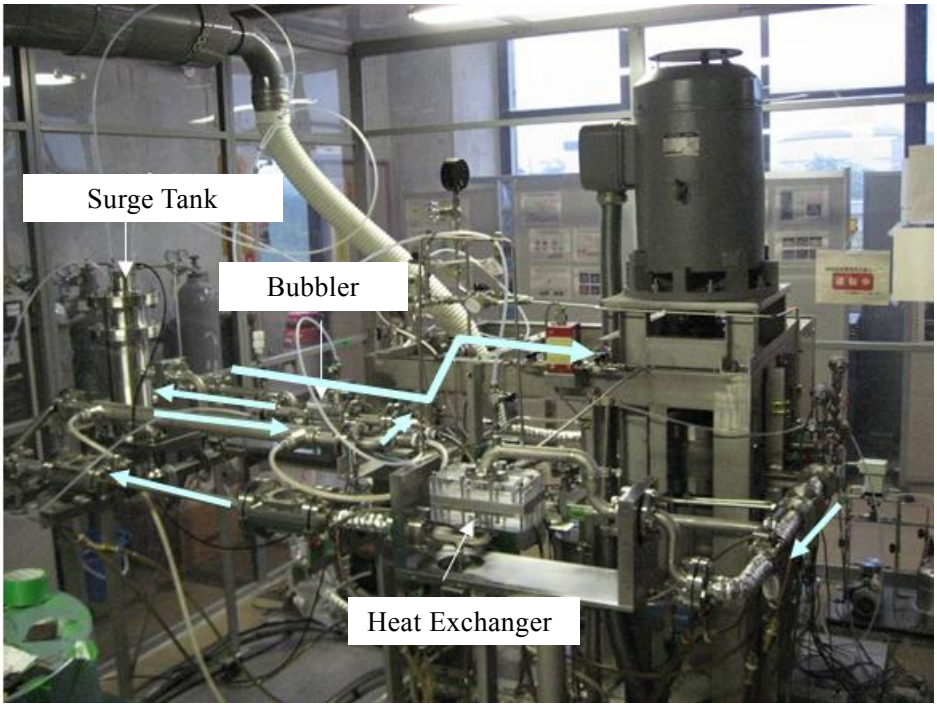



Fig.6.10　水銀ループ試験装置

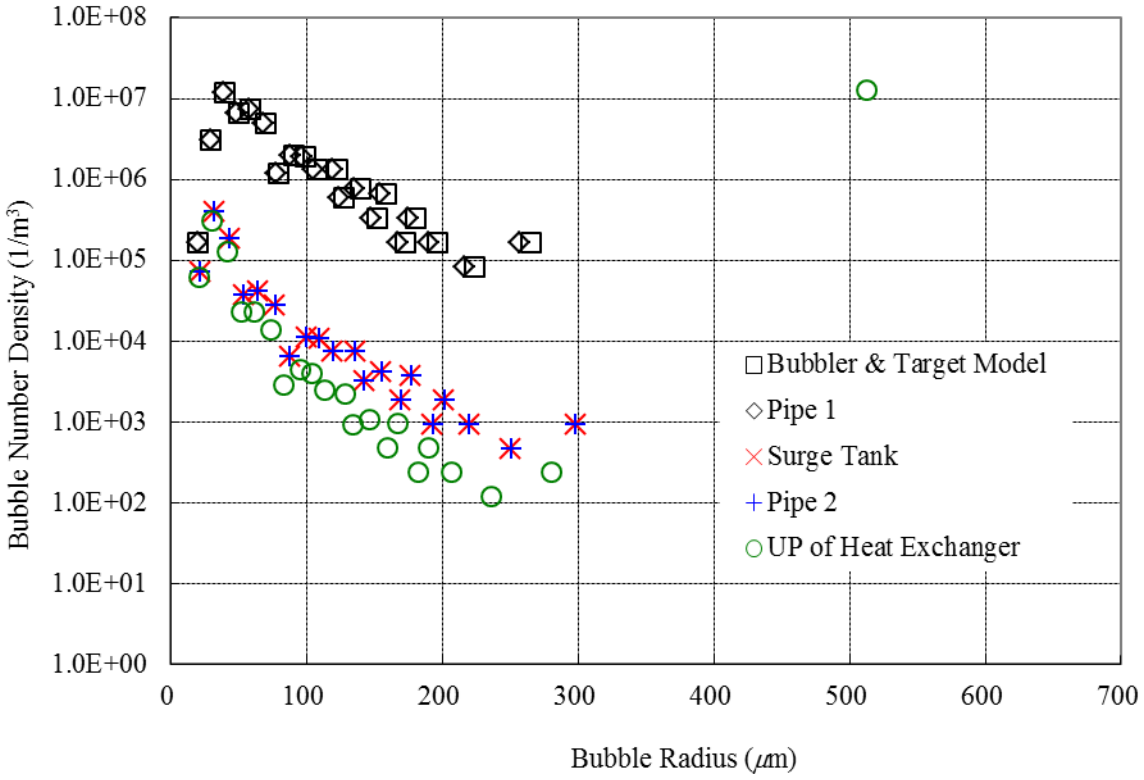



Fig.6.11　Hg-case01 における各コンポーネントの気泡個数密度

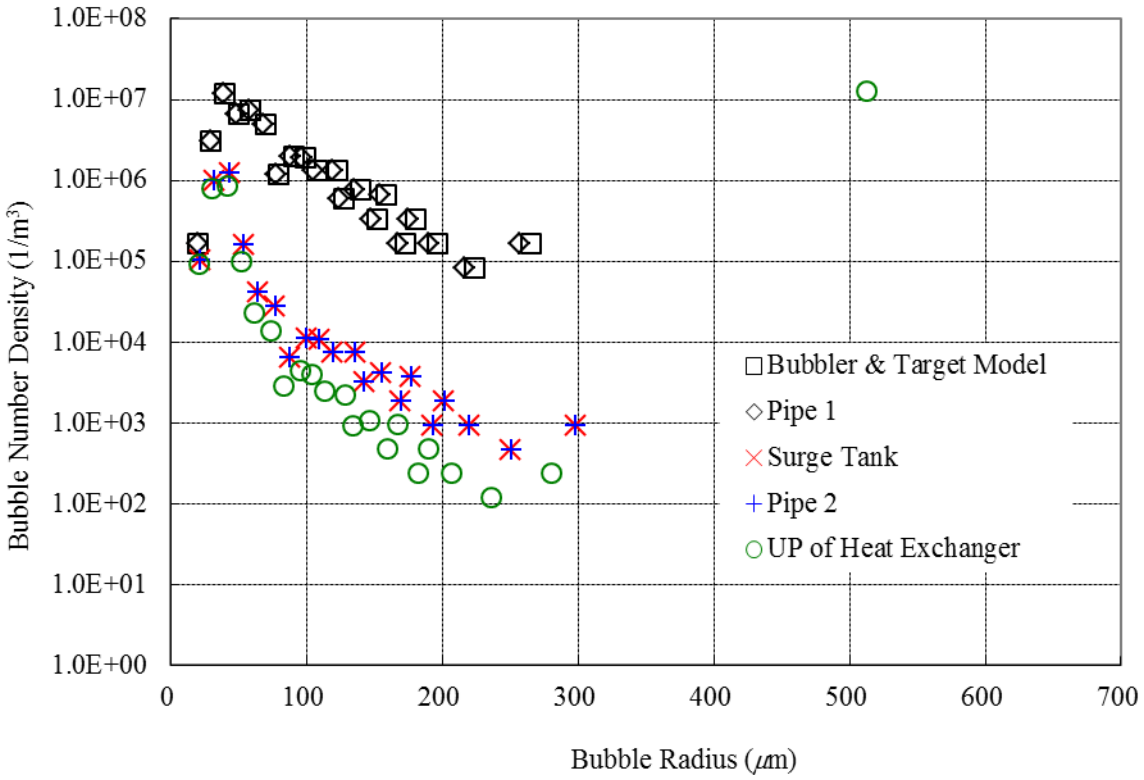



Fig.6.12　Hg-case02 における各コンポーネントの気泡個数密度

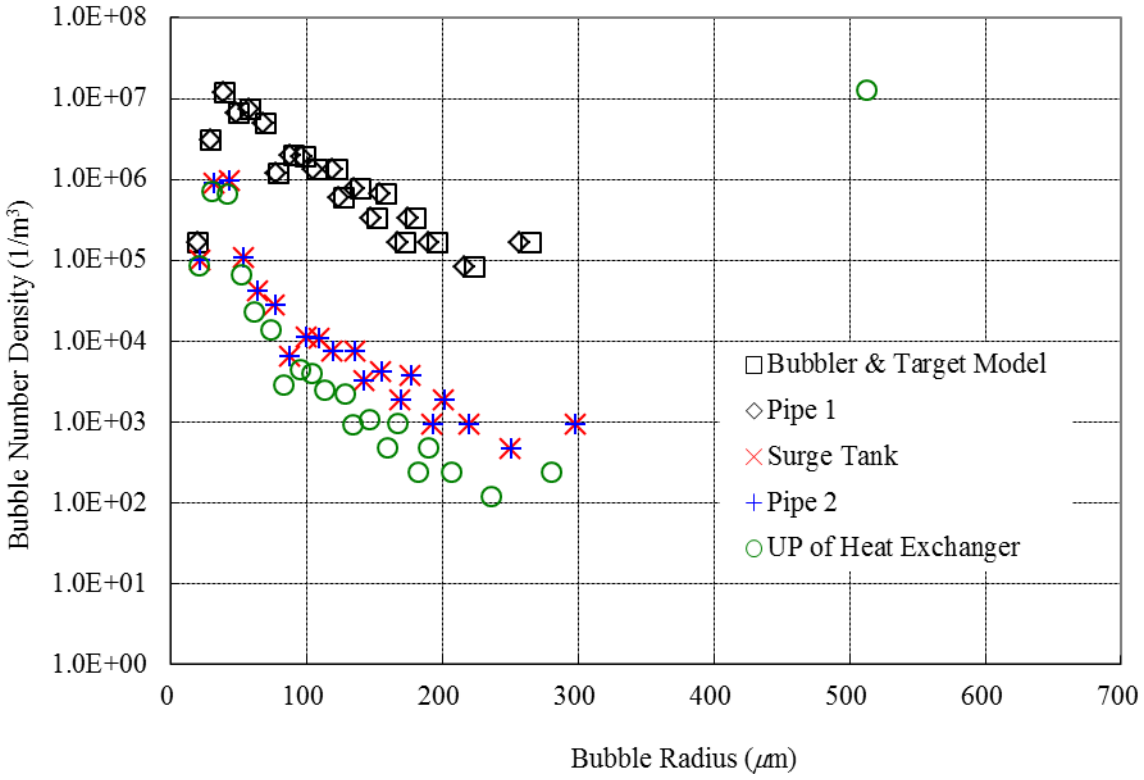



Fig.6.13　Hg-case03 における各コンポーネントの気泡個数密度

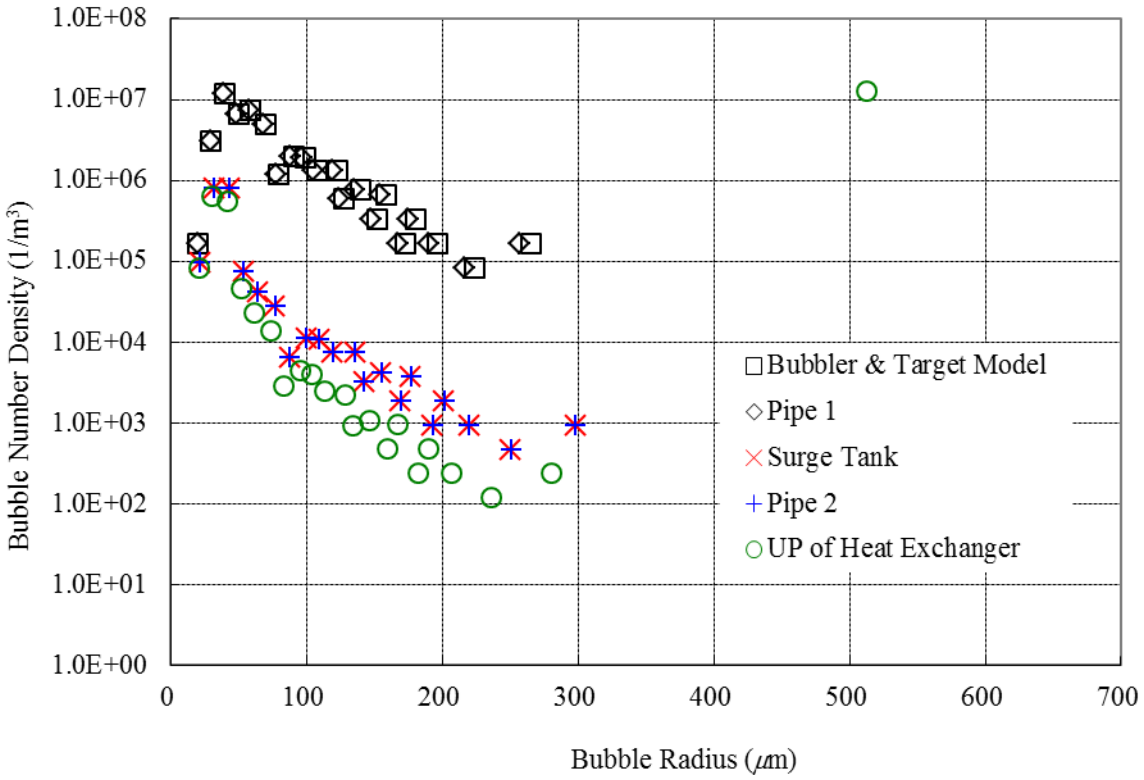



Fig.6.14　Hg-case04 における各コンポーネントの気泡個数密度

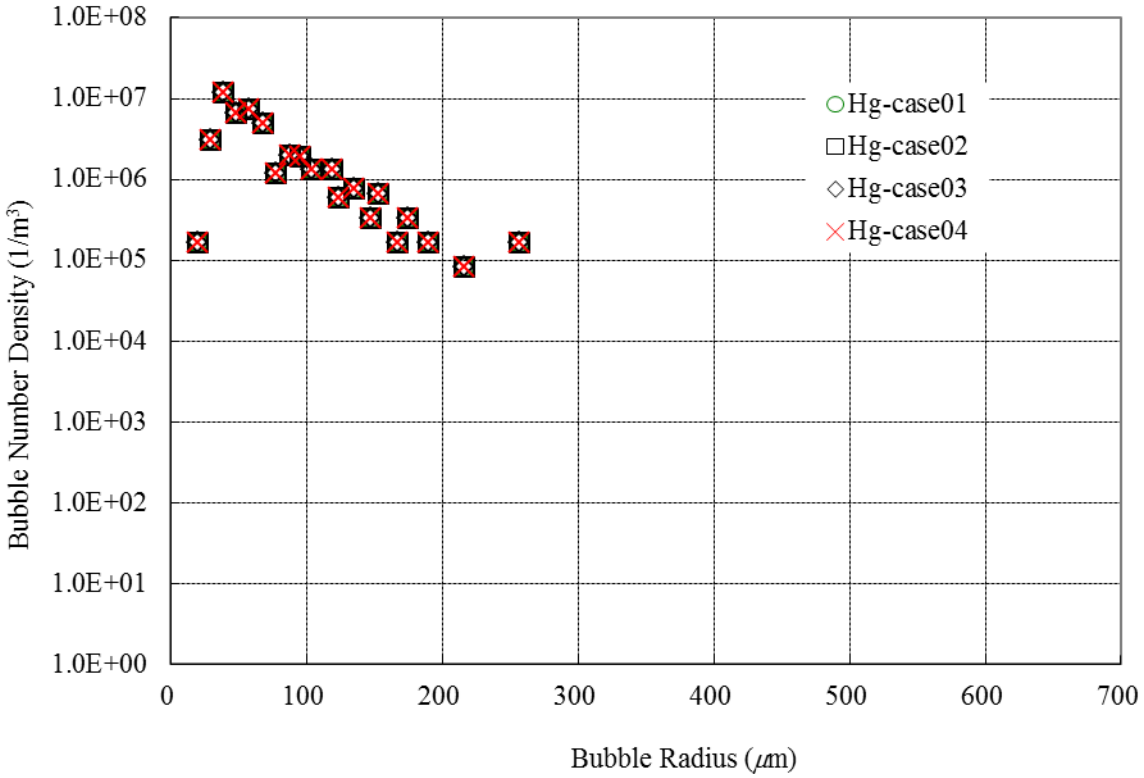



Fig.6.15　サージタンク上流における気泡個数密度分布の比較（水銀-ヘリウム系）

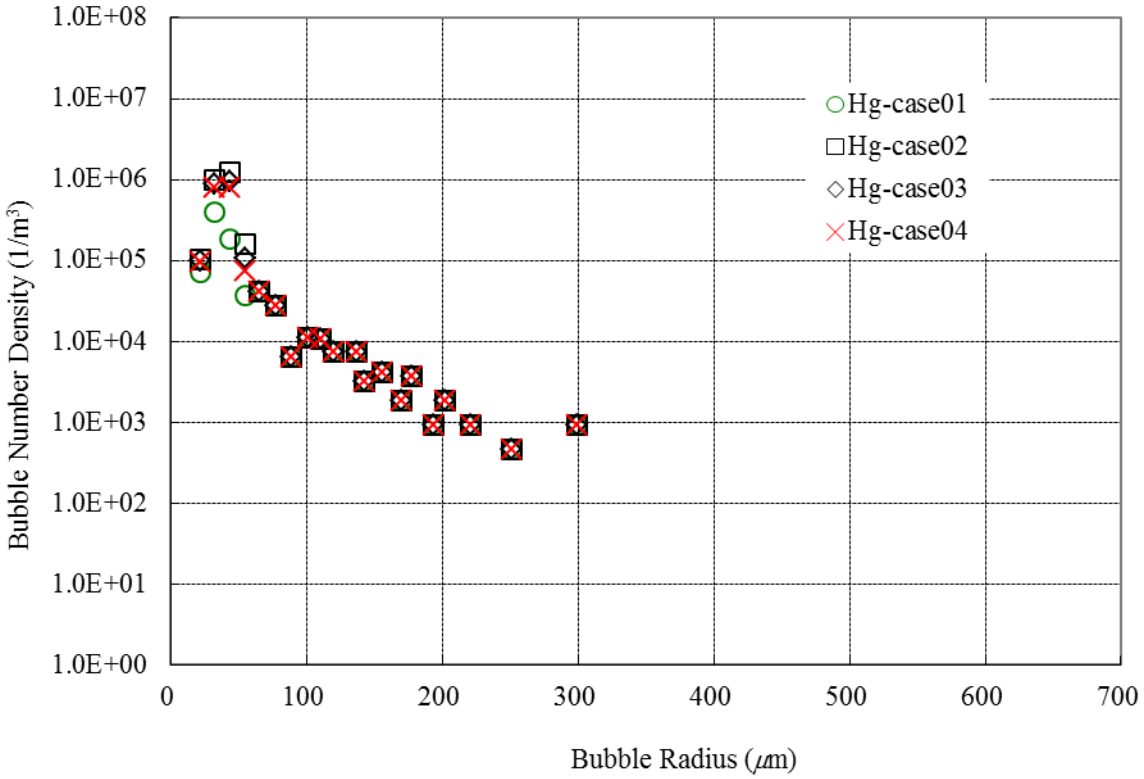



Fig.6.16　サージタンク下流における気泡個数密度分布の比較（水銀-ヘリウム系）

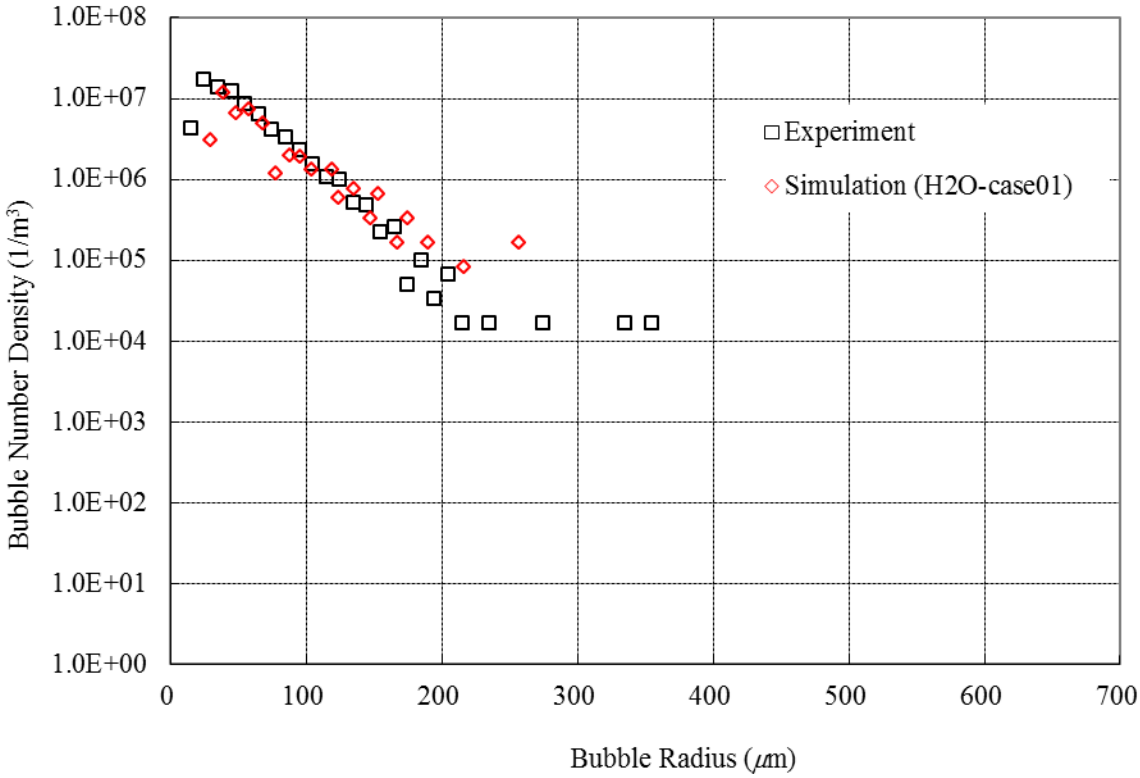



Fig.6.17　試験結果と解析結果の気泡個数密度分布比較（サージタンク上流）

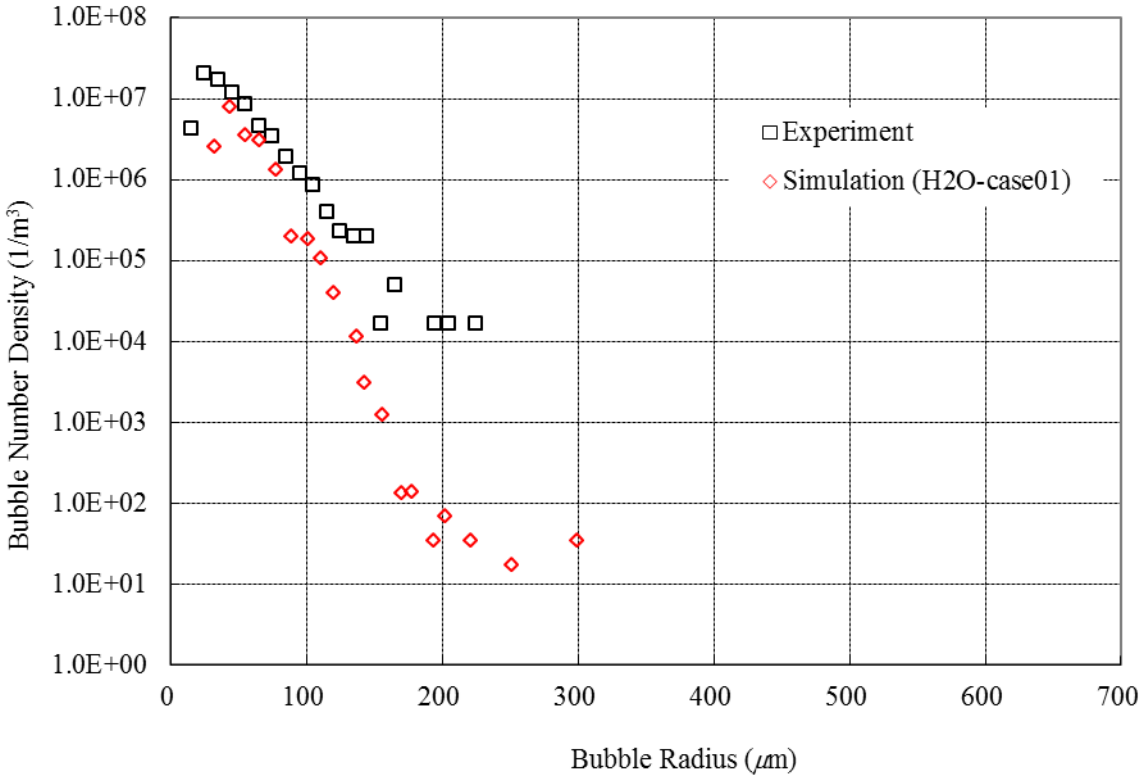



Fig.6.18　試験結果と解析結果の気泡個数密度分布比較（サージタンク下流）

# 7. 結論

ナトリウム冷却大型高速炉 1 次冷却系統内における不活性ガス（Ar、He）の気泡・溶存ガス挙動および水銀ターゲットシステム内の微小気泡挙動を評価するため、VIBUL コードの改良と新規モデル開発を行い、数値解析を実施し、以下の知見を得た。

① VIBUL コードの改良

陽解法による気泡モル保存式の離散化、核生成計算用配列の初期化処理、Na 中ガス飽和温度計算式の取扱い、IHX での圧力計算式、合流部における溶解度計算式についてコードの改良を行い、気泡挙動（モル保存等）が正しく計算できることを確認した。

② JSFR 体系の解析

各コンポーネントにおける気泡・溶存ガス挙動（IHX における気泡析出等）が計算でき、また、気泡ソース量の影響や Ar ガス、と He ガスの挙動の違いについて評価できることを確認した。

③ 水銀ターゲットシステムのモデル開発

物性値関数、開ループ計算機能、大気泡放出モデル、サージタンクにおける気泡放出モデル、熱交換器における気泡合体・蓄積モデル、熱交換器におけるキャリーアンダー（ガス巻込み）モデルの開発・導入を行い、各モデルの動作確認によって、各コンポーネントにおける気泡挙動が計算できることを示した。

④ 水銀ターゲットシステムの解析

水-空気系および水銀-ヘリウム系の解析を実施し、各コンポーネントにおける気泡数密度分布について評価した。また、試験結果との比較によって気泡数密度が概ね再現できることを示した。

# 参考文献

1)A. Yamaguchi and A. Hashimoto : “A computational model for dissolved gas and bubble behavior in the primary coolant system of sodium-cooled fast reactor”, Proceedings of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Avignon, France, Oct. 2-6 (2005).

2)J. L. Berton : “VIBUL, Un Modele de Calcul de la Vie des Bulles en Reacteur”, Note Technique, CEA/Cadarache (1991).

3)E. Tatsumi, T. Takata, A. Yamaguchi : “Modeling and Quantification of Nucleation, Dissolution and Transportation of Bubbles in Primary Coolant System of Sodium Fast Reactor”, Proceedings of the 15th International Conference on Nuclear Engineering, Nagoya, Japan, Apr. 22-26 (2007).

4)A. Yamaguchi, E. Tatsumi, T. Takata, K. Ito, H. Ohshima, H. Kamide, J. Sakakibara : “Gas entrainment allowance level at free surface and gas dynamic behavior of sodium-cooled fast reactor”, Nuclear Engineering and Design, 241, 1627 (2011).

5)日本機会学会 : 伝熱工学資料, 改訂 4 版 (1986).

6)S. Hasegawa, T. Naoe, M. Futakawa : “Solubility of helium in mercury for bubbling technology of the spallation neutron mercury target”, Journal of Nuclear Materials, 398, 189 (2010).

7)E. L. Reed, J. J. Droher : “Solubility and Diffusivity of Inert Gases in Liquid Sodium, Potassium, and NaK”, Liquid Metal Engineering Center. Report LMEC-69-36 Issued: Jan. 31 (1970).

8)秋山守, 有冨正憲 : 新しい気液二層流数値解析, コロナ社 (2002).

9)K. Bin, Andrzej : “Gas Entrainment by Plunging Liquid Jets”, Chemical Engineering Science, 48, 3585 (1993).

# 付録 1　改良したプログラムのソースコード

ここでは、3 章において改良を行った以下のプログラム（VIBUL コード内のサブルーチン）の改良後のソースコードを示す。

- vibul.f
- echbul.f
- nucleation.f
- ClcJoin.f
- common.inc

vibul.f 1/12

```
      ⋮
       include 'common.inc'
        dimension histdv(dim_class,dim_nmat), histmax(dim_point)
        dimension iclmax(dim_point), icl10p(dim_point)
        dimension ncls(dim_point,dim_nmat)
        dimension icls(dim_point,dim_class,dim_nmat)
        dimension nbaux(dim_class,dim_nmat)
      ⋮
        dimension khistcou(dim_nmat)
      ⋮
        real*8 nbaux, histdv, qsto, qsto2, histmax
        integer icl10m, iclmax
        real*8 tps, temps, precip, q1, q8, qbalai, prod, prod2, nmtot
        integer icl10p
        real*8 ecrit
      ⋮
       real * 8 rnbmax(dim_nmat)
        integer ierr,iboit
        real * 8 gmoltotsn,gmolin,gmolout
        character * 14 fname(5)
        data fname /'MatNo1hist.txt','MatNo2hist.txt','MatNo3hist.txt',
       1            'MatNo4hist.txt','MatNo5hist.txt'/
        real * 8 gmoltots, gmolnds
        character * 12 gmolnum(5)
        character * 11 gmolndn(5)
        data gmolnum /'gmoltot1.txt','gmoltot2.txt','gmoltot3.txt',
       1              'gmoltot4.txt','gmoltot5.txt'/
        data gmolndn /'gmolnd1.txt','gmolnd2.txt','gmolnd3.txt',
       1              'gmolnd4.txt','gmolnd5.txt'/
        character * 12 nmname(5)
        character * 12 rcname(5)
        data nmname /'MatNo1nb.txt','MatNo2nb.txt','MatNo3nb.txt',
       1            'MatNo4nb.txt','MatNo5nb.txt'/
        data rcname /'MatNo1rc.txt','MatNo2rc.txt','MatNo3rc.txt',
       1            'MatNo4rc.txt','MatNo5rc.txt'/
      ⋮
```

vibul.f 2/12

```
   ⋮
      integer itr
      itr = 0
      DebugFlg = 0
        open(50,file ='nmcdp1.txt',status ='unknown')
        close(50,status = 'delete')
        open(51,file = 'Debug.txt',status = 'unknown')
        close(51,status = 'delete')
        open(52,file ='nmcdp2.txt',status ='unknown')
        close(52,status = 'delete')
        open(53,file ='nmcdp3.txt',status ='unknown')
        close(53,status = 'delete')
        open(54,file ='anmcdp1.txt',status ='unknown')
        close(54,status = 'delete')
        open(55,file ='anmcdp2.txt',status ='unknown')
        close(55,status = 'delete')
        open(56,file ='qaraux.txt',status ='unknown')
        close(56,status = 'delete')
        open(57,file ='qarchi_41.txt',status ='unknown')
        close(57,status = 'delete')
        open(58,file ='dev41.txt',status ='unknown')
        close(58,status = 'delete')
        open(59,file ='x3.txt',status ='unknown')
        close(59,status = 'delete')
        open(60,file ='Debug13.txt',status ='unknown')
        close(60,status = 'delete')
c
      open(92,file ='iter.txt',status ='unknown')

      pi = 4.d0*datan(1.d0)
      call TheNumberRead
      call DataRead(precip, prod, prod2, qbalai)
      open(93,file ='mol1.txt',status ='unknown')
      open(94,file ='mol2.txt',status ='unknown')
      open(95,file ='mol3.txt',status ='unknown')
      write(93,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      write(94,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      write(95,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      open(83,file ='mol1_2.txt',status ='unknown')
      open(84,file ='mol2_2.txt',status ='unknown')
      open(85,file ='mol3_2.txt',status ='unknown')
```

| vibul.f | 3/12 |
|---|---|

```
      write(83,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      write(84,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      write(85,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
c
      open(96,file='mol1_s.txt',status ='unknown')
      open(97,file='mol2_s.txt',status ='unknown')
      open(98,file='mol1_o.txt',status ='unknown')
      open(99,file='mol2_o.txt',status ='unknown')
      write(96,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      write(97,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      write(98,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      write(99,5002) (ipt,ipt=1,npt),(ipt,ipt=1,npt)
      open(901,file='void1_8.txt',status = 'unknown')
      open(902,file='void2_8.txt',status = 'unknown')
      open(903,file='void3_8.txt',status = 'unknown')
         open(200,file='GasLayer.txt',status ='unknown')
      write(200,*) '          time','  gas layer height','     gas volume'
      open(777,file='bubrel.txt',status = 'unknown')
         open(778,file='nb.txt',status = 'unknown')
         do ipt = 1, npt
           do imat = 1, nmat
             do icl = 1, ncl(imat)
              dnm(ipt,icl,imat) = 0.0d0
         end do
         end do
         end do
 5002 format('   time   ',2(<npt>('   No(',i2,')   ')))
        do imat = 1, nmat
          open(650+imat,file=gmolnum(imat),status='unknown',
     1         form='formatted')
          write(650+imat,5001) (iboit,iboit=1,nboit)
          open(600+imat,file=gmolndn(imat),status='unknown',
     1         form='formatted')
          write(600+imat,5001) (iboit,iboit=1,nboit)
          write(100+imat,*) ' time  系内の全モル数'
     1                     ,' 系外からの入力  系外への放出  '
        end do
 5001 format('      time     ',<nboit>('   Plenum(',i2,') '),' Total ')
   ⋮
```

| vibul.f | 4/12 |
|---|---|

```
    ⋮
      open(51,file=fname(1),status='unknown',form='formatted')
      if (nmat.ge.2) then
        do imat = 2, nmat
          open(50+imat,file=fname(imat),status='unknown',
     1         form='formatted')
        end do
      end if
      do imat = 1, nmat
        open(80+imat,file=nmname(imat),status='unknown',
     1       form='formatted')
        open(70+imat,file=rcname(imat),status='unknown',
     1       form='formatted')
      end do
c
     open(56,file='ar41nmnd.txt',status='unknown',form='formatted')
      open(57,file='ar41hist.txt',status='unknown',form='formatted')
      kresult = 56
    ⋮
      if(DebugFlg .eq. 2)then
        open(777,file = 'Debug.txt', status = 'unKnown')
        write(777,3000) prod
        write(777,3010) qbalai
        close(777)
      endif
    ⋮
      do imat = 1, nmat
        call nmclas (ircl,imat)
      end do
    ⋮
      tps = 0.D0
      kpertr = 1
      it1 = 0
      call temperature (itemperature, tps, kpertr, it1)
     ⋮
```

vibul.f 5/12

```
   ⋮
      do imat = 1, nmat
        call jclbris (ijclbris,imat)
        call jclboit (ijclboit,imat,kpertr,tps)
      end do
c
          flagconv = 0
   ⋮
          if (kpertr_lu.eq.2.and.k_per_tr1.eq.2) then
            it1 = 1
            tps = 0.d0
          else
            it1 = itrep + 1
            itr = idint((tfin(kpertr)-tps)/dt1(kpertr))
            nt1 = it1 + itr
          endif
   ⋮
        if (itr.eq.0) nt1 = nt(kpertr)
   ⋮
        if(DebugFlg .eq. 1)then
          open(777,file ='Debug.txt',access ='append',status ='unknown')
          write(777,*)' dt =',dt
          write(777,*) ' it1=',it1,' nt1 =',nt1
          write(777,*) ' pasexpl =',pasexpl
          write(777,*) ' pasimp =',pasimp
          write(777,*)
          close(777)
        endif
   ⋮
            if (kpertr.eq.2) then
              call setflow(tps)
              call temperature (itemperature, tps, kpertr, it1)
              call setpres(tps)
              call jclboit (ijclboit,imat,kpertr,tps)
            end if
   ⋮
```

vibul.f 6/12

```
   ⋮
          do imat = 1, nmat
            call physpt (iphyspt,kpertr,imat)
            call physboit (iphysboit,kpertr,imat)
          end do
   ⋮
          do imat = 1, nmat
            call clsort (iiclsort,kpertr,imat)
          end do
   ⋮
          if (kpertr.eq.1.and.it.eq.1) then
            do imat = 1, nmat
              call iniperm (iiniperm,imat)
            end do
            call ini41
c
            do 210 ipt=1,npt
              do imat = 1, nmat
                call imphist (ipt, iimphist, imat)
              end do
210           continue
c
            do imat = 1, nmat
              call imptaugaz (iimptaugaz,imat)
            end do
            call imptau41 (iimptaugaz)
          endif
c
        endif
   ⋮
        if (it.eq.1) then
          do imat = 1, nmat
            call initbilan (iinitbilan,imat)
          end do
          call initbilan41 (iinitbilan)
        endif
   ⋮
```

vibul.f 7/12

```
      do 400 intLoop = 1,TotalNum
        do 401 intLoop2 = 1,DamNum
          if(ClctrnD(intLoop2) .eq. intLoop)then
            do imat = 1, nmat
            if(BublFlgD(intLoop2,imat) .ne. 0) then
              call devers (histdv, devInNo(intLoop2), devOutNo(intLoop2),
     *                     idevers, nbaux, taudvD, rprobD(intLoop2,imat),
     *                     imat, intLoop2, BsBblD(intLoop2,imat),
     *                     BublFlgD(intLoop2,imat),
     1                     BTabNoD(intLoop2,imat),tps,kpertr)
c
            else
              call devprocess(devInNo(intLoop2),devOutNo(intLoop2),
     1                        idevers,imat)
            endif
            end do

            if(BublFlgD(intLoop2,1) .ne. 0) then
              call dev41 (nbaux, histdv,devInNo(intLoop2),
     *                    devOutNo(intLoop2), idev_41)
            end if
            OutNoDmy = devOutNo(intLoop2)
            call decroi(idecroi,OutNoDmy)
            do imat = 1, nmat
              call imphist (devOutNo(intLoop2), iimphist, imat)
            end do
            goto 400
c
          endif
c
  401   continue
            nb_old(:,:,:) = nb(:,:,:)
            nd_old(:,:) = nd(:,:)

        do 402 intLoop2 = 1,nboit
          if(ClctrnP(intLoop2) .eq. intLoop)then
            PleCunt = PleCunt + 1
            do imat = 1, nmat
              if(BublFlgP(intLoop2,imat) .ne. 0) then
                call bubblegnrt (histdv, PleInNo(intLoop2),
```

vibul.f 8/12

```
     *                          PleOutNo(intLoop2), idevers, nbaux,
     *                          taudvP, rprobP(intLoop2,imat), 2, imat,
     *                          intLoop2, BublFlgP(intLoop2,imat),
     *                          BsBblP(intLoop2,imat),
     1                          BTabNoP(intLoop2,imat),tps,kpertr)
               call echbul (intLoop2, iechbul, imat, tps, nbaux)
               if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1) then
                 OutNoDmy = PleOutNo(intLoop2)
               end if
               call imphist (PleOutNo(intLoop2), iimphist, imat)
               if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1)
     1            call ech41 (iech_41, intLoop2)
c
             else
               call echbul (intLoop2,iechbul, imat, tps, nbaux)
               call imphist (PleOutNo(intLoop2), iimphist, imat)
               if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1)
     1           call ech41 (iech_41, intLoop2)
c

             end if
           end do
           if(PleKind(intLoop2) .eq. 4 .and. kpertr.eq.1)then
             OutNo = PleOutNo(intLoop2)
             nd_41(OutNo) = nd_41(OutNo) + pcoeur*prod/qvnan(OutNo)
     *                + pcoeur*prod2*nd(OutNo,1)*dt
             do 415 icl=1,ncl(1)
               if (nb(OutNo,icl,1).ne.0.d0) then
                 nm_41(OutNo,icl) = nm_41(OutNo,icl)
     *                    + pcoeur*prod2*nm(OutNo,icl,1)*dt
               endif
 415         continue
           endif
c
           goto 400
c
         end if
c
 402   continue
```

| vibul.f | 9/12 |
|---|---|

```
c
        do 403 intLoop2 = 1,nbris
          if(clctrnI(intLoop2) .eq. intLoop)then
c
            ItmCunt = ItmCunt + 1
c
            do imat = 1, nmat
              if(BublFlgI(intLoop2,imat) .ne. 0) then
                call bubblegnrt (histdv, ItmInNo(intLoop2),
     *                           ItmOutNo(intLoop2), idevers, nbaux,
     *                           taudvI, rprobI(intLoop2,imat), 1, imat,
     *                           intLoop2, BublFlgI(intLoop2,imat),
     *                           BsBblI(intLoop2,imat),
     1                           BTabNoI(intLoop2,imat),tps,kpertr)
                call t_p_bris (intLoop2, it_p_bris, kpertr, imat)
                if (imat.eq.1) then
                  OutNoDmy = ItmOutNo(intLoop2)
                end if
                call imphist (OutNoDmy, iimphist, imat)
                if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1)
     1            call t_p_bris41 (it_p_bris_41, intLoop2)
              else
                if (imat.eq.1) OutNo = ItmOutNo(intLoop2)

                call t_p_bris (intLoop2, it_p_bris, kpertr,imat)
                call imphist (OutNo, iimphist, imat)
                if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1)
     1            call t_p_bris41 (it_p_bris_41, intLoop2)
c
              endif
            end do
            if(PrcsFlgI(intLoop2) .eq. 2 .and. kpertr.eq.1)then
   ⋮
              do 405 icl=1,ncl(1)
                if (nb(OutNo,icl,1).ne.0.d0) then
                  nm_41(OutNo,icl) = nm_41(OutNo,icl)
     *                       + pcoeur*prod2*nm(OutNo,icl,1)*dt
                endif
c
  405         continue
c
```

vibul.f 10/12

```
            endif
     ⋮
c
          endif
c
  403   continue
        do 404 intLoop2 = 1,JinNum
          if(ClctrnJ(intLoop2) .eq.intLoop)then
            do imat = 1, nmat
              call ClcJoin(intLoop2,imat)
            end do
    ⋮
c
          endif
    ⋮
  400   continue
    ⋮
          if (m.eq.100) then
            n = n + 1
            if (n.gt.100000) n = 100000
            do 28 ib=1,nboit
    ⋮
28          continue
    ⋮
          if (int(it/pasexpl)*pasexpl.eq.it) then
            do imat = 1, nmat
              call redhist (histmax, icl10m, iclmax, icl10p,
     *                      iredhist,imat,tps)
            end do
            do imat = 1, nmat
              call histcou (tps, khistcou, titre, ihistcou, imat,kpertr)
            end do
          endif
    ⋮
               if (it.eq.nt1) then
```

| vibul.f | 11/12 |
|---|---|

```
            do imat = 1, nmat
              call bilan (ibilan,imat)
            end do
    ⋮
          endif
    ⋮
          if (int(it/pasexpl)*pasexpl.eq.it) then
            do imat = 1, nmat
              call imptaugaz (iimptaugaz,imat)
            end do
            call imptau41 (iimptaugaz)
            do imat = 1, nmat
              call result (iresult,kresult,imat,tps,kpertr)
            end do
          endif
    ⋮
          if (kpertr.eq.1.and.flagconv.eq.0) then
c     write(303,1020) it,nm(2,1)
            do imat = 1, nmat
              call gazsignific (icls, ncls, precip, igazsignific,imat)
            end do
            do imat = 1, nmat
              call test_conv_perm (ncls, icls, flagconv,imat,rnbmax(imat))
            end do
            if (mod(it,100).eq.0.or.it.eq.2) write(92,'(i10,5(1pe12.4))')
     1           it,(rnbmax(imat),imat=1,nmat)
            ierr = 0
            do imat = 1, nmat
              if (rnbmax(imat).gt.epsilon) ierr = 1
            end do
            if ((it-it1).gt.1.and.ierr.eq.0) then
              do imat = 1, nmat
                call redhist (histmax, icl10m, iclmax, icl10p,
     *                        iredhist,imat,tps)
              end do
              do imat = 1, nmat
                call histcou (tps, khistcou, titre, ihistcou, imat,kpertr)
              end do
```

| vibul.f | 12/12 |
|---|---|

```
              if (kelrep.eq.1.or.kelrep.eq.3) then
                write(6,*)' on ecrit sur fichier'
                if (kpertr.eq.1.and.nphase.eq.1) then
                  write(6,*) ' permanent au temps tps=',tps
                else
                  write(6,*) ' transitoire au temps tps=',tps
                endif
                write(6,1002) it,tps
                if (nphase.eq.1)
     1              call reprise_calc (kpertr, tps, 13, itrep)
              end if
              go to 200
            end if
          it_conv = it_conv + 1
         endif
c
         do 120 ipt=1,npt
c
           nm41tot(ipt) = 0.d0
c
           do 130 icl = 1,ncl(1)
             nm41tot(ipt) = nm41tot(ipt) + nm_41(ipt,icl)*nb(ipt,icl,1)
130        continue
120      continue
    ⋮
```

echbul.f 1/15

```
c ----------------------------------------------------------------------
      subroutine echbul(iboit, iechbul, imat, tps, nbaux)
c ----------------------------------------------------------------------
    ⋮
            include 'common.inc'
c
      dimension nmbul(dim_boit,dim_class)
      dimension nbaux(dim_class,dim_nmat)
      real * 8 nbaux
      real*8 qvna1, qvnae1, dsurv, qsurv, qsurve, r1, r2, dk1, qaraux
      real*8 qechaux, qgeaux, qgsaux, tau,tps,qaraux1,nbnm1,nbnm2
      real*8 nd1, nm1, nm2, nmbul, naux, k1, nc, aux, aux2
      real*8 sig1, pi1, rth1, h1, t1, pg, x3, x4, x5
      real*8 dplus,dmoins,nmtot,nbclas,almax,almin,nb_nu,nba,naux1
      real*8 xb1,xb2,xb3
      dimension nb_nu(dim_class),naux1(dim_class)
      real * 8 qgsoraux, qgnuaux
c
      integer iboit, iechbul, ipte1, ipts1, icl, iclm, cl1, cl2, imat
      integer iclboit1, kpertr,intLoop2,inp
c
      real*8 nb_1c,nb_2c,nbbul2
      real*8 aux_1,aux_2
      real*8 qaraux_1,qaraux_2,qechaux_1,qechaux_2
      real*8 qgsaux_1,qgsaux_2,qaraux1_1,qaraux1_2
      real*8 qgeaux_1,qgeaux_2,qgsoraux_1,qgsoraux_2
      real*8 qgnuaux_1,qgnuaux_2
      real*8 nba_1,nba_2
      real*8 nb_in(dim_class)
      real*8 nmol_rls, Vrls, nmol_dssltn, Vdssltn
      real*8 dglyr
    ⋮
      do icl=1,dim_class
        nb_nu(icl)=0.
      end do
      delta_nd=0.
c
      ipte1 = ipteboit(iboit)
      ipts1 = iptsboit(iboit)
      qvna1 = qvnan(ipts1)*qvnaprop
```

| echbul.f | 2/15 |
|---|---|

```
      qsurv = qvna1/vna(iboit)
      qvnae1 = qvnan(ipte1)*qvnaprop
      qsurve = qvnae1/vna(iboit)
      dsurv = d(iboit,imat)/vna(iboit)
c
      do icl = 1,ncl(imat)
        nb_in(icl) = nb_old(ipte1,icl,imat)
      end do
c
c NUCLEATION:
      if(PleKind(iboit) .eq. 5)then
        nde = nd_old(ipte1,imat)
        if(nuclsignal.eq.1 .and. rmax(imat) .ne. 0.0
     1                     .and. rmin(imat) .ne. 0.0) then
c
    ⋮
c
          almax=0.
          almin=0.
          imax(imat)=1
          imin(imat)=ncl(imat)
          do 222 icl=1,dim_class
            nb_nu(icl)=0.
222       continue
          do 205 icl=1,ncl(imat)
            dplus=rcclm(ipts1,icl,imat)+drclm(ipts1,icl,imat)/2.
            if (rmin(imat).lt.dplus) then
              imin(imat)=icl
              almin=(-rmin(imat)+dplus)/drcl(icl,imat)
              goto 216
            endif
205       continue
          write(6,2001)
          write(6,2002) rcclm(ipts1,ncl(imat),imat)
          write(6,2003) rmin(imat),rmax(imat)
 2001     format(' 核生成による最小半径が最大クラスの半径を超えました')
 2002     format(' 最大クラスの半径：',1pe14.6)
 2003     format(' 核生成の最小半径：',1pe14.6,' 最大半径：',1pe14.6)
          imin(imat)=ncl(imat)
216       do 207 icl=ncl(imat),1,-1
            dmoins=rcclm(ipts1,icl,imat)-drclm(ipts1,icl,imat)/2.
```

| echbul.f | 3/15 |
|---|---|

```
            if (rmax(imat).gt.dmoins) then
              imax(imat)=icl
              almax=(rmax(imat)-dmoins)/drcl(icl,imat)
              goto 208
            endif
207       continue
          write(6,3001)
          write(6,3002) rcclm(ipts1,1,imat)
          write(6,3003) rmin(imat),rmax(imat)
 3001     format(' 核生成による最大半径が最小クラスの半径を下回りました')
 3002     format(' 最小クラスの半径：',1pe14.6)
 3003     format(' 核生成最小半径：',1pe14.6,' 最大半径：',1pe14.6)
          imax(imat)=1
208       if (imax(imat).eq.imin(imat)) then
            almin=1.
            nmtot=almin*nm(ipts1,imin(imat),imat)
          else
            nmtot=almin*nm(ipts1,imin(imat),imat)
     1           +almax*nm(ipts1,imax(imat),imat)
            if ((imax(imat)-imin(imat)).gt.1) then
              do 209 icl=imin(imat)+1,imax(imat)-1
                nmtot=nmtot+nm(ipts1,icl,imat)
209           continue
            endif
          endif
          do 221 icl=1,ncl(imat)
            nmolclas(icl,imat)=0.
221       continue
          nbclas=delta_nd/nmtot
          sum_mol(imat)=0.
          if (imin(imat).eq.imax(imat)) then
            nb_nu(imin(imat))=(almin)*nbclas
            nmolclas(imin(imat),imat)
     1             =nm(ipts1,imin(imat),imat)*nb_nu(imin(imat))
            sum_mol(imat)=nmolclas(imin(imat),imat)
          endif
          if ((imax(imat)-imin(imat)).eq.1) then
            nb_nu(imin(imat))=almin*nbclas
            nb_nu(imax(imat))=almax*nbclas
            nmolclas(imin(imat),imat)
     1             =nm(ipts1,imin(imat),imat)*nb_nu(imin(imat))
            nmolclas(imax(imat),imat)
```

| echbul.f | 4/15 |
|---|---|

```
            if (rmax(imat).gt.dmoins) then
              imax(imat)=icl
              almax=(rmax(imat)-dmoins)/drcl(icl,imat)
              goto 208
            endif
207       continue
          write(6,3001)
          write(6,3002) rcclm(ipts1,1,imat)
          write(6,3003) rmin(imat),rmax(imat)
 3001     format(' 核生成による最大半径が最小クラスの半径を下回りました')
 3002     format(' 最小クラスの半径：',1pe14.6)
 3003     format(' 核生成最小半径：',1pe14.6,' 最大半径：',1pe14.6)
          imax(imat)=1
208       if (imax(imat).eq.imin(imat)) then
            almin=1.
            nmtot=almin*nm(ipts1,imin(imat),imat)
          else
            nmtot=almin*nm(ipts1,imin(imat),imat)
     1           +almax*nm(ipts1,imax(imat),imat)
            if ((imax(imat)-imin(imat)).gt.1) then
              do 209 icl=imin(imat)+1,imax(imat)-1
                nmtot=nmtot+nm(ipts1,icl,imat)
209           continue
            endif
          endif
          do 221 icl=1,ncl(imat)
            nmolclas(icl,imat)=0.
221       continue
          nbclas=delta_nd/nmtot
          sum_mol(imat)=0.
          if (imin(imat).eq.imax(imat)) then
            nb_nu(imin(imat))=(almin)*nbclas
            nmolclas(imin(imat),imat)
     1             =nm(ipts1,imin(imat),imat)*nb_nu(imin(imat))
            sum_mol(imat)=nmolclas(imin(imat),imat)
          endif
          if ((imax(imat)-imin(imat)).eq.1) then
            nb_nu(imin(imat))=almin*nbclas
            nb_nu(imax(imat))=almax*nbclas
            nmolclas(imin(imat),imat)
     1             =nm(ipts1,imin(imat),imat)*nb_nu(imin(imat))
            nmolclas(imax(imat),imat)
```

| echbul.f | 5/15 |
|---|---|

```
     1             =nm(ipts1,imax(imat),imat)*nb_nu(imax(imat))
            sum_mol(imat)
     1             =nmolclas(imin(imat),imat)+nmolclas(imax(imat),imat)
          endif
          if ((imax(imat)-imin(imat)).gt.1) then
            nb_nu(imin(imat))=almin*nbclas
            nb_nu(imax(imat))=almax*nbclas
            nmolclas(imin(imat),imat)
     1             =nm(ipts1,imin(imat),imat)*nb_nu(imin(imat))
            nmolclas(imax(imat),imat)
     1             =nm(ipts1,imax(imat),imat)*nb_nu(imax(imat))
            sum_mol(imat)
     1             =nmolclas(imin(imat),imat)+nmolclas(imax(imat),imat)
            do 210 icl=imin(imat)+1,imax(imat)-1
              nb_nu(icl)=nbclas
              nmolclas(icl,imat)=nm(ipts1,icl,imat)*nb_nu(icl)
              sum_mol(imat)=sum_mol(imat)+nmolclas(icl,imat)
210           continue
          endif
2000      format(i6,d30.20,d30.20,d30.20,d30.20,d30.20)
        endif
      endif
c
      if(PleKind(iboit) .eq. 5 .and. nuclsignal.eq.1 .and.
     1    rmax(imat) .ne. 0.0 .and. rmin(imat) .ne. 0.0) then
        do icl=1,ncl(imat)
           nb_old(ipte1,icl,imat)= nb_old(ipte1,icl,imat)
     1                             + nb_nu(icl)/qvnae1
           nb_2(ipte1,icl,imat)= nb_2(ipte1,icl,imat) + nb_nu(icl)/qvnae1
        end do
        nd_old(ipte1,imat)=nd_old(ipte1,imat)-delta_nd/qvnae1
      endif
c
        if(iflgoplp.eq.1.and.iboit.eq.1) then
          do icl=1,ncl(imat)
            nb_old(ipte1,icl,imat) = nbinp(icl,imat)
     1                             + nbaux(icl,imat) * (qvna1/qvnae1)
            nb_1(ipte1,icl,imat) = nbaux(icl,imat) * (qvna1/qvnae1)
            nb_2(ipte1,icl,imat) = nb_nu(icl)/qvnae1
          end do
           else
```

| echbul.f | 6/15 |
|---|---|

```
          do icl=1,ncl(imat)
            nb_old(ipte1,icl,imat) = nb_old(ipte1,icl,imat)
     1                               + nbaux(icl,imat) * (qvna1/qvnae1)
            nb_1(ipte1,icl,imat) = nb_1(ipte1,icl,imat) + nbaux(icl,imat)
     *                            * (qvna1/qvnae1)
          end do
           end if
c
       do 200 icl=1,ncl(imat)
            nc = - alpha(iboit,icl,imat)*nb_old(ipts1,icl,imat)
     1           - qsurv*nb_old(ipts1,icl,imat)
     2           + qsurve*nb_old(ipte1,icl,imat)
            nbbul(iboit,icl,imat)=nc*dt+nb_old(ipts1,icl,imat)
            nb_1c= - alpha(iboit,icl,imat)*nb_1(ipts1,icl,imat)
     1           - qsurv*nb_1(ipts1,icl,imat)
     2           + qsurve*nb_1(ipte1,icl,imat)
            nb_2c= - alpha(iboit,icl,imat)*nb_2(ipts1,icl,imat)
     1           - qsurv*nb_2(ipts1,icl,imat)
     2           + qsurve*nb_2(ipte1,icl,imat)
          nbbul_1(iboit,icl,imat)=nb_1c*dt+nb_1(ipts1,icl,imat)
          nbbul_2(iboit,icl,imat)=nb_2c*dt+nb_2(ipts1,icl,imat)
          nbbul2=nbbul_1(iboit,icl,imat)
     1         +nbbul_2(iboit,icl,imat)
            if  (nbbul(iboit,icl,imat).lt.0.0)then
                nbbul(iboit,icl,imat)=0.0
            endif
200    continue

       pi1 = 4.*pi
       h1 = h(ipts1,imat)
       t1 = t(ipts1)
c
       do 201 icl=1,ncl(imat)
          r1  = rcclm(ipts1,icl,imat)
          r2  = r1*r1
          k1  = k(iboit,icl,imat)
          pg  = p(ipts1) + 2.*sig(ipts1)/r1 - pvap(ipts1)
          naux1(icl) =- k1*pi1*r2*(h1*pg - nd_old(ipts1,imat))
              nmbul(iboit,icl)= naux1(icl)*dt+nm(ipts1,icl,imat)
              if  (nmbul(iboit,icl).lt.0.0)then
```

| echbul.f | 7/15 |
|---|---|

```
               nmbul(iboit,icl)=0.0
              endif
          naux1(icl) = (nmbul(iboit,icl)-nm(ipts1,icl,imat))/dt
          dnm(ipts1,icl,imat) = nbbul(iboit,icl,imat)
         1                           *naux1(icl)*vna(iboit)
201    continue
c
       if(iflgoplp.eq.1.and.iboit.eq.1) then
         x3 = qsurve* ndinp(imat) - qsurv* nd_old(ipts1,imat)
          else
         x3 = qsurve* nd_old(ipte1,imat) - qsurv* nd_old(ipts1,imat)
          end if
       if(iflgbubacc(iboit).eq.1) then
            if(vglyr.gt.0.0d0) then
           if ((nd_old(ipts1,imat)-h1*plib_ihx).lt.0.d0) then
                nmol_dssltn = coefqd(iboit,imat) * dsurv
         1                      * (h1 * plib_ihx - nd_old(ipts1,imat)) * dt
             vdssltn = nmol_dssltn * rth * t(ipts1)/plib_ihx
              if(vglyr.le.vdssltn) then
                vdssltn = vglyr
                nmol_dssltn = plib_ihx * vdssltn/(rth * t(ipts1))
                 end if
                      x3 = x3 + nmol_dssltn/dt
              else
             nmol_dssltn = 0.0d0
                   end if
            else
              nmol_dssltn = 0.0d0
            end if
       else
         if ((nd_old(ipts1,imat)-h1*plib(PressNo(iptsboit(iboit))))
      1     .lt.0.d0) then
           x3 =x3- coefqd(iboit,imat)*dsurv*(nd_old(ipts1,imat)
      1       -h1*plib(PressNo(ipts1)))
           endif
       end if
       x4 = 0.0
       do 202 icl=1,ncl(imat)
          x4 = x4- nbbul(iboit,icl,imat)*naux1(icl)
202    continue
       nd1 = nd_old(ipts1,imat)+(x3+x4)*dt
```

echbul.f 8/15

```
      do 213 icl=1,ncl(imat)
        nb(ipts1,icl,imat) = 0.d0
        nb_1(ipts1,icl,imat)=0.d0
        nb_2(ipts1,icl,imat)=0.d0
213   continue
c
      x5=0.
      do 203 icl=1,ncl(imat)
        if (nbbul(iboit,icl,imat).ne.0.d0) then
           if (nmbul(iboit,icl).lt.nm(ipts1,1,imat)) then
c
              ksort(iboit,icl,imat) = 1
              x5 = x5 + nbbul(iboit,icl,imat)*nmbul(iboit,icl)
c
           elseif (nmbul(iboit,icl).ge.nm(ipts1,ncl(imat),imat)) then
              ksort(iboit,icl,imat) = 3
              nb(ipts1,ncl(imat),imat) = nb(ipts1,ncl(imat),imat)
     1                             + nbbul(iboit,icl,imat)
     2                 *nmbul(iboit,icl) / nm(ipts1,ncl(imat),imat)

           else
              ksort(iboit,icl,imat) = 2
              do 204 iclm=1,ncl(imat)
                if (nmbul(iboit,icl).lt.nm(ipts1,iclm,imat)) then
                    cl1 = iclm-1
                    cl2 = iclm
                    nm1 = nm(ipts1,cl1,imat)
                    nm2 = nm(ipts1,cl2,imat)
                    if ((nm1-nm2).eq.0.d0) then
                      aux = 0.d0
            aux_1=0.d0
            aux_2=0.d0
                    else
                      aux = nbbul(iboit,icl,imat)/(nm1-nm2)
            aux_1=nbbul_1(iboit,icl,imat)/(nm1-nm2)
            aux_2=nbbul_2(iboit,icl,imat)/(nm1-nm2)
                    endif
                    nb(ipts1,cl1,imat) = nb(ipts1,cl1,imat)
     1                           + aux*(nmbul(iboit,icl) - nm2)
                    nb(ipts1,cl2,imat) = nb(ipts1,cl2,imat)
     1                           + aux*(nm1 - nmbul(iboit,icl))
          nb_1(ipts1,cl1,imat)=nb_1(ipts1,cl1,imat)
```

| echbul.f | 9/15 |
|---|---|

```
     *                          + aux_1*(nmbul(iboit,icl)-nm2)
          nb_2(ipts1,cl1,imat)=nb_2(ipts1,cl1,imat)
     *                          + aux_2*(nmbul(iboit,icl)-nm2)
          nb_1(ipts1,cl2,imat)=nb_1(ipts1,cl2,imat)
     *                          + aux_1*(nm1-nmbul(iboit,icl))
          nb_2(ipts1,cl2,imat)=nb_2(ipts1,cl2,imat)
     *                          + aux_2*(nm1-nmbul(iboit,icl))
                    goto 33
                endif
204           continue
            endif
          endif
33        continue
203     continue

       nd1 = nd1 + x5
       nd(ipts1,imat) = nd1
c
       do 500 icl = 1,ncl(imat)
          nbint3(iboit,icl,imat) = nb(ipts1,icl,imat)
500    continue
c
    ⋮
c --------
    ⋮
c
       iclboit1 = iclboit(iboit,imat)
       if (iclboit1.ne.ncl(imat)) then
         nba = 0.d0
         nba_1 = 0.0d0
         nba_2 = 0.0d0
         do 212 icl=iclboit1+1,ncl(imat)
           if (nb(ipts1,icl,imat).ne.0.d0) then
             nba = nba + nb(ipts1,icl,imat)*nm(ipts1,icl,imat)
             nb(ipts1,icl,imat) = 0.d0
           endif
           if (nb_1(ipts1,icl,imat).ne.0.d0) then
             nba_1 = nba_1 + nb_1(ipts1,icl,imat)*nm(ipts1,icl,imat)
```

| echbul.f | 10/15 |
|---|---|

```
            nb_1(ipts1,icl,imat) = 0.d0
          endif
          if (nb_2(ipts1,icl,imat).ne.0.d0) then
            nba_2 = nba_2 + nb_2(ipts1,icl,imat)*nm(ipts1,icl,imat)
            nb_2(ipts1,icl,imat) = 0.d0
          endif

212     continue
    ⋮
        nb(ipts1,iclboit1,imat) = nb(ipts1,iclboit1,imat)
     1                    + nba/nm(ipts1,iclboit1,imat)
        nb_1(ipts1,iclboit1,imat) = nb_1(ipts1,iclboit1,imat)
     *                    + nba_1/nm(ipts1,iclboit1,imat)
        nb_2(ipts1,iclboit1,imat) = nb_2(ipts1,iclboit1,imat)
     *                    + nba_2/nm(ipts1,iclboit1,imat)
      endif

         do icl = 1,ncl(imat)
         nb_tem(ipts1,icl,imat) = nb(ipts1,icl,imat)
         end do
      if(iflgbubrel(iboit).eq.1) then
           do icl = 1, ncl(imat)
          if(rcclm(ipts1,icl,imat).gt.rrel(iboit)) then
            nb(ipts1,icl,imat) = 0.0d0
               nb_1(ipts1,icl,imat) = 0.0d0
               nb_2(ipts1,icl,imat) = 0.0d0
             end if
        end do
      end if
      nmol_rls = 0.0d0
      Vrls = 0.0d0
      dglyr = 0.0d0
      if(iflgbubacc(iboit).eq.1) then
        do icl = 1, ncl(imat)
          nmol_rls = nmol_rls + alpha(iboit,icl,imat) * nb_old(ipts1,icl,imat)
     1               * nm(ipts1,icl,imat) * vna(iboit) * dt
        end do
           vrls = nmol_rls * rth * t(ipts1)/plib_ihx
c
        dglyr = vrls -vdssltn
        if(vglyr + dglyr.ge.0.0d0) then
```

| echbul.f | 11/15 |
|---|---|

```
                    vglyr = vglyr + dglyr
          else
               dglyr = -vglyr
               vglyr = 0.0d0
             end if
          do icl = 1, ncl(imat)
            alpha(iboit,icl,imat) = alpha(iboit,icl,imat)
           1                          * vna(iboit)/(v_ihx - vglyr)
          end do
          vna(iboit) = v_ihx - vglyr
             if(vna(iboit).le.0.0d0) then
               write(*,1022) iboit
               stop
             end if
          hglyr = vglyr/sna(iboit)
          plib_ihx = rona(ipts1)*9.81*(h_ihx + hglyr)
           end if
        if(iboit.eq.2) then
          write(2999,'(1pe18.10,1pe18.10,1pe18.10,1pe18.10)')
           1        nmol_rls, vrls, nmol_dssltn, vdssltn
        end if
c
    ⋮
          qaraux_1=0.d0
          qaraux_2=0.d0
          qechaux_1=0.d0
          qechaux_2=0.d0
          qgsaux_1=0.d0
          qgsaux_2=0.d0
          qaraux1_1=0.d0
          qaraux1_2=0.d0
          qgeaux_1=0.d0
          qgeaux_2=0.d0
          qgsoraux_1=0.d0
          qgsoraux_2=0.d0
          qgnuaux_1=0.d0
          qgnuaux_2=0.d0
```

echbul.f 12/15

```
c
      do 306 icl=1,ncl(imat)
          qaraux = qaraux - alpha(iboit,icl,imat)
     1             * nb(ipts1,icl,imat)*nm(ipts1,icl,imat)
c
          qaraux_1= qaraux_1 - alpha(iboit,icl,imat)*
     *                nb_1(ipts1,icl,imat)*nm(ipts1,icl,imat)
          qaraux_2= qaraux_2 - alpha(iboit,icl,imat)*
     *                nb_2(ipts1,icl,imat)*nm(ipts1,icl,imat)
c
          qechaux = qechaux + nbbul(iboit,icl,imat)*naux1(icl)
          qechaux_1 = qechaux_1 + nbbul_1(iboit,icl,imat)*naux1(icl)
          qechaux_2 = qechaux_2 + nbbul_2(iboit,icl,imat)*naux1(icl)
c
          if (bltrns(icl,iboit,imat).ne.1) then
c
c
            qgsaux = qgsaux + nm(ipts1,icl,imat)*nb(ipts1,icl,imat)
            qgsaux_1 = qgsaux_1 + nm(ipts1,icl,imat)*nb_1(ipts1,icl,imat)
            qgsaux_2 = qgsaux_2 + nm(ipts1,icl,imat)*nb_2(ipts1,icl,imat)
          else
            qaraux1 = qaraux1 - nm(ipts1,icl,imat)*nb(ipts1,icl,imat)
            qaraux1_1 = - qaraux1_1 - nm(ipts1,icl,imat)*nb_1(ipts1,icl,imat)
            qaraux1_2 = - qaraux1_2 - nm(ipts1,icl,imat)*nb_2(ipts1,icl,imat)
          end if
c
      if(iflgoplp.eq.1.and.iboit.eq.1) then
        qgeaux = qgeaux + nm(ipte1,icl,imat)*nbinp(icl,imat)
         else
        qgeaux = qgeaux + nm(ipte1,icl,imat)*nb_in(icl)
      end if
c
          qgeaux_1 = qgeaux_1 + nm(ipte1,icl,imat)*nb_1(ipte1,icl,imat)
          qgeaux_2 = qgeaux_2 + nm(ipte1,icl,imat)*nb_2(ipte1,icl,imat)
c
        qgsoraux = qgsoraux + nm(ipts1,icl,imat)*nbaux(icl,imat)
        qgsoraux_1 = qgsoraux_1 + nm(ipts1,icl,imat)*nbaux(icl,imat)
        qgsoraux_2 = 0.d0
```

| echbul.f | 13/15 |
|---|---|

```
c
        if(PleKind(iboit) .eq. 5 .and. nuclsignal.eq.1 .and.
     1      rmax(imat) .ne. 0.0 .and. rmin(imat) .ne. 0.0) then
          qgnuaux = qgnuaux + nm(ipts1,icl,imat)*nb_nu(icl)
          qgnuaux_1 = 0.d0
          qgnuaux_2 = qgnuaux_2 + nm(ipts1,icl,imat)*nb_nu(icl)
        end if
c
306   continue
c
c-------------------------------------------------------
c
      qarchi(iboit,imat) = qaraux*vna(iboit)
      qarchi_1(iboit,imat) = qaraux_1*vna(iboit)
      qarchi_2(iboit,imat) = qaraux_2*vna(iboit)
c
      qech(iboit,imat) = qechaux*vna(iboit) - x5*qvna1
      qech_1(iboit,imat)   = qechaux_1*vna(iboit) - x5*qvna1
      qech_2(iboit,imat)   = qechaux_2*vna(iboit) - x5*qvna1
c
      qgsor(iboit,imat) = qgsoraux*qvna1
      qgsor_1(iboit,imat) = qgsoraux_1*qvna1
      qgsor_2(iboit,imat) = qgsoraux_2*qvna1
c
      qgnu(iboit,imat) = qgnuaux
      qgnu_1(iboit,imat) = qgnuaux_1
      qgnu_2(iboit,imat) = qgnuaux_2
c
      qge(iboit,imat) = qgeaux*qvnae1
      qge_2(iboit,imat)    = qgeaux_2*qvnae1 - qgnuaux
c
      qgs(iboit,imat) = qgsaux*qvna1
      qgs_1(iboit,imat)    = qgsaux_1*qvna1
      qgs_2(iboit,imat)    = qgsaux_2*qvna1
```

echbul.f 14/15

```
      if(iflgoplp.eq.1.and.iboit.eq.1) then
        qnde(iboit,imat) = ndinp(imat)*qvnae1 + qgnuaux
      else
        qnde(iboit,imat) = nd_old(ipte1,imat)*qvnae1 + qgnuaux
      end if
      qnds(iboit,imat) = nd(ipts1,imat)*qvna1
      gmoltot(iboit,imat) = (qgsaux+qnds(iboit,imat)/qvna1)*vna(iboit)
      gmolnd(iboit,imat) = qnds(iboit,imat)/qvna1*vna(iboit)
      if(iflgbubacc(iboit).eq.1) then
                     qd(iboit,imat) = nmol_dssltn
      else
        if ((nd_old(ipts1,imat) - h1*plib(PressNo(iptsboit(iboit))))
     1     .lt.0.d0) then
          qd(iboit,imat) = -coefqd(iboit,imat)* d(iboit,imat)*
     1                    (nd_old(ipts1,imat)-
     2                     h1*plib(PressNo(iptsboit(iboit))))
        else
          qd(iboit,imat)=0.0
        endif
      end if
c ------------------------------ Formats --------------------------------
c -----------------------------------------------------------------------
c
1000  format(' aux   =',e12.5,' and   =',d15.8,' iboit=',i3)
1001  format(' aux   =',e12.5,' arccl    =',d15.8,' iboit=',i3,
     *       ' icl   =',i3 ,  ' rccl  =',d15.8)
1002  format(' qarchi=',d15.8,' qd =',d15.8,' qech=',d15.8)
1003  format(' qge   =',d15.8,' qgs=',d15.8)
1004  format(' sp ech40',/,' --------')
1005  format(' fin sp ech40')
1006  format(' rth   =',d15.8,' pi1   =',d15.8/
     *       ' nd1   =',d15.8,' h1    =',d15.8/
     *       ' t1    =',d15.8,' p(ipts1)    =',d15.8/
     *       ' sig1  =',d15.8,' rth1  =',d15.8/
     *       ' x2    =',d15.8,' x3    =',d15.8/
     *       ' x4    =',d15.8,' x8    =',d15.8)
1007  format(' sx11  =',d15.8,' sx12  =',d15.8)
1008  format(' ipts1 =',i3,    ' nd    =',d15.8)
1009  format(' ipte1 =',i3,    ' ipts1 =',i3,' qvnae1 =',d15.8,
     1       ' qvna1 =',d15.8,' qsurve =',d15.8,' qsurv =',d15.8,
     2       ' dsurv ='d15.8)
1010  format(5(i3,d15.8,1x))
900   format(' r1    =',d15.8,' r2    =',d15.8,' k1    =',d15.8)
```

| echbul.f | 15/15 |
|---|---|

```
901   format(' dk1   =',d15.8,' pg    =',d15.8,' naux  =',d15.8)
902   format(' x1    =',d15.8,' x5    =',d15.8,' x6    =',d15.8)
903   format(' x7    =',d15.8,' x9    =',d15.8)
904   format(' aux   =',d15.8,' x11   =',d15.8,' x12   =',d15.8)
905   format(' aux   =',d15.8,' x13   =',d15.8,' x14   =',d15.8)
1020  format(i10,i10,1(d30.20))
1021  format(i10,i10,1(d30.20))
c
1022  format(i3,'番目のプレナム内冷却材体積が 0 以下になりました。')
      return
c
      end
```

nucleation.f 1/12

```
c ----------------------------------------------------------------------
      subroutine nucleation(iboit,kpertr,imat)
c ----------------------------------------------------------------------

    ⋮

c
      include 'common.inc'
c
      integer ipte,ipts,iboit,i,j,kpertr,nt1,imat

    ⋮

      dimension Vflist(2),Vlist(2),Relist(2),Reblist(2)
      real * 8 Vflist,Vlist,Relist,Reblist
      real * 8 ramda, framda, framdad, errrmd
      integer inew
      real * 8 fr,frd,frfd,frff,frfs,errfr
      real * 8 Rtemp
      real*8 qvnan2,nde2
      real * 8 p_loss
      real * 8 frfd1,frff1,frfd2,frff2,frfdm,frffm,
     *          xmid
c++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
      DIMENSION XKP(3),CP(3),ROH(2),SIGM(2),PL(2),CI(2)
      REAL*8 CF,TAUW,UAST
      REAL*8 XKP,CP,ROH,SIGM,PL,CI
      REAL*8 CB,PHI,BETA,TPK,DIF,VISC
      REAL*8 X1,X2,XP1,XP2,UP1,UP2,UF1,UF2,REB1,REB2,GS1,GS2,
     1         GSR1,GSR2,FR101,FR102,FR201,FR202,FR301,FR302,
     2         FSL1,FSL2,FS,FDUX,FR1,FR2,RTBIS,DX,
     3         XM,XPM,UPM,UFM,REBM,GSM,GSRM,FR1M,FR2M,FR3M,FSLM,FRM
      REAL*8 XN,FQ101,FQ102,FQ201,FQ202,FQS1,FQS2,FB,
     1         FQ1M,FQ2M,FQSM
      REAL*8 RE1,RE2,SC,SH1,SH2,PE1,PE2,AUX1Z2,AUX2Z2,
     1         PE01,PE02,SH01,SH02,BETA01,BETA02,PE0M,SH0M,BETA0M,
     2         FDUX1,FDUX2,FDUXM
c++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
```

| nucleation.f | 2/12 |
|---|---|

```
c
    ⋮
      ipte=ipteboit(iboit)
      ipts=iptsboit(iboit)
c
    ⋮
      L=HTelev(iboit)
      rmax(imat)=0.
      rmin(imat)=0.
c
      p_loss=p(ipte)+(rona(ipte)+rona(ipts))/2*g*L-p(ipts)
    ⋮
      if(nde .eq. 0)then
        goto 115
c
      endif
c
      do 200 i=1,100
    ⋮
        P2=p(ipte)+(rona(ipte)+(rona(ipte)*Lsat+rona(ipts)*(L-Lsat))/L)
     1     /2.0*g*(L-Lsat)-p_loss*(L-Lsat)/L
        qvnan2=(qvnan(ipte)*Lsat+qvnan(ipts)*(L-Lsat))/L
        nde2=(qvnan(ipte)/qvnan2)*nde
c
        T2=-csolu1(imat)/(log10(amolna*nde/(rona(ipte)
     1     *P2*1.d-5))+csolu0(imat))
    ⋮
200   continue
201   continue
c
    ⋮
c
      tes=T2in(iboit)+273.15
      tss=tes + (t(ipte)-t(ipts))
c
    ⋮
```

| nucleation.f | 3/12 |
|---|---|

```
    ⋮
c
      hmax=((rona(ipte)*Lsat+rona(ipts)*(L-Lsat))/L)/amolna*
     *    1.d-5*10**(-csolu0(imat)-csolu1(imat)/Tpsat)
      hmin=rona(ipts)/amolna*1.d-5*10**(-csolu0(imat)
     1    -csolu1(imat)/Tps)
      hs=rona(ipts)/amolna*1.d-5*10**(-csolu0(imat)
     1  -csolu1(imat)/t(ipts))
      ps=p(ipts)
c
      ndsat=hs*ps
c
      delta_nd=nde*qvnan(ipte)-ndsat*qvnan(ipts)
c
      delta_nd = delta_nd*nurate(iboit)
c
      xmax=nde/hmax
      xmin=ndsat/hmin
c
    ⋮
c
      if (Rsmax.lt.Rsmin) then
        Rtemp = Rsmin
        Rsmin = Rsmax
    ⋮
        Rsmax = Rtemp
      end if
c
    ⋮
c
      if (Rsmin.lt.0.d0.or.Rsmax.lt.0.d0) then
        nuclsignal=0
        go to 115
      end if
      R1=Rsmax*1.d6
      R2=Rsmin*1.d6
```

nucleation.f 4/12

```
c
    ⋮
c
      qvave = 0.5d0*(qvnan(ipts)+qvnan(ipte))
      U = qvave/A1Na(iboit)
      Dh = Dh1Na(iboit)
c
    ⋮
c
      z(1,1)=1.1781
      z(2,1)=0.64
      z(3,1)=1.32
      z(4,1)=0.379
      z(5,1)=0.
      z(6,1)=5.
c
      z(1,2)=7.0717
      z(2,2)=0.0064
      z(3,2)=1.0032
      z(4,2)=0.498
      z(5,2)=5.
      z(6,2)=30.
c
      z(1,3)=67.077
      z(2,3)=-0.4952
      z(3,3)=0.7524
      z(4,3)=0.665
      z(5,3)=30.
      z(6,3)=1.d90
c
      do 202 i=1,2
c
    ⋮
c
```

| nucleation.f | 5/12 |
|---|---|

```
c
    ⋮
c
        ramda = A*Re**B
        do inew = 1, 100
          framda = 2.d0*log10(Re*dsqrt(ramda))-1.d0/dsqrt(ramda)-0.8d0
          errrmd = dabs(framda/0.8d0)
          framdad = (1.d0/log(10.d0)+0.5d0/dsqrt(ramda))/ramda
          ramda = ramda - framda/framdad
          if (errrmd.lt.1.d-5) exit
        end do
c
        Vf=dsqrt(ramda/8.d0)*U
c
        do 203 j=1,3

C++++++++++++
      XKP(1) = 0.25D0*DLOG(5.D0)
      XKP(2) = 0.2D0
      XKP(3) = 0.4D0
      CP(1)  = 1.0D0
      CP(2)  =-3.05D0
      CP(3)  = 5.5D0
      ROH(1) = (rona(ipte)*Lsat+rona(ipts)*(L-Lsat))/L
      ROH(2) = RONA(IPTS)
      SIGM(1)= (sig(ipte)*Lsat+sig(ipts)*(L-Lsat))/L
      SIGM(2)= SIG(IPTS)
      PL(1) = PLSAT
      PL(2) = PS
      CB    = NDE
      CI(1)  = HMAX*PLSAT*1.0D-5
      CI(2)  = HMIN*PS*1.0D-5
    ⋮
```

nucleation.f 6/12

```
      IF(ICAL.EQ.1)THEN
        CF   = RAMDA / 4.D0
        TAUW = CF*0.5D0*ROH(I)*U**2.D0
        UAST = DSQRT(TAUW/ROH(I))

        TPK  = TP(I)+273.15D0
        PHI  = RTH*TPK*(CB-CI(I))/PL(I)
        BETA = PHI*( 0.5D0+0.5D0*DSQRT(2.D0) )
        DIF  = RTH*TPK/(AVONUM*6.0D0*PI*VISC(TPK)*RATOM(IMAT))

        IF (J.EQ.1)THEN
          X1 = MU/UAST
          X2 = 5.D0*MU/UAST
        ELSEIF(J.EQ.2)THEN
          X1 = 5.D0*MU/UAST
          X2 = 30.D0*MU/UAST
        ELSEIF(J.EQ.3)THEN
          X1 = 30.D0*MU/UAST
          X2 = 300.D0*MU/UAST
        ENDIF
        XP1  = X1*UAST/MU
        XP2  = X2*UAST/MU
        UP1  = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XP1)+CP(J)
        UP2  = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XP2)+CP(J)
        UF1  = UP1*UAST
        UF2  = UP2*UAST
        REB1 = 2.D0*X1*UF1/MU
        REB2 = 2.D0*X2*UF2/MU
        GS1  = 1.D0 / (DLOG(X1*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J))
        GS2  = 1.D0 / (DLOG(X2*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J))
        GSR1 = DLOG(X1*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J)
        GSR2 = DLOG(X2*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J)
        FR301= REB1**(-2.0D0)+0.014*GSR1**(-2.D0)
        FR201= GSR1
        FR101= 0.5D0*3.877D0*(FR201**(-0.5D0)*FR301**(0.25D0))
        FR302= REB2**(-2.0D0)+0.014*GSR2**(-2.D0)
        FR202= GSR2
        FR102= 0.5D0*3.877D0*(FR202**(-0.5D0)*FR302**(0.25D0))
        FSL1 = ROH(I)*PI*X1*X1*UF1*UF1*FR101
        FSL2 = ROH(I)*PI*X2*X2*UF2*UF2*FR102
        FS   = 2.D0*PI*RSITE(I)*SIGM(I)
        FDUX = 44.D0*BETA**4.D0*PI*ROH(I)*DIF**2.D0/3.D0
```

nucleation.f 7/12

```
      FR1  = FSL1 - FS - FDUX
      FR2  = FSL2 - FS - FDUX
      IF(FR1*FR2.GE.0.D0) GOTO 203
      IF(FR1.LT.0.D0)THEN
        RTBIS= X1
        DX   = X2-X1
      ELSE
        RTBIS= X2
        DX   = X1-X2
      ENDIF
      DO INEW =1, 100
        DX  = DX*0.5D0
        XM  = RTBIS + DX
        XPM = XM*UAST/MU
        UPM = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XPM)+CP(J)
        UFM  = UPM*UAST
        REBM = 2.D0*XM*UFM/MU
        GSM  = 1.D0 / (DLOG(XM*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J))
        GSRM = DLOG(XM*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J)
        FR3M = REBM**(-2.0D0)+0.014*GSRM**(-2.D0)
        FR2M = GSRM
        FR1M = 0.5D0*3.877D0*(FR2M**(-0.5D0)*FR3M**(0.25D0))
        FSLM = ROH(I)*PI*XM*XM*UFM*UFM*FR1M
        FRM  = FSLM - FS - FDUX
        IF(FRM.LE.0.D0)RTBIS=XM
        IF(ABS(DX).LT.1.D-10.OR.FRM.EQ.0.D0)THEN
          R(I) = RTBIS
          GOTO 205
        ENDIF
      ENDDO
    ELSEIF(ICAL.EQ.2)THEN
      CF   = RAMDA / 4.D0
      TAUW = CF*0.5D0*ROH(I)*U**2.D0
      UAST = DSQRT(TAUW/ROH(I))
      XN   = 0.65D0

      IF (J.EQ.1)THEN
        X1 = MU/UAST
        X2 = 5.D0*MU/UAST
      ELSEIF(J.EQ.2)THEN
        X1 = 5.D0*MU/UAST
```

nucleation.f 8/12

```
          X2 = 30.D0*MU/UAST
        ELSEIF(J.EQ.3)THEN
          X1 = 30.D0*MU/UAST
          X2 = 300.D0*MU/UAST
        ENDIF

        XP1  = X1*UAST/MU
        XP2  = X2*UAST/MU
        UP1  = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XP1)+CP(J)
        UP2  = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XP2)+CP(J)
        UF1  = UP1*UAST
        UF2  = UP2*UAST
        REB1 = 2.D0*X1*UF1/MU
        REB2 = 2.D0*X2*UF2/MU
        FQ101= 2.D0/3.D0+((12.D0/REB1)**XN+0.796D0**XN)**(1.D0/XN)
        FQ102= 2.D0/3.D0+((12.D0/REB2)**XN+0.796D0**XN)**(1.D0/XN)
        FQ201= 6.D0*PI*ROH(I)*MU*UF1*X1
        FQ202= 6.D0*PI*ROH(I)*MU*UF2*X2
        FQS1 = FQ101*FQ201
        FQS2 = FQ102*FQ202
        FS   = 5.D0/3.D0*RSITE(I)*SIGM(I)
        FB   = 4.D0/3.D0*PI*X1**3.D0*ROH(I)*G
        FR1  = FB + FS - FQS1
        FR2  = FB + FS - FQS2
        IF(FR1*FR2.GE.0.D0) GOTO 203
        IF(FR1.LT.0.D0)THEN
          RTBIS= X1
          DX   = X2-X1
        ELSE
          RTBIS= X2
          DX   = X1-X2
        ENDIF
        DO INEW =1, 100
          DX  = DX*0.5D0
          XM  = RTBIS + DX
          XPM = XM*UAST/MU
          UPM = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XPM)+CP(J)
          UFM  = UPM*UAST
          REBM = 2.D0*XM*UFM/MU
          FQ1M = 2.D0/3.D0+((12.D0/REBM)**XN+0.796D0**XN)**(1.D0/XN)
          FQ2M = 6.D0*PI*ROH(I)*MU*UFM*XM
```

| nucleation.f | 9/12 |
|---|---|

```
          IF(FRM.LE.0.D0)RTBIS=XM
         IF(ABS(DX).LT.1.D-10.OR.FRM.EQ.0.D0)THEN
           R(I) = RTBIS
           GOTO 205
         ENDIF
       ENDDO
     ELSEIF(ICAL.EQ.3)THEN
       TPK  = TP(I)+273.15D0
       DIF  = RTH*TPK/(AVONUM*6.0D0*PI*VISC(TPK)*RATOM(IMAT))
       SC = MU/(ROH(I)*DIF)
       RE1 = 0.1D0
       RE2 = 70.D0
       PE1 = RE1*SC
       SH1 = 1.D0+(1.D0+0.564D0*PE1**(2.D0/3.D0))**(3.D0/4.D0)
       PE2 = RE2*SC
       SH2 = 2.D0*(1.D0-2.89D0/RE2**0.50)**0.5D0*PE2**0.5D0/PI**0.5D0
       AUX2Z2 = (SH2 - SH1)/(RE2 - RE1)
       AUX1Z2 = SH1 - RE1*AUX2Z2
       CF   = RAMDA / 4.D0
       TAUW = CF*0.5D0*ROH(I)*U**2.D0
       UAST = DSQRT(TAUW/ROH(I))

       IF (J.EQ.1)THEN
         X1 = MU/UAST
         X2 = 5.D0*MU/UAST
       ELSEIF(J.EQ.2)THEN
         X1 = 5.D0*MU/UAST
         X2 = 30.D0*MU/UAST
       ELSEIF(J.EQ.3)THEN
         X1 = 30.D0*MU/UAST
         X2 = 300.D0*MU/UAST
       ENDIF
       XP1  = X1*UAST/MU
       XP2  = X2*UAST/MU
       UP1  = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XP1)+CP(J)
       UP2  = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XP2)+CP(J)
       UF1  = UP1*UAST
       UF2  = UP2*UAST
       REB1 = 2.D0*X1*UF1/MU
       REB2 = 2.D0*X2*UF2/MU
```

nucleation.f | 10/12

```
      PE01 = REB1*SC
      PE02 = REB2*SC
      IF (REB1.LT.RE1) THEN
        SH01 = 1.D0+(1.D0+0.564*PE01**(2.D0/3.D0))**(3.D0/4.D0)
      ELSEIF (REB1.LT.RE2) THEN
        SH01 = SH1 + (REB1 - RE1)*AUX2Z2
      ELSE
        SH01 = 2.D0*(1.D0 - 2.89D0/REB1**0.5D0)**0.5D0*(PE01/PI)**0.5D0
      ENDIF
      IF (REB2.LT.RE1) THEN
        SH02 = 1.D0+(1.D0+0.564*PE02**(2.D0/3.D0))**(3.D0/4.D0)
      ELSEIF (REB2.LT.RE2) THEN
        SH02 = SH1 + (REB2 - RE1)*AUX2Z2
      ELSE
        SH02 = 2.D0*(1.D0 - 2.89D0/REB2**0.5D0)**0.5D0*(PE02/PI)**0.5D0
      ENDIF
      BETA01 = (SH01 - 2.D0)/4.D0
      BETA02 = (SH02 - 2.D0)/4.D0
      GS1  = 1.D0 / (DLOG(X1*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J))
      GS2  = 1.D0 / (DLOG(X2*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J))
      GSR1 = DLOG(X1*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J)
      GSR2 = DLOG(X2*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J)
      FR301= REB1**(-2.0D0)+0.014*GSR1**(-2.D0)
      FR201= GSR1
      FR101= 0.5D0*3.877D0*(FR201**(-0.5D0)*FR301**(0.25D0))
      FR302= REB2**(-2.0D0)+0.014*GSR2**(-2.D0)
      FR202= GSR2
      FR102= 0.5D0*3.877D0*(FR202**(-0.5D0)*FR302**(0.25D0))
      FSL1 = ROH(I)*PI*X1*X1*UF1*UF1*FR101
      FSL2 = ROH(I)*PI*X2*X2*UF2*UF2*FR102
      FS   = 2.D0*PI*RSITE(I)*SIGM(I)
      FDUX1= 44.D0*BETA01**4.D0*PI*ROH(I)*DIF**2.D0/3.D0
      FDUX2= 44.D0*BETA02**4.D0*PI*ROH(I)*DIF**2.D0/3.D0
      FR1  = FSL1 - FS - FDUX1
      FR2  = FSL2 - FS - FDUX2
      IF(FR1*FR2.GE.0.D0) GOTO 203
      IF(FR1.LT.0.D0)THEN
        RTBIS= X1
        DX   = X2-X1
      ELSE
```

| nucleation.f | 11/12 |
|---|---|

```
            RTBIS= X2
            DX   = X1-X2
          ENDIF
          DO INEW =1, 100
            DX  = DX*0.5D0
            XM  = RTBIS + DX
            XPM = XM*UAST/MU
            UPM = (1.D0/XKP(J))*DLOG(XPM)+CP(J)
            UFM  = UPM*UAST
            REBM = 2.D0*XM*UFM/MU
            SC = MU/(ROH(I)*DIF)
            PEOM = REBM*SC
            IF (REBM.LT.RE1) THEN
              SHOM = 1.D0+(1.D0+0.564*PEOM**(2.D0/3.D0))**(3.D0/4.D0)
            ELSEIF (REBM.LT.RE2) THEN
              SHOM = SH1 + (REBM - RE1)*AUX2Z2
            ELSE
              SHOM = 2.D0*(1.D0 - 2.89D0/REBM**0.5D0)**0.5D0*(PEOM/PI)**0.5D0
            ENDIF
            BETAOM = (SHOM - 2.D0)/4.D0
            GSM  = 1.D0 / (DLOG(XM*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J))
            GSRM = DLOG(XM*UAST/MU)+XKP(J)*CP(J)
            FR3M = REBM**(-2.0D0)+0.014*GSRM**(-2.D0)
            FR2M = GSRM
            FR1M = 0.5D0*3.877D0*(FR2M**(-0.5D0)*FR3M**(0.25D0))
            FSLM = ROH(I)*PI*XM*XM*UFM*UFM*FR1M
            FDUXM= 44.D0*BETAOM**4.D0*PI*ROH(I)*DIF**2.D0/3.D0
            FRM  = FSLM - FS - FDUXM
            IF(FRM.LE.0.D0)RTBIS=XM
            IF(ABS(DX).LT.1.D-10.OR.FRM.EQ.0.D0)THEN
              R(I) = RTBIS
              GOTO 205
            ENDIF
          ENDDO
        ELSEIF(ICAL.EQ.0)THEN

C++++++++++++++++++++++

    ⋮

        ENDIF
c
```

| nucleation.f | 12/12 |
|---|---|

```
205     CONTINUE
c
          if (r(i)*Vf/mu.gt.z(5,j).and.r(i)*Vf/mu.lt.z(6,j)) then
            goto 204
          endif
c
203     continue
c
204     rmax(imat)=r(1)
        rmin(imat)=r(2)
        if(rmax(imat).le.rmin(imat)) then
          rmax(imat)=rmin(imat)
        endif
c
    ⋮
       Vflist(i) = Vf
        Vlist(i)  = V
        Relist(i) = Re
        Reblist(i)= Reb
c
202   continue
c
    ⋮
```

ClcJoin.f 1/4

```
c
      subroutine ClcJoin(rArray, imat)
c
      include 'common.inc'
c
      dimension OutMolNum(500), nmNum41(500)
c
      real*8 InFlow, InFlowT, FMTotal, Innd, Jinmol, OutMolNum
      real*8 OutFlow, OutFlowT
      real*8 MolFlowNum, MolFlowNum41, nmNum41
      integer rArray, intLoop, InNo, OutNo, intLoop2
      integer intLoop3, intLoop4, imat
      dimension OutMolNum_1(500),OutMolNum_2(500)
      real*8 OutMolNum_1,OutMolNum_2
c
c
      OutFlowT = 0.d0
      do intLoop = 1,JinOutNum(rArray)
        OutNo = JiningEva(rArray,intLoop,1)
        OutFlowT = OutFlowT + qvnan(OutNo)
      end do
c
      do 100 intLoop = 1,JinOutNum(rArray)
c
      InFlowT = 0.d0
      MolFlowNum = 0.d0
      MolFlowNum41 = 0.d0
c
      do 105 intLoop2 = 1,ncl(imat)
        OutMolNum(intLoop2) = 0.d0
        nmNum41(intLoop2) = 0.d0
c
        OutMolNum_1(intLoop2) = 0.d0
        OutMolNum_2(intLoop2) = 0.d0
c
  105 continue
c
        OutNo = JiningEva(rArray,intLoop,1)
c
        do 110 intLoop2 = 1,JinInNum(rArray)
c
          InNo = JinInNo(rArray,intLoop2)
```

ClcJoin.f 2/4

```
c
          InFlow = qvnan(InNo)
c
          InFlowT = InFlowT + InFlow
c
          MolFlowNum =MolFlowNum + nd(InNo,imat) * InFlow
c
          if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1 ) MolFlowNum41 =MolFlowNum41
     1                                  + nd_41(InNo) * InFlow

          if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1) then
          do 115 intLoop3 = 1,ncl(1)
            nmNum41(intLoop3) = nmNum41(intLoop3)
     1                        + nb(InNo,intLoop3,1) *
     *                          InFlow * nm_41(InNo,intLoop3)
115       continue
          end if
          if(HPPoint(OutNo) .eq. 1 .or. HPPoint(InNo) .eq. 1)then
            do 120 intLoop3 = 1,ncl(imat)
              do 130 intLoop4 = 1,ncl(imat)
                if(nm(OutNo,intLoop4,imat) .GE.
     1             nm(InNo,intLoop3,imat))then
                  OutMolNum(intLoop4) = OutMolNum(intLoop4) +
     *                                  nb(InNo,intLoop3,imat) *
     *                                  nm(InNo,intLoop3,imat) * InFlow
                  goto 120
                elseif(intLoop4 .eq. ncl(imat))then
                  OutMolNum(intLoop4) = OutMolNum(intLoop4) +
     *                                  nb(InNo,intLoop3,imat) *
     *                                  nm(InNo,intLoop3,imat) * InFlow
c
                endif
c
  130         continue
c
  120       continue
c
           else
            do 150 intLoop3 = 1,ncl(imat)
              OutMolNum(intLoop3) = OutMolNum(intLoop3) +
     *                              nb(InNo,intLoop3,imat) *
     *                              nm(InNo,intLoop3,imat) * InFlow
```

ClcJoin.f 3/4

```
c
              OutMolNum_1(intLoop3) = OutMolNum_1(intLoop3) +
     *                                nb_1(InNo,intLoop3,imat) *
     *                                nm(InNo,intLoop3,imat) * InFlow
              OutMolNum_2(intLoop3) = OutMolNum_2(intLoop3) +
     *                                nb_2(InNo,intLoop3,imat) *
     *                                nm(InNo,intLoop3,imat) * InFlow
c
  150        continue
c
           endif
c
  110    continue
c
         do 170 intLoop2 = 1,ncl(imat)
           nb(OutNo,intLoop2,imat) = OutMolNum(intLoop2) /
     *                             nm(OutNo,intLoop2,imat) /
     *                             OutFlowT
           nb_1(OutNo,intLoop2,imat) = OutMolNum_1(intLoop2) /
     *                             nm(OutNo,intLoop2,imat) /
     *                             InFlowT
           nb_2(OutNo,intLoop2,imat) = OutMolNum_2(intLoop2) /
     *                             nm(OutNo,intLoop2,imat) /
     *                             InFlowT
c
  170    continue
         nd(OutNo,imat) = MolFlowNum / OutFlowT
         if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1)
     1       nd_41(OutNo) = MolFlowNum41 / OutFlowT
         if (imat.eq.1.and.iflg41.eq.1) then
         do 180 intLoop2 = 1,ncl(1)
           if (nb(OutNo,intLoop2,1).ne.0.d0) then
             nm_41(OutNo,intLoop2) = nmNum41(intLoop2) /
     *                               nb(OutNo,intLoop2,1)/ OutFlowT
           endif

180      continue
         end if
c
        if(DebugFlg .eq. 2)then
          open(777,file= 'Debug.txt',access ='append',status ='unknown')
```

ClcJoin.f 4/4

```
          write(777,*)
          write(777,1000) OutNo
          do 200 intLoop2 = 1,ncl(imat)
            write(777,1100) intLoop2,nb(OutNo,intLoop2,imat)
c
  200     continue
c
          close(777)
c
        endif

  100 continue
c
 1000 format('評価位置 ',i3,' の気泡クラス別気泡数')
 1100 format(5(1x,i3,f15.5))
c
      return
c
      end
```

common.inc 1/11

```
      implicit none
c
    ⋮
 c
      integer dim_dev, dim_join, dim_table, dim_divrg, dim_positin
      parameter (dim_boit = 100, dim_class = 50, dim_bris = 1,
     *           dim_point = 100, dim_dev = 10, dim_Join = 100,
     *           dim_table = 1000, dim_divrg = 100, dim_positin = 100)
      integer dim_nmat
      parameter (dim_nmat = 5)
c
c COMMON BLOCK boite1:
c --------------------
    ⋮
      dimension vitlib(dim_boit), alpha(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension k(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension dkdr(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension d(dim_boit,dim_class), diff(dim_boit,dim_class)
      dimension sna(dim_boit)
      dimension vna(dim_boit), pvap(dim_point)
      dimension expo(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension rboitn(dim_boit,dim_nmat)
      real * 8 rboitn
      dimension SpltFlgP(dim_boit,dim_nmat),SpltTabNo(dim_boit,dim_nmat)
      integer SpltFlgP,SpltTabNo
      dimension HTelev(dim_boit), T2in(dim_boit), A1Na(dim_boit)
      dimension Dh1Na(dim_boit)
      real * 8  HTelev, T2in, A1Na, Dh1Na
      dimension nurate(dim_boit)
      real * 8  nurate
      real * 8  nd_const
      real*8 llibp, llibc, plib, vitlib, alpha, dkdr, d, diff, sna, vna
      real*8 k, expo, pvap
c
    ⋮
     *             ,SpltFlgP,SpltTabNo,rboitn
     *             ,HTelev, T2in, A1Na, Dh1Na
     1             ,nurate
```

common.inc 2/11

```
       dimension nd_const(dim_point,dim_nmat)
      dimension fdis(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension fout(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension frel(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension Rinup(dim_boit),Doutup(dim_boit),Hup(dim_boit)
      dimension L1up(dim_boit)
      dimension Vinup(dim_boit),Voutup(dim_boit)
      dimension FRn(dim_boit,dim_class), EOn(dim_boit,dim_class)
      dimension FRnO(dim_boit,dim_class)
      real*8 fdis, fout, frel
      real*8 Rinup, Doutup, Hup, L1up
      real*8 Vinup, Voutup
      real*8 FRn, EOn, FRnO
c
      common/boite1/fdis, fout, frel
     1              ,Rinup, Doutup, Hup, L1up
     1              ,Vinup, Voutup, FRn, EOn, FRnO
     1                     ,nd_const
c
c COMMON BLOCK boite2:
c --------------------
    ⋮
      dimension boiteipt(dim_point), boitsipt(dim_point)
    ⋮
      dimension iclboit(dim_boit,dim_nmat)
      integer iclboit
c
    ⋮
      integer boiteipt, boitsipt
c
    ⋮
     *       ,iclboit
     *       ,boiteipt, boitsipt
    ⋮
c
c COMMON BLOCK bris:
```

common.inc 3/11

```
c ------------------
c
      dimension rbrisn(dim_bris,dim_nmat)
      dimension iptebris(dim_bris), iptsbris(dim_bris)
      dimension iclsort(dim_bris,dim_class,dim_nmat)
      dimension iclbris(dim_bris,dim_nmat)
      dimension ksort_bris(dim_bris,dim_class,dim_nmat)
      dimension nmolclas(dim_class,dim_nmat)
      dimension imax(dim_nmat),imin(dim_nmat)
c
    ⋮
c
c COMMON BLOCK nucleation:
c ------------------------
    ⋮
      real*8 rmax, rmin, sum_mol, delta_nd,nde
      dimension rmax(dim_nmat),rmin(dim_nmat),sum_mol(dim_nmat)
c
c COMMON BLOCK classes:
c ---------------------
c
      dimension rccl(dim_class,dim_nmat), drcl(dim_class,dim_nmat)
      dimension rccllog(dim_class,dim_nmat)
      dimension rcclm(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      dimension drclm(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      dimension rccllogm(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      real*8 rcclm, drclm, rccllogm
c
    ⋮
     1              ,rcclm, drclm, rccllogm
c
```

common.inc 4/11

```
c COMMON BLOCK conv :
c -------------------
c
      dimension xpnew(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      dimension xpnew_41(dim_point,dim_class)
c
        real*8 xpnew, xpnew_41
c
      common/cconv/xpnew, xpnew_41
c
c COMMON BLOCK sodium :
c ----------------------
c
      dimension sig(dim_point), rona(dim_point), amuna(dim_point)
      dimension SpcfcHt(dim_point)
c
      real*8 amolna, rona, amuna, sig, SpcfcHt
c
      common/c_sodium/amolna, amuna, rona, sig, SpcfcHt
c
c COMMON BLOCK general :
c ----------------------
c
      dimension dt1(2), nt(2), tfin(2) ,nl(dim_point,dim_nmat)
      dimension ncl(dim_nmat)
      integer nmat
c
    ⋮

      integer iequmod
      integer ical
      integer iflg41
      integer iflgoplp
c
      common/c_general/dt, dt1, epsilon, lambda, nboit, ncl,
     *    nphase, npt, nt, it, kelrep, k_per_tr1, pasexpl,
     *    pi, rth, tfin, Vciel, pasimp, inucleation, nl, itt,
     *    nmat
     *  ,iequmod
     *  ,iflg41
```

common.inc 5/11

```
     *  ,iflgoplp
     *  ,ical
      dimension time_trans(dim_point,dim_table)
      dimension rate_trans(dim_point,dim_table)
      dimension nb_time(dim_point)
      integer nb_time, nb_trans
      real * 8 time_trans, rate_trans
      common /bubtrn/ nb_time, nb_trans, time_trans, rate_trans

c COMMON BLOCK donnees :
c ----------------------
      dimension temps_temp(dim_table)
      dimension FlowAmnt(dim_point)
      dimension FlowAmnt0(dim_point)
      dimension nd_ini(dim_nmat),rcclmin(dim_nmat),rcclmax(dim_nmat)
      dimension csolu0(dim_nmat),csolu1(dim_nmat),csolu2(dim_nmat),
     1          ratom(dim_nmat)
      real*8 csolu0,csolu1,csolu2,ratom,avonum
      real*8 temps_temp, nd_ini
      real*8 qcon, qdvn, taudv, rprob, rcclmin, rcclmax
      real*8 FlowAmnt,FlowAmnt0
c
    ⋮
c
      real*8 tmolcls, pmolcls
      common/c_donnees/temps_temp,
     *                 qcon, qdvn, taudv, rprob, nd_ini, rcclmin, rcclmax,
     *                 nb_temp, FlowAmnt,FlowAmnt0
     *                  ,csolu0,csolu1,csolu2,ratom,avonum
     *                  ,tmolcls, pmolcls
c
      dimension nm0(dim_class,dim_nmat)
      dimension nm(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      dimension nb(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      dimension nd(dim_point,dim_nmat), qd(dim_boit,dim_nmat)
      dimension nb_old(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      dimension nd_old(dim_point,dim_nmat)
c
      dimension nbnew(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      dimension ndnew(dim_point,dim_nmat)
```

common.inc 6/11

```
      dimension qarchi(dim_boit,dim_nmat), qech(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qgsor(dim_boit,dim_nmat), qgnu(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qge(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qgs(dim_boit,dim_nmat), ngt_b0(dim_boit,dim_nmat)
      dimension ngt_b1(dim_boit,dim_nmat), dndebi_b(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qnde(dim_boit,dim_nmat),qnds(dim_boit,dim_nmat)
      dimension gmoltot(dim_boit,dim_nmat),gmolnd(dim_boit,dim_nmat)
      real*8 qnde,qnds,gmoltot,gmolnd
      dimension nbinp(dim_class,dim_nmat)
      dimension ndinp(dim_nmat)
      real*8 nm0
      real*8 nbnew,ndnew
      real*8 nm, nb, nd, ngt_b0, ngt_b1, qarchi, qech, qge, qgs, dndv
      real*8 dndebi_b, dndebi_r, qvnaprop, qd, pcoeur, nb_old, nd_old
      real * 8 qgsor,qgnu
      dimension qarchi_1(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qarchi_2(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qech_1(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qech_2(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qge_1(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qge_2(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qgs_1(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qgs_2(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qgsor_1(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qgsor_2(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qgnu_1(dim_boit,dim_nmat)
      dimension qgnu_2(dim_boit,dim_nmat)
      real*8 qarchi_1,qarchi_2,qech_1,qech_2,qge_1,qge_2
      real*8 qgs_1,qgs_2,qgsor_1,qgsor_2,qgnu_1,qgnu_2
      real*8 nbinp
      real*8 ndinp
      dimension dnm(dim_point,dim_class,dim_nmat)
           real*8 dnm
      dimension nb_tem(dim_point,dim_class,dim_nmat)
           real*8 nb_tem
      integer it_conv
c
      common/memppal/nm, nb, nd, ngt_b0, ngt_b1, qarchi, qech, qge,
     *               dndebi_b, dndebi_r, qvnaprop, qd, qgs, dndv, pcoeur,
     *               it_conv, nb_old, nd_old
     *              ,qnde,qnds,gmoltot,gmolnd
     *              ,nm0
```

common.inc 7/11

```
     *              ,nbnew,ndnew
     *              ,qgsor,qgnu
     *              ,qarchi_1,qarchi_2,qech_1,qech_2,qge_1,qge_2
     *              ,qgs_1,qgs_2,qgsor_1,qgsor_2,qgnu_1,qgnu_2
     *              ,nbinp,ndinp
     *              ,dnm
     *              ,nb_tem
c
c COMMON BLOCK point:
c --------------------
c
      dimension t(dim_point), p(dim_point)
      dimension h(dim_point,dim_nmat), qvnan(dim_point)
    ⋮
c
c COMMON BLOCK inter:
c -------------------
    ⋮
c
c COMMON BLOCK traceur:
c ---------------------
c
      dimension nm_41(dim_point,dim_class), nd_41(dim_point)
      dimension nbbul(dim_boit,dim_class,dim_nmat), dndebi_b_41(dim_boit)
      dimension ngt_b0_41(dim_boit), ngt_b1_41(dim_boit)
      dimension qarchi_41(dim_boit), qech_41(dim_boit), qge_41(dim_boit)
      dimension qgs_41(dim_boit), qd_41(dim_boit)
      dimension txboit(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension txbris(dim_bris,dim_class,dim_nmat)
      dimension ksort(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension arccl(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension nbint(dim_bris,dim_class,dim_nmat)
      dimension icl1(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension nbint2(dim_bris,dim_class,dim_nmat)
      dimension nbint3(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      real*8 nbint3
```

common.inc 8/11

```
   ⋮
      dimension nbbul_1(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension nbbul_2(dim_boit,dim_class,dim_nmat)
      dimension nb_1(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      dimension nb_2(dim_point,dim_class,dim_nmat)
      real*8 nbbul_1,nbbul_2,nb_1,nb_2
c
   ⋮
     *        ,nbint3
     *        ,nbbul_1,nbbul_2,nb_1,nb_2
c
c COMMON BLOCK DeveroirData:
c ---------------------
c
      dimension devInNo(dim_dev), devOutNo(dim_dev), ClctrnD(dim_dev)
      dimension BublFlgD(dim_dev,dim_nmat)
      dimension taudvD(dim_class,dim_dev,dim_nmat), rprobD(dim_dev,dim_nmat)
      dimension BsBblD(dim_dev,dim_nmat)
c
      real*8 taudvD, rprobD
      real*8 BsBblD
c
      integer DamNum, devInNo, devOutNo, ClctrnD, BublFlgD
      integer BTabNoD
      dimension BTabNoD(dim_dev,dim_nmat)
c
      common/DevDataI/DamNum, devInNo, devOutNo, ClctrnD, BublFlgD
     1               ,BTabNoD
      common/DevDataD/taudvD, rprobD, BsBblD
c
c COMMON BLOCK PlenumData:
c ---------------------
c
      dimension PleInNo(dim_boit), PleOutNo(dim_boit), ClctrnP(dim_boit)
      dimension BublFlgP(dim_boit,dim_nmat), PrcsFlgP(dim_boit)
      dimension taudvP(dim_class,dim_boit,dim_nmat), rprobP(dim_boit,dim_nmat)
      dimension BsBblP(dim_boit,dim_nmat)
      dimension BlncPntOtptFlg(dim_boit)
      dimension coefqd(dim_boit,dim_nmat)
```

| common.inc | 9/11 |
|---|---|

```
      real * 8 coefqd
      dimension PleKind(dim_boit)
      real*8 taudvP, rprobP
      real*8 BsBblP
c
      integer PleNum, PleInNo, PleOutNo, ClctrnP,  BublFlgP, PrcsFlgP
      integer BlncPntOtptFlg, PleKind
c
      integer BTabNoP
      dimension BTabNoP(dim_boit,dim_nmat)
      integer vaflgP
      real * 8 velmlt
      dimension vaflgP(dim_boit),velmlt(dim_class,dim_boit,dim_nmat)
      integer ncabr
      real * 8 nRsmax,nRsmin
      dimension ncabr(dim_boit),nRsmax(dim_boit),nRsmin(dim_boit)
      integer bltflgP,bltrns
      dimension bltflgP(dim_boit),bltrns(dim_class,dim_boit,dim_nmat)
      integer iuppermodel,if3d
      integer iflgbubrel(dim_boit)
           dimension rrel(dim_boit)
           real*8 rrel
      dimension iflgbubacc(dim_boit)
      integer iflgbubacc
           real*8 vglyr, hglyr, v_ihx, h_ihx, plib_ihx
c
      common/PleDataI/PleNum, PleInNo, PleOutNo, ClctrnP,  BublFlgP,
     *                BlncPntOtptFlg, PleKind
     1               ,BTabNoP
     1               ,vaflgP
     1               ,ncabr
     1               ,bltflgP,bltrns
     1               ,iuppermodel,if3d
     *               ,iflgbubrel,rrel
     *               ,iflgbubacc, vglyr, hglyr, v_ihx, h_ihx, plib_ihx
c
      common/PleDataD/taudvP, rprobP, coefqd, BsBblP
     1               ,velmlt
     1               ,nRsmax,nRsmin
c
```

common.inc | 10/11

```
c COMMON BLOCK ItemData:
c ---------------------
c
      dimension ItmInNo(dim_bris), ItmOutNo(dim_bris), PrcsFlgI(dim_bris)
      dimension BublFlgI(dim_bris,dim_nmat), ClctrnI(dim_bris)
      dimension taudvI(dim_class,dim_boit,dim_nmat), rprobI(dim_bris,dim_nmat)
      dimension BsBblI(dim_bris,dim_nmat)
      dimension HiHX(dim_bris), tempHX2(dim_bris)
      dimension Dh1HX(dim_bris), A1HX(dim_bris)
c
      real * 8 HiHX, tempHX2, Dh1HX, A1HX
      real*8 taudvI, rprobI
      real*8 BsBblI
c
      integer ItmNum, ItmInNo, ItmOutNo, PrcsFlgI, BublFlgI, ClctrnI
c
      integer BTabNoI
      dimension BTabNoI(dim_dev,dim_nmat)
c
      common/ItmDataI/ItmNum, ItmInNo, ItmOutNo, PrcsFlgI, BublFlgI, ClctrnI
     1               ,BTabNoI
c
      common/ItmDataD/taudvI, rprobI, HiHX, tempHX2, Dh1HX, A1HX, BsBblI


c
c COMMON BLOCK JoinData:
c ---------------------
c
      dimension JinInNum(dim_Join), JinInNo(dim_Join,dim_positin)
      dimension  JinOutNum(dim_Join), JiningNum(dim_Join,dim_divrg)
      dimension JiningEva(dim_Join,dim_divrg,dim_positin),ClctrnJ(dim_Join)
c
      integer JinNum, JinInNum, JinInNo, JinOutNum, JiningNum, JiningEva
      integer ClctrnJ
c
      common/JoinData/ JinNum, JinInNum, JinInNo, JinOutNum, JiningNum,
     *                 JiningEva, ClctrnJ
c
```

common.inc 11/11

```
c COMMON BLOCK EvalutionData:
c ---------------------
c
      dimension FlowInd(dim_point,dim_point), TempNo(dim_point)
      dimension PressNo(dim_point), StanFlow(dim_point)
      dimension tc_perm(dim_point), HPPoint(dim_point)
      dimension Hight(dim_point), Const(dim_point), Const2(dim_point)
      dimension tc_trans(dim_point,dim_table)
      real*8 StanFlow, tc_perm, Hight, Const, Const2, tc_trans
c
      integer FlowInd, TempNo, PressNo, HPPoint, BaseQNum, BaseTNum, BasePNum
      integer StanFlowNum, tc_PermNum, BasPrsNum
      integer nb_flow
      dimension time_flow(dim_table),flow_trans(dim_point,dim_table)
      real*8 time_flow,flow_trans
      integer ioflg, nb_pres
      dimension time_pres(dim_table),pres_trans(dim_point,dim_table)
      dimension plib_trans(dim_point,dim_table)
      real*8 time_pres,pres_trans,plib_trans
c
      common/EvalutionI/ FlowInd, TempNo, PressNo, HPPoint, BaseQNum,
     *                   BaseTNum, BasePNum, StanFlowNum, tc_PermNum,
     *                   BasPrsNum
     *                  ,nb_flow
     *                  ,nb_pres
     *                  ,ioflg
c
      common/EvalutionD/ StanFlow, tc_perm, Hight, Const, Const2, tc_trans,
     *                  time_flow,flow_trans
     *                  ,time_pres,pres_trans,plib_trans
c
c COMMON BLOCK Debug:
c ---------------------
c
      integer DebugFlg
c
      common/Debug/ DebugFlg
```

# 付録 2　3 次元気泡挙動解析

サージタンクの気泡放出モデルを構築するため、3 次元汎用熱流体解析コード（FLUENT）を用いてサージタンク内における気泡挙動の数値解析を行う。解析条件を以下に示す。

解析体系

サージタンク内における気泡挙動を模擬するため、流入配管および流出配管を含むサージタンク形状を模擬した体系において解析を実施する。また、D/P が気泡放出に与える影響について評価するため、Fig.5.1 に示すような D/P（内側 D/P と外側 D/P の 2 重構造）を挿入できる解析モデルとする。その際、外側 D/P とサージタンク壁面との間隙をパラメータとし、3 通り（2.0、5.0、10 (mm)）に変化させられるように設定する。同様に、サージタンク内の液面高さに関しても、D/P 上面からの距離をパラメータとして 4 通り変化させられるようにする。サージタンクおよび D/P の主要寸法を、Table A2.1 に示す。

解析格子

解析格子を Fig.A2.1 に示す。配管内にはヘキサメッシュ、サージタンク内は、D/P 周辺にヘキサメッシュ、それ以外の領域をテトラメッシュとプリズムメッシュを適用する。境界層に対しては、配管壁面で 5 層、タンク壁面で 4 層のメッシュを適用する。また、外側 D/P とサージタンク壁面の間隙および外側 D/P と内側 D/P の間隙については、径方向、高さ方向ともに 5 分割とする。

解析条件

流体と気泡の組み合わせは、水-空気および水銀-ヘリウムとする。液体側の境界条件としては、入口境界に一様流速条件（0.7 (m/s)）を与え、出口境界に一様圧力条件（0.0 (Pa)）を与える。また、配管やサージタンクの壁面 D/P 表面には No-Slip 条件を与え、自由液面は Free Slip 壁面（変形は考慮しない）として取り扱う。FLUENT の解析スキームは、以下の通り設定する。

| | |
|---|---|
| 速度-圧力の Coupling | ：SIMPLE |
| 対流項差分 Scheme | ：2 次精度風上差分 |
| 圧力補間 Scheme | ：Standard |
| 乱流モデル | ：RNG $k$-$\varepsilon$ モデル |

外側 D/P とタンク壁面の間隙の制限によりタンクの境界層を厚くとれない（間隙が最小 2.0 (mm)の場合があるため、境界層の総厚みを 2.0 (mm)未満としなければならない）ことにより $y^+$ の低下が懸念される。そこで、$y^+$適用範囲の広い改良型壁関数モデル（EWT：Enhanced Wall Treatment）を用いる。

気泡挙動の計算は、個々の気泡の運動を時間追跡する混相流モデルである DPM（Discrete Phase Model）を用いて行う。DPM の計算条件を以下に示す。

| | |
|---|---|
| 気泡径 | : 1.0-1000 ($\mu$m)（100 クラスに等分割） |
| 気泡個数 | : 10,000（各気泡径について 100 個） |
| 気泡発生位置 | : 流入境界面 |
| 気泡径分布 | : ランダム分布（Fig.A2.2 参照） |
| 気泡の初期速度 | : 入口流速条件に一致 |
| 壁面条件 | : トラップ条件（自由液面） |
| | 跳ね返り条件（構造物壁面） |

ただし、気泡数および流入境界面における影響を調査する予備解析を行い、影響が小さいことを確認している。

解析ケース

Table A2.2 に解析ケースを示す。水-空気系については、液面高さ、D/P の有無および D/P とサージタンク壁面の間隙をパラメータとして解析を行う。水銀-ヘリウム系については、液面高さを一定（910 (mm)）とし、D/P 無のケースとサージタンク壁面と D/P との間隙が 2.0 (mm)のケースを解析する。

Fig.A2.3-A2.6 に、水-空気系の解析ケースのうち、液面高さ 910 (mm)のケースの流線図を、Fig.A2.7 および A2.8 に水銀-ヘリウム系の解析ケースの流線図を示す。全ケースとも入口側の曲管の影響により、サージタンク内に時計回りの旋回流が見られる。また、D/P の有無及び D/P とタンクとの間隙別で比較すると、主に D/P 周辺の流動場が異なっている。なお、case05 については計算が発散し、流動結果を得ることができなかった。

case01～case04、case06～case16 に対する気泡追跡の結果を用いて、液面高さおよび D/P の影響について評価する。Table A2.3 に、それぞれのケースにおける気泡放出割合、気泡流出割合および気泡滞留割合を示す。ただし、Residence Ratio ＝ 1 － Release Ratio － Flow Out Ratio として計算する。D/P 無の場合と比較し、D/P 有の場合は、気泡の滞留割合が大きくなっている。また、D/P の有無に関わらず、液面高さは気泡追跡結果にあまり影響していない。気泡径別の気泡放出割合および気泡流出割合を Fig.A2.9-A2.16 に示す。D/P 無の体系では、気泡径とサージタンク液面またはサージタンク出口からの放出割合に強い相関が見られる。一方、D/P 有の体系では、100 ($\mu$m)以上の大気泡に関して、サージタンク液面からの放出割合に大きなばらつきが生じている。ただし、これは、D/P の存在により、サージタンク内に残留する気泡が増加するためであり、液面高さそのものの影響は小さいと考えられる。このため、水-空気系における液面高さ 910 (mm)のケース（Case03、07、11、15）に基づいて、D/P の影響を考慮した気泡放出モデルの検討を行う。その際、D/P 有の場合は気泡の滞留割合が大きいが、滞留気泡は最終的には放出もしくは流出するため、Fig.A2.17 および 2.18 に示すように滞留気泡の影響を除いた放出割合および流出割合を用いることとする。Fig.A2.19 には、同様の修正を行った水銀-ヘリウム系における気泡放出割合を示す。

Table A2.1　サージタンクおよび D/P の主要寸法

| | | |
|---|---|---|
| Surge Tank | Inner Diameter (mm) | 430.0 |
| | Liquid Height (mm) | 882.0, 895.0, 910.0, 930.0 |
| Pipe | Inner Diameter (mm) | 70.3 |
| | Inlet Height (mm) | 595.0 |
| | Outlet Height (mm) | 245.0 |
| | Curvature Radius of Elbow (mm) | 63.5 |
| D/P | Thickness (mm) | 3.0 |
| | Height of Upper Surface (mm) | 873.5 |
| | Gap to Tank Wall (mm) | 2.0, 5.0, 10 |
| | Gas of Inner/Outer D/Ps | 1.0 |
| | Diameter of Inner D/P | 254.0 |

Reference Height (0.0 (mm)) : Bottom of Surge Tank

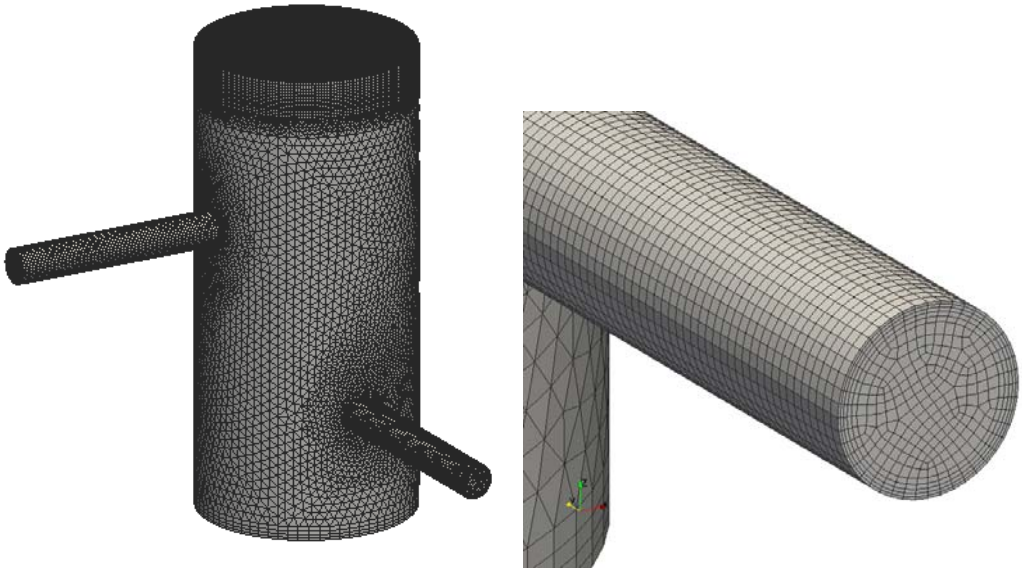
Table A2.2　解析ケース

| Case | Fluid | Liquid Height (mm) | D/P (Gap of D/P and Wall (mm)) |
|---|---|---|---|
| case01 | Water-Air | 882 | N/A |
| case02 | ↑ | 895 | ↑ |
| case03 | ↑ | 910 | ↑ |
| case04 | ↑ | 930 | ↑ |
| case05 | ↑ | 882 | 2.0 |
| case06 | ↑ | 895 | ↑ |
| case07 | ↑ | 910 | ↑ |
| case08 | ↑ | 930 | ↑ |
| case09 | ↑ | 882 | 5.0 |
| case10 | ↑ | 895 | ↑ |
| case11 | ↑ | 910 | ↑ |
| case12 | ↑ | 930 | ↑ |
| case13 | ↑ | 882 | 10 |
| case14 | ↑ | 895 | ↑ |
| case15 | ↑ | 910 | ↑ |
| case16 | ↑ | 930 | ↑ |
| case17 | Mercury-Helium | 910 | N/A |
| case18 | ↑ | 910 | 2.0 |

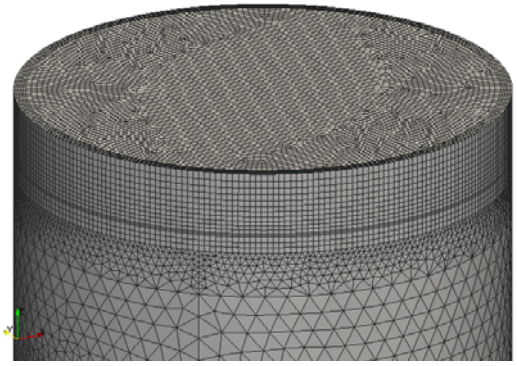
Table A2.3　サージタンクにおける気泡挙動

| Gap of D/P and Wall (mm) | Liquid Height (mm) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 882 | 895 | 910 | 930 |
| w/o D/P | 34.5 %<br>60.7 %<br>4.8 % | 35.1 %<br>58.3 %<br>6.6 % | 33.8 %<br>60.6 %<br>5.6 % | 34.9 %<br>59.2 %<br>5.9 % |
| 2.0 | | 12.7 %<br>57.8 %<br>29.5 % | 16.7 %<br>59.6 %<br>23.7 % | 8.7 %<br>61.6 %<br>29.7 % |
| 5.0 | 12.6 %<br>65.2 %<br>22.2 % | 20.3 %<br>59.2 %<br>20.5 % | 16.2 %<br>59.9 %<br>23.9 % | 15.8 %<br>59.3 %<br>24.9 % |
| 10 | 19.5 %<br>55.2 %<br>25.3 % | 21.2 %<br>60.3 %<br>18.5 % | 22.9 %<br>58.3 %<br>18.8 % | 32.3 %<br>56.7 %<br>11.0 % |

Upper: Release Ratio, Middle: Flow Out Ratio, Lower: Residence Ratio



(a) Bird's Eye View　　(b) Pipe Region



(c) Upper Region of Surge Tank

Fig.A2.1　解析格子

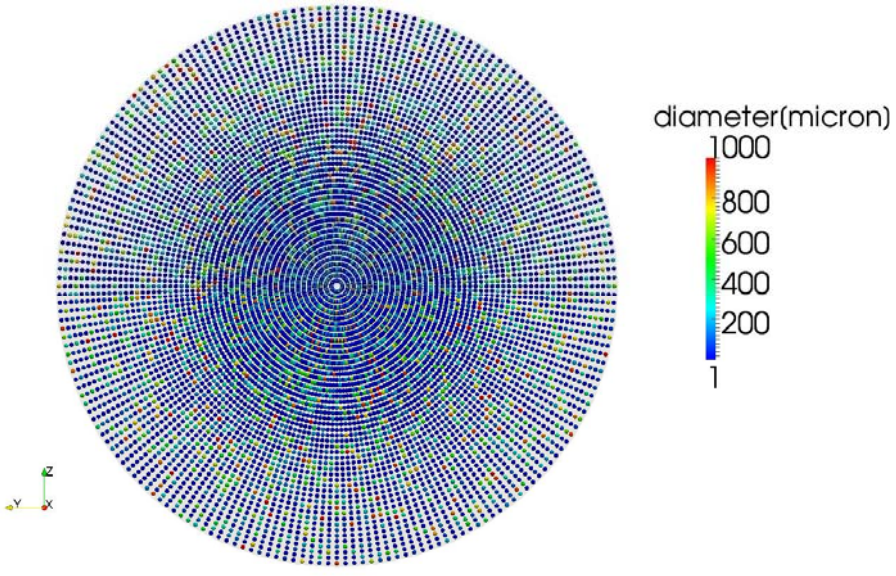



Fig.A2.2　流入境界面における気泡径分布

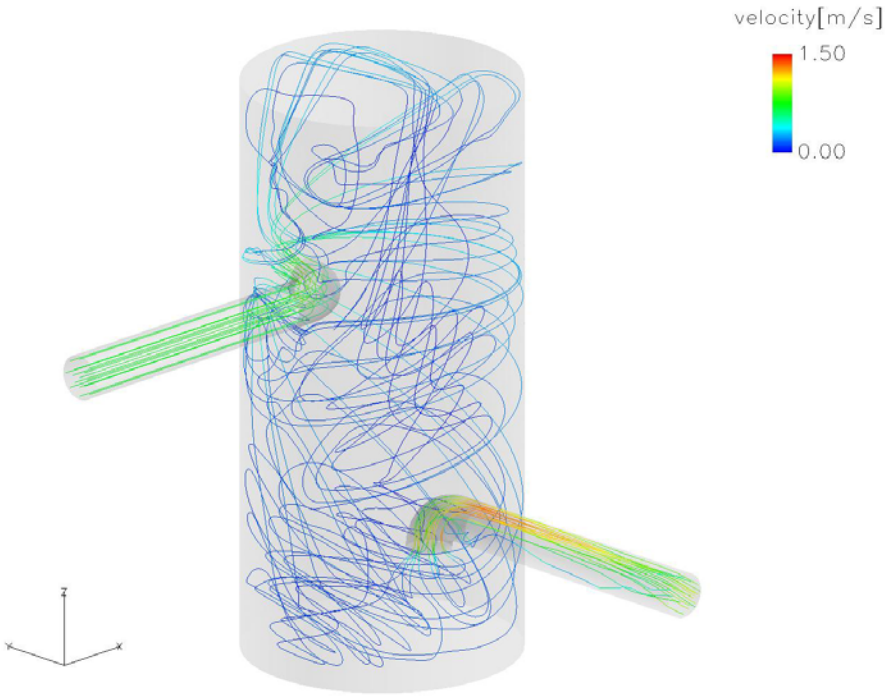



Fig.A2.3　Case03 の流線図（水、液面高さ 910 (mm)、D/P 無）

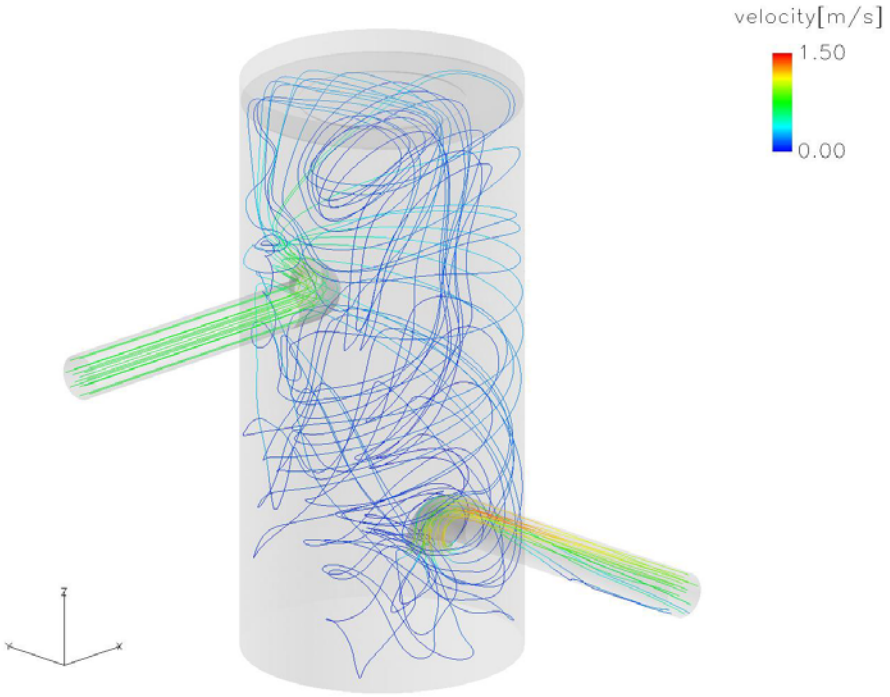



Fig.A2.4　Case07 の流線図（水、液面高さ 910 (mm)、D/P-壁面間隙 2.0 (mm)）

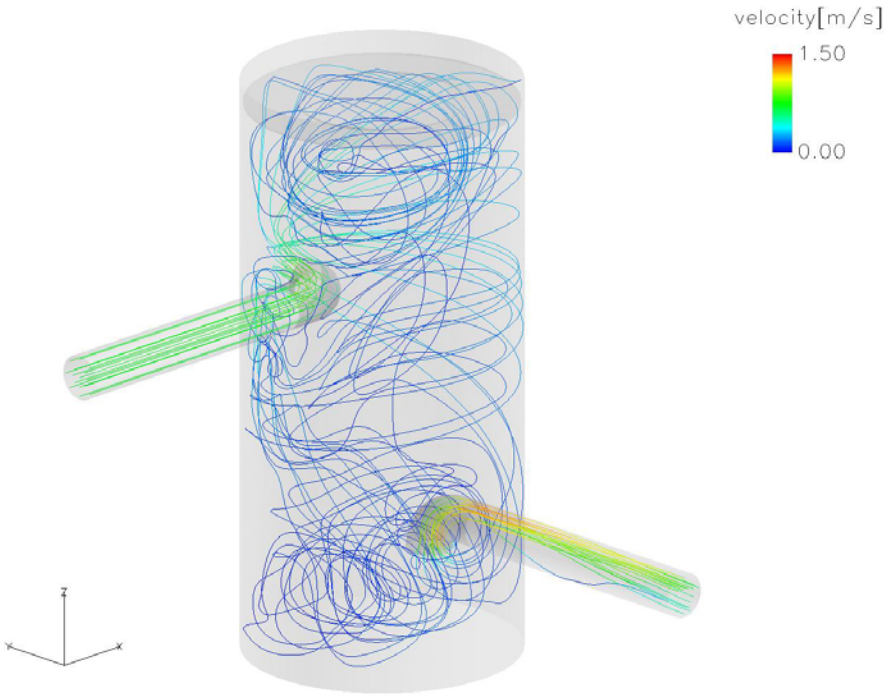



Fig.A2.5　Case11 の流線図（水、液面高さ 910 (mm)、D/P-壁面間隙 5.0 (mm)）

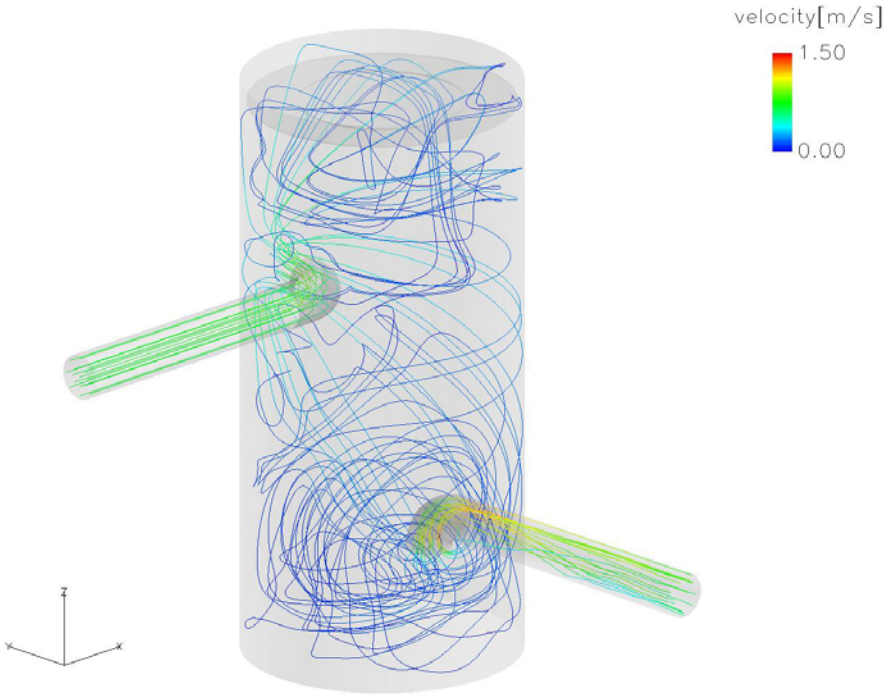



Fig.A2.6　Case15 の流線図（水、液面高さ 910 (mm)、D/P-壁面間隙 10 (mm)）

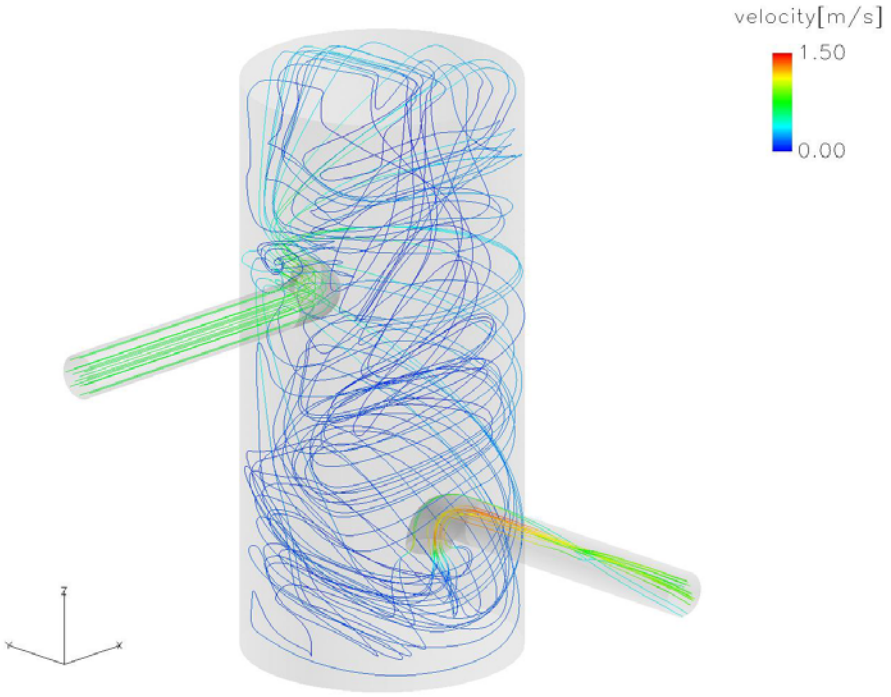



Fig.A2.7　Case17 の流線図（水銀、液面高さ 910 (mm)、D/P 無）

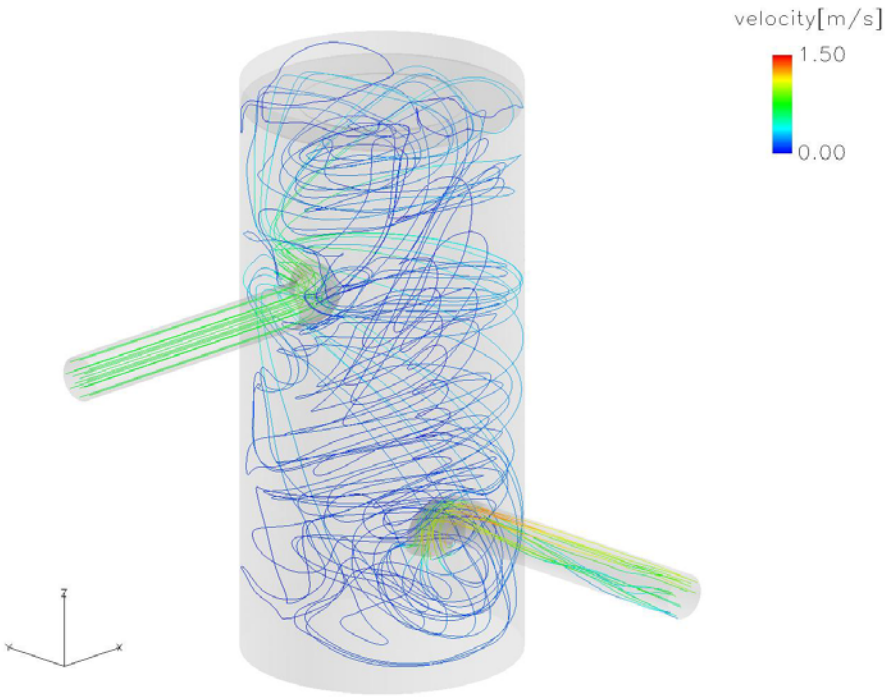



Fig.A2.8　Case18 の流線図（水銀、液面高さ 910 (mm) 、D/P-壁面間隙 2.0 (mm)）

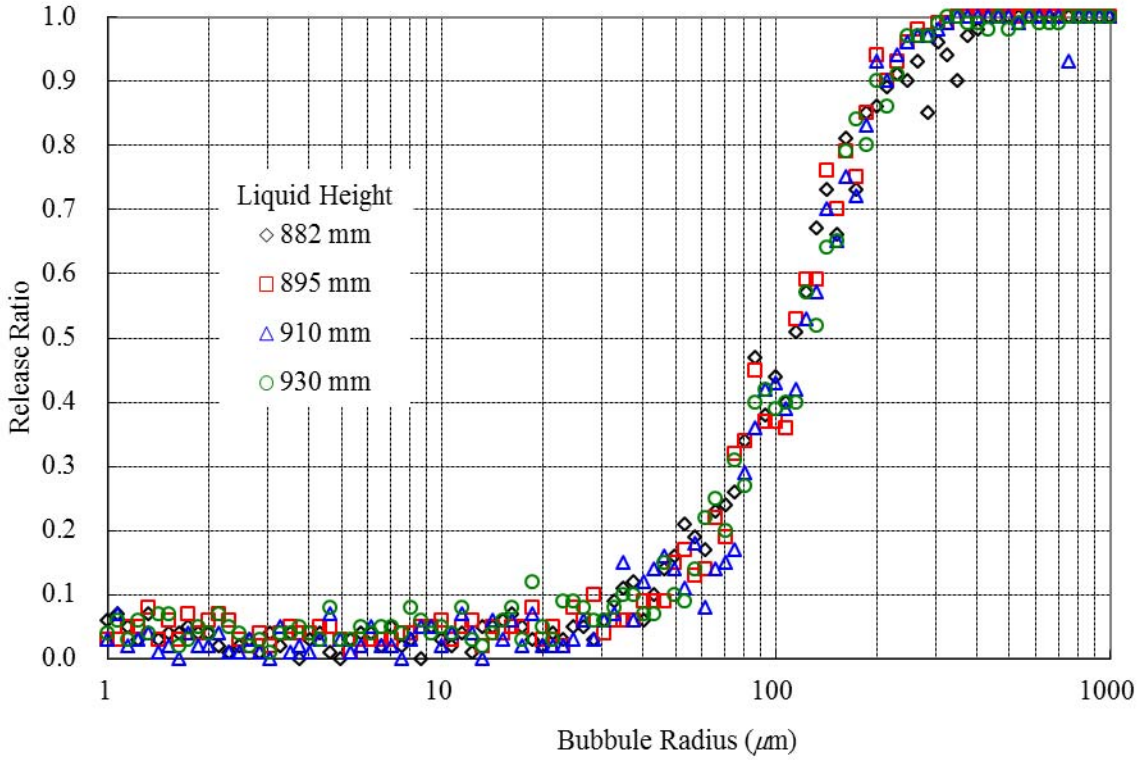



Fig.A2.9　サージタンク液面からの気泡放出割合（水-空気、D/P 無）

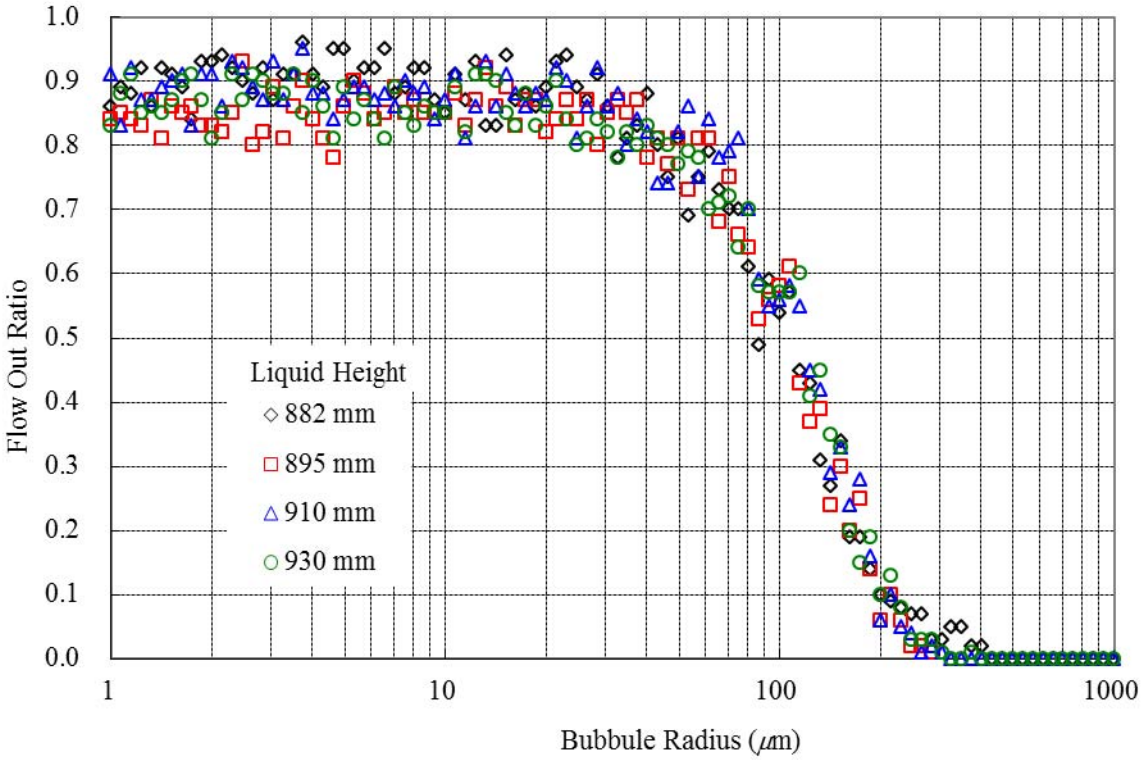



Fig.A2.10　サージタンク出口からの気泡流出割合（水-空気、D/P 無）

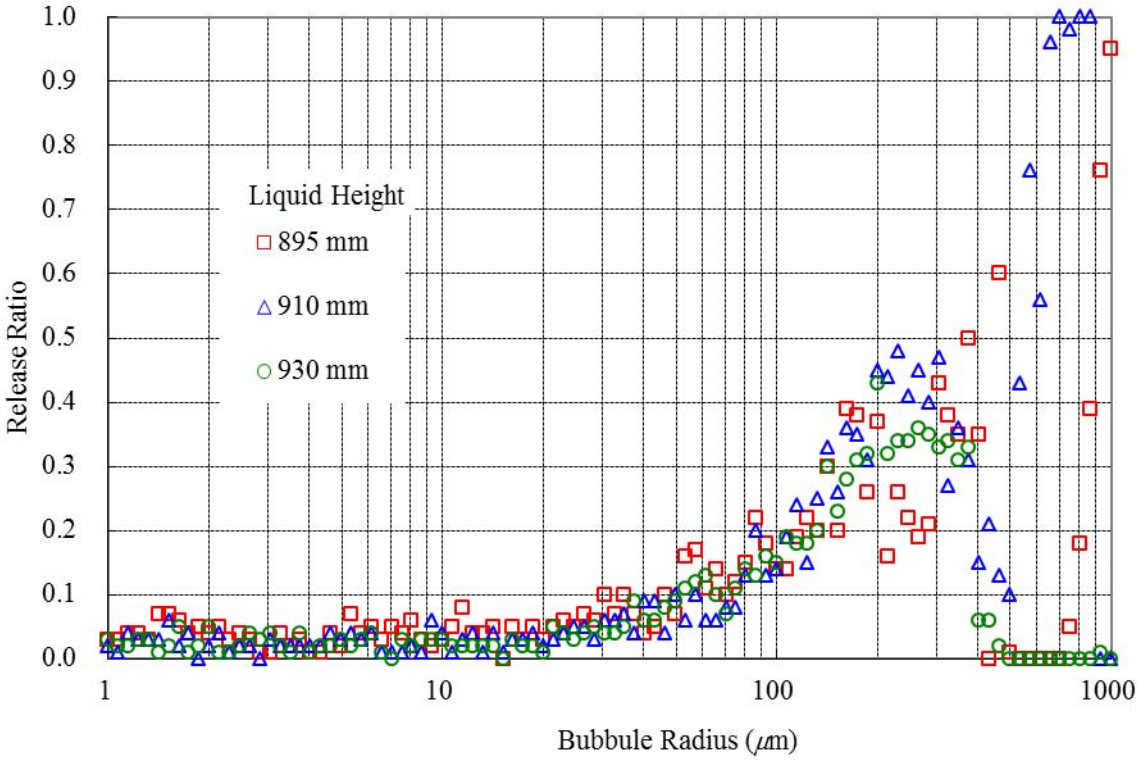



Fig.A2.11　サージタンク液面からの気泡放出割合（水-空気、D/P-壁面間隙 2.0 (mm)）

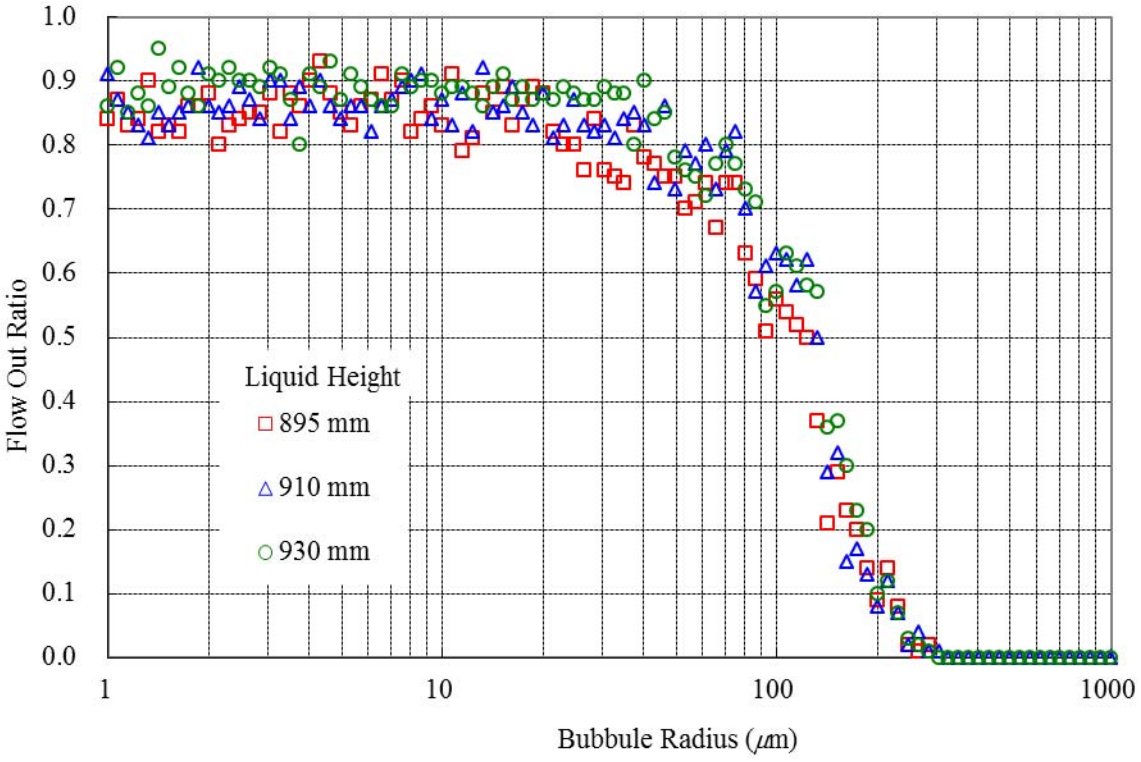



Fig.A2.12　サージタンク出口からの気泡流出割合（水-空気、D/P-壁面間隙 2.0 (mm)）

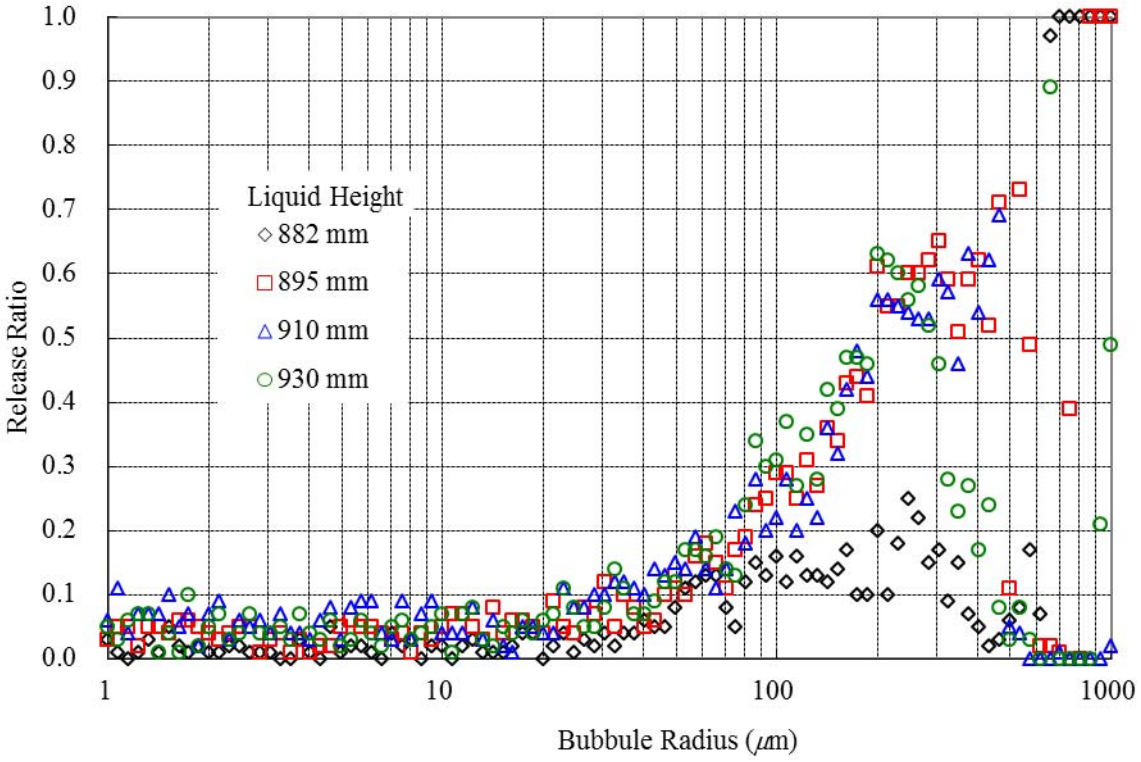



Fig.A2.13　サージタンク液面からの気泡放出割合（水-空気、D/P-壁面間隙 5.0 (mm)）

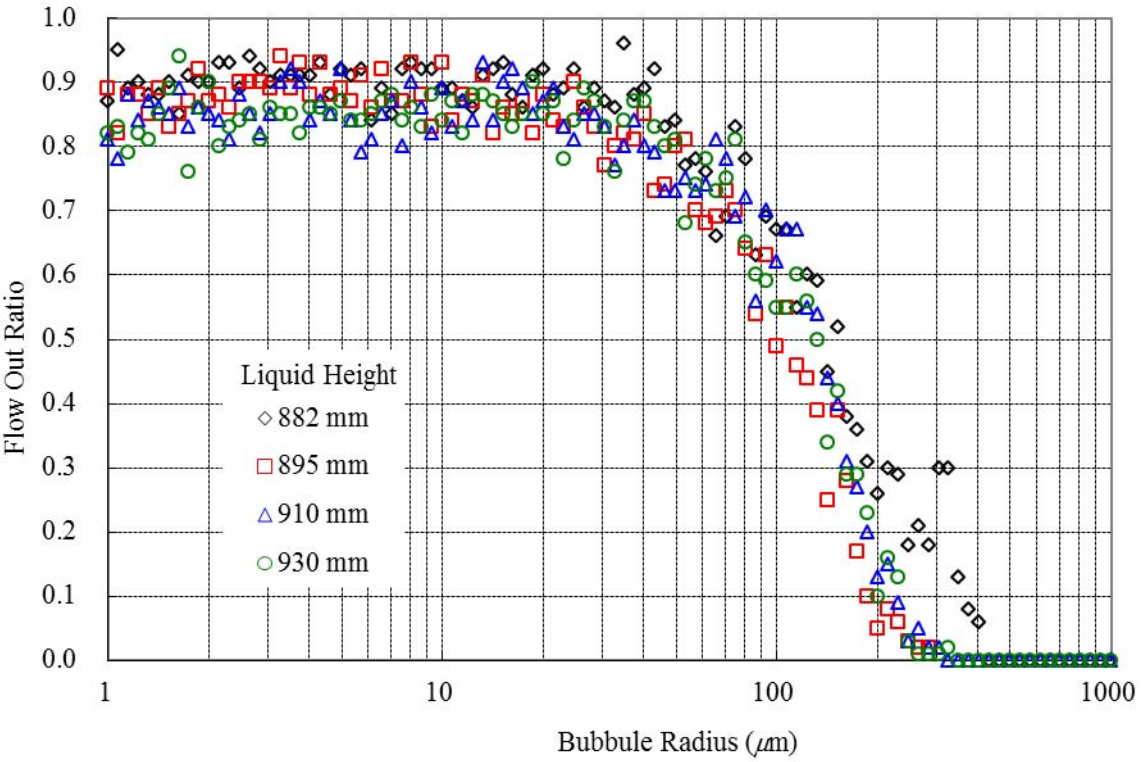



Fig.A2.14　サージタンク出口からの気泡流出割合（水-空気、D/P-壁面間隙 5.0 (mm)）

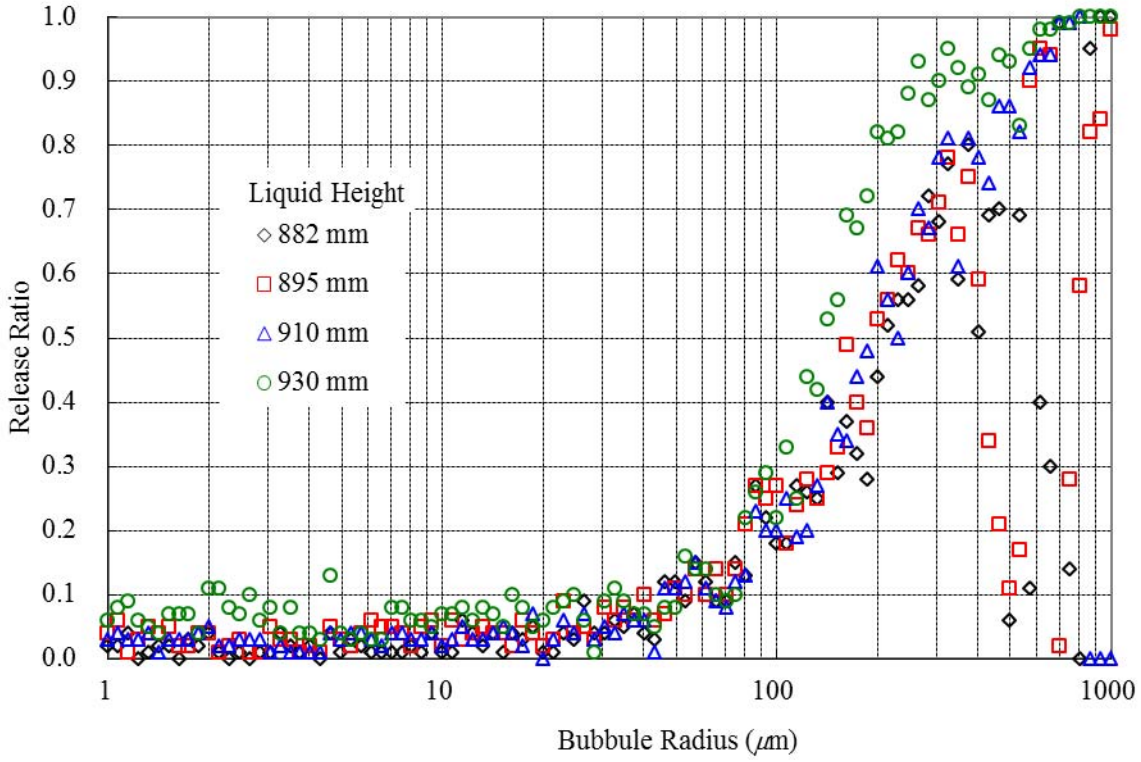



Fig.A2.15　サージタンク液面からの気泡放出割合（水-空気、D/P-壁面間隙 10 (mm)）

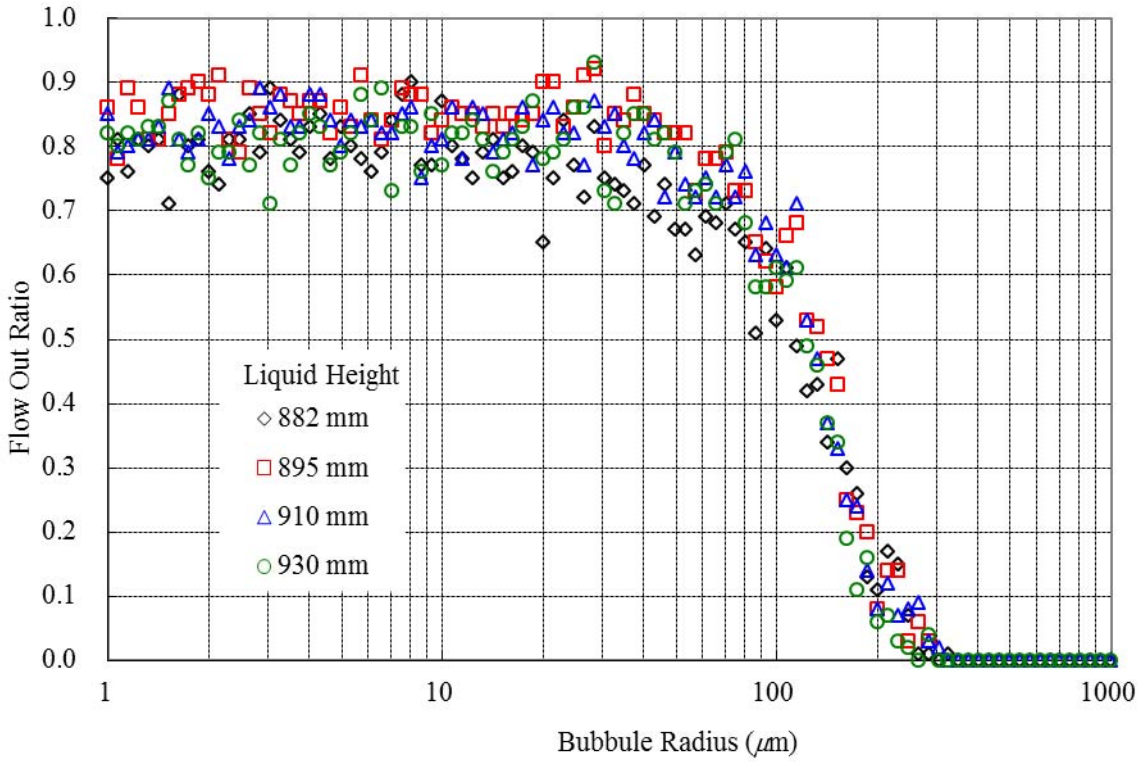



Fig.A2.16　サージタンク出口からの気泡流出割合（水-空気、D/P-壁面間隙 10 (mm)）

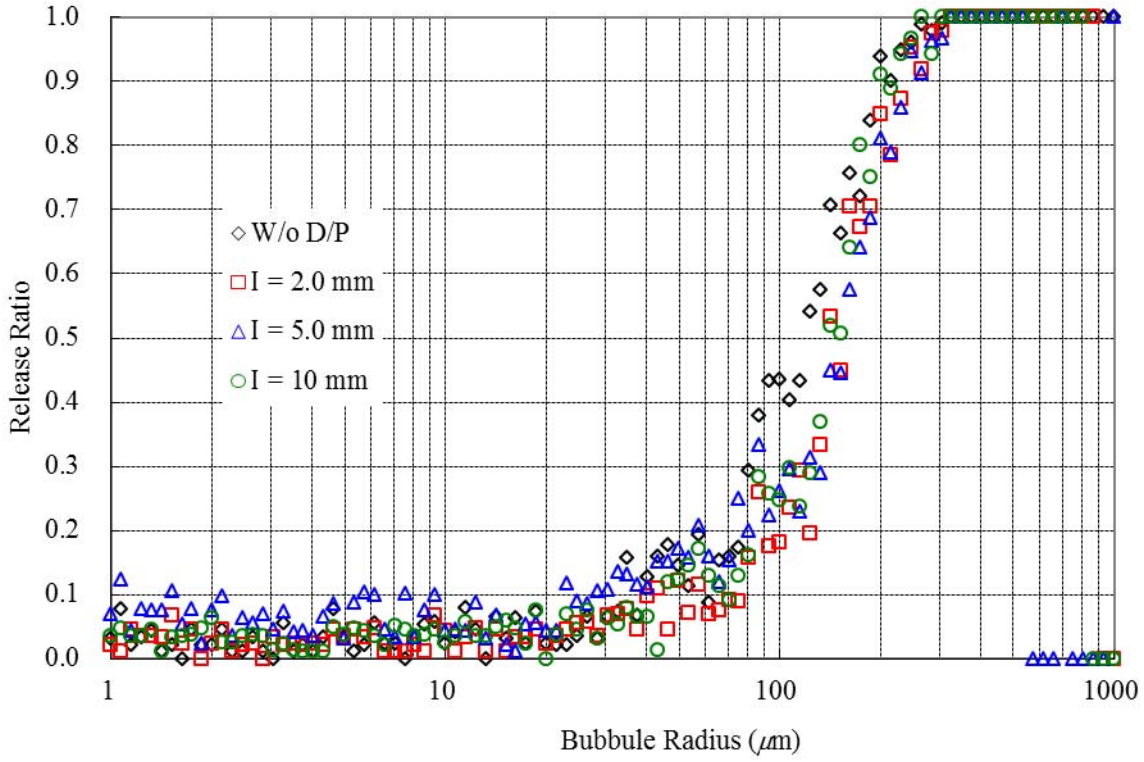



Fig.A2.17　気泡放出割合に対する D/P の影響（水-空気、液面高さ 910 (mm)）

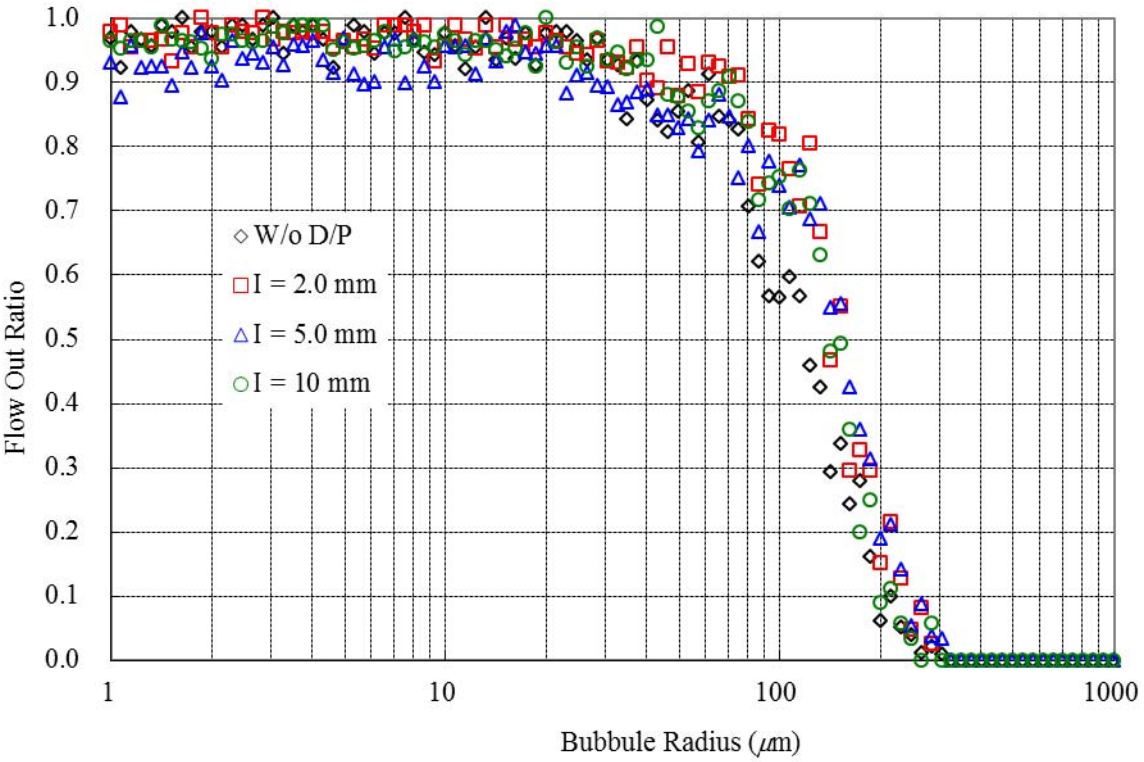



Fig.A2.18　気泡流出割合に対する D/P の影響（水-空気、液面高さ 910 (mm)）

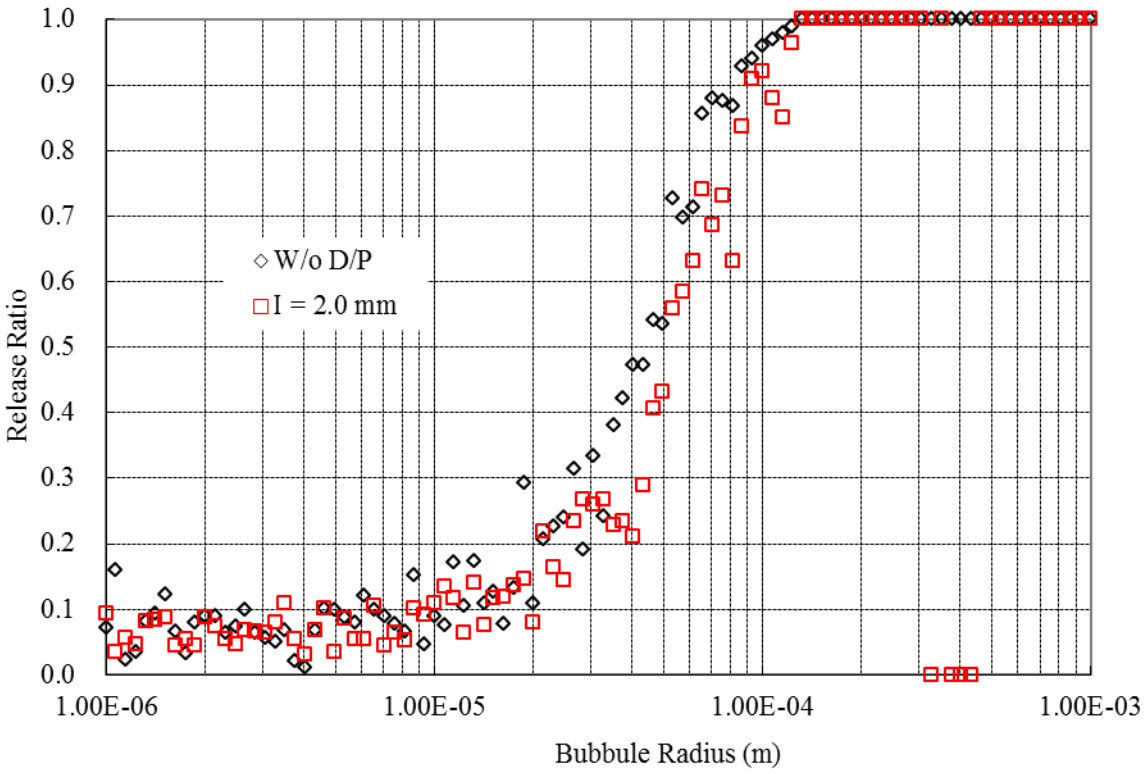



Fig.A2.19　気泡放出割合に対する D/P の影響（水銀-ヘリウム、液面高さ 910 (mm)）

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 |
| 物質量 | 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 | 立法メートル | $m^3$ |
| 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 | キログラム毎立法メートル | $kg/m^3$ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | $cd/m^2$ |
| 屈折率(b) | （数字の） 1 | 1 |
| 比透磁率(b) | （数字の） 1 | 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 | ジーメンス | S | A/V | $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$ |
| 磁束 | ウエーバ | 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 | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| セルシウス温度 | セルシウス度(e) | ℃ | | K |
| 光束 | ルーメン | lm | cd sr(c) | cd |
| 照度 | ルクス | lx | $lm/m^2$ | $m^{-2}$ cd |
| 放射性核種の放射能(f) | ベクレル(d) | Bq | | $s^{-1}$ |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ | 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つたえるために使われる。実際には、使用する時には記号radおよび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 | $m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$ |
| 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=60s |
| 時 | h | 1h =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 | $1ha=1hm^2=10^4m^2$ |
| リットル | L, l | $1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$ |
| トン | t | $1t=10^3$ 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 | $1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$ |
| ダルトン | Da | $1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$ |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1 Da |
| 天文単位 | ua | $1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$ |

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=0.1MPa=100kPa=$10^5$Pa |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=$10^{-10}$m |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バーン | b | $1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$ |
| 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 |
| ポアズ | P | $1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$ |
| ストークス | St | $1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$ |
| スチルブ | sb | $1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$ |
| フォト | ph | $1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$ |
| ガル | Gal | $1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$ |
| マクスウェル | Mx | $1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$ |
| ガウス | G | $1\ G =1Mx\ cm^{-2} =10^{-4}T$ |
| エルステッド(c) | Oe | 1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$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 | $1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$ |
| レントゲン | R | $1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$ |
| ラド | rad | $1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$ |
| レム | rem | $1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$ |
| ガンマ | γ | $1\ \gamma=1\ nT=10\text{-}9T$ |
| フェルミ | | 1フェルミ=1 fm=10-15m |
| メートル系カラット | | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg |
| トル | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa |
| カロリー | cal | 1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー） |
| ミクロン | μ | $1\ \mu=1\mu m=10^{-6}m$ |

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています