

分置

多成分多相流の熱流動現象の 数値シミュレーションに関する研究

—多成分系の蒸発／凝縮過渡挙動に関する研究（2）—

(先行基礎工学研究に関する平成15年度共同研究報告書)

2004年7月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

九州大学 (Kyushu University)

2004

JNC TY9400 2004-013
2004年7月

多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーションに関する研究
-多成分系の蒸発／凝縮過渡挙動に関する研究（2）-

（先行基礎工学研究に関する平成15年度共同研究報告書）

守田 幸路*, 松元 達也*, 福田 研二*
飛田 吉春**, 山野 秀将**, 佐藤 一憲**

要 旨

炉心損傷事故時に生ずる多成分・多相流の複雑な熱流動現象に対する数値シミュレーション技術の高度化を図ることは、原子炉の安全評価の信頼度を向上する上で重要な課題の一つである。本共同研究では、多成分系での相変化現象に対する安全解析コードの適用性を向上するため、非凝縮性ガス成分を含んだ蒸気泡の過渡的な凝縮挙動に対する物理モデルの開発と実験的研究を実施する。本年度は、窒素を混合した水蒸気を用いた実験を行い、凝縮を伴わない比較的大きな気泡の過渡挙動について実験データを得た。また、高速炉安全解析コードを用いた実験解析を実施し、その妥当性について議論した。

本研究は、先行基礎工学研究に関する研究協力として、九州大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究として実施したものである。

* 九州大学大学院工学研究院、環境システム科学研究所センター

** 大洗工学センター、要素技術開発部、リスク評価研究グループ

JNC TY9400 2004-013
July, 2004

Study on a Numerical Simulation for Thermal-Hydraulic Phenomena of Multiphase, Multicomponent Flows

– Transient Vaporization/Condensation Phenomena in Multicomponent System (2) –

Koji MORITA*, Tatsuya MATSUMOTO*, Kenji FUKUDA*

Yoshiharu TOBITA**, Hidemasa YAMANO**, Ikken SATO**

Abstract

It is one of important problems for more reliable reactor safety evaluation to improve numerical simulation techniques for involved thermal-hydraulic phenomena of multiphase, multicomponent flows in core disruptive accidents. In the present cooperative research, physical model development and experimental investigation were conducted for transient condensation phenomena of a vapor bubble with noncondensable gases to improve applicability of a fast-reactor safety analysis code for the phase-transition phenomena in multicomponent systems. This fiscal year experiments using steam mixed with nitrogen gas were performed for the transient bubble condensation phenomena, and then experimental data were obtained for relatively large-scale bubble behavior. In addition, experimental analyses was performed by the fast-reactor safety analysis code and its validity was discussed.

Work performed under contracts between Kyushu University and Japan Nuclear Cycle Development Institute.

* Institute of Environmental Systems, Graduate School of Engineering, Kyushu University.

** Nuclear System Safety Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC.

目 次

	ページ
要 旨	i
Abstract	ii
目 次	iii
図表目次	iv
1. 緒 言	1
1. 1. 研究の目的と概要	1
1. 2. 期待される効果	2
2. 蒸気泡過渡凝縮実験	4
2. 1. 実験装置および実験方法	4
3. 実験解析	10
3. 1. 数値解析の概要	10
3. 2. 窒素のみの場合	11
3. 3. 水蒸気のみおよび混合蒸気の場合	13
3. 4. まとめ	14
4. 物理モデル開発	32
5. 結 言	34
謝 辞	35
記号説明	36
参考文献	38

図表目次

	ページ
図 1 蒸気泡過渡凝縮実験の装置概略	6
図 2 蒸気泡過渡凝縮実験の装置概略（圧力容器部）	7
図 3 蒸気泡過渡凝縮実験装置の系統図	8
図 4 蒸気泡過渡凝縮実験における混合蒸気放出の過程	9
図 5 プール流流動様式でのラージスケール気泡の体積率（拡張流動様式モデル）	16
図 6 SIMMER-III コードによる実験解析体系	17
図 7 水槽内圧力の時間変化（窒素 100% ; 0.21MPa -昨年度実施分→	18
図 8 水槽内気泡体積の時間変化（窒素 100% ; 0.21MPa -昨年度実施分→ ..	18
図 9 水槽上部圧力の時間変化（窒素 100% ; 0.36MPa, 19°C)	19
図 10 圧力容器内圧力の時間変化（窒素 100% ; 0.36MPa, 19°C)	19
図 11 水槽内の気相および気泡体積の時間変化（窒素 100% ; 0.36MPa, 19°C) ..	20
図 12 流動様式モデルの違いによる気液界面積（窒素 100% ; 0.36MPa, 19°C) ..	20
図 13 水槽上部圧力の時間変化（窒素 0.0% ; 0.32MPa, 142°C)	21
図 14 圧力容器内圧力の時間変化（窒素 0.0% ; 0.32MPa, 142°C)	21
図 15 水槽上部圧力の時間変化（窒素 3.2% ; 0.32MPa, 136°C)	22
図 16 圧力容器内圧力の時間変化（窒素 3.2% ; 0.32MPa, 136°C)	22
図 17 水槽上部圧力の時間変化（窒素 10.7% ; 0.32MPa, 136°C)	23
図 18 圧力容器内圧力の時間変化（窒素 10.7% ; 0.32MPa, 136°C)	23
図 19 圧力容器内の気相体積の変化（窒素 0.0% ; 0.32MPa, 142°C)	24
図 20 圧力容器内の気相体積の変化（窒素 3.2% ; 0.32MPa, 136°C)	24
図 21 圧力容器内の気相体積の変化（窒素 10.7% ; 0.32MPa, 136°C)	25
図 22 水槽および圧力容器内の気相体積の変化（窒素 0.0% ; 0.32MPa, 142°C) ..	26
図 23 水槽および圧力容器内の気相体積の変化（窒素 3.2% ; 0.32MPa, 136°C) ..	26
図 24 水槽および圧力容器内の気相体積の変化（窒素 10.7% ; 0.32MPa, 136°C) ..	27
図 25 水槽および圧力容器内の気相体積の変化（窒素濃度の影響)	27
図 26 水槽内に放出された気相領域の比較（窒素・水蒸気のみ；短期挙動) ..	28
図 27 水槽内に放出された気相領域の比較（窒素・水蒸気のみ；長期挙動) ..	29

- 図 28 水槽内に放出された気相領域の比較（混合蒸気；短期拳動） 30
図 29 水槽内に放出された気相領域の比較（混合蒸気；長期拳動） 31

1. 緒 言

1. 1. 研究の目的と概要

原子炉の炉心損傷事故時に炉心内で生ずる多成分・多相流の伝熱・流動・相変化の複合現象に対する数値解析手法の高度化を図ることは、原子炉の安全評価の信頼度を向上する上で重要な課題の一つである。特に、損傷炉心における炉心物質の熱流動現象を支配する過渡的な蒸発／凝縮挙動を明らかにし、これを精度良く解析するための機構論的な解析モデルを開発することは、損傷炉心の安全解析コードの評価精度を向上する上で必要不可欠である。そこで、本研究では、過渡的な蒸発／凝縮挙動に対する安全解析コードの実験的検証と解析モデルの開発・改良を通じて、安全解析コードに用いられる多成分・多相流の熱流動現象の数値シミュレーション技術の高度化を図ることを目的とする。

炉心損傷時の多成分系での蒸発／凝縮現象は、非凝縮性ガスや多成分蒸気の影響を受けるだけでなく、急速な過渡挙動であることから、相変化界面における熱伝達、相変化、entrainment 等の素過程に対する現象解明やモデル検証が必要である。本課題では、冷却材プール中に非凝縮ガスを含む多成分蒸気を放出した際の、非凝縮性ガスの存在による過渡的な凝縮の抑制効果、気液界面過渡変化等のメカニズムの解明と定量的評価に関する実験的研究を実施する。また、気液界面積の過渡変化を模擬する上で必要な安全解析コードの改良も併せて実施し、多成分系の蒸発／凝縮過渡挙動を記述する物理モデルの最適化を図る。本研究では、以下のような項目を実施する。

(1) 実験予備解析および実験装置の準備・調整

核燃料サイクル開発機構で開発中の高速炉安全解析コード SIMMER-III [1] を用いて蒸気泡過渡凝縮実験に対する予備解析を実施し、実験体系、パラメータ等の最適化に必要な検討を実施する。また、九州大学の原子力安全性試験室に付設の混相流伝熱流動実験設備等を利用して、蒸気泡過渡凝縮実験装置の準備、非凝縮性ガスを用いた予備試験、測定系の調整を行う。

(2) 蒸気泡過渡凝縮実験

予備解析結果の知見に基づき、水蒸気と非凝縮性ガスからなる混合蒸気を用いた蒸気泡過渡凝縮実験を行う。本実験では、非凝縮性ガス（窒素、ヘリウム、キセノン等）を含む水蒸気を水プール中に吹き込み、プール界面の水位変化からプール中での水蒸気の凝縮速度を、また、可視化データから気泡界面積を測定する。

（3）実験解析およびモデル改良

SIMMER-III コードによる実験解析を実施し、同コードに用いられている拡散律速過程に基づく多成分系蒸発／凝縮モデルの過渡条件への適用性を検証する。さらに、SIMMER コードによる実験解析と試験結果の分析に基づき、巨視的な気泡形状と気液界面積の過渡変化を模擬する上で必要なモデル改良を実施し、多成分系蒸発／凝縮条件下における気液界面積のモデル化手法の最適化を図る。

（4）実験結果に基づく総合検証

最適化されたモデル化手法を用いた SIMMER-III コードによる総合的なモデル検証を行い、実機の安全評価における改善効果について検討するとともに、その成果を SIMMER コードに反映する。

1. 2. 期待される効果

SIMMER コードでは、損傷炉心における多成分・多相流の伝熱・流動・相変化を構成する素現象を記述する要素物理モデルを機構論的な手法を開発している。このため、本コードの伝熱・流動・相変化の複合現象に対する妥当性を確認するためには、要素物理モデルの汎用性と一般性を検証するための基礎的な実験データが必要不可欠である。特に、炉心物質の熱流動現象を支配する相変化過程は、拡散律速過程に基づく多成分系の蒸発／凝縮モデル [2] で記述されているが、多成分系での挙動のみならず急速な過渡的な条件下でのモデルの妥当性についての検証データは極めて少ない。このため、本研究によってこれらの挙動に対するモデルの適用性を確認することで、損傷炉心における多成分・多相流解析に対する評価信頼度を向上することが期待される。

また、蒸発／凝縮挙動を支配する因子の一つである気液界面積を定める SIMMER コードの境界面積対流モデルでは、気泡の合体や分裂等による変化と対流による履歴が扱われる一方で、気泡径に代表される気泡形状は計算セル内で定義される局所的な流動様式に依存する。このため、SIMMER コードでは、計算セルの大きさを超える気泡

形状を原理的に取り扱えない制限がある。しかしながら、本研究によって、局所的な流動様式に依存しない巨視的な気泡形状も取り扱えるようになれば、SIMMER コードの適用範囲の大幅な拡大が期待される。

SIMMER コードで採用されている要素物理モデルは、炉心損傷時の主要現象のみならず、一般的な多成分・多相流を汎用的に記述できるように設計されている。このため、本研究による成果は、多成分・多相流を扱う他の多くの分野および現象に対しても適用できる可能性を有している。

2. 蒸気泡過渡凝縮実験

非凝縮性ガスの存在による過渡的な凝縮の抑制効果や気液界面の過渡変化が重要な比較的大きな蒸気泡の挙動に対する定量データを得るために、冷却材プール中に单一蒸気泡を放出し、その過渡的な凝縮挙動を観察する蒸気泡過渡凝縮実験を行う。本年度は、昨年度の実験装置に混合蒸気を生成・加圧・放出するための機能を付加し、水蒸気に窒素を混合した蒸気泡を用いた実験を実施した。

2. 1. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概略を示す。実験装置は、上部の水槽と下部の圧力容器より構成されており、試験領域となるアクリル製円筒型貯水槽（内径310 mm、高さ750 mm）の上部には、アクリル製パイプ（内径57 mm、高さ1000 mm）が接続され、水位変化から気泡体積の変化を測定する。また、画像撮影の際に屈折率の違いによる画像の歪みの影響を極力減らすためアクリル製矩形水槽（450 mm×450 mm×950 mm）で円筒型貯水槽を取り囲んでいる。水槽下部は、開口部内径50 mmのステンレス製圧力容器に接続されており、その上部は、2枚の破裂版（RD: Rupture Disk）で仕切られた断熱層となっている。圧力容器の概略を図2に示す。ここで、水槽側RDはポリエチレン製、圧力容器側はステンレス製反転型RDであり、後者は規定の圧力差で破裂・開放する仕様となっている。断熱層は真空ポンプで数kPa程度まで減圧され、水蒸気の発生過程における圧力容器側から水槽への熱伝達と圧力容器上部での水蒸気の凝縮を抑える。水蒸気は、圧力容器下部に溜めた水を電気ヒータによって加熱することで発生させる。

実験系統図を図3に示す。実験では、圧力容器内に規定量の非凝縮性ガスおよび水を封入した後、混合蒸気を生成・加圧し、規定圧力（本実験では、約0.3 MPa）でのステンレス製RDとポリエチレン製RDの破裂によって、混合蒸気を水槽内に放出する（図4）。本実験では、非凝縮性ガスとして用いた窒素濃度をパラメータとして実験を行った。気泡の形状や運動の過渡変化は、高速度カメラ（菱光社製；シャッター速度10⁻⁴秒、録画速度400 fps）によって記録された気泡の可視化画像をデジタル処理することで定量的に評価した。この画像解析には、昨年度同様、本実験用に開発した画像解析システムを用いた。この解析システムを用いることで、撮影した画像（原画

像)に二値化処理を施して画像上の気泡境界を明確にした後、気泡径や体積等に関する定量データを得ることができる。本試験での画像解析では、二値化画像として抽出された気泡形状と等しい投影面を持つ回転体を仮定し、気泡体積を算出した。一方、水槽上部に接続されたアクリル製パイプ内の水位変化(初期水位:パイプ下端より150~400 mm程度)も高速度カメラで記録し、圧力容器および水槽内の気相体積の変化量を算出した。この際、発泡ポリスチレン製の浮子(直径約57 mm, 高さ50 mm)を用いることで、水位面の乱れを押さえた。2台の高速度カメラによる撮影は、水槽底部側面に取り付けたデジタルレーザーセンサによって気相の通過を感知することで開始する。尚、高速度カメラはトリガー入力より数フレーム前からの記録が可能である。

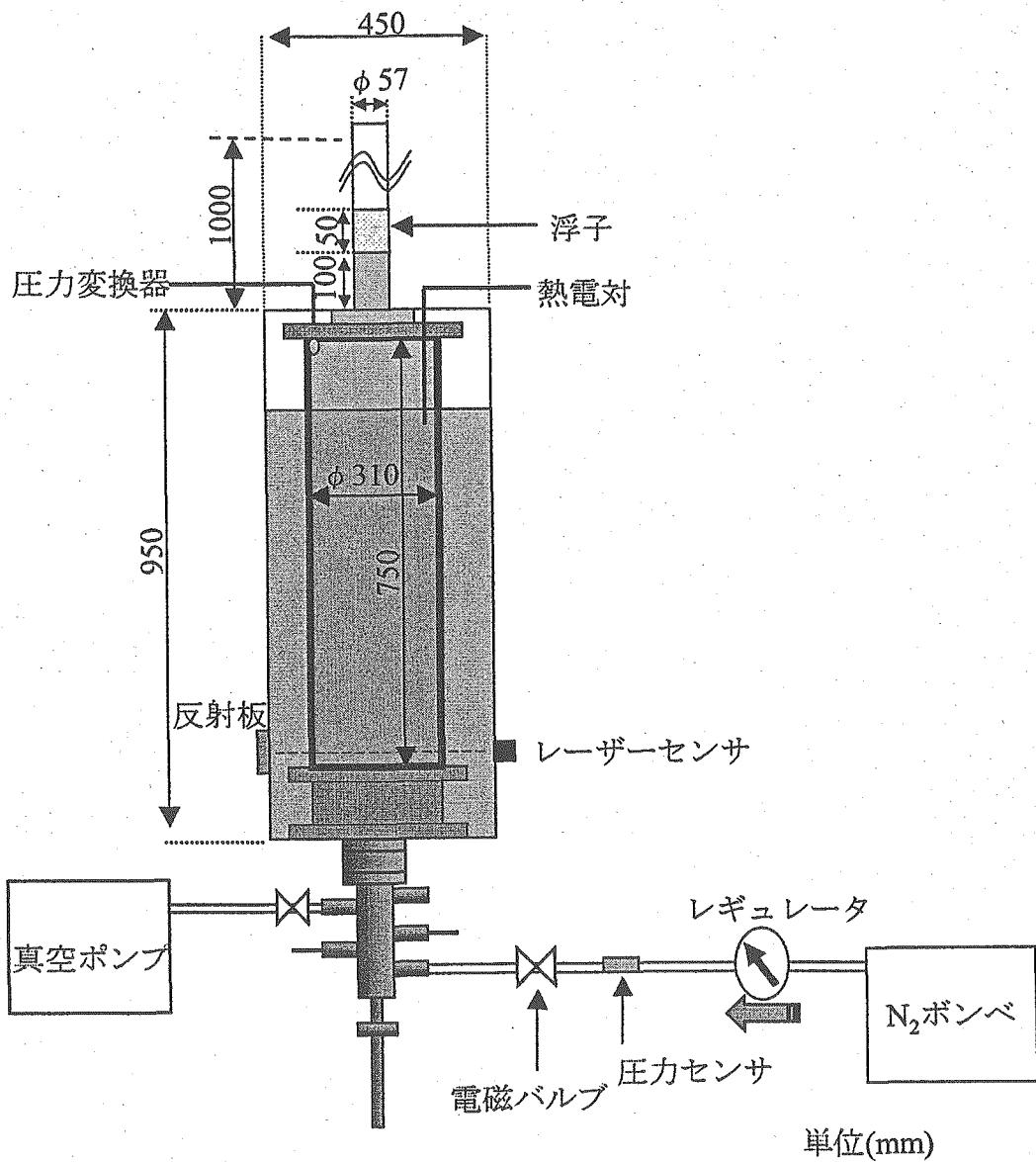


図 1 蒸気泡過渡凝縮実験の装置概略

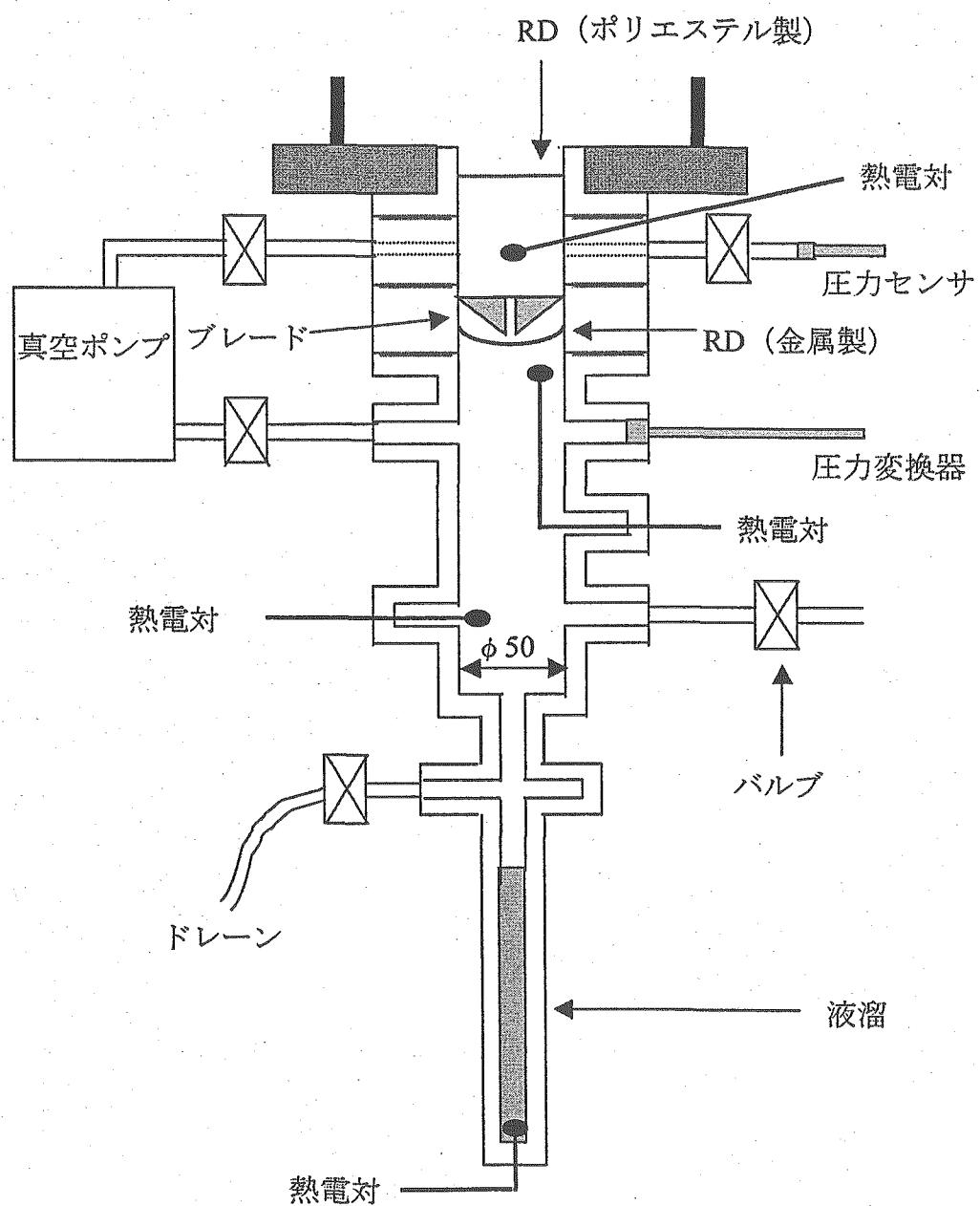


図 2 蒸気泡過渡凝縮実験の装置概略（圧力容器部）

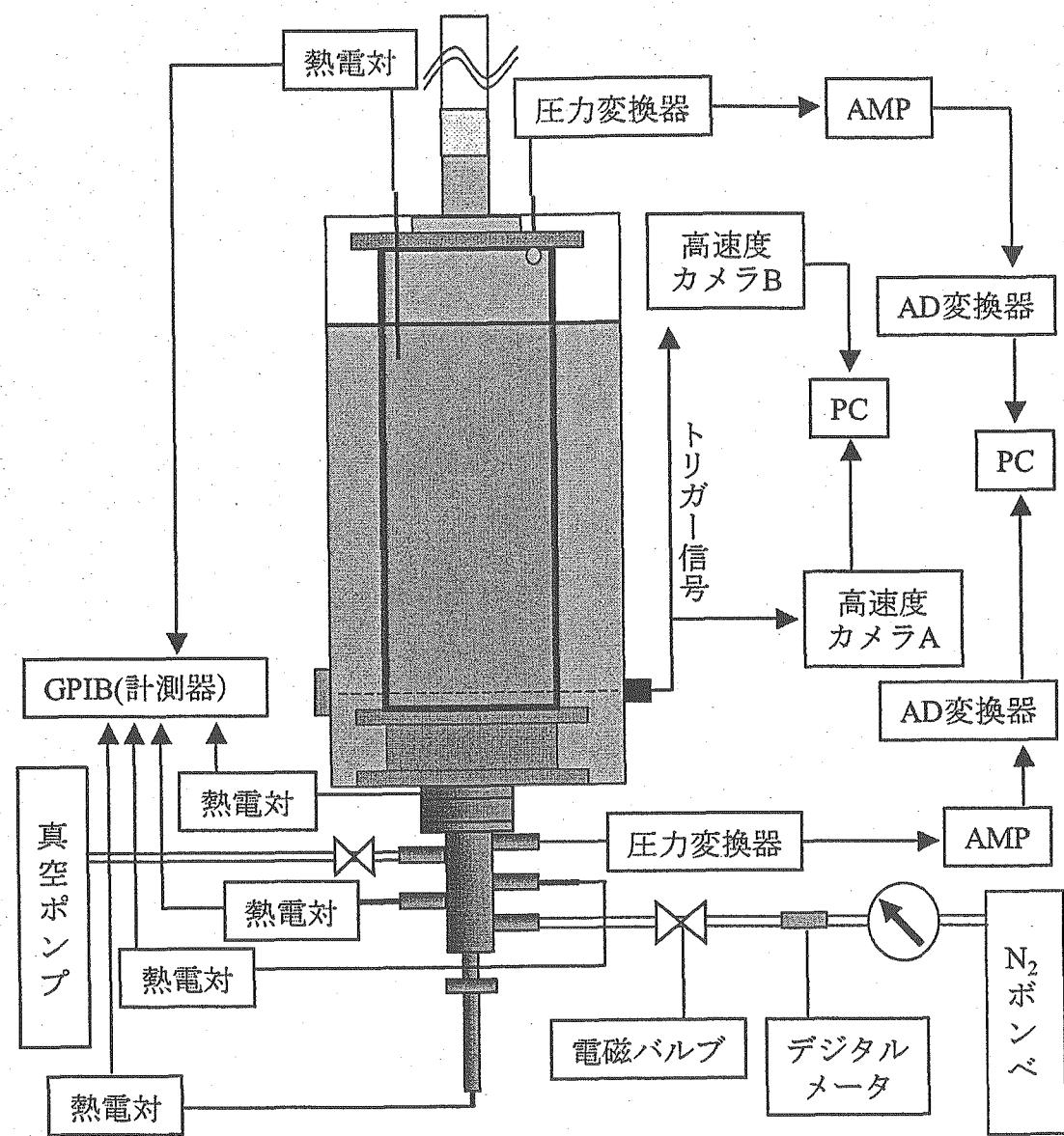


図 3 蒸気泡過渡凝縮実験装置の系統図

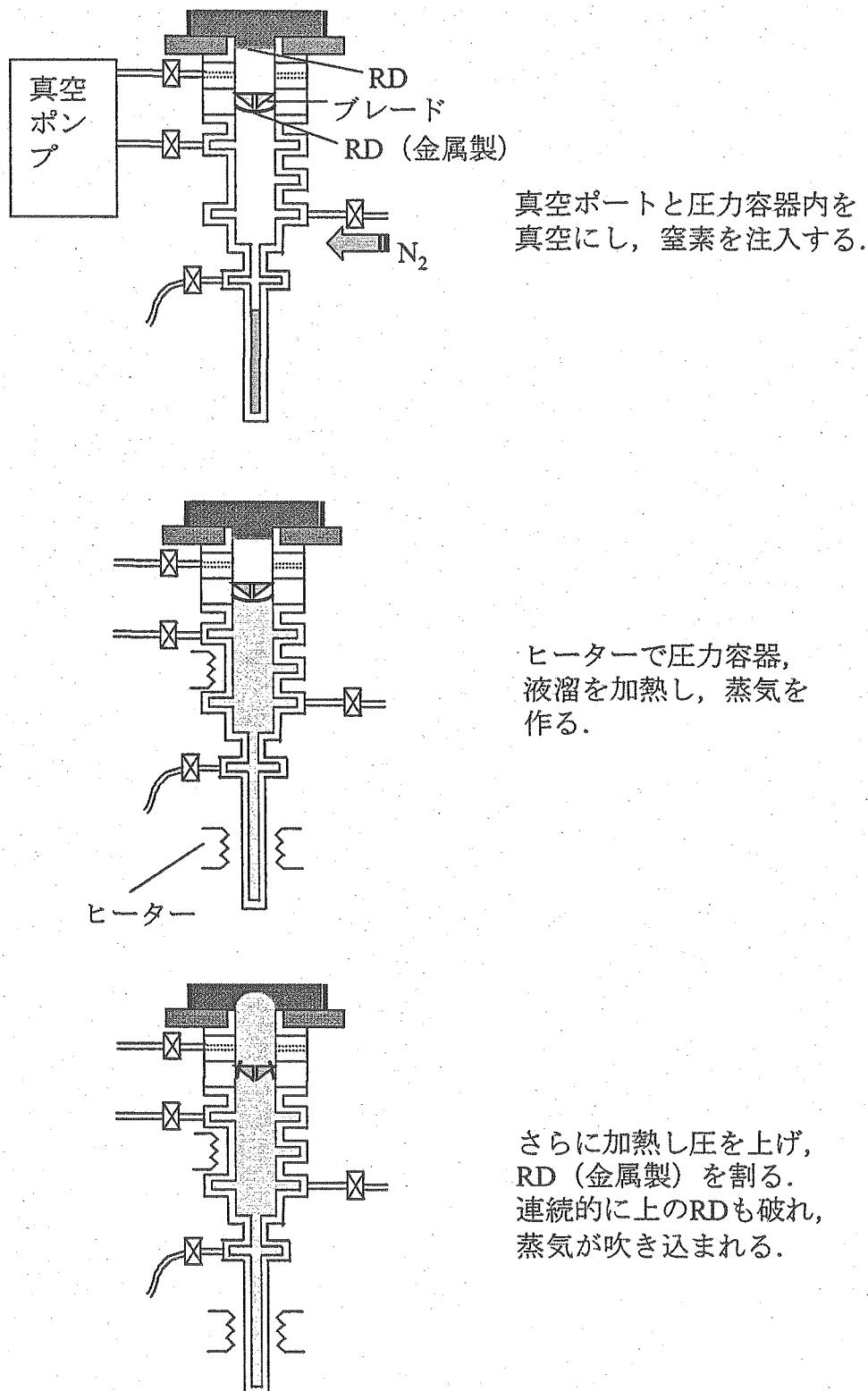


図4 蒸気泡過渡凝縮実験における混合蒸気放出の過程

3. 実験解析

3.1. 数値解析の概要

本試験の解析には、昨年度開発した拡張流動様式モデルを組み込んだ SIMMER-III コードを用いた。本モデルは、計算セルの大きさを超える巨視的な気泡（ラージスケール気泡）を取り扱える流動様式モデルとして拡張されており、マルチスケール流動様式モデルとも呼んでいる。このモデルには、以下の2つのオプションがある。

MODEL A：計算セル(i,j)においてラージスケール気泡領域が占める体積率 $\alpha_{lb,ij}$ を分散流領域が占める割合 $\alpha_{D,ij}$ と等しいとおく。すなわち、

$$\alpha_{lb,ij} = \alpha_{D,ij}$$

本モデルでは、 $\alpha_{lb,ij} > 0$ すなわち $\alpha_{ij} > \alpha_B$ を満たす計算セルの連続領域をラージスケール気泡領域とする。

MODEL B：計算セル(i,j)においてラージスケール気泡領域が占める体積率 $\alpha_{lb,ij}$ を分散流領域が占める割合 $\alpha_{D,ij}$ に気泡流領域において気相が占める体積率 $\alpha_{GB,ij}$ を加えたものに等しいとおく。すなわち、

$$\alpha_{lb,ij} = \alpha_{GB,ij} + \alpha_{D,ij}$$

本モデルでは、 $\alpha_{ij} > \alpha_B$ を満たす計算セルの連続領域とその領域に隣接する $\alpha_{lb,ij} > 0$ を満たす計算セルを合わせてラージスケール気泡領域とする。

昨年度の解析で MODEL B の方が実験と良い一致を示したことから [3]、本解析では、 MODEL B (図 5 参照) を標準として用いた。

解析体系の概略を図 6 に示す。解析は、図に示すような左側下端を原点とした r-z 平面の円筒座標 2 次元体系にて行った。解析体系は、主要な実験体系を模擬するよう に、圧力容器、水槽、上部パイプの領域を設け、実験条件と同じ温度、圧力を初期条件とした。2枚の破裂板 (RD) は計算開始より 0.1 秒後に開放するように設定し、破裂時点を時刻ゼロとする。境界条件は、上部パイプ出口において圧力一定 (大気圧)、自由流出／流入条件、それ以外の境界壁表面では free slip の条件を与えた。本実験体系では、水槽底部に接続された圧力容器出口、水槽上部の上部パイプ接続部におい

て流路断面積の急拡縮がある。このため、本解析では、いずれのケースにおいても、流出口および流入口での圧力損失を近似的に模擬するため、以下のオリフィス係数を与えた。

$$c_{orf} = 0.5 \text{ (水槽底部に接続された圧力容器出口)}$$

$$c_{orf} = 0.25 \text{ (水槽上部の上部パイプ接続部)}$$

但し、SIMMER-III コードでは、このオリフィス係数による圧力損失を次式で定義している。

$$\Delta p = -c_{orf} \bar{\rho}_q |v_q|^2$$

ラージスケール気泡の気泡界面には、次の抗力係数 [4] を用いた。

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

ここで、 $Re = 2R_G \rho_L (v_G - v_L) / \mu_L$ 、 $Eo = g (\rho_L - \rho_G) (2R_G)^2 / \sigma$ である。上式は、水道水のように特別な浄化処理をしていない液体（中程度の汚れ系）に適切なモデル式であり、広範囲の流体物性・気泡径の单一気泡に適用可能である。

3. 2. 窒素のみの場合

窒素のみを吹き込んだ実験においては、昨年度実施した実験でも観察されたように、アクリル製円筒水槽壁の歪みに起因すると思われる圧力振動が観察された。ここでは、昨年度実施した RD 破裂圧力 0.21MPa で窒素のみを吹き込んだケースを例に、圧力振動の原因を定量的に考察してみる。

リングの面内のたわみ振動の固有振動数 f は、次式で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi R^2} \frac{n(n^2 - 1)}{\sqrt{n^2 + 1}} \sqrt{\frac{EI}{\rho}}$$

ここで、 n は全波数、 ρ はリング単位長さ当たりの質量、 EI は曲げ剛性、 R は半径である [5]。Young [6] によると、円筒断面に対する固有振動数は、曲げ弾性率 E を $E/(1-\nu^2)$ (ν はポアソン比) で置き換えることで評価できる。アクリル樹脂に対する物性 $E = 3200$ MPa および $\nu = 0.35$ を用いると、上式は本実験で用いた円筒構造の

固有振動数として、 $n = 2$ の場合、 $f = 84 \text{ Hz}$ を与える。一方、初期圧力 0.21 MPa の場合、初期の 12 ms 周期の圧力ピークは、図 7 に見られるように、約 83 Hz の振動周波数となる。このことは、内側の水槽上部で観察された圧力振動が、アクリル樹脂性の円筒壁の構造振動によるものであると推定される。

図 8 に、画像解析から得られた気泡体積 (equivalent bubble volume) および水槽上部のパイプ内の水位変化から得られた気泡体積 (actual bubble volume) の変化を比較したものを示す。水位変化から得られた気泡体積は単調に増加する一方で、画像解析から得られた気泡体積は水位変化から得られた気泡体積に対してやや大きな振動した変化を示している。この画像解析から得られた気泡体積の振動挙動は、圧力変化に見られた振動と一致している。従って、画像解析から得られた気泡体積と水位変化から得られた気泡体積の違いは、気泡への水の entrainment ではなく、水槽の円筒構造の構造的な歪みによって生じたものと考えられ、少なくとも気泡成長の初期には、顕著な entrainment は発生しなかったと思われる。

窒素のみを用いた気泡挙動実験は平成 14 年度に実施済みであるが、混合蒸気を用いた実験と同じ条件で比較するため、断熱層を設けた新しい実験体系で再実験を行った。窒素圧力 0.36 MPa 、温度 19°C で放出された場合について、図 9 に水槽上部圧力の時間変化、図 10 に圧力容器内圧力の時間変化、図 11 に水槽内の気相および気泡体積の時間変化を示す。ここで、actual bubble volume および equivalent bubble volume は、それぞれ、拡張流動様式モデルを用いた SIMMER-III コードによる解析で得られたラージスケール気泡内の気相体積およびラージスケール気泡体積に対応する。また、本解析では、ステンレス製 RD 破裂後の流動抵抗を仮定し、

$$c_{orf} = 0.025 \quad (\text{ステンレス製下部 RD 部})$$

を用いた。画像解析では気泡成長と運動に伴って気泡体積を過大評価する傾向にあることを考慮すると、解析と実験の一一致は良く、気泡成長過程が適切に模擬できている。また、図 12 に示すように、気泡流～液滴流のみを扱う従来の流動様式モデルによる解析での水槽内の気液界面積は、拡張流動様式モデルによる解析での单一気泡の気液界面積と比べ著しく大きい。このことから、蒸気泡に含まれる非凝縮性ガスが支配的

で比較的大きい気泡が形成される場合は、気液界面積の適切な取り扱いが気泡成長や運動のシミュレーションに重要となり得ることが分かる。

3. 3. 水蒸気のみおよび混合蒸気の場合

水蒸気のみを放出した場合（水蒸気圧力 0.32 MPa、温度 142°C）および窒素濃度をパラメータとした混合蒸気の場合（窒素濃度 3.3%、10.7%；混合蒸気圧力 0.32 MPa、温度 136°C）について、水槽上部圧力の時間変化を図 13、図 15 および図 17 に、圧力容器内圧力の時間変化を図 14、図 16 および図 18 に示す。SIMMER-III コードによる解析では、水蒸気のみおよび混合蒸気を用いた場合についても、全てのケースで、窒素のみの場合と同じオリフィス係数を設定し、ここでは、気泡流～液滴流を扱う通常の流動様式モデルに加え、非凝縮性ガスの凝縮抑制効果を無視する条件での解析結果を示している。解析では、特に、水槽上部での圧力振動挙動が再現できないものの、比較的長い時間スケールでの圧力変化の傾向は再現できている。本実験では、破裂板開放後、圧力容器内の圧力低下によって水槽側から急速に水が逆流する現象が観察された。図 19～図 21 は、水蒸気のみを放出した場合および混合蒸気の場合について、解析で得られた圧力容器内の気相体積の初期量からの変化を示したものである。ここでは、それぞれ、上部 RD 以下の領域、下部 RD 以下の領域および圧力容器下部（蒸気発生部）についてその変化を示している。ここに示した 3 つの解析ケースでは、RD 破損後 80～110ms で下部 RD より下の圧力容器部まで水が逆流している。このため、圧力容器内の圧力変換器の受圧面が水に濡れ、指示圧力が破裂板開放後 100ms 前後でゼロを示した。この圧力容器内への水の逆流現象は、後述する急速な凝縮挙動に影響を及ぼしている可能性がある。

図 22、図 23 および図 24 に、上部パイプ内の水位変化から求めた水槽および圧力容器内の気相体積の初期量からの変化について、水蒸気のみを放出した場合および窒素濃度をパラメータとした混合蒸気の場合の結果を SIMMER-III コードによる解析と比較したものを示す。ここで、SIMMER-III コードによる解析では、拡張流動様式モデル、気泡流～液滴流を扱う通常の流動様式モデルを用いた結果を示している。また、SIMMER-III コードの相変化モデル [7] では、非凝縮性ガスの凝縮抑制効果を拡散律速モデルに基づいて考慮できるが、通常の流動様式モデルに加えこの凝縮抑制効果を無視したシミュレーション結果も示した（図 25）。尚、上述の水槽上部圧力および圧力

容器内圧力の時間変化として示した解析結果は、この解析条件で計算したものである。尚、水蒸気のみを放出した場合の解析結果（図 22）においても、非凝縮性ガスの凝縮抑制効果が現れているのは、断熱層に残存した窒素ガス（窒素濃度 0.0%、3.3%、10.7% の場合に、それぞれ 4.3kPa、4.8kPa、3.6kPa）の影響のためである。図 26～図 29 に水槽内での気相領域について窒素のみと水蒸気のみを放出した場合で比較した写真を示す。気相の水槽内放出直後は、水蒸気混合の有無に関わらず気液界面が明確に区別でき、单一気泡として成長しつつある様子が観察される。しかしながら、水蒸気を混合した場合は、窒素のみの場合のように单一気泡としては成長せず、急激な凝縮が進むことで蒸気相が気泡流状に分散し、また、窒素濃度 10.7% の場合に見られるように、後続して放出される混合蒸気がジェット状に水槽内に進入する様子が伺える。このような現象が、どの程度の窒素混合率で顕著となるのかは、今後確認しておく必要がある。

これらの結果の比較から、水蒸気のみおよび混合蒸気を放出した場合、本実験条件の範囲内では、凝縮を伴う気相の運動挙動はかなり分散的になり、SIMMER-III コードによる解析では、気相領域を单一気泡として扱う拡張流動様式モデルよりは、気泡流～液滴流として扱う通常の流動様式モデルの方が適切であると思われる。また、観察された凝縮現象においては、非凝縮性ガスの凝縮抑制効果が解析で予測されたものより、その効果がかなり小さいことが伺える。非凝縮性ガスの凝縮抑制効果が働くには、凝縮界面で非凝縮性ガス濃度の大きな境界層が発達する必要があるが、本実験条件では、凝縮によって加速された気液混合によって、固体壁面への凝縮現象で見られるような非凝縮性ガスの凝縮抑制効果 [2] が現れなかつたと考えられる。しかしながら、凝縮抑制効果を無視したシミュレーションにおいても、SIMMER-III コードは、水蒸気のみの場合は比較的実験に近い結果を与えるものの、概して凝縮挙動を過小評価する傾向にあり、窒素濃度の違いによる気相体積変化の違いを再現できていない。このことから、本実験で観察されたような短時間に急激な凝縮が進む場合の素過程を記述する物理モデルの改良が必要と考えられる。

3. 4. まとめ

以上の非凝縮性ガスの濃度をパラメータとした実験および解析から、凝縮を伴う蒸気泡の成長・運動挙動について、蒸気泡に含まれる非凝縮性ガスが支配的で比較的大

きい気泡が形成される場合は拡張流動様式モデルが適用できると考えられ、今後、凝縮条件下での実験的な検証を進める。一方、今回の実験条件の範囲では、非凝縮性ガスの凝縮抑制効果は小さく、急激な凝縮が進むことで蒸気相が気泡流状に分散する現象が観察された。今後、このような現象の素過程を記述する SIMMER-III コードの物理モデルの改良について検討を進める。また、一方で、本実験では、破裂板 (RD) 開放後の圧力容器内への水槽側からの水の逆流による二相混合が圧力容器内で急速な凝縮を加速した可能性もあり、SIMMER-III コードによる解析の妥当性も含めて、気泡放出の実験条件の改良についても今後検討する。

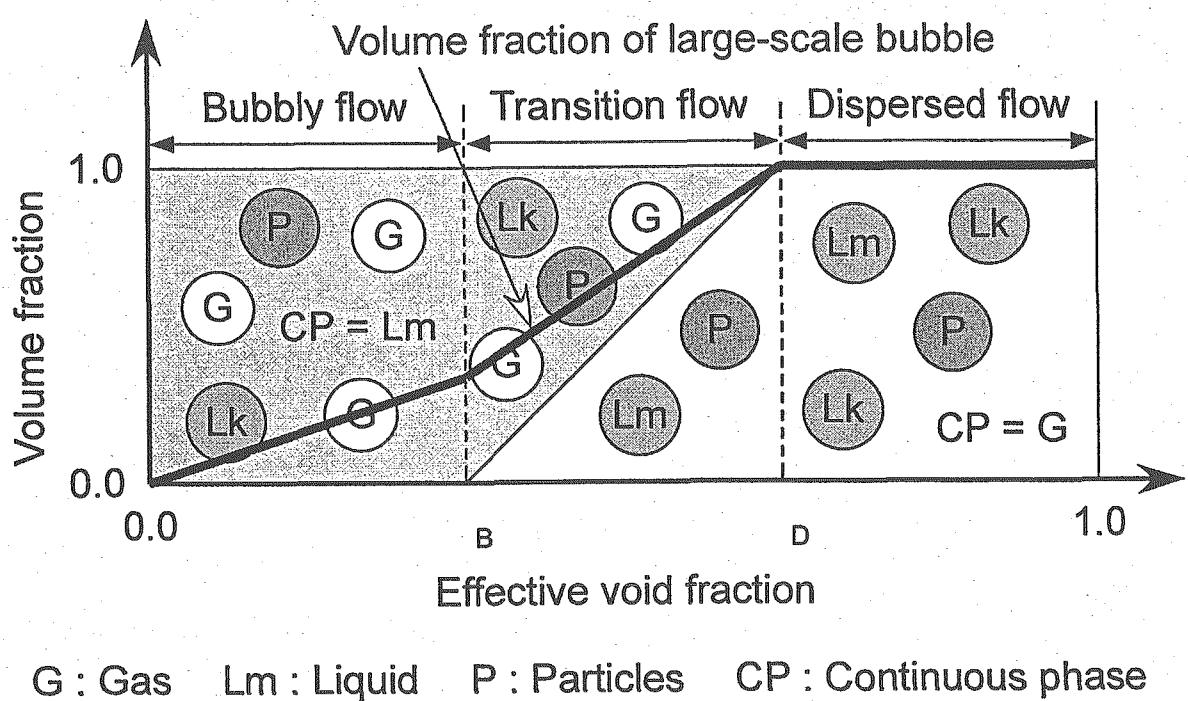


図 5 プール流流動様式でのラージスケール気泡の体積率（拡張流動様式モデル）

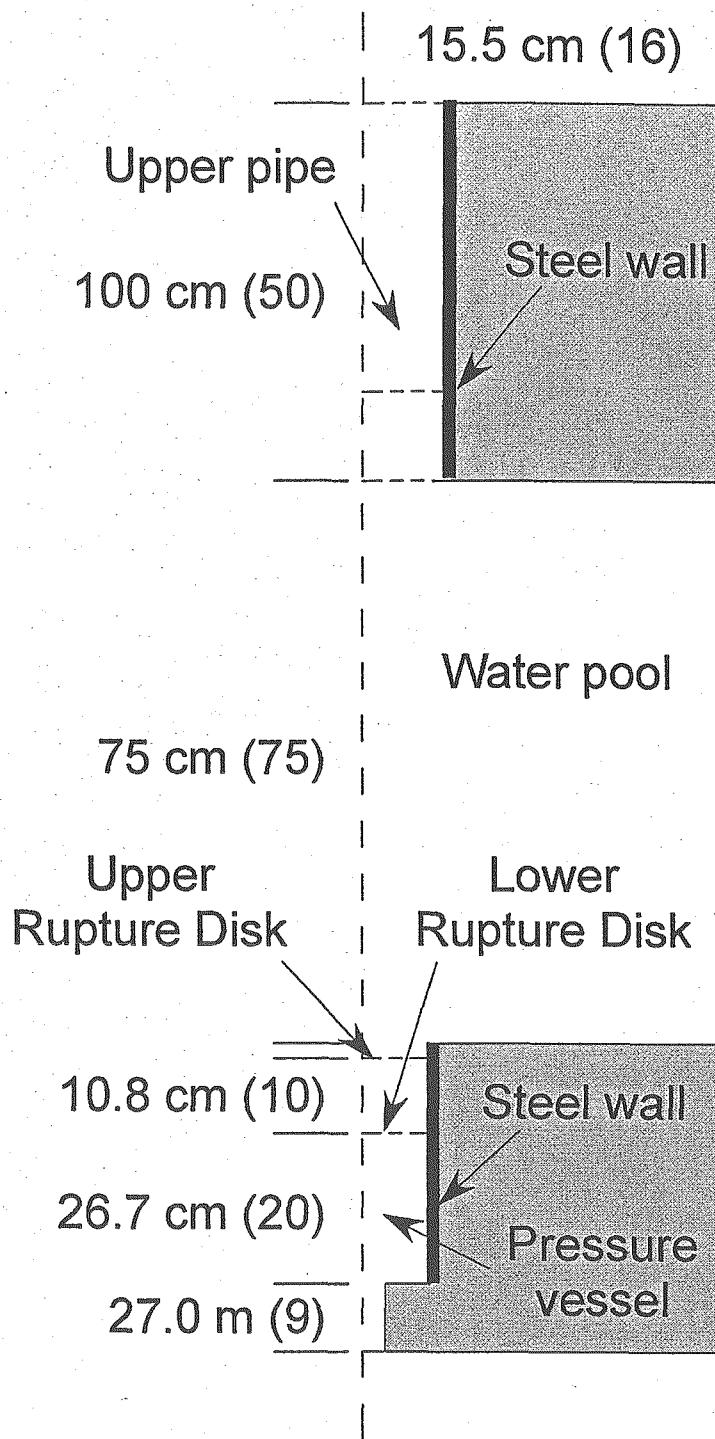


図 6 SIMMER-III コードによる実験解析体系
(括弧内の数字は計算セルの個数)

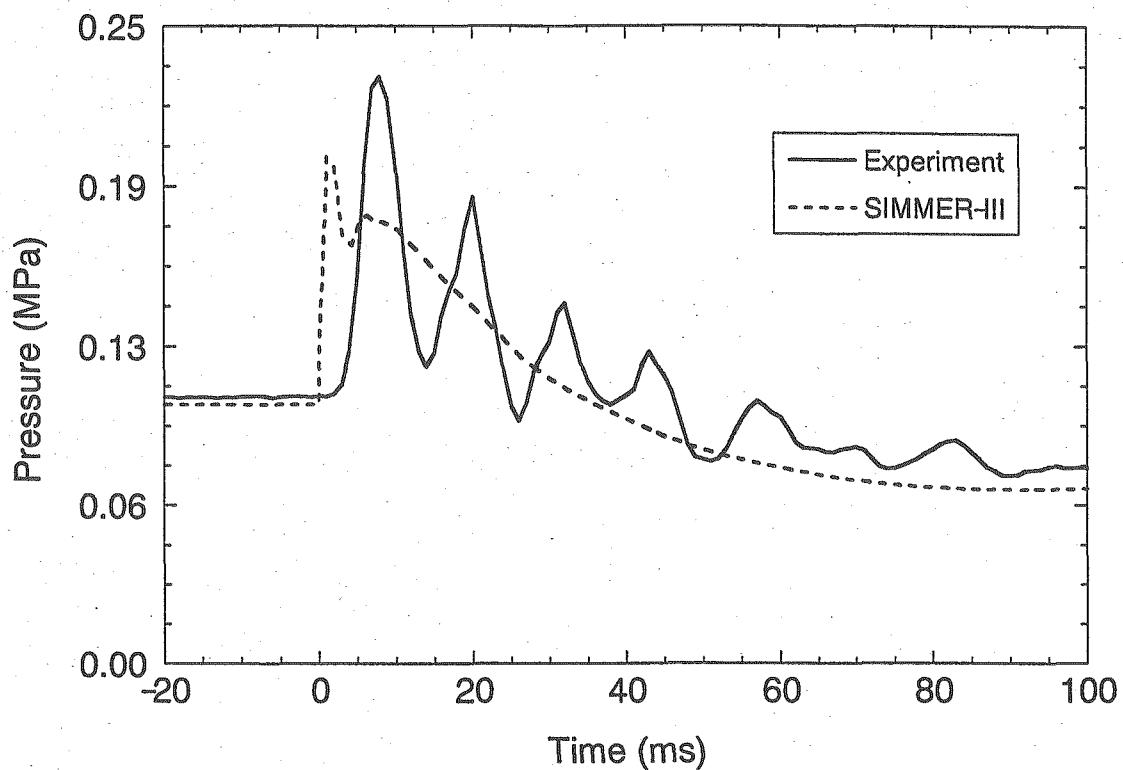


図 7 水槽内圧力の時間変化（窒素 100% ; 0.21MPa -昨年度実施分→）

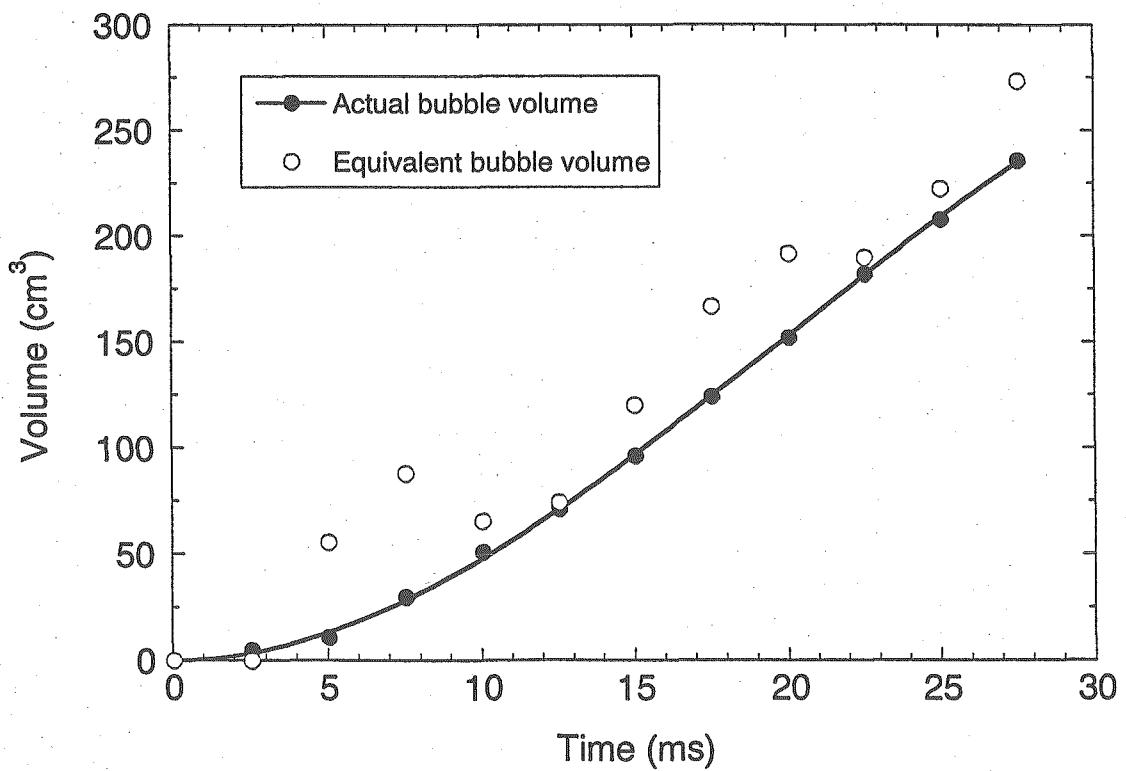


図 8 水槽内気泡体積の時間変化（窒素 100% ; 0.21MPa -昨年度実施分→）

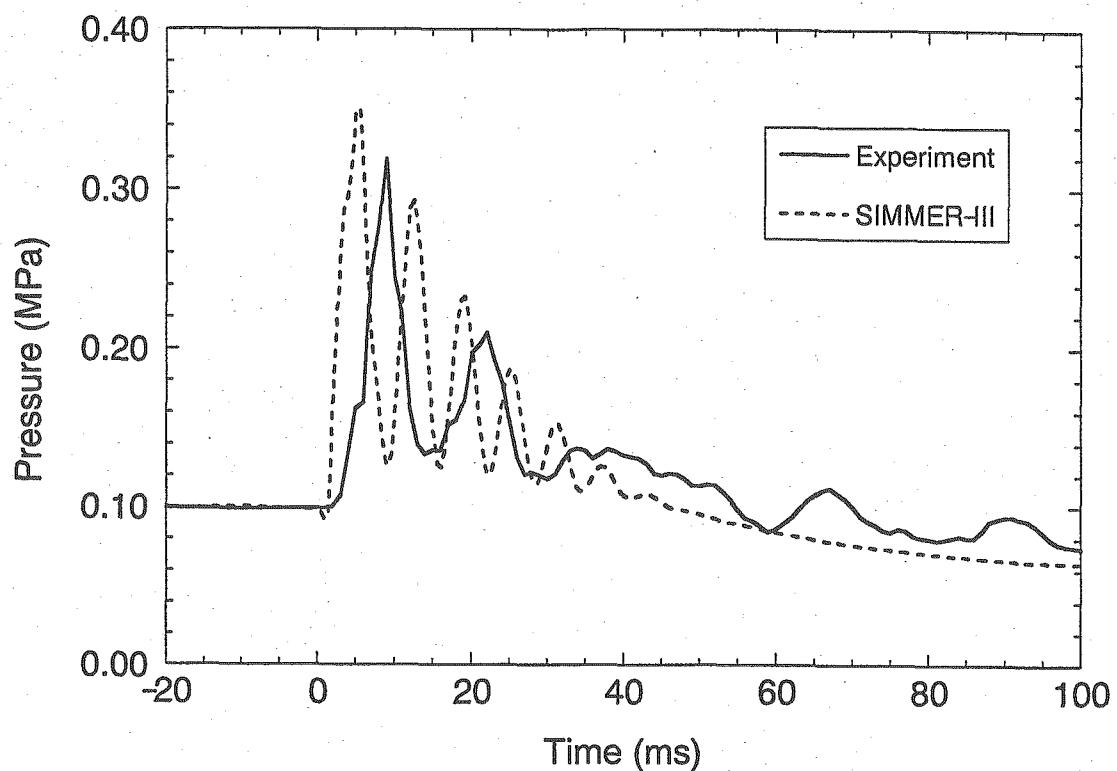


図 9 水槽上部圧力の時間変化 (窒素 100% ; 0.36MPa, 19°C)

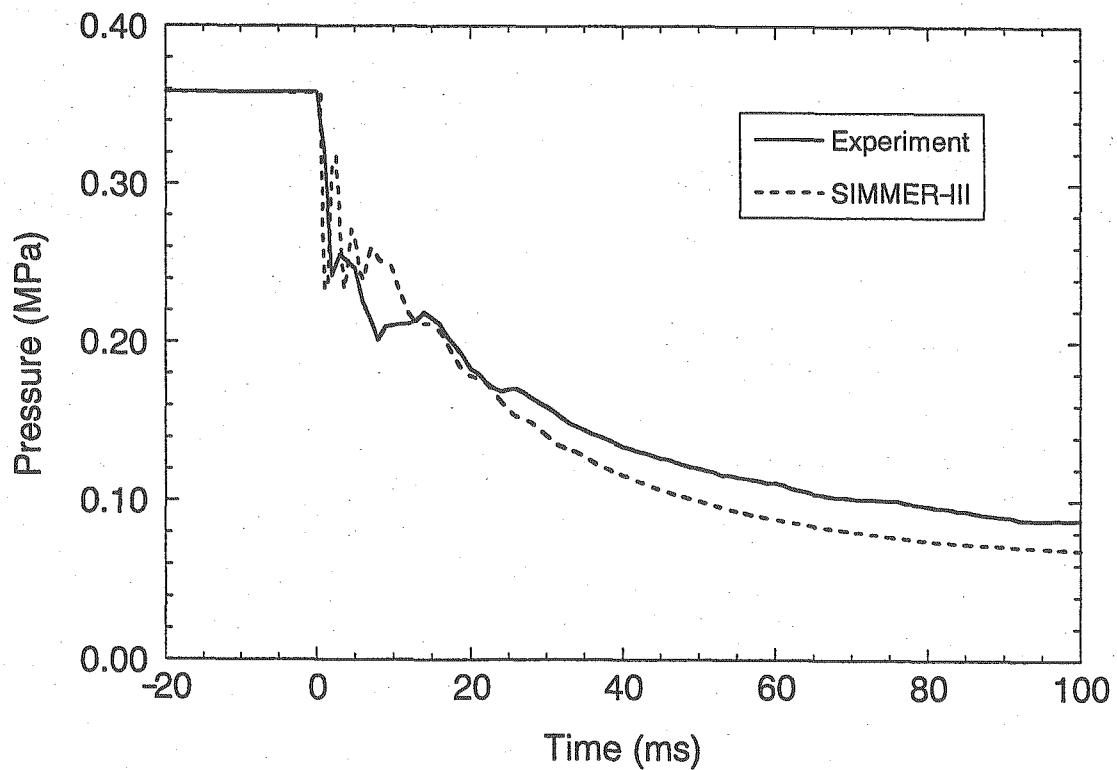


図 10 圧力容器内圧力の時間変化 (窒素 100% ; 0.36MPa, 19°C)

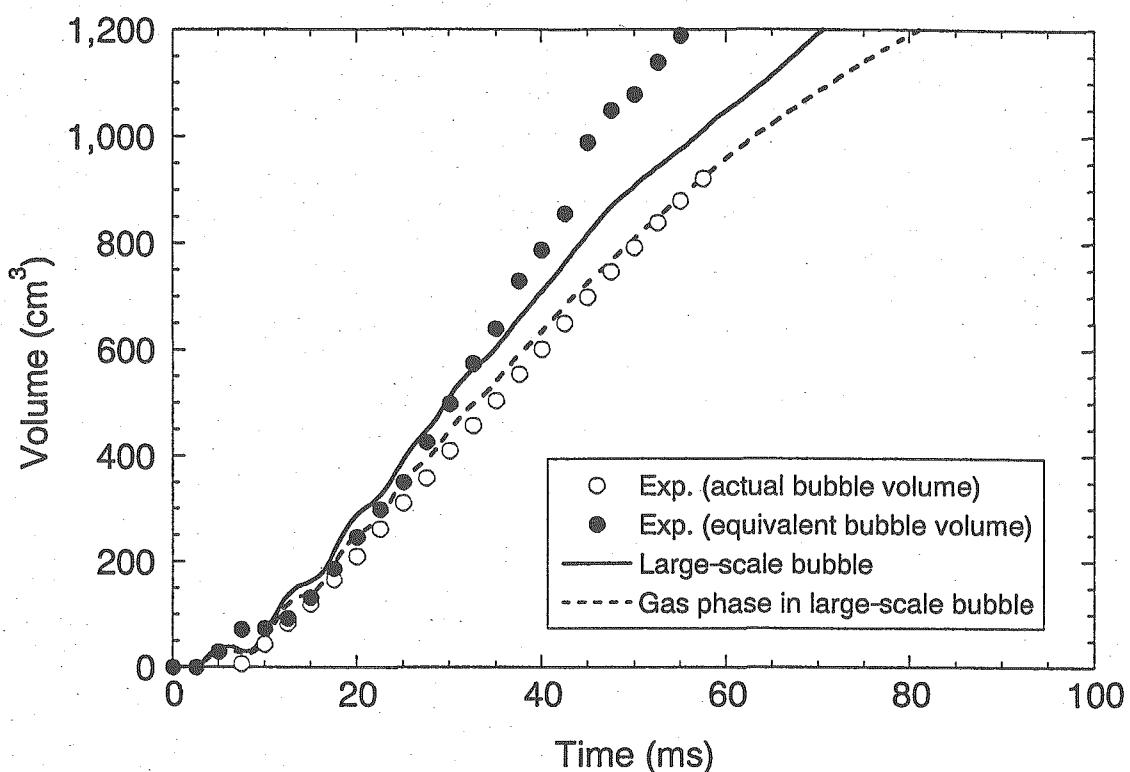


図 11 水槽内の気相および気泡体積の時間変化 (窒素 100% ; 0.36MPa, 19°C)

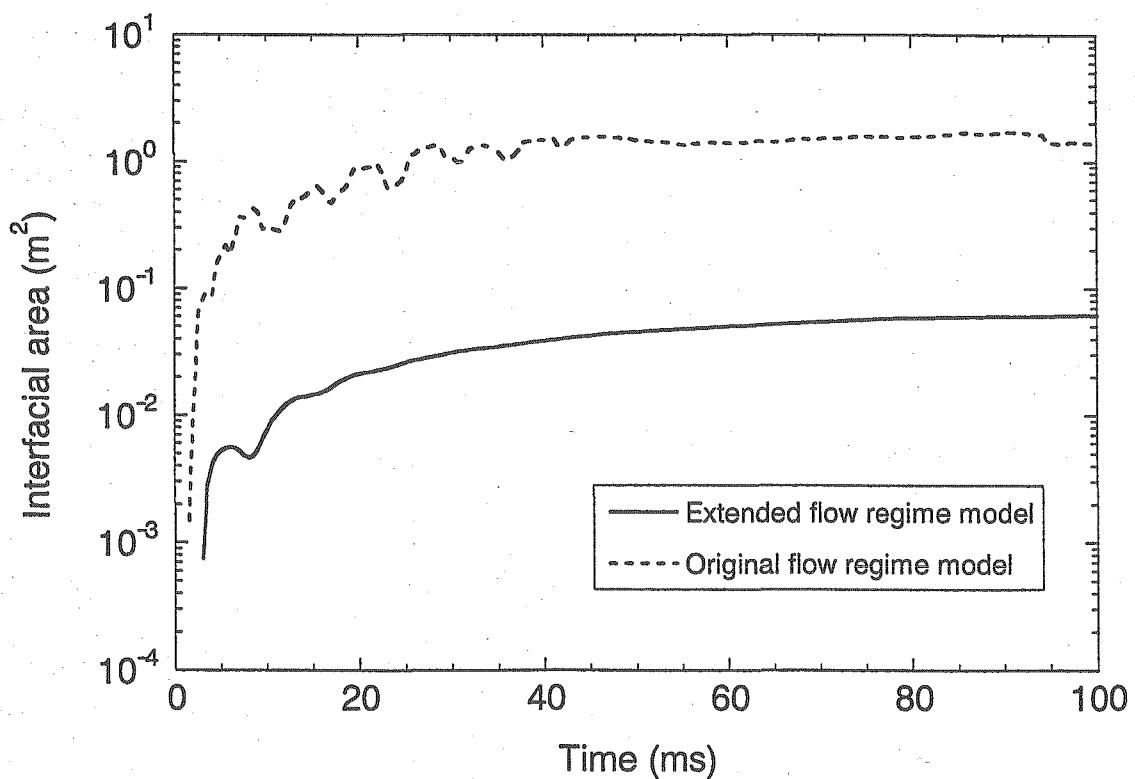


図 12 流動様式モデルの違いによる気液界面面積 (窒素 100% ; 0.36MPa, 19°C)

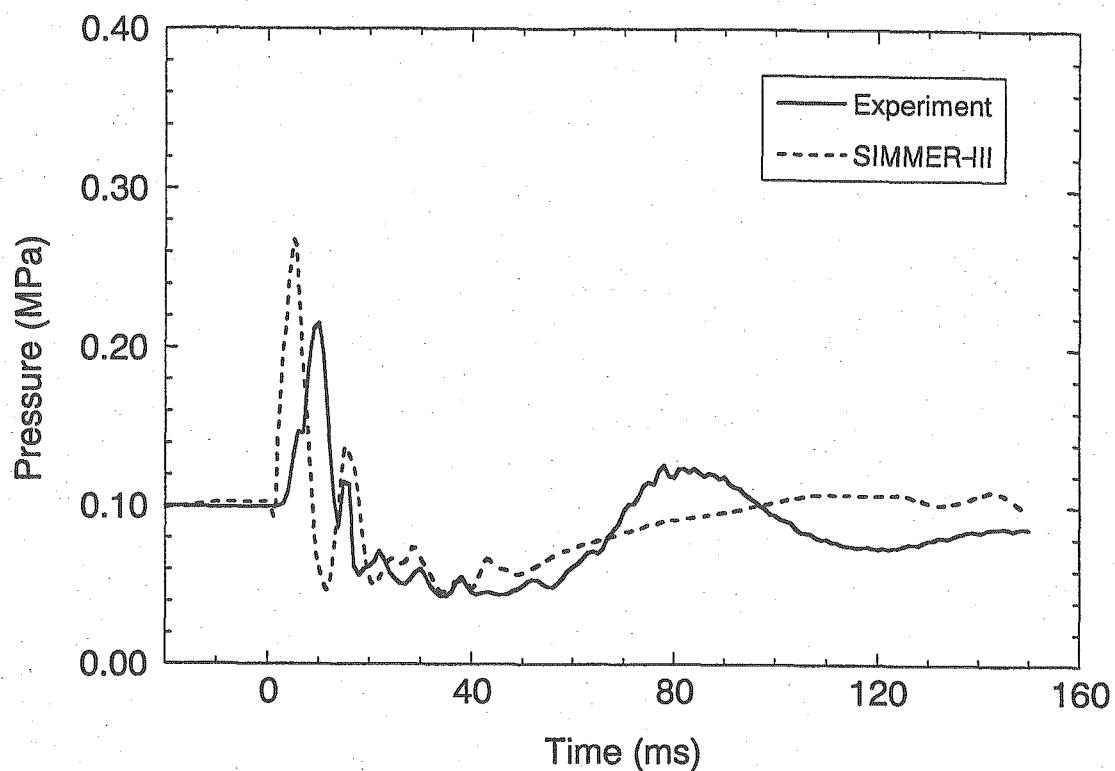


図 13 水槽上部圧力の時間変化 (窒素 0.0% ; 0.32MPa, 142°C)

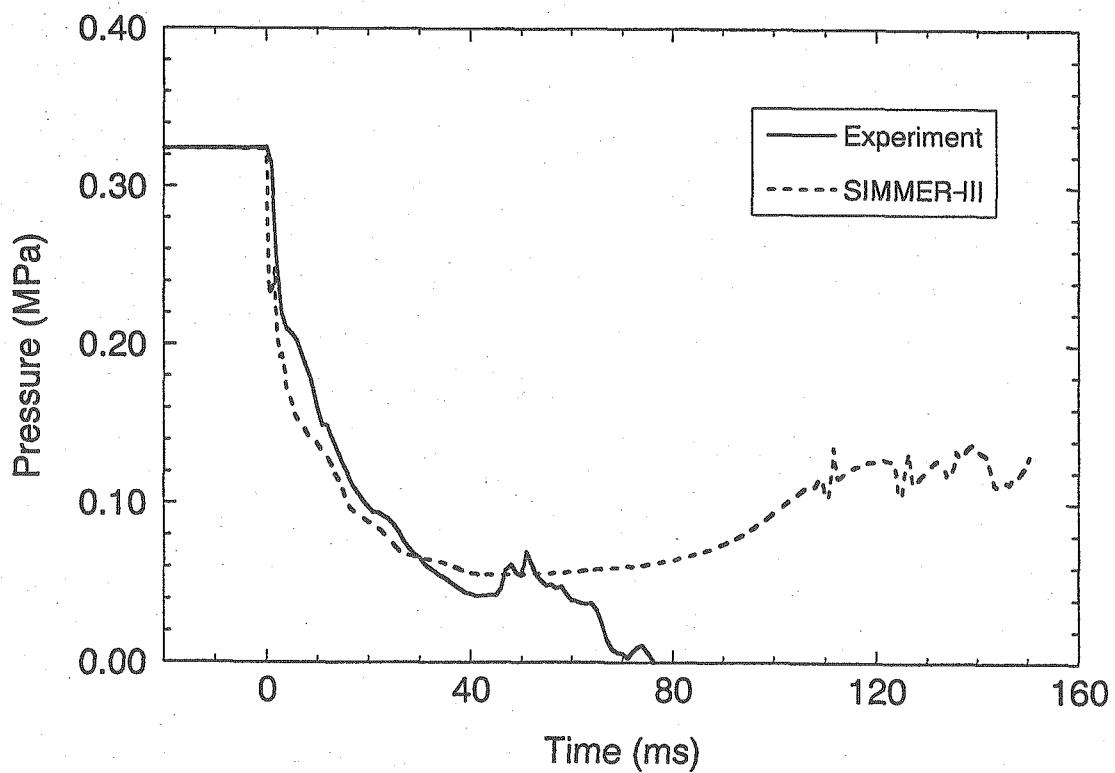


図 14 圧力容器内圧力の時間変化 (窒素 0.0% ; 0.32MPa, 142°C)

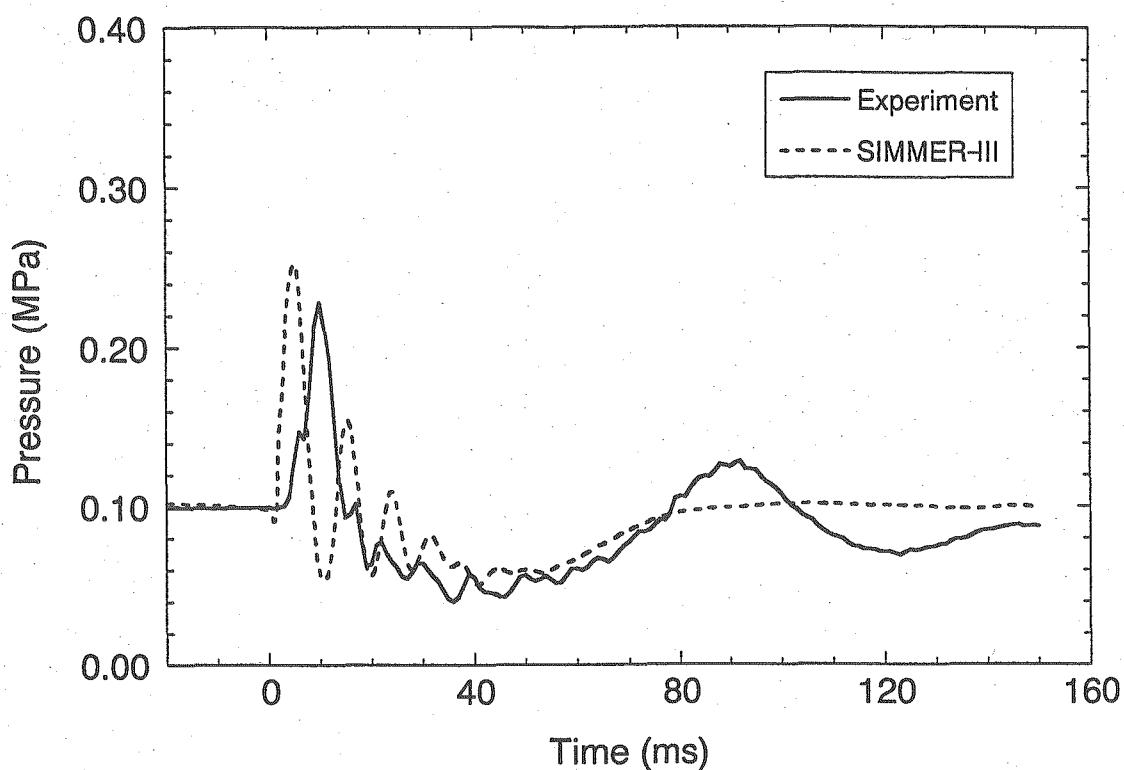


図 15 水槽上部圧力の時間変化 (窒素 3.2% ; 0.32MPa, 136°C)

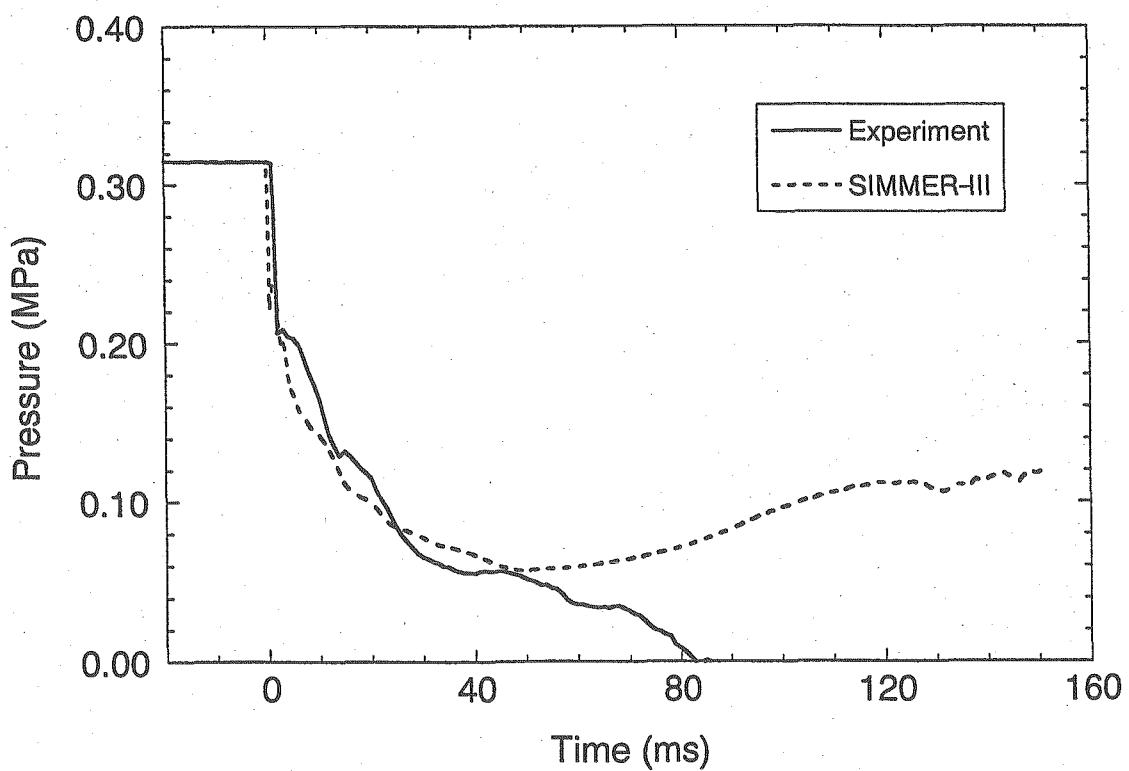


図 16 圧力容器内圧力の時間変化 (窒素 3.2% ; 0.32MPa, 136°C)

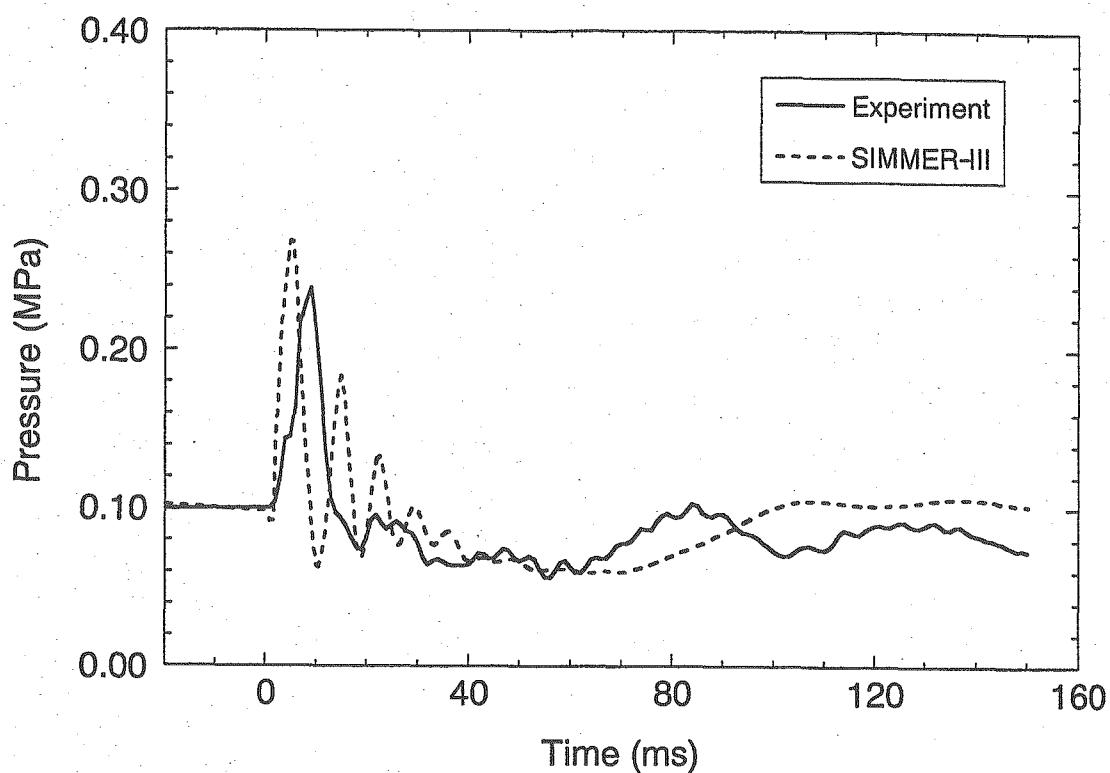


図 17 水槽上部圧力の時間変化 (窒素 10.7% ; 0.32MPa, 136°C)

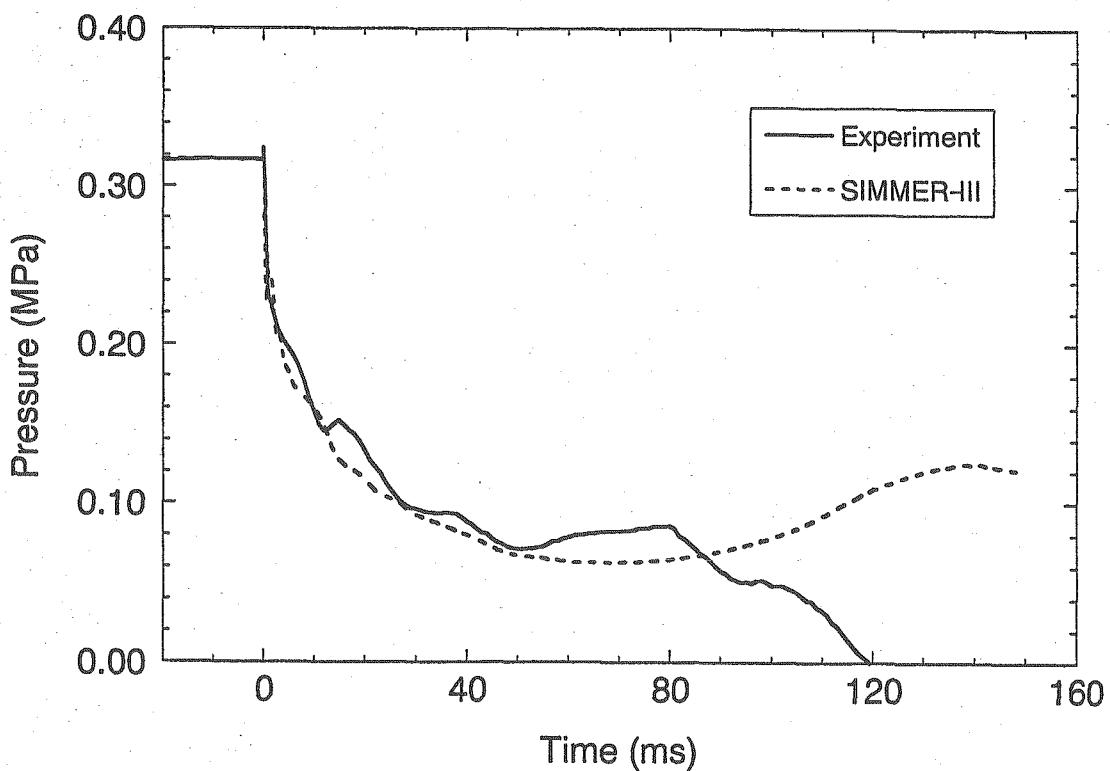


図 18 圧力容器内圧力の時間変化 (窒素 10.7% ; 0.32MPa, 136°C)

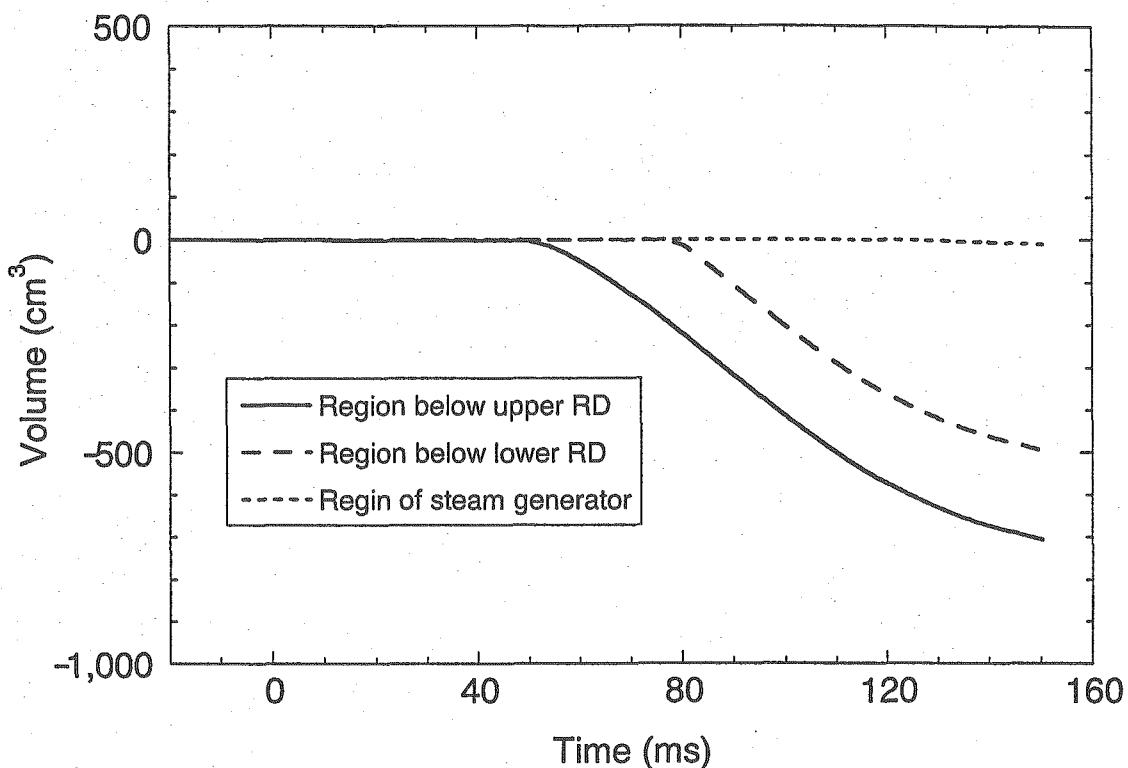


図 19 圧力容器内の気相体積の変化 (窒素 0.0% ; 0.32MPa, 142°C)

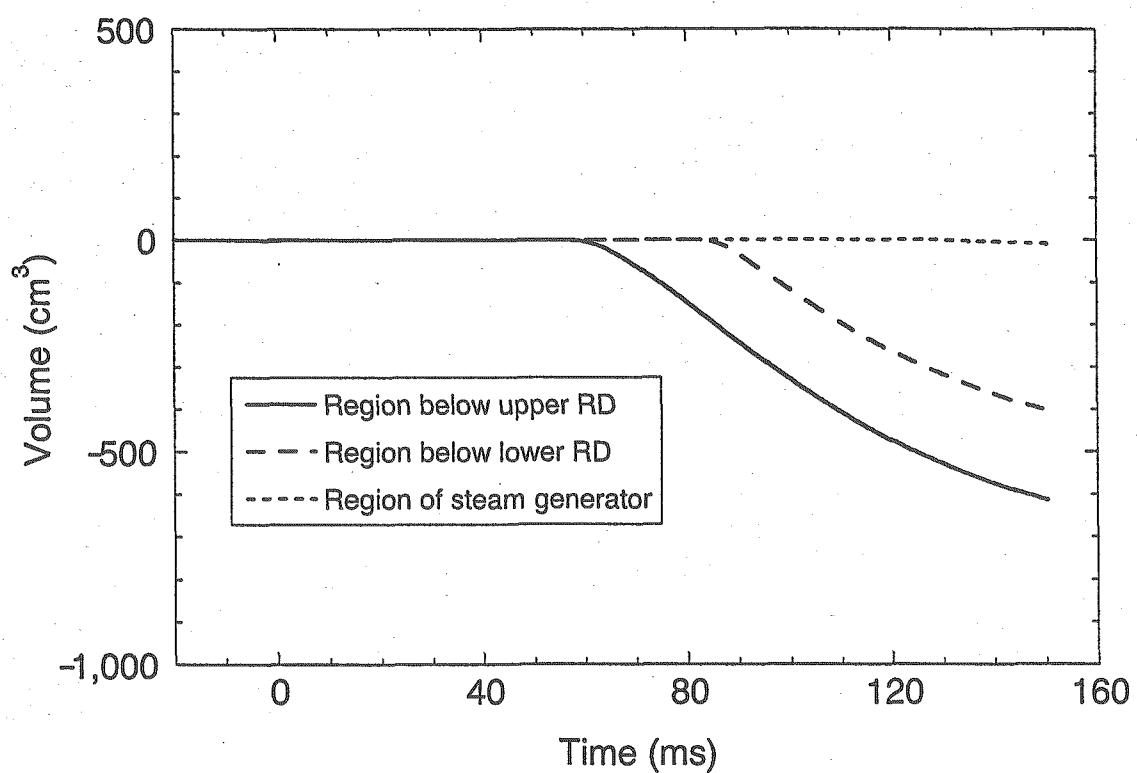


図 20 圧力容器内の気相体積の変化 (窒素 3.2% ; 0.32MPa, 136°C)

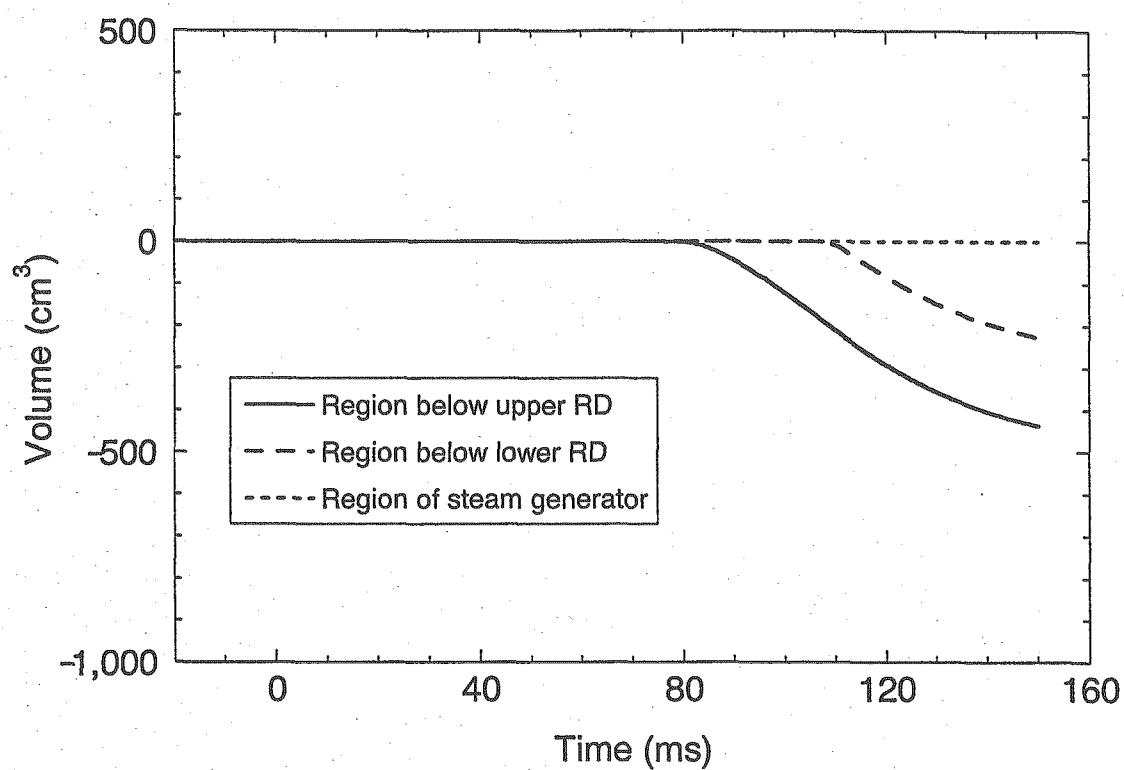


図 21 圧力容器内の気相体積の変化 (窒素 10.7% ; 0.32MPa, 136°C)

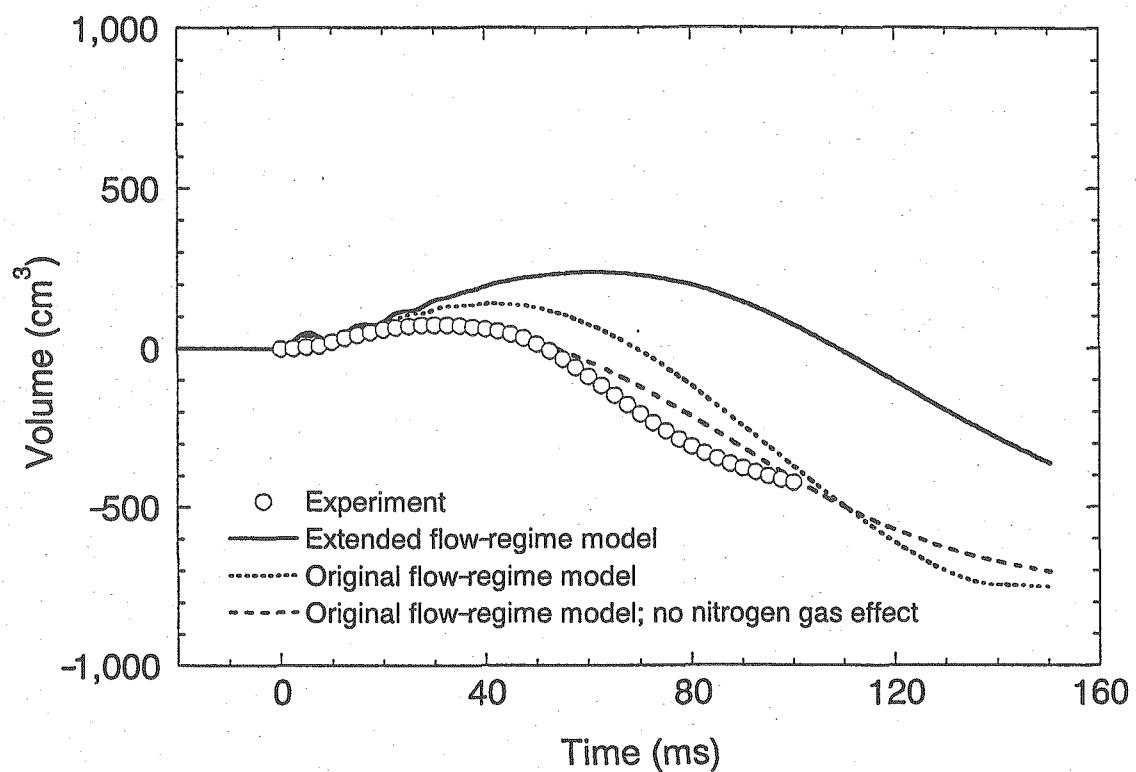


図 22 水槽および圧力容器内の気相体積の変化 (窒素 0.0% ; 0.32MPa, 142°C)

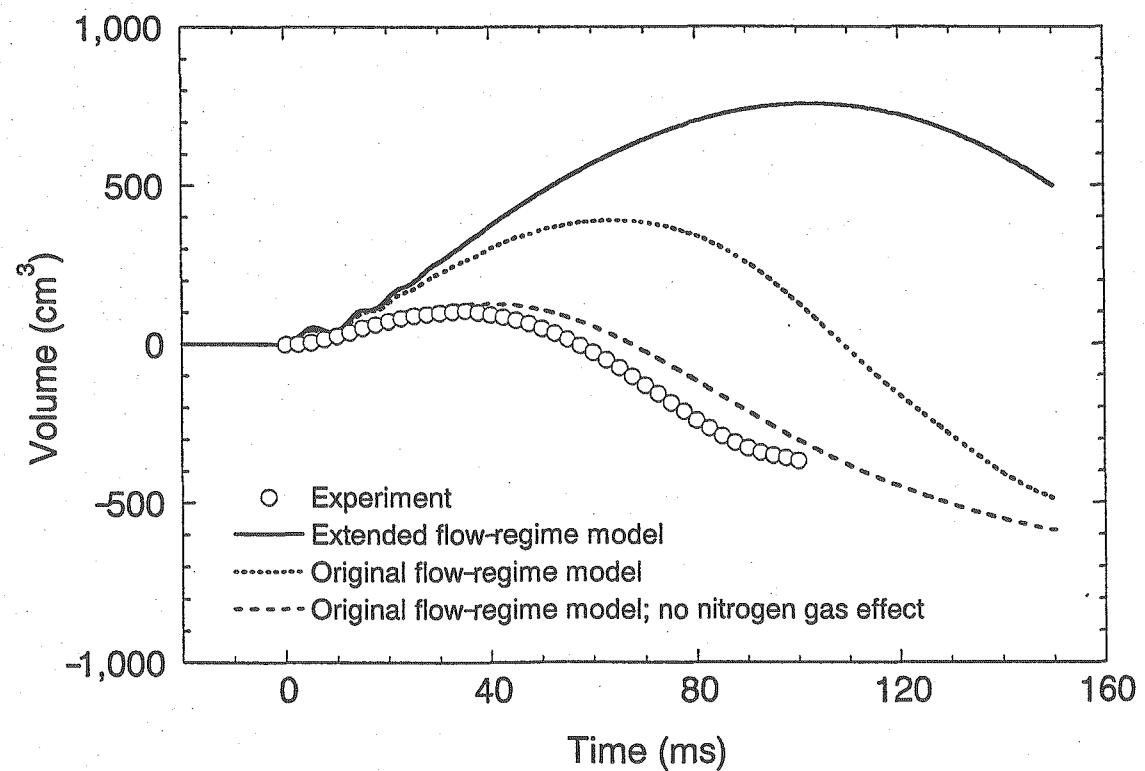


図 23 水槽および圧力容器内の気相体積の変化 (窒素 3.2% ; 0.32MPa, 136°C)

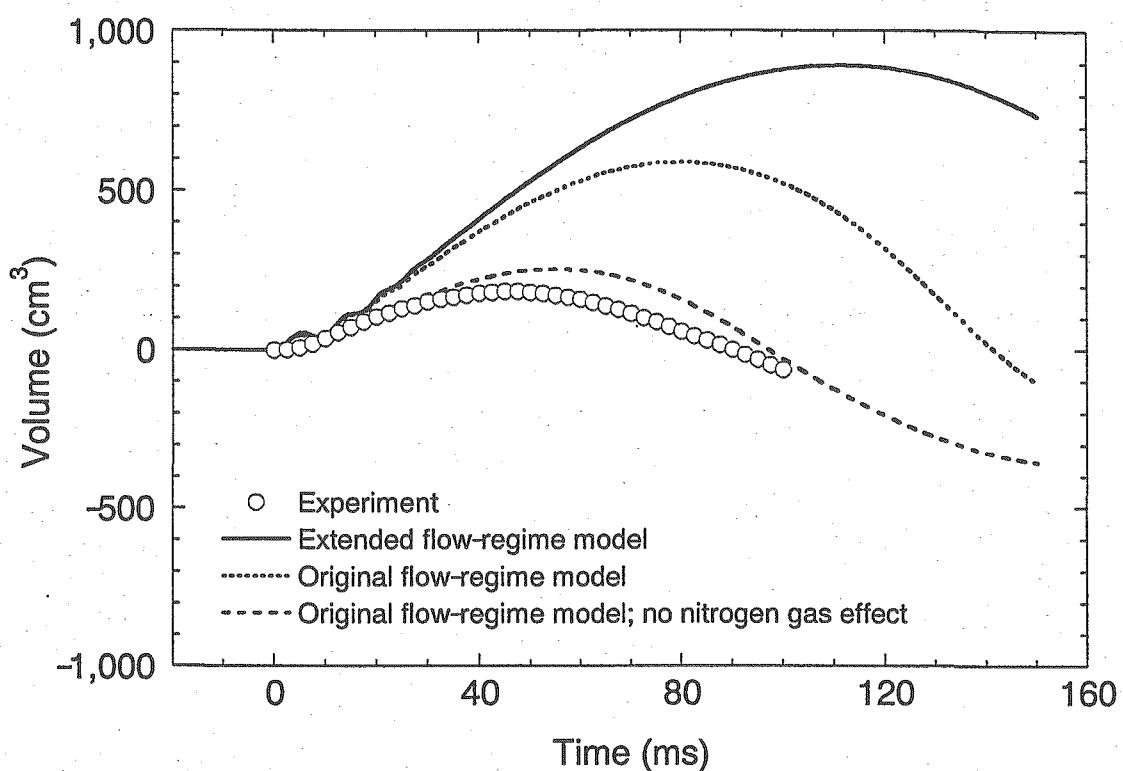


図 24 水槽および圧力容器内の気相体積の変化 (窒素 10.7% ; 0.32MPa, 136°C)

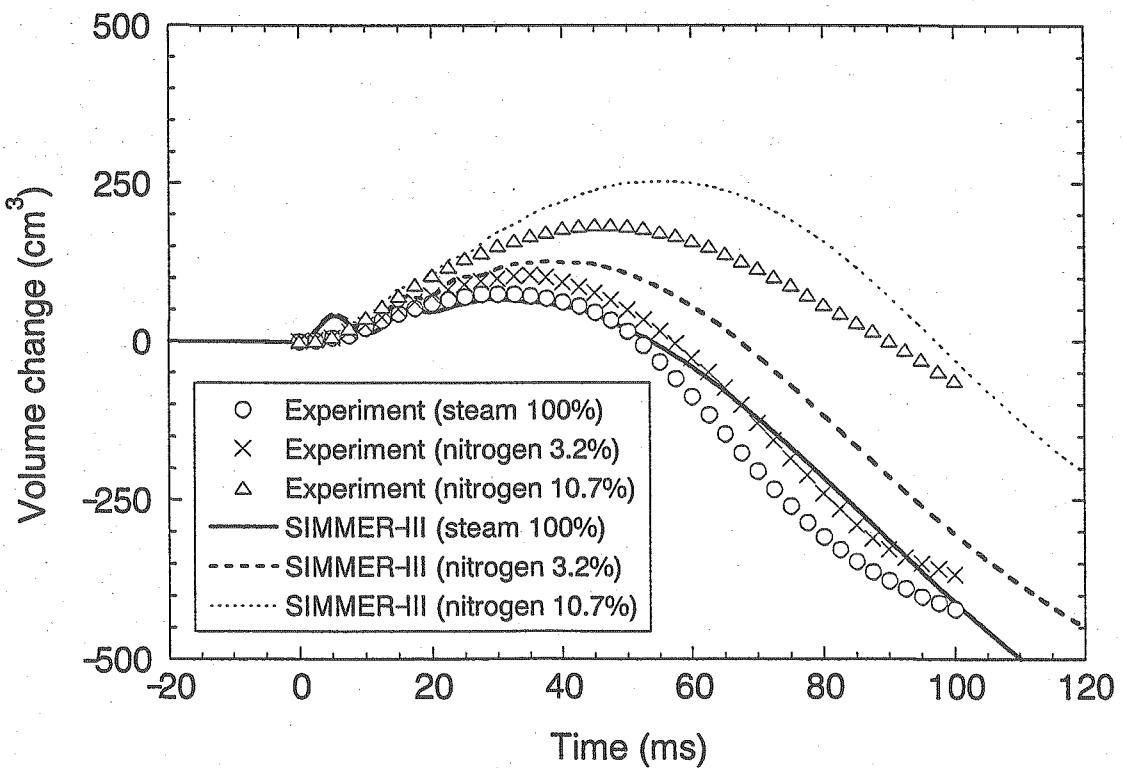


図 25 水槽および圧力容器内の気相体積の変化 (窒素濃度の影響)

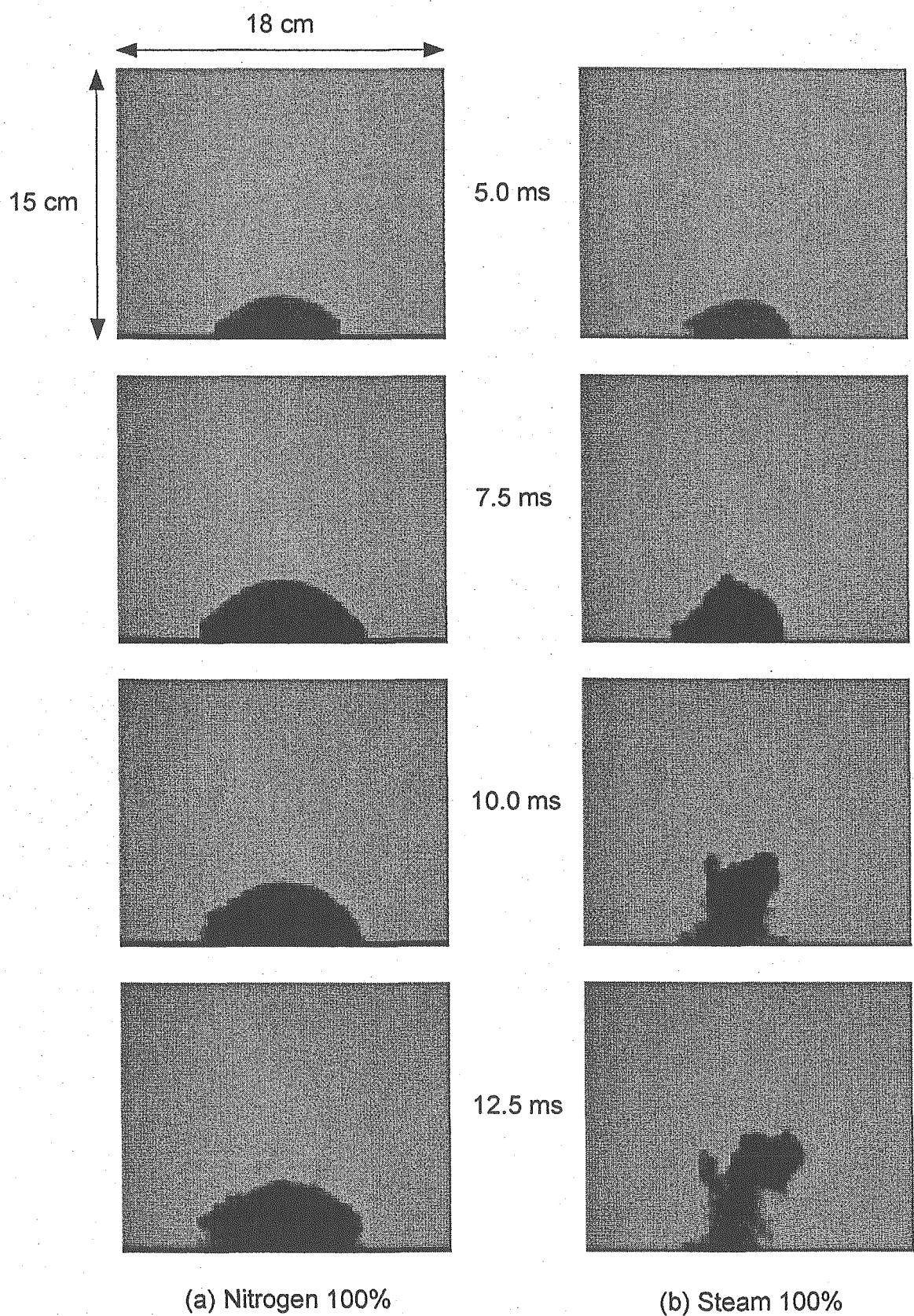


図 26 水槽内に放出された気相領域の比較（窒素・水蒸気のみ；短期挙動）

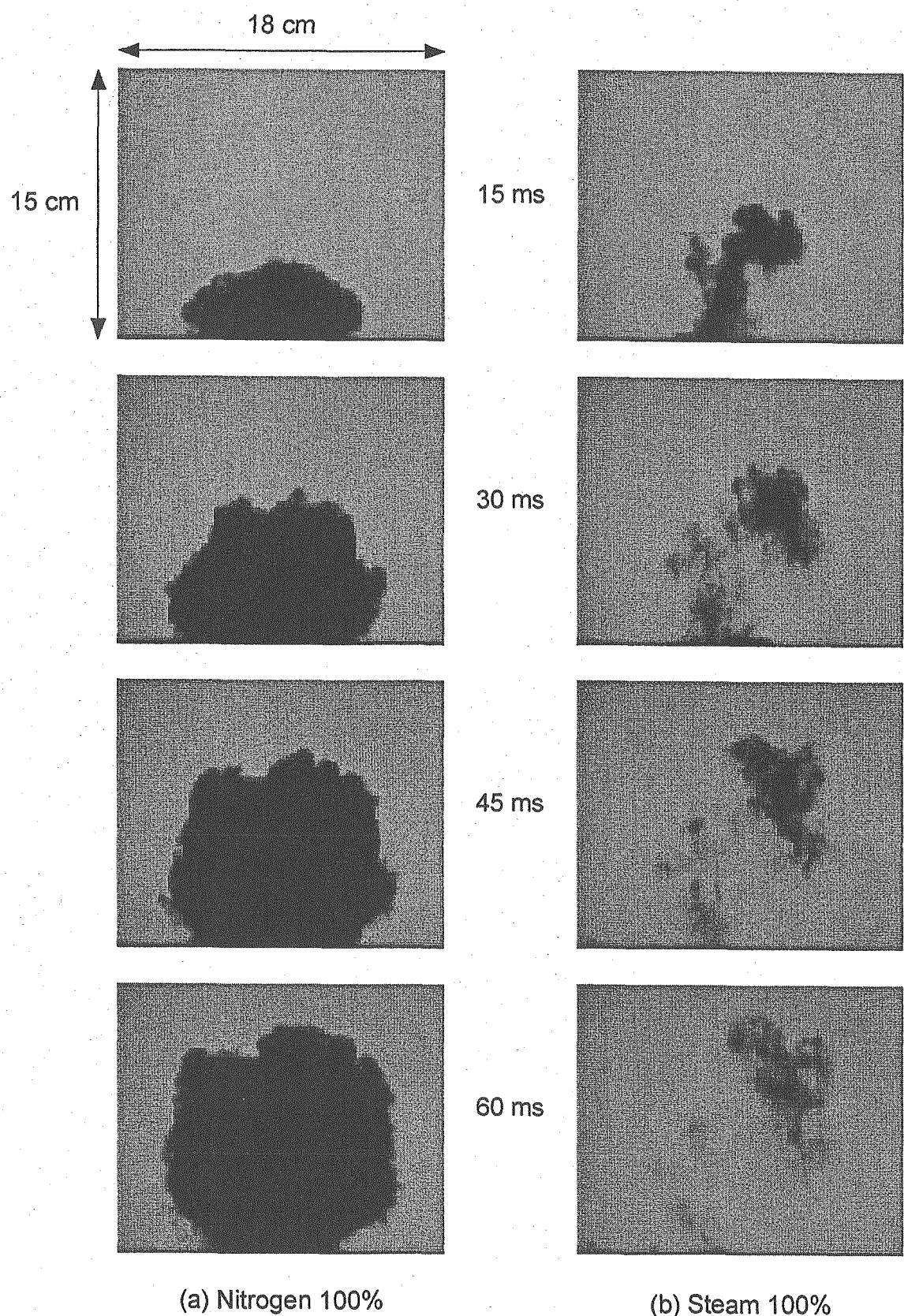


図 27 水槽内に放出された気相領域の比較（窒素・水蒸気のみ；長期挙動）

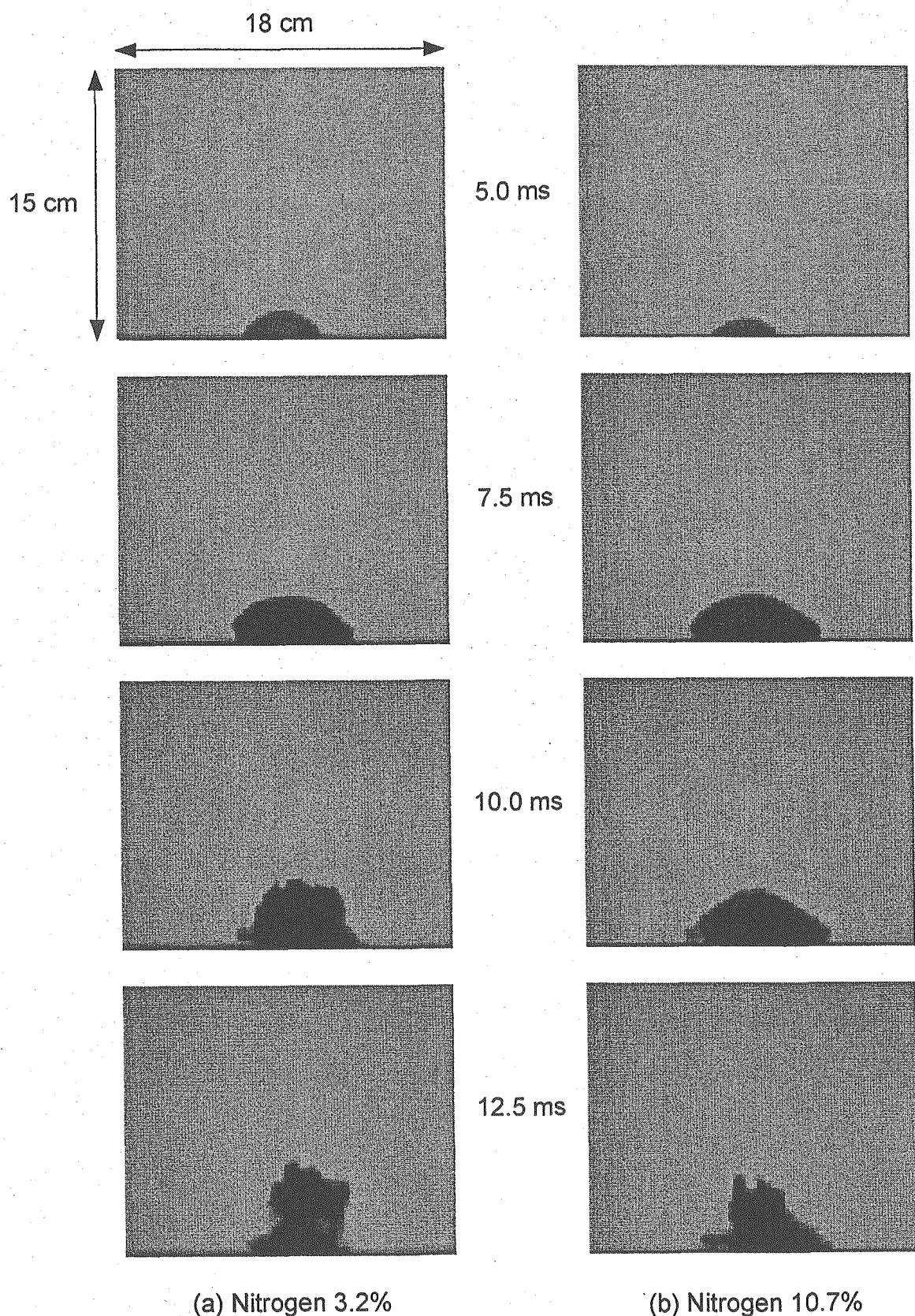


図 28 水槽内に放出された気相領域の比較（混合蒸気；短期挙動）

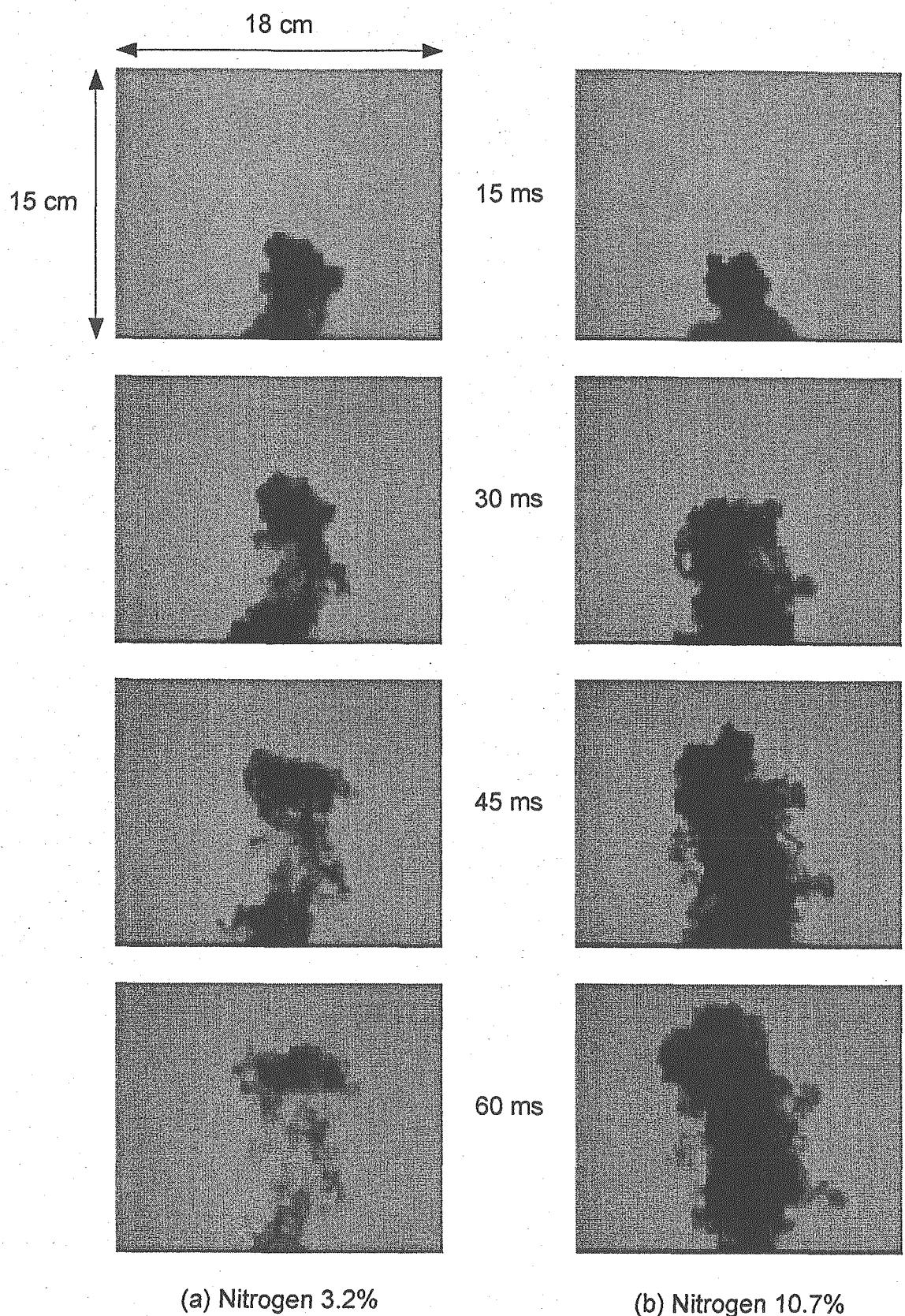


図 29 水槽内に放出された気相領域の比較（混合蒸気；長期拳動）

4. 物理モデル開発

高速炉の安全研究の分野では、これまで、炉心損傷事故時の気泡膨張過程に関する多くの研究がなされている。これらの研究では、気泡膨張過程における周囲液体の気泡中への entrainment 挙動が気泡成長と運動挙動に大きな影響を与えることが指摘されている。そのメカニズムとして 1) ジェット entrainment、2) Kelvin-Helmholtz 不安定性、3) Rayleigh-Taylor 不安定性、4) 凝縮による衝撃 が気泡膨張過程の様々な段階で entrainment を支配するとして考えられている[8]。このうち、Corradini ら[9]によって提案された Rayleigh-Taylor 不安定性に基づく entrainment モデルは、最も良く知られたモデルであり、entrainment の速さを気泡界面の加速度と関係付けて定式化している。本研究では、この Corradini らによる entrainment モデルを拡張流動様式モデルと組み合わせて用いることで、SIMMER-III コードへ導入する方法について検討した。また、昨年度開発した拡張流動様式モデルは、既に二次元コード SIMMER-III への導入を完了しているが、このモデルを三次元コード SIMMER-IV にも適用し、三次元空間でのラージスケール気泡の形状変化や運動を模擬できる機能を同コードに導入した。以下では、SIMMER-III コードへ導入する方法について検討した Corradini らによる entrainment モデルについて、その概要を述べる。

気泡の膨張過程では、加速度が軽い流体から重い流体に働くことから、気泡界面では、Rayleigh-Taylor 不安定が発生する。Corradini らは、この時の界面における液滴の気泡内への entrainment の速さを次式で与えた。

$$\frac{dV_e}{dt} = 4.65A\sqrt{a\lambda_c}$$

ここで、 λ_c は、Rayleigh-Taylor 不安定性の臨界波長であり、次式で与えられる。

$$\lambda_c = 2\pi\sqrt{\frac{\sigma}{a\Delta\rho}}$$

これらの式で、 A : 気泡の気液界面積 ($= 4\pi R_g^2$)、 V_e : entrainment された液体の体積、 a : 気泡の膨張加速度、 σ : 表面張力、 $\Delta\rho$: 気液密度差 である。

界面における液滴の気泡内への entrainment 現象は、気液界面積の増加だけでなく、気泡界面から気泡内への液滴移行も伴うため、液滴の移行・運動挙動までモデル化す

ることが考えられる。しかしながら、簡単化のため、熱移行および相変化過程に寄与する実効的な気液界面積の変化のみをモデル化し、Rayleigh-Taylor 不安定性が気泡挙動へ及ぼす影響について確認することにする。

モデル化に当たっては、気泡界面の位置を特定する必要があるが、これには、昨年度開発した昨年度開発した拡張流動様式モデルを適用する。また、気泡の膨張加速度は、気泡界面を含む計算セルにおける圧力勾配から求めるものとする。

熱移行および相変化過程に寄与する実効的な気液界面積の増加速度は、気泡界面の存在する計算セルにおいて、液滴の気泡内への entrainment の速さと、Rayleigh-Taylor 不安定性の臨界波長に関係付けられる液滴大きさから求める。

本モデルを SIMMER-III コードへ導入することで、気泡の膨張過程で起こりうる気液界面の Rayleigh-Taylor 不安定に起因した気液界面積の変化が模擬される。これにより、特に、気液界面あるいは気泡内で生ずる熱移行および相変化による質量移行過程をより精度良く解析できることが期待される。

5. 結 言

平成 15 年度は、蒸気泡過渡凝縮挙動に対する実験および解析、サイクル機構で開発中の高速炉安全解析コードの整備について、以下を実施した。

(1) 蒸気泡過渡凝縮実験

平成 14 年度の実験装置を改造し、混合蒸気（水蒸気+非凝縮性ガス）を生成・加圧・放出するための機能を付加した。非凝縮性ガスに窒素を用いた試験を実施し、凝縮を伴う気泡の過渡挙動についての基礎的な実験データを得た。

(2) 実験解析

SIMMER-III コードによる試験解析を実施し、凝縮を伴う混合蒸気泡の過渡挙動について同コードの適用性を検討した。

(3) 安全解析コードの整備

SIMMER-III コードにおいて気泡界面での entrainment 現象を扱う上で必要な物理モデルについて検討した。また、平成 14 年度に開発した拡張流動様式モデルを三次元に拡張し、三次元コード SIMMER-IV に導入した。

平成 16 年度は、主として以下の課題を実施する予定である。

(1) 蒸気泡過渡凝縮実験

凝縮条件下での蒸気泡挙動について、混合蒸気中の非凝縮性ガスの濃度に加え、物性値（異なる種類の非凝縮性ガス；He、Xe）をパラメータとした実験データを得る。

(2) 実験解析およびモデル改良

SIMMER-III コードのモデル改良と実験解析を通じて、様々な凝縮条件下での蒸気泡挙動に対する同コードの性能を総合的に評価する。

(3) 実験解析およびモデル改良

検証成果を統合した SIMMER-III コードについて、実機の安全評価や安全性試験解析の観点からその改善効果を総合的に評価する。

謝 辞

本研究の実施にあたり、核燃料サイクル開発機構大洗工学センター要素技術開発部リスク評価研究グループから実験技術について助言を頂きました。また、本研究の実施に当たり、九州大学大学院工学研究府の田上慎一氏、同工学部の高田秀樹氏に協力を頂きました。これら関係者の皆様にお礼申し上げます。

記号説明

A	気泡の気液界面積 (m^2)
a	気泡の膨張加速度 (m s^{-2})
c_{orf}	オリフィス係数
E	曲げ弾性率 (Pa)
EI	曲げ剛性 (Pa m^4)
Eo	Eötvös 数
f	固有振動数 (Hz)
g	重力加速度 (m s^{-2})
I	断面2次モーメント (m^4)
n	全波数
R	リング半径 (m)
R_G	ラージスケール気泡の半径 (m)
Re	Reynolds 数
V_e	entrainmentされた液体の体積 (m^3)
v	速度 (m s^{-1})

ギリシャ文字

α	体積率
α_{ij}	計算セル(i,j)における実効ボイド率
$\alpha_{lb,ij}$	計算セル(i,j)においてラージスケール気泡領域が占める体積率
α_B, α_D	気泡流および分散流のボイド率範囲を定めるモデルパラメータ
$\alpha_{D,ij}$	計算セル(i,j)で分散流が占める体積率
$\alpha_{G,ij}$	計算セル(i,j)におけるボイド率
$\alpha_{GB,ij}$	計算セル(i,j)の気泡流領域において気相が占める体積率
Δp	圧力差 (Pa)
$\Delta\rho$	気液密度差 (kg m^{-3})
μ	粘性 (Pa s)

ρ	密度 (kg m^{-3})、または、リング単位長さ当たりの質量 (kg m^{-1})
$\bar{\rho}$	巨視的密度 (kg m^{-3})
λ_c	Rayleigh-Taylor 不安定性の臨界波長 (m)
σ	表面張力 (N m^{-1})
ν	ポアソン比

下付添え字

D	分散流
G	気相
L	液相
ij	計算セル(i,j)
q	速度場

参考文献

- [1] H. Yamano, S. Fujita, Y. Tobita, K. Kamiyama, Sa. Kondo, K. Morita, E. A. Fischer, D. J. Brear, N. Shirakawa, X. Cao, M. Sugaya, M. Mizuno, S. Hosono, T. Kondo, W. Maschek, E. Kieffhaber, G. Buckel, A. Rineiski, M. Flad, T. Suzuki, P. Coste, S. Pigny, J. Louvet, T. Cadiou "SIMMER-III: A Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis, Version 3. A Model Summary and Program Description," JNC TN9400 2003-071, August 2003.
- [2] K. Morita, T. Matsumoto, R. Akasaka, K. Fukuda, T. Suzuki, Y. Tobita, H. Yamano, Sa. Kondo, Development of multicomponent vaporization/condensation model for a reactor safety analysis code SIMMER-III: Theoretical modeling and basic verification, Nuclear Engineering and Design, Vol. 220, No. 3, pp. 224-239, 2003.
- [3] 守田幸路, 松元達也, 福田研二, 飛田吉春, 山野秀将, 小西賢介, 佐藤一憲, 多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーションに関する研究 -多成分系の蒸発／凝縮過渡挙動に関する研究(1)-, 核燃料サイクル開発機構, JNC TY9400 2003-011, April 2003.
- [4] A. Tomiyama, I. Kataoka, I. Zun, T. Sakaguchi, Drag Coefficients of Single Bubbles under Normal and Micro Gravity Conditions, JSME Int. J., Ser. B, Vol. 41, No. 2, pp. 472-479, 1998.
- [5] J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, Dover Publications, New York, 1985.
- [6] W.C. Young, *Roark's Formulas for Stress and Strain*, McGraw-Hill Book, New York, 1998.
- [7] K. Morita, H. Yamano, Y. Tobita, Sa. Kondo, SIMMER-III/IV Heat- and Mass-Transfer Model - Model and Method Description -, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN9400 2003-047, July 2003.
- [8] J.R. Moszynski, T. Ginsberg, Liquid Entrainment by Expanding Gas or Vapor Bubble - A Review of Experiments and Models, Brookhaven National Laboratory, BNL-NUREG-2B345, September 1980.
- [9] M.L. Corradini, W.M. Rohsenow, N.E. Todreas, The Effect of Sodium Entrainment and Heat Transfer with Two-phase UO₂ during a Hypothetical Core Disruptive Accident, Nucl. Sci. Eng., Vol. 73, pp. 242-252, 1980.