

流量低下時の過渡バーンアウトに関する研究

1984年3月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

日本原子力研究所研究成果編集委員会

委員長 森 茂 (理事)

委 員

朝岡 卓見 (原子炉工学部)	下川 純一 (技術情報部)
飯泉 仁 (物理部)	鈴木 伸武 (研究部)
石川 迪夫 (安全解析部)	鈴木 康夫 (大型トカマク開発部)
伊藤 彰彦 (環境安全研究部)	田中 正俊 (核融合研究部)
梅沢 弘一 (企画室)	沼宮内 弼雄 (保健物理部)
岡下 宏 (原子炉化学部)	畑田 元義 (大阪支所)
小森 卓二 (原子炉化学部)	半田 宗男 (燃料工学部)
佐藤 一男 (研究炉管理部)	瑞穂 満 (ラジオアイソトープ原子炉研修所)
佐藤 雅幸 (材料試験炉部)	村尾 良夫 (安全工学部)
佐野川 好母 (高温工学部)	安野 武彦 (動力炉開発・安全性研究管理部)
鹿園 直基 (物理部)	横田 光雄 (動力試験炉部)
四方 英治 (製造部)	吉田 健三 (開発部)

Japan Atomic Energy Research Institute

Board of Editors

Shigeru Mori (Chief Editor)

Takumi Asaoka	Muneo Handa	Motoyoshi Hatada
Masashi Iizumi	Michio Ishikawa	Akihiko Ito
Takuji Komori	Mitsuru Mizuho	Yoshio Murao
Takao Numakunai	Hiroshi Okashita	Konomo Sanokawa
Kazuo Sato	Masayuki Sato	Eiji Shikata
Naomoto Shikazono	Junichi Shimokawa	Nobutake Suzuki
Yasuo Suzuki	Masatoshi Tanaka	Hirokazu Umezawa
Takehiko Yasuno	Mitsuo Yokota	Kenzo Yoshida

JAERI レポートは、日本原子力研究所が研究成果編集委員会の審査を経て不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI reports are reviewed by the Board of Editors and issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

流量低下時の過渡バーンアウトに関する研究

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

岩村 公道・黒柳 利之

1983年8月4日受理

要 旨

軽水炉の出力-冷却不整合(PCM)事故時の燃料棒の熱的挙動を調べる研究の一環として、一様加熱垂直円管と環状流路を用いた流量低下バーンアウト実験を実施した。実験範囲は、系圧力0.1~3.9 MPa、流速減少率0.44~1100 %/sである。また、過渡時の局所質量速度を求めるための計算も行った。

主要な知見は以下のとおりである。

流速減少率があるしきい値を超えると、流量低下バーンアウト時の入口質量速度は定常時よりも減少した。系圧力が高くなると、過渡効果は小さくなった。

系圧力が2 MPaの場合、流速減少率が20 %/s以下では、局所バーンアウト質量速度は定常バーンアウト質量速度に一致し、流速減少率が20 %/s以上になると、局所バーンアウト質量速度は定常バーンアウト質量速度よりも大きくなった。系圧力が1 MPa以下の場合には、流速減少率が2 %/sのしきい値を超えると、局所バーンアウト質量速度は定常バーンアウト質量速度よりも小さくなった。

流量低下時の局所バーンアウト質量速度と定常バーンアウト質量速度の比を、蒸気と水の密度比および流速減少率の関数として求める関係式を導出した。本関係式は、Cumoらの実験結果をかなり良く予測したが、40 %/s以上の急激な流量低下の場合には適用できなかった。

Study of Transient Burnout Characteristics under Flow Reduction Condition

Takamichi IWAMURA and Toshiyuki KUROYANAGI

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

Received August 4, 1983

Abstract

As part of a study of the thermal behavior of fuel rods during Power-Cooling-Mismatch (PCM) accidents in light water reactors, burnout characteristics in a uniformly heated, vertically oriented tube or annulus, under flow reduction condition, were experimentally studied. Test pressures ranged 0.1~3.9 MPa and flow reduction rates 0.44~1100 %/s. An analytical method is developed to obtain the local mass velocity during a transient condition.

The major results are as follows:

With increasing flow reduction rate beyond a threshold, transient burnout mass velocity at the inlet was lower than that in steady state tests under the experimental pressures. The higher system pressure resulted in the less transient effects.

At pressures higher than 2.0 MPa and flow reduction rates lower than 20 %/s, the local burnout mass velocity agreed with the steady state burnout mass velocity, whereas the local burnout mass velocity became higher than the steady state burnout mass velocity at flow reduction rates higher than 20%/s. At pressures lower than 1 MPa, with increasing flow reduction rate beyond the threshold value of 2%/s, the local burnout mass velocity was lower than the steady state burnout mass velocity.

An empirical correlation is presented to give the ratio of the transient to the steady state burnout mass velocities at the burnout location as a function of the steam-water density ratio and the flow reduction rate. The experimental results by Cumo et al. agree with the correlation. The correlation, however, cannot predict the experimental results at higher flow reduction rates beyond 40 %/s.

Keywords: Burnout, Transient Two-phase Flow, Flow Boiling, Power-cooling-mismatch, CHF Correlation, Flow Reduction, Reactor Safety, Light Water Reactors.

目 次

1. 緒 言	1	4.4 沸騰二相流の基礎式と特性曲線法による解法	23
1.1 本研究の背景	1	4.5 指数関数状流量低下の場合の沸騰二相流挙動の計算	24
1.2 他の研究者による研究	2	4.5.1 計算方法	24
1.3 本研究の目的と概要	3	4.5.2 計算結果	24
2. 常圧大気開放ループによる実験	4	4.6 まとめ	28
2.1 序	4	5. 流量低下バーンアウト発生時局所質量速度の評価	31
2.2 実験装置	4	5.1 序	31
2.3 実験方法	6	5.2 流量低下バーンアウト実験における出口と入口の質量速度差	31
2.4 管内流路による流量低下バーンアウト実験	6	5.3 バーンアウト発生時出口質量速度と流速減少率の関係(系圧力の効果)	31
2.4.1 実験条件と結果	6	5.4 流量低下過渡時の局所バーンアウト質量速度関係式	34
2.4.2 考 察	8	5.4.1 入口における過渡時と定常時のバーンアウト質量速度比の関係式	34
2.5 環状流路による流量低下バーンアウト実験	9	5.4.2 出口と入口のバーンアウト質量速度比の関係式	34
2.5.1 実験条件と結果	9	5.4.3 過渡時と定常時の出口バーンアウト質量速度比の関係式	34
2.5.2 考 察	10	5.4.4 Cumoらおよび Moxonらによる実験結果との比較	35
2.6 まとめ	13	5.5 まとめ	35
3. 高圧過渡沸騰試験装置による実験	14	6. 結 論	36
3.1 序	14	謝 辞	37
3.2 実験装置	14	参考文献	37
3.3 実験方法	17	記号表	38
3.4 実験条件と結果	17	付 録 4章の計算方法の検討	39
3.5 考 察	19	A.1 エネルギー保存式における圧力変化項とエネルギー逸散項の評価	39
3.5.1 定常バーンアウト熱流束測定値と限界熱流束相関式との比較	19	A.2 物性値の圧力依存性の評価	39
3.5.2 バーンアウト発生時入口質量速度と流速減少率との関係	19	A.3 スリップ比の影響	42
3.5.3 常圧大気開放ループによる実験結果との比較	21		
3.6 まとめ	21		
4. 流量低下過渡時の沸騰二相流挙動	22		
4.1 序	22		
4.2 計算上の仮定	22		
4.3 沸騰境界の計算	22		

CONTENTS

<p>1. Introductions 1</p> <p> 1.1 Backgrounds 1</p> <p> 1.2 Previous Studies by Other Investigators 2</p> <p> 1.3 Objectives and Outline of Present Study 3</p> <p>2. Experiments under Atmospheric Pressure . . . 4</p> <p> 2.1 Introduction 4</p> <p> 2.2 Experimental Facility 4</p> <p> 2.3 Experimental Procedures 6</p> <p> 2.4 Transient Burnout Experiment under Flow Reduction Conditions by using Tube Test Sections 6</p> <p> 2.4.1 Experimental Conditions and Results 6</p> <p> 2.4.2 Discussions 8</p> <p> 2.5 Transient Burnout Experiment under Flow Reduction Conditions by using Annular Test Section 9</p> <p> 2.5.1 Experimental Conditions and Results 9</p> <p> 2.5.2 Discussions 10</p> <p> 2.6 Conclusions 13</p> <p>3. Experiments under Elevated Pressure 14</p> <p> 3.1 Introduction 14</p> <p> 3.2 Experimental Facility 14</p> <p> 3.3 Experimental Procedures 17</p> <p> 3.4 Experimental Conditions and Results 17</p> <p> 3.5 Discussions 19</p> <p> 3.5.1 Comparison of Measured Steady State Burnout Heat Flux with CHF Correlations 19</p> <p> 3.5.2 Relation between Burnout Inlet Mass Velocity and Flow Reduction Rate 19</p> <p> 3.5.3 Comparison with the Results under Atmospheric Pressure 21</p> <p> 3.6 Conclusions 21</p> <p>4. Calculation of Boiling Two-phase Flow under Flow Reduction Transient 22</p> <p> 4.1 Introduction 22</p> <p> 4.2 Hypotheses for Calculation 22</p>	<p> 4.3 Calculation of Boiling Boundary 22</p> <p> 4.4 Basic Equations of Boiling Two-phase Flow and Calculation Method 23</p> <p> 4.5 Calculation of Boiling Two-phase Flow under Exponential Flow Reduction Condition 24</p> <p> 4.5.1 Calculation Method 24</p> <p> 4.5.2 Calculated Results 24</p> <p> 4.6 Conclusions 28</p> <p>5. Evaluation of Local Mass Velocity at Flow Reduction Burnout Location 31</p> <p> 5.1 Introduction 31</p> <p> 5.2 Difference of Mass Velocities at Inlet and Outlet during Flow Reduction Transient 31</p> <p> 5.3 Relation between Burnout Mass Velocity at Outlet and Flow Reduction Rate (Effects of System Pressure) 31</p> <p> 5.4 Correlation of Local Mass Velocity at Flow Reduction Burnout Location 34</p> <p> 5.4.1 Ratio of Transient to Steady State Burnout Mass Velocities at Inlet 34</p> <p> 5.4.2 Ratio of Outlet to Inlet Burnout Mass Velocities 34</p> <p> 5.4.3 Ratio of Transient to Steady State Burnout Mass Velocities at Outlet 34</p> <p> 5.4.4 Comparison with Experimental Results by Cumo et al. and Moxon et al. 35</p> <p> 5.5 Conclusions 35</p> <p>6. Conclusions 36</p> <p>Acknowledgements 37</p> <p>References 37</p> <p>Nomenclature 38</p> <p>Appendix Discussions on Calculation Method in Chapter 4 39</p> <p> A.1 Evaluation of Pressure and Energy Dissipation Terms in Energy Equation . . . 39</p> <p> A.2 Evaluation of Pressure Dependency of Material Properties 39</p> <p> A.3 Evaluation of Slip Ratio Effect 42</p>
--	--

List of Tables and Figures

List of Tables

- Table 1.1** Experimental conditions for previous and present flow reduction burnout experiments
- Table 2.1** Range of parameters for flow reduction transient burnout experiments under atmospheric pressure (Tube test section)
- Table 2.2** Range of parameters for flow reduction transient burnout experiments under atmospheric pressure (Annular test sections)
- Table 2.3** Flow channel dimensions in tube and annular test sections
- Table 3.1** Characteristics of transient boiling experiment loop
- Table 3.2** Measuring items
- Table 3.3** Range of parameters for flow reduction transient burnout experiments under elevated pressure
- Table 4.1** Dimensionless parameters used in analysis
- Table 4.2** Parameters for calculation of exponential flow reduction
- Table A.1** Effects of slip ratio on calculated results

List of Figures

- Fig. 1.1** PCM accidents in PWR and BWR.
- Fig. 1.2** Experimental ranges of liquid/vapor density ratio and flow reduction transient time for previous and present flow reduction burnout experiments.
- Fig. 2.1** Schematic of experimental loop under atmospheric pressure.
- Fig. 2.2** Tube test section.
- Fig. 2.3** Annular test section (Flow shroud).
- Fig. 2.4** Annular test section (Heated rod).
- Fig. 2.5** Measurement and recording system of atmospheric pressure loop.
- Fig. 2.6** Typical transient histories for flow reduction transient burnout experiments under atmospheric pressure (Tube test section).
- Fig. 2.7** Comparison of measured burnout heat flux under atmospheric pressure with Thompson-Macbeth correlation.
- Fig. 2.8** Comparison of measured burnout heat flux under atmospheric pressure with Becker correlation.
- Fig. 2.9** Increase of inlet pressure just before burnout vs. flow reduction rate.
- Fig. 2.10** Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. flow reduction rate (Tube test section under atmospheric pressure).
- Fig. 2.11** Typical transient histories for flow reduction transient burnout experiments under atmospheric pressure (Annular test section; gap = 2 mm).
- Fig. 2.12** Steady state burnout heat flux vs. inlet mass velocity (Tube and annular test sections).
- Fig. 2.13** Steady state burnout heat flux vs. outlet quality (Tube and annular test sections).
- Fig. 2.14** Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. flow reduction rate (Annular test section; gap = 2 mm, under atmospheric pressure).
- Fig. 2.15** Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. flow reduction rate (Annular test section; gap = 1.4 mm, under atmospheric pressure).
- Fig. 3.1** Schematic of transient boiling experiment loop.
- Fig. 3.2** Test section.
- Fig. 3.3** Control method of flow reduction pattern.
- Fig. 3.4** Data processing system.
- Fig. 3.5** Typical transient histories for flow reduction transient burnout experiments at elevated pressures.
- Fig. 3.6** Comparison of measured burnout heat flux under elevated pressure with Thompson-Macbeth correlation.
- Fig. 3.7** Comparison of measured burnout heat flux under elevated pressure with Becker correlation.
- Fig. 3.8** Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. flow reduction rate, with system pressure as a parameter.
- Fig. 3.9** Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. system pressure, with flow reduction rate as a parameter.

- Fig. 3.10** Effects of inlet subcooling and initial mass velocity on ratio of transient to steady state burnout mass velocities vs. flow reduction rate.
- Fig. 4.1** Calculated results under exponential flow reduction condition (1) (Base case/0.25 MPa).
- Fig. 4.2** Calculated results under exponential flow reduction condition (2) (Effects of slip ratio /0.25 MPa).
- Fig. 4.3** Calculated results under exponential flow reduction condition (3) (Effects of flow decay constant/0.25 MPa).
- Fig. 4.4** Calculated results under exponential flow reduction condition (4) (Effects of final flow velocity/0.25 MPa).
- Fig. 4.5** Calculated results under exponential flow reduction condition (5) (Effects of initial enthalpy/0.25 MPa).
- Fig. 4.6** Calculated results under exponential flow reduction condition (6) (Base case/15 MPa).
- Fig. 4.7** Calculated results under exponential flow reduction condition (7) (Effects of slip ratio /15 MPa).
- Fig. 4.8** Calculated results under exponential flow reduction condition (8) (Effects of system pressure).
- Fig. 5.1** Transients of mass velocities at inlet and outlet of test section in flow reduction burnout experiments with different system pressure.
- Fig. 5.2** Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at outlet of test section vs. flow reduction rate, with different system pressure.
- Fig. 5.3** Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at outlet of test section vs. system pressure, with different flow reduction rates.
- Fig. 5.4** Deviation of burnout mass velocity at outlet from that at inlet of test section vs. flow reduction rate.
- Fig. 5.5** Comparison of G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s obtained by transient calculation with that by correlation (5-5).
- Fig. A.1** Example of experimental data and calculated results at 0.53 MPa.
- Fig. A.2** Example of experimental data and calculated results at 3.0 MPa.

1. 緒 言

1.1 本研究の背景

軽水炉において、異常な出力上昇や流量低下などが生じた場合、原子炉出力と冷却材による除熱能力が不均衡になる状態が考えられ、このような熱的不整合が生じる異常状態を出力-冷却不整合 (Power-Cooling Mismatch; PCM) と称している。

加圧水型(PWR)および沸騰水型(BWR)原子力発電所の設置許可申請時安全解析の想定事故のうち、PCM とみなせる起因事象と過渡変化の速さを Fig. 1.1 に示す。一般に PCM 事故では、冷却材喪失事故(LOCA)のような配管破断に伴う減圧は考えず、また、出力上昇の場合も、反応度事故(RIA)と比べてはるかに長い過渡変化時間(数秒以上)を持つものとして定義されている¹⁾。Fig. 1.1 に見られるように、PCM 事故は LOCA や RIA に比べて、極めて広い流量低下率と出力上昇率の範囲をカバーしており、その発生確率も LOCA や RIA よりかなり高い。

PCM 時には、その起因事象が何であれ、燃料棒から

冷却材への熱流束は限界熱流束を超え、被覆管温度の急上昇による強度低下や FP ガスの急激な放出による内圧上昇および燃料や被覆管の溶融をもたらす、最終的には燃料の破損に至る可能性がある。

このように、発生確率もかなり高く重大な燃料破損事故の原因ともなり得ることから、PCM 時の燃料挙動の解析は軽水炉の安全確保上重要な問題である。既に米国の PBF(Power Burst Facility)では出力上昇と流量低下による PCM 炉内実験を実施している。しかしながら、PBF は炉内実験のため実際の核燃料の PCM 条件下での挙動が調べられる利点を持っているが、実験回数が少なく、計測点や試験パラメータ範囲などの制約のため、現象の物理的理解や計算コードの改良に十分なデータは得られない。特に PBF では実験装置上の制約から急激な流量低下実験が行えない欠点がある。これに対し、炉外実験では広範囲なパラメータ範囲で多くのデータが得られる利点がある。従って炉内実験と炉外実験は相互に補完的な役割を持っている。原研では炉内実験については NSRR-PBF 研究協力協定締結により、PBF 実験

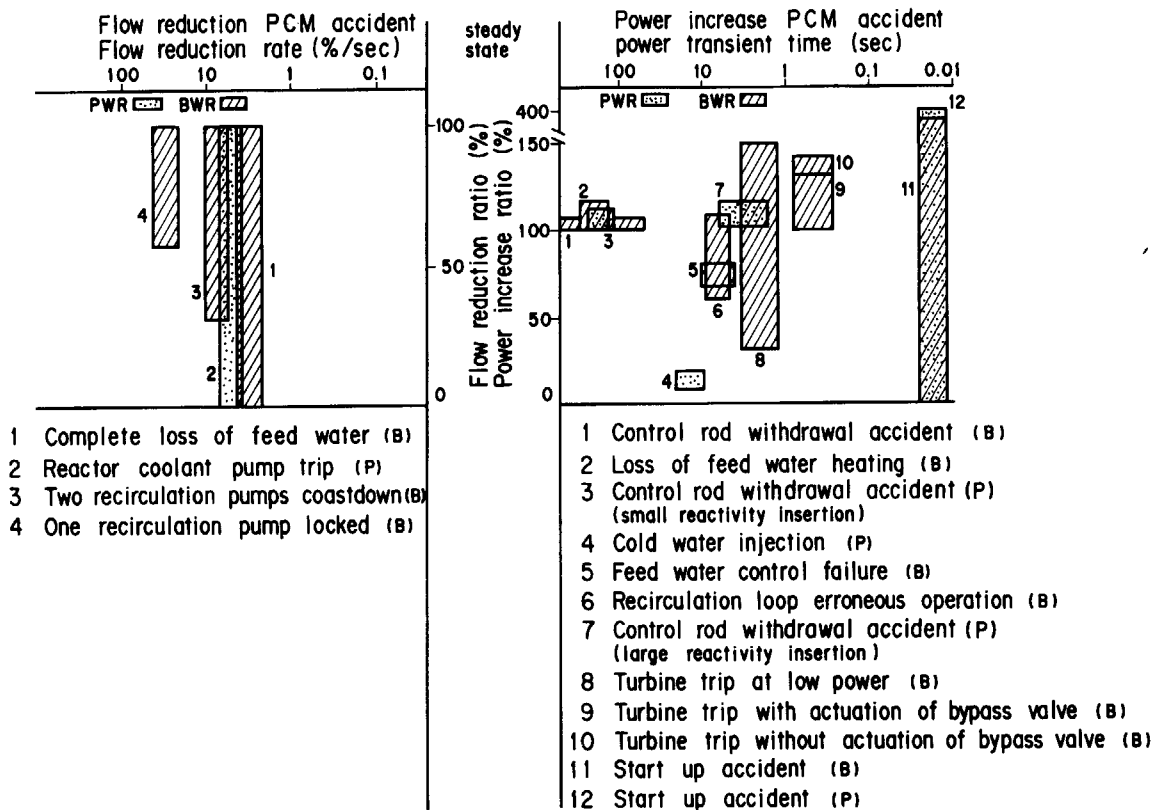


Fig. 1.1 PCM accidents in PWR and BWR.

Table 1.1 Experimental conditions for previous and present flow reduction burnout experiments

Investigators (Ref.)	Fluid	Test Section Geometry	Pressure (MPa)	Initial Mass Velocity (kg/m ² ·s)	Heat Flux (kw/m ²)	Transient Type	Transient Time (sec)
W. Kastner et al. (2)	water	4-rod 1.9m long 9-rod 1.0m long	6.9 "	460-1600	800-1550 (estimated)	Flow decay (step)	-
B.S. Shiralkar* et al. (3)	water	Anular 2.75m long 9-rod 1.83m long 16-rod 3.66m long	6.9 " "	270-1360 340-1360 "	660-1800 85-1580 60-1000	High-low-high Flow decay; ON/OFF/ON "	about 0.5
R.A. Smith, and* P. Griffith (4)	Freon-113	tube 2.44m long	1.38	3400	30-140	Flow reversal	-
M. Cumo et al. (5)	Freon-12	tube 7.8mm dia 2m long	1.1-1.8	760-900	29-75	Flow decay	0.7-3.2
T. Asada, and T. Kobori (6)	water	28-rod 3.7m long	3.0	1400-1700	-	Flow decay (Ramp)	0.3-2.0
D. Moxon et al. (7)	water	tube 11 mm dia 3.66m long 37-rod 3.66m long	6.9	2370-2710	845-1150	Flow decay (Exponential)	<0.5
G.P. Gaspari et al. (8)	water	18+1 rod 4m long	5.9	1200-2300	Power 2.1-3.3MW	Flow decay	0.1
Present work	water	tube 8 and 10mm dia 0.8m long	0.1-3.9	500-3050	760-3860	Flow decay (linearly)	0.06-83

* summarized by J.C.M. Leung (9)

データの入手が可能となったので、原研独自の PCM 研究は炉外実験を中心に進めることになった。

本研究では、PCM 炉外実験の一環として、流量低下過渡時と定常時のバーンアウト発生条件の相違を解明するため、実験および解析的検討を実施した。

本来 PCM 時には一次系圧力の減圧は生じないので、原子炉運転圧力下での実験が望ましいが、実験装置上の制約もあり、本実験は大気圧から最高 3.9 MPa の圧力下で実施した。ところで系圧力が沸騰現象に及ぼす影響は主として蒸気と水の密度比の変化にあるが、この密度比は大気圧から 4 MPa までに 40 倍変化し、4 MPa から加圧水型原子炉の運転圧力 16 MPa までには 7.3 倍変化する。従って本実験により得られる系圧力の効果を外挿することにより、実際の炉での流量低下バーンアウト挙動をある程度評価できると思われる。

実際の炉で想定される PCM 条件下での流速減少率は 100%/s 以下 (Fig. 1.1 参照) なので、本実験の大部分はこの範囲内で実施した。しかしながら、実際の炉においても局所的にはより急激な流量低下が生じる可能性も否定できず、さらに現象の理解を進める上にも 100%/s 以上の流量低下時におけるバーンアウト挙動を調べることも必要と考えられるので、一部の試験では最大 1100%/s の流速減少率まで実験範囲を拡張した。

1.2 他の研究者による研究

従来、定常状態におけるバーンアウト実験は、水冷却

原子炉の開発に関連して、極めて活発に行われ、多くの実験式や半理論式が提案されている。また、定常状態の実験で得られたバーンアウト関係式が、流量低下過渡時にも適用できるか否かを評価するため、これまで各種の流路形状や実験条件のもとで、流量低下バーンアウト実験がなされてきた²⁾⁻⁸⁾。これらの過渡バーンアウト研究のレビューが Leung⁹⁾により報告されている。Table 1.1 に、従来の主要な流量低下バーンアウト実験の実験条件を示す。また、Fig. 1.2 に主要な実験について、水/蒸気密度比と流量低下時間のパラメータ範囲を示す。

既存のバーンアウト関係式の多くは、バーンアウト熱流束を局所的な質量速度、クオリティ等の流動条件の関数として表現した式(局所条件の式)と、上流側の条件、例えばサブクール度と流路長さの関数として表現した式(システム条件の式)に分類される。局所条件の式としては、Becker¹⁰⁾、CISE¹¹⁾、Biasi¹²⁾、W-3¹³⁾、および B & W-2¹⁴⁾の式があり、システム条件の式としては、Macbeth¹⁵⁾、Thompson Macbeth¹⁶⁾、Modified Barnett¹⁷⁾、および甲藤¹⁸⁾の式がある。

ところで、流量低下過渡時には、バーンアウト発生点の質量速度変化はテスト部入口の質量速度変化よりも遅れ、流速減少率が大きい程両者の差は拡大すると考えられる。従来の研究では、流量低下によるバーンアウト発生は、バーンアウト発生点における局所流動条件(質量速度、クオリティ等)を用いて、定常バーンアウト関係式を適用することにより予測できるとしたものが多い⁹⁾。

しかしながら、Moxon ら⁷⁾の研究は過渡時の局所バ

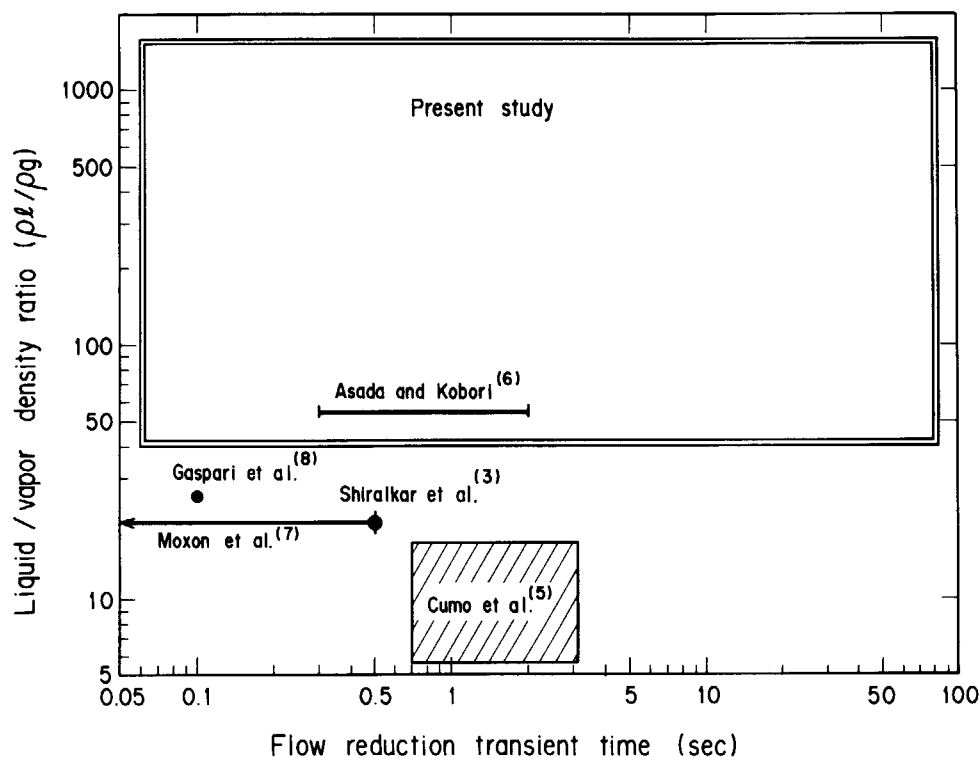


Fig. 1.2 Experimental ranges of liquid/vapor density ratio and flow reduction transient time for previous and present flow reduction burnout experiments.

ーンアウト質量速度は定常時よりも小さくなる傾向にあることを示唆しているし、一方、Cumóらのフロン12を用いた実験では、むしろ逆の傾向が示されている⁵⁾。

以上の実験結果からも明らかなように、流量低下時のバーンアウトが、定常バーンアウトの場合と同一の局所流動条件下で発生するか否かについては、まだ正確な結論は得られていない。

さらに Table 1.1 に示した従来の実験では、系圧力と流速減少率または流量低下時間の変化範囲が狭く、このようなパラメータが流量低下バーンアウト発生条件に及ぼす影響についての系統的な研究はほとんど行われていない。

1.3 本研究の目的と概要

本研究の目的は、流量低下バーンアウト発生条件と定常バーンアウト発生条件との相違を明らかにすることである。このため、系圧力および流速減少率を広範囲に変化させて、流量低下バーンアウト実験を実施した。本研究における実験条件の範囲を Table 1.1 と Fig. 1.2 に

示す。

本報告書の概要を次に示す。

まず、常圧大気開放ループを用いて実施した流量低下バーンアウト実験^{20)~22)}の内容と結果を2章に述べる。

次に高圧過渡沸騰試験装置を用いて、系圧力をパラメータとして実施した流量低下バーンアウト実験²³⁾の概要を3章に述べる。

4章では、流量低下時の沸騰流路内局所流動条件の計算方法を述べる。さらに、指数関数状流量低下を仮定した場合について計算を行い、流量低下過渡時の局所流動条件の過渡変化に関して考察する²⁴⁾。

5章では、流量低下バーンアウト発生条件を、局所流動条件を用いて評価する。また流量低下バーンアウト発生点における局所質量速度と定常バーンアウト質量速度との関係を表示する関係式を導出し、Moxon および Cumó の実験・解析結果と比較する²⁵⁾。

6章では、本研究を通して得られた結論をまとめる。

最後に、付録として、4章で述べる計算方法の妥当性に関する評価を行った。

2. 常圧大気開放ループによる実験

2.1 序

流量低下時におけるバーンアウト発生現象の基本的特性を調べるため、昭和 51 年度より 52 年度にかけて、常圧大気開放ループによる実験を実施した。主要な検討項目は、流量低下バーンアウト発生前後のテスト部壁温と流路圧力の挙動、バーンアウト発生時入口質量速度と定常バーンアウト質量速度との関係に及ぼす流速減少率の効果、流路断面積が流量低下バーンアウト発生条件に及ぼす影響、およびバーンアウト発生前後の流動状況観察である。

本実験では、加熱長さ 800 mm のステンレス管をテスト部として用い、円管の内側を水が流れる場合(管内流路)と、円管と外側のシュラウドとの間隙を水が流れる場合(環状流路)について調べた。本章では以上二種類のテスト部による実験結果と考察結果を述べる。

2.2 実験装置

本装置は常圧大気開放の水ループで、Fig. 2.1 に装置の概要を示す。同図に示すように、本装置は、貯水タンク、循環ポンプ、浮子式流量計、タービン流量計、流量

調節弁、入口温度制御用ヒータ、テスト部、および気水分離器より構成されている。本装置の最高加熱電力は 100 kW で最高使用温度は 150°C である。

Fig. 2.2 に管内流路テスト部の形状と計装取り付け位置を示す。

本テスト部は、内径 8 mm、外径 10 mm、発熱長さ 800 mm の SUS304 ステンレス鋼製であり、直流直接通電方式により加熱した。テスト部外壁には壁温測定用として、直径 0.32 mm の C-A 熱電対 9 本をスポット溶接した。また、テスト部の入口、出口それぞれの圧力および入口と出口の差圧測定用の圧力検出孔を設置した。なお、バーンアウト発生によるテスト部の損傷を防止するため、温度上昇による電気抵抗変化を利用したブリッジ式バーンアウト検出器のリード線も Fig. 2.2 に示す位置に銀ろう付けし、バーンアウト検出と同時に供給電力を遮断した。

Fig. 2.3 と Fig. 2.4 に、環状流路シュラウドと発熱体の形状を示す。

発熱部は外径 10 mm、肉厚 1 mm、加熱長さ 800 mm の SUS 304 ステンレス鋼製であり、直流直接通電方式により加熱した。発熱部の外側にはパイレックスガラス管シュラウドを設置した。流路のギャップ幅は 2 mm の場

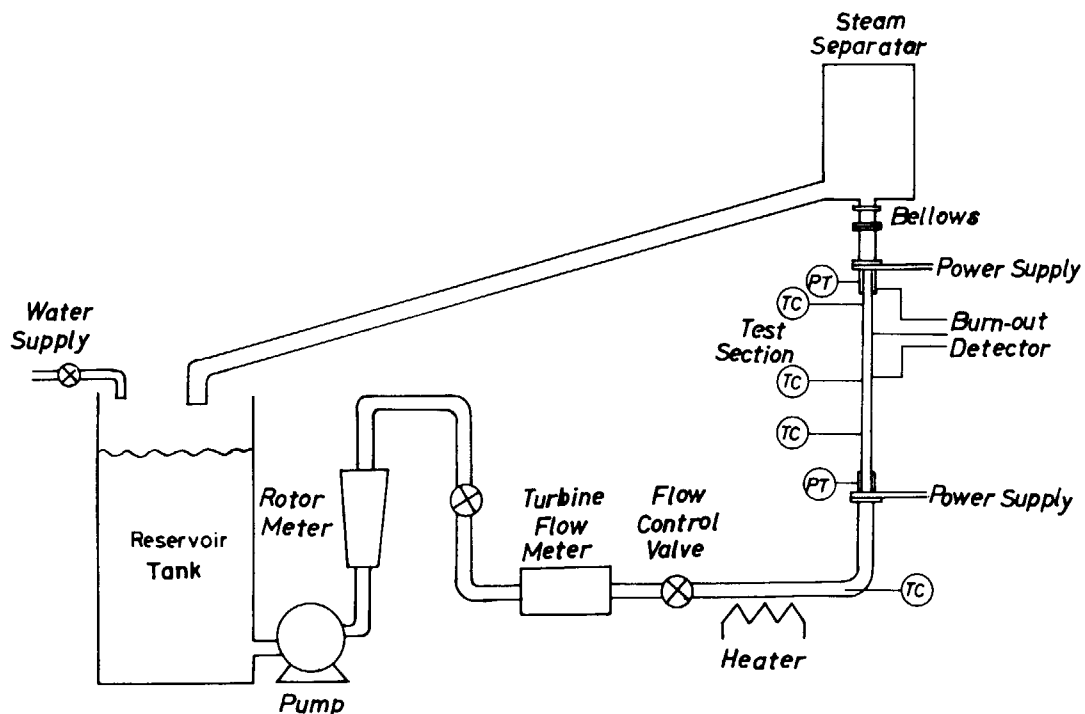


Fig. 2.1 Schematic of experimental loop under atmospheric pressure.

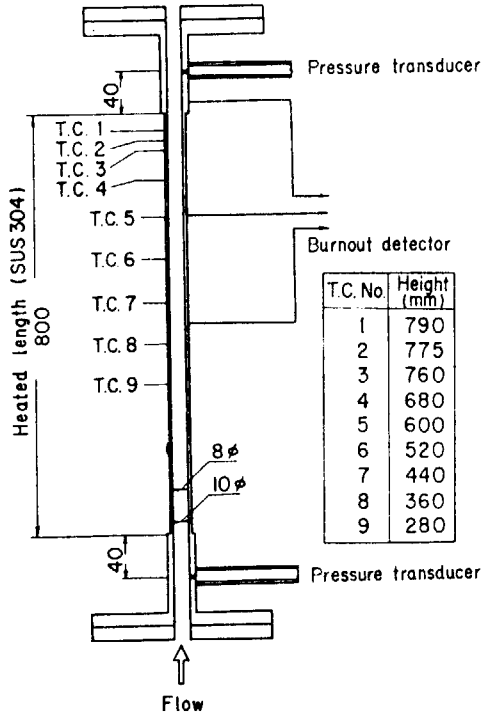


Fig. 2.2 Tube test section.

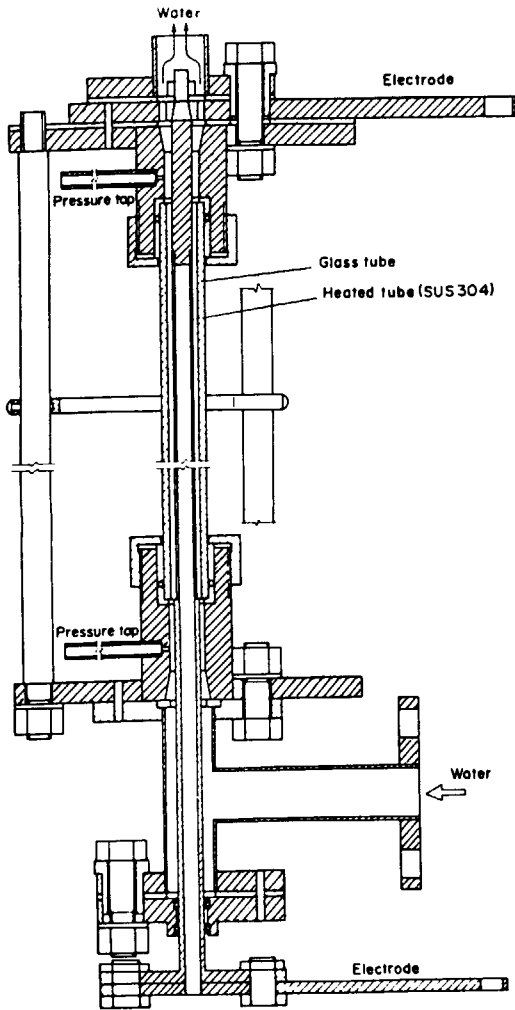


Fig. 2.3 Annular test section (Flow shroud).

合と 1.4 mm の場合について実験を行った。

テスト部にはシース径 0.5 mm, 線径 0.1mm の C-A 熱電対 6 本を, Fig. 2.4 に示す位置に取り付けた. 取り付け方法は Fig. 2.4 に示すように, テスト部の内側より 45 度の角度で熱電対を差し込み, 外側より銀ろう付けした. また管内流路テスト部と同様に, 流路の出口と入口の圧力検出孔やブリッジ式バーンアウト検出器リード線も, それぞれ Fig. 2.3 と Fig. 2.4 に示す位置に設置した.

本実験における計測・記録系の概要を Fig. 2.5 に示す. 測定項目は, 流量, 加熱電流, 加熱電圧, 入口と出口圧力, テスト部差圧, 入口水温, およびテスト部壁温である. 記録装置としては, ペンレコーダと電磁オシログラフを用いた.

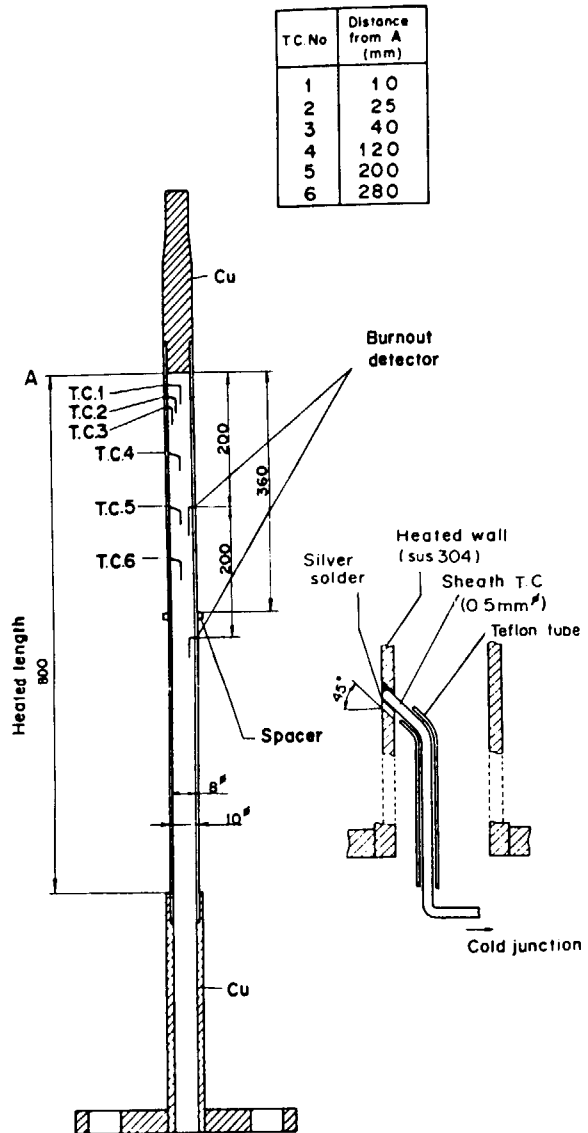


Fig. 2.4 Annular test section (Heated rod).

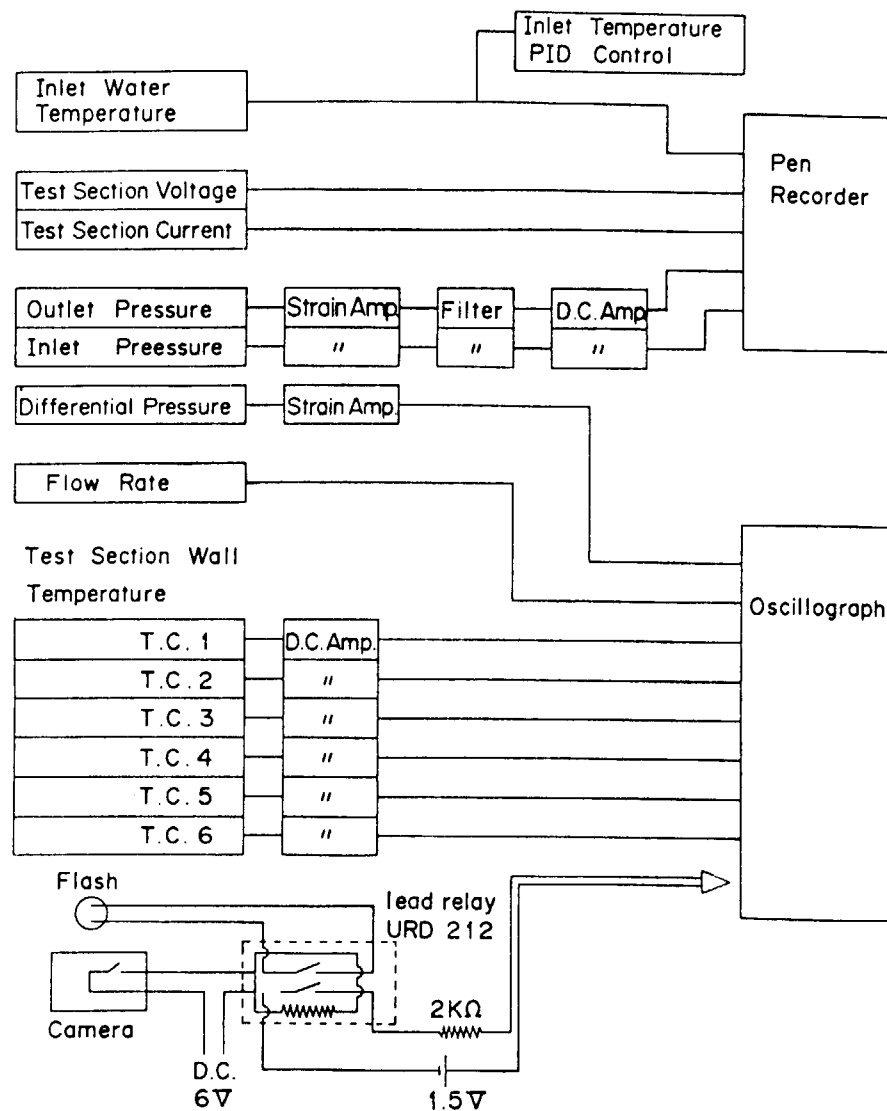


Fig. 2.5 Measurement and recording system of atmospheric pressure loop.

2.3 実験方法

本実験の実験手順を以下に述べる。

- (1) 各計測器の較正
- (2) 加熱電力、入口水温、初期流量等の実験条件を設定し、定常状態に保持する。
- (3) テスト部入口流量を減少し、バーンアウト検出により加熱電源を遮断する。
- (4) (2)に戻って再び実験条件を設定する。

なお、流量の減少に際しては、相互比較の便を考慮して、流量ができるだけ直線状に低下するようにした。この場合、流量低下速度を一般的に表現する指標として、初期流速： V_i に対する流速低下速度の割合： $\frac{4V}{4t}$ をとり、流速減少率： f と定義し、%/sの単位で表現した。

すなわち、

$$f = \frac{100 \Delta V}{V_i \Delta t} (\%/s)$$

である。

次に、本実験テスト部は一樣加熱でバーンアウト発生前の壁温は加熱管長さによってほぼ一様となり、加熱管両端での損失を無視すればほぼ一樣熱流束と見なせる。従って、バーンアウト熱流束は加熱電力を全伝熱面積で割って求めた。ただしバーンアウト後は壁温の局所的急上昇のため、この方法で局所熱流束を求めることはできない。

2.4 管内流路による流量低下バーンアウト実験

2.4.1 実験条件と結果

管内流路による流量低下バーンアウト実験のパラメータ範囲を Table 2.1 に示す。本実験は計 160 回実施した。

Fig. 2.6 (a)~(d) に、本実験で得られたテスト部壁温、入口と出口圧力、入口流速などの測定例を、流速減少率

の小さい方から順に示す。以上の実験データにおいて、流量低下バーンアウト時の壁温、入口圧力、および入口流速に関して、以下の現象が見られる。

(1) バーンアウト前の壁温低下現象

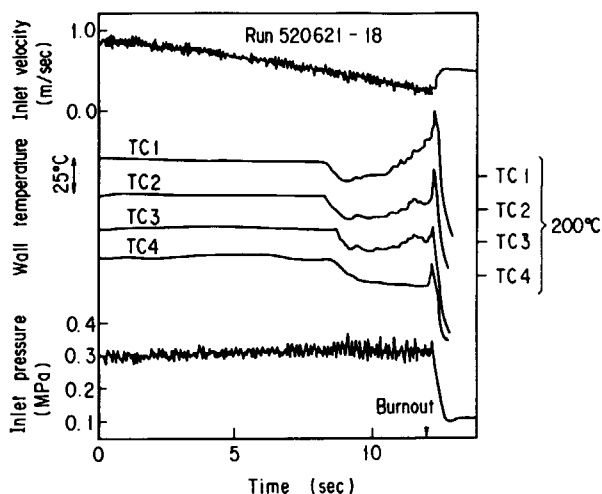
流速減少率が小さい場合(Fig. 2.6(a), (b))には、バーンアウトが近付くと、壁温がステップ状に低下する現象が見られ、この壁温低下現象はテスト部出口より上流に向かって進行し、壁温低下量は Fig. 2.6(a) の場合で約 15°C である。流速減少率が大きくなると、このような壁温のステップ状低下は見られなくなる。

(2) 電力遮断後の壁温挙動

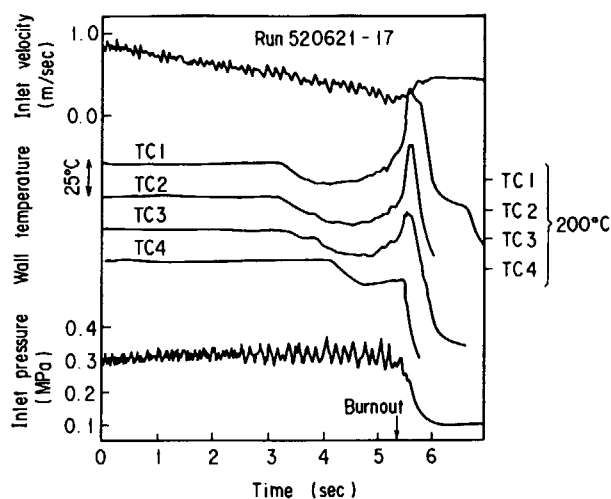
流速減少率が大きくなると、テスト部壁温はバーンアウト発生による電力遮断後もしばらく高温に維持され、その後テスト部下方より順次急冷される現象が見られる。

Table 2.1 Range of parameters for flow reduction transient burnout experiments under atmospheric pressure (Tube test section)

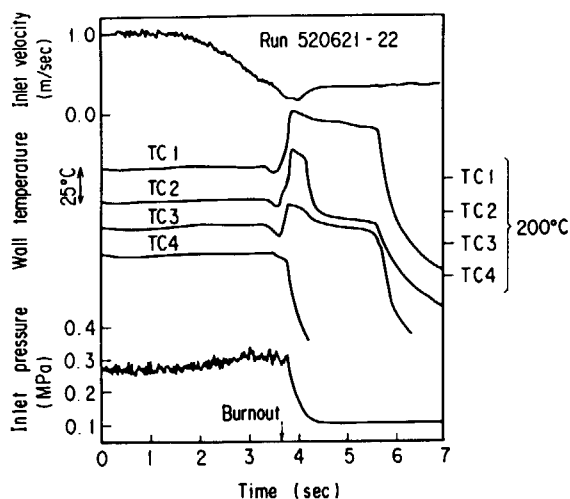
System pressure (P)	Atmospheric pressure
Heat flux (q)	$1.01 \sim 1.93 \times 10^6 \text{ W/m}^2$
Inlet temperature ($T_{i,n}$)	30, 50, 80 °C
Initial velocity (V_i)	0.5~1.1 m/s
Initial mass velocity (G_i)	500~1100 kg/s·m ²
Flow reduction time (dt)	0.07~70 s
Flow reduction rate (f)	0.57~1100 %/s
Burnout mass velocity (G_{bo})	0~556 kg/s·m ²
Inlet pressure ($P_{i,n}$)	0.25~0.46 MPa
Outlet pressure (P_{out})	0.14~0.24 MPa



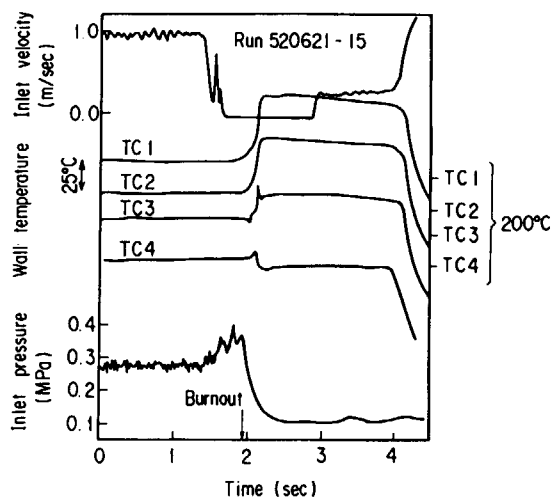
(a) $f = 4.5\%/sec$
 $q = 1.59 \times 10^6 \text{ w/m}^2, T_{in} = 30^\circ\text{C}$



(b) $f = 9.0\%/sec$
 $q = 1.59 \times 10^6 \text{ w/m}^2, T_{in} = 30^\circ\text{C}$



(c) $f = 38\%/sec$
 $q = 1.59 \times 10^6 \text{ w/m}^2, T_{in} = 30^\circ\text{C}$



(d) $f = 660\%/sec$
 $q = 1.59 \times 10^6 \text{ w/m}^2, T_{in} = 30^\circ\text{C}$

Fig. 2.6 Typical transient histories for flow reduction transient burnout experiments under atmospheric pressure (Tube test section).

本現象の原因については 2.5.2 項(2)で述べる。

(3) 圧力挙動

テスト部入口圧力の振動の振幅は、バーンアウトが近付くにつれて大きくなっている。また、流速減少率が大きくなると、バーンアウト発生直前に入口圧力振動の周期は長くなる。さらに、入口圧力はバーンアウト直前に一度上昇し、再び減少を開始した直後にバーンアウトが発生している。入口圧力平均値の上昇量は、Fig. 2.6(c)の場合は約 0.05 MPa, Fig. 2.6(d)の場合は約 0.09 MPa である。

(4) バーンアウト発生時入口流速

流速減少率が大きくなると、バーンアウト発生時の入口流速は減少した。特に Fig. 2.6(d)に見られるように、流速減少率が 660 %/s と極めて大きい場合には、流量低下終了より約 0.5 秒遅れてバーンアウトが発生している。

2.4.2 考察

(1) 定常バーンアウト熱流束測定値と限界熱流束相関式との比較

本実験装置により得られたバーンアウト熱流束の妥当性を確認するため、本実験パラメータ、特に低圧領域を適用範囲に含む、Thompson-Macbeth の式¹⁶⁾と Becker の式¹⁰⁾による計算値と本実験により得られた定常バーンアウト熱流束測定値との比較を、それぞれ Fig. 2.7 と Fig. 2.8 に示す。

両図より、本実験結果は Becker の式と良く一致するが、Thompson-Macbeth の式より約 30 % 小さな値を示していることが分かる。低圧では実験データのバラツキも大きく、適用可能な限界熱流束相関式も少ないことを考慮すると、本装置により得られたバーンアウト熱流束の値は従来の実験結果と矛盾するものではないと言える。

(2) バーンアウト発生直前の入口圧力上昇

2.4.1 項で述べたように、流速減少率が大きい場合には、バーンアウト発生の直前にテスト部入口圧力が急上昇す

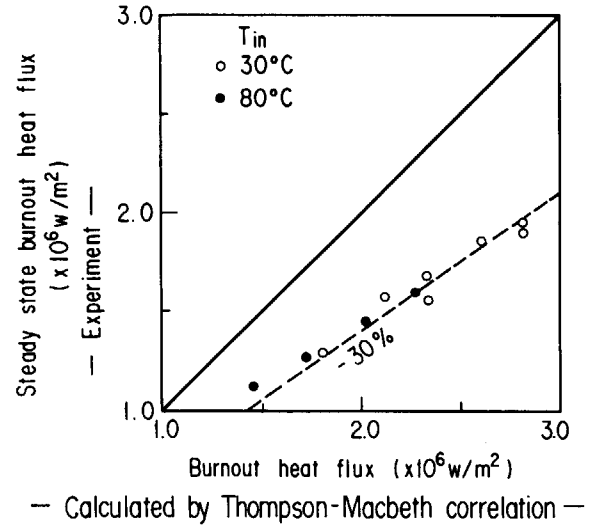


Fig. 2.7 Comparison of measured burnout heat flux under atmospheric pressure with Thompson-Macbeth correlation.

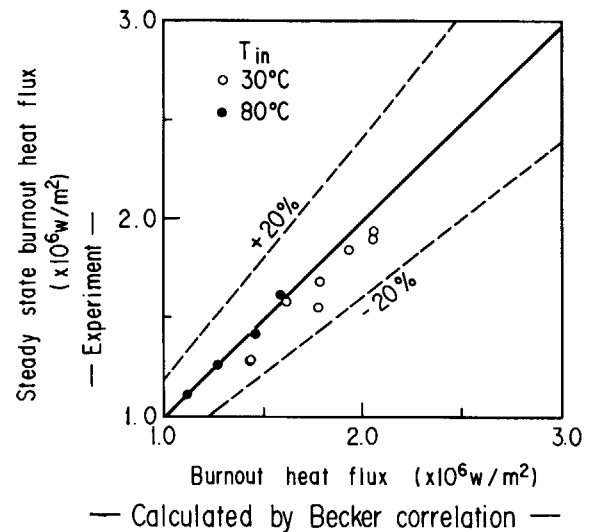


Fig. 2.8 Comparison of measured burnout heat flux under atmospheric pressure with Becker correlation.

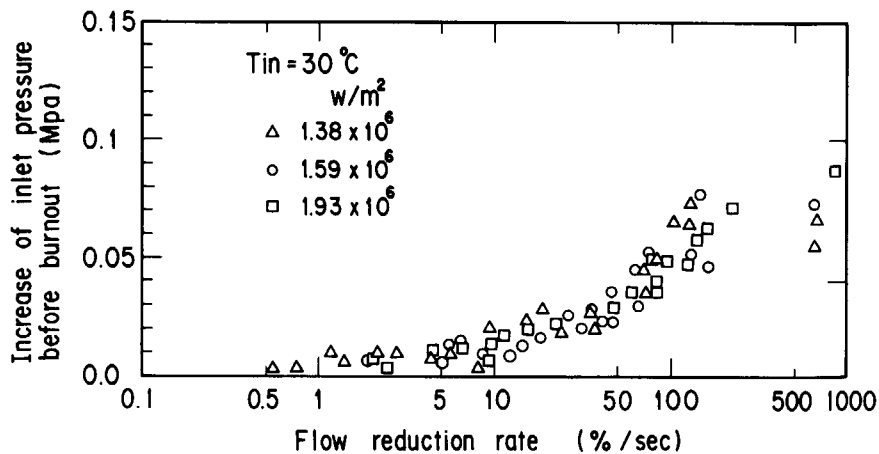


Fig. 2.9 Increase of inlet pressure just before burnout vs. flow reduction rate.

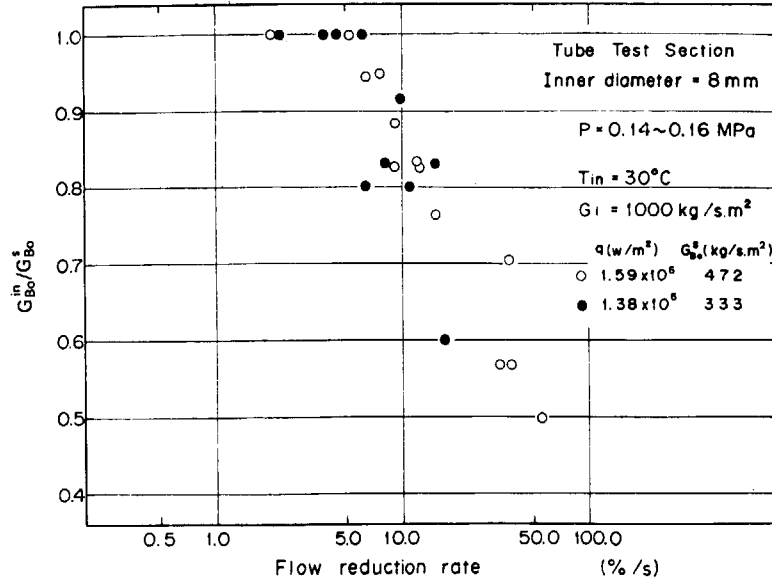


Fig. 2.10 Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. flow reduction rate (Tube test section under atmospheric pressure).

る現象が見られた。バーンアウト直前の入口圧力上昇幅と流速減少率の関係を Fig. 2.9 に示す。同図より、流速減少率が十分小さい場合には、入口圧力はバーンアウト発生までほぼ一定だが、流速減少率が約 5 ~ 10 %/s 以上になると、バーンアウト直前に入口圧力が急上昇し、その上昇量は流速減少率増大と共に大きくなるが、やがて一定値に近づく傾向にあることが分かる。

このようなバーンアウト直前の入口圧力急上昇については、指数関数状流量低下を仮定した計算例 Fig. 4.3(b) から、次のように定性的な説明ができる。流量低下に伴い初期非沸騰部が沸騰を開始すると、その位置での局所質量速度は一時的に急上昇し、流速減少率が大きいほど局所質量速度上昇量は大きくなる。従って本実験で見られたような流量低下時の入口圧力の急上昇の原因は、流路内部における局所質量速度の急上昇によるものと推察される。

なお、Fig. 2.9 に見られるように、流速減少率が約 100 %/s 以上になると入口圧力のピーク値がほぼ一定になるのは、このような急激な過渡時には沸騰境界移動速度が一定値に近づくため¹⁹⁾、沸騰流路内の過渡挙動も同一挙動を示すためである。

(3) バーンアウト発生時入口質量速度と流速減少率との関係

流量低下バーンアウト発生時の入口質量速度(G_{Bo}^{in})と定常バーンアウト時の質量速度(G_{Bo}^s)との比(G_{Bo}^{in}/G_{Bo}^s)と、流速減少率との関係を Fig. 2.10 に示す。同図に見られるように、流速減少率が約 5 %/s 以下の場合には、バーンアウト発生時入口質量速度は定常バーンアウト質量速度にほぼ等しいが、流速減少率が約 5 %/s 以上になると、バーンアウト発生時入口質量速度は定常バーンアウト質量速度よりも小さい。

Table 2.2 Range of parameters for flow reduction transient burnout experiments under atmospheric pressure (Annular test section)

System pressure (P)	Atmospheric pressure
Heat flux (q)	$0.76 \sim 1.58 \times 10^6$ W/m ²
Inlet temperature (T_{in})	30, 76 °C
Initial velocity (V_i)	0.66 ~ 1.66 m/s
Initial mass velocity (G_i)	660 ~ 1660 kg/s.m ²
Flow reduction time (dt)	0.1 ~ 68 s
Flow reduction rate (f)	0.44 ~ 770 %/s
Burnout mass velocity (G_{Bo})	0 ~ 797 kg/s.m ²
Inlet pressure (P_{in})	0.14 ~ 0.38 MPa
Outlet pressure (P_{out})	0.10 ~ 0.17 MPa
Annular gap	2.0, 1.4 mm

これは、流速減少率が大きくなると、テスト部の入口と出口の質量速度差は大きくなり、同一の出口質量速度に対応する入口質量速度は小さくなるためである。

なお、局所質量速度による流量低下バーンアウト発生条件の評価に関しては 5 章で述べる。

2.5 環状流路による流量低下バーンアウト実験

2.5.1 実験条件と結果

環状流路による流量低下バーンアウト実験のパラメータ範囲を Table 2.2 に示す。

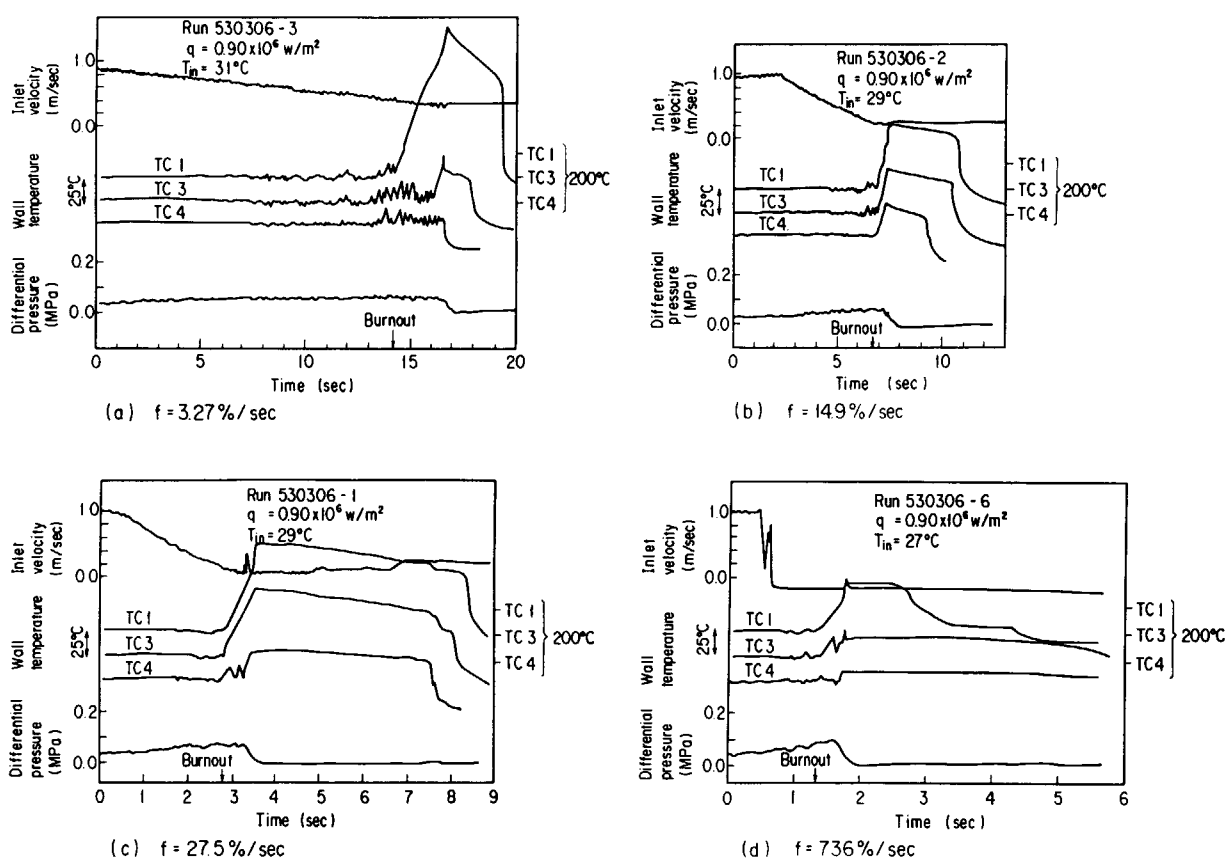
テスト部の断面形状を比較するため、環状流路(ギャップ幅 2 mm および 1.4 mm)と管内流路(内径 8 mm)の各場合の流路断面積、熱的等価直径、水力学的等価直径、および流速比の値を Table 2.3 に示す。

環状流路テスト部を用いた流量低下バーンアウト実験

Table 2.3 Flow channel dimensions in tube and annular test sections

Test section : outer diameter = 10mm, inner diameter = 8mm

Geometry	Run No.	Shroud I.D. (mm)	Flow channel gap (mm)	Flow area (mm ²)	Heated equivalent diameter (mm)	Hydraulic equivalent diameter (mm)	Relative flow velocity
Annular	530303	14.0	2.0	75.4	9.6	4	0.667
	530528						
Annular	530606	12.8	1.4	50.1	6.38	2.8	1.003
	530607						
Tube	520615 520720	—	—	50.3	8	8	1

**Fig. 2.11** Typical transient histories for flow reduction transient burnout experiments under atmospheric pressure (Annular test section; gap = 2.0 mm).

は計 115 回実施した。Fig. 2.11(a)～(d)に、本実験で得られたテスト部壁温、テスト部差圧、入口流速などの測定例を、流速減少率の小さい方から順に示す。これはギャップ幅 2 mm、熱流束 $0.90 \times 10^6 \text{ w/m}^2$ 、入口温度約 30°C の場合の実験結果である。

同図の実験データを Fig. 2.6 の管内流路の実験データと比較すると、バーンアウト発生による電力遮断後の壁温高温維持現象は両テスト部で共通に見られる。しかしながら、環状流路テスト部では、バーンアウト発生直前の壁温のステップ状低下現象は測定されず、流速減少

率が大きい場合でもバーンアウト発生直前の入口圧力上昇は管内流路の場合ほど顕著ではない。また本実験では熱電対が伝熱面に近いため、Fig. 2.11(a)に見られるように、流速減少率が小さい場合にはバーンアウト発生直前に壁温の激しい振動が見られた。

2.5.2 考察

(1) 定常バーンアウト熱流束の流路形状依存性

バーンアウト発生の流路形状依存性を調べるために、管内と環状流路を用いて得られた定常バーンアウト熱

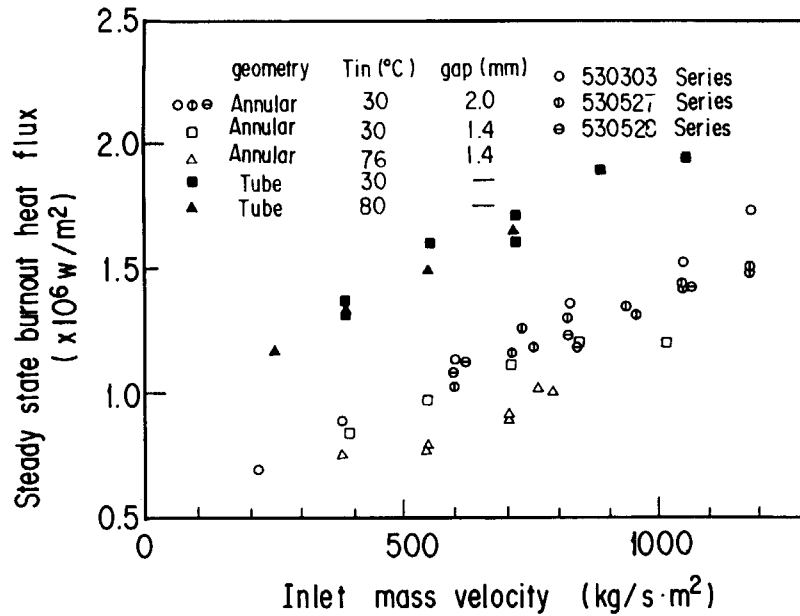


Fig. 2.12 Steady state burnout heat flux vs. inlet mass velocity (Tube and annular test sections).

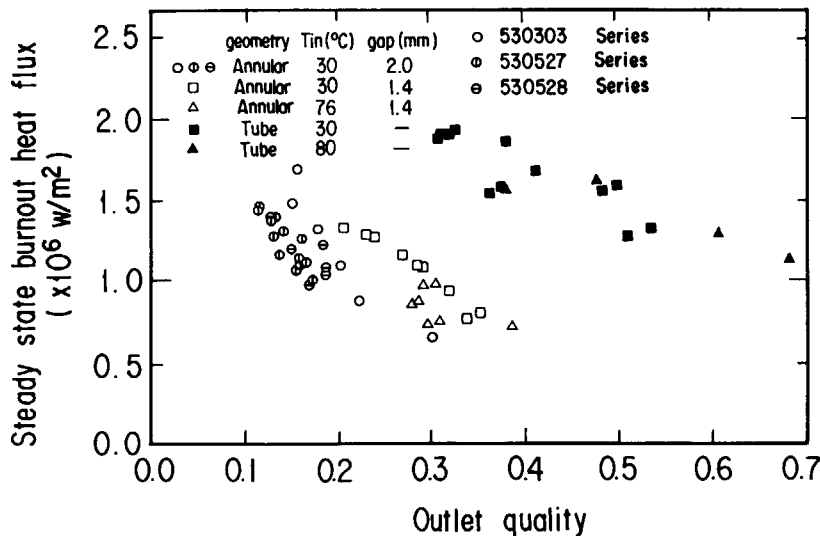


Fig. 2.13 Steady state burnout heat flux vs. outlet quality (Tube and annular test sections).

流束と入口質量速度および出口クォリティとの関係を Fig. 2.12 と Fig. 2.13 に示す。両図には、環状流路テスト部と管内流路テスト部を用いて得られた結果を合わせて示す。

Fig. 2.12 に見られるように、環状流路のほうが管内流路に比べて、同一質量速度におけるバーンアウト熱流束は小さくなる。これは、加熱面より非加熱面のほうに液滴が多く付着するため、加熱面でバーンアウトが発生しやすくなるためと考えられる。

次に、Fig. 2.13 に見られるように、バーンアウト時の出口クォリティは、管内流路よりも環状流路のほうが低くなっている。これは上述のように、同一質量速度の場合、環状流路のほうがバーンアウト熱流束が小さいためである。

なお、Fig. 2.12 と Fig. 2.13 には、環状流路(ギャップ幅 2 mm)の場合について、3種類のテスト部による測定値を区別して示す。各テスト部ごとにバーンアウト挙動が少し異なっているのは、ガラス管シュラウドと発熱部の間隙が必ずしも一様でなく、テスト部ごとに偏心の程度が異なるためと考えられる。

(2) バーンアウト発生前後の壁温および圧力挙動

Fig. 2.11 に見られるように、環状流路でも管内流路の場合(Fig. 2.6)と同様に、流速減少率が大きくなると、バーンアウト発生による電力遮断後もテスト部壁温が 0.1 ~ 5 秒程度約 250 °C の温度に維持されてから急冷される現象が観察された。この現象が起きる原因は、流動観察により、バーンアウト発生直後に上部流路の水が流路から噴出して加熱面が蒸気相にさらされ、やがて流入して

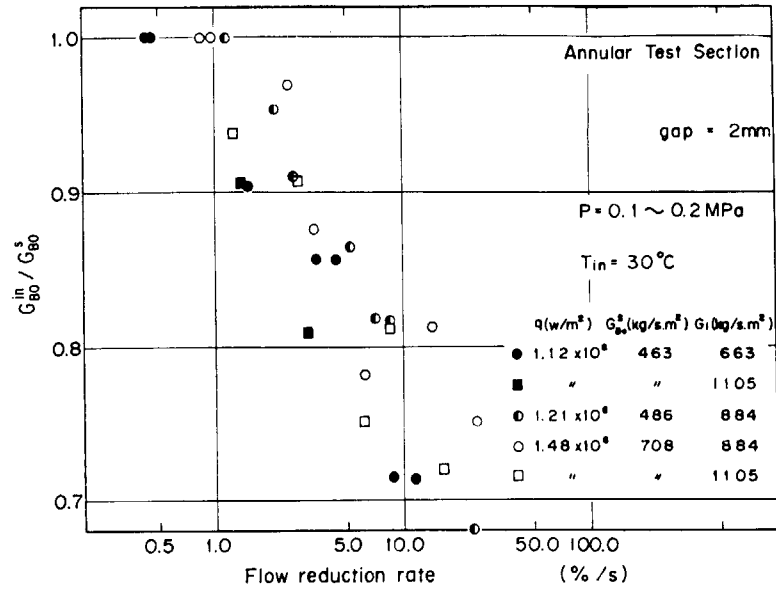


Fig. 2.14 Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. flow reduction rate (Annular test section; gap = 2 mm, under atmospheric pressure).

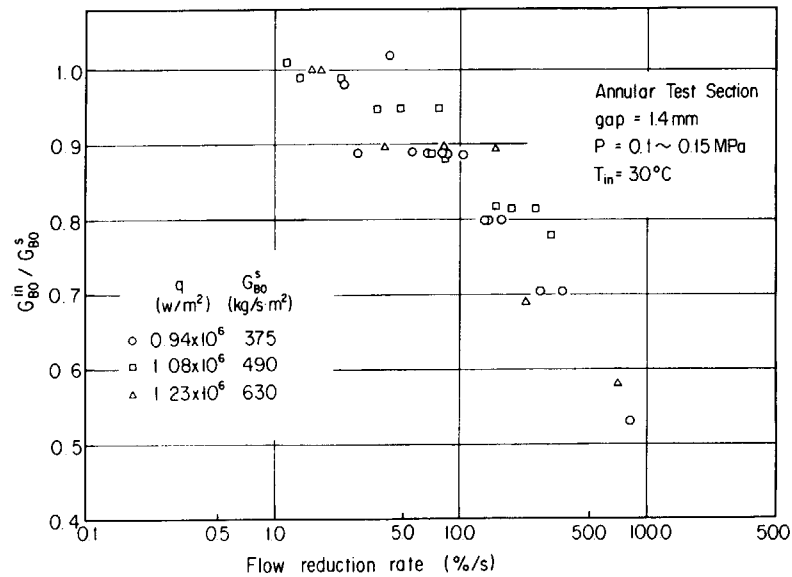


Fig. 2.15 Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. flow reduction rate (Annular test section; gap = 1.4 mm, atmospheric pressure).

きた水によりテスト部下方から順次急冷されるためであることが分かった。

なお、管内流路で見られたようなテスト部壁温のステップ状低下現象は、環状流路では全く測定されなかった。

また、バーンアウト直前の入口圧力の上昇も、管内流路の場合ほど顕著ではなかった。これについては以下のような定性的説明が考えられる。Fig. 2.13に見られるように、バーンアウト発生時の出口クォリティは、管内流路で約0.3~0.7であるのに対し、環状流路では約0.1~0.4とかなり小さくなっており、初期出口クォリティが一定の場合でも、環状流路のほうが流量低下に伴う沸騰長さの変化が相対的に短い。一方、Fig. 4.4 (b)の計算例に

見られるように、初期沸騰長さが一定でも、沸騰長さ変化量が小さい程流量低下中の出口と入口の質量速度比は小さくなる。一方、2.4.2項の(2)で述べたように、入口圧力の急上昇は流量低下に伴う過渡的な蒸気発生によると考えられるので、出口と入口の質量速度比が小さいことは、入口圧力上昇量も小さいことに対応している。

(3) バーンアウト発生時入口質量速度と流速減少率の関係

Fig. 2.14 と Fig. 2.15 にそれぞれギャップ幅 2 mm, 1.4 mm の各場合の、バーンアウト発生時の入口質量速度と定常バーンアウト質量速度の比(G_{bo}^t / G_{bo}^s)と、流速減少率との関係を示す。

両図を比較すると、 G_{bo}^{*}/G_{bo}^* が1より低下し始める流速減少率は、ギャップ幅 2 mm の場合は約 1%/s で、ギャップ幅 1.4 mm の場合には 3~5%/s である。一方、**Fig. 2.10** に示した管内流路の実験結果によると、この流速減少率のしきい値は約 5%/s で、ギャップ幅 1.4 mm の環状流路の場合とほぼ一致している。しかしながら、ギャップ幅 2 mm の環状流路の場合の流速減少率しきい値は、管内流路の場合よりもかなり小さい。

ところで **Table 2.3** に示したように、管内流路テスト部とギャップ幅 1.4 mm の環状流路テスト部は、ほぼ等しい流路断面積を有しているが、ギャップ幅 2 mm の場合の流路断面積は約 1.5 倍となっている。従って、流路断面積が大きい場合には、より小さな流速減少率において、流量低下バーンアウト発生時入口質量速度が定常バーンアウト質量速度よりも低下し始めることが分かった。

2.6 まとめ

常圧大気開放ループを用いた流量低下バーンアウト実験により得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 管内流路テスト部で得られた定常バーンアウト熱流束の値は、Becker の式と良く一致した。

(2) 管内流路では、流速減少率が小さい場合に、テスト部出口から順々に壁温がステップ状に低下する現象が見られたが、環状流路ではこの現象は見られなかった。

(3) 管内流路においては、流速減少率が約 10%/s 以上になると、バーンアウト直前に入口圧力が急上昇した。この圧力上昇量は流速減少率増大と共に大きくなったが、約 100%/s 以上の流速減少率ではほぼ一定となった。

(4) 流速減少率があるしきい値を超えない範囲では、定常時とはほぼ同じ入口流量のときにバーンアウトが発生したが、流速減少率があるしきい値を超えると、入口流量が定常バーンアウト流量よりもさらに減少してからバーンアウトが生じた。このしきい値は、管内流路およびそれと同じ流路断面積を持つギャップ幅 1.4 mm の環状流路の場合は約 5%/s で、ギャップ幅 2 mm の環状流路では約 1%/s となり、この非定常効果が生じはじめる流速減少率は、流路断面積が大きい場合には小さくなる傾向を示した。また、いずれの場合も、このしきい値は、本実験範囲内での熱流束や入口温度にはほとんど依存しなかった。

3. 高圧過渡沸騰試験装置による実験

3.1 序

前章で述べた常圧大気開放ループによる実験では、流量低下バーンアウト現象の基本的特性は把握できたが、実際の炉における PCM 事故時のように高圧下での流量低下バーンアウト現象を解明するためには、より高圧での実験が必要である。また、系圧力が高いほど蒸発に伴う比体積変化が小さいので、圧力変化項を無視した過渡沸騰二相流基礎式からも局所質量速度が比較的精度よく計算できるという利点がある。さらに、従来のバーンアウト実験は主として高圧下で行われているので、相互に比較するデータ数が多い利点もある。

以上の観点より、昭和 53 年度より 55 年度まで、最高使用圧力 4 MPa の高圧過渡沸騰試験装置を用いて、系圧力をパラメータとする流量低下バーンアウト実験を実施した。

本章では、本実験装置により得られた結果と考察について述べる。

3.2 実験装置

過渡沸騰試験装置の概要を Fig. 3.1 に示し、本装置の主要性能を Table 3.1 に示す。本装置は、給水系、循環ポンプ、流量計(浮子式およびタービン流量計)、流量調節弁、入口温度制御用ヒータ、テスト部、気水分離器、圧力制御系(減圧タンクと圧力逃し弁等)、蒸気凝縮器、加圧器(ヒータ内蔵)、冷却器、および高圧ガス系から構成されている。

以下、主要項目について概要を述べる。

本実験で使用したテスト部の形状と計装取り付け位置を Fig. 3.2 に示す。テスト部は内径 10 mm、肉厚 1 mm、加熱長さ 800 mm の SUS 304 ステンレス鋼製管内流路であり、最高 100 kW(50 V, 2000 A)の直流直接通電により加熱した。テスト部外壁には、直径 0.32 mm の C-A 熱電対 6 本をスポット溶接した。またテスト部の入口と出口には、圧力検出孔を設置した。さらに、バーンアウトによるテスト部損傷を防止するため、ブリッジ式バーンアウト検出器の検出端線も Fig. 3.2 に示す位置に取り付けた。

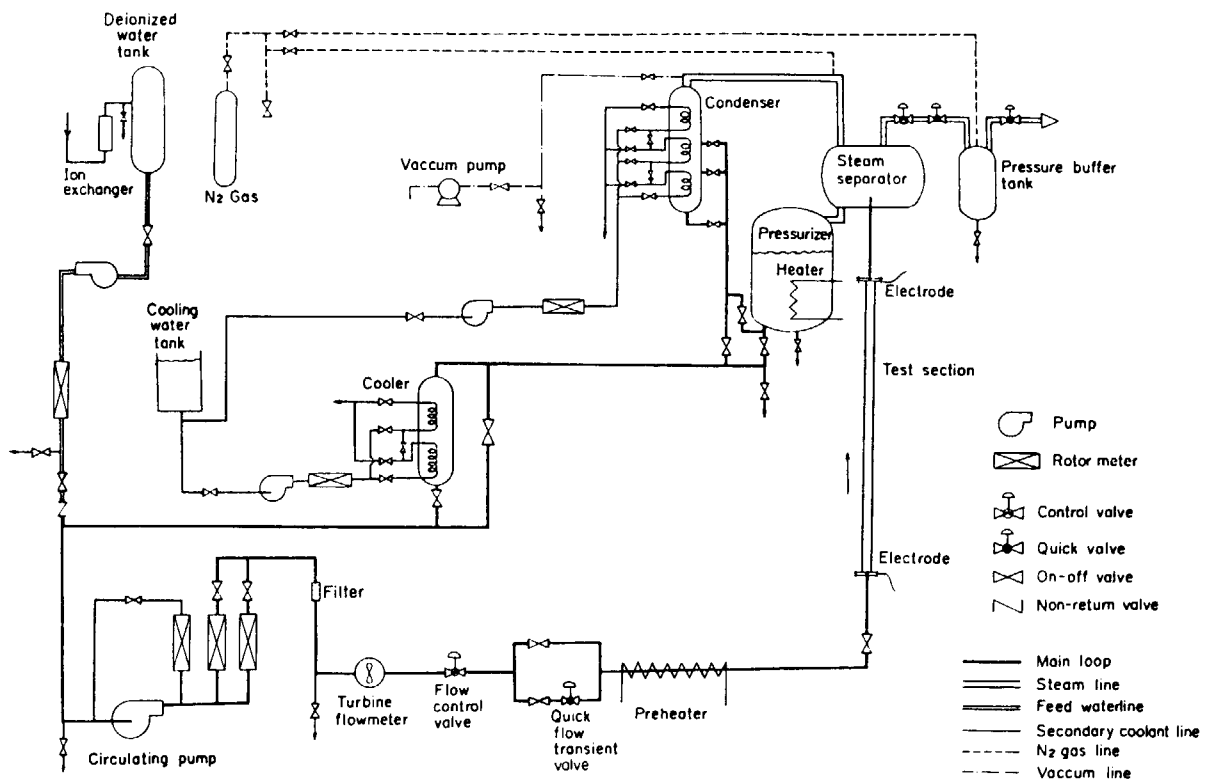


Fig. 3.1 Schematic of transient boiling experiment loop.

Table 3.1 Characteristics of Transient Boiling Experiment Loop

Loop	Pressure	4.0 MPa (Max.)
	Flow rate	50 ℓ/min (Max.)
	Pump head	100 m
	Inlet temperature	250 °C (Max.)
	Flow transient time	0.5 sec (Min.)
Main Component	Steam separator	200 ℓ
	Pressurizer	300 ℓ (Heater 22 kW)
	Condenser	162 ℓ (Condensing power 150 kW (Max.))
	Cooler	100 ℓ (Cooling power 100 kW (Max.))
	Pressure buffer tank	100 ℓ
	Deionized water tank	1200 ℓ
	Cooling water tank	280 ℓ
Test Section	Heating power	100 kW (Max.)
	Geometry	Tube
	Maximum length	2 m

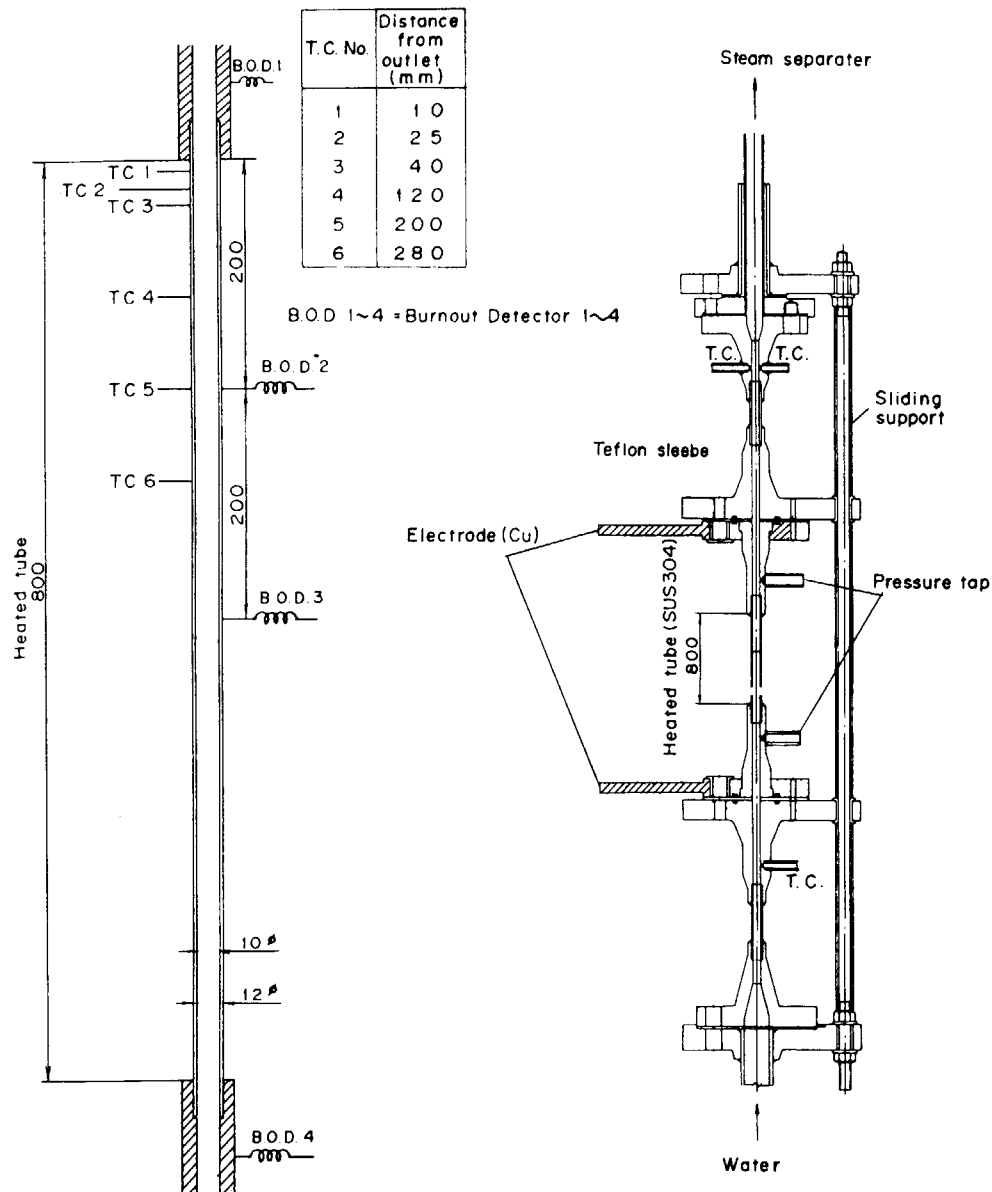


Fig. 3.2 Test section.

本実験では、系統的な相互比較を可能とするため、直線状流量低下が実現できるように、弁の作動特性も考慮してあらかじめ設定した関数信号により流量調節弁を作動させた。本制御方式の概要と、制御信号と流量変化の実例を Fig. 3.3 に示す。なお、流量低下過渡時間が1秒以下の急激な過渡変化の場合には、上記の制御方式では直線状流量低下が実現できなくなるので、手動弁または急速作動弁を用いて流量を低下させた。

本実験における標準的な計測項目と測定点数を Table 3.2 に示す。実験用計測項目は、流量、加熱電流、加熱電圧、入口と出口圧力、テスト部差圧、加圧器と定圧タンク圧力、入口と出口水温、テスト部壁温およびバーンアウト検出器信号等である。

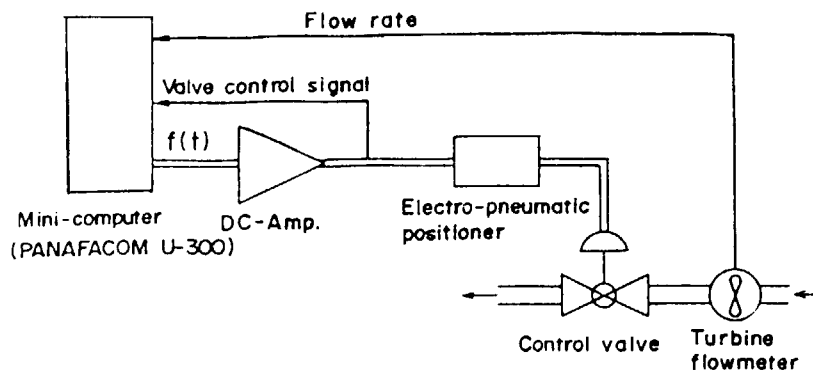
計測器としては、テスト部壁温用として0.32φ C-A熱電対(スポット溶接)、水温用として1.6φ 非接地型シーース熱電対を用いたほか、タービン流量計、ひずみ式圧力計、ひずみ式差圧計、電流・電圧計等を使用した。

データ集録処理システムの概要を Fig. 3.4 に示す。本システムでの最大集録チャンネル数は32で、集録速度

は2~8 ms/32 chである。さらに大型計算機により作図や解析作業を行うため、集録した実験データは磁気テープに転送した。

Table 3.2 Measuring items

item	points
Flow rate	1
Test section heating voltage	2
Test section heating current	1
Inlet pressure	1
Outlet pressure	1
Test section differential pressure	1
Constant pressure tank pressure	1
Pressurizer pressure	2
Inlet water temperature	1
Outlet water temperature	1
Test section wall temperature	6
Burnout detector signal	1
Load cell	1
Flow control signal	1
Spare channels	11
Total	32 points



Valve control signal

$$f(t) = \begin{cases} a & t \leq t_i \\ b - (b-a)e^{-\frac{c}{\Delta r} t} & t_i < t < t_i + g\Delta r \\ b - (b-a)e^{-\frac{c}{\Delta r} (t_i + g\Delta r)} + d(b-a)\frac{c}{\Delta r} e^{-\frac{c}{\Delta r} (t_i + g\Delta r)} (t - t_i - g\Delta r) & t \geq t_i + g\Delta r \end{cases}$$

(Example)

$$a = 0.85, b = 0.15, c = 2.30259, d = 1.2, g = 0.6, t_i = 0.15 \Delta r$$

$$\Delta r = 5.0 \text{ sec}$$

$$\Delta r = 20.0 \text{ sec}$$

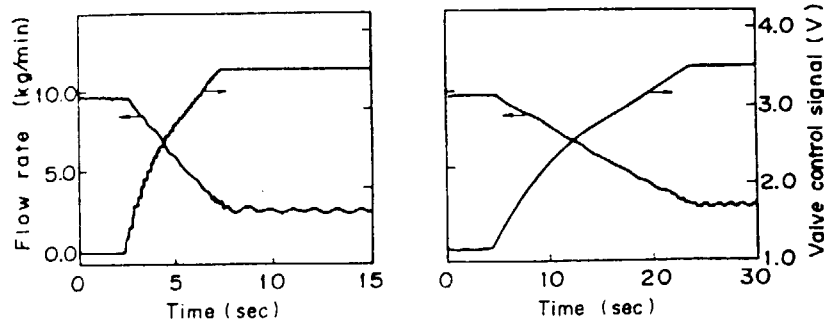


Fig. 3.3 Control method of flow reduction pattern.

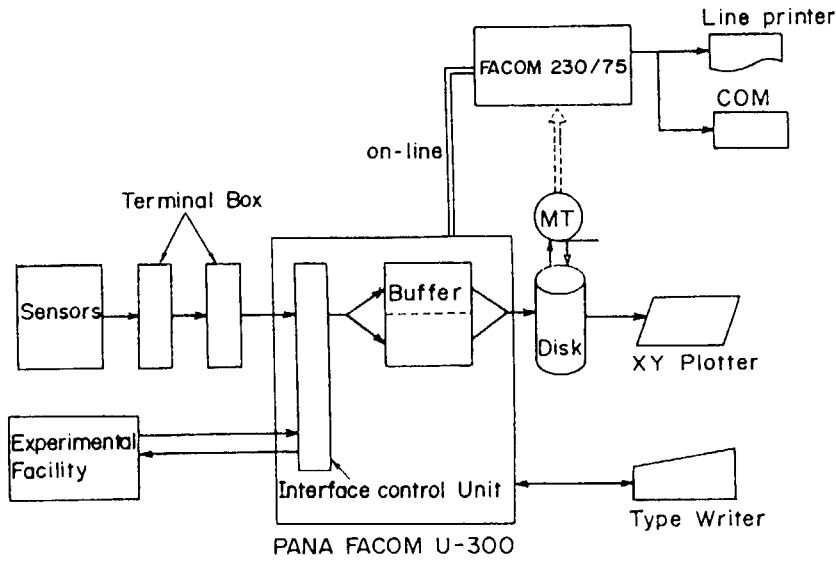


Fig. 3.4 Data processing system.

3.3 実験方法

本装置を用いた流量低下バーンアウト実験の実施手順は以下のとおりである。

- (1) 計測器の校正を行う。
- (2) 実験の初期条件を設定し、定常状態に保つ。初期条件としては、系圧力、加熱電圧、初期流量およびテスト部入口温度がある。
- (3) 3.2節で述べた方法により、テスト部入口流量を直線状に低下させる。同時にデータ集録を開始する。
- (4) バーンアウト発生により、テスト部壁温が設定値以上となると、小型計算機からの指令により、加熱用電源を遮断する。なお、テスト部保護のため、バーンアウト検出器も併用する。
- (5) 実験データのチェック用作図を行う。
- (6) 実験条件を変更して、(2)~(5)を繰り返す。
- (7) 一連の実験終了後、データを磁気テープに転送する。
- (8) 大型計算機により、データ整理と作図を行う。

3.4 実験条件と結果

本実験の主要パラメータ範囲を Table 3.3 に示す。本実験では、系圧力を 0.5 ~ 3.9 MPa と変化させ、流速減少率は 1.0 %/s 以下から約 130 %/s の範囲で実施した。また、入口温度、熱流束、初期流量もパラメータとした。

本実験は系圧力 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 および 3.9 MPa の各場合について計 381 回実施した。Fig. 3.5 (a) ~ (d) に、本実験で得られたテスト部壁温、出口圧力、テスト部差圧、および入口質量速度の測定例を示す。同図(a), (b) は系圧力 1 MPa で流速減少率はそれぞれ 5.21 と 35.0 %/s の場合であり、(c), (d) は系圧力 3.9 MPa で流速減少率はそれぞれ 3.93 と 33.4 %/s の場合である。なお、

Table 3.3 Range of parameters for flow reduction transient burnout experiments under elevated pressure

Pressure (P)	0.50~3.9 (MPa)
Burnout heat flux (q)	2.16~3.86 × 10 ⁶ (W/m ²)
Inlet temperature (T_{in})	66~201 (°C)
Initial mass velocity (G_i)	1240~3050 (kg/s·m ²)
Initial outlet quality (X_{out}^{out})	-0.03~0.38
Flow transient time (dt)	0.35~83 (s)
Flow reduction rate (f)	0.6~160 (%/s)

Fig. 3.5 の点線は 4 章で述べる計算により得られた値で、沸騰境界は(4-4), (4-5)式より、出口ボイド率は(4-18)式の積分より、出口質量速度は(4-20)式より、出口クォリティは(4-21)式よりそれぞれ計算される。

バーンアウト発生時刻はバーンアウト検出器出力信号の急変化時刻とした。これはテスト部出口近くの壁温の急上昇開始時刻にほぼ一致している。Fig. 3.5 には、バーンアウト発生時刻と加熱電流遮断時刻も示してある。

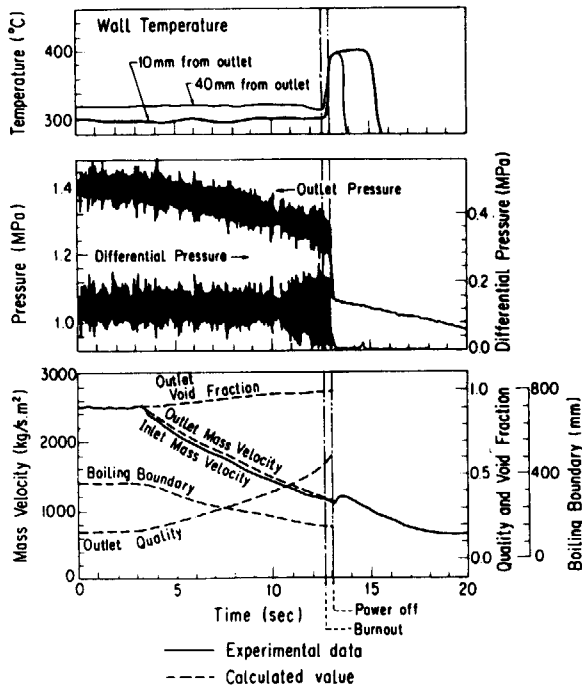
Fig. 3.5 より、バーンアウト発生前後の圧力と壁温挙動に関して以下のような現象が見られた。

系圧力が高い程、圧力とテスト部差圧の振動周波数は高くなり、振幅は小さくなる。また、いずれの圧力下でも、バーンアウト発生直前には圧力振動の周波数が小さくなる傾向にある。

バーンアウト発生前後の壁温挙動については、系圧力の影響は特に認められなかった。なお一部の試験では、バーンアウト発生直前に壁温が約 10 °C 程度ステップ状に低下する現象が見られた。この現象の発生は系圧力には依存せず不規則であった。

Run 541210-8

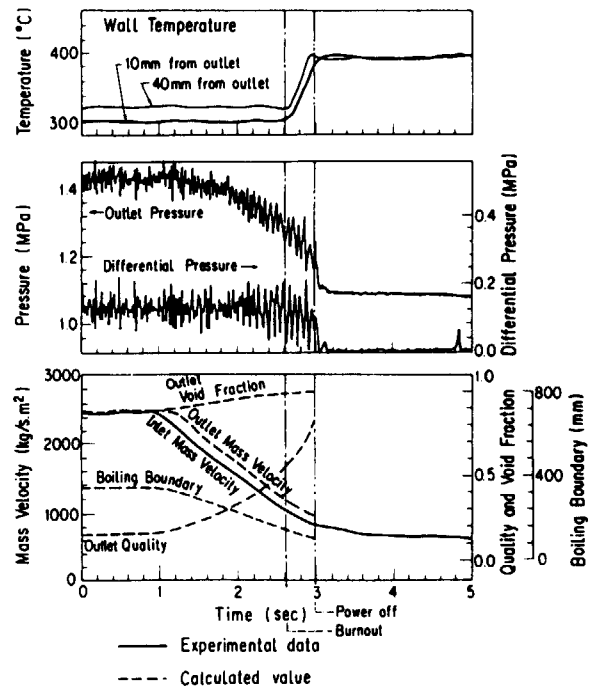
System Pressure = 1.07 MPa, Heat Flux = 3.79×10^6 W/m²
 Inlet Temperature = 140 °C, Flow Reduction Rate = 5.21 %/sec
 Steady State Burnout Mass Velocity = 1180 kg/s.m²



(a)

Run 541210-13

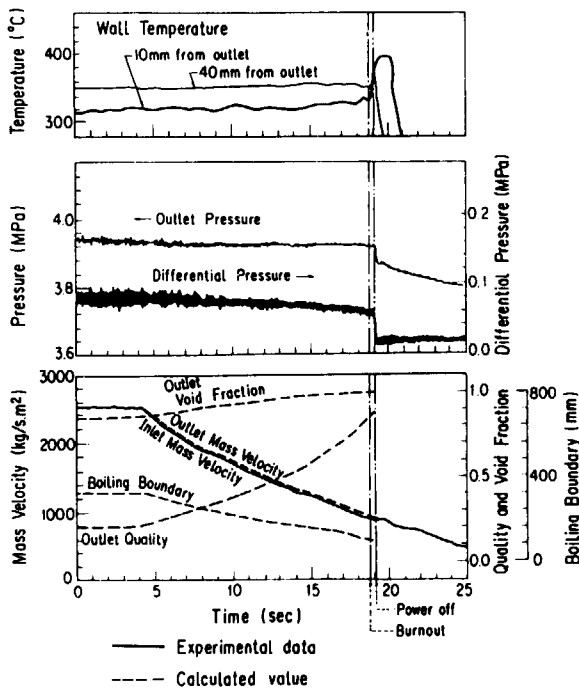
System Pressure = 1.08 MPa, Heat Flux = 3.80×10^6 W/m²
 Inlet Temperature = 142 °C, Flow Reduction Rate = 35.0 %/sec
 Steady State Burnout Mass Velocity = 1180 kg/s.m²



(b)

Run 550122-9

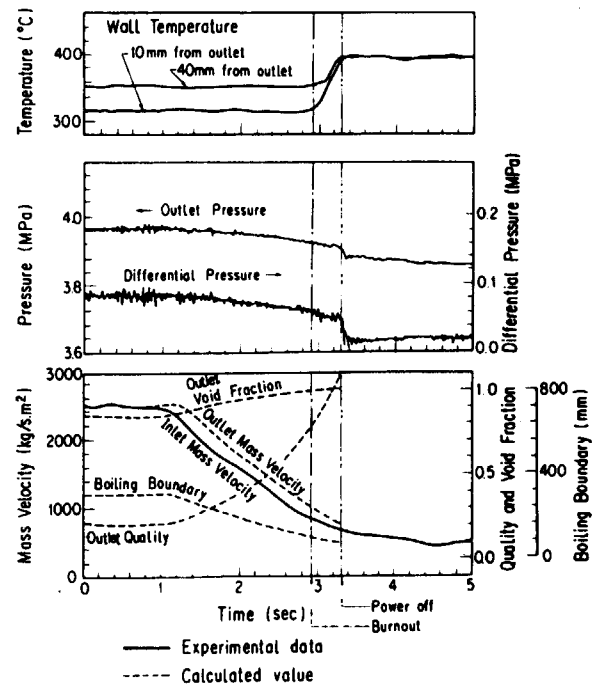
System Pressure = 3.83 MPa, Heat Flux = 3.69×10^6 W/m²
 Inlet Temperature = 200 °C, Flow Reduction Rate = 3.93 %/sec
 Steady State Burnout Mass Velocity = 949 kg/s.m²



(c)

Run 550122-6

System Pressure = 3.86 MPa, Heat Flux = 3.65×10^6 W/m²
 Inlet Temperature = 202 °C, Flow Reduction Rate = 33.4 %/sec
 Steady State Burnout Mass Velocity = 949 kg/s.m²



(d)

Fig. 3.5 Typical transient histories for flow reduction transient burnout experiments at elevated pressures.

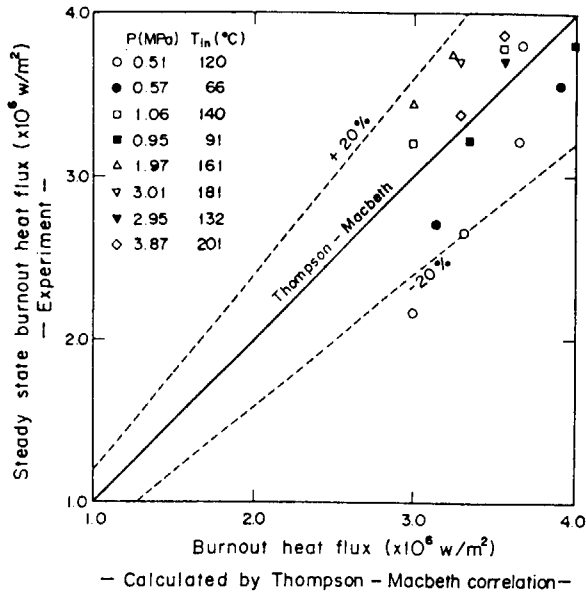


Fig. 3.6 Comparison of measured burnout heat flux under elevated pressure with Thompson-Macbeth correlation.

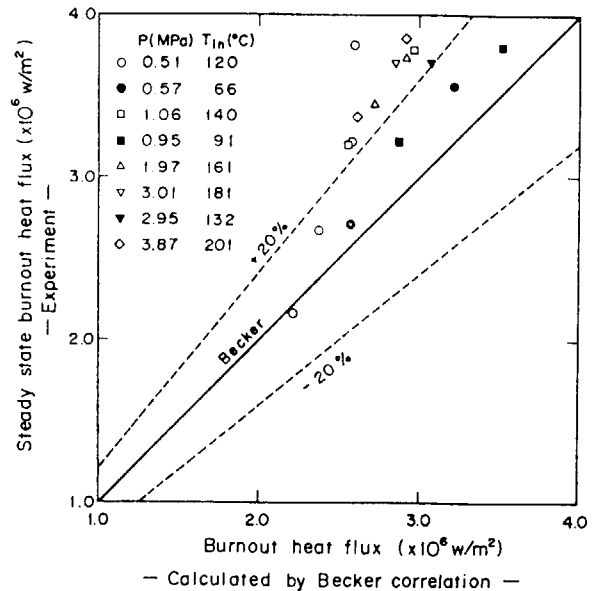


Fig. 3.7 Comparison of measured burnout heat flux under elevated pressure with Becker correlation.

3.5 考察

3.5.1 定常バーンアウト熱流束測定値と限界熱流束相関式との比較

本装置で得られたバーンアウト熱流束の値の妥当性を確認するため、定常バーンアウト熱流束測定値と、Thompson-Macbeth の式¹⁶⁾ および Becker の式¹⁰⁾ による計算値とを比較した結果をそれぞれ Fig. 3.6 と Fig. 3.7 に示す。なお、両限界熱流束相関式とも本実験範囲をその適用範囲内に含んでいる。

Fig. 3.6 と Fig. 3.7 より、本装置で得られた定常バーンアウト熱流束の値は Thompson-Macbeth の式とは ± 20% 以内ではば一致し、Becker の式による計算値よりは約 20% 高くなっていることが分かる。しかしながら、相関式自体の精度¹⁰⁾ を考慮すれば、本装置による結果は、従来の多くのバーンアウト実験データと矛盾するものではないことが確認された。

3.5.2 バーンアウト発生時入口質量速度と流速減少率との関係

流量低下バーンアウト発生時の入口質量速度(G_{bo}^i)は、流速減少率が大きくなると一般に同一条件下での定常バーンアウト質量速度(G_{bo}^s)よりも小さくなる。この関係を一般化して表示するため、両者の比(G_{bo}^i / G_{bo}^s)と流速減少率との関係を、系圧力をパラメータとして Fig. 3.8 に示す。

同図より、 G_{bo}^i / G_{bo}^s は、ある一定の流速減少率以下では 1 となり、定常バーンアウトであることを示し、流速減少率がそのしきい値を超えると、 G_{bo}^i / G_{bo}^s は 1 より減少し、過渡状態にあることが分かる。系圧力が高くな

ると、この流速減少率のしきい値も大きくなり、例えば系圧力 0.5 MPa の場合と 3.9 MPa の場合を比較すると、前者の場合には 1~2%/s であるのに対し、後者の場合には 3~5%/s となっている。

流速減少率が同じなら、 G_{bo}^i / G_{bo}^s の減少割合は系圧力増加と共に小さくなるが、2 MPa 以上になると系圧力の影響は低下する。Fig. 3.9 に、流速減少率を約 2.5, 5.0, 10.0, および 25.0%/s のそれぞれの場合に分割して、 G_{bo}^i / G_{bo}^s と系圧力の関係を示す。同図の斜線部分はデータの分散範囲を示す。

Fig. 3.9 に見られるように、流速減少率が約 2.5%/s の場合には、系圧力 2MPa 以上では G_{bo}^i / G_{bo}^s は約 0.97~1.0 となり、系圧力 0.5 MPa では G_{bo}^i / G_{bo}^s は約 0.9~1.0 の範囲にある。流速減少率が 5%/s, 10%/s と増加すると、1 MPa 以下での G_{bo}^i / G_{bo}^s の低下率が顕著となり、2 MPa 以上でも G_{bo}^i / G_{bo}^s の低下が認められる。流速減少率が 25%/s 付近になると、 G_{bo}^i / G_{bo}^s は系圧力 2 MPa 以上で約 0.92~0.96 であるのに対し、系圧力 1 MPa では約 0.84~0.88、系圧力 0.5 MPa では約 0.7~0.8 となっている。すなわち、系圧力が高いほど、バーンアウト発生時の入口質量速度の低下率は小さくなることが分かる。

次に、系圧力以外の各パラメータが流量低下バーンアウト発生時の入口質量速度低下率に及ぼす影響について調べてみる。まず、加熱電力(熱流束)については、Fig. 3.8 に示すように系圧力が約 1 MPa 以上の場合にはほとんど影響が認められない。入口サブクール度と初期流量の影響を Fig. 3.10 に示す。同図より、本実験範囲内では、これら 2つのパラメータの影響もほとんど認められない。

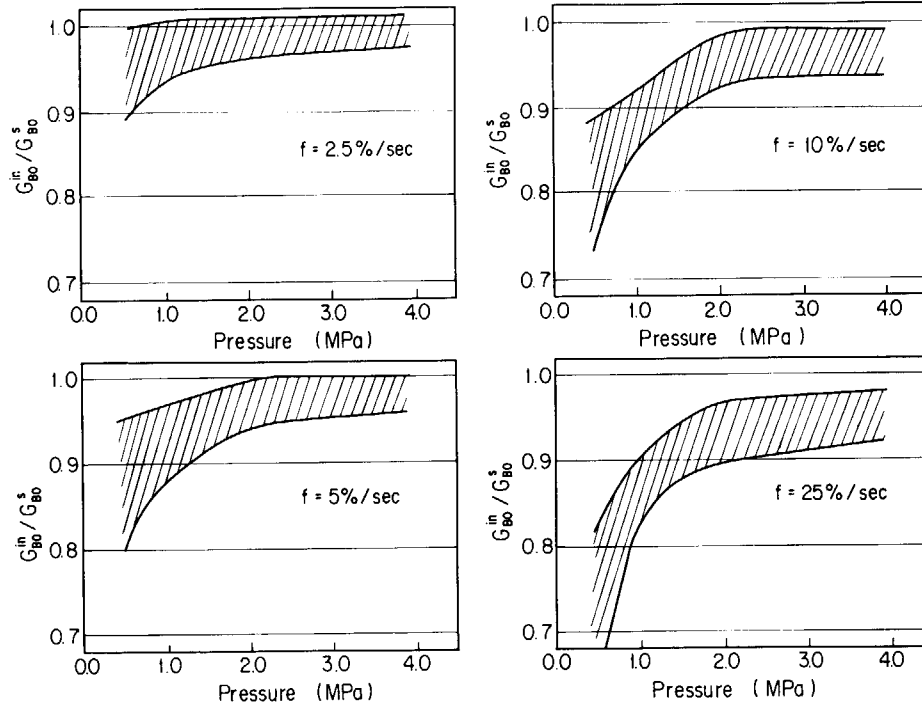


Fig. 3.8 Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. flow reduction rate, with system pressure as a parameter.

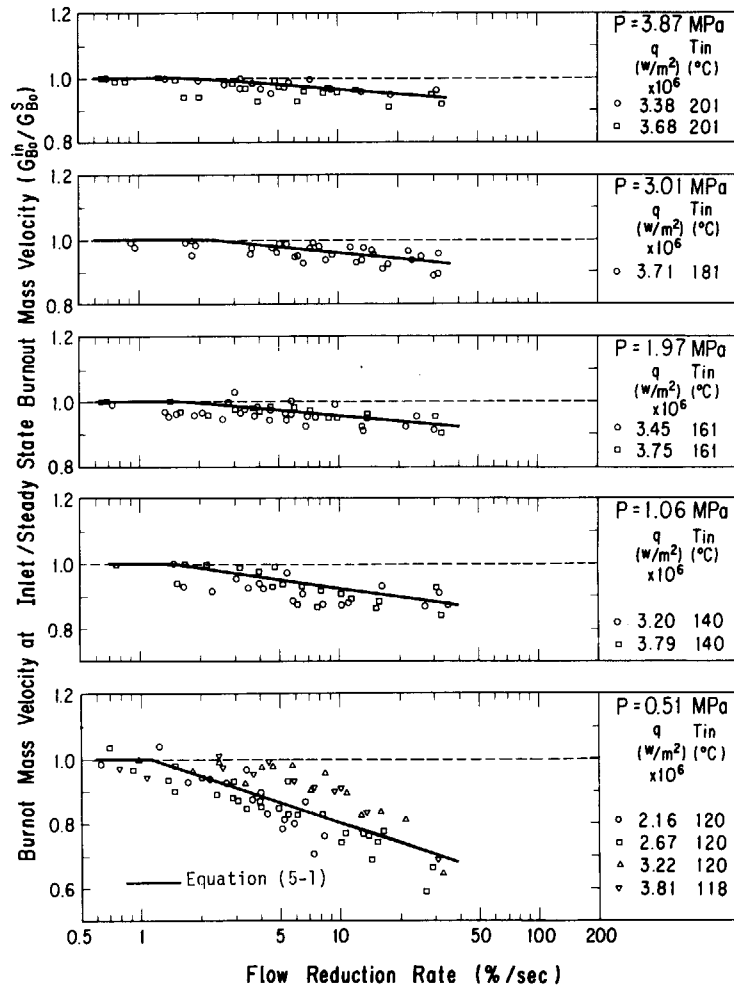


Fig. 3.9 Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at inlet vs. system pressure, with flow reduction rate as a parameter.

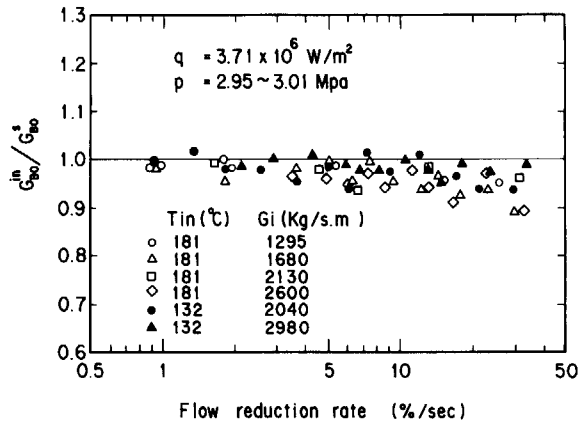


Fig. 3.10 Effects of inlet subcooling and initial mass velocity on ratio of transient to steady state burnout mass velocities vs. flow reduction rate.

3.5.3 常圧大気開放ループによる実験結果との比較

Fig. 2.10, 2.14 および 2.15 に示した常圧大気開放ループにおける G_{bo}^{in} / G_{bo}^s と流速減少率との関係を、本実験における Fig. 3.8 と比較すると、常圧ループの場合の流速減少率増大時の G_{bo}^{in} / G_{bo}^s の低下率は、本実験における最も低圧の場合(0.5 MPa)よりもさらに大きく、3.5.2項で述べた系圧力の効果をさらに低圧まで延長した結果に対応していることが分かる。

3.6 まとめ

高圧過渡沸騰試験装置を用いた流量低下バーンアウト実験により得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- (1) 本実験装置で得られた定常バーンアウト熱流束の値は、Thompson-Macbeth の式と良く一致し、本実験の結果は従来のバーンアウト実験結果と十分な精度で比較できる。
- (2) 系圧力が高い程、バーンアウト発生点近傍の圧力振動の振幅は小さく、周波数は高くなった。
- (3) 壁温挙動については、系圧力の影響は認められなかった。
- (4) 過渡時と定常時のバーンアウト発生時入口質量速度比(G_{bo}^{in} / G_{bo}^s)は、流速減少率があるしきい値を超えると、1より減少した。
- (5) 系圧力が高いほど、流速減少率増大時の G_{bo}^{in} / G_{bo}^s の低下率は小さくなり、 G_{bo}^{in} / G_{bo}^s が減少し始める流速減少率のしきい値も系圧力が高い程大きくなった。このような系圧力の効果は低圧ほど顕著で、2 MPa 以上の高圧では小さくなった。
- (6) 系圧力が約 1 MPa 以上では、熱流束、入口サブクール度、初期流量等のパラメータが、流速減少率増大時の G_{bo}^{in} / G_{bo}^s の低下率に及ぼす影響はほとんど認められなかった。

4. 流量低下過渡時の沸騰二相流挙動

4.1 序

流量低下バーンアウト現象を解析するためには、流量低下過程での沸騰二相流諸量、特に局所質量速度の過渡変化を求める必要がある。本章では、未沸騰領域における単相流と沸騰領域における二相流の基礎式の導出と、特性曲線法による解法について述べる。さらに指数関数状流量低下の場合の計算結果を用いて、流量低下時の沸騰二相流過渡挙動に対する各種パラメータ、特に系圧力と流量低下時定数が、計算結果に及ぼす影響について定性的な理解を得る。

4.2 計算上の仮定

計算方法を導出する際には、以下の仮定を用いた。

- 熱流束は一様かつ一定とする。
- 入口エンタルピは一定とする。
- サブクール沸騰は考えない。
- 分離流モデルを採用。
- 蒸気と水は熱力学的平衡にある。
- 系圧力に対して流路圧力損失を無視する。
- エネルギー式においてエネルギー逸散項を無視する。
- スリップ比は一定とする。

バーンアウト発生までは壁温の変化は小さいので、(a)の仮定は妥当である。また実験は入口温度と出口圧力一定の条件下で行ったので(b)の仮定も成立している。(c)は計算の単純化のため良く用いられる仮定である。(d)については、バーンアウト発生に関する液膜挙動を表現できない欠点はあるが、断面平均質量速度の計算には適している。(e)の仮定もバーンアウト発生までの流動状態においては成立すると考えられる。(f)、(g)、(h)の仮定の妥当性については、付録Aで評価する。

なお、一般のエネルギー保存式(A-1)には圧力変化項が含まれているが、本実験のように高熱流束下での沸騰実験の場合には、付録A.1で評価するように、圧力変化項の寄与は加熱量に比べて十分小さく、特に高圧の場合には圧力変化項の寄与はほとんど無視できると考えられる。

一方、分離流モデルで二相流諸量を求める際には、気液流速間の関係を知る必要がある。この関係式としては運動量平衡式を採用する方法と、スリップ関係式を採用する方法とがある。運動量平衡式には二相流摩擦抵抗の項が含まれているが、従来の定常実験で得られた二相流

摩擦抵抗係数実験式が流量低下過渡状態にも適用可能かどうかは不明である。さらにスリップ関係式についても同様の不確定性が存在する。従って、流量低下過渡時の気液流速を求める際に、必ずしも過渡条件下で実証されていない実験式に計算結果が依存するという意味では、運動量平衡式とスリップ関係式は同等である。

本研究では、以上二つの方法を比較検討した結果、計算の簡便さを考慮してスリップ関係式を採用した。なお実際には付録A.3で評価するように、スリップモデルの相違が局所質量速度計算結果に及ぼす影響は小さいので、スリップ比は系圧力のみ関数で実験中は一定と仮定した。

4.3 沸騰境界の計算

水単相流部分のエネルギー式は次式で表現できる。

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{P_e q}{A} \quad (4-1)$$

本式を Table 4.1 に示す無次元パラメータを用いて無次元化すると、(4-1)式は次のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + u(\tau) \frac{\partial H}{\partial \eta} = \phi(\eta, \tau) \quad (4-2)$$

この式から特性曲線法により次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\eta}{d\tau} &= u(\tau) \\ \frac{dH}{d\tau} &= \phi(\eta, \tau) \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

今、仮定(a)より $\phi=1$ である。また、 $\tau < 0$ では $u(\tau)=1$ である。

過渡状態の初期において、注目する流体成分の存在場所により、次の2とおりの場合が考えられる。

- $\tau=0$ でテスト部内単相流領域に存在する流体成分については、

$\tau=0$ で $H=H_i$ 、 $\eta=\eta_i$ とすると(4-3)式より $H_i=\eta_i$ 、
 $\tau=\tau_{sat}$ で $H=H_{sat}$ (飽和エンタルピ)になるとすると、(4-3)式を積分して、次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{sat} &= H_{sat} - H_i \\ \eta_{sat} &= \int_0^{H_{sat}-H_i} u_{in}(\tau) d\tau + H_i \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

- $\tau > 0$ でテスト部に流入する流体成分については、
 $\tau=\tau_i$ で $\eta=0$ 、 $H=0$ とすると、(4-3)式を積分して

Table 4.1 Dimensionless parameters used in analysis

b	: Flow reduction rate $\equiv L dv/dt /v_i^2$
G^*	: Mass velocity $\equiv G/G_i$
H	: Enthalpy $\equiv (h_l - h_{in})/(q_i P_e L/A \rho v_i)$
H_i	: Initial enthalpy
H_{sat}	: Enthalpy at saturation point
u	: Velocity $\equiv v/u_i$
u_{in}	: Inlet velocity $\equiv v_{in}/v_i$
u_g	: Vapor velocity $\equiv v_g/v_i$
u_l	: Liquid velocity $\equiv v_l/v_i$
β	: Final velocity $\equiv v_f/v_i$ (linear flow reduction)
β_1	: Final velocity $\equiv v_f/v_i$ (exponential flow reduction)
$1/\beta_2$: Flow decay constant
η	: Height $\equiv Z/L$
η_i	: Initial height
η_{sat}	: Height of saturation point
ν	: Density ratio $\equiv \rho_g/\rho_l$
τ	: Time $\equiv t v_i/L$
τ_i	: Time when a fluid particle enters into test section
τ_{sat}	: Time when a fluid particle reaches saturation
ϕ	: Heat flux $\equiv q/q_i$

Subscripts

f	: Final
g	: Vapor
i	: Initial
in	: Inlet
l	: Liquid
out	: Outlet
sat	: Saturation

次式を得る.

$$\left. \begin{aligned} \tau_{sat} - H_{sat} + \tau_i \\ \eta_{sat} = \int_{\tau_i}^{\tau_i + H_{sat}} u_{in}(\tau) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (4-5)$$

以上(4-4)または(4-5)式より, 流体の平均エンタルピが飽和エンタルピに等しくなる時刻と位置 (τ_{sat}, η_{sat}), すなわち沸騰境界の過渡変化が求められる.

4.4 沸騰二相流の基礎式と特性曲線法による解法

4.2節の仮定(d)~(g)より, 沸騰二相流の一次元分離流モデルに基づく基礎式は次のように書ける.

連続の式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha + \rho_l(1-\alpha)) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_g \alpha v_g + \rho_l(1-\alpha)v_l) = 0 \quad (4-6)$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha h_g + \rho_l(1-\alpha)h_l) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_g \alpha h_g v_g + \rho_l(1-\alpha)h_l v_l) - \frac{P_e q}{A} \quad (4-7)$$

また, スリップ比は一般にボイド率の関数とすると,

$$\frac{v_g}{v_l} = S(\alpha) \quad (4-8)$$

となる.

ここで, (4-7)式は一般のエネルギー保存式において, 圧力変化項とエネルギー逸散項を無視した結果に対応する. この仮定の妥当性については, 付録 A.1 で述べる.

次に, (4-6), (4-7)式において物性値の圧力依存性を無視して, ((4-7)式-(4-6)式 $\times h_l$)/ $(\lambda \rho_g)$ および ((4-7)式-(4-6)式 $\times h_g$)/ $(\lambda \rho_l)$ より, それぞれ次式を得る.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha v_g) = \frac{P_e q}{\lambda \rho_g A} \quad (4-9)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}((1-\alpha)v_l) = \frac{P_e q}{\lambda \rho_l A} \quad (4-10)$$

なお, 物性値の圧力依存性を考慮した場合の寄与については, 付録 A.2 で評価する.

以上, (4-9), (4-10)および(4-8)式が本解析における基礎式である. これら3式を **Table 4.1** に示す無次元パラメータを用いて無次元化すると, 以下の3式を得る.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \eta}(\alpha u_g) = \frac{-X_{in}}{\nu H_{sat}} \phi \quad (4-11)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \eta}((1-\alpha)u_l) = \frac{-X_{in}}{H_{sat}} \phi \quad (4-12)$$

$$u_g/u_l = S(\alpha) \quad (4-13)$$

(4-11)-(4-12), および(4-13)式を用いて次式を得る.

$$\frac{\partial}{\partial \eta} [u_l(1-\alpha + \alpha S)] = \frac{-X_{in}}{H_{sat}} \cdot \frac{1-\nu}{\nu} \phi$$

時刻 τ における飽和点位置を $\eta_{sat}(\tau)$ として上式を積分すると,

$$u_l(1-\alpha + \alpha S) - u_{in}(\tau) = \frac{-X_{in}}{H_{sat}} \cdot \frac{1-\nu}{\nu} \int_{\eta_{sat}(\tau)}^{\eta} \phi d\eta \quad (4-14)$$

(4-14)式を(4-12)式に代入して次式を得る.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{[S + \alpha(1-\alpha) \frac{\partial S}{\partial \alpha}]}{(1-\alpha + \alpha S)^2} \left[\frac{(-X_{in})(1-\nu)}{H_{sat} \nu} \int_{\eta_{sat}(\tau)}^{\eta} \phi d\eta + u_{in}(\tau) \right] \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} - \frac{(-X_{in})}{H_{sat}} \left[1 + \frac{(1-\alpha)(1-\nu)}{1-\alpha + S\alpha} \right] \phi \quad (4-15)$$

本式の境界条件は, $\tau = \tau_{sat}$ で $\alpha = 0$, $\eta = \eta_{sat}$ で $\alpha = 0$ となる.

(4-15)式は特性曲線法により、以下のような2階連立常微分方程式に変換できる。

$$\frac{d\alpha}{d\tau} - \frac{(-X_{in})}{H_{sat}} \left[1 + \frac{(1-\nu)}{1-\alpha+\alpha S} \right] \phi \quad (4-16)$$

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \frac{\left[S + \alpha(1-\alpha) \frac{\partial S}{\partial \alpha} \right]}{(1-\alpha+\alpha S)^2} \left[\frac{(-X_{in})(1-\nu)}{H_{sat} \nu} \int_{\eta_{sat}(\tau)}^{\eta} \phi d\eta + u_{in}(\tau) \right] \quad (4-17)$$

(4-16), (4-17)式は $\tau \geq \tau_{sat}$ で成立し、初期条件はそれぞれ $\tau = \tau_{sat}$ で $\alpha = 0$, $\tau = \tau_{sat}$ で $\eta = \eta_{sat}$ として与えられる。

仮定(a), (h)より $\phi = 1$, $S = \text{一定}$ とすると、(4-16)と(4-17)式の両式はそれぞれ次のように簡略化される。

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{-X_{in}}{H_{sat}} \left(1 + \frac{1-\nu}{\nu} \cdot \frac{1-\alpha}{1-\alpha+\alpha S} \right) \quad (4-18)$$

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \frac{S}{(1-\alpha+\alpha S)^2} \left[u_{in}(\tau) + \frac{-X_{in}}{H_{sat}} \cdot \frac{1-\nu}{\nu} (\eta - \eta_{sat}(\tau)) \right] \quad (4-19)$$

実験により得られる無次元入口流速変化 $u_{in}(\tau)$ を用いると、(4-18)と(4-19)式より、時刻 τ における α , η が求まり、無次元質量速度 G^* は次式により求まる。

$$G^* = \frac{1-\alpha+\nu S\alpha}{1-\alpha+S\alpha} \left[u_{in}(\tau) + \frac{-X_{in}}{H_{sat}} \cdot \frac{1-\nu}{\nu} (\eta - \eta_{sat}(\tau)) \right] \quad (4-20)$$

また、クォリティは次式で与えられる。

$$X = \frac{\nu S\alpha}{1-\alpha+\nu S\alpha} \quad (4-21)$$

4.5 指数関数状流量低下の場合の沸騰二相流挙動の計算

本節では、流量低下時の沸騰二相流の過渡挙動に対する系圧力、流速低下時定数、スリップ比、最終流速および初期条件等の影響を調べるため、指数関数状流量低下の場合に4.3, 4.4節で述べた計算法を適用し、二相流諸量の計算を行う。

4.5.1 計算方法

入口液流速を次式で与える。

$$u_{in}(\tau) = \beta_1 + (1-\beta_1)e^{-\beta_2\tau} \quad (4-22)$$

このとき、(4-4), (4-5)式より、沸騰境界の移動は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_{sat} &= H_{sat} - (1-\beta_1) \left\{ \tau - \frac{1}{\beta_2} (1-e^{-\beta_2\tau}) \right\}, & \tau \leq H_{sat} \\ \eta_{sat} &= \beta_1 H_{sat} + \frac{(1-\beta_1)}{\beta_2} (1-e^{-\beta_2 H_{sat}}) e^{-\beta_2(\tau-H_{sat})}, & \tau \geq H_{sat} \end{aligned} \right\} \quad (4-23)$$

(4-22)式を(4-19)式に代入して数値積分を行うと、流体成分の位置(η , τ)が得られ、この曲線上でのボイド率の変化は(4-18)式の積分より次式で求められる。

(1) $\tau_i = 0$ で沸騰部分にある流体成分の場合 ($\alpha = \alpha_i$)

$$\tau - \frac{-\nu H_{sat}}{(1-\nu S)(-X_{in})} \left[(S-1)(\alpha - \alpha_i) + \frac{S(1-\nu)}{(1-\nu S)} \ln \frac{1-(1-\nu S)\alpha}{1-(1-\nu S)\alpha_i} \right] \quad (4-24)$$

(2) $\tau_i > 0$ で沸騰境界に達する流体成分の場合

$$\tau - \tau_i - \frac{\nu H_{sat}}{(1-\nu S)(-X_{in})} \left[(S-1)\alpha + \frac{S(1-\nu)}{(1-\nu S)} \ln \{ 1 - (1-\nu S)\alpha \} \right] \quad (4-25)$$

以上の方法により、ある流線に沿ったボイド率変化が得られると、対応する質量速度やクォリティの変化も計算できる。

4.5.2 計算結果

Table 4.2 に、本計算のパラメータ一覧表を示す。

同表で、 β_1 は最終流速を、 β_2 は流速減少時定数の逆数をそれぞれ示す。今、加熱長さが800mmで初期流速が1m/sの場合を想定すると、 $\beta_2 = 0.1, 1, 10$ はそれぞれ時刻0において、6, 60, 600%/sの流速減少率に対応する。またこの場合の $\tau - 1$ は、実時間で0.8秒となる。

系圧力が0.25 MPaの場合の計算結果を Fig. 4.1~4.5に、系圧力が15 MPaの場合の計算結果を Fig. 4.6と Fig. 4.7に示し、さらに系圧力を0.25~15 MPaと変化させたときの計算結果を Fig. 4.8に示す。

以下では計算結果の概要と各パラメータの効果について述べる。

(1) 系圧力0.25 MPaの場合の基準ケース(Fig. 4.1)

Fig. 4.1に見られるように、沸騰流路内の過渡時局所質量速度は入口質量速度と大きく異っている。例えば、出口質量速度は $\tau \approx 0.5$ までほとんど低下しておらず、初期非沸騰部($\eta = 0.4, 0.3$ など)が沸騰を開始すると、局所質量速度は急上昇し、出口質量速度の値に近付いている。

出口クォリティは $\tau \approx 0.5$ まではゆっくり増加し、その

Table 4.2 Parameters for calculation of exponential flow reduction

Objective	Fig. No.	Variables	Parameters						
			P (MPa)	S	η	β_1	β_2	H _{sat}	X _{in}
Base case / 0.25 MPa	4-1 (a)	G^*, X, η_{sat}	0.25	2	0.3~1.0	0.5	10	0.5	-0.1
	4-1 (b)	G_i, α	0.25	2	0.3~1.0	0.5	10	0.5	-0.1
Effects of slip ratio	4-2 (a)	$G_{out}^*, X_{out}, \eta_{sat}$	0.25	1,2,5	1.0	0.5	10	0.5	-0.1
	4-2 (b)	$U_{i,out}, \alpha$	0.25	1,2,5	0.5,1.0	0.5	10	0.5	-0.1
Effects of flow decay constant	4-3 (a)	G_{out}^*, X_{out}	0.25	2	1.0	0.5	1,2,5,10	0.5	-0.1
	4-3 (b)	G^*, η_{sat}	0.25	2	0.4	0.5		0.5	-0.1
	4-3 (c)	$G_{out}^*/G_{in}^*, U_{in}, \eta_{sat}$	0.25	2	1.0	0.5	0.1,1,10	0.5	-0.1
Effects of final flow velocity	4-4 (a)	G^*, X_{out}	0.25	2	0.3,1	0.25,0.3333, 0.5	10	0.5	-0.1
	4-4 (b)	$G_{out}^*/G_{in}^*, U_{in}, \eta_{sat}$	0.25	2	1	0.25,0.3333, 0.5	10	0.5	-0.1
Effects of initial enthalpy	4-5	$G_{out}^*, X_{out}, \eta_{sat}$	0.25	2	1	0.5	10	0.25 0.50	-0.05 -0.05 -0.10
Base case / 15 MPa	4-6 (a)	G^*, X, η_{sat}	15	2	0.3~1.0	0.5	10	0.5	-0.1
	4-6 (b)	U_i, α	15	2	0.3~1.0	0.5	10	0.5	-0.1
Effects of slip ratio	4-7 (a)	$G_{out}^*, X_{out}, \eta_{sat}$	15	1,2,3	1	0.5	10	0.5	-0.1
	4-7 (b)	$U_{i,out}, \alpha_{out}$	15	1,2,3	1	0.5	10	0.5	-0.1
Effects of system pressure	4-8 (a)	G_{out}^*, X_{out}	0.25~15	2	1	0.5	10	0.5	-0.1
	4-8 (b)	G^*	0.25~15	2	0.4,0.6	0.5	10	0.5	-0.1
	4-8 (c)	$U_{i,out}$	0.25~15	2	1.0	0.5	10	0.5	-0.1
	4-8 (d)	$\alpha_{out}, G_{out}^*/G_{in}^*$	0.25~15	2	1.0	0.5	10	0.5	-0.1

後急上昇している。

液流速は入口流速低下に伴って増加している。

ボイド率は、初期沸騰領域においては過渡期間中の変化は少ないが、初期非沸騰領域が沸騰を開始すると急上昇している。

(2) 系圧力 15 MPa の場合の基準ケース (Fig. 4.6)

系圧力が 15 MPa の場合と、前述の 0.25 MPa の場合の計算結果とを比較すると、局所質量速度、クオリティ、ボイド率などの変化はいずれも滑らかとなり、最終値に到達する時間も約 1.5 倍となっている。特に初期非沸騰部が沸騰を開始したときの局所質量速度の増加は少なく、出口液流速は初期値よりも小さくなっている。

(3) スリップ比の影響 (Fig. 4.2 と Fig. 4.7)

Fig. 4.2 と Fig. 4.7 を比較すると、0.25 MPa の圧力においては、出口質量速度や出口クオリティはスリップ比が 1~5 と変化しても大きな差は生じないが、15 MPa の高圧では、スリップ比の影響が大きいことが分かる。特に高圧では、スリップ比が大きいほど過渡時の出口クオリティが大きくなり、低圧の場合と逆の傾向となる。

出口液流速についてはスリップ比の影響が強く見られ、出口液流速最終値は低圧では初期値より大きく、高圧では初期値より小さい。

ボイド率はスリップ比が小さいほど大きく、特に低圧ほどスリップ比の影響が顕著となる。

(4) 流速低下の時定数の影響 (Fig. 4.3)

Fig. 4.3 において β_2 は流速低下時定数の逆数である。出口質量速度 (Fig. 4.3(a)) は、 $\tau \leq 0.5$ では変化していないが、 $\tau \geq 0.5$ では β_2 が大きい程急低下している。

初期非沸騰部 $\eta = 0.4$ における局所質量速度 (Fig. 4.3(b)) は、沸騰が開始すると一時的に急上昇し、この上昇量は β_2 が大きい程大きくなるが、 $\beta_2 = 0.25$ ではほとんど上昇を示していない。

出口と入口の質量速度比 (Fig. 4.3(c)) は、 β_2 が大きいほど大きなピーク値に達しており、流量低下過渡時の管内流動様式は β_2 の値の大小に依存することを示している。

(5) 最終流速の影響 (Fig. 4.4)

Fig. 4.4 において β_1 は最終流速と初期流速との比を

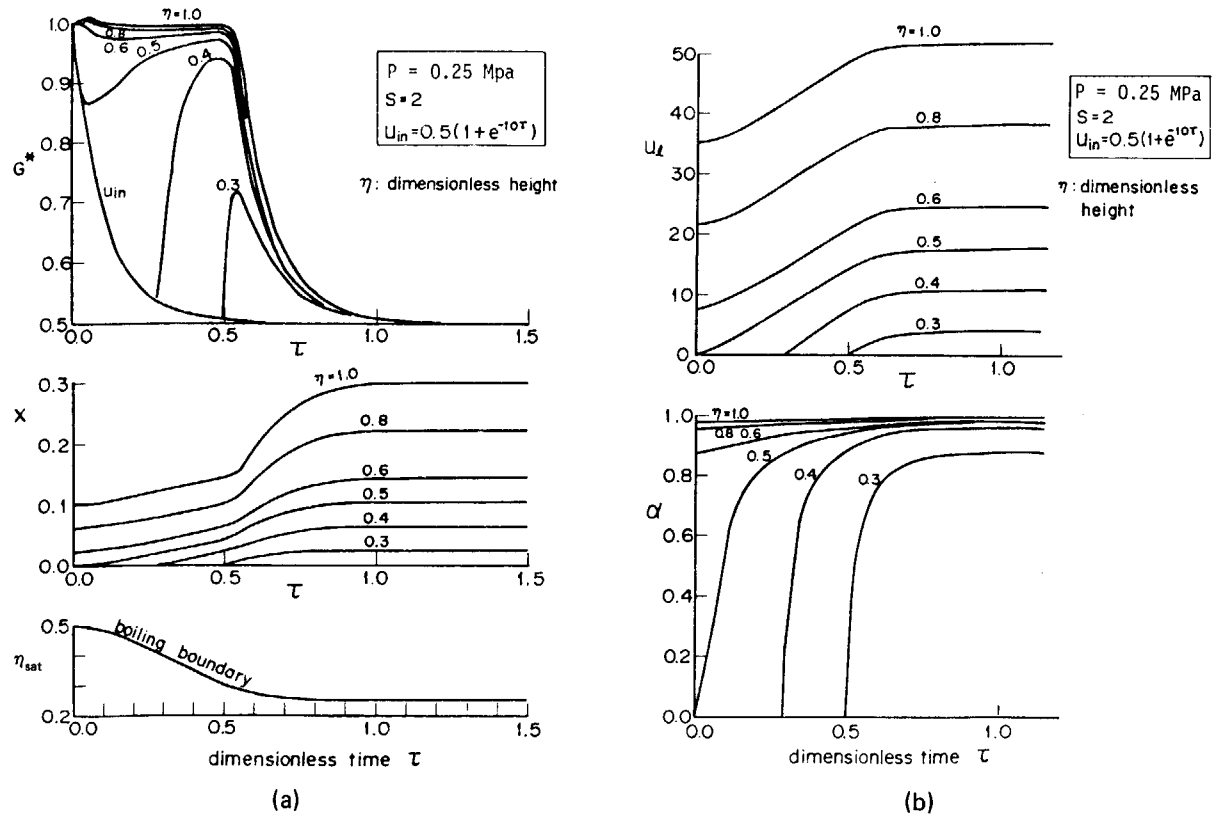


Fig. 4.1 Calculated results under exponential flow reduction condition (1) (Base case/0.25 MPa).

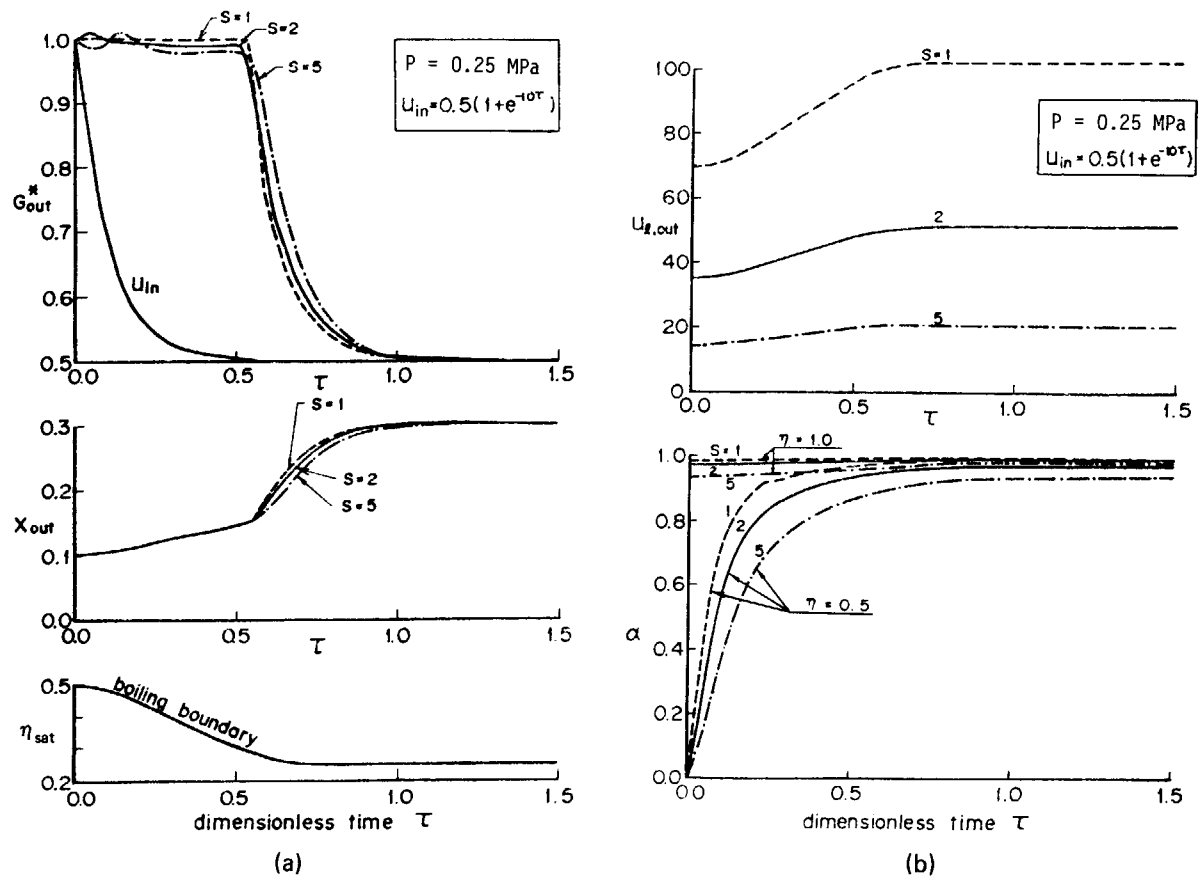


Fig. 4.2 Calculated results under exponential flow reduction condition (2) (Effects of slip ratio/0.25 MPa).

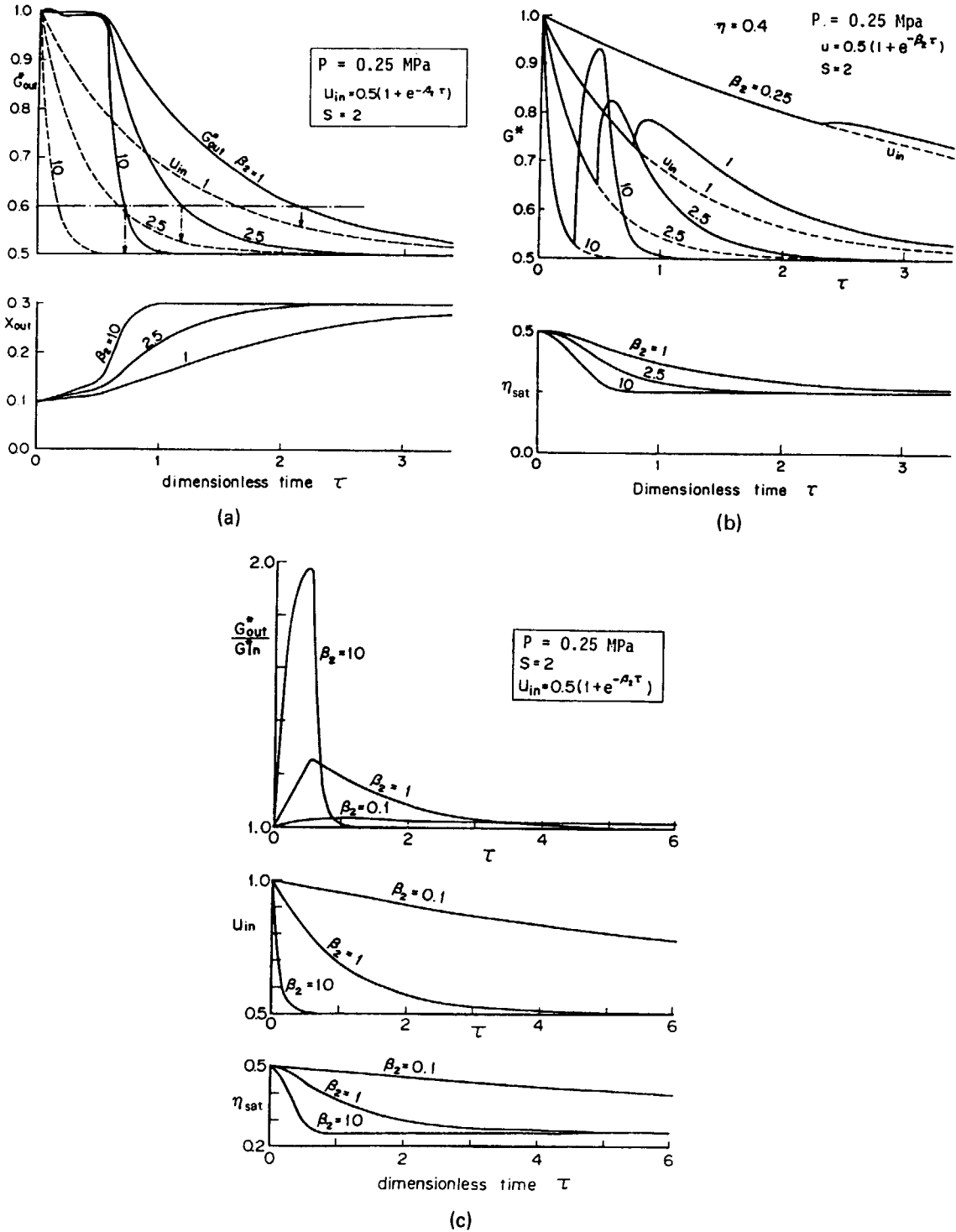


Fig. 4.3 Calculated results under exponential flow reduction condition (3) (Effects of flow decay constant/0.25 MPa).

示す。

同図に見られるように、初期非沸騰部における局所質量速度の上昇量や、出口と入口の質量速度比は、最終流速が小さいほど大きなピークに達している。これは最終流速が小さいほど、沸騰領域の長さが長くなり、過渡変化の程度が大きくなるためである。

(6) 初期エンタルピーの影響(Fig. 4.5)

初期沸騰高さが流路中央($H_{sat} = 0.5$)の場合、入口クォ

リティ X_{in} が -0.1 の場合と -0.05 の場合を比較すると、出口質量速度の差は小さいが、出口クォリティは入口クォリティが $X_{in} = -0.05$ の場合のほうが高くなっている。

入口クォリティが $X_{in} = -0.05$ で $H_{sat} = 0.5$ の場合と $H_{sat} = 0.25$ の場合を比較すると、 $H_{sat} = 0.25$ のほうが沸騰境界の変化量が小さいため、出口質量速度と入口質量速度の差は小さくなっている。

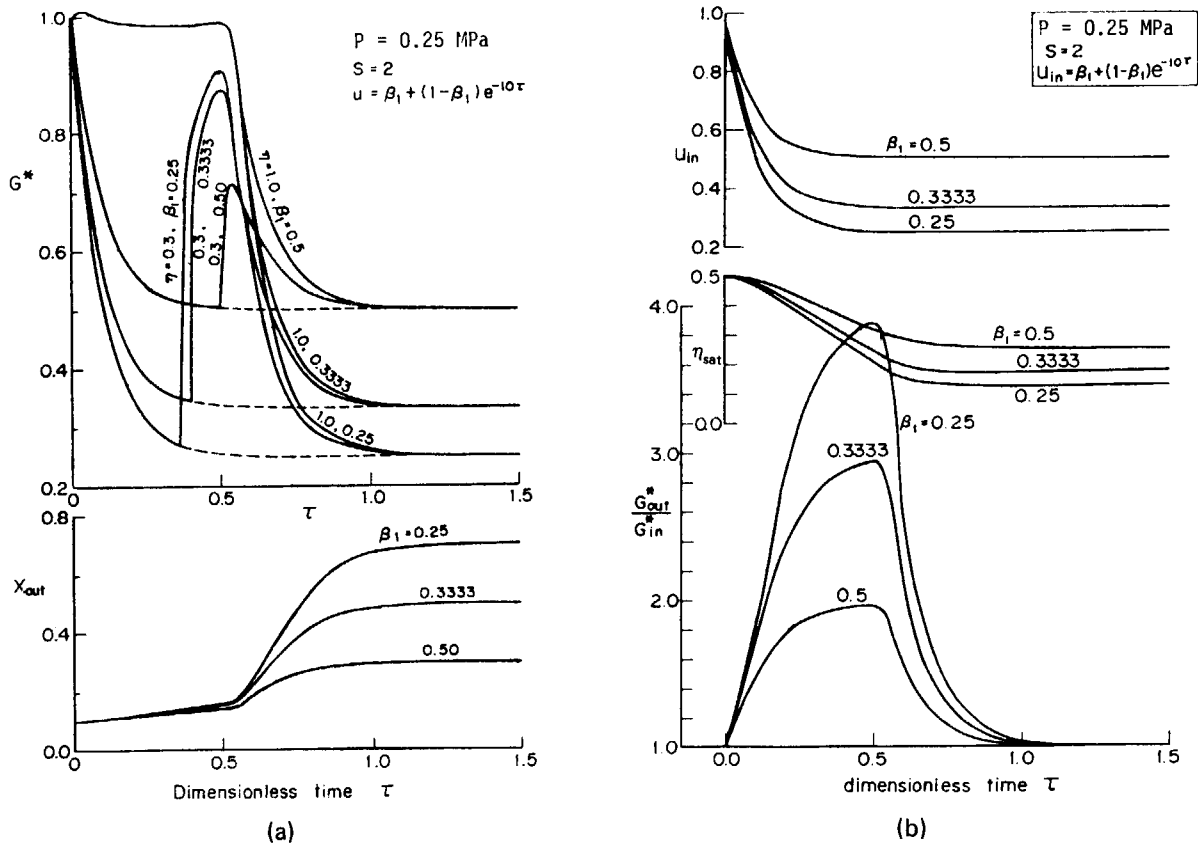


Fig. 4.4 Calculated results under exponential flow reduction condition (4) (Effects of final flow velocity/0.25 MPa).

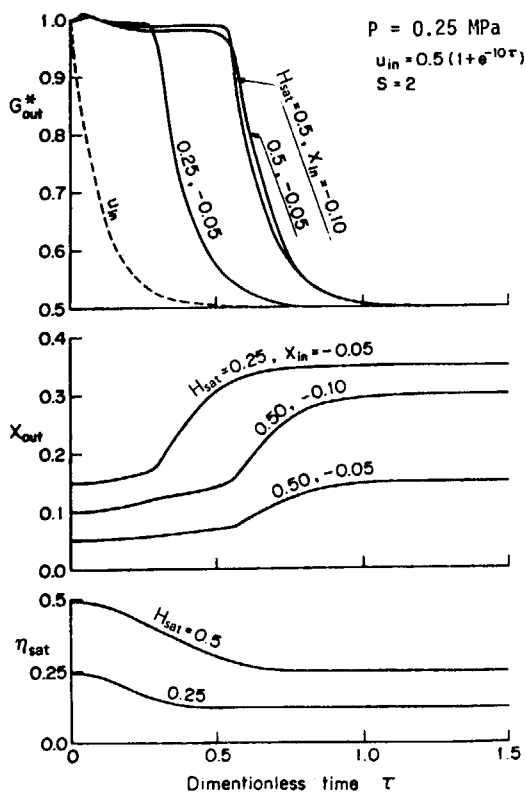


Fig. 4.5 Calculated results under exponential flow reduction condition (5) (Effects of initial enthalpy/0.25 MPa).

(7) 系圧力の影響 (Fig. 4.8)

Fig. 4.8(a)に示すように、出口質量速度は系圧力の増加と共に小さくなるが、最終値に漸近する時間は長くなっている。出口クォリティも初期には系圧力が高いほうが大きくなっているが、最終値に漸近する時間も系圧力が高いほど長くなっている。

Fig. 4.8(b)に見られるように、初期沸騰部($\eta = 0.6$)の質量速度変化は出口質量速度変化と同じ傾向を示しており、初期非沸騰部($\eta = 0.4$)では沸騰開始時に局所質量速度が上昇しているが、その最大値は系圧力が高い程小さくなっている。

Fig. 4.8(c)の出口液流速は系圧力増加により著しく減少し、低圧では最終液流速が初期値よりも大きくなっているのに対して、高圧ではむしろ最終液流速は初期値よりも小さくなっている。

Fig. 4.8(d)に見られるように、出口ポイド率は系圧力増加と共に小さくなり、出口と入口の質量速度比も系圧力増加と共に小さくなっている。

4.6 まとめ

本章では、流量低下過渡時の二相流諸量を分離流モデルにより計算する方法、および指数関数状流量低下の場合の計算結果について述べた。

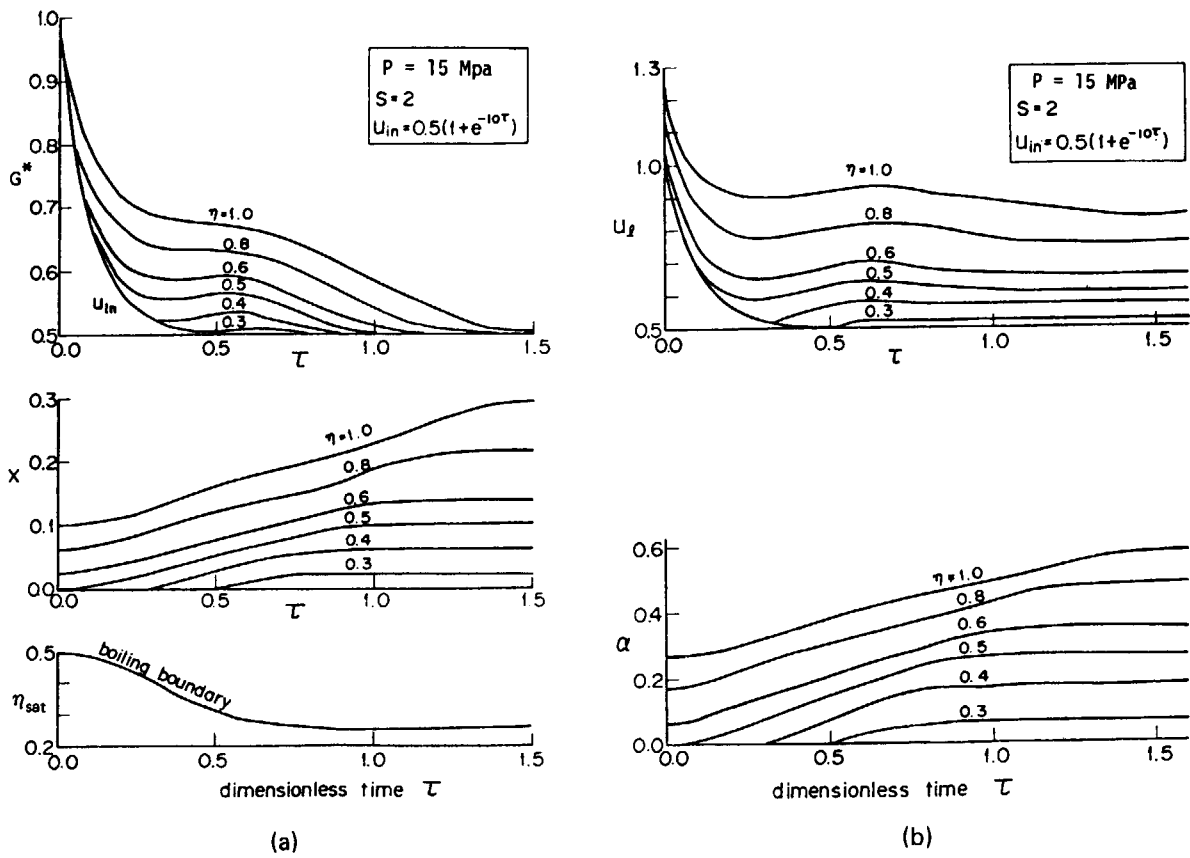


Fig. 4.6 Calculated results under exponential flow reduction condition (6) (Base case/15 MPa).

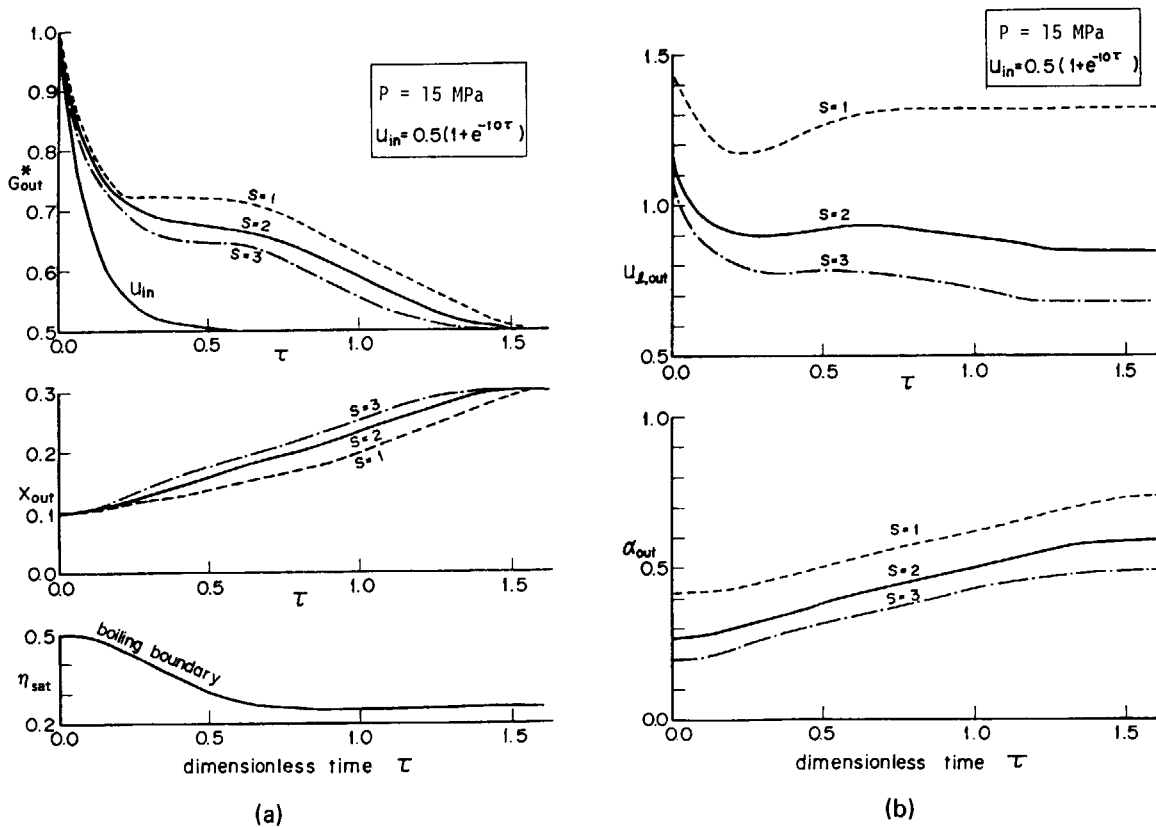


Fig. 4.7 Calculated results under exponential flow reduction condition (7) (Effects of slip ratio/15 MPa).

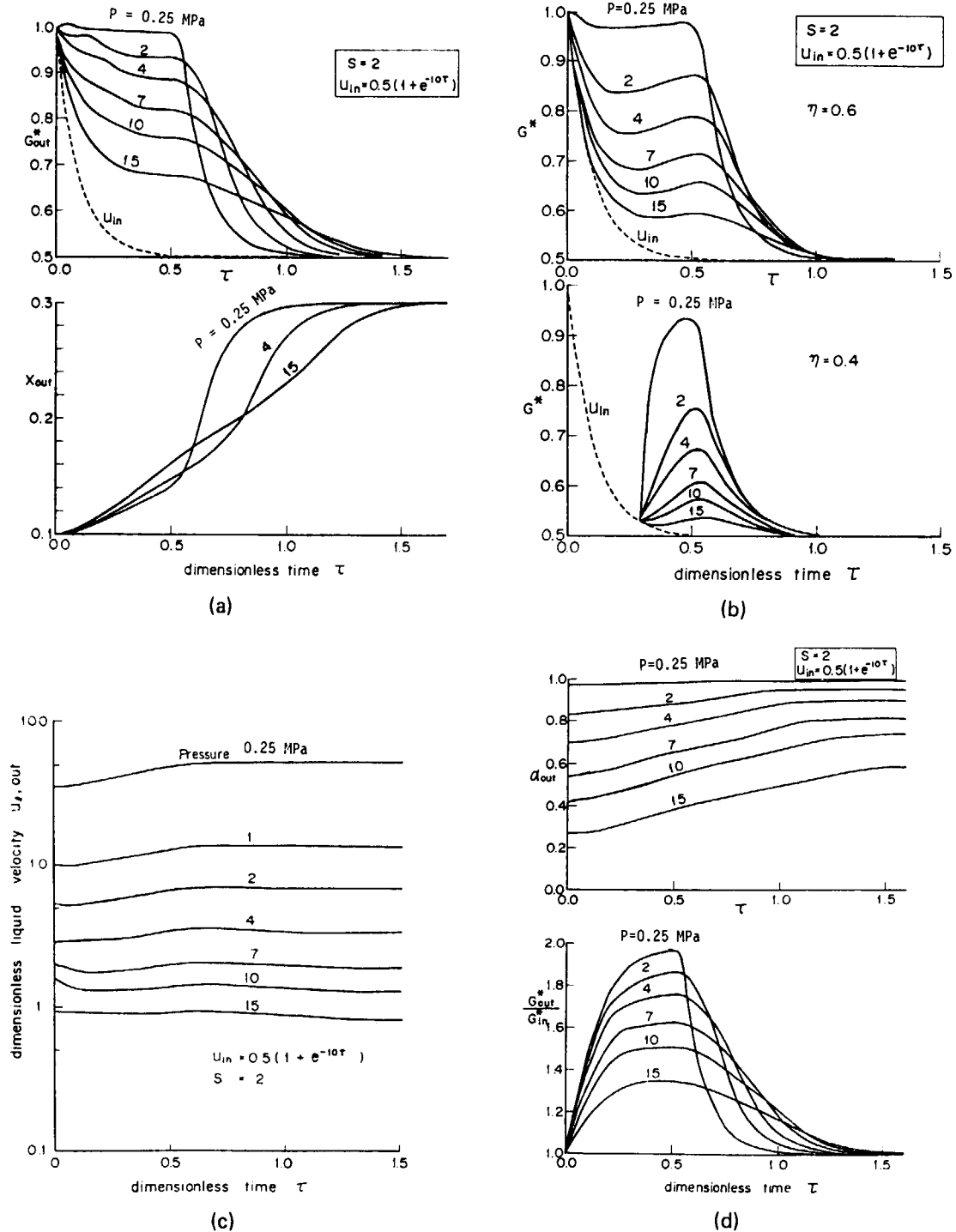


Fig. 4.8 Calculated results under exponential flow reduction condition (8) (Effects of system pressure).

主要な結論は以下のとおりである。

(1) 流量低下時の沸騰二相流挙動を計算するため、分離流モデルによる計算方法を導出した。本計算方法においては、エネルギー保存式、連続の式、およびスリップ関係式を基礎式として、特性曲線法により計算した。

また、本基礎式では、流路内圧力変化項とエネルギー逸散項を省略し、物性値とスリップ比は一定と仮定した。

(2) 本計算方式を指数関数状流量低下の場合について適用し、系圧力、流量低下時定数、スリップ比、最終流速、入口エンタルピー等のパラメータが、流量低下時の沸騰二相流挙動に及ぼす影響を明らかにした。特に急激な流量低下の場合には、流路出口と入口の質量速度差は増大し、系圧力が低い程その差は拡大した。また、系圧力が低い場合には、流量低下による沸騰開始時に流路内部の局所質量速度が一時的に上昇する現象が認められた。

5. 流量低下バーンアウト発生時局所 質量速度の評価

5.1 序

4.5節の計算例に見られるように、流量低下過渡時には、テスト部出口(バーンアウト発生点)と入口の質量速度変化との間には時間的なずれを生じ、急激な流量低下の場合ほどその差は大きくなる。従って、3章のように流量低下バーンアウト現象を入口条件のみで評価するのは不十分で、バーンアウト発生点における局所流動条件でも評価する必要がある。

本章では、バーンアウト発生時のテスト部出口質量速度と流速減少率の係に及ぼす系圧力の効果を調べ、さらに過渡期と定常時のバーンアウト質量速度比を求める関係式を導出し、CumoraおよびMoxonらによる実験結果と比較する。

5.2 流量低下バーンアウト実験における出口と入口の質量速度差

Fig. 5.1に、系圧力0.5, 1.0, 2.0, および3.9 MPaの各場合の流量低下バーンアウト実験において、流速減少率が6%/s以下の場合と30%/s以上の場合について、テスト部入口と出口の質量速度の過渡挙動を示す。同図にはバーンアウト発生時刻も示してある。

本章で述べるテスト部出口質量速度の過渡挙動は、4章の計算式(4-18)と(4-19)式を解いて求めた。ここで、沸騰境界の位置(τ_{sat} , η_{sat})は(4-4)式又は(4-5)式により求め、入口流量 $u_{in}(\tau)$ はテスト部入口における測定値を用いた。蒸気/水密度比 ν 、飽和エンタルピ H_{sat} 等はテスト部入口と出口の平均圧力における値を用い、入口オリティ X_{in} はテスト部入口水温の測定値より求めた。またスリップ比 S は付録A.3で述べる理由により、各系圧力ごとに一定値を用いた。

Fig. 5.1に見られるように、流速減少率が小さい場合は出口と入口の質量速度はほぼ一致しているが、流速減少率が大きくなる両者の差は拡大している。特に流速減少率が167%/sの場合(Fig. 5.1(b))には、バーンアウト発生時の出口と入口の質量速度比は2.75と極めて大きくなっている。

5.3 バーンアウト発生時出口質量速度と流速減少率の係(系圧力の効果)

流量低下バーンアウト発生時の出口質量速度と定常バーンアウト質量速度との比(G_{bo}^{out}/G_{bo}^s)と、流速減少率との係を、系圧力をパラメータとして、Fig. 5.2に示す。同図より、系圧力が約0.5 MPaの場合は、流速減少率が約2~5%/s以上になると G_{bo}^{out}/G_{bo}^s は1より小さくなり、その低下率は熱流束の小さいほうがやや大きくなっている。系圧力が約1 MPaの場合には、流速減少率が約2~30%/sの範囲内では、 G_{bo}^{out}/G_{bo}^s は1よりわずかに小さくなっており、それ以上の流速減少率ではむしろ1より大きくなる傾向が見られる。系圧力が2~3.9 MPaになると、流速減少率が約20%/s以下では G_{bo}^{out}/G_{bo}^s はほぼ1に等しく、それ以上の流速減少率では1より大きくなっている。すなわち、系圧力が2 MPa以上では、20%/s以下の流速減少率の場合には、出口における局所質量速度が定常バーンアウト質量速度に到達したときに出口でバーンアウトが発生しているが、さらに急激な過渡変化の場合には、出口質量速度が定常バーンアウト質量速度に達する前にバーンアウトが発生していることを示している。

以上のように、 G_{bo}^{out}/G_{bo}^s と流速減少率との係には系圧力の影響が顕著である。本実験における流速減少率を0.6~2%/s, 2~5%/s, 5~10%/s, 10~20%/sおよび20~37%/sの5領域に分割し、各領域ごとの G_{bo}^{out}/G_{bo}^s の平均値と圧力との係をFig. 5.3に示す。同図より以下のような傾向がみられる。

まず流速減少率が2%/s以下では、 G_{bo}^{out}/G_{bo}^s は系圧力に依存せず約1となっており、出口質量速度が定常バーンアウト質量速度に一致した時点でバーンアウトに至ることを示している。

系圧力が0.5 MPaの場合には、流速減少率増大と共に G_{bo}^{out}/G_{bo}^s は1より低下し、出口質量速度が定常バーンアウト質量速度よりも減少してからバーンアウトが発生している。系圧力が1 MPaの場合には、流速減少率が10%/s以下では流速減少率が大きくなるほど G_{bo}^{out}/G_{bo}^s は小さくなり、10%/s以上ではむしろ G_{bo}^{out}/G_{bo}^s は大きくなっている。系圧力が2 MPa以上になると、流速減少率が20%/s以下では G_{bo}^{out}/G_{bo}^s はほとんど1となり、20%/s以上では G_{bo}^{out}/G_{bo}^s は1より大きくなっている。

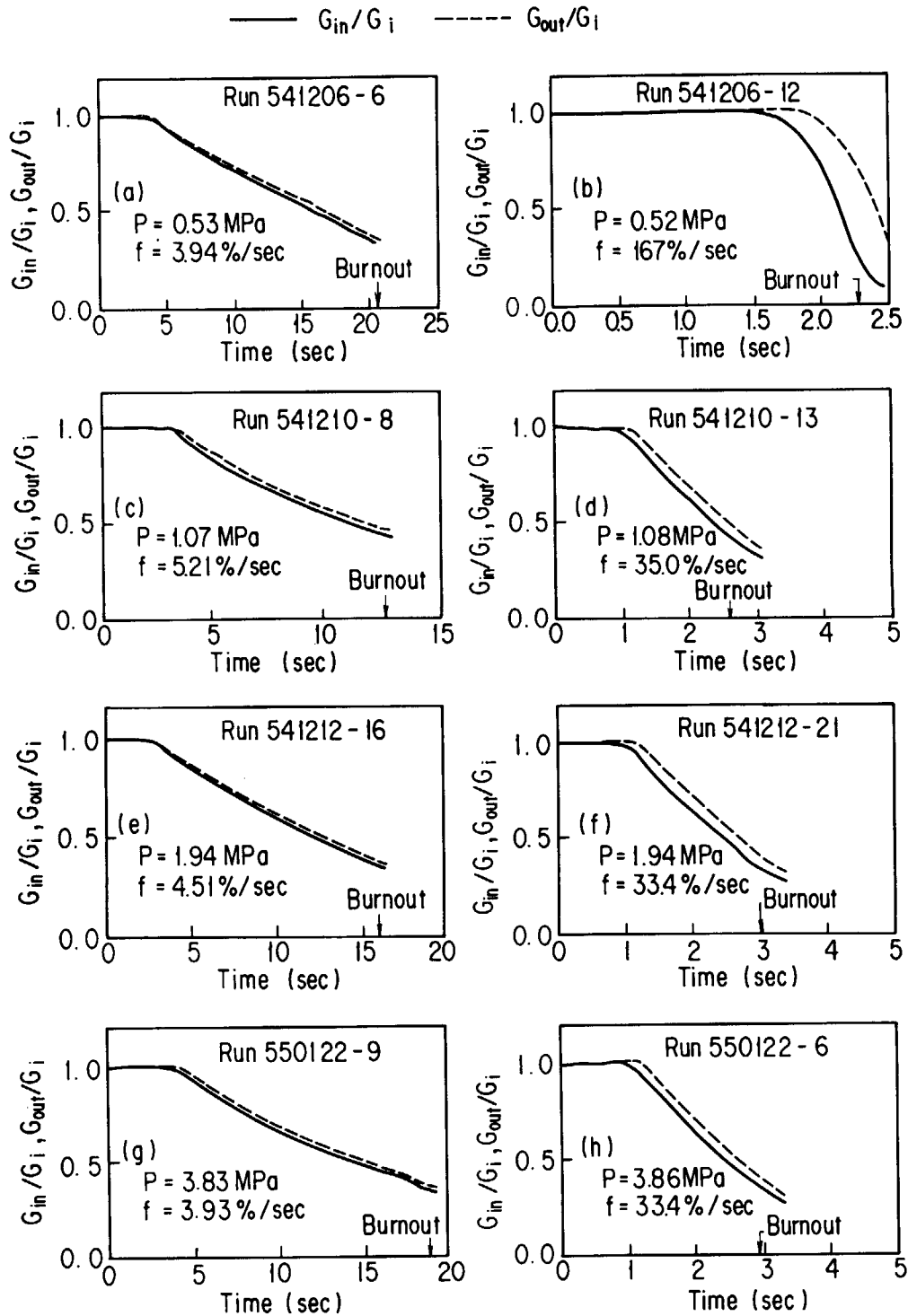


Fig. 5.1 Transients of mass velocities at inlet and outlet of test section in flow reduction burnout experiments with different system pressure.

また、系圧力の効果には 2 MPa 以上ではほとんど差が見られなくなる。

ところで、本実験のような高クォリティ領域における流量低下バーンアウトの場合には、流量低下による液膜流量の減少と蒸気流速増大によるエントレインメント量増加により、加熱面上の液膜が消滅してバーンアウトに至ると考えられる。流量を急速に減少させたときの沸騰

流路内過渡挙動は 4.5 節の計算結果に見られるように流速減少率により異なるので、過渡時の液膜の流動様式も同一の質量速度に対応する定常状態の液膜挙動と異なっている可能性がある。このような場合には、出口質量速度が定常バーンアウト質量速度に等しくなくても液膜が消滅してバーンアウトに至ると考えられる。

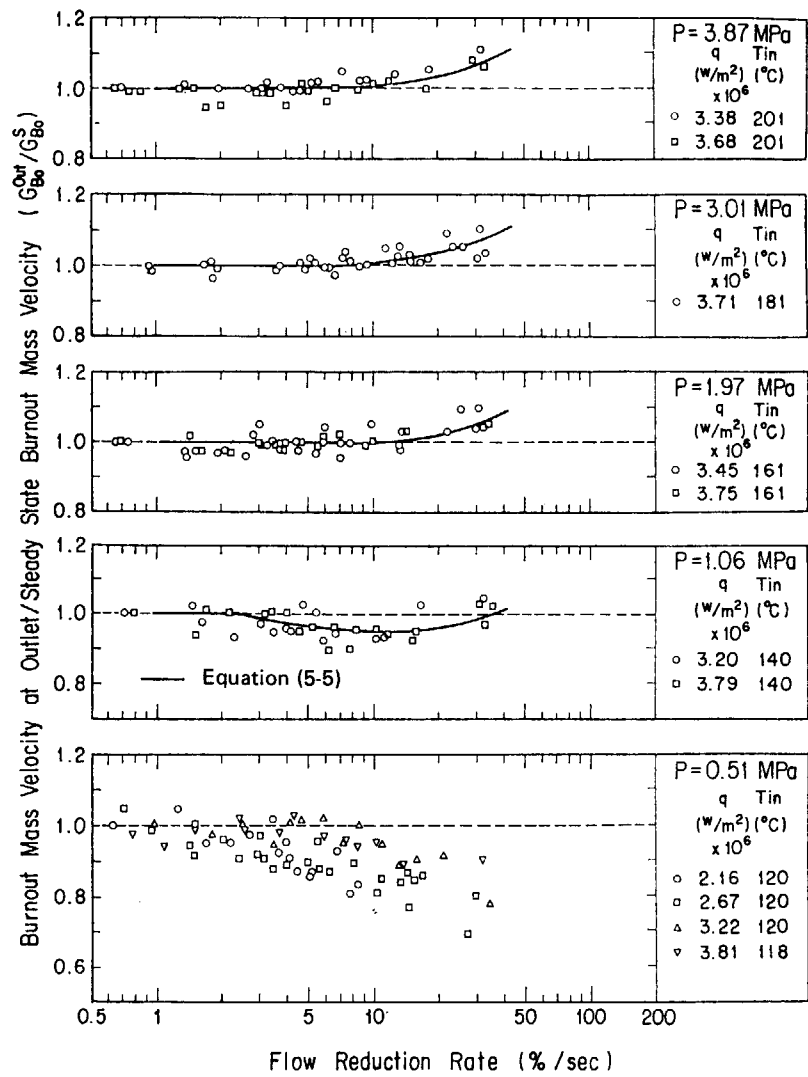


Fig. 5.2 Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at outlet of test section vs. flow reduction rate, with different system pressure.

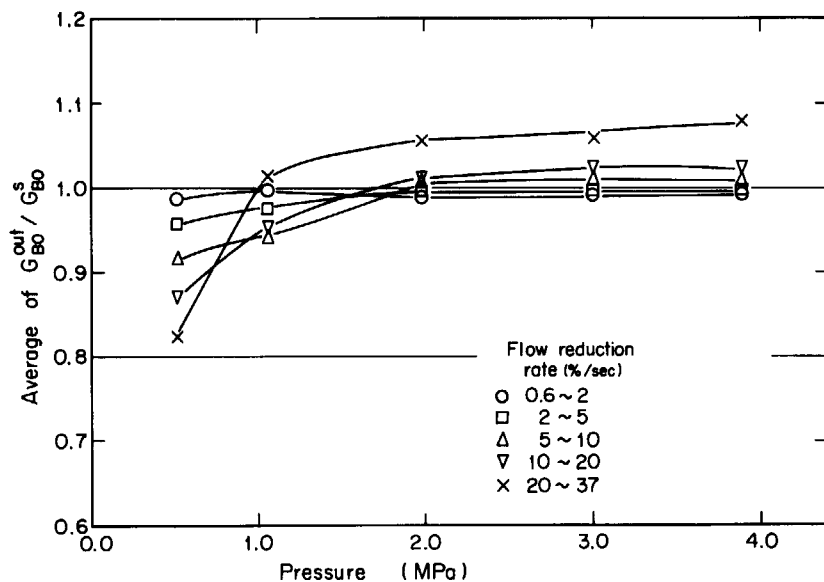


Fig. 5.3 Ratio of transient to steady state burnout mass velocities at outlet of test section vs. system pressure, with different flow reduction rates.

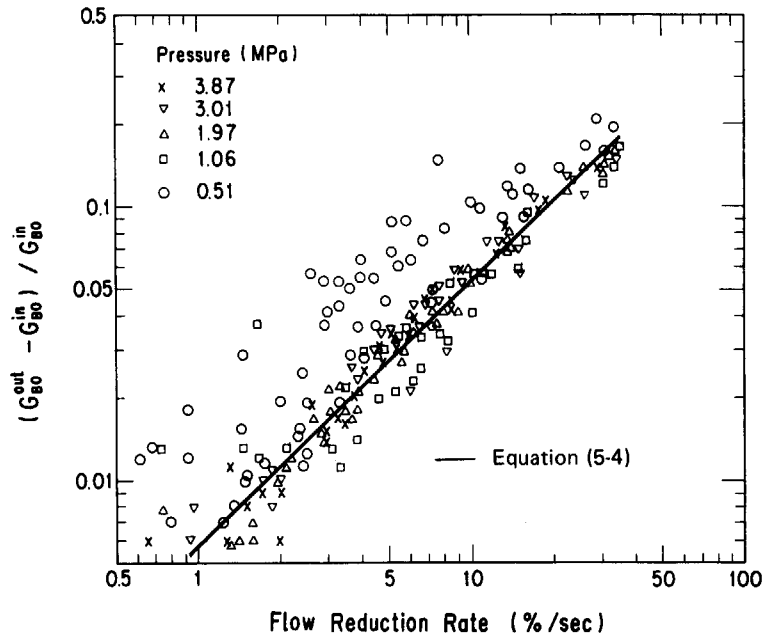


Fig. 5.4 Deviation of burnout mass velocity at outlet from that at inlet of test section vs. flow reduction rate.

5.4 流量低下過渡時の局所バーンアウト質量速度関係式

流量低下過渡時の局所バーンアウト質量速度の定常バーンアウト質量速度からのずれを定量的に予測するため、以下に述べる手順により、過渡時と定常時の出口バーンアウト質量速度比(G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s)を、実験条件として与えられる流速減少率(f)と蒸気-水の密度比(ν)の関数として表示する実験式を導出した。

5.4.1 入口における過渡時と定常時のバーンアウト質量速度比の関係式

Fig. 3.8 に示したように、流速減少率があるしきい値以上になると、 G_{Bo}^{in}/G_{Bo}^s は1より小さくなり、その低下率は系圧力が高くなると小さくなる。本実験により得られた G_{Bo}^{in}/G_{Bo}^s を、流速減少率(f)と蒸気と水の密度比(ν)の関数としてフィッティングすると、次式となる。

$$G_{Bo}^{in}/G_{Bo}^s = \begin{cases} 1 & f \leq f_c(\nu) \\ 1 + a(\nu) \log_{10} \frac{f}{f_c(\nu)} & f > f_c(\nu) \end{cases} \quad (5-1)$$

ただし、

$$a(\nu) = 6.426 \times 10^{-5} \nu^{-1.315} - 0.05 \quad (5-2)$$

$$f_c(\nu) = 11.14 \nu^{0.3924} \quad (5-3)$$

ここで $f_c(\nu)$ は G_{Bo}^{in}/G_{Bo}^s が1より小さくなり始める流速減少率である。

Fig. 3.8 には(5-1)式による計算値も合わせて示す。

5.4.2 出口と入口のバーンアウト質量速度比の関係式

一般に各圧力において、流速減少率が大きい程、 G_{Bo}^{out} と G_{Bo}^{in} の差は大きくなる。Fig. 5.4 は、バーンアウト発生時の出口と入口の質量速度差を、入口質量速度で割った値($(G_{Bo}^{out} - G_{Bo}^{in})/G_{Bo}^{in}$)と、流速減少率の関係を示す。同図に見られるように、 $(G_{Bo}^{out} - G_{Bo}^{in})/G_{Bo}^{in}$ の対数は流速減少率の対数に関して直線状に増加し、特に1 MPa 以上の圧力では系圧力の影響は認められない。

Fig. 5.4 において系圧力1 MPa 以上の全データを直線近似すると次の関係式を得る。

$$G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^{in} = \begin{cases} 1 & f \leq f_c(\nu) \\ 1 + 0.0057 f^{0.956} & f > f_c(\nu) \end{cases} \quad (5-4)$$

5.4.3 過渡時と定常時の出口バーンアウト質量速度比の関係式

(5-1)式と(5-4)式を組み合わせると、 G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s の関係式として次式を得る。

$$G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s = \begin{cases} 1 & f \leq f_c(\nu) \\ (1 + 0.0057 f^{0.956}) \left(1 + a(\nu) \log_{10} \frac{f}{f_c(\nu)} \right) & f > f_c(\nu) \end{cases} \quad (5-5)$$

ただし、本式の適用範囲は以下の通りである。

圧力 1.0 ~ 3.9 MPa

流速減少率 0 ~ 40 %/s

Fig. 5.2 に(5-5)式による計算値も合わせて示す。

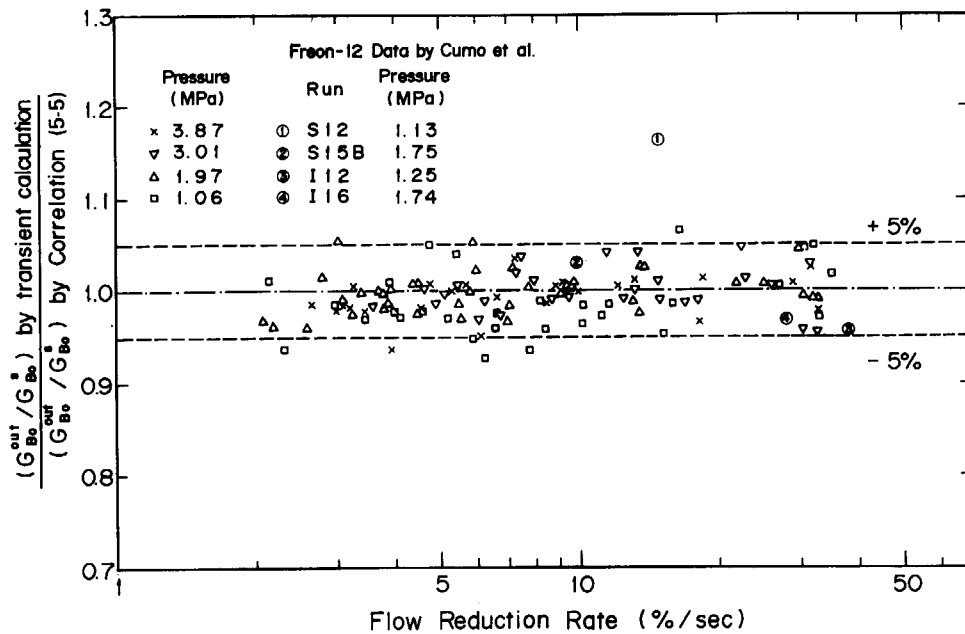


Fig. 5.5 Comparison of G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s obtained by transient calculation with that by correlation (5-5).

本実験により得られた G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s の値と(5-5)式による計算値との比と、流速減少率との関係を Fig. 5.5 に示す。同図より、大部分の G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s の値は、(5-5)式による計算値の $\pm 5\%$ 以内に入っていることが分かる。

5.4.4 Cumo らおよび Moxon らによる実験結果との比較

(5-5)式の各係数は、テスト部形状や実験条件に依存するので、(5-5)式の一般的な適用性を評価するには、従来の実験結果と比較する必要がある。

Fig. 5.5 には、Cumo ら⁵⁾ による流量低下バーンアウト実験と解析結果より求めた G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s の値と、(5-5)式により計算した G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s の比も示してある。Cumo らの実験は、1.1~1.8 MPa のフロン-12を用いているにもかかわらず、流速減少率が(5-5)式の適用範囲内に入っているため、同図に示すように、 G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s は(5-5)式によりかなり良く予測される。

次に Moxon ら⁷⁾ の流量低下バーンアウト実験結果と比較する。Moxon らの実験は指数関数状流量低下なので、流量の半減時間 0.34 秒に対応する流速減少率として 147%/s を仮定し、(5-5)式により G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s を計算すると 1.53 となる。これに対し、Moxon らにより求められた G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s の値は 0.78 となっている。このように両者が著しい不一致を示したのは、Moxon らの実験では極めて急激な指数関数状流量低下によりバーンアウトが発生しており、(5-5)式の導出に際して採用したデータベースにおける流速低下方式(直線状)や流速減少率範囲(40%/s 以下)と著しく異なっているためである。

以上、Cumo らや Moxon らの実験・解析結果との比較により、(5-5)式は、直線状の流量低下で、40%/s 以下の流速減少率の場合には、実験結果を良く予測できるが、流量低下パターンが異なったり、40%/s 以上の急激な流量低下の場合には適用できないことがわかった。

5.5 まとめ

4章で述べた計算方法を、流量低下バーンアウト実験に適用し、バーンアウト発生時の局所質量速度と定常バーンアウト質量速度との比(G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s)と流速減少率の関係を調べ、以下の諸点が明らかとなった。

- (1) 流速減少率が 2%/s 以下では 0.5~3.9 MPa の圧力で局所バーンアウト質量速度は定常バーンアウト質量速度に一致する。
- (2) 系圧力が 0.5 MPa では、流速減少率が 2%/s 以上になると G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s は 1 より小さくなる。
- (3) 系圧力が約 1 MPa の場合には、流速減少率が 2~30%/s では G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s は 1 よりやや小さいが、流速減少率が 30%/s 以上になると、 G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s は 1 より大きくなる傾向にある。
- (4) 系圧力が 2 MPa 以上の場合には、流速減少率が 20%/s 以下で G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s はほぼ 1 となり、20%/s 以上では G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s は 1 より大きくなる傾向にある。
- (5) G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s の値を流速減少率と蒸気と水の密度比の関数として表示する関係式(5-5)を導出した。本式は Cumo らの流量低下バーンアウト実験結果をかなり良く予測している。

6. 結 論

流量低下過渡時と定常時のバーンアウト発生条件の相異を明らかにするため、実験および解析的研究を実施した。本研究により得られた主要な成果を以下にまとめて述べる。

- (1) 流速減少率があるしきい値を超えると、流量低下バーンアウト時の入口質量速度は定常バーンアウト質量速度よりも減少した。
- (2) 系圧力が高い程、(1)で述べた流速減少率のしきい値は大きくなり、バーンアウト発生時入口質量速度と定常バーンアウト質量速度との比は小さくなった。このような系圧力の効果は低圧である程顕著で、2MPa以上の高圧では小さくなった。
- (3) 指数関数状流量低下の場合について、分離流モデルによる計算結果より、急激な流量低下時には流路出口と入口の質量速度差が増大し、系圧力が低い程その差は拡大すること、および流量低下による沸騰開始時には局所質量速度が一時的に上昇することが認められた。
- (4) 系圧力が2MPa以上の場合、流速減少率が20%/s以下では、出口(バーンアウト発生点)における質量速度が定常バーンアウト質量速度に一致したときにバーンアウトが発生したが、流速減少率が20%/s以上になると、出口バーンアウト質量速度は定常バーンアウト質量速度よりも大きくなった。
- (5) 系圧力が0.5~1.0MPaの場合、流速減少率が2%/sのしきい値を超えると、出口バーンアウト質量速度は定常バーンアウト質量速度よりも小さくなった。しかしながら、系圧力が1MPaの場合には、流速減少率が30%/s以上になると、高圧の場合と同様に、出口バーンアウト質量速度は定常時よりも大きくなる傾向を示した。
- (6) 流量低下時の局所バーンアウト質量速度と定常バーンアウト質量速度との比を、蒸気と水の密度比および流速減少率の関数で表した次の関係式を導出した。

$$G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s = \begin{cases} 1 & f \leq f_c(\nu) \\ (1 + 0.0057f^{0.956}) \left(1 + a(\nu) \log_{10} \frac{f}{f_c(\nu)} \right) & f > f_c(\nu) \end{cases}$$

$$a(\nu) = -6.426 \times 10^{-5} \nu^{-1.315} - 0.05$$

$$f_c(\nu) = 11.14 \nu^{0.3924}$$

本関係式は Cumo らの実験結果をかなり良く予測できたが、40%/s以上の急激な流量低下の場合には適用できなかった。

以上の諸結果を総合すると、系圧力が2MPa以上の場合、流速減少率が20%/s程度以下であれば、バーンアウト発生位置での局所質量速度を定常バーンアウト相関式に適用することにより、バーンアウトの発生を予測できると言える。

本実験では系圧力が実際の炉よりも低く、形状も異なるので、得られた結果をそのまま実際の炉のPCM条件下まで拡張することはできないが、定性的な傾向予測は可能となった。すなわち、本実験結果より、系圧力が高い程流量低下に伴う過渡効果は小さくなることが確認されたので、実際の炉のような高圧下での流量低下バーンアウト発生の予測には、流速減少率が20%/s以下であれば、定常バーンアウト相関式が適用できると考えられる。

実際の炉における流量低下バーンアウト発生を定量的に予測するため、将来以下の諸項目を解明する必要がある。

- (1) 高圧でかつ流速減少率が20%/s以上での流量低下バーンアウト発生条件を調べる。
- (2) バンドル形状での流量低下バーンアウト特性を調べる。
- (3) 流速減少率が大きい場合、局所バーンアウト質量速度と定常バーンアウト質量速度が異なる物理的原因を調べる。
- (4) 結論(6)で述べた関係式を、より広範囲な実験データに基づいて改良する。
- (5) 以上の研究成果を、燃料過渡挙動計算コードの改良に反映させる。

謝 辞

本研究の遂行に際し、適切な御指導をいただいた、安全工学部平野見明次長および安全工学第二研究室村尾良夫室長に感謝いたします。

また、解析上の基礎式や実験結果の検討に関して、有益な討論をしていただいた、動力試験炉部小山内正夫前部長、安全工学第二研究室安達公道主任研究員、およびラジオアイソトープ・原子炉研修所山崎弥三郎前所長に感謝いたします。

本研究を遂行するに当たっては多くの人々の協力を得た。PCM 研究計画の作成の際には、反応度安全研究室星蔦雄前室長およびリスク評価解析室飛岡利明室長が中心的役割を果たされた。実験装置の製作は安全試験技術室深谷好夫氏に、測定技術に関しては安全工学第二研究室新妻泰氏に、データ集録装置の設計に関しては高レベル廃棄物処理処分研究室武田常夫氏に、それぞれ負うところが大きかった。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 星蔦雄, 他, “PCM 研究の現状”, JAERI-M 6927, (1977).
- 2) Kastner W. and Mayinser F.: “Burnout Tests in Connection with Safety Research”, AEC-tr 7394 (1970).
- 3) Shiralkar B.S. et al.: “Transient Critical Heat Flux Experimental Results”, GEAP-13295 (1972).
- 4) Smith R.A. and Griffith P.: “Critical Heat Flux in Flow Reversal Transients”, PB-254 425 (1976).
- 5) Cumo M. et al.: “Transient Critical Heat Flux in Loss-of-Flow-Accidents (L.O.F.A.)”, RT/ING (77) 14 (1977).
- 6) 浅田, 小堀, “非定常ドライアウトの研究(第1報, 流量急減下のドライアウト)”, 第14回日本伝熱シンポジウム講演論文集 p.175 (1977).
- 7) Moxon D. and Edwards P.A.: “Dryout during Flow and Power Transient”, AEEW-R 553 (1967).
- 8) Gaspari G.P. et al.: “Transient Dryout in a Modelled CIRENE 18+1 Rod Cluster”, CISE-R-379 (1975).
- 9) Leung J.C.M.: “Critical Heat Flux under Transient Conditions, A Literature Survey”, NUREG/CR-0056 (1978).
- 10) Becker K.M.: “An Analytical and Experimental Study of Burnout Conditions in Vertical Round Ducts”, Nukleonik, Band 9, April, 257-270 (1967).
- 11) Bertolotti S. et al.: “Heat Transfer Crisis with Steam-Water Mixtures”, Energia Nucleare, Vol.12, No.3 (1965).
- 12) Biasi L. et al.: “Studies on Burnout Part 3 - A New Correlation for Round Ducts and Uniform Heating and Its Comparison with World Data”, Energy Nucleare Vol.14, No.9 (1967).
- 13) Tong L.S.: “Prediction of Departure from Nucleate Boiling for an Axially Non-Uniform Heat Flux Distribution”, J. of Nuclear Energy, 6, 21 (1967).
- 14) Gellerstedt J.S. et al.: “Correlation of Critical Heat Flux in a Bundle Cooled by Pressurized Water”, Two-Phase Flow and Heat Transfer in Rod Bundles, 63-71, ASME Winter Meeting, Los Angeles (1969).
- 15) Macbeth R.V.: “Burnout Analysis Part 4: Application of a Local Conditions Hypothesis to World Data for Uniformly Heated Round Tubes and Rectangular Channels”, AEEW-R267 (1963).
- 16) Thompson B. and Macbeth R.V.: “Burnout in Uniformly Heated Round Tubes: A Compilation of World Data with Accurate Correlations”, AEEW-R356 (1964).
- 17) Hughes E.D.: “A Correlation of Rod Bundle Critical Heat Flux for Water in the Pressure Range 150 to 725 psia”, IN-1412 (1970).
- 18) 甲藤好郎 “一様加熱垂直円管内の強制流動沸騰の限界熱流束の無次元整理” 日本機械学会論文集 44 巻 387 号 (1978).
- 19) 黒柳利之・岩村公道, “流量低下時の圧力および壁温変化(常圧ループによる過渡沸騰実験(Ⅲ))”, JAERI-M 7396, (1977).
- 20) 黒柳利之・岩村公道, “流量低下時のバーンアウト発生(常圧ループによる過渡沸騰実験(Ⅳ))”, JAERI-M 7489, (1978).
- 21) 黒柳利之・岩村公道, “環状流路における流量低下バーンアウト実験データ報告(常圧ループによる過渡沸騰実験(Ⅴ))”, JAERI-M 7808, (1978).
- 22) 黒柳利之・岩村公道, “環状流路における流量低下バーンアウト発生(常圧ループによる過渡沸騰実験(Ⅵ))”, JAERI-M 8047, (1979).
- 23) 黒柳利之・岩村公道, “管内流路における流量低下過渡バーンアウト(1)”, JAERI-M 8774, (1980).
- 24) 岩村公道・黒柳利之, “管内流路における流量低下過渡バーンアウト(2)(局所流動条件の計算による実験結果の解析)”, JAERI-M 9012, (1980).
- 25) Iwamura T. and Kuroyanagi T.: “Burnout Characteristics under Flow Reduction Condition”, Journal of Nucl. Sci. and Tech., Vol.19, No.6, pp.438-448 (1982).
- 26) Jones A.B. and Dight D.G.: “Hydrodynamic Stability of a Boiling Channel Part 2”, KAPL-2208 (1962).
- 27) Thom J.R.S.: “Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling of Water”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.7, p.709-724 (1964).

記 号 表

A	: Flow area	(m^2)	X	: Quality	
$a(\nu)$: Gradient of G_{Bo}^{in}/G_{Bo}^s defined by Eq. (5-2)		z	: Axial distance	(m)
D	: Inner diameter	(m)	α	: Void fraction	
E_f	: Energy dissipation rate	(W/m^3)	λ	: Latent heat of evaporation	(J/kg)
$\Delta E_g^l, \Delta E_g^z, \Delta E_l^l, \Delta E_l^z$: Pressure dependent terms in energy equations (A-8) and (A-9)		ρ	: Density	(kg/m^3)
f	: Flow reduction rate	(%/s)	Subscripts		
$f_c(\nu)$: Threshold flow reduction rate defined by Eq. (5-3)		B	: Boiling boundary	
G	: Mass velocity	($kg/s \cdot m^2$)	Bo	: Burnout	
g	: Acceleration due to gravity	(m/s^2)	f	: Final	
h	: Enthalpy	(J/kg)	g	: Vapor	
L	: Heated length	(m)	i	: Initial	
L_b	: Boiling length	(m)	in	: Inlet	
P	: Pressure	(Pa)	l	: Liquid	
P_e	: Perimeter	(m)	out	: Outlet	
q	: Heat flux	(W/m^2)	sat	: Saturation	
S	: Slip ratio		Superscripts		
T	: Temperature	($^{\circ}C$)	in	: Inlet	
t	: Time	(s)	out	: Outlet	
Δt	: Flow transient time	(s)	s	: Steady state	
v	: Velocity	(m/s)	t	: Time	
ΔV	: Velocity reduction range	(m/s)	z	: Axial location	

付録 4章の計算方法の検討

A.1 エネルギー保存式における圧力変化項とエネルギー逸散項の評価

エネルギー保存式において、エネルギー逸散項と圧力変化項を無視しない場合は、(4-7)式は以下のように拡張される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha h_g + \rho_l (1-\alpha) h_l) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_g \alpha h_g v_g + \rho_l (1-\alpha) h_l v_l) - \frac{P_e q}{A} + E_f + \frac{\partial P}{\partial t} + (\alpha v_g + (1-\alpha) v_l) \frac{\partial P}{\partial z} \quad (A-1)$$

(A-1)式のうち、エネルギー逸散項と圧力変化項の大きさを、Fig. A.1 に示した実験データの場合について評価する。

Fig. A.1 の差圧データの周波数と最大振幅はそれぞれ、約 15 Hz および 0.2 MPa なので、圧力振動項の絶対値は最大次の程度となる。

$$\left| \frac{\partial P}{\partial t} \right| < 0.2 \times 10^6 \times 15 \times 2 = 6 \times 10^6 \text{ W/m}^3 \quad (A-2)$$

次に、4.4節の方法で計算した沸騰長さ、ボイド率、液および蒸気流速を用いると、圧力損失項の大きさは、以下の程度と評価される。

$$(\alpha v_g + (1-\alpha) v_l) \frac{\partial P}{\partial z} \sim -16 \times 10^6 \text{ W/m}^3 \quad (A-3)$$

また、エネルギー逸散項 E_f は次式で表現される。

$$E_f = -(\alpha v_g + (1-\alpha) v_l) \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_f \quad (A-4)$$

ここで、 $\left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_f$ は、摩擦圧力損失で、その絶対値は全圧力損失より小さい。

従って(A-3)式より、

$$|E_f| < 16 \times 10^6 \text{ W/m}^3 \quad (A-5)$$

(A-2)、(A-3)、(A-5)の各評価値より、(A-1)式のエネルギー逸散項と圧力変化項の和は、以下のように評価される。

$$E_f + \frac{\partial P}{\partial t} + (\alpha v_g + (1-\alpha) v_l) \frac{\partial P}{\partial z} = \begin{cases} 6 \times 10^6 \text{ W/m}^3 & (\text{最大}) \\ -22 \times 10^6 \text{ W/m}^3 & (\text{最小}) \end{cases} \quad (A-6)$$

Fig. A.1の実験の場合、単位体積当りの注入エネルギーは、

$$\frac{P_e q}{A} = 1,520 \times 10^6 \text{ W/m}^3 \quad (A-7)$$

である。(A-6)と(A-7)の比は最大でも約 -0.014 となり、これは実験中の加熱電力の変動と同程度である。

以上の検討結果より、エネルギー式(A-1)においてエネルギー逸散項や圧力変化項の寄与は十分小さいと言える。さらにこれらの項の寄与は、系圧力が高い程小さくなる。

A.2 物性値の圧力依存性の評価

4.4節では物性値は圧力に依存せず一定としたが、もし、物性値の圧力依存性を考慮すると、式(4-9)、(4-10)はそれぞれ以下ようになる。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha v_g) + \Delta E_g^t + \Delta E_g^z = \frac{P_e q}{\lambda \rho_g A} \quad (A-8)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}[(1-\alpha) v_l] + \Delta E_l^t + \Delta E_l^z = \frac{P_e q}{\lambda \rho_l A} \quad (A-9)$$

ただし、

$$\Delta E_g^t = \frac{\partial P}{\partial t} \left[\alpha \left(\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial P} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial h_g}{\partial P} \right) + (1-\alpha) \frac{\rho_l}{\lambda \rho_g} \frac{\partial h_l}{\partial P} \right]$$

$$\Delta E_g^z = \frac{\partial P}{\partial z} \left[\alpha v_g \left(\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial P} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial h_g}{\partial P} \right) + (1-\alpha) v_l \frac{\rho_l}{\lambda \rho_g} \frac{\partial h_l}{\partial P} \right]$$

$$\Delta E_l^t = \frac{\partial P}{\partial t} \left[(1-\alpha) \left(\frac{1}{\lambda} \frac{\partial h_l}{\partial P} - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial \rho_l}{\partial P} \right) + \alpha \frac{\rho_g}{\lambda \rho_l} \frac{\partial h_g}{\partial P} \right]$$

$$\Delta E_l^z = \frac{\partial P}{\partial z} \left[(1-\alpha) v_l \left(\frac{1}{\lambda} \frac{\partial h_l}{\partial P} - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial \rho_l}{\partial P} \right) + \alpha v_g \frac{\rho_g}{\lambda \rho_l} \frac{\partial h_g}{\partial P} \right]$$

次に、以上の式により ΔE_g^t 、 ΔE_g^z 、 ΔE_l^t 、 ΔE_l^z の各項の大きさを評価し、(A-8)式と(A-9)式の右辺の大きさと比較してみる。なお、圧力振動振幅や周期などはバーンアウト発生直前の値をとり、 α 、 v_l 、 v_g などの値は、バーンアウト発生直前の沸騰長さの中間における計算値を採用した。Fig. A.1、A.2 にテスト部出口圧力が約 0.8 MPa と 3.1 MPa の各場合について、実験と計算結果を示す。

(1) 出口圧力 0.8 MPa の場合 (Fig. A.1)

$$(\Delta E_g^t + \Delta E_g^z) / \left(\frac{P_e q}{\lambda \rho_g A} \right) = 0.065 \sim 0.12$$

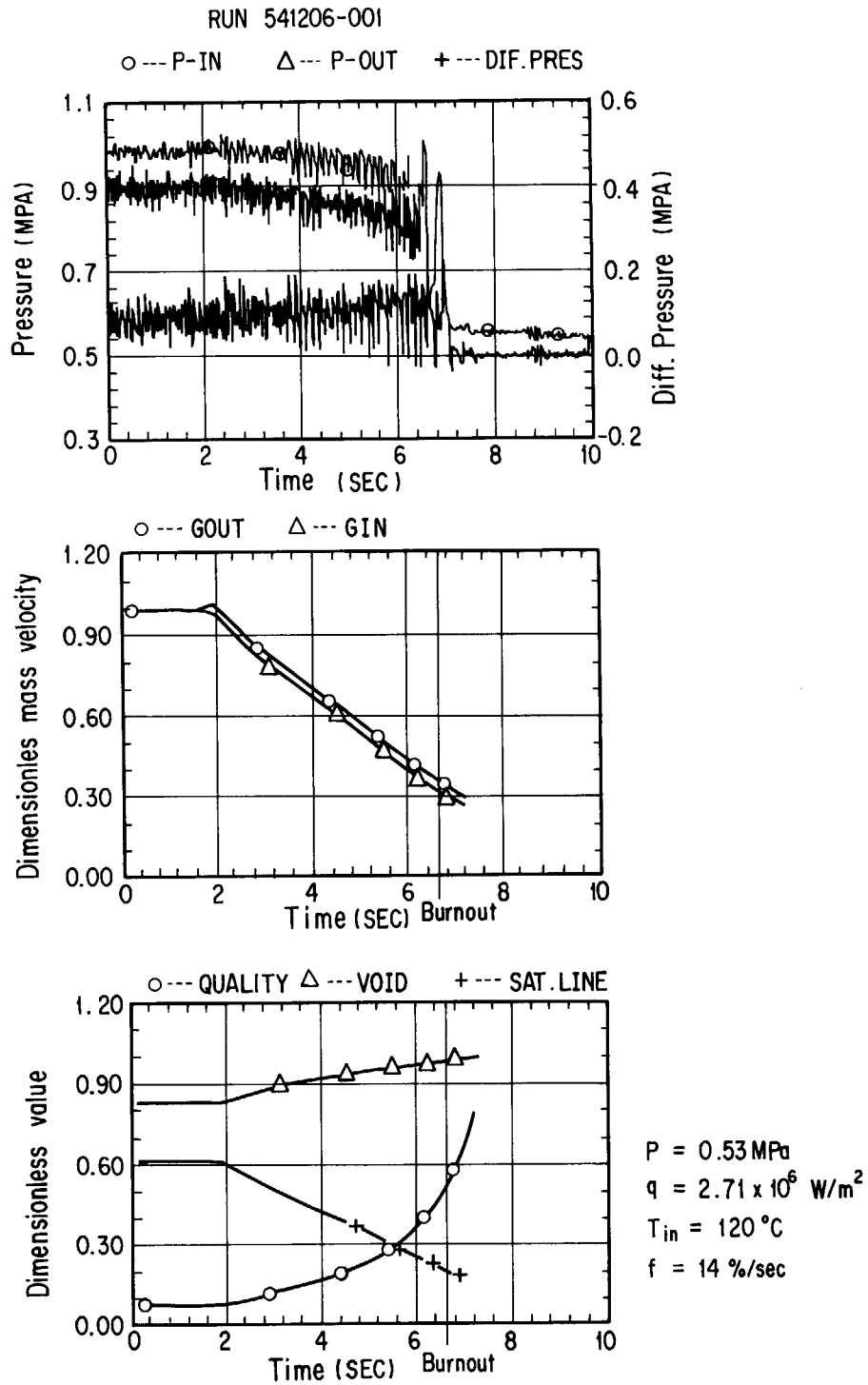


Fig. A.1 Example of experimental data and calculated results at 0.53 MPa.

$$(\Delta E'_i + \Delta E'_i) / \left(\frac{P_e q}{\lambda \rho_l A} \right) \approx 0.025 \sim 0.061$$

(2) 出口圧力 3.1 MPa の場合 (Fig. A.2)

$$(\Delta E'_g + \Delta E'_g) / \left(\frac{P_e q}{\lambda \rho_g A} \right) \approx -0.003 \sim 0.023$$

$$(\Delta E'_i + \Delta E'_i) / \left(\frac{P_e q}{\lambda \rho_l A} \right) \approx 0.003 \sim 0.009$$

以上の結果より、(A-8)、(A-9)式において物性値の圧力依存性を考慮した項の寄与は、0.8 MPa の低圧では最大 12% 程度となるが、3.1 MPa の圧力では最大 2% 程度しかないと分かる。従って、計算の際には物性値の圧力依存性を考慮しなかった。これによる誤差は低圧の場合は必ずしも無視できないが、圧力が高い程誤差は十分小さくなると言える。

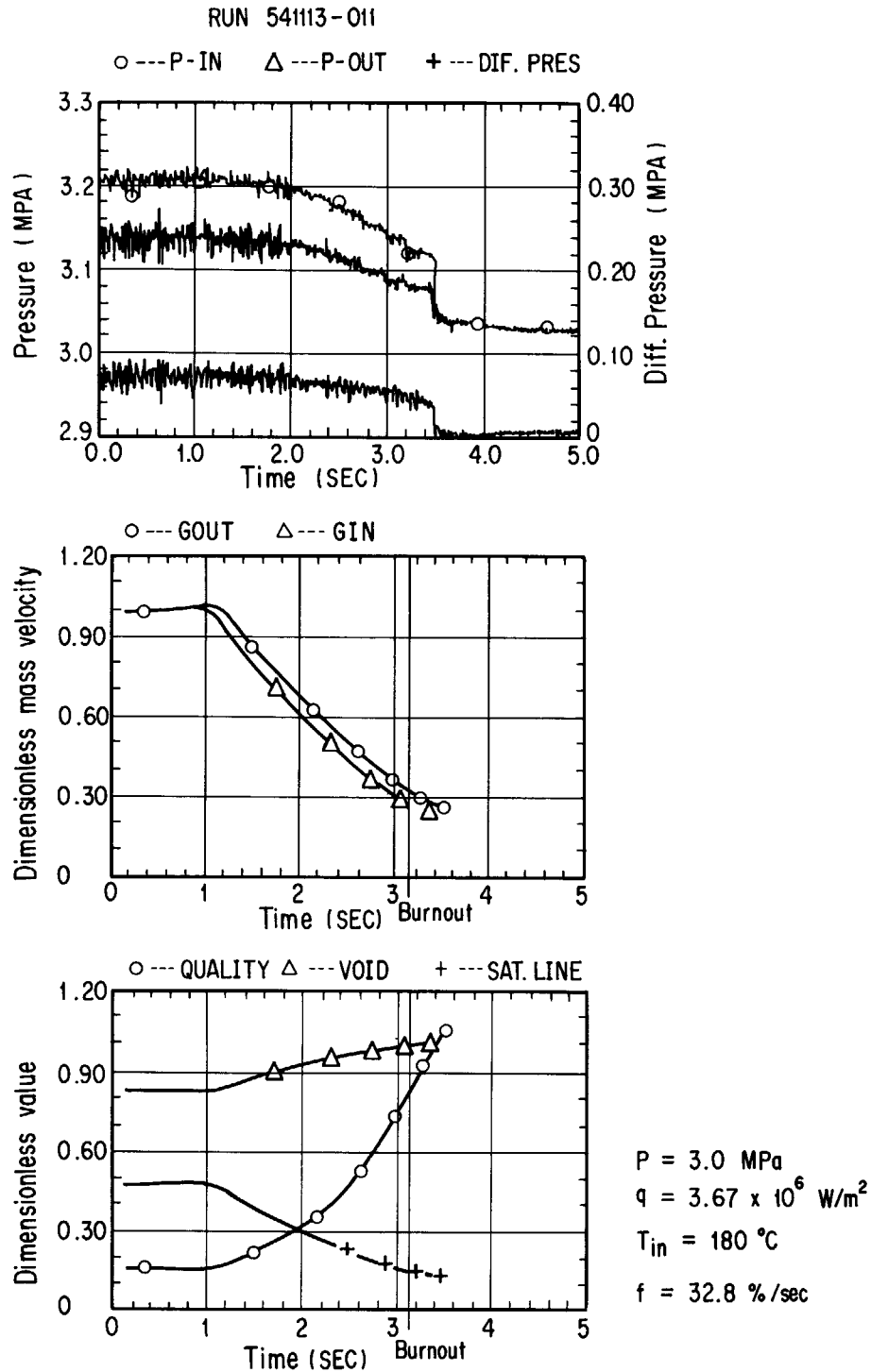


Fig. A.2 Example of experimental data and calculated results at 3.0 MPa.

A.3 スリップ比の影響

スリップ比の値が流量低下過渡沸騰二相流挙動に与える影響を調べるため、スリップ比を一定値(1, 3, 5)とした場合と、修正 Bankoff モデル²⁶⁾を用いた場合について、バーンアウト発生時のテスト部出口におけるボイド率、クォリティ、質量速度等を計算した。Table A.1 に計算結果の比較を示す。同表より、バーンアウト

発生時の二相流諸量の計算結果に対するスリップモデルの影響は、ボイド率以外については十分小さいことが分かる。

以上の検討結果を考慮して、流量低下バーンアウト実験の解析の際は、単純化のためスリップ比一定とした。スリップ比の値は Thom によるスリップ比と圧力の関係²⁷⁾に基づき、系圧力 0.5, 1, 2, 3, 3.9 MPa の各場合に、それぞれ 3.0, 2.8, 2.2, 2.0, 1.9 とした。

Table A.1 Effects of slip ratio on calculated results

Type of transient	Slow			Fast		
Run No.	541206-16			541206-19		
Flow reduction rate	3.94 %/s			14.5 %/s		
Flow reduction time	16.8 s			4.25 s		
Slip model	Constant slip			Mod.	Mod.	
	S=1	S=3	S=5	Bankoff	S=3	Bankoff
α_{Bo}^{out}	0.995	0.986	0.977	0.958	0.991	0.968
X_{Bo}^{out}	0.489	0.483	0.485	0.485	0.589	0.589
G_{Bo}^{out} (kg/s·m ²)	899	914	906	909	797	795
$G_{Bo}^{out} / G_{Bo}^{in}$	1.067	1.085	1.076	1.080	1.172	1.170
G_{Bo}^{out} / G_{Bo}^s	0.914	0.930	0.922	0.925	0.810	0.809

Experimental condition : $P=0.51MPa$, $T_{in}=120^\circ C$, $q_{Bo}=2.67 \times 10^6$ w/m²,
 $G_i=1740$ kg/s·m²