

JAERI-M

7489

流量低下過渡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)

1978年2月

黒柳利之・岩村公道

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしく下さい。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

流量低下過渡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)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
黒柳利之・岩村公道

(1977年12月23日受理)

軽水炉の出力-冷却不整合 (PCM) 時の過渡沸騰に伴う諸現象の概要を知るため、常圧大気開放ループを用いて、流量低下時の過渡バーンアウト実験を行った。テスト部は内径 8 mm、外径 10 mm、長さ 800 mm のステンレス管で、直流直接通電により加熱した。

実験範囲は、熱流束： $0.87 \sim 1.66 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ ，入口温度： $30 \sim 80^\circ\text{C}$ ，初期質量速度： $1.8 \sim 3.8 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$ ，流量減少過渡時間： $0.07 \sim 70 \text{ sec}$ ，流速減少率： $0.24 \sim 1100 \text{ cm/sec/sec}$ である。

実験結果より、流速減少率がある程度以上大きくなると、流路圧力や壁温の挙動に、流量低下過渡バーンアウト特有の諸現象が見られること、同一熱流束におけるバーンアウト発生時入口質量速度は、定常状態の時よりもかなり減少することなどがわかった。

Burnout phenomena in a Tube during Flow Reduction Transients
[Transient flow boiling under atmospheric pressure (IV)]

Toshiyuki KUROYANAGI and Takamichi IWAMURA
Division of Reactor Safety, Tokai Research
Establishment, JAERI.

(Received December 23, 1977)

Burnout phenomena in flow reduction transients have been studied in up-flow of water in a vertical tube under atmospheric pressure.

The electrically heated test section is a stainless steel tube 8 mm in diameter and 800 mm long.

Experimental conditions are:

inlet water temperature = 30~80 °C;
heat flux = $0.87\sim 1.16 \times 10^6$ kcal/hm²;
initial mass velocity = $1.8\sim 3.8 \times 10^6$ kg/hm²;
flow reduction time = 0.07~70 sec; and
flow reduction rate = 0.24~1100 cm/sec/sec.

Beyond a flow reduction rate of 10 cm/sec/sec, there appear phenomena peculiar to the flow reduction transient burnout in channel pressure and wall temperature. The burnout inlet mass velocity is also lower than the steady-state one under the same heated power conditions.

Keywords : Two-phase Flow, Transient Flow, Flow Reduction,
Power Cooling Mismatch, Heat Transfer,
Reactor Safety, Burnout, Critical Heat Flux

目 次

1. まえがき	1
2. 実験装置	3
2.1 実験装置概要	3
2.2 計 装	3
2.3 実験方法	4
3. 実験結果	7
3.1 定常バーンアウト実験	7
3.2 流量低下バーンアウト実験	7
4. 実験結果の検討	20
4.1 バーンアウト発生前後の諸現象	20
4.1.1 定常バーンアウト時の壁温および圧力挙動	20
4.1.2 流量低下過渡バーンアウト時の壁温, 圧力, 流量等の挙動	20
4.1.3 特異な実験例	23
4.2 壁温変化における非定常効果	25
4.3 圧力変化における非定常効果	25
4.4 入口流量の過渡時における挙動	26
4.5 バーンアウト時入口質量速度と熱流束におよぼす流速減少率の影響	27
5. ま と め	47
謝 辞	48
参 考 文 献	49
記 号 表	50
付録 A 分離流モデルによる流量低下過渡沸騰挙動の計算	52
A-1 計 算 式	52
A-2 計算結果と検討	56
付録 B 定常バーンアウト実験結果とバーンアウト熱流束関係式との比較	78

CONTENTS

1. INTRODUCTION	1
2. EXPERIMENT DESCRIPTION	3
2.1 Loop and Test Section	3
2.2 Measurement and Recording System	3
2.3 Experimental Procedures	4
3. EXPERIMENTAL RESULTS	7
3.1 Steady-State Burnout Experiments	7
3.2 Flow Reduction Transient Burnout Experiments	7
4. DISCUSSION OF EXPERIMENTAL RESULTS	20
4.1 General Description of Burnout Experiments	20
4.1.1 Behavior of Wall Temperature and Channel Pressure during Steady-State Burnout Experiments	20
4.1.2 Behavior of Wall Temperature, Channel Pressure and Flow Rate during Flow Reduction Transient Burnout Experiments	20
4.1.3 Particular Examples of Experimental Results	23
4.2 Effects of Flow Reduction Rate on Wall Temperature .	25
4.3 Effects of Flow Reduction Rate on Channel Pressure .	25
4.4 Behavior of Inlet Flow Rate in Transient Conditions.	26
4.5 Effects of Flow Reduction Rate on Burnout Inlet Mass Velocity and Burnout Heat Flux	27
5. CONCLUSIONS	47
ACKNOWLEDGMENTS	48
REFERENCES	49
NOMENCLATURE	50

APPENDIX A CALCULATION OF TRANSIENT BOILING FLOW IN FLOW
REDUCTION CONDITIONS WITH SEPERATE FLOW MODEL .. 52
A-1 Analytical Model 52
A-2 Numerical Results and Discussions 56
APPENDIX B COMPARISON OF STEADY STATE BURNOUT
EXPERIMENTS AND BURNOUT CORRELATIONS 78

TABLES

Table 2-1.	Characteristics of experimental apparatus	5
Table 3-1.	Parameter ranges of steady state burnout experiments ...	10
Table 3-2.	Parameter ranges of flow reduction transient burnout experiments	10
Table 3-3.	Summary of conditions and results for steady state burnout experiments	11
Table 3-4.	Summary of conditions and results for flow reduction transient burnout experiments	11
Table 4-1.	Summary of conditions and results for flow reduction transient burnout experiments (Fig. 4-2~4-9)	29
Table A-1.	Water properties	62
Table A-2.	Lists of parameters. (Fig. A-1~A-26)	63

FIGURES

Fig. 2-1.	Experimental apparatus	5
Fig. 2-2.	Test section	5
Fig. 2-3.	Measurement and recording system	6
Fig. 4-1.	Examples of steady state burnout experiments	30
Fig. 4-2.	Examples of flow reduction transient burnout experiments (I) ($q'' = 1.37 \times 10^6$ kcal/hm ² , $T_{in} = 30$ °C)	31
Fig. 4-3.	Examples of flow reduction transient burnout experiments (II) ($q'' = 1.20 \times 10^6$ kcal/hm ² , $T_{in} = 30$ °C)	33
Fig. 4-4.	Examples of flow reduction transient burnout experiments (III) ($q'' = 1.66 \times 10^6$ kcal/hm ² , $T_{in} = 30$ °C)	34
Fig. 4-5.	Examples of flow reduction transient burnout experiments (IV) ($q'' = 1.19 \times 10^6$ kcal/hm ² , $T_{in} = 80$ °C)	35
Fig. 4-6.	Examples of flow reduction transient burnout experiments (V) ($q'' = 0.87 \times 10^6$ kcal/hm ² , $T_{in} = 80$ °C)	37
Fig. 4-7.	Particular examples of flow reduction transient burnout experiments (I) (Wall temperature excursion without power cut off, $W_{BO} > 0$)	38
Fig. 4-8.	Particular examples of flow reduction transient burnout experiments (II) (Wall temperature excursion without power cut off, $W_{BO} \approx 0$)	39
Fig. 4-9.	Examples of flow reduction experiments which were failed to burnout	40
Fig. 4-10.	Effect of flow reduction rate on duration of wall temperature plateau after power cut off	41
Fig. 4-11.	Effect of flow reduction rate on behavior of inlet pressure prior to burnout	41
Fig. 4-12.	Effect of flow reduction rate on inlet pressure peak ($T_{in} = 30$ °C)	42

Fig. 4-13.	Effect of flow reduction rate on inlet pressure peak. ($T_{in} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	42
Fig. 4-14.	Effect of final flow rate on flow flashing phenomenon prior to burnout	43
Fig. 4-15.	Dependency of flow flashing phenomenon prior to burnout on final flow rate and flow reduction rate ..	44
Fig. 4-16.	Effect of flow reduction rate on burnout inlet mass velocity. ($T_{in} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	45
Fig. 4-17.	Effect of flow reduction rate on burnout inlet mass velocity. ($T_{in} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	45
Fig. 4-18.	Comparison of burnout heat flux between flow reduction transient and steady state. ($T_{in} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	46
Fig. 4-19.	Comparison of burnout heat flux between flow reduction transient and steady state. ($T_{in} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	46

Fig. A-1.	Effect of pressure on time duration required for void fraction (α) from 0 to 1.	65
Fig. A-2.	Transient behavior of mass velocity (G^*) quality (X), and boiling boundary (η_B), for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)	66
Fig. A-3.	Transient behavior of liquid velocity (U_l) and void fraction (α) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)	66
Fig. A-4.	Transient two-phase flow.	65
Fig. A-5.	Effect of slip ratio (S) on outlet mass velocity (G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)	67
Fig. A-6.	Effect of slip ratio (S) on outlet liquid velocity ($U_{l,out}$) and void fraction (α) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)	67
Fig. A-7.	Effect of flow reduction time constant ($1/\beta_2$) on outlet mass velocity (G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)	68
Fig. A-8.	Effect of flow reduction time constant ($1/\beta_2$) on mass velocity (G^*) at position of $\eta = 0.4$ for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)	68
Fig. A-9.	Effect of flow reduction time constant ($1/\beta_2$) on ratio of outlet to inlet mass velocity (G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)	69
Fig. A-10.	Effect of final to initial velocity ratio (β_1) on mass velocity (G^*) and outlet quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$) ..	69
Fig. A-11.	Effect of final to initial velocity ratio (β_1) on ratio of outlet to inlet mass velocity (G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$) ..	70
Fig. A-12.	Effects of inlet quality (X_{in}) and boiling boundary (η_B) on outlet mass velocity (G^*_{out}) and quality for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)	70
Fig. A-13.	Transient behavior of mass velocity (G^*), quality (X) and boiling boundary for flow	

reduction condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$) 71

Fig. A-14. Transient behavior of liquid velocity (U_l)
and void ratio (α) for flow reduction condition.
($P = 150 \text{ kg/cm}^2$) 71

Fig. A-15. Effect of slip ratio (S) on outlet mass velocity
(G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction
condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$) 72

Fig. A-16. Effect of slip ratio (S) on outlet liquid
velocity ($U_{l, out}$) and void ratio (α_{out})
for flow reduction condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$) 72

Fig. A-17. Effect of flow reduction time constant ($1/\beta_2$)
on ratio of outlet to inlet mass velocity
(G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition.
($P = 150 \text{ kg/cm}^2$) 73

Fig. A-18. Effect of final to initial velocity ratio (β_1)
on ratio of outlet to inlet mass velocity
(G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition.
($P = 150 \text{ kg/cm}^2$) 73

Fig. A-19. Effect of pressure on outlet mass velocity (G^*_{out})
and quality (X_{out}) for flow reduction condition.
($\beta_2 = 10$) 74

Fig. A-20. Effect of pressure on mass velocity (G^*) at
positions of $\eta = 0.4$ and 0.6 for flow reduction
condition. ($\beta_2 = 10$) 74

Fig. A-21. Effect pressure on outlet liquid velocity ($U_{l, out}$)
for flow reduction condition. ($\beta_2 = 10$) 75

Fig. A-22. Effect of pressure on outlet void ratio (α_{out})
and ratio of outlet to inlet mass velocity
(G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition.
($\beta_2 = 10$) 75

Fig. A-23. Effect of pressure on outlet mass velocity
(G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction
condition. ($\beta_2 = 1$) 76

Fig. A-24. Effect of pressure on mass velocity (G^*) at
positions of $\eta = 0.4$ and 0.6 for flow reduction
condition. ($\beta_2 = 1$) 76

Fig. A-25. Effect of slip ratio (S) on outlet mass velocity
(G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction

	condition. (P = 40 kg/cm ² .)	77
Fig. A-26.	Effect of final to initial velocity ratio (β_1) on ratio of outlet to inlet mass velocity (G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition. (P = 40 kg/cm ²)	77
Fig. B-1.	Comparison of steady state burnout heat flux data with Macbeth, Thompson-Macbeth, and Becker correlations. (T _{in} = 30 °C)	84
Fig. B-2.	Comparison of steady state burnout heat flux data with Macbeth, Thompson-Macbeth, and Becker correlations. (T _{in} = 80 °C)	84

1. ま え が き

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、軽水炉の安全確保上重要な問題の一つである。⁽¹⁾

PCM時には、燃料棒は限界熱流束を越える可能性があり、被覆管温度の急上昇による強度低下や熔融など、燃料棒の健全性にとって重大な問題となる。従って、出力上昇または流量低下過渡時におけるバーンアウト発生を正確に予測することは、PCM時の被覆管温度挙動評価のための重要な研究課題である。

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、極めて活発になされ、多くの実験式または半理論式が提案されている。しかし、おそい過渡変化時とはともかく、ある程度以上急激な過渡変化時にも、このような関係式をそのまま適用できるかどうかは今後十分検討する必要がある。

出力上昇または流量低下による過渡時に、バーンアウトを発生させた実験は、それ程多くはない。これらの実験では、バーンアウト熱流束または過渡状態発生よりバーンアウト発生 (熱電対で検知) までの経過時間を、定常状態での知見を適用して構成された計算コードから得られた計算値と比較している。

Tongら⁽²⁾は、圧力 1500 psi で、長さ 60 inch の21本正方管束または19本三角管束を用いて、出力上昇 (経過時間 0.4~9秒, 増加率 3.6~16.7%/sec) または、流量低下 (経過時間 1または10秒, 流量変化割合 25~50%) の実験を行っている。実験の大部分は、計算に用いたバーンアウトの関係式の適用範囲外であって、実験値と計算値の比較はなされていない。ただ数個の実験結果については、実験で得られたバーンアウト熱流束と計算で得られたバーンアウト熱流束の比が、0.7~1.1であることを示している。

Moxonら⁽³⁾は、圧力 1000 psi で、円管 (長さ 6または12ft, 軸方向一様加熱または不均一加熱) または 36本管束 (長さ12ft) を用いて、出力上昇 (テスト部に直列の抵抗をショートする) の実験を行っている。この実験では、実験で得られたバーンアウトが発生するまでの経過時間と、計算によって得られた同様の経過時間との比は、0.7~7.8であることを示している。Kastnerら⁽⁴⁾は、圧力 70~140 bar で 4本または9本の管束 (長さ 1または1.9m) を用いて、出力上昇 (経過時間 0.5~3秒) および流量低下 (経過時間 3~15秒) の実験を行っている。この実験では、出力上昇の場合、過渡時のバーンアウト熱流束は、定常の場合の約2倍に達する場合もあること、および、流量低下時の過渡バーンアウト熱流束は、ほとんど定常値の誤差内にあると報告されている。

Le Tourneauら⁽⁵⁾は、圧力 1000~1800 psi で、20本管束 (長さ 96インチ) を用いて、流量低下 (経過時間 1.6~7.7秒, (最終流量)/(初期流量) = 0.16~0.31) の実験を行っている。そして、実験で得られたバーンアウトが発生するまでの経過時間と、計算でえられた同様の経過時間

との比は、1.4～2.6であることを示している。

Shiralkar ら⁽⁶⁾は圧力800～1000 psiで、1本円管(長さ12 ft)、9本管束(長さ6 ft)、16本管束(長さ12 ft)を用いて、流量低下(主として、(最終流量)/(初期流量) = 0.1～0.8 となるように急速に流量を低下し、その状態を1～16秒保持する)および圧力低下((最終圧力)/(初期圧力) = 0.68～0.83 まで、1.9～2.6秒間に低下)の実験を行っている。実験で得られたバーンアウトが発生するまでの経過時間と計算で得られた同様の経過時間との比は、0～3の値を示している。

Gaspari ら^{(7),(8)}は、圧力50 kg/cm² abs. で、環状流路(長さ4 mで外管加熱)又は18本管束(長さ4 m)を用いて、流量低下(急速に流量0または初期値の半分とし、この際の圧力一定または減圧)および出力上昇((最終出力)/(初期出力) = 1.5～2.6 まで0.5～1.5秒間に上昇)の実験を行っている。この場合、実験で得られたバーンアウト発生までの経過時間と計算でえられた同様の経過時間との比は、0.58～2.3であることを示している。

浅田ら⁽⁹⁾は、圧力30 kg/cm²で、28本管束(長さ3.7 m)を用いて、流量低下((最終流量)/(初期流量) = 0.47～0.57 に0.3～2.0秒間で低下)の実験を行っている。そして、入口流量が約半分になる時間が1秒以上では、バーンアウト熱流束は、ほとんど定常バーンアウトデータのバラツキの中に入っているとしている。

以上で述べたように、過度バーンアウト実験はまだ数が限られており、過度時におけるバーンアウト発生機構に関する理論的説明も不十分な段階にある。このような観点から、過度バーンアウト研究の第一段階として、流量低下時のバーンアウトに伴う諸現象の概要を知り、定常時のバーンアウト現象との差を明らかにするため、常圧大気開放ループを用いて流量低下過度バーンアウト実験を行った。

なお、過度状態でのバーンアウト現象は、その発生時刻以前の沸騰流路内流動状態変化の影響を受けると考えられるので、本実験に先立ち、流量低下時の過度沸騰現象を調べる実験を行った。¹⁰⁾本実験は、以上の成果をふまえて、実際にバーンアウト現象を実現させたものである。

本報では、流量低下過度バーンアウト前後のテスト部壁温や流路圧力の挙動に、どのような非定常特有の現象が見られるか、過度変化の速度が大きくなると、バーンアウト発生時の入口流量は、定常の場合よりどの程度減少するか、などについての考察結果を報告する。

なお、付録Aにおいては、流量低下過度沸騰時の質量速度やクォリティなどの変化を、分離流モデルにより計算した結果を述べ、付録Bでは、本実験で得られた定常バーンアウト実験結果と既存の限界熱流束関係式との比較を行う。

2. 実験装置

2.1 実験装置概要

本装置は、常圧大気開放水ループで、貯水タンク、循環ポンプ、ローターメーター（浮子式流量計）、タービン流量計、流量調節用手動弁、圧縮空気作動流量制御弁、入口温度制御用ヒーター（PID制御）、テスト部および気水分離器よりなる。実験装置の概要および諸元をそれぞれ Fig. 2-1, Table 2-1 に示す。

テスト部は、内径 8 mm, 外径 10 mm, 長さ 800 mm の SUS 304 ステンレス製パイプで、直流直接通電により加熱した。テスト部の入口と出口には、圧力検出用タップを設置し、テスト部外壁には、直径 0.32 mm の C-A 熱電対 9 本をスポット溶接した。また、バーンアウト発生によりテスト部が極度に損傷するのを防ぐため、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をテスト部上半分の 3 点（Run 520712 以後はテスト部上下端と中間点の 3 点）に銀ろう付し、バーンアウトの検出と同時に供給電力を遮断した。Fig. 2-2 にテスト部の形状と計装取り付け位置を示す。

2.2 計装

本実験の測定・記録系のフローダイアグラムを Fig. 2-3 に示す。

同図に見られるように、本実験の測定項目のうち、入口流量 1 点、圧力信号 2 点（入口圧力、出口圧力、入口-出口差圧のうち 2 点）、テスト部壁温 5 点（TC 1~6 より 5 点選択）、および一部の試験では、バーンアウト検出器信号 1 点の計 8~9 点の信号は電磁オシログラフに記録された。また、テスト部加熱電流・電圧、テスト部入口水温、テスト部壁温信号の残りの点などはペンレコーダーに記録された。

なお、入口圧力および出口圧力については、圧力の振動状況を把握するため、原則として低域通過型フィルターを通さない信号を電磁オシログラフで記録し、一方圧力の平均的な挙動を調べるため、同じ信号を低域通過型フィルターを通してペンレコーダーで記録した。一部の試験ではバーンアウト検出器信号も同じペンレコーダーで記録した。入口-出口の差圧信号は常にフィルターを通さないで記録された。

さらに、テスト部入口水温測定用熱電対（シース径 1.6 mm の C-A 非接地型）信号は、入口水温を所定の設定値に保持するための入口温度制御用ヒーターの PID 制御信号としても用いた。

入口流量測定用タービン流量計出力信号は、ローターメーターで校正され、圧力検出器および差圧検出器の出力信号は、空気圧を利用して超精密級圧力計により校正された。

また、テスト部外壁にスポット溶接された熱電対の起電力は、テスト部に流れる約 1000 A 程度の直流電流により影響を受ける。この影響は溶接をやり直すことにより、かなり小さくすることができたが、それでも影響を除去できない場合には、前報⁽¹⁰⁾に述べたような方法で、テスト部

電圧による補正を行った。

2.3 実験方法

実験方法は、前報⁽¹⁰⁾で報告した過渡沸騰実験の場合と全く同様であり、以下にその手順を示す。

- (1) テスト部壁温測定用熱電対校正
- (2) 圧力計，タービン流量計校正
- (3) 圧縮空気作動流量制御弁を使用する場合には，作動速度，作動率を調節して，所定の流量減少過渡時間，流量減少範囲を設定する。
- (4) テスト部に電流を流し，所定の出力を得る。
- (5) PID制御により，入口水温を所定の値に $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内で保持する。
- (6) 手動式流調弁により，初期流量を所定の値に設定し，十分定常状態になるのを待つ。
- (7) 圧縮空気作動弁または手動式流調弁により流量を減少させ，入口・出口圧力，差圧，流量，壁温等の過渡変化を記録する。
- (8) 再び弁を開き，(3)または(4)に戻り，次の実験条件を設定する。
- (9) 一連の実験終了後，再び圧力計とタービン流量計の校正を行なう。

なお，流量の減少に際しては，解析や相互比較の便を考慮してなるべく直線状の流量低下を実現するため，流量減少過渡時間が0.1秒以上の場合には，すべて手動式流調弁により流量を直線状に減少させ，0.1秒以下の流量減少を実現する場合にのみ，圧縮空気作動弁を使用した。

Table 2-1. Characteristics of experimental apparatus.

ループ諸元	
使用圧力	大気圧開放ループ
最高使用温度	150°C
最高加熱電力	100 KW
循環水	水道水
ポンプヘッド	50 m以上
使用流量範囲	10~1 ℓ/min
テスト部諸元	
発熱部材質	SUS 304
内 径	8 mm
外 径	10 mm
加熱部長さ	800 mm

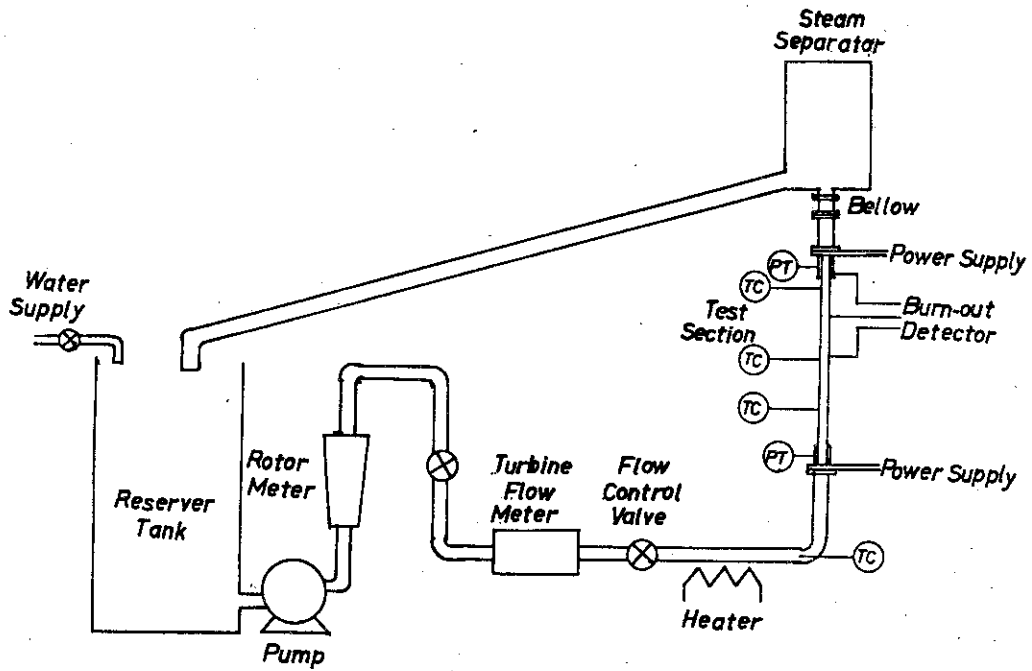


Fig. 2-1. Experimental apparatus

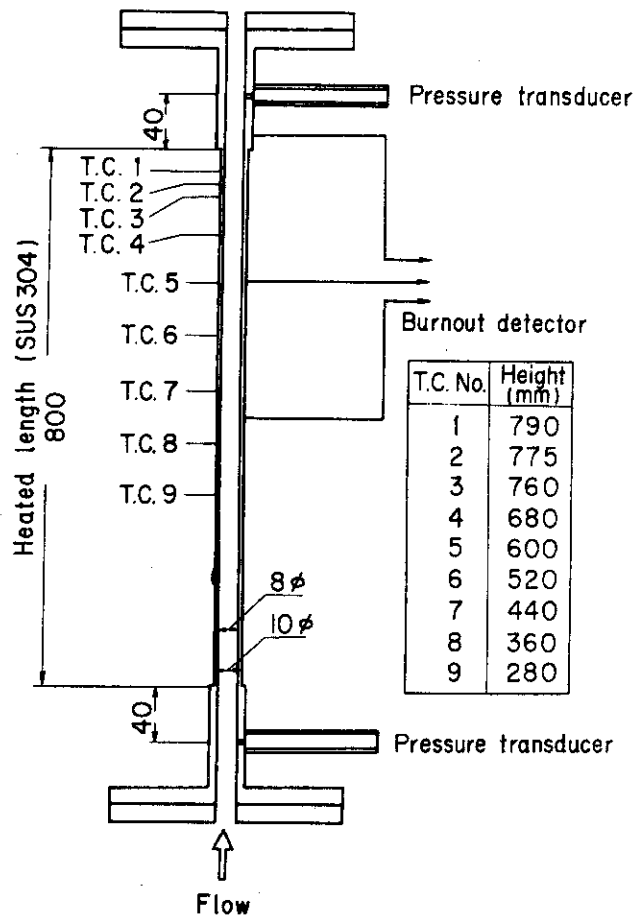


Fig. 2-2. Test section

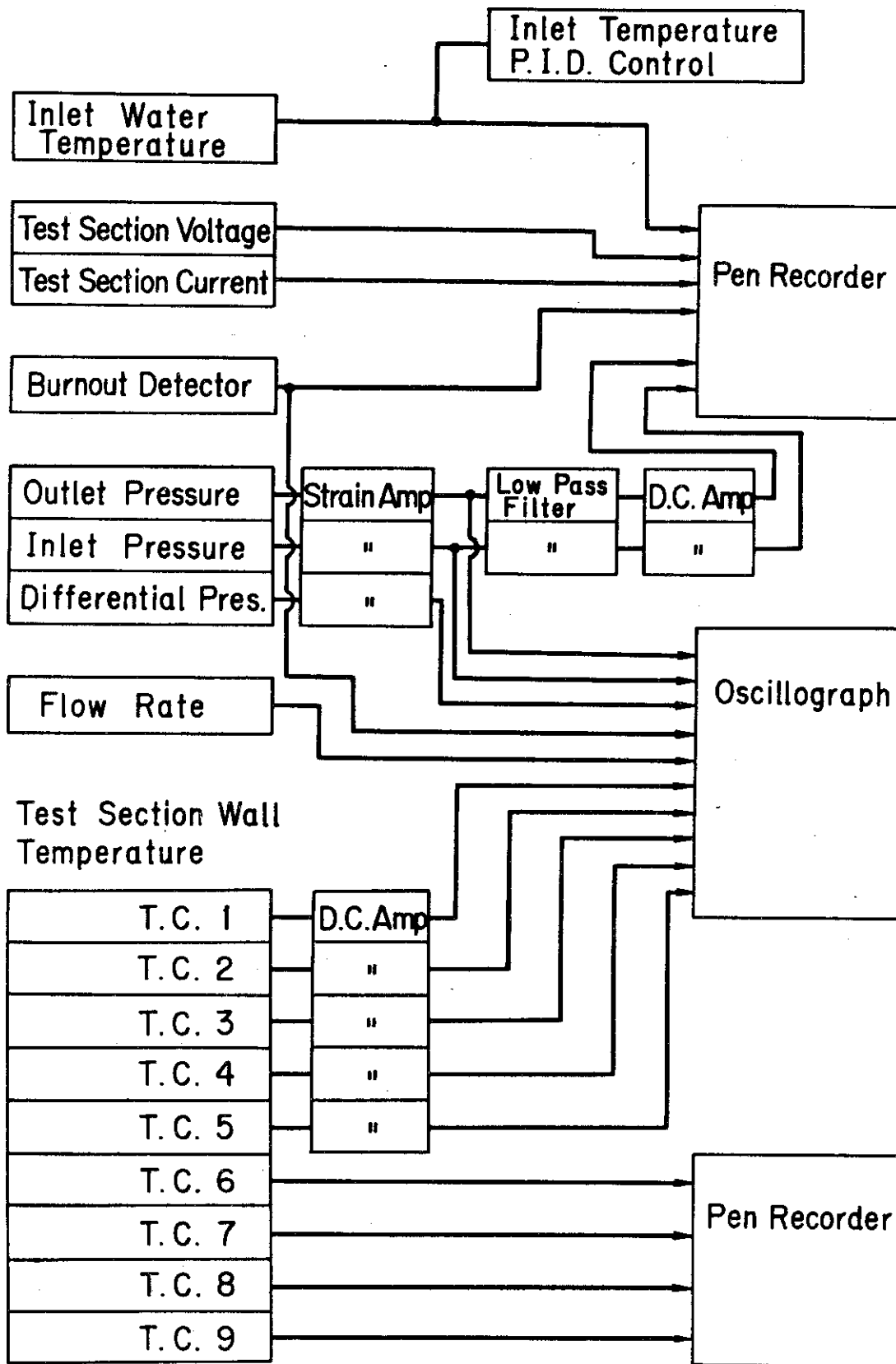


Fig. 2-3. Measurement and recording system

3. 実験結果

本実験は、いわゆる定常バーンアウト実験と流量低下バーンアウト実験とからなり、それぞれの実験範囲を Table 3-1 および 3-2 に示し、実験条件および結果の一覧表を Table 3-3, 3-4 にそれぞれ示す。

3.1 定常バーンアウト実験

本実験は、入口温度と入口流量を一定に保持し、出力をステップ状（5～10秒おきに約 0.04×10^6 kcal/hm² の増分）にゆっくりと上昇させてバーンアウトに至る実験（表 3-3 で出力上昇モードが“S”と表記した実験）と、ランプ状（約 0.05×10^6 kcal/hm²/sec の上昇率）に出力を上昇させてバーンアウトに至る実験（表 3-3 で“R”と表記した実験）の2種類の実験からなる。このうち、前者を定常バーンアウトとみなし、流量低下過渡バーンアウト現象を評価するための基礎データとした。一方、後者は必ずしも定常とはみなされないが、参考データとして Table 3-3 に同時に集録した。

同表において、バーンアウト時の沸騰長さ L_{BO} および、出口クォリティ Xe_{BO} は、次式により求めた。

まず、定常状態における L_{BO} は次式で与えられる。

$$L_{BO} = L \left[1 - 0.06 \frac{\rho_L W_{BO} (h_{sat}(P) - h_{in})}{\pi D L q''} \right] \quad (3-1)$$

ここで、(3-1)式における飽和エンタルピー h_{sat} は圧力 P の関数であり、本実験範囲では次式を用いた。

$$h_{sat}(P) = 59.872 + 55.023 P - 19.990 P^2 + 4.9110 P^3 - 0.65238 P^4 + 0.035448 P^5 \quad (3-2)$$

$$h_{sat} : \text{kcal/kg}, \quad P : \text{kg/cm}^2$$

(3-2)式の適用範囲は $P = 1 \sim 5$ kg/cm² である。

また(3-2)式を計算する際の圧力 P としては、次式のように、テスト部入口圧力から单相流水柱圧を補正した値を採用した。

$$P = P_{in} - 0.1 (L - L_{BO}) \quad (3-3)$$

以上(3-1), (3-2), (3-3)を連立させれば、 L_{BO} を計算できる。

次に、バーンアウト時の出口クォリティ Xe_{BO} は、熱バランスにより次式で計算される。

$$Xe_{BO} = \frac{\pi D L_{BO} q''}{0.06 W_{BO} \rho_L \lambda(P_{out})} \quad (3-4)$$

ここで、蒸発の潜熱 λ は次式により求めた。

$$\begin{aligned} \lambda(P) = & 563.77 - 33.180P + 11.480P^2 - 2.7945P^3 \\ & + 0.36930P^4 - 0.019995P^5 \end{aligned} \quad (3-5)$$

λ : kcal/kg, P : kg/cm²

(3-5)式の適用範囲は $P=1\sim 5$ kg/cm²である。

3.2 流量低下バーンアウト実験

Table 3-4は入口温度および出力を一定に保持し、流量を減少させた場合のバーンアウト実験の実験条件および主な結果の一覧表で、熱流束、入口温度、流量減少範囲、流量減少過渡時間、流速減少率、バーンアウト時流量および質量速度、流量突変の有無、初期およびバーンアウト時クォリティ、初期およびバーンアウト時の沸騰長さ、入口および出口の初期圧力、最大ピーク圧力、バーンアウト時圧力、温度プラト領域の長さを示している。このうち主な項目については以下で説明する。

熱流束(q'') : Table 3-4に表示した熱流束は印加電力を伝熱面積で割った公称値であり、いわゆる限界熱流束とは厳密には一致しない。

流量減少範囲 (Flow Reduction Range) : 初期流量から弁操作により制御した最終流量をそれぞれ (from), (to) の欄に示す。一方, Fig. 4-2(d)に見られるような急激な過渡変化の場合には、弁操作により流量を減少させた後、テスト部での蒸気発生急増による圧力損失増大のため、さらに流量が減少する場合があります、この時の最低流量を (min) の欄に示した。その他、流量減少の遅い場合でも、顕著な流量振動等により公称の最終値よりも低い流量が実現している場合にもこの欄に記した。

流量減少過渡時間 (Flow Transient Time) : 流量低下開始よりバーンアウトに至るまでの時間。ただし、例えば Fig. 4-2(d)に見られるように、流量低下終了後ある程度の時間をおいてバーンアウトが発生した場合は、流量低下に要した時間を(A)、流量低下終了後バーンアウト発生までの待ち時間を(B)として表示した。なお、ここでは壁温急上昇開始時点とバーンアウト発生点としたので、この時刻はバーンアウト検出器作動時刻よりも0.1~数秒程度早くなっている。

流速減少率 (Flow Reduction Rate) : 流量の低下がほぼ直線状とみなせるものについては、次式で流速減少率を定義した。

$$\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = (V_i - V_f) / \Delta t \quad (\text{cm/sec/sec}) \quad (3-6)$$

Δt としては前述の(A)欄に表示した値を用いた。なお、流量が直線状に減少したとみなせないものは "irg" と記した。

バーンアウト時流量および質量速度 (W_{BO} , G_{BO}) : テスト部入口での流量および質量速度を示す。なお、実験記録より真のバーンアウト発生ではないにもかかわらず、バーンアウト検出器が作動したと思われるものはこの欄に横線を記した。

流量突変の有無 (Flow Flashing) : 例えば Fig. 4-2(d)に見られるように、流速減少率が大きく、最終流量が小さい場合には急激な流量低下後、流量が突然変化する現象が見られた。こ

の現象を流量突変 (Flow Flashing) と定義し、これが顕著なものに○印、少し見られるものに△印をつけた。

初期およびバーンアウト時のクォリティ (Xe_i , Xe_{BO}) および沸騰長さ (L_{Bi} , L_{BO}): このうち Xe_i , L_{Bi} の求め方は、3-1の場合と全く同様である。すなわち、 L_{Bi} は次式で与えられる。

$$L_{Bi} = L \left[1 - 0.06 \frac{\rho_L W_i (h_{sat}(P) - h_{in})}{\pi D L q'} \right] \quad (3-7)$$

ここで、 $h_{sat}(P)$ は (3-2) 式で与えられ、圧力 P は (3-3) と同様に、次式で与えられる。

$$P = P_{in,i} - 0.1 (L - L_{Bi}) \quad (3-8)$$

(3-7), (3-3), (3-8) より L_{Bi} が計算できる。この時 Xe_i は次式で与えられる。

$$Xe_i = \frac{\pi D L_{Bi} q'}{0.06 W_i \rho_L \lambda(P_{out})} \quad (3-9)$$

$\lambda(P_{out})$ は (3-5) 式で与えられている。

一方、流量低下バーンアウト時には、沸騰長さの変化を伴う。流量低下を直線状と仮定した場合の、沸騰境界の過渡変化については、前報⁽¹⁰⁾の付録Bに解析結果を報告した。同付録中の (B3-3), (B3-4), (B3-8), (B3-9), (B3-10) の各式を用いることにより、バーンアウト発生時の沸騰長さ L_{BO} が計算できる。

この L_{BO} を用いて、バーンアウト時出口クォリティ Xe_{BO} を次式で計算した。

$$Xe_{BO} = \frac{\pi D L_{BO} q'}{0.06 \rho_L W_{BO} \lambda(P_{out,BO})} \quad (3-10)$$

$\lambda(P_{out,BO})$ は (3-5) 式を用いた。

なお、Table 3-4のうち、圧力値の不確かさ等のため推定値を使用した場合は () で示した。一方、 Xe_{BO} については、(3-10) 式の W_{BO} (入口流量) が流量低下過渡時におけるバーンアウト点の流量と等しいとは限らないので、全て () を付し、参考値とみなした。また、真のバーンアウトでない場合や Flow Flashing のある場合および流量低下が直線状とみなせないような場合には、 Xe_{BO} , L_{BO} は求めなかった。

入口および出口圧力 (P_{in} , P_{out}): 一般に流速減少率が大きい場合には、入口および出口圧力は一度ピークに達してから減少し、バーンアウトに至る傾向を示す。Table 3-4 に記した値のうち、初期圧力および最大圧力はフィルターを通してペンレコーダーに記録した値を用い、バーンアウト時圧力はフィルターを通さず電磁オシログラフに記録した値を採用した。(一部はペンレコーダーの記録値を採用) なお、バーンアウト発生時点での圧力の減少はかなり急激でしかも振動しているので、表記したバーンアウト時圧力には $\pm 0.2 \text{ kg/cm}^2$ 程度の誤差が含まれている。

電力遮断後の壁温挙動 (Temp. Plateau): 一般に、流速減少率が小さい場合や 3.1 節の定常バーンアウトの場合には、壁温は電力遮断後直ちに急冷しているが、流速減少率の大きい場合には電力遮断後も壁温は 1~2 秒程度高温に維持された後急冷している。これも流量低下バーン

アウトに特有な現象と考えられるので、電力遮断後の壁温が高温に維持される時間を Temp. Plateau と定義して、TC1~TC5の各熱電対について表示した。また、壁温が急上昇して記録用紙をはみ出したものは“ex”と記した。

なお、Table 3-4中*印は測定しなかったことを示す。

以下、第4章では、これらの実験結果に対する考察を行なう。

Table 3-1. Parameter ranges of steady state burnout experiments.

熱流束 (q'')	$0.98 \sim 1.79 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$
入口温度 (T_{in})	30, 50, 80°C
流量 (W)	0.8~2.0 ℓ/min
質量速度 (G)	$0.96 \sim 2.4 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$
出口クォリティ (X_{out})	0.307~0.719
沸騰長さ (L_B)	47.3~71.6 cm
入口圧力 (P_{in})	2.30~3.90 kg/cm^2
出口圧力 (P_{out})	1.20~2.10 kg/cm^2

Table 3-2. Parameter ranges of flow reduction transient burnout experiments.

熱流束 (q'')	$0.87 \sim 1.66 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$
入口温度 (T_{in})	30, 50, 80°C
初期流量 (W_i)	1.5~3.2 ℓ/min
初期質量速度 (G_i)	$1.8 \sim 3.8 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$
バーンアウト流量 (W_{BO})	0.0~1.7 ℓ/min
バーンアウト質量速度 (G_{BO})	$0.0 \sim 2.0 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$
流量減少過渡時間 (Δt)	0.07~70 sec
流速減少率 ($ \frac{\Delta V}{\Delta t} $)	0.24~1100 cm/sec/sec
初期出口クォリティ (X_{ei})	0.06~0.38
バーンアウト時出口クォリティ (X_{eBO})	0.41~1.28 以上 ^(*)
初期沸騰長さ (L_{Bi})	22~61 cm
バーンアウト時沸騰長さ (L_{BO})	52~75 $\text{cm}^{(*)}$
入口圧力ピーク値 ($P_{in,max}$)	2.5~4.6 kg/cm^2
出口圧力ピーク値 ($P_{out,max}$)	1.4~2.4 kg/cm^2

(*) バーンアウト時の出口クォリティは、3.2節に述べたような仮定に基づいて計算した。また前述したように流量の突変後、流量が約0.0~0.1 ℓ/min 近くでバーンアウトした場合は、出口クォリティおよび沸騰長さの計算は行なわなかった。そのような場合には当然この最大値よりも大きくなっている。

Table 3-3. Summary of conditions and results for steady state burnout experiments.

Run No	Final Heat Flux (kcal/hmf) $\times 10^4$	T _{in} (°C)	Power Increase Mode S = Step R = Ramp	Flow Rate WBo (l/min)			G _{Bo} (kg/hmf) $\times 10^4$	X _{eBo}	L _{Bo} (cm)	Final Pressure (abs. kg/cm ²)	
				Nominal	Max	Min				P _{in}	P _{out}
520615-16	1.56	50	S	2.0	2.7	1.5	2.4	0.322	51.8	3.85	2.05
17	1.60	"	S	2.0	3.1	1.3	2.4	0.334	52.4	3.90	2.10
520624-1	1.63	30	S	2.0	2.5	1.5	2.4	0.307	47.3	3.80	1.95
2	1.64	"	S	2.0	2.5	1.5	2.4	0.310	47.5	3.80	1.95
3	1.33	"	S	1.5	1.7	1.3	1.8	0.364	52.1	3.05	1.60
4	1.36	"	S	1.5	1.7	1.3	1.8	0.375	52.4	3.15	1.65
5	1.10	"	S	1.0	1.05	0.95	1.2	0.509	59.3	2.40	1.22
6	1.10	"	S	1.0	1.05	0.95	1.2	0.509	59.3	2.40	1.20
7	1.06	50	S	1.0	1.0	0.80	1.2	0.522	62.9	2.42	1.28
8	1.40	"	S	1.5	1.7	1.2	1.8	0.428	57.9	3.30	1.75
9	1.42	"	S	1.5	1.7	1.1	1.8	0.457	60.9	3.30	1.80
10	1.60	"	S	2.0	2.6	0.8	2.4	0.335	52.7	3.8±0.3	2.0±0.15
11	1.10	"	S	0.8	0.9	0.7	0.96	0.719	66.7	2.45	1.32
12	1.09	"	S	0.8	0.85	0.7	0.96	0.711	66.6	2.45	1.30
13	1.58	"	S	2.0	3.0	0.7	2.4	0.331	52.6	3.7±0.2	2.0±0.1
14	1.45	30	R	1.5	1.6	1.3	1.8	0.412	53.9	3.24	1.74
15	1.45	"	R	1.5	1.6	1.2	1.8	0.413	54.0	3.20	1.70
16	1.40	"	R	1.5	1.6	1.2	1.8	0.394	53.5	3.05	1.65
17	1.44	"	R	1.5	1.7	1.2	1.8	0.410	54.1	3.10	1.65
18	1.12	"	R	1.0	0.9	0.8	1.2	0.523	59.7	2.38	1.28
19	1.17	"	R	1.0	0.95	0.85	1.2	0.554	60.5	2.40	1.30
20	1.79	"	R	2.0	2.5	1.5	2.4	0.359	50.2	3.80	2.08

Table 3-3. (continue)

Run No	Final Heat Flux (kcal/hm ²) × 10 ⁶	T _{in} (°C)	Power Increase Mode S = Step R = Ramp	Flow Rate WBo (l/min)			G _{Bo} (kg/hm ²) × 10 ⁶	X _{eBo}	L _{Bo} (cm)	Final Pressure (abs. kg/cm ²)	
				Nominal	Max	Min				P _{in}	P _{out}
520624-21	1.78	30	R	2.0	2.5	1.5	2.4	0.356	50.2	3.75	2.10
520712-17	1.61	30	S	1.75	2.2	1.3	2.1	0.380	52.1	3.40	1.85
18	1.61	"	S	1.75	2.2	1.3	2.1	0.379	52.0	3.45	1.85
19	1.37	"	S	1.25	1.4	1.0	1.5	0.499	57.8	2.90	1.50
20	1.36	"	S	1.25	1.3	1.0	1.5	0.494	57.6	2.90	1.50
21	1.34	"	S	1.25	1.35	1.0	1.5	0.483	57.3	2.90	1.50
22	1.37	"	S	1.25	1.3	1.0	1.5	0.498	57.7	2.95	1.55
23	1.45	"	S	1.5	1.7	1.2	1.8	0.413	54.0	3.20	1.70
24	1.46	"	S	1.5	1.7	1.2	1.8	0.417	54.2	3.20	1.70
25	1.14	"	S	1.0	1.0	0.8	1.2	0.534	59.8	2.45	1.30
26	1.14	"	S	1.0	1.0	0.8	1.2	0.534	59.8	2.45	1.28
27	1.67	"	S	2.0	2.6	1.3	2.4	0.325	49.0	3.50	1.90
28	1.65	"	S	2.0	2.6	1.3	2.4	0.319	48.7	3.45	1.85
520720-1	1.43	80	R	1.5	2.0	0.5	1.8	0.493	65.3	3.5 ± 0.1	1.8 ± 0.15
2	1.39	"	S	1.5	2.1	0.5	1.8	0.477	64.9	3.5 ± 0.4	1.8 ± 0.2
3	1.17	"	R	1.0	1.0	0.8	1.2	0.640	68.7	2.75	1.38
4	1.12	"	S	1.0	1.0	0.8	1.2	0.608	69.3	2.70	1.35
5	1.31	"	R	1.25	1.4	0.8	1.5	0.557	67.4	*	1.60
6	1.26	"	S	1.25	1.4	0.9	1.5	0.532	66.9	*	1.60
7	1.01	"	R	0.8	0.8	0.7	0.96	0.706	71.6	2.32	1.20
8	0.98	"	S	0.8	0.8	0.7	0.96	0.683	71.5	2.30	1.20
9	1.35	"	R	1.75	2.5	0.6	2.1	0.376	61.5	3.6 ± 0.5	1.8 ± 0.2
10	1.35	"	S	1.75	2.2	1.0	2.1	0.376	61.5	3.6 ± 0.5	1.8 ± 0.2

Table 3-4. (continue)

Run No	q" (kcal/hm ²) × 10 ⁴	T _{in} (C)	Flow Reduction Range (l/min)		Flow Transient Time (sec) (A)+(B)	Flow Reduction Rate (cm/sec ²)	W _{Bo} (l/min)	Q _{Bo} (kg/hm ²) × 10 ⁴	Flow Flashing	Exit X _{ei}	Exit X _{eBo}	Boiling Length (cm)		Pressure (abs. kg/cm ²)						Temp. Plateau (sec)																	
			from	to								L _{Bi}	L _{Bo}	P _{in}	P _{out}	P _{in}	P _{out}	P _{in}	P _{out}	P _{in}	P _{out}	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5											
520621-9	1.37	50	2.4	1.5	1.2	12	1.5	1.8	-	0.198	0.014	436	674	3.35	1.80	-	-	32	*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
10	"	"	3.0	1.0	0.7	0.08+0.5	0.7	0.84	○	0.126	-	348	-	3.31	* 4.0	*	32	*	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.15													
11	"	"	3.0	0.6	1.8	42	0.7	0.84	-	0.126	0.010	349	653	3.30	* 3.55	*	32	*	1.4	1.4	1.4	1.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
12	"	"	3.0	1.2	6.5	8.7	1.3	1.6	-	0.128	0.049	353	697	3.22	1.80	3.42	-	32	*	<0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
13	"	30	3.0	0.7	1.3+0.2	59	0.7	0.84	○	0.0986	-	274	-	2.82	1.60	3.50	1.80	3.3	*	1.6	1.6	1.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
14	"	"	3.0	0.7	0.6	110	0.6	0.72	○	0.0988	-	274	-	2.81	1.60	3.55	1.84	3.2	*	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6		
15	"	"	3.0	0.6	0.1	660	0.1	0.12	○	0.0990	-	274	-	2.88	1.65	3.81	2.00	3.2	*	1.9	1.9	1.9	1.9	1.75	1.75	1.3											
16	"	"	3.0	1.0	0.7	660	0.9	1.1	○	0.0991	-	275	-	2.80	1.62	3.78	2.00	3.2	*	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
17	"	"	3.0	1.0	0.9	9.0	1.25	1.5	-	0.0983	0.048	272	65.0	2.84	1.64	3.20	1.70	3.2	*	0.25	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
18	"	"	3.0	1.3	1.1	4.5	1.4	1.7	-	0.0970	0.014	26.9	63.5	2.90	1.68	3.18	1.70	3.2	*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	"	"	2.5	1.3	1.7	1.6	1.3	1.6	-	0.157	0.067	36.2	66.0	2.80	1.60	3.15	-	3.1	*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	"	"	3.0	1.0	7.3	7.7	1.3	1.6	-	0.0991	0.060	27.5	65.2	2.80	1.60	3.15	1.65	3.1	*	0.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	"	"	3.0	1.0	5.4	12	1.2	1.4	-	0.0969	0.500	26.9	66.2	2.90	1.64	3.20	1.72	3.2	*	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	"	"	3.0	0.7	2.0	38	0.8	0.96	-	0.0989	0.812	27.4	69.9	2.81	1.62	3.28	1.75	3.1	*	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
23	"	"	3.0	0.7	2.3	33	0.8	0.96	-	0.100	0.821	27.8	60.0	2.75	1.61	3.24	1.70	3.1	*	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
24	"	"	3.0	0.7	1.4	55	0.7	0.84	-	0.0991	0.909	27.5	68.7	2.80	1.62	3.44	1.80	3.2	*	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
25	"	"	3.0	1.4	2.6	2.0	-	-	-	0.0924	-	25.6	-	3.10	1.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
520624-22	1.37	30	3.0	0.9	0.5	660	0.7	0.84	-	0.101	0.040	28.2	66.9	2.70	1.60	3.62	1.98	3.3	*	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
23	"	"	3.0	0.9	0.6	660	0.7	0.84	-	0.0996	0.104	27.6	67.4	2.78	1.62	3.63	1.95	3.0	*	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
24	"	"	3.0	1.2	0.9	330	1.2	1.4	-	0.102	0.532	28.2	68.9	2.70	1.62	3.50	1.90	2.8	*	0.25	0.2	0.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	"	"	3.0	0.8	0.1	660	0.1	0.12	○	0.010	-	27.0	-	2.76	1.64	4.0	2.05	3.1	*	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	ex	
520625-1	1.37	30	3.0	1.2	1.1	66	1.25	1.5	-	0.0991	0.049	27.5	66.9	2.80	1.62	3.34	1.34	3.0	*	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	"	"	3.0	1.2	1.3+0.4	45	1.25	1.5	-	0.0996	0.049	27.6	66.7	2.78	1.62	3.29	1.78	3.1	*	0.17	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 3.4. (continue)

Run No	q' (kcal/hmf × 10 ⁶)	T _{in} (°C)	Flow Reduction Range (l/min)		Flow Transient Time (sec) (A)+(B)	Flow Reduction Rate (cm ² /sec ²)	W _{Bo} (l/min)	G _{Bo} (kg/hmf × 10 ⁶)	Flow Flashing	Exit		Quality	Boiling Length (cm)		Pressure (abs. kg/cm ²)						Temp. Plateau (sec)				
			from	to						X _{ei}	X _{eBo}		L _{Bi}	L _{Bo}	Initial	Maximum	Burnout	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5			
													P _{in}	P _{out}	P _{in}	P _{out}	P _{in}	P _{out}	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5		
520714-6	1.19	30	3.1	0.75	0.94 + 0.63	83	0.2	0.24	○	0.0706	-	0.660	234	-	212	140	313	168	26	14	ex	ex	ex	ex	ex
7	"	"	3.0	0.7	1.2 + 0.52	71	0.7	0.84	○	0.0751	-	0.670	241	-	224	140	310	161	27	15	27	27	*	24	0.15
8	"	"	3.0	0.7	2.2 + 0.05	35	0.7	0.84	-	0.0743	0.806	0.606	239	600	227	140	292	155	28	14	29	29	*	19	0.0
9	"	"	3.0	0.6	4.0 + 0.2	20	0.65	0.78	△	0.0735	0.940	0.640	236	654	230	140	280	150	27	14	30	30	*	19	0.15
10	"	"	3.0	0.8	7.4	9.6	0.9	1.1	-	0.0730	0.627	0.627	234	605	232	140	284	151	26	13	29	29	*	0.0	0.0
11	"	"	3.0	0.7	5.1	15	0.85	1.0	△	0.0727	0.660	0.660	233	604	233	142	288	154	27	14	03	03	*	0.0	0.0
12	"	"	3.0	0.65	9.6	8.1	0.85	1.0	△	0.0743	0.670	0.670	239	615	227	140	270	147	27	14	25	25	*	0.0	0.0
13	"	"	3.0	0.75	16	4.5	1.0	1.2	-	0.0709	0.553	0.553	228	592	240	144	275	147	27	14	32	30	*	0.0	0.0
14	"	"	3.0	0.9	32	2.2	1.0	1.2	-	0.0697	0.558	0.558	223	599	245	145	278	147	26	13	1.6	0.2	*	0.0	0.0
15	"	"	2.0	0.95	37	0.95	1.0	1.2	-	0.190	0.558	0.558	407	598	260	140	270	147	27	13	0.3	0.0	*	0.0	0.0
16	"	"	2.0	0.95	25	1.4	1.05	1.3	-	0.189	0.520	0.520	404	588	260	140	270	150	27	13	0.1	0.0	*	0.0	0.0
17	"	"	3.0	0.9	18	3.9	1.0	1.2	-	0.0735	0.554	0.554	236	593	230	140	272	148	27	14	ex	02	*	0.0	0.0
18	"	"	3.0	0.75	12.5	6.0	1.0	1.2	-	0.0735	0.550	0.550	236	590	230	140	275	150	27	13	24	26	*	0.0	0.0
19	"	"	3.0	0.75	12	6.4	0.8	0.96	-	0.0757	0.730	0.730	243	634	222	140	269	148	25	13	28	27	*	0.1	0.0
20	"	"	3.0	0.6	4.6	17	0.6	0.72	-	0.0735	1.01	1.01	236	648	230	140	293	159	27	14	31	30	*	0.0	0.0
21	"	"	3.0	0.6	3.4 + 0.15	24	0.65	0.78	-	0.0751	0.933	0.933	241	649	224	140	282	151	26	14	31	30	*	19	0.1
22	"	"	3.0	0.65	17	17	0.75	0.90	-	0.0735	-	0.635	236	-	230	140	303	164	26	14	30	30	*	0.0	0.0
23	"	"	3.0	0.65	0.74	105	0.15	0.18	○	0.074	-	0.630	239	-	228	140	329	170	25	14	30	31	*	26	2.0
24	"	"	3.0	0.7	0.60	130	0.15	0.18	○	0.0751	-	0.641	241	-	224	140	337	171	25	15	28	28	*	27	2.0
25	"	"	3.0	1.2	0.1	660	-	-	○	0.075	-	0.640	240	-	225	140	325	170	-	-	-	-	*	-	-
26	"	"	3.0	0.9	0.07 + 0.72	1100	0.15	0.18	○	0.0739	-	0.639	236	-	229	140	365	185	27	14	38	44	*	37	3.1
27	1.66	"	3.0	0.75	0.09 + 0.45	830	0.1	0.12	○	0.148	-	0.637	337	-	340	190	462	238	37	19	33	33	*	31	2.1
28	"	"	3.0	0.7	0.1	160	0.1	0.12	○	0.148	-	0.636	336	-	342	191	430	227	36	19	31	32	*	26	1.8
29	"	"	3.0	0.7	1.2 + 0.1	75	1.05	1.3	-	0.148	0.748	0.748	337	596	340	190	418	220	36	19	20	20	*	0.0	0.0

Table 3.4. (continue)

Run No	q" (kcal/hmf) × 10 ⁶	T _{in} (C)	Flow Reduction Range (L/min)		Flow Transient Time (sec) (A) + (B)	Flow Reduction Rate (cm/sec ²)	W _{Ho} (L/min)	Q _{Ho} (kg/hmf) × 10 ⁶	Flow Flashing	Exit X _{ce}	Exit X _{ceHo}	Boiling Length (cm)		Pressure (abs. kg/cm ²)				Temp. Plateau (sec)					
			from	to								L _{Bi}	L _{Ho}	Initial P _{in}	Initial P _{out}	Maximum P _{in}	Maximum P _{out}	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	
520720-16	1.19	80	20	0.5	5.0	10	0.84	-	0.271	0.967	574	722	3.28	1.78	3.30	1.8	2.9	1.5	0.6	2.1	*	0.0	0.0
17	"	"	20	1.0	7.0	4.7	1.2	-	0.271	0.649	574	693	3.28	1.80	3.30	1.80	2.9	1.5	0.4	0.4	*	0.0	0.0
18	"	"	20	1.0	11	3.0	1.2	-	0.270	0.650	573	694	3.30	1.80	3.30	1.80	2.9	1.5	1.4	0.0	*	0.0	0.0
19	"	"	20	1.0	27	1.2	1.3	-	0.271	0.580	575	682	3.26	1.80	3.31	1.80	3.0	1.5	1.0	0.0	*	0.0	0.0
20	1.02	"	20	0.5	0.1+0.45	500	0.0	○	0.229	-	553	-	2.95	1.60	3.29	1.72	2.7	1.3	2.5	2.5	*	2.5	0.4
21	"	"	20	0.4	0.6+0.35	78	0.48	○	0.224	-	557	-	2.91	1.60	3.0	1.60	2.3	1.4	2.0	2.3	*	0.4	0.0
22	"	"	20	0.4	1.5+0.25	35	0.48	-	0.224	0.513	557	758	2.90	1.60	2.92	1.60	2.3	1.3	1.7	0.6	*	0.2	0.0
23	"	"	20	0.6	2.1+0.35	22	0.72	-	0.224	0.979	556	736	2.92	1.60	2.92	1.60	2.4	1.3	2.0	0.6	*	0.0	0.0
24	"	"	20	0.6	4.1	11	0.72	-	0.223	0.971	555	730	2.93	1.60	2.93	1.60	2.4	1.3	2.3	1.9	*	0.0	0.0
25	"	"	20	0.6	6.4	7.3	0.84	-	0.224	0.823	557	721	2.90	1.60	2.92	1.60	2.4	1.3	1.6	0.8	*	0.0	0.0
26	"	"	20	0.6	10.5	4.4	0.96	-	0.224	0.706	557	707	2.89	1.59	2.89	1.59	2.6	1.3	1.4	0.3	*	0.0	0.0
27	"	"	20	0.6	15	3.1	0.96	-	0.224	0.709	557	710	2.90	1.60	2.90	1.60	2.5	1.3	2.3	0.4	*	0.0	0.0
28	"	"	20	0.7	27	1.7	0.96	-	0.224	0.710	557	711	2.90	1.60	2.90	1.60	2.5	1.3	0.2	0.0	*	0.0	0.0
29	0.87	"	20	0.4	0.2+0.5	270	0.60	○	0.184	-	539	-	2.56	1.40	2.83	1.52	2.1	1.3	0.1	0.1	*	0.0	0.0
30	"	"	20	0.4	0.4+0.52	130	0.48	○	0.184	-	539	-	2.54	1.40	2.70	1.40	2.1	1.2	2.1	3.0	*	0.0	0.0
31	"	"	20	0.4	0.55+0.5	97	0.48	○	0.184	-	539	-	2.56	1.40	2.67	1.40	2.1	1.2	1.5	0.4	*	0.0	0.0
32	"	"	20	0.6	7.0+3.0	6.6	0.72	-	0.185	0.826	540	732	2.53	1.40	2.53	1.40	2.1	1.1	ex	-	*	0.0	0.0
33	"	"	20	0.4	0.8+0.45	66	0.48	△	0.183	0.29	535	754	2.60	1.40	2.60	1.40	2.1	1.2	1.3	0.3	*	0.0	0.0
34	"	"	20	0.4	3.2+0.4	17	0.60	-	0.185	0.10	540	743	2.53	1.40	2.53	1.40	2.1	1.1	1.7	0.3	*	0.0	0.0
35	0.88	"	20	0.4	5.8	9.2	0.48	-	0.180	0.125	533	748	2.59	1.42	2.59	1.42	2.1	1.1	0.5	0.0	*	0.0	0.0
36	0.87	"	20	0.4	8.7	6.1	0.48	-	0.185	0.127	541	751	2.52	1.42	2.52	1.42	2.1	1.1	0.4	0.0	*	0.0	0.0
37	"	"	1.5	0.5	15	2.2	0.60	-	0.275	0.10	604	742	2.54	1.40	2.54	1.40	2.1	1.1	2.3	0.0	*	0.0	0.0
38	0.86	"	20	0.4	35	1.5	0.48	-	0.182	0.126	540	753	2.50	1.40	2.50	1.40	2.1	1.1	2.1	0.0	*	0.0	0.0

4. 実験結果の検討

4.1 バーンアウト発生前後の諸現象

4.1.1 定常バーンアウト時の壁温および圧力挙動

流量低下過度バーンアウト時特有の諸現象と対比するため、まず定常バーンアウト時の壁温や圧力の挙動を調べた。

Fig. 4-1(a)(b)は、入口温度を 30°C に保ち、流量をそれぞれ $1.5 \ell/\text{min}$ ($1.8 \times 10^6 \text{ kg}/\text{hm}^2$, $50 \text{ cm}/\text{sec}$) および $1.0 \ell/\text{min}$ ($1.2 \times 10^6 \text{ kg}/\text{hm}^2$, $33 \text{ cm}/\text{sec}$) に保持しつつ、出力を約10秒おきにそれぞれ 0.04 または $0.02 \times 10^6 \text{ kcal}/\text{hm}^2$ の増分でステップ状にゆっくり上昇させた場合の測定記録例である。なお、出力をステップ状に上昇させるごとに、蒸気発生に伴うテスト部圧力損失の増大により流量が低下するので、常に手動式流調弁を操作して流量を一定に保持するようにした。

同図よりまず壁温挙動を見ると、テスト部出口より $1 \sim 4 \text{ cm}$ のTC信号(TC1~3)は、バーンアウトが近づくにつれて激しい振動を示した後、急上昇してバーンアウトに至っている。そしてバーンアウト発生による壁温急上昇をバーンアウト検出器が検出し、電力を遮断している。

また同図において、バーンアウトに至る少し前の出力レベルにおいて、TC5(出口より 20 cm 上流)の信号が約 12°C (Fig. 4-1(a)) または約 6°C (Fig. 4-1(b))程度ステップ状に低下する現象が見られる。一方、TC1~4についても同図の時間範囲より以前に、同様な壁温のステップ状低下が観察されており、このような壁温のステップ状低下現象は、バーンアウトが近づくにつれ上流の方に転移していることがわかった。

なお、このような定常バーンアウト実験においては、例外なく電力遮断と同時に壁温は急冷している。

次に圧力挙動を見ると、入口圧力と入口-出口差圧はともにバーンアウト時点近くで、周期約 0.2 秒程度、振幅約 $\pm 0.3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 程度で振動しているが、そのレベルはバーンアウト発生までほとんど変化していない。

また、流量も圧力と同じ周期で振動していて、一定に保持するレベルが高い程、振幅が大きくなっている。

4.1.2 流量低下過度バーンアウト時の壁温、圧力、流量等の挙動

Fig. 4-2(a)~(d)に、熱流束を $1.37 \times 10^6 \text{ kcal}/\text{hm}^2$ 、入口温度を 30°C に保持して、入口流量を $3 \ell/\text{min}$ ($100 \text{ cm}/\text{sec}$) から $1.3 \ell/\text{min}$ ($43 \text{ cm}/\text{sec}$) 以下に、ほぼ直線状に低下させてバーンアウトを発生させた場合の、流量、入口圧力、出口圧力、壁温(TC1~5)、バーンアウト検出器信号などの測定記録例を、流速減少率の小さい方から大きい方の順に示す。また、同図に示した実験例の実験条件および実験結果を、表3-4から抜粋してTable 4-1に示す。

以下では、流速減少率が大きくなるにつれ、壁温、圧力、流量などが、流量低下過度バーンアウト前後にどのような挙動を示すかについて、Fig. 4-2(a)~(d)の各図に基づいて述べる。

(a) Fig. 4-2(a) ($\Delta t = 12 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 4.5 \text{ cm/sec/sec}$) の場合

- ① バーンアウト前の壁温低下現象：定常の場合 (Fig. 4-1(a), (b)) と同様に、バーンアウトが近づくとつれ、テスト部出口から順番に壁温がステップ状に低下する現象が見られる。壁温低下量は約 15°C で、壁温低下開始より約 3 秒後にテスト部出口近くの壁温 (TC1~3) が急上昇し、バーンアウトの発生を示している。
- ② 電力遮断後の壁温挙動：バーンアウトの検出による電力遮断直後に、全ての壁温は急冷している。
- ③ 圧力挙動：入口圧力と入口-出口差圧は共に、約 6~7 ヘルツの周波数で振動し、バーンアウトが近づくとつれて振巾が大きくなっている。ただし、圧力レベルは流量低下にもかかわらず、バーンアウト発生まであまり変化していない。
- ④ 流量挙動：同図に見られるように、直線状流量低下といっても、実際にはかなり振動しており、振動周波数は圧力振動と同じく 6~7 ヘルツである。

(b) Fig. 4-2(b) ($\Delta t = 7.4 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 9.0 \text{ cm/sec/sec}$) の場合

- ① バーンアウト前の壁温低下現象：(a)の場合とほぼ同様な傾向を示し、特に、壁温低下現象がテスト部出口より順々に上流に転移する様子が明確に示されている。壁温低下開始よりバーンアウト発生まで約 2 秒程度と、(a)の場合より少し短かくなっている。
- ② 電力遮断後の壁温挙動：TC1 (出口より 1 cm) は、電力遮断後も約 0.3 秒間、約 240°C 程度の高温に維持されてから急冷している。他の TC はほぼ電力遮断後直ちに急冷している。
- ③ 圧力挙動：(a)の場合とほぼ同様な挙動を示す。
- ④ 流量挙動：(a)の場合とほぼ同様な挙動を示す。

(c) Fig. 4-2(c) ($\Delta t = 2.0 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 38 \text{ cm/sec/sec}$) の場合

- ① バーンアウト前の壁温低下現象：壁温低下量は最大約 7°C (TC3) と小さくなり、壁温低下開始よりバーンアウト発生までの時間も約 0.3 秒と、短かくなっている。
- ② 電力遮断後の壁温挙動：TC1 は電力遮断後も約 1.8 秒間高温に維持されてから急冷している。また、TC2 (出口より 2.5 cm)、TC3 (出口より 4 cm) は 0.3 秒間程高温に維持されてから少し低下し、TC1 と同時に急冷している。TC4, 5 については電力遮断後直ちに急冷している。
- ③ 圧力挙動：圧力振動の周期がバーンアウト発生直前には長くなる傾向を示している。また、入口圧力のレベルがバーンアウト発生直前に約 0.5 kg/cm^2 程度上昇し、少し減少を開始してからバーンアウトに至っている。
- ④ 流量挙動：バーンアウト発生時の流量は 0.8 l/min ($0.96 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$) と、(a)の場合の 1.4 l/min ($1.7 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$) に比べ、かなり減少している。

(d) Fig. 4-2(d) ($\Delta t = 0.12 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 660 \text{ cm/sec/sec}$) の場合

- ① バーンアウト前の壁温低下現象：(a), (b), (c) で見られたような、バーンアウト前の壁温低下現象は TC3 にわずかに見られる他はほとんど見られない。
- ② 電力遮断後の壁温挙動：電力遮断後の壁温高温維持時間は 1.95 秒 (TC1, 2), 1.75 秒

(TC3, 4), 1.3秒 (TC5) と長くなり, 出口より20cm以内のすべてのTCにおいてこの現象が見られる。

- ③ 圧力挙動: バーンアウト発生直前には, 圧力振動周期は長くなり, 振巾も大きくなっている。また, 入口圧力はバーンアウト発生直前に初期値よりも平均レベルで約 0.9 kg/cm^2 上昇し, ピークに達してから減少を開始して約 0.2秒後にバーンアウトが発生している。
- ④ 流量挙動: (a), (b), (c) の場合と異なり, (d) の場合には, 弁操作による流量低下が終了してから, バーンアウト発生前に, 入口流量が突然大きく振動する現象が見られる。また, 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。

次に, 熱流束や入口温度のパラメータ効果の比較のため, 入口温度 30°C で熱流束が約 $1.20 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ の場合を Fig. 4-3(a)~(c) に, 熱流束が $1.66 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ の場合を Fig. 4-4(a)~(c) に, それぞれ流速減少率の小さい方から順に示す。また, 入口温度 80°C で熱流束が $1.19 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ の場合について Fig. 4-5(a)~(d) に, 熱流束が $0.87 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ の場合を Fig. 4-6(a)~(c) に, 流速減少率の小さい方から順に示す。以上の実験例の実験条件および結果も, Table 3-4 から抜粋して Table 4-1 に示してある。

以上の Fig. 4-3~4-6 の各場合について, バーンアウト発生前後の壁温, 圧力, 流量などの挙動の定性的な相互比較を行なった結果, 以下の諸点が明らかとなった。

(i) Fig. 4-3(a)~(c) (熱流束 = $1.17 \sim 1.20 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 入口温度 = 30°C) の場合

- ① バーンアウト前の壁温低下現象: Fig. 4-2 ほど明確な壁温低下は見られない。
- ② 電力遮断後の壁温挙動: Fig. 4-2 と特に顕著な差はないが, 電力遮断後に高温維持現象が出現する流速減少率はやや大きくなる傾向にある。
- ③ 圧力挙動: Fig. 4-2 より熱流束が低いので, 圧力レベルは下がるが, 流量低下に伴う圧力変化の傾向には, 特に差は見られない。
- ④ 流量挙動: Fig. 4-3(c) (流速減少率 71 cm/sec/sec) に見られるように, 流量低下終了後の流量の突変が出現し始める流速減少率は小さくなっている。

(ii) Fig. 4-4(a)~(c) (熱流束 = $1.66 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 入口温度 = 30°C) の場合

- ① バーンアウト前の壁温低下現象: Fig. 4-2 の場合と特に顕著な差はない。
- ② 電力遮断後の壁温挙動: Fig. 4-2 に比べて, より小さな流速減少率において, 電力遮断後の高温維持現象が見られ, 高温維持時間も長くなる傾向がある。
- ③ 圧力挙動: Fig. 4-2 に比べて, 圧力レベルが高くなり, バーンアウト直前の入口圧力上昇量も大きくなっている。
- ④ 流量挙動: 流量低下終了後の流量突変が出現し始める流速減少率は Fig. 4-2 に比べて大きくなり, 突変の程度も小さくなっている。

(iii) Fig. 4-5(a)~(d) (熱流束 = $1.19 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 入口温度 = 80°C) の場合

この場合は熱流束がほぼ同じで, 入口温度が 30°C の Fig. 4-3 の場合と比較する。

- ① バーンアウト前の壁温低下現象: (a), (b) のように流速減少率が小さい場合には, テスト部出口から順に壁温がステップ状に低下する現象が明確に現われていて, 流速減少率増大により壁温低下現象は見られなくなる。
- ② 電力遮断後の壁温挙動: 水温 80°C の場合には一般に(a)のように流速減少率がかなり小さい

時でも、TC1はバーンアウト発生による電力遮断後も直ちに急冷していない。また、(a)～(d)に見られるように、流速減少率増大とともに、高温維持現象が見られる領域は上流に転移していき、その出現し始める流速減少率は水温30℃の場合よりも小さくなる傾向にある。

- ③ 圧力挙動：バーンアウト発生直前の入力圧力上昇現象は、(d)のように流速減少率がかなり大きくなってから見られ、しかもその上昇量は入口温度30℃の場合よりもずっと小さくなっている。
- ④ 流量挙動：(c)、(d)の場合に見られるように、流速減少率が大きくなると、弁操作による流量低下終了直後に、流量が約0.1秒間程急に増大してから0となり、0.2～0.4秒後にバーンアウトが発生している。Fig. 4-3(c)に見られたような、流量低下終了後の激しい流量振動は見られない。

(IV) Fig. 4-6(a)～(c) (熱流束 = 0.87×10^6 kcal/hm², 入口温度 = 80℃) の場合

- ① バーンアウト前の壁温低下現象：(c)のように、流速減少率が270 cm/sec/secと大きい場合にも、壁温低下現象が見られ、TC1, 2が急上昇を開始してからもTC4, 5は低下を続けており、バーンアウト現象が出口の近くに限定されていることを示している。また、熱流束が低い場合バーンアウト発生時の壁温上昇速度もFig. 4-5や、入口温度30℃の場合に比べてかなりおそくなっている。
- ② 電力遮断後の壁温挙動：Fig. 4-6の場合は、他の場合よりも外面温度がかなり高温に達してから電力が遮断されているので、その後の壁温挙動を他の場合と比較するには問題があるであろう。ここでは、TC1のみに注目すると、(a)～(c)より明らかなように、流速減少率が増大すると高温維持時間がむしろ減少し、今までの例と逆の傾向を示している。また、急冷の速度もかなりゆるやかになっている。
- ③ 圧力挙動：(a)～(c)とも、バーンアウト発生時の入口および出口圧力は、流量低下前の値よりかなり小さくなっている。また、Fig. 4-5の場合と同様に、バーンアウト直前の入口圧力上昇が見られる流速減少率は入口温度30℃の場合よりもかなり大きくなり、その上昇量は例えば(c)の場合で約0.3 kg/cm²とかなり小さくなっている。
- ④ 流量挙動：Fig. 4-5と異なり、流速減少率270 cm/sec/secの(c)の場合には、激しい流量振動が見られる。また、バーンアウト発生時の流量も0ではない。

以上に述べたように、入口温度80℃、熱流束 0.87×10^6 kcal/hm² の実験例には、バーンアウト発生前後の壁温や圧力の挙動に、かなり顕著な特徴が見られる。

4.1.3 特異な実験例

ここでは、流量低下バーンアウト実験において、バーンアウト検出器の特殊な設定等により得られた特異な実験例の代表的なものを示す。なお、ここに示す実験例の実験条件等はTable 4-1にまとめて示してある。

Fig. 4-7, Fig. 4-8は、バーンアウト検出器を作動させなかったため、壁温が異常に急上昇した例である。

Fig. 4-7(a), (b)は、熱流束 1.66×10^6 kcal/hm², 入口温度30℃の場合で、(a)はテスト部の赤熱を確認してから手動により電力を遮断した例で、(b)はバーンアウト検出器を作動させず、壁

温の異常上昇が生じ、テスト部が完全に破断した例である。(a), (b)ともバーンアウト発生時の入口流量は1ℓ/min以上であるが、流量は激しい振動を伴っている。また、両者とも流速減少率はかなり小さい(a): 4.5 cm/sec/sec, (b): 15 cm/sec/sec)ので、バーンアウト発生前に出口の壁温から順にステップ状低下をする現象は明確に現われているが、入口圧力レベルの上昇は小さい。

Fig. 4-8(a), (b)は入口温度30°Cで、熱流束は、(a): 1.19×10^6 kcal/hm², (b): 1.37×10^6 kcal/hm²の場合で、(a)は手動による電力遮断の例、(b)はバーンアウト検出器リード線の銀ろうが溶け落ちたことにより電力が遮断された例である。この場合はFig. 4-7と異なり、流速減少率は、(a): 83 cm/sec/sec, (b): 660 cm/sec/secとかなり大きく、バーンアウト発生時の入口流量は完全に0となっている。また、バーンアウト発生前の壁温低下現象は現われていないが入口圧力の上昇は顕著である。

Fig. 4-9(a), (b), (c)は、真のバーンアウト発生ではないにもかかわらず、バーンアウト検出器が作動して電力が遮断された例を示している。

(a)は流速減少率0.6 cm/sec/secで流量を低下途中、約1.5 ℓ/minの時、(b)は流速減少率37 cm/sec/secで流量を約1.5 ℓ/minに低下してから約2.5秒後に、それぞれバーンアウト検出器が作動して電力が遮断されているが、バーンアウト発生時特有の壁温急上昇は見られない。なお電力遮断時点で壁温信号が飛び上っているのは、加熱電流の効果や、直流増巾器の特性によるもので、真の温度信号ではない。

(a), (b)とも熱流束は 1.37×10^6 kcal/hm²、入口温度は30°Cの場合で、この条件下での定常バーンアウト時入口流量は約1.5 ℓ/minである。(Table 3-3参照)

一方、(c)は熱流束 1.19×10^6 kcal/hm²、入口温度30°Cで、660 cm/sec/secの流速減少率により流量を約1.0 ℓ/minに低下してから、約3.8秒後に電力が遮断されている。また、この条件下での定常バーンアウト時入口流量はTable 3-3より約1.0 ℓ/minであることがわかる。

すなわち、(a), (b), (c)とも、定常バーンアウト発生時の流量レベルにおいて、かなりの時間経過後に電力が遮断されており、壁温の顕著な急上昇は見られないにしても、バーンアウト発生直前の熱的な不安定性を感知して、バーンアウト検出器が作動したものと思われる。

特に、(c)の場合には、流量低下終了後、入口圧力は一度ピークに達し、かつTC1, 2がそれぞれ約68°C, 48°C程度の上昇を示した後、再び低下し始めてから約1.8秒後に電力が遮断されるという特異な現象が現われている。これは、バーンアウト検出器の設定によっては、この例に見られるような壁温の一時的上昇により作動する可能性を示しており、バーンアウトの実験に際しては注意しなければならない。

次節以降では、以上に述べたような、流量低下バーンアウト現象に特有な、壁温、圧力、流量等の挙動と、流速減少率との関係を調べ、どの程度の流速減少率において、定常バーンアウトと過度バーンアウトの相異が現われるかについて述べる。

4.2 壁温変化における非定常効果

4.1で述べたように、流速減少率がある程度以上大きくなると、テスト部出口近く（バーンアウト発生場所）の壁温は、バーンアウト発生による電力遮断後も、約240℃の高温に0.1～3秒程度維持されてから急冷する現象が見られ、流速減少率がさらに増大すると、この現象が見られる領域は上流に向かって拡大し、高温維持時間も増加する傾向にある。

このように、電力遮断後の壁温挙動に定常時との差が生じるのは、流速減少率が大きくなると、流量低下による過度バーンアウト発生時の二相流動状態が、定常バーンアウトの場合とかなり異なってくるためと考えられる。

Fig. 4-10は、テスト部最上部熱電対TC1（出口より1cm）に注目し、電力遮断後の高温維持時間と流速減少率の関係を、熱流束 $1.37 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ 、入口温度30℃、初期流速 100 cm/sec ($3.6 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$) の場合について、最終流速をパラメータとして示したものである。

同図より、一般に流速減少率が約10 cm/sec/sec以上になると、バーンアウト検出による電力遮断後もバーンアウト発生位置の壁温は急冷せず、高温に維持され、さらに流速減少率が50 cm/sec/sec程度以上になると、この維持時間は1.5～2秒となり、これ以上流速減少率が大きくなってもほぼ一定値となっていることがわかる。また、この高温維持時間は、最終流速が小さい程長くなる傾向にある。

一方、定常バーンアウト実験によれば、Fig. 4-1(b)に示すように、入口質量速度が $1.0 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$ 以下の場合でも、このような現象は見られないので、以上のような壁温挙動は流量低下過度バーンアウト特有の現象と考えられよう。

また、4.1でも述べたように、流速減少率が大きくなると、定常あるいは比較的遅い流量低下時のバーンアウト発生前に見られるような、壁温の階段状低下は、低下量と低下時間が共に小さくなり、さらに大きな流速減少率においてはほとんど見られなくなる。これも流量低下に伴う非定常性の一つと考えられる。

なお、壁温の測定に関しては、加熱電流の熱電対起電力におよぼす影響、テスト部内面温度変化が外面に現われるまでの時間遅れ、熱電対溶接上の問題、直流増巾器の特性上の問題など、測定精度上さまざまな問題があったので、壁温の絶対値の定量的な議論は行なわなかった。

4.3 圧力変化における非定常効果

4.1の一般的傾向でも述べたように、流速減少率増大に伴い、バーンアウトの直前に入口圧力が急上昇し、一度ピークに達して、再び減少を開始してから0.1～0.2秒後にバーンアウトが発生するという挙動を示す。

この入口圧力挙動が流速減少率によりどう変化するかを、熱流束 $1.37 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ 、入口温度30℃、初期流速 100 cm/sec ($3.6 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$) の場合を例にとり、Fig. 4-11に示す。同図からもわかるように、流速減少率が1100 cm/sec/secに達すると、バーンアウト直前の入口圧力の初期値からの上昇分は約 1.1 kg/cm^2 になっている。

ところで、入口流量が指数関数状に低下した場合の、沸騰流路内各位置における質量速度クォ

リティ、ボイド率などの過度挙動を、分離流モデルにより計算した結果を付録Aに示してある。このうち、Fig. A-2の計算例に見られるように、急激な流量低下過度時には沸騰流路内各点での質量速度が不均一で、しかも、例えば同図で $\eta (=Z/L) = 0.4, 0.3$ の各位置における質量速度挙動に注目すると、このような位置においては、沸騰が開始すると同時に質量速度は急上昇し、続いて急低下する傾向にあることがわかる。

本実験において、Fig. 4-11に見られるように、流速減少率が大きい場合に、入口圧力が一度ピークに達し、さらに少し低下してからバーンアウトに至る現象を示しているのは、この計算例における質量速度の過度挙動、すなわち、急激な流量低下に伴う沸騰流路内の過渡的な蒸気発生挙動によるものと推察される。

次に、Fig. 4-12は、入口温度 30°C の場合について、入口圧力のピーク値と流速減少率の関係を、熱流束をパラメータとして示したものである。同図より、定常バーンアウト時や流速減少率が十分小さい過度バーンアウト時には入口圧力はバーンアウト発生までほぼ一定値に保持されるが、流速減少率が約 $5 \sim 10 \text{ cm/sec/sec}$ 以上となると、バーンアウト直前に入口圧力が急上昇する現象が見られ、その上昇分は流速減少率増大により大きくなるが、やがて一定値に近づく傾向を示していることがわかる。また、入口圧力の値は熱流束の大きい方が高くなるが、入口圧力ピークが出現し始める境界の流速減少率は、本実験範囲内での熱流束($1.19 \sim 1.66 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$)の値にはそれほど依存していない。

Fig. 4-13は、入口温度 80°C の場合について、入口圧力ピーク値と流速減少率との関係を示したもので、Fig. 4-12と比較すると、サブクール度が小さいFig. 4-13の方が、入口圧力上昇量は小さくなり、入口圧力ピークが出現し始める流速減少率は約 $40 \sim 50 \text{ cm/sec/sec}$ と大きくなっているが、その境界値はFig. 4-12の場合と同様に、熱流束にはほとんど依存しない。

ところで、サブクール度が小さくなると入口圧力上昇量も小さくなるのは、付録Aの計算結果から次のような定性的説明ができる。

サブクール度が小さい場合には、初期沸騰長さは大きいので、流量低下に伴う沸騰長さの変化は相対的に小さくなる。一方、Fig. A-11に見られるように、初期沸騰長さは一定($\eta = 0.5$)で、沸騰長さの変化が小さい場合($B_1 = 0.5$)は、それが大きい場合($B_1 = 0.25$)よりも出口-入口質量速度比($G_{\text{out}}^*/G_{\text{in}}^*$)の変化は小さくなっている。

このような、沸騰長さ変化量による質量速度挙動の差が、上述のサブクール度減少による、バーンアウト直前の入口圧力上昇量の低下を示唆していると思われる。

4.4 入口流量の過渡時における挙動

4.1で述べたように、流速減少率が大きくなると、弁操作による流量低下が終了してから入口流量が突然大きく振動する現象が見られた。この現象は、最終流量にも影響されると思われるので、ほぼ同じ流速減少率($45 \sim 59 \text{ cm/sec/sec}$)において最終流量のみが異なる場合の、バーンアウト実験記録例を比較したのがFig. 4-14(a), (b)である。Fig. 4-14(a)は、弁操作による最終流量が 1.1 l/min の場合で、流量の突変は見られないが、Fig. 4-14(b)は、最終流量が 0.7 l/min の場合で、流量低下終了後バーンアウト直前に流量の突変が生じている。

Fig. 4-15は、このような流量挙動が、流速減少率と最終流量にいかに関係するかを示したものである。同図より、流速減少率が大きい程、最終流量が低い程、すなわちバーンアウト熱流束が低い程、バーンアウト直前に流量の突変が出現しやすくなることがわかる。

4.5 バーンアウト時入口質量速度と熱流束におよぼす流速減少率の影響

流速減少率がある程度以上大きくなると、定常バーンアウト発生流量よりも低い流量においてバーンアウトが発生する傾向を示した。これは、ある流量におけるバーンアウト熱流束は、その流量に至る過度変化速度が一定の限界を超えると、定常の場合よりも高くなることを意味している。

Fig. 4-16は、入口温度が30°Cの時のバーンアウト時入口質量速度と流速減少率との関係を、熱流束をパラメータとして示したものである。同図より、流速減少率が約5~10cm/sec/sec以下の場合には、定常バーンアウトの場合とほぼ同じ質量速度でバーンアウトが発生しているが、流速減少率がそれより大きくなる程、同じ熱流束でもバーンアウト時入口質量速度は小さくなり、非定常効果が現われていることを示している。また、この非定常効果が見られる境界の流速減少率は、本実験での熱流束範囲(1.19~1.66×10⁶ kcal/hm²)において、熱流束にはほとんど依存しないことがわかる。

Fig. 4-17は、以上の関係を入口温度80°Cの場合について示したものである。同図の場合も、Fig. 4-12の場合と同様にバーンアウト時入口質量速度が減少し始めるのは、流速減少率が約5~10cm/sec/secであることがわかる。

このように、流速減少率が増大する程、バーンアウト発生時の入口質量速度が低下することは付録Aの分離流モデルによる計算結果から、以下のように定性的な説明ができる。

まず、Fig. A-7に示すように、同一の出口質量速度の時点における入口質量速度は、流量を急激に低下した場合($B_2 = 2.5$)の方が、ゆっくりと流量を低下した場合($B_2 = 1$)よりも、かなり小さくなっていることがわかる。今、流速減少率によらず、バーンアウト発生時の出口質量速度は同一であると仮定すれば、上述の理由により、バーンアウト発生時入口質量速度は、流速減少率が大きい程小さくなることがわかる。

次に、流速減少率をパラメータとして、バーンアウト時の熱流束と入口質量速度との関係について述べる。

Fig. 4-18は、入口温度30°Cの場合について、定常時と過度時のバーンアウト発生時における熱流束と入口質量速度との関係を、流速減少率をパラメータとして示したものである。

なお、同図に示したバーンアウト発生時の熱流束や入口質量速度には、以下で述べるように、過度変化に伴う種々の問題点が含まれている。

まずバーンアウト熱流束は、本実験では加熱電力を伝熱面積で割って求め、軸方向に一様で、過度変化時にも一定値を保つと仮定した。なお今の場合、テスト部から外部への熱放出は無視できると考えられる。

ところで、流量低下途中においては、壁温のステップ状低下などの現象が見られ、その時点においては熱流束も変化していると思われるが、バーンアウト発生時付近では壁温はあまり変化し

ておらず、壁温変化による局所熱流束の変動は無視できると思われるので、本報では特に考慮しなかった。

また、付録Aの計算結果（例えばFig.A-2）からもわかるように、特に低圧で流速減少率が大きい場合には、過渡時におけるテスト部入口と出口の質量速度の差はかなり大きいので、バーンアウト発生時の質量速度を過渡時と定常時について比較する際には注意する必要がある。

以上で述べたように、流量低下過渡バーンアウト発生時の質量速度には、不確かな要素が含まれているので、Fig. 4-18より直ちに定量的な議論はできないが、流速減少率が大きくなった場合のおよその傾向は把握できるとと思われる。

すなわち、同図より、流速減少率増大に伴い、同一熱流束で比較すれば、バーンアウト発生時入口質量速度は小さくなり、同一入口質量速度で比較すれば、バーンアウト熱流束は上昇していることがわかる。たとえば、入口質量速度 $1.2 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$ におけるバーンアウト熱流束は、流速減少率 $5 \sim 10 \text{ cm/sec/sec}$ なら定常値の約 1.1 倍、流速減少率 $20 \sim 50 \text{ cm/sec/sec}$ なら約 1.25 倍、流速減少率が 50 cm/sec/sec 以上なら約 1.5 倍程度となっている。

Fig. 4-19は、入口温度 80°C の場合について、同様な関係を示したものである。この場合は、パラメータ範囲が小さいため、Fig. 4-18ほど明確ではないが、同じように流速減少率増大によりバーンアウト熱流束が上昇する傾向を示している。

なお、参考のため、付録Bには、定常バーンアウト熱流束の実験値と、本実験範囲を適用範囲に含む既存のバーンアウト熱流束関係式（Macbeth⁽¹⁾、Thompson-Macbeth⁽²⁾、Becker⁽³⁾の各式）による計算値との比較を示す。

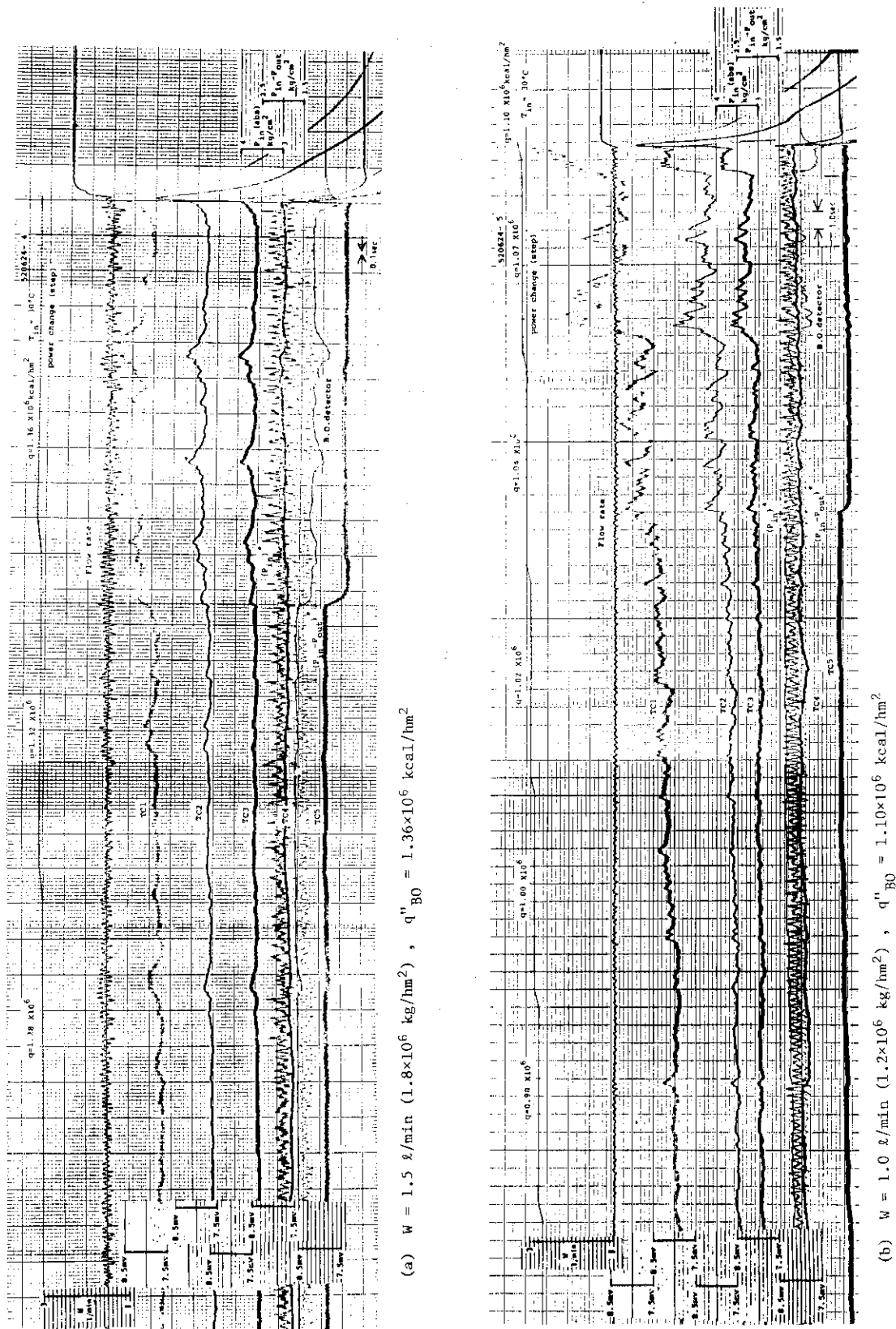
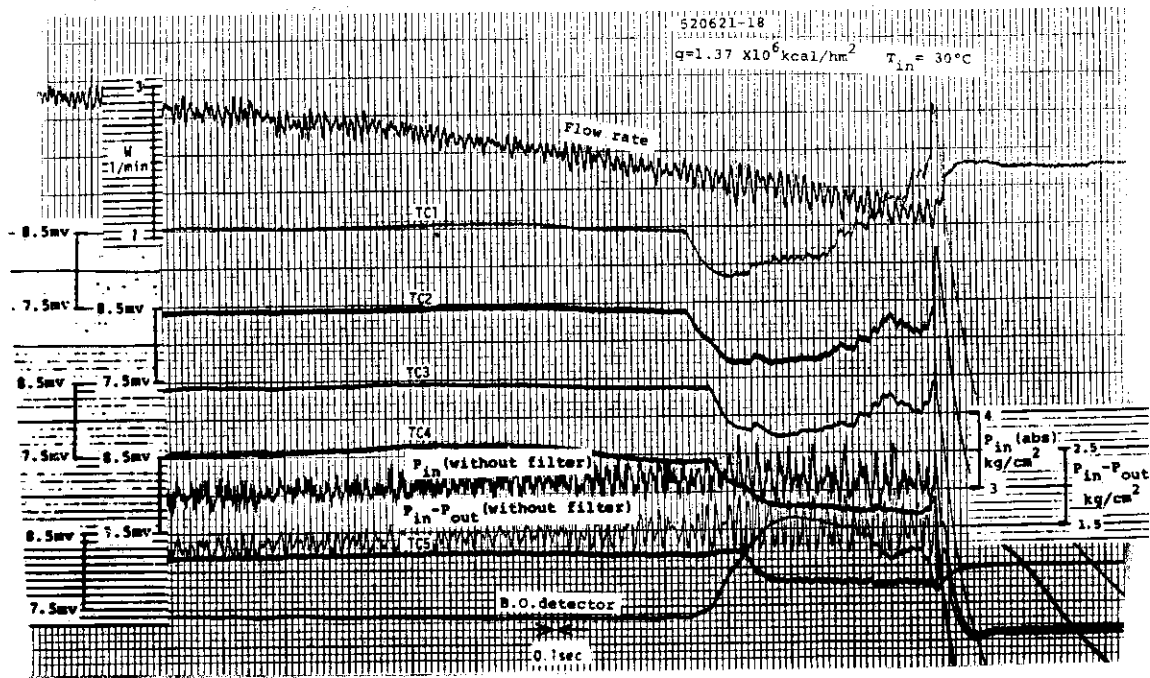
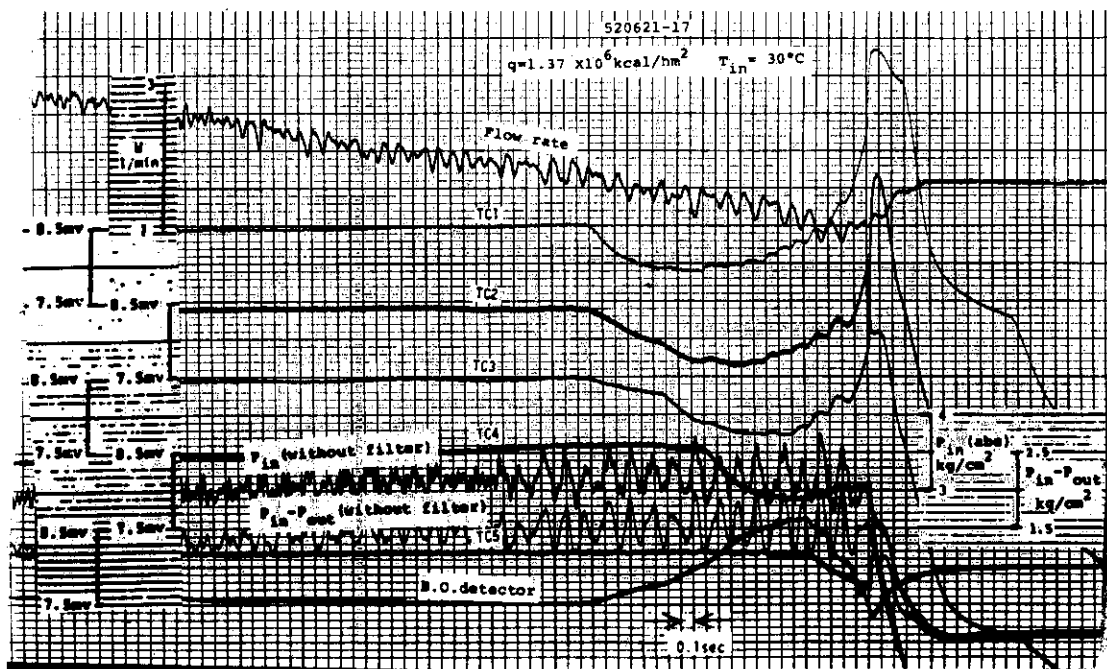


Fig. 4-1. Examples of steady state burnout experiments



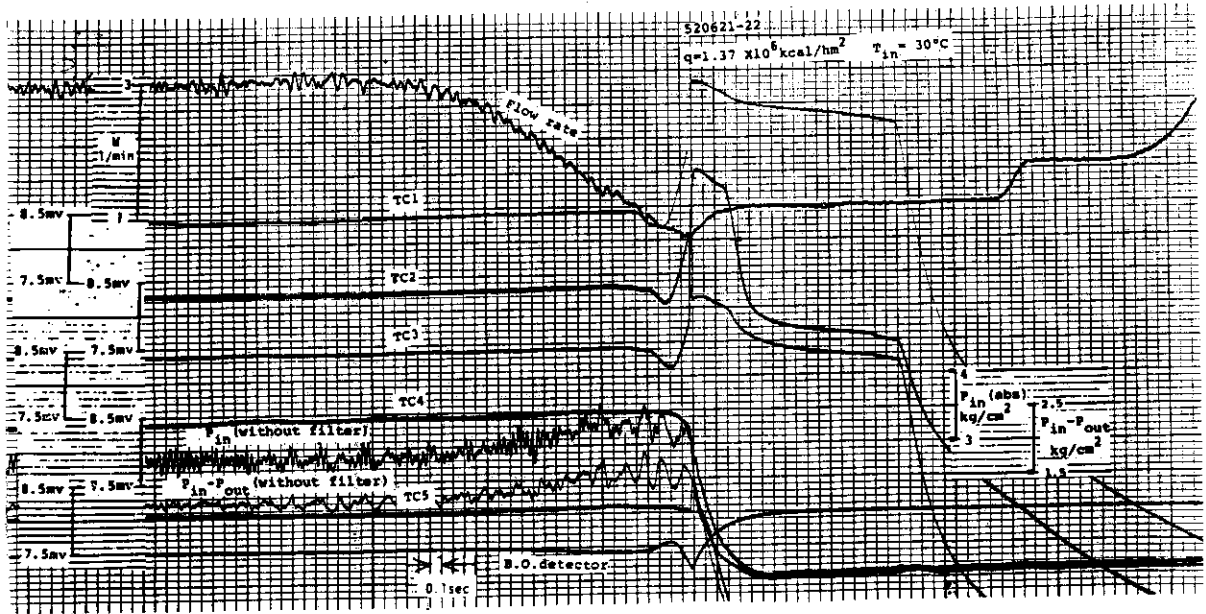
(a) $\Delta t = 12 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 4.5 \text{ cm/sec/sec}$



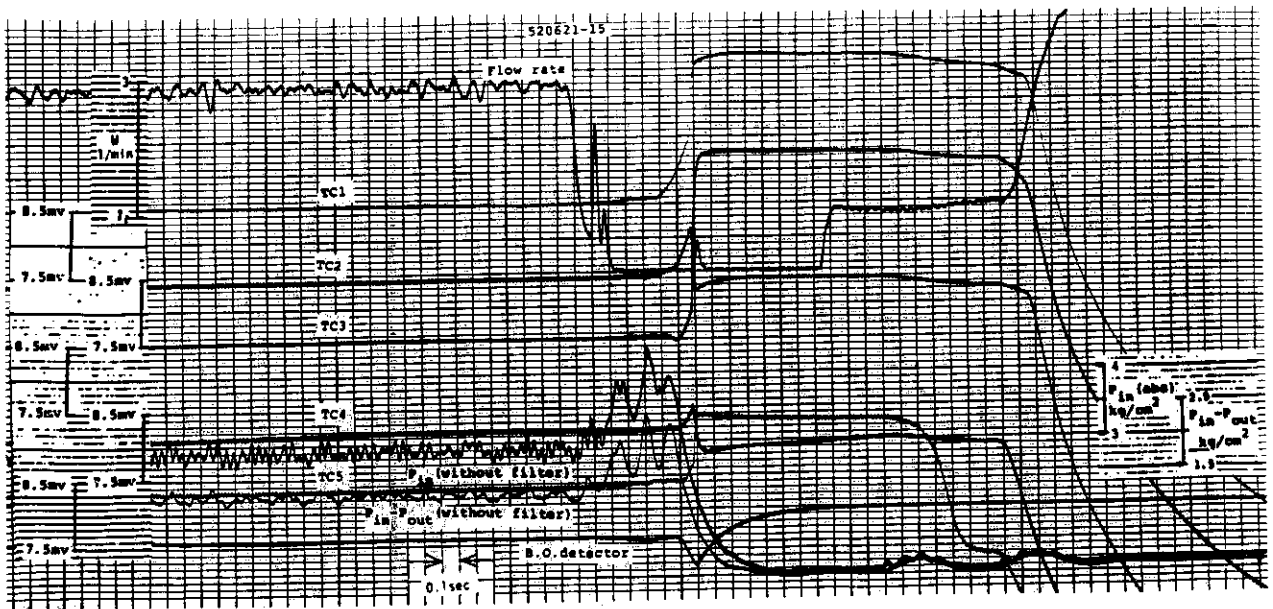
(b) $\Delta t = 7.4 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 9.0 \text{ cm/sec/sec}$

Fig. 4-2. Examples of flow reduction transient burnout experiments (1)

($q'' = 1.37 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, $T_{in} = 30^\circ\text{C}$)

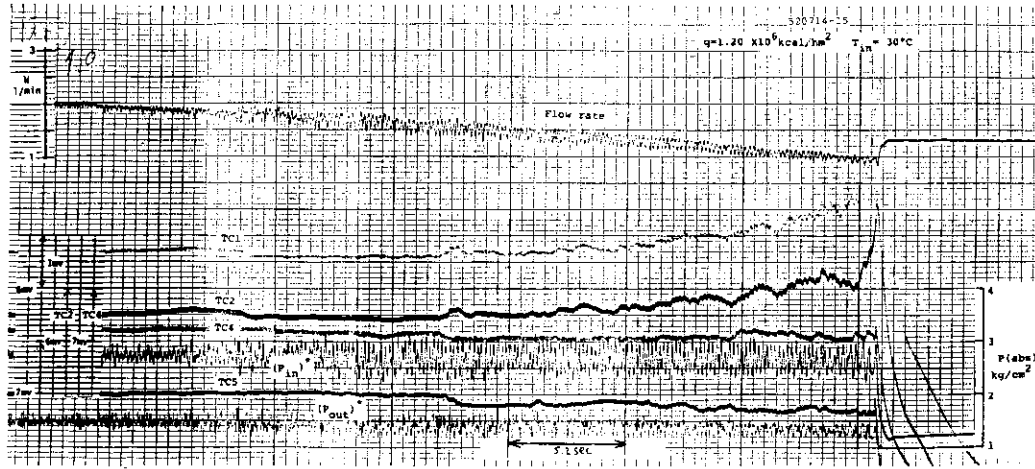


(c) $\Delta t = 2.0 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 38 \text{ cm/sec/sec}$

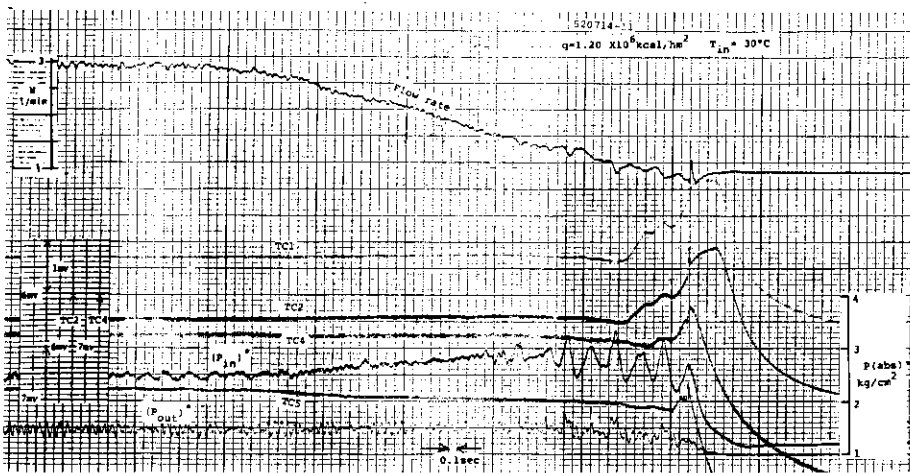


(d) $\Delta t = 0.12 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 660 \text{ cm/sec/sec}$

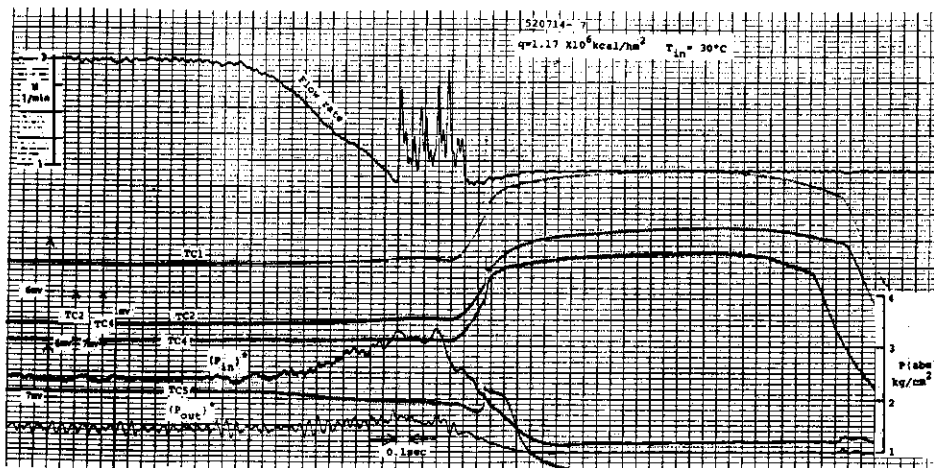
Fig. 4-2. (Continue)



(a) $\Delta t = 37 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 0.95 \text{ cm/sec/sec}$



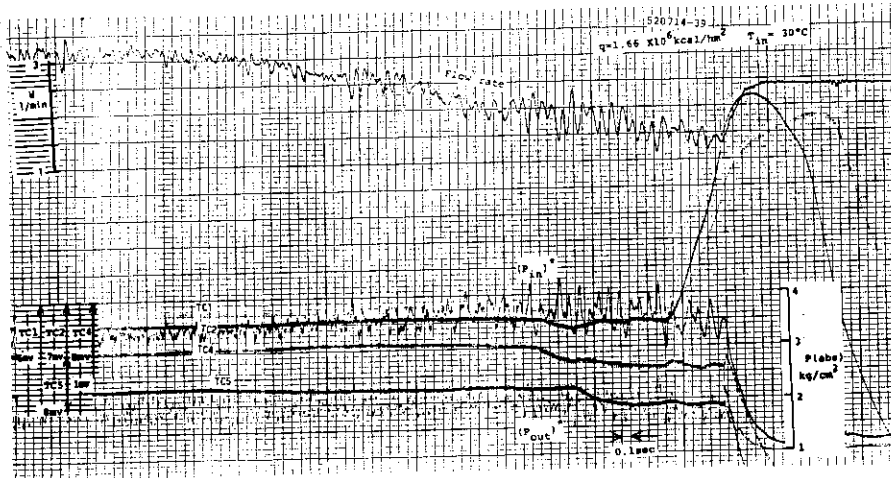
(b) $\Delta t = 5.1 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 15 \text{ cm/sec/sec}$



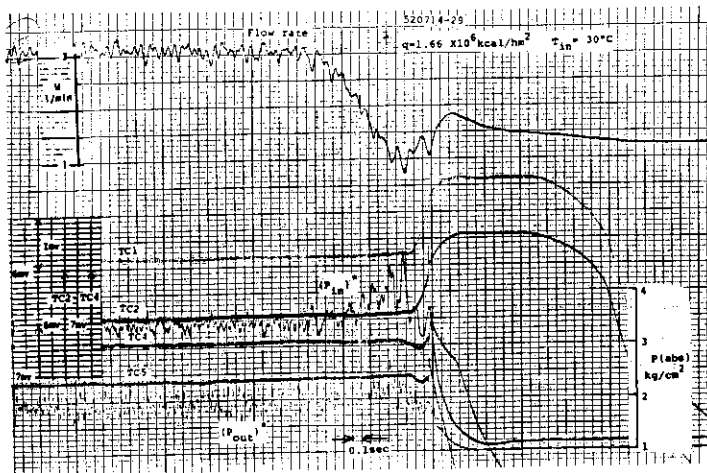
(c) $\Delta t = 1.2 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 71 \text{ cm/sec/sec}$

Fig. 4-3. Examples of flow reduction transient burnout experiments (II)

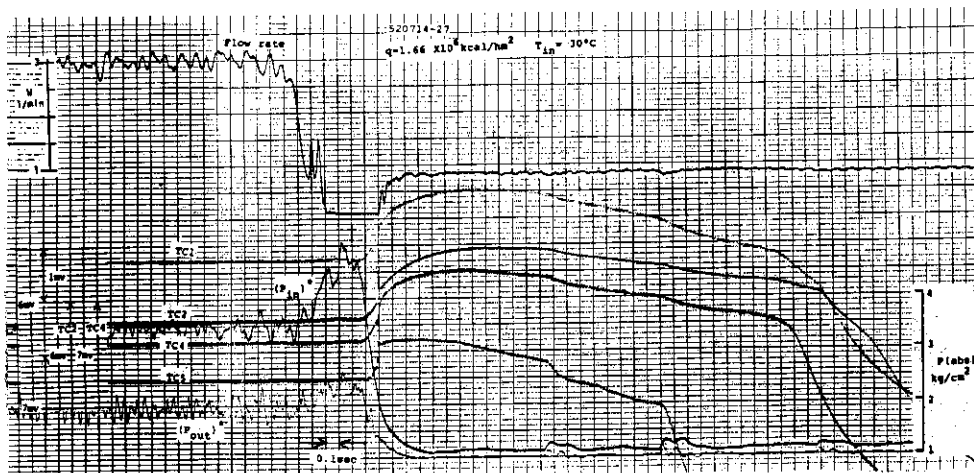
($q'' = 1.20 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, $T_{in} = 30^\circ\text{C}$)



(a) $\Delta t = 6.1 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 10 \text{ cm/sec/sec}$



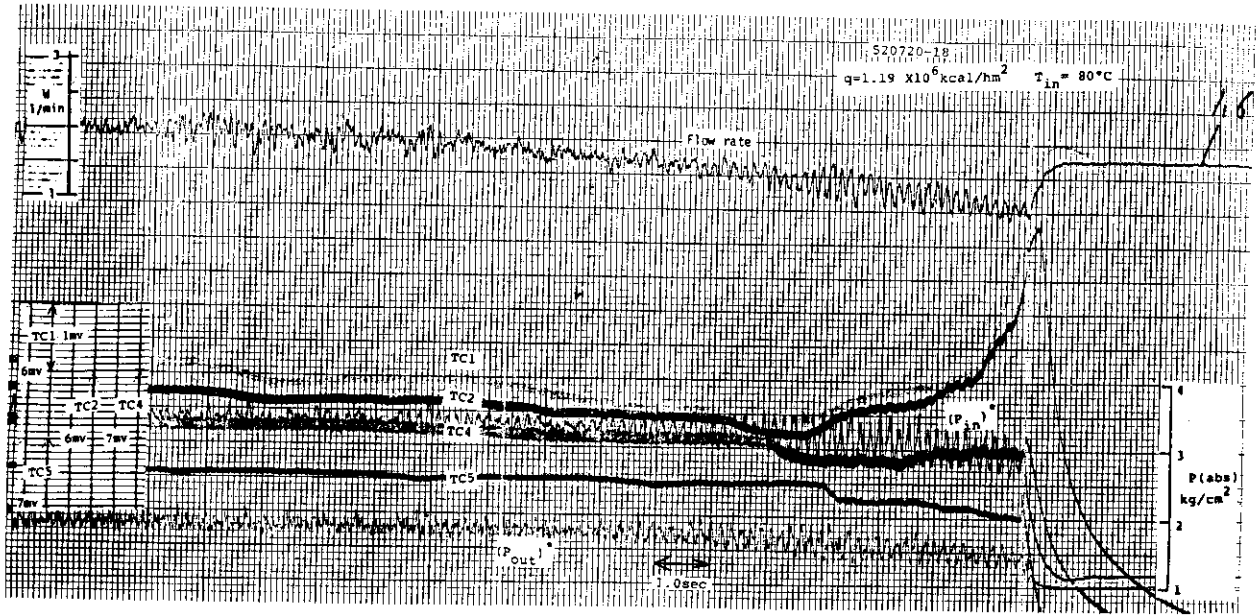
(b) $\Delta t = 1.2 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 75 \text{ cm/sec/sec}$



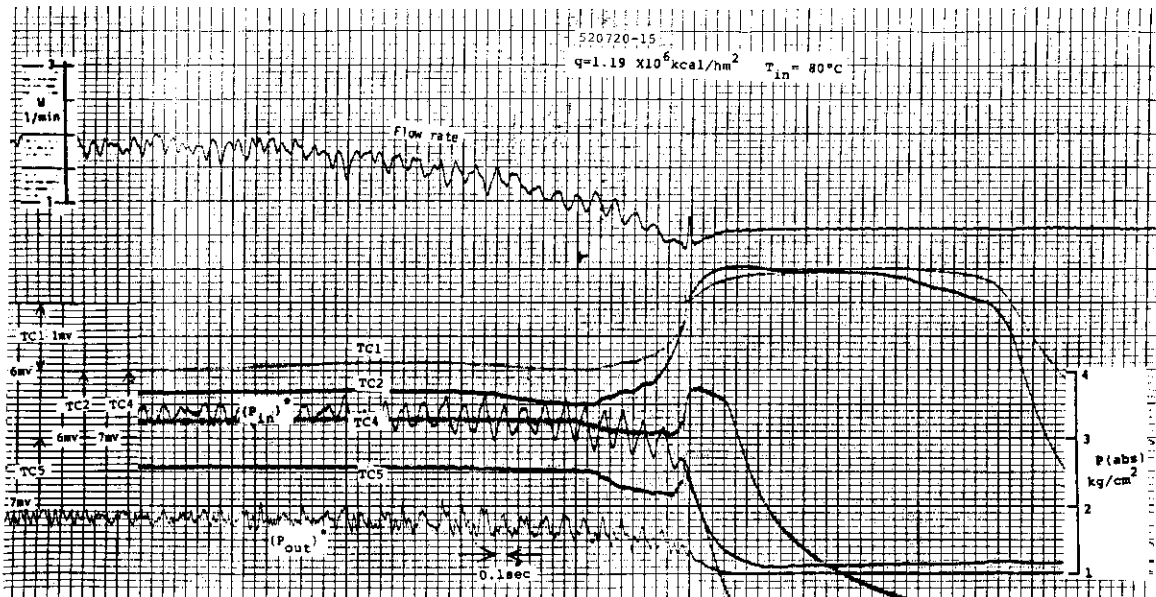
(c) $\Delta t = 0.09 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 830 \text{ cm/sec/sec}$

Fig. 4-4. Examples of flow reduction transient burnout experiments (III)

($q'' = 1.66 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, $T_{in} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)



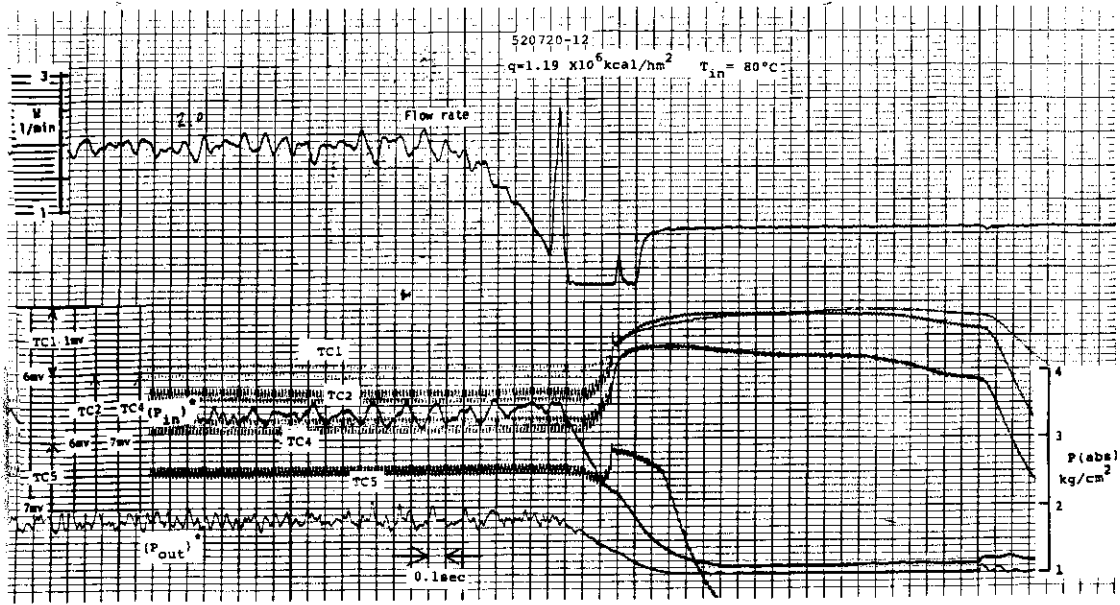
(a) $\Delta t = 11 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 3.0 \text{ cm/sec/sec}$



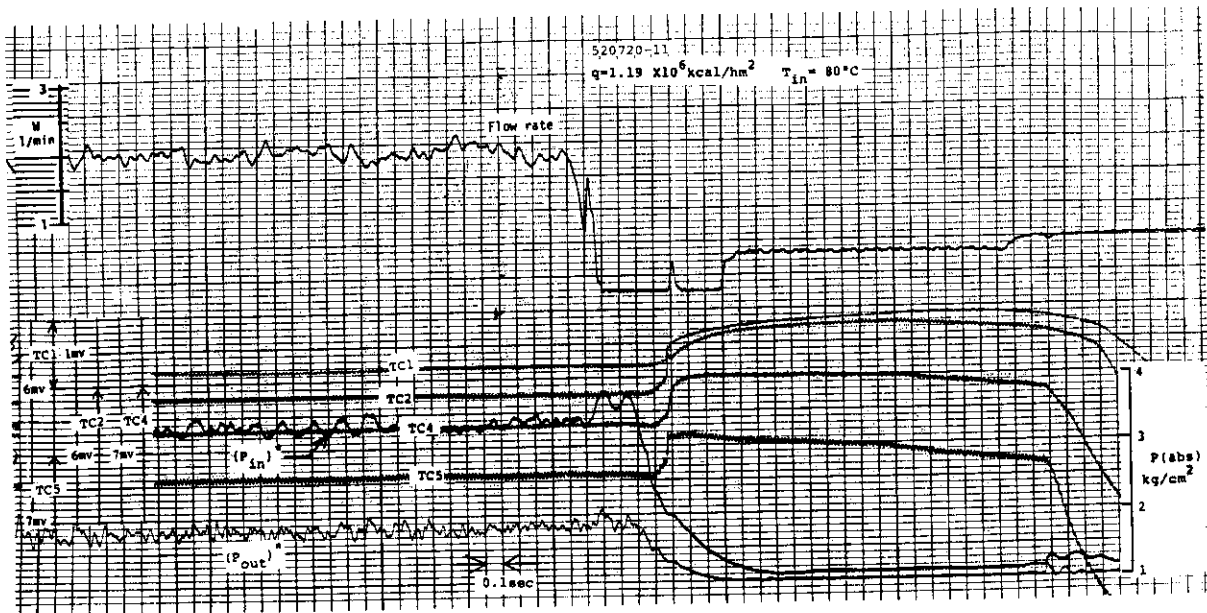
(b) $\Delta t = 2.5 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 19 \text{ cm/sec/sec}$

Fig. 4-5. Examples of flow reduction transient burnout experiments (IV)

($q'' = 1.19 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, $T_{in} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$)

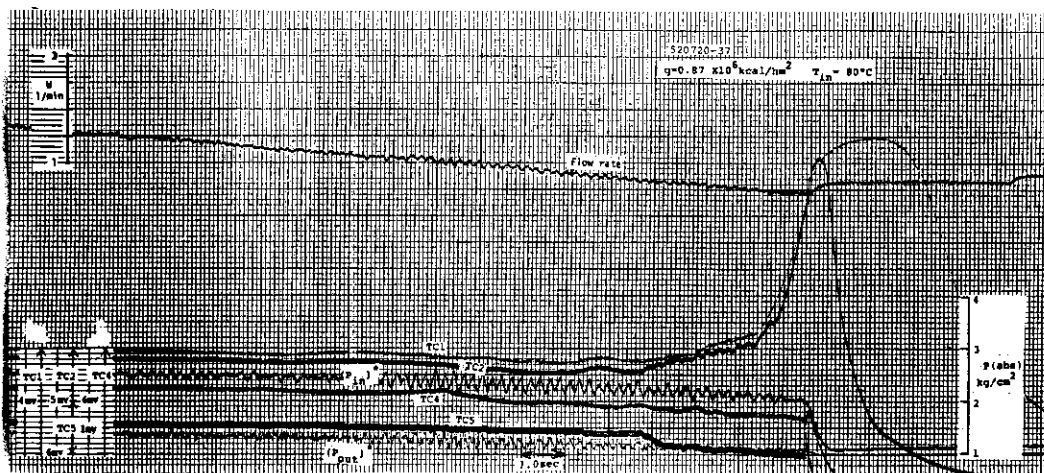


(c) $\Delta t = 0.5 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 80 \text{ cm/sec/sec}$

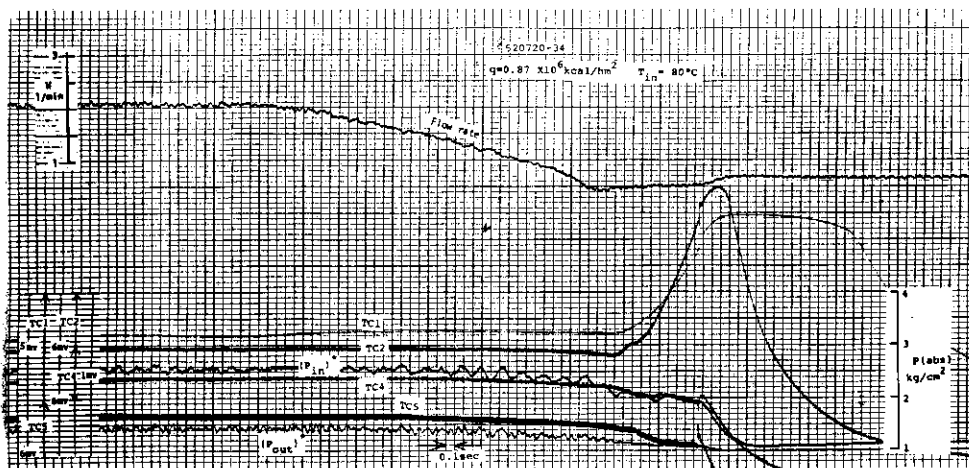


(d) $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 470 \text{ cm/sec/sec}$

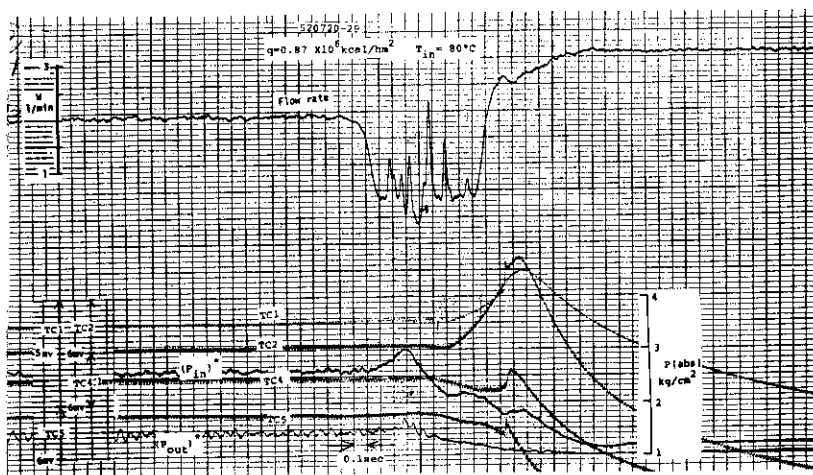
Fig. 4-5. (Continue)



(a) $\Delta t = 15 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 2.2 \text{ cm/sec/sec}$



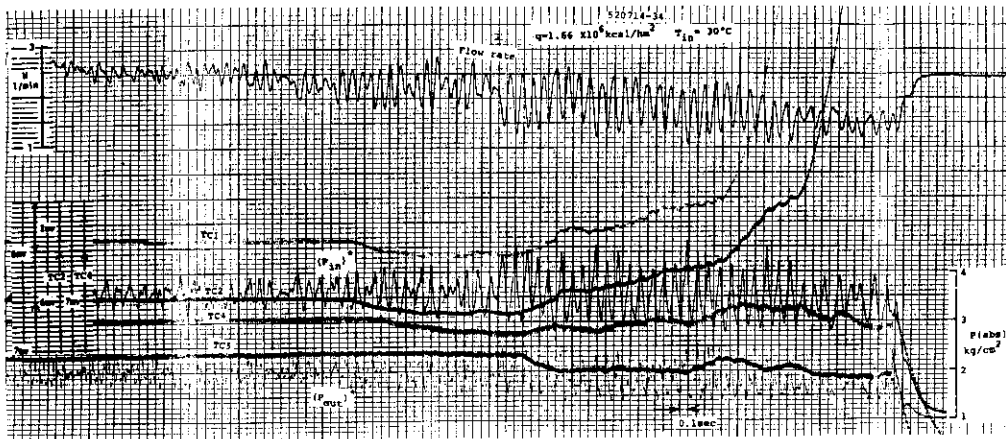
(b) $\Delta t = 3.2 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 17 \text{ cm/sec/sec}$



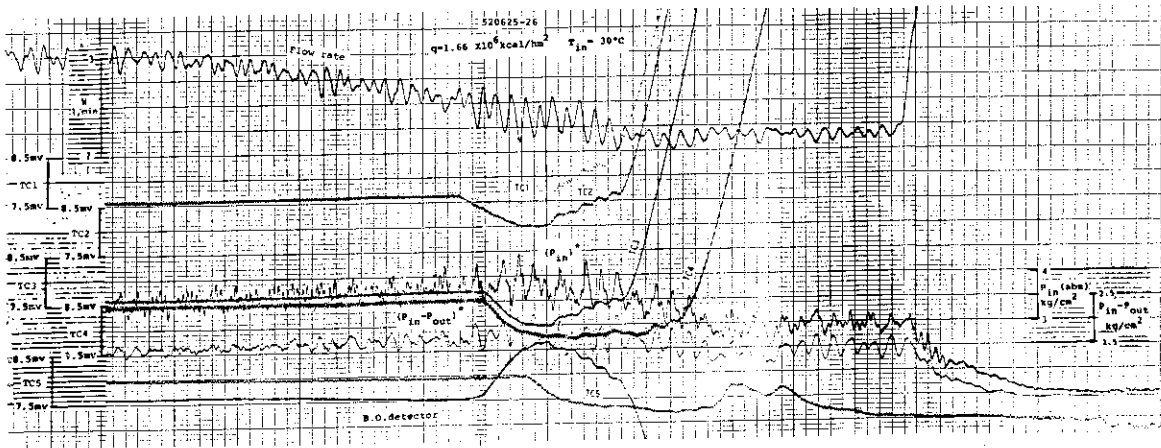
(c) $\Delta t = 0.2 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 270 \text{ cm/sec/sec}$

Fig. 4-6. Examples of flow reduction transient burnout experiments (V)

($q'' = 0.87 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, $T_{in} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$)



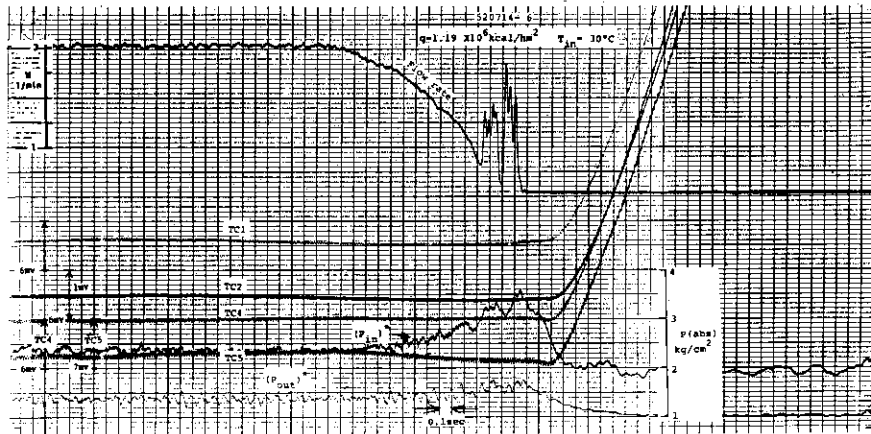
(a) $\Delta t = 12 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 4.5 \text{ cm/sec/sec}$
 power cut off by manual



(b) $\Delta t = 3.1 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 15 \text{ cm/sec/sec}$
 test section failure without power cut off

Fig. 4-7. Particular examples of flow reduction transient burnout experiments (1)

(Wall temperature excursion without power cut off, $W_{BO} > 0$)

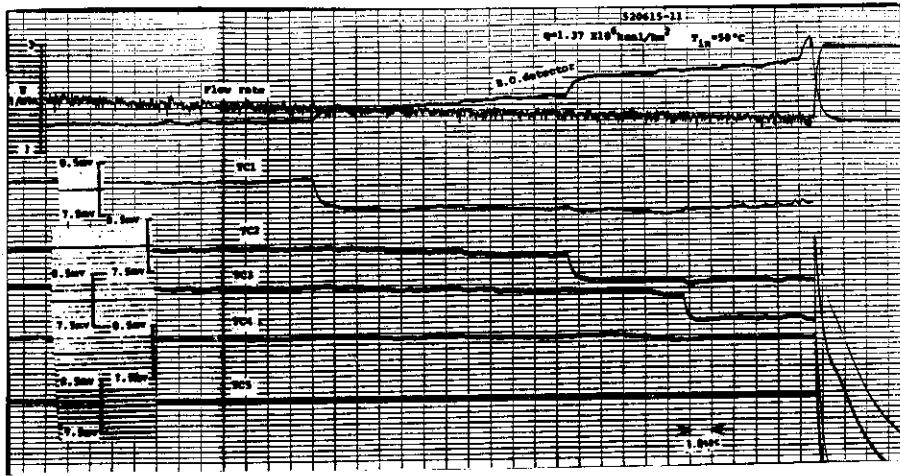


(a) $\Delta t = 0.94 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 83 \text{ cm/sec/sec}$
 power cut off by manual

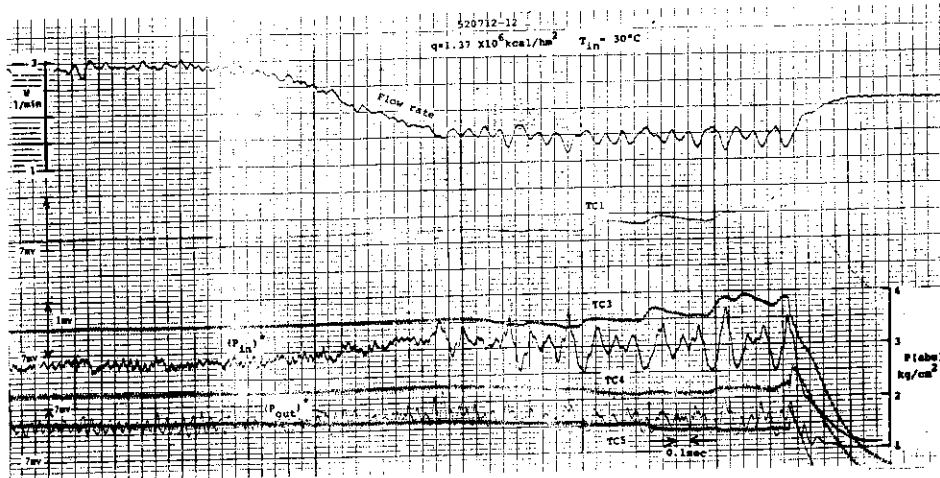


(b) $\Delta t = 0.11 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 660 \text{ cm/sec/sec}$
 Lead wire of burnout detector detached from the test section

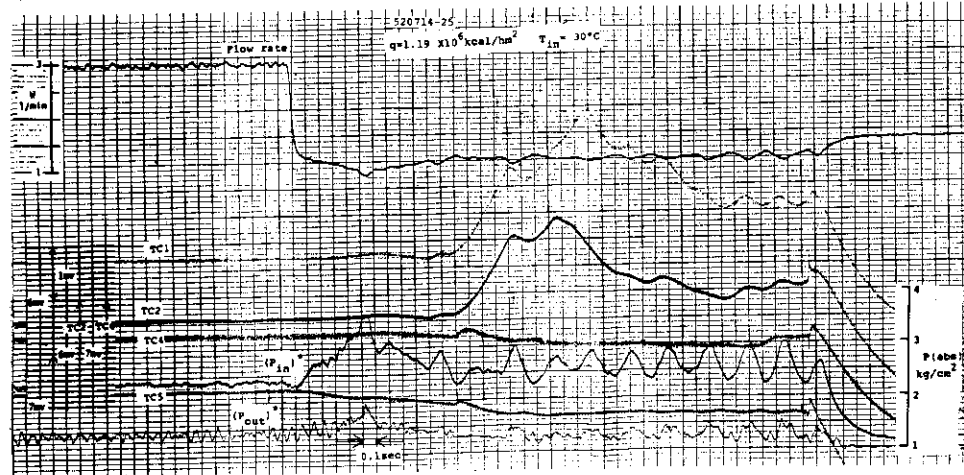
Fig. 4-8. Particular examples of flow reduction transient burnout experiments (II)
 (Wall temperature excursion without power cut off, $W_{BO} = 0$)



(a) $\Delta t = 33 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 0.6 \text{ cm/sec/sec}$



(b) $\Delta t = 1.3 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 37 \text{ cm/sec/sec}$



(c) $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 660 \text{ cm/sec/sec}$

Fig. 4-9. Example of flow reduction experiments which were failed to burnout

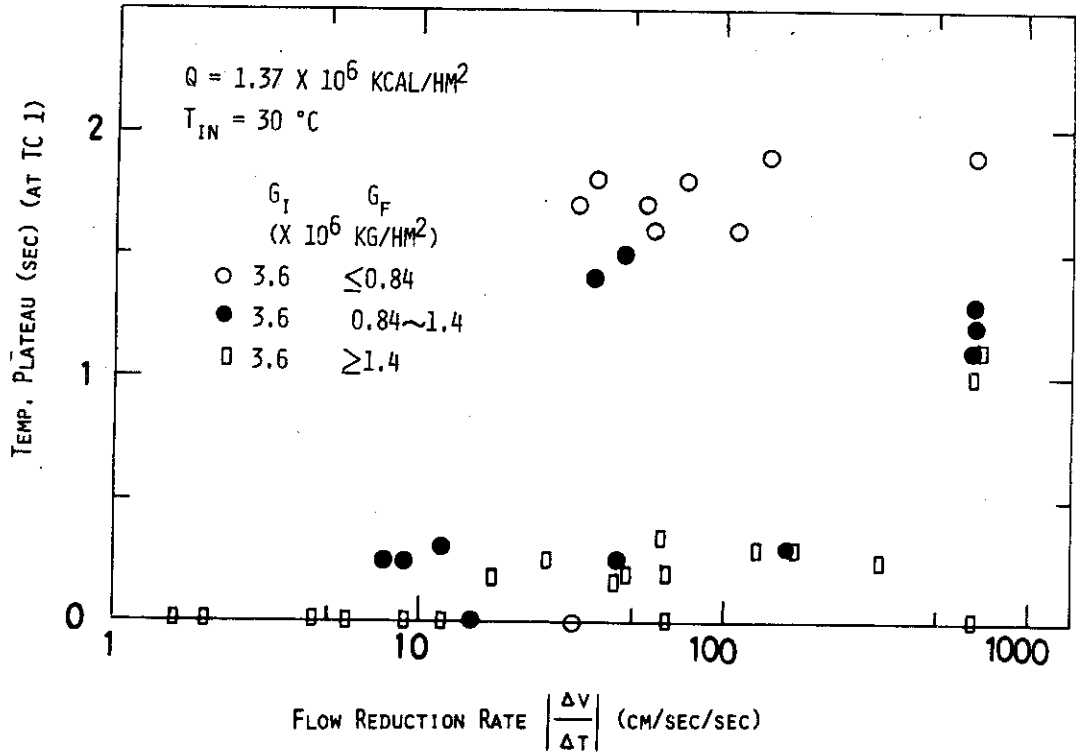


Fig. 4-10. Effect of flow reduction rate on duration of wall temperature plateau after power cut off.

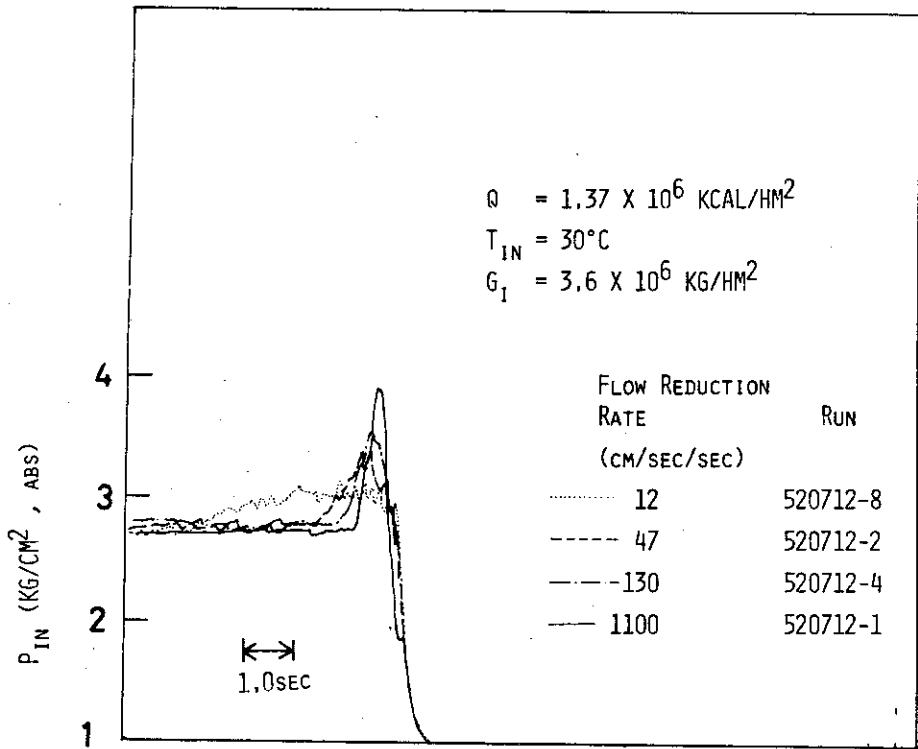


Fig. 4-11. Effect of flow reduction rate on behavior of inlet pressure prior to burnout

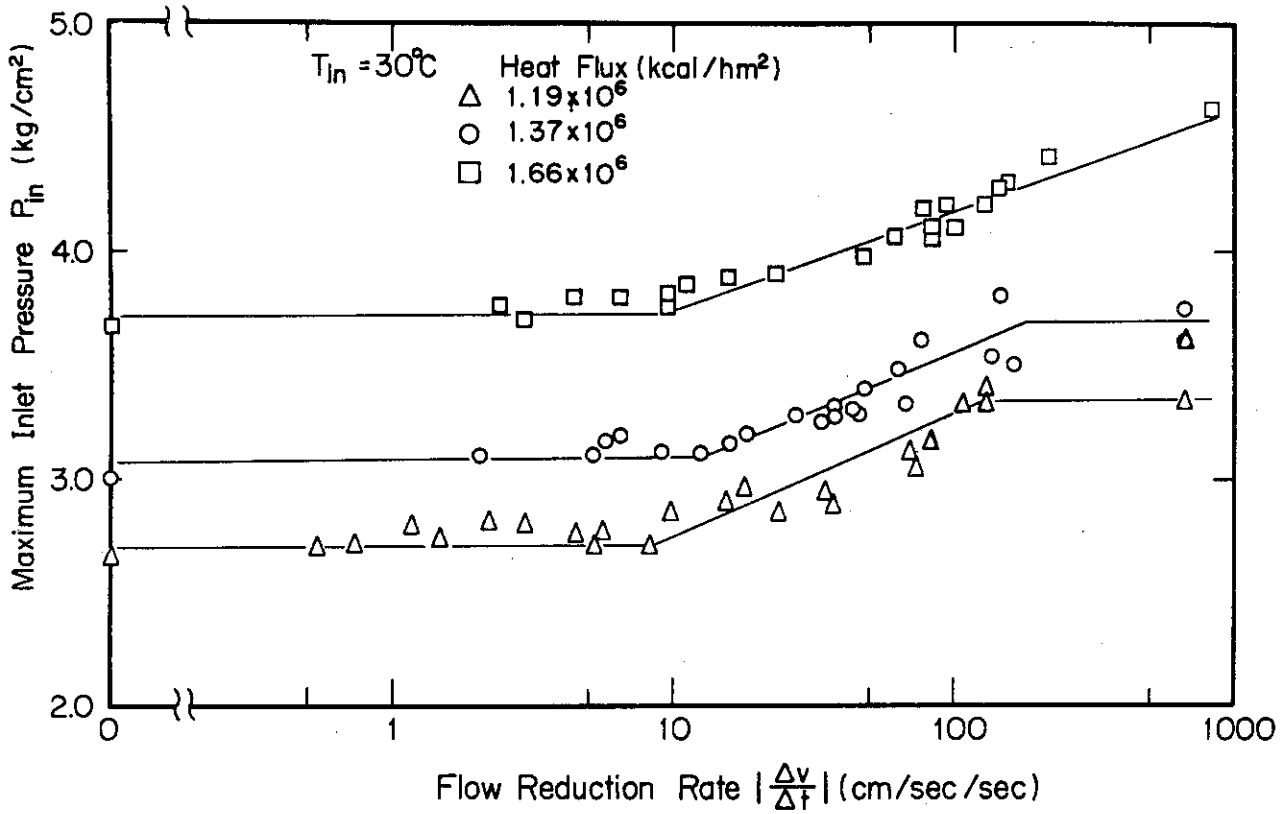


Fig. 4-12. Effect of flow reduction rate on inlet pressure peak.
($T_{in} = 30^\circ C$)

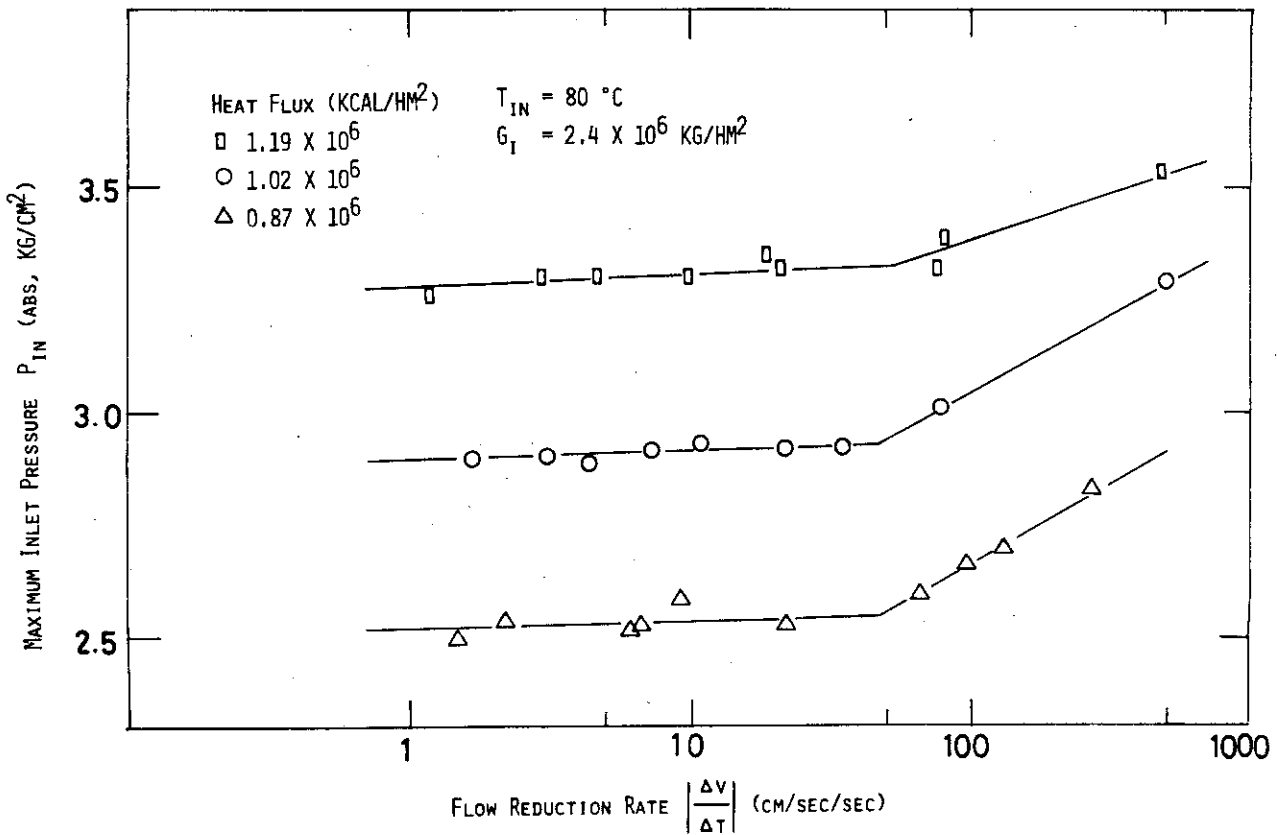
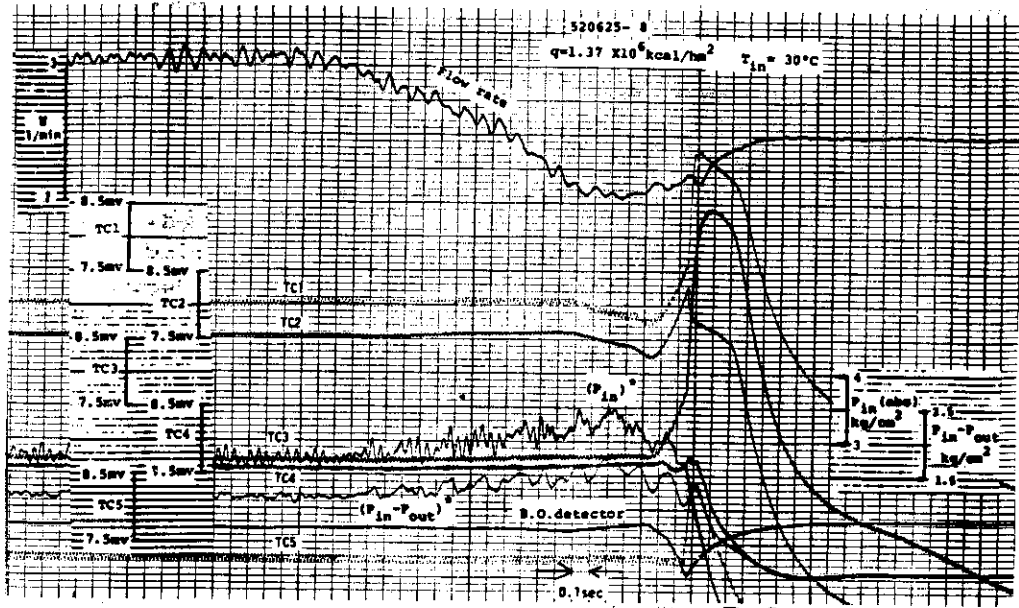
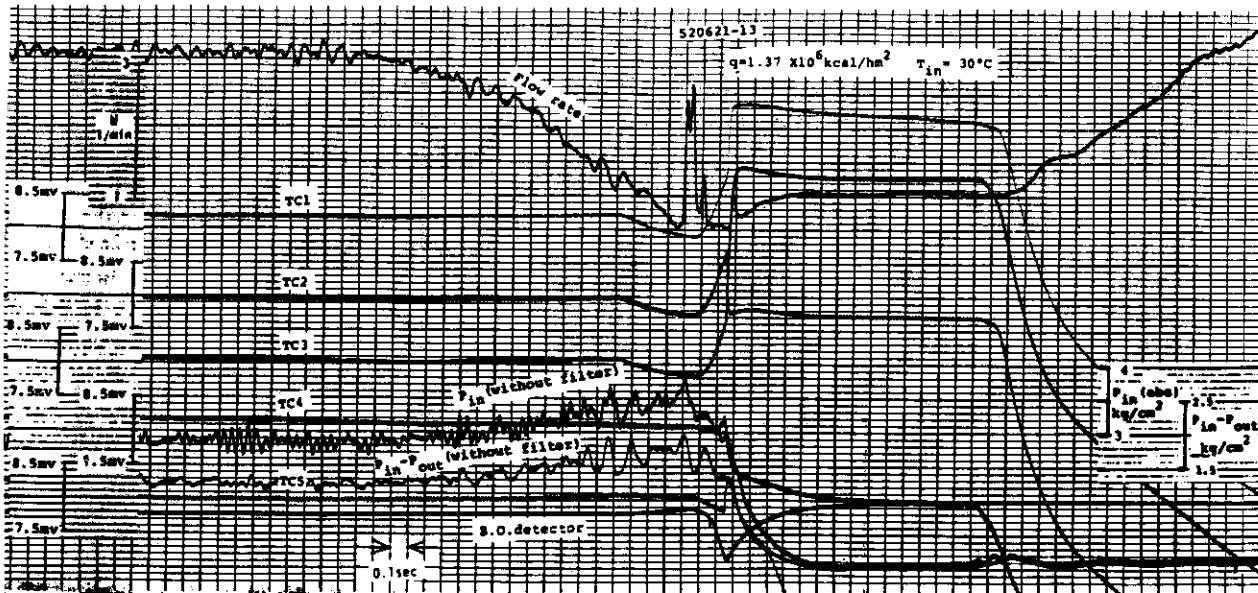


Fig. 4-13. Effect of flow reduction rate on inlet pressure peak.
($T_{in} = 80^\circ C$)



(a) flow reduction range : 3.0 → 1.1 l/min
 $\Delta t = 1.4 \text{ sec}$, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 45 \text{ cm/sec/sec}$



(b) flow reduction range : 3.0 → 0.7 l/min
 $\Delta t = 1.3 \text{ sec}$ $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 59 \text{ cm/sec/sec}$

Fig. 4-14. Effect of final flow rate on flow flashing phenomenon prior to burnout

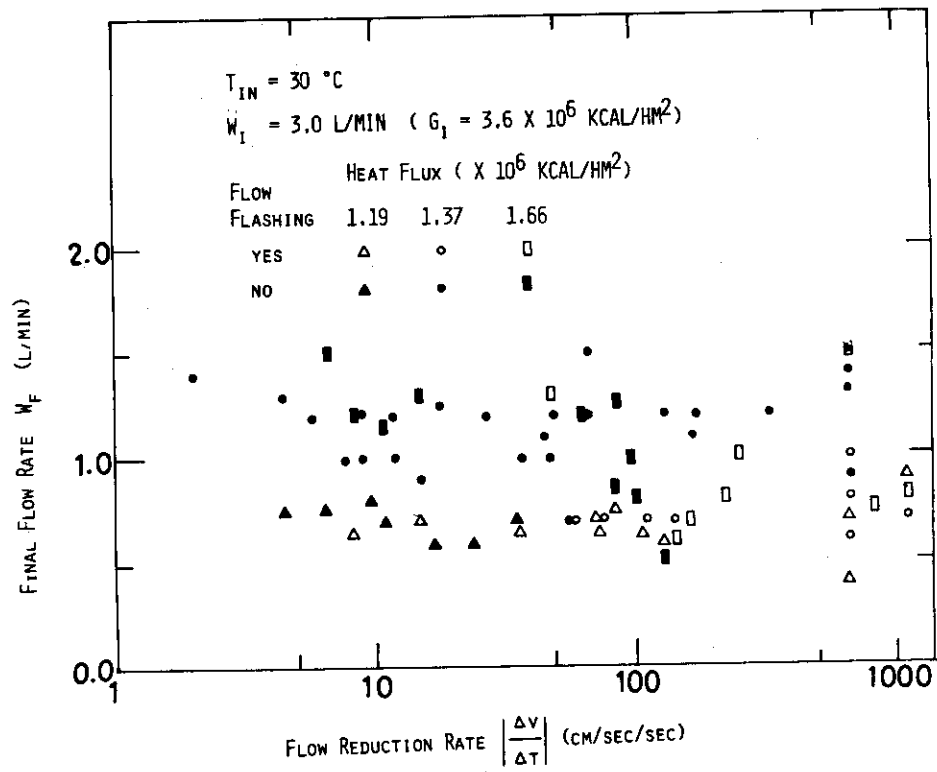


Fig. 4-15. Dependency of flow flashing phenomenon prior to burnout on final flow rate and flow reduction rate

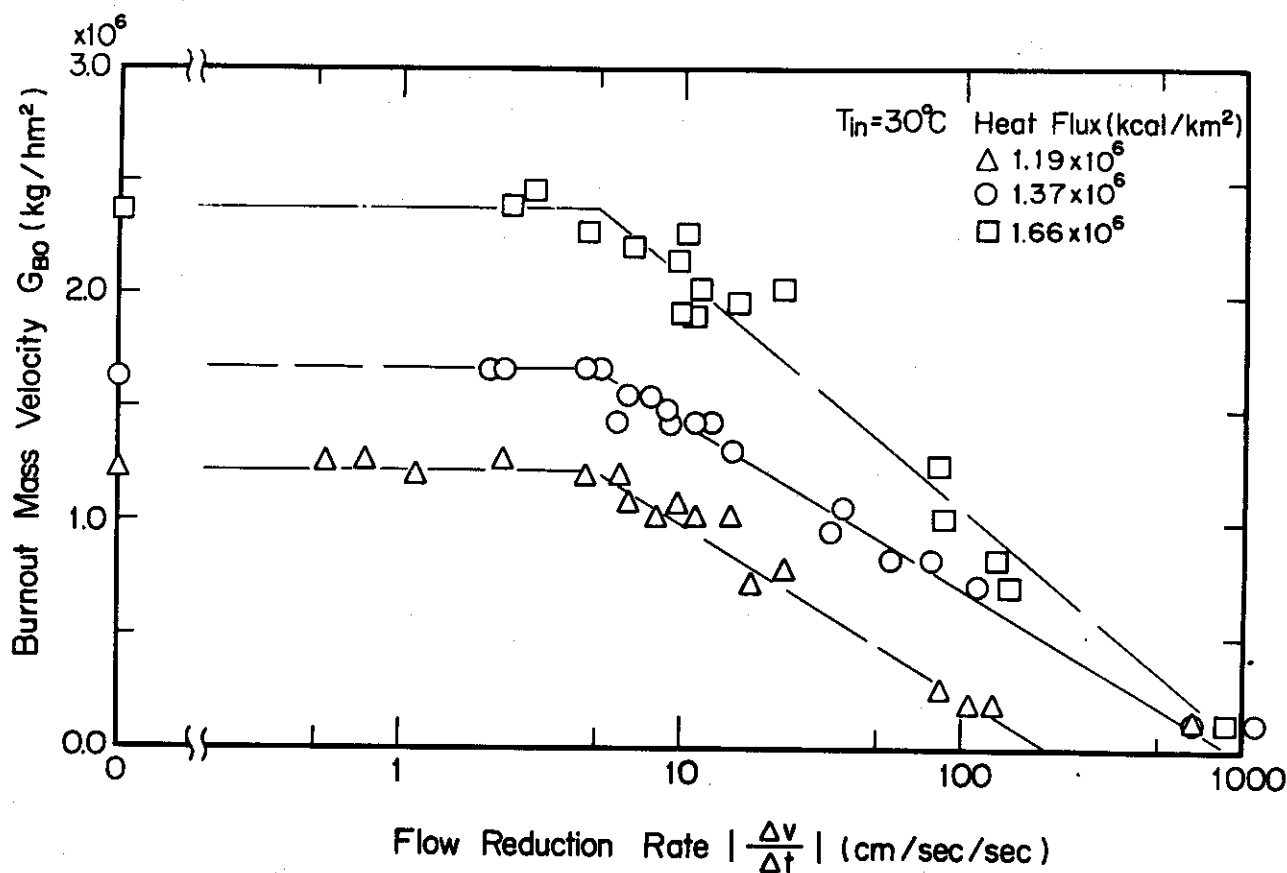


Fig. 4-16. Effect of flow reduction rate on burnout inlet mass velocity
($T_{in} = 30^\circ C$)

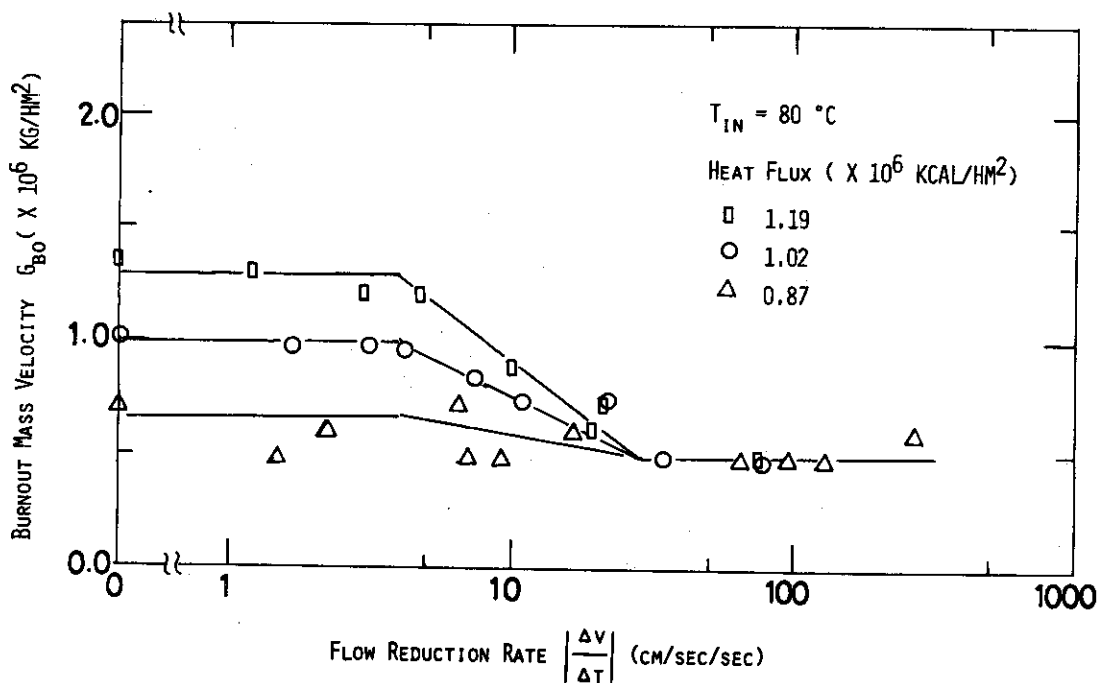


Fig. 4-17. Effect of flow reduction rate on burnout inlet mass velocity
($T_{in} = 80^\circ C$)

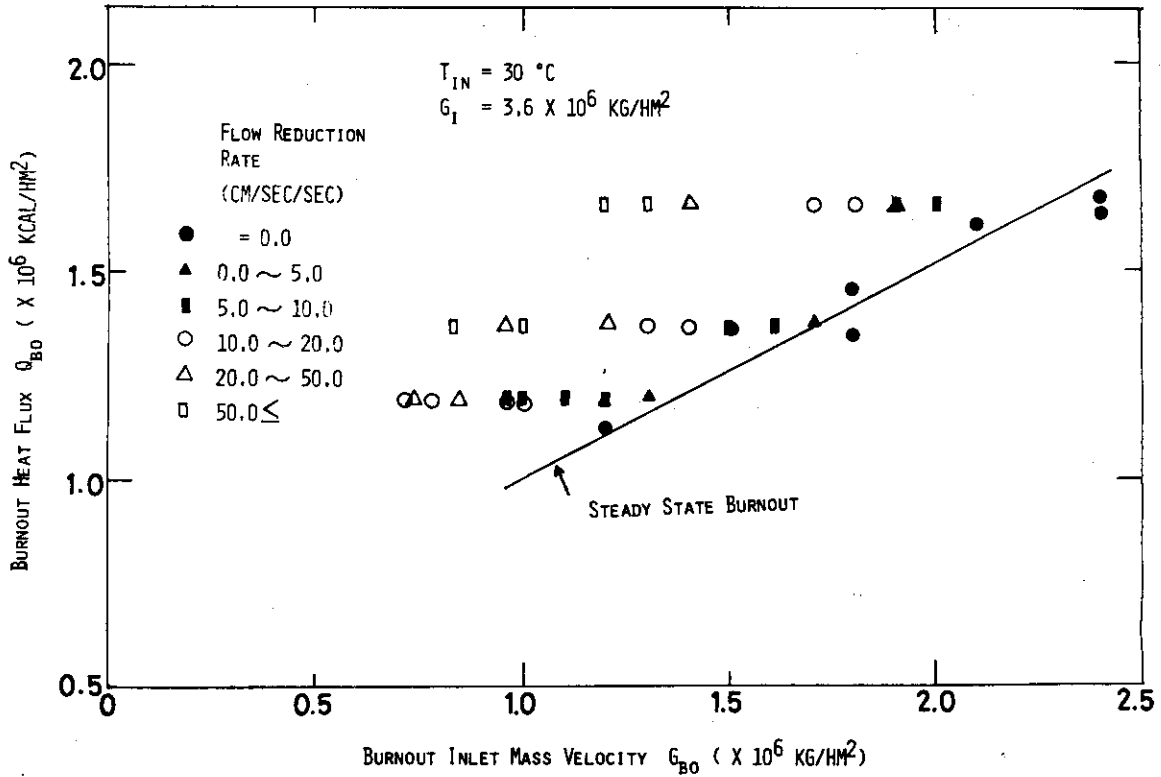


Fig. 4-18. Comparison of burnout heat flux between flow reduction transient and steady state. ($T_{in} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

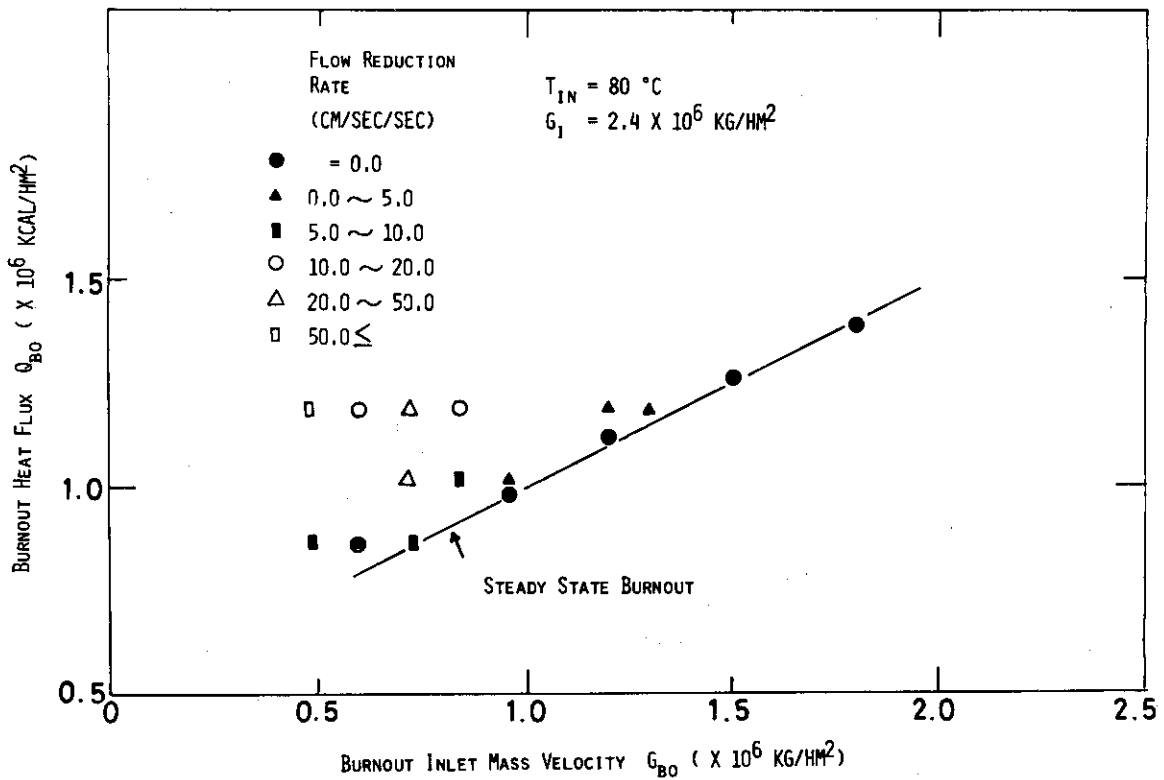


Fig. 4-19. Comparison of burnout heat flux between flow reduction transient and steady state. ($T_{in} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$)

5. ま と め

常圧大気開放ループを用いて、流量低下による過度バーンアウト実験を行ない、壁温変化、テスト部入口圧力、出口圧力、バーンアウト発生時入口流量などの過度挙動を測定して、流速減少率により整理したところ、以下の点が明らかとなった。

- (1) 流速減少率が小さい場合には、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、流速減少率増大につれて、この低下量は小さくなり、ある程度以上大きな流速減少率では全く見られなくなった。
- (2) 流速減少率がある程度以上大きくなると、バーンアウト発生による電力遮断後も、出口近くの壁温は、0.1～3秒間程高温に維持されてから急冷する現象が見られた。流速減少率増大につれて、この現象はテスト部上流でも見られるようになり、高温維持時間も長くなる傾向を示した。また、熱流束が大きい程、入口温度が高い程、より小さな流速減少率において、この現象が見られた。
- (3) 流速減少率が大きくなると、バーンアウト発生の0.1～0.2秒前に、入口圧力が一度ピークに達する現象が見られ、この圧力上昇量は流速減少率増大とともに大きくなった。本実験範囲では、この現象が生じ始める流速減少率は、熱流束にほとんど依存せず、入口温度30℃の場合は約5～10 cm/sec/sec、入口温度80℃の場合は約40～50 cm/sec/secであった。また、圧力上昇量はサブクール度が小さい程小さくなった。
- (4) 流速減少率が大きい程、最終流量が低い程、流量低下終了後、バーンアウト発生直前に流量が急激に変化する現象が見られた。
- (5) 流速減少率が約5～10 cm/sec/sec以下では、バーンアウト発生時入口質量速度は、定常バーンアウトの場合とほぼ同じだが、流速減少率がこれ以上増大するにつれ、熱流束が同じでもバーンアウト時入口質量速度は小さくなった。すなわち、同一の入口流量におけるバーンアウト熱流束は、流速減少率増大と共に上昇する傾向にあった。また、このような非定常効果が生じる流速減少率は、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。

以上のように、流速減少率が大きくなると、壁温、圧力、流量などの挙動に、各種の非定常性を示すと思われる現象が見られ、流量低下バーンアウト発生条件は定常の場合と異なる可能性が示唆された。

一方、バーンアウトの発生は局所的な現象であり、局所的な流動状態や熱流束等により決定されるものと思われる。流量低下過度時におけるバーンアウト発生機構の詳細を知るためには、このような局所的現象の解明と、圧力や流量などのパラメータをより広範囲に変化できる実験が必要である。

本報告書で述べたような常圧大気開放ループによる実験では、パラメータ範囲が限定され、また蒸発に伴う比体積変化が大きいなど解析上の困難さもあるので、今後より高圧流動下での過度バーンアウト実験が望まれる。このような実験により得られる知見は、実炉におけるPCM条件下での燃料棒過度挙動の予測にも役立つであろう。

謝 辞

本研究の遂行にあたって、終始、指導と激励をいただいた、安全工学第2研究室長平野見明氏に感謝の意を表わしたい。また、安全工学部次長山崎弥三郎氏に数々の討論をいただいたことに感謝する。実験装置の製作は、安全工学第2研究室の深谷好夫氏をわずらわした。また、測定法、測定技術に関して、新妻泰氏に負うところが大きかった。ここに記して、感謝申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) 星, 飛岡, 岩村, 黒柳, 武田, 平野, "PCM研究の現状", JAERI-M 6927, 1977 2月
- 2) L. S. Tong et al., "Critical Heat Flux (DNB) in Square and Triangular Array Rod Bundles, JSME 1967 Semi-International Symposium", (1967), Tokyo.
- 3) D. Moxon et al., "Dryout during Flow and Power Transients". AEEW-R 553 (1967)
- 4) W. Kastner et al. "Burnout Tests in Connection with Safety Research", AEC-tr 7394 (1970)
- 5) B. W. Le Tourneau et al., "Critical Heat Flux and Pressure Drop Tests with Parallel Upflow of High Pressure Water in Bundles of Twenty 1/2 in. Rods". Nucl. Sci. Eng., 43 (1971) pp. 90.
- 6) B. S. Shiralkar et al., "Transient Critical Heat Flux-Experimental Results", GEAP-13295 (1972)
- 7) G. P. Gaspari et al., "Dryout Onset in Flow Stoppage, Depressurization, and Power Surge Transient", Energia Nucleare, 20 (1973) pp.554
- 8) G. P. Gaspari et al., "Transient Dryout in a Modelled CIRENE 18+1 Rod Cluster", CISE-R-379 (1974)
- 9) 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(1977) 175頁
- 10) 黒柳利之, 岩村公道, "流量低下過渡沸騰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年10月.
- 11) R. V. Macbeth, "Burn-Out Analysis Part 4: Application of a Local Condition Hypothesis to World Data for Uniformly Heated Round Tubes and Rectangular Channels", AEEW-R267 (1963).
- 12) R. V. Macbeth and B. Thompson, "-Boiling Water Heat Transfer-Burnout in Uniformly Heated Round Tubes: A Compilation of World Data with Accurate Correlations", AEEW-R356 (1964).
- 13) K. M. Becker, "An Analytical and Experimental Study of Burnout Conditions in Vertical Round Ducts", Nukleonik, Band 9, April, 257-270, (1967).
- 14) G. C. Clerici et al., "A Catalogue of Burnout Correlations for Forced Convection in the Quality Region", EUR 3300.e (1966).

記号表

NOMENCLATURE

- A = cross-section area (m^2)
 a = thermal diffusivity (m^2/h)
 b = dimensionless velocity change rate $\equiv \frac{L}{v_i^2} \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right|$
 C_p = specific heat at constant pressure ($kcal/kg \cdot ^\circ C$)
 D = diameter (m)
 G = mass velocity ($kg/m^2 \text{sec}$)
 G^* = dimensionless mass velocity
 H = dimensionless enthalpy $\equiv (h - h_{in}) / \left(\frac{q_i p_i L}{A p v_i} \right)$
 h = enthalpy ($kcal/kg$)
 k = thermal conductivity ($kcal/mh^\circ C$)
 L = heated length (cm or m)
 L_B = boiling length (cm or m)
 P = pressure (kg/cm^2)
 p = perimeter (m)
 Q = heat generation rate (w/cm)
 q'' = heat flux ($kcal/hm^2$)
 S = slip ratio
 T = temperature (mV or $^\circ C$)
 t = time (sec)
 Δt = flow reduction time (sec)
 u = normalized velocity $\equiv v(\tau)/v_i$
 v = velocity (cm/sec or m/sec)
 $\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right|$ = flow reduction rate (cm/sec/sec)
 W = flow rate (l/min)
 X = bulk quality
 Z = axial distance (cm)

Greek letters

- α = void fraction
 β_1 = final to initial flow rate ratio
 $1/\beta_2$ = flow reduction time constant
 δ = thickness (mm or μ)

η = dimensionless height $\equiv Z/L$
 λ = latent heat of evaporation (kcal/kg)
 v = density ratio $\equiv \rho_v/\rho_l$
 ρ = density (kg/m³)
 τ = dimensionless time $\equiv tv_i/L$
 ϕ = normalized flux $\equiv q(u,\tau)/q_i$

Subscripts

B = boiling boundary
e = exit
f = final
i = initial
in= inlet
l = liquid
out= outlet
s = steady state
sat= saturation
v = vapor

付録A. 分離流モデルによる流量低下 過渡沸騰挙動の計算

流量変化あるいは加熱量変化に伴う沸騰流路内の二相流の過渡状態についての特性曲線法による解析については、すでに前報¹⁰⁾において述べた。ここでは、指数函数状に流量を低下した場合の計算結果を示す。以下にみられるように、ここでは、熱流束分布一様、熱流束不変、スリップ比一定とし、圧力の変化は無視した。しかし、過渡状態における沸騰二相流の特性、すなわち、クォリティ、質量速度（これらはバーンアウト相関式中の主要なパラメーター）や気液の速度、ポイド率の時間的变化、およびこれらの圧力やスリップ比の依存性について概観することが出来る。

A.1. 計算式

沸騰部分の連続の式として次式を用いる。なお、以下で ρ_v, ρ_l, h_v, h_l は飽和状態における値である。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha + \rho_l (1-\alpha)) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho_v \alpha v_v + \rho_l (1-\alpha) v_l) = 0 \quad (A-1)$$

エネルギー式は、すでに述べたように、圧力変化の項を無視し、かつ、粘性によるエネルギー消散の項も無視して、次式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha h_v + \rho_l (1-\alpha) h_l) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho_v \alpha h_v v_v + \rho_l (1-\alpha) h_l v_l) = \frac{q_p}{A} \quad (A-2)$$

また、スリップ比に関しては次式とする。

$$S(\alpha) = v_v / v_l \quad (A-3)$$

(A-1)~(A-3)式より、未知量、 α, v_v, v_l が求められれば、クォリティや質量速度は次式により求められる。

$$x(Z, t) = \frac{\rho_v \alpha v_v}{\rho_v \alpha v_v + \rho_l (1-\alpha) v_l} \quad (A-4)$$

$$G(Z, t) = \rho_v \alpha v_v + \rho_l (1-\alpha) v_l \quad (A-5)$$

(A-1)式に h_l をかけ(A-2)式をひく、また、(A-1)式に h_v をかけ(A-2)式をひくとそれぞれ、次式をうる。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial Z} (\alpha v_v) = \frac{q_p}{\lambda A \rho_v} \quad (A-6)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{\partial ((1-\alpha) v_l)}{\partial Z} = \frac{q_p}{\lambda A \rho_l} \quad (A-7)$$

ただし、 $\lambda = h_v - h_l$ である。

ここで、時間、距離、单相流の平均流速、蒸気および液の流速を次のように無次元化し、パラメータも次のように定める。

$$\begin{aligned} \tau &\equiv t v_i / L \\ \eta &\equiv Z / L \\ u(\tau) &\equiv v(\tau) / v_i \\ \phi(\eta, \tau) &\equiv q(\eta, \tau) / q_i \\ u_v &\equiv v_v / v_i \\ u_\ell &\equiv v_\ell / v_i \\ \nu &\equiv \rho_v / \rho_\ell \end{aligned} \tag{A-8}$$

$$H_B \equiv \frac{(h_\ell - h_{in})}{\left(\frac{q_i p L}{A \rho v_i}\right)} = \frac{h_\ell - h_{in}}{h_{out, i} - h_{in}}$$

$$x_{in} = \frac{h_{in} - h_\ell}{\lambda}$$

この (A-8) 式を用いると、(A-6)、(A-7)、(A-3) 各式は、

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \eta} (\alpha u_v) = \frac{(-x_{in})}{\nu H_B} \phi \tag{A-9}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \eta} ((1-\alpha) u_\ell) = \frac{(-x_{in})}{H_B} \phi \tag{A-10}$$

$$u_v / u_\ell = S(\alpha) \tag{A-11}$$

となる。この三ヶの式より、未知量 α 、 u_ℓ 、 u_v が求められれば、クォリティや無次元質量速度 $G^* = G / \rho_\ell v_i$ は、(A-4)、(A-5) 式より次式となる。

$$\left. \begin{aligned} x &= \nu S \alpha / (1 - \alpha + \nu S \alpha) \\ G^* &= (1 - \alpha + \nu S \alpha) u_\ell \end{aligned} \right\} \tag{A-12}$$

さて、(A-9)、(A-10) 式より、(A-11) 式を用いて、

$$\frac{\partial}{\partial \eta} [u_\ell (1 - \alpha + \alpha S)] = \frac{(-x_{in})}{H_B} \frac{1 - \nu}{\nu} \phi$$

を得る。これを積分すると

$$u_\ell (1 - \alpha + \alpha S) - u(\tau) = \frac{(-x_{in})}{H_B} \frac{1 - \nu}{\nu} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta \tag{A-13}$$

を得る。ここで $\eta_B(\tau)$ は、(A-13) 式を考えている時刻 τ における沸騰開始点である。これより u_ℓ を (A-10) 式に代入して、次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{\{S + \alpha(1-\alpha)\} \frac{\partial S}{\partial \alpha}}{\{1 - \alpha + \alpha S\}^2} &\left[\frac{(-x_{in})(1-\nu)}{\nu H_B} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta + u_{in}(\tau) \right] \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \\ &= \frac{(-x_{in})}{H_B} \left[1 + \frac{(1-\alpha)(1-\nu)}{1 - \alpha + S\alpha} \right] \phi \end{aligned}$$

これは、特性曲線法によって、次式のように現わされる。

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{(-x_{in})}{H_B} \left[1 + \frac{(1-\nu)(1-\alpha)}{\nu(1-\alpha+\alpha S)} \right] \phi \quad (A-14)$$

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \frac{\{S+\alpha(1-\alpha)\frac{\partial S}{\partial \alpha}\}}{(1-\alpha+\alpha S)^2} \left[\frac{(-x_{in})(1-\nu)}{\nu H_B} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta + u_{in}(\tau) \right] \quad (A-15)$$

沸騰二相流の諸未知量を求める問題は、(A-14)、(A-15)の両式の積分を行うことに帰着する。

ここで、初期および境界条件は、

i) $\tau_i = 0$, $1 > \eta_i > \eta_B(0)$ なる (τ_i, η_i) についての、 $\alpha = \alpha_i$ は、(A-9)~(A-11)

で、 $\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = 0$ としたときの解で与えられ、

ii) $\tau_i > 0$ では、沸騰境界 $(\eta_B, \tau) = \text{Function}(H_B)$ 上の点 $\tau_i = \tau$, $\eta_i = \eta_B$ で $\alpha = 0$ である。

したがって、パラメータ ν , X_{in} , H_B が与えられたとき、過渡速度変化 $u(\tau)$ あるいは過渡熱流束変化 $\phi(\eta, \tau)$ に対応する $\alpha(\eta, \tau)$ を (A-14)、(A-15) を用いて求めることが出来る。このとき、液流速は、(A-13) から、したがって蒸気流速は (A-11) から、そして、クォリティ、質量速度は (A-12) より求められる。

以下においては、熱流束分布一様および熱流束不変 ($\phi = 1$) かつ $S = \text{定数}$ の場合を取扱う。このとき (A-15) 式は次式のようになる。

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \frac{S}{(1-\alpha+\alpha S)^2} \left[\frac{(1-\nu)(-x_{in})}{\nu H_B} (\eta - \eta_B(\tau)) + u_{in}(\tau) \right] \quad (A-16)$$

ここで、 $\eta_B(\tau)$ は τ における沸騰境界の座標である。(A-16) 式を、初期条件 (η_i, τ_i) で積分して得られる (η, τ) の曲線上での α の変化は (A-14) 式で与えられる。そこで

a) $\tau_i = 0$ で、 $1 > \eta_i > \eta_B(0)$ の $\alpha = \alpha_i$ に着目する場合には、(A-14) 式の積分より

$$\tau = \frac{-\nu H_B}{(1-\nu S)(-x_{in})} \left[(S-1)(\alpha - \alpha_i) + \frac{S(1-\nu)}{(1-\nu S)} \ln \frac{1-(1-\nu S)\alpha}{1-(1-\nu S)\alpha_i} \right] \quad (A-17)$$

である。

b) $\tau_i > 0$ では、沸騰境界上の $\eta_B(\tau_i)$ では $\alpha = 0$ として、(A-14) 式の積分は次式で与えられる。

$$\tau = \tau_i - \frac{\nu H_B}{(1-\nu S)(-x_{in})} \left[(S-1)\alpha + \frac{S(1-\nu)}{(1-\nu S)} \ln \{1-(1-\nu S)\alpha\} \right] \quad (A-18)$$

ここで、(A-17)、(A-18)式で与えられる τ は、 $u(\tau)$ のいかんにかかわらず成り立つものである。すなわち、これらの式は、流量変化のいかんにかかわらず、ボイド率の変化に必要な時間を示している。とくに、(A-18)式からえられる $\tau - \tau_i$ は、沸騰境界上 $\eta_B(\tau_i)$ で τ_i に零であるボイド率が、ボイド率 α となるに必要な時間を意味し、また、パラメーター、 ν 、 S 、 H_B/x_{in} に支配される過渡特性の指標としての時間を示している。比較の為に $\alpha = 1$ になるのに必要な時間 $(\tau - \tau_i)_{\alpha=1}$ と $H_B/(-x_{in})$ との比を、圧力を変数(ν は圧力の関数)とし、 S をパラメーターとして示したものが、Fig. A-1である。この図より、同じ $H_B/(-x_{in})$ (初期条件に関する指標)に対して、ボイド率が零より1になるのに必要な時間は、圧力によって大きく変化していて、低圧では短く、高圧では長いことがわかる。これは、Table A-1にみるように、低圧では ν が小さく、高圧では ν が大きい(沸騰に伴う体積変化が低圧では大きく、高圧では小さい)ので、沸騰発生後の気液二相流の流速は、低圧で大きく、高圧で小さい。したがって、ボイド率が零より1に変化するに要する時間、すなわち、過渡に要する時間は、低圧では短く、高圧では長くなると考えられる。

なお、この図を利用して、(A-16)式の数値積分を行う場合の、時間巾を選択することが出来る。

次節では、流速が指数関数状に低下する場合について(A-16)、(A-17)、(A-18)式を解き(A-12)式より無次元質量速度 G^* 、クォリティ x 、また(A-13)式より液流速 u_L を求めた計算例を示す。流速の変化は次式で与えられる。

$$u_{in}(\tau) = \beta_1 + (1 - \beta_1)e^{-\beta_2\tau} \quad (A-19)$$

このような流速変化の場合の沸騰境界は、熱流束分布一様および熱流束不変の場合($\phi = 1$)について、すでに前報⁽¹⁰⁾に示された方法で求められ次式である。

$$\eta_B = H_B - (1 - \beta_1) \left\{ \tau - \frac{1}{\beta_2} (1 - e^{-\beta_2\tau}) \right\}, \quad \tau \leq H_B \quad (A-20)$$

$$\eta_B = \beta_1 H_B + \frac{(1 - \beta_1)}{\beta_2} (1 - e^{-\beta_2 H_B}) e^{-\beta_2(\tau - H_B)}, \quad \tau \geq H_B \quad (A-21)$$

なお、 $\phi = 1$ の場合には、

$$X_{in} = - \frac{(X_{out})_i H_B}{1 - H_B} \quad (A-22)$$

である。また、(A-20)式より、 $\tau = 0$ で、

$$\eta_B = H_B \quad (A-23)$$

である。

A.2 計算結果と検討

A.2.1 圧力 2.5 kg/cm² の場合の計算結果

以下に示す各計算結果の図のパラメーターの一覧表を Table A-2 にまとめて示す。

Fig. A-2 および Fig. A-3 には、圧力 2.5 kg/cm² で、初期、 $H_B = 0.50$ (初期沸騰境界は加熱部中央にある)、 $(x_{out})_i = 0.1$ ($x_{in} = -0.1$) より流速が

$$u_{in} = 0.5 (1 + e^{-10\tau})$$

で低下し、最終流速が初期流速の半分になった場合の、沸騰境界 η_B 、クォリティ x 、質量速度 G^* 、液流速 u_L 、ボイド率 α の各場所 η での過度変化挙動を、スリップ比 $S = 2$ の場合について示してある。この場合、 $\tau = 0$ における流速減少率は、

$$\frac{du}{d\tau} \Big|_{\tau=0} = \frac{L}{v_i^2} \frac{dv}{dt} \Big|_{t=0} = 5$$

であるから、本報の多くの実験、 $L = 80$ cm、 $v_i \sim 100$ cm/sec の値を用いると、

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{t=0} \sim 600 \text{ cm/sec/sec}$$

である。この程度の流速減少率は、本報中にみられるように、比較的、急速な流速低下の場合である。また、この場合の $\tau = 1$ は約 0.8 秒である。

Fig. A-2 では、 $\eta = 1$ (出口) の質量速度 G^* は、 $\tau \approx 0.5$ まで、入口流速はほとんど低下を終了しているのに、初期の値 $G^* \sim 1$ を示している。また、 $\eta = 0.4$ の場所は、当初、非沸騰領域内にあるが、流速の低下に伴い、 $\tau = 0.28$ の時刻に沸騰境界 (クォリティ零) が現われ、その時刻以降は、沸騰状態にあることが、沸騰境界 η_B の過度変化についての図よりわかる。この $\eta = 0.4$ の場所が、 $\tau = 0.28$ に沸騰状態となると、この場所の G^* は急速に増大し、 $\tau \sim 0.5$ でピークに達してから急速に減少して、一定値に近づいている。このように、沸騰領域内各点の過度時質量速度は、入口質量速度 (図中 u_{in} と同一曲線) と異った大きな値を示している。このことは、次のように考えることが出来る。Fig. A-4 で、加熱によって、当初、流路内の領域 ABC は蒸気で占められ、その他の領域は水であったとする。この状態から、流量低下 (あるいは加熱量増加) によって、最終的に、領域 CDE は蒸気で、その他は水で占められるとする。したがって、過度期間中の質量速度は、図中の斜線部 ADEB 内にあった水による流れによって、入口質量速度より大きな値を示すと考えられる。

Fig. A-2 で、出口近傍のクォリティ x は、 $\tau \sim 0.5$ まで、比較的ゆっくり、その後急速に増加して一定値に近づいている。

液流速 u_L は、Fig. A-3 に示すように、流速低下に伴って増加し、一定値に漸近している。

ボイド率 α は、Fig. A-3に示すように、出口($\eta=1$)では、ほとんど1に近い値を示している。また、流速低下開始前にすでに沸騰領域にある場所 $\eta=0.6, 0.8$ のボイド率も、過渡期間中の変化は少ない。一方、過渡期間中に沸騰状態となる場所 $\eta=0.3, 0.4$ のボイド率は、急速に増大して一定値に漸近している。

Fig. A-5, Fig. A-6は、沸騰二相流の過渡挙動についてのスリップ比 S の影響を示すもので、初期条件および流速低下条件はFig. A-2, Fig. A-3の場合と同一である。Fig. A-5に示されるように、出口質量速度 G_{out}^* や出口クォリティ x_{out} の過渡変化は、スリップ比 S を1, 2, 5と変更しても、あまり大きな差は認められない。一方、液流速 $u_{l,out}$ は、Fig. A-6に示されるように、スリップ比に大きく影響される。また、同図にみられるように、ボイド率 α は、出口($\eta=1$)ではスリップ比にほとんど影響されないが、加熱部中央($\eta=0.5$)では、やや影響されている。

Fig. A-7~Fig. A-9は、沸騰二相流の過渡挙動についての流速低下時定数($1/\beta_2$)の影響を示す。初期条件は今までと同一であり、 S は2とし、流速低下形状は

$$u_{in} = 0.5(1 + e^{-\beta_2 \tau})$$

で、 $\beta_2 = 0.1, 0.25, 1, 2.5, 10$ の場合である。これらの β_2 は、本報中の実験条件では、

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{t=0} \sim 6, 15, 60, 150, 600 \text{ cm/sec/sec}$$

の流速減少率に対応している。

Fig. A-7に示すように、出口質量速度 G_{out}^* は、過渡変化開始から $\tau \leq 0.5$ では、 β_2 の値によらず、1に近い値を示している。しかし、出口と入口の質量速度の差は β_2 の値に依存している。 $\tau \geq 0.5$ では、 G_{out}^* は、 β_2 が大きい程、急速に低下している。また、同一入口質量速度における G_{out}^* は、 β_2 の大きいほど大きいことを示している。

流速低下時定数($1/\beta_2$)によって、沸騰二相流動の挙動のちがいを、場所 $\eta=0.4$ における質量速度 G^* について示したものがFig. A-8である。この場所での G^* は、沸騰開始とともに、入口質量速度より大きな値となり、ピークに達してから低下している。このピークは、 β_2 が大きな(流速低下が急激)ほど、早い時刻にあらわれ、しかも、大きな値を示している。そして、 $\beta_2=0.25$ では、ピークは現われていない。したがって、Fig. A-7に示した G_{out}^* が、 $\tau \approx 0.5$ まで、 β_2 によらず、ほとんど同じであっても、管路内部の流動の様相は、 β_2 の値の大小によって、かなり異っていると思われる。

Fig. A-9には、 $\beta_2 = 0.1, 1, 10$ の場合の出口質量速度 G_{out}^* と入口質量速度 G_{in}^* との比を示す。この比は、流速低下時定数($1/\beta_2$)が小さいほど、大きなピークに達していて、過渡変化の程度の大きいことを示している。 $\beta_2 = 0.1$ の場合(ゆっくりした流速低下)でも、この比は1より、わずかではあるが、大きくなっている。

Fig. A-10, Fig. A-11には、沸騰二相流の過渡挙動についての最終流速の影響を、 $\beta_2 = 10$ の場合について示す。初期条件は今までと同一($H_B = 0.5$, $(x_{out})_i = 0.1$)であり、 $S = 2$ とし、最終-初期流速比 β_1 を $1/2, 1/3, 1/4$ とした場合である。これらの場合の最終クォリティは、それぞれ、0.3, 0.5, 0.7である。

Fig. A-10に見られるように、出口 ($\eta = 1.0$) における質量速度 G^* は、 $\tau \sim 0.5$ まで、入口質量速度の低下終了にもかかわらず、また最終流速値 β_1 の値にもかかわらず、初期値とほとんど変わらない同一の値を示している。しかし、場所 $\eta = 0.3$ における質量速度 G^* は、最終流速の小さい (β_1 小) ほど、大きなピークに達してから低下している。Fig. A-11中の沸騰境界 η_B の変化に見られるように、最終沸騰境界は、 $\beta_1 = 0.5$ の場合、0.25であり、 $\beta_1 = 0.25$ の場合、0.125である。すなわち、 $\eta = 0.3$ より上流の沸騰領域は $\beta_1 = 0.5$ の場合より、 $\beta_1 = 0.25$ の場合のほうが大きい。したがって、 $\eta = 0.3$ においては、最終流速が小さいほど、質量速度 G^* は大きなピークを示すものと考えられる。

Fig. A-11には、出口-入口質量速度比 G_{out}^*/G_{in}^* の過度変化を示す。この比は、最終流速が小さい (β_1 が小さい) ほど、ピークが大きく、過度変化の程度の大きいことがわかる。

以上の計算例は、初期条件が、 $H_B = 0.5$ 、 $(x_{out})_i = 0.1$ ($x_{in} = -0.1$) の場合であるが、 H_B や $(x_{out})_i$ (したがって x_{in}) を変化した場合の出口質量速度 G_{out}^* や出口クォリティ x_{out} の過度挙動を、Fig. A-12に示す。この場合、流速低下条件は同一で、 $\beta_1 = 0.5$ 、 $\beta_2 = 10$ である。

$H_B = 0.5$ で、 $(x_{out})_i = 0.1$ ($x_{in} = -0.1$) の場合と $(x_{out})_i = 0.05$ ($x_{in} = -0.05$) の場合とを比較すると、沸騰境界 η_B の変化は同一であり、出口クォリティ x_{out} の差は大きい、出口質量速度 G_{out}^* の差は小さい。また、 $x_{in} = -0.05$ で、 $H_B = 0.5$ ($(x_{out})_i = 0.05$) の場合と $H_B = 0.25$ ($(x_{out})_i = 0.15$) の場合とを比較すると、沸騰境界 η_B の変化の差に応じて、 G_{out}^* や x_{out} の変化の差も大きくなっている。

A 2.2 実験との対比

今まで、圧力 2.5 kg/cm^2 の場合について、流速低下時の沸騰 2 相流の過度変化挙動の計算例を示した。以下に、これらの計算結果と本報でのべた実験結果とを比較する。なお、本実験では過度変化中に圧力が変化する。この圧力変化による物性値の変化は、Table A-1 に示すように大きい、計算では、このような圧力や物性値の変化を考慮していない。また、実験では、大部分、ランプ状に流速を低下したが、計算では、指数函数状に流速低下するとした。したがって、以下に述べることは、あくまでも定性的な評価にとどまるものである。

(i) 流量低下時に圧力ピークが出現するのは (Fig. 4-11), Fig. A-7 ~ Fig. A-9 にみられるように、流速減少率が大きい程、沸騰流路内各点の質量速度が大きなピークを示すためと思われる。また、

(ii) 大きな流速減少率で、圧力ピークがほぼ一定値を示すのは (Fig. 4-12), 流速減少率がある程度以上大きくなると、沸騰境界の移動速度は、ほとんど一定値に近づき、沸騰流路内 2 相流の挙動が、急速な流速低下の場合に対応する Fig. A-2, Fig. A-3 の場合と、ほとんどかわらないためである。

(iii) 圧力ピークの変化量を、Fig. 4-12 (入口温度 30°C , 3 l/min より約 1 l/min へと流量低下) と Fig. 4-13 (入口温度 80°C , 2 l/min より約 1 l/min へと流量低下) 中の同一熱流速 ($1.19 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$) の場合についてくらべると、Fig. 4-12 の場合が大きい。また、Fig. 4-13 の場合には、圧力ピークが出現し始める流速減少率が、Fig. 4-12 の場合よりかなり大き

な値を示している。これらは、過渡時における最終流量 (β_1) の影響を示した Fig. A-10 および初期沸騰境界位置 H_B や初期出口クォリティ (x_{out})_i の影響を示す Fig. A-12 にみられるように、Fig. 4-12 の場合は、Fig. 4-13 の場合より、過渡変化の程度が大きいと思われる。

(IV) 実験で、バーンアウトは圧力ピークが終了してから発生している。これは、Fig. A-2 あるいは Fig. A-7, Fig. A-8 に見られるように、過渡時には、沸騰流路内の質量速度がピークに達し、つづいて低下してからバーンアウトが発生するものと考えられる。

(V) 流速減少率の増加とともに、小さい入口質量速度でバーンアウトが発生することが認められた (Fig. 4-16, Fig. 4-17)。これは、若し、バーンアウトが局所的に同一出口質量速度または同一出口クォリティで発生すると仮定すれば、Fig. A-7 に示されるように、同一出口質量速度であっても、または、同一出口クォリティであっても、そのときの入口質量速度は、流速減少率が大きい程、小さな値を示しているためと思われる。

A 2.3 圧力 150 kg/cm² の場合の計算結果

Fig. A-13 および Fig. A-14 には、圧力 150 kg/cm² で、初期、 $H_B = 0.5$ (初期沸騰境界は加熱部中央にある)、 $x_{out} = 0.1$ ($x_{in} = -0.1$) より、流速が

$$u = 0.5 (1 + e^{-10\tau})$$

で低下し、最終流速が初期流速の半分になった場合の、沸騰流路内の各場所での、沸騰 2 相流に関する諸量の変化の模様を、スリップ比 2 の場合について示してある。これらの初期条件、流速低下方式は、圧力 2.5 kg/cm² の場合の、Fig. A-2, Fig. A-3 に示された場合と全く同様である。したがって、沸騰境界 η_B の変化も、また同一である。沸騰 2 相流動に関する諸量を、圧力 2.5 kg/cm² の場合と 150 kg/cm² の場合について比較すると次の通りである。

	2.5 kg/cm ² の場合 (Fig. A-2, A-3)	150 kg/cm ² の場合 (Fig. A-13, A-14)
出口 ($\eta = 1$)	$\tau \sim 0.5$ まで	なめらかに低下する
質量速度 G^*	1 に近い値を示し、 その後、急減する	
$\eta = 0.3, 0.4$ での 質量速度 G^*	急激なピークを示す	わずかに増加し、つづいて減少する
クォリティ x	$\tau \sim 0.5$ 以降かなり はやく増加する	なめらかに増加する
出口液流速 u_e	初期値より大きな最終値に増加する 40~50 の値を示す	初期値より小さな最終値に減少する 1 前後の値を示す
出口近くの ポイド率 α	ほとんど 1 に近い値を示す ほとんど変化しない	1 より小さい値を示す なめらかに増加する
場所 $\eta = 0.3, 0.4$ でのポイド率 α	急激に増加する	なめらかに増加する
最終値に達するに 要する時間	$\tau \sim 1.0$	$\tau \sim 1.5$

Fig. A-15およびFig. A-16は、沸騰二相流の過渡挙動についての、スリップ比 S の影響を示すもので、初期条件および流速低下条件は、Fig. A-13, Fig. A-14の場合と同様である。Fig. A-15に示した出口質量速度 G_{out}^* や出口クォリティ x_{out} の過渡時における S の影響を、圧力 2.5 kg/cm^2 の場合のスリップ比の影響を示したFig. A-5と比較してみると、圧力 150 kg/cm^2 の場合のほうが S の影響が大きいといえる。また、出口クォリティ x_{out} について比較すると、圧力 2.5 kg/cm^2 の場合には、 S が小さいほど過渡時の x_{out} が大きい、圧力 150 kg/cm^2 の場合には、この関係が逆転している。

また、出口液流速 $u_{L,out}$ の最終値は、Fig. A-16に示すように、 S が1の場合でも、初期値より小さな値を示している。出口ボイド率 α も1より小さな値を示している。

Fig. A-17, Fig. A-18は、圧力 150 kg/cm^2 の場合の流速低下時定数 $(1/\beta_2)$ および最終-初期流速比 (β_1) の影響を、出口-入口質量速度比 G_{out}^*/G_{in}^* の過渡変化について示す。これらの図と、圧力 2.5 kg/cm^2 の場合について、同様の影響を示したFig. A-9およびFig. A-11とを比較してみれば、これらの比は、いずれの場合も、圧力 150 kg/cm^2 の場合に小さい値を示し、かつ、一定値に漸近するのに長い時間を要している。

以上述べたように、一般に、圧力 150 kg/cm^2 の場合の過渡変化の程度は、圧力 2.5 kg/cm^2 の場合より、比較的小さい傾向にあるといえよう。

A 2.4 圧力の影響について

ここでは、流量低下時の沸騰二相流動の過渡挙動に対する圧力 $2.5 \sim 150 \text{ kg/cm}^2$ の間の圧力の影響について述べる。

Fig. A-19~Fig. A-22は、初期に、 $H_B=0.5$, $(x_{out})_i=0.1$ ($x_{in}=-0.1$)であり、流速を

$$u_{in} = 0.5 (1 + e^{-10\tau})$$

にしたがって低下した場合である。

Fig. A-19に示すように、出口質量速度 G_{out}^* は、圧力の増加と共に、 τ が小さい間、小さい値を示しているが、最終値に漸近する時間は長くなっている。また、出口クォリティ x_{out} は、初期には圧力の高い方が大きい、最終値に漸近する時間は、圧力の増加とともに、長くなっている。

場所 $\eta=0.4$ および 0.6 での質量速度 G^* の過渡変化をFig. A-20に示す。場所 $\eta=0.6$ は、初期にすでに沸騰状態にあるので、この点の質量速度 G^* の変化は、出口($\eta=1$)のそれ(Fig. A-19)と同様な傾向を示す。一方、場所 $\eta=0.4$ は、 $\tau=0.28$ で沸騰領域に入る、質量速度 G^* にピークが現われているが、そのピーク値は、圧力の増加とともに、小さくなっている。

出口液流速 $u_{L,out}$ の変化挙動をFig. A-21に示す。圧力の増加とともに、出口液流速のオーダーは次第に減少している。また、低圧では、最終出口液流速は初期出口液流速より大きな値を示しているが、高圧では、最終出口液流速のほうが小さくなっている。これは、沸騰に伴う体積変化が、Table A-1に示すように、低圧では大きく、高圧では小さいことによるものと考えられる。

出口ボイド率 α_{out} および出口-入口質量速度比 G_{out}^*/G_{in}^* の過渡変化を Fig. A-22 に示す。 α_{out} は、圧力 2.5 kg/cm^2 で、1 に近い値で、過渡期間中、ほとんど変化していない。しかし、圧力の増加とともに、その値は次第に低下し、過渡変化とともに増加している。また、 G_{out}^*/G_{in}^* の値は、圧力の増加とともに小さくなっている。

Fig. A-23, Fig. A-24 には、初期条件は Fig. A-19 ~ Fig. A-22 の場合と同様であるが、流速をゆるやかに低下した場合 ($\beta_2 = 1$) の沸騰二相流の過渡挙動に対する圧力の影響を示す。このようにゆっくりとした流速低下の場合、各場所での質量速度 G^* や出口クォリティの過渡変化に対する圧力の影響は比較的小さくなっている。 $\eta = 0.4$ における質量速度 G^* は、圧力 2.5 kg/cm^2 でピークを示しているが、圧力 40 kg/cm^2 以上では、このピークは現われず、時間の経過とともに減少している。

さきに、圧力 2.5 kg/cm^2 の場合と圧力 150 kg/cm^2 の場合とでの、出口質量速度や出口クォリティの過渡変化におよぼすスリップ比 S の影響は逆転していることを述べた (Fig. A-5 と、Fig. A-15 の比較)。圧力 40 kg/cm^2 における出口質量速度 G_{out}^* や出口クォリティ x_{out} の過渡変化におよぼすスリップ比 S の影響を示したものが Fig. A-25 である。出口質量速度 G_{out}^* の変化は、スリップ比 S により、影響をうけているが、出口クォリティ x_{out} の変化には、あまり影響がみられない。しかし、これらの変化におよぼすスリップ比の効果は、 $\tau \sim 0.75$ 以降、圧力 150 kg/cm^2 の場合と同傾向であり、圧力 2.5 kg/cm^2 の場合とは逆になっている。

なお、Fig. A-26 は、圧力 40 kg/cm^2 で、出口-入口質量速度比 G_{out}^*/G_{in}^* の過渡変化におよぼす最終-初期流速比 (β_1) の影響を示したものである。この比のピーク値は、圧力 2.5 kg/cm^2 の場合 (Fig. A-11) と圧力 150 kg/cm^2 の場合 (Fig. A-18) との間にある。

Table A-1. Water properties.

圧 (abs.) (kg/cm ²)	飽和温度 (°C)	比 体 積 (m ³ /kg)		ν = ρ_g/ρ_f	Specific Enthalpy of Saturated Water (kcal/kg)	Latent Heat (kcal/kg)
		蒸 気 $1/\rho_g$	水 $1/\rho_f$			
2	119.6	0.9018	1.060×10^{-3}	0.00146	119.9	526.3
3	132.9	0.6168	1.073	0.00174	133.4	517.2
20	211.4	0.1015	1.175	0.0116	215.9	452.1
21	213.9	0.09672	1.179	0.0122	218.6	449.6
30	232.8	0.06794	1.214	0.0179	239.6	429.7
31	234.6	0.06574	1.218	0.0185	241.7	427.7
40	249.2	0.05076	1.249	0.0246	258.4	410.6
41	250.6	0.04949	1.253	0.0253	260.1	408.8
70	284.5	0.02798	1.347	0.0481	301.0	361.8
71	285.4	0.02754	1.350	0.0490	302.3	360.3
150	340.6	0.01066	1.644	0.154	382.1	244.5
152	341.6	0.01044	1.653	0.158	383.9	241.3

Table A-2. Lists of parameters. (Fig. A-1VA-26)

Fig.	Ordinate	Abscissa	Parameters							
			P (kg/cm ²)	S	η	β_1	β_2	H _B	X _{in}	
A-1	$\frac{\tau(\alpha=1)-\tau_1}{H_B/(-X_{in})}$	P	-	1,2,3	-	-	-	-	-	-
A-2	G*, X, η_B	τ	2.5	2	0.3~1.0	0.5	10	0.5	-0.1	
A-3	U _q , α	"	"	"	"	"	"	"	"	"
A-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-5	G* _{out} , X _{out} , η_B	τ	2.5	1,2,5	1.0	0.5	10	0.5	-0.1	
A-6	U _q , out, α	"	"	"	0.5, 1.0	"	"	"	"	"
A-7	G* _{out} , X _{out}	"	"	2	1.0	"	1,2,5,10	"	"	"
A-8	G*, η_B	"	"	"	0.4	"	0.25, 1 2.5, 10	"	"	"
A-9	G* _{out} /G* _{in} , U _{in} , η_B	"	"	"	1.0	"	0.1, 1, 10	"	"	"
A-10	G*, X _{out}	"	"	"	0.3, 1	0.25, 0.3333, 0.5	10	"	"	"
A-11	G* _{out} /G* _{in} , U _{in} , η_B	"	"	"	1	"	"	"	"	"
A-12	G* _{out} , X _{out} , η_B	"	"	"	"	0.5	"	0.25 0.50	-0.05 -0.05 -0.10	

Table A-2. (cont.)

Fig.	Ordinate	Abscissa	Parameters							
			P (kg/cm ²)	S	η	β_1	β_2	H _B	X _{in}	
A-13	G*, X, η_B	τ	150	2	0.3~1.0	0.5	10	0.5	-0.1	
A-14	U _{ℓ} , α	"	"	"	"	"	"	"	"	
A-15	G* _{out} , X _{out} , η_B	"	"	1, 2, 3	1	"	"	"	"	
A-16	U _{ℓ} , _{out} , α	"	"	"	"	"	"	"	"	
A-17	G* _{out} /G* _{in} , U _{in} , η_B	"	"	2	"	"	0.1, 1, 10	"	"	
A-18	G* _{out} /G* _{in} , U _{in} , η_B	"	"	"	"	0.25, 0.3333, 0.50	10	"	"	
A-19	G* _{out} , X _{out}	"	2.5 ~150	"	"	0.5	"	"	"	
A-20	G*	"	"	"	0.4, 0.6	"	"	"	"	
A-21	U _{ℓ} , _{out}	"	"	"	1.0	"	"	"	"	
A-22	α _{out} , G* _{out} /G* _{in}	"	"	"	"	"	"	"	"	
A-23	G* _{out} , X _{out}	"	"	"	"	"	1	"	"	
A-24	G*	"	"	"	0.4, 0.6	"	"	"	"	
A-25	G* _{out} , X _{out} , η_B	"	40	1, 2, 3	1.0	"	10	"	"	
A-26	G* _{out} /G* _{in} , U _{in} , η_B	"	"	2	"	0.25, 0.3333, 0.5	10	"	"	

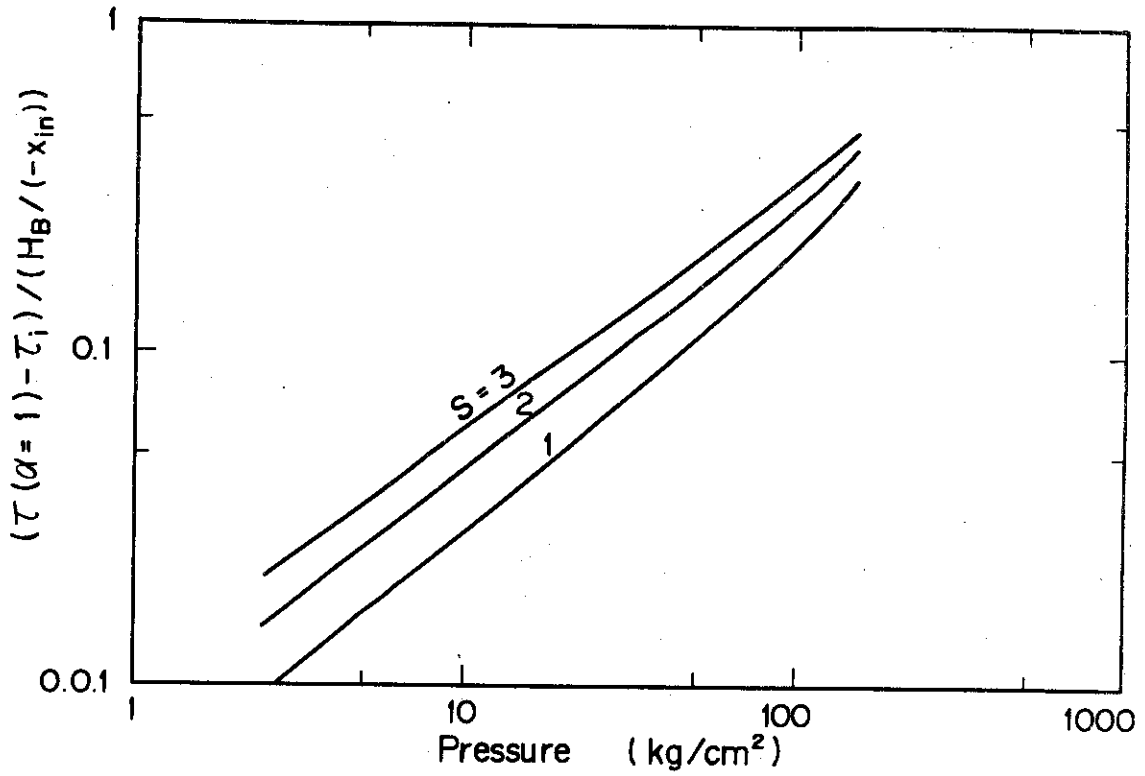


Fig. A-1. Effect of pressure on time duration required for void fraction (α) from 0 to 1.

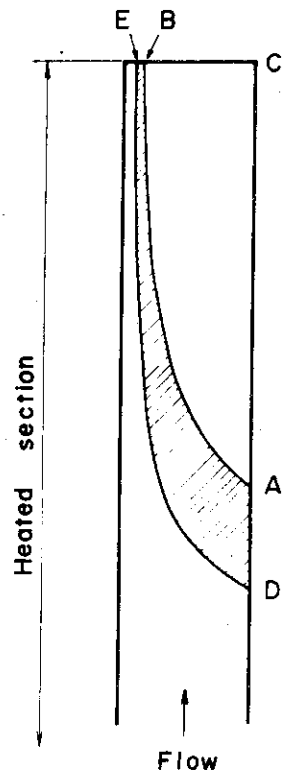


Fig. A-4. Transient two-phase flow

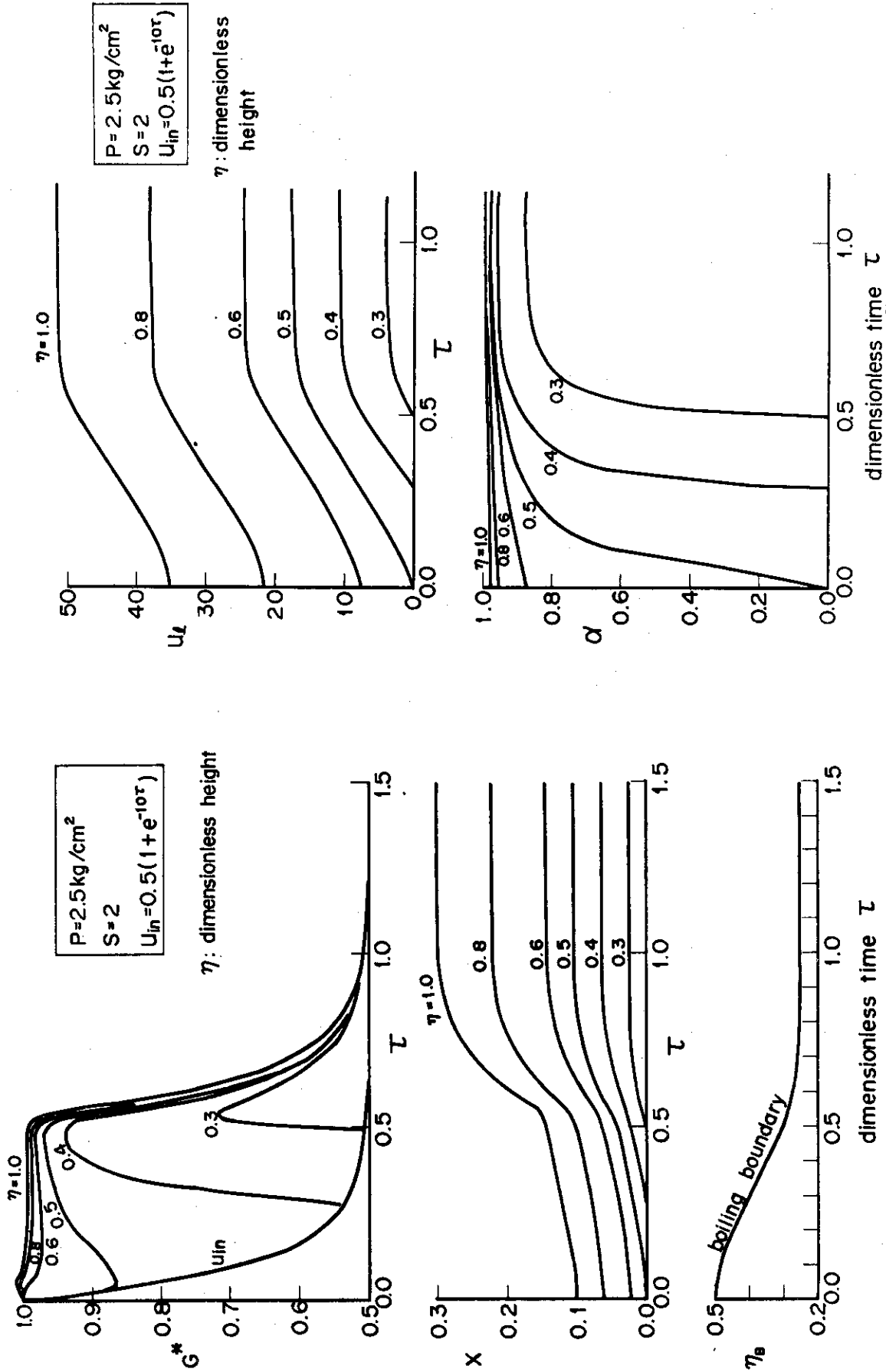


Fig. A-3. Transient behavior of liquid velocity (U_L) and void fraction (α) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

Fig. A-2. Transient behavior of mass velocity (G^*), quality (X), and boiling boundary (η_b), for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

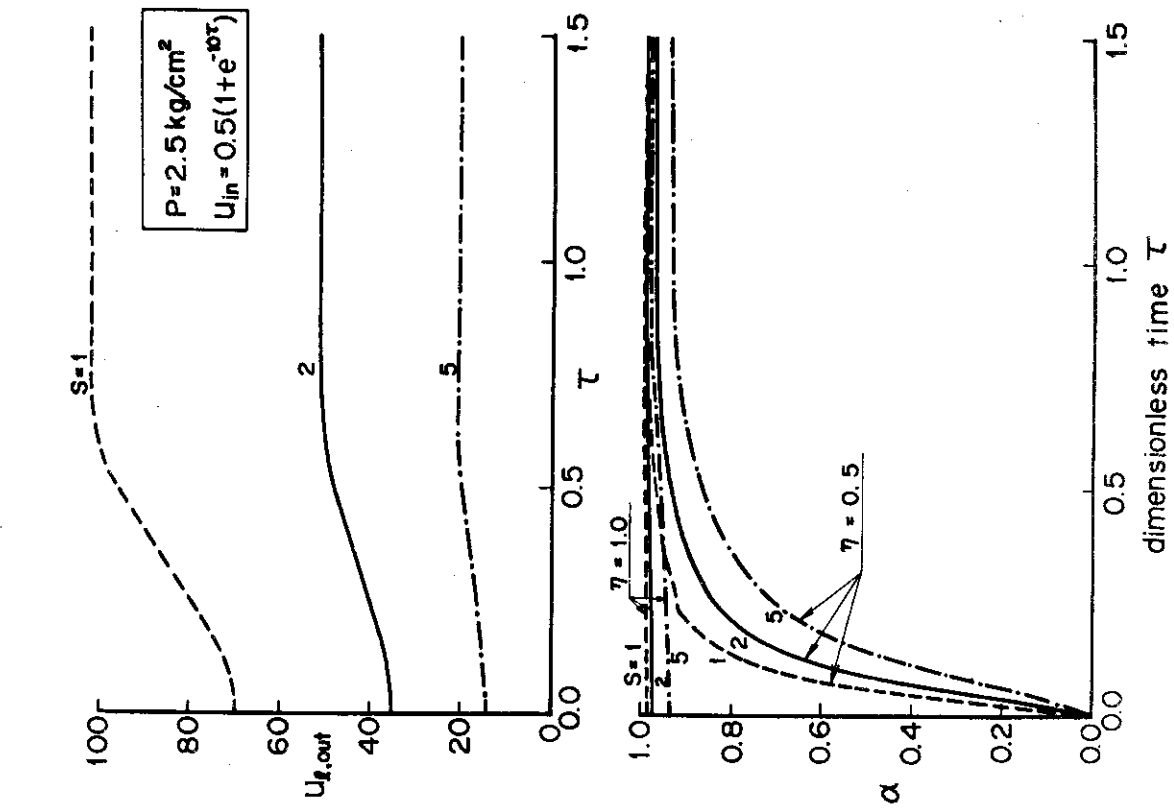


Fig. A-5. Effect of slip ratio (S) on outlet mass velocity (G_{out}^*) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

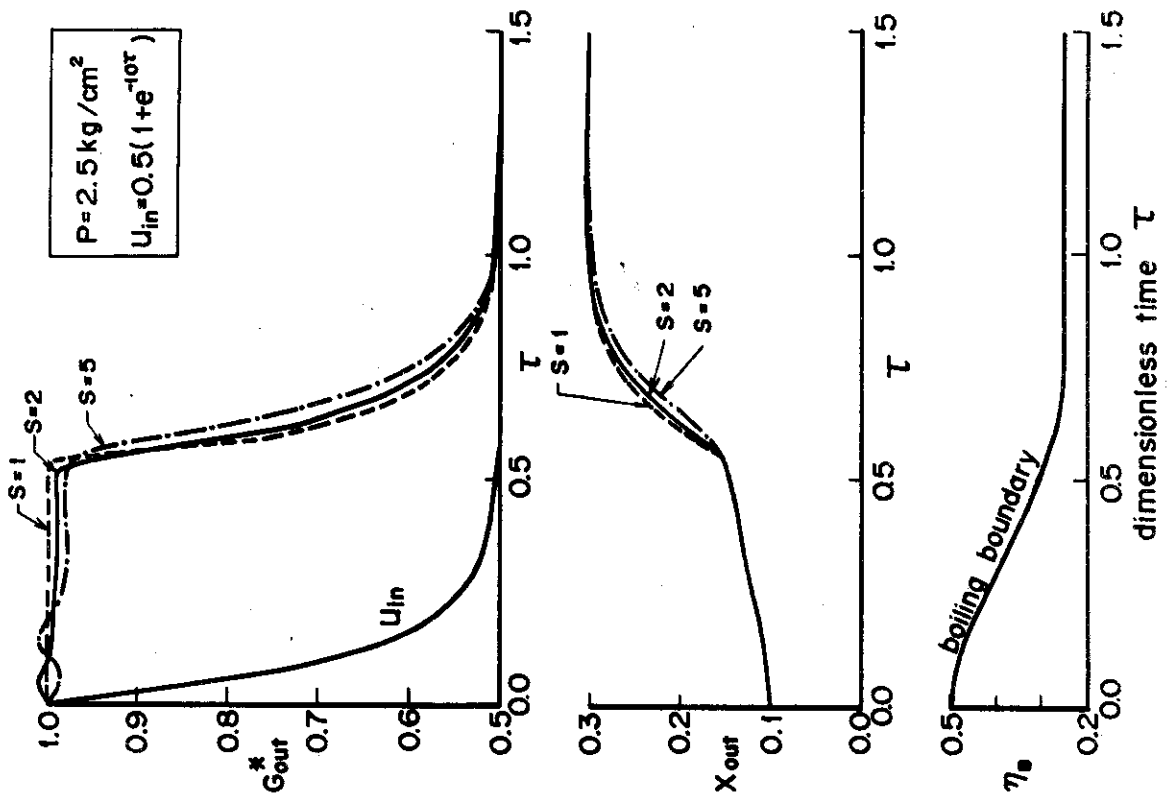


Fig. A-6. Effect of slip ratio (S) on outlet liquid velocity ($U_{g,out}$) and void fraction (α) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

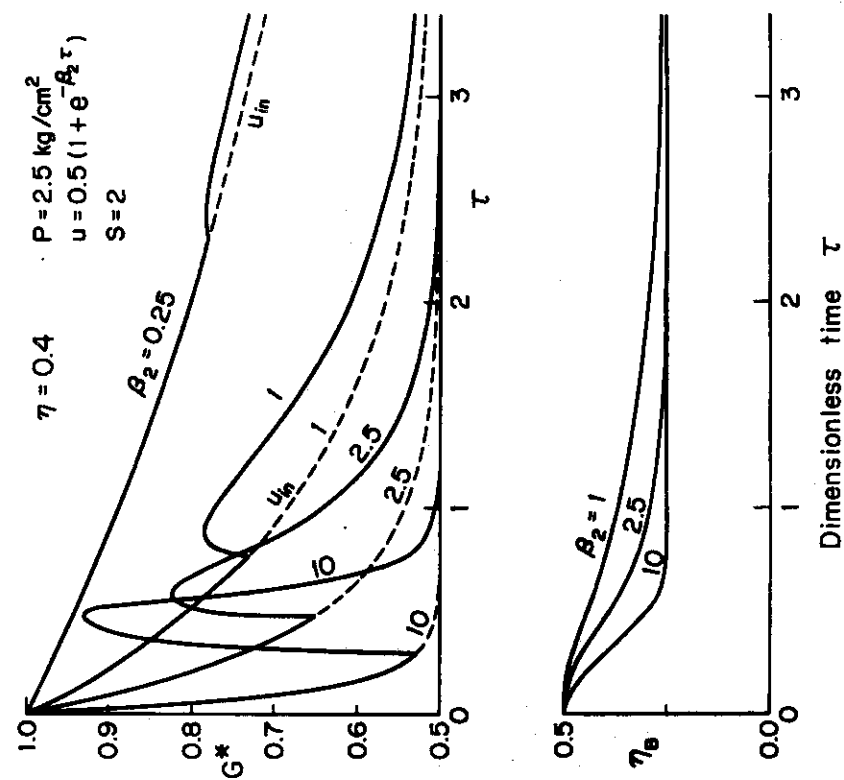


Fig. A-8. Effect of flow reduction time constant ($1/\beta_2$) on mass velocity (G^*) at position of $\eta = 0.4$ for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

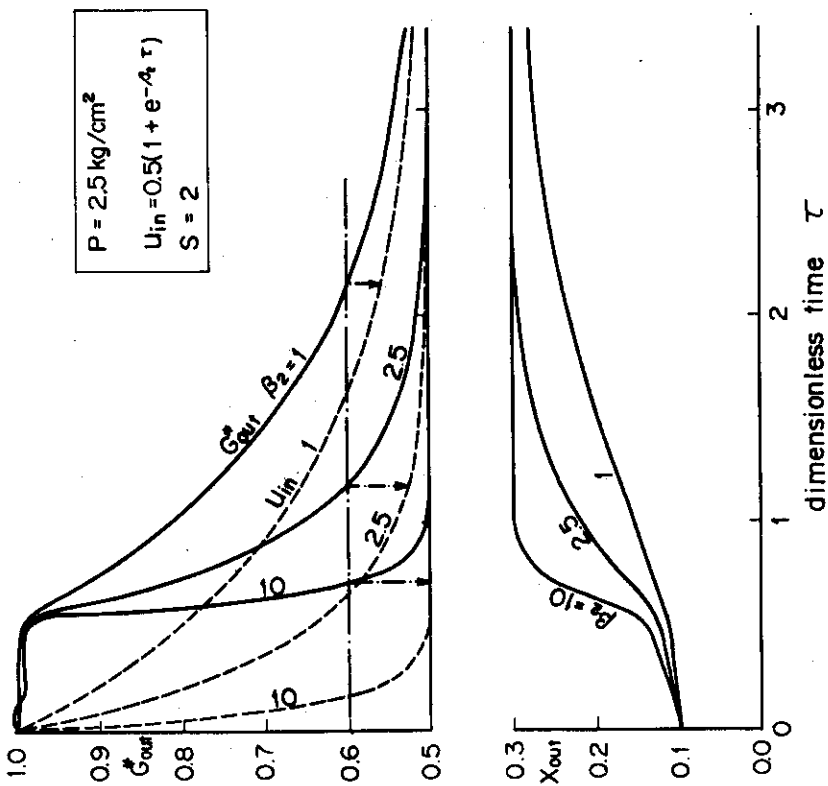


Fig. A-7. Effect of flow reduction time constant ($1/\beta_2$) on outlet mass velocity (G_{out}^*) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

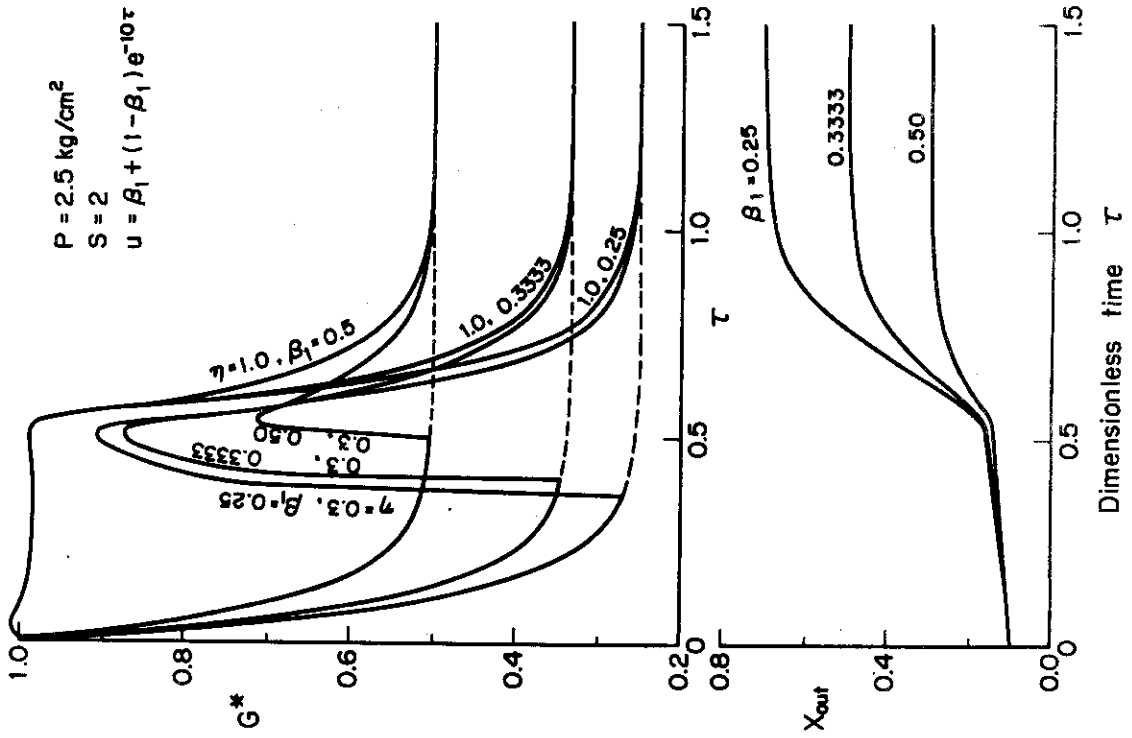


Fig. A-10. Effect of final to initial velocity ratio (β_1) on mass velocity (G^*) and outlet quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

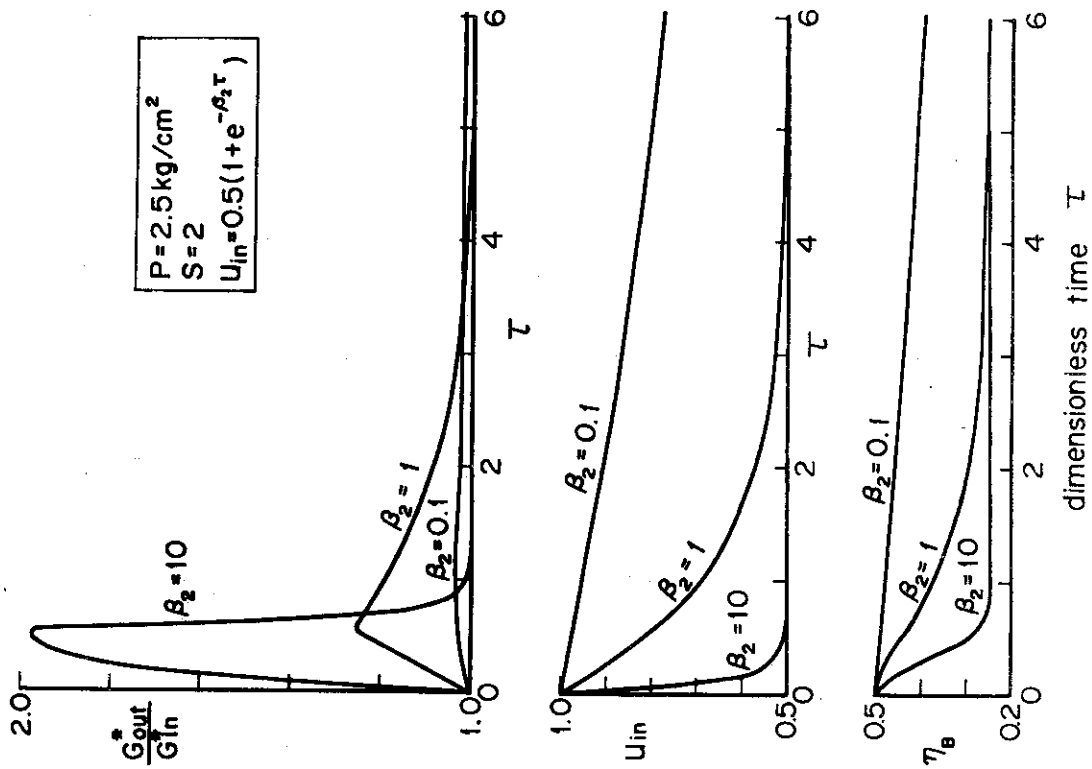


Fig. A-9. Effect of flow reduction time constant ($1/\beta_2$) on ratio of outlet to inlet mass velocity (G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

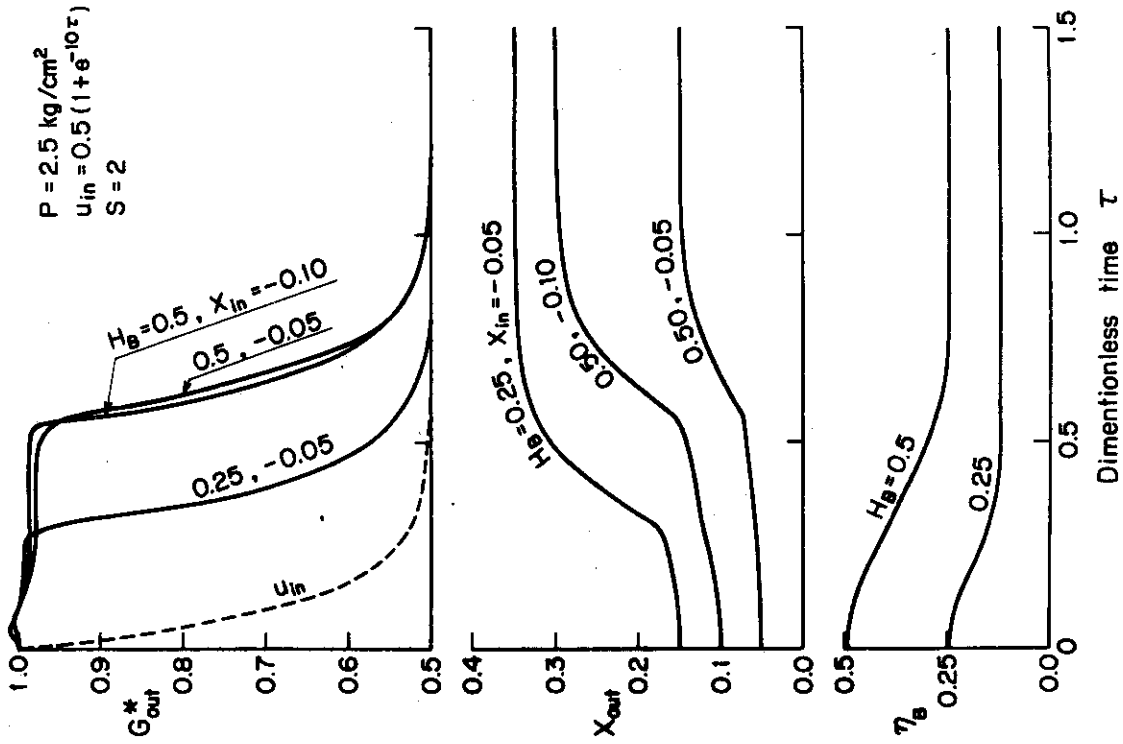


Fig. A-12. Effects of inlet quality (X_{in}) and boiling boundary (h_b) on outlet mass velocity (G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

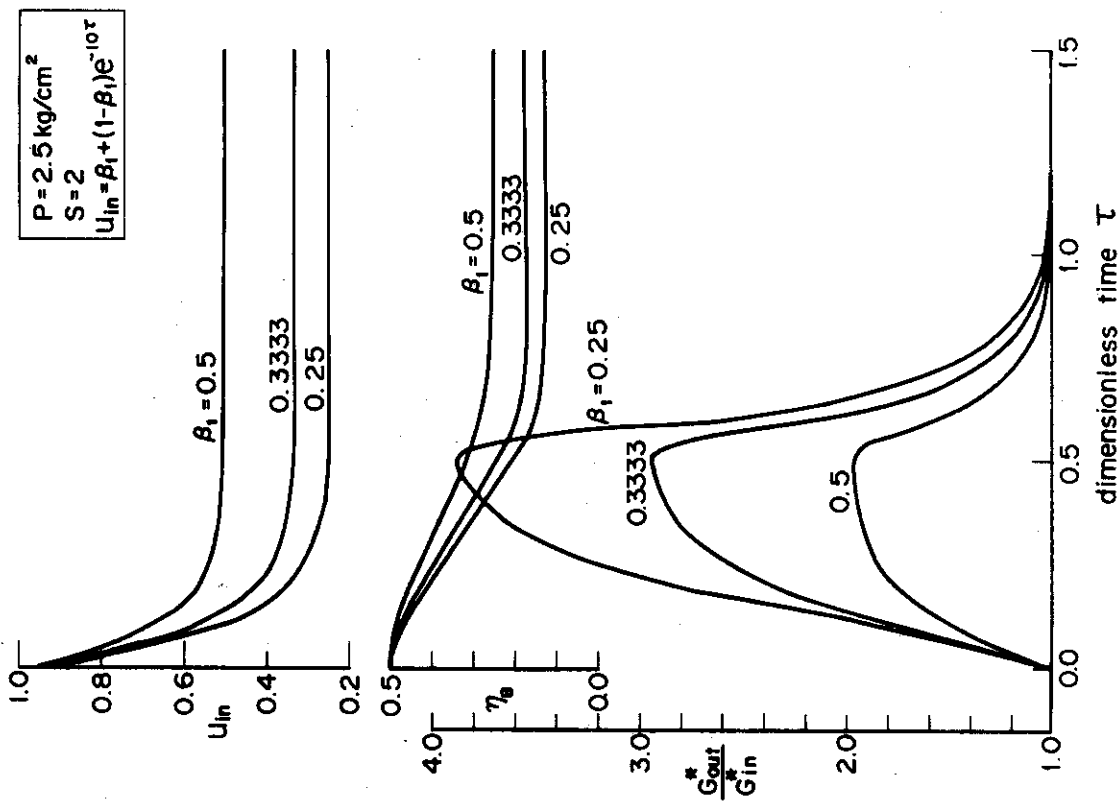


Fig. A-11. Effect of final to initial velocity ratio (β_1) on ratio of outlet to inlet mass velocity (G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition. ($P = 2.5 \text{ kg/cm}^2$)

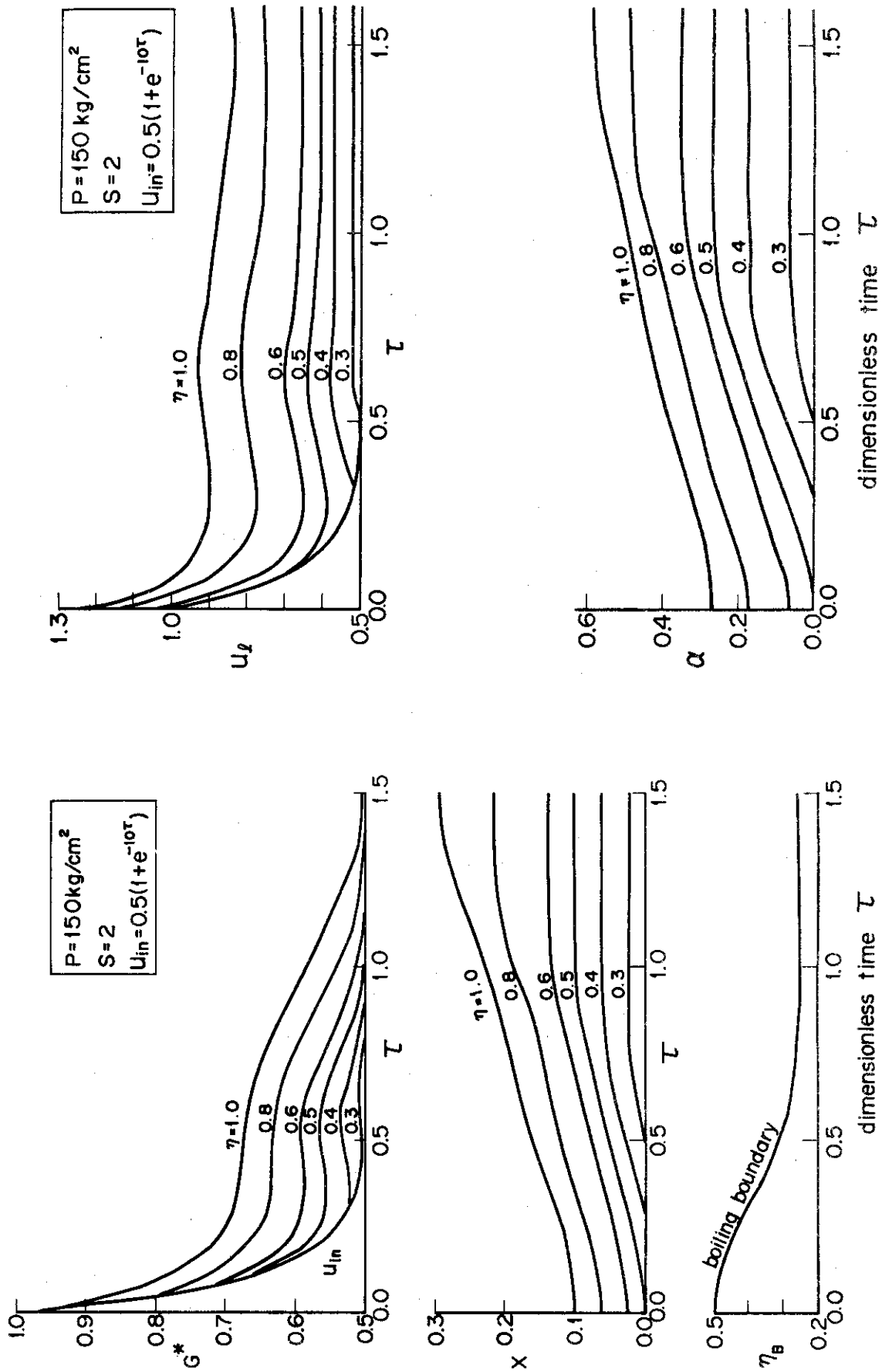


Fig. A-13. Transient behavior of mass velocity (G^*), quality (X) and boiling boundary (η_B) for flow reduction condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$)

Fig. A-14. Transient behavior of liquid velocity (U_L) and void ratio (α) for flow reduction condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$)

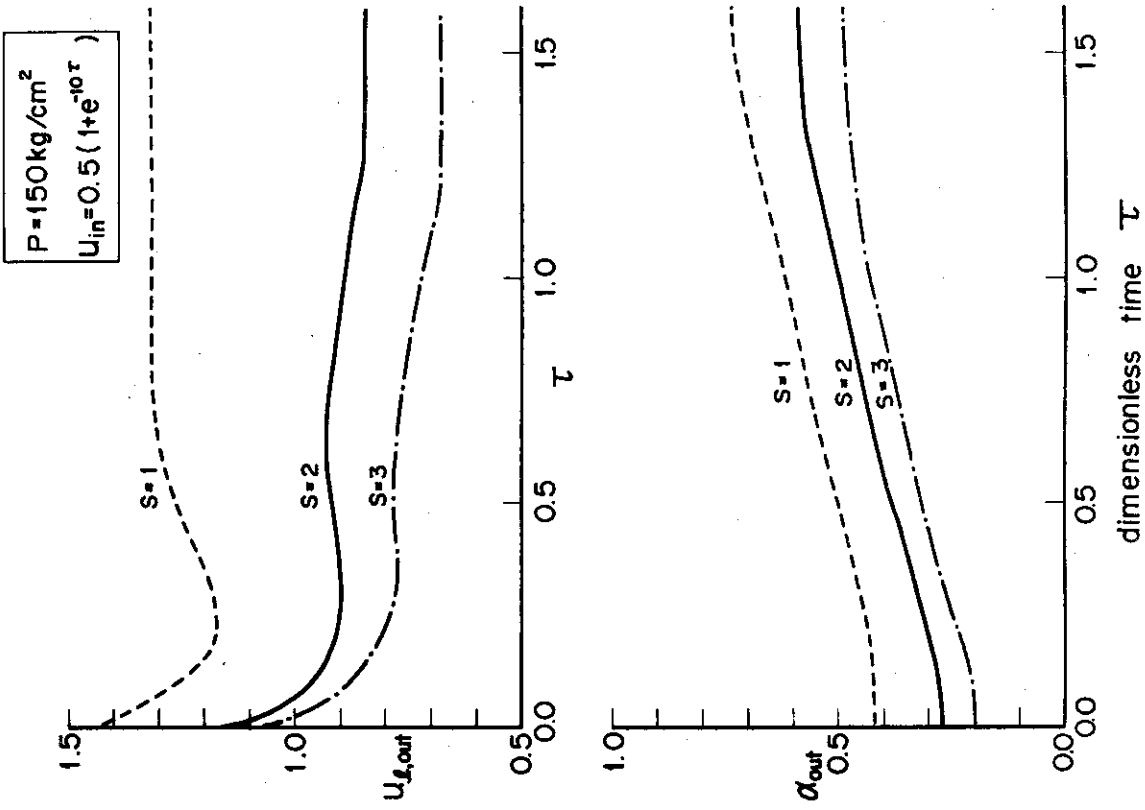


Fig. A-16. Effect of slip ratio (S) on outlet liquid velocity ($U_{l, out}$) and void ratio (α_{out}) for flow reduction condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$)

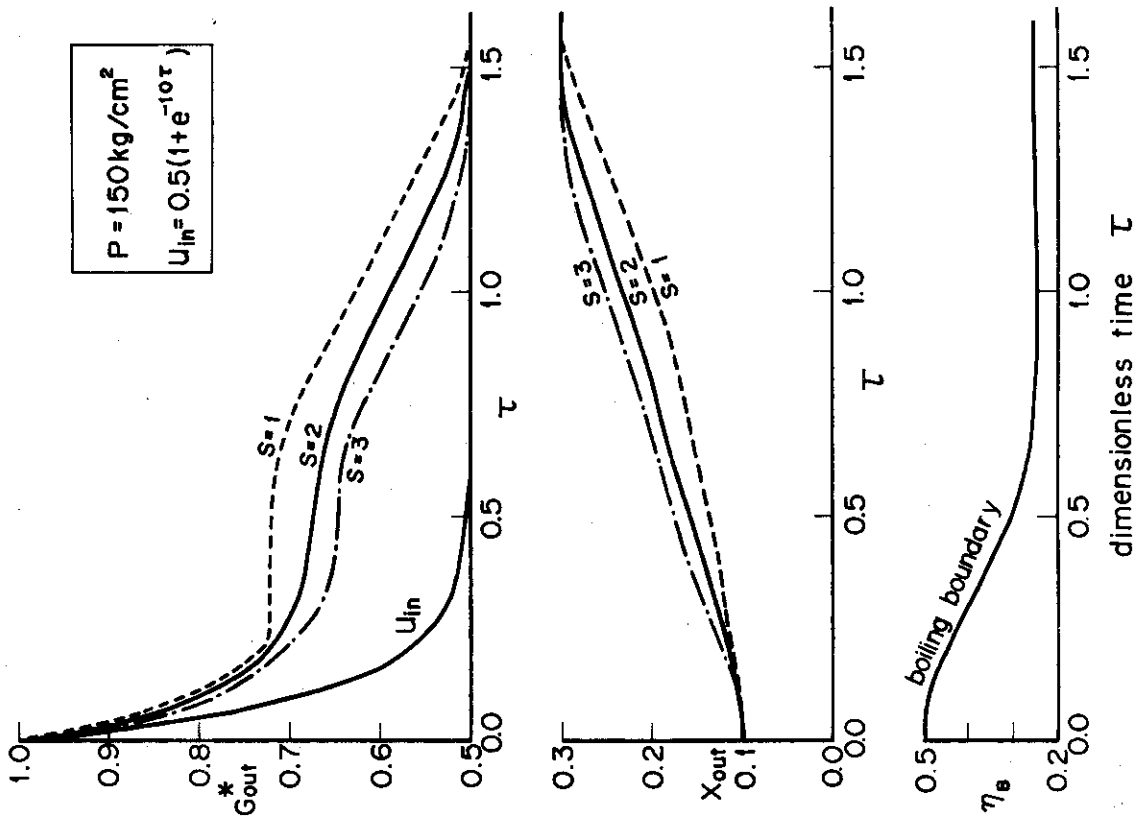


Fig. A-15. Effect of slip ratio (S) on outlet mass velocity (G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$)

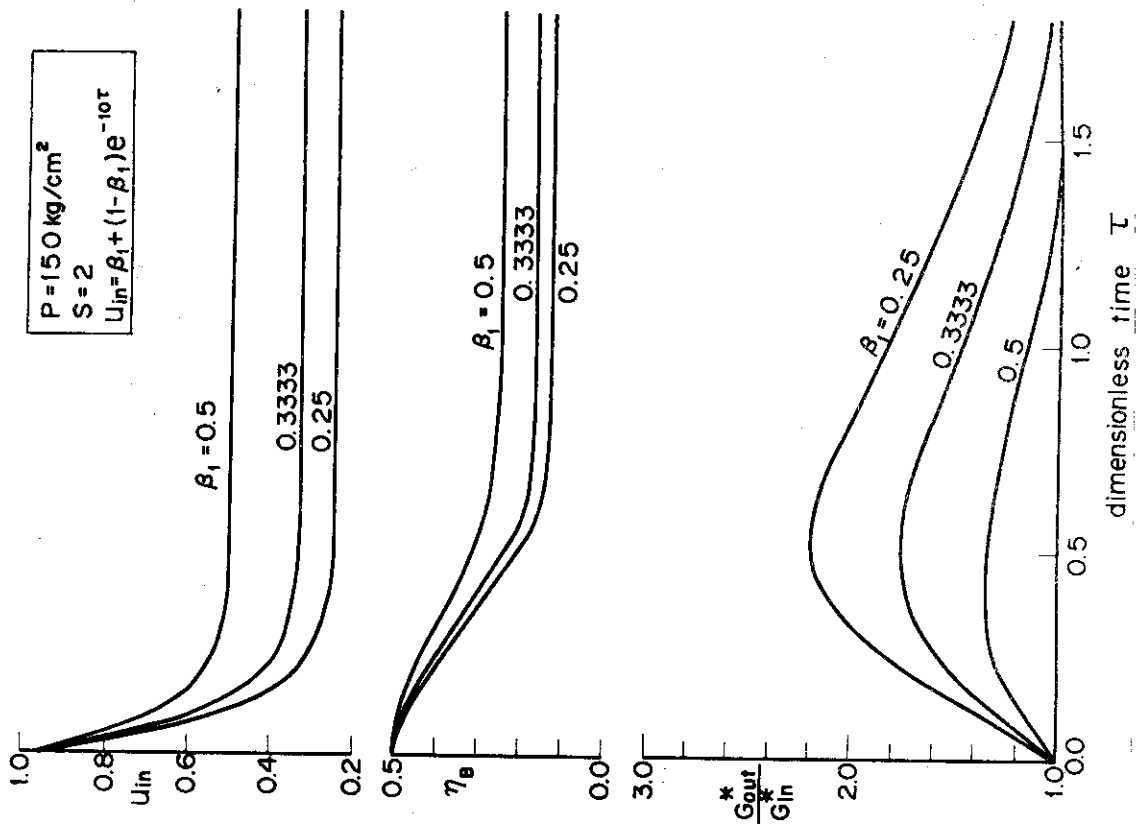


Fig. A-18. Effect of final to initial velocity ratio (β_1) on ratio of outlet to inlet mass velocity (G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$)

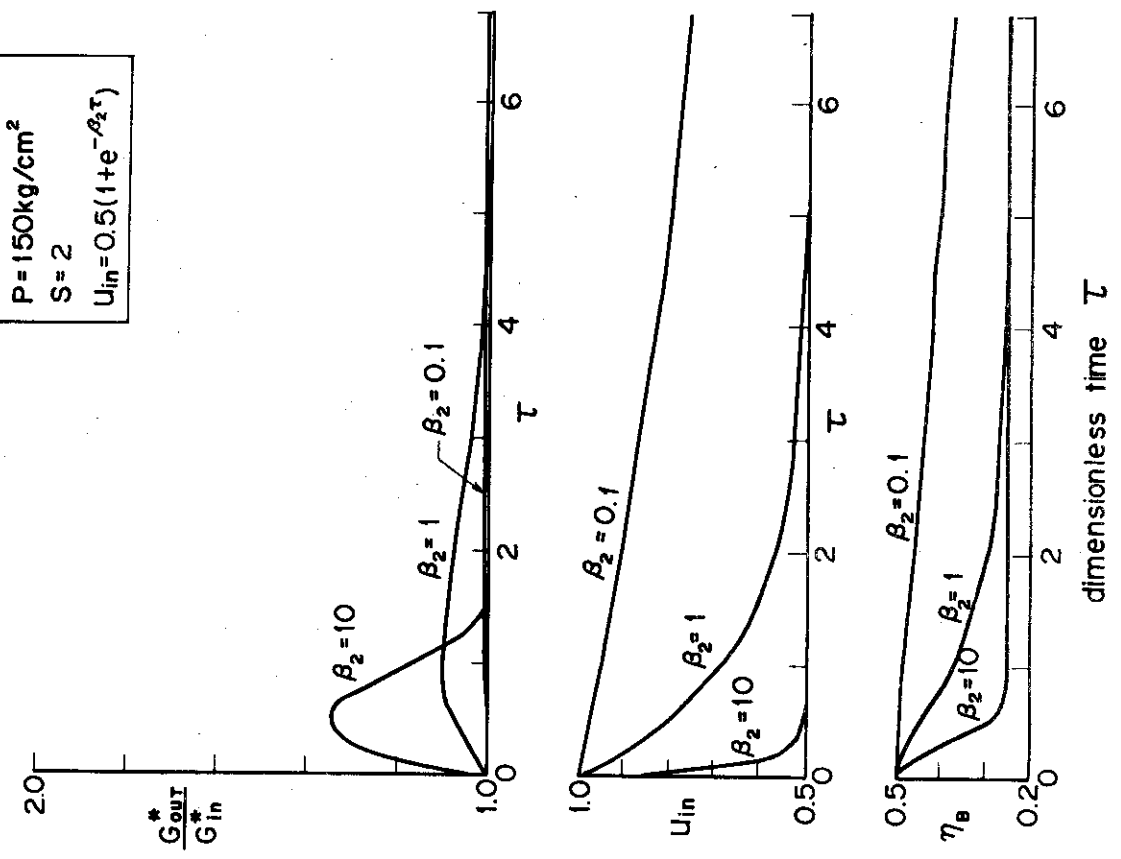


Fig. A-17. Effect of flow reduction time constant ($1/\beta_2$) on ratio of outlet to inlet mass velocity (G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition. ($P = 150 \text{ kg/cm}^2$)

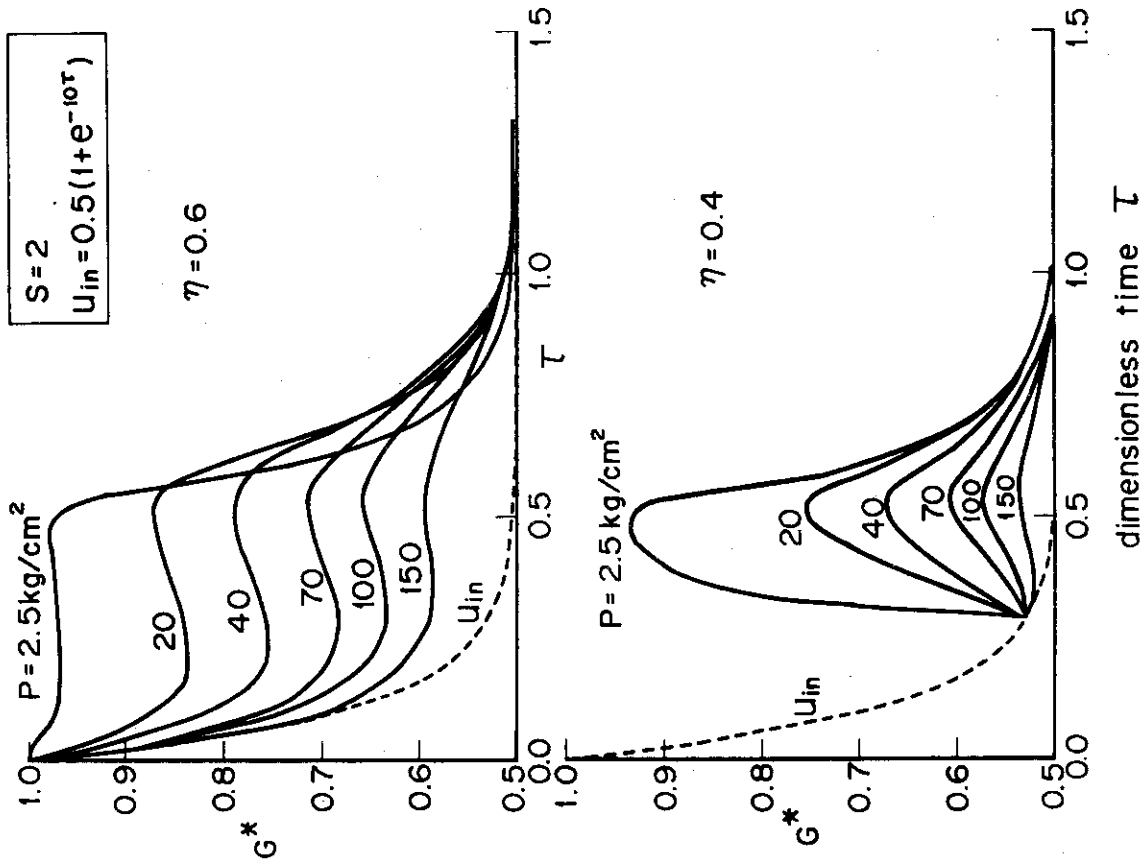


Fig. A-20. Effect of pressure on mass velocity (G^*) at positions of $\eta = 0.4$ and 0.6 for flow reduction condition. ($\beta_2 = 10$)

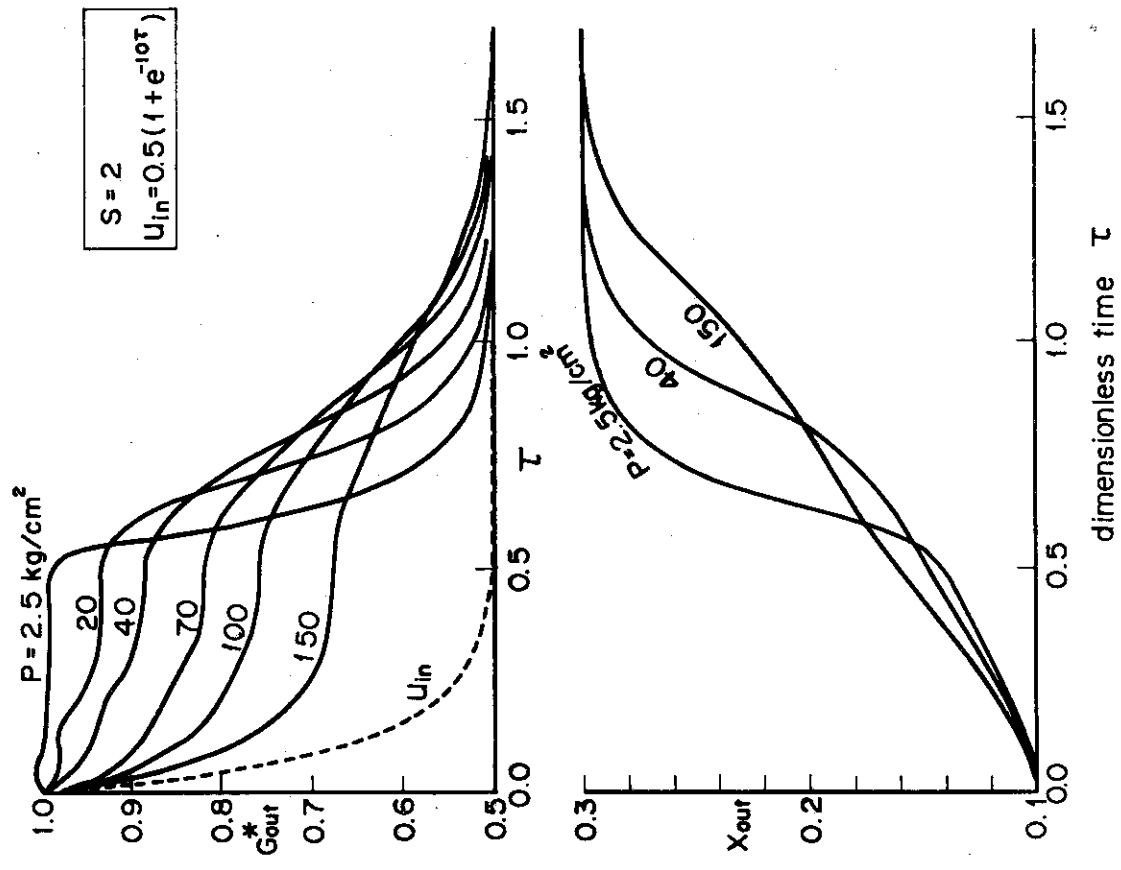


Fig. A-19. Effect of pressure on outlet mass velocity (G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($\beta_2 = 10$)

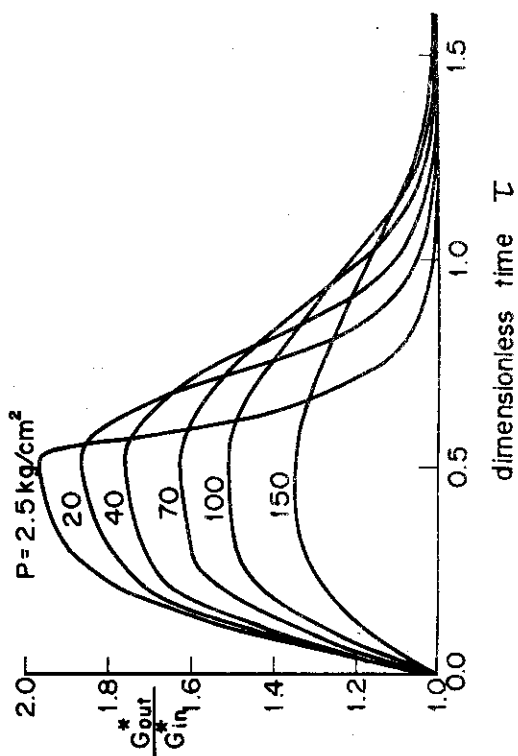
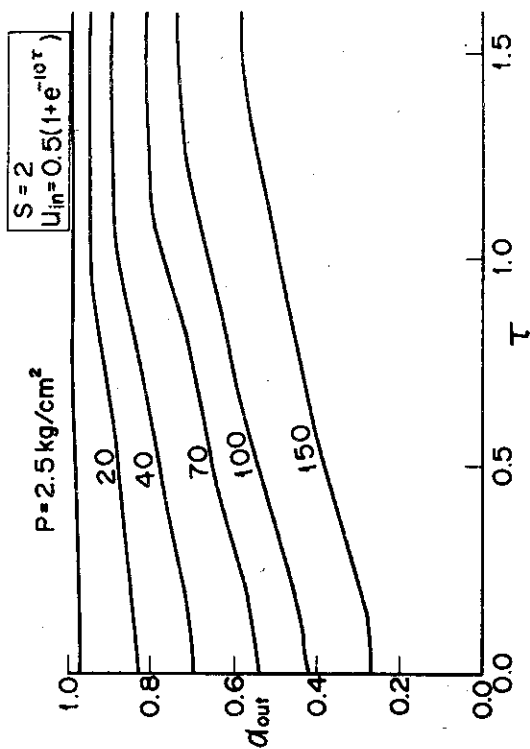


Fig. A-22. Effect of pressure on outlet void ratio (α_{out}) and ratio of outlet to inlet mass velocity (G_{out}^*/G_{in}^*) for flow reduction condition. ($\beta_2 = 10$)

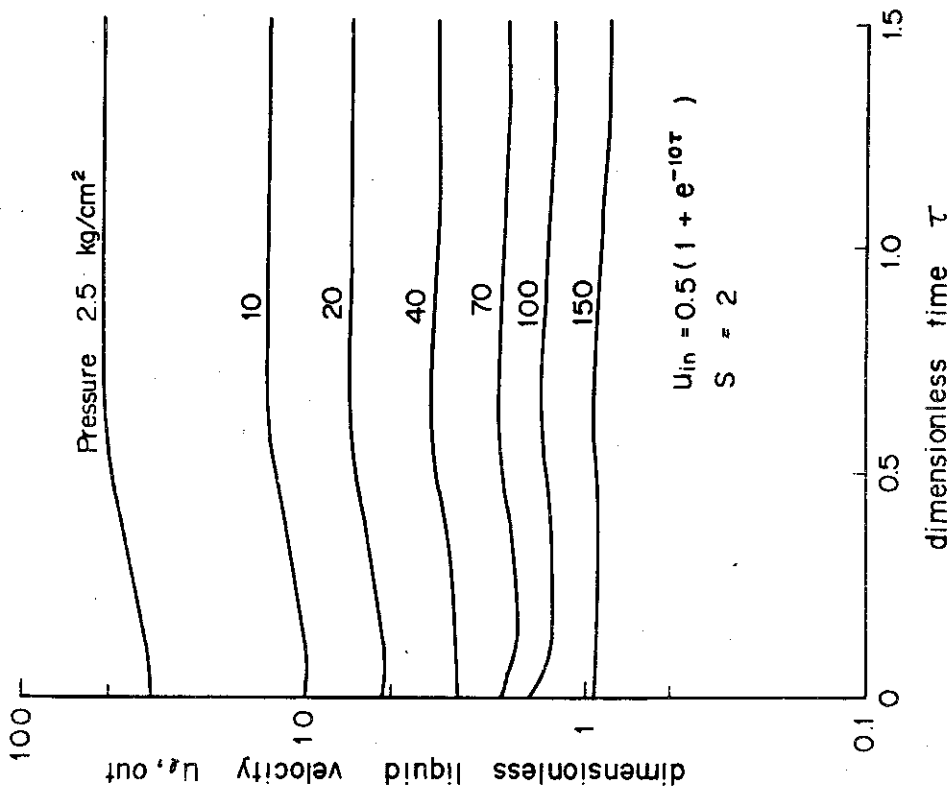


Fig. A-21. Effect of pressure on outlet liquid velocity ($U_{l, out}$) for flow reduction condition. ($\beta_2 = 10$)

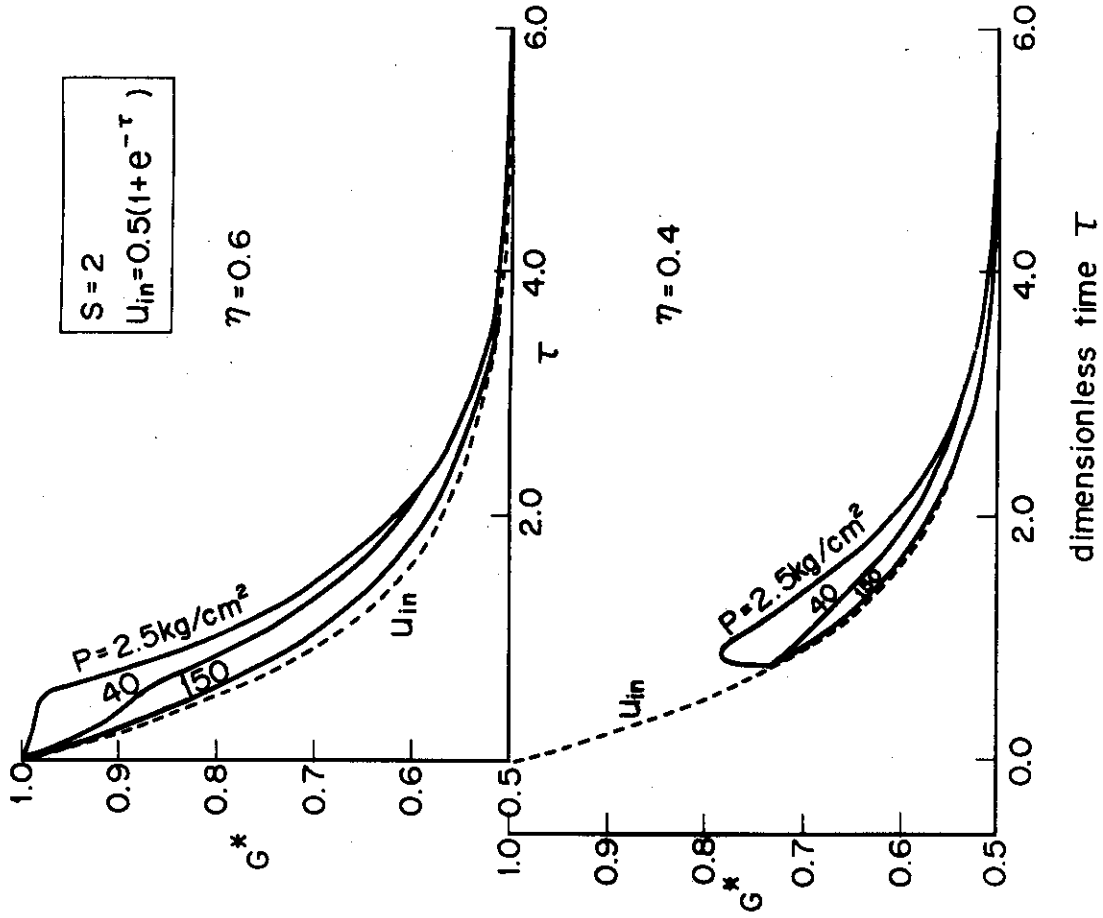


Fig. A-24. Effect of pressure on mass velocity (G^*) at positions of $\eta = 0.4$ and 0.6 for flow reduction condition. ($\beta_2 = 1$)

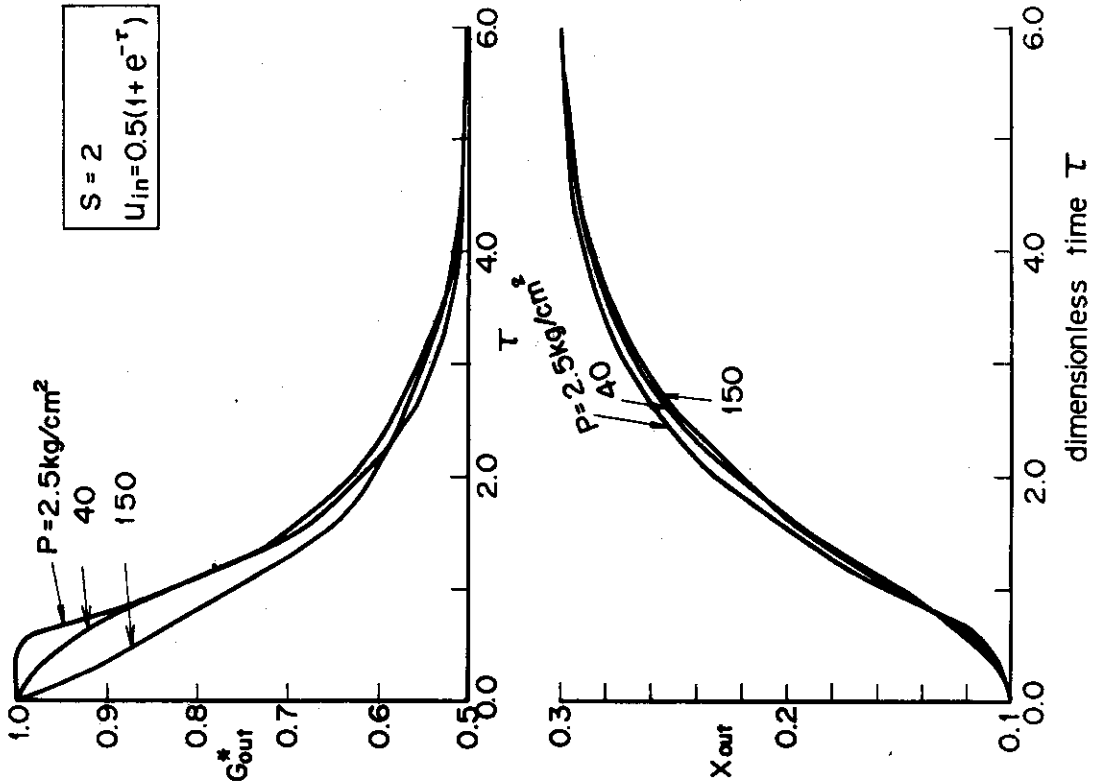


Fig. A-23. Effect of pressure on outlet mass velocity (G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($\beta_2 = 1$)

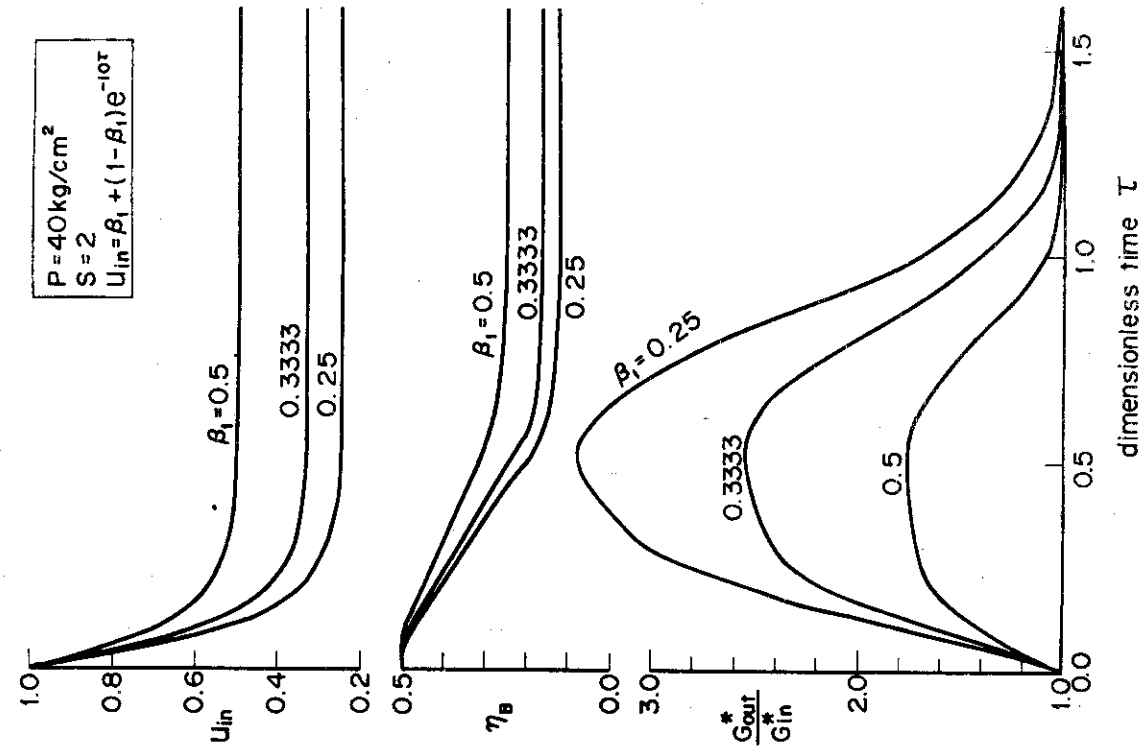


Fig. A-26. Effect of final to inlet velocity ratio (β_1) on ratio of outlet to inlet mass velocity (G^*_{out}/G^*_{in}) for flow reduction condition. ($P = 40 \text{ kg/cm}^2$)

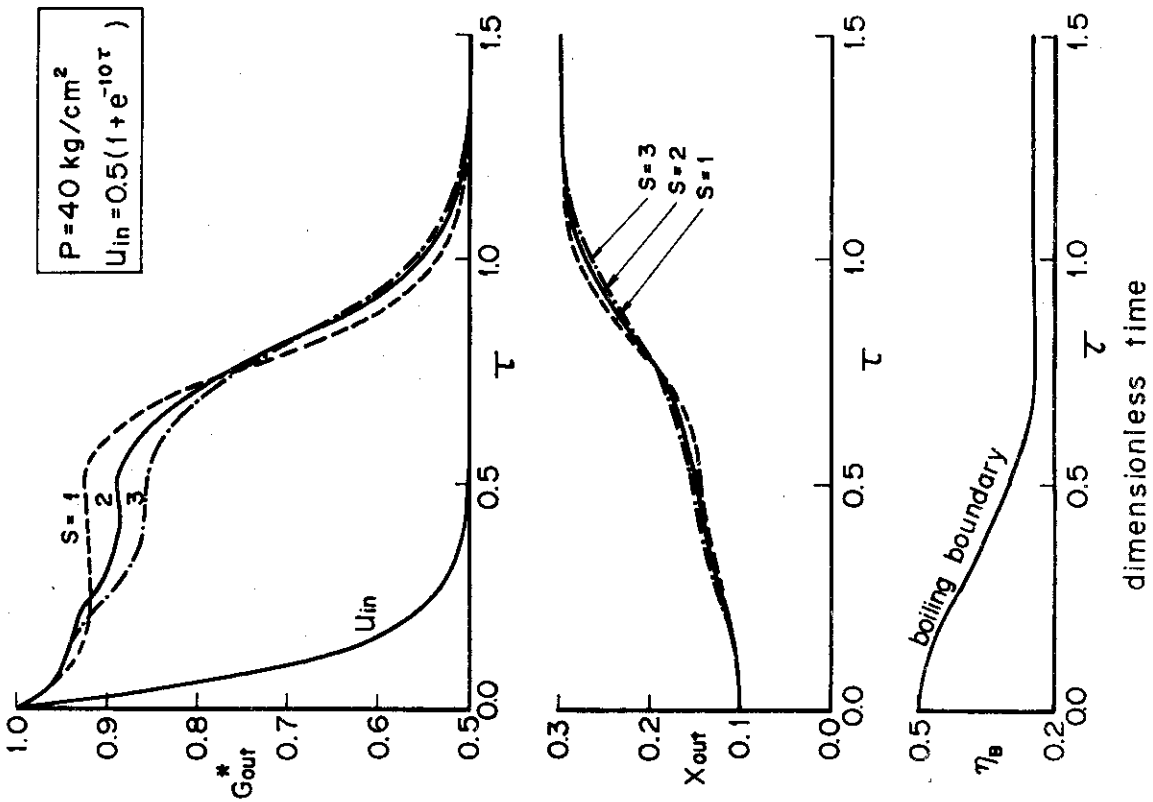


Fig. A-25. Effect of slip ratio (S) on outlet mass velocity (G^*_{out}) and quality (X_{out}) for flow reduction condition. ($P = 40 \text{ kg/cm}^2$)

付録B. 定常バーンアウト実験結果とバーンアウト熱流束関係式との比較

従来、あるシステムパラメータが与えられた時の強制対流バーンアウト熱流束を求めるため、多くの実験式や半理論式が提案されているが、その大部分は直接原子炉の設計や安全評価を目的としているため、適用範囲に限られており、特に本実験のような常圧大気開放ループでのバーンアウト実験に適用できるような関係式の数に極めて少ない。さらに、常圧近傍においては蒸発の比体積変化が大きいことなどのため、実験装置相互のデータのバラツキが大きいことも、低圧においても適用できる一般的な関係式をつくりにくい理由の一つであろう。

また、従来の関係式はすべて定常バーンアウト実験に基づくもので、特に流速減少率の大きな流量低下バーンアウト実験においては、バーンアウト点流量は付録Aで示したように入口流量とかなり異なっている可能性があり、さらにバーンアウト発生点近くの流動状態も定常の場合とはかなり異なっていると思われるので、このような関係式を、流量低下過渡バーンアウト実験に適用するに当たっては注意を要する。以上のような過渡時におけるバーンアウト熱流束を予測することは今後の研究課題である。

以下においては、本実験の圧力、流量、テスト部形状、熱流束等を、適用範囲を含むバーンアウト熱流束関係式の例をあげ、本装置による定常バーンアウト実験結果と既存のバーンアウト熱流束関係式との比較を行なう。

本実験範囲を適用範囲を含むバーンアウト熱流束関係式として、ここでは Macbeth の式⁽¹¹⁾、Thompson-Macbeth の式⁽¹²⁾、Becker の式⁽¹³⁾を採用した。これらの関係式、適用範囲などは以下に示す通りである。

1. Macbeth の式⁽¹¹⁾

CHF 関係式

1) 低速域

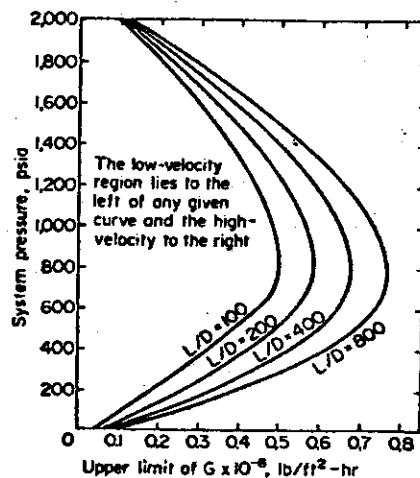
$$\frac{q_{\text{CHF}}}{10^6} = \frac{(G \times 10^{-6})(H_{fg} + \Delta H_{\text{sub}})}{158 D_e^{0.1} (G \times 10^{-6})^{0.49} + 4L/D_e}$$

2) 高速域

$$\frac{q_{\text{CHF}}}{10^6} = \frac{A' + \frac{1}{4} D_e (G \times 10^{-6}) \Delta H_{\text{sub}}}{C' + L}$$

$$A' = y_0 D_e^{y_1} (G \times 10^{-6})^{y_2}$$

$$C' = y_3 D_e^{y_4} (G \times 10^{-6})^{y_5}$$



関係式中の単位	適用範囲
q_{CHF}^* (Btu/hft ²)	一様加熱
G (lb _m /hft ²)	円管
$H_{fg}, \Delta H_{sub}$ (Btu/lb _m)	$D_e = 0.04 - 0.934$ in (1.02 - 23.7 mm)
L, D_e (in)	$L = 1 - 123$ in (25 - 3120 mm)
	$L/D \geq 8.5$
	$P = 15 - 2700$ psia (1.05 - 190 kg/cm ²)
	$G/10^6 = 0.01 - 7.82$ lb _m /hft ² (0.05 - 38.2 kg/hm ²)
	$X_{CHF} = 0 - 1$
	$X_{in} = -2.5 - 0$

Pressure lb/in ²	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
250 (nominal)	106.5	0.847	0.677	60.3	1.4	0.937
530 (nominal)	123.5	0.834	0.408	78.8	1.4	0.737
1000	124.5	0.913	0.376	118	1.4	0.555
1570 (nominal)	59.5	0.873	0.120	82.7	1.4	0.096
2000	67.5	1.13	0.535	108	1.4	0.343
2700 (nominal)	1.3	-0.05	1.02	103	1.4	0.529

2. Thompson-Macbeth の式⁽¹²⁾ (1の修正)

CHF 関係式

$$\frac{q_{CHF}''}{10^6} = \frac{A' + \frac{1}{4} D_e (G/10^6) \Delta H_{sub}}{C' + L}$$

$$A' = y_0 D_e^{y_1} (G/10^6)^{y_2} [1 + y_3 D_e + y_4 (G/10^6) + y_5 D_e (G/10^6)]$$

$$C' = y_6 D_e^{y_7} (G/10^6)^{y_8} [1 + y_9 D_e + y_{10} (G/10^6) + y_{11} D_e (G/10^6)]$$

関係式中の単位	適用範囲
q_{CHF}'' (Btu/hft ²)	一様加熱
D_e, L (in)	円管
G (lb _m /hft ²)	$D_e = 0.04 - 1.76$ in (1.0 - 44.7 mm)
ΔH_{sub} (Btu/lb _m)	$L = 1 - 137$ in (25 - 3480 mm)
	$P = 15 - 2000$ psia (1.05 - 141 kg/cm ²)
	$G/10^6 = 0.0073 - 13.71$ lb _m /hft ² (0.036 - 66.9 kg/hm ²)
	$X_{CHF} = 0 - 1.0$

System pressure (psia)	15	250	560	1000	1250	1550	1800	2000
y_0	1120	106	237	114	93.3	58.0	194	65.5
y_1	1.19	0.847	1.20	0.811	1.10	0.834	2.09	1.19
y_2	1.37	0.677	0.425	0.221	0.575	0.224	0.593	0.376
y_3	0	0	-0.940	-0.128	0	-0.0336	-0.597	-0.577
y_4	0	0	-0.0324	0.0274	0	0.0755	-0.131	0.220
y_5	0	0	0.111	-0.0667	0	-0.296	-0.0482	-0.373
y_6	1000	60.3	19.3	127	88.5	48.3	231	17.1
y_7	1.4	1.4	0.959	1.32	1.46	0.823	1.93	1.18
y_8	1.05	0.937	0.831	0.411	1.00	0.121	0.612	-0.456
y_9	0	0	2.61	-0.274	0	0	-0.575	1.53
y_{10}	0	0	-0.0578	-0.0397	0	0	-0.255	2.75
y_{11}	0	0	0.124	-0.0221	0	0	0.110	2.24

3. Becker の式⁽¹³⁾

CHF 関係式

$$\frac{1}{G^{1/2} q_{CHF}^*} = \frac{B \cdot v_{fg}}{b \cdot H_{fg}}$$

$$B = \frac{-1_n (1 - X_{CHF}) + 1_n \left(0.98 - \frac{\epsilon \nu^* B^{1/2}}{X_{CHF}^{1/4} (B+1)} \right) - 1_n \left(1 - \frac{\epsilon (X_{CHF} + \nu^*) B^{1/2}}{(1 - X_{CHF}) X_{CHF}^{1/4} (B+1)} \right)}{1_n \frac{X_{CHF} + \nu^*}{\nu^*}}$$

$$q_{CHF}^* = \frac{G (\Delta H_{sub} + X_{CHF} H_{fg})}{4 L / D_e} \quad (\text{熱バランズ式})$$

$$\epsilon = \epsilon(P), \quad b = b(P)$$

関係式中の単位	適用範囲
q_{CHF}^* (kJ/sm ²)	一様加熱
G (kg/sm ²)	円管
v_{fg} (m ³ /kg)	$D_e = 3.93 - 25.0$ mm
$\Delta H_{sub}, H_{fg}$ (kJ/kg)	L = 400 - 3500 mm
L, D_e (mm)	L/D = 40 - 890
$\epsilon =$ entrainment coef. (dimensionless)	P = 2.7 - 101 kg/cm ²
b = droplet diffusion coef. (kg ^{1/2} /s ^{3/2})	G = 120 - 5450 kg/sm ² (0.43 - 19.6 × 10 ⁶ kg/hm ²)
$\nu^* = v_f / v_{fg}$	$X_{CHF} = 0 - 1.0$
	$\Delta T_{sub} = 30 - 240^\circ\text{C}$
	$q_{CHF}^* = 35 - 686$ W/cm ² (0.30 - 5.9 × 10 ⁶ kcal/m ²)

Clerici et al.⁽¹⁴⁾ による近似式

$$\epsilon = \epsilon(P) \simeq -0.385 \times 10^{-6} P^3 + 2.1867 \times 10^{-4} P^2 - 2.1182 \times 10^{-2} P + 0.5913$$

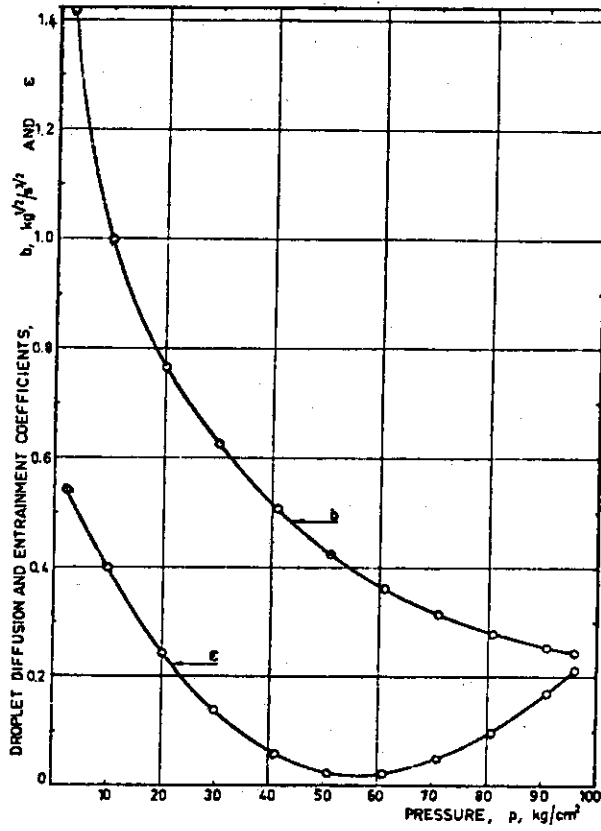
$$b = b(P) \simeq 1.0677 / P - 0.6688 \times 10^{-6} P^3 + 0.199 \times 10^{-3} P^2 - 0.02184 P + 1.0876$$

$$K_d = K_d(D_e) \simeq \begin{cases} 0.9 + 0.29 e^{-4.25(D_e - 0.5)^2} & D_e < 1.2 \\ 1.019 - 0.048 D_e & D_e \geq 1.2 \end{cases}$$

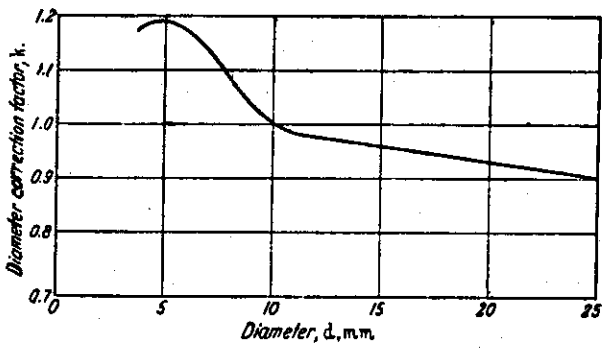
$$a_0 = a_0(P) \simeq -118.505 / P^2 + 0.113281 \times 10^{-5} P^3 - 0.196885 \times 10^{-3} P^2 + 1.13773$$

$$a_1 = a_1(P) \simeq 0.196257 \times 10^{-6} P^3 - 0.124829 \times 10^{-2} P + 0.40475$$

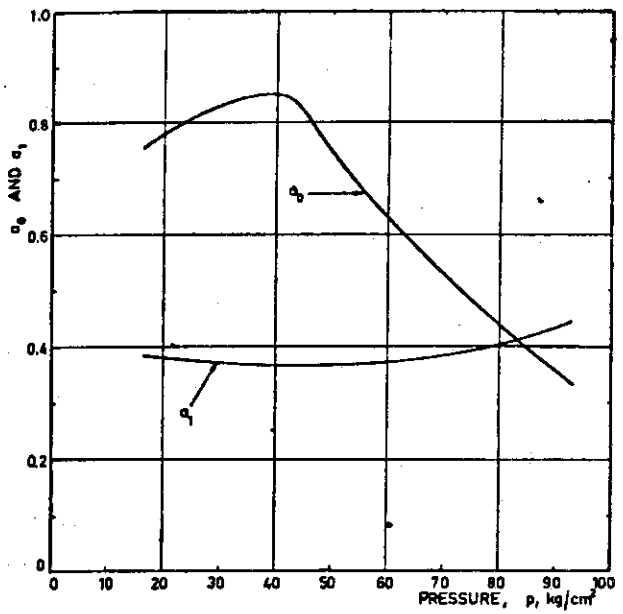
ただし, P (kg/cm²), D_e (cm), ϵ (dimensionless), b (kg^{1/2}/S^{3/2})



ϵ, b



K_d



a_0, a_1

入口温度 30°C と 80°C の場合について、以上の関係式による計算値と実験値との比較を、それぞれFig.B-1, B-2に示す。両図より、Beckerの式はMacbethの式やThompson-Macbethの式よりもよく実験値に一致し、特に入口温度 80°C の場合は極めてよく一致している。

なお、Fig.B-1とB-2を比較すればわかるように、各関係式においては、サブクール度が小さくなるとバーンアウト熱流束も小さくなる傾向にあるが、本実験においては、定常バーンアウト熱流束と質量速度の関係は、入口温度が 30°C の場合も 80°C の場合も、ほぼ同一直線上にのっており、サブクール度による差は見られなかった。

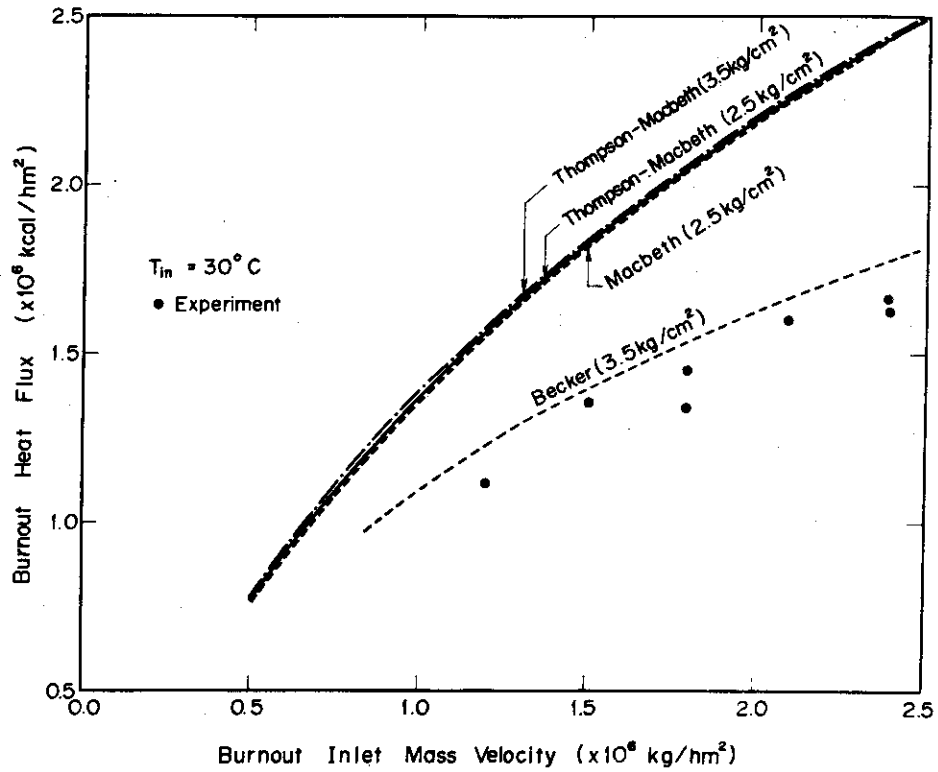


Fig. B-1. Comparison of steady state burnout heat flux data with Macbeth, Thompson-Macbeth, and Becker correlations. ($T_{in} = 30^\circ\text{C}$)

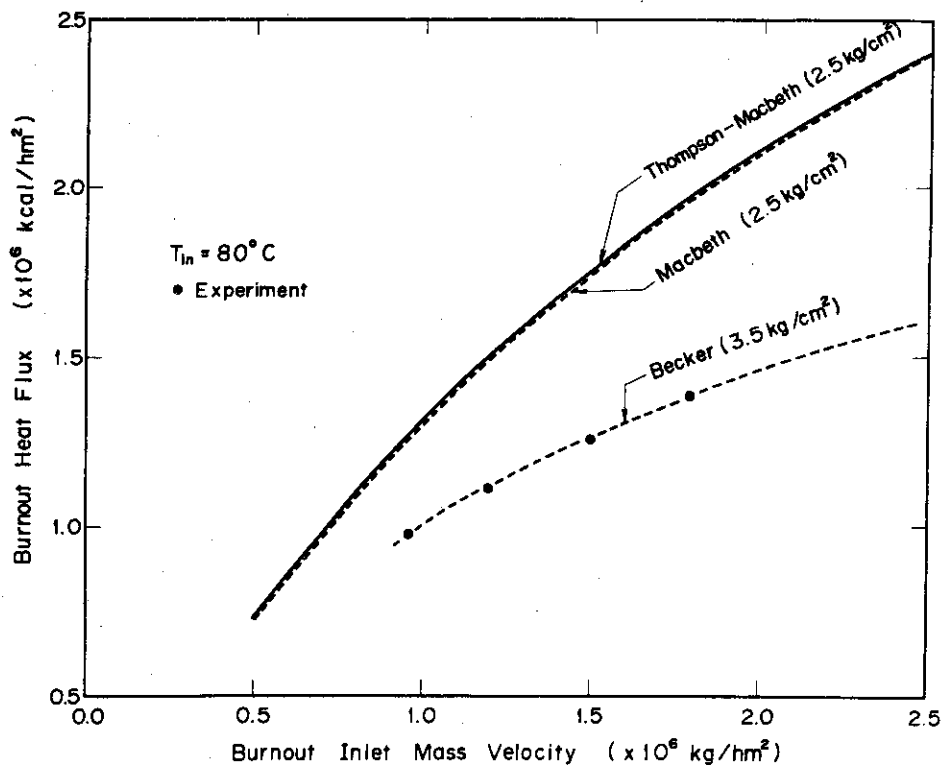


Fig. B-2. Comparison of steady state burnout heat flux data with Macbeth, Thompson-Macbeth, and Becker correlations. ($T_{in} = 80^\circ\text{C}$)