

JAERI-M
9012

管内流路における流量低下過渡バーン
アウト(2)
(局所流動条件の計算による実験結果の解析)

1980年8月

岩村 公道・黒柳 利之

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、お申しこしてください。

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.

管内流路における流量低下過渡バーンアウト(2)
(局所流動条件の計算による実験結果の解析)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
岩村 公道・黒柳 利之

(1980年7月23日受理)

加熱長さ800mm, 内径10mmの管内流路テスト部による流量低下過渡バーンアウト実験を解析するため, 分離流モデルにより, 沸騰二相流過渡挙動の計算を行った。解析対象の実験範囲は, 圧力0.5~3.9MPa, 熱流束 $2.16\sim 3.86\times 10^6\text{W/m}^2$, 入口サブクール度50~100°C, バーンアウト質量速度 $770\sim 1300\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$, および流速減少率0.6~1.90%/secである。

バーンアウト発生時のテスト部出口質量速度計算値 $G_{\text{BO}}^{\text{out}}$ と, 流速減少率との関係を調べた結果, 以下の諸点が明らかとなった。

- 1) 流速減少率が2%/sec以下では, 全実験条件下で $G_{\text{BO}}^{\text{out}}$ および入口バーンアウト質量速度 G_{BO}^{i} は, 定常バーンアウト質量速度 G_{BO}^{s} にほぼ一致する。
- 2) 流速減少率が大きくなるほど, $G_{\text{BO}}^{\text{out}}$ と G_{BO}^{i} との差は拡大する。
- 3) 圧力が2~3.9MPaの場合, 流速減少率が2~20%/secの範囲では, $G_{\text{BO}}^{\text{i}}/G_{\text{BO}}^{\text{s}}$ が約1.0~0.9とやや低下しているにもかかわらず, $G_{\text{BO}}^{\text{out}}/G_{\text{BO}}^{\text{s}}$ はほぼ1となる。また, 流速減少率が20%/sec以上では $G_{\text{BO}}^{\text{out}}/G_{\text{BO}}^{\text{s}}$ は1よりやや大きくなる傾向にある。
- 4) 約1MPa以下の圧力では, 流速減少率が2%/sec以上になると $G_{\text{BO}}^{\text{out}}/G_{\text{BO}}^{\text{s}}$ は1より小さくなる。

Flow Reduction Transient Burnout in a Vertical Tube (2)
(Analysis of Experimental Results with Local Flow Conditions)

Takamichi IWAMURA and Toshiyuki KUROYANAGI
Division of Reactor Safety

Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 23, 1980)

Transient behavior of boiling two-phase flow was calculated by separate flow model to analyze flow reduction burnout experiment in a vertical tube, 10mm diameter and 800mm long. The ranges of experimental conditions were pressure 0.5~3.9 MPa, heat flux $2.16\sim 3.86 \times 10^6 \text{ W/m}^2$, inlet subcooling $50\sim 100^\circ\text{C}$, burnout mass velocity $770\sim 1300 \text{ kg/s.m}^2$, and flow reduction rate $0.6\sim 190 \text{ \%/sec}$.

The results reached were as follows:

- 1) As the flow reduction rate reached below 2 \%/sec , the burnout mass velocity at outlet G_{Bo}^{out} and at inlet G_{Bo}^t became nearly equal to steady state burnout mass velocity G_{Bo}^s under all experimental conditions.
- 2) The difference between G_{Bo}^{out} and G_{Bo}^t became greater, at greater flow reduction rate.
- 3) For the experimental conditions of 2 to 3.9 MPa pressure and the flow reduction rate of 2 to 20 \%/sec , G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s was nearly equal to unity, while G_{Bo}^t/G_{Bo}^s was between 0.9 and 1.0. For a flow reduction rate greater than 20 \%/sec , G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s became a slightly greater than unity.
- 4) For pressure lower than 1 MPa and the flow reduction rate greater than 2 \%/sec , G_{Bo}^{out}/G_{Bo}^s became less than unity.

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

目 次

1. まえがき.....	1
2. 流量低下過渡時の沸騰二相流諸量の計算.....	3
2.1 計算上の主要な仮定	3
2.2 单相流における飽和点の計算方法	3
2.3 沸騰二相流の基礎式およびその評価.....	4
2.4 沸騰二相流諸量の計算方法.....	9
2.5 計算手法の検討	10
2.5.1 解析解との比較	10
2.5.2 スリップ比の影響	11
3. 流量低下バーンアウト実験の解析	16
3.1 流量低下バーンアウト実験の概要	16
3.2 計算結果の概要	16
3.3 バーンアウト発生時の出口質量速度および出口クオリティと流速減少率の関係	17
3.4 バーンアウト発生時出口質量速度と流速減少率の関係に対する圧力の影響	18
4. ま と め	40
謝 辞	40
参考文献	40
記 号 表	42
付録 A. テスト部出口質量速度, ボイド率, クオリティ, 飽和点等の過渡変化計算例	44
B. テスト部内部のクオリティ, ボイド率および質量速度の過渡変化計算例	61
C. 流量低下バーンアウト実験の実験条件および計算結果	64

CONTENTS

1. INTRODUCTION	1
2. CALCULATION OF BOILING TWO-PHASE FLOW IN FLOW REDUCTION TRANSIENT	3
2.1 Hypothesis for calculation	3
2.2 Calculation method of saturation point in single phase flow	3
2.3 Basic equations and evaluation of boiling two-phase flow	4
2.4 Calculation method of boiling two-phase flow	9
2.5 Verification of calculation method	10
2.5.1 Comparison with analytical result	10
2.5.2 Effect of slip ratio model	11
3. ANALYSIS OF FLOW REDUCTION BURNOUT EXPERIMENT	16
3.1 General discription of flow reduction burnout experiment	16
3.2 Calculated results	16
3.3 Relation between burnout mass velocity and quality at outlet and flow reduction rate	17
3.4 Effect of pressure on the relation between burnout mass velocity at outlet and flow reduction rate	18
4. CONCLUSION	40
ACKNOWLEDGMENTS	40
REFERENCES	40
NOMENCLATURE	42
APPENDIX	
A. Examples of calculated results of mass velocity, void fraction, quality at outlet and saturation point	44
B. Examples of calculated results of void fraction, quality and mass velocity in test section	61
C. Experimental conditions and calculated results of flow reduction burnout experiments	64

1. ま え が き

軽水炉の異常な出力上昇や流量低下事故（PCM）時には、バーンアウト発生により、燃料被覆管温度が急上昇して、燃料棒破損に至る可能性がある。

すでに、流量低下時のバーンアウト発生条件に対する圧力、熱流束、入口温度等の影響を調べるため、内径10mm、長さ800mmのステンレス鋼製垂直上向管内流テスト部を用いて行った流量低下バーンアウト実験について前報⁽¹⁾で報告した。前報では流量低下バーンアウト時の入口質量速度が、流速減少率が增大すると、定常バーンアウトの場合よりも小さくなる現象に注目して、バーンアウト時入口質量速度の低下率に対する圧力等のパラメータの影響について述べた。

一方、既存のバーンアウト関係式の中には、バーンアウト熱流束を局所的な質量速度、クオリティ等の流動条件の関数として表現した式が多く見られる。

ところで、流量低下過渡時には、沸騰二相流の流動状態変化にある程度の時間がかかることにより、テスト部出口（バーンアウト発生点近傍）の質量速度変化と入口質量速度変化の間には時間的なずれが生じ、流速減少率が大きいほど両者の差は拡大すると考えられる。従って、流量低下過渡バーンアウト現象をテスト部入口条件のみで評価するのは不十分で、バーンアウト発生点の局所的な流動条件（質量速度、クオリティ等）により評価する必要がある。

これまで円管やハンドル形状流路を用いた、各種の流量低下バーンアウト実験や解析結果が報告されている。^{(2)~(6), (13), (14)}これらの実験と前報で報告した実験の実験条件をTable 1-1に示す。従来の研究では、一般に流量低下過渡時のバーンアウト発生は、バーンアウト発生位置での局所流動条件を用いて、定常バーンアウト関係式により予測した結果とほぼ一致していると報告されている。しかし、Table 1-1に示すように、従来の実験は系圧力をパラメータとしておらず、流量低下時間のパラメータ数も少く、その範囲も狭くて、流速減少率に関する整理はなされていない。

一方、前報で報告したように、圧力および流速減少率を広範囲にわたりきめ細かく変化させた実験結果より、流量低下バーンアウト現象の非定常性は圧力が低いほど顕著であることが明らかとなった。従って本報では過渡時の沸騰二相流諸量を計算し、流量低下バーンアウト発生時の局所質量速度と流速減少率との関係におよぼす圧力の効果を調べることを目的とする。

Table 1.1 Experimental Conditions for Flow Transient Burnout Experiments

Investigators (Ref.)	Fluid	Test Section Geometry	Pressure (MPa)	Initial Mass Velocity ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	Heat Flux (kw/m^2)	Transient Type	Transient time (sec)
W. Kastner et al (2)	water	4-rod 1.9m long 9-rod 1.0m long	6.9 "	460-1600	800-1550 (estimated)	Flow decay (step)	-
B.S. Shiralkar* et al (3)	water	Anular 2.75m long 9-rod 1.83m long 16-rod 3.66m long	6.9 " "	270-1360 340-1360 "	660-1800 85-1580 60-1000	High-low-high Flow decay ON/OFF/ON "	about 0.5
R.A. Smith, and* P. Griffith (4)	Freon-113	tube 2.44m long	1.38	3400	30-140	Flow reversal	-
M. Cumo et al. (5)	Freon-12	tube 7.8mm dia 2m long	1.1-1.8	760-900	29-75	Flow decay	0.7-3.2
T. Asada, and T. Kobori (6)	water	28-rod 3.7m long	3.0	1400-1700	-	Flow decay	0.3-2.0
D. Moxon et al. (3)	water	tube 11mm dia, 3.66m long 37 rod 3.66m long	6.9	2370-2710	845-1150	Flow decay	< 0.5
G.P. Gaspari et al. (4)	water	18+1 rod 4m long	5.9	1200-2300	Power 2.1-3.3MW	Flow decay	0.1
Present work	water	tube 10mm dia 0.8m long	0.5-3.9	1240-3050	2160-3860	Flow decay (linearly)	0.4-83

* summarized by J.C.M. Leung (5)

2. 流量低下過渡時の沸騰二相流諸量の計算

流量低下バーンアウト実験を解析するため、実験データを用いて、テスト部出口（バーンアウト発生点）における質量速度やクオリティ等の過渡変化を計算により求めた。以下では一様加熱管内流における流量低下過渡時の沸騰二相流の諸量を、特性曲線法により求める方法を述べる。

2.1 計算上の主要な仮定

計算の単純化のため以下の仮定をおいた。

- (1) 分離流モデルに基づく。
- (2) 蒸気-水は熱力学的平衡にある。
- (3) 基礎式はエネルギー保存式、連続の式、スリップ関係式とし、運動量バランスは考慮しない。
- (4) エネルギー式において圧力変化項および粘性によるエネルギー消散項を無視する。
- (5) 熱流束はテスト部内で一様で、バーンアウト発生時点まで一定とする。
- (6) 入口エンタルピーは一定とする。
- (7) サブクール沸騰は考慮しない。
- (8) 飽和点の計算は各時刻の入口圧力における飽和エンタルピーを採用するが、二相流の計算では物性値は一定とする（2.4節参照）

(1)については、局所流動状態特にバーンアウト発生に直接関係のある加熱面上の液膜挙動を表現できない欠点はあるが、断面平均質量速度の計算などの目的には十分と思われる。(2)は本実験のようにバーンアウト発生までの流動状態においてはほぼ成立すると思われる。(3)、(4)、(8)については2.3節で詳述する。(5)、(6)は実験結果より判断して妥当な仮定である。(7)については計算の単純化のためよく用いられる仮定である。

2.2 単相流における飽和点の計算方法

まず、平均エンタルピーを用いた単相流エネルギー式は次式で表現できる。

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h}{\partial Z} = \frac{pq(Z, t)}{A} \quad (2-1)$$

ここで、時間、距離、平均速度、熱流束および平均エンタルピーを次式に従って無次元化する。

$$\tau \equiv t v_i / L$$

$$\eta \equiv Z / L$$

$$u(\tau) \equiv v(\tau) / v_i$$

$$\left. \begin{aligned} \phi(\eta, \tau) &\equiv q(\eta, \tau) / q_i \\ H(\eta, \tau) &\equiv (h(\eta, \tau) - h_{in}) / \left(\frac{q_i p L}{A \rho v_i} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

(2-2)式を用いると(2-1)式は

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + u(\tau) \frac{\partial H}{\partial \eta} = \phi(\eta, \tau) \quad (2-3)$$

となる。この式から、特性曲線法により次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\eta}{d\tau} &= u(\tau) \\ \frac{dH}{d\tau} &= \phi(\eta, \tau) \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

今、熱流束一定($\phi = 1$)で、入口エンタルピー一定とすると、(2-4式)で $\tau < 0$ なら $u(\tau) = 1$ だから、初期条件として次式が成立する。

$$H_i = \eta_i \quad (2-5)$$

特性曲線法にて取扱う流体成分の初期存在場所により、次の2通りの場合が考えられる。

(i) $\tau = 0$ でテスト部内に存在する流体成分について

$\tau = 0$ で $H = H_i$, $\eta = \eta_i$ ((2-5)式より $H_i = \eta_i$), $\tau = \tau_{sat}$ で $H = H_{sat}$ (飽和エンタルピー)に到達するとすると、(2-4)式より次式を得る。

$$\tau_{sat} = H_{sat} - H_i \quad (2-6)$$

従って(2-4)式より、注目する流体成分が飽和点に達する位置 η_B は次式で与えられる。

$$\eta_B = \int_0^{\tau_{sat}} u(\tau) d\tau + H_i \quad (2-7)$$

(ii) $\tau > 0$ でテスト部に流入する流体成分について

$\tau = \tau_i$ で $\eta = 0$, $H = 0$ になるとすると、

$$\tau_{sat} = H_{sat} + \tau_i \quad (2-8)$$

従って、飽和点の位置 η_B は次式で与えられる。

$$\eta_B = \int_{\tau_i}^{\tau_i + H_{sat}} u(\tau) d\tau \quad (2-9)$$

以上(2-6), (2-7)式および(2-8), (2-9)式により、任意の流体成分が飽和点に達する時刻と位置(τ_{sat} , η_B)すなわち飽和点の過渡変化が求められる。

2.3 沸騰二相流の基礎式およびその評価

分離流モデルによる沸騰二相流の基礎式として、連続の式、エネルギー保存式、スリップの式を採用した。

このうち、エネルギー保存式の評価について以下で考察する。

圧縮性单相流のエネルギー保存式は、例えば文献(8), (9)等により次式で与えられる。

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = Q + E_f + \frac{1}{J} \frac{DP}{Dt} \quad (2-10)$$

このうち、左辺は単位体積内エンタルピー変化、右辺第一項は流入熱量、第二項は摩擦によるエネルギー消散項、第三項は圧力変化による寄与を示す。

圧縮性一次元单相流の連続の式は次式で与えられる。ただし、管断面積は一定とする。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (2-11)$$

(2-10) ÷ (2-11) × h より次式が得られる。

$$\frac{D(\rho h)}{Dt} = Q + E_f + \frac{1}{J} \frac{DP}{Dt} \quad (2-12)$$

次に沸騰二相流を一次元分離流モデルで取扱う場合には、(2-12)式は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha h_v + \rho_l (1-\alpha) h_l) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_v \alpha h_v V_v + \rho_l (1-\alpha) h_l V_l) \\ & = Q + E_f + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + (\alpha V_v + (1-\alpha) V_l) \frac{\partial P}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2-13)$$

前報で報告した流量低下バーンアウト実験の場合について、右辺各項の大きさを評価してみる。

テスト部圧力変化は低圧ほど大きいので、圧力 0.53 MPa、入口温度 120°C、熱流束 2.71 × 10⁶ W/m² の Run 541206-1 (Fig. 2.1 に実験データを示す) を例にとると、流量低下過程において最大振動数約 10 Hz (周期 0.1 秒)、最大振幅約 0.2 MPa (2.0 kg/cm²) 程度の圧力振動が見られる。この場合 $\frac{\partial P}{\partial t}$ 項は最大以下の程度となる。

$$\frac{1}{J} \frac{\partial P}{\partial t} \leq 0.0234^{(*)} \times \frac{2.0}{0.1} \approx 0.47 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{s} \quad (2-14)$$

この場合の計算結果 (付録 A. Fig. A1-4) より、沸騰長さは約 30~65 cm、出口ボイド率は 0.84~0.99 に変化しており、出口の蒸気流速はバーンアウト時点で最大約 100 m/sec のオーダーである。差圧の最大値は約 0.2 MPa (2 kg/cm²) なので、沸騰長さ全体で圧力勾配が一様と仮定すると、(2-13) 式の圧力損失は最大以下の程度となる。

$$\left| \frac{1}{J} (\alpha V_v + (1-\alpha) V_l) \frac{\partial P}{\partial z} \right| \leq 0.0234 \times 10000 \times \frac{2}{65} \approx 7.2 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{s} \quad (2-15)$$

次に摩擦圧力損失を $\left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_f$ とすると、 E_f は次式となる。

$$E_f = -\frac{1}{J} (\alpha V_v + (1-\alpha) V_l) \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_f \quad (2-16)$$

一方、本実験条件内では加速圧力損失項と $\left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_f$ は同一符号だから、 $\left| \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_f \right|$ は全圧

(*) 1 kg·cm = 0.0234 cal なので 1 kg/cm² = 0.0234 cal/cm²
すなわち $\frac{1}{J} = 0.0234 \text{ (cal/cm}^3 \text{) / (kg/cm}^2 \text{)}$

力損失 $|\frac{\partial P}{\partial z}|$ より小さい。従って (2-15) の結果より、次の関係が成立する。

$$E_f < 7.2 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{s} \quad (2-17)$$

今の場合 (Run 541206-1), 注入熱量 Q は以下の値となる。

$$Q = \frac{q_p L}{AL} = \frac{q \pi DL}{\frac{\pi}{4} D^2 L} = \frac{4q}{D} = \frac{4 \times 2.71 \times 10^6 \times 2.388 \times 10^{-5}}{1} = 260 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{s} \quad (2-18)$$

(2-18) と (2-14), (2-15), (2-16) を比較すれば, 圧力項やエネルギー消散項の寄与は十分小さく, 本実験データを解析する目的においては無視してもよいと考えられる。従ってエネルギー保存式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v a h_v + \rho_l (1-a) h_l) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_v a h_v V_v + \rho_l (1-a) h_l V_l) = \frac{q_p}{A} \quad (2-19)$$

(2-11) 式に対応する二相流連続の式は次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v a + \rho_l (1-a)) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_v a V_v + \rho_l (1-a) V_l) = 0 \quad (2-20)$$

次に, 蒸気と水の流速を関係づける関係式として, スリップ比 S を仮定する。

$$\frac{V_v}{V_l} = S(\alpha) \quad (2-21)$$

(2-19), (2-20) 式の物性値は圧力の関数である。まず, (2-19) 式を微分項に物性値を含む項と含まない項に分割すると次式を得る。

$$\begin{aligned} & \rho_v h_v \frac{\partial a}{\partial t} + \rho_l h_l \frac{\partial (1-a)}{\partial t} + \rho_v h_v \frac{\partial}{\partial z} (a V_v) + \rho_l h_l \frac{\partial}{\partial z} ((1-a) V_l) \\ & + a \frac{\partial}{\partial t} (\rho_v h_v) + (1-a) \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l h_l) + a V_v \frac{\partial}{\partial z} (\rho_v h_v) + (1-a) V_l \frac{\partial}{\partial z} (\rho_l h_l) \\ & = \frac{q_p}{A} \end{aligned} \quad (2-22)$$

同様に (2-20) 式より次式を得る。

$$\begin{aligned} & \rho_v \frac{\partial a}{\partial t} + \rho_l \frac{\partial (1-a)}{\partial t} + \rho_v \frac{\partial (a V_v)}{\partial z} + \rho_l \frac{\partial ((1-a) V_l)}{\partial z} \\ & + a \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + (1-a) \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + a V_v \frac{\partial \rho_v}{\partial z} + (1-a) V_l \frac{\partial \rho_l}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (2-23)$$

((2-22) - (2-23) $\times h_l$) / $(\lambda \rho_v)$ より次式を得る。

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (a V_v) + \Delta E_v^t + \Delta E_v^z = \frac{q_p}{\lambda A \rho_v} \quad (2-24)$$

ただし,

$$\Delta E_v^t = \frac{\partial P}{\partial t} \left\{ a \left(\frac{1}{\rho_v} \frac{\partial \rho_v}{\partial P} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial h_v}{\partial P} \right) + (1-a) \frac{\rho_l}{\lambda \rho_v} \frac{\partial h_l}{\partial P} \right\} \quad (2-25)$$

$$\Delta E_v^z = \frac{\partial P}{\partial z} \left\{ a V_v \left(\frac{1}{\rho_v} \frac{\partial \rho_v}{\partial P} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial h_v}{\partial P} \right) + (1-a) V_l \frac{\rho_l}{\lambda \rho_v} \frac{\partial h_l}{\partial P} \right\} \quad (2-26)$$

((2-22)-(2-23)×h_v)/(λρ_ℓ)より次式を得る。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{\partial((1-\alpha)V_\ell)}{\partial z} + \Delta E_\ell^1 + \Delta E_\ell^2 = \frac{qP}{\lambda A \rho_\ell} \quad (2-27)$$

ただし、

$$\Delta E_\ell^1 = \frac{\partial P}{\partial t} \left\{ (1-\alpha) \left(\frac{1}{\lambda} \frac{\partial h_\ell}{\partial P} - \frac{1}{\rho_\ell} \frac{\partial \rho_\ell}{\partial P} \right) + \alpha \frac{\rho_v}{\lambda \rho_\ell} \frac{\partial h_v}{\partial P} \right\} \quad (2-28)$$

$$\Delta E_\ell^2 = \frac{\partial P}{\partial z} \left\{ (1-\alpha)V_\ell \left(\frac{1}{\lambda} \frac{\partial h_\ell}{\partial P} - \frac{1}{\rho_\ell} \frac{\partial \rho_\ell}{\partial P} \right) + \alpha V_v \frac{\rho_v}{\lambda \rho_\ell} \frac{\partial h_v}{\partial P} \right\} \quad (2-29)$$

次に、(2-25)、(2-26)式と(2-24)式の右辺、(2-28)、(2-29)式と(2-27)式の右辺をそれぞれ比較して、物性値の圧力依存性を考慮した項がどの程度寄与しているかを調べてみる。

単位圧力変化当りの物性値変化は低圧ほど大きく、また、テスト部差圧や差圧変動も低圧の方が大きい。そこで、流量低下バーンアウト実験のうち、低圧の例としてRun 541206-1(加圧器圧力0.53MPa)、高圧の例としてRun 541113-11(3.01MPa)をとり、それぞれの場合の ΔE_v^1 、 ΔE_v^2 、 ΔE_ℓ^1 、 ΔE_ℓ^2 の寄与を評価する。

i) Run 541206-1の場合

実験データをFig. 2.1に示し、計算結果を付録AのFig. A1-4に示す。

この場合、Fig. 2.1よりバーンアウト発生時刻近傍において、入口圧力約0.9MPa、出口圧力約0.8MPaで、圧力振動の振巾は約0.1MPa、振動数は約8Hzである。

この条件下での圧力振動や差圧に基づく物性値変化を計算すると $\Delta E_v^1 \sim \Delta E_\ell^2$ は次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta E_v^1 &= \pm \frac{\Delta P}{\Delta t} \{ 0.1141\alpha + 2.1897(1-\alpha) \} \\ \Delta E_v^2 &= \pm \frac{\Delta P}{\Delta z} \{ 0.1141\alpha V_v + 2.1897(1-\alpha)V_\ell \} \\ \Delta E_\ell^1 &= \pm \frac{\Delta P}{\Delta t} \{ 0.01623(1-\alpha) + 0.0000111\alpha \} \\ \Delta E_\ell^2 &= \frac{\Delta P}{\Delta z} \{ 0.01623(1-\alpha)V_\ell + 0.0000111\alpha V_\ell \} \end{aligned}$$

ただし ΔP は(kg/cm²)単位である。

以上の値を評価するに当り、 α 、 V_ℓ 、 V_v として、まずバーンアウト発生時における沸騰長さの中間における計算値を用いる。すなわち $\Delta z = 64$ cm、 $\alpha = 0.96$ 、 $V_\ell = 17$ m/s、 $V_v = 51$ m/sとして上式に代入すると、以下の評価値が得られる。

$$\Delta E_v^1 \approx \pm 3.15 (s^{-1}), \quad \Delta E_v^2 \approx 11.1 (s^{-1})$$

$$\Delta E_\ell^1 \approx \pm 0.0106 (s^{-1}), \quad \Delta E_\ell^2 \approx 0.0258 (s^{-1})$$

一方、(2-24)および(2-27)式の右辺はそれぞれ次の値となる。

$$\frac{qP}{\lambda A \rho_v} \approx 1.23 (s^{-1}), \quad \frac{qP}{\lambda A \rho_\ell} \approx 0.60 (s^{-1})$$

すなわち,

$$(\Delta E_v^1 + \Delta E_v^2) / \left(\frac{qP}{\lambda A \rho_v} \right) \approx 0.065 \sim 0.12$$

$$(\Delta E_l^1 + \Delta E_l^2) / \left(\frac{qP}{\lambda A \rho_l} \right) \approx 0.025 \sim 0.061$$

ところで, ΔE_v^1 , ΔE_v^2 について, 最も値が大きくなると思われるバーンアウト発生時の出口における α , V_l , V_v の計算値を用いて評価すると, $\alpha = 0.99$, $V_l = 33 \text{ m/s}$, $V_v = 100 \text{ m/s}$ だから,

$$\Delta E_v^1 \approx 2.16 (\text{s}^{-1}), \quad \Delta E_v^2 \approx 1.88 (\text{s}^{-1}) \text{ および, } (\Delta E_v^1 + \Delta E_v^2) / \left(\frac{qP}{\lambda A \rho_v} \right)$$

$\approx 0.14 \sim 0.17$ となり, やや大きな誤差を示す。ところで (2-25), (2-26), (2-28), (2-29) 式の $\frac{\Delta P}{\Delta t}$, $\frac{\Delta P}{\Delta z}$ はテスト部全体の量なので, α , V_l , V_v を出口で評価するよりも, 沸騰長さ中間値で評価する方がより妥当であろう。

ii) Run 541113-11 の場合

実験データを Fig. 2.2 に示し, 計算結果を付録 A の Fig. A5-5 に示す。

この場合, Fig. 2.2 よりバーンアウト発生時刻近傍において, 入口圧力約 3.15 MPa, 出口圧力約 3.1 MPa, 圧力振動の振巾は約 0.04 MPa, 振動数は約 20 Hz である。

i) と同様の方法により, この場合の ΔE_v^1 , ΔE_v^2 , ΔE_l^1 , ΔE_l^2 を評価し, (2-24), (2-27) の右辺と比較して次の評価値が得られる。

$$(\Delta E_v^1 + \Delta E_v^2) / \left(\frac{qP}{\lambda A \rho_v} \right) \approx -0.003 \sim 0.023$$

$$(\Delta E_l^1 + \Delta E_l^2) / \left(\frac{qP}{\lambda A \rho_l} \right) \approx -0.003 \sim 0.009$$

i), ii) の結果より, (2-24), (2-27) 式において, 物性値の圧力依存性を考慮した項の寄与は, 0.8 MPa の低圧では最大約 12% 程度であるが, 3.1 MPa の圧力では最大約 2~3% 程度の寄与しかなく, 計算の単純化のためこれらの項を無視しても, 低圧ではともかく, 圧力が高いほど誤差は十分小さくなることがわかる。すなわち, (2-24), (2-27) 式において ΔE_v^1 , ΔE_v^2 , ΔE_l^1 , ΔE_l^2 の項を省略すると次式を得る。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha V_v) = \frac{qP}{\lambda A \rho_v} \quad (2-30)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{\partial ((1-\alpha)V_l)}{\partial z} = \frac{qP}{\lambda A \rho_l} \quad (2-31)$$

すなわち, (2-30), (2-31), (2-21) が以下の計算で使用する基礎式である。これらの式は, エネルギー保存式 (2-13) において, エネルギー消散項と圧力変化による仕事項を無視し, エネルギー式 (2-13) および連続の式 (2-20) において, 物性値の圧力依存性を無視した結果に対応している。

2.4 沸騰二相流諸量の計算方法

前節で述べた(2-30), (2-31), (2-21)の3基礎式より, 沸騰流路内のボイド率, クオリティ, 質量速度等の過渡変化を, 特性曲線法により計算する方法を以下に述べる。

まず, 次のような無次元量を定義する。

$$\left. \begin{aligned}
 \tau &\equiv t v_i / L \\
 \eta &\equiv Z / L \\
 u(\tau) &\equiv v(\tau) / v_i \\
 \phi(\eta, \tau) &\equiv q(\eta, \tau) / q_i \\
 u_v &\equiv v_v / v_i \\
 u_\ell &\equiv v_\ell / v_i \\
 \nu &\equiv \rho_v / \rho_\ell \\
 H_B &\equiv \frac{(h_\ell - h_{in})}{\left(\frac{q_i p L}{A \rho v_i}\right)} = \frac{h_\ell - h_{in}}{h_{out,i} - h_{in}} \\
 x_{in} &= \frac{h_{in} - h_\ell}{\lambda}
 \end{aligned} \right\} \quad (2-32)$$

(2-32)を用いると(2-30), (2-31)は以下のようになる。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \eta} (\alpha u_v) = \frac{(-x_{in})}{\nu H_B} \phi \quad (2-33)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \eta} ((1-\alpha) u_\ell) = \frac{(-x_{in})}{H_B} \phi \quad (2-34)$$

$$u_v / u_\ell = S(\alpha) \quad (2-35)$$

(2-33)-(2-34)より(2-35)を用いて次式を得る。

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

これを積分すると

$$u_\ell (1-\alpha + \alpha S) - u_{in}(\tau) = \frac{(-x_{in})}{H_B} \frac{1-\nu}{\nu} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta \quad (2-36)$$

ここで $\eta_B(\tau)$ は時刻 τ における飽和点位置であり, 2.2節の方法により求められる。

(2-36)を(2-34)に代入すると次式となる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{\{S + \alpha(1-\alpha) \frac{\partial S}{\partial \alpha}\}}{\{1-\alpha + \alpha S\}^2} \left[\frac{(-x_{in})(1-\nu)}{\nu H_B} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta + u_{in}(\tau) \right] \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \\
 = \frac{(-x_{in})}{H_B} \left[1 + \frac{(1-\alpha)(1-\nu)}{1+\alpha+S\alpha} \right] \phi \quad (2-37)
 \end{aligned}$$

この式は特性曲線法により、以下のような α , η に関する 2 階連立常微分方程式に変換できる。

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{(-x_{in})}{H_B} \left[1 + \frac{(1-\nu)(1-\alpha)}{1-\alpha+\alpha S} \right] \phi \quad (2-38)$$

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \frac{\left\{ S + \alpha(1-\alpha) \frac{\partial S}{\partial \alpha} \right\}}{(1-\alpha+\alpha S)^2} \left[\frac{(-x_{in})(1-\nu)}{\nu H_B} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta + u_{in}(\tau) \right] \quad (2-39)$$

(2-38), (2-39) 式において, x_{in} , H_B は入口圧力の初期値で評価する。一方, ν は計算時刻における入口と出口圧力の平均値で評価し, S , $\frac{\partial S}{\partial \alpha}$ を計算する際の圧力も同様である。

熱流束一定の場合 $\phi = 1$ だから, 実験により得られる $u_{in}(\tau)$ を用いて, (2-38), (2-39) 式より, 時刻 τ における α と η が得られる。この時の液流速は (2-36) 式より求められ, クオリティと無次元質量速度は次式により与えられる。

$$X = \frac{\rho_v \alpha v_v}{\rho_v \alpha v_v + \rho_l (1-\alpha) v_l} = \frac{\nu S \alpha}{1-\alpha+\nu S \alpha} \quad (2-40)$$

$$G^* = \frac{\rho_v \alpha v_v + \rho_l (1-\alpha) v_l}{\rho_l v_l} = (1-\alpha+\nu \alpha S) u_l \quad (2-41)$$

2.5 計算方法の検討

2.5.1 解析解との比較

一定熱流束, 一定スリップ比で入口流量を指数関数状に低下させた場合には, 单相流基礎式 (2-1), 二相流基礎式 (2-19), (2-20), (2-21) から導出された無次元特性方程式 (2-4), (2-38) は解析解が求まり, (2-39) のみを数値的に解けば, 解が得られる。解析的に求めた解は文献(10)の付録 B に示し, 計算結果の例は文献(11)の付録 A に示した。

ここでは, 本報告での計算方法の妥当性を検証するため, 指数関数状入口流量低下を仮定した場合の, テスト部出口のクオリティ, ボイド率, 無次元質量速度, 無次元液流速等の値について, 以上の解析的に求めた結果と, 2.2~2.4 節で述べた方法により計算した結果との比較および両者の相対誤差を, Table 2.1 に示す。同表には計算条件も示してある。

なお, この計算例は指数関数状流量低下であるが, 例えば初期流速を 2 m/sec とすると, 流速減少率にして約 75~150%/sec 程度とみなされるので, かなり急激な流量低下に対応している。

Table 2.1 より, ほぼ全時間範囲内で, 計算結果と解析的に求めた解は約 1.2% 以内の精度で一致しており, 特に 3 章で問題とするようなバーンアウト発生時点付近の出口質量速度は約 0.5% 以内の一致を示している。

以上の結果より, 本計算方法は妥当と考えられる。

2.5.2 スリップ比の影響

本計算モデルにおいて、スリップ比モデルの選択の相異が計算結果にどの程度の影響を与えるかを調べるため、スリップ比を一定値(1, 3, 5)とした場合と、修正 Bankoff モデル⁽¹²⁾によるスリップ比とボイド率の関係をを用いた場合について、バーンアウト発生時のテスト部出口におけるボイド率、クオリティ、質量速度等を計算し、Table 2.2に計算結果の比較を示す。計算条件は、圧力0.5MPa、入口温度120°Cで、流速減少率が3.94%/sec (Run 541206-16)と1.45%/sec (Run 541206-19)の2ケースについて示してある。

同表より、バーンアウト発生時の二相流諸量に対するスリップ比の相異による影響は、ボイド率以外ではかなり小さく、スリップモデルの選択は、ボイド率以外の解析結果にはそれほど大きな影響は与えないことがわかる。なお、バーンアウト熱流束関係式にボイド率が含まれることはほとんどなく、また、本実験のように環状流領域でのバーンアウトはボイド率よりも液膜挙動に依存すると考えられるので、本解析の目的上、ボイド率についてはクオリティ、質量速度ほどの計算精度は要求されない。

従って、次章で述べる流量低下バーンアウト実験の解析に際しては、単純化のため一定スリップモデルを採用し、スリップ比の値は、Thomによるスリップ比と圧力の関係⁽⁷⁾に基づき、系圧力のみ関数として定めた。各実験の解析に際して採用したスリップ比は、圧力0.5, 1, 2, 3, 3.9MPaの場合に、それぞれ3.0, 2.8, 2.2, 2.0, 1.9とした。

Table 2.1 Comparison of calculated results with analytical results

Dimensionless value : $\tau = tv_1/L$, $G_{in}^*(\tau) = G_{in}(\tau)/G_1$, $G_{out}^*(\tau) = G_{out}(\tau)/G_1$, $u_l(\tau) = v_l(\tau)/v_1$

calculated condition : $P = 0.245 \text{ MPa}$, $S = 20$, $G_{in}^*(\tau) = 0.5(1 + e^{-\tau})$, $H_B = 0.5$, $X_1^{in} = -0.1$, $X_1^{out} = 0.1$

Dimensionless time τ	(1) Calculated results						(2) Analytical results						Error ((1)-(2)) / (2)					
	G_{in}^*	X_{out}^{out}	G_{out}^*	u_l	α^{out}	X_{out}^{out}	G_{out}^*	u_l	α^{out}	X_{out}^{out}	G_{out}^*	u_l	α^{out}	X_{out}^{out}	G_{out}^*	u_l	α^{out}	
0.0448	0.978	0.0990	1.011	35.29	0.974	0.1000	1.001	35.21	0.974	-0.010	0.010	0.0023	0					
0.4460	0.820	0.1074	1.003	37.88	0.976	0.1087	0.997	38.05	0.977	-0.012	0.0060	0.0045	-0.0001					
0.6478	0.762	0.1224	0.940	40.32	0.980	0.1225	0.945	40.53	0.980	-0.0008	-0.0053	-0.0052	0					
0.8498	0.714	0.1410	0.860	42.40	0.983	0.1411	0.865	42.59	0.983	-0.0007	-0.0058	-0.0045	0					
1.0515	0.675	0.1590	0.795	44.10	0.985	0.1591	0.799	44.27	0.985	-0.0006	-0.0050	-0.0038	0					
1.4542	0.617	0.1921	0.698	46.62	0.988	0.1923	0.701	46.76	0.988	-0.0001	-0.0043	-0.0030	0					

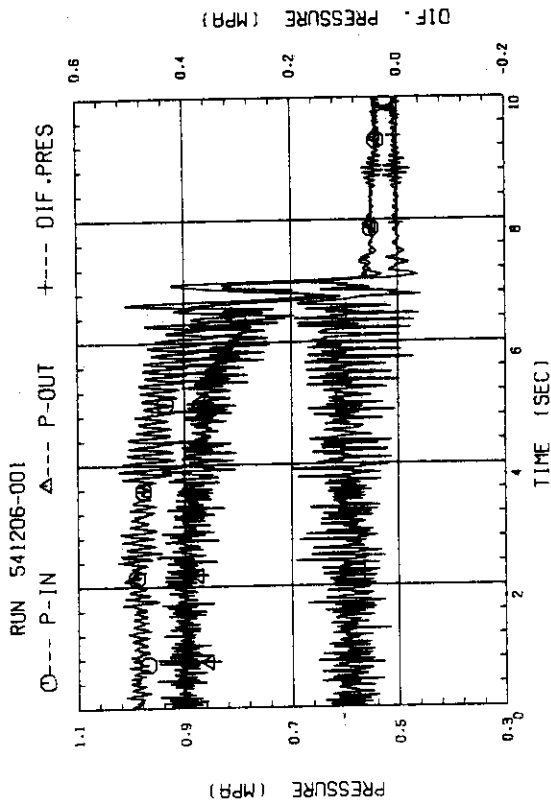
Table 2.2 Effect of slip ratio on calculated results

Type of transient	Slow				Fast	
Run No.	5 4 1 2 0 6 - 1 6				5 4 1 2 0 6 - 1 9	
Flow reduction rate	3.94 %/sec				1.45 %/sec	
Flow reduction time	1.68 sec				4.25 sec	
Slip model	Constant slip			Mod. ⁽¹²⁾		Mod. ⁽¹²⁾
	S=1	S=3	S=5	Bankoff	S=3	Bankoff
α_{BO}^{out}	0.995	0.986	0.977	0.958	0.991	0.968
X_{BO}^{out}	0.489	0.483	0.485	0.485	0.589	0.589
G_{BO}^{out} (kg/s.m ²)	899	914	906	909	797	795
G_{BO}^{out} / G_{BO}^t	1.067	1.085	1.076	1.080	1.172	1.170
G_{BO}^{out} / G_{BO}^s	0.914	0.930	0.922	0.925	0.810	0.809

Experimental condition: $P=0.51\text{MPa}$, $T_{in}=120^\circ\text{C}$

$$q_{BO}=2.67 \times 10^6 \text{ w/m}^2, G_1=1740$$

kg/s.m²



RUN NO 541206 - 1

MT VOL. NUMBER = 12

MT FILE NUMBER = 28

SAMPLING INTERVAL = 5.0 (MSEC)

HEATING VOLTAGE = 38.4 (VOLT)

HEATING POWER = 68.1 (KW)

HEAT FLUX = 2.709 E+6 (W/SQCM)

INLET TEMPERATURE = 120.3 (DEG-C)

INITIAL MASS VELOCITY = 2425.2 (KG/S.SQCM)

PRESSURE = 0.53 (MPA)

INITIAL EXIT QUALITY = 0.102

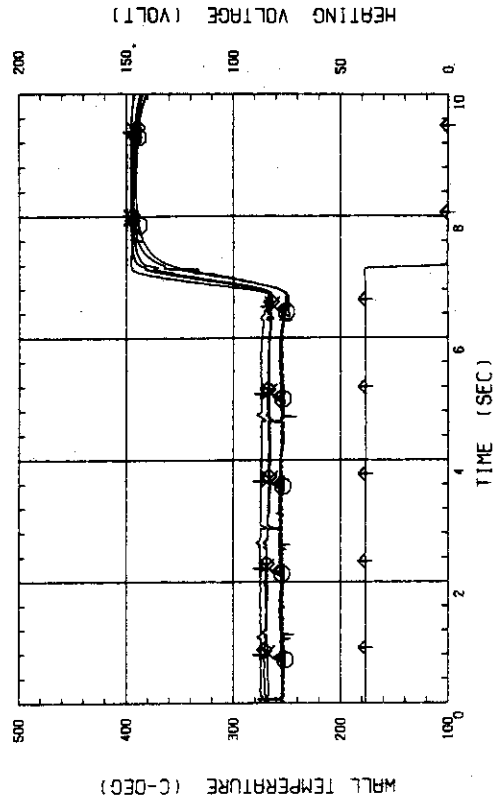
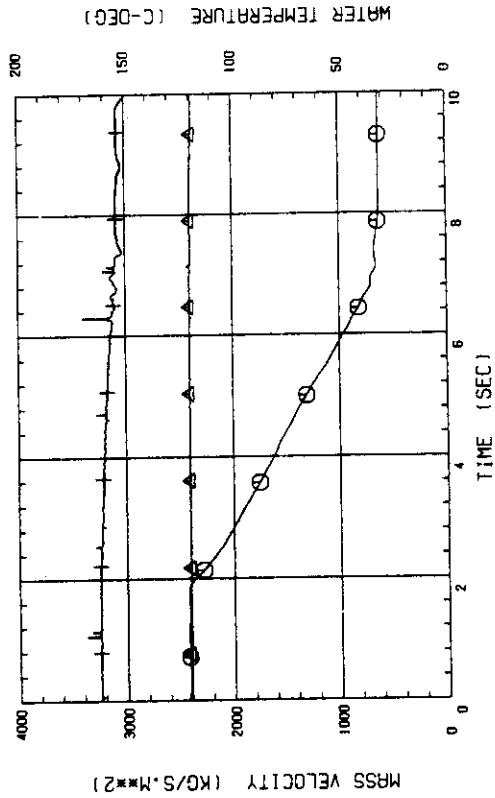
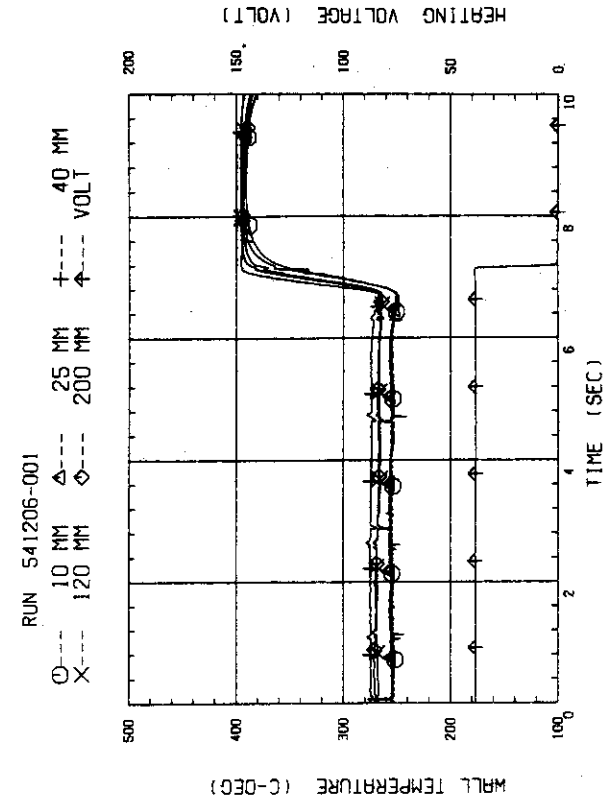
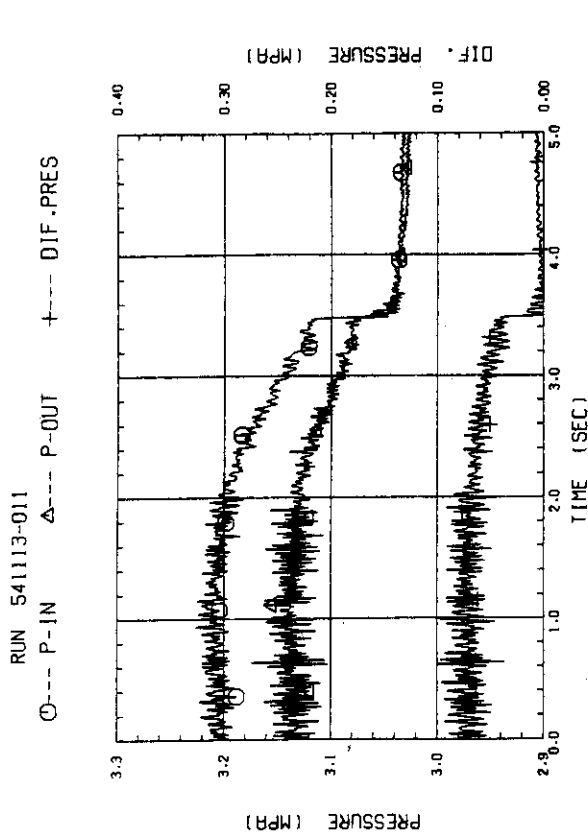


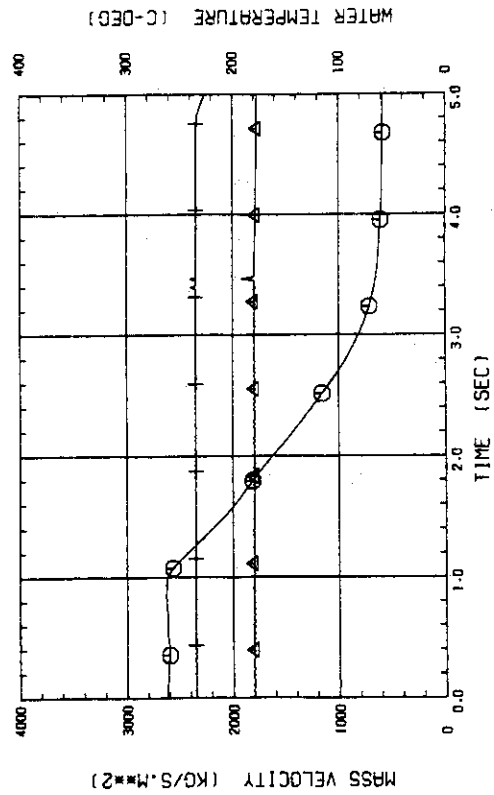
Fig. 2.1 Example of experimental data (1) (P=0.53MPa)

RUN NO 541113 - 11

MT VOL. NUMBER = 10
 MT FILE NUMBER = 24
 SAMPLING INTERVAL = 5.0 (MSEC)
 HEATING VOLTAGE = 45.9 (VOLT)
 HEATING POWER = 92.2 (KW)
 HEAT FLUX = 3.670 E+6 (W/SQM)
 INLET TEMPERATURE = 180.1 (DEG-C)
 INITIAL MASS VELOCITY = 2617.3 (KG/S.SQM)
 PRESSURE = 3.01 (MPA)
 INITIAL EXIT QUALITY = 0.113



RUN 541113-011



RUN 541113-011

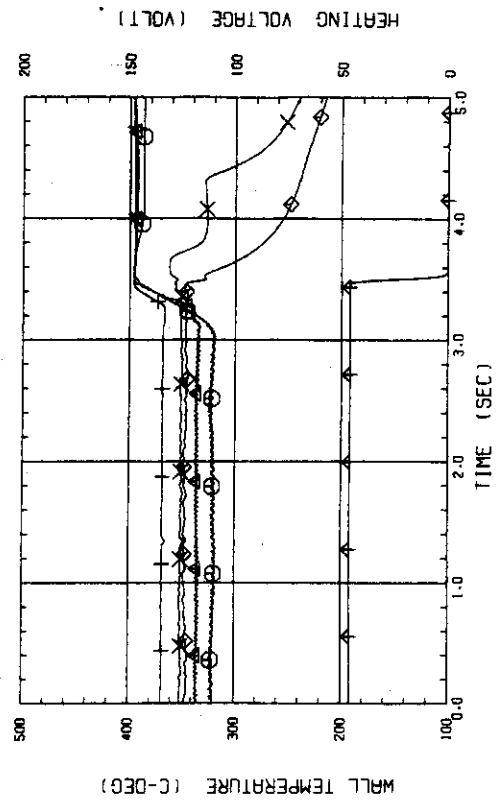


Fig. 2.2 Example of experimental data (2) (P=3.01MPa)

3. 流量低下バーンアウト実験の解析

2章で述べた計算方法により、沸騰流路においてバーンアウトが発生するまで流量を低下した場合の二相流諸量を計算すると、バーンアウト発生位置（本実験の場合はテスト部出口）における局所流動条件（質量速度、クオリティ等）が求められる。

本章では、まず流量低下バーンアウト実験の概要および実験データを用いて計算した沸騰二相流の過渡挙動について述べ、次にバーンアウト発生時点の出口質量速度および出口クオリティと、流速減少率の関係を求め、さらに圧力が流量低下過渡時のバーンアウト発生条件におよぼす影響について考察する。

3.1 流量低下バーンアウト実験の概要

本報で解析する流量低下バーンアウト実験の実験装置、実験方法、結果等については、既に報告したので⁽¹⁾ここでは実験概要のみを述べる。

実験装置のフローシートをFig. 3.1に示し、テスト部をFig. 3.2に示す。

テスト部は内径10mm、肉厚1mm、加熱長さ800mmのステンレス製垂直上向管内流路で、直流直接通電により加熱した。主要な測定項目は、テスト部入口および出口の水溫、圧力、差圧、テスト部外壁溫度（6ヶ所）、ブリッジ式バーンアウト検出器信号、テスト部加熱電圧および電流、入口流量等である。

実験方法としては、テスト部加熱電力を一定に保持し、あらかじめ設定した信号に従って作動する流量調節弁により入口流量を低下させた。そして、バーンアウト発生によりテスト部壁溫が急上昇すると、加熱電力を遮断した。

本実験では、データを統一的に整理するため、入口流量をできるだけ直線状に低下させた。そして、流量低下の速度を示す量として、初期流速に対する流速低下速度の割合を%/sec単位で表現し、これを流速減少率（FR）と定義した。

実験パラメータは圧力、熱流速、入口溫度、初期質量速度、および流速減少率（又は流量低下時間）で、実験範囲はTable 3.1に示す。

3.2 計算結果の概要

2章で述べた計算方法により、流量を低下してバーンアウトに至るまでの過渡沸騰過程を計算した。付録AのFig. A1-1~A6-5に、計算結果の例として、テスト部入口と出口の質量速度、飽和点位置、テスト部出口のボイド率とクオリティ等の過渡変化を、0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 3.9MPaの各圧力において、流速減少率の小さな方から順に示す。また、Table A.1には、各Runごとの実験条件、バーンアウト発生時刻、対応する実験データのFig.No.（文献(1)の付録Bに集録）等を示す。なお、本計算はいずれも、バーンアウト発生により加熱電源

を遮断するまで行った。Fig. A1-1~A6-5にはバーンアウト発生時刻も示してある。

Fig. A1-1~A6-5より、各圧力において流速減少率が小さい場合は、入口と出口の質量速度はほぼ一致しているが、流速減少率が大きくなるにつれて両者の差は拡大していることがわかる。特に、流速減少率が100%/sec以上と極めて急激な過渡変化の場合(Fig. A1-5, A6-5)には、バーンアウト時の出口と入口の質量速度比は約2.75および1.53と極めて大きくなっている。また、流量の低下と共に、飽和点位置はほぼ直線状に低下し、出口ボイド率、出口クオリティは上昇している。

付録BのFig. B.1~B.4には、圧力が0.5MPaおよび3.9MPaで、流速減少率が小さい場合と大きい場合について、テスト部内部の各位置におけるボイド率とクオリティの過渡変化挙動の代表例を示す。同図より、ほぼ同じ程度の過渡変化時には、テスト部内部においてもクオリティの変化は、圧力が高い程ゆるやかとなる傾向にあることがわかる。またFig. B.5, B.6, B.7は流速減少率が大きい場合のテスト部内部の質量速度の過渡変化挙動を示す。Fig. B.5に見られるように、圧力0.52MPaで流速減少率が167%/secと大きい場合には、テスト部内部の $Z/L=0.5\sim 0.3$ の位置において、流量低下による沸騰開始初期に一時的に質量速度が上昇してから低下する傾向があり、テスト部下部ほどこの上昇が著しい。これは、急激な流量低下により、沸騰境界付近で、蒸気流量が一時的に急上昇したためと考えられる。一方、圧力3.83MPaの場合(Fig. B.7)には流速減少率が約190%/secと大きいにもかかわらず、低圧時のような流量低下による沸騰開始時における質量速度の上昇は現われていない。これは、高圧時には、沸騰による比体積変化が低圧時よりもかなり小さいため、急激な流量低下時においても、低圧の場合ほど顕著な蒸気流量の急上昇が生じないためであろう。

3.3 バーンアウト発生時の出口質量速度および出口クオリティと流速減少率の関係

前節の計算例で示したように、流速減少率が大きい程、テスト部の入口と出口の質量速度の差は大きくなるので、流量低下バーンアウト現象の解析のためには、テスト部出口質量速度や出口クオリティを求める必要がある。付録CのTable C.1~C.5に、流量低下バーンアウト実験の各ケースについて求めた、バーンアウト発生時刻におけるテスト部出口質量速度、クオリティ等を、実験条件と共に示す。なお、各種実験条件下でのバーンアウト発生質量速度を統一的に整理するため、バーンアウト発生時の入口と出口の質量速度は、定常バーンアウト質量速度との比(それぞれ G_{BO}^t/G_{BO}^s , G_{BO}^{out}/G_{BO}^s)で表現した。また、入口と出口の質量速度の相異の程度は G_{BO}^{out}/G_{BO}^t で表現できる。Table C.1~C.5には以上の各質量速度比の値も示してある。

圧力、入口温度、熱流束等の各条件下での G_{BO}^t/G_{BO}^s および G_{BO}^{out}/G_{BO}^s と流速減少率の関係をFig. 3.3~3.18に示す。前報⁽¹⁾で述べたように、流速減少率がある値以上となると、 G_{BO}^t/G_{BO}^s は1より小さくなるが、その低下率は1.0MPa以下の低圧で大きく、2.0MPa以上の高圧では小さくなっている。一方、 G_{BO}^{out} の計算値は G_{BO}^t よりも大きく、その差は流速減少率増大につれて大きくなるが、Fig. 3.3~3.18に見られるように、 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s と流速減少率の関係は、圧力にかなり依存していることがわかる。

まず、圧力約 0.5 MPa で入口温度 120°C の場合 (Fig. 3.3~3.6) には、流速減少率が約 2~5%/sec 以上となると G_{BO}^{out}/G_{BO}^s も 1 より小さくなり、その低下率は熱流束の小さい方が大きくなっている。一方、同一圧力でも入口温度が 66°C の場合 (Fig. 3.7~3.8) の G_{BO}^{out}/G_{BO}^s には、流速減少率増大時にもほとんど低下する傾向は見られない。圧力約 1 MPa の場合 (Fig. 3.9~3.12) には、データのバラツキが大きく必ずしも明確ではないが、全体としては流速減少率が約 2~20%/sec の範囲内では G_{BO}^{out}/G_{BO}^s は 1 よりわずかに小さくなっており、それ以上の流速減少率においてはむしろ 1 より大きくなる傾向が見られる。圧力が約 2~3.9 MPa の場合 (Fig. 3.13~3.18) においては、流速減少率が約 20%/sec 以下では G_{BO}^{out}/G_{BO}^s はほぼ 1 に等しく、約 20%/sec 以上では 1 より大きくなる傾向にある。ただし、圧力 2.95 MPa, 入口温度 132°C の場合 (Fig. 3.16) には、約 5%/sec 以上の流速減少率で G_{BO}^{out}/G_{BO}^s は 1 より大きくなっている。

一般に流速減少率が大きい程、 G_{BO}^{out} と G_{BO}^i の差も大きくなる。Fig. 3.19~3.26 に、各圧力、入口温度における G_{BO}^{out}/G_{BO}^i と流速減少率の関係を示す。これらの図より、同一流速減少率においては、熱流束の低い程、入口温度の低い程、 G_{BO}^{out}/G_{BO}^i は大きくなる傾向が見られるが、圧力の影響はほとんど認められない。

次に、バーンアウト発生時の出口クオリティ (X_{BO}^{out}) と流速減少率との関係を、各圧力、入口温度の場合について Fig. 3.27~3.34 に示す。 X_{BO}^{out} の値は、同一圧力においては熱流束の高い程、入口温度の低い程小さくなり、同一熱流束、サブクール度の場合には、圧力が低い程小さくなっている。一方、 G_{BO}^{out} が大きいと、それに対応する X_{BO}^{out} は小さくなるので、 X_{BO}^{out} と流速減少率の関係は、上述の G_{BO}^{out}/G_{BO}^s と流速減少率の関係を逆にしたものに対応している。例えばサブクール度の小さい場合について比較すると、圧力 0.5 MPa の場合 (Fig. 3.27) には、流速減少率が大きくなると X_{BO}^{out} も大きくなり、約 1 MPa の場合 (Fig. 3.29) には、 X_{BO}^{out} は流速減少率にほとんど依存せず、圧力が 2 MPa 以上 (Fig. 3.31, 3.32, 3.34) となると、流速減少率が増大すると、 X_{BO}^{out} は小さくなる傾向にある。

3.4 バーンアウト発生時出口質量速度と流速減少率の関係に対する圧力の影響

Fig. 3.3~3.18 に示したように、 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s と流速減少率との関係に対しては圧力の影響が顕著で、熱流束や初期質量速度の影響は小さい。 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s と流速減少率との関係に対する圧力の影響を調べるため、流速減少率を 0.6~2%/sec (very slow transient), 2~5%/sec (slow transient), 5~10%/sec (intermediate transient), 10~20%/sec (fast transient), 20~37%/sec (very fast transient) の 5 領域に分割し、圧力と入口温度の各条件ごとに、それぞれの領域内における G_{BO}^{out}/G_{BO}^s の平均値と標準偏差を求め、Table 3.2 にその結果を示す。このうち入口サブクール度が小さい場合について、 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s の平均値と圧力との関係を、上記の流速減少率領域をパラメータとして Fig. 3.35 に示す。

Fig. 3.35 より、流速減少率が 2%/sec 以下の場合には、 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s は圧力に依存せず約 1 となっており、 G_{BO}^{out} と G_{BO}^i の差も極めて小さいので、入口条件でも出口条件でも定常バーン

アウトと考えられる。

圧力が約 2 MPa 以上においては、流速減少率が 20%/sec 以下では G_{BO}^{out}/G_{BO}^s はほぼ 1 となり、出口質量速度が定常バーンアウト質量速度に達した時点でバーンアウトが発生したことを示している。さらに、流速減少率が 20%/sec 以上になると、 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s は 1 よりやや大きくなる傾向が見られる。

一方、圧力が約 0.5 MPa の場合には、流速減少率が大きい程 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s は 1 より小さくなり、出口質量速度が定常バーンアウト質量速度よりもさらに減少してからバーンアウトが発生したことを示している。

圧力が約 1 MPa の場合には、10%/sec 以下の流速減少率においては、流速減少率が大きくなるほど G_{BO}^{out}/G_{BO}^s は小さくなっているが、10%/sec 以上ではその傾向が逆になっている。

ところで、本実験のような高クオリティ領域（環状流）における流量低下バーンアウトの場合には、加熱量は一定なので、流量低下による液膜流量の減少と、蒸気流速の増大によるエントレインメント量の増加が重なって、加熱面上の液膜が消滅し、バーンアウトに至ると考えられる。一方、入口流量を急激に変化させても、沸騰二相流の流動様式の変化には時間がかかるので、ある程度以上の流速減少率の場合には、過渡時における液膜、液滴、蒸気等の流動様式が、同一の質量速度やクオリティに対応する定常状態の場合と異なっていると思われる。従って、このような場合には、 G_{BO}^{out} が G_{BO}^s に等しくしなくても、液膜が消滅してバーンアウトが発生する可能性がある。

2章で述べたような分離流モデルによる計算では、液膜、液滴、蒸気という流動区分はなされておらず、バーンアウト発生に直接関係のある液膜流量の過渡挙動は求められない。また、基礎式自体においても運動量バランスを考慮していないことや、二相流計算部分で物性値の圧力依存性を無視したことなどの問題点があり、Fig. 3.35に示したような、流量低下バーンアウト時の G_{BO}^{out} に対する流速減少率と圧力の影響を確認するには、さらに詳細な実験および解析を行う必要がある。

Table 3.1 Range of parameters for flow reduction burnout experiment

Pressure (P)	0.50~3.9 (MPa)
Burnout heat flux (q_{BO})	$2.16\sim 3.86 \times 10^6$ (w/m^2)
Inlet temperature (T_{in})	66~201 ($^{\circ}C$)
Initial mass velocity (G_i)	1240~3050 ($kg/s \cdot m^2$)
Initial outlet quality (X_i^{out})	-0.03~0.38
Flow transient time (Δt)	0.35~83 (sec)
Flow reduction rate (FR)	0.6~190 (%/sec)

Table 3.2 Average and standard deviation of G_{BO}^{out}/G_{BO}^t in five flow reduction rate ranges

up	- Average of G_{BO}^{out}/G_{BO}^s
middle	- Standard deviation
down	- Data points

P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO} (×10 ⁶ w/m ²)	Flow reduction rate %/sec				
			0.6~2	2~5	5~10	10~20	20~37
0.51	120	2.16~3.81	0.983	0.953	0.914	0.870	0.821
			0.0402	0.0497	0.0613	0.0537	0.0950
			13	23	16	12	5
0.57	66	2.71~3.56	1.009	0.973	0.965	0.978	0.998
			0.0216	0.0493	0.0403	0.0514	0.134
			3	6	6	6	4
1.06	140	3.20~3.79	0.999	0.975	0.939	0.949	1.011
			0.0216	0.0310	0.0357	0.0358	0.0321
			4	11	9	7	5
0.95	91	3.22~3.81	0.966	0.941	0.963	0.983	0.951
			0.0473	0.0692	0.0665	0.0436	0.0755
			10	16	13	10	7
1.97	161	3.45~3.75	0.985	0.994	1.003	1.008	1.059
			0.0193	0.0222	0.0273	0.0264	0.0281
			9	16	13	4	6
3.01	181	3.71	0.990	0.997	1.007	1.025	1.059
			0.0186	0.0097	0.0192	0.0202	0.0338
			6	4	10	8	6
2.95	130	3.71	1.008	1.010	1.036	1.090	1.132
			0.0146	0.0269	0.0254	0.0245	0.0458
			3	5	7	7	4
3.87	201	3.38~3.68	0.992	0.992	1.007	1.027	1.082
			0.0198	0.0191	0.0219	0.0216	0.0222
			9	11	10	4	3

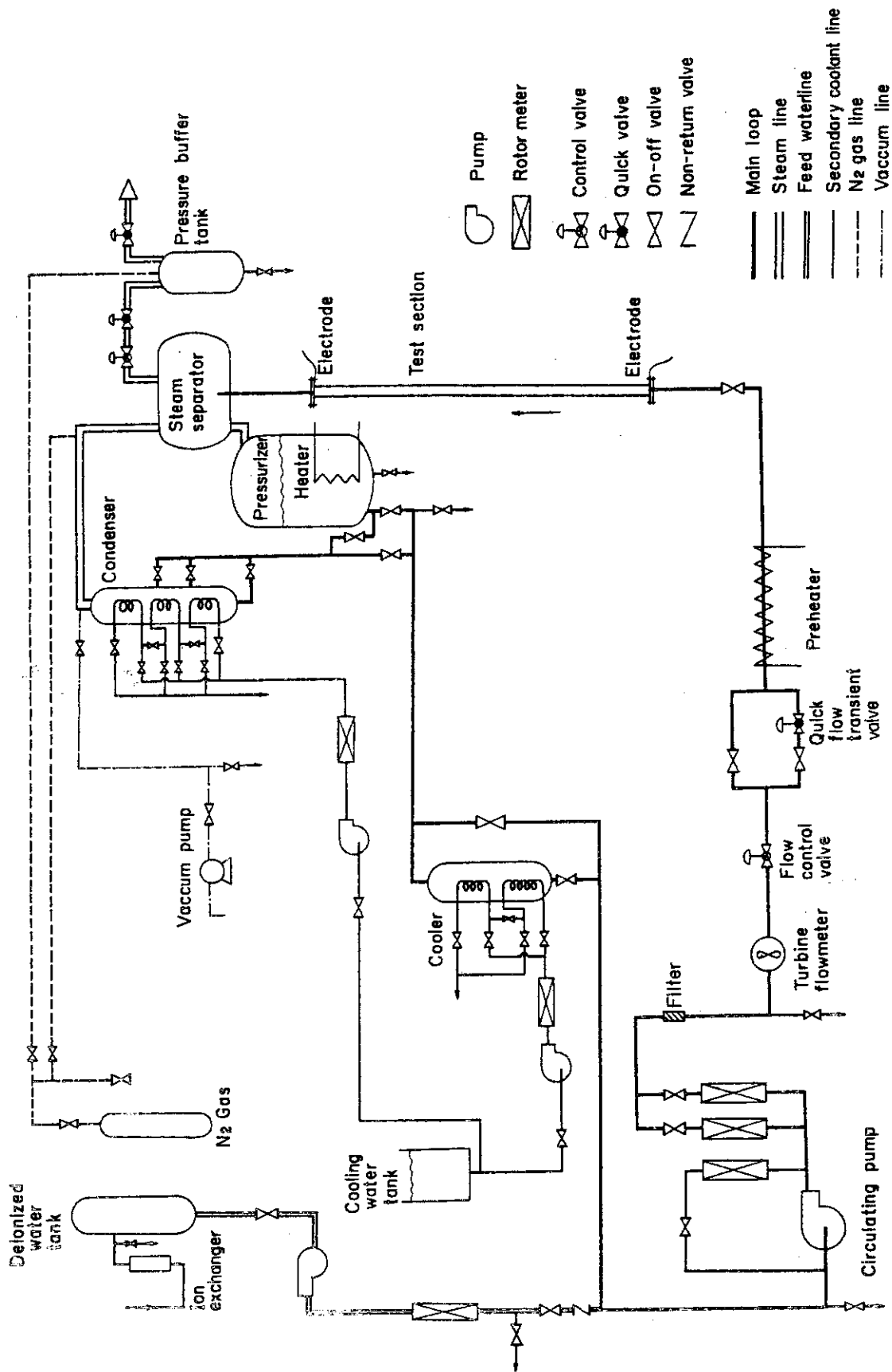


Fig. 3.1 Transient boiling experiment loop

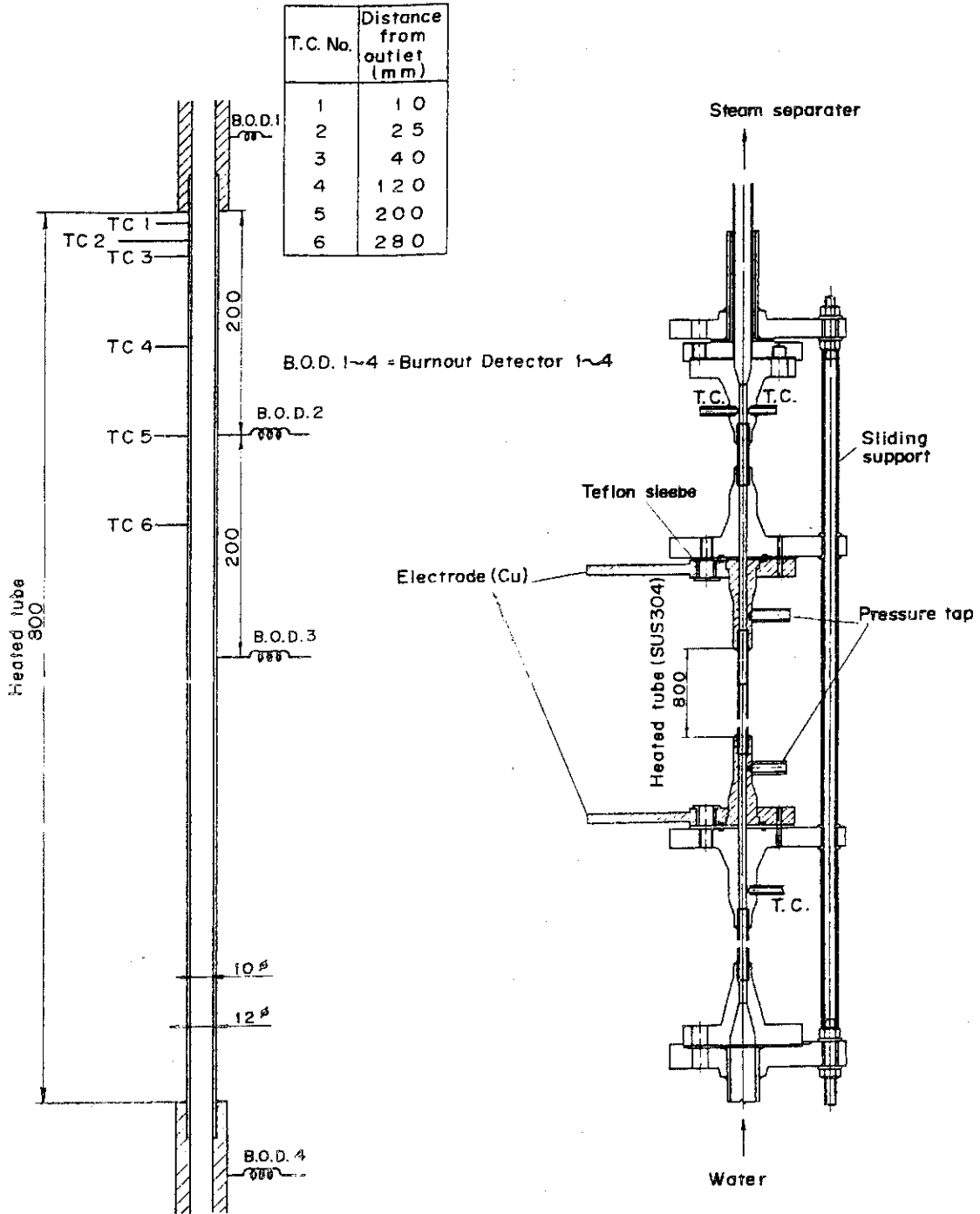


Fig. 3.2 Test section

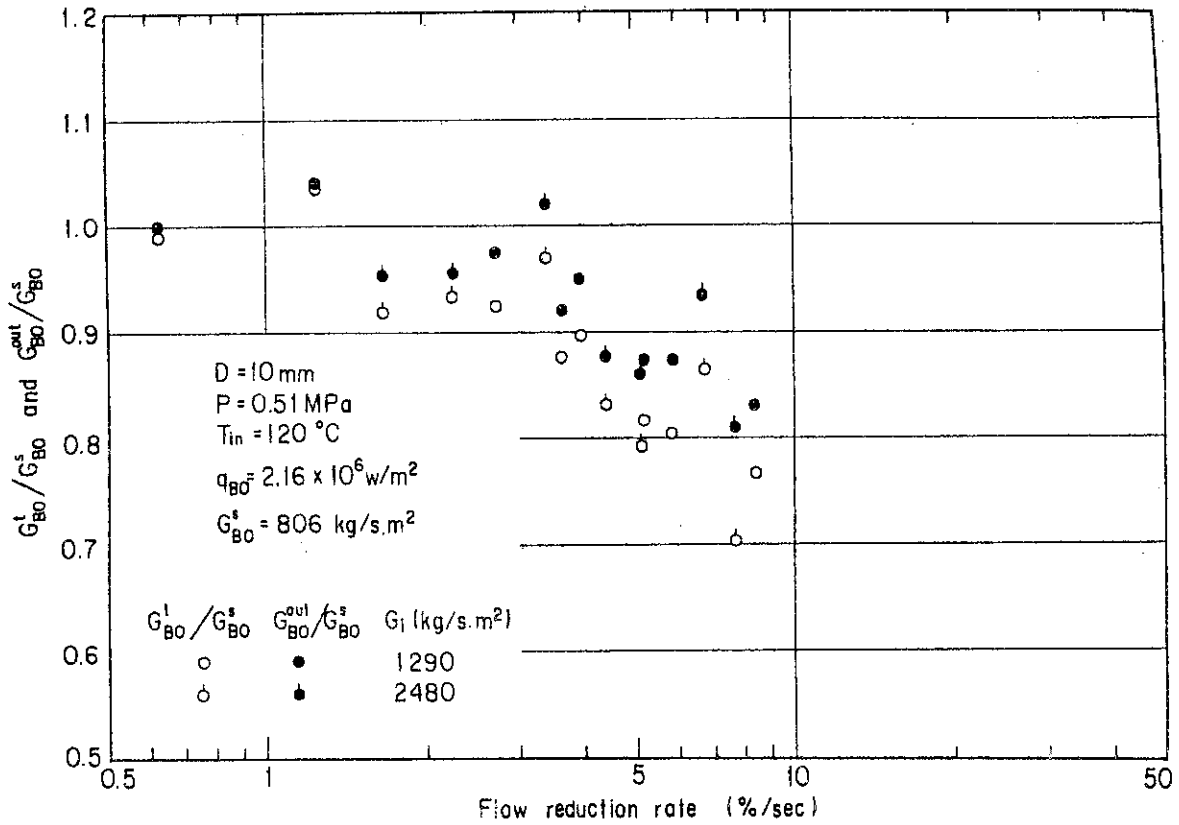


Fig. 3.3 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (1)
 ($P = 0.51 \text{ MPa}$, $T_{in} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO} = 2.16 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

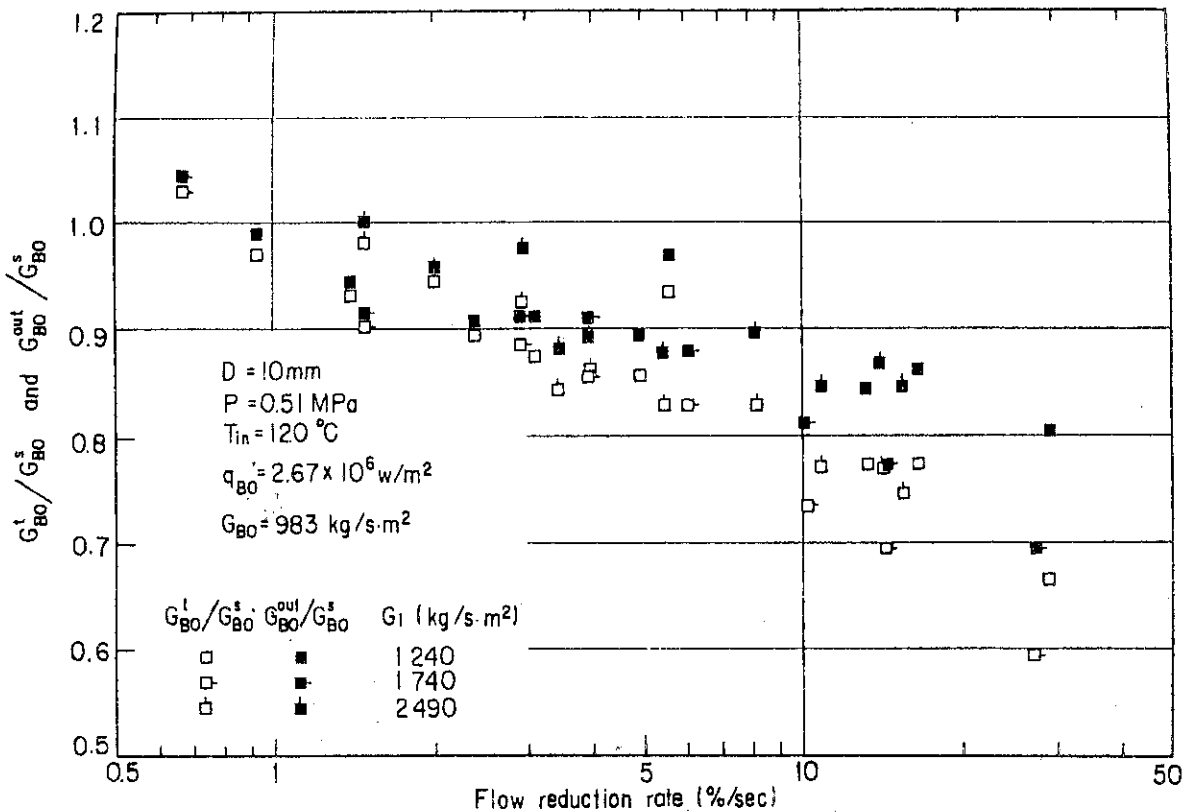


Fig. 3.4 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (2)
 ($P = 0.51 \text{ MPa}$, $T_{in} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO} = 2.67 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

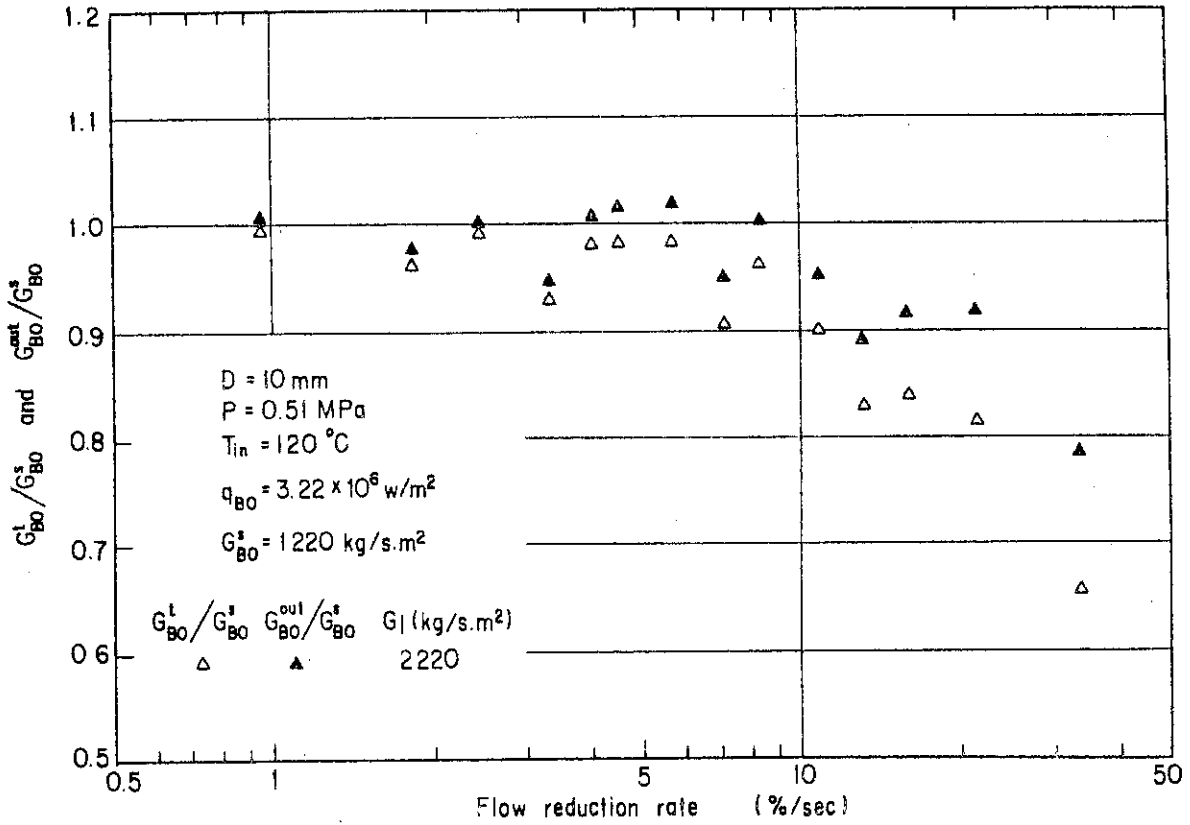


Fig. 3.5 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (3)
 ($P = 0.51 \text{ MPa}$, $T_{in} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO} = 3.22 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

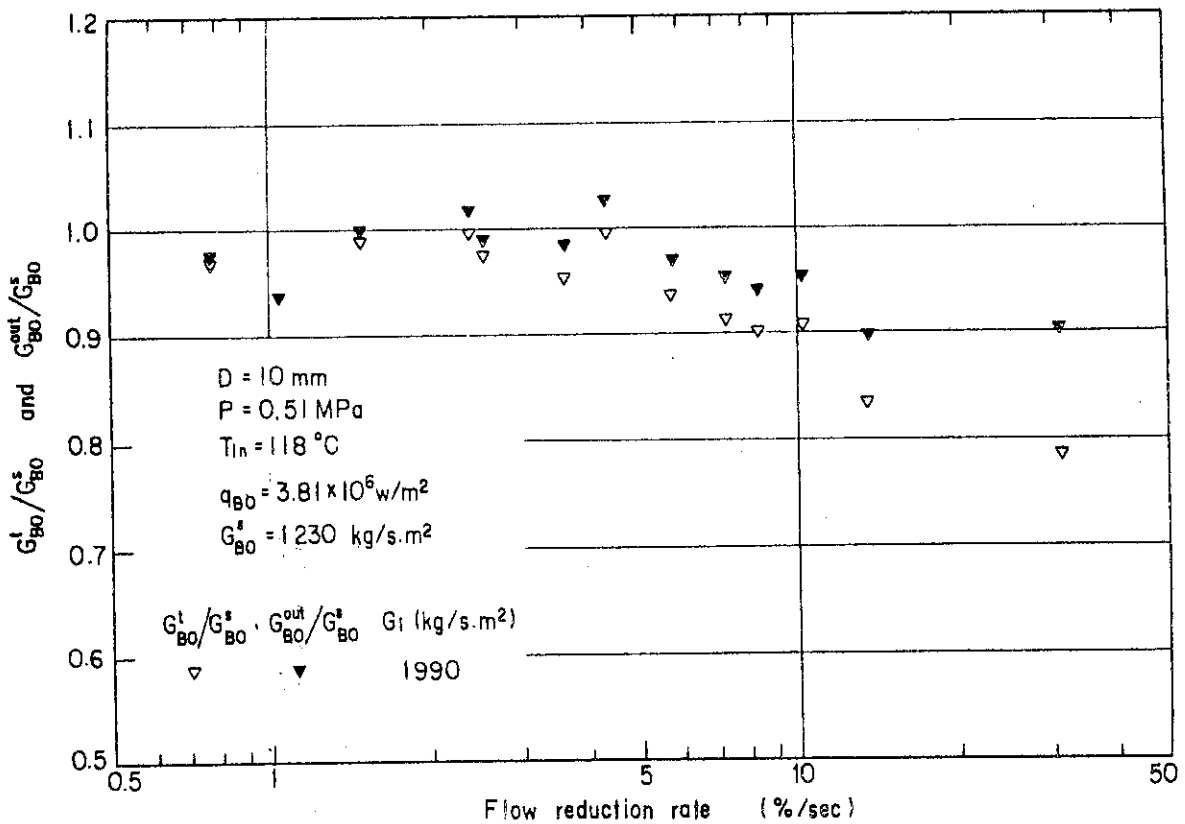


Fig. 3.6 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (4)
 ($P = 0.51 \text{ MPa}$, $T_{in} = 118 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO} = 3.81 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

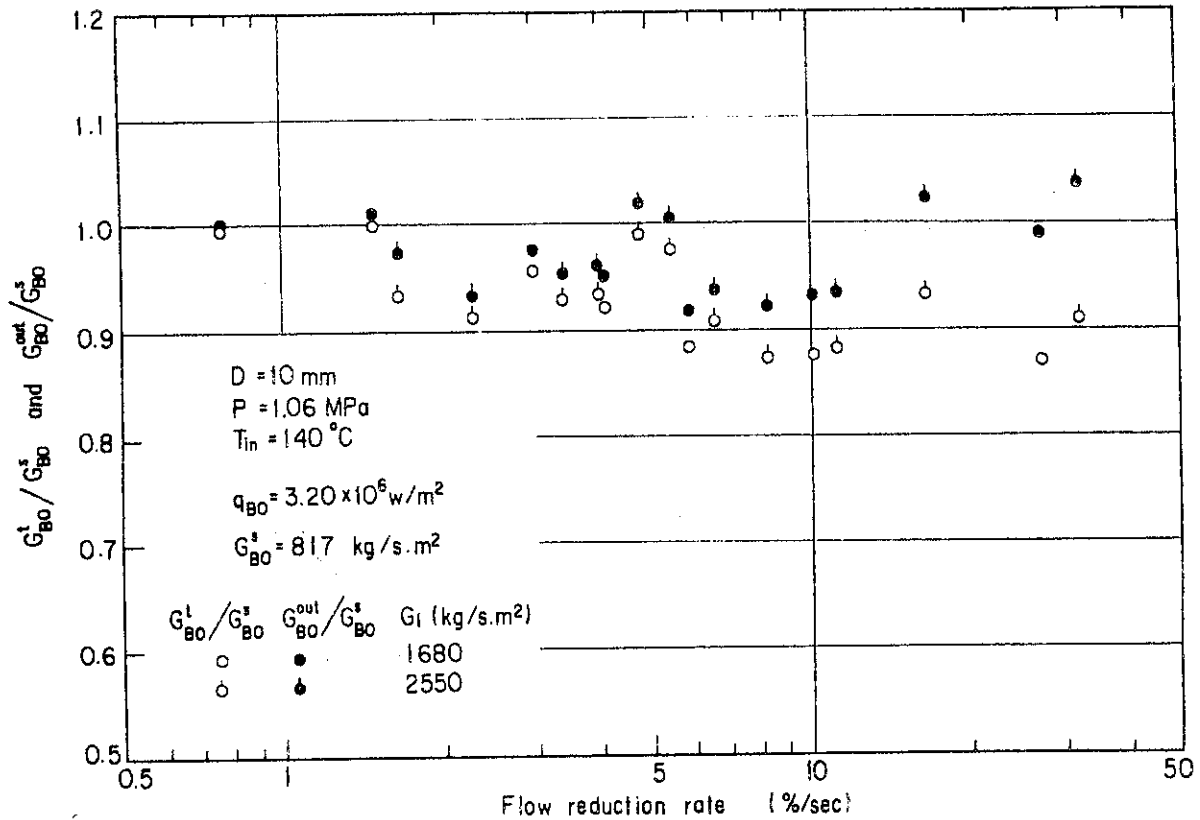


Fig. 3.9 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (7)
 ($P=1.06 \text{ MPa}$, $T_{in}=140 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO}=3.20 \times 10^6 \text{ W/m}^2$)

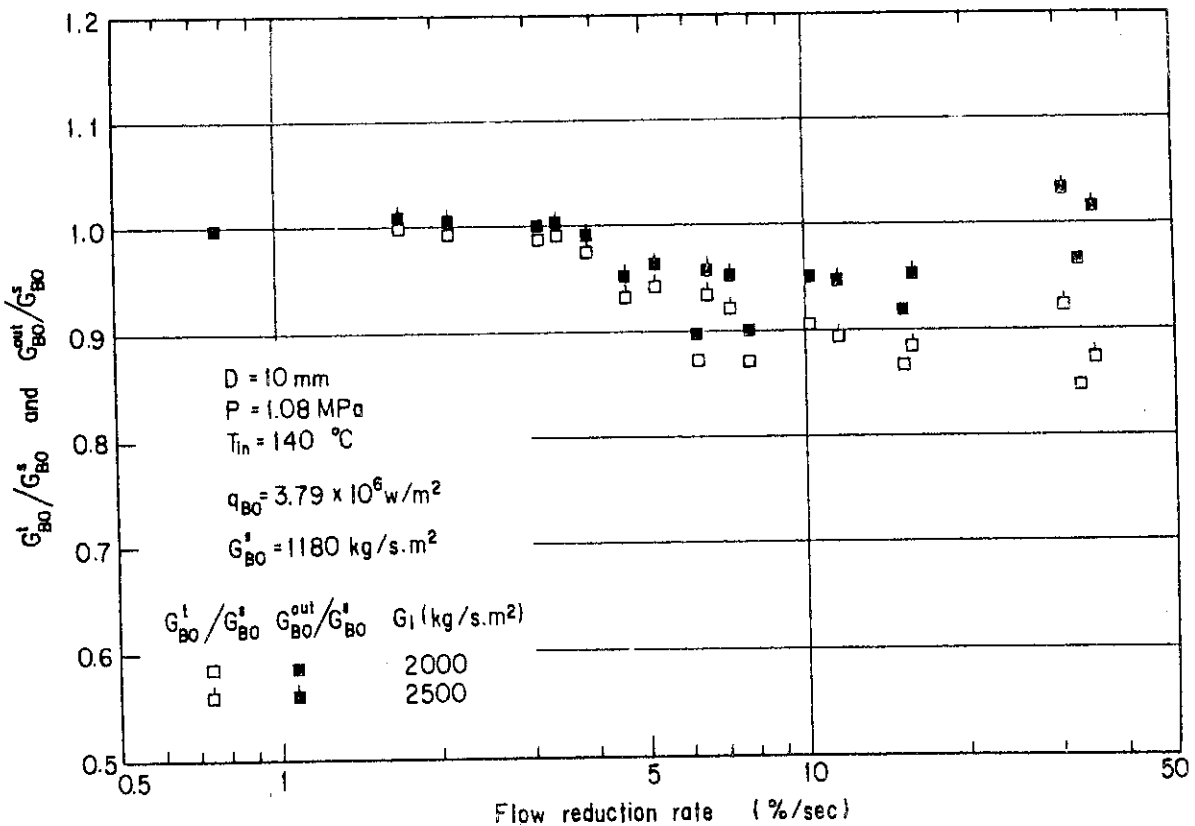


Fig. 3.10 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (8)
 ($P=1.08 \text{ MPa}$, $T_{in}=140 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO}=3.79 \times 10^6 \text{ W/m}^2$)

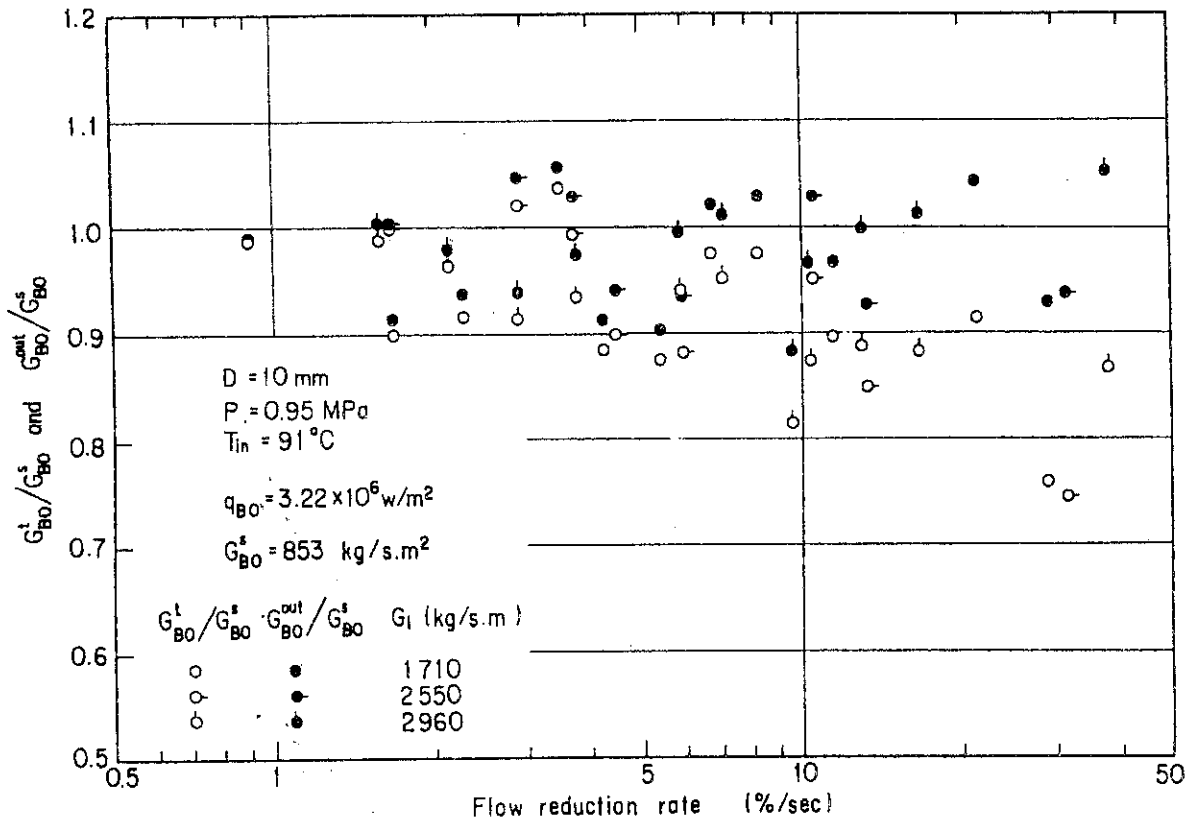


Fig. 3.11 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (9)
 ($P=0.95 \text{ MPa}$, $T_{in}=91^\circ \text{C}$, $q_{BO}=3.22 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

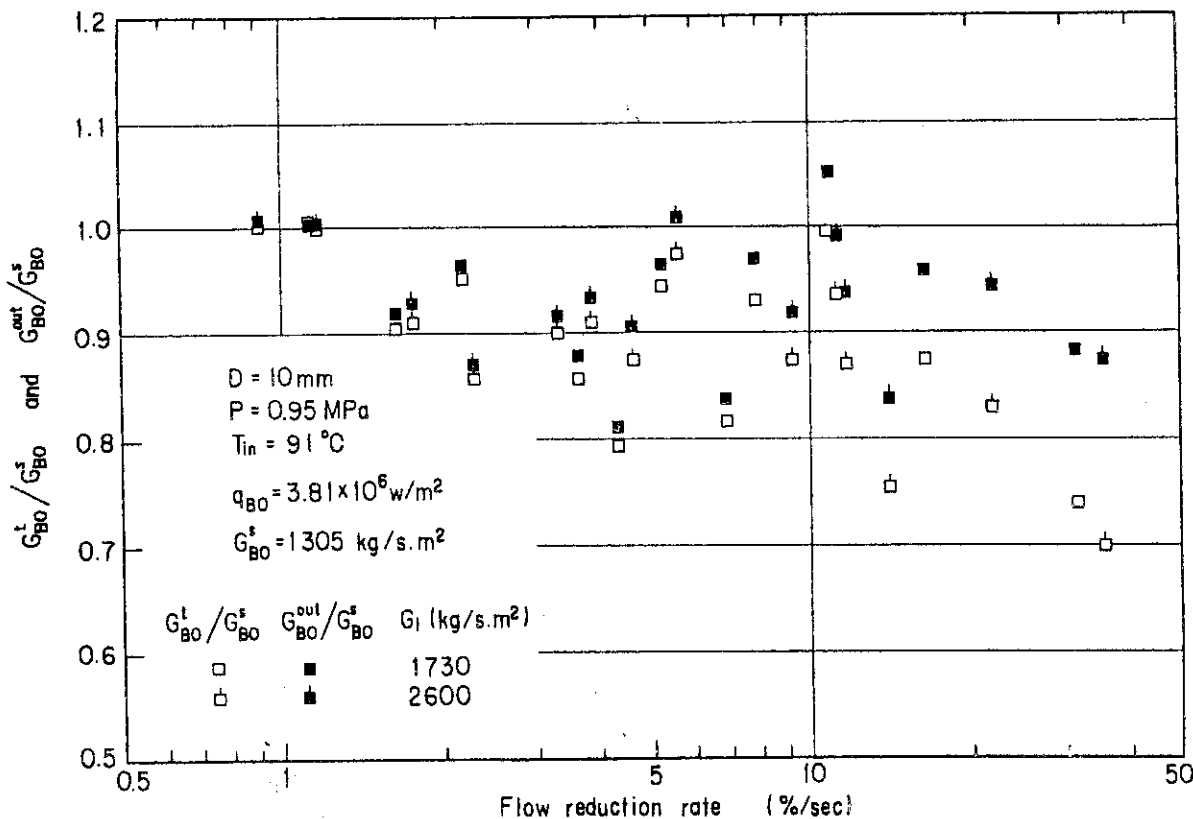


Fig. 3.12 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (10)
 ($P=0.95 \text{ MPa}$, $T_{in}=91^\circ \text{C}$, $q_{BO}=3.81 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

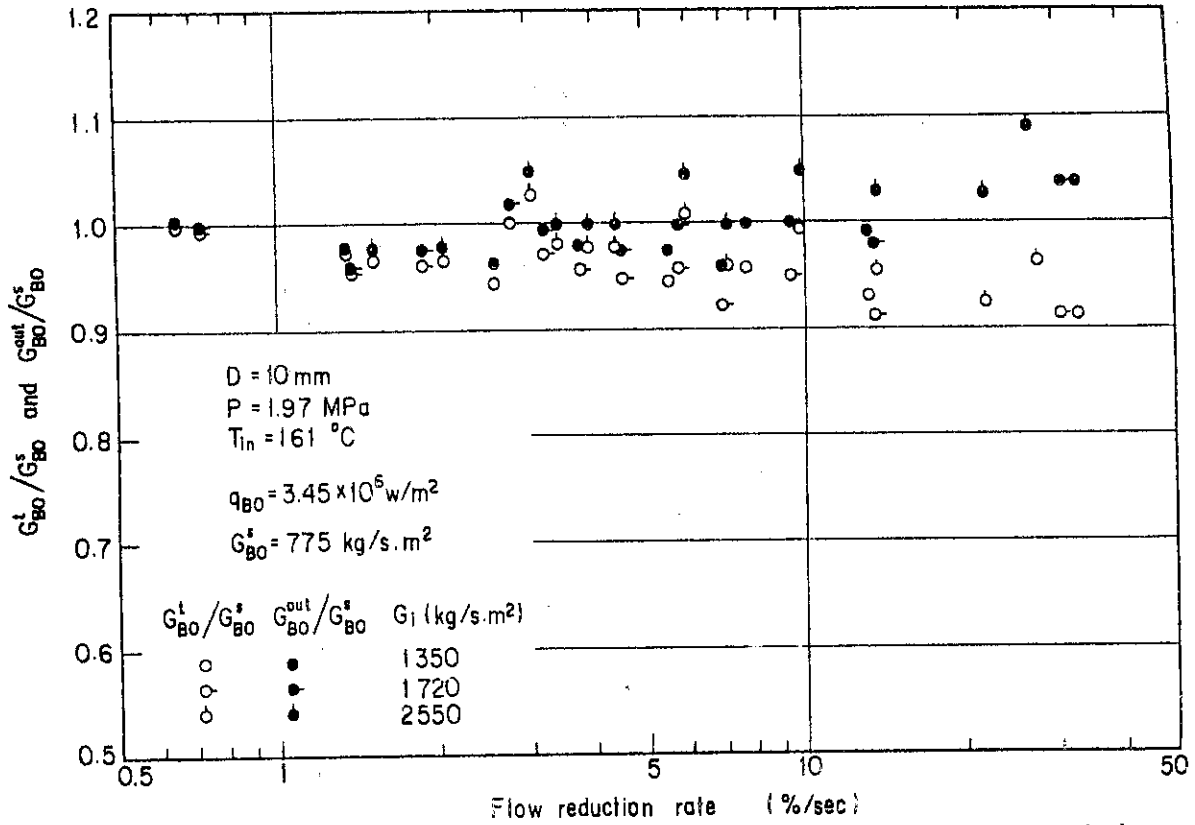


Fig. 3.13 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (1)
 ($P = 1.97 \text{ MPa}$, $T_{in} = 161 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO} = 3.45 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

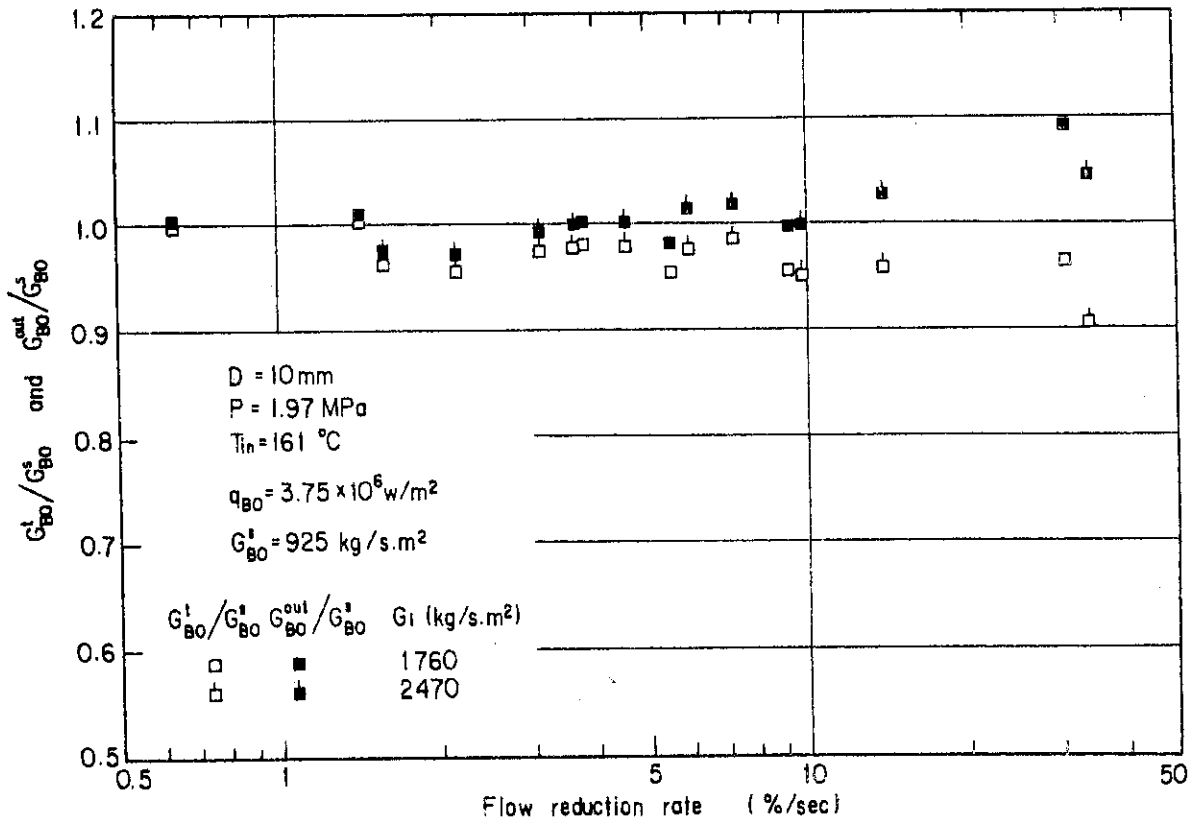


Fig. 3.14 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (2)
 ($P = 1.97 \text{ MPa}$, $T_{in} = 161 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO} = 3.75 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

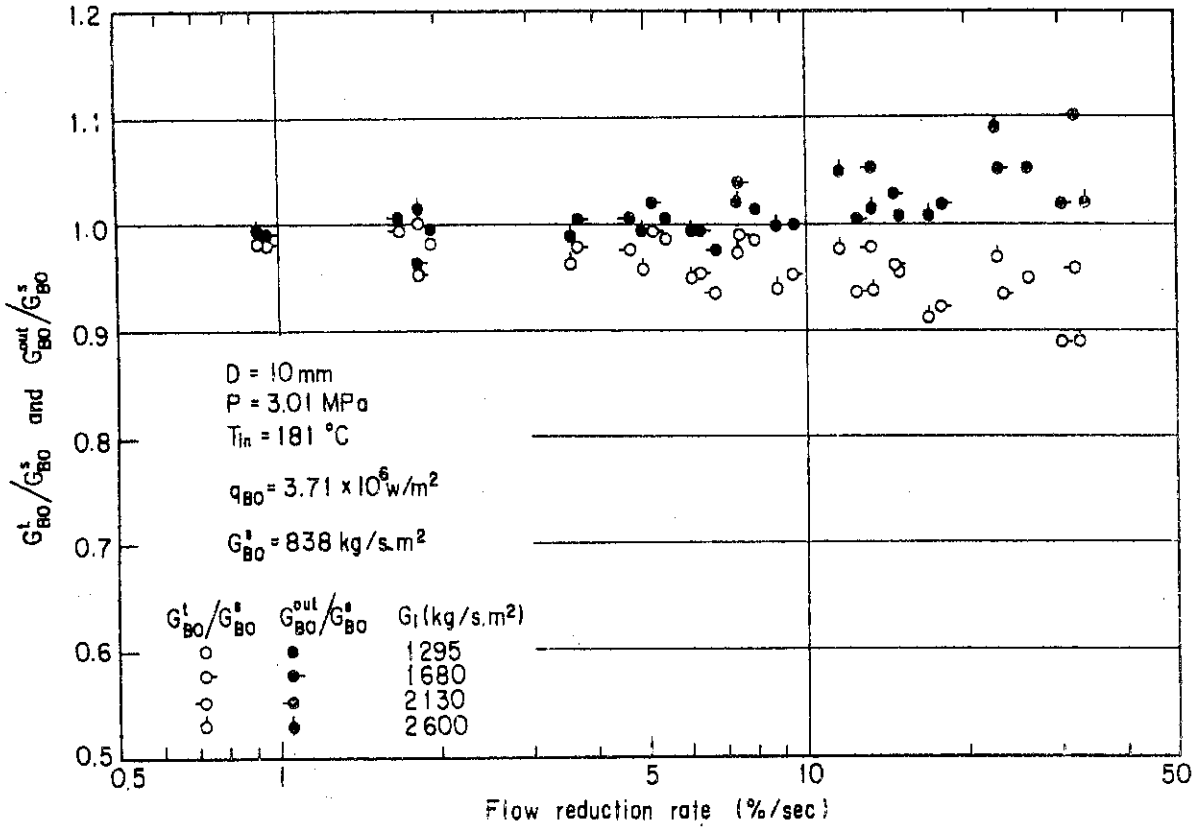


Fig. 3.15 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (13)
 ($P = 3.01 \text{ MPa}$, $T_{in} = 181 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO} = 3.71 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

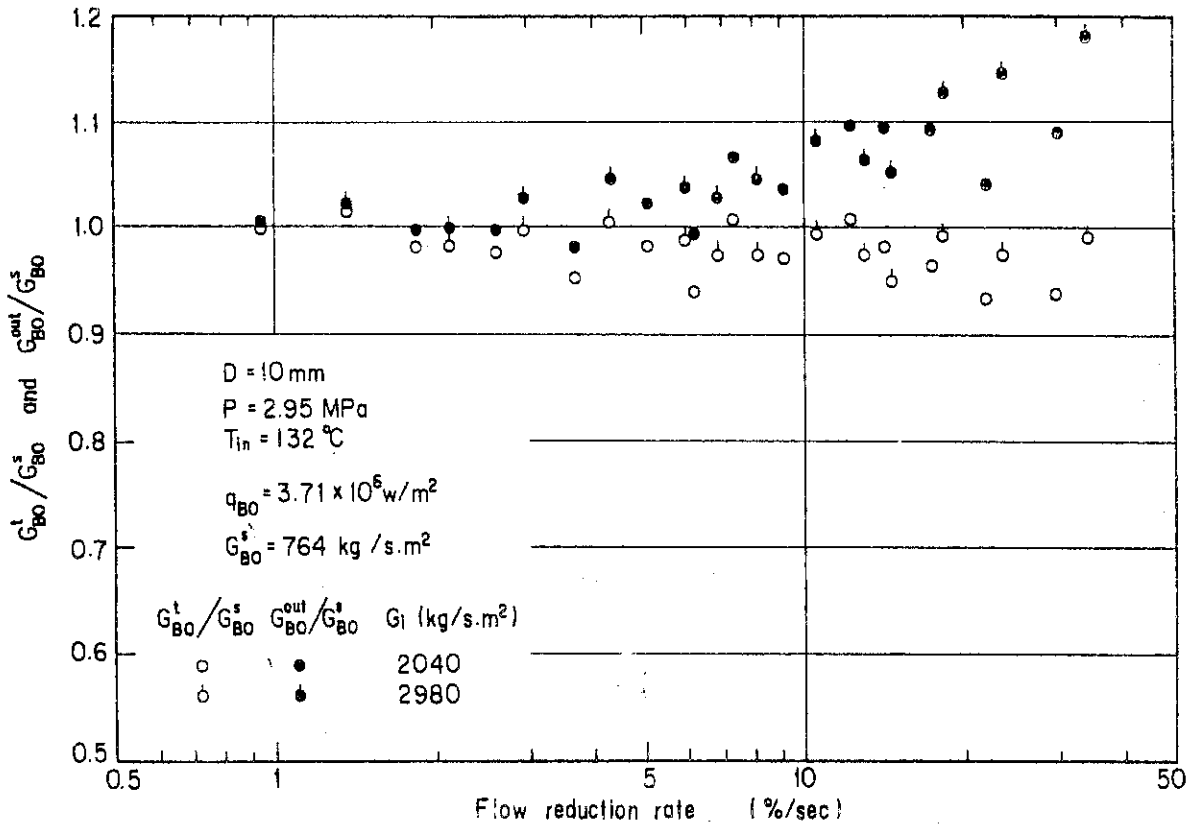


Fig. 3.16 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (14)
 ($P = 2.95 \text{ MPa}$, $T_{in} = 132 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO} = 3.71 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

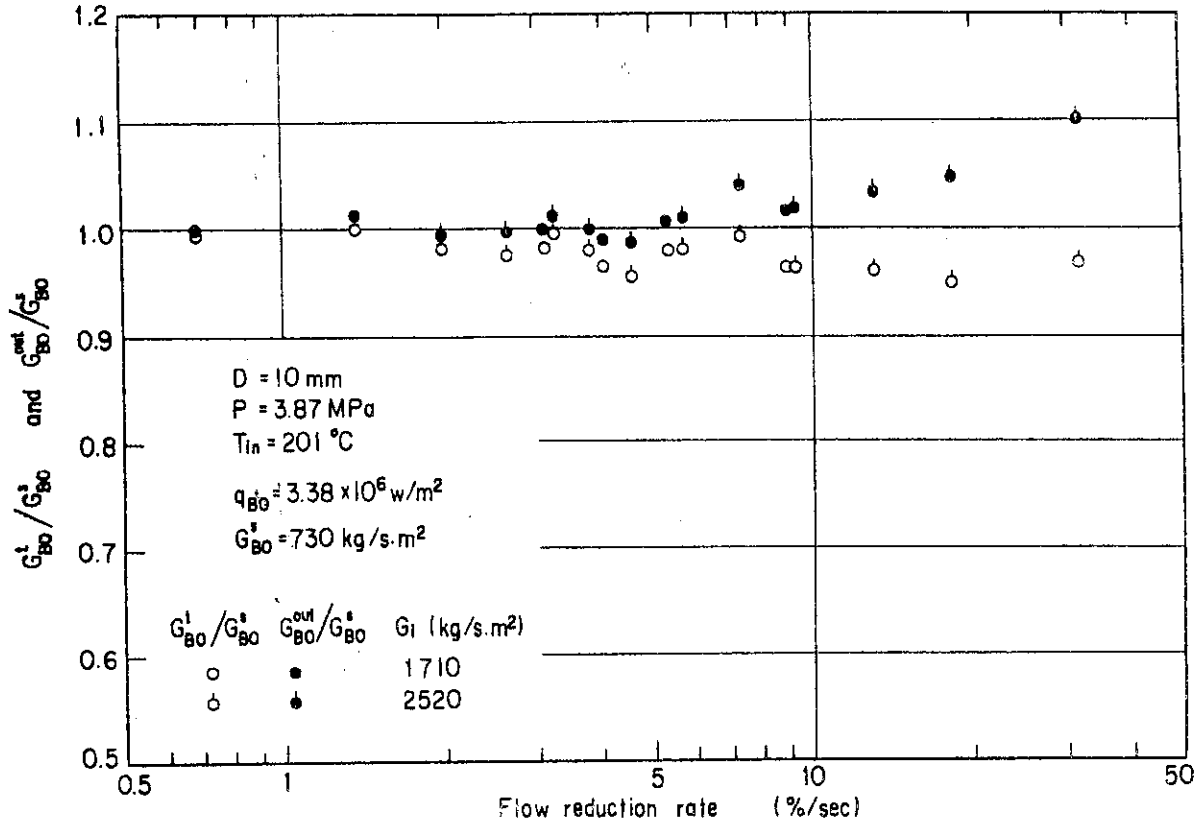


Fig. 3.17 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (15)
 ($P=3.87 \text{ MPa}$, $T_{in}=201 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO}=3.38 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

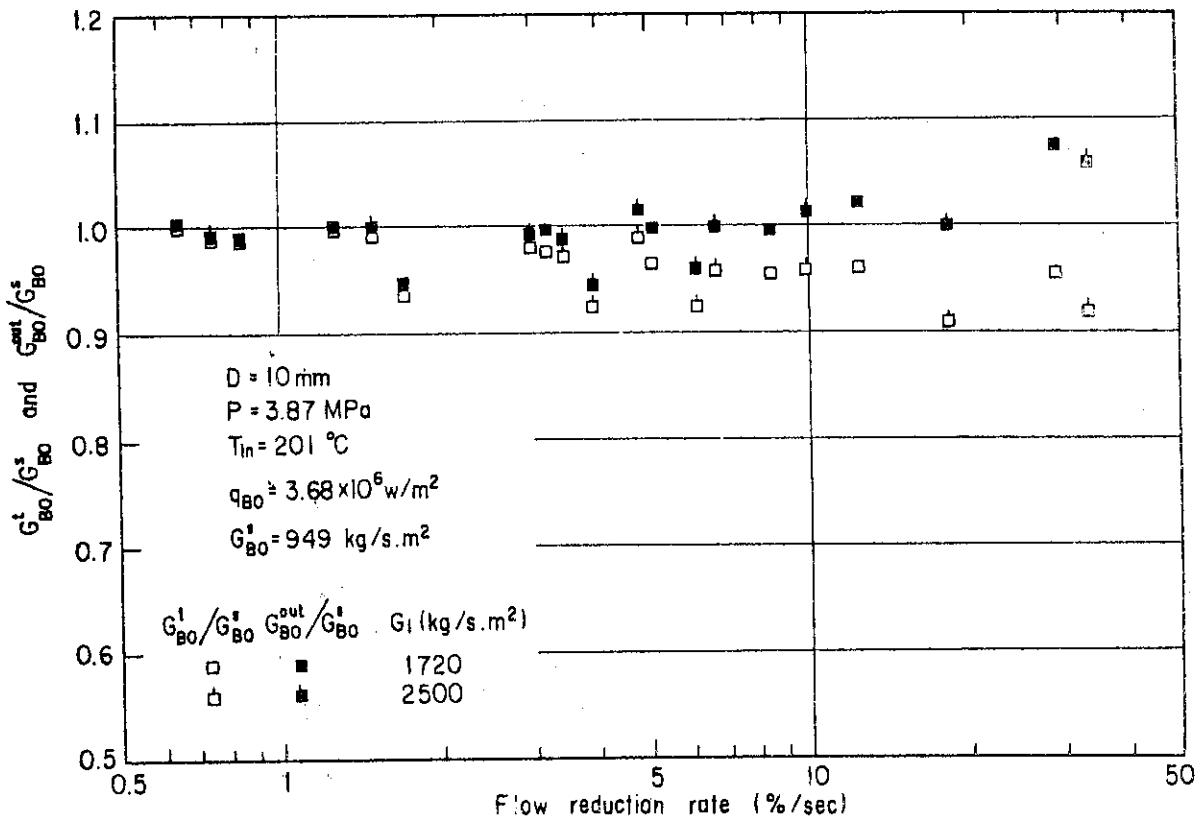


Fig. 3.18 Dimensionless burnout mass velocity at outlet and inlet vs. flow reduction rate (16)
 ($P=3.87 \text{ MPa}$, $T_{in}=201 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{BO}=3.68 \times 10^6 \text{ w/m}^2$)

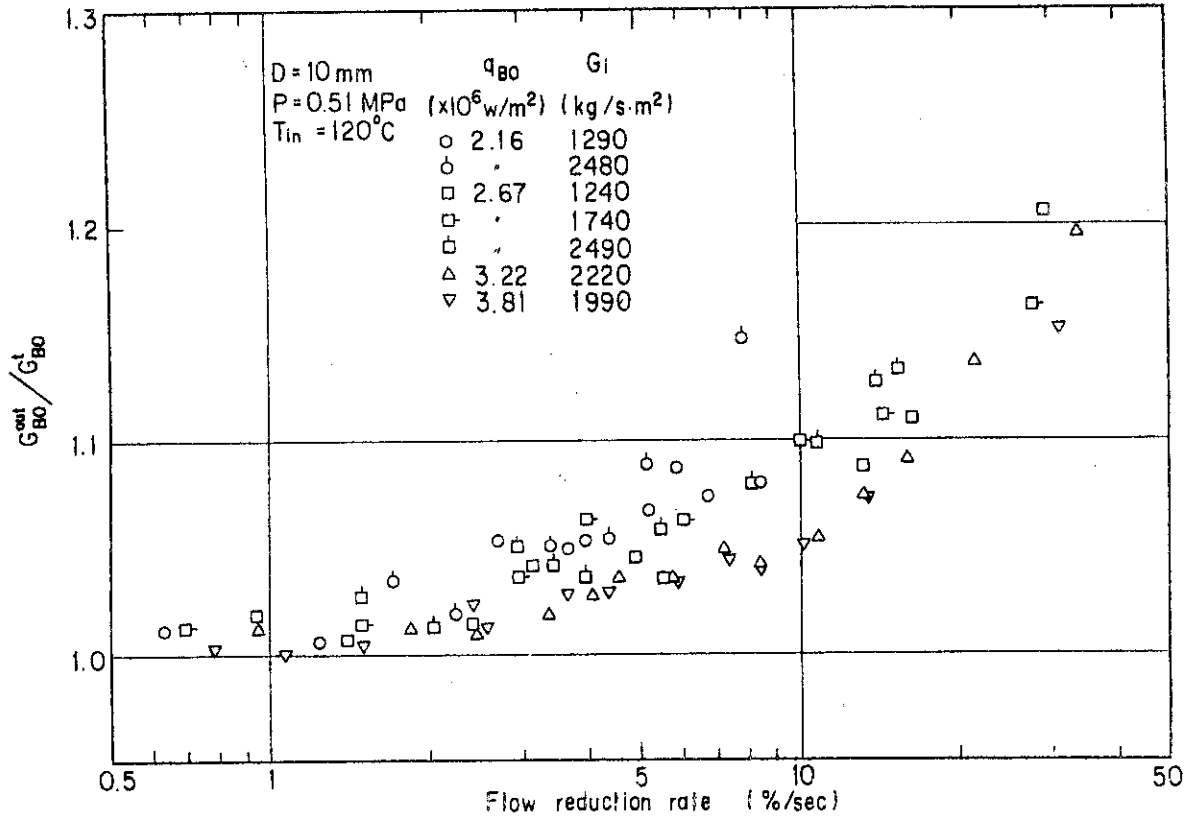


Fig. 3.19 Outlet/inlet burnout mass velocity ratio vs. flow reduction rate (1)
 ($P=0.51\text{MPa}$, $T_{in}=120^\circ\text{C}$)

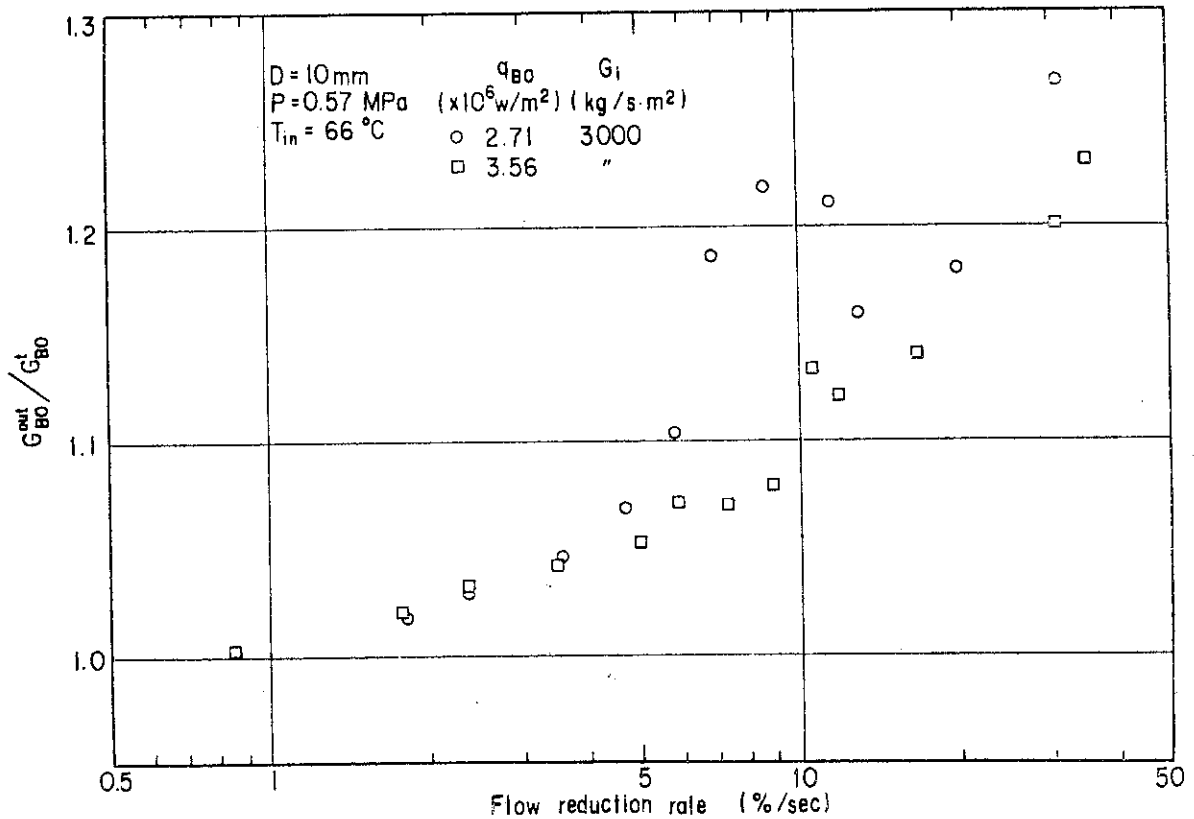


Fig. 3.20 Outlet/inlet burnout mass velocity ratio vs. flow reduction rate (2)
 ($P=0.57\text{MPa}$, $T_{in}=66^\circ\text{C}$)

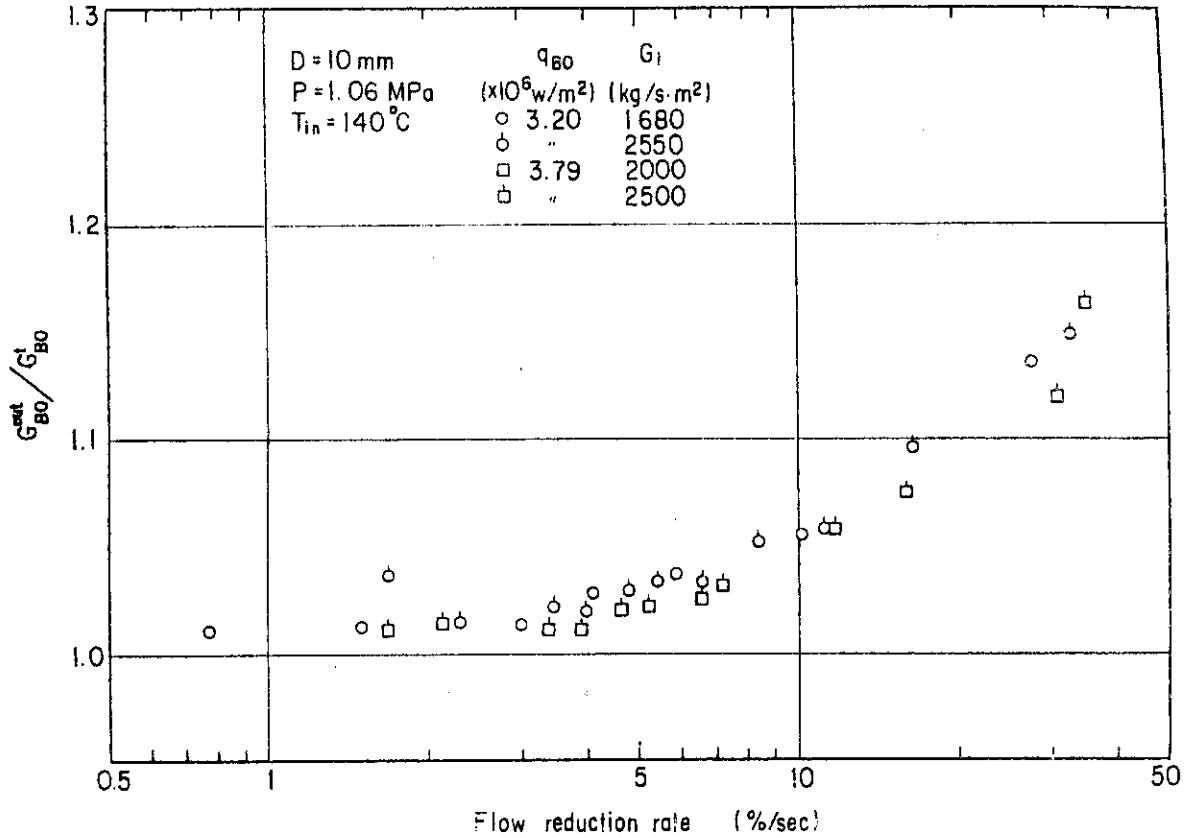


Fig. 3.21 Outlet/inlet burnout mass velocity ratio vs. flow reduction rate (3)
($P = 1.06 \text{ MPa}$, $T_{in} = 140^\circ\text{C}$)

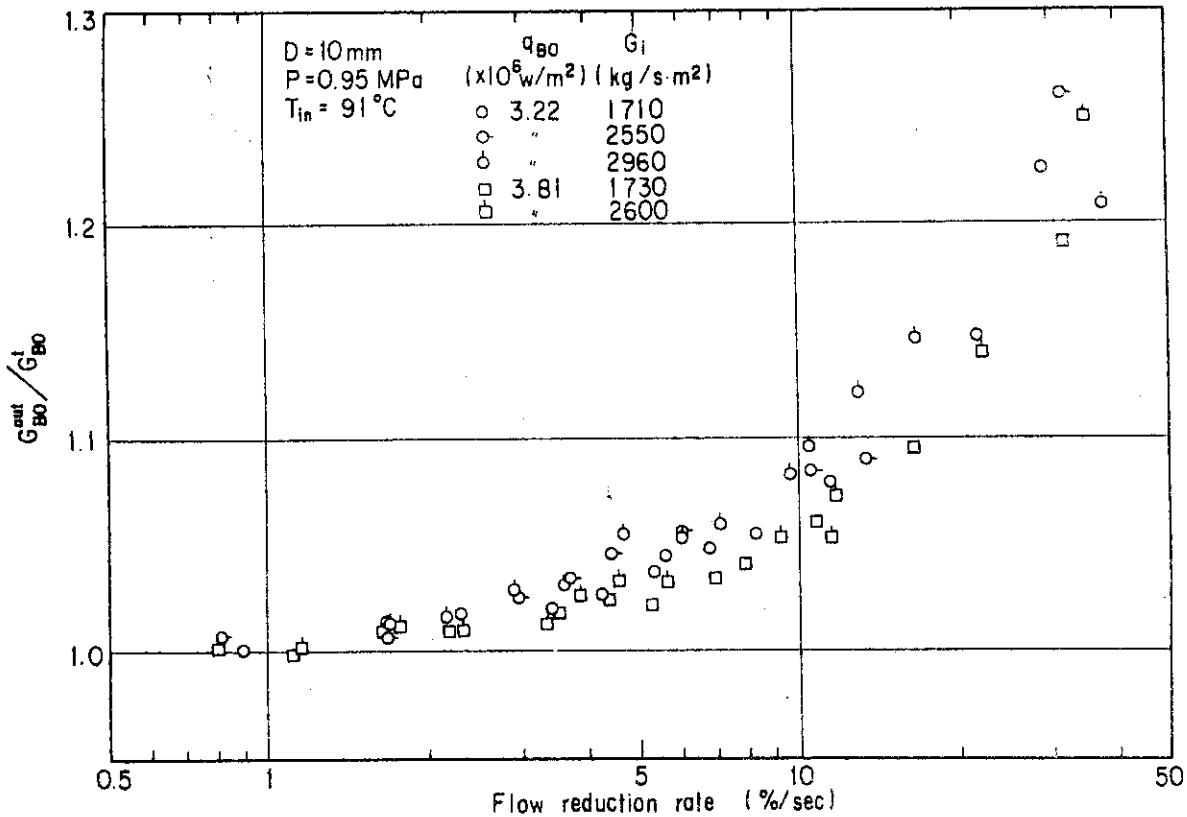


Fig. 3.22 Outlet/inlet burnout mass velocity ratio vs. flow reduction rate (4)
($P = 0.95 \text{ MPa}$, $T_{in} = 91^\circ\text{C}$)

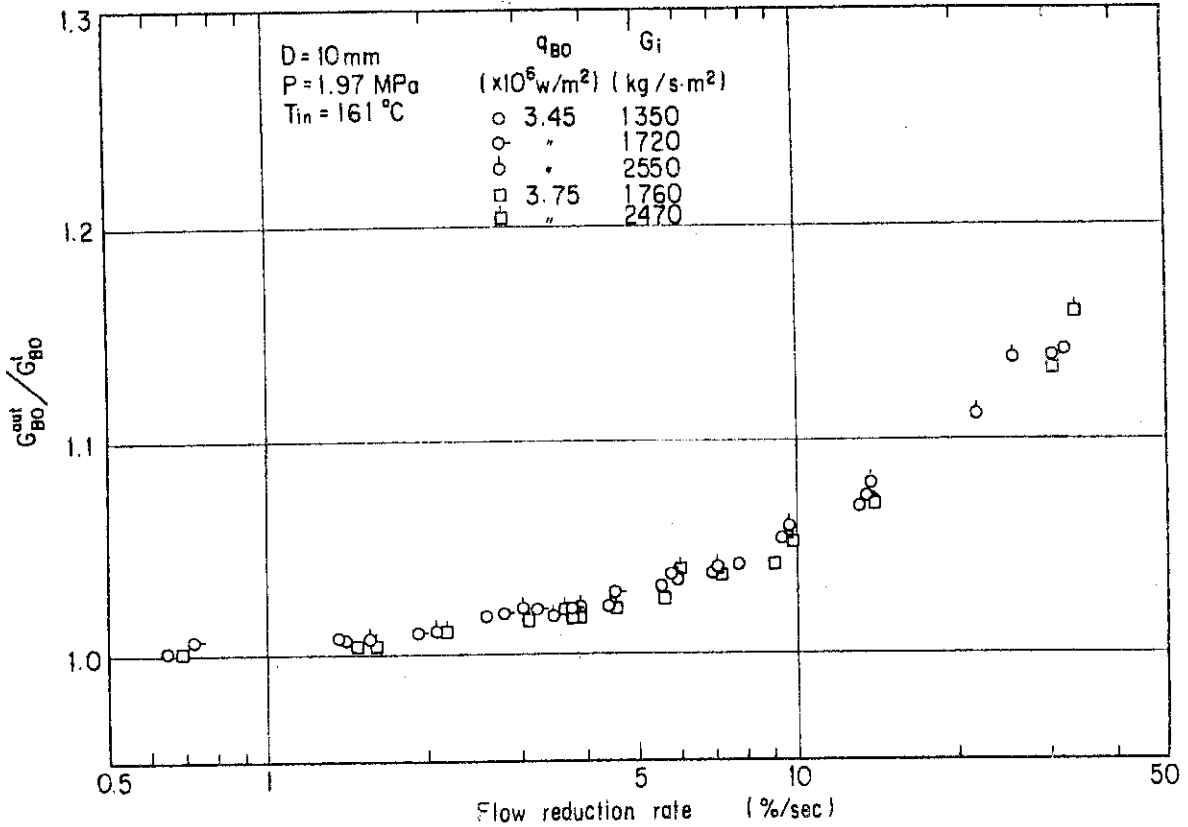


Fig. 3.23 Outlet/inlet burnout mass velocity ratio vs. flow reduction rate (5)
($P=1.97$ MPa, $T_{in}=161$ °C)

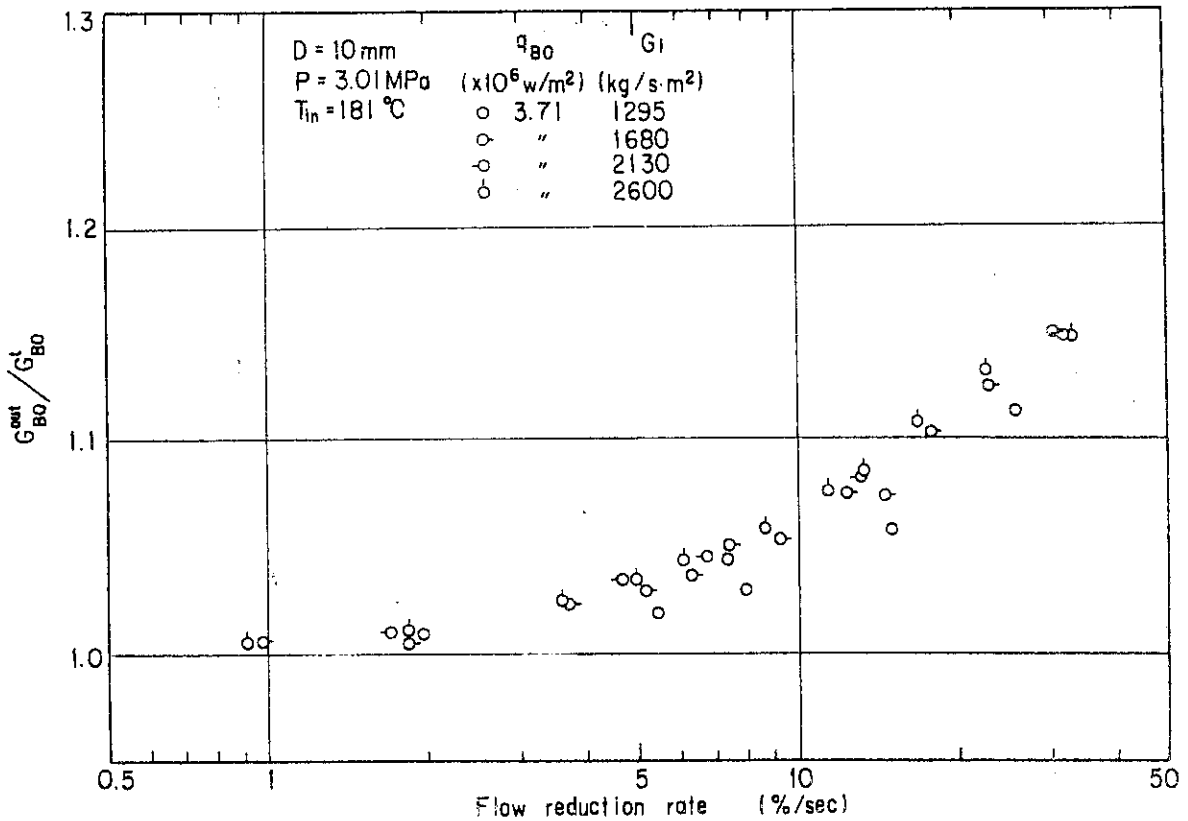


Fig. 3.24 Outlet/inlet burnout mass velocity ratio vs. flow reduction rate (6)
($P=3.01$ MPa, $T_{in}=181$ °C)

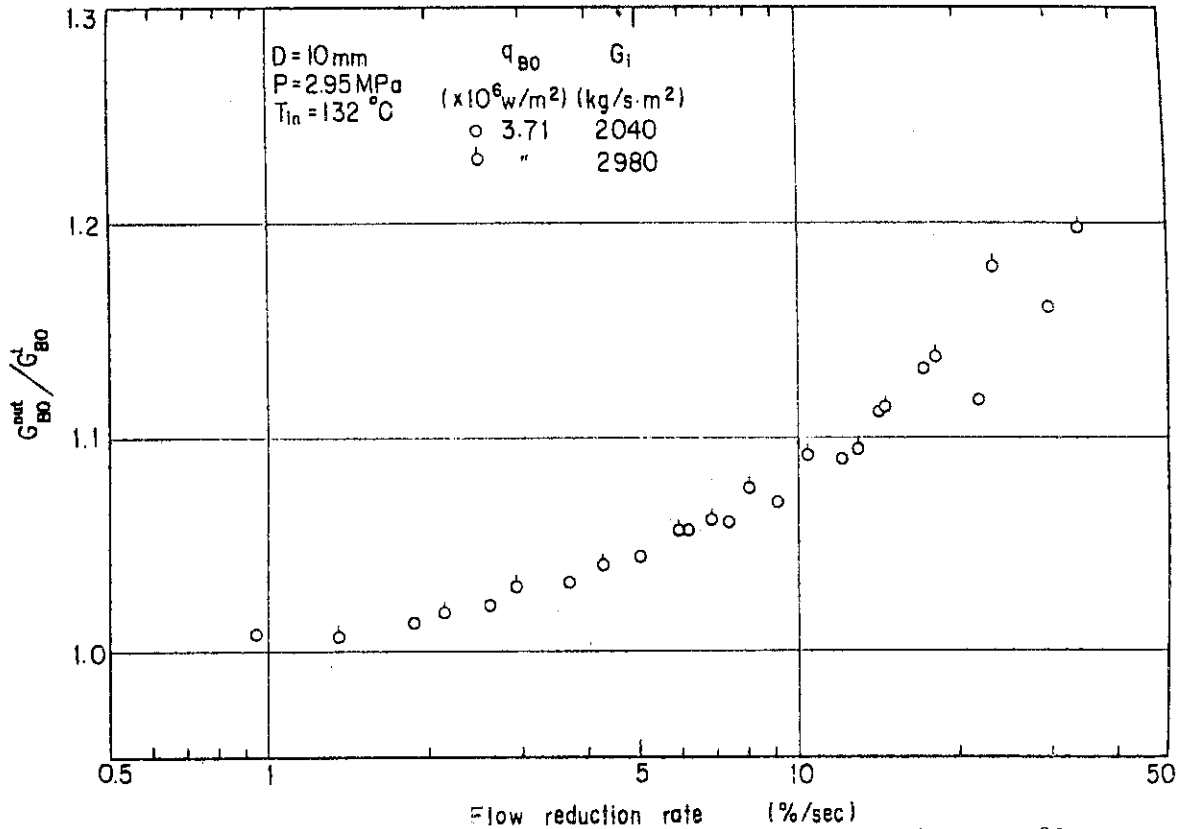


Fig. 3.25 Outlet/inlet burnout mass velocity ratio vs. flow reduction rate (7)
 ($P=2.95\text{ MPa}$, $T_{in}=132\text{ }^{\circ}\text{C}$)

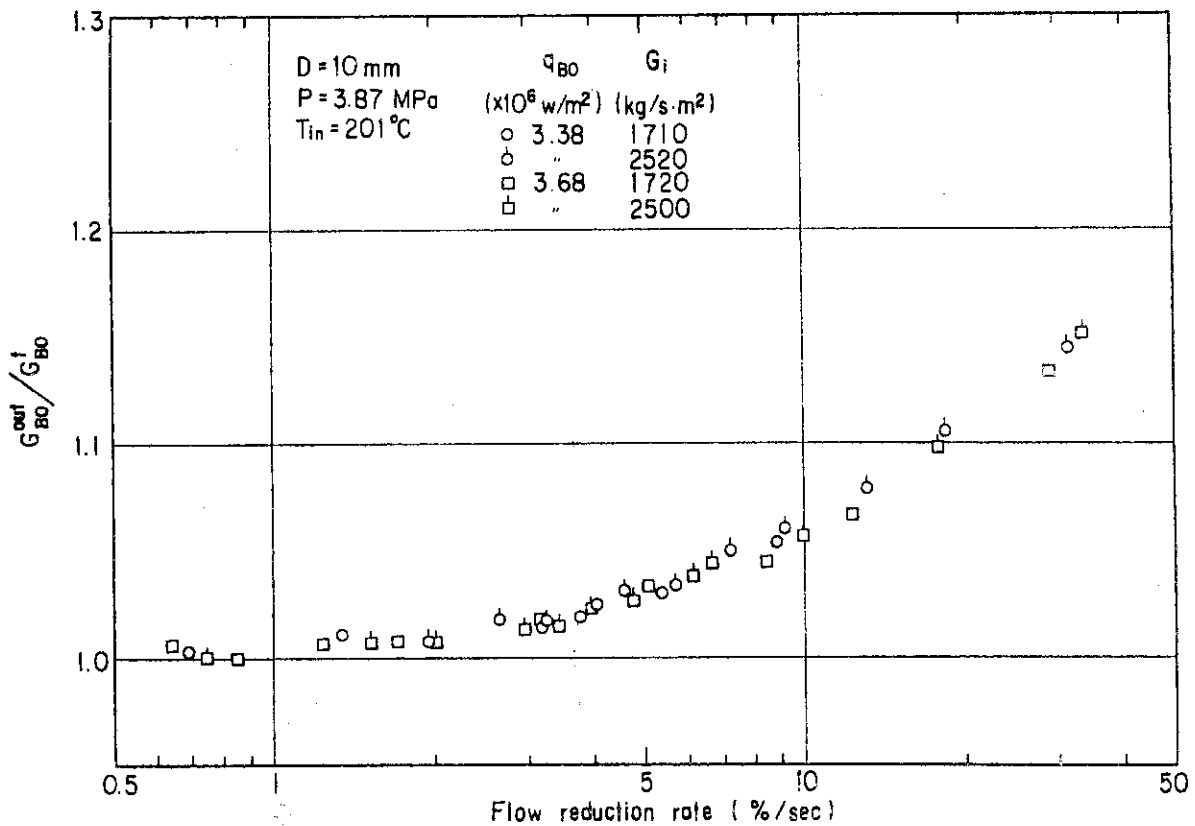


Fig. 3.26 Outlet/inlet burnout mass velocity ratio vs. flow reduction rate (8)
 ($P=3.87\text{ MPa}$, $T_{in}=201\text{ }^{\circ}\text{C}$)

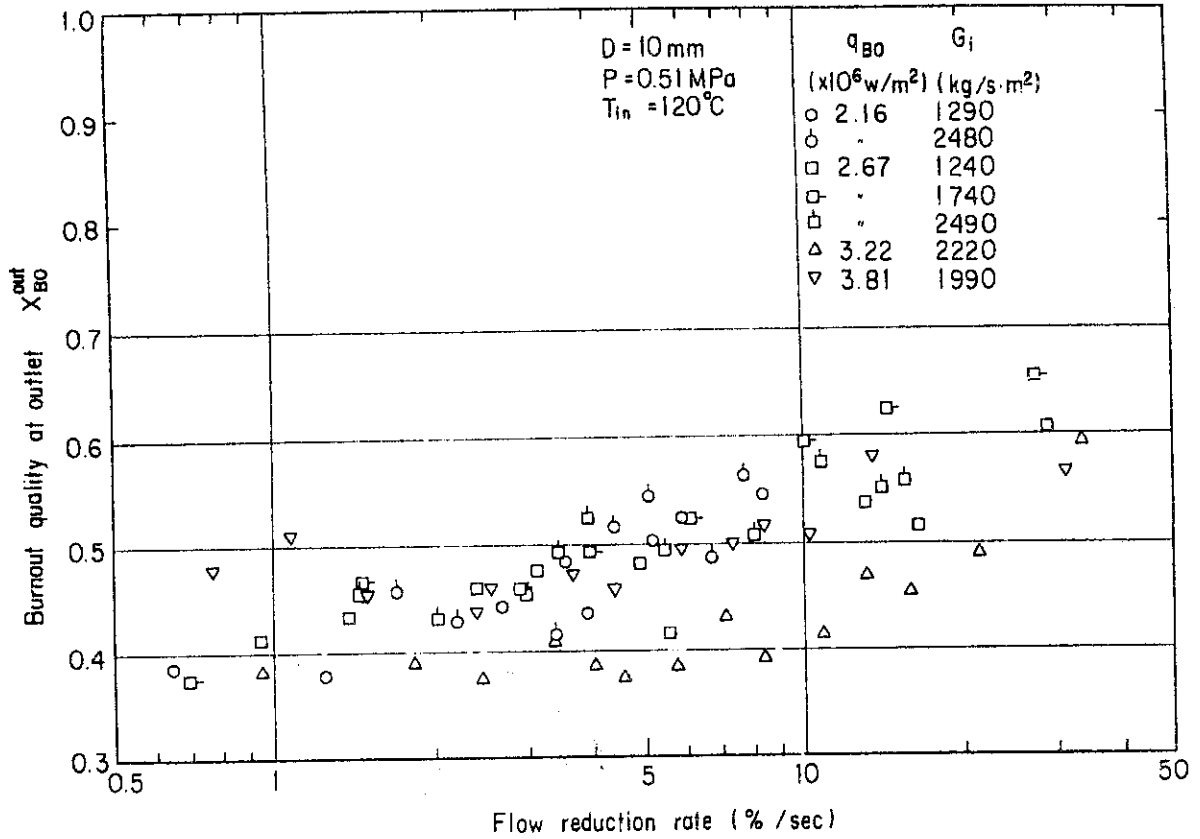


Fig. 3.27 Burnout quality at outlet vs. flow reduction rate (1)
($P=0.51\text{MPa}$, $T_{in}=120^\circ\text{C}$)

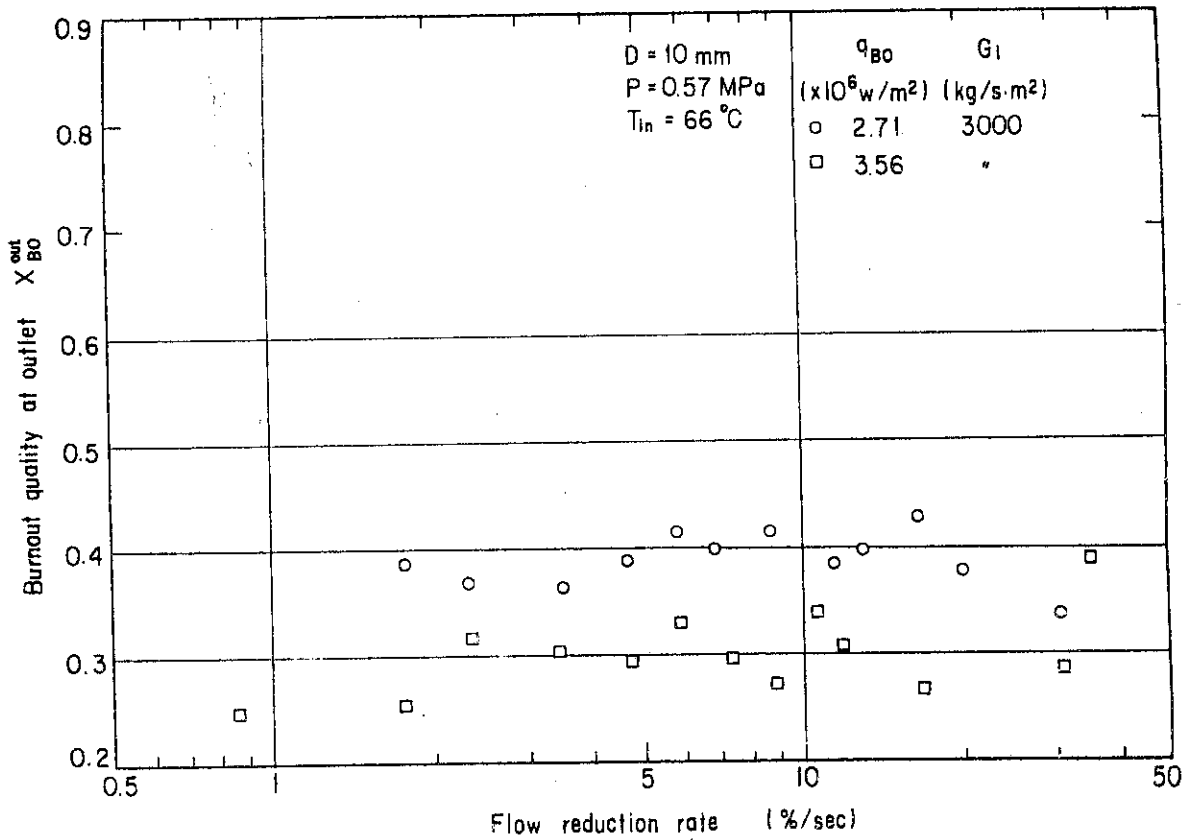


Fig. 3.28 Burnout quality at outlet vs. flow reduction rate (2)
($P=0.57\text{MPa}$, $T_{in}=66^\circ\text{C}$)

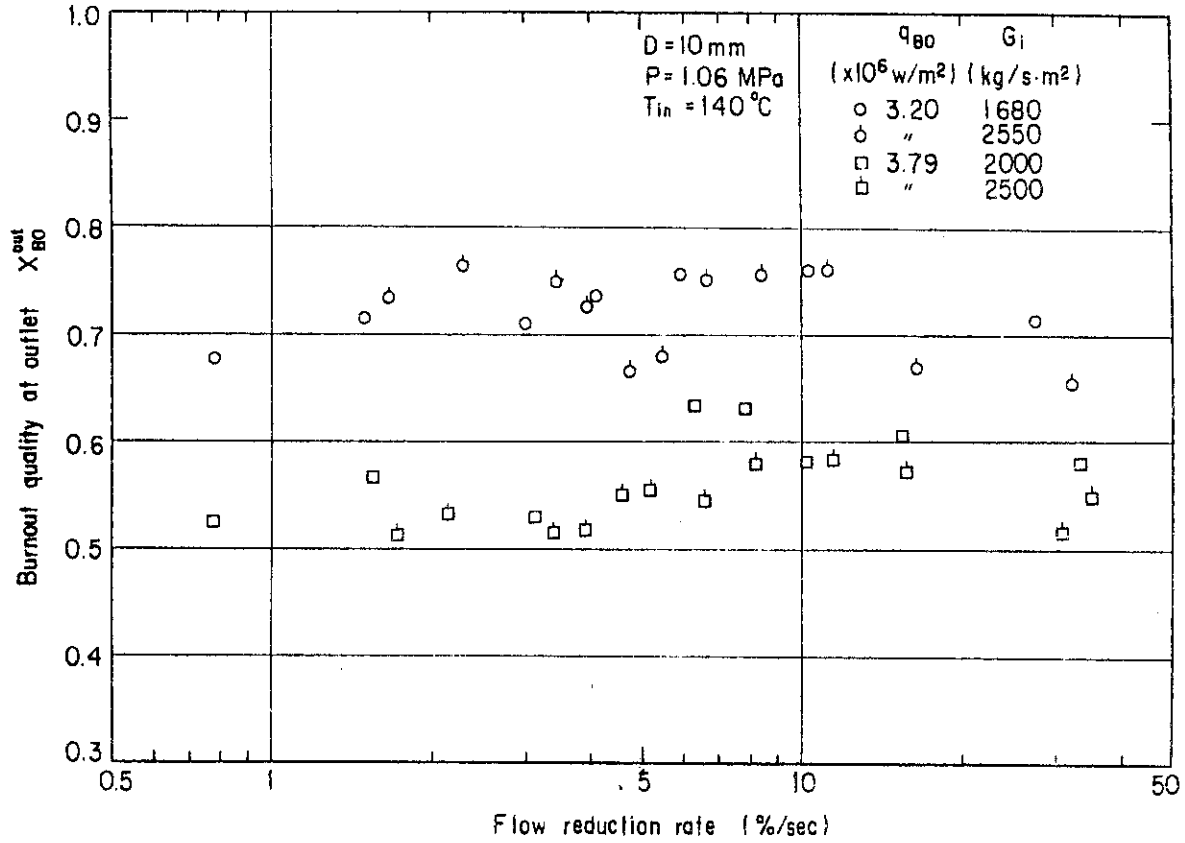


Fig. 3.29 Burnout quality at outlet vs. flow reduction rate (3)
 ($P = 1.06 \text{ MPa}$, $T_{in} = 140^\circ \text{C}$)

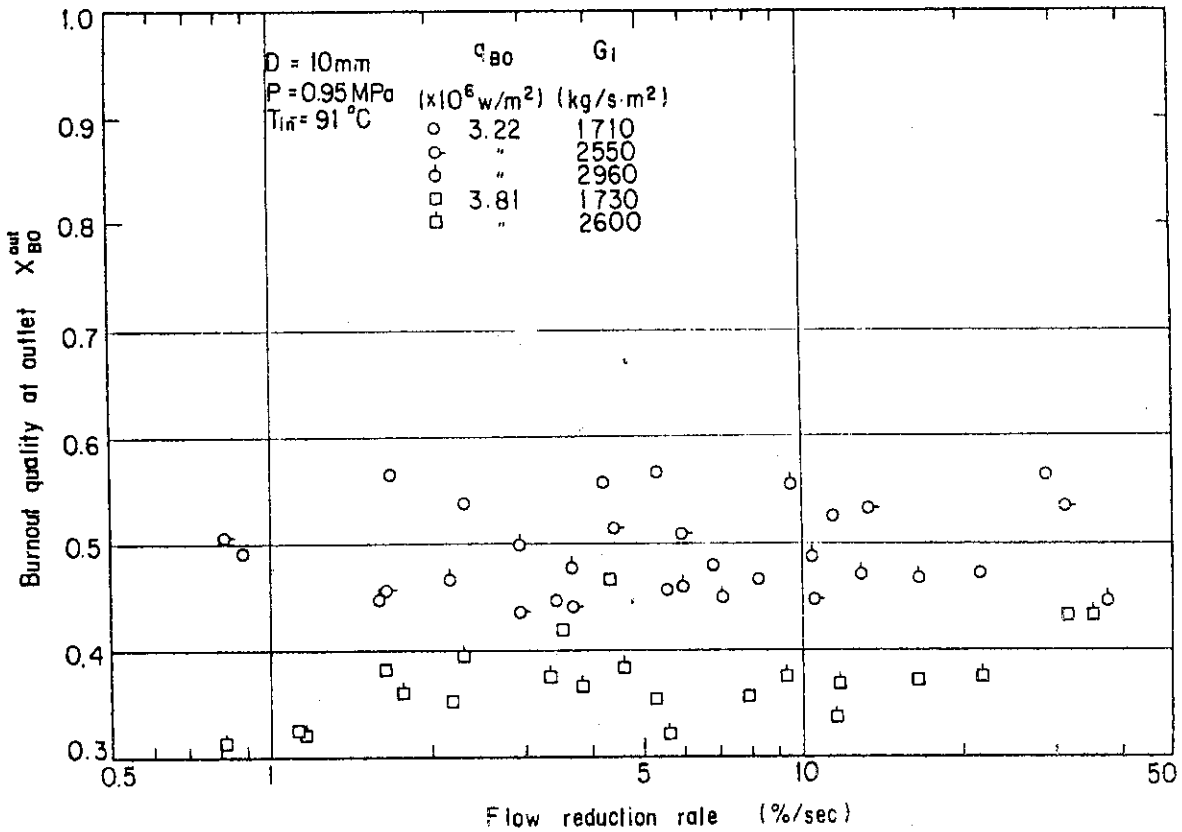


Fig. 3.30 Burnout quality at outlet vs. flow reduction rate (4)
 ($P = 0.95 \text{ MPa}$, $T_{in} = 91^\circ \text{C}$)

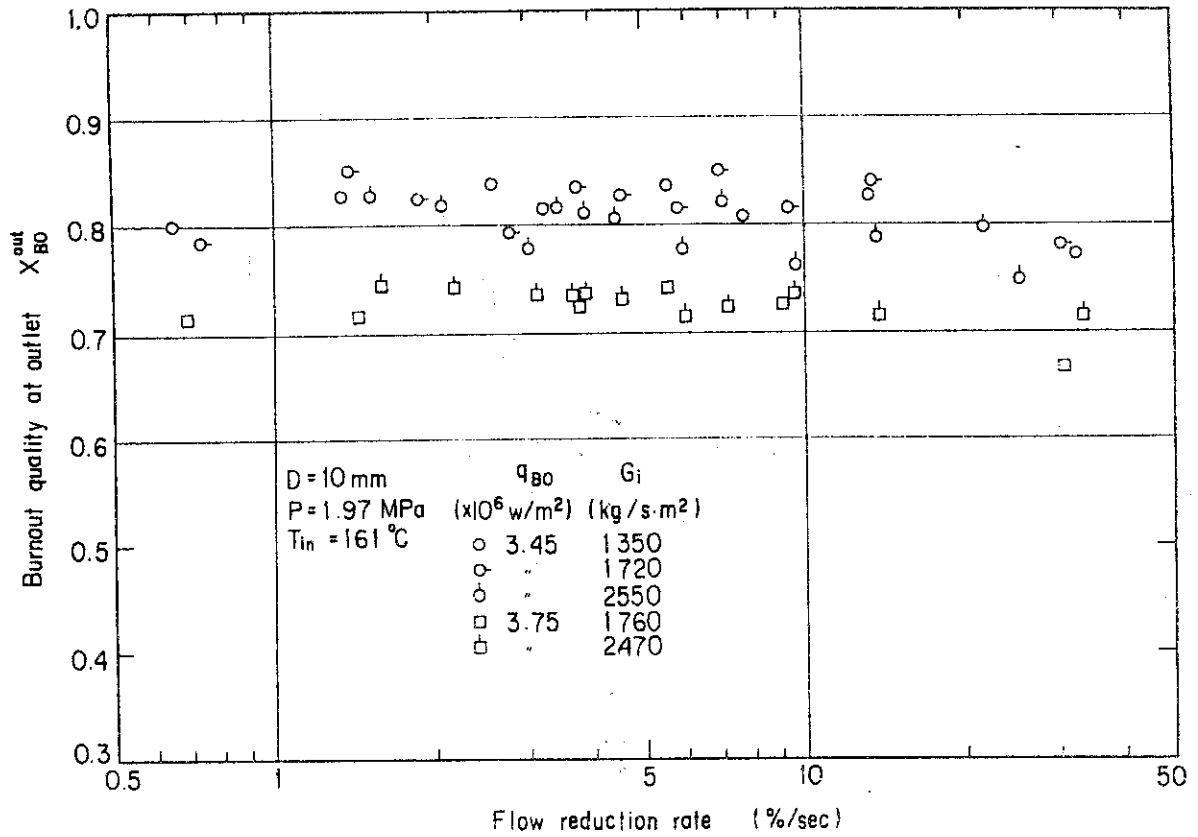


Fig. 3.31 Burnout quality at outlet vs. flow reduction rate (5)
($P=1.97$ MPa, $T_{in}=161$ °C)

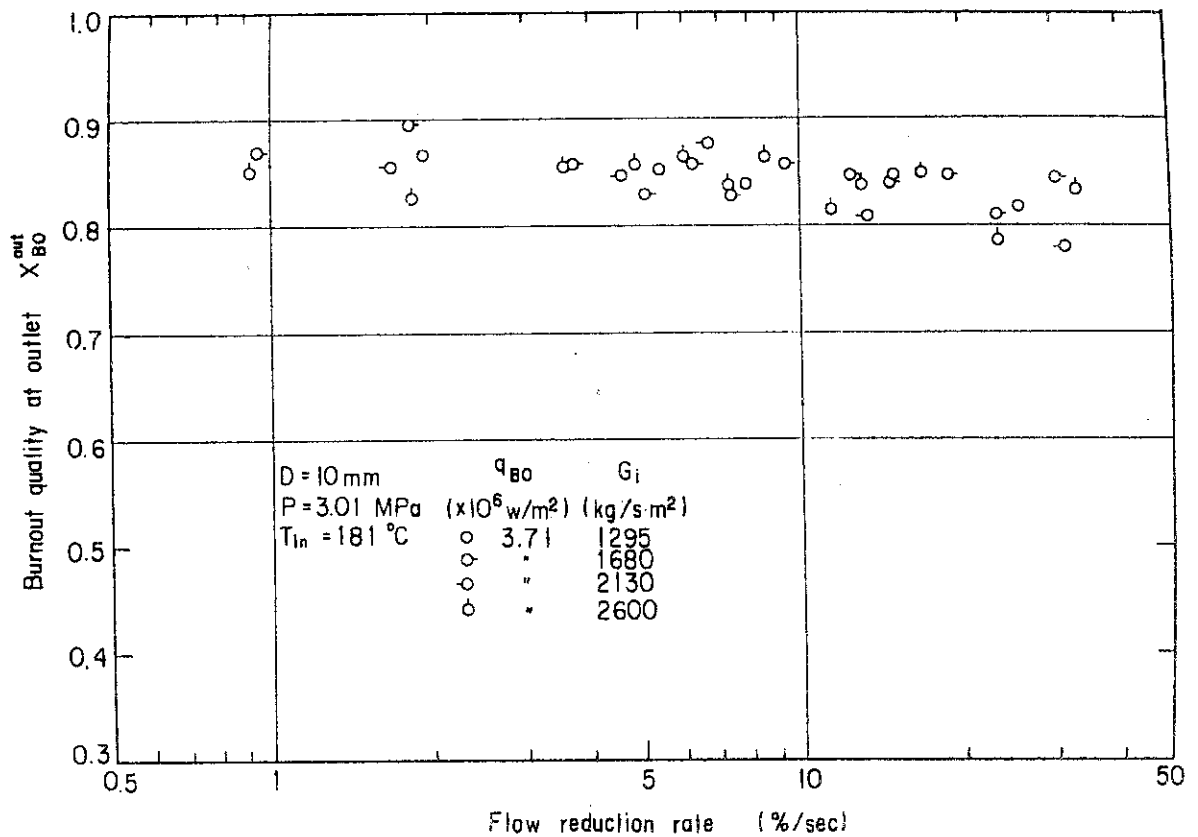


Fig. 3.32 Burnout quality at outlet vs. flow reduction rate (6)
($P=3.01$ MPa, $T_{in}=181$ °C)

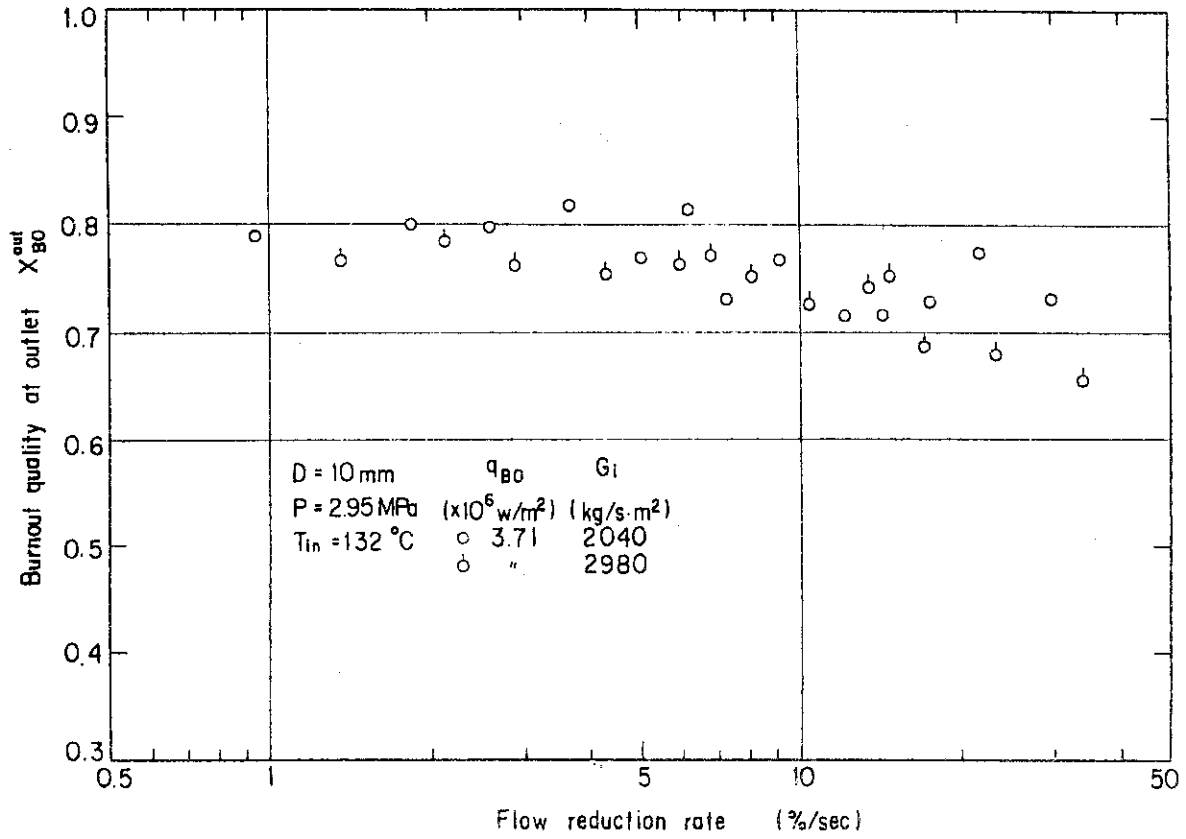


Fig. 3.33 Burnout quality at outlet vs. flow reduction rate (7)
($P=2.95\text{MPa}$, $T_{in}=132^\circ\text{C}$)

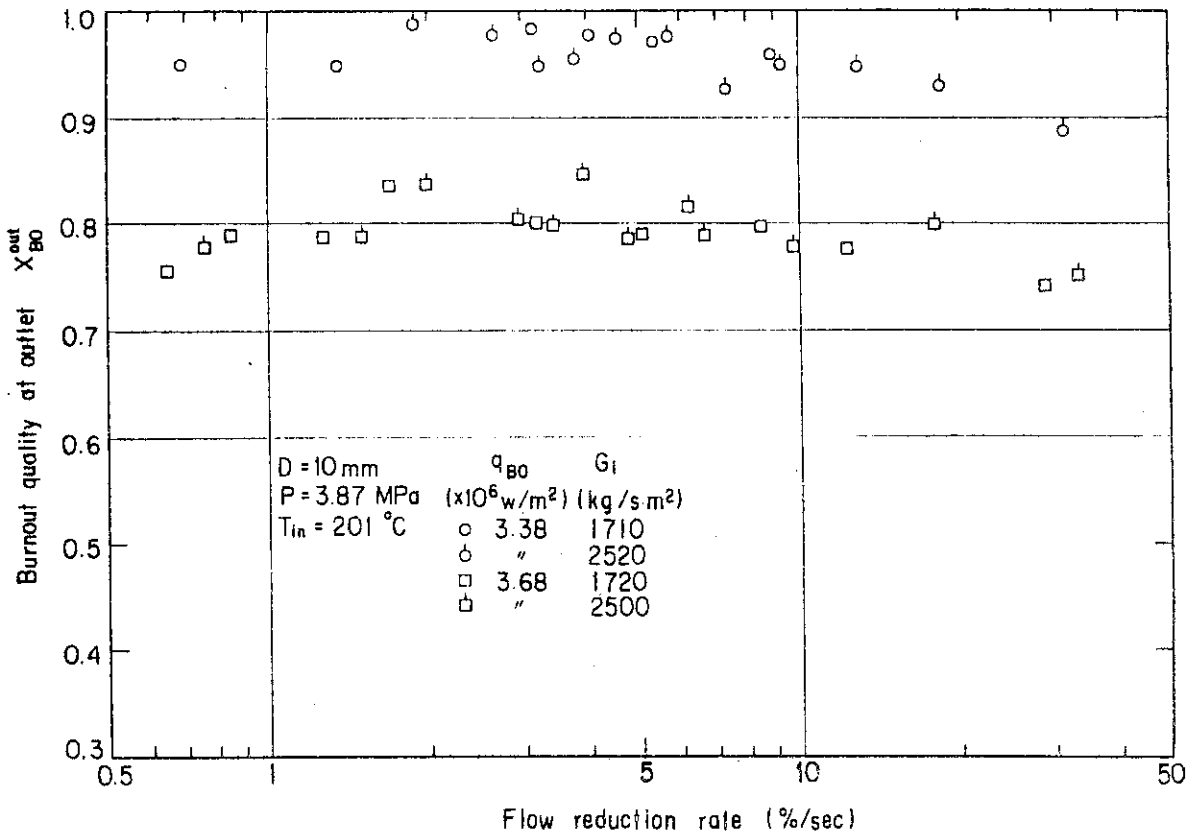


Fig. 3.34 Burnout quality at outlet vs. flow reduction rate (8)
($P=3.87\text{MPa}$, $T_{in}=201^\circ\text{C}$)

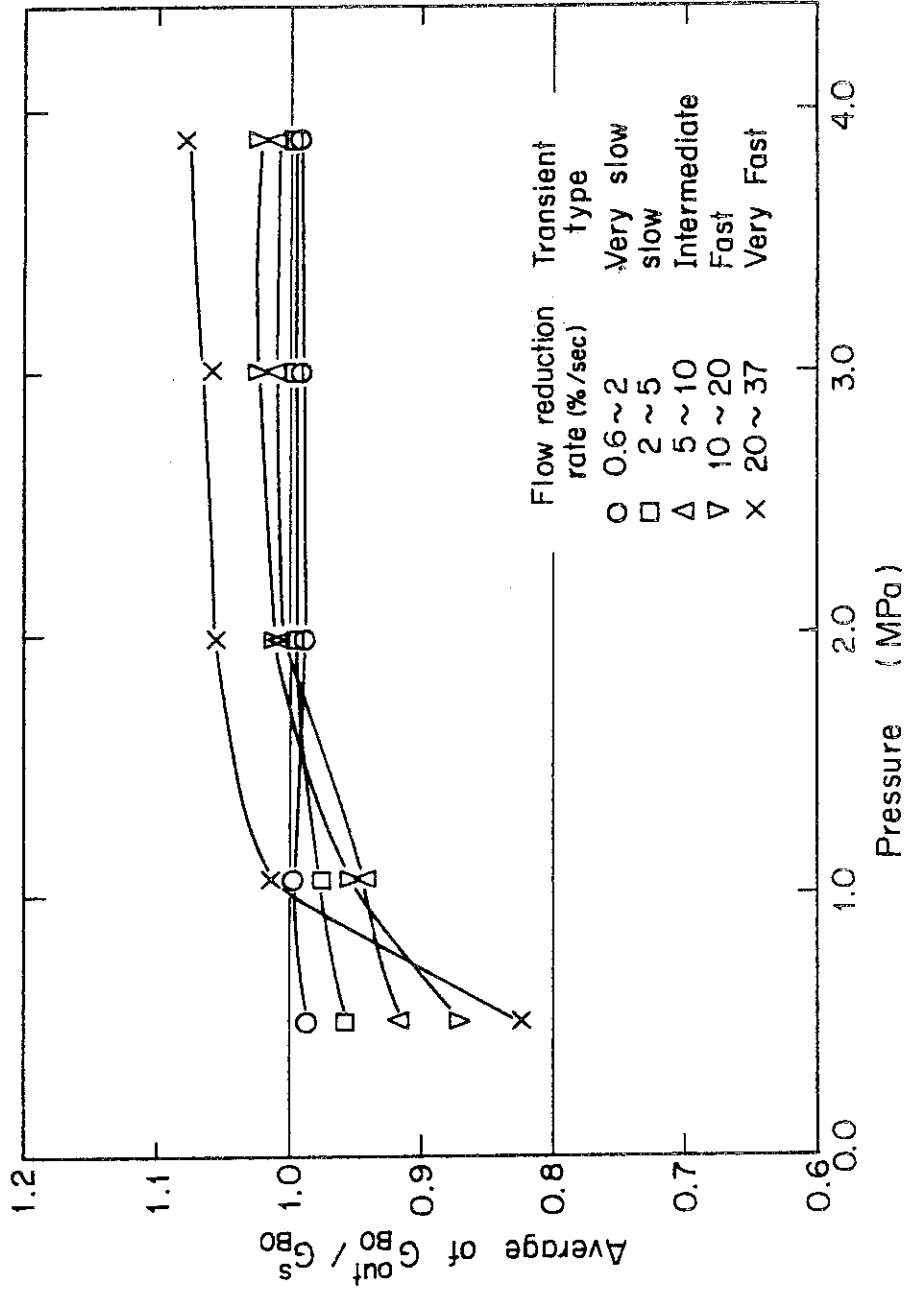


Fig. 3.35 Average of dimensionless burnout mass velocity at outlet vs. pressure

4. ま と め

加熱長さ800mm, 内径10mmの管内流路テスト部による流量低下バーンアウト実験を解析するため, 過渡時の沸騰二相流の諸量を求める計算を行った。計算は二相流を分離流モデルで取り扱い, 摩擦によるエネルギー消散項, 圧力による仕事項および物性値の圧力依存性を無視したエネルギー保存式, 連続の式, スリップの式を基礎式として, 解法は特性曲線法によった。

この計算方法により求めたバーンアウト発生時の出口質量速度 (G_{BO}^{out}) と流速減少率の関係を, 各条件下で求めて, 以下の諸点が明らかとなった。

- 1) 流速減少率が約2%/sec以下では, 0.5~3.9MPaの各圧力下で G_{BO}^{out} は定常バーンアウト質量速度 (G_{BO}^s) にほぼ一致し, バーンアウト時入口質量速度 (G_{BO}^i) にもほぼ一致しているので, 定常バーンアウトと考えられる。
- 2) 流速減少率が大きくなると, G_{BO}^{out} と G_{BO}^i の差は拡大する。
- 3) 圧力が約2MPa以上の場合, 流速減少率が2~20%/secの範囲では, G_{BO}^i / G_{BO}^s が約0.92~1.0とやや低下しているにもかかわらず, G_{BO}^{out} / G_{BO}^s はほぼ1となる。また, 流速減少率が20%/sec以上では G_{BO}^{out} / G_{BO}^s は1よりやや大きくなる傾向にある。
- 4) 約1MPa以下の圧力の場合には, 流速減少率が2%/sec以上にになると, G_{BO}^{out} / G_{BO}^s は1より小さくなる。

今後以上の結論を実験的に検証するため, テスト部出口における諸量(特に質量速度)の過渡変化を測定して, 定常時と過渡時でバーンアウト発生時の局所流動条件にどの程度の差が生じるかを調べる必要がある。また解析手法上の問題として, 本計算のように運動量バランスを考慮しなかったことが, 出口質量速度計算結果にどの程度影響しているかを評価する必要もある。

謝 辞

本研究の遂行に際して指導と協力をいただいた, 安全工学第二研究室長平野見明氏に感謝いたします。また, 解析上の基礎式や解析結果の検討に関して, 有益な助言をいただいた, 安全工学部次長小山内正夫氏および安全工学第二研究室安達公道氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 黒柳利之・岩村公道, “管内流路における流量低下過渡バーンアウト(1)”, JAERI-M 8774(1980)
- (2) W. Kastner, F. Mayinser, “Burnout Tests in Connection with Safety Research”, AEC-tr 7394(1970)
- (3) B.S. Shiralkar et al., “Transient Critical Heat Flux Experimental Results”, GEAP-13295(1972)
- (4) R.A. Smith and P. Griffith, “Critical Heat Flux in Flow Reversal

4. ま と め

加熱長さ800mm, 内径10mmの管内流路テスト部による流量低下バーンアウト実験を解析するため, 過渡時の沸騰二相流の諸量を求める計算を行った。計算は二相流を分離流モデルで取り扱い, 摩擦によるエネルギー消散項, 圧力による仕事項および物性値の圧力依存性を無視したエネルギー保存式, 連続の式, スリップの式を基礎式として, 解法は特性曲線法によった。

この計算方法により求めたバーンアウト発生時の出口質量速度 (G_{BO}^{out}) と流速減少率の関係を, 各条件下で求めて, 以下の諸点が明らかとなった。

- 1) 流速減少率が約2%/sec以下では, 0.5~3.9MPaの各圧力下で G_{BO}^{out} は定常バーンアウト質量速度 (G_{BO}^s) にほぼ一致し, バーンアウト時入口質量速度 (G_{BO}^i) にもほぼ一致しているので, 定常バーンアウトと考えられる。
- 2) 流速減少率が大きくなると, G_{BO}^{out} と G_{BO}^i の差は拡大する。
- 3) 圧力が約2MPa以上の場合, 流速減少率が2~20%/secの範囲では, G_{BO}^i / G_{BO}^s が約0.92~1.0とやや低下しているにもかかわらず, G_{BO}^{out} / G_{BO}^s はほぼ1となる。また, 流速減少率が20%/sec以上では G_{BO}^{out} / G_{BO}^s は1よりやや大きくなる傾向にある。
- 4) 約1MPa以下の圧力の場合には, 流速減少率が2%/sec以上にになると, G_{BO}^{out} / G_{BO}^s は1より小さくなる。

今後以上の結論を実験的に検証するため, テスト部出口における諸量(特に質量速度)の過渡変化を測定して, 定常時と過渡時でバーンアウト発生の局所流動条件にどの程度の差が生じるかを調べる必要がある。また解析手法上の問題として, 本計算のように運動量バランスを考慮しなかったことが, 出口質量速度計算結果にどの程度影響しているかを評価する必要もある。

謝 辞

本研究の遂行に際して指導と協力をいただいた, 安全工学第二研究室長平野見明氏に感謝いたします。また, 解析上の基礎式や解析結果の検討に関して, 有益な助言をいただいた, 安全工学部次長小山内正夫氏および安全工学第二研究室安達公道氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 黒柳利之・岩村公道, “管内流路における流量低下過渡バーンアウト(1)”, JAERI-M 8774(1980)
- (2) W. Kastner, F. Mayinser, “Burnout Tests in Connection with Safety Research”, AEC-tr 7394(1970)
- (3) B.S. Shiralkar et al., “Transient Critical Heat Flux Experimental Results”, GEAP-13295(1972)
- (4) R. A. Smith and P. Griffith, “Critical Heat Flux in Flow Reversal

4. ま と め

加熱長さ800mm、内径10mmの管内流路テスト部による流量低下バーンアウト実験を解析するため、過渡時の沸騰二相流の諸量を求める計算を行った。計算は二相流を分離流モデルで取り扱い、摩擦によるエネルギー消散項、圧力による仕事項および物性値の圧力依存性を無視したエネルギー保存式、連続の式、スリップの式を基礎式として、解法は特性曲線法によった。

この計算方法により求めたバーンアウト発生時の出口質量速度 (G_{BO}^{out}) と流速減少率の関係を、各条件下で求めて、以下の諸点が明らかとなった。

- 1) 流速減少率が約2%/sec以下では、0.5~3.9MPaの各圧力下で G_{BO}^{out} は定常バーンアウト質量速度 (G_{BO}^s) にほぼ一致し、バーンアウト時入口質量速度 (G_{BO}^i) にもほぼ一致しているので、定常バーンアウトと考えられる。
- 2) 流速減少率が大きくなると、 G_{BO}^{out} と G_{BO}^i の差は拡大する。
- 3) 圧力が約2MPa以上の場合、流速減少率が2~20%/secの範囲では、 G_{BO}^i/G_{BO}^s が約0.92~1.0とやや低下しているにもかかわらず、 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s はほぼ1となる。また、流速減少率が20%/sec以上では G_{BO}^{out}/G_{BO}^s は1よりやや大きくなる傾向にある。
- 4) 約1MPa以下の圧力の場合には、流速減少率が2%/sec以上になると、 G_{BO}^{out}/G_{BO}^s は1より小さくなる。

今後以上の結論を実験的に検証するため、テスト部出口における諸量(特に質量速度)の過渡変化を測定して、定常時と過渡時でバーンアウト発生時の局所流動条件にどの程度の差が生じるかを調べる必要がある。また解析手法上の問題として、本計算のように運動量バランスを考慮しなかったことが、出口質量速度計算結果にどの程度影響しているかを評価する必要もある。

謝 辞

本研究の遂行に際して指導と協力をいただいた、安全工学第二研究室長平野見明氏に感謝いたします。また、解析上の基礎式や解析結果の検討に関して、有益な助言をいただいた、安全工学部次長小山内正夫氏および安全工学第二研究室安達公道氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 黒柳利之・岩村公道, "管内流路における流量低下過渡バーンアウト(1)", JAERI-M 8774(1980)
- (2) W. Kastner, F. Mayinger, "Burnout Tests in Connection with Safety Research", AEC-tr 7394(1970)
- (3) B.S. Shiralkar et al., "Transient Critical Heat Flux Experimental Results", GEAP-13295(1972)
- (4) R.A. Smith and P. Griffith, "Critical Heat Flux in Flow Reversal

- Transients", PB-254 425 (1976)
- (5) M. Cumo et al., "Transient Critical Heat Flux in Loss-of-Flow-Accidents (L.O.F.A.)", RT/ING(77)14 (1977)
 - (6) 浅田, 小堀, "非定常ドライアウトの研究(第1報, 流量急減下のドライアウト)", 第14回日本伝熱シンポジウム講演論文集 p175 (1977)
 - (7) J.R.S. Thom, "Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 7, p709-724, (1964)
 - (8) S. Goldstein, "Modern developments in fluid dynamics", Oxford Univ. Press, (1952)
 - (9) L. Howarth, "Modern developments in fluid dynamics high speed flow", Oxford Univ. Press, (1953)
 - (10) 黒柳利之・岩村公道, "流量低下時の圧力および壁温変化(常圧ループによる過渡沸騰実験Ⅲ)", JAERI-M 7396, (1977)
 - (11) 黒柳利之・岩村公道, "流量低下時のバーンアウト発生(常圧ループによる過渡沸騰実験Ⅳ)", JAERI-M 7489, (1978)
 - (12) A.B. Jones and D.G. Dight, "Hydrodynamic Stability of a Boiling Channel Part 2", KAPL-2208, (1962)
 - (13) D. Moxon, P.A. Edwards, "Dryout during Flow and Power Transient", AEEW-R 553 (1967)
 - (14) G.P. Gaspari et al., "Transient Dryout in a Modelled CIRENE 18+1 Rod Cluster", CISE-R-379 (1975)
 - (15) J.C.M. Leung, "Critical Heat Flux under Transient Conditions, A Literature Survey", NUREG/CR-0056 (1978)

記 号 表

- A = cross-section area (m^2 or mm^2)
 D = inner diameter (m or mm)
 E_f = energy dissipation rate (w/m^3 or $cal/cm^3 \cdot s$)
 FR = flow reduction rate = $\frac{100 \Delta G}{G_i \Delta t}$ (%/sec)
 G = mass velocity ($kg/s \cdot m^2$)
 G_i = initial mass velocity ($kg/s \cdot m^2$)
 G_{BO}^{out} = burnout mass velocity at outlet ($kg/s \cdot m^2$)
 G_{BO}^s = steady-state burnout mass velocity ($kg/s \cdot m^2$)
 G_{BO}^i = burnout mass velocity at inlet ($kg/s \cdot m^2$)
 ΔG = mass velocity reduction range to burnout ($kg/s \cdot m^2$)
 G^* = dimensionless mass velocity
 H = dimensionless enthalpy $\equiv (h_f - h_{in}) / \left(\frac{q_i p L}{A \rho V_i} \right)$
 H_B = dimensionless enthalpy at boiling boundary
 H_i = dimensionless initial enthalpy
 H_{sat} = dimensionless enthalpy at saturation point
 h = enthalpy (J/kg or $kcal/kg$)
 h_{in} = inlet enthalpy (J/kg or $kcal/kg$)
 h_f = liquid enthalpy (J/kg or $kcal/kg$)
 h_v = vapor enthalpy (J/kg or $kcal/kg$)
 J = mechanical equivalent of heat = 4.18×10^7 ergs/cal = 42.7 kg.cm/cal
 L = heated length (m)
 L_B = boiling length (m)
 P = Pressure (MPa)
 p = perimeter (m)
 Q = heat added to unit volume (w/m^3 or $cal/cm^3 \cdot s$)
 q = heat flux (w/m^2)
 q_{BO} = burnout heat flux (w/m^2)
 q_i = initial heat flux (w/m^2)
 S = slip ratio
 T = temperature ($^{\circ}C$)
 T_{in} = inlet temperature ($^{\circ}C$)
 t = time (sec)

- t_{BO} = burnout time (sec)
 Δt = flow reduction time (sec)
 u = dimensionless velocity $\equiv v/v_i$
 u_{in} = dimensionless inlet velocity
 u_ℓ = dimensionless liquid velocity
 u_v = dimensionless vapor velocity
 v = velocity (m/s)
 v_i = initial velocity (m/s)
 v_ℓ = liquid velocity (m/s)
 v_v = vapour velocity (m/s)
 x = quality
 x_{BO}^{out} = burnout quality at outlet
 x_i^{in} = initial quality at inlet
 x_i^{out} = initial quality at outlet
 z = axial distance (m)
 α = void fraction
 η = dimensionless height $\equiv Z/L$
 η_B = dimensionless height of saturation point
 η_i = initial dimensionless height
 λ = latent heat of evaporation (J/kg)
 ν = density ratio $\equiv \rho_v/\rho_\ell$
 ρ = density (kg/m³)
 ρ_ℓ = liquid density (kg/m³)
 ρ_v = vapor density (kg/m³)
 τ = dimensionless time $\equiv tv_i/L$
 τ_i = dimensionless entrance time of a fluid particle into test section
 τ_{sat} = dimensionless saturation time corresponding to η_B
 ϕ = dimensionless heat flux $\equiv q/q_i$

付録 A テスト部出口質量速度，ボイド率，クオリティ， 飽和点等の過渡変化計算例

2章で述べた計算方法により，流量を低下してバーンアウトに至るまでの過渡沸騰過程を計算した。

Fig. A1-1~A6-5に，計算結果の例として，テスト部入口と出口の質量速度，飽和点位置，テスト部出口のボイド率とクオリティ等の過渡変化を，0.5，1.0，2.0，3.0，3.9 MPaの各圧力において，流速減少率の小さな方から順に示す。また，Table A・1には，各Runごとの実験条件，バーンアウト発生時刻，対応する実験データのFig. No.（文献(1)の付録Bに収録）等を示す。なお，本計算はいずれも，バーンアウト発生により加熱電源を遮断するまで行った。Fig. A1-1~A6-5にはバーンアウト発生時刻も示してある。

Table A.1 Experimental conditions of the data presented in Fig. A1-1 to Fig. A6-5

Fig.No.	Run No.	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO} (w/m ²) ×10 ⁶	G _i (kg/s.m ²)	△t (sec)	FR (%/sec)	t _{BO} (sec)	Data Fig. No. in ref. (1)
A 1-1	541206- 2	0.5 2	1 22	2.6 7	2 41 0	3 9.8	1.4 9	4 4.5	B 1-3-1
A 1-2	- 6	0.5 3	1 21	2.6 8	2 46 0	1 6.8	3.9 4	2 0.5	B 1-3-2
A 1-3	- 8	0.5 4	1 22	2.6 5	2 46 0	8.2 4	8.1 1	1 0.2	B 1-3-3
A 1-4	- 1	0.5 3	1 20	2.7 1	2 43 0	4.9	1 4.0	6.6 6	B 1-3-4
A 1-5	- 12	0.5 2	1 21	2.6 8	2 42 0	0.4 5	1 6.7	2.2 8	
A 2-1	541210- 3	1.0 8	1 40	3.7 9	2 49 0	3 0.5	1.7 2	3 3.3	B 2-3-1
A 2-2	- 8	1.0 7	"	"	2 40 0	1 0.6	5.2 1	1 2.6	
A 2-3	- 10	1.0 6	1 41	3.8 0	2 45 0	6.8	8.1 8	8.8 2	B 2-3-2
A 2-4	- 13	1.0 8	1 42	"	2 48 0	1.6 5	3 5.0	2.6 1	B 2-3-3
A 3-1	550108-114	0.9 1	9 2	3.2 3	2 96 0	4 4.8	1.5 9	4 5.2	B 2-6-1
A 3-2	-110	0.8 9	"	3.2 2	2 94 0	1 9.8	3.6 9	2 2.2	B 2-6-2
A 3-3	-102	0.9 6	"	3.2 1	2 98 0	1 0.2	7.1 2	1 2.4	B 2-6-3
A 3-4	-105	0.9 0	9 1	3.2 3	2 99 0	5.7 5	1 3.0	7.1	
A 3-5	-107	"	9 2	"	2 96 0	1.9 8	3 7.8	3.3	B 2-6-4
A 4-1	541212- 25	1.9 7	1 6 4	3.7 3	2 46 0	3 9.6	1.6 0	4 2.5	B 3-4-1
A 4-2	- 23	"	"	3.7 6	2 48 0	2 0.4	3.1 1	2 3.3	
A 4-3	- 16	1.9 4	1 6 2	3.7 7	2 47 0	1 4.0	4.5 1	1 6.1	B 3-4-2
A 4-4	- 19	1.9 8	1 6 3	"	2 43 0	6.5 8	9.6 4	8.9	B 3-4-3
A 4-5	- 21	1.9 4	1 6 2	3.7 6	2 47 0	1.9 5	3 3.4	2.9 9	B 3-4-4
A 5-1	541113- 2	2.9 8	1 8 1	3.7 1	2 56 0	3 6.3	1.8 5	4 1.8	B 4-4-1
A 5-2	- 4	3.0 0	1 8 0	3.7 0	2 61 0	1 4.2	4.9	1 8.2	B 4-4-2
A 5-3	- 6	3.0 1	"	3.7 4	2 60 0	7.9 2	8.7 4	1 0.4	B 4-4-3
A 5-4	- 8	3.0 0	1 8 1	3.7 0	2 61 0	5.2 5	1 3.3	7.6 4	
A 5-5	- 11	3.0 1	1 8 0	3.6 7	2 62 0	2.1 8	3 2.8	3.1 5	B 4-4-4
A 6-1	550122- 13	3.8 6	2 0 2	3.7 0	2 51 0	4 1.3	1.5 1	4 3.0	B 5-1-1
A 6-2	- 9	3.8 3	2 0 0	3.6 9	2 54 0	1 6.5	3.9 3	1 8.8	B 5-1-2
A 6-3	- 2	3.8 5	"	3.6 6	2 50 0	9.6	6.6 5	1 0.4	B 5-1-3
A 6-4	- 6	3.8 6	2 0 2	3.6 5	2 49 0	1.9 3	3 3.4	2.9 1	B 5-1-4
A 6-5	- 7	3.8 3	2 0 0	3.7 2	2 50 0	0.5	1 1.2	1.7 1	B 5-1-5

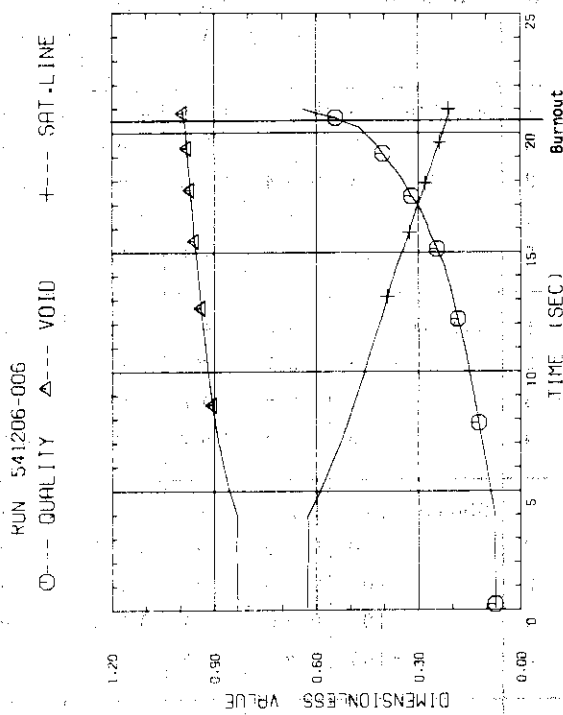
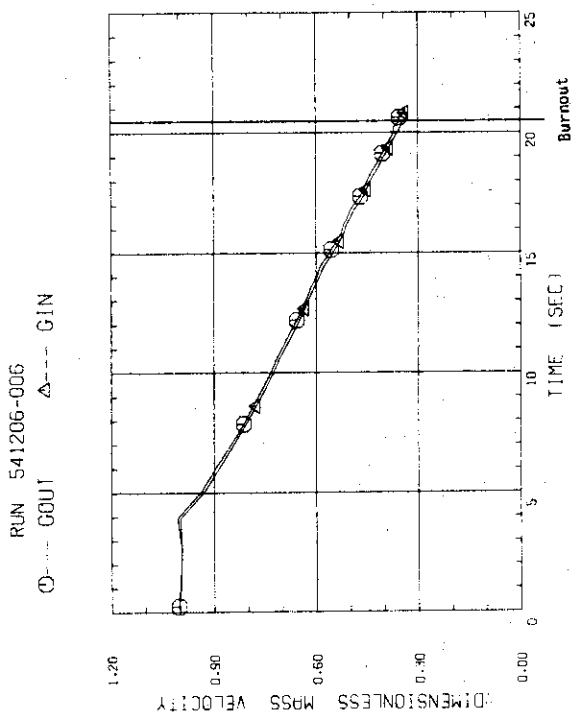


Fig.A1-2 Example of calculated results(2)
 ($P=0.53\text{MPa}$, $T_{in}=121^{\circ}\text{C}$, $FR=3.94\%/sec$)

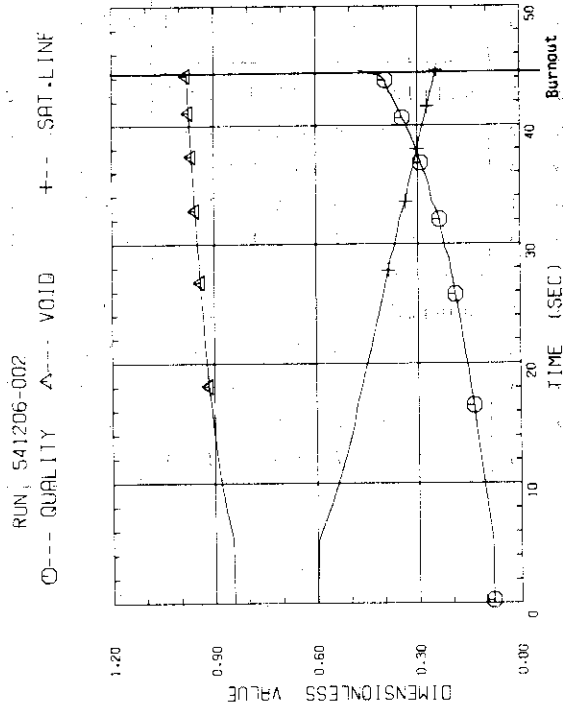
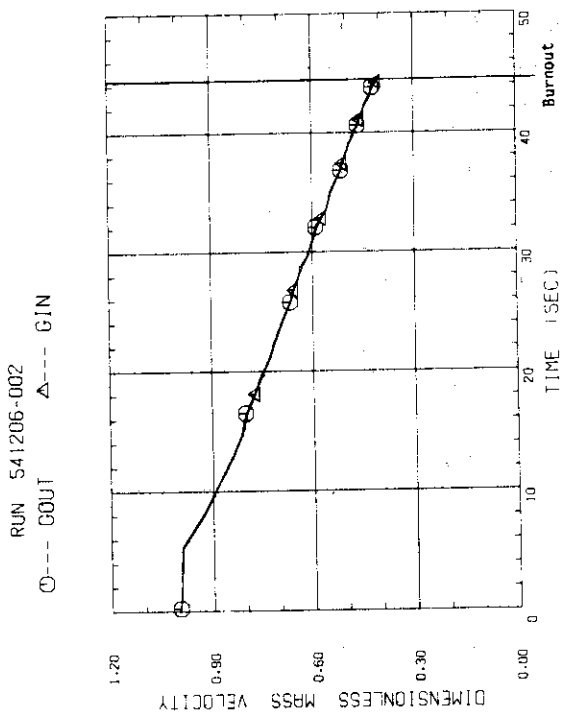


Fig.A1-1 Example of calculated results(1)
 ($P=0.52\text{MPa}$, $T_{in}=122^{\circ}\text{C}$, $FR=1.49\%/sec$)

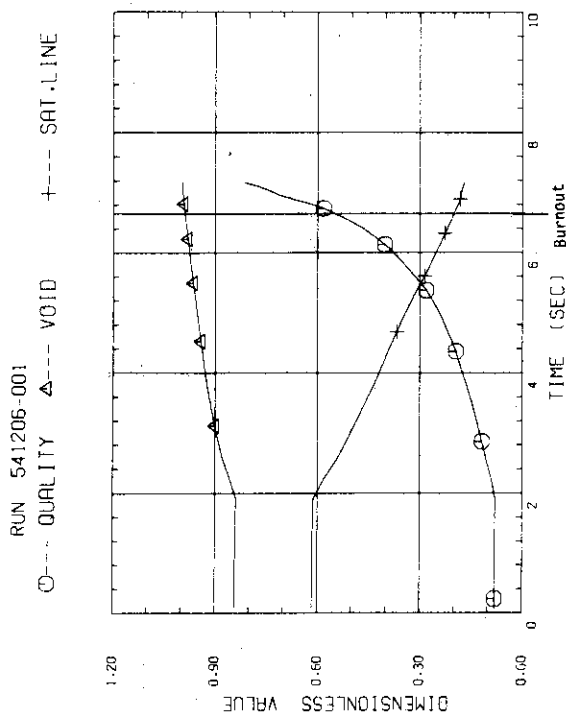
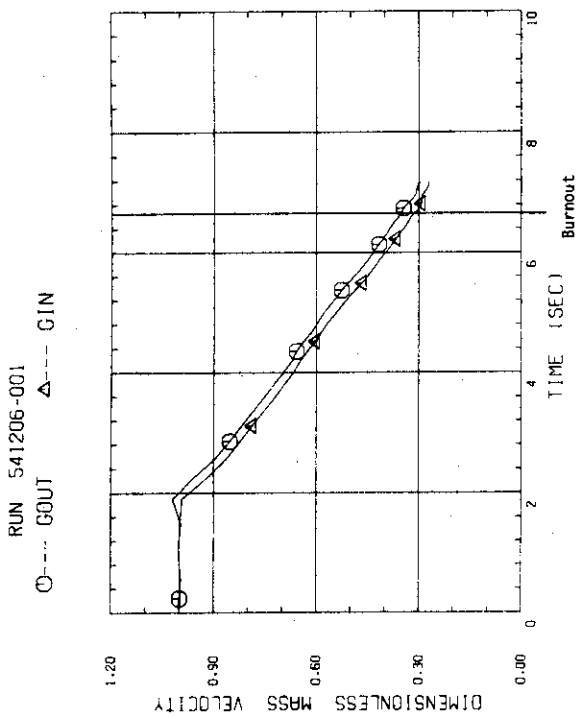


Fig.A1-4 Example of calculated results(4)
 (P=0.53MPa, $T_{in}=120^{\circ}\text{C}$,
 FR=14.0%/sec)

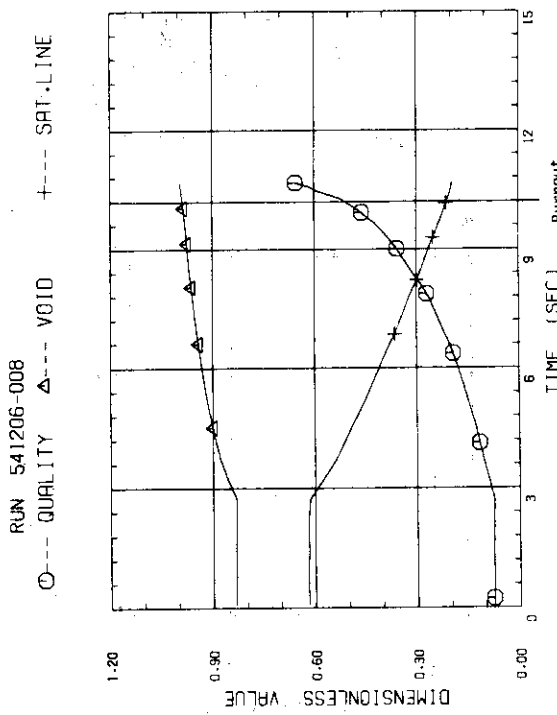
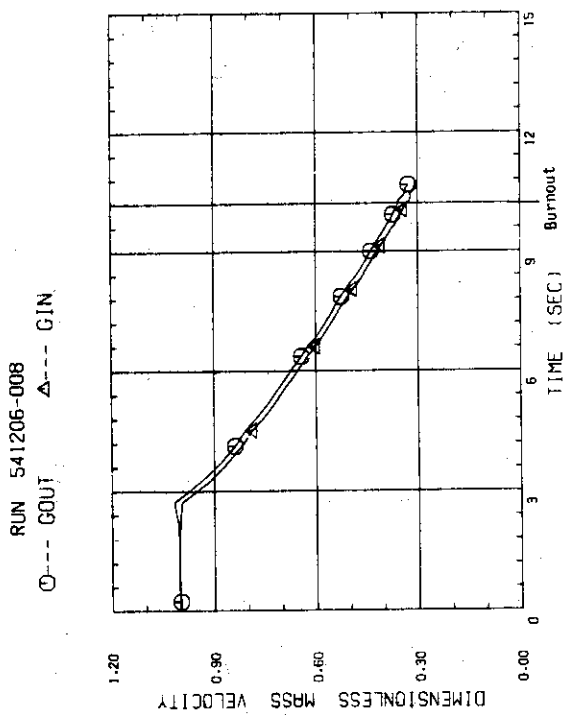


Fig.A1-3 Example of calculated results(3)
 (P=0.54MPa, $T_{in}=122^{\circ}\text{C}$,
 FR=8.11%/sec)

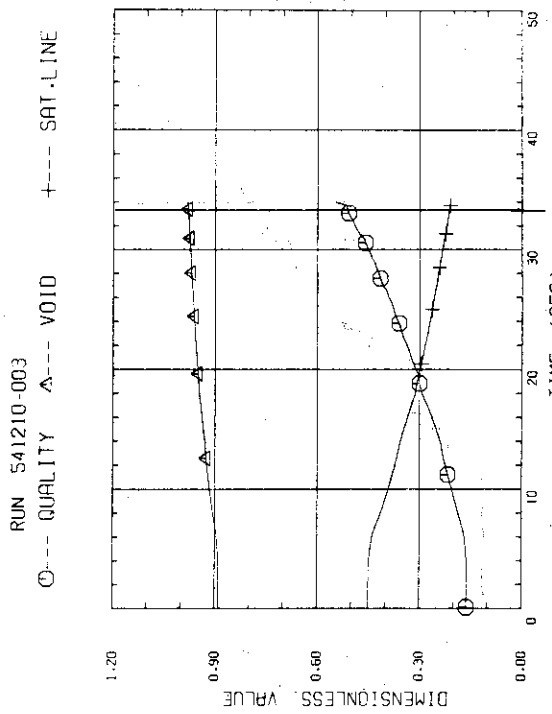
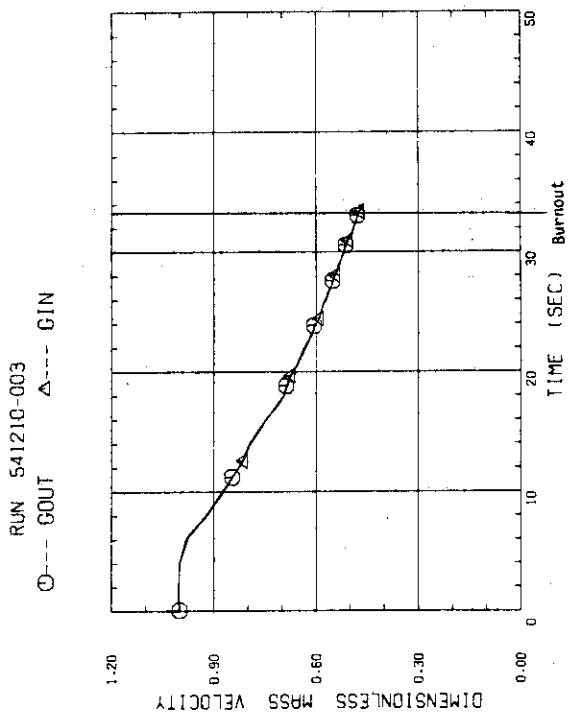


Fig.A2-1 Example of calculated results(6)
 (P=1.01MPa, $T_{in}=140^{\circ}\text{C}$,
 FR=1.72%/sec)

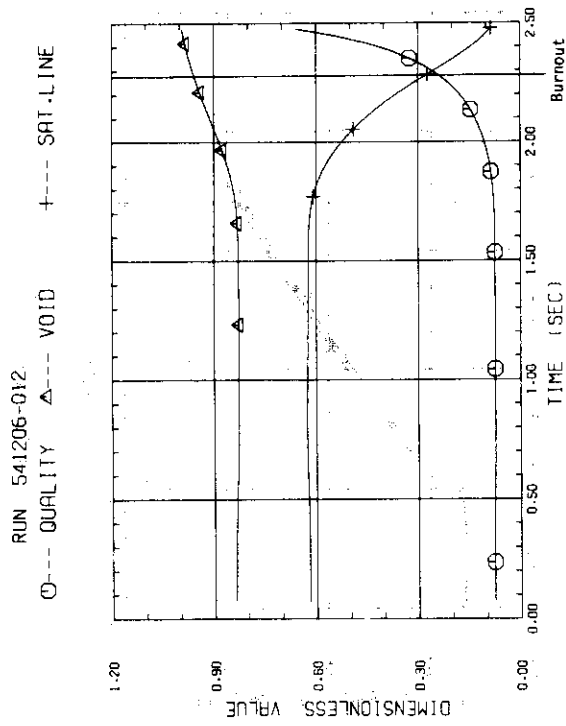
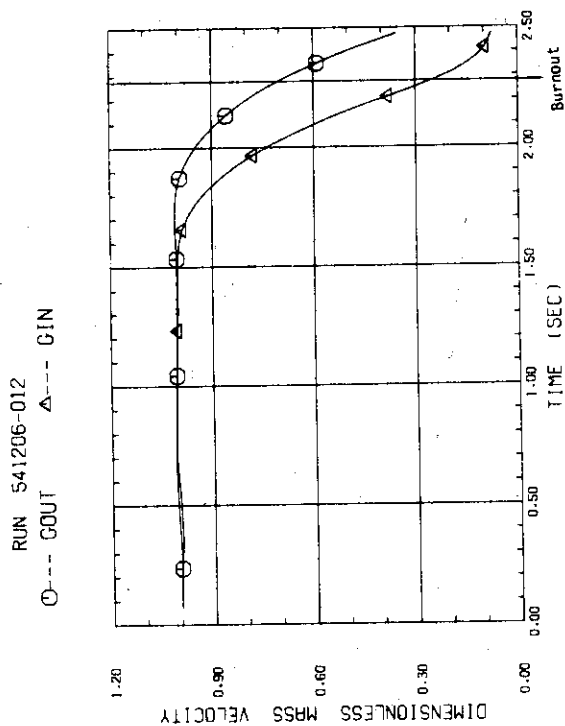


Fig.A1-5 Example of calculated results(5)
 (P=0.52MPa, $T_{in}=121^{\circ}\text{C}$,
 FR=1.67%/sec)

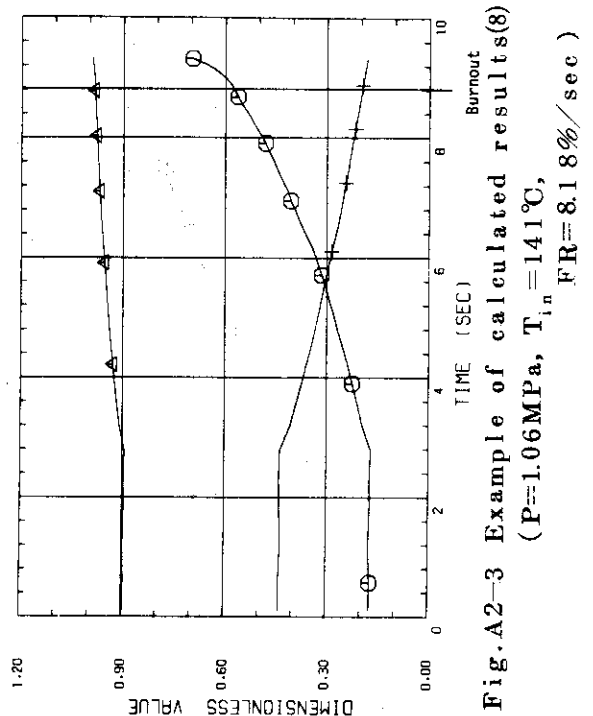
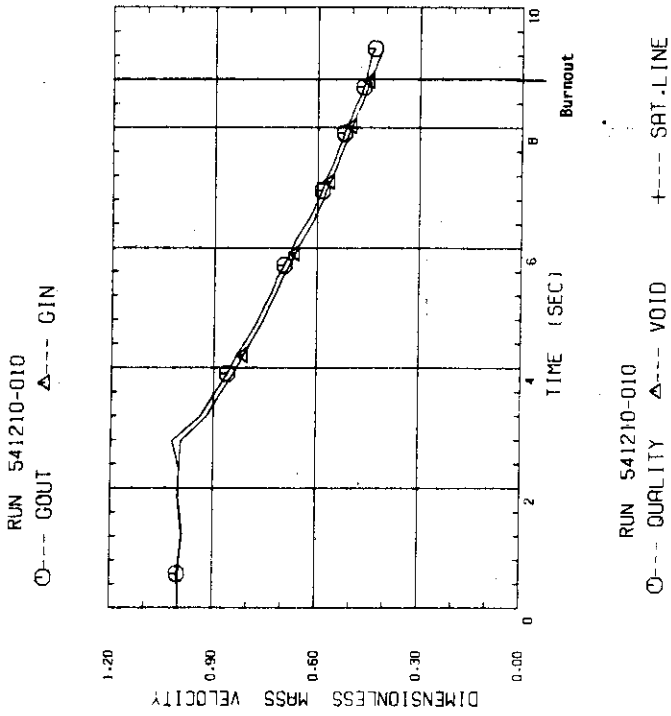


Fig.A2-3 Example of calculated results(8)
 (P=1.06MPa, $T_{in}=141^{\circ}\text{C}$,
 FR=8.18%/sec)

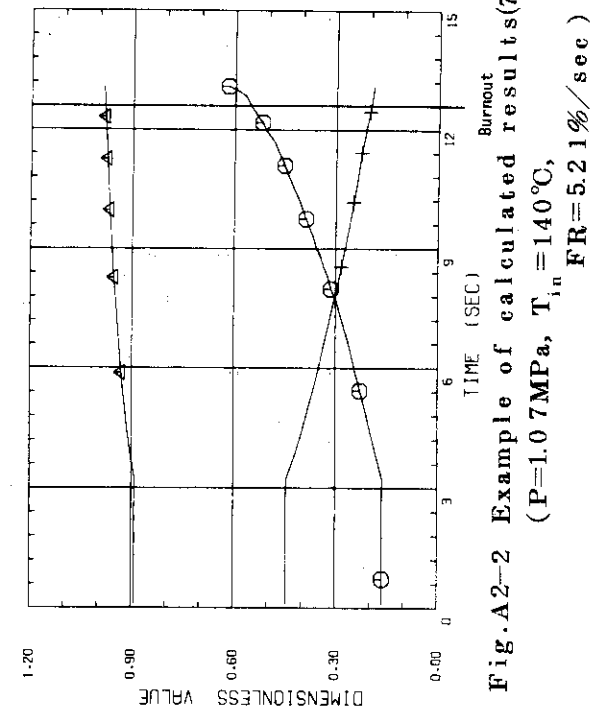
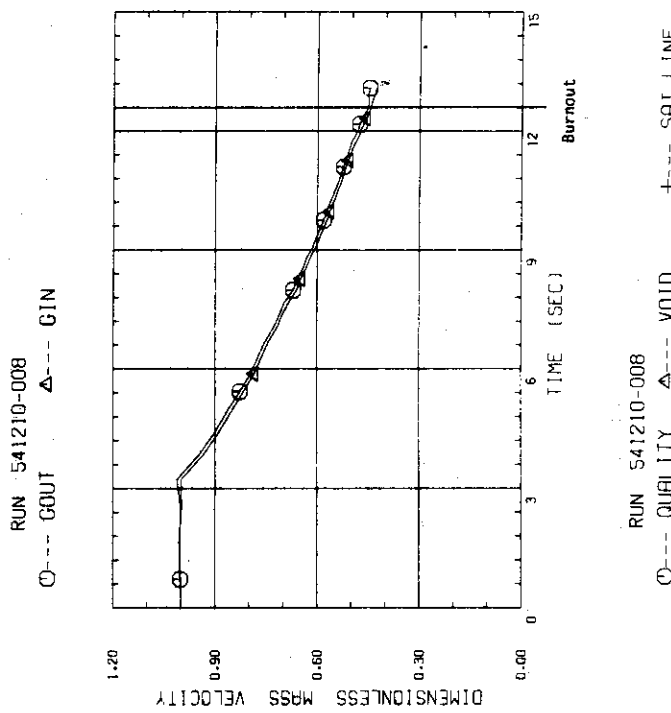
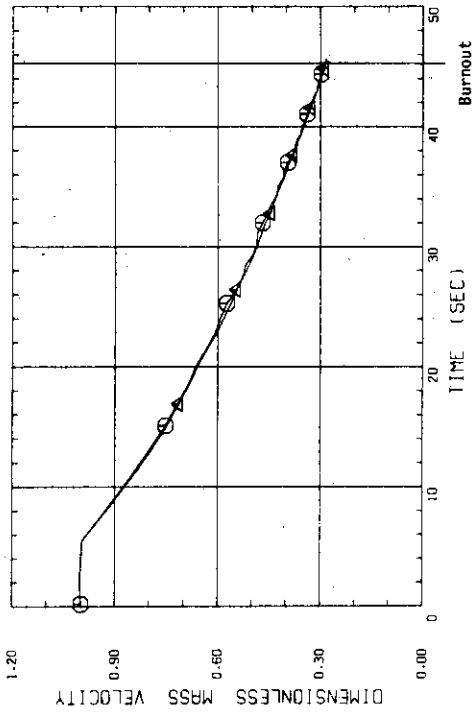


Fig.A2-2 Example of calculated results(7)
 (P=1.07MPa, $T_{in}=140^{\circ}\text{C}$,
 FR=5.21%/sec)

RUN 550108-114
 ○--- GOUT △--- GIN



RUN 550108-114
 ○--- QUALITY △--- VOID +--- SAT.LINE

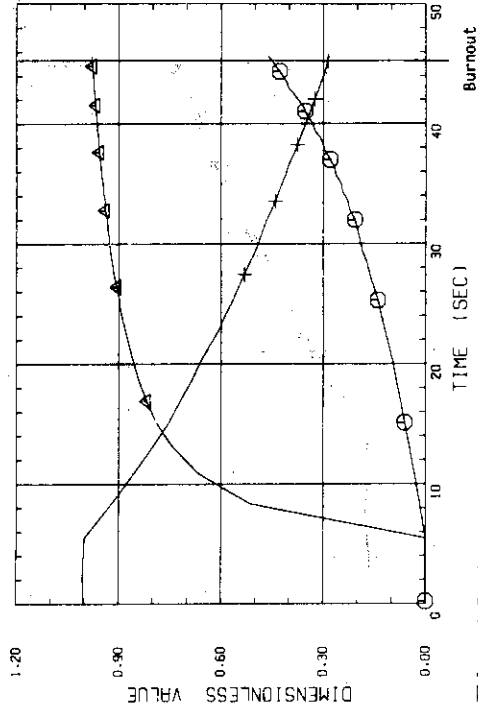
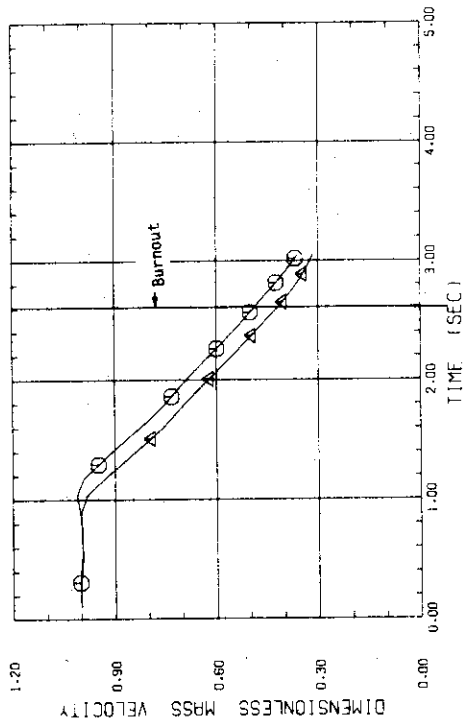


Fig.A3-1 Example of calculated results(10)
 (P=0.91MPa, $T_{in}=92^{\circ}\text{C}$,
 FR=1.59%/sec)

RUN 541210-013
 ○--- GOUT △--- GIN



RUN 541210-013
 ○--- QUALITY △--- VOID +--- SAT.LINE

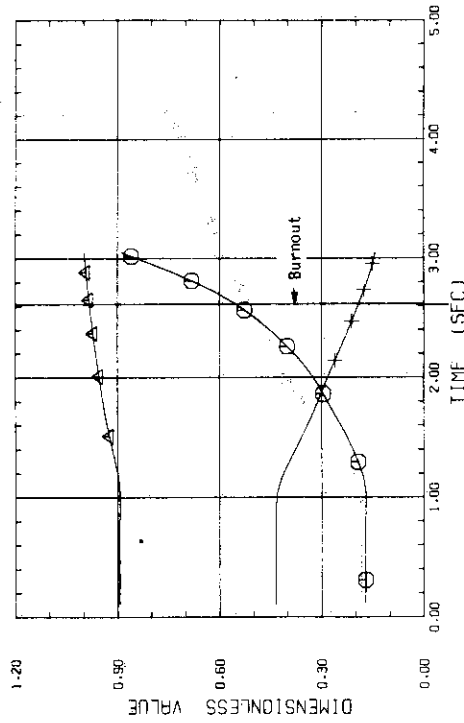


Fig.A2-4 Example of calculated results(9)
 (P=1.08MPa, $T_{in}=142^{\circ}\text{C}$,
 FR=35.0%/sec)

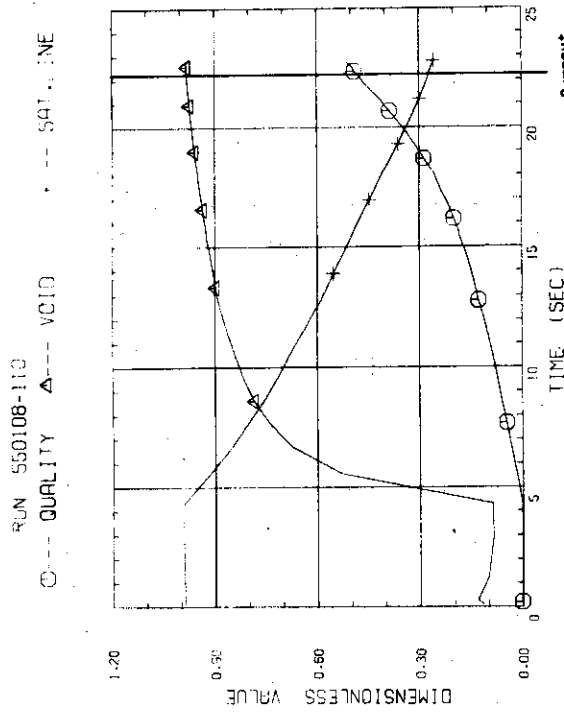
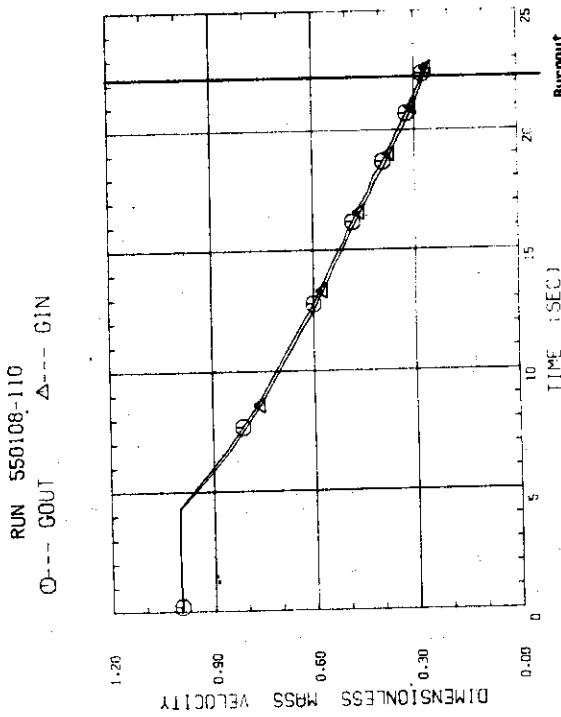
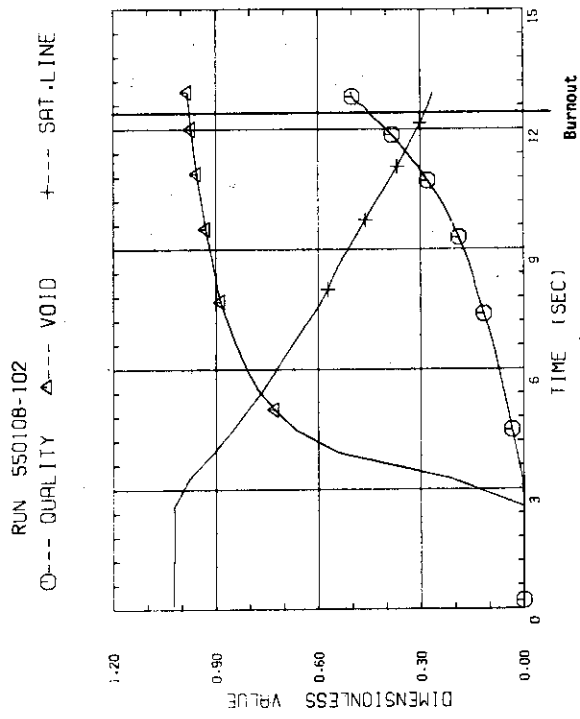
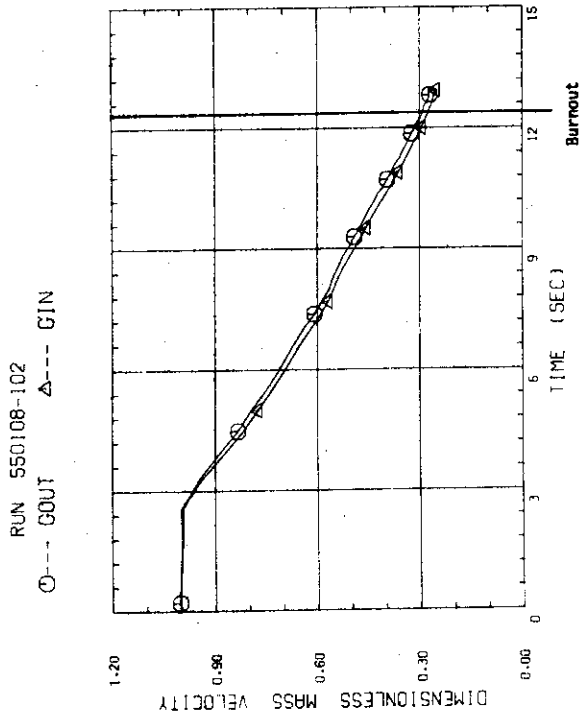


Fig.A3-3 Example of calculated results(2)
 (P=0.96MPa, $T_{i,n}=92^{\circ}\text{C}$,
 FR=7.12%/sec)

Fig.A3-2 Example of calculated results(1)
 (P=0.89MPa, $T_{i,n}=92^{\circ}\text{C}$,
 FR=3.69%/sec)

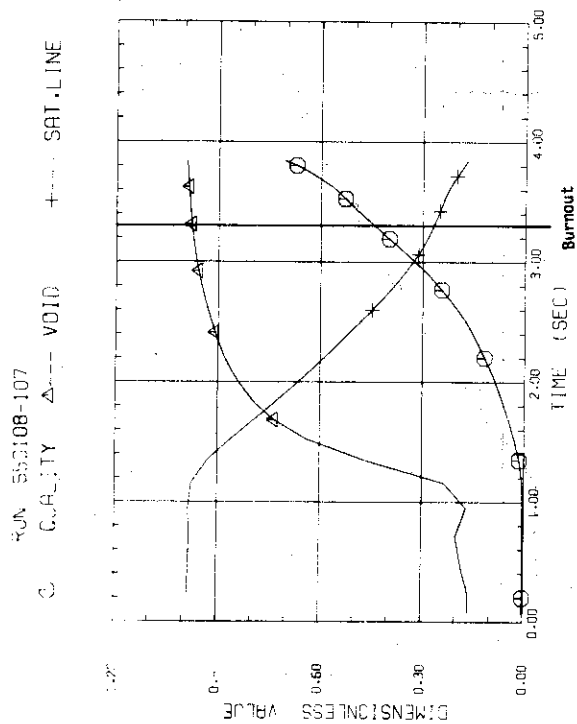
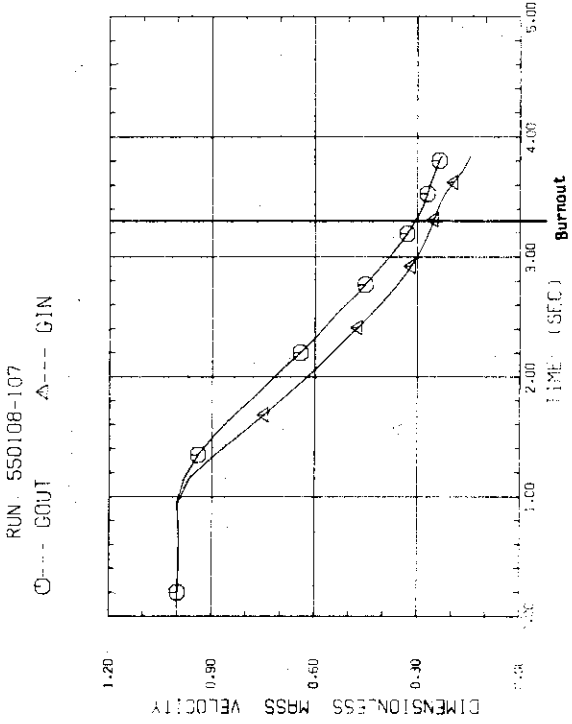


Fig.A3-5 Example of calculated results(4)
 ($P=0.9\text{MPa}$, $T_{in}=92^{\circ}\text{C}$,
 $FR=37.8\%/sec$)

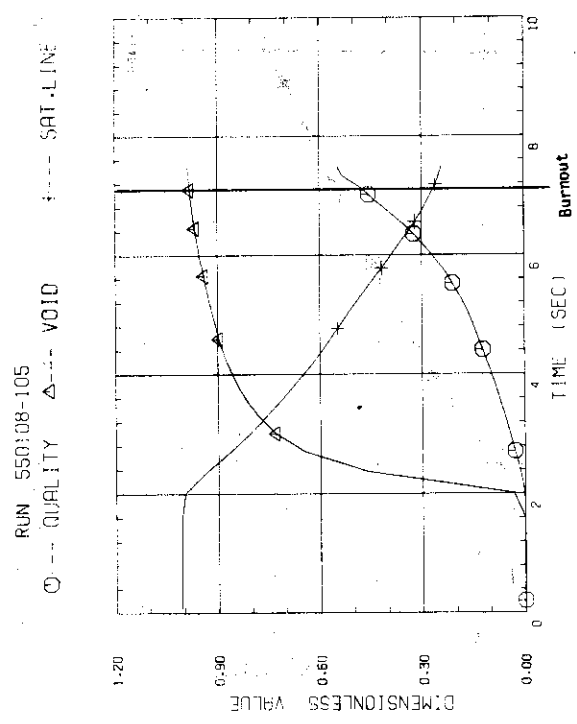
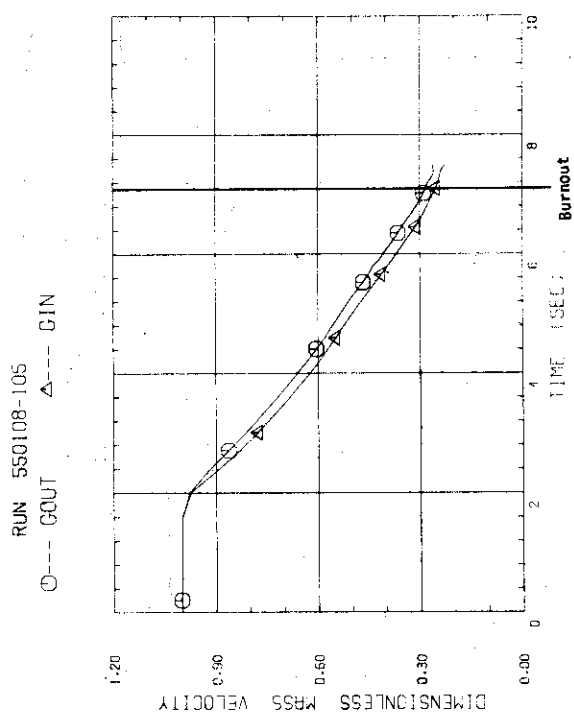


Fig.A3-4 Example of calculated results(3)
 ($P=0.9\text{MPa}$, $T_{in}=91^{\circ}\text{C}$,
 $FR=13.0\%/sec$)

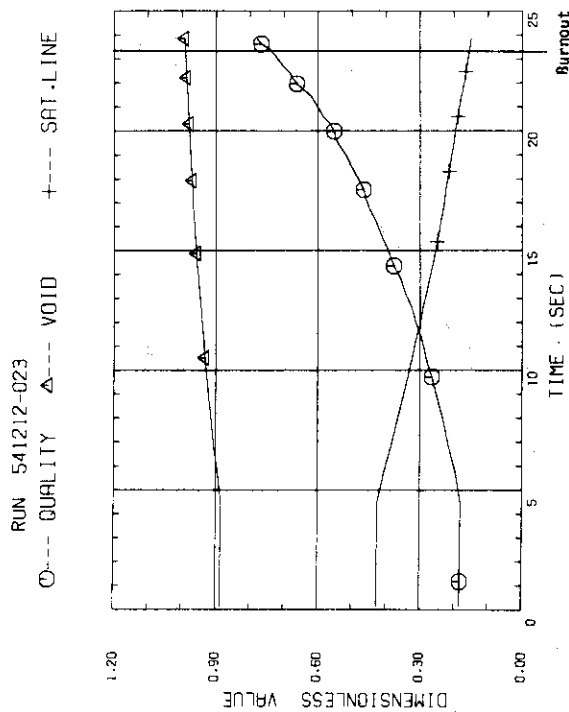
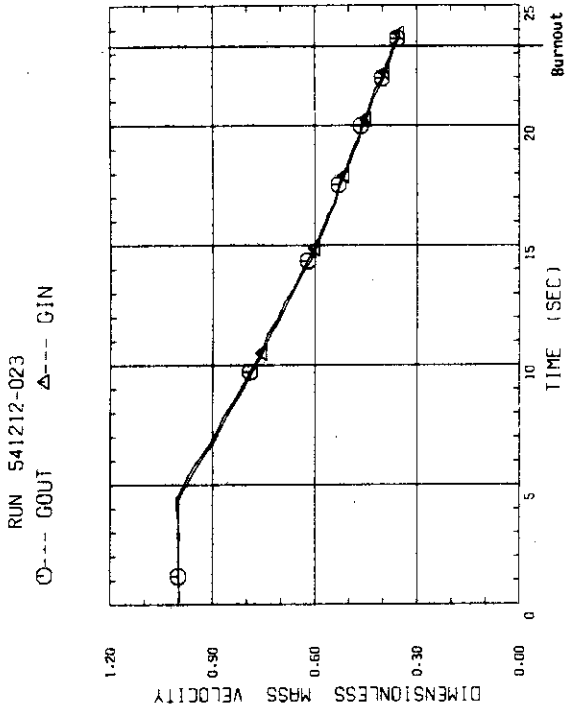


Fig.A4-2 Example of calculated results(6)
 (P=1.97MPa, $T_{in}=164^{\circ}\text{C}$,
 FR=3.11%/sec)

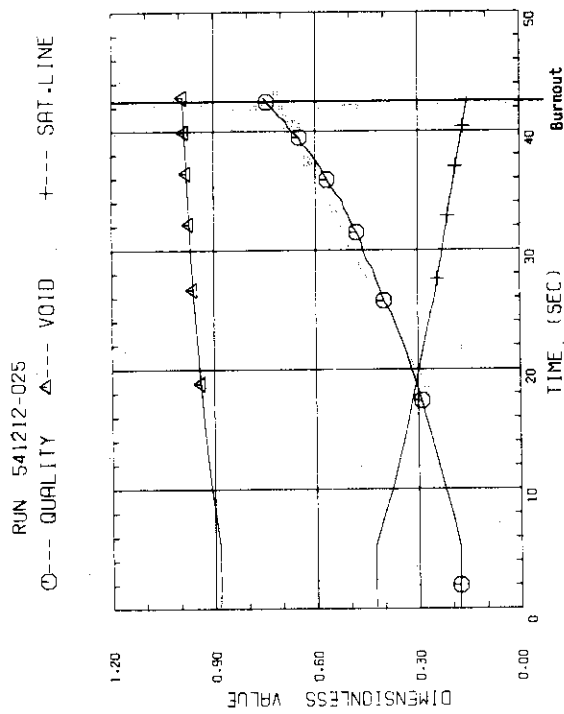
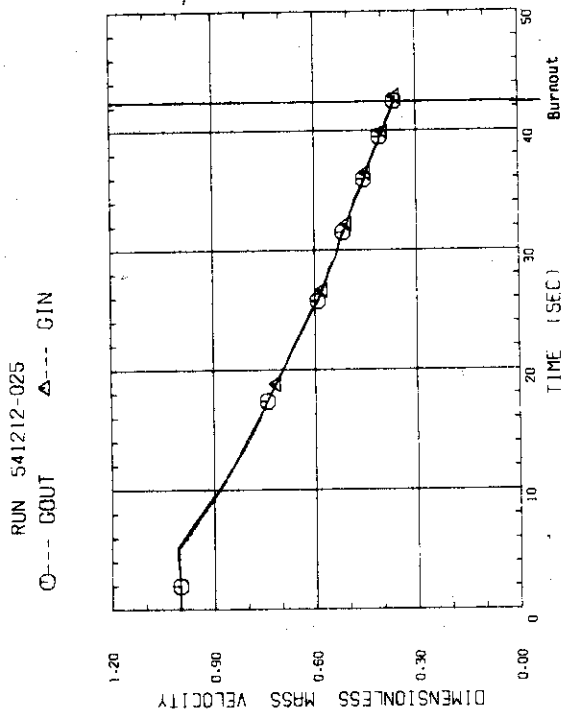


Fig.A4-1 Example of calculated results(5)
 (P=1.97MPa, $T_{in}=162^{\circ}\text{C}$,
 FR=1.60%/sec)

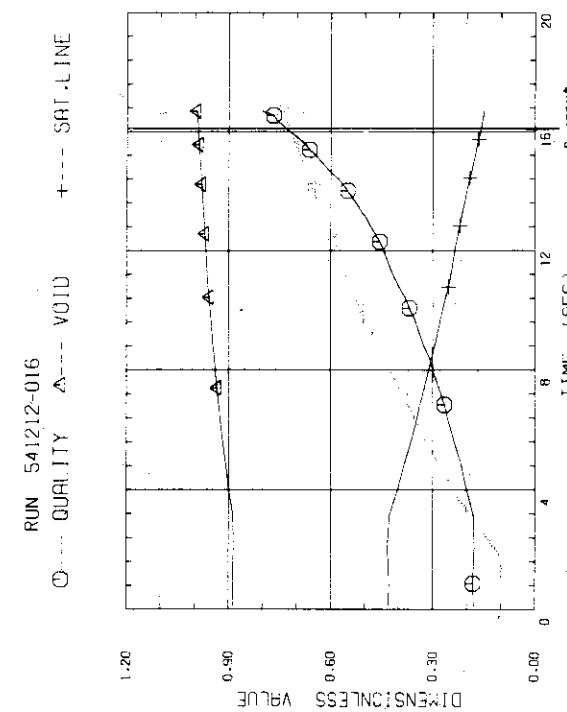
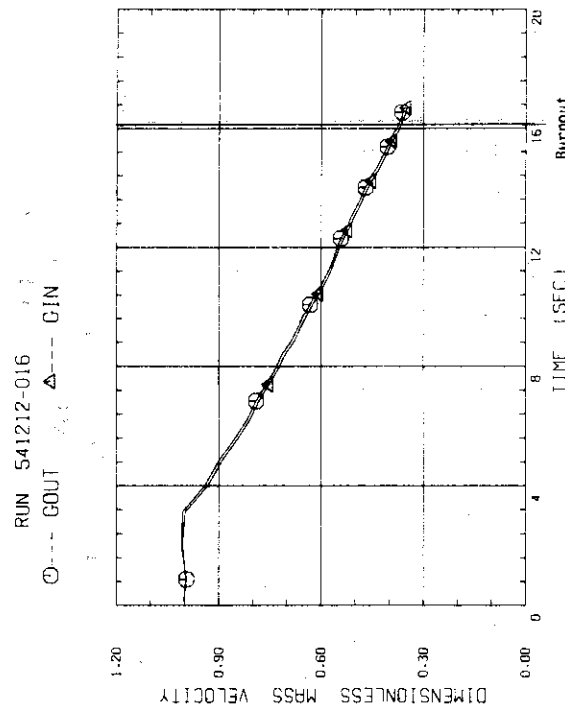
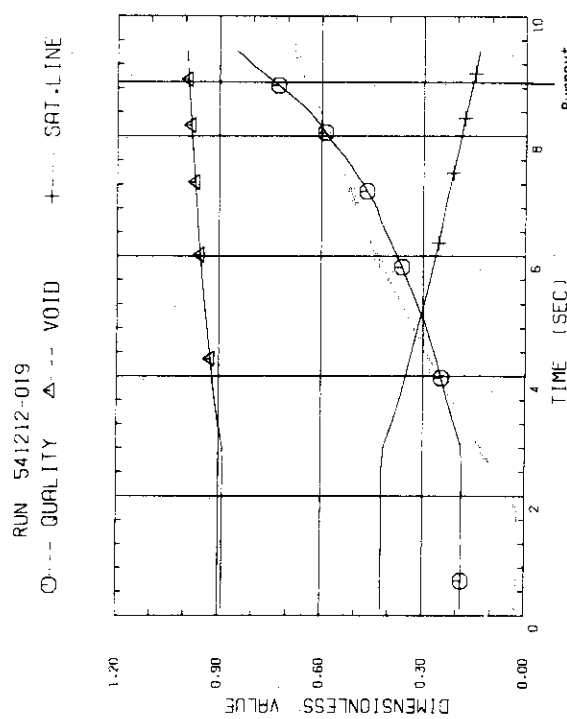
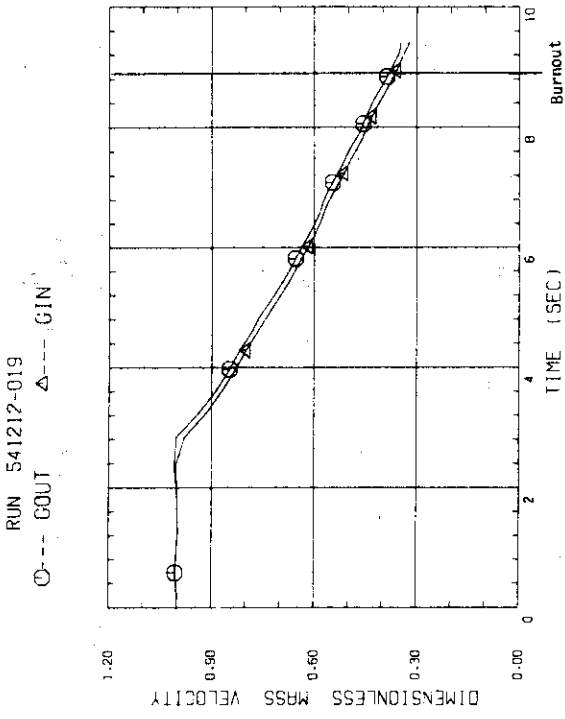


Fig.A4-4 Example of calculated results(8)
 ($P=1.98\text{MPa}$, $T_{in}=163^{\circ}\text{C}$, $FR=9.64\%/sec$)

Fig.A4-3 Example of calculated results(7)
 ($P=1.94\text{MPa}$, $T_{in}=152^{\circ}\text{C}$, $FR=4.51\%/sec$)

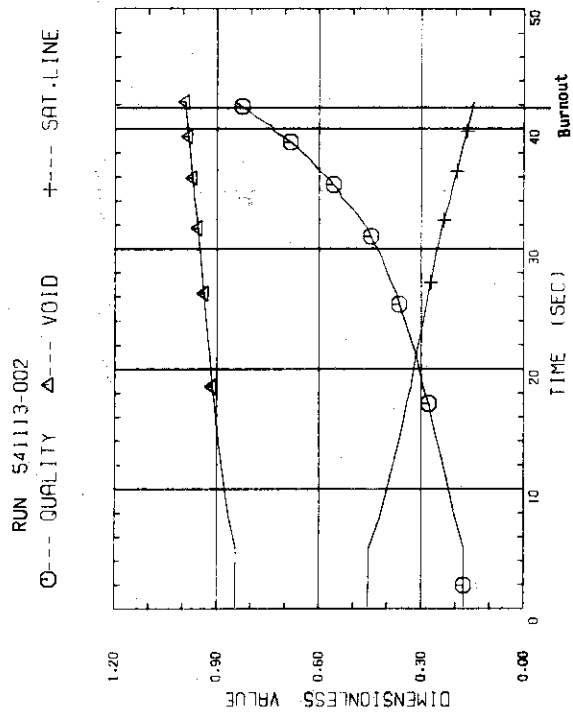
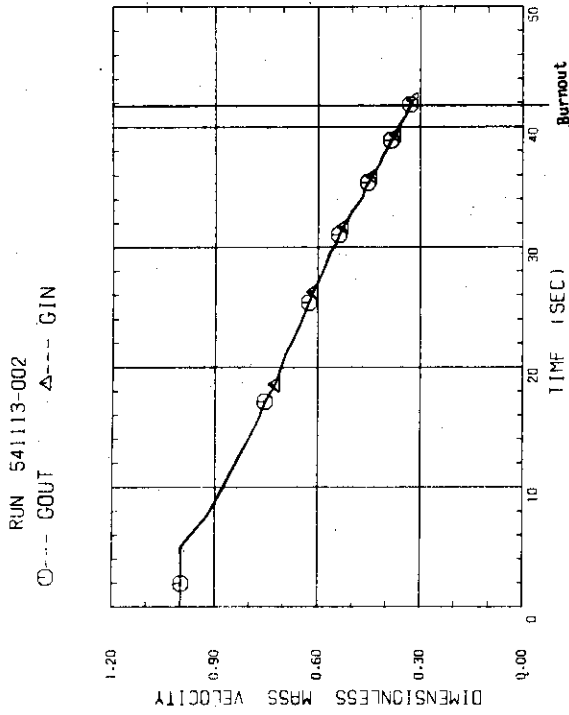


Fig.A5-1 Example of calculated results(8)
 (P=2.98MPa, $T_{in}=181^{\circ}\text{C}$,
 FR=1.85%/sec)

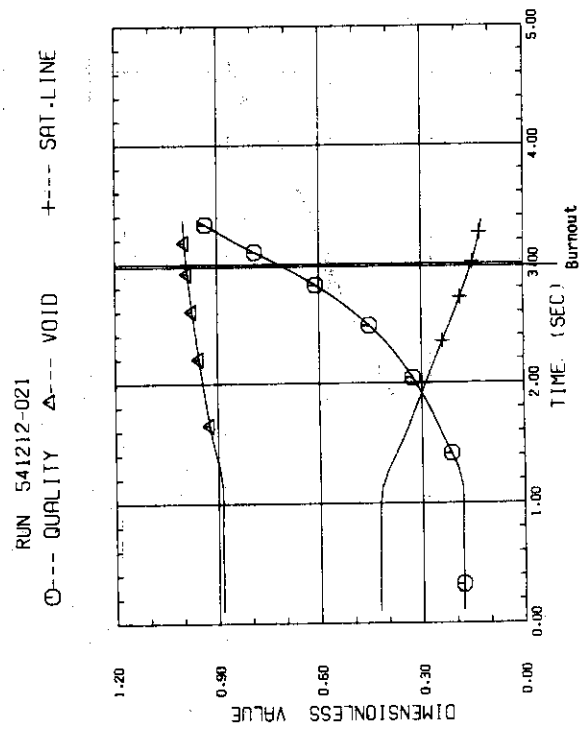
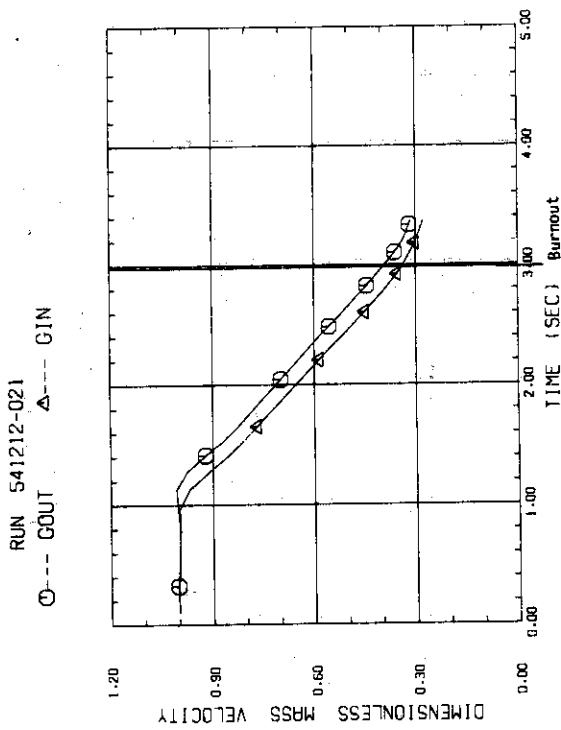
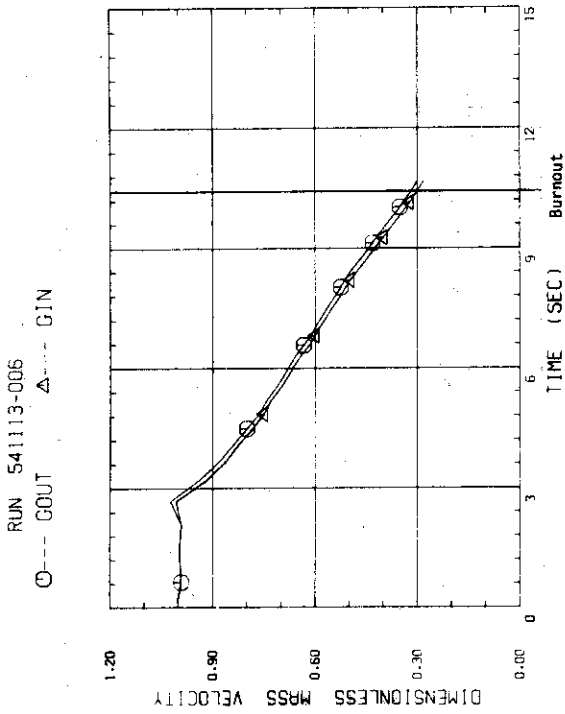


Fig.A4-5 Example of calculated results(9)
 (P=1.94MPa, $T_{in}=162^{\circ}\text{C}$,
 FR=33.4%/sec)



RUN 541113-006

○--- QUALITY △--- VOID +--- SAT.LINE

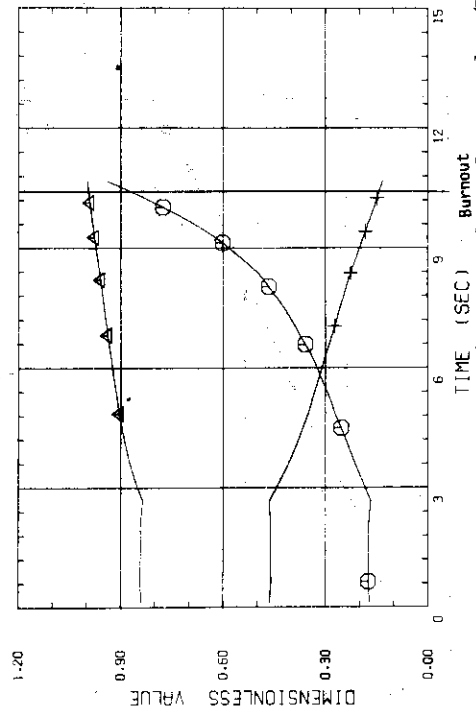
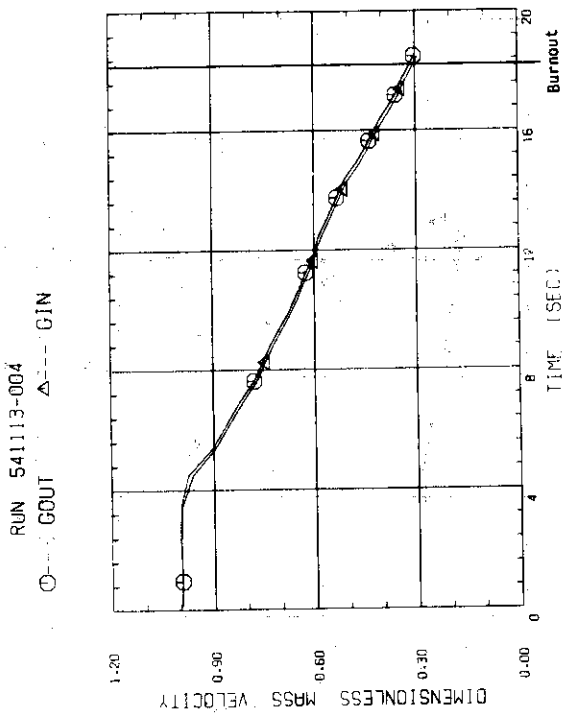


Fig.A5-3 Example of calculated results(2)
 (P=3.01MPa, $T_{in}=180^{\circ}\text{C}$,
 FR=8.74%/sec)



RUN 541113-004

○--- QUALITY △--- VOID +--- SAT.LINE

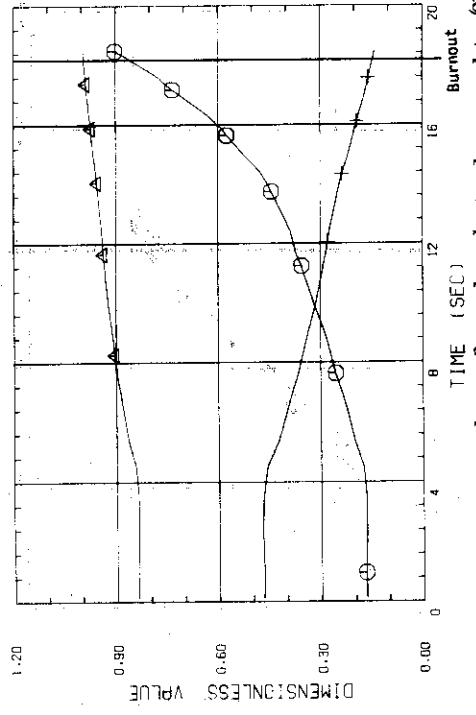


Fig.A5-2 Example of calculated results(2)
 (P=3.0 MPa, $T_{in}=180^{\circ}\text{C}$,
 FR=4.9%/sec)

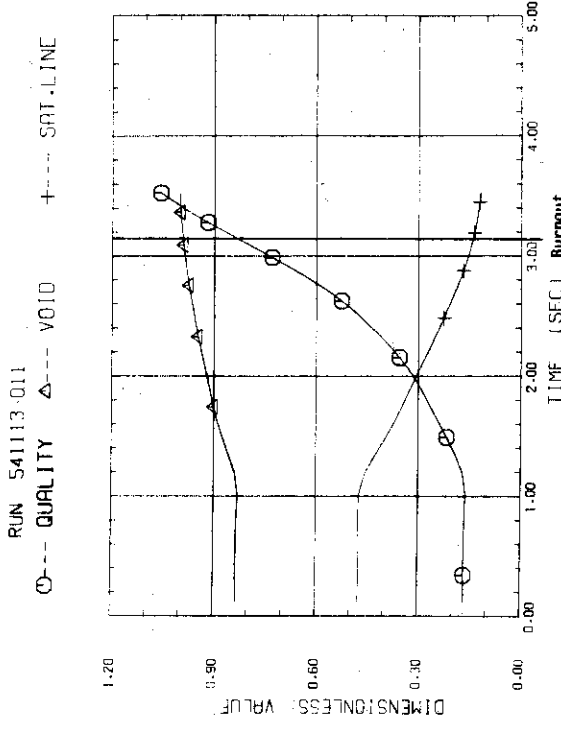
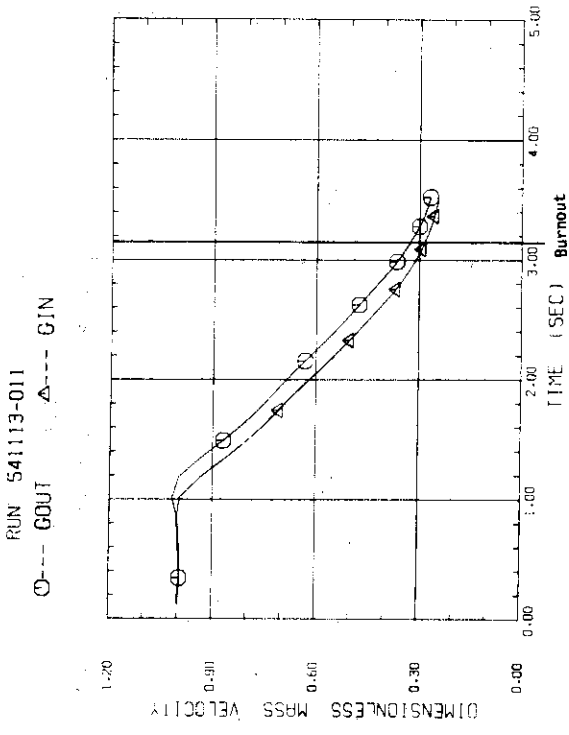


Fig.A5-5 Example of calculated results(2)
 (P=3.01MPa, $T_{in}=180^{\circ}\text{C}$,
 FR=32.8%/sec)

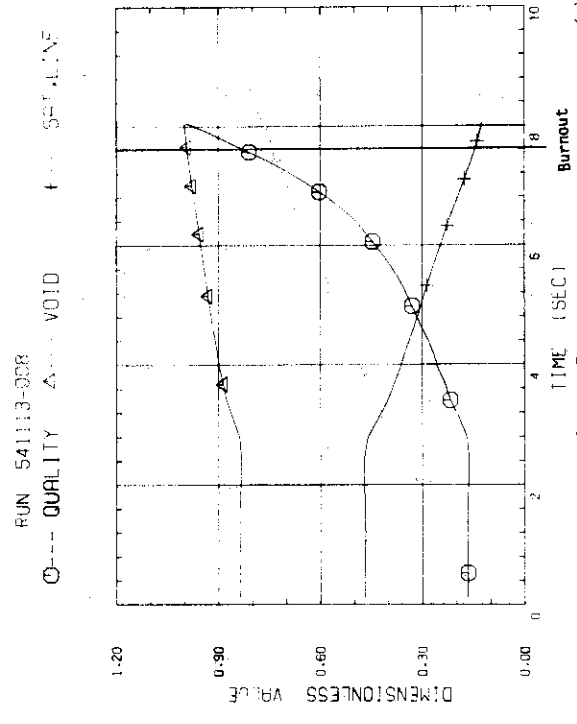
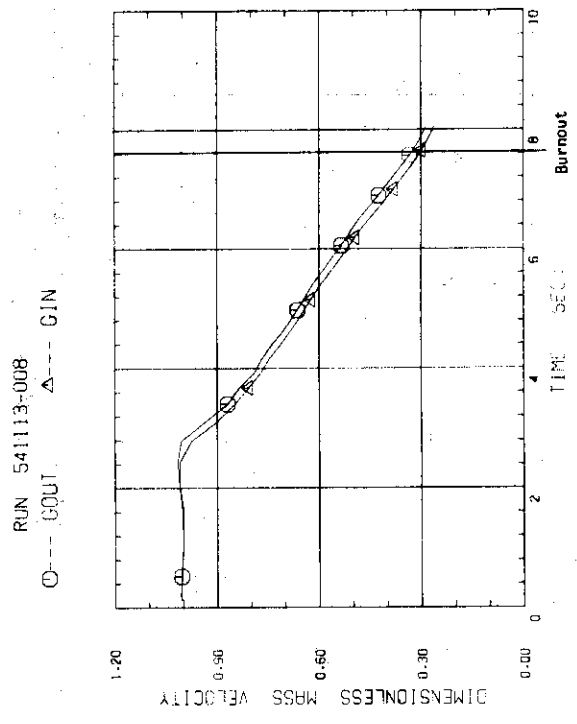


Fig.A5-4 Example of calculated results(2)
 (P=3.0MPa, $T_{in}=181^{\circ}\text{C}$,
 FR=13.3%/sec)

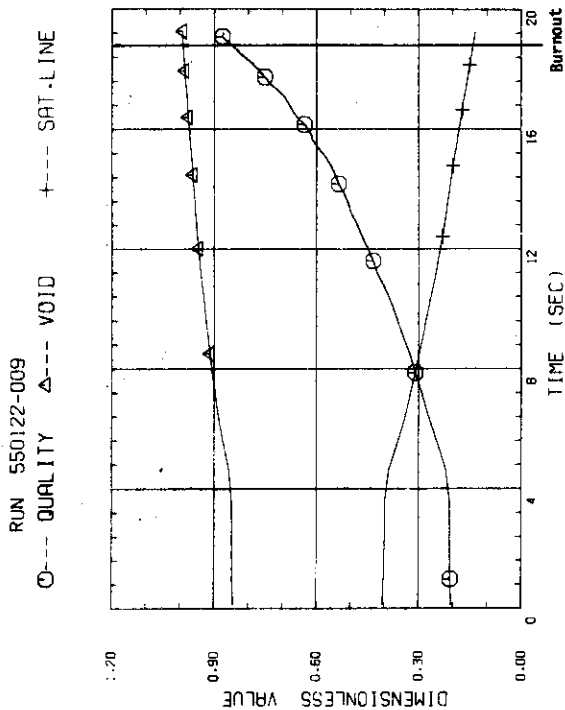
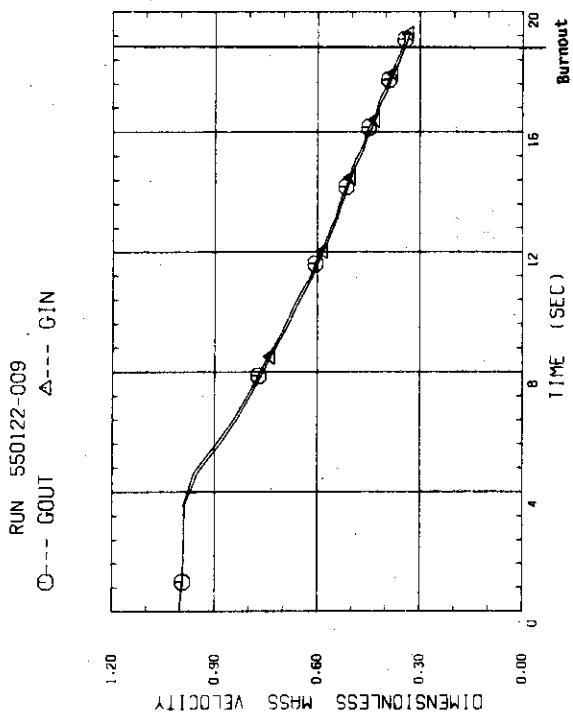


Fig.A6-2 Example of calculated results(2)
 (P=383MPa, $T_{in}=200^{\circ}\text{C}$,
 FR=3.93%/sec)

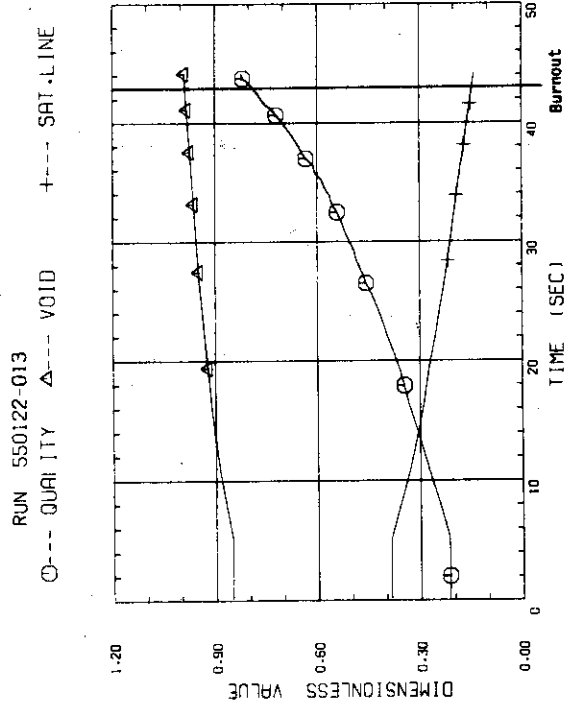
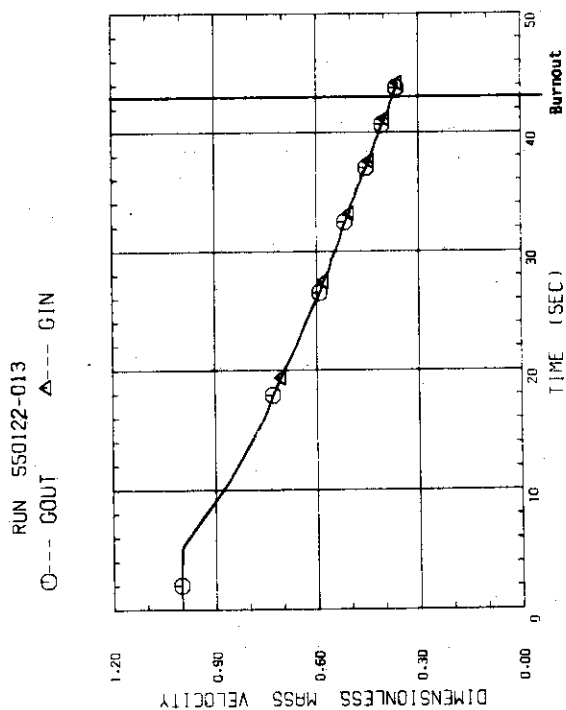


Fig.A6-1 Example of calculated results(2)
 (P=386MPa, $T_{in}=202^{\circ}\text{C}$,
 FR=1.51%/sec)

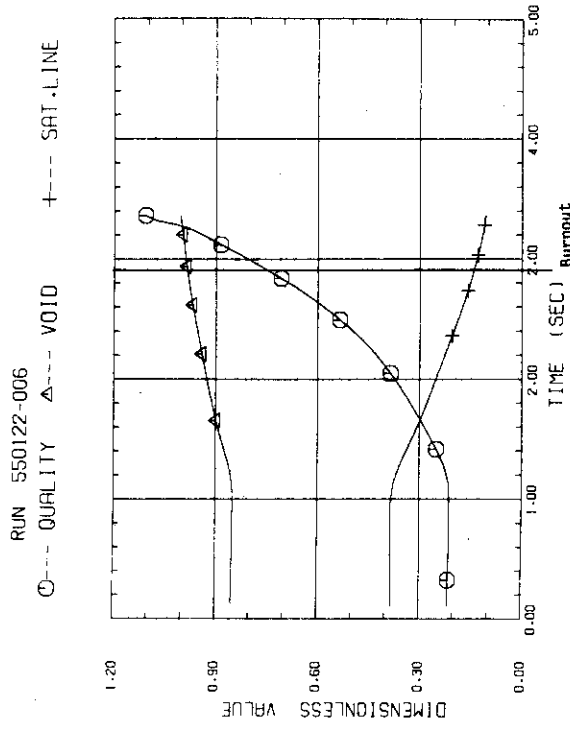
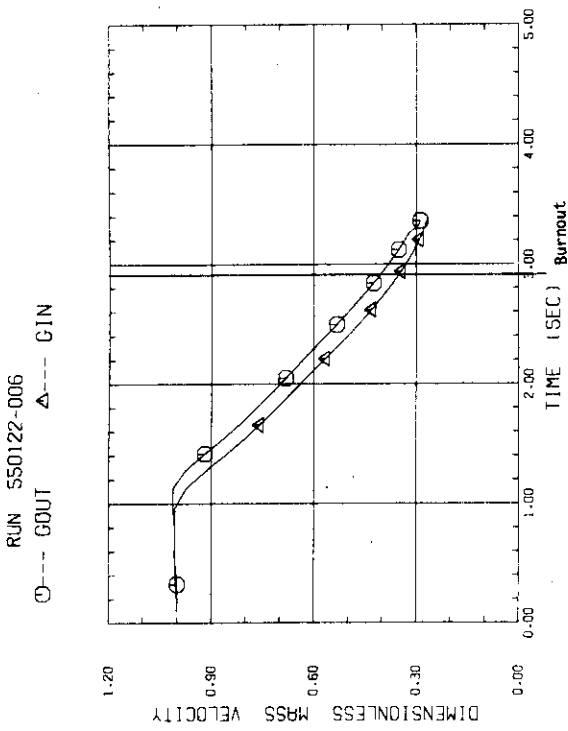


Fig.A6-4 Example of calculated results(28)
 ($P=3.86\text{MPa}$, $T_{in}=202^{\circ}\text{C}$,
 $FR=3.34\%/sec$)

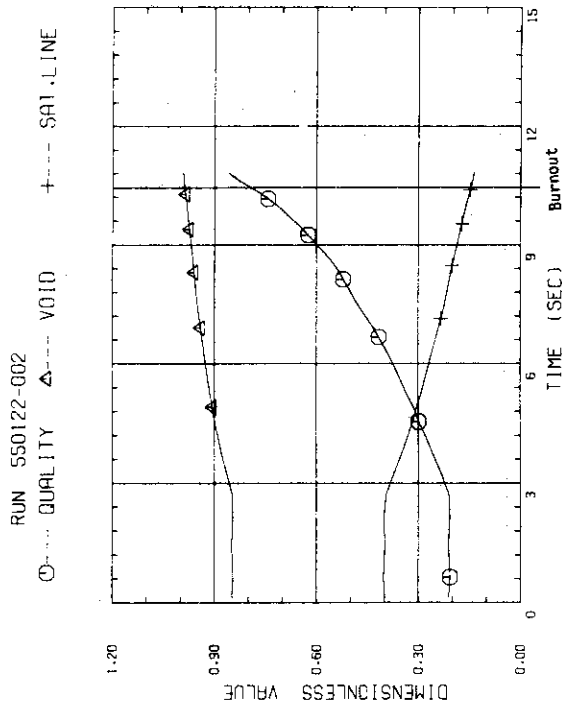
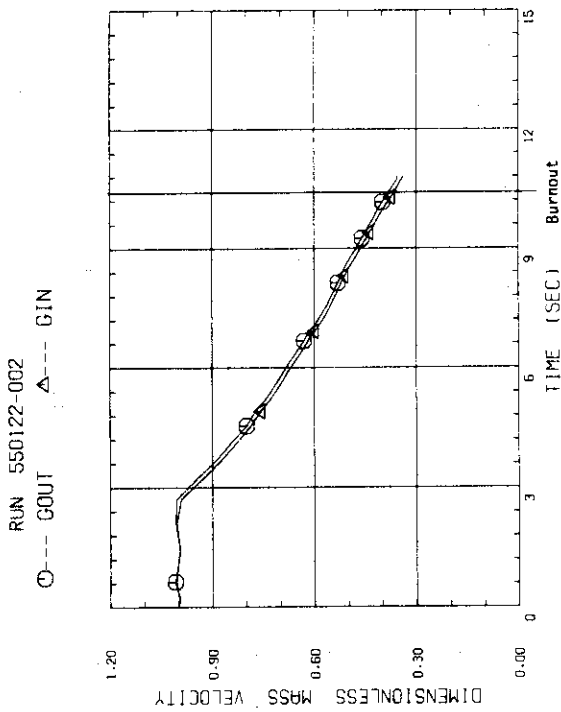


Fig.A6-3 Example of calculated results(27)
 ($P=3.85\text{MPa}$, $T_{in}=200^{\circ}\text{C}$,
 $FR=6.65\%/sec$)

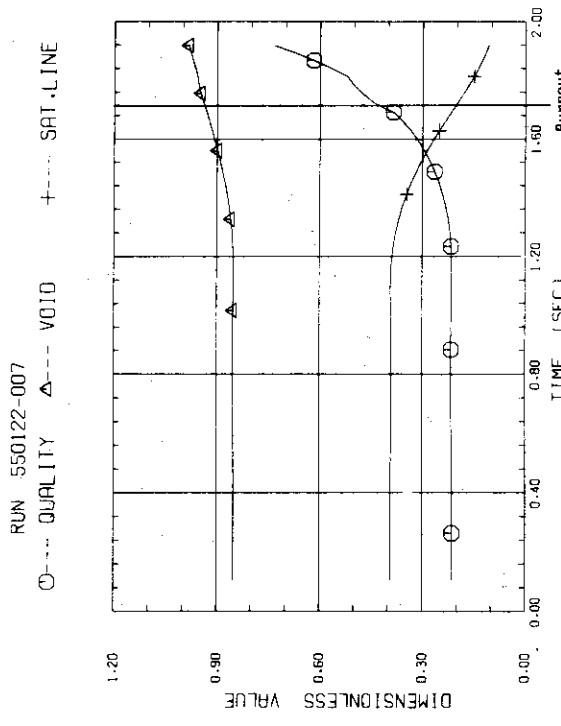
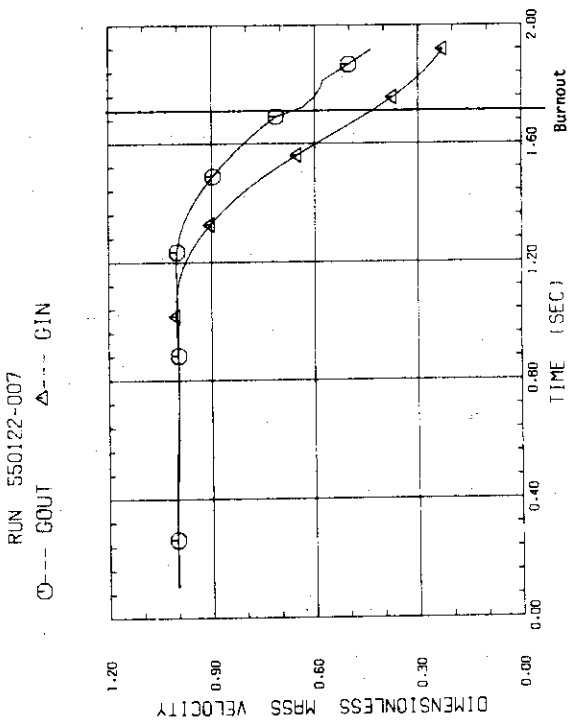


Fig. A6-5 Example of calculated results(29)
 ($P=3.83\text{MPa}$, $T_{in}=200^{\circ}\text{C}$, $FR=112\%/sec$)

付録B テスト部内部のクオリティ、ボイド率および質量速度の過渡変化計算例

Fig. B.1~B.4 には、それぞれ、圧力が0.5MPaおよび3.9MPaで、流速減少率が小さい場合と大きい場合について、テスト部内部の各位置におけるボイド率とクオリティの過渡変化挙動の代表例を示す。また、Fig. B.5, B.6, B.7 には流速減少率の比較的大きな場合について、テスト内部の質量速度の過渡変化挙動を示す。これらの図には、実験条件、流速減少率、バーンアウト発生時刻等も示してある。

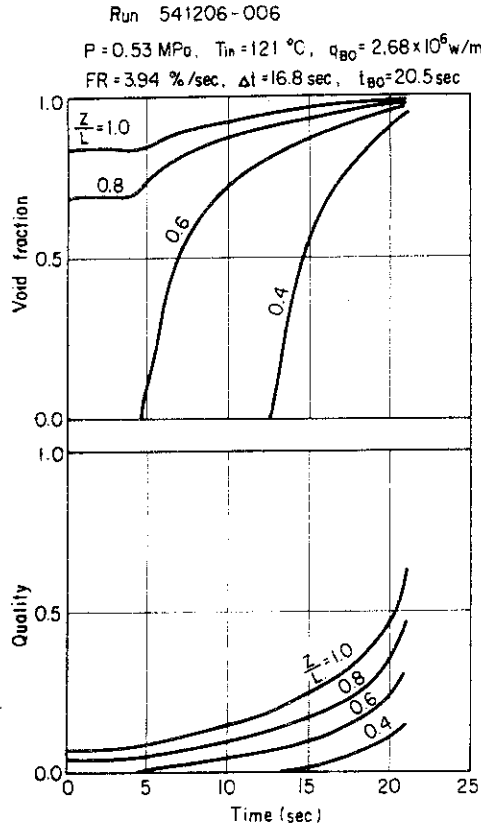


Fig. B.1 Void fraction and quality in test section ($P = 0.53 \text{ MPa}$, $FR = 3.94 \text{ \% / sec}$)

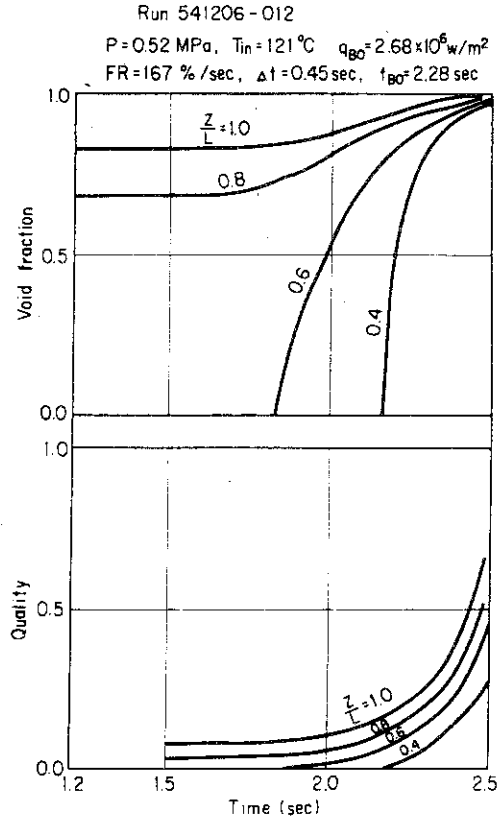


Fig. B.2 Void fraction and quality in test section ($P = 0.52 \text{ MPa}$, $FR = 167 \text{ \% / sec}$)

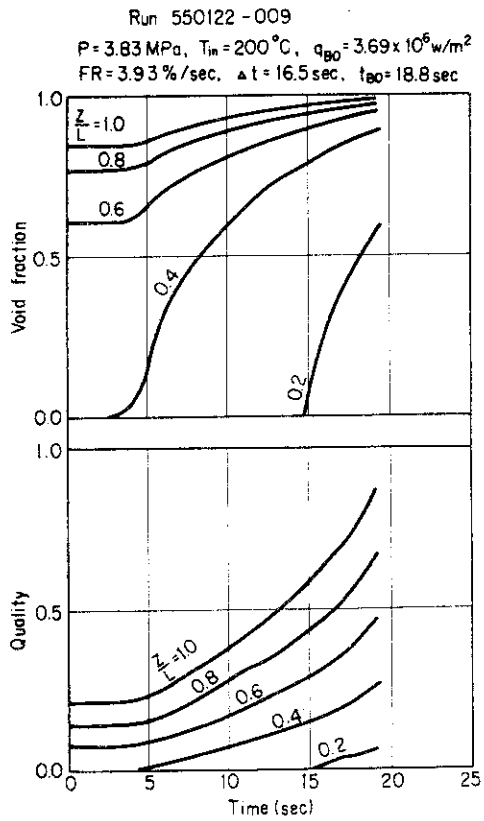


Fig. B.3 Void fraction and quality in test section ($P = 3.83 \text{ MPa}$, $FR = 3.93 \text{ \% / sec}$)

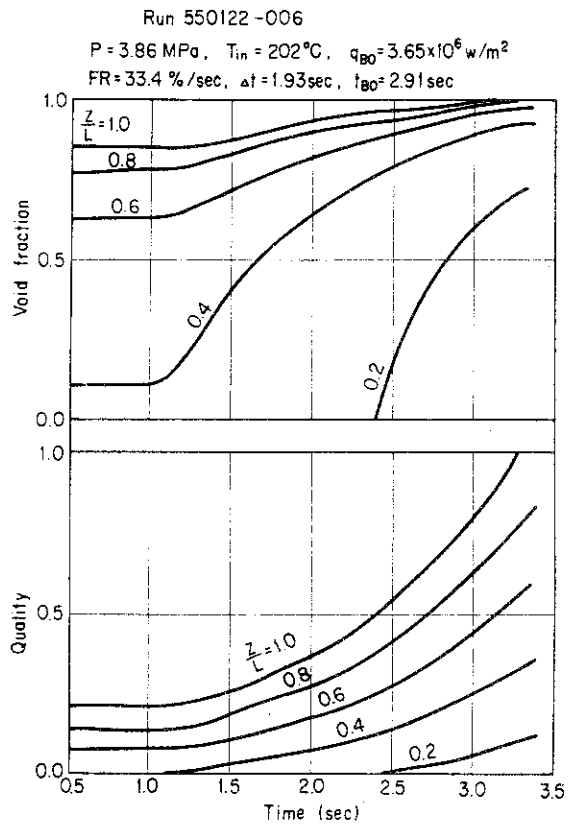


Fig. B.4 Void fraction and quality in test section ($P = 3.86 \text{ MPa}$, $FR = 33.4 \text{ \% / sec}$)

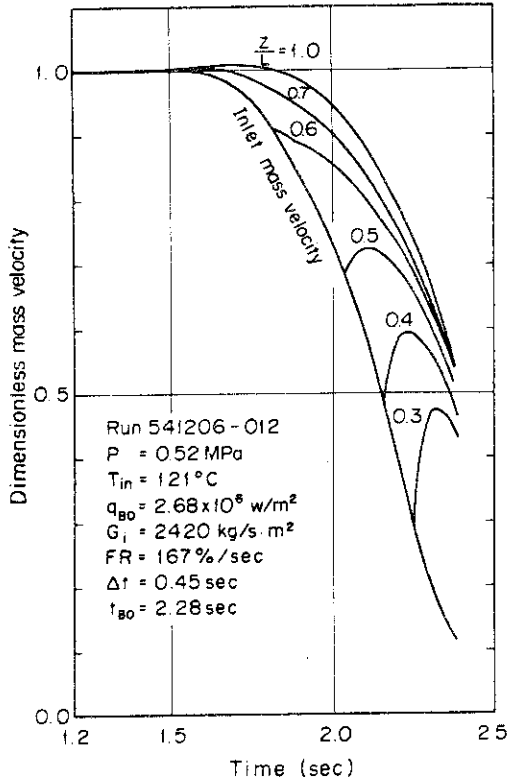


Fig. B.5 Dimensionless mass velocity in test section (P=0.52MPa, FR=167%/sec)

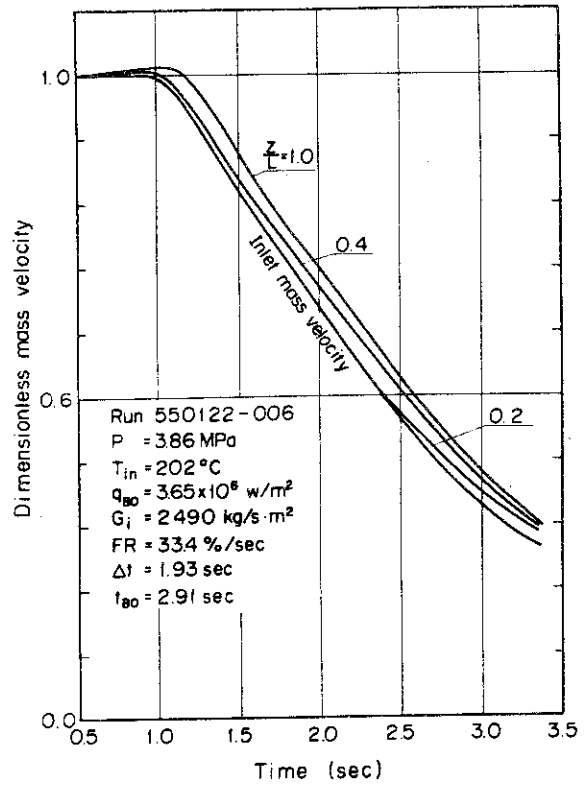


Fig. B.6 Dimensionless mass velocity in test section (P=3.86MPa, FR=33.4%/sec)

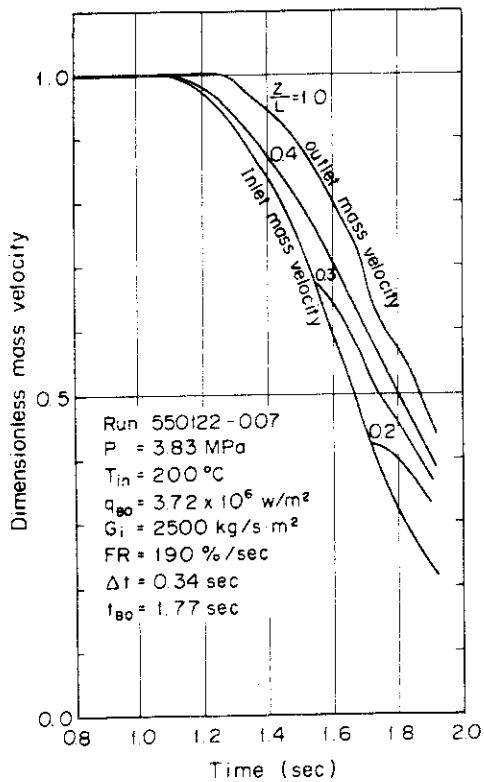


Fig. B.7 Dimensionless mass velocity in test section (P=3.83MPa, FR=190%/sec)

付録C 流量低下バーンアウト実験の実験条件および 計算結果

流量低下バーンアウト実験(381ケース)の各Runごとの実験条件と、バーンアウト発生時の入口および出口質量速度(G_{BO}^i および G_{BO}^{out})、出口クオリティ(X_{BO}^{out})、出口/入口質量速度比(G_{BO}^{out}/G_{BO}^i)、入口と出口の質量速度と定常バーンアウト質量速度の比(G_{BO}^i/G_{BO}^s および G_{BO}^{out}/G_{BO}^s)を、圧力が約0.5, 1, 2, 3, 3.9 MPaの各場合について、Table C. 1~C. 5にそれぞれ示す。

Table C.1 Experimental condition and calculated results(P=0.5MPa)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO} ⁶ ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541206- 45	0.5 1	120	2.1 7	1300	806	0.6 3	793	802	0.387	1.012	0.983	0.996
- 46	"	"	2.1 6	1290	"	1.2 5	838	844	0.379	1.007	1.040	1.047
- 47	0.5 3	"	2.1 7	"	"	2.7 0	744	784	0.445	1.055	0.923	0.973
- 48	0.5 4	"	2.1 5	1300	"	3.9 3	724	763	0.438	1.054	0.898	0.947
- 49	0.5 1	"	2.1 7	1280	"	5.8 6	646	702	0.524	1.087	0.801	0.870
- 50	0.5 3	"	"	1290	"	8.4 0	619	669	0.543	1.079	0.768	0.829
- 51	0.5 5	"	2.1 6	1310	"	5.2 0	658	702	0.565	1.066	0.817	0.871
- 52	0.5 2	121	"	1290	"	3.6 5	706	741	0.483	1.049	0.876	0.920
- 36	0.5 1	122	2.1 6	2450	"	6.7 3	699	750	0.487	1.074	0.867	0.931
- 37	0.5 3	"	2.1 5	2480	"	1.7 0	742	769	0.458	1.036	0.921	0.954
- 38	0.5 1	119	2.1 7	"	"	2.2 3	755	"	0.429	1.019	0.936	"
- 39	0.5 2	121	2.1 6	2470	"	3.4 0	783	823	0.414	1.052	0.971	1.021
- 40	0.5 0	"	"	2430	"	-	-	-	-	-	-	-
- 41	0.5 1	120	"	2470	"	3.7 6	-	-	-	-	-	-
- 42	0.5 3	121	"	2490	"	4.4 0	671	707	0.515	1.054	0.832	0.877
- 43	0.5 2	120	2.1 8	2480	"	5.1 2	638	694	0.545	1.088	0.792	0.861
- 44	0.5 3	"	2.1 6	2520	"	7.7 4	569	652	0.566	1.147	0.705	0.809
541206- 53	0.5 1	120	2.6 8	1230	983	0.9 4	952	969	0.412	1.018	0.969	0.986
- 54	0.5 4	121	2.6 6	1250	"	2.4 0	876	890	0.460	1.015	0.892	0.905
- 55	0.5 5	"	2.6 7	1260	"	4.9 7	838	876	0.482	1.045	0.853	0.891
- 56	0.5 3	120	"	1250	"	1.3 3	760	826	0.539	1.088	0.773	0.841
- 57	0.5 2	120	"	"	"	2.9 0	653	788	0.602	1.207	0.664	0.802
- 58	"	"	"	1240	"	1.3 9	918	925	0.436	1.008	0.934	0.941
- 59	0.5 3	"	2.6 8	"	"	3.1 1	861	897	0.473	1.041	0.876	0.912
- 60	0.5 2	"	2.6 7	"	"	5.5 2	917	949	0.416	1.035	0.933	0.966
- 61	0.5 1	"	2.6 8	1230	"	1.6 5	762	846	0.512	1.110	0.775	0.860
- 62	0.4 9	"	"	1210	"	-	-	-	-	-	-	-
- 13	0.5 2	121	2.6 7	1710	"	0.6 9	1016	1029	0.377	1.013	1.033	1.047
- 14	0.5 6	119	"	1780	"	1.4 8	887	900	0.465	1.015	0.902	0.915
- 15	0.5 5	"	"	1760	"	2.9 3	869	"	0.460	1.036	0.884	0.916
- 16	0.5 4	120	2.6 6	1740	"	3.9 7	841	894	0.493	1.063	0.855	0.910
- 17	"	121	"	1730	"	6.0 7	813	863	0.526	1.062	0.827	0.878
- 18	0.5 3	"	"	1720	"	1.0 1	724	796	0.593	1.100	0.737	0.810
- 19	0.5 7	121	2.6 7	1760	"	1.4 5	681	757	0.624	1.111	0.693	0.770
- 20	0.5 6	"	2.7 0	1740	"	2.7 4	582	678	0.655	1.164	0.592	0.690
541206- 1	0.5 3	120	2.7 1	2430	983	1.4 0	757	853	0.552	1.127	0.770	0.868
- 2	0.5 2	122	2.6 7	2410	"	1.4 9	963	990	0.459	1.028	0.979	1.007
- 3	0.5 6	120	"	2520	"	2.0 1	927	940	0.431	1.014	0.943	0.956
- 4	"	"	"	2510	"	2.9 4	912	959	0.456	1.052	0.928	0.976

Table C.1 Continue (1)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO6} ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541206- 5	0.56	118	2.66	2570	983	3.42	829	864	0.494	1.042	0.843	0.879
- 6	0.53	121	2.68	2460	"	3.94	846	876	0.525	1.036	0.861	0.891
- 7	0.56	119	2.66	2560	"	5.48	813	861	0.495	1.059	0.827	0.876
- 8	0.54	122	2.65	2460	"	8.11	816	881	0.511	1.080	0.830	0.896
- 9	0.51	"	2.67	2400	"	1.08	757	831	0.578	1.098	0.770	0.845
- 10	0.54	121	2.66	2470	"	1.54	734	833	0.556	1.134	0.747	0.847
- 11	0.52	"	2.67	2420	"	-	-	-	-	-	-	-
- 12	"	"	2.68	"	"	1.67	-	-	-	-	-	-
541206- 21	0.50	119	3.21	2250	1220	7.17	1107	1161	0.430	1.048	0.906	0.950
- 22	"	120	"	2190	"	1.83	1178	1192	0.389	1.011	0.964	0.975
- 23	0.54	121	"	2280	"	2.47	1211	1224	0.374	1.011	0.991	1.002
- 24	0.50	"	"	2180	"	3.36	1135	1157	0.413	1.019	0.929	0.947
- 25	0.51	"	3.22	2220	"	4.05	1199	1232	0.387	1.028	0.981	1.008
- 26	0.53	120	3.21	2280	"	4.57	1201	1244	0.373	1.036	0.983	1.018
- 27	"	122	3.22	2240	"	5.78	1204	1245	0.384	1.035	0.985	1.019
- 28	0.51	121	"	2210	"	8.48	1177	1226	0.391	1.042	0.963	1.003
- 29	0.52	"	3.23	2230	"	1.09	1100	1160	0.413	1.054	0.900	0.949
- 30	0.51	"	3.22	2220	"	16.0	1026	1119	0.453	1.091	0.840	0.916
- 31	0.50	"	3.21	2210	"	21.5	993	1127	0.489	1.135	0.813	0.923
- 32	"	120	"	2200	"	33.7	803	960	0.593	1.195	0.657	0.785
- 33	0.49	"	3.22	2170	"	0.95	1216	1231	0.383	1.012	0.995	1.007
- 34	0.52	122	3.20	2210	"	13.2	1013	1088	0.469	1.074	0.829	0.890
- 35	0.49	121	3.23	2160	"	14.7	945	1741	0.291	1.843	0.773	1.425
550124- 1	0.49	120	3.81	1760	1230	4.35	1225	1262	0.456	1.030	0.996	1.026
- 2	0.48	119	"	1800	"	5.85	1153	1192	0.495	1.034	0.937	0.969
- 3	0.47	117	3.82	1810	"	7.33	1122	1172	0.500	1.045	0.912	0.953
- 4	0.48	120	3.82	1790	"	8.38	1108	1155	0.517	1.042	0.901	0.939
- 5	0.47	117	3.80	1810	"	10.2	1115	1172	0.507	1.051	0.906	0.952
- 6	0.48	120	3.81	"	"	13.5	1024	1160	0.580	1.074	0.832	0.894
- 7	0.51	117	3.82	1940	"	31.0	965	1112	0.563	1.152	0.785	0.904
- 8	0.52	119	"	1880	"	11.2	-	-	-	-	-	-
- 9	0.55	"	3.78	2000	"	3.65	1176	1209	0.473	1.028	0.956	0.983
- 10	0.52	116	3.82	1970	"	3.05	-	-	-	-	-	-
- 11	0.54	119	3.81	1950	"	2.55	1201	1216	0.461	1.012	0.976	0.988
- 12	0.52	116	"	"	"	2.41	1224	1253	0.438	1.024	0.995	1.019
- 13	0.54	118	"	"	"	1.50	1214	1226	0.454	1.010	0.987	0.996
- 14	0.51	120	3.82	1850	"	1.07	1150	1150	0.507	1.000	0.935	0.935
- 15	0.53	117	"	1930	"	0.78	1188	1197	0.475	1.007	0.966	0.973
- 16	0.54	120	"	1940	"	0.65	-	-	-	-	-	-

Table C.1 Continue (2)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO6} ×10 ⁶ (W/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541115-105	0.59	66	2.69	3050	770	6.88	643	762	0.400	1.186	0.835	0.990
-106	0.58	"	2.70	3010	"	1.76	745	759	0.386	1.018	0.968	0.985
-107	0.52	"	2.71	2980	"	20.0	672	792	0.374	1.179	0.872	1.028
-108	0.55	"	2.70	3000	"	2.35	763	785	0.368	1.028	0.991	1.019
-109	0.58	65	"	2970	"	3.54	"	797	0.362	1.045	0.990	1.035
-110	0.56	"	2.69	2970	"	4.67	714	762	0.387	1.068	0.927	0.990
-111	"	"	2.70	2990	"	5.79	667	736	0.415	1.104	0.866	0.956
-112	0.58	"	"	3000	"	8.67	620	754	0.414	1.218	0.804	0.980
-113	0.54	66	"	2990	"	11.4	651	789	0.381	1.212	0.845	1.025
-114	0.52	65	2.71	2980	"	13.0	653	757	0.398	1.160	0.848	0.983
-115	0.53	"	2.70	2990	"	16.3	520	739	0.427	1.420	0.675	0.959
-116	0.52	"	2.72	"	"	30.9	690	874	0.335	1.267	0.896	1.136
-117	0.51	"	2.71	2980	"	—	—	—	—	—	—	—
541115- 91	0.60	65	3.56	3030	1230	7.27	1109	1187	0.297	1.071	0.901	0.965
- 92	0.58	"	3.57	2990	"	2.34	1090	1125	0.315	1.032	0.886	0.914
- 93	"	"	3.56	3000	"	3.48	1100	1147	0.305	1.043	0.894	0.932
- 94	"	"	"	3010	"	4.76	1106	1164	0.297	1.053	0.899	0.946
- 95	"	"	3.55	2990	"	5.85	1025	1098	0.330	1.071	0.833	0.892
- 96	0.55	66	"	2970	"	8.85	1149	1240	0.270	1.080	0.933	1.008
- 97	0.53	"	"	2930	"	11.9	1056	1184	0.306	1.121	0.858	0.962
- 98	0.53	"	"	2910	"	10.5	974	1105	0.339	1.134	0.792	0.898
- 99	0.55	"	"	2950	"	16.8	1124	1282	0.265	1.140	0.913	1.041
-100	"	"	"	"	"	30.7	1038	1248	0.284	1.202	0.843	1.013
-101	"	"	3.56	2970	"	34.7	816	1004	0.391	1.231	0.663	0.815
-102	0.56	65	3.59	"	"	11.3	—	—	—	—	—	—
-103	0.62	"	3.56	3030	"	1.76	1237	1264	0.252	1.022	1.005	1.027
-104	0.59	"	3.54	3010	"	0.86	1240	1250	0.248	1.008	1.007	1.015

Table C.2 Experimental conditions and calculated results (P=1MPa)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO} ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541207-113	1.01	142	3.22	1640	817	1.50	817	827	0.716	1.013	1.000	1.013
-114	1.04	140	3.19	1680	"	2.99	780	791	0.707	1.014	0.955	0.968
-115	"	142	3.20	1660	"	4.11	753	775	0.737	1.029	0.922	0.948
-116	1.09	140	3.19	1710	"	5.89	722	749	0.758	1.037	0.884	0.916
-117	"	142	3.20	1700	"	10.2	717	756	0.762	1.055	0.877	0.926
-118	1.07	141	3.21	1690	"	27.4	711	808	0.715	1.137	0.870	0.989
-119	"	"	3.20	"	"	0.77	810	821	0.672	1.013	0.992	1.005
541207-101	1.04	137	3.19	2560	"	32.2	742	852	0.655	1.148	0.908	1.042
-102	0.99	141	"	2480	"	1.67	763	790	0.734	1.036	0.933	0.967
-103	1.06	"	3.21	2550	"	2.30	747	758	0.763	1.015	0.914	0.928
-104	1.09	142	3.23	"	"	3.45	757	774	0.750	1.022	0.927	0.948
-105	1.08	141	3.19	"	"	3.97	765	781	0.723	1.020	0.936	0.956
-106	1.05	140	3.20	2530	"	4.75	811	835	0.666	1.030	0.992	1.022
-107	1.06	141	3.19	2540	"	5.44	796	823	0.680	1.034	0.974	1.007
-108	1.08	142	3.20	2530	"	6.58	742	767	0.751	1.033	0.909	0.938
-109	"	139	3.19	"	"	8.37	716	753	0.755	1.052	0.876	0.921
-110	1.07	142	"	2550	"	11.1	722	763	0.762	1.058	0.883	0.934
-111	1.05	140	"	2540	"	16.5	765	838	0.670	1.096	0.936	1.026
-112	1.07	"	"	2560	"	-	-	-	-	-	-	-
541210-15	1.06	139	3.79	2020	1180	0.77	1175	1167	0.526	0.993	0.996	0.989
-16	1.01	"	3.80	2000	"	1.54	1110	1100	0.568	0.992	0.940	0.932
-17	1.06	141	"	2010	"	10.2	1069	1113	0.584	1.041	0.906	0.944
-18	1.10	"	"	2040	"	3.16	1168	1183	0.528	1.013	0.990	1.003
-19	1.07	137	3.79	2060	"	-	-	-	-	-	-	-
-20	1.02	142	3.80	1970	"	6.24	1031	1054	0.640	1.023	0.873	0.893
-21	1.06	"	"	1990	"	7.80	1028	1063	0.632	1.034	0.871	0.900
-22	1.03	141	3.76	2010	"	15.2	1021	1083	0.604	1.060	0.866	0.918
-23	1.01	139	3.80	"	"	33.0	1001	1141	0.579	1.140	0.848	0.967
541210-1	1.02	139	3.80	2360	"	30.9	1095	1224	0.517	1.118	0.928	1.037
-2	1.11	142	3.78	2390	"	6.55	1102	1130	0.545	1.025	0.934	0.957
-3	1.08	140	3.79	2490	"	1.72	1178	1193	0.508	1.012	0.998	1.011
-4	1.00	"	3.78	2420	"	2.15	1170	1186	0.531	1.013	0.992	1.005
-5	1.08	141	3.79	2510	"	3.36	1172	1185	0.512	1.011	0.994	1.004
-6	"	140	3.79	2510	"	3.89	1151	1167	0.518	1.014	0.975	0.989
-7	"	"	3.77	"	"	4.60	1098	1121	0.551	1.020	0.931	0.950
-8	1.07	"	3.79	2500	"	5.21	1112	1136	0.556	1.021	0.943	0.963
-9	1.04	139	"	2490	"	-	-	-	-	-	-	-
-10	1.06	141	3.80	"	"	8.18	1089	1124	0.579	1.032	0.923	0.952
-11	1.10	"	3.79	"	"	11.5	1054	1113	0.585	1.057	0.893	0.943
-12	1.07	139	3.78	"	"	15.9	1045	1122	0.569	1.074	0.885	0.951

Table C.2 Continue (1)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO} ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541210- 13	1.08	142	3.80	2490	1180	35.0	1034	1202	0.549	1.162	0.877	1.019
- 14	1.09	139	"	"	"	138	-	-	-	-	-	-
550109- 10	0.95	91	3.19	1710	853	5.58	862	900	0.454	1.044	1.011	1.055
- 11	0.94	"	3.22	1700	"	6.80	834	873	0.480	1.047	0.977	1.024
- 12	0.95	92	3.20	1710	"	1.68	757	767	0.565	1.013	0.887	0.899
- 13	0.96	"	"	"	"	2.29	781	795	0.538	1.017	0.916	0.932
- 14	0.95	89	3.21	"	"	3.42	888	904	0.447	1.019	1.041	1.060
- 15	0.93	"	3.20	1720	"	4.24	756	774	0.555	1.025	0.886	0.908
- 16	0.96	90	3.21	1730	"	5.37	740	768	0.568	1.037	0.868	0.900
- 17	0.91	89	3.20	1710	"	8.29	833	878	0.467	1.054	0.977	1.030
- 18	0.95	91	3.21	"	"	11.5	764	824	0.524	1.078	0.896	0.966
- 19	0.92	90	3.20	1700	"	21.7	778	891	0.471	1.146	0.912	1.045
- 20	0.95	"	"	1710	"	28.9	646	791	0.566	1.225	0.757	0.928
- 21	0.92	89	3.19	1690	"	-	-	-	-	-	-	-
- 22	0.95	93	"	"	"	-	-	-	-	-	-	-
- 23	0.96	91	3.21	1710	"	0.89	839	840	0.491	1.001	0.984	0.985
550109- 1	0.93	89	3.20	2570	"	5.98	753	795	0.509	1.056	0.883	0.932
- 2	0.96	90	3.22	2560	"	10.5	814	882	0.448	1.084	0.954	1.034
- 3	0.94	"	3.21	"	"	13.3	724	788	0.532	1.089	0.848	0.924
- 4	0.97	"	3.20	2570	"	31.4	631	795	0.534	1.260	0.740	0.932
- 5	0.96	"	3.21	2540	"	4.45	766	801	0.512	1.046	0.898	0.939
- 6	0.95	89	3.22	2550	"	3.70	856	885	0.440	1.034	1.003	1.038
- 7	0.93	91	"	2530	"	2.93	874	896	0.436	1.026	1.024	1.051
- 8	0.95	93	"	2520	"	1.66	851	858	0.456	1.008	0.998	1.005
- 9	"	90	3.23	2550	"	0.81	777	782	0.507	1.007	0.911	0.917
550108-101	0.99	91	3.19	2990	"	5.98	804	847	0.459	1.054	0.942	0.993
-102	0.96	92	3.21	2980	"	7.12	816	864	0.449	1.060	0.956	1.013
-103	0.94	91	3.23	2970	"	9.57	694	752	0.554	1.083	0.814	0.881
-104	0.92	"	3.22	2980	"	10.4	748	820	0.488	1.097	0.877	0.962
-105	0.90	"	3.23	2990	"	13.0	759	851	0.471	1.121	0.890	0.998
-106	"	92	"	2950	"	16.7	752	862	0.468	1.147	0.881	1.011
-107	"	"	"	2960	"	37.8	749	906	0.443	1.209	0.878	1.062
-108	0.89	91	3.22	2980	"	-	-	-	-	-	-	-
-109	"	"	3.23	2960	"	4.63	-	-	-	-	-	-
-110	"	92	3.22	2940	"	3.69	798	825	0.478	1.033	0.936	0.967
-111	0.90	90	3.23	2970	"	3.66	-	-	-	-	-	-
-112	"	92	"	"	"	2.92	778	800	0.500	1.029	0.912	0.938
-113	0.91	"	"	2960	"	2.16	820	833	0.466	1.017	0.961	0.977
-114	"	"	"	"	"	1.59	843	855	0.449	1.015	0.988	1.003

Table C.2 Continue (2)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO} ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
550109- 24	0.93	90	3.85	1710	1305	6.91	1051	1086	0.452	1.033	0.806	0.833
- 25	0.94	89	3.80	1740	"	10.8	1304	1381	0.302	1.060	0.999	1.059
- 26	"	91	3.82	1730	"	16.5	1139	1247	0.370	1.094	0.873	0.955
- 27	0.96	93	"	"	"	31.6	966	1148	0.432	1.189	0.740	0.880
- 28	0.99	90	3.80	1750	"	—	—	—	—	—	—	—
- 29	0.93	"	3.82	1720	"	7.92	1218	1266	0.352	1.040	0.933	0.970
- 30	"	"	3.80	"	"	5.24	1229	1255	"	1.021	0.942	0.961
- 31	0.91	89	3.82	"	"	4.35	1023	1047	0.468	1.024	0.784	0.803
- 32	0.95	92	3.81	1730	"	3.53	1115	1135	0.419	1.018	0.854	0.870
- 33	"	"	3.79	1720	"	2.19	1242	1254	0.351	1.009	0.952	0.961
- 34	0.94	93	3.80	"	"	1.64	1181	1192	0.384	"	0.905	0.913
- 35	0.93	"	"	"	"	1.12	1325	1317	0.325	0.994	1.016	1.009
550109- 36	0.94	91	3.81	2580	"	9.30	1136	1197	0.376	1.053	0.871	0.917
- 37	"	"	"	"	"	11.7	1133	1216	0.369	1.073	0.868	0.931
- 38	0.95	"	3.82	2620	"	11.6	1225	1290	0.333	1.053	0.939	0.989
- 39	0.94	93	3.81	2580	"	16.0	—	—	—	—	—	—
- 40	0.96	"	3.80	2590	"	21.9	1079	1230	0.373	1.140	0.827	0.942
- 41	"	92	3.82	2600	"	35.1	906	1132	0.435	1.250	0.694	0.867
- 42	0.95	"	"	2590	"	—	—	—	—	—	—	—
- 43	0.93	91	3.81	"	"	5.61	1276	1318	0.320	1.033	0.977	1.010
- 44	0.94	"	"	"	"	4.58	1139	1176	0.384	1.032	0.873	0.901
- 45	0.96	93	"	"	"	3.86	1183	1214	0.366	1.026	0.907	0.930
- 46	"	"	"	2580	"	3.36	1175	1190	0.375	1.013	0.900	0.912
- 47	0.94	91	3.80	2630	"	2.31	1116	1128	0.395	1.010	0.855	0.864
- 48	0.96	92	3.78	2620	"	1.76	1180	1203	0.359	1.013	0.910	0.922
- 49	0.95	"	3.83	2590	"	1.16	1301	1311	0.320	1.008	0.997	1.005
- 50	0.96	91	3.81	2630	"	0.82	1308	1314	0.308	1.004	1.003	1.007

Table C.3 Experimental conditions and calculated results (P=2MPa)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO} ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541211-114	1.98	161	3.48	1340	775	1.34	753	758	0.827	1.006	0.972	0.978
-115	1.97	160	3.45	1350	"	2.59	732	745	0.839	1.017	0.945	0.961
-116	1.92	161	"	1340	"	3.67	-	-	-	-	-	-
-117	1.96	160	3.46	1350	"	5.55	731	753	0.833	1.030	0.943	0.971
-118	1.95	161	3.47	"	"	13.3	719	768	0.823	1.068	0.928	0.991
-119	1.98	160	3.46	1360	"	7.77	723	773	0.805	1.041	0.958	0.998
-120	1.96	"	3.45	1340	"	32.3	709	809	0.770	1.141	0.915	1.044
-121	"	"	"	1350	"	0.65	775	776	0.799	1.001	1.0	1.001
541211-101	2.01	161	3.45	1710	"	5.82	744	772	0.812	1.038	0.959	0.996
-102	1.95	"	3.46	"	"	1.40	737	741	0.851	1.006	0.951	0.957
-103	1.96	"	3.45	1700	"	1.90	745	753	0.823	1.010	0.962	0.972
-104	1.94	"	3.47	"	"	28.1	779	790	0.791	1.015	1.004	1.02
-105	1.92	"	"	1710	"	3.25	753	769	0.814	1.022	0.971	0.993
-106	1.93	"	3.46	"	"	3.77	742	758	0.834	1.021	0.958	0.978
-107	1.94	"	3.44	1720	"	4.55	733	753	0.825	1.029	0.945	0.972
-108	1.98	"	"	1740	"	7.01	716	742	0.850	1.037	0.924	0.958
-109	1.96	"	3.46	1720	"	9.42	736	775	0.812	1.053	0.950	1.000
-110	1.99	"	3.47	1730	"	13.5	707	759	0.840	1.074	0.912	0.979
-111	"	"	3.44	1750	"	30.5	709	807	0.780	1.140	0.914	1.042
-112	1.96	"	3.46	1730	"	16.1	739	1381	0.429	1.869	0.954	1.782
-113	1.95	"	"	"	"	0.73	768	774	0.782	1.008	0.991	0.998
541212- 1	1.99	162	3.46	2540	"	5.96	784	812	0.774	1.035	1.012	1.047
- 2	"	"	3.44	2550	"	3.89	759	775	0.809	1.021	0.979	1.000
- 3	1.96	161	"	2570	"	4.43	"	776	0.805	1.023	"	1.002
- 4	"	163	"	2530	"	7.08	744	774	0.820	1.041	0.959	0.998
- 5	1.95	161	"	2560	"	9.70	723	818	0.758	1.059	0.997	1.056
- 6	1.96	162	"	2570	"	13.7	741	799	0.788	1.079	0.956	1.031
- 7	1.94	"	3.48	2540	"	-	-	-	-	-	-	-
- 8	1.95	163	3.44	"	"	22.0	719	800	0.798	1.112	0.928	1.032
- 9	"	161	3.45	2530	"	-	-	-	-	-	-	-
- 10	1.97	163	3.46	2550	"	3.44	761	775	0.816	1.018	0.982	1.000
- 11	"	"	3.47	"	"	3.04	800	818	0.772	1.022	1.032	1.055
- 12	"	162	3.44	"	"	2.08	749	757	0.819	1.011	0.967	0.977
- 13	1.98	163	3.45	2560	"	1.53	748	754	0.828	1.007	0.965	0.973
- 14	"	161	3.47	"	"	25.3	746	848	0.746	1.138	0.962	1.095
541212- 27	1.97	162	3.75	1770	925	1.44	932	937	0.713	1.006	1.008	1.013
- 28	1.94	161	"	1760	"	3.75	907	922	0.726	1.017	0.980	0.997
- 29	1.98	160	3.77	1770	"	5.53	885	909	0.741	1.027	0.956	0.982
- 30	1.99	162	3.72	"	"	9.11	882	918	0.729	1.041	0.954	0.993
- 31	1.98	"	3.76	"	"	30.4	890	1013	0.666	1.138	0.963	1.095

Table C.3 Continue (1)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO} ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541212- 32	1.96	163	3.77	1760	925	0.69	929	932	0.714	1.002	1.004	1.006
541212- 15	1.96	162	3.74	2500	//	3.88	896	912	0.737	1.018	0.968	0.986
- 16	1.94	//	3.77	2470	//	4.51	907	927	0.731	1.023	0.980	1.002
- 17	1.97	161	3.76	2500	//	5.98	904	940	0.713	1.040	0.977	1.016
- 18	1.96	163	3.75	2480	//	7.21	909	944	0.724	1.038	0.983	1.020
- 19	1.98	//	3.77	2430	//	9.64	880	925	0.739	1.052	0.951	1.000
- 20	1.96	161	3.76	2480	//	13.8	888	951	0.714	1.071	0.960	1.029
- 21	1.94	162	//	2470	//	33.4	837	969	//	1.159	0.904	1.048
- 22	1.99	//	3.77	2500	//	3.67	907	926	0.732	1.021	0.980	1.001
- 23	1.97	164	3.76	2480	//	3.11	903	919	0.735	1.018	0.976	0.994
- 24	1.99	163	//	2500	//	2.19	887	898	0.744	1.012	0.959	0.970
- 25	1.97	164	3.73	2460	//	1.60	893	//	0.745	1.006	0.965	0.971
- 26	2.00	//	//	2480	//	1.24	-	-	-	-	-	-

Table C.4 Experimental conditions and calculated results (P=3MPa)

Run No.	Experimental Condition and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO6} ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ⁱ (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^i}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541113- 19	3.00	182	3.71	1290	838	1.95	816	825	0.868	1.010	0.979	0.989
- 20	"	183	3.72	"	"	5.45	824	841	0.853	1.021	0.988	1.009
- 21	2.99	181	3.70	"	"	7.98	820	844	0.839	1.030	0.983	1.012
- 22	3.00	"	3.71	"	"	15.0	796	842	0.848	1.057	0.955	1.009
- 23	3.01	182	3.72	1300	"	25.8	792	881	0.816	1.112	0.950	1.056
541109-106	3.00	184	3.70	1640	"	7.46	826	868	0.828	1.051	0.990	1.04
-107	3.01	182	3.72	1670	"	1.85	795	801	0.897	1.008	0.953	0.961
-108	3.00	183	3.70	1650	"	3.72	817	836	0.857	1.024	0.979	1.003
-109	"	180	"	1690	"	5.13	827	852	0.827	1.031	0.991	1.022
-110	3.03	"	3.69	1700	"	6.29	795	825	0.858	1.037	0.953	0.989
-111	3.02	"	3.72	1690	"	9.45	793	835	"	1.053	0.951	1.001
-112	3.04	"	3.70	"	"	12.5	781	839	0.848	1.075	0.936	1.006
-113	3.01	183	3.72	1680	"	14.8	801	859	0.842	1.072	0.960	1.029
-114	3.00	182	3.69	1690	"	17.9	770	850	0.846	1.103	0.924	1.019
-115	3.01	179	3.72	1680	"	23.3	782	880	0.810	1.125	0.937	1.055
-116	3.04	180	3.70	1710	"	30.2	742	852	0.844	1.149	0.889	1.021
-117	"	181	3.71	"	"	0.95	817	822	0.870	1.007	0.979	0.985
-118	3.01	180	"	1700	"	-	-	-	-	-	-	-
541113- 14	3.00	179	3.71	2130	"	6.71	779	814	0.876	1.045	0.934	0.976
- 15	2.98	182	"	2140	"	1.71	828	837	0.856	1.010	0.993	1.003
- 16	2.99	180	3.72	" 0	"	4.68	811	840	0.848	1.035	0.973	1.007
- 17	2.98	"	"	2150	"	13.4	816	883	0.807	1.081	0.979	1.058
- 18	2.97	181	"	2110	"	31.7	801	920	0.779	1.147	0.960	1.103
541113- 1	3.00	180	3.73	2610	"	7.33	816	856	0.834	1.045	0.979	1.026
- 2	2.98	181	3.71	2560	"	1.85	838	848	0.825	1.011	1.005	1.016
- 3	3.01	180	3.70	2580	"	3.60	802	823	0.857	1.026	0.962	0.987
- 4	3.00	"	"	2610	"	4.90	798	826	"	1.035	0.957	0.990
- 5	3.02	"	3.71	2630	"	6.09	792	827	0.865	1.044	0.950	0.992
- 6	3.01	"	3.74	2600	"	8.74	786	833	0.867	1.059	0.942	0.998
- 7	3.00	183	3.70	2590	"	11.5	817	878	0.813	1.075	0.979	1.053
- 8	"	181	"	2610	"	13.3	783	848	0.838	1.084	0.939	1.017
- 9	"	180	"	2640	"	16.9	760	842	0.850	1.108	0.911	1.009
- 10	"	181	3.71	2630	"	22.6	806	911	0.785	1.130	0.967	1.092
- 11	3.01	180	3.67	2620	"	32.8	743	854	0.835	1.149	0.891	1.024
- 12	3.01	180	3.67	2630	"	12.5	-	-	-	-	-	-
- 13	2.99	181	3.70	2590	"	0.92	818	823	0.851	1.006	0.981	0.986
541102-101	2.97	130	3.72	2100	764	7.37	775	822	0.731	1.061	1.014	1.076
-102	3.02	"	3.71	2050	"	1.84	749	760	0.801	1.015	0.980	0.995
-103	2.92	131	3.72	2040	"	2.61	744	"	0.799	1.022	0.974	"

Table C.4 Continue (1)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P (MPa)	T _{in} (°C)	q _{BO6} ×10 ⁶ (w/m ²)	G _i (kg/s.m ²)	G _{BO} ^s (kg/s.m ²)	FR (%/sec)	G _{BO} ^t (kg/s.m ²)	G _{BO} ^{out} (kg/s.m ²)	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
541102-104	2.98	131	3.72	2040	764	3.70	727	750	0.818	1.032	0.951	0.981
-105	"	130	3.69	"	"	5.06	750	783	0.769	1.044	0.981	1.025
-106	3.01	131	3.71	2030	"	6.19	718	758	0.813	1.056	0.939	0.992
-107	2.96	"	"	2040	"	9.15	740	792	0.767	1.070	0.969	1.036
-108	2.97	"	"	"	"	12.2	771	840	0.714	1.090	1.009	1.100
-109	"	"	3.70	"	"	14.1	749	836	0.718	1.115	0.981	1.094
-110	2.96	"	3.72	"	"	17.4	736	834	0.729	1.133	0.964	1.092
-111	"	"	3.71	2030	"	21.9	713	796	0.773	1.116	0.933	1.041
-112	"	"	"	2040	"	298	718	833	0.732	1.160	0.940	1.090
-113	2.95	"	3.72	"	"	113	—	—	—	—	—	—
-114	3.04	"	3.70	2030	"	0.94	762	768	0.789	1.009	0.997	1.006
541107- 1	2.92	133	3.70	2990	"	8.11	745	802	0.751	1.076	0.976	1.050
- 2	2.91	132	3.71	2950	"	2.13	750	764	0.784	1.018	0.982	1.000
- 3	"	"	3.72	2980	"	2.93	762	786	0.761	1.031	0.998	1.029
- 4	2.97	133	"	2990	"	4.29	769	800	0.751	1.040	1.006	1.047
- 5	2.94	"	3.73	2980	"	5.96	753	795	0.762	1.056	0.986	1.041
- 6	"	"	3.72	"	"	6.83	745	790	0.770	1.061	0.975	1.034
- 7	"	134	3.71	2970	"	10.1	759	828	0.727	1.091	0.993	1.084
- 8	2.95	132	3.72	2980	"	13.0	743	814	0.743	1.095	0.973	1.066
- 9	"	133	"	2990	"	14.5	726	808	0.753	1.114	0.950	1.058
- 10	2.92	132	"	2970	"	18.2	761	866	0.688	1.138	0.996	1.133
- 11	2.93	133	3.71	2960	"	23.4	744	877	0.682	1.179	0.973	1.148
- 12	2.94	132	3.73	2950	"	33.9	759	908	0.656	1.197	0.993	1.189
- 13	2.95	133	3.71	3030	"	123	—	—	—	—	—	—
- 14	2.97	"	"	2980	"	1.37	777	783	0.766	1.008	1.017	1.024

Table C.5 Experimental conditions and calculated results (P=3.9MPa)

Run No.	Experimental Conditions and Calculated Results											
	P	T _{in}	q_{BO}^6 ×10 ⁶	G _i	G _{BO} ^s	FR	G _{BO} ^t	G _{BO} ^{out}	X _{BO} ^{out}	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^t}$	$\frac{G_{BO}^t}{G_{BO}^s}$	$\frac{G_{BO}^{out}}{G_{BO}^s}$
	(MPa)	(°C)	(w/m ²)	(kg/s.m ²)	(kg/s.m ²)	(%/sec)	(kg/s.m ²)	(kg/s.m ²)				
550122- 26	3.92	203	3.39	1710	730	5.33	715	737	0.971	1.031	0.979	1.009
- 27	3.87	202	3.38	"	"	8.90	705	742	0.959	1.054	0.965	1.017
- 28	"	206	3.37	"	"	17.0	-	-	-	-	-	-
- 29	3.83	201	"	"	"	4.03	704	721	0.975	1.025	0.964	0.988
- 30	3.86	"	3.38	1720	"	3.13	716	727	0.981	1.015	0.981	0.996
- 31	3.84	203	3.40	1710	"	2.08	-	-	-	-	-	-
- 32	3.87	201	3.38	"	"	1.37	732	740	0.946	1.011	1.002	1.013
- 33	3.84	200	3.37	"	"	0.69	727	730	0.947	1.004	0.996	0.999
550122- 34	3.83	204	3.38	2520	"	5.71	716	741	0.972	1.034	0.981	1.014
- 35	"	202	"	2530	"	7.31	727	764	0.927	1.050	0.996	1.046
- 36	"	199	"	2520	"	9.25	703	745	0.950	1.060	0.962	1.020
- 37	3.79	202	"	"	"	13.1	702	756	0.946	1.078	0.961	1.036
- 38	3.88	200	3.40	2550	"	18.4	694	767	0.930	1.105	0.950	1.050
- 39	3.87	202	3.39	2510	"	31.6	706	808	0.887	1.144	0.967	1.106
- 40	"	199	3.38	2550	"	-	-	-	-	-	-	-
- 41	"	201	3.37	2530	"	4.56	699	721	0.972	1.032	0.957	0.988
- 42	"	"	"	2540	"	3.81	717	731	0.951	1.020	0.982	1.002
- 43	3.88	202	3.40	2520	"	3.25	728	742	0.947	1.019	0.997	1.016
- 44	3.90	201	3.39	"	"	2.67	714	728	0.977	"	0.978	0.997
- 45	3.89	202	3.38	2540	"	1.99	719	723	0.990	1.006	0.984	0.991
550122- 15	3.82	199	3.68	1710	949	5.04	915	946	0.788	1.034	0.964	0.997
- 16	3.85	200	"	1720	"	8.50	905	945	0.795	1.044	0.954	0.996
- 17	3.86	203	3.66	1730	"	12.4	912	972	0.774	1.066	0.961	1.024
- 18	3.87	202	3.69	"	"	29.0	904	1024	0.740	1.133	0.953	1.079
- 19	3.86	"	3.68	1720	"	3.96	-	-	-	-	-	-
- 20	3.93	"	3.69	"	"	3.19	925	940	0.801	1.017	0.974	0.991
- 21	3.85	201	3.70	"	"	2.52	-	-	-	-	-	-
- 22	3.90	200	3.67	1730	"	1.72	889	897	0.834	1.009	0.937	0.945
- 23	3.88	203	3.68	1720	"	1.27	945	950	0.785	1.006	0.995	1.001
- 24	3.87	200	3.69	"	"	0.85	938	937	0.787	0.999	0.988	0.987
- 25	3.88	"	3.67	1730	"	0.65	951	957	0.751	1.006	1.002	1.008
550122- 1	3.77	194	3.69	2510	"	6.16	878	911	0.816	1.038	0.925	0.960
- 2	3.85	200	3.66	2500	"	6.65	909	950	0.785	1.045	0.958	1.001
- 3	3.90	201	3.69	2500	"	9.94	909	960	0.777	1.056	0.958	1.012
- 4	3.82	202	"	"	"	14.1	-	-	-	-	-	-
- 5	"	199	"	2510	"	18.1	864	948	0.796	1.098	0.910	0.999
- 6	3.86	202	3.65	2490	"	33.4	875	1008	0.751	1.152	0.922	1.062
- 7	3.83	200	3.72	2500	"	-	-	-	-	-	-	-
- 8	3.85	203	3.69	"	"	4.77	939	965	0.783	1.027	0.990	1.017
- 9	3.83	200	"	2540	"	3.93	877	897	0.848	1.023	0.924	0.945
- 10	3.86	201	3.67	2500	"	3.43	920	935	0.798	1.016	0.970	0.985
- 11	3.85	"	3.70	2510	"	2.99	929	941	0.803	1.014	0.979	0.992
- 12	"	200	3.69	2500	"	2.00	892	900	0.839	1.009	0.940	0.949
- 13	3.86	202	3.70	2510	"	1.51	941	948	0.786	1.008	0.991	0.999
- 14	3.85	200	"	2500	"	0.75	934	936	0.775	1.002	0.984	0.986