

JAERI-M

6031

密に配列されたロッドバンドルのバーンアウト熱流束

——流量およびクオリティの影響——

1975年3月

山崎弥三郎・井口 正・新妻 泰

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

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.

密に配列されたロッドバンドルのバーンアウト熱流束  
流量およびクオリティの影響

東海研究所原子炉工学部安全工学部

山崎弥三郎<sup>\*</sup>・井口 正・新妻 泰

(1972年9月受理)

ATRの設計では燃料棒は非常に密に配列されており、ロッド間隙は従来の炉に比べ非常に狭い。この点がバーンアウト熱流束にどの程度損失を与えるかを知ることは、従来微少間隙の経験に乏しいことを考えると重要である。先の報告で、微少間隙の影響について記したが、その時の実験では、出口クオリティ、流速共に等しい条件での微少間隙の影響を調べることは不可能であり、出口クオリティを大きく変えるためには流速を変える必要があった。

高圧沸騰試験装置に高熱出力の予熱器を付加し、バーンアウト実験を、特に入口クオリティの高い時について、流量一定の条件で行い、ロッド間隙の影響、スペーサーの影響を調べた。

使用したテスト部は3本ないし4本バンドルであり、ロッド径は10 mm、ロッド間隙は1.75, 2.5, 4.0 mm、加熱長は300 mmである。実験は蒸気圧10 kg/cm<sup>2</sup>、入口流速0.5～3 m/s、入口クオリティー5～30%の範囲で行った。

ロッドバンドルにおけるバーンアウト熱流束は円管についての値より小さい。ロッド間隙がバーンアウト熱流束に及ぼす影響はクオリティの高いところでは殆んどない。またスペーサーは入口クオリティの値によって高温点発生位置に影響を与えるが、バーンアウト熱流束については影響が小さい。

Burnout Heat Flux of Narrow-Spaced Rod Bundles  
-Effect of Flow Rate and Steam Quality-

Yasabro YAMAZAKI\*, Tadashi IGUCHI, Yasushi NIITSUMA

Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI  
(Received September 1972)

In the designs of ATR fuel assemblies narrow rod-to-rod clearances and unsymmetric rod arrays are used. It is important how the factors influence burnout heat flux of the rod bundles.

The effects were studied for 3-or 4-rod bundles previously. Capacity of the test facility made it impossible to observe the effects for various mass velocities at constant exit quality.

A 500 KW preheater installed solved the problem. Burnout experiments to study the effects of rod clearance and spacers in wide quality ranges were thus carried out at constant mass flow rate.

The test section is 3-or 4-rod bundle having rod-to-rod and rod-to-shroud clearances of 1.75, 2.5 and 4.0 mm respectively.

The outer diameter of the rod is 10 mm and the heated length is 300 mm. Experiments were made at system pressure  $10 \text{ Kg/cm}^2$  abs., inlet velocity  $0.5\sim 3 \text{ m/s}$  and inlet quality  $-5\sim +30\%$ .

Burnout heat flux of the rod bundles is less than that of the tube of same diameter. Effect of the rod clearance is hardly observed for the high qualities.

The spacers influence largely position of the high temperature spot on the rods, but only little the burnout heat flux of rod bundle.

---

The work performed under contracts between Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation and JAERI.

\* Presently, Deputy Head, Office of Safety and Control

## 目 次

1 序 .....	1
2 実験装置 .....	2
2.1 テスト部 .....	2
2.2 装置・計装 .....	3
3 実験方法 .....	3
4 実験結果 .....	4
4.1 データの算出 .....	4
4.2 ロッドクリアランスを変えた実験 .....	5
4.3 スペーサーを取付けた実験 .....	5
5 検討および考察 .....	5
5.1 再現性の問題 .....	5
5.2 表示上の問題 .....	6
5.3 ロッドクリアランスの影響 .....	7
5.4 スペーサーの影響 .....	7
6 結論 .....	8

## 1 序

ATRの設計では、燃料棒は軽水炉に比べ非常に密に配列されており、燃料棒間の間隙や、燃料棒、シュラウド間の間隙は従来の炉に比べ非常に狭い。バーンアウト現象は、水冷却炉の熱出力限界を決める重要な因子の一つである。燃料棒が密に配列されているため、この点がバーンアウト現象にどの程度の影響を与えるかを知ることは重要である。本シリーズの初期の実験の報告<sup>(1)</sup>で我々は、模擬燃料棒間の間隙および模擬燃料棒、シュラウド間の間隙を1.25 mmから4 mmの範囲で4通りに変え、燃料棒の粗密とバーンアウト熱流束の関係を検討した。その結果、バーンアウト熱流束と出口クオリティとの関係から模擬燃料棒間隙の影響は、クオリティが負の領域では始んどなく、クオリティが正の領域では、間隙が小さくなるに伴い、バーンアウト熱流束が小さくなるというデータが得られた。しかし、その実験結果は、あまり広い範囲の実験条件を含むものではなかった、その上、出口クオリティをできる限り広い範囲に変えるためにテスト部への入口サブクリーリングあるいは入口クオリティを変える方法によつたものではなく、主にテスト部入口の冷却水流速を変える方法によつた。これは予熱器の加熱電力に限界があつたため、やむを得ず採用した方法である。従つて、出口クオリティ、冷却水流速それ一定の実験条件での比較は不可能であった。

出口クオリティ、冷却水流速それぞれ一定の実験条件で模擬燃料棒間隙のバーンアウト熱流束へ及ぼす影響を調べるためにには、予熱器の加熱電力を更に増強する必要がある。

今回、我々は500 kWの予熱器を装置に付加することにより、上記の点の検討を行い得るに至つた。即ち流量一定の条件でクオリティを主に正の方向に充分広くとり、模擬燃料棒の間隙の影響あるいは前報で指摘したようなサブチャンネルの効果を調べることが今回の実験の目的であった。前回のデータと併せて検討することにより、両者のデータのつながり具合が一致しているか否かまた新しいポンプの設置により実験装置の softness はより hard になつたものと思われるが、その点によりバーンアウト特性がどのように変つたかといった検討も可能であろう。

また前回の実験では、スペーサー装着によりバーンアウト熱流束がどのように変るかを検討した。<sup>(2)</sup>その結果スペーサー装着位置のクオリティをパラメータとしたデータをとる必要のあることを指摘した。今回はスペーサー取付け位置を固定し、その位置のクオリティを変え、バーンアウトデータを得た。同時に、燃料棒にスペーサーが多数個取り付けられている場合、スペーサーの上流側でバーンアウトが発生するか、また下流側で発生するかを知ることも試みた。

先の実験により、加熱長300 mmという比較的短かい試験片での結果は短かいための特異性を特に含んでいるものではないことを確めた。<sup>(3)</sup>今回の実験でも、今迄と同様に加熱長300 mmの模擬燃料棒を使用した。テスト部の形状は、ATR燃料体を構成する基本的配列である3本バンドルおよび4本バンドルである。

今回の実験の主要な条件を以下に列記しておく。

テスト部

形状：3本バンドル（三角配列）

## 4本バンドル(四角配列)

内管・模擬燃料棒間隙: 1.75, 2.50, 4.00 mm

模擬燃料棒間隙: 1.75, 2.50, 4.00 mm

(3本バンドル, 4本バンドル共通)

模擬燃料棒発熱長: 3.00 mm

発熱部径: 1.0 mm

スペーサー取付け位置: 発熱部上流端および下流端

## 実験条件

系圧力: 10 kg/cm<sup>2</sup> a

テスト部入口冷却水流速: 0.5 ~ 3 m/s (单相基準)

mass velocity:  $2 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \text{ h}$ 

入口クオリティ: 約 -5 ~ +30 %

出口クオリティ: 約 0 ~ 30 %

## 2 実験装置

実験は日本原子力研究所化工特研内の高圧沸騰試験装置を用いて行った。装置のフローシートは Fig. 1 に示す。以下に高圧沸騰試験装置の主要性能を示す。

最高使用圧力 70 kg/cm<sup>2</sup> G

最高使用温度 280 °C

最高循環流量 300 l/min

最高加熱電力 500 KW DC および 200 KW DC

本実験では 500 KW を予熱器に、200 KW をテスト部に供給した。

循環水 イオン交換水 ( $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  以上)

## 2.1 テスト部

前回に使用したテスト部<sup>(1)(2)</sup>と殆んど変りない。模擬燃料棒は 3 本ないし 4 本である。模擬燃料棒あるいは模擬燃料棒と流路壁との間隙を規定寸法に維持するために、発熱部上下の銅棒部の外向きの面に適当な間隔でアルミナ片を取り付け、アルミナ片の先端が流路壁に接触するようにした。アルミナ片により規定寸法の維持と同時に、模擬燃料体のセンターリングと電気絶縁を行った。

発熱部となる S U S 2 7 製円管部には軸方向のほぼ中央部にステンレス製のリングをロー付けし、このリングから 1 本のリード線を取り出し、バーンアウト検出器に接続した。発熱部の上流側には、発熱部と等しい形状の前流部が約 300 mm ある。

テスト部の主要な寸法を下に示す。

燃料体形状: 3 本バンドル(三角配列)

4 本バンドル(四角配列)

## 4本バンドル(四角配列)

内管・模擬燃料棒間隙: 1.75, 2.50, 4.00 mm

模擬燃料棒間隙: 1.75, 2.50, 4.00 mm

(3本バンドル, 4本バンドル共通)

模擬燃料棒発熱長: 3.00 mm

発熱部径: 1.0 mm

スペーサー取付け位置: 発熱部上流端および下流端

## 実験条件

系圧力: 10 kg/cm<sup>2</sup> a

テスト部入口冷却水流速: 0.5 ~ 3 m/s (单相基準)

mass velocity:  $2 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \text{ h}$ 

入口クオリティ: 約 -5 ~ +30 %

出口クオリティ: 約 0 ~ 30 %

## 2 実験装置

実験は日本原子力研究所化工特研内の高圧沸騰試験装置を用いて行った。装置のフローシートは Fig. 1 に示す。以下に高圧沸騰試験装置の主要性能を示す。

最高使用圧力 70 kg/cm<sup>2</sup> G

最高使用温度 280 °C

最高循環流量 300 l/min

最高加熱電力 500 KW DC および 200 KW DC

本実験では 500 KW を予熱器に、200 KW をテスト部に供給した。

循環水 イオン交換水 ( $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  以上)

## 2.1 テスト部

前回に使用したテスト部<sup>(1)(2)</sup>と殆んど変りない。模擬燃料棒は 3 本ないし 4 本である。模擬燃料棒間あるいは模擬燃料棒と流路壁との間隙を規定寸法に維持するために、発熱部上下の銅棒部の外向きの面に適当な間隔でアルミナ片を取り付け、アルミナ片の先端が流路壁に接触するようにした。アルミナ片により規定寸法の維持と同時に、模擬燃料体のセンターリングと電気絶縁を行った。

発熱部となる S U S 27 製円管部には軸方向のほぼ中央部にステンレス製のリングをロー付けし、このリングから 1 本のリード線を取り出し、バーンアウト検出器に接続した。発熱部の上流側には、発熱部と等しい形状の前流部が約 300 mm ある。

テスト部の主要な寸法を下に示す。

燃料体形状: 3 本バンドル(三角配列)

4 本バンドル(四角配列)

内管・模擬燃料棒間隙：1.75, 2.50, 4.00 mm

模擬燃料棒間隙：1.75, 2.50, 4.00 mm

(3本バンドル・4本バンドル共通)

模擬燃料棒発熱長：300 mm

発熱部材質：SUS27

発熱部径：10 mm

テスト部の詳細寸法はTable 1に示す。

スペーサーの影響を調べる実験で使用したスペーサーの概略をFig. 2に示す。今回はこのうち1種のスペーサーを使用した。スペーサーの取付け位置は、発熱部の上流端および下流端である。スペーサーは長さ20 mmであり、取付状態では発熱部と10 mm重なっている。

## 2.2 装置・計装

バーンアウト検出を、1台のブリッジ式バーンアウト検出器で行った他は前回の実験と大差ないが、今回はテスト部入口の冷却材のクオリティを一定流量で広い範囲に変えられるようにテスト部上流に新たな予熱器を設置した。

本予熱器はステンレス製蛇管で、管内部を冷却水が流れ加熱される。加熱方法は、蛇管を一つの電気抵抗体とみて直接電圧を印加し加熱させる直接通電加熱方式である。

発熱部内径：28 mm

発熱部長：約13,000 mm

コイル径：700 mm

最大発熱量：500 kW

## 3 実験方法

流量・圧力を一定に維持し、テスト部より上流に位置する予熱器の熱出力を規定入口クオリティになるように設定する。しかる後にテスト部への供給電力を少しづつ増加する。やがてテスト部でのバーンアウト発生を検知してバーンアウト検出器が動作するので、その時供給電力を遮断する。電源遮断時の流量・圧力・予熱器熱出力等を測定し、データとした。

流量・予熱器熱出力・水温等をいろいろに変えデータを得た。実験範囲は次の通りである。

系圧力：10 kg/cm<sup>2</sup> a

テスト部入口流速：0.5～3 m/s (单相基準)

mass velocity:  $2 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$

入口クオリティ：約-5～30%

バーンアウト検出器の出力あるいは電圧・電流比等に異常が認められた時、テスト部にバーンアウトによる損傷が生じたものと判断し、テスト部を解体した。このようにしてデータのなかにテスト部が損傷した時のものが入り込むことを避ける。こうした損傷の有無の判断はなか

内管・模擬燃料棒間隙：1.75, 2.50, 4.00 mm

模擬燃料棒間隙：1.75, 2.50, 4.00 mm

(3本バンドル・4本バンドル共通)

模擬燃料棒発熱長：300 mm

発熱部材質：SUS27

発熱部径：10 mm

テスト部の詳細寸法はTable 1に示す。

スペーサーの影響を調べる実験で使用したスペーサーの概略をFig. 2に示す。今回はこのうち1種のスペーサーを使用した。スペーサーの取付け位置は、発熱部の上流端および下流端である。スペーサーは長さ20 mmであり、取付状態では発熱部と10 mm重なっている。

## 2.2 装置・計装

バーンアウト検出を、1台のプリッジ式バーンアウト検出器で行った他は前回の実験と大差ないが、今回はテスト部入口の冷却材のクオリティを一定流量で広い範囲に変えられるようにテスト部上流に新たな予熱器を設置した。

本予熱器はステンレス製蛇管で、管内部を冷却水が流れ加熱される。加熱方法は、蛇管を一つの電気抵抗体とみて直接電圧を印加し加熱させる直接通電加熱方式である。

発熱部内径：28 mm

発熱部長：約13,000 mm

コイル径：700 mm

最大発熱量：500 kW

## 3 実験方法

流量・圧力を一定に維持し、テスト部より上流に位置する予熱器の熱出力を規定入口クオリティになるように設定する。しかる後にテスト部への供給電力を少しづつ増加する。やがてテスト部でのバーンアウト発生を検知してバーンアウト検出器が動作するので、その時供給電力を遮断する。電源遮断時の流量・圧力・予熱器熱出力等を測定し、データとした。

流量・予熱器熱出力・水温等をいろいろに変えデータを得た。実験範囲は次の通りである。

系圧力：10 kg/cm<sup>2</sup> a

テスト部入口流速：0.5～3 m/s (单相基準)

mass velocity:  $2 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$

入口クオリティ：約-5～30%

バーンアウト検出器の出力あるいは電圧・電流比等に異常が認められた時、テスト部にバーンアウトによる損傷が生じたものと判断し、テスト部を解体した。このようにしてデータのなかにテスト部が損傷した時のものが入り込むことを避ける。こうした損傷の有無の判断はなか

り経験的なものであるが、一応の信頼はできるものと思われる。テスト部解体後、模擬燃料棒表面を肉眼観察した。

実験は次の通りのテスト部について行った。

1. 3本バンドル、ロッドクリアランス 1.75 mm
2. 3本バンドル、ロッドクリアランス 2.5 mm
3. 3本バンドル、ロッドクリアランス 4 mm
4. 4本バンドル、ロッドクリアランス 1.75 mm
5. 4本バンドル、ロッドクリアランス 2.5 mm
6. 4本バンドル、ロッドクリアランス 4 mm
7. 3本バンドル、ロッドクリアランス 1.75 mm  
スペーサー装着
8. 4本バンドル、ロッドクリアランス 1.75 mm  
スペーサー装着

## 4 結 果

### 4.1 データの算出

Table 2 ~ Table 9 に本実験で得られたデータを掲げる。データ中、テスト部入口クオリティ  $x_1$  は次の算式による。

$$x_1 = \frac{\frac{Q_1 - Q_{loss}}{G} - \Delta h}{r}$$

ただし

$$\Delta h = h' - h_1$$

$Q_1$  : 予熱器熱出力 ( kcal/h )

$Q_{loss}$  : 予熱器熱損失 ( kcal/h )

$G$  : 冷却水流量 ( kg/h )

$h_1$  : 予熱器入口冷却水エンタルピー ( kcal/kg )

$h'$  : 予熱器出口の飽和水エンタルピー ( kcal/kg )

$r$  : 予熱器出口の冷却水蒸発潜熱 ( kcal/kg )

$h_1$ ,  $h'$ ,  $r$  は圧力によって値は異なるが、実際には系圧力での値を採用した。

本実験に先だって、予熱器での熱損失の見積りを行った。水温 170°C 前後では、予熱器周囲の断熱材外壁温度はほぼ 80°C で、予熱器熱出力には殆んど関係しない。断熱材外壁表面からの熱損失はほぼ 2 KW と見積られる。この値は、予熱器入口水温、出口水温の熱収支からの見積りと大体一致する。本実験での予熱器熱出力は数十 KW であるので、熱損失はほぼ無視できるといえる。以上は充分熱平衡が達成された場合についてであるが、冷却水流速を変えた時や、予熱器熱出力を変えた時などの過度時には、予熱器壁に熱が蓄積されることにより熱損失

り経験的なものであるが、一応の信頼はできるものと思われる。テスト部解体後、模擬燃料棒表面を肉眼観察した。

実験は次の通りのテスト部について行った。

1. 3本バンドル、ロッドクリアランス 1.75 mm
2. 3本バンドル、ロッドクリアランス 2.5 mm
3. 3本バンドル、ロッドクリアランス 4 mm
4. 4本バンドル、ロッドクリアランス 1.75 mm
5. 4本バンドル、ロッドクリアランス 2.5 mm
6. 4本バンドル、ロッドクリアランス 4 mm
7. 3本バンドル、ロッドクリアランス 1.75 mm  
スペーサー装着
8. 4本バンドル、ロッドクリアランス 1.75 mm  
スペーサー装着

## 4 結 果

### 4.1 データの算出

Table 2 ~ Table 9 に本実験で得られたデータを掲げる。データ中、テスト部入口クオリティ  $x_1$  は次の算式による。

$$x_1 = \frac{\frac{Q_1 - Q_{loss}}{G} - \Delta h}{r}$$

ただし

$$\Delta h = h' - h_i$$

$Q_1$  : 予熱器熱出力 ( kcal/h )

$Q_{loss}$  : 予熱器熱損失 ( kcal/h )

$G$  : 冷却水流量 ( kg/h )

$h_i$  : 予熱器入口冷却水エンタルピー ( kcal/kg )

$h'$  : 予熱器出口の飽和水エンタルピー ( kcal/kg )

$r$  : 予熱器出口の冷却水蒸発潜熱 ( kcal/kg )

$h_i$ ,  $h'$ ,  $r$  は圧力によって値は異なるが、実際には系圧力での値を採用した。

本実験に先だって、予熱器での熱損失の見積りを行った。水温 170°C 前後では、予熱器周囲の断熱材外壁温度はほぼ 80°C で、予熱器熱出力には殆んど関係しない。断熱材外壁表面からの熱損失はほぼ 2 KW と見積られる。この値は、予熱器入口水温、出口水温の熱収支からの見積りと大体一致する。本実験での予熱器熱出力は数十 KW であるので、熱損失はほぼ無視できるといえる。以上は充分熱平衡が達成された場合についてであるが、冷却水流速を変えた時や、予熱器熱出力を変えた時などの過度時には、予熱器壁に熱が蓄積されることにより熱損失

は大きくなる。予熱器熱出力を変えるといった外乱を加えた後、予熱器出口の冷却水水温が、ある平衡値に落着くには、冷却水流量が小さい程時間を要するが、我々の実験範囲では、最大で 30 sec 以内であった。

従って、外乱を加えた後、30 sec 以上経過すれば、熱損失は無視できると考えられる。

#### 4.2 ロッドクリサランスを変えた実験

バーンアウト熱流束と、テスト部入口クオリティ  $x_{in}$ 、または出口クオリティ  $x_e$  との関係を Fig. 3～Fig. 18 に示す。Fig. 3～10 のデータは一見するとかなりバラツキて見えるが図中に引いた正の低クオリティで下に落込む曲線のようにデータの配列を見ると、いかさまとまつて見える。この曲線については後述する。

データの概略傾向は次のようである。

- (1)  $x_e$  が等しいなら、流量の違いによるバーンアウト熱流束の違いは殆んど認められない。特に出口クオリティ 15%～20%付近では、バーンアウト熱流束は等しい。
- (2) しかし、流量が小さい程  $dq_{BO}/dx_e$  は大きい。(ただし  $dq_{BO}/dx_e$  は負である) 従って  $x_e > 20\%$  では、流量の小さい程、バーンアウト熱流束はこころもち大きくなる傾向にある。
- (3) これに反し、低クオリティの落込みの部分は、流量に著しく関係する。低流速程、バーンアウト熱流束は小さい。

#### 4.3 スペーサーを取付けた実験

スペーサーを取付けた実験の結果を Fig. 9, 10, 17, 18 に示す。Fig. 19～26 はテスト部解体後肉眼観察によって高温点の発生位置を調べた結果である。図は各燃料棒を展開して示したもので、黒塗りの部分が高温点の発生位置である。図中の中心線は燃料棒の最外側即ちシャラウドに最も近接した所を示す。

データは、スペーサーを取付けない時に比べ、バラツキが大きい。前回の実験よりも正クオリティに広く実験条件を変えてバーンアウト熱流束を測定したが、スペーサーを取付けたことによるバーンアウト熱流束の相違は殆んどなかった。

### 5 検討および考察

#### 5.1 再現性の問題

4.2 項で記したように低クオリティでのバーンアウト熱流束の落込みを除けば、今回の実験条件の範囲内では冷却水流速が異っていても、出口クオリティが等しい場合、バーンアウト熱流束は殆んど等しかった。従って、 $q_{BO}$  VS  $x_e$  図の全体的な傾向をみれば、従来当所で得られたバーンアウトデータとの比ができるものと考えられる。何故なら、今回の実験条件は従来の実験条件を一部含むものであって、また、冷却水流量は違うが、出口クオリティで見る限り、ほぼ等しい範囲の実験条件をかなり含んでいる。

は大きくなる。予熱器熱出力を変えるといった外乱を加えた後、予熱器出口の冷却水水温が、ある平衡値に落着くには、冷却水流量が小さい程時間を要するが、我々の実験範囲では、最大で 30 sec 以内であった。

従って、外乱を加えた後、30 sec 以上経過すれば、熱損失は無視できると考えられる。

#### 4.2 ロッドクリサランスを変えた実験

バーンアウト熱流束と、テスト部入口クオリティ  $x_{in}$ 、または出口クオリティ  $x_e$  との関係を Fig. 3～Fig. 18 に示す。Fig. 3～10 のデータは一見するとかなりバラツキて見えるが図中に引いた正の低クオリティで下に落込む曲線のようにデータの配列を見ると、いかがまとまって見える。この曲線については後述する。

データの概略傾向は次のようである。

- (1)  $x_e$  が等しいなら、流量の違いによるバーンアウト熱流束の違いは殆んど認められない。特に出口クオリティ 15%～20%付近では、バーンアウト熱流束は等しい。
- (2) しかし、流量が小さい程  $dq_{BO}/dx_e$  は大きい。(ただし  $dq_{BO}/dx_e$  は負である) 従って  $x_e > 20\%$  では、流量の小さい程、バーンアウト熱流束はこころもち大きくなる傾向にある。
- (3) これに反し、低クオリティの落込みの部分は、流量に著しく関係する。低流速程、バーンアウト熱流束は小さい。

#### 4.3 スペーサーを取付けた実験

スペーサーを取付けた実験の結果を Fig. 9, 10, 17, 18 に示す。Fig. 19～26 はテスト部解体後肉眼観察によって高温点の発生位置を調べた結果である。図は各燃料棒を展開して示したもので、黒塗りの部分が高温点の発生位置である。図中の中心線は燃料棒の最外側即ちシェラウドに最も近接した所を示す

データは、スペーサーを取付けない時に比べ、バラツキが大きい。前回の実験よりも正クオリティに広く実験条件を変えてバーンアウト熱流束を測定したが、スペーサーを取付けたことによるバーンアウト熱流束の相違は殆んどなかった。

### 5 検討および考察

#### 5.1 再現性の問題

4.2 項で記したように低クオリティでのバーンアウト熱流束の落込みを除けば、今回の実験条件の範囲内では冷却水流速が異っていても、出口クオリティが等しい場合、バーンアウト熱流束は殆んど等しかった。従って、 $q_{BO}$  VS  $x_e$  図の全体的な傾向をみれば、従来当所で得られたバーンアウトデータとの比較ができるものと考えられる。何故なら、今回の実験条件は従来の実験条件を一部含むものであって、また、冷却水流量は違うが、出口クオリティで見る限り、ほぼ等しい範囲の実験条件をかなり含んでいる。

4本バンドル, ロッドクリアランス 4 mm, 3本バンドル, ロッドクリアランス 1.75 mm, 3本バンドル, ロッドクリアランス 2.5 mm 等いずれもよく一致している。Fig. 27 は 3本バンドル, ロッドクリアランス 1.75 mm の例である。

以上により再現性は充分良好であるといえる。同時に本実験のデータの信頼性, 特にバーンアウト検出器の信頼性を確認できたものと考えられよう。

## 5.2 表示上の問題

Fig. 3~Fig. 10 のバーンアウト熱流束に及ぼす出口クオリティの影響を図示した図を詳細に見ると Fig. 28 にモデル化して示したような, 正の低クオリティでバーンアウト熱流束が著しく低くなる特性が見られる。この点を明確にするために入口クオリティとバーンアウト熱流束の関係をプロットしてみた。Fig. 11~Fig. 18 はその例である。これらの図は流量がパラメータであって, 一見して知れるようにバーンアウト熱流束は, 入口クオリティの一値関数である。これらの図の中でも特に Fig. 15 の例で明らかのように, バーンアウト熱流束と入口クオリティの関係は Fig. 29 に模式化して示したような関係にある。即ち全般的に右下がりの直線で表示される領域と, この直線で表わされるバーンアウト熱流束よりも著しく低いバーンアウト熱流束を示す領域が存在し, 前者の領域では, バーンアウト熱流束は流量にそれ程依存せず, 後者の領域では流量の違いによりバーンアウト熱流束値が異なる。

Fig. 28 と Fig. 29 は熱バランスにより互に同値な平面であり, Fig. 29 の  $q_{BO} - x_i$  平面に描かれた曲線を  $q_{BO} - x_e$  平面に写像すれば Fig. 28 のようになる。図中の A, B, C 等は互に対応する点である。

Fig. 11~Fig. 18 で見たように入口冷却水クオリティがある範囲の時, バーンアウト熱流束が B-C のように激減するものとすると  $q_{BO} - x_e$  平面では Fig. 28 のような曲線が得られる筈である。Fig. 3~Fig. 10 の図中の曲線は以上のような観点で引かれたものである。このように  $q_{BO} - x_e$  図のデータは一見バラツイて見えるが, かなりまとまったものであると言つてよいと思われる。 $q_{BO} - x_e$  平面でのバーンアウト熱流束の表示は, 我々のコントロールしうる操作量(オペレーション・ファクター)一義的に決め, バーンアウト熱流束がそれらの一値関数として決定される場合であっても, 操作量を出口クオリティとしてのみ取り出しているため表現上多値関数となってしまうことのある点, 注意を要する。これはいわゆる Parametric distortion と呼ばれているものである。

以上に述べた正の低クオリティでのバーンアウト熱流束の著しい低下は, 前回のデータにもみられた。前回はテスト部入口で液は飽和温度以下であったが, 入口サブクーリング 10°C 以下のバーンアウト熱流束の減少という傾向は, 今回の実験での傾向と一致している。Fig. 28, 29 でみると入口クオリティ  $x_i = 0$  を中心としてその両側に  $q_{BO}$  の急激に変化する領域があることがわかる。このうち負のクオリティ側におこるものは  $q_{BO} - x_e$  図で表わす時「右上りのカーブ」として, さきに発表したものである。

単管での実験で Miroplolsky Doroschak らは, 系の softness が非常に soft であるとバーンアウト熱流束が流量の脈動により, 急激に減少することを指摘しており, 本実験での傾向と非常に類似している。

本実験での系の softness が、これらの実験と同じ範囲であるかどうかは明らかではないが、本ループでは二相流部分の圧力損失は単相流部分の圧力損失の  $1/4 \sim 1/5$  である。従つて前記のデータの傾向が系が soft であることに基因するとは断言できかねる。

### 5.3 ロッドクリアランス $\delta$ の影響

前回のデータで、出口クオリティ  $x_e$  が、マイナス数%以上の時、ロッドクリアランスが大きくなるに従い、バーンアウト熱流束が増加するという結果を得た。 $x_e = 2\%$  の時の例を Fig. 30 に示す。

今回更に出口クオリティが増加した時のデータを得た。その結果、 $x_e$  がほぼ 10%付近で前述のバーンアウト熱流束の激減があるが、それ以上のクオリティでは、例えば Fig. 31 に見るように、ロッドクリアランスが違っても、バーンアウト熱流束の違いは殆んどなかった。

しかし、ロッドクリアランスが大きくなるに従い、バーンアウト熱流束が増加するという傾向は保存されている。この領域はテスト部入口で環状流になる領域に対応するものと思われるが、その定量的説明は別報に譲る。

前回、燃料体のバーンアウト熱流束が单管でのバーンアウト熱流束より小さいことを指摘したが、高クオリティでも Fig. 27 にみられるように、やはり低い値であることが確認された。その原因是前報に記したように流路（サブチャンネル）の幾何学的および熱的不均等性に基因するものであろう。

### 5.4 スペーサーの影響

Fig. 19～Fig. 26 はそれぞれのテスト部について、実験で生じた高温点の位置の肉眼観察を図示したものである。高温点の発生位置は、スペーサーの有無により明らかに違いがあった。スペーサーを取付けない場合、高温点は殆んど発熱部の下流端で生じた。しかしへーサーを取付けた場合、出口スペーサーの上流および入口スペーサーの下流にほぼ等しい確率で高温点が生じた。

この事実はスペーサーが、何らかの形でバーンアウト現象に影響を及ぼしていることを示していると言えよう。

また出口スペーサーの上流で生じた高温点は、主に中央サブチャンネルで生じており、入口スペーサーの下流で生じた高温点は、主に模擬燃料棒の最外側でシラウドに最も近接した部分に生じているという違いが見られる。入口スペーサーの影響と出口スペーサーの影響と及ぼす性質が違うようと思われる。

高温点が模擬燃料棒に取付けられたバーンアウトリード線より上流に発生した場合、バーンアウト検出器入力はマイナスの入力となり、下流に発生した場合はプラスの入力となる。従つてバーンアウト検出器の入力をメーターで監視することにより、高温点の発生位置の推定ができる。高温点の発生位置の一番確かな検知方法は一回一回燃料棒を焼け切ることであるが、そのような方法は事実上非常に困難であろう。

バーンアウト時のメーターのふれが小さく、正負の判定はあまり明確ではなかったが、測定できた例を Fig. 10 に示す。図中の黒塗りの実験点は、上流側で高温点が発生したこと示

す。高温点の発生位置をクオリティとの関係としてとらえると、スペーサー取り付け位置でのクオリティが低い場合、低クオリティ側に取付けられたスペーサーの直後で、スペーサー取付け位置でのクオリティが高い場合、高クオリティ側に取付けられたスペーサーの直前で、高温点が発生する傾向にあるものである。

$q_{BO} - x_e$  図をみるとスペーサー取付けによるバーンアウト熱流束値の相違は殆んど認められない。ただし、バーンアウト熱流束はスペーサーのない場合に比べ、非常にバラツキが大きくなっている。

今回使用したスペーサーについて次のことが観察された。

- (1) スペーサーは模擬燃料棒の発熱部を軸方向に 1.0 mm 包みこむ恰好で取付けられているが、模擬燃料棒のスペーサーで包みこまれた部分ではバーンアウトは起らない。
- (2) スペーサーの直後はバーンアウトしない。

上記(1), (2)は前回の結果と同じである。

## 6 結 論

従来の実験装置に予熱器を増設し、テスト部入口冷却水流速一定の条件で、入口クオリティを今までより広い範囲で変えたバーンアウト実験を行い、下記の結果を得た。

- (1) 今回得られたデータと、従来報告したデータとの間の再現性は良好であった。
- (2) クオリティの高い領域では流量の違いに基づくバーンアウト熱流束の差はあまりない。
- (3) 正の低クオリティ附近にバーンアウト熱流束の激減する領域がある。
- (4) 単管バーンアウトデータと比較すると、ロッドバンドルのバーンアウトデータはかなり小さい。
- (5) 高クオリティでは、ロッドクリアランスの違いに基づくバーンアウト熱流束の差は、低クオリティの場合と異なり小さい。
- (6) スペーサーにより高温点の発生位置がかわる場合が認められ、バーンアウト現象にスペーサーが影響を及ぼしているが、バーンアウト熱流束値では大差ない。

### 引用文献

- (1) 山崎、井口、千葉、小堀、菊池、第7回伝熱シンポジウム前刷集 p109 (1970)
- (2) 山崎、井口、千葉、新妻、高野：JAERI-M 6030 (1975)
- (3) 山崎、井口、千葉、新妻、高野：JAERI-M 6030 (1975)

す。高温点の発生位置をクオリティとの関係としてとらえると、スペーサー取り付け位置でのクオリティが低い場合、低クオリティ側に取付けられたスペーサーの直後で、スペーサー取付け位置でのクオリティが高い場合、高クオリティ側に取付けられたスペーサーの直前で、高温点が発生する傾向にあるものである。

$q_{BO}-x_e$  図をみるとスペーサー取付けによるバーンアウト熱流束値の相違は殆んど認められない。ただし、バーンアウト熱流束はスペーサーのない場合に比べ、非常にバラツキが大きくなっている。

今回使用したスペーサーについて次のことが観察された。

- (1) スペーサーは模擬燃料棒の発熱部を軸方向に 10 mm 包みこむ恰好で取付けられているが、模擬燃料棒のスペーサーで包みこまれた部分ではバーンアウトは起らない。
  - (2) スペーサーの直後はバーンアウトしない。
- 上記(1), (2)は前回の結果と同じである。

## 6 結 論

従来の実験装置に予熱器を増設し、テスト部入口冷却水流速一定の条件で、入口クオリティを今までより広い範囲で変えたバーンアウト実験を行い、下記の結果を得た。

- (1) 今回得られたデータと、従来報告したデータとの間の再現性は良好であった。
- (2) クオリティの高い領域では流量の違いに基づくバーンアウト熱流束の差はあまりない。
- (3) 正の低クオリティ附近にバーンアウト熱流束の激減する領域がある。
- (4) 単管バーンアウトデータと比較すると、ロッドバンドルのバーンアウトデータはかなり小さい。
- (5) 高クオリティでは、ロッドクリアランスの違いに基づくバーンアウト熱流束の差は、低クオリティの場合と異なり小さい。
- (6) スペーサーにより高温点の発生位置がかわる場合が認められ、バーンアウト現象にスペーサーが影響を及ぼしているが、バーンアウト熱流束値では大差ない。

### 引用文献

- (1) 山崎、井口、千葉、小堀、菊池、第7回伝熱シンポジウム前刷集 p109 (1970)
- (2) 山崎、井口、千葉、, 第8回伝熱シンポジウム前刷集 p409 (1971)
- (3) 山崎、井口、新妻、高野 : JAERI-M 6030 (1975)

Table 1 Dimensions of Test Sections

rod	$D_s$ mm	$L$ mm	$D_r$ mm	$\delta_{r-r}$ mm	$\delta_{r-s}$ mm	$s$ $\times 10^3$ mm $^2$	$A_0$ mm $^2$	$P_{W_0}$ mm	$D_{W_0}$ mm	$D_{H_0}$ mm	$A_1$ mm $^2$	$P_{W_1}$ mm	$D_{W_1}$ mm	$D_{H_1}$ mm	$A_2$ mm $^2$	$P_{W_2}$ mm	$D_{W_2}$ mm	$D_{H_2}$ mm		
1	30.1	300	10	1.75	1.75	37.704	39.74	220.29	125.66	7.216	12.650	59.51	31.4	7.58	84.47	47.20	23.56	7.16	14.34	
4	2	32.7	300	10	2.50	2.50	37.704	52.57	228.33	125.66	9.209	16.734	77.71	31.4	9.9	111.99	49.24	23.56	9.10	19.04
3	37.8	300	10	4.00	4.00	37.704	30.81	244.42	125.66	13.247	25.723	119.46	31.4	14.96	172.65	53.25	23.56	12.9	29.31	
1	27.1	300	10	1.75	1.75	28.278	34.12	179.38	94.25	76.08	144.81	20.51	15.7	5.23	106.89	54.56	26.18	7.84	16.33	
3	2	29.4	300	10	2.50	2.50	28.278	44.33	186.61	94.25	9.502	188.14	28.39	15.7	7.23	138.28	56.97	26.18	9.71	21.13
3	34.1	300	10	4.00	4.00	28.278	67.77	201.38	94.25	13.46	28.763	45.60	15.7	11.62	210.68	61.89	26.18	13.6	32.19	

## Notes:

- $L$  • heated length
- $D_s$  • shroud diameter
- $D_r$  • rod diameter
- $S$  • heating surface area
- $A$  • flow area of channel
- $P_W$  • wetted perimeter
- $P_H$  • heated perimeter
- $D_W$  • wetted equivalent diameter
- $D_H$  • heated equivalent diameter
- $\delta_{r-r}$  • rod to rod spacing
- $\delta_{r-s}$  • rod to shroud spacing

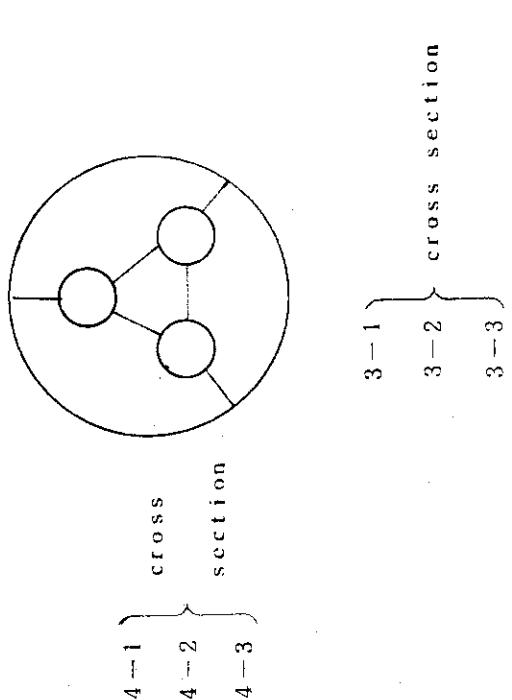
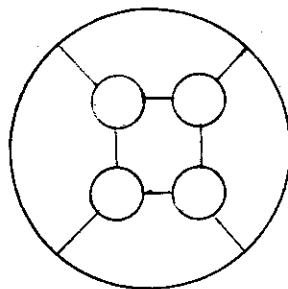
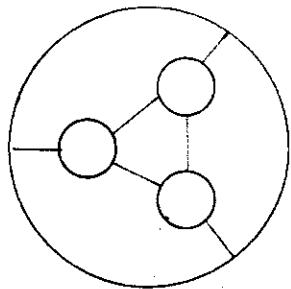


Table 2 Results of burnout experiment  
(rod bundle, gap 1.75 mm)

RUN No.	P (kg/cm <sup>2</sup> a)	u (m/s)	G × 10 <sup>-6</sup> (kcal/m <sup>2</sup> h)	hi (kcal/kg)	q <sub>BO</sub> × 10 <sup>-6</sup> (kcal/m <sup>2</sup> h)	x <sub>i</sub> (%)	x <sub>e</sub> (%)
8-14-1	1.00	1,976	2,233	143.8	3.869	-2.96	7.05
" 2	1.00	"	2,229	144.8	4.078	-2.75	7.99
" 3	1.10	1,991	2,249	143.8	3.248	0.43	8.97
" 4	"	1,976	2,233	"	3.231	0.50	9.06
" 5	1.00	"	2,227	146.9	2.522	7.03	13.67
" 6	"	1,986	2,229	150.0	2.390	7.66	13.97
" 7	1.15	1,976	2,218	"	2.230	11.13	17.09
" 8	1.05	"	2,216	151.0	2.063	12.15	17.66
" 9	1.25	1,991	2,219	157.2	1.659	16.51	20.98
" 10	1.10	"	2,109	156.2	1.501	17.90	21.95
" 11	"	1,976	2,210	154.1	3.703	-6.50	5.43
" 12	1.05	"	2,218	150.0	3.568	-6.87	5.09
" 13	1.00	2,986	3,322	159.3	3.556	5.02	11.30
" 14	1.10	2,996	3,339	158.2	3.450	3.86	9.69
" 15	1.00	2,986	3,332	159.3	4.054	-0.31	6.86
" 16	1.10	2,986	3,334	156.2	4.347	-1.42	6.29
" 17	9.5	"	3,340	154.1	2.180	8.83	12.65
" 18	1.00	"	3,328	157.2	2.215	9.06	12.97
" 19	1.20	2,942	3,328	"	1.816	15.40	18.71
" 20	1.15	2,986	3,279	"	2.060	16.84	20.57
" 21	1.00	"	3,328	"	3.727	-4.93	1.64
" 22	8.5	1,000	3,355	148.9	3.513	-5.08	0.99
" 23	1.05	"	1,117	156.2	1.896	12.03	22.03
" 24	1.10	"	1,115	158.2	1.932	12.52	22.76
" 25	1.15	"	"	"	1.622	16.92	22.55
" 26	9.5	1,005	1,112	160.3	1.497	18.83	26.65
" 27	1.15	1,000	1,117	"	1.705	17.68	27.76
" 28	9.5	"	1,112	"	1.686	25.08	30.77
" 29	9.0	"	1,111	161.3	0.824	25.31	29.63
" 30	1.15	"	"	"	1.073	28.16	33.90
" 31	1.05	"	"	"	0.943	29.02	34.03
" 32	"	"	"	"	2.944	-4.409	11.20
" 33	1.00	"	1,113	159.3	3.227	-4.364	12.65
" 34	1.10	"	1,115	158.2	3.248	-1.49	15.73
" 35	"	"	1,117	156.2	3.092	-1.86	14.50
" 36	1.00	"	"	156.2	1.753	4.29	13.50
" 37	1.05	"	1,114	158.2	1.744	3.45	12.68

Table 3 Results burnout experiment  
(3 rod bundle, gap 25mm)

RUN No.	P [kg/cm <sup>2</sup> a]	u [m/s]	G × 10 <sup>-3</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	hi	q <sub>BO</sub> × 10 <sup>-6</sup> [kcal/kg]	x <sub>i</sub> [%]	x <sub>e</sub> [%]
8-4-1	9.7	2,977	4,305	160.5	3,116	2.415	6.63
" 2	9.8	2,996	4,332	160.5	3,398	1.816	6.41
" 3	10.0	2,977	4,293	168.6	3,820	2.091	7.31
" 4	11.0	"	4,282	171.8	4,171	1.868	7.63
" 5	11.5	2,951	4,233	173.9	3,956	4.05	9.59
" 6	"	2,962	4,245	174.9	4,000	4.46	10.06
" 7	11.3	2,977	4,255	177.0	3,950	4.85	10.35
" 8	13.3	2,962	4,234	177.0	3,730	5.76	11.04
" 9	14.3	2,951	4,191	182.5	3,544	6.24	11.36
" 10	11.0	2,962	4,311	160.3	3,802	3.88	9.09
" 11	16.2	2,951	4,218	177.0	3,378	6.79	11.69
" 12	9.5	2,962	4,234	177.0	3,951	-0.315	5.14
" 13	14.0	2,977	4,305	166.5	3,583	5.778	10.80
" 14	9.5	2,951	4,218	177.0	3,880	-0.315	5.06
" 15	13.5	2,962	4,291	163.4	3,554	5.97	10.94
" 16	8.3	2,939	4,228	171.8	3,457	-0.148	4.59
" 17	12.5	1,985	2,862	168.6	3,154	-0.514	2.22
" 18	11.0	1,985	2,860	169.7	2,827	7.02	12.87
" 19	10.5	1,985	2,860	169.7	2,804	7.46	13.23
" 20	8.8	1,985	2,862	168.6	3,275	3.15	9.81
" 21	9.0	1,985	2,886	161.3	3,180	1.35	7.77
" 22	10.5	"	2,878	163.4	2,562	10.25	15.68
" 23	11.5	"	2,870	166.5	2,399	6.95	11.91
" 24	12.0	"	2,860	169.7	2,631	7.25	12.73
" 25	16.5	1,988	2,832	173.9	2,273	12.67	17.56
" 26	9.5	"	2,832	180.2	3,309	0.006	
" 27	12.0	1,985	2,907	154.1	2,276	11.26	15.89
" 28	10.0	1,988	2,85	179.1	3,206	-0.341	6.26
" 29	8.5	1,985	2,857	170.7	3,297	-0.574	
" 30	10.0	1,000	1,463	155.1	2,364	8.58	18.06
" 31	9.0	0,992	1,451	156.2	2,223	9.84	18.77
" 32	10.0	1,007	1,475	154.1	1,766	15.01	22.03
" 33	10.3	"	1,474	155.1	2,004	14.99	22.98
" 34	11.0	"	1,474	155.1	1,966	17.13	25.02
" 35	11.8	"	1,473	156.2	1,799	16.78	24.04
" 36	13.5	"	1,469	158.2	2,215	21.01	30.08
" 37	9.0	1,000	1,454	161.3	2,268	1.13	10.21
" 38	8.0	"	1,454	161.3	2,338	11.78	21.07
" 39	10.5	1,007	1,475	154.1	1,403	22.43	28.03
" 40	11.0	1,011	1,485	151.0	1,541	21.21	27.34
" 41	9.3	1,007	1,458	165.5	2,060	1.89	10.14
" 42	8.5	"	1,461	163.4	2,316	2.25	11.45
" 43	9.7	"	1,474	155.1	2,526	4.54	14.82
" 44	9.5	"	1,474	155.1	2,305	4.48	13.62
" 45	12.7	1,015	1,485	155.1	1,170	27.88	32.59
" 46	14.8	1,011	1,481	154.1	1,285	16.51	31.77

Table 4 Results of burnout experiment  
(3 rod bundle, gap 4 mm)

RUN No.	P [ kg/cm <sup>2</sup> a ]	u [ m/s ]	G × 10 <sup>-6</sup> [ kcal/m <sup>2</sup> h ]	hi [ kcal/kg ]	q <sub>BO</sub> × 10 <sup>-6</sup> [ kcal/m <sup>2</sup> h ]	xi [ % ]	xe [ % ]
8-6-1	1.05	1.179	2.603	168.6	2.947	5.60	12.07
" 2	"	"	"	"	2.994	5.40	12.18
" 3	1.05	"	2.591	172.8	2.790	7.47	14.01
" 4	8.0	"	"	"	2.660		
" 5	1.20	1.181	2.623	163.4	2.781	7.41	13.72
" 6	1.05	1.179	2.596	171.8	2.565	1.70	7.52
" 7	1.00	"	2.601	169.7	2.703	1.70	7.82
" 8	1.60	1.181	2.606	"	2.416	11.09	16.57
" 9	1.15	1.184	2.584	179.1	3.843	-1.50	73.38
" 10	9.3	"	2.600	173.9	3.877	-0.73	7.97
" 11	1.60	1.976	4.313	179.1	3.843	4.95	10.39
" 12	1.30	"	4.269	189.7	4.357	-0.02	6.11
" 13	1.07	"	4.313	179.1	4.083	-0.09	5.50
" 14	1.10	"	4.330	177.0	3.740	3.36	8.47
" 15	1.15	"	4.319	179.1	3.819	3.41	8.66
" 16	1.00	"	4.326	178.1	3.681	2.29	7.38
" 17	"	"	4.334	176.0	3.109	1.95	6.16
" 18	8.5	"	4.349	172.8	2.580	-0.192	3.25
" 19	1.30	"	4.383	164.5	2.44	5.98	9.22
" 20	8.7	"	4.352	171.8			

Table 5 Results of burnout experiment  
(3 rod bundle, gap 1.75mm, spacer set)

RUN No.	P [kg/cm <sup>2</sup> a]	u [m/s]	G × 10 <sup>-6</sup> [kg/m <sup>2</sup> h]	hi [kcal/kg]	q <sub>BO</sub> × 10 <sup>-6</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	x <sub>i</sub> [%]	x <sub>e</sub> [%]
8-17-1	1 0.8	1.976	2.176	1 6 8.6	2.353	1.66	8.04
2	"	"	2.173	1 7 0.7	3.003	2.10	10.26
3	1 2.0	"	2.171	1 7 1.8	3.562	5.8	15.58
4	1 1.0	"	2.163	1 7 4.9	3.688	7.31	17.39
5	1 2.0	"	"	"	3.412	11.40	20.80
8-19-1	1 0.0	"	2.171	1 7 1.8	2.722	3.08	10.70
2	1 0.5	1.961	2.160	1 6 8.6	1.322	6.29	9.90
3	1 0.0	1.976	2.173	1 7 0.7	1.554	7.10	11.30
4	1 1.0	"	2.176	1 6 8.6	2.625	10.77	17.91
5	"	"	2.174	1 6 9.7	1.473	11.02	15.02
6	1 3.0	"	2.171	1 7 1.8	1.552	14.80	19.08
7	1 1.5	"	2.163	1 7 4.9	2.711	-2.58	4.85
8	1 2.0	"	2.167	1 7 3.9	3.323	-3.25	5.89
9	1 4.0	1.986	2.183	1 6 9.7	1.520	18.14	22.34
10	1 5.5	1.981	2.188	1 6 6.5	1.964	16.49	21.96
11	1 1.0	2.991	3.256	1 7 9.1	2.146	-1.30	2.60
12	"	"	3.277	1 7 3.7	3.418	-2.45	3.72
13	1 0.0	"	3.288	1 7 0.7	2.045	2.48	6.12
14	"	"	3.285	1 7 1.8	2.453	2.71	7.09
15	1 1.0	"	3.291	1 6 9.7	3.649	5.97	12.53
16	"	"	3.274	1 7 4.9	3.577	7.20	13.66
17	1 4.0	2.947	3.220	1 7 6.0	2.828	10.08	15.38
18	1 7.0	"	3.205	1 8 0.2	3.003	9.10	14.85
19	1 0.5	1.005	1.102	1 7 2.8	2.144	-2.03	15.33
20	1 0.0	"	1.109	1 6 7.6	1.765	-2.66	6.84
21	1 1.0	"	1.113	1 6 3.4	1.870	-0.46	9.32
22	"	"	1.116	1 6 1.3	3.334	-4.68	-2.19
23	1 1.5	"	1.118	1 5 9.3	1.857	3.13	12.47
24	1 0.0	"	1.116	1 6 1.3	2.164	-3.20	-2.06
25	1 0.5	0.981	1.091	1 5 9.3	2.037	9.41	2.04
26	9.5	1.005	1.117	1 6 0.3	2.111	9.53	20.08
27	9.0	"	1.116	1 6 1.3	1.987	14.55	24.70
28	1 1.0	"	"	"	2.364	12.54	24.59
29	1 0.0	"	"	1 5 9.3	1.837	17.19	26.49
30	"	"	1.119	1 5 8.2	1.581	16.42	24.21
31	1 1.0	"	"	"	1.420	21.65	28.71
32	"	"	1.118	1 5 9.3	1.352	22.11	28.89
33	"	"	1.116	1 6 1.3	1.386	23.66	30.72
34	"	"	"	"	1.447	16.82	24.20
35	1 0.0	"	1.113	1 6 3.4	1.849	14.06	23.66
36	"	0.990	1.097	"	2.103	12.14	24.87
37	"	1.005	1.112	1 6 4.5	1.811	5.98	15.47
38	1 1.5	"	1.113	1 6 3.4	2.898	-0.88	14.34
39	1 1.5	"	1.116	1 6 1.3	3.022	-4.93	10.48

Table 6 Results of burnout experiment  
( 4 rod bundle, gap 1.75 mm )

Run No.	P [kg/cm <sup>2</sup> a]	u [m/s]	G × 10 <sup>-6</sup> [kg/m <sup>2</sup> h]	hi [kcal/kg]	q <sub>BO</sub> × 10 <sup>-6</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	x <sub>i</sub> [%]	x <sub>e</sub> [%]
8-8-1	1.2.5	1.927	2.541	179.1	2.916	2.32	114.6
" 2	1.3.0	1.995	"	"	3.129	1.92	117.7
" 3	1.5.0	"	2.536	181.2	3.293	3.48	139.9
" 4	1.3.0	"	2.580	165.5	2.453	4.13	117.4
" 5	1.2.0	"	2.557	173.9	3.529	-3.26	7.70
" 6	1.2.5	"	2.640	142.8	2.088	4.18	104.8
" 7	1.9.0	"	2.568	169.7	2.168	10.72	17.23
" 8	9.5	1.990	2.669	128.4	2.970	-9.16	-0.48
" 9	1.0.0	1.994	2.664	132.5	4.024	-0.26	115.6
" 10	1.7.0	"	2.606	156.2	3.424	3.39	145.7
" 11	1.6.0	1.051	1.363	163.4	3.538	-8.98	122.4
" 12	1.5.0	1.060	1.383	157.2	3.653	-9.74	117.4
" 13	1.3.2	"	1.389	153.1	3.678	-8.61	126.0
" 14	1.2.0	1.051	1.378	"	3.558	-7.57	129.3
" 15	1.1.0	"	1.380	151.0	3.392	-6.99	121.0
" 16	1.0.0	"	1.382	150.0	3.517	-6.34	135.8
" 17	1.0.5	1.060	1.391	151.0	3.034	-1.97	151.8
" 18	1.0.0	1.047	1.381	146.9	3.241	-2.31	16.06
" 19	1.1.0	"	"	"	1.878	1.35	119.1
" 20	1.3.0	1.051	1.378	153.1	1.978	-5.39	16.88
" 21	1.0.5	"	1.374	156.2	3.444	-5.53	141.8
" 22	1.3.5	"	"	"	2.121	1.066	23.03
" 23	1.7.0	"	1.370	158.2	2.187	13.42	26.50
" 24	1.6.0	1.060	1.380	159.3	1.853	18.12	29.07
" 25	1.2.5	1.051	1.363	163.4	3.293	-3.82	154.2
" 26	1.5.7	1.060	1.373	164.5	1.699	20.17	30.12
" 27	1.3.0	2.974	3.814	173.9	4.357	-0.998	8.14
" 28	1.7.0	"	3.800	177.0	4.036	4.28	12.99
" 29	2.0.0	"	3.814	173.9	3.444	5.95	13.48
" 30	1.4.0	0.553	0.702	182.3	2.535	-3.65	22.68
" 31	9.0	0.553	0.711	171.8	2.468	-2.01	25.93
" 32	1.0.0	0.540	0.708	154.1	2.338	-4.31	21.33
" 33	"	0.553	0.726	151.0	2.168	40.44	63.76
" 34	1.1.2	0.570	0.752	145.8	1.011	45.96	151.2
" 35	1.0.5	0.553	0.737	135.6	1.202	12.43	153.1
" 36	1.1.0	0.540	0.722	132.5	1.290	5.88	19.91
" 37	1.1.5	0.553	0.740	130.5	1.446	11.05	26.45
" 38	1.1.0	0.540	0.721	133.5	1.463	15.05	31.12
" 39	"	0.553	0.737	135.6	1.476	19.97	35.76
" 40	"	"	0.734	139.7	1.508	21.21	37.41

Table 7 Results of burnout experiment  
(4 rod bundle, gap 25mm)

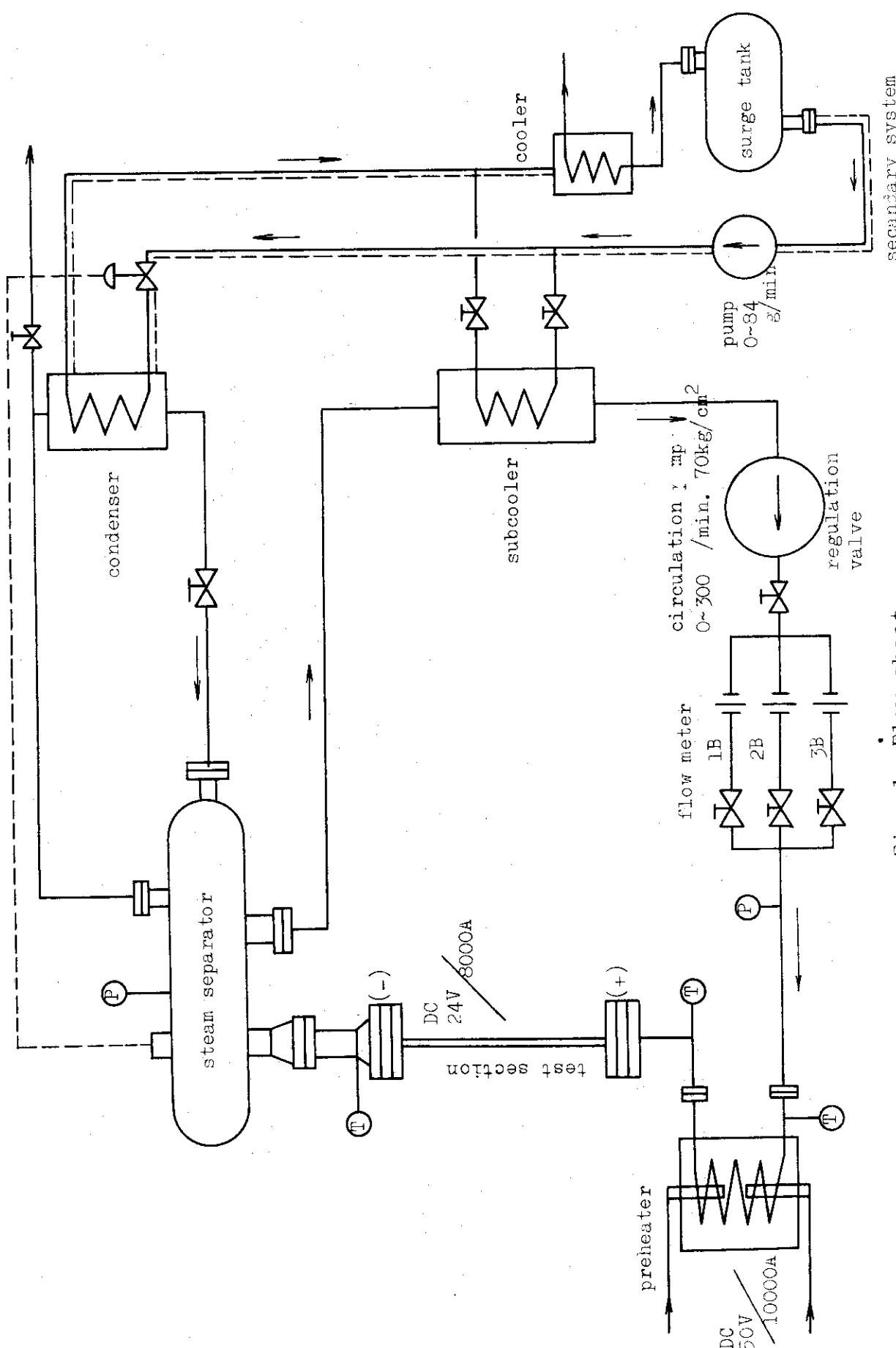
Run No.	P [kg/cm <sup>2</sup> a]	u [m/s]	G × 10 <sup>-6</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	hi [kcal/kg]	g <sub>BO</sub> × 10 <sup>-6</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	x <sub>i</sub> [%]	x <sub>e</sub> [%]
8-10-1	1.0.0	0.998	1.714	158.2	2.704	5.27	17.62
" 2	1.1.0	"	1.713	159.3	2.641	4.62	16.78
" 3	1.0.0	0.985	1.691	"	2.398	10.20	21.3
" 4	"	1.001	1.707	165.5	2.569	11.51	23.29
" 5	1.1.0	0.991	1.691	"	2.234	15.52	25.93
" 6	1.1.5	0.994	1.696	"	2.465	15.09	26.60
" 7	1.2.5	1.013	1.694	170.7	2.250	17.81	28.40
" 8	8.5	1.017	1.724	171.8	2.530	4.30	15.65
" 9	9.5	0.998	1.714	158.2	2.303	0.53	11.01
" 10	"	"	1.727	151.0	2.401	15.58	26.42
" 11	1.0.0	0.991	1.716	"	2.269	15.28	25.63
" 12	1.3.0	0.998	1.724	153.1	2.090	20.29	29.99
" 13	1.4.0	0.991	1.708	156.2	2.171	20.58	30.81
" 14	8.0	"	1.699	161.3	2.886	-1.90	11.18
" 15	1.3.0	1.013	1.751	153.1	2.147	20.25	30.06
" 16	1.0.0	0.991	1.714	152.0	3.128	-5.94	8.34
" 17	"	0.998	1.725	"	1.873	22.45	30.95
" 18	1.1.0	1.805	3.118	153.1	3.521	-1.61	7.29
" 19	9.7	"	3.109	156.2	3.223	5.75	13.82
" 20	1.0.0	"	3.093	161.3	3.421	6.56	15.22
" 21	1.1.0	"	3.115	154.1	3.441	9.31	18.02
" 22	7.0	1.811	3.161	142.8	3.177	10.55	18.23
" 23	1.0.0	1.805	3.129	148.9	3.310	9.01	17.28
" 24	1.0.5	2.780	4.777	158.2	4.188	5.49	12.37
" 25	1.2.0	"	4.738	166.5	4.161	5.61	12.58
" 26	1.0.0	0.515	0.898	143.8	1.251	5.65	16.54
" 27	1.1.0	"	0.903	137.6	1.282	3.40	13.72
" 28	1.0.5	0.502	0.894	120.3	1.303	16.45	27.9
" 29	1.1.0	0.486	0.866	119.3	"	4.52	16.38
" 30	"	0.499	0.889	"	1.419	9.38	21.97
" 31	"	"	"	"	1.286	"	20.79
" 32	1.0.0	"	"	"	1.581	14.76	28.68
" 33	1.1.5	0.486	0.865	120.3	1.344	14.56	26.85
" 34	1.1.0	0.499	0.888	"	1.329	19.70	31.54
" 35	1.0.5	0.477	0.848	"	1.284	21.70	33.63
" 36	1.0.0	0.499	0.887	121.3	1.213	-2.98	7.72
" 37	9.0	"	"	"	1.283	-1.96	9.27

Table 8 Results of burnout experiment  
(4 rod bundle, gap 4 mm)

Run No.	P [kg/cm <sup>2</sup> a]	u [m/s]	G × 10 <sup>-6</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	hi [kcal/kg]	q <sub>BO</sub> × 10 <sup>-6</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	x i [%]	x e [%]
8-12-1	12.0	0.996	2.676	143.8	3.548	-1.479	9.05
" 2	10.0	"	2.651	153.1	3.148	3.916	13.25
" 3	15.0	"	2.644	156.2	3.383	4.905	15.27
" 4	16.0	"	2.656	151.0	2.792	7.899	16.47
" 5	7.0	"	2.696	135.6	1.999	-1.37	4.27

Table 9 Results of burnout experiment  
(4 rod bundle, gap 1.75mm, spacer set)

Run No.	P [kg/cm <sup>2</sup> a]	u [m/s]	G × 10 <sup>-6</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	hi [kcal/kg]	q <sub>BO</sub> × 10 <sup>-6</sup> [kcal/m <sup>2</sup> h]	x i [%]	x e [%]
8-21-1	11.0	2.974	3.810	174.9	3.204	2.78	9.41
" 2	10.0	"	3.831	169.7	3.929	2.57	10.59
" 3	13.0	"	"	"	3.235	5.29	12.34
" 4	13.5	"	3.800	177.0	2.399	6.31	11.37
" 5	16.5	"	3.777	182.3	3.406	5.66	13.01
" 6	12.0	"	3.873	159.3	2.601	7.93	13.27
" 7	15.5	"	2.814	173.9	2.995	8.61	14.99
" 8	10.5	2.002	2.600	102.4	2.910	0.259	9.05
" 9	"	"	2.603	161.3	2.982	0.025	9.03
" 10	11.5	"	2.588	166.5	2.910	6.74	15.64
" 11	11.0	"	"	"	2.758	6.07	14.49
" 12	13.5	"	2.603	161.3	2.787	7.77	16.36
" 13	10.0	"	2.617	156.2	2.731	9.39	17.56
" 14	11.5	"	"	"	2.487	13.52	21.04
" 15	12.0	"	2.607	159.3	2.420	12.81	20.18
" 16	11.0	"	2.603	161.3	2.224	-4.97	1.76
" 17	10.5	"	2.631	150.0	2.186	-6.90	-0.37
" 18	10.0	1.051	1.389	144.8	2.794	-7.43	8.21
" 19	"	"	1.398	137.6	2.603	-8.92	5.65
" 20	11.0	"	1.401	135.6	2.007	3.38	14.67
" 21	10.5	"	"	"	2.176	3.87	16.16
" 22	"	"	1.378	153.1	1.895	12.48	23.25
" 23	10.0	"	1.377	154.1	2.140	13.05	25.21
" 24	11.0	"	1.374	156.2	2.020	16.97	27.34
" 25	11.5	"	"	"	1.830	16.61	27.14
" 26	12.0	1.060	1.385	"	2.714	-2.19	13.26
" 27	10.5	1.051	1.380	151.0	2.140	-1.93	10.26
" 28	11.0	"	1.378	153.1	2.538	1.99	16.51
" 29	10.5	"	"	"	2.126	2.44	14.56
" 30	11.5	"	"	"	1.871	20.68	31.12
" 31	10.0	"	"	"	1.702	21.71	31.38



secondary system

Fig. 1 Flow sheet

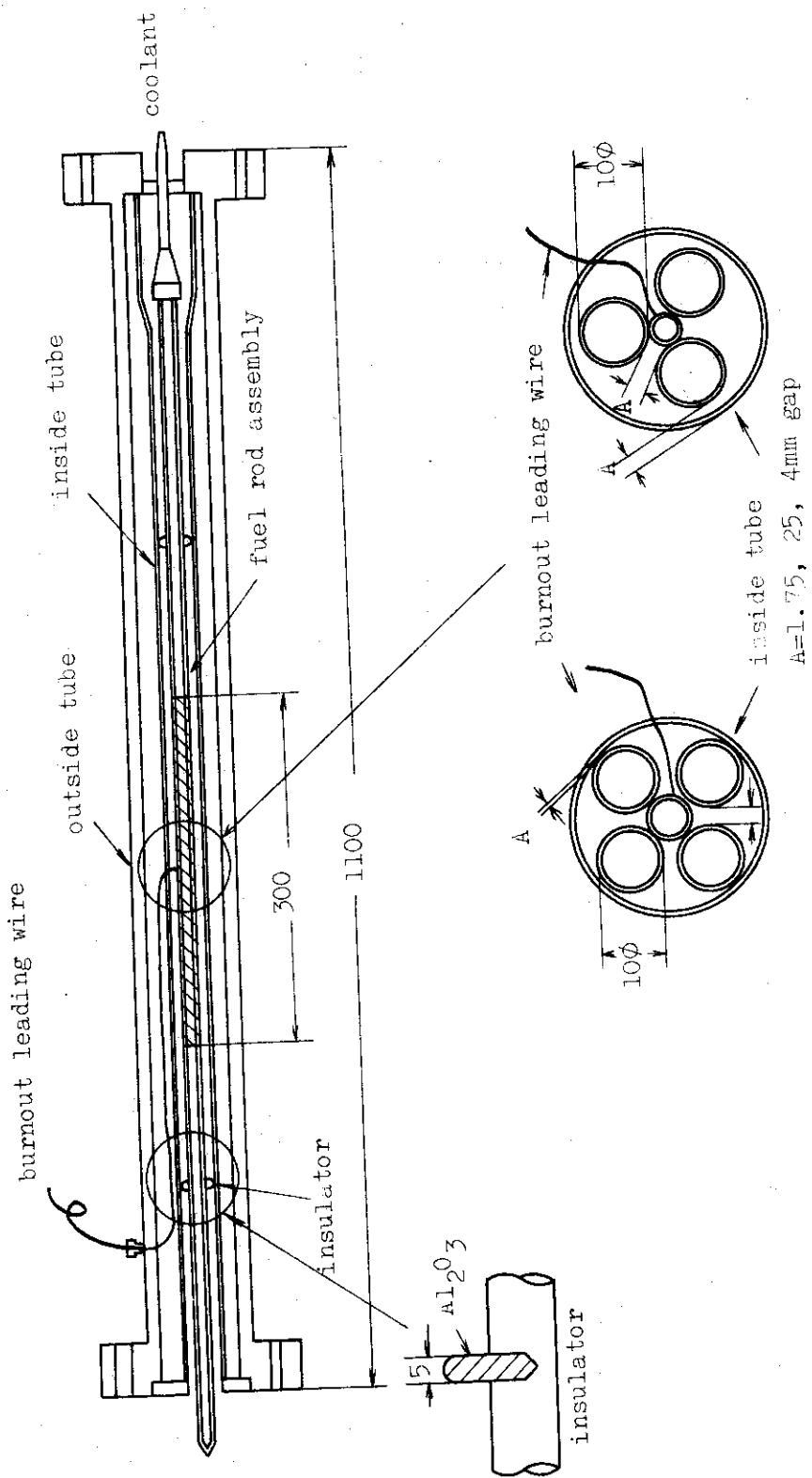


Fig. 2 Test section

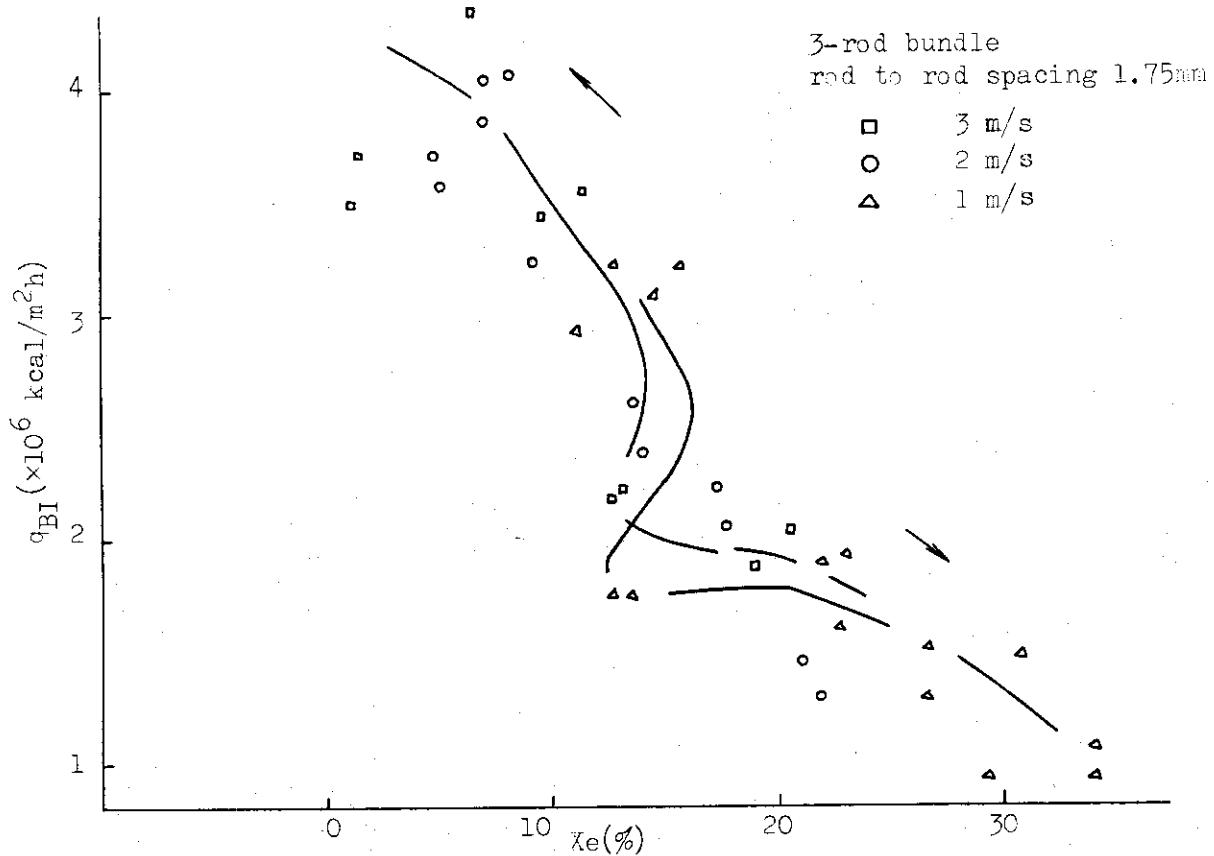


Fig. 3 Burnout flux vs Exit quality

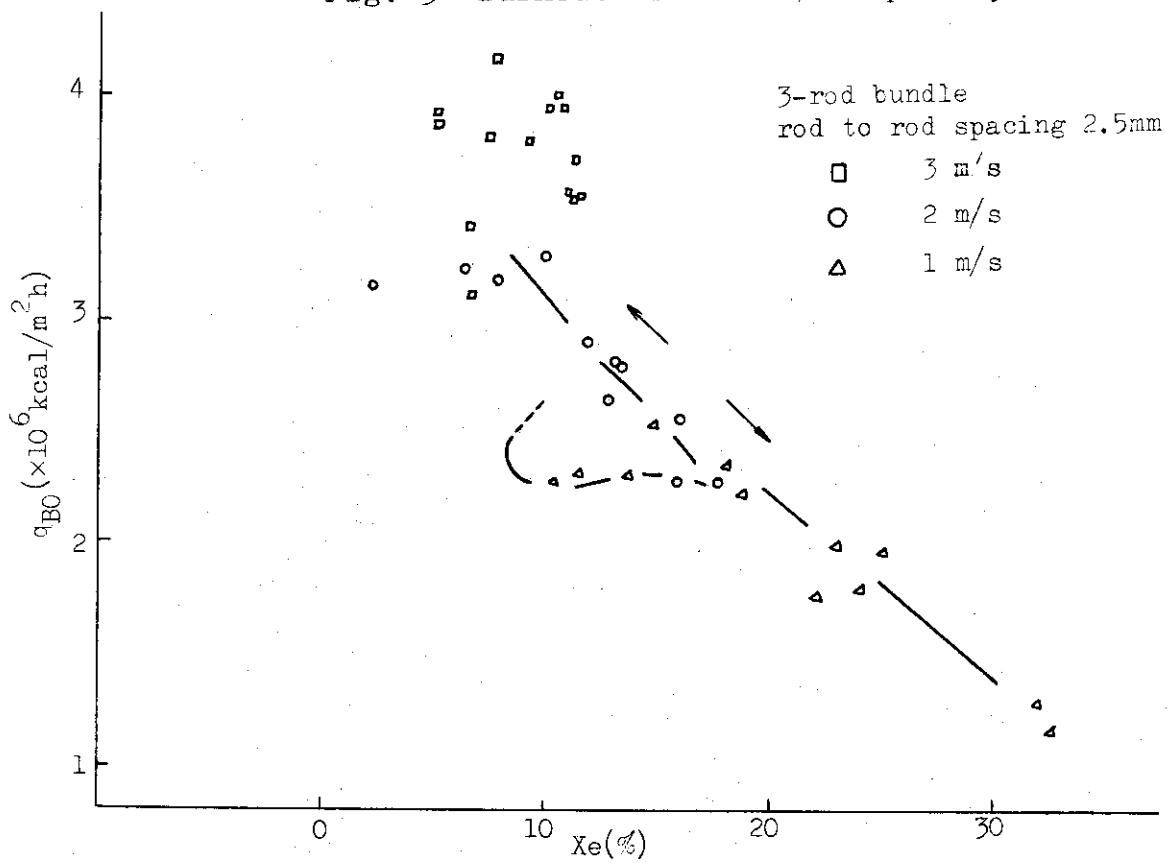


Fig. 4 Burnout flux vs Exit quality

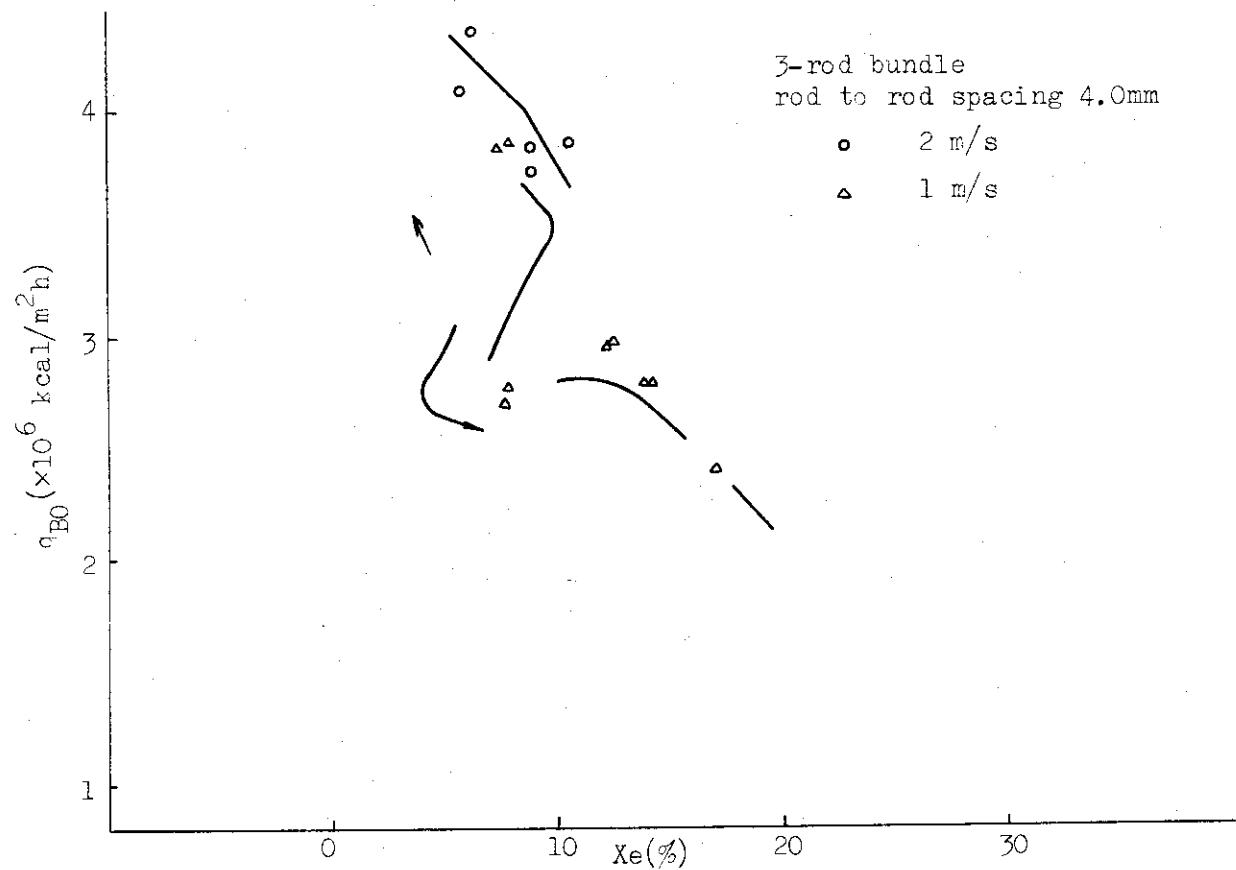


Fig. 5 Burnout flux vs Exit quality

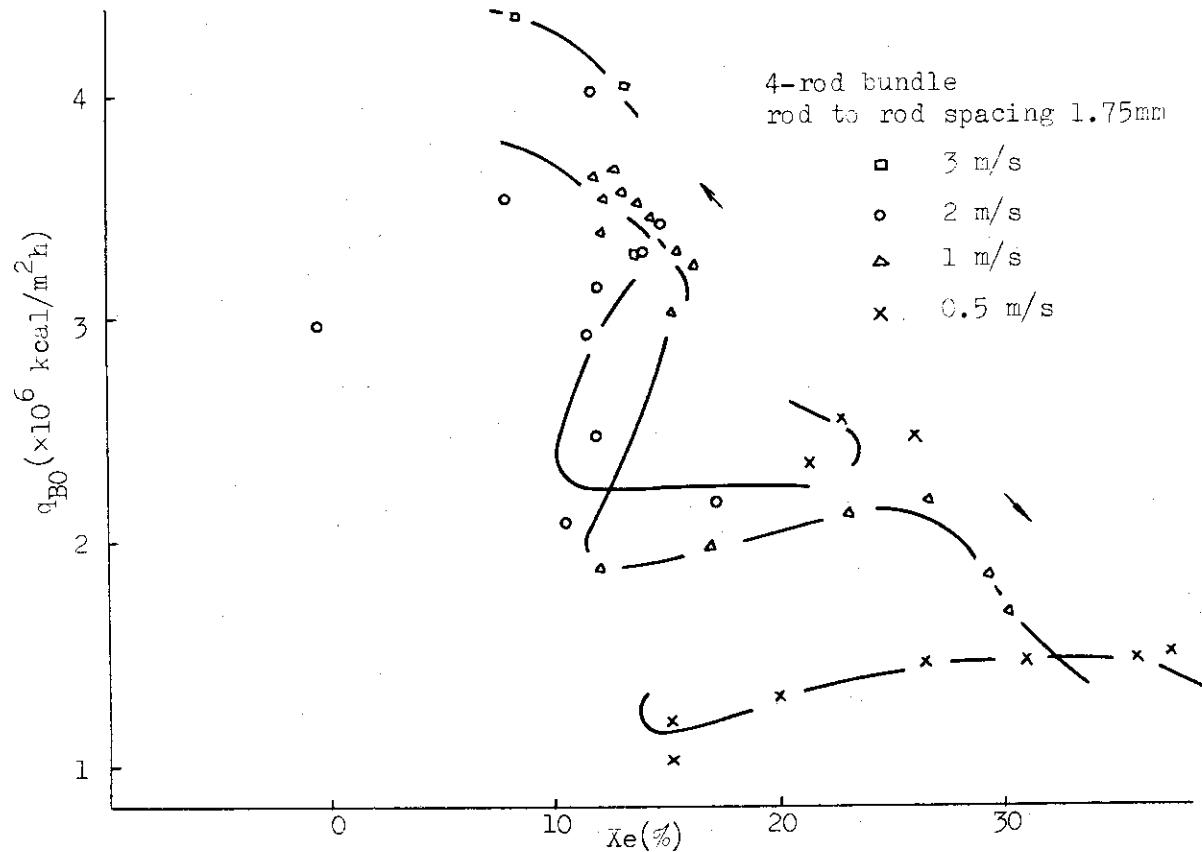


Fig. 6 Burnout flux vs Exit quality

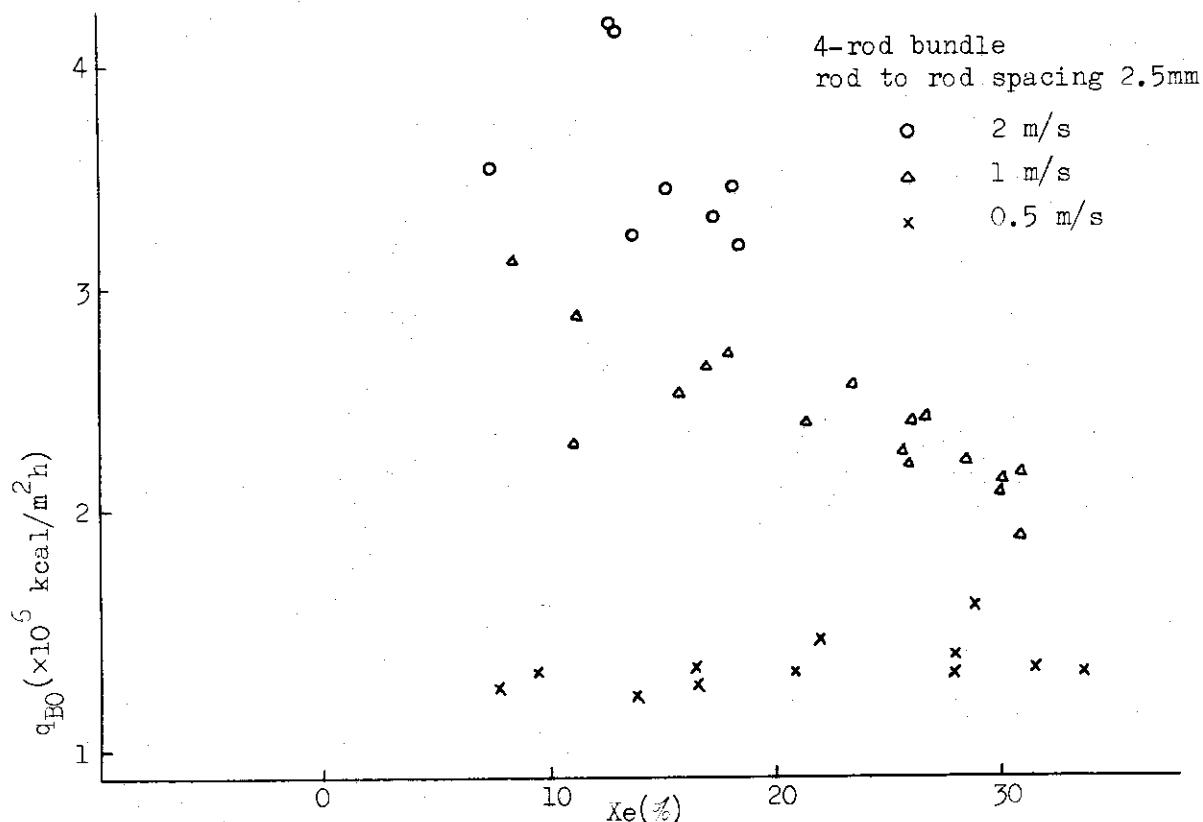


Fig. 7 Burnout flux vs Exit quality

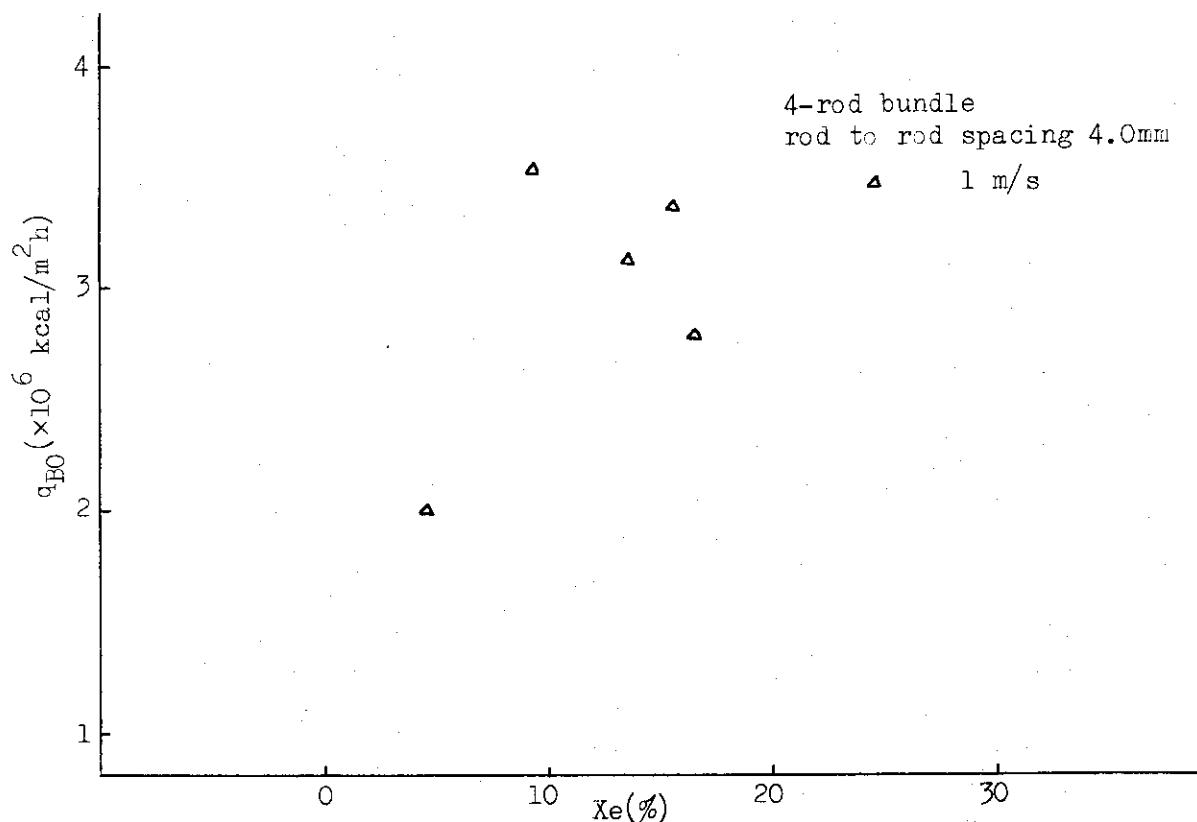


Fig. 8 Burnout flux vs Exit Quality

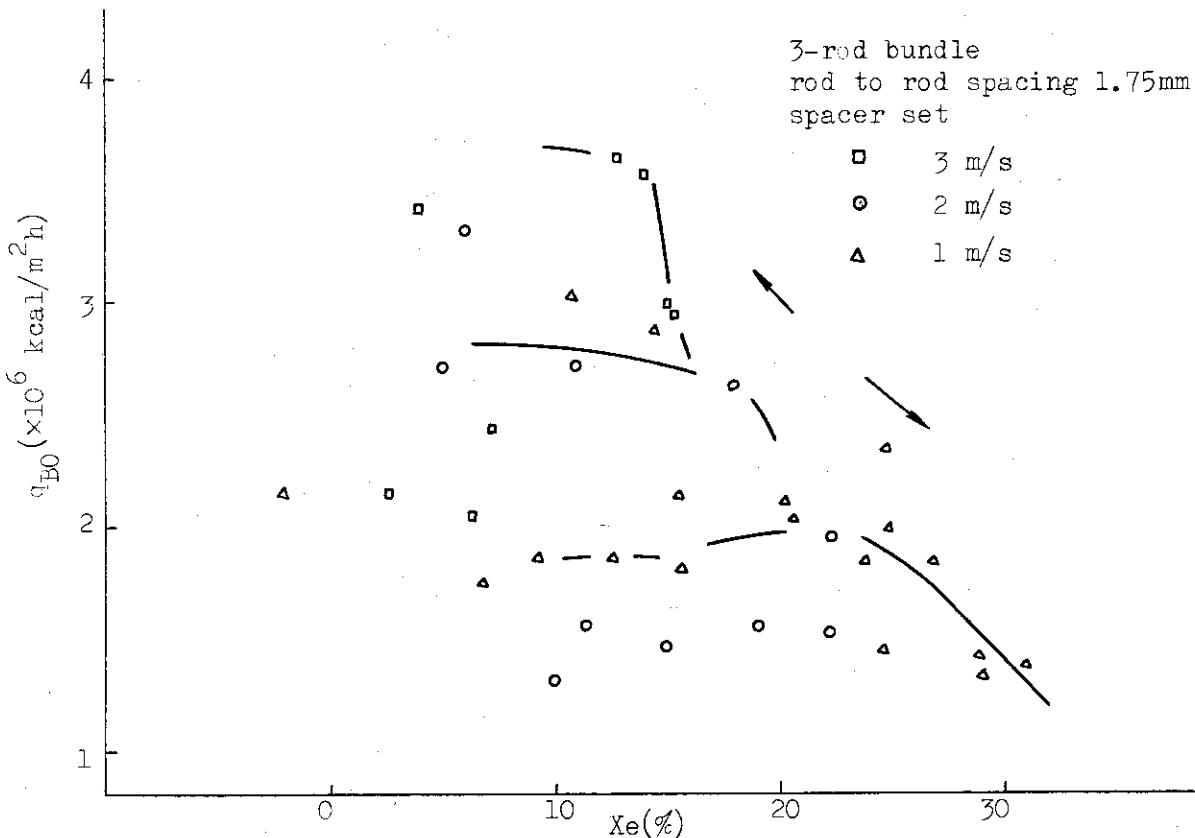


Fig. 9 Burnout flux vs Exit quality

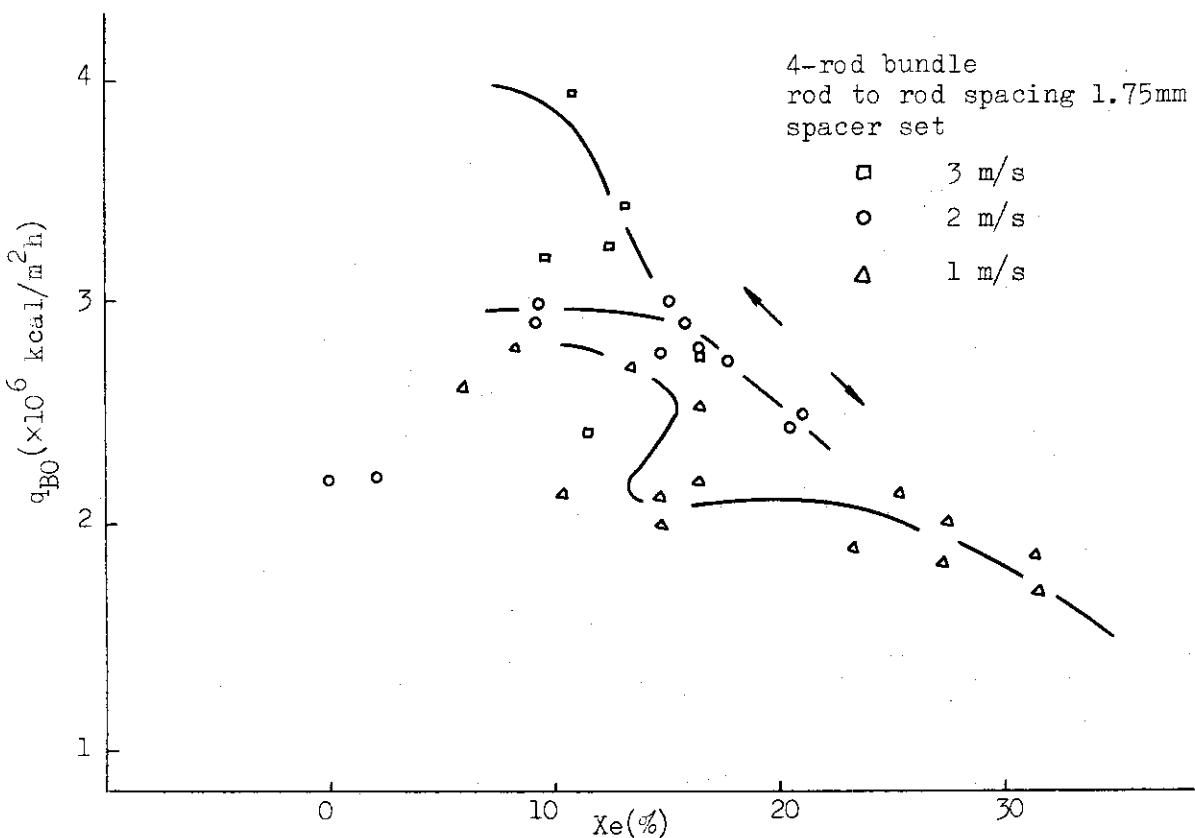


Fig. 10 Burnout flux vs Exit quality

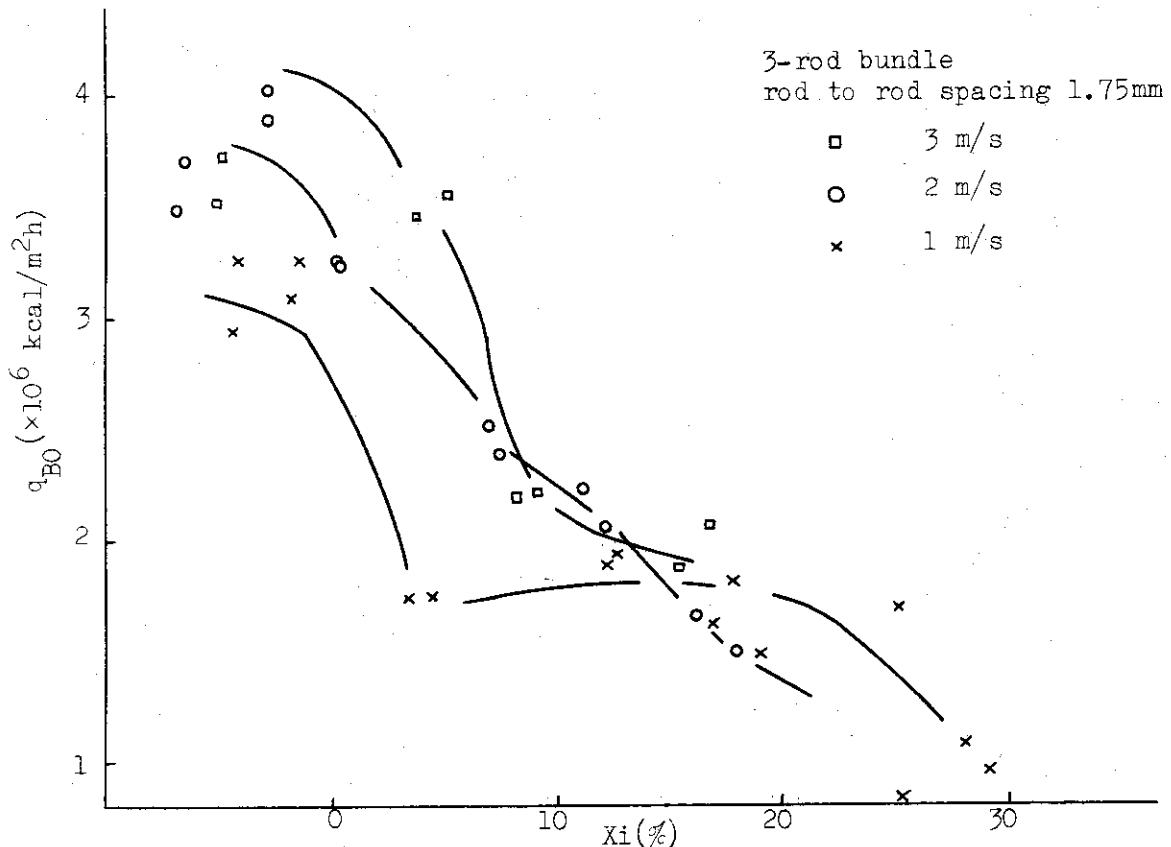


Fig.11 Burnout flux vs Inlet quality

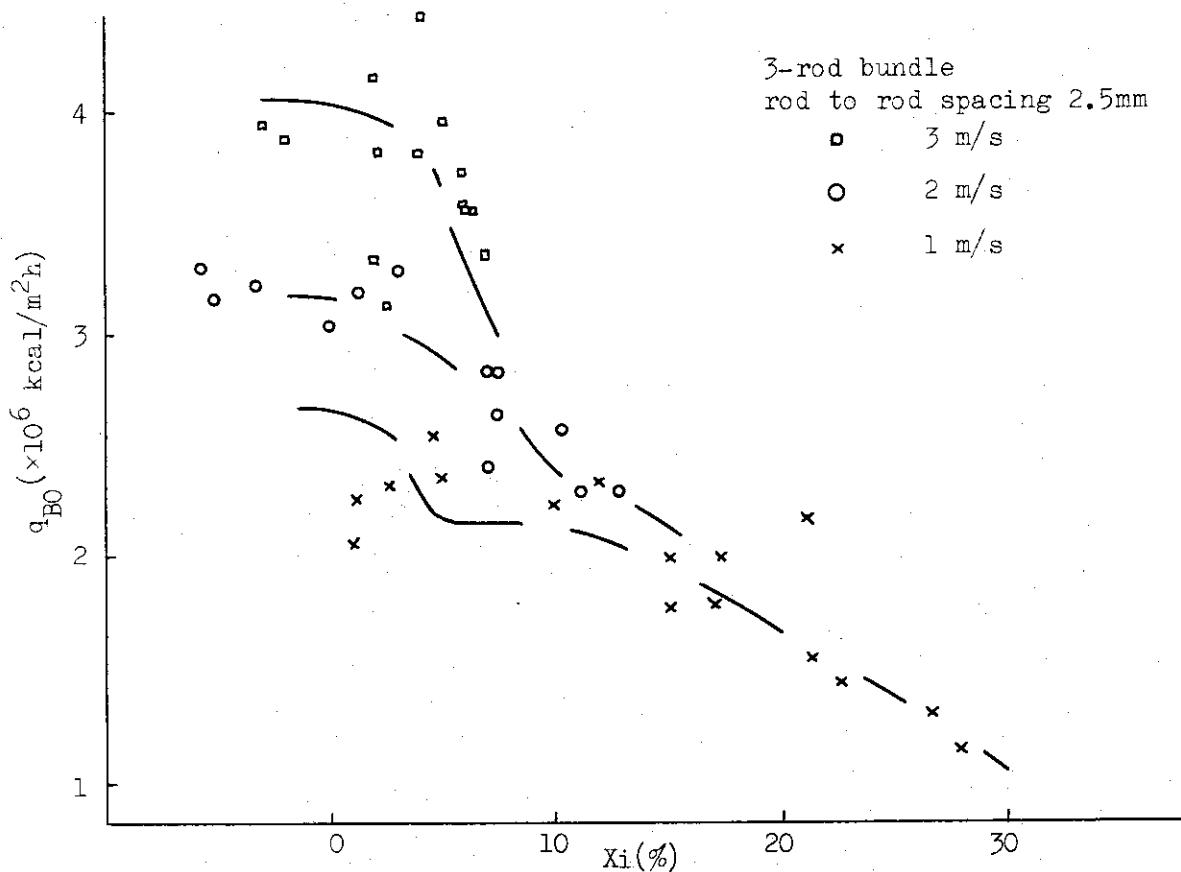


Fig.12 Burnout flux vs Inlet quality

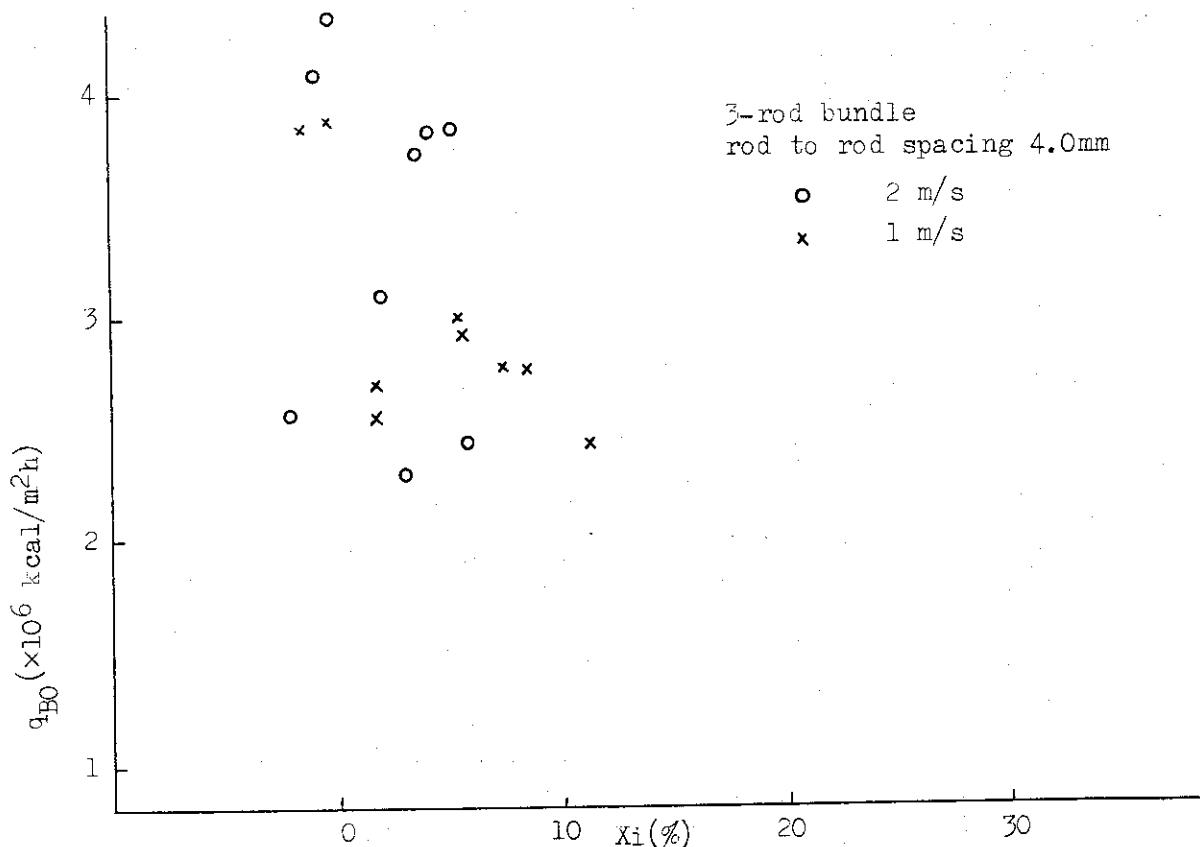


Fig.13 Burnout flux vs Inlet quality

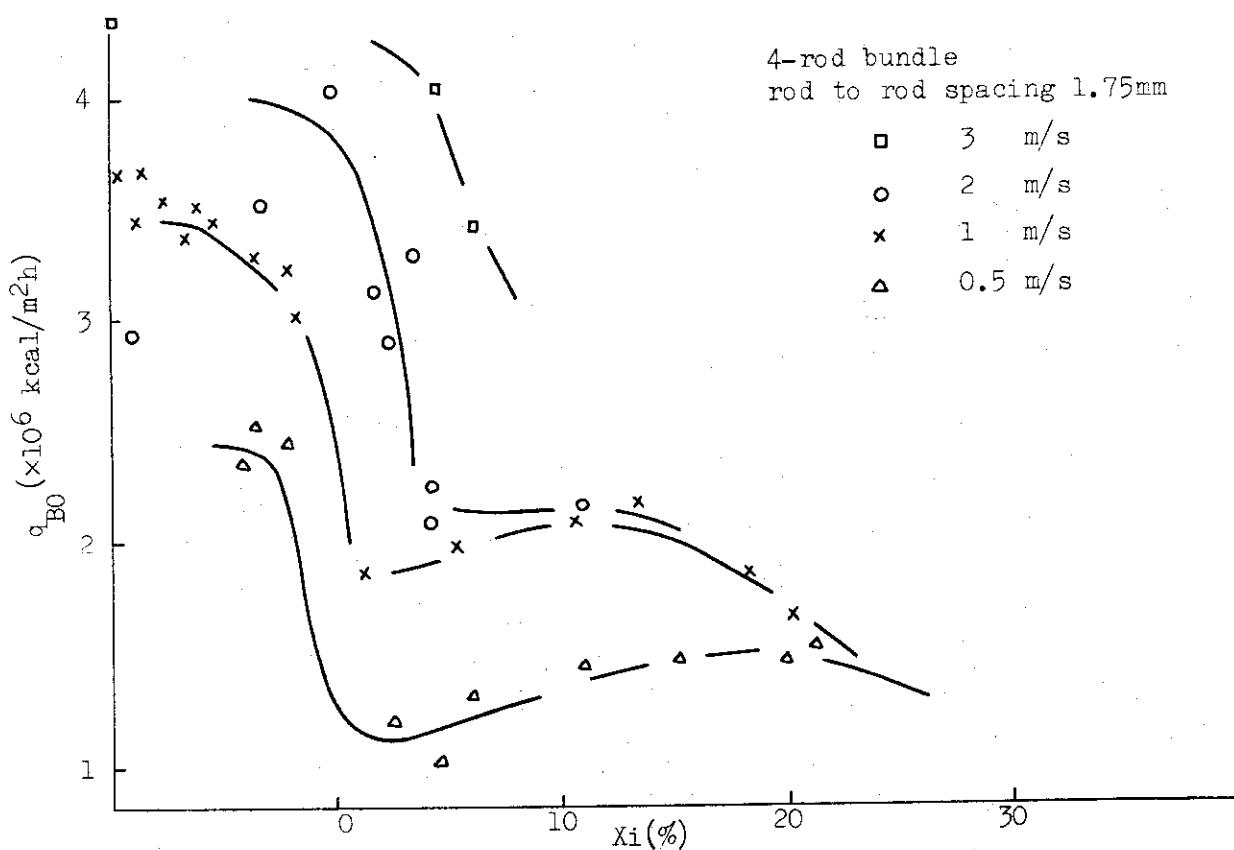


Fig.14 Burnout flux vs Inlet quality

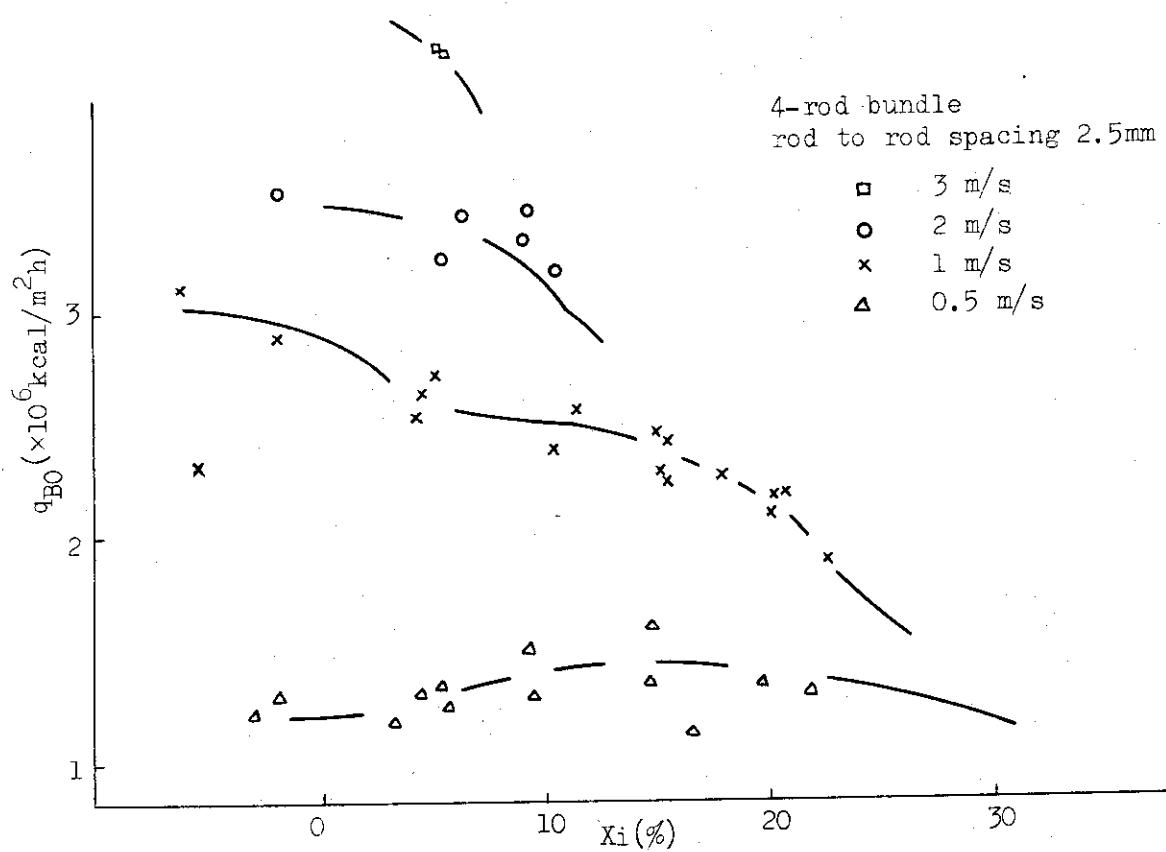


Fig.15 Burnout flux vs Inlet quality

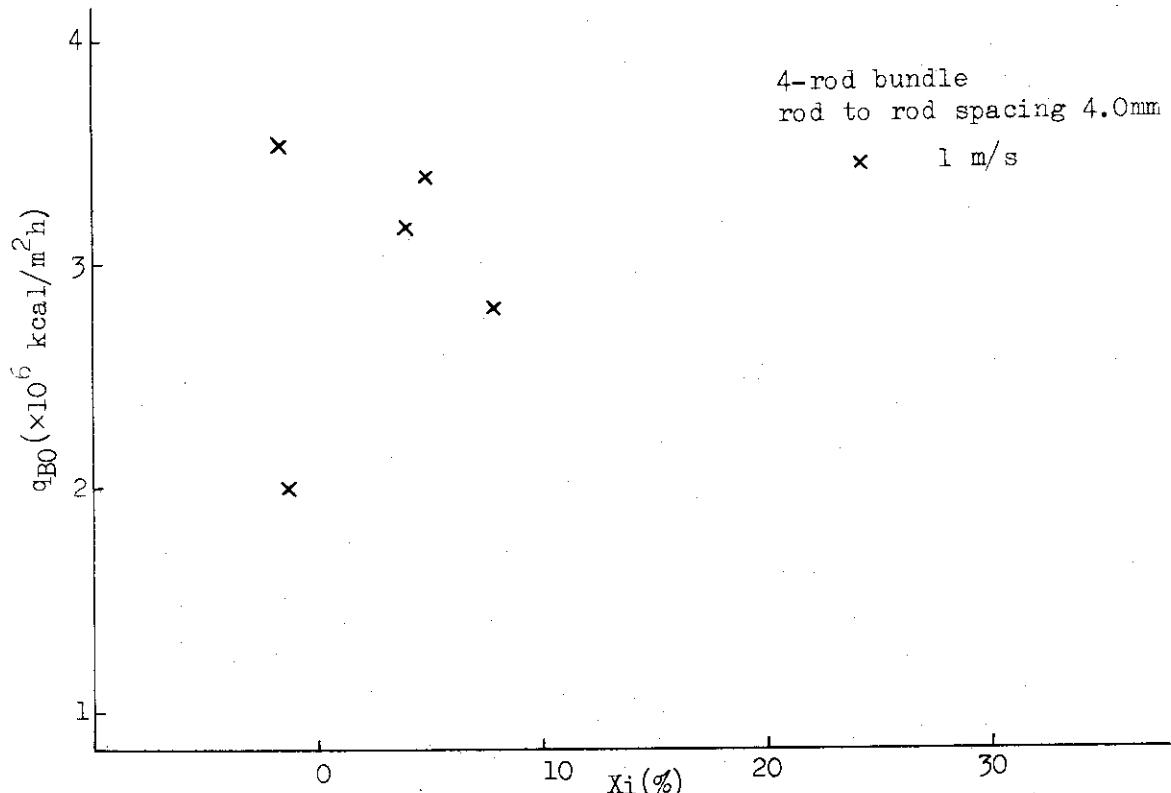


Fig.16 Burnout flux vs Inlet quality

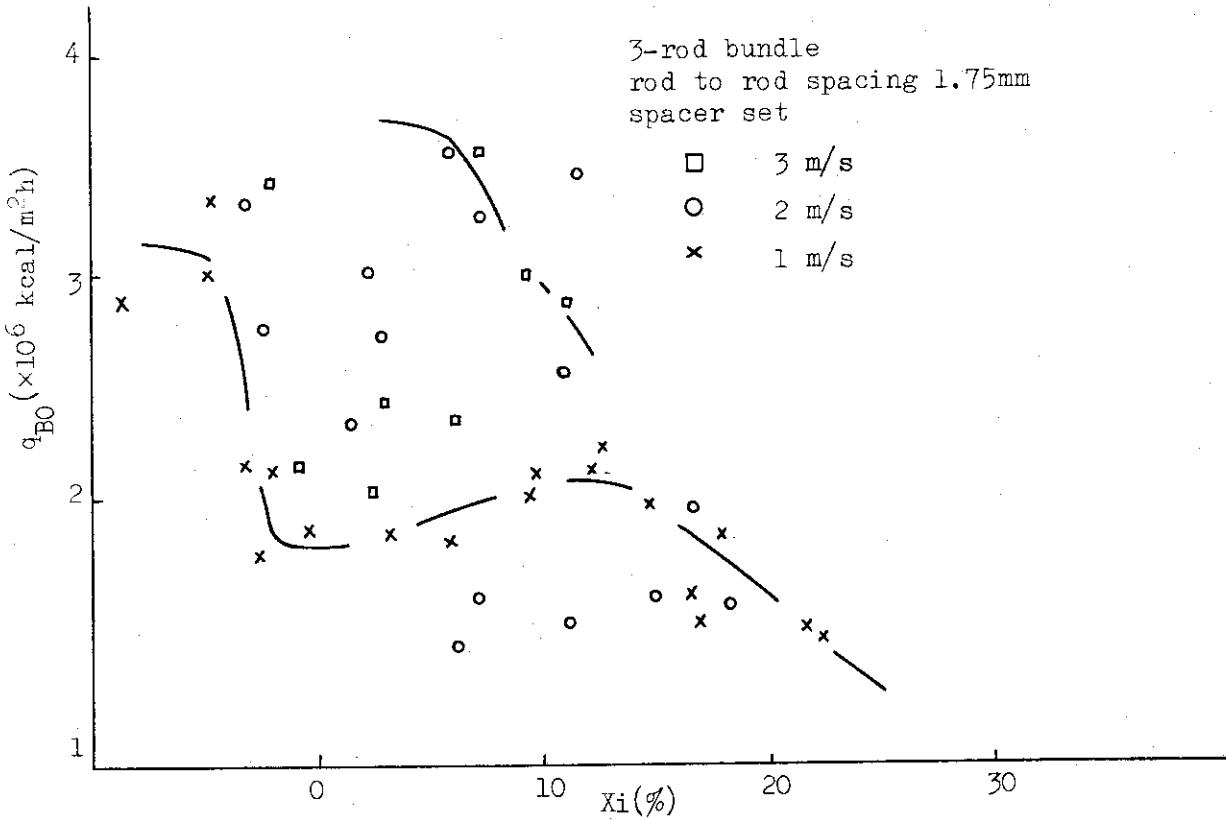


Fig.17 Burnout flux vs Inlet quality

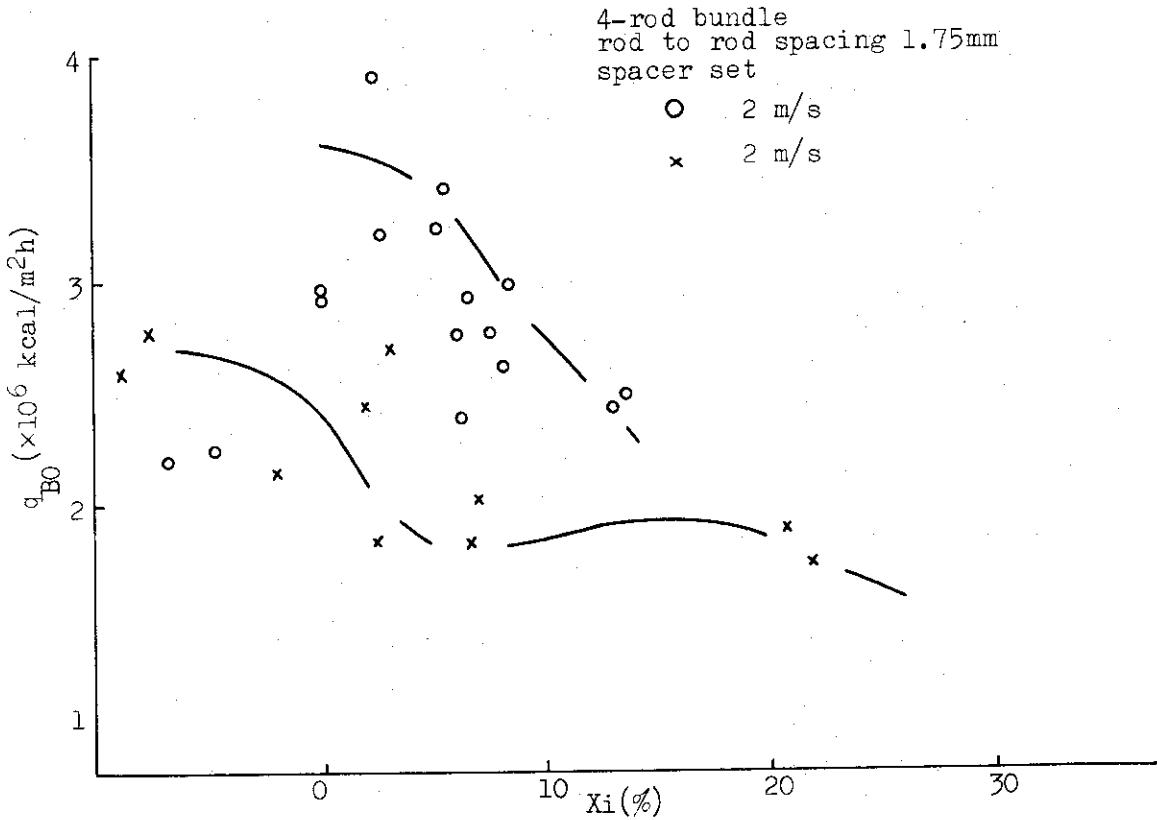


Fig.18 Burnout flux vs Inlet quality

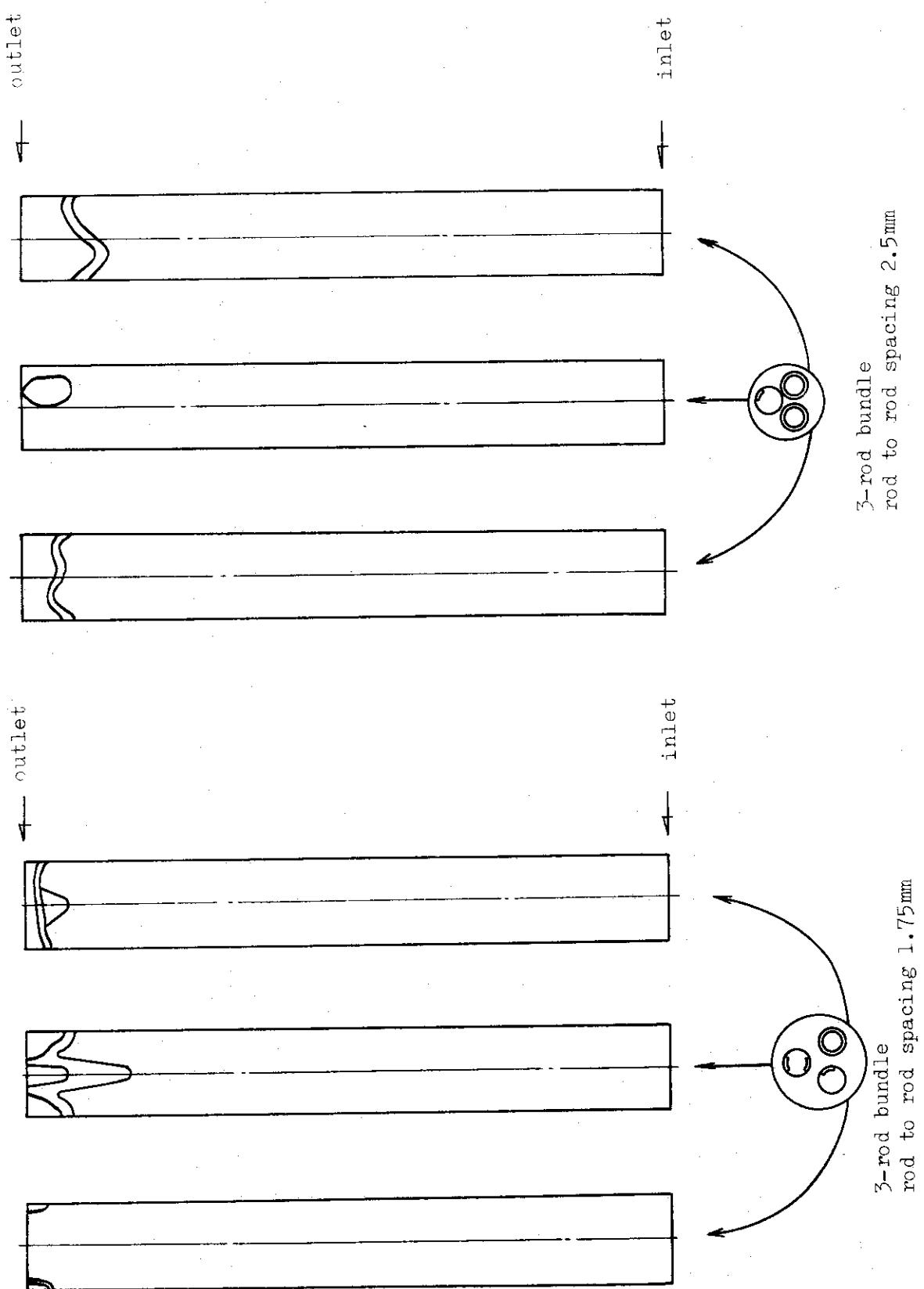


Fig.19 Burnout location

Fig.20 Burnout location

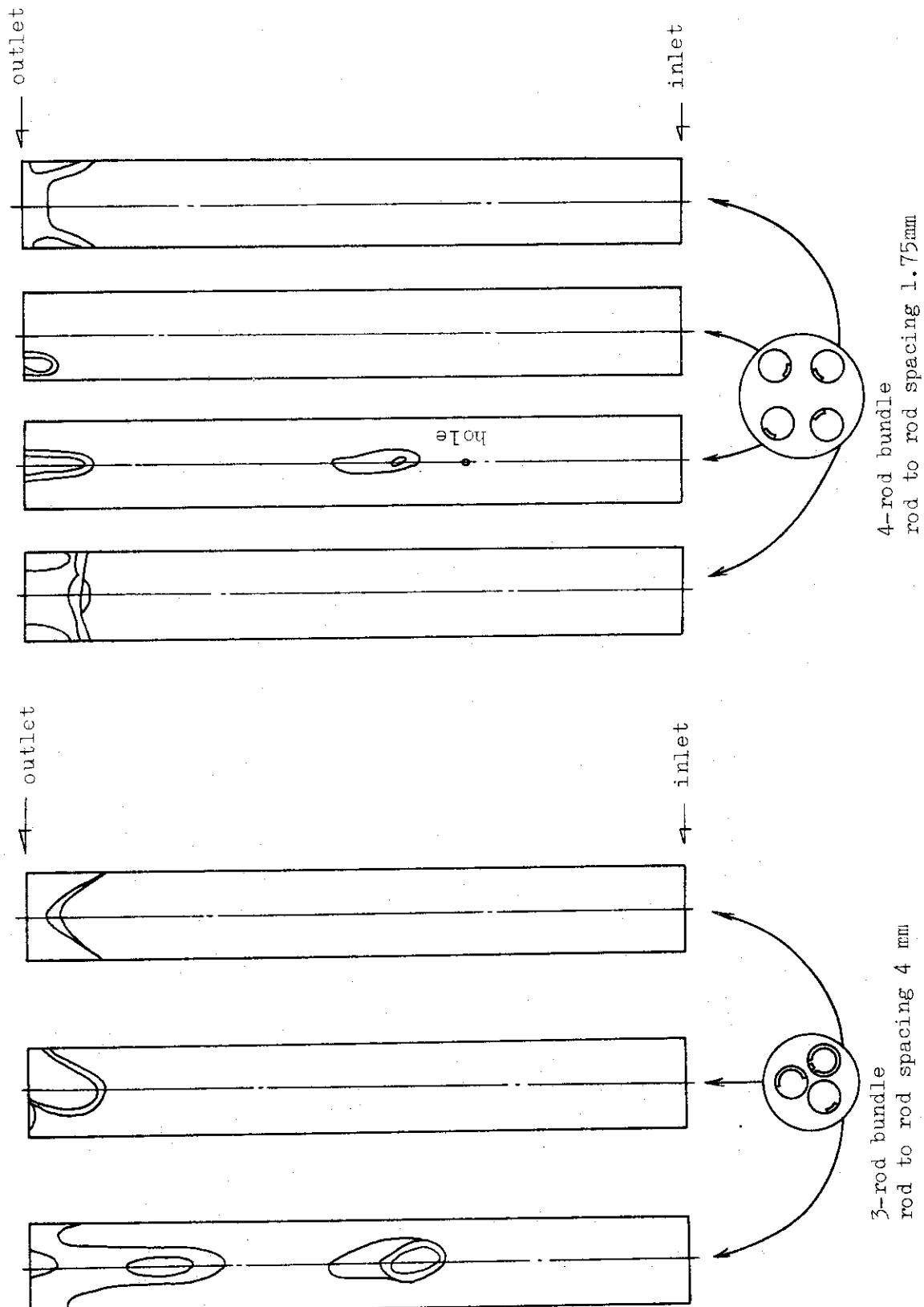


Fig.21 Burnout location

Fig.22 Burnout location

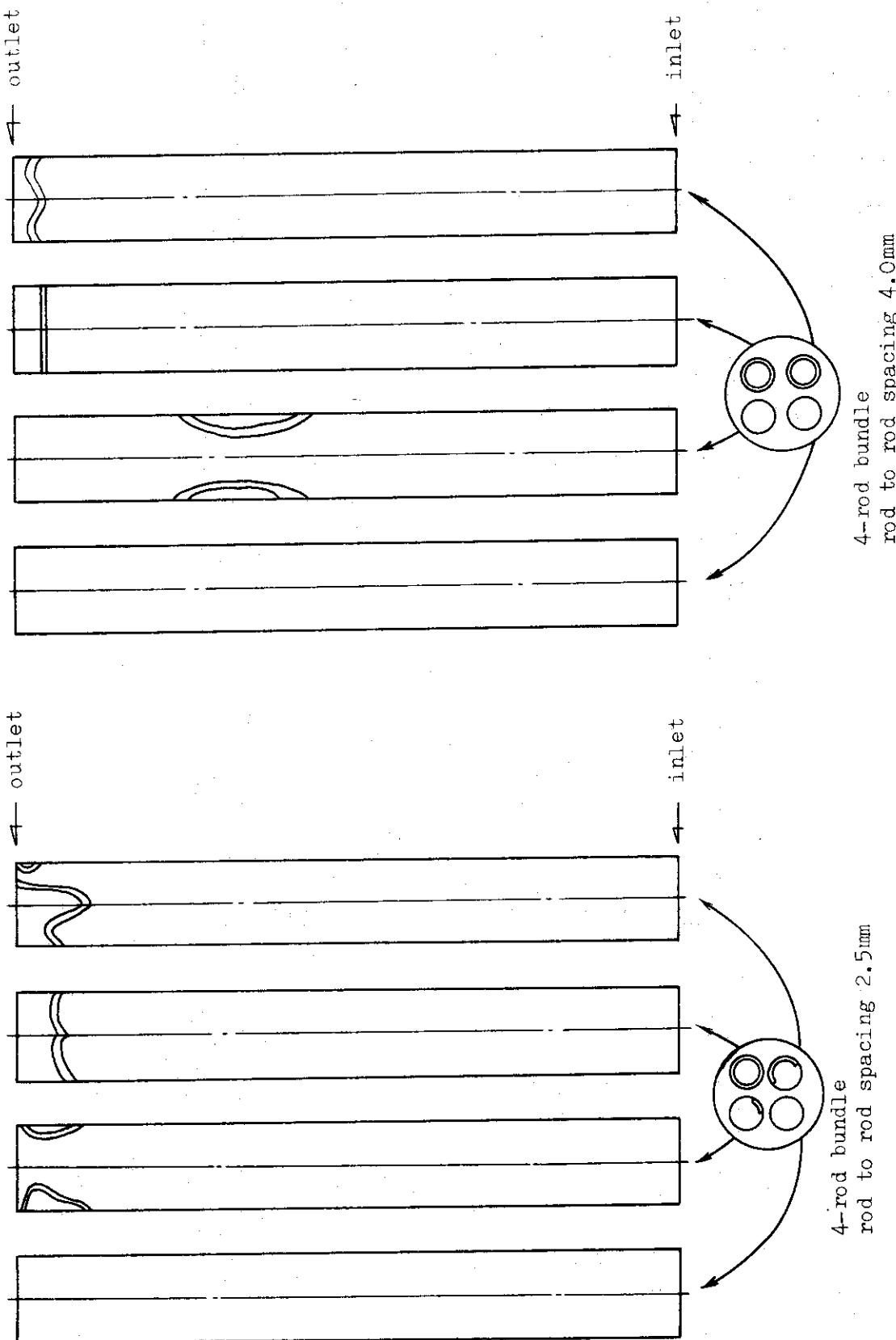
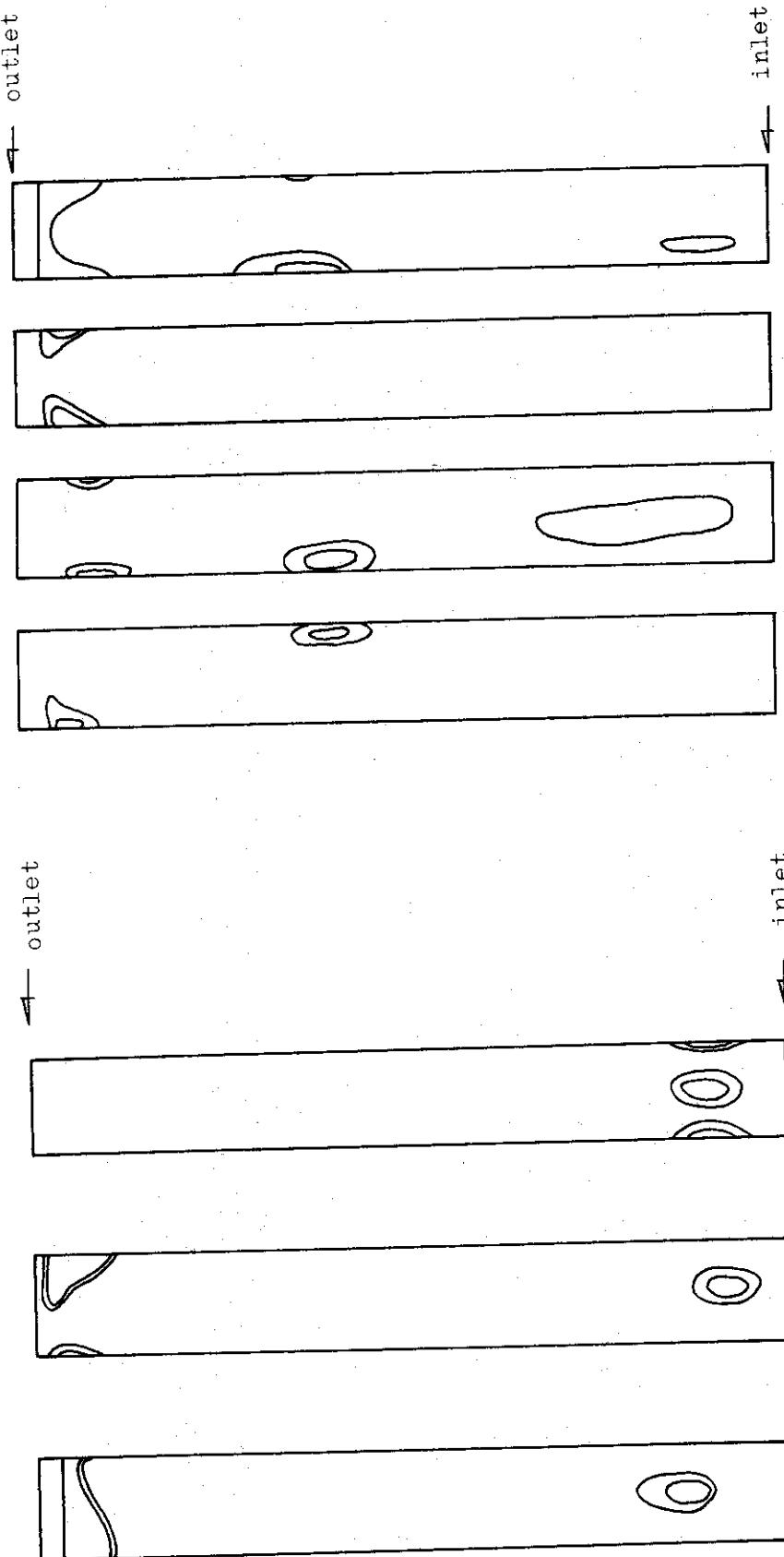


Fig.23 Burnout location

Fig.24 Burnout location



3-rod bundle  
rod to rod spacing 1.75mm  
spacer set

4-rod bundle  
rod to rod spacer set

Fig.25 Burnout location

Fig.26 Burnout location

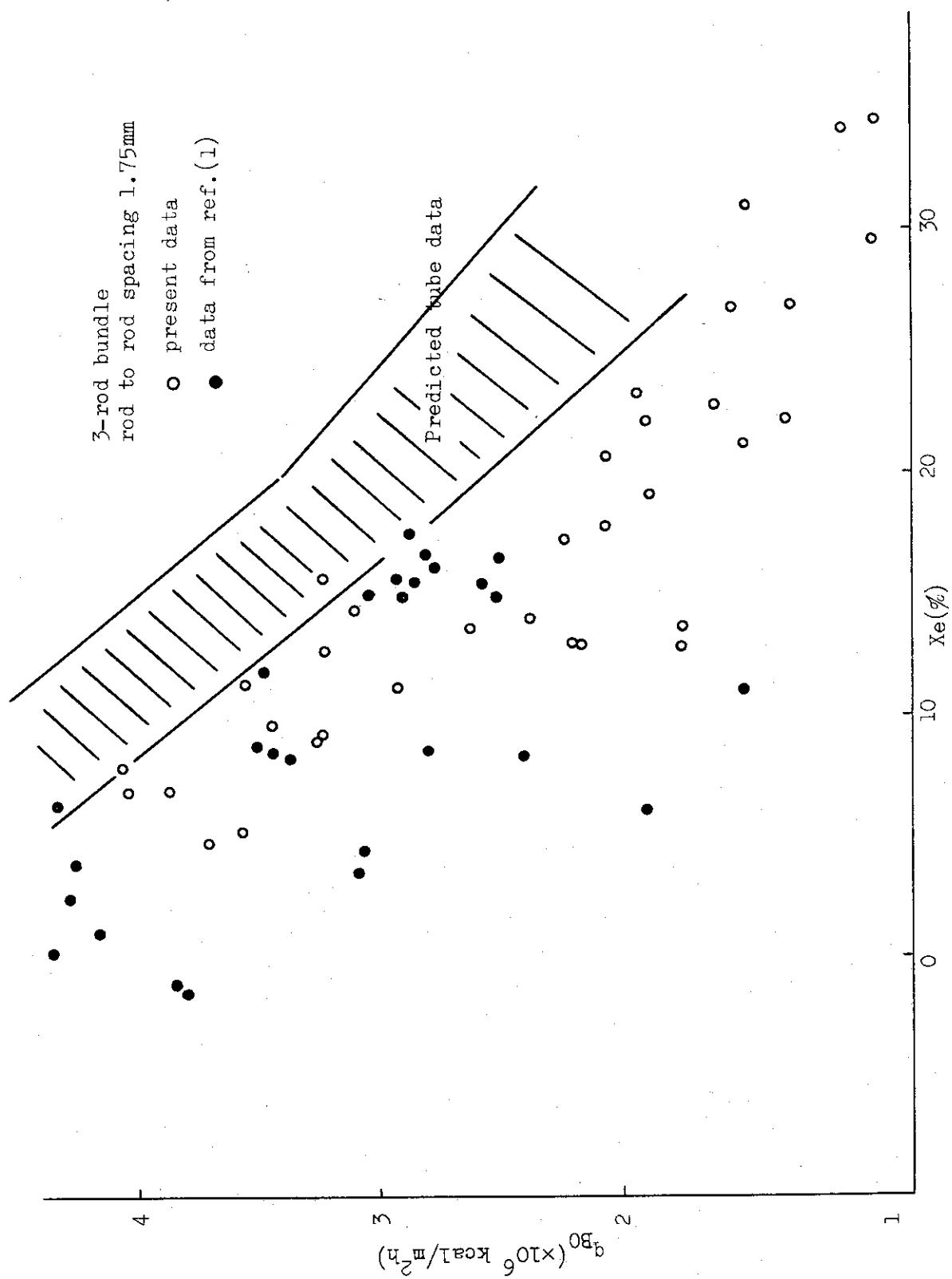
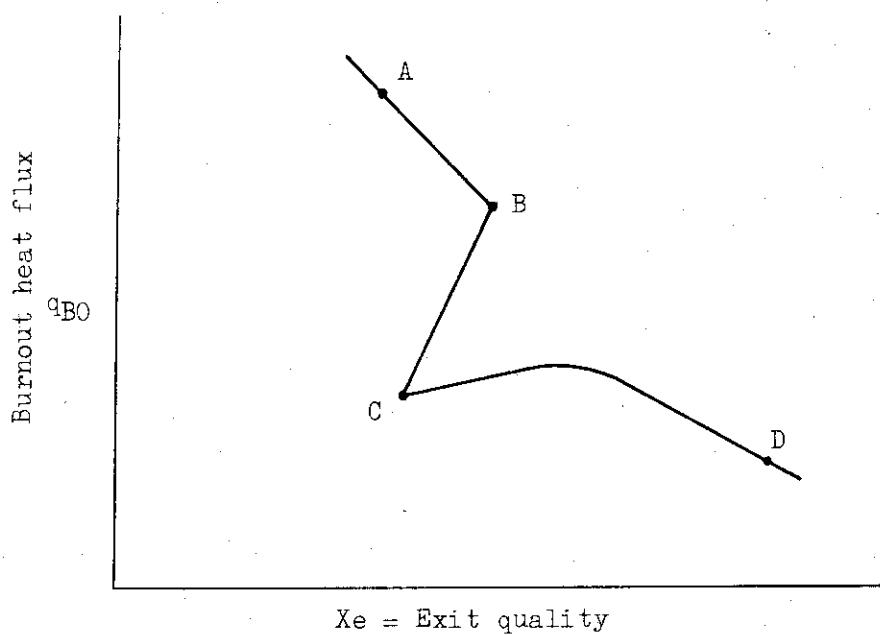
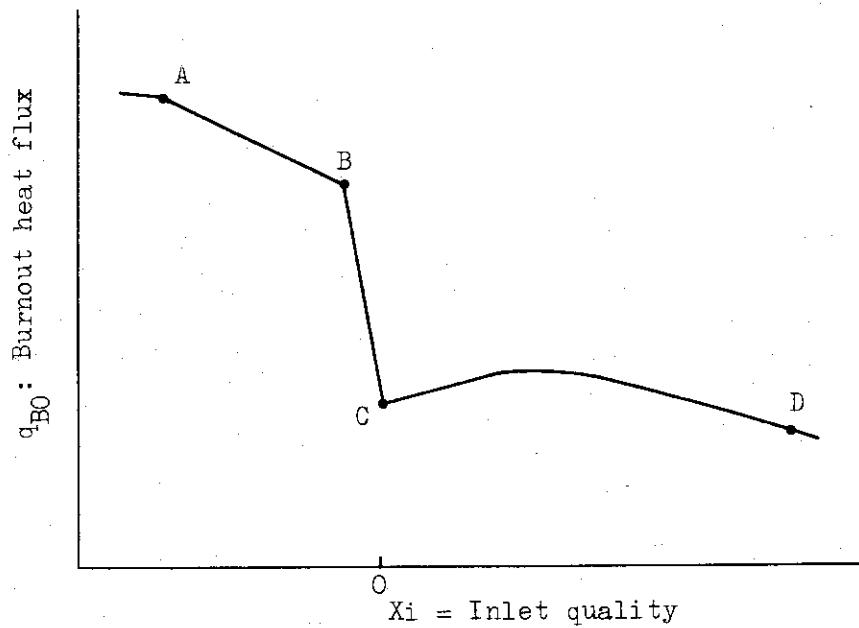


Fig.27 Reproducibility of the experimental results



$X_e$  = Exit quality

Fig.28 Schematic curve of Burnout heat flux



$X_i$  = Inlet quality

Fig.29 Schematic curve of Burnout heat flux

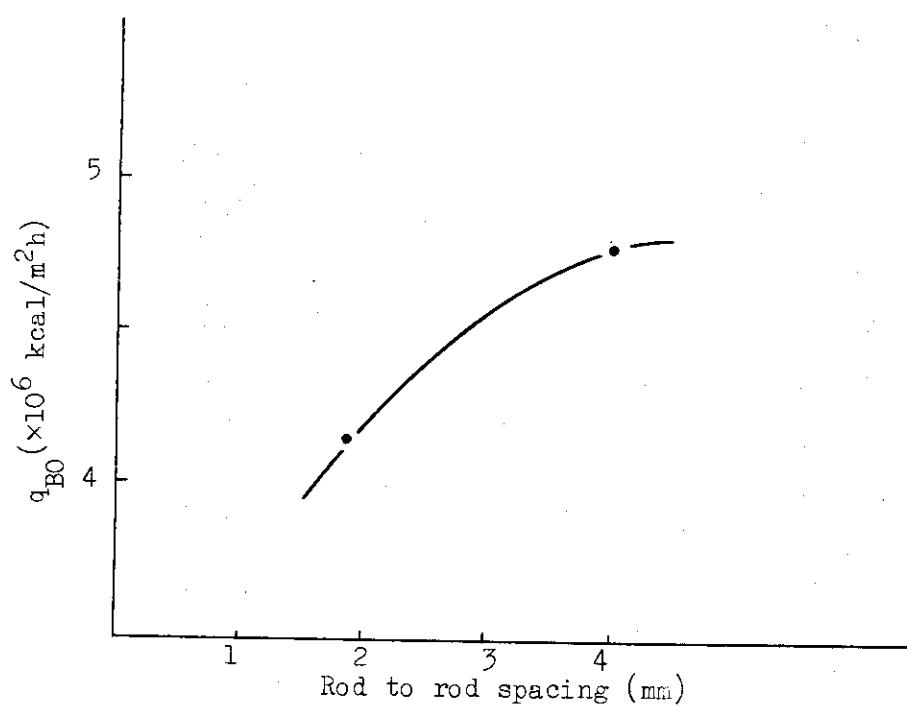


Fig.30 Effects of spacing on brout heat flux  
 $xe=2\%$ , 3-rod bundle (by ref (1))

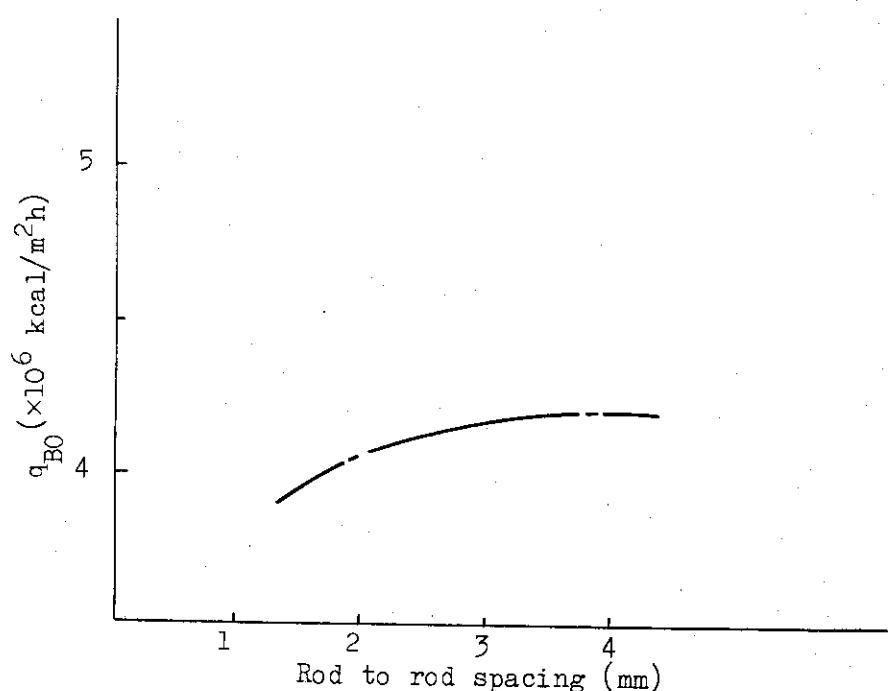


Fig.31 Effects of spacing on burnout heat flux  
 $xe=20\%$ , 3-rod bundle