

J A E R I - M
93-200

高温高圧ボイルオフ条件下における
炉心ボイド率分布：小型定常二相流
試験装置(TPTF)を用いた実験的研究

1993年10月

近藤 昌也・熊丸 博滋・村田 秀男
安濃田良成・久木田 豊

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

高温高压ボイルオフ条件下における炉心ボイド率分布：
小型定常二相流試験装置（TPTF）を用いた実験的研究

日本原子力研究所原子炉安全工学部熱水力安全研究室

近藤 昌也・熊丸 博滋・村田 秀男

安濃田良成・久木田 豊

（1993年9月9日受理）

原子炉事故時の炉心冷却性能を予測するには、ボイルオフ条件下における炉心のボイド率分布の予測が重要である。本研究では小型定常二相流試験装置（TPTF）を用いて高温高压条件下でボイルオフ実験を実施し、その実験結果を用いて既存のボイド率相関式及びモデルの適用性を評価した。実験はそれぞれPWR 17×17型燃料集合体及びさらに稠密な炉心形状を模擬した2種類の試験部を使用して行った。その結果、1) Chexal-Lelloucheのモデルが最も良い予測を与えるが、高压下ではボイド率を過小評価する傾向が見られた、2) 稠密型の燃料集合体に対する予測性能は、PWR型の燃料集合体に対する予測性能に比べて大きな相違は見られなかった、3) ガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率を比較したところ、ガンマ線型密度計によるボイド率が差圧計によるボイド率に比べて大きいという実験結果が得られたが、これは径方向ボイド率分布が平坦でないことに起因することが明らかになった。

Core Void Fraction Distribution under
High-temperature High-pressure Boil-off Conditions:
Experimental Study with Two-phase Flow Test Facility (TPTF)

Masaya KONDO, Hiroshige KUMAMARU, Hideo MURATA
Yoshinari ANODA and Yutaka KUKITA

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

(Received September 9, 1993)

The prediction of void fraction distributions in a core under boil-off conditions is important for analyzing the core cooling performance during reactor accidents. In this work, boil-off experiments were conducted under high-temperature high-pressure conditions using PWR-type and tight-lattice type ($p/d = 1.11$) simulated fuel assembly test sections of the Two-Phase flow Test Facility (TPTF). Several existing void fraction correlations and models were assessed against the experimental data. As a result, it has become clear that: 1) while the Chexal-Lellouche model predicts best the present experimental data, the model has a tendency to underestimate void fraction at higher pressures; 2) no significant problem are found in the applicability of the tested correlations and models to the tight-lattice geometry; and 3) void fractions measured by single-beam gamma densitometers tend to be larger than those measured by differential pressure transducers due to the radial void fraction distribution.

Keywords: Void Fraction, Core, Rod Bundle, Boil-off, PWR,
Tight-lattice, Two-phase Flow, TPTF.

目 次

1. 序	1
2. 実験方法	2
3. 試験装置	3
4. 実験条件	4
5. 熱損失の評価	4
6. 圧力損失の評価	6
6.1 壁面摩擦による圧力損失	6
6.2 グリッドスペーサによる圧力損失	7
6.3 スパイラルワイヤ型スペーサを伴うバンドルの圧力損失	8
7. ボイド率相関式及びモデル	10
7.1 気液の見かけ速度の算出	10
7.2 ボイド率相関式及びモデル	10
8. 実験結果	12
8.1 PWR型模擬燃料集合体に対するボイド率相関式及びモデルの適用性の評価	12
8.2 稠密型模擬燃料集合体に対するボイド率相関式及びモデルの適用性の評価	14
8.3 差圧計とガンマ線型密度計による測定結果の比較	15
9. 結 論	16
謝 辞	16
参考文献	17
Appendix	51

Contents

1. Introduction	1
2. Test Method	2
3. Test Facility	3
4. Test Conditions	4
5. Estimation of Heat Loss	4
6. Estimation of Pressure Drop	6
6.1 Frictional Pressure Drop	6
6.2 Pressure Drop due to Grid Spacers	7
6.3 Pressure Drop of Bundle with Spiral Wire Spacers	8
7. Void Fraction Correlations and Models	10
7.1 Calculation of Gas-phase and Liquid-phase Superficial Velocities	10
7.2 Void Fraction Correlations and Models	10
8. Test Results	12
8.1 Applicability of Void Fraction Correlations and Models to PWR-type Fuel Assembly	12
8.2 Applicability of Void Fraction Correlations and Models to Tight-lattice Type Assembly	14
8.3 Comparison of Measurements between Differential Pressure Transducers and Gamma-ray Densitometers	15
9. Conclusion	16
Acknowledgment	16
References	17
Appendix	51

1. 序

加圧水型原子炉 (PWR) において小破断冷却材喪失事故 (LOCA) 等が発生し、1 次系冷却材保有量が大幅に減少すると (定格運転時の約 55 - 60% 以下)、1 次系ループ内の自然循環は途絶える。このような場合、炉心では炉心流入流量が極めて小さくなり、炉心内での沸騰・蒸発による冷却材の減少を補えなくなる。このような状態をボイルオフ状態と称する。

ボイルオフ条件下では、1 次系冷却材保有量の減少が進み、炉心に水/蒸気混合水位が生じる場合がある。このような場合、燃料棒表面温度は混合水位より下ではほぼ飽和温度に保たれるが、混合水位より上では除熱が不十分となり高温となる恐れがある。それゆえ、ボイルオフ条件下での炉心の冷却能力を評価するには、炉心の混合水位を予測することが不可欠である。

混合水位は炉心内の水の体積と、水/蒸気二相混合物中の蒸気の体積割合 (ボイド率) により決まる。炉心内の水 (冷却材) の保有量は、1 次系全体の冷却材保有量及びその空間分布によって決まるが、炉心混合水位を求めるためにはさらに炉心内のボイド率分布を予測することが必要である。

現在までに、ボイルオフ条件下におけるボイド率分布を予測するための多くの相関式及びモデルが提案されてきた。しかしながら、それらの相関式及びモデルの多くは 7 MPa 以下の実験データに基づいているため、より高圧の条件への適用性については検討されていない。他方、PWR の小破断 LOCA、全電源喪失事故等では最高 17 MPa に至る高圧下で炉心露出がおこる可能性があり、このような高圧下でのボイド率予測のためには適切な実験と、それによる相関式の評価及び改良が必要である。加えて、相関式及びモデルの多くは、PWR 15 × 15 ないし 17 × 17 燃料、BWR 8 × 8 燃料等を対象としており、より稠密な炉心バンドル形状への適用性は保証されていない。従って、PWR の全交流電源喪失事象をはじめとするより高圧条件下の事象の評価への適用、もしくは稠密炉心等の異なる炉心形状への適用にあたっては、事前にその予測性能を実験データ等により定量的に評価する必要がある。

さらに、実験データを用いて相関式及びモデルの定量的な評価を行う場合、その実験データの測定方法について検討することが重要である。一般的に、ボイド率の測定には差圧計ないしはガンマ線型密度計が用いられることが多いが、差圧計は体積平均ボイド率を、ガンマ線型密度計は弦平均ボイド率をそれぞれ測定するというように、その測定内容は同じではない。

本研究では小型定常二相流試験装置 (Two-Phase Flow Test Facility : TPTF)^[1] を用いて高温高圧条件下でボイルオフ実験を実施し、その実験結果を用いて I) 既存のボイド率相関式及びモデルの予測性能に対する圧力条件及び流量条件の影響の評価、II) 稠密炉心に対する既存の相関式の適用性の評価、III) 差圧計とガンマ線型密度計によるボイド率の測定結果の比較を行った。なお、I) については一部実施済み^[2] であるが、その後、差圧の測定精度を向上させて再度実験を実施して新しい実験データを得たので、本報ではこれらのデータによりボイド率相関式及びモデルの再評価を行った。

2. 実験方法

原子炉事故時に生じるボイルオフ条件下においては、炉心入口から流入したサブクール水は燃料棒表面を除熱しながら上昇し、やがて飽和温度に達する。飽和温度に達した後は水/蒸気二相流となって燃料棒表面を除熱するが、徐々に燃料棒表面からの熱により蒸気の割合が増加してゆく。その結果、炉心内のボイド率は炉心下部から炉心上部にかけて緩やかに上昇し、混合水位付近で不連続的に1に近づく分布を示す (Fig.2-1)。一方、燃料棒表面温度は混合水位より下ではほぼ飽和温度以下に保たれるが、混合水位を境に急激に上昇する。

こうしたボイルオフ条件下の炉心の状態は、燃料集合体を模擬した流路に下方よりややサブクールした水を低流量で注入し、その模擬燃料集合体を構成する燃料棒を適度に発熱させることにより模擬できる。この場合、流路内の水及び蒸気の見かけ速度は質量流束とクオリティーによって決定されるため、燃料棒の発熱量、入口流量及び入口サブクール度を調節することによって任意に設定することが可能である。水の見かけ速度が蒸気の見かけ速度に比べて十分小さい場合、ボイド率は水の流量にあまり影響されないことが知られており、実験においては水の流量を調節して試験部内の混合水位がほぼ一定となるような状態にすることが可能である。なお、実験条件と対応させるため、燃料棒表面熱流束は炉心崩壊熱に対応する値である。

このような燃料集合体を模擬した流路中の軸方向ボイド率分布の測定には、一般に差圧計が広く用いられている。すなわち、比較的短い測定区間を持つ差圧計を流路の軸方向に連続して設置し (Fig.2-2)、その差圧測定値から流路の各位置における平均密度を算出してボイド率分布を求める方法である。水と蒸気との密度差は高圧条件下では小さくなる傾向にあるが、12 MPa 程度までの圧力条件下では水と蒸気の密度は10倍以上異なるため、水/蒸気二相混合物の密度からボイド率を精度良く求めることができる。しかしながら、測定対象とする配管内に流れがある場合、差圧計で測定される差圧は摩擦損失及び形状損失等の圧力損失を含んだものとなる。とりわけ、二相流の摩擦損失は単相流のそれと比べて大きくなる傾向にあるため、差圧計によるボイド率の測定には摩擦損失の評価が欠かせない。また、各種のスペーサ等の障害物が流路内にある場合、流量によってはそれによる形状損失の影響が無視できない。そのため、差圧計によるボイド率の測定を定量的に行う場合、摩擦損失及び形状損失を定量的に把握することは極めて重要である。そこで、本報では実験結果だけでなく、ボイド率を差圧計を用いて測定する際に重要な摩擦損失及び形状損失の定量的評価についても併せて報告する。

3. 試験装置

TPTF は小破断 LOCA 時等の熱水力現象に関する基礎的なデータを得るための個別効果試験装置であり、沸騰二相流条件下の炉心熱伝達に関する実験等を行うことを目的とした垂直試験部（炉心熱伝達試験部）と、ホットレグをはじめとする大口径水平管内の二相流流動特性に関する実験等を行うことを目的とした水平試験部（水平配管試験部）から構成される。

本研究では垂直試験部を用いてボイルオフ実験を実施した。垂直試験部は内径 79.28 mm の円筒形の圧力容器であり、その内部に PWR (17 x 17) 型炉心もしくは稠密炉心を模擬した燃料集合体のいずれか 1 体を装荷可能である (Fig. 3-1, 3-2, Table 3-1)。PWR 型の模擬燃料集合体は、それを構成する燃料棒の直径、間隔、有効発熱長等が、実炉に装荷されている燃料集合体に即して作られた燃料集合体である。一方、稠密型の模擬燃料集合体は、燃料棒直径 (d) に対する燃料棒間隔 (p) の比が非常に小さい ($p/d = 1.11$) 炉心を想定して作られた燃料集合体である。これらの模擬燃料集合体はいずれも、原子炉停止後の炉心出力を電気ヒーターによる発熱によって模擬することが可能である。

TPTF 垂直試験部には、ボイド率測定用の機器として、差圧計、ガンマ線型密度計、光学式ボイド計^[3] が設置されている (Table 3-2)。

差圧計は PWR 型の模擬燃料集合体装荷時には、模擬炉心全体のボイド率の測定用が 1 台、模擬炉心の軸方向（垂直方向）局所ボイド率の測定用が 9 台、計 10 台が設置されている。一方、稠密型の模擬燃料集合体装荷時にはそれぞれ 1 台と 4 台の計 5 台が設置される。PWR 型の模擬燃料集合体によるボイルオフ実験においては、前回実施したボイルオフ実験^[2] 時と比較して差圧測定精度を向上させる工夫がなされている。すなわち、差圧導圧管内の水の密度を一定に保つため、差圧導圧管取り出し部分及びコンデンスポットを外側から冷却し、温度を一定に保つ工夫がなされている。しかし、実験の実施時期の違いから、稠密型の模擬燃料集合体を装荷して行ったボイルオフ実験の実施時点では、差圧導圧管及びコンデンスポットの冷却は行っていない。また、ボイルオフ実験時には一部の実験を除き差圧導圧管内の温度を測定しなかったため、差圧導圧管内の水の密度は、圧力容器内を満水状態（圧力容器入口流量 ~ 0 ）としたときの差圧測定値と圧力容器内部の密度から算出した (Table 3-3)。ただし、稠密型の模擬燃料集合体装荷時には、圧力容器内を満水状態とした条件での実験データが十分に得られなかったため、ボイルオフ実験時の差圧導圧管内の水の密度は PWR 型の模擬燃料集合体装荷時に準じるものとした。

ガンマ線型密度計は圧力容器を挟んでその両側に設置されているガンマ線源 (Cs-137, 10 Ci) と同検出器 (NaI シンチレーションカウンター) から成る測定器であり、高さ 10.0 mm、幅 1.0 mm の矩形断面のガンマ線を有する。本密度計は、TPTF 垂直試験部の軸方向に沿って 3 台設置されており、各々圧力容器の中心を通る直径位置における密度、すなわち弦平均ボイド率を測定することができる。なお、稠密型の模擬燃料集合体装荷時には、ガンマ線ビームが模擬燃料棒によって遮断されるため、本密度計を用いてのボイド率の測定は不可能となる。

光学式ボイド計^[3] は垂直試験部に 1 台設置されており、3 MPa の非加熱条件下での二相流の径方向局所ボイド率分布を測定することができる。本ボイド計は、可動式の検出端から放たれる赤外線反射光の割合を検出することによって、検出端の濡れないし乾きを判定し、乾き時間を積分することによってボイド率を求めるものである。なお、本ボイド計も、稠密型の模擬燃料集合体装荷時にはガンマ線型密度計と同様に使用不能となる。

4. 実験条件

実験は、模擬燃料集合体の種別に関わらず、圧力と流量を主なパラメータとして行った。すなわち、PWR 型及び稠密型の模擬燃料集合体のそれぞれについて、圧力は 3, 7, 12 MPa の 3 通りの条件、流量は質量流束が約 5, 10, 20, 40, 70, 100 kg/m²s の 6 通りの条件の計 18 通りの条件で実験を行った。試験部入口はほぼ飽和温度の水単相流で、そのサブクール度は 5 - 40 K であった (5 - 15 K の場合が多い)。模擬炉心の熱出力は、蒸気/水の混合水位が上部プレナムもしくは模擬燃料棒上端付近に位置するように調整した。この場合、混合水位は、燃料棒表面温度等が飽和温度を示している位置と、飽和温度以上を示している位置との間にあるものと見なした。

すべての実験は、実験時の圧力、流量、熱出力等の設定可能な条件が一定となった定常状態で行い、混合水位、試験部内の温度及び差圧が一定となるまで待機し、試験部内部が十分な状態となったことを確認して実験データを収録した。

5. 熱損失の評価

TPTF 垂直試験部は、その表面の大部分を断熱材で覆うことにより熱損失の低減を図っている。しかし、本研究の目的上、試験部の熱収支を定量的に把握することが必要であり、そのためには試験部の熱損失を正確に知る必要がある。そこで、熱損失の測定を目的とした実験を通常のボイルオフ実験と別に行った。

低流量の水単相流を試験部に流した場合、水の温度は熱損失によって徐々に低下するため、試験部の軸方向に緩やかな温度勾配が生じる。それゆえ、試験部の軸方向温度分布を評価することにより、その熱損失を評価することができる。本研究では、構造材の熱容量による誤差を少なくするため、一定流量の水単相流を測定前に長時間流し続けて試験部の構造物と水単相流との熱平衡を達成した。

最初に、PWR 型炉心を模擬した燃料集合体が装荷されている状態で行った、熱損失の測定実験の概要とその評価結果とを示す。この実験では、その測定前におよそ 1 時間程度水単相流 (圧力約 3 MPa、流量約 20 kg/m²s、非加熱条件) を試験部に流し、十分に試験部の構造物と水との熱平衡をとった後に測定した。

この実験によって得られた、低流量の水単相流時の試験部内の軸方向温度分布及び比エンタルピーの分布を Fig. 5-1 に示す。この図に示している温度は、それぞれ同一高さに設置してある熱電対 (7 点) による燃料棒表面温度の平均値 (誤差棒はその標準偏差) であり、比エンタルピーはその平均温度と圧力における値である。試験部に流入した水の温度は、水が試験部を通過するに従ってほぼ直線的に低下しており、比エンタルピーもそれに従い減少している。

この結果に基づき、最小二乗法を用いて単位長さあたりの水の温度変化 (dT/dz) と比エンタルピー変化 (dh/dz) を求めたところ、それぞれ次のようになった。

$$\left(\frac{dT}{dz}\right) = -2.92 \quad (\text{K/m}) \quad (5-1)$$

$$\left(\frac{dh}{dz}\right) = -1.31 \times 10^4 \quad (\text{J/kgm}) \quad (5-2)$$

この実験では水は一定の流量 ($W = 0.061 \text{ kg/s}$) で供給しているので、試験部の単位長さあたりの熱損失 ($d\dot{Q}/dz$) は、比エンタルピーの変化率から次のように求められる。

4. 実験条件

実験は、模擬燃料集合体の種別に関わらず、圧力と流量を主なパラメータとして行った。すなわち、PWR 型及び稠密型の模擬燃料集合体のそれぞれについて、圧力は 3, 7, 12 MPa の 3 通りの条件、流量は質量流束が約 5, 10, 20, 40, 70, 100 kg/m²s の 6 通りの条件の計 18 通りの条件で実験を行った。試験部入口はほぼ飽和温度の水単相流で、そのサブクール度は 5 - 40 K であった (5 - 15 K の場合が多い)。模擬炉心の熱出力は、蒸気/水の混合水位が上部プレナムもしくは模擬燃料棒上端付近に位置するように調整した。この場合、混合水位は、燃料棒表面温度等が飽和温度を示している位置と、飽和温度以上を示している位置との間にあるものと見なした。

すべての実験は、実験時の圧力、流量、熱出力等の設定可能な条件が一定となった定常状態で行い、混合水位、試験部内の温度及び差圧が一定となるまで待機し、試験部内部が十分な状態となったことを確認して実験データを収録した。

5. 熱損失の評価

TPTF 垂直試験部は、その表面の大部分を断熱材で覆うことにより熱損失の低減を図っている。しかし、本研究の目的上、試験部の熱収支を定量的に把握することが必要であり、そのためには試験部の熱損失を正確に知る必要がある。そこで、熱損失の測定を目的とした実験を通常のボイルオフ実験と別に行った。

低流量の水単相流を試験部に流した場合、水の温度は熱損失によって徐々に低下するため、試験部の軸方向に緩やかな温度勾配が生じる。それゆえ、試験部の軸方向温度分布を評価することにより、その熱損失を評価することができる。本研究では、構造材の熱容量による誤差を少なくするため、一定流量の水単相流を測定前に長時間流し続けて試験部の構造物と水単相流との熱平衡を達成した。

最初に、PWR 型炉心を模擬した燃料集合体が装荷されている状態で行った、熱損失の測定実験の概要とその評価結果とを示す。この実験では、その測定前におよそ 1 時間程度水単相流 (圧力約 3 MPa、流量約 20 kg/m²s、非加熱条件) を試験部に流し、十分に試験部の構造物と水との熱平衡をとった後に測定した。

この実験によって得られた、低流量の水単相流時の試験部内の軸方向温度分布及び比エンタルピーの分布を Fig. 5-1 に示す。この図に示している温度は、それぞれ同一高さに設置してある熱電対 (7 点) による燃料棒表面温度の平均値 (誤差棒はその標準偏差) であり、比エンタルピーはその平均温度と圧力における値である。試験部に流入した水の温度は、水が試験部を通過するに従ってほぼ直線的に低下しており、比エンタルピーもそれに従い減少している。

この結果に基づき、最小二乗法を用いて単位長さあたりの水の温度変化 (dT/dz) と比エンタルピー変化 (dh/dz) を求めたところ、それぞれ次のようになった。

$$\left(\frac{dT}{dz}\right) = -2.92 \quad (\text{K/m}) \quad (5-1)$$

$$\left(\frac{dh}{dz}\right) = -1.31 \times 10^4 \quad (\text{J/kgm}) \quad (5-2)$$

この実験では水は一定の流量 ($W = 0.061 \text{ kg/s}$) で供給しているので、試験部の単位長さあたりの熱損失 ($d\dot{Q}/dz$) は、比エンタルピーの変化率から次のように求められる。

$$\left(\frac{dQ}{dz}\right) = \left(\frac{dh}{dz}\right) \times W = -803 \quad (\text{W/m}) \quad (5-3)$$

ここで求めた熱損失は、燃料棒表面温度並びに流体温度がおよそ 200 °C の場合の熱損失である。ボイルオフ実験時の試験部の温度は 3 - 12 MPa の飽和温度（およそ 230 - 320 °C）であるため、この熱損失をそのまま適用することは適当ではない。そこで、次のような仮定をしてボイルオフ実験時の熱損失を求めた。

試験部の熱損失は試験部の温度と周囲の雰囲気温度との差に比例すると仮定すると、その比例定数（以下、この値を熱損失係数と呼ぶ）とボイルオフ実験時の試験部の温度及びその周囲の温度から熱損失を求めることができる。本実験の場合、試験部の軸方向にわずかな温度勾配が生じているものの、試験部とその周囲との温度差と比較すると小さく、軸方向の温度差は無視し得る。そこで、すべての燃料棒表面温度（98 点）の平均をとって試験部の温度 T_{pv} と仮定し、その温度と試験部周囲の温度 T_0 との差から熱損失係数を求めた。なお、試験部の周囲の温度は測定しなかったが、実験の実施時期（2 月）及び実施した時間帯（3 MPa へ昇圧後まもなく）を考慮して経験的に 25 °C と仮定した。

$$a = \frac{1}{T_{pv} - T_0} \left(\frac{dQ}{dz}\right) = -4.45 \quad (\text{W/mK}) \quad (5-4)$$

ただし、 $T_{pv} = 206$ °C、 $T_0 = 25$ °C

この値は以前に行った実験^[2]の結果から算出した熱損失係数（3.9 - 4.3）よりやや大きいのが、差圧導圧管取り出し部分及びコンデンスポットを冷却していることを考慮すると妥当な範囲に収まっていると思われる。なお、この熱損失係数からボイルオフ実験時の試験部全体の熱損失を求めると、試験部の温度によりおよそ 3.4 - 4.9 kW に相当する熱損失があることになる。

次に、稠密型の模擬燃料集合体を装荷した状態の試験部の熱損失の評価について示す。この場合の熱損失の測定実験及び評価方法は基本的に PWR 型の模擬燃料集合体を装荷した場合に行ったものと同様であるが、熱損失と試験部の圧力（温度）との関係をも調べるため、熱損失の測定のための実験を 3 MPa の条件に加えて 7 MPa と 12 MPa の条件下でも行った。また、試験部の温度が安定していることを確認するために、それぞれの条件下で約 10 分の間隔をおいて 2 度データを収録した。なお、稠密型の模擬燃料集合体については、熱損失の測定及びボイルオフ実験のいずれも、差圧導圧管取り出し部分及びコンデンスポットの冷却を実施していない状態で行った。

実験の結果、試験部内の軸方向温度分布として Fig. 5-2 に示すような結果が得られた。この図に示している温度は、同一高さに設置してある熱電対（7 点）による燃料棒表面温度の平均値、誤差棒はその標準偏差である。試験部内の圧力に関わらず、温度の標準偏差が PWR 型の模擬燃料集合体を装荷した場合と比べて大きいことを示している。これは稠密型の模擬燃料集合体では PWR 型の模擬燃料集合体と比べて、I) 熱損失が少ない、II) 試験部の温度分布が完全に一様ではないことによるものと思われる。

3 MPa の条件下で行った実験では、試験部出口に向かうに従い試験部内の温度が若干低下する様子が示されているが、その条件より試験部が高温になる（すなわち、熱損失が大きくなる）7 MPa 及び 12 MPa の条件下で行った実験では、試験部内に定性的な軸方向温度分布は見られなかった。ゆえに本研究では、稠密型の模擬燃料集合体を装荷した試験部の熱損失をその圧力条件に関わらず無視し得るとし、熱損失係数 a を 0 としてボイルオフ実験の評価を行うこととした。

なお、熱損失の評価に用いた実験の実験条件の一覧を Table 5-1 に示す。

6. 圧力損失の評価

本研究ではボイルオフ条件を中心に実験条件を定めたため、その流量条件は比較的低流量に集中している。しかしながら、試験部は内部に多数（PWR型32本、稠密型61本）の模擬燃料棒を有しており同口径の単なる円管に比べて濡れ縁長さが長いため、摩擦損失が大きくなると思われる（とりわけ、稠密型の模擬燃料集合体の場合）。また、PWR型の模擬燃料集合体の場合、実機の燃料集合体を正確に模擬するという主旨から、その軸方向の8カ所（試験部）にグリッドスペーサが設置されており、スペーサ部分では流路が絞られる構造になっている。同様に稠密型の模擬燃料集合体については、その燃料棒の外周にスパイラルワイヤ型スペーサが巻かれている。

こうした理由から、差圧測定値をそのまま使用することは、差圧の過小評価、すなわちボイド率の過大評価につながる恐れがある。そこで、差圧測定値からボイド率を算出するに際し、PWR型の模擬燃料集合体については摩擦損失（壁面摩擦）とグリッドスペーサによる圧力損失を、稠密型の模擬燃料集合体についてはスパイラルワイヤ型スペーサを伴うバンドルの圧力損失を、それぞれ個別に評価して差圧測定値を補正することを試みた。

6.1 壁面摩擦による圧力損失

本研究では二相流摩擦損失を、既存の相関式の一つである Lockhart-Martinelli 相関^[4]を用いて評価した。Lockhart-Martinelli 相関は、ほぼ大気圧の条件下の実験結果に基づいた相関式であり、二相流摩擦損失勾配をそのうちの液相（気相）成分だけが単相流として流れたときの摩擦損失勾配に対する比として表す^[5]。

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_f = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_l \Phi_l^2 = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_g \Phi_g^2 \quad (6-1)$$

そして、その比 Φ_l , Φ_g をただ一つの無次元変数 X の関数としてグラフ及び表により実験的に与えている（Table 6-1）^[4]。本研究ではこの表の値を用い、必要に応じて次式で内挿して無次元変数 X から Φ_l , Φ_g を計算した。

$$\Phi = \exp \left[\frac{\ln \Phi_{i+1} - \ln \Phi_i}{\ln X_{i+1} - \ln X_i} (\ln X - \ln X_i) + \ln \Phi_i \right] \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (6-2)$$

ここで Φ_i , Φ_{i+1} , X_i , X_{i+1} はいずれも Table 6-1 で与えられている値で、 X_i , X_{i+1} は無次元変数 X を挟む X に最も近い値とし、 Φ_i , Φ_{i+1} はそれぞれ X_i , X_{i+1} に対応するものとする。なお、無次元変数 X は Lockhart-Martinelli により次のように定義された変数である。

$$X = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_l}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_g}} \quad (6-3)$$

単相流成分だけの摩擦損失勾配 $(\Delta P/\Delta z)_l$, $(\Delta P/\Delta z)_g$ はそれぞれ次式を用いて求めた。

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{l,g} = \frac{2f_{l,g} \rho_{l,g} J_{l,g}^2}{D} \quad (6-4)$$

ここで、 f_l, f_g は摩擦係数、 ρ_l, ρ_g は密度、 J_l, J_g は見かけ流速を表す。摩擦係数については気液それぞれの場合について、見かけレイノルズ数を基準に乱流と層流に場合分けして以下の式から求めた。

乱流の場合（見かけレイノルズ数 $(G_l D/\mu_l), (G_g D/\mu_g)$ が 1000 以上）

$$f_{l,g} = \frac{0.046}{\left(\frac{G_{l,g} D}{\mu_{l,g}}\right)^{0.2}} \quad (6-5)$$

層流の場合（見かけレイノルズ数 $(G_l D/\mu_l), (G_g D/\mu_g)$ が 1000 以下）

$$f_{l,g} = \frac{16}{\left(\frac{G_{l,g} D}{\mu_{l,g}}\right)} \quad (6-6)$$

ここで、 G_l, G_g は質量流束、 μ_l, μ_g は粘性係数、 D は水力相当直径を表す。

以上の式からグリッドスペーサ以外の壁面等による二相流摩擦損失を算出した。なお、Lockhart-Martinelli 相関はほぼ大気圧条件下の二相流について提案されたものであるため、高圧条件下の二相流に対して適用するにあたっては、相関式の高圧条件に対する適用性についての評価を行うことが望ましい。しかし、適用性を確認する適当な手段がなかったため、本研究ではそのまま高圧条件下の二相流摩擦損失の算出に用いた。

6.2 グリッドスペーサによる圧力損失

TPTF 垂直試験部に取り付けられている 9 台の局所差圧を測定する差圧計のうち、5 台の差圧計は、その測定区間に 1 ないし 2 個のグリッドスペーサを有する (Table 3-2)。流速の速いボイルオフ条件下で実験を行ったところ、壁面摩擦による圧力損失（摩擦損失）を補正したにもかかわらず、これらグリッドスペーサをその差圧測定区間に挟む差圧計から求めたボイド率はグリッドスペーサを挟まない差圧計から求めたボイド率と比べて、著しく低い値を示した (Fig. 6-1)。そこで、ボイド率を小さくする原因がグリッドスペーサによる圧力損失（形状損失）にあると考え、その圧力損失を評価し差圧測定値を補正することを試みた。

沸騰水型原子炉 (BWR) の炉心内のグリッドスペーサによる圧力損失の評価には均質流モデルが用いられており、摩擦係数のとりかたによっては実測値と良く合うとされている^[6]。そこで、本研究においても均質流モデルを用いてグリッドスペーサによる圧力損失の評価を行うこととした。

グリッドスペーサ 1 個による圧力損失 ΔP_{SP} が均質流の運動エネルギーに比例すると仮定し、その比例定数を K_{SP} とすると、

$$\Delta P_{SP} = -K_{SP} \frac{G^2}{2\rho} \quad (6-7)$$

という式が成り立つ。ただし、 G は質量流束、 ρ は二相流の平均密度を表す。

$$\rho = \frac{1}{\left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l}\right)} \quad (6-8)$$

さて、比例定数 K_{SP} がクオリティーに関わらず一定であると仮定すると、その値は水単相流

条件下のグリッドスペーサによる圧力損失から求めることができる。水単相流条件下のグリッドスペーサによる圧力損失は、圧力容器内の水と差圧導圧管内の水の密度差から予想される差圧と差圧測定値とのずれから壁面等との摩擦による圧力損失を減ずることによって求めることができる。そこで、差圧測定区間にグリッドスペーサを挟む差圧計 (DPX-7) と挟まない差圧計 (DPX-2) のそれぞれの場合について、密度差から予想される差圧と差圧測定値とのずれを計算したところ、Fig. 6-2, 6-3 に示す結果が得られた。これらの図で用いた差圧測定値は既に摩擦損失を補正済みであるため、差圧のずれは水単相流の流量 (レイノルズ数) にかかわらず常に 0 になることが望ましく、実際にグリッドスペーサを測定区間に挟まない差圧計の場合については差圧のずれがレイノルズ数に関わらずほぼ 0 であることがわかる。しかし、測定区間にグリッドスペーサを挟んでいる差圧計の場合については、レイノルズ数がおよそ 10^4 を超えた条件下において差圧のずれが飛躍的に増大することを示している。

グリッドスペーサを測定区間に挟む差圧計の場合の差圧のずれ (Fig. 6-2) がすべてグリッドスペーサによる圧力損失 ΔP_{sp} であると仮定して比例定数 K_{sp} を求めたところ Fig. 6-4 に示す結果が得られた。ただし、この差圧計 (DPX-7) の場合、その測定区間に 2 個のグリッドスペーサを有するため、評価にあたってはグリッドスペーサ 1 個あたりの圧力損失は等しいものとして差圧のずれの 1/2 がグリッドスペーサ 1 個による圧力損失であると仮定した。

この図によると比例定数 K_{sp} の値は低レイノルズ数では種々の誤差のためにばらつきが大きいが、グリッドスペーサによる損失が問題となるレイノルズ数が 10^4 以上ではほぼ一定値を示す。低流量条件下のグリッドスペーサによる圧力損失は高流量条件下のそれと比べて相対的に無視し得たことから (Fig. 6-2)、本研究では比例定数 K_{sp} の値として高流量条件において収束した値を用いた。すなわち、

$$K_{sp} \sim 2.7 \quad (6-9)$$

として評価を行った。

Fig. 6-1 に示したボイド率の軸方向分布に対し、グリッドスペーサによる圧力損失を評価して差圧測定値を補正したところ、グリッドスペーサの有無に関わらずボイド率の軸方向分布が連続的となった (Fig. 6-5)。しかし、気液の密度差の大きい低圧条件のボイド率の補正については、低流量条件では圧力損失の補正過多、高流量条件では補正不足の傾向が見られた。また、グリッドスペーサの部分のみをその測定区間とする差圧計 (DPX-5、測定区間 14.0 mm) に関しては、グリッドスペーサによる圧力損失の補正後も他の差圧計による測定値と著しく異なる結果しか得られなかったため、ボイド率相関式等の評価に用いないこととした。なお、本節においてグリッドスペーサによる圧力損失の評価に用いた実験データの一覧を Table 6-2 に、そして評価結果、すなわち各ボイルオフ実験における圧力損失 (摩擦損失及びグリッドスペーサによる形状損失) の補正量を Table 6-3 に付す。

6.3 スパイラルワイヤ型スペーサを伴うバンドルの圧力損失

稠密型の模擬燃料集合体にはスペーサとして、スパイラルワイヤ型スペーサがその軸方向全体に一樣に巻かれているため、PWR 型模擬燃料集合体のようにスペーサによる圧力損失 (形状損失) を摩擦損失と区別して評価すると取り扱いが困難になる。そこで、稠密型の模擬燃料集合体については、その圧力損失をスパイラルワイヤ型スペーサを伴うバンドルの圧力損失として一括して評価を行うこととした。

スパイラルワイヤ型スペーサを伴うバンドル内を流れる単相流の摩擦係数 f は、Rehme^[7] によって次式のように提案されている^[8]。

$$f = \frac{f' F S_b}{4 S_t} \quad (6-10)$$

ここで、 S_b 、 S_t はそれぞれバンドル部のみの濡れ縁長さ及び流路壁面をも含めた濡れ縁長さを表す（本燃料集合体では $S_b = 1.67$ m、 $S_t = 1.92$ m）。また、パラメータ F 、 f' は各々以下の式によって定義されている。

$$F = \left(\frac{p}{d}\right)^{0.5} + \left[7.6 \frac{d_m}{H} \left(\frac{p}{d}\right)^2\right]^{2.16} \quad (6-11)$$

$$f' = \frac{64}{Re} + \frac{0.0816}{Re^{0.133}} \quad (6-12)$$

$$Re' = Re\sqrt{F} \quad (6-13)$$

ただし、 p 、 d はそれぞれ燃料棒の間隔及び直径、 d_m はスパイラルワイヤ型スパーサの平均直径、 H は巻きピッチ、 Re はレイノルズ数を表す（本燃料集合体では $d_m = 0.85$ mm、 $H = 0.2$ m）。

この摩擦係数を与える式は単相流摩擦損失について提案されたものであるが、本研究では Lockhart-Martinelli 相関と組み合わせてこれを二相流摩擦損失に適用した。すなわち、二相流のうちの液相もしくは気相成分だけが単相流として流れたときの摩擦損失勾配を求める際に、Rehme によって提案された摩擦損失係数 (6-10) をその摩擦損失係数として用いた。

このようにして求めた圧力損失を用いて補正した軸方向ボイド率分布の一例を Fig. 6-6 に、また、稠密型の模擬燃料集合体についての各ボイルオフ実験における圧力損失の補正量を Table 6-4 に示す。

7. ボイド率相関式及びモデル

本研究で評価したボイド率相関式及びモデルは、いずれも物性値と気液の見かけ速度からボイド率を予測するものである。物性値については圧力と温度を用いて蒸気表から求めることができるが、気液のみかけ速度については任意の高さに対してそれぞれ求める必要がある。そこで、まず気液の見かけ速度の算出方法について示し、その後評価に用いた各ボイド率相関式及びモデルについての概要を示す。

7.1 気液の見かけ速度の算出

TPTF 垂直試験部に設置されている軸方向局所ボイド率測定用の差圧計は、いずれもその測定区間が短いので測定区間内のボイド率はほぼ一様であると見なすことができる。それゆえ、相関式及びモデルによるボイド率予測値と差圧測定値から求めたボイド率とを比較するにあたっては、差圧計の測定区間の中心位置におけるボイド率は差圧測定値から算出したボイド率によって代表されると仮定して、各差圧計の測定区間の中心位置において両者を比較することにした。

差圧計 n の測定区間の中心位置における比エンタルピー h_n は、試験部入口における比エンタルピー h_{in} と模擬燃料棒の熱出力 Q (熱損失を差し引いた値) から、

$$h_n = \frac{Z_n Q}{Z_0 W} + h_{in} \quad (7-1)$$

となる。ここで、 Z_0 は模擬燃料棒の有効発熱長、 W は質量流量を表す。この比エンタルピー h_n から、その位置におけるクオリティー X_n は、

$$X_n = \frac{h_n - h_l}{h_g - h_l} \quad (7-2)$$

ただし、 $X_n > 1$ のとき $X_n = 1$
 $X_n < 0$ のとき $X_n = 0$

と表される。ここで、 h_l 、 h_g は飽和水及び飽和蒸気の比エンタルピーを表す。このクオリティー X_n から気液のみかけ速度 J_g 、 J_l を求めると、

$$J_{gn} = \frac{X_n G}{\rho_g} \quad (7-3)$$

$$J_{ln} = \frac{(1 - X_n) G}{\rho_l} \quad (7-4)$$

となる。ただし、 G は質量流束を表す。

7.2 ボイド率相関式及びモデル

本研究で評価の対象としたボイド率相関式及びモデルは以下の 5 種類である。

Cunningham-Yeh^[9] の相関式
 安濃田^[10] の相関式

Wilson^[11] の相関式
 Chexal-Lellouche^{[12][13][14]} のモデル
 Bestion^[15] のモデル

Cunningham-Yeh の相関式は、圧力 0.69 - 2.75 MPa、出力 0.5 - 2.0 MW の条件でウェスティングハウス社の Verification Test Facility (VTF) を用いて行われた小破断冷却材喪失事故の模擬実験の結果に基づいて提案されたものである。この実験に用いられた VTF の試験部は、PWR 型燃料集合体 (15 x 15) 1 体を模擬しており、12 フィート (3.6 m) の電気加熱型燃料棒 480 本と非加熱型燃料棒 48 本から構成される。また、その出力分布は径方向についてはおおよそ均一、軸方向についてはピーキング係数 1.66 のコサイン分布となっている。

安濃田は、高圧、高出力条件下においても有用な相関式を得るために、Cunningham-Yeh の相関式の各係数を大型非定常試験装置^[16] (LSTF) を用いて行われたボイルオフ実験 (圧力 1 - 17.2 MPa、熱流束 4.5 - 62 kW/m²) の実験データを使って修正した相関式を提案した。LSTF はウェスティングハウス型の 4 ループの PWR を模擬した総合試験装置で、17 x 17 タイプの燃料集合体によって構成される模擬炉心 (電気加熱型燃料棒 1008 本、非加熱型燃料棒 96 本) を有する。なお、ボイルオフ実験時の LSTF 模擬炉心の径方向出力分布は均一、軸方向出力分布はピーキング係数が 1.495 のコサイン分布である。

Wilson は自然循環型沸騰水型原子炉における自然循環条件を模擬した実験を直径 7.4 cm の円筒状の試験部を用いて行い、その結果を基に相関式を提案した。この実験は圧力 0.52 - 1.5 MPa の条件下で、それぞれ流れのない条件、自然循環条件及び強制循環条件で実施された。

Chexal-Lellouche のモデルは、ドリフトフラックスモデル^[17] のドリフトフラックスパラメータ、すなわち分配係数 C_0 とドリフト速度 V_{gj} を気液の密度、レイノルズ数等から算出するものである。このモデルはその適用範囲が広いことが特長となっており、圧力は 0.1 MPa から水の臨界圧力まで、水力相当直径は 0.01 - 1.0 m、流量による制限は特にないとされている。さらに適用体系についても、その水力相当直径が適用範囲内ならば PWR、BWR の区別なく適用できるとしている。このモデルはまた、分配係数 C_0 が圧力の関数となっていることも他の相関式と異なる点である。

Bestion のモデルは、フランスで開発された原子炉安全解析用の計算コードである CATHARE コードに使用されているモデルであり、その適用範囲は圧力 0.1 - 16.0 MPa、水力相当直径 0.01 - 0.7 m となっている。このモデルも Chexal-Lellouche のモデルと同様にドリフトフラックスモデルに基づいている。

以上のボイド率相関式及びモデルについては、その式の形を Appendix に記す。

8. 実験結果

各ボイルオフ実験の測定データは、試験部内の圧力、流量、熱出力等が一定となるまで待機した後に周波数 30 Hz にて 20 秒間収録した（600 ブロック）。実験結果を評価するにあたっては、それら測定データの時間平均を求め、時間平均値を対象に評価を行った（測定対象は厳密には定常状態ではないためわずかな経時変化があるが、ここではその評価は行わなかった）。

以下の評価に用いたボイド率の実験値（測定値）については、PWR 型模擬燃料集合体に関するものを Table 8-1 に、稠密型模擬燃料集合体に関するものを Table 8-2 に、それぞれ摩擦損失等を補正した後の値をその実験条件とともに示す。

8.1 PWR 型模擬燃料集合体に対するボイド率相関式及びモデルの適用性の評価

PWR 型燃料集合体の軸方向ボイド率分布の実験値（差圧計による。圧力損失は補正済み）とボイド率相関式及びモデルによる予測値とを比較した例を Fig. 8-1 に示す。この図では差圧計 DPX-5 によるボイド率を表示していないが、これは先にも述べたとおり、差圧計 DPX-5 が挟むグリッドスペースによる圧力損失の影響を十分に補正できなかったためである。同様な理由から、以下の評価についても差圧計 DPX-5 によるボイド率は評価の対象から除外した。

各ボイド率相関式及びモデルの予測性能を評価するにあたり、本研究ではボイド率の予測値と実験値との関係を明らかにするため、両者の比較プロットを行った。比較プロットは、各相関式及びモデルの圧力並びに流量依存性を把握するため、同一データに対して圧力で分類した場合（Figs. 8-2 - 8-6）と質量流束で分類した場合（Figs. 8-7 - 8-11）の 2 通りを行った。これらの比較プロットではボイド率実験値と予測値とをそれぞれ横軸、縦軸にとっており、45° の直線上にプロット点が集積する傾向が強いほど、その相関式もしくはモデルの予測性能が優れていることを示す。そして、データが 45° の直線より上の領域にプロットされるとボイド率の過大評価、下の領域にプロットされると過小評価の傾向があることを示す。なお、これらのプロットではいずれも測定位置、すなわち差圧計を区別していない。

本研究ではこうした図示に加えて、ボイド率予測値と実験値との差並びにその差の実験値に対する比を定量的に評価し、ボイド率相関式及びモデルの予測性能の評価基準として用いた。ただし、ボイド率予測値と実験値との差の実験値に対する比については、ボイド率（実験値）が小さい条件ではそのずれを過大評価するため、ボイド率（実験値）が 0.1 以下のデータについては評価の対象から除外した。

ボイド率予測値と実験値との差の平均：

$$m_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_{cal i} - \alpha_{exp i}) \quad (8-1)$$

ボイド率予測値と実験値との差の実験値に対する比の平均：

$$m_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha_{cal i} - \alpha_{exp i}}{\alpha_{exp i}} \right) \quad (8-2)$$

α_{cal} ボイド率（予測値）

α_{exp} ボイド率（実験値）

N データ数

これら 2 通りの物理量についてはその平均値に加えてそれぞれその標準偏差を求め、ボイド

率予測値と実験値との相関の強弱についての評価基準とした。

ボイド率予測値と実験値との差の標準偏差：

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_{cal i} - \alpha_{exp i} - m_d)^2} \quad (8-3)$$

ボイド率予測値と実験値との差の実験値に対する比の標準偏差：

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha_{cal i} - \alpha_{exp i}}{\alpha_{exp i}} - m_r \right)^2} \quad (8-4)$$

ボイド率予測値と実験値との差については Table 8-3 に、ボイド率予測値と実験値との差の実験値に対する比については Table 8-4 に、各実験を実施した（パラメトリックに変化させた）圧力及び質量流束毎に示す。

Cunningham-Yeh の相関式によるボイド率予測値は、ボイド率の大小にかかわらず実験値を 10 - 20 % 程度過大評価する傾向を示したが、この過大評価の割合と圧力及び流量条件との相関は特に見い出せなかった。しかし、ボイド率予測値と実験値との差は流量に対して単調増加する傾向を示した。これは、高流量条件で行った実験では低流量条件のそれと比べてボイド率が全体的に高い（絶対値として大きい）傾向を示したためである。このような傾向を示した理由としては、本研究では入口流量にかかわらず混合水位を燃料集合体上端付近に設定してボイルオフ実験を行ったことが挙げられる。その結果、加熱区間の長さが実験によらずほぼ一定となり、高流量条件では高熱流束条件となったため、低流量・低流量条件で行った実験と比べて大きいボイド率を示す傾向が現われたものと思われる。

安濃田 の相関式は、Cunningham-Yeh の相関式の各係数を修正したことにより、Cunningham-Yeh の相関式による予測値よりもやや低めのボイド率を予測する傾向がある。その結果、依然として過大評価する傾向が見られるものの、圧力及び流量条件にかかわらず実験値と予測値とがかなりよく一致する結果が得られた。とりわけ 3 MPa の条件下では、評価の対象とした相関式及びモデルのなかで本相関式が最も良好な予測性能を示した。予測性能に対する圧力及び流量の影響については、Cunningham-Yeh の相関式と同様の傾向、すなわち圧力条件による影響はほとんど見られないが、高流量・高熱流束条件下では予測値と実験値の差が開く傾向を示した。

Wilson の相関式は、その係数を気相の無次元速度の大小による場合分けを行って与えている。しかし、本研究で実施したボイルオフ実験のうち、高流量条件で行われたものについてはクオリティーが大きくなると、この場合分けのどちらをも満たさない条件となる。このような場合、本研究ではその条件においては評価を行わず、本相関式の条件式を満たす条件でのみ評価を行った。ゆえに、Fig. 8-4, 8-9 では他の図と比べてややデータ数が少なくなっている。

この相関式についてもボイド率を過大評価する傾向が見られた。過大評価する割合については Cunningham-Yeh の相関式とはほぼ同程度であるが、本相関式の場合、その過大評価の割合は圧力条件により大きく変化することが示された。すなわち、圧力の増加に伴い過大評価の割合が単調に減少する傾向が見られた。その結果、3 MPa の条件下では評価の対象とした相関式及びモデルのなかで最も予測性能が悪かったにもかかわらず、12 MPa の条件下では最も良好な予測性能を示した。また、流量条件の影響については Cunningham-Yeh、安濃田の相関式と同様に、高流量・高熱流束条件下で予測値と実験値の差が開く傾向を示した。

Chexal-Lellouche のモデルによる予測値は、ボイド率が中程度の範囲では若干実験値と異なるものの、全体的に見て実験値とほぼ一致した。とりわけ、他の相関式及びモデルの予測性能

が良くなかった 7 MPa の条件では極めて良い一致を示した。一方、予測値と実験値との相関の強弱、すなわち両者の相関の標準偏差を圧力毎に評価した結果、他の相関式及びモデルに比べてやや強い相関を持つ傾向が示された。これは予測値と実験値とが一意に対応する傾向が強いことを示しており、ボイド率に影響をもたらす各種要因を正しく評価していることを示すものである。その結果、全実験データを対象とした場合、本研究で評価の対象としたボイド率相関式及びモデルのなかで最も良好な予測性能を示した。しかしながら、本モデルについては予測性能に対する圧力条件の影響が顕著に現れた。すなわち、3 MPa の条件ではボイド率の過大評価の傾向が、12 MPa の条件では過小評価の傾向がそれぞれ見られ、予測性能に圧力依存性があることが明らかになった。一方、流量条件の影響についてはほとんど見られなかった。高流量・高熱流束条件下で見られる高ボイド率の予測については、Cunningham-Yeh をはじめとする多くの相関式では予測値と実験値との差が拡大する傾向が見られたが、本モデルでは非常に良好な予測を示した。その結果高ボイド率の予測については、予測値と実験値との差の実験値に対する割合が相対的に小さくなる傾向が見られた。

Bestion のモデルによる予測値と実験値とを比較したところ、全体的にボイド率の過大評価の傾向が現われた。しかし、Cunningham-Yeh 等のボイド率相関式が示した過大評価の傾向と異なり、高ボイド率のデータについては良好な予測がなされたものの、中程度のボイド率の予測については過大評価の傾向が顕著に現われた。予測性能に対する圧力条件の影響についてはほとんど見られなかったが、流量条件の影響については Chexal-Lellouche のモデルと同様に高ボイド率データを多く含む高流量・高熱流束条件下の予測が良好であった。この原因がドリフトフラックスモデルによるものか、それとも係数など他の要因によるものであるかは本研究では明らかにできなかったが、本研究で評価の対象とした範囲ではボイド率相関式による予測は比較的低いボイド率を良好に予測し、ドリフトフラックスモデルに基づくモデルでは高いボイド率を良好に予測する傾向が見られた。

ボイド率の測定を目的としたボイルオフ実験は、TPTF の他に LSTF^[16] 及び THTF^[18] 等他の実験装置でも実施されている。これら他の実験装置によるボイルオフ実験と本研究で実施したボイルオフ実験とでは実験装置の構造も実験条件も異なるので、実験データの直接の比較はできない。しかし、ボイド率相関式及びモデルによる予測値と実験値との相対的な傾向を比べてみると、TPTF におけるボイド率は他の実験装置におけるボイド率と比較して過大評価される傾向が強いことが示された。この原因が、TPTF の構造上の問題（燃料集合体の大きさ、ないしは燃料集合体の外周を非加熱燃料棒が占めていること）によるものなのか、ボイド率の径方向分布など他の要因によるものなのかについては、今後の実験により明らかにする計画である。

8.2 稠密型模擬燃料集合体に対するボイド率相関式及びモデルの適用性の評価

稠密炉心に対する既存のボイド率相関式及びモデルの評価は、PWR 型燃料集合体の場合と同様の手法によって行った。すなわち、ボイド率予測値と実験値との比較プロットを圧力及び質量流束毎に行うとともに、予測値と実験値の差の定量的な評価を行った (Figs. 8-12 - 8-21、Table 8-5, 8-6)。稠密型模擬燃料集合体を装荷して行ったボイルオフ実験の回数は PWR 型の燃料集合体装荷時に比べて多かったものの、集合体の軸方向高さが PWR 型のそれと比べて短いために軸方向ボイド率分布測定用の差圧計は 4 基と少なく、さらに燃料集合体の上端付近に混合水位を設定した実験を多く行ったこともあり、評価に用いたデータ数は相対的にやや少ないものとなった（差圧計がその測定区間に混合水位を挟む場合、そのデータは除外した）。

PWR 型燃料集合体についての比較プロット (Figs. 8-2 - 8-11) と稠密型燃料集合体についての比較プロット (Figs. 8-12 - 8-21) とを各相関式及びモデルについてそれぞれ比較すると、稠密型燃料集合体装荷時のボイド率予測値と実験値との基本的な傾向は PWR 型の燃料集合体装荷時に比べてほとんど変化していないことがわかる。しかし、PWR 型燃料集合体については

予測値と実験値とが不一致でありながらもほぼ一意に対応していたが（データの散らばりが小さかった）、稠密型燃料集合体については両者の相関が比較的弱くなりデータが大きく散らばる傾向が見られた。とりわけ、Bestion のモデルについては PWR 型燃料集合体の場合と比べて予測値と実験値との相関が非常に弱くなった結果が得られた。逆に、Chexal-Lellouche のモデルについては、同じドリフトフラックスモデルに基づきながらも、対象とするバンドル形状の影響が最も軽微であるという結果が得られた。しかし、このデータの散らばる傾向が稠密型燃料集合体への相関式ないしモデルの適用性に起因するのか、それとも測定上の問題（例えば、差圧導圧管の冷却を行わなかったこと等）に起因するのかは本研究では明確には把握できなかった。

圧力及び流量条件に対する各相関式及びモデルの予測性能については、データが散らばったためにその傾向はやや不明瞭なものとなったが、いずれの相関式及びモデルについても基本的な傾向は PWR 型燃料集合体の場合と変わらなかった。全体的な予測性能についても、Chexal-Lellouche のモデルが最も優れており、次いで安濃田の相関式が優れているという図式についても PWR 型燃料集合体の場合と変わらなかった。

8.3 差圧計とガンマ線型密度計による測定結果の比較

TPTF 垂直試験部には、ボイルオフ条件下のボイド率測定手段として、これまで評価に用いてきた差圧計の他にガンマ線型密度計がある。その測定原理の違いから、差圧計は体積平均ボイド率を、ガンマ線型密度計は弦平均ボイド率をそれぞれ測定するものの、水平断面のボイド率分布が一樣であるならば、同じ高さのボイド率を測定した場合の両者のボイド率は一致するはずである。本試験部には、3 基のガンマ線型密度計がそれぞれ軸方向局所ボイド率測定のための差圧計（DPX-3, 6, 8）の測定区間のほぼ中央に設置されているため、それら対応するガンマ線型密度計と差圧計の測定値を比較することにした。

Fig. 8-22 は PWR 型模擬燃料集合体を装荷して行ったボイルオフ実験についてのガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率との比較である（この図では流量及び測定位置の区別は行っていない）。单相流に近い状態、すなわちボイド率が 0 及び 1 の付近では両者による値はほぼ一致しているが、二相流状態ではガンマ線型密度計によるボイド率が差圧計によるボイド率より大きい値を与えている。この理由として、1) ガンマ線型密度計のビームが通過する模擬燃料棒と模擬燃料棒との中間の領域（Fig. 8-23）に気泡が集合したため、ガンマ線型密度計は局所的な高いボイド率を測定している（模擬燃料棒表面と模擬燃料棒表面との間隔は最小でも 3.6 mm あるが、ガンマ線型密度計のビームの幅は 1.0 mm と細い）、2) 試験部径方向中央部に気泡が密集したため（Fig. 8-24）、積分方法の異なる弦平均ボイド率と面平均（体積平均）ボイド率とでは相違が見られる、等が考えられる。

そこで、光学式ボイド計^[3]を用いて試験部内の直径位置における径方向ボイド率分布を測定することを試みた。光学式ボイド計はその仕様上の制約から、3 MPa の飽和温度に相当する温度以下でかつ非加熱条件下でのみ使用可能である。ゆえに、本研究では 3 MPa の非加熱条件下の水／蒸気二相流を対象にその径方向ボイド率を測定し、ボイルオフ条件下の径方向ボイド率分布の評価の参考にした。Figs. 8-25, 8-26 に 3 MPa の非加熱条件下の水／蒸気二相流の径方向ボイド率分布の一例として、質量流束 10.5 kg/m²s、クオリティー 0.47 の条件下のボイド率分布及び質量流束 20.8 kg/m²s、クオリティー 0.29 の条件下のボイド率分布を示す^{[19][20]}。これらの径方向ボイド率はいずれも模擬燃料棒と模擬燃料棒との中間の領域（サブチャンネル中央）のボイド率が高く、かつ、試験部径方向中心部のボイド率が高いことを示している。

この径方向ボイド率分布は直径位置におけるものであるが、試験部水平断面全体のボイド率分布がこの径方向分布に準じると仮定し、径方向並びに水平断面で積分し弦平均ボイド率と面積平均ボイド率とを求めたところ、それぞれ同時に測定したガンマ線型密度計（GD-3）によるボイド率及び差圧計（DPX-8）によるボイド率とほぼ一致した。この結果から、加熱条件下と

非加熱条件下という違いはあるものの、ガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率との相違は、試験部水平断面内ボイド率分布に起因するものとして説明できることが明らかになった。

9. 結論

本研究では、小型定常二相流試験装置（TPTF）を用いて高温高圧条件下でボイルオフ実験を行い、既存のボイド率相関式等の評価を行った。実験はそれぞれ PWR 17 × 17 型燃料集合体及びさらに稠密な炉心形状を模擬した 2 種類の試験部を使用した。得られた結論は以下の通りである。

1. 評価に用いたボイド率相関式及びモデルのうち、Wilson の相関式と Chexal-Lellouche のモデルについては実験データとは異なった圧力依存性（両者ともに高圧条件になるに従い、相対的にボイド率を小さく予測する傾向を示した）がみられた。しかし、評価に用いたボイド率相関式及びモデルの中では Chexal-Lellouche のモデルの予測性能が全般的に優れていた。なお、LSTF 等による他の類似実験と本実験との間には、値としては小さいものの定性的な相違が見られたため、今後非加熱流動実験等を実施し、装置の特性や実験条件の影響をさらに調べる。
2. 稠密型の模擬燃料集合体中のボイド率について既存のボイド率相関式及びモデルの予測性能を評価したところ、PWR 型の模擬燃料集合体装荷時に比べて予測値と実験値との相関が弱くなる傾向があらわれたものの、各相関式及びモデルの予測性能に大きな相違は見られなかった。
3. ガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率を比較したところ、ガンマ線型密度計によるボイド率が差圧計によるボイド率に比べて大きいという実験結果が得られたが、これは径方向ボイド率分布が平坦でないことに起因することが明らかになった。

謝辞

TPTF ボイルオフ実験を行うにあたり、実験を支援して下さった（株）原子力エンジニアリングの方々に感謝します。

非加熱条件下という違いはあるものの、ガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率との相違は、試験部水平断面内ボイド率分布に起因するものとして説明できることが明らかになった。

9. 結論

本研究では、小型定常二相流試験装置（TPTF）を用いて高温高圧条件下でボイルオフ実験を行い、既存のボイド率相関式等の評価を行った。実験はそれぞれ PWR 17 × 17 型燃料集合体及びさらに稠密な炉心形状を模擬した 2 種類の試験部を使用した。得られた結論は以下の通りである。

1. 評価に用いたボイド率相関式及びモデルのうち、Wilson の相関式と Chexal-Lellouche のモデルについては実験データとは異なった圧力依存性（両者ともに高圧条件になるに従い、相対的にボイド率を小さく予測する傾向を示した）がみられた。しかし、評価に用いたボイド率相関式及びモデルの中では Chexal-Lellouche のモデルの予測性能が全般的に優れていた。なお、LSTF 等による他の類似実験と本実験との間には、値としては小さいものの定性的な相違が見られたため、今後非加熱流動実験等を実施し、装置の特性や実験条件の影響をさらに調べる。
2. 稠密型の模擬燃料集合体中のボイド率について既存のボイド率相関式及びモデルの予測性能を評価したところ、PWR 型の模擬燃料集合体装荷時に比べて予測値と実験値との相関が弱くなる傾向があらわれたものの、各相関式及びモデルの予測性能に大きな相違は見られなかった。
3. ガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率を比較したところ、ガンマ線型密度計によるボイド率が差圧計によるボイド率に比べて大きいという実験結果が得られたが、これは径方向ボイド率分布が平坦でないことに起因することが明らかになった。

謝辞

TPTF ボイルオフ実験を行うにあたり、実験を支援して下さった（株）原子力エンジニアリングの方々に感謝します。

非加熱条件下という違いはあるものの、ガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率との相違は、試験部水平断面内ボイド率分布に起因するものとして説明できることが明らかになった。

9. 結論

本研究では、小型定常二相流試験装置 (TPTF) を用いて高温高压条件下でボイルオフ実験を行い、既存のボイド率相関式等の評価を行った。実験はそれぞれ PWR 17 × 17 型燃料集合体及びさらに稠密な炉心形状を模擬した 2 種類の試験部を使用した。得られた結論は以下の通りである。

1. 評価に用いたボイド率相関式及びモデルのうち、Wilson の相関式と Chexal-Lellouche のモデルについては実験データとは異なった圧力依存性 (両者ともに高压条件になるに従い、相対的にボイド率を小さく予測する傾向を示した) がみられた。しかし、評価に用いたボイド率相関式及びモデルの中では Chexal-Lellouche のモデルの予測性能が全般的に優れていた。なお、LSTF 等による他の類似実験と本実験との間には、値としては小さいものの定性的な相違が見られたため、今後非加熱流動実験等を実施し、装置の特性や実験条件の影響をさらに調べる。
2. 稠密型の模擬燃料集合体中のボイド率について既存のボイド率相関式及びモデルの予測性能を評価したところ、PWR 型の模擬燃料集合体装荷時に比べて予測値と実験値との相関が弱くなる傾向があらわれたものの、各相関式及びモデルの予測性能に大きな相違は見られなかった。
3. ガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率を比較したところ、ガンマ線型密度計によるボイド率が差圧計によるボイド率に比べて大きいという実験結果が得られたが、これは径方向ボイド率分布が平坦でないことに起因することが明らかになった。

謝辞

TPTF ボイルオフ実験を行うにあたり、実験を支援して下さった (株) 原子力エンジニアリングの方々に感謝します。

参考文献

1. Nakamura, H. et al. : "System Description for ROSA-IV Two-Phase Flow Test Facility," JAERI-M 83-042 (1983).
2. Kondo, M. et al. : "Void Fraction under High-Pressure Boil-Off Conditions in Rod Bundle," ANS Proc. 1991 National Heat Trans. Conf., pp.225-232 (1991).
3. 村田秀男、他 : "高温高压水/蒸気二相流計測用工学式ボイド計", 日本原子力学会予稿集 B56 (1992秋) .
4. Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C. : "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes," Chem. Eng. Prog., Vol. 45, pp. 39-48 (1949).
5. 植田辰洋 : "気液二相流", 養賢堂, pp. 39-41 (1981).
6. Lahey, R. T. Jr. and Moody, F. J. : "The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor," American Nuclear Society, pp. 242-245.
7. Rehme, K. : "Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers," Nucl. Technol., Vol. 17, pp. 15-23 (1973).
8. 伝熱流動研究室 : "高転換軽水炉の熱水力工学の研究", JAERI-M 91-055 (1991)
9. Cunningham, J. P. and Yeh, H.C. : "Experiments and Void Correlation for PWR Small Break LOCA Conditions," Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 17, pp. 369-370 (1973).
10. Anoda, Y. et al. : "Void Fraction Distribution in Rod Bundle under High Pressure Conditions," Proc. ASME Winter Annual Meeting, FED-Vol. 99, Advances in Gas-Liquid Flows, pp. 283-289 (1990).
11. Meyer, C. and Wilson, F. : "Steam Volume Fraction in Flowing and Non-Flowing Two-Phase Mixtures," Trans. Am. Nucl. Soc., pp. 507-508 (1964).
12. Chexal, B. and Lellouche, G. : "A Full-Range Drift-Flux Correlation for Vertical Flows (Revision 1)," EPRI NP-3989-SR, Revision 1 (1986).
13. Chexal, B. and Lellouche, G. et al. : "A Void Fraction Correlation for Generalized Applications," Proc. 4th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Vol. 2, pp. 996-1002 (1989).
14. Chexal, B. et al. : "An Assessment of Eight Void Fraction Models," Nucl. Eng. & Des., Vol. 126, pp. 71-88 (1991).
15. Rousseau, J. C. et al. : "Assessment Results of the French Advanced Safety Code CATHARE," Proc. ENC Conf. (1986).
16. The ROSA-IV Group : "ROSA-IV Large Scale Test Facility (LSTF) System Description for Second Simulated Fuel Assembly," JAERI-M 90-176 (1990).
17. Zuber, N. and Findlay, J. A. : "Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems," J. Heat Transfer, Vol. 87, pp. 453-468 (1965).
18. Anklam, T. M. and Miller R. F. : "Void Fraction under High Pressure, Low Flow Conditions in Rod Bundle Geometry," Nucl. Engrg. Des., Vol. 75, pp.99-108 (1982).
19. Kumamaru, H. et al. : "Void Fraction Distribution under High-Pressure Boil-Off Conditions in Rod Bundle," to be published in Nucl. Eng. & Des.
20. 近藤昌也、他 : "高温高压ボイルオフ条件下のバンドル内ボイド率", 日本原子力学会予稿集 D35 (1993春)

Table 3-1 ボイルオフ実験に用いた模擬燃料集合体

	PWR 型模擬燃料集合体	稠密型模擬燃料集合体
模擬燃料棒総数	32	61
電気加熱型燃料棒	24	39
非加熱型燃料棒	8	22
模擬燃料棒直径 (mm)		
電気加熱型燃料棒	9.5	9.0
非加熱型燃料棒 (本数)	9.5 × 5.75 (8)	9.0 (4) 9.0 × 7.5 (12) 8.7 × 3.4 (6)
模擬燃料棒間隔 (mm)	12.6	10.0
模擬燃料棒間隔/直径 (p/d)	1.33	1.11
有効加熱長 (mm)	3700	1850
加熱面積 (m ²)	2.65	2.04
軸方向ピーク係数	1	1
压力容器内径 (mm)	79.28	79.28
スベーサ (個数)	グリッドスベーサ (8)	スパイラルワイヤ型スベーサ
流路断面積 (mm ²)	2876	1540
水力相当直径 (mm)	9.79	3.21

Table 3-2 TP TF 垂直試験部に設置されているボイド率測定機器とその設置位置

模擬燃料 集合体	測定機器	測定範囲 h (m)	測定位置 (中央) z (m)	測定範囲内の グリッドスペース数
PWR 型	差圧計	DPX-1	0.287	2
		DPX-2	0.731	0
		DPX-3	1.184	2
		DPX-4	1.638	0
		DPX-5	1.864	1
		DPX-6	2.091	0
		DPX-7	2.545	2
		DPX-8	3.025	0
		DPX-9	3.455	1
		DPX-10	3.700	1.850
稠密型	ガンマ線型密度計	GD-1	1.181	-
		GD-2	2.091	-
		GD-3	3.024	-
	光学式ボイド計	OP	3.500	-
		差圧計	DPX-1	0.231
DPX-2	0.694		-	
DPX-3	1.142		-	
DPX-4	1.605		-	
DPX-5	0.925		-	

※) 稠密型模擬燃料集合体については、ガンマ線型密度計及び光学式ボイド計は使用不能。

Table 3-3 差圧の算出に使用した差圧導圧管内の流体密度

模擬燃料 集合体	差圧計	差圧導圧管内流体密度 (kg/m ³)			相当温度 (°C)		
		3 MPa	7 MPa	12 MPa	3 MPa	7 MPa	12 MPa
PWR 型	DPX-1	994.9 ± 2.1	996.2 ± 2.1	996.7 ± 2.0	36.5	37.6	41.7
	DPX-2	988.6 ± 2.1	989.4 ± 2.4	991.8 ± 2.4	51.7	53.6	52.9
	DPX-3	991.3 ± 3.4	992.7 ± 4.3	993.5 ± 3.9	45.6	46.3	49.2
	DPX-4	990.0 ± 2.8	990.4 ± 2.4	988.2 ± 1.1	48.6	51.4	60.2
	DPX-5	992.3 ± 2.2	989.9 ± 3.9	985.3 ± 5.0	43.2	52.5	65.7
	DPX-6	989.2 ± 2.7	989.4 ± 3.0	987.7 ± 3.5	50.4	53.6	61.2
	DPX-7	994.5 ± 1.8	993.8 ± 2.8	991.8 ± 2.3	37.6	43.7	52.9
	DPX-8	986.0 ± 2.4	985.0 ± 3.6	982.7 ± 3.3	57.0	62.3	70.3
	DPX-9	993.0 ± 2.3	992.7 ± 3.3	993.2 ± 3.6	41.5	46.3	49.9
	DPX-10	993.1 ± 4.5	994.3 ± 4.6	994.1 ± 4.4	41.2	42.5	47.9
稠密型	DPX-1	991.5	991.1	990.9	45.0	50.0	55.0
	DPX-2	991.5	991.1	990.9	45.0	50.0	55.0
	DPX-3	991.5	991.1	990.9	45.0	50.0	55.0
	DPX-4	991.5	991.1	990.9	45.0	50.0	55.0
	DPX-5	991.5	991.1	990.9	45.0	50.0	55.0

Table 5-1 熱損失の評価に用いた水单相流実験

模擬燃料 集合体	実験番号	圧力 (MPa)	質量流束 (kg/m ² s)	電気出力 (kW)	入口温度 (°C)	流量計用 オリフィス	実験日
PWR 型 稠密型	4044	3.04	21.3	0.0	218.6	A6	930218
	5011	3.05	39.0	0.0	223.0	A6	901121
	5012	3.05	39.3	0.0	222.5	A6	901121
	5021	6.94	40.3	0.0	265.1	A6	910110
	5022	6.95	40.5	0.0	264.3	A6	910110
	5031	11.9	41.9	0.0	299.8	A6	901219
	5032	11.9	41.9	0.0	299.6	A6	901219

Table 6-1 比 Φ_l , Φ_g と無次元変数 X との関係

無次元変数 X	乱流-乱流		乱流-層流		層流-乱流		層流-層流	
	Φ_l	Φ_g	Φ_l	Φ_g	Φ_l	Φ_g	Φ_l	Φ_g
0.01	128	1.28	120	1.2	112	1.12	105	1.05
0.02	68.4	1.37	64.0	1.28	58.0	1.16	53.5	1.07
0.04	38.5	1.54	34.0	1.36	31.0	1.24	28.0	1.12
0.07	24.4	1.71	20.7	1.45	19.3	1.35	17.0	1.19
0.10	18.5	1.85	15.2	1.52	14.5	1.45	12.4	1.24
0.2	11.2	2.23	8.90	1.78	8.70	1.74	7.00	1.40
0.4	7.05	2.83	5.62	2.25	5.50	2.20	4.25	1.70
0.7	5.04	3.53	4.07	2.85	4.07	2.85	3.08	2.16
1.0	4.20	4.20	3.48	3.48	3.48	3.48	2.61	2.61
2.0	3.10	6.20	2.62	5.25	2.62	5.24	2.06	4.12
4.0	2.38	9.50	2.05	8.2	2.15	8.60	1.76	7.00
7.0	1.96	13.7	1.73	12.1	1.83	12.8	1.60	11.2
10	1.75	17.5	1.59	15.9	1.66	16.6	1.50	15.0
20	1.48	29.5	1.40	28	1.44	28.8	1.36	27.3
40	1.29	51.5	1.25	50	1.25	50.0	1.25	50.0
70	1.17	82.0	1.17	82	1.17	82.0	1.17	82.0
100	1.11	111	1.11	111	1.11	111	1.11	111

出典) 文献4による。

Table 6-2 グリッドスペースによる摩擦損失の評価に用いた水単相流実験

実験番号	Re 数 (-)	圧力 (MPa)	質量流量 (kg/m ² s)	試験管内温度 (°C)	差圧測定値 (Pa)										水の密度差から算出した差圧と差圧測定値とのずれ (Pa)									
					DPX-1	DPX-2	DPX-3	DPX-4	DPX-5	DPX-6	DPX-7	DPX-8	DPX-9	DPX-1	DPX-2	DPX-3	DPX-4	DPX-5	DPX-6	DPX-7	DPX-8	DPX-9		
0711	495	3.00	5.8	229.3 ± 1.2	-934.0	-488.0	-937.7	-485.3	-225.0	-483.6	-962.3	-557.6	-797.9	-3.1	-3.7	-10.8	-10.6	0.0	-11.5	-3.3	-10.8	5.5		
0721	897	2.99	10.5	227.0 ± 1.0	-893.2	-474.4	-913.5	-475.2	-217.7	-474.4	-937.3	-548.3	-777.4	-26.0	-7.6	-16.5	-11.0	-3.0	-11.0	-9.9	-8.7	0.2		
0731	1761	3.03	20.5	221.9 ± 1.3	-881.0	-460.0	-876.1	-465.5	-213.3	-461.6	-899.9	-525.9	-730.5	0.7	-0.7	-13.6	0.6	2.2	-2.4	-7.0	-6.2	-13.3		
0741	3462	3.02	40.3	222.5 ± 1.7	-889.1	-463.1	-883.7	-470.8	-214.0	-469.6	-908.0	-527.6	-734.6	4.2	-0.1	-10.8	3.4	1.7	3.0	-3.7	-7.4	-13.2		
0751	6094	3.07	70.8	228.8 ± 1.7	-928.9	-488.4	-936.5	-490.1	-217.7	-485.4	-947.3	-558.5	-774.3	-3.5	-0.7	-7.2	-3.2	-6.1	-7.2	-13.5	-7.0	-14.2		
0761	8627	3.07	100.2	230.4 ± 1.0	-906.7	-492.6	-918.1	-495.7	-210.9	-490.0	-937.3	-570.7	-780.3	-38.2	-3.4	-38.6	-4.5	-16.0	-9.4	-36.5	-2.8	-18.8		
0786	12010	3.07	139.4	231.5 ± 0.9	-888.5	-500.7	-899.3	-503.5	-195.5	-502.3	-914.3	-580.8	-770.9	-65.5	-0.1	-66.8	-1.6	-33.6	-2.1	-68.8	1.5	-36.0		
0811	595	6.91	5.7	264.8 ± 2.2	-1238.7	-654.8	-1242.8	-649.9	-287.9	-645.0	-1232.8	-741.1	-1010.4	15.4	11.0	5.6	1.9	-5.1	-2.7	-21.1	-6.2	-20.6		
0821	1143	6.87	11.0	269.3 ± 2.8	-1148.0	-638.6	-1252.0	-664.1	-296.6	-667.1	-1297.0	-786.1	-1081.1	-120.0	-29.6	-31.4	-8.2	-7.3	-5.0	-3.0	10.2	11.9		
0831	2112	6.92	20.4	278.0 ± 1.2	-1341.2	-713.4	-1359.7	-719.2	-325.8	-713.2	-1379.4	-821.6	-1134.8	-15.5	-3.1	-15.5	-1.5	0.2	-7.5	-12.3	-11.2	-10.3		
0841	4194	6.93	40.5	272.3 ± 2.4	-1307.6	-692.3	-1309.5	-692.6	-311.9	-684.4	-1312.3	-772.8	-1071.6	10.2	8.1	-4.4	4.2	0.8	-3.9	-18.1	-22.0	-22.8		
0851	7389	6.93	71.3	279.6 ± 1.2	-1355.4	-728.8	-1381.1	-727.7	-315.4	-722.5	-1390.1	-819.2	-1145.1	-18.5	-2.1	-12.0	-2.4	-14.4	-7.7	-19.4	-24.7	-14.8		
0861	10471	6.93	101.0	280.0 ± 1.1	-1322.3	-725.5	-1351.6	-726.7	-304.2	-721.4	-1360.7	-830.8	-1133.2	-55.9	-2.7	-45.9	-5.7	-26.6	-11.0	-53.2	-15.7	-30.3		
0877	13143	6.98	126.6	278.8 ± 2.5	-1321.0	-728.7	-1343.9	-723.8	-294.9	-716.7	-1340.7	-825.3	-1112.9	-44.0	7.7	-40.0	-1.5	-32.7	-8.5	-59.5	-12.8	-39.4		
0911	716	11.8	5.6	313.1 ± 1.4	-1753.9	-932.8	-1770.3	-925.7	-408.4	-913.8	-1752.3	-1053.2	-1471.7	14.4	9.1	2.0	-2.2	-9.8	-14.7	-31.8	-23.2	1.6		
0921	1440	11.8	11.3	311.1 ± 1.5	-1621.7	-890.4	-1714.3	-905.5	-399.6	-900.8	-1741.8	-1050.0	-1462.2	-89.1	-17.6	-24.4	-6.7	-11.6	-12.0	-12.7	-7.9	16.6		
0941	5278	11.9	41.4	316.5 ± 1.3	-1800.4	-964.1	-1829.5	-953.5	-418.0	-950.7	-1821.7	-1095.6	-1502.8	11.4	13.5	10.0	-1.3	-12.3	-4.9	-13.5	-12.4	-9.6		
0951	9132	11.8	71.7	315.5 ± 1.4	-1765.8	-946.4	-1799.0	-944.8	-404.7	-934.2	-1795.1	-1066.3	-1477.4	-8.5	3.8	-5.3	-2.1	-22.0	-13.3	-24.9	-32.4	-22.4		
0961	12949	11.8	101.7	317.9 ± 1.2	-1772.2	-960.8	-1810.5	-956.4	-406.5	-949.1	-1802.9	-1090.4	-1501.5	-39.5	-2.2	-32.5	-10.8	-29.3	-18.8	-55.8	-32.2	-30.3		
0972	48326	11.9	379.1	318.9 ± 0.7	-1256.2	-978.7	-1300.6	-976.7	-140.8	-978.6	-1294.0	-1122.4	-1249.2	-571.9	6.7	-559.5	0.5	-299.0	1.7	-581.7	-10.7	-296.6		
3031	7138	3.07	82.9	229.6 ± 0.8	-858.8	-401.9	-886.9	-409.2	-233.3	-440.9	-927.2	-466.1	-710.9	-79.9	-90.7	-63.3	-87.5	7.9	55.1	-40.1	-103.4	-82.9		
3051	21108	3.04	245.6	231.5 ± 0.8	-678.0	-425.4	-680.9	-439.6	-87.3	-451.3	-723.9	-480.5	-611.8	-275.5	-75.2	-284.6	-65.2	-141.7	-52.8	-258.7	-98.5	-194.7		
3061	28528	3.05	331.6	233.0 ± 0.5	-537.4	-448.1	-531.1	-442.9	-40.4	-457.7	-589.0	-488.5	-548.0	-428.1	-59.1	-446.9	-68.5	-191.5	-53.0	-406.0	-98.2	-268.8		
3091	17583	3.00	205.3	230.5 ± 0.5	-735.1	-424.6	-715.4	-432.6	-143.6	-466.5	-796.7	-458.7	-634.3	-210.8	-71.9	-242.3	-68.1	-83.6	-33.5	-178.1	-115.4	-165.7		
3111	2209	6.95	21.3	265.6 ± 3.8	-1211.2	-591.6	-1171.8	-589.5	-278.8	-588.1	-1224.2	-630.4	-936.2	-19.8	-56.4	-73.3	-62.7	-16.1	-63.8	-37.5	-121.8	-101.4		
3121	4308	6.93	41.6	275.4 ± 4.1	-1279.4	-614.8	-1262.4	-616.0	-312.4	-601.4	-1331.6	-630.0	-1027.3	-50.1	-86.8	-84.7	-89.9	-6.6	-104.4	-31.9	-185.4	-94.6		
3131	8574	6.97	82.6	273.8 ± 4.7	-1282.4	-644.6	-1267.9	-630.3	-304.0	-627.9	-1327.9	-688.7	-1007.2	-30.1	-47.8	-61.6	-66.3	-10.7	-68.6	-18.1	-115.7	-100.1		
3141	17035	6.97	164.1	279.5 ± 4.7	-1239.3	-663.3	-1238.7	-663.0	-272.1	-661.6	-1285.4	-737.7	-1003.4	-133.0	-61.7	-152.7	-66.2	-57.3	-67.6	-122.3	-105.1	-155.1		
3151	29437	6.95	245.3	281.7 ± 4.6	-1100.2	-662.9	-1138.5	-664.4	-219.5	-667.5	-1195.9	-722.0	-956.2	-295.9	-75.1	-277.5	-77.8	-115.7	-74.8	-236.4	-136.1	-222.6		
3161	34567	6.95	333.3	282.0 ± 4.7	-961.7	-688.1	-961.0	-675.6	-135.5	-683.6	-1027.1	-739.0	-896.5	-438.0	-51.9	-458.7	68.5	-200.6	-60.5	-408.9	-121.3	-285.4		
3171	42802	6.93	412.9	282.3 ± 4.7	-759.9	-677.2	-764.0	-678.2	-30.6	-686.7	-834.3	-729.3	-800.9	-643.8	-64.9	-659.8	-68.1	-306.4	-59.7	-605.9	-133.6	-384.4		
3191	21208	6.88	204.9	280.0 ± 4.6	-1147.9	-648.1	-1162.2	-648.2	-251.7	-660.2	-1250.8	-679.2	-1006.8	-231.1	-80.6	-236.1	-84.7	-79.3	-72.7	-163.8	-167.9	-157.4		
3311	2894	11.9	22.7	299.2 ± 6.8	-1579.0	-797.5	-1540.7	-774.4	-362.2	-780.9	-1595.5	-817.2	-1213.9	27.7	-23.6	-32.9	-50.9	-10.2	-44.7	5.8	-138.5	-95.2		
3321	5441	11.8	42.8	313.8 ± 1.2	-1666.3	-843.8	-1676.3	-813.7	-420.6	-800.6	-1793.4	-837.7	-1369.5	-83.6	-85.5	-102.7	-119.8	-0.1	-133.6	-1.4	-245.3	-109.5		
3331	10529	11.8	82.8	319.1 ± 0.7	-1742.0	-914.3	-1722.6	-905.8	-398.6	-891.5	-1850.5	-903.1	-1428.2	-90.1	-59.8	-141.5	-72.5	-42.2	-87.6	-29.2	-232.6	-121.1		
3351	31118	11.8	244.5	320.7 ± 0.7	-1555.8	-930.8	-1542.3	-917.1	-278.1	-955.2	-1640.9	-927.9	-1323.5	-302.2	-57.4	-348.7	-75.4	-169.0	-38.2	-265.6	-224.4	-248.0		
3361	42048	11.8	330.5	320.5 ± 8.4	-1401.6	-934.8	-1393.1	-925.8	-220.6	-933.5	-1473.9	-1005.0	-1246.9	-452.7	-51.5	-494.1	-64.7	-225.6	-57.8	-428.8	-145.0	-321.4		
3381	15759	11.8	124.0	314.3 ± 8.3	-1697.6	-883.6	-1676.9	-866.9	-406.1	-859.1	-1762.9	-931.7	-1350.6	-60.1	-50.0	-110.2	-70.9	-16.5	-79.4	-40.0	-156.3	-135.1		

注) 3000番台の実験では差圧導圧管内を冷却していない。

Table 6-3 PWR 型模擬燃料集合体における圧力損失 (摩擦損失及び形状損失)

実験番号	圧力 (MPa)	質量流速 (kg/m ² s)	摩擦損失 (Pa)										グリッドスペーサによる圧力損失 (Pa)				
			DPX-1	DPX-2	DPX-3	DPX-4	DPX-5	DPX-6	DPX-7	DPX-8	DPX-9	DPX-1	DPX-3	DPX-5	DPX-7	DPX-9	
0712	2.98	5.9	1	1	2	1	1	1	2	4	3	4	0	2	2	4	3
0722	2.98	10.6	2	2	5	3	2	4	10	7	11	1	6	5	13	9	
0732	3.01	20.7	5	7	22	11	6	14	33	24	20	5	26	21	57	38	
0733	3.01	20.7	4	6	19	14	5	12	29	21	32	4	22	18	50	34	
0742	3.02	40.5	20	25	77	54	27	64	107	78	67	24	105	83	227	146	
0752	3.05	70.4	49	58	173	123	61	152	326	222	253	67	261	204	556	377	
0762	3.06	100.1	90	104	308	221	110	272	594	406	571	130	499	389	1058	716	
0812	6.88	5.7	0	1	2	1	0	1	2	1	1	0	1	1	2	1	
0822	6.87	11.1	0	1	4	3	1	3	7	2	3	0	4	3	8	5	
0823	6.87	11.0	0	1	2	2	1	2	5	4	5	0	2	2	5	4	
0832	6.91	20.8	4	5	14	9	3	8	18	12	9	3	12	10	27	16	
0842	6.91	40.8	13	16	45	30	15	35	70	36	29	12	45	35	95	62	
0852	6.92	71.3	36	41	113	77	38	91	190	119	127	38	127	97	260	175	
0862	6.90	100.7	67	73	200	135	67	163	343	223	295	76	238	181	485	325	
0912	11.76	6.0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	
0922	11.76	11.5	0	1	2	2	1	1	3	2	3	1	1	1	3	2	
0932	11.75	21.8	1	3	10	7	3	8	11	7	5	2	7	5	15	9	
0942	11.85	42.3	9	12	32	21	10	25	49	22	27	9	26	20	52	35	
0952	11.83	71.8	30	34	87	57	27	65	127	71	43	30	80	59	155	101	
0962	11.84	102.5	54	62	158	104	50	119	239	143	136	61	154	112	294	194	

Table 6-4 稠密型模擬燃料集合体における圧力損失

実験番号	圧力 (MPa)	質量流束 (kg/m ² s)	圧力損失 (Pa)			
			DPX-1	DPX-2	DPX-3	DPX-4
5410	3.02	10.9	10	20	26	59
5411	3.02	10.8	9	19	26	58
5420	3.02	19.6	22	77	101	137
5421	3.02	19.6	22	76	100	137
5430	3.03	27.7	41	133	171	232
5431	3.03	27.9	40	132	171	232
5440	3.04	46.7	133	264	354	507
5441	3.03	46.9	132	264	354	508
5450	3.05	69.8	342	765	668	975
5451	3.05	69.2	339	760	663	967
5462	3.02	104.0	523	1172	1666	1586
5463	3.03	103.8	521	1168	1660	1580
5514	6.92	11.4	8	16	31	16
5515	6.92	11.4	8	16	31	16
5523	6.91	20.6	16	55	68	75
5524	6.91	20.8	16	55	68	76
5533	6.91	29.4	28	88	109	127
5534	6.91	29.6	28	88	110	129
5544	6.92	48.0	90	270	218	270
5545	6.91	48.4	91	271	220	274
5555	6.93	70.9	236	487	394	504
5563	6.94	95.3	351	723	948	791
5564	6.95	95.2	351	722	947	790
5611	11.8	11.6	2	12	21	9
5612	11.8	11.7	2	12	21	9
5621	11.8	21.5	5	23	47	50
5622	11.8	21.3	5	23	46	49
5630	11.9	30.2	7	33	66	85
5631	11.9	30.3	7	57	66	85
5632	11.9	31.0	27	68	79	72
5633	11.9	31.0	8	65	76	85
5640	11.9	50.1	44	167	212	178
5641	11.9	50.1	46	167	213	178
5643	11.9	50.8	46	186	149	182
5650	11.9	72.7	116	307	385	312
5651	11.9	72.6	118	308	386	312
5653	11.9	73.6	119	331	415	323
5662	11.8	96.9	284	537	665	490
5663	11.8	96.7	283	536	664	488

Table 8-1 PWR 型模擬燃料集合体についてのボイルオフ実験条件とボイド率測定値 (圧力損失補正済み)

実験番号	圧力 (MPa)	質量流束 (kg/m ² s)	電気出力 (kW)	入口温度 (°C)	流量計用オリフィス	実験日	ボイド率 (-)			ボイド率 (-)								
							GD-1	GD-2	GD-3	DPX-1	DPX-2	DPX-3	DPX-4	DPX-5	DPX-6	DPX-7	DPX-8	DPX-9
0712	2.98	5.9	37.0	208.0	A6	921210	0.32	0.43	0.53	0.06	0.13	0.23	0.24	0.33	0.27	0.34	0.35	0.39
0722	2.98	10.6	59.4	212.1	A6	921210	0.42	0.57	0.67	0.08	0.20	0.31	0.34	0.43	0.38	0.44	0.49	0.55
0732	3.01	20.7	124.3	219.1	A6	921203	0.63	0.81	0.93	0.15	0.33	0.46	0.55	0.50	0.62	0.62	0.76	0.88
0733	3.01	20.7	109.6	218.0	A6	921203	0.59	0.74	0.87	0.12	0.29	0.42	0.50	0.48	0.55	0.57	0.67	0.68
0742	3.02	40.5	244.8	225.4	A6	921203	0.85	0.97	0.99	0.26	0.51	0.62	0.75	0.64	0.83	0.83	0.94	0.92
0752	3.05	70.4	340.8	229.6	A5	921217	0.89	0.98	0.99	0.32	0.57	0.70	0.80	0.76	0.87	0.90	0.95	0.96
0762	3.06	100.1	454.3	230.3	A5	921217	0.91	0.99	1.00	0.35	0.61	0.73	0.83	0.84	0.90	0.92	0.95	0.98
0812	6.88	5.7	34.3	256.2	A6	921210	0.21	0.30	0.37	0.02	0.08	0.15	0.16	0.23	0.19	0.25	0.26	0.29
0822	6.87	11.1	76.4	249.8	A6	921210	0.35	0.51	0.62	0.01	0.14	0.25	0.30	0.36	0.36	0.41	0.47	0.51
0823	6.87	11.0	49.3	249.0	A6	921210	0.25	0.40	0.48	-0.02	0.09	0.17	0.21	0.28	0.25	0.31	0.35	0.38
0832	6.91	20.8	116.6	270.8	A6	921203	0.48	0.71	0.83	0.10	0.24	0.36	0.46	0.45	0.53	0.55	0.65	0.80
0842	6.91	40.8	206.4	274.5	A6	921203	0.66	0.88	0.95	0.15	0.36	0.50	0.61	0.57	0.70	0.71	0.84	0.89
0852	6.92	71.3	315.3	278.5	A5	921217	0.79	0.95	0.99	0.22	0.47	0.60	0.71	0.67	0.80	0.83	0.91	0.94
0862	6.90	100.7	409.4	279.6	A5	921217	0.83	0.98	1.00	0.25	0.50	0.64	0.74	0.75	0.82	0.87	0.92	0.96
0912	11.8	6.0	29.2	301.3	A6	921210	0.18	0.27	0.33	0.02	0.08	0.13	0.16	0.19	0.18	0.23	0.25	0.26
0922	11.8	11.5	43.2	290.5	A6	921210	0.18	0.34	0.41	-0.06	0.05	0.13	0.18	0.21	0.23	0.27	0.31	0.33
0932	11.8	21.8	99.3	301.8	A6	921210	0.42	0.61	0.72	0.00	0.20	0.30	0.39	0.40	0.44	0.49	0.56	0.58
0942	11.8	42.3	169.7	313.0	A5	921217	0.60	0.80	0.91	0.11	0.34	0.44	0.55	0.53	0.62	0.65	0.75	0.76
0952	11.8	71.8	285.5	316.8	A5	921217	0.72	0.94	0.99	0.18	0.43	0.55	0.66	0.65	0.76	0.80	0.89	0.90
0962	11.8	102.5	373.0	317.6	A5	921217	0.76	0.96	1.00	0.20	0.45	0.58	0.70	0.71	0.78	0.84	0.90	0.94

Table 8-2 稠密型模擬燃料集合体についてのボイルオフ実験条件と
ボイド率測定値（圧力損失補正済み）

実験番号	圧力 (MPa)	質量流束 (kg/m ² s)	電気出力 (kW)	入口温度 (°C)	流量計用 オリフィス	実験日	ボイド率 (-)				
							DPX-1	DPX-2	DPX-3	DPX-4	DPX-5
5410	3.02	10.9	25.2	207.5	A6	901121	0.01	0.28	0.36	0.46	0.29
5411	3.02	10.8	25.2	206.7	A6	901121	0.01	0.27	0.36	0.46	0.29
5420	3.02	19.6	50.2	213.3	A6	901121	0.10	0.42	0.50	0.59	0.42
5421	3.02	19.6	50.2	212.9	A6	901121	0.10	0.41	0.49	0.59	0.41
5430	3.03	27.7	74.4	231.0	A6	901121	0.27	0.54	0.60	0.70	0.54
5431	3.03	27.9	74.4	227.9	A6	901121	0.26	0.55	0.61	0.72	0.55
5440	3.04	46.7	124.3	226.4	A6	901121	0.31	0.61	0.67	0.78	0.61
5441	3.03	46.9	124.3	225.4	A6	901121	0.31	0.62	0.67	0.79	0.61
5450	3.05	69.8	187.9	228.9	A6	901121	0.41	0.75	0.75	0.88	0.72
5451	3.05	69.2	187.8	228.7	A6	901121	0.42	0.76	0.76	0.90	0.73
5462	3.02	104.0	225.1	227.9	A5	910131	0.43	0.81	0.95	0.91	0.79
5463	3.03	103.8	225.1	227.9	A5	910131	0.43	0.82	0.96	0.92	0.79
5514	6.92	11.4	40.2	235.9	A6	910110	0.01	0.30	0.40	0.51	0.32
5515	6.92	11.4	40.2	235.1	A6	910110	0.01	0.30	0.40	0.51	0.33
5523	6.91	20.6	58.7	249.3	A6	910110	0.07	0.40	0.51	0.64	0.42
5524	6.91	20.8	58.7	248.8	A6	910110	0.07	0.39	0.50	0.63	0.42
5533	6.91	29.4	79.0	260.3	A6	910110	0.13	0.48	0.59	0.73	0.50
5534	6.91	29.6	79.0	259.9	A6	910110	0.12	0.47	0.58	0.70	0.49
5544	6.92	48.0	123.1	268.3	A6	910110	0.20	0.60	0.69	0.82	0.60
5545	6.91	48.4	123.0	268.4	A6	910110	0.20	0.59	0.67	0.80	0.58
5555	6.93	70.9	180.4	273.7	A6	910110	0.28	0.66	0.71	0.86	0.65
5563	6.94	95.3	220.1	276.5	A5	910131	0.31	0.69	0.81	0.84	0.68
5564	6.95	95.2	220.1	276.6	A5	910131	0.31	0.69	0.82	0.84	0.68
5611	11.8	11.6	37.2	268.4	A6	910124	0.00	0.14	0.24	0.37	0.19
5612	11.8	11.7	37.2	267.4	A6	910124	0.00	0.14	0.23	0.36	0.19
5621	11.8	21.5	50.3	286.5	A6	910124	0.00	0.28	0.41	0.58	0.34
5622	11.8	21.3	50.3	285.9	A6	910124	0.00	0.24	0.36	0.45	0.28
5630	11.9	30.2	49.4	301.7	A6	901219	0.00	0.24	0.35	0.48	0.28
5631	11.9	30.3	49.2	300.1	A6	901219	0.00	0.25	0.35	0.47	0.28
5632	11.9	31.0	75.0	294.4	A6	901219	0.06	0.43	0.57	0.78	0.48
5633	11.9	31.0	69.3	293.6	A6	901219	0.02	0.39	0.52	0.71	0.43
5640	11.9	50.1	83.2	304.0	A6	901219	0.00	0.32	0.46	0.56	0.35
5641	11.9	50.1	83.2	304.4	A6	901219	0.02	0.36	0.50	0.61	0.39
5643	11.9	50.8	104.4	298.7	A6	901219	0.03	0.43	0.52	0.67	0.43
5650	11.9	72.7	124.3	311.4	A6	901219	0.13	0.49	0.62	0.72	0.51
5651	11.9	72.6	124.3	311.7	A6	901219	0.13	0.49	0.62	0.71	0.51
5653	11.9	73.6	144.6	308.0	A6	901219	0.10	0.51	0.64	0.73	0.51
5662	11.8	96.9	194.9	315.0	A5	910131	0.21	0.58	0.73	0.77	0.60
5663	11.8	96.7	194.8	314.9	A5	910131	0.21	0.58	0.72	0.76	0.59

Table 8-3 PWR 型模擬燃料集合体におけるボイド率相関式及びモデルの予測性能

(計算値と実験値との差 $m_d = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^N (\alpha_{cal i} - \alpha_{exp i})$ による比較)

PWR 型集合体					
	Cunningham-Yeh	安濃田	Wilson	Chexal-Lellouche	Bestion
3 MPa	0.065 ± 0.051	0.028 ± 0.040	0.108 ± 0.064	0.039 ± 0.042	0.051 ± 0.059
7 MPa	0.080 ± 0.059	0.052 ± 0.048	0.065 ± 0.055	-0.002 ± 0.029	0.062 ± 0.058
12 MPa	0.077 ± 0.081	0.059 ± 0.073	0.026 ± 0.060	-0.040 ± 0.025	0.046 ± 0.044
5 kg/m ² s	0.041 ± 0.042	0.025 ± 0.029	0.042 ± 0.053	0.005 ± 0.048	0.068 ± 0.052
10 kg/m ² s	0.050 ± 0.044	0.028 ± 0.031	0.050 ± 0.052	0.011 ± 0.044	0.083 ± 0.050
20 kg/m ² s	0.059 ± 0.054	0.023 ± 0.050	0.075 ± 0.073	0.014 ± 0.060	0.074 ± 0.054
40 kg/m ² s	0.090 ± 0.069	0.048 ± 0.059	0.064 ± 0.069	-0.013 ± 0.041	0.038 ± 0.046
70 kg/m ² s	0.102 ± 0.066	0.072 ± 0.059	0.082 ± 0.073	-0.013 ± 0.032	0.020 ± 0.043
100 kg/m ² s	0.113 ± 0.075	0.090 ± 0.065	0.101 ± 0.082	-0.006 ± 0.030	0.021 ± 0.045
Total	0.074 ± 0.064	0.046 ± 0.056	0.065 ± 0.068	0.001 ± 0.046	0.053 ± 0.055

Table 8-4 PWR 型模擬燃料集合体におけるボイド率相関式及びモデルの予測性能

(計算値と実験値との差の実験値に対する比 $m_r = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha_{cal i} - \alpha_{exp i}}{\alpha_{exp i}} \right)$ による比較)

PWR 型集合体					
	Cunningham-Yeh	安濃田	Wilson	Chexal-Lellouche	Bestion
3 MPa	0.119 ± 0.083	0.045 ± 0.070	0.249 ± 0.098	0.092 ± 0.097	0.137 ± 0.130
7 MPa	0.198 ± 0.112	0.123 ± 0.092	0.180 ± 0.110	0.007 ± 0.071	0.220 ± 0.184
12 MPa	0.137 ± 0.176	0.090 ± 0.163	0.003 ± 0.168	-0.145 ± 0.117	0.147 ± 0.138
5 kg/m ² s	0.227 ± 0.126	0.148 ± 0.099	0.213 ± 0.172	0.011 ± 0.208	0.360 ± 0.134
10 kg/m ² s	0.188 ± 0.112	0.104 ± 0.086	0.171 ± 0.140	0.014 ± 0.154	0.317 ± 0.103
20 kg/m ² s	0.119 ± 0.113	0.043 ± 0.103	0.145 ± 0.141	0.019 ± 0.134	0.176 ± 0.104
40 kg/m ² s	0.111 ± 0.159	0.043 ± 0.145	0.067 ± 0.187	-0.043 ± 0.122	0.083 ± 0.093
70 kg/m ² s	0.130 ± 0.115	0.081 ± 0.112	0.103 ± 0.157	-0.029 ± 0.081	0.049 ± 0.083
100 kg/m ² s	0.152 ± 0.121	0.112 ± 0.111	0.142 ± 0.168	-0.013 ± 0.073	0.051 ± 0.090
Total	0.151 ± 0.131	0.085 ± 0.117	0.143 ± 0.165	-0.006 ± 0.136	0.168 ± 0.157

Table 8-5 稠密型模擬燃料集合体におけるボイド率相関式及びモデルの予測性能

(計算値と実験値との差 $m_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_{cal i} - \alpha_{exp i})$ による比較)

稠密型集合体					
	Cunningham-Yeh	安濃田	Wilson	Chexal-Lellouche	Bestion
3 MPa	0.111 ± 0.070	0.072 ± 0.058	0.194 ± 0.081	0.064 ± 0.051	0.163 ± 0.075
7 MPa	0.099 ± 0.071	0.070 ± 0.066	0.134 ± 0.085	0.001 ± 0.030	0.150 ± 0.055
12 MPa	0.138 ± 0.104	0.115 ± 0.098	0.123 ± 0.100	0.004 ± 0.047	0.169 ± 0.097
5 kg/m ² s	0.080 ± 0.066	0.055 ± 0.056	0.115 ± 0.065	0.032 ± 0.037	0.200 ± 0.102
10 kg/m ² s	0.080 ± 0.063	0.053 ± 0.053	0.131 ± 0.097	0.024 ± 0.056	0.184 ± 0.084
20 kg/m ² s	0.087 ± 0.071	0.052 ± 0.056	0.062 ± 0.220	0.002 ± 0.062	0.159 ± 0.080
40 kg/m ² s	0.155 ± 0.100	0.116 ± 0.087	0.167 ± 0.102	0.037 ± 0.053	0.171 ± 0.064
70 kg/m ² s	0.162 ± 0.095	0.138 ± 0.096	0.116 ± 0.256	0.025 ± 0.044	0.142 ± 0.046
100 kg/m ² s	0.153 ± 0.073	0.128 ± 0.079	0.197 ± 0.074	0.012 ± 0.046	0.114 ± 0.069
Total	0.119 ± 0.088	0.089 ± 0.082	0.142 ± 0.096	0.021 ± 0.053	0.162 ± 0.081

Table 8-6 稠密型模擬燃料集合体におけるボイド率相関式及びモデルの予測性能

(計算値と実験値との差の実験値に対する比 $m_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha_{cal i} - \alpha_{exp i}}{\alpha_{exp i}} \right)$ による比較)

稠密型集合体					
	Cunningham-Yeh	安濃田	Wilson	Chexal-Lellouche	Bestion
3 MPa	0.210 ± 0.112	0.132 ± 0.103	0.501 ± 0.134	0.147 ± 0.122	0.407 ± 0.318
7 MPa	0.189 ± 0.084	0.121 ± 0.086	0.285 ± 0.092	-0.005 ± 0.060	0.383 ± 0.230
12 MPa	0.384 ± 0.212	0.310 ± 0.195	0.348 ± 0.208	0.024 ± 0.136	0.584 ± 0.418
5 kg/m ² s	0.365 ± 0.329	0.258 ± 0.304	0.472 ± 0.229	0.131 ± 0.151	0.871 ± 0.498
10 kg/m ² s	0.257 ± 0.157	0.175 ± 0.150	0.403 ± 0.218	0.099 ± 0.194	0.612 ± 0.334
20 kg/m ² s	0.207 ± 0.132	0.123 ± 0.118	0.190 ± 0.366	0.004 ± 0.128	0.458 ± 0.236
40 kg/m ² s	0.309 ± 0.130	0.227 ± 0.132	0.371 ± 0.123	0.071 ± 0.102	0.406 ± 0.210
70 kg/m ² s	0.260 ± 0.125	0.215 ± 0.131	0.236 ± 0.332	0.038 ± 0.081	0.336 ± 0.249
100 kg/m ² s	0.253 ± 0.115	0.203 ± 0.108	0.402 ± 0.033	0.030 ± 0.067	0.251 ± 0.241
Total	0.270 ± 0.177	0.196 ± 0.167	0.366 ± 0.182	0.057 ± 0.131	0.468 ± 0.352

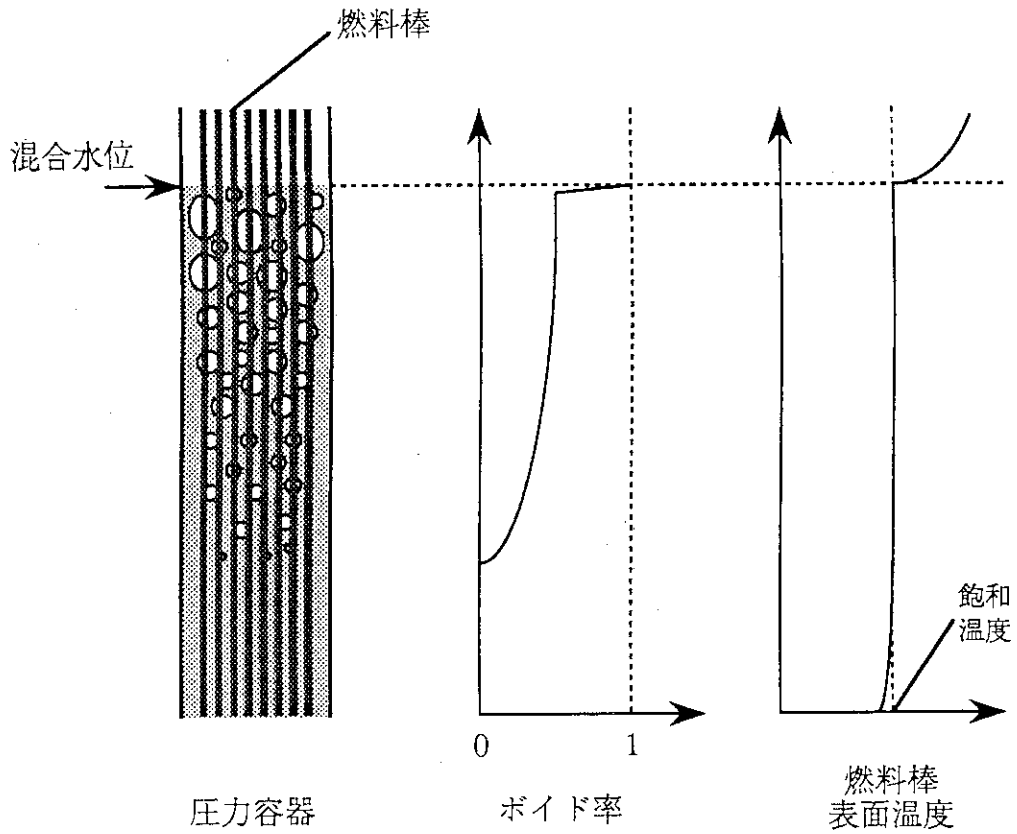


Fig. 2-1 ボイルオフ条件下の炉心内ボイド率分布と燃料棒表面温度

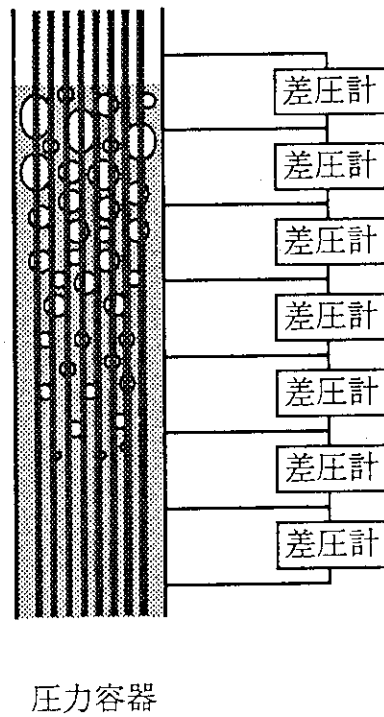


Fig. 2-2 差圧計による炉心内ボイド率分布の測定の概念図

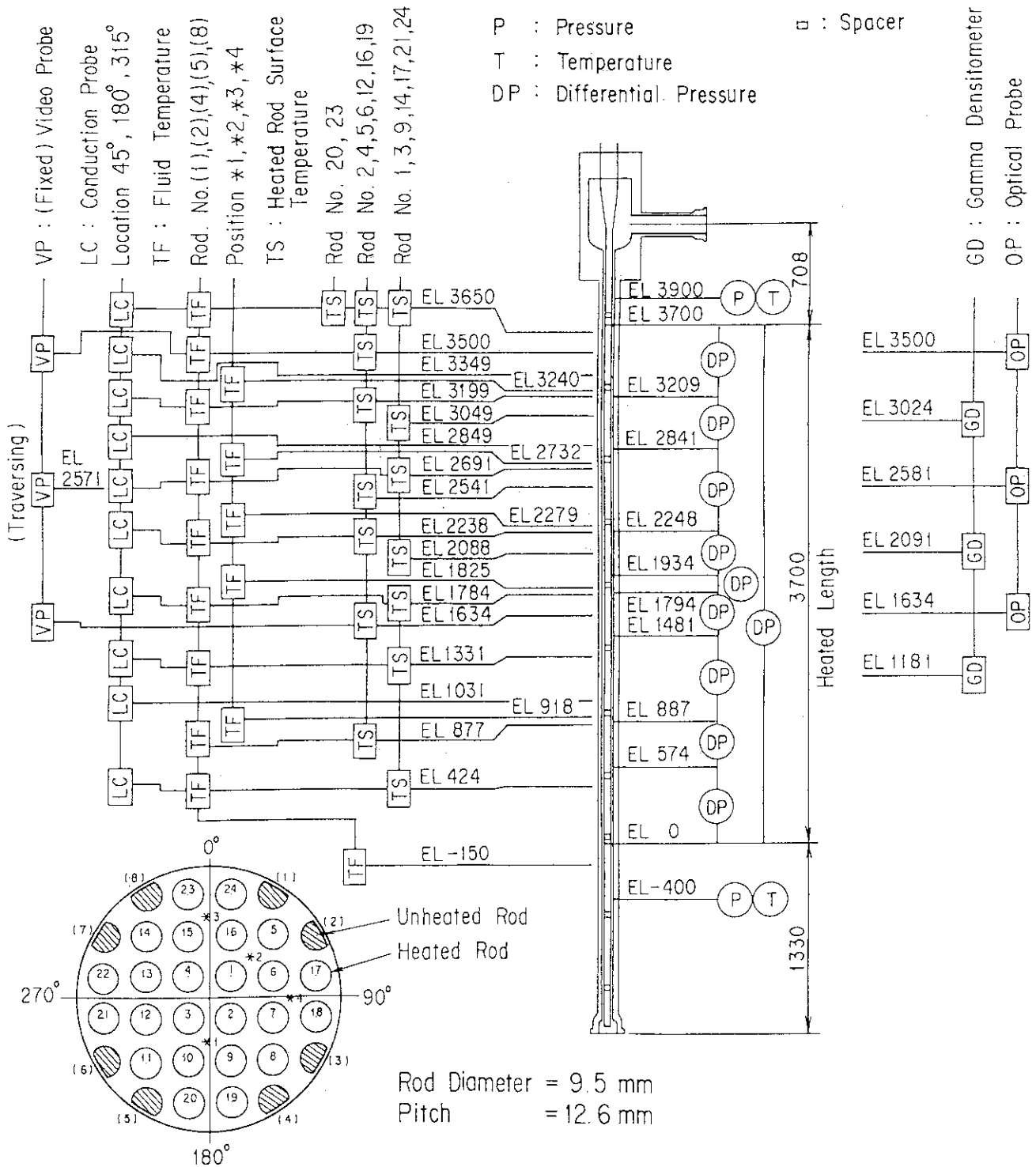


Fig. 3-1 TPTF 垂直試験部の概念図 (PWR 型模擬燃料集合体装荷時)

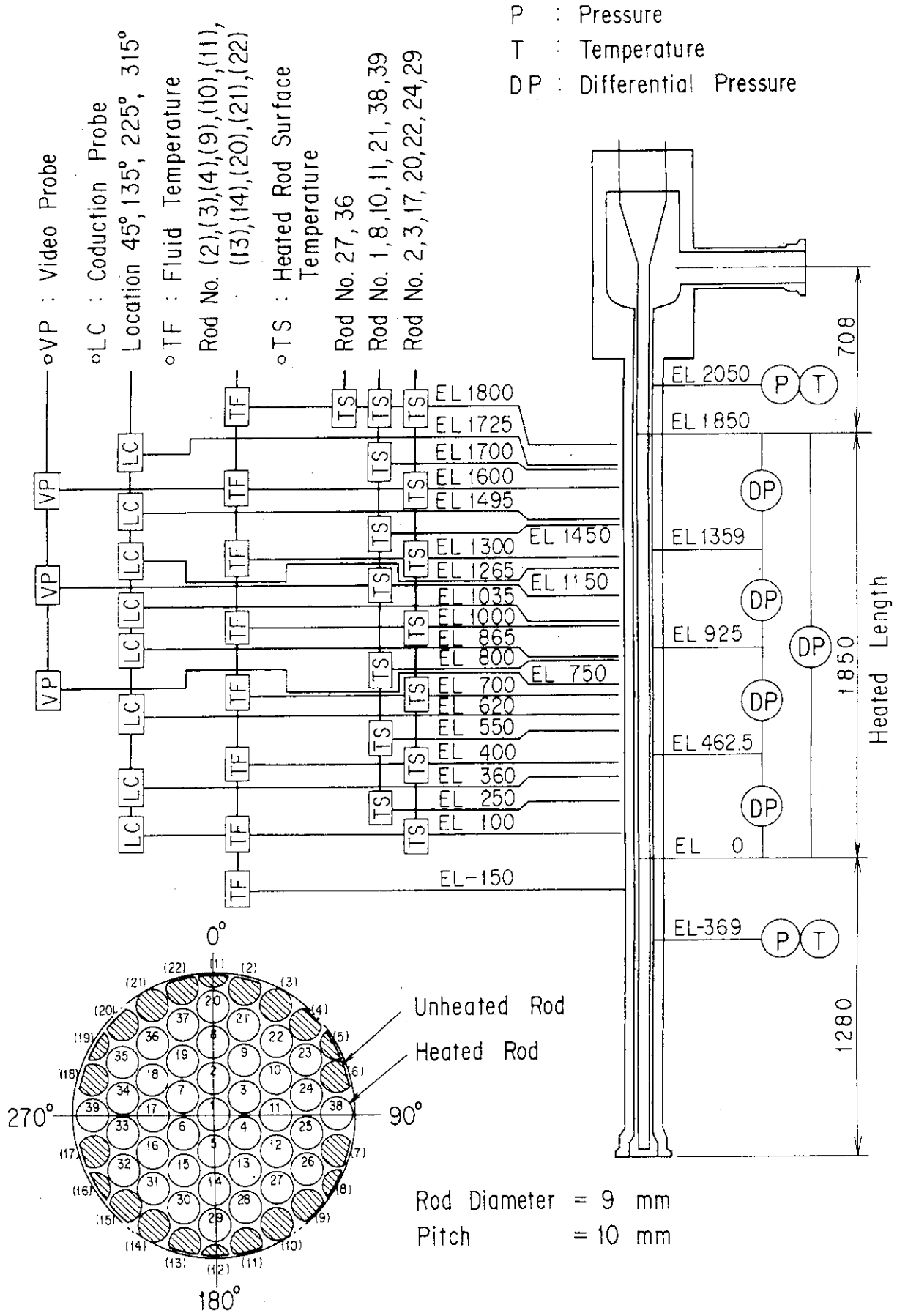


Fig. 3-2 TPTF 垂直試験部の概念図 (稠密型模擬燃料集合体装荷時)

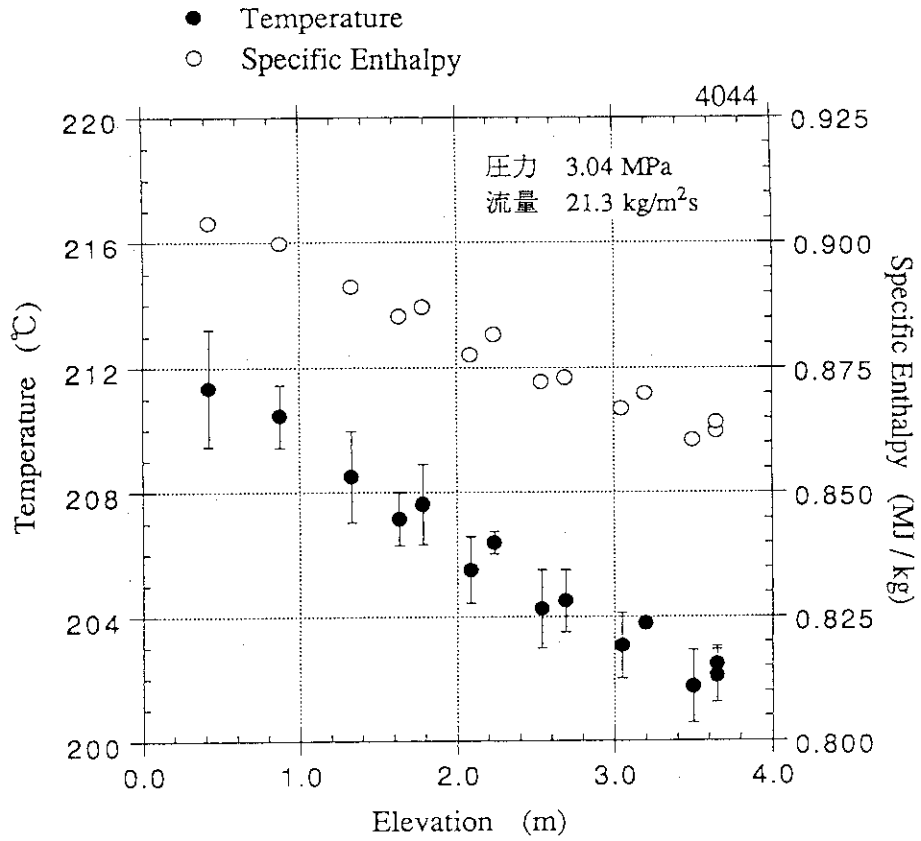


Fig. 5-1 熱損失測定時の試験部内の軸方向温度分布及び比エンタルピー分布 (PWR 型模擬燃料集合体装荷時)

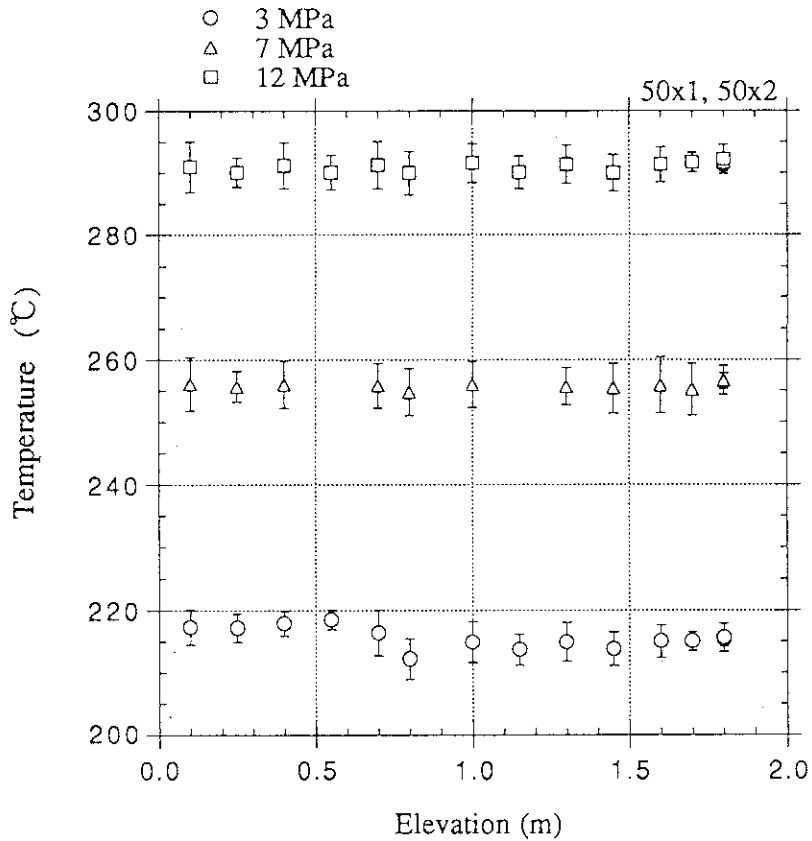


Fig. 5-2 熱損失測定時の試験部内軸方向温度分布 (稠密型模擬燃料集合体装荷時)

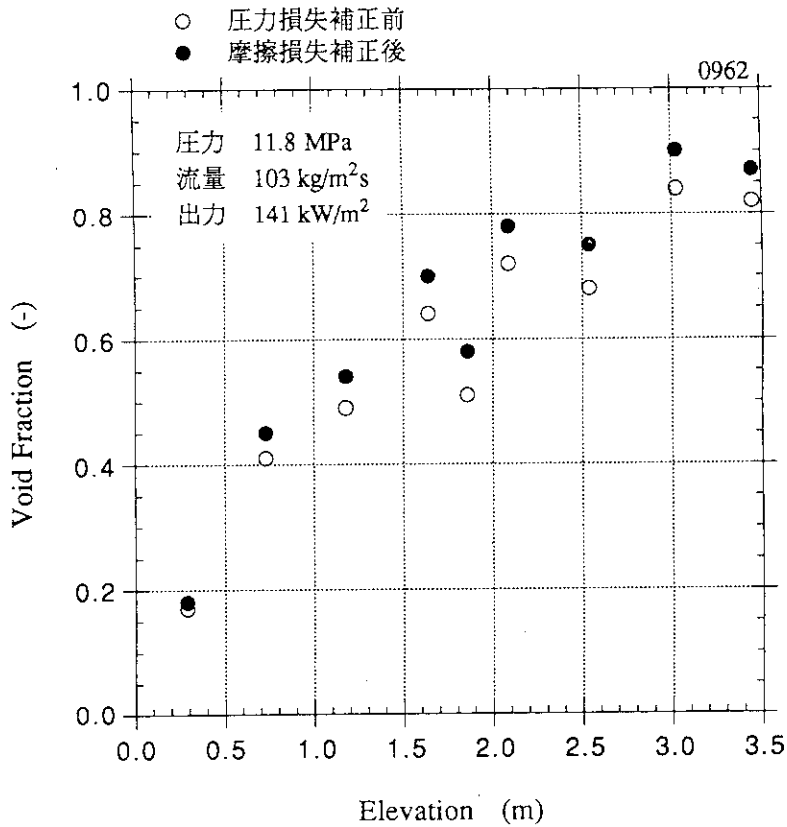


Fig. 6-1 グリッドスペーサによる圧力損失補正前の軸方向ボイド率分布の例

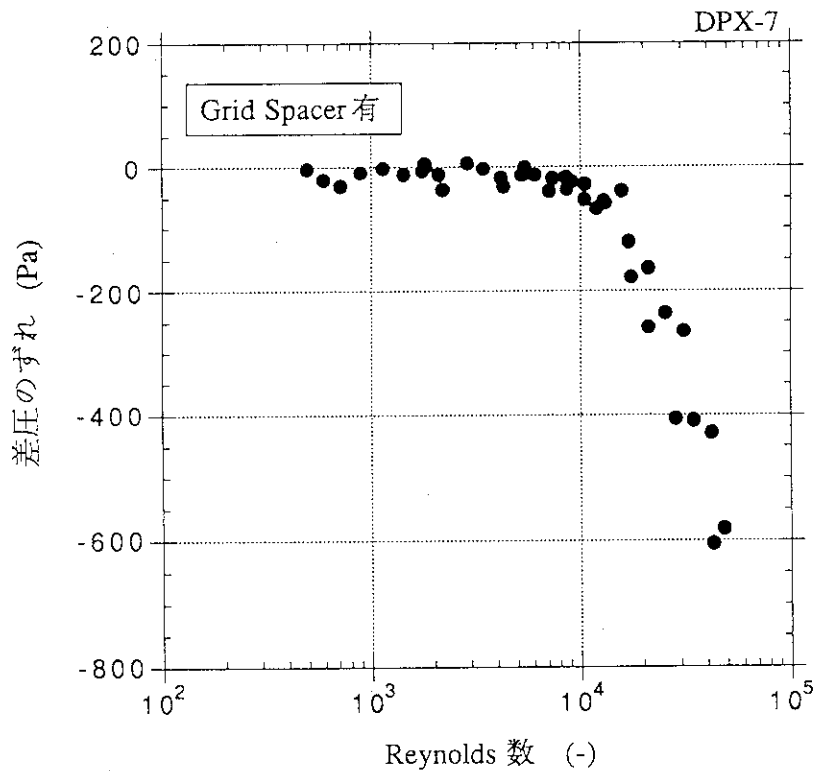


Fig. 6-2 水単相流条件下における圧力容器内と差圧導圧管内の水の密度差から予想される差圧と差圧測定値との差 (グリッドスペーサ有)

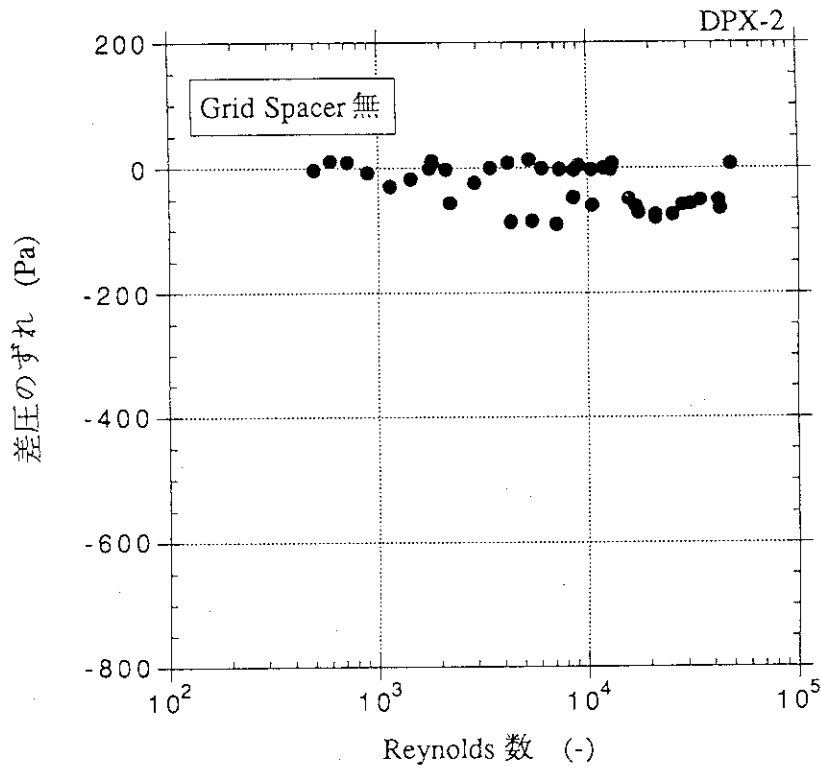


Fig. 6-3 水単相流条件下における圧力容器内と差圧導圧管内の水の密度差から予想される差圧と差圧測定値との差（グリッドスペーサ無）

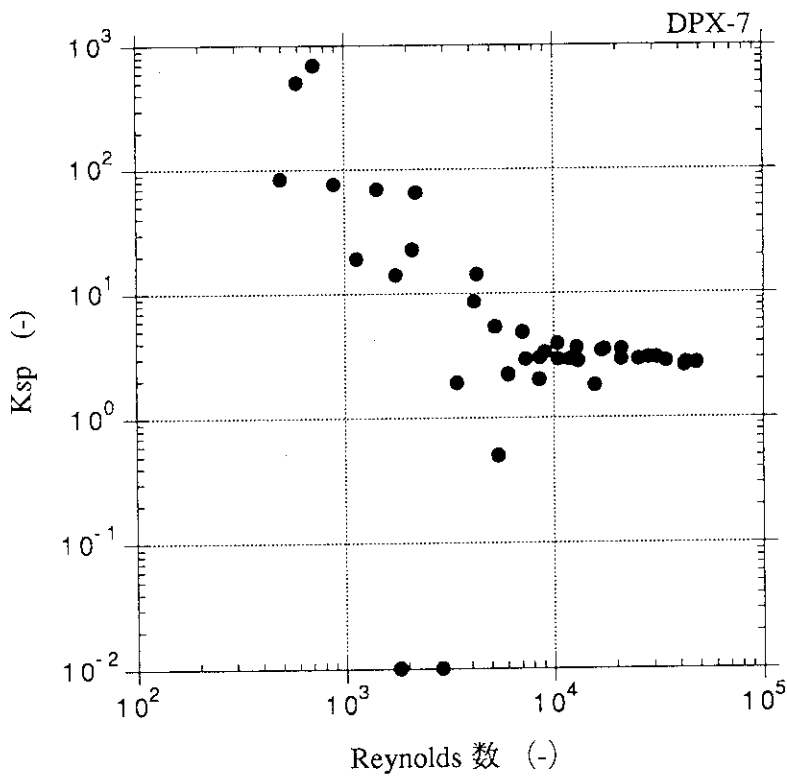


Fig. 6-4 比例定数 K_{SP} とレイノルズ数との関係（水単相流条件）

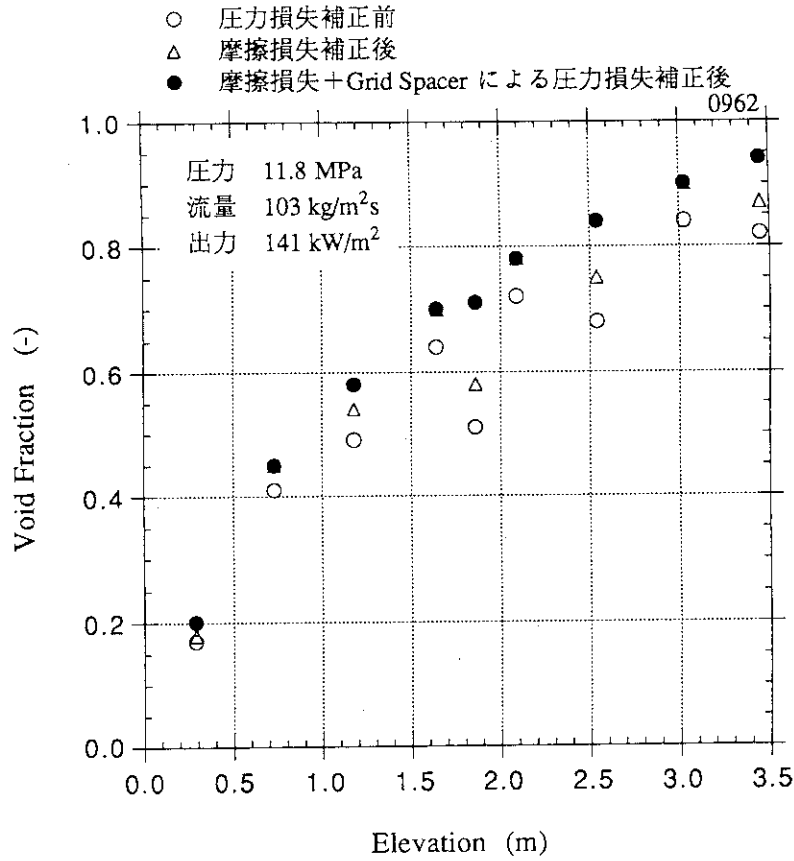


Fig. 6-5 グリッドスペーサによる圧力損失補正後の軸方向ボイド率分布の例

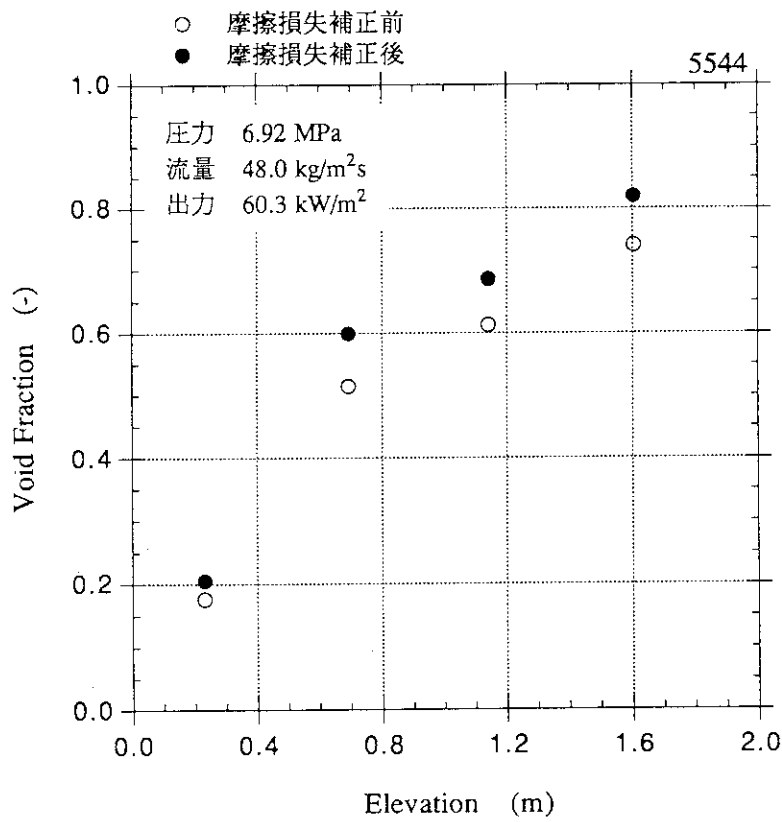


Fig. 6-6 スパイラルワイヤ型スペーサによる圧力損失補正の例

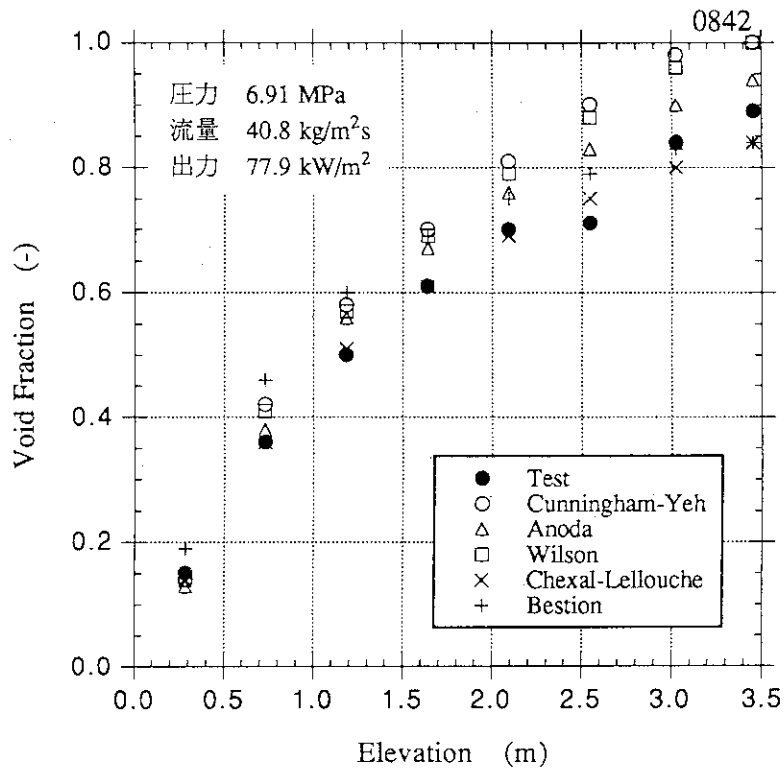


Fig. 8-1 軸方向ボイド率分布の例

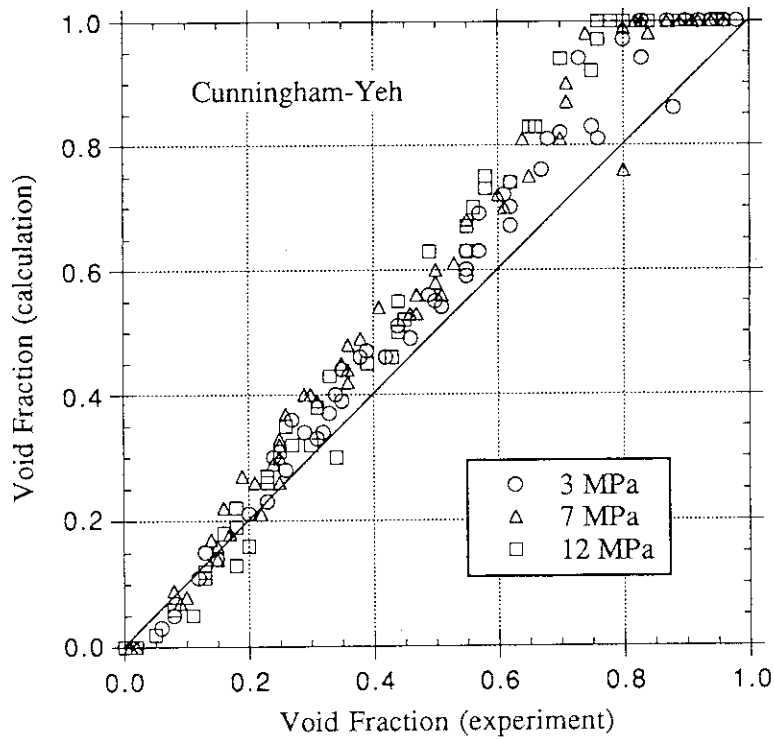


Fig. 8-2 Cunningham-Yeh の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較 (圧力による分類、PWR 型燃料集合体)

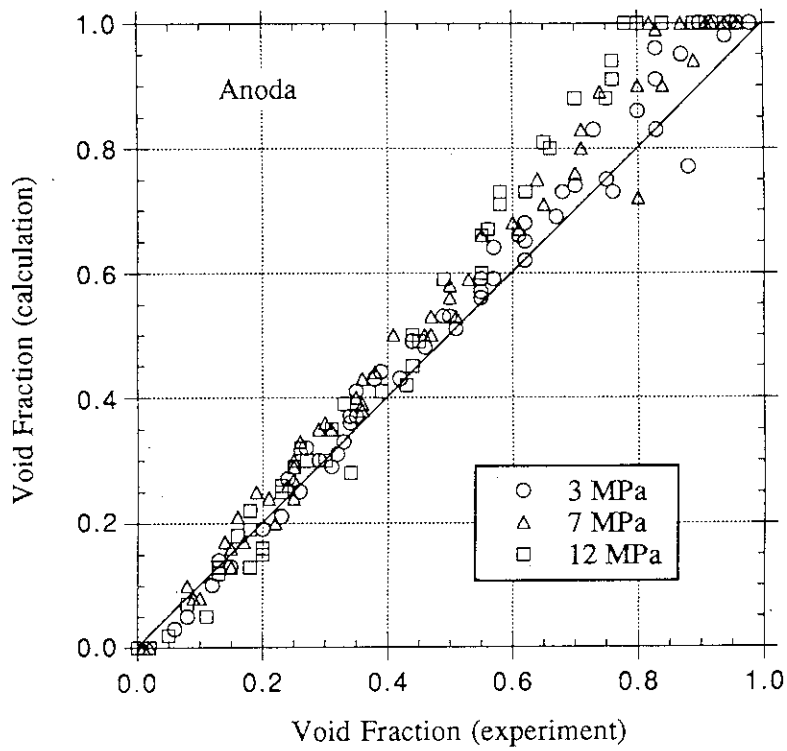


Fig. 8-3 安濃田の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、PWR 型燃料集合体)

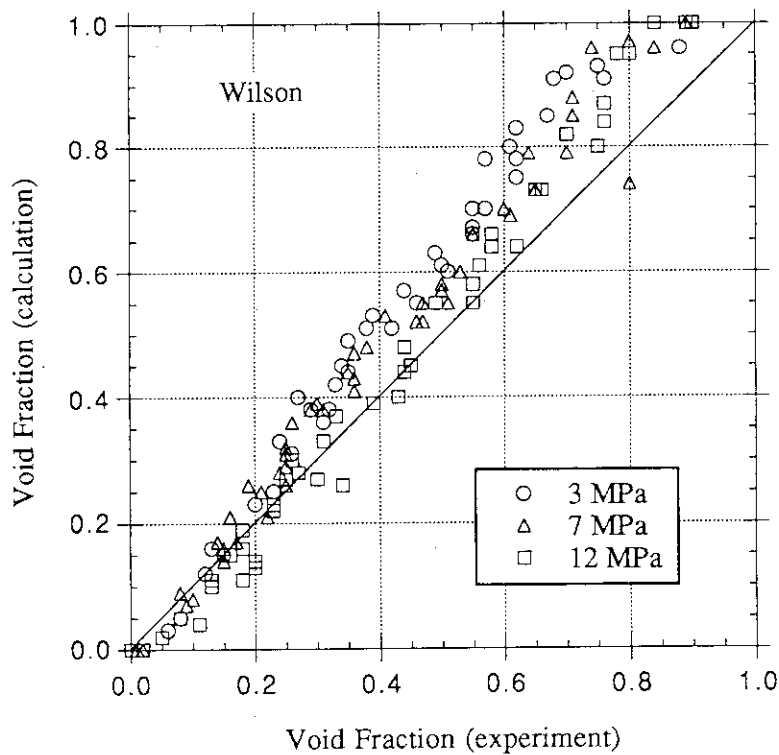


Fig. 8-4 Wilson の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、PWR 型燃料集合体)

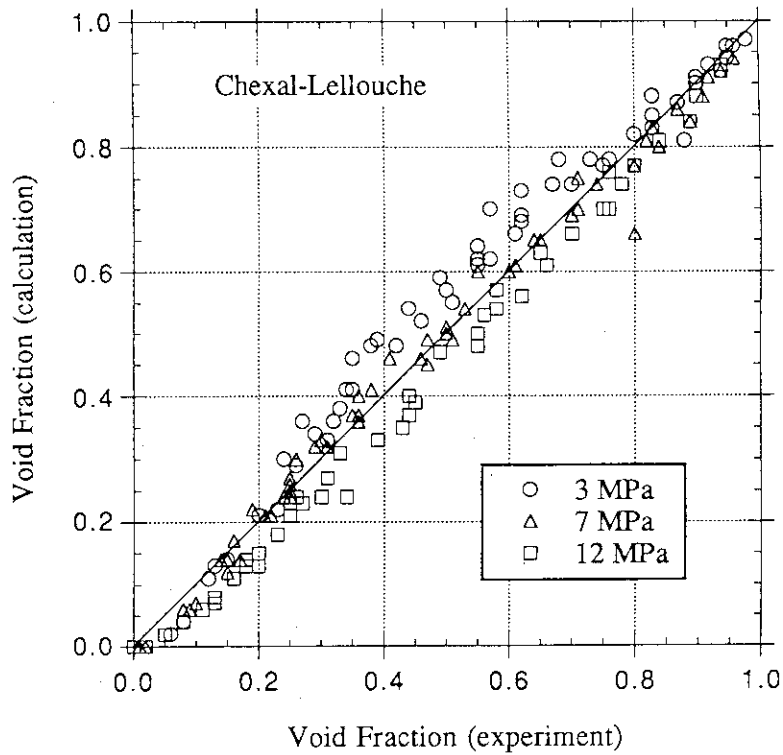


Fig. 8-5 Chexal-Lellouche のモデルによるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、PWR 型燃料集合体)

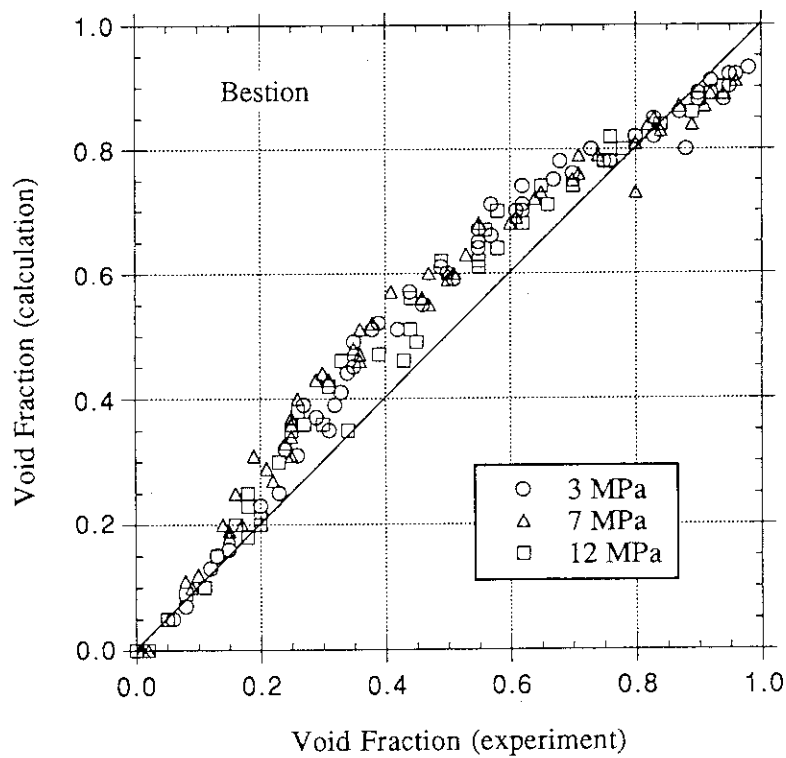


Fig. 8-6 Bestion のモデルによるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、PWR 型燃料集合体)

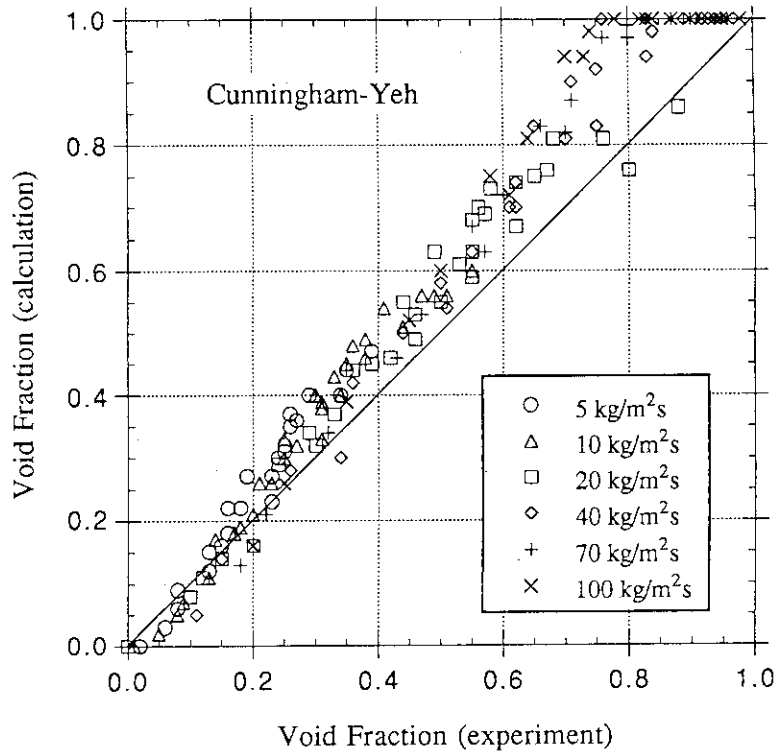


Fig. 8-7 Cunningham-Yeh の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較 (質量流束による分類、PWR 型燃料集合体)

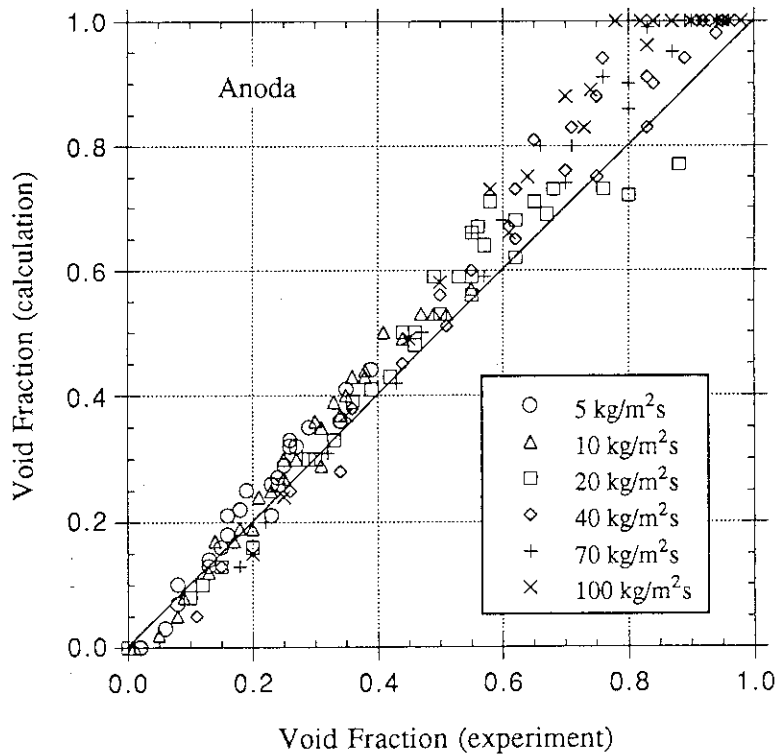


Fig. 8-8 安濃田の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較 (質量流束による分類、PWR 型燃料集合体)

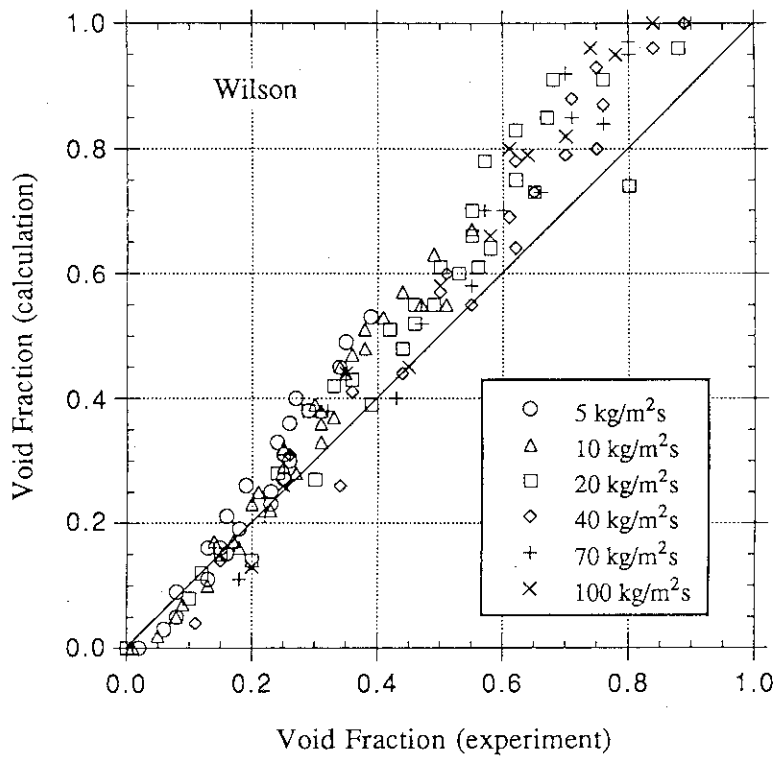


Fig. 8-9 Wilson の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(質量流束による分類、PWR 型燃料集合体)

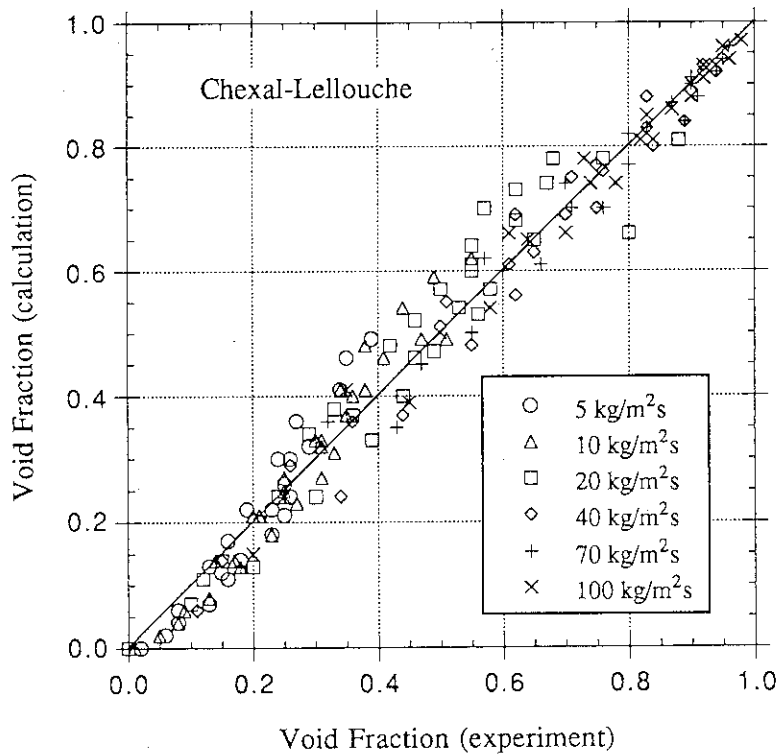


Fig. 8-10 Chexal-Lellouche のモデルによるボイド率予測値と実験値との比較
(質量流束による分類、PWR 型燃料集合体)

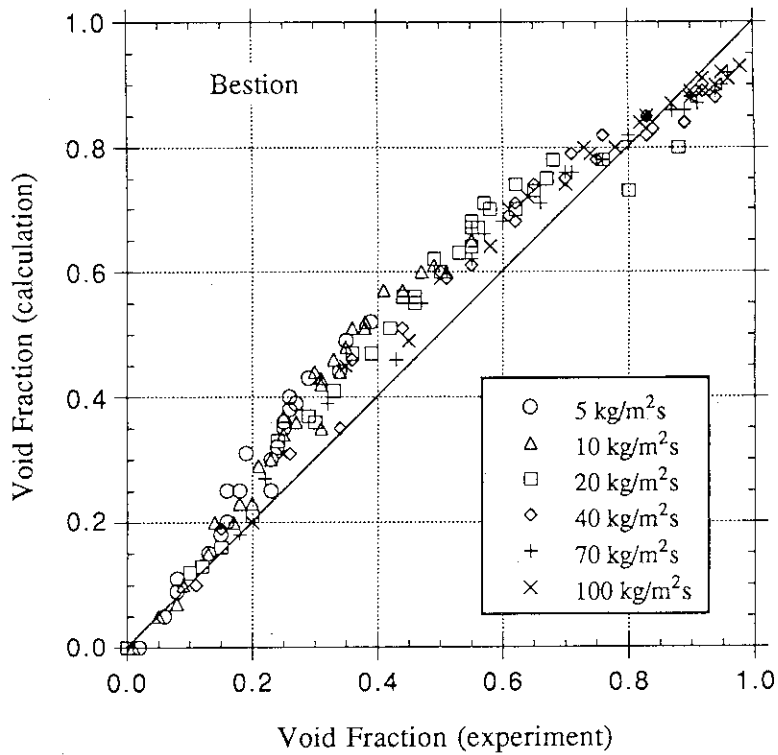


Fig. 8-11 Bestion のモデルによるボイド率予測値と実験値との比較
(質量流束による分類、PWR 型燃料集合体)

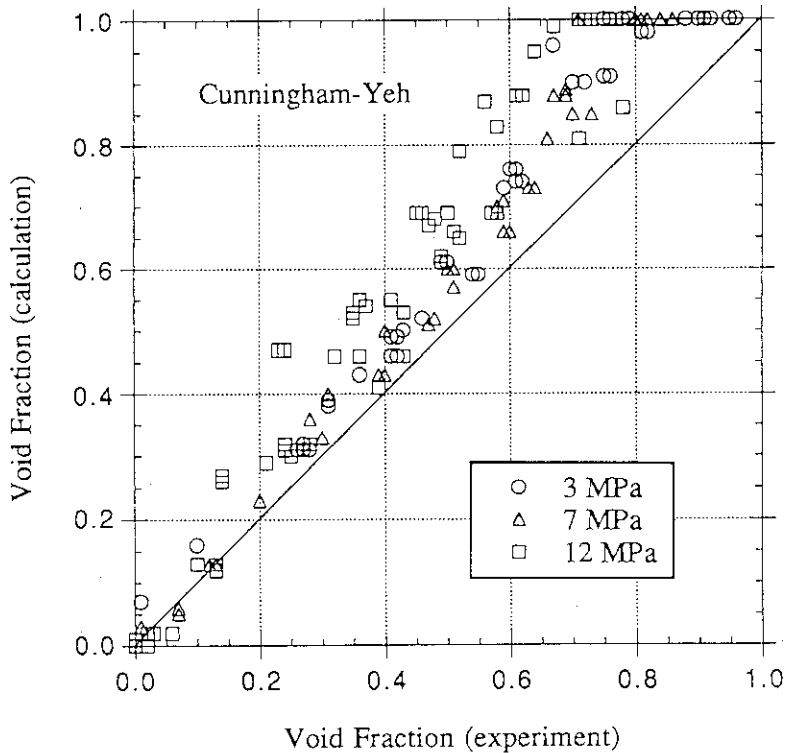


Fig. 8-12 Cunningham-Yeh の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、稠密型燃料集合体)

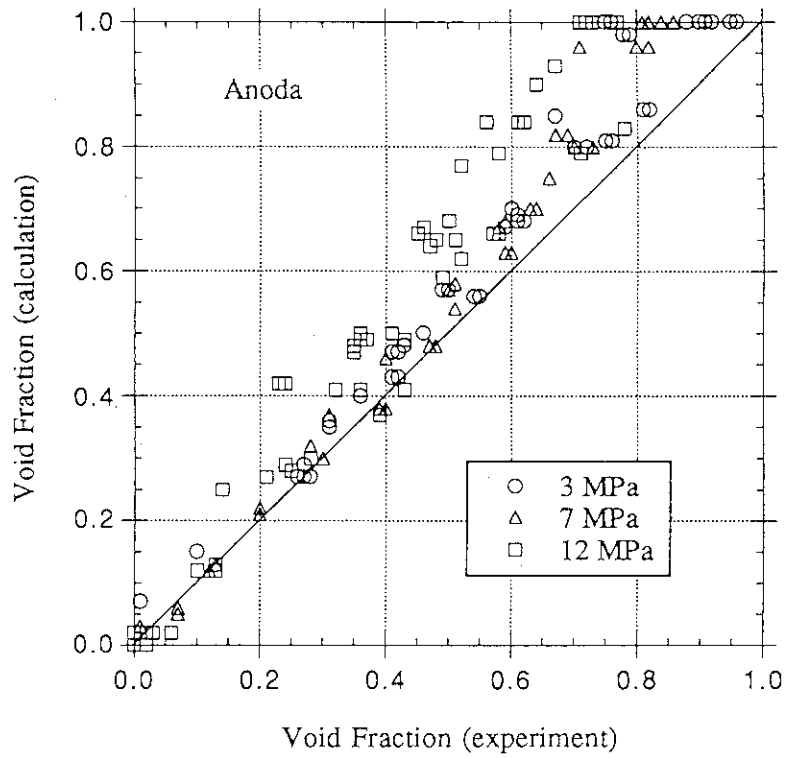


Fig. 8-13 安濃田の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、稠密型燃料集合体)

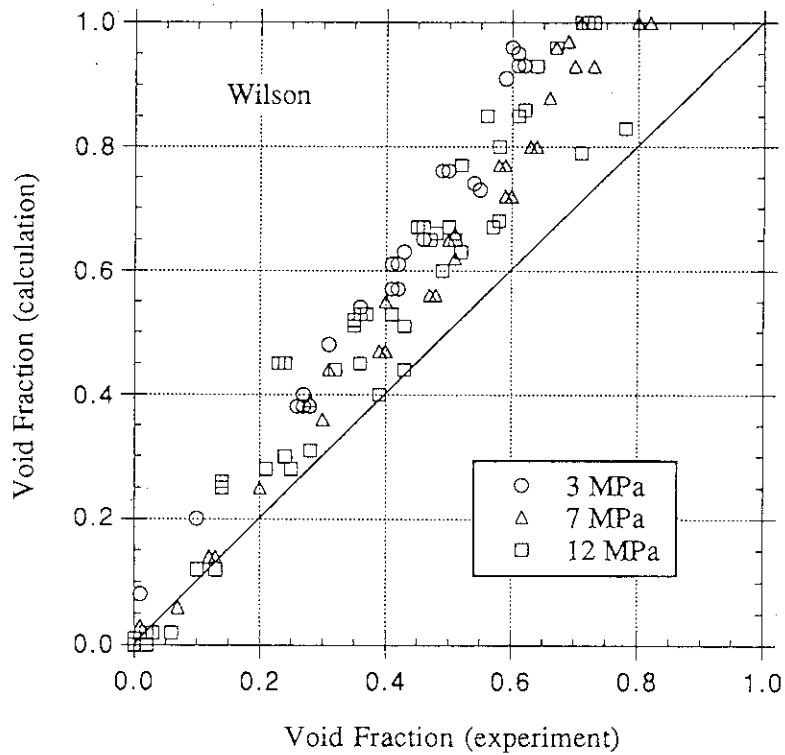


Fig. 8-14 Wilson の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、稠密型燃料集合体)

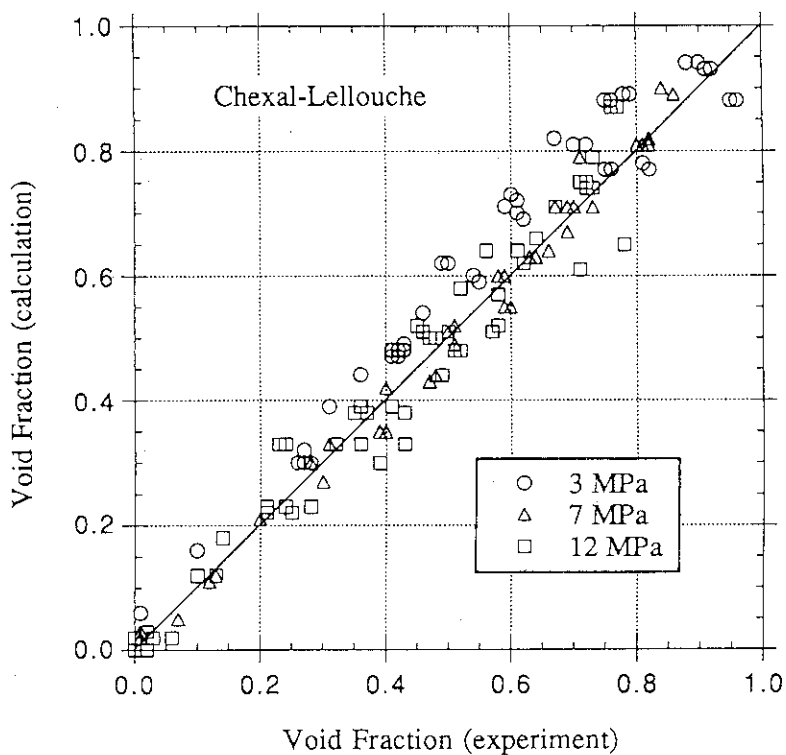


Fig. 8-15 Chexal-Lellouche のモデルによるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、稠密型燃料集合体)

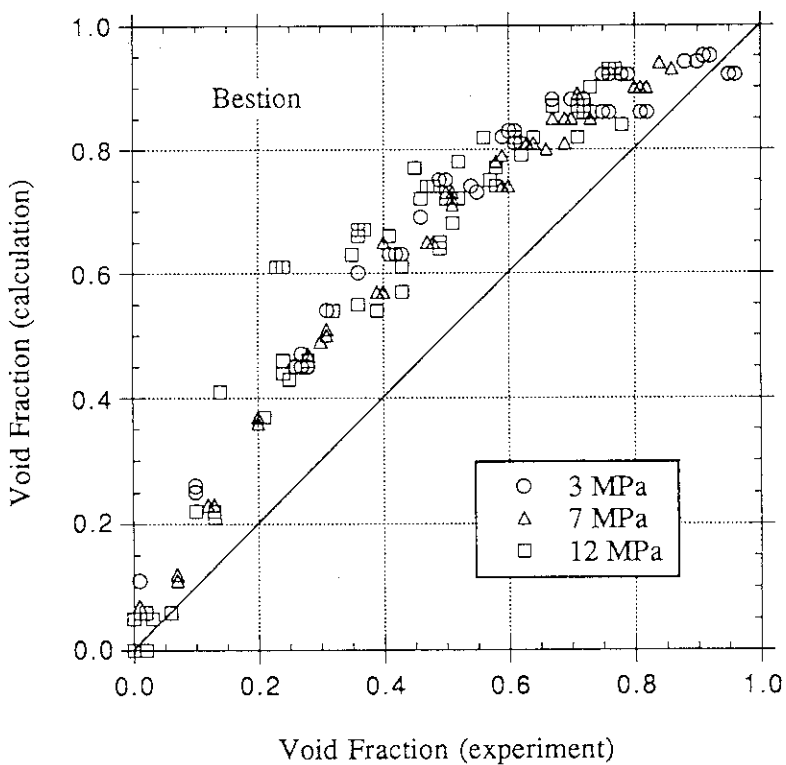


Fig. 8-16 Bestion のモデルによるボイド率予測値と実験値との比較
(圧力による分類、稠密型燃料集合体)

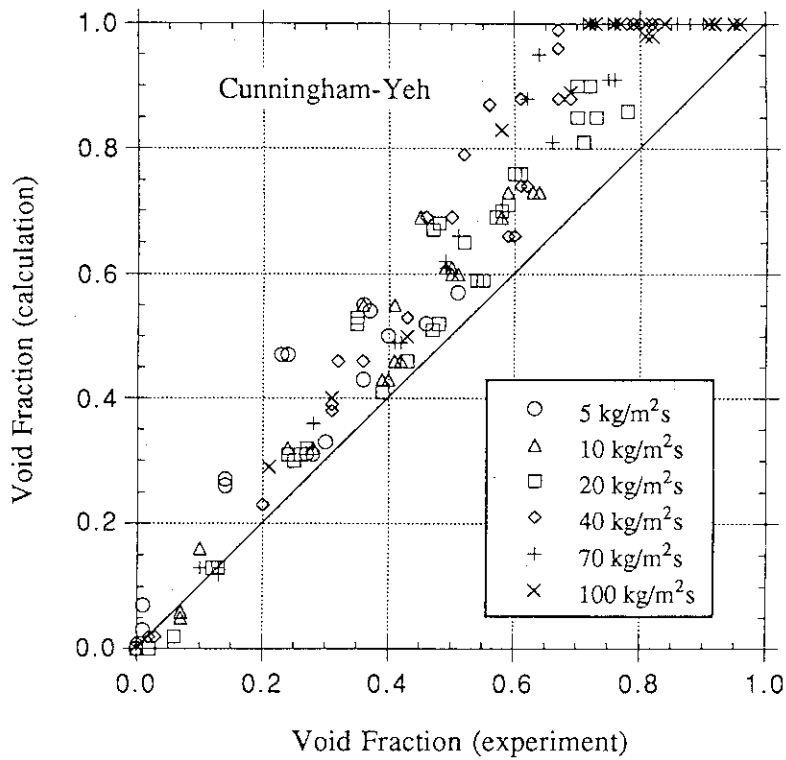


Fig. 8-17 Cunningham-Yeh の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(質量流束による分類、稠密型燃料集合体)

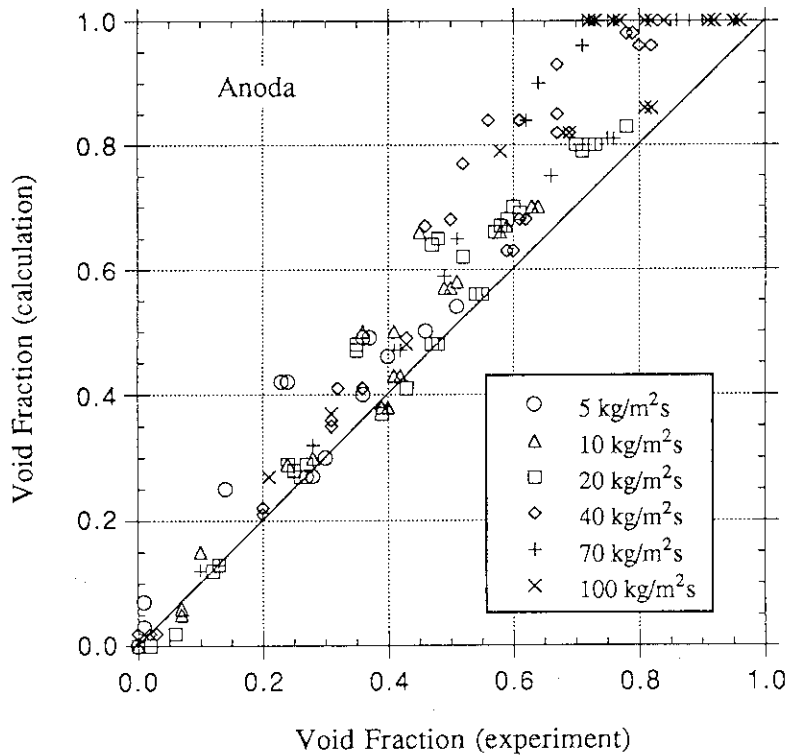


Fig. 8-18 安濃田の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(質量流束による分類、稠密型燃料集合体)

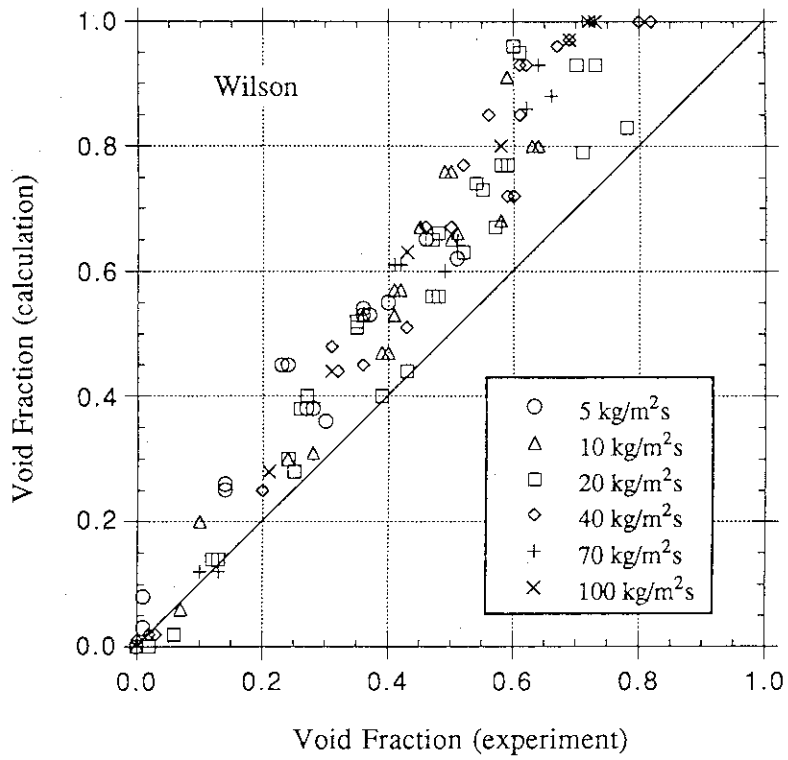


Fig. 8-19 Wilson の相関式によるボイド率予測値と実験値との比較
(質量流束による分類、稠密型燃料集合体)

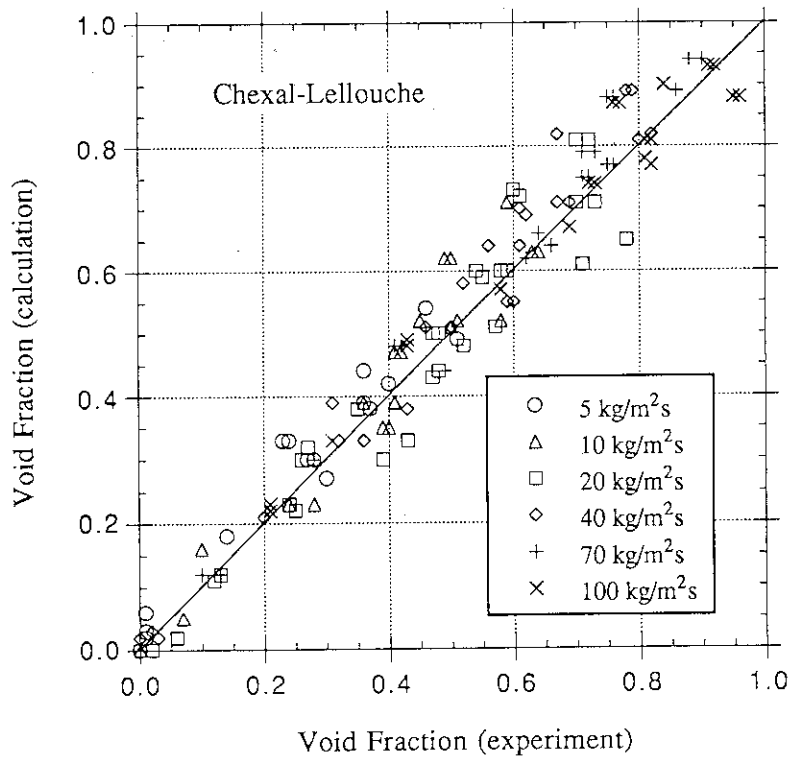


Fig. 8-20 Chexal-Lellouche のモデルによるボイド率予測値と実験値との比較
(質量流束による分類、稠密型燃料集合体)

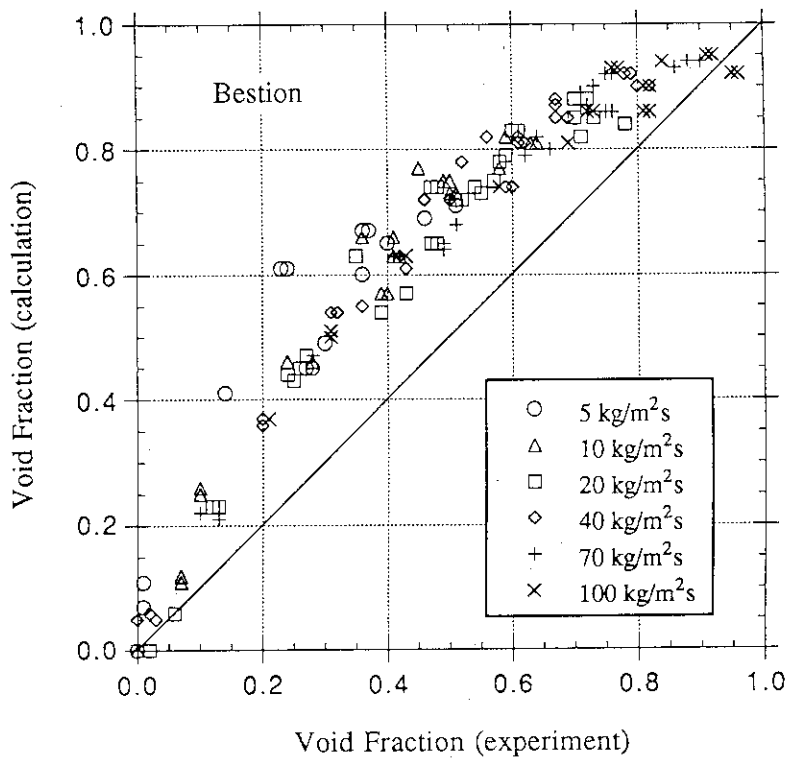


Fig. 8-21 Bestion のモデルによるボイド率予測値と実験値との比較
(質量流束による分類、稠密型燃料集合体)

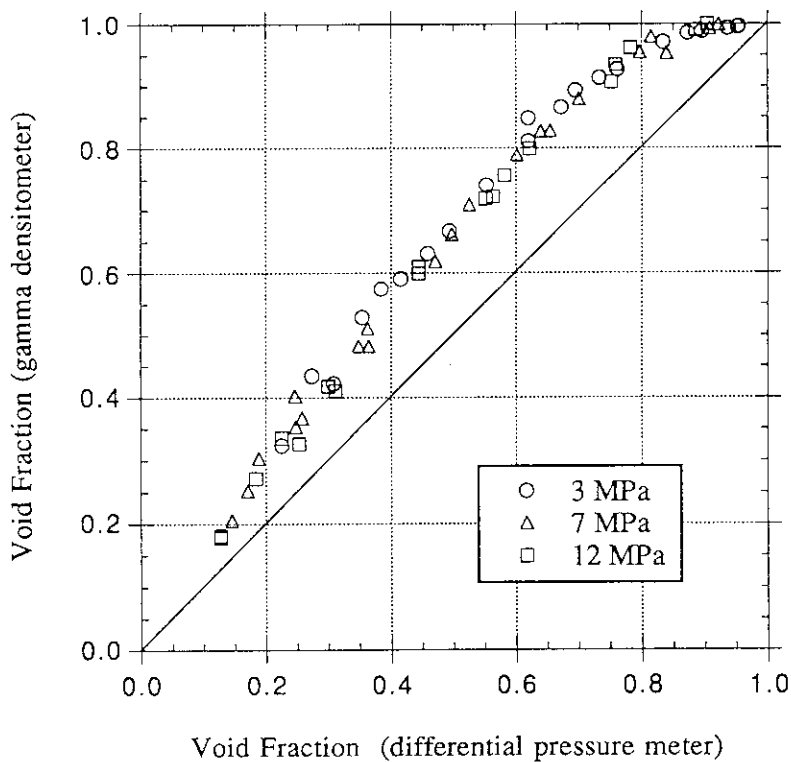


Fig. 8-22 ガンマ線型密度計によるボイド率と差圧計によるボイド率との比較

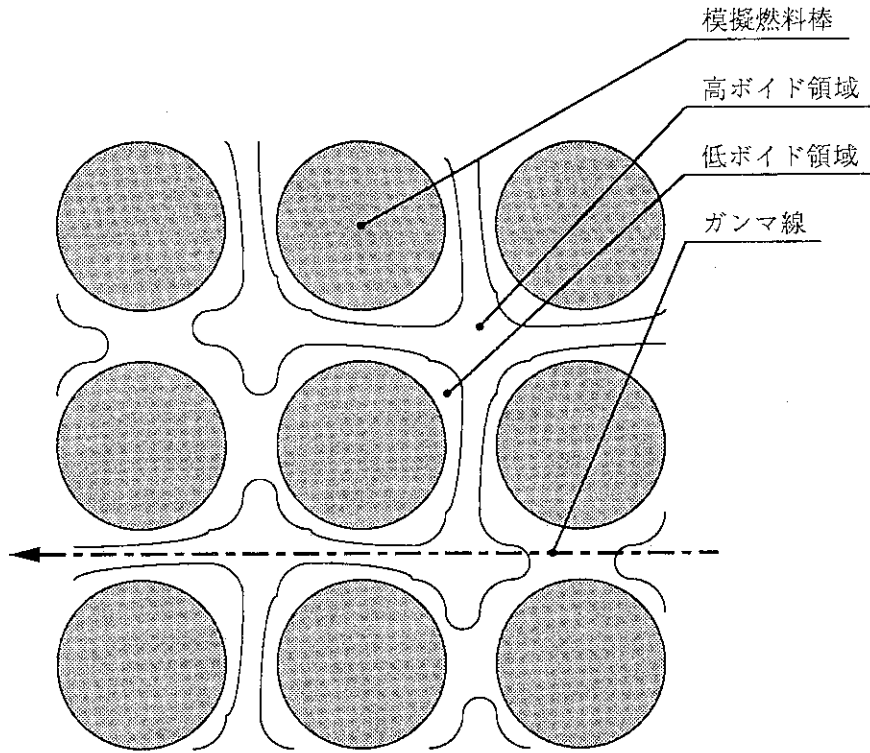


Fig. 8-23 バンドル内の局所ボイド分布の予想図

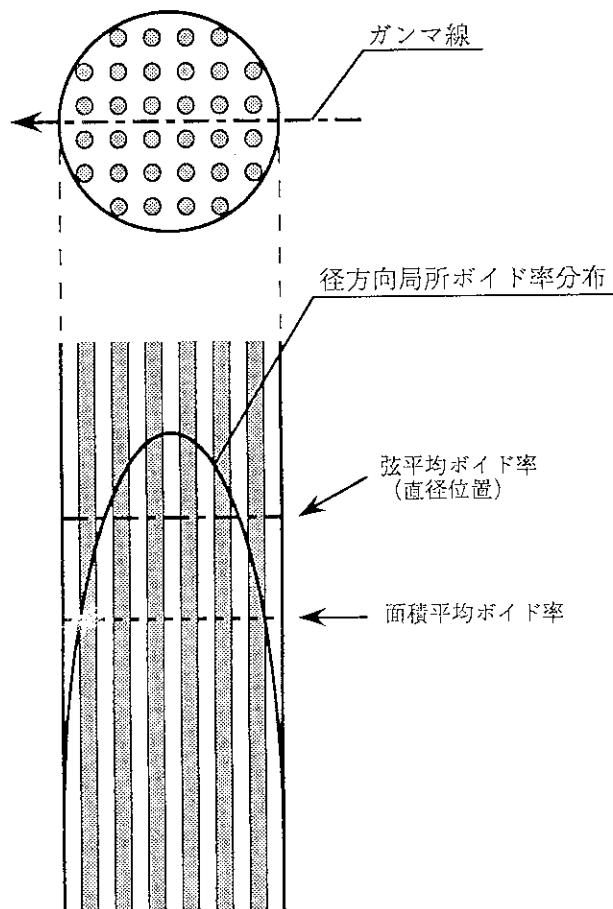
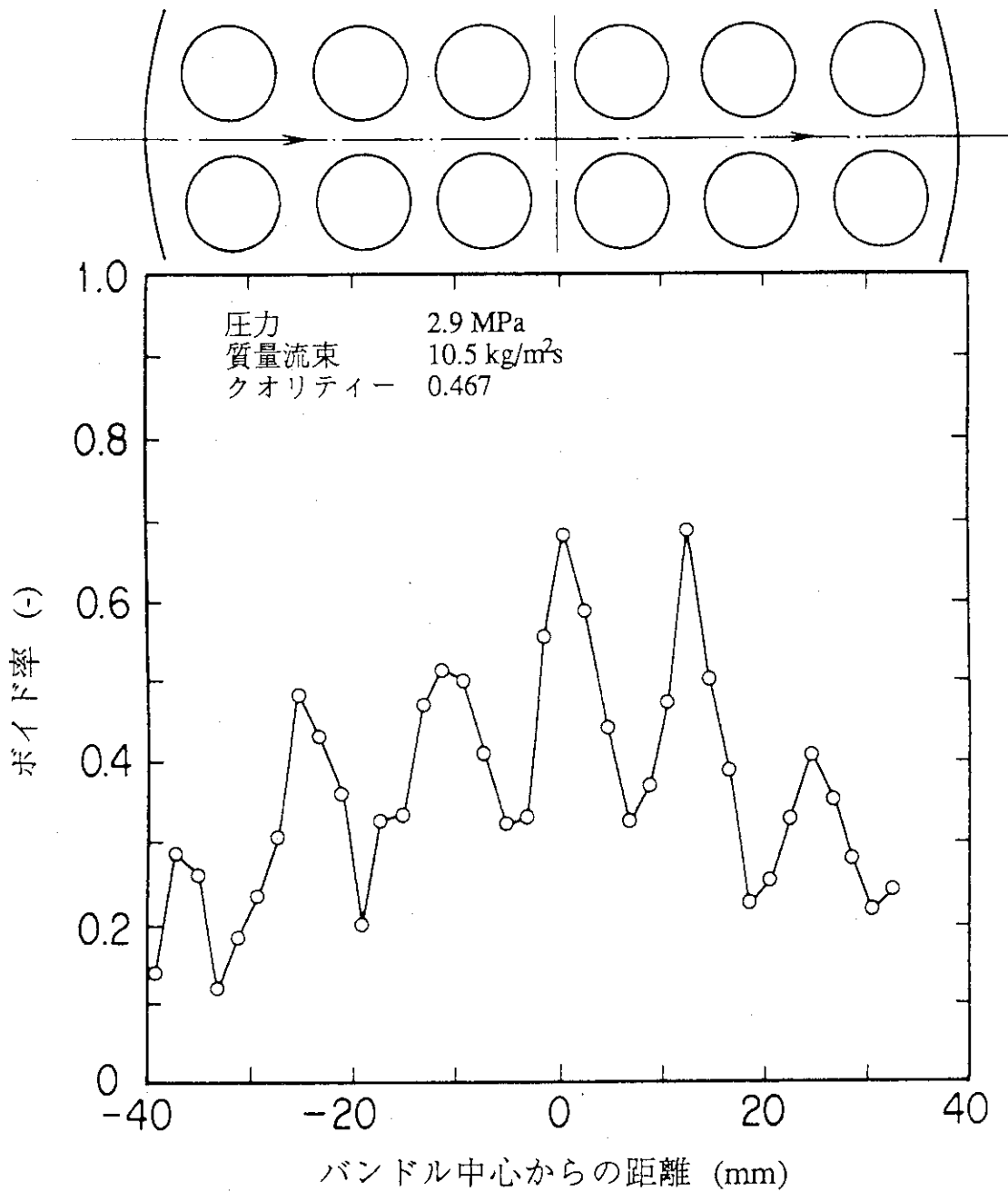
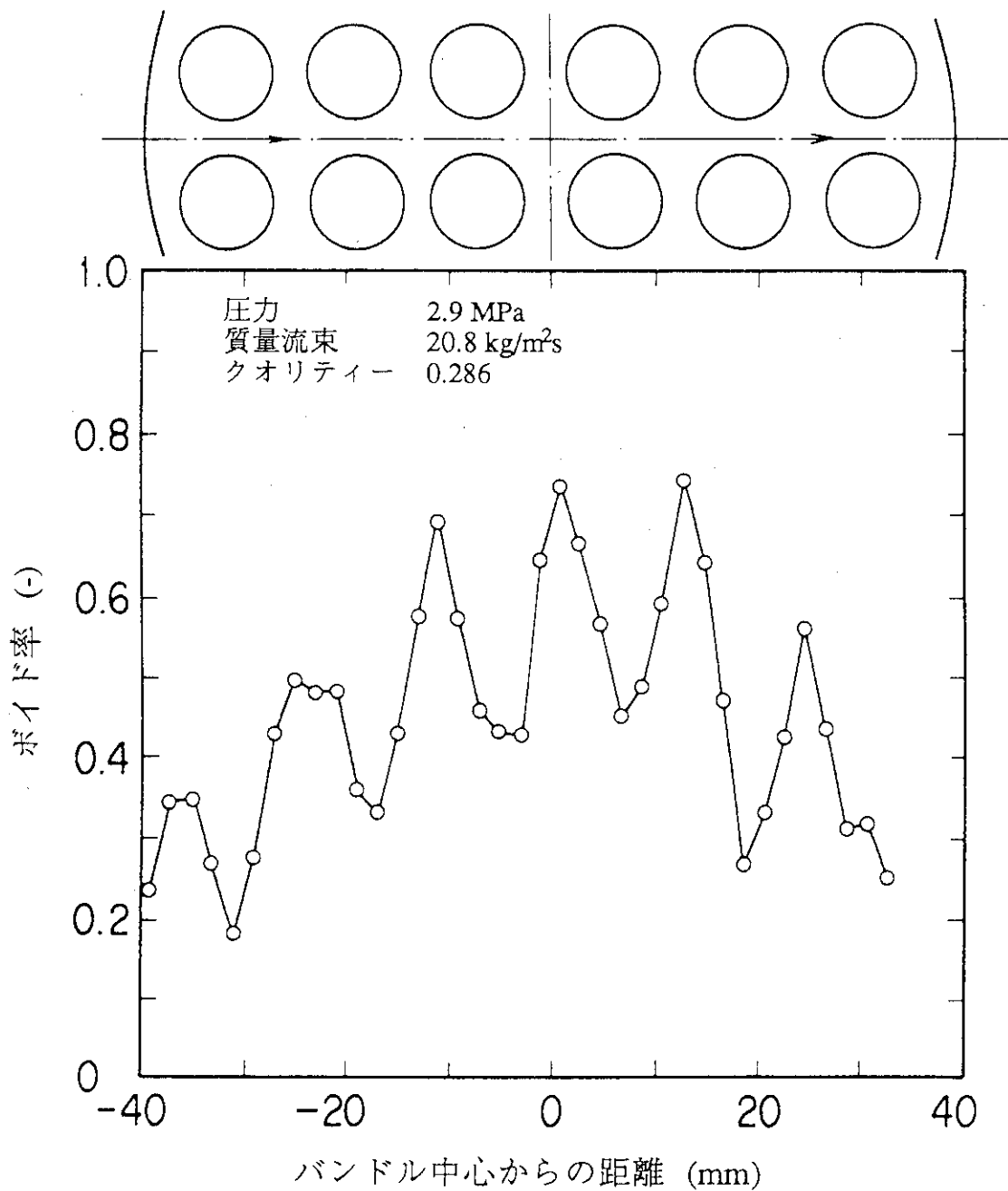


Fig. 8-24 バンドル全体の径方向ボイド分布予想図



ガンマ線型密度計による弦平均ボイド率	0.39
差圧計による面積 (体積) 平均ボイド率	0.28
光学式ボイド計による弦平均ボイド率	0.36
光学式ボイド計による面積平均ボイド率	0.24

Fig. 8-25 高温高圧非加熱条件下の径方向ボイド率分布の例



ガンマ線型密度計による弦平均ボイド率	0.45
差圧計による面積 (体積) 平均ボイド率	0.32
光学式ボイド計による弦平均ボイド率	0.44
光学式ボイド計による面積平均ボイド率	0.33

Fig. 8-26 高温高圧非加熱条件下の径方向ボイド率分布の例

A p p e n d i x

Appendix

NOMENCLATURE

C_0	distribution parameter
D_h	hydraulic diameter
g	gravitational acceleration
j	superficial velocity
Ku	Kutateladeze number
P	pressure
P_{crit}	critical pressure of water
Re	Reynolds number
V_{gj}	drift velocity
α	void fraction
ρ	density
σ	surface tension

Subscripts

g	saturated gas
l	saturated liquid

Cunningham-Yeh correlation

$$\alpha = 0.925 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.239} \left(\frac{j_g}{j_{bcr}} \right)^a \left(\frac{j_g}{j_g + j_l} \right)^{0.6}$$

where

$$a = 0.67 \quad \text{if } \frac{j_g}{j_{bcr}} < 1$$

$$a = 0.47 \quad \text{if } \frac{j_g}{j_{bcr}} \geq 1$$

and

$$j_{bcr} = 1.53 \left(\frac{g\sigma}{\rho_l} \right)^{0.25}$$

Anoda correlation

$$\alpha = C_1 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.24} Ku^{C_2} \left(\frac{j_g}{j_g + j_l} \right)^{0.6}$$

where

$$\begin{array}{lll} C_1 = 0.63 & C_2 = 0.6 & \text{if } Ku < 3.3 \\ C_1 = 0.8 & C_2 = 0.4 & \text{if } Ku \geq 3.3 \end{array}$$

$$Ku = \frac{j_g \rho_1^{0.5}}{[g\sigma(\rho_1 - \rho_g)]^{0.25}}$$

Wilson correlation

$$\alpha = K \left[\frac{j_g}{\left(\frac{g\sigma}{\rho_1 - \rho_g}\right)^{0.25}} \right]^a \left(\frac{\rho_g}{\rho_1 - \rho_g} \right)^{0.12} \left(\frac{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_1 - \rho_g)}}}{D_h} \right)^{0.1} \left(\frac{j_g}{j_g + j_l} \right)^{0.6}$$

where

$$\begin{array}{lll} K = 0.564 & a = 0.67 & \text{if } 0 < \left[\frac{j_g}{\left(\frac{g\sigma}{\rho_1 - \rho_g}\right)^{0.25}} \right] < 1.5 \\ K = 0.619 & a = 0.47 & \text{if } 1.5 < \left[\frac{j_g}{\left(\frac{g\sigma}{\rho_1 - \rho_g}\right)^{0.25}} \right] < 10 \end{array}$$

Chexal-Lellouche model

$$\alpha = \frac{j_g}{C_0(j_g + j_l) + V_{gj}}$$

where

$$C_0 = \frac{1 - \exp(-C_1\alpha)}{1 - \exp(-C_1)}$$

$$C_0 = \frac{K_0 + (1 - K_0)\alpha^r}{K_0 + (1 - K_0)\alpha^r}$$

$$C_1 = \frac{4P_{\text{crit}}^2}{P(P_{\text{crit}} - P)}$$

$$K_0 = B_1 + (1 - B_1) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.25}$$

$$r = \frac{1 + 1.57 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)}{1 - B_1}$$

$$B_1 = \min \left(0.8, \frac{1}{1 + \exp \left(-\frac{Re}{60000} \right)} \right)$$

$$Re = \max (Re_g, Re_l)$$

$$V_{gj} = 1.41 \left(\frac{(\rho_l - \rho_g) \sigma g}{\rho_l^2} \right)^{0.25} (1 - \alpha)^{B_1} C_2 C_3 C_4$$

$$C_2 = 1 \quad \text{if } C_5 > 1.0$$

$$C_2 = \frac{1}{1 - \exp \left(-\frac{C_5}{1 - C_5} \right)} \quad \text{if } C_5 < 1.0$$

$$C_3 = \max \left\{ 0.5, 2 \exp \left(-\frac{|Re_l|}{60000} \right) \right\}$$

$$C_4 = 1 \quad \text{if } C_7 > 1.0$$

$$C_4 = \frac{1}{1 - \exp \left(-\frac{C_7}{1 - C_7} \right)} \quad \text{if } C_7 < 1.0$$

$$C_5 = \sqrt{150 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)}$$

$$C_7 = \left(\frac{D_2}{D_h} \right)^{0.6}$$

$$D_2 = 0.0914 \text{ m} \quad (0.3 \text{ ft})$$

Bestion model

$$\alpha = \frac{j_g}{C_0(j_g + j_l) + V_{gj}}$$

$$C_0 = 1 + 0.244 \exp \left\{ -273 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \right\}$$

$$V_{gj} = \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\left(\frac{K_1 \rho_l + K_g \rho_g}{f_{b2} L} + \frac{\rho_g C_{fv}}{D_h} \right)}}$$

$$L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}}$$

$$f_{b2} = 2.13 \times 10^{-2} + 0.9787 \alpha^3 (256 - 768 \alpha) \quad \text{if } \alpha < 0.25$$

$$f_{b2} = 1 \quad \text{if } \alpha > 0.25$$

$$K_1 = 1.063 \times 10^{-2}$$

$$K_g = 0.752$$

$$C_{fv} = 37.045$$