原子炉内の気体と液体の動きを 最新の計測技術でモデル化

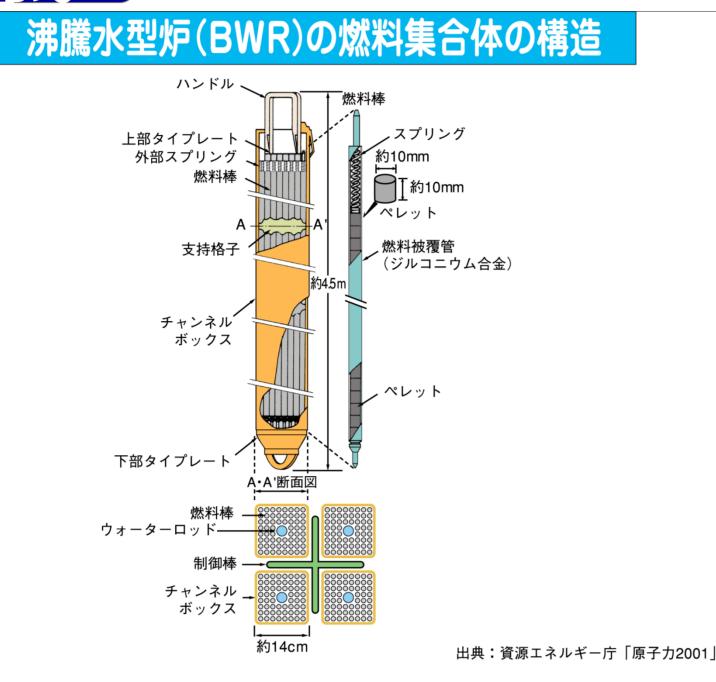
~軽水炉燃料集合体内気液二相流の流動特性と界面輸送機構の解明~

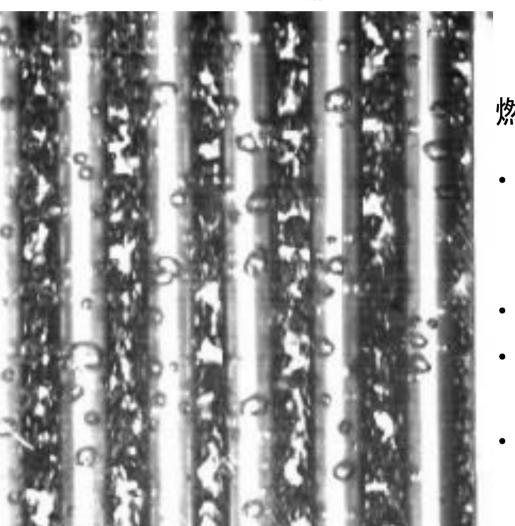
京都大学複合原子力科学研究所

沈秀中・山本俊弘・チャルゲリビクラント

研究の背景と意義

(型炉(BWR)原子力発電のしくみ 原子炉格納容器 変圧器 放水路へ



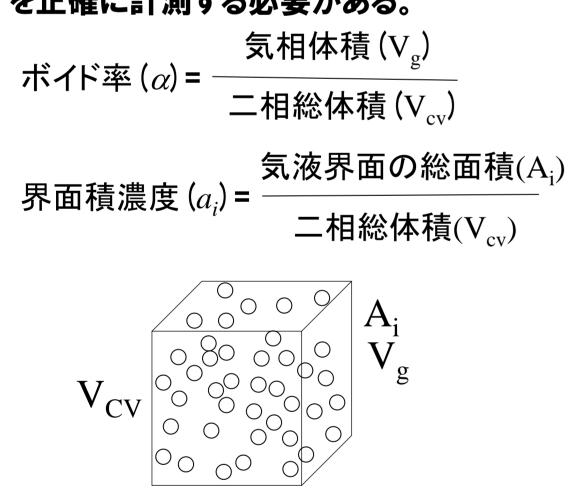


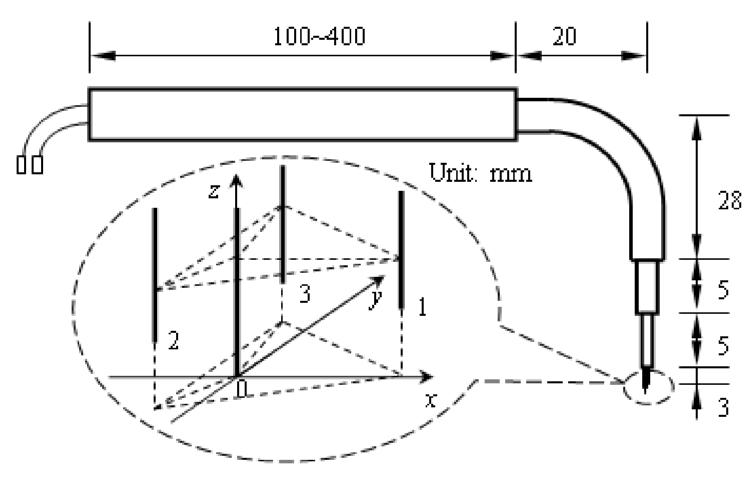
燃料棒の加熱により沸騰すれば、水蒸気一水気液二相流になる。

- 気液二相流の特徴:高温の気泡が界面を通して低温の水に熱を 高効率的に輸送することが可能である。事故緩和の役にも立つ。
- 原子炉設計と安全評価:安全解析・評価コードで実施する。
- 安全解析・評価コード:多種多様な流動と熱輸送の物理モデルが 組み込まれている。その中の界面輸送モデルが最重要。
- 本研究の目的:燃料集合体内多次元気液二相流の流動特性 データベースを構築し、相間相互作用と界面輸送機構の複雑な 現象を解明し、その界面輸送現象をモデリング化することである。

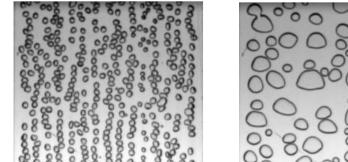
研究の創意性と特徴

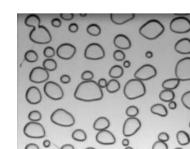
・気液二相流の界面輸送モデルの開発と検証には、精度の高い局所流動特性計測手法を用いた実験デー タベースの構築が不可欠であり、特に、ボイド率、界面積濃度、気泡径、気相速度などの局所パラメーター を正確に計測する必要がある。

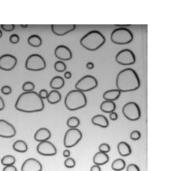




- 1) 研究担当者らが開発した先進的な4センサ・プローブ(4本の光ファイバを触針とするプローブ)でロッドバ
- ンドル流路に存在する気液二相流のボイド率、界面積濃度、気泡径及び気相速度を高精度に計測する。 気泡移動抵抗により気泡を大小二群に分類し、二群気泡のボイド率、界面積濃度、気泡径と気相速度 のデータベースを構築する。Ishii & Zuber (1979) の<mark>最大変形気泡径 (約10mm</mark>) を二群境界線としている。









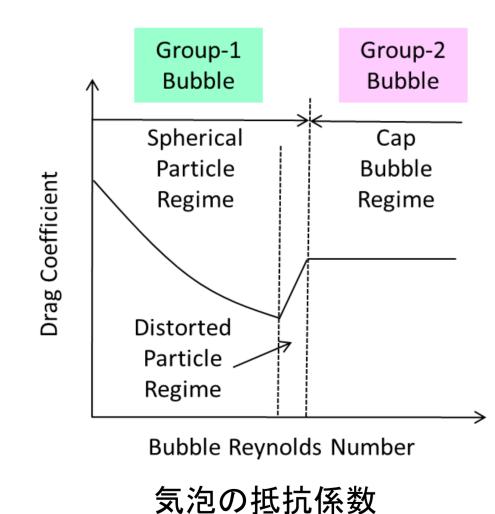


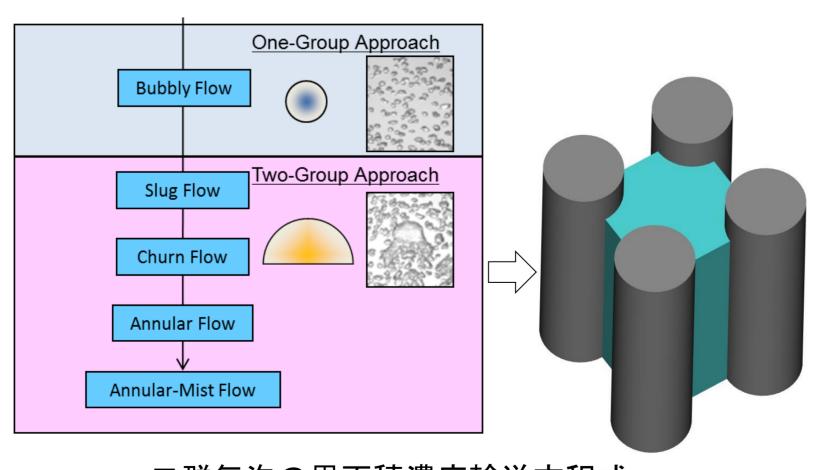
光学式4センサ・プローブ



一群気泡:球形気泡、変形気泡

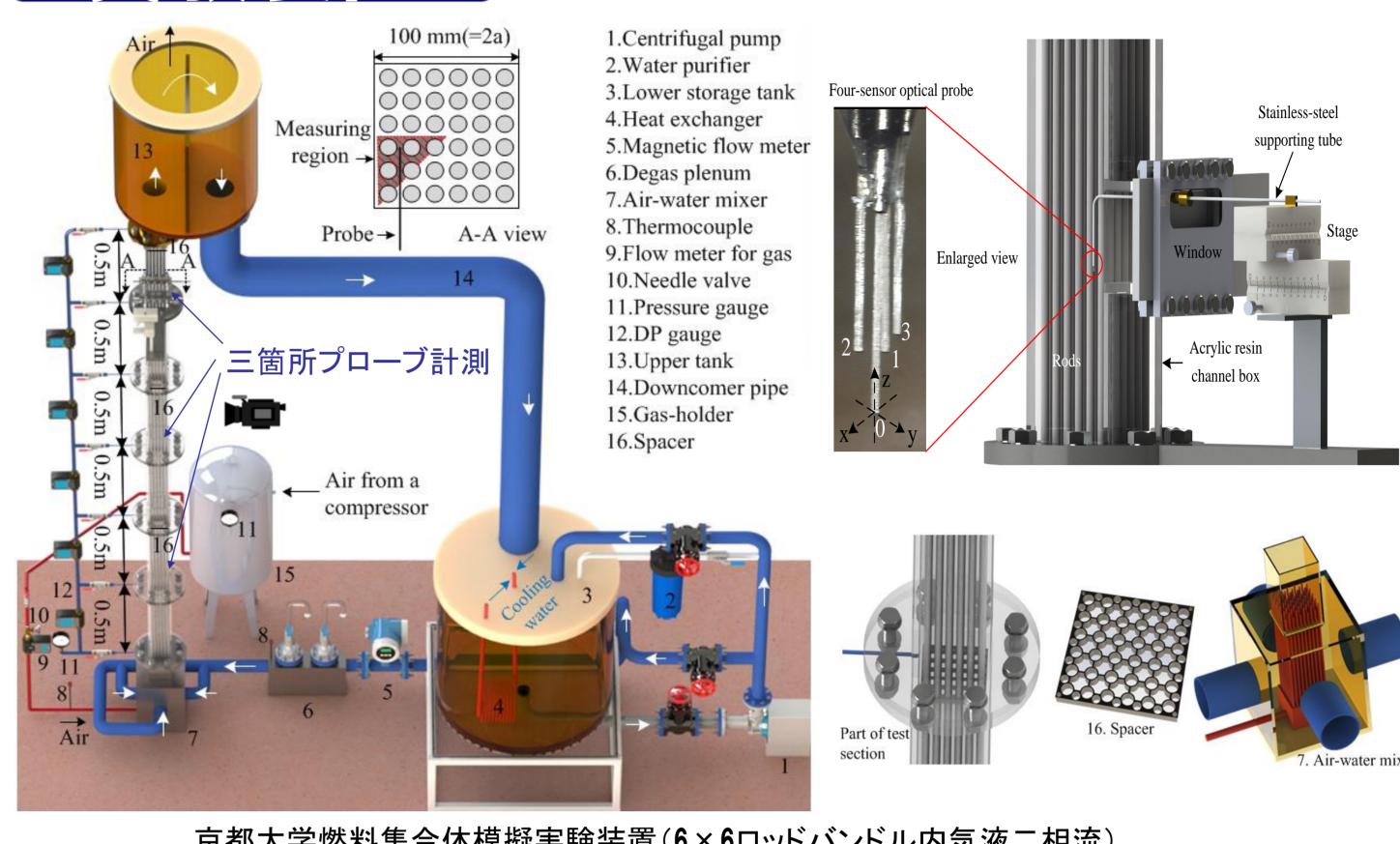
二群気泡:キャップ気泡、スラグとチャーンタービュラント気泡





二群気泡の界面積濃度輸送方程式

- 3) 気泡の合体と分裂モデルを含む二群気泡の界面積濃度輸送方程式を開発・検証する。
- ・ 高速ビデオカメラの局所測定により、流動様式のデータベースを構築し、流動様式を分類し、流動様式遷 移モデルを開発・検証する。
- ・差圧計の局所測定により、単相流と二相流の摩擦損失と局所平均ボイド率のデータベースを構築した。こ れらのデータベースと既存の他の研究者のデータベースに基づき、燃料集合体内気液二相流の流動特性 の高精度予測を可能とするドリフトフラックスモデル、単相流摩擦係数モデル及び二相流摩擦乗数モデル を開発・検証した。

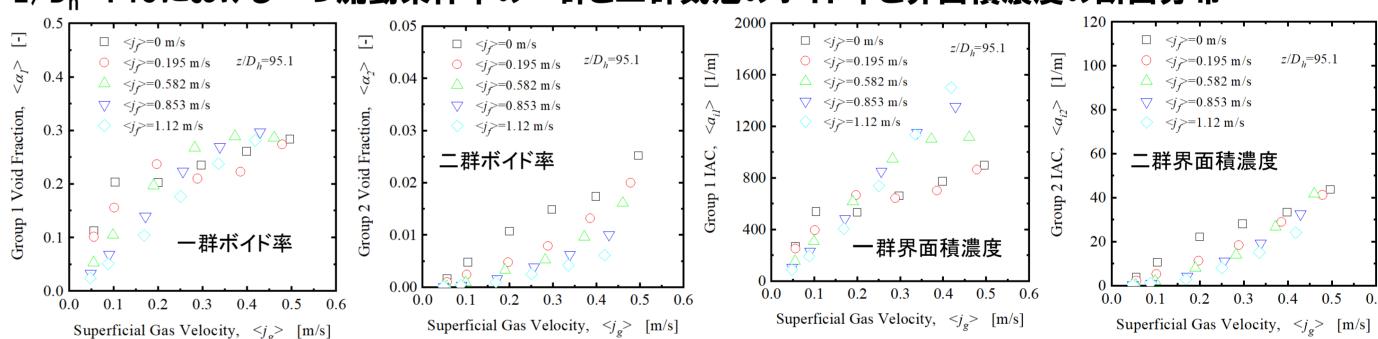


京都大学燃料集合体模擬実験装置(6×6ロッドバンドル内気液二相流)

選定した5液相流速×6気相流速の流動条件において、4センサ・プローブを用いて断面1/8の三角形領

域を測定し、次の代表的な結果(データベース)を示す。 二群界面積濃度 一群界面積濃度 1.0 ,0.5 0.0 1.0 0.5 0.0 $< j_f > = 0.195 \text{ m/s}$ $< j_f > = 0.195 \text{ m/s}$

z/D_h=149における一つ流動条件下の一群と二群気泡のボイド率と界面積濃度の断面分布

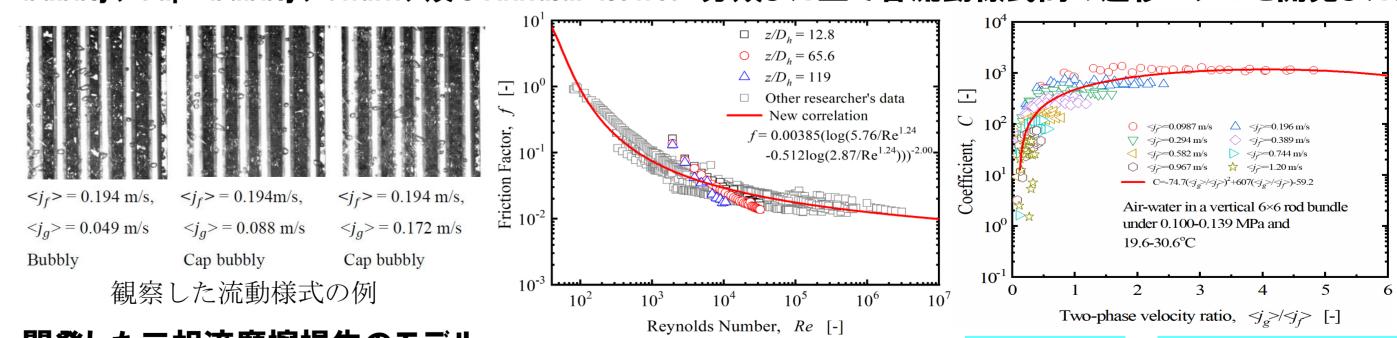


z/D_h=95.1における30流動条件の一群と二群気泡の断面平均ボイド率と界面積濃度

開発した二群気泡の界面積濃度輸送方程式 $\frac{\partial a_{i1}}{\partial t} + \nabla \cdot (a_{i1}\vec{v}_{i1}) = \left(\frac{2}{3} - CD_{c1}^{*2}\right) \frac{a_{i1}}{\alpha_1} \left[\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1\vec{v}_{g1}) - \eta_{ph1}\right] + \sum_j \phi_{j,1} + \phi_{ph1},$

 $\frac{\partial a_{i2}}{\partial t} + \nabla \cdot (a_{i2}\vec{v}_{i2}) = k_{\alpha_2}^{\alpha_{i2}} \left[\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_2\vec{v}_{g2}) - \eta_{ph2} \right] + C(D_{c1}^*)^2 \frac{a_{i1}}{\alpha_1} \left[\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1\vec{v}_{g1}) - \eta_{ph1} \right] + \sum_j \phi_{j,2} + \phi_{ph2}.$ 気泡合体 二群総合:37.3% \Box $z/D_h=41.6$ 00 00 00 00 気泡分裂

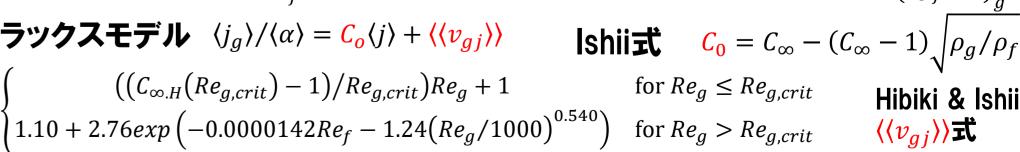
二群界面積濃度輸送方程式で予測した二群界面積濃度 <aij>と<aij>と実測値との比較 流動様式のデータベースを構築し、これらの流動様式と他の研究者のデータをBubbly、Finely dispersed bubbly、Cap-bubbly、Churn、及びAnnular flowsに分類した上で各流動様式間の遷移モデルを開発した。



開発した二相流摩擦損失のモデル

二相摩擦乗数 Φ_f^2 計算用係数 ${\sf C}$ のモデル 単相流摩擦損失係数fのモデル Darcy-Weisbach \pm $\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_f$

・ボイド率予測の新ドリフトフラックスモデル $\langle j_g \rangle / \langle \alpha \rangle = \frac{C_o \langle j \rangle}{\langle v_{gj} \rangle}$ $((C_{\infty,H}(Re_{g,crit})-1)/Re_{g,crit})Re_g+1$



 (dp_f/dz)

- 本研究では、模擬燃料集合体内気液二相流の挙動を先進4センサ・プローブ、高速ビデオカメラと差圧計を 用いて計測・データベース構築し、ドリフトフラックスモデル、流動様式遷移モデル、二相流摩擦損失モデル 及び気泡の合体と分裂モデルを含む二群気泡の界面積濃度輸送方程式を開発・検証した。
- 既存軽水炉のジルカロイ燃料被覆管の代替となる耐高温セラミック燃料被覆管の利用は水素爆発等のリ スクを大幅に抑えられるので、今後セラミック管で構成する燃料集合体内熱輸送機構の解明研究に展開。