

# 燃料集合体の流動予測技術の開発

Development of Prediction Techniques for Flow Through Fuel Assembly

技術本部 市岡 丈彦\*<sup>1</sup> 沢田 一由\*<sup>1</sup>  
 川田 裕\*<sup>2</sup>  
 原子力事業本部 星 雅也\*<sup>3</sup>  
 神戸造船所 今泉 正彦\*<sup>4</sup>  
 ニュークリア・デベロップメント株式会社 小林 裕\*<sup>5</sup>

従来、燃料集合体の開発・設計における水力学的特性評価、特に圧力損失評価は、モデル供試体を用いた流水試験により行われてきた。このため、モデル供試体の製作にある程度の期間を要するという難点があった。しかし最近、開発期間の短縮化と流動状況のより詳細な把握の必要性から、CFDを用いたシミュレーション解析のニーズが非常に高まってきている。そこで本研究では、非構造格子を用いた有限体積法による三次元流動解析を燃料グリッドに適用した。そして得られた結果を別途実施した流れの可視化試験、圧力損失計測、燃料棒周囲の圧力分布計測結果と比較した。これにより、本解析手法が実用上十分な精度で流れ場を予測し得ることを示した。

Hydraulic characteristics of the fuel assembly, especially pressure losses, have so far been calculated based on flow tests employing a test model at the development and design stage. In this method it took long time to manufacture the model grid. Recently the needs for a simulation analysis by CFD have greatly increased in order to develop new design timely and to understand the flow pattern in more detail. In this study, a three-dimensional flow analysis based on the finite volume method employing an unstructured mesh was applied to the fuel grid spacer. The results obtained were compared with the results of the separately conducted tests, including flow visualisation tests, pressure loss measurements, and measurements of pressure distribution around fuel rods. The comparison showed that the analytical method can predict a flow field with sufficient accuracy for practical use.

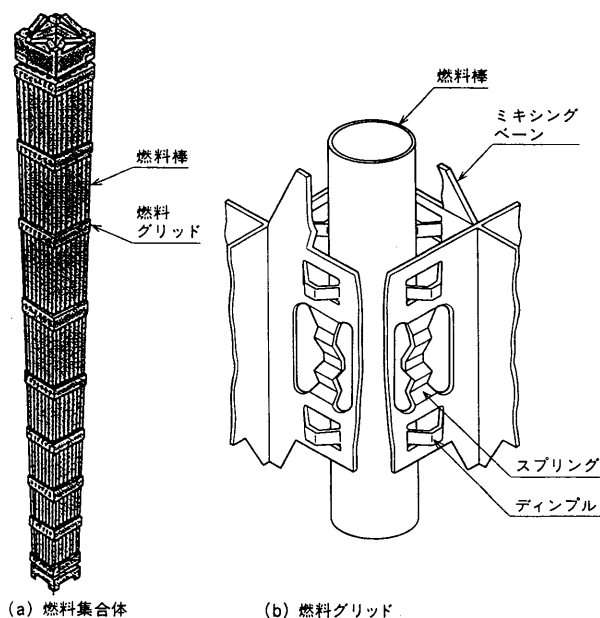
## 1. ま え が き

燃料集合体の設計・開発では、燃料棒を束ねる燃料グリッド周りの流動現象とともに、圧力損失の評価が重要な検討項目となっている。これについては従来、実寸大のモデル供試体を用いた流水試験により圧力損失の計測を行ってきた。しかしこの方法では、供試体の製作や部分形状の変更、最適化にある程度の期間を要するなどの問題があった。一方、近年の計算流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）とコンピュータ技術の発達は著しく、複雑な三次元形状物体周りの流れ場を精度良く、しかも短期間にシミュレートすることが可能となり、燃料グリッドへの適用<sup>(1)-(3)</sup>も実現できる状況となった。そこで本研究では、非構造格子を用いた有限体積法<sup>(4)</sup>による三次元流動解析を燃料グリッドに適用して、その流れ場をシミュレートした。そして、得られた結果を別途実施した流れの可視化、燃料棒周囲の圧力分布<sup>(5)</sup>、圧力損失等の実測データと比較・検討した。ここでは、本解析手法の精度的な評価と実用性について報告する。

## 2. 解析手法及び解析条件

流動シミュレーションの対象である燃料集合体は、複数の燃料棒を燃料グリッドを用いて束ねたものである。燃料集合体と燃料グリッド形状の一例を図1に示す。

CFDによる流動シミュレーションでは、流れ場に計算格子を生成する必要があるが、このような複雑形状を有する流れ場にCFDを適用する場合、一般に用いられる規則正しく並んだ構造格子を用いるのは非常に困難である。ここでは、このような複雑



(a) 燃料集合体 (b) 燃料グリッド  
 図1 燃料集合体と燃料グリッドの形状 (a)は燃料集合体の全景を示し、(b)は燃料グリッドの代表的な形状を示す。  
 Shape of fuel assembly and fuel grid spacer

形状の流れ場に適用可能な非構造格子<sup>(6)</sup>を用いた有限体積法により、ナビエ・ストークス方程式を離散化する手法<sup>(4)</sup>を用いた。数値解析のアルゴリズムはSIMPLE法<sup>(7)</sup>である。また、乱流モデルとしては、乱れエネルギー $k$ とその散逸 $\varepsilon$ の輸送方程式をモデル化して得られる $k-\varepsilon$ モデル<sup>(8)</sup>を用いた。

\*1 高砂研究所流体研究室

\*2 高砂研究所流体研究室長 工博

\*3 原子力技術センター原子炉設計部熱水力設計課

\*4 原子燃料技術部燃料技術グループ

\*5 第二研究部構造技術開発室

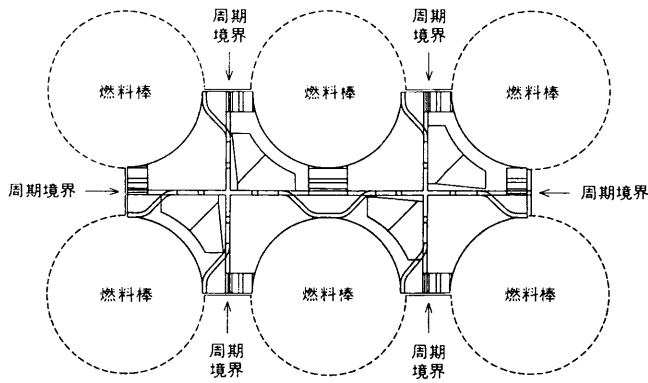


図2 解析領域 (半径方向断面) 6本の燃料棒に囲まれた流路を解析領域とし、半径方向の境界には周期境界条件を用いた。  
Analytical domain (Section)

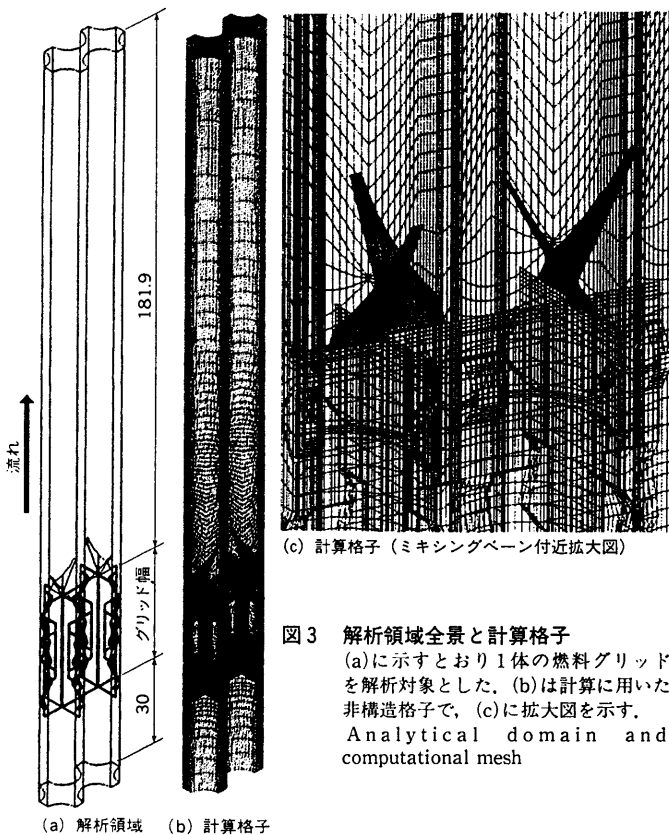


図3 解析領域全景と計算格子  
(a)に示すとおり1体の燃料グリッドを解析対象とした。(b)は計算に用いた非構造格子で、(c)に拡大図を示す。  
Analytical domain and computational mesh

今回シミュレートする解析領域は、燃料グリッド全体の代表形状として図2に示すように6本の燃料棒に囲まれた流路セル(したがって、解析対象は2セル)とし、流れと直角方向の速度及び圧力の境界条件に周期境界条件を設定した。これにより、流れと直角方向には、あたかも流路セルが無限に存在するような流れ場を計算することができる。また、流れ方向のシミュレート区間は、燃料グリッドの上流30 mmから下流約180 mmの区間とし、流れ方向に燃料グリッドが一体だけ存在する流れ場とした。流れ方向の境界条件は、上流側境界条件を乱れ度10%の一樣流とし、下流側境界条件は一樣流出境界とした。使用した計算格子と計算領域を図3に、また解析条件を表1に示す。

### 3. 解析結果

#### 3.1 実験結果による解析結果の定性的検証

まず、本解析手法を定性的に検証するために、シミュレーションにより得られた流況と可視化実験により得られた流況を比較す

表1 解析条件  
Conditions of analysis

グリッド形状	タイプA	タイプB	タイプC
レイノルズ数	$7.7 \times 10^4$	$7.7 \times 10^4$	$2 \times 10^4, 8 \times 10^4, 5 \times 10^5$
流体	水	水	水
入口流速	4.2 m/s	4.2 m/s	6 m/s
解析領域	2セル	2セル	2セル
計算格子数	約20万	約20万	約20万

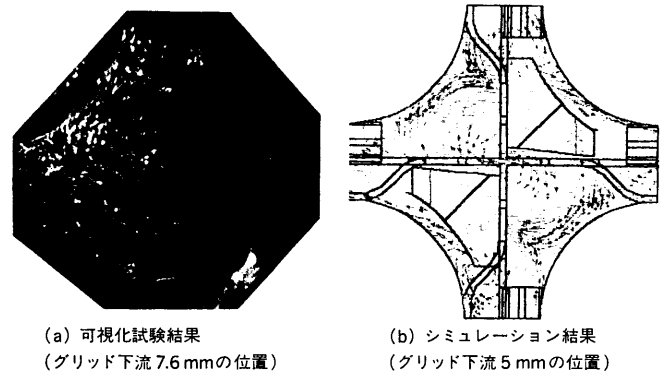


図4 計算と実験の流況比較 (a)にはミキシングペーンによる強い渦流とはく離による二次渦が認められるが、(b)の解析結果にも同様の渦が認められる。  
Comparison between analytical and experimental results (Flow pattern)

る。図4には、燃料グリッド下流において4本の燃料棒に囲まれた流路断面の流況を解析結果と実験結果とで比較して示す。可視化写真は、レーザーライトシートを流れと直角方向から照射して流路断面を照らし、上流から注入した気泡をトレーサとして流況を可視化し、下流側に設置したカメラで撮影したものである。可視化結果を見ると、流路中央のミキシングペーンにより生じる強い渦流と、ミキシングペーン側方の角部から生じるはく離渦の存在が良く分かるが、シミュレーション結果にもそれらが明確に認められ、定性的には本シミュレーションが実現象を忠実に再現していることを示している。

#### 3.2 実験結果による解析結果の定量的検証

燃料グリッド内部は、図1(b)に示したとおり燃料棒を支えるためのスプリングやディンプルなど、流れに対する障害物が幾つかあるが、これらにより燃料棒の周方向及び流れ方向には、ある圧力分布が存在する。ここでは、この圧力分布の測定結果を用いて解析結果を定量的に検証する。

まず、図5(a)には、模擬燃料棒に圧力測定孔を設けて計測した、ミキシングペーン付け根断面における燃料棒周りの圧力分布を、解析結果と実験結果とで比較する。このときの計測方法は、図5(b)に示すように、模擬燃料棒に設けた圧力測定孔を周方向に1回転させ、上流側基準圧力との差圧分布を計測した<sup>(5)</sup>。図5(a)において、A位置とB位置、すなわちミキシングペーンの直上流位置で差圧が小さくなっているが、これはミキシングペーンが流路を狭めることによるブロッカージュ効果により、この位置での静圧が上昇し、その結果、上流側基準圧力との差圧が小さくなったことに起因する。解析結果と実験結果はこのような部分でも定量的におおむね良く一致しており、本シミュレーションがこのような流動場を忠実に再現していることを示している。

次に、流れ方向の圧力分布を比較する。ここでは、図5(c)に

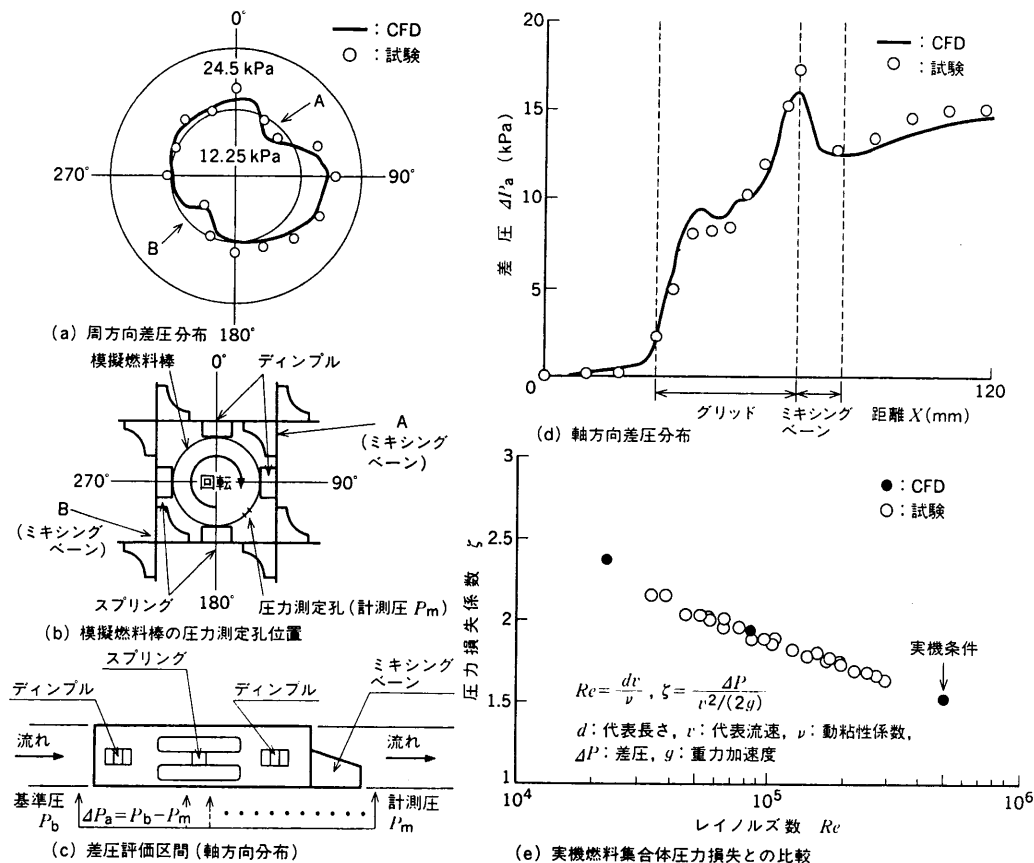


図5 計算と実験結果の定量的比較  
Comparison between analytical and experimental results (Pressure distributions)

示すように、模擬燃料棒の圧力測定孔を周方向に回転させず、流れ方向にトラバースしたときの上流側基準圧力との差圧分布の測定結果<sup>(5)</sup>を解析結果と比較する。図5(d)で両者の比較結果を見ると、燃料グリッド内部の複雑な差圧分布も本シミュレーションはおおむね忠実に現象を再現しており、定量的に良い一致が見られた。

最後に、燃料集合体の開発・設計において重要な性能評価手段の一つとなる、燃料グリッドの圧力損失係数を実験結果とシミュレーション結果とで比較する。図5(e)は、実機燃料集合体の中温ループを用いた流水試験による一定区間の圧力損失計測結果と本シミュレーション結果を比較したものである。シミュレーションでは燃料グリッド全体を2セルの解析領域で代表させているものの、広いレイノルズ数範囲で実験結果とおおむね一致した。これにより、本手法が実機設計における圧力損失評価の有力なツールとなり得ることを確認した。

#### 4. ま と め

従来の燃料集合体の設計・開発、特に水力学的特性の評価は、実験的アプローチによる評価が主体であった。しかし、近年の燃料集合体高性能化の要請から、より詳細な流動状況の把握と同時に開発期間の短縮、水力学的特性評価の高精度化を目的として、最近発達の著しいCFD技術を適用した流動予測手法を開発した。本報では、実験結果とCFDによるシミュレーション結果を流況、圧力分布、圧力損失係数により比較し、それぞれについて非常に良く一致することを示し、本手法が実用上十分な精度を有することを示した。そして、CFDを用いることにより、実機の運転条件であるレイノルズ数の高い流動条件における圧力損失等がある

程度の精度で評価できること、計測の難しい燃料グリッド内部の流況を詳細に把握できることを示した。この流動予測技術に関しては、これまでに広範囲な実験結果との検証を実施済みであり、ここで開発した手法は、構造解析及び振動解析と同一の形状データベースを共有している。そして、既に新型グリッドの開発に適用され、設計検討段階における予備試験並びにモデル供試体製作期間を大幅に短縮するなどの実績をあげつつある。

#### 参 考 文 献

- (1) 市岡丈彦ほか、PWR用燃料集合体の流動予測法の開発(2)、日本原子力学会1994秋の大会予稿集、A 48 (1994-9) p.48.
- (2) 川田 裕ほか、CFDを用いた燃料集合体の流動予測に関する研究、火力原子力発電大会予稿集、(1994-10) p.94.
- (3) Ichioka, T. et al., Development of Predictive Method of Flow Characteristics for PWR Fuel Assembly, ICONE-3 (1995-4)
- (4) Demirdzic, I. et al., A calculation procedure for turbulent flow in complex geometries, Comput Fluids Vol.15 No. 3 (1987) p.251
- (5) 小林 裕ほか、PWR用燃料集合体の流動予測法の開発(1)、日本原子力学会1994秋の大会予稿集、A 47 (1994-9) p.47.
- (6) 保原 充ほか、数値流体力学、東京大学出版会、(1992) p.167.
- (7) Patankar, S. V. et al., A calculation procedure for heat, mass and momentum in three-dimensional parabolic flows, Int. J. Heat Mass Transfer (1972) p.15.
- (8) Launder, B. E. et al., The numerical computation of turbulent flow, Comp. Meth. in Appl. Mech. Engg. 3 (1974) p.269.