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 畄 彦*1 由*' 4 沢 ⊞ Ш Ħ 裕*2 原子力事業本部 星 雅 也*3 今 彦*' 神戸造船所 ΙĒ 泉 ニュークリア・デベロップメント株式会社 小 林 裕*5

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 develope 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 empoying 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(1)~(3)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("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(5)、 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



形状の流れ場に適用可能な非構造格子(6)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(4)を用いた.数 値解析のアルゴリズムは SIMPLE 法(のである.また、乱流モデ ルとしては、乱れエネルギー k とその散逸 εの輸送方程式をモ デル化して得られる k-εモデル⁽⁸⁾を用いた。







(a)解析領域 (b)計算格子

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%の一様流とし、 下流側境界条件は一様流出境界とした。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

先ず,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	7.7×104	7.7×104	$2 \times 10^4, 8 \times 10^4$ 5×10^5
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



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ベーンにより生じる強い 渦流と、ミキシングベ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.

先ず、図5(a)には、模擬燃料棒に圧力測定孔を設けて計測し た、ミキシングベ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⁽⁵⁾. 図5(a)において、A位置とB位置、すなわちミキシングベーン の直上流位置で差圧が小さくなっているが、これはミキシングベ ーンが流路を狭めることによるブロッケージ効果により、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



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⁽⁵⁾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をある 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

- 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.

171