

高速増殖炉の研究にひかれて

竹 田 敏 一*

高速増殖炉の研究をやり始めて10年余りが過ぎ、その面白さがやっと分かり始めた段階であるので、研究内容を紹介するのもおこがましいが、今後の研究方針を定める上での参考とするつもりで、これまでの研究内容を整理してみる。高速炉の特色は何と言ってもその高増殖性である。燃料親物質である ^{238}U を中性子捕獲により ^{239}Pu に転換させる増殖方式が今日の高速炉で広く用いられている。高増殖性のみを考えると、従来型の原子炉である軽水炉よりも優れているが、冷却材のナトリウムが、何らかの異常時に沸騰し、ボイドが生じると正の反応度が生じ、炉心安全上問題となる。さらに、1次系冷却材(Na)は放射化するので2次冷却系が必要となり原子炉の建設費は軽水炉より高くなる。このような諸問題を考えると高速炉の研究は、原子炉の特性を精度よく予測できる計算法およびに計算コードの開発、実験解析による計算法の予測精度の評価、確立された手法による安全かつ経済的な新しい原子炉の設計に分類できる。われわれの研究室では、このうち主に計算法の開発、予測精度の評価について研究してきたので以下に簡単に紹介する。

大型高速増殖特性を含めた炉心核特性の評価に必要な情報を得るためアメリカ・アイダホ州のアルゴンヌ国立研究所の零出力臨界装置ZPPRを用いた日米共同の実験が進められている。この共同研究はJUPITER計画(Japanese-United States Program of Integral Test and Experimental Researches)と呼ばれ、昭和53年、54年には均質高速臨界集合体ZPPR-9および10炉心の実験が行われ、昭和58年、59年には炉心内に内部ブランケットを持つ非均質

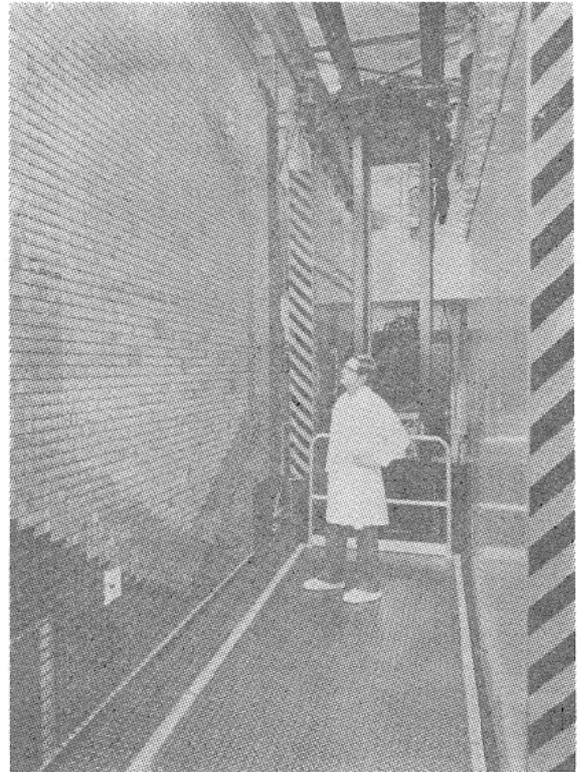


写真1 両坩集合体分離時のZPPR

高速臨界集合体ZPPR-13炉心の実験が行われた。このJUPITER実験はこれまでの実験炉あるいは原型炉を模擬したものとは異なり、大型高速炉のベンチマーク炉心であり、写真1に示すように炉心体積も4,600~6,200ℓ(電気出力で700~900MW相当)で、高速炉の臨界実験史上最大のものである。JUPITER実験の解析は日米各研究機関で行われ、大学関係では大阪大学のみがこの実験解析に加わり、高速炉の炉心計算法の予測精度の評価並びに新しい計算法の開発研究を行っている。

JUPITER実験解析では、臨界量、中心反応率比、制御棒反応度値、ドプラー反応度、ナトリウムボイド反応度等の核特性量の炉物理的把握のみならず、各特性量の計算値と実験値との比(C/E値、バイヤス)、並びにその値のバラ

*竹田敏一(Toshikazu TAKEDA), 大阪大学, 工学部, 原子力工学科, 原子炉物理研究室, 助教授, 工学博士, 原子炉物理

つき（不確かさ）を計算している。バイヤス値および不確かさは実機原子炉を設計する際に必要になはわけであるが、不確かさが大きいと例えば制御棒本数が必要以上に多い炉心を設計することになり炉心経済上のロスになる。このため不確かさをできるだけ小さくすることが望まれる。しかし一方、JUPITER 実験解析の結果、制御棒値および反応率分布（出力分布）の C/E 値の空間依存性は大型炉になる程大きくなり、バイヤスの不確かさも大きくなること示された。また、ナトリウムボイド反応度値の C/E 値は約1.3であり、計算値と実測値の間に30%もの差があることがわかった。このような原因を調べるためには用いた計算法および断面積を見直し、それらの改善をしなければならない。

計算法の改善の際には高速臨界集合体特有の燃料集合体構造を考慮する必要がある。燃料集合体（格子）は図1に示すように Pu, U, Na, Fe のプレートがドロワと呼ばれる引出し状の鞘に数枚入った構造になっているので、非均質性は実機高速炉の燃料集合体に比べ大きい。そこで核計算を行う場合に、その非均質性を考慮しなければならない。格子内の非均質効果として核計算に問題となるのは、格子内各プ

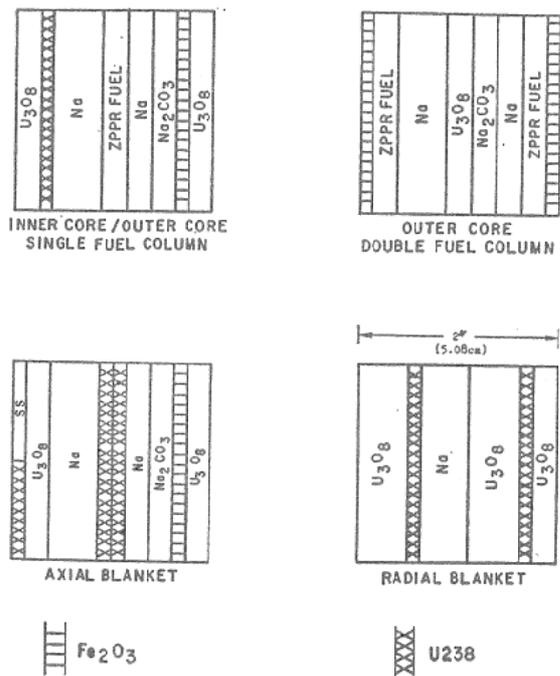


図1 ZPPR-9, -10のセル・パターン

レートの中性子束微細構造、共鳴による自己遮蔽、および Na のような中性子が透過しやすい物質による中性子ストリーミングの効果である。これらの効果を正確に取り入れた格子計算法を開発中である。その一例として、中性子ストリーミングの異方性を拡散理論で取り扱うために導出した統一拡散係数について述べる。この拡散係数は燃料格子、制御棒、ナトリウムフォロー等の中性子ストリーミング干渉効果のみならず、各格子内の微細なプレート構造に基づく中性子ストリーミングをも取り扱える。格子内の Na プレートをボイドカンに置換した場合の反応度差—ナトリウムボイド反応度—の実験解析に統一拡散係数を応用した場合の結果を図2に示す。この図は ZPPR-9 炉心の軸方向のナトリウムボイド反応度マップを表わしているが、従来の拡散係数を用いた場合に比べ実験値と計算値との一致が大幅に改善される。炉心内の任意の位置で、この一致がよくなるのでバイヤス因子のバラツキすなわち不確かさも小さくなる。以上、格子内計算法の改善について述べたが、炉心特性を正確に予測するためには正確な炉心計算法の開発が当然必要となる。

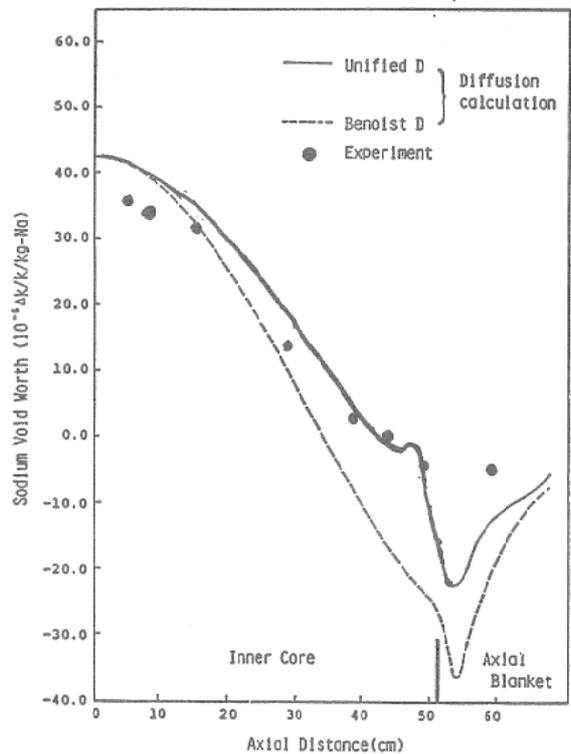


図2 軸向ナトリウムボイド反応度軸方向中央軸線に沿った ZPPR-9 炉心

高速臨界集合体における詳細な核特性の研究には三次元中性子輸送効果を取り入れなければならない。現在、使用可能な三次元中性子輸送計算コードは世の中にないので、新しい計算法を導出して三次元輸送計算コードを作成中である。また、実機高速増殖炉の燃料集合体は臨界集合体とは異なり六角形状である。それ故、実機原子炉の設計には六角メッシュあるいは三角メッシュを用いた炉心計算コードを用いなければならない。われわれは三次元ヘキサ-Z体系を粗メッシュで精度よく取り扱う手法を導出し、コード化した。このコードは現在高速炉の設計計算に広く用いられており、大学での研究成果が役立っている点、うれしく思う。

次に断面積の核特性への影響について考える。JUPITER 実験解析では現在、日本の評価済み核データライブラリーの第2版である JENDL-2 が用いられている。このライブラリーは第1版の JENDL-1 に比べ臨界性等をより精度よく予測できるが、先に述べたようにナトリウムボイド反応度は約30%過大評価される。このような原因を調べるには、断面積変化により核特性がどう変化するかを示す感度係数が役立つ。感度係数の計算のための有力な数学的手法として一般化摂動論がある。この方法により

二次元体系の感度係数計算コードを作成し、種の中性子スペクトルを持つ高速臨界集合体の感度を計算し、JENDL-2 ライブラリーの感度解析を行った。その結果、ナトリウムボイド反応度には1 keV 付近の ^{239}Pu 核分裂断面積、1 MeV 以上の ^{238}U 非弾性散乱断面積の影響が大きく、今後これらの断面積の見直しが必要であることを指摘した。また、一般化摂動論を進展させ、原子炉の燃焼に伴う核特性の変化の感度を計算する新しい手法を導びいた。この方法および計算結果については昭和59年9月にシカゴで開催される米国原子力学会 topical meeting で発表する予定である。今後、炉心燃焼特性も含めた臨界集合体、実験炉の測定データを使い断面積をアジャストする方法を開発する計画である。

以上高速臨界集合体を中心として計算法および断面積の改善方法、および予測精度の評価について述べてきたが、今後より研究を深め高速増殖炉の設計が経済的にできるよう炉心特性の評価法を確立する予定である。また、昭和59年9月に ANL-West で開かれる日米高速炉会議にこれまでの成果を出し、日米の解析結果につき議論し、高速増殖炉の研究をより進展させたい。