<第40回炉物理夏期セミナー報告>

若手研究会報告

### (1) GPU の汎用開発環境 CUDA を用いた

# 中性子輸送計算の高速化

名古屋大学大学院 工学研究科 マテリアル理工学専攻 小玉 泰寛

# 1. 序論

核計算手法を高精度化することによって核特性をより正確に予測し、炉心計算の信頼性 を向上させて炉心の経済性を高めることは非常に重要である。しかし、核特性の正確な予 測は原子炉の形状が非常に複雑であることから、解析的に解くことはできず、計算機によ る数値計算を用いても膨大な計算時間がかかってしまう。そこで、従来の核設計は計算を 実用的な時間内で終わらせるために、多数の工学的近似を導入してきた。

ところが、1990年代からの目覚しい計算機の発展によって、これら近似を極力排した高 精度解析がより現実的な研究課題として注目されるようになった。この高精度解析コード は、現時点ではまだ計算時間の観点から実用的ではないが、このまま計算機の性能が向上 し続けると仮定すると十年後には十分実用に耐えられると考えられる。

一方、この飛躍的な計算機性能の向上に目を向けると、画像処理を中心としたゲーム・ エンターテイメントの分野の専用演算装置の発展が注目を集めている。これらの装置は独 自のマルチコア構造を発達させ、PCの中央演算装置(CPU)を超える速度で性能向上を果 たしている。

そこで以前の研究では、ゲームコンソールに搭載された"Cell Broadband Engine (Cell B.E.)" を用いて核計算の高速化を試みた<sup>1)</sup>。その結果、約9倍程度の高速化が図れ、また計算の加 速を実現するためには、その独自の計算機構造に適したプログラミングモデルを採用しな ければならないという知見が得られた。

本研究では、計算装置として"Graphic Processing Unit(GPU)"を用い、炉心解析への応用を 考える。GPU もまた独自の計算機構造を持つため、前述の Cell B.E.を用いた研究と同様に、 その構造に適したプログラミングモデルを採用せねば計算の加速が実現できないだろうと 容易に想像できる。そこで、本研究の目的は、GPU を用いた核計算の高速化を実現するた めの最適なプログラミングモデルを模索・検討し、その速度向上を評価すること、とする。

# 2. GPU プログラミングモデル

本章では、GPU を用いた核計算の高速化を実現するための最適なプログラミングモデル について述べる。具体的には、まず PC 全体というシステムの観点から、GPU を用いて計算 を高速化させる上での大原則について述べる。次に、GPU のハードウェアの特性について 述べ、そこから GPU の得意とする処理について説明する。最後に、そのハードウェアの特 性をソフトウェア (ソースコード)的にはどのように実現するか簡単に述べる。

### 1) 演算専用装置としての GPU

GPU とは画像処理を担当するグラフィックボードに搭載された演算装置のことである。 グラフィックボードは画像データを保持するための独立したメモリー(VRAM)をもち、 PCI Express という高速なバスで PC と接続されている。これを簡単な図で示すと Fig. 2.1 と なる。



Fig. 2.1 PC 内の CPU, GPU, メモリーの簡略図

Fig. 2.1 より、VRAMに対するアクセス速度に対し、PCI Expressのアクセス速度は圧倒的 に遅いことがわかる。したがって、計算にPCI Expressの通信を含める場合、このアクセス速 度がボトルネックとなって高速化が望めないと思われる。実際に、全ての計算をGPUで処 理させる計算では 10 倍から 100 倍の加速を得ることができるが、一部分の計算(例えばHot Spotのみなど)をGPUで処理させる計算では数 10%ないし 3 倍程度の加速しか得ることが できない、という報告がある<sup>2)</sup>。

よって、GPU を用いた高速計算の実現には、計算に必要なデータを VRAM 上に確保し PCI Express を通した通信を可能な限り少なくする、いわばグラフィックボードで閉じたプ ログラムを作成することが大原則であることがわかる。

#### 2) GPU のハードウェア特性

続いて、GPU のハードウェアの特性について述べる。

ゲーム・エンターテイメントという大きな市場を背景に、独自の進化を遂げた GPU のア ーキテクチャの特徴の一つに、非常に高い並列計算能力を持つことがあげられる。CPU が ようやく 4 コア、6 コアのマルチコア化を実現してきた現在、GPU は最新のもので 240 も の計算処理ユニットを搭載する。GPU はこの大多数の計算処理ユニットを用いて、超並列 計算を実行することで計算の高速化を実現する。

また、GPUのアーキテクチャのもう一つの特徴はダイの多くを演算関連回路に割り当て、 制御関連回路の割合が非常に低いことが挙げられる。このことは言い換えれば、GPU は条 件分岐などのある複雑な計算は不得意であるが、その分単純な処理を高速に扱うことがで きるといえる。

以上より、Fig. 2.2 に示すとおり GPU は高い並列計算能力を活かすような超並列計算を得 意とする。一方、配列要素の総和を計算させるような並列化できない計算や、それぞれの 計算処理ユニットが自分に割り振られた仕事を担当するようなシリアルな計算は不得意で ある。



Fig. 2.2 GPU の得意·不得意

# 3) GPU プログラムのソフトウェア設計

前節にて GPU の得意とする処理が超並列計算であることを示した。本節では、この超並 列計算をソフトウェア的にどのように実現するか述べる。

この超並列計算の実現方法というものは、かつてGPUの汎用計算への応用の中で大きな 課題だった。なぜならば、GPUはそもそもグラフィック処理に特化した装置であり、CPU のように汎用性を求められなかったので、ソースコードの記述・データ変数の確保などに大きな制約があったからである。そこでCUDAというものが開発された<sup>3)</sup>。CUDAとは、"Compute Unified Device Architecture"の略で、GPUのベンダーの一つであるnVIDIA社の提供するGPU向けの統合開発環境である。CUDAは標準的なC言語と簡単な拡張でGPUプログラムを可能にする。

CUDA のプログラミングモデルは以下の通りである。

まず、PC というシステム全体を見ると、CUDA は CPU を host、GPU を device とし、host 側のプログラムは処理の制御を行い、device 側は host から与えられた命令を実行する、と いうモデルを採用する。これは、Cell B.E.などのヘテロジニアスマルチコアのプログラミン グモデルと似ている。host が制御する処理内容として、例えば VRAM 上のデータの確保・ 開放、メインメモリーと VRAM 間のデータ通信、後述のスレッドの数の指定などがある。

device 側では先の超並列計算を多数の「スレッド」を発行することで実現する。このスレッドは、CPUのスレッドと異なり生成・切替のオーバーヘッドが非常に小さいものである。 これらをまとめると、CUDAのプログラミングモデルはおおよそ Fig. 2.3 となる。



Fig. 2.3 CUDA プログラミングモデル

# 3. 中性子輸送計算コードの開発と検証計算

前章では GPU プログラムのプログラミングモデルを示した。本章では、このプログラミングモデルに則した中性子輸送計算コードの開発について述べる。また、ベンチマーク問題を用いた高速化の検証結果を示す。

### 1) 中性子輸送計算コードの開発

前章で述べたプログラミングモデルをまとめると、以下のようになる。

- 1. 高速化のためには閉じた GPU プログラムの作成が大原則である。
- 2. GPUは多数のスレッドを発行し、超並列計算を実現する。

このことを踏まえて、以下のように中性子輸送計算コードを開発した。

本コードは二次元の体系について拡散理論に基づき固有値を求める。また、拡散計算は 並列計算に対応するため応答行列法を採用した。この際、GPU が得意とする超並列計算を 実現するために、Fig. 3.1 に示すように集合体内を細かく区切ったメッシュ一つの処理を1 つのスレッドが計算するように実装した。



Fig. 3.1 応答行列法と GPU スレッドの実装

また、閉じた GPU プログラムの作成を試みたが、固有値を求める処理をおこなうには、全 てのメッシュにおいて拡散計算が終了している必要があり、これの実現は不可能であった。 そこで、拡散計算の終了の同期処理は CPU 上で制御し、VRAM 上に各メッシュのデータの ような大きなデータ通信は一度だけ、拡散計算の処理をおこなうか固有値を計算する処理 をおこなうかの命令制御のための通信は何回も繰り返すという実装をおこなった。

# 2) 検証計算

以上の実装で開発した計算コードを用いてIAEAの 2 次元ベンチマーク問題<sup>4)</sup>の解析を CPUとGPU上で行い、計算高速化の検証をおこなった。このベンチマーク問題は、拡散計算 コードの検証計算に世界的にも広く利用されているものである。計算体系をFig. 3.2 に示す。 炉心は 2 種類の燃料で構成され、燃料領域には合計 9 体の集合体に制御棒が挿入されてい る。



Fig. 3.2 IAEA 2次元ベンチマーク問題

また、計算を実行した CPU と GPU の性能比を Table 3-1 にまとめる。

Table 3-1 CPUとGPUの性能比<sup>5)</sup>

	種類	メモリー <u>量</u> (MB)	ピーク性能 (GFlops)	性能比 (GPU/CPU)
CPU	Intel Xeon 2.8GHz	_	5.6	
GPU	nVIDIA GeForce 8800GTX	768	518	92.5

計算結果を Table 3-2 し示す。

Table 3-2 計算結果

	Meshes /Assembly 10 x 10	Meshes /Assembly 20 x 20	k <sub>eff</sub> 20 x 20
CPU :Xeon 2.8 GHz	34.1s	162.3s	1.03372
GPU :GeForce8800GTX	0.8s	3.2s	1.03379
CPU/GPU	42.6	50.7	0.99993

結果より、本計算コードは CPU に対して 50 倍ほどの高速化ができた。50 倍の加速率で あれば、計算完了に1時間要する計算を約1分で計算できることになる。これは現在レフ アレンス計算として用いられているような計算が、十分に実用計算に耐えられると考えら れる加速率である。

Table 3-2 より 50 倍速の結果が得られたが、Table 3-1 をみると CPU と GPU のピーク性能 比はおよそ 90 倍であるので、今回の実装では GPU のピーク性能が引き出せていないこと がわかる。これは以下のことが原因と考えられる。

1. PCI Express を通した通信の存在

今回開発したコードでは、拡散計算の終了の同期を CPU で行っているため、大きな データ通信こそないものの、ボトルネックとなりやすい通信を含んでいる。このこと がピーク性能を引き出せなかった一番の要因だと考えられる。

2. 体系の規模、メモリー使用量とピーク性能の関係

一般に並列計算の効果は並列化率に支配される。「Gustafson の法則」によれば、こ の並列化率は問題の規模を大きくすることにより改善されることが多く、より詳細な メッシュをとる、または問題を3次元化するなどの方法でさらなる高速化が図れると 期待できる。

# 4. まとめ

核計算手法の高精度化に伴う計算時間増加の問題を解決するために、GPU を用いた計算 高速化を考え、それを実現するための最適なプログラミングモデルを模索・検討した。また 実際に GPU 上で動作するプログラムを開発し、検証計算により高速化の評価をおこなった。

GPU 上にて高速化を実現するための最適なプログラミングモデルは以下の通りであった。まず、PC 全体というシステムの観点から、PCI Express を通した遅いデータ通信によるボトルネックを回避するため、GPU で閉じたプログラムを作成することが大原則であるということがわかった。また、GPU のアーキテクチャは超並列計算向きであるということがわかった。

これらの計算をソフトウェア的に実現するために、CUDA という統合開発環境を用いた。 CUDA では CPU がプログラムを制御、GPU が計算を処理するというプログラミングモデル を採用している。また、超並列計算を多数のスレッドを発行することで実現することがわ かった。

以上のプログラミングモデルに則した中性子輸送計算コードの開発し、検証計算を行ったところ最大 50 倍程度の高速化を図ることができた。

この結果から、十分実用に耐えられる高精度核計算コードの開発が期待できる。

# 5. 参考文献

- <sup>1</sup> Kodama, Y., Yamamoto, A., Yamane, Y., Ohoka, Y., Tatsumi, M.: "Application of a game console for fast reactor physics computation." ANS Winter Meeting (November 2008)
- <sup>2</sup> 青木尊之, "マルチモーメント型高精度流体計算スキームとGPUアクセラレータによる超高速計算,"第26回NEC・HPC研究会, (2008).
- <sup>3</sup> NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture Programming Guide, NVIDIA Corporation, (2007).
- <sup>4</sup> Argonne Code Center: "Benchmark Problem Bool (11. multi-dimensional (x-y-z) LWR model)," ANL-7416, Suppl. 2, Argonne National Laboratry (1977).
- <sup>5</sup> 坂牧 隆司ら, "グラフィックカードを用いた高速分子動力学シミュレーション,",次 世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2007,東京,日本,(2007).

〈第40回炉物理夏期セミナー報告〉

若手研究会報告

#### (2) 原子炉可視化ソフトウェアの研究開発

東京工業大学大学院 理工学研究科 原子核工学専攻 関本研究室 修士課程2年 奥井翔大

#### 背景

原子炉の構造は複雑であり、平面図と数値によって表された情報だけではその3次元的 なイメージを掴みにくいという問題があった。原子炉の構造を平面図だけを用いて他者に 正確かつ容易に伝えることは困難、もしくはそのために必要以上の時間と労力が費やされ るという恐れがあった。原子力関連メーカーや大規模研究施設等においては、原子炉を3 次元グラフィックスに、もしくはアニメーションとして可視化するソフトウェアも存在す るが、例外なく非常に高価で高機能であるため、一研究者が容易に利用するためには敷居 が高すぎるという問題がある[1]。そこで本研究では、3次元グラフィックスなどの特別な 知識を必要としない、簡単なパラメータ入力と簡単な操作によって原子炉の構造を3次元 に描写する原子炉可視化ソフトウェア Visual Reactor(VR)を開発する事にした。さらに原 子炉の構造と核的または熱的な特性、例えば中性子束分布や温度分布などを一緒に表示す ることができれば原子炉専用のソフトウェアとしての期待度は増す。よって VR の主な機能 は原子炉構造の描写、核・熱特性の解析、核・熱特性の描写の3つになる。

#### 目的

簡易な操作によって原子炉の全体像を掴む手助けとなるような原子炉構造の描写機能と 核・熱解析機能を備えたソフトウェアを開発する。

#### ソフトウェアの概要

VR は操作を簡単にするためにグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)を採用している。GUI とはグラフィック上に表示したウィンドウを用いて、基本的な操作の大半をマウスによって行うインターフェースのことである。ウィンドウ上に多くの情報を表すことができるので直観的な操作が可能となる。また扱い易くするために比較的性能の低いパソコン、例えばノート PC などでも利用可能とし、OS は Windows を採用した。3 次元 CGの描写には DirectX を使用した。VR の操作の手順を簡単に示すと、まず原子炉の構造を描写するためのパラメータを入力し描写させる。次に核・熱特性を解析するためのパラメー

タを入力し計算する。そして最後に計算結果を原子炉の構造とリンクさせて表示するとい う流れになる。ここで計算に時間が掛かり過ぎてしまうと計算結果が反映されるまでにタ イムラグが発生してしまい、操作性を著しく悪くしてしまう。そこで VR に組み込む解析コ ードは計算に時間が掛からないようにする必要があり、体系を簡略化することによって計 算コストの削減を図った。この計算コードはもちろん詳細な計算には使えないが、VR の最 大の目的である「簡易的な操作で原子炉の全体像を表す」に添ったものとなり、炉特性の おおざっぱな全体像を示すものとなる。

#### 原子炉構造の描写

簡易的な操作によって原子炉の構造を3次元的に描写する。平面図では無く立体的に描 くので個々の部品の位置関係を理解しやすくなる。原子炉の構造は球、半球、円柱、直方 体と扇柱を組み合わせて形成する。構造を作る手順は球などの基本となる形状を選択して 座標や大きさなどのパラメータを入力して個々の構成要素を作成していく。例として円柱 のパラメータ入力画面を Fig.1 に、描写された3次元 CG を Fig.2 に示す。原子炉の構造を 再現するには配管が必要になってくるが、それについては配管の太さと配管の通る座標を 入力することによって描写する。上記の5種類の基本となる形状に分解できる物体であれ ば原子炉はもちろんのこと、建屋やポンプなども描写することができる。



Fig.1 円柱のパラメータ入力例



Fig.2 円柱の描写例

鉛ビスマス長寿命小型安全炉(LSPR)についての描写例を示す。LSPRの断面図は Fig.3 のようになり、SG が圧力容器内に設置してあるインテグラルタイプとなっている。平面図 だけでは炉全体の立体的なイメージが湧きにくいが VR を使用して3次元的に描写すると Fig.4 のようになる。特定の部分だけ描写することができるので Fig.5 のように圧力容器を 除いた内部の様子も表示することができる。また、マウスでドラッグすることによってカ メラの位置を自由に変えることができ、さらにマウスのホイールによって拡大縮小するこ とができるので、様々な角度から見ることができる。このように VR の構造の描写機能は原 子炉構造の理解を深めるのに大きな助っ人となる。特に原子炉の構造を相手に説明するよ うな場合にはこの VR を使用すれば質問に柔軟に対応することができ、大きな威力を発揮す



Fig.3 LSPR の断面図



Fig.4 VR での LSPR 描写例



Fig.5 LSPR の描写例



Fig.6 LSPR の描写例(上部)

#### 計算コード

VR に組み込む計算コードでは中性子束分布や出力密度分布などの核特性と温度分布な どの熱特性を解析し、その結果を3次元 CG として描写する。VR は炉物理を専門としてい る以外のユーザーにも扱いやすく設計しているので、計算コード部分もそのようにする必 要がある。まず、計算コードが扱いにくくなる原因の一つとしてインプットのパラメータ の多さがあげられる。知識のある人にしか決め難いエネルギー構造や空間メッシュの分割 数などのパラメータにはデフォルトの値をあらかじめ用意し、特にそういった項目を入力 する必要無く扱えるようにした。また、本計算コードはインプットを入力してすぐさまア ウトプットに反映されるようなインタラクティブな操作性を確保する必要がある。計算結 果が表示されるまでに多大な時間がかかってしまっては使い易いソフトウェアとはいえな い。そこで物理モデルを簡略化することによって計算量の削減を図った。

本研究では、計算コード開発の第一段階として高速炉のセル計算について検証した。計 算量を削減するために均質なセルを扱い、非均質効果は扱わないようにした。まずSRAC[2] を利用して 10MeV~0.414eVまでの 74 群の無限希釈断面積 $\sigma_{\infty}$ を計算し、ファイルの形に して用意する。同様に自己遮蔽因子f( $\sigma_{0}$ ,T)も背景断面積 $\sigma_{0}$ と温度Tをパラメータとしたテ ーブルの形で用意しておく。あるマテリアルの微視的断面積を求める際にまず、それぞれ の核種について式2で背景断面積を計算し[3]、自己遮蔽因子を内挿して求める(式1)。そしてそれぞれの核種について微視的断面積が求まったら巨視的断面積を求め、式3を用いて無限体系でのスペクトルを計算し断面積を縮約する。

$$\sigma_n = \sigma_{\infty,n} f(\sigma_{0,n}, T). \tag{1}$$

$$\sigma_{0,n} = \frac{1}{N_n} \sum_{m \neq n} (N_m \sigma_{t,m}).$$
<sup>(2)</sup>

$$\Sigma_t \phi_g = \sum_{g'} \Sigma_{s,g',g} \phi_{g'} + \frac{\chi_g}{k_{\inf}} \sum_{g'} \nu \Sigma_{f,g'} \phi_{g'}.$$
(3)

ここでセル計算の計算例を示す。計算対象として酸化物燃料、Na冷却高速炉を選んだ。 Kinfの比較した結果を Table.1 に載せる。SRAC と比較して誤差は-0.870%となった。Fig.7 と Fig.8 に少数群巨視的捕獲断面積と少数群巨視的核分裂断面積を載せる。誤差は捕獲断面 積の1群で7%ほどになったが、他は1%以内になった。同様に Fig.9 にエネルギースペク トルを載せる。

Table. 1 Kinf の比較				
コード Kinf				
VR	1.24412			
SRAC	1.25494			
誤差	-0.870%			





Fig. 9 エネルギースペクトル

VRの計算コードにはセル計算以外にも中性子拡散計算、燃焼計算それから熱計算機能も 追加する予定である。それらについても計算時間を少なくするための工夫が必要である。

### まとめ

原子炉の構造を3次元CGで描写する機能、及び原子炉の特性を解析する計算コードと 解析結果を表示する機能を兼ね備えたソフトウェアVisual Reactorの開発を行っている。 VR は簡易な操作でこれらのことが行えるように設計しているために扱いやすいものとな っており、原子炉物理の研究者の助けとなり教育の現場でも有効になることが期待できる。

### 参考文献

- [1] 春日章治、原子炉可視化ソフトウェアの開発研究、東京工業大学 修士学位論文(2007)
- [2] K. Okumura, T. Kugo, et al ,"SRAC2006 : A comprehensive Neutronics Calculation Code System," JAERI-Data/Code 2007(2007).
- [3] T. Tone, "A Numerical Study of Heterogeneity Effects in Fast Reactor Critical Assemblies," J. Nucl. Sci. Technol., 12(8), 467(1975).

<第40回炉物理夏期セミナー報告>

若手研究会報告

#### サーメット燃料を用いた小型 PWR の検討

北海道大学大学院 工学研究科 エネルギー環境システム専攻 修士課程2年 平山聖

背景

当研究室では、革新的な小型原子炉であるPFPWR50の炉心解析、設計が行われてきた<sup>1)</sup>。 PFPWR50は、北方圏の都市近辺や発展途上国への設置をターゲットとしている。そのため、 熱出力 50MWの小型加圧水型原子炉とし、ワンススルー方式を採用している。これらの特 長により、設置・燃料交換等の簡易化によるコスト削減ができ、ワンススルー方式は核拡 散抵抗性の観点からも利益を得ることができる。

PFPWR50の最大の特徴として、高温ガス炉に使用される被覆粒子燃料の使用が挙げられる。被覆粒子燃料の核分裂生成物閉じ込め機構によって、より高い安全性を得ることができる。しかし、300℃以下の低温照射によって、炭素層のスウェリングが起こり、被覆粒子燃料のSiC層が破れてしまうという問題が米国のPNNLによって提示された<sup>2)</sup>。PNNLはこの問題を解決するために、燃料核をZrで固め、ペブル状の球状サーメット燃料を提案した。本研究ではこれを参考にし、被覆粒子燃料の炭素層を取り除き、燃料核を直接Zr、またはZr 化合物で覆うサーメット粒子燃料のPFPWR50への適用を検討する。

PFPWR50は燃料交換回数を減らし、無駄なく燃焼させるために炉心の長寿命化を目標と している。燃料核としてはThO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>を使用しているので、中性子スペクトルは高速側にシ フトし、通常よりも高い転換率を得ることができ、燃焼は緩やかに進む。また、これまで の研究では通常のPWRの可溶性ホウ酸のシステムを取り除き、制御棒操作を減少させるた めに、余剰反応度の制御は可燃性毒物の装荷で行ってきた。そこで燃料ペレット構成の変 更とともに炉心燃焼計算の最適化の再検討を行う。

炉心仕様

PFPWR50 は 37 本の燃料棒が装荷されている燃料集合体 85 体によって構成されている。 燃料核のThO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>の質量比は 9:1 でPuの核分裂同位体はPu-239 が 63wt%、Pu-241 が 12wt% で燃料核に対して 7.5wt%を占める。また、熱供給炉としての使用が想定されているので、 燃料温度、冷却材温度ともに発電炉と比べて低くなっている。その他、基本的な炉心仕様 をまとめたものを表1に示す。 また、私は発表において炉心サイズを尋ねられた際に、緊張のため特大のサイズを答えたと思います。正しくは今回表1に示しますように、炉心等価直径2.4m、炉心有効長1.8mです。

熱出力	50[MW]	Pu 核分裂同位体	7.5[wt%]
炉心等価直径	~2.4[m]	被覆管材料	ジルカロイ
炉心高さ	~1.8[m]	単位セル形状	六角格子
冷却材平均温度	~250[°C]	減速材	軽水
冷却材圧力	8.6[MPa]	集合体内燃料棒数	37[本]
燃料集合体数	85[体]	集合体ピッチ	21[cm]
平均線出力	9.1[kW/m]	燃料棒ピッチ	34[mm]
Th:Pu 比	9:1	燃料ペレット直径	26[mm]

表1 PFPWR50 の炉心仕様

目的

本研究の目的は、低温時の被覆粒子燃料の問題を解決するためのサーメット粒子燃料の 適用性の調査と、長期運転・余剰反応度抑制を目指した燃料装荷パターンの検討である。

まず、サーメット粒子燃料の適用についてであるが、図1に示すPNNLの球状サーメット 燃料を参考にしている。Zr金属で燃料核を被覆し、それをZrまたはZrH2の基盤に埋め込むこ とによって、燃料ペブルを形成している。対して、本研究ではZrとZrH2、加えて耐熱性セラ ミックスとして使用されているZrO2(ジルコニア)を被覆層とし、炭素充填層で固めて燃 料ペレットを形成する。つまり、図2のように従来のPFPWR50の燃料コンパクトから被覆 粒子燃料の被覆層の変更を検討する。これらZr、ZrO2、ZrH2に対して単位セル燃焼計算を行 い、被覆層の決定を行った。また、PFPWR50の燃料核はThO2-PuO2であるが、このセル計 算ではより一般的な核燃料であるUO2燃料(濃縮度 5.0wt%)を用いて解析を行った。

被覆粒子燃料からサーメット粒子燃料へ変更したことにより、燃料ペレット中の炭素量 が低下し、運転寿命・余剰反応度に影響を与えていた。そこで可燃性毒物を含む集合体の 装荷パターンの再検討を行った。



解析手法

従来のPFPWR50 の解析は日本原子力機構によって開発された汎用核計算コードシステム SRAC95 (断面積ライブラリー:JENDL3.2)によって行われてきたが、本研究からSRAC2006 (断 面積ライブラリー:JENDL3.3)を使用している<sup>3)</sup>。単位燃料棒セル、燃料集合体を衝突確率法計 算モジュールであるSRAC-PIJ、炉心計算をCOREBNコードによって行った。COREBNコードは、 多次元拡散計算モジュールCITATIONに巨視的断面積内挿機能を加えた炉心燃料計算コードで あり、SRAC-PIJによって作成された縮約断面積をテーブル化して使用する。

結果

被覆層の決定のために行った単位セル燃焼計算によって得られた無限増倍率を、横軸を 燃焼期間(年数)として図3に示す。参考のために従来のTRISO型粒子燃料の結果を黒線で 掲載してある。青線のZr金属、赤線のZrO2の結果と比較すると、炭素量が減少したため燃焼 を通して増倍率が低下している。3つのサーメット被覆層で他のものと最も大きな差がある のは緑線で示したZrH2である。計算前の予想では水素が含まれているため、燃焼初期はZrH2 が最も大きい増倍率を示すと考えていた。しかし、結果は燃焼期間6年程度まではZr金属、 ZrO2とほぼ同じ燃焼特性を示し、その後大きく低下している。この理由を探るために、図4 の燃焼初期における中性子スペクトル(最大値を1に規格化)、図5の燃焼期間に対する 生成断面積 $\nu \Sigma_f$ から考察を行う。図 4 から計算前の予想通り、燃焼初期においてZrH<sub>2</sub>によ る燃料を用いると水素の効果によって、他の2つの被覆層を用いた場合よりも十分に減速 されていることが読み取れる。そのため、図 5 の生成断面積も燃焼初期において大きな値 を示している。つまり、核分裂が起こりやすくなっており、そのため低下も早い。これが 無限増倍率の燃焼期間 6 年目以降の低下に影響していると思われる。燃焼初期の無限増倍 率については図 5 の生成断面積に加えて図 6 に示す吸収断面積 $\sum_a$ を見ることで説明ができ る。図 6 よりZrH2の燃焼初期において非常に大きな吸収断面積が見られる。これが生成断 面積の初期の大きな値と打ち消し合った結果、図3の無限増倍率となる。つまり、3種類の

被覆層による燃料で燃焼初期はほぼ同様の核反応が起こっているように思えるが、ZrH<sub>2</sub>は 核分裂と吸収のバランスが偶然に一致し、他の2つの無限増倍率と重なったと考えられる。



図4 中性子スペクトル (燃焼初期)



本研究の最大の目標は1 バッチでの可能な限りの長期運転である。上記の解析結果から この目標に反するZrH<sub>2</sub>は被覆層として不適であることが分かった。Zr金属、ZrO<sub>2</sub>については 図 3~6 に示した結果はほぼ同等であった。FP閉じ込め能力・熱的特性等を調査すればどち らが適しているかを決定することができるであろうが、本研究の次のステップである燃料 装荷パターンの決定は極端な話、実効増倍率にのみ着目している。上で得られたデータが ほぼ一致していたので、例えばZr金属を採用した燃料装荷パターンは被覆層をZrO<sub>2</sub>に変更し てもその結果をそのまま適用できるであろう。そこでとりあえずZr金属を選択し、次に進む ことにした。

燃料装荷パターンの検討に当たって、上の結果を基に2つの燃料コンパクトを検討する。 まずPNNLによって提示されたサーメット燃料により近い、燃料核をペレット上のZr金属基 盤中に埋め込んだ図7の燃料コンパクト。もう一つは、日本原子力機構でTRISO型被覆粒子 燃料の被覆層として検討されているZrC<sup>4)</sup>を用いて黒鉛粉末で固めた図8に示す燃料コンパ クトである。また本研究では被覆層としての炭素のスウェリングを懸念しているのでTRISO 型でなく燃料核を直接ZrCで覆う。燃料核を上の解析で使用したUO2燃料からPFPWR50で使 用されているThO2-PuO2に変更してZr金属、ZrO2、ZrCに対して同様の計算を行ったところ、 3 つの無限増倍率はほぼ一致した。以下、図7をZrサーメット燃料、図8をZrC粒子燃料と する。



まず、ZrC 粒子燃料、Zr サーメット燃料を用いた燃料集合体の無限増倍率を燃焼度に対 して、図 9 に示す。ほぼ同じ燃焼特性を示しているように見えるが、燃焼が進むにつれて 徐々に双方の差が表れ始めている。しかし、炉心運転寿命である増倍率が 1 の時点でその 差は 1%∠k 程度である。全炉心を対象に解析を行うと中性子の洩れの効果から、もう少し 早い期間で寿命を迎えるので、その差はより小さくなる。よって一方で燃料装荷パターン を決定できれば、もう一方に適用しても問題ないと思われるので以降、ZrC 粒子燃料に対し て装荷パターンの検討を行う。



PFPWR50 は可燃性毒物としてGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用いて余剰反応度の抑制を行っている。今回の解 析では集合体当り 37本の燃料棒について、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度 1、2、3wt%と制御棒案内管(ガイド チューブ:GT)を含む本数を変更し、表 2 に示す計 7種の燃料集合体を用意した。

夕称	燃料のみ	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度[wt%]			СT	<b>生</b> △休粉	
石柳		1	2	3	01	未口仲奴	
FU	37					6	
Gd1	19	18				18	
Gd2	19		18			13	
Gd3-a	25				12	12	
Gd3-b	19				18	12	
GT	25					12	
GT+Gd	19				6	12	

表2 各集合体の燃料棒本数

表2の燃料集合体を用いて組んだ炉心が図10である。また比較として、図10の炉心からGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を取り除いたものが図11である。これら2つの炉心に対して計算した実効増倍率を図12に示す。Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含まない図11において26000MWd/t相当の7.2年の運転寿命に対して、図10の炉心は23000MWd/t相当の6.5年の寿命が得られた。また、余剰反応度についてはサイクルを通して3.5%/k以下に抑えられている。

反応度評価として、ドップラー係数、減速材温度係数の評価を行った。各反応度係数について、いくつかの燃焼度点において評価したところ、表 3 に示される結果が得られた。 ここで燃焼度点 3,500MWd/t は図 12 に見られるように燃焼初期の実効増倍率が一時低下し ている点である。また燃焼度 1,8000MWd/t は燃焼中期から末期にかけての若干高い増倍率 を示す点である。どちらの反応度係数も現行の PWR と同程度の値を示しており、十分に満 足できる値であると考えられる。

表 4 は燃焼初期、CZP におけるワンロッドスタック時の実効増倍率である。対称性を考慮して図 13 の a,b,c について部会での報告の後評価を行った。表 3 のように c の集合体の制御棒引き抜けがおこった場合、原子炉を停止することができないことがわかった。

しかし、最近の研究で新たに組み上げられた炉心は、サイクルを通してすべての制御棒 引き抜けに対して、1%∠k/k以上のスタックロッド余裕を持っている。



燃焼度[MWd/t]	ドップラー係数[pcm/℃]	減速材温度係数[pcm/℃]			
 0	-3.5	-27.0			
3500	-2.7	-22.7			
18000	-3.0	-26.0			
25000	-3.5	-32.1			

表3反応度係数

表 4	ワンロ	ッドスタ	ック言	評価	
宝动	IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII	(ワンロ	ッドフ	スタック	時)

	а	b	с		
BOC	0.9894	0.9930	1.0161		



図13制御棒引き抜け位置

#### 結論

今回掲げた 2 つの目的のうち、一つ目の被覆粒子燃料の問題点については、サーメット 燃料の使用の検討を行った。その結果、燃料コンパクト中にZrH2を含むと、増倍率を早期 に低下させてしまい、本研究の最大の目的である運転寿命の長期化に反するということが 分かった。そこで、新しい燃料コンパクトとして、Zrサーメット燃料、ZrC粒子燃料を提案 し、ZrC粒子燃料を用いて装荷パターンを検討したところ 6.5 年の炉心運転寿命が得られた。 また、ドップラー係数、減速材温度係数ともに、十分な負の値を示している。今回掲載し た炉心は十分な炉停止余裕を示さなかったが、最近の研究における新しい炉心ではこの問 題を解決済みである。 参考

- 1. 谷平出帆:「Th-Pu 被覆粒子燃料を用いた小型 PWR の長寿命化に関する研究」 修士論文 北海道大学大学院 工学研究科 (2006)
- 2. Georgi Tsiklauri (Pacific Northwest National Laboratory, WA, USA) : COATED PARTICLES FUEL FOR SMALL LIGHT WATER REACTOR ]
- 奥村啓介、金子邦男、土橋敬一郎:「SRAC95;汎用核計算コードシステム」、 JAERI-Data/Code 96-015(1996)
- 4. 高山智生、植田祥平、相原純、安田淳、石橋英春、沢和広:「ZrC 被覆燃料粒子検査手 法の検討」JAEA Research (2007)