(P15) 連続エネルギーモンテカルロコードを用いた KURの中性子スペクトル及び金のカドミ比の計算

(京大原子炉) 茶谷 浩

1. はじめに

原子炉の中性子スペクトルを知ることは、中性子の振舞いを理解することや、照射場の中性子特性を 知る上で興味あることである。またこのような中性子スペクトルは高速中性子領域における(n,p)や

(n, α)のようなしきい反応の平均断面積の計算などにも利用できる¹⁾。ここでは連続エネルギーモンテ カルロコードMonte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C (MCNP-4C)²⁾を用いて、京都大学研究用原 子炉(KUR)の炉心(Core)及び照射設備である水圧輸送管(Hyd)、圧気輸送管(Pn)、傾斜照射孔(Slant)及び黒 鉛設備圧気輸送管(TC-Pn)について、中性子スペクトル及び金のカドミ比を計算した。またカドミ比につ いては実験値との比較を行った。

2. 計算モデル

2-1. 炉心の構成元素

KURの濃縮ウラン燃料は、U-235の燃焼度を平均25%としている³ことを考慮して、ここでは25%の 半分である12.5%燃焼済の公称93%濃縮ウラン燃料を想定した。核分裂生成物(FP)はウランの燃焼に 伴い生成しているが、ここではFPは無視している。燃料の燃焼によるU-235の減損分は計算上アルミニ ウムで補填した。炉心の主な構成核種等はU-235、U-238、AI、H2Oである。計算にあたっては、これら核 種や元素が均一に混ざり合っているとし、原子数の比及び炉心の平均密度を第1表の通りにした。なお 軽水を減速材とする格子系(非均質炉)では燃料の間隔・直径(KURでは燃料板間隔・厚さ)が減速領 域における中性子の平均自由行路(Mean free path)に比べて小さいので、格子系を燃料と減速材の均質 な混合物として扱うことが出来る⁴⁾⁵⁾。このような原子炉を準均質炉(または半均質炉:Semi homogeneous reactor)と呼ぶ。ちなみに軽水中における中性子の平均自由行路は数eV以上では約6.7 mmを超える。 第1表には炉心のほか反射体や照射用カプセルの元素組成等も原子数の比で示している。

2-2. 炉心の大きさ

実際の炉心には負の反応度に寄与する制御棒や長期照射用プラグ等があり、さらにキセノンやサマリウム等の中性子毒物も存在している。しかし計算ではこれらの存在は無視している。従って実際の炉心の大きさでは臨界超過になってしまうため、第1図の計算モデルに示すように、縦横それぞれ32、36 cm、高さ38 cm の炉心を想定した。発生する中性子は Maxwell 型の核分裂中性子スペクトルを持ち、炉心の中で均一に発生すると仮定している。また炉心タンクは方形で実物に比べると極端に小さいが、軽水層の厚さは炉心の上下や黒鉛反射体等の表面から10 cm 以上とってある。これは軽水中における中性子の拡散距離約2.8 cm の3 倍を超えている。従って、中性子の振舞いを計算する上ではこの大きさで問題ないと考えられる。Hyd カプセルは内径2 cm 内高10 cm 肉厚はボートも含めて4 mm のアルミニウム製とし、カプセルの中と外は軽水で満たした。実物のHyd プラグの一辺は約7.7 cm であるが、アルミニウムの枠等を考えて一辺を7 cm とした。Pn カプセルと Slant 容器はそれぞれ厚さ2 cm、1 cm の板状を想定したが、これは出来るだけ中性子の軌跡を多く集めるためである。Pn カプセルの中身は空気とし、カプセルは厚さ2.5 mm の高密度ポリエチレン製で、その周囲は気送パイプや構造材を模擬した厚さ4 mm のアルミニウムで囲い、さらにその外側は炭酸ガスとした。Slant は厚さ3 mm のアルミニウムで囲い、内部は全て軽水である。

3. 中性子スペクトルの結果と考察

第2-1 及び2-2 図に中性子スペクトルの計算結果を示す。この計算では1keVを境にレサジー(Lethargy: エネルギー対数の減少)幅を変えている。0.001 eV 以上1keVまではレサジー幅を0.2231 とし、1keV以 上20 MeVまでは0.1108 とした。このことは単に中性子スペクトルを見やすくする為である。特に1keV 以上では炉心を構成する元素の影響が見られる為、レサジー幅を小さく取っている。本計算のヒストリ ーは179 万であるが1 個の線源中性子は平均約 69 回の核分裂を誘発し、中性子の全発生数は即発中性 子および鉛などの(n,2n)反応等による増加分を加えて30256万であった。なお Core のスペクトルは Core 全体の平均であり、Pn は Pn-1, -2, -3 の平均(Pn-1+2+3)である。後述する金のカドミ比(以下単に Cd 比) を計算するための 253 群の中性子束も、このとき同時に計算した。

TC-Pn のスペクトルは第1図のモデルでは統計精度が劣るため、別途TC-Pn 計算専用に直径 35 cm の 球形の炉心を考え、その周囲に厚さ18cm の鉛の殻、さらにその周囲に厚さ5 cm のグラファイト層の殻 を積層して直径 3.2 m の球体系を想定した。この球体系を用いて Cd 比と中性子スペクトルをグラファ イト層中5 cm 間隔で求めた。こうして求めたグラファイト殻の Cd 比(数個)と、先に第1図の計算モ デルを用いて計算した TC-Pn の Cd 比(1個)とを比較して、最も一致する Cd 比をもつグラファイト殻 における中性子スペクトルを、第2-1、2-2 図の TC-Pn のスペクトルとしてプロットした。このとき第1 図を用いて求めた熱中性子領域における TC-Pn のスペクトルに、球殻から求めたスペクトルを規格化し た。なお TC-Pn 専用の計算とストリーは 156 万、1 個の線源中性子による核分裂誘発は約57 回であり、 (n,2n)反応等を含む全中性子発生数は 8956 万であった。

4. 金のカドミ比の計算

Cd比 (R_{Cd})の定義は、裸で照射した金の反応率をR、Cdでカバーして照射した金の反応率をRとすれば

$$R_{Cd} = \frac{R}{R} \tag{1}$$

である。ここで

$$R = \int_{E_1}^{E_2} \phi(E)\sigma(E)dE$$
(2)
$$R' = \int_{E_1}^{E_2} \phi(E)\sigma(E)dE$$
(3)

と表すことが出来る。ここでEは中性子エネルギー、 $\phi(E)$ は中性子束、 $\sigma(E)$ は金の捕獲断面積。 E_{Cd} は カドミカットオフエネルギー (Cd-cutoff energy) であり約 0.5 eV である。ここでは $E_{Cd} = 0.478$ eV とし た。これは後述するように中性子エネルギーを 253 群に分割した場合 0.5 eV が中心点 (Mid point) とな るエネルギー幅の低い方の値である。いづれにしても E_{Cd} がこのエネルギー近傍で 0.1 eV 変わったとし ても、試算によればCd比は 0.6 %の変化でしかない。 E_1 は積分の下限エネルギーであり、Evaluated Nuclear Data File, Version 6 (ENDF/B-6)の金の捕獲断面積データの最小エネルギーに相当する 1×10⁻⁵ eV とした。 E_2 は積分範囲の上限のエネルギーであり出来るだけ高く取る方がよいが、ここでは 535 eV までとった。Cd比を計算するための中性子束は 1×10⁻⁵ ~535 eV の範囲を 253 のグループに組分けし た。この組分けは、断面積が中性子の速度に逆比例して(1/vに従って)単調に減少する 0.5 eV 以下の 領域では粗く、共鳴ピークの複雑な部分ではその形状を再現するように細かくおこなった。第 3 図はこ の 253 群に組分けしたエネルギーをENDF/B-6 のAu(n, γ)Au-198 反応断面積上にプロットしたものであ る。MCNPで計算したあるエネルギー幅の中性子束に、そのエネルギー幅のMid pointに相当する断面積 を掛け合わすことで、そのエネルギーの中性子に対応する反応率が計算される。この様にして算出した 反応率を上式に従って積分することで*R* および*R'*を求めた。

5. Cd 比の結果と考察

式(1), (2), (3)から分るように E_2 が大きくなるに従って、 R_{Cd} は小さくなる。その関係は計算した範囲内において第(4)式のようになった。

$$R_{cd} = a1 - a2 \bullet \ln(E_2)$$
 (E₂: eV) (4)

(4)式の定数a1、a2 は各照射設備について第2表の通りである。この定数は253 群中 E_2 =74 eV ~ 535 eV の範囲でCd比を9点計算してベストフィットさせて求めたものである。その様子をCoreの場合について第4図に示す。Cd比の結果は第3表に過去の実験値と共に、 E_2 =535 eV のCd比を(括弧)付きで、第(4) 式を使って E_2 =500 keVまで外挿した値を(括弧)無しで示した。第4図は明らかに E_2 の増大に伴って R_{Cd} が減少する傾向を示しているので、本MCNPによる計算結果は E_2 =500 keVにおける値とする。なおMCNP計算の誤差は考慮していない。

Cd比はWestcott's epithermal index ^のと密接に関係しているので Epithermal index が求まればCd比を求 めることが出来る。第3表の実験値の多くはこの方法で求めている。Pn-2のCd比はEpithermal indexから 求める方法とAuにCdカバーをして求める方法の両方で測定したものである。Slantについては照射容器 が比較的大きく炉心からの距離を特定しにくいが、実験は出来るだけ照射容器の中心で照射するように している。HydとSlantについては実験値と計算値はよい一致を示した。Pn-2 については計算値が 16%程 度大きく出ている。このように計算値が大きく出た理由として、計算モデルの炉心は実物の大きさ約 (40 ×45×59(H) cm) に比べれば小さいので、特にPnの近傍では回りこみの中性子が考えられ、Cd比が大き くなったものと考えられる。Slantは本来の位置より炉心からの中性子が多くあたる位置に設定したため、 実験値と計算値が一致したともの考えられる。Coreについては実験値が無く、TC-Pnの実験値は 1 回分 でしかも不十分であるので、この2カ所については考察の対象にしない。Cd比は中性子スペクトルに依 存するので、炉心からの距離、減速材温度、炉心燃料配置、照射カプセル位置の再現性などによって変 わる。このため細かい数字の議論はできないが、MCNPによる計算は大まかなCd比を求める上では有用 であることがわかった。

謝 辞

MCNP-4C のインストールについては宇根崎博信助教授のご協力を得ました。 ここに感謝いたします。

材料	構成核種または元素およびそれらの原子数比			密度 (g/cm ³)
炉心	U-235: 0.002946 U-238: 0.0002493	Al-27: 0.672 H-1: 1.0	O-16: 0.5	1.76
グラファイト	C-12: 1			1.79
水	H-1: 2	O-16: 1		1.0
鉛	Pb: 1			11.344
アルミニウム	Al-27: 1			2.697
高密度ポリエチレン	H-1: 2	C-12: 1		0.942
炭酸ガス	C-12: 1	O-16: 2		1.9769e-3
空気	N-14: 0.784	O-16: 0.211	Ar: 0.005	1.293e-3

第1表 計算モデルの構成材料

注) 1.9769e-3 は 1.9769×10⁻³ を表す

第2表 照射設備と(4)式の定数

照射設備	<i>a</i> 1	<i>a</i> 2
Core	1.696	0.01436
Hyd	3.112	0.02357
Slant	6.487	0.04305
Pn-2	3.050	0.02432
TC-Pn	444.6	2.916

	Core	Hyd	Slant	Pn-2	TC-Pn
過去の実験値		$2.53 \pm 0.06 * {}^{7)}$ $2.73 \pm 0.19 * {}^{8)}$	$\begin{array}{c} 6.3 {\pm} 0.3 * {}^{7)} \\ 5.44 {\pm} 0.38 * {}^{8)} \end{array}$	$2.22 \pm 0.06^{7)} \\ 2.38 \pm 0.17^{*8)}$	>62 * 9)
MCNP による 計算値	(1.61) 1.51	(2.96) 2.80	(6.22) 5.92	(2.90) 2.73	(426) 406
C/E		1.06	1.01	1.19	<6.5

第3表 Cd比の実験値と計算値の比較

*: 実験から求めたWestcott's epithermal index ($r\sqrt{T/T_0}$)を(5)式に当てはめてCd比に換算した値。

$$R_{Cd} = \frac{g + s_0 r \sqrt{T/T_0}}{r \sqrt{T/T_0}} \left[f_\delta s_0 + \frac{g}{K} \right]^{-1}$$
(5)

ここで g=1, $s_0 = 17.2$, K=2.0738, $f_{\delta}=1$, これらの詳細は参考文献 10) を参照



第1図 計算モデルと主要な 寸法 (cm)。矢印の出発点は 全て中心線。

炉心および反射体の高さは 38 cm 。Hyd, Slant, Pn-1, 2, 3 の縦方向の位置は炉心の縦 方向中心位置。カプセルの長 さ(高さ)はHyd, Pn は 10 cm、 Slant は 5 cm。黒鉛熱中性子 柱の高さは 1 m、鉛熱遮蔽体 の高さは 70 cm とした。 TC-Pn は統計精度を上げる ため(40×30(H)×10 cm)の 大きさとした。





第 3-1 図 ENDF/B-6のAu(n, γ)Au-198 断 面積上にプロットした中性子エネルギー 253 群 。



第4図 Coreの場合について、第(2), (3) 式の積 分範囲の上限 (E_2)を変えた場合のCd比の変 化。直線(第(4)式)は●を用いて計算を行った。 〇は $E_2 = 32.7 \text{ eV}$ として、4.9 eV の共鳴ピーク までを使ってCd比を計算したもの(直線の計算 には加えていない)。

参考文献

1) 小林捷平,松下録治,吉田博行,小山睦夫,中川益夫,岡田守民 他,京大研究炉 (KUR)実験照射 設備における中性子スペクトルの測定,KURRI-TR-287, Jan. (1987).

 10^{5}

2) Contributed by Los Alamos National Laboratory, "Monte Carlo N-Particle Transport Code System" (2001).

3) 原子炉設置変更承認申請書(研究用原子炉), 京都大学原子炉実験所 (平成8年5月).

4) 石森富太郎 編, 原 子炉工学講座 3 = 原子炉物理 (1973) pp. 109 – 110.

5) ラマーシュ著(武田充司, 仁科浩二郎 訳), 原子炉の 初等理論 上 (1974) p. 438.

6) C. H. Westcott, W. H. Walker and T. K. Alexander, [•] Effective Cross Sections and Cadmium Ratios for the Neutron Spectra of Thermal Reactors", Proc. 2nd. Int. Conf. Peaceful Use of Atomic Energy, Session A-11, P/202 (1958) pp. 70-76.

7) Hiroshi CHATANI, "Measurements of the Westcott Conventionality Thermal Neutron Flux and Suchlike at Irradiation Facilities of the KUR", JAERI-Conf 2003-006 (2003) pp. 241-246.

8) Hiroshi Chatani, "Measurement of Effective Cross Section of Th-233(n, γ)Th-234 Reaction Using the KUR", Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, New Mexico, USA, 26 Sept. – 1 Oct. (2004) Proceedings pp.664-667.

9) 茶谷 浩, • KUR 照射設備の中性子束測定(II) 黒鉛設備圧気輸送管 (TC-Pn), z第 36 回京都大学原子 炉実験所学術講演会,報文集(P/14) (2002) pp.161-166.

10) 茶谷 浩, • KURの水圧輸送管(Hyd)および圧気輸送管(Pn)照射カプセル内の中性子束分布, Epithermal index, Westcott流熱中性子束の測定, KURRI-TR-432 (2001).

Calculation of Neutron Spectra and Cd-Ratios of Au in the KUR Using a Continuous-Energy Monte Carlo Code HIROSHI CHATANI