

<概要>

原子炉物理の理解のための前提条件として原子と原子核についての基本的な知識と、原子核から放出される放射線と物質の相互作用について知ることが必要である。この分野を原子核物理と呼んでいるが、本タイトルは原子核物理の基礎としての「原子核の構造」<03-06-03-01>に始まる一連の内容についてシリーズ形式で記述したものであり、シリーズ物が総合されてサブタイトルの「原子核の物理」編として完結する。

<更新年月>

2006年06月

（本データは原則として更新対象外とします。）

<本文>

1. 断面積

1.1 ミクロ断面積とマクロ断面積

これより先我々は原子核と中性子の間の反応を定量的に扱わなくてはならない。そのために必要となる、中性子が核と反応する確率に相当する概念「断面積」を導入する。今、図1に示すように単位面積当り毎秒 j 個の中性子の流れ（個・ m^{-2} ・ s^{-1} ）が単位面積当り N_0 （個・ m^{-3} ）の原子を含むきわめて薄い標的（厚さ dx （m））に垂直に入射しているとする。厚さが薄いということは、入射する中性子が標的の後ろの方にある原子核に達する前に減少してしまわないことを保証するための仮定である。このような状況下での単位時間、単位体積当りの反応率 R （個・ m^{-2} ・ s^{-1} ）は、入射中性子の流れの強さ j と存在する標的核の数（中性子数） $N_0 dx$ （個）に比例するはずだから、比例定数を σ と書くと（本文中の式の表示については表1 参照）

$$R = \sigma j N_0 dx \quad \text{または} \quad R = \sigma j N_A \quad \text{ただし} N_A = N_0 dx \quad \cdots (1)$$

となる。これを

$$\sigma = \frac{R/N_A}{j} = \frac{\text{単位時間当り標的核1個当りの反応率}}{\text{単位時間当り単位面積当りの中性子入射数}} \quad \cdots (2)$$

と書き直すと σ は単位時間単位表面積当りに1個中性子が入射するとき、単位時間にどれだけ数の反応が起こるかを示す量となっていることが分かる。原子炉物理では σ が面積（ m^2 ）の単位を持つことから σ をミクロ断面積と呼ぶ。そして $10^{-28} m^2$ を特別の単位とし、これをバーン（b）と呼んでいる。これは原子核の半径が $10^{-14} m$ の程度なので、その断面の面積は $10^{-28} m^2$ 程度となることに由来している。

さらに1つの原子核でもいろいろな核反応を起こすことから反応毎にミクロ断面積を定義し、 σ にそれぞれの反応を示す添字をつけてそれらを区別する。主なものには散乱断面積 σ_s 、吸収断面積 σ_a 、核分裂断面積 σ_f 、捕獲断面積 σ_c （または σ_y ）がある。この他、原子炉物理では、全ての反応断面積を総和した全断面積 σ_t がよく現れる。 σ_t は σ_s と σ_a の和として与えられる。なお、吸収断面積には核分裂断面積も含むので他の反応のない場合、 $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c$ であることに注意して欲しい。ミクロ断面積の大きさは核種によって、また入射中性子のエネルギーによって大きく変化する。核種によっては数100万バーンという大きな断面積をもつこともある。このため断面積の大きさについて、一般的に議論することはできない。

次いで図2のように、標的が単位体積当りNo個の原子を含む厚い板の場合を考え、その表面に j_0 (個・ m^{-2} ・ s^{-1}) の単一のエネルギーの中性子が垂直に入射している場合を考える。このとき、板の表面からxのところにある微小な厚さdxの部分を考え、ここでの中性子の流れを $j(x)$ と表わすと、厚さxからx+dxの間での中性子の流れの減少 $-dj$ は、 σ を全断面積とすると

$$-dj = \sigma j(x) N_0 dx \quad (\text{マイナスの記号は減少を表わす}) \quad \dots (3)$$

と表わすことができる。この式から

$$-dj/j = \sigma N_0 dx \quad \dots (4)$$

であるから、これを積分して

$$j(x) = j_0 \exp(-\sigma N_0 x) \quad \dots (5)$$

となる。 σ と N_0 の積を Σ と書いてマクロ断面積という。すなわち

$$\Sigma = \sigma N_0 \quad \dots (6)$$

である。他のミクロ断面積についても、上式と同じ形で各反応に対するマクロ断面積が定義される。ただし、 Σ は断面積という名はついていないが、実はデイメンジョンは m^{-1} で面積(m^2)の単位ではないことに注意して欲しい。また、(6)より Σ は

$$\Sigma = \frac{-dj/j}{dx} \quad \dots (7)$$

と書くことができるから、 Σ は単位長さ当りに中性子の流れが減少する割合を表わしていることが分かる。

1.2 断面積のエネルギー変化

先に述べたように断面積の大きさは核によって大きく変わると同時にエネルギーによっても大きく変化する。ここでは質量数の大きな核(重核)と、質量数の小さな核(軽核)についてミクロ断面積のエネルギー変化を原子炉物理において重要な2つの核 ^{235}U と ^{12}C を代表として見ていくこととする。質量数の中位の核(中重核)はおおむねこの両者の中間の変化を示す。

(a) 質量数の大きな核

図3に入射中性子エネルギーに対する ^{235}U の核分裂断面積の変化を示す。質量数の大きな核の断面積のエネルギー変化はおおむねこの ^{235}U の場合と同様になる。

1eV以下のエネルギーの低い領域では、断面積は $1/v$ ($=1/vE$)に比例して減少する。しかし1eV付近より上では大きな凹凸を繰り返す。これを共鳴といい、中性子のエネルギーが複合核の励起準位と一致したときに核反応が起こりやすくなることを示している(図4参照)。中性子のエネルギーが高くなるにつれて共鳴断面積のピークの高さが次第に小さくなると同時に共鳴のエネルギー幅が広がって、結果的に滑らかな断面積変化を示すようになる。そして1MeVを超えると核分裂断面積は階段状に上がっていく。

捕獲断面積のエネルギー変化も1MeV以上の高エネルギー領域で単調に減少することを除いては、この核分裂断面積と同様の变化を示す。また核分裂を起こさない核では高エネルギー領域で(n, p)、(n, α)等の荷電粒子放出反応が起こるようになる。

(b) 質量数の小さな核

図5に ^{12}C の全断面積のエネルギー変化を示す。 ^{12}C の場合、吸収断面積が小さいため、この全断面積=散乱断面積と考えてよい。質量数の小さい核はこの ^{12}C と共通したエネルギー変化を示すことが多いが、全く異なった変化を示す核も少なくない。

図5から分かる通りもっとも低いエネルギー領域(10^{-4} eV程度)ではほぼ $1/v$ に比例するエネルギー変化を示す。 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ eVの間で断面積が急激に大きくなり、その後不規則なジグザグを示す。これは、このエネルギーで中性子の波長($\lambda = h/Mv$)が炭素原子の原子間距離と同程度となり、中性子が炭素原子核とでなく、炭素原子と相互作用するようになるため、黒鉛の結晶のように物質が規則的な構造を持つとき、中性子が結晶面で回折現象を起こすためである(中性子の波長が結晶の格子面間距離の整数倍となるところで回折を起こす)。

この領域よりエネルギーが高くなると回折は起こらなくなり、核そのものの大きさで定まる断面積で反応が起こるようになる。この領域をポテンシャル散乱領域といい、断面積は広いエネルギー範囲にわたり

$$\sigma_p = 4\pi R^2 \quad (R; \text{原子核半径}) \quad \dots (8)$$

で表わされるポテンシャル散乱断面積を取る。

ポテンシャル散乱領域より上のエネルギー領域(^{12}C では1MeV以上)では ^{235}U の場合に見られ

たのと同様の共鳴散乱が起こる。ただし、散乱断面積の場合、共鳴散乱とポテンシャル散乱の間で干渉が起こるので、共鳴のピークの下側で断面積が小さくなり、上側で大きくなる特徴がある（[図4](#) 参照）。このことは遮蔽の問題において重要となる。

さらに、この領域より上の領域では、中性子の波長が原子核の大きさに比べて短くなるため、原子核と相互作用する確率が減るので、エネルギーが上がるにつれて断面積が小さくなる。しかし、核分裂連鎖反応に伴う中性子のエネルギーは最大10MeV程度なので、原子炉の解析においては非常に高いエネルギーの中性子の挙動は問題にしないでよい。

＜関連タイトル＞

- [原子核物理の基礎 \(1\) 原子核の構造 \(03-06-03-01\)](#)
 - [原子核物理の基礎 \(2\) 原子核の壊変 \(03-06-03-02\)](#)
 - [原子核物理の基礎 \(3\) 核反応 \(03-06-03-03\)](#)
 - [原子核物理の基礎 \(4\) 核分裂反応 \(03-06-03-04\)](#)
 - [原子核物理の基礎 \(6\) 放射線と物質の相互作用 \(03-06-03-06\)](#)
 - [原子核物理の基礎 \(7\) 関連用語一覧 \(03-06-03-07\)](#)
-

＜参考文献＞

平川直弘、岩崎智彦「原子炉物理入門」東北大学出版会（2003年10月）

表1 本文中で使用した式の表示一覧

表番号	式の表示
(1)	$R = \sigma_j N_0 dx$ または $R = \sigma_j N_A$ ただし $N_A = N_0 dx$
(2)	$\left[\sigma = \frac{R/N_A}{j} = \frac{\text{単位時間当り標的核 1 個当りの反応率}}{\text{単位時間当り単位表面積当りの中性子入射数}} \right] \quad (1.52)$
(3)	$-dj = \sigma_j(x) N_0 dx$ (マイナスの記号は減少を表わす) (1.53)
(4)	$-dj/j = \sigma N_0 dx$ (1.54)
(5)	$j(x) = j_0 \exp(-\sigma N_0 x)$ (1.55)
(6)	$\Sigma = \sigma N_0$ (1.56)
(7)	$\left[\Sigma = \frac{-dj/j}{dx} \right]$
(8)	$\sigma_p = 4\pi R^2$ (R; 原子核半径)

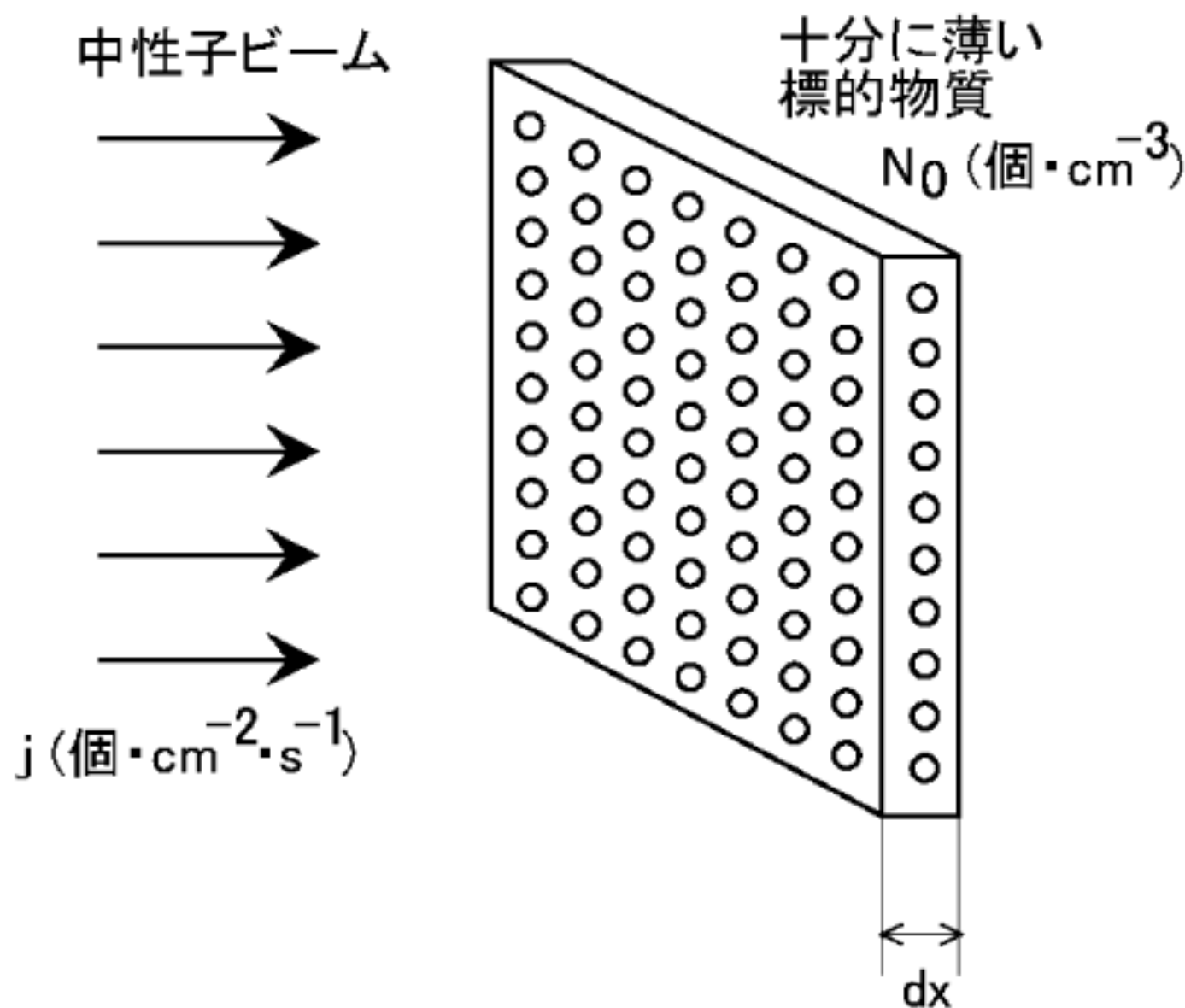


図1 薄い標的物質に入射する単一エネルギーの中性子ビームの概念図

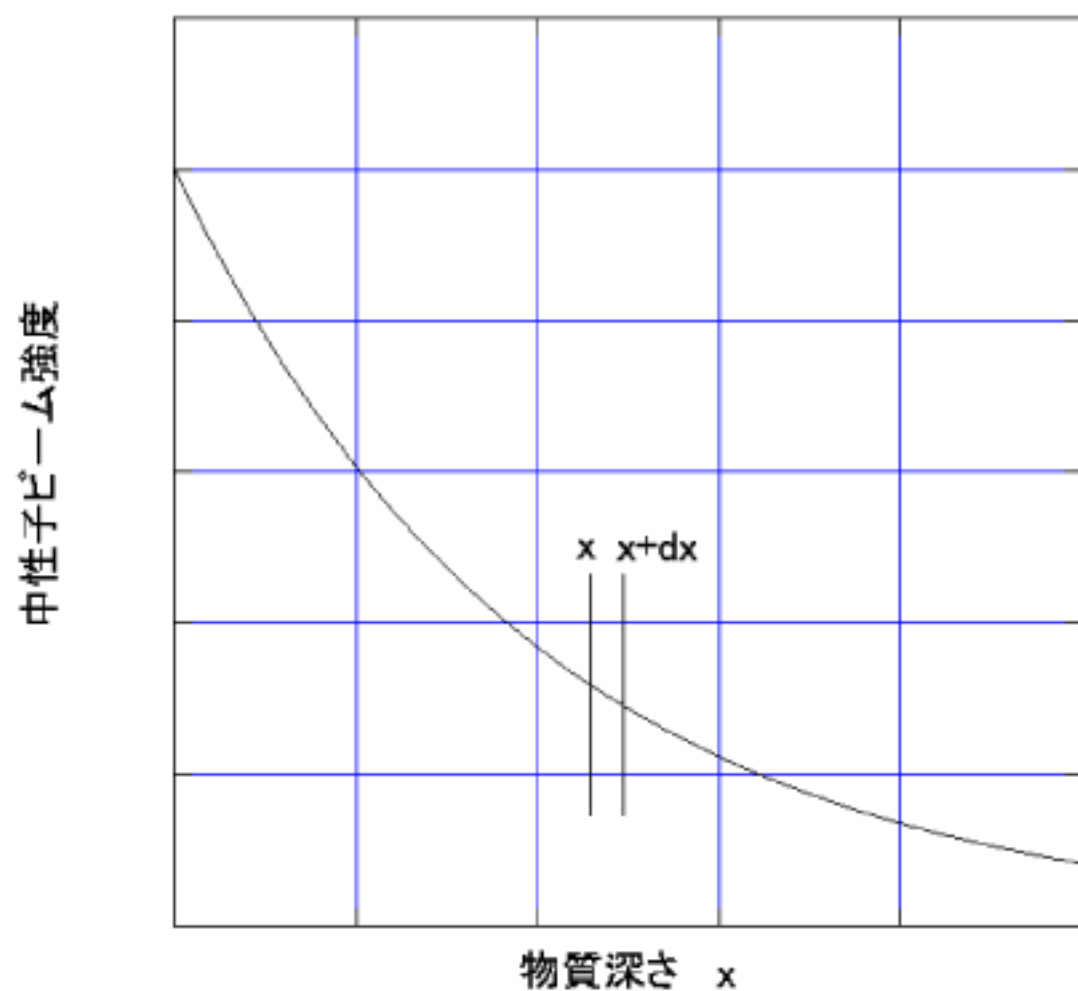
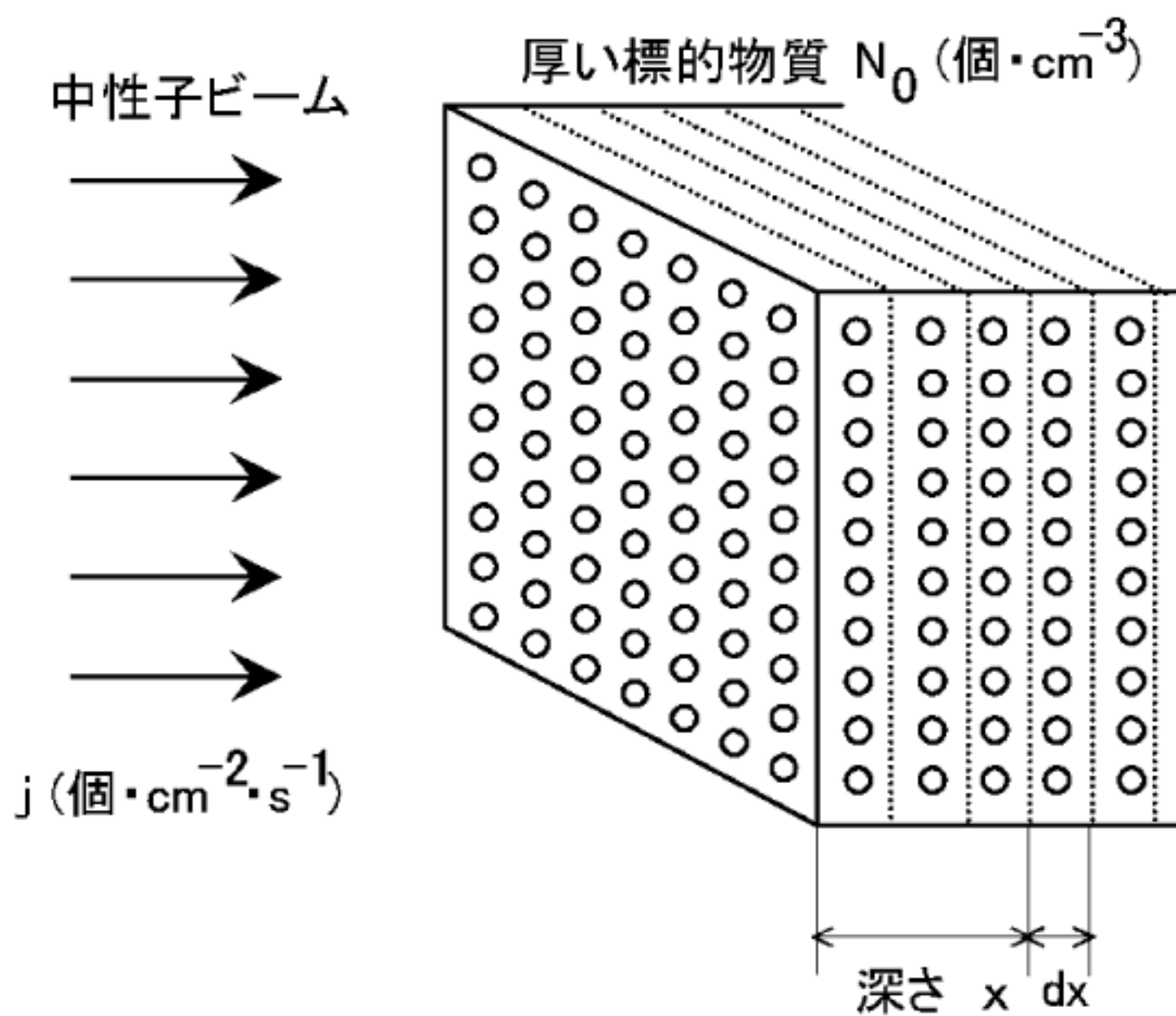


図2 厚い標的物質に単一エネルギーの中性子が入射している場合の減衰の様様

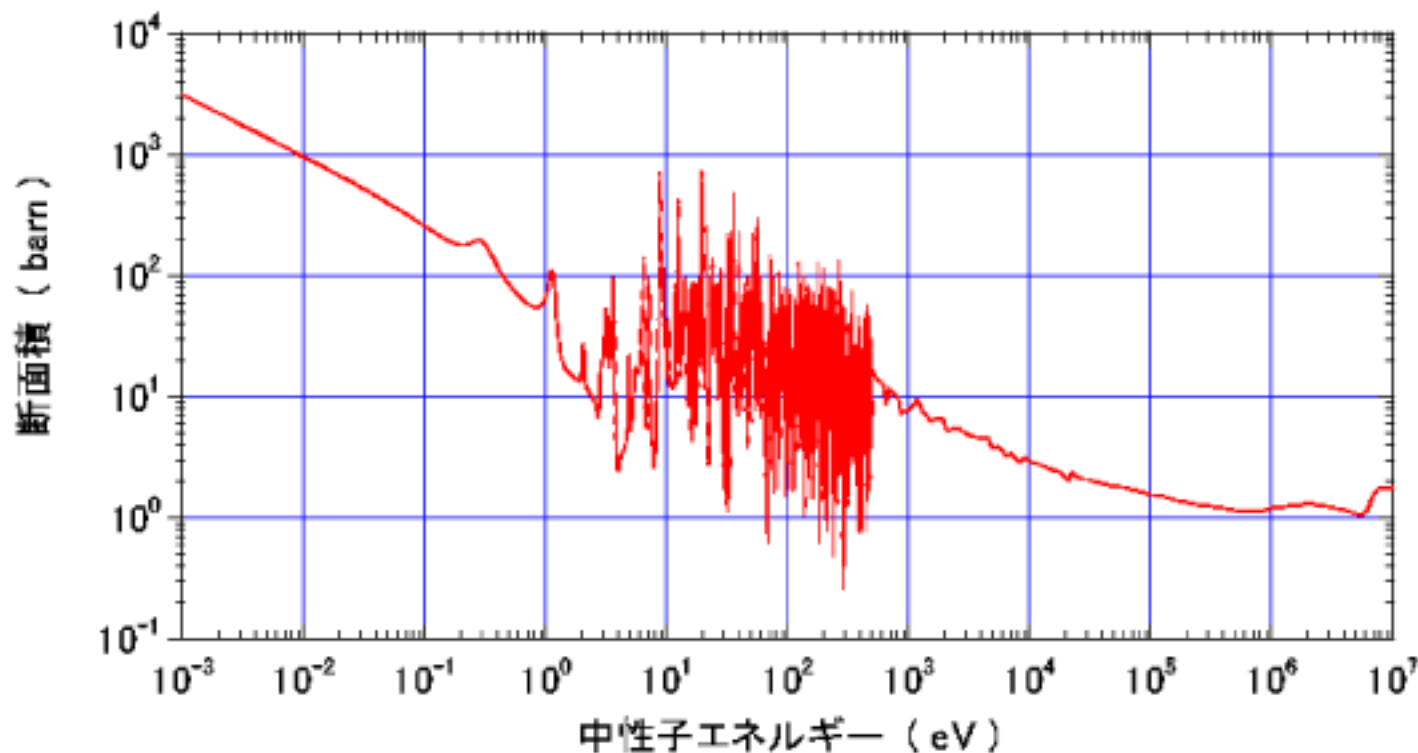


図3 ^{235}U の核分裂断面積の入射エネルギーによる変化 (JENDL3.2による)

[出典] T.Nakagawa et.al: J.Nucl.Sci.Technol.32(1995), p.1295

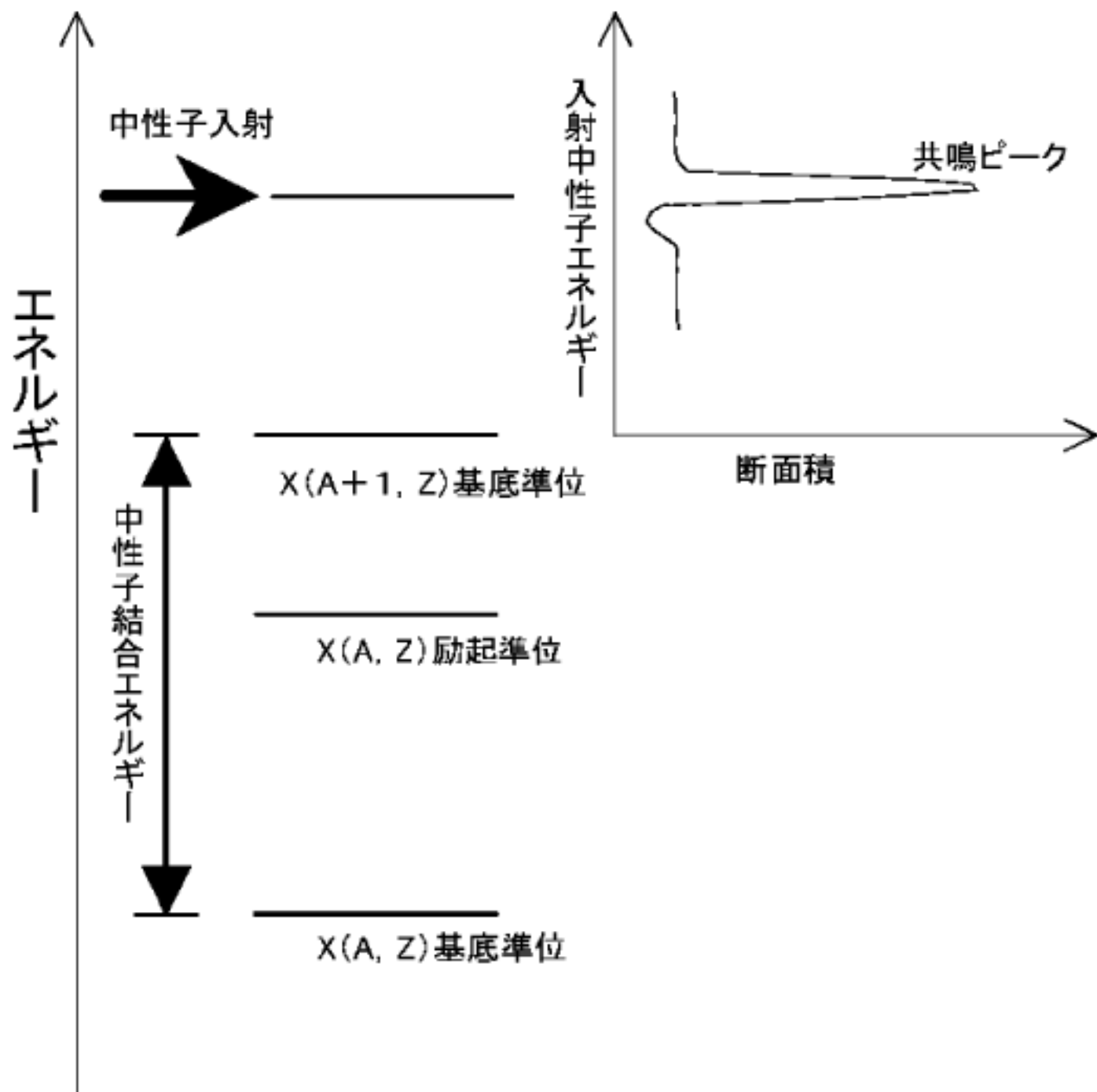


図4 入射中性子エネルギー、中性子結合エネルギー、エネルギー準位と共鳴断面積の関係の一例

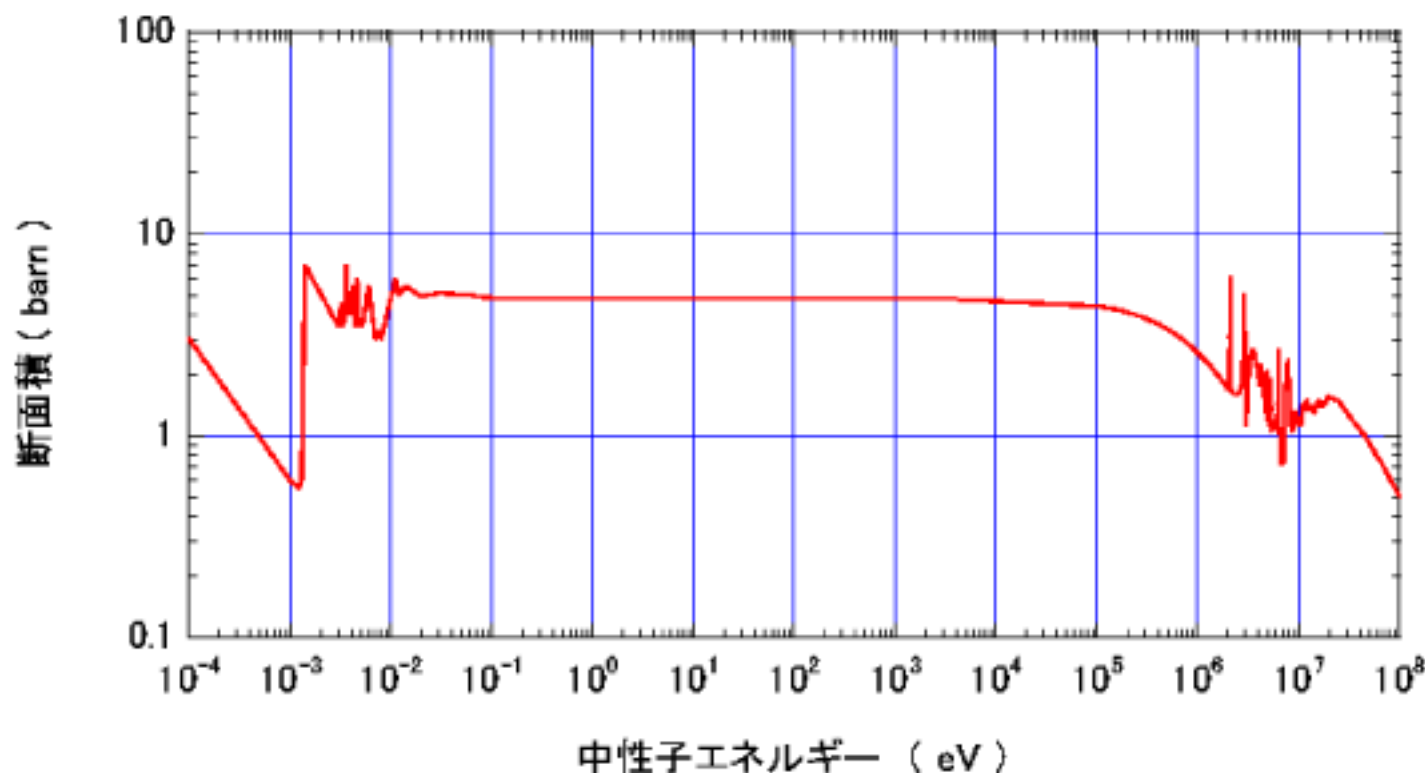


図5 ^{12}C の全断面積の入射エネルギーによる変化
(JENDL3.2による)

[出典] T.Nakagawa et.al: J.Nucl.Sci.Technol.32(1995), p.1295