
第2章

中性子と物質の反応

1. はじめに
 2. 微視的(ミクロ)断面積
 3. 微視的断面積の種類
 4. 巨視的(マクロ)断面積と平均自由行程
 5. 微視的断面積の値とエネルギー変化
 6. 断面積のデータベース
 7. 中性子密度と中性子束
 8. まとめ
-

〔この章のポイント〕

第1章では、中性子と原子核の反応について学んだ。原子炉の振る舞いを理解したり、原子炉を設計するためには、これらの反応を定量的に取り扱わなければならない。そのため、中性子と原子核との反応のしやすさを表す「断面積」と、物質内に存在する中性子の数を表す「中性子束」という物理量を用いる。

本章では、「断面積」と「中性子束」とはどのようなものかを、順次学んでいく。これらの物理量を用いると、中性子と原子核が核反応する数を表す「反応率」を、容易に求めることができる。これらの量は、次章以降の原子炉内の中性子の振る舞いを定量的に考えていく際に欠かせないものである。

第2章 中性子と物質の反応

2.1 はじめに

本章では、中性子が起こす核反応を定量的に扱う手段について学ぶ。その中で、中性子が原子核と反応する確率に相当する量である**(核) 反応断面積** (reaction cross section: 以下、単に断面積と呼ぶ)、次いで飛行する中性子の量を記述する**中性子束** (neutron flux) について学ぶ。それらを用いると、中性子と原子核が核反応する数量である核反応量を表す**反応率** (reaction rate) を簡単に表すことができる。

2.2 微視的(ミクロ)断面積

中性子と物質との相互作用を厳密に考えるには、量子力学を用いた記述をしなければならない。中性子はエネルギーが高ければ(速度が速ければ)高いほど粒子的な性質が顕著になり、反対に低くなるにつれ波動的な性質が顕著になるからである。

このことから、中性子と物質との相互作用を量子力学的に記述するときは、入射して来る中性子を平面波とみなし、それが標的である物質の核力のポテンシャル場と相互作用した後、二次的に散乱波が生じるものとして考える。そして散乱波の振幅を考えねばならない。

しかし、本書は、入門書であるから量子力学的な考えはとらず、中性子が小さな粒であり、それが標的の物質の核に衝突するというように、直感的に想像できる素朴な考え方から始める。

空中にたくさん浮かんでいる標的にボールを当て、割ることを考える。どのような条件を考えると、たくさんの標的を割ることができるであろうか? 標的とボールについてそれぞれ条件を考えてみて欲しい。

標的については、①標的を密集して浮かべること(単位体積当たりの標的の数を増やすほど、当たりやすくなる)、②大きい標的を使うこと(大きい方が当たりやすい)、③標的が浮かんでいる領域を大きくすること(広い範囲に浮かんでいる方が当たりやすい)の三つの方策が考えられる。

一方、ボールについては、④多数のボールを密集して投げる(ボールの数の密度が大きいほど当たりやすい)、⑤ボールの速度を大きくする(速度が大きいほど、たくさん投げることができる)の二つの方策が考えられる。なお、単位時間当たりに投げられるボールの数は、④と⑤のかけ算に比例することに注意する必要がある。

上記の「的あてゲーム」の考え方は、原子核(標的)と中性子(ボール)の相互作用の際にも適用可能である。反応率(単位時間当たりにボールが標的に当たる数)は、①原子核の数密度(標的の密度)、②原子核の大きさつまり断面積(標的の大きさ)、③物質の体積(標的がある領域の大きさ)、④中性子の数密度(ボールの数密度)、⑤中性子の速度(ボールの速度)に比例する。すなわち、原子核と中性子の反応率は、

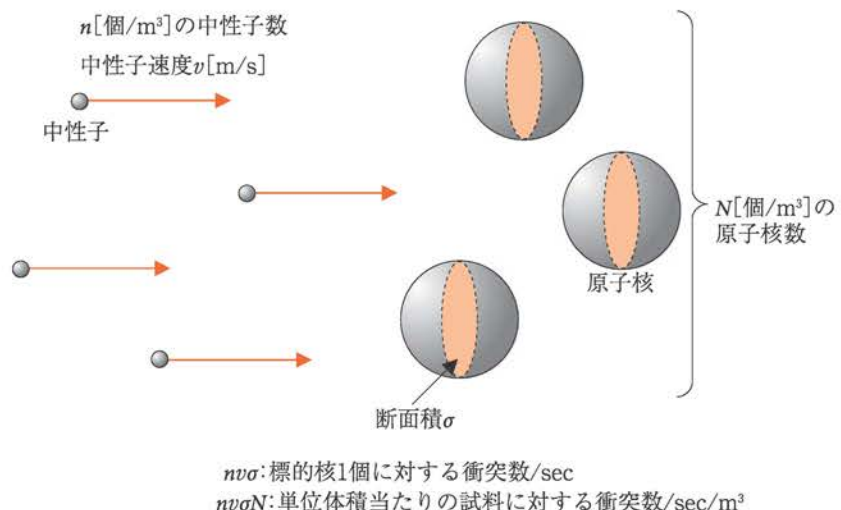


図2.1 断面積を核の面積で表した断面積で説明する概念図

①～⑤のかけ算で与えられる。これらの因子のうち、①～③は標的物質の性質、④、⑤は中性子ビームの性質に依存するものである。

始めに**微視的断面積**（**ミクロ断面積**：microscopic cross section）について学ぶ。このため、中性子が一方向から物質に入射する場合を考え、この物質内でおこる核反応の数に着目する（図2.1参照）。

今、速度 $v(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、数密度 $n(\text{個}\cdot\text{m}^{-3})$ の中性子が薄い物質^(注2.1)の標的核 N 個 $(\text{個}\cdot\text{m}^{-3})$ に垂直に入射するとする。

中性子と標的核が起こす衝突の数（核反応の数）は、それを起こす確率の尺度つまり断面積を考え、それを比例定数 σ と書くことにすると、標的核1個に対する衝突の数は $n\cdot v\cdot\sigma$ だから、単位体積当たりの標的核との衝突の数 R は

$$R=n\cdot v\cdot\sigma\cdot N \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

と表現できる。すなわち単位時間当たりの核反応の数は、中性子入射数、標的の原子核数との積で与えられ、入射する中性子が多いほど、反応する原子核の数も多いほど、また、このときの比例定数(断面積)が大きければ大きいほど、大きくなる。

この σ は面積 (m^2) の単位を持つことから、 σ を微視的断面積と呼ぶ。そして、単位として $10^{-28}(\text{m}^2)$ を用い、これを**1バーン** (b:barn) ^(注2.2)と呼んでいる。この単位は、原子核の大きさが $10^{-14}(\text{m})$ 程度であることに由来している。

そして、物質の単位体積当たりに核反応する数を**反応率** (reaction rate) と呼ぶ。入射する中性子を集団としてとらえ、その積 $n\cdot v$ を j とひとまとめにし、中性子束とみなせば、反応率を改めて $R(\text{個}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1})$ として、 R は

$$R=\sigma\cdot j\cdot N \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

のように書くことができる^(注2.3)。中性子束についてはこの後2.7節でもう少し詳しく説明する。

〈例題2.1〉

^{12}C の断面積 $\sigma=2.5(\text{barn})$ 、原子数密度 $N=8.0\times 10^{27}(\text{個}\cdot\text{m}^{-3})$ 、入射中性子の量 $J=2.0\times 10^{16}(\text{個}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ であるとき、 ^{12}C の反応率を求めよ。

〈解答2.1〉

反応率 $R=\sigma\cdot J\cdot N=2.5\times 10^{-28}\times 2.0\times 10^{16}\times 8.0\times 10^{27}$
 $=4.0\times 10^{16}(\text{個}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1})$

2.3 微視的断面積の種類

微視的断面積は、すべての原子核に共通な概念で、すべての原子核一つ一つが起こす、すべての核反応（1.6参照）について、それぞれの値を持つ。すなわち、1つの原子核が起こす様々な反応ごとに、それぞれの微視的断面積が定義される。それぞれの微視的断面積は、通常、微視的断面積を表す記号 σ に^(注2.4)、各反応を表す添字をつけて表す。主だったものとして、散乱反応の微視的断面積についてはscatteringの頭文字sをつけて σ_s 、核分裂反応についてはfissionのfをつけて σ_f 、捕獲反応（中性子捕獲や放射捕獲反応ともいう）についてはcaptureのc（または γ 線が放射されることから γ ）をつけた σ_c （または σ_γ ）、吸収反応についてはabsorptionのaをつけて σ_a などと記される^(注2.5)。

微視的吸収断面積 σ_a は中性子を吸収する微視的断面積の総和で定義され、

$$\sigma_a=\sigma_f+\sigma_c+\dots\dots\dots (2.3)$$

で定義される。さらに、一つの原子核が起こす中性子反応を総和した微視的断面積として、微視的全断面積 σ_t (total cross section) がよく現れる。

$$\sigma_t=\sigma_s+\sigma_c+\sigma_f+\dots\dots\dots (2.4)$$

なお、原子炉の振舞いを考える場合には、微視的吸収断面積は実質的に微視的捕獲断面積 σ_c と微視的核分裂断面積 σ_f の二つの和 $\sigma_a=\sigma_f+\sigma_c$ となる場合が多い。この

注2.1：厚さが極めて薄いと言うことは、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。

注2.2：バーン (barn) の語源は、1942年当時、ハーヴェ大学で核分裂断面積の研究に当たっていたM. G. ホロウェイとC. P. ベイカーが単位の名称がないのは不便だから何か付けようということになり、「オッペンハイマー」（長すぎて不便）とか「ベータ」（ベータ線と混同しがち）とか考えたあげく、指導教官のジョン・マンレイにちなみ、Johnとしてみた。しかし、これはアメリカ人にたくさんある名前なので気に入らず、方言に由来する連想で「John」（掘って建て小屋、小さな納屋、男子用公衆便所）がだめなら「barn」（大きな納屋）ではどうかということになり、これにしたという。後日、彼らはロスアラモスの研究所に移り、そちらでもbarnを使っているうち定着してしまった。

注2.3：

$$R\left(\frac{1}{\text{m}^3\cdot\text{s}}\right)=\sigma f N\left(\text{m}^2\cdot\frac{1}{\text{m}^2\cdot\text{s}}\cdot\frac{1}{\text{m}^3}\right)$$

注2.4： σ はギリシャ文字 Σ （シグマ）の小文字。

注2.5： σ_s 散乱断面積、 σ_a 吸収断面積、 σ_f 核分裂断面積、 σ_c （または σ_γ ）捕獲断面積、 σ_t 全断面積と呼ばれる。

場合、微視的全断面積 σ_t は、 $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$ で与えられる。

〈例題2.2〉

^{235}U の微視的核分裂断面積 $\sigma_f = 500(\text{b})$ 、微視的捕獲断面積 $\sigma_c = 150(\text{b})$ 、微視的散乱断面積 $\sigma_s = 10(\text{b})$ とする。以下の問いに答えよ。

- ①微視的吸収断面積および微視的全断面積を求めよ。
- ②核分裂反応が起る確率は何%か。

〈解答2.2〉

①微視的吸収断面積 $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c = 500 + 150 = 650(\text{b})$

微視的全断面積 $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s = 650 + 10 = 660(\text{b})$

②核分裂反応が起る確率

$$P = \sigma_f / \sigma_t \times 100 = 500 / 660 \times 100 = 75.6(\%)$$

断面積の値は、原子核、核反応によって大きく変化する。さらに、入射する中性子エネルギーによっても大きく変化する特徴がある。微視的断面積の値、エネルギー変化については後述する。

2.4 巨視的(マクロ)断面積と平均自由行程

微視的断面積に次いで**巨視的断面積(マクロ断面積: macroscopic cross section)**について学ぶ。そのため図2.2のような厚い物質に中性子が入射する場合を考える。この物質の原子核密度は同じく単位体積当り N (個 $\cdot\text{m}^{-3}$)であり、ここでは十分大きな厚さをもつものとする。

この物質に垂直に入射している中性子を考え、その大きさを物質の表面において J_0 (個 $\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)とする。そして物質中に、物質の表面から x の距離にある厚さ dx の部分を考える。その深さ x の位置での中性子数を $J(x)$ と書き、厚さ x から $x+dx$ まで間に中性子が減少する数を $-dJ$ と書くと、 $-dJ$ は、物質の全断面積 σ_t を用いて(注2.6)

$$-dJ = \sigma_t J(x) N dx \quad (2.5)$$

と書ける(注2.7)。この式は

$$\frac{dJ(x)}{dx} = -\sigma_t N J(x) \quad (2.6)$$

となる。この微分方程式は容易に解け、

$$J(x) = J_0 \exp(-\sigma_t N x) \quad (2.7)$$

注2.6: 中性子の数は深くなるほど減少するので、厚さ dx の間に変化する量としてマイナス符号をつけて $-dJ$ としている。

注2.7: 深さ x の位置で厚さ dx の部分において、核反応する全数は、微視的全断面積(σ_t)とその場の中性子束($J(x)$)と、その場の原子核数($N dx$)の積で求められる。そしてそこでの核反応1個は、中性子1個の損失と等価であるから、厚さ dx における核反応数はそこで失う中性子数、すなわち同じ厚さ dx における中性子減少数 $-dJ$ と等しくなる。

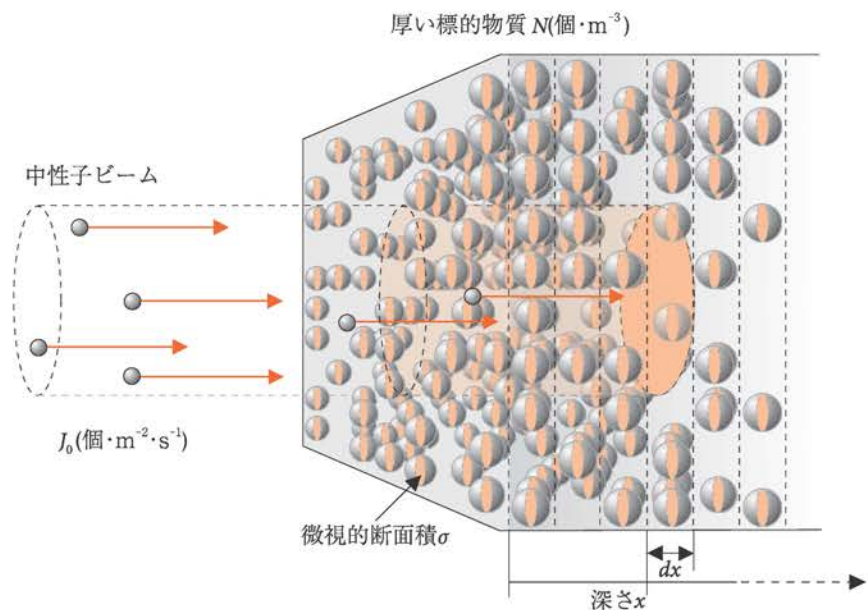


図2.2 厚い標的物質に入射する中性子の概念

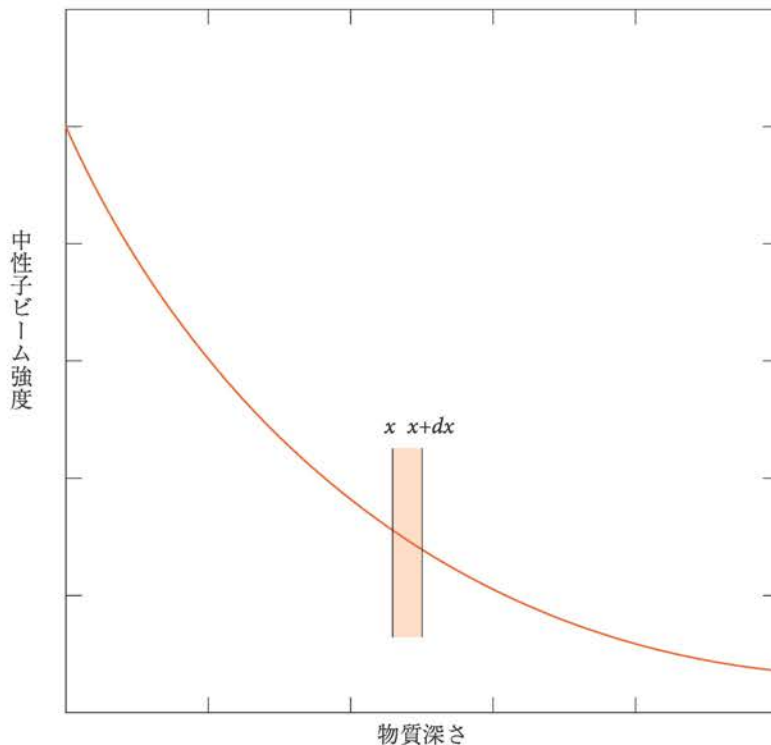


図2.3 厚い物質中の中性子数の減衰の様相

となる。この様子を図示すると、図2.3のようになる。

この式中の σ と N の積のことを Σ と書いて、すなわち (注2.8)

$$\Sigma = \sigma \cdot N \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

として、これを巨視的断面積と呼ぶ。この巨視的断面積の単位は、 $\sigma(m^2) \times N(m^{-3})$ から m^{-1} である。そして、この巨視的断面積を用いると、反応率 $R(\text{個} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$ は

$$R = \Sigma \cdot J \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

のように書くことができる。

巨視的断面積にも微視的断面積と同様の種類がある。すなわち、 Σ_s 巨視的散乱断面積、 Σ_a 巨視的吸収断面積、 Σ_f 巨視的核分裂断面積、 Σ_c (または Σ_γ) 巨視的捕獲断面積、 Σ_t 巨視的全断面積である (注2.9)。

なお、巨視的全断面積の逆数を ℓ と定義して、**平均自由行程** (mean free path) とよぶ。

$$\ell = \frac{1}{\Sigma_t} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

この平均自由行程 ℓ は中性子が核反応してから次に核反応するまでの距離の平均値に相当し、その単位は m である。

〈例題2.3〉

(2.9) 式で与えられる平均自由行程は、中性子の到達距離の期待値であることを示せ。

〈解答2.3〉

中性子が物質を x だけ通り抜ける確率は、(2.7) 式、(2.8) 式より $\frac{J(x)}{J_0} = \exp(-\Sigma_t x)$

x だけ通り抜けた中性子が次の dx で相互作用する確率は (2.6) 式、(2.8) 式より

$$-\frac{dJ}{J} = \sigma_t N dx = \Sigma_t dx$$

注2.8: この Σ は、巨視的断面積という名はついているが、単位は m^{-1} であり、面積の単位 m^2 ではないことに注意して欲しい。

注2.9: 巨視的吸収断面積と巨視的全断面積については、微視的断面積と同様に定義される。原子炉などを考える場合について、 $\Sigma_a = \Sigma_f + \Sigma_c$ 、 $\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s$ となる。

これより、中性子が物質中の $x \sim x+dx$ で相互作用する確率は

$$\exp(-\Sigma_t x) \Sigma_t dx$$

この確率から到達距離の期待値を計算すると、

$$\int_0^{\infty} x \exp(-\Sigma_t x) \Sigma_t dx = \frac{1}{\Sigma_t}$$

これは、(2.9) 式と一致している。

巨視的断面積や平均自由行程を用いると、物質中の中性子の減衰を表す式は

$$I(x) = I_0 \exp(-\Sigma_t x) = I_0 \exp\left(-\frac{x}{\ell}\right) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

とできる。すなわち、物質の中で中性子数は、巨視的断面積あるいは平均自由行程で決められる指数関数で減少する。

〈例題2.4〉

水素Hの原子数密度 $N_H = 6 \times 10^{28} (\text{個} \cdot \text{m}^{-3})$ 、微視的散乱断面積 $\sigma_{sH} = 20 (\text{barn})$ とするとき、水素の巨視的散乱断面積を求めよ。

〈解答2.4〉

$$\Sigma_{sH} = N_H \times \sigma_{sH} = 6 \times 10^{28} \times 20 \times 10^{-28} = 120 (\text{m}^{-1})$$

〈例題2.5〉

^{235}U の吸収断面積 $\sigma_a^{235} = 700 (\text{barn})$ 、 ^{238}U の吸収断面積 $\sigma_a^{238} = 3 (\text{barn})$ であるとき、天然ウランの巨視的吸収断面積を求めよ。ただし、 ^{238}U の天然同位体比を99.3%、天然ウランの原子量を238、密度を $19 (\text{ton} \cdot \text{m}^{-3})$ とする。

〈解答2.5〉

$$\text{天然ウランの原子数密度 } N = (19 \times 10^6 / 238) \times 6.02 \times 10^{23} = 4.81 \times 10^{28} (\text{個} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$^{235}\text{Uの原子数密度 } N^{235} = 0.007 \times N = 3.36 \times 10^{26} (\text{個} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$^{238}\text{Uの原子数密度 } N^{238} = 0.993 \times N = 4.77 \times 10^{28} (\text{個} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$\Sigma_a^{235} = \sigma_a^{235} \times N^{235} = 700 \times 10^{-28} \times 3.36 \times 10^{26} = 2352 \times 10^{-2} = 23.5 (\text{m}^{-1})$$

$$\Sigma_a^{238} = \sigma_a^{238} \times N^{238} = 3 \times 10^{-28} \times 4.77 \times 10^{28} = 14.3 \times 10^0 = 14.3 (\text{m}^{-1})$$

よって、天然ウランの巨視的吸収断面積

$$\Sigma_a = \Sigma_a^{235} + \Sigma_a^{238} = 23.5 + 14.3 = 37.8 (\text{m}^{-1})$$

〈例題2.6〉

液体Na中の100keV中性子の巨視的全断面積および平均自由行程を求めよ。ただし、100keV中性子に対するNaの微視的全断面積 $\sigma_t = 3 (\text{barn})$ 、Naの原子数密度 $N = 2.0 \times 10^{28} (\text{個} \cdot \text{m}^{-3})$ とする。

〈解答2.6〉

$$\text{巨視的全断面積 } \Sigma_t = \sigma_t \times N = 3 \times 10^{-28} \times 2.0 \times 10^{28} = 6.0 (\text{m}^{-1})$$

$$\text{平均自由行程 } \ell = 1/\Sigma_t = 1/6.0 = 0.17 (\text{m})$$

2.5 微視的断面積の値とエネルギー変化

微視的断面積は、中性子と原子核の間のいわゆる核力の相互作用により決まるものであり、中性子に対する個々の原子核の特徴は、その原子核由来の固有の物理量である^(注2.10)。

中性子に対する原子核の特徴を決める因子として、核内の陽子の数と中性子の数の組み合わせがあげられ、その違いにより断面積は非常に大きく変化する。すなわち、同じ元素(すなわち同じ陽子数の原子核)でも中性子数が異なる同位体において、断面積の値が全く異なる場合がある。たとえば、ともに陽子数92個を持つウラン元素である ^{235}U と ^{238}U の核分裂断面積は、軽水型原子炉で代表的な中性子エネルギーである0.025 eVにおいて、 ^{235}U では約600 (barn)であるのに対して、 ^{238}U の核分裂断面積は

注2.10：核反応と断面積について、より詳しく学ぶためには、中性子・原子核に対する量子力学的な記述を待つ必要がある。そのような量子力学的な記述は、いずれの量子力学の教科書にも記載されている。興味がある諸君は、各自手元にある量子力学の教科書を開いてもらいたい。

ほぼゼロである。また、水素の同位体である ^1H と ^2H の捕獲断面積も、同じく0.025 eVの中性子エネルギーに対してそれぞれ0.3 (barn)と0.0003 (barn)と、やはり大きな差が存在する。

このように原子核によって断面積が変わるという特徴の他に、断面積は核反応する中性子のエネルギー（正確には原子核と中性子の相対速度）によっても大きく変化するという特徴がある。微視的断面積のこのような特徴は、断面積のエネルギー依存性と呼ばれる^(注2.11)。

微視的断面積のエネルギー依存性を表すものとして、以下の4つが重要である。いずれも断面積が中性子エネルギーによって大きく変化する形状を表したものである。以下、順にそれらを説明する。その際、図2.4および図2.5を参照のこと。

2.5.1 $1/v$ 特性

ここでの“ v ”は速度を表すもので、断面積が、速度に（運動エネルギーの平方根に）反比例して、すなわち $1/v (= 1/\sqrt{E})$ に比例して減少するエネルギー変化を表す特徴を表すものである。中性子を吸収する核反応の微視的断面積において比較的低い中性子エネルギー領域で現れる。特に質量数が多い原子核においては、この特性がほとんどの原子核に現れている。この $1/v$ 特性 ($1/v$ characteristics) は、下記の共鳴と同じく、原子核内部における励起エネルギー準位の存在に起因して起こるものである。

断面積の $1/v$ 特性を理論的に説明するためには、量子力学の知識が必要となる。断面積の研究が始まった初期の頃、グレゴリー・ブライトとユージン・P・ウィグナーは断面積の理論計算に量子力学を適用し、ブライト・ウィグナーの公式を表した。それによると、断面積は入射中性子のエネルギーの平方根に反比例して変化する。すなわち、上記のように $\sigma = \text{定数}/\sqrt{E} = \text{定数}/v$ であり、断面積は入射速度に反比例するという事実を説明することができる。

2.5.2 共鳴

断面積が狭いエネルギー範囲において急激に変化する特徴を表す。このようなエネルギー変化は、原子核内部の殻（シェル）構造に起因して生じる原子核内部の「励起エネルギー準位」の存在によって起こるものである。励起エネルギー準位に合致するエネルギーで飛行する中性子に対して、原子核は中性子と非常に反応しやすくなる。共鳴 (resonance) の典型的な例が、 ^{238}U における中性子エネルギー6.7eVにおける共鳴である（図2.5参照）。この共鳴では、数eV領域の中性子エネルギーではおよそ10 (barn) 程度の微視的断面積であるのに対し、6.7eVにおいては10000 (barn)

注2.11: ドップラー効果と呼ばれる特殊な場合などを除き、原子炉内で原子核は停止していると考えてよい。従って、両者の相対速度は、中性子の速度（あるいは運動エネルギー）のみに依存することとなる。



グレゴリー・ブライト



ユージン・P・ウィグナー

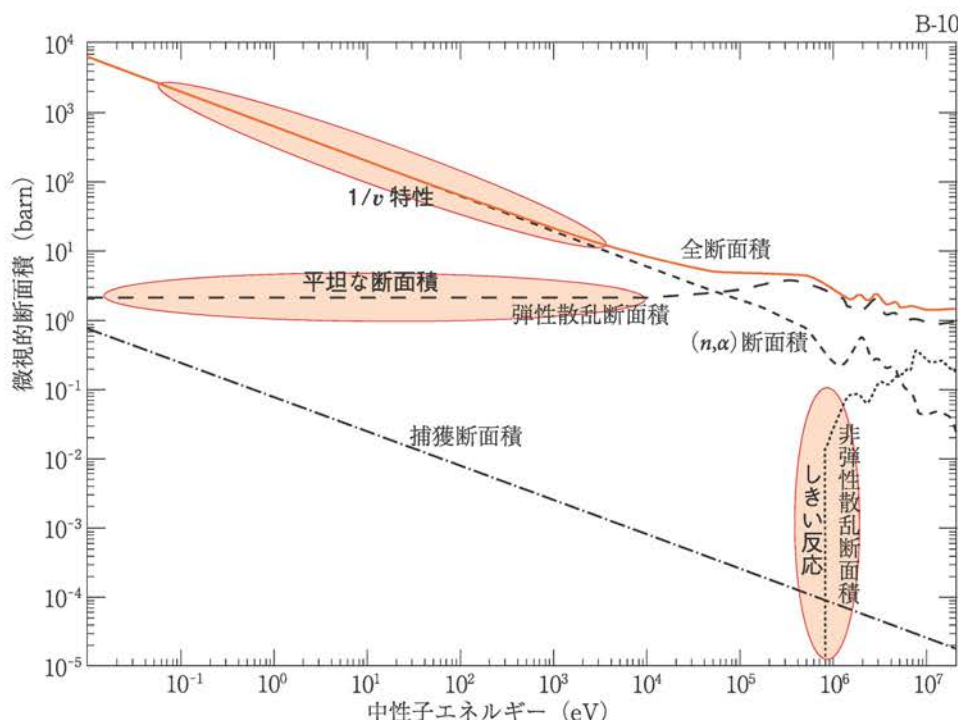


図2.4 ^{10}B の断面積のエネルギー変化(出典:JENDL-3.3)

Gregory Breit (Wikipedia Commons: Photograph: Karol Lagner氏が提供)

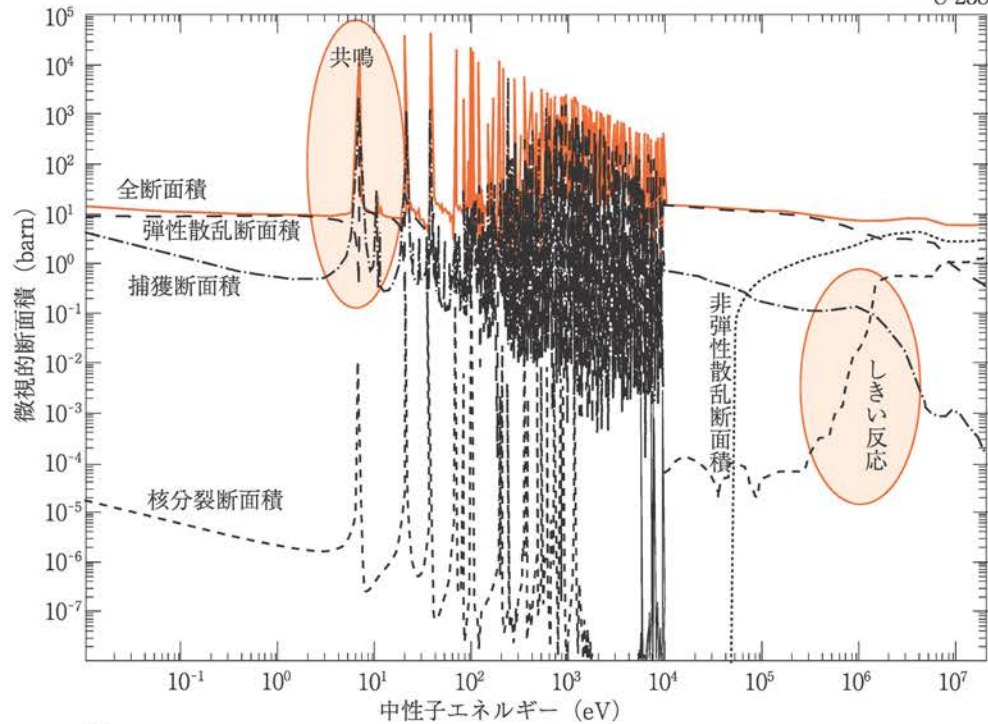


図2.5 ^{238}U の断面積のエネルギー変化(出典:JENDL-3.3)

を超える断面積を示す。共鳴によっては非常に大きな断面積を有することから、原子炉設計においては、厳密な取り扱いが必要となる。

2.5.3 しきい反応

第1章で述べた通りに、一定の中性子エネルギー以上に限って反応が起こる核反応がある。そのような核反応の断面積は、一定の中性子エネルギー以下ではゼロ（あるいは非常に小さな値）であり、そのエネルギー以上になると急激に大きくなるものがある（注2.12）。このような反応はしきい反応（threshold reaction）と呼ばれ、反応が起こる境界のエネルギー、すなわち断面積が急激に大きくなるエネルギーをしきいエネルギーと呼ぶ。一例として、原子炉で重要となるしきい反応として ^{238}U の核分裂反応があげられる。そのしきいエネルギーは約1MeVであり、変化の様子は図2.5の通りである。

2.5.4 平坦な断面積

中性子エネルギーによって断面積が変化しない場合もある。このような変化の特徴は通常、平坦（flat）な断面積などと表現されている。このような特性は、散乱反応においてよく現れる。この特徴の一定の断面積は、中性子の球が、同じく球状の原子核と散乱することをイメージして、そのような散乱において散乱する確率（すなわち、断面積）は原子核そのものの大きさに依存して決まる一定の値（すなわち中性子エネルギーによらない）を取ることを想像することで理解できる（注2.13）。このエネルギー依存性は、主に軽い原子核（質量数が小さな原子核）においてよく表れる。

これらのエネルギー依存性を持つ微視的断面積の典型例を、以下に示す。

まず、図2.4に、 ^{10}B の散乱断面積のエネルギー変化を示している。この図の中は、横軸が中性子エネルギーで 10^{-2}eV から20MeVの範囲を対数表示しており、単位eVである。一方、縦軸は、微視的断面積であり、同じく対数表示されていて、単位bである。図の中には、5つの微視的断面積が、異なる線で記されている。断面積の種類は、全断面積、弾性散乱断面積、非弾性散乱断面積、捕獲断面積、 (n, α) 反応断面積である。なお、図中には、エネルギー依存を表す用語に対応する部分を明記している。

^{10}B の断面積のエネルギー依存性の特徴は、約 10^4eV までの、 (n, α) 反応断面積および全断面積の $1/v$ 特性、また同じ領域での平坦な散乱断面積と、 10^6eV 付近の非弾性散乱のしきい反応などである。

図2.5には、同じく 10^{-2}eV から20MeVのエネルギー範囲における ^{238}U の微視的断面積の変化を示す。この図中には、断面積が狭いエネルギー範囲において急激に変

注2.12：しきい反応において、しきいエネルギー以下で反応断面積がわずかながら値を持つのは、量子力学における「トンネル効果」のためである。

注2.13：このような散乱をポテンシャル散乱、このような特徴を示すエネルギー領域をポテンシャル散乱領域と呼ぶこともある。この散乱では、断面積が一定の値（ポテンシャル散乱断面積） $\sigma_p = 4\pi R^2$ を取る。ここでRは原子核の半径である。

化する共鳴が見られる。 ^{238}U の例では、1eV以上においていくつかの共鳴が存在し、そこでは共鳴の形が一つ一つよく見てとれる。中性子エネルギーが比較的高くなり100eV~10keVの領域では、非常に数多くの共鳴が重なるように存在していることが見て取れる。なお、 ^{238}U の例で10keVにおいて共鳴がなくなり滑らかな断面積エネルギー変化となっている。これは、共鳴がなくなったのではなく、一つの共鳴する中性子エネルギー（の幅）が隣接する共鳴の中性子エネルギー（の幅）とほとんど重なり合っ て見かけ上滑らかな断面積変化を示すようになったためである（注2.14）。

注2.14：共鳴のエネルギー変化において、共鳴の変化が見取れる領域を「分離共鳴領域」（ ^{238}U の例では1eV～10keV）、見かけ上滑らかになっている領域を「非分離領域」（ ^{238}U の例では10keV以上）と呼ばれる。

2.6 中性子密度と中性子束

原子炉の振る舞いを理解したり、原子炉を設計するためには、原子炉などの体系の中での中性子の振る舞いを知らなければならない。そのためには、任意の体系内での中性子分布を定量的に表す手段を学ばなければならない。原子炉物理学では、中性子の量や分布を定量的に表す量として、以下の二つを通常用いる。

- ①中性子密度
②中性子束

この二つの物理量はともに、原子炉物理学において極めて重要な量である。以下順に学ぶ。

まず、**中性子密度** (neutron density) について学ぶ。中性子密度は、単位体積当たりの中性子数と定義される。より厳密に書くと、「時間 t 、空間位置 $\mathbf{r}(x,y,z)$ における、単位体積当たりの中性子数」を中性子密度 $n(\mathbf{r},t)$ (個・ m^{-3}) と定義する^(注2.15)。さらに、同様の変数を用いて、前節であらわれた反応率を、「時刻 t 、空間位置 $\mathbf{r}(x,y,z)$ における、単位体積当たりの核反応の数」として反応率 $R(\mathbf{r},t)$ (個・ m^{-3}) と定義する。以下、この反応率と中性子密度について考えていく。

注2.15:ここでは中性子が全て同じ速さ $v(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ を持っているとは仮定する。

まず、微視的断面積 $\sigma(\text{m}^2)$ の原子核が原子核密度 $N(\text{個}\cdot\text{m}^{-3})$ で存在する物質を考える^(注2.16)。そして、その物質中を、一定の速さ $v(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ である一方向に飛行している中性子(の集団)を考え、その中性子が、物質中のある面を単位時間に通過する中性子の数に着目する。たとえば、1秒の間にある面を通過する中性子は、その面から「1秒間に飛行できる距離の中に存在する中性子」に限られる。すなわち、速さが v のとき単位時間内にその中性子が飛行できる距離は $v(\text{m})$ であるから、速さ v の中性子がある面を通過できるのはその面から長さ $v(\text{m})$ の距離の内にある中性子の数である(図2.6参照)。通過する面の面積を $1(\text{m}^2)$ として、言い換えると、速さ v の中性子が単位時間、単位面積

注2.16: この物質の巨視的断面積 Σ は、先の通り σ と N の積で与えられる。すなわち $\Sigma = \sigma N$ である。

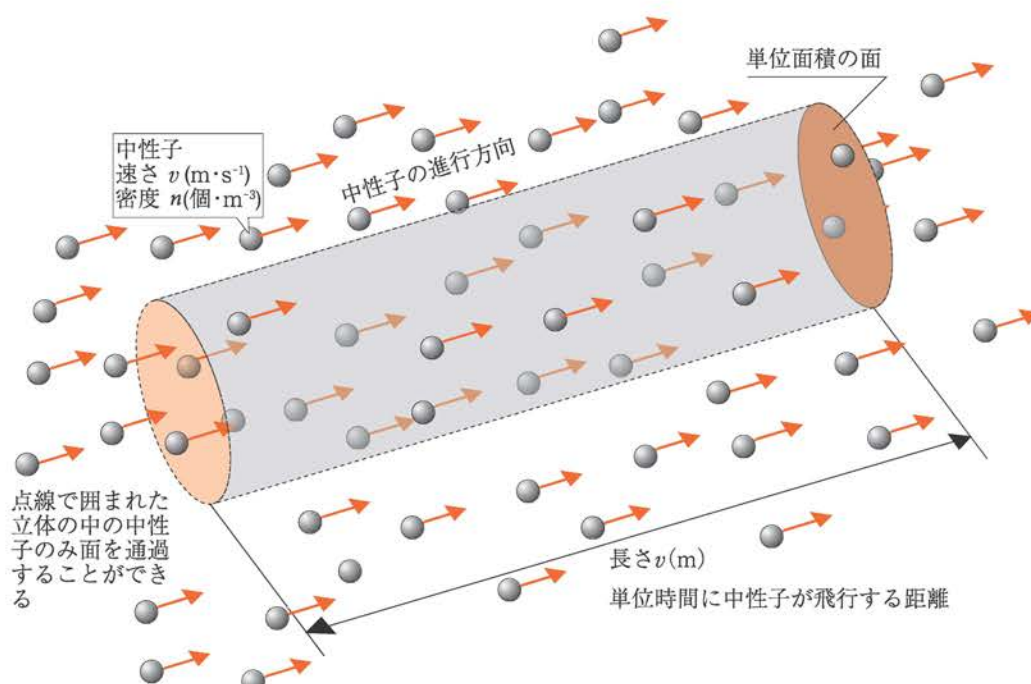


図2.6 物質中を飛行する中性子の様子

あたりにある面を通過する数は、高さ $v(\text{m})$ で単位面積($1(\text{m}^2)$)の底面の持つ立体($1 \times v = v(\text{m}^3)$)の中に存在する中性子数とすることができる。そして、物質の中性子密度 (すなわち、単位体積当たりの中性子数) が $n(\mathbf{r}, t)$ (個 $\cdot\text{m}^{-3}$)であるとする、ある面を単位時間、単位面積あたりに通過する中性子数は、

$$v(\text{m}^3) \times n(\mathbf{r}, t) (\text{個} \cdot \text{m}^{-3}) = vn(\mathbf{r}, t) \cdots \cdots \cdots (2.11)$$

と表すことができる。すなわち、ある面を単位時間、単位面積あたりに通過する中性子数は、中性子密度と単位時間に飛行する距離の積、すなわち $vn(\mathbf{r}, t)$ で与えられる。

反応率 $R(\mathbf{r}, t)dV$ は、前節の通り、ある面を(すなわち十分薄い物質)を単位時間に通過する中性子数と、そこでの巨視的断面積 $\Sigma = \sigma N$ の積で書けるので、ある面を通過する中性子数 $vn(\mathbf{r}, t)$ を用いると、

$$R(\mathbf{r}, t)dV = \Sigma(\mathbf{r}) \cdot vn(\mathbf{r}, t)dV \cdots \cdots \cdots (2.12)$$

と書くことができる。

そして、この反応率の式の中、中性子の速さと密度の積、 $vn(=vn(\mathbf{r}, t))$ を、**中性子束** $\phi(\mathbf{r}, t)$ (neutron flux) と呼ぶ。すなわち、

$$\phi = vn(\mathbf{r}, t) \cdots \cdots \cdots (2.13)$$

である(注2.17)。この中性子束は、単位(個 $\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)($=v(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \times n(\text{個}\cdot\text{m}^{-3})$)であり、原子炉物理学で最も頻りに用いられる量である。この中性子束を用いることによって中性子と物質との反応率は、より簡単な表記

$$R(\mathbf{r}, t)dV = \Sigma(\mathbf{r}) \cdot \phi(\mathbf{r}, t)dV \cdots \cdots \cdots (2.14)$$

のように書くことができる(注2.18)。

〈例題2.7〉

原子炉内の中性子密度が $n=3.0 \times 10^{15}$ (個 $\cdot\text{m}^{-3}$)であり、その中性子のエネルギーが0.0253(eV)であるとする。1eV $=1.60 \times 10^{-19}$ (J)、中性子の質量が 1.67×10^{-27} (kg)とし、以下の問いに答えよ。

- ①中性子の速さを求めよ。
- ②中性子束を求めよ。

〈解答2.7〉

①中性子のエネルギー $E = \frac{1}{2}mv^2$ より

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.0253 \cdot 1.60 \times 10^{-19}}{1.67 \times 10^{-27}}} \approx 2.2 \times 10^3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

②中性子束 $= v \times n = 2.2 \times 10^3 \times 3.0 \times 10^{15} = 6.6 \times 10^{18}$ (個 $\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

この中性子束は、第4章で学ぶ通り、ボルツマン (Boltzmann) の輸送方程式やそれを近似して得られる拡散方程式に従う。原子炉物理学では、これらの方程式を解析的あるいは数値計算を行うことによって解き、中性子束を得ている。そして、それらにより、いったん中性子束が求められると、それに知りたい反応の巨視的断面積を掛けることによって、知りたい反応の体系内で反応率分布を得ることができる。たとえば核分裂断面積を用いれば、熱計算に用いるべき熱出力が求められるし、 (n, α) 断面積を用いれば原子炉材料の損傷に大きく影響するHeガスの生成量が求められる。

2.7 断面積のデータベース

多くの原子核に対する断面積の値が、原子炉内で重要となるエネルギー範囲についてまとめられており、通常、**核データライブラリ** (nuclear data library) と呼ばれている。核データライブラリの例として、日本原子力研究開発機構のデータベースにおける核データライブラリJENDL-3.3があげられる。このJENDL-3.3では、おおよそ 10^{-5} eVから10MeV程度にわたる中性子エネルギー範囲について、質量数1のH原子核から質量数約255のFm程

注2.17：中性子束は、反応率を計算するために導入された数学的な量(速さ・密度の積)あるいは原子炉物理学特有の道具と考えるべきである。なお、中性子束は、次章であらわれる中性子流と同じ次元の量であることなどから混同しやすいので注意すること(詳細は4章参照)。

注2.18：この概念を中性子のエネルギーが変化するケースに対応できるようにするため、中性子密度をエネルギーの変数を入れて $n(\mathbf{r}, E, t)dVdE$ と書くこともできる。この場合、エネルギー依存の反応率密度が、 $R(\mathbf{r}, E, t)dVdE = \Sigma(\mathbf{r}, E)v(E)n(\mathbf{r}, E, t)$ で求められる。

度まで約350種類の原子核の断面積の値が収められている。これらの断面積値は、日本原子力研究開発機構のホームページから自由に無料で入手（ダウンロード）できる^(注2.19)。

なお、日本原子力研究開発機構のデータベースには核データライブラリとともに、データベース内に以下のものが一緒に整備されているので、必要に応じて利用されたい。

- ①核図表、元素の周期表データ
- ②核構造・崩壊データ
- ③核種の質量、存在比、半減期、スピン、パリティ

2.8 まとめ

本章では、反応断面積と中性子束をそれぞれ定義し、これらを用いて核反応量を表現することで、中性子と物質との核反応を定量的に表わす方法を示した。反応断面積には、核反応の確率に相当する量である微視的断面積と、微視的断面積と原子核の原子数密度の積で与えられる巨視的断面積があった。微視的断面積は原子核によって、また入射する中性子のエネルギーによって大きく変化することも学んだ。さらに、原子炉物理学において最も頻繁に現れる中性子束について学んだ。すなわち、中性子束は、単位時間にある単位面積を通過する中性子の数であり、それは中性子密度と中性子の速度の積で求めることができる。

次章以降で述べる中性子輸送あるいは拡散方程式を用いることにより、中性子束を求めることができる。いったんこの中性子束が求まれば、中性子束と巨視的断面積の積にて、容易に反応率の分布を求めることができ、これにより、原子炉の振る舞いを詳細に理解できることとなる。

注2.19: JENDL-3.3 (Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3.3) を含め、核データライブラリを入手したい、あるいは詳しく知りたいときは、わが国で核データライブラリを整備管理している機関である日本原子力研究開発機構（核データ評価研究グループ）のホームページを参照のこと。
<http://www.ndc.tokai-sc.jaea.go.jp/index.html>

《演習問題》

- [1] ^{235}U 、 ^{10}B 、 ^1H からなる物質を用いて、半径31.4cmの球形原子炉を真空中に作る。下表の数値データを用いて、この原子炉に対する以下の(1)～(4)を、有効数字2桁で求めよ。

- (1) Σ_a (巨視的吸収断面積)
 (2) Σ_f (巨視的核分裂断面積)
 (3) Σ_t (巨視的全断面積)
 (4) ℓ (平均自由行程)

		単位	^{235}U	^{10}B	^1H
σ_c	微視的捕獲断面積	barn	100	0	0
σ_α	微視的 (n, α) 断面積	barn	0	5000	0
σ_f	微視的核分裂断面積	barn	500	0	0
σ_s	微視的散乱断面積	barn	0	0	20
A	原子量	—	235	10	1
N	密度	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.235	0.0012	0.5

- [2] 熱中性子ビームを、厚さ0.1mmのカドミウム板に入射させたとき、透過率（反対側に通過してきた熱中性子の割合）が21.4%であった。この場合のカドミウムの熱中性子に対する微視的全断面積を求めよ。ただし、カドミウムの原子量を112.4、密度を8.65g/cm³とする。

- [3] 50kgの裸金属ウラン炉心が高速中性子により臨界状態にある。炉出力が100Wのとき、この炉心内の平均中性子束を求めよ。ただし、ウランの原子量を238、平均核分裂断面積を1.40 (barn) および核分裂当たりの放出エネルギーを3.04×10⁻¹¹W・secとする。

- [4] 中性子核反応に関する以下の文章中の□に適当な語句、数字または数式を入れ、番号とともに記せ。

中性子が起こす核反応を定量的に扱う目的で、中性子が核反応する確率に関係する断面積という量が導入され、微視的断面積 σ と巨視的断面積 Σ の二つの形で用いられている。微視的断面積 σ は、原子核によって大きく変化するとともに、中性子エネルギーによっても大きく変化する。断面積のエネルギー依存性を表す用語として、熱中性子エネルギー領域においてウランなどの重い原子核によく見られる①□、eV程度～keV程度の中性子エネルギー領域によく見られる共鳴構造などがある。断面積の具体的な値を、原子炉で重要なウランについて見てみると、ウラン235の場合、熱中性子に対して約②□ (barn) の核分裂反応断面積をもつ。これに対しウラン238の場合は、中性子エネルギー③□ eVに非常に大きな共鳴をもち、そのピーク断面積は数千 (barn) を超える。もう一つの断面積である巨視的断面積 Σ は、原子核によって構成される物質に対する量であり、通常、微視的断面積 σ と物質の密度 ρ および原子量 M から、次式により求めることができる。

$$\Sigma = \text{④} \square$$

なお、 Σ として巨視的全断面積を考えた場合、その逆数は⑤□と呼ばれ、核反応間の平均的な距離の目安を与える。