

第 4 章 中性子と原子核の反応および断面積

内容

第4章 中性子と原子核の反応および断面積.....	63
4.1 中性子と原子核の反応の種類.....	65
4.1.1 核分裂反応	66
4.1.2 弾性散乱反応.....	67
4.1.3 非弾性散乱反応.....	70
4.1.4 放射捕獲反応.....	71
4.1.5 $(n, 2n)$ および $(n, 3n)$ 反応	72
4.1.6 (n, α) および (n, p) 反応	72
4.1.7 その他の反応.....	72
4.2 中性子と原子核の反応確率と断面積.....	74
4.2.1 中性子と原子核の反応確率と断面積の関係	74
4.2.2 微視的断面積.....	75
4.2.3 巨視的断面積.....	77
4.2.4 微視的断面積の特徴.....	79
4.3 中性子と原子核の反応率.....	84
4.3.1 一つの中性子と物質の反応率.....	84
4.3.2 多数の中性子と物質の反応率.....	85
4.3.3 中性子束	86
4.4 中性子と原子核の相互作用データベース（中性子断面積データ）	89

【この章のポイント】

- ・ 中性子と原子核の相互作用の確率は、微視的断面積と呼ばれ、入射する中性子のエネルギーにより、大きく変化する。
- ・ 中性子と原子核の相互作用の種類は、散乱反応及び吸収反応が存在し、吸収反応は核分裂反応や捕獲反応などがある。
- ・ 原子炉の特性を評価する基礎となる中性子と原子核の相互作用率（反応率）は、物質の原子数密度、微視的断面積、中性子数密度、中性子の速さから計算することが出来る。

原子炉内で発生する様々な物理現象のうち、最も重要なものの一つは原子炉内を飛び交っている中性子と原子核を構成する様々な物質の相互作用であろう。

この相互作用の一つである核分裂反応を考える。核分裂を起こす核種（ウラン、プルトニウムなど）の原子核と中性子が相互作用すると、核分裂が起こり、その際に大量のエネルギーを発生する。従って、原子炉内における発熱分布は、原子炉内における核分裂反応の空間分布に依存して決まる。仮に発熱分布に極端な偏りがあり、局所的に非常に高い発熱が生じている場合（つまり、局所的に非常に高い割合で核分裂反応が発生している場合）、原子燃料がその熱に耐えることが出来ず、破損してしまう可能性もある。この例は、中性子と原子核の相互作用が、原子炉の振る舞いの多くを決定することを示している。

原子炉物理の主要な関心事の一つは、中性子と原子核の反応を精度良く定量的に評価することである。第4章では、中性子と原子核の反応について説明を行う。

4.1 中性子と原子核の反応の種類

【この節のポイント】

- ・ 中性子と原子核の相互作用の種類は、中性子が原子核に衝突し散乱される散乱反応、中性子が原子核に吸収される吸収反応がある。
- ・ 散乱反応は、運動エネルギーが保存される弾性散乱反応、運動エネルギーが保存されない非弾性散乱反応がある。
- ・ 吸収反応は、原子核が分裂する核分裂反応、中性子が原子核に捕獲される捕獲反応などがある。

中性子は電荷を持っていないため、正に帯電した原子核あるいは負に帯電した電子から電氣的な力を受けることはない。従って、中性子は原子核の周りを回っている電子に邪魔されることなく（電子と反応することなく）原子核に到達し、原子核と相互作用することが出来る。

中性子と原子核の相互作用は図4-1のように整理できる。本節では、中性子と原子核の相互作用のうち、主要なものについて説明を行う。

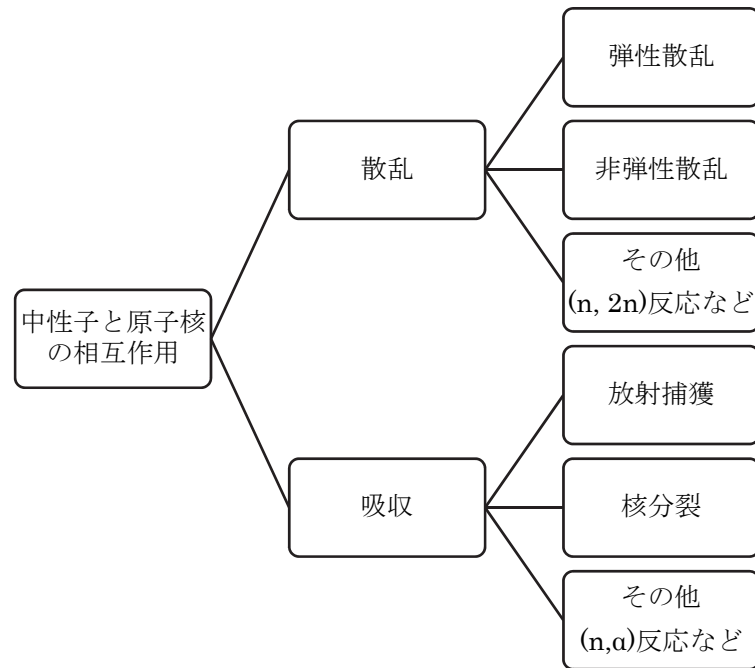


図 4-1 中性子と原子核の反応

4.1.1 核分裂反応

原子炉における中性子と原子核の反応のうち、最も重要なものの一つである。ウラン、プルトニウムなど質量数大きい核種の原子核と中性子が反応すると、中性子を一旦吸収した原子核が二つに分裂することがある(図 4-2)。これが**核分裂反応 (nuclear fission reaction)**である。この際、反応を起こした原子核や、入射した中性子のエネルギーにもよるが、多くの場合、平均的に 2~3 個の中性子も同時に放出する。この中性子がさらに別の原子核と反応し、核分裂反応を発生させる場合があり、このような核分裂反応の「連鎖」が継続する状態を**核分裂連鎖反応 (fission chain reaction)**と呼んでいる。

核分裂反応で分裂した後の原子核は**核分裂片 (fission fragment)**と呼ばれ、大きな運動エネルギー(約 170 MeV)を持っている。核分裂片は、核分裂を起こした地点から遠くへは飛ばず、ほぼその場で全量が熱エネルギーに変わる。原子力発電は、この熱エネルギーを利用して行うものである。

核分裂で発生した核分裂片は、一般にエネルギーを余剰に持っている(持て余している)不安定な状態である。そのため、多くの核分裂片は、この余剰のエネルギーを放射線として放出し、自らのエネルギーを減ずることで、よりエネルギー的に安定な状態に変化する。これが核分裂を起こした核燃料から高い放射線が放出される理由となる。ハイテンションな人がはしゃぎまくり、エネルギーを使うことで「安定」な状態になるのと同じイメージであろう。

核分裂反応では、原子核が二つに分裂し、さらに中性子を放出することから、質量数、原子番号ともに変化する。詳細については、第 5 章で説明する。

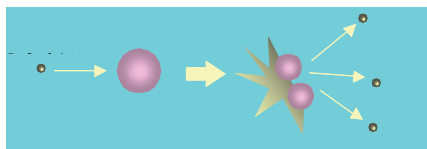


図 4-2 核分裂反応のイメージ

【コラム】ニュートロンジャマーとニュートロンジャマーキャンセラー

アニメ機動戦士ガンダムシリーズのシード、シード・デスティニーでは、「ニュートロンジャマー」と「ニュートロンジャマーキャンセラー」という装置が出てくる。ニュートロンジャマーは中性子が原子核と相互作用して核分裂を発生させるメカニズムを妨害 (jamming) することで、核分裂を抑制するデバイスである。すなわち、ニュートロンをジャミングするということで、ニュートロンジャマーと称されている (ニュートロンの邪魔をするからではない)。このアニメの世界では、ニュートロンジャマーのため、核兵器が利用できないという設定になっている。ニュートロンジャマーのメカニズムは不明であるが、中性子は荷電粒子ではないことから、電場・磁場などの影響を受けないため、このデバイスを実際に開発することは原理的に困難であると思われる。実際に開発されれば、そのインパクトは非常に大きいであろう。制御棒に代わる原子炉停止装置として使用できると思われる。

なお、ニュートロンジャマーキャンセラーは、ニュートロンジャマーの効果をキャンセルする装置であり、この装置を積んでいる機体 (フリーダムガンダム) は、核分裂炉をエネルギー源として稼働している。この機体が落とされる際、パイロットのキラ・ヤマトが原子炉の緊急停止 (スクラム) を行う描写がある。

4.1.2 弾性散乱反応

弾性散乱 (elastic scattering) は中性子が原子核と衝突し、散乱される反応である。この際、衝突前後で中性子と原子核の運動エネルギーの総和は保存される。運動エネルギーの総和が保存されない場合、後に説明する**非弾性散乱 (inelastic scattering)** となる。ビリヤードのように、球と球が衝突するイメージで捉えると良い (図 4-3)。ただし、ビリヤードでは、球 (玉) の大きさは手玉・的玉ともに全て同じ大きさ (重さ) であるが、中性子と原子核の衝突の場合、原子核の重さが核種により異なる。水素原子 (原子核が陽子 1 つからなる軽水素) の場合、原子核と中性子はほぼ同じ重さであり、ビリヤードの玉と玉の衝突のイメージに近いものとなる。一方、ウラン原子の場合、原子核の重さは中性子の 200 倍以上である。

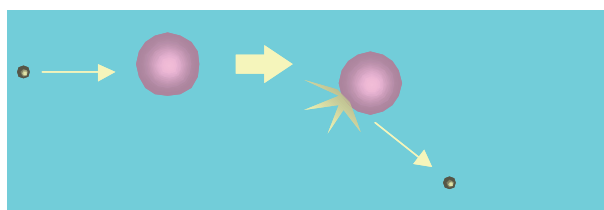


図 4-3 弾性散乱のイメージ

弾性散乱が生じると、中性子の飛行方向とエネルギーが変化する。衝突により中性子がエネルギーを失うため、弾性散乱後の中性子のエネルギーは、散乱前のものに比べて低くなる。水素の原子核の例を考えよう。中性子が水素の原子核を「かすった」場合、方向もエネルギーもほぼ変化しないであろう。一方、中性子が水素の原子核と「真正面から衝突した」場合、両者の重さはほぼ同じであることから、中性子のエネルギーはほぼゼロとなり、原子核が中性子の持っていたエネルギーをそのまま受け取って運動を開始することになる。これらの関係は、先に述べたビリヤードの手玉と的玉の関係と同じである。

逆に、非常に重い原子核の場合はどうであろうか？例えば、ウランの原子核を考える。U-238 の場合、原子核の重さは、中性子のほぼ 240 倍である。ビリヤードの手玉は約 150 g、ボーリングの玉は 6 kg 程度なので、重さの比は 40 でしかない。中性子とウランの原子核の重さの違いはこれよりずっと大きい。ボーリングの玉を U-238 の原子核とすると、中性子に相当する重さは約 25 g であり、10 円玉 5 枚分に相当する。さて、中性子が ^{238}U の原子核をかすめた場合、先と同じく、方向もエネルギーもほぼ変化しないと考えて良い。一方、両者が正面衝突した場合、U-238 の原子核は非常に重たいので、U-238 の原子核はほぼ動かず、中性子がほぼそのままのエネルギーで跳ね返るであろう。すなわち、中性子はほとんどエネルギーを失わないはずである。

これまでの考察をまとめてみると、質量数が小さく軽い原子核と中性子が弾性散乱した場合、平均的には中性子は大きくエネルギーを失う、言い換えると大きく減速することが予想される。一方で質量数が大きく重い原子核と中性子が弾性散乱した場合、中性子はエネルギーをほとんど失わない、言い換えるとほとんど減速しないことになる。

第5章で説明するが、ウランやプルトニウムなどの核分裂反応は、中性子の速さが小さいとき、より発生しやすい性質を持っている。一方、核分裂で発生する中性子の速さは極めて大きい。この中性子の速さを減少させるためには、質量数の小さい原子核と弾性散乱させることが有効であり、そのため、軽水炉では、水素が多量に含まれている水を冷却材かつ中性子の速さを小さくする（中性子を減速させる）減速材として用いているのである。

もう一点、弾性散乱後の中性子の飛行方向について検討してみよう。まず、イメージしやすい例としてビリヤードの手玉と的玉を考える。手玉は、的玉に当たった後、どの方向に進むであろうか？ただし、手玉にスピンをかけることは行わないとする。手玉が的玉をかすった場合は、方向はほぼ変化しない。手玉が的玉の斜めに当たった場合、手玉は斜め前方方向に飛ぶであろう。ただし、手玉が的玉にどのように当たろうとも、(スピンを掛けなければ)手前に戻ってくることはない。一方、ビリヤードの球をボーリングの球など、非常に重たい球に当たった場合、手前に戻ってくることもあるため、全体的にどちらの方向に散乱されるかは分からない。以上のことから、中性子が原子核と弾性衝突する場合、原子核が軽ければ中性子は全体的に前方に（元々飛行していた方向に）偏って散乱され、原子核が重ければ、原子核を中心として等方的に（どの方角にも同じ確率で）散乱されることが分かる。図 4-4 に水素 (H)、重水素 (D)、炭素 12 (C)、ウラン 238 (U) と中性子が弾性散乱した場合の

散乱後の角度を示す。散乱により角度が変わらない場合が散乱角=0、散乱により入射方向に逆戻りする場合は散乱角 ($\pi = 3.14$) となる。これより、H に対しては、後方への散乱（散乱角 $> \pi/2 = 1.57$ ）が発生せず、前方に散乱が偏っていることが分かる。原子核の質量が大きくなるにつれ、散乱の角度分布は急速に等方に（どの角度にも同じ確率で）散乱されるようになることが分かる。

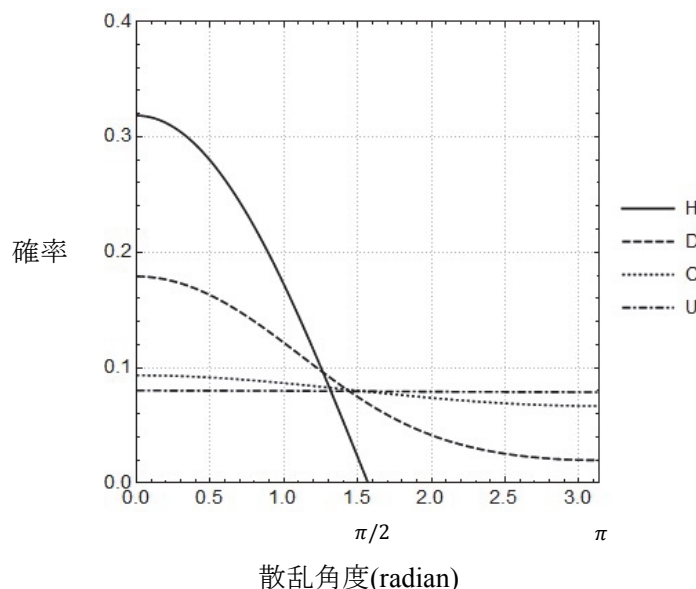


図 4-4 弾性散乱時の散乱方向毎の確率（実験室系）。散乱角度は、入射方向と散乱方向の間の角度であり、散乱により角度が変わらない場合、散乱角度は 0、入射方向と垂直な方向に散乱される場合は $\pi/2$ 、入射方向と逆方向に散乱される場合は π になる。確率は単位立体角あたりの値

なお、弾性散乱反応では、原子核の質量数と原子番号は変化しない。

【発展的内容】弾性散乱後の中性子の速さが増加する場合は？

ビリヤードの手玉が的玉に当たった場合、手玉の速さは必ず減少する。これまで述べたように、中性子（手玉）が原子核（的玉）に当たった場合、中性子の速さは減少する場合が多い。ここで、「場合が多い」と書いたのは、弾性散乱後の中性子の速さが減少せず、むしろ増加する場合があるからである。では、弾性散乱後に中性子の速さが増加するのは、どのような場合であろうか？

ビリヤードの手玉と的玉に戻って考えてみよう。手玉が的玉に衝突した後、手玉の速さが増加するのはどのような状況であろうか。物理的に明らかであるが、的玉が静止していれば、手玉の速さは衝突後、必ず減少する。一方、的玉が動いている場合はどうであろうか。この場合、手玉が的玉に「弾き飛ばされ」、速さが増加する場合があります。ビリヤードでブレイクショット（最初のショット）をうったとき、遅くなった手玉に速い的玉が当たり、手玉の速さが増加する現象がしばしばある。これが、衝突後に手玉の速さが増加する一例で

ある。

では、中性子と原子核の場合はどうであろうか。的玉である原子核は静止しているわけではなく、絶対零度でなければ熱振動をしており、この熱振動は、温度が高いほど激しくなる。固体や液体の場合、ビリヤードの的玉のように、原子核が空間を自由に飛び回ることではないが、原子核は激しく振動している。そこに速さの小さい（つまり、エネルギーの低い）中性子がゆっくり近づいていくことを想像してみよう。容易にイメージできるように、中性子は原子核の熱振動により「弾き飛ばされ」、速さが増加する。

上記のような現象を原子炉物理の分野では上方散乱と呼んでいる。これは、散乱後の中性子がエネルギー的に高い状態になることを表している。これまでの説明から直感的に理解できると思うが、上方散乱はエネルギーの高い中性子に対しては発生せず、エネルギーの低い中性子に対して顕著に表れる。

【発展的内容】弾性散乱における実際の中性子と原子核の相互作用

これまでの説明では、わかりやすさのため、球と球の衝突のイメージで説明したが、実際の弾性散乱には、中性子が原子核に取り込まれずに散乱されるポテンシャル散乱と中性子が一旦原子核に取り込まれ、原子核にエネルギーを与えることなく中性子が再度放出される共鳴散乱がある。なお、放出される中性子は入射したものと同一の中性子かどうかは分からない。

惑星の重力を利用して宇宙探査船の方向を変えるための「スイングバイ」という技術があるが、ポテンシャル散乱はこのイメージに近い。ただし、スイングバイは惑星の動きを利用して宇宙探査船を加速・減速することにも使われるが、ポテンシャル散乱はそのような効果は発生しない。

4.1.3 非弾性散乱反応

中性子が原子核に一度吸収されたあと、原子核から中性子が放出されることがある。放出された中性子は、原子核に入射・吸収された中性子と同一かどうかは不明であり、多くの場合、入射した中性子と別の中性子が放出されているのであろう。この反応は、中性子の入射→原子核による吸収→中性子の放出、という順番で発生し、原因と結果、すなわち、入射と放出のみを見ると一般的な散乱に見えることから、散乱反応の一つに区別することが出来る（図4-5）。これを**非弾性散乱反応（inelastic scattering reaction）**と呼ぶ。

この反応では、入射した中性子により、原子核がエネルギーを受け取り、エネルギーが高い（励起した）状態になる。中性子を放出した後も原子核のエネルギー状態が高いため、中性子と原子核の力学的な弾性衝突と見ると、エネルギーが保存されていない状態になる。なぜならば、入射した中性子のエネルギーの一部は、原子核を励起されることに消費され、原子核の中にそのエネルギーが保持されているため、放出された中性子と原子核の合計の運動エネルギーは、入射した中性子の運動エネルギーより小さくなるためである。

力学で、運動エネルギーが保存しない衝突は非弾性衝突と呼ばれていることから、ここで

述べた中性子と原子核の散乱は、非弾性散乱と呼ばれている。

非弾性散乱反応では、原子核の質量数と原子番号は変化しない。

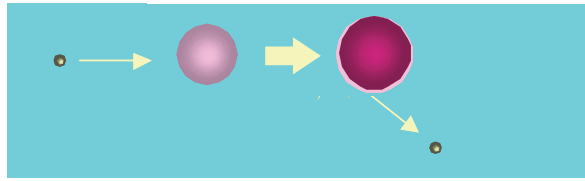


図 4-5 非弾性散乱のイメージ

【発展的内容】 非弾性散乱後の中性子のエネルギー

ウランなど重たい原子核と中性子が弾性散乱しても、中性子はほぼエネルギーを失わない。一方、非弾性散乱では、入射した中性子のエネルギーの一部が標的の原子核の励起エネルギーとなるため、散乱後の中性子のエネルギーは、一般的に弾性散乱に比べて小さくなり、ウランなどの重核種との散乱でも、ほぼゼロになる場合がある。そのため、ウランなどの重核種と中性子の散乱においては、非弾性散乱が中性子の減速に大きな寄与をしている。

4.1.4 放射捕獲反応

中性子が原子核に衝突し吸収（捕獲）されると、原子核は中性子の運動エネルギーや原子核の結合エネルギーの増加などにより、エネルギーが増加した（励起した）状態になる。励起された状態の原子核はエネルギーを持て余しており、「落ち着かない」状態であるため、何らかの形でエネルギーを外部に放出する。この余剰のエネルギーがガンマ線の形で放出（放射）される場合を**放射捕獲反応（radiative capture）**と呼ぶ（図 4-6）。これは、中性子が捕獲され、ガンマ線が放射される反応、という意味である。原子炉物理では、最初の「放射」を省略して「捕獲反応」と称することが一般的である。

放射捕獲反応では、中性子が原子核に吸収されることから、原子核の原子番号は変わらず、質量数は+1 される。

原子炉の制御を行うために使用する制御棒に用いる材料の一つとしてカドミウム（Cd）がある。カドミウムは放射捕獲反応を起こしやすく、炉心内に存在すると、中性子を良く吸収する。そのため、カドミウム製の制御棒を炉心内に挿入すると、核分裂の連鎖反応に必要な中性子がこれに吸収され、連鎖反応に寄与しなくなるため、核分裂数を減らすことが出来る。

このように、放射捕獲反応は、原子炉の運転・制御において重要な意味を持つ。

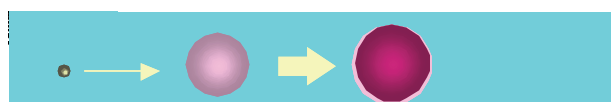


図 4-6 放射捕獲反応のイメージ（励起状態になった原子核はガンマ線を放出する）

4.1.5 (n, 2n)および(n, 3n)反応

4.1.3 節において、非弾性散乱反応について説明した。非弾性散乱では、中性子を吸収した原子核から中性子が1個出てきたが、中性子が2個、3個と出てくる場合がある。これは、入射した中性子のエネルギーが高く、原子核に大きなエネルギーを与えたときに発生することがある。原子核のエネルギーが非常に高くなり、エネルギーを持て余しすぎ、1個の中性子では不足、原子核が複数の中性子を勢い余って放出する、というイメージである。中性子が2個出てくる場合を**(n, 2n)反応** (**(n, 2n) reaction**)、3個出てくる場合を**(n, 3n)反応** (**(n, 3n) reaction**) と呼ぶ。

(n, 2n)および(n, 3n)反応の場合、原子核の原子番号は変わらず、質量数がそれぞれ-1, -2となる。なお、(n, 2n)および(n, 3n)反応は、反応後に中性子が複数出てくる吸収反応として取り扱うことも可能であるが、ここでは散乱反応として区分している。

4.1.6 (n, α)および(n, p)反応

中性子を吸収した原子核が中性子とは別の粒子を放出することがある。ヘリウムの原子核（陽子2個、中性子2個）であるα粒子を放出する場合を**(n, α)反応** (**(n, α) reaction**) という。また、陽子を放出する場合を**(n, p)反応** (**(n, p) reaction**) という。また、このように電気を帯びた荷電粒子を放出する反応を荷電粒子反応と呼ぶことがある。

ホウ素 (B) は、ホウ酸 (H_3BO_3) の形で冷却材に溶かしたり、制御棒の形で原子炉の制御に用いたりされる。天然のホウ素は、二種類の同位体から構成され、質量数が10のB-10が約20%、11のB-11が約80%である。このうち、B-10は中性子の良い吸収材であり、中性子を吸収するとα粒子を放出してリチウム (Li) になる。発生したα粒子及びリチウムの飛程は非常に短い。

(n, α)反応の場合、原子核の原子番号は-2、質量数が-3となる。また、(n, p)反応の場合、原子番号は-1、質量数は変化しない。

【コラム】(n, α)反応の医療への応用

脳腫瘍などの治療に用いられるホウ素捕獲療法は(n, α)反応を使用している。B-10を含んだ薬剤（腫瘍に集まる性質を持ったもの）を投与したあと、腫瘍部分に原子炉などから取り出した中性子を照射することでB-10の(n, α)反応を発生させ、発生したα粒子及びリチウムの運動エネルギーにより、ガン細胞を破壊する。α粒子は荷電粒子であり、また質量が大きいため飛程が非常に短い。従って、ガン細胞に多くのダメージを与え、周辺の健康な細胞への影響は低くなる。

4.1.7 その他の反応

ここまで、原子炉物理にとって重要な中性子と原子核の反応について説明してきた。原子炉内で発生する中性子と原子核の反応は多種多様であり、例えば、後述する中性子と原子核の反応データベースには、数十種類の反応の種類が定義されている。

原子炉の解析では、これら多種多様の反応を全て考慮する必要はない。理由は二つあり、(1)多くの反応の発生確率は低く、事実上発生しない反応も多いこと、(2)原子炉の振る舞いを評価する観点からは、中性子の数と反応後のエネルギーが重要であり、中性子が発生しない原子核反応は全て「吸収反応」として一括りに扱えること、である。

4.2 中性子と原子核の反応確率と断面積

【この節のポイント】

- ・ 中性子と原子核の相互作用は、確率的に発生する。
- ・ 中性子と一個の原子核の相互作用のしやすさは、微視的断面積で表される。微視的断面積は面積の単位を持つ。原子核を標的と考えたときの標的の大きさに相当する。
- ・ 中性子と物質の相互作用のしやすさは、巨視的断面積で表される。巨視的断面積は微視的断面積と原子数密度の掛け算で表され、長さの逆数の単位を持つ。中性子が物質の中を単位長さだけ移動するときの相互作用の確率に相当する。

前節では、中性子と原子核の様々な種類の反応について説明した。本節では、中性子と原子核が反応する確率について説明する。原子炉物理では、後述するように、中性子と原子核の反応確率は、**断面積 (cross section)** と呼ばれている。

さて、中性子と原子核がビリヤードの玉のような剛体球であるとしよう。この場合、中性子がどのような速さであっても、原子核と衝突する確率は変化しないであろう。仮に、中性子と原子核の反応確率が（原子核の種類には依存したとしても）中性子の速さによって変化しなければ、原子炉物理は、はるかに簡単なものになっていたに違いない。

しかしながら、現実には、中性子と原子核の反応確率は、中性子の速さ（エネルギー）に対して、極めて複雑な挙動を示す場合が多い。原子炉内を飛び交う中性子のエネルギー範囲は、約 $20 \text{ MeV} \sim 10^{-5} \text{ eV}$ と 12 桁にも及ぶが、単一核種の反応確率であっても中性子のエネルギーによって数桁、値が変化することが一般的である。中性子と原子核の反応には様々な種類があるが、反応が異なれば反応確率は数桁の大きさで値が変化する。また、中性子のエネルギーが同じであっても、核種により反応断面積はやはり数桁の大きさで値が異なる。このように、中性子と原子核の反応確率は極めて複雑であり、これが原子炉物理を難しいものとし、原子炉の設計計算を難しくしている要因の一つでもある。

以下では、まず中性子と原子核の反応確率の考え方を述べ、なぜ反応確率が断面積と呼ばれているかを説明する。次に、代表的な反応確率（断面積）を例にとって、その特徴を説明する。

4.2.1 中性子と原子核の反応確率と断面積の関係

お祭りの縁日でよくやっている射的を考えよう（図 4-7）。射的では、コルクの玉を鉄砲で撃ち、棚に飾ってある景品に当て、景品を棚から落としてゲットする。では、どのような景品であればゲットし易いであろうか。以下では、話を簡単にするため、景品の重さについては考慮せず（全て同じ重さとして）、大きさだけを考えることにする。



図 4-7 縁日の射的

容易に想像できるように、景品が大きいほどコルク玉を当て易いであろう。もう少し正確に言うと、単に大きいというだけではなく、射的をやっている人から見て、景品の面積が大きいほどコルク玉を当てやすいと考えてよい。ちなみに、大きくても、景品が薄い箱のような形状をしている場合、側面を向けられていれば、玉が当たりにくいいため難易度は上がる。実際に、高い景品の場合は、このようにおいてある場合がある。側面から当てても景品が倒れないので、二重に難しい。

通常、射的は景品に狙いを定めてそれを落とすわけであるが、仮に目隠しをして射的をするを考えよう。この場合、景品をゲットする確率は格段に下がるものの、やはり射的をする人から見て、面積が大きい景品に当て易いことは確かであろう。

この「目隠しをして射的をする」状況は、中性子と原子核の相互作用を考える上で直感的によいモデルになっている。中性子は原子炉の中をランダムに飛行しており（目隠しをして射的をしている状態であり）、中性子（コルクの玉）が原子核（景品）に衝突するかどうかを考えるわけである。先の「射的モデル」の議論によると、景品の「面積」が大きいほど当てやすいということであった。より厳密に言うと、射的をする人から見た景品の「断面積」が大きいほど当たりやすいということである。

直感的に当たり前のことを言っているように聞こえるかもしれないが、このイメージを中性子と原子核の相互作用に当てはめることで、両者の反応確率が「断面積」（英語では Cross section）と呼ばれていることが理解できる。すなわち、原子核の「断面積」が大きいほど反応確率が高い、ということである。

4.2.2 微視的断面積

前節では、射的モデルを使用して、中性子と原子核の相互作用のイメージを描いた。そこで重要であったのは、景品の「断面積」であった。

原子炉物理では、原子核一個の反応確率（景品一個にコルク玉が当たる確率に相当）を**微視的断面積（microscopic cross section）**と呼んでいる。詳細は後述するが、まずは、中性子から見た原子核の「当たりやすさ」と「大きさ」を示しているものと理解しておけばよい。

断面積の単位は、当然ながら、面積であり、SI 単位系では m^2 となる。ただし、原子核の

直径は 10^{-15} m 程度であり、非常に小さい。そのため、原子核の「断面積」は非常に小さい値になる。このため、原子炉物理では、微視的断面積を表すために **barn** という単位を用いる。1 barn は 10^{-28} m² もしくは 10^{-24} cm² と定義されている。1 barn は、大雑把に言って、ウラン原子核の幾何形状的な断面積に対応している。なお、barn の省略形として、b が用いられる場合もある。

微視的断面積は、4.1 節で述べた反応の種類だけある (図 4-8)。核分裂に対しては微視的核分裂断面積、弾性散乱に対しては微視的弾性散乱断面積、等であり、中性子と原子核の反応に応じて微視的〇〇断面積と称される。なお、全ての反応を積算したものは、微視的全断面積と称される。

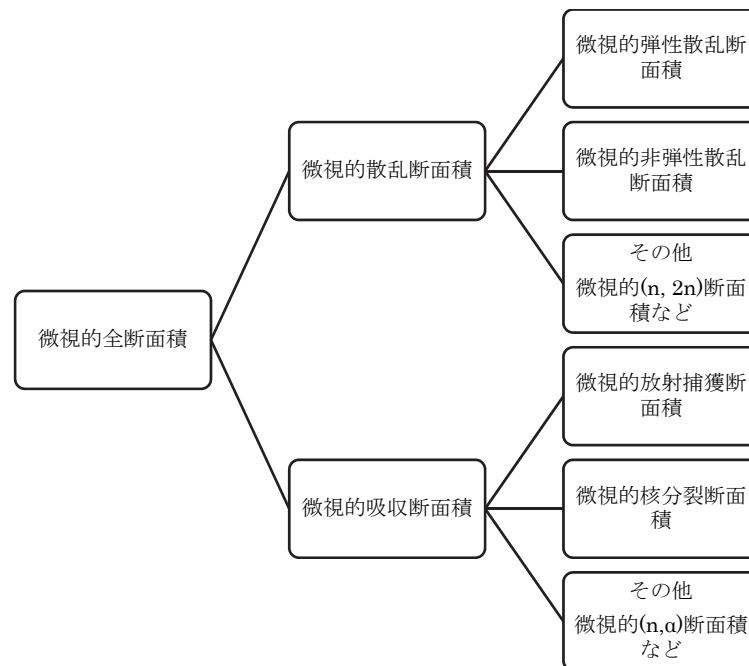


図 4-8 微視的断面積の種類

【コラム】 barn の語源

「barn」を辞書で調べると、「納屋」と出てくる。納屋と原子核の反応確率がどのように関係するのであろうか。英語に”couldn't hit the broad side of a barn” (「大きな」納屋の広い側面に当てることさえできない) というフレーズがあり、これは、「目的がなっておらず、何かを達成することが難しい状況」を示すとのことである。

このフレーズに触発され、マンハッタン計画に従事していた科学者が、秘密を保持しつつ、(目眩ましもかねて?) ウランの原子核の反応確率 (断面積) を表すために、barn を用いたようである。また、加速器を用いてウランの原子核に粒子を衝突させる実験においては、ウランの原子核は十分に大きいことも、この barn という単位を採用した理由になっていたらしい。(参考: Wikipedia、英語版)

4.2.3 巨視的断面積

もう一度射的の話に戻ろう。先ほどは、一個の景品を考え、景品の大きさ（断面積）が景品に当たる確率に比例することを述べた。さて、射的をやっている店が何軒かあるとしよう。できるだけたくさん景品をゲットするためには、どのように射的屋を選べばよいであろうか。話を簡単にするため、全ての射的屋で値段は変わらず、射撃に使用するコルク球の数も同一であるとする。さらに、全ての射的屋で景品一個の値段と重量は同一で、景品の数はコルク球の数より十分多いとする。ここでの観点は、できるだけ景品の数を稼ぐことである。なお、普通の射的ではあり得ないが、目隠しをするものとする。

このような条件で考えたとき、選び方としては、①できるだけサイズの大きな（断面積の大きな）景品が、②できるだけ密集しておいてあり、③景品がおいてある範囲が広く、④景品までの距離が近いところ、が良さそうに思える。

また、通常の射的には存在しないが、屋根から景品がランダムに吊り下げられている状況を考える。景品は、床から天井まで、さらに奥行き方向にランダムに吊り下げられているものとする。この場合でも、上記と同じく、①景品のサイズが大きく、②密集しており、③景品がある範囲（体積）が大きく、④景品までが近い、状況が有利である。

これまでの議論で明らかのように、景品一個あたりの断面積が大きいほど、コルク玉は景品に当たりやすい。景品が密集していれば（理想的には隙間がなければ）、さらに当たりやすくなるであろう。景品の置いてある範囲が広い（従って、置いてある景品の数が多い）場合も当たりやすくなるであろう。また、景品までの距離が近いと当たりやすい。

いずれも直感的に当たり前であるが、これを中性子と原子核の相互作用に置き換えて考える。①は、原子核の微視的断面積が大きいことに相当する。②は、原子核の原子数密度が大きいことに相当する。③は目標の原子核から構成される物質の体積が大きいことに相当する。④は、中性子の発生源から物質までの距離が小さいことに対応する。

これらのうち、原子核が構成する物質の性質に対応するものは、①の微視的断面積と②の原子数密度である。これらが大きいほど、中性子と物質は相互作用しやすくなる。そのため、原子炉物理では、微視的断面積に原子数密度を乗じた値を**巨視的断面積（macroscopic cross section）**として定義している。中性子が物質に入射した場合、巨視的断面積が大きいほど、物質を構成する原子核と中性子が相互作用しやすくなる。なお、物質に複数の核種が含まれている場合、核種毎にその核種の微視的断面積とその核種の原子数密度を掛け合わせ、これを全ての核種について足し合わせたものが巨視的断面積となる。

微視的断面積の単位が「面積（ m^2 ）」であり、原子数密度の単位は「 $1/\text{体積}$ （ $1/\text{m}^3$ ）」である。従って、これらを乗じた巨視的断面積の単位は「 $1/\text{長さ}$ （ $1/\text{m}$ ）」となる。長さの逆数を持つ物理量を「面積」と称しているのはやや違和感があるかもしれない。これは、元々の英語が **macroscopic cross section** であり、それを和訳しているためである。巨視的断面積が大きいほど中性子が原子核と相互作用しやすくなることは、先に述べたとおりである。そこで、巨視的断面積は、中性子が単位距離進む間に相互作用する確率を示しているものと理解すればよい。そうすれば、巨視的断面積の単位が「 $1/\text{長さ}$ 」になっていることが納得できるで

あろう。

【コラム】 物質中で原子核はまばらにしか存在していない

原子の大きさは大雑把に 10^{-10} m であり、原子核の大きさは 10^{-15} m である。つまり、原子の大きさと原子核の大きさは 10^5 (10 万倍) の違いがある。

東京ドームのグラウンドの面積は約 13,000 m² である。東京ドームを原子とすると、原子核の面積は、概ね 0.1 m²、つまり、直径 0.35 m の円盤に相当する。グラウンドの中にボールをランダムに投げ入れ、この円盤にボールが当たる確率は極めて低いであろう。すなわち、ある 1 個の原子に中性子が入射しても、原子核と反応を起こす確率は低いということである。

ここまで、中性子と原子核の相互作用を射的のモデルで説明してきたが、実際の原子核は、射的屋の景品とは比べものにならないほど、まばらにしか存在していないということである。この点を頭に入れておくとよい。

なお、物質を構成する原子核の数は極めて多いため、結果として中性子と物質は「それなりに」相互作用する。例えば、常温の水の場合、5 cm の厚さがあれば、99.9% 程度の中性子は、水を構成する水素あるいは酸素の原子核と何らかの相互作用をする。

巨視的断面積は、微視的断面積に原子数密度を乗じたものであるため、微視的断面積と同じだけ種類が存在する (図 4-9)。

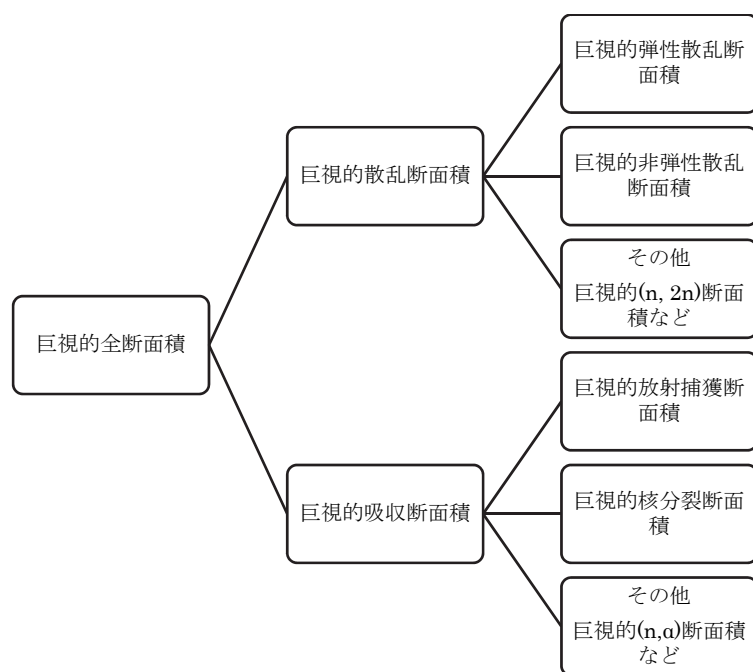


図 4-9 巨視的断面積の種類

4.2.4 微視的断面積の特徴

ここでは、代表的な微視的断面積について、入射する中性子に対するエネルギー依存性について説明する。ポイントは以下の5点である。

- ①入射する中性子のエネルギーにより、微視的断面積は大きく変化する。
- ②微視的断面積（の種類、核種によって微視的断面積は大きく異なる。また、同位体であっても、質量数が1異なるだけで微視的断面積は大きく異なる。
- ③原子核に入射する中性子のエネルギーが低いほど微視的断面積が大きくなる場合が多い。すなわち、エネルギーの低い中性子の方が、原子核と反応しやすい場合が多い。
- ④質量数が大きくなるほど、微視的断面積のエネルギー依存性は複雑となる。また、特定の中性子エネルギーに対して、反応確率が非常に大きくなる場合がある。
- ⑤中性子の入射エネルギーが大きい場合にのみ、微視的断面積がゼロでない値を持つ場合がある。

以下では、微視的断面積の種類ごとに大まかなエネルギー依存性と、そのような振る舞いを示す理由を述べる。また、代表的な核種について、微視的断面積を図4-10～4-15に図示する。微視的断面積は、中性子のエネルギー範囲が広いこと、また微視的断面積の値が中性子の入射エネルギーに対して大きく変化することから、横軸（入射中性子のエネルギー：eV）、縦軸（微視的断面積：barn）ともに対数で表示するのが一般的である。

(1)微視的弾性散乱断面積

おおよそ、 $0.1 \text{ MeV} \sim 10^{-8} \text{ MeV}$ (10^6 eV) 程度のエネルギー範囲で一定値を取る（例：図4-10）。 $0.01 \text{ eV} \sim 0.001 \text{ eV}$ 以下では、中性子のエネルギーが小さくなるほど微視的断面積は大きくなる。核種ごとの差異は、後述の捕獲断面積などに比べて小さい。

(2)微視的捕獲断面積

基本的に中性子のエネルギーが小さくなるほど、微視的捕獲断面積は大きくなる。多くの場合、微視的断面積は、入射する中性子の速さの逆数に比例する。このような微視的断面積のエネルギー依存性を「 **$1/v$ 依存性 ($1/v$ law)**」と呼んでいる（例：図4-10）。質量数が高くなる核種については、 $1 \text{ eV} \sim 1,000 \text{ eV}$ 近辺で非常に複雑な挙動を示す（例：図4-15）。特定の中性子エネルギーに対して、微視的断面積が極端に大きくなる現象は、**共鳴 (resonance)** と呼ばれており、微視的断面積に共鳴が見られるエネルギー領域を共鳴領域と呼んでいる。なお、 $1/v$ 依存性は、共鳴領域より低いエネルギー領域で見られる。

【コラム】 声でワイングラスを割る

人間の声でワイングラスを割る動画を見たことがあるだろうか？（見たことがない人は、voice glass break で検索）。これは、人間の声の周波数と、ワイングラスが持っている固有振

動数が一致したとき、ワイングラスの振動が極端に大きくなり、その振動に耐えきれずガラスが破損する現象である。固有振動数より低い音、あるいは高い音であれば、かなり大きな音であってもワイングラスは割れないであろう。これは、音によりワイングラスが振動しても、その振動が大きくなりからである。

横軸に音の周波数、縦軸にガラスの振動をとってグラフを書くと、特定の周波数のみでガラスの振動が大きくなり、ピークが生じる。このグラフは、微視的断面積の共鳴ピークとよく似た形をしている。

微視的断面積の共鳴は、中性子の入射エネルギーと、原子核の励起エネルギーが一致した場合、特に反応が起こりやすくなることから発生する。

(3) 微視的核分裂断面積

核分裂を起こす核種のうち、U-235 など質量数が奇数の核種については、微視的捕獲断面積と類似の挙動を示す（例：図 4-14）。すなわち、エネルギーの低い中性子に対して、微視的核分裂断面積は大きくなる。また、微視的核分裂断面積は、入射する中性子の速さの逆数に概ね比例する。一方、核分裂を起こす核種のうち、U-238 等、中性子数が偶数の核種については、低エネルギーの中性子に対して微視的核分裂断面積はほぼゼロであり、一方、高エネルギーの中性子に対して微視的核分裂断面積が大きくなる（例：図 4-15）。すなわち、高エネルギーの中性子に対しては核分裂が生じるが、エネルギーの低い中性子では核分裂が発生しないことになる。なお、高エネルギーの中性子のみで発生する反応を**しきい反応**（**threshold reaction**）と呼ぶ。

(4) (n, α) 反応断面積

B-10 など、特定の核種については、反応のほとんどを(n, α)反応が占めている（例：図 4-11）。ただし、質量数が 1 変わるだけで(n, α)反応の大きさは大きく変化する（例：図 4-11, 4-12）。 $1/v$ 依存性を示す場合がある。

(5) (n, 2n)、(n, 3n) 反応断面積

入射する中性子のエネルギーが高いときに限って発生するしきい反応である。図 4-13 の O-16 に対する(n, 2n)反応の断面積で、このような特性を見ることが出来る。

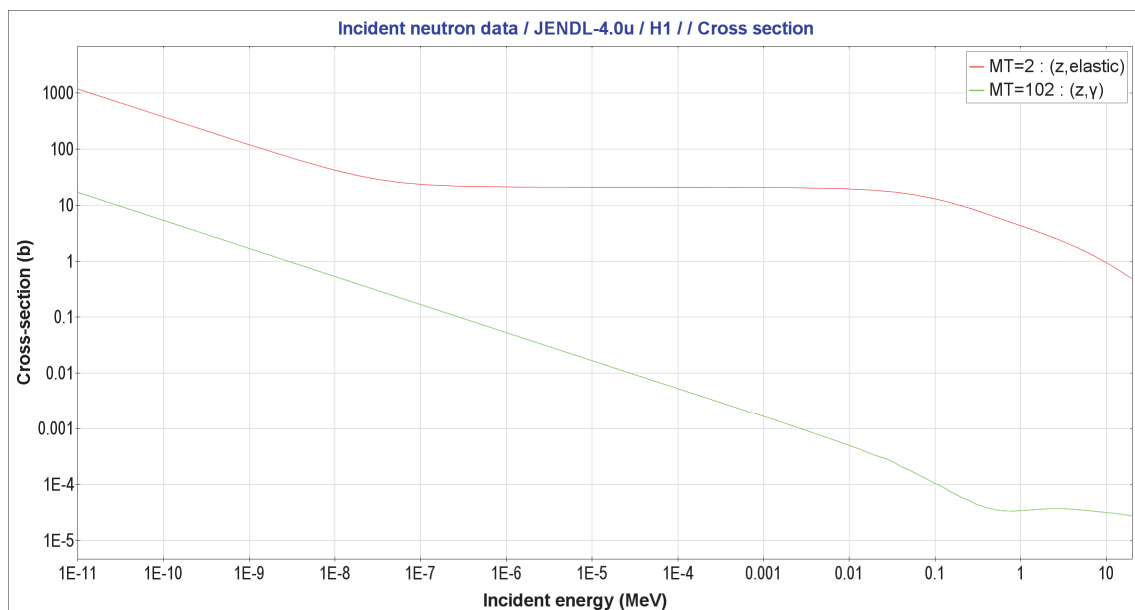


図 4-10 H-1 の微視的弾性散乱断面積 (MT=2) および微視的捕獲断面積 (MT=102)。z は入射粒子であり、中性子(n)を表す。

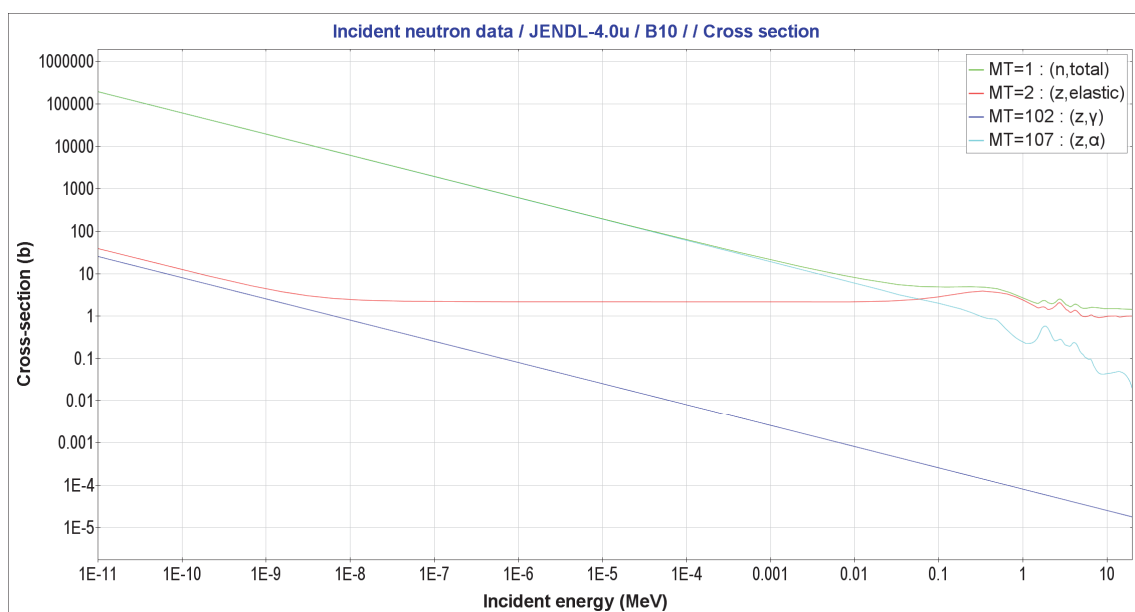


図 4-11 B-10 の微視的全断面積 (MT=1)、微視的弾性散乱断面積 (MT=2)、微視的捕獲断面積 (MT=102) および微視的(n, α)断面積 (MT=107)。z は入射粒子であり、中性子(n)を表す。

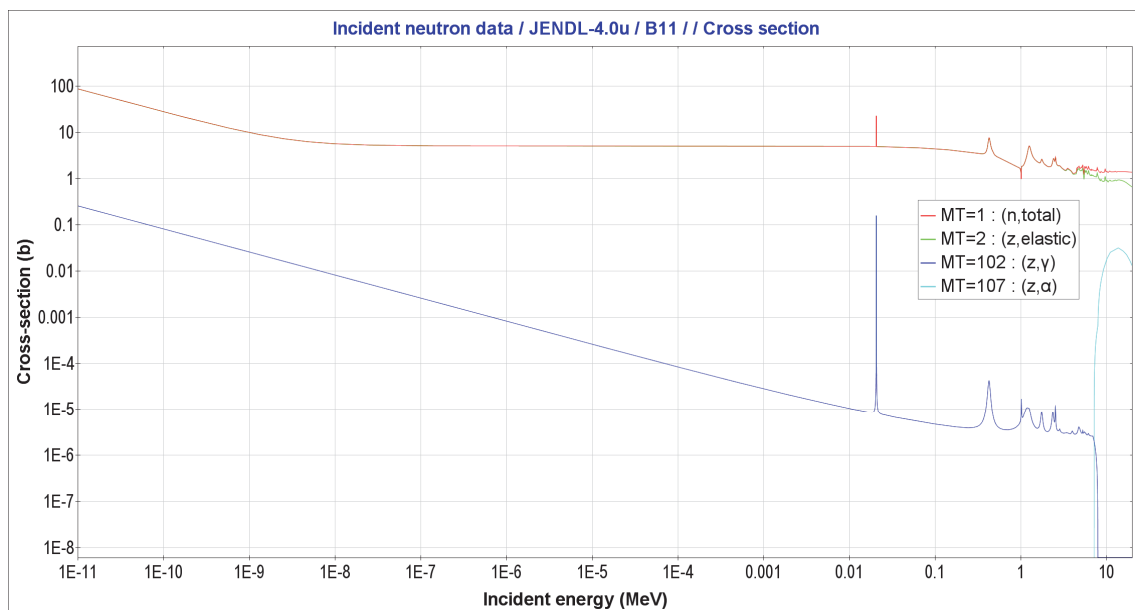


図 4-12 B-11 の微視的全断面積 (MT=1)、微視的弾性散乱断面積 (MT=2)、微視的捕獲断面積 (MT=102) および微視的(n, α)断面積 (MT=107)。z は入射粒子であり、中性子(n)を表す。

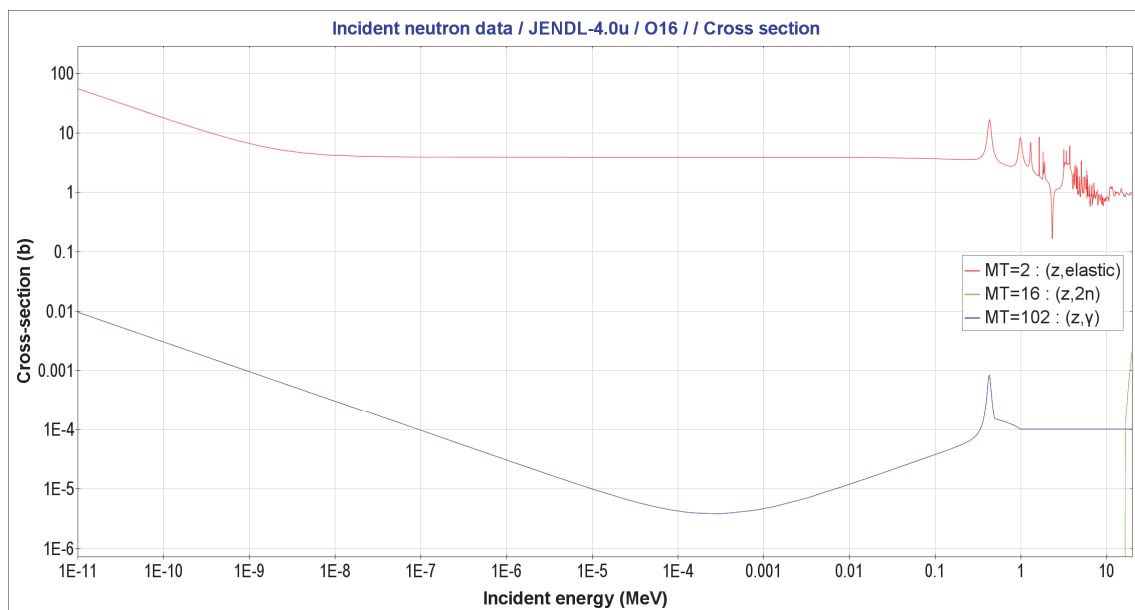


図 4-13 O-16 の微視的弾性散乱断面積 (MT=2)、微視的(n, 2n)断面積 (MT=16) および微視的捕獲断面積 (MT=102)。z は入射粒子であり、中性子(n)を表す。

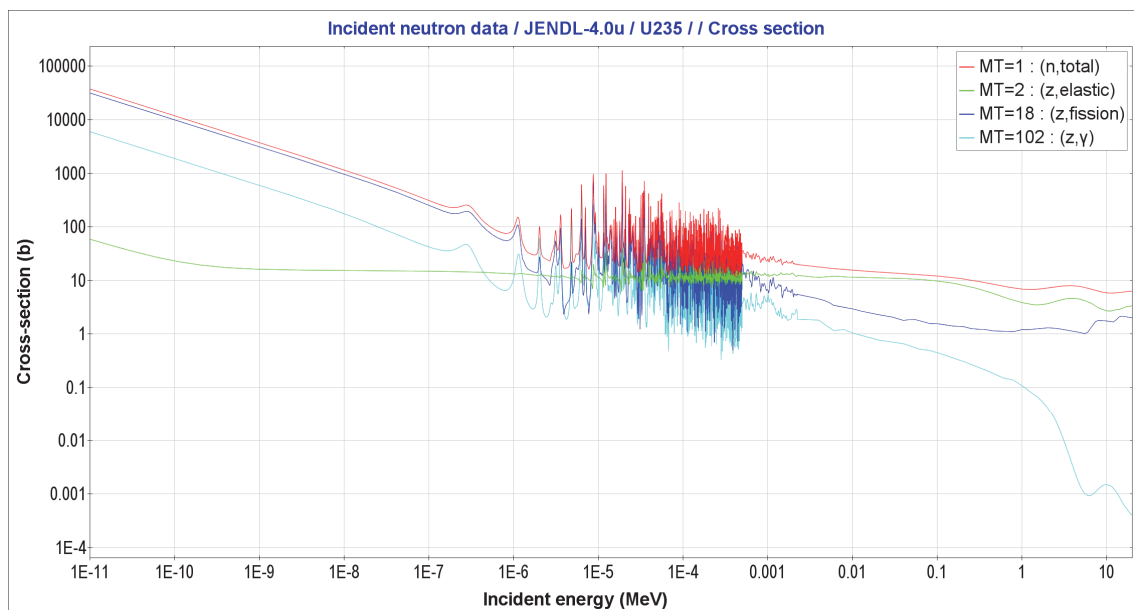


図 4-14 U-235 の微視的全断面積 (MT=1)、微視的弾性散乱断面積 (MT=2)、微視的核分裂断面積 (MT=18) および微視的捕獲断面積 (MT=102)。z は入射粒子であり、中性子(n)を表す。

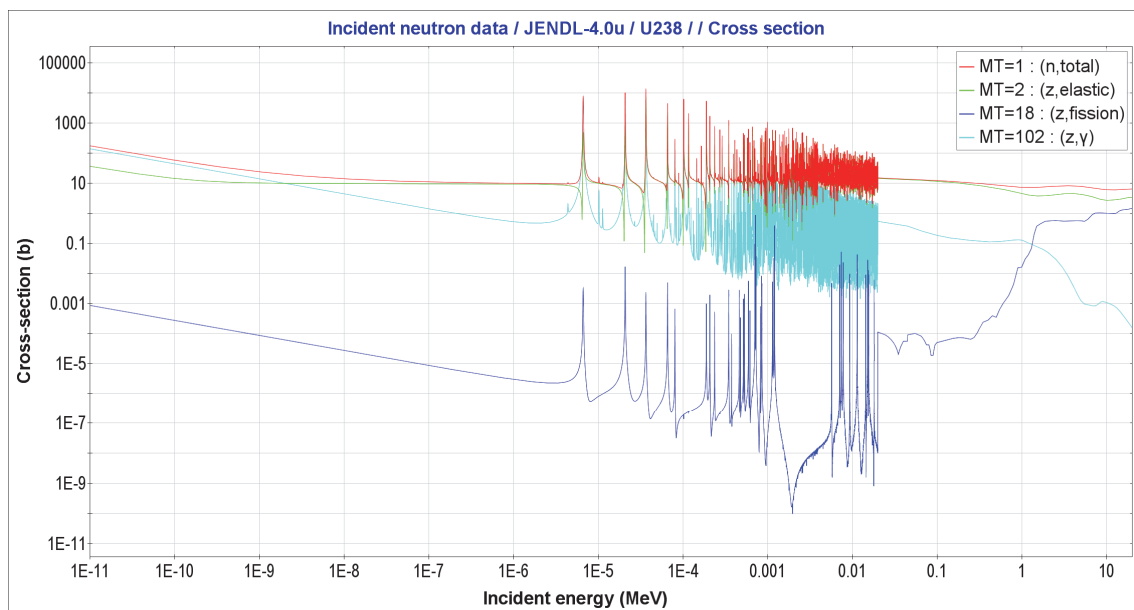


図 4-15 U-238 の微視的全断面積 (MT=1)、微視的弾性散乱断面積 (MT=2)、微視的捕獲断面積 (MT=102) および微視的核分裂断面積 (MT=18)。z は入射粒子であり、中性子(n)を表す。

4.3 中性子と原子核の反応率

【この節のポイント】

- ・ 単位時間・単位体積あたりの中性子と原子核の反応数(反応率)は、微視的断面積、原子数密度と中性子数密度、中性子の速さに比例する。
- ・ 中性子束は、中性子数密度と中性子の速さに比例する物理量であり、単位時間・単位体積あたりの中性子の軌跡(飛行距離)の総和に相当する。
- ・ 反応率は、巨視的断面積(微視的断面積×原子数密度)に中性子束(中性子数密度×中性子の速さ)を乗じることで算出できる。

4.2 節では、一つの中性子と一つの原子核の反応のしやすさ(微視的断面積)および、一つの中性子と多数の原子核が集まって構成される物質の反応のしやすさ(巨視的断面積)について説明した。

原子炉内には、多数の中性子が飛んでおり、これらの中性子が原子炉を構成する物質と相互作用する。本節では、中性子の集団と物質の**反応率(reaction rate)**(相互作用率、単位時間・単位体積あたりの相互作用数)について説明する。以下では、簡単のため、中性子のエネルギー(飛行の速さ)が変わっても、微視的断面積と巨視的断面積が変化しないと仮定して説明を行う。

4.3.1 一つの中性子と物質の反応率

まず、最も簡単なケースとして、原子炉内に中性子が1個だけ飛行しているとする。この場合の反応率はどのようになるだろうか。4.2.3 節において、面積の単位を持つ微視的断面積と物質の原子数密度を乗じた値として、巨視的断面積を説明した。巨視的断面積は、1/長さの単位を持ち、物理的には、「単位体積あたりの標的の面積の合計」あるいは「中性子が単位長さを進むときの反応確率」として解釈できることを説明した。原子炉内を飛行している中性子の単位時間あたりの飛行距離は、速さと同じになる。例えば、毎秒 100 m の速さを持っている中性子が 1 秒間に移動する距離は 100 m である。巨視的断面積は、「中性子が単位長さを進むときの反応確率」であることを思い出すと、1 個の中性子の反応率(単位時間あたりの相互作用数)は、巨視的断面積に中性子の速さを乗じたものになる。例えば、巨視的断面積が 0.01 [1/m] であり、中性子の速さが毎秒 100 m であるとする、 $0.01 \times 100 = 1$ であり、この中性子は、1 秒あたり 1 回相互作用すると見積もることが出来る。また、中性子の速さが毎秒 10 m であるとする、反応率は $0.01 \times 10 = 0.1$ であり、1 秒あたり 0.1 回相互作用すると予想出来る。

なお、冒頭にも述べたが、実際には微視的断面積が中性子のエネルギー(速さ)に依存するため、巨視的断面積も中性子のエネルギーに依存する。従って、このような単純な計算(中性子の速さが 10 倍になると、反応率が 10 倍になる)では反応率は求められないことに注意が必要である。

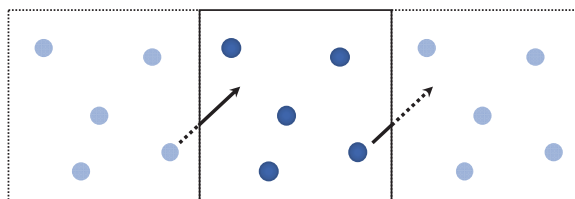
4.3.2 多数の中性子と物質の反応率

次に、原子炉内を多数の中性子が飛行している、より現実的な状況を考えよう。中性子が多数飛んでいるほど、より多く相互作用が起きることは直感的に明らかである。つまり、反応率は原子炉内における中性子数密度に比例するであろう。ここで、中性子数密度（原子炉内を飛行している中性子の単位体積あたりの個数）を例えば 1,000 としよう。これらの中性子の速さを例えば毎秒 100 m とすると、単位体積内に存在する中性子が 1 秒あたりに移動する距離の総和は中性子数密度×中性子の速さで求めることができ、 $1,000 \times 100 \text{ m} = 100,000 \text{ m}$ となる。

【コラム】 単位時間・単位体積あたりの中性子の移動距離

単位体積あたりの中性子の総飛行距離を考える場合、中性子が着目している単位体積から「出て行ってしまう」可能性があるため、総飛行距離をイメージしにくいかもしれない。これは、以下の様に考えると良い。

着目する「単位体積」が原子炉の中に隣接して並んでいると考える（下図）。これらの単位体積の中の中性子の飛行状況は同じであると仮定する。一般的に、単位体積内の中性子数は非常に大きいので、平均的には（総飛行距離を求める観点からは）無理のない仮定であろう。着目している単位体積から出て行った中性子は、となりの単位体積に入射するが、それと同時に、反対側から（同じ飛行方向の）中性子が入射してくると考えることが出来る。これは、中性子が着目している単位体積から出て行かないのと同じ状況になっていると見る事ができる。



なお、このような考え方は、物理の解析で一般的に使用されることがあり、周期境界条件と呼ばれている。

物質の巨視的断面積を 0.01 [1/m] とすると、単位体積・単位時間あたりの中性子と物質の相互作用数は、 $0.01 \times 100,000 = 1,000$ 回と見積もることが出来る。

以上のことから、多数の中性子を考慮した場合の反応率は、「巨視的断面積」×「中性子数密度」×「中性子の速さ」で与えられることが分かる。

4.3.3 中性子束

4.3.2 節において、原子炉内における中性子と物質の反応率は、「巨視的断面積」、「中性子数密度」、「中性子の速さ」のかけ算で表せることを説明した。巨視的断面積は、各物質に固有の値であるが、中性子数密度と中性子の速さは、原子炉内を飛び交っている中性子の飛行状況に関わるものである。原子炉物理では、中性子数密度と中性子の速さのかけ算を**中性子束 (neutron flux)**と呼んでいる。中性子束を用いると、中性子と物質の反応率は、巨視的断面積×中性子束で計算することが出来る。本節では、中性子束の物理的な解釈について、3通りの説明をする。

(1) 単位時間・単位体積あたりの中性子の飛行距離の総和

「犬も歩けば棒に当たる」ということわざがある。「何かをしようとする」と災難にあうことが多い」というアンラッキーな意味と「出歩いていると思わぬ幸運に行き当たる可能性がある」というラッキーな意味合いの二つがあるようである。いずれにせよ、「動き回っていると何かに行き当たる」という意味合いであろう。4.3.2 節で述べたように、中性子の移動距離が長いほど、原子核と出会う確率が高くなることから、中性子束を単位時間・単位体積あたりの中性子の飛行距離の総和とみることは理にかなっていると言える。

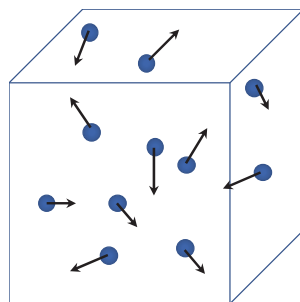


図 4-16 単位体積における単位時間あたりの中性子の飛行距離の総和のイメージ
(矢印の長さを全て足し合わせる)

(2) 単位時間・単位面積を通過する中性子数

中性子束は、中性子数密度と速さのかけ算であり、その単位は、 $[1/\text{m}^2/\text{sec}]$ 、つまり、単位面積あたり単位時間あたりになる。この単位のイメージは、「ビームの強度」に近いのではないかと思う。この単位だけを見ていると、中性子束が単位時間・単位体積あたりの中性子の飛行距離の総和であるとはイメージしにくいかもしれない。念のために書いておくと、密度は $1/\text{m}^3$ であり、速さは m/sec であることから、これらを乗じると $[1/\text{m}^2/\text{sec}]$ となる。

さて、中性子束の単位からイメージすると、中性子束は、単位時間あたりに単位面積を通過する中性子の個数として捉えることも出来る。原子炉内では、様々な方向に中性子が飛んでいるため、単位面積を考えると、特定の方に飛んでいる中性子だけではなく、全ての方向に飛んでいる中性子を考える必要があることに留意が必要である (図 4-17)。

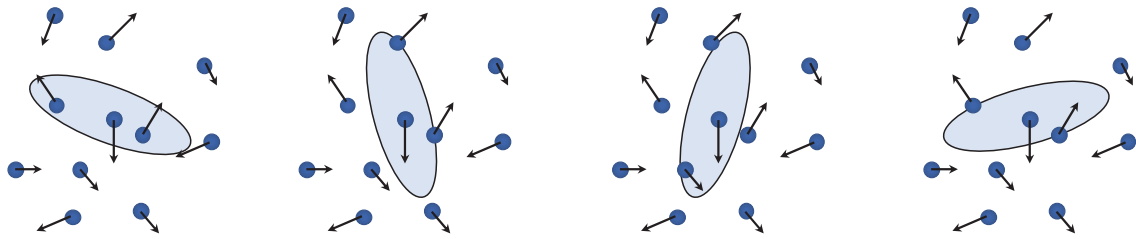


図 4-17 単位時間あたりに単位面積を通過する中性子数の総和
(楕円が様々な方向の単位面積を示している)

(3)反応率を計算するための便宜的な量

これまでに説明してきたように、微視的断面積が一定であれば、中性子と物質の反応率は、中性子数密度が大きいほど、中性子の速さが大きいほど、大きくなる。そのため、中性子密度に近いイメージで、中性子数密度と中性子の速さを乗じた値を反応率計算のための便宜的な量として定義している、と考えることも出来る。

【コラム】 「束」の意味

中性子束は、英語の **neutron flux** の訳である。では、”flux”とは元々、どのような概念なのだろうか。

ロングマン現代英英辞典によると、英文の **flux** は、”a situation in which things are changing a lot and you cannot be sure what will happen”とあり、日本語の「流転する」などのニュアンスがあるように思われるが、何かが「流れている」ことを示す言葉だと解釈できる。方丈記に「ゆく河の流れは絶えずして、しかももとの水にあらず。淀みに浮かぶうたかたは、かつ消えかつ結びて、久しくとどまりたるためしなし。世の中にある人とすみかと、またかくのごとし。」とあるが、これは **flux** の語感に近いであろう。

物理では、「束」の概念が良く現れる。流束、熱流束などは、単位時間に単位面積を通過する流体の量、熱量であり、これは、元々の **flux** の言葉の意味に沿っていると考えることが出来る。**flux** の英単語としての観点からは、上記(2)の解釈（単位時間・単位面積を通過する中性子数）が **flux** の元の意味に近いと言える。(1)は、**flux** の語源からは遠ざかるが、原子炉物理的に解釈すると「総飛行距離」と捉えることが出来る、というように見ることが出来るのかもしれない。

【発展的内容】 中性子束と中性子流

以下の写真は、とある時間帯の渋谷駅前ライブカメラの映像である。左側が JR 渋谷駅側である。スクランブル交差点を、様々な方向に人が歩いている状況が確認できる。



原子炉内の中性子も同様に、物質内を様々な方向に飛行している。中性子と物質の反応率を計算する際には、中性子束として全ての飛行方向の中性子を考慮する。一方、原子炉の挙動を解析する場合には、「正味として、どちらの方向に中性子が移動しているのか」が重要になる。例えば、「原子炉から外部に漏れ出している中性子の個数は正味どれだけか？」あるいは、「減速材から核燃料に流れ込んでいる中性子の正味の個数はどれだけか？」といった観点である。ライブカメラの映像で言うと、渋谷駅から出て行く人も渋谷駅に向かっていく人もいるが、正味の人の移動量はどうなっているか？ということに相当する。恐らく、朝方は渋谷駅から街に出て行く人が圧倒的に多く、夜は逆に渋谷駅に向かっていく人が圧倒的に多いことが想像できる。昼間は、両者が同程度になっているかもしれない。そうすると、正味で見ると、朝方は駅→街の方向に人が移動し、夜は街→駅の方に人が移動すると言えるであろう（昼間は、正味での人の移動は少ない）。

原子炉のある地点において、特定の方向とその方向に直交する平面を考える。中性子流は、この平面を単位時間あたり単位面積あたりに正味何個の中性子が通過しているか、を示す物理量である。中性子束は、あらゆる飛行方向の中性子をカウントしたが、中性子流は、ある方向を決め（例えば、渋谷駅→街方向）、この方向に飛行していく中性子（歩いて行く人）の数をプラス、反対方向に飛行していく中性子の数をマイナスとして、両者を足し合わせることで中性子の正味の移動量を計算する。ある方向を決めて中性子数をカウントするため、中性子流は、スカラー量ではなく、方向を持ったベクトル量となる。中性子流の単位は、 $[1/\text{m}^2/\text{sec}]$ であり、中性子束と同じであるため、両者を混同しがちであるが、両者は別の概念である。

4.4 中性子と原子核の相互作用データベース（中性子断面積データ）

【この節のポイント】

- ・ 中性子と原子核の相互作用のしやすさを表す微視的断面積は、データベースとして公開されている。
- ・ このデータベースを計算機で処理し、炉物理計算に使用する。

中性子と原子核の相互作用は、その複雑さから、残念ながら理論計算で全て求めることはできない。そのため、複数の測定値と理論計算に基づき、エキスパートが微視的断面積を個別に評価しているのが現状である。微視的断面積データの測定は、地道な作業と膨大なコストを要すること、原子炉の設計で考慮しなければならない核種の種類や反応が極めて多いことから、中性子の微視的断面積データの評価が途方もない労力を要する作業であることは容易に想像できよう。

そのため、評価された核データは世界共通の「財産」と考えられ、特定のフォーマットに従った形で編集され、公開されている。このようなデータベースを**評価済み核データ (evaluated nuclear data)**と呼んでいる。

代表的な評価済み核データとしては、以下のものがあげられる。

JENDL : Japanese Evaluated Nuclear Data Library の略であり、日本の原子力研究開発機構を中心に評価・整備されている。2018 年現在、バージョン 4.0 であり、406 核種のデータが格納されている。

ENDF : Evaluated Nuclear Data File の略であり、米国の研究所 (Los Alamos National Laboratory、Oakridge National Laboratory、Brookhaven National Laboratory) などを中心に整備・評価されている。2018 年現在、バージョン VIII.0 であり、557 核種のデータが格納されている。

JEFF : Joint Evaluated Fission and Fusion Nuclear Data Library の略であり、欧州で整備・評価されている。2018 年現在、バージョン 3.3 であり、562 核種のデータが格納されている。

評価済み核データの一例として、JENDL-4.0 の H-1 の断面積の一部を図 4-16 に示す。例えば、下から 3 行目の下線部は、0.2 eV の入射エネルギーの中性子に対し、H-1 の微視的全断面積が 20.55439 barnであることを示している。原子炉の設計計算を行うためには、この評価済み核データをプログラムで処理したものを用いる。

JENDL-4.0 H - 1				0 0 0 0
1. 001000+3 9. 991673-1	0	0	6	1 125 1451 1
0. 000000+0 0. 000000+0	0	0	0	6 125 1451 2
1. 000000+0 2. 000000+7	0	0	10	4 125 1451 3
0. 000000+0 0. 000000+0	0	0	81	7 125 1451 4
1-H - 1 LANL	EVAL-OCT05 G. M. Hale			125 1451 5
	DIST-MAY10	20080703		125 1451 6
----JENDL-4.0	MATERIAL 125			125 1451 7
-----INCIDENT NEUTRON DATA				125 1451 8
-----ENDF-6 FORMAT				125 1451 9
(中略)				
	1	451	92	1 125 1451 86
	2	151	4	1 125 1451 87
	3	1	35	1 125 1451 88
	3	2	35	1 125 1451 89
	3	102	35	1 125 1451 90
	4	2	196	1 125 1451 91
	6	102	201	1 125 1451 92
				125 1 099999
				125 0 0 0
1. 001000+3 9. 991673-1	0	0	1	0 125 2151 1
1. 001000+3 1. 000000+0	0	0	1	0 125 2151 2
1. 000000-5 1. 000000+5	0	0	0	0 125 2151 3
5. 000000-1 1. 276553+0	0	0	0	0 125 2151 4
				125 2 099999
				125 0 0 0
1. 001000+3 9. 991673-1	0	0	0	0 125 3 1 1
0. 000000+0 0. 000000+0	0	0	2	96 125 3 1 2
30 5	96	2	0	0 125 3 1 3
1. 000000-5 3. 713628+1	2. 000000-5 3. 224498+1	5. 000000-5 2. 790478+1	125 3 1 4	
1. 000000-4 2. 571732+1	2. 000000-4 2. 417056+1	5. 000000-4 2. 279806+1	125 3 1 5	
1. 000000-3 2. 210633+1	2. 000000-3 2. 161720+1	5. 000000-3 2. 118318+1	125 3 1 6	
1. 000000-2 2. 096443+1	2. 530000-2 2. 076834+1	5. 000000-2 2. 067250+1	125 3 1 7	
1. 000000-1 2. 060332+1	<u>2. 000000-1 2. 055439+1</u>	5. 000000-1 2. 051095+1	125 3 1 8	
1. 000000+0 2. 048901+1	2. 000000+0 2. 047341+1	5. 000000+0 2. 045928+1	125 3 1 9	
1. 000000+1 2. 045169+1	2. 000000+1 2. 044545+1	5. 000000+1 2. 043707+1	125 3 1 10	
(略)				

図 4-16 JENDL-4.0 の H-1 の評価済み核データ

【コラム】 微視的断面積を見てみよう

Web において、JANIS という微視的断面積の可視化ツールが公開されている。

<http://www.oecd-nea.org/janisweb/search/endl>

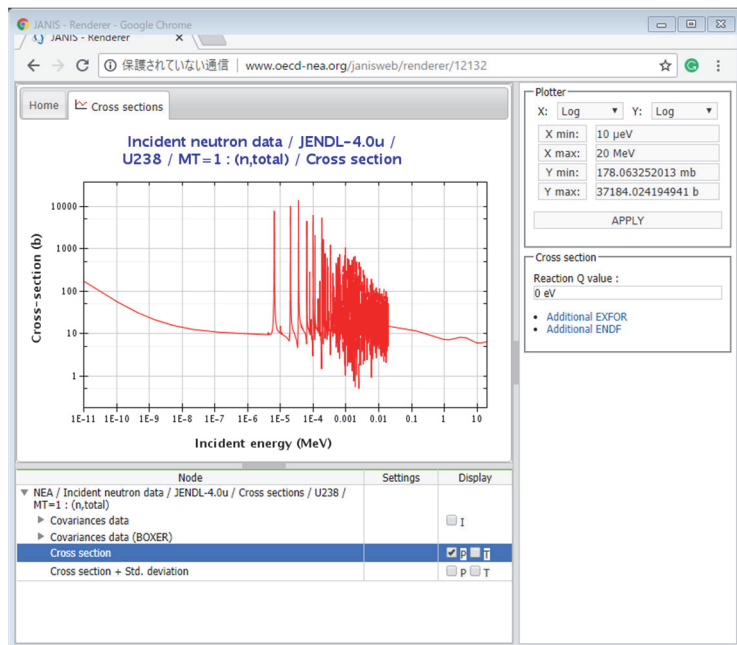
これを用いて、微視的断面積をプロットしてみよう。

まず、入射する粒子の種類と評価済み核データを選択する。今回は、それぞれ中性子 (incident neutron data)、JENDL-4.0u を選ぶこととする。Material としては、U-238 を選ぶ。その後、“Search”をクリックする。

以下の画面が現れるので、プロットする微視的断面積の種類を選択する。今回は、微視的全断面積 (MT=1,(n,total)) を選択する。

Incident particle	Evaluation	Material	MF	MT
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	1	MT=451 : (z,...) Heading or title information
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	1	MT=452 : nubar total
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	1	MT=455 : nubar delayed
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	1	MT=456 : nubar prompt
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	1	MT=458 : Fission energy release
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	2	MT=151 : (n,RES)
☒ Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	3	MT=1 : (n,total)
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	3	MT=2 : (z,elastic)
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	3	MT=4 : (z,n')
Incident neutron data	JENDL-4.0u	U238	3	MT=16 : (z,2n)

画面を一番下までスクロールし、“Open selected”をクリックする。以下の画面が現れるので、“Cross section”の“P”のチェックボックスをクリックする。U-238 の微視的全断面積が表示される。



見たい部分をマウスで範囲指定することにより、拡大も可能である。

