



## 代理反応 (Surrogate reaction)

千葉 敏 (独立行政法人 日本原子力研究開発機構)

理工学のいろいろな分野で原子核と中性子の反応断面積を精度良く把握することが必要とされます。原子力では原子炉内で生起する核反応が核分裂の連鎖反応を維持する原動力となります。また核燃料の燃焼に伴って元々原子炉内に存在しなかった多くの放射性原子核が生成することによって原子炉の特性が変化します。熱核分裂性ではない $^{238}\text{U}$ から核燃料となる $^{239}\text{Pu}$ の生成が行えるのもこの摂理に基づいていますし、核分裂により生成する $^{135}\text{Xe}$ は、その大きな熱中性子吸収断面積のために原子炉の停止後や出力低下後、一定期間経過してそれが十分崩壊するまで再起動や出力の再上昇をできなくすることが知られています(キセノンオーバーライドという現象で、チェルノブイリ事故は運転員がこれを良く理解していなかったことが一因と言われています)。一方、宇宙において、中性子捕獲元素合成過程は鉄より重い原子核のほぼ全てを生成するプロセスとして重要です。さらには医学分野においても脳腫瘍に対するBNCT(ホウ素中性子捕捉療法)は他の放射線治療と同様、患者の術後のQOL(Quality of Life)の高い治療法として有望視されています。

これらの過程で起こる反応は低エネルギーの中性子入射核反応なので、通常は複合核過程が支配的です。つまり、原子核が中性子を吸収して、一度、複合核という準安定な状態に遷移します。そして核内核子の一粒子運動の時間スケールに比べて遙かに長い時間その状態にとどまった後に熱的揺動によって崩壊が起こります。このような反応が起こると、崩壊する原子核は自分がどのようにして生成されたかという記憶を無くしているために、生成過程とは無関係に、励起エネルギー及びスピン・パリティにのみ依存して崩壊することになります。実際、原子力用のデータを計算するためにこのような仮定に基づいて定式化されたいろいろな共鳴公式やHauser-Feshbachなどの統計模型が用いられ、パラメータをうまく調整すると中性子入射断面積を良く再現できることがわかっています。しかし、これらの模型には多くのパラメータが含まれていて、一般には断面積の実験データが存在しないと、応用目的で必要とされる精度で断面積を予測するのは困難です。

これまで、中性子の断面積データは目的とする原子核を標的として中性子ビームを用いて測定されてきましたが、原子炉内で生成する多くの重い原子核(アクチノイド、マイナーアクチノイド)、核分裂生成物は放射性原子核であり、また天然にも存在しないために直接測定するのは至難の業です。一方、21世紀はエコやりサイクルの時代ですが、原子力分野でも核燃料の有効利用のため、原子炉の燃焼度(一定の燃料を用いてどれだけのエネルギーを取り出すかを示す量)を高くしようという傾向にあります。燃焼度が高くなると、低燃焼度の運転に比べて多くの重い原子核ができると共に核分裂生成物の量も増えます。さらには $^{239}\text{Pu}$ を再処理しMOX燃料として原子炉や高速炉で使用すると $^{239}\text{Pu}$ を起点とする核反応が多く生起し、さらに重い原子核、核分裂生成物が発生します。このような原子力分野の将来ビジョンを可能にするために天然に存在しない不安定原子核と中性子の核反応特性の把握が必要となって来ていますが、上に書いたように、直接実験ができるほど

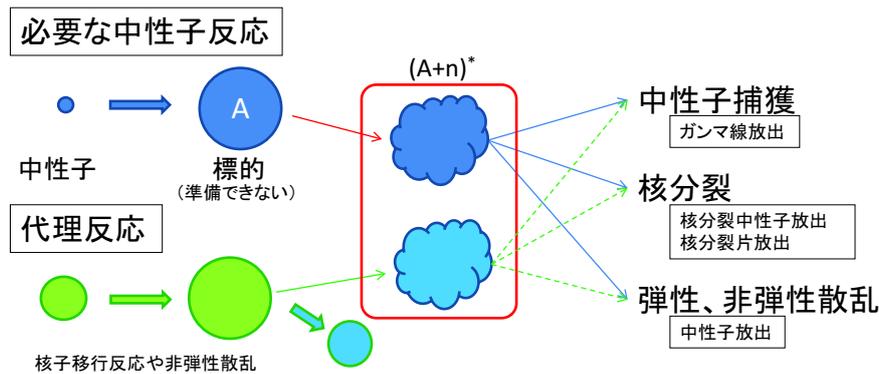


図 1: 中性子反応と代理反応の関係の概念図

の標的を用意できないことが多々あります。かと言って理論だけでは応用上必要とされる精度は満たしていません。それでは、どのようにしたらこれらの中性子断面積を知ることができるでしょうか？その方法の一つが代理反応です。

代理反応は、準備できる標的核を用いて、イオンビームを使って核子移行反応や非弾性散乱によって、目的とする（準備できない）原子核が中性子を吸収した場合と同じ複合核を生成して、それがいろいろなモードで崩壊する分岐比を測定して（準備できない）原子核の中性子反応断面積を間接的に決定する方法です（図 1）。複合核はできてしまえばそれがどのようにしてできたかを忘れてくれるという便利な性格の人なので、同じ複合核を同じ励起エネルギーに作ってやればそれが壊れる確率は中性子でできて代理反応でできて変わらない、というのが基本的な考えです。分岐比データから断面積を求めるためには中性子と原子核の全反応断面積を掛ける必要がありますが、それは光学模型やチャンネル結合法により精度良く計算することができます。

ただし、この考えは実際には単純すぎます。というのも、一つには目的とする複合核の励起エネルギーが、中性子が一つ非束縛状態にありえる領域なので、ブレイクアップ反応の効果が無視できない可能性です。幸い、これについては性質の似た近傍原子核の測定を同時に行って比を取ることでその効果をキャンセルさせることができます。もう一つは、低エネルギー中性子反応は通常は小さな角運動量しか持ち込まないのに対して、代理反応はより大きな角運動量を持ち込むと考えられることです。スピンの違えば崩壊の分岐比は変わってしまいます。変わる理由は、最大の分岐比を持つ中性子放出がスピン選択則により抑制されるためです。それでも核分裂は中性子に負けず劣らず大きな分岐比を持つことが多いので、核分裂断面積については代理反応ですでにいくつかのデータが取られ、中性子で直接計ったデータと良く一致することが分かっています。我々も核分裂に関する量（核分裂断面積、即発核分裂中性子数、核分裂生成物の分布）の測定を行う予定です。しかし、中性子捕獲反応に相当する光子放出の分岐比は元々が小さいためにスピン分布に対する依存性が非常に強く、代理反応による測定は成功していません。いろいろ議論の余地はありますが、最近の計算で、その場合にも一定の条件が満たされれば近傍核との比を取ることによって代理反応が中性子捕獲断面積を再現することがわかりました。今後、その原理に基づいて中性子捕獲反応断面積を求める可能性を実証していく予定です。世界的には軽イオン代理反応が主流ですが、我々はそれを重イオン入射反応にまで拡張し、アクチノイド、マイナーアクチノイド、長寿命核分裂生成物の核データや s 過程元素合成の分岐点に関連するデータを一網打尽にすることを目指しています。