

原子力の本質を探究

—第9回—

原子炉内の核反応

NPO法人
ニュークリア・サロン 出澤 正人

主役を演じる中性子

原子力発電は火力発電のボイラーの部分で原子炉に置き換えただけという説明は原子力発電を身近に感じさせるが、原子力の本質を探究するには、この常識を一步進め、原子炉の中の核反応を常識にしてゆく必要がある。

原子炉内では、核分裂反応で発生する中性子と、原子炉内にある物質の原子核と散乱反応、吸収反応、核分裂反応が起きている。

散乱反応には標的核の内部状態が変化せず、入射中性子のエネルギーの一部が原子核の運動エネルギーになり、中性子は運動エネルギーの一部を失う弾性散乱と、入射中性子のエネルギーの一部が標的核に与えられ、ガンマ線となって放出される非弾性散乱がある。核分裂で生まれる中性子のエネルギーは最大で約20 MeV(電子ボルト)(平均で約2 MeV)であり、様々な原子核(軽水炉では主として減速材の水)との散乱反応でエネルギーを失い、周りの物質を構成する原子の熱運動と平衡に達した熱中性子となる。常温では 0.0253 eV (速さは約 $2.2 \times 10^8 \text{ m/s}$)付近に分布する。従って、原子炉内の中性子は、核分裂で生じた中性子から熱中性子に変わる広い

エネルギーを持っている。

吸収反応は、標的核(制御材の水ウラン等)に衝突した中性子が標的核に捕われ、標的核から出てこなくなる反応である。このとき、陽子、アルファ粒子等が出てきても、中性子が出てこないため吸収反応に分類される。純粋に入射中性子が標的核(ウラン238等)に入り、他の粒子が出てこない反応は捕獲反応といわれる。このとき、捕獲された中性子のエネルギーは、ガンマ線となって放出される。したがって、捕獲反応では中性子が失われることになる。

核分裂反応は、中性子が標的核(ウラン235、プルトニウム239等)に入ることにより、標的核が二つに壊れる反応である。壊れて出来るのが

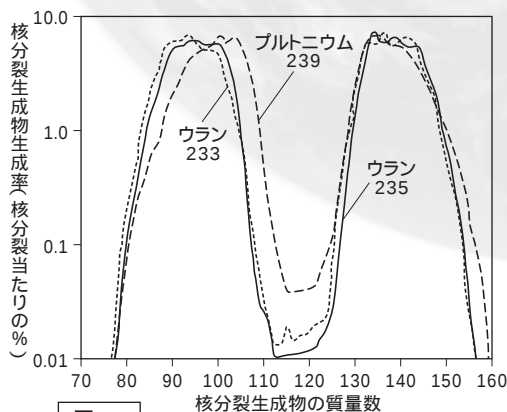


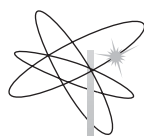
図-1 核分裂生成物の質量数分布

出典：W.マーシャル編：原子炉技術の発展(上) 裳華房、p72

核分裂生成物である。図-1に核分裂生成物の収率(生成割合)を質量数毎に示す。このように核分裂生成物は様々な核種が生成される。これらの中には、非放射性で有用な物質も含まれる。ウラン235の核分裂の場合、核分裂生成物の収率が質量数一四〇と九五の付近で大きい。核分裂により新たに中性子が発生するが、その個数は、熱中性子とウラン235の核分裂反応の場合、平均二・四個の中性子を放出する。

遅発中性子の存在で制御可能に

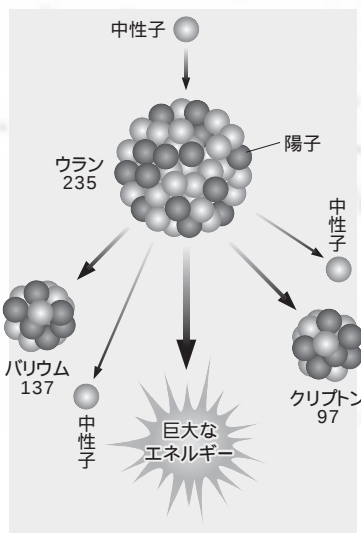
核分裂で放出される中性子数は生成される核分裂生成物によりかなり異なるが、非常に多くの核分裂を対象とするので、その平均値のみが問題となる。この値は核分裂する核種と、入射中性子エネルギーの両方に依存し、入射中性子エネルギーとともに増加する。核分裂に伴って発生する中性子のうちの一個をウラン235に吸収させて次の核分裂反応を起こさせることができれば、核分裂連鎖反応が達成される。残りの中性子を核分裂性物質の生産や核変換による放射能消滅に使うことができる。ウラン235に中性子が吸収されると、複合核ウラン236が形成される。熱中性子の場合、複合核ウラン236のうち一



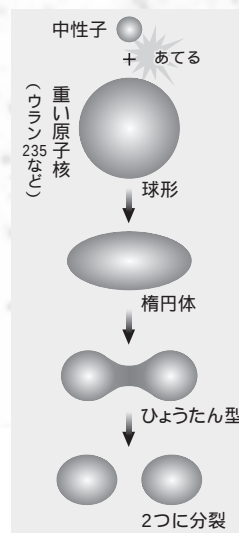
中性子の核反応で更なる未来を拓く

七％はウラン²³⁵のままγ線を出して基底状態におちるが、残りの八三％は核分裂する。

ところで、陽子が多く中性子があり多くない核種では、陽子同士に働くクーロン力の影響で原子核全体が不安定な状態にあるため、原子核が量子力学的な揺らぎによって自発的に核分裂を引き起こす。これを自発核分裂というが、他の核分裂反応



ウラン235の核分裂の模式図



液滴模型による核分裂のメカニズム

図-2

と源による高上げは不要となる。

核分裂生成物は、その質量数の核としては中性子が過剰であるため、ほとんどの場合不安定で、何回かのβ壊変を行って安定な核へと移行するが、その際β線として約三・五％、それに伴うγ線として約三・五％のエネルギーを放出する。このエネルギーは様々な核の半減期に相当する時間遅れを持って放出されるの

と同様に中性子が放出される。ウラン²³⁵は五・六〇×¹⁰回/秒・キログラム、ウラン²³⁸は六・九三回/秒・キログラムの割合で発生している。そのため、臨質量以上の核分裂性物質が存在する場合には自発核分裂が連鎖反応を引き起こしうる。実際には、その状態を監視しながら臨界接近するために、中性子検出器で有意に計測できる程度(三個/秒)以上になるような中性子源を用いて高上げする。燃焼が進んだ燃料が混在する場合は、自発核分裂中性子が多く、中性子源による高上げは不要となる。

核分裂中性子のほとんどは核分裂が生ずると同時に(¹⁴10秒以内に)放出される。これを即発中性子という。しかし、ごくわずか(一％以内)の中性子がかかるの時間遅れ(数十秒まで)を持って放出される。これを遅発中性子という。前にも述べたが、遅発中性子はその生成率がきわめて小さいにも拘らず、これが存在するという自然の計らいによって核分裂反応を安全に制御できる原子炉が設計できるわけである。

核反応の割合は、反応の確率を表す「断面積」で示される。その単位は、バーン(一バーン=10平方メートル)で表される。この次元は長さの二乗であり、「面積」と同じ次元である。つまり、標的核の見かけの大きさを表している。ウラン²³⁵では核分裂の断面積が中性子のエネルギーが小さい方

が大きくなっており、効率的に核分裂を起こすには、核分裂で生じたエネルギーの高い中性子のエネルギーを低くして核分裂を起こしやすくする必要があり、軽水炉では水が減速材として用いられている。なお、ウラン²³⁸では低エネルギーの中性子では核分裂が起きず、ある程度エネルギーが高くなって初めて核分裂が起きる。このように断面積の振る舞いは核種によって大きく異なっている。

核反応データ整備が出发点

中性子と原子炉内物質の原子核との核反応の割合を知ることが設計上も運転上も不可欠である。中性子エネルギーの広いエネルギー範囲での断面積データが必要である。このためには、実験データや理論的な考察から、最も確かであると思われる断面積の値をエネルギー毎に与えるため、世界的に認識されているデータとして米国のENDF(Evaluated Nuclear Data File)、欧州のJEFF(Joint Evaluated Fission and Fusion File)、日本のJENDL(Japanese Evaluated Nuclear Data Library)がある。

所用の目的に適う原子炉、原子燃料の設計には、このような詳細な核データが不可欠である。