

^{235}U の全核分裂生成物の放射能の時間変化

福井大学工学部物理工学科 大沼 正季, 森近 厚平

2012年2月

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震が発生し、日本では誰も経験したことのないほど大規模な地震と津波という自然の猛威により日本は大きな被害を受けた。震災後問題となったのが福島第一原発事故である。卒業研究配属先が原子核理論研究室であることもあり、放射能問題に興味をもった私達は、公的研究機関によりWEB公開されている核データを利用して、原子炉の燃料である ^{235}U が熱中性子の吸収によって核分裂したときの核分裂生成物が安定核種に向かって β 崩壊を繰り返す様子を再現するプログラムを作成し、その結果を実際のデータと比較し考察した。

原子核は半減期程度の時間で核分裂や α ・ β ・ γ 崩壊を起してより安定な核に変わる。時間間隔 dt の間に崩壊する原子核の個数 dn は、そのときの原子核の個数 n に比例し、 $dn = -\lambda ndt$ という微分方程式で表される。ここで、 λ は崩壊定数と呼ばれ、単位時間あたりの崩壊確率を表し、半減期 $T_{1/2}$ と $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ という関係にある。私達は、この微分方程式の複数(N 種)の核種への拡張である、 $dn_i = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} n_j dt$ 、 $n_i(t=0) = n_i^0$ ($1 \leq i \leq N$)、を解きその解析解の値をプログラムで計算することで崩壊の様子を調べた。ここで重要なことは、 λ_{ij} は j 番目の核種が i 番目の核種へと崩壊する単位時間あたりの確率であり、崩壊はエネルギーの下がる向きにしか起きないから、核種をエネルギーの高いものから順番に並べることで崩壊定数行列(λ_{ij})を下三角行列にできることである。そして、三角行列の固有値は行列の対角成分そのものであり、この場合の様に固有値が分かれば定数係数線形常微分方程式の解析解は有限回の四則演算で得られることである。

上記の微分方程式の崩壊定数行列要素 λ_{ij} と初期値 n_i^0 の値を設定するには原子核の放射性崩壊についての専門的な知識が必要である。まず、行列の対角成分 $\lambda_{ii}(\leq 0)$ は i 番目の核種の半減期から計算できる。非対角成分 $\lambda_{ij}(\geq 0)$ は崩壊の分岐比を使って計算する。例えば1番目の核種が2番目、3番目の核種に崩壊する分岐比を b_{21}, b_{31} ($b_{21} + b_{31} = 1$)とすれば、 $\lambda_{21} = -b_{21}\lambda_{11}$ 、 $\lambda_{31} = -b_{31}\lambda_{11}$ となる。次に、厳密には原子核の基底状態だけではなく全ての励起状態を計算に含めねばならないが、実際にはほとんどの励起状態はごく短時間のうちに γ 崩壊し基底状態へ落ちるので無視することができる。しかし、半減期が長い励起状態(アイソマー)だけは基底状態とは別個に独立した核種の一つとして扱う必要がある。娘核にアイソマーがある場合、基底状態とアイソマーへの分岐比が重要になり、特殊用途の複雑なフォーマットのデータから調べ出す必要がある。最後に、初期値 n_i^0 には ^{235}U が熱中性子の吸収により核分裂してできる核種の生成確率データを読み込む。このデータを差し替えることで特定の原子炉の具体的な運転履歴に合わせた計算をすることも原理的には可能である。なお、 β 崩壊直後に中性子を放出する β^-n 崩壊については、半減期が非常に短いため、核分裂直後に β^-n 崩壊が完了していると近似して初期値に繰り込んだ。

作成したプログラムを用いて放射能の時間変化を見たところ、10秒から100年の間で全放射能は時間に反比例して減少することが分かった。私達はこの振る舞いを、 β 崩壊系列の特徴である「下流の核になるにつれて半減期が長くなること」から導き出すことができた。これは α 崩壊系列の特徴である放射平衡とは全く異なる振る舞いである。

原子力安全・保安院による平成23年6月6日の公表資料中に、大気中へ放出された放射性物質の放射能の推定量がベクレル単位で与られている。この資料で原発事故発生から1日後までの放出量が最も多い核種は、私達の計算結果でも放射能が高いことが確かめられた。また、1年後では最大の汚染物質である ^{137}Cs よりも高い放射能を持つ核種が炉中には多数存在しているはずだということも分かった。これらの核種より ^{137}Cs のほうが問題なのは、沸点が低く揮発性が高いため大気中に放出され易いからである。私達の計算結果から、例えば、万一 ^{137}Cs よりも高い放射能をもつ核種が炉に閉じ込められずに大気中に放出されたら、現在よりも遙かに大きな汚染が引き起こされることがわかる。