

# 主任者 コーナー

“今こそ復習！”主任者の基礎知識 —「もっと基礎を，ここが肝」編—

## 第4回 物理の話題 (2)

上衰 義朋

「物理の話題 (1)」では、原子と原子核、原子番号と質量数、原子核の結合エネルギー、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線などについて解説を試みた。今回は放射線取扱主任者の守備範囲からはやや外れるが、核分裂をキーワードに、原子炉についても触れる。

### 核分裂の非対称性

天然のウランには、 $^{238}\text{U}$ が99.27%， $^{235}\text{U}$ が0.72%， $^{234}\text{U}$ が0.0055%存在するが、商業用に稼働している水冷却の原子炉で核分裂するのは主に $^{235}\text{U}$ である。重水でない普通の水を使う軽水炉では、天然ウランのままの存在度では原子炉は臨界（連鎖反応が一定の割合で続く状態）にならないので、 $^{235}\text{U}$ を3%から5%程度に濃縮した燃料が使われている。

$^{235}\text{U}$ の核分裂によって生じた平均エネルギー約2 MeVの高速中性子は、主に軽水中の水素との衝突によって熱中性子に減速され、再び $^{235}\text{U}$ に吸収されて核分裂を起こす。 $^{235}\text{U}$ の熱中性子による核分裂では、2個の核分裂生成物（fission product：FP）が生じるとともに、高速中性子が2個から3個放出される。すなわち、



もし発生する中性子が2個で、2個のFPが同じ場合は、 $^{117}\text{Pd}$ が生じることになる。しかし実際の熱中性子による核分裂はこのように対称ではなく、図1に示すように、質量数95近辺と138近辺に2つの山を持つ、非対称に分裂

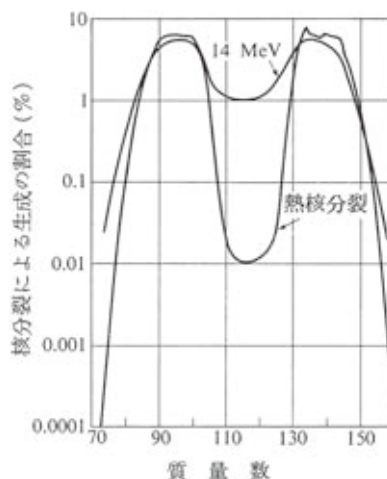


図1 核分裂収率の質量数分布<sup>2)</sup>  
値を全て合算すると200%になる（「J.R. Lamarsh (著)、武田充司、仁科浩二郎 (訳)、原子炉の初等理論 (上)、吉岡書店、p.131 (1974)」から引用)

する。図の縦軸は対数で表されているので、中央近辺の収率は極端に少ない。

仮に2個のFPの質量数が95と138であり、陽子数もその割合で分配されるとすれば、生成するFPは $^{95}_{38}\text{Sr}$ と $^{138}_{54}\text{Xe}$ になる。安定なSrの質量数は最大88、Xeのそれは136であるから、

## 主任者 コーナー

一般にFPは中性子過剰核である。核分裂による生成核種のほとんどが $\beta^-$ 壊変するのはこのためである。例えば質量数95の核分裂生成物は最終的に $^{95}_{42}\text{Mo}$ に、質量数138の核分裂生成物は最終的に $^{138}_{56}\text{Ba}$ に壊変して安定になる。

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故(以下“事故”)によってたくさんの種類の放射性核種が環境中にばらまかれたが、原発の近傍を除いて、現在見られる核種はほとんど $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ に限られる。 $^{137}\text{Cs}$ は、 $^{235}\text{U}$ の熱中性子による核分裂で、直接及び $\beta^-$ 壊変の結果、最終的に6.2%生成される<sup>1)</sup>。一方 $^{134}\text{Cs}$ は、文献<sup>1)</sup>などの収率の表を見ても値がない。すなわち、核分裂によって直接的にはほとんど生成されないのである。これは質量数134の核分裂生成物が生成されても、原子番号が1つ上の $^{134}\text{Xe}$ が安定核種なため、 $\beta^-$ 壊変が、 $^{134}\text{Xe}$ で止まってしまうからである。 $^{134}\text{Cs}$ は、質量数133の様々な核分裂生成物が $\beta^-$ 壊変し、安定な $^{133}\text{Cs}$ が蓄積した後、原子炉中の熱中性子の捕獲反応 $[^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134}\text{Cs}]$ によって生成される。事故によってばらまかれた $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の放射能はほぼ1対1であったが、これは核燃料の燃焼度と炉心の中性子束のバランスによって、たまたまこのようになったにすぎない。また $^{134}\text{Cs}$ の生成過程から、大気中核実験によるフォールアウトには $^{134}\text{Cs}$ は見られない。

$^{134}\text{Cs}$ を除き、事故発生以来問題となった核種のほとんどは、核分裂によって直接生成される。それぞれの核分裂収率は、 $^{90}\text{Sr}$ :5.78%、 $^{131}\text{I}$ :2.89%、 $^{132}\text{Te}$ :4.30%、 $^{133}\text{Xe}$ :6.70%である<sup>1)</sup>。

### 原子炉の崩壊熱

原子炉が運転中は、発熱のほとんどは核分裂生成物の運動エネルギーが元である。しかし連鎖反応が停止した後でも、核分裂生成物の大半は放射性であり、それらが相当量のエネルギー

を、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線の形で放出するため、炉心は発熱を続ける。電気出力が100万kW(1GW)の原子炉(熱効率を33%と仮定して熱出力は3GW)をT秒間運転し、停止してt秒後の発熱は、近似的に次式で表される<sup>2)</sup>(ボルスト・ホイラーの式。停止後約1秒から $10^6$ 秒の間で適用可能)。

$$P(t, T) = 200 \times [t^{-0.2} - (t+T)^{-0.2}] \text{ (MW)}$$

図2に、Tを1年間としたときの変化をグラフで表した。すなわち停止直後では、運転中の約6%もの発熱がある。今回の事故は、地震による原子炉の停止後、1時間以上遅れて津波によって引き起こされたと考えられる。仮に停止後1時間15分後(4,500秒)とすれば、発熱は運転中の約1%に下がっていたはずであるが、それでも1時間に約50トンもの水を蒸発させる。

### 核分裂生成物から放出される中性子

核分裂生成物の $^{87}\text{Br}$ は、半減期55.6秒で $\beta^-$

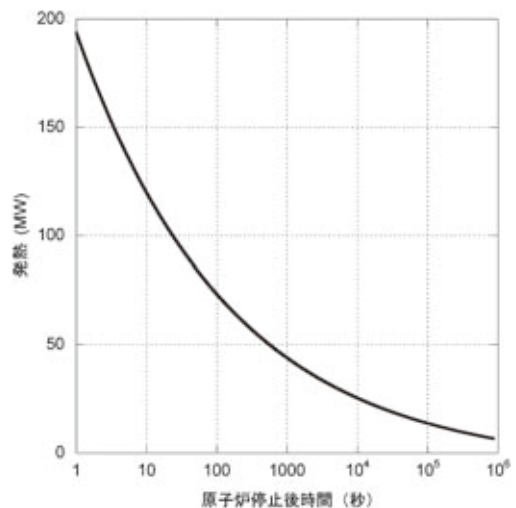


図2 電気出力100万kWで1年間運転した原子炉(熱効率33%)停止後の発熱量の変化

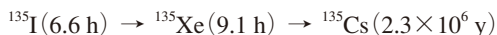
壊変するが、2.6%の割合で、 $\beta^-$ 壊変の後に更に中性子を放出する。このように、核分裂に遅れて放出される中性子を遅発中性子、放出する核を先行核という。先行核の半減期は1秒以下～数十秒の範囲であり、放出される全中性子に対する遅発中性子の割合も0.7%程度であるが、この遅発中性子の存在が原子炉の制御を容易にしている。

核分裂 → 減速 →  $^{235}\text{U}$ に吸収 → 核分裂という中性子サイクルに着目した場合、初めの核分裂数に対する、次の核分裂数の比を増倍率という。増倍率が正確に1であるときが臨界状態である。核分裂と同時に放出された中性子が、減速されて次の核分裂を起こすまでの時間は極めて短い。そのため、もしすべての中性子が核分裂と同時に放出されるのであれば、増倍率がわずかでも1を超えると、原子炉の出力は急上昇して暴走する。しかし実際は遅発中性子があるため、次の核分裂数が増えるまでに時間が掛かり、出力はゆっくりと上昇する。原子爆弾では、遅発中性子の分を超えて増倍率が大きくなるように作られているため、一瞬で出力が大きくなって核爆発を起こすのである。

### 核分裂生成物に吸収される中性子

核分裂生成物の中には、 $^{135}\text{Xe}$  や  $^{149}\text{Sm}$  のように、それぞれ  $2.7 \times 10^6$  バーン、 $4.0 \times 10^4$  バーンと極めて大きな熱中性子吸収断面積を有するものがある。

$^{135}\text{Xe}$  は、核分裂によって直接生成される割合は少なく、ほとんどは  $^{135}\text{I}$  の娘核として生じる。すなわち、(カッコ内は半減期)



原子炉運転中は、 $^{135}\text{Xe}$  はその大きな断面積で中性子を吸収して消費されることによって量が抑えられているが、停止すると吸収反応によ

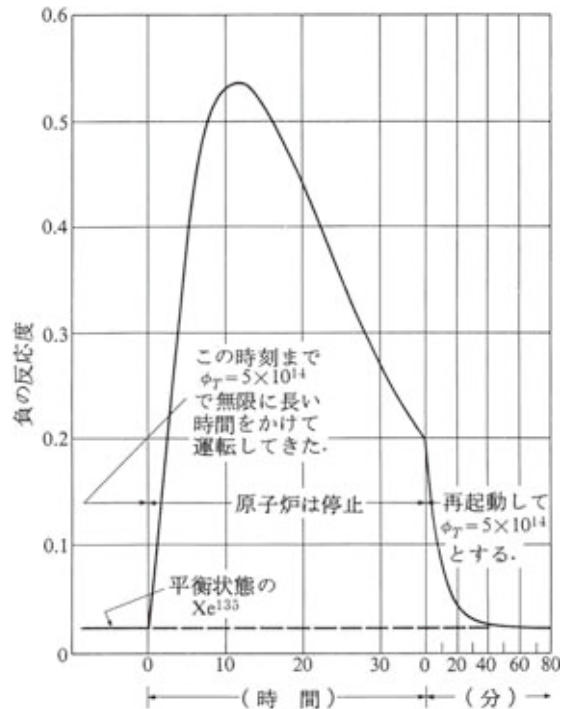


図3 原子炉停止後の $^{135}\text{Xe}$ 量の変化と、再起動した後の変化<sup>2)</sup>

$^{135}\text{Xe}$ の量は負の反応度として与えられている。商業用の原子炉の熱中性子束  $\phi_T$  は  $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  程度であり、 $^{135}\text{Xe}$ の影響は図よりも小さい(「J.R. Lamarsh(著)、武田充司、仁科浩二郎(訳)、原子炉の初等理論(上)、吉岡書店、p.705(1974)」から引用)

る減少がなくなるため、急激に量が増える。その様子を図3に示す。原子炉の制御棒を抜いても上げられる反応度(大まかには、増倍率を1から上げる割合と考えてよい)は限られているため、原子炉を停止して数時間経過すると、ビルドアップした $^{135}\text{Xe}$ の妨害作用のため、数十時間再起動できないことがある。しかし一旦起動すると、熱中性子によって $^{135}\text{Xe}$ の量は急速に減少するため、それに合わせて制御棒を挿入していく必要がある。

$^{149}\text{Sm}$  は  $^{149}\text{Pm}$  の娘核種として生成する。

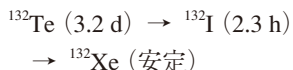
## 主任者 コーナー



$^{149}\text{Sm}$  の半減期は極めて長いので、ビルドアップした後は  $^{135}\text{Xe}$  のように減少することはない。ただし妨害作用は  $^{135}\text{Xe}$  ほど強くはなく、再起動が不可能にはならない。

### 放射性壊変による線量の変化

事故直後は  $^{131}\text{I}$  による影響が大きかったが、比較的  $\gamma$  線強度の高い半減期 2.3 時間の  $^{132}\text{I}$  も観測された。 $^{132}\text{I}$  は核分裂によって直接生成されることは少なく、親核種の  $^{132}\text{Te}$  が 4.3% の収率で生成され、次の壊変系列を経る。



この系列は過渡平衡と呼ばれる放射平衡状態を形成する。初めに  $^{132}\text{Te}$  が 1 MBq 存在し、 $^{132}\text{I}$  がなかったと仮定した場合のそれぞれの放射能、総放射能の変化を図 4 に示す。 $^{132}\text{Te}$  は時間とともに単調に減衰するが、 $^{132}\text{I}$  は一旦  $^{132}\text{Te}$  の壊変によるビルドアップで増加し、親核種の放射能よりも若干大きくなり、その後は  $^{132}\text{Te}$  の半減期に従って減衰する。

これらの線源から 1 m の距離における実効線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) を同じ図に太い線で示す。 $^{132}\text{Te}$  の実効線量率定数 (単位:  $\mu\text{Sv/h} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$ ; 以下も同じ) が 0.0375 であるのに対し、 $^{132}\text{I}$  のそれは 0.301 と大きいため、線量率の変化は  $^{132}\text{I}$  の放射能の変化に近い。

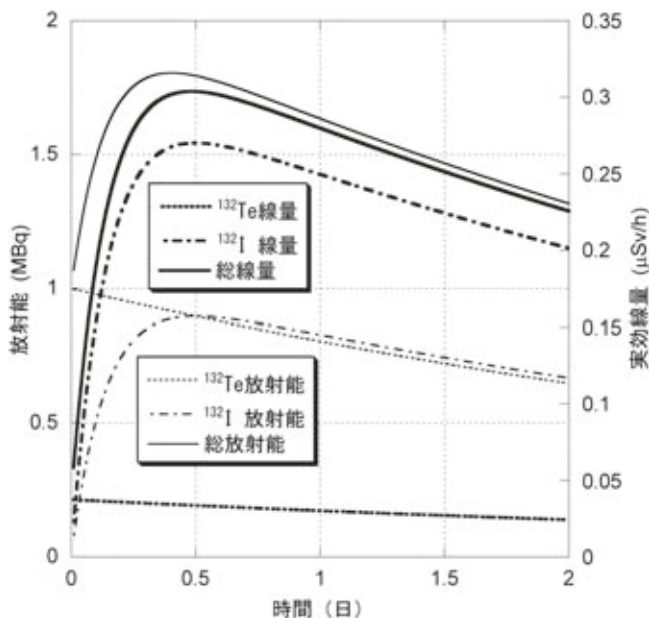


図 4  $^{132}\text{Te}$  と  $^{132}\text{I}$  の放射能 (細線) と、それらによる線量率 (太線) の変化

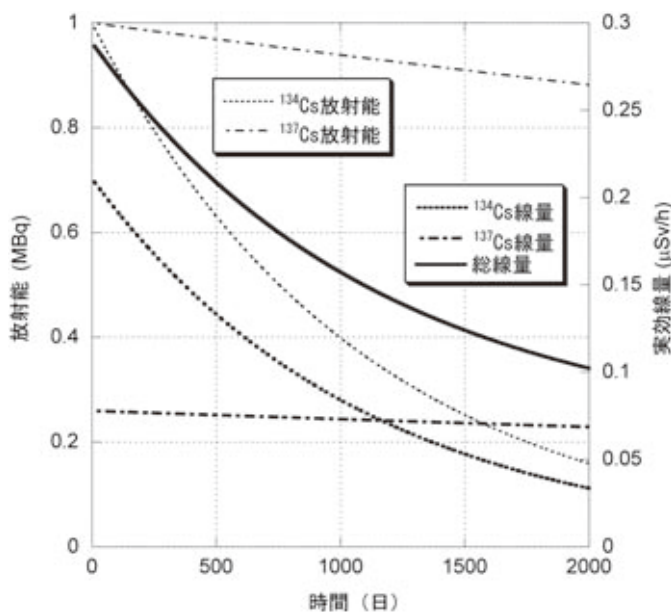


図 5  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の放射能 (細線) と、それらによる線量率 (太線) の変化

Ge 検出器などを用いて核種分析をしたとき、このような放射平衡を示す核種の場合、減衰補正には特に注意を要する。測定された核種の半減期が短くても、減衰は親核種の半減期に従うためである。測定された核種の誤った半減期でさかのぼり補正をすると、とんでもない過大評価をすることになる。

現在事故の影響で環境中に残っている放射性核種は主に  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  である。これらの半減期と実効線量率定数は、それぞれ 2.06 年と 0.211, 30.2 年と 0.0779 (放射平衡に達している  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の寄与を含む) である。事故で放出された放射能はほぼ 1 対 1 であったことを念頭

に、それぞれの放射能が初めに 1 MBq ずつ存在した場合の、放射能 (細線) と線量率 (太線) の変化を図 5 に示す。線量率の減衰は初めのうちは比較的早いですが、数年経過して  $^{134}\text{Cs}$  の寄与が小さくなってくると、減衰は遅くなる。

#### 参考文献

- 1) アイソトープ手帳 11 版, 日本アイソトープ協会, p.126 (2011)
- 2) J.R. Lamarsh (著), 武田充司, 仁科浩二郎 (訳), 原子炉の初等理論 (上), 吉岡書店, p.134, p.705 (1974)  
(独立行政法人理化学研究所 仁科加速器研究センター)