

# Borst-Wheeler 関数による崩壊熱の予測精度<sup>1</sup>

原子炉停止後の崩壊熱の時間変化を定量的に評価するためには、核燃料中に含まれる個々の放射性核種の個数の時間変化を評価する必要がある。これに対して、崩壊熱の時間変化そのものを簡易的に評価するための式がいくつか提案されている。以下の式はその一つであり、Borst-Wheeler の関数と呼ばれるものである。

$$P(t) = P_0 \times 0.066 \{t^{-0.2} - (T+t)^{-0.2}\} \quad (1)$$

ここで、 $t$  は原子炉停止後の経過時間（秒）、 $P_0$  は原子炉を運転していたときの熱出力（W）、 $P(t)$  は  $t$  における崩壊熱（W）、 $T$  は原子炉停止直前までの運転時間（秒）を示す。この簡易評価式の適用範囲は  $1 < t < 10^6$ （つまり原子炉停止後 1 秒から 12 日程度まで）とされており、より詳細な方法で評価した結果に対する再現精度は 20%以内と言われている。

Borst-Wheeler の式を眺めると、以下のことが分かる。

- 原子炉運転時間  $T$  について  $T \rightarrow 0$  の極限をとると、 $f(T) = (T+t)^{-0.2}$  としたとき、1 次のテーラー展開により  $f(T) \approx f(0) + Tf'(0) = t^{-0.2} - 0.2Tt^{-1.2}$  と書けることから、Borst-Wheeler の式の括弧内は  $0.2Tt^{-1.2}$  と近似できる。
- 一方、 $T \rightarrow \infty$  の極限をとると、Borst-Wheeler の式の括弧内は  $t^{-0.2}$  と近似できる。
- $t \rightarrow 0$  の極限をとると、 $T > 0$  である限り  $P(t) \rightarrow \infty$  となるが、Borst-Wheeler の式の適用範囲が  $t > 1$  であることを踏まえて考えると、適用範囲の下限となる  $t = 1$  では、 $(T+1)^{-0.2} \ll 1$  であるとするならば、 $P(t) = P_0 \times 0.066$  となる。この 0.066 という数値は、「原子炉運転中の熱出力の崩壊熱成分が占める割合」として知られる値と同程度である。

濃縮度 4.1 wt% の  $\text{UO}_2$  のピンセル体系に対して、1,300 の核分裂生成物と 21 のアクチニドを考慮した燃焼計算を行い、いくつかの異なる燃焼度まで一定出力で運転して以降の崩壊熱を計算し、Borst-Wheeler の式に基づく予測値との比較を行った。結果を Fig. 1 と 2 に示すが、Borst-Wheeler の式による予測が良好であることが確認できる。なお、図中の 0.1 GWD/t は時間にして 2.65 日に対応する。

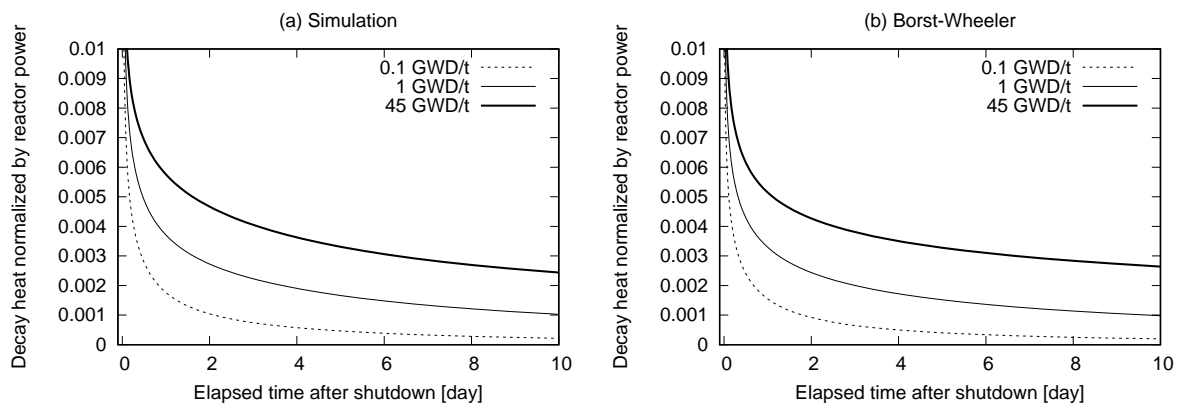


Fig. 1: Decay heat after reactor shutdown (linear scale)

Fig. 2 からは、原子炉運転直後の崩壊熱は  $t^{-0.2}$  に、運転後しばらく経過した後の崩壊熱は  $t^{-1.2}$  に、それぞれ近似されており、この振る舞いが「切り替わる」時間点が、運転期間  $T$  が長くなるにつれて、小さくなっていくことが分かる。この切り替わりの時間点は、大まかに  $0.2Tt^{-1.2}$  と  $t^{-0.2}$  の交点  $t = 0.2T$  と

<sup>1</sup> /Document/Education/ReactorEng/DecayHeatCal

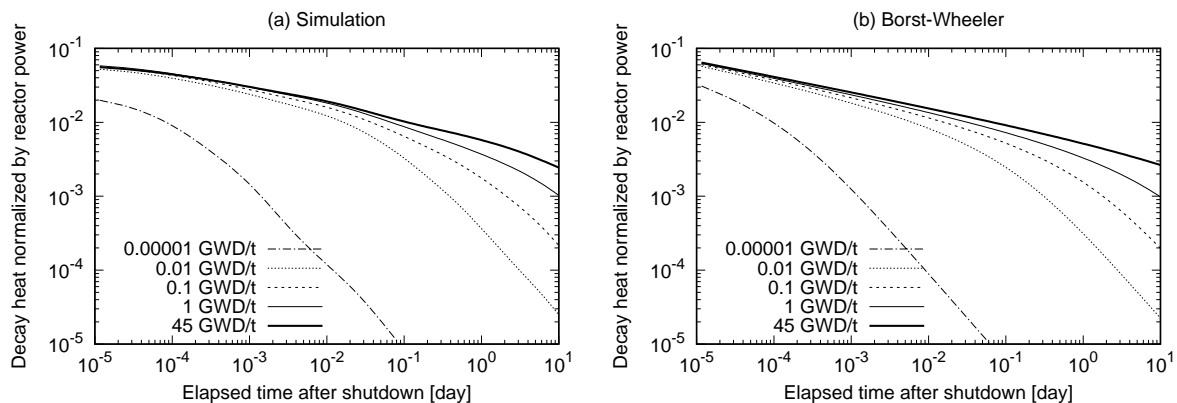


Fig. 2: Decay heat after reactor shutdown (log scale)

して見積ることが出来、例えば 0.01 GWD/t の場合、この数値  $0.2T$  は 0.05 日程度となる。参考として、 $y = ax^{-0.2}$  と  $y = bx^{-1.2}$  を比較したものを Fig. 3 に示す（定数  $a$ 、 $b$  は適当に決めたものであることに留意されたい）。

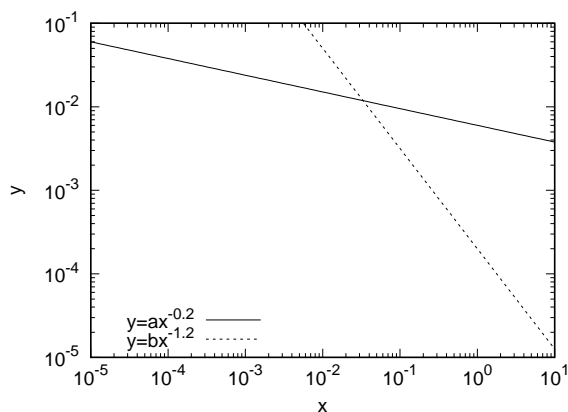


Fig. 3: Comparison of two curves

上記の振る舞いについて理解を深めるため、崩壊熱への寄与が大きいいくつかの核種について、核種毎の崩壊熱を Fig. 4 に示す。この図中において比較的半減期が長いものとして、I-132 (2.2 時間) I-135 (6.7 時間) Np-239 (2.4 日) が挙げられる。I-135 の寄与については、0.01 GWD/t と 0.1 GWD/t の間には有意な差異が見えるが、0.1 GWD/t と 45 GWD/t との間には差異は小さく、0.1 GWD/t 以上では照射中は平衡状態に達しているものと考えられる。それに対して半減期が長い Np-239 については、0.1 GWD/t と 45 GWD/t との間には有意な差異が見られており、0.1 GWD/t でも平衡状態には達していないものと考えられる。I-132 については、半減期が 3.2 日の Te-132 の娘核であることから、Np-239 と同様に、照射時間に対する依存性が見られている。

本メモを作成するにあたり、北大・応用量子科学部門の富岡智先生に大変有益なご助言をいただきました。ここに深い謝意を表します。

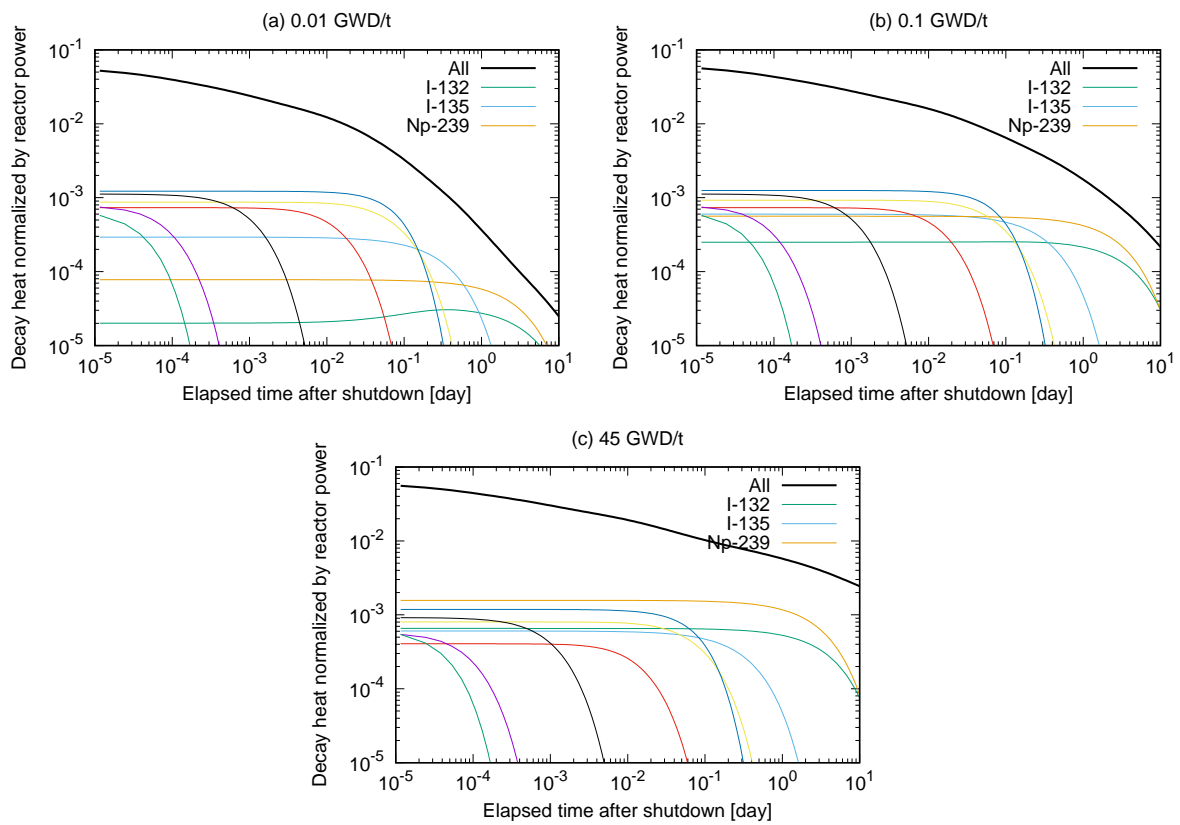


Fig. 4: Nuclide-wise decay heat with different irradiation periods