

卒業論文発表会

2012年1月31日 福井大学工学部物理工学科

$^{235}\text{U}$ の全核分裂生成物の  
放射能の時間変化

物理工学科 大沼 正季

---

## ～ 研究の目的 ～

---

東北地方太平洋沖地震で発生した福島第一原発事故後、放射能汚染が大きな問題となっている。

私たちの卒研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。

本研究では、公的研究機関によりWEB公開(米国 **National Nuclear Data Center**)されている核データ(半減期、エネルギー)を利用して、 $^{235}\text{U}$ が核分裂した時の生成物のもつ放射能の時間推移を自分たちで作成したプログラムで計算し、その結果について考察する。

## 福島第一原発事故と放射能汚染問題

### 事故の経緯

地震と津波により、全電源が失われ、冷却が不能になった。



崩壊熱により圧力容器内と使用済燃料プールの燃料棒が溶融した。



多量の放射性物質が外部に放出された。

### 放射性物質の流出と汚染

大気中に放出された放射性物質が風で拡散した。



特に<sup>131</sup>Iや<sup>137</sup>Csによる外部被曝や農作物、畜産物等の汚染が問題視されている。

また、海水中に放出された放射性物質による汚染も心配されている。

## 放射能の単位

### 本研究ではベクレルを使用する

⇒ベクレルとは、放射能の量を表すSI単位の1つ。[Bq]  
(1秒間に1つの原子核が崩壊して放射線を放つ放射能の量が1[Bq]。)

### 参考：グレイとは

⇒放射線のエネルギーが人体にどれだけ吸収されたかを表す単位。[Gy]  
(1Gyは、物体1[Kg]あたり、1[J]のエネルギー吸収がある時の線量。)

### 参考：シーベルトとは

⇒人が放射線を受けたときの影響の程度を表す単位。[Sv]  
(Svは、Gyに放射線の種類や人体の性質ごとの係数をかけたもの。)

## $\beta$ 崩壊系列と放射性同位体

### $\beta^-$ 崩壊

中性子が陽子に変わり、同時に電子と反電子ニュートリノが生まれて、それが放出される現象。



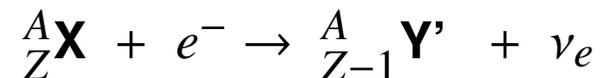
### $\beta^+$ 崩壊

陽子が陽電子と電子ニュートリノを放出して中性子になる現象。



### 電子捕獲(EC)

陽子が軌道上の電子を捕獲して中性子に換わり、電子ニュートリノを放つ現象。



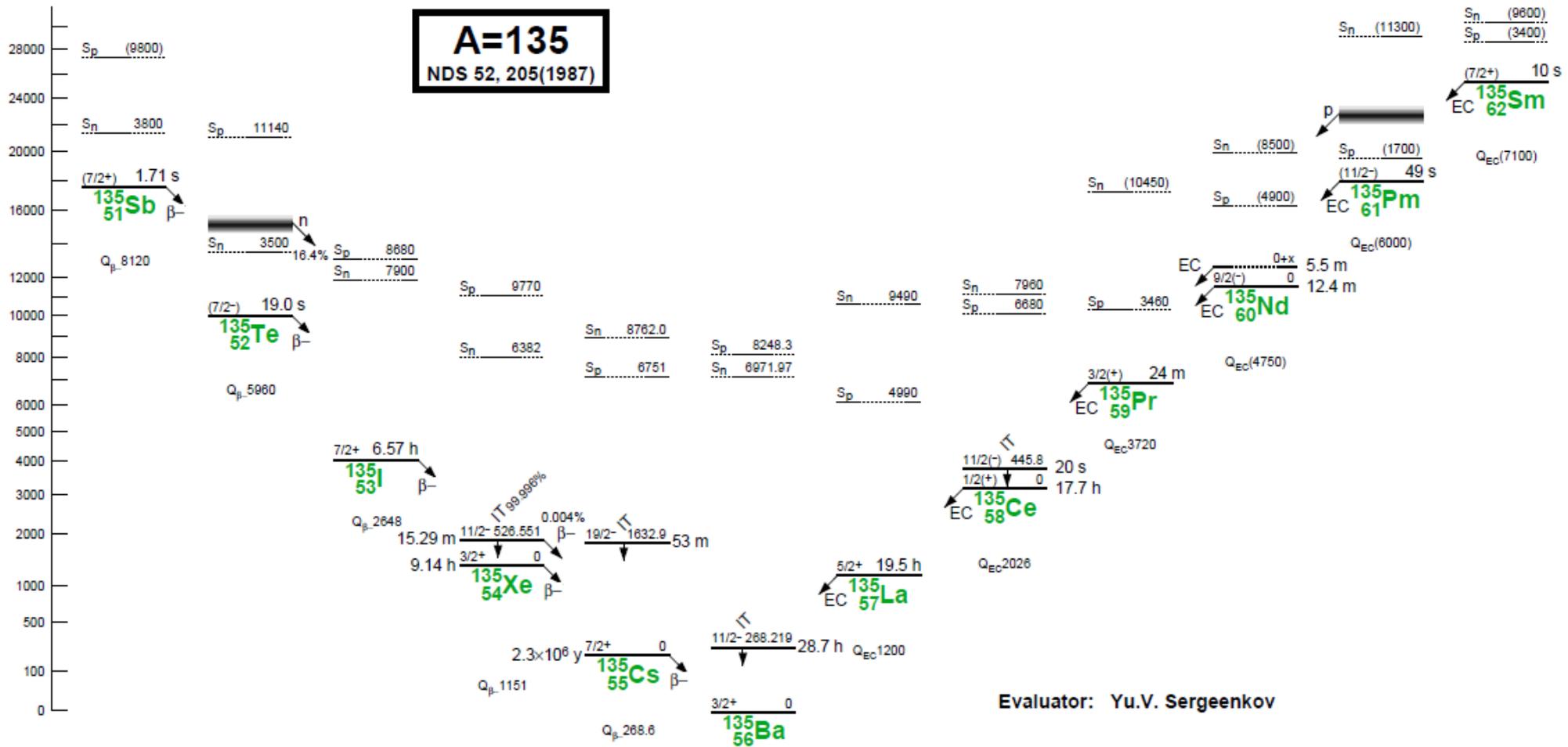
## 放射性同位体とは

陽子の個数が同じ(即ち同じ元素)で、中性子の個数が違う核種を同位体という。同位体は安定なものとは不安定なものがあり、不安定なものは時間が経つと放射線を発して別種の原子核になる(放射性崩壊)。

自然に存在するものは、ウランやトリウムからの $\alpha$ 崩壊系列及び宇宙線との反応で生成したものである。原子炉や加速器を用いて人工的に作ることも可能。

本研究では原子炉中で、核燃料 $^{235}\text{U}$ が熱中性子を吸収して核分裂してできる放射性同位体を対象とする。

# β崩壊系列の例



## 崩壊を表す微分方程式

放射性崩壊による原子核の個数の時間変化について時間幅  $dt$  の間に崩壊する原子核の数  $dn$  は、その時点での原子核の個数に比例する。

$$dn = -\lambda n dt \quad \lambda \text{ は崩壊係数と呼ばれ、半減期 } T_{\frac{1}{2}} \text{ と、 } \lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}}$$

という関係にある。

## 複数の核の崩壊を扱う場合

一本の  $\beta$  崩壊系列上にある  $N$  種類の核の個数をそれぞれ  $n_1, n_2, \dots, n_N$  とすると。

定数係数 1 階常微分方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{pmatrix}$$

初期条件

$$t = 0 \text{ で } \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1^0 \\ \vdots \\ n_N^0 \end{pmatrix}$$

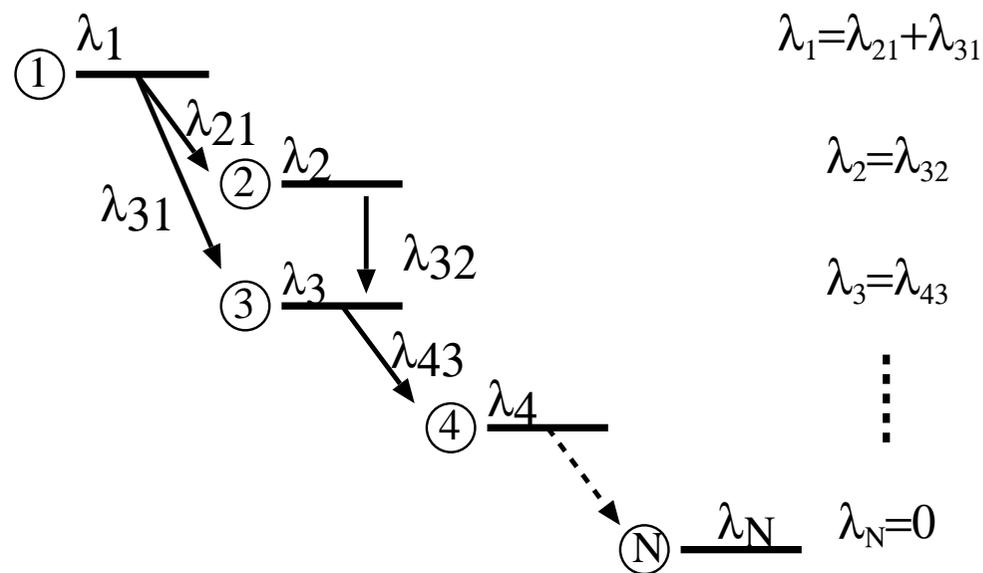
原子核をエネルギーの高いものから順番に並べれば  $\lambda$  は下三角行列になる。

$$(\lambda) = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{N1} & \lambda_{N2} & \lambda_{N3} & \cdots & \lambda_{NN} \end{pmatrix}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$\lambda_{ij}$  は核データからとる。

$$\begin{cases} i = j \text{ のとき} & \lambda_{ii} = -\lambda_i < 0 \\ i < j \text{ のとき} & \lambda_{ij} = 0 \\ i > j \text{ のとき} & \lambda_{ij} \geq 0 \end{cases}$$



他の  $\lambda_{ij}$  は 0。

三角行列の固有値は対角成分 $(-\lambda_1, \dots, -\lambda_N)$ であるから

$$n_i = \sum_{j=1}^i C_{ij} e^{-\lambda_j t}$$

とおき、微分方程式及び初期値条件に代入して $C_{ij}$ を定めることで解は解析的に求まる。

$$C_{11} = n_1^0 \quad , \quad C_{ij} = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} \sum_{k=j}^{i-1} \lambda_{ik} C_{kj} \quad (2 \leq i \leq N \quad , \quad 1 \leq j \leq i-1)$$

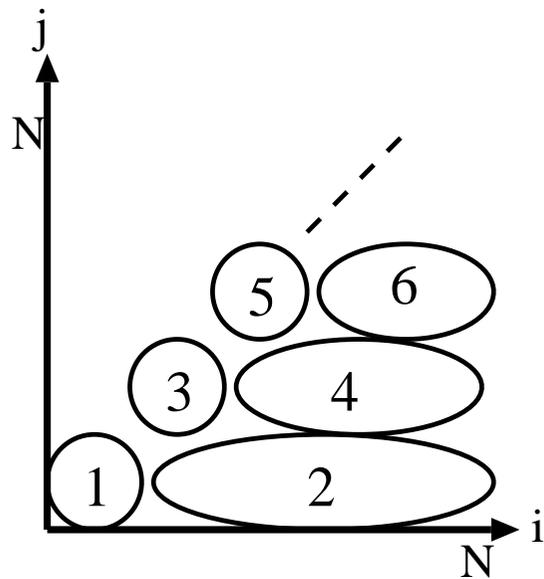
$$C_{ii} = n_i^0 - \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} \quad (2 \leq i \leq N \quad , \quad 1 \leq j \leq i-1)$$

## プログラムの仕組みと評価

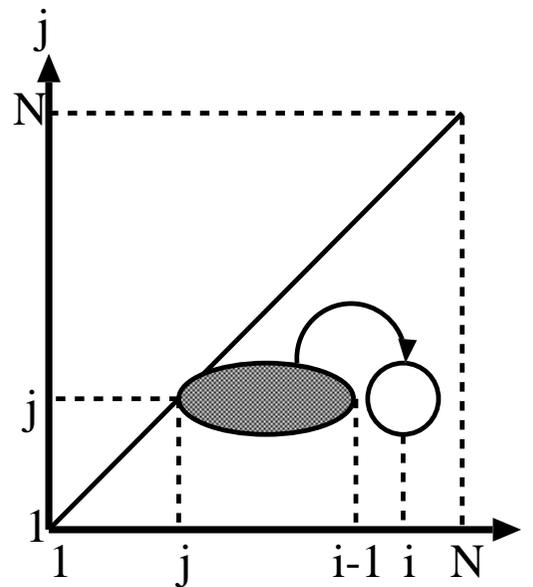
$$C_{11} = n_1^0, \quad C_{ij} = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} \sum_{k=j}^{i-1} \lambda_{ik} C_{kj} \quad (2 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq i-1)$$

$$C_{ii} = n_i^0 - \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} \quad (2 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq i-1)$$

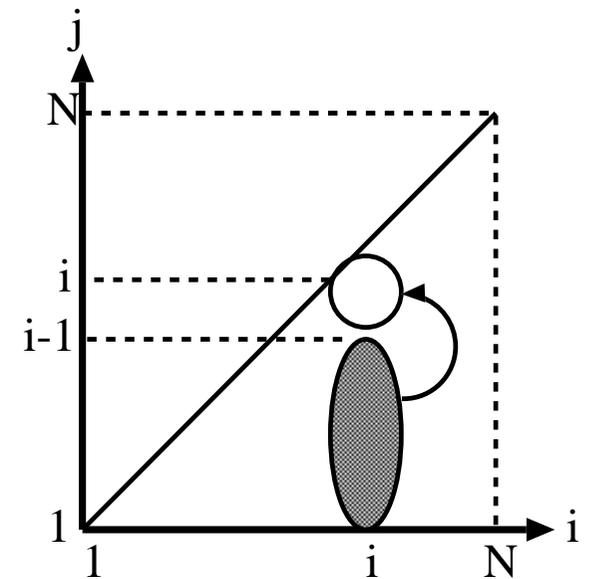
$C$ を図のような流れで求める。



$C_{ij}$ 決定の手順

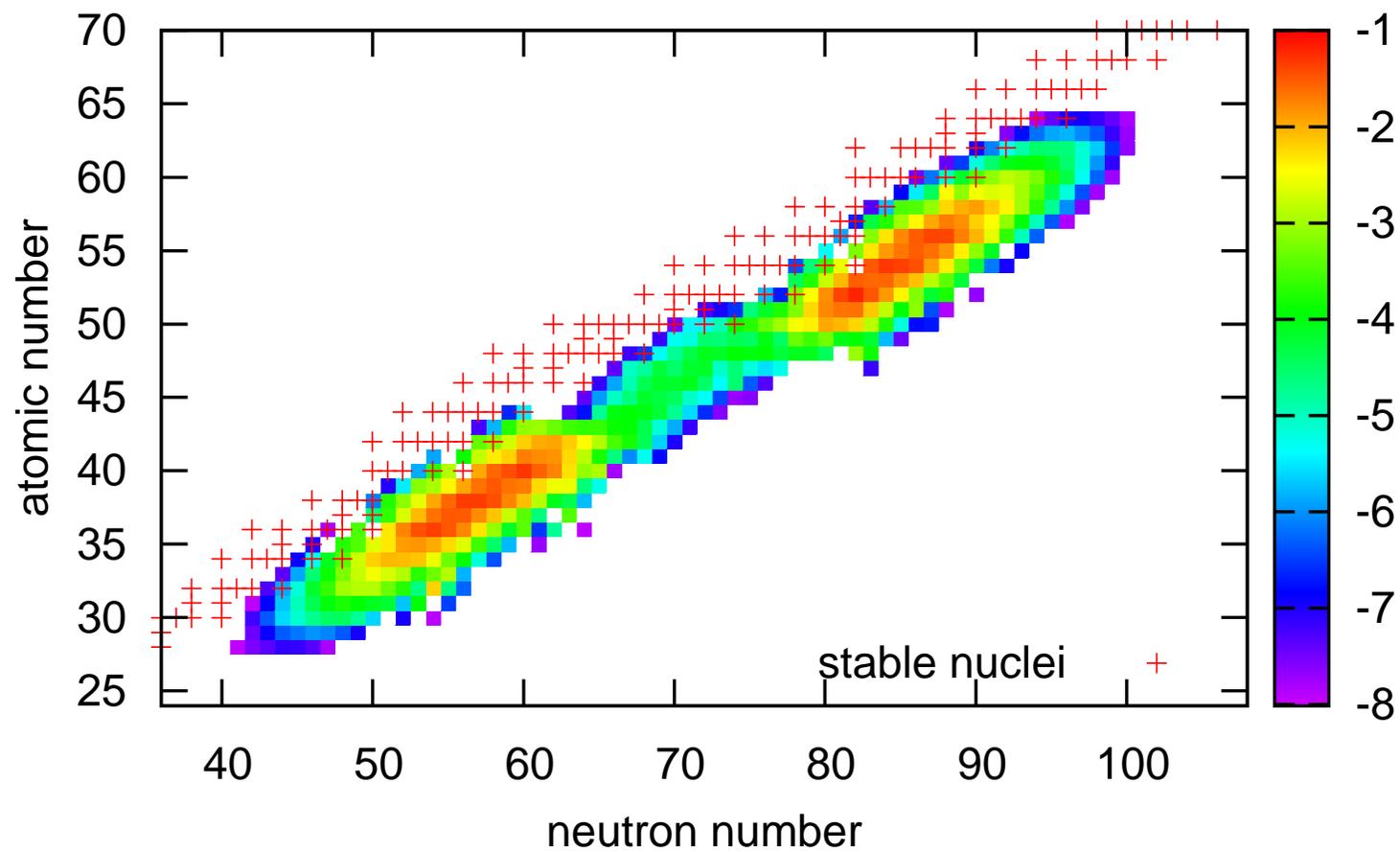


$C_{ii}$ 決定の手順



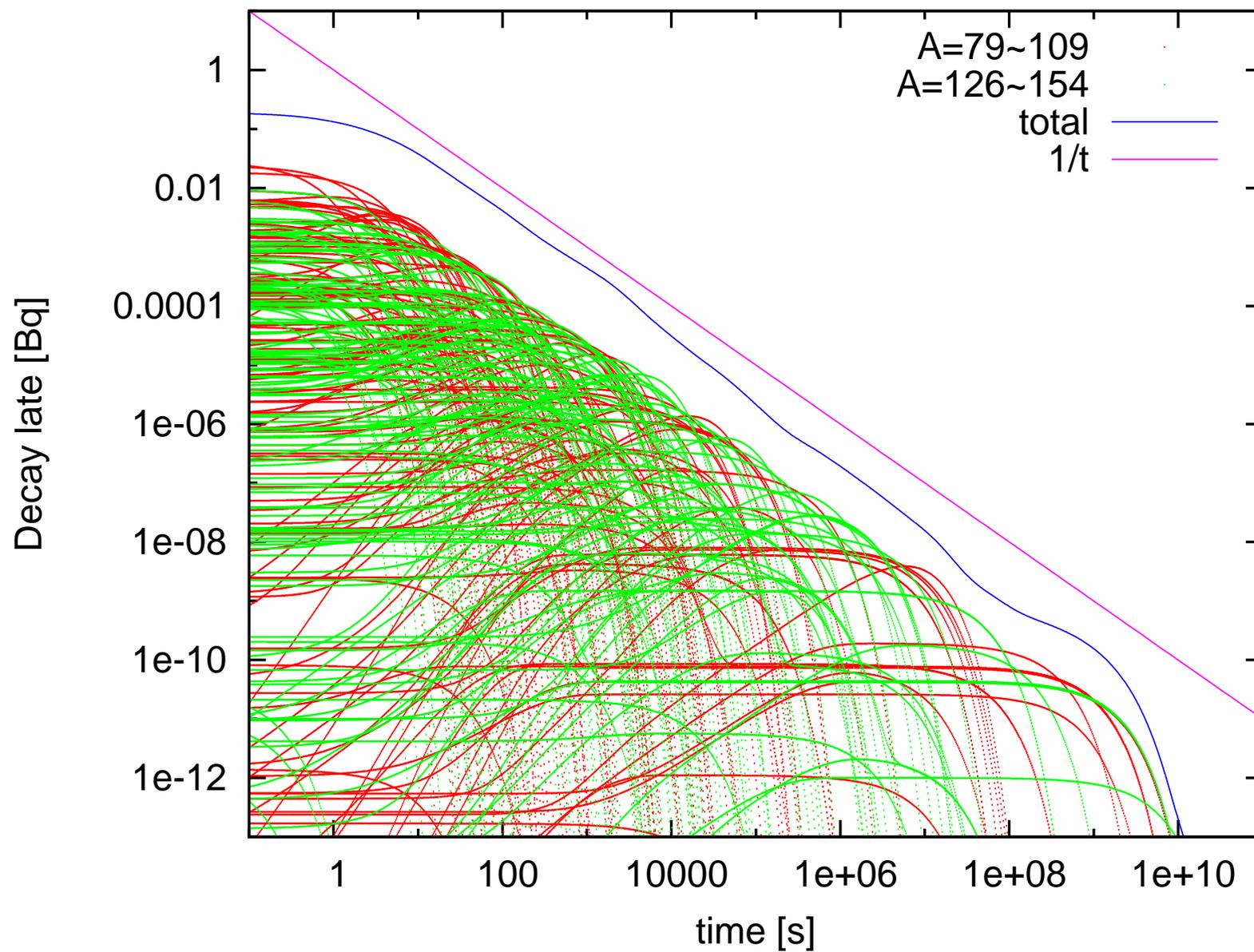
## $^{235}\text{U}$ の核分裂収率

Common logarithm of yields of fission products of  $^{235}\text{U}$  by thermal neutron

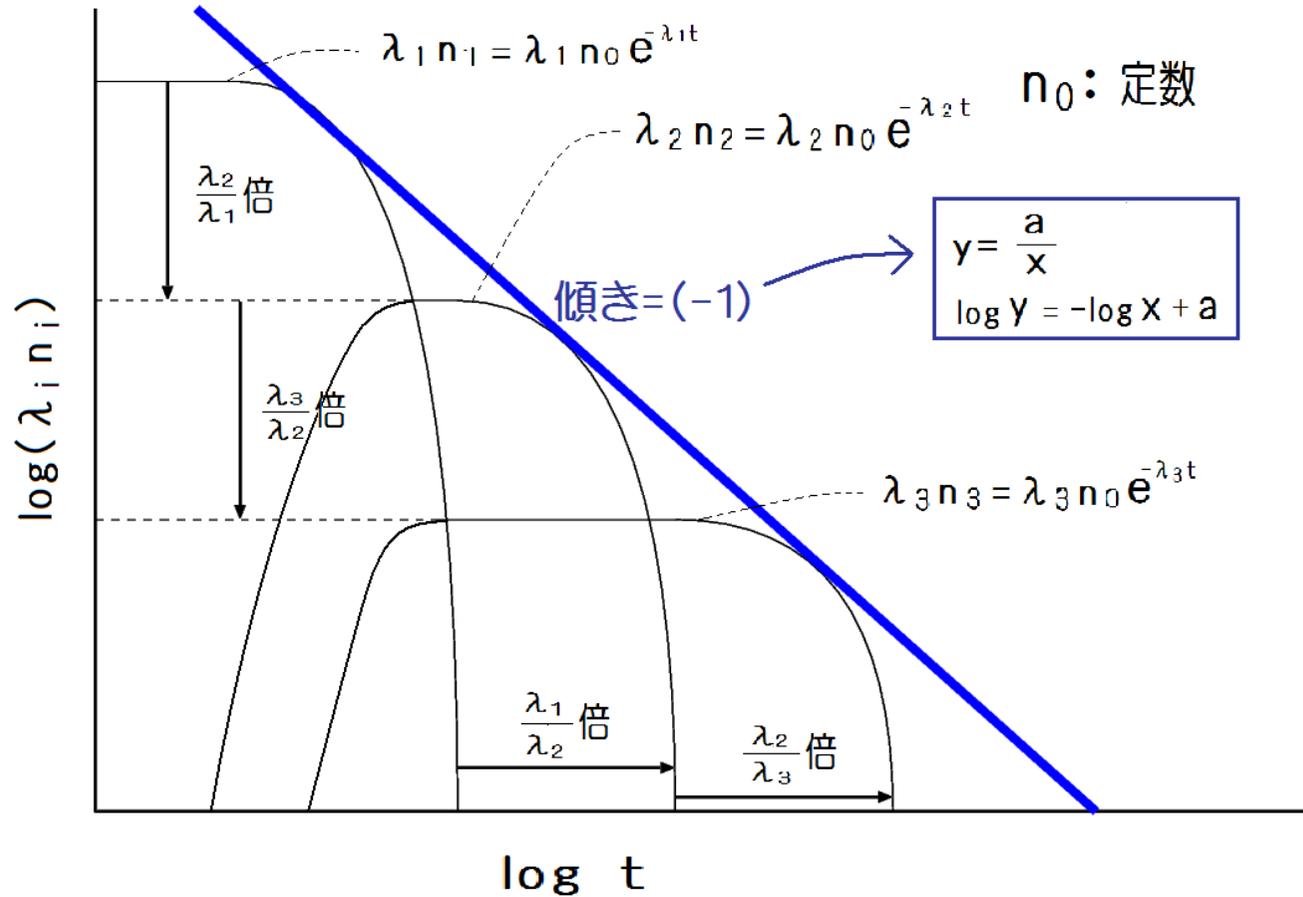




# $^{235}\text{U}$ の核分裂生成物の $\beta$ 崩壊による放射能の時間推移計算結果1

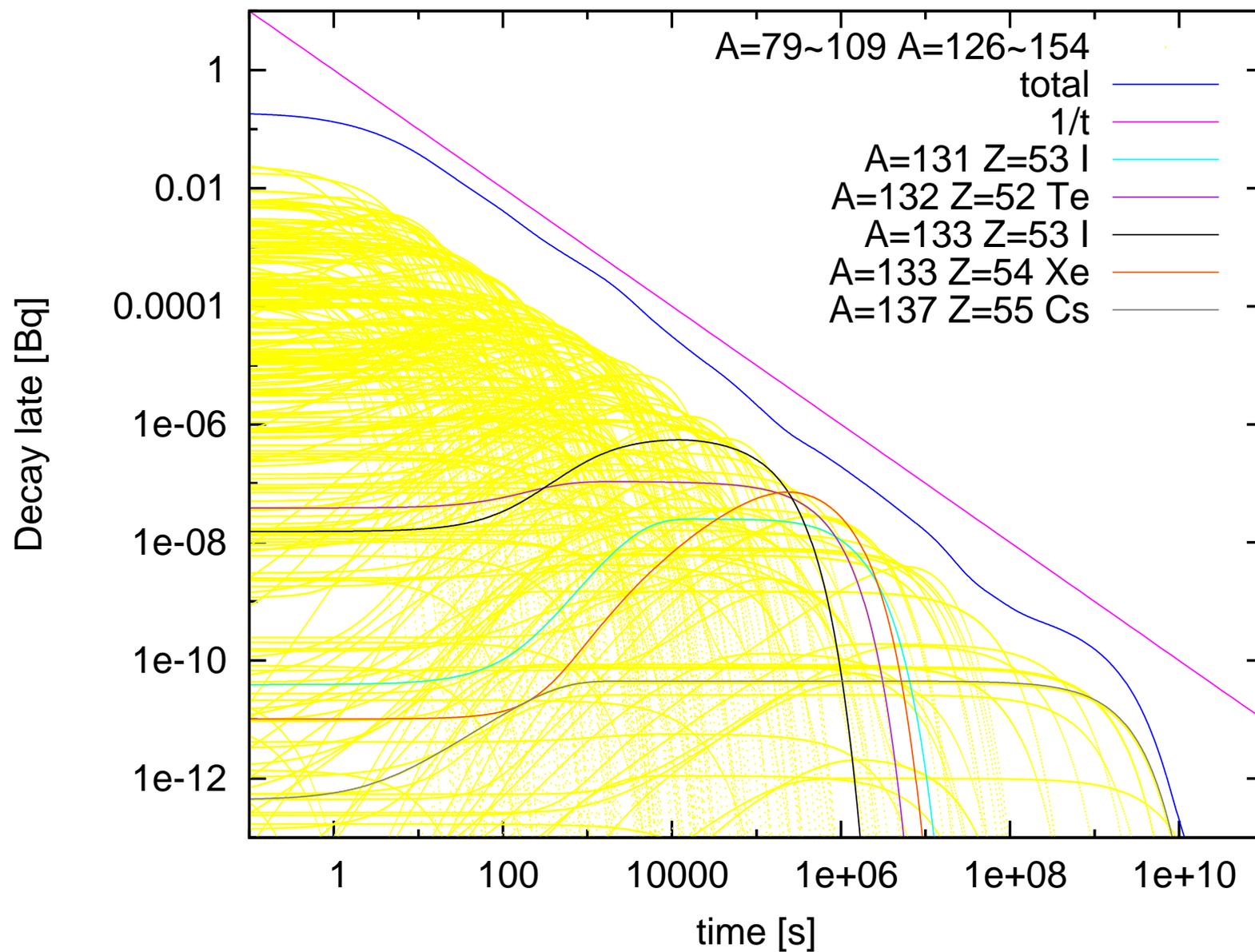


## 傾きについて



$\beta$ 崩壊系列のように、崩壊鎖に沿って次第に半減期が長くなる。  
その場合、各核の放射能を表す曲線の包絡線は(時間)<sup>-1</sup>の形となる。  
全放射能も(時間)<sup>-1</sup>に比例して減少する。

## $^{235}\text{U}$ の核分裂生成物の $\beta$ 崩壊による放射能の時間推移計算結果2



## まとめ

1.  $^{235}\text{U}$ の核分裂生成物の $\beta$ 崩壊による放射能[Bq]の時間推移をプログラムを自作し計算した
2.  $\beta$ 崩壊を表す微分方程式の解析解を求める手順を示した
3. 全放射能は10秒から100年の間は時間に反比例して減衰することを示した

## 今後の課題

1.  $\beta^-n$ 崩壊の正しい考慮
2. 中性子吸収について ( $^{134}\text{Cs}$ が現れない)
3.  $\beta$ 崩壊での基底状態、励起状態への分岐比データ

---

## $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ について

---

### 1. $^{90}\text{Sr}$ [半減期 28.90 y]

- ・核分裂生成物としては半減期が長く、存在量も多い
- ・ $^{90}\text{Y}$ に $\beta$ 崩壊し、 $^{90}\text{Y}$ は高エネルギーの $\beta^-$ 線放出体
- ・体内では30%が骨に移行して、半減期が非常に長くなる

### 2. $^{131}\text{I}$ [半減期 8.03 d]

- ・揮発性が高く、拡散しやすい
- ・体内では30%が甲状腺に取り込まれる(甲状腺腫瘍、甲状腺機能低下)

### 3. $^{137}\text{Cs}$ [半減期 30.08 y]

- ・揮発性が高く、拡散しやすい
- ・核分裂生成物としては半減期が長く、存在量も多い