



産学官連携

原子力人材育成ネットワーク

Nuclear Human Resource Development Network

原子炉物理学の基礎 (第4章)

山下清信

(独) 日本原子力研究開発機構

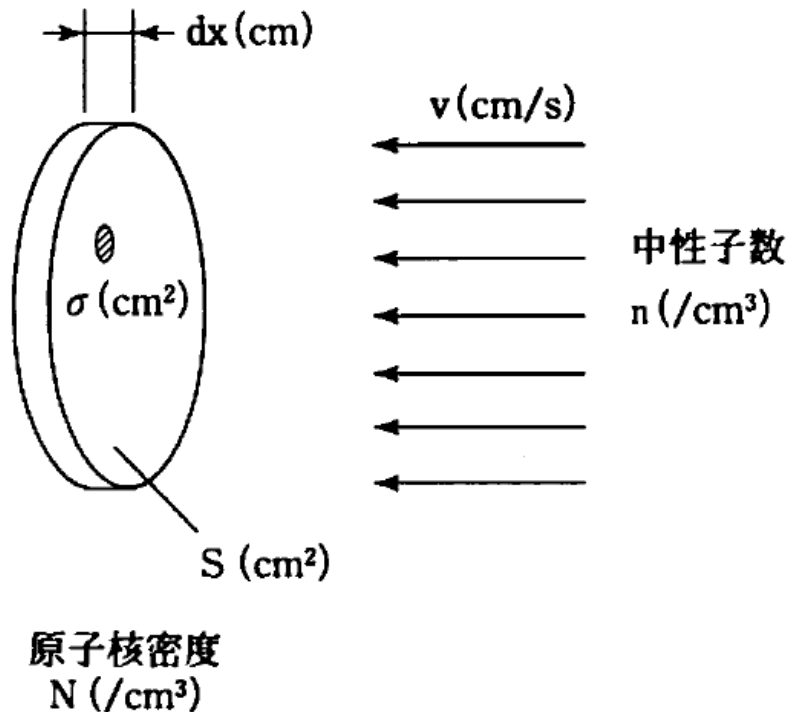
原子力人材育成センター長

<第4章 学習内容>



1. **断面積、中性子、反応率**
2. **中性子と原子核の反応**
3. **中性子の減速と熱中性子**
4. **臨界**

断面積、中性子束、反応率



σ : ミクロ (微視的) 断面積 (cm^2)
 Σ : マクロ (巨視的) 断面積 (cm^{-1})
 ϕ : 中性子束 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

標的に毎秒入射する中性子数

$$S n v \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad \dots \textcircled{1}$$

標的の中の (原子核の) 有効面積

$$\sigma N S dx \text{ (cm}^2\text{)}$$

全面積に対する有効面積の大きさ =
入射中性子が核と衝突する確率

$$\sigma N S dx / S = N \sigma dx \quad \dots \textcircled{2}$$

標的中の反応率 (衝突率) = $\textcircled{1} \times \textcircled{2}$

$$\begin{aligned} S n v \cdot N \sigma dx &= (n v) \cdot (N \sigma) \cdot S dx \\ &= \phi \cdot \Sigma \cdot V \text{ (s}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

単位体積当たりの反応率

$$= \Sigma \phi \text{ (cm}^{-3}\text{s}^{-1}\text{)}$$

中性子と原子核の反応とマクロ断面積



- 散乱 (Scattering)
 - 弾性散乱 (Elastic scattering) Σ_s
 - 非弾性散乱 (Inelastic scattering) $\Sigma_{s'}$
- 吸収 (Absorption) Σ_a
 - 捕獲 (Capture) Σ_c
 - 核分裂 (Fission) Σ_f
 - その他 (荷電粒子放出)
- Q値 (Q value)
 - 反応前後の静止質量差に相当するエネルギー

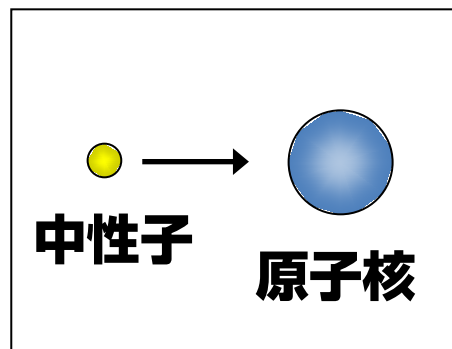
中性子と原子核の反応 (1)



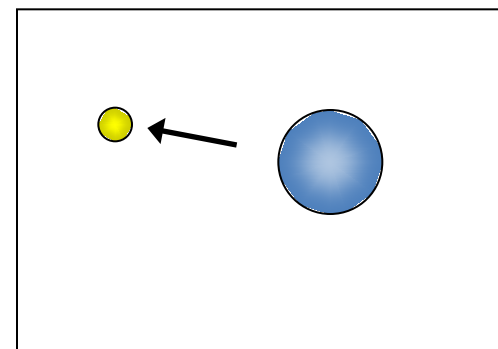
- **散乱**

- **弾性散乱**

反応前



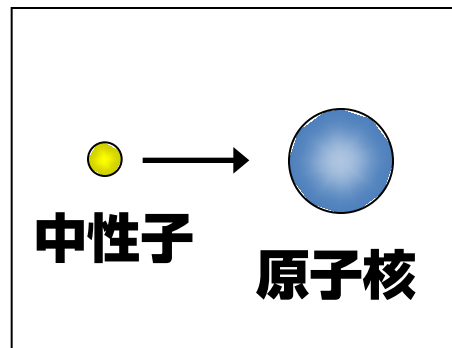
弾性散乱



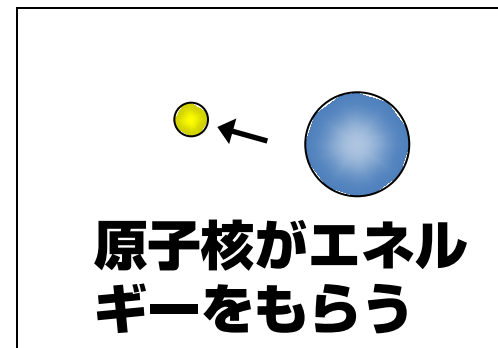
- **非弾性散乱**

運動エネルギーが
保存しない

反応前



非弾性散乱



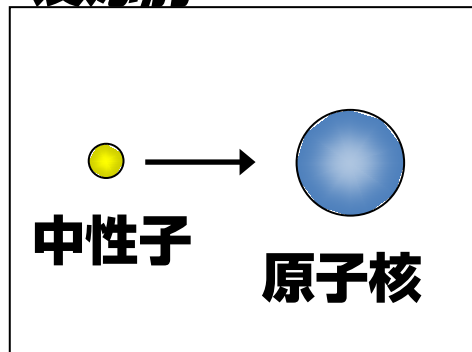
中性子と原子核の反応 (2)



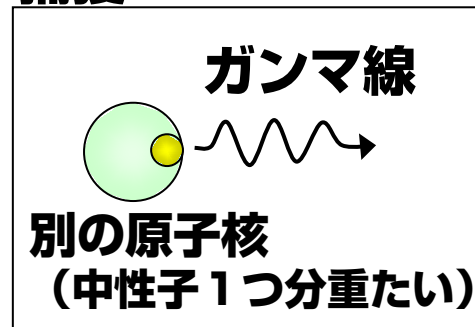
• 吸収

- 捕獲
- 核分裂
- その他
(粒子放出等)

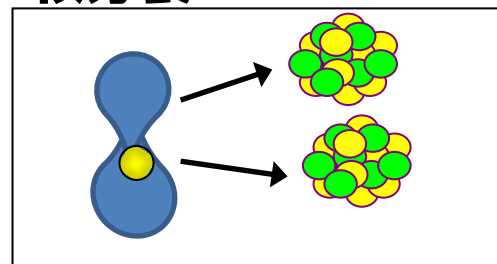
反応前



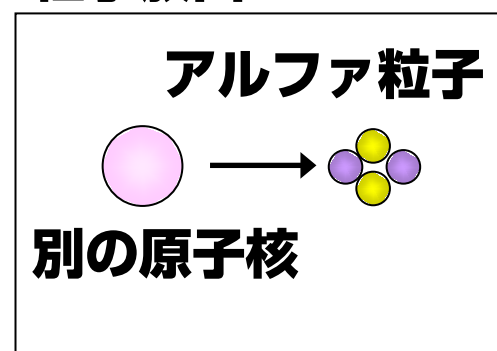
捕獲



核分裂



粒子放出

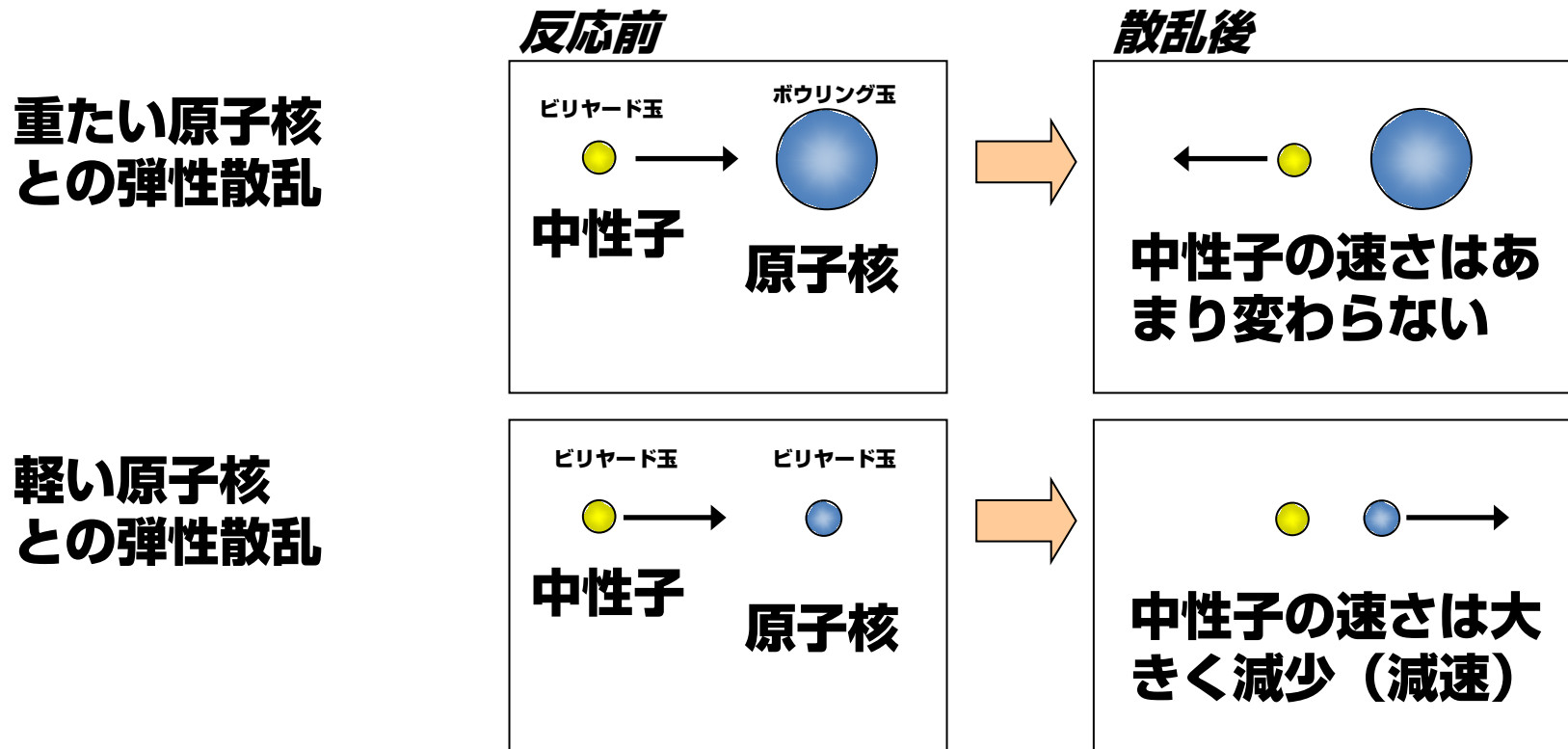


全断面積 = 弾性散乱 + 非弾性散乱 + 吸収 (捕獲 + 核分裂 + その他)

中性子の減速と熱中性子



- 核分裂で生まれた中性子は速さ（スピード）が速い（高速中性子）。
- **ウラン235は速度の遅い中性子（熱中性子）と核分裂反応を起こしやすい。**
- このため、中性子を軽い原子核と衝突（弾性散乱）させて、中性子の速さを遅くしてやる（減速させる）。
- 多くの原子炉では、このために**水**（の水素原子核）を使っている（**減速材**）。



なぜ中性子を減速する必要があるのか

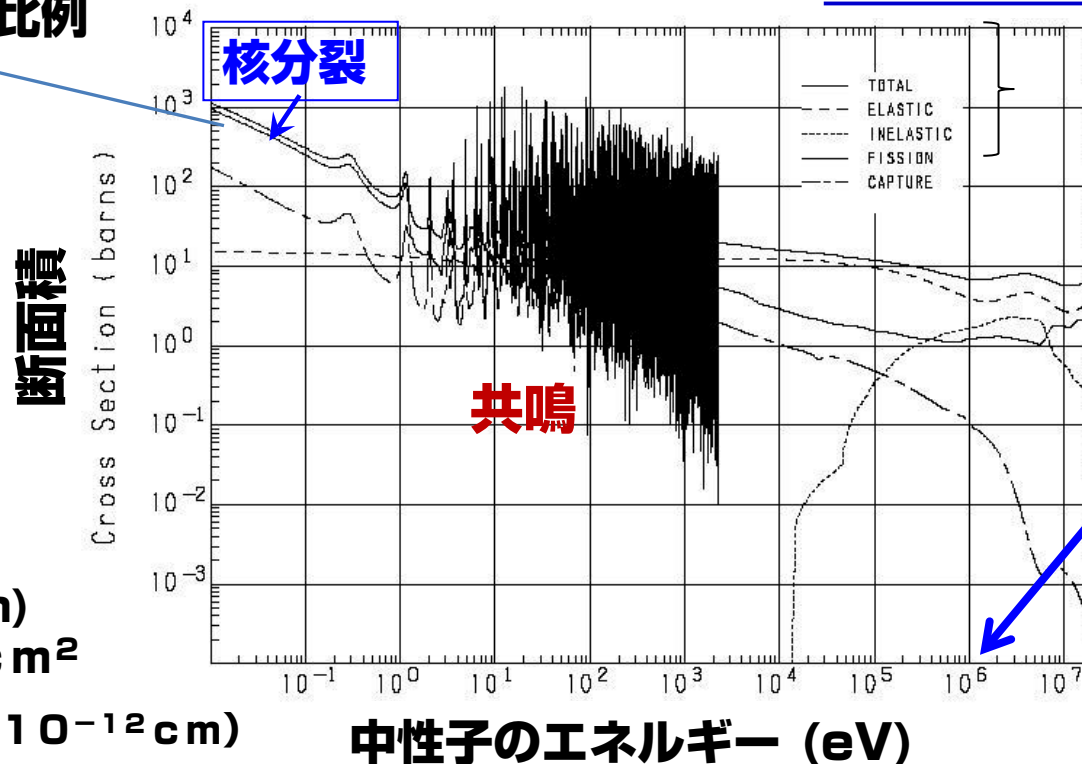


中性子1個と原子核1個の間でおこる相互作用（反応）の確率は、断面積と呼ばれる物理量によって表される。（前述）

低エネルギーで、断面積は速さの逆数に比例し、核分裂が起こりやすくなる。

1/(速さ) に比例

U-235



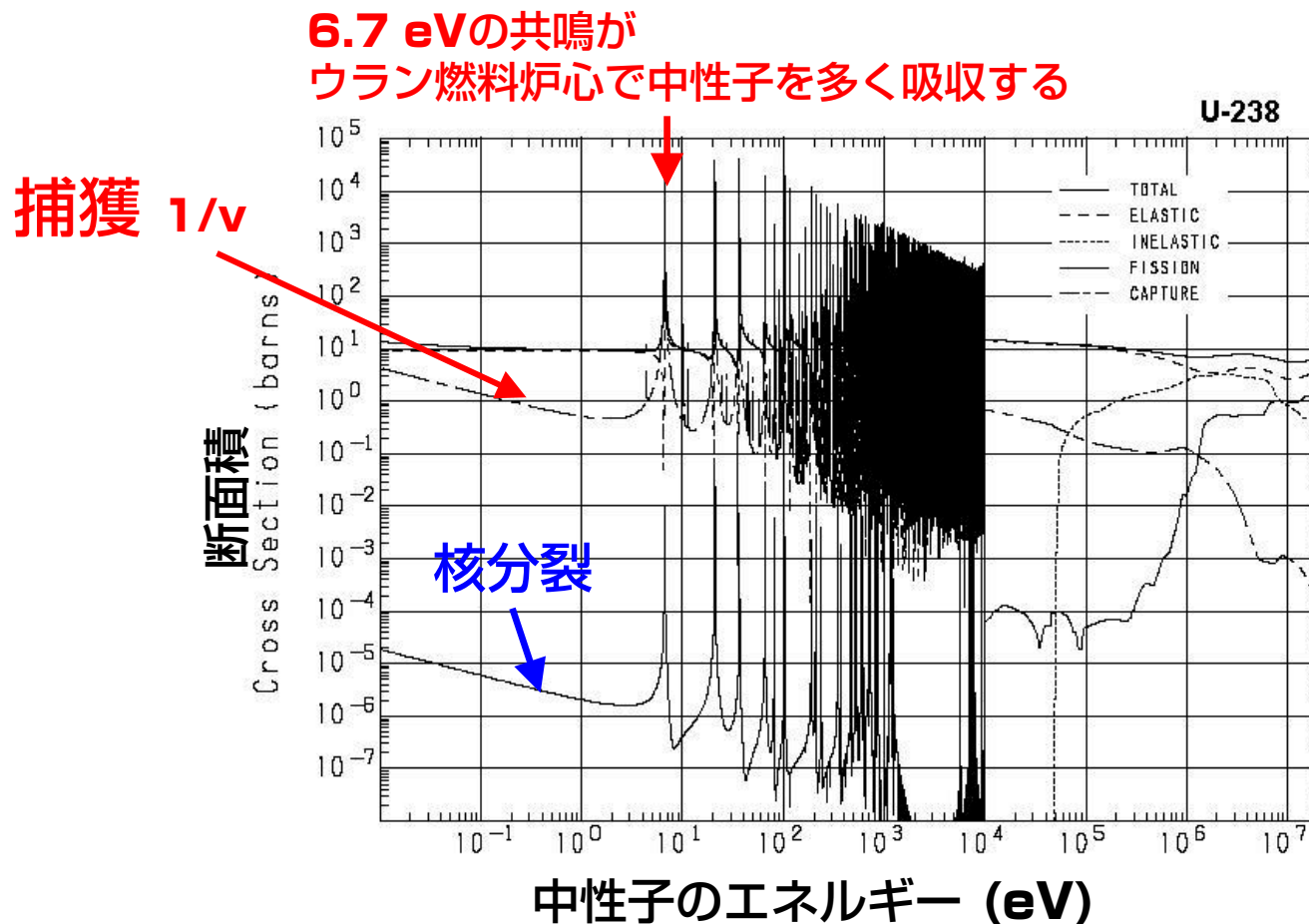
断面積

単位：
バーン(barn)
 $= 10^{-24} \text{ cm}^2$

(原子核半径 約 10^{-12} cm)

核分裂で発生
する中性子の
エネルギーは
2MeV

U-238 断面積



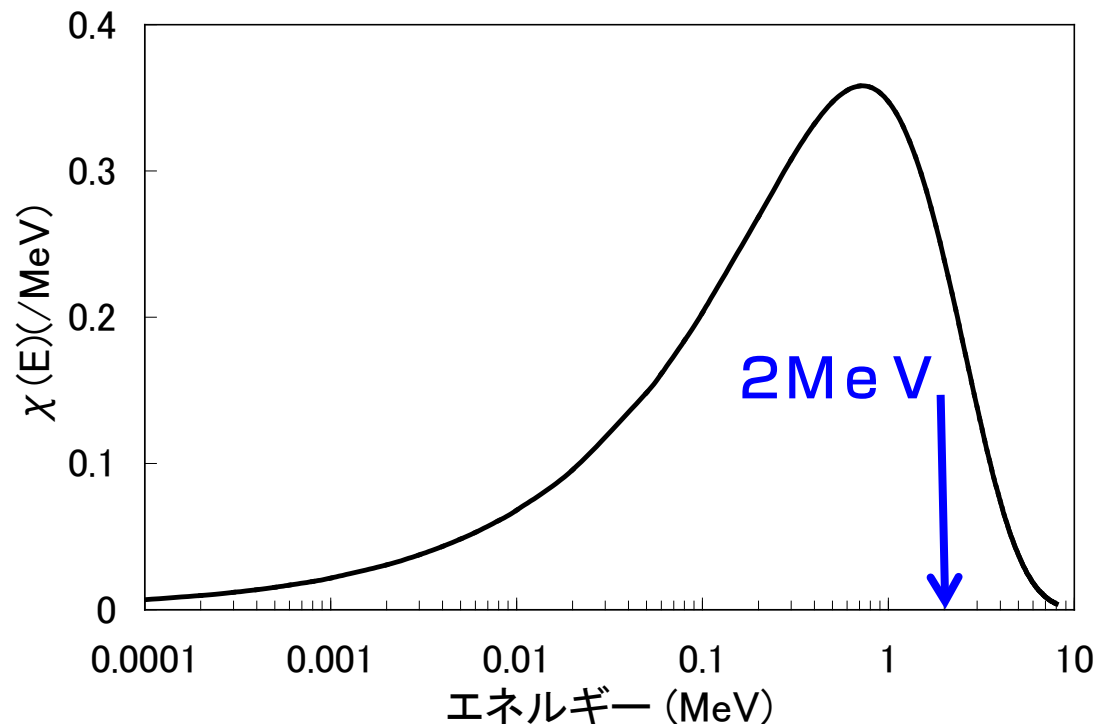
http://www.ndc.jaea.go.jp/index_J.html のJENDL-3.3より

核分裂断面積は小さく、核分裂は非常に起こりにくい。
軽水炉の新燃料のU-235濃縮度は、平均で約3~4%である。

核分裂



^{235}U の核分裂によって放出される中性子のエネルギー分布（核分裂スペクトル）



核分裂で発生する中性子の平均エネルギーは約**2MeV**

新燃料の**U-235**濃縮度は、平均で約**3～4%**である。
つまり、**U-238**の方が圧倒的に多い。

U-238断面積の共鳴ピークは**U-235** の断面積より大きい。

なぜ、中性子は、**U-238**の共鳴吸収を逃れて、熱エネルギー領域で**U-235**の核分裂を引き起こすことができるのか。

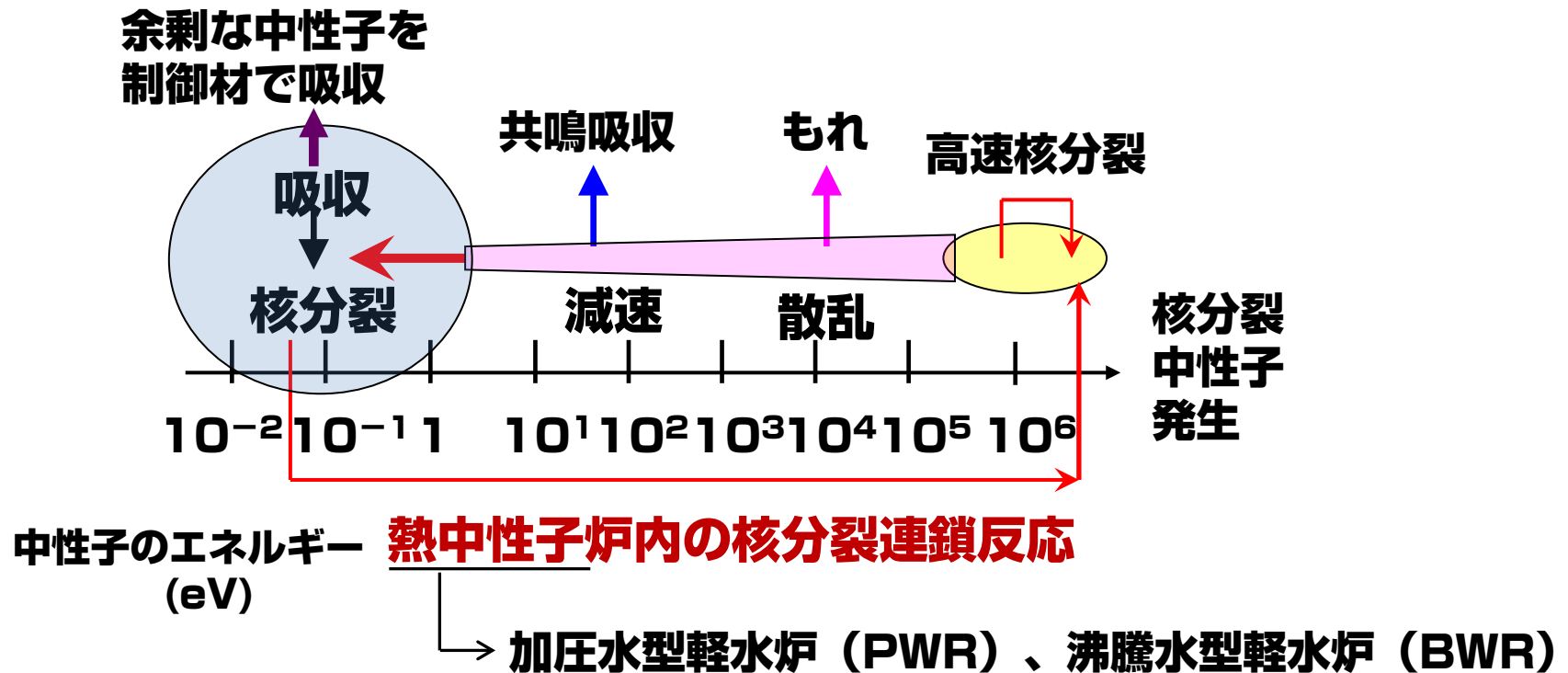
答) 軽元素による中性子減速と燃料の非均質性の効果

熱領域の σ_{f235} は数百barn、熱領域の σ_{a238} は数barn でウラン**235**の方が中性子を奪い取り、核分裂しやすい

臨界



臨界とは、中性子源がない状態で、核分裂連鎖反応が定常的に維持されること



核分裂可能な物質の消費が続くと、余剰中性子が減少する。

余剰中性子がゼロとなったところで運転終了、定期点検、一部燃料を新燃料に交換

**何故、U-235は熱中性子で核分裂するのに、
U-238は高速中性子でなければ核分裂しないのか。**



^{235}U の中性子吸収反応に伴う結合エネルギーの放出

$$E_B = [M(235, 92) + M_N - M(236, 92)]c^2 = 6.5\text{MeV}$$

^{238}U の中性子吸収反応に伴う結合エネルギーの放出

$$E_B = [M(238, 92) + M_N - M(239, 92)]c^2 = 4.8\text{MeV}$$

核分裂エネルギー障壁 約 $5.5 \sim 6.0\text{MeV}$

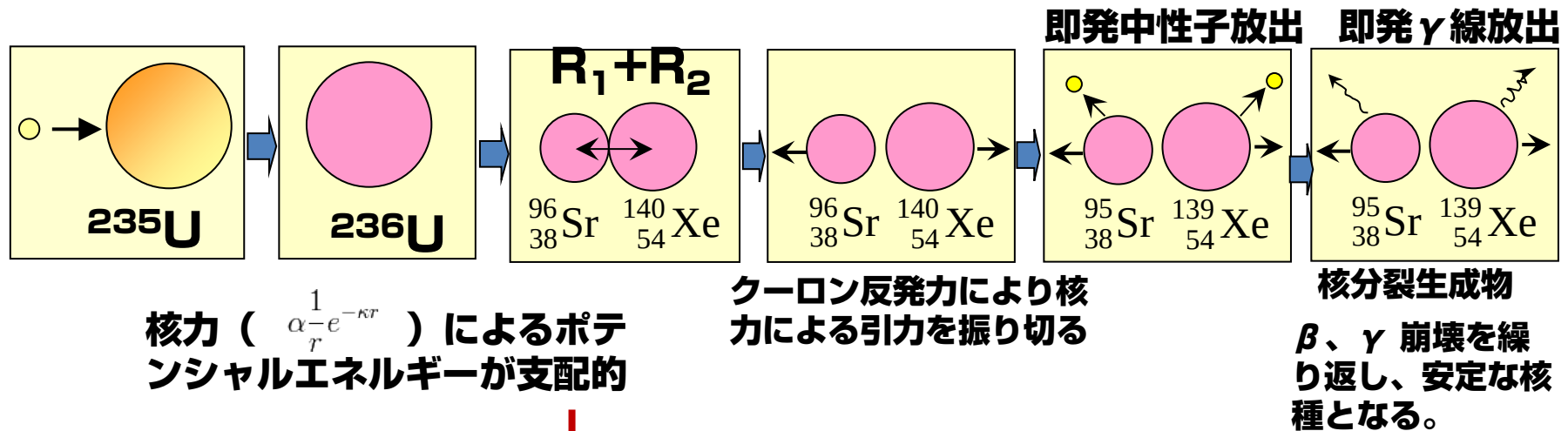
$^{235}\text{U} \rightarrow ^{236}\text{U}$: E_B が核分裂エネルギー障壁を上回り、熱エネルギーで核分裂がおこる。

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{U}$: E_B は核分裂エネルギー障壁より小さく、高速エネルギー中性子の運動エネルギーにより、不足分が供給されなくてはならない。

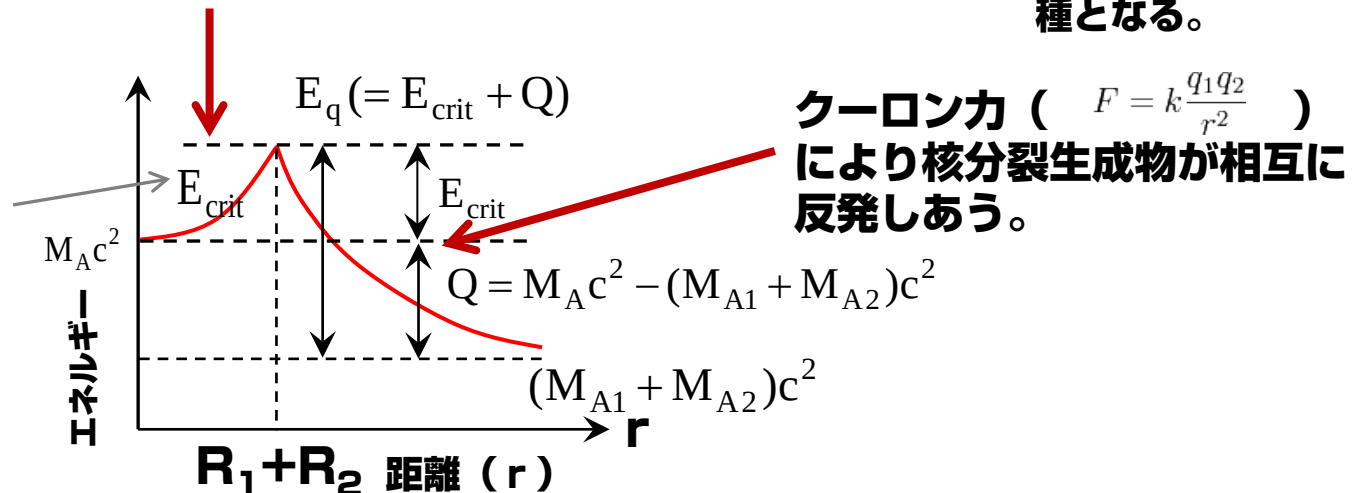
核分裂



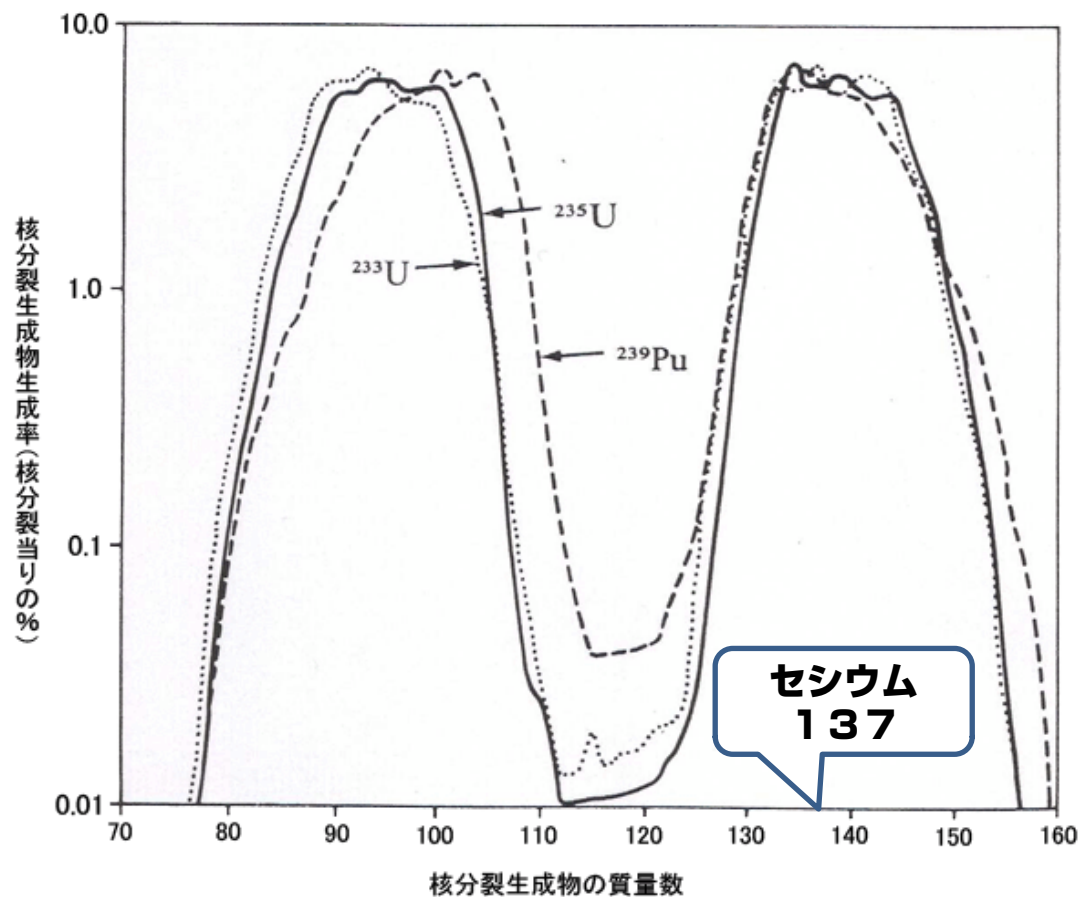
核分裂性核種 (fissile) : ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu 等質量数が奇数で、原子番号が偶数のウラン・プルトニウム



E_{crit} (核分裂エネルギー障壁) 以上のエネルギーが結合エネルギー放出 (及び入射中性子の運動エネルギー) によって供給されなければならない。



核分裂生成物の収率

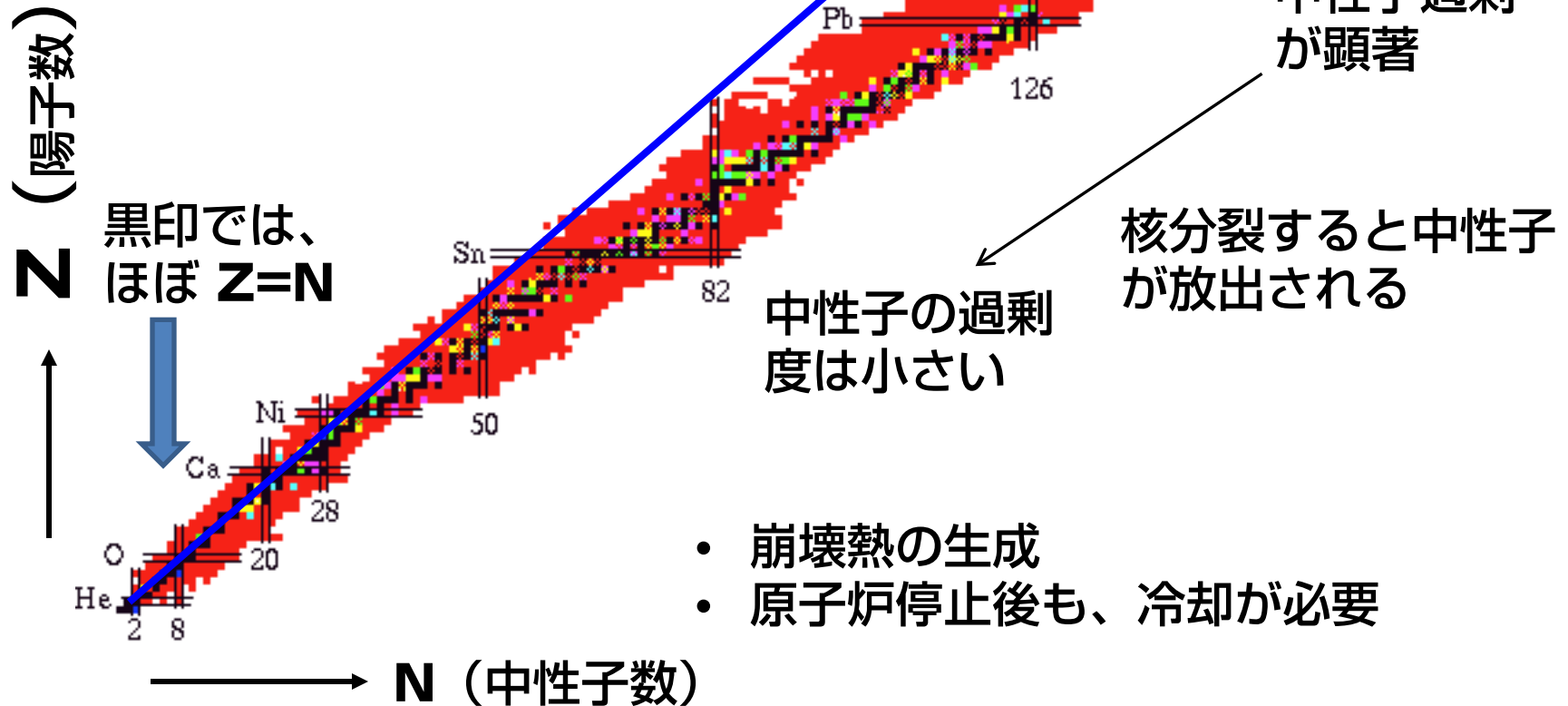


核分裂生成物の質量数分布

核種分布



- 黒印は安定な核や超長寿命の原子核
- 赤印は極めて不安定な原子核
- 核分裂生成物は、 β -崩壊、 γ 崩壊により黒印の安定核種へと向かう。



この章のまとめ



1. 1回の核分裂で発生するエネルギーは約200MeV

2. σ : ミクロ (微視的) 断面積 (cm^2)、

Σ : マクロ (巨視的) 断面積 (cm^{-1})

ϕ : 中性子束 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

N : 原子数密度 (コ/ cm^{-3})

単位体積当たりの反応率 $R (\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1})$

$$R = \sigma N \phi = \Sigma \phi$$

$$\Sigma = \sigma N$$

3. 中性子と原子核の反応には、 Σ_s , Σ_s' , Σ_a , Σ_f , Σ_c がある

4. ウラン235は速度の遅い中性子 (熱中性子) と核分裂反応を起こしやすい、このため核分裂で生まれた高速中性子は 軽い原子核と衝突させて、減速させる (軽水炉)

5. 核分裂生成物は、 β -崩壊、 γ 崩壊により安定核種へと向かう。