

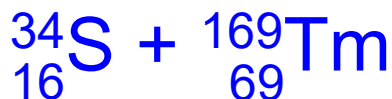
# 反跳生成核分離装置を用いた実験

日本原子力研究開発機構  
先端基礎研究センター  
西尾 勝久

# 実習で学ぶ反応

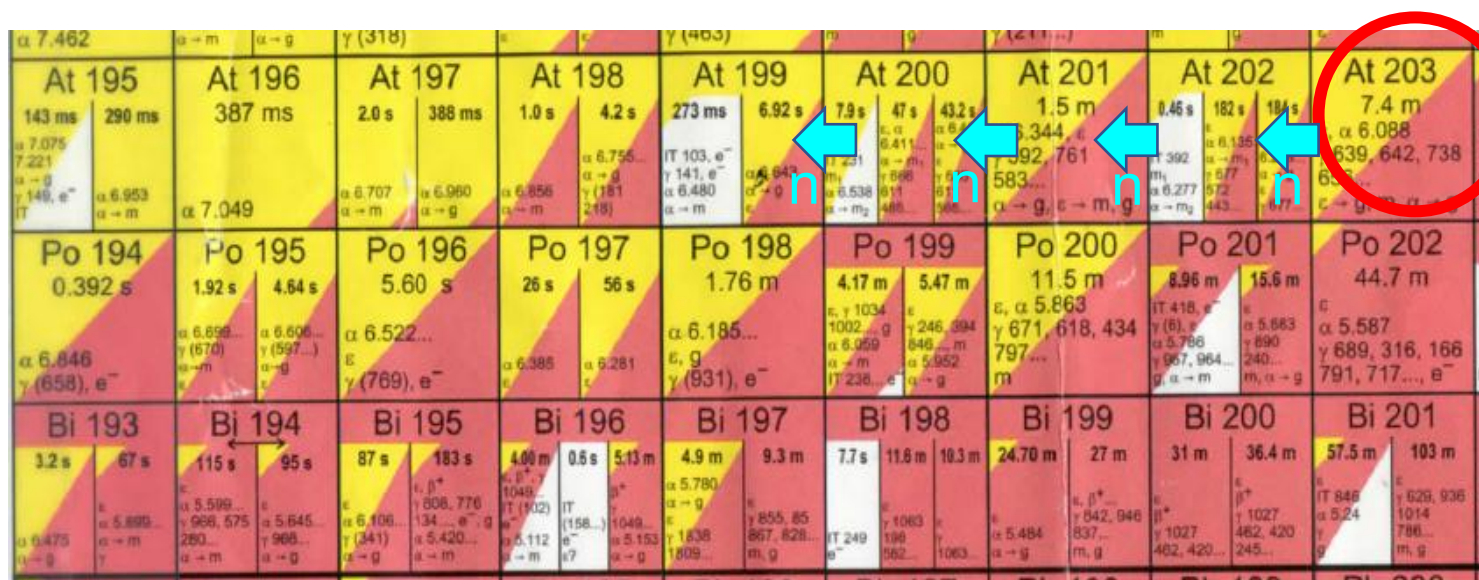
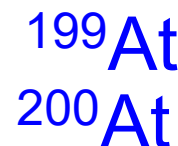
タンデムで加速

160 MeV  
146 MeV



複合核

蒸発残留核



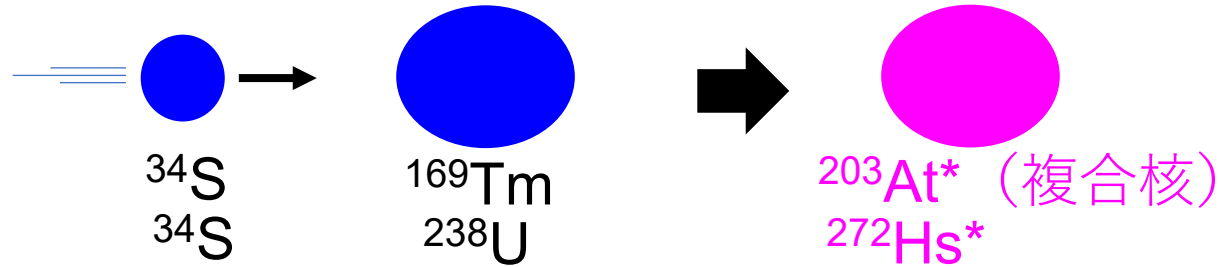
複合核

α崩壊

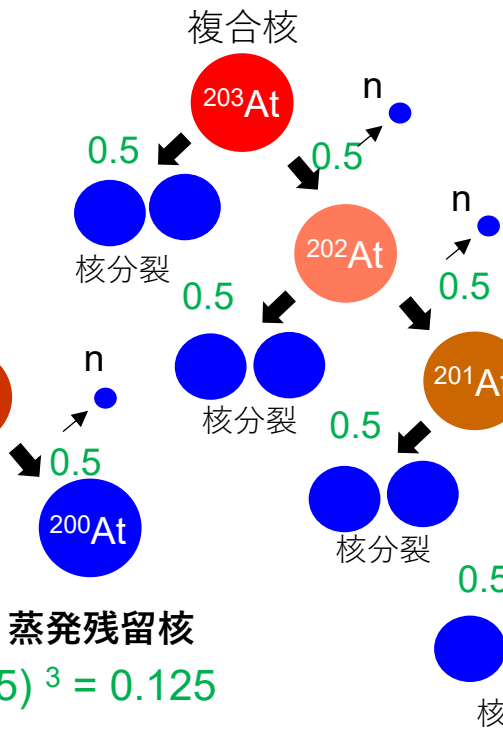
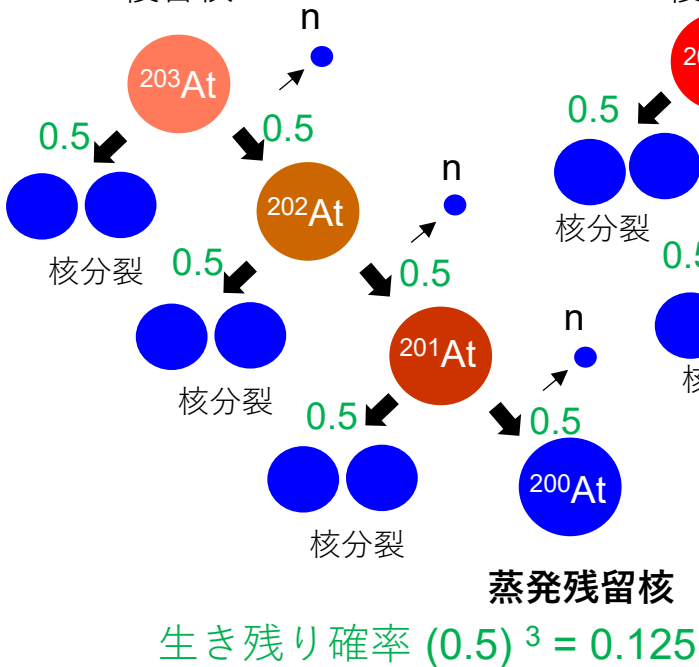
EC/β<sup>+</sup>崩壊

α崩壊を観測することで、生成核種 ( ${}^{199}\text{At}$ や ${}^{200}\text{At}$ ) を同定する

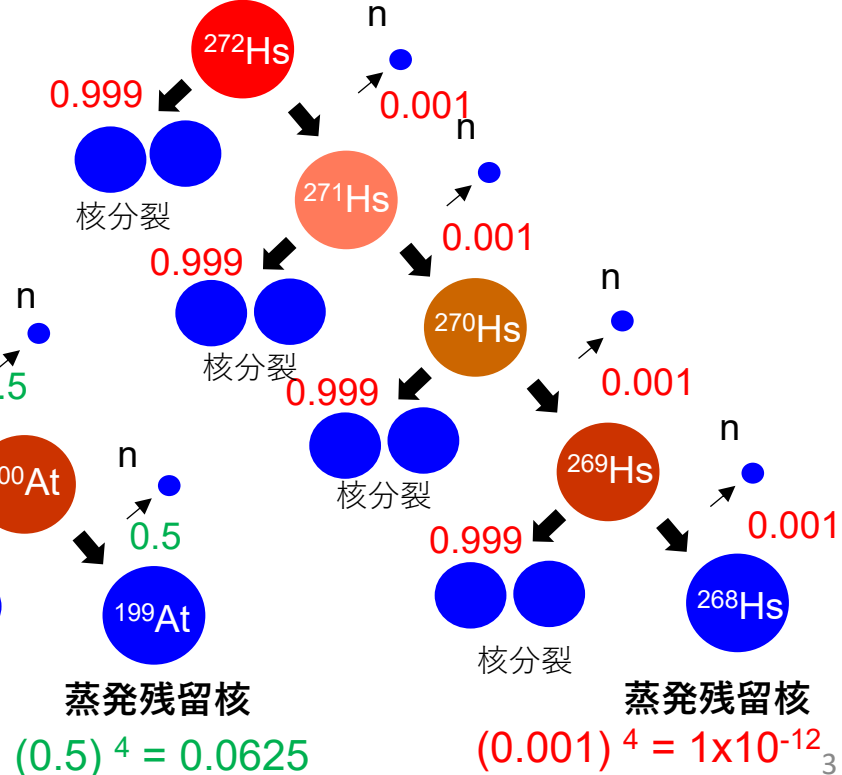
# ビームエネルギーと生成される蒸発残留核



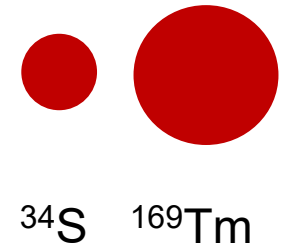
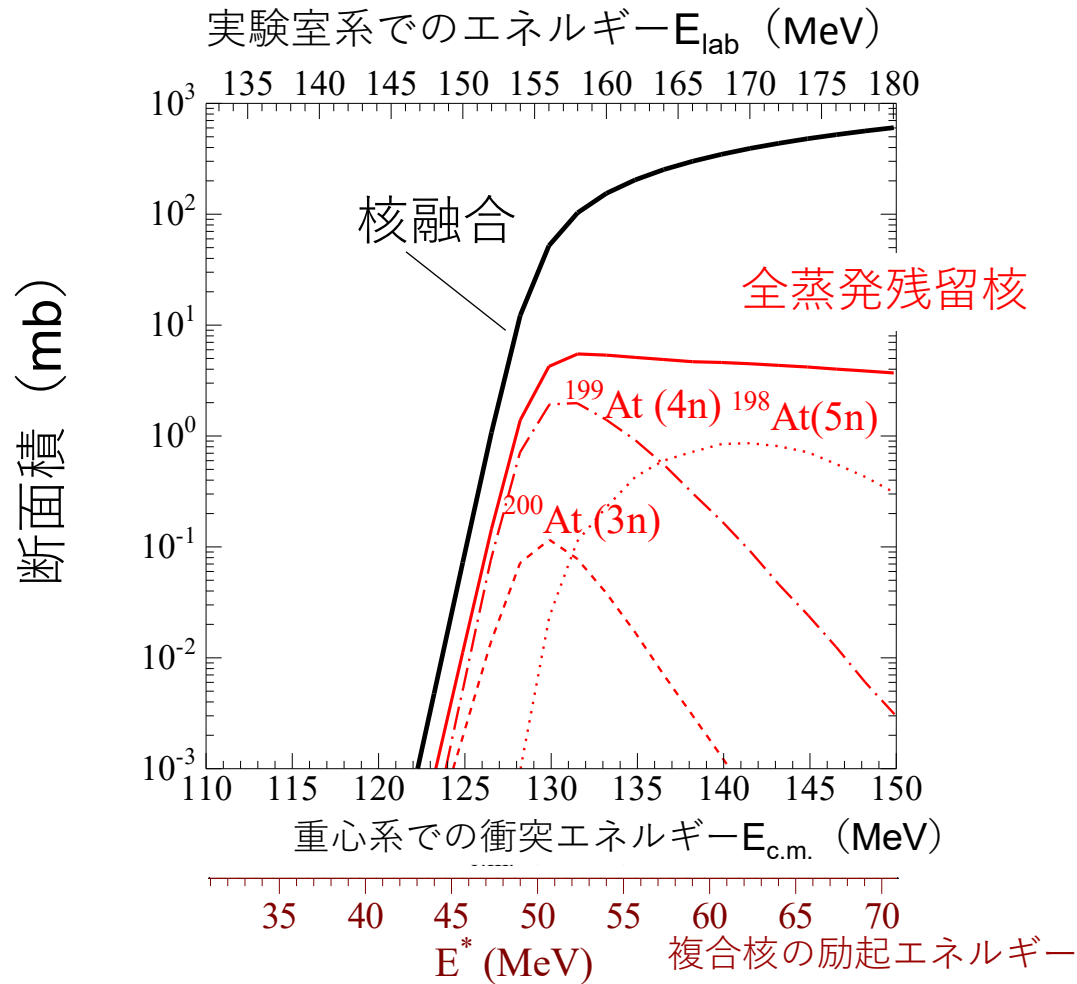
【ビームエネルギー 146MeV】 【ビームエネルギー 160MeV】  
 励起エネルギー 43MeV 励起エネルギー 54MeV  
 複合核



【超重元素  $^{268}\text{Hs}$  の場合】  
 励起エネルギー 40MeV  
 複合核



# 蒸発残留核の生成断面積

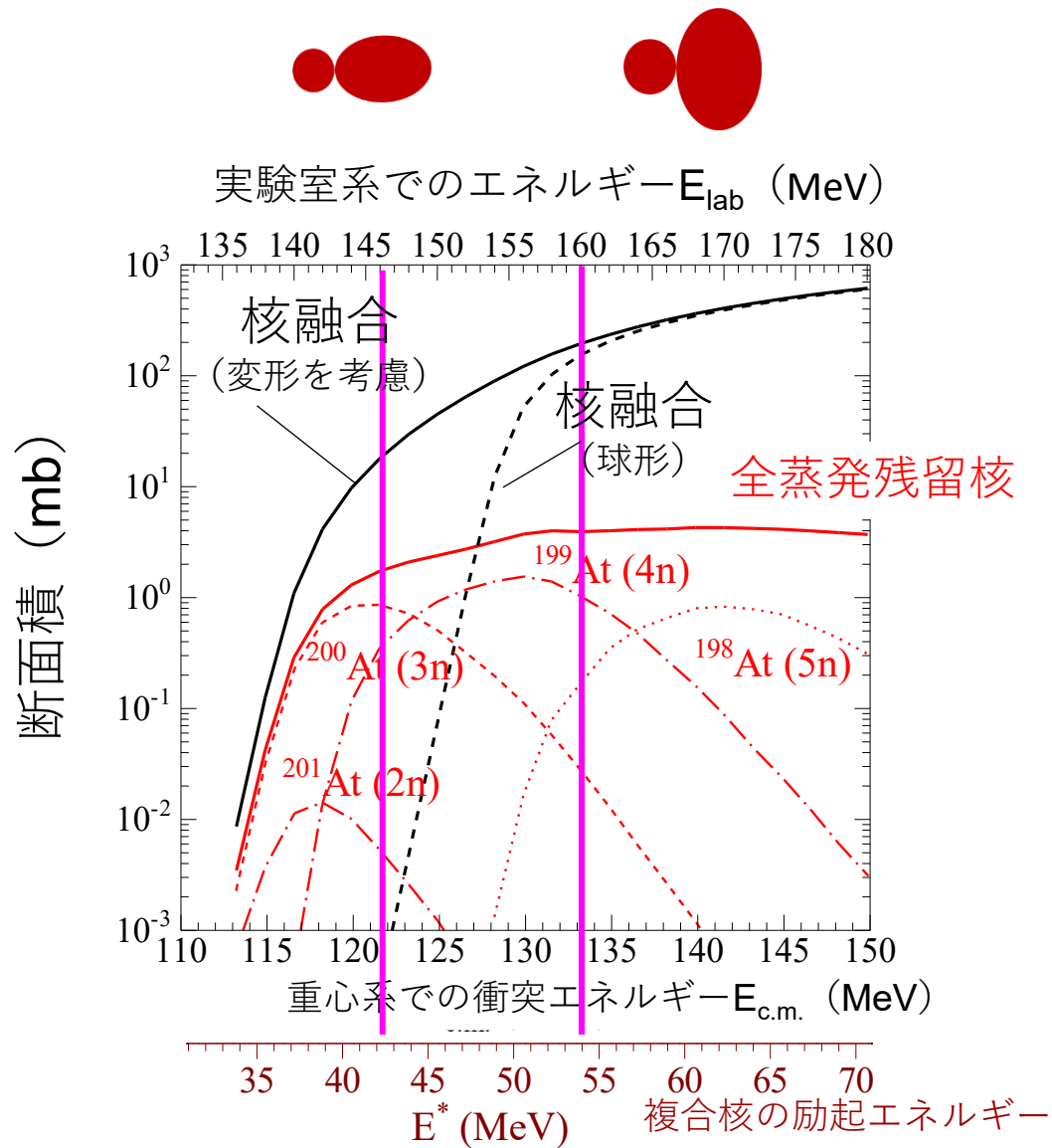


$^{34}\text{S} + ^{169}\text{Tm}$ の融合反応のQ値:  $Q_{\text{fusion}} = -79.1 \text{ MeV}$

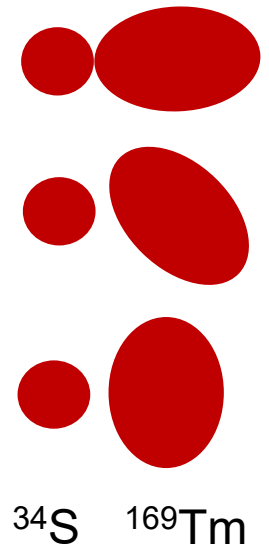
複合核の励起エネルギー:  $E^* = Q_{\text{fusion}} + E_{\text{c.m.}}$

$$E_{\text{lab}} = E_{\text{c.m.}} \frac{A_{\text{projectile}} + A_{\text{target}}}{A_{\text{target}}}$$

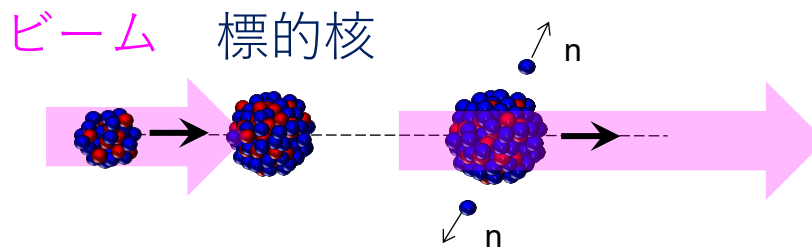
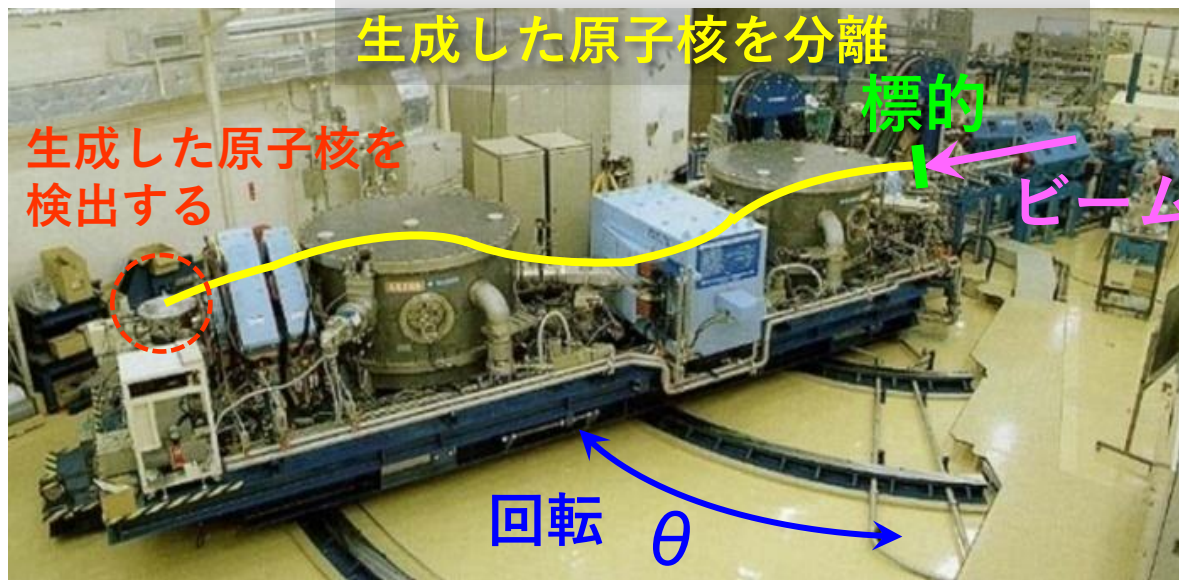
# 蒸発残留核の生成断面積



原子核の変形を取り入れた計算  
(正しい描像)



# 反跳生成核分離装置（JAEA Recoil Mass Separator）

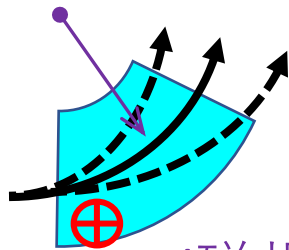


核融合反応で生成された原子核は、反跳を受けてビームと同じ方向に飛び出す（ゼロ度方向に**RMS**をセット）。

# イオンの磁場 $B$ と電場 $E$ での曲がりにくさ ( $B\rho$ と $E\rho$ )

$B\rho$ と $E\rho$ はイオン（質量数 $A$ , 運動エネルギー $\varepsilon$ , 電荷 $+q$ ）固有の値であり、それぞれ磁場と電場の中での曲がりにくさを表す。

$P$ (曲率半径)

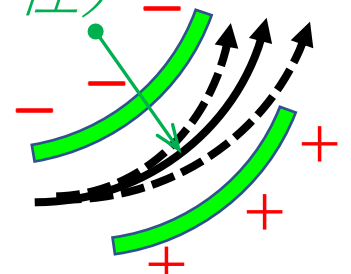


$B$ (磁場の強さ)

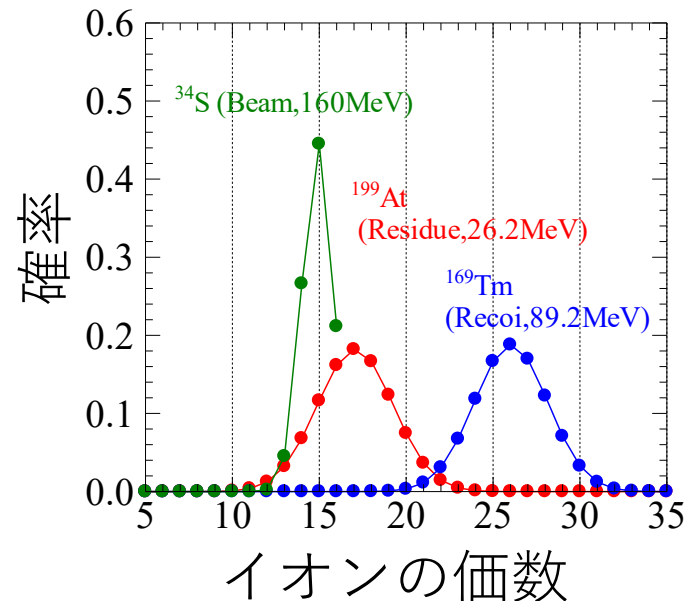
$$B\rho \propto \frac{\sqrt{A \cdot \varepsilon}}{q}$$

$$E\rho \propto \frac{2\varepsilon}{q}$$

$\rho$  (曲率半径)



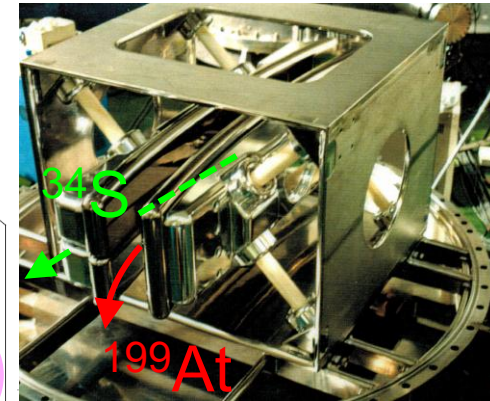
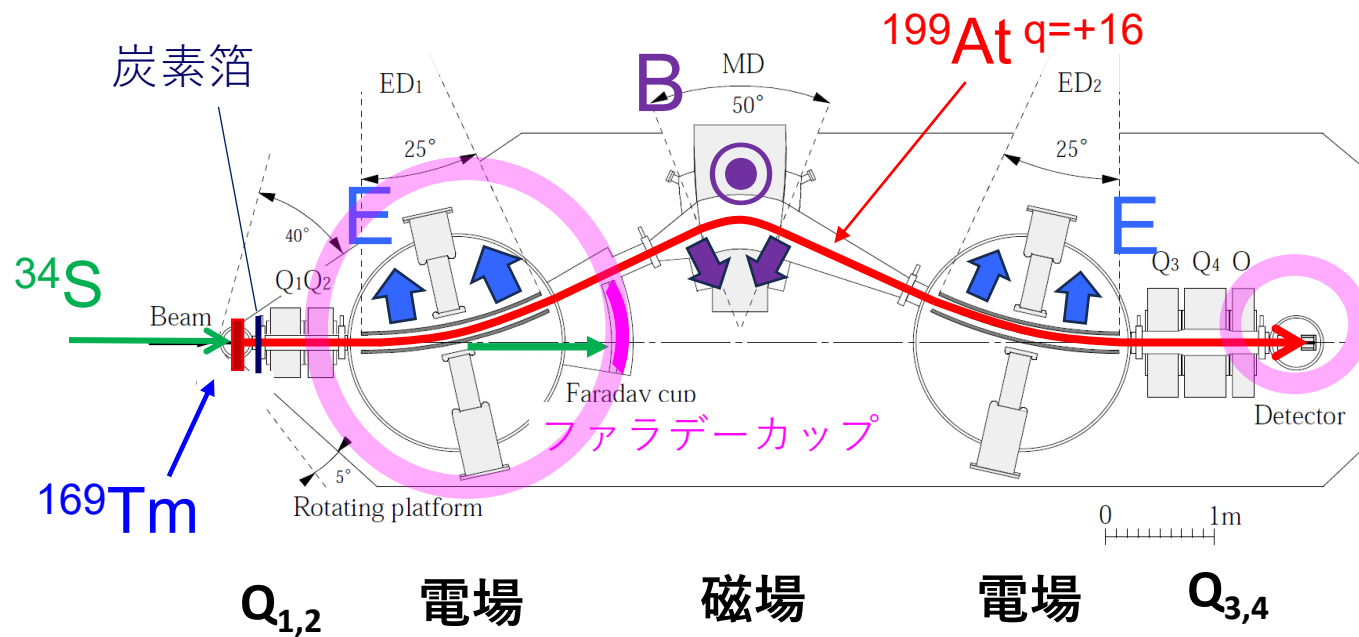
$E$ (電場の強さ)



	$B\rho$ (Tm)	$E\rho$ (MV)
$\text{S-34}$ ( $15^+$ , 160MeV)	0.7088	21.33
$\text{At-199}$ ( $17^+$ , 26.2MeV)	0.6110	3.08

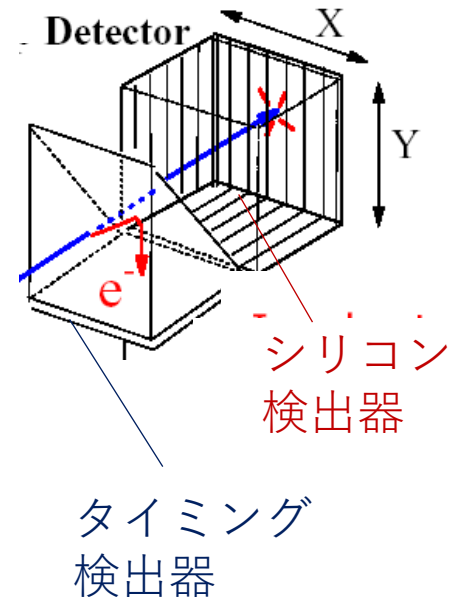
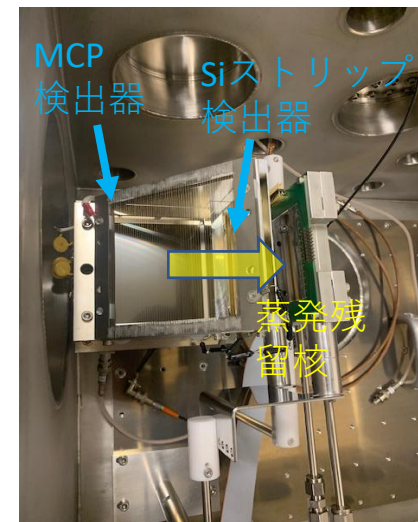


# 反跳生成核分離装置 (JAEA-RMS)



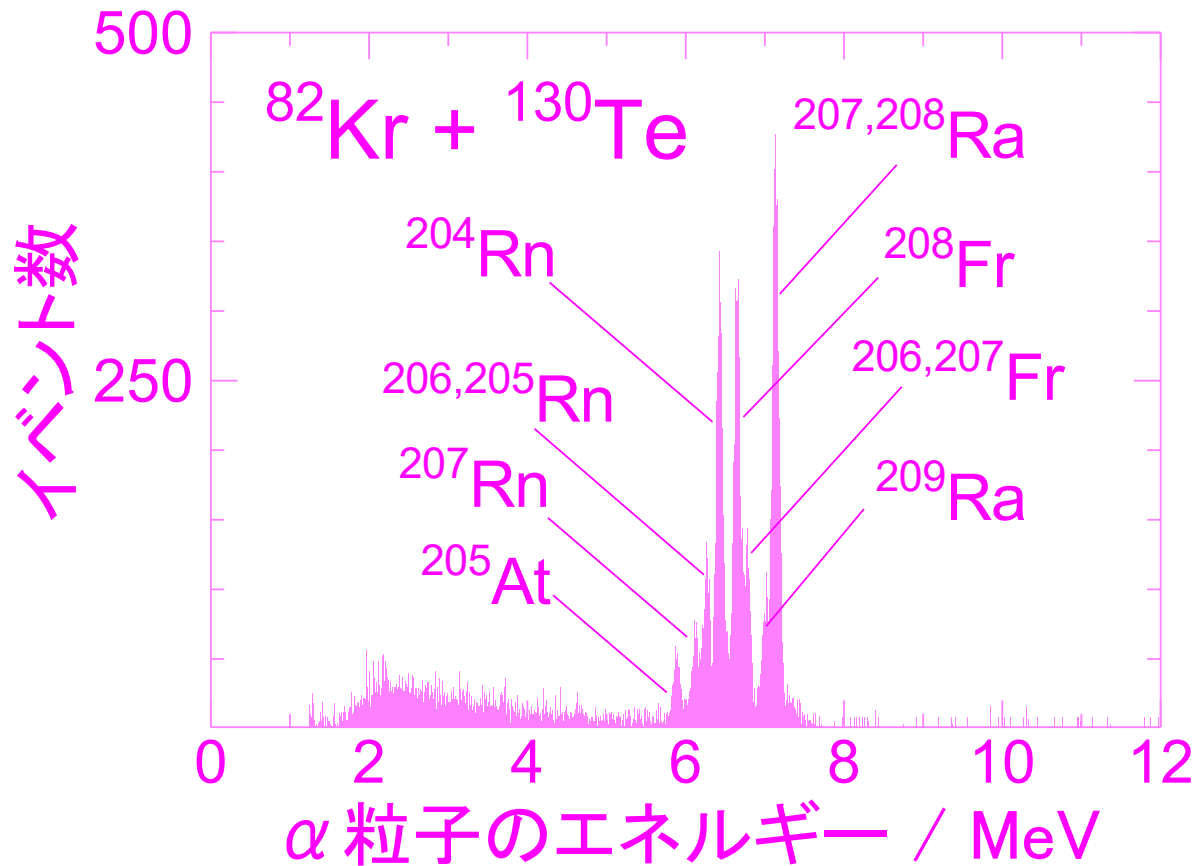
輸送できる運動エネルギーの範囲  
= 設定値の  $\pm 12\%$

輸送できる質量数の範囲  
= 設定値の  $\pm 4\%$



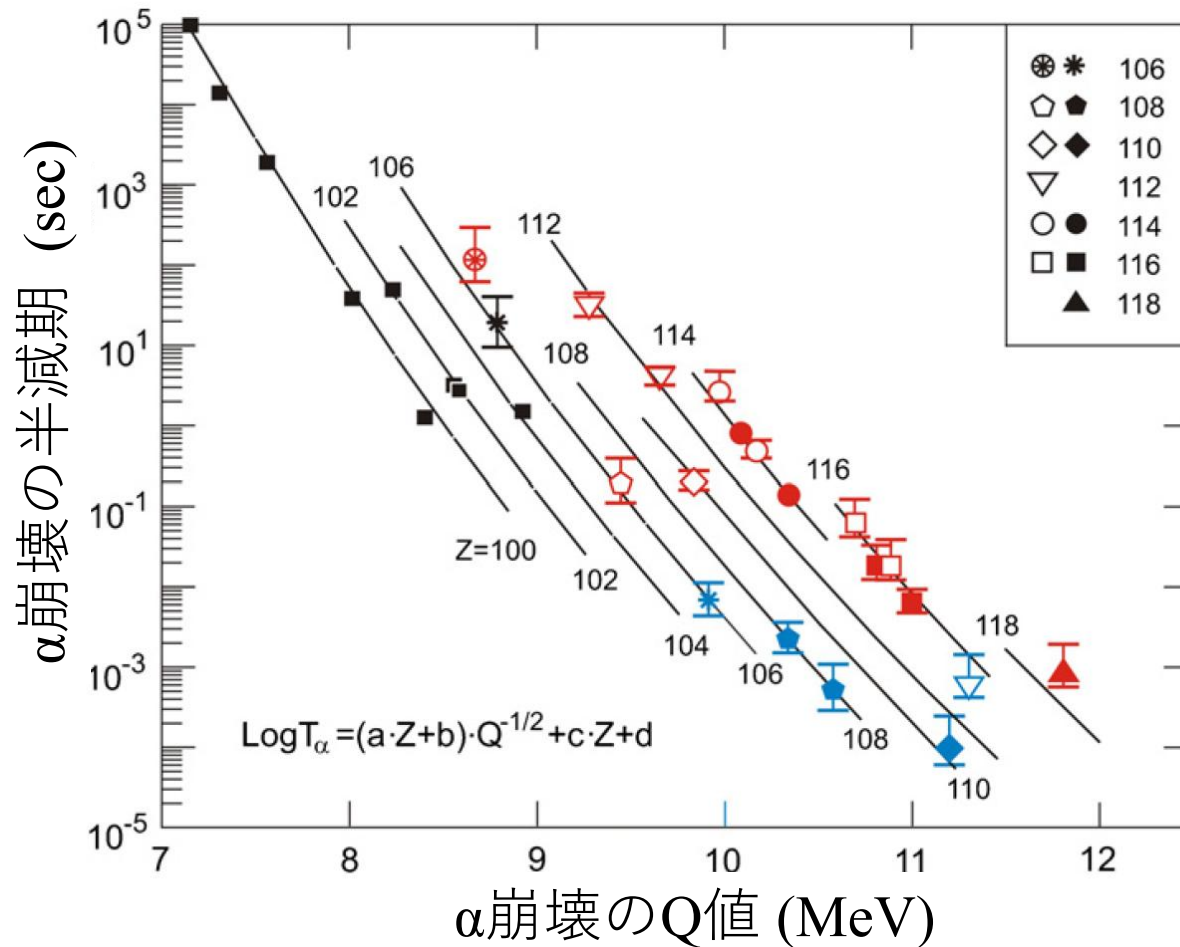


# $\alpha$ 線のエネルギースペクトル（測定例）



# 超重元素の $\alpha$ 崩壊

$\alpha$ 崩壊のエネルギーと寿命の観測は、超重元素を合成した証拠になる。



† 出典: Yuri Oganessian (2007), Heaviest nuclei from  $^{48}\text{Ca}$ -induced reactions, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Vol. 34 R165, IOP Publishing, [10.1088/0954-3899/34/4/R01](https://doi.org/10.1088/0954-3899/34/4/R01)

# 生成断面積



**断面積**は、原子核どうしの反応のしやすさ（しにくさ）を表す量である。実習では、生成される核種ごとに断面積を導出してみる。

断面積の単位：バーン (b) =  $1.0 \times 10^{-24}$  (cm<sup>2</sup>)

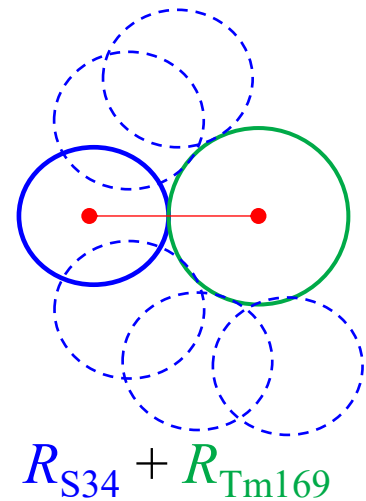
mb (ミリバーン)、 $\mu$ b (マイクロバーン)、nb (ナノバーン)、pb (ピコバーン)、fb (フェムトバーン)

## 簡単な考察

原子核の半径  $R = 1.2 \times A^{1/3}$  fm ( $A$ は、原子核質量数)

<sup>34</sup>S と <sup>169</sup>Tmが衝突できる面積は、

$$\begin{aligned} \text{面積 } S &= \pi (R_{\text{S}34} + R_{\text{Tm}169})^2 = \pi (3.88 + 6.63)^2 [\text{fm}^2] \\ &= \pi (3.88 + 6.63)^2 \times (10^{-13})^2 [\text{cm}^2] \\ &= 3.47 \times 10^{-24} [\text{cm}^2] \\ &= 3.47 [\text{b}] = 3,470 [\text{mb}] \end{aligned}$$



より厳密な計算によれば、<sup>34</sup>S (160MeV) + <sup>169</sup>Tm  
の融合断面積は、200mb

$$\text{【}^{199}\text{Atの生成量}\text{】} = \text{【断面積}\text{】} \times \text{【入射ビーム数}\text{】} \times \text{【面積あたりの標的数 (個/cm}^2\text{) }\text{】}$$

$$N_{\text{At199}} \quad \sigma_{\text{At199}} \quad N_{\text{S34}} \quad N_{\text{Tm169}}$$

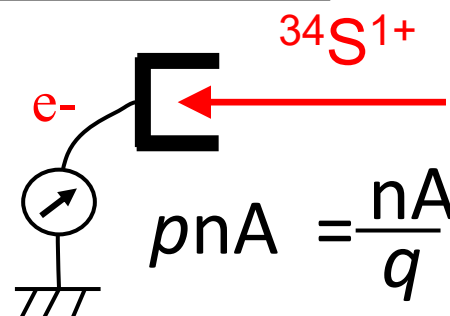
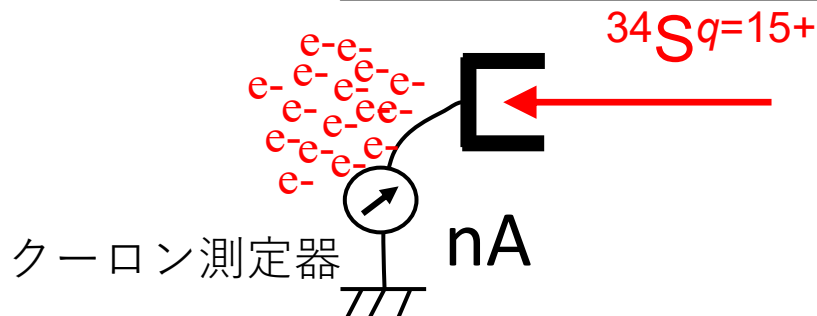
- (1)  $^{199}\text{At}$ の生成断面積  $\sigma_{\text{At199}} = 1 \text{ mb} = 1 \times 10^{-27} \text{ (cm}^2\text{)}$
- (2) 電流  $10 \text{ pA}$  (パ-ティクル・ナ・ズ※) のイオンビームを照射する。  
1秒あたり、薄膜標的を通過するイオンビームの数は、  
 $10 \times 10^{-9} \text{ (Coulomb/秒=A)} / 1.602 \times 10^{-19} \text{ (Coulomb/e)} = 6.24 \times 10^{10} \text{ (イオン/秒)}$
- (3)  $100 \mu\text{g/cm}^2$  の  $^{169}\text{Tm}$  薄膜標的を用意する。  
 $1 \text{ cm}^2$  面積あたりのTm原子の数は、  
 $= N_A \text{ (個/mol)} \times 100 \times 10^{-6} \text{ (g/cm}^2\text{)} / 169 \text{ (g/mol)} = 3.56 \times 10^{17} \text{ (個/cm}^2\text{)}$

1秒あたりの $^{199}\text{At}$ の生成量

$$(1) \times (2) \times (3) = 22.2 \text{ (個/秒)}$$

実習では、 $\sigma_{\text{At199}}$ 、 $\sigma_{\text{At200}}$  など、いくつかの核種の生成断面積を決定する。

※イオン価数を1に換算した時の電流



# 蒸発残留核の断面積を決定する

【 $^{199}\text{At}$ の生成量】 = 【断面積】 × 【入射ビーム数】 × 【面積あたりの標的数 (個/cm<sup>2</sup>)】

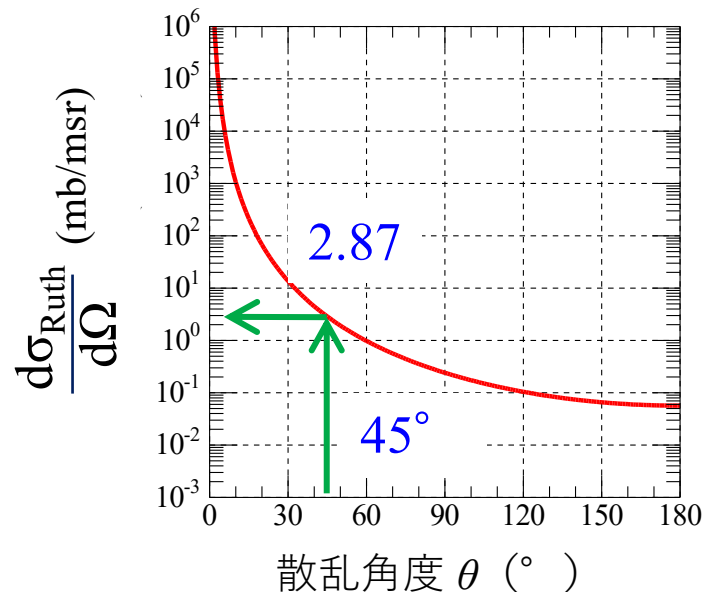
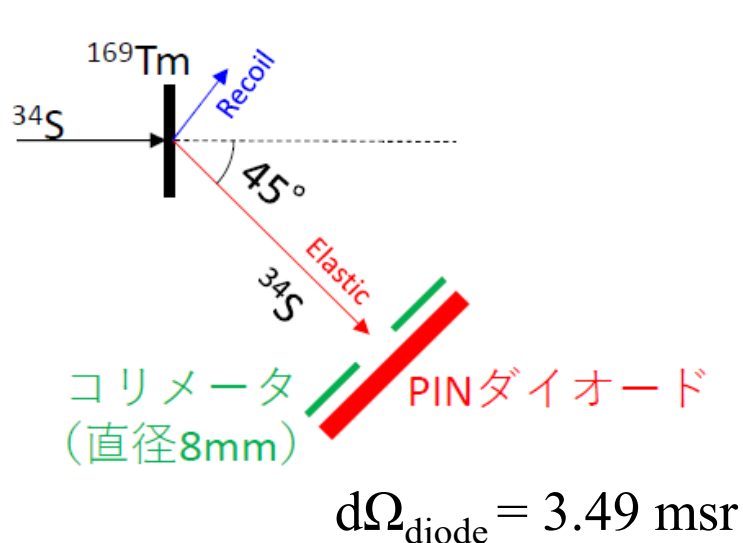
【A】  $N_{\text{At199}} = \sigma_{\text{At199}} N_{\text{S34}} N_{\text{Tm169}}$

【弾性散乱の数】 = 【断面積】 × 【入射ビーム数】 × 【面積あたりの標的数 (個/cm<sup>2</sup>)】

【B】  $N_{\text{elastic-S34}} = \frac{d\sigma_{\text{Ruth}}}{d\Omega} \times d\Omega_{\text{diode}} N_{\text{S34}} N_{\text{Tm169}}$

$$2.87 \text{ mb/msr} \times 3.49 \text{ msr} = 10.0 \text{ mb}$$

【A】  $^{199}\text{At}$ の合成・記録と、【B】 弾性散乱の記録を同時に行う。



# まとめ

- ❖ 重イオン核融合反応で生成される蒸発残留核は、ビームと進行方向に飛び出す。これを分離するのが反跳生成核分離装置であり、イオンの電場・磁場での曲がりやすさを使って分離する。
- ❖  $\alpha$ 崩壊のエネルギーおよび半減期は、核種に固有である。よって、 $\alpha$ 崩壊を観測することで生成核を識別できる。
- ❖ 実習では、生成される原子核の断面積を決定してみる。ここでは、弾性散乱断面積を参照する。