



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3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3章 学習内容>



1. **原子と原子核の構造**
2. **原子質量**
3. **核反応、核分裂エネルギー**
4. **エネルギーの質量と単位**
5. **結合エネルギー**

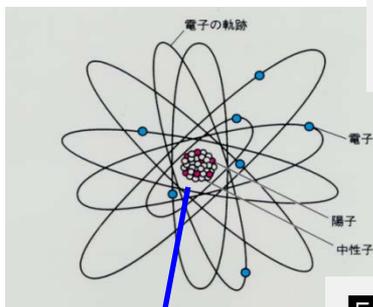
粒子エネルギー準位の階層



化学

原子

10^{-10} m
1 Å



電子軌道

原子核

[eV]



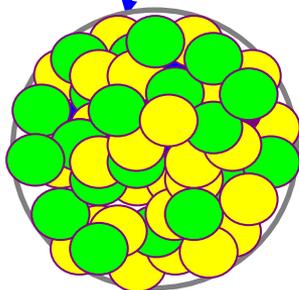
$1\text{eV} = 1.602189 \times 10^{-19}\text{J}$
電子1個が1ボルトの電位差で得るエネルギー

Na 原子
(電子1個あたり)

原子力

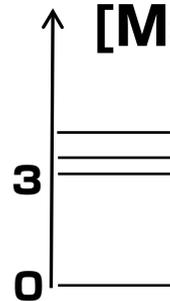
原子核

10^{-14} m
 10^{-12} cm



陽子と中性子
(核子)

[MeV]=[10^6 eV]

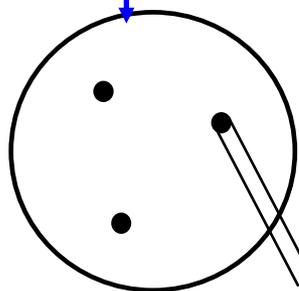


^{208}Pb 原子核
(核子1個あたり)

素粒子物理

陽子・中性子
(核子)

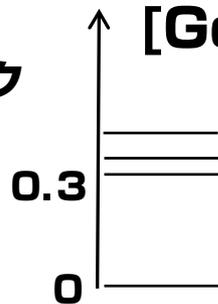
10^{-15} m



クォーク

$\leq 10^{-18}$ m

[GeV]=[10^9 eV]

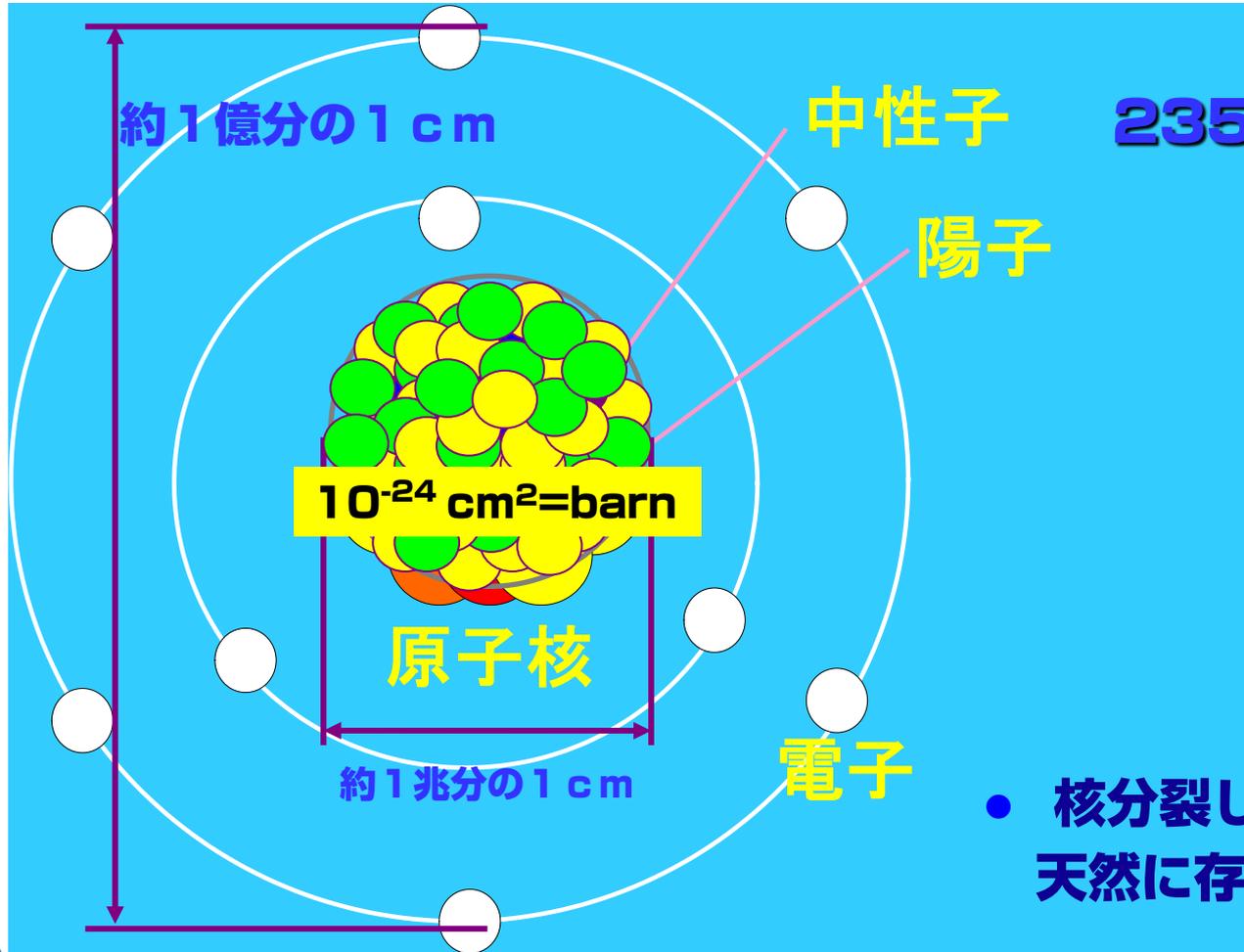


陽子
(クォーク1個あたり)

原子



- 核分裂するウラン235
天然に存在する割合：0.7%



$$235 = 92 + 143$$

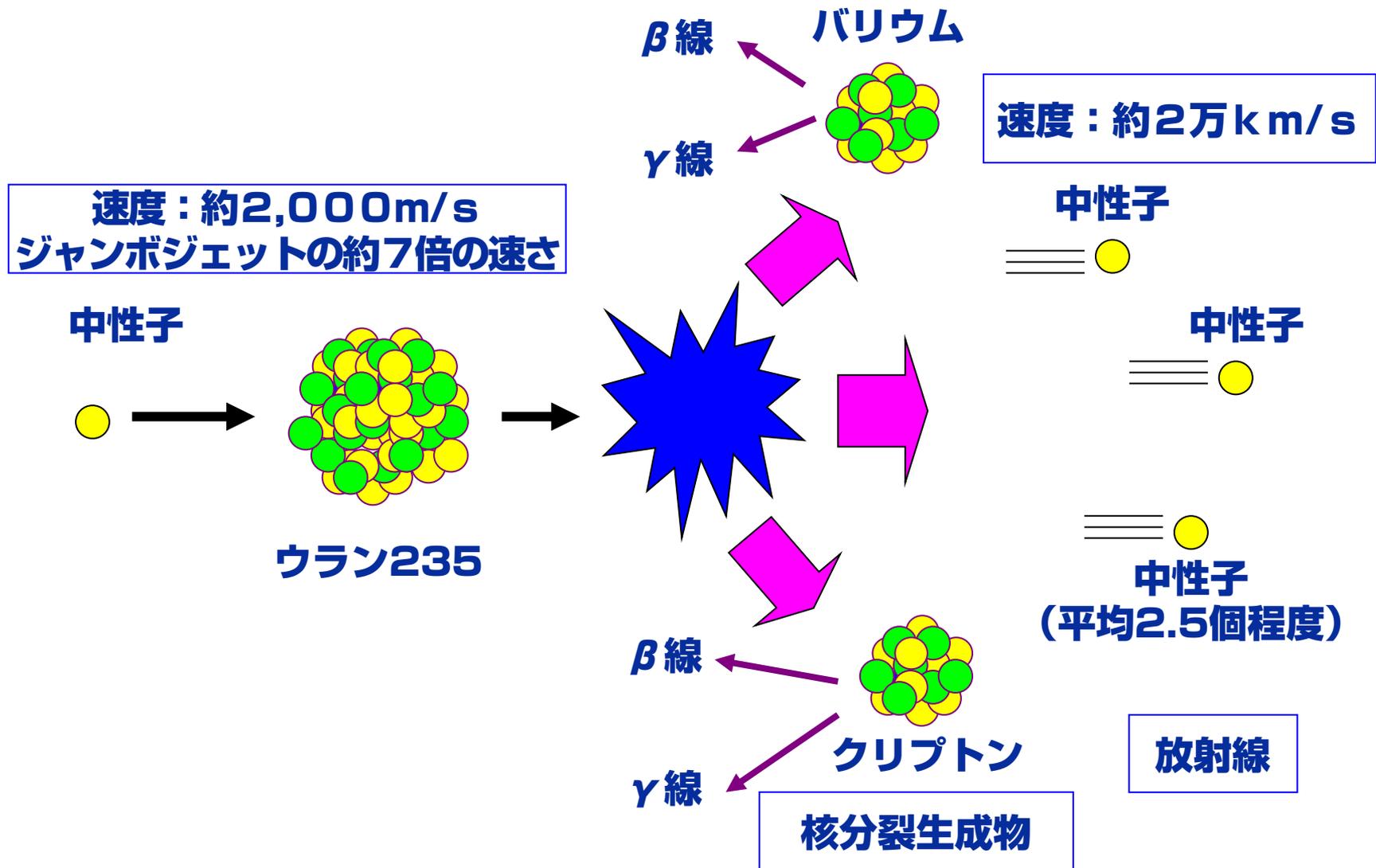
U

92

235 : 質量数
92 : 陽子数
(原子番号)
143 : 中性子数

- 核分裂しないウラン238
天然に存在する割合：99.3%

ウランの核分裂及び連鎖



核分裂エネルギー



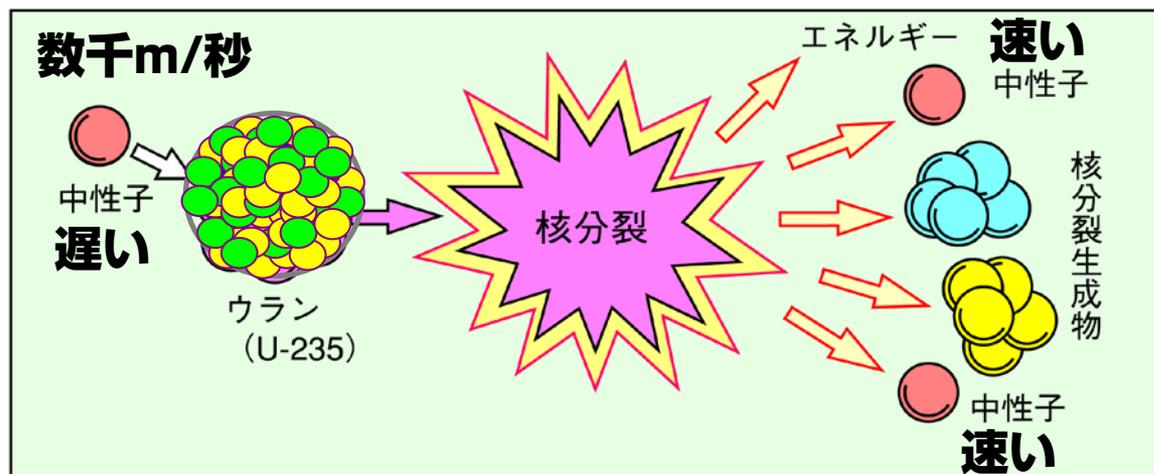
1 MeV = 10^6 eV

1 eV 程度以下

平均2MeV
(2万km/秒) 光速の1/15

熱中性子

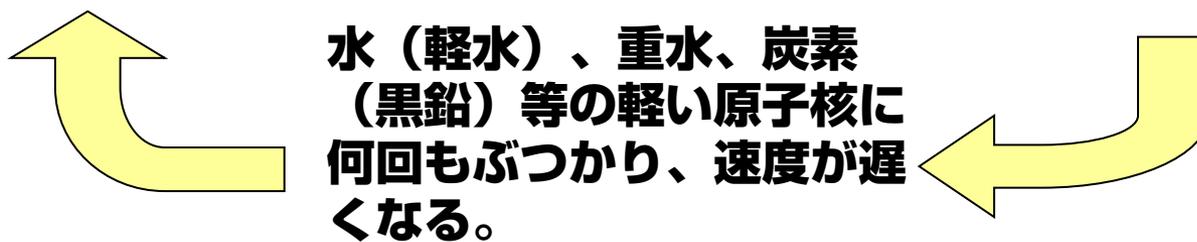
(物質を構成する原子の原子核とほぼ熱平衡)



高速中性子

核分裂生成物は、他の物質と衝突して熱を発生する。この熱で蒸気をつくり発電する

高速中性子



水（軽水）、重水、炭素（黒鉛）等の軽い原子核に何回もぶつかり、速度が遅くなる。

(235+1個の核子の結合に関するエネルギーの関与により)

1核分裂あたり約200MeVのエネルギーが放出される。

エネルギーと質量の単位



エネルギーの単位

eV : 電子ボルト (エレクトロンボルト)

1Vの電位差で電子 (電荷e) が得るエネルギー = 1 eV

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

質量の単位

u : 原子質量単位 (atomic mass unit : amu)

炭素12の原子1個の質量の1/12 = 1 u

$$1\text{u} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ g} \quad [1\text{u} = (12\text{g}/6.02 \times 10^{23}) / 12]$$

エネルギーによる質量の表現 : $E=mc^2$ (質量とエネルギーは等価)

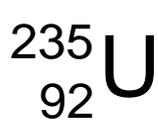
$$1\text{u} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ g} = (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$= 1.49 \times 10^{-10} \text{ J} = 931 \times 10^6 \text{ eV} = 931 \text{ MeV}$$



X: 元素記号

A: 質量数=核子数



Z: 原子番号=陽子数

N: 中性子数 (= A-Z)

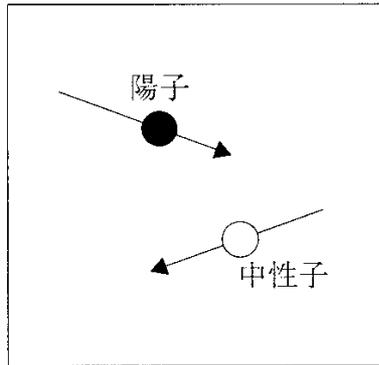
通常、Nは省略される。
Zが省略されることもある。

原子核質量 : $M(\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} X)$, $M(A, Z)$, etc.

$$M(\begin{smallmatrix} 235 \\ 92 \end{smallmatrix} \text{U}) = 235.0439\text{u}$$

$$M(\begin{smallmatrix} 144 \\ 56 \end{smallmatrix} \text{Ba}) = 143.92\text{u}$$

結合エネルギー

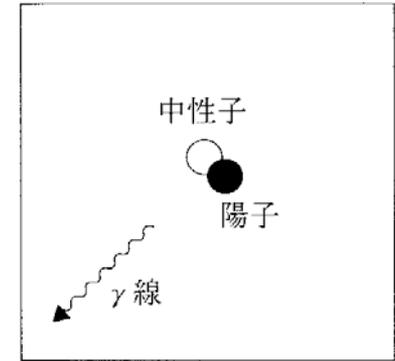


自由な陽子と中性子



中性子と陽子は核力 ($\propto \frac{1}{r} e^{-\kappa r}$) によって

結合する。この核力は、クーロン力に比べてはるかに強いが影響範囲は 10^{-15}m と小さい。



重水素の原子核 (${}^2\text{H}^+$)

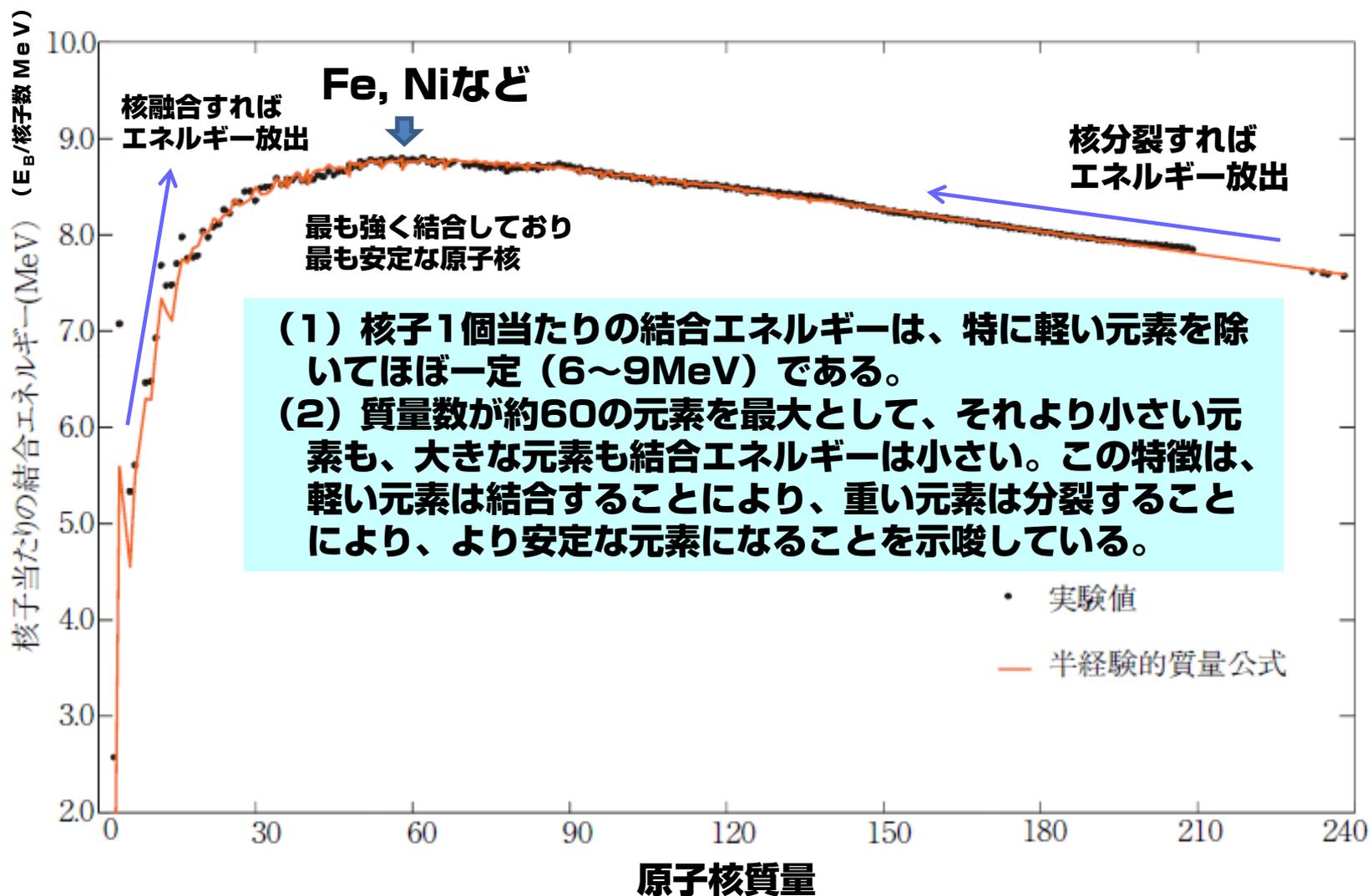
原子核の**結合エネルギー** E_B は**前後の静止質量の差** $E_B = \Delta mc^2$

$$E_B = [(陽子数) \times M_{陽子} + (中性子数) \times M_{中性子} - M_{原子核}] c^2$$
$$= [ZM_p + (A - Z)M_n - M(A, Z)] c^2$$

(Z: 陽子数、A: 核子数、C: 光速= $2.99792458 \times 10^8 \text{ m/sec}$)
(相対性理論によると、(エネルギー) = (質量) × (光速)² である。)

原子核を陽子と中性子にバラバラにするのに
エネルギー E_B を必要とするとも言える。

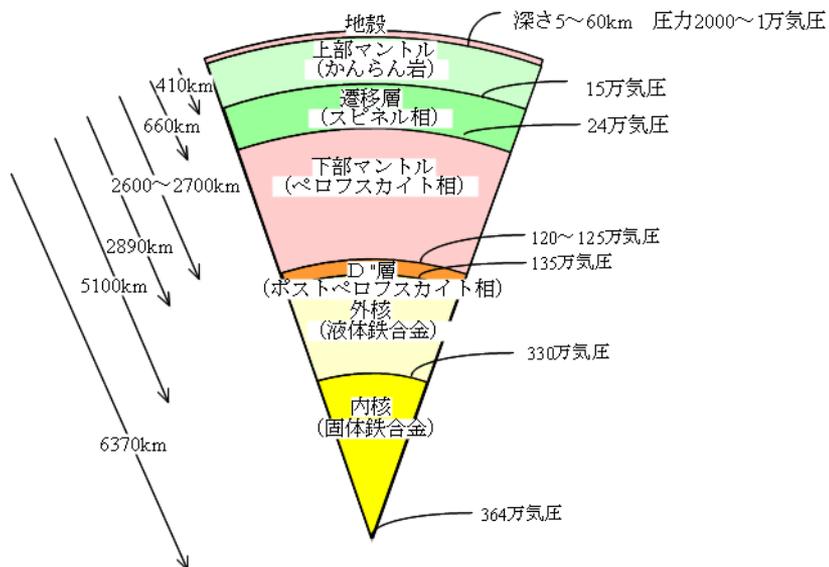
核子当たりの結合エネルギー



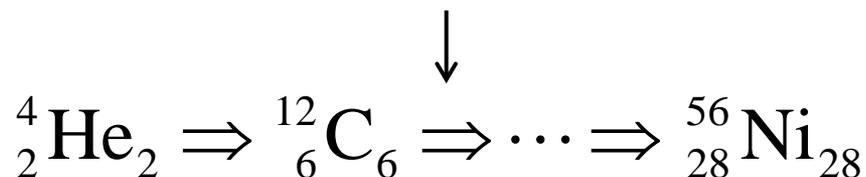
地球のコアはなぜ鉄か



地球のコアはたいへん高温であったので、核融合反応が進行した。



トリプルアルファ反応



放射性崩壊による ^{56}Fe の生成



^{56}Fe が鉄元素の91.72%を占める。

質量数60 (A=60)で、核子あたりの結合エネルギーが最大になる。したがって、A=60より大きい元素は、核融合によって生成されたわけではなく、超新星爆発に起源がある。

核分裂反応の例



Q値：核反応で発生するエネルギーQは $Q = \Delta mc^2$
反応前後の静止エネルギーの差より求められる

$$Q = [M({}^{235}_{92}\text{U}) + M_{\text{N}} - M({}^{144}_{56}\text{Ba}) - M({}^{90}_{36}\text{Kr}) - 2M_{\text{N}}]c^2$$

$$M_{\text{N}} = 1.00867\text{u},$$

$$M({}^{235}_{92}\text{U}) = 235.0439\text{u}$$

$$M({}^{144}_{56}\text{Ba}) = 143.92\text{u},$$

$$M({}^{90}_{36}\text{Kr}) = 89.92\text{u}$$

$$Q = (0.19523\text{u})c^2$$

1u C² ~ 931.5 MeVであるから

$$Q = 180\text{MeV}$$

核分裂によるエネルギー発生の内訳



単位：MeV

核分裂生成物の運動エネルギー	168	} 180
核分裂で発生する中性子の運動エネルギー	5	
核分裂に伴う即発 γ 線	7	
核分裂生成物の放射性崩壊	β	8
	γ	7
	中性微子（ニュートリノ）	12
捕獲 γ 線（核分裂によって発生した中性子が燃料以外の物質に吸収されて生ずる γ 線）	3-12	

（ラマーシュ 原子炉の初等理論 上 p145） 合計 210-219

ニュートリノによって持ち去られるエネルギーは工学的に回収できないので、核分裂発生エネルギーは約200MeVとなる。

この章のまとめ



- 1. 中性子が、ウラン235の原子核に衝突すると核分裂され、この時、平均2～3個の中性子が発生する。また、この中性子の一部が、次の核分裂を引き起こし連続する反応を連鎖反応という。**
- 2. 1核分裂あたり約200MeVのエネルギーが放出される。**
- 3. 原子核の結合エネルギーEは、前後の静止質量の差 ($E = \Delta mc^2$) である。**