

# エネルギー工学概論

エネルギー関連材料 担当: 橋爪

授業予定(演習有り。試験なし。)

- 第8回 核分裂炉燃・材料(1)
- 第9回 核分裂炉燃・材料(2)
- 第10回 核分裂炉燃・材料(3)
- 第11回 水素エネルギー材料(1)
- 第12回 核融合エネルギー材料(1)
- 第13回 核融合エネルギー材料(2)
- 第14回 その他のエネルギー関連材料

## 火力発電と原子力発電の違い

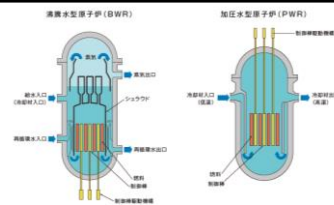
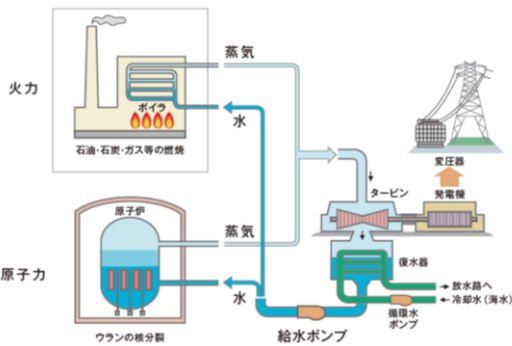


Table 1 Estimated original core materials inventory

Core materials	Mass (ton)		
	IF1	IF2/3	TMI-2
UO <sub>2</sub>	78.3	106.6	93.9
Zry	32.7	44.8	23.6
(fuel cladding)	(19.1)	(26.1)	(19.1)
(channel box)	(13.6)	(18.7)	(4.5) <sup>a)</sup>
Fe	12.5	17.7	3.40
B <sub>4</sub> C	0.59	0.82	2.75 <sup>b)</sup>
Inconel	1.0 <sup>c)</sup>	1.4 <sup>c)</sup>	2.16
Total	125.1	171.3	125.8

<sup>a)</sup>Cladding of burnable poison rods  
<sup>b)</sup>Ag-In-Cd  
<sup>c)</sup>Assumed based on educated guess

# エネルギー工学概論

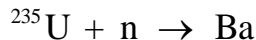
(第8回、担当: 橋爪)

## 核分裂炉燃料

### 8. 核燃料

#### 8-1 核燃料の歴史・特徴

1938年 Hahn & Strassmann による核分裂の発見 (Ba検出)



核燃料となる元素としては U, Th (天然) および Pu (人工)

化石燃料と比較して、

メリット: エネルギー密度が高い

デメリット: 放射性(核分裂後は特に高い)、兵器転用、保管時等の臨界の危険性、燃料以外の用途無し。

### 「核燃料物質」、「核原料物質」法令上の定義

#### ■核燃料物質

- ①ウラン235のウラン238に対する比率が天然の混合率であるウラン及びその化合物(天然ウラン)
- ②ウラン235のウラン238に対する比率が天然の混合率に達しないウラン及びその化合物(劣化ウラン)
- ③トリウム及びその化合物
- ④前3号の物質の一又は二以上を含む物質で原子炉において燃料として使用できるもの
- ⑤ウラン235のウラン238に対する比率が天然の混合率をこえるウラン及びその化合物(濃縮ウラン)
- ⑥プルトニウム及びその化合物
- ⑦ウラン233及びその化合物
- ⑧前3号の物質の一又は二以上を含む物質

#### ■核原料物質

ウラン若しくはトリウム又はその化合物を含む物質で核燃料物質以外のものです。

### 8-2 天然 U、Th 同位体存在比など

${}^{238}\text{U}$  99.3%、 ${}^{235}\text{U}$  0.72%、 ${}^{234}\text{U}$  0.0055%  
 ${}^{232}\text{Th}$  100%

#### 半減期( $T_{1/2}$ )

${}^{238}\text{U}$  4.468x10<sup>9</sup> y、 ${}^{235}\text{U}$  7.038x10<sup>8</sup> y、 ${}^{234}\text{U}$  2.45x10<sup>5</sup> y  
 ${}^{232}\text{Th}$  1.41x10<sup>10</sup> y

#### U と Th の地殻中の平均存在率

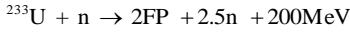
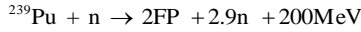
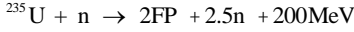
U: 4ppm Th: 12ppm (参考 Li: 60ppm)

#### U と Th の海水中の存在率

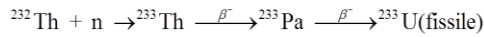
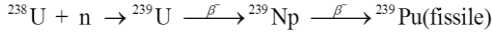
U: 1.5ppb Th: <0.5ppb (参考 Li: 200ppb)

# 核燃料物質の核反応について

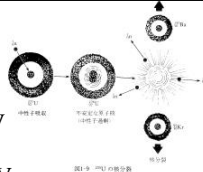
核分裂性燃料 (fissile)



潜在核燃料、親物質 (fertile)



燃料 (fissile material) 生成には増殖炉が必要



# 8-3 Uの核的な性質 (U-235とU-238の中性子吸収特性に注意)

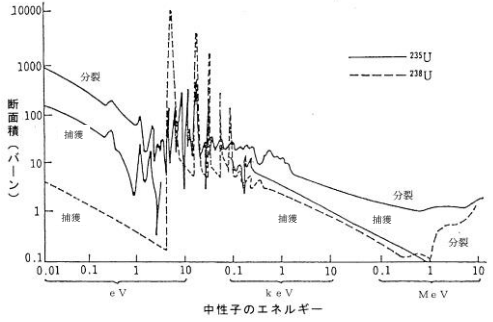


図 2.1.4 <sup>235</sup>Uおよび<sup>238</sup>Uの断面積

# 中性子反応断面積とは

中性子束  $\phi$  = 中性子密度  $n$  × 平均速度  $v$

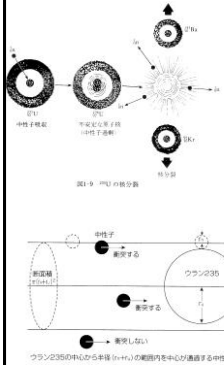
$$\phi \left[ \text{n/m}^2 \text{sec} \right] = n \left[ \text{n/m}^3 \right] \times v \left[ \text{m/sec} \right]$$

単位体積当りの衝突回数  $R$

$$= \text{衝突断面積 } \sigma \times \text{中性子束 } \phi \times \text{原子核数密度 } N$$

$$R \left[ \text{n/m}^3 \text{sec} \right] = \sigma \left[ \text{m}^2 \right] \times \phi \left[ \text{n/m}^2 \text{sec} \right] \times N \left[ \text{n/m}^3 \right]$$

衝突散乱断面積  $\sigma \left[ \text{m}^2 \right] = \pi(r_n + r_c)^2$



実際の核反応には、衝突散乱 scattering だけでなく、吸収 absorption (吸収には、捕獲 capture、核分裂 fission) などの反応が起こるため、全反応断面積はそれぞれの反応断面積の和として表される。

$$\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_a = \sigma_s + \sigma_c + \sigma_f$$

$\sigma$  は微視的 (マイクロ) 反応断面積と呼ばれる。σ は b (barn, 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>) を単位とする。ここで、

$$R = \sigma \times \phi \times N$$

であり、

$$\sigma N = \Sigma \quad (R = \phi \times \Sigma)$$

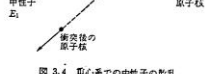
とおき、Σ を巨視的 (マクロ) 反応断面積と呼ぶ。Σ は (m<sup>-1</sup>) を単位とし、中性子が 1メートル進む間に起こる反応の回数に相当する。

また、 $1/\Sigma = \lambda$  は中性子の平均自由行程を意味する。

# 中性子の減速について

弾性衝突、重心系  $E_1 \rightarrow E_2$

A: 衝突原子の質量数



$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{(A+1)^2}{A^2 + 2A \cos \theta + 1} \quad (3.18)$$

エネルギー対数減衰率:  $\xi \equiv \ln \left( \frac{E_1}{E_2} \right) = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} + \frac{2}{A+2/3}$

レザージ (lethargy): 原子炉物理学で使われるエネルギーの尺度  $u = \ln \frac{E_0}{E}$

$E_0 \rightarrow E$  までの弾性衝突回数:  $n = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_0}{E}$

表 3.1 弾性衝突の回数 ( $E_0 = 2 \text{ MeV} \rightarrow E = 0.025 \text{ eV}$ )

媒質	H	H <sub>2</sub> O	D	D <sub>2</sub> O	Be	C	O	Fe	U
衝突回数	18.2	19.8	25.1	35.8	87.1	115	152	510	2172 <sup>1)</sup>

# 中性子の減速と吸収

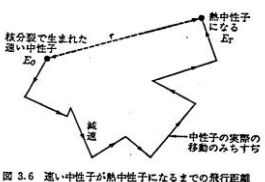


図 3.6 速い中性子が熱中性子になるまでの飛行距離

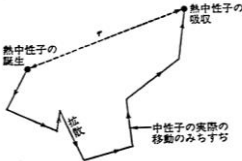


図 3.5 熱中性子の発生から吸収までの飛行距離

ボルツマン方程式 (中性子の拡散輸送方程式で記述)

### 中性子の減速と中性子束

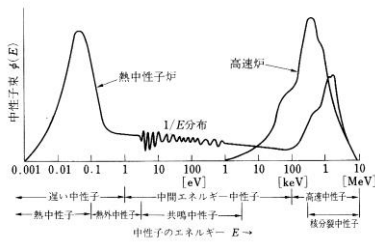


図 2.4 熱中性子炉および高速炉の炉中性子スペクトルの比較

単位:  $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$

炉型	BWR	PWR
熱中性子束	4	5
1 MeV 以上の中性子束	5	9

### 代表的核子ごとの熱中性子に対する反応断面積

表 2.1 熱中性子 (0.0253 eV) に対する断面積

元素	$\sigma_s$ (b)	$\sigma_a$ (b)	$\sigma_f$ (b)
H	38	0.332	
D	7	$0.53 \times 10^{-3}$	
Be	6.14	0.0092	
B	3.6	759	
C	4.75	$3.4 \times 10^{-3}$	
O	3.76	$0.27 \times 10^{-3}$	
Fe	10.9	2.55	
Cd	5.6	2480	
$^{135}\text{Xe}$		$2.7 \times 10^6$	
U(天然)	8.90	7.59	4.19
$^{235}\text{U}$	15	683	582
$^{238}\text{U}$	8.3	2.71	
$^{239}\text{Pu}$	9.6	1028	746

### 8-4 金属ウランの性質

表4-4 金属ウランの性質

相	結晶形	格子定数 (nm)	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	変態温度 (K)	変態熱 (kJ/mol)	容積変化 (%)
変態	$\alpha$ 斜方晶	$a_0=0.2853$ $b_0=0.5868$ $c_0=0.4955$	19.060(298K)	$\alpha \rightarrow \beta$ 941	2.8200	1.15
	$\beta$ 正方晶	$a_0=1.052$ $b_0=0.557$	18.13(973K)	$\beta \rightarrow \gamma$ 1047	4.732	0.71
	$\gamma$ 体心立方晶	$a_0=0.3474$	17.79(1173K)	融点 1405		

弾性係数  
ヤング率  $E=1.95 \times 10^{11}$  (Pa)      弾性係数  $G=8.056 \times 10^{10}$  (Pa)  
剛性率  $K=0.111 \times 10^{12}$  (Pa)      ボアツソン比  $\sigma=0.2087$

沸点: 4445 K

### 金属ウランの熱膨張係数 (異方性)

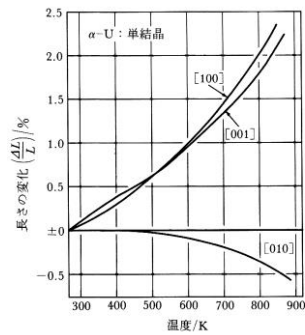


図4-4 U 単結晶の熱膨張曲線

### 8-5 酸化ウランの性質 代表的組成 $\text{UO}_2, \text{U}_3\text{O}_8, \text{UO}_3$

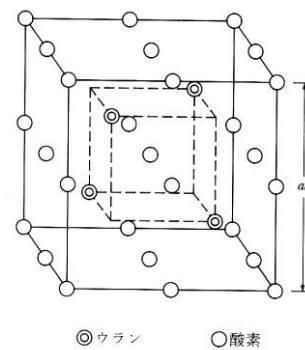
表4-9  $\text{UO}_2, \text{U}_3\text{O}_8, \text{UO}_3$  の組成構造データ

化合物 O/U 比	結晶系	空間群	格子定数 a (nm)	格子定数 b (nm)	格子定数 c (nm)	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
$\text{UO}_2$	面心立方	Fm3m (0.230)	0.380			10.96
$\alpha\text{-U}_3\text{O}_8$	正交	P2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub>	0.546	0.740	0.740	11.44
$\beta\text{-U}_3\text{O}_8$	正方	P4 <sub>3</sub>	0.549	0.549		11.36
$\gamma\text{-U}_3\text{O}_8$	斜方	C2/m (0.418)	1.180	0.418	0.418	8.43
$\delta\text{-U}_3\text{O}_8$	斜方	Am2 (0.418)	1.181	0.418	0.418	
$\epsilon\text{-U}_3\text{O}_8$	斜方	Cmcm (0.709)	1.145	0.830	0.830	8.38
$\zeta\text{-U}_3\text{O}_8$	六方	P6 <sub>3</sub>	0.878	0.878		9.15
$\eta\text{-U}_3\text{O}_8$	斜方	P2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub>	1.246	0.823	0.823	7.86
$\theta\text{-U}_3\text{O}_8$	斜方	C2/m (0.484)	4.345	0.415	0.415	7.44
$\iota\text{-U}_3\text{O}_8$	単斜	P2 <sub>1</sub>	1.034	0.591	0.591	8.25
$\kappa\text{-U}_3\text{O}_8$	斜方	Fddd (0.881)	1.993	0.971	0.971	8.02
$\lambda\text{-U}_3\text{O}_8$	立方	P2 <sub>3</sub>	0.416			6.67
$\mu\text{-U}_3\text{O}_8$	三斜	P2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub>	0.4082	0.3841	0.4485	98.10(90.20)(20.17)
$\nu\text{-U}_3\text{O}_8$	斜方	P2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub>	0.511	0.566	0.5224	8.86

原子炉燃料:  $\text{UO}_2$   
 $\text{UO}_{2-x}$ : 亜化学量論組成  
 $\text{UO}_{2+x}$ : 過化学量論組成  
 Hyper-stoichiometry

図4-15 U-O 系状態図

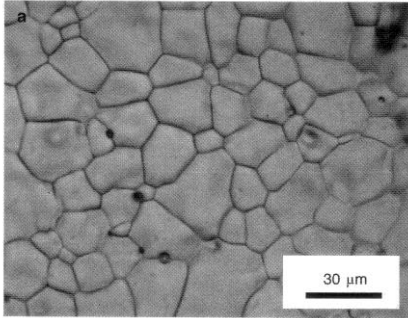
### 二酸化ウランの構造 (螢石型 $\text{CaF}_2$ )



◎ウラン ○酸素

図4-16  $\text{UO}_2$  の結晶構造

酸化ウランUO<sub>2</sub>の表面写真(1300°C水蒸気エッチング後)



19

金属ウランとUO<sub>2</sub>の物性値比較

	U	UO <sub>2</sub>
密度 g/cc	19.1	10.96
融点 °C	1132	2850
熱伝導度 W/mK	27.5	10
熱膨張率 °C <sup>-1</sup>	13.9x10 <sup>-6</sup>	11.5x10 <sup>-6</sup>
化学的安定性	×	○

20

核燃料の化学形態と原子炉

表4-2 固体核燃料の種類と用途

	名称	化合物名	使用原子炉
金属燃料	金属ウラン	U	黒鉛炉(コールドホール)研究炉
	合金	U-Al U-Mo U-ZrH	高速炉(EBR-II) パルス炉(NSRR)
セラミックス燃料	ケイ化ウラン	U <sub>3</sub> Si	重水炉
	酸化物	UO <sub>2</sub>	軽水炉・重水炉
	混合酸化物	(U, Pu)O <sub>2</sub>	高速炉・新型転換炉
	混合炭化物	(U, Pu)C	高速炉
	混合窒化物	(U, Pu)N	高速炉
分散型燃料	被覆粒子燃料	(U, Th)O <sub>2</sub> -PyC-SiC-PyC	高温ガス炉
	金属-金属	(U, Th)C <sub>2</sub> -PyC-SiC-PyC	高温ガス炉
	セラミックス-金属	UAl <sub>3</sub> -Al UO <sub>2</sub> -Al, UO <sub>2</sub> -SUS	材料試験炉 研究炉(HFIR)

21

8-6 核分裂反応



表 2.2 放出エネルギー (235U の熱中性子による核分裂)

核分裂破片の運動のエネルギー	168 MeV
即発中性子の運動のエネルギー	5
即発γ線	5
核分裂生成物の崩壊	
遅発γ線	6
β線	7
中性微子(ニュートリノ)	(11 MeV)(利用出来ない)
全エネルギー/分裂	202 MeV

22

核分裂中性子のエネルギー分布と発生数

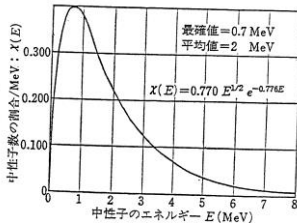
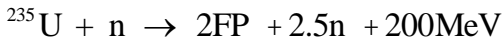


図 3.2 核分裂中性子のエネルギースペクトル

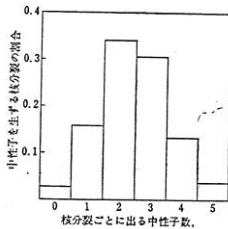
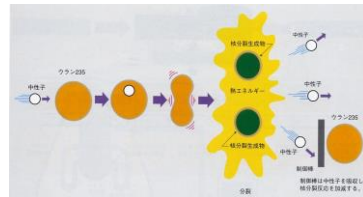


図 2-11 核分裂中性子数の分布

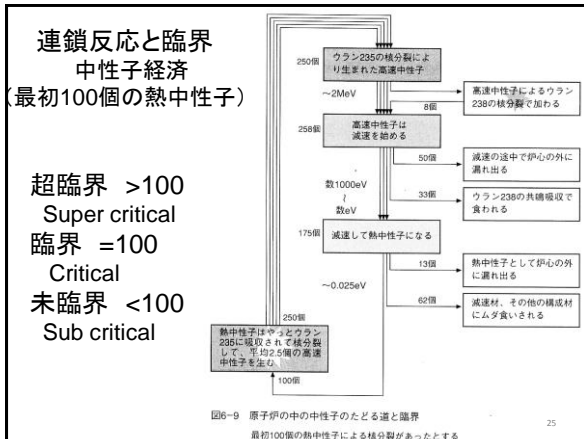
23

8-7. 連鎖反応と臨界、中性子経済



核燃料物質1個が中性子を吸収して核分裂すると、平均ν個の高速中性子が放出される。この中性子は燃料以外の物質に吸収されたり、外に漏れたりして減少するが、(原子炉内のような)適当な環境下では、その中性子の一部が核燃料物質に吸収され、次の核分裂を引き起こすことができる。以後同様の過程が繰り返されて、対象となる体系の中で、次々と核分裂反応が起る。このことを「連鎖反応」と呼ぶ。

1回の核分裂あたり、平均ν個の高速中性子が放出され、そのうちの丁度1個が次の核分裂を引き起こせば連鎖反応は継続され、全体の中性子の数は変化せず、この状態を「臨界(critical)」と呼ぶ。



### 増倍率による臨界の表現

#### 増倍率 $k$ (multiplication factor) の定義

$$k = \frac{\text{ある世代で起った核分裂数}}{\text{1世代前に起った核分裂数}}$$

$$= \frac{\text{ある世代で起った吸収の数}}{\text{1世代前に起った吸収の数}}$$

$$= \frac{\text{ある世代で生成される中性子数}}{\text{1世代前に生成された中性子数}}$$

核分裂が起きて生まれた中性子が、再び核分裂を起こして次の中性子を産み出す過程のひとりを世代 (generation) という。 $k=1$  のとき、各世代での核分裂数は一定になるので、連鎖反応は一定の割合で起り続ける。これを「臨界」状態にあるという。 $k>1$  では、核分裂数は世代とともに増大し連鎖反応は発散する。この状態を臨界超過 (超臨界、supercritical) とよび、 $k<1$  では、連鎖反応は停止に向かい、この状態を臨界未満 (未臨界、subcritical) と呼ぶ。

### 四因子公式、六因子公式 four-factor formula, six-factor formula

無限増倍率  $k_{\infty}$ : 無限大の体系の増倍率 (infinite multiplication factor)  
実効増倍率  $k_{\text{eff}}$ : 有限体系の増倍率 (effective multiplication factor)

$$k_{\infty} = \eta f \epsilon p$$

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} P_F P_T$$

$f$ : 熱中性子利用率 (thermal utilization factor)  
 $\epsilon$ : 早い中性子による核分裂数 (fast fission factor)  
 $\eta$ : 中性子再生率 (neutron regeneration factor)  
 $p$ : 共鳴を逃れる確率 (resonance escape factor)

$P_F$ : 早い中性子の漏れない確率 (fast nonleakage factor)  
 $P_T$ : 熱中性子の漏れない確率 (thermal nonleakage factor)

### 8-8. 核燃料の燃焼度 Burn-up

#### 3種類の表記方法

(a) 核分裂したU(またはPu)の量 : %  
Fraction per Initial Metal Atom (FIMA) とも呼ぶ

(b) 燃料1m<sup>3</sup>当たりの核分裂数 : m<sup>-3</sup>

(c) 1tonの金属U(またはPu)当りの発熱エネルギー量 : MWd/t(U)  
Mega Watt day (MWd)、Giga Watt day (GWd)

(c)' 1tonの燃料当りの発熱エネルギー量 : MWd/t(F)

それぞれの燃焼度の表記は以下のように関係づけられる。

(a)であらわした燃焼度を  $B_0$  % (FIMA) とすれば、(b)の  $B_1$  m<sup>-3</sup>は、

$$B_1 (\text{m}^{-3}) = \frac{\rho N_A}{M} \times 10^6 \times \frac{B_0}{100} = 6.02 \times 10^{27} \frac{\rho}{M} B_0 (\% \text{FIMA})$$

ここで、 $N_A$ はアボガドロ数、 $\rho$ は燃料ペレット密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $M$ は燃料の分子量 (g) である。また、(c)と(c)'の  $B_2$  MWd/t(U)、 $B_2'$  MWd/t(F) は、それぞれ、

$$B_2 (\text{MWd/t(U)}) = \frac{M(\text{UO}_2)}{M(\text{U})} \times B_2' (\text{MWd/t(F)})$$

$$B_2' (\text{MWd/t(F)}) = \frac{10^6}{M} \times N_A \times \frac{B_0}{100} \times E_f$$

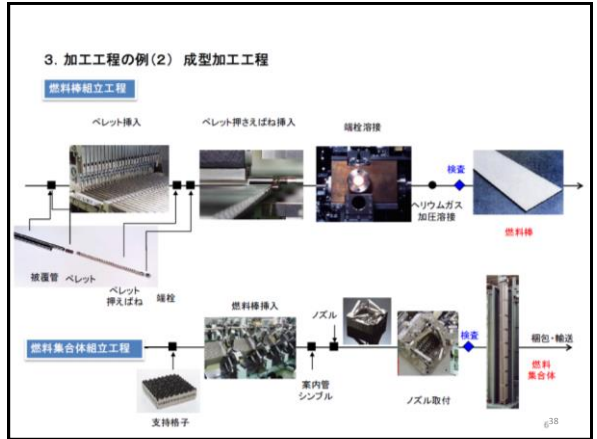
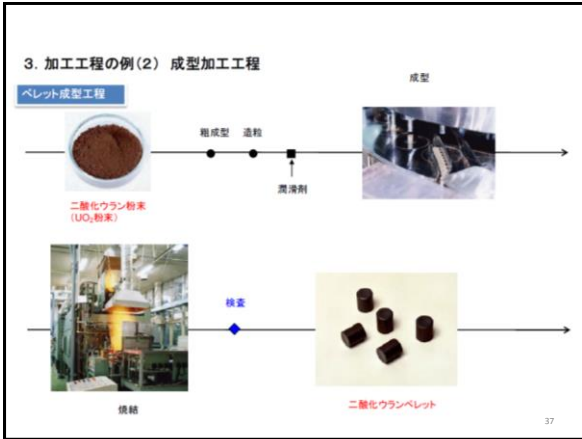
となる。ここで、 $E_f$ は1核分裂当りの放出エネルギー (J) である。

### 燃料の種類ごとの燃焼度の換算は下表ようになる。

表4-11 U系燃料の燃焼度単位換算表

燃焼度\燃料	U	UO <sub>2</sub>	UC
$B_0$ (%) (初装荷 U)	1	1	1
$B_1$ (m <sup>-3</sup> )	$4.82 \times 10^{26}$	$2.45 \times 10^{26}$	$3.28 \times 10^{26}$
$B_2$ (MWd/t(U))	9370	9370	9370
$B_2'$ (MWd/t(F))	9370	8260	8940
密度 (室温) $\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	19.06	10.96	13.63
分子量 $M$ (g)	238	270	250





## 原子力の歴史

1895 X線	レントゲン
1896 ウランの放射能	ベクレル
1898 ラジウム	キュリー夫妻
1905 特殊相対性理論	アインシュタイン
1911 原子核の存在	ラザフォード
1932 中性子	チャドウィック
1938 ウランの核分裂	ハーン、シュトラスマン
1942 核分裂連鎖反応	フェルミ

1953 原子力の平和利用
1957 日本での原子力研究の実質的スタート
1963 日本での発電に成功(JPDR)
1966 日本での商業発電開始

39

### 地殻中の平均存在度: Th 12 ppm(38位)、U 4 ppm(53位)

表 1.4 地殻中の元素の存在度 [mass%]

元 素	存在度	元 素	存在度	元 素	存在度
1 酸素	49.5	26 タングステン	6×10 <sup>-3</sup>	51 ハフニウム	4×10 <sup>-4</sup>
2 ケイ素	25.8	27 リチウム	6×10 <sup>-3</sup>	52 ジスプロシウム	4×10 <sup>-4</sup>
3 アルミニウム	7.56	28 セリウム	4.5×10 <sup>-3</sup>	53 <u>ウラン</u>	4×10 <sup>-4</sup>
4 鉄	4.70	29 コバルト	4×10 <sup>-3</sup>	54 アーケオン	3.5×10 <sup>-4</sup>
5 カルシウム	3.39	30 スズ	4×10 <sup>-3</sup>	55 イットリウム	2.5×10 <sup>-4</sup>
6 ナトリウム	2.63	31 亜鉛	4×10 <sup>-3</sup>	56 エルビウム	2×10 <sup>-4</sup>
7 カリウム	2.40	32 イットリウム	3×10 <sup>-3</sup>	57 ホルミウム	1×10 <sup>-4</sup>
8 マグネシウム	1.93	33 ネオジム	2.2×10 <sup>-3</sup>	58 ユーロピウム	1×10 <sup>-4</sup>
9 水素	0.87	34 ニオブ	2×10 <sup>-3</sup>	59 テルビウム	8×10 <sup>-5</sup>
10 ナタン	0.46	35 ランタン	1.8×10 <sup>-3</sup>	60 ルテチウム	7×10 <sup>-5</sup>
11 塩素	0.19	36 鉛	1.5×10 <sup>-3</sup>	61 アンチモン	5×10 <sup>-5</sup>
12 マンガン	0.09	37 モリブデン	1.3×10 <sup>-3</sup>	62 カドミウム	5×10 <sup>-5</sup>
13 リン	0.08	38 スコウウム	1.2×10 <sup>-3</sup>	63 チリウム	3×10 <sup>-5</sup>
14 炭素	0.08	39 ガリウム	1×10 <sup>-3</sup>	64 ヨウ素	3×10 <sup>-5</sup>
15 イオウ	0.06	40 タンタル	1×10 <sup>-3</sup>	65 水銀	2×10 <sup>-5</sup>
16 窒素	0.03	41 ホウ素	1×10 <sup>-3</sup>	66 ツリウム	2×10 <sup>-5</sup>
17 フッ素	0.03	42 セシウム	7×10 <sup>-4</sup>	67 ビスマス	2×10 <sup>-5</sup>
18 ルビジウム	0.03	43 ガルマニウム	6.5×10 <sup>-4</sup>	68 インジウム	1×10 <sup>-5</sup>
19 バリウム	0.025	44 サマリウム	6×10 <sup>-4</sup>	69 亜鉛	1×10 <sup>-5</sup>
20 ジルコニウム	0.02	45 ガドリニウム	6×10 <sup>-4</sup>	70 セレン	1×10 <sup>-5</sup>
21 タングステン	0.02	46 臭素	6×10 <sup>-4</sup>	71 バラジウム	1×10 <sup>-5</sup>
22 ストロンチウム	0.02	47 ベリリウム	6×10 <sup>-4</sup>	72 ヘリウム	8×10 <sup>-6</sup>
23 バナジウム	0.015	48 プラセオジム	5×10 <sup>-4</sup>	73 ルテチウム	5×10 <sup>-6</sup>
24 ニッケル	0.01	49 铈	5×10 <sup>-4</sup>	74 白金	5×10 <sup>-6</sup>
25 銅	0.01	50 スカンジウム	5×10 <sup>-4</sup>	75 金	5×10 <sup>-6</sup>

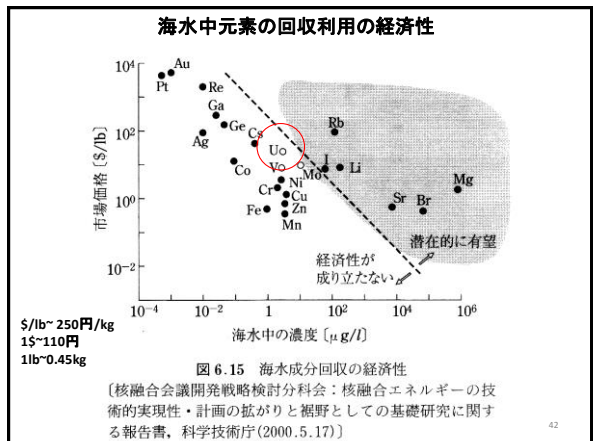
40

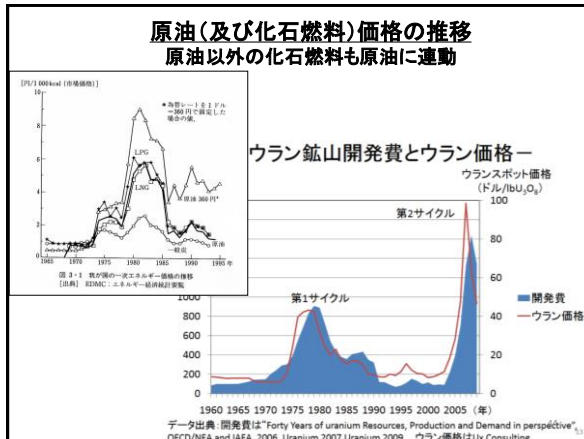
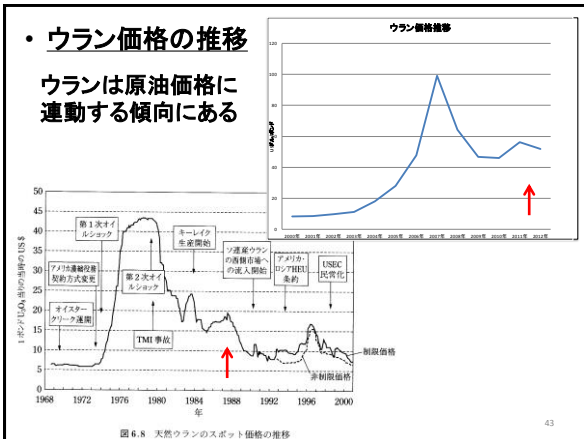
### 海水中の平均存在度: U 1.5 ppb, Th < 0.5 ppb

表 4 海水中に存在する元素の量

元 素	Cl=19.00%	元 素	Cl=19.00%
	mg/kg		mg/kg
塩素	18,980	亜鉛	0.005
ナトリウム	10,501	鉛	0.004
マグネシウム	1,372	モリブデン	0.004
硫黄	884	セシウム	0.002
カルシウム	400	ウラン	0.0015
カリウム	380	モリブデン	0.0005
臭素	65	トリウム	<0.0005
炭素	28	セリウム	0.0004
ストロンチウム	13	銀	0.0003
ホウ素	4.6	バナジウム	0.0003
珪素	0.02~4.0	ウラン	0.0003
フッ素	1.4	イットリウム	0.0003
窒素	0.01~0.7	ニッケル	0.0001
アルミニウム	0.5	スカンジウム	0.00004
ルビジウム	0.3	水銀	0.00003
イットリウム	0.001~0.10	金	0.0000005
バリウム	0.05	ラジウム	0.2~3×10 <sup>-18</sup>
ヨウ素	0.05	カドミウム	Cd
ヒ素	0.01~0.02	クロム	Cr
鉄	0.002~0.02	コバルト	Co
マンガン	0.001~0.01	鉛	Pb
銅	0.001~0.01	錫	Sn

41





### ウランの資源量

政治情勢が比較的安定した国で産出

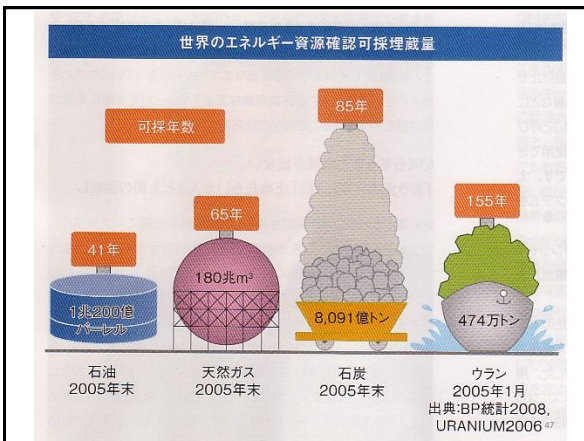
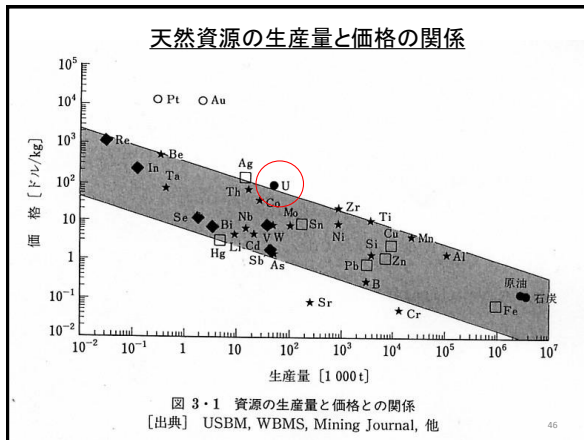
表 6.1 在来型資源量 [1 000 tU]

資源量	在来型既知資源		未発見資源	
	確認資源	推定追加資源 I	在来型既知資源 II	推定追加資源 II
≦\$130/kgU (≦\$50/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2 964	990	3 954	2 295
≦\$80/kgU (≦\$30/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2 274	728	3 002	1 460
≦\$40/kgU (≦\$15/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )*	>916	>338	>1 254	
コスト区分なし	53	25	78	6 121
資源集中度区分, コスト区分なし	70		70	

\* \$40/kgU 以下については、オーストラリア、アメリカなどが報告していない。

表 6.2 主要ウラン資源国の資源量 (1999年1月1日現在) (千 tU)

国名	在来型既知資源			
	≦\$40/kgU	≦\$80/kgU	≦\$130/kgU	既知資源合計 (%)
オーストラリア	NA	607	716	NA
カナダ	321	437	599	113
ロシア	66	66	83	40
ウズベキスタン	44	71	71	8
モンゴル	11	62	62	11
その他	11	113	197	5
合計	>1 044	2 515	3 266	>392
調整後合計 (回収可能資源)	>916	2 274	2 964	>338



### 課題-8 (核分裂炉燃料)

- 核燃料物質にはどのような核種があるか？ それぞれの特徴もあわせて記せ。
- 反応断面積 (barn) とは何か？
- 臨界とは何か？
- 動力炉にウラン酸化物燃料が使われる理由 (金属ウランがあまり使われない理由) を記せ。

解答には、氏名、授業日を記入のこと。  
また、図表を除き手書きのレポートとすること。