

主題3 原子力発電の  
エネルギーの源

**くっついたり離れたり  
するとエネルギー（1）**

### 3. 原子力発電のエネルギーの源

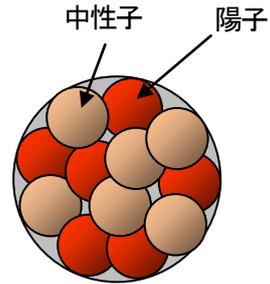
くっついたり離れたりするとエネルギー

どうして?



ストーブは消火するときに冷たくなる。  
でも原子炉は停止後も発熱し続ける。  
何が違うのだろう。

まず、  
予想しよう

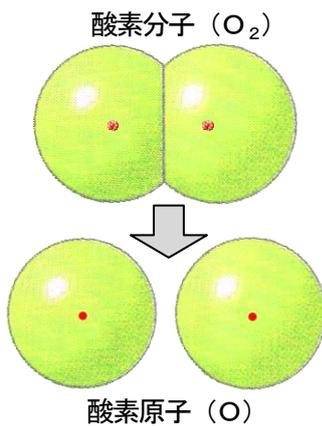


炭素の原子核

- ・陽子は正の電荷
- ・中性子は無電荷

陽子だけでは反発するが中性子がある  
ことによって一固まりになっている。

#### 1. ストープの中の現象 (炭素の燃焼)



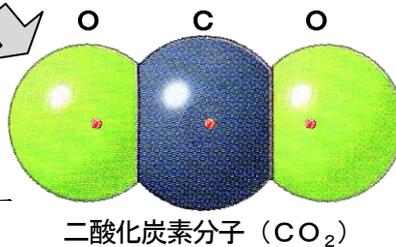
炭素原子 (C)

原子核の周りを電子  
が飛び回っている。

拡大

化学反応では、原子核の周りの電子  
の飛ぶコースが原子の結合によっ  
て変わるが、原子核は変わらない。

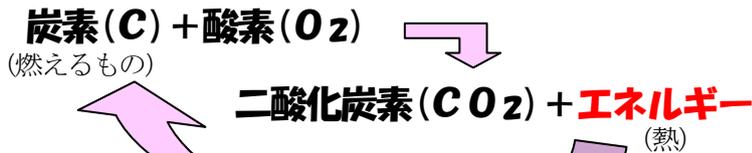
炭素の燃焼 (炭素と酸素が結合)



**+エネルギー**

結合の仕方が変化し、その結果、  
エネルギーが余ると熱エネルギー  
となる (発熱反応)。

◆炭素の燃焼が続くには・・・燃えるもの、酸素、温度



エネルギー (熱) が放出  
されて温度が維持され、  
反応が継続する。



石炭



ウラン鉱石



1kgの石炭の燃焼による発熱量と、  
1kgの天然ウランの核分裂による発  
熱量を計算してみよう。

#### <原子のつくり>

原子番号 (原子の陽子数) 順に電子の配置を考慮して元素を  
並べた表を周期表と呼ぶ。陽子だけの水素原子核を除いて、原  
子核は陽子と中性子で構成されており、陽子の数と中性子の数  
の合計を質量数と呼ぶ。そして、陽子と同数の電子が、原子核  
の周りを回っている。陽子が 6 個の元素は炭素 (C) であり、  
中性子が 6 個の炭素を C-12 (12 は陽子 6 個と中性子 6 個の和、  
すなわち質量数) と表すことがある。

中性子は無電荷で、陽子 (正の電荷) だけでは不安定な原子  
核の接着剤のような役割をする。一般に、質量の小さな原子は、  
陽子の数と中性子の数はほぼ同数で安定している。それに対し

て、質量の大きな原子は、陽子より中性子の数が多くなる傾向  
にある (例えば、ウラン U-235 は陽子が 92 個であるが、中性  
子は 143 個もある)。

<周期表の一部>

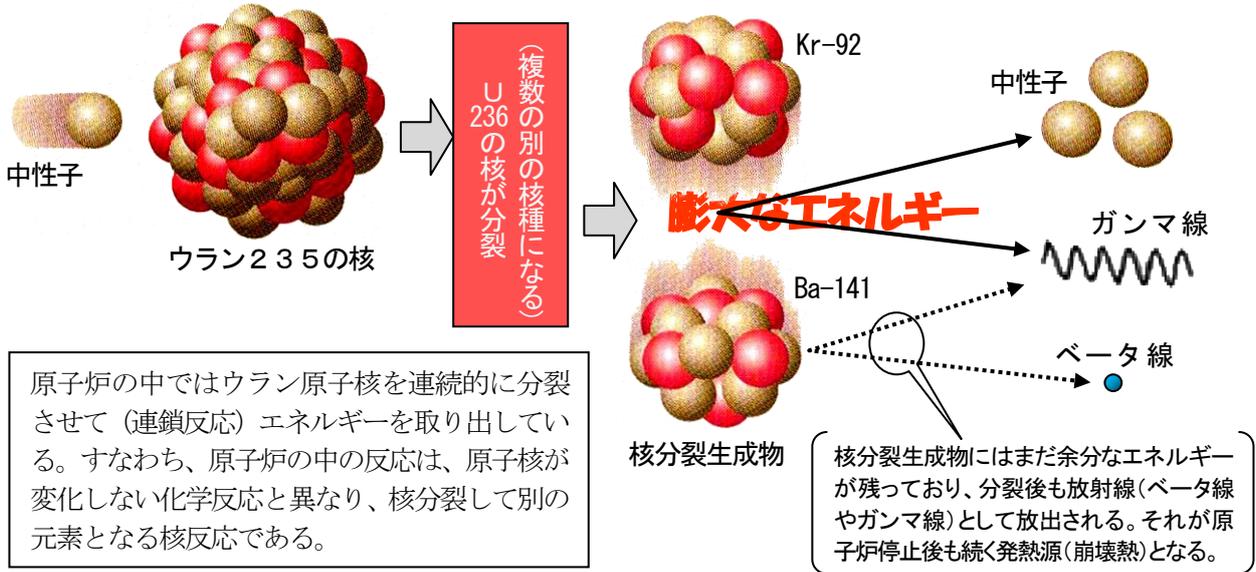
H 水素 1	He ヘリウム 2						
Li リチウム 3	Be ベリリウム 4	B ホウ素 5	C 炭素 6	N 窒素 7	O 酸素 8	F フッ素 9	Ne ネオン 10
Na ナトリウム 11	Mg マグネシウム 12	Al アルミニウム 13	Si ケイ素 14	P リン 15	S イオウ 16	Cl 塩素 17	Ar アルゴン 18

●原子記号  
 ●原子名  
 ●原子番号(陽子の数)

## 2. 原子炉の中の現象（ウランの核分裂）

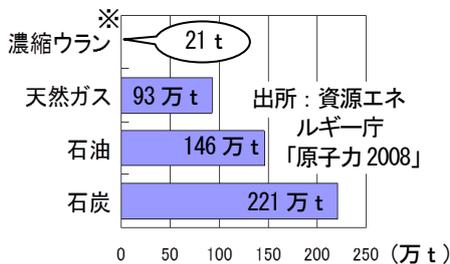
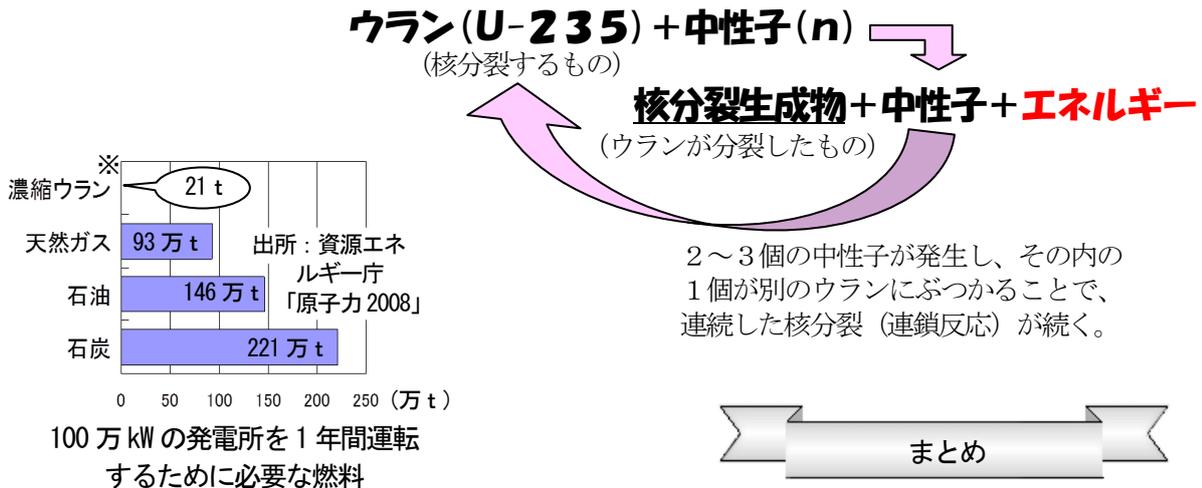
ウラン235の原子核が中性子1個を吸収した後、2つに分裂

核分裂によってエネルギーが放出される。同時に2～3個の中性子とγ線が発生する。



原子炉の中ではウラン原子核を連続的に分裂させて（連鎖反応）エネルギーを取り出している。すなわち、原子炉の中の反応は、原子核が変化しない化学反応と異なり、核分裂して別の元素となる核反応である。

◆核分裂が続くには・・・核分裂するもの、中性子、核分裂が続く環境



100万kWの発電所を1年間運転するために必要な燃料

※濃縮ウラン  
天然ウラン中に約0.7%しか含まれていないウラン235の濃度を人工的に高めたウラン。発電用には3～4%程度のものが用いられる。

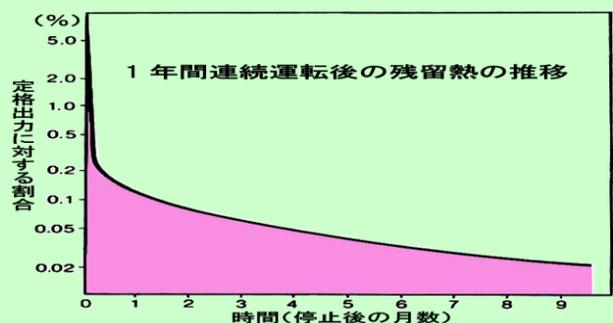
- ・ 化学反応と原子核反応によるエネルギーの相違点と共通点、それから気付いたことをまとめよう。
- ・ 「どうして？」に対する答えを、予想と比較してまとめよう。

### <原子炉停止後も続く発熱源（崩壊熱）>

核分裂生成物は、陽子と中性子の数がアンバランスなものが多い。上の例では、バリウム Ba-141 は、陽子 56 個、中性子 85 個で中性子がかかなり多い。そのため、中性子が陽子（正電荷）と電子（負電荷）に分かれて、多すぎる中性子を減らそうとする。このときに原子核の外へ電子がβ線として、さらに余分なエネルギーがγ線として放出される。これらのエネルギーが、核分裂生成物の崩壊熱の原因である。

原子炉は運転期間分の核燃料を原子炉内に装荷し、制御棒を調整してエネルギーを取り出している。制御棒を原子炉に全挿入すれば核分裂は止まる。しかし、一度でも核分裂させた核燃

料からは核分裂生成物の崩壊熱が発生するので、原子炉停止後も冷却を続ける必要がある。



### 主題3 「原子力発電のエネルギーの源（くっついたり離れたりするとエネルギー（1）」の学習展開

授業のねらい：原子力発電のエネルギーの源は原子核反応に伴って生じるエネルギーであることを学ぶ。原子核反応と化学反応を対比させた学習を通して、化石燃料など従来型のエネルギー源とは発生原理が異なり、それが発生するエネルギー量の規模の差や取扱い方法の差となることを、簡潔に説明できる。

所要時間：2時間（1と2あわせて）

#### 学習の展開（1）

WS：ワークシート

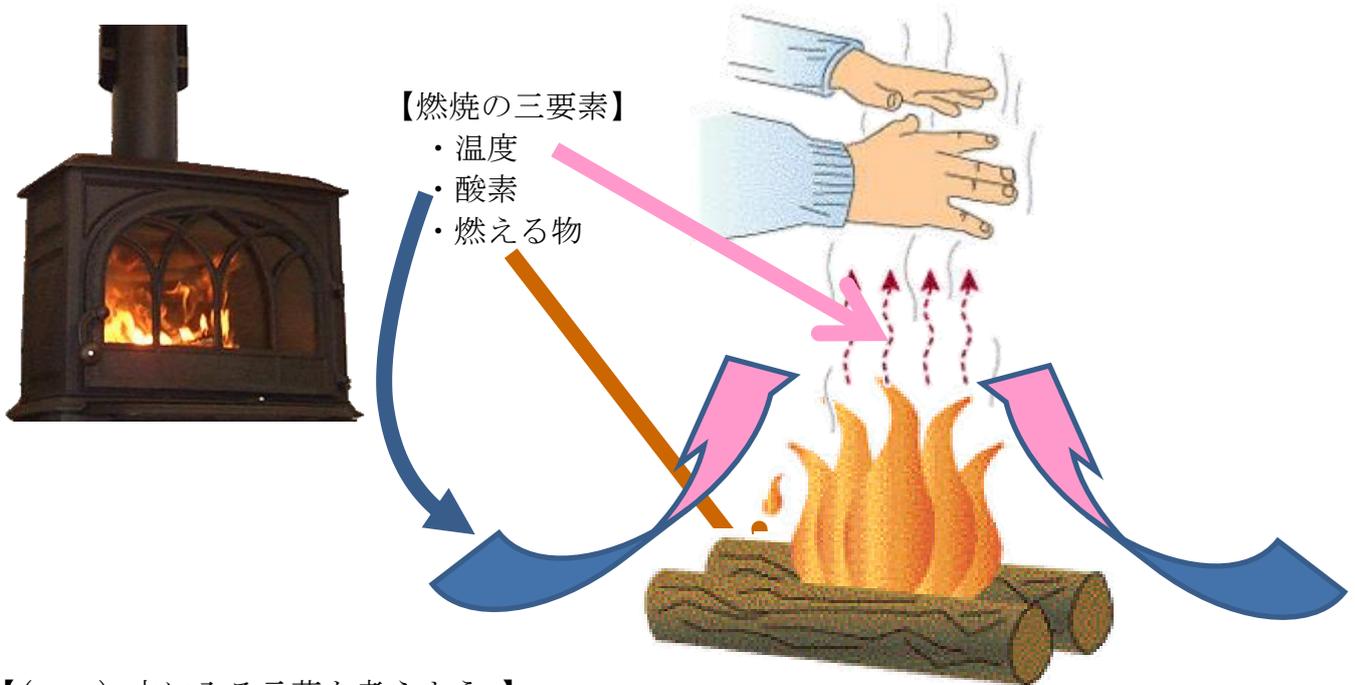
学習項目	学習のポイント	教師用資料・WSとの関連等
<p>＜問いかけ＞</p> <p>ストーブは消火するとじきに冷たくなる。でも原子炉は停止後も発熱し続ける。何が違うのだろう。</p> <p>1. ストーブの中の現象（炭素の燃焼）</p> <p>原子の構造</p> <p>炭素の燃焼</p> <p>2. 原子炉の中の現象（ウランの核分裂）</p>	<p>福島第一原子力発電所の事故では、地震後に原子炉が止まったにもかかわらず、津波で原子炉を冷却する機能を失い、燃料の損傷・溶融に至った。止まったにもかかわらず、発熱し続ける理由を、ストーブと対比させて考えさせ、エネルギー源の違いに関する考察につなげる。ストーブと原子炉の燃え方の違いを比較して予想させるワークシート1を用いてもよい。</p> <p>炭素の燃焼は化学反応であり、電子の配置が変わることによってエネルギーが発生（その他の化学反応では吸収もあるが）している。しかし、原子核は変化していないこと、すなわち反応の前後で関与した元素に変化はないことを押さえる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>電子軌道や原子核のつくりをしっかり押さえたうえで、燃焼（化学）反応は電子の配置が換わることによって起こる現象であることにつなげる。</li> <li>必要に応じ、ワークシート2を使って、原子模型の仕組みを体験的に学ばせるとよい。</li> <li>炭素と酸素は電子軌道で相互に結び付くことによってより安定な（低エネルギー）状態になり、余ったエネルギーを熱として放出すること、反応を開始させるには一定の活性化エネルギーが必要なこと、反応開始後は放出されたエネルギーを利用して反応が継続することを押さえる。また、この一連の過程で原子核は一切変化していないことを確認する。</li> <li>余裕があれば、ワークシート3及び4を使って、視覚的かつ定量的に押さえるとよい。</li> </ul> <p>原子核反応は、原子核を構成する陽子と中性子の組み合わせの変化、すなわち元素が変化する反応であり、その前後で変化（減少）した質量がエネルギー源となること、化学反応に比べて桁違いのエネルギーの発生があることを押さえる。また、核分裂反応では生じた核分裂生成物からは放射線が長期にわたって放出され続け、原子炉停止後も発熱し続けることを押さえる。</p>	<p>教師用資料・WSとの関連等</p> <p>WS1「ストーブと原子炉の燃え方の違い」</p> <p>周期表を用意しておくとうい</p> <p>教師用 Q1-Q3</p> <p>WS2「いろいろな原子模型を作ってみよう」</p> <p>教師用 Q3</p> <p>WS3「二酸化炭素の結合を作ってみよう」</p> <p>WS4「エネルギーを計算してみよう」</p> <p>教師用 Q6</p>

学習項目	学習のポイント	教師用資料・WSとの関連等
<p>核分裂反応と質量欠損</p> <p>発電用原子炉の種類</p> <p>核分裂生成物の存在</p> <p>&lt;まとめ&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・化学反応と原子核反応によるエネルギーの相違点と共通点、それから気付いたことをまとめよう。</li> <li>・問いかけに対する答えを、予想と比較してまとめよう。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉の中ではウラン 235 の核分裂が進行し、その過程で失われた質量 (質量欠損) がエネルギーに転換されていることを確認する。</li> <li>・余裕があれば、ワークシート 4 を使って、定量的に押さえるとよい。</li> <li>・次の時間 (くっついたり離れたりするとエネルギー (2)) の学習を省略するのであれば、この時点で、発電用原子炉には加圧水型と沸騰水型の 2 種類があること、原子炉の中で核分裂が継続的に続く状態を作り出して発生したエネルギーを利用していることを押さえる (次の時間で触れるのであれば、特にここで押さえる必要はない)。</li> <li>・原爆と混同しているようであれば、その違いについて説明する。</li> <li>・核分裂生成物にはまだエネルギーが残っており (不安定な放射性核種として)、安定状態になるまで放射線を放出し続ける (すなわち燃料の加熱が続く) ことを押さえる。 一次の放射線の学習につなぐ。</li> </ul> <p>原子炉停止後の熱発生メカニズムはストーブの余熱とは原理的に異なることの確認を通して、原子力発電のエネルギー源は核分裂に伴う質量欠損であることを押さえる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・結合と分裂で両者の特徴を捉える生徒がいるかもしれないので、大量のエネルギーを放出する核反応には核分裂と核融合があること、太陽エネルギーの源は核融合であることを補足しておくとうい。</li> <li>・共通点と相違点の視点例 <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt;エネルギー密度</li> <li>&gt;放射線の有無</li> <li>&gt;停止後の残留熱の有無</li> <li>&gt;温室効果ガスの有無</li> <li>&gt;反応前後での質量差の有無 (相違点であるが厳密には共通点)</li> <li>&gt;兵器利用 (相違点でもあり共通点でもある)</li> <li>&gt;etc</li> </ul> </li> </ul>	<p>教師用 Q4-Q8 WS4「エネルギーを計算してみよう」 教師用 Q6 教師用 Q9、Q10</p> <p>教師用 Q11、Q2</p> <p>WS1「ストーブと原子炉の燃え方の違い」</p>

# ワークシート1：ストーブと原子炉の燃え方の違い

## 【問いかけ】

ストーブは消火するとじきに冷たくなる。でも原子炉は停止後も発熱し続ける。何が違うのだろう。ストーブの消火と比較して考えてみよう。



## 【( ) 内に入る言葉を考えよう】

- 原子力発電にも三要素に類似のものがあるのだろうか？

ストーブ	原子力発電
温度：炎があがるような高温	核分裂が続く環境
酸素：通風口から入り円筒に抜ける	次の核分裂を引き起こす <u>(中性子)</u>
燃える物：ストーブ内の薪・チップなど	<u>(核または原子)</u> 燃料

- 消火の方法は？

ストーブ	原子力発電
放水などで温度を下げる	_____
通風（酸素）を遮断する	制御棒などで <u>(中性子)</u> を吸収する
燃える物を取り出したり、補給を止めたりする。	_____
↓	↓
燃焼反応が止まると余熱だけになる。	<u>(核分裂)</u> による発熱は止まるが、核分裂生成物からの <u>(崩壊熱)</u> がある
冷えていく	<u>(冷却)</u> を続ける必要有り

## ワークシート2：いろいろな原子模型を作ってみよう (原子核の様子や電子の数を調べよう)

コルクボードや発泡ポリスチレンボードを使って、図1や図2のようなボードをつくる。そこに、電子(黄色の発泡ポリスチレン球)、陽子(赤色の発泡ポリスチレン球)、中性子(白色の発泡ポリスチレン球)に爪楊枝を刺して、ボードに刺さるようにした玉を用意する。

ここで、C(炭素)の例を示すと、周期表より原子番号6、質量数12から、陽子が6個、中性子が6個( $12 - 6 = 6$ )ということがわかる(図1)。それを、原子模型ボードに刺す(図2)。

刺し方は、陽子と中性子を中心に固めて刺す。電子は、内側の軌道から刺していく。電子はペアで入っていくので、向かい合う場所(対角線上)に入れていく(図2の色のついた丸シールを参照)。

電子 (-)		6個の黄色い玉
原子核	陽子 (+)	6個の赤い玉
	中性子	6個の白い玉
原子量		12

図1 電子、陽子、中性子数を調べる

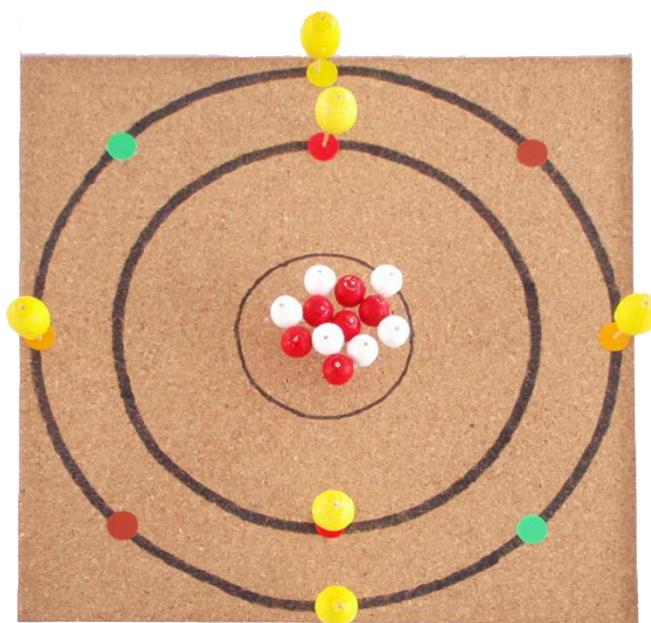
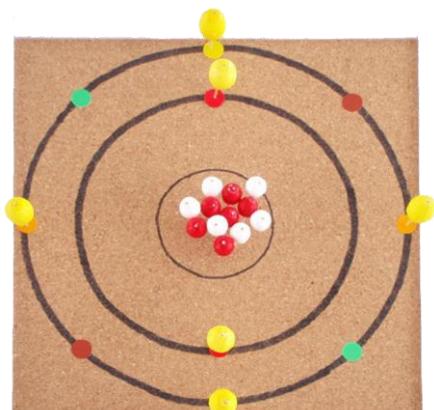


図2 炭素の原子模型

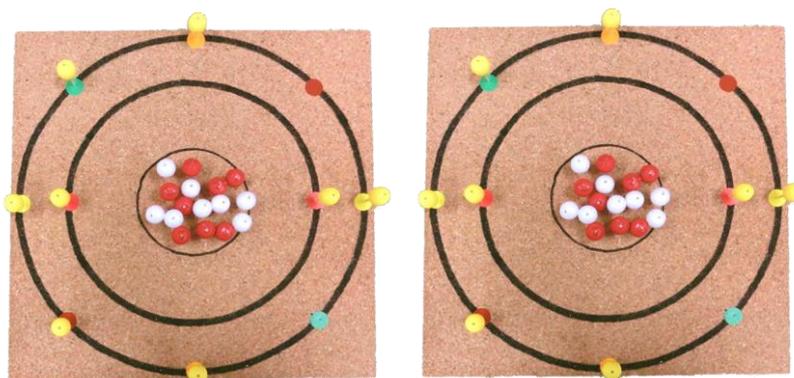
## ワークシート3：二酸化炭素の結合を作ってみよう (化学反応を調べよう)

### 1. 炭素と酸素（2個）の原子模型を作る



<炭素原子>

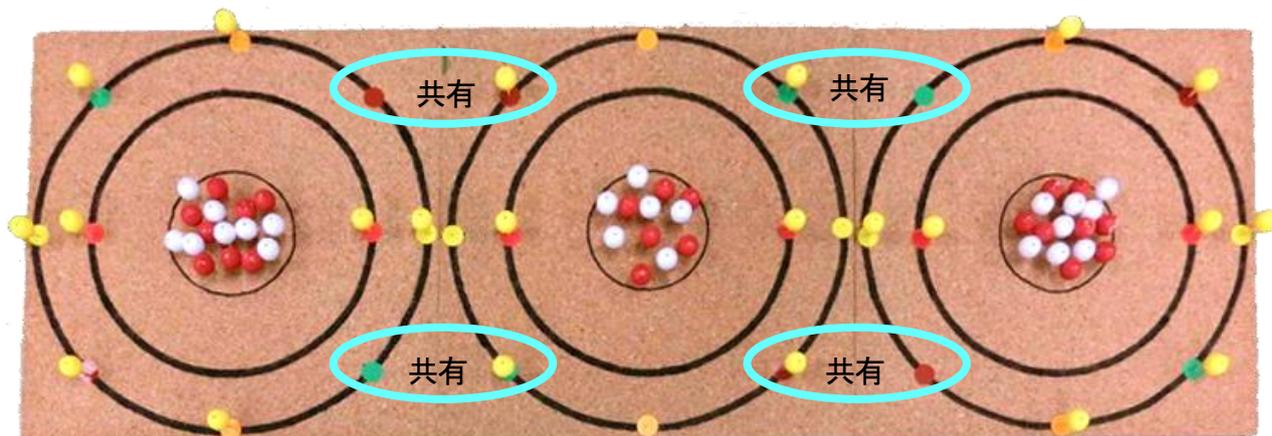
炭素原子は、最外殻電子が4個である。  
酸素原子は、最外殻電子が6個で、軌道に2個の空きがある。



<酸素原子>

### 2. 各原子模型から二酸化炭素の結合模型を作る

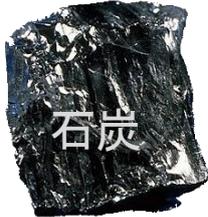
炭素原子の4つの電子を、2個ずつ2つの酸素原子に渡す（共有する）と、酸素の最外殻軌道は埋まる。また、2つの酸素の2つの電子を炭素に渡す（共有する）ことで、炭素の最外殻電子も埋まる。すなわち、軌道が埋まり安定した結合状態（低エネルギー状態）となる。この結果、余ったエネルギーが熱エネルギーとなる。



化学反応は、電磁気力による結び付きの変化（電子の共有やイオンの電気的な力による結合）であり、電磁気力が化学反応によって生じるエネルギーの源である。しかし、電磁気力は、原子核を結び付けている強い力や原子核の崩壊に関わる弱い力と比べると、格段に小さい。この力の差が核分裂と化学反応のエネルギーの桁外れの差の原因である。

## ワークシート4：燃焼と核分裂のエネルギーを計算してみよう

### (1) 石炭の燃焼熱を求めてみよう



この石炭がすべて炭素であるとして、石炭1kgの発熱量を計算してみよう。炭素と酸素がくっつき二酸化炭素になるとエネルギー（熱量）が発生する。熱化学方程式では次のように表わされる。



すなわち、1モルの炭素が完全燃焼すると394kJの熱が発生する。

炭素1モルの質量をXとすると、 $X=12$  g

したがって、炭素1kg（1,000g）の発熱量をYとすると、

$$Y = 394 \text{ kJ} \times \frac{1,000}{X} = 32,800 \text{ kJ}$$

なお、実物の石炭には不純物が含まれているため、実際の発熱量はこの値より小さい。

### (2) ウランが核分裂した時のエネルギーを求めてみよう



石炭では炭素と酸素がくっついてエネルギーが発生したのに対して、ウランは原子核が分裂してエネルギーが発生する。天然ウランには核分裂しやすいウラン235が0.71%ほど含まれ、残りのほとんどが核分裂しにくいウラン238である。天然ウラン1kg中のウラン235が全部核分裂したときに発生するエネルギーを求めてみよう。

1個のウラン235が核分裂して発生するエネルギーは約200MeVである。ここに、eVは1個の電子が1Vの電位差を1個の電子が移動したときのエネルギーの単位、Mは百万倍を表す補助単位である。

$$1 \text{ MeV} = 1,000,000 \times (1.602 \times 10^{-19}) \text{ J}$$

として計算してみよう。

1モルのウラン235（235g）の発熱量Xは、アボガドロ数（1モル中の粒子数 =  $6.022 \times 10^{23}$ ）を乗じて、

$$X = 200 \times 1.602 \times 10^{-13} \times 6.022 \times 10^{23} = 19300 \times 10^9 \text{ J/モル}$$

1kgの天然ウランには7.1gのウラン235がある。このウラン235が全部核分裂した時の発熱量Eは、

$$E = X \times \frac{7.1}{235} = 583,000,000,000 \text{ J}$$

$$= 583,000,000 \text{ kJ}$$

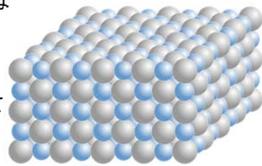
石炭1kgの約1万8千倍である。

## Q1 原子のつくりはどうなっている？

中心に原子核があり、その周りを電子が回っている

全ての物質は原子からできている。  
大きさは、 $10^{-10}\text{m}$ 程度、そのつくりはラザフォードによって明らかにされた。

中心に原子核(プラスの電荷を持った陽子と電荷を持たない中性子の集まり)があり、その周りを電子が回っている。



原子の大きさは、 $1/10\text{nm}$ ( $1\text{\AA}$ )程度

物質の構造例 (丸い物質が原子)

## 原子のつくりと周期表の関係は……

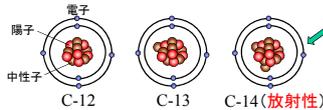
周期表は、元素を、それぞれが持つ物理的・化学的性質が似たもの同士が並ぶように配列したものだ。

- ・横軸は外側を回る電子の数(最外殻電子数)に対応
- ・縦軸は電子の軌道(K殻、L殻、M殻……)に対応



## Q2 同位体とは何？

原子核の陽子の数は同じ(原子番号は同じ、すなわち同じ元素)なのに、中性子の数が異なる原子のこと。英語でアイソトープ※



三種類の炭素

宇宙線に含まれる陽子が大気中の窒素と核反応して生成

	陽子数	中性子数	存在割合(%)
C-12	6	6	98.93
C-13	6	7	1.07
C-14	6	8	< $10^{-12}$

原子の質量数は「陽子+中性子」。しかし、同じ元素でも中性子の異なる同位体が混ざっているため、周期表の質量数(同位体全体の平均値)は整数にならない。

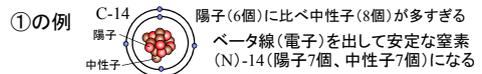
## 放射性的同位体とは……

次のような原子核には、放射線を出して(その結果、陽子と中性子の割合や数が変わる)、より安定な別の原子核に変わろうとする性質がある。

- ① 陽子と中性子の割合が大きく偏った原子核
- ② 陽子と中性子の数が多すぎる原子核

主題「放射線」も参照のこと

放射線を出す同位体を放射性同位体と呼ぶ。



②の例 三種類のウラン。天然に存在するが全て放射性



天然ウラン	陽子数	中性子数	存在割合(%)
U-238	92	146	99.28
U-235 <sup>※1</sup>	92	143	0.71
U-234	92	142	0.0054

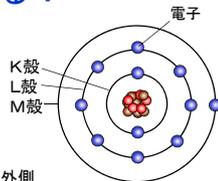
アルファ線(ヘリウム原子核)を出し、陽子と中性子が2個ずつ少ない原子核に変わる<sup>※2</sup>

※1 原子力発電の燃料になる。  
※2 変わった原子核もまだ放射性である。

## Q3 原子核の周りを回る電子はどうなっている？

電子の回り方には規則性がある。

- ・回ることができる(電子殻と呼ぶ)は決まっている。  
=>原子核に近いところからK殻、L殻、M殻……と呼ばれる
- ・それぞれの電子殻に入ることのできる電子の数は決まっている。  
=>K殻で2個、L殻8個、M殻18個……と、外側ほど増える
- ・原則として、内側の電子殻から外側の電子殻へと入る。  
=>内側を回る電子ほどエネルギーが少なく※、「安定な状態」なので、電子もより安定な状態になろうとする。

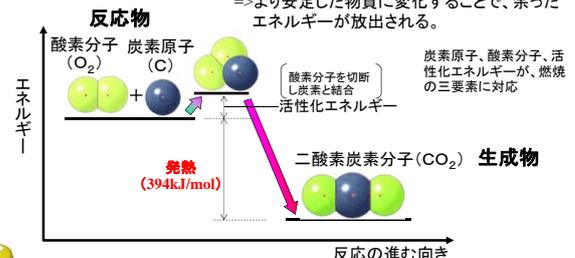


時間があればワークシート2「いろいろな原子模型を作ってみよう」に取り組んでみよう。

※重力によって低いところへ自然に水が流れる(位置エネルギーの少ないところへ移動するように、原子核(正の電荷)に電磁力で引っ張られている電子(負の電荷)も、エネルギー状態の低い位置(原子核に近い電子殻)から埋まる。

## 原子核の周りの電子の変化が、化学反応で発生する熱(エネルギー)と関係している……

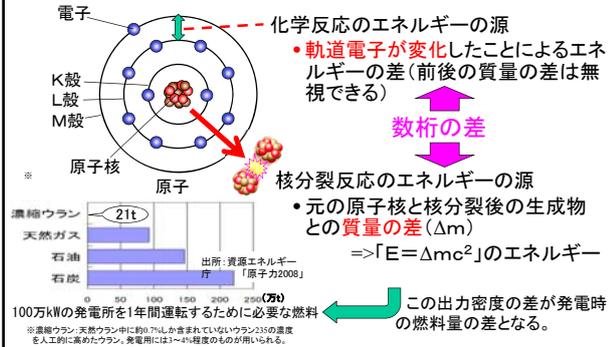
炭素が燃えるとは、炭素と酸素の原子核の周りの電子が組み合わせあって、より安定した二酸化炭素の組み合わせになること  
=>より安定した物質に変化することで、余ったエネルギーが放出される。



ワークシート3「二酸化炭素の結合を作ってみよう」及びワークシート4「エネルギーを計算してみよう」に取り組んでみよう。



## Q7 化学反応と原子核反応によるエネルギーは結局？



## エネルギーはどんな形態で発生する……

### 化学反応(炭素の燃焼の場合)

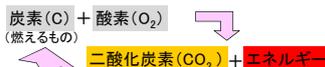
- 二酸化炭素分子の運動や振動のエネルギー  $\Rightarrow$  周囲の物質にぶつかってエネルギーを伝達(すなわち周囲に熱エネルギーを伝達する)。
- 一部は熱線(電磁波)として周囲に発散される

### 核分裂反応

- 核分裂生成物の運動や振動のエネルギー  $\Rightarrow$  周囲の物質にぶつかってエネルギーを伝達(すなわち周囲に熱エネルギーを伝達する)。
- 一部は中性子線などの高速で移動する粒子線やガンマ線(電磁波)などとして周囲に発散される  $\Rightarrow$  すなわち放射線が発生する。(詳細は主題4参照)

## Q8 燃焼の条件は？

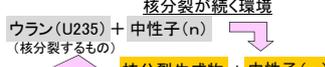
### 炭素の燃焼……燃えるもの、酸素、温度



発生した熱によって次の反応が継続する温度が必要

燃焼(化学反応)で発生したエネルギー(熱)が次の化学反応を引き起こし、燃焼が継続。

### ウランの核分裂……核分裂するもの、中性子、核分裂が継続環境



分裂で発生した中性子によって次の核分裂が継続する環境が必要

核分裂(原子核反応)でエネルギー(熱)と中性子が発生し、この中性子が次の核分裂を引き起こし、核分裂が継続。

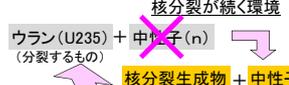
## それでは、燃焼の止め方は……

### 炭素の燃焼……燃えるもの、酸素、温度



- 三つのどれかを除く。例えば、
- ① 破壊消防(江戸の火消し)
  - ② 二酸化炭素消火器
  - ③ 放水など

### ウランの核分裂……核分裂するもの、中性子、核分裂が継続環境



- 中性子を減らす方法がとられる。例えば、
- ・制御棒挿入
  - ・ホウ酸水<sup>\*</sup>注入など

<sup>\*</sup>ホウ素の同位体B10(ホウ素全体の約20%)には中性子を吸収する性質がある。

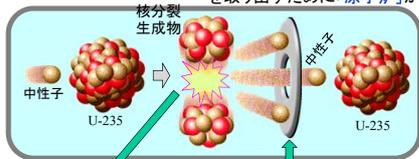
## Q9 核分裂エネルギーをどのように制御する？

核分裂のエネルギーを利用するには、

- ・核分裂の数を一定にし(「臨界状態」と呼ぶ)
- ・それを継続的にしていく(「連鎖反応」と呼ぶ)

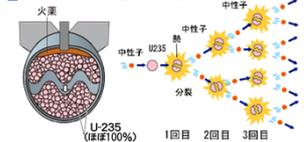
ことが必要だ。

この環境を作り出し、発生したエネルギーを取り出すために「原子炉」が利用される。

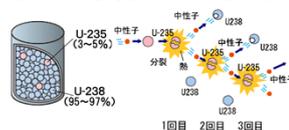


## 原子炉と原子爆弾の違いは……

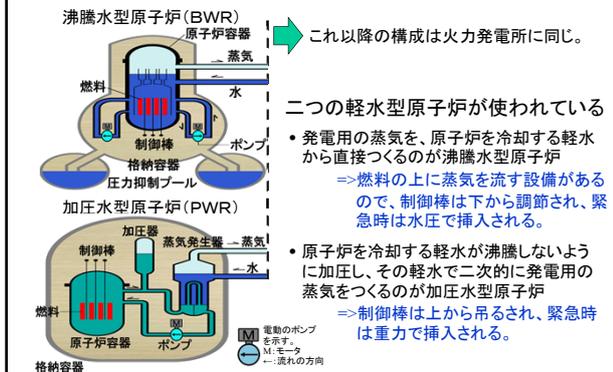
原子爆弾のウランは、連鎖反応を一瞬に起こすため、全部U-235にしてある



発電に使われる原子炉の燃料の場合、核分裂を起こすU-235の割合は4%程度で、残りは核分裂しにくいU-238だ。



## Q10 発電用原子炉の構造は？



## 何で2つのタイプがある……

PWRは米国のウエスティングハウス社(WH)が原子力潜水艦用に開発したもの※1を、陸上での発電用に改良したもの、BWRは同じく米国のゼネラルエレクトリック社(GE)が、陸上での発電用に開発したものだ。

それを、WHは三菱重工(株)と、GEは(株)日立製作所と(株)東芝と提携し、国内の電力会社に導入した。

【電力会社】 PWR:北海道、関西、四国、九州  
と型式 BWR:東北、東京、中部、中国

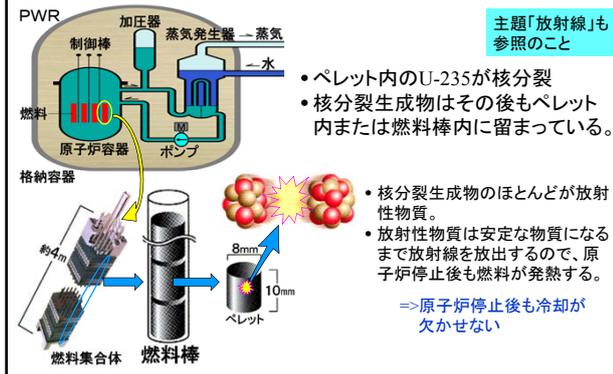
PWRは、タービン側(2次系)に放射能を含む蒸気が来ないが、構成が複雑になる。但し、原子炉本体はシンプル。

BWRは、構成がシンプルだが、タービン側(2次系)に放射能を含む蒸気※2がくる。また、原子炉は大型になる。

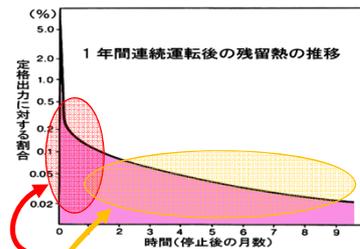
などの違いがあるが、発電規模、費用などには大差がないと言われる

※1 PWRの場合、潜水艦が傾いても核燃料が冷却水から露出しない。  
※2 原子炉内で水の酸素(O-16)が放射化され強いガンマ線を放出する窒素(N-16)が生成されるが、短時間で減衰(半減期約7秒)するので、蒸気配管を長くすることによってタービンにきたときの放射線量を低くしている。また、原子炉が停止すれば直ちに低下する。

## Q11 核分裂生成物はどこへいく？



## 核分裂生成物の熱はいつまで続く……



核分裂生成物には様々な放射性物質が含まれている。  
放射性物質には「半減期」がある。

- 半減期の短いものは、強い放射線を出す(エネルギーが大きい)が、短時間で減少する。
- 半減期の長いものは、弱い放射線を出す(エネルギーが小さい)が、長期にわたって出し続ける。

