

別冊

TWO SCENE

NUCLEAR POWERPLANT GUIDE

SCENE 1 放射能測定
 SCENE 2 放射線被ばく
 SCENE 3 ウランの生涯
 HP からダウンロード、郵送ができます。
 ▶▶ <http://cnic.jp>

アーカイブ

どうなっているの？ 原子力発電

どうして原子力で発電ができるの？

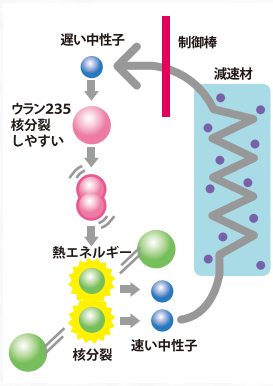
ウランに中性子が当たって核分裂すると、ウランより軽い2つの原子(核分裂生成物)と新たな中性子がうまれます。これらは高いエネルギーをもっています。核分裂生成物は、周りの原子に衝突し、持っているエネルギーを熱として与えます。核分裂生成物からはベータ線やガンマ線などの放射線も発生します。原発では、この熱でお湯を沸かして作った蒸気から、発電機を回す力を取り出して電気を作っています。

原子炉

燃料を核分裂させて熱を作り出すところ。原子炉の中には、核燃料を組み合わせた燃料集合体、核分裂をコントロールするための制御棒や発電に利用するために熱を機械に伝える冷却材が入っています。

減速材

中性子を次の核分裂を起こしやすい状態に変えるためのもの。水や黒鉛が使われる。原子炉では核分裂で生まれた中性子を、次の核分裂を起こすために使います。生まれたばかりの中性子は、スピードが速すぎて核分裂を起こしにくい状態なので、起こしやすい状態に変えるために、減速材に通過させて中性子の速度を調節します。

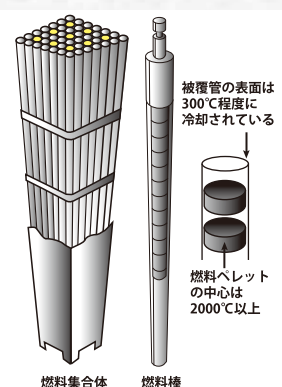


冷却水

核燃料を冷やすためのもの。熱を発電に利用するために外部に伝える機能も持つ。日本の原発では、冷却材と減速材を兼ねて水を使っている。発電中の核燃料の中心温度は2,000℃にもなります。しかし原子炉をこんなに熱くしたら危険です。これは原子炉内で使われる素材が溶け出す温度よりも高い温度です。これより低い温度でも、燃料棒に使われる素材のジルコニウムは900℃くらいになると水と反応して水素を発生させ、水素爆発を引き起こす危険があります。そうしないために、原発は核燃料を冷やしながらいと運転できない仕組みになっているのです。冷却水という名前なのですが、冷たい水ではなくお湯や蒸気の状態です。

燃料集合体

核燃料を発電に使いやすいように組み立てたもの。酸化ウランを小さく焼き固めた「ペレット」を、細長いジルコニウム合金の被覆管にいれたものを「燃料棒」といいます。燃料棒(沸騰水型原子炉の場合は約60~80本、加圧水型原子炉の場合は約180~260本)と、冷却・減速材などを、うまく働かすように組み合わせたものを「燃料集合体」といいます。燃料棒は【本】と数え、燃料集合体は【体】と数えます。



制御棒

中性子を吸収する物質でできた、核分裂の発生数を調整するためのもの。異常時に緊急停止するときは、全部の制御棒を挿入して中性子が次のウランまで届かなくさせると、核分裂反応を止めることができます。

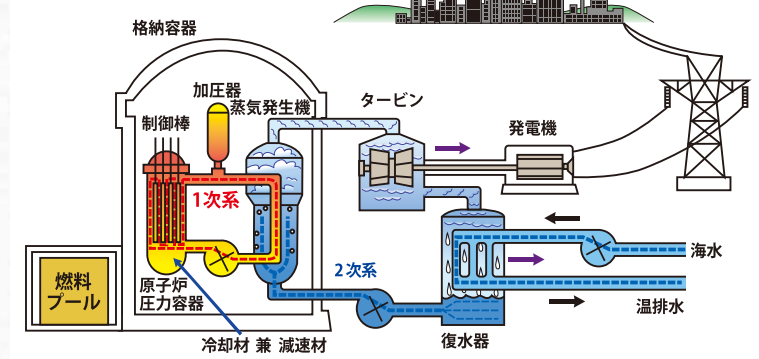
臨界

核分裂が一定の規模で連続して起きている状態のこと。核分裂を引き起こす中性子の数が多すぎると、発生するエネルギーが爆発的に増加して原発事故になってしまい、少なすぎると核分裂が止まってしまう。原発は、核分裂の発生数を一定にコントロールして発電に利用できるようにしています。

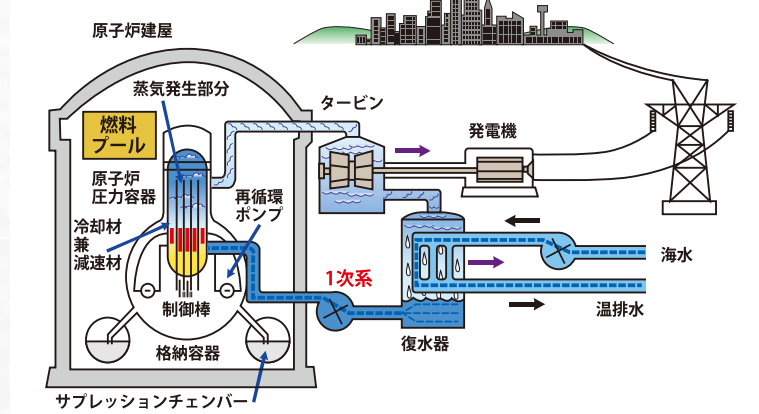
復水器

蒸気を冷やして水に戻すための装置。原発は冷却水を循環して使う仕組みになっているので、タービンを回し終わった蒸気を冷却し、水に戻して再利用しています。冷却するために大量の海水を使っているため、日本の原発は海岸沿いにしかないのです。

加圧水型原子炉



沸騰水型原子炉



サプレッションチェンバー

原子炉内の圧力上昇を抑制するための装置。異常が起きて原子炉内の圧力が上がりすぎると、サプレッションチェンバーの水の中に向かって気体の流れ込みます。熱い気体が水で冷やされて体積がしぼむことによって炉内の圧力上昇を抑える仕組みです。ウェットウェルベントとは、ここを介して大気中に原子炉内の気体を放出することです。気体が水中を通るときに一部の放射性物質は水中に溶け出ていくので大気中に放出される放射性物質の量を減らすことができます。とはいえ、完全に取り除くことはできません。福島第一原発のドーナツ型の構造物が印象的ですが、新しい BWR 原発にはサプレッションチェンバーでなく同じ機能をもつ圧力抑制室があります。福島原発事故後、これに加えてフィルター付ベント装置を設置することが義務付けられました。

タービン

蒸気の流れを回転力に変える装置。回転力は発電機に伝えられる。火力発電も原子力発電も、お湯を沸かして蒸気タービンを回しているのは同じです。水力発電では流れ落ちる水の流れを利用してタービンを回し、風力発電では風を利用してタービンを回しています。

発電機

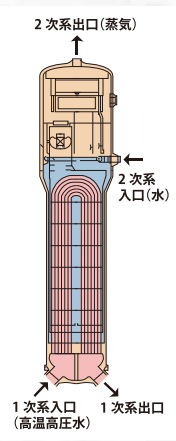
運動エネルギー(回転力)から電気エネルギーを生み出す機械のこと。発電機の回転数は、1分間に3,000回転(50ヘルツ:東日本)や3,600回転(60ヘルツ:西日本)という速さです。交流電流の周波数はここで決まっています。

発電効率

原発の発電効率はおよそ33~35%。平均的な火力発電の効率(40%程度)よりも低いのです。最新の火力発電は効率が60%近くまで高められています。原発で生み出された熱のうち6割強が発電に使わずに海に捨てられています。これは温排水と呼ばれ、周辺海域の環境影響が懸念されています。タービン発電機では、入口側の蒸気の温度が高いほどエネルギー変換効率を高くできますが、原発では核燃料を冷やすことがとても重要なので、現状よりも蒸気の温度を上げられないのです。

蒸気発生器

核分裂でできた熱から蒸気をつくる場所。加圧水型原発(PWR)にある。蒸気発生器の中では、U字型の細い管の中を1次系の高圧高温の冷却水が流れ、その外側を流れる2次系の冷却水が熱を受けて蒸気を発生させます。蒸気発生器では振動や局所的にかかる力によって金属疲労などを起こした配管が損傷し、蒸気や熱水が噴き出す事故が起きています(1991年美浜原発のギロチン破断)。また、2012年米岡サンオノフレ原発でも蒸気発生器に問題が発生したため、廃炉が決定しました。沸騰水型原子炉(BWR)では原子炉の中で直接蒸気を作っているため、蒸気発生器はありません。



加圧水型原子炉：PWR (Pressurized Water Reactor)

原子炉内の水が沸騰しないように、原子炉の圧力を高めた原発のこと。PWRでは原子炉の熱を伝える1次系の冷却水と蒸気になってタービンを回す2次系の冷却水に分かれていて、核燃料と直接つながる1次系のみ放射線物質を閉じ込める設計になっています。蒸気発生器が原子炉の外にあるため、制御棒を原子炉の上部から挿入することができます。(水は大気圧<1気圧>では100℃で沸騰しますが、圧力を上げるともっと高い温度にならなければ沸騰しません。圧力鍋で料理が早くできるのは、圧力を高めているため100℃より高い温度で料理ができるからです。)

沸騰水型原子炉：BWR (Boiling Water Reactor)

原子炉内の水を直接沸騰させて蒸気をつくる原発のこと。BWRの原子炉内では冷却水が沸騰していて、上部は気体(水蒸気)、下部は液体(お湯)になっています。原子炉上部は蒸気を取り出すための装置があり、制御棒を上から挿入することができません。そのため重力に逆らって制御棒を原子炉の下側から挿入する構造がとられています。PWRと違って1次系の冷却水で作られた蒸気がタービンを回しているため、核燃料に直接触れる放射性物質を含んだ水蒸気が原発内の広い範囲まで流れています。配管から水が漏れれば放射性物質の漏れになるし、運転に必要なメンテナンスにかかわる原発労働者の被ばく量も高くなります。原子炉内の水の沸騰によって発生する気泡は、原発運転の不安定さにつながります。

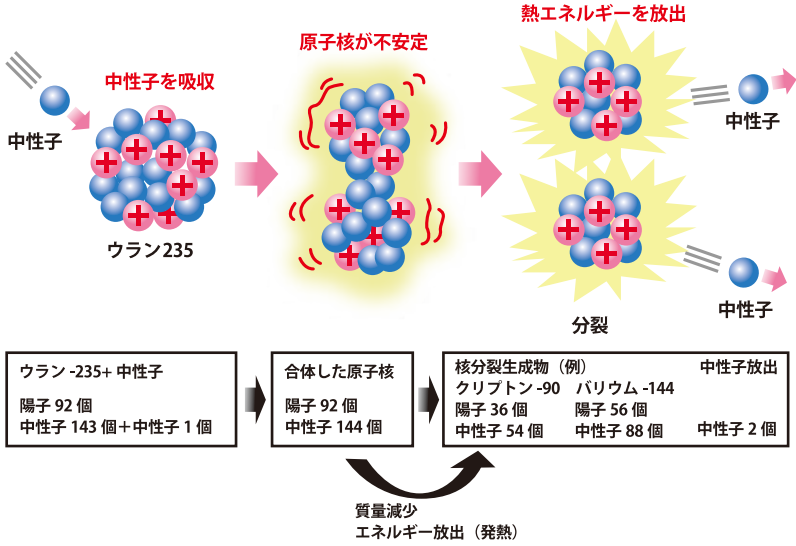
どうして核分裂するとエネルギーが生まれて発電できるの？

オモテではウランが核分裂するとエネルギーが発生すると書きました。ここでは、どうしてエネルギーが発生するのかを考えてみましょう。

ウランの核分裂で起きていること

ウラン燃料（陽子 92 個+中性子 143 個）に中性子が 1 つ当たって原子核と合体した瞬間は、陽子 92 個+中性子 144 個の状態になります。この状態は、自然界にある“安定”だったウランに中性子をぶつけて“安定性をみだした状態”ですので、とても“不安定”です。そのあと原子核は 2 つ（ときどき 3 つ）に分かれ、新しくできた原子核に入れなかった中性子が平均 2 個放出されます。新しく生まれた原子を核分裂生成物といい、さまざまな元素ができます。

ウランの核分裂



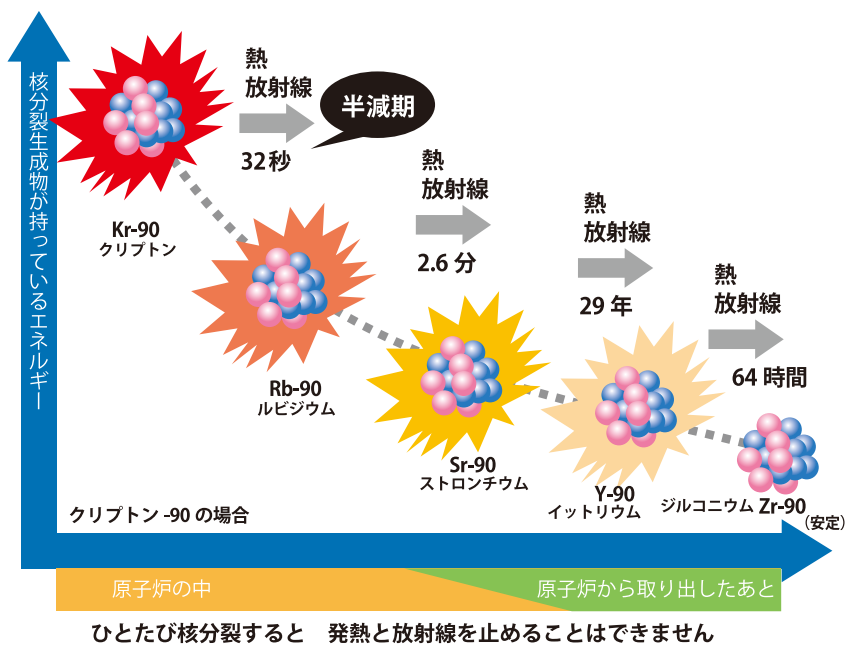
このとき、核分裂前のウラン-235+中性子 1 個の質量と、核分裂後にできたもの（たとえば、クリプトン-90+バリウム-144+中性子 2 個）の質量を比較すると、なんと！分裂後のほうが軽くなっているのです。軽くなった分は一体どこに消えたのか？これが、原発で生まれるエネルギーに関係しています。

熱が生まれるわけ ~そのエネルギーが熱になる~

こうして核分裂によって放出されたエネルギーは、いったん核分裂生成物のエネルギーになります。核分裂生成物もとのウランの原子核があった場所から飛び出そうとし、そのときに周りのウランや他の核分裂生成物の原子核に何度もぶつかって、持っているエネルギーを熱として消費します。原発ではこの熱でお湯を沸かしているのです。

核分裂生成物はベータ線やガンマ線も放出します。

核分裂生成物のエネルギーは膨大で、核分裂生成物が原子炉内にいる期間だけでは、持っているエネルギーを出し切ってしまうことができません。制御棒で核分裂反応を止めた後はもちろん、燃料を原子炉から取り出した後も、核分裂生成物は長期にわたって熱と放射線を発生しつづけます。ひとたび核分裂すると安定な状態になるまでは人間のちからで発熱と放射線放出を止めることはできないのです。



E=mc² 質量が減るとエネルギーが生まれる？!

アインシュタインが発表したことで有名な、E=mc² という式をどこかで見たことがあると思いますが、普段の生活で使うことはあまりないし、身近な感じはしないですね。でも実は、身近なところにもあるのです。原発で使うウランの核分裂のエネルギーはこの式で導けます。では、一緒に計算してみましょう。

E はエネルギー (Energy)、m は質量 (mass)、c は光速 (ラテン語で速さを意味する celeritas) です。光速は定数 (変わらない値) です。

この式は m (質量) が大きくなると E (エネルギー) も大きくなり、質量が小さくなるとエネルギーも小さくなる、ということを示しています。

つまり、質量というのは、エネルギーなのです！！

ウランの核分裂での質量変化を詳しく見ていきましょう。

●原子質量		●定数	
中性子	1.008 665	光速 (c)=3.00×10 ⁸ m/s	毎秒3億メートル
ウラン-235	235.043 931	1 原子質量=1.66×10 ⁻²⁷ kg	
クリプトン-90	89.919 528	●単位の交換	
バリウム-144	143.922 955	1 kg · m ² /s ² =6.24×10 ¹² MeV (メガ電子ボルト)	

×モ

メガ M=10⁶

核分裂前の質量は

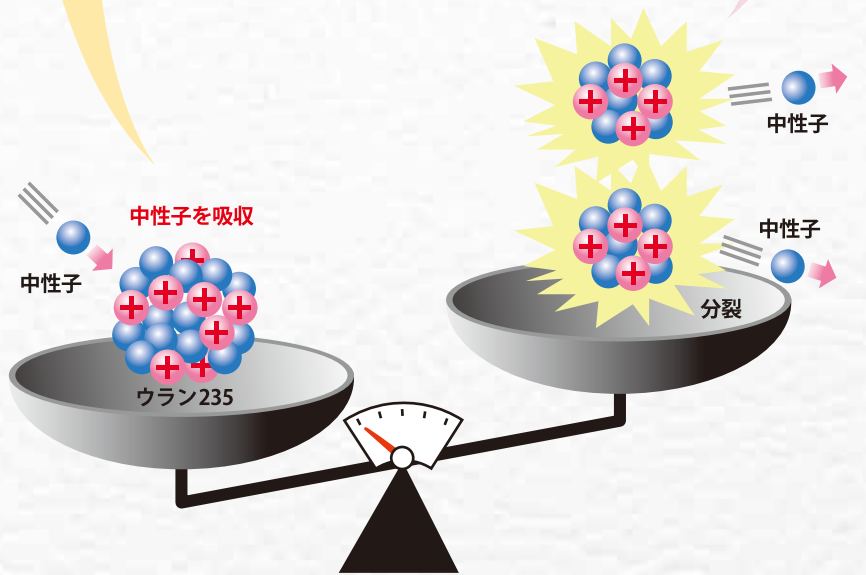
$$\text{ウラン-235 } 235.043\ 931 + \text{中性子 } 1.008\ 665 = 236.052\ 596$$

核分裂後の質量は

$$\text{クリプトン-90 } 89.919\ 528 + \text{バリウム-144 } 143.922\ 955 + \text{中性子 } 1.008\ 665 + \text{中性子 } 1.008\ 665 = 235.859\ 813$$

質量の変化

$$\text{(核分裂前) } 236.052\ 596 - \text{(核分裂後) } 235.859\ 813 \doteq 0.193$$



ウランの核分裂で原子質量がおよそ 0.193 軽くなったことが分かりました。

このとき発生するエネルギーを求めるには、あの有名な式 E=mc² にあてはめて計算すれば良いのです。

$$E=mc^2$$

原子質量差を kg に換算

$$E=0.193 \times 1.66 \times 10^{-27} (\text{kg})$$

$$= 2.84 \times 10^{-11} (\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2)$$

$$= 2.84 \times 10^{-11} \times 6.24 \times 10^{12} (\text{MeV}) \dots \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 \text{ を MeV に変換}$$

$$\doteq 177 \text{ MeV} \dots \text{ウランの核分裂で発生するエネルギー}$$

原子質量 0.193 に等しいエネルギーはおよそ 177 MeV。ウランの核分裂 1 回で 177 MeV のエネルギーが放出されることが分かりました。これは日常生活で扱うエネルギーに比べると、ものすごく大きい値です。例えば、炭素の燃焼で発生するエネルギーは炭素原子 1 つあたり 4 eV ですから、ウランの核分裂で生まれるエネルギーは、その 1 億倍もの大きさなのです。ウラン 1g あたり家庭のお風呂を 4,000 回沸かせる計算になります。

どうして質量が変わるの？

陽子や中性子などは、ばらばらでいる状態よりも、くっ付いている状態の方が安定しています。くっ付いている状態というのは、原子核になっている状態ということです。くっ付いている陽子や中性子の数や、陽子と中性子の割合によっても安定状態が変わります。つまり種類によって原子核はさまざまな安定状態を取ります。その原子核の「安定状態の差」は、その原子核の「もっているエネルギー差」と理解することができます。核分裂によって、もとの原子核よりも安定な新しい原子核が生まれる時、核分裂前後の安定性の差、つまり「持っているエネルギーの差」が、質量減少としてあらわれるのです。