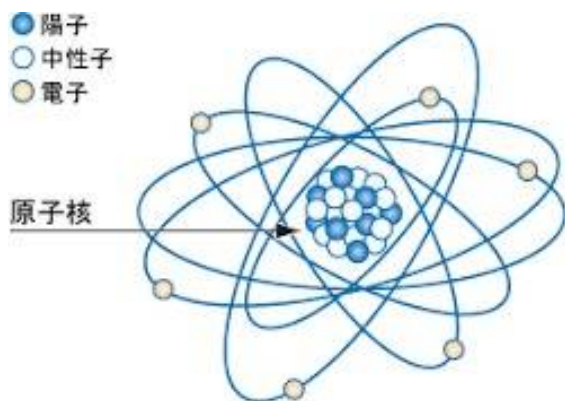


### 3.3 原子力発電

原子力発電所は、ウランの核分裂で発生するエネルギーを電力に変換する施設です。燃料はウラン鉱石から化学的にウランを抽出し、次に核分裂しやすいウラン 235 を遠心分離機で濃縮して作ります。日本には原子力発電設備が 38 基あり、核分裂装置は沸騰水型と加圧水型の 2 種類です。出力 100 万 kW の原子力発電所で使う燃料は年に約 21 トンですが、石炭なら 235 万トンに相当します。

#### 1. 核分裂と原子力発電の仕組み

原子力発電所は、原子が核分裂する際に発生する膨大なエネルギーを水蒸気に変換し、発電機と直結したタービンを回転させて電力を得る施設です。われわれを取り巻くすべての物質は原子でできており、原子は原子核と周囲を動き回る電子でできています。さらに原子核は、図 1 に示すように陽子と中性子からできています。



※原子核の陽子、中性子の数をウランをイメージしやすくするために増加させています。

図 1. 原子の構造

陽子 (+電荷) と電子 (-電荷) は同じ個数ですが、中性子の個数は同じ原子でも異なる同位元素 (アイソトープ) があります。ウランは陽子と電子の数が 92 個ですが、中性子には 142 個、143

個、146 個の 3 種類があり、重さは僅かしか違いませんが、核分裂性が大きく違います。中性子が 143 個のウランは、陽子の数と合せてウラン 235 と呼ばれ、核分裂しやすいのですが、中性子が 146 個のウラン 238 は容易に核分裂しません。自然界にあるウランは、核分裂しにくいウラン 238 の割合が多く、ウラン 235 は 0.7%しか含まれていません。このため原子力発電では、ウラン 235 を 3%~5%に濃縮した低濃縮ウランを使用します。ウ

ラン 235 に中性子を当てると、核分裂が起きて核種と呼ばれる多種類の物質に分解し、同時に新たな 2~3 個の中性子が発生します。この中性子を別のウラン 235 に当てると、また核分裂が起きてさらに 2~3 個の中性子が発生します。原子力発電は連鎖的に核分裂を起こさせ、エネルギーを連続的に発生させて利用する仕組みです。

一方、原子炉内では混入しているウラン 238 が中性子を吸収すると、自然界には存在しないプルトニウムが生まれます。このプルトニウム 239 は核分裂性なので、中性子を吸収すると核分裂してエネルギーを発生します。このように原子炉の中では、ウランとプルトニウムが同時に燃えています。ここで「燃える」というのは核分裂のことで、

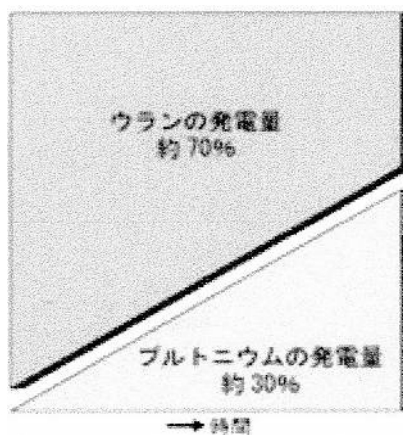


図 2. 原子炉内のウランとプルトニウムの割合

物が燃えるのとは意味が違いますが、核分裂をわかりやすく伝える便宜的な表現です。原子炉でウラン燃料を使用すると、ウランは燃えて少なくなりますが、プル

トニウムが次々に生まれます。したがって図 2 に示すように、時間の経過とともにウランよりプルトニウムの方が多く燃えるようになります。その結果、運転中を平均すれば約 3 割、燃料取替前では約 6 割のエネルギーがプルトニウムの核分裂によるものです。

## 2. 原子炉の種類（軽水炉と他の炉）

原子炉には、減速材と冷却材の種類によって複数の種類があります。減速材は核分裂で発生した高速の中性子のスピードを落とし、次の核分裂を起こしやすい状態にする材料です。中性子の速度が速すぎると、核分裂が連鎖的に起きないからです。冷却材は核分裂によって発生した熱を取り出す役割を果たします。軽水炉は軽水（普通の水）を、減速材と冷却材を兼ねて使用する炉で、日本も含めて世界で最も多く採用されています。軽水炉の他には、減速材に重水素を使う重水炉、黒鉛を使う黒鉛炉などがありますが、商用電力にはあまり使われていません。

軽水炉は発生する熱を外部に取り出す方式によって、三つの型式があります。図 3 に示すのは原子力発電所の設備構成ですが、左側に示す装置が**沸騰水型軽水炉（BWR）**です。核分裂を起こすのは円筒形の原子炉圧力容器で、水を沸騰させて発生した蒸気を外部に送り出し、発電機と直結したタービンを駆動します。なお、原子炉圧力容器は放射線が漏れても外部に拡散しないように、密閉された原子炉格納容器の中に設置にされています。沸騰水型軽水炉（BWR）は、東日本に立地する原子力発電所を中心に多く採用されています。

二番目に多いのは、図 4 に示す**加圧水型（PWR）軽水炉**です。原子炉内の圧力を高くし、水を沸騰させずに高温水で圧

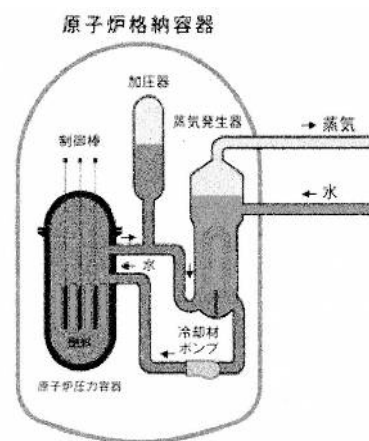


図 4. 加圧水型軽水炉

力容器内の蒸気発生器に送ります。蒸気発生器では、伝熱管を介して蒸気を発生させ、タービンに送り出して発電機を駆動します。原子炉の冷却水と、タービンを回転させる蒸気が別系統になっていて接触しません。日本では、西日本に立地する原子力発電所に多く採用されています。

三番目の型式は、**改良沸騰水型軽水炉（ABWR）**と呼ばれる方式です。沸騰水型の冷却水再循環ポンプを、原子炉圧力容器の内部に納めて、格納容器を小型にしています。また、運

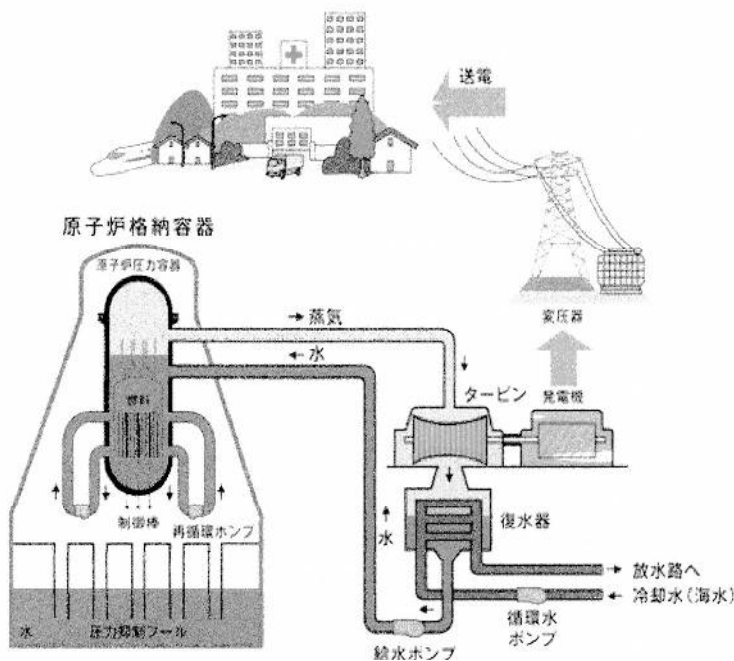


図 3. 沸騰水型軽水炉（BWR）の原子力発電所

出典：「原子力・エネルギー図面集 2014」

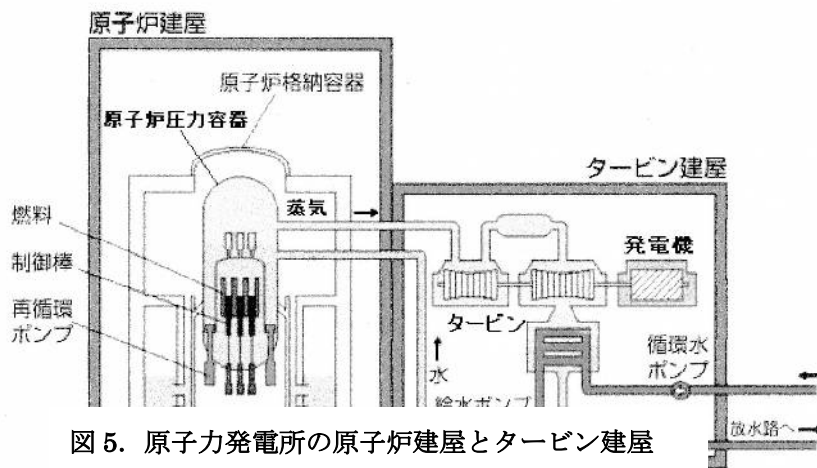


図 5. 原子力発電所の原子炉建屋とタービン建屋

出典：JパワーHP

転性と操作性を高めて作業者が受ける放射線量を低減させ、緊急時の安全性を高めています。

### 3. 原子炉の大きさと建屋

核反応が起きる反応容器の大きさは、沸騰水型で発電出力が 100 万 kW クラスの場合、高さが約 22m で内径が約 6.5m です。加圧水型では 100 万 kW クラスで、高さが約 13m で内径が約 4.5m です。反応容器は鋼鉄製で、ステンレス鋼が内張りされています。高圧に耐える必要があるため、反応容器の厚さは 15～30 センチもあります。図 5 に示すように、原子炉反応容器は原子炉格納容器とともに、原子炉建屋に設置されています。

一方、タービンを回転させて発電機を駆動する設備は、原子炉建屋と別のタービン建屋に設置されています。タービン建屋で発電機を駆動し、圧力と温度が下がった蒸気は復水器で冷やされ、凝縮して沸騰水型なら原子力压力容器に、加圧水型なら蒸気発生器に戻ります。復水器で温度が上がった海水は、火力発電の場合と同様に放水路を通過して海中に放流されます。タービン駆動の蒸気は温度が 260℃から 280℃、圧力は 50 気圧から 70

気圧です。火力発電の場合は、500℃以上で約 250 気圧ですから、それより低い温度と圧力です。

### 4. 原子炉の燃料棒と制御棒

原子炉の燃料は、ウラン 235 を 3～5%含む低濃縮ウランです。これを酸化物（セラミック）にして、図 6 に示すような縦横 1cm 程度の円柱状に焼き固めた「燃料ペレット」が最小単位です。燃料ペレットを「被覆管」と呼ばれる特殊合金製のサヤに入れたのが「燃料棒」で、燃料棒を束ねたのが「燃料集合体」です。1 個の燃料集合体を構成する燃料棒は、沸騰水型なら 50～80 本、加圧水型なら 180～270 本です。

核分裂は燃料棒の中で起こるので、燃料集合体の間に入れる制御棒を上下に動かして反応を制御します。制御棒は中性子を吸収し、しかも自身が核分裂を起こさない物質として炭化ホウ素やカドミウム合金が使われています。この制御棒を燃料集合体の中に深く挿入すると、中性子の大部分が制御棒に吸い取られ、核分裂が起こらなくなります。一方、制御棒を抜き取っていくと、中性子が働いて核分裂が開始され、再び核分裂の連鎖反応が起こります。沸騰水型の原子炉の場合、制御棒は図 6 の下部に示すように、平らな板 2 枚を十字形に組み合わせた形をしており、4 個の燃料集合体に対して 1 個が挿入されています。制御棒を押し込むには、沸騰水型は高圧で蓄えてある水の力を利用します。

### 5. 核燃料の製造方法

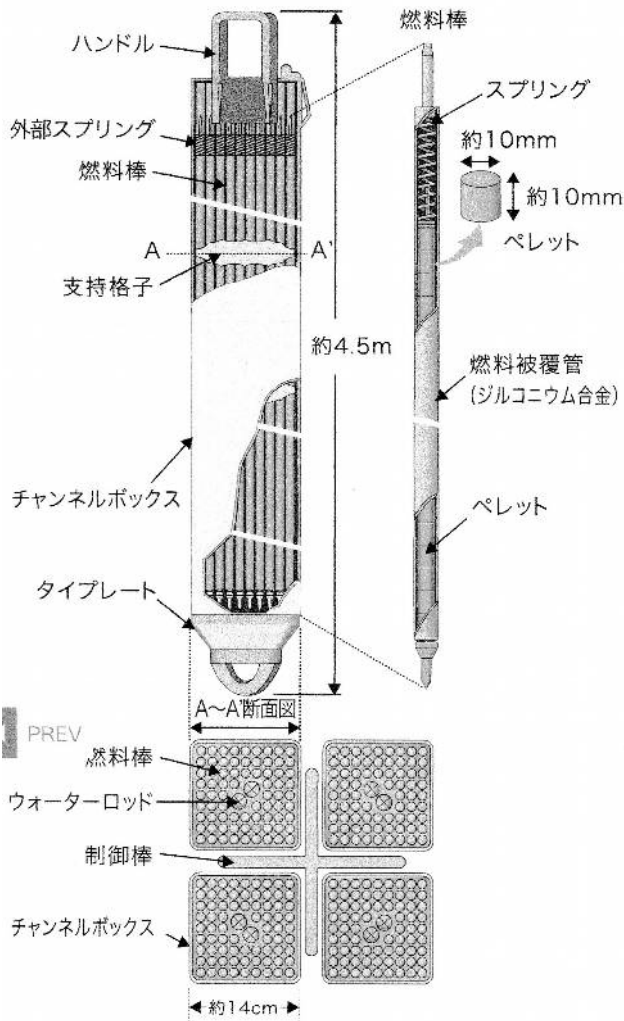


図 6. 原子炉の燃料棒と制御棒  
引用：電気事業連合会 HP

原子力発電の燃料はウランですが、前述のように天然のウランには、核分裂しやすいウラン 235 が 0.7%しか含まれていないので、3%~5%に濃縮する必要があります。濃縮する工程には、採掘の現場近くで行われるイエローケーキ製造段階、転換工場で行われる六フッ化ウラン転換段階、濃縮工場で行われる濃縮段階があります。イエローケーキ製造段階では、採掘されたウラン鉱石を細粉化し、硫酸でウランを溶解して六価ウランの浸出液にします。次に溶媒抽出、イオン交換、または沈殿法のような化学的方法で不純物を除きます。こうしてウラン含有率を 60%ぐらいに高めたのが、

イエローケーキ（ウラン精鉱）と呼ばれる黄色の粉末です。イエローケーキは、ドラム缶に詰められて転換工場へ出荷されます。輸出入はイエローケーキの状態で行われますが、価格には含有するウラン濃度が反映されます。

転換工場ではイエローケーキを硝酸で溶解し、TBP（リン酸トリブチル）などを用いて不純物を取り除いた後、脱硝して三酸化ウランを生成させます。三酸化ウランは水素を用いて還元し、二酸化ウランにした後、流動床などの装置でフッ化水素と反応させ、四フッ化ウランにします。次にフレームタワーと呼ばれる縦型反応器を用いてフッ素と反応させ、高純度の六フッ化ウランガスにします。転換工場の最終製品は、冷却して固化した六フッ化ウランです。荷姿は 48Y シリンダーと呼ばれる直径が約 1.4m、長さが約 3.8m の鋼製円筒容器で、濃縮工場に出荷されます。なお、日本には稼働しているウラン鉱山も転換工場も存在しません。

図 7 に濃縮工場の処理工程を示します。48Y シリンダーに封入された六フッ化ウランは、発生槽でガス化され、カスケード状に配列された遠心分離機に送入されます。図 8 が遠心分離機の構造で、内部では回転胴が超高速で回転しています。送入された六フッ化ウランガスは、遠心力で回転胴に押し付けられ、重量がウラン 235 より僅かに大きいウラン 238 が外側に移動します。そこでウラン 235 の割合が減少した六フッ化ウランを、遠心分離機の上部から劣化ウランとして取り出します。一方、ウラン 235 は中心部に残りやすいので、ウラン 235 の割合が増加した六フッ化ウランを低濃縮ウランとして取り出します。ウラン 235 とウラン 238 は重量の差が僅かなので、1 回の遠心分離では少ししか濃縮できません。このため、多数の遠心分離機を並べ、徐々に濃縮を重ねてウラン 235 の濃度を高めます。なお、ウラン 235 の濃度

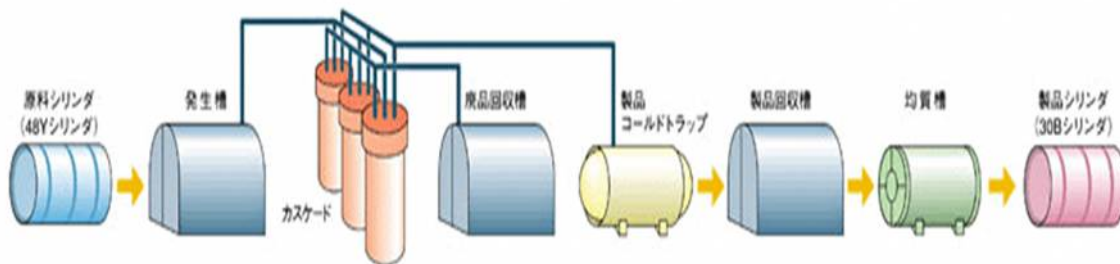


図 7.ウラン濃縮工場の処理工程 出典：日本原燃 HP

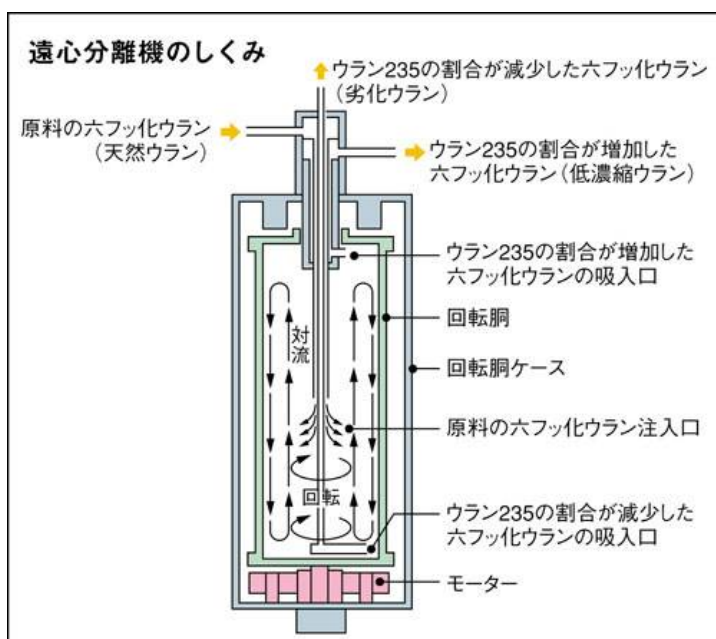


図 8. ウラン遠心分離機の構造 (出典：日本原燃 HP)

が 0.7%以上で 20%以下なら低濃縮ウラン、20%以上だと高濃縮ウランと呼ばれます。遠心分離機から排出されるウラン 235 の割合が減少した劣化ウランは、冷却して気体から固体に変換し廃品回収

槽に貯槽します。一方、製品の低濃縮ウランは、製品コールドトラップで冷却して気体から固体に変換します。続く均質槽では低濃縮ウランを温めて液体にし、均一化した後、気体にして製品シリンダーに貯蔵します。

ウランの核分裂によって得られるエネルギーは、ウラン 235 の 1 グラムで石炭なら約 3 トン、石油なら約 2 トンに相当します。したがって、100 万 kW の発電所が 1 年間に消費する燃料は、濃縮ウランなら 21 トンですが、天然ガスなら 95 万トン、石油なら 155 万トン、石炭なら 235 万トンに相当します。表 1 に日本の原子力発電所を示します。

(おわり)

参考：日本原燃 HP、電気事業連合会 HP

表 1. 日本の原子力発電所

会社名	発電炉名	炉型	出力 万 kW	運転 開始	運転 年数	稼動状況(2019年3月)	
						現状	停止理由
日本原電	東海第二	BWR	110.0	1978.11	40	停止中	安全対策工事
	敦賀 2	PWR	116.0	1987.02	32	停止中	漏洩燃料調査
北海道 電力	泊 1	PWR	57.9	1989.06	29	停止中	定期検査
	泊 2	PWR	57.9	1991.04	27	停止中	定期検査
	泊 3	PWR	91.2	2009.12	9	停止中	定期検査

表1. 日本の原子力発電所(続き)

会社名	発電炉名	炉型	出力 万 kW	運転 開始	運転 年数	稼動状況(2019年3月)	
						現状	停止理由
東北電力	女川 2	BWR	82.5	1995.07	23	停止中	定期検査
	女川 3	BWR	82.5	2002.01	17	停止中	東北地震
	東通 1	BWR	110.0	2005.12	13	停止中	定期検査
東京電力	福島第二-1	BWR	110.0	1982.04	36	停止中	東北地震
	福島第二-2	BWR	110.0	1984.02	35	停止中	東北地震
	福島第二-3	BWR	110.0	1985.06	33	停止中	東北地震
	福島第二-4	BWR	110.0	1987.08	31	停止中	東北地震
	柏崎刈羽 1	BWR	110.0	1985.09	33	停止中	定期検査
	柏崎刈羽 2	BWR	110.0	1990.09	28	停止中	トラブル
	柏崎刈羽 3	BWR	110.0	1993.08	25	停止中	新潟地震
	柏崎刈羽 4	BWR	110.0	1994.08	24	停止中	新潟地震
	柏崎刈羽 5	BWR	110.0	1990.04	28	停止中	定期検査
	柏崎刈羽 6	ABWR	135.6	1996.11	22	停止中	定期検査
柏崎刈羽 7	ABWR	135.6	1997.07	21	停止中	定期検査	
中部電力	浜岡 3	BWR	110.0	1987.08	31	停止中	定期検査
	浜岡 4	BWR	113.7	1993.09	25	停止中	通産大臣要請
	浜岡 5	ABWR	138.0	2005.01	14	停止中	通産大臣要請
北陸電力	志賀 1	BWR	54.0	1993.07	25	停止中	ポンプ軸部取替
	志賀 2	ABWR	120.6	2006.03	14	停止中	定期検査
関西電力	美浜 3	PWR	82.6	1976.12	42	停止中	定期検査
	高浜 1	PWR	82.6	1974.11	44	停止中	定期検査
	高浜 2	PWR	82.6	1975.11	43	停止中	定期検査
	高浜 3	PWR	87.0	1985.01	34	稼動中	
	高浜 4	PWR	87.0	1985.06	33	稼動中	
	大飯 3	PWR	118.0	1991.12	27	稼動中	
	大飯 4	PWR	118.0	1993.02	26	稼動中	
中国電力	島根 2	BWR	82.0	1989.02	30	停止中	定期検査
四国電力	伊方 3	PWR	89.0	1994.12	24	稼動中	
九州電力	玄海 2	PWR	55.9	1981	37	廃炉	
	玄海 3	PWR	118.0	1994.03	24	稼動中	
	玄海 4	PWR	118.0	1997.07	21	稼動中	
	川内 1	PWR	89.0	1984.07	34	稼動中	
	川内 2	PWR	89.0	1985.11	33	稼動中	
小計	38 基(稼動 9 基)		3,804.2				