

## 第1章 原子力エネルギー

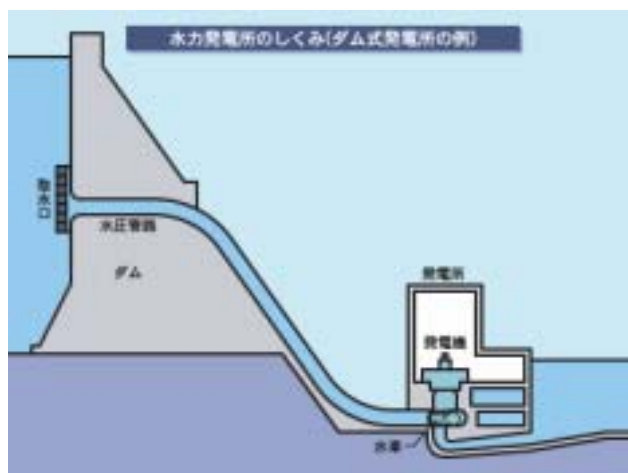
### 1-1 核エネルギー

#### (1) 核エネルギーで燃える太陽

石油を燃やせば熱や光が出てくる。熱や光はそれぞれエネルギーの一つの形態である。高いところから落下している物体が持つ運動のエネルギーもエネルギーの一形態である。静止した物体はエネルギーを持たないように見えるが、落下すると運動エネルギーを持つようになることから、重力場の中にかくれたエネルギーを持っている筈である。これを潜在的エネルギーと呼ぶ。重力場のように、力が働く「場」の影響を受けている物は、潜在的エネルギーを持っているのである。

エネルギーは一つの形態から他の形態に移り変わる。水力発電では、図 1.1.1 のように、高いところにある水の潜在的エネルギーが水の落下により運動エネルギーに代わり、次に水の運動エネルギーが発電機でタービンの回転運動エネルギーに変わり、そして電気エネルギーに変わる。電気エネルギーはモーターを回せば電車の運動エネルギーに変わり、お湯をわかせば熱エネルギーに変わる。では何が水を高いところにあげたかと言えば、太陽エネルギーが地表や海面の水を温め、蒸発させて雲を作り、雨となり、山や湖に降ったからである。太陽エネルギーのもと、後に述べる核エネルギーである。太陽光発電も、風力発電も、波力発電も、バイオマスエネルギーも、はては化石エネルギーも、もとをたざせば太陽の中で起こる核反応エネルギーから来ている。

図 1.1.1 水力発電の原理



[ 出典 ] 中部電力ホームページ

#### (2) 化学反応のエネルギー

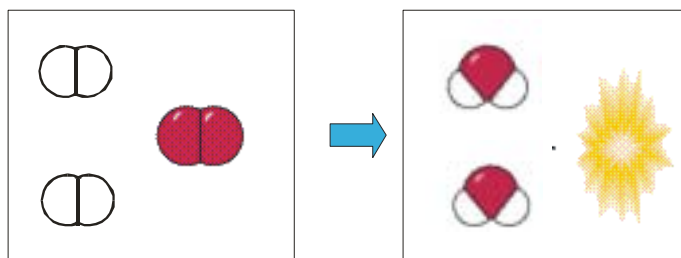
石油を燃やすとエネルギーが出てくるのは、化学反応が起こるからである。化学反応が起こると物質を構成する原子の結合の仕方、つまり分子の構成が変わる。石油の分子は炭

素や水素の原子が集まってできており、燃焼により空気中の酸素分子との化学反応によって二酸化炭素分子と水の分子ができる。原子や分子は、プラスの電荷を持つ原子核とマイナスの電荷を持つ電子が、静電的な力（クーロン力と呼ばれる）によって結合してできたものである。原子や分子の大きさはおよそ一億分の一センチメートルであり、原子核はそれらのおよそ十万分の一の大きさである。原子や分子を野球場の大きさとするれば、原子核はその中にあるごま粒程度の大きさしかない。電子はもっと小さい。

さて、化学反応が起こるとどこからエネルギーが出てくるのであろうか。化学反応が起こると、反応の前と後では分子が同じでないために、原子核や電子の組み合わせ、すなわち原子核と電子の位置関係が変わることになる。このため、反応の前後では潜在的エネルギーの総和が変化する。

図 1.1.2 は、水素分子と酸素分子が化学反応を起こして水分子ができると同時にエネルギーが発生する様子を示している。この場合水素分子は白玉で表した水素原子が二つ結合してできたものであり、酸素分子も同様に色玉で表した酸素原子が二つ結合してできている。

図 1.1.2 化学反応の例



[ 出典 ] 著者作成

化学反応の後、分子に閉じ込められていた潜在的エネルギーが余って解放される場合、その化学反応は発熱反応と呼ばれる。石油の燃焼はその例である。逆に、エネルギーを外から加えなければ起こらない反応を吸熱反応と言う。水を電気分解して水素と酸素に分ける反応は吸熱反応であり、それを起こそうと思えば電気エネルギーを加える必要がある。その逆の水素と酸素が水に変わる化学反応はもちろん発熱反応である。

### ( 3 ) 核反応のエネルギーと原子力発電

次は分子の十万分の一の世界で起こる核反応に目を移そう。原子核はプラスの電荷を持つ陽子と電荷を持たない中性子が核力と呼ばれる力で結合したものである。そして、陽子と中性子が持つ潜在的エネルギーの大きさは、原子や分子の静電場の中で原子核や電子が持っていた潜在的エネルギーのおよそ百万倍もある。このため、核反応が起これば化学反応の何百万倍もの核エネルギーが出て来ることになる。

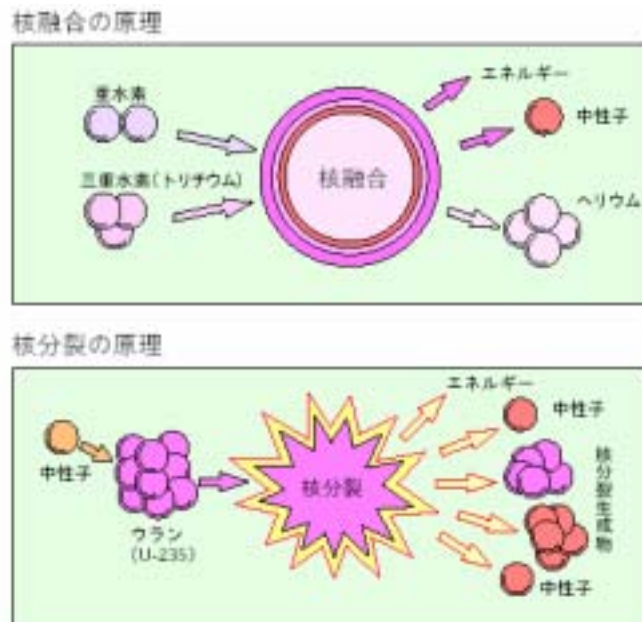
化学反応では原子や分子の組み合わせが変わることにより、発熱反応や吸熱反応が起こ

った。核反応の場合は、核の中の陽子や中性子の組み合わせが変わることによりやはり発熱反応や吸熱反応が起こる。発熱反応では核から潜在的エネルギーが放出され、吸熱反応では外から加えるエネルギーが核に蓄えられるのである。

核反応は、原子核同士を衝突させることにより起こすことができる。しかし原子核はプラスの電荷を持っていて互いの間に強い静電反発力が働くために、衝突させようとしてもほとんどの場合すれ違うだけで、なかなか核反応が起こらない。ところが原子核に中性子をぶつけると、中性子は電荷を持たないので原子核の中に簡単に入りこむことが出来て、核反応を起こす。なお、核反応を起こさずに散乱される中性子や、通りぬける中性子もある。

発熱核反応には、図 1.1.3 に描いたように、軽い原子核同士が衝突して重い原子核ができる核融合反応と、重い原子核がいくつかの核に分裂する核分裂反応がある。前者については、核融合炉のところで述べることにして、ここでは核分裂反応をとりあげる。核分裂反応は中性子が重い原子核に吸収されて起こる核反応であり、1938年にドイツのオットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンによって発見された。

図 1.1.3 核融合反応と核分裂反応



[ 出典 ] 電気事業連合会「原子力」図面集

原子力発電では核分裂反応が利用される。その燃料として利用されている重い原子核は、質量数が 235 のウランである。ウラン 235 は 92 個の陽子と 143 個の中性子が核力で結合している。ウランには質量数が 235 以外の同位体（陽子の数が同じで、中性子の数だけが異なる原子核）がいくつかあるが、ウラン 235 が最も核分裂反応を起こしやすい。しかし、天然のウランの中にはウラン 235 はわずか 0.7%しかなく、残りの約 99.3%がウラン 238

で、ウラン 234 がごく微量含まれる。このため、原子炉の燃料としては、天然ウランの中のウラン 235 の濃度を高くした濃縮ウランが用いられる。

原子炉でウラン燃料を燃やせば、燃料に含まれるウラン 238 が中性子を吸収してウラン 239 に変わり、続いて自然崩壊してプルトニウムに変わる。プルトニウムは核分裂反応を起こしやすいので、燃え滓からこれを取り出して再び燃料にすることができる。このことを利用すれば、燃料を燃やしながらか燃料を生産するという、魔法のようなシステムができあがる。それについては 1 - 3 ( 2 ) の高速増殖炉のところで解説する。

ウラン 235 に中性子が吸収されて核分裂反応が起こると、ウランは 2 個以上の原子核に分裂し、同時に中性子も放出される。このとき原子核の中に閉じ込められていた大きな潜在エネルギーが解放されて出て来る。ウラン 1 グラムの核分裂反応で得られるエネルギーは、石油 2000 リットルの燃焼エネルギーに相当する。原子炉は、少ない燃料で膨大なエネルギーを出すことができるのである。

## 1 - 2 原子力発電のしくみと歴史

### ( 1 ) 核分裂反応と発電

化学反応では熱や光のエネルギーが出てきた。実は化学反応で出てくるエネルギーは反応でできる分子の運動エネルギーと光のエネルギーであり、熱エネルギーはそれらが変換されたものである。核分裂反応ではエネルギーは核分裂生成物と中性子の運動エネルギーの形で出て来る。原子力発電ではその運動エネルギーが原子炉の炉心の燃料棒や冷却水に吸収されて、熱エネルギーに変わる。最終的には加熱された冷却水が高温の蒸気になり、蒸気でタービンを回して発電するのである。蒸気で発電するところは火力発電の仕組みと同じである。原子力発電で熱エネルギーから電気エネルギーに変換される効率は 33% 程度であり、残りの熱エネルギーは廃熱となり環境に放出される。

核分裂反応で 1 ワットの電力を出すには、毎秒 100 億回以上の核分裂反応を起こさなければならない。一方、原子力発電所の電気出力は 100 万キロワットであるから、原子炉の中ではさらにその 10 億倍から 100 億倍の核分裂反応が起こっていることになる。この数字を見ると驚くかも知れないが、実はウラン燃料としては毎秒 1 グラム程度が燃えるにすぎない。出力 100 万キロワットの原子炉を一年間運転すれば約 30 トンの濃縮ウランが消費される。これに対して同じ出力の火力発電所を運転する場合、石油ならば 140 万キロリットル、石炭ならば 230 万トンが燃やされることになる。

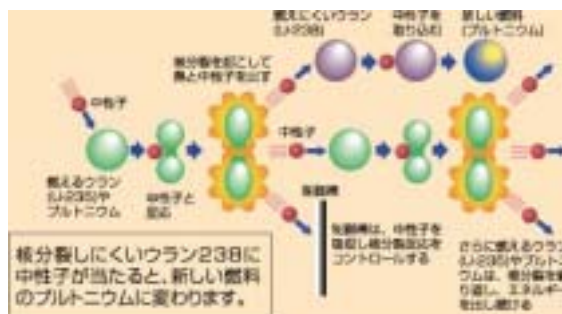
### ( 2 ) 原子力発電所では継続して核分裂反応が起こっている

原子力発電で電気を続けて出すには、核分裂反応が自動的に継続して起こる仕掛けが必要である。普通の燃焼で化学反応を安定に持続させるためには、エネルギーの収支をバランスさせると同時に、燃料供給と灰の排出をバランスさせる装置が必要である。要はエネルギーと“もの”(燃料と灰)の流れを適切に「制御」しなければ、火が消えてしまったり逆に爆発が起こったりするのである。例えば火力発電では、燃料と空気を一定の割合で供給しながら、排ガスと灰の排出を調節している。これは物量の制御に相当する。エネルギーの制御の方は、燃焼で発生した熱があとから供給されてくる燃料を着火に十分な温度ま

で加熱することでバランスさせている。はじめは冷たくて燃えない燃料でも、一旦燃え始めるとその熱で温度が上がり、持続的に燃えるのである。この状態を自己点火と言う。このような反応維持に必要な条件は、化学反応に基づく燃焼では必ず満たされるし、後述するように核融合炉の炉心もこれに近い条件を満たす。

原子炉の場合はどうであろうか。実はこれだけは例外であって、反応維持に必要な条件にエネルギーの収支は関係していないし、またそのため燃料の収支も関係していない。前節で述べたように、核分裂反応は中性子が引き起こす。このとき、1個の中性子がウランと核反応を起こすと、核分裂生成物と数個の中性子が出て来る。これらの中性子には、近くの物質に捕獲されて消滅したり、炉心から逃げ出したりするものがある一方、ウランと核反応を起こして中性子の数を増やすものもある。消える中性子と増える中性子の数がちょうどバランスして、中性子の数が変わらなくなった状態を臨界（critical）状態という。臨界状態を越えると、核分裂反応が起こる毎に中性子の数が増え続け、それとともにエネルギーも出る。このように、次から次へと核分裂反応が起こる仕組みを連鎖反応と呼ぶ。図 1.2.1 はこれを模式的に表したものである。核分裂物質を一定の値を超える量まで集めると、臨界状態に達して核分裂連鎖反応が起こり始める。この量のことを臨界量（critical mass）と呼ぶ。

図 1.2.1 核分裂連鎖反応



[ 出典 ] 福井原子力センターあっとほうむ

このような核分裂連鎖反応は、アフリカのガボン共和国のオクロウラン鉱床で約 17 億年前に起きていたことが、1972 年に発見された。砂岩と泥岩の境界に形成された高品位のウラン鉱床で、豊富な水の存在と核分裂反応を抑制する中性子吸収元素が少なかったことが、天然原子炉が成立しえた原因である。そこでは、臨界条件達成による原子炉活動の開始、水温上昇、水の蒸発、原子炉停止、周辺温度低下、水の再集積、臨界状態再達成というサイクルが数十万年にわたり繰り返されたと考えられている。天然原子炉の存在は、1956 年に当時米国アーカンソー大学に務めていた故黒田和夫博士が原子炉理論を使って予言したものであり、日本人による大きな発見の一つである。なお、核分裂反応によって生じた半減期 24000 年のプルトニウムは、同じ地層中にとどまったまま崩壊したことが確認されている。オクロ鉱山の岩盤には、放射性物質を隔離・保存する能力もあったのである。

エネルギー利用の立場からは、核分裂連鎖反応が爆発的に起こるようでは使い物にならない。このため、連鎖反応を制御しながら必要量だけ起こす方法が考えられた。それが原

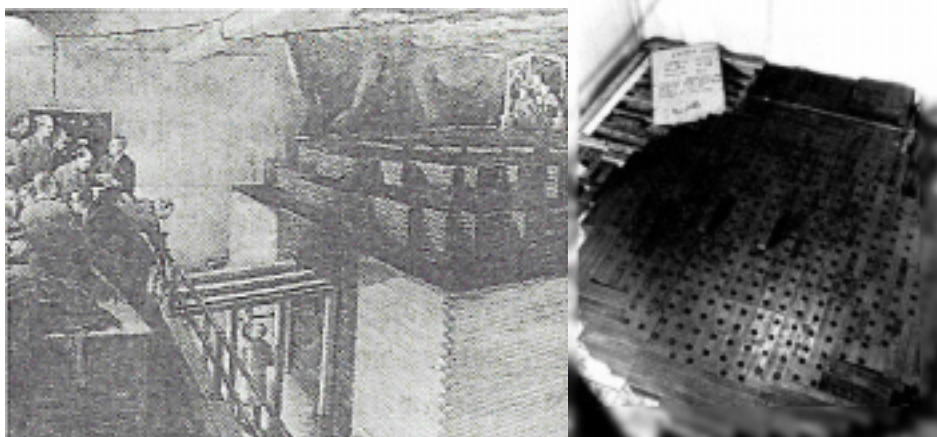


子炉である。前述のように、化学的な燃焼は燃料と酸素の流入量を調節することにより制御され、また燃料の制御なしに燃焼を制御することは極めて難しい。原子炉の場合は、反応は中性子によって起こるので、燃料は固定したままで核分裂反応を起こす中性子の数を調節して連鎖反応を制御するのである。それには、多数の燃料の間に中性子を吸収する物体を出し入れして、中性子の数を制御することで連鎖反応を制御する。この物体を制御棒と称する。制御棒が一杯に挿入された状態では連鎖反応は停止しており、制御棒を引き上げると連鎖反応が始まるのである。こうして、何年も使えるだけの燃料を積んでいても、中性子の数を制御するだけで反応を完全に停止することも、望み通りの出力で燃やすこともできるのが原子炉である。

### (3) 原子力発電の歴史

世界で初めての原子炉は、ハンガリー生まれの米国人レオ・ジラードのアイデアをもとに、イタリア生まれの米国人エンリコ・フェルミ(1938年ノーベル物理学賞受賞)をリーダーとするプロジェクトチームが実現した。この原子炉はシカゴ大学構内に建設され、シカゴパイル1(CP-1)と呼ばれている。図1.2.2はCP-1の写真である。パイル(積み重ねること)という名の由来は、小さなウラン燃料を入れた黒鉛を積み重ねたところから来ている。このとき使ったウランは天然ウランであり、ウラン235は0.7%しか含まれていない。核分裂反応で出てくる中性子はそのままのスピードでは次の反応を起こしにくいので減速してやらなければならない。その目的で減速材として働く黒鉛の中を通してスピードを落としたのである。制御棒としては、中性子の吸収効率が高いカドミウムの棒が使われた。

図 1.2.2 シカゴパイル CP-1 の絵(左) シカゴパイル CP-1 の写真(右)



[ 出典 ] 経済産業省原子力のページ [ 出典 ] Paks Nuclear Power Plant ホームページ

連鎖反応が確認されて人類初の原子力の灯がともったのは、1942年12月2日午後3時30分のことであった。このとき、引き上げられた制御棒はロープでつなぎ止められていた。もし連鎖反応の進行が速すぎるときには、人がロープを斧で切って制御棒を落とす算段で

あったが、その心配はなかった。現在でも原子炉を緊急停止することをスクラム(SCRAM)と言い、これは安全制御を確保する斧を持った人(Safety Control Reserve Axed Man)を意味する。なお、日本最初の原子力の灯をともしたのは東海村の日本原子力研究所にある研究用原子炉 JRR-1 であり、1957 年 8 月 27 日のことであった。さらに 6 年後の 1963 年 10 月 26 日には、日本原子力研究所の動力試験炉 JPDR によって日本最初の原子力発電が行われている。我が国は 1956 年 10 月 26 日に国際原子力機関 (IAEA) 憲章に調印しており、二つのできごとを記念して 10 月 26 日は「原子力の日」に制定されている。

世界で初めて商業用原子炉の営業を始めたのはイギリスで、1956 年のことである。このときの原子炉は中性子の吸収が少ない黒鉛を減速材とし、炭酸ガスを冷却材とするコールダーホール型黒鉛減速・炭酸ガス冷却炉(GCR: Gas Cooled Reactor)と呼ばれるものであった。そして、わが国では日本原子力発電株式会社東海発電所が GCR を導入して、1966 年 7 月に最初の商業用原子力発電所の営業運転を開始した。この原子炉は 30 年にわたる使命を終えて 1998 年に発電を停止した。

シカゴパイルのあと、原子炉は格段に発達して種類も著しく増えた。設計された原子炉は 900 種類にもなると言われる。現在原子力発電用に最も多く使われている原子炉は、核分裂反応で出てくる中性子を減速材で減速して熱中性子(サーマルニュートロン: thermal neutron)に変えるタイプの熱中性子動力炉(サーマルリアクター: thermal reactor)である。減速された中性子は、普通の気体分子のように炉心の燃料、減速材、冷却材の中を飛び回る。こうしたガス様の中性には、気体と同じように「温度」があり、常温に近い温度を持つ中性子の集まりを熱中性子と言うのである。これに対して、中性子を減速せず高速のまま核分裂反応を起こさせるタイプの原子炉もある。このタイプの原子炉は高速炉と呼ばれている。熱中性子のスピードはおよそ毎秒 2 キロメートル、高速中性子のスピードはその約一万倍であり、一秒間に地球を一周する速さである。

原子炉の炉心から熱を取り出す冷却材としては、軽水、重水、炭酸ガス、ヘリウムガス、液体金属ナトリウムなどがある。軽水とは普通の水であって、中性子を吸収する性質があるため臨界状態の達成が困難になる。このため、燃料の方で核分裂反応を起こしやすくする必要があり、軽水を冷却材に使う軽水炉では、ウラン 235 の濃度を約 3%以上に高めている。これを濃縮ウランと言い、精製するには高度な技術と大がかりな設備、それに大きな電力が必要である。一方重水は水の一つであるが中性子をほとんど吸収しない。このため重水を冷却材として用いる重水炉では天然ウラン燃料でも臨界状態に達するが、重水は軽水に比べてはるかに高価であるために、発電コストがあがる。

炭酸ガスやヘリウムを冷却材として使う原子炉は、ガス冷却炉と呼ばれる。炭酸ガスはヘリウムガスよりも安価で、熱を伝え、運ぶ能力が優れているが、高温で化学的に活性となるために使用温度が制限される。これに対してヘリウムガスは不活性であり、摂氏 900 度を越える高温でも燃料や構造材と化学反応を起こさないため、非常に高い温度の熱を運ぶのに適している。

ナトリウムは高速炉で使われ、高温のナトリウムを熱交換器に通して冷却水を高温蒸気に変える。冷却効率が高いが、水と触れると激しく燃えることや、熔融状態を保つために原子炉を止めても加熱し続けなければならない。

## 1 - 3 いろいろな原子炉

### (1) 原子炉の種類

原子炉には多数の種類がある。ここでは商業目的の原子力発電で使われる熱中性子動力炉と、研究開発中の高速増殖炉および高温ガス炉を取り上げて、その仕組みについて解説する。熱中性子動力炉には、軽水、すなわち普通の水を冷却材に使うものと重水を冷却材に使うもの、そして炭酸ガスを冷却材に使うものがある。さらに軽水や重水を沸騰しないように高い気圧に保ちながら運転する加圧水型原子炉と、沸騰させながら運転する沸騰水型原子炉がある。

#### 加圧水型軽水炉 (PWR)

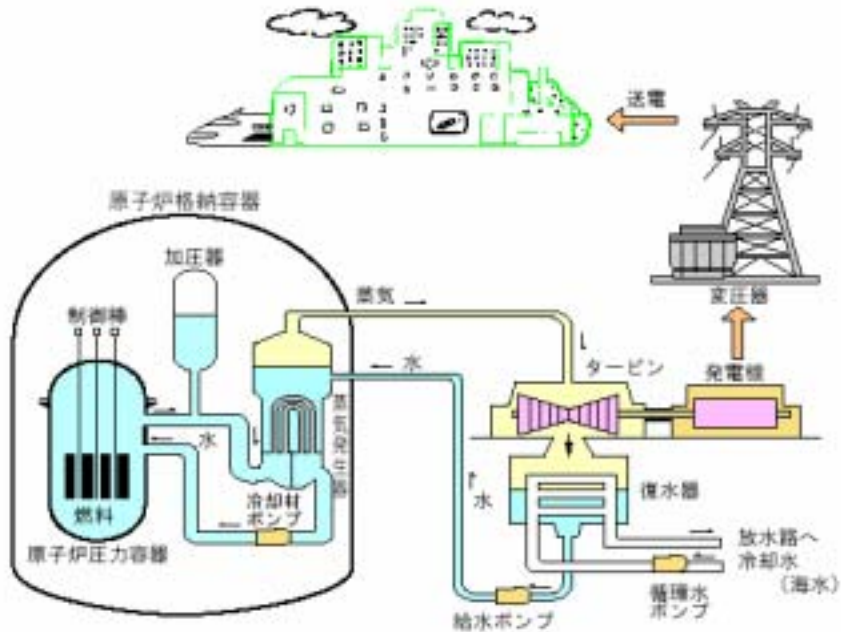
図 1.3.1 は加圧水型軽水炉 (PWR: Pressurized Water Reactor) の説明図である。この原子炉は米国のウエスティングハウス (Westinghouse) 社により開発された。炉心の燃料には、ウラン 235 を濃度 3 ~ 5% に濃縮した低濃縮ウランが用いられる。燃料は高密度に固めた二酸化ウランの円柱状の塊 (ペレットと呼ばれる) にされ、ペレットはジルコニウム合金でできた燃料被覆管と呼ばれる内径 1~2 センチメートルのパイプ内に積み重ねられる。こうしてできたものが燃料棒である。多数の燃料棒を配列したものを燃料集合体と言い、これが分厚いステンレス鋼の内張りのできた原子炉圧力容器の中におさまられている。原子炉の出力は、燃料棒の隙間に中性子を吸収する制御棒を出し入れして制御する。冷却水は原子炉圧力容器の中を流れて燃料棒を冷やしながらエネルギーを集める。水は中性子減速材の働きもする。このタイプの炉では水がないと中性子が熱中性子まで減速されないため、連鎖反応が起こりにくくなる。

ところで、蒸気タービンをまわして発電機で熱エネルギーを電気エネルギーに変換する場合、エネルギー変換効率は蒸気の温度が高いほど高くできる。水は大気圧では摂氏約 100 度で沸騰してしまうが、沸騰温度をもっと上げたければ水の圧力を上げればよい。軽水炉では加圧器で水圧を 15 メガパスカル (150 気圧) まで上げて、摂氏 320 度以上まで沸騰温度を上げている。この温度ではエネルギー変換効率は 33% になるが、それでも火力発電の 40% ~ 50% には及ばない。

加圧水型原子炉の冷却水は図 1.3.1 に見られるように二つの系統に分かれている。一つ目の系統を流れる冷却水は、原子炉の炉心で加熱されたあと蒸気発生器 (別名熱交換機) に入り、そこで二つ目の系統を流れる別の冷却水を加熱して蒸気を発生させたあと、再び炉心に戻って自分自身が加熱される。このループを一次系、中を流れる冷却水を一次系冷却水と呼ぶ。一次系冷却水は放射能をおびている。二つ目の系統を流れる冷却水は二次系冷却水であり、蒸気発生器で高温蒸気になってタービンを回して発電し、そのあと復水器で水に戻り、再び蒸気発生器で加熱される。復水器は蒸気を冷やして凝結させる装置であり、ここでも別の冷却水によって熱が取り出され、原子炉建家の外に運ばれて環境に放出



図 1.3.1 加圧水型原子炉 ( PWR ) のしくみ



[ 出典 ] 日本原子力文化振興財団ホームページ

される。この冷却水として海水が用いられる場合もある。

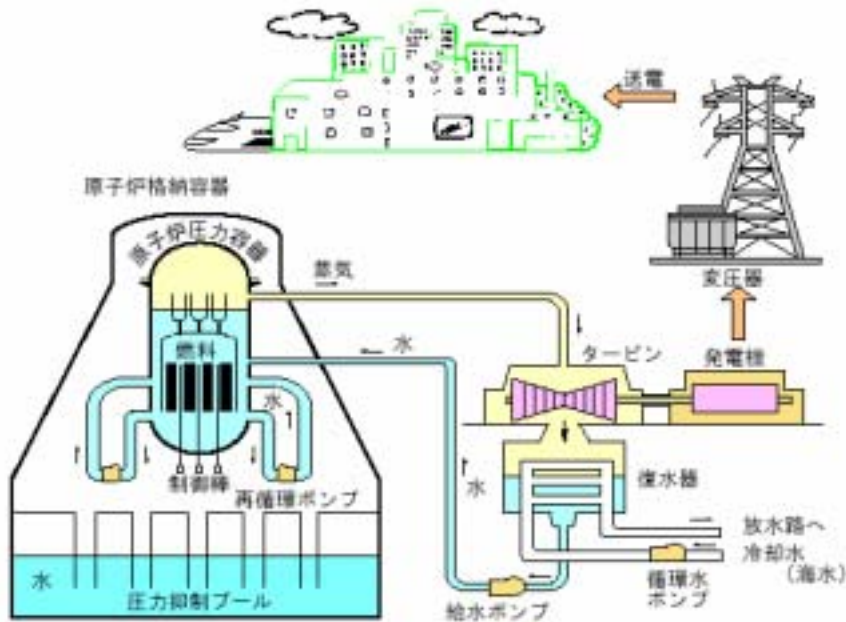
加圧水型原子炉では原子炉圧力容器、加圧器、蒸気発生器が大きな金属容器に収納されている。この容器は原子炉格納容器と呼ばれ、放射性物質の漏洩を防止する壁の役目も果たす。加圧水型原子炉は、蒸気発生器で一次系冷却水が二次系冷却水と完全に分離されているため、原子炉格納容器の外に放射化された冷却水が出てこないという利点を持つ。その反面、複雑な構造をもつ蒸気発生器が必要となる。

燃料やそれが燃えてできる使用済燃料はペレットとして、さらに燃料被覆管、原子炉圧力容器、原子炉格納容器、原子炉建家からなる多重の壁で閉じ込められていることになる。これは、多重防護による安全確保の考えが設計に反映された結果である。

### 沸騰水型軽水炉 ( BWR )

図 1.3.2 は沸騰水型軽水炉 ( BWR: Boiling Water Reactor ) である。この原子炉は米国のアルゴンヌ国立研究所やジェネラルエレクトリック ( General Electric ) 社で開発された。図の通り原子炉圧力容器が蒸気発生器を兼ねていて、そこで発生した蒸気がそのまま蒸気タービンに入り、発電する。したがって、蒸気発生器は不要である。沸騰水型軽水炉の制御棒は加圧水型とは反対に下から挿入される。圧力容器は約 70 気圧 ( 約 7 メガパスカル ) に保たれ、蒸気の温度は 280 度まで上がる。この原子炉は全体として構造が単純であるが、放射能をおびた冷却水が原子炉格納容器の外に出て蒸気タービンや復水器を通ることになるため、それらの機器を含む建家を放射線管理区域にしなければならない。

図 1.3.2 沸騰水型原子炉（BWR）のしくみ



[ 出典 ] 日本原子力文化振興財団ホームページ

### 重水炉

説明図は省略するが、加圧重水冷却重水減速炉がカナダで稼働しており、CANDU（CANada Deuterium Uranium）炉と呼ばれている。この炉では前節で述べたように軽水と異なり中性子の吸収が少ない重水を冷却・減速材として使用するため、天然ウランを使うことができるのが利点である。一方、重水が高価で発電コストが高いことと、原子炉全体が大きくなることが軽水炉と比較した不利な点である。

我が国では、原子炉内で生み出されるプルトニウムによる発電を実証することを目的に、自主開発による初の国産発電プラントとして、新型転換炉「ふげん」が1978年7月から2002年3月まで運転された。「ふげん」では、冷却材に軽水を用い、減速材に重水を使っているところに特徴がある。約24年間に722体のプルトニウムとウランを混ぜた混合酸化物燃料（MOX 燃料）を用いて1本の燃料棒破損もなく安全に発電し、プルトニウムを資源として活用できることを実証した。

### ガス冷却炉

現在、発電用として実用化されているガス冷却炉は、減速材に黒鉛、冷却材として炭酸ガス等を用い、熱交換器により蒸気を発生させ、蒸気タービンを駆動して発電するものである。このタイプの原子炉で世界初の商業用原子力発電が行われたことは、1-2(3)で述べたところである。改良型ガス冷却炉では、摂氏600度を超える冷却材温度で発電効率40%を達成することができた。

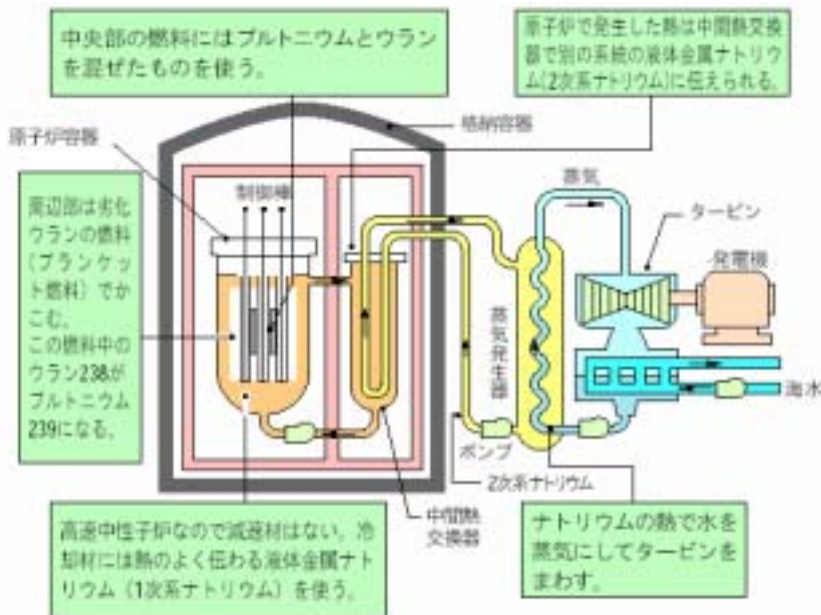
## (2) 核燃料のリサイクル

原子炉から出る使用済燃料については、未処理のまま廃棄処分するか、再処理して使用済燃料に生成しているプルトニウムを取り出し、燃料として利用するかとの二つの選択肢がある。前者はワンスルー型と呼ばれ、ウラン資源の利用率としては低いことになる。後者はリサイクル型であり、資源の利用率が格段に高くなる。それには高速増殖炉で燃やす方法と、既存の軽水炉で混合酸化物燃料、すなわち MOX (Mixed Oxide) 燃料として燃やすプルサーマルをとる方法がある。(プルサーマルとは、プルトニウムと前節で述べたサーマルリアクターの合成語である。)その一方で半減期が長く毒性が強いプルトニウムを扱わねばならなくなる。プルトニウムは核不拡散条約のより厳しい査察対象物質でもあり、我が国は利用目的のないプルトニウムを持たないことを世界に公約している。

### 高速増殖炉 (FBR)

高速増殖炉は、高速中性子を用いて核分裂物質を増殖する原子炉 (FBR: Fast Breeder Reactor) である。その原理は、天然ウランの大半を占める核分裂しにくいウラン 238 に原子炉からの中性子を高速度のままでも照射して、核分裂反応を起こしやすいプルトニウム 239 に変換するものである。図 1.3.3 は高速増殖炉の概略図である。炉心の燃料集合体は、プルトニウムと劣化ウラン、または天然ウランの MOX 燃料である。炉心のまわりは劣化ウラン、または天然ウランからなるブランケット(毛布)と呼ばれる燃料集合体で囲まれ、その外側は炉から逃げようとする中性子を反射し、かつ外に対しては遮蔽するための中性子遮蔽反射体で取り囲まれている。

図 1.3.3 高速増殖炉 (FBW) の仕組み



[ 出典 ] 日本原子力文化振興財団ホームページ

ブランケット燃料集合体は、炉心からの高速中性子の照射によってその中でプルトニウムが生産される。高速中性子炉の冷却材としては、中性子を減速する能力が小さい方が望ましく、水はこの点で不利である。従って、中性子を減速する能力が小さく、かつ熱伝導性がよいなどの性質を持つナトリウムが使われる。ナトリウムの沸点は高いので、ほぼ大気圧で摂氏 500 度もの高温で運転することができる。ナトリウム冷却系は一次冷却系と二次冷却系に分かれており、中間熱交換器で一次冷却系から二次冷却系に熱が伝えられる。そして二次ナトリウム冷却系の熱が、蒸気発生器で水に熱エネルギーを伝える。その先は軽水炉による発電と同じである。このように複雑な仕組みになっているのは、ナトリウムが水と触れると激しく化学反応を起こすので、万一を考えて放射能をおびた一次ナトリウム冷却系と冷却水を隣接させないためである。

我が国では、1977 年 4 月に動力炉・核燃料事業団（現核燃料サイクル開発機構）の実験炉「常陽」が臨界に達し、最終的に熱出力 14 万キロワットを発生した。常陽の研究成果をもとに高速増殖原型炉「もんじゅ」が設計され福井県敦賀市に建設された。「もんじゅ」は電気出力 28 万キロワットの本格的発電プラントである。「もんじゅ」が臨界に達したのは、1994 年 4 月であった。「もんじゅ」のミッションは我が国で高速増殖炉を自主開発し、運転経験を通して高速増殖炉の信頼性や安全性を実証することであったが、1995 年 12 月に二次系ナトリウム漏えいの事故を起こし、現在プラントは停止している。今後は、地元の理解を得た上でナトリウム漏えい対策等に係わる改造工事を行う予定である。

## プルサーマル

高速増殖炉は新しい原子炉を開発してウラン資源を最大限に有効利用しようとするものであるが、技術的信頼性の確立にはなお時間を要する。一方のプルサーマル方式は既存の原子炉を使用する。プルサーマル用 MOX 燃料は、まず再処理工場で使用済燃料からウランとプルトニウムを取り出し、次に燃料工場でこれに天然ウランなどを混ぜて製造する。軽水炉の燃料が 3～5%のウラン 235 と燃えにくい天然ウランでできているのに対し、MOX 燃料は 4～9%のプルトニウムと使用済燃料からの回収ウランおよび天然ウランでできている。ついでながら、高速増殖炉用の燃料は 16～21%のプルトニウムと天然ウランなどでできている。

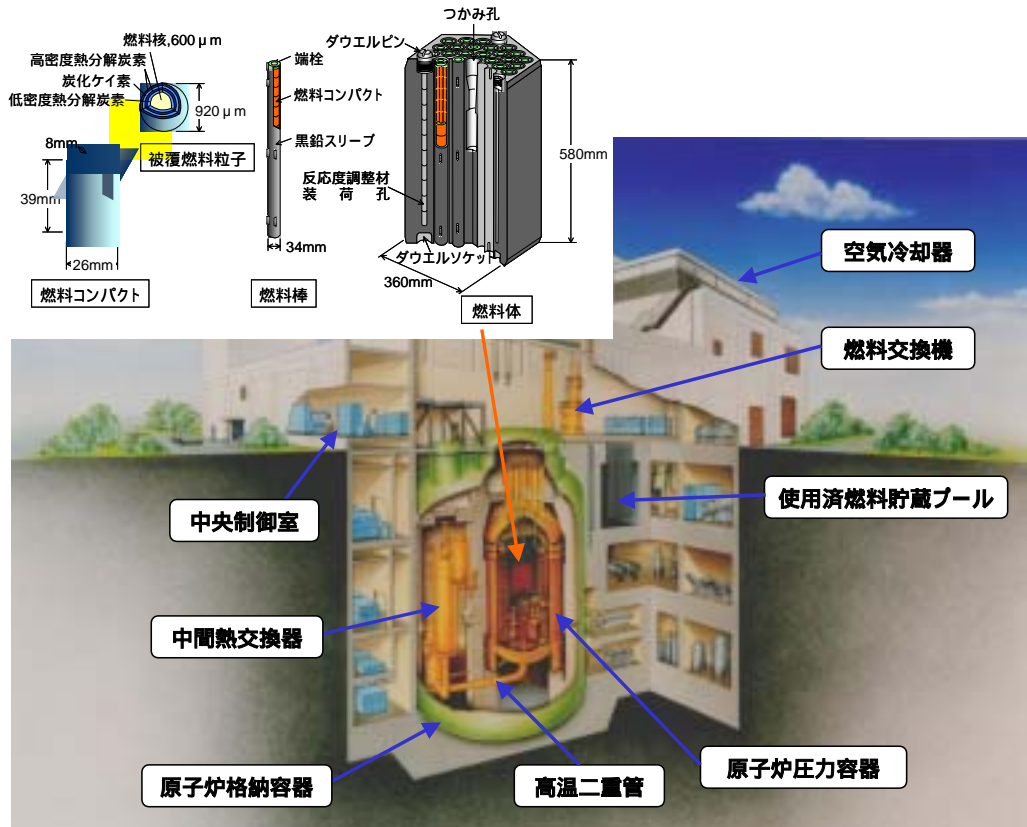
### （3）核熱利用の拡大を目指す高温ガス炉

高温ガス炉は、冷却材として化学的に不活性なヘリウムガス、減速材（炉心構造材）として放射線に強く高温に耐える黒鉛、そして燃料には、直径が 1mm に満たない球状の燃料核をセラミックスで 4 重に被覆した被覆燃料粒子を用いていることから、極めて安全性が高いことが世界的にも認められている。また、摂氏 900 度を超える高温の熱を炉外に取り出すことができるので、発電も含めた多様な分野での利用が可能である。特に、クリーンエネルギー源である水素製造のための熱供給源としても利用できる。さらに、高温熱を利用してガスタービン発電を行えば、約 50%の高い発電効率が得られる。

我が国では、1998 年 11 月に図 1.3.4 に示した日本原子力研究所の高温工学試験研究炉 (HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor)が臨界に達し、2001 年 12 月には

定格熱出力 3 万キロワットおよび原子炉出口冷却材温度摂氏 850 度が得られた。HTTR では、2004 年に原子炉出口冷却材最高温度摂氏 950 度の達成が計画されている。また、原子炉利用の新たな展開を目指して、HTTR を用いて世界で初めて核分裂による熱を利用することによる水素製造を実証する研究が進められている。原子炉の高温熱を用いた水素製造に関しては、天然ガスの水蒸気改質により水素を作る方法の技術開発、その先進システムとして水を熱化学分解して水素を製造する方法の研究開発が行われている。

図 1.3.4 高温工学試験研究炉 (HTTR) のしくみ



[ 出典 ] 日本原子力研究所



## 【コラム】

### 原子力利用とは

「原子力」といえば原子力発電のことを考える人は多い。また、長崎・広島  
の悲劇を思い出す人もいる。

原子力の応用は大きく分けると、例えば、キュリー夫人が見つけたラジウム  
などから自然に放出されるような「放射線」を工業・医学などに利用するいわ  
ゆる「放射線利用」と、ウランなどの大きい原子核が中性子などとぶつかるこ  
とによって、2つに割れるときに発生する大きなエネルギーを取り出して利用す  
る「エネルギー利用」との2つがある。

「放射線利用」はレントゲンが1895年にX線を発見した3週間後には手の骨  
の透視に使われたという程であるから、20世紀の前半からすでに一部の分野で  
利用されはじめた。しかし、本格的に利用されるようになったのは、原子炉で  
アイソトープが作られるようになった60年代以降である。

一方「エネルギーとしての原子力の利用」は第二次世界大戦後、ウランの核  
分裂からのエネルギーを制御して取り出せるようになってからである。多くの  
努力によって安全な発電用原子炉が設計・製作された。1950年代以降「原子力  
発電」は急速に発展した。

今年(2003年)はアイゼンハウアー米国大統領が国連で有名な“Atoms for  
Peace”という演説をして「人類の幸福と繁栄」のために原子力を平和利用しよ  
うと呼びかけてから50年目にあたる。

いま原子力エネルギーは世界の16%の電力を供給しており、また放射線医療  
や工業、農業など生活に密着したところでも利用されている。地球と共生し、  
持続的な社会を達成するために、原子力技術を安全に効果的に活用していくこ  
とが必要なのである。