

原子力発電のしくみ

(読んでほしい人：電気系の高専生と大学生)

2011/4/3 舞鶴高専 平地克也

はじめに

福島第1原発で深刻な事故が発生しています。テレビでは連日事故の状況が詳細に報道されています。世界中が固唾を飲んで事故の推移を見守っています。今後この事故が電気の世界に大きな影響を与えることになるでしょう。電気系の高専生と大学生は原子力発電の基本的なしくみを理解しておく必要があります。

核分裂連鎖反応

核分裂連鎖反応で巨大なエネルギーが発生することは皆さんよく御存知の通りです。図1に核分裂連鎖反応の模式図を示します。U235 (原子量が235のウラン)の原子核に中性子(n)が衝突して2つの原子核(核分裂生成物)に分裂すると同時に2~3個の中性子が発生します。この中性子がさらにU235に衝突して分裂させます。これが際限なく繰り返されます。

以上が核分裂連鎖反応ですが、これは実は原子炉の中の核反応ではありません。図1のような核分裂連鎖反応が発生すると核分裂するU235がまたたくまに増加して一瞬にして巨大なエネルギーが発生します。図1は原子炉ではなく、原子爆弾の核反応です。図1の核反応が発生するには次の2つの条件が必要です。

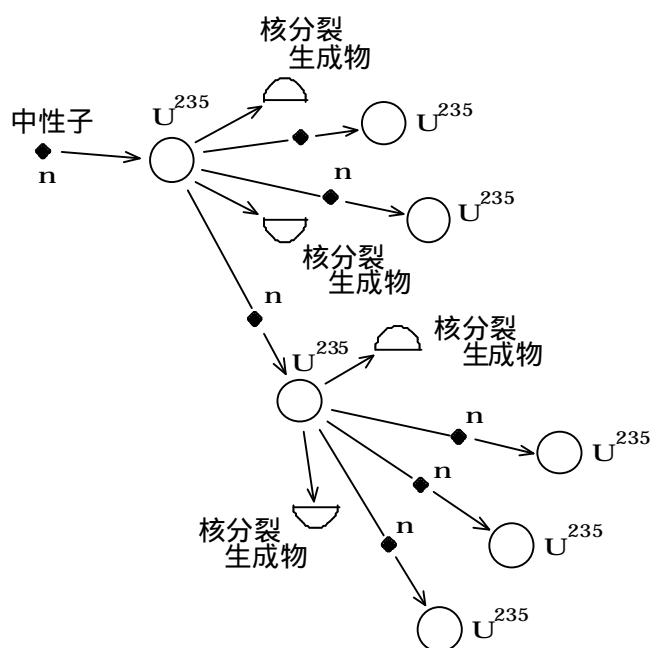


図1 核分裂連鎖反応

(1) ウランが十分に濃縮されていること：天然ウランは核分裂しないU238が99.3%を占めておりU235は0.7%しかありません。これを濃縮して大部分をU235にしないと図1の反応は継続しません。原子力発電には3%濃縮ウランが使用されます。原子力発電所が事故を起こすと原子爆弾のような大爆発が発生するのではないかと心配する人が居ますが、その心配は無用です。3%濃縮ウランでは図1の反応が継続して発生することはありません。

(2) U235が一定量以上存在すること：図1の核反応が継続するには核分裂で発生した中性子が次のU235に確実に衝突する必要があります。そのためには一定量以上の大きさのU235のかたまりが必要です。かたまりが小さいと大部分の中性子は次のU235に衝突する前にかたまりの外に飛び出してしまい、図1の核反応は継続しません。新聞で核疑惑国の核物質保有量がよく報道されますが、これ

は1つの原子爆弾を作るためには一定量以上の核物質が必要となるからです。

原子炉内部の核反応

図1は原子炉ではなく原子爆弾の核反応であることを説明しました。次に原子炉の核反応を図2に示します。原子炉の核反応は原子爆弾の核反応よりかなり複雑です。原子炉の中では核分裂連鎖反応以外に次のような現象が発生しています。

- (1) 散乱：中性子が原子炉内部の原子に衝突して跳ね返ります。これを散乱と言います。散乱には散乱後も中性子の速度が変化しない非弾性散乱と速度が減少する弾性散乱の2種類があります。
- (2) U238への吸収：一部中性子はU238と衝突して吸収されます。中性子を吸収したU238はU239に変化しますが、さらに線を2回放出してプルトニウムPu239に変化します。Pu239はU235と同じように核分裂連鎖反応の能力があり、新たに原子炉の燃料になります。この核反応を利用してPu239を大量に生産できるように設計された原子炉が高速増殖炉です。
- (3) 制御棒の原子への吸収：一部中性子は制御棒の原子と衝突して吸収されます。制御棒は中性子吸収能力の高いホウ素やカドミウムなどで作られています。この機能を利用して、制御棒を抜き差しすることによって原子炉の核分裂反応の量を制御します。
- (4) 炉外への飛散：一部中性子は原子炉の外部に飛散します。

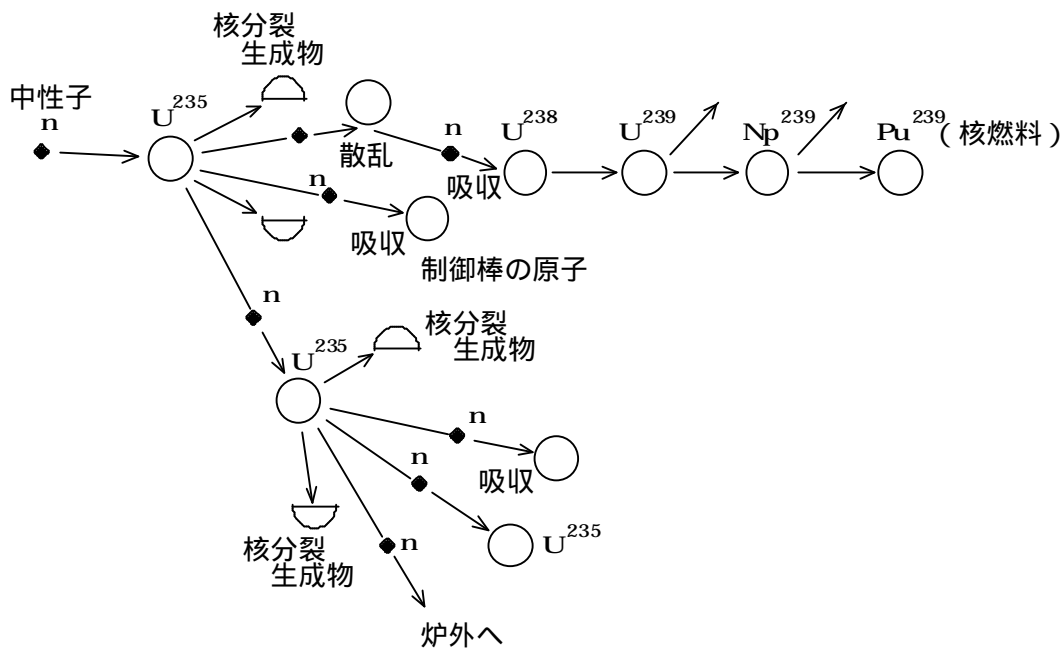


図2 原子炉内部の核反応

このように原子炉内部では複雑な現象が発生しており、核分裂反応で発生した中性子の一部だけが次の核分裂反応を引き起こします。1回の核分裂で発生する中性子が次の核分裂反応を引き起こす割合を中性子増倍率と言ひ、 k_{eff} という記号で表します。 $k_{eff} = 1$ の時のみ核分裂連鎖反応が安定に維持されます。この状態を臨界と言ひ、原子炉はこの状態で運転するように制御されます。原子炉を停止させる時は制御棒を挿入して $k_{eff} < 1$ とします。

発電によるウラン燃料の組成の変化

図3に発電前と発電後のウラン燃料の組成の変化を示します。この図を見れば原子炉内部の核反応がよく理解できると思います。発電前の燃料には3%のU235と97%のU238が含まれています。U235は約2/3が核分裂して核分裂生成物に変化します。1/3はそのまま残ります。U238は一部が中性子を吸収してプルトニウムPu239に変化します。Pu239はU235と同様に核分裂連鎖反応の能力があるのでPu239の一部は核分裂して核分裂生成物に変化します。その結果発電後の燃料にはU235とU238以外に核分裂生成物とプルトニウムが残ることになります。

原子力発電では核分裂反応を継続させるためにある一定量以上の核燃料を原子炉に装填する必要があります。量が少ないと中性子の多くが炉外に飛散してしまい、核分裂反応が継続しません。その代わりに、ある一定量以上の核燃料を装填しておけば原子炉は数年間燃料を補給することなく運転を継続することができます。これは常に大量の燃料を補給し続けねばならない火力発電と比較して原子力発電の大きな長所ですが、同時に欠点でもあります。万一原子炉の暴走事故が発生した場合でも燃料が燃え尽きて自然に事故が終了することは期待できません。

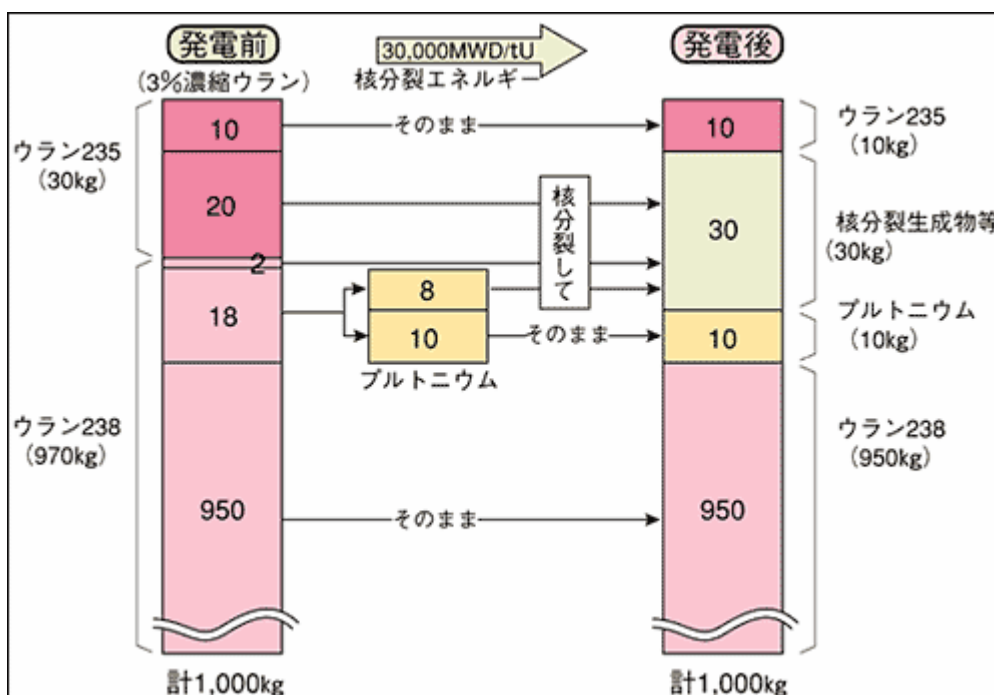


図3 発電によるウラン燃料の組成の変化（資源エネルギー庁のホームページより）

核分裂生成物

U235が核分裂して核分裂生成物が生じますが、どのような物質が生じるかは偶然に支配されます。そしてその多くは不安定な物質です。不安定な物質は安定な物質に変化する過程で放射線と熱を放出します。使用済み核燃料を放置すれば核分裂生成物から放出される大量の熱のために溶解してしまいます。さらには原子炉の一部も溶かしてしまいます。スリーマイル島や福島第一原発ではこのような事故が発生しています。また、核分裂生成物から放出される放射線は人体に有害であり、大きな問題になっていることは皆さんご存じの通りです。

減速材の必要性

中性子の U^{235} への衝突により核分裂反応が発生しますが、中性子の速度により核分裂反応が発生する確率が大きく変化します。 U^{235} は速度の遅い中性子と反応して核分裂を起こします。高速の中性子ではあまり核分裂反応が発生しません。一方、核分裂反応により発生する中性子は大部分が高速の中性子です。したがって、原子炉で U^{235} の核分裂反応を継続させるためには中性子を減速させる必要があります。減速は図 2 の散乱（弾性衝突）で実現します。衝突の対象となる物質（減速のための物質）を減速材と言います。なお、高速の中性子を高速中性子、速度の遅い中性子を熱中性子と言います。

図 4 に核分裂連鎖反応が継続するメカニズムを示します。核分裂により発生した高速中性子は減速材に何度も衝突して熱中性子になります。そして熱中性子が次の核分裂反応を発生させます。減速材にはいろんな物質が使用されますが、最もよく使用されるのが水（ H_2O ）です。減速材に H_2O を使った原子炉を軽水炉と言います。

福島第一原発の事故では溶解した核燃料が原子炉の底に貯まって再度臨界に達する（再臨界）のではないかという報道もありますが、核分裂連鎖反応を継続させるには上記のように減速材を適切に配置する必要があります。単に溶解して貯まっただけで簡単に臨界に達するわけではありません。

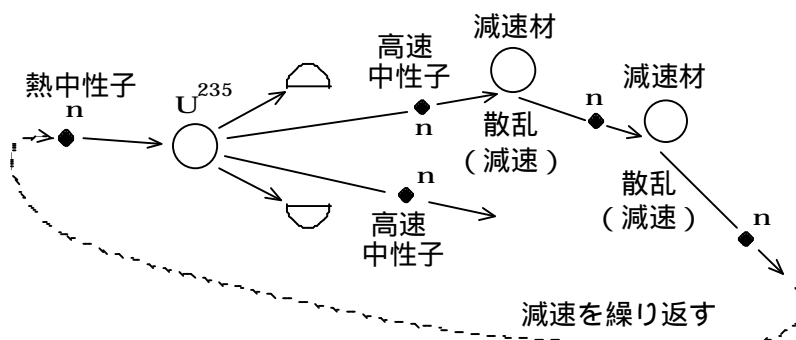


図 4 核分裂連鎖反応継続のメカニズム

原子炉の構造

火力発電ではボイラーで石油や石炭を燃焼させて水蒸気を作り、タービンを回転させて発電機を回します。原子力発電では図 5 のようにボイラーの代わりに原子炉で水蒸気を作ります。それ以外のしくみは基本的には火力発電と同じです。図 5 を模式図で示したものが図 6 (a) です。原子炉の内部で水を沸騰させて蒸気を作っているのが沸騰水型と言います。福島原発など東京電力の原子力発電所は全てこのタイプです。

一方、関西電力は図 6 (b) のタイプの原子炉を使っています。原子炉内部には高圧の 1 次冷却水が循環するので加圧水型と言います。原子炉で加熱された 1 次冷却水で 2 次冷却水を加熱して蒸気を発生させます。加圧水型は沸騰水型に比べて構造が複雑ですが核燃料に直接接する 1 次冷却水がタービンや復水器を通過しないので安全設計が容易になります。

図 5 に示すように核燃料は常時水の中にあります。図 6 (b) の加圧水型も同じです。沸騰水型も加圧水型も水は蒸気を作って発電すると同時に減速材として働いています。

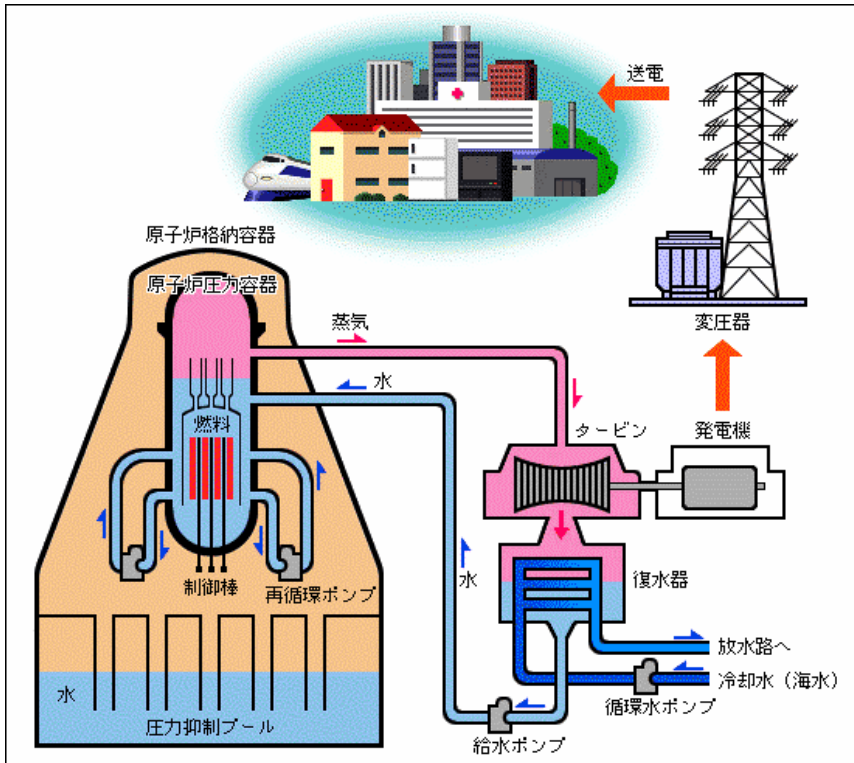


図5 原子力発電の仕組み（資源エネルギー庁のホームページより）

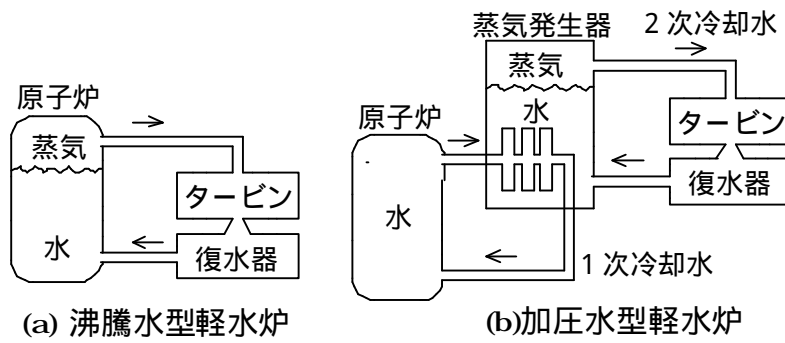


図6 原子力発電の模式図

以上