

## 環境・エネルギーシリーズ

## 原子力発電・放射線基礎講座 I 原子力発電の特徴

Seminar—The Basics of Nuclear Energy and Radiation—  
I Features of Nuclear Power Generation岡村 章  
Okamura Akira

原子力発電は、ウランなどの核分裂連鎖反応のエネルギーにより発電を行うもので、供給安定性に優れ、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>を発生しないといった長所を有する一方、事故のリスクや放射性廃棄物処分の課題を抱える。また、核兵器転用防止のための保障措置、核セキュリティ対策のための核物質防護が要求される。

Nuclear power generation makes use of enormous energy released from controlled nuclear fission chain reactions caused by fissile material such as uranium. It has many advantages such as assuring stable supply of electricity and featuring virtually zero emission of greenhouse gases including CO<sub>2</sub>. At the same time, it certainly has its own issues such as risks of the radiological accidents and difficulty in finding radioactive waste disposal sites. It also requires the safeguards arrangements against proliferation risks of the nuclear weapons and physical protection measures considering nuclear security.

キーワード：核分裂生成物，崩壊熱，再処理，原子燃料サイクル，保障措置，核物質防護

## 1 はじめに

日本技術士会による福島支援活動に資するための情報提供として、原子力・放射線部会の解説チームにより、6回にわたり原子力発電・放射線基礎講座を連載する。本稿は、第1回として原子力発電の特徴について述べる。次回以降、原子力発電の安全性とリスク、福島第一原子力発電所事故の原因・影響等、放射線の人体への影響、放射線利用、放射性廃棄物処分と廃炉に関して順次、解説していく。

## 2 原子力発電の仕組み

原子力発電は、原子炉内にウランなどの核燃料を装荷し、核分裂の連鎖反応を制御しつつ継続させることにより多量の熱エネルギーを発生させ、その熱で得られる高温・高圧の蒸気をタービン・発電機に供給して発電を行うものである。タービン・発電機を回した後の蒸気は、復水器で凝縮され、水となり原子炉へと循環される。核分裂の過程で、放射性物質である核分裂生成物が燃料内に蓄積される。

核分裂エネルギーは、化学反応（燃焼）のエネ

ルギーと比べ、原子・分子当たりの反応エネルギーで比較すると数百万倍と桁違いに大きい。このため、原子力発電は少量の燃料で多量の電気エネルギーを発生させることができる。石炭火力発電所やLNG火力発電所では毎月のように海外から燃料を運搬し補給しないと運転できないが、原子力発電所では1度の燃料交換で1年以上運転継続が可能である。（表1）

表1 100万kW発電所の1年間の運転に必要な燃料

燃料	必要量	輸送の頻度
石炭	235万トン	石炭船（10万トン）で月に2回程度
LNG	95万トン	LNG船（6万トン）で年に15回程度
石油	155万トン	タンカー（25万トン）で2か月に1回程度
ウラン	21トン	専用輸送船又は輸送車両で年に1回程度

（資源エネルギー庁「原子力2010」をもとに算出）

ただし、燃料の伝熱などの制約からタービンの蒸気条件は約300度（飽和蒸気）と火力発電の約600度（過熱蒸気）に比べて低く、発電所の熱効率も30%強程度にとどまっている。

運転の過程でCO<sub>2</sub>を発生しないことも原子力発電の特長である。建設や燃料の採掘・輸送など

の全過程を含めたライフサイクルでの単位発電量当たりのCO<sub>2</sub>発生量を比較しても、火力発電はもとより太陽光発電、風力発電よりも低い。(図1)

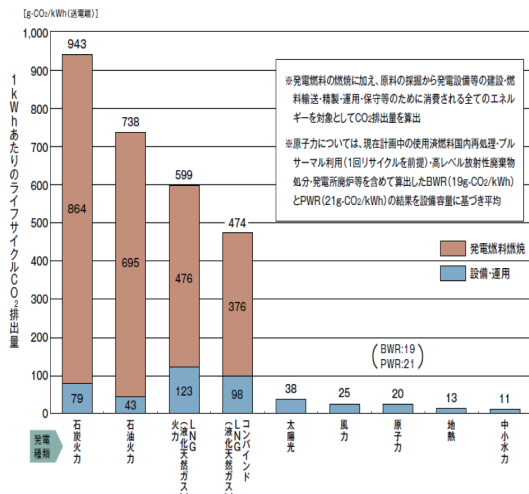


図1 各種電源別ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量  
(出典：電力中央研究所)

ウランの主な産出国は、オーストラリア、カザフスタン、カナダ、ニジェール、ナミビア、ロシアなどであり、現在は全量を輸入している。2011年末の主なエネルギー資源の可採年数は、石油が54.2年、天然ガスが63.6年(シェールガスを除く)、石炭が112年、ウランが93年とされている<sup>1)</sup>。ただし、可採年数とは、経済的に採掘が可能になる可採埋蔵量を当該年の年間生産量で除したものであり、新たな鉱脈の発見や採掘技術の進展のほか、資源価格の上下、需要の増減等によって毎年変動する。現在、世界で約430基の発電用原子炉が稼働しているが、将来この基数が増加するか減少するかでウランの可採年数も増減する。欧米では、今後耐用年数を迎える原発が増えていくことから長期的には総数は減少していくと予想されるが、中国では現在約30基が建設中であり今後も20基を超える建設計画がある。東南アジア、中近東の国々でも原子力発電の導入計画が進められている<sup>2)</sup>。

## 3 原子力発電所の炉型

### 3.1 軽水炉

原子力発電所では、核分裂で発生した高速の中性子を減速させ次の核分裂を効率よく起こさせるための減速材と、燃料内で発生した熱を除熱する冷却材が必要である。軽水炉とは、軽水(普通の

水)を減速材及び冷却材として使用する原子炉である。原子炉容器内に多数の燃料体で構成される炉心が収められ、燃料体の間を冷却材と減速材を兼ねる水が循環し熱を除去する。経済性に優れていることなどから現在世界で稼働している原子力発電所の80%以上は軽水炉である。軽水炉は、沸騰水型原子炉(BWR)と加圧水型原子炉(PWR)に大別される。BWRでは原子炉容器の中で直接蒸気を発生させるのに対し、PWRでは原子炉容器内の一次冷却水を加圧し冷却水の沸騰を抑え、蒸気発生器を介して一次冷却水から二次冷却水に熱を伝達し蒸気を発生させる。

燃料は、天然ウラン中に約0.7%含まれる核分裂性のウラン235を数%に濃縮したウランの酸化物をペレットという1cm程度の粒に焼き固め、多数のペレットを長さ4m程の金属製の燃料被覆管に充てんし、多数の燃料被覆管を束ねた燃料集合体の形で原子炉に装荷される。BWRでは400~900体程度、PWRでは100~200体程度の燃料集合体が原子炉に装荷されており、1年に1回程度の頻度で炉内の1/4~1/3の使用済燃料が新燃料に交換される。ちなみに、ペレット1個で一般家庭で使う電気の半年~1年分を発電することができる。

軽水炉は、当初米国で開発され、その後、米国、欧州、日本などで、主に経済性向上を目的としたユニット出力の増大や運転・保守性向上の面から改良が行われてきた。近年は欧米を中心に、動力源を要しない安全系を備え過酷事故に対する安全性の向上を図った受動的安全炉の開発も進められている。

### 3.2 その他の炉型

水に約0.7%含まれる重水(重水素と酸素の結合した水)は軽水に次ぐ中性子減速能力を有し、中性子をほとんど吸収しないので、重水を減速材とすれば天然ウランを濃縮せずに燃料として利用できる。重水減速炉としてはCANDU炉がカナダを中心に多数建設・運転されている。黒鉛を減速材とする原子炉も開発され、冷却材にガスを使用するタイプのAGRが英国で、水を使用するタ

タイプの RBMK 炉が旧ソ連で建設・運転されたが現在ほぼすべてが運転停止している。

ナトリウムなどを冷却材とし中性子を減速させず核分裂反応を起こさせる高速炉の開発も進められている。原子炉内では非核分裂性のウラン 238 が中性子を吸収し核分裂性プルトニウムが生成している。高速増殖炉は、高速中性子による核分裂を主とすることで、消費した量以上にプルトニウム 239 などの核分裂性物質をつくり出すもので、ウラン資源の利用効率を飛躍的に高めることができるため、日本などで将来の原子力発電の要とされ開発が進められている。

## 4 原子燃料サイクル

ウラン鉱山で採掘した天然ウランは製錬や転換（化学形態の変換）の過程を経て濃縮工場で濃縮され、燃料成型加工工場で燃料体に加工して原子炉に装荷される。原子炉から取り出した使用済燃料中には、核分裂していないウラン 235 やプルトニウム 239 などが含まれているため、再処理工場で使用済燃料を化学的に処理し、これらを廃棄物（燃料被覆管、核分裂生成物等）から分離して取り出し、原子炉で利用することができる。この燃料の再利用に関する一連の循環を原子燃料サイクル（または核燃料サイクル）といい（図 2）、日本の原子力政策の基本方針となっている。一方、米国などのように再処理を行わない（ワンス・スルー）路線の国もある。

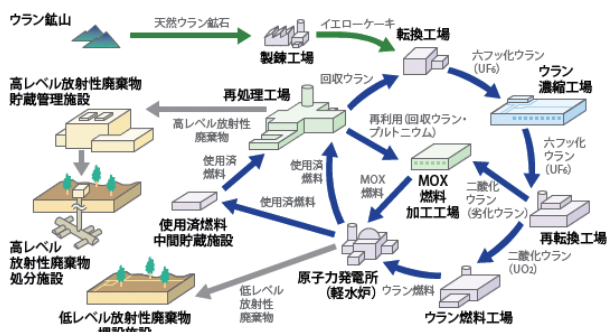


図 2 原子燃料サイクル

プルトニウムは、ウランとの混合酸化物の形態（MOX 燃料）で利用する。プルトニウムは高速増殖炉サイクルにおいて利用することでウラン資源の利用率を数十倍に高め、原子力発電の供給安

定性というメリットをより活かせるが、軽水炉の燃料としても利用可能である。軽水炉でのプルトニウム利用をプルサーマルといい、海外では以前から多くの実績がある。国内でも近年、玄海原子力発電所、伊方発電所、高浜発電所などで MOX 燃料が装荷されている。これまで再処理は主にフランス、英国など海外に委託していたが、現在、青森県六ヶ所村において日本原燃（株）の再処理工場が建設中である。原子燃料サイクルは、ウラン資源の節約になる、エネルギー・セキュリティを高める（燃料の輸入依存度の低減、準国産化）、使用済燃料の直接処分比べて高レベル廃棄物の量（容積）を減少させるなどの利点を有するが、ワンス・スルー方式に比べて発電コストが若干上昇する。

## 5 核分裂生成物の崩壊熱

核分裂生成物には、多様な元素が含まれるが、その多くは質量数が 95 付近と 140 付近に集中している。（表 2）

表 2 主要な核分裂生成物の収率

核分裂核種	U235の収率	Pu239の収率	半減期
ストロンチウム 90	5.8%	2.1%	29年
ジルコニウム 93	6.3%	3.8%	150万年
テクネチウム 99	6.0%	N/A	21万年
ヨウ素 131	2.8%	3.9%	8.0日
キセノン 133	6.7%	7.0%	5.3日
セシウム 137	6.2%	6.6%	30年
プロメチウム 147	2.0%	N/A	2.6年

核分裂生成物から放出される放射線は周囲の物質にエネルギーを付与し熱を発生させる。この熱を崩壊熱という。炉心の核分裂反応が停止した後も崩壊熱は発生し続け、原子炉停止 1 時間後で

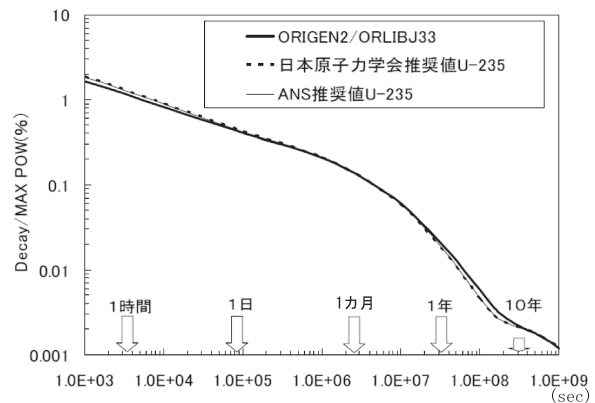


図 3 崩壊熱曲線（ウラン 235 2年照射）  
（出典：吉田正：崩壊熱、炉物理研究 第 64 号）

は定格出力の約 1.5%の熱を発生する（図 3）。したがって、原子力発電所は原子炉停止後も燃料を冷却し崩壊熱を除去し続ける必要がある。個々の元素の放射線は崩壊定数（半減期）に従って指数関数で減少していく。

万が一、重大事故が発生し核分裂生成物が発電所の周辺環境に多量に放出される事態が生じると、その影響は長期間継続する。また、使用済燃料からも放射線及び崩壊熱が長期的に発生する。このため、原子力発電所は、異常があれば直ぐに原子炉を停止し、燃料を冷却し、放射性物質を閉じ込めるための厳重な安全対策が必要であり、国による厳格な安全規制を受けている。

さらに、核分裂生成物には半減期が数百万年と非常に長い核種も含まれ、放射能が環境に影響を与えない程度に十分に減衰するまでには数万年から数十万年を要することから、原子力発電を進める各国で、使用済燃料またはこれを再処理した際に発生する高レベル廃棄物の処分が大きな課題となっている。

## 6 核不拡散

原子力は平和利用と核兵器開発が表裏一体となって進められてきた歴史がある。原子燃料や原料物質の核兵器への転用を防止するため、原子力利用国は核兵器不拡散条約（NPT 条約）に基づき国際原子力機関（IAEA）の「保障措置」を受けるとなっている。保障措置は、事業者が核物質の在庫量等を国に報告する「計量管理」、核物質の移動等を封印、監視カメラ等により確認する「封じ込め・監視」、国や IAEA の査察官が施設に立ち入り核物質の計量及び管理の状況を確認する「査察」といった手段により核兵器への転用を監視するものである。

プルトニウムはウランより臨界量が少ないこと、ウラン濃縮よりプルトニウム抽出のほうが容易であることから、再処理施設や高速増殖炉のようなプルトニウムを取り扱う原子力施設はより厳格な保障措置が適用される。日本は、核兵器非保有国のなかで唯一再処理が国際的に認められてい

る国である。

また、原子力施設や核物質は、テロリスト等から妨害破壊行為や強奪の標的とされることも懸念される。このため、これらの行為から原子力施設や核物質を守るために講じられる措置が「核物質防護」である。核物質防護は上記の保障措置と同様に核不拡散を目的としたものであり、その手段としては、入館者の身元確認を厳格に行う、敷地の周囲を侵入検知センサー付きのフェンスで囲う、監視カメラで施設周辺を常時監視する、建屋の防護区域を強固な障壁や強化扉で防護するとともに厳格な施設管理を行う、警察や海上保安庁が施設や輸送中の核物質を警護する等が行われる。

## 7 むすび

現在、国の資源エネルギー調査会において年内を目標に新たな「エネルギー基本計画」がとりまとめられつつあり、本稿では今後の原子力発電の位置づけについては述べていないが、下記の引用文献<sup>3)</sup>の技術士 CPD 教材に各部会の技術士による関係論文が多く掲載されているので一読されたい。

### <引用文献>

- 1) 原子力・エネルギー図面集 2013, 電気事業連合会, p.1-1-6
- 2) 世界の原子力発電開発の動向 2013 年版, 日本原子力産業協会, pp.6-12, 2013 年 5 月
- 3) 技術士 CPD 教材 原子力放射線の整理と検討のための資料～ 3.11 福島第一原子力発電所事故について共に考える～, 日本技術士会, 2013 年 3 月

### <参考文献>

- 4) 原子力のすべて, 国立印刷局, 2003 年 12 月
- 5) 藤家洋一: 原子力ー自然に学び, 自然を真似るー, ERC 出版, 2005 年 6 月

岡村 章 (おかむら あきら)  
技術士 (原子力・放射線部門)

原子力・放射線部会 解説チーム  
e-mail : akira\_okamura@jpower.co.jp

