

1章 水力発電所

1. 水力発電の概要

水力発電は、水のもっている高さ（水頭）と水の容量を利用して電気を発生するもので、利用する水の力は落差と使用水量によってきまり、発電電力 P は次のように表される。

(発電力) = (重力の加速度) × (使用水量) × (有効落差) × (効率) × (密度)

$$P(\text{kW}) = 9.8 \text{ m/s}^2 \times Q(\text{m}^3/\text{s}) \times H(\text{m}) \times \eta \times \rho(\text{t/m}^3)$$

効率は、水車効率(0.88) × 発電機効率(0.975) = 0.86 程度であることから、使用水量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ で 100 m の有効落差をもつ発電所は約 $8,400 \text{ kW}$ の発電力がある。すなわち、高い位置にある河川や湖沼の水を適当な方法で導水し、低い位置にある発電所に落として水車を回し、その動力によって発電機を回転して電気を発生した後、仕事を終えた水を河川へ放水する。落差を得る方法により、**水路式**、**ダム式**、**ダム水路式**に、水の使い方により、**流込み式**、**調整池式**、**貯水池式**、**揚水式**に分類できる。

水力発電所の機械・電気設備は、機能的に見て発電用と揚水用がある。発電用は、流下する水のエネルギーを電気エネルギーに変換するもの、揚水用は、電気エネルギーにより揚水して、これを水の位置エネルギーに変換するもので、水車（ポンプ水車）、発電機（発電電動機）、主要変圧器、開閉設備、その他付属設備などから構成され、設備としては共通のものが多い。

水力発電は、水力エネルギーの有効活用とピーク供給力の確保をおもな目的としており、前者としての一般水力は、貴重な国内資源として着実に開発を行う必要があるが、**包蔵水力**の70%程度がすでに開発され、残された経済性の悪い地点に取り組む必要があるため容易ではない。後者は、一般水力の中高落差の有利な地点が枯渇した現状では揚水発電所に頼らざるをえない。


このため、一般水力はあらゆる面で標準化、量産化、簡素化、汎用化および新技術の導入による合理的設計を推進して、いっそうのコストダウンを図る必要がある。一方、揚水発電は、揚水と発電の往復に、水路・ポンプ・水車・発電電動機・その他の経路で30%程度の総合損失がある不利な面もあるが、河川流量に関係なく上部池と下部池の貯水容量に応じて発電力を大きくできるので、ピーク

 チェック

$8,400 \text{ kW}$ を1日中発電すると、
20万2,000kWh
1年間では、
73万7,000MWh
となる。

 チェック

陸地の降水は、落差と組み合わせて水力エネルギー発生の可能性を有する。これを包蔵水力といい、未開発1地点当りの平均出力は5,000kW弱である。

 チェック

揚水発電は、単機容量30kW、落差500m級が多く開発されており、最近では40kW、700m級が運転開始した。

供給力としてすぐれている。また、総合効率向上の見地から揚水発電所も開発が進められている。そのような背景から、高落差の大規模揚水発電とすることにより、スケールメリットを追求していく必要がある。

2. 水車

(1) 水車の相似則と比速度

1) 相似則

ランナの形状が幾何学的に相似の水車は、その大小に関係なく、回転速度、流量、出力の無次元化量は等しく、水力特性が同じになる。これを水車の相似則という。

$$\text{回転速度の無次元化量} \quad n = \left(\frac{N}{D}\right) \times H^{\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

$$\text{流量の無次元化量} \quad q = \left(\frac{Q}{D^2}\right) \times H^{\frac{1}{2}} \quad (1-2)$$

$$\text{出力の無次元化量} \quad p = \left(\frac{P}{D^2}\right) \times H^{\frac{3}{2}} \quad (1-3)$$

ここで、 N : 回転速度[r/min], Q : 流量[m³/s], P : 出力[kW]

D : 水車の代表寸法(ランナ径)[m]とする。

2) 比速度

水車の特徴を表す数値として比速度がある。比速度は、その水車と幾何学的に相似な水車を単位落差 1 m において相似な状態で運転させ、単位出力 1 kW を発生させるように寸法を定め、そのときに必要な回転速度で表す。有効落差 H [m], 定格回転速度 N [r/min], 最大出力 P [kW] のランナ比速度 n_s は次式となる。

$$n_s = N \times \left(\frac{P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}\right) (\text{m} \cdot \text{kW}) \quad (1-4)$$

比速度は、ペルトン水車、フランシス水車、斜流水車、プロペラ水車の順に大きくなり、適用落差はこの順に低くなる。

図 1-1 のように比速度が大きくなるにつれ、ペルトン水車はランナ径に比べバケットが大きくなる。フランシス水車は、ランナ入り口径に比べて出口径が大きくなり、さらに大きくなると斜流水車に近づく。プロペラ水車は斜流水車よりも比速度が大きくなる。プロペラ水車でも比速度が大きくなると、羽根枚数が少ないなどの形状変化がある。

チェック

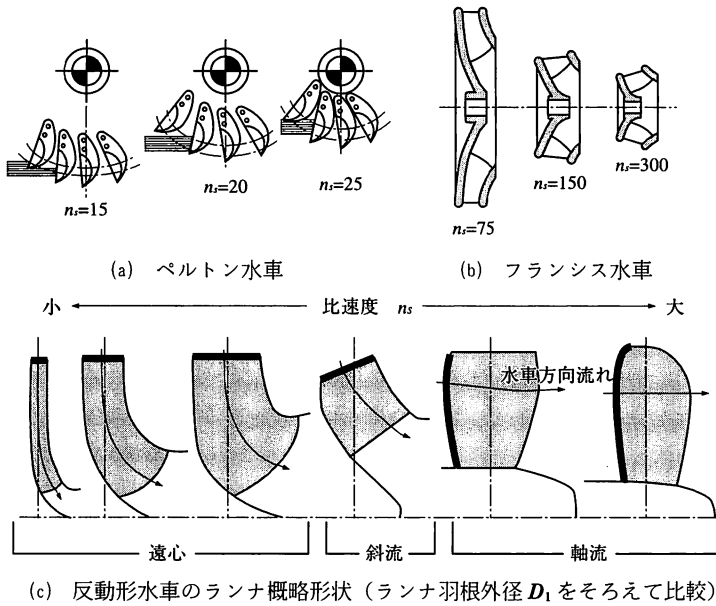
N , Q , P , D が異なる水車でも、ランナ形状が相似であれば n , q , p の値は等しい。

チェック

P は、ランナ 1 個当り、ノズル 1 個当りの値を用いる。

チェック

低落差発電所では、流速が低いため、 n_s の大きい水車を選定して小形化する。一方、高落差発電所では、流速が高いため、 n_s の小さい水車でも小形化できる。



●図1-1 比速度と水車形状

例1-1 水車の比速度とは、(1) 水車と幾何学的に相似な (2) 水車が、単位落差において単位出力を発生する場合の回転速度をいう。ある水車の比速度 n_s は $n_s = N$ (3) $[m \cdot kW]$ で表される。ここで、 H は有効落差[m]、 N は水車の定格回転速度[r/min]を表し、 P は衝動水車では (4) 1個当り、反動水車では (5) 1個当りの最大出力とする。

【解答】 (1) 実物 (2) 模型 (3) $P^{1/2}/H^{5/4}$ (4) ノズル (5) ランナ

(2) 水車の特性

1) 水車の種類と適用落差

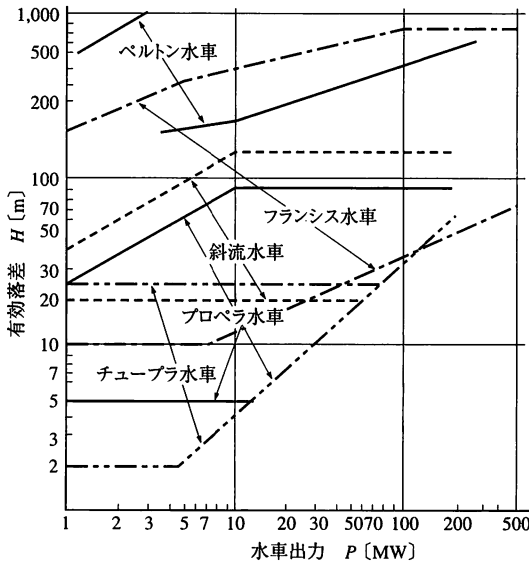
図1-2に、落差と出力による水車形式選定図の一例を示す。

① ペルトン水車

ランナの半径に対して直角方向に衝撃を与え、流水の運動エネルギーを回転エネルギーに変える構造のもので、ニードル弁により高速ジェット水流が得られ、バケットのような小さい羽根でも大きな



国内では落差150m以上の高落差、小水量に適用されている。



●図1-2 水車形式選定図の一例

エネルギーを得る。少ない水量を他の水車のように隙間から逃すことなく受けられる。

② フランシス水車

落差が低く水量が増すと、ペルトン水車ではバケットが大きくなり、ジェット水流が後続するバケットの背中にあたって効率が著しく低下する。そこで、クラウンとバンドを設けて水の流れを閉鎖した流路として損失を減らす。流水摩擦による損失は増加するが、水量が増すぶん比率的に損失が小さくなる。ランナ流入水は、ある程度の速度をもつため衝動と反動の両作用をする。形状変更によりこの比率を変えることで、特性は広範囲に変わる。

③ 斜流水車

フランシス水車では流水摩擦損失が大きく、落差が低くなって損失水頭の割合が大きくなると効率の低下が大きくなる。そこで、クラウン、バンドを取り外した斜流水車が有利となる。ランナ内の流れをフランシス水車に近い形にし、カプラン水車の高落差領域からフランシス水車の中落差域に適用できる。さらに、流量に合わせて羽根角度の調整を可能にしたテリア水車は、軽負荷時の損失が低減される。

④ プロペラ水車

低落差、大流量になるとランナと流水との相対速度が大きくなっ



チェック

国内では落差 10～430m の広範囲に適用されている。



チェック

国内では落差 40～130m の中・低落差、大水量に適用されている。

て摩擦損失が増す。このため、羽根枚数を少なくし、かつ羽根の高さを低くして扁平なランナとすると効率を高くできる。これがプロペラ水車である。水は、半径方向から流入しランナペーンを軸方向に通過して放水路で90°向きを変える。ランナ羽根が可動形のプロペラ水車をカプラン水車という。

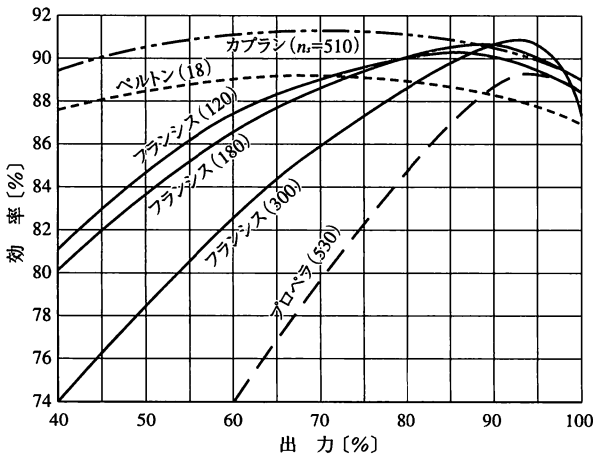
⑤ 円筒水車

低落差になると、プロペラ形の流れでは方向変換による損失が無視できない。このため、流入から流出まで軸方向に流れる円筒形が有利となる。円筒断面の水路の中に円筒ケーシングを設け、この中に可動羽根プロペラ水車を入れたものを一般に円筒水車という。このうち、発電機も円筒ケーシングの中に納めたものをバルブ水車、流水路外に設置したものをチューブラ水車という。渦巻ケーシングがなく、流水の通路が単純となるため、損失が小さく効率が高い。

2) 出力変化と効率

水車は、全負荷またはそれよりいくぶん低い負荷において最高効率になるよう設計されるため、過負荷または軽負荷時は効率が低下する。

図1-3のように、低下割合は水車形式と比速度によって異なる。



●図1-3 出力変化と効率

① ペルトン水車

最高効率は他の水車に比べてやや低いですが、流量が変化しても噴射水の方向が変わらないため、軽負荷ないし全負荷領域における効率変化が少ない。



国内では5~70mの低落差、大水量に適用されている。

国内では23m以下の超低落差地点に適用されている。



多ノズル方式の場合は、出力変化に応じてノズルの使用数が増減し、全負荷領域にわたって効率の平坦な運転が可能となる。

② フランス水車

ランナ羽根が固定であり、出力や落差によって変わる水の流入方向に対して羽根角度の調整ができない。このため、設計点外での諸損失が増加し、特に軽負荷時の効率低下が大きい。

③ 斜流水車およびプロペラ水車

ランナ羽根が固定の斜流水車やプロペラ水車は、軽負荷時の損失増加が大きく効率低下が著しい。これに対し、可動羽根であるデリア水車、カプラン水車、チューブラ水車は、水の流入方向に対して最適な羽根角度に調整できるため、軽負荷時でも諸損失の増加が少なく効率低下が少ない。

3) 落差変化に対する特性

ダム式発電所や落差の低い発電所では、落差変化が水車の特性に影響を与える。落差変化前の有効落差を H [m]、回転速度を N [r/min]、流量を Q [m³/s]、出力を P [kW] とし、落差変化後のそれらを H' 、 N' 、 Q' 、 P' とすると、次の関係が成り立つ。

$$\frac{N'}{N} = \left(\frac{H'}{H}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-5)$$

$$\frac{Q'}{Q} = \left(\frac{H'}{H}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{N'}{N} \quad (1-6)$$

$$\frac{P'}{P} = \left(\frac{H'}{H}\right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{N'}{N}\right)^3 \quad (1-7)$$

これより、落差変化前後の水車特性を等しくするには、回転速度、流量は落差の 1/2 乗、出力は落差の 3/2 乗に比例して変化させる必要がある。しかし、実際の発電所では落差の変化に対し任意に速度を変えることは不可能なため、必然的に水車特性が変化する。この変化割合は、水車の形式や比速度によって傾向が異なる。

例 1-2) 水車効率は、水車の種類、比速度、定格出力および (1) によって異なる。(2) 水車は軽負荷時の効率低下が大きく、(3) 水車ではこの傾向がさらに大きい、(4) 水車と (5) 水車では比較的少ない。

〔解答〕 (1) 負荷状態 (2) フランス (3) プロペラ
(4) ベルトン (5) カプラン

 チェック

一般的に比速度の大きい水車ほど出力変化による効率変化が大きい、可動羽根としている。

 チェック

落差が大きくなると、流量はその 1/2 乗、出力はその 3/2 乗に比例して増加する。このため、一定出力を保つにはガイドベーン開度を閉じて流量を絞る。落差が小さくなると、逆にガイドベーン開度を開ける必要がある。

3章 原子力発電所

1. 原子炉の基礎

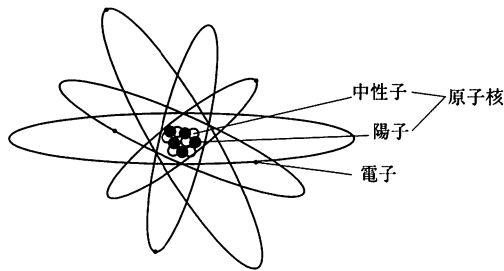
(1) 原子核の構造と崩壊

原子核は、正電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子からなっている。陽子数 (Z) をその原子の原子番号と定め、中性子数 (N) との和を質量数 (A) という。

$$A = Z + N$$

元素記号の左肩、または右肩に A を、左下に Z をつけ、 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 、 U^{235} のように表す。

各粒子の質量は、原子質量単位 (amu: atomic mass unit) で表し、炭素原子 ${}^{12}_6\text{C}$ の質量を 12amu とし、これを基準にして表す。



●図 3-1 原子構造モデル

$$1\text{amu} = 1.66054 \times 10^{-27}\text{kg}$$

この場合、陽子は 1.00728amu、中性子は 1.00866amu、電子は 0.00055amu となる。

原子番号が同じでも、中性子数が異なるために質量数の異なる元素のことを**同位元素** (アイソトープ) といい、原子核としての性質は全く異なる。だが、化学的性質が同じであるために、化学的に分離することは不可能で、質量差を利用した質量分析、気体拡散、遠心分離などによる分離法が必要である。

原子核は、通常は安定な状態にあるが、不安定なものが放射線を出して安定な状態になろうとすることを**崩壊**といい、同位元素の中でも放射性のもの、つまり放射性崩壊をする同位元素を**放射性同位元素** (RI: ラジオアイソトープ) という。

崩壊の割合は、そのとき存在する原子の数 N に比例するので、微小時間 dt の間に崩壊する原子数を dN 、時間 $t=0$ のときの原子

参照

電子も含めた原子の直径は約 10^{-10}m
原子核の直径は約 10^{-14}m

質量数の値が実際の重さを表しているわけではない。

チェック

炭素 1g 原子量、すなわち、12g の中には、 6.02214×10^{23} (アボガドロ数) 個の炭素原子が存在するので、

$$1\text{amu} = \left(\frac{12}{6.02214} \right) \times 10^{23} \times \frac{1}{12}$$

$$= 1.66054 \times 10^{-24}\text{g}$$

電子の質量は陽子、中性子に比べ、約 $1/1800$ で、原子の質量はほとんど原子核で占まる。

数を N_0 、定数を λ とすると $dN/dt = -\lambda N$ より、

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

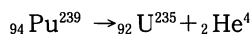
となり、比例定数 λ (s^{-1}) を崩壊定数という。原子の数が半分の $N = N_0/2$ になるのに要する時間 T (s) を半減期という。

$$T = \frac{(\log_e 2)}{\lambda} = \frac{0.69315}{\lambda}$$

① α 崩壊

原子核中の中性子数に比べて陽子数が多すぎるものが、陽子と中性子それぞれ 2 個ずつ（ヘリウム原子核 ${}_2\text{He}^4$ 相当）からなる放射線（ α 線）を放出し、元の原子核の原子番号が 2、質量数が 4 減少した物質に変化する。

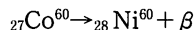
プルトニウム 239 がウラン 235 になる例



② β 崩壊

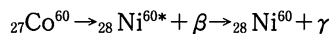
原子核中の陽子の数に比べて中性子数が多すぎるものが、中性子 1 個が陽子に変化して、1 個の電子を放出（ β 線）し、元の原子核の原子番号が 1 増加し、質量数はそのままである。

コバルト 60 がニッケル 60 になる例



③ γ 線放出

原子核のエネルギーが安定状態よりも余分にある場合（励起状態）に、余分なエネルギーを電磁波（ γ 線）として放出し、原子核の原子番号、質量数はともに変化しない。 α 崩壊、 β 崩壊したあとでも、核はまだ余分なエネルギーをもっており、引き続き γ 線を放出することが多い（* は励起状態を表示する。下記の式参照）。



例 3—1 テルル ${}_{52}\text{Te}^{135}$ が (1) 崩壊すると、よう素 ${}_{53}\text{I}^{135}$ になり、このときの崩壊定数が約 $0.00578 s^{-1}$ で、 $\log_e 2$ が 0.693 であるので、テルル ${}_{52}\text{Te}^{135}$ の半減期は約 (2) 分である。また、プルトニウム ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ が (3) 崩壊するとウラン ${}_{92}\text{U}^{235}$ になり、このとき放出される粒子は中性子 (4) 個、陽子 (5) 個で、ヘリウムの原子核である。

【解答】 (1) β (2) 2 (3) α (4) 2 (5) 2

 チェック

$$\frac{1}{N} dN = -\lambda t$$

$$\log_e N = -\lambda t + K'$$

$$e^{-\lambda t + K'} = K e^{-\lambda t} = N$$

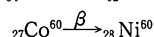
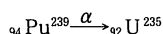
$$t=0 \text{ で } N=N_0 \text{ より}$$

$$K=N_0$$

$$\therefore N=N_0 e^{-\lambda t}$$

 参照

左記と別の表し方



(2) 核分裂

陽子1個の質量を m_p 、中性子1個の質量を m_n 、電子の質量を m_e とすると、原子の質量はこれら粒子の総和 ($Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e$) となるはずであるが、実際の質量 M はこれよりも小さくなっている。この質量の差 ΔM を質量欠損という。

$$\Delta M = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e) - M$$

アインシュタインの法則によれば、質量もエネルギーも本質的に同じものであり、質量 M [kg] がエネルギー E [J] に変換される場合、光速を C [約 3×10^8 m/s] とすると、

$$E = M \cdot C^2 \text{ [J]}$$

質量欠損に相当する $E = \Delta M \cdot C^2$ を原子核の結合エネルギーという。重い原子核が中性子を吸収し、2つの原子核に分裂するとともに、同時に数個の中性子と熱エネルギーおよび γ 線を放出することを核分裂という。2つの原子核(核分裂生成物)の質量は一定ではなく、その時々さまざな種類のものとなる。このとき放出されるエネルギーは、質量欠損のエネルギーに相当し、おもに核分裂生成物や中性子の運動エネルギーとなって放出される。

${}_{92}\text{U}^{235}$ の原子核1個の核分裂で放出される中性子数は平均で約2.5個、エネルギーは約200 MeVである。

核分裂前	${}_{92}\text{U}^{235}$	= 235.124	amu	236.133
	中性子1個	= 1.009	amu	
	合計	= 236.133	amu	
核分裂後	${}_{39}\text{Y}^{95}$	= 94.945	amu	-235.918 差 0.215
	${}_{53}\text{I}^{139}$	= 138.955	amu	
	中性子2個	= 2.018	amu	
	合計	= 235.918	amu	

この核分裂の例では、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ の約0.09%の0.215 amuの質量欠損分のエネルギー E [J] が放出される。0.215 amu は 0.357×10^{-27} kg となるので、

$$\begin{aligned} E &= 0.357 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 \\ &= 3.213 \times 10^{-11} \text{ J} \\ &= 2.0056 \times 10^8 \text{ eV} = 200 \text{ MeV} \end{aligned}$$

200 MeV の約80%以上は、核分裂生成物の運動エネルギーとして放出される。

核分裂で発生する中性子は、平均約2 MeVの大きなエネルギー



陽子、中性子を総称して核子といい、核子がばらばらに存在するよりも、原子核を構成しているほうが、エネルギーが低い状態となる。



1eV は電位差 1V の2点間で電子が加速されるときに得るエネルギーで、

$$\begin{aligned} 1\text{eV} &= 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} \\ 1\text{J} &= 0.24 \times 10^{-3} \text{ kcal} \\ 1\text{W} &= 1\text{J/S} \\ 1\text{kWh} &= 3600\text{kJ} \\ &= 864\text{kcal} \end{aligned}$$



左記は核分裂生成物がイットリウム ${}_{39}\text{Y}^{95}$ とヨウ素 ${}_{53}\text{I}^{139}$ の場合であるが、他の核種の場合もほぼ同様な値となる。実際の核分裂では質量数72~158までの約60種類以上の核分裂生成物が発生し、そのつど核種が定まっているわけではない。

電力

をもった高速中性子であるが、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ は中性子の速度が遅く、エネルギーが小さい中性子を吸収して核分裂しやすい性質がある。

中性子は、原子核との衝突を繰り返すことによりエネルギーを失い、減速していき、ついには衝突によってエネルギーの授受が行われない平衡状態まで減速される。この中性子を熱中性子という。

① 高速中性子

0.1 MeV以上(4.4×10^6 m/s 以上)

② 低速中性子 (熱中性子)

1 eV 以下(1.4×10^4 m/s 以下)

熱中性子により核分裂を行わせる PWR や BWR などの熱中性子炉は、核分裂で発生する高速中性子では核分裂が維持できず、高速中性子を減速材で約 0.025 eV の熱中性子に減速し、核分裂を維持させている。

原子炉で核分裂が起きると核分裂生成物が蓄積される。核分裂生成物は、放射線を出しながら核種に応じた半減期に従って、次々と他の元素に崩壊していき、最終的に安定した元素になろうとする。

これにともなって放出する熱を崩壊熱または残留熱という。崩壊熱は、原子炉停止後も長時間出てくるので、通常運転時に原子炉を停止した場合でも、この熱を安全に除去するための残留熱除去設備が必要で、原子炉の冷却材が喪失するような事故の際には非常用炉心冷却設備が必要となる。

例 3—2 電気出力 1100 MW の原子力発電所が ${}_{92}\text{U}^{235}$ の濃縮度 3.2% の核燃料を使用し、1 年間 (365 日) の平均発電端熱効率 34%、平均設備利用率 80% で運転した場合の記述である (ただし、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ だけが核分裂するものとする)。

${}_{92}\text{U}^{235}$ の核分裂による質量欠損は約 (1) % であるので、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 1g では (2) [J] の熱出力となり、これは (3) MWh の電気出力となる。したがって、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ の消費量は (4) g/MWh であり、年間の核燃料使用量は (5) t となる。

【解説】

${}_{92}\text{U}^{235}$ の質量欠損は理論値が約 0.09% であるので、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 1g で得られる熱量 Q [kcal] は、



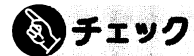
参照

天然のウランには約 0.7% の ${}_{92}\text{U}^{235}$ が含まれ、残りの 99.3% の ${}_{92}\text{U}^{238}$ は軽水炉ではほとんど核分裂を起こさない。



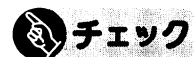
参照

- ・ PWR (加圧水形原子炉)
- ・ BWR (沸騰水形原子炉)



チェック

- 崩壊熱
BRW の場合 1 回の核分裂で得られるエネルギーの約 7% が崩壊熱によるもので、原子炉停止直後では停止直前の出力の約 7%、1 分後で約 2%、1 日後で約 0.7% の熱が発生する。



チェック

$$Q = \Delta M \cdot C^2 \text{ [J]}$$

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$$

$$\text{光速} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$