

電気の知識を深めようシリーズ Vol.4

電気をつくる

一般社団法人 電気学会

まえがき

わたしたちの周りにはスマホ、テレビ、冷蔵庫、電灯など電気で動作するものがいっぱいあふれていますが、この電気はどのようにつくられているのでしょうか？

最近では家の屋根に太陽光パネルが設置されたりして、電気がわたしたちの身近でもつくられるようになってきました。その他にはどのような形で電気がつくられるか知っていますか？

電気がどのように作られているか知ることは、電気を使う上でも、将来どのような世の中になっていくか考える上でも参考になると思います。

電気がどのようにつくられているかこれから読んでみませんか？

目 次

まえがき	ii
1 電気をつくる	1
さまざまなエネルギーから電気をつくる	1
発電方法を整理して考える	2
発電にかかわるエネルギーの比率	6
電気のつくり方は一日の間でも変化する	8
発電機を回して電気をつくる	9
つくられる電気には直流と交流がある	11
交流の電気	11
交流電気をつくる発電機	13
2 再生可能エネルギーで電気をつくる	14
太陽光発電	14
太陽電池のしくみ	15
太陽光発電として必要な広さ	16
風力発電	18
風力発電の特徴的な大きさ	19
地熱発電	20
水力発電	21
水力発電のしくみ	22
揚水発電	23
電気が、足りないときは発電機、 あまるときはポンプ	24
揚水発電所の例	25

3 蒸気ので電気をつくる	26
火力発電	26
火力発電のしくみ	27
コンバインドサイクル発電	29
コージェネレーション	31
コラム：日本が造った発電設備がギネスブックに！	32
原子力発電	33
原子力発電の特徴	34
4 直流の電気をつくる	35
電池と直流電気	35
電池のしくみ	36
充電できる電池とできない電池	37
スマートフォンは充電が必要	37
燃料電池	38
5 将来に向けた電気ので作り方を考える	40
本冊子の企画趣旨について	42
電気の知識を深めようシリーズ	
刊行ワーキンググループメンバー	43

1 電気をつくる

電気がどのようにつくられているのかを考えましょう。私たちが使っている電気の大部分は電力会社の発電所でつくられています。最近では電力会社だけでなく、発電設備を持つ会社が電気をつくり、供給することも可能となりました。さらに、一般家庭の屋根などに設置された太陽電池パネルのように、新しい発電の方法もとり入れられるようになっていきます。

東日本大震災の後、すべての原子力発電所が運転を停止しました。燃料となる石油・石炭・天然ガスは、地球に存在する有限なエネルギー資源です。これらを燃やして発電すると二酸化炭素が排出され、地球温暖化に影響を与えています。このように電気をつくるためには、課題もたくさんあります。一方では、水素の利用や新しい燃料の開発などの技術が進展しており、電気をつくる方法に、これまでにはない発想がとり入れられ、明るい未来も期待できます。将来にわたって電気を使えるようにするには、電気がつくられる仕組みを理解することが大事です。

さまざまなエネルギーから電気をつくる

電気は、自然界にあるエネルギーを使ってつくる必要があります。すなわち、これらのエネルギーを何らかの方法で変換して電気をつくります。このことを「発電」と呼びます。そのために、風力、太陽光、地熱、水力、石炭、石油、天然ガス、原子力などのエネルギーが使われます。これらを使った発電の方法には、それぞれ特徴があります。それぞれの長所を生かした発電により、自然環境に大きな影響を与えずに、私たちの生活

を豊かにする電気を将来にわたって使えるようにしていくことが大切です。

発電方法を整理して考える

発電に使われるエネルギーにより、さまざまな方法があります。従来の発電では、石油、石炭、天然ガスのように地球の中からとり出した有限なエネルギー資源である化石エネルギーや、原子力エネルギーを使ってきました。一方、風力、太陽光、地熱、水力などは永続的に利用できる再生可能エネルギーと呼ばれ、これらを利用する発電の設備も、身近に目にするが増えています。再生可能エネルギーと地球に存在している化石エネルギーなどを、それぞれ有効に使っていく必要があります。そこで、再生可能エネルギーによる発電から始めて原子力発電までについて、それぞれの特徴をまとめると次に示す表のようになります。

なお、太陽光発電や燃料電池以外は、回転する羽根（ブレード）、あるいは類似の形をしたタービンの軸に結合された発電機により、電気がつくられます。

表1 いろいろな発電の方法とその特徴

発電方法	特 徴
太陽光発電	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽の光エネルギーから太陽電池で発電します。 ・ 再生可能エネルギーを利用するもので、太陽光があれば発電できます ・ 太陽が出ている日中しか発電できず、雲で光がさざざられば発電量が低下します。 ・ 太陽からの単位面積あたり光エネルギーが小さいので、大きな電力を得るためには広大な面積の太陽電池が必要で、他の発電方法に比べると発電コストが高くなります。 ・ 天候と時刻により発電量が変化するので、電気を一定に供給できるための工夫が必要です。
風力発電	<ul style="list-style-type: none"> ・ 風のエネルギーで羽根（ブレード）を回し発電機で発電します。 ・ 再生可能エネルギーを利用するもので、風さえあれば発電できます。 ・ 風が強く風速が速くないと、効率的な発電ができません。 ・ 風速が低下すれば発電量も低下し、風が止むと発電できません。また、風が強くなりすぎても安全のため発電を停止します。 ・ 日本では、風が強く発電に適した場所は限られるため、発電できる量に限りがあります。 ・ 風の強さが時間的に変化すると発電量も変化するので、電気を一定に供給できるための工夫が必要です。

地熱発電	<ul style="list-style-type: none"> ・地下に生じている熱水などから蒸気を得て、タービンと発電機を回して発電します。 ・再生可能エネルギーを利用するもので、地熱エネルギーが得られれば発電できます。 ・地熱で得られる蒸気には腐食性のガスも含まれているため、タービンなどの発電設備が腐食することもあります。
水力発電	<ul style="list-style-type: none"> ・ダムなどで高いところから水を流して、水の位置エネルギーで水車と発電機を回して発電します。 ・再生可能エネルギーを利用します。 ・日本では多くの水力発電所をすでに建設してきたため、新たに水力発電所を作る余地はほとんどなくなっています。 ・発電できる量は降水量に影響を受けます。 ・電気がたくさんあるときに水を上側のダムにくみ上げておき、電気が足りなくなりそうな時に水を放出して発電する揚水発電所もあります。
火力発電	<ul style="list-style-type: none"> ・石油、石炭、天然ガスなどを燃焼して蒸気を発生させ、タービンと発電機を回して発電します。 ・日本では火力発電が主たる方法ですが、燃料となるエネルギー資源は輸入に頼っています。 ・石油、石炭、天然ガスが採掘できる期間は数十年～百年程度とされています。 ・燃焼により二酸化炭素が発生するので、地球温暖化への影響が無視できません。

<p>ディーゼル 発電</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・火力発電の一つで、ディーゼルエンジンで発電機を回して発電します。 ・効率は若干低いですが、停電など万が一の場合に有効です。 ・燃焼により二酸化炭素が発生します。また、騒音対策のカバーなどが必要になる場合があります。
<p>原子力発電</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ウランなどの核分裂反応で生じる熱で蒸気を発生させ、タービンと発電機を回して発電します。 ・放射性物質である核燃料を使用するので、放射能の管理が必要です。 ・運転に伴って発生する放射性廃棄物の処理が必要です。
<p>燃料電池</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・水素などを燃料として使用して、燃料から直接電気を生み出します。 ・発生した熱で温水をつくって利用すれば、効率をより高くできます。

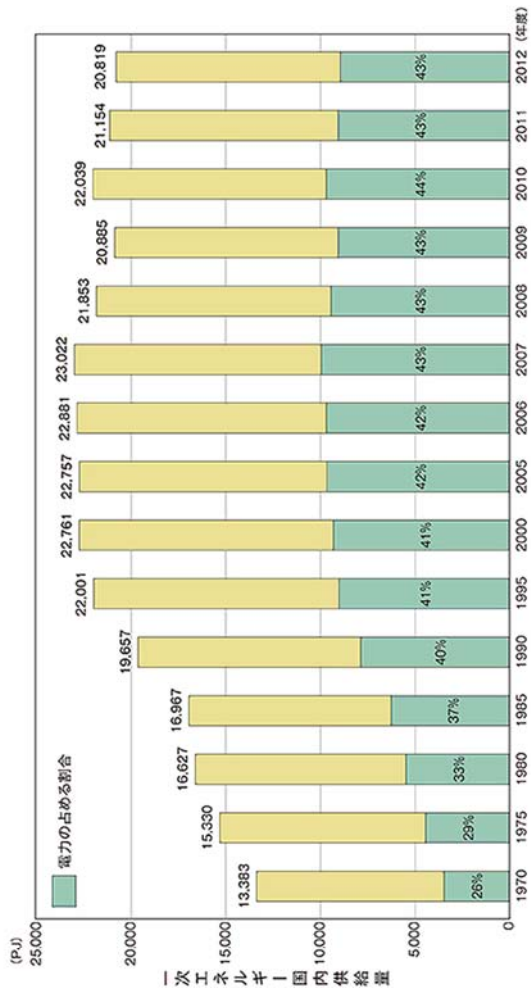
発電にかかわるエネルギーの比率

日本の一次エネルギーは、1973年度では石油に75.5%も頼っていましたが。その後、エネルギー源の多様化を図ることによって、2010年度では石炭22.5%、天然ガス19.2%、原子力11.1%と比率を増やすことにより、石油を39.8%まで低減できました。しかし、2011年に発生した東日本大震災とそれによる原子力発電所の停止により、2013年度では石油の割合は42.7%まで、再び上昇しています。なお、この全エネルギーの中で電気に変換している比率を電力化率といいますが、2012年度で43%程度になっています。

石油、石炭、天然ガスなど、そのほとんどを輸入している化石エネルギーへの依存度は92%にもなっており、その他は原子力0.4%、水力3.2%、新エネルギー・地熱4.3%しかありません。ここで、新エネルギーとは水力と地熱を除いた再生可能エネルギーのことを言います。

このように、日本はほとんどのエネルギーを輸入に頼っていますので、化石燃料の安定的な確保と、原子力や再生可能エネルギーなどの代替エネルギーを増やしていくことが必要です。

一次エネルギーに占める電力の比率(電力化率)



(注) 1PJ(=10¹⁶J)は原油約25,800kLの熱量に相当 (PJ=ペタジュール)

図1 一次エネルギーに占める電力の比率(電力化率)
(出典：電気事業連合会「原子力・エネルギー一面集 2015」)

電気のつくり方は一日の間でも変化する

電気が使われる量は一日の間で時々刻々と変化します。社会が活発に活動している昼間や、冷房・暖房が必要な季節には、電気がたくさん使われます。一方、大事なことですが、私たちが使う電気の量に応じて、発電しなければならないのです*1。1日で時間ごとに使われる電気の量と、それに対してどのような方法で発電されているかを示すグラフを、日負荷曲線といいます。日負荷曲線は、季節により変化しますし、電気が消費される地域によっても異なります。

電気がたくさん使われる日中には、発電量の調整が容易な水力発電と石油や天然ガスを使う火力発電によって電気がつくられます。図は東日本大震災前の例であるため、原子力発電も、大きな割合で入っています。

ここで示している発電所以外でも、これからは太陽光発電・風力発電など再生可能エネルギーにより発電する電気が占める割合も増えてきます。このため、電気をつくる多種類の方法をどのように構成してゆくか、という課題も重要になってきています。

*1) その理由は、この小冊子の Vol.6 で説明されています。

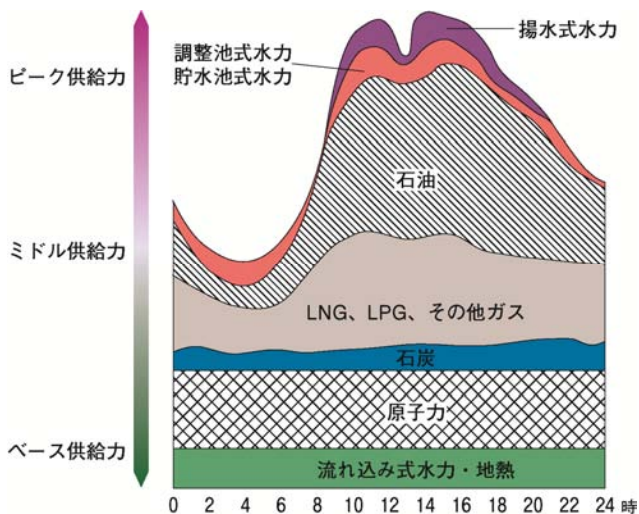


図2 日負荷曲線（東日本大震災前）

注)

- 「流れ込み式水力」：川の水をそのまま発電所に引き込んで発電する方法です。豊水期や渇水期など水量変化にともない、発電できる電気の量も変わります。
- 「調整池式水力」：調整池に水を貯水することで水量を調節し、発電する方法です。1日分あるいは1週間分程度の発電用水を調整池に溜めて、発電量を調整することができます。
- 「貯水池式水力」：河川をダムでせき止め、ダムに溜まった水を発電用に用いるものです。雪どけや梅雨、台風などの豊水期に貯水し、渇水期に放流して発電する方法です。構造物から見た場合、ダム式、ダム水路式がこの方法です。

発電機を回して電気をつくる

大部分の電気は発電機を使ってつくられています。身近にある発電機として、防災用品としてあげられる手回し発電機や、自転車のライトをつけるための発電機などがあります。これら

と発電所にある発電機の原理は、基本的には同じです。つまり、磁石から出てくる磁力線を動かしてコイルの中を横切らせると、Vol. 3 で説明した電磁誘導と呼ばれる現象により、コイルの両端に電圧が現れます。この原理を利用するのが発電機です。

発電機では、磁力線を発生する磁石は、永久磁石でもよいのですが、多くの場合、電磁石が使われます。電磁石とするためのコイルは回転できるように、回転子あるいはローターと呼ばれるものに取り付けられます。コイルはN極、S極をもつ電磁石をつくり磁力線を発生します。

回転子は水車、タービン、羽根（ブレード）により回転します。回転子の周りには、電気を発生させるためのコイルが配置されます。このコイルは、固定子コイルあるいはステータコイルと呼ばれ、発電機に固定されています。このコイルの両端から電気が出力されます。すなわち、回転子が回転し磁力線が時間的に変化しながら、周囲にある固定子コイルを横切ると、その両端に交流の電気が発生します。

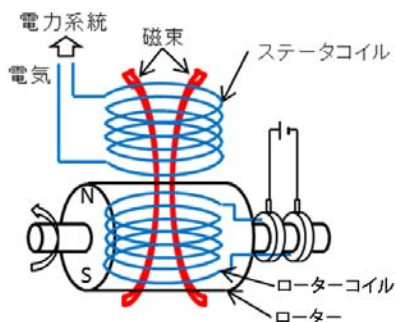


図3 発電機のしくみ
(本図は原理の説明図で実際の
発電機の構造とは異なります)

つくられる電気には直流と交流がある

電気には直流と交流があります*1。乾電池や充電できる電池では、直流の電気が発生します。直流の電気にはプラス(+)とマイナス(-)の極性があるので、極性を間違わずに接続して使わなければいけません。一方、電力会社から家庭などに供給される電気は発電機でつくられており、交流です。交流の電気の場合、コンセントに接続するときに電気の極性を気にする必要はありません。

*1) Vol.3 に詳しく説明されています。

交流の電気

家庭のコンセントでは、電気の極性がどのようになっているのでしょうか。交流の極性は時間とともに、プラス(+)になったり、マイナス(-)になったり変化します。この時間的变化について、時計を使って針とその影の長さにより説明しましょう。図4のように時計に対して、12時方向から6時方向に光が当たっているとします。ここで、短針がつくる影の長さに注目し、この長さを電気の大きさと考えことにします。

時間の経過につれて、短針が1時、2時と変化するとともに影の長さは長くなり、3時の位置で影の長さは最大になります。この長さを+1とします。その後、4時、5時へと変化すると影の長さは短くなってゆき、6時の位置では影の長さがなくなり、長さは0となります。さらに、7時、8時へと変化すると影の長さは反対方向に長くなり、9時の位置で影の長さは最大になります。これは3時と反対の位置ですから、この時の長さを-1とします。その後、10時、11時へと変化すると影の長さは短くなり、12時の位置で、影の長さは再び0となります。

交流電気をつくる発電機

この時計の針の時間変化を使って、発電機が交流の電気をつくる仕組みを説明することができます。短針が発電機の回転子の電磁石と考えてください。例えば短針の先端側が N 極、反対側が S 極とします。回転子の電磁石から発生する磁力線が、固定子のコイルを横切ることにより、先程説明した短針の影の長さが変化するように、固定子のコイルに時間的に極性が変化する電気が発生します。

電気の極性が一秒間あたりに変化する繰り返しの回数が周波数です。この周波数は東日本では 50Hz（ヘルツ）、西日本では 60Hz となっています。例えば、東日本においては発電機の回転子が 50Hz で回っており、これは 1 秒間に 50 回、短針が回ることになります。発電機がつくる交流の周波数が時間とともに大きく増えたり、減ったり変化してしまうと、電気を安定に送ることが難しくなるので、周波数が常に一定となるように調整されています。このことについては、Vol.5 で詳しく説明しています。

2 再生可能エネルギーで電気をつくる

エネルギー源として永続的に利用することができる風力、太陽光、地熱、水力などは、再生可能エネルギーと呼ばれています。いずれも燃料を必要としないので、エネルギー資源の枯渇という問題がなく、地球温暖化に大きな影響を与えない長所があります。このため、海外でも積極的な利用が進んでいます。しかしながら、大規模に発電しようとする自然環境への配慮も必要となります。

風力発電の風車や太陽光発電の太陽電池パネルを、身近に目にする機会が多くなったので、まず再生可能エネルギーで電気をつくる方法を説明します。このうち、太陽光発電だけは直流の電気をつくります。そこで、太陽光発電から始めます。

太陽光発電

地球ならびに、そこに生きる人類と生物は太陽に大きく依存しています。太陽光が無ければ、地球上の生物の大部分は生存



図5 太陽光発電

できません。石油や石炭などの化石エネルギーは太陽エネルギーが長い年月をかけて形を変えたもの、とも言われています。太陽からは、紫外線、可視光線、赤外線など波長が異なる光エネルギーが地球上にそそいでいます。太陽光は典型的な再生可

能エネルギーで、地球上のどこでも利用できます。

太陽からのエネルギーは、日本では1平方メートルあたりに最大約 1,000W (ワット) (1kW (キロワット)) となります。このエネルギーは、家庭の電気の契約量を例として、どの程度になるかを考えてみましょう。例えば、4人家族で電気の契約量が 40A (アンペア) とすれば、一人あたりでは 10A となります。家庭にきている電圧は 100V ですので、10A の電気を使うとすると $100V \times 10A = 1,000W$ (1kW) になります。これは、1平方メートルの面積にそそがれている太陽エネルギーと同じ程度です。太陽からのエネルギーで電気が十分まかなえる計算になります。しかしながら、太陽のエネルギーをすべて電気に変えることは、残念ながらできないのです。

太陽電池のしくみ

屋根の上に太陽電池パネルを取り付けた家や、広大な敷地に太陽電池パネルを多数配置したメガソーラーと呼ばれる発電施設について、それぞれ聞いたことがあるでしょう。

太陽光発電では、太陽電池を使って太陽からの光エネルギーを電気エネルギーに変換します。太陽電池は、n型とp型という二種類の半導体を貼り合わせた構造をしています。n型半導体は電子が多く、p型半導体は逆に電子が少ない性質を持っています。

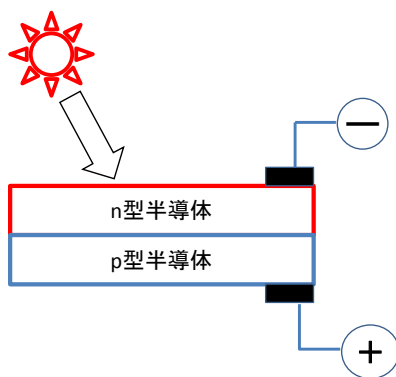


図6 太陽電池の原理

この二種類の半導体を貼り合わせた部分に太陽光があたると、光エネルギーにより電子が新たに発生し、この電子による電流が、それぞれの半導体に取りつけた電極を通じて外部に流れるように、直流の電気が発生します。

一般に、他の発電方式では運動エネルギーを発電機で電気に変換しますが、太陽電池は光エネルギーから電気エネルギーに直接変換することができます。

太陽の光の強さは、日の出からだんだん強くなり、昼過ぎに最大になり、日の入りとともになくなってしまいます。同様に、太陽光発電も日の出とともに発電が始まり、昼過ぎに最大になり、日の入りとともに発電が終わります。また、雲が太陽光をさえぎると発電量が減ってしまいます。

実際の太陽光発電では、広い面積に配置した多数の太陽電池パネルにより、たくさんの電気を作ります。太陽電池は直流の電気を発生しますので、他の発電方法でつくった電気と一緒にして使うためには、交流に変換する装置が必要となります。発電した電圧と周波数を電力系統に合わせる機能をもつ変換装置を、専門用語で PCS (Power Conditioning System) と呼びます。このようにして太陽の光エネルギーを電気エネルギーとして、電力系統に接続して送ることができます。

太陽光発電として必要な広さ

太陽電池パネルの電気への変換効率は、まだ 20%弱です。このため、先に計算した家庭一人あたりの電気の契約量 1,000W (1kW) に相当する電気をつくるには、晴天のときでも、太陽電池パネルの面積は 5 平方メートルくらいが必要になります。また、天気が雨や曇りの場合には、さらに発電量が低下し、か

つ夜間は発電できないので、利用率*1は12%程度となってしまいます。1,000W(1kW)の太陽電池パネルを設置しても、平均的には120Wしか発電できないことになります。

*1) 利用率とは実際の発電量が、仮に100%運転を続けた場合に得られる電力量の、何%にあたるかを表す数値です。

太陽光発電は他の発電方式に比べると、エネルギー密度が低いので、大きな電力を生み出すためには、広大な面積が必要となります。また、太陽光発電は昼間しか発電できず、雨や曇りになると極端に出力が減ってしまいます。発電する電力量が不安定となる欠点を、他の発電方式と組み合わせて補い、一定の電気が供給できるようにする必要があります。

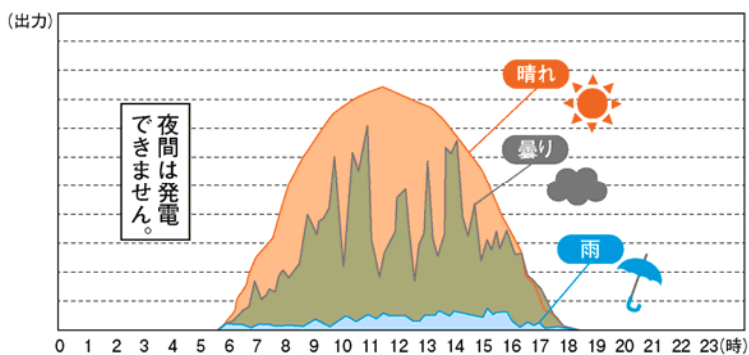


図7 太陽光発電の出力変動

例えば、太陽光発電と二次電池と呼ばれる電池を組み合わせることにより、晴れたときに電池に充電しておき、曇った時に電池から放電することにより、太陽光発電の発電を一定にすることが可能です。なお、充電ができる二次電池の詳しい説明は、

Vol.6 にあります。また、太陽光発電が大規模になれば、後で述べる水力発電で発電量の増減を補う方法があります。

いろいろな地点の太陽光発電を広い地域で管理すれば、ある地域では曇りでも、他の晴れたところで発電した電気により補ってやることにより全体的に増減を小さくすることが可能となります。この効果を、増減をある程度平均化することから、ならしこうか均し効果あるいは平滑化効果と言います。このように太陽光発電を効率的に運用するために、他の発電方式と組み合わせるなど、いろいろな検討がされています。

日本最大級の太陽光発電所として、大分県にある約 105 万平方メートルの敷地に、出力 82,000kW (8 万 2 千 kW*1) の、太陽電池の施設があります。

*1) 発電に関する説明では、1,000,000W を 1 千 kW のように、「kW」を単位とする表現がしばしば使われます。

風力発電

海を走るヨットや帆船、オランダの風車など、風の力はさまざまに利用されています。風車を使って発電機を回す方法が、風力発電です。風の力をブレード（羽根）で受け風車が回り、風車につながった発電機が電気を生み出します。このように、風力発電では交流の電気がつくられます。



図 8 風力発電

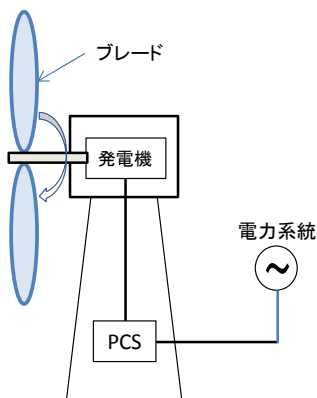


図9 風力発電の構成

風は自然現象なので風速は速くなったり、遅くなったりするため、これに対応して発電機の回転数も変化します。このため、発電される電圧と周波数は、風速に従って変化してしまいます。このように変化する電気を電力系統に直接つなぐことはできません。

そこで、太陽光発電と同じように、PCS (Power Conditioning System) あるいはパワーコンディショナーと呼ばれる特別な変換装置に接続して、電圧と周波数を電力系統に合わせています。風力発電では風のエネルギーで単純に電気をつくるだけでなく、電力系統に接続できるように調整・変換してから送り出されます。

風力発電の特徴的な大きさ

最近では、風車のブレードが 60m を超える長さのものも作られており、たいへん大きな構造物となります。このため、風車の回転による騒音の発生や野鳥への影響など、自然環境への配慮も必要です。

風車 1 台で 1~5MW (メガワット) (1,000~5,000kW、1千~5千 kW) を発電できる風力発電装置が多く設置されています。ただし、風の力は強くなったり、弱くなったりするので、発電機としての利用率は 20%程度となります。つまり、出力が 5MW の風車を設置しても、平均的には 1MW しか発電できません。

日本最大級の施設として、福島県の郡山布引高原風力発電所ぬのびきがあり、風車が 33 台で合計出力は 66MW (6 万 6 千 kW) です。

地熱発電

世界でも有数な火山国である日本には、各地に温泉があります。温泉では、地表から数 km の深さにあるマグマの熱により、地下水などが加熱されてできた温水・熱水を取り出しています。

地中には、マグマにより加熱された熱水が貯まっている層があります。言いかえると、地中の熱エネルギーが貯まっている層があります。この熱エネルギーでつくられる蒸気により、タービンを回して発電するのが地熱発電です。地中の熱エネルギーは再生可能エネルギーの一つであり、風力や太陽光と違って、天候や時間にも左右されずに、エネ

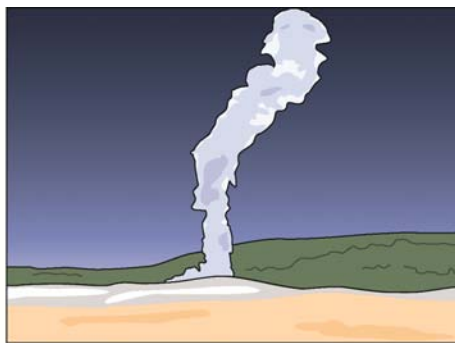


図 10 地熱発電に使える蒸気

ルギーをたえず一定に利用して発電できる特長があります。

タービンを回すための高温の蒸気には、地中から直接得られるもの、熱水と蒸気を分離してから得られるもの、とがあります。また、温度が十分には高くない熱水しか得られない場合には、沸騰する温度が水よりも低い物質を熱交換器を使って蒸気を発生し、タービンを回す方法もあります。

日本の付近はプレートが複雑に入り組んでおり、そのために地震が多く発生し、火山もたくさんあります。これは地中にマグマが生じる可能性が高いことを意味します。地震・火山の噴火という自然災害が起きる宿命を持つ日本は、その特殊な地下の構造とエネルギーを積極的に利用するよう、前向きにとらえる必要があります。

日本最大の地熱発電所は、大分県の^{ほっちょうぼる}八丁原発電所で、出力が110MW（11万kW）です。

水力発電

日本は山国のため、高いところから低いところに向かって急流となる河川がたくさんあります。高いところから水が急激に落下する滝を見たこともあるでしょう。滝の下では水が激しく岩にぶつかり、しぶきをあげています。高いところにある水は位置のエネルギーをもっています。この



図 11 水力発電

エネルギーを電気に変換するのが水力発電です。河川に豊かな水量を確保し、森林などにより自然界における水の適正な循環を維持することが必要ですが、水力発電は水という再生可能エネルギーを利用する方法です。

最近では、里山などにみられる高低の差が小さい水の流れでも、水車の構造を工夫して発電する小規模水力も実用化されています。

水力発電のしくみ

水力発電では、水の力で水車と発電機を回して電気をつくります。水の力を連続的に利用できるように、川の流れをダムでせき止め、水を貯め、人工の湖を作ります。高いダムを作れば、ダムの上部と下部では水の高さに大きな違いができます。ダムの上部で取り入れた水を鉄管などの水路で、下部に設置された発電所の中にある水車のところまで導いてやると、水の力で水車を回すことができます。

川の上流と下流とで標高に大きな違いがある場合には、水の力を別な使い方で利用できます。上流のダムは水を大量に貯めるのではなく、発電するための必要な水が一定に得られるよう、川の流れをせき止めるために作ります。取り入れた水は水路を使って、低いところにある水車まで導き、発電します。水力発



図 12 水車 (235MW)
(画像提供：日立三菱水力㈱)

電では、電気へのエネルギー変換効率は90%程度になります。

火力発電や原子力発電の運転が始まるまで、日本の電気の多くは水力発電により、つくられていました。戦後しばらく、「黒部の太陽」の映画で有名な、黒部川第四発電所が発電を開始する1960年のはじめごろまでは、水力発電による発電量が火力発電を上回っていました。これを「水主火従」と言います。その後、安価な石油を使った火力発電の発電量が水力を上回るようになり、「火主水従」と逆の言い方になりました。さらに、大阪で日本万国博覧会（大阪万博）が開催された1970年ごろからは、原子力発電も増えていきました。

現在、世界で最大の中国長江（揚子江）の三峽ダム発電所^{さんきょう}は、ダムの大きさが高さ185m、長さ2.3kmもあります。この発電所には、水車の直径が9.5mで、最大水量600ton/sを流せる700MW（70万kW）の水車が32台もあり、合計22,400MW（2,240万kW）もの大きな電気を生み出しています。

揚水発電

水力発電では、発電に使った水は川に放流します。この水を貯水池に貯めて再び発電に使えないでしょうか。そのためには、高さに違いがある上部と下部の場所に調整池をそれぞれ作り、下部の調整池にある発電をした後の水を、上部の調整池に再び汲みあげてやる必要があります。水力発電所では発電機を回すために、高いところから低いところに流れる水の力で水車を回しています。逆に、発電機をモーターとして、また水車をポンプとして運転できれば、一組の水車と発電機を使って発電すると、水の汲みあげることの両方の運転ができるようになります。

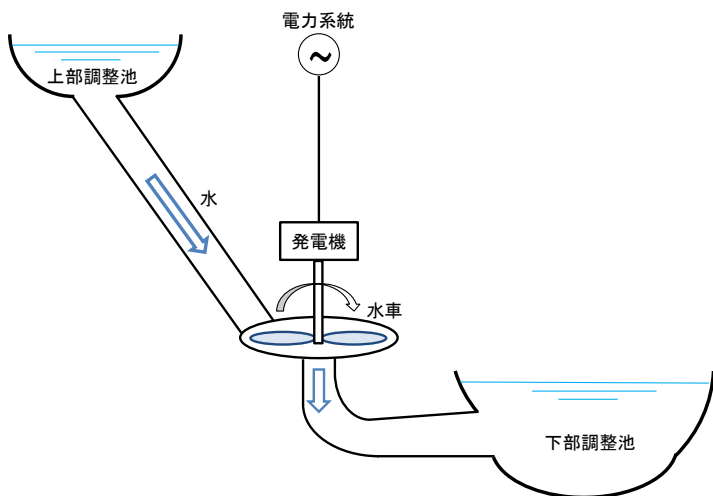


図 13 揚水発電の原理

電気が、足りないときは発電機、あまるときはポンプ

発電機をモーターとして運転することは電氣的に難しいことではありません。水車と発電機を使って、発電と水をくみ上げるポンプの両方の運転ができる技術が開発されています。このような働きができる発電所が揚水発電所です。なお、水を汲みあげることを「揚水」と言います。電気がたくさんあるときに水を上側の調整池に組み上げておき、電気が足りなくなりそうな時に水を放出して発電することができます。これは、電気を水の位置エネルギーに変えて貯めるもの、と言えます。電気を大規模に貯めることのできるのは、現段階で唯一この方法しかありません。揚水発電所では発電とともに電気を貯める機能により、電気が有効に使われるようにしています。

揚水発電所の例

群馬県にある神流川^{かんながわ}発電所は、地表から 500m の深さに発電所があり、1 台の水力発電機で 470MW (47 万 kW) の出力が可能で、6 台すべてが完成すると出力が 2,820MW (282 万 kW) の揚水発電所となります。

写真に示す北海道の京極発電所は、山間部に標高差のある二つの人工の池を造り、上部調整池（写真左上）から下部調整池（写真中央）までの高さの違い約 400m を利用して発電しています。

巨大なすり鉢状をした上部の池は、札幌ドームの約 3 杯分に相当する 440 万 m³ を貯水でき、電気がたくさんあるときに下部の池から上部の池に水をくみ上げておき、電気が足りなくなるときの時には下部の池に水を流して発電します。



図 14 揚水発電所

(出典：電気事業連合会「Enellog」Vol.15)

3 蒸気力で電気をつくる

イギリスで18世紀なかばから始まった産業革命では、蒸気を動力として利用するさまざまな機械が発明されました。燃料を使って高温・高圧の蒸気を発生し、蒸気をタービンにあてて発電機を回すと、交流の電気がつくられます。蒸

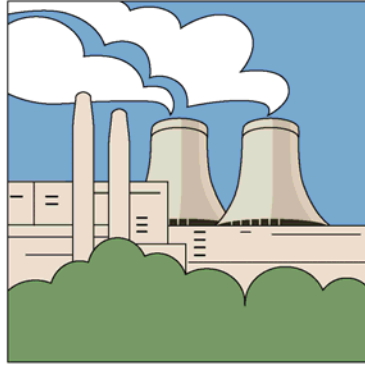


図 15 火力・原子力発電

気の発生方法の違いにより、火力発電と原子力発電とがあります。

火力発電

日本では産業と経済活動の発展とともに、大量の電気が必要になり、電気の主たる発生方法が水力発電から火力発電に移りました。火力発電で最初に使われた燃料は石炭で、石炭を掘りだす炭鉱が日本にも多くありました。次に、安くて使いやすい石油が輸入されるようになると、石炭の使用量は激減してしまいました。しかしながら、1970年代に石油の価格が高騰して、輸入が困難となったオイルショックを経験し、燃料として石油だけに頼るのは問題であることが分かりました。現在では、さまざまな燃料を使った発電方法を組み合わせています。主成分

がメタンで硫黄分を含まない LNG（液化天然ガス）も、多く使われています。

火力発電のしくみ

火力発電では、石炭・石油・LNGなどの燃料を焚いてボイラーで水を加熱し、高温・高圧の蒸気を発生させます。この蒸気でタービンを回すので、蒸気タービンと呼ばれ、発電機と一体になっています。発電機と同じ軸で回っている蒸気タービンは通常、複数取り付けられています。これは、ボイラーで発生した蒸気の一つの蒸気タービンの回転に使った後、再加熱などの処理を加えて、次のタービンを回すのに使われるためです。このようにして、蒸気の熱エネルギーを有効に使う努力がはらわれています。

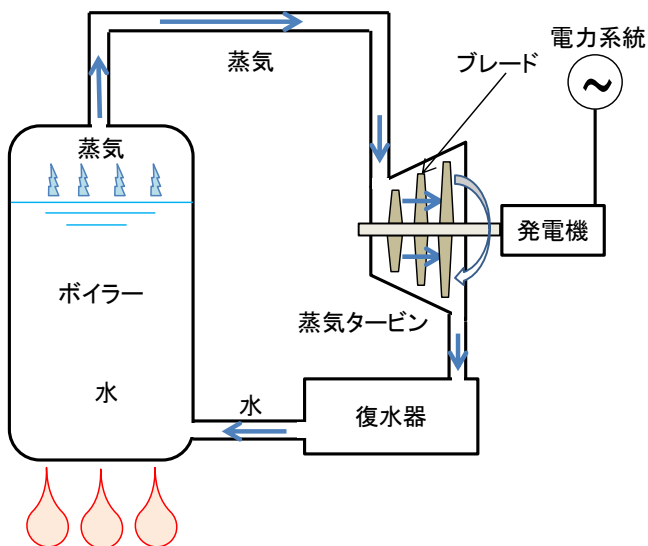


図 16 火力発電の原理



図 17 蒸気タービン (1,000MW)
(画像提供：三菱日立パワーシステムズ株式会社)

典型的な火力発電では、効率が約 40%です。蒸気の温度と圧力を高くしていくと、効率を上げることができます。愛知県にある碧南^{へきなん}火力発電所では、1 台で 1,000MW (100 万 kW)



図 18 タービン・発電機 (1,000MW)
(画像提供：三菱日立パワーシステムズ株式会社)

の発電設備があります。ボイラーから発生した圧力が 240 気圧で、600°C 近い高温の蒸気で回るタービンは、直径が 3.7m もあり、回転するブレードの先端の速度は、音速の 2 倍にもなります。また、発電機の回転子である電磁石の部分は、直径 1.2m、長さ 7m 程度になります。

なお、火力発電の発電機一台について、日本において最も大きな発電出力の大きさが、「100 万 kW」であることを覚えておくと、他の発電方法と比較するときに役立ちます。

今まで説明した火力発電では、ボイラーで発生した蒸気を使うので「汽力発電」とも呼ばれます。一方、自動車で使われるエンジンで発電機を回すこともできます。これを「内燃力発電」と言い、例えば、ディーゼルエンジンで発電機を動かして、離島や非常用の発電設備として使われています。

コンバインドサイクル発電

さらに効率を高めるため、ガスタービンを組み合わせた火力発電があります。ガスタービンはジェットエンジンと類似した構造となっています。ガスタービン内に燃料を供給し、燃焼させて発生した高温の燃焼ガスでガスタービンを回し、発電機で電気をつくります。この発電では蒸気の代わりに、温度が約 1,300°C の高温の燃焼ガスが使われます。

タービンに加わる燃焼ガスの温度が高いほど、発電機の効率は高くなります。しかし、高温に耐えられるタービンの金属材料の開発が重要になります。

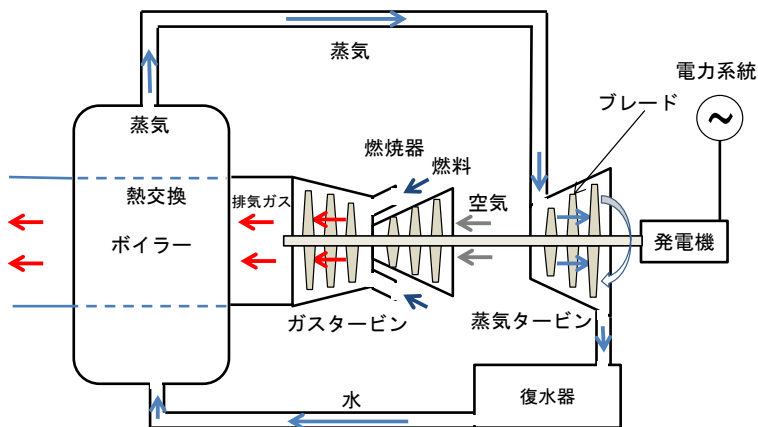


図 19 コンバインドサイクル

ガスタービンから出てきた高温の排気ガスは、まだ十分な熱エネルギーを持っているので、その熱をボイラーに加え、発生させた蒸気により、さらに蒸気タービンを回して電気を発生させることができます。ガスタービンと蒸気タービンのそれぞれによる発電を組み合わせることから、この方式を英語でコンバインドサイクル（組み合わせサイクル）発電と呼びます。この方式では、効率を 50%以上高くできます。

兵庫県にある姫路第二発電所では、コンバインドサイクル発電方式への更新工事を行い、熱効率が更新前約 42%から、世界最高水準の約 60%に向上しました。火力発電の効率が一挙に 1.5 倍になり、燃料も 2/3 に減るわけですから、これは大きな技術革新のひとつです。

このコンバインドサイクルに、さらに燃料電池を加えたトリプルコンバインドサイクルの研究もされています。液化天然ガ

ス（LNG）を燃料電池に入れ、電気を取り出します。この熱も使って LNG を燃焼させ、その圧力でガスタービンを回し、2 度目の発電をします。最後にガスタービンから出た排気ガスで水を沸騰させ、蒸気タービンを回します。このトリプルコンバインドサイクルにより効率を 70%に向上することが可能となります。

このように将来に向けて化石燃料を賢く利用する、さまざまな研究が進められています。

コージェネレーション

天然ガス、石油、LP ガスなどを燃料として、エンジン、タービン、燃料電池などの方式により発電し、その際に生じる熱も同時に利用して、電気と熱の両方を供給するシステムをコージェネレーション（熱電併給）と呼びます。

通常の方法では、発電に利用した以外の熱エネルギーは捨てていましたが、余った熱を捨てずに水を温めることに利用すれば、さらにエネルギーが有効に利用できます。

コラム：日本が造った発電設備がギネスブックに！

オーストラリアに納入する発電設備を製造することになった日本のメーカーが、超コンパクトな火力発電機を開発しました。コイルには大きな電流が流れるので、大きな損失により熱も大量に発生してしまいます。そこで、コイルだけでなく周辺の電気回路部分を、効率よく冷却できる方法を苦労のすえ実現しました。このとき、工場で試験を実施し、性能を検証できた技術者たちは、大きな感動を味わったということです。

オーストラリアの顧客に性能を高く評価され、合計で10台も納入できました。故障もほとんどなく、使い勝手も良いことから、発電設備が1,073日間にわたって連続運転できた記録により、2002年にギネスブックにも掲載されました。

原子力発電

原子力発電では、ウランなどの核燃料を使い、ウランの核分裂によって生じる熱エネルギーにより、原子炉で蒸気を発生させます。この蒸気でタービンを回し、発電機で電気をつくります。簡単に言えば、原子力発電の原子炉は、火力発電におけるボイラーに相当します。

原子炉内で発生させた蒸気でタービンを直接回す沸騰水型（BWR型）と、原子炉内で生じた高温の水を熱交換器により蒸気を発生させる加圧水型（PWR型）の、二種類の方式が使われています。

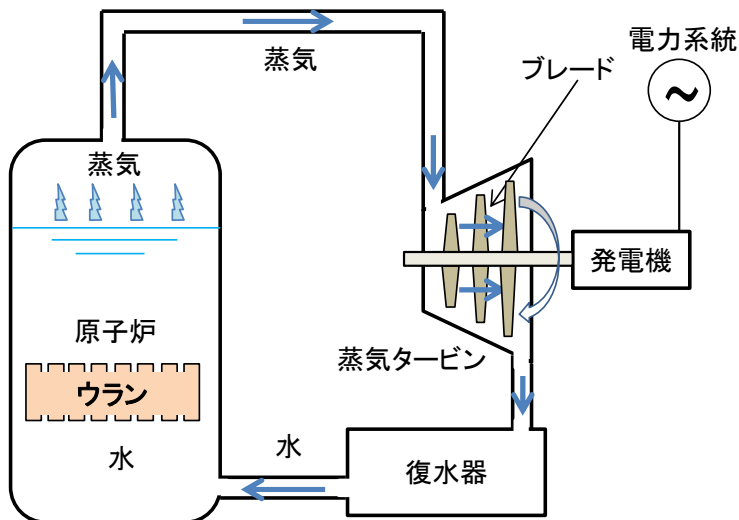


図 20 沸騰水型（BWR）原子力発電の原理

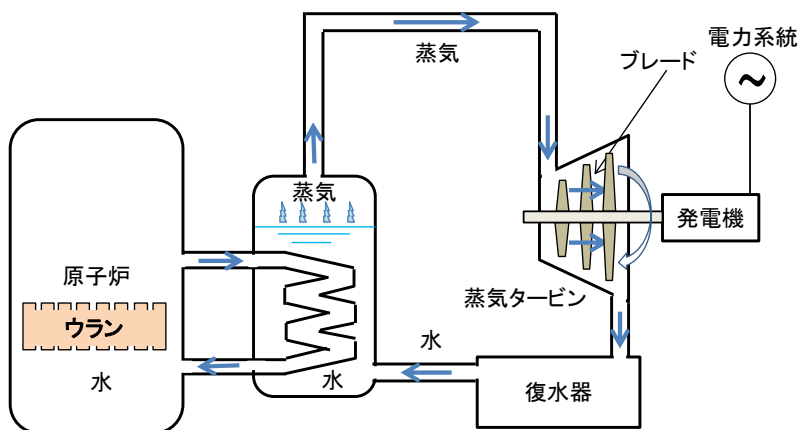


図 21 加圧水型 (PWR) 原子力発電の原理

原子力発電の特徴

原子力発電のエネルギー効率は 35%程度です。原子力発電所で大きなものは、一台の出力が 1,350MW (135 万 kW) で、原子炉の大きさは直径 7m、高さ 20m、質量 900 トンであり、タービンの直径は 5.3m にもなります。新潟県にある^{かしわざきかりわ}柏崎刈羽原子力発電所では、7 台の発電機で構成され、合計出力が 8,200MW (820 万 kW) の発電が可能です。

原子力発電は放射能の管理ならびに放射性廃棄物の処理という課題がありますが、石油、石炭、天然ガスに比べて、燃料の交換期間が 1 年から 2 年間と長いこと、二酸化炭素 (CO₂) を出さないことの利点があります。

4 直流の電気をつくる

電気には交流と直流の二種類があることを説明しました。ここまで説明した発電方法では太陽光発電を除いて、つくられる電気は交流です。交流の電気は、発電所から変電所を経て送電線・配電線により、家庭・会社・学校などに供給されています。これは、遠く離れた所にある発電所から、電気を使うところまでに電気を送るには、交流が適しているためです。しかしながら、私たちの身のまわりにあるテレビ・エアコン・パソコンなど、多くの電気製品は直流の電気で動いています。これらの電気製品の内部には、交流から直流に変える装置が入っているので、直流で動いているとは思わないでしょう。このように、私たちは交流と直流の両方の電気を意識しないで使っています。

スマートフォン、デジタルカメラをはじめとして電池を使って、どこでも自由に直流の電気を利用できるようになりました。このようにどこにでも持ち出せることが電池の大きな特長です。最近では電池を自動車に使用する電気自動車などにより、ガソリンエンジン車よりエネルギー効率を良くすることが可能になりました。電気自動車やハイブリッド自動車は直流の電気を使っています。充電ができる小型・軽量で高性能の電池ができれば、さらに便利になることでしょう。

電池と直流電気

身近にある直流の電気は、単一や単三の乾電池から得られます。このほかに太陽電池、燃料電池でも、直流の電気をつくることができます。これらの電池にはプラスとマイナスの電極が

あり、電気的な極性は時間的に変化しません。電池に何も接続していなくても、プラスとマイナスの電極の間には電圧が現れています。この電圧の大きさは電池の種類によって違います。例えば、単三型のアルカリ乾電池では 1.5V (ボルト)、充電ができるニッケル-水素電池では 1.2V、自動車のバッテリーでは 12V です。

電池は目的に応じて、直列に接続し電圧を高くして使われます。例えば、電気自動車で使われる電池の出力電圧は、300～400V です。



図 22 さまざまな電池

電池のしくみ

電池では、電池の内部に配置された電解質と電極との化学反応で、直流の電気がつくられます。電極表面での化学反応により、マイナスの電気を帯びた粒子である電子が発生したり、消滅したりします。また、プラスの電気を帯びた粒子であるイオンも発生したり、消滅したりします。つまり、電極付近では、電子とイオンそれぞれの発生と消滅が起こっています。電極で発生した電子は、電極に接続された外部の回路に流れて電流となります。

電解質と電極の種類による組み合わせにより、さまざまな電池があります。リモコン、時計、懐中電灯などに使われている、もっとも身近な電池にマンガン電池、アルカリ・マンガン電池があります。電卓や腕時計には、ボタンやコインの形をしたリチウム電池などが入っています。自動車では鉛蓄電池が、エンジンをスタートさせ、走行中はランプ、エアコンを動かすために充電と放電を繰り返しています。

充電できる電池とできない電池

電池には充電ができるものと、できないものの二種類があります。電池の詳しい説明は、Vol. 6 にまとめられています。電解質と電極での化学反応の性質から、充電ができないマンガン電池やアルカリ・マンガン電池を、一次電池と呼びます。一方、自動車のバッテリー、スマートフォンやデジタルカメラに使われる電池は充電ができ、二次電池と呼ばれています。その代表的なものとして、ニッケル・水素蓄電池やリチウムイオン二次電池があります。

スマートフォンは充電が必要

電池では、化学反応により化学エネルギーを電気エネルギーに変えています。このため、直流の電気は、どこでも簡単に得られるという大きな特長があります。一方、技術の進歩により、わずかな電力で動くコンピューターなどの電子機器が開発されたので、スマートフォンなどが使えるようになりました。これらを動かす電子回路は直流の電気で動くので、充電式の電池である蓄電池が使われています。

充電のために AC アダプターを、普段何気なく使っています。しかも家の中には、多くの AC アダプターがあるでしょう。テ

レビ、エアコンなど、われわれが使っている電気製品の多くは、コンセントから電気を得ていますが、内部は直流の電気で動いています。しかしながら、ACアダプターは見当たりません。これは、電池を使わずに、交流から直流の電気に変換する回路を、電気製品の中に組み込んで、直流の電気を得ているためです。充電やACアダプターの使用という手間が必要ですが、直流の電気は携帯できる電気製品に大きな貢献をしています。



図 23 ACアダプター

燃料電池

直流の電気は、燃料電池からも得られます。次世代の自動車として、電気自動車や燃料電池自動車が期待されています。充電が必要な電気自動車は、充電に時間がかかること、蓄電池の容量の制限から、一回の充電で走れる距離が短いことなどの課題があります。これらの課題を解決できる燃料電池自動車の実用化が進んでいます。燃料電池は水素を燃料として、酸素との化学反応から電子を発生し、燃料電池に接続されている回路に電子による電流が流れ、直流の電気が発生します。

燃料電池の基本構造は、微細な孔が多数設けられた一組の電極が、電解質を挟むように配置されています。片方の電極側に

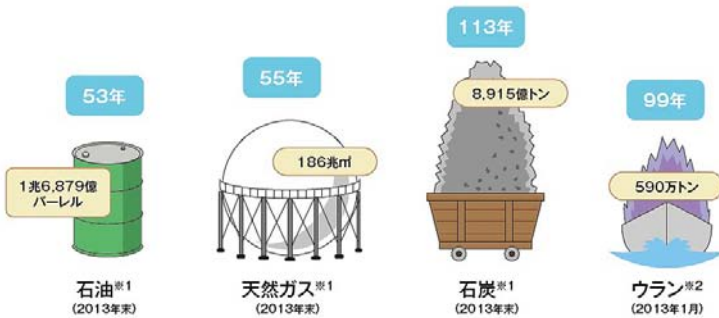
水素を流入させると水素イオンになり、電子が発生します。水素イオンは電解質中を移動し、反対側の電極に到達すると、そこに存在する酸素と電子と反応して水になります。このとき、二つの電極が回路で接続されていると、電子の流れによる電流となります。この原理により、直流の電気が燃料電池により発生できます。

電解質の違いにより、さまざまな形式の燃料電池が開発され、大容量の発電にも使われています。燃料電池は熱も発生するので、温水を利用して、全体の効率を高くする努力も図られています。

5 将来に向けた電気のつくり方を考える

電気はさまざまなエネルギーと方法からつくられています。日本には石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料資源はほとんどなく、海外に頼っています。今まで述べた太陽光や風力以外にも、将来に向けて潮力、波力、太陽光の熱を利用した太陽熱発電などいろいろな検討がされています。ただし、再生可能エネルギーの中でも、太陽光や風力による場合には、発電量が天候などに依存し大きく変動します。化石燃料の枯渇、CO₂による地球温暖化、生物・自然環境への影響など、どのエネルギーにしても大きな課題をかかえています。将来にわたって電気を使

世界のエネルギー資源確認埋蔵量



(注) 可採年数=確認可採埋蔵量/年間生産量
ウランの確認可採埋蔵量は費用130ドル/kgU未満

出典: (H13)BP統計2014、(H12)DECC-IEA Uranium 2014

図 24 資源埋蔵量
(出典：電気事業連合会「原子力・エネルギー図面集 2015」)

つていけるとともに、世界にも貢献できる技術をうみだせるよう、挑戦する必要があります。

各種電源別のライフサイクルCO₂排出量

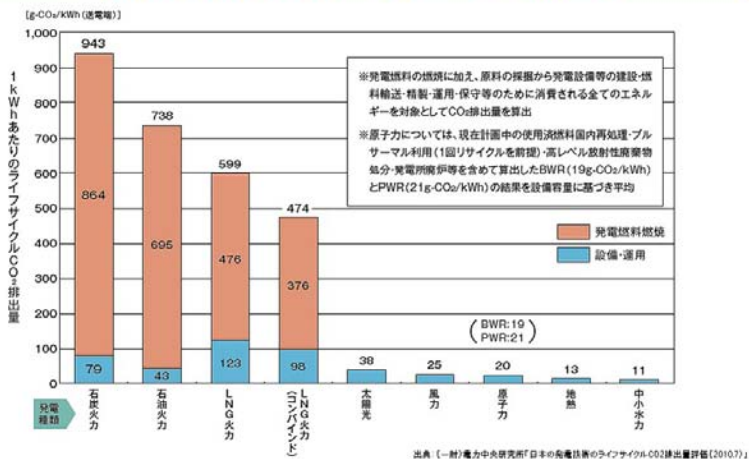


図 25 CO₂ 排出量

(出典：電気事業連合会「原子力・エネルギー図面集 2015」)

本冊子の企画趣旨について

2011年3月11日に発生した東日本大震災で、多くの発電所や変電所の運転が止まり、電気が供給されなくなる事態が発生しました。電気は、スイッチを入れればいつでも、どこでも、欲しいだけ使える状態が当たり前になっていましたので、市民生活にも社会活動にも大きく影響しましたが、その一方で人々の電気に対する関心が高まりました。

電気は便利なものですが、エネルギー資源が有限であるという制約の中で、正しく、賢く使うべきものでもあります。電気学会は、電気に対する理解を広く一般の皆様に深めていただくことが、重要で有用なことと考えます。この「電気の知識を深めようシリーズ」は、電気をやさしく、かつ正しい内容で理解いただき、電気に対する知識を深め、親しみをさらに増していただくために発行するものです。

2016年8月

電気の知識を深めようシリーズ刊行ワーキンググループ

電気の知識を深めようシリーズ

刊行ワーキンググループメンバー

主査 石井 彰三 ※

副主査 大来 雄二

副主査 新藤 孝敏

委員 伊与田 功

委員 白田 誠次郎

委員 桂井 誠

委員 亀田 秀之

委員 神津 薫

委員 酒井 祐之

委員 佐藤 之彦

委員 塩原 亮一 ※

委員 高田 達雄

委員 高橋 一弘

委員 谷口 元

委員 谷口 治人

委員 長谷川 有貴

委員 前島 正裕

委員 雪田 和人

(名前の後の※は本冊子担当者を示す)

電気の知識を深めようシリーズについて

電気の知識を深めてもらうことを目的とした本シリーズには、以下の7つの小冊子が用意されています。併せて読むと「電気」がもっとおもしろくなりますので、是非お読み下さい。

Vol. 1 電気とは何だろう

Vol. 2 私たちの身近にある電気

Vol. 3 電気の基本を考えてみよう

Vol. 4 電気をつくる

Vol. 5 電気を送る・配る

Vol. 6 電気を貯める

Vol. 7 スマートに安全・確実に電気を使う

電気の知識を深めようシリーズ Vol.4

電気をつくる

2016年9月30日 初版発行

非売品

編集者	一般社団法人 電気学会 電気の知識を深めようシリーズ 刊行ワーキンググループ
発行者	一般社団法人 電気学会 代表者 酒井祐之 〒102-0076 東京都千代田区五番町 6-2 Tel 03-3221-7312 Fax 03-3221-3704 http://www.iee.jp
印刷所	株式会社 太平印刷社

落丁・乱丁はお取替いたします。

©2016 Japan by Denki-gakkai

Printed in Japan



一般社団法人 電気学会

