

新エネルギーの開発と課題

—電力の芽生えから新エネルギーまで、 歴史的な発展を振り返りつつ—

国士舘大学理工学部理工学科電子情報学系教授 乾 昭文

抄録

今では電気のない生活は考えられない。これらの電気を生み出す発電方式として用いられているのは、水力発電、火力発電及び原子力発電が主なものである。このような中で、2011年3月11日に発生した東日本大震災による東京電力福島第1原子力発電所の放射性物質の大気放出という重大事故は、世界に大きな衝撃を与えた。原子力発電は安全性と廃棄物処理に課題があることは認識されていたが、その衝撃は強烈であった。エネルギー資源に乏しい日本は、電力資源をバランスよく取り入れてきた。今後は、原子力発電の安全性を見直しつつ、「再生可能エネルギー」や「新エネルギー」の普及を目指すことも重要な課題となる。東日本大震災以降、原子力に代わる新たなエネルギーが世界的な関心事になっている昨今、電力の芽生えから電力系統の形成の歴史的な発展経緯を紹介し、さらに、新たなエネルギー技術が現在どこまで進んでいるかをまとめる。

1. まえがき

今では電気のない生活は考えられない。これらの電気を生み出す発電方式として用いられているのは、水力発電、火力発電及び原子力発電が主なものである。水力発電は河川の持つ水のエネルギーを利用して水車、発電機を回して発電するものである。火力発電は地下資源の石炭、天然ガスを燃やして蒸気を発生させて、蒸気タービン、発電機を回して発電するものである。また、原子力発電はウランの核分裂の際に出る反応熱を利用して蒸気を発生させて、火力発電と同じように蒸気タービン、発電機を回して発電するもので、発電機を回転させる動力であるエネルギー源が火力と原子力でそれぞれ異なるものである。

主要国の電源別の発電電力量をみると、世界平均では、火力発電が約68%、原子力発電が約14%、水力発電が約16%、その他が約2% (2008年) となっている。日本では火力発電が約66%であり、日本でも、また、世界的にも火力発電の占める割合が高いことがわかる。1973年の石油危機以来、各国とも発電用燃料の石油依存度を減らす努力をしている。各国とも原子力の割合を高めており、特にフランスでは電力のほとんどを原子力で発電している(約77%、2008年)。日本では石油依存度が特に高かったが、エネルギー確保のリスク分散から電源の多様化を図っているのが現状である。特に、石油資源は、21世紀半ばにも消費しかねない状況である。一方、石炭は一番豊富な化石燃料であるが、燃焼ガス中に有害物質が存在する問題に加えて、炭素含有量が石油より20%多く、多量のCO₂を排出し地球温暖化の原因になっている。また、発電用燃料に使用する石炭は、現在の火力発電技術では石炭の

中でも良質のものに限られている。従って、今後はCO₂の回収、貯蔵などの技術開発を促進すべきであり、低品位石炭の活用技術も開発する必要があるかもしれない。このような火力発電に比べると、原子力発電は水力発電とともにCO₂を発生しない発電方式であり、地球温暖化の観点から世界的に特に先進国の間でその普及を推進する動きが加速的であった。

このような中で、2011年3月11日に発生した東日本大震災による東京電力福島第1原子力発電所の放射性物質の大気放出という重大事故は、世界に大きな衝撃を与えた。原子力発電は安全性と廃棄物処理に課題があることは認識されていたが、その衝撃は強烈であった。我が国でも高速増殖炉の開発計画を含む原子力政策全体の見直しが求められている。未曾有の悲劇に見舞われた日本は、国を挙げて復旧、復興に向け動き出している。しかし、未だ安定した原子力発電への見通しは立っていない。今回の原発事故から何を学ばなければならないのだろうか。この事故を契機に、反原発の声が高まっている。しかし、今すぐにすべての原子力発電を停止させるというのは、電力需給を考えれば非現実的である。むしろ、今考えるべきことは、いかに原子力発電の安全性を高めるかということと、原子力発電への依存度を抑えていくかということである。

エネルギー資源に乏しい日本は、原子力、石炭、天然ガス、石油、水力など電力供給源をバランスよく分散させてきた。今後は、原子力発電の安全性を見直しつつ、「再生可能エネルギー」や「新エネルギー」の普及を目指すことも重要な課題となる。「再生可能エネルギー」は太陽光や風力、水力、地熱など、再生可能な(繰り返し使用可能な)エネルギーを利用したエネルギー利用技術をいう。「新エ

エネルギー」利用技術には、燃料として使い物にならない粗悪な石炭を焼き固めたペレットを用いる技術や、日本近海の海底に眠る世界屈指の埋蔵量があるとされる、メタンと水が氷状に結晶したメタンハイドレードなどを用いる技術も検討されている。石油や石炭など、消費することによって枯渇してしまう「枯渇性エネルギー」に対して、自然の力を利用した長期間にわたって枯渇しないエネルギー源を指して「再生可能エネルギー」という言葉が使われる。もっともポピュラーなのは、現在も国内の1割弱の発電量を賄っている水力発電である。風力や太陽光などの自然エネルギー源はほぼ無限であるといえるが、発電設備面でのコストや発電効率の低さ、さらにエネルギー供給の不安定性など、課題が非常に多いのが現状である。このような中で、右肩上がりに増えてきた電力需要を低コストで安定な電力供給で賄うには、原子力発電は不可欠であるというのも事実であった。ところが、原子力発電はひとたび事故が起これば深刻な被害をもたらすことが今回の事故で明らかになった。新エネルギーにける期待と課題は非常に大きいものである。

ところで、電力系統は初期の発電機と負荷が1対1で直結されていた時代から現在の全国連携広域運営へと変遷した。発電方式で言えば、最初の往復駆動機が高速蒸気タービンとなり、今では原子力が全電力量の1/3を占めるようになった。今日の電力系統は三相交流で、家庭など小規模需要には単相交流で給電している。しかし、最初は直流であった。発電所と需要家を結ぶ送変電は初期の直流から交流に移り、交流は単相から多相と、電圧は500～1000kVに達し、さらに、直流が再登場し、海外では800kV送電が一般化した。

ここでは、東日本大震災以降、原子力に代わる新たなエネルギーが日本のみならず、世界的な関心事になっている昨今、電力の芽生えから電力系統の形成の歴史的な発展経緯を紹介し、さらに、新たなエネルギー技術が現在どこまで進んでいるかをまとめる。それと同時に、研究段階である最先端のエネルギー技術についても考えてみたいと思う。

2. 人類文明とエネルギー資源の変遷

人類がこの世に出現したのは今から1400万年前といわれているが、火をおこし、簡単な道具を使って生活を始めたのは100万年くらい前からである。森林の木々を切り倒して木材として家を建て、枯れ葉を集めて火をおこし、エネルギー源とした。木材が人類文明の発展における消費資源の最初ともいえる。このことをエネルギー資源という観点から眺めてみると、人は水が沸騰し蒸気が発生すること、地表に出ている燃える石、石炭の存在にも気付いたことが推察される。

人類がエジプトやメソポタミアなどの大河流域に移動

し、文明世界を築くのは約5000年前からである。このころの農耕作業、都市生活を支える動力は人力、牛、馬による畜力であり、その後、2000年くらいたってから（今より約3000年前）水のエネルギーを利用した水車が登場し、脱穀、製粉に用いられるようになったといわれている。

地表にしみ出てくる燃える液体、石油の存在も古くから知っていたことが伺われる。中東を流れるユーフラテス川の沿岸地方では、石油の一部がガス化して焰を挙げていること、また、その焰を崇拜する宗教も存在したことなどがギリシャ神話に記載されている。ギリシャ神話には、石油と思われる油に火をつけた武器を用いていることも記載されている。

一方、水が蒸気となることは古くから知られていたと思われるが、蒸気を動力にした機関は、約2000年前に、古代アレキサンドリアの工学者で数学者のヘロン（Heron、生没年不詳）によって発明されたといわれている。このヘロンの蒸気機関を図1に示す。木材により火をおこし、水を沸かして蒸気とし、蒸気を円筒状のノズルから噴出させて回転させてエネルギーを得ている様子が示されている。



図1 ヘロンの蒸気機関

溶鉱炉によるせん鉄の量産は14世紀になると可能になったが、その時の燃料は木材であった。鉄鋼産業が盛んになる17世紀になると、森林資源の枯渇が問題になり始めた。この危機を救い、また、産業革命の発端になる役割を果たしたのが、ワット（James Watt, 1736～1819）の蒸気機関の発明と、ダービー父子（Abraham Darby, 同姓同名の3代にわたる製鉄業者）のコークス高炉法の発明（1709年）である。水車に代わり蒸気機関が動力に用いられ、木材に代わり火力の強い石炭が燃料に用いられることになった。画期的な出来事である。

19世紀になると、いよいよ電気の出番である。次節でその芽生えの詳しいことは述べることにするが、電流と磁気の関係が発見され、それに伴い、各種の電気機器（発電機、電動機、変圧器など）が矢継ぎ早に発明され、実用化された。こうして、人類は火の次に眼には見えない「電気」を手に入れ、これを使いこなすようになったのである。エ

ジソン (Thomas Alva Edison, 1847～1931) による 1879 年の電球の発明から、蒸気機関の発電機による電球の点灯を経て、直流、交流戦争も経て発電技術が確立していった。

水の持つエネルギーを利用する水車に発電機を取り付けて発電する水力発電は、1882年ニューヨークで最初に実施された。さらに、翌1883年にはイギリスのポートルッシュ発電所で落差79m、出力75Wの水力の電力が電鉄用に利用された。

蒸気機関で有名なワットは、往復動蒸気機関だけでなく、1781年に回転式蒸気機関も発明している。仕事、電力の単位[W]は彼の業績にちなんで使われている。これらの原動機に発電機を直結して最初に電気を発生させたのはイギリスのパーソンズ (Charls Algemon Persons, 1854～1931) で、1884年に反動式蒸気タービンを直流発電機と組み合わせて7.5kWの出力を得ている。これが火力発電の原点である。このような経緯を経ていよいよ発電時代の幕開けである。火力発電の燃料には最初は石炭が用いられたが、中東で大規模な油田が発見され、石油が安定した価格で取引されるようになると、急速な電力需要に対応するため、石油火力発電所が多く建設された。さらに、1960年代になると、将来の石油資源不足を懸念して、LNG (液化天然ガス) への転換も図られるようになった。

1953年にアメリカのアイゼンハワー大統領 (Dwight David Eisenhower, 1890～1969) が国連で平和のための原子力利用を呼びかけた。原子力発電の始まりである。ウランがエネルギー資源として利用されるが、減速材 (黒鉛、重水、軽水) により中性子を制御し、同時に冷却材 (炭酸ガス、窒素ガス、重水、軽水) を用いて、発生した熱を蒸気に変えてタービンを回して発電するのが原子力発電である。実用化された原子力発電所の1号機は、1954年にロシアのオブニンスク発電所で5MWの電力を発電しモスクワに送電したのに始まる。一方、我が国での1号機は、1966年の茨城県の東海発電所である。

今後のエネルギー資源の増大により化石燃料の枯渇が心配されている。そのため、循環型エネルギーで、環境にやさしい自然エネルギーの開発が急務となる。環境にやさしいクリーンなエネルギーという認識であるが、その安定した利用にはさまざまな難しい点もある。ただし、例えば太陽放射 (太陽が全地球に降り注ぐエネルギー) の推定収集可能量は1000TWあるとされており、この1パーセント (10TW) を利用したとしても、世界中のエネルギー消費量を賄うに十分である。このほかにも、例えば、風力、波力、潮力、地熱流、バイオマス、地熱などの自然エネルギー活用についても地道に展開を拡大することが望まれる。さらに、地中深く眠るといわれているオイルシェールやタールサンドの掘削、活用技術、人類究極のエネルギー源といわれる核融合発電や宇宙太陽光発電などの新技術の開発も期待される。

3. 電力の芽生え

電力の発端は蛙であるといえる。今日の電力系統は三相交流で、家庭など小規模需要家には単相交流で給電している。電力系統の最初は直流であり、電気の発生を蛙により発見したことに始まる。イタリア、ボローニャ大学の解剖学の教授ガルバーニ (Luigi Galvani, 1737～1798) は、1789年、異種の金属線を蛙の両脚に付け、他端子を接触させたところ、蛙が激しく痙攣するのを見て、蛙の筋肉内で電気が発生したと考え、1791年、「動物電気説」を唱えた。これに対し、パヴィア大学のボルタ (Alessandro Volta, 1745～1827) はカエルの足は検電器にすぎないと考えた。蛙でなくても、異種の金属線と電解液の働きをする濡れた物体が起電力を発するとして「電堆」を考案した。1800年のことである。これが「電池」の先駆けとなるものである。その後、ダニエル (John Frederic Daniell, 1790～1845) が改良を加え、連続して電流を取り出せる電池を完成させた。

初期の電池は出力が弱く、より強力な直流電源が望まれていた。これに応じて最初に直流発電機を完成したのがピクシー (Antoine Hippolyte Pixii, 1808～1835) である。図2にピクシーによる最初の直流発電機を示す。回転するU字形磁石の両極に対向して一対のコイルを配置し、ここに交流電圧を誘起し、この交流電圧を整流して直流を得るようになっている。その後、多くの人々により改良が加えられた。一例として、英国のホルムズ (Frederick Hale Holmes, 1840～1875) が、英仏海峡のドーバー近く of 灯台用に作った、当時としては最大級のマグネト型直流発電機 (1852年) を図3に示す。3枚の固定円盤 (界磁) に各20個のU字形磁石を配置し、その間に2枚の回転円盤 (電機子) を挿入し、各々に80個のコイルを取り付けるといったものである。高さは3m近くあり、3HPの蒸気機関で駆動した。出力は約1kWと推定される。1858年に設置、調整に入り、実際に運転に入ったのは1862年で、12年間

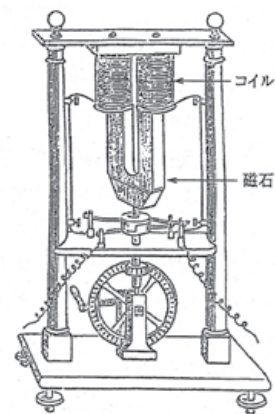


図2 ピクシーによる最初の直流発電機 (1832年)
(出典: The Electrician, June, 1881)

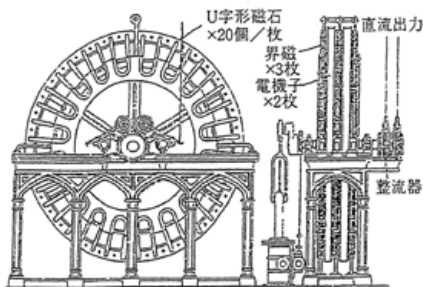
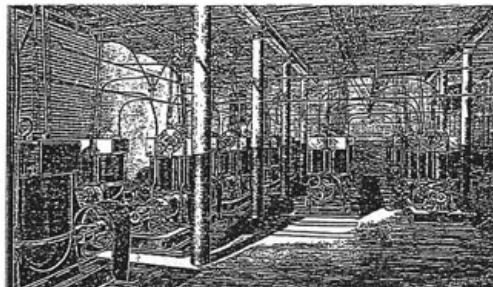


図3 ホルムズのマグネト型直流発電機 (1852年)
(出典: Proc. Institute of civil Engineers, 1878)



(a) エジソンの直流発電機
(出典: Electrical World, March, 1899)



(b) エジソン機を用いたボストン発電所
(出典: Electrical World, Aug, 1889)

図4 エジソンの直流給電システム

運転された。このような永久磁石を用いた発電機をマグネト (Magnet) と呼ぶ。この次に、界磁を永久磁石から電磁石に変えた、強力な主磁束を作る構造の発電機、ダイナモ (Dynamo) が出現する。

米国ではエジソンが彼の発明になる白熱電球と、200kW程度のジャンボ直流発電機を組み合わせた照明システムを全米に展開した。図4にこのエジソンの直流発電機と、それを用いたボストン発電所の様子を示す。1881年のパリ博では、エジソンは自らの照明システムを展示し実演した。これを契機にエジソンはニューヨークのみならず、ロンドン、パリ、ベルリンなどに直流事業を展開した。

しかし、直流は昇降圧が難しく(変圧器が使えない)、従って、発電電圧で給電し、負荷側はその電圧をその電圧のまま使用することになる。そのため発電所から需要家までの距離が長くなると、送電による損失のため電圧が低下するので、発電所からの供給範囲に限られることになる。直流電源では発電所から需要家までの距離がせいぜい1~2kmに制限され、需要拡大に対処するためには小規模発電所を多数建設しなければならないということになる。これに対し、交流では変圧器で容易に電圧を昇降圧できるため、供給範囲の拡大が可能になる。このようなことから、直流は交流系統に席を譲らざるを得なくなる。

ホルムズらが1852年、ドーバー海峡の灯台用にアーク灯電源のマグネト型直流発電機の開発を行ったが、この種の発電機は整流部分での損失が大きく、効率は50%にも達しなかった。これを交流にすることで、整流子を外し、大幅に効率を改善したのがフランスのアリアンス (Alliance) 社である。アーク灯が交流でも差支えないことを明らかにしたのである。1861年には交流発電機でパリの凱旋門を照明し、1869年には英仏海峡の灯台を灯したが、まだ発電機1台でアーク灯を1機、もしくは1群を灯すのがやっとであった。

直流から交流に移るもう一つのきっかけは、1870年代に普及したヤブロコフ (Paul Jablochhoff、露、1847~1894) の電気キャンドルである。アーク灯は光が非常に強いため室内の照明には適さない。電気キャンドルは図5(a)に示すように、カオリンを主体とした粘土質の半導体を発光体として、2本の炭素棒の間に挟んだものである。発光(点灯)は上部から始まって炭素棒の消耗に従って下部に移っていくというものである。炭素棒の消耗に極性差があり、直流電源では陽極の消耗が激しいため、交流電源が用いられるようになった。また、キャンドルは多数直列で使用されるため、1灯が断になると全部が消灯になる。

4. 交流系統の形成

(1) 西欧の場合

1890年前後の10年くらいが直流系統から交流系統に代わる時期である。直流派のエジソンと交流派のウェスティングハウス (George Westinghouse Jr, 1846~1914) との間に激しい争いが起こった。エジソンは人体に対する安全性も持ち出し、エジソンとウェスティングハウスの間に交流直流戦争(交直論争、the battle of the currents)が始まった。ただし、これ以前にも直流から交流に代わる兆しが、1800年代半ばに西欧であった。

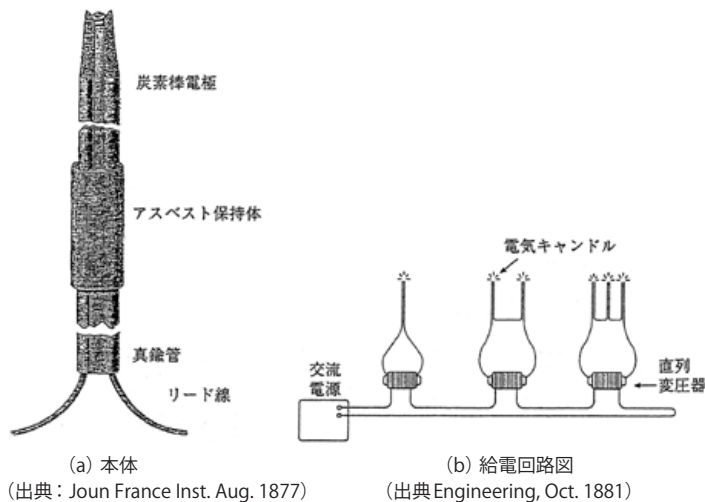


図5 ヤブロコフのキャンドル (1870年代)

そこで、各灯に変圧器を入れ、図5 (b) のような回路構成とする工夫をした。交流ゆえの工夫である。このシステムは、白熱電球の出現で姿を消すことになるが、この照明システムは、変圧器を用いた本格的な交流による照明システムの前段となる画期的なものであった。

今日のように高い電圧で送電し、低い電圧で配電する系統構成と、それに使用する変圧器を開発したのはゴーラール (Lucien Gaulard, 1850～1888、仏) とギブス (John Dixon Gibbs, 1834～1912、英) である。今日の電力系統は定電圧方式であるが、当時彼らのものは定電流方式であった。1883年には、ロンドンの鉄道会社に採用され、さらに、同年には王立博物館で開催された博覧会にも展示された。さらに翌1884年のイタリアのトリノ博では、Turin 駅とLonzo 駅間、さらにその周辺への送配電も実施した。その後、ヨーロッパの各地で採用されることになった。

しかし、不特定の需要家の負荷が増大しその変動が大きくなると、電圧変動も大きくなり、電灯の明るさが大きく変わるなどの欠陥が目立ってきたものと思われる。これに対して現れたのが定電圧システムである。現在の交流送配電システムにつながるものである。

定電圧給電を行う目的で、定電圧変圧器を最初に実用化したのはハンガリーのガンツ (Ganz) 社である。開発された定電圧閉磁気回路変圧器は負荷の変動による電圧変動も少なく、効率も向上し、現在の変圧器構造の先駆けとなるものであった。また、“Transformer” と初めて呼称した。1884年に製作された最初の変圧器は外鉄型で、図6 (a) に示すものであった。この構造は巻線の冷却を容易にするために鉄心をドーナツ状に束ね、これに一次、二次巻線を巻いた (b) に示すような内鉄型の変圧器に代わった。

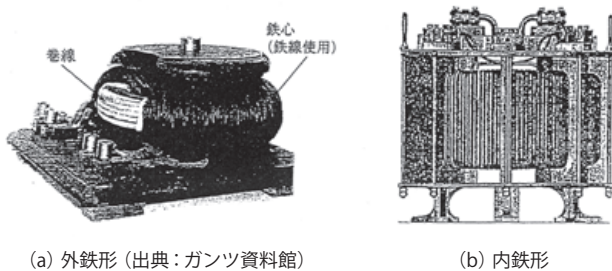


図6 ガンツ社の初期変圧器例

(2) 米国の場合

米国では、エジソンの直流システムとウェスティングハウスの交流システムの論争が激しく行われた。

ウェスティングハウスは白熱電球による照明の将来性に目を付け、この分野への進出を狙った。しかし、すでにエジソンが直流による白熱電球照明で確固たる立場を築いていたので、交流で挑戦することにした。ロンドンでのゴーラールとギブスの変圧器のことも聞き、彼らのシステムの

特許使用権と関連機器を購入した。

1886年、ウェスティングハウスは交流での電灯事業を商業化した。さらに、1888年の特斯拉 (Nikola Tesla, 1856～1943) の多相交流の発表を聞くや、その特許の使用権を入手し、会社に特斯拉を招き、多相交流機器の開発に着手した。こうして、ウェスティングハウスの交流システムは確実な地位を築くことになる。

ここで、1890年前後の10年間にわたり、直流派のエジソンと交流派のウェスティングハウスとの間に激しい争い、「交直論争 (the battle of the currents)」が起こった。エジソンは人体に対する安全性を持ちだしたのである。

1880年にニューヨークは処刑方法に電気処刑を採用し、最初の処刑が行われた。この発電機にウェスティングハウスの反対にもかかわらず、ウェスティングハウス社 (WH社) 製の発電機を採用し、交流と死を結びつけた。さらに、エジソンは1889年、バージニア州の議会に、電圧の規定に関する議案を提出した。「直流は800V、間欠繰り返し直流は550V、交流は200Vを超えてはならない」というものである。さらに、その説明として、公聴会で大衆に、「直流は穏やかに海にそそぐ川の流れるようなもの、交流は断崖を越えて流れる激流のようなもの」と説明した。議長のモルトン (Morton) は「直流は一本のパイプの中を一定方向に流れる水流、交流は同じパイプの中を最初は一方向に流れ、次いで逆方向に流れるようなもの」と補足した。議案は成立しなかったが、なりふり構わぬところがあつたようである。

しかし、常軌を逸する交流への反撃も交流の優位性を崩せず、1890年代には誘導電動機の実用化、1893年のシカゴ万博での電源への交流採用と多相交流システムが確立していった。

1892年には、エジソンGE社は交流の技術を持つトーマス-ハウストン (Thomson-Houston) 社と合併しGE社となる。GE社は1893年カリフォルニアで米国最初の三相250kW 2台で7.5マイル送電を行った。また、ナイアガラ第2発電所ではWH社と同定格の二相5000HP11台を受注した。

1896年のWH社のナイアガラプロジェクトの電力システムでは、バッファローへの送電はGE社が三相交流で送電した。

ナイアガラ発電所の発電機群は世界の大容量発電の先駆けをなすものである。特斯拉の多相交流は二相に限られたものではなく、三相誘導電動機の普及に従い、WH社も三相機を作るようになり、米国でも三相交流は一般化した。

(3) 我が国の場合

日本での最初の事業用給電は明治20年 (1887年)、東京電灯がエジソン直流発電機を用いて給電したのに始まる。欧米の手本もあり、比較的短期間に電力系統を形成することができ、各地に電灯会社が設立された。これが現在

の電力会社の誕生に繋がる。

東京電灯の場合、エジソンの直流システム導入の後、明治29年には現在標準となっている三相-50Hz機をAEG社より導入、その後、WH社、ジューメンス社からいずれも三相50Hz機を購入し設置した。このことから東日本の周波数は50Hzに統一されることになる。

一方、大阪電灯では、明治22年最初に設置した発電機は単相、125Hz-30kWの交流機であった。まだ米国では交直論争がおこなわれていたときに交流を選んだことになる。その後、当時の最新機を続々と導入した。明治30年にはGE社のモノサイクリック (Monocyclic) 機の60Hz-600kW機を導入、明治34年には60Hzの最初の三相機を、明治36年には60Hzの二相機を導入した。結果的には相異なる機の導入で運営上支障をきたし、逐次三相60Hzに統一していったのが実情である。このような経緯を経て西日本の周波数は60Hzが標準になった。

こうして、日本の場合、結果的に、東日本では50Hz、西日本では60Hzと、2つの周波数が存在することになったが、三相交流という点では統一された。

このように、現在の電力系統は、正弦波で50または60Hzの三相交流が使用されている。ただし、今の電力系統に至るまでには紆余曲折があった。最初は直流、次いで交流、さらに、交流は単相、二相、三相へと推移したことがわかる。

5. 新エネルギー発電

現在の各種発電方式のうち、その資源は基本的に非循環形エネルギー、すなわち、いったん使用すると枯渇してしまう資源である。しかも、これらを大量使用すると、発生するCO₂ガスは地球温暖化の原因となる。また、ディーゼル車などから放出されるSO_x (SO₂, SO₃)、NO_x (NO, NO₂)は酸性雨の原因でもある。

原子力は比較的長く利用可能であるが、放射性物質の処理に苦勞している。加えて、2011年3月に発生した東日本大震災による事故から、原子力発電に対する今後の運転には数々の難しい解決課題を残している。将来的には、他の電力発生資源にも頼らざるを得ないといえる。

これに対して、太陽光、太陽熱は枯渇しない循環形のエネルギーである。また、風力なども活用の対象となる。これらの活用を図ることは、極めて重要な意義を有する。非循環型エネルギーに対しては高効率の利用、循環形のエネルギーに対しては、効率を高めることはもちろん、新しい着眼点での利用も図る必要がある。現状で実用化までに至近距離にあると思われる新エネルギーを拾ってみた。

(1) 燃料電池

水素と酸素とを触媒を介して反応させて電気を作るもの

が燃料電池で、水の電気分解と逆の反応である。1839年イギリスのW.グロブ卿 (Sir William Robert Grove, 1811~1896) の実験が始まるとされている。図7に燃料電池の原理図を示す。水素を燃料電極 (アノード) へ供給すると、水素ガスは電子 (e) を放出しイオン化する。放出された電子は、外部電気回路を伝わって酸素電極 (カソード) へ、水素イオン (H⁺) も電解質内を通過して酸素電極へ移動する。多孔質酸素電極では、酸素ガスが水素イオンおよび電子と還元反応を起こして水 (H₂O) となる。この水の電気分解と逆の反応を利用して、その得られるエネルギーを電気として取り出すものが燃料電池である。

現在、実用化または開発中の燃料電池は、電解質の種類により次の4種類に分類される。

- (a) リン酸型燃料電池：電解質としてリン酸水溶液を用いる。第1世代燃料電池といわれた。
- (b) 固体高分子膜型燃料電池：電解質として固体高分子膜を用いる。現在、家庭用、自動車用に開発されている。
- (c) 溶融炭酸型燃料電池：電解質として溶融炭酸塩を用いる。反応温度が500~800℃と高く、発電効率が低い。
- (d) 固体酸化物燃料電池：電解質として固体酸化物を用いる。固体酸化物の酸素イオンの導電性を利用する。将来の高効率発電システムとしての期待が大きい。

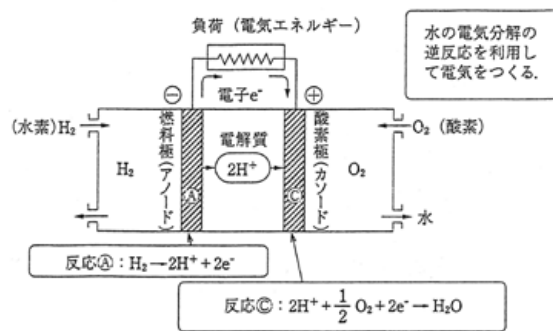


図7 燃料電池の原理

(2) 風エネルギー

風車により風エネルギーを回転エネルギーに変換し、発電機によって電気エネルギーを発生するものが風力発電である。風力発電はオランダで農場や牧場に水をくみ上げる (揚水) ために利用することから始まった。そして、ヨーロッパを中心に製粉、排水などに利用されていた。その後、世界の多くの地で、家庭用や工業用の発電に用いられるようになった。風力発電システムの原理構成図を図8に示す。風力発電システムは風を受けて回転エネルギーに変換する風車、ナセルと呼ばれる発電機収納部、これらを支える支持部 (タワー) から構成されている。

風力は自然界の循環型エネルギーであり、これを利用できれば公害問題が生じない好ましい発電となる。しかし、

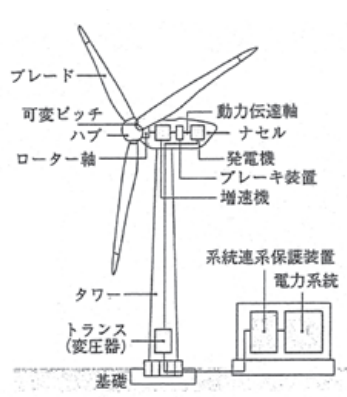


図8 風力発電の原理

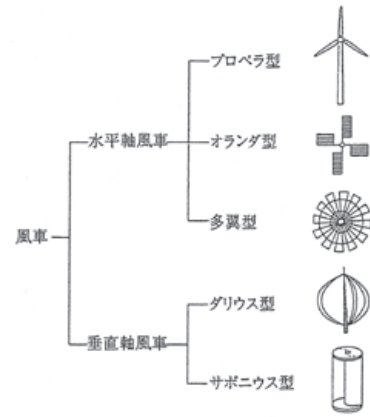


図9 風車の種類

風車が風向、風速に対応できるような配慮と可変速運転可能な発電機種とが必要になる。

密度 ρ の空気が風速 v で、回転面積 A の風車を通過するときの質量 M は

$$M = \rho Av$$

従って、風車が単位時間あたりに受けるエネルギー E は、

$$E = \frac{1}{2} Mv^2 = \frac{1}{2} \rho Av^3$$

すなわち、風車の発電量は風速の3乗に比例する。

風車が発電用として使われ始めたのは、1890年代からである。風車は回転軸が地面に対して水平になる水平軸型と、垂直になる垂直軸型に分けられる。垂直軸型は水平軸型のような風向制御を必要としない特徴がある。また、風車は動作原理から、風車のブレードに生じる揚力を利用する揚力型と抗力型に分けられる。各風車の種類と特徴は図9に示す通りである。

- (a) プロペラ型：発電用にもっとも多く用いられ、2~3枚の飛行機のプロペラに似たブレード（羽根）を持ち、高速で回転する。
- (b) オランダ型：製粉や揚水に用いられ、翼の枠の上に布を張ったものを使用し、低速回転する。歴史も古い。
- (c) 多翼型：多くの金属製の羽根を持ったもので、アメリカの農場や牧場で揚水用に多く用いられている。低速で回転し、大きなトルクが出る。
- (d) ダリウス型：円弧上の羽根を有し、風向きに無関係に回転し、風速以上の高い周速度が得られることから、発電用に用いられる。
- (e) サボニウス型：半円筒状羽根2枚で構成され、バケットの凹面と凸面の抗力差で作動し、軌道トルクが大きく、回転数は低く静粛である。発電、および駆動用に用いられる。

最近では、単機で2000kW級のものまで実用化され、拡大採用にも注力されている。2010年には風力発電の総設備容量が240万kWを超え、現在も増加中である。

(3) 太陽エネルギー

自然エネルギーの中では、エネルギー量が膨大な太陽エネルギーを利用した太陽光発電や太陽熱発電が期待されている。太陽エネルギーの利用形態を図10に示す。太陽から地球に到達するエネルギーは世界の総エネルギーの需要量の数万倍にもなる。しかし、太陽エネルギーはエネルギー面積密度が 1kW/m^2 と極めて低く、昼夜、季節間の差が大きいため、年間の平均日照率は約 $1/6$ (160W/m^2) にすぎず、実用化には低い設備稼働率、設備コストの低減が重要課題となっている。

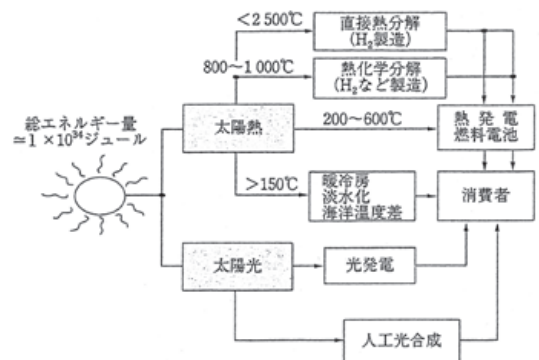


図10 太陽エネルギーの利用形態

太陽光発電には、太陽の光のエネルギーを電気エネルギーに変換するため、太陽電池が用いられる。太陽電池はp型とn型の二つのシリコン半導体の薄層を接合したもの

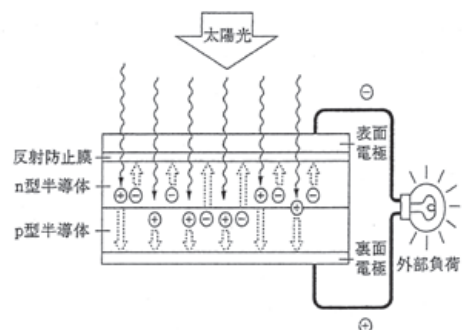


図11 太陽電池の原理

に光を照射すると、p型の層はプラスに、n型の層はマイナスに帯電し、この両者に負荷回路を接続して電気を発生させるものである(図11)。太陽電池の半導体材料には単結晶シリコンならびにアモルファスシリコンが用いられる。

太陽電池のコストを下げするため、最近では色素増感型太陽電池(光触媒としても知られている酸化チタンのナノ多孔膜を光電極として用いる太陽電池で、色素によって光エネルギーを吸収、利用する電池)、量子ドット型太陽電池(基板結晶上にnmサイズの極微細な半導体粒子(量子ドット)を作りこみ、「量子効果」と呼ばれる現象を利用して発電する太陽電池)なども実用化に向けた研究が行なわれている。

太陽熱発電は、太陽エネルギーを反射鏡で集光・集熱し蓄熱装置に貯蔵した後、蒸気によってタービン発電機を回して電気エネルギーを発生する方式である。その概念図を図12に示す。我が国では、1981年に香川県仁尾町(現・三豊市)において、タワー集光方式と曲面集光方式(1MW)の太陽熱発電システムが稼働し、約3年半の運転研究が行なわれ成功している。また、最近では、2009年、アメリカカリフォルニア州郊外の砂漠に1300MW以上の太陽熱発電所を建設するプロジェクトが開始し、2013年からの稼働を予定している。さらに、中東諸国や北アフリカのサハラ砂漠地帯での大容量太陽熱発電化計画が検討されている。なお、太陽エネルギーを熱エネルギーとして集め、これを給湯や冷暖房に利用するソーラーシステムはすでに実用化し普及している。

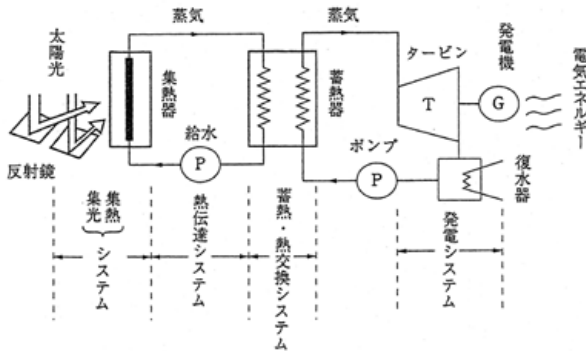


図12 太陽熱発電の概念図

(4) バイオエネルギー

バイオマスとは生命、生物を意味するバイオと、集まりを意味するマスからなる言葉で、「生物現存量」と訳される。このバイオマスをエネルギー資源として利用することを考える場合、有機廃棄物などのバイオマスや太陽エネルギーなどから変換手段を通して、生成、または排出される水素、メタンなどをバイオエネルギーといい、さらに、このバイオエネルギーを利用して発電する方式がバイオマス発電である。バイオエネルギーへの変換手段としては、微

生物を利用して発酵や光合成を行い、水素などを生産するシステム、ならびに人工的に生物の能力を模倣した技術を用いて水素を生産する人工光合成システムなどがある。発電用のバイオマス燃料には、まき、もみ殻、有機廃棄物(ゴミ、廃材)などがある。バイオマス発電には、これらを直接燃焼させる方式や、ガス化してガスタービンで利用する方式もある。また、メタン、メタノール、エタノールへ転換し発電用燃料として利用する方式もある。このバイオマス発電の概念の例を示すと図13のようになる。

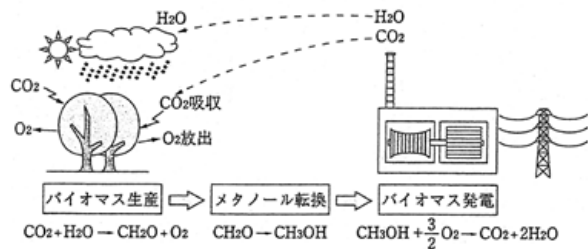


図13 バイオマス発電の概念

(5) 海洋エネルギー

海洋は膨大な潜在エネルギーを秘めており、熱(温度差)、運動(海流、潮汐、波力)、化学(濃度差)などを利用して発電する海洋エネルギー発電の研究が進められている。開発は波力発電と海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)が先行している。我が国では既に1976年、1MWの波力発電の実海域実験が行われ、現在ではブイなどの照明用電源装置として実用化されている。

海洋温度差発電は海洋の温かい表層水と冷たい深層水の温度差を利用して発電する方式である。海洋表層から温海水をくみ上げ、この熱によりアンモニアなどの作動媒体を気化させてタービンを回して発電する。タービンから出た蒸気は凝縮機で深層からくみ上げられた冷海水によって熱が奪われ凝縮液化し循環する。赤道近海で実証試験が行われた。

潮汐発電は太陽と月の引力によって起こる海面の高低差を有効に利用する発電システムである。すでにフランスのランスで実用化されているが、10m以上の潮位差がないと実用化は難しい。

(6) その他

将来に向けての新エネルギー源として、多くのものが研究途上にある。その例として、核融合反応を利用した核融合発電(Nuclear Fusion Generation)、電磁流体発電(Magneto-Hydro Dynamics Generation, MHD発電)などがある。核融合発電は太陽エネルギーの発生機構をなすもので、質量数の少ない重水素と三重水素を高速で衝突させると融合して質量数の大きなヘリウムになる。その際に放

出すエネルギーを利用しようというものである。

MHD発電は燃料電池と同様に電磁流体を用いて直接発電しようというものである。導電性流体を磁界中に流すと、フレミングの法則に従って電圧が誘起する。この電圧を電極を介して外部に取り出すというものである。タービン発電機のような回転部を持たない発電である。

6. 超電導のエネルギーへの利用

エネルギーを有効利用するには高効率の各種機器を開発することはもとより、送電線路、各種機器内で発生する抵抗損を軽減することも重要である。それらの問題を解決する技術として、超電導体を活用する技術に期待が寄せられている。

1911年、オランダのオンネス(Heike Kamerlingh Onnes, 1853~1926)は、低温下の4.2Kで水銀の電気抵抗がなくなることを発見した。これ以来、超電導の歴史が始まった。今日、超電導は次の3つで特徴づけられる。

- (1) 完全導電性
- (2) 完全反磁性(マイスナー効果)
- (3) ジョセフソン効果

電力エネルギー分野で、超電導体を利用する場合、上記(1)の完全導電性を利用することを目的としている。磁束を作り出すために励磁大電流を流しても、超電導では導体内で抵抗損の発生なしに必要な高磁束密度を発生できる。すでに、MRI(核磁気共鳴画像法、Magnetic Resonance Imaging)など医療診断機器などに利用されている。

ここでは、超電導が特に電力分野でどのように使用されているかの概要を簡単にまとめる。

- ①超電導同期発電機：大容量タービン発電機の回転子の界磁巻線に低温超電導体といわれるNbTi(ニオブチタン)線材を使用することにより、固定子鉄心が不要になり、固定子周上に常電導線を密に巻くことができる。極めてコンパクトな構造の発電機である。すでに研究試作が進んでいる。
- ②超電導直流電動機：直流電動機の固定子すなわち界磁巻線に超電導線を使用し、十分な磁束を発生させる。整流子なしで、集電ブラシで十分な構造となる。超電導船などへの応用が期待される。
- ③超電導変圧器：鉄心なしの空心にした変圧器の設計も可能であるが、鉄心は常温空間におき、巻線には高温超電導線を用い、液体窒素容器内に収容する構造が検討されている。
- ④超電導ケーブル：電力用ケーブルは交流で用いられるため、交流損失が問題となり実用化には難しい問題点を抱えている。線路に沿っての冷凍設備も必要になる。現在の技術では、液体窒素による高温超電導線の適用に優位性があると考えられている。

- ⑤超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)：Superconducting Magnetic Energy Storageの略で、超電導コイルに電流を流し磁気エネルギーに変換して、損失を発生させずにエネルギーを貯蔵する貯蔵装置である。
- ⑥超電導故障電流限流器：超電導線は常電導状態に転移し、超電導状態に復帰できなくなる現象がある。これをクエンチと呼ぶ。この特性を逆に利用して、回路の故障大電流の抑制を図ろうとする装置が超電導故障電流限流器である。
- ⑦超電導磁気浮上鉄道：将来の磁気浮上鉄道に向けて、すでに山梨県で試験検証が行われている。

7. あとがき

本稿が掲載になるのは5月ですが、ちょうどこの原稿の執筆と時を同じくして、「発送変電工学」が技報堂出版(株)より3月に刊行になりました。この著書は、筆者と東芝時代に一緒に(とはいっても皆、小生の先輩ですが)研究開発の経験を持ち、その後、多くは大学で教鞭の経験を持った4人の有志とともに著した著書です。本稿はこの著書の内容の一部に基づいて記載しています。そういう点からも、筆者は「発送変電工学」の著者、伊藤進、川口芳弘、大地昭生、山本充義(敬称略)の各位、ならびに掲載を許可していただいた技報堂出版(株)の関係各位に感謝いたします。

profile

乾 昭文(いぬい あきふみ)

1954年2月5日生まれ。1977年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1979年3月早稲田大学大学院理工学研究科博士課程前期(電気工学専攻)修了。工学博士。同年、(株)東芝入社。電力機器の研究開発・設計、環境・エネルギー事業の企画業務に従事。この間、(財)化学技術戦略推進機構にて、1997年10月~2000年3月、通産省ニューサンシャイン計画先導研究開発「超臨界流体利用技術」、2000年4月~2001年9月、経済産業省エネルギー技術総合技術開発プロジェクト「超臨界流体利用環境負荷低減技術開発」の推進取りまとめ業務に従事。2002年4月、国士舘大学工学部(現理工学部)教授、現在に至る。1992年電気学会論文賞受賞。電気学会、電子情報通信学会、放電学会、化学工学会、IEEE(アメリカ電気電子工学会)所属。

