

電気の知識を深めようシリーズ Vol.1 2刷

電気とは何だろう



電気の知識を深めようシリーズ Vol. 1 2刷

電気とは何だろう

一般社団法人 電気学会

まえがき

電気とは何でしょう？ 電気は私たちの身の回りにあたりまえにあるものなので、こう聞かれても困るかもしれませんね。

私たちは、電気に囲まれて大変豊かな暮らしをしています。この豊かな暮らしを与えてくれる電気について、一度考えてみませんか？

この小冊子は、そのようなために作られたものです。

目 次

まえがき	ii
1 電気に囲まれて	1
家の中で	1
電気と照明	1
毎日の暮らしと家庭電気製品	1
街に出ると	2
交通機関と電気	3
電気の時代	4
社会を変えた電気	4
情報通信技術を支える電気	4
2 電気のない生活	5
停電	5
停電した家の中は	5
停電で街の中も大混乱	6
今と昔	6
電気をたたえる日	6
電気記念日	7
あかりの日	7
日本最初の街灯	8
でんきの月	8
三種の神器	9
3 電気を作る・送る・配る・使う	10
電気を作る	11
さまざまな発電方式	11

発電方式の長所と短所	11
電気を送る	12
電気を配る	13
時間帯により使われる電気の大きさは変化する	13
作る電気と使う電気の大きさは同じ	14
家庭の電圧は常に同じにする	14
電気をコントロールする	14
大変化	15
今までは電気は発電所から一方向に	
使用場所まで流れていた	15
太陽光発電や風力発電による電気が合流する	15
情報としての電気の使用量	16
4 電気エネルギーとは	16
さまざまなエネルギー	16
電気は地面を掘っても出てこない	17
電気エネルギー	17
電気エネルギーは使いやすい	18
電気エネルギーはたくさん貯めるのが苦手	18
5 電気と安全	19
正しく使うことが大事	19
6 電気と未来社会	20
データは大事	20
自動車と電気	20
ロボットと電気	21
電気の作り方が変わる	22
電気の課題は山のようにある	23

本冊子の企画趣旨について 24

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 25

電気の知識を深めようシリーズについて

電気の正しい知識を深めていただくために企画された本シリーズには、次の 7 種類の小冊子があります。いずれも「電気」がもっと身近で、おもしろくなる内容です。是非あわせてお読み下さい。

- 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

1 電気に囲まれて

みなさんの身の回りを見てください。電気で動くものであふれていることに、気づくでしょう。その様子を、家の中と外で見してみよう。

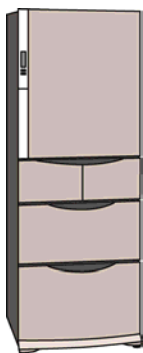
家の中で

電気と照明

夕方になって、部屋の中が暗くなると、照明器具を使います。皆さんはそれを「電気をつける」と言いませんか。そのくらい電気と照明は、生活の中で密接な関係があります。いろいろな照明がありますね。蛍光灯もあれば、LED ランプもあります。LED ランプは白熱電球に比べて、ずっと少ない電気で明るい照明を得られるし、寿命も長いので、近年大いに注目されています。携帯できる照明器具として、懐中電灯も便利です。



毎日の暮らしと家庭電気製品



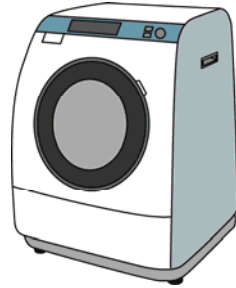
身の回りで電気を使うものは、照明装置だけではありません。山のようにあります。料理をするときに使うものとして、電気炊飯器、電子レンジ、オーブントースター、IH キッキングヒーター、トースター、などなど、いろいろあります





ね。食材は冷蔵庫にしまっておきます。冷凍食品を使うことが多くなってきたので、冷凍庫付き冷蔵庫が一般的になっています。冷蔵庫とは別に、冷凍庫を買って使っている家庭もあります。

朝、目覚まし時計で起きるとき、それは電池を使っていますか。もしかしたら、スマホ（スマートフォン）を目覚まし時計としても使っている人がいるかもしれませんね。



起きたら洗面所に行って、顔を洗います。ひげをそる人は、電気カミソリを使いそうですね。もしかしたら歯を磨くために、電動歯ブラシを使っている人もいそうです。着替えた衣服は洗濯です。昔はタライと洗濯板を使って洗濯しましたが、今は電気洗濯機を使います。

居間に行きましょう。テレビ、オーディオ、エアコン、扇風機、パソコン、デジカメ、電気ストーブなどなど、さまざまなものが電気で動いています。

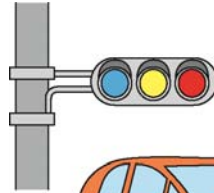
電気温水器やヒートポンプ、家庭用燃料電池なども、家庭で使われるようになってきています。

街に出ると

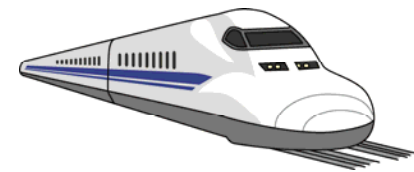
街の中も電気が活躍しています。街路灯のランプは電気を使います。東京タワーも東京スカイツリーも、照明で美しく彩られます。

交通機関と電気

交通信号も電気が必要ですし、交通信号を制御する装置も電気を使います。道路を走る車にも、電気はなくてはなりません。ヘッドライトは



当然電気ですし、窓の開け閉めも電気を使ったモーターの



力で行います。高級車には、何十個ものモーターが使われています。例えばクライニングシートの調節も、モーターを利用する車があります。カーナビも車内の照明用ランプもオーディオも電気ですね。

電車は電気で動く車だから電車ですし、飛行機も船もその照明や制御には、多くの場合電気を使います。ビルのエレベーターやエスカレーターも電気で動いています。病院、学校、道路、駅、空港、コンビニ、オフィス、工場などでも、電気がさまざまな形で使われています。ですから、停電するとたいへんな事態になります。電気をいつでもどこでも使えるようにしておくこと、そして電気を無駄づかいしないことは、大切なことです。



電気の時代

社会を変えた電気

このように私達は今まさに「電気の時代」に生きています。電気のおかげで、不便さから解放された快適な生活を送れるようになりました。電灯による照明は暗闇やほの暗さから私たちを解放し、街路灯は安全な街を実現しました。モーターを使った掃除機・洗濯機などは私たちを、つらい家事労働から解放しました。電熱を使用したアイロン・プレスナーなどは衣料の手入れの方法を変えました。さらに電気による調理器具は料理の仕方を変え、料理の種類も味も豊富になりました。人の移動も、広く普及した電気鉄道により、はるかに自由になりました。医療も電気ので大きく変わり、多くの人を命を救ってきました。ものを作る工場のすがたも、電気を動力として使うようになって一変しました。このように、電気は社会を大きく変えてきました。

情報通信技術を支える電気

電気は電気製品として表に出るだけでなく、裏からも私たちの社会を支えています。例えば、現代の社会では電話やインターネットは重要な役割を果たしています。世界中の人が、さまざまな情報を共有し、交換できるようになりました。情報通信技術の進歩のおかげです。そこでは電気が表に出てくることはありませんが、電気がなければ電話もインターネットも動きません。またテレビや携帯電話を機能させている電波を送受信しているのも電気です。

このように、電気は人々の夢を実現してきたと言っても過言ではありません。でも、電気はどこでどうやって作るのですよ

うか。作った電気を、私たちのところまでどうやって運ぶのでしょうか。

2 電気のない生活

ここで少し、電気のない生活について、考えてみましょう。

停電

皆さんは停電を経験したことがありますか。家の中で電気を使い過ぎて、ブレーカー（電線を外から家の中に引き込んでいるところについている安全装置）が落ちてしまうという経験はありませんか。町中が停電で困ったことはありませんか。日本は世界でも停電が少ない国ですが、それでも時に起きます。

停電した家の中は

もし、テレビゲームに夢中になっているときに家のブレーカーが切れて、せっかくの高得点が消えてしまったら、がっかりしますね。停電になったら、電池が切れたスマホも充電できません。冷蔵庫の冷凍室に入れて、今度の誕生日に食べることを楽しみにしていた「ストロベリー・チョコレート・ナッツ・キャラメル・スペシャルミックス・デラックスアイスクリーム」（そんなのありませんが）が溶けてしまったら、がっかりですね。お金を銀行から引き出そうとしてもできなくなって、困るでしょうね。また、エレベータで昇降する高層マンションでは、外出するにも階段を使わなければなりませんし、高いビルの水道は電気で水を押し上げているので、水道やトイレの使用もできなくなります。

停電で街の中も大混乱

街では交差点が大渋滞となります。横断歩道があっても、信号が止まってしまったら、道路を横切るのも危険です。電車が止まって、遊園地にも行けません。そもそも遊園地に行っても、入場券の券売機も止まっているし、遊具もみな止まって遊べません。病院では、入院している人、診察を受けている人、手術中の人は、それぞれどうなるでしょう。

皆で考えてみませんか、電気が停まったら私たちの生活がどうなるかを。

今と昔

電気をたたえる日

幸いなことに、今私たちは電気を使うことができます。でも、昔の人たちは使えませんでした。雷が見えるとか、もの同士をこすると面白い現象が起きるといったことを知っていましたが、そもそも、どう利用したらよいのかを知らなかったのですから。

皆さんは「でんきの日」を知っていますか。知っている人はいないでしょうね。ごめんなさい、そんな日はありません。でも電気記念日、あかりの日、でんきの月はあります。電気記念日は3月25日、あかりの日は10月21日、でんきの月は3月です。

電気記念日

明治 11 年 (1878 年) 3 月 25 日に、虎ノ門にあった東京大学工学部の前身である工部大学校の講堂で、初めて電灯「アーク灯」(図 1)が点灯されました。点灯した人はウィリアム・エアトンという、英国のスコットランドから電気技術を教えるために日本に来ていた先生です。講堂に集まった人は、さぞかしびっくりしたでしょうね。なにしろロウソクとか^{あんどん}行燈で暮らしていた時代に、目もくらむばかりの光を、生れて初めて見たのですから。電気記念日は、その日を記念する日です。

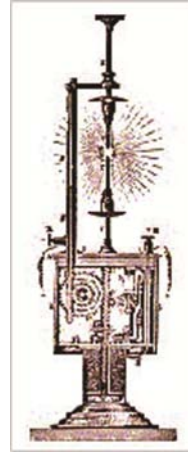


図 1 アーク灯
(出典：「日本照明器具工業史」一般社団法人日本照明工業会)

あかりの日

では、あかりの日はどのような日でしょうか。日本で初めてアーク灯が^{とも}灯った年の翌年、1879 年 10 月 21 日に、アメリカの発明家エジソン (図 2) が、実用的な白熱電球の開発に成功しました。彼は連続して 40 時間も点灯することに成功したのです。その

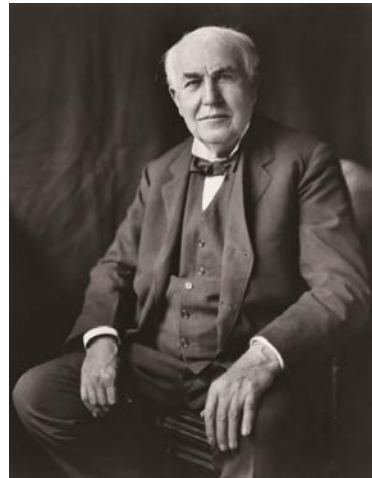


図 2 大発明家 エジソン

偉業を記念したのが、あかりの日です。白熱電球の発明者が誰かということは、エジソンだとかスワン（英国人の発明家）だとか諸説があって、おもしろい話題ですが、実は、長時間使える実用的な白熱電球の開発に成功したのは、エジソンだったのです。

日本最初の街灯

先ほどの工部大学校の講堂でアーク灯の点灯を見られた人は、誰だったのでしょうか。その日にあった祝賀会へ出席していた 150 人を超える人たちだけしか見られなかったのです。一般の人が見られるようになったのは、その 4 年半後、明治 15 年（1882 年）11 月 1 日です。設立されて間もない東京電灯会社が、銀座二丁目で街灯を点灯しました(図 3)。



図 3 東京銀座通電気点灯(写真提供:電気の史料館)

でんきの月

「でんきの月」は、電気が空気のようにあるのが当たり前の

ものになるなかで、あらためて電気の役割を見つめなおすことを目的として、電気記念日がある 3 月に設定されています。今と昔の生活を、表 1 に比べてみます。表になっていない項目についても、考えてみてください。

表 1 今と昔の暮らしの変化

	150 年前 (江戸時代)	90 年前 (大正時代)	現 在
あかり	行燈(あんどん)	白熱電球	蛍光灯、LED
ごはん	かまど と お釜	かまど と お釜	電気炊飯器
洗 濯	たらい	たらい と 洗濯板	電気洗濯機
食物保存	塩漬け	氷型冷蔵庫	電気冷蔵庫
娯 楽	歌舞伎、大相撲	劇場、映画館	テレビ鑑賞
連 絡	飛脚が運ぶ手紙	有線電話 (交換手が接続)	携帯電話
移 動	徒歩、かご	蒸気機関車	新幹線

三種の神器

白黒テレビ、洗濯機、冷蔵庫は、1950 年代後半に三種の神器と呼ばれ、私たちの家庭生活を大きく変えました。過重な家事労働が減り、自由な時間が生まれ、それまでできなかった家庭で映像による娯楽を楽しんだり、旅行を楽しんだりするなど、さまざまなことが可能になりました。

1960 年代には、カラーテレビ、クーラー、カーを「3C」と呼びました。カラーテレビ、クーラーに電気が必要なのは言うまでもありません。この時代の自動車は、今ほどは電気を使

っていませんでしたが、それでもヘッドライトやエンジン内のガソリンの点火には電気が必要です。エンジンを起動するスターターも電気モーターでした。

3 電気を作る・送る・配る・使う

電気を使うためには、電気を作り、送って、使う人や場所に配る必要があります。電気を作ることを発電、送ることを送電、配ることを配電と、それぞれ言います。全部を合わせて電力系統あるいは電力システムと呼びます。その様子を図 4 に示します。

いろいろな発電所で作られた電気が、送電線や配電線を通して家庭や工場に届くわけです。電気の流れを一本の矢印で書いてありますが、実際には後の「電気を送る」の項目にあるような理由から、送電線は網の目状に構成されています。

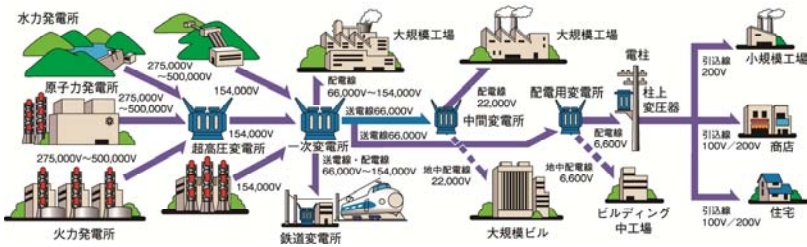


図 4 発電所から家庭までの電気の流れ
(出典:電気事業連合会「FEPC INFOBASE」)

電気を作る

さまざまな発電方式

水の力を使って電気を作る方式を、水力発電と言います。同じように石炭を燃やして得られる熱を使って電気を作れば、石炭火力発電、石油を使えば石油火力発電、天然ガスを使えば天然ガス火



力発電です。火山地帯で地中の熱を使えば、地熱発電です。ウランの核反応を使えば、原子力発電になります。太陽光を電気に変換する発電方式が、太陽光発電です。風力を使えば風力発電、海の潮の流れを使えば潮力発電です。動植物から生まれた生物資源を、直接に燃やしたりガス化したりして発電する方式が、バイオマス発電です。

発電方式の長所と短所

これらのさまざまな発電方式には、長所もあれば、短所もあります。例えば、元々のエネルギーをどの程度電気エネルギーに変換出来るかの指標を発電効率と言います。そのエネルギーのすべてを電気エネルギーに変えることができれば、効率100%になります。現在では水力で90%程度、火力で50%前後、原子力では25%程度で、太陽光では20%弱といったところです。また、太陽光や風力では、気候によって発電量が急変するといった特徴もあります。加えて、水力や太陽光・風力等は燃料が不要で国内でまかなえますが、石油・石炭・天然ガスは輸入しなければなりません。原子力も燃料のウランを輸入します

が、同じ発電量に必要な原料の量は石油の約7万分の1になります。

さらに火力発電は地球温暖化の要因となる二酸化炭素を排出しますが、太陽光・風力、原子力は排出しません。ただし原子力では放射性廃棄物が出ます。

それぞれの発電方式の長所を生かしつつ、その短所を別の発電方式で補って、全体として高いエネルギーセキュリティ（資源確保の確実さ）、安いコスト、高い環境性能で、実現してゆくことが大切です。そのことを発電方式のベストミックスと呼びます。どのようにすればベストミックスを実現できるのか、それを皆で考えることが大切です。

電気を送る

電気を送るには、送電線を使います。送電線で送れる電気の量は、電圧と電流を掛け合わせたものとなります。そのため、送る量を大きくするためには、電圧を高くするか電流を大きくします。また、送電線は、



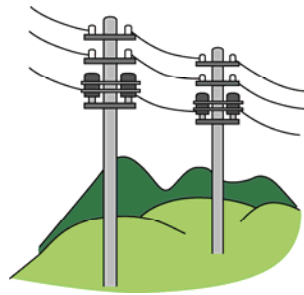
銅やアルミなど比較的電気の流れやすい金属で作られていますが、電気の流れを妨げる抵抗があるため、発生した熱が大気中に放出されます。この熱の量は電圧には依らず電流の二乗に比例するため、なるべく高い電圧を使用して、電流を少なくする努力がされています。

現在、日本での最高電圧は 50 万ボルト [V] ですが、送る必要のある電気の量に応じて 27 万ボルト [V]、15 万ボルト

〔V〕、6万ボルト〔V〕などの電圧が使われています。これらの送電線は広い地域をカバーするためや、一つの送電線に事故があった場合、他の送電線を通して迂回ができるよう、網の目状に形成されています。また変電所では電圧を変えると同時に、必要な時に送電線を接続したり切り離しをしたりできるよう、遮断器が設置されています。

電気を配る

このように高い電圧で送られてきた電気は、使われる場所の近くで、使い易い低い電圧に変えられ、配電線と呼ばれる、電柱を使って空中に張った電線や、地中の電線を経由して、家庭やビル・工場などに届きます。



時間帯により使われる電気の大きさは変化する

使われる電気の大きさを電力と呼びます。これは季節によっても、一日の時間帯によっても、大きく変化します。季節に着目すると、日本全体では8月の昼間に使われる電力が最大となります。これを、「ピーク電力が夏



に出る」というように言います。夏の暑い日には、冷房のための電力需要が急増しますし、甲子園の高校野球を、多くの人がテレビで視ます。その一方で、正月とかゴールデンウィークに

は、使用電力は小さくなります。

作る電気と使う電気の大きさは同じ

一日を通してみても、使用電力は大きく変化します。夜明け前には電力は少ししか使われませんが、活動が盛んになる日中には、たくさん使われます。昼休みの時間帯には、工場の設備を止めたり、事務所の照明を消したりしますので、一時的に使用電力が減りますが、昼休みが終わると、ふたたび急激に増えます。電力会社はこの変化に対応して発電電力をきめ細かく制御して、常に使用電力と発電電力が同じになるようしています。

家庭の電圧は常に同じにする

供給される電力、すなわち配電線に流れる電流の大きさが違ってくると、供給元の電圧を同じにしても、末端



のほうの電圧が違ってきます。電圧が低すぎたり高すぎたりすれば、電気機器が正常に動作しなくなる恐れがあります。このため、日本では家庭で使う 100 ボルト [V] の電圧は、その変化が 95 ボルト [V] から 107 ボルト [V] の範囲に収まるよう規定されています。この規定を守るため、電流の量が変化するのに合わせ、電圧がこの範囲に収まるように調整する必要があります。この調整は、大枠は電圧の高い所で、細かいところは電気を配るところで、それぞれ行われています。

電気をコントロールする

今までの話は実際に電気が通る設備についてのことですが、これに匹敵する重要なものに、電気の流れをコントロールする

ということがあります。電気の流れは一瞬一瞬変化しており、また、送電線の事故なども発生しますから、その状況を常に監視して電気の流れや電圧を適正に保ち、事故が起これば速やかにその部分を切り離す必要があります。このため状況を把握する通信網や、事故点を切り離す保護装置など、機械の力を活用しながら適切にコントロールをしています。

大変化

いま、この電力システムに大変化が起きつつあります。そのため、多くの研究や開発が必要です。

今までは電気は発電所から一方向に使用場所まで流れていた

今まで述べたように、従来、電気は発電所で起こされ、使う場所までいろいろな電圧を使って、送られ、配られ、使われてきました。ですから電気の流れは、発電所から電気が使われる所まで、いわば一方通行でした。これを前提に、発電する量や電圧が制御されてきました。

太陽光発電や風力発電による電気が合流する

しかし、現在は新しい制度により、太陽光発電や風力発電で作られた電気を、電気を配る段階のところでも自由に電力システムに接続することができるようになりました。このため場所によっては、電気の流れる方向が変わったり、量がいままでは考えなかった大きさに変わったりします。特に太陽光発電の場合は、局地的に雲がさすと、その場所での発電量は急激に低下するため、電流の変化も急になり、電圧の維持が課題となります。

情報としての電気の使用量

電気が使用されている量を個々の場所で計って、それをビッグデータの一つとして使うことが検討されています。皆さんは、スマートメーターということばを聞いたことがありますか。電気を大量に使うビルでも一般家庭でも、電気の使われ方が時々刻々わかったら、電気を安定して配る工夫が今よりもきめ細かくできるようになります。電力システム全体の設備を使用する効率も上げられるでしょう。そのために使われる電力メーターが、スマートメーターです。これから日本でも世界でも、広く使われるようになってゆきます。便利な反面、個人情報のあり方の問題や、誰もがこうしたデータにアクセスできるようになると、そのデータが不正に操作されたり、不正な目的に使われたりすることも、考えなくてはなりません。これらはいずれも今後の大きな課題で、技術開発やきちんとした制度作りが必要です。

4 電気エネルギーとは

今まで、電気エネルギーについて、見てきました。ここで、そもそもエネルギーとは何かを少し考えてみましょう。

さまざまなエネルギー

私たちが、重たい荷物をヨイショと持ち上げて、移動したとします。そのとき、エネルギーを使って仕事をしたという感じがしませんか。実はエネルギーと仕事は等しい価値を持っています。このことをエネルギーと仕事は等価だと言います。

エネルギーにはいろいろな形態があります。熱エネルギー、

力学的エネルギー（機械エネルギー）、電気エネルギー、化学エネルギーなどです。前節で説明した水力発電は、高いところにある水が持つ位置のエネルギーを、水車を回すことに使っています。水車が回るということは、水車が力学的エネルギーを持つということです。これは水の位置エネルギーが、水車の力学的エネルギーに変換されたことを示します。次に、水車は発電機を回すことに使われ、発電機からは電気エネルギーが生まれます。すなわち、力学的エネルギーが電気エネルギーに変換されたのです。

電気は地面を掘っても出てこない

化学エネルギーである石炭や石油を含むいろいろな資源は、地面の下にあります。ですから、地面を掘れば、それらを得ることができます。では、電気も地面を掘ると出てくるのでしょうか。出てきませんね。電気エネルギーは、熱エネルギー、力学的エネルギー、化学エネルギーのような、別のエネルギーを使って作る必要があります。

電気エネルギー

発電所で作られた電気エネルギーは消費地に送られます。例えば、電気ストーブで使われて、部屋を暖めます。この場合、電気エネルギーが熱エネルギーに変わったのです。このようにエネルギーは、お互いに変換することができます。ここで、電気エネルギーの使いやすさを考えてみましょう。ひとつの例として薪まきを考えます。薪は燃やせば熱が得られます。木の主成分は炭素で化学エネルギーと言えます。それが空気中の酸素と化

学反応を起こすのが燃焼で、その結果熱が得られます。化学エネルギーが熱エネルギーに変換され、その熱を暖房に使ったり、調理に使ったりするわけです。しかしながら、熱エネルギーを得るまでには、木から火を作るために面倒な手間がかかります。

電気エネルギーは使いやすい

電気エネルギーについて考えてみましょう。第1章には、家の中でも街に出ても、いたる所で電気が使われていることが書いてありました。これは電気エネルギーが、光にも力にも熱にもと、ほとんどのエネルギーに容易に、しかも極めて効率よく、かつスマートに変換できるからです。要するに、電気はとても使いやすいエネルギーなのです。あらゆるエネルギーの中で、最終的に電気エネルギーの形で使われる割合は、長年にわたって増え続けています。これを「電力化率が増大する」という言い方で表します。この傾向は、将来も続くでしょう。ですから電気を上手に作り、送り、配り、使うことの重要性は、今後も増してゆくのです。

電気エネルギーはたくさん貯めるのが苦手

このように万能にも見える電気も、その苦手な点として、大量の電気を貯めるのが難しいという問題があります。前にも説明したように電気を使うときには、同時にそれに見合うだけの発電をする必要があります。

電気は、まったく貯められないわけではありません。電池があります。ただ、電気を貯めておく能力はとても小さいのです。例えば、家庭で使われる電気の量は、およそ1月に300 kWh程度で、1日にすると約10kWhとなります。これをたとえば家庭でよく使われる単三のニッケル水素充電電池で1日分を

丸々まかなうとすると、約 4,000 個もの電池が必要になります。このように、貯めることに関しては極めて苦手であることは否めません。電気自動車がなかなか普及しないのも、これが理由です。

家庭用ではありませんが、蓄電密度の高いナトリウム・硫黄電池等も実用化されており、これからも新しい電池の開発が進んでいくと、この状況はだんだん改善されてくるでしょう。

5 電気と安全

正しく使うことが大事

電気にはもう一つ大事な点があります。それは正しく使うということです。うっかりコンセントにつないだ器具で電線がむき出しになった所に触り、びっくりした人もいますが、高い電圧ですと危険な事故となることもあります。クレーン車が送電線に異常に接近したために、クレーンの操作者が感電した事故も報告されています。

屋内配線の絶縁物が劣化して漏電すると火災の原因になります。延長コードに多数の電気器具を接続したため、電線に決められている以上の電気が流れ過熱して、火災に至るということもあります。

事故が起こらないための対策として、送電線に対する接近警報装置や家庭用の漏電遮断器・安全ブレーカーなどの装置もありますが、事故を完全に防止するのは難しいので、安全の規則や取扱説明書などの指示に従い、電気を正しく使うことがとても重要です。

6 電気と未来社会

データは大事

今まで見てきたように、電気は他の技術と一緒に人々の多くの夢を実現してきました。それはこれからも続きます。例えば、近年大いに進歩しているセンサー技術を使って得られる人の健康状態を示すデータが、もっと早く正確にいろいろな角度からつかめるようになり、いろいろな形で蓄積されて、処理されて、使いやすい情報になるでしょう。私たちは自分で日々その情報を見て、健康を維持するように工夫するでしょう。いざというときには、お医者さんがその情報を活用して、私たちに元気を取り戻してくれるでしょう。

自動車と電気

自動車は電気でどんどん進歩します。現在の自動車は1台に1つのエンジンを積んでいます。そのエンジンで燃料となるガソリンを燃やして、車輪を回す力を得ています。エンジンは一つで、車輪は4か所についていますから、機械で精密な工夫をして、エンジンの力を2か所又は4か所の車輪に分配して走ります。電気自動車では、モーターが車輪を動かすようになります。モーターはエンジンに比べてずっと小さく、軽くできますから、車輪ごとにモーターを取り付けることも可能になります。モーターは電気で動かすのでいろいろな制御がやりやすくなります。車輪ごとにモーターをつければ、車輪ごとに効率のよい制御ができるようになります。音も静かで、より安全で乗り心地の良い車になります。モーターを電気で動かすため



図 5 電気自動車の充電ステーション

には、車に電池を積んでおかなければなりません。その電池自体、そして電池に電気を送って貯める技術は、大きく進歩するでしょう(図 5)。走っている車に道路の下から電気を送って、電池を充電する技術も実現しています。

ロボットと電気

危険な仕事、つらい仕事はどんどん機械がやってくれるようになります。人が近づけない場所であったり、テレビカメラで空から状態を正確につかんだり、さまざまな形で消火活動に役立つようになります。地震や水害などの災害現場では、救助ロボットが大活躍するようになるでしょう。人が少なく不便な場所に荷物を運ぶときには、無人飛行機が使われるようになるでしょう。体力が落ちて、自分でお風呂に入れないお年寄りも、ロボットの助けでお風呂に入って、ゆったりとした気持ちになれるでしょう。これらを実現するためには、ほとんどの場合、

電気技術が必要になります。さらに、材料、機械、化学、情報などのさまざまな技術も必要になります。

電気の作り方が変わる

電気の作り方や作る場所も、どんどん変わってゆきます。たとえば近年、太陽光発電の設備がどんどん増えてきました。従来の大型の発電所に比べて、ずっと小さな発電設備が、いたる所で作られるようになっていきます。太陽が照ればたくさん電気を出しますが、雨が降れば少ししか出しません。もちろん夜は動きません。それでも電気は使いたいときに、使いたい場所で、使いたい量だけ使いたいでしょう。そうなれば、送り、配り、使う、それぞれについて、今よりずっとずっと工夫する必要があります。地

球を回る人工衛星を大規模な太陽光発電所にして、そこから地上まで電気を送って使おうという、夢のような話もあります(図6)。

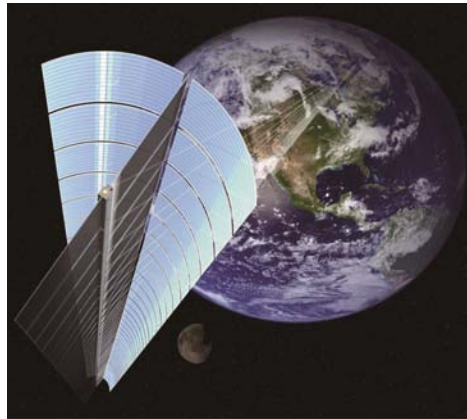


図6 宇宙で電気を起こす(写真提供:JAXA)

電気の課題は山のようにある

未来に向けて、電気を上手に作り、送り、配り、使うことの重要性は今後も増してゆくのであれば、そのための工夫をたくさんしなければならぬということになります。ですから、そこには興味深い課題が山のようにあります。その課題を一つひとつ解決して、より住みやすくより安全でより健康な未来社会を実現する必要があります。

本シリーズでは、いろいろな電気技術の一つひとつに焦点を当てて、解説しています。山のような課題の解決には、皆さんの力が必要です。きっとおもしろいですよ。ぜひ取り組んでみてください。

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。日本では、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、エネルギー資源は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、ただし、正しい内容で説明し、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。

2015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

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 臼田 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 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 福田 務 委員 前島 正裕

(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 Vol.1

電気とは何だろう

2015年9月15日 初版発行

非売品

2016年9月30日 2刷発行

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



電気の知識を深めようシリーズ Vol.2 2刷

私たちの身近にある電気



一般社団法人 電気学会

電気の知識を深めようシリーズ Vol.2 2刷

私たちの身近にある電気

第2版

一般社団法人 電気学会

まえがき

現在、私たちは電話、照明、テレビ、電車など、電気を利用して非常に便利で豊かな生活をしています。このように電気に囲まれた快適な生活に慣れてしまった私達には、電気の無い生活を想像するのはかなり大変ですが、100年ちょっと前には、日本でも皆、電気を使わずに生活をしていました。

この小冊子では、今、身近にある電気がどのように使われるようになってきたか、振り返ってみます。そこには、まだ皆さんの知らない電気的一面があるかもしれません。

目 次

まえがき	ii
1 私たちの身近にある「電気」～コミュニケーション編～	1
スマートフォンや携帯電話は本当に便利！	1
情報・通信技術の進化で変わる	
コミュニケーション	1
情報・通信技術の発展は電気技術の発展の源	2
コミュニケーションのはじまり	2
言葉の誕生	2
遠く離れた場所に伝える	2
歴史的発見！文字の誕生	3
手紙を送る	3
郵便制度の誕生	4
人が手紙を運ぶ時代から電信の時代へ！	4
電気を通信のために使う	4
モールス符号	4
コラム：SOSはSave Our Shipの略？	5
日本での電信機の活躍はもう少し先	6
福沢諭吉、ネット時代の到来を予知?!	6
電信時代の幕開け	7
タイタニック号の悲劇から無線通信の時代へ	8
電信に頼らない新たな技術開発	8
無線機の登場！しかし・・・	8
必死の「SOS」もむなしく、タイタニック号沈没	9

海の安全のために、なくてはならない無線通信	10
リアルタイムで声を届ける！～電話機の誕生～	10
音声通信のはじまり	10
研究者たちの成果が組み合わせられ、電話機誕生	11
電話機のしくみ	11
電話交換台のオペレータが手動でつなぐ	12
手動から自動に、安定した電話サービスへ	13
携帯電話の登場とつながりやすさを支える技術革新	15
移動式電話の登場	15
無線基地局を細かくつないで快適な携帯通話	16
急速に発展した携帯電話	17
様々な技術革新が携帯電話の普及を支えた	17
携帯電話とインターネット	18
福沢諭吉の夢を超えたデータ通信の世界	18
インターネットでのデータ送受信	18
パケット通信で快適通信	18
インターネット通信高速化の時代へ	19
2 私たちの身近にある「電気」～エネルギー編～	19
電気を使った便利な生活	19
光として使う～照明～	20
電球の発明	21
蛍光灯の普及	23
照明の主役がLED ランプに	23
コラム：エジソンの名言	23
動画鑑賞の液晶テレビ	24

熱として使う	24
電気炊飯器	24
ヒータを使わない IH 調理器	26
電波を使う電子レンジ	26
電子レンジは日向水と同じ？	27
火を使わない台所	27
動力として使う	28
蒸気力で動く蒸気機関車	28
蒸気機関車から電車へ	29
電車も発電する	29
さらなる高速鉄道を目指して	29
消費電力の比較	30
本冊子の企画趣旨について	32
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	33

電気の知識を深めようシリーズについて

電気の正しい知識を深めていただくために企画された本シリーズには、次の7種類の小冊子があります。いずれも「電気」がもっと身近で、おもしろくなる内容です。是非あわせてお読み下さい。

- 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

1 私たちの身近にある「電気」

～コミュニケーション編～

電気にはいろいろな使われ方がありますが、最も使われているのが、電話に代表されるコミュニケーションの道具としてでしょう。ここでは、電気がいかにコミュニケーションに使われているか、みてみることにしましょう。

スマートフォンや携帯電話は本当に便利！

私たちは、スマートフォン（略してスマホ）や携帯電話を毎日当たり前のように使い、メールをしたり、SNS(Social Network Service)でメッセージを送ったり、ゲームをしたりしています。移動中でも電話ができ、インターネットでいろいろな情報を得ることができるスマホや携帯電話は、本当に便利で、使う人によっては、生活する上で無くてはならない道具と言えるでしょう。

情報・通信技術の進化で変わるコミュニケーション

最近では、直接会って話をしたり、電話で会話したりするよりも、メールやメッセージ機能などの文字によるコミュニケーションを大事な場面、例えば、愛の告白とか（?!）で使う人も増えているようです。その善し悪しはひとまず置いておきますが、私たちのコミュニケーション方法やそれを支える情報・通信技術は、人間の進化や生活スタイルの変化とともに長い年月をかけて進化してきました。

情報・通信技術の発展は電気技術の発展の源

情報・通信技術の発展は、電信ケーブルを地上にも海底にも張り巡らせるインフラ技術の発展につながり、そのことが、電気エネルギーを作り（発電）、いろいろなところに運搬して（送電）、配る（配電）技術の発展にもつながりました。それでは、そんな電気の発展の源でもある情報・通信技術の、時代による移り変わりや、私たちを取り巻く最新の技術を見ていきましょう。

コミュニケーションのはじまり

言葉の誕生

四足歩行から直立し、二本の足で歩くようになった猿人に続いて、人間の祖先である原人は、およそ 50 万年前に誕生しました。原人は、石斧せきふを作ったり、たき火をしたりするようになるとともに、集団で生活するようになりました。集団生活の中では、仲間に何かを伝える必要があったため、このころから言葉による「コミュニケーション」が始まったと言われています。しかしこのときはまだ、文字は使われていませんでした。

遠く離れた場所に伝える

その後、集団生活の規模が大きくなり、いろいろな場所に集落や村ができるようになると、遠く離れた別の場所に合図を送ることが必要になりました。そこで、音による通信（ドラム通信）や、煙やかがり火などを使った目で確認できる通信（のろし通信）が生まれました（図 1）。

さらに、他の村に正確な情報を伝えたり、情報を未来に残し

たりするために登場したのが、「文字」です。



(a) ドラム通信

(b) のろし通信

図1 紀元前の通信方法

歴史的発見！文字の誕生

文字として人類最古の役割を果たしたとされる「絵」は、今から約3万年前に生まれ、その後、象形文字やくさびがた楔形文字として進化しました。文字は、コミュニケーションの歴史の中で最も重要な発明で、文字がなければ、私たちの今の生活スタイルもまったく違うものになっていたに違いありません。

手紙を送る

文字が登場すると、その文字は手紙として書かれて、遠くにいる人へ伝えられるようになります。最初は手紙を人が走って運んだり、馬や伝書鳩を使って運んだりしていました。手紙を運ぶ人として日本では、江戸時代中期から明治まで活躍していた「飛脚」が有名です。飛脚は、大名や武家の人々だけでなく、町人も利用しており、当時の主要な通信手段の一つでした。

郵便制度の誕生

飛脚が文字通り日本中を走り回っていた 1840 年ころ、世界では、重要な制度が動き出しました。イギリスの政治家だったローランド・ヒルが、「郵便改革」を唱え、世界で初めて切手を作り、距離に応じて料金を設定する郵便制度を創設したのです。この制度のおかげで、誰でも手軽に手紙を送ることができる時代がやってきました。しかし、人の力で情報が伝えられることは変わりませんでした。

人が手紙を運ぶ時代から電信の時代へ！

電気を通信のために使う

1837 年、アメリカの画家であったサミュエル・モールスは、イギリスへの美術留学の帰路、船上で行われた「電磁石」の簡単な実験で、カチカチと音を立てて電磁石に鉄片がつくのを見て、電気を使った通信システムを思いつき、電信機を発明しました。

モールス符号

モールスが発明した電信機で送信される信号は、「モールス符号(信号)」と呼ばれ、アルファベットや数字の一文字一文字に「・(短点)」と「ー(長点)」からなる符号を割り当てたものでした(表 1)。

このモールス符号を信号として使うと、送られてくる信号を紙に印字して文字として記録したり、信号を耳で聴いて言葉として認識したりすることができます。

表1 アルファベットと数字のモールス符号

A · -	H · · · ·	O - - -	V · · · -	3 · · · - -
B - · · ·	I · ·	P · - - ·	W · - -	4 · · · · -
C - · - ·	J · - - -	Q - - · -	X - · · -	5 · · · · ·
D - · ·	K - · -	R · - ·	Y - - · -	6 - · · · ·
E ·	L · - · ·	S · · ·	Z - - · ·	7 - - · · ·
F · · - ·	M - -	T -	1 · - - - -	8 - - - · ·
G - - ·	N - ·	U · · -	2 · · - - -	9 - - - - ·

コラム：SOSはSave Our Shipの略？

緊急時の救援信号として有名なSOSですが、最初はCQDという符号が用いられていました。しかし、緊急時に間違いなく送れて、聞き誤りにくいということを考え、モールス符号の中でも単純なS(···)O(---)S(···)という組み合わせにしたものです。なお、かつてピンクレディーというデュオが歌った「SOS」という歌には、冒頭にSOS信号が入っていたため、その部分は放送できなかったとのことです。

【調べてみよう】

SOSは本当に“Save Our Ship”の省略形なのでしょうか。ではCQDは何の略？ 氷山に衝突して沈没するタイタニック号(9~10ページの記事参照)は、どのような信号を送ったのでしょうか。調べてみましょう。

日本での電信機の活躍はもう少し先

日本に初上陸したモールス符号を送るための電信機（図 2）は、1854 年、あの黒船に乗ったペリーが 2 度目に来航したときにもたらされました。しかしそのときは大きな注目を集めることもなく、日本では普及しませんでした。それでも、日本のいろいろな分野の研究者たちは、西洋で広がっていた電信技術に非常に興味を持ち、日本に導入する機会を伺っていました。

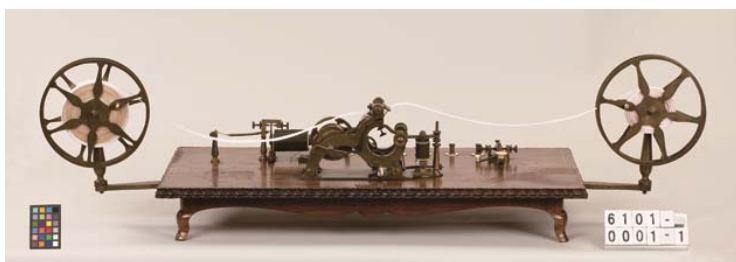
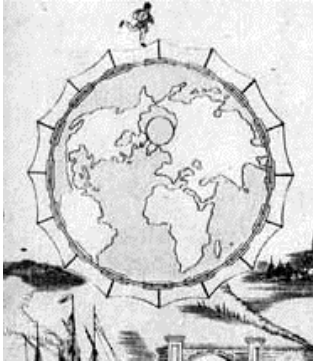


図 2 ペリーから献上されたモールス電信機(写真提供: 郵政博物館)

福沢諭吉、ネット時代の到来を予知 ?!

少し話が横道にそれますが、慶應義塾大学の創設者で、啓蒙思想家であり、西洋学者でもあった福沢諭吉は、1866 年に著書「西洋事情」の中で「電信（当時は傳（伝）信と書いた）」について述べ、それを表す特徴的な絵を書籍の扉絵として使っています。図 3(a)が、その扉絵です。そこには地球に張り巡らされる電信線が描かれていて、現在、私たちがインターネットのシンボルマークとしてよく使う地球の絵（図 3(b)）とそっくりです。



(a) 福沢諭吉著「西洋事情」の扉絵(1866年出版)

(b) 現在、インターネットを連想させる絵の例

図3 福沢諭吉の電信と現代のインターネットの表現

電信時代の幕開け

「西洋事情」の出版から3年後の1869年(明治2年)、日本で初めての電信が東京―横浜間で開業し、その後、電信は日本全国に広がっていきました。

さらに、海底ケーブルを用いた国際電信も発達し、国内外の電信網整備が進みました。そして、1879年、国際電報を含む、すべての電信事業を担う電信中央局が開局し、日本にも本格的な電信の時代がやってきます。

1900年代初頭までに世界中の海底に設置された電信ケーブルは、約40万海里(約740,800キロメートル(1海里=1,852メートル))で、地球の赤道を19周もできるほどの長さになっていました。

タイタニック号の悲劇から無線通信の時代へ

電信に頼らない新たな技術開発

電信の全盛期は、イギリスのビクトリア朝の全盛期でもあったため、海底に設置された電信ケーブルの半数以上はイギリスの支配下にあります。電信を使った通信情報のほとんどがイギリスに渡ってしまう状況を打開しようと、近隣諸国では新たな通信技術の開発が進められます。

無線機の登場！しかし・・・

ここで、新たな通信技術として登場したのが、無線通信つまり、ケーブルを使わない、電波による通信です。1864年にイギリスのマクスウェルが「電磁気の理論」を発表し、1888年には、ドイツのヘルツが、電磁気の理論を実験的に証明しました。そして1901年、イタリアのマルコーニが大西洋横断無線通信（モールス符号の送受信）に成功し、特に、有線（電信ケーブル）では通信が難しい、船舶をターゲットとした無線通信事業を始めます。

しかし、当時は海底ケーブルによる地上での通信が一般的で、高価な無線機を設置しようとする船はほとんどありませんでした。

一方、日本ではマルコーニの無線実験の成功を聞くやいなや、電気試験所の研究者が無線機を開発し、さらに海軍が無線機を採用して全軍艦に無線アンテナを取り付けました。日本とロシアの海戦ではこの無線通信が日本の勝利に大きく貢献したと言われています。

必死の「SOS」もむなしく、タイタニック号沈没

そんな中、あの歴史的な海難事故が起こります。1912年に起こった世界最大(当時)の豪華客船、タイタニック号の沈没です。タイタニック号は、氷山が迫っていることに気が付かず、氷山に衝突して沈没してしまいます。

タイタニック号には無線室があり、マルコーニ社製の無線機が設置されていました。氷山に衝突してから沈没するまで、タイタニック号はこの無線機を使って周辺にいる船舶に必死にSOSを送り続けます(図4)。ところが、多くの船舶は無線機を装備していなかったため、無線機で信号をキャッチした船は、100 kmも離れたところにいました。その船は、信号を受けて救助に向かいましたが、到着したときには沈没から2時間半以上経過していて、結局2,200名以上の乗員乗客のうち約1,500名もの命が失われました。ただ当時は、一旦海難事故が起これば生存者数は零なのが普通という時代であり、その意味では無線機により数百名の命は救われたわけですから、人命救助に大きく貢献したとも言えます。



図4 タイタニック号の姉妹船オリムピック号の無線室の様子

海の安全のために、なくてはならない無線通信

このタイタニック号の遭難をきっかけに、海上での安全面の強化のため、ある程度の大きさの船には、無線機を設置することが義務づけられるようになりました。また、第1次世界大戦中も、世界各地との交信には無線通信が使われるなど、海底ケーブルによる電信とともに、無線通信も広く使われるようになっていきました。

衛星技術やデジタル技術の発達によって、1999年に、モールス符号を用いた遭難通信の利用は廃止され、現在は、衛星通信機器やデジタル通信機器を利用したシステムが主に使われていますが、一部の船舶や他国との通信手段としてモールス符号を用いた無線通信は現在でも利用されています。

リアルタイムで声を届ける！～電話機の誕生～

音声通信のはじまり

1900年代初頭までに広く普及していた電信では、電報を送りたいときに電信局へ行って送信を依頼し、送り手に最も近い電信局で受信した電報を配達夫が届ける、という仕組みだったため、リアルタイムでのやりとりはできませんでした。

リアルタイムで対話が可能な電話を開発したのは、アメリカ・ボストン大学で音声学の教授をしていたグラハム・ベルで、1876年3月7日に特許が提出されています。モールス符号を開発したモールスは画家、電話を開発したベルは音声学者と、どちらも物理、数学や電気の専門家ではなかったということは非常に興味深いことです。

研究者たちの成果が組み合わされ、電話機誕生

電話に関する特許を最初に提出したのはベルですが、実は、ベルと同じ日のおよそ 2 時間後に、多重電信機などの研究をしていたエリシャ・グレイも電話機の特許を提出しています。さらに、白熱電球の発明などで有名なトーマス・エジソンも電話機の発明に成功していて、この三者の成果が組み合わされて、電話の技術は発展していきます。

電話機のしくみ

ベルは、音声の振動を電気振動に変えて伝え、伝わってきた電気振動を音声の振動に変えて伝えられることを発見し、離れた場所にいてもリアルタイムで会話ができる「電話機」を開発しました。電話機の構造を支える主役となるのは、モールス電信機でも利用された「電磁石」です。

ベルは、振動板が受け取った声の振動から、電磁石を介して電気信号の波を作り、これを同じ構造の受信側で声に変換しました。

図 5 が、ベルが特許申請した電話機の概略図です。糸電話の糸の代わりに電磁石と導線を使った非常にシンプルな構造です。さらに、エジソンによって、振動板と電磁石との間に、炭素（カーボン）でできたボタンを入れた送話器が作られ、エジソンのカーボン送話器とベルの電磁受話器の組み合わせが電話機の原型となり、長きに渡って電話サービスを支えます。

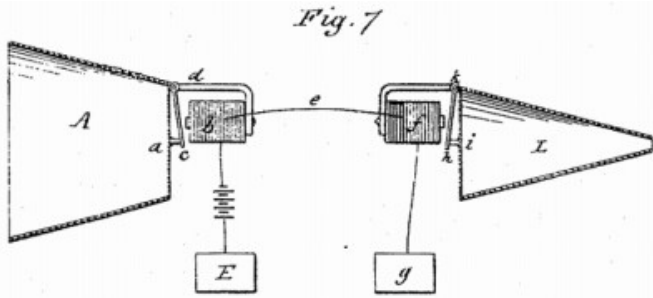


図5 ベルが特許申請した電話機の概略図

電話交換台のオペレータが手動でつなぐ

ベルの特許申請から1年後の1877年には、世界で初めての電話局がアメリカ合衆国のコネチカット州に誕生し、翌年には、ロンドン、パリ、ベルリンなどの欧州での利用も始まり電話サービスはみるみる広がっていきました。

日本では、電信の普及率が高かったことや、電話サービスを民営化するか、国営化するかの議論が長引いたことなどから、1890年ようやく電話サービスが開始されました。

現在では、固定電話でも携帯電話でも、話したい時に話したい相手に直接つながりますが、当時は、各家庭やオフィスにある電話機から、電話交換台につなぎ、交換台の交換扱者（オペレータ）が指定された電話機に手動でつないでいました。そのため、電話がつながるまでに1時間以上かかることも少なくありませんでした。

手動から自動に、安定した電話サービスへ

そこで次に進められたのが、交換機の自動化です。1896年に自動化のために開発された技術が、回転ダイヤルです。回転ダイヤルとは、ダイヤルが回転する円弧の長さに応じて交換機内の電磁石が動き、自動的に任意の電話番号につなぐことができる仕組みです。回転ダイヤルを採用した自動交換機の登場によって、オペレーターの手を介さず、電話番号に基づいて自動で迅速に、電話をかけたい相手につなげることができるようになりました。

国内で初めて導入された自動交換機に採用されたのが「ステップ・バイ・ステップ」という方式です。「ステップ・バイ・ステップ」とは、各電話機に割り当てられた電話番号に応じたダイヤルの回転の長さによって、接続する回線が段階的に選択され、電話をかけたい相手の電話機に回線がつながる方式です。

その後、交換機やケーブル技術の改良、地域を区別する市外局番の導入などを経て、何万という電話機が同時に通話しても混線したり、つながらなくなったりすることのない、安定した電話サービスへと発展していきました。

図6は、電話機が普及してから現在までの電話機の形状を、年代を追って示したものです。



(a) 1910年



(b) 1933年



(c) 1963年



(d) 1970年



(e) 1985年



(f) 2000年

図6 各年代に日本で利用された電話機(写真提供:NTT技術史料館)

携帯電話の登場とつながりやすさを

支える技術革新

移動式電話の登場

世界で初めての移動式電話が自動車電話として登場したのは、1949年のことです。ここで移動式電話、と言ったのは、「携帯」するにはまだあまりにも大きいものだったからです。大きさは大きいものの、移動しながら通話できることは本当に画期的なことでした。

自動車電話は、自動車大国であるアメリカで開発が進められ、日本では、1979年に自動車電話サービスが開始されました。これが現在の携帯電話の始まりです。1985年にサービスが開始された「ショルダーホン」は、その名の通り肩にかけて持ち歩くことができる電話機でしたが、重さ3kg、最長通話時間約40分と、今の携帯電話とは比べものにならないものでした(図7)。



図7 ショルダーホン
(写真提供:NTT 技術史料館)

移動式電話では当然、無線通信が行われますが、当初は、無線通信用の回線が限られていることや、無線基地局(有線の電話線とつなぐ交換基地)の数が少なかったため、つながりにく

く、途中で切れたり、混線したりすることが頻繁にありました。

無線基地局を細かくつないで快適な携帯通話

そこで、より効率的でつながりやすさを向上するために生まれた方式が、セル方式です。セル方式では、サービス地域を数百 m から数 km の小さな区画（これをセル(Cell)と呼びます）に分け、各セルにある基地局からの送信出力を弱めることで、離れた基地局との干渉を避け、離れたセルでは同じ周波数での通話ができるように工夫されています（図 8）。

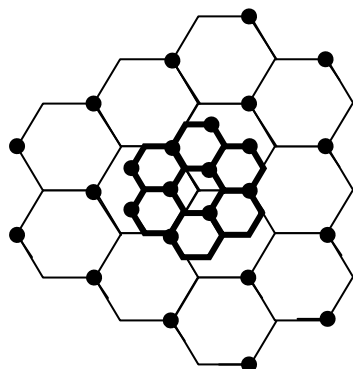


図 8 セル方式移動電話で細分化されたセルのイメージ
(図中の黒点が無線基地局)

現在の携帯電話でもセル方式が使われており、英語では携帯電話は、Cell-Phone(Cellular phone)と呼ぶのが一般的です。

1987 年に日本で最初に販売された携帯電話は、重さ 900 g と大変重いものでしたが、1991 年には、現在も利用されているガラケー（携帯電話）の原型とも言える超小型携帯電話「ムーバ」が発売されます。この「ムーバ」は重さ 230 g で、一気に小型化されていました（図 9）。



a) 日本最初の携帯電話 b) ムーバ c) スマートフォン

図9 携帯電話の変遷（写真提供：NTT Docomo）

急速に発展した携帯電話

現在主流となっているスマホは、画面の大きさなどの制約もあることから、それほど小型化に対する重要度は増していませんが、スマホの平均的な重さは110g程度で、さらに小型で操作性の高いものになっています。

携帯電話の誕生から2014年現在まで、まだ30年も経過していません。通信や電話の歴史に比べると、急速に成長した技術と言えます。

様々な技術革新が携帯電話の普及を支えた

携帯電話が急速に発展し、普及した背景には、長きに渡って、研究、改良が進められてきた、通信技術、電話技術のノウハウがあります。さらに、移動電話通信網の充実、構成部品の電子化、繰り返し充電して利用できる二次電池の高効率化などの技術革新が携帯電話の普及を支えています。

携帯電話とインターネット

福沢諭吉の夢を超えたデータ通信の世界

現在の携帯電話は、インターネットにつながずに使うことはほとんどありません。携帯電話だけでなく、パーソナルコンピュータ（PC）やタブレット端末で、調べ物や買い物をしたりすることも当たり前になっています。

インターネットは、電信技術、音声通信技術、テレビなどを含む画像動画通信技術など、すべての通信技術を一挙に引き受ける夢のような世界を実現しました。福沢諭吉が西洋事情で示し、全世界がつながることを夢見ていた電信の世界を超え、データ通信という形で、さらに大容量の情報のやりとりを可能としたのです。

インターネットでのデータ送受信

インターネットでやりとりする情報は、コンピュータが理解できる言葉に翻訳されたデータと呼ばれるものです。

いろいろな場所にいるユーザーから送られるデータが、1本の通信経路を通して送られる時、データになんの印もついていないと、途中で迷子になったり、意図していないところに送られたりする可能性があります。また、一つのデータが大きすぎると、通信経路を止めてしまう可能性もあります。

パケット通信で快適通信

そこで考えられたのが、パケット通信という方法です。なんらかのデータを送ろうとすると、コンピュータ内で、送信するデータを通信網に負担をかけない程度の小さなブロックに分け、それぞれのブロックに宛先と番号をつけた上で送り出しま

す。このときの小さなブロックが「パケット」です。

これで、送信先を誤る心配はなくなり、受信する側は、来たデータを番号順に並べて送信されたデータを再現することができます。

インターネット通信高速化の時代へ

インターネットの通信手段には、有線と無線があります。有線は無線に比べて通信速度が速いので、自宅や学校、仕事場で使う PC の場合には、有線 LAN (Local Area Network) が一般的に使われています。最近では、スマホや iPad などのタブレット端末の利用が増えているため、無線通信技術がさらに発展し、さらに効率的な技術が生み出されていくことでしょう。

2 私たちの身近にある「電気」

～エネルギー編～

前章では、通信技術を中心に電気がどのように使われるようになったか見てきましたが、それ以外にも、電気は生活のあらゆる面に大きな変化をもたらしました。その様子を見ていきましょう。

電気を使った便利な生活

電気は、エネルギーをスイッチひとつで使える便利なものです。どんなところで電気が使われているかを見るために、電気を「発光」、「熱」、「動力」として使われている例を、現在と 100 年前と比較して表 2 にまとめました。100 年前の大正時代の

表2 電気製品を使った現在と昔の比較

分類		現在 電気製品	100年前 電気製品に 対応したもの
発光 として使う	照明	蛍光灯、LED	灯油ランプ
	動画鑑賞	液晶テレビ	活動写真（映画）
熱 として使う	炊飯	電気炊飯器	かまど と お釜
	温める	電子レンジ	日向（ひなた）水
	空調	冷暖房機	団扇 炭火
動力 として使う	洗濯	電気洗濯機	たらい と 洗濯板
	のりもの	電車、新幹線	蒸気機関車

人々からは想像もできないほど、現在の私たちは便利な生活をしています。ここで共通していることは、スイッチを ON（オン）にするだけで、テレビを観る、照明が灯る、ご飯が炊ける、コーヒーを温める、洗濯できる、電車も動き出す、と言うことです。昔と比較しながら、現在の電気の利用がどれくらい便利であるかを見てみましょう。

光として使う ～照明～

量販店の照明器具売り場に行くと、棚にあるのはLEDランプばかり、でもそのようになったのはごく最近のことです。照明は松明^{たいまつ}や行燈^{あんどん}のように火を燃やすことから始まりました。明治時代には灯油ランプなども使われましたが、電気による照明の始まりはアーク灯でした。これは、電気溶接などに使うアーク放電による照明で、確かにまばゆい程のものなのですが、かな

り大がかりな装置を必要とするので、一般家庭で使うようなものではありませんでした。大正時代になると、やっと一般家庭でも電気による明かりが使われるようになりました。しかし、当時は天井から電線コードで釣り下がっている電球を、夕食時に食卓の上に移動し、食事がすむと居間に戻すと言った使いまわしをしていました。それでも、夜間の部屋は明るくなり、大変に便利と感じていました。私たちは、よく電気をつけるとか電気を消すとか言いますが、この「電気」というのは電気による照明ということですよ。私たちの生活において、電気と照明がいかに強く結びついているかが分かります。

その後、照明は蛍光灯、LED と大きく変化しました。現在では、各居間はもちろんのこと、学習机にも照明、風呂場、玄関、いたるところでスイッチを押せば照明が灯る、とても便利な生活です。このように、電球の実用化以降、便利さ、明るさ、発熱を抑えた省エネへと、照明技術は大きく進歩してきました。その基本技術を追ってみましょう。

電球の発明

電球を初めて発明したのはイギリスのスワンという人ですが、スワンの作った電球は寿命が短い、太い電線で電気を送らなければならないなどの欠点がありました。電気を使ったさまざまな製品を発明・実用化した米国の発明王エジソン(図 10 左)は、竹ひご(日本の京都の竹)を使った電球(図 10 右)を発明しました。この電球は竹ひごを蒸し焼きして炭素の細い線(フィラメント)を作り、燃え尽きないように真空ガラス球に封じ込めたものでした。これが実用的な電球の最初です。

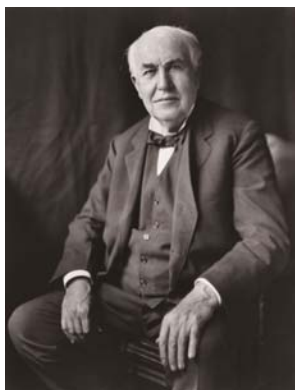


図 10 エジソン(左)、エジソン型電球(右)

(電球写真提供:国立科学博物館)

その光の輝きはまばゆいもので、部屋を明るく照らすことができたので、あるお金持ちから自分の邸宅の部屋に灯してほしいと注文を受けました。しかし当時は電気を供給する電力会社はまだなく、電球を点けるには自宅に発電機を設置する必要がありました。そこで建物を暖房していた蒸気を利用して発電機を回して発電し、炭素フィラメント電球で、客人を招待して舞踏会を催した大広間の照明をしました。

その後、安価で長寿命のタングステンをフィラメントに使った白熱電球が開発され、一般家庭にも電灯照明が広まりました。このような白熱電球は、手を触れたら火傷する^{やけど}くらいの温度です。これは、フィラメントを1000度以上の温度に上昇させて、白色光を出しているためですが、実は白熱電球は照明するより熱になるエネルギーが大きく、照明効率はあまり良くありません。

蛍光灯の普及

その後、熱くない照明として蛍光灯が発明されました。蛍光灯は低気圧ガスの電気放電を利用しています。ガラス放電管の内面に蛍光塗料を塗布しておき、放電で生じた紫外線が蛍光塗料に照射されたときに生じる発光を利用しているため、熱くなりません。また蛍光灯は直管状や円環状であるので、発光する面積が大きく一様な照明をするのに便利です。

照明の主役がLED ランプに

現在は省エネルギー(少量の電気エネルギーで照明効率の良いもの)を実現するために、LED ランプが照明の主役になりつつあります。交通信号機や野外照明にも LED ランプの利用が広がっています。東京スカイツリーもすべて LED ランプでライトアップされています。LED ランプは半導体に電流を流すときに発光する現象を利用しているのですが、同じ明るさであれば、

コラム：エジソンの名言

エジソンは次の言葉を残しています。

I tried everything. I have not failed.

I have just found 10,000 ways that won't work.

訳)私はあらゆるものを試したが、失敗はしたことがない。
10,000 通りもの、うまくいかない方法を発見したのだ。

電球のフィラメントの材料の開発にはかなりの苦労があったようですが、いかにも不屈の人エジソンらしい言葉ではありませんか。

消費電力が小さく、寿命が長いという特徴があります。この LED という名前ですが、発光ダイオードという英語の Light Emitting Diode の頭文字をとって LED と呼んでいます。

2014 年のノーベル物理学賞に、この LED 開発に貢献した 3 人の日本人(赤崎勇博士、天野浩博士、中村修二博士)が受賞したことは日本の誇りです。

動画鑑賞の液晶テレビ

映画では、撮影フィルムの背後からランプで光をあてて大画面で動画像を見えるようにしていますが、液晶テレビでは、デジタル電気信号の画像を、裏から一様な明るさで照らして、絵として見えるようにします。このために、小さい LED が数多く使われます。

この他、パソコン、デジタルカメラ、スマートフォンなどの画面を見るためにも小さい LED がたくさん使われています。このような技術により、映画館に行かなくても、家庭や手のひらの上できれいな動画が楽しめるようになりました。

熱として使う

電気炊飯器

電気炊飯器は日本で発明され、世界中で使われている調理器です。電気炊飯器のない時代、お母さんは寒い朝にもかかわらず、皆がまだ寝ている時間に起きてご飯を炊くといった、つらい仕事をしていました。

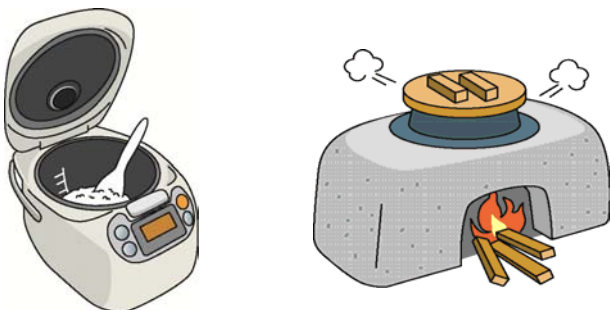


図 11 電気炊飯器（左）と かまど(右)。

お釜をかまどに置き、薪の火力でご飯を炊く。

60年前の一般家庭では、土間に「かまど(竈)」(図 11 右)が設置されていて、そこに水洗いしたお米の入ったお釜を載せて、その下から薪まきの火力で炊飯していました。この薪は「かまど」の焚き口に置いてあるような、木を切ったものですから、「かまど」からは煙が立ち上り、炊事場の天井は煤すすで真っ黒になります。薪による火加減を注意深く調節し、「おこげ」にならないようにご飯が炊ければ一人前です。このご飯を炊くためのスペースはたたみ二畳分は必要でした。

そこで、ある電気技術者が、薪の代わりに電気ヒータを使ってご飯を炊く、電気炊飯器を考案しました。この電気炊飯器(図 11 左)を考えてみましょう。そのスペースは 40センチ四方もあれば十分で、棚の上に置くこともでき、スイッチを ON しておけば、そばについていなくても 1 時間程度でご飯が炊けます。煙も出なければ、火の番をする必要もありません。電気炊飯器

は、如何にお母さんを毎朝のきつい仕事から解放させたか、分かりましたか。

ヒータを使わない IH 調理器

最近、電気ヒータを使わない IH(Induction Heating)調理器も家庭の台所に登場しています。ガスコンロのように排気ガスを出すこともなく、ガスの消し忘れによる中毒や火災事故の恐れもない、IH 調理器が推奨されています。金属鍋を IH 調理器に置くだけで、火をつけなくても料理ができます。その秘密ですが、実は IH 調理器の下に電流コイルが設置されており、時間変化する強力な磁界(数十キロヘルツの交流磁界)を発生しています。この交流磁界の場所に金属鍋を接近させて置くと、電磁誘導により金属鍋の底板に強力な交流電流が流れて熱を発生し鍋が熱くなります。このため、ヒータがなくても料理ができるのです。

電波を使う電子レンジ

電子レンジは英語では“microwave oven”(マイクロ波オーブン)と言います。1940年代に、戦闘機の追跡のためにマイクロ波のマグネトロン発信機が開発されました。技術者たちは、

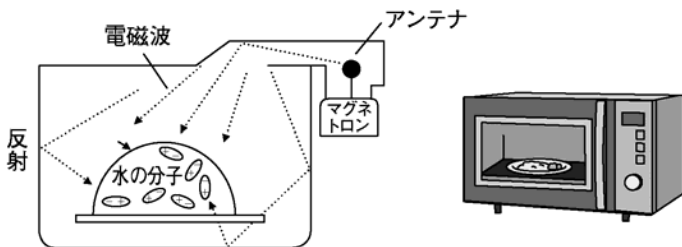


図 12 電子レンジの構造

マグネトロン発信機のアンテナ近くに手のひらをかざすと、大やけどを知っており、またマグネトロンのマイクロ波の電磁波でコーヒーを短時間で温めることを日常的にやっていました。ならば、火を使わなくともマグネトロンで調理器が作れると思ひ立ち、航空機食事の暖かい調理サービス提供に利用が始まりました。つまり、電子レンジにはマグネトロン発信機が内蔵され(図 12)、電磁波の一種であるマイクロ波(波長は 12 センチメートル)を発生し、そのマイクロ波がコーヒーだけでなく、食べ物も温めるのです。

電子レンジは日向水と同じ？

意外かもしれませんが、電子レンジが物を温める原理は日向ひなた水みずと同じです。太陽の光も電磁波の一種です。この電磁波のエネルギーが水に吸収されるので、日向に置かれた水は温かくなるのです。同じように、電子レンジもマイクロ波電磁波が食べ物や飲み物に吸収されて、食べ物や飲み物が温められるのです。電子レンジで使われている陽極分割型マグネトロンは日本の科学者、岡部金次郎により 1928 年に発明されました。

火を使わない台所

電気炊飯器はヒータで発生する熱でご飯を炊き、IH 調理器は電磁誘導によって金属鍋を加熱して調理し、電子レンジは電磁波が直接食べ物を温める調理器です。それぞれ異なった電気理論を利用した調理器が台所で活躍していることになりますが、いずれも火は使いません。火を全く使わないオール電化の台所の出現です。

動力として使う

電車は電気を使って動く車だから電車です。私たちは通学や通勤に電車(図 13)に乗って出かけます。駅のホームで5分も待たないうちに電車が来て私たちを運んでくれます。しかし60年前にはまだまだ蒸気機関車が主流でした。



図 13 電車

架空線とレールの上に1,500ボルトの電圧を供給。10両編成の満員電車が動き始めるとき、パンタグラフを通して1,000アンペアの電流が流れる。すると、1,500,000ワットの電力をモーターに供給して電車は動き出す。この巨大な電力を使って、都会では多数の電車が毎日動き、ここでも便利な生活を支えている。

蒸気力で動く蒸気機関車

日本でも明治時代には、鉄のレールを敷き、その上に蒸気機関車を走らせ、人と物を運ぶことが始まりました。蒸気機関車は、自分で燃料となる石炭を積んだ貨車を引っ張って、それを少しずつ釜かまの中で燃やし、その熱でタンクから引き込んだ水を熱して水蒸気をつくり、水蒸気のでピストンを動かして車輪を回して、客車や貨物車を牽引しています。

蒸気機関車から電車へ

一方、火力発電所では、石炭や石油を燃やし、水蒸気をつくり、タービンを回転させ、発電機を回し電気をつくりだしています。この電気でモーターを回して電車は動くのです。火力発電所も蒸気機関車も動力を生み出す基本原理は変わらないのです。

電車の好きな鉄道ファンは、先頭車両に乗り、運転席の後ろ窓から前景風景を楽しみながら、運転台のメーターを見ることでしょう。電車の運転手は、発車前に電圧が 1,500 ボルト (V) を指示し、電気が届いていることを確認します。そして「発車！」の掛け声でハンドルを倒す(スイッチ ON)と電車が動き出します。すると電流計の針が振れ、1,000 アンペア (A) を示します。電車のスピードがどんどん増して指定速度に達すると、運転手はハンドルを戻します(スイッチ OFF)。すると電流計の針は零を指しますが、電車は惰性でそのまま走っていきます。

電車も発電する

惰性で走って来た電車が停車駅に接近すると、運転手はハンドルを逆に倒し電車を減速させます。これを回生ブレーキと言いますが、この時は惰性で走ってきた電車のエネルギーで発電しているのです。この発電した電気は、他の発車しようとしている電車に送られて有効に使われます。

さらなる高速鉄道を目指して

人々は、さらなる便利さを求めて、より高速の鉄道を作ろうとしています。日本でも磁気浮上のリニア新幹線の計画(建設)

が進められています。従来の電車は、パンタグラフを通して架空線から電気を供給し、搭載しているモーターを駆動して、車輪を回し走る仕組みです。これに対して、リニア新幹線は駆動モーターを搭載していません。駆動モーターは、リニア新幹線に走る軌道の地面側に出発点から終点まで並べられており、そこからのエネルギーで車体を浮上させて高速走行をします。すでに、2002年から中国の上海で営業走行しています。

消費電力の比較

最後に、家庭で使われている電化製品は、どれくらいの電力を消費するか、比較してみましょう。図 14 に家電製品のおおよその消費電力を棒グラフに整理しました。大きな分類は、表 2 と同じに「発光」、「熱」、「動力」としています。

図 14 から、発光としての照明の消費電力は少ないことが分かります。しかし照明は夜間に長時間使うので、消費電力量は多くなります。熱としての電子レンジ、オーブン・トースター、電気ポットは、1,000 ワットもの大きい電力を消費しますが、使用時間は数分と短いので、消費電力量はそれほど多くなりません。電気炊飯器は、1,000 ワットを約 1 時間にわたり使用するので、大きな消費電力量となります。モーターを使う洗濯機、掃除機、エアコンも比較的長い時間使うので、消費電力量が多くなります。

このように、私たちは家庭生活の中で電気エネルギーを多量に消費することによって、快適で便利な生活を営んでいることを理解して下さい。

その時、それぞれの家電製品の消費電力と使用時間を掛け算した値の消費電力量が、電気料金になります。すなわち、この消費電力量に比例した量の化石燃料を私たちは消費しているのです。

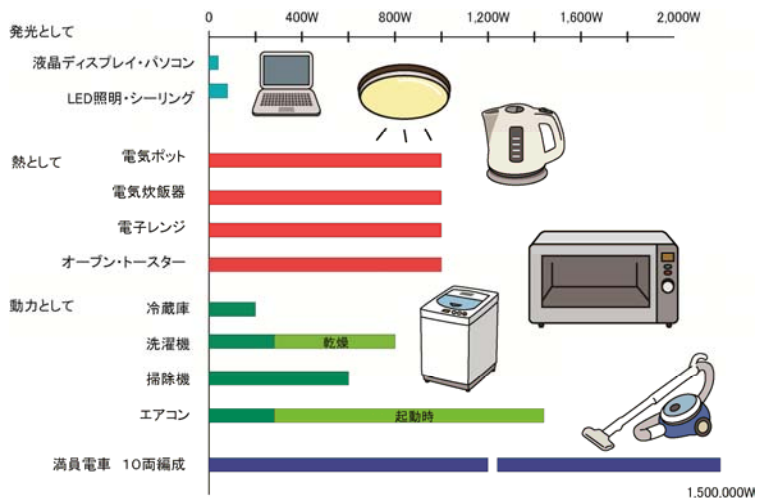


図 14 消費電力の比較

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。日本では、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、エネルギー資源は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、ただし、正しい内容で説明し、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。

2015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

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 臼田 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 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 福田 務

委員 前島 正裕

(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 Vol.2

私たちの身近にある電気

2015年9月15日 初版発行

非売品

2016年9月30日 2刷発行

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

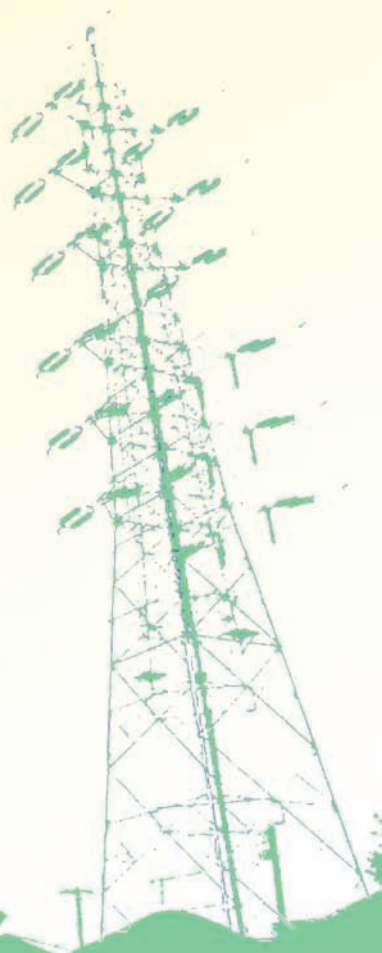


一般社団法人 電気学会



電気の知識を深めようシリーズ Vol.3 2刷

電気の基本を考えてみよう



一般社団法人 電気学会

電気の知識を深めようシリーズ Vol.3 2刷

電気の基本を考えてみよう

一般社団法人 電気学会

まえがき

皆さんの身の回りには、電気を使っているものがたくさんありますね。皆さんは、電気を使えない生活を経験したことがありますか。私たちの暮らしは、電気のおかげで便利で豊かなものになっています。その便利さは、これからも増してゆくことでしょう。

そのように大切な電気ですが、電気そのものについて皆さんはどれだけ興味がありますか。電気のことをよく分かったら、電気を使う生活がもっと興味深いものになると思いませんか。この小冊子は、そのように思っている「あなた」のために作りました。

目 次

まえがき	ii
1 電気をイメージしてみよう	1
電気と血液を並べて考えてみよう	1
電車の運転台をのぞいてみよう	3
テレビを観察してみよう	6
次のステップに進むために	8
2 昔から電気はおもしろかった	10
電気発見の物語	11
電気を科学する	11
単純な関係は美しい	12
電池の発明、そして電気と磁気の関係の発見	15
電気を起こす	17
電気の発見から発明へ、そしてイノベーションへ	19
電信機の発明と電気が伝わる仕組みの理論化	19
発電機・白熱電球の発明と電力事業化	22
交流と直流のどちらが優れているのか	25
志田林三郎と藤岡市助	27
3 電気を正しく書き表す	30
電圧と電流	31
直流と交流	34
電力と電力量	38
4 電気を正しく使う	42

家庭への電気の入口は分電盤	42
電気を安全に使うために気をつけること	45
家の外も見てみよう	49
5 電気エネルギーが伝わるしくみ	51
クイズ	52
本格的に考えよう	54
準備運動-電圧の働き	54
空間中の電界と磁界	57
電気エネルギーが伝わる場所	58

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 63

電気の知識を深めようシリーズについて

電気の正しい知識を深めていただくために企画された本シリーズには、次の7種類の小冊子があります。いずれも「電気」がもっと身近で、おもしろくなる内容です。是非あわせてお読み下さい。

- 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

1 電気をイメージしてみよう

電気は見えませんね。でも人のからだとか、身近にある電気を利用しての装置や器具、例えば電気エネルギーで動く電車とか電波を利用してのテレビとかスマホ、を少し注意することで、電気の存在や働きをイメージすることができます。

電気と血液を並べて考えてみよう

電気は発電所で作られて、電線で送られて、家庭やビルや工場でいろいろな形で使われています。その電気を、人のからだのしくみを使って、イメージしてみましよう。

電気の流れ、つまり電流について、人体内の血液の流れを思い描きながら、考えてみます。電気の性質と血液の性質は、まったく同じとは言えませんが、電気の性質をからだのしくみと機能に対応させて考えると、具体的な形でその概念を理解する助けになるでしょう。

血液は、人が生きてゆくために必要なエネルギーの元となる、酸素と栄養分を体中にくまなく運びます。電気も電気エネルギーを、私たちが生活する社会の隅々にまで運びます。生物や機械を問わず、動くためにはエネルギーが必要です。私たちの体を考えてみましょう。歩く、走る、つかむ、書くなどするときには、手足の筋肉が複雑に動いています。これらの筋肉が動くためには、エネルギーの元となる酸素と栄養分が必要です。

人間にとって大事な器官である脳に酸素と栄養分が運ばれ

ないと、生命にかかわる重大な事態にいたることは、よくご存じでしょう。酸素と栄養分は血液によって体の組織や器官に運ばれます。血液を流すために必要になるのが、血管です。心臓から送りだされた血液はさまざまな太さの血管を通して、体のすみずみまで流れてゆき、心臓にもどされます（図1）。

体が動くことかわりに、ロボットや機械が動くことを考えてみましょう。ここでは電気が使われます。すなわち、これらの装置における機

械的な運動は、電気でモーターなどが動くことにより実現されています。モーターは、電線を通してきた電流により回転します。電気エネルギーを運ぶためには、電線が必要になります¹。

このことから、電線は血管に相当するものと考え、電気が運ばれるイメージをつかみやすくなります。血液の流れを電流に対応させると、電気は血液に似ていると思いませんか。途中で電線が切れてしまうと、電流は流れませんからモーターは止まってしまいます。

人体における血液の循環では、心臓、肺、肝臓、腎臓といった臓器の働きにより、血液が動脈へと押し出され、血液中へ酸

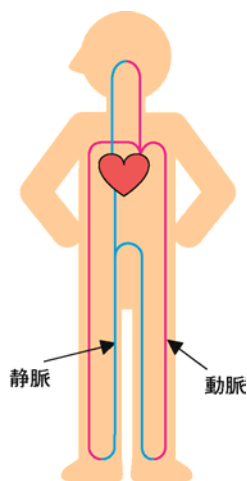


図1 血液は心臓から送り出される

¹ もっとも無線通信などでは、電気エネルギーは電波で運ばれるので、電線はかならずしも必要ではありません。

素が供給され、不純物が取り除かれています。心臓はポンプの働きをして、血液を血管内で循環させます。血管を通る血液によって酸素と栄養分が各組織に運ばれ、仕事をして静脈を通して心臓にもどされます。この状態は、電源（発電所や電池）から電線により電気が運ばれる様子と似ています。

原理や構造が異なるので、電気の流れと人体の血液循環とを、正確に対比させることには無理があります。しかし、大事なことは私たちが恩恵にあずかっている電気の働きと、人体の血液循環とは基本的には共通点があるということです。どちらも複雑で多数の要素で作られるという意味で、巨大なシステムであることに間違いはありません。

電気のしくみを理解して、電気を正しく大切に使う姿勢は、エネルギー資源が有限であることを知った私たちが身につけるべきものです。さらに、人体の脳と神経系を、コンピュータと情報通信システムになぞらえると、高度な情報通信技術を活用した、新しい電気エネルギーシステムの理解も容易になります。

電車の運転台をのぞいてみよう

電車に乗るとき、先頭車両か最後尾の車両で、運転台をのぞいてみましょう。電車は通常は直流の電気で動く車です。電気（正確には電流）は架線からパンタグラフを介して電車に入ってきて、電気エネルギーとしてモーターを回す仕事をして車輪を回してレールに流れ出ます。架線とレールは発電機につながっていて電圧がかかっているため、電気が供給されます。つま

り、架線とレールという電線に、モーターがつながっているのです。モーターが回転することにより、レールの上に乗った車輪がまわって、電車は走ります。電車を運転するのが運転士、運転する場所にあるのが運転台です。

電車の運転台には、運転するために必要な、いろいろな計器が並んでいますね。その中に図 2 の写真に示すような計器があったら、その指針がどのように動くかを見てみましょう。これは電流計と呼ばれる計器です。電流は電気の流れです。小学校の理科の時間に勉強しましたね。この計器の名前は、もっと正確には直流電流計と呼ばれ、モーターに流れる電流の量を測ります。量の単位はアンペアで、[A] と表記します。

駅に止まっているとき、指針は上を向き、ゼロ(0)を指しています。0A(ゼロアンペア)とは、電流が全く流れていないことを示します。モーターは止まっているわけです。さあ、運転士が操作棒(レバー)を動かしました。電車はゆっく



図 2 電車の運転台

りと動き出します。その時の電流計の針の動きはどうでしょう。そう、ゆっくりではなく、一気に大きく右側に触れましたね。止まっている重たい電車を動かすために、モーターは大きな力を出さなくてはなりません。そうすることで、電車のスピードを上げてゆかなくてはなりません。

電車のスピードがどんどん上がります。それは外の景色を見ても分かりますが、運転台についている速度計を見ても分かりますね。十分スピードが出たときを見はからって、運転士がレバーを元の位置に戻しました。電流計の針は0 A（ゼロアンペア）になりました。モーターに流れる電流はゼロです。でも、電車には勢いがついていますから、慣性でそのまま走り続けます。正確には、車輪とレールの摩擦とか空気抵抗がありますから、徐々にスピードが落ちます。運転士は時々レバーを押して、スピードを上げます。

次の駅が近づいてきました。今度は、電車のスピードを落とさなければなりません。運転士がレバーを制御しました。そのときに、電流計の針はどのように動くのでしょうか。右側の領域からゼロ（0）を超えて、左側の領域に入りました。直流は向きがある電気です。右側の場合、電車は架線から電流を受けて、モーターを回すのに使っています。それが左側の領域に入ると、どういうことでしょうか。そう、おわかりですよ。レールから電車のモーターを通して、架線に電気を戻しているのです。

このとき、モーターは発電機に変身しているのです。発電機は外から機械的な回転のエネルギーをもらって、発電します。この電車の場合は、重たい車体を載せた車輪が回り続けようと

するときに持っている機械的なエネルギーをもらって、それを電気エネルギーに変えているのです。電流は、レールから発電機に変身したモーターを通して、架線に戻っているのです。電流計の針は右側の領域（プラス領域）から左側の領域（マイナス領域）に入ります。そのとき、先ほどまでモーターだった機械は、もはや発電機になっているのですから、電気を使って電車を走らす仕事をしているのではなく、発電することで電車にブレーキをかけているのです。電流計の針が左側の領域に入った時、電車のスピードはどんどん落ちてゆきます。架線に戻った電気は、他の電車を動かすために使われます。

皆さんは、自転車を運転していてスピードを落とそうするとき、ブレーキをかけます。自転車のブレーキは、鉄とゴムとか、鉄と鉄をこすり合わせて、自転車の運動エネルギーを熱エネルギーに変えて捨てることで、スピードを落としているのです。電車の運動エネルギーを電気に変えて再利用するなんて、ずいぶん省エネな賢い方法だと思いませんか。このようなブレーキのかけ方を、回生制動といいます。

テレビを観察してみよう

皆さんは、自宅でテレビをよく見るでしょう。テレビ放送にはいくつもチャンネルがあります。どうやってチャンネルを変えますか。リモコンを使いますね。昔はテレビの前面に回転式のダイヤルが付いていて、それを回すことでチャンネルを変えました。今はリモコンです。

リモコン、そう、リモート（離れたところから）コントロー

ル（操作する）です。テレビとリモコンは電線で結ばれているわけではありません。でもリモコンのボタンを押すと、テレビのチャンネルが変わります。リモコンが出す電気信号が赤外線となって空間に放射され、放射された赤外線をテレビが感知し、チャンネルを変える操作を行うのです。

電波は振動する波です。光だって波です。実は電波と光の領域は、1秒当たりの振動数（周波数と言います）が異なるだけで、連続的につながっています。周波数が低いところから高いところに向けて、どのように使われているかの実例を挙げてみましょう。

家庭のコンセントの電気は、地域によって 50 Hz（ヘルツ）や 60 Hz です。電波時計と呼ばれる時計があるのを知っているでしょう。この時計は受信する電波を使って、表示時刻を作っています。使っている周波数は 40 kHz とか 60 kHz です²。ラジオの AM 放送の電波は 526.5～1,606.5 kHz、FM 放送は 76～90 MHz³です。テレビはその上、地上波デジタルが 470～710 MHz、BS デジタルは 11.73～12.15 GHz⁴、CS デジタルは 12.29～12.73 GHz、携帯電話はテレビ電波の隙間の 0.7～2 GHz を利用しています。さらに上に行くと、電波望遠鏡や赤外線暖房器具（こたつ、ストーブなど）があります。白熱

² kHz はキロヘルツと読みます。キロは 1,000 倍を意味しますから、40 kHz は 40,000 Hz、すなわち 1 秒間に 4 万回振動する波を意味します。ちなみに、ヘルツ (Hertz) は電波の研究で大きな成果を出したハインリッヒ・ヘルツ (独、1857-1894) にちなんだ振動の単位です。

³ MHz はメガヘルツ、メガは 1,000 の 1,000 倍、つまり 100 万倍です。

⁴ GHz はギガヘルツ、ギガは 1,000 の 1,000 倍の 1,000 倍、つまり 10 億倍です。GHz の 1,000 倍が THz (テラヘルツ) です。

電球が出す光はそれより高い周波数の、可視光の領域の電波を使っています。可視光より少し低い周波数が赤外線、少し高い周波数が紫外線です。サングラスは紫外線をカットすることで、目を保護しています。病院にあるレントゲン写真とかX線CTとかはそれより高い周波数ですね。癌がんの治療に使う放射線はさらに高い周波数です。これらを、周波数の一本の線で示したのが図3です。

電波は目に見えません。でも、皆さんは電波をイメージできるようになったでしょう。ちなみにこれらの電波は、正確には電磁波と呼ばれます。太陽から放射され、私たちの生存を可能にしている太陽光も電磁波です。

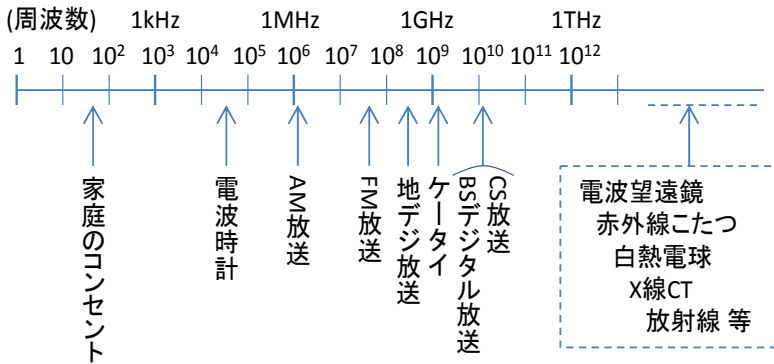


図3 電波や光の使用例

次のステップに進むために

皆さんは、電気だけでなく磁気という言葉も知っていますね。

そう、磁石の「磁」のことです。いままで、電気という言葉を使ってきましたが、正確には、電気と磁気の二つを分けて考える必要があります。

まず、電気の性質を示す具体例を挙げましょう。物体の表面が正（プラス）あるいは負（マイナス）の電気を帯びることがあります。この性質はプラスチックの表面で、しばしば観察できます。プラスチック製のフィルムやシートをはがすとき、手にまとわりついたりしますが、この原因はフィルムやシートが電気を帯びたためです。より正確に言うと、それまで一緒にいた正と負の電気が分かれたためです。これは静電気（帯電）と呼ばれるもので、先人により調べられています。

次に磁気の例を挙げましょう。磁気に深い関係のある磁石は、身の回りにたくさんあります。図 4 は方位磁針ですが、皆さんの家で、冷蔵庫に磁石でメモを貼り付けたりしていませんか。モーターはいたるところで使われていますが、そこでも磁石は大活躍です。磁石に二つの磁極、N極とS極があるのは、よくご存じでしょう。磁気は磁極によって作られますが、電流によっても作られます。二つの磁極と電流、両者それぞれが磁気を発生し、さらに磁気と作用すると力が働く、このおかげで、モーターは回るのです。

電気と磁気は密接に関係しています。これらを合わせて、簡単に電気と呼んでしまうこともあるのですが、正確には電磁気と呼びま

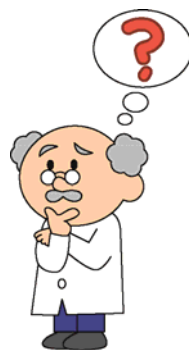


図 4 方位磁針

す。電磁気を研究する学問を電磁気学と呼びます。でも、いつ、だれが、何を研究してきたのでしょうか。そして、人々の生活に役立つ、どんなものを生み出してきたのでしょうか。それを次に見てみましょう。

2 昔から電気はおもしろかった

朝になると日が昇り、夕方になると日が沈みます。風が吹き、雨が降ります。周りで起きる様々な自然現象はどうして起きるのでしょうか。現象が起きるには何か原因があると考え、現象を詳しく観察します。複雑な現象は、多数の単純な原因の組み合わせになるまで分けて考えます。こうして自然科学⁵への道が始まりました。



その一方で、人は昔から経験の積み重ねによって発明された技術を使って生活を便利なものにしてきました。便利にする工夫は、昔からあったのです。それが自然科学と結びついたとき、技術は経験に加えて理論の力を借りて飛躍的に発展するようになりました。世の中を変革するイノベーションが、短い間に次々と起こるようになりました。

電気を中心にして、自然科学の発展、技術発明、そしてイノベーションについて考えてみましょう。

⁵ 自然科学ということばは、比較的新しいことばです。英語では science もしくは natural science といいます。Science という単語が登場するのは18世紀のことで、あのアイザック・ニュートンの時代でさえ、哲学 (philosophy) の一部でした。

電気発見の物語

電気を科学する

琥珀^{こはく}を布でこすると、ほこりを引き付けること、石のなかには、小さな破片を引き付けるもののあること、これらの不思議

な現象は、紀元前 5 世紀頃にはすでに知られていました。しかし、なぜそのようなことが起こるのか、確かめようがないので、いろいろと想像するしかありませんでした。

棒状の磁石を水に浮かべると、南北の方向に向きます。このことを利用した方位磁針は、中国で発明されて西洋に伝わり、大航海時代に船の道案内に利用されました。よく使われるようになると、方位磁針は北の方で使うと下を向く傾向があること、真北（地球の回転軸上の北極）ではなく少しずれた方向（磁北といいます）を指すことなどが、いろいろと分かってきました。

電気や磁気に関する認識が進んだのは 17 世紀です。イギリスのエリザベス一世の侍医であったウィリアム・ギルバート（図 6）は、それまで磁石について伝わっていたいろいろなことを整理し、地球儀を磁石で作っ



図 5 琥珀



図 6 ウィリアム・ギルバート

て方位磁石が北のほうでは下を向くことなどを実験で確かめるなどして、「磁石について」という本を著しました。1600年のことです。

物理学や天文学に関わるさまざまな観測や実験を行ったガリレオ・ガリレイのことは、皆さんも知っているでしょう。このような観測結果から導かれた仮説を理論とし、その理論を実験で確かめる方法をとることによって、科学は大きく花開いたのです。

単純な関係は美しい

電気と磁気の現象は、似ているところがあります。近づけると引き付けあったり、反発したりします。電気と磁気は関係があるのでしょうか。

図7のように磁石と磁石を近づけると、引き付けるあるいは反発する強い力を感じます。両者の距離を近づけるとその力は強くなり、離せば弱くなります。

電気を帯びたもの同士も同じです。みなさんは、このことをなんとなく当たり前

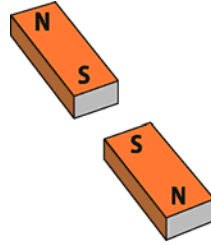


図7 磁石と磁石の間に働く力（この図の場合、反発する力）



図8 シャルル・クーロン

のように思うでしょうが、シャルル・クーロン(図 8)は、図 9 のような捻り^{ひね}をもちいた高精度の秤^{はかり}を自作して、この引き付けあう、あるいは反発する力と距離の関係を詳しく計ってみようと考えました。そうすると、電気を帯びた二つのものの中に働く力には、次のような関係が成り立つことが分かりました。

$$\text{力} = k \times \frac{\text{電荷の量 (一方のもの)} \times \text{電荷の量 (他方のもの)}}{\text{距離} \times \text{距離}}$$

ただし、

力：電気を帯びた二つのものの中に働く引き合う力もしくは反発する力

距離：二つのものの中の距離

k：比例係数

です。

ここで、記号を使ってこの関係を、式で表してみましよう。

電気を帯びた二つのものの中に働く力を F 、一つ目のものの電荷量を Q_1 、二つ目のものの電荷量を Q_2 、二つの間の距離を d という記号であらわすものとします。上の関係は、次の

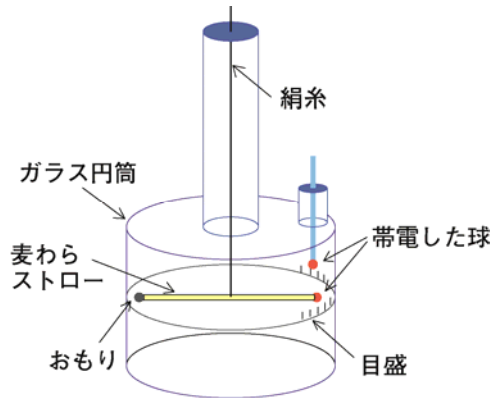


図 9 クーロンの秤

式になります。なお、この式で各種記号の単位を決めてありませんから⁶、比例関係を表す係数として k を用います。

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{d^2}$$

ずいぶん単純な式ですね。単純な関係は美しいのです。クーロンは、電気を帯びたもの同士が引き付けあったり反発したりする現象を、当たり前と思わずきちんと計測することによって、この美しい関係を見出したのです。1785年のことです。

これは、「クーロンの法則」と呼ばれます。式が出てくると、途端に解らなくなると言う人がいるかもしれませんが、文字で書くより式で表した方が、関係がわかりやすいので、科学者や技術者は式を使います。式をよく見てください。何も難しいこととは言っていません。双方に働く力は、それぞれの電荷の大きさを掛けたものに比例し、逆に距離が遠くなると、力が距離に従ってただ単に弱くなるのではなくて、その二乗で弱くなる。つまりお互いが2倍離れると力は4倍弱くなることを意味しています。

さらに、式で書くともう一ついい事があります。それは計っていないことも予想できることです。例えば、この力はどのくらい遠くまで働くのでしょうか。式を見れば明らかですね。無限に遠くまで働く、ただし働く力は無限に小さくなる、というわけです。

⁶ 単位を表記する場合の電荷量 Q の単位は、クーロンです。もちろんこれは、シャルル・クーロンの業績をたたえる単位名です。

磁石同士の間に働く力も、全く同じように書けるのです⁷。

$$\text{力} = k \times \frac{\text{磁気}の\text{量}（一方のもの） \times \text{磁気}の\text{量}（他方のもの）}{\text{距離} \times \text{距離}}$$

ただし、

力：磁気を帯びた二つのものの間に働く引き合う力もしくは反発する力

距離：二つのものの間の距離

k：比例係数

です。

電池の発明、そして電気と磁気の関係の発見

こんなに似た性質があるのに、両者はまったく別のものでしょうか。お互いに関係はないのでしょうか。多くの科学者が、両者の関係を調べてみましたが、なかなかうまくゆきませんでした。でもついに、道は開かれました。その道を開いたのが、電池の発明なのです。

イタリアの科学者ルイージ・ガルバーニは、解剖したカエルの脚を金属で触ると足がけいれんすることを発見し、動物の体内にある電気のせいだと考えました。同じイタリアの科学者アレサンドロ・ボルタは、その現象に興味を持ちいろいろ実験していたところ、生体がなくても電気が起きることに気付いたのです。

⁷ 実は、昔からこの式を使っていますが「磁気」については注意が必要です。磁石には必ずS極とN極の両方があって、どちらか一方だけのものは存在しません。この式の分子は、一方だけのものが存在することを意味しているからです。具体的には細長い棒磁石の両先端には孤立したN, Sがそれぞれ存在すると見なしてよいのです。

ボルタは、銅や錫すずなどの異種の金属を、単に湿った紙などを挟んで接触させ、それを図10のように何重にも積み重ねる（パイルといいます）ことによって、定常的に大量の電気を作れることを発見したのです。こうして、人類はいつでも安定して長時間、電気を流すことができるようになりました。これは、科学の進歩にとって、大事件です。

電気を安定して流せれば、いろいろな実験ができるよ

うになります。デンマークのハンス・クリスティアン・エルステッドは、学生に電気や磁気の実験を見せるために準備をしていました。たまたま電線の横には、図11のように方位磁針が置いてありました。電線に電気を流すと、なんと方位磁針が振



図10 「異種の導体の単なる接触により起こる電気」アレサンドロ・ヴォルタ 1800年(金沢工業大学ライブラリーセンター所蔵)

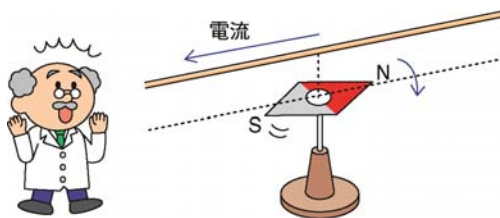


図11 電気で発生する磁気

れるではありませんか。このことは、電線に電気を流す(電流)とその周りには、磁石によって生じる磁気と同じ状態が生じたことを意味しています。電気が流れなければ何も起きない、電気が流れて初めて、磁気を生じたのです。それも電気が流れる方向ではなく、流れる向きとは別の方向(直角の方向)に磁気が生じるという、誰も考えつかない結果でした。こうして、電気から方位磁針の針を動かすもの、つまり磁石と同じ磁界(磁場ともいいます)が発生することが発見されたのです。

安定して電気を流すことができれば、空間内に磁界を発生させることができる。磁界は電線から離れたところに伝わる。流す電流を変化させれば、離れたところの磁界も変化する。その磁界は、距離の二乗に反比例して弱まってしまいはするものの、無限の距離を伝わってゆく。離れたところでその変化を電気信号として検出できれば、元の電流の変化を知ることができる。何か伝えたいことを電流の変化にすれば、それを離れたところに伝えられる。もう、無線の電気通信が実現できそうですね。でも、これだけでは、はるか遠方まで電気の力を伝えるのには、無理があります。無線通信はずっと後になります。それより前に有線の、電線を使った通信が実現されることになるのです。

通信の話に入る前に、そもそも、磁気から電気を発生させることができるのでしょうか。安定的に電気を得る方法としては、電池にいつまでも頼らなければならなかったのでしょうか。

電気を起こす

電気から磁気を発生させられることがわかれば、当然その逆、磁気から電気を発生させることができるかもしれないと、人は

考えます。これについても、多くの科学者は挑戦しました。しかしなかなかうまくゆかなかったのです。

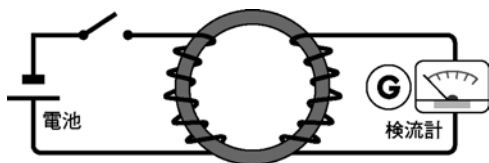


図 12 ファラデーの電磁誘導コイルの模式図

皆さんは小学校の理科の実験で、釘などの周りにエナメル線と呼ばれる電線をぐるぐる巻いて、電磁石を作って電気の実験をしたことがあるかもしれません。エルステッドの発見から、電気が流れると磁気を生じる（磁石になる）ことはわかりましたから、その原理を応用すれば電磁石を考案できます。イギリスの科学者マイケル・ファラデーは、釘の代わりにドーナツ状の鉄の輪に電線をぐるぐる巻いて、電磁石を作りました。

同じドーナツに、さらにもう一組電線をぐるぐる巻きしました。このようにぐるぐる巻きにしたものを、コイルと呼びます。このファラデーが実験に使ったコイルは今も保存されていて、イギリスの電気学会に行くと見ることができます。図 12 はそのコイルの模式図です。

その二つのコイルの一方に電気を流すと、もうひとつのコイルの電線に「なんと一瞬だけ!」、スイッチを入れた瞬間と切るときだけ、電気が流れました。つまり電気を流した電線は電磁石となり、鉄心内に磁気が発生し、その磁気の変化がもうひとつの電線に電気を生じさせたのです。しかし、電気が一定で流れ続けている間、つまり一定の磁気が発生している間は、も

うひとつの電線には電気は生じず、スイッチを入れた瞬間と切れた瞬間、つまり鉄心内の磁気に変化した時（発生したときと消滅した時）だけ、電気が生じたのです。この発見された現象は、電磁誘導の法則と呼ばれます。

こうして、電気から磁気、磁気から電気を発生させることができるようになりました。

電気の発見から発明へ、そしてイノベーションへ

前節で説明したような多くの科学者の努力の結果、電気と磁気の性質がかなり正確にわかってきました。二つを合わせて、電磁気と呼びます。電磁気の性質が正確にわかれば、使いやすくなります。電磁気はさまざまな形で、私たちの生活を便利にするようになってゆきます。まず、信号を伝えるものとして、続いてエネルギー源として使われるようになったのです。

電信機の発明と電気が伝わる仕組みの理論化

電信機を発明したのはサミエル・モールスで、1837年のことです。日本にその技術が入ってきて、東京と横浜の間で公衆電報が開始されたのが1869年（明治2年）です。電話機を発明したのはアレグザンダー・グラハム・ベルで、1876年のことです。東京と横浜の間で電話交換業務が開始されたのが1890年（明治23年）です。そして1895年には、マルコーニが無線機を発明しました。ここでは電信機の発明と、その技術を成り立たせている理論の解明について、見てゆきましょう。

アメリカ人の画家であったモールスは、イギリスへの美術留学の帰路、船上で行われた「電磁石」の簡単な実験を見て、電



図 13 サミエル・モールス

気を使った通信システムを思いつき、電信機を発明しました。モールスが発明した電信機で送信される信号は、「モールス符号」と呼ばれ、アルファベットや数字の一文字一文字に、短点（・）と長点（—）を組み合わせた符号をわりあてたものでした。例えば s は「・・・」
o は「— — —」です。「・」を

トン、「—」をツーと呼ぶことにすれば、「助けてください」を意味する SOS は「トントントン、ツーツーツー、トントントン」です。

何キロメートルも離れた A 街と B 街の間に電柱を立てて 2 本の電線を張り、電気信号の往路と復路にします。A 街でスイッチを押すと B 街の電磁石が作動して、紙テープに短点と長点が記録されます。アルファベット(A~Z)と数字(0~9)の 36 文字に対応させたモールス符号を使って、手紙文を送信しました。ひとびとは、これは便利だと利用し、瞬く間に街から街へと広がってゆきました。

ついには 1853 年から 1866 年にかけて、大西洋に電信ケーブルを敷設することに挑戦し、ヨーロッパと北米の間で、一瞬にして手紙を送信できる社会をつくりました。発明者のモールスは、手紙を瞬間に遠方に届けられることを「なぜだろう」と考えることなく、電信線を敷設して電気通信事業を進めていく

ことに熱心でした。

一方、英国のグラスゴー大学教授のウィリアム・トムソンは「いったい何が 2本の電線を伝搬しているか」の疑問を持ち、解析しようしました。しかし、トムソンもまた 1853 年からの 13 年間は、大西洋横断電信ケーブル敷設船に乗り、その敷設事業に参画し、また他の数々の研究課

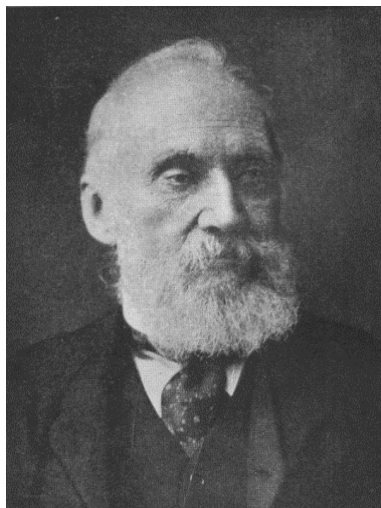


図 14 ウィリアム・トムソン

題にも取り組んでいたため⁸、その疑問の解明を、ケンブリッジ大学を卒業したばかりの若き英才ジェームズ・マクスウェルに託しました。

マクスウェルは 10 年もの歳月を費やし、2 本の電線の間に見える電気の間(電界)と電線に流れる電流の磁気の間(磁界)が電磁界を作り、その伝搬スピードは当時既に知られていた光の速度になることを、数式的に導きました(1863 年)。さらに、弟子のジョン・ポインティングはその電磁界は電気のエネルギーを運ぶことも数式的に導きました(1884 年)。

⁸ トムソンは 1854 年に、「運動の伝播」「熱の伝導」「光の伝播」の対比に関する論文を講演しています。ちなみに、後日トムソンはその業績を評価されて、「卿」の称号を得て、ケルビン卿と呼ばれるようになります。ケルビン (K) は、絶対温度の単位として、現在使われています。

しかし、当時はこの理論はあまりにも飛躍した考えで、当時の科学者たちを簡単に納得させることはできませんでした。彼らの残したこの業績は、後の科学者や技術者が電気を使った電気機器や電子機器を実用化する過程で、多くの人に理解されるようになり、物理や電気の専門書に記述されるようになりました。

技術は大昔からありました。しかし近代に勃興し急速に進歩した科学が、技術の可能性を大きく広げ、私たちの生活を変えていったのです。今、それを通信の分野に見ました。次にエネルギーの分野で見てください。

発電機・白熱電球の発明と電力事業化

先に、ファラデーのコイルを使った実験について述べました(P.18 参照)。磁気の変化はコイルに電気を生じさせるという実験でした。ぐるぐる巻かれた銅線(コイル)の間を通る磁気

が変化した時に、銅線に電気が流れるなら、図 15 のような構造にして、磁石を中心軸のまわりにぐるぐる回転させても、コイルに電気が流れることになります。逆に、磁石を静止させて、コイルを回転させても、コイルに電気が流れます。これが発電機です。

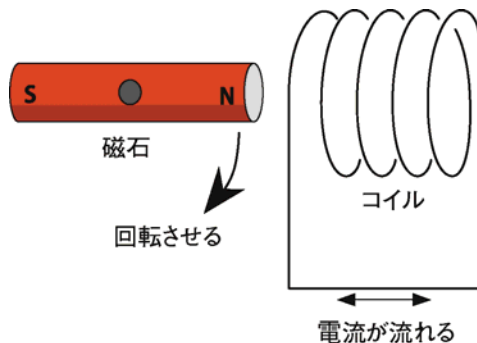


図 15 発電機の原理

この電気は、電池で発生させたものと違って、磁石の回転に伴って電線を行ったり来たりします。電池で発生させたものは一方方向に流れ、これを直流と呼びます。一方、図 15 のような電気を交流と呼びます。現代の水力、火力、原子力や風力発電所では、水や水蒸気や風の力によって発電機内の磁石を回していますが、発電機で電気が起きる原理は、まさにファラデーが発見した電磁誘導の法則そのものです。

実用的な発電機の開発には、多くの人が関わっています。1832 年には、フランスのピクシが永久磁石を回転させ、固定したコイルに電流を作る実用的な発電機を開発しました⁹。1860 年代後半以降、それまで産業革命を牽引していた蒸気機関に代わることができるほど大量の電力を供給できる、実用的な直流発電機(ダイナモと呼ばれます)の開発が、シーメンス、グラム、エジソンらにより行われました。

さて、電力供給と書きましたが、何のための電力供給なのでしょう。照明と、モーター(電動機)のためでした。電気エネルギーを熱として利用するのが、白熱電球などの照明です。電気エネルギーを回転する機械エネルギーに変換して利用するのが、モーターです。前者は夜を明るくし、後者は昼に仕事しました。双方のおかげで電気の利用はさかんとなり、どち

⁹ この発電機で得られる電気は交流ですが、おもしろいことに、当時の主要な電源はボルタの電池で、得られる電気は直流で、それを利用した電気化学工業が進展しつつあったので、交流の電気を作っても、わざわざ整流子と呼ばれるものを入れて直流にして利用しようとしていたのです。

らも私たちの世の中を大きく変えました。白熱電球の発明と電力事業の発展に、それを見てみましょう。

白熱電球というとエジソンが有名ですが、彼より前にイギリスで1878年にスワンが、炭素フィラメント電球の製造に成功しました。しかし、この電球は長時間の使用に耐えませんでした。エジソンはスワンに少し遅れて、綿糸を素材にした炭素繊維をフィラメントにした白熱電球を作り、40時間の連続点灯に成功しました(図16)。1879年のことです。エジソンは実用的電球を製造するため、ガラスバルブの製造方法や口金とソケットなど、さまざまな技術開発をしますが、電球をさらに長寿命にするため、フィラメントの原材料の研究も継続しました。

そのときに採用されたのが、京都の石清水八幡宮の竹でした。

エジソンがすごいのは、もちろん長い時間使える白熱電球を発明したこともありますが、そのときにフィラメント抵抗をあ

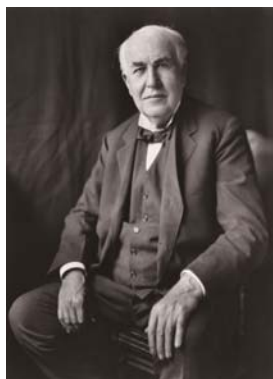


図16 トーマス・エジソン(左) エジソン型電球(右)

(電球写真提供: 国立科学博物館)

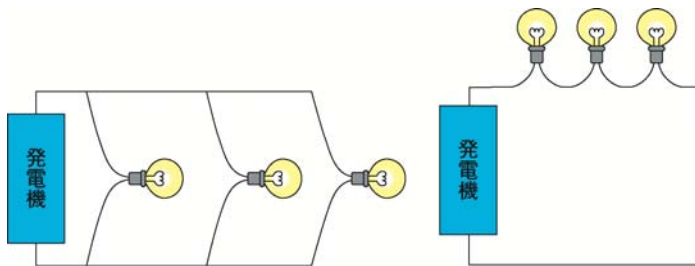


図 17 並列接続（左）と直列接続（右）

げて並列に電球を接続できるようにして電気を配り、照明を事業化して成功したことです。ここで強調したいのは並列に電球を接続することの重要性です。直列では一つの電球が切れたら電流は止まってしまう全部の電球が消えてしまいます。その上、直列では一つ一つの電球をスイッチでもって独立に切ったり入れたりすることは困難です(図 17)。エジソンは発電所を作って、発電機で電気を起こし、電線で各々の建物に電圧一定の電気を配って、並列に接続した多数の電球を灯し、暗い夜を明るく変え、世の中にイノベーションを起こしたのです。事業にするためには電気料金を徴収しなくてはなりませんから、使った電気の量（電力量）を計測するため、電気メッキを利用した電力量計も開発しました。

交流と直流のどちらが優れているのか

ここには、まだまだおもしろい話がいっぱいあります。エジソンが使った発電機は、直流発電機です。直流の電気を利用者に配りました。現在、皆さんの家庭に来ている電気は交流です。発電機もほとんどすべてが交流です。エジソンが電力事業を立ち上げて間もなく、直流がよいのか交流がよいのかの大論争が

起きます。そして交流派が大勝利を取めます。エジソンは敗退します。そもそも回転する発電機でできる電気は交流ですし、何よりも交流は変圧器を使って電圧を上げることが容易のできるので、ロスを減らして長距離を伝送することができます¹⁰。1896年には、交流発電機を採用したナイアガラ発電所から、40km はなれたバッファロー市への送電が成功しました。交流の優位が実証され、交直論争に決着がつけられました。

しかし、いつでもどこでも交流が直流より優位なのでしょう。そうでもないのです。実は送電する距離が長くなればなるほど、交流には電気を送りにくくなる現象があります。その場合には直流送電が有利になります。カナダのように国土が広くて人口が少ない国では、直流送電も多く使われています。

また、電気を使う場面を見てみましょう。パソコンやテレビの中の電子回路は直流で動いています。エアコンではパワーエレクトロニクス技術によって、コンセントからの交流をいったん直流に変換して、それを周波数が高い交流に再変換し、その変換過程を制御することで、高性能と省エネの両方を実現しています。初めから直流を使えば、もっと省エネになります。19世紀に一度は結論が出た交直論争ですが、もう一度考え直し、新しい技術を創り出す時期に来ていると言ってもよいのです。

¹⁰ 電力輸送と損失の関係はここでは述べません。この小冊子シリーズの「電気とは何だろう」や「電気を送る・配る」(続刊)を見てください。

志田林三郎と藤岡市助

ここまで電気の発見から発明、そしてイノベーションに関わるお話をしてきましたが、出てくる人は外国の人ばかりでした。日本は欧米に比べて遅れて近代化しましたので、外国人に教わることがたくさんあったのは間違いありません。でも、日本中で電気を自由に、しかも安定して使えるようにするために活躍した、電気工学の偉人と呼ばれる日本人も、もちろん何人もいます。

ここでは、日本の電気工学の草創期である明治の時代に活躍した二人の偉人、志田林三郎と藤岡市助を紹介しましょう。1856（安政3）年に現在の佐賀県多久市に生まれ、小さい頃から神童と呼ばれていた志田林三郎は、1872（明治5）年、現在の東京大学工学部電気系学科の前身である工部省工学寮電信科に第1期生として入学し、非常に優秀な成績を修めました。工学寮を首席で卒業した後、スコットランドの大学に留学して物理学や数学を学び、最優秀者に与えられる賞をいくつも受賞して帰国した志田は、日本の電気工学や通信技術の発展のために工部省で働きつつ、電気、通信、磁気などに関するさまざまな研究を行いました。当時、電気を利用する技術



図 18 志田林三郎
(多久市郷土資料館蔵)

は、物理学や土木工学といった別の分野の一部だとする考え方が一般的でしたが、志田はその将来性にいち早く注目していました。

そして、1888（明治 21）年、電気工学の調査・研究と、その普及と発展のために、電気学会の設立を宣言し、当時、逓信省（郵便や通信を管轄する官庁）の大臣であった榎本武揚を電気学会の初代会長に据えました。

電気学会の第一回総会で志田は、「将来可能となるであろう十余のエレクトロニクス技術の予測」として、無線通信、長距離電送、テレビ、映像音声記録など、電気工学の未来技術について演説し、その後、それらの技術が次々と実現したことから、今でもその先見性が高く評価され「先見の人」と呼ばれています。

日本で初めての工学博士であり、現在まで語り継がれる大演説など、さまざまな功績を残した志田ですが、演説から 4 年後の 1892（明治 25）年、36 歳の若さで病に倒れてこの世を去り、自らが予言した未来技術を実際に見ることはできませんでした。

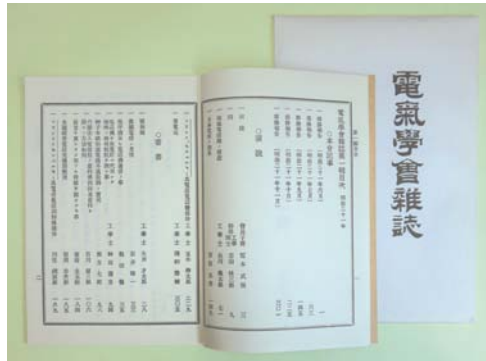


図 19 志田の演説が掲載された電気学会雑誌 第一輯

もう一人、紹介したい偉人がいます。「電気界の父」とも、「日本のエジソン」とも呼ばれる藤岡市助です。

藤岡は、1857（安政 4）年に現在の山口県岩国市に生まれ、志田林三郎も卒業した、工部省工学寮電信科に第 3 期生として入学し、電気学や数学を学びました。藤岡は在学



図 20 藤岡市助

（写真提供：東芝未来科学館）

中、電気灯「アーク灯」の点灯実験に参加し、1878（明治 11）年 3 月 25 日に行われた電信中央局の開局祝賀会の会場でアーク灯の点灯に日本で初めて成功しています（現在、3 月 25 日は「電気記念日」となっています）。1881（明治 14）年に、志田と同じく首席で卒業した藤岡は、母校の教員として電気の後輩達に教えるかたわら、日本の夜を電気の明かりで照らすことを夢見て研究を続けます。

前節で紹介したように、この頃エジソンは照明、電気の事業化に成功していました。1884（明治 17）年、藤岡は国の使節としてアメリカに渡り、フィラデルフィアで行われた万国電気博覧会や電気産業を視察するとともに、ニューヨークのエジソンの研究室を訪れました。藤岡はエジソンに、「日本に帰ったら電気事業の創設に我が身を捧げます」と宣言し、電気の事業化について、エジソンから直々に教えを受けます。この時エジソンは、「どんなに電力が豊富でも、電気器具を輸入するよう



図 21 藤岡市助が開発した白熱電球の特許証

では国は滅びる。まずは電気器具の製造から手がけ、日本を自給自足の国にのびなさい」と藤岡に告げました。

エジソンの言葉を胸に、1886（明治 19）年、

藤岡は教員を辞め、「東京電燈」（現在の東京電力株式会社のルーツ）の設立を提言し、自ら東京電燈の技師長となって白熱電灯の試作を開始しました。その後も、電灯メーカー「白熱舎」（現在の株式会社東芝のルーツの一つ）を設立したり、日本初の路面電車を走らせたり、当時浅草に建てられた日本初の超高層ビル「凌雲閣」に、日本初の電動式エレベーターを設計、設置したり、電気事業に関わる「日本初」には、必ず藤岡が関わっているとんでもない過言ではありません。藤岡の活躍がなければ、現在私たちの暮らしを明るく照らし、便利に利用できる電気の世界は、まったく違うものになっていたに違いありません。

3 電気を正しく書き表す

自然科学と技術が相まって、私たちの暮らす社会、私たちの日々の生活を便利にしてきた歴史の一端を、第 2 章（特に「電気発見の物語」P.11～）で振り返りました。その中で、電磁気

にかかわるいろいろな「モノ」の関係を式で表すことにより、現象を正確に表現できることを見てきました。

式で表すときには、モノがどのような性質を持っているのかをはっきりさせ、そのモノが量れる場合には、量をどのように表すかをはっきりさせておかないと、話が始まりません。この章では、電気の基本となる性質とその特徴を表す量について、考えてみましょう。

電圧と電流

電池と豆電球を電線でつなぐと、豆電球が光ります。電池両端には電圧（直流電圧）が発生していて、電線には電流（直流電流）が流れます。電圧の高さを示す単位はボルト [V] で、アルカリ乾電池の端子電圧は 1.5 V です。電流の大きさを表す単位はアンペア [A] です。

発電所では発電機が回って、そこで起きた電気が家庭にまで届けられて、壁のコンセントまで来ています。そこにテレビのコードをつなげば、テレビ放送が視られます。コンセントの電圧（交流電圧）が 100 V であることは、よくご存じでしょう。

コンセントの電圧は国によって違います。コンセントの形もさまざまです。このため日本の家庭電気製品を、そのまま外国で使えません。電圧が 100 V よ

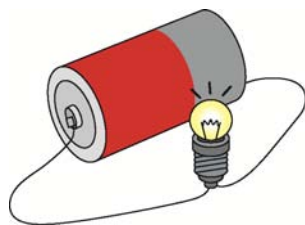


図 22 乾電池で豆電球に点灯

りも高い国に行って、日本の電気製品をコンセントに接続すると故障してしまいます(そのようなことが起こらないようにコンセントの形は電圧によって変えてあります)。なお、電気シェーバーなど電源アダプターを使う電気製品では、外国の電圧にも対応できるものもあります。一般に、電気で動く機器や装置には、そのための電源電圧の高さが指定されています。

電圧の他に電気の性質を特徴づけるもう一つの重要な量があります、電流です。上で述べたように、電流の大きさを表す単位はアンペア [A] です。テレビ、パソコン、炊飯器などを、電源に接続しスイッチを入れると動作を始めます。このとき電気の流れである電流が流れます。電源である乾電池の端子やコンセントの両端に電圧は常に現れていますが、何もつながなかったり、スイッチを入れたりしなければ電流は流れません。電気を何に使うかによって、電流の大きさは違います。通常は電源(電池とかコンセント)の電圧は一定な値に決められていますので、電圧よりも電流に注目する必要があります。

電流の大きさは何で決まるのでしょうか。電気を発光、熱、

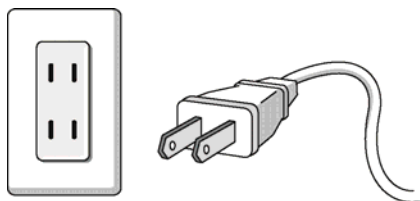


図 23 壁のコンセントとプラグ

動力に変換する仕組みにより、必要な電流の大きさが決まります。テレビは1~2 A、電気ストーブでは4~8 A程度の電流が流れます。比較的大きな電流が流れる電

気製品の例として、エアコン、電子レンジ・オーブン、炊飯器などがあります。電気を動力として使う場合に、大きな電流が流れることが多くなります。たとえば電車が動き出し加速しているときには、数 100～1,000 アンペア [A] もの大きな電流が流れます。

家庭やオフィスにある電気製品では、コンセントから流れている電流の大きさはさまざまです。コンセントや電源コードには、流すことができる電流が指定されています。使っている電源コードが熱くなった経験のある人もいるでしょう。電線のように電気を流すものを導体と呼びます。電気が流れると、導体の温度は程度の差はありますが上昇します。これは導体に電気抵抗があるためです¹¹。抵抗の大きいニクロム線を使って、積極的に熱を発生させて利用するのが電気ストーブです。

電源の種類により電圧は所定の値が決められており、アルカリ乾電池の電圧は 1.5 ボルト [V] です。しかし、ランプや電子機器をつなぐと、この電圧は低下します。電源としての電圧である 1.5 ボルト [V] が、なぜ保たれなくなるのでしょうか。乾電池には、それ自身の内部に電気抵抗をもっています。このため、電流が流れると電気抵抗の両端に生じる電圧分だけ、乾

¹¹ 導体の温度をどんどん下げてゆくと、ある温度を境にして電気抵抗が急に零になる現象が現れます。超電導現象です。抵抗がゼロですから、いくら電流が流れても発熱は生じません。ただし、電流が交流の場合や機械的振動に曝されると微小ながら超電導線に熱が発生するのでそれを除熱する冷凍機が必要です。リニア新幹線で使われる磁気浮上コイルには超電導の電線が採用されています。なお、電気屋さんには超電導という漢字を使いますが、物理さんは超伝導と書きます。おもしろいですね。

電池の端子に現れる電圧が低下してしまうからなのです。乾電池内部の電気抵抗が零であれば、ランプや電子機器のスイッチが入っても、常に 1.5 ボルト [V] の電圧が維持されますが、残念ながら、このような理想的な乾電池は現実にはありません。大きな電流が流れる電気製品のスイッチを入れると、コンセントの電圧もわずかですが低下します。

直流と交流

先に、一定の方向に電流を流し続けることができる電池の発明が、科学の発展に大きな役割を果たしたことを見てきました (P.15~)。このような電気を、直流と呼びます。各種の電池に、+と-の極性が表示されているように、電気にはプラスとマイナスの極性があります。電池の極性は電池の構造から定まり、電池の端子の電圧と、その極性も時間的に変化しません。このような性質をもつ電池の電気が、直流であることを知らない人はいないでしょう。

電気がかかわる機器や現象を扱うとき、マイナスとプラスの極性は重要です。スマホ、パソコンなどの電子機器は、その中の電子回路を構成する部品は極性が決まっているので、直流の電気で動きます。物質の中には電子とイオンが含まれています¹²。電氣的にみると、電子はマイナスの極性を持ち、イオンはマイナスあるいはプラスのどちらかの極性をもっています。

¹² 原子は、陽子と中性子からなる原子核と、その周囲の軌道にある電子とからなっています。軌道にある電子を放出したり、逆に電子を受け入れたりすることで、プラスやマイナスに帯電します (イオン化します)。

電子、イオンの数により電氣的な極性が決まります。

電氣の極性がプラスかマイナスかを定める場合、電圧を零とする基準点を作らなければなりません。これが「接地」あるいは「アース」と呼ばれるものです。－電極を接地すると、反対側の電極はプラスの電圧に、＋電極を接地すると、反対側の電極はマイナスの電圧に、それぞれなります。このため電池は、プラスとマイナスどちらかの極性の電氣として使えるのです。

先に、エジソンが白熱電球と電力事業に果たした貢献の大きさを見てきました（P.22～）。電氣を一定電圧で供給して並列に電氣装置を接続する、皆さんの家庭でもそうになっていますね。この基本的構造を使って、電力を商品として売ること、事業に成功しました。ここでもし、電圧一定ではなくて電流一定で電氣を売ったら、事業は成功したでしょうか。ちょっと考えてみてください¹³。

しかしエジソンが使ったのは直流で、交流派との戦いに、結局は敗北してしまったことも見てきました。

電力会社から家庭や学校・オフィスに供給される電氣は交流です。コンセントの端子に現れる交流電圧では、プラスとマイナスの極性が交互に繰り返すように、時間的な変化をしています。このため、交流の電氣では電池のように定まった極性、という概念が成り立ちません。この繰り返しの回数は日本の場合、1秒間に50あるいは60回です。周波数の単位 ヘルツ [Hz] を

¹³ 図 17 (p. 25) の並列接続と直列接続の図を思い出しましょう。並列接続の方が、個々の電球にスイッチを容易に入れることができます。すなわち、接続を要する電球の数が変わっても、容易に対応できます。

使って表すと、50 Hz あるいは 60 Hz となります。この周波数を商用周波数と呼びます。交流電圧の大きさは時間の進行に伴い、正弦波的に¹⁴変化しています。それを図示すると、図 24 のようになります。

交流の電気が来ているコンセントに接続されているパソコン、テレビなどの家庭電気製品は、実際の動作には直流電気が使われています。エアコンなどでは交流からいったん直流に変換し、さらに商用周波数より高い周波数の交流に再変換して、高性能・高効率を実現するものが主流になっています。そのため、交流から直流に変える回路で、交流電気が直流電気に変換されています。直流と交流との双方への電氣的な変換は、パワーエレクトロニクスと呼ばれる技術の進歩のおかげで比較的容易にできるようになりました。

直流電気を発生させる太陽光発電や、風の強さによって周波数が変わる電気が起きる風力発電のような再生可能エネルギーは、商用周波の電線に直接接続することはできません。利用にあ

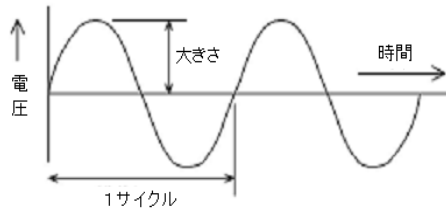


図 24 正弦波になる交流電圧波形

¹⁴ ここで出てきた正弦波とは、時間の経過とともにゼロを中心にプラスになったりマイナスになったりする波です。電気の交流もゼロを中心にプラスになったりマイナスになったりする正弦波なのです。

っては、交流・直流電気それぞれの違いを理解して、両者を自由に使いこなす技術が求められています。

ところで、日本ではなぜ 50 Hz と 60 Hz の二種類の交流周波数の電気が使われるようになったのでしょうか。周波数の地域による違いは、大まかに言うと静岡県東部を流れる富士川を境にして、東側の関東・東北・北海道では 50 Hz、西側の地域では 60 Hz になっています¹⁵。この周波数の違いは、19 世紀後半、日本で電力事業が始められたときに、関東地域では周波数が 50 Hz であるドイツの発電機を、また、関西地域では周波数が 60 Hz である

米国の発電機を導入したことに起因しています。周波数が異なる電気のシステムを直接接続することはできませんので、東地域と西地域の間には周波数変換所が置かれています。そこでは一方の周波数の電気をいったん直流に直して、さらに



図 25 富士川を境に周波数が変わる

¹⁵ 私たちが町で使う電気の周波数は、富士川を境にして変わっています。では東海道新幹線はどうでしょう。実は東京駅までの全線が、60Hz になっています。では上越新幹線はどうなっているでしょう。長野新幹線と北陸新幹線は？ 調べてみましょう。

それを他方の周波数に変換して接続します。ここでもパワーエレクトロニクスが大活躍しています。

電力と電力量

電圧と電流が、電気の性質を表す大事な量であることを示しました。もう一つの量として電力があります。実生活において、電気にかかわる一番重要な量が、電力かもしれません。

皆さんの家庭では、毎月電気料金を電力会社に払っていますね。電力会社からはそのための請求書（使用した電力の量および料金の通知）と領収書が送られてきます。電気を使ってテレビを見たり、冷蔵庫を冷やしたり、洗濯機を回したりします。電気は仕事をしたわけで、その仕事に見合う電力料金を支払ってくださいというわけです。

図 26 の電力会社からの通知を見てみましょう。「あなたの家では 189 kWh の電気を使いました。だから 6,145 円を請求する予定です。」といった感じになっていますね。この kWh が電力量の単位で、キロ・ワット・アワーと読みます。そして、ワット[W]が電力の単位です。

電力の物理的な意味は、1 秒間あたりに使われる電気エネルギーの大きさです。エネルギーについては、皆さんは中学で電気のエネルギー、光や音のエネルギー、熱エネルギー、力のエネルギー、化学エネルギーなどを学習しました。これらのエネルギーの単位は、ジュール [J] ですから、電力の単位は、ジュール/秒すなわち [J/s] で表されます。

ワット [W] は1秒当たりの電気エネルギーを表す単位なのです。両者の関係は次の通りです。

$$1 [J/s] = 1 [W]、1 [J] = 1 [W \times s]$$

先ほどの電力料金の通知は、物理的には、

$$189 \times 1,000 \times 60 \times 60 = 680,400,000 [J]$$

のエネルギーを使って仕事をしましたから、その対価として6,145円をいただきますという意味になります。kWh（キロ・ワット・アワー）の方がずっとなじみがありますね。電気は物理より親しみやすいと思いませんか。

毎度ご利用いただきありがとうございます

電気ご使用量のお知らせ

ご使用場所

27年3月分 ご使用期間 2月16日～ 3月15日
検針月日 3月16日 (28日間)

ご契約種別 従量電灯B

ご使用量 189kWh

ご契約 50A

請求予定金額 6,145円
(うち消費税等相当額) 455円

基本料金 1,404円00銭

電力量料金
・1段料金 2,331円60銭
・2段料金 1,787円79銭

燃料費調整額 534円87銭

再エネ発電賦課金 141円

口座振替割引 -54円00銭

当月指示数 93632
前月指示数 93443
差引 189

計器乗率(倍) 1
取替前計量値 928
計器番号(下3桁)

昨年3月分は28日間で 214kWhです。
今月分は1日あたり 11%減少しています。

燃料費調整のお知らせ (1kWhあたり)

3月(当月)分 +2円83銭
4月(翌月)分 +2円62銭
翌月分は当月分に比べ -0円21銭

今月分 振替予定日 3月26日
次回検針予定日 4月16日

地区番号 A1 お客さま番号 123-456-789

検針員

お問い合わせは、下記の電話番号まで
～おかけ間違いをお気をつけください。～

お問い合わせ先/カスタマーセンター
お引越/契約の変更 0120-xxxx-xxxx
その他の電気に関するご質問 012x-000-000

東西電力株式会社
東京支社

図 26 電力会社からの通知

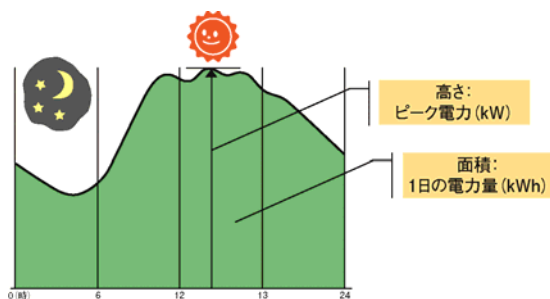


図 27 電力と電力量

ワット[W]の具体例として、ハイブリッド自動車では電気的な出力が **50 kW** である、などの説明を見たことがあるでしょう。ワット[W]はどれだけ力を出せるかの単位の量です。家庭電気製品のラベルやカタログに記載されている消費電力の例を見てみましょう。これは、この製品を使うと、どれだけの電力が消費されるかを表しています。テレビは **50~600 W** 程度です。**LED** ランプには **13 W** で白熱電球 **100 W** 相当などと書いてあります。白熱電球の **8 分の 1 弱** の消費電力で同じ明るさを出せますという意味です。

1 日の 24 時間の使用電力が、図 27 のように変化したとしましょう。その瞬時、瞬時の高さが電力、曲線の下面積が電力量です。発電所は電力のピークに合わせて作って運転できるようにしないと、電気が足りなくなって停電します¹⁶。電力料金

¹⁶ 発電所は長期的な需要予測のピークに合わせて、予想外の事態に備える予備力を含めて建設し、しかも時々々のピーク需要を含む時々刻々と変化する需要に合わせて発電機を運転できるようにしないと、電気の過不足が生じて停電等の不都合が生じます。

は図の面積に応じて、すなわち使った電力量に応じて、支払うこととなります。

4 電気を正しく使う

雷は電気、雷に打たれたら命の危険がある、これは誰でも知っていますね。では、電気は雷だけかと思ったら、そうではありません。これまでも見てきたように、雷以外にも電気はいたるところにあります。それらは安全なのでしょうか。それらを使うときに、どのような注意を払ったらよいのでしょうか。

家庭への電気の入口は分電盤

どの家庭でも、図 28 のような箱が廊下などの上の方についているはずです。これを分電盤といい、電気メーター¹⁷からきた電気はまずここにつながります。

ここでは、赤、白、黒の 3 本が見えますが、白い線が接地された線で、赤と白の線で 100 ボルト [V]、黒と白の線で 100 ボルト [V]、赤と黒の線では 200 ボルト [V] の電圧が出せるようになっています。このような配電方式を、単相 3 線式と呼びます。分電盤にあるものは、どれも家庭内での事故を防ぐものです。まず図 28 の右の写真で、一番左にあるものが、アンペアブレーカーと呼ばれるものです(ブレーカーというのは、回路を切るスイッチと考えて下さい)。ここを流れる電流の合計が、契約電流以上の大きな電流になった時(電気ストーブと電子レンジとエアコンを同時に使った場合などが考えられますが)、電気を切る役目を持っています。この写真の例で

¹⁷ 電気メーター(正式には電力量計といいます)がどこにあるのか、気になりますね。自分の家の周りを見てみましょう。

は、30 アンペア [A] 以上の電流が流れると電気が切れます。

皆さんの家庭で電気を使い過ぎたときに、例えば夜テレビを観ながら、エアコンと冷蔵庫と洗濯機と布団乾燥機を使っているときに、電子レンジで「チン」しようとしたら、「バン！」と音がして部屋の中が真っ暗になったことはありませんか。電気の使い過ぎですから、このアンペアブレーカーが飛んだのです。使う電気を減らして、例えば布団乾燥機を止めて、このブレーカーのスイッチを元に戻せば、「チン」しても大丈夫になります。

実は、このアンペアブレーカーのアンペアで、各家庭は電力会社と電力料金の契約をします。誰のものかといえば、皆さんの家庭のものではなくて、電力会社の所有物です。電力会社はこれも無料で利用者宅に取り付けますが、その際に取り付け場所を利用者から提供してもらうのです。皆さんの家庭に送られてくる「電気使用量のお知らせ」を見てみましょう。契約アンペアが何アンペアかは必ず書いてあります。前に出た図 26 の

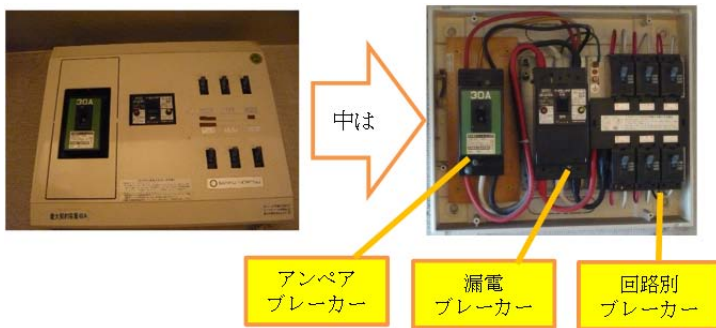


図 28 家庭内の分電盤

例では、「ご契約 50A」と書いてあるので、契約アンペアは 50 アンペアということです。電気料金はこの契約アンペアで基本料金が決まり、月々の使用電力量に応じた料金をそれに加算して決まります。最近、国として再生可能エネルギーによる発電を促進するため、「再エネ発電賦課金」も加算されるようになっていきます。

図 28 の左から 2 番目のものが、漏電ブレーカーというものです。電気が家庭内の配線や家電機器の外へ流れてしまうとすれば、それは異常です。いわゆる漏電が起こったので、そのときに電気を切るものです。漏電は、大きな電流ではなくても配線のコードに傷がついたとか、家電機器に故障が起こったなどの原因で起きます。それを発見し、自動的に電気を切るのが漏電ブレーカーです。漏電に気がつかないと、器具に触った時にビリッと感電することもあり、流れる電流が多い時には人の命に関わります。

万一、漏電が起こったときにも、電気を安全に大地に逃がすのが接地（アース）です。洗濯機、食器洗い機のように水気や湿気が多い場所で使う機器はアースを付けるようになっているはずですので、忘れずに付けるようにしましょう。

その右に同じようなスイッチがいくつもありますが、これらは個別の回路毎に、大きな電流が流れた時に電気を切れるようにしてある、回路別ブレーカーです。

回路別ブレーカーからは、回路ごとに、例えば部屋ごとに、電線（宅内配線）が張られています。電線にはビニールの被覆があって、感電しないようになっていますが、この配線工事は

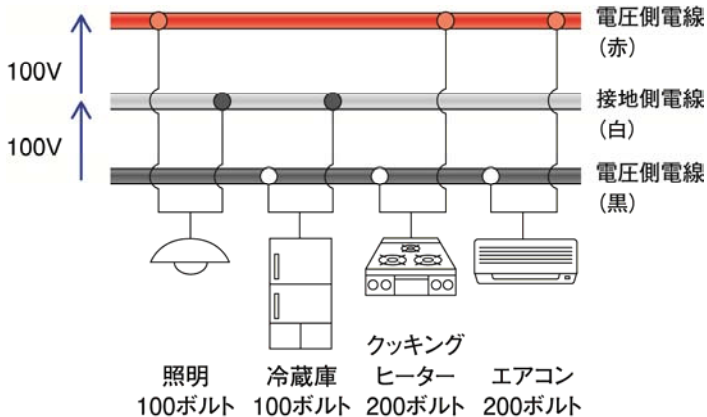


図 29 家庭内で電気を使うための配線

安全を確保するため、国の資格を持った人だけしかできません。

いま、簡単に考えるため宅内の回路が一つしかないとして、照明、冷蔵庫、クッキングヒーター、エアコンを接続するとします。接続の仕方は、図 29 のようになります。実際の接続はコンセントを介して行いますが、コンセントの図示は省略してあります。

電気を安全に使うために気をつけること

前節でみたように、家庭では2重、3重に電気の安全対策が取られています。またプラグやコードも電気を通さないビニールなどで包まれていますので、触っても感電することはありません。しかし、コードに傷がついていると、中の線に手が触れて感電する可能性があります。このため、プラグが曲がっていたり、欠けていたりしているものを使わないのはもちろん、プ

プラグをコンセントから引き抜く時に、ついコードを持って引っ張りたくなりますが、そうするとコードやプラグ部分を痛めるので、必ずプラグを持って抜くようにしましょう。

実は電線の被覆材としてビニールが使われるようになる前から、電線は使われていました。その時代、家庭内で使用される電線のコードは、どのようにして絶縁されていたのでしょうか。代表的なものはゴムの被覆とか糸巻きによる絶縁です。これらは経年劣化や傷つきやすさなどの問題を抱えていました。ビニールはじめ各種の人工プラスチックの開発によって、現在のような安全で信頼性の高い絶縁電線が普及して、それが電気の利用を促進したのです。

ここで、クイズを一つ。図 30 はプラグのイラストですが、プラグの先には穴があいています。この穴は何のためのもののでしょうか？

この穴は単なる飾りではなく、ちゃんと意味があります。実は、この穴はプラグをコンセントに差し込んだ時、コンセントの中にある突起部に組み合わせさせて、プラグを抜けにくくする役目があります。これは規格で決まっているので、プラグには必ず穴があいています。もう一つ、クイズです。壁のコンセント

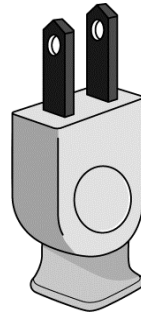


図 30 プラグの先の穴は何のため？

をよく見てみましょう。図 31 を良く見て下さい。

差込口の大きさが左右で違います。左側が 9 mm で、右側が 7mm となっているのですが、左側の長い方は接地されている線です。ブレーカーや家庭内の配線図で見た白い線がこの線になります。ですから、左側の線に触っても感電しないはずです。(ただし、正しく配線されていないと感電するので、試すのは止めましょう)

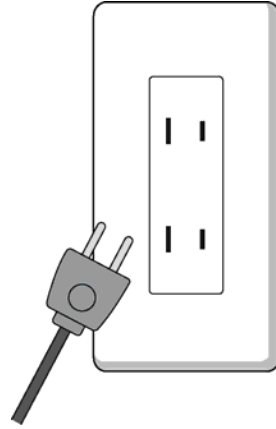


図 31 コンセントの穴の大きさは左右同じ？

普通の家電機器は、プラグの向きを逆にして差し込んでも問題なく動きますので、通常はどちらが接地側かを気にする必要はありません。

なお、上のプラグとコンセントは 100 ボルト [V] の電気機器用です。プラグやコンセントの形状や性能を製造者が勝手に決めると、電気機器に互換性が無くなって、使用者が迷惑することなどを考えて、これらは標準化されています¹⁸。100 ボルト [V] の電気機器用、200 ボルト [V] の電気機器用では、それぞれ 125 ボルト [V]、250 ボルト [V] で使えるプラグやコンセントを用います。プラグの刃とコンセントの刃受（差込口）の代表的な形状を、図 32 に示します。

¹⁸ 日本工業規格 (JIS) C8303:2007 「配線用差込接続器」

コンセントからの電気を使いすぎると、コードが加熱し、場合によっては火事になる場合もあります。特に、壁のコンセントからテーブルタップで差し込み口を増やし、多くの器具を接続して使







刃受	刃	定格
		15A125V
		15A125V (接地極付)
		15A250V (接地極付)

図 32 プラグとコンセントの形状

う、いわゆる「たこ足配線」は大変危険ですので、止めましょう。また、ヘアードライヤー、トースター、電気ポットなど、熱を出すものは、器具そのものは小さくても、使用する電気は意外に多いので、コンセントの許容最大値を超えないように気をつけましょう。

次に注意する必要があるのは、ほこりです。ほこりは電気機器にとって大敵で、前節で述べた漏電の原因になることがしばしばあります。ほこりはその成分にもよりますが、ふつうはある程度電気を通します。ですから大量のほこりがあると、大きな漏電電流が流れ、コードや電気機器が発熱し、火事になることもあります。古いテレビや扇風機などが、火事の原因になったとのニュースが流れることもあります。こまめに掃除をして、ほこりがたまらないようにしましょう。

また、万が一、コードが燃え出したら、あわてて水をかけて

はいけません。水は電気を良く通すので、感電する恐れがあるからです。そのような時には、まずやけどをしないように気を付けてプラグをコンセントから引き抜くか、ブレーカーで電気を切ってから、水かけるようにしましょう。

家の外も見てみよう

家の外に出て、電柱を見てみましょう。図 33 のようにたくさんの線がかけられています。電話の線やケーブルテレビの線等です。ここではこれらの線の内、配電線と呼ばれる電力線の話をしていきます。

図 34 を見てください。電柱からの電線（引込線）は、電力量計を経由して家の中に入っています。電力量計はここにあったのですね。電力会社の検針員は、毎月このメータの指示をチェックして、それに応じて各家庭に電気料金の請求が来ているのです。このメータに不正があればたいへんですから、国の認可を受けた日本電気計器

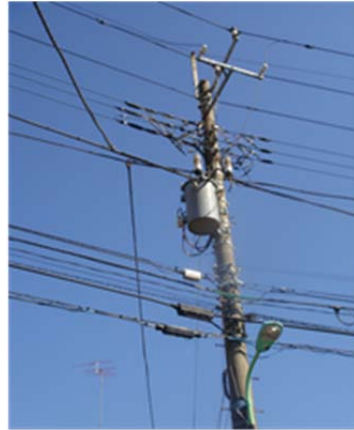


図 33 電信柱にかけられた線

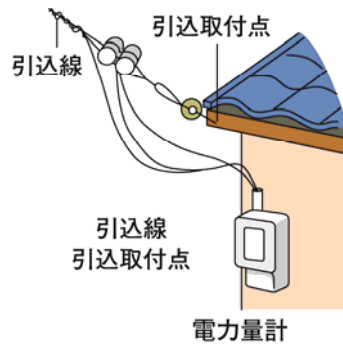


図 34 家庭に引き込まれている電線

検定所が、計量法という法律に基づいて一つひとつ検定しています。また、もしこのメータを勝手に操作すると、それは犯罪行為になります。

引込線の先を見てみましょう。電柱の電線から来ています。その配電線の電圧が、100 ボルト [V] と 200 ボルト [V] なのです。電柱の電線をもっとよく見てみましょう。引込線が引き込まれている電線の上部に、別の電線がありませんか。実はその配電線の電圧は 6,600 ボルト [V] の高圧なのです。高圧配電線の電圧を家庭などに配ることができる 100 ボルト [V] と 200 ボルト [V] に降圧するために、何本かに 1 本の電柱には、図 35 のように変圧器（電柱の上にあるので柱上変圧器と呼ばれています）が置かれています。

さて、この高圧配電線はどこから来ているのでしょうか。また、その先には何があるのでしょうか。ずっと先には発電所があります。そこで起こした電気が、家庭にまで送られてきています。

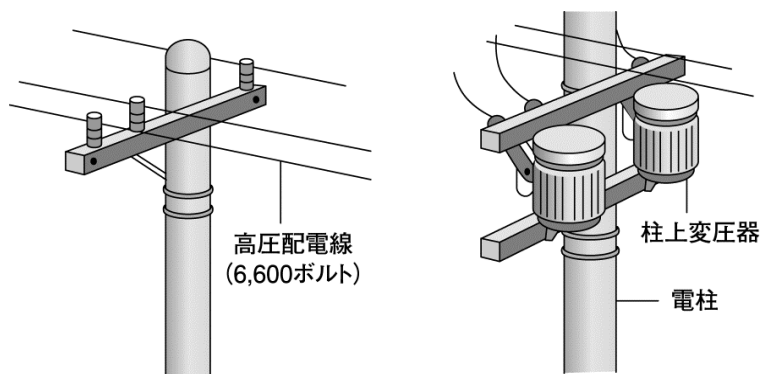


図 35 配電線と柱上変圧器

でも発電所と高圧配電線の間にはその他にもいろいろな設備が置かれ、それぞれが重要な役割を果たしています。それらについては、別の小冊子で説明することにします。でも、電気が伝わる仕組みについては、電気の基礎の重要部分ですので、次章で見ておきます。

送電線とか配電線では3相交流というものが使われていて、電線3本が一組となって電力をおくっています。このことはVol.5で述べます。

5 電気エネルギーが伝わるしくみ

血液が血管の中を、水道水が水道管の中を流れるように、電気エネルギーは電流と同じように電線の中を流れているのでしょうか。実はそうではないのです。皆さんは小学校のときから、電気の通り道や電気回路について学んできています。乾電池と豆電球を電線でつなげば、豆電球が光る実験¹⁹によって、電流が電線の中を通ることを学んでいます。豆電球のフィラメントが電流で熱せられて白熱して光になります。電気エネルギーが熱エネルギーに変わったのです。この電気エネルギーはどのようにして伝わるのか、それがこの章の中心テーマです。

この章は、皆さんの今までの学習経験からすると、違和感を持つところが出てきます。そこで「なぜだろう」「もっと知りたい」と思ってくれたら、皆さんの目の前には、電磁気学の最も魅力的な部分が垣間見えてきます。さあ、チャレンジしましょう。

¹⁹ 「電圧と電流」(P. 31～) 参照

クイズ

まずはクイズです。電線に鳥が止まっているところを見たことがありますか。多くの人が「見たことあるよ」と答えるでしょうね。鳥が感電して丸焼きになることはありませんね。鳥が一本の電線に止まっても鳥の体内に電流は流れないからです。

では次のクイズです。「鳥が止まらない電線はありますか。」もちろん地面の中の電線（地中ケーブルと呼びます）には鳥は止まれません。地上の電線（架空線と呼びます）も電圧がすごく高くなると、鳥は止まらなくなります。

では、次のクイズです。なぜ、電圧が高くなると、鳥は止まらなくなるのでしょうか。結論を言うと、電線の周囲には電界という電気の力を伝える「場」が発生しているからです。このことを詳しくのべてみます。



図 36 電線に止まる鳥（写真提供；近藤良太郎氏）

P.25 で、電気を供給するには直流がよいか交流がよいかとの大論争があり、直流を主張したエジソンが敗北した歴史を知りました。交流は電圧を上げたり下げたりすることが容易で、高電圧にすると電気エネルギーを送るうえでメリットがあるからです²⁰。ですから送電電圧を上げる研究開発が続けられてきました。日本の最高電圧は 50 万ボルト [V] で、世界では 100 万ボルト [V] です。日本でも 100 万ボルト送電を実現するための技術は確立されていますが、電力需要が伸びなくなり、今のところ実用化する必要がない状態です²¹。

送電線の電圧についての基礎知識を得ましたから、電圧が高くなると送電線には鳥が止まらなくなる問題に戻りましょう。先に電信機発明の歴史を見ましたが (P.19～)、その当時トムソンが「いったい何が 2 本の電線を伝搬しているか」に疑問を持ち、その解決を若き天才だったマックスウェルに託したと話しました。マックスウェルと弟子のポインティングは、見事この問題を解決したと話しました。2 本の電線の間のできる電気場 (電界) と電線に流れる電流の磁気場 (磁界) が電磁界をつくり、その電界と磁界の組み合わせが電気エネルギーを

²⁰ 電線には抵抗があるので、流れる電流で発熱して、送ろうとした電気エネルギーの一部が熱エネルギーとして無駄に消費されてしまい、これが損失になります。また、交流で送電する場合、送電線には電流が流れるのをさまたげようとする性質があり、長距離送電が困難になります。この二つの問題は、送電電圧を上げて送電電流を小さくすれば緩和できます。

²¹ ところで、この電圧は実用的な意味で何ボルトまで上げられるのでしょうか。これは大学レベルのクイズです。

光の速度²²で運ぶのです。電界と磁界は電線の周辺にできます。電圧が上がるほど、また電流が流れるほど電磁界は強くなります。その影響は生き物にもあります²³。鳥もそのため、電圧が高い送電線にはとまらなくなると考えられています。丸焼きになるのがこわいからではありません。

本格的に考えよう

準備運動—電圧の働き

本格的に考えるための、準備運動をします。エネルギーや電気エネルギーについての「電力と電力量」(P.38～)の説明を思い出してみましょう。その上で、水の流れと電気の流れを対比して考えます。水圧ポンプでもって、水車を回すとします。その時、エネルギーはどこを流れて行くのでしょうか。ここに水を循環させる閉じた輸送管があって、一端にはポンプが設置されていて、そこで水に圧力を加えて、他端に設置された水車を回す装置を考えてみましょう。ポンプで水に圧力を加えた後、ポンプの供給する力学的エネルギーを水車まで送るのに、二つの異なる方法が考えられます。

²² 光の速度で電気エネルギーが伝わるのは、正確には真空中の現象です。空気中ではそれより少しだけ遅くなります。絶縁物のなかでは光の速度は真空中よりも遅くなります。

²³ 人間も生き物ですから、電磁界の影響(特に悪影響)を受けるのだろうかということが、関心事になります。送電線も電磁波を出しますし、携帯電話も出します。これらの生体影響を、国内外で科学者が研究をしていて、通常は安心してよいが、全く影響がないとは言えないと考えられています。この問題に関心がある人は、「新・でんきの暮らしと健康不安」(電気学会、2011年)が入門書として良いと思うので、お読みください。

(i)まず考えられる方法は、一端からポンプで水を押し、その水に加わる圧力を介して、他端で水車をまわす方法です（図 37）。

この場合、ポンプの出力エネルギーは水圧と水流の効果が組み合わさって管内を輸送され、水車まで送られます。

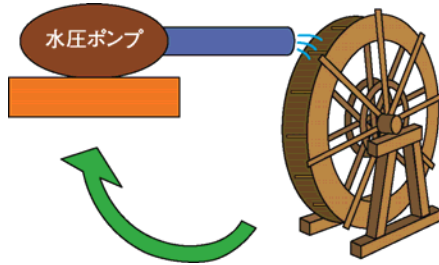


図 37 ポンプから水を出して、水車を回す

(ii)別の方法があります。まず、重力に逆らって水をポンプで高い場所に持ち上げます。次に、その水を落下させて水車を回します（図 38）。このときは重力の力で仕事が行われます。ポンプの力が直接伝わって他端で仕事をした訳ではありません。ポンプの駆動力は、水のもっている位置のエネルギーを増大させ、その位置のエネルギーが輸送されて、そのエネルギー

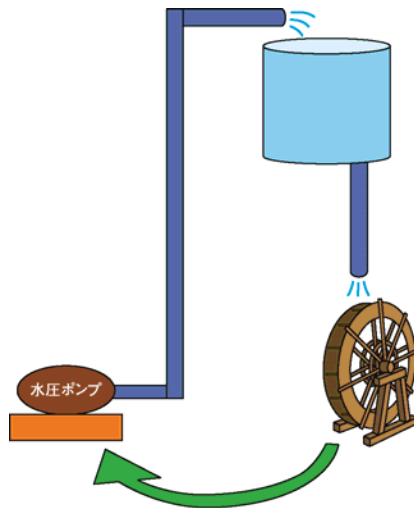


図 38 水が重力で落ちることで、水車を回す

が他端で仕事をさせたこととなります。この場合、水は水路の中を流れましたが、エネルギーは水路の中を流れたわけではなく、周囲の重力空間を流れたこととなります。

電気のエネルギーの輸送は (ii) の原理に基づいています。電源の起電力(ポンプ作用)で電圧が上昇し(電圧がかかって)、電源の電位²⁴が上昇します。その電位が電線に沿って伝搬する電磁波によって運ばれて、他端での電位となり(通常ではこれも電圧とよばれています)、それが機器(モーターや電球など)の二つの端子間の電位差となり、その電位差が電流を流し、電流と電位差が相まって仕事をするわけです。

電池で豆電球をつける実験の場合、電池が電源です。電池の電圧(電位差)が通常銅の合金で出来ている2本の電線に沿って豆電球にまで運ばれ、その電圧が豆電球をつける(電気エネルギーを熱エネルギーに変える)という仕事をしているのです。ここで述べたように「電気エネルギーは電線内の電流によって運ばれているわけではない」ということを理解しないと、どうして電線を通して電気信号が光の速度で伝わるのかわからなくなってしまう。電線の中の電子は質量をもっていて重さがあるので、光の速度で信号を伝えるなどということは出来ないからです。

家庭の電球をつける場合、発電設備が電源です。電池は直流で、発電設備は原子力・火力・水力・風力・地熱の場合は交流、太陽光の場合は直流ですが、いずれにせよ上の電気エネルギー

²⁴ 電圧と電位差は多くの場合、同じ意味です。厳密に区別して使わなければならない場合もありますが、ここではその説明は省略します。

輸送の考え方は普遍的に通用するのです。

空間中の電界と磁界

さあ、どこを電気エネルギーは流れているのか、その様子をさらに詳しく説明しましょう。といっても、今までの説明が分かっていたら、複雑なことではありません。

電線の周囲には電界の場（電場）と磁界の場（磁場）ができていることを、「電気を科学する」（P.11～）で説明しました。それでは、電線の周囲には電圧によって電界が、電流によって磁界がそれぞれ発生していることを実感してみましょう。そのために、送電線には鳥がとまるのかとまらないのかのクイズ（P.51～）を、本格的に考えます。

都市を出て郊外に行くと、高圧送電線を見ることができます。その近くに行くと、特に雨の日にはジリジリという雑音が聞こえることがあります。この音はどのようにして出るのでしょうか。さらに、街中の電線には鳥がとまっていますが、超高圧送電線に鳥がとまっていることはありません。どうしてでしょうか。

2本の平行な電線があって、その間に電圧がかかっている状態を考えてみます。手を近づけて電線にさわれば感電する恐れがあります。しかし、触らなければなにも感じません。感じないのは電圧が低いからなのですが、実は2本の電線周囲の空間には電線の表面に誘起されている電荷（電圧がかかっているということは、それぞれの電線に正負の電荷が誘起されているということです）から湧き出している電界が生じています。そ

れをイメージするために、電気力線²⁵という言葉を使います。電気力線がプラス側からマイナス側の電線へと連結して(伸びて)いるわけです。電線周囲のあらゆる場所は、電界とその電気力線で満たされています。何10万ボルトもかかっている超高压送電線ともなると、特に電気力線の集中する電線の表面での電界は極端に大きくなります。

その強い電界によって、雨の日には電線に近い周囲の空間で間欠的な放電が起こって、ジリジリという音を出すのです。放電が起きれば音がするのは、雷現象で皆さんも知っているでしょう。高压送電線を保守する電力会社の作業員の方に話を聞くと、鉄塔に上って電線に近づくと皮膚全体がチリチリしてイヤな感じを受けるそうです。街中の配電線(6,000ボルト[V])には鳥がよくとまっています。しかし50万Vの超高压送電線に鳥がとまっているのは見たことがないと思います。鳥もこの電界の強い場所には、不気味な感じがして近づきたくないのでしょう。

電気エネルギーが伝わる場所

次には、電圧と電流の両方が加わっている電線を考えてみましょう。電気エネルギーの流れる量である電力(ワット)は、電圧(ボルト)と電流(アンペア)の積です。電圧と電流は、それぞれ電界と磁界を周囲空間に発生していますから、「電力

²⁵ 「でんきりきせん」と読みます。電界の強さと方向をイメージするために使う言葉です。実際に線が見えるわけではありませんし、プラス側電線からマイナス側電線を線で結んでいるわけではありません。両方の電線の間で電界が生じていることを表す、本格的な表現方法です。

＝電圧×電流」とは、言い換えると空間内の「電界×磁界」ということになります。つまり、電力は空間内の電界と磁界との積によって運ばれるのです。専門用語でこれを「ポインティングベクトル」と呼び、その大きさは単位断面の空間を流れる電力（の面密度）、方向は電界と磁界の両者に直交する方向であって、今の場合は電線の方向となります。ポインティングベクトルという名前は、この現象を解明したジョン・ポインティングを記念してつけられています。

「電圧と電流」の項 (P.31) で、電池で豆電球をつける実験の話をし、本章の P.55 で、電池で豆電球をつける実験の場合、電池の電圧が2本の電線に沿って豆電球にまで運ばれ、その電圧が豆電球をつける話をしました。なぜ豆電球が光るのかも、実は同じ理屈なのです。電気エネルギーは電池の側面から空間に放射し、それが一对の絶縁電線（銅の合金線）の周囲に導かれ、空間を電線に沿って光の速度で電界と磁界（電磁界）として流れてゆき、最後は豆電球のフィラメントの側面から内部に流入して、フィラメントの持つ抵抗によって熱のエネルギーとなってフィラメントを加熱し、その熱によって白熱したフィラメントが光を発しているのです。電気エネルギーが電磁界として流れる様子を図示したものが、図 39 です。スイッチを入れた瞬間には、まだ豆電球は光りません。電気エネルギーが豆電球の両端に達してフィラメントが熱せられた瞬間に、豆電球は光ります。その間には光が伝わるのと同じ時間が必要です。電線の長さが 3m だとすると、スイッチを入れてから光るまで、約 10 ナノ秒 (0.00000001 秒) の時間が必要です。

電池は直流です。では交流になったらどうなるのでしょうか。
 図3 (P.8) を思い起こしましょう。「家庭のコンセント」の周波数は 50 Hz とか 60 Hz です。電池と豆電球の場合と同じ

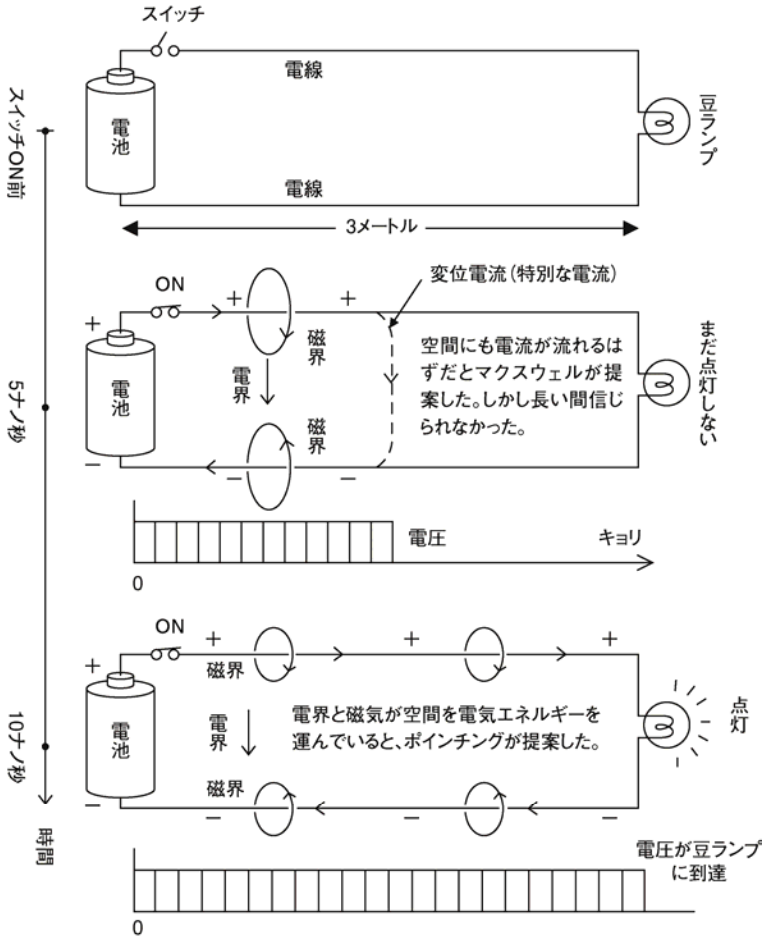


図 39 スイッチを入れてから豆電球が光るまで
 (電気エネルギーの伝搬)

ように、電線があります。電気エネルギーも発電所から皆さんの家庭の電気製品まで、電磁界として送られてきているのです。同じ図 3 には、「放送」とか「ケータイ」もあります。これらは無線です。電線がありません。この場合には、実は交流電磁界の周波数が高くなって、信号の電気エネルギーは電線がなくても空間を伝わるができるのです。通信の信号は光の速度で伝わります。

電気エネルギーは電界と磁界の存在する空間を流れるのであり、それは絶縁材料（空気とか真空）を通して流れることになります。よって、電気工学の進歩は絶縁材料の進歩によってもたらされた、といっても過言ではありません。

では、通信や放送より周波数が高くなったら、どうなるのでしょうか。図 3 に関連して、可視光とか赤外線、紫外線の話をしました。これらは人工的にも作れますが、そもそも太陽からの光です。光も電磁気学的に言えば、電磁波なのです。太陽が出す電磁波のエネルギーが、光として地球に送られ、私たちの生命を育てているのです。

私たちは、いまエネルギー問題とか環境問題に直面しています。改めて、エネルギーとは何なのか、エネルギーとどのように向き合うべきなのかを考えてみましょう。

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。日本では、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、エネルギー資源は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、ただし、正しい内容で説明し、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。

2015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

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 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 福田 務 委員 前島 正裕 ※

写真提供 近藤良太郎 氏 ※

(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 Vol.3

電気の基本を考えてみよう

2015年9月15日 初版発行

非売品

2016年9月30日 2刷発行

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



電気の知識を深めようシリーズ -4

電気をつくる



一般社団法人 電気学会

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つくり方を考える	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。

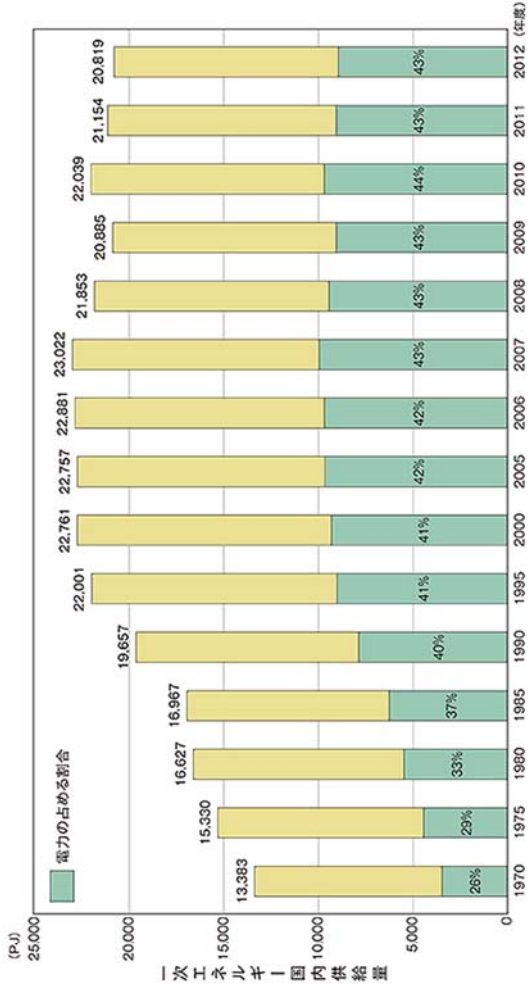
発電にかかわるエネルギーの比率

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(=10¹⁰J)は原油約25,800k桶の熱量に相当(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。

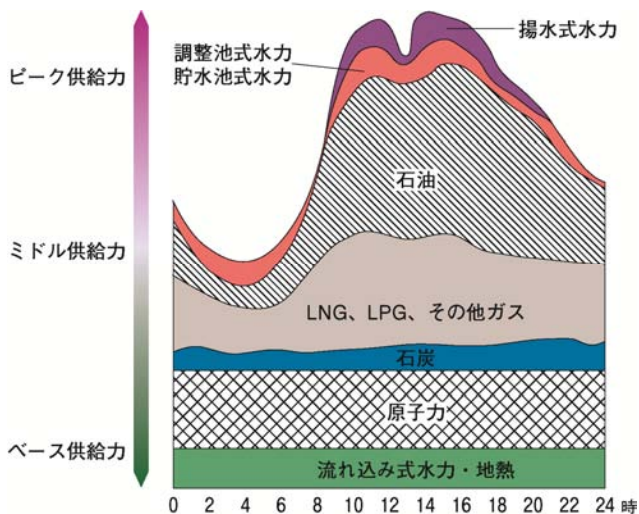


図2 日負荷曲線（東日本大震災前）

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。

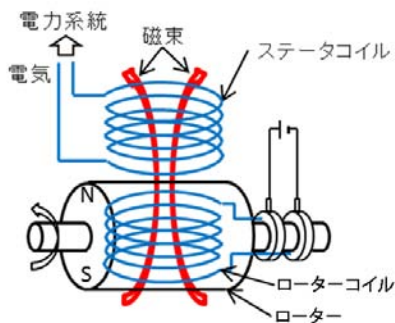


図3 発電機のしくみ
(本図は原理の説明図で実際の
発電機の構造とは異なります)

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。

このように時間の経過とともに長さ、すなわち電気の大きさが、 $0 \rightarrow +1 \rightarrow 0 \rightarrow -1 \rightarrow 0 \rightarrow \dots$ と変化するのが交流です。このように交流では、電気の極性がプラスとマイナスに変化します。

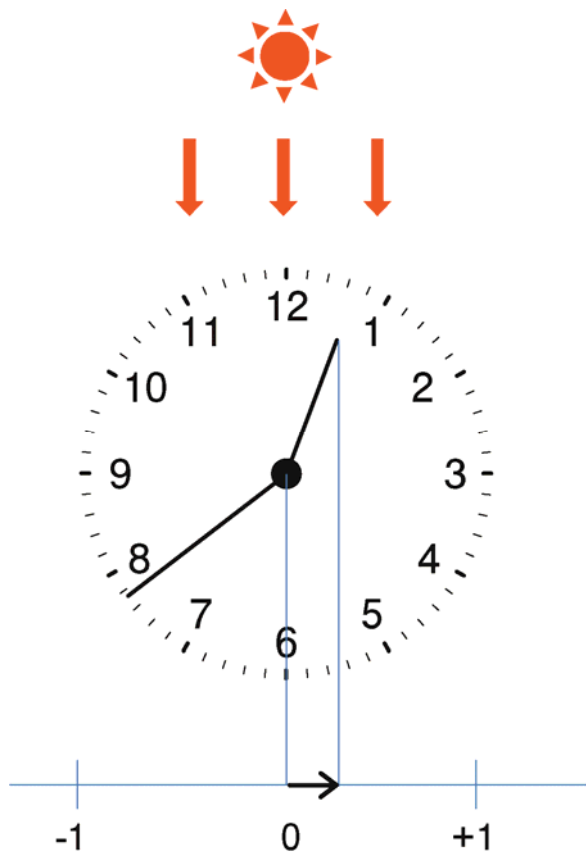


図4 交流のイメージ

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。

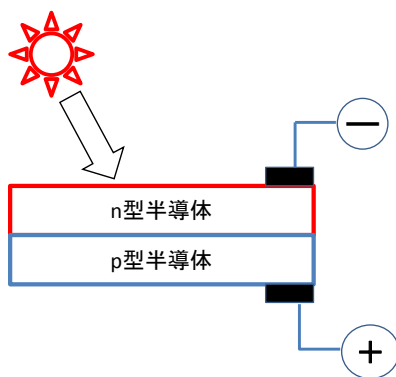


図6 太陽電池の原理

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。

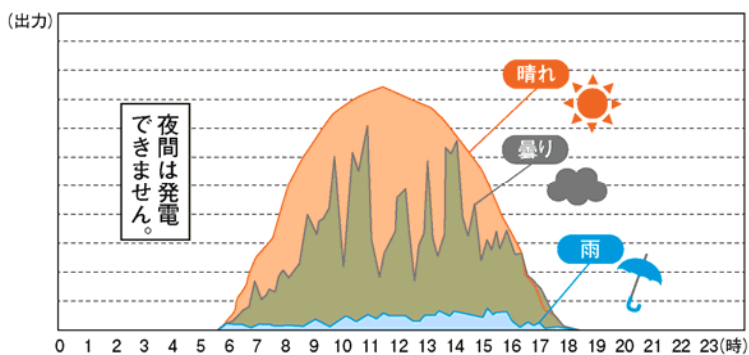


図7 太陽光発電の出力変動

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

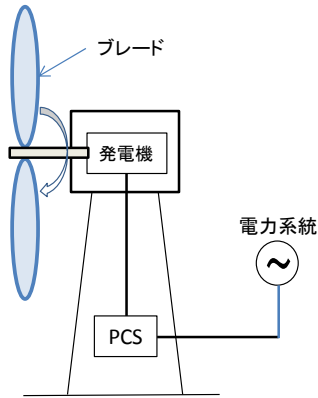


図9 風力発電の構成

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

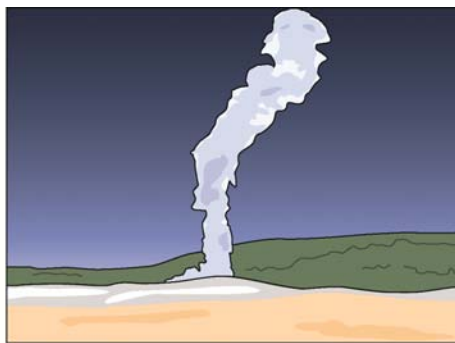


図 10 地熱発電に使える蒸気

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。

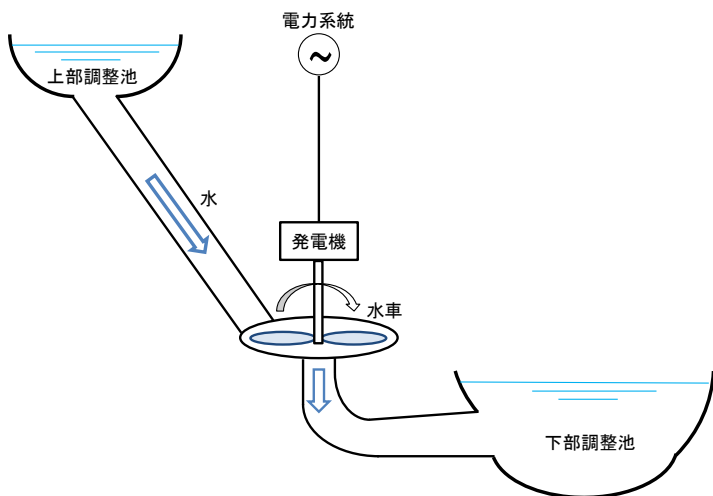


図 13 揚水発電の原理

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

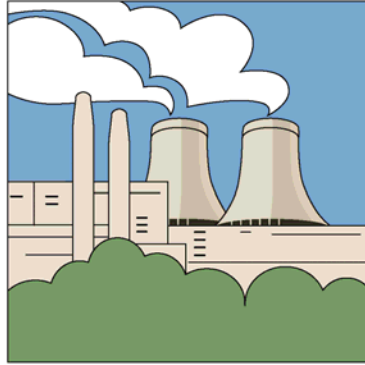


図 15 火力・原子力発電

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を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。

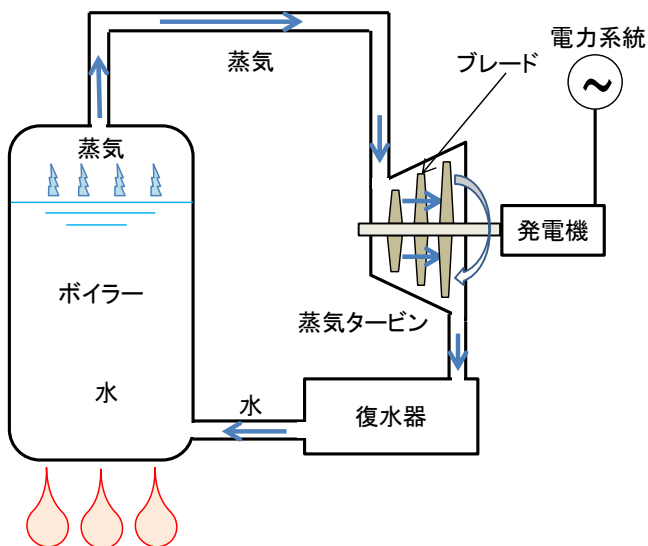


図 16 火力発電の原理



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。

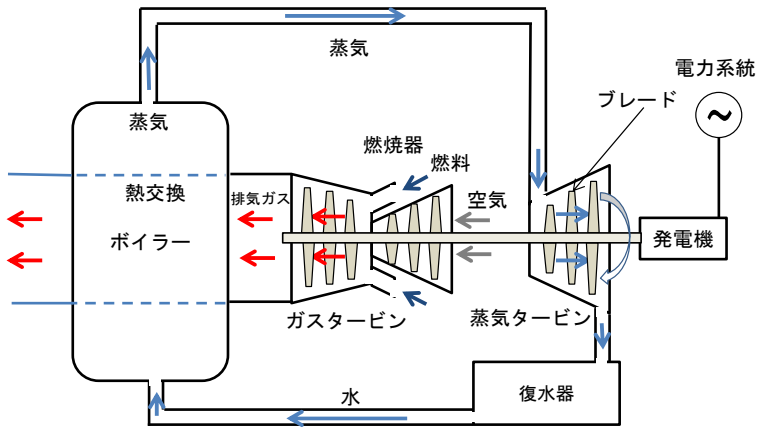


図 19 コンバインドサイクル

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。

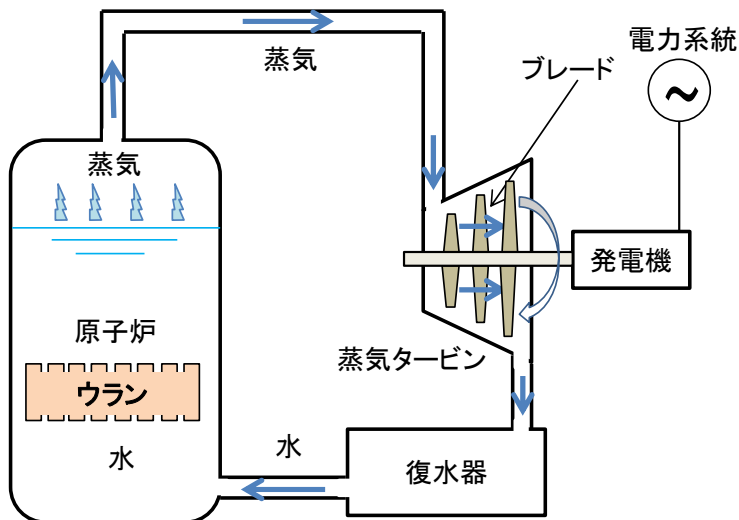


図 20 沸騰水型（BWR）原子力発電の原理

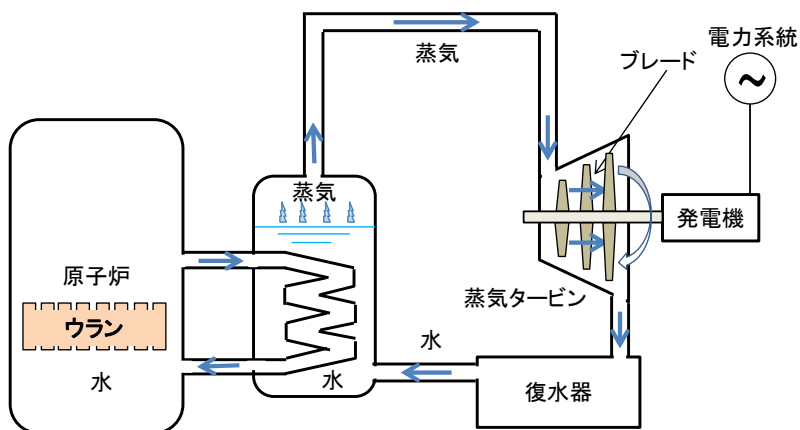


図 21 加圧水型（PWR）原子力発電の原理

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

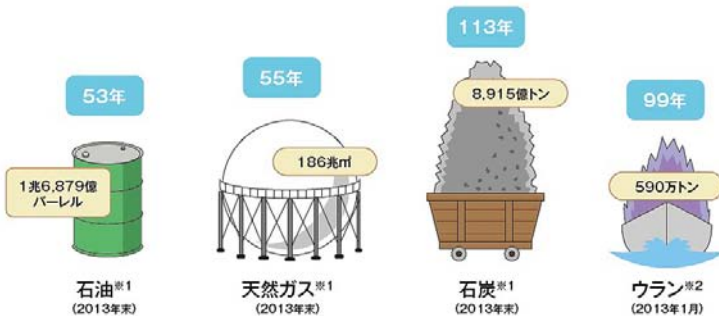
水素を流入させると水素イオンになり、電子が発生します。水素イオンは電解質中を移動し、反対側の電極に到達すると、そこに存在する酸素と電子と反応して水になります。このとき、二つの電極が回路で接続されていると、電子の流れによる電流となります。この原理により、直流の電気が燃料電池により発生できます。

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)OECD-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

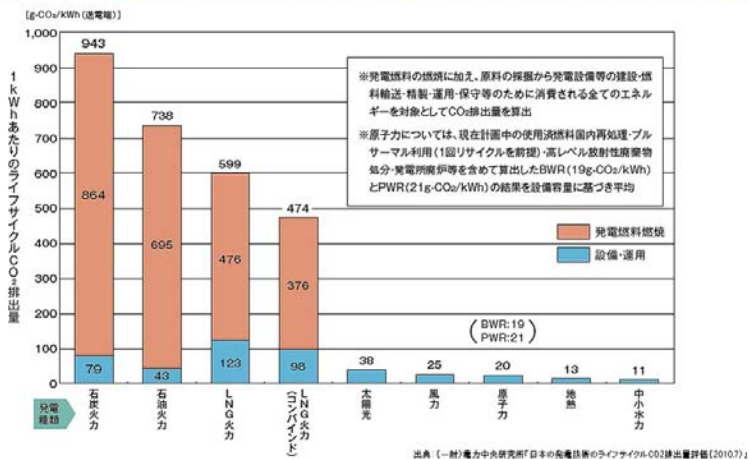


図 25 CO₂ 排出量

(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



電気の知識を深めようシリーズ -5

電気を送る・配る



一般社団法人 電気学会

電気の知識を深めようシリーズ Vol.5

電気を送る・配る

一般社団法人 電気学会

まえがき

水道水が水道管を通して送られ、都市ガスがガス管を通して送られてくるように、電気は電線を通して送られてきます。では、100km、200km、500km離れたところに発電所があるとして、そこから電線を引いてくるだけで、必要な電気を確実に届けることができるのでしょうか。

実は、そう簡単ではありません。そこにはさまざまな工夫があって、初めて私たちは電気を安心して使うことができるのです。電気を起こし、送って、配って、使う、そのようなシステム全体を電力システムと呼ぶことにしましょう。「電力システムは人類が創造した最大級の複雑システム」という言い方もあります。送って配る部分はあまり目立ちませんが、そこには興味深い技術の工夫がたくさんあります。あなたはそれを知ってみたいと思いませんか。

目次

まえがき	ii
1 電力システム	1
電気を届ける仕組み	1
電気をもつ供給面の特徴とは	3
電気は最高レベルのエネルギー	3
電気の供給上の弱み～2つの泣き所～	4
電力システムの意義・役割とは	6
電力システムの意義	6
コラム：電力システム	
～それは20世紀最大の技術的偉業～	7
電力システムの役割	7
電力システムはどのように機能しているか	9
経済性の追求を目指して	10
信頼性の確保を目指して	11
電力システムがもつ特有の性質とは	12
取引商品としての電気に固有な特質	12
流通する電気に固有の物理的な特異性	13
電力システムの構成の様子	14
電力システムを構成する仲間たち	14
ハードウェア群とソフトウェア群の協調的共存	15
コラム：電力システムは巨大生物～まるでマンモス、 そして人類が創造した最大級の複雑システム～	16
電力システムの規模について調べる	16
地理的に広がった大きな構築物	16

連系グリッドのもつメリットとデメリット	17
日本の連系グリッド	17
周波数の異なる2大地域	19
大規模化に至るまでの小史	19
電力システムの形態について調べる	20
構造は電圧階級による多層構造	20
送電線路と配電線路の役目	21
形状はループ状と放射状に大別	22
形状選定の一般的傾向	23
コラム：私たちの国の配電電圧の昇圧問題	24
2 送電線と配電線	25
3本一組で電気を送る送電線	25
雷よけの架空地線	28
電力線の工夫	29
電気を通さないガイシで	
電力線は支えられている	29
地面の中でも電気は送られている	31
コラム：ガイシの個数で電圧が分かる	33
家庭に電気を配る配電線	34
コラム：柱上変圧器から家庭の単相3線式へ	36
電柱の無い街—どうやって電気は送られている？	38
もっと知りたいあなたに（その1）：	
＜単相交流と3相交流のちがい＞	40
もっと知りたいあなたに（その2）：	
＜送電線周囲の電界と磁界、それによるエネルギーの流れ＞	42

3 電気の配送センター	47
変電所とはどのような所でしょう？	47
変電所の構成と主要な設備	49
屋内の設備	53
変電所の立地と運転	54
変電所の役割	56
【役割その1】変圧機能	56
コラム：変圧器の原理	58
【役割その2】集配機能	58
【役割その3】保護・制御機能	58
電力システムの制御と保護	60
電力システムの保護(保護リレーって何？)	60
電力システムの監視と制御	61
変電所の同族	62
交直変換所と周波数変換所	62
開閉所	63
移動用変電所	63
将来の変電所	64
現状の変電所の問題点	64
変電所の将来に向けた方向性	64
もっと知りたいあなたに (その3) : <母線の役割>	66
もっと知りたいあなたに (その4) :	
<保護リレー技術で世界に貢献>	68
4 電気の性質をうまく使って届ける	73
交流の電気とは	74
交流の電気の発生	74

交流の電気は大きさが変化する	79
交流の電気は波のように変化する	80
発電機が2台のとき一緒に回っているか？	80
同期とは？	80
「同期」の概念をタンデム型の自転車だととえる	82
チェーンがゴム紐の場合	82
二人が同じ力で漕ぐと	83
後ろの人が漕ぐのをやめると	85
発電機の場合には？	85
周波数との対応は？	85
漕ぐ力が突然変わったら？	85
上り坂にさしかかると？	86
発電機同士を伝える力は？	86
ねじれが大きくなると	88
発電機の間働く力	89
発電機同士を伝える力を大きくするには？	90
四つの方法	90
無効電力の働きとは	92
多数の発電機がつながれている場合は？	92
「同期」の働きと「自己制御性」	93
周波数が違う場合には？	93
直流でつなぐのはどのような場合？	93
雷が落ちると？	94
平穏な一日での電気の伝わり方	94
発電が足りない場合	95
落雷などで送電線が使えなくなる場合	95

電気の回り込み	95
雷が落ちなくても停電はおこる	96
雷が落ちなくても大きな停電は起こりえる	96
欧州での例	96
北米と日本での例	96
その背景には電気の「自己制御性」	97
もっと知りたいあなたに（その5）：＜交流の電力＞	98
もっと知りたいあなたに（その6）： ＜交流の電気は三角関数を使えば分かり やすくなる＞	108
本冊子の企画趣旨について	112
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	113

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

1 電力システム

電気を届ける仕組み

電気は現代の人々のまわりのさまざまな分野に広く深く行き渡っています。実際に電気がどこで使われているか見てみましょう。身のまわりで最も近い場所は家庭ですが、図1に示すように、それ以外にも病院、自動車工場、コンビニ、遊園地など、仕事場から遊び場まで数多くの場所で使われています。余りにもたくさんあり過ぎて書ききれないくらいです。

ここで、図1の中央部にある各種の施設の集まりに目を転じ、それらの働きについて簡単に触れておきます。誰もが良く知っているように、電気は発電所でつくられ、送電線や配電線それぞれに変電所を通して私たちに届けられます。また、給電所や制御所と呼ばれる施設は、遠くから通信情報を介して、発電所・変電所・送電線・配電線などの運用管理を行う役目を持っています。そして、図1に示す周辺部と中央部を合せた全体の集まりが本書で述べる「電力システム」に当たるのです。

また、電気がつくられてから使われるまでの具体的な道のを、私たちの家庭に至る場合について見てみると図2のようになります。つまり、電気は発電所から鉄塔を通り、変電所や電柱にある変圧器で電圧を変えながら私たちの家庭まで届けられることが分かります。

では、本題に入るまえに、このような長い道りを経て運ばれ、いつも私たちに便利に使われている電気の特徴～長所と短所～について、簡単に振り返っておきましょう。

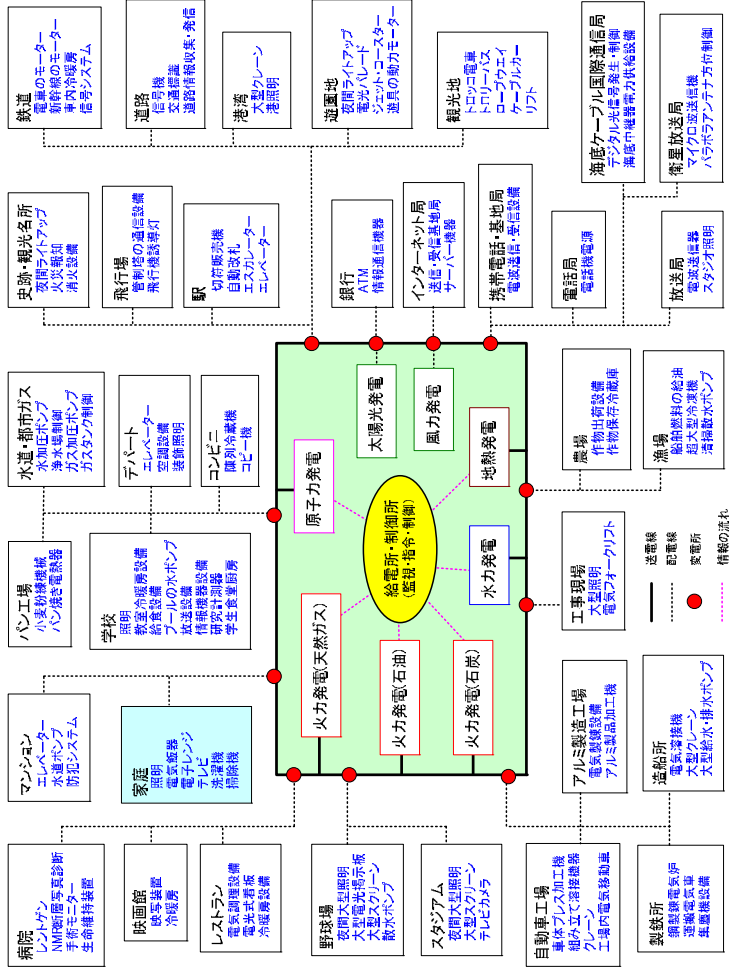


図 1 電気をつくり届け使う

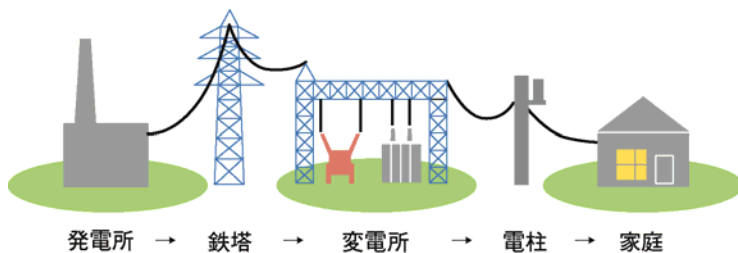


図2 発電所から家庭までの電気の道のり

電気がもつ供給面の特徴とは

電気は最高レベルのエネルギー

電気は用途が極めて多様であることが大きな長所です。つまり、電気は図1に示すようなさまざまな場所でどんな目的にも使える、万能なエネルギーなのです。また、私たち消費者の要求に応じて、欲しいだけの分量が場所・時刻を問わずスイッチひとつで即座に確実に届けられるので、実に便利なエネルギーです。さらに、使う際に周辺の環境を少しも汚さないのも、とてもクリーンなエネルギーなのです。

しかも、電気は眼に見えないものの、使い方を誤らない限りは全く安全です。そのうえ扱い易く、微妙なコントロールも容易なので、精密な作業を正確に成し遂げるには絶対に欠かせません。こうしてみると、電気の質的な価値（エネルギーとしての品質）は限りなく高いと考えられることから、「最高レベルのエネルギー」とみなすことができるでしょう。全エネルギー供給量に占める電気の割合（電力化率）が一国の文明度や先進度を測る物差しにされているのも、こうした背景があるからです。

電気の供給上の弱み ～2つの泣き所～

電気は使用面に関しては、とても貴重で優れたエネルギーです。完璧に近いと言っても構わないでしょう。ところが不幸なことに、電気には「大量貯蔵が困難」という致命的な弱点があります¹。さらに供給面から眺めると、ほかにも幾つかの弱みが見受けられます。以下に、どうしても無視できない電気の供給上の泣き所を2つ挙げておきましょう。

<その1> 決して小さくはない供給コスト

ひとつはガスや石油など他のエネルギーと比べると、必ずしも供給コストが小さくないことです。この理由は、電気のもつ価値の高さを考えれば当然のことですが、そもそも電気をつくるに当たって、原料となる資源が実に贅沢に使われることに大きく起因しているのです。例えば、燃料を原料とする場合、近年の変換技術に目覚ましい進歩が認められるにも関わらず、最新鋭機であっても燃料の6割程度、平均では何と半分未満のエネルギーしか電気に変換することができないのです²。

また、大量の電気を供給する場合には、用地の取得や施設の工事に莫大な資金と時間が費やされます。その際に地域の住民や周辺の自然界に対して、少なからぬ負荷を掛けていることも

¹ この弱点は見方によっては、もし電気を簡単に貯めることができるとしたら、場所を問わずコードレスの電気が自由に使える、といった素晴らしい利点が引出せることを示唆しています。それには数々の先端技術の開発が欠かせませんが、研究者・技術者には、大いに興味深い夢のある課題を提供してくれます。電気を蓄える技術の詳細については Vol. 6「電気を貯める」を参照。

² 熱エネルギーを経由したエネルギー変換には温度で制約される条件（熱力学の第二法則）があり、効率を高めるには温度を上げる必要があります。詳しくは Vol.4「電気をつくる」を参照。

忘れてはなりません。

言い換えるならば、電気は極限にまで凝縮された二次エネルギーであるが故に、それだけ割高な一次エネルギーからの変換コストが避けられないうえ、高めの輸送コストも併せて必要とすることは、至極当然のことになるのです³。

<その2> 秘められた甚大な社会リスク

もうひとつの供給面の欠点は、電気が余りにも有能であるため、それが逆に弱みとなって、自分の代理の役目を果たしてくれる友だちが何処にも居ないことに由来しています。実は、電気は代替性や融通性に乏しい孤独なエネルギーなのです。

従って、もし電気の供給が途絶えるようなことが起これば、一般の商品のような在庫による応急措置が困難であることとも重なって、人々の生活には不便や混乱を招き、社会や産業に対しては経済的な大打撃を与えるでしょう。場合によっては、人命や国家の危機に繋がる事態さえ引き起こしかねません⁴。

こうしてみると、まさに電気は「切れたら大ごと」、すなわち電気は大切なエネルギー源であることが理解されます。裏返

³ ここでの一次エネルギーとは、石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料や、原子力・水力・地熱・太陽熱などのように、自然から取られたままの物質や能力を源とするエネルギーのことです。一方、二次エネルギーとは、電気をはじめ、都市ガス、石油製品などのように、一次エネルギーを使いやすい形に変換・加工したエネルギーのことを指しています。

⁴ 電気が掛け替えのないことは、図1に示したような様々な場所で、突然、電気の供給が停止してしまったような場面を想像してみれば直ちに納得できるでしょう。電灯もテレビもつかず、冷蔵庫も働かず、トイレも使えません。パソコンや電話も満足に機能しないので、肝心の緊急情報が入手できません。電車も信号機も止まったまま交通は大混乱に至ります。不便どころか身に危険な状況に陥ってしまうことにもなりかねないのです。

せば、電気の供給が万が一でも停止した途端、思いも寄らない大規模な被害を受けることもあり得ることから、電気には甚大な社会リスクが秘められており、そのリスク回避のために大きな努力が求められていると言えるのです。

電力システムの意義・役割とは

ここからの各項では、電力システムの全体像に関して、さまざまな側面から順次、説明していくことにします。最初に電力システムがもつ意義と役割について大まかに調べておくことにしましょう。

電力システムの意義

電気は一種の商品であり、通常の商品と同じように、方々の生産地から出荷され、ひとつの流通市場に一括して集荷され、そして個々の顧客の要求量に応じて配達・販売され、それぞれの利用に供されます。電力システムとは、直接的であれ間接的であれ、この際に電気の生産地から消費地に至るまでの、さまざまな仕事に携わる一連の要素の有機的な集まり（集合体）を指しています⁵。

現代社会における電力システムは、交通輸送網（道路・鉄道・空路・海路）や資源供給網（ガス配管・上水道）あるいは情報通信網（電話回線・無線通信ネットワーク）などと同じように、生活や産業に不可欠なシステムとなっています。換言すれば、電力システムは私たちの日々の暮らしから見ると、生活の基盤

⁵ この小冊子においては、このうちの流通関連（送配電・変電）の記述が主体であり、発電関連にはほとんど触れていません。発電関連に関する詳細は Vol.4 「電気をつくる」を参照。

を支えるライフラインであり、また社会や国家の視点から眺めると、産業や経済の活動に必須な原動力を提供する公益的インフラである、といった位置づけができることになります。

コラム：電力システム ～それは 20 世紀最大の技術的偉業～

21 世紀が始まって間もなくのことですが、アメリカ工学アカデミー (NAE <http://www.nae.edu/About.aspx>⁶) が行った興味深い調査があります。それは「20 世紀において人類が成し遂げた技術的な業績のなかで最大のものは何か」を問うた会員向けのアンケートでした。その回答の集計結果として最終的に選ばれたのは、何と「電力システム」だったのです。自動車や飛行機でもなく、人工衛星でもなく、またデジタル計算機でもなかったのです。電力システムなくしては、そうした革新的技術も易々とは誕生し得なかったとの判断からでしょう。20 世紀を象徴する堅実な電気の供給技術は、考案した T.エジソンや企業化した S.インサルの時代以来、世界の国々には目覚ましい繁栄を、人々には豊かな暮らしを絶えず産み出してきたのです。

電力システムの役割

電力システムに与えられた役割を一口で述べるならば、各地に所在する専用の製造工場（発電所）で生産された電気という商品を、複数の中継基地ないし配送センター（変電所）を経て、地理的に広がった配送ルート（送配電線路）を通し、何時でもどこでもすべての消費者の要求量に瞬時に応じて、「効率よく」

⁶ 厳密には以下を参照。

<http://books.nap.edu/catalog/10726/a-century-of-innovation-twenty-engineering-achievements-that-transformed-our>

かつ「確実に」届けることにあると言えます。以下、こうした点について、もう少し詳しく調べてみましょう。

＜基本的には経済性と信頼性の2つ＞

電力システムの役割を前述のような電気の供給上の2つの弱点と関連づけてみると、「効率よく」は「経済性」に、「確実に」は「信頼性」に、それぞれ対応づけられることが分かります。前者は電気が他に比べ供給コストが割高であることに、後者は電気が甚大な社会リスクを秘めていることに、それぞれ強く結びつくからです。つまり、電力システムは「経済性の追究」と「信頼性の確保」という2つの相反する使命をバランスよく両立させることを主柱にした役割を担っているのです。

＜「3E」から「3E+S」へ＞

こうした「経済性と信頼性のバランス」という理念は、そもそも電力政策における本来の基本原則でしたが、1990年代になると経済性・安定性・環境性を意味する「3E」で表される3つの要件も併せて求められるようになりました。さらに、2011年の3.11惨事以降になると図3に示すように「3E+S」と称して、「S」つまり安全安心の要件が加わえられたという経緯があります。

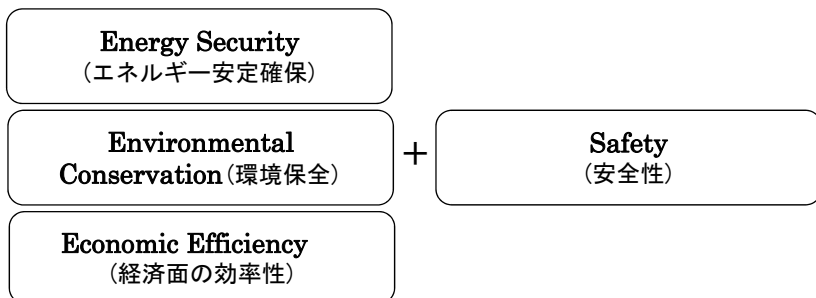


図3 電力政策の新視点「3E+S」

電力システムはどのように機能しているか

ここでは、「経済性の追究と信頼性の確保」⁷といった本来の使命を柔軟に達成するため、電力システムがどのように機能しているかについて、大まかに把握しておくことにします。

最初に触れておきたいことは、電力システムは極めて多くのさまざまな設備や装置を巧みに駆使しながら機能していることです。この際、発電所や変電所、それに送電線路や配電線路といった施設たちが主役となって見事な団結力を発揮し、華々しい活躍をしている様子が明白に見て取れます。しかしながら実のところ、これ以外にも数えきれないほどの高度で繊細な制御装置や情報機器、それに全体を円滑にまとめ上げる仕組み、知見、ルールなどが、表立って姿を見せることなく、主役たちの密接な結びつきを懸命に支えているのです。

もうひとつ、電力システムは課せられた任務を手際よく果たすために、入り組んだ多数の仕事を分業制にして処理しています。このため、電力システムには全系を絶えず監視しつつ指令を発するセンター機関（中央給電指令所：中給、図4を参照）がトップに位置しています。中給は人間で言えば頭脳にあたります。そして中給のほかにも、主要な地区には管轄区内の発電所や変電所などの施設を、もっと身近な場から監視・指令・制御・操作する多くの運用管理担当の拠点が配置されています。

こうした拠点にはさまざまな種類や役割があり、しかも呼称

⁷ ここに、以下のことを補足しておきます。一般の商品に求められるさまざまな要件は、原則的に「価格」と「品質」の2つに大別されますが、これを電気の場合に当てはめると、「経済性」が「価格」に対応することは当然なのですが、「信頼性」すなわち供給停止（停電）を防ぐことは「品質」の一部としてみなすことができます。

もまちまちですが、概して給電所、制御所などと呼ばれていません（図 1 を参照）。中給と地区に所在する拠点との間には、運用状況の情報連絡が密接に行われ、電力システムとしての全体機能に絶えず協調性が保たれるようになっています。



図 4 中央給電指令所の様子
（画像提供：東京電力株式会社）

経済性の追究を目指して

電力システムには、可能な限り電気の価格を低く抑える役目があります。このため、中給では翌日の需要予測に基づき、当日の最も安価な運用手順を組み上げ、それに合わせるために、全系の需給状態を集中的に監視しつつ、遙か遠方から運転指令を発信しているのです。つまり、時々刻々変動する消費量（需要）の総量を把握し、それに応じて各地の発電所の生産量（供給）が経済的に分配されるように、常に発電機の出力を遠隔調整しているのです。こうした機能を「経済運用」と呼んでいます⁸。

なお、この経済運用の働きを助けるために、需給のアンバランス量に含まれる大小の変動分を絶えず補正する機能が備えられています。このアンバランス量の補正は幾つかの担当の発

⁸ 具体的には、発電コストの小さい原子力や石炭などを原料とする電気は極力、長時間にわたって生産し、揚水発電（Vol.4 参照）や石油火力など発電コストの高い電気は真昼のピーク時に短時間だけ生産するようにしています。

電所（発電機）に任されていますが、そこでは小さな変動分ならば、自らの判断によって自動的に制御され、大きな変動分については、中給からの指示により調整される仕組みが採られています。

信頼性の確保を目指して

上記のような働きとともに、電力システムは常に信頼性の高い供給にも努めています。具体的には、思いがけないトラブルによって引き起こされる停電の発生や影響を可能な限り抑える努力がなされています。このような異常時対応のための機能は「信頼度管理（信頼度制御）」と呼ばれており、①停電の発生を減らす、②停電の拡大を防ぐ、③停電の復旧を早める、という3つの面から、それぞれの目的が果たされています⁹。

具体的には、①落雷などにより自動的に切り離された線路を感知できないほど瞬時に元に戻して電気を流し、人々に気付かれるような停電の発生を抑える¹⁰（停電回数の低減）、②全系の電気の流れを常時監視し、どこかにトラブルが起こって連鎖的波及の恐れが予測される場合には、事前に余裕ある流し方に変更しておく（停電規模の抑制）、③それでも実際に停電が生じた場合は、いち早く異常事態の全貌を検知して、指定シーケンス¹¹に従った手早い復旧を図っていく（停電時間の短縮）、といった制御や操作が行われます。

⁹ 停電の影響を測るうえでの「回数」「規模」「時間」の3つの尺度のことを、一般に「停電の3要素」と呼んでいます。

¹⁰ 切り離すのに0.1秒程度以下、元に戻すのに1秒程度以下の時間をかけます。これを高速度再開路と言います。

¹¹ あらかじめ定められた順序や手続きに従って、制御や操作の各ステップを逐次進めていくといった仕組みのことを指します。

電力システムがもつ特有の性質とは

電力システムには一般の商品の取引市場には決して見当たらない特殊な性質が幾つかあります。この節では、電力システムに特有の性質に関して、取引商品としての電気に固有な性質（経済面）と流通する電気に潜む物理的な特異性（技術面）の2つの側面から、重要な点を概観しておきましょう。

取引商品としての電気に固有な特質

あらゆる商品に共通することですが、ひとつの流通市場においては常に変動する多数の需要と供給が広く混在し、しかもどこであれ何時であれ、両者が一致することはまずありません。つまり、空間のおよび時間的ギャップが必ず存在しますが、通常、空間的ギャップは輸送によって、時間的ギャップは貯蔵によってそれぞれ対処されます。

さて、電気の取引に携わる電力システムの場合ですが、どのように遠方であれ電気は極めて迅速に届けることが可能なことから、輸送の能力に関しては一般の商品と比べ格段に優れていることは確かです。その一方で貯蔵の能力となると、そもそも電気の致命的な弱点であり、電力貯蔵（蓄電）技術の現状レベルも十分ではないこともあって、著しく不得手であると言えます。

従って電気の取引においては、一般の商品の流通市場における在庫の働き（倉庫）を簡易な形で整備することは不可能です。このため、当初から貯蔵には深く関知することなく、もっぱら輸送の優位性を最大限に発揮させる、つまり、絶えず消費者のニーズに応じた分量だけを時々刻々生産し素早く配送すると

いった取引の仕方に徹するとの原則¹²が採られているのです。

流通する電気に固有の物理的な特異性

電力システムに特有の性質を理解するには、そこを行き交う電気の正体を知ることも重要です。電気に秘められたさまざまな物理的な特異性が、普通の商品取引には全く見掛けない奇妙な様相を、電気の流通に生み出しているからです。ここでは、代表的な特異事象を例示するに留めておきましょう。

最初に、電気の基本的な物理的特性を幾つか挙げてみます。さて、電力システムにおいては、広大な場所で巨額な電気という商品の取引が一瞬も途絶えることなく、しかも極めて迅速に行われています。しかしながら、そもそも商品自体が目に見えないことから、折角の市場の活気ある雰囲気が一向に感じ取れない点が固有な特性として挙げられます。現代社会では、電気は空気のようなもので、無くならないとその有難さが分からないと言ってもよいのかもしれませんが。

次いで、電気には一般の商品に共通して付随する「種類」という属性がないことです。この点は水道水に似ています。その結果、すべての生産地から送られる電気が瞬時に混ざり合い完全に均一になってしまうため、生産地が複数ある際には、個々の電気の生産先を特定する（区別する）ことができません。

このほか、やや専門的ですが、電力システムを流れる電気には電車や自動車のように自力で動ける能力がないこと¹³、発電

¹² この原則は、電力自由化市場における「同時同量のルール」、すなわち取引しあう消費者と発電所の間、絶えず変動する需要に見合うだけの発電量を調整して届ける、とのルールにつながります。

¹³ 電気の流れもガスや水道水と同じように、一種の圧力差によって生じると考えられます。

所から需要家へ配送できる限度は配送経路の容量だけでなく距離にも支配されること、外乱などで不具合が生じて、軽微なら自然に回復する力を備えていることなども指摘することができます¹⁴。

電力システムの構成の様子

ここでは、電力システムを構成する、多数の主役たちとさまざまな脇役たちとの係わりの様子について説明しておきましょう。

電力システムを構成する仲間たち

一般の電力システムは図 5 示すように、互いに結ばれた大勢の仲間から成り立っています。電力システムの構成要素のうちで主要な設備だけでも極めて多種多様なものがありますが、そ

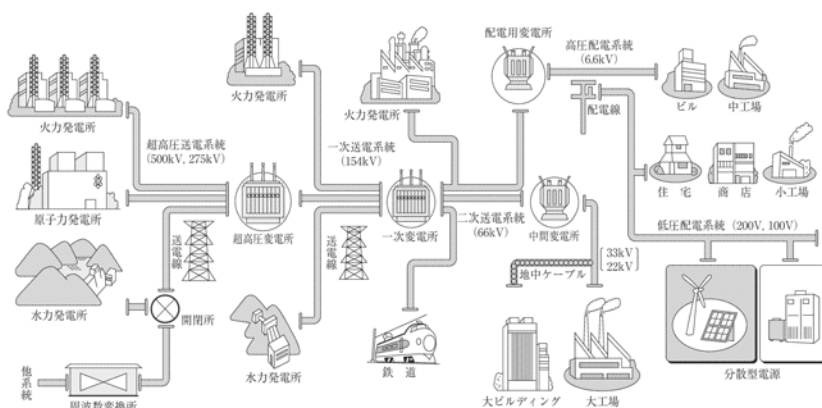


図 5 電力システムの構成

(出典: 高橋一弘 「エネルギーシステム工学概論」電気学会 2007)

¹⁴ 電気が流れる際に現れるもっと詳しい物理的な事柄については、4 章「電気の性質をうまく使って届ける」(p.73) を参照。

れらは生産関連の施設（発電所）に属するものと、流通関連の施設（変電所・電線路）に属するものに大別されます¹⁵。

強調しておきたいことは、これらの施設に属する多くの設備や装置は自動化されていることです。流通関連の施設についても当然のこと、ほとんどは自動化済みであり、その日常の運転も大抵は無人化されています。定期的な点検・保守などの期間を除き、普段こうした施設で大勢の人影を見ることは滅多にありません。

ハードウェア群とソフトウェア群の協調的共存

電力システムには本来の役割に撤するたくさんの施設のほか、機器や装置も数多く組み込まれています。これらハード関連の仲間たちに加え、もっぱら情報処理の仕事を受けもつさまざまなセンサーや計測系、通信ネットワーク、それに知能的な仕事を担う業務用・制御用コンピューターや情報通信装置など大勢のソフト関連の仲間たちも一体となって働いています。

つまり外見上では、電力システムは頑健なハード群の大きなかたまりのように映るのですが、実際には繊細なソフト群も多種多数が裏舞台で仲良く力を合せ働いているのです。そうした巧みなコラボ（協同作業）の存在も決して見落としてはなりません。

¹⁵ 変電所については3章「電気の配送センター」（p.47）を、電線路については2章「送電線と配電線」（p.25）を参照。

コラム：電力システムは巨大生物 ～まるでマンモス、そして人類が創造した最大級の複雑システム～

電力システムは人類が創造した最大級の複雑システムです。極めて多数のハードウェアとソフトウェアが融合し合い、協調性に富む有機的な仕掛けが取り込まれています。生き物として見れば、ハード群は手足の骨格や筋肉に、ソフト群は手足の動きを司る頭脳や神経に、それぞれ相当していると考えられます。

電力システムが複雑な人工の構造物であるとは言え、まるで生き物のごとく振舞うため、巨大生物マンモスに例えられることがあります。その背景には両者に共通するキーワードとして、行動や成長といった動物学の術語のほか、巨大性・融合性・自律性などの用語も挙げられるからでしょう。

電力システムの規模について調べる

ここでは、現実の電力システムの規模に関する事項について調べてみます。また、特に私たちの国の電力システムを取り上げ、地理的・歴史的な側面からも眺めておきましょう。

地理的に広がった大きな構築物

実際の電力システムは広大な区域にわたる極めて大きな規模の構築物です。しかも、単一でもすでに十分に大きい地理的な広がりを用意していますが、隣接する電力システムが幾つかある場合には、通常は互いに結ばれているので、一段と大きな規模が形成されています。このように連結された組織体は、一般

に「連系¹⁶グリッド¹⁷ (パワープール)」と呼ばれます。

連系グリッドのもつメリットとデメリット

多数の電力システムを、相互に連系することによって得られる基本的なメリットとは、電気という商品を、常時・異常時を問わず、容易に融通し合えるようになるため、より安い電気を、より確実に消費者の手元に届けられることです¹⁸。つまり、経済面と信頼面で互いにメリットがある関係が成立することです。

半面、連系によるデメリットも避けられません。その代表的なものとしては、一部に起こったトラブルが些細なものであっても、それが次々に相手の電力システムに波及して、広域に及ぶ大停電を引き起こすといった危険性をはらむことです。

日本の連系グリッド

私たちの国では、現在、それぞれの電力会社が自社の電力システムを所有していますが、ほとんどは 図 6 のように相互に結ばれ、全国規模（本土・北海道・四国・九州の四島）の連系グリッドを形成しています。こうした電力システムの連結の様子は、鉄道や道路の場合と同じように、全国の施設が一体的に結ばれ、ひとつの広域的な集合体になって運営されていることに似ています。

16 電力システム同士を電氣的につなぐことを「連系」と言います。系統をつなぐので、「携」ではなく「系」を使います。

17 グリッドとは、電力網、送電網を表す用語です。ですから連系グリッドとは、複数の電力網が連系されている状態を示す言葉です。

18 具体例として、安価な余剰の電気があれば互いに譲り合える、ピーク時や渇水時のトラブルに備えた予備設備の容量が節減される、停電時などに供給力不足が生じても緊急の応援が期待される、などのほか、より大容量の電源を共同で導入できる、需給アンバランスによる周波数の乱れが抑制される、といった利点も挙げられます。

●全国基幹連系系統(2014年7月末現在)

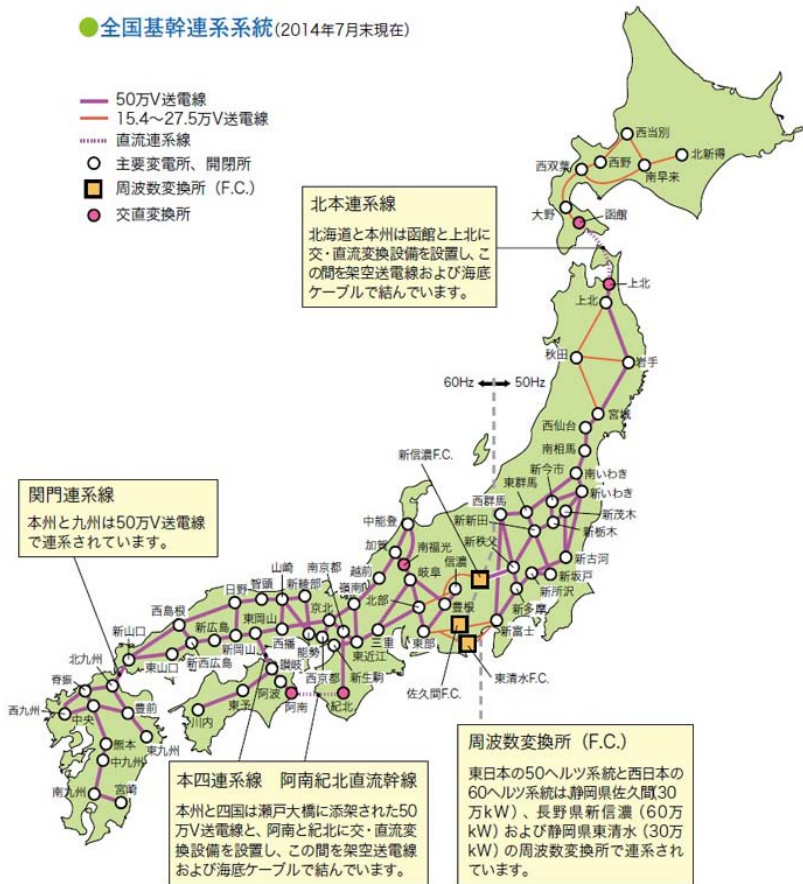


図6 日本の電力システム(連系グリッド)
 (出典: 電気事業連合会「INFO BASE2015」)

周波数の異なる 2 大地域

私たちの国の電力システムには、地理的にみて極めて特異な点があります。それは図 6 のように、全土四島を結ぶ連系グリッドが、50Hz（ヘルツ）と 60Hz の 2 大地域に分かれていることです。このような異なる周波数の連系グリッドをもつ先進国は日本のほかにありません¹⁹。

両者の間には通路（周波数変換所 p.62 を参照）が図 6 に示す通り 3 ケ所だけ存在しています。しかし、現在の両地域間の融通可能量は、合計しても大型の原子力発電機 1 基分に当たる 120 万 kW（キロワット）であり、容量的には極めて狭い関所となっています。そのため将来の本格的な電力自由化に備え、2020 年代には 2.5 倍の 300 万 kW に拡大する方針が打ち出されています。

大規模化に至るまでの小史

現在の電気事業の元となる体制が誕生したのは 1951 年のことでした。発足当時の 9 つの電力会社²⁰からなる電気事業は、大戦後の早期復興支援を皮切りに、以来一貫して人々の生活の向上や産業の発展に寄与してきました。こうした戦後以来の急

¹⁹ 一定の周波数をもつ電力システムの発電機（同期機）は全て仲良く同じ回転数で動いています。しかし、周波数が少しでも異なる電力システムどうしは本質的に不仲であり、両者を直接つなぐことは絶対に許されません。つないだ途端、個々の発電機の回転が狂い出し直ちに発電が止まり、一瞬にして全系が停電状態に陥ってしまうからです。また、商用周波数の全国統一は、確かに合理的な事業のように見え、技術的にも決して不可能ではないのですが、敢えて実施したとしても、期待されるほどのコストパフォーマンス（費用対効果）の得られないことが専門家の研究調査によって明らかにされています。

²⁰ 電力再編成に伴い、9 社（北海道、東北、東京、北陸、中部、関西、中国、四国、九州）に区分されました。

激な経済成長の歴史のなかで、特記すべき事項をいくつか挙げておきます。

まず、誕生から現在に至るまでの 60 年余りで、電力システムの規模（電気事業の販売電力量）は約 30 倍に伸びたことです。ちなみに、この間の人口増加は約 1.5 倍に過ぎません。特に大規模化が目覚ましく進展した期間は、日本の高度経済成長の発端となる神武景気が始まった 1955 年ごろから、バブル経済が崩壊した 1990 年ごろまでです。

また、現在の電気事業の元となる体制が発足した当時では、未だ個々の電力会社の電力システムは常時は連系運用されることなく、それぞれの供給区域を自らの施設で担っていました。その後、事業規模が拡大するに従って、1950 年代の中ごろから隣接する電力システムどうしが順々に連系し合うようになりました。

そして、50Hz 系統と 60Hz 系統が初めて結ばれたのは、静岡県浜松市にある佐久間周波数変換所（図 6 を参照）の運転開始によるものであり、それは 1965 年の出来事でした。さらに時が経ち 1979 年になって、北海道と本州が直流の海底ケーブルを通して連結され、ここによりやく全国連系が完成するに至ったのです。

電力システムの形態について調べる

ここでは電力システムの形態に係わる事項として、その構造と形状の 2 つの観点から調べてみることにしましょう。

構造は電圧階級による多層構造

電力システムを構造面から見た場合の顕著な特徴は、電圧階

級が「多層構造」になっている点です。つまり、通常の電力システムは数十万 V(ボルト)級の上位レベルの基幹系から、数百 V 級の下位レベルの末端系まで、数段にわたる電圧階級から成り立っています。基幹系と末端系の間層は、一次系・二次系などと呼ばれます。こうした多段構造は、道路網や鉄道網などの大規模ネットワークに共通して見られる特徴です²¹。

そして、大量の電気が基幹系（送電線路）を通して運ばれ、複数の変電所を経由して徐々に降圧されながら、次々と少量の電気に分割されて、末端系（配電線路）に接続している需要家に配られる仕組みになっています。この様子を道路網に当てはめてみると、基幹系は高速道路に、末端系は各種の一般道や路地などに相当します。また、人体に例えると、基幹系は大動脈に、末端系は毛細血管に当たると考えることができます。

送電線路と配電線路の役割

高い電圧ほど用地あたりの配送量が大きく、かつ配送量あたりの経費や損失が小さくなります。それ故、遠方の発電所から大量の電気を運ぶ送電線では、50 万 V といった高い電圧を使って、電気を効率よく運ぶようにしています²²。

しかし、実際に電気を使用するにあたり、低い電圧であるほ

²¹ 首都圏など大都市圏に広がる道路網や鉄道網は、概して圏内や周辺を取り巻く路線と地方や近郊に向かう路線から成り立っています。このように形態の面から眺めてみても、電力システムは交通網に酷似しています。なお、電力システムの場合は、圏内や周辺を取り巻く送電線（ほとんどが基幹系）は一般に外輪線と呼ばれています。

²² 電気を送る効率だけからいえば、電圧は高い程良いのですが、電圧を高くすると鉄塔なども大きくする必要があるので、建設コストなどを考えると高い電圧にすれば良いというものでもありません。現在、送電線の高電圧化の限界は 100 万 V 程度とされています。

ど多様な用途に応じ少しずつ分けて使うことが容易なうえ、感電などの危険も抑えることが可能です。つまり、低位の電圧階級である配電線路は、適当なレベルに電圧を下げて使い易くした電気を家庭や工場に届けるといった役目をもっています。

形状はループ状と放射状に大別

次いで、電力システムの形状について調べてみます。あらゆるネットワークがそうであるように、電力システムの形状に関しても、大別すると図7のように、ループ状のものと放射状のものがあります。言うまでもなく、前者は一部に迂回ルートを含み、後者は全く迂回ルートを含まない形をしています。

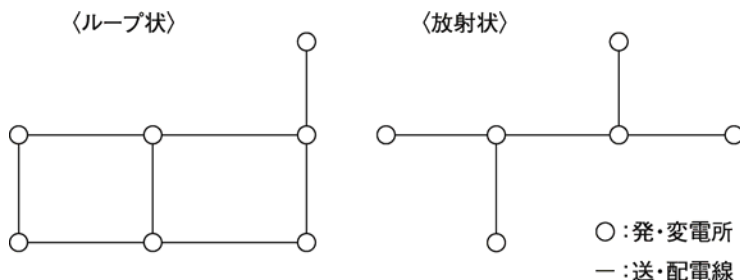


図7 ネットワークの形状

一般に、迂回ルートはトラブル発生時の混雑回避などに効力を発揮します。そのため、電力システムの場合もループ状のほうが、放射状よりも多量の電気を安心して（信頼して）流しておくことができます。半面、投資面・運用面においては、放射状よりも不利な点を含んでいることは否めません。

形状選定の一般的傾向

通常、上位の基幹系はループ状に、下位の末端系は放射状に、それぞれの流通施設が結ばれています。また、欧米の国々のように面的な広がりを持ち消費地が散在している地域では、ループ状の形状が多く採用されています。これに対して、私たちの国のように国土が狭い島国で、需要が密集している地域では、放射状の形状が選ばれる傾向があります。

しかし、こうした傾向は必ずしもすべて電力会社が実際に採択している形状の選定基準になっているわけではありません。現実の電力会社の選択は、上記のような地形などの地理的要因、需要密度などの経済的条件のほか、設計面・運用面・制御面における技術レベルなどにも支配されます。これ以外にも、供給の信頼性の在り方に対する各社独自の判断、各社が採ってきた経営理念や隣接する電力会社との関係などの歴史的な経緯にも左右されるのです。

コラム：私たちの国の配電電圧の昇圧問題

私たちの国の電力システムは、低圧レベルの配電系統に100Vの商用電圧が採用されていますが、これは先進諸国の中では最も低い電圧階級です。アメリカ（120V）を除く大抵の先進諸国では200V台の電圧が使用されています。

配電系統の昇圧化の問題は、これまで種々の角度から幾度も議論されてきました。しかしながら、全国に及ぶさまざまな消費者に莫大な費用負担を強いる、という社会的・経済的な障壁が最大の難関であることが分かり、総じて現実性と緊急性を欠くとの理由から、否定的な結論がほとんどを占めてきました。

しかし、配電電圧の昇圧化のメリットは電力損失の低減に留まらず、CO₂削減が可能になります。つまり、地球温暖化を防止するといった環境面の改善にもつながります。さらに、この国の社会や産業が本格的な成熟期を迎えつつあるなかで、電気の利便性を一段と高め、使用機器の性能向上を図ることが必要とされます。こうしたことから、将来的には全国での配電電圧の一律昇圧のみならず、スマートコミュニティ向けに、直流・400Hz・高中低品質といった多様な電気を一括して届ける革新的な給電システムの登場する日も間近かも知れません。

2 送電線と配電線

送電線や配電線はいろいろな部品からできています。以下では主要な部品のみを簡単に紹介しましょう。

3 本一組で電気を送る送電線

送電線は、発電所と変電所、変電所間を結んで、電気を送る役目をしています。鉄塔の高さは、図8に示すように送る電圧により違います。他にも送る電圧によりさまざまな工夫がされています。

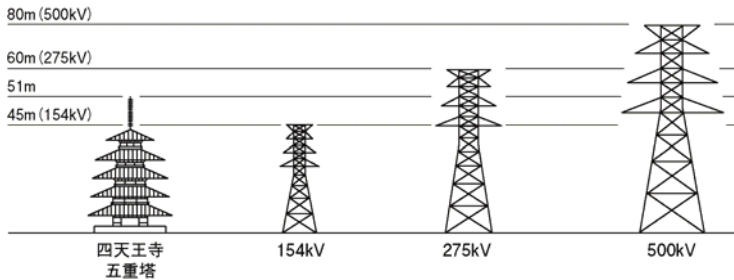


図8 送電鉄塔の高さ

(画像提供：電気学会保護リレーシステム技術委員会)

では、実際にその送電線の仕組みをみていきましょう。

図9は実際の送電線の写真です。この写真では、鉄塔の右側に4本、左側に4本線があります。図10は送電線の構成を簡単に書いたものですが、一番上の2本は「架空地線」と呼ばれる線で、この線は電気を送ってはいません。その下に、右側に3本、左側に3本の線がありますが、これらの線が実際に電気を送っている線で、「電力線」と呼ばれます。

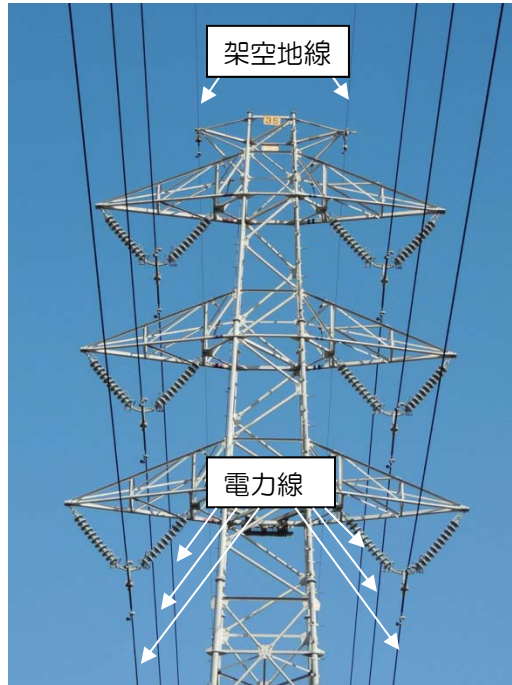
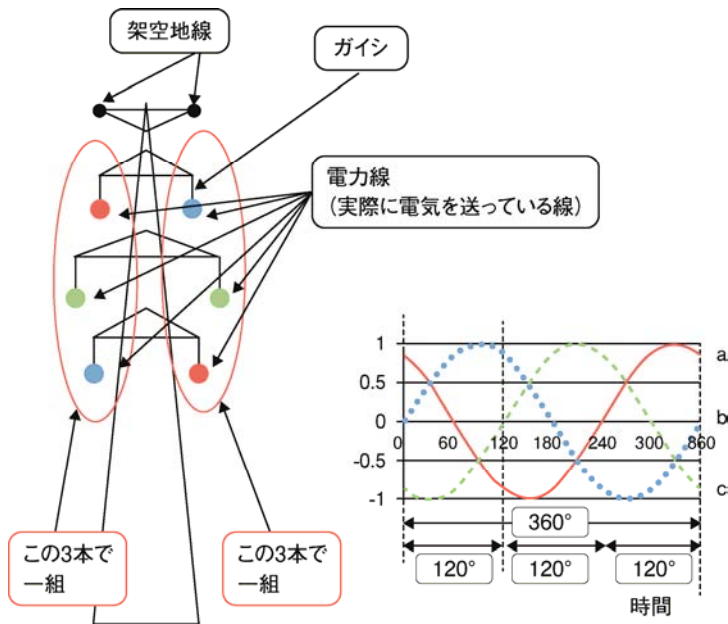


図9 実際の送電線の写真

この「電力線」は、鉄塔の右側と左側で、それぞれ3本で一組となって電気を送っています。送電線は交流で電気を送るのですが、このように3本一組で電気を送るため三相交流と呼ばれます。そもそも、広く使われている交流には単相と三相交流の2種類があります。単相交流は、電柱から引き込まれ家庭で使われるもの、三相交流は発電所から電柱までの間の送電線で使われ、単相交流を3つ組み合わせたものです。発電機や送電線のほとんどで、三相交流が用いられていて、大きな工場でも三相交流を使用しています。



東日本では周波数が 50Hz なので、一周期 (360°) が 20 ミリ秒 (0.02 秒) になる。一組になる 3 本の送電線で電圧が最大になるタイミングが少しずつずれている。西日本は 60Hz なので、一周期は 16.7 ミリ秒になる。

図 10 送電線構成の概略図

この電力線の 3 本一組の電線にはどれも交流の電圧がかかっているのですが、そのピークとなる時間は図 10 右の波形にあるように、それぞれ少しずつずれています。これはわざとずらしているわけではなく、交流発電機からの出力が、そもそもこのような形になっているのです。交流電圧を 120° ずつずらして等間隔で発生させて、3 本の線で送ります。三相交流は、3 組の送電線の戻りを 1 本にまとめると電流が流れなくなるので戻り線を省略できます。このため、3 本の電線だけで送電で

きるメリットがあるのです。三相交流を使用すると、大きな電力が送れるだけでなく、送電線の本数を半分に減らせる（もっと知りたいあなたに：その1 (p.40) を参照）という利点もあります。

雷よけの架空地線

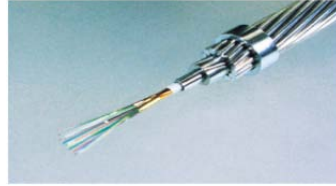
図9の写真ではちょっと細くて見にくいですが、鉄塔の一番上にある架空地線は鉄塔に直接つながっており、さらに鉄塔を通じて大地にもつながっている、まるで空に架かった地面の線、言わば接地（アース）です。英語では **overhead ground wire** といいます。この架空地線は電気を送っていないと言いましたが、飾りでつけられているものではありません。これは何のためのものかと言えば、電気を送っている電力線に雷が落ちるのを防ぐためにつけられているものです。

普通の建物であれば、雷から建物を守るためには避雷針を立てるのですが、送電線は長く伸びているので、鉄塔に避雷針を立てただけでは鉄塔と鉄塔の間の部分の電力線を雷から防ぐのはかなり難しいのです。そのため、電力線の上に接地された線を張って、電力線への雷撃を防ぐという考えでつけられているもので、言ってみれば避雷針ならぬ「避雷線」です。

架空地線は、アルミ合金線ですが、ケーブルの中に光通信用のファイバを巻き込んだものも使用されています。これを OPGW (Optical fiber composite overhead ground wire) と呼びます。光ファイバを用いれば、雷の電磁界や送電線自身の交流電磁界などの影響を受けずに、通信することが可能です。図11にそれらの例を示します。



通常の架空地線



OPGW（中心が光ファイバ）

図 11 通常の架空地線と OPGW の例

（画像提供：電気学会保護リレーシステム技術委員会）

なお、実際の送電線では、電力線も架空地線もかなりたるんでいるように見えますが、電線が重いので、あまり電線をピンと張ろうとすると鉄塔に力がかかりすぎて倒れてしまいます。実際には、夏と冬の温度差による電線の伸びや、風や雪などによる加重なども含め、総合的に考えて設計しています。

電力線の工夫

電気を通さないガイシで電力線は支えられている

鉄塔は金属ですので電気を通しますから、電気を送っている電力線を直接鉄塔につけては、電気がすべて鉄塔を通じて地面に流れてしまったり、送電線同士がショートしてしまい、電気を送ることはできません。そのため電力線は電気を通さない「ガイシ^{ガイシ}（碍子）」というもので、送電鉄塔から吊り下げられています。ガイシはガラスやプラスチックでできたものもありますが、日本では瀬戸物でできたものが良く使われています。今度送電線を見かけたら、よく見て下さい。いくつものガイシがつけられていて、その先に送電線を吊り下げているのが分かります。



図 12 ガイシ (画像提供：日本ガイシ株式会社)

ガイシは、天気がよく晴れている時はもちろん、雨に濡れても電気を通さないことが必要です。また、海岸近くでは海から飛んでくる塩水がガイシ表面にかかったりしますし、雪国では雪や氷がガイシを覆ったりすることもあります。このような場合でも電気を通さないために、ガイシの大きさや長さが決められています。以上のように、ガイシの数を見ると、送電電圧の見当が付きまますので、あなたも空を見上げる際にガイシも意識して見てはいかがでしょうか。

電気を送っている各相の電力線には、電気の流れやすい金属を使います。通常金属の中で一番電気の流れやすいのが銀で、それに続いて銅になります。しかし銀は高価ですので、硬銅を使ったり、電気の流れやすさは少し劣るのですが、同じ重さなら銅の約半分の価格の安価なアルミニウムを使ったりします。アルミニウムは銅より軽いのですが、柔らかく引っ張り力に弱いいため、中心に硬い鋼線を入れて力を持たせています。また、送電電圧が 27 万 5 千 kV(キロボルト)程度以上の高電圧になると、多導体方式と言って、図 13 のように複数の線を数十 cm

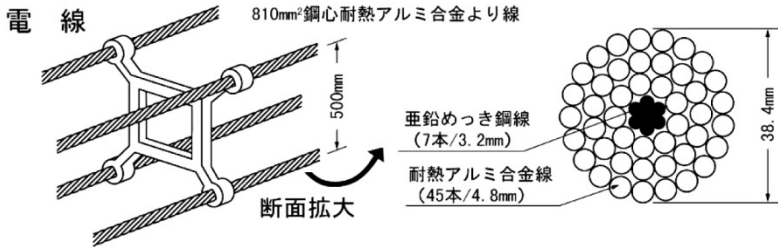


図 13 500kV 送電線の例

(画像提供：電気学会保護リレーシステム技術委員会)

間隔で配置し、一つの電力線として使います。これは 50 万 V の送電線の例ですが、4 本の線で一つの相の電力線が作られています。

地面の中でも電気は送られている

送電線というと鉄塔というイメージが強いですが、都会部やその近郊など、用地事情や景観などの理由で架空送電が行にくい場所では、図 14 のように地面の中に張った電線で電気が送られることもあります。地面の中に電線を張って電気を送るといっても、金属の電線を地面にむき出しのまま埋めてしまえば、土の中に電気が流れ出してしまいます。そのため、電気を送る金属の電線を中心にして、電気を通さないプラスチックなどで電線の周囲を包んだ「ケーブル」というもので電気が送られています。図 15 にケーブルの例を示します。図にあるように、電気を送っている中心の金属線から外側までは、土との間の絶縁のため、また周りの土やそこに含まれる水分の影響でケーブルが劣化してしまうのを防ぐために、何重にもなっています。電圧の高いものほど、電気を通さないプラスチックの層（絶縁層）を厚くする必要がありますので、その分ケーブルも太

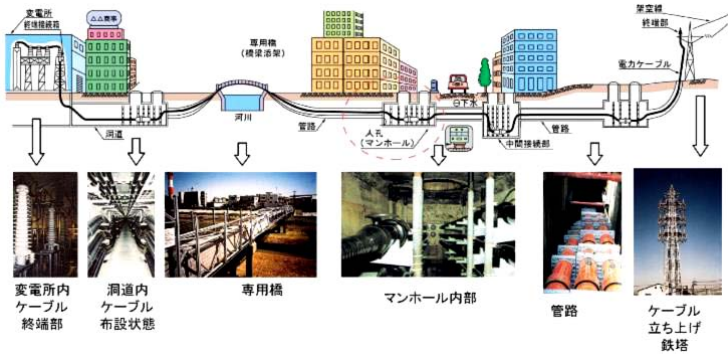


図 14 地中送電設備の例

(画像提供：電気学会保護リレーシステム技術委員会)

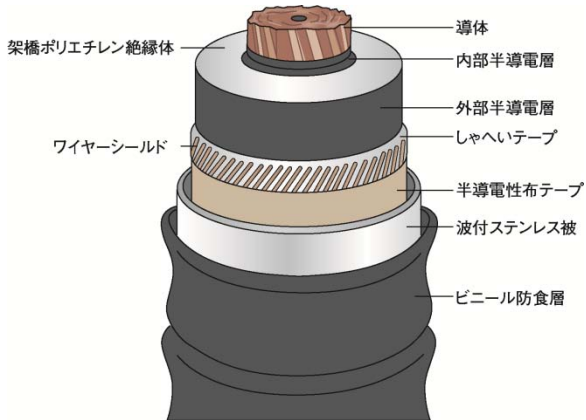


図 15 電力ケーブル

くなります。50 万 V のケーブルでは外径は 15cm 程度になります。

日本の地中送電電圧は、最初は 11～33kV が中心だったので、プラスチックの絶縁性能の向上により、現在 500kV の

ケーブルが作られており、東京の新豊洲変電所と千葉県の新千葉変電所の約 40km を結ぶ長距離地中送電線に使われています。

コラム：ガイシの個数で電圧が分かる

皆さんは送電線をご覧になって、何ボルトの電圧がかかっているか見分かりますか？

それは表に示すように、ガイシの数でおおよその電圧を見分けることがで

電圧	ガイシの個数
11～22kV	2～3
33kV	3
66～77kV	4～5
110～154kV	7～10
187kV	10～11
220kV	12～13
275kV	15～16
500kV	28～30

きます。一般に海岸に近いところでは、ガイシに塩水がついて放電しやすくなるので、これよりガイシの個数を多くする場合があります。表のガイシの個数は概略値です。

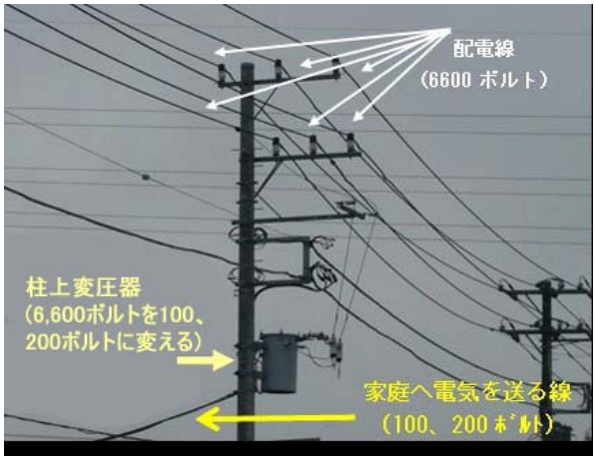
家庭に電気を配る配電線

私たちが町中で良く見る電柱の上に張ってあるのが配電線です。図 16 は配電線の例ですが、配電線は送電線よりかなり低い電圧で電気を送っています。送電線から配電線へは変電所（配電用変電所）で電圧を下げますが、変電所については、次の章で説明します。実際の配電線の電圧は通常数千 V であり、送電線よりは低いと言っても、一般の家庭で使うには実はまだ電圧が高すぎます。そのため、さらに電柱の上にある変圧器（柱上変圧器）で電圧を 100V や 200V に下げて家庭に送ります。送電線や配電線では 3 本一組（三相交流）で電気を送っていますが、柱上変圧器から家庭に電気を引き込む時には、家庭のコンセントに合わせて 2 本の電気を送る線およびアース線の 3 本を通常使います²³。

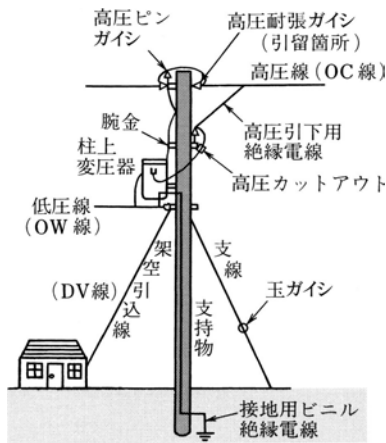
地中送電でケーブルを使うという話をしましたが、架空配電線でもケーブルが使われることがあります。通常の配電線では、ビニールで金属線を包んだだけの電線が使われるのですが、電線付近に建物が密集していたりして、十分な距離をとって電線を張るのが難しいところではケーブルを電線のように張った架空ケーブルが使われます。架空ケーブルの例を図 17 に示します。ケーブルは 3 本まとめてラッシングワイヤーというワイヤーでひとくくりになされ、メッセンジャワイヤーという鉄線で吊られています。電気を送っている線をひとくくりにはしているのですが、ケーブルは外側にシースというアースした金属があるので、3 本を近づけても問題はありません。

²³ Vol.3 「電気の基本を考えてみよう」の図 29 (p.44) と、Vol.5 コラム「柱上変圧器から家庭の単相 3 線式へ」(p.36) を参照。

電線に流す電流の大きさが大きくなると、中心部の導体も太くなり、そのため全体の外径も変わってきますが、通常、このような架空ケーブルの外径は数 cm 程度です。



(1) 配電線の例



(2) 配電線の構成

図 16 配電線

(出典：道上 勉「送電・配電 改訂版」電気学会 2001)

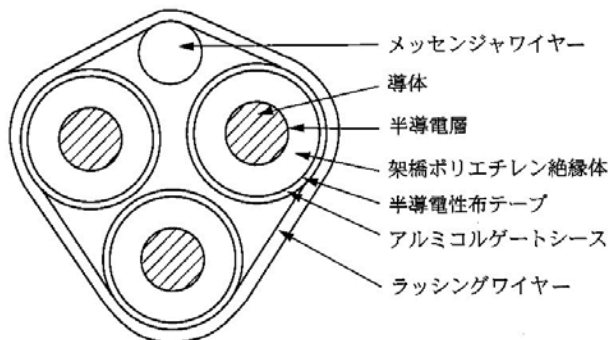


図 17 架空ケーブルの例

(出典：「電気工学ハンドブック第 6 版」電気学会 2001)

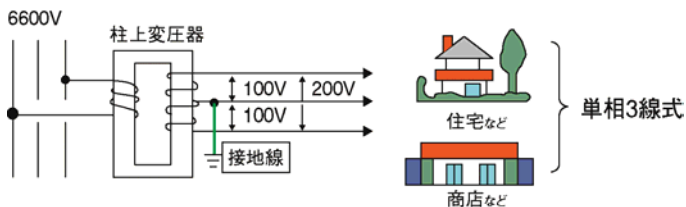
コラム：柱上変圧器から家庭の単相 3 線式へ

家庭で使用する電気は、柱上変圧器から配電線を通り写真に示すような家庭の外壁に設置されている電力量計に引き込まれ、そこからまた家庭に分配されます。ですので、電力量計から 2 本のパイプが出ていてそれぞれのパイプには 3 本の電線が入っています。

その際に使用する配電方式は、ほとんどの家庭で使用されている単相 3 線式です。皆さんの自宅の壁に設置された電力量計を見てみてください。パネルに交流単相 3 線式と書かれているのが確認できると思います。



その单相 3 線式は次のような仕組みになります。



上の図で左の 6600V の電線は、図 16(1)の電柱の上の方の 6 本の電線です。ここは三相交流²⁴なので、図 16(1)では 3 本一組の電線が二組張られています。このうちの 2 本の電線から柱上変圧器で電圧を上の方のように下げて 3 本の電線（3 本をまとめてあるので、一見すると一本に見えます）で家庭へ送っています。このように、6600V の線間電圧の一つからしかとっていないので、单相と言ひ、また 3 本の電線を使っているので、单相 3 線式と言います。3 本の電線の組み合わせで 100V や 200V の電圧が出せるようになっています²⁵。

²⁴ もっと知りたいあなたに（その 1） p.40 を参照。

²⁵ Vol.3 「電気の基本を考えてみよう」の図 29（p.44）を参照。なお 100V や 200V は標準電圧で、電気事業者は電気を供給する場所において、それぞれ「101V の上下 6V を超えない値」「202V の上下 20V を超えない値」に維持するように努めなければならないことが定められています。

電柱の無い街—どうやって電気は送られている？

図 18(a)の写真はある街の写真です。街中では電柱が多く見られますが、これが駅の近くになると、図 18(b)のように電柱が全く見られない場所もあります。これは街の美観を高めるため、配電線をすべて地中に埋設したためです。このように電柱を使わず、地下からビルなどへ電気を送る場合も都会では多く見られます。この場合も地中送電線と同じく「ケーブル」で電気が送られています。ケーブルは地中に直接埋められる場合もありますが、金属やコンクリートの管の中に入れる場合も多く、また都心部では、大きなトンネルを作ってその中に何本ものケーブルを配置する場合もあります。



(a) 街中
(道の端に電柱が並んでいる)



(b) 駅の近く
(電柱は見あたらない)

図 18 ある街の風景

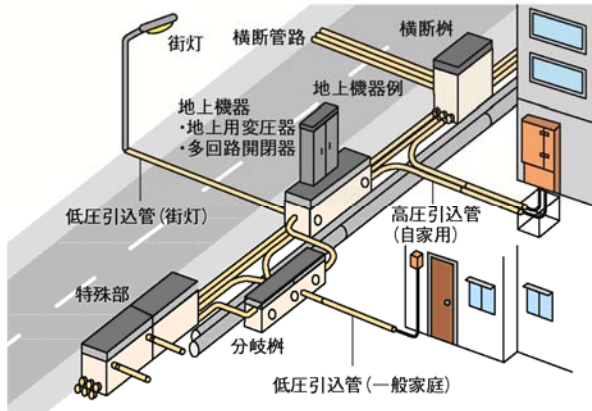


図 19 地中配電線のイメージ図

図 19 に示すような送電用ケーブルや配電用ケーブルを用いた地中送配電のメリットは、景観の改善のみでなく、地下にあるので暴風雨や落雷などの影響を受けにくく（事故が起きにくく）、また人などに触れないので安全性が高まります。一方、デメリットは、建設に時間がかかり、建設費が高くなること、事故復旧に長時間を要することです。

もっと知りたいあなたに（その1）

<単相交流と3相交流のちがい>

電気を使う時には、行きと帰りの2本の電線が必要です。この電球を光らせるひと組の電線を相と言いますが、3つの負荷に電気を供給するには、通常は図20のように6本の線が必要です。

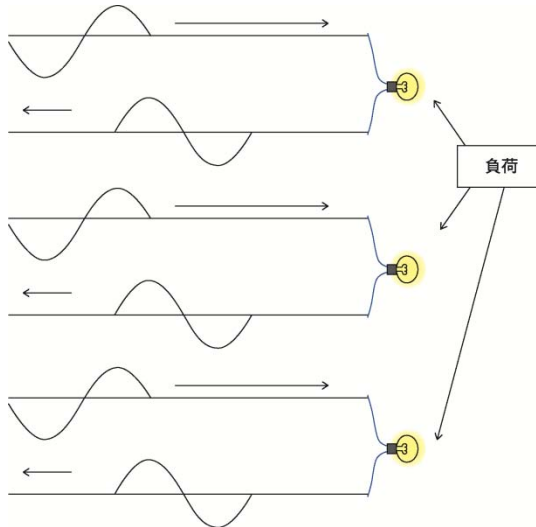


図20 線が6本の場合

ちなみに、図で負荷と表記した電球は、直流電流でも光りますが、図示するような交流電流でも光ります。小学校の理科の乾電池と豆電球の実験では、直流で光らせています。家庭の天井の電球は交流で光らせています。図の様な交流波形を正弦波（サイン・ウェーブ）と呼びます。

帰りの線を一本にまとめることもできますが、3本分の電気が流れるため、一本の線だけでは不十分で、結局3本分の線が必要になります。

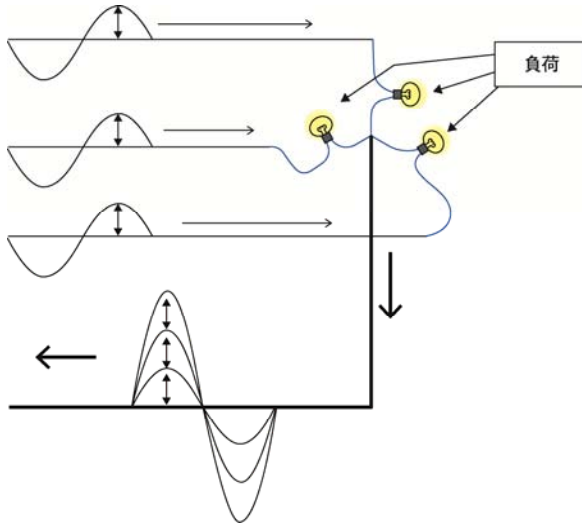


図 21 線が 3 本の場合

しかし 3 相交流では、電線は 6 本必要ありません。それは、3 相の各相の正弦波状の電圧や電流のピークが少しずつずれているため、各相の電圧や電流を足すと常に 0 になります。その

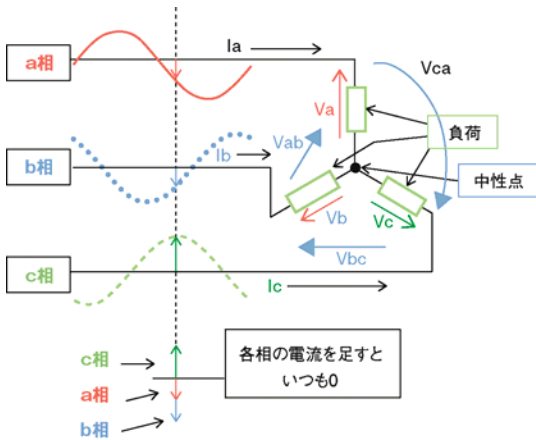


図 22 帰りの線が必要ない場合

ため、帰りの線がなくとも構わないのです。つまり三相を組み合わせることにより、各相が独立していた場合に 6 本必要だった電線が、3 本で済むようになる

のです。

このとき、各相の電流（図 22 の Ia、Ib、Ic）を線電流と言
い、電球のそれぞれにかかっている電圧を相電圧（Va、Vb、
Vc）と言います。また、電線の間にかかっている電圧を線間電
圧（Vab、Vbc、Vca）と言います。

もっと知りたいあなたに（その 2）

<送電線周囲の電界と磁界、それによるエネルギーの流れ>

図 9 に示す様な巨大な送電線では、地面（アース）に対して
交流で約 30 万 V ($50 \text{ 万 V} / \sqrt{3}$)²⁶もの電圧がかかっています。
交流ですから瞬間的にはその約 1.4 倍²⁷の約 40 万 V もの電圧
がかかります。一方、1 本の電線（導体）に流れる電流は 3 千
A 程度です。ということは、空中の電線と大地を一对の電線と
して考えてみると、30 万 V × 3 千 A（アンペア）= 0.9GW²⁷
（ギガワット）すなわち約 90 万 kW の電力が送られています。
電力は 3 相交流で送られ、通常は左右合計 2 系統の送電線が張
られていますので、それぞれの鉄塔に張られた電線全体では、
上で計算した 1 本の場合の 6 倍の電力、すなわち約 540 万 kW
の電力が送られていることになります。

送電線に電力を送り出す大規模な発電所は、電力の消費地で

²⁶ 三相交流は 3 本の線に位相の異なる 3 つの交流電源を接続したも
のです（もっと知りたいあなたに（その 1）を参照）。3 本の相電圧を
みで見ると、60Hz 系の場合、ある相がピーク電圧に達した 1/180 秒
後に次の相がピークに達し、また 1/180 秒後に次の相がピークに達し、
結果 1/60 秒間で一巡する（1 回転する。4 章の「電気の性質をうまく
使って届ける」図 42 を参照）。三相交流電源に接続される 3 つの負荷
が等しい場合、電力は線電流 × 相電圧 × 3、あるいは、線電流 × 線間
電圧 × $\sqrt{3}$ で求められます。

²⁷ もっと知りたいあなたに（その 5）<交流の電力>p.98 を参照。

ある都市部近郊に設置される火力発電所を除くと、都市部から遠く離れて立地されている場合が多く、その場合、発電所から電力を送り届けるにはこのような巨大な送電線を利用する必要があります。

通常、一つの発電所には発電機が何機もあって、数百万キロワットの電気を送り出しています。この膨大な電力は、50万Vの送電電圧を利用すれば、一本の鉄塔に張られた一連の送電線で送ることが可能となります。私たちの国では、用地事情の制約が厳しく鉄塔を並べて設置する余裕はありません。多くの送電線は左右2回線を備えています。一方、多くの諸外国では用地に余裕がありますので、鉄塔倒壊のリスクを考えて、二本以上の独立の鉄塔にそれぞれ1回線ずつ3相電線を設置することがよくあります。この場合は、鉄塔一本が倒壊しても残りの鉄塔の電線で電力を送り続けることができます。

さて、送電線を見上げた時に、電気エネルギーが流れている様子を想像できますか？ 皆さんが川の流れをご覧になれば、流れのエネルギーは水によって担われていることが容易に想像できるでしょう。では、送電線を眺める場合ではいかがですか。送電線、もっと一般には電線をみて、どこを電気のエネルギーが流れているのか想像できますか。もし、電気エネルギーが電線の中に閉じ込められて電線の中を送られている、と思われたら、その考えは修正していただく必要があります。実は電気エネルギーは電線の周囲の空間全体を通して電線に沿って、電線の張られている方向に流れているのです。この電気エネルギーの流れは、物理的には「ポインティングベクトル」として

表現できます²⁸。ポインティングは、この電気エネルギーの流れを解明したイギリス人の名前です。

ポインティングベクトルといっても馴染みの無い読者が多いと思いますので概要を以下に述べておきます。ポインティングベクトルは電界と磁界との積で表されます²⁹。空間内の電界は電線の電圧によって作られ、磁界は電線を通る電流によって作られますが、それら電界と磁界の様子を表すものが電気力線と磁力線です。

図 23 は送電線周りの電気力線と磁力線の大まかな様子を描いたもので、実線が電気力線、点線が磁力線です。ここで、注

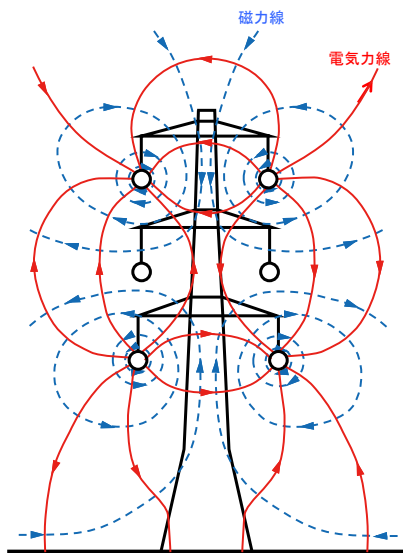


図 23 送電線周りの電気力線と磁力線

意すべきは送電線で送られているのは交流ですから、周期的に電圧、電流は変化するので、図 23 に描いた電気力線も磁力線も周期的にそのパターンが時々刻々と変化します。それを動画で示せば面白いのですが、ここでそれをお見せする事ができないの

²⁸ ポインティングベクトルについては Vol.3 (p21, p52, p58) を参照。

²⁹ 厳密には電界と磁界のベクトルとの外積(ベクトル積)のことです。

が残念です。

図 23 に描いたような電気力線と磁力線が、送電線を通る三相交流電流の時間変化に応じて空間内につくられ、それらの力線（言い換えれば、空間の電界と磁界ということですが）によって、送電線周りの空間に作られるポインティングベクトルが、電気エネルギーを輸送しているということが出来ます。このような知識をもつと、送電線を眺めたり、写真を撮ったりする時の見方が少し変わるのではないのでしょうか。

最後に一言、もし、この送電線に雷が落ちたら、その場所の電圧、電流はその瞬間に大きく乱され、その乱れは波及して行きます。その乱れはどの程度の速さで送電線を伝わって行くのでしょうか。もし、電気エネルギーが電線の中を伝わっているのであれば、それは電線内の電子によって^{にな}担われていますから、電子の速度で伝わることとなります。しかし、その速度は亀の歩みより遅いので³⁰、この考えはとても現実的とは思えません。では実際はどのようなのでしょうか。電磁波の速度は光の速度と同じで、約 30 万 km/秒です。ある地点で落雷が起きたときには、その周囲空間を満たしている電界、磁界は大きく乱され、その乱れは、電磁波となって光速で電線方向に沿って両側に伝わるのです。周囲の電界、磁界が乱れば、電線間の電圧と電線内の電流もそれに依りて乱れて、それも光速で伝わります。

落雷によって電圧、電流が乱れるから電界、磁界も乱れるが、その乱れは電線内の電子によって伝わって行く。そのように考

³⁰ 電子の速度は電流÷(電子のもつ電荷×金属中の電子の密度×電線の断面積)で与えられ、直径 1mm の電線に 1A の電流を流した場合の電線中の電子の速さを計算すると 0.1mm/秒程度となります。

えてしまうと、落雷による乱れが光速で伝わる原理が解らなくなってしまいますので、注意してください。

落雷によって乱された電界、磁界は電線の電圧、電流を同時に乱して、両者ともが光速で電線にそって遠方まで伝わっていくので、途中で接続された装置を破壊してしまう恐れがあります。そこで、すぐに保護リレーという装置³¹で送電線のスイッチ³²を動作させて、その伝わりを阻止することが大切です。と言っても光速以上の速さであらかじめ乱れを予測することは不可能です。実際には落雷の検出からスイッチを切るまで、交流の3周期から5周期程度（0.1秒以下）で対応するように出来ています。

³¹ 3章の電力システムの保護「保護リレーって何？」(p.60)を参照。

³² このスイッチは、正式には遮断器と言います。送電線両端の変電所内に設置されています。「3 電気の配送センター」(p.47)の章を見てください。

3 電気の配送センター

電力システムには変電所と呼ばれる、たいへん重要な役割を果たしているところ（施設）があります。これを宅配便に例えて考えてみると、宅配便では受け付けた荷物を近隣の配送センターに集めて、同じ方面へ送る荷物をある程度まとめて送り先の最寄りの配送センターに送ります。そこに送られてきた荷物は、区分けされて、送り先へ届けられます。

電気の場合も発電所で作られた電気は、変電所に集められて送電線につながり、何か所かの変電所を経由して私たちの使うところに（需要家のもと）に届きます。宅配便とよく似ていますが、違うのは電気には宛先がつけられないことです。

このように、物流における配送センターの役割を担うのが、変電所です。一般の人からは目立ちませんが、たいへん重要な役割を担っています。変電所は、その名前の通り、電気を変えるところです。まず、電圧を変えます。また、電気の通り道も変えることができます³³。変電所の役割とそれを実現するための設備などについて見ていきましょう。

変電所とはどのような所でしょう？

電気は電圧が高いほど送電するときの電力損失（ロス）³⁴が

³³ 電圧を変えずに通り道だけを変える場所もあります。それは開閉所と呼ばれます。

³⁴ 損失は、電線路がもつ抵抗によって電気エネルギーが、熱エネルギーに変換され、空気中に捨てられることによって発生します。その大きさは流れる電流の二乗に比例し、抵抗値に比例します。電気エネルギーを送るとき、電圧を2倍にすれば電流は1/2で済みます。電流が1/2で済めば、損失は $(1/2)^2=1/4$ で済みます。

少なく、電線も細いもので済むため、図 24 に示すように、発電所で作られた電気³⁵は電圧を高くして消費地の近くまで送電し、そこで電圧を下げるようになっていきます³⁶。

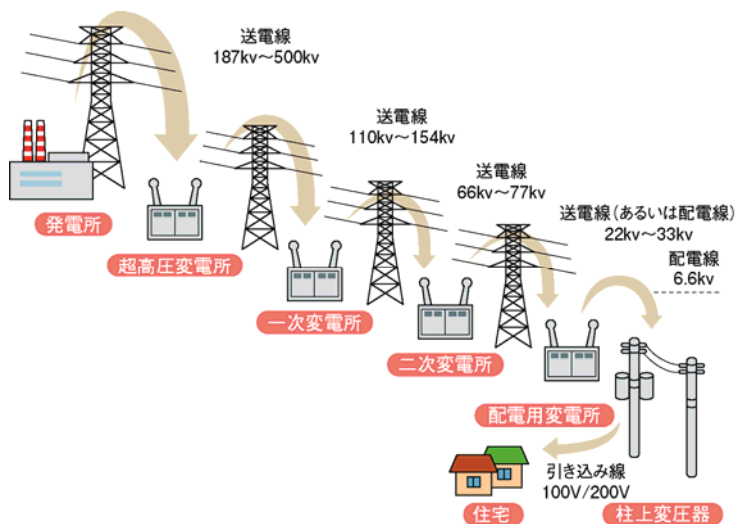


図 24 変電所の種類

また、電気の流れを集中・分配することで、落雷などで部分的に電気の流れが途絶えても広い範囲で停電することがないようにになっています。変電所は、電気の流れを効率的に送る中核となる施設であり、電力の流通網（配送網）における中継基地となっています。

³⁵ 大きな発電機の出力電圧は数千 V から 3 万 V ぐらいで、これを 27 万 5,000V や 50 万 V まで電圧をあげて送電します。

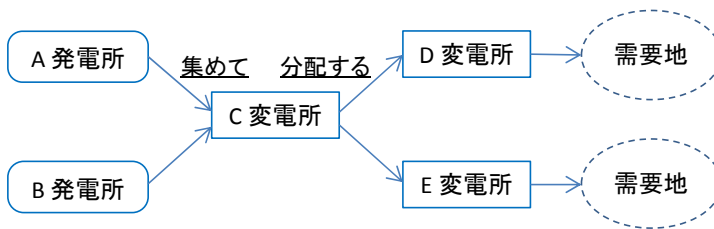
³⁶ 電圧を高くすることを「昇圧」、低くすることを「降圧」と言います。

つまり、変電所とは、効率よく送電するために電圧を高くしたり低くしたりする、使いやすい電圧の電気にする、電気を集め、必要な個所に分配するといった役割をもった所と言えます。外観を図 25 に示しま



図 25 1973 年に日本で初めて 500kV 送電が始められた時の変電所の写真（画像提供：東京電力パワーグリッド株式会社）

す。また、変電所が担う役割を単純化して示したものが、図 26 です。この図を元にして、あとでもっと詳細な図に展開して、詳しく説明することにします。



A、B 発電所で起こした電気を、送電線経由で C 変電所に集めます。C 変電所ではそれを D、E 変電所へ向けて送り出します。

図 26 変電所が担う役割

変電所の構成と主要な設備

変電所の構成の概要を図 27 に示します。これは屋外に設置された変電所で、比較的敷地に余裕がある場合の例です。

高い電圧で送られてきた電気（図では左の方の送電線から）

は、遮断器や断路器を通過して、「母線³⁷」に集められます。母線は、電気をいったん集め分配するための変電所内の電線のことです。

遮断器 (CB)³⁸は大きなスイッチで、雷などで送電線がショートして大きな電流が流れても電気を切ることができます。大きな遮断器では、電圧が 50 万 V (500kV) 用で電流が 6 万 3 千 A までの電流を、切り離せとの命令が来てから 0.04 秒程度³⁹でスイッチを開いて大きな電流を切ることができます。なるべく大きな電流をどうやったら速く確実に切る (遮断する) ことができるか、装置をいかにコンパクトにしかも安価にできるかなどで、絶え間なく研究開発が行われています。

一方、断路器も大きなスイッチですが、遮断器のような大きな電流を切ることはできません。通常使っている電流を切り離

³⁷ 母線は、いろいろな変電所からくる送電線や配電線を一か所に集め、また別の変電所へ効率よく送るための設備です。また、母線には、変電所の重要度、電圧階級、接続される回線数などに応じて、さまざまな構成のものが採用されています。「もっと知りたいあなたに (その 3) <母線の役割>」(p.65)を参照。

単母線構成は母線事故時にはその変電所全体の電気が停まる (全停となる) ため、引き出し送電線数が少ない変電所に適用されています。また、基幹系統の変電所では二重母線と呼ばれる構成のものが多く使われており、2 つの母線のうち片側の母線で事故が発生した場合にも、もう一方の母線は使えるため、信頼度が高い構成となっています。

³⁸ 遮断器は結合部分を機械的に開いて、大きな電流を切ることができます。英語では、Circuit Breaker と言うので、CB と略されます。

³⁹ 50Hz 系統の場合で、1 サイクル (1 周期) は 0.02 秒 (周期÷周波数: $1 \div 50 = 0.02$) だから、2 サイクル程度 (2 周期分の時間)。60Hz 系統では 0.0167 秒 ($50 \div 60 =$ 約 0.83 倍) です。実際には、電流がゼロ付近になったところで切れます。これは 50 万 V で高速度再開路用として適用されている CB の例です。

すことはできます⁴⁰ので、電気の通り道を変える時に使います。

電圧の大きさや電流の大きさを計るための計器もあります。

変電所にあるいろいろな機器のうちで、最も重い機器が変圧器です。変圧器で必要な電圧に変えます⁴¹。

また、雷の侵入を防止するため、避雷器⁴²も設置されています。

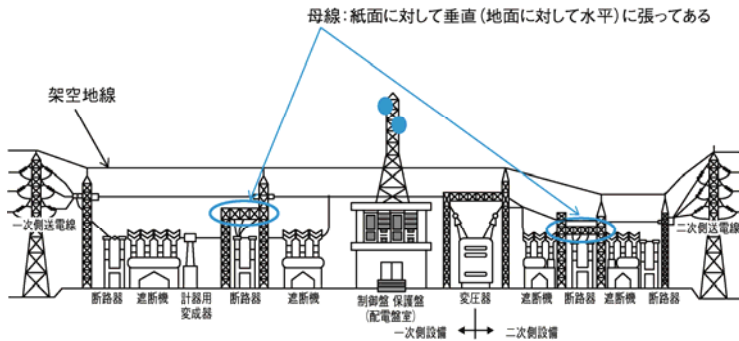


図 27 変電所の構成

変電所の機能を機器との関係で理解するために、変圧器、遮断器、母線だけに単純化して、その構成を図 28 に示します。図 27 と比べつつ見てみましょう。

A、B 発電所から送電線を介して送られてきた電気は、遮断器 (CB11、CB12) を介して左側の母線に接続されています。ですから発電所の片方が停止しても、左側の母線には電気が来ます。それはまた別の遮断器 (CB21) を介して変圧器 (TR :

40 電流を切ることのできない断路器もあります。その場合には遮断器で先に電流を流れないようにしてから、断路器の入り切りを行います。

41 コラム「変圧器の原理」(p.58)を参照。

42 Vol.7の「避雷器」を参照。

transformer) に送られ、変圧器で電圧を上げ下げして、遮断器 (CB22) を介して、右側の母線に接続されます。右側の母線からは、遮断器 (CB31、CB32) を介して、D、E 変電所へ向かう送電線に電気が送り出されます。このようにして、電気の集配機能、変圧機能が実現されています。

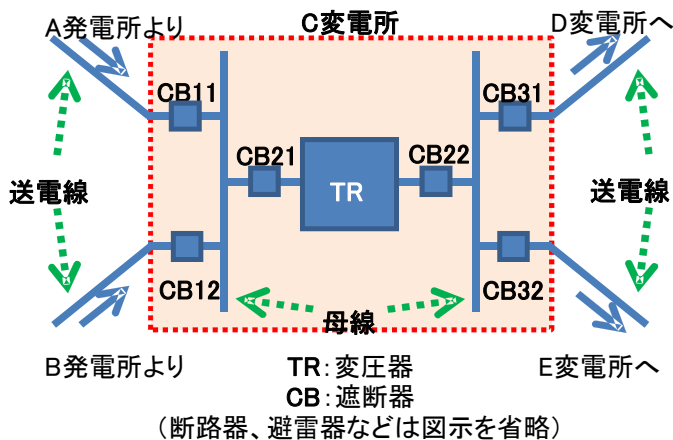


図 28 変電所の構成例

ここで皆さんは不思議に思うかも知れませんね。例えば、A 変電所からの送電線が 1 本の線で描かれていますが、三相交流なのだから 3 本の線があるのではないのだろうか。郊外の送電線の鉄塔を見ると、両側に 3 本ずつ、合計 6 本の送電線があるのではないかと。それらは図 28 には表現されていないが、どうなっているのだろうか。

そのような疑問はとても自然なものだと思います。図において、1 本の線で示された部分は、実際には三相交流の 3 本だったり、三相交流の二つ分、つまり二回線の 6 本だったりしてい

ます⁴³。しかし、変電所の集配機能や変圧機能を理解するためには、1本の線で済みます。このような1本の線で図示して機能を理解する図を、単線結線図と呼び、しばしば使われます。

屋内の設備

変電所には、図 26 には示されていない機器もいろいろあります。変電所の建物の中に配置されている保護リレーや通信設備などは、図示されていませんが、大事なものです。

保護リレーは後ろで詳しく紹介するとして、まず、通信設備です。変電所で計測された電圧、電流や潮流^{ちようりゅう}⁴⁴、遮断器の情報、保護リレーの動作情報を制御所や給電所、あるいは別の変電所に送る装置です。変電所の運転に必要な外部からの情報も受けます。これらの情報は、基幹系統ではマイクロ波や光ファイバを用いて送られています。

また、近年では変電所構内の情報をデジタル情報に変換したり、集約したりするために、光 LAN (Local Area Network) が敷設してある変電所も多くなっています。

変電所に置かれている保護・制御機器などを動かすためには所内電源が必要です。これら機器の電源には直流が使われています。このための電気は常時は電力系統からもらってきて直流に直して使いますが、停電時など電源が供給されない場合に備えて、蓄電池や非常用発電機なども置かれています。

⁴³ 2章「送電線と配電線」の「3本一組で電気を送る送電線」(p25)を参照。

⁴⁴ 潮流とは、交流の電気の流れ、通常は、有効電力と無効電力の流れを言います。もっと知りたいあなたに(その5)〈交流の電力〉(p.98)を参照。

変電所の立地と運転

変電所はどのような場所につくられているのでしょうか。農村地帯や都市郊外のような広い土地が確保しやすいところでは、屋外に建設します。高い送電線からの電線が引き込まれている施設を、皆さんも見たことがあるでしょう。あれが屋外式の変電所です。

しかし、東京や大阪のような大都市では、変電所はどのようになっているのでしょうか。大都市は大きな電力を必要としています。しかし高い建物もあるし地価も高く、架空送電線を敷設しにくいし、屋外式変電所も建設困難です。ですから、この前の章の「2. 送電線と配電線」で述べたように地下に埋設した送電線、地下ケーブルにより都市部に電力を供給します。そして変電所も地下に建設されるのです。地下式の変電所、いわゆる地下変です。この様子を図 29 に示します。

地下変は屋外式に比べて、新しい技術です。最大の問題は、狭いスペースに作るために電気絶縁が難しくなることです。屋外式であれば、空気の絶縁耐力に依存した気中絶縁方式が採用できますが、地下式ではそれが難しくなります。絶縁する力が空気より高いガス⁴⁵を封じ込めた容器の中に電力機器を配置するガス絶縁式の技術開発がなされ、地下式変電所の建設が比較的容易になりました。

⁴⁵ 窒素と酸素の混合物である通常の空気より絶縁耐力が高い SF₆(六フッ化硫黄) というガスを使っています。



図 29 屋外式変電所と地下式変電所

ガス絶縁式の電力機器はコンパクトですから、屋外式変電所であっても大都市近郊のスペースや景観上の制約が厳しいところでも使われるようになりました。中近東の砂漠地帯のような、空気中の砂塵による悪影響が懸念されるようなところでも使われます。

変電所の運転や保守のために、以前は構内に係員が 24 時間体制（1 日 3 交代体制）で常駐していました。その後、監視・制御技術や通信技術の発達により、現在では制御所などが同一の敷地にある場合などを除いて、ほとんどが無人で運転されています。

ただし、我が国の最上位電圧である 50 万 V（500kV）変電所ではその重要度などから、有人で運転されている変電所もあります。なお、77kV 以下の変電所は、配電用変電所を含めてすべて無人化されています。

変電所の役割

変電所の役割には大きく分けると以下の 3 つの役割があります。

【役割その 1】変圧機能（電圧を変える）

【役割その 2】集配機能（電気の流れを集中・分配する）

【役割その 3】保護・制御機能（電力系統の安定運転を支える）

電力システムの運転は、1 章「電力システム」内の「電力システムはどのように機能しているか」（p.6～）で述べているように、中央給電指令所（中給）を中心にした給電所や制御所で、電力システム全体を見ながらなされています。しかし、給電所や制御所には実際の機器があるわけではないので、変電所にある機器を制御して運転し、また情報も変電所から取り込んでいます。つまり、変電所のもっている機能は、給電所や制御所からの指令によってなされています。

もちろん、変電所にある機器そのものを直接保護している場合や、近くの変電所の情報だけから判断できる保護や制御は、変電所だけでなされています。

【役割その 1】変圧機能

効率的な電気の流れを作るために電圧を変える役割で、変圧器で行います。変圧器は、配送された電気の電圧を変える役目をもつ設備で、電磁誘導を利用して交流電圧を変換します。変電所では通常は 3 相交流を扱うため、3 相用のものを 1 台、あるいは単相用のものを 3 台接続して、3 相交流用として使っています。

変電所には引き出される送配電線の数や系統の信頼度、保守

停止時の停電の影響などを考慮して変圧器の台数が決定されます。

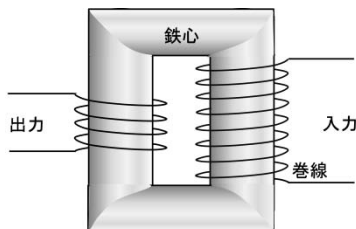
変圧器は変電所以外でも活躍しています。発電所の発電機の出口に備えられている専用の昇圧変圧器や、需要家の近くの電柱上に設けられて、電圧を家庭に届ける 100V や 200V に下げる降圧変圧器（柱上変圧器）もあります。

また、変圧器には、タップ切替え装置が付属される場合もあります。これは、使う電力が多くなると一般に電圧が下がりますので、巻線の途中にタップを設けて巻き数比（変圧比）を調整して、電力を使う側（需要側）の電圧を一定に保つものです。さらに、変圧器の巻線の一部を接地（アース）⁴⁶して、事故が発生した場合の異常電圧を抑制するようにしてあるところもあります。

⁴⁶ 変圧器の接地は、1) 電力系統に事故が発生した場合に発生する異常電圧を抑制し、電力機器の絶縁を低減する、2) 系統事故時に発生する零相電流（三相各相の電流の和で常時はゼロ）による通信線への誘導を軽減する、3) 系統事故時に保護リレーで確実に事故を検出するのに必要な電氣量を得るなどの目的で設けられ、直接接地、抵抗接地、非接地などの種類があります。

コラム：変圧器の原理

変圧器は鉄でできた鉄心に銅でできた巻線が巻いてあります。入力側と出力側では巻線の巻き数が異なっています。この巻き数の比率により、交流の電圧を変えることができます。例えば、出力側の巻き数が入力側の巻き数の半分であれば、交流電圧を半分下げることができます。



【役割その2】集配機能

発電所で作られた電気や他の変電所から送られてきた電気をいったん集め、消費地や別の変電所などに電気を配る役割です。発電所で作られた電気をそのまま消費地に送ることを考えると、その途中に落雷などがあると電気の流れが途絶え、消費地に電気が届かなくなります。このために、電気を母線という設備に集め、そこから電圧を下げる変圧器や別の送電線に電気を配ることにより、事故が発生した場合でも停電範囲を広げないような構成となっています⁴⁷。

【役割その3】保護・制御機能

電力システムの安定な運転を支える機能です。安定な運転とは、停電することなく、良質な電気（あらかじめ定められた範囲で

⁴⁷ もっと知りたいあなたに（その3）＜母線の役割＞（p.65）を参照。

一定の電圧と周波数の電気)を消費地まで途絶えることなく送ることができる状態をいいます。変電所にはその役割を担うための機能と設備があります。

その機能とは、保護機能、監視・制御機能、計測機能になります。これらの各々について述べていきます。

まず、保護機能とは、電力系統を構成する設備に発生する事故や故障⁴⁸に対し、他の健全な設備から遮断器によって電氣的に切り離すことです。切り離すことで、健全な設備を安定に保ち、また、事故や故障の継続による人々への被害を最小限にします。このための役割をもった装置が保護リレーです。保護リレーについては、次項「電力システムの制御と保護」で詳しく紹介します。

次に、監視・制御機能です。これは、変電所で計測した電圧や電流などを用いて、主に給電所でどのように制御するかを判断し、変電所に指令する機能です。詳しくは次項「電力システムの監視と保護」を参照ください。

最後に、電圧や電流、電力などを計測する機能があります。計測量は、電力系統の制御や保護のために使用したり、安定であることの確認あるいは運転記録や、翌日などこれからの運転計画作成のために使われます。この計測には電圧変成器 (VT : Voltage Transformer)、電流変成器 (CT : Current Transformer)⁴⁹などによって、非常に高い電圧や大きな電流を計測に適し

⁴⁸ 事故と故障については、p.60 脚注を参照。

⁴⁹ 送電線や配電線、母線、変圧器などの機器の電圧や電流を保護リレーや制御機器に取り込むための機器です。ここから得られた電気量は、伝送装置を介して、制御所や給電所などに送られ、電力系統の運転状態の把握などにも使われます。

た大きさに変換して、継続的あるいは定期的に計測しています。これらの情報は、計測された変電所で利用されるとともに、給電所へ送られて給電所での制御にも使われます。

電力システムの制御と保護

電力システムの保護（保護リレーって何？）

電力システムの保護とは、故障や事故⁵⁰にあった機器を電氣的に切り離し、その機器のダメージを小さくするとともに、停電範囲がなるべく狭くなるように、また故障の影響が健全な範囲に拡大しないように、健全な部分から切り離すことです。この保護は、保護リレーが故障や事故であると判断して遮断器に指令を出して遮断器で切り離すことによって行われています。

保護リレーには大きく分けて、事故除去リレーと事故波及防止リレーの2種類があります。

事故除去リレーは、送電線や配電線、母線、変圧器など機器ごとに取り付けられています。そして、電圧変成器や電流変成器あるいは別の変電所の電圧や電流などもいっしょに使って、常に、これらの機器に落雷や絶縁劣化などによって事故が発生していないかを判定しています。事故が発生したと判断すれば、直ちに、遮断器を開いて事故の箇所を切り離すように信号を出します。電圧階級が高い変電所などにある重要な機器では、事故判定がうまくいかなかったときのため、リレーが二重化されたり、バックアップのためのリレーが備えられたりしています。

⁵⁰ 故障は機器の不具合（異常）で、事故は停電が発生することと区別されることもありますが、一般にはあまり厳密には区別されずに使われます。

事故除去リレーの中で、私たちの国の電圧の高い変電所で主となって使用されているリレーの原理は、「もっと知りたいあなたに（その4）＜保護リレー技術で世界に貢献＞p.68」を参照ください。

この事故除去リレーには、油やガスが使われている変圧器やガス絶縁機器などでは、電気量だけでなく、その圧力や温度などの異常を検出するリレーもあります。

事故波及防止リレーは、事故が除去されても潮流（電気の流れ）の変化などが大きくなって電力系統の一部あるいは全体が不安定になる異常現象が発生しそうな場合や発生した場合に働きます。このリレーにより、発電機や負荷を適切に制御したり、あるいは異常がある系統と健全な系統とを切り離すことによって系統を安定化させます。このリレーは、非常に高い電圧を扱う変電所や制御所に設置されています。

電力システムの監視と制御

変電所で計測した電圧や電流などの各種電気量が、電力系統の安定運用あるいは法律上の規定値に収まっているかどうかを判断する機能が監視機能です。各種電気量が規定値から外れている場合に規定値内に収めるように機器や系統を操作し、あるいは事故時に電力系統を早期に安定側に回復させるために行われる操作などが制御機能です。すなわち電気の流れをコントロールする機能です。

制御については、電力系統を安定に保つための常時制御と、事故時の緊急対応のための事故時制御があります。

常時制御では、変電所で得られる各種電気量から、電圧や潮流（電気の流れ）が適正な値の範囲に収まっていることを監視

し、電圧に対しては最終的には各家庭での電圧が 95～107V、182～222V の範囲に収まるように、変圧器のタップの上げ下げや調相設備⁵¹の入り切りを行います。

潮流（電気の流れ）の常時制御は、潮流が安定な運転ができる限度を逸脱することが予想される場合などに行います。この制御では、変電所で計測し給電所などに集めた電圧や潮流、遮断器の開閉状態情報から、発電機の出力を指定したり、調相設備の入り切りや系統構成を変更したりします。

事故時制御では、事故があった系統を使わなくて済むように、変電所の母線の接続をあらかじめ決められたように変更することなどの制御が行われます。

変電所の同族

交直変換所と周波数変換所

変電所に似た働きをする施設の一族として、交直変換所と周波数変換所があります。両者とも電圧を上げたり下げたりすることが直接の目的ではなく、交流と直流との間の変換（交直変換）あるいは異なる周波数の交流相互の変換（周波数変換）を対象にした仕事を担っています⁵²。変換所の主役となる設備は

⁵¹ 近傍の電圧を一定範囲に保持するため、コンデンサーやリアクトルと呼ばれる電圧調整用の機器です。この機器は無効電力を調整することで力率を改善し受電側での電圧制御を行うものです。もし、電圧が高くなればリアクトルを、電圧が低くなればコンデンサーを給電所からの指令あるいはスケジュールに基づいて自動的に、あるいは変電所に運転員が出向き現地制御盤で入れたりはずしたりします。

⁵² 東日本の 50Hz 系統と西日本の 60Hz 系統をつないでいるのが、周波数変換所です。北海道と本州をつなぐには、途中に津軽海峡があるので、交流をコンバーターでいったん直流にして直流ケーブルで海峡を横断し、直流をインバーターで交流に戻して電氣的につないでいま

交直変換器です。交直変換器はもっぱら交流と直流との相互の変換を行う働きをしています。

開閉所

これら変電所や変換所のほかに、開閉所と呼ばれる同族もあります。開閉所には、変圧器や変換器は設置されていません。変電所・変換所と開閉所とは、高速道路のインターチェンジとジャンクション⁵³の関係に似ています。つまり、開閉所はさまざまな方面から集まる電気の行き先の中継ぎと、配送網における電気の円滑な配送到に必要な電圧を保持する役目をもっているのです。このほか、開閉所が長距離の配送経路の中間に設けられている場合には、そのルートの配送能力を強化する役目を果たすこともできます。

移動用変電所

変電所が災害にあつたり、機器更新などのために設備の運用を一時的に停止したりするときに、現地に仮設して変電所の容量を補う役割を果たします。移動用変電所はトレーラーや鉄道車両に変圧器などを設置して移動可能としたものです。主に電鉄用の変電所に用いられています。

す。

詳しくは、「4. 電気の性質をうまく使って届ける」の p.93「直流でつなぐのはどのような場合？」(p.93)を参照。

⁵³ インターチェンジとは複数の道路が交差する、または近接する箇所において、その道路の相互を連結するランプを設けて、これらの道路を立体的に接続する構造の施設です。ジャンクションとは、道路において、異なる方向に進もうとする複数の車両を中心とした交通を制御し、交通事故を最小限にするために設けられた施設です。ジャンクションはインターチェンジの一種でもあります。一般には、インターチェンジは高速道路と一般道との接続点で、ジャンクションは高速道路同士との接続点との意味で使われることが多い。

将来の変電所

現状の変電所の問題点

現状の変電所には、導入時点の違い、製造メーカーの違いなどにより、さまざまな種類の変電機器が存在します。さらに、制御装置や保護リレーについても同様に多くの種類が存在します。このような状態では設備の維持が難しくなり、特殊な機器を購入する必要性を生じるため、運転・維持に多額のコストが発生する可能性があります。

また、制御ケーブルが膨大であり、万一機器のいずれかに不具合や故障が発生した場合にはその取り換えは容易ではなく、既設ケーブルの上に配線が行われてしまうようなこととなります。

そのため、標準化、保守の容易性、さらに一部機器の高度化などに取り組む必要がある一方、運転・保守のコストダウンの要請があります。このように、信頼性向上とコストダウンといった相反する要請に応じていく技術として注目されているのがデジタル化技術です。

変電所にある保護制御機器のデジタル化、構内通信の LAN 化、他電気所間との通信技術の高度化によりどんどんデジタル化してきています。

変電所の将来に向けた方向性

国際的な通信プロトコルの規格を取り込み、保護・制御機器の情報をステーションバスと呼ばれる LAN を介してやり取りし、情報の共有化やより高度な機能の実現が図られています。このことは、構成機器の標準化に向かう仕組みの構築にもつながります。さらに、計器用変成器 (CT/VT) の近くで電流・電

圧信号をデジタル化し、その信号を LAN と呼ばれる光ケーブルの回線に変電所の保護、制御、監視機器で共有することにより、制御ケーブルを削減するとともに情報の共有化を目指す仕組みも検討されています。このように将来は全デジタル変電所が出現する、あるいは移行していくと考えられています。

もっと知りたいあなたに（その3）

<母線の役割>

変電所には変圧器や遮断器などの他に、必ず母線という設備があります。多くの人に変圧器などは知っていても、母線を知る人は数少ないのです。でも、母線はとても大切。その役割を説明します。

図 30 を見てください。A 発電所で起こした電気を、D 変電所経由で需要地に送っています。同じように B 発電所で起こした電気を、E 変電所経由で需要地に送っています。もし、A 発電所が止まったら、上側の需要地は停電です。B 発電所が止まったら、下側の需要地が停電です。

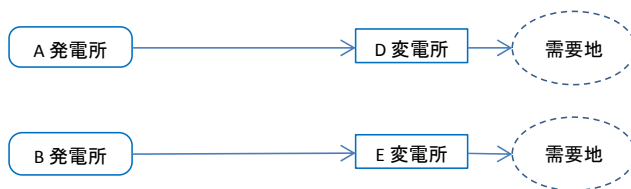


図 30 電気を需要地に送る

上側の需要地で電力需要が増えて、A 発電所だけで賄いきれなくなったらどうでしょう。A 発電所の能力に合わせ、部分的に停電させればよいのでしょうか。でもそのときに B 発電所の能力に余裕があったら、もったいない話ですね。それを融

通すれば、上側の需要地に停電なく電気を届けられるのに。そもそも、これでは発電所の設備の定期点検もできませんね。定期点検のために発電所を止めたら、停電するというのでは、話になりません。

そのための工夫が、図 31 です。A、B 発電所から遠くないところに C 変電所を作り、そこに二つの発電所の電気を集めて、その上で D、E 変電所に集めた電気を分配するのです。このようにすれば、どちらの発電所が停まっても、需要量が残った発電所の能力を超えない限り、停電を引き起こさずに済みます。

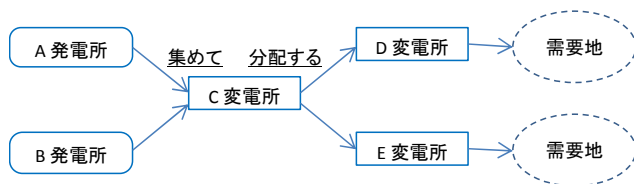


図 31 電気を集めて分配する

そのために、C 変電所では具体的にどのような工夫をするのでしょうか。それを示したのが、図 32 です。A、B 発電所から送電線を介して送られてきた電気は、遮断器 (CB) を介して母線と呼ばれる左側の線に接続されます。そして、変圧器 (TR) を通って右側の母線に接続され、そこから D、E 変電所に送り出されていきます。そうすれば A、B どちらの発電所で起こした電気も、D、E 変電所を介して二つの需要地に送ることができます。電力の供給信頼度が上がります。

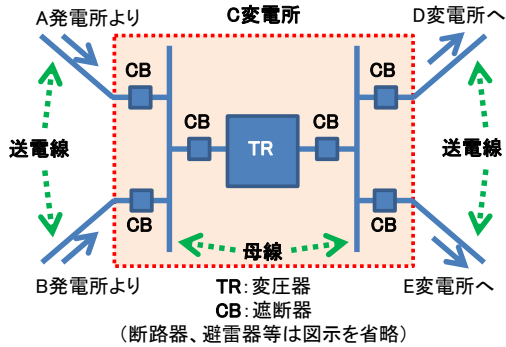


図 32 集めて分配するための母線

でも、ここで考えましょう。発電機が停まることさえ考えておけばよいのか。いえいえ、送電線だって落雷で使えなくなることがあります。遮断器も変圧器も故障することがあります。さらに母線も使えなくなることがあります。そのために、電力技術者はさまざまな工夫を実際に行っています。その代表例を、図 33 に示します。キーワードは二重化です。送電線も二重化、遮断器も二重化、母線も二重化、変圧器も二重化、そして二重化した母線間での電気のやり取りを可能にするために、図のよ

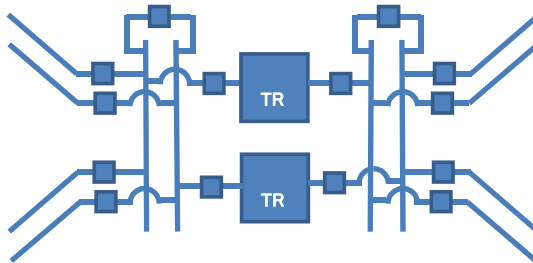


図 33 二重化による信頼性向上

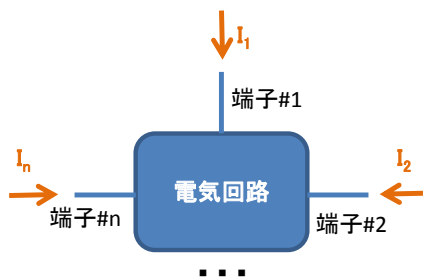
うに遮断器で母線間を接続してあります⁵⁴。

この図で、A、B 発電所などは図示してありませんが、初めの図と同一です。ですからこの図には、例えば A 発電所からの線が 2 本描かれています。実際にはこの線は三相交流の二回線送電線、すなわち $3 \times 2 = 6$ 本です。送電線の鉄塔の両側に 3 本ずつあったあの線が、このように変電所に入ってくるのです。

もっと知りたいあなたに（その 4）

<保護リレー技術で世界に貢献>

日本は第二次世界大戦に敗北した後、たいへんな努力をして世界に例を見ない戦後復興を成し遂げました。復興の過程で経済が急速に成長し、電力需要も急増しました。需要の急増に対応するためには、それに見合うだけの発電所を作り、送電線を張って、電気を需要地まで運んでこなければなりません。でもそれらの電力設備を一朝一夕に作ることはできません。費用も時間もかかるからです。それで電力システムの技術者は、不足気味の発電所や送電線を何とかやりくりして、



$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0$$

図 34 キルヒホッフの電流法則

⁵⁴ このように二重化した母線構成を二重母線構成と言います。これに対し、母線が一組しかない場合を単母線構成と言います。

なるべく停電を起こさないようにするための技術開発を懸命にやりました。その代表格が保護リレー技術です。

いろいろな保護リレー技術がありますが、ここでは日本が世界に先駆けて開発し実用化した、デジタル技術による送電線電流差動保護方式について紹介してみましょう。デジタル電流差動方式です。ここでは、差動であって作動や茶道ではありません。電流差動方式とは、ある電気設備に流入した電流は、その設備が正常である限りすべて流出するという原理を使っています。厳密に言えば、設備内で生じる電氣的な損失とか電流の計測誤差などがありますが、ここでは単純化して、入った電流はすべて出ると表現してあります。

この原理は、電気回路理論にあるキルヒホッフ (Kirchhoff) の電流法則と呼ばれる法則を使っています。図 34 において、電気回路に n 個の入出力口 (端子) があったとして、そこに入り出す電流を、流入する方向をプラス (正)、流出する方向をマイナス (負) として、すべて足し合わせると合計はゼロになるという法則です。

図 34 の「電気回路」が、変電所に設置された変圧器だったとします。変圧器の入口と出口の電流を、変圧器に流れ込む電流を正 (プラス)、流れ出す方向をマイナス (負) として足し合わせれば、変圧器が正常である限り、加算結果はゼロになるはずですが、しかし、もし変圧器の内部で、絶縁不良などの不具合が起きて流入した電流がその不具合点からどこかに漏れ出たとすると、入口と出口の電流を足し合わせた結果はゼロにはならず、漏れ出した電流の大きさに相当する値になります。従って、不具合の有無を正確に判定できることになります。これが

電流差動保護方式です。ここでは保護対象を変圧器としているので、変圧器電流差動保護方式と呼ばれますが、対象

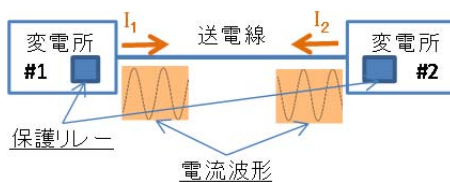


図 35 送電線の電流差動保護

を発電機にすれば、発電機電流差動保護方式になります。

では、保護の対象を図 35 のような送電線にしたらどうなるでしょうか。すなわち送電線電流差動保護方式を実現しようとしたら、どうなるのでしょうか。その場合でも、原理は同じで、送電線の両端で、送電線に流れ込む電流と、送電線から変電所などに流れ出す電流を、上のように方向を考えて足し合わせればゼロになるはずですが、もし落雷などで送電線のどこかに事故が起こり、ショートしたりして、電流が別の場所に流れ出していれば、送電線両端の電流を足し合わせてもゼロにはなりませんので、事故が起こっていることが分かるわけです。ただ、送電線では、変圧器や発電機にはなかった問題があります。

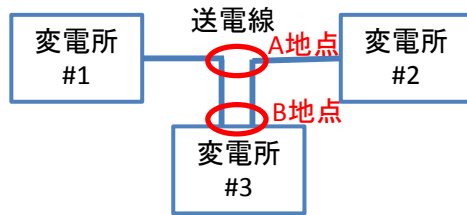
変圧器や発電機であれば、電流の出入り口（端子）はすべて一か所、すなわち変電所とか発電所の中にあります。その電流信号を集めてくるのは容易です。

でも送電線だと、両端の変電所の間には数 10 キロから 100 キロメートル、場合によるともっと遠い距離があります。そのように遠く離れた送電線両端の端子の電流信号を伝送して一か所に集めた上で電流差動演算する必要があります。電流信号は時々刻々その値が変化する交流波形です。その波形の信号伝

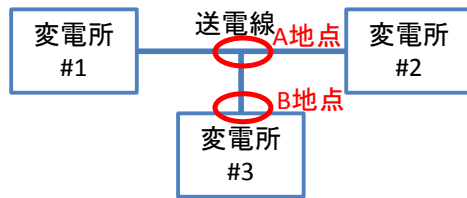
送が必要になります。

そのためには、遠く離れた点であっても同じ時刻の電流を測る必要があります。また、計測した量をデジタル化するためや信号伝送にも時間的な遅れが存在します⁵⁵。また、電流の波形を十分に元に戻せるだけのサンプリング間隔⁵⁶を確保しなければなりません。日本の保護リレー技術者は、これらの要件を満たすように、10年以上の研究開発の結果、1980年に世界で初めて実用化に成功

しました。それがデジタル方式による送電線電流差動保護方式です。これにより、送電線事故の検出能力が飛躍的に高まりました。例えば、送電線の下の木が成長して、わずかに送電線に接触し、小さな電流がそこから漏れ出てしま



(a) 2端子送電線の組み合わせ



(b) 3端子送電線

図 36 変電所間の送電線

⁵⁵ これらの時間遅れの合計が $20\mu\text{秒}$ (0.00002 秒) 以下であれば、同時とみなされます。

⁵⁶ 電流の1サイクルの波形を最低でも12分割してデジタル化します。50Hzで12分割する場合には、 $20\text{m秒}/12$ (0.0017 秒) ごとに電流波形をサンプリングして、アナログ・デジタル変換器でデジタル信号に符号化することになります。

うような、従来方式では検出が難しかった事故も、高感度で検出できるようになりました⁵⁷。

図 35 では、送電線は 2 端子で表示されていますが、原理的に 3 端子以上になっても問題なく高い正確さで送電線の異常（事故）を検出できます。これは従来の保護方式では実現できなかった特徴です。3 か所の変電所を送電線で結ぶ必要があるときに、図 36(a)図のような 2 端子送電線の組み合わせではなく、(b)図のような 3 端子送電線で結べるのですから、建設費は大幅に安くなりました。つまり、3 端子送電線にすることで、図 36 中の A B 地点間の送電線の組数が半分になります。また変電所#3 での遮断器などの機器の数も半分になりますので、建設費の削減となるわけです。

この保護リレー方式は、今では国内外で広く用いられるようになっており、日本のメーカーだけでなく海外のメーカーも装置を製作するようになっていきます。

⁵⁷ 送電線の電流差動保護は、デジタル方式に先駆けて、アナログ方式が実用化されています。いわゆる FM 電流差動保護リレーです。これも日本が世界に先駆けて実用化しました。しかし、多様な保護ニーズへの対応や、装置が自分で自分が健全な状態にあるかを監視点検する機能実現の優位性などのため、現在ではデジタル方式一本になっています。

4 電気の性質をうまく使って届ける

これまでの各章で、電気は発電所で作られ、送電線や配電線を通して、変圧器で電圧を上げたり下げたりして、電気が使われるところへ届けられることが紹介されました。ここでは、電気を届けるために、電気の性質をうまく使っていることを紹介します。

発電所で回っている発電機により作られる電気は交流の電気ですが、太陽光発電では直流で発電されます。しかし電気をたくさんのところへ配るには交流が適しているため、直流を交流に変えて配られているわけです。送るのに交流が適している理由は、効率面から考えると電力損失⁵⁸の理由もあげられます。送電の際、電気の一部は熱になって失われてしまうので、電流を減らして送る必要があります。つまり、少ない電流で効率的に送るには電圧を高くする必要があります。直流だと変圧器を使えませんが、交流だと変圧器を用いて比較的容易に電圧を上げ下げできます。この事情は、世界のどこでも同じです。このため、多数派である、交流で直接、発電する発電機の特性について紹介します。

この発電機にも 2 種類の方式がありますが、「同期発電機」という発電機を使って発電された電気について紹介します。もう一つの発電機の種類は「誘導発電機」と言いますが、数百 kW 以下の小さな発電機に使われて、全体の 1%程度以下の発

⁵⁸ 抵抗に電流が流れると、電流の二乗に比例した損失が発生します。電力は電圧と電流の掛け算になりますので、同じ電力を送るには電圧を高くして電流を小さくするのが損失を減らすのに有効です。脚注 34 (p.47) および、Vol.1 の「電気を送る」(p.12) を参照。

電しかしていませんので、ここでは省略します。ただ、電気になってしまうと、どのようにして発電されたかは関係がなくなります。しかし、これから紹介する電気の性質をうまく説明するには、同期発電機との関係で説明するのが分かりやすくなります。

交流の電気とは

交流の電気の性質を考える前に、交流の電気はどのようなものかを復習しましょう。

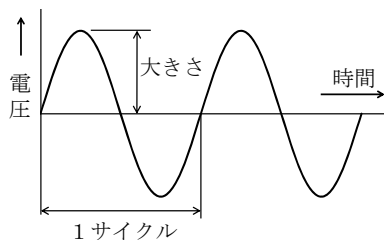


図 37 正弦波になる交流電圧波形

交流の電気の発生

日本の電力は、交流で送られています。電力システムの電圧は1秒間に東日本で50回、西日本で60回、上昇と下降を繰り返します。これを、電力システムは周波数50Hz、60Hzの交流で動いていると言います。電力システムに組み込まれている発電機も交流モーターも同じ周波数で回って（動いて）いるのです。発電機の例を図38から図40に示します。発電機には、毎分1,500回転から3,600回転する高速回転のタービン⁵⁹発電

⁵⁹ タービン（英語：turbine）とは、流体が持っているエネルギーを有用な機械的動力に変換する回転式の原動機の総称です。蒸気や水な

機と、回転数がこれより低い水車発電機があります。発電機はこれらの図にあるように、大きく言えば、電気を発生する静止部にある固定子（静止部分）と、電磁石の回転子（回転する部分）から構成されています。



図 38 水車発電機の例

〔固定子（電気を発生する静止している部分）の中に回転子（電磁石）が挿入されているところ〕

（出典：中部電力株式会社 HP「でんきのあした 03」）



図 39 タービン発電機の例

〔手前がタービン発電機で、奥の上にパイプが乗っているのがタービン〕

（画像提供：三菱日立パワーシステムズ株式会社）

どの各種の流体を回転体のまわりに備え付けた数枚ないし数十枚の羽根や翼に当てて高速回転させるものです。



図 40 タービン発電機の回転子例

〔電磁石になる部分。回転数が高いので直径に比べて長さが長い〕

(画像提供：三菱日立パワーシステムズ株式会社)

電力システムの重要な特徴の一つに、電力の需要量が増えたら（減ったら）、そのとき同時に発電力をそれに見合せて増やす（減らす）必要があることが挙げられます。いわゆる「需給バランス⁶⁰」をとることです。このため、電力需要の急増が見込まれるので、止まっていた発電機を回してそれを電力システムにつなぎこむことにしたとしましょう（これを「発電機を系

⁶⁰ 電力の意味では、電力システムも電気回路なので、電氣的損失を無視すれば全体の発電電力と消費電力（需要）は常に同じになっています。発電機を回す力（これをここでは「発電力」と言っています）が発電電力より小さければ、回転エネルギーを放出して回転数が減少し、周波数が下がっていきます。ただし、部分系統で考えると、その部分系統の消費電力が増加した分は、部分系統内の発電機からも供給されますが、部分系統の外の系統からも供給されます。このため、部分系統の中だけでの発電電力と消費電力のバランスを見ると、発電電力が不足しています。部分系統の「需給バランス」とは、部分系統の中だけで発電電力と消費電力のバランスをとることを言います。これがいわゆる「同時同量」という概念につながることにあります。なお、太陽光発電など回転体のない発電システムでは、消費電力が増加しても発電電力は増加しません。

統に併入する」と言います)。

電力システムの周波数は 50Hz (60Hz) ですので発電機を 50Hz (60Hz) に相当する回転数で回して電圧の周波数を 50Hz (60Hz) にします⁶¹。さらに、発電機の出口の電圧の大きさを電力システム側と同じにして、その間のスイッチ (遮断器) を閉じて、併入すればよいのでしょうか。いや、ちょっと待ってください。電力システム側の電圧も発電機側の電圧も交流ですので、上昇と下降を繰り返しています。電力システム側の電圧がプラスの最高値にあつて、発電機側の電圧がマイナスの最高値にあるときに、遮断器を閉じたらどうなるでしょう……。周波数と電圧の大きさを揃えるだけでなく、電圧波形のずれがないようにして (「電圧の位相を合わせて」と言います)、発電機を系統に併入する必要があります。

実際には、50Hz (60Hz) の電力システムに対して、併入しようとする発電機の電圧の周波数を 50.05Hz (60.05Hz) 程度で回します。両方の電圧の位相の差⁶²を検出する回転式のメーターを用意しておくと、システム側と発電機側には 0.05Hz の差がありますから、メーターの針は 1 秒間に 0.05 回転、すなわち 20 秒間で 1 回転します。その針がゼロになる (両者の電圧位相がそろ) タイミングを見計らつて、遮断器を閉じ、発電

61 発電機の N 極と S 極の数は 1 対とは限らず、多数の対になっていることがあります。対の数が多くなれば、回転数は低くてもよくなりますが、対の数に反比例した回転数にする必要があります。図 38 の水車発電機の回転子では、少し出っ張っている部分が磁石の N 極あるいは S 極になりますので対の数がたくさんあることがわかります。

62 電圧が一番大きくなる山と山、小さくなる谷と谷の時間的な差のことです。

機を系統に併入⁶³するのです。

併入前の発電機は、システム側の周波数よりわずかに速い周波数（回転スピード）で回っていましたが、併入後にはシステム側の動きに引きずられて、全く同じ周波数で回るようになります。これを同期化力が働いて、同じスピードで回るようになりますと言います。むかし、電力会社に勤めた技術者の中には、新人研修の一環でこの発電機併入操作を実際に発電所で実習する人もいました。タイミングを間違えると、大きくて重い、そしてたいへん高価な発電機を壊してしまう操作ですから、緊張して足が震えたそうです。いまは自動制御技術の進歩で、ほとんどの発電機では機械が自動的に系統併入操作を行います。

では、実際に発電機の動きについてみていきましょう。交流の電気は、図 41 に示すような（同期）発電機で作られます。赤で示した導体（通常は銅線を束ねて数 cm×数 cm の角材のようにしたもの）が埋め込まれた円筒（固定子）の中を磁石（回転子）が回転します。この磁石の回転軸は、蒸気や水の力で回されるタービンにつながれていて、同じように回転しています。磁石が回転すると、固定子の導体に電圧が図のように発生して、電気を取り出すことができます。発電機は、コイルの中で磁石を出し入れすると電気が発生する、電磁誘導⁶⁴という現象を利用しています。

63 発電機の系統への併入時には、周波数差、電圧の大きさの差、電圧の位相の差が小さくなっている必要があります。

64 イギリスの物理学者マイケル・ファラデーによって発見されました。

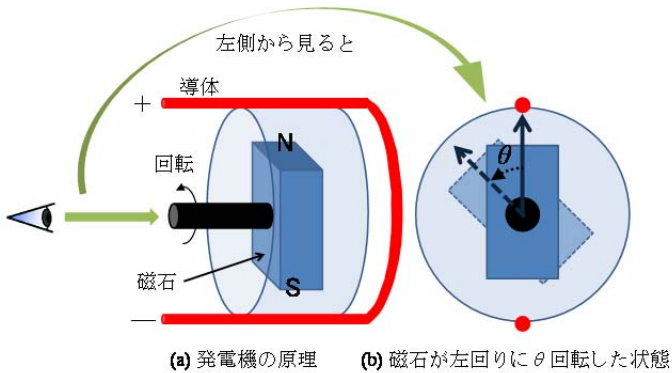
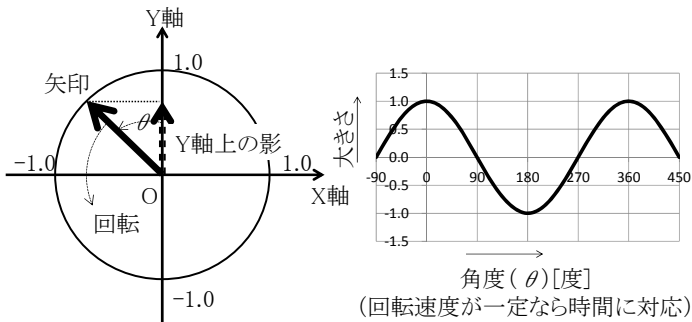


図 41 発電機（同期発電機）の簡単な原理

交流の電気は大きさが変化する

この磁石が図 41(b)のように回転し、ある角度 θ ^{シータ} になったときのことを考えます。すると、発生する電圧の大きさはその角度に応じて小さくなります。これを図 42 で示しますと、磁石が図 42(a)の、実線の矢印のように回転していると考えます。



(a) 矢印が左回りに回転 (b) Y軸上の影の角度による変化

図 42 交流の電気とは

磁石の N 極が上を向いたときが、矢印が上を向いたときに相当して、電圧が最も大きくなります。この矢印がさらに回転して、例えば角度 θ が 45 度になると、その時の電圧は、矢印が図 42(a)の Y 軸に写る影（左あるいは右から X 軸に平行な光をあてて、Y 軸に写る影）の大きさになります。

交流の電気は波のように変化する

この変化の動きは、横軸に角度をとって Y 軸に写る影の大きさを描くと、図 42(b)のようになります。プラスから同じ大きさのマイナスまで波のように周期的に変化しています。この横軸は、矢印の回転速度が一定ならば、時間と考えることができます。波の一番高い時間から次の波の一番高い時間までを一周期と言います⁶⁵。また、この波が 1 秒間に何回あるかが周波数で、その単位は Hz です。例えば、日本の東日本の電気の周波数は 50Hz です。周期は $1 \text{ (秒)} \div 50 = 0.02 \text{ 秒}$ になります。

以上のように、交流の波形は波のような動きになります。

発電機が 2 台のとき一緒に回っているか？

同期とは？

これまでは、発電機が一台の場合を示してきましたが、実際には多くの（同期）発電機が電線でつながれていると、同じように回って発電しています。このときの発電機の動きを説明するのに、発電機の種類を表す名前にある「同期」の概念が重要になります。この「同期」とは英語では、synchronous（同期

⁶⁵ 同じ波形が繰り返しているので、周期を見る点は必ずしも最高点でなくても構いません。例えば、横軸（時間軸）をマイナスからプラスによぎる交点に着目してもよいのです。

の、同期している)、synchronize (同期する)と言います。水泳のシンクロナイズドスイミング (Synchronized swimming) では、音楽に合わせて (音楽に同期して) 泳ぐことを言いますが、同期の意味は共通です。また、図 43 のように大縄跳びをしているときを考えると、みんながタイミングを合わせて跳ばないと大縄跳びは続きません。同期が重要なことの一例です。このとき、掛け声や跳んでいる隣の人の様子を見たり感じたりして、タイミングを合わせて跳ぶことが可能になります。

発電機の場合の同期とは、お互いの発電機の回転に合わせてお互いが回転していることを言います。タイミングを合わせるには、音楽や掛け声ではなく、つながれている電線を伝わる電氣的な力によります。この力は同期化力とよばれ、発電する電気の角度の差が大きくなるとこの力も大きくなってお互いを引き戻すことによって同期が保たれています。この同期の概念について、もう少し詳しくこれから紹介していきましょう。



図 43 大縄跳びでの同期の例

「同期」の概念をタンデム型の自転車でたとえる

この「同期」の概念についてたとえを交えて紹介しましょう。まず、図 44 に示すような 2 人乗りのタンデム型の自転車を、頭の中で思い浮かべてください。

チェーンがゴム紐の場合

実際の自転車ではチェーンホイール間はチェーンで繋がれていますが、ここでは「ゴム紐」で繋がれているとします。「ゴム紐」を考えるのは、先に紹介した同期化力とある程度似た性質を表すことができるためです。

そうしますと、前の人も後ろの人も同じ力で漕いでいるときに比べて、前の人が一生懸命にペダルを漕ぐと、この上側のゴム紐は伸びる（逆に下側のゴム紐は縮まる）ことになります。

これによって、
図 45 のように、
前の人のクランクシャフト（ペダルから力をチェーンホイールへ伝える棒）が、
後ろのクランクシャフトに比べて角度が進むこと
になります。

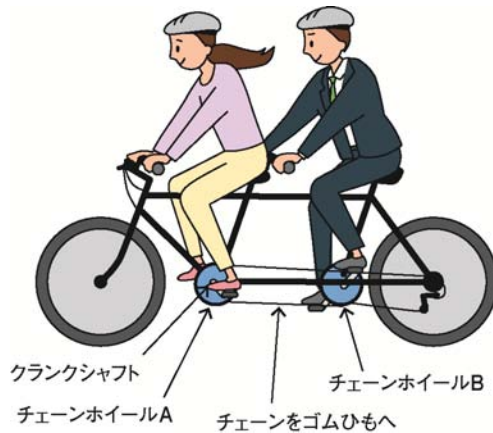
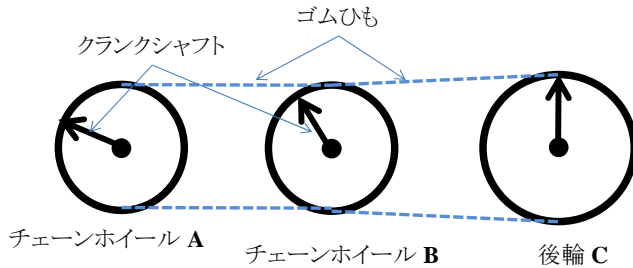


図 44 発電機（同期発電機）の簡単な原理
（タンデム自転車によるたとえ）



前の人(A)と後ろの人(B)が同じ力で自転車を漕げば、
上側のゴム紐が伸びて、AのクランクシャフトはBより角度が進む

図 45 タンデム自転車のチェーンホイールと後輪の図

二人が同じ力で漕ぐと

このチェーンホイール A と B、実際に自転車を動かしている後輪の中心を合わせて描くと、図 46 のようになります。ここで、止まっているときに真上を向いている後輪のスポークにしるしを付け、またその時に A と B のクランクシャフトも真上を向いているように調整しておきます。その後、自転車を A と B の二人ともに同じ力で漕いで走っている状態を考えます。後輪のしるしを付けたスポークが真上を向いた瞬間の A と B のクランクシャフトの位置は、図 46 のようになっています。これをもう少し詳しく説明します。

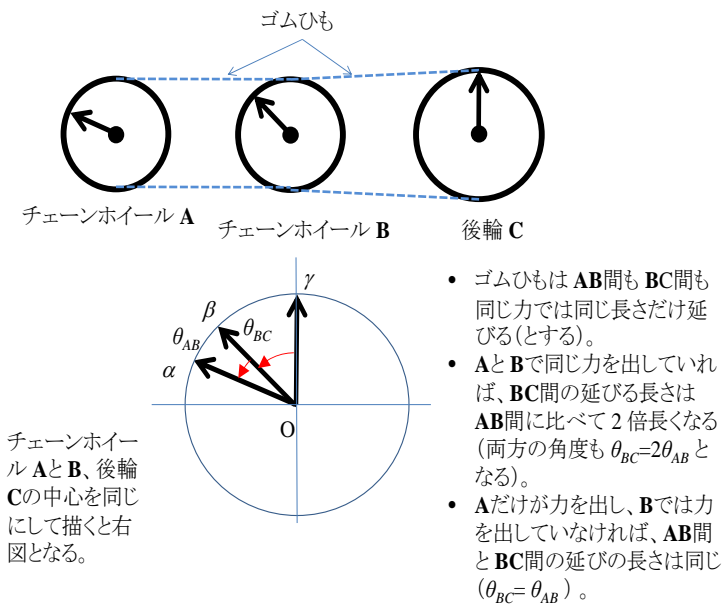


図 46 チェーンホイールと後輪の中心を同じにして描くと

まず、チェーンホイール A、B と後輪のしるしのついたスポークを表す、それぞれの矢印の先端を、 α 、 β 、 γ とします。A の人は力を出していますので、その力に応じてチェーンホイール A、B 間の上側のゴム紐が伸びます。その伸びに対応した角度 (α と β の間の角度) を θ_{AB} とします。B の人も A と同じだけの力で漕いでいけば、後輪 (C) を動かす力は 2 倍になりますので、チェーンホイール B と後輪間の上側のゴム紐は 2 倍だけ伸びます。このため、 β と γ 間の角度 θ_{BC} は θ_{AB} の 2 倍となります。このように、二人が同じ力でペダルを漕ぐと、後ろの人のチェーンホイールは後輪よりも少しだけ進んだ角度で、前の人のチェーンホイールはさらに進んだ角度で回っています。

後ろの人が漕ぐのをやめると

もし後ろの人 B がペダルを漕ぐのを全くやめてしまうと、チェーンホイール B からは力が加わりませんので、チェーンホイール A と B 間、チェーンホイール B と後輪間でのゴム紐で引っ張る力は同じになって、 θ_{AB} と θ_{BC} は同じとなります。つまり、前の人と後ろの人のチェーンホイールの角度は同じで回っています。このように、前の人と後ろの人の漕ぐ力が違っていても、力の大きさに応じてゴム紐の長さが自動的に変わって、チェーンホイール A と B の間の角度が調節されて、自転車を進めるのに協力し合っていることとなります。

発電機の場合には？

発電機の場合も同じで、発電機を回す力（水や蒸気でタービン回す力）に応じて、ゴム紐に対応した送電線に流れる電気の大きさで、発電機同士が自動的に協力し合って発電しています。

周波数との対応は？

また、タンデム自転車の例では、チェーンホイールの回転速度（これは自転車のスピードに比例しています）が周波数に対応します。要するに、1 分間や 1 秒間に何回回転しているかが周波数ということになります。この周波数の考え方から、発電機同士の回転速度もほとんど同じになっていることが、お分かりいただけたでしょうか？

漕ぐ力が突然変わったら？

もちろん、自転車からも分かることですが、例えば前の人 A が突然一生懸命に漕ぎだして大きな力を出すと、ゴム紐が伸びるのでチェーンホイール A の回転速度が一時的に速くなった

りしますが、しばらく経つと A と B の回転速度も同じになります。これと同様に、ある発電機を回す力が大きくなると一時的にその回転速度はわずかに速くなりますが、すぐに（数秒たつと）同じ回転速度になります。ただ、ゴム紐と同じような性質をもっていますので、同じ回転速度になるまでに振動を繰り返すこともあります⁶⁶。

上り坂にさしかかると？

自転車が上り坂にさしかかると、同じ力で漕いでいるとスピードが落ちてしまいます。スピードを同じに保つには、漕ぐ力を増やす必要があります。発電機の場合には、私たちが電気をたくさん使くと、坂道を上ると同じようなことになるので、タービンを回す力が同じでは回転速度が遅くなってしまいます。つまり、周波数が低下してしまいます。このようなときには、水力発電では水の使用量を増やし、火力発電では燃料をたくさん燃やして蒸気をたくさん作り、タービンを回す力を大きくして、回転速度が一定になるようにします。

発電機同士を伝える力は？

ここまでは、タンデム自転車を例に、そのチェーンをゴム紐に代えて、発電機同士の結びつき方について紹介してきました。この場合、ゴム紐の性質として、引っ張る力が強くなるとそれに比例して延びの長さも長くなります。その力がさらに大きくなるとゴム紐は切れてしまいます。

しかし、交流の電気で繋がっている発電機同士では、その間

⁶⁶ このため、交流でつながれていても場所ごとに周波数はわずかに違っていることがあります。p.92、93の脚注 69、70 も参照。

を繋ぐ力はずっとややこしくなっています。ここではまず、発電機が2台ある場合について、自転車のたとえを続けます。そのため、タンデム自転車ではなく、図47のような、エクササイズ用自転車の並列運転を考えてみましょう。ただ、この自転車ではBの車輪にだけ負荷装置が取り付けられており、回すのに力が必要になっています（負荷装置の値段が高いのでひとつしかない？）。自転車Aでもこの負荷装置が使えるように、車輪Aと車輪Bが連結されていますが、この連結に図48に示すように、何本かのゴム紐が使われているとします。

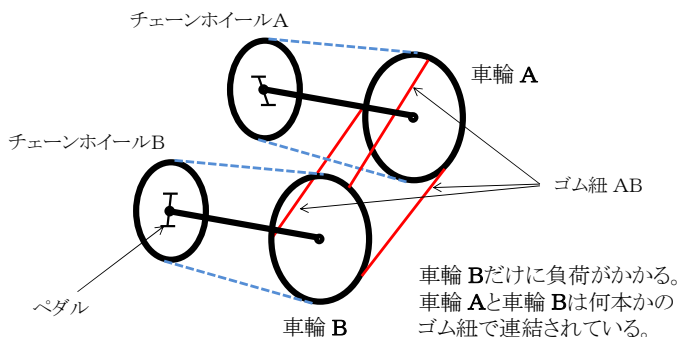


図47 エクササイズ自転車の並列運転

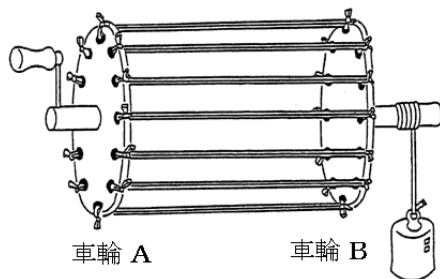


図48 車輪Aと車輪Bをつなぐゴム紐のイメージ
 (画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

ねじれが大きくなると

自転車 A と B にそれぞれ人が乗ってペダルを漕ぐと、自転車 A の人が漕ぐ力は、車輪 A が車輪 B に対して少しねじれることで伝わります。このねじれと伝わる力の関係は図 49 のように、ねじれがあるところまでは、ねじれが大きくなるにつれて大きくなります。しかし、ねじれの大きさがあるところを超えると、伝わる力は段々と小さくなり、最後はほとんど伝わらなくなってしまいます。

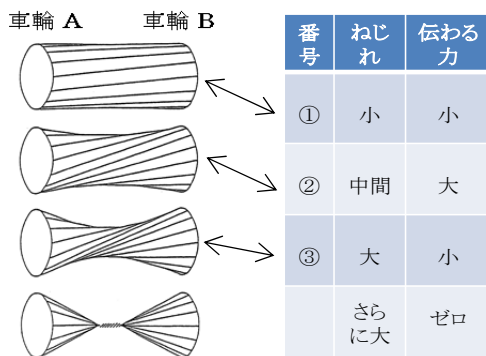


図 49 車輪 A と車輪 B 間のねじれと伝わる力の関係
(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

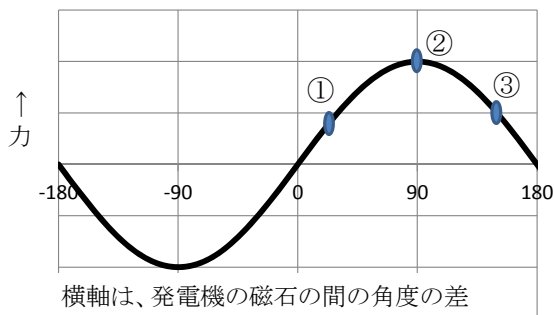


図 50 発電機の間伝わる力

発電機の間働く力

実際に発電機の間働く力は、これより少し複雑で、2台の発電機の磁石(図41)の間の角度の差が変わると、図50のように変化します。図50には、図49のねじれの大きさに対応した大まかな場所を、番号①、②、③として示しています。

図49の発電機の間伝わる力の関係は、図42(b)の交流の波の形と同じです。実は、ゴム紐のねじれと伝わる力の関係は、角度が0度から180度までの間でも、発電機の場合よりもさらに複雑になっていますが、あるところまでのねじれまでは、ねじれるほど伝わる力が大きくなり、それよりもねじれが大きくなると伝わる力が小さくなるという性質は同じです。発電機間の場合、電気だから、この関係が比較的きれいな形になっているとも言えます⁶⁷。

このように、横軸と縦軸の量との関係が、素直な比例関係になっていないことを非線形な関係と言います。これに対し、発電機同士に働く力やタンデム自転車の例であっても、角度の差が小さい場合には、伝わる力の大きさとお互いの角度の差は比例関係になっています。これを線形の関係と言います。非線形な関係の場合には、どのように動くかなどの予測や計算が難しくなります。

⁶⁷ ゴム紐のねじれと力の関係は、図50より複雑です。ここでは、大体の対応関係を示しています。また、ゴム紐のねじれが大きくなりすぎると力は伝わらなくなりますが、発電機間では、図50のように反発の力が働きます。もう少し厳密に書きますと、力は $\sin \theta$ と正弦波関数で表現されますので、 $360 \times n + 180 < \theta < 360 \times (n+1)$ (n は整数)の間は反発力が働きます。

なお、ここでの θ は電氣的な角度のことですので、送電線が機械的にねじれるわけではありません。

発電機同士を伝える力を大きくするには？

発電機の間には伝わる力は、図 50 のようにあるところ(90度)で最大になります。この力をさらに大きくするにはどうしたらよいでしょうか？ それには四つの方法があります。

四つの方法

図 47 のエクササイズ自転車の並列運転でのゴム紐でつないで力を伝えている場合を考えると、

- ① ゴム紐の数を増やす
- ② ゴム紐を強くする、太くする
- ③ 二つの車輪の間の長さを縮める
(ゴム紐の長さも短くする)
- ④ 車輪(直径)を大きくする

の方法があると推測されます。それぞれについて詳しく説明していきましょう。

- ① ゴム紐の数を増やす

電線を増やすことに対応して、最大の力を大きくします。

- ② ゴム紐を太くする

送電線の太さを太くすることに対応しますが、実は交流の電気の場合はほとんど影響がありません。この最大の力が電気抵抗で決まっていれば、電線を太くすれば抵抗も減りますので、力は大きくできます。しかし、交流の電気の場合は、最大の力は電線の抵抗ではなく、インダクタンスで決まっています。インダクタンスというのは、電線をコイルのように巻くと、電気の変化を妨げるような性質を持ちますが、その性質の強さを言います。電線の場合、その距離も長くなりますので、コイルのように

巻かれているわけではありませんが、このインダクタンスの性質が強まっているのです。

③ ゴム紐を短くする

図 51 のように、二つの車輪の間の長さを縮めれば、確かに伝えることのできる最大の力を、大きくすることができます。これは、電気の場合も同じです。しかし、地理上の距離を変えるわけにはいきませんので、この方法を採用することは不可能です。

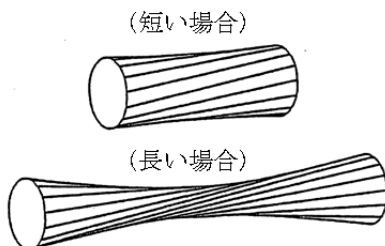


図 51 車輪 A と車輪 B 間の長さが変わる場合

(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

④ 車輪（直径）を大きくする

車輪の直径を片方だけでも大きくすれば、伝える力を大きくできます。この方法は電気の場合にも採用できます。それは、電圧の大きさを高くすることです。電圧の大きさを大きく変えるには、変圧器を使います。遠くの発電所から電気を送る場合に、変圧器を使って、数万 V の電圧を数十万 V の電圧まで高くして送るのは、このためです。また、車輪を大きくする他の方法は、発電機の磁石の強さを強くすることです。変圧器のように大幅に電圧を変えることはできませんが、少しは調節することができます。発電機の磁石は、普通は永久磁石ではなく電磁石なので、電磁石に流す電流を強くすれば、電磁石の強さも

強くなり、発電機で発電する電圧も高くなります。

無効電力⁶⁸の働きとは

この電圧を高くする能力をもった電力を「無効電力」と言います。無駄な電気という意味ではなく、このように大切な能力をもっています。これに対し、ゴム紐を通して伝える力に相当する電力を「有効電力」と言います。実際に仕事をするのは「有効電力」ですが、「無効電力」はスムーズに仕事をさせるのにどうしても必要となってくる電力です。

有効電力の単位は W(ワット)、無効電力の単位は var(ヴァール)と言いますが、日常的には W だけが使われています。この有効電力を何時間分使ったかを表すのが、Wh(ワットアワー)で、電気料金算定の基礎になります。

多数の発電機がつながれている場合は？

日本や海外でも、たいいていのところには電気が通じています。この電気は多数の発電機で発電され、お互いが電線でつながりあっています。このつながり方は、一か所から一か所を見れば、これまで紹介したような、発電機同士を結び付けている交流の電気の力で結びついているわけです。

このようなわけで、交流の電気につながっているところでは、周波数はほとんど同じになっています⁶⁹。

⁶⁸ もっと知りたいあなたに(その5) <交流の電力> (p.98) を参照。

⁶⁹ 「漕ぐ力が突然変わったら？」 (p.85) でタンデム自転車の例で示したように、ある発電機の発電する力が突然増加すると、その発電機はちょっと速く回りだします。そうするとほかの発電機に対する角度が大きくなってきますので、電気出力も大きくなって回転速度が落ちてきます。このようにして振動しながらだんだんと新しい角度に落ち着きます。周波数は近くの発電機の回転数で大体は決まるので、周波

「同期」の働きと「自己制御性」

また、「発電機が2台のとき一緒に回っているか？」で説明したように、周波数が下がったので、どこかの発電機の燃料を増やして出力を増やしたとすると、交流の電気の「同期」という性質から、自動的に発電機同士で調整し合い、新しい状態に落ち着きます。これを「自己制御性」と言います。

周波数が違う場合は？

日本の場合、東日本と西日本では周波数が違い50Hzと60Hzになっています。このように周波数が違う場合には、発電機同士が一緒に回ることができません（同期がとれません）。このため、いったん片方の交流を直流にして、その直流を他方の周波数に合う交流にしてつなぐ必要があります。

直流でつなぐのはどのような場合？

このように周波数が異なれば、いったん直流にしてつなぐ必要がありますが、このほかにも同じ周波数同士でも直流の利点をいかしてつなぐ場合もあります。例えば、北海道と本州の場合には、津軽海峡がありますので、海底ケーブルの連系線を使って、直流の電気をつないでいます。このため、北海道と本州では連系線の直流の電気を制御して50Hzの周波数にしようとしています⁷⁰。日本では他にも、四国と本州をつなぐ二ルートの送電

数も場所によって少しだけ異なってきます。ただし、数十秒間の平均をとれば、電線で交流でつながっている限り同じ周波数となります。
⁷⁰ ここで周波数が異なっているというのは、前のページで、交流でつながっている場合に場所によってわずかに周波数が異なっていることがあるのとは意味が違います。直流だけでつながっている場合には、両方の系統の周波数を同じにしようとして直流の電気を制御しても、いろいろな制約から常に一緒にすることは難しいためです。

線の片方のルートや、北陸と中部をつなぐところにも使われています。基本は交流ですが、直流には交流では得られない利点があり、これを上手く利用しているわけです⁷¹。

雷が落ちると？

平穏な一日と、雷などによって停電が起こるような場合の、電気の伝わり方の違いについて紹介します。

平穏な一日での電気の伝わり方

平穏な一日では、使う電気の量が時間によって増えたり減ったりしますが、大きく変わりそうな場合には、発電する発電機の数を増やしたり減らしたりします。これは、運転員が電気の使用量の予測をして、調整しているわけです。さらに、自動的な制御で周波数を一定にするようにもしています。個々の発電機では、自分の周波数を見ながら、周波数が下がればたくさん発電するようにしています。

このように、つねに発電機の発電量や、電気の流れ方は変わっていますが、上の「同期」の働きによる「自己制御性」によって、勝手に新しいバランスをとっています。

⁷¹ 直流でつなぐ主な利点は次の通りです。まず、長い海峡があると送電鉄塔を建てられないので海底ケーブルを使います。ケーブルでは、交流の電気の場合、余計な電流（充電電流と言います）がたくさん流れますが、直流では流れません。次に、直流ですと、交流のような「同期」による「自己制御性」が働きません。これは交流の利点の一つでもあります。系統が複雑になると電気の流れが複雑になってしまいます。直流の場合は、制御で電気の流れを決められるので、単純になります。また、両方の系統の周波数が異なっても直流を介すれば電気をつなぐことができます。最後に、絶縁がちょっと楽になります。直流の短所は、両側に直流と交流の変換装置が必要になってコストがかかることや変圧器を使えないこと、直流を遮断できる遮断器がないことなどです。

発電が足りない場合

しかし、発電機の数や燃料が足りなくて、発電できる電気の量が不足しますと、周波数が低下してしまいますので、発電機が運転できなくなり停電となってしまいます。このようなことを防ぐためには、東日本大震災の後にしばらく実行された計画（輪番）停電が必要になります。また、このような状態には、送電線が使えなくなり、ある部分が切り離されてしまった場合にも発生することがあります。

落雷などで送電線が使えなくなる場合

発電機の数や燃料が十分であっても、途中の送電線などで送ることのできる電気の量が制限される場合にも停電が発生することがあります。例えば、送電線に雷などが落ちると、ショートして

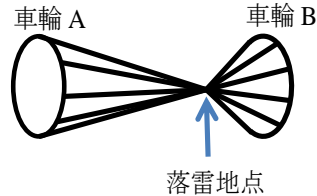


図 52 線路の途中に落雷があつてショートした状態

しまいます。これはちょうど図 52 のようにゴム紐の途中を突然ギュッと縮めてしまうことに相当します。このような状態をいつまでも続けておくことはできませんので、落雷があつた送電線はスイッチ（送電線両端にある遮断器）で電氣的に切り離します。そうするとその送電線は使えなくなります。

電気の回り込み

このような場合、使えなくなった送電線を通っていた電気が、別の送電線を通して流れるようになります。これは、電気のもつ「自己制御性」によって自動的になされます。自動的に回り込んだ電気の量が多いと、回り込まれた通り道も将棋倒しのよ

うに使えなくなっていき、最後は全く電気の通り道がなくなっ
てしまい、大きな停電になることがあります。この状況は、道
路での車の通行状況にも似ています。

雷が落ちなくても停電はおこる

雷が落ちなくても大きな停電は起こりえる

落雷をきっかけにした、その後の発電機の動きや電気の通り
方、停電の発生原因について説明してきました。しかし、落雷
がなくても、大きな停電になることがあります。もちろん、東
日本大震災の時のように大きな地震や、大雪などの自然災害に
よっても停電になることはあります。しかし、そのような徴候
が何もないような時にも、大きな停電になってしまったことも
何回かありました。

欧州での例

例えば、2006年の欧州の大規模停電では、一部区域ごとで
はありますが、欧州の西半分のあちこちでの停電になってしま
いました。このきっかけは、運転員にとっては日常的に行って
いる、ある送電線の停止でした。その後、電気の回り込みによ
って大きな停電へと拡大していきました。

北米と日本での例

2003年の北米北東部の停電や、私たちの国での1987年の関
東地域の停電⁷²では、明確なきっかけとなった事故や徴候はな

⁷² 北米北東部での停電は、要因の一つずつを取り出せば何の問題に
もならないような複数の要因が重なって、最終的には6,000万kW(東
京電力の最大電力とほぼ同じ)にも及ぶ大きな停電となりました。ま
た、1987年7月の関東地域の停電では280万戸にも及ぶ停電とな
りました。これらの停電では、明確なきっかけとなった事故や徴候はな

かったのですが、大きな停電になってしまいました。この2件の停電では、電圧が大幅に低下してしまい、電気の通り道としての性能が大幅に低下したことも主要な原因として挙げられています。

その背景には電気の「自己制御性」

大きな停電になってしまう背景には、広い意味では電気のもつ「自己制御性」と非線形な特性があります。これらの特性は、電気のもつ物理法則に支配されていますので、人間が思うように動かすことはできません。

このように、電気の特性は非常に有用な性質ではありますが、いったん、ある範囲を超えた大きなショックに発展しますと、人間の手をつけられないような状況になり、大きな停電を引き起こしてしまうこともあるわけです。

かったのですが、猛暑のため、昼休み後に急速に電力需要が伸びていったのが理由とも考えられています。停電の要因や進展状況、対策などについて、ここで紹介するには長くなりすぎますので省略しますが、Web や文献で調べることができます。

もっと知りたいあなたに（その5）

<交流の電力>

交流の電力には、3種類があって、中には胡散臭^{うさんくさ}そうな名前の電力があります。実際に仕事をする電力は有効電力と言いますが、無効電力と皮相電力という一見訳のわからない電力もあります。これは中国語でも同じで、それぞれ、有功功率（有効な電力）、无功功率（無効な電力）、視在功率（見かけの電力）と呼んでいます（括弧内はそれぞれの簡単な意味です）。これらは英語やラテン語圏では、**active power**（活発な電力）、**reactive power**（反動電力あるいは、反応電力）、**apparent power**（見かけの電力）となっていて、**reactive power**には日本語や中国語の無効な電力という意味はありません。

ここでは、この3種類の電力の役割について、ちょっと調べてみましょう。

(1) 有効電力と電圧や電流の実効値～抵抗の場合

直流では、電力は一種類しかありません。電圧と電流を掛け合わせたのが電力となります。この電力は、(力) 仕事をしたり、物を温めたりします。

交流でも、この考え方は同じで、電圧と電流を瞬時瞬時に掛け合わせて、それらを足し合わせて有効電力とします。図 53 に交流の電圧を抵抗にかけたときの電流と電力を示します（電力は上の図の実線です）。交流での有効電力は、このように大きくなったり小さくなったりと脈打っています⁷³。この回数は電圧や電流の周波数の2倍の周波数になります。そこで、交流

⁷³ 三相交流（「3本一組で電気を送る送電線」(p.25)）の場合には、この脈打ちは無くなって、直流の場合のように一定になります。

の有効電力は、この脈打っている電力の平均をとることになっています。平均をとることを厳密に言いますと、抵抗をつないだときと同じ発熱量になることを言います。図 53 では、電力の色づけ部分の面積になります。

例えば、直流の場合には、オームの法則により 2Ω (オーム) の抵抗に $4V$ (ボルト) の直流電圧を加えると $2A$ (アンペア) の電流が流れるので、抵抗が消費する (有効) 電力は $8W$ (ワット) になります⁷⁴。

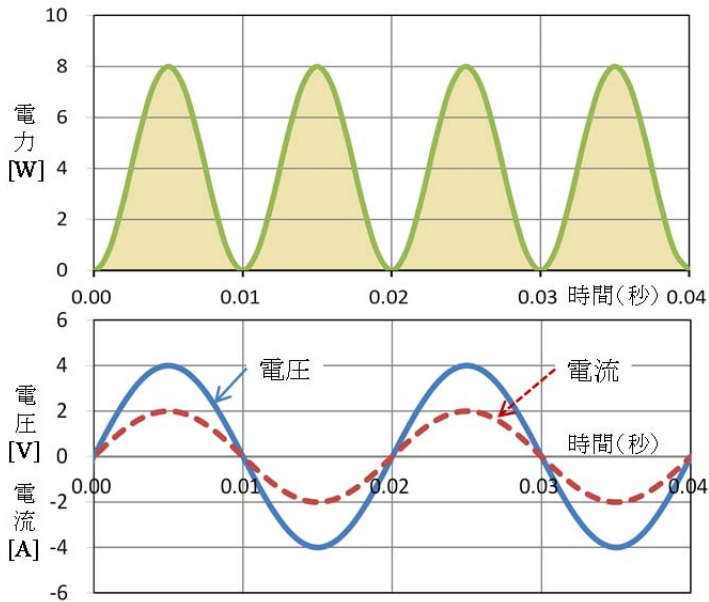


図 53 抵抗で消費される交流の電力

これと同じように、 50Hz の交流の電圧 (最大電圧が $4V$) を同じ抵抗に加えると、最大の電流は $2A$ で、電力は図 53 のようになります。この電力の平均を見ますと $8W$ ではなく、その

⁷⁴ 直流では、電力 = 電圧 × 電流になります。 $8[W] = 4[V] \times 2[A]$

半分の $4W$ になっています。このように最大の電圧や電流の大きさを直流と同じ感覚で使ってしまうと、有効電力が 2 倍になってしまいます。このため、交流の最大電圧や最大電流の大きさを、ルート 2 (二乗すると 2 になる数字; $\sqrt{2}=1.414\dots$) で割って、直流の電圧と電流のように扱います。これを電圧や電流の実効値と呼びます。家庭での電圧が $100V$ や $200V$ という場合には、この実効値電圧で表現していることとなります。このため、交流で $100V$ と言った時には、その最大値は $141V$ になっています。この実効値電圧や実効値電流を使うことで、電圧と電流を掛け算して電力にすることができることになりました。

(2) 無効電力～コイルの場合

図 53 では、抵抗に交流電圧がかかった場合の話をしてきましたが、コイルにかかった場合はどうなるのでしょうか？ コイルの電流は、電圧がかかっても抵抗の時のようにはすぐには追いつけません。電流の変化をさまたげる作用があるためです⁷⁵。

このため、抵抗の場合と同じく、 4Ω (オーム⁷⁶) のコイルに、最大電圧が $4V$ の $50Hz$ の交流の電圧をかけた場合のコイルに流れる電流を図 54 に示します。図(a)には、時間が 0 のとき ($t=0$) にスイッチが入った直後付近の電圧と電流、瞬間瞬間の電圧と電流を掛け算した抵抗での有効電力に対応した量の動きを示しています。電流は電圧がかかると、それに対応して大

⁷⁵ レンツの法則 (Lenz's Law)

⁷⁶ 交流の場合にも、オームの法則(電圧を電流で割ると一定値になる)が成り立ちます。電圧と電流の大きさの関係が直流の場合と同じになる量をリアクタンスと言います(単位は Ω)。ただ、このリアクタンスは周波数によって変化し、コイルでは周波数に比例します。

きくなろうとしますが、時間的に遅れて大きくなります。結局電圧にやや遅れた形で電流が変化することになります。

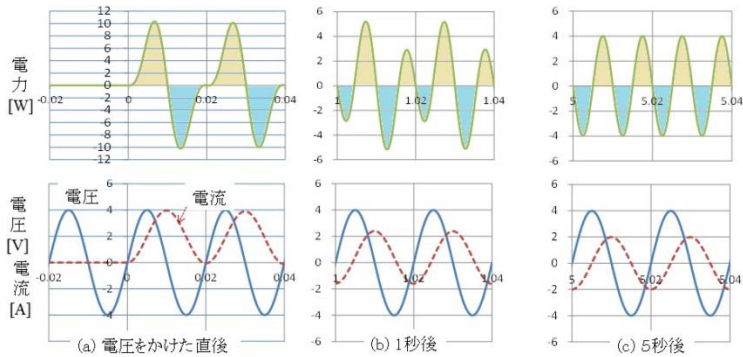
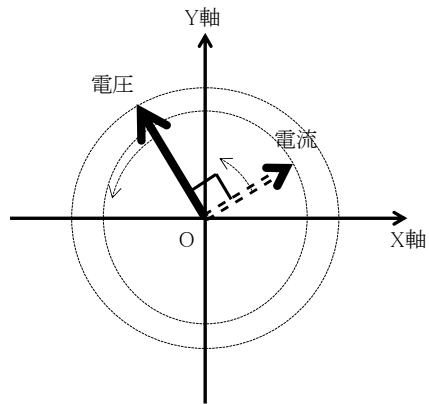


図 54 コイルに交流の電圧をかけた時の電圧、電流、電力の関係

図 54 の(a)の電圧と電流の図を見てください。電圧をかけた直後のこの時間あたりでは、電流はほぼ正の値になっています(縦軸の2[A]を中心にして上下に振動しています)。このコイルの例では、ごく小さな抵抗を考えていますので、電流の平均値はだんだんとゼロになっていきます(縦軸の0[A]を中心にした振動に近づいていきます)。その途中を示したのが、図 54(b)になります。さらに時



電流が電圧より90度遅れて回転

図 55 コイルにかかる電圧と流れる電流との関係

さらに時

間が経過すると、図 54(c)のように、電流はゼロ[A]を中心に変動していて、平均はゼロになっています。しかし、その最大となる点は、電圧に比べて遅れています。この例では、5.005 秒で電圧が最大になっているのに対し、電流の最大点は 5.01 秒になっています。この遅れは、1 サイクルを 360 度としますと、図 55 に示すように 90 度になります。(時間と角度の関係については、「交流の電気は波のように変化する」(p.80)を参照してください)。

では、電力の波形はどのようになっているのでしょうか？ それを図 54 の上側の図に示しました。図 54(a)の電圧がかかった直後や、電流の平均がまだゼロになっていない時(図 54(b))には、電力の最大値も大きくなったり小さくなったりしています。しかし、電流の平均がゼロになった図 54(c)では、最大値は一定になっていますが、抵抗の場合と同じく 2 倍の周波数で脈打っています。ただ、その平均(中心)がゼロになっていることが大きく異なります。このため、コイルで消費している有効電力はゼロということになります。

しかし、電圧がかかっていて電流も流れていますので、何らかの電力として定義しておく必要があります。エネルギーとしてみると、消費と発生を交互に繰り返していますので、reactive power (反応電力)が適当と思いますが、日本語や中国語では、仕事としては何もしていない(エネルギーがゼロ)ということで無効電力と名付けられています。

この無効電力は、コイルの場合には、電圧(実効値)と電流(実効値)の掛け算で与えられ、単位は var (ヴァール)と言います。図 54(c)の例では、電圧が $4/\sqrt{2}$ [V] で電流が $2/\sqrt{2}$ [A] な

ので、 $4[\text{var}]$ となります。

(3) 電流の足し算

抵抗を 2 本並列につないだ、図 56(a)で、それぞれの抵抗に流れる電流を $3[\text{A}]$ と $4[\text{A}]$ としますと、この合計の電流は $7[\text{A}]$ になります。

2 本の抵抗の内、 $4[\text{A}]$ の電流が流れている抵抗を同じ大きさの電流が流れるコイルに取り換えると (図 56(b))、合計の電流はどうなるでしょうか？ 電流を足したグラフを図 57(a)に示します。このグラフで、抵抗に流れる $3[\text{A}]$ は実効値ですので、最大値はその 1.41 倍の $4.24[\text{A}]$ になっています。コイルの電流は、実効値が $4[\text{A}]$ で、最大値が $5.66[\text{A}]$ になっています。電流を足し合わせることは、瞬間瞬間ごとに足し合わせるようになります。抵抗とコイルに流れる電流の最大になる瞬間は違いますので、合計電流の最大値は両方の最大値どうしを足し合わせた値より小さくなります。この場合には、最大値では $9.90[\text{A}]$ (実効値は $7[\text{A}]$) ではなく $7.07[\text{A}]$ (実効値は $5[\text{A}]$) になっています。

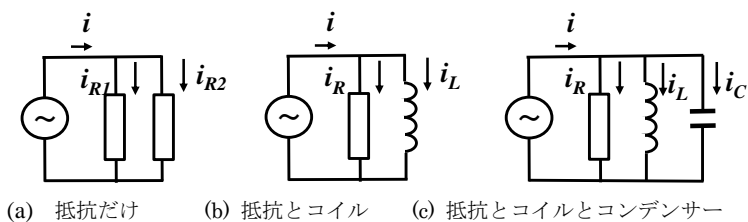
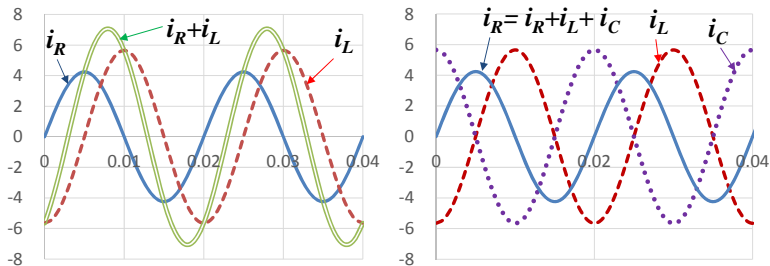


図 56 電流の足し算はどうなるでしょう



(a) 抵抗とコイルの場合 (b) 抵抗とコイルとコンデンサーの場合

図 57 電流の足し算

(4) コンデンサーとの組み合わせ

次に、図 56(b)に並列にコイルと同じ大きさの電流が流れるコンデンサーを付け加えた図 56(c)の場合はどうなるでしょうか？コンデンサーは、コイルの電圧と電流を入れ替えた特性になります。ということは、同じ電圧をかけると、電流は反対の動きをすることになります。このため、図 57(b)に示すように、コイルに流れる電流とコンデンサーに流れる電流は打ち消し合ってしまう、その合計はゼロになってしまいます。つまり、抵抗とコイルとコンデンサーに流れる電流の和は、抵抗だけがつながれている場合と同じになります。

(5) 交流電流の足し算～まとめ

このように、電流の足し算は、同じ種類（抵抗、コイル、コンデンサー）同士の場合には普通の足し算で良いのですが、種類が違う場合には、普通の足し算の結果よりは小さくなります。この電流どうしの合計は、図 58 のように次の三平方の定理（ピタゴラスの定理）の関係で表されます。

$$\begin{aligned}
 (\text{合計の電流の大きさ})^2 &= (\text{抵抗に流れる電流})^2 + \\
 &\quad (\text{コイルに流れる電流} - \text{コンデンサーに流れる電流})^2
 \end{aligned}$$

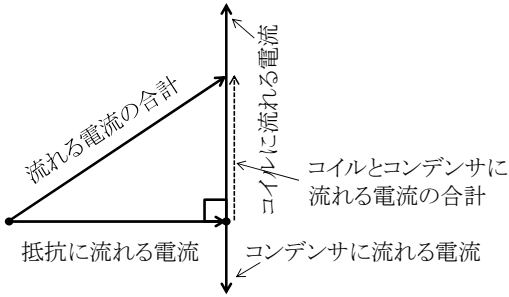


図 58 交流の電流の足し算

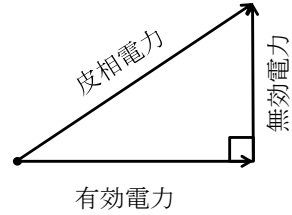


図 59 交流の電力の関係

ところで、図 57(a)で示した電流の合計で分かるように、普通の場合、電流は抵抗だけやコイルだけの電流とは異なり、きちんと電圧の波形と同じであったり、90 度遅れているわけではありません。そのような場合には、図 56(a)のように、電圧と同じ成分と 90 度遅れた成分に分解することができます。このように分解することで、電力も以下のように分けることができるわけです。

有効電力 = 電圧 ×

{電圧と同じ電流成分 (抵抗に流れる電流成分)}

無効電力 = 電圧 ×

{電圧に 90 度遅れた電流成分 (コイルやコンデンサーに流れる電流成分)}

なお、コンデンサーで消費する無効電力はコイルと逆に、符号がマイナスになります。これは無効電力を発生していることを意味します。無効電力を発生するのは、コンデンサーのほか、(同期) 発電機や、特別に作られたパワーエレクトロニク

ス装置があります⁷⁷。

(6) 皮相電力と力率

電圧の大きさと流れている電流の大きさを分解しないでそのまま掛けあわせた電力を皮相電力と言います。これは、単純に電圧の大きさと電流の大きさを掛けただけですので、文字通り「うわべの電力」「表面的な電力」ということになります。この単位は VA（ボルトアンペアまたはヴァイエイ）です。

また、有効電力と皮相電力の比（＝有効電力÷皮相電力）を、皮相電力の中で仕事をする電力の割合という意味から、力率と定義されています⁷⁸。

(7) 交流の電力の間の関係

これら 3 種類の交流の電力は、電流の場合と同じように、図 59 の関係になっており、以下のように三平方の定理の関係が成り立っています⁷⁹。

(皮相電力)²＝

(有効電力)²＋(コイルの無効電力－コンデンサーの

無効電力)²

電流の足し算の最後に、家庭での契約電流以上の電流を使用

⁷⁷ 同期発電機は無効電力の発生と消費の両方ができます。誘導発電機は無効電力を消費するだけです。太陽光発電や風力発電でも発生と消費の両方ができるものがあります。無効電力の発生と消費の専用装置としては、SVC (Static var Compensator) や STATCOM (Static Synchronous Compensator) などが 있습니다。

⁷⁸ コイルの電流成分が強い場合を遅れ力率、コンデンサーの成分が強い場合を進み力率と言います。

⁷⁹ もっと知りたいあなたに(その 6)「交流の電気は三角関数を使えば分かりやすくなる」(p.108)を参照。

した場合に電気を止めるアンペアブレーカー⁸⁰について、補足しておきます。家庭で使用する電気機器のほとんどは、無効電力を消費する機器です。このため、皮相電力から定まる電流の和が契約電流以下になるようにしておく必要があります⁸¹。また機種によっては、起動時などの短時間は大きな電流が流れることがありますので、これらも考慮しておく必要があります⁸²。

(8) 無効電力の働き

無効電力の意味は上に述べたとおりですが、その働きについて簡単に述べておきます。

コイルがあると無効電力を消費します。モーターにはコイルが使われていますので、無効電力を消費しています。この無効電力は、磁界を作ることで、モーターを回す力の元になっています。

次に、TV やパソコンなど交流を直流にしてから電気を使っている機器では、直流にするのにやはり無効電力が必要になります。

さらに、積極的に無効電力を使う場合があります。それは、次のような場合です。まず、電気を使う機器のほぼすべて⁸³が無効電力を消費します（コイルと同じ性質）ので、電流の大き

⁸⁰ アンペアブレーカーをつける電力会社とつけない会社があります。ここでは付ける場合について記します。

⁸¹ 200V 機器の場合は電流を 2 倍に換算して足します。あるいは、100V 機器でも 200V 機器でも、その皮相電力を足し算して、100V×契約電流よりも小さくするようにします。

⁸² 詳しくは

<http://www.tepco.co.jp/e-rates/individual/basic/ampere/ampere01-j.html>

⁸³ オイルヒーターのように、電気を直接熱として利用する場合は、有効電力だけを使っています。

さが有効電力だけを使う場合より大きくなります。電流が大きくなると、電圧が下がります。電流の大きさは小さいほど良いわけです。そこで、無効電力を補償するように、無効電力を発生するコンデンサーを使います。これで、電流の大きさが有効電力だけの電流の大きさに近づいて小さくなりますので、電圧の低下も小さくなるわけです。

このようにして、交流の送電・配電では、電圧をどんなところでもほとんど同じ大きさにできることとなります⁸⁴。家庭の電圧がほぼ 100[V]⁸⁵になるように調整されているのも、このような無効電力の働きによるものです。

もっと知りたいあなたに（その6）

<交流の電気は三角関数を使えば分かりやすくなる>

交流の電気は、高校で学習する三角関数をつかえば、より分かりやすくなります。

例えば、抵抗に流れる電流とコイルやコンデンサーに流れる電流の合計と有効電力や無効電力との関係は、以下のようにまとめられます。

⁸⁴ 送電線や配電線には、抵抗とコイル成分とコンデンサー成分があります。架空線（空中に張られている線）では、コンデンサー成分よりコイル成分が大きいので、架空線では無効電力が消費されています。このため、コンデンサーを使ってこの消費分を補償できるわけです。地中線ではコンデンサー成分が相対的に大きくなりますので、逆に夜間などで電気の消費が少ないときに電圧が上がりすぎる場合があります。また、昼間の力率を大きくするために工場などではコンデンサーで補償することがありますが、夜間に電力消費が少なくなってもそのままになっている場合があります。そのような場合には、無効電力を消費するコイルを使って電圧を下げるようになります。

⁸⁵ 我が国では、100[V]では 95～107[V]の範囲、200[V]では 182～222[V]の範囲にするよう、法律で決まっています。

以下では、抵抗とコイルが並列に接続されている場合を想定します。

まず、電圧を $\sqrt{2}v\sin(\omega t)$ とすれば、抵抗に流れる電流は電圧と同相になるので $\sqrt{2}i_R\sin(\omega t)$ 、コイルに流れる電流は 90° 遅れるので $\sqrt{2}i_L\sin(\omega t - 90^\circ)$ と表されます。ただし、ここで、 v や i_R 、 i_L は実効値であり、 ω は交流の角周波数 ($\omega = 2\pi f\alpha$ 、 f は周波数[Hz]、 α は度への換算係数= $180/\pi$)、 t は時間[秒]です。

したがって、抵抗とコイルに流れる電流の合計は、

$$\sqrt{2}i_R\sin(\omega t) + \sqrt{2}i_L\sin(\omega t - 90^\circ) = \sqrt{2}\sqrt{i_R^2 + i_L^2}\sin(\omega t - \varphi)$$

(ただし、 $\tan \varphi = i_L / i_R$)

有効電力 P は電圧と抵抗に流れる電流の大きさの掛け算、無効電力 Q は電圧とコイルに流れる電流の大きさの掛け算、皮相電力 S は電圧と合計電流の大きさの掛け算なので、以下のようになります。

$$P = vi_R, \quad Q = vi_L, \quad S = v\sqrt{i_R^2 + i_L^2}$$

以上より、抵抗に流れる電流とコイルに流れる電流とこれらの合計電流との間、また、有効電力と無効電力と皮相電力との間に三平方の定理が成り立つことが示されました。

今度は逆に、ある機器にかかる実効値電圧の大きさが v で、流れている電流はその大きさが i (実効値) で位相が φ ^{ファイ} だけ遅れている場合の、機器が消費している有効電力と無効電力を求めてみましょう。

電圧を $\sqrt{2}v\sin(\omega t)$ とすれば、電流は $\sqrt{2}i\sin(\omega t - \varphi)$ となるので、これを以下のように分解します。

$$\begin{aligned}\sqrt{2}i \sin (\omega t - \varphi) &= \sqrt{2}i\{\sin (\omega t) \cos \varphi - \cos (\omega t) \sin \varphi\} \\ &= \sqrt{2}i\{\sin (\omega t) \cos \varphi + \sin (\omega t - 90^\circ) \sin \varphi\}\end{aligned}$$

そうすると、右辺の第1項が抵抗成分に流れる電流で、第2項がコイル成分に流れる電流に相当します。それぞれの実効値の大きさは、 $i \cos \varphi$ と $i \sin \varphi$ になるので、消費している有効電力 P と無効電力 Q は次のようになります。

$$P = vi \cos \varphi, \quad Q = vi \sin \varphi$$

なお、無効電力は位相が進んでいる場合 ($-180^\circ < \varphi < 0^\circ$) には負になります。これはコンデンサー成分が強いことを表しています。

また、皮相電力 S は、電圧と電流の大きさを掛けたただけなので以下のようになります。

$$S = vi = vi \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

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 Vol.5

電気を送る・配る

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

電気を貯める



電気の知識を深めようシリーズ Vol.6

電気を貯める

一般社団法人 電気学会

まえがき

この冊子の主役は電池です。皆さんも知っているとおり、電気を貯めて使うのが「電池」です。電気技術の中では、かなり古くから使われている技術ですが、社会の中で生まれる新たな要求や、電池を必要とする技術の進歩とともに、常に進化していくことが望まれる技術でもあります。この冊子は、「電気を貯める」をテーマとして、3つの章で構成されています。

1つ目の「電気を貯めて使う」では、電池を使う用途や必要性から、貯める技術について利用者の視点で見えていきます。最初に、私たちの身の回りにある電気を持ち運んで使う技術、次に、環境問題の改善などのために、これからますます重要性が高まる電気自動車、そして、再生可能エネルギーなどを安定して利用するための蓄電技術、に着目してまとめています。

2つ目の「電気エネルギーを貯める技術」では、電気を貯める技術の根幹に迫ります。電池は、1回使ったらそれで終わりの一次電池と、充電することで繰り返し使える二次電池とに分類されます。これらの「電池」のしくみはどのようになっているて、どのような種類があり、それぞれにどのような特徴があるのかを紹介します。

3つ目の「電気を貯める技術」のこれから」では、未来に向けた電気を貯める技術への期待と課題を見ていきます。貯める技術の研究開発には、未解決な技術、だからこそ魅力的な課題がたくさんあります。この章を読んで、それらの課題を解決する方法を考えたり、ここに書かれてない新たな課題を見つけたり、未来を切り拓く「アイデア」を研いでください。

目 次

まえがき	ii
1 電気を貯めて使う	1
電気を携帯して使う	1
据え置き家電から携帯して楽しむ家電へ	1
携帯家電から個人で楽しむ機器へ	4
繰り返し充電して利用する「二次電池」	5
最初の携帯電話は重かった・・・	6
スマートフォンのバッテリー容量の読み方	7
コラム：ポータブル機器用リチウムイオン電池の定格表示	8
ウェアラブル時代にも活躍する貯める技術	9
電気自動車に使う	10
100年以上前にも電気自動車は走っていた！	10
エジソンも二次電池を作っていた！	11
二次電池の技術が追いつかず、消えた電気自動車	12
ガソリン車とディーゼル車の特徴と課題	12
コラム：日本人が初めて運転した自動車	13
再び訪れた電気自動車の時代を支える技術躍進	17
コラム：北京オリンピックの青空	18
電気のでモーターを動かす自動車の特徴	19
システム技術として自動車を考える	25
据え置きの設備として使う	26
なぜ電気を貯めたいのか	26
再生可能エネルギーの利用促進	31
全国でのメガソーラーの建設拡大	33

大型発電設備との共存へ	36
スマートグリッドでの再生可能エネルギー利用	37
コラム：電気の供給と消費のバランス(同時同量)	39
2 電気エネルギーを貯める技術	40
電気を貯める電池	40
化学電池のしくみ	40
コラム：世界初の化学電池「ボルタ電池」	41
一次電池と二次電池	42
コラム：「一次」、「二次」ってなあに？	44
コラム：二次電池の容量	45
電気を貯める技術	46
電気を貯める難しさ	46
電気エネルギーに変換して使うエネルギーのいろいろ	47
揚水発電の特徴	49
ハイパワー用電力コンデンサーの特徴	50
フライホイールの特徴	52
超電導電力貯蔵装置の特徴	52
代表的な二次電池とその特徴	54
二次電池の種類	54
鉛蓄電池	54
ニッケル水素電池	55
リチウムイオン電池	57
ナトリウム硫黄 (NaS) 電池	57
レドックスフロー電池	59
二次電池はリサイクルへ！	59

コラム：意外と深い、日本と電池の関わり	60
3 「電気を貯める技術」のこれから	62
再生可能エネルギーの利用拡大	62
電力貯蔵の利用拡大に向けて	62
今よりさらに拡大した電力の運用システムへ	62
高機能な蓄電設備の開発から見える未来	63
電力貯蔵の技術開発	63
さらに高性能な「貯める技術」への期待	64
本冊子の企画趣旨について	66
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	67

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

1 電気を貯めて使う

スマートフォンや携帯電話のような小型で携帯して使うものには、充電して（電気を貯めて）繰り返し使える電池が使われています。乾電池として知られるマンガン電池やアルカリ電池は、充電して繰り返し使うことができません。このように一度切りしか使えない電池は「一次電池」と呼ばれています。一方、スマートフォンで使われているような充電して繰り返し使うことができる電池は、「二次電池（蓄電池、バッテリーなどとも呼ばれます）」と呼ばれています。

二次電池の用途は、大きく分けると3つに分類することができます。1つ目は、スマートフォンのような小型で携帯できる機器用のもの、2つ目は、自動車や飛行機用のある程度の電気が貯められて移動可能なもの、3つ目は、落雷による停電や災害時に電力を補う非常用電源として、あるいは、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーを安定して利用するために、地上に据え置いて利用するものです。

ここでは、この3つの用途を中心にして「貯めて使う電気」について、歴史的な発見やイノベーション（技術革新）も振り返りながら見ていきましょう。

電気を携帯して使う

据え置き家電から携帯して楽しむ家電へ

携帯して使うものといえば、デジタルカメラ、デジタルビデオカメラ、音楽プレイヤー、サウンドレコーダーといった、小型で一つの役割に特化したものや、ノート型パソコンや iPad

のようなタブレット型端末のように多機能なものなど、携帯電話やスマートフォン以外にもさまざまなものがあります。

現在のように、さまざまなものを携帯して使用する社会への発展に大きく貢献したと言われているのが、「トランジスタラジオ」です。

トランジスタは、1948年にアメリカのベル研究所で発明され¹、その後の電気電子の世界に革命をもたらした半導体素子で、微小な信号を増幅して取り出すことができる非常に小型で軽量の電子部品です。

当時のラジオは、真空にしたガラス管（真空管）を複数並べた真空管ラジオと呼ばれるものでした。例えば、図1は、1951年に松下電器産業株式会社（現在のパナソニック株式会社）から発売された真空管ラジオ US-200 です。内部の写真から5本の真空管が並んでいることがわかります。

この US-200 型の真空管ラジオは、当時としては比較的小型だったと言われていますが、高さ約 25cm×幅 40cm×奥行き



図1 真空管ラジオ 正面（左）と内部（右）の写真
（画像提供：日本ラジオ博物館）

¹ トランジスタは、ベル研究所の研究者だったウィリアム・ショックレー、ジョン・バーディーン、ウォルター・ブラッタン²の3名によって発明されました。3人はその榮譽を称えられ、1956年にノーベル物理学賞を受賞しました。

23cm で、重量は 6kg 程度だったため、家の中に据え置いて家族みんなで楽しむものでした。

そんな中、1954 年、世界初のトランジスタラジオがアメリカのリージェンシー社から発売され、翌年の 1955 年には、現在のソニー株式会社の前身である東京通信工業株式会社から、日本初のトランジスタラジオ TR-55 が発売されました²(図 2)。

内蔵されたトランジスタは、図 2 の右の写真にあるように非常に小さいため、TR-55 は、高さ約 9cm×幅 14cm×奥行き 4cm、重量 560g と真空管ラジオに比べて非常に小型で軽いものとなりました。さらに、トランジスタラジオは、乾電池を電源としているため、持ち運びが可能で、どこでも楽しめるようになりました。

こうして真空管ラジオは、ラジオ受信器としての主役の座をトランジスタラジオに譲りましたが、電源を入れるとほんのりオレンジ色に光る真空管の様子は美しく、現在もそれに魅了さ

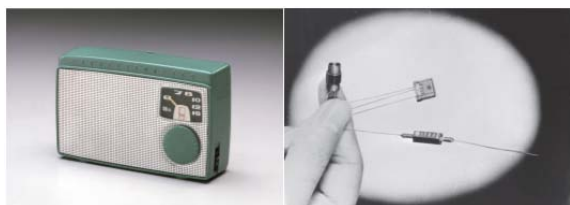


図 2 日本初のトランジスタラジオ TR-55 (左) と
TR-55 に内蔵されたトランジスタ (右)
(画像提供：ソニー株式会社)

² 世界初のトランジスタラジオを販売したリージェンシー社は、その商売に失敗しますが、ソニーは大成功しました。その違いはなんだったのでしょうか。イノベーションに興味がある人は調べてみてください。

れて、真空管を箱に収めずに飾りとして見せるラジオを自作したり、改良して音の変化を楽しむ「真空管ラジオファン」が少なくありません。

ラジオと同じように、家族みんなで楽しむ家電の一つだったのが、蓄音機やレコードプレイヤーなどの音楽を再生する機器です。1960年から1990年ころは、カセットテープと呼ばれる音楽の録音再生が可能なテープが広く一般に使われるようになり、「ラジカセ」と呼ばれる、カセットテープレコーダーにラジオ機能の付いた音楽プレイヤーがほとんどの家庭で使われるようになりました。

ラジカセは、据え置きで使用するレコードプレイヤーに比べて小型、軽量で、また、乾電池による利用が可能だったため、外出時に持ち歩いたり、路上で仲間とラジカセを囲み、音楽を聴いたり踊ったりする「竹の子族」の文化も生まれました。

携帯家電から個人で楽しむ機器へ

1979年、世界で初めてのポータブルオーディオプレイヤーである「ウォークマン®」が、ソニー株式会社から発売されました。このウォークマンの特徴は、小型であったことだけではなく、スピーカーを使わず、当時開発されていた超軽量ヘッドフォンを採用したことが大きな特徴でした（図3）。

これによって、周りを気にせず、いつでもどこでも好きな曲を好きな時に個人（パーソナル）で楽しむ、という新しいライフスタイルが確立され、社会風景さえもガラリと変えるきっかけとなりました。現在では世界中で見られる当たり前の光景は、ウォークマンの登場がなければなかったとも言え、日本から生まれた画期的な商品企画の一つと言えます。



図3 世界初のポータブルオーディオプレイヤー“ウォークマン®”
(画像提供：ソニー株式会社)

販売当初のウォークマンは、乾電池を使っていて、電池を取り替えて使う必要がありましたが、以降は充電して使える二次電池使用モデルも登場しました。

ウォークマンが作ったパーソナルに楽しむ、というライフスタイルは今、インターネットから音楽をダウンロードして、ウォークマンをはじめとする iPod などの携帯型音楽プレイヤーやスマートフォン、パーソナルコンピューター、iPad などのタブレット型端末などで楽しむという形に進化しています。

繰り返し充電して利用する「二次電池」

スマートフォンやデジタルカメラ、ノートパソコンなどは、家庭やオフィスに据え置いて使うような固定電話や冷蔵庫などと違って、常にコンセントにつないでいなくても使うことができます。

今私たちが、携帯電話やスマートフォンなどを電車の中でも、バスの中でも、家の中のどこでも、コンセントにつながず、手軽に使うことができるのは、繰り返し充電することが可能な電池、「二次電池」を利用しているからです。

世界で初めて開発された二次電池は、1859年にフランスの科学者だったガストン・プランテによって発明された鉛（なまり）蓄電池です（図4）。

鉛蓄電池から始まった二次電池の研究開発の歴史は、社会の

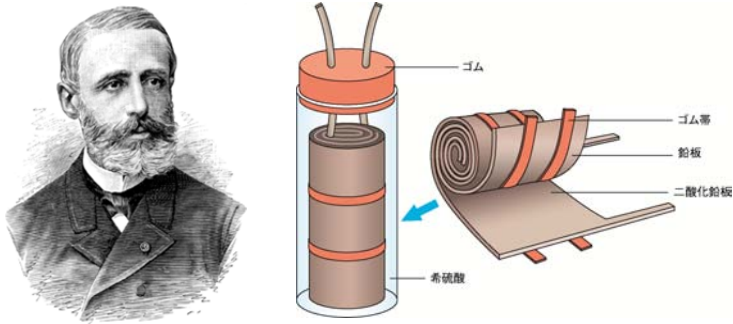


図4 プランテ (左)、プランテが発明した鉛蓄電池の構造 (右)

発展とともに進んでいき、二次電池はどんどん小型で、長時間使うことができる大容量なものに進化していきました。この二次電池のおかげで、コンセントがなくても、電気を便利に利用することができる社会が実現されたのです。

この冊子の最後に紹介するように、その研究開発は現在も活発に進められ、新しい二次電池を生み出し続けています。

最初の携帯電話は重かった・・・

本シリーズ Vol.2 の「私たちの身近にある電気」でも紹介されているように、1979年に開始された自動車電話サービスや、1985年に販売された「ショルダーホン」から携帯電話の歴史は始まりますが、ショルダーホンの重さは3kgもありました。

ショルダーホンにも、もちろん二次電池が使われていましたが、この二次電池が大きくて重かったため、ショルダーホンはどうしても重くなってしまったのです。しかも、フル充電（電池が貯めることができる最大まで電気を貯めた状態）までに約8時間かかり、最長でも40分しか通話ができませんでした。

2016年現在市販されているスマートフォンの重さは150g

前後ですから、ショルダーホンの重さは約 20 倍もあります。

スマートフォンのバッテリー容量の読み方

1 回の充電でできるだけ長く使うことができるスマートフォンを選ぶとしたら、スマートフォンに内蔵されている二次電池、バッテリーの容量を調べる必要があります。

スマートフォンのカタログには、それぞれの機種を紹介するページに、図 5 のようにバッテリー容量が必ず載っています。この図では、2200mAh と書かれていますが、この数字が大きければ大きいほど、電気を多く貯めておけるというわけです。「mAh」は、「ミリアンペアアワー（または、ミリアンペア時）」と読み、バッテリーに蓄えられる電気の量を表す単位です。

この単位は、mA（電流の大きさ）×h（電流を流す時間）を意味していて、ある電流の量で何時間電気を使うことができるかを表しています。例えば、200mA 消費するアプリを使っているとしたり、2200mAh のバッテリーを何時間使うことができるでしょうか。2200mAh を 200mA で割ると「11」なので、11 時間は使うことができるという計算ができます。

実際には、ディスプレイの大きさなどによって、また使用しているアプリによって電流の消費量が異なるので、バッテリー容量が大きいから長持ちする、と決めつけることはできませんが、目安にはなります。



図 5
スマートフォンの
バッテリー容量の
表記例

コラム：ポータブル機器用リチウムイオン電池の定格表示

リチウムイオン電池に記載されているmAh(またはAh)の数字は、電池に貯えられたエネルギーのうち外部に有効に取り出せる電気量を表しています。従来は公称容量や定格容量で表示されていましたが、欧州電池指令以降は、定格容量表示に統一されました。定格容量は、規定された方法によって電池を充電及び休止後に、5時間で放電終了する電流値によって放電したときの容量mAh(またはAh)で表示されます。

電池に2200mAhと表示されていれば、440mAで5時間使用できる容量になります。一般にこれより小さい電流で使用すれば、2200mAhより大きな容量まで使用できます。なお、電池の種類によって定格容量の表示方法が異なる場合があるので注意が必要です。

※公称容量 (nominal capacity) :

電池の製造者が指定する設計上の中心容量。

※定格容量 (rated capacity) :

電池の製造者が保証する最低容量 (mAh または Ah)。

電圧値は公称電圧 (nominal voltage) で表示される。

※欧州電池指令 :

2008年に施行され、欧州地域での電池の有害物質の含有規制、リサイクルを要求する規制。この規制の中で容量表示の不統一を無くすために国際規格での表示が統一化された。

ウェアラブル時代にも活躍する貯める技術

最近、スマートウォッチ、スマートグラスなど、腕時計やリストバンド、メガネのような形状で、身につけて利用する（着ることができる＝ウェアラブル）電子機器の開発、販売が進められています。

例えば、メガネ型のスマートグラスでは、見ている景色をそのまま、視線の動きの通りに録画、撮影できるなど、その娯楽性や利便性が広がります。スマートグラスを使うと、旅行先で自分が見ている風景を、インターネットを通じて、家族や友達に送ることもできるようになるのです。

さらに、ウェアラブルであるためにその利用が期待され、開発が進められている分野に医療、福祉の分野があります。

これらの機器は、身につけている人の心拍数や脳波などを本人の不快感や違和感なく記録、分析し、健康管理や運動トレーニングをサポートすることを目的としていて、スマートフォンなどのアプリと連動させてグラフ化して確認することもできます（図6）。

このように、自身の健康管理ができることはもちろんですが、



図6 心拍センサー搭載 SmartBand 2
(画像提供：ソニー株式会社)

離れて暮らす両親の健康状態を毎日チェックすることも可能となるため、見守り機能の一つとしても有効です。

ウェアラブル機器は、重くしては使えませんし、すぐに充電が切れてしまっても、継続したデータを記録することができないため、超小型で長時間利用可能な二次電池が利用され、これからもそれに特化した二次電池の開発が必要となるでしょう。

電気自動車に使う

自動車は、私たちの生活に大きな便益をもたらしています。国の産業としても大きく、化石燃料を中心とするエネルギー消費の面でも大きな存在です。その自動車技術が、電池の進歩によって大きく変わりつつあります。

100 年以上前にも電気自動車は走っていた！

電気自動車は、その名の通り電気の力でモーターを動かすことで走る車です。現在は、国内や海外のいくつかの自動車メーカーによって電気自動車が発売されていて、町中でも普通に見かけるようになっていますが、「最近の車」という印象のほうが強いでしょう。

ところが実は、ガソリン車も開発途上だった 1870 年代にイギリスの発明家だったロバート・ダビットソンによって世界で最初の電気自動車が実用化されています。ただし、ダビットソンが実用化した電気自動車では、充電することのできない一次電池を使っていました。

1881 年には、電気自動車用に改良されたガストン・プランテの鉛蓄電池(図 4)が電気自動車の電池として採用され、1900 年ころまでの電気自動車に使われていました。

当時の鉛蓄電池は、重くて持続時間の短い電池で、1回の充電での走行距離は80kmだったものの、欧米では電気自動車の最盛期を迎えました。

この当時は、町中を馬車や蒸気自動車が走り、ガソリン車の販売も始まっていましたが、騒音や振動が少なく、運転が簡単で、排気ガスも出ないことから、当時の貴婦人たちにもとても人気があったといえます。

エジソンも二次電池を作っていた！

1909年には、白熱電球の発明などで有名なエジソンが「エジソン電池（ニッケル・アルカリ蓄電池）」と呼ばれる二次電池を発明し、電気自動車を走らせることに成功しています。「エジソン電池」は、鉛蓄電池よりも軽量、大容量で、電気自動車の走行距離を2倍に延ばす画期的なものでした。エジソンはこの車で、アメリカのニューヨークとニューハンプシャー間の1,000マイル（約1,600km）を、途中で何度も充電しながら走りきりました。この走破を達成し、誇らしげに電気自動車脇に立つ、下のようなエジソンの写真が残されています（図7）。

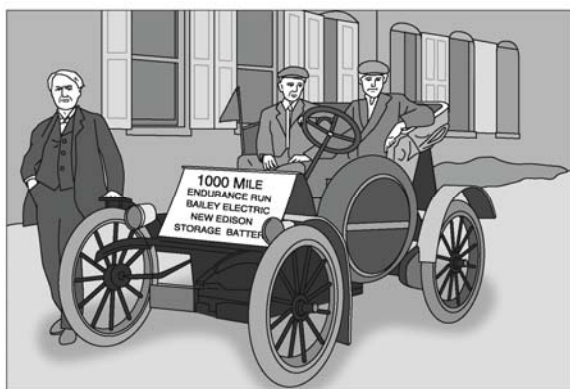


図7 1,000マイル走破した電気自動車とエジソン（左端）

二次電池の技術が追いつかず、消えた電気自動車

ところが、この当時の電気自動車の時代は、そう長くは続きませんでした。当時の二次電池は、非常に重く、貯められる電気の量にも限界があったため、長距離を走るためには何回も何回も途中で充電する必要がありました。

エジソンは、1903年に自動車メーカーのフォードモーター社を創業したヘンリー・フォードとともに、充電なしで長距離を走行できる軽量の蓄電池を開発するためのプロジェクトを立ち上げ、その実現を目指しましたが、思うように性能を上げることができず、その開発を断念しています。

そして、エジソンが電気自動車で1,000マイル走破した前年の1908年に、フォードモーター社から発売されたガソリン車「T型フォード」が、電気自動車の時代からガソリン車の時代へと変わる大きな起点となりました。

T型フォードは、大量生産可能な体制を整えることで低価格で大衆向けの自動車の販売を実現し、かつ全米規模でのアフターサービス体制を整えて維持費を抑えるなど、現在の自動車製造販売スタイルを作り出した最初の自動車と言われ、これによって自動車産業は巨大なものになり、ガソリンスタンドの整備なども進んだことから、1920年を過ぎた頃には、ほとんどの車がガソリン車となりました。

電気自動車は、蓄電池が重い上に電池容量が限られていたため持続時間が短く、長距離走行ができないという欠点をどうしても克服できず、消えていくこととなったのです。

ガソリン車とディーゼル車の特徴と課題

では、なぜ今、電気自動車が改めて注目され、一般にも利用

できるようになったのでしょうか。その話をする前に、自動車として一般的な、ガソリン車とディーゼル（軽油）車の特徴と課題を整理しておきましょう。

ガソリン車とディーゼル車は、エンジン内部で燃料（ガソリンまたは軽油）を燃焼、爆発させることで膨張した燃料ガスが押し出される力を動力とする自動車です。

ガソリンは、火花があればすぐに燃え始める性質があり、軽油は、高温で高い圧力を受けると発火する性質があります。

そのためガソリン車は、ライターを着火するときのように火花を起こすことで着火する構造となっていて、すぐに動力部分

コラム：日本人が初めて運転した自動車

1900年、当時の皇太子（後の大正天皇）の成婚記念に、アメリカのウッズ社製の電気自動車が献上されました。皇太子を乗せる前に試運転を任された、後に東京電機大学の創設者となる廣田清一が、初めて自動車を運転した日本人とされています。

しかし残念ながら、この車に大正天皇が乗ったという記録はありません。実は、試運転中に（日本初の）自動車事故が起きてしまい、危険な乗り物と思われる、乗ることができなかったと言われています。



献上された電気自動車

（東京日日新聞 1900年9月8日）

*参考資料：森本雅之「我が国で最初に走った電気自動車」, 電気学会半導体電力変換研究会資料（2012）

の回転数を上げることができるのが特徴で、一般的な乗用車など比較的小さい自動車に利用されます。

一方のディーゼル車は、エンジン内部の空気を圧縮して圧力と温度を上げ、そこに燃料である軽油を霧状にして噴射することによって発火、燃焼させていて、速い回転は苦手ですが、力強く、燃費も良いため、大型トラックやバスなど大きくて重い自動車に使われます。

燃料を使う自動車は、一度の給油で長距離走行することができるため、非常に便利な乗り物です。しかし、このようなエンジンを用いる自動車には、2つの大きな問題があることに、我々人間は気づき始めました。

一つは、地球の地下に眠っている化石燃料と呼ばれる資源を掘り起こし、燃やして使用するため、いつかはそれらの資源が地球上からなくなってしまうという問題です。

そしてもう一つは、燃料を「燃焼する」ことで発生する排気ガスによる環境汚染です。ガソリン車が普及しはじめたころは、ほとんど意識されていませんでしたが、1950年代以降、自動車の排気ガスによる環境汚染の問題が深刻となり、対策の検討や法律による規制が始まりました。

排気ガスに含まれる二酸化炭素 (CO₂) が地球温暖化³の原因を作ること、硫黄酸化物 (SO_x、ソックス)、窒素酸化物 (NO_x、

³ CO₂、メタン、水蒸気などは、地上から出た赤外線を吸収し、再び放出する性質を持っているので、温室効果ガスと呼ばれます。温室効果ガスによる地球温暖化も重要な問題ですが、私たちの住む地球が、非常に長い時間をかけて作ってきた化石資源を、私たちの世代が気ままに使ってよいのだろうか、また後の世代にどれだけ残すことができるのだろうかという問題も、同時に考えていく必要がありますね。

ノックス)、微粒子状物質 (PM、ピーエム) によって大気が汚染され、光化学スモッグや酸性雨⁴が発生し、これらの汚染物質がぜんそくやがんの発症の原因となることがわかったのです。

特に、粒子サイズが 2.5 μm (マイクロメートル) 以下の PM は PM2.5 と呼ばれ、図 8 で見ても分かるように、髪の毛よりも、スギ花粉よりもずっと小さい粒子なので、呼吸器や循環器に入り込んで人体に大きな影響を与えます。

1950年代のイギリスのロンドン⁵、アメリカのロサンゼルス、日本の工業地帯や大都市部でも、近くの景色も霞むほどの大気汚染に悩まされたことがありましたが、現在はさまざまな排気ガスの規制などによって改善されています。しかし、法的な規制が十分に行われていない国では、PM2.5 による深刻な大気汚染が続いています。

2015年現在、PM2.5の年間平均濃度が世界で最も高い都市は、インドのニューデリー市で、日本で定められている基準値の約10倍もの濃度のPM2.5が大気中に広がっています。

2015年12月に、インドの公的調査機関である科学環境センターが公表した報告書によると、ニューデリー市では、大気汚染が原因とみられる肺疾患などの病気によって年間1万人を

⁴ 酸性雨は、河川や土壌を酸性化して、生態系に影響を与えたり、建造物の錆や劣化の原因ともなります。もっと詳しく知りたい場合には、酸性雨に関する知識を紹介している気象庁のホームページ (http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/acid/info_acid.html) などを参照してみてください。

⁵ 特に、1952年12月に発生した大気汚染は「ロンドンスモッグ (London Smog)」と呼ばれ、この月だけで4,000人以上のロンドン在住者が亡くなるという史上最悪の健康被害をもたらした事件として語り継がれています。

超える死者が出ており、車両の利用を制限する通行規制が試行されています。

東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県の一都三県などでは、黒い煙を排出しながら走るディーゼル車は、NOx や PM2.5 をばらまいている、として、PM 排出基準を満たしていないすべてのディーゼル車の走行が禁止されています。

ただし最近では、クリーンディーゼル車と呼ばれる、排気ガスによる大気汚染を最小限に抑えた、クリーンで新しいディーゼル車が開発され、その良さが認められるようになってきました。

日本各地や日本に近いアジアの都市の PM2.5 の濃度は、環境省のインターネットサイト「そらまめ君（そらをマメに監視します）」(<http://soramame.taiki.go.jp/>) で公開されているので、たまに覗いてみると良いでしょう（図9）。

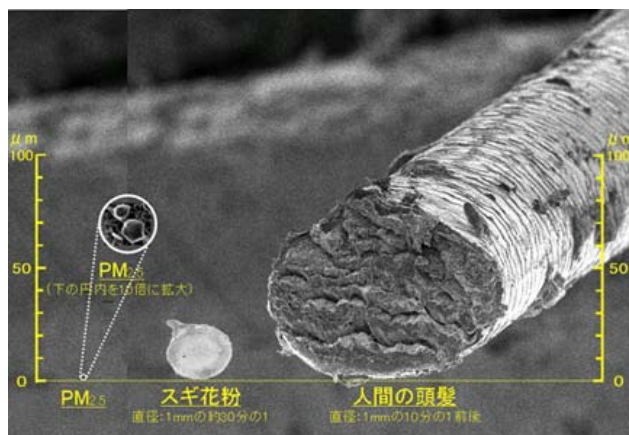


図8 PM2.5の大きさの比較

(出典：東京都環境局 HP「微小粒子状物質（PM2.5）対策」)



図9 「そらまめ君」によるPM2.5観測データ表示例（左）と
海外都市のモニタリング（右）
（出典：環境省大気汚染物質広域監視システム「そらまめ君」）

再び訪れた電気自動車の時代を支える技術躍進

ガソリン車の普及によって、一斉に姿を消し、研究開発すらされなくなった電気自動車でしたが、大気を汚染しない、クリーンな自動車として再び注目されるようになり、1965年ころから研究開発が再開されるようになりました。

一方で、ガソリン車、ディーゼル車の排出ガスを浄化する技術も進歩していったため、すぐに電気自動車が実用化されることはありませんでした。

しかし、大気汚染の問題は深刻さを増すばかりだったことから、各国で電気自動車の販売を促進する法律が定められるようになり、1990年頃、電気自動車の開発が改めて本格化してきました。一度は普及が進められたにもかかわらず、消えていった電気自動車でしたが、沈黙の70年あまりの間に劇的に変化し、発展したものがありました。

それは、1900年代初頭に多くの科学者や技術者たちが開発、改良に取り組むものの、どうしても解決することができなかった二次電池の技術の大きな躍進です。1990年代の後半から、

コラム：北京オリンピックの青空

PM2.5 と聞くと、中国の大気汚染をイメージする方も多
いかもしれません。2008 年に開催された北京オリンピッ
クの際には、開催の数ヶ月前から国を挙げた環境改善対策
が行われ、数千もの工場の運転や、建設現場の作業を停止
したり、車両の走行を制限したりすることで、一時的に「北
京の青空」を取り戻したことが話題となりました。しかし、
2009 年には、元の大気汚染状態に戻ってしまいました。

環境汚染や健康に関する調査を行っている、アメリカと
中国の研究機関による共同研究によって、北京五輪開催中
に生まれた新生児の体重は、2007 年や 09 年の同じ時期
に生まれた新生児に比べて、平均 23g 重く、PM2.5 など
の大気汚染の影響が新生児の体重に表れた、という研究結
果が発表*されていることから、PM2.5 が人体へ与える
影響の大きさや怖さが伺えます。

*参考資料：David Q. Rich et al. “Differences in Birth Weight
Associated with the 2008 Beijing Olympics Air Pollution
Reduction: Results from a Natural Experiment”, Environ-
mental Health Perspectives, Vol. 123, no. 9, pp. 880-887
(2015).

ノートパソコンや携帯電話が急速に普及し、それらに使用され
る二次電池の小型化、軽量化が飛躍的に進んでいたのです。

電気自動車がガソリン車に敗れて消えてから、およそ 100 年
の時を経て、大気汚染の早期解決と、科学技術の発展による二
次電池の劇的な進歩という条件が重なり、いよいよ電気自動車
の時代が到来したと言えます。

新たに開発が進められた二次電池の中でも、特にリチウムイオン電池は、小型軽量であるにも関わらず容量が大きいこと、充電と放電を繰り返して行ってもバッテリー容量の低下が少ないことなどのメリットがあり、電気自動車用としての応用はもちろん、次に紹介する再生可能エネルギーによって作られた電力の貯蔵用としても利用されていて、さまざまな場所で利用できる革新的な二次電池です。

現在、リチウムイオン電池以外にも、次世代の二次電池となる技術の開発は進められています。リチウムイオン電池の性能が非常に良いため、しばらくはリチウムイオン電池の時代が続くと考えられますが、さらに大容量なものや、充電速度の速いものなど、リチウムイオン電池の性能を超える、次世代の二次電池の研究開発も世界的に重要なテーマとなっています。

電気力でモーターを動かす自動車の特徴

電気力でモーターを動かす自動車には、主に表 1 にまとめた 4 種類があります。

いずれも電気でモーターを動かすことに変わりはありませんが、燃料とその補給方法が異なり、求められる性能が変わるため、搭載するバッテリーやモーターの大きさや重さが変わります。

まずは、1997 年にトヨタ自動車の世界で初めて発売したプリウス（図 10）を代表とするハイブリッド車（HEV : Hybrid Electric Vehicle）です。ハイブリッドとは、動物で言えば雑種を意味する言葉です。つまり、複数の仕組みを組み合わせることで、モーターと、ガソリンや天然ガスを燃料とするエンジンの両方を搭載しています。

次に、プラグイン・ハイブリッド車 (PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle) も、ハイブリッド車と同じようにモーターとエンジンを搭載した車です。Plug-in (プラグイン) とは、プラグ (コンセント) を差して充電できることを意味していて、家庭のコンセントや、電気自動車専用の充電ステーションなどから直接充電することが可能です。PHEV 車が充電している様子を図 11 に示します。

表 1 モーターを使う自動車の特徴

	ハイブリッド	プラグイン ハイブリッド	電気自動車	燃料電池車
略称	HEV	PHEV	EV	FCV
搭載物	小バッテリー モーター エンジン	大バッテリー モーター エンジン	大バッテリー モーター	燃料電池 小バッテリー モーター
燃料	ガソリン	電力 ガソリン	電力	水素
燃料補給	ガソリンスタンド	コンセント ガソリンスタンド	コンセント 充電ステーション	水素ステーション
CO ₂	排出する	EV 時は排出 しない	排出しない	排出しない
航続距離 (燃費) *	900km (30km/l)	1,000km EV: 25km (30km/l)	230km	700km

*航続距離：各自動車の違いをイメージしやすくするために記載した一例です。運転条件や技術進歩で大きく変化する場合があります。

そして、電気自動車（EV：Electric Vehicle）は、エンジンを搭載せず、電気の力のみで動かす車で、こちらも家庭のコンセントなどで充電することが可能です（図 12）。

最後に、次世代の車とも言える、燃料電池車（FCV：Fuel Cell Vehicle）は、水素と酸素の化学反応によって電気を作る燃料電池の仕組みを利用してモーターを動かします。どの自動車も電気でモーターを動かすことには変わりはありませんが、燃料とその補給方法が異なることから、バッテリーやモーターに求められる性能が異なります。

例えば、ハイブリッド車では、加速や減速のときに大きな電力が必要ですが、走り始めればガソリンを使って走行することができるため、軽量小型で高出力の電池が使われます。

一方、エンジンを持たない電気自動車では、携帯電話と同じように 1 回の充電で走行できる距離ができる限り長いことが求められるため、大容量の電池が必要不可欠です。大容量の電池を載せるということは、大きな電池を載せる必要があるということなので、車両全体は重くなります。

燃料電池車でも、燃料電池で作った電気をそのままモーターにつないで使えばよいのですが、燃料電池だけでは加速と減速のときに必要な大きな電力を得ることが難しいため、ハイブリッド車と同じように小型バッテリーが必要となります。また、水素を貯めておく重いタンクを搭載しているため、燃料電池車の車両も重くなります。

表 1 のとおり、電気自動車と燃料電池車では、走行時に CO₂ を排出しません。そのため、この 2 つの自動車の普及が進むことは、大気汚染の改善へとつながります。それでも、爆発的に



図 10 プリウス（2015年モデル）
（画像提供：トヨタ自動車株式会社）



図 11 充電中の PHEV 車

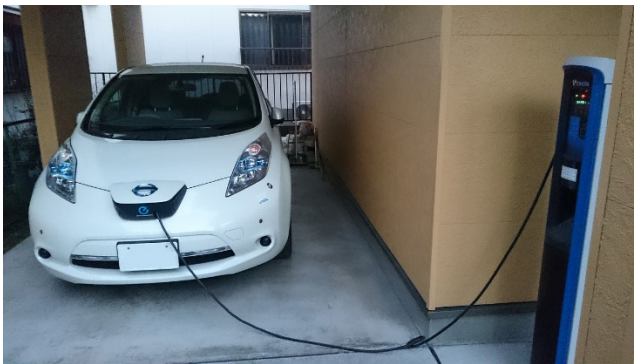


図 12 充電中の EV 車

普及していない原因は、車体価格が高いことと、充電ステーションと水素ステーションの整備が必要なことです。

電気自動車用の充電ステーションに関しては、かなりのスピードで設置が進められており、県庁や市役所などの公的機関の駐車場や高速道路ではほとんどのサービスエリア（SA）で設置されるようになってきていますし（図 13）、町中でも見かけるようになってきました。

2016 年 8 月現在、充電ステーションの検索サイト GoGoEV (<http://ev.gogo.gs/>) の登録充電ステーションの数は、普通充電が 13,588 カ所、急速充電が、6,947 カ所となっています。



図 13 高速道路の SA に設置された充電ステーション



図 14 水素ステーションの設置例

燃料電池車については、2015年に販売が開始されたものの、2016年4月現在の水素（H₂）ステーション（図14）の設置数は、19都府県に約70箇所あるのみです。また、水素タンクの軽量化、安全性の向上など、車体価格と水素ステーションの整備以外の課題もあるため、実際の普及はまだ先になりそうです。

ここまで読んで気がついた方がいるかもしれませんが、電気自動車と燃料電池車は、「走行時にCO₂を排出しない」、という説明は、正確に言えば正しくありません。実は、充電に使う電気が、燃料を燃焼させて電気を作る（CO₂を排出する）火力発電所などから供給される電気だったり、燃料電池に使われる水素の製造段階では、CO₂が排出されていたりするため、これらの自動車に乗ることで、完全にCO₂が排出されなくなったわけではないのです。

それでは実際に、どの自動車がどの程度、CO₂を排出しているのでしょうか。これを比較するために「Well to Wheel（井戸（油田）から車輪まで）」という用語があります。

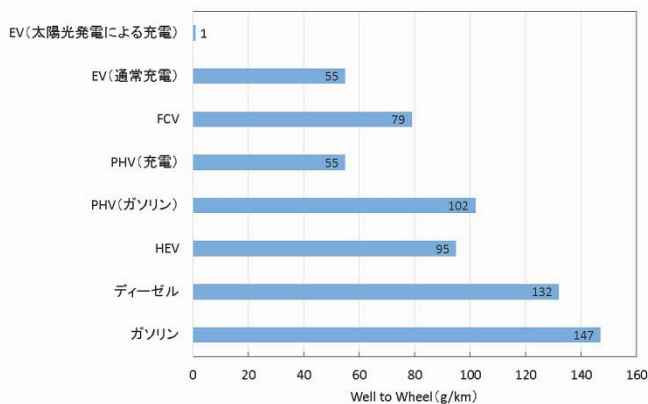


図15 各自動車のWell to Wheelの比較
(日本自動車研究所「総合効率とGHG排出分析」を基に作成)

これは、原油の採掘、精製、運搬から自動車の走行までに使用される全エネルギーから CO₂ がどのくらい排出されているのかを表すものです。

Well to Wheel では、太陽光発電で電気自動車を 1km 走らせた場合に排出される CO₂ の量を、各自動車の値と比較します。その結果を図 15 に示します。

この結果から、明らかにガソリン車とディーゼル車の値が高いことと、電気自動車や燃料電池車の利用で CO₂ の排出量は抑えられるものの、完全に排出されないわけではないことがよく分かります。これらの事実も意識して、これからも環境に配慮しながら快適な自動車での走行を可能とする関連技術の開発を進めていくことがとても大切です。

システム技術として自動車を考える

これまでの説明では、自動車を動かす技術の中でも、電気を貯めてモーターを回す技術を中心に見てきました。しかし、貯めた電気はモーター以外にも使われています。ヘッドライトも電気で光りますし、カーナビも電気で動きます。窓の開閉にも、パーキングブレーキにも、最近では電気が使われています。

自動車におけるエネルギー消費量の大きさを考えた場合、モーターを回すことに次いで重要なのは、空調です。凍てつく吹雪の中では暖房をきかせ、灼熱の太陽の下では冷房をきかせて、乗っている人に快適な空間を提供する必要があります。

まず、暖房を考えてみましょう。ガソリン車やディーゼル車、さらには燃料電池車では、エンジンや燃料電池から多量の熱が発生するため、暖房にはその熱を使うことができます。電気自動車では、二次電池に蓄えられたエネルギーを暖房用に使えば

よいのですが、暖房に電気を使うと、電気自動車の弱点である航続距離を、さらに短くすることにつながります。

冷房も重要です。真夏の昼下がりに冷房をガンガン入れながらガソリン車を運転すると、燃費がかなり悪くなります。これは、冷房用にガソリンが使われた結果です。二次電池を用いてモーターを回して走る自動車でも、同じようなことが起きます。

冷暖房のために二次電池の電気を消耗し、そのために航続距離が落ちるということは、電気自動車が高効率であることの裏返しの現象でもあります。

今でも十分便利に使うことができる自動車ですが、未来の自動車、自動車交通システム、人や貨物の移動システムについては、これからも解決する必要がある興味深い課題が山積です。

据え置き設備として使う

今、据え置き設備として電池を使う技術が脚光を浴びています。なぜでしょうか。また、誰が使うのでしょうか。さらに、電池が脚光を浴びる前はどのようにしていたのでしょうか。

なぜ電気を貯めたいのか

なぜ電気を貯めたいのか、主なメリットは次の4項目です。

- (1) 停電対策
- (2) 瞬時電圧低下に対する対策
- (3) 電力需要の負荷平準化
- (4) 発電所出力の安定化

これらは二つに分けることができます。(1)と(2)は電気を利用する側にとってのメリット、(3)と(4)は電気を供給する側のメリットです(図16)。それぞれについて見ていきましょう。

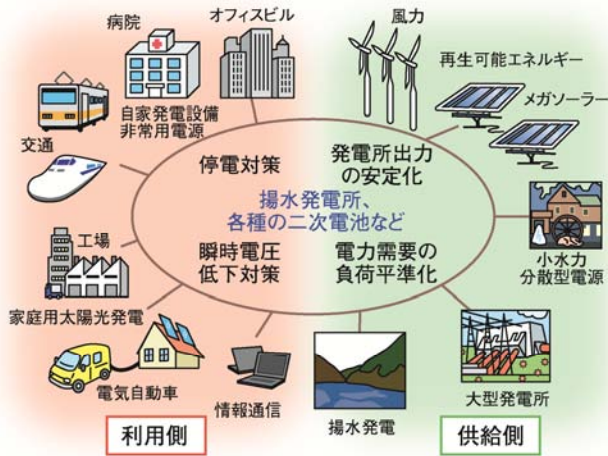


図 16 大型蓄電技術導入のメリット

(1) 停電対策

一般の家庭であれば、停電したら回復するまで待っているのが普通でしょう。しかし、人工透析をしたり、人工呼吸器を使っていたりする場合には、停電の回復を待っている訳にはいきません。対策するにはお金がかかりますが、それでも停電対策をしておくことは大切です。

オフィスビル、ホテル、デパート、病院などには、一般に非常用電源の設置が法令で義務づけられています。オフィスビルやホテル、マンションなどのビルでは、非常用のエレベータを動かす必要があるかもしれませんし、最低でも最寄りの階まで動いて扉を開けるようにしてくれないと、狭いスペースに閉じ込められて、場合によっては深刻な事態になってしまいます。また、病院での停電はまさに命取りとなります。

このように、施設内の電気設備の機能がある程度維持するた

めの保安用電源、火事が起きたときのスプリンクラーや排煙設備を動かすための非常用電源、地震や火事などの災害時に停電したときの非常用照明など、考えておかなければならない場合はたくさんあります。

そのために、従来からいろいろな電源設備が用いられてきました。例えば、非常用ディーゼル発電機を備えついたり、重くて広いスペースが必要となる鉛蓄電池を大量に用意して、常時充電しておき、非常時に備えている場合もあります。

最近では、例えば、太陽光発電設備によって昼間に作られた電気を大型の二次電池に蓄電しておくことで、夜間に災害が発生して停電した場合などの緊急時にも、電気を使えるようにしているところもあります。

(2) 瞬時電圧低下（瞬低）に対する対策

送電線や配電線への落雷や事故が起こった時、短い時間の電圧低下（瞬時電圧低下）が発生します。パソコンが使われ出した初期には、瞬時電圧低下によって急にパソコンの電源が落ち、それまでの作業がすべて消えてしまって、ガッカリしたことを覚えている方がいることでしょう。今は、パソコン側での対策も進んでいて、そのような事態はまず発生しなくなりました。

現在は、このような瞬時電圧低下が起こったとしても、生活面ではほとんど支障を感じることはありませんが、半導体の製造設備や精密機器などの工場が、瞬時電圧低下の影響を受けると、大きな損害となることがあります。そのため、これらの設備では二次電池に電気を貯めて、瞬時電圧低下が起こらないような対策がとられています。

このほかにも、業務用のコンピューターや通信機器などの設

備は、基本的に停めることができませんし、やむを得ず停める場合でも、正しい手順で停止操作を行わないと、データがなくなってしまうなどの不都合が生じる場合があります。そのため業務用の設備では、商用電源と機器の間に無停電電源装置（UPS : Uninterruptible Power Supply）を設置するのが一般的です。

(3) 電力需要の負荷平準化

図 17 に示す一日の変化を見ても分かるように、電力需要は昼間多く、夜間には少なくなり、夜明け前にはさらに少なくなります。発電所では、このように変動する需要に合わせて発電量を調節する必要があり、発電所の経済運用のためには、電力需要の山（ピーク）と谷（ボトム）との差を縮める対策が必要となります。これが、電力需要の負荷平準化です。

火力発電所や原子力発電所は、定格出力付近の一定出力で運転したとき、最も経済的で、熱的なストレスも少なくなるため、供給が必要な発電量の多くは、このような大型発電所によって発電されています。

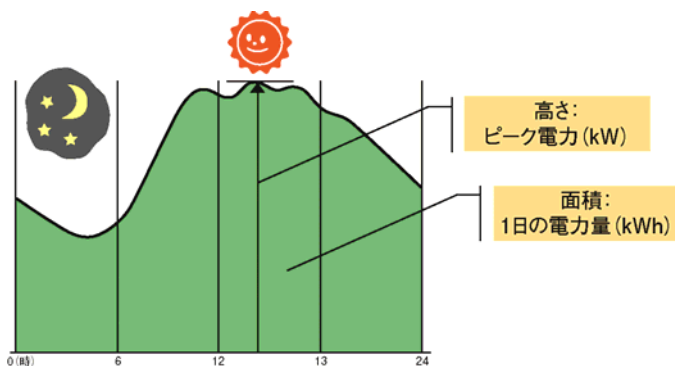


図 17 一日の電力需要の変化（日負荷曲線）

これまで、電力需要に合わせた大型発電所の発電量の調整には、対応の早さや経済面から、水力発電所による発電が使われるのが一般的でしたが、近年、変動する負荷が水力発電による調整力を超えるようになりました。

そこで、位置エネルギーとして電気を貯めておくことのできる揚水発電所が大規模に用いられるようになったり、二次電池の利用が進められるようになったりしてきました。

(4) 発電所出力の安定化

2011年3月に起こった東日本大震災のあと、さまざまな分野で省エネルギー化を進めながら、原子力発電および化石燃料による発電に依存する割合を下げるとともに、再生可能エネルギーの利用促進が進められています。

しかし、太陽光発電や、風力発電によって発電される電気は、そのときの天候次第で大きく変動します。太陽に雲がかかれば太陽光発電によって作られる電気は減りますし(図18)、風力発電では、風が吹かなければ回らないことはもちろんのこと、風速や風向によっても出力が変動します(図19)。

さらに、強風による風車の回りすぎによって設備が破壊されることなどを考慮し、定められた風速以上の強風が吹いた場合には、自動的にストップさせるように設計されているため、発電量が突然、ゼロになってしまう場合があります。

そこで、太陽光や風力などの自然エネルギーによって発電した電気を二次電池などの蓄電設備に電気を貯えておけば、太陽のない時間帯でも、風が吹いていなくても、必要なときに、より安定な電源として使えるようになります。

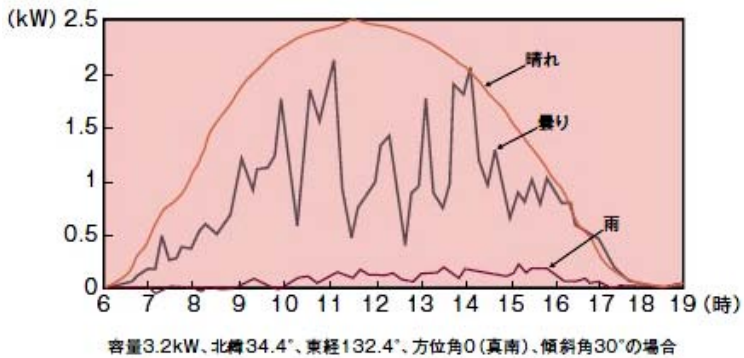


図 18 太陽光発電の出力変動例

(出典：電気事業連合会「原子力・エネルギー図面集 2015」)

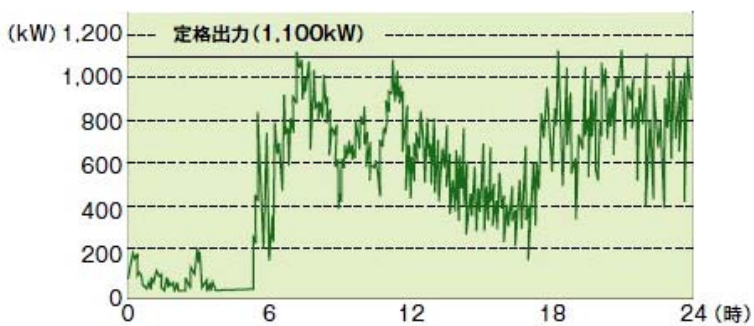


図 19 風力発電の出力変動例

(出典：電気事業連合会「原子力・エネルギー図面集 2015」)

再生可能エネルギーの利用促進

電気を大量に安価に貯えられれば、再生可能エネルギーの導入が促進され、環境にやさしく安全・安心な社会作りに貢献することになります。

太陽光発電システムは、一般家庭の屋根に設置され、利用される実用例が増えています。図 20 は、日本における太陽光発電システムを設置している住宅数の変化を表しています。この図から、2008 年から 5 年間でおよそ 3 倍の住宅で太陽光発電システムが設置されていることがわかります。

さらに、2011 年の東日本大震災を機に、設置数は伸び続け、2014 年時点での 2 人以上の世帯における全国平均普及率は 6.6%となっています。図 21 は、都道府県別の普及率を表したもので、1 位の宮崎県で 14.3%、2 位の佐賀県で 13.9%となっていて、特に日照量の多い地域での導入が積極的に進められています。

これまでは、発電所で作られた電気が電線を伝わって各家庭に送られていましたが、このように、消費者のすぐ近くに分散して置かれ、言わば地産地消が可能な分散型電源として再生可能エネルギーの利用が進められています。

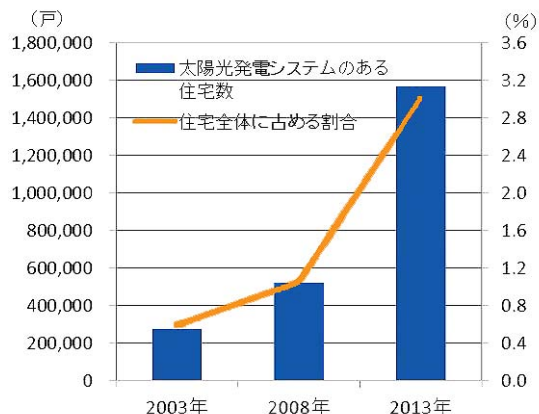


図 20 太陽光発電システムが設置されている住宅数
〔「平 15、20、25 年住宅・土地統計調査結果」(総務省統計局)

<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001051892> を加工して作成]

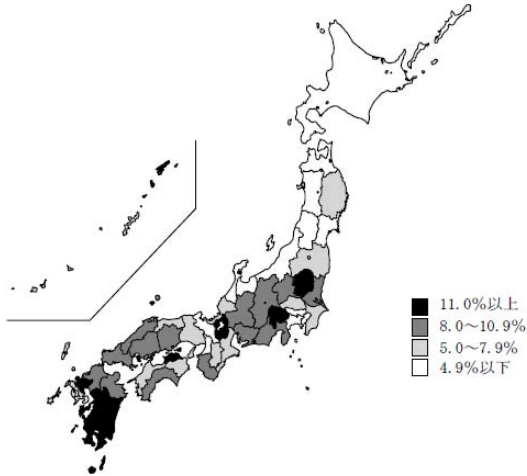


図 21 住宅への太陽光発電システムの普及 (2014年) [「平成 26 年全国消費実態調査」(総務省統計局)]

<http://www.stat.go.jp/data/zensho/2014/pdf/gaiyo.pdf> (2016/6/1 利用)]

2012 年より、再生可能エネルギーで発電した電気を、電力会社が一定価格で買い取る⁶ことを国が約束する「再生可能エネルギーの固定価格買取制度 (FIT、フィット)」が実施されているため、太陽光発電システムで発電して家庭内で使わなかった電気は収入源にもなるというメリットも打ち出されるなど、さらなる利用促進も進められています。

全国でのメガソーラーの建設拡大

広大な敷地に何千枚もの太陽光発電パネルを敷き詰め、1,000kW(キロワット) [=1MW (メガワット)] 以上の出力を得ようとする大型太陽光発電システムは、メガソーラーと呼ば

⁶ 電力会社が買い取る費用は、電気の利用者からの賦課金^{ふかきん}という形で集められています。

れます。メガソーラーでは、一般世帯に換算すると 250 世帯程度⁷の電力をまかなうことができます。

2012 年に FIT が開始されて以降、最初は、遊休地や学校の屋根に数百枚のパネルを置き、10kW～500kW の出力を得る中規模太陽光発電設備の導入が進み、最近では、メガソーラー規模の発電設備の建設が全国で拡大されつつあります。

2015 年 10 月より営業運転を開始した、日本最大規模とされるユーラス六カ所ソーラーパーク（青森県、図 22）では、東京ドーム約 50 個分（2.53 平方キロメートル）の土地に敷き詰められた約 51 万枚のソーラーパネルによって、最大で 148,000kW 出力することが可能です。

メガソーラーによって、その日の発電量などの情報をインターネット上で公開しているところもあります（図 23）。

また、例えば川崎市にある浮島太陽光発電所では、「かわさきエコ暮らし未来館」が併設されていて、展望スペースからメガソーラーが眺められ、ガイドによる案内も行われています。FIT で認定された再生可能エネルギー発電設備は、毎月増え続けており、設備の数や買取電力量、買取金額などは、経済産業省の資源エネルギー庁が運営する

「なっとく！再生可能エネルギー」

(http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/)

⁷ 太陽光発電は、雨天や曇りでは設備分だけの発電はできませんし、もちろん夜は発電できません。我が国では、年間平均で設備の 10%強の発電が可能となっています。つまり、1MW の太陽光発電では、平均 100kW 強発電されます。一方、単身世帯を含む一般世帯の電気の使用量は、平均すると 1 世帯あたり 400W 程度ですから、250 世帯程度の電力をまかなえることとなります。



図 22 ユーラスホカ所ソーラーパーク（千歳平北地区）
（画像©2016Google）

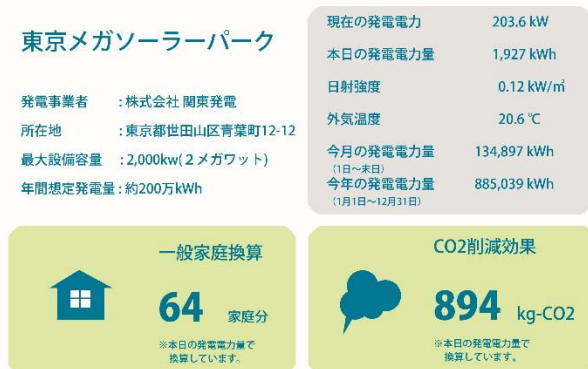


図 23 メガソーラー設備での発電量等情報公開サイトの例

saiene/index.html) というサイトで確認することができます。

ちなみに、2015 年現在の世界の様子に目を向けてみると、広大な敷地を持つアメリカでは、200MW を超える出力を持つメガソーラーが 8 つもあり、カリフォルニア州にあるアメリカ最大のものは、世界で 2 番目に大きい 579MW の出力、インド

にある世界最大のメガソーラーでは、600MW の出力が可能となっています。(世界のメガソーラーの写真を掲載しても、敷地が広大すぎてパネルが見えませんが、掲載していません。)

大型発電設備との共存へ

電気が地産地消できることは大変良いことなのですが、一方で、再生可能エネルギーによる分散型電源が増え、これらの設備が、電力会社の管理する電力系統に接続されることによって困ったことが起こる可能性があります。

火力発電などの大型発電設備が安定して電力を供給し続けるためには、電気の生産量と消費量が同時同量であることが重要です。生産量と消費量のバランスが崩れると、電力系統に送られる電気の周波数が変化してしまうためです。

出力が不安定な再生可能エネルギーが電力系統に接続されると、それまで保つことができていた電気の生産量と消費量のバランスを取ることがとても難しくなります (p.39 コラム参照)。特に、メガソーラーが電力系統につながり、消費量よりも発電量が上回ってしまう事態が起こると、電力の安定供給ができなくなることが心配されています。

実際に、2014年9月以降には全国の電力会社が次々に、太陽光発電について、新規の設備設置や売電申請の受付を中断することを発表しました。発電量が上回った場合には、二次電池に電気を貯めておけばよいではないか、ということなのですが、貯めておくことができる電気の量には限界があり、これ以上設備が増えると、電力の安定化が保てなくなることから、各電力会社は、買取を中断せざるを得なくなったのです。

2016年1月時点では、条件付きで買取が再開されています

が、電力会社は再生可能エネルギー事業者に年間の時間を決めて出力抑制を要請することができるようになっていきます。

大型発電設備が増えていけば、出力抑制が要請されることがさらに多くなる可能性があり、メガソーラー設備を稼働中、あるいは建設中の再生可能エネルギー事業者などにとっては大きな損失を負うことになりかねません。

この状況の解決のためにも、二次電池のさらなる大容量化など、性能の向上が期待されます。

スマートグリッドでの再生可能エネルギー利用

今までの電力システムでは、大規模発電所を中心として、起こした電力を長距離の送電網で必要な場所に送っていました。大規模化によって、安定化とコスト低減を実現してきたのです。

しかし、これまで説明してきたように、太陽光、風力などの再生可能エネルギーの利用が大幅に拡大してきています。一般家庭の屋根は、ミニ太陽光発電所になりますし、プラグイン電気自動車も、時にはミニ発電所としての機能を発揮するようになります。そのため、これからは大小規模の数多い発電所を、時々刻々と変化する電力需要に合わせて運用する技術が必要になります。電力需要そのものを、利用者の利便性を大きく損なわない範囲で制御する⁸ことも必要になるかもしれません。

このような電力システムで、決定的に重要な役割を果たす技

⁸ たとえば、家庭の電力需要で、冷蔵庫消費電力が占める割合は大きなものですが、住民が留守をしている時間帯、つまり冷蔵庫の扉の開閉をすることが無い時間帯に、多少の時間冷蔵庫のモーターを止めても、生活に支障は起きないでしょうし、電力のピークカットには役立ちることになります。将来のスマートグリッドでは情報通信技術の助けを借りて、そのような制御も行われることになるかもしれません。(実証実験はすでに行われています。)

術が、情報通信技術（ICT : Information and Communication Technology）であり、据え置き型の蓄電技術です。電気の供給側と需要側の状況に応じて、賢く電力の流れを制御して最適化することで、再生可能エネルギーによって発電された電気を有効に活用し、省エネルギー効果を高めるとともに、停電対策などの電力の安定供給を図ることができます。

そのような賢い送配電網のことを、スマートグリッドと呼び、世界中で注目が集まり、技術開発がすすめられています。

スマートグリッドについては、本シリーズ Vol.7「スマートに安全・確実に電気を使う」で詳しく紹介していますので、是非そちらも読んでみてください。

コラム：電気の供給と消費のバランス（同時同量）

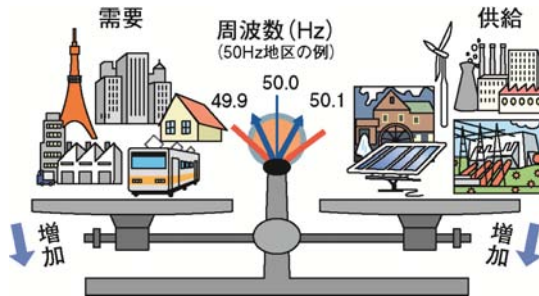
電気は、供給される量と消費される量が同時同量で、ある地域内で一致するよう（電気の周波数が常に一定の範囲を保つよう）に電力会社によって常に制御されています（図）。

なぜ周波数を一定に保たなければならないのでしょうか。

工場などで利用される電動機や発電機の多くは、系統周波数に連動して回転しています。周波数の変動は、繊維、製紙業における巻き取り機や、製鉄、アルミニウム業における圧延工程（ローラーで圧力をかけて鉄やアルミニウムなどを一定の厚さにする工程）など、製品の品質に影響を与える場合があります。また、周波数の変動範囲を小さくすることで、効率の高い発電所を作ることができます。

時々刻々と変化する電気の需要に対して供給する電力を完全に追従させることは不可能なため、平常時には標準値からの周波数のずれ（周波数偏差）がある範囲内（日本では、 $\pm 0.1 \sim 0.3\text{Hz}$ ）に収まるように制御されています。

電気の周波数や同期のしくみについては、本シリーズの Vol.5 の中で詳しく説明していますので、参考にしてください。



2 電気エネルギーを貯める技術

電気は大変便利に使えるエネルギーですが、本シリーズのVol.4、5でも紹介されているように、通常は、使われる分だけ発電して送られるもので、大量に貯めておくことはとても難しいという特徴があります。

ここでは、古くから用いられてきた電池についての一般的な説明と、電池以外も含めたさまざま電気を貯める技術の紹介の後、現在大いに注目されている二次電池について説明します。

電気を貯める電池

化学電池のしくみ

電気を貯める電池には、電気を「使い捨て」する一次電池と、充電して繰り返し使う二次電池があります。一次電池も二次電池も、化学エネルギーを電気エネルギーに換えて使うもので、化学電池と呼ばれる種類に分類されます。

電気が流れることは、物質内を電子が流れることを意味していて、化学電池内には、電子を受け取る「還元反応」を起こす場所（正極）と、電子を放出する「酸化反応」を起こす場所（負極）があり、この二つの場所は、電気を通さない物質（絶縁体）で仕切られています。化学電池では、その二つの場所を外側から導線でつなぐことで電気を流すことができます。

電池に使われる金属の性質によって、電子を受け取りやすいのか、放出しやすいのかが決まり、この性質によって電池の電圧も決まります（図24）。

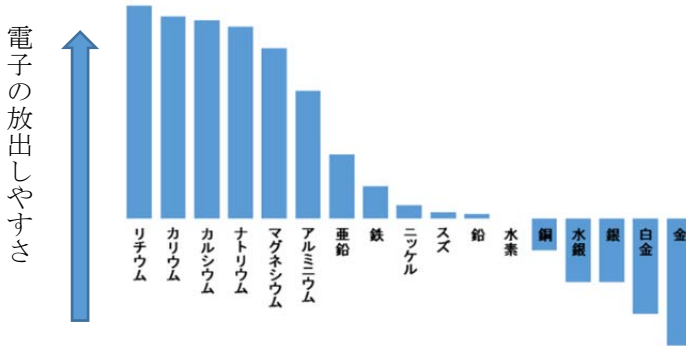


図 24 電池の性能に関わる金属の電子の放出しやすさ

コラム：世界初の化学電池「ボルタ電池」

世界で初めての化学電池は、1800年にイタリアの自然哲学者で物理学者だったボルタによって発明されました。ボルタ電池は、銅板と亜鉛板を用いて作られていて、1.1Vの電圧を持つ一次電池でした。

ナポレオンの敬意も受けていたボルタの名前は、電圧の単位であるV（ボルト）の由来にもなっており、ユーロが導入される前の10,000リラ紙幣には、ボルタの肖像とボルタ電池が描かれていました。化学電池を発明したボルタは、イタリアの英雄なのです。



ボルタとボルタ電池が描かれた紙幣

*参考資料：前島正裕・一原嘉昭「紙幣になった科学者・技術者」
電気学会誌（1994）

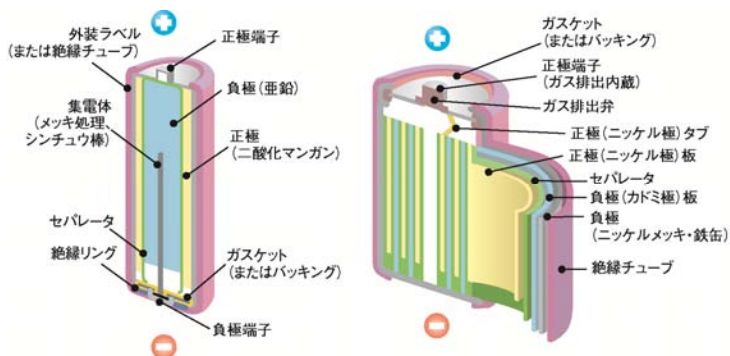


図 25 アルカリ電池 (左) とニカド電池 (右) の構造

一次電池と二次電池

代表的な一次電池には、一般に乾電池として使われるマンガン電池、アルカリ電池 (図 25 (左)) などがあります。

実は、マンガン電池とアルカリ電池に使われている材料は全く同じで、電圧も 1.5V と同じですが、酸化反応を起こす負極の材料の加工方法と電解質が工夫されているアルカリ電池のほうが、大きな電流を効率的に取り出すことができ、電池の持ちも良いという特徴があります。

二次電池は、鉛蓄電池、ニッケルカドミウム (ニカド) 電池 (図 25 (右))、ニッケル水素 (Ni-MH) 電池、そしてリチウムイオン電池という順番で開発されました。ニッケル水素電池の電圧は 1.2V で、ニカド電池と同じながら、ニカド電池の 2 倍の容量を持ち、毒性の強いカドミウムを使わなくて済むという利点とともに、一次電池である乾電池と共通で利用できる標準化されたサイズで販売されているため、アルカリ電池などの



図 26 市販のニッケル水素電池の例

代わりとして一般的に用いられるようになっていきます(図 26)。

そして、ニッケル水素電池よりもさらに小型で容量が大きく、電圧も 3.7V と非常に高いリチウムイオン電池が開発され、携帯機器などに使われるようになっていきます。

二次電池では、2つの金属の間を、電子を運ぶイオンが行ったり来たりすることができます。つまり、電子を放出する反応と、そのまったく逆の、電子を受け取る反応を一つの電池の中で行うことができるので、充電が可能なのです。

ではなぜ、マンガン電池やアルカリ電池などの一次電池は充電できないのでしょうか。実際には、全く充電できないわけではありませんが、充電してもう一度電気を作り出せるようにするためには、放電する前と全く同じ状態に戻さなければなりません。一次電池では、充電する反応の過程で水素などのガスが発生してしまうため、完全に元の状態に戻すことはできません。

また、発生したガスの圧力に耐えられる構造になっていないため、無理に充電すると熱を持つことや、最悪の場合には爆発する危険があります。世の中には、一次電池を充電できることを売り文句にした充電器が売られていることがありますが、大変危険なことなので、一次電池は充電しないもの、と覚えておきましょう。

コラム：「一次」、「二次」？ってなあに？

使い切りの電池は「一次電池」、繰り返し充電可能な電池は「二次電池」と呼ばれていますが、「一次」と「二次」とは、なにを意味しているのでしょうか。

繰り返し充電できる二次電池が開発された 19 世紀には、今のように、電力会社があったわけでも、コンセントがあったわけでもありません。では、どのように充電していたのでしょうか。

実は、化学反応によって電気を作り出すことのできる電池、つまり現在「一次電池」と呼ばれている電池を使って充電していました。

そのため、電気を供給する側の電池は「一次電池」、その電池から充電される側の電池は「二次電池」と呼ばれるようになったのです。

ちなみに、本シリーズの別の冊子の中では、「一次エネルギー」と「二次エネルギー」という言葉も出てきますが、この場合は、自然にあるものをそのままエネルギーにしているものが「一次エネルギー」で、天然ガス、石油、石炭、そして、太陽光や水力などがそれにあたります。

一方、「二次エネルギー」は、一次エネルギーを変換して、都市ガスや電気、ガソリンなど、使いやすい形にしたもののことを指します。

コラム：二次電池の容量

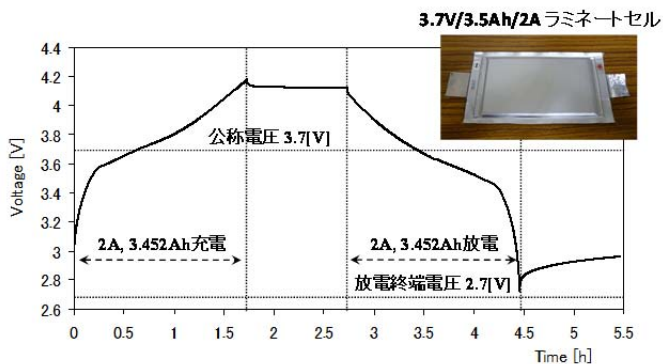
電気の大きさを表すのに、電圧（単位はV：ボルト）、電流（A：アンペア）、電力（W：ワット）、電力量（Wh：ワットアワー、またはワット時）があることは、良く知られています。このうち、電気がする仕事*の大きさを表すものが電力量（Wh）です。しかし、二次電池の容量は、本小冊子 p.8 の「スマートフォンのバッテリー容量の読み方」にあるように、Ah（アンペアアワー、またはアンペア時）が使われることが多いようです。これは、電池の内部で進む化学反応が、電子が何個動いた（電流の積算）かによって決まっている面が強いからです。

しかし、単位が Ah では、電池でどれだけの仕事ができるか、瞬発力はどれぐらい出せるかなどが良くわかりません。つまり、実際に電池を使う上では、WやWhの単位ではどうなっているかが重要になります。

図に、リチウムイオン電池の充電・放電特性の例を示します。充電と放電は、2A の一定で行っています。この図にあるように、電圧は充電や放電に伴って上昇、下降します。そのため、使える最大の電力は、公称電圧と最大の電流の掛け算で与えることになっています。この時、最大の電流の大きさは、電池に悪い影響（内部発熱による寿命の低下など）を与えない限度として決められます。

また、Wh としての容量は、満充電から放電終端電圧までに流れた電流の積算（これが Ah に相当します）と公称電圧を掛け算して与えられます。

しかし、厳密にいうと、流す電流の大きさによって電圧が変わるので、電池の容量を表す W や Wh、Ah の値を求めするには、電流の大きさを決めておく必要があります。



リチウムイオン電池の充電・放電特性の例

*仕事とは、エネルギーのことで、その大きさはジュール (J) やワットアワー (Wh) という単位で表され、 $1[J] = 1[W \times s]$; ワット×秒)、 $1[Wh] = 1[W] \times 1[時間] = 1[W] \times 3600[秒] = 3600[J]$ の関係があります。詳しくは、Vol.3 の pp.38-39 を参照してください。

電気を貯める技術

電気を貯める難しさ

例えば、再生可能エネルギーなどで発電しすぎて使われなかった電気は貯蔵しておいて、電気の供給が不足した時にその電気を使えば、同時同量の条件を満たすことができます。

言葉にすると簡単なことのようにですが、充電して使える二次電池は、電気を化学エネルギーに変えて貯え、使うときに再び電気エネルギーに戻す仕組みになっているため、瞬時に大きな電気を供給することが苦手です。また大量の電気の貯蔵には大きなスペースと費用が必要になります。だから、電気を貯めるのは難しく、これを解決する技術開発が進められています。

電気エネルギーに変換して使うエネルギーのいろいろ

現在電気は、位置、化学、電気、磁気、運動エネルギーとして貯めることができます。

位置エネルギーを利用した揚水発電は、設置場所に制約があるものの、大量の電気が貯められ、電力需要の平準化、周波数変化の抑制用に長年貢献し使われてきた電力貯蔵設備です。

電気エネルギーを利用した電力コンデンサーは、二次電池に比べて瞬時に大量の電気の充電、放電が可能で、パワー半導体素子の大容量化・高電圧化と制御技術の進歩に伴い利用が拡大してきました。

電気化学エネルギーを利用した二次電池には、鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池の他に、ナトリウム硫黄(NaS)電池、レドックスフロー電池などがあります。二次電池は、機能の向上、小形軽量化、価格の低減化などに伴い、小規模なものから大規模なものまで、さまざまな用途での利用が広がり、さらに、全く新しい電池材料についての検討も進められています。

運動エネルギーを利用したフライホイールは、瞬時の停電対策用、鉄道の列車減速エネルギーの貯蔵などとして古くから利用されています。

磁気エネルギーを利用した超電導⁹電力貯蔵装置は、電気の出し入れ速度が速いことから瞬時の停電対策用、電力の安定化用として開発され利用されています。

表2に、電気を貯めるさまざまな方法について、その特徴と用途を簡単にまとめます。

⁹ 超電導は超伝導とも書きます。同じ意味です。

表 2 電気を貯める形態とその特徴

貯めるエネルギー	貯める方法	特徴、用途
位置エネルギー	揚水発電所	負荷の平準化として大電力を貯蔵できる。大きなものは、470MW (470,000kW) /台、6台で発電所出力2、820MW (282,000kW) になる。
電気エネルギー	電力コンデンサー	瞬時に大きな電力の出し入れができる。瞬時電圧低下補償装置用。10MVA・秒 (10,000kVA・秒) 等。IT 機器、HEV 車等。
電気化学エネルギー (二次電池)	ナトリウム硫黄電池	負荷平準化、非常用電源として比較的大きな電力貯蔵ができる。34MW (34,000kW) ・244.8MWh (244、800kWh) 等。
	レドックスフロー電池	負荷平準化や停電対策として比較的大きな電力貯蔵ができる。太陽光、風力発電出力変動抑制用。15MW (15,000kW) ・60MWh (60,000kWh) 等。
	リチウムイオン電池	単位重量あたり大きな電力が貯められる。太陽光・風力変動抑制用。20MW (20,000kW) ・20MWh (20,000kWh)、EV 用 25kWh 等。
	ニッケル水素電池	単位重量あたり大きな電力が貯められる。鉄道用バッテリーパワーシステム (地上設備)、IT 機器、EV 車用など。約 3MW (3,000kW) ・420kWh 等。
	鉛蓄電池	歴史が長く性能が安定している。風力変動抑制用、産業用、自動車用など。10.4MWh (10,400kWh)。
運動エネルギー	フライホイール	短時間で電力貯蔵ができる。電車線の回生電力貯蔵。瞬時停電対策用など。3MW (3,000kW) ・25kWh 等。
磁気エネルギー	超電導電力貯蔵装置	高効率、高速応答。瞬時電圧低下補償装置用など。5MW (5 千 kW) ・1 秒等。

MWh : メガ (1,000 キロ) ワットアワーを表す単位

フライホイール : 回転部分に運動エネルギーを貯めるはずみ車

個人個人が電気の供給者にもなり、いろいろな用途でこれらの蓄電設備が分散して設置されるなか、これからは、これらの設備が単独で機能するのではなく、スマートグリッド技術のように、多数の分散型電源や負荷と連動して、全体的なシステム制御のしくみが構築されることも求められます。

揚水発電の特徴

本シリーズの Vol.4 でも紹介しているように、揚水発電は、長年にわたり利用されてきた電力貯蔵設備です。

揚水発電は、高さに違いのある上部と下部に調整池（ダム）をそれぞれ作り、水力発電と同じように上部から下部に流す水の流れで水車と発電機を回して発電します（図 27）。

水力発電とは異なる揚水発電の特徴は、電力需要の少ない時間帯に、発電機をモーターとして、水車をポンプとして下部ダムの水を上部ダムに汲み上げて貯めることで、電気を水の位置エネルギーとして貯め、これを効率よく繰り返し使うことができることです。

東日本大震災のあと、ほとんどの原子力発電所が停止し、夜間の原子力発電による余剰電力が利用できない状況が続いていましたが、揚水発電は、夏の暑い時期の昼間の電力ピーク対策の貴重な電力供給源になっていました。



図 27 揚水発電所の概要

最近では、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が進められ、その出力が大きくなっていることから、発電したものの使われなかった余剰電力を揚水発電所の汲み上げに使用することで、短時間の出力変化を安定させるなどの、新しい役割があります。

特に、可変速揚水発電（揚水時にポンプの回転数を変えて電気の使用量を調整できる発電）は、揚水運転時にも短時間で電気の使用量を調整することが可能で高付加価値化、多機能化の傾向にあります。

ハイパワー用電力コンデンサーの特徴

コンデンサー¹⁰⁾は、従来から電子回路用や電力用として使われてきましたが、最近の性能向上や大容量化に伴い、産業用、電力用にも用途が広がって来ました。

容量は少ないけれど短時間で充電、放電ができるコンデンサーは、無酸素運動で瞬発力の高い短距離ランナーに、充電に時間がかかるけれど、容量が大きい蓄電池は、有酸素運動の長距離ランナーにたとえることができます（図 28）。

つまり、蓄電池はコンデンサーに比べて体積、重量あたりに貯められる電気の量が多く、コンデンサーは瞬時にらせる電気の量が大きいのが特長です。ここでは、代表的なハイパワー用電力コンデンサー技術を 2 つ紹介します。

¹⁰ 電池を発明したボルタは、検電器を強く働かせるための仕組みとして、薄い絶縁体を 2 枚の金属ではさむことにより、多くの電荷を貯められることを利用した器具などを考案し、その仕組みからこれらを Condenser（コンデンサー）と名づけました。ちなみに condense には濃縮する、凝縮するという意味があります。今では一般的に、電気を貯める容量（Capacity（キャパシティ））を持つ素子という意味で「Capacitor（キャパシタ）」とも呼ばれています。



有酸素運動(蓄電池)



無酸素運動(コンデンサー)

図 28 蓄電池とコンデンサー

(1) 電気二重層コンデンサー (EDLC)

電気二重層コンデンサー (Electric double-layer capacitor : EDLC) は、電気二重層 (溶媒分子などの層とイオン層の二重の層) という物理現象を利用して直接電気を貯めることで、効率を高めたコンデンサーです。1980 年代から主に電子回路用として実用化され、その後、高性能材料の開発による大型化が進み蓄電設備としての用途が拡大しつつあります。

電気二重層コンデンサーの特長は、大きな静電容量 (電荷を蓄える量) が得られ、急速な充放電ができることなどです。そのため、瞬間的に起こる電圧低下を避けるための装置 (瞬時電圧低下補償装置) や、電車減速時の短時間のエネルギーを貯蔵する装置 (電気鉄道用電力貯蔵装置) などに使用されています。

(2) リチウムイオンキャパシタ (LIC)

リチウムイオンキャパシタ (Lithium ion capacitor : LIC) は、電気二重層コンデンサーとリチウムイオン電池の短所を補い合うような特徴を持つキャパシタ (コンデンサー) です。

リチウムイオンキャパシタの特長は、キャパシタの短所であるエネルギー密度を高めたことと、一つの電池の電圧を高めて

大容量化を可能にしたことなどです。

リチウムイオンキャパシタは、瞬時電圧低下補償、無停電電源、太陽光・風力発電の安定化、車のアイドリングストップ用などの用途で利用されています。

フライホイールの特徴

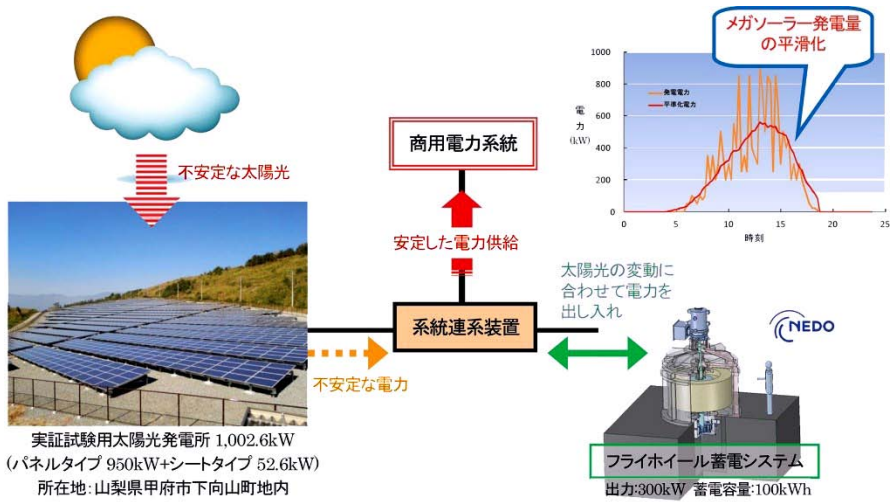
フライホイールは、電気エネルギーを高速で回転する独楽のような構造のフライホイールの回転運動エネルギーに換えて貯蔵する装置です。高速での電力制御が可能であること、寿命が長いことなどから、核融合や粒子加速器のように瞬間的に大きな電力が必要な用途や、太陽光発電や風力発電設備での発電電力の変動を緩和する用途などに使用されています。

大容量化の限界と、長時間運転の場合にエネルギーの損失が大きいという短所があるため用途が限られていましたが、超電導技術などを応用したこれらの改善によって、次世代の蓄電設備となることが期待されています。

2015年には、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」助成事業として世界最大級の実証機が完成し、本格的な実証試験が始まっています(図29)。

超電導電力貯蔵装置の特徴

磁気エネルギーを利用した超電導電力貯蔵装置は、超低温(液体窒素： -196°C 、液体ヘリウム： -269°C など)下に置いたコイル(リング)に電流を流すと抵抗がゼロになり、電流が減衰せずに流れ続け、一定の磁場を発生し続ける現象を利用して、電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯める装置です。



実証試験用太陽光発電所 1,002.6kW
 (パネルタイプ 950kW+シートタイプ 52.6kW)
 所在地:山梨県甲府市下向山町地内

図 29 フライホイール蓄電システムによる太陽光発電の変動補償
 (画像提供:公益財団法人鉄道総合技術研究所)

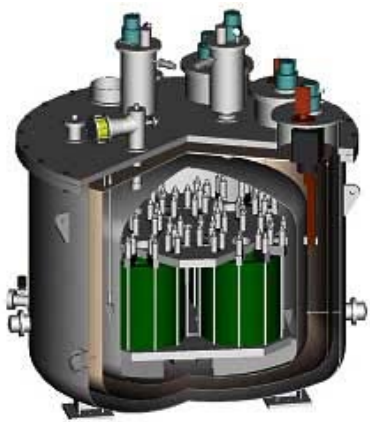


図 30 5,000kW・1秒補償級 超電導電力貯蔵装置
 (出典:中部電力株式会社 HP プレスリリースバックナンバー
 「超電導電力貯蔵システム SMES のフィールド試験の実施について」)

この装置は、通称スメス (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) と呼ばれ、電力の出し入れ速度が速く、エネルギー貯蔵効率が良いことから、瞬時の電圧低下対策用や変化する電力の安定化用として利用されています (図 30)。

代表的な二次電池とその特徴

二次電池の種類

化学エネルギーとして電気を貯める二次電池の種類を表 3 に示します。二次電池は、できるだけ小型、軽量で、貯蔵できるエネルギーが大きいほうが望ましいので、二次電池の性能は、電池の重量あたりの貯蔵エネルギーを表す「重量エネルギー密度 (Wh/kg、ワットアワーパーキログラム)」、または電池出力を表す「重量出力密度 (W/kg、ワットパーキログラム)」で表されます。

また、電池の体積に対するエネルギー密度あるいは出力密度として、「体積エネルギー密度 (Wh/l、ワットアワーパーリットル)」、「体積出力密度 (W/l、ワットパーリットル)」で表される場合もあります。エネルギー密度は、どのくらい貯められるか、出力密度は、瞬時にらせる電力の大きさを表しているといえます。

鉛蓄電池

鉛蓄電池は、1859 年にプランテがプランテ式蓄電池を発明して以来 160 年近い歴史をもち、今でも経済性、信頼性、安全性から主要な二次電池として産業用、自動車用、非常用電源などに広く利用されています。また、電力貯蔵用としては、数 MW 程度の中規模までのものに使われています。

表3 化学エネルギーによる二次電池の種類

	鉛	ニッケル 水素	リチウム イオン	ナトリウム 硫黄	レドックス フロー
エネルギー 密度 (Wh/kg)	35	60	200	130	10
大容量化	○ ~MW	○ ~MW	○ MW	◎ MW以上	◎ MW以上
充電状態の 計測・監視	△	△	△	△	◎
安全性	○	○	△	△	◎
資源量	○	△	○	◎	△
加温	なし	なし	なし	>300℃	なし
寿命 (サイクル数)	17年 (3,150)	5-7年 (2,000)	6-10年 (3,500)	15年 (4,500)	6-10年 (制限なし)

(経済産業省蓄電池戦略プロジェクトチーム平成「蓄電池戦略」平成24年7月より作成)

鉛蓄電池は、他の蓄電池と比べて重量あたりの価格が安く、電圧が2Vと比較的高い特長があります。欠点として、エネルギー密度が小さく、大きい設置スペースを要すること、設置する床への荷重を考慮する必要があることが挙げられます。

一般的には、充電時に電池内で発生したガスを内部吸収し、電解液が減らないように密閉化したもの(「制御弁式」と言い、補水の必要がない)が用いられますが、風力発電の出力変動の制御用には、寿命を高めた長寿命のものが製作され、使用されています。

ニッケル水素電池

ニッケル水素電池が開発されるまでは、ニッケルカドミウム

電池が使われていましたが、毒性のあるカドミウムを使わなくて良いこと、ニッケルカドミウム電池や鉛蓄電池の約2倍のエネルギー密度を持つことから、携帯用のものから、自動車用や定置用のものまで幅広く開発が進められました。

ニッケル水素電池の特徴は、電池内の電極板サイズや枚数を増やすことで大容量化が容易になること、危険物を含まないため安全性が高く、高速な充放電が可能であることなどが挙げられます。

川崎重工工業株式会社が開発した「ギガセル」は、従来円筒型だったニッケル水素電池をバイポーラ構造と呼ばれる構造に改良し、放熱効果を高めることで、大容量、高速充放電可能で、しかも、温度上昇の少ない安全な電池として、鉄道システム用蓄電設備や再生可能エネルギーによる発電の安定化にも寄与しています（図31）。

リチウムイオン電池が登場するまでは、ワイヤレスで利用される電話や掃除機などにも利用されていましたが、小型化や軽量化などの性能が求められるビデオカメラやノートパソコンなどの電池は、リチウムイオン電池に置き換わっています。

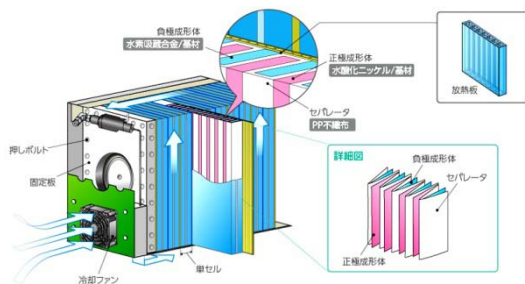


図 31
ギガセルの
構造図
(画像提供：
川崎重工株
式会社)

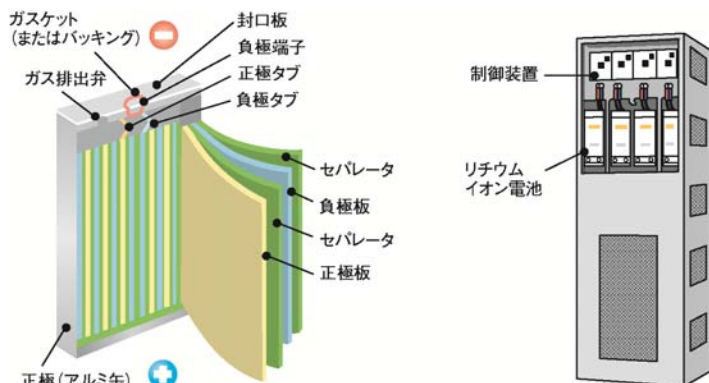


図 32 リチウムイオン電池の構造 (左) と 蓄電システム例 (右)

リチウムイオン電池

携帯電話やノートパソコンなどの携帯機器の高性能化により、小形軽量で高性能な二次電池の要求が高まりリチウムイオン電池の開発が進み、同時に自動車用、産業用、大規模電力貯蔵用にもその利用が広がっています。

リチウムイオン電池の特長としては、単電池の電圧が 3~4V と高いこと、エネルギー密度が高く、軽量、小形化ができることなどが挙げられます。図 32 にリチウムイオン電池の構造図と蓄電システムの例を示します。

電力用リチウムイオン電池は、自然エネルギー発電による電力変動の安定化などに、小形リチウムイオン電池は、家庭用・業務用電力貯蔵設備、無停電電源装置のバックアップ用、医療機関の停電対策用など、さまざまところで使われています。

ナトリウム硫黄 (NaS) 電池

NaS 電池は、他の二次電池に比べて大容量であることが大きな特徴で、応答速度も速いことから、停電や短時間停電対策用

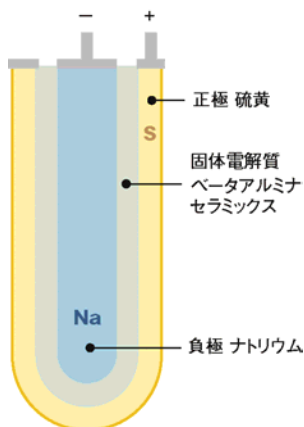


図 33 ナトリウム硫黄 (NaS) 電池の構造

の電池として利用されているほか、消防法に基づく消防用設備の非常用電源としても設置されています。

NaS 電池は、その名の通り、ナトリウムと硫黄を材料とした電池で、ナトリウムを通す性質を持つ固定電解質「ベータアルミナセラミックス」が使われていて、ナトリウムが正極と負極を行ったり来たりできるため、充電と放電を繰り返し行うことができます (図 33)。

二次電池の中でもエネルギー密度が比較的高く、長寿命であることが特徴の一つです。また、自然界に豊富にある材料を使用しているため、量産化することでコストを下げられることも大きなメリットです。

ただし、NaS 電池は高温 (300°C以上) 下で使うことで初めて電池の役割を果たすことから、使っていないときにも常に加熱しておかなければいけないこと、一方で材料であるナトリウムと硫黄は燃えやすいことから、取扱には注意が必要です。

レドックスフロー電池

レドックス(redox)とは、還元(reduction)と酸化(oxidation)を合成した用語で、酸化還元という意味です。電池反応を行うセル(単電池)、活物質(電子の受け渡しを行う物質)の溶液を貯蔵する正負極のタンク、溶液循環用ポンプなどで構成され、交直変換(交流と直流を変換)装置を介して交流電源回路に接続されます。

レドックスフロー電池の特長は、出力(kW)¹¹を決定する単電池(セル)と、充電容量(kWh)を決定する容量部(タンク)が独立しているため、用途に応じて出力と充電容量の適切な配分の設計や配置が可能となることです。また、応答性が良いので、電力などの不安定な短い周期変動の吸収用途に適しています。

二次電池はリサイクルへ！

スマートフォンなどに使われている二次電池は、繰り返し利用できることはもちろん、使い捨てではなくリサイクルすることができます。それぞれ、電池にはリサイクルのマークが付けられていますので(図 34)、大切な資源を無駄にしないよう、リサイクルすることを心がけましょう。



(a) ニカド (b) ニッケル水素 (c) リチウムイオン

図 34 二次電池に表記されているリサイクルマーク

¹¹ p. 45 のコラム「二次電池の容量」を参照してください。

コラム：意外と深い、日本と電池の関わり

手軽に持ち運べることで、電池の使い勝手が飛躍的に良くなったのは「乾電池」のおかげです。この乾電池、実は、1887年に日本人の屋井先蔵^{やいさきぞう}という方が、世界で初めて実用化に成功し、「乾電池」と名付けたと伝えられています。屋井はその後、「屋井乾電池」を創業しています（特許や世界的な業績は、1888年にドイツのカール・ガスナーが発明したのが最初です）。

また、現在二次電池の中でも主流となっているニッケル水素電池やリチウムイオン電池の先駆けともいえるニッケルカドニウム電池を開発し、業界で初めて充電式ラジオに搭載したのは、日本の電機メーカーである三洋電機（現パナソニック）です。この電池は「カドニカ」の愛称で親しまれ、これによって、携帯機器の小型化が急速に進み、二次電池の存在意義が大きく変わるきっかけとなりました。

そして、現在二次電池の代表格としていろいろな用途で使われているリチウムイオン電池は、当時別々のところで研究開発に取り組んでいた二人の日本人研究者による成果から誕生しました。

本文の図 24 で紹介されているように、リチウムは非常に陽イオンになりやすく、また軽量であるため、大容量化、小型軽量化に最も適した負極元素になることは分かっていたため、金属のリチウムを負極とした一次電池は早くから開発、市販されていました。しかし、これを二次電池として充電して利用しようとすると、金属リチウムの表面にリチウムの結晶ができてしまい、絶縁されていなければならない正極と、負極にできた結晶が接触し、発熱発火するという大変危険な現象が起こることから、長年、リチウムを利用した二次電池の開発は難しいとされていました。

1980年頃、企業の研究者として新材料の利用について検討していた吉野彰博士は、それまでの発想を転換し、リチウムを含む材料を正極に使う、リチウムイオン電池の原型を考案しました。そしてちょうど同じ頃、イギリスに留学していた水島公一博士が、1982年にリチウム入りの正極材料の開発に成功したことを発表したのです。

この発表記事をたまたま読んだ吉野博士が、すぐに自分のところで開発していた材料と水島博士の材料を組み合わせることで電池を作成したところ、充電と放電が可能な二次電池として動作する電池ができました。

その後、さらに小型化が可能な負極の材料についての検討が進められ、小型で大容量で、しかも安全性も考慮された現在のリチウムイオン電池が誕生しました。

吉野博士と水島博士の発明によって、リチウムイオン電池が実用化されたことから、二人の博士には、ノーベル化学賞受賞も期待されています。



屋井乾電池



'カドニカ'電池

(画像提供 左：一般社団法人電池工業会 右：パナソニック株式会社)

3 「電気を貯める技術」のこれから

再生可能エネルギーの利用拡大

電力貯蔵の利用拡大に向けて

東日本大震災のあと、さまざまな分野で省エネルギー化を進めながら化石燃料に依存する割合を下げるとともに、再生可能エネルギーの利用促進、系統の広域的な運用、蓄電システムの利用などが進められています。

本冊子で説明したように、太陽光、風力発電のような出力変動の大きな電源が大量に電力系統に接続されると、需要と供給のバランスが崩れ、系統を安全に使用するための制約が出てきます。今後、電気の供給者が、従来の電力会社や自家発電事業者などに加えて、自治体、企業、個人などに拡大し、電気の使用面では、電気の貯蔵や電気自動車の導入がさらに進められていきます。

社会全体で、安全に安心して電気を利用するためには、ICT技術（情報通信技術）を活用した最適な電力の貯蔵の形やその使い方について検討を進める必要があります。

今よりさらに拡大した電力の運用システムへ

近年、我々一人ひとりが電力の利用者であると同時に、再生可能エネルギーによる電気の生産者として重要な役割を担うことが可能となってきました。

従来の「大規模集中型エネルギーシステム」（電力会社による大規模発電、長距離送配電）に、再生可能エネルギーや蓄電システム技術による「分散型エネルギーシステム」を加えて、安全でより効率の良いシステムを構築しようとする取り組み

が行われつつあります。

これまで、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー用設備の多くは、電気を使う場所で電気を作る、いわば地産地消で利用されてきましたが、その設置による経済性は、地域によって大きく異なります。

最近では、日本全体で見た時のエネルギーの有効活用を考え、再生可能エネルギーの広域的な活用に必要な送配電網の整備や、定常時、緊急時ともに効率よく、経済的に安定して電気を供給するための蓄電設備の設置が進められるなど、再生可能エネルギーを、地域を越えてより広域的に活用するための計画も進められています。

高機能な蓄電設備の開発から見える未来

電力貯蔵の技術開発

電池は、1800年にボルタによって初めて電池が開発されてから、多くの学者や技術者たちの手によって着実にその可能性を広げ、1859年にプランテが二次電池を開発したことで、新たな世界が開くといった歴史を着々と進んできました。

さらに、時代の流れに合わせて、さまざまな材料と構造の研究開発が進められたことによって、現代社会を支えるすばらしい技術が生み出し続けられています。

次世代を支える高機能蓄電池の開発には、新材料の評価、開発が重要なポイントになり、その組み合わせや可能性は無限にあるといっても過言ではありません。

1878年に銀座木挽町で日本最初の電灯（アーク灯）がイギリス人 W.E.エアトンにより点灯されてから 140年近くたった

今、電力技術の進歩は社会を大きく変えて利用者の生活を豊かにしてきました。いまや電気は、社会を動かす頭脳であり、血液であり、その活力そのものとなっています。

これからも、「電気を貯める」技術に求められるハードルは上がっていくばかりで、化学、物理、生物などの分野を超えた、広範囲な技術開発が必要になります。

今後も、携帯用、電気自動車用、再生可能エネルギー用、さらにはまだ見ぬ未来を支えるための激しい開発競争が国内でも海外でも繰り広げられていくことでしょう。

さらに高性能な「貯める技術」への期待

多くの機器、設備の利用者や社会が、さらに高機能、小型、軽量、安価な蓄電池、蓄電設備の出現を待っています。

携帯電話・スマートフォン、ノートパソコン、デジカメが「10秒で充電を終わらせてほしい。もっと長時間使えるようにしてほしい」と言っています。

電気自動車が「もっと長距離走りたい。走りながら充電したい。車に貯めた電気を家のなかでも使ってほしい」、電車が「停電のとき、せめて駅までたどり着きたい」と言っています。

太陽光発電が「夜でも使えるようにしてほしい」、風力発電が「風のないときにも役立ちたい」、高層ビルが「安価な夜間電力をもっと利用したい」、病院が「災害時でも安定した電力の供給を確保したい」、家庭や学校が「クリーンな電気をもっと使いたい」と言っています。

そして、電池自身が「古くなっても再利用してほしい。廃棄物となった時にも問題が起きないようにしてほしい。」と言っています。

10年後、20年後、そして100年後、これらの声はどこまで実現されているでしょうか。一つずつ実現されていく中で、また新たな声も続々と生まれていることでしょう。

これらの声の実現に、個人として、家族や社会の一員として、あなたにはどんなことができるでしょうか。そんなことを意識して、これからも電気のある暮らしを楽しんでいきましょう。

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 臼田 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

外部協力者 廣田 幸嗣 氏 ※

(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 Vol. 6

電気を貯める

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

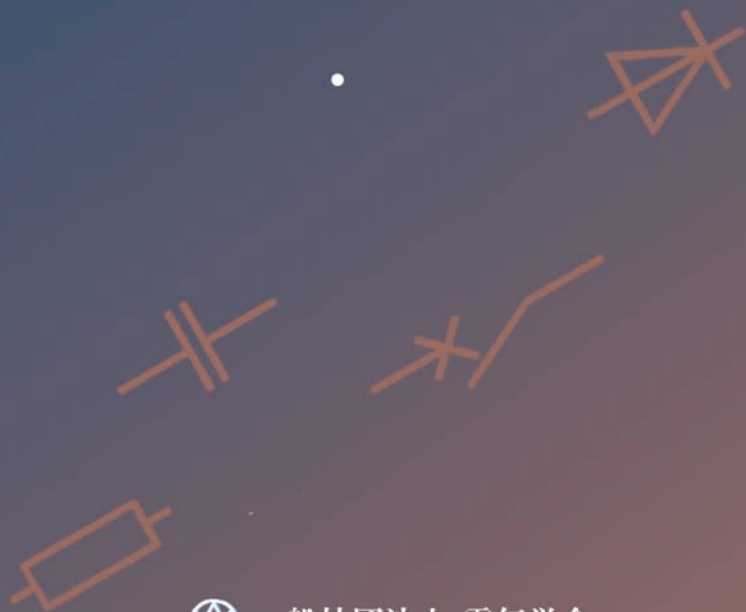
発行者 一般社団法人 電気学会
代表者 酒井祐之
〒102-0076 東京都千代田区五番町 6-2
Tel 03-3221-7312 Fax 03-3221-3704
<http://www.iee.jp>

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



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.7

スマートに安全・確実に
電気を使う

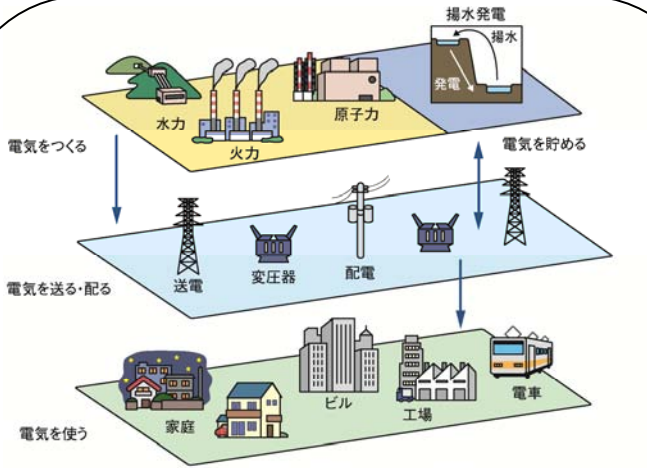
一般社団法人 電気学会

まえがき

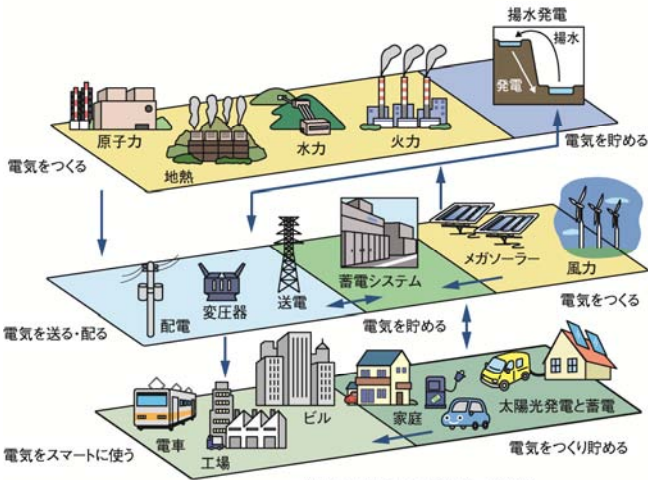
私たちは、電気をたいへん便利に使ってきています。その電気はどこで作られ、どのようにして私たちの手元まで送られてきているのでしょうか。これから、それはどのようになっていくのでしょうか。また、安全・確実に電気を使うにはどのようにすればよいのでしょうか。それがこの Vol.7 の主題です。

電気を巡る全体像が、今大きく変わってきているのです。図 1 を見てください。今までは、電気の流れは基本的に一方向でした。図 1(a)にあるように、火力、原子力、水力などの大規模な発電設備で電気を起こしました。それが第一層です。第一層で起こした電気を、電圧を上げて（昇圧して）遠くに送り、電圧を下げてきめ細かく配るために、第二層に流しました。第二層からは、一般家庭、事務所、工場などの電気を使う層（第三層）に電気を流しました。

この三層間の電気の流れ、各層内の電気の流れが大きく変わってきています。それを示したものが、図 1(b) です。火力、水力のような大規模発電設備に加えて、メガソーラーや風力などの中規模の発電設備が加わるとともに、家庭での太陽光発電設備などが設置され、従来、基本的に一方向だった電気の流れが双方向になっています。また、電気を蓄えるシステムがたいへん重要になってきています。



(a)これまでの電力エネルギーの供給



(b)これからの電力エネルギーの供給

図1 発電所から家庭までの電気の流れ

この電気学会の7冊の「電気の知識を深めよう」シリーズと、図1の三層の関係は次のようになっています。全体をVol.1で概観しました。使う立場での概観

が Vol.2 です。電気の来し方行く末を考えるため、その歴史を理解し、さらに科学的に理解するための理論を概観したのが Vol.3 です。以上が導入編と言えるでしょう。

そしてそれらの中で取り扱ったトピックスを発展させたのが、Vol.4～7 です。第一層について記述したのが Vol.4 です。第二層についての記事は Vol.5 を中心にして、Vol.6, 7 にもあります。第三層については Vol.7 を中心にして、Vol.6 でも説明しました。

さらに、このようにして送られてきた電気を上手にかつ安全に使うには、最新の技術に基づいた多くの工夫がなされています。また、電力自由化など、将来に向けて、電力システムは大きく変わろうとしています。さらに、地球温暖化など、エネルギー使用に関する地球規模の重要な問題もあります。

本冊子は 2 部構成となっています。第 1 部では、「スマートに電気を使う」というタイトルで、省エネルギーなどを中心に、電気を効率的に使う工夫と今後の電力システムの在り方について説明しています。第 2 部では、「安全・確実に電気を使う」というタイトルで、停電を防ぐさまざまな工夫や電気に関する安全について紹介しています。

これからの電気社会を考えるために、この Vol.7 を読んでみましょう。

目次

まえがき	ii
第1部 スマートに電気を使う	1
1 家の中の電気	1
家庭へ電気が来る道筋	1
大切な電気をうまく使うには	4
2 省エネルギー・省資源	7
我々ほどのくらいエネルギーを使っているか	7
どこにエネルギーは使われているのか	9
パワーエレクトロニクス技術による省エネルギー	10
電力損失を減らすには	12
家庭における省エネルギー	13
照明における省エネルギー	14
空調機器（エアコン）における省エネルギー	16
コラム：空調機（エアコン）の歴史と省エネ	19
熱の有効利用	22
省資源を考える	24
コラム：ヒートポンプ	25
3 直流電気を使った、電気の有効活用	27
交流 vs 直流	27
家の中の直流電気	30
直流技術の研究開発	37
交流中心のシステムから交流と直流が共存する社会へ	38
4 スマートグリッドとスマートコミュニティ	43
電気を使うには発電所が必要	44

再生可能エネルギーによる発電	45
太陽光や風力による発電の特徴～出力変動	47
電気の使い方	48
課題の解決に役立てる	48
スマートメーターとスマートハウス	50
電気を賢く使うスマートハウス	50
スマートグリッドからスマートコミュニティへ	54
情報通信の役割の重要性	56
5 電力自由化とは	58
日本の電力自由化の歴史	58
日本の電力システム改革の概要	59
自由化の対象となる電力システムの技術的特徴	61
電気という特殊な商品	61
コラム：樹木が引き起こした大停電	63
米国の電力自由化	64
英国の電力自由化	66
ドイツの電力自由化	68
日本の電力自由化の留意点	70
第2部 安全・確実に電気を使う	74
1 停電から暮らしを守る	74
クレーン船で大停電	74
停電はなぜ起こる	76
停電の起こる3つの理由	77
需要と供給のバランス	79
送電線は雷に弱い	81

誘導雷（電線に雷が落ちなくても事故になる）	84
停電を防ぐには	85
消費を予測し発電計画	85
雷を防ぐ架空地線	86
いったん切ってまたつなぐ	87
電力システムで停電を防ぐ	90
瞬時電圧低下	91
配電線事故時には？	93
開閉器で停電地域を最小化	94
ループにして停電を防ぐ	96
停電や瞬時電圧低下への使用者側での対策	98
自分の大切な設備は自分で守る	98
非常用電源設備のいろいろ	99
2 雷から建物や電気機器を守る	104
避雷器	104
避雷器は雷を避けるスイッチ	104
酸化亜鉛（ZnO）という奇妙な物質	105
送電線や配電線にも避雷器が	108
避雷針	110
避雷針の発明者は、あのフランクリン	111
コラム：日本で最初の避雷針	114
3 雷や感電から人を守る	115
雷から身を守るには	115
側撃（雷が鳴ったら、木の側は危険！）	116
足の間に発生する歩幅電圧	118
雷が鳴ったら、身に着けた金属は離すべき？	119

感電を防ぐには	120
接地（アース）は何のため？	121
コラム：接地はアース？ グランド？	124
危険な電流、安全な電流	125
通電火災	128
地震の後から起きる電気火災	129
本冊子の企画趣旨について	130
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	131

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

第 1 部 スマートに電気を使う

1 家の中の電気

家庭へ電気が来る道筋

図 2 にあるように、家庭への電気は、配電柱にある変圧器によって、交流の 6,600V(ボルト)の電圧を 100V または 200V に下げて使います。通常、家庭には単相 3 線式といって 3 本

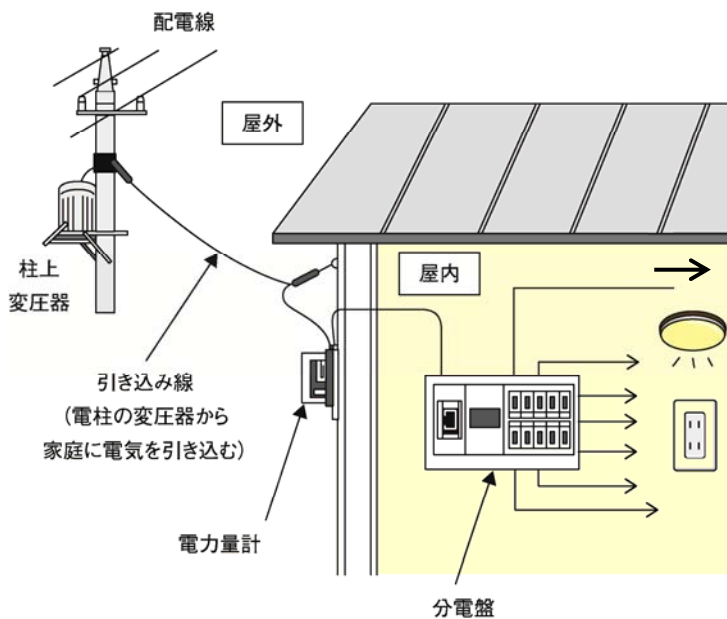


図 2 配電線から家の中に電気が来る道筋

ての線で電気が取り入れられています¹。

柱上変圧器からの線は、まず電力量計につながります。電力量計は使用した電力量を測る装置です。これまでは、流れる電流に応じて機械的に円盤が回る図 3 のような回転型電力量計が使われていましたが、使われた電力量を電子回路によって測定する電子型電力量計、さらに通信機能などを付加し、種々の情報をやりとりできるようにしたスマートメーターと呼ばれる新型の電力量計も使われるようになりました。スマートメーターについては、第 1 部の 4 章で説明します。



図 3 回転円盤型電力量計

電力量計を出た線は、屋内の分電盤に入ります。分電盤では、電気の使い過ぎや事故などで予定外の大きな電流が流れた時に回路を切るための漏電ブレーカーや遮断器がついています。

この分電盤で電気を分けて、100V または 200V で照明や屋内のコンセントにつなげられています。クッキングヒーターや

¹ 詳しくは、本シリーズの Vol.3「電気の基本を考えてみよう」の「4. 電気を正しく使う」をご覧ください

エアコンなど、多量の電気を消費する機器は 200V で使われることもあります。テレビや冷蔵庫、洗濯機、電灯など多くの家電機器は 100V で使われます。

ちなみに日本では家電機器は 100V が一般的ですが、世界的にみると、むしろこれは例外的な電圧です。北アメリカや、ブラジルなど南アメリカの北部の国は 110～127V であり、ヨーロッパやアジア、アフリカなど、他のほとんどの国は 220～240V が使われています。

海外へ行くと、電圧の違う日本の電化製品はそのままでは使えませんので、昔は海外旅行をするときには小型の変圧器などを持っていく必要がありました。しかし、最近はパソコンや電気シェーバーなどは交流を直流に代えて使うようにしており、その変換器も交流の 100V から 240V まで使えるものが増えてきましたので、電圧の違いを気にする必要は少なくなりました。ただし、プラグの形は図 4 のように国内と海外ではかなり異なる場合がありますので、注意が必要です。



図 4 さまざまな形のプラグ

大切な電気をうまく使うには

家庭に入った電気は、電灯をはじめとして、テレビ、冷蔵庫、洗濯機、パソコンなどさまざまな用途に使われています。電灯というとエジソンの名前が思い浮かびますが、エジソンは直流の110Vで配電システムを作りました。交流システムはテスラという人が提案し、ウェスチングハウスという人が実用システムとして構築しましたが、テスラは240Vが最適と考えていたようです。エジソンは安全性を考えて110V程度の電圧にしたようですが、このあたりが、同じ交流でも100V系システムと200V系システムが生じた理由のようです。この時、電力システムとして、交流が良いか直流が良いかの大論争が起きました。現在は、世界的に交流で電気が送られる場合が多いですが、実際に使う時には直流の方が便利な場合も少なくありませんので、それについては、3章で説明します。

電気は限られたエネルギーですので、大切に使う必要があります。そのために家電機器の省エネルギー化が進められています。特に、照明は省エネルギー効果の高いLED²が多く使われるようになりました。また、日本の夏は蒸し暑いのでクーラーはかかせなくなっていますが、最近は冷やすばかりではなく、一台のエアコンで夏は涼しく、冬は暖かく、という快適な生活ができるようになってきました。このような空調機器でも省エネルギー化は著しく進んでいます。このような省エネルギーの話は2章で詳しく紹介します。

² Light Emitting Diode の略。詳しくは Vol.2 の p.22 を参照下さい。

また、さらに一步進んで、家庭やビルで、エネルギーをうまく管理して電気の無駄遣いを省くということも進められています。これらは、家庭用エネルギー管理システム (HEMS)³、ビルエネルギー管理システム (BEMS)⁴などと呼ばれていますが、個別の家庭やビルのみならず、地域全体としてエネルギーを有効活用しようという、スマートコミュニティという考え方が進められています。かつては、電気は水力発電所、火力発電所、原子力発電所などの大規模の発電設備から、送電線や配電線を通して家庭まで電気が送られていましたが、最近では、太陽光発電設備や風力発電設備などの新しい発電設備も増えており、また一般家庭でも太陽光発電設備が使われることも増えています。さらに、電気自動車の普及に伴い、電気自動車に搭載されている電池を、蓄電装置として活用しようという考え方も生じてきました。

このような種々の異なった電源設備を社会全体として有効活用しようというのがスマートグリッドであり、さらにスマートコミュニティとは、電気エネルギーを中心に、ガス、鉄道、水道、産業など、非常に広範なレベルで社会全体としてエネルギーを有効活用し、快適な社会を構築しようとするものです。このような、社会としてのエネルギーの将来像については、4章で説明します。

最近の電気エネルギー分野のトピックとしては、何と云って

³ HEMSはHome Energy Management Systemの略でへムスと読みます。

⁴ BEMSはBuilding Energy Management SystemもしくはBuilding & Energy Management Systemの略でべムスと読みます。

も、2016年4月から始まった、電力自由化でしょう。電力自由化とは、電力会社以外の会社でも自由に電気を売ることができるようになったということですが、実は2016年以前からもこのようなことは一部認められていました。ただ、2016年4月からは、一般家庭についても電力の自由販売が認められ、誰でも電力を売ることができ、また好きな会社から電気を買うことができるようになったということです。このような電力自由化は海外ではすでに行われている国も多く、また電力自由化による弊害があることも分かってきました。各国、それぞれ置かれている状況が異なりますので、他国の例がそのまま日本にあてはまるとは限りません。「日本の電力システムはどうあるべきか」、これはかなり難しい問題ですので、5章で考えてみたいと思います。

2 省エネルギー・省資源

我々はどのくらいエネルギーを使っているか

電気もエネルギーのひとつの現れ方であって、便利で清潔で使いやすいことから、私たちは他のエネルギー源から電気エネルギーに変えて（エネルギー変換して）使っています。石油、石炭、ガスや水力などの一次エネルギーのうち、我が国ではその40%強を利用して電気に変換しています。60%弱の一次エネルギーは、熱源としてそのまま燃焼させて使ったり、自動車や船、飛行機などの燃料や、工業製品の原料となったりしています。

この一次エネルギー量を一人あたりの使用量としてみますと、2010年時点では、世界平均では2.5kW(キロワット)を、我が国では5kWを、アメリカでは10kWを常時使っていることとなります⁵。

一方、動物の一員としての人類を考えると、一日に必要なエネルギーは食品から得られ、約2,000kcal(キロカロリー)になります。これを上の数値に換算すると、約100W(ワット)となります⁶。この量は、体重でほとんど決まっていて、ハツカネズミ(体重約20g)では約0.15W、ゾウ(体重約4t)では

⁵ 産業や運輸などにも使われているエネルギーも含んだ値です。石油に換算すると我が国では、一人あたり約4t/年の使用量になります。エネルギー量としては、 $5 \times 1000 \times 365(\text{日}) \times 24(\text{時間} \times 3600(\text{秒})) \text{J}$ となります。なお、電気として使っているのは、我が国では約1kW(常時)となります。

⁶ $2000 \text{ kcal/日} = 2000 \times 1000 \text{ cal/日} = 2000 \times 1000 \times 4.2 \text{ J/日}$
 $= 2000 \times 1000 \times 4.2 \div 24 \text{ J/時} = 2000 \times 1000 \times 4.2 \div 24 \div 3600 \text{ J/秒}$
 $= 97.2 \text{ J/秒} \approx 100 \text{ J/秒} = 100 \text{ W}$

2,000W(=2kW)程度になっていて、人間の100Wもこの線の上にあります⁷。

つまり、人間は他の動物に比べて、世界平均では25倍の、我が国での平均では50倍のエネルギーを使っていることになります⁸。

このように人間は、動物として生きていくのに必要なエネルギーの数十倍を使って、快適な生活を送っているわけです。

しかし、このエネルギーは無尽蔵にあるわけではありません。このまま使っていって何年使えるかを可採年数⁹と言いますが、石油やガスでは数十年、石炭でも百年ちょっとしかありません。石炭は地球温暖化の主要な要因である二酸化炭素の排出量も多いため、そのまま無制限、無制約¹⁰に使っていくのは困難になってきています。

このため、できるだけエネルギーを使わないで、快適な生活を享受できるように考えていく必要があります。産業界では製

⁷ この関係は、標準代謝量(単位は[W]) $\approx 4.1 \times W^{3/4}$ (W: 体重[kg])で与えられます。例えば、本川達雄:「ゾウの時間ネズミの時間—サイズの生物学」中公新書、1992 なお、これは哺乳類の例であり、例えば爬虫類では係数が若干小さくなります。

⁸ これは一人あたりの数字ですので、人類全体としては原始時代に比べて人口も格段に増加していますので、人類が現在消費しているエネルギーの総量は膨大な量になっていることがわかります。

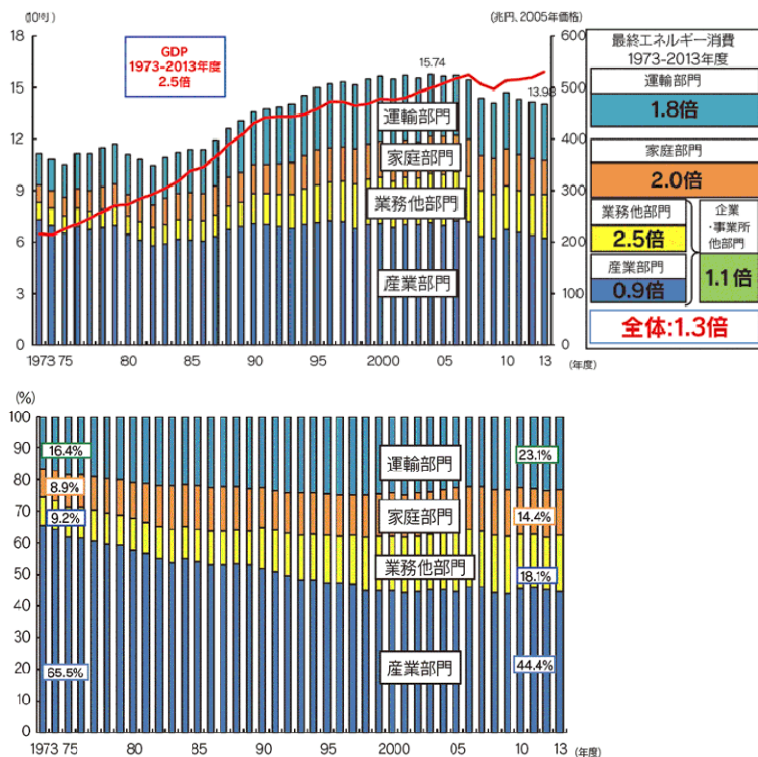
⁹ 可採年数=確認埋蔵量/年間産出量。確認埋蔵量は、「存在している場所、質および量が工学的根拠から明らかにされており、現在の技術で経済的に採掘が可能な量(=可採埋蔵量)」です。このため、確認埋蔵量や可採年数は年ごとに変化していきます。

¹⁰ 電気に変換する場合に二酸化炭素の相対的な排出量を少なくするには、発電効率を上げるのが効果的です。また、排出される二酸化炭素を集めて大気中に放出しないCCS(Carbon Capture and Storage)の技術も開発中です。

品製造でのエネルギー効率を高める工夫をさらに進めることが重要です。また分かりやすい例では、自動車の燃費の向上があります。

どこにエネルギーは使われているのか

日本のエネルギー消費を、産業、運輸、業務、家庭の4部門に分けて、今と昔とを比べたものが図5です。産業部門が多額の割合を占めているのは、今も昔も変わりませんが、その割



(出典:資源エネルギー庁 HP 「平成26年度エネルギーに関する年次報告」)

合は減ってきています。一方、業務と家庭部門は、石油ショック前の 1973 年から 2013 年までの間に、2.0 倍から 2.54 倍と大きく増加しています。

これからみても、家庭での省エネルギーが重要なことはよく分かりますが、個人としても、省エネルギーに貢献できることはたくさんあります。東日本大震災後は節電の意識がこれまで以上に高まりました。スマートメーターによる電気使用量の「見える化」によって、さらに効果的になることが期待されます¹¹。

パワーエレクトロニクス技術による省エネルギー

また最近ではパワーエレクトロニクスを使って、積極的に省エネルギーを行うことが進められています。パワーエレクトロニクスとは、スイッチとして動作させる半導体デバイスを用いた回路によって、電力変換を行う技術分野を指します。電力変換というのは、交流と直流の間の変換や、交流の場合はその周波数の調整、電圧や電流の大きさの調整などの電気の形態や大きさを変更することです。

家庭のコンセントの電気は 50Hz(ヘルツ)または 60Hz の交流ですが、実際の機器では直流や、数十 kHz(キロヘルツ)の高周波の交流の方が良い性能を発揮することが少なくありません。このため、機器の内部で交流から直流や高周波に電気を変換して使っている機器が、実はかなりあります。この変換を

¹¹ スマートメーターについては、第 1 部 4 章で紹介します。

する時に、エネルギーの損失をできるだけ発生しないことが、エネルギーの有効利用の点で重要です。

図 6 に、電力変換を行う回路と、その入力電力、出力電力、損失の関係を図示します。出力電力というのは、この電力変換回路が電力を供給する対象に与える電力です。身近な例で考えると、エアコンであれば圧縮機（コンプレッサー）やファンを回転させるためのモーター、照明器具であれば蛍光灯や発光ダイオード（LED）、電磁調理器であれば磁界を発生させるためのコイルに供給する電力にあたります。電力変換回路に電力の損失があると、電力変換器が電源から受け取る入力電力は、出力電力に損失電力を加えたものとなります。損失が大きければ、その分、電力変換器が電源から供給を受ける電力が増加し、エネルギーの有効利用の点で好ましくありません。また、この電力損失は熱となって回路の温度上昇を招くため、損失が大きいとその熱を逃がして温度を適切な範囲に保つことが大変になります。したがって、電力の損失を極力少なくすることが非常に重要です。

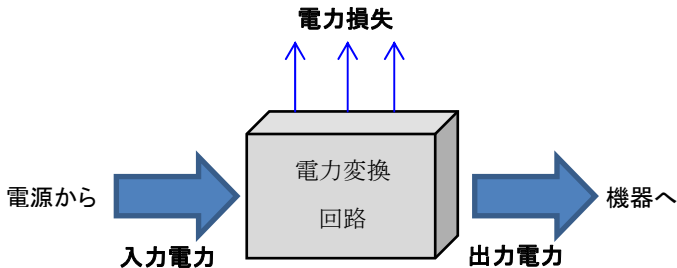


図 6 電力変換回路と入力電力、出力電力、電力損失

電力損失を減らすには

では、電力の損失をできるだけ少なくするにはどうしたらよいでしょうか。そのためには、電力の損失を発生しない構成部品のみで電力変換回路を構成すればよいことは明らかです。このため、電力変換回路の主要な構成要素としてスイッチとして動作する素子¹²を用います。スイッチは、図 7 に示すようにオンとオフの 2 つの状態しか持ちません。

オフのときはスイッチの両端に電圧がかかりますが通過する電流は 0 となります。また、オンのときは電流が流れますが、両端の電圧は 0 となります。電気回路の消費電力 (P) は、そこにかかっている電圧 (V) と流れている電流 (I) の積 ($P=V \times I$) ですので、スイッチとしてオンとオフの動作しか、させないとすると、常に電圧か電流の少なくともどちらか一方は 0 となるので、スイッチそのものの消費する電力は 0 となります。

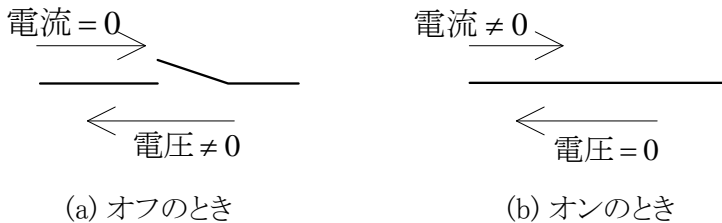


図 7 スイッチの動作状態と電圧と電流

¹² 現在では半導体デバイスが用いられています。後述するように、いくらかの損失を発生します。

さらに、実際の電力変換回路では、スイッチ動作により電流が不連続となることを補うために、コイルやコンデンサーを用います。これらの回路素子は、スイッチ動作に伴ってエネルギーの吸収と放出を繰り返して動作しますが、エネルギーを消費することはありません。

以上のように、電力変換回路を、スイッチとして動作させる半導体デバイスとコイルとコンデンサーから構成することにより、「理想的には」エネルギーの消費、すなわち電力の損失は発生しません。

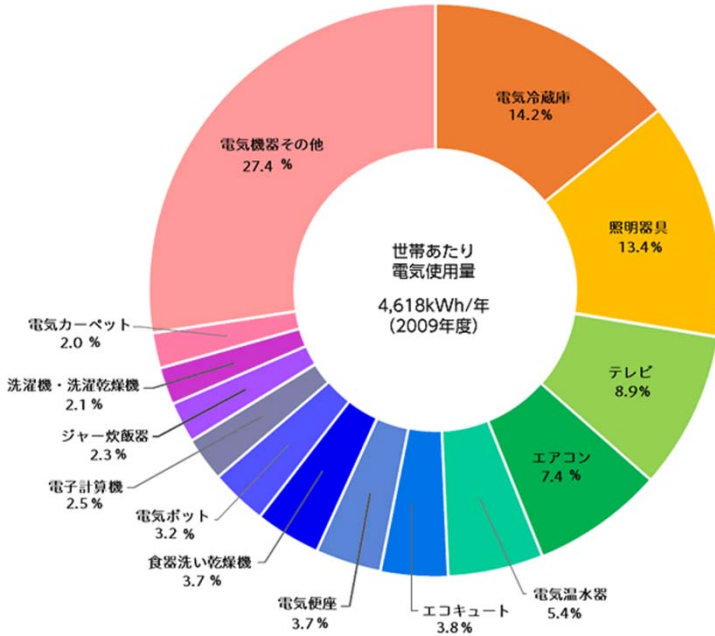
ただ、現実の半導体デバイスでは、オンのときに電圧降下を生じたり、スイッチングによってオンとオフの状態を行き来する際に電圧も電流も 0 でない状態を通過することによるスイッチング損失を発生したりします。また、コイルやコンデンサーも実際にはある程度の電力の損失を伴います。

とはいっても、これらの損失は、現状でも十分に小さく、電力変換装置は一般に高効率を達成しています。しかし、放熱器を小さくして小型化を目指す場合などでは、電力の損失をさらに減らすことが求められています。このような電力変換回路は、最近はいろいろの家電機器で使われています。

家庭における省エネルギー

図 8 は、家電機器でのエネルギー消費の内訳を示したのですが、冷蔵庫、照明、テレビ、エアコンなどの比率が大きいです。以下では、代表的な例として、照明とエアコンに関する省エネルギーについて紹介します。

家庭部門機器別電気使用量の内訳



総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会(第17回)
資料「参考資料1」トップランナー基準の現状等について」より作成

図 8 家庭部門機器別の電力消費の内訳

(出典:資源エネルギー庁 HP「家庭のエネルギー消費の実態」)

照明における省エネルギー

パワーエレクトロニクスを利用した照明としては、インバーター蛍光灯や LED 照明が代表的です。蛍光灯は、電力会社から供給される 50Hz や 60Hz の交流電力でも点灯させることが可能であり、以前は電力変換回路を用いずに点灯させていました。これに対して、電力変換回路で数 10kHz(キロヘルツ)という高い周波数に変換することにより、同じ電力でより明るく点灯できるようになりました。これがインバーター蛍光灯と呼

ばれるものです。

インバーター蛍光灯は、蛍光灯が高い周波数の交流電力で効率よく発光する性質を活かしたものです。また、図9のような白熱電球とほぼ同じ形状の電球型のインバーター蛍光灯も開発されています。これは、口金の部分に非常に小型化した電力変換回路を内蔵しています。電球型蛍光灯は、白熱電球を用いていた照明器具でそのまま使用することができるため、明るさの割に消費電力が大きい白熱電球に比べて、格段に少ない消費電力で同じ明るさが実現できます。例えば、ある電球型蛍光灯では60Wの白熱電球と同等の明るさを12Wの消費電力で実現しています。

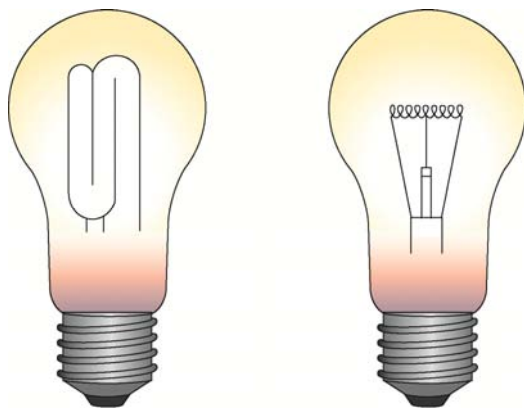


図9 電球型蛍光ランプ（左）と白熱電球（右）

さらに最近では、LED（発光ダイオード）を用いた照明が急速に普及しています。LEDは直流で点灯するので、電力会社から供給される電力を直流に変換する電力変換回路が必要

となります。LED は、それ自体が明るさの割に消費電力の少ない効率の高い光源ですが、以前は表示灯などに用途が限られていました。最近になって、照明として使えるような明るさのものが安価に入手できるようになりました。

また、改良が進められ消費電力あたりの明るさの改善も進みました。LED 専用の照明器具に加えて、従来の白熱電球や蛍光灯と同じ形状や接続端子のものが多数市販されており、従来の照明器具を用いたままでの置き換えが可能なものが数多く商品化されています。

これらの LED 電球では、取付け部の口金の中に非常に小型化された電力変換回路が組み込まれています。LED 照明は白熱電球に対してはもちろんのこと、蛍光灯やインバーター蛍光灯に対しても、同じ明るさあたりの消費電力が小さくできます。例えば、60W の白熱電球と同じ明るさのある LED 電球の消費電力は 7.8W しかありません。

以上のように、インバーター蛍光灯では高い周波数の交流電力を、LED 照明では直流電力を、電力変換回路によって得ており、パワーエレクトロニクス技術が、高効率の光源を容易に利用できるようにして、省エネルギー化に大いに役立っていると言えます。

空調機器（エアコン）における省エネルギー

パワーエレクトロニクス技術によって省エネルギー化を達成しているもう一つの身近な例はエアコンです。このエアコンで消費する電力は、家庭での総消費電力の約 7.4%¹³を占めて

¹³ 資源エネルギー庁資料

いるといわれています。エアコンは、冷房運転時には室内の熱を屋外に移動させ、暖房運転時には屋外の熱を屋内に移動させることによって、室内の温度を調整しています。いわば、熱をポンプで運んでいるようなもので、ヒートポンプ¹⁴といわれています。

この熱の移動は冷媒という熱を運ぶための媒体の圧縮と膨張によって行われ、その中心的な役割を果たしているのが圧縮機（コンプレッサー）であり、エアコンの消費電力の大半を消費しています。現在、日本で使われている多くのエアコンでは、周波数を自由に調整できる電力変換装置（インバーターといいます）を用いて圧縮機の回転数を調整しています。冷房運転時に、設定温度に対して室温が高く、その差が大きい場合は圧縮機の回転数を上げて熱の移動量を増やします。室温が設定温度に近づいてくると圧縮機の回転数を下げて熱の移動量を減らしていきます。圧縮機の回転数を下げると、圧縮機を回すために必要な電力は大幅に減少するので、エアコンの消費電力も大きく減少します。また、これに加えて、圧縮機の回転数を下げるとヒートポンプの効率が高くなるので消費電力の削減が可能です。これに対して、初期のエアコンでは、設定温度と室温

http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/actual/

¹⁴ 水は高いところから低いところには流れますが、低いところから高いところへは流れません。低いところから高いところに水を上げるためには、ポンプによる機械力が必要です。熱も温度の高いところから低いところへしか流れません。しかし、外部からの機械力を使うことで、温度の低いところから高いところへも熱を運ぶことができます。そのような装置をヒートポンプと言います。詳しくは、p.25 のコラムをご覧ください。

の高低によって単純にオンするかオフするか動作をさせていました。この場合、オンの際には圧縮機を定速の回転数で運転し、設定温度に達すると圧縮機を止めるという動作を繰り返すようにしていたので、常に効率の良い条件で運転するというわけにはいかず、また起動停止時にも余計な電力を消費するため、結果的に電力消費が大きくならざるを得ませんでした。

これに対して、インバーターを用いて圧縮機の回転数を調整することにより、室温に応じて最適な動作状態で運転できるようになるため、無駄な電力消費を抑えることができ、省エネルギー化が実現できます。これを世界に先駆けて開発したのが東京芝浦電気（現東芝ライフスタイル(株)）です¹⁵。図 10 が、その第 1 号機の写真です。

また、圧縮機のモーターには、以前は誘導モーターが使われていましたが、最近では誘導モーターよりも効率の高い永久磁石同期モーターが使われるようになってきました。永久磁石同期モーターはスタートの際に電源周波数を徐々に上げていく必要があるため、インバーターがなくては使うことができません。冷蔵庫についても、冷却するためのしくみの基本はエアコンと共通であり、インバーターを用いることによりエアコンと同様な省エネルギー化が進められています。

¹⁵ インバーターエアコンは、第一回の電気学会「電気の礎」の顕彰を受けています。

<http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/30-foundation/data02/index01.php>



図 10 日本で開発された世界初のインバーターエアコン
(画像提供：東芝ライフスタイル株式会社)

コラム：空調機(エアコン)の歴史と省エネ

暑い時には冷たい物がほしいものです。古代エジプトの砂漠地方では素焼きの壺に水を入れて屋外に出しておき、水が蒸発した時に熱が奪われることを利用して水を冷たくして飲んだということが知られています。水が蒸発する時の冷却効果を使うのは、夏の打ち水などと同じです。また、日本では、自然の氷を氷室^{ひむろ}に保存して夏季に使用したという記録が日本書紀にあり、江戸時代には将軍に氷^{こおりけんじょう}献上がなされていたようです。中国では、周の時代に、山の雪で冷水を作って飲んだという記録もあるようです。

しかし、自然の氷や雪ではなく、季節に関係なく人工的に冷たさを作り出すことは人類の長年の夢でした。この実

現に大きく貢献したのが、フランスのカルノーによる熱機関サイクルの理論です。カルノーは、等温圧縮・断熱膨張・等温膨張・断熱圧縮というサイクル過程を用いれば、人工的に気体を冷やすことが可能であるという理論を1824年に打ち立てました。1834年には、英国のパーキンスが、エチルエーテルを用いた冷凍機を実現しています。

エアコンは、1902年に米国で印刷工場での問題を解決するために、ウィリスキャリアによって開発されました。これはクーラーであり、室内の温度を下げるるとともに、除湿機能を持ったものでした。国内においては、空気調整器として1935年に生産され始めています。1958年には、名称がルームクーラーに統一され、冷却方式として空冷式と水冷式が生産されるようになりました。1959年には室外機と室内機が分離したセパレート型が発売されています。1960年になると冷房専用型の冷媒ガスの流れを切り替え、冷房だけでなく暖房もできる機種が発売されるようになりました。1965年になるとルームクーラーがルームエアコンに名称変更され、1966年ごろから一般家庭に普及し始めています。

1973年ごろに第一次オイルショックがあり、ちょうどこのころに、エアコンの省エネ開発が大きく進み始めました。1977年には、マイコンやICなどによる電子制御機能の搭載、コンプレッサーや熱交換器の高効率化が導入されたエアコンが発売されました。そして、1980年には本文にもあるように、電力用半導体を利用したインバーターと、回転

数が変化しても高効率運転ができるコンプレッサーを開発し、マイクロコンピューターによりコンプレッサーの回転数を負荷状態に応じて最適に変化させるようにしたインバーターエアコンが世界に先駆けて発売されました。このインバーターエアコンにより、快適性と経済性が従来のものより格段に向上し、エアコンの技術史に大きな革命をもたらしたといっても過言ではありません。

このエアコンにおける省エネ効果については、例えば東芝は1993年から2000年の間に消費電力量を50%以上低減し、シャープは1998年から2008年の間に40%以上の低減を実現しています。エアコンは古くからさまざまな技術開発が行われ、現在でもその努力が続けられているのです。

参考までに、その他の家電機器についても注目してみると、例えば、冷蔵庫、照明器具、テレビなどについては、資源エネルギー庁で毎年、消費電力量などのデータを公開して省エネ努力をメーカーに促しています（これを「トップランナー制度」と言っています）。さらに一般の消費者に対しては、「省エネラベリング制度」によって、いろいろな家電品の省エネ性能を製品やカタログに表示して、買い替えや購入時の参考になるようにしています。

注) エアコンの歴史について、もっと詳しく知りたい方は以下のホームページをご覧ください。

(<http://www.kdb.or.jp/showaeacon.html>)

熱の有効利用

以上は、電力変換装置を用いた省エネルギーの例でしたが、照明として使おうと、エアコンの圧縮機などのモーターを回そうと、電力損失は最終的には熱の形で現れます。熱はエネルギーの最終形態で、いわば「エネルギーのなれの果て」ですが、この熱エネルギーが有効に使えれば、省エネルギーの効果は大きいものがあります。

例えば、家庭でのお湯の使い道は、入浴や食器洗浄などですが、40 数度と比較的低い温度のお湯で十分です。これらのお湯を沸かすのにヒートポンプを使うと、使った電気エネルギーの数倍のエネルギーを使うことができるので、エネルギー効率からはきわめて有効な手段になります。

また大きな工場、病院、ホテル、スポーツ施設などは、天然ガス、石油、LP ガスなどを燃料としたガスタービンやディーゼルエンジンなどの発電機を設置しているところもかなりあります。このような発電機では必ず熱が出るのですが、通常は捨ててしまうこの熱を、捨てないで利用しようとするのが、コージェネレーション (Cogeneration) です。日本語では「熱電併給」または「コージェネ」と言いますが、海外では CHP (Combined Heat and Power) と呼んでいます。

上記のような施設では、熱の利用もかなり多いので、発電のついでに発生する熱を利用できれば、全体の効率はかなり高くなります。実際、電気を使うだけでは燃料のもつエネルギーの半分程度しか有効に使えません (効率 50%) が、熱も使えらると、総合的な効率は 75%~80%に向上します。2015 年度末で、約 16,000 台、総計約 1,000 万 kW のシステムが我が国で使わ

れています。

実際に熱を使う場合ですが、燃焼直後の高温は生産工程などに使用し、もう少し温度が低くなったら、吸収冷凍機¹⁶の熱源として冷房に、さらに温度が下がったら給湯や暖房にと、熱も無駄なく使い切ることが望まれます。

最近は、このような大型のものばかりでなく、都市ガスやLP ガスから水素ガスを作って燃料電池¹⁷で発電し、一方、その時に出る熱を用いてお湯を沸かしておくといった1kW級の家庭用コージェネシステムも多く使われるようになりました。また集合住宅でも、コージェネシステムを用いてエネルギー供給業者が熱と電気を合わせて供給するようなことも今後行われていくと思われます。コージェネシステムの経済性は燃料価格とともに、熱をどの程度まで有効活用できるかにかかっています。これには、電力会社からの電力と需要家で発電する電力との調整など、情報通信技術をうまく利用して、社会全体としてエネルギーの効率的利用を図るべきです。

世の中には、熱エネルギーに限らず、捨てられているエネルギーがたくさんあります。これらの未使用エネルギーが利用できれば省エネルギー、省資源に大きく役立ちますので、今後、技術の進歩により、これらのエネルギーのさらなる活用が期待されます。

¹⁶ 熱を使って冷凍というと奇妙に聞こえますが、吸収冷凍機とは水滴が蒸発して濃い塩水に吸収されるとき気化熱で冷房するシステムです。塩水は水を吸収するのでだんだん薄くなっていきますが、その水分を蒸発させて再び濃い塩水にするために熱をつかうのです。

¹⁷ Vol.4「電気をつくる」参照。

省資源を考える

ただ、省資源や省エネルギー、節電に意識を使いすぎて、自分たちにとっての快適さを大きく犠牲にはしてはなりませんので、自分たちにとって何が重要かを勘案しながら進めていくことが長続きするコツだろうと考えます¹⁸。

省資源には、エネルギー資源だけでなく、元素や物質としての資源もあります。例えば主要な金属である銅や鉛などの可採年数は50年以下ですし、地球上にはあまり存在しない元素（レアメタルやレアアース）も同様です¹⁹。

レアメタルやレアアースは、少量であってもこれを加えると性能が大幅に向上することがあります。例えば、磁石の力が200℃を超える高温でも強さを保つことができるなどの効果が得られます。しかし、これを電気自動車や燃料電池自動車のモーターに使うとすぐに枯渇してしまうとも言われています。そのためには、これらの希少な元素を使わなくても同等の能力を発揮できる元素の発見や製造方法を開発すること、さらには一度利用した希少資源を再利用するための資源の回収も重要となります。

¹⁸ 次のサイトでは、環境を重視するタイプやコストを重視するタイプなど、ライフスタイルに応じた省エネルギーの方法を提案しています。http://criepi.denken.or.jp/pieceeco/piece_eco/piece_eco.html

¹⁹ JOGMEC 「非鉄金属資源開発技術のしおり」、および環境省「平成23年版 環境・循環型社会・生物多様性白書」 p.17 など。

コラム：ヒートポンプ

ヒートポンプは一見不思議な機械です。投入したエネルギーよりもたくさんのエネルギーを生み出すように見えます。例えば、電気エネルギーを 1kWh（キロワットアワー）使ったとしますと、6kWh 分の電力量を使ったのと同じだけの熱エネルギーが得られます。

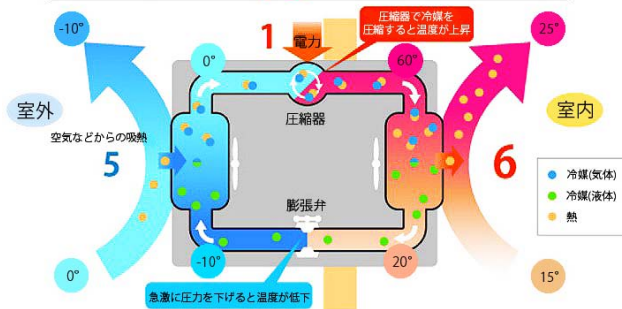
これは、周りの環境から熱エネルギーを集めているためで、集めることだけに電気エネルギーが使われているためです。また、この現象は、環境の温度とあまり温度が違わない物体の熱エネルギーはその質が低いことにも対応しています。

ヒートポンプの大まかな原理を図に示します。圧縮機で冷媒（冷たいという意味ではなくて、熱エネルギーを運ぶ媒体のことです）を圧縮しますと温度が上昇します。この上昇した冷媒を熱交換器で室内の空気に熱を移します。そうすると、冷媒の温度が下がります。この温度の下がった冷媒をさらに膨張弁という弁を通して急激に圧力を下げるとさらに温度が下がります。これをさらに室外の空気と熱交換器を通して熱交換させると、今度は熱をもらって温度を少し上昇させます。これを圧縮機に入れて、冷媒をこの順番でグルグル回していくのです。

冷媒を循環させるのにエネルギーが必要になりますが、室内へ入ってくる熱エネルギーは外気からも取り入れていますので、投入したエネルギーよりも大きなエネルギーが室内へ取り込まれます。

この冷媒の循環を逆に回すと、外気に熱を放出して、室内の

1の電力+ 5の大気熱 → 6の熱エネルギー (家庭用エアコン種類の一例)



(出典：一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターHP「ヒートポンプとは」)

空気を冷やすことができます。このように、ヒートポンプを使ったエアコンでは、暖房と冷房が一台でできることとなります。

また、冷房と同じ原理で冷蔵庫を冷やすこともできます。暖房と同じ原理でお湯を温めることもできます。

投入したエネルギーを分母に、得られた熱エネルギーを分子にした値を成績係数 (COP: Coefficient Of Performance) といいます。COP は技術開発のおかげで、現在家庭用エアコンでは 6 程度までに (暖房時、冷房時には少し下がります) なっています。なお、この原理から分かるように、室外の温度が COP には大いに関係します。暖房時に室外の気温が低すぎれば COP は小さくなりますし、極端な場合にはちゃんと動作しなくなります。しかし、最近では寒冷地仕様のヒートポンプであれば、十分使えるようになっています。また、地中熱を使ったり、排水の熱を使ったりして、COP を高くするようにした例も増えてきています。

3 直流電気を使った、電気の有効活用

電気には交流と直流があります。私たちの社会の将来に向け、その直流電気の在り方を改めて考えてみましょう。

交流 vs 直流

交流と直流のどちらが優れているのかについては、本シリーズの Vol.3 に以下のような記述があります。

『19世紀に一度は結論が出た交直論争ですが、もう一度考え直し、新しい技術を創り出す時期に来ていると言ってもよいのです。』(Vol.3 p.26)

現在では、世界的に交流を中心とした電力システム²⁰が構築されています。それでは、何故、そのようになったのでしょうか。

歴史的にみると、電気の研究や利用は、もともとボルタによる直流の電池の発明から始まっています。そのため、最初は電灯なども直流が使われていました。しかし、電気は磁石が回転子として回転する発電機で作りますので、そのままでは交流の電気になります。これを直流にするため、整流子とブラシという装置で、交流から直流への変換をしていました。

交流をそのまま使えば、この変換装置は不要になります。また、電気を長距離に送電する時には、電圧を高くする方が電気的な損失を減らすことができるので有利です。交流の電気は、

²⁰ 電力システムあるいはそれに関連する用語としてのグリッドについては、本小冊子シリーズ Vol.5 の第一章を参照してください。

変圧器を用いて容易に電圧を上げ下げすることができるので、高電圧にすることは容易ですが、直流では電圧を換えるのは容易ではありません。これらの理由により、交流は直流よりも普及し、現在に至っています。

交流の電気と直流の電気の特性について、再度考えてみましょう。図 11 に交流と直流の特性を示します。同図に示すように、横軸を時間、縦軸を電圧値あるいは電流値とすると、交流の電気は正負が変化しますが、直流の電気は一定値です。

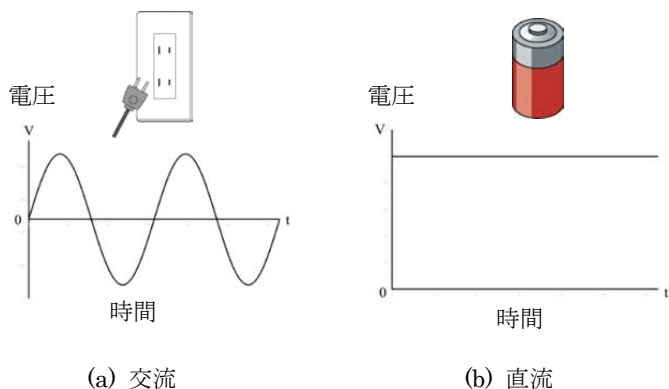


図 11 交流と直流に関する特性の違い

交流の電気と直流の電気の違いを電気工学的に比較してみたものが表 1 です。交流の場合、電力には有効電力、無効電力がありますが²¹、直流の電気は有効電力だけです。また、交流

²¹ 交流の有効電力や無効電力、位相などについては Vol.5 「電気の性質を使ってうまく届ける」に詳しく述べられています。また、大量の電気を扱う場合の交流と直流の違いについては、同じく Vol.5 の p.93 「直流でつなぐのはどのような場合？」を参照ください。

の電気は、電圧波形と電流波形のタイミングの違い、いわゆる力率、位相という考えがあります。

表1 交流と直流の特徴比較

	送電・配電の特徴	発電機器同士の 接続の特徴	蓄電に関する特徴
交流	電圧波形と電流波形のタイミングの違いを考える必要がある。 変圧器により簡単に電圧変換可能。	電流と電圧の位相などを合わせる必要がある。(電気を使うだけなら問題なし)	電池を利用するときには直流への変換装置が必要。
直流	変換装置により電圧変換可能だが、やや面倒。	電流と電圧の位相を考慮する必要がない。	電池などにそのまま接続可能な場合もある。

そのため、電力系統へ無停電電源装置などを接続する場合、交流の電気では、接続する両端の電圧の位相を合わせる必要²²が生じることがあります²³が、直流の電気は一定値なので、位相、力率という概念がそもそもありませんので、このような配慮の必要はありません。また電気を電池などに蓄えることを考

²² 交流の電源同士を接続する場合の注意点については、Vol.5 の p.74 からの「交流の電気とは」を参照ください。

²³ 家庭のコンセントに家電機器のプラグを差し込む時には、家電機器側に電源はないので、このようなことを気にする必要はありません。パソコンのように蓄電器があっても、直流側から交流側へは電気が流れないようにしているので、問題ありません。

えた場合、交流の電気は、直流に変換する必要がありますが、直流の電気は、電圧値を合わせるだけで蓄電することが可能だといえます。

この点が、直流の電気は、電池との親和性が高いといわれる点です。ただし、交流から直流へ変換する装置（整流器）と直流と直流間の電圧値を合わせる変換装置（コンバーター）²⁴の電力変換効率が一緒であれば、直流の電気が交流よりも優れているとは言えません。

家の中の直流電気

私たちは、多くの家電製品に囲まれて生活しています²⁵。例えば、LED 照明、デジタルテレビ、電話機、パソコン、プリンター、エアコン、スマートフォン、デジタルカメラ、ポータブルゲーム機などが身近なものとして思い浮かぶと思います。

このうち、みなさんがよく使用する家電製品の代表例である、スマートフォン、デジタルカメラ、ノートパソコンなどは、機器内部に搭載された蓄電池を充電してそれを直流電源として使っています。これらの機器を分解すると、電子回路が使われていることが分かりますが、その多くは、直流の電気で動いています。

²⁴ 本節では、交流から直流に変換するものを整流器、直流から交流に変換するものをインバーター、コンバーターは、直流の電圧値を変換するものを DC/DC コンバーターとしています。また、コンバーターとしては、マトリックスコンバーター、サイクロコンバーターなどもありますが、この章ではコンバーターとしては扱っていません。

²⁵ 例えば、この小冊子シリーズの次のところを見てください。

Vol.1 「電気とは何だろう」の「第 1 章 電気に囲まれて」の「家の中で」の項、Vol.2 「私たちの身近にある電気」

先ほどのスマートフォンやノートパソコンなどは、家の中のコンセントからの交流の電気を、ACアダプター²⁶で直流に変換して、機器内部の電池に直流電気を供給していますが、LED照明やデジタルテレビなどは、コンセントからの交流の電気を、機器内部の整流器で直流に変換して使用しています。このように身近な家電製品も直流の電気をを用いているものが増えてきているため、住宅や建物内配線においても直流の使用が考えられています。

ところで、私たちの生活の中で使われている直流の電気は、図12のように直流の電圧値で分類することができます。

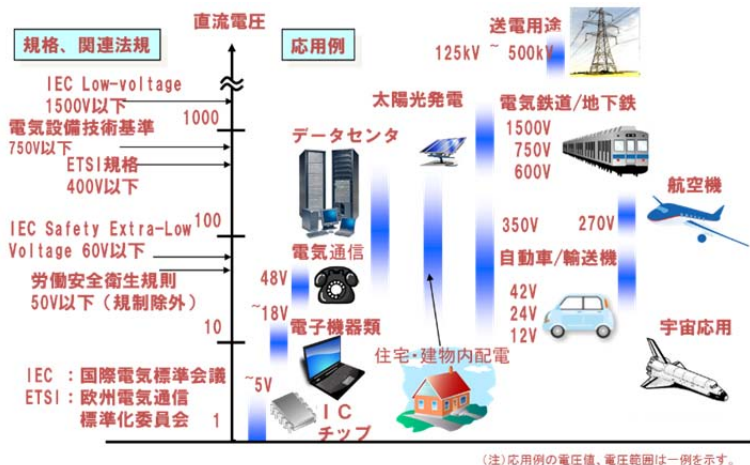


図12 現在使用されている直流電圧値
(出典：廣瀬圭一「直流配電の現状と普及への可能性」電気設備学会中国支部講演会、2013年2月28日)

²⁶ ACアダプターとは、コンセントに接続して、交流の電気から、接続した機器を動作させる直流の電気を取り出す装置です。

同図に示すように、5V 程度の低い電圧値で電子回路が動作し、48V 程度で固定電話、12V/24V 程度で自動車、40V から 500V で住宅・建物内配電や太陽光発電装置、600V/750V/1,500V で鉄道²⁷など、幅広い直流電圧が使用されています。このように現在も、直流の電気は私たちの生活に密着していることがわかります。

ただし、家電機器の中には、ドライヤーなどの熱電機器のように、主に交流電気を使用するものもあるので、直流の電気のみですべての家電機器が動いているわけではありません。

ここで、直流の電気による住宅の例を図 13 に示します。同図は、宅内直流給電アライアンスという組織が提唱しているもので、エネルギー創造機器・エネルギー蓄積機器として、電気自動車やプラグインハイブリット車、蓄電池、太陽光発電、家庭用燃料電池などの直流電気を出力するものは、電圧値を等しくすれば、直接接続できます。したがって、交流電気のように同期をとらないで²⁸接続できることを示しています。

さらに、先ほど説明したように、デジタル家電などにおいても機器内部にて直流の電気を使用する場合、直流の電気を外部から供給することにより、整流器や DC/DC コンバーターを減らせることが期待されています。ただし、機器同士で使用して

²⁷ ここでいう鉄道は、直流の電気で動くものを対象としています。参考までに新幹線は交流の電気で動いています。

²⁸ 同期は交流電気の重要な概念の一つです。詳しくは、Vol.5 の第 4 章「電気の性質をうまく使って届ける」の「発電機が 2 台のとき一緒に回っているか？」の項を読んで下さい。なお、家庭用の交流 100V や 200V のコンセントを利用する時には、同期を考えることなく家電機器を接続できます。

いる直流電圧が同じならば直流電気の利点がありますが、使用している直流電圧が異なり、電圧を大きく変更するよう DC/DC コンバーターを用いなければならない場合には、直流の電気の利点が見いだせないこともあります。

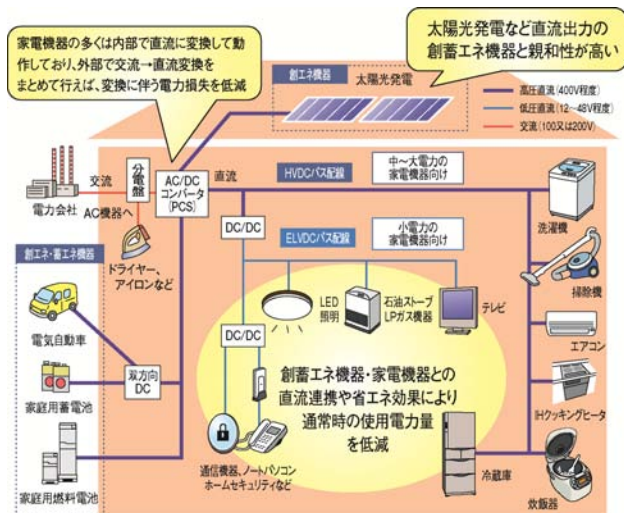


図 13 直流電気による住宅構成

住宅における直流電気の利点について、電気を比較的大量に消費する機器の代表としてエアコンを取り上げて説明しましょう。

このエアコンは、図 14 に示す DC ハイブリットエアコンで、これまでの交流電気のみでの使用だけでなく、蓄電池からの直流電気で動作するものとなっています。図 14 に示すように、交流のみで動作するエアコンは、蓄電池からの直流電気を変換装置にて交流電気に変換し、入力される交流電気が機器内部で直流電気に変換され消費されているのに対して、DC ハイブリッ

ドエアコンは、蓄電池からの直流電気をそのまま使用できる構造になっています。蓄電池からの電力をいったん交流に戻してから使うよりも、装置全体としての損失を約5%低減できると報告されています。



図 14 交流・直流ハイブリッドエアコン
(出典：シャープ株式会社 DC ハイブリッドエアコン HP)

このハイブリッドエアコンの住宅における構成を図 15 に示します。同図の蓄電池には、ハイブリッドパワーコンディショナ、太陽光発電装置が接続されています。これらエネルギーの制御には、住宅用のエネルギーマネジメントシステムである HEMS が導入されて計測と制御が実施されています。具体的

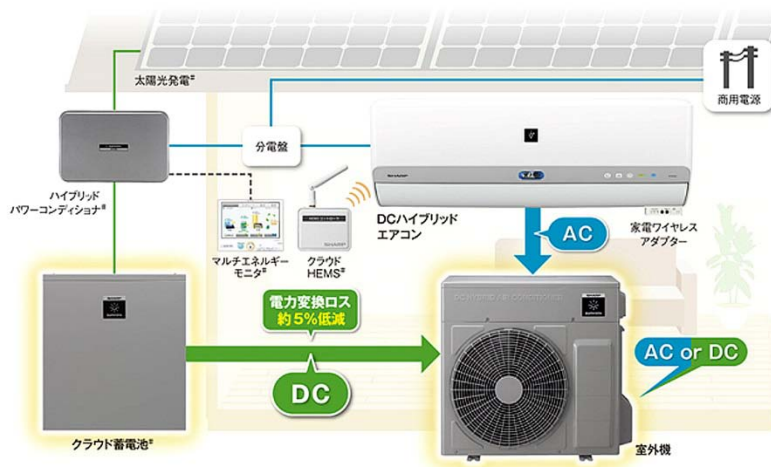


図 15 DC ハイブリッドエアコン

(出典：シャープ株式会社 DC ハイブリッドエアコンニュースリリース HP)

には、HEMS を用いて、太陽光発電で発電された電力を、住宅内の負荷での消費、蓄電池の充放電、電力系統への売電に合理的に配分するのに HEMS が使われています。このとき、ハイブリッドパワーコンディショナを用いることにより、蓄電池と太陽光発電装置のそれぞれ単独のシステムよりもパワーコンディショナの台数を 1 台削減できることとなります。

このシステムにおいては、蓄電池に十分電気がある場合は、直流で動作させ、蓄電池に十分な電気がない場合は、交流の電気で室外機が動く構成になっており、かならずしも直流電気のみ仕様になっていないことがわかります。

ここで、エアコンの室外機は、インバーターを用いたコンプレッサーが導入されています。このため、インバーター機器の交流—直流変換部分に外部から直流の電気を給電すれば、電気の交流—直流の変換回数を減らすことが可能となり、これまでの交流の電気だけ用いる方式よりも、省エネルギー化が期待できます。これは、私たちが使っているハイブリット車（HEV：Hybrid Electric Vehicle）²⁹においても、起動時や低速走行時においてエンジンの燃費が悪い状態を改善する動作に似ていると言えます。

図 16 にハイブリット自動車の駆動構成を示します。同図には電気モーター、発電機、ニッケル水素電池、パワーコントロールユニットなどから構成されていることがわかります。

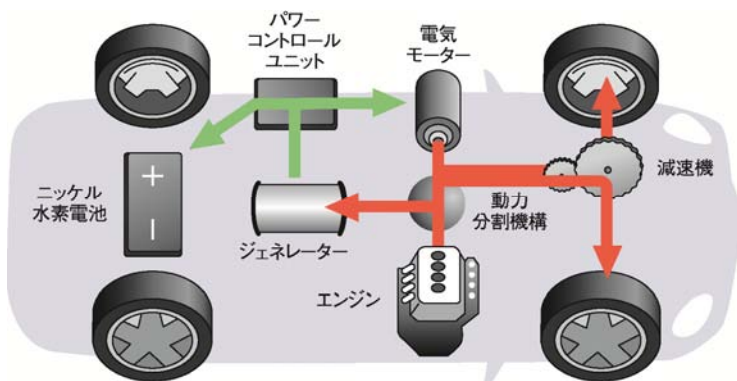


図 16 ハイブリッド車の駆動構成

²⁹ HEV の詳細については、本シリーズ Vol.6 p.19, 「電気の力でモーターを動かす自動車の特徴」を参照してください。

直流技術の研究開発

このように使い方によっては、交流の電気よりも利点がある直流電気ですが、技術的な問題や安全性に関する問題があります。技術的な問題として、接続するエネルギー創生機器、エネルギー蓄積機器などと機器装置の直流電圧値が等しいのであれば利点もありますが、使用する電圧値が異なる場合にはパワーエレクトロニクス技術を用いて、電圧値を合わせる必要があります。このとき、交流—直流あるいは直流—交流変換装置が、直流—直流変換装置と変換効率、装置の機器損失が同等であるのであれば、直流電気の利点が見えない場合があります。したがって、直流の電気の普及は、パワーエレクトロニクス技術に大きく依存しているとも言えます。

さらに、安全性に関しても、交流の電気の遮断技術、漏電検出技術などは確立されていますが、直流の電気の遮断技術、漏電検出技術、ノイズ抑制など解決しなくてはならない問題が多数あるのが現状です。

一例として、遮断技術について考えてみましょう。遮断技術に関係する分野は、電気を使う際のスイッチやコンセントです。図 11 に示したように、交流の電気は正極と負極が交互にかわります。しかし、直流の電気は正極側あるいは負極側で一定です。電気が流れている回路を考えたとき、交流の電気の場合は、電流が、“ゼロ”になるところで回路のスイッチを開けば遮断が可能です。直流の電気の場合は、“ゼロ”になる部分がないので、回路のスイッチを開くと、アーク放電が発生します。このアーク放電は、比較的電圧が低く電流が小さい場合には遮断が容易ですが、電圧が高い場合や電流が大きい場合などは遮

断が難しいという問題があります。現在、太陽光発電装置などの故障時の直流アーク検出、遮断が大きな課題となり、その解決策に関して多面的な研究がなされています。参考までに、図 17 に太陽光発電装置の太陽電池（PV）パネルが発電時に断線したときのアーク発生例を示します。

直流電気の遮断技術ですが、トヨタ自動車のプリウスが実用化されたのも 400V 級の直流の電気を入り切りできるスイッチが開発できたことによるとも言われています。



図 17 PV パネルを電源とした直流アークの発生

交流中心のシステムから交流と直流が共存する社会へ

交流一辺倒³⁰だった電力システムが、未来社会に向けて大きく変わりつつあります。その中で直流電気が大きな役割を果たすようになります。情報化社会であるスマート社会における電

³⁰ 直流と交流の役割分担が大いに交流に傾いていたという意味であって、交流しかなかったというわけではありません。以前は電車や高級エレベーターのモーターは直流モーターでしたし、現在でも電力を送電線で送るとき、その距離が長い場合や、海底を送電する場合などには、直流送電はなくてはならない技術です。

気エネルギーを考えると、図 18 に示すように、太陽光発電所（メガソーラー）、蓄電池を併設した風力発電、家庭用の太陽光発電、燃料電池発電、蓄電池など直流電気を出力あるいは利用する装置が増加してきています。

このようなスマート社会においては、エネルギーの制御、計測には、ICT (Information and Communication Technology) と呼ばれる高度情報通信技術が用いられるため、各装置間や住宅、オフィスビル、工場間にも情報通信網が必要です。

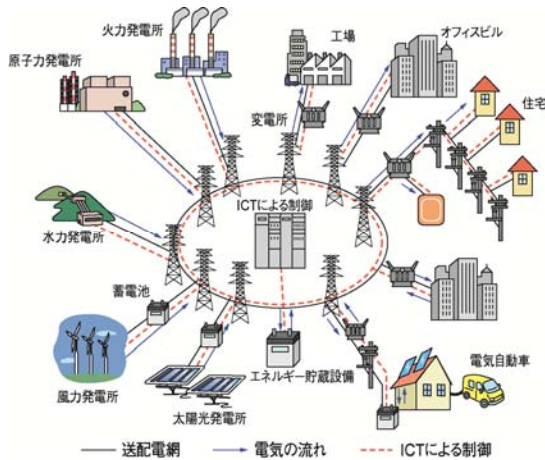


図 18 スマート社会における電気エネルギーと情報の流れ

また、私たちの身近にある家電製品を考えると前述したように、LED 照明、LED テレビ、パソコン、プリンターなど機器内部で直流変換して使用しているものが普及してきています。さらに自動車に関しても、プラグインハイブリッド車 (PHV)、電気自動車 (EV) は、交流の電気をを用いた普通充電だけでなく、直流の電気をを用いた急速充電や自動車からの住宅

への給電（V2H：Vehicle to Home）などに関しても研究がなされています。

図 18 に示すように、スマート社会においては、各発電装置の状態や機器の状態、昨今注目されている IoT（Internet of Things）は言うに及ばず、21 世紀の「情報化社会」に飛び交う情報の量は加速度的に増えています。この情報を構成するデータはほとんどが電気信号であり、そのデータはデータセンターなどに蓄積され、交換されています。このため、データセンターで消費される電力エネルギーの量が莫大になりつつあるという問題があります。そこで、データセンターで消費される電気エネルギーを削減するため、さまざまな取り組みがなされています。その一つに直流の電気の利用があります。ここでデータセンターとは、会社などの組織が自分で用意していた計算機を中心とするサーバーシステムを、そっくり外部で運用・保守できるようなサービスを提供する施設のことで³¹。

このようなシステムは、直流の電気を使用しているコンピューターが主になるため、図 19 に示すように、交流の電気を用いるよりも直流の電気を用いると、整流器や DC/DC コンバーターの数を削減できるため、省エネ化が期待されます。

データセンターは、住宅と異なり多くのコンピューターを使用するため、1 台での電力削減が大きな効果になります。また、データセンターでは発熱を抑えるために、冷却装置を稼働させ

³¹ サーバーやネットワーク機器などの IT 機器、インターネットへの接続回線から構成され、セキュリティや災害対策などのメリットがあるため、近年急速に注目されるようになってきました。データセンターは計算機からの発熱などに配慮するため、空調と機器運転に膨大な電気が必要となっています。

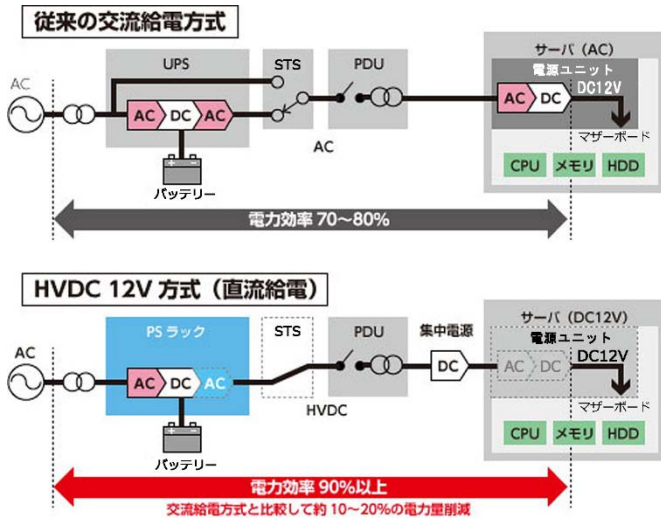


図 19 データセンターによる直流電気の使われ方

(出典：日経スマートシティコンソーシアム HP 2012年11/15 記事
 技術サービス最前線 第6回『『直流給電』は効率的な電力利用の土台
 となるか』2012年11月15日)

ていますので、1台の消費電力が削減されると、冷却装置に使用する電気エネルギーも削減され、データセンター全体での省エネ化が期待できます。

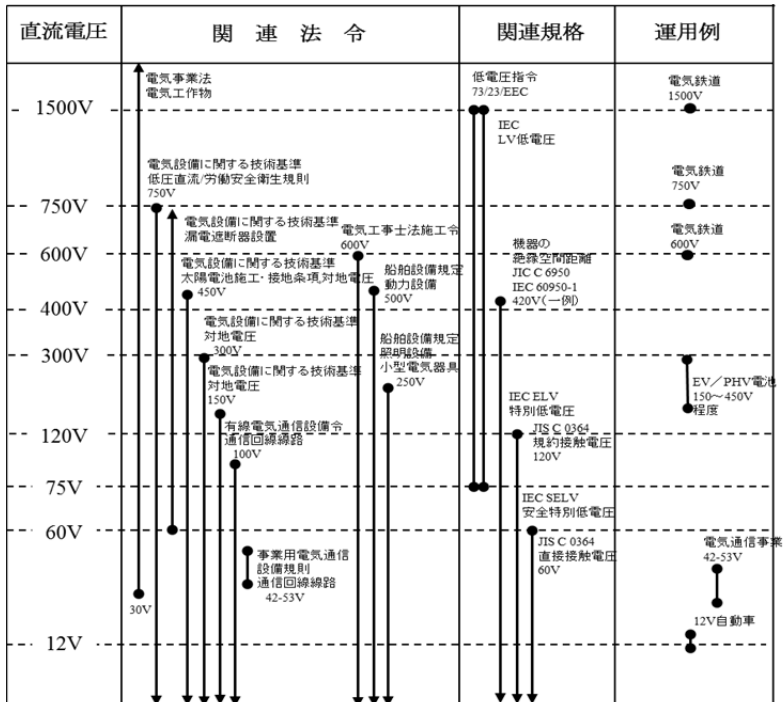
これからの技術として注目が集まる、有機 EL (エレクトロルミネッセンス)、エネルギーハーベスト³²、次世代太陽電池パネルなどの次世代エネルギーデバイスや材料においても、直流の電気を使用するものが数多くあります。これらがより多く

³² エネルギーハーベストとは、身の回りのわずかな未使用エネルギー(光、熱、電波、機械振動など)を採取(ハーベスト)して電力に変換し、活用しようとする技術のことを言います。

の役割を果たせるようにするために、直流電気に係る技術開発と標準化の重要性が、飛躍的に高まっています。

最後に、現在の直流の電気に関する関係法令と規格を表 2 にまとめます。同表に示すように、各技術基準においても直流の電圧値がばらついており、今後の直流の電気が社会に普及するにともない、このような関係法令と規格の整備も必要かもしれません。

表 2 直流の電気に関する関係法令・規格



注1: 図中の電圧範囲は、概ねの値(範囲)を示している。詳細は、各法令、規格、文献を参照のこと。
注2: 法令、規格等は略号を用いている。

(出典：廣瀬圭一「直流電流の遮断・制御技術と国内外における直流規格」電気学会次世代電力システムにおける直流給配電の技術動向講習会 2012年12月22日)

4 スマートグリッドとスマートコミュニティ

電気は、電気事業としてエジソンが事業を開始した当初から、電気を使う量に応じて発電するようになってきました。また、発電所は大型化するほど、効率も向上し、環境対策もやりやすくなり、コストも低下してきました。一方、交流の電気では電圧を変圧器で容易に変えることができるので、遠隔地からの送電も可能になりました。このため、大型の発電所が消費地から離れた場所に建設され、これを大規模複雑な電力ネットワークで連系するようになってきました。

しかし、使う電気の量に応じて発電することは、電気の使用量が最大の時に備えて、発電設備や安定に送るための電力流通設備³³を備えておく必要があります。電気の使用量が最大になるのは、我が国では、夏の暑い時期の短い時間帯に限られます。このため、この時間帯の電気の使用量を少なくすることができれば、これらの設備の建設をしなくてもよいこととなります。我が国では、夏に一斉休暇となる工場が多くありますが、この面からの効果もあることとなります。

この、電気がたくさん使われそうな時間帯に、使う量を積極的に少なくして、発電設備や流通設備の建設を抑え、結果として全体の電気代を安くしようとするのが、デマンドサイドマネジメント（DSM, Demand Side Management）やデマンドレスポンス（DR, Demand Response）と呼ばれる概念です。詳

³³ 電力流通設備とは、電力を送電し、変電（電圧を変えること）し、配電するのに必要な、情報通信設備も含めたすべての設備。送配変電設備ということもあります。

しくは後述しますが、これをさらにきめ細かく実行できるのが、スマートグリッドやスマートコミュニティになります。

一方、地球温暖化や資源枯渇の面から、再生可能エネルギーによる発電も注目され、風力発電や太陽光発電も増加してきています。これらで発電される電気の量は、風や日射量などの自然条件に支配されますので、電気の消費量に合わせて制御することもできませんし、突然大きくなったり小さくなったりすることもあります。これらの変動は、他の発電設備からの発電量の調整によって吸収する必要があります。このため、火力発電所や揚水発電所を含む水力発電所、さらには、量は少ないですが蓄電器による出力制御がなされます。また、これらの変動の吸収には、電力の消費量そのものを調整することでも効果が得られます。スマートグリッドやスマートコミュニティの DSM や DR では、このような目的にも役立つように考えられています。

本章では、再生可能エネルギーによる発電の特徴と、スマートグリッドやスマートコミュニティについて紹介します。

電気を使うには発電所が必要

電気は、便利で清潔で線さえあればどこでも何にでも使える優れたエネルギーです。このため、広く使われてきました。しかし、現在の技術をもってしても、自然にある電気をそのまま使うことは残念ながらできません。例えば、雷は電気現象ですが、いつどこで発生するかわかりませんし、これを使えるようにする装置も現在の技術では不可能です。また、雷の電気を使えるようになったとしても、一回の落雷で得られるエネルギー

の量は、一軒の家庭で使う電気エネルギーのせいぜい一か月分程度しかありません。また、生物でも電気ウナギや電気ナマズなど、電気を発生することはできます。しかし、これらの生物の発生する電気は、電圧こそ、数百ボルトと高いのですが、電流は小さいので、これを私たちが普通に利用することはできません。

このため、私たちが使えるような電気は、発電所で人工的に作る必要があります。そのもとになるエネルギー（エネルギー源）には、水力、火力（石炭、石油、天然ガス）、原子力などがあります。しかし、これらのエネルギー源は、水力を除けば地球が長い年月をかけて蓄えてきたエネルギー源ですので、私たちが今後も使っていくと、だんだんと減っていき、永久に使えるというものではありません。いずれは、なくなってしまうかもしれない電気。これをできるだけ使えるようにするためには、二つの方法があります。

一つは、一度利用しても比較的短期間に再生が可能で、資源が無くならない（太陽が輝き続ける数十億年くらいの間は）、再生可能エネルギーで電気を起こすことです。もう一つは、できる限り電気を効率的に使うことで、電気の使用量を減らすことです。

再生可能エネルギーによる発電

再生可能エネルギーには、太陽の恵みである、太陽光や風力、水力、バイオマスなどがあり、また地球内部のエネルギーである地熱などがあります



火力発電所



風力発電所



太陽光発電所

再生可能エネルギーは、エネルギーが無尽蔵にあること、地球温暖化の主要な原因物質である二酸化炭素を排出しないことから、最近では、太陽光発電を中心にその利用が増えてきています³⁴。我が国では、太陽光発電の導入量が風力発電に比べて格段に多いのですが、世界的にみると、風力発電の導入量の方が太陽光発電の数倍もあります³⁵。また、水力発電は雨水を利用するわけですが、雨などの気象現象は太陽のエネルギーで起こることなので、これも再生可能エネルギー電源と言えます。しかし、我が国では水力発電に適したところはほとんどが開発されてしまっているので、今後、水力発電を大幅に増やすことはあまり期待できません。一方、火山国である我が国では、地熱発電も早くから導入されていますが、その量は太陽光発電に比べるとわずかなものです。

³⁴ 我が国の場合、石炭、石油、天然ガスは100%近くが輸入ですが、再生可能エネルギーである太陽光や風力は国産エネルギーなので、エネルギーの自給率を上げることに貢献します。

³⁵ 我が国では、風が安定して吹く地域が限られていることと、過去の政策とから相まって、風力発電の導入は小規模にとどまっています。

そこで、太陽光発電や風力発電への期待が大きくなるわけですが、その導入を進めるため、発電した電気が余ったらそれを電力会社が買い取るという「固定価格買取制度」³⁶が 2012 年に発足しました。それ以来、特に太陽光発電は急速に導入が進み、2015 年 11 月には、運転中の容量は 2,000 万 kW を超え、認定された容量は 8,000 万 kW を超えています。これは我が国の太陽光発電を除く総電源容量の 10%、40%程度になります³⁷。

太陽光や風力による発電の特徴～出力変動

しかし、一見良さそうに見える太陽光発電や風力発電には、電力システムにとって困った問題を引き起こすことがあります。太陽光発電は太陽が照っていないと発電できません（あたりまえですが）し、雲がかかると出力が下がります。また風力発電では、風の強さによってその出力が大きく変動しますが、その出力の予測があまり正確にはできません。

しかし、このように発電量が勝手に増えたり減ったりすると、一般の家庭での電圧が大きく変動したり、周波数が変動したりします。

³⁶ フィット（FIT：Feed-in Tariff）と呼ばれます。再生可能エネルギーによる電力供給を、20 年間などの長期に「固定」した価格で、電力会社に買い取ることを政府が義務づける制度。その費用は賦課金として電気料金に上乗せされ、一般家庭を含めた電気の利用者が負担しています。

³⁷ 容量と実際に発電する電力量とは比例関係にはありません。例えば、太陽光発電は、夜は発電できませんし、曇りや雨の日は発電量が減少します。設備がその容量の 100%で常に発電したとする発電量を分母にとって、分子に実際に発電した電力量をとった割合を利用率といます。我が国では、太陽光発電や風力発電の利用率は 20～30%になります。燃料がありさえすれば発電できる火力発電などと比較する場合には注意が必要です。

このような課題を解決するためには、家庭までの配線に電圧を調整する機器を新たに設置したり、配線を太くしたりする対策が必要になります。

また、周波数の変動を抑制するためには、在来型電源である火力発電や水力発電で、電気が不足する場合には発電を増加し、余る場合には発電を減少させなければなりません。もちろん蓄電池があれば、発電と貯蔵ができますので、変動の抑制には効果的です。しかし、コストが高いためあまり大容量の設備は期待できません。したがって、このような対策でも課題が解決できない場合には、太陽光発電や風力発電の出力を減少させなければなりません³⁸。

電気の使い方と太陽光発電などによる課題の解決に役立つ

電気を使う方でも、これらの課題を解決する助けをすることができます。例えば、電気が不足する場合には電気の使用を控えたり、電気が余る場合には電気の使用を増やしたりすることで、発電量と消費量がアンバランスになる影響を緩和することができます。これはデマンドサイドマネジメント（DSM：Demand Side Management）やデマンドレスポンス（DR：Demand Response）³⁹と呼ばれており、以前からある深夜電力

³⁸ 太陽光発電や風力発電では、最大出力がその時の日射量や風速で決まるので、出力を増やすことはできませんが、出力を減らすことはできます。

³⁹ Demand とは要求や電力需要（電気の使用量）、Response とは応答という意味ですが、ここでは電気を使う側で、電気の使用量を調整して対応する意味で使われます。

制料金⁴⁰も広い意味では DR の一種になります。

DR には、大きく分けると 3 種類の方式があります。まず、東日本大震災時などの緊急時の発電不足を解消するため、需要（電気の使用量）を削減する方式です。これは容量プログラムと呼ばれます。

次に、平常時の経済プログラムで、時間帯（または時間）別に料金を変えることで、電気の使用者に自らの判断で、時間帯によって決められている電気料金に応じて、その使用時間帯をシフトするように促す方式です。これには、①1 日を時刻に応じて数段階の電気料金が設定された時間帯別料金 (TOU: Time Of Use)、②電気をたくさん使う時間帯だけ料金を高くする緊急ピーク時課金 (CPP: Critical Peak Pricing)、③30 分単位などで全体としての電気の使用量などで決まる料金を適用するリアルタイム料金 (RTP: Real Time Pricing) などがあります。なお、年間を通した電気料金は、どの料金方式を採用しても、ほとんど変わらないように設定されます。

また、周波数を一定に維持することを目的に、電気の使用量を数分単位で調整する方式もあります。

我が国でも、最初の容量プログラムに相当する方式は工場などに対してすでに実施されていますが、今後は家庭などへも広まっていくことが考えられます。また、経済プログラムや周波数維持のための方式は、米国などの一部で採用されていますが、我が国では一部の地域で実証研究がなされているところです。

⁴⁰ 深夜には一般に電気の利用が全体として少なくなるので、その間（一般には、毎日 23 時から翌日の午前 7 時）の電気料金を割り引く制度。

これら DR は、再生可能エネルギーによる発電量の不確実性や変動による電力システムへの悪影響を緩和するだけでなく、最初に述べたように、発電設備や電力流通設備の建設を抑制する効果も期待されます。

スマートメーターとスマートハウス

上に述べた DR は、スマートメーターが導入されたスマートグリッドで初めて、これまでよりもっときめ細かな対応ができるようになります。スマートメーターとは、毎月の使用電力量の検針を自動化し、さらに 30 分単位での電力使用量を計測できる、高度化された電力量計です。図 20 にスマートメーターの例を示します。

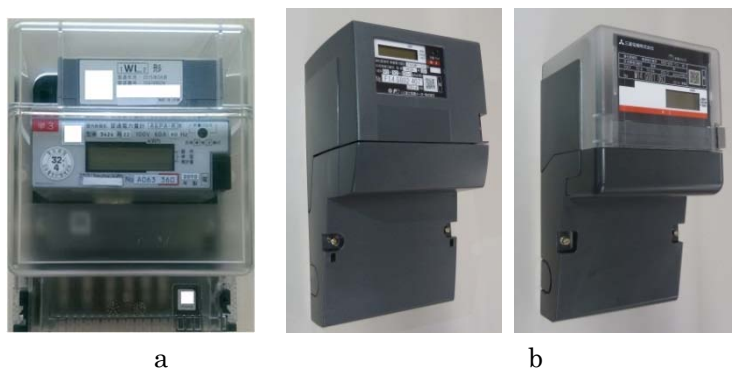


図 20 スマートメーターの例
(画像提供：a 関西電力株式会社、b 東京電力株式会社)

電気を賢く使うスマートハウス

一方、家庭内でのエネルギーの有効活用を図るため、家庭でのエネルギーの使用状態を管理し適切な情報提供を行う、家庭

内エネルギー管理システムの検討も進められており、**HEMS**⁴¹と呼ばれています。**HEMS**の基本的な役割は主として以下の3つです。

- 1) エネルギー使用状況の見える化
- 2) 省エネルギーや快適性維持のための宅内制御
- 3) 電力システムへの貢献のための制御

スマートメーターは、情報通信機能を持っているので、図21に示すように、電気使用状況を、**HEMS**を通じて把握することができるようになってきました。さらに、設定によっては、冷蔵庫や洗濯機など、個々の家電機器ごとの電気使用状況の把握も可能になります。このような機能を有した家屋はスマートハウスと呼ばれています。

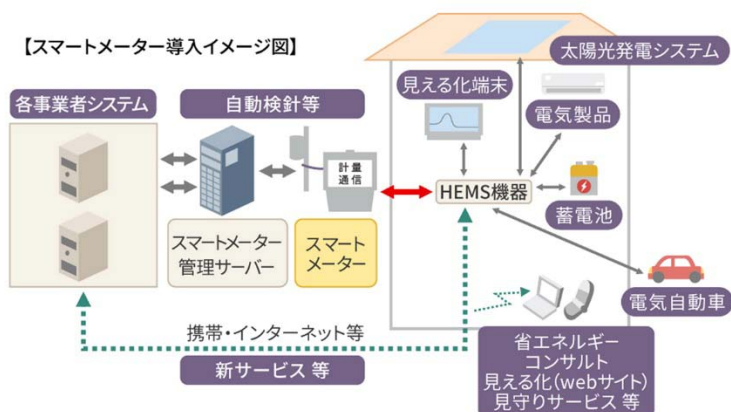


図21 スマートメーターを使ったサービス
(出典：東京電力エナジーパートナー株式会社 HP)

⁴¹ 脚注3 (p.5) 参照

スマートハウスでは、スマートメーターや HEMS を通じて、個々の家電機器をコントロールできるようになるので、例えば、発電量が不足している時には不急の機器を止めたり、夏では冷房の設定温度を少し上げたりして全体の消費電力を減らすことで、太陽光や風力発電の出力変動の緩和に役立てることができます。

さらに、ヒートポンプ⁴²と組み合わせた給湯器やバッテリー、プラグイン電気自動車⁴³などのエネルギー貯蔵ができる機器があれば、もっと効果的に、電気利用の便利さを損なうことなく、役立てることができます。

今後は、発電の不足や余剰に応じて電気料金も変わるような制度も取り入れられていくでしょう。一般的には、前の日に翌日の時間単位程度での料金が提示されることになるでしょう。

このような場合、前日に翌日の一日間の電気の使い方をうまく計画することが重要になります。この計画は家族の誰かが立てることもできますが、毎日いろいろ考えて計画を立てるのは面倒といえば面倒です。その場合には、スマートメーターや HEMS に自分の家族の省エネルギー優先か利便性優先か、何をどの順序でコントロールするか、などの好みをあらかじめ設

⁴² p.25 のコラム参照

⁴³ 電気自動車には、家庭用の電気から充電（あるいは放電）できるプラグインのタイプと、自動車に別途搭載されている（ガソリン）エンジンだけで充電するプラグインでないハイブリッド電気自動車があります。我が国では、自動車の大半が、ほとんどの時間、駐車しています。この駐車中にプラグイン電気自動車のバッテリーを利用することが可能です。

定しておき、自動的に計画を立て、実行してくれるようにすることもできるようになるでしょう。

このように、スマートメーターは電気使用状況の「見える化」を可能にする電力量計ですので、その導入により、電気料金メニューの多様化や社会全体の省エネルギー化への寄与、電力供給における将来的な設備投資の抑制などが期待されています。我が国では、電力会社によっては 2011 年度から導入が開始され、全国的には 2023 年度ごろまでには全家庭への導入が完了する予定になっています。

さらにスマートメーターと HEMS や BEMS⁴⁴とを活用することにより、住宅やビルなどの需要家サイドにおいても、快適な居住空間や省エネルギーの実現と並行して、需要家機器の運転制御や太陽光発電システムの出力制御、電気自動車への充電など、社会コストの最小化を目指すことができると考えられます。

⁴⁴ 脚注 4 (p.5) 参照。

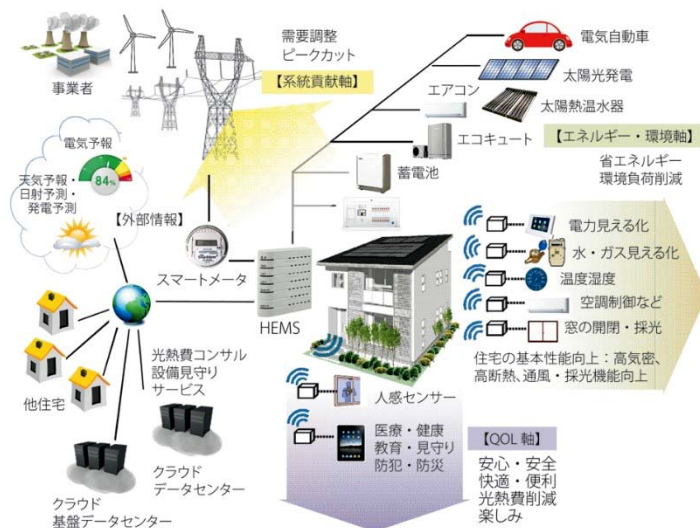


図 22 HEMS の役割

(出典：岩舟由美子「これからの HEMS」電気学会誌 Vol.133 No12 pp.809-812 (2013))

この意味で、スマートメーターとともに HEMS や BEMS のさらなる普及が望まれます。そのため、単にエネルギーの観点だけではなく、情報通信機能を活用した HEMS や BEMS の高付加価値化、高機能化が検討されています。その一例を図 22 に示しますが、HEMS はエネルギーのみならず、住まいの総合管理手法として、活用されることが期待されます。

スマートグリッドからスマートコミュニティへ

これまで紹介してきたような電気のスマートな使い方と、電気を発電して送る全体の電力システムを組み合わせた電力シ

システムをスマートグリッドと言います。エネルギー貯蔵装置としては、各家庭で設置されている機器のほかに、ある程度のかたまりごとに大きめの貯蔵装置を設ける場合も多くあります。また当然、在来型の発電所や再生可能エネルギーを用いたある程度大きな発電所（例えば、メガソーラー⁴⁵）も直接コントロールすることもあります。このように、電気を使う側と発電・送電する側が双方向に情報を連絡し合って、全体としてうまく働かせようとする仕組みがスマートグリッドと言えます。この概念を図に示したのが図 23 になります。

スマートコミュニティは、電気の他にもガスや交通、水道、情報通信などのインフラ設備や、家庭の他にもオフィスや商業施設なども含めた、地域としての全体としてエネルギーの総合的な最適運用を実現する地域のことを言います。さらに、住民のライフスタイルの変革までも複合的に組み合わせて、次世代のエネルギー・社会システムを表す概念とも言えます。このようにスマートコミュニティは、スマートグリッドも含んだ概念とも言えますが、市や区程度の限られた地域を対象とする点が、若干異なります。スマートグリッドでは、一般に電氣的につながれたすべての電力システムを指して使われる場合が多くあります。

⁴⁵ メガソーラーとは、1MW（メガワット）程度の規模以上の太陽光発電所のことを言います。1MW は 1,000kW になりますので、普通の家庭の屋根にある太陽光発電が 5kW 程度であることから、相当に大きな発電所になります。ただ、在来の発電所では数百万 kW の発電所も数多くありますので、こちらと比べれば随分小さな発電能力となっています。

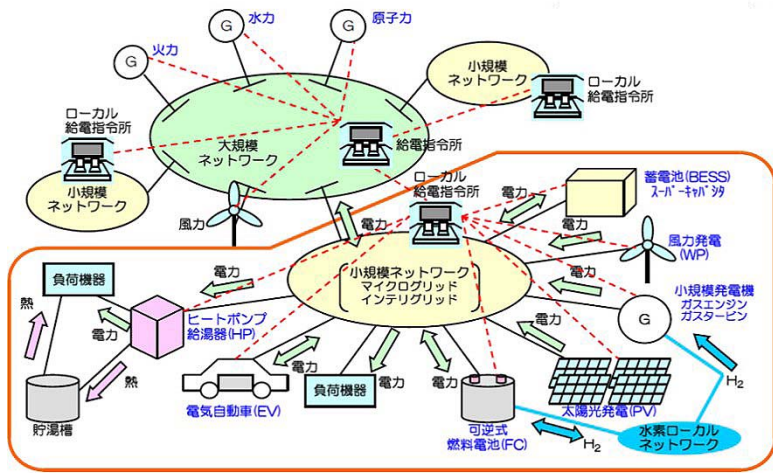


図 23 スマートグリッドの概念図

(出典：谷口治人 平成 21 年電気学会電力・エネルギー部門大会座談会「東大におけるユビキタスパワーネットワークの研究」配布資料)

情報通信の役割の重要性

スマートグリッドやスマートコミュニティでは、情報通信の役割が大変重要になります。家庭の中の家電機器の一つ一つの情報までは必要とはしませんが⁴⁶、少なくとも家庭一軒ごとの電気の使用状況を 30 分単位で集め、また、30 分単位での翌日の電気料金を伝えたりすることが必要になります。スマートメーターの台数は一軒に一台は必要ですので、数千万台の情報を扱うことになります。

家庭の中でも、スマートメーターや HEMS を通して、一般

⁴⁶ 比較的容量の大きい、電気自動車のバッテリーや太陽光発電装置などは、直接コントロールの対象となることも考えられます。ただし、その場合も、数十軒から数万軒をまとめるアグリゲーターと呼ばれる中間段階を経由することになるでしょう。

には無線で家電機器と結ばれることになるでしょう。これを用いれば、外出先からでも照明や暖冷房のコントロールも可能となりますし、お年寄りなどの「見守り」にも活用されるでしょう。

このように、今後は情報通信の役割はますます大きくなっていきます。これに伴って、情報通信のセキュリティにも十分な注意がはらわれる必要があるのは当然のことです。

5 電力自由化とは

電力自由化という言葉を、テレビ新聞などでよく見聞きします。電力自由化は、公的には多くの場合、電力システム改革と呼称します。電力を供給する体制やその仕組みを改革しようとする動きなのです。

しかし、電力システム改革は電力システム技術や電力事業経営に密接に関係しています。そして海外諸国⁴⁷に数多い先進事例もあります。この章ではこれらの関係を解きほぐします。日本の電力の市場や経営と技術の将来について考えてみましょう。

日本の電力自由化の歴史

日本では、図 24 にあるように 2000 年 3 月から電力の小売り自由化が開始されています。

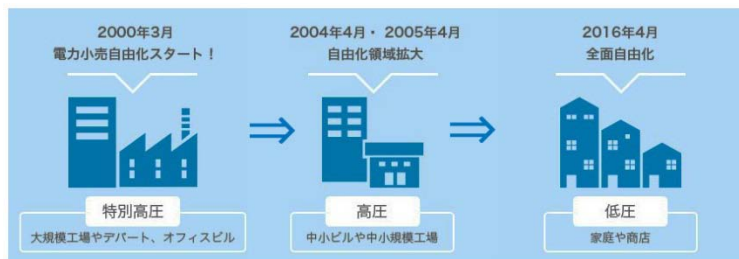


図 24 電力の小売り自由化の歴史

(出典:資源エネルギー庁 HP 「電力の小売全面自由化って何?」)

⁴⁷ 欧州諸国（英国、ドイツ、フランス、北欧諸国、スペイン、イタリア、など）、米国諸州（カリフォルニア、テキサス、北東部諸州、など）、オーストラリア、ニュージーランド、韓国、など。

2000年の時点では、自由化されたのは大規模工場のみでしたが、その後、自由化の範囲が段階的に広げられ、2016年4月からは家庭への小売り参入も全面自由化されました。

これにより誰でもどこの電力会社からでも自由に電気が買えることになりました。これに先立ち多くの企業が新電力会社として名乗りを上げています。各社ともいろいろなメニューを用意してお客の確保に努めています。

それでは具体的に自由化の中身を見てみましょう。

日本の電力システム改革の概要⁴⁸

現在（2016年4月時点）進行している電力システム改革の狙いは、日本の電力システムの改革によって私たちの生活や電力利用の姿を変えること、新しい産業や雇用を生み出すことです。そのために次の三つを目的としています。

①安定供給の確保

電気が足りない地域に柔軟に供給できるよう広域的な電力融通の促進。再エネや自家発電設備など多様な電源を供給力として活用

②電気料金の最大限の抑制

競争の促進と電気の生産や販売の創意工夫や経営努力による電気料金の抑制。

③電気利用の選択肢や企業の事業機会の拡大

⁴⁸ この節の記述は、経済産業省がウェブで公開している「電力システム改革が作り出す新しい生活とビジネスのかたち」(http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/pdf/20140306.pdf) に準拠しています。

どの電力会社からどのような電気を買うかをすべての電気の利用者が選べるようになり、企業のビジネスチャンスなどを促進。

これらの目的を達成するための柱としているものは、次の三つです。

①地域を超えた電気のやり取りの拡大

地域を超えた電気のやり取りをしやすくすることによる災害時での停電の低減。その司令塔として「電力広域的運営推進機関」の創設。

②電気の小売りの全面自由化

電気の小売販売ビジネスへの新規参入を解放解禁し、すべての電気利用者が料金メニューを自由に選択可能。

③送配電ネットワークの利用しやすさの拡大

電力会社の送配電部門を別会社に分離することにより、誰でもがそのネットワークを公平に利用できるよう配慮。

これらの改革は次のようなスケジュールで進んでいます。

第1段階 広域系統運用の拡大

電力 広域的運営推進機関の発足（2015年4月）

第2段階 小売り参入の全面自由化

家庭でも電力会社や料金メニューを自由に選択可（2016年4月）

第3段階 送配電部門の法的分離⁴⁹と小売り料金規制の撤廃

電力会社送配電部門の法的分離、小売り料金規制の撤廃

⁴⁹ 法的分離とは、送配電部門を別会社化する方式。これに対し所有権分離とは、別会社化に加え、発電・小売会社との資本関係も解消する方式。

(2020年4月目途)

このように電力システム改革が進んでいますが、先に述べましたように海外諸国ではすでにいろいろな経験を積んでいるので、これらを可能にする技術は何なのか、諸外国が苦しんでいる問題を克服するための技術は何なのか、それらの技術の研究開発と維持、技術者の育成はどうしたらよいのかを考えてみましょう。

自由化の対象となる電力システムの技術的特徴

このようにいろいろなメニューを選択出来、新電力を含むこの電力会社からでも電気を買えることになったことで市場の活性化が期待されています。しかし、自由化の中でも電力システム自体の特性は何ら変わりがありません。従来は廉価で安定な電気を供給するために、それまでの電力会社が自身の努力で行ってきたことを、今後は新電力を含めて電力に携わるすべての企業・機関が行う必要があるのです。

また、電力の自由化はすでに多くの国々で実施され、いろいろな経験を積んでいます。そうした自由化先進国の動向をみると、競争が実現した・選択肢が増えたというメリットと同時に、いろいろな課題も見えてきました。

電気という特殊な商品

それは、電力システムは他のエネルギーやインフラ設備と比べて大きく違う次のような特質を持っており、制度が変わっても、これらの特質に十分な配慮が払われないと、安定的に電気を使うことが出来なくなるからです。

①一つ目は、毎瞬時毎瞬時に使う量と発電する量が同じでなければならぬすなわち同時同量ということです。これは短期的にもそうですし、また、発電や送電設備の建設には時間が掛かるため、必要な設備を長期的に維持・建設していかないと、将来、需要と供給を合わせるために計画停電が必要になるかもしれません。これが失われると大停電になり得ます。

②二つ目は、電力システムの中の全設備は電氣的にすべて結合されていて、どこか1箇所のトラブルが直ぐに全設備に影響を与えるということです。いわば一心同体ですべての設備に慎重な扱いが必要ということです。

③三つ目は送電線で送れる電力量には許容限界があり、状況によっては需要に見合う供給量はあっても送れない場合があります。

④四つ目は送電線の長さとする量によっては需要側の電圧が下がって既定の電圧を維持できず、また同期⁵⁰がとれずに系統全体が異常をきたす恐れがあることです。

⑤五つ目は、電力設備は常に適正な運用と適切なメンテナンスが必要で、これを怠ると大規模停電を誘発することがあり得ることです⁵¹。

電力自由化は諸外国に先例がありますので、具体的に海外の状況を見てみたいと思います。

⁵⁰ Vol.5 の4章「電気の性質をうまく使って届ける」を参照ください。

⁵¹ これらを怠ったために実際に大停電になったのが2003年8月の北米大停電です。詳細は次ページのコラムを参照下さい。

コラム：樹木が引き起こした大停電

2003年8月14日午後4時ごろ（米国東部時間）、米国中西部およびカナダ・オンタリオ州にわたる地域で大停電が発生しました。この大停電によって、北米では263もの発電所が停止し、その規模は約6,180万kWとほぼ当時の東京電力の最大需要に達し、ニューヨークをはじめとして米国8州およびカナダ・オンタリオ州の約5,000万人に影響を与えました。

きっかけはオハイオ州の比較的小規模の電力会社ファーストエナジー社の送電線が樹木に接触し停止したことです。この時、制御のコンピューターが故障していたこともあり、（問い合わせの連絡により認識する機会があったにもかかわらず）オペレーターがこの事故に気が付かず放置してしまいました。

その結果、この送電線に流れていた電気が他の送電線に流れ込み、その送電線の電流（潮流）が許容限界に達して遮断をしてしまい、それがさらに他の送電線にも波及するということが起こりました。

このため、連系していた複数のネットワークが幾つかに分断され、さらにそれぞれの部分で需給のアンバランスなどの異常が起こり、ニューヨークやトロントなど巨大なエリアで大停電が起こってしまったのです。

米国の電力自由化

まず電力自由化の先進国で、この国の現在の姿は10年～20年後の日本の姿ともいわれる米国の状況を見てみましょう。

米国はかつてジェネラル・エレクトリック（GE）やウェスティングハウス・エレクトリック（WH）などのメーカーや大手の電力会社が、電力技術やそのシステムで世界を指導して来ました。しかし、石油ショックなどで電力設備の投資が抑えられてきたのに加え、1992年のエネルギー政策法による電力卸売市場の自由化以来、電力の設備投資のさらなる削減などにより、米国の国内電力メーカーは衰退し、多くの事業が外国メーカーに売却されました⁵²。

電力会社も世界に向かって技術を指導する余裕がない状況になっています。この状況を米国の電力技術の重鎮の一人であるカサツザ氏はその著書「忘れられたルーツ⁵³」で次のような警鐘を鳴らしています。たいへん示唆に富む内容なので、少し長くなりますがその趣旨を以下に示します。

『電力会社の設備は「電力系統」というシステムの中で発電し・送電し、需要家に電気を届けている。そうした設備はすべて電氣的に結合されているので互いに勝手な振る舞いは許されず、所謂「同期したシステム」を構成している。同期したシ

⁵² GEは選択経営によりガスタービン事業に特化、WHは次々と事業を切り売りする中で火力部門はジーメンスに、原子力部門は東芝に売却されました。ただしGEは現在電力流通分野にも再参入しています。

⁵³ ジャック・カサツザ（著）「忘れられたルーツ—電力産業120年の浮沈とこれからの100年」日本電気協会（2009）

システムの中ではどの電力会社、発電事業者、取引業者、送電業者でも何かをすればあるいは何かをしなければ、また時には事故が起こればそれがネットワーク内のすべてに影響してしまう。この「同期」を維持するために各瞬間での供給力と需要が等しいことが必須となる。この同時同量が電力システムの本質であり鉄道、電話、ガス、水道など他のインフラと大きく異なる点である。

また、電力システムを円滑に動かすためには、必要な設備の建設、燃料の確保、設備維持費用の確保、系統状況の常時把握などが必要となる。このため電力事業は電力設備自体のネットワークに加え、電力会社をコントロールしている政府の規制ネットワーク、事業自体を成り立たせるために必要な事業ネットワーク、燃料ネットワーク、マネーネットワークおよび監視制御のための情報通信ネットワーク、の六つのネットワークがすべて円滑に機能することも必須となる。こうしたことが十分に検討されないまま自由化に踏み切った結果次のようなことが起こってしまった。

- i) 電力価格が前例のないほど不安定になってしまった。日々猛烈に変動し前日比で百倍に上がることもあった。
- ii) この不安定さは電力ヘッジ取引を促進した。これはコストの不確実さを減らす保障にはなったが、電力にこれまでは無かったコストを加えることとなった。
- iii) 合併や会社売却を推進したり、必要な資金を供給したりするために投資銀行家と弁護士の役割が決定的に増大した。
- iv) 電気事業の経営基本方針は利益を最大化することとなり、電力コストを最小化することではなくなった。

v) 電力会社の取締役会は市場原理主義者が中心となり、その一方で電力システムを運用するスキルは弱体化した。

vi) 電力会社間の協力体制はこうして失われた。

加えて当時より米国国内に短期的利益追求の潮流があり、本来長期的視点に立った計画により設備を整備し、コスト削減に向けた技術開発を進めていくべき電力事業にもそれが蔓延した。その悪影響は大きく、本来公益事業である電力事業にこの短期的利益の追求を取り入れたことが最大の問題である。』

以上がその趣旨ですが、2000年夏に作為的に需給ひっ迫を作り出し電気料金を釣り上げて暴利を得たエンロン社の事件⁵⁴もこの文脈にあります。この事件を契機に米国では電力自由化を実施している州は13州に留まっています。

また、カサツザ氏は、『電力に携わる技術者として「自分は一般大衆に職業上の責任を負っているとの自覚」をしっかりと持つことが極めて大事』との主張も、この本でされています。

英国の電力自由化

次に、自由化を最初に導入した英国の例を見てみましょう。世界で電力自由化の先頭を切ったのは英国です。サッチャー政権の1990年に国営のCEGB⁵⁵が、発電会社3社と送電会社1社に分割民営化され、電力自由化がスタートしました。また、

⁵⁴ その後エンロン社は不正経理が露見し、翌年2001年12月に破綻しました。

⁵⁵ 発送電局。Central Electricity Generating Board. 発電と送電を独占していた国有の機関。

12の国有配電局も民営化され、配電会社になりました。1999年には小売りも全面自由化されました。

電気料金は自由化当初は低下しましたが、2005年ごろから元の水準を超えて上昇しています。

英国は北側に電源が多く南側に需要が多い構造になっていますが、南北間の送電線の建設が進んでいません。またCO₂排出の問題から石炭火力を停止せざるを得ないこと、老朽化の問題から多くの原子力発電所の停止が進むことなどから電源が不足する一方、発電所の建設が進んでいません。こうした状況を打開し発電所の建設を進めるため、新規原子力発電所を含め、多くの電源に実質的な固定価格買取制度が導入されようとしています。

自由化の中で新規の大電源の建設が進まない、また、必要なのに作られないのは、市場に調達を委ねるところに原因があります。それは、従来は電源も送電線も一体であったため、大変であっても需要の多いところに送りやすい電源を作る、ということが当然視されていたのですが、別会社の電源会社にはそのような必然性は無く、作りやすいところに作るということになっていきます。また、ピークの時だけに運転する発電所も稼働率が低いということから、それをカバーする極めて高額で電気が売れば別ですが、建設には慎重になります。それに加えて自由化の中では自社が確保できる需要予測が難しいため、時間や費用の掛かる新規電源の建設に慎重にならざるを得ません。

また、発電所のコストは燃料費と固定費からなりますが、最新鋭の高効率電源は減価償却が進んでいないため固定費が高

くなります。そのためその発電電力は、償却が進んだ効率の悪い老朽火力よりもコストが高くなり、コストがすべての市場では最新鋭火力の電気が売れないという問題も起こってしまいます。このように電力会社は新規電源の建設に慎重になってしまい、建設を促すために英国では自由化とは相反する固定価格買取制度⁵⁶を多くの電源に導入せざるを得ない状況となりました。自由市場ではどこでもこの問題が内在します。

英国は島国のため他国から容易に電気を買うことが難しいという背景もあり、現在では、長距離海底ケーブルを使用した他国との連系にも力を入れています。

なお、自由化の中で、英国の発電・小売り事業者は6つの大きなグループにほぼ統合され、その内4社が海外資本の会社となっています。

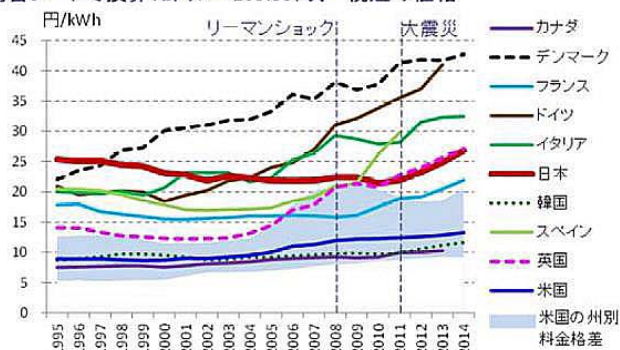
ドイツの電力自由化

自由化・再生可能エネルギーの固定価格買取制度・脱原子力を並行して進めているドイツの例を見てみましょう。ドイツは1998年に電力ならびにガスの完全自由化が始まりました。その少し前の1990年から再生可能エネルギーの固定価格買取制度が始まっています。加えて原子力発電所は一部を停止し2022年までにすべて廃止することになっています。

⁵⁶ 脚注 36 (p.47) 参照

再生可能エネルギーの高額での固定価格買取制度を強力に進めた結果、ドイツの再生可能エネルギーは2015年に30%を超えるに至りました。一方その間、買取価格を電気料金に転嫁した結果、図25のように、家庭用の電気料金は約2倍となっています。

2014年為替レートで換算:1ドル=105.85円、税込み価格



出典: IEA Energy Prices and Taxes等を基に電力中央研究所にて作成

注1: 米国については、州ごとの料金格差が大きいため、EIAデータをもとに、割高な州の代表としてコネチカット州、割安な州の代表としてワシントン州をとり、その幅を水色で示している。

注2: カナダ、ドイツの2014年、スペインの2012,2013,2014年は欠損値。

図25 家庭用電気料金の国際比較

(出典: 電力中央研究所フリーディスカッションペーパー SERC 15003「電気料金の国際比較—2014年までのアップデート—」)

また、再生可能エネルギーの多いドイツ北側から需要の多いドイツ南側への送電線が不足しているため、隣国を經由して変動の大きい電気が流れ、隣国での電力系統の安定性に影響しているといわれています。現在南北を結ぶ送電線の計画はありますが、反対運動により建設が進んでいません。

また、ドイツでは2050年までに再生可能エネルギーの割合を80%にまで上げる計画であり、変動の激しい電源が大半に

なった時の系統の運用を安定的にするため、大量の蓄電装置の導入や予備電力、さらに制御技術の一層の高度化が必要と考えられますし、その通過地域で太陽光発電が使用できなくなった2015年3月20日の欧州の日食のときを上回るような日食対策も必要になると考えられます。

日本の電力自由化の留意点

以上、自由化先進国の状況を見てきましたが、そこから浮かび上がるいくつかの問題について、日本が同じ問題を避けていくために留意すべき点を取り上げたいと思います。

①系統の安定

先に取り上げたとおり、系統の安定な運転で必須なのは各瞬時の同時同量と電圧の維持であり、多少の変動であれば系統自身に吸収する力がありますが、許容限度を超えれば系統が崩壊します。この需給調整の最終責任は我が国では送配電会社が持ちますが、変動の大きな再生可能エネルギーが増えてきているので安定化が難しくなりつつあります。また、入札制度では減価償却費が大きい新規設備を作ることに慎重になり、長期的に発電設備の減少を起こしかねません。さらに設備維持、すなわちメンテナンスに投資する意欲も働きにくくなります。当面は電力会社の安定供給への責任感が維持され問題はないと思いますが、長期的にカサツザ氏が警告した短期利益至上主義に陥らないような施策が必要です。そうした諸施策と同時に、安定を維持するための設備の更新や、技術者の技術力維持向上に対する投資、ならびに技術者の公益に対する強い責任感が必須となります。

②無駄の排除

入札制度の場合、発電コストは主に燃料費と減価償却費からなるため、先に述べた通り減価償却費の大きい高効率の最新鋭火力よりも減価償却が進んだ効率の悪い老朽火力の方が安く、老朽火力が高稼働で新鋭火力が遊んでいるということがすでに英国やドイツで起きています。短期の市場原理には沿っているものの、長期の公益に反するこうした運用が起きないように制度的な工夫が必要です。

③料金の安定

i) 入札制度の課題

電力の売買を仲介している取引所での 現在の入札制度では、その時点時点で低い値段のものから積み上げ、負荷に見合う合計量になった時点での発電設備の値段で、低い値段のものも同じ値段で買い取って供給します。そのため発電費用はその時点時点で発電している設備の最も高い料金がすべての発電に適用されます。これに対し、今までの料金算定はそれぞれの発電設備の発電にかかった費用を合算して計算するので、いわば平均値の費用で済んでおり、この差も電気料金を押し上げる要因となり得ます。

ii) 再生可能エネルギー固定価格買取制度の課題

再生可能エネルギーの固定価格買取制度については平成 26 年度でその買取金額が 1 兆 86 億円とすでに 1 兆円を超えています。また 27 年度も 8 月までの 5 カ月分ですでに 6798 億円と前年の 5 割増し以上となっています。この金額はすべて電気料金に上乗せされます。今後これはさらに増加して 20 年間は続いてしまいます。ドイツではすでにこの問題が顕在化して電

気料金が2倍近くにもなり、2017年以降、再生エネルギー年間導入量の80%を競争入札により調達することとしています。

我が国でも、買取金額を長期的な経済原則に見合ったレベルに近づけるよう低減するなど、買取制度の見直しが行われています。なお、将来のことではありますが、固定価格での買取期間が終了した際の大量の太陽光発電設備の廃棄問題にも対処が必要です。また、買取期間の20年が終了した時点を考えて新たな課題も見えてきます。その時点で太陽光発電のコストが、火力などに比し技術の進歩で十分に低くなっていれば、買取制度の有無に関係なく再度建設して売電をする意欲が働きます。しかし火力などに比し経済性がなければ買取保証がない限り再建設する必然性はありません。発電専門の新電力としては赤字を出してでも発電するという義務が課せられない限り、買取期間が終了した時点ないしは設備の寿命が来た時点で発電を廃止してしまう可能性もあるわけです。

地球環境の関係から再生可能エネルギーの発電を維持するためには、国を挙げて再生可能エネルギー発電コストの大幅な低減を実現するか、または再度買取を保証するかを選択を迫られる可能性があります。こうしたことを考えれば、再生可能エネルギーの増強自体については、例えば各発電会社に対し10年計画で発電量の15%以上を再生可能エネルギーで発電するように求めるなどの措置で対応することも一つの方法と考えられます。もちろんそれ以外にもいろいろアイデアはあると思いますので、皆で考えていくことが大事です。

④エネルギーセキュリティの確保

米国の歴史を通観すると制度の変更が産業を大きく変えてしまうことが良く解ります。エネルギー資源が貧弱な我が国としては、制度の変更でエネルギーセキュリティが失われないように常に監視することが必要です。

⑤すべては電気料金に反映

電気を作り、また送るために必要な資金はすべて電気料金に反映されます。先の買取制度の高い金額もそうですし、効率の悪さが残っていれば、結局その非効率のコストも料金に反映されてしまいます。今まで述べましたように自由化先進諸国の良さ・課題も見えています。

このような中、ここで取り上げたような課題を顕在化させないためには、電力供給にかかわるすべての事業者がこれまで以上に議論を重ね、協調して課題解決に取り組む必要があります。さらに、将来に亘り私たちの生活を支える電気を安価で安定的に利用していくためには、関係者だけでなく皆で考えて日本型の良い制度を構築していく必要があると思います。

第2部 安全・確実に電気を使う

1 停電から暮らしを守る

何の予告もなく、とつぜん電気が止まると、本当に困ってしまいます。明るかった部屋が真っ暗になり、テレビやパソコンも画面が見えなくなって、急に静まりかえります。外に出て見ると街灯も消えていて信号機も止まり、車のクラクションを鳴らす人もいるでしょう。

広い地域がまとまって停電になるのは、何か大きな事故がからんでいるのに違いありません。そんな例をあげますと、東京・江東区で起こったクレーン船による事故があります。

クレーン船で大停電

2006年8月14日の朝、クレーンを立てたまま東京の川を航行していたクレーン船が、クレーンの先端を送電線に接触させてしまったのです。

事故の発生は、7時35分ごろ。クレーン船はしゅんせつ工事の現場に向かうため、東京湾から旧江戸川をさかのぼっていました。航行中はクレーンのアーム（長さ約33m）は下げてありましたが、工事現場に近づいたので、アームを上げました。しかしそこには川をまたいで送電線が張られていて、接触事故を起こしてしまいました。幸い送電線は切れませんでした⁵⁷、

⁵⁷ Vol.5 の図 13 の右側の図の、耐熱アルミ合金線（素線）の何本かは切断されましたが、垂れ下がりはありませんでした。

近所の人々は「バーン、バーン」と2回、爆発音に似た大きな音を聞いたとのことでした。

送電線の高さは約16mで、江戸川区と浦安市を結ぶ「江東線」と呼ばれる電圧275kV(27万5千V)の基幹送電線です。クレーンが送電線と地面(この場合は水面)をショートさせたので、送電線に大きな電流が流れ、「保護装置」が働いて、その送電線のスイッチ(専門用語では遮断器といいます)を切ったので、その送電線によって電力を供給されている地域全体が停電しました。

ちょうどお盆休みの時期で、停電が起きても会社などの仕事への影響は比較的少なかったようですが、一般の人々の生活には大きな影響が出ました。どのような影響だったか、くわしく見てみましょう。

鉄道では東京メトロと東京急行電鉄が、全線で運転を停止しました。東京メトロの場合、50数か所ある変電所の約4分の1で送電が止まりました。これが1か所くらいなら、近隣の変電所からのバックアップ(支援)によりほとんど影響は出ませんが、これだけ多くの変電所で止まってしまうと、それも無理でした。JRは、自社の発電所でかなりの電力をまかなっているため、全体的な影響は軽かったのですが、それでも京葉線では大きな遅れが発生しました。

道路の信号機も止まりました。都内の信号機は約15,100基ありましたが、そのうちの約1,160基(8%)が消えたそうです。自家発電装置付きの信号機もあるのですが、その数はわずかでした。羽田空港に着陸する飛行機を導くための誘導灯の一部も、

点灯できなくなりました。幸いなことに晴れて視界も良かったため、飛行機の運航に影響はでませんでした。

ビルのエレベーターも止まりました。ふつうビルには非常用電源があり、エレベーターには最寄階^{もよりのかい}までバッテリーで動かす装置がありますから、乗っている人は避難できますが、そのような装置を付けていないところで閉じ込められた事例が相次ぎました。

電話もガスも止まり、水道水に濁りが出た地域もありました。銀行のATM(現金自動預け払い機)も止まりました。百貨店やスーパーでも、開店時間が遅れたり、しばらく営業を見合わせたりしました。東京ディズニーランドでも開園が遅れ、株の取引状態を示す日経平均株価などの算出システムに障害が起きて、株価指数の表示ができなくなりました。

暑い日でしたから、クーラーが止まったところでは、ずいぶん苦しい思いをしたことでしょうね。代わりに扇風機を使おうと思っても、これも動きません。冷蔵庫は、扉を開けなければけっこう冷えたままでいられますが、3時間も止まると、きつと影響がでたことでしょう。

こうして大勢の記憶に残る夏の1日となったのです。

停電はなぜ起こる

このような大停電はなぜ起こるのでしょうか。その前に、まず、家庭で起きるミニ停電について考えましょう。

家庭でテレビゲームをしている時に、誰かが電源コードに足を引っ掛けてコードを外してしまい、折角のゲームがダメになってしまったことはありませんか。線がはずれてしまえば、電

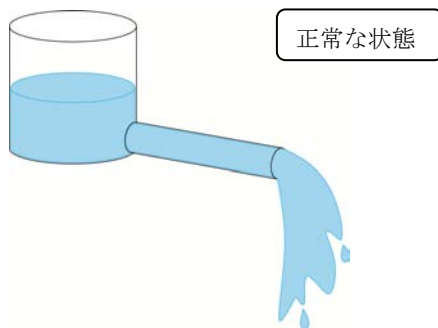
気が送れないのは当たり前ですね。また、エアコンや炊飯器、電子レンジなど多くの家電製品を同時に使ったりして、ブレーカーが落ちて家中が真っ暗になったことはありませんか？電気を使いすぎた場合も電気が切れて停電となります。これらは、家庭内で起きるミニ停電です。

停電の起こる3つの理由

さて、本題の広範囲にわたる大停電ですが、このようなことが起こる大きな理由は、大きく分けて、

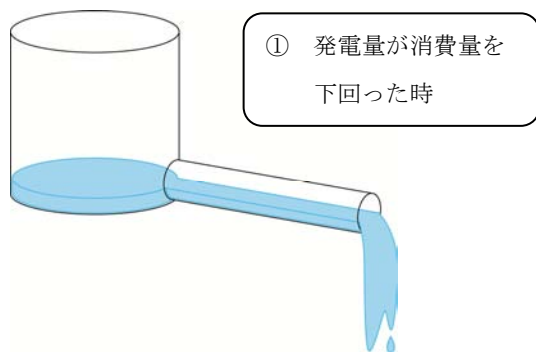
- ①発電量が消費量を下回った時、
- ②送電線が何かの原因でショートした時、
- ③送電線が送れないほどの電気を送らねばならなくなった時の三つになります⁵⁸。

電気の流れ（電流）は水の流れに例えるとイメージがつかみやすいので、それで説明してみましよう。通常、電気が送られているというのは、水源からパイプを通して水が流れている状態です。



⁵⁸ 大きな停電の原因については、Vol.5「電気を送る・配る」の「4 電気の性質をうまく使って届ける」もご参照下さい。

①の「発電量が消費量を下回った時」というのは、水源の水が足りなくなった状態です。この場合には、それまで電気を送っていたところの全部に送る電気はないので、一部で停電が生じます。後で詳しく説明するように、東日本大震災の時に、計画停電といって、部分的に停電する地域がありました。これもももとの電気が足りなくなったためです。



②の「送電線が何かの原因でショートした時」というのは、パイプが途中で破れて、水が噴き出している状態です。この場合には、その送電線につながっているところ全部が停電となります。



③の「送電線が送れないほどの電気を送らねばならなくなった時」というのは、パイプの太さ以上の水を流さなければいけなくなった時で、無理に送ろうとするとパイプが壊れてしまいますので、水の流れを止めてしまうような状態です。具体的な例としては、発電所から工場や家庭まで、いくつかの送電線で並列に分担して電気を送っている時に、一つの送電線が何らかの理由で使えなくなり、その分の電気が他の送電線に流れ込んでしまった場合などです。この時は、過剰の電流が流れ込んだ送電線では電気が流れないように遮断器という装置で送電線を切り離します⁵⁹。すると、行き場所の無くなった電流は、また別の送電線に流れ込み、またその送電線が切り離されるといったことが起こります。そのようなことがドミノ倒しの重なって、広い地域にわたる大停電になる場合もあります⁶⁰。

ここで、基本的な最初の二つの原因について、もう少し詳しく説明しましょう。

需要と供給のバランス

①発電力量が消費電力量を下回った時

ほんの一瞬でも電気が止まると、私たちの暮らしは成り立ちません。だれもが電気を「いつでも」「好きなだけ」使いたいと思っています。そのためには、使われる電気の総量（需要）とぴったり同じだけの力で発電機を回していることが必要で

⁵⁹ 大きな電流を流し続けると、送電線の温度が高くなり、電線の弛み^{たる}が大きくなって、送電線の下の木や枝などに電線が触れたり、極端な場合には電線が切れてしまったりします。

⁶⁰ これが、2003年の北米大停電です。詳しくは本 Vol の第1部5章のコラム「樹木が引き起こした大停電」をご覧ください。同様の停電は2006年に欧州でも起きています（Vol.5のp.96）。

す。この発電機を回す力をここでは発電力と言うことにしましょう。需要も発電力も刻々変化しますが、同じ時刻では両者は同じ量でなくてはならないということで、同時同量という言い方をすることもあります。

もし、使われる電気の量が大きいと、発電機の負担が大きくなり、発電機が通常の回転速度より遅くなり、送られている交流の電気の周波数が下がってしまいます（自転車で坂を上るようなもので、負荷が多いと、どうしても速度は落ちます）。逆に発電力量の方が大きいと、発電機が通常より速く回転し、周波数が上がってしまいます⁶¹。（自転車で下り坂を走るようなものです）。

それでは交流の周波数が変わると、何がいけないのでしょうか。一番良い例が電気で回るモーターです。モーターは交流の周波数に連動して回転しているので、交流の周波数が変わるとモーターの回転数も変わります。繊維業では糸を巻き取るモーターの速度が変わると糸切れや糸の太さの不揃いが起こることがあり、また製鉄業では、圧延機（ローラーに圧力をかけて鉄を一定の厚さにする機械）の動きが変わると鉄の厚みにむらが出るなど、周波数の変動は製品の品質に大きな影響を与えます。このように、周波数は非常に重要なものなのです。

このため、電力会社では使われる電気の量に応じて、常に発電量を調整しているのです。もし何かの理由で発電量が十分賄えなかった場合には、停電となるのです。

⁶¹ 大まかには、発電機の回転数が電気の周波数です。毎分 3,000 回転（3,000rpm）している発電機による電力システムの周波数は、 $3,000/60$ 秒=50Hz（ヘルツ）です。3,600rpm なら 60Hz です。

送電線は雷に弱い

②送電線が何かの原因でショートした時

送電線がショートする原因として、冒頭ではクレーン船が送電線に触れた例を紹介しましたが、実際に一番多いのは実は雷によるものです。

今では、雷は電気現象であることが分かっていますが、雷雲の電圧は約 1 億 V と言われており、さらに雷で流れる電流は平均で約 3 万 A（アンペア）という膨大なものです⁶²。

今、日本では年間に 50 万発から 100 万発くらいの数の雷が落ちていますが、雷が送電線に落ちると、送電線がショートする場合があります。さらに、場合によれば送電線につながっている変圧器などの機器が壊れたりすることもあります。そのようなことになっては大変ですので、送電線がショートしたことが分かると、送電線の両端の変電所で送電線のスイッチ（遮断器）を切るのです、その区間は停電になります。



図 27 大地に落ちる雷
(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

⁶² 落雷現象は数 10～数 100 μ s（マイクロ秒）の現象ですので、3 万 A の電流といっても、それが流れている時間は非常に短いのです。

雷以外にも、台風や大雪など、過酷な自然条件で送電線がショートして停電となることもあります。図 28 は原因別の架空送電線事故率⁶³を示したのですが、架空送電線の事故原因の約半分は雷によるものであることが分かります。図 29 は送電線の運転電圧別の雷事故率⁶⁴です（送電線 100kmあたり年間に平均して何件の雷事故が起こっているか示したもの）。年によって雷の数も異なるので、事故率も年によってかなり違いますが、500kV（50 万 V）の送電線では年間 100km あたり平均 0.5 回程度ですが、66-77kV（6 万 6 千 V～7 万 7 千 V）級の送電線では、その 10 倍程度の雷事故が起こっていることが分かります⁶⁵。

⁶³ 図 28 は、「供給支障」（停電のことです）になった件数と割合を示した図です。

⁶⁴ 図 29 での雷事故率は、落雷によって送電線の両端の遮断器を開いた回数でまとめています。したがって、雷が落ちてでも停電になっていない場合も数えられています。雷が落ちてでも停電にならない場合については、後述の「いったん切ってまたつなぐ」の最後の方をご覧ください。

⁶⁵ 電圧階級の低い方が、基本的な絶縁レベルが低いため、雷が落ちた時に事故になりやすいのです。

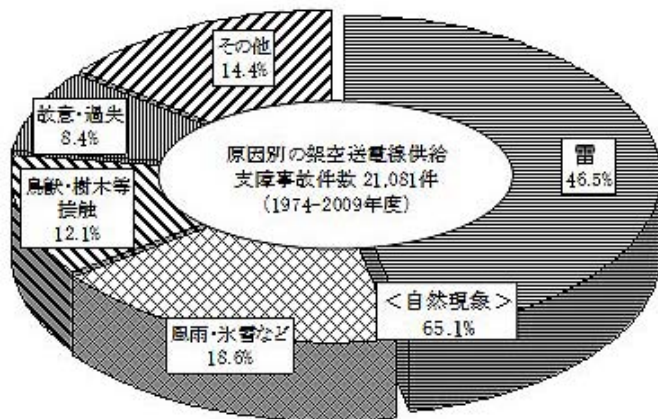


図 28 架空送電線の原因別事故比率

(出典:「送電線避雷装置適用ガイド」電力中央研究所総合報告 H07 2012)

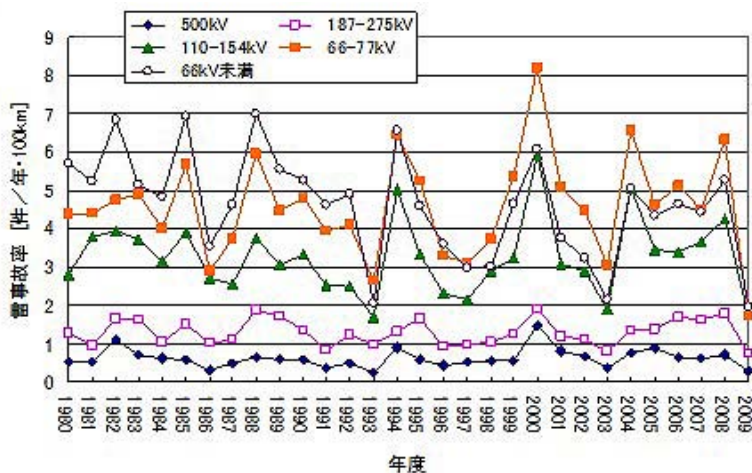


図 29 運転電圧別の送電線雷事故率

(出典:「送電線避雷装置適用ガイド」電力中央研究所総合報告 H07 2012)

誘導雷（電線に雷が落ちなくても事故になる）

これまでは、送電線への落雷の話ですが、配電線（街でよく見かける電柱についている電線のことです）にも落雷は起こります。一般に雷は高いところに落ちやすいので、送電線に比べて高さの低い配電線には雷は落ちにくいのですが、配電線に落雷することもあります（直撃雷）。また、雷が配電線の近くに落ちただけでも、電磁誘導によって配電線で通常使用している電圧よりも大きな電圧が発生し、事故になることもあります（誘導雷）。また送電線を人間の大動脈とすれば、配電線は毛細血管のようなものであり、至るところに広がっているため、どこかの配電線に落雷することは十分あり得ます。配電線への落雷では、広範囲にわたる停電になることは少ないにしても、停電の回数は決して少なくありません。

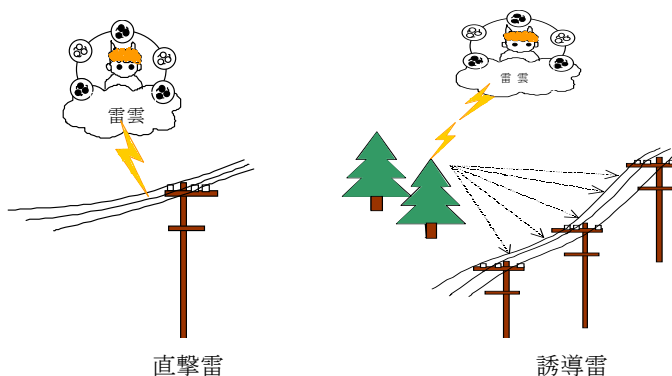


図 30 直撃雷と誘導雷

（画像提供：一般財団法人電力中央研究所）

図 31 は誘導雷が起こった時の写真です。民家に落雷があった時に、誘導雷のため、近くの配電線で火花放電が発生しています。



図 31 誘導雷の例

(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

停電を防ぐには

それでは、このような原因で起こる停電を防ぐにはどうすればよいのでしょうか。

消費を予測し発電計画

前の節で説明したように、停電は、発電する能力と送る能力の二つがそろわなかったときに起こります。

すでに説明したように、発電する量は使われる量を考える必要があります、勝手に発電すればよいというものではありません。例えば、夏は電力の消費量が多くなるので、それに間に合うように発電の計画を立てます。一つの発電所で発電する能力が足りなくなった時には、他の発電所での発電量を増加します。さらに電力会社同士でも、お互いに電力を送ったり受け取ったりし合って⁶⁶発電量の不足を補いあいます。

⁶⁶ これを「電力融通」と言います。

東日本大震災のあと、東京電力は「計画停電」を実施しました。これは大震災の揺れや津波のために、福島第一原子力発電所および周辺の大規模な発電所も運転ができなくなり発電量が不足しました⁶⁷。そのままだと、広い地域で停電が起きる恐れがあります。そこで発電できる電力に見合うように、計画的に一部の消費地を選び、一定の時間だけ停電させることにしました。普段は使う電気量に発電する量を合わせてバランスを取りますが、この時は、発電できる量に消費を合わせてバランスを取ったのです。

雷を防ぐ架空地線

雷は自然現象ですので、その発生を防ぐことは困難です。また雷は高い物に落ちやすい性質があるので、高い送電線は雷の格好の目標になります。

送電線への落雷を防ぐためには、鉄塔ごとに避雷針を付けることがまず考えられます。鉄塔は鉄できていて、しかも地面につながっていますから、そこに落ちた雷はそのまま地面に流れるので避雷針としては最適です。

ただ高電圧の送電線となると、鉄塔と鉄塔の間隔はかなり長いので、鉄塔に避雷針を付けただけでは、その間の送電線に雷が落ちることを防ぎきれません。そのため、送電線では、電気を送っている線の上に鉄塔と鉄塔を繋ぐような線を張っています。この線を架空地線と言いますが、これによって送電線に

⁶⁷ 東日本大震災の地震発生前後の電力供給力ですが、東京電力管内では約 5,200 万 kW が約 3,100 万 kW に、約 4 割減りました。東北電力は約 1,430 万 kW が約 900 万 kW と、これも約 4 割減りました。

雷が落ちることを防ぎ、もしこの線に雷が落ちたとしても鉄塔を通じて大地に雷が流れるようにしています。「避雷針」ではなく、「避雷線」です。

いったん切ってまたつなぐ

しかし、万が一、送電線に落雷したらどうするのでしょうか。

図 32 は、発電所からの電気の流れる道筋を表したものです。発電所で起こされた電気は、「変電所」「送電線」「配電線」を通じて消費者のもとに送られますが、これをまとめて「電力システム」といいます。送る部分を「送電系統」、配る部分を「配電系統」と分けて呼ぶこともあります。「電力システム」には、たくさんの遮断器があります。これは、大きなスイッチと考えると下さい。

送電線や送電鉄塔に大きな雷が落ちると、電気を送っている送電線と接地状態の鉄塔との間で放電が発生します。その一例を図 33 に示しますが、これは一回の雷撃によって 3 か所で放電が起こった学術的にも貴重な写真です。

このような放電が起こると電気が非常に流れやすい状態になります。雷の電流が流れ続ける時間は、普通は 1,000 分の 1 秒以下の非常に短いものなのですが、一旦このような放電が起きると雷の電流が流れ終わった後でもイオン化した空気を伝わって、通常の交流の電気が流れ続け（いわゆるショートした状態です）、そのままにしておけば、電流はいつまでも流れ続けます。そのため、一度回路を切って電気の流れ（電流）を止め、イオン化した空気が通常の状態に戻って、その絶縁性が回復するのを待つ必要があります。この作業を行うのが保護リレーと遮断器です。

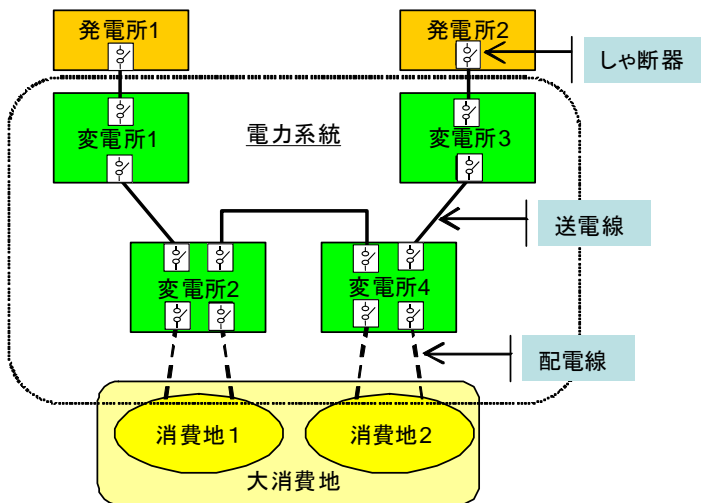


図 32 発電所から消費者までの電気の流れの道筋

例えば、図 32 の変電所 3 から変電所 4 への送電線で事故があったとします。図 34 にあるように、送電線に落雷が起こると①、雷によって送電線と鉄塔の間で放電(図 34 では「閃絡」)が起こり②、放電した道筋を通して大きな電流が流れ③、送電線の電圧が低下し④、各種の影響が発生します⑤。

一方、変電所では、いつも送電線に異常がないかどうか見張っています。落雷があつて送電線がショートしたと分かると、直ちに保護リレーという装置が働いて⁶⁸、その両端の遮断器をオフにして回路を切り離しなさいという信号を遮断器に送り

⁶⁸ 保護リレーについては、Vol.5「電気を送る・配る」の巻の「保護リレーって何？」という節でも説明していますので、興味のある方はそちらもご覧下さい。



図 33 送電鉄塔への雷撃で放電が起こった写真
(画像提供：北陸電力株式会社)

まず⑥。遮断器は、その信号をうけるとすぐに電気の流れ（電流）を切ります⑦。このオフにするまでの動作は、早いものでは 0.07 秒という時間で行えます。電流が切れれば、通常一秒程度以内にイオン化した空気が元の状態に戻るなので、オフにした遮断器を再びオンにして線路をつないで電圧をかけてもショートにはなりません。そこで、一つのルートに電気を送る線が二組設置してある場合には、ほとんどの場合、線路をつないでも問題ないので、一秒以内に送電を再開します⁶⁹。このよう

⁶⁹ これを高速再開路と言います。Vol.5 の p.11 の脚注を参照下さい。なお、電圧が 220kV 以上の送電線では、ほとんどが 2 組の送電線の組になっています。また、線路をつなげない場合は、線路の両端の電圧の位相差が大きい場合です。この場合には、線路をつなぐと非常に大きな電流が流れて、発電機などに与えるショックも大きく、機器を壊す可能性があるからです。

に、送電の再開までの時間が短いので、何か起こったということは人間にはほとんど分かりません。ただ、いったんショートするので、0.07 秒程度と極めて短い時間ではあっても、場所によっては電圧が大きく低下しています。これは、「瞬時電圧低下」と言い、p.91 でもう少し詳しく説明しています⁷⁰。

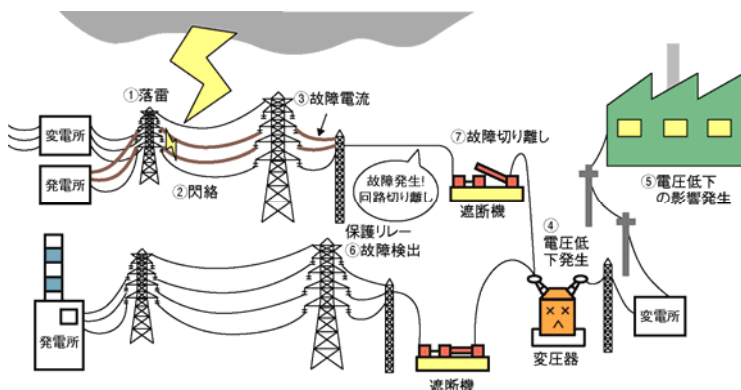


図 34 送電線に落雷があった時の状況

電力システムで停電を防ぐ

しかし、送電線の事故は、図 28 に示したように雷以外の原因でも起こります。送電線に雪や氷がついて事故になったり、台風で送電線の鉄塔が倒れたり、極端な場合には送電線が飛行機や船に切られたりもします。この場合には、雷とは違って、

⁷⁰ 停電や瞬時電圧低下の影響や対策については、p.98 からの「停電や瞬時電圧低下への使用者側での対策」を参照。また、蓄電池を使った対策については、Vol.6「電気を貯める」p.26 の「据え置き設備として使う」も参照ください。

ずっと事故の状態のままなので、遮断器をオンにして線路をつなぐことはできません。図 32 の変電所 3 から変電所 4 への送電線でそのような事故が起こると、発電所 2 から消費地 2 に電気を送る経路がなくなってしまいます。そのままでは、電気が不足しますので、発電所 1 の発電を増やして消費地 1、2 で必要な電気を発電します。このような工夫で停電を防いでいます。これが、「電力システム」が停電を防いでいる仕組みのひとつです。基本的にひとつのところに 2 つ以上の経路で電気を送れるようにし、ひとつの送電線が切れても、残った送電線で送れるようにしています。また、発電所も必要に応じて発電を増やせるように準備しています。

瞬時電圧低下

これまでお話してきたのは、事故などで電圧がこなくなる、いわゆる停電の話でしたが、送電線に雷が落ちた場合、その影響で電圧が「一時的」に下がることもあります。これは瞬時電圧低下と呼ばれます。

例えば図 35 のように発電所から二つの送電線を使って、電気を送っている場合を考えましょう。2 号線に落雷があって送電線がショートすると、事故点に近いお客様 B では電圧が大きく低下します。さらに、お客様 A やお客様 C でも、それに引きずられて電圧が低下します。前に説明したように、そのような場合はリレーが働いて直ちに変電所で遮断器をオフにします。これで 2 号線は完全に切り離されますので、電圧は 0 になりお客様 B は完全な停電になります。

一方、お客様 A やお客様 C は事故が起こった送電線が切り離されると、本来の電圧に復帰します。しかし、リレーが事故を検知し、遮断器が働いて 2 号線が切り離されるまでの間は電圧が低下してしまいます。これが瞬時電圧低下（瞬低）です。通常は電圧が下がっている時間は 1 秒以内ですが、コンピューターなどはそのような短時間でも影響を受ける場合があります、もしそのコンピューターが工場をコントロールしている場合には、工場の製造ラインが止まるなどの被害がでる場合もあります。

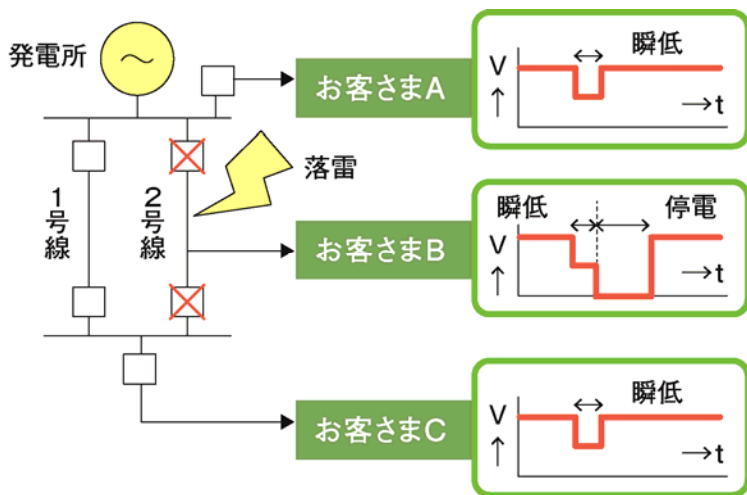


図 35 瞬時電圧低下

この瞬時電圧低下の大きさや起こりやすさは、電力システムの構成や、どこに雷が落ちたかなど、種々の要素が影響しますので一概には言えませんが、過去に調査された結果では、瞬時

電圧低下で20%以上の電圧が低下することは年間で10件から20件程度発生しているとのこと⁷¹。

配電線事故時には？

配電線で落雷などにより事故が起こった場合も、停電となるのは送電線と同じで、またそれをリレーで検知して変電所で回路を切り離すのも、送電線と同じです。しかし送電線では、原則として変電所でしか回路を切り離すことができませんが、配電線の場合には、電柱の上に開閉器と呼ばれるスイッチを設置している場合があります。



図 36 開閉器の例

(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

⁷¹ 瞬時電圧低下については、電気共同研究会という団体が、平成23年に「電力系統瞬時電圧低下対策技術」という報告を出しています。(電気共同研究 第67巻2号)

開閉器で停電地域を最小化

開閉器の役割について、図 37 を使って説明します。これは配電用変電所から一本の配電線が出ているという単純な形ですが、No.1 から No.3 の配電柱には開閉器が設置されているとします。ここで No.2 と No.3 の間に落雷があつてショートしたとしましょう。この時には、送電線の場合と同じく、すぐにリレーが事故を検知し、まず配電用変電所の遮断器をオフにします⁷²。

また、同時に開閉器もすべてオフ（切れた状態）にします。次に配電用変電所では、事故が解消されたかどうかをみるため、1分程度時間が経った後、遮断器をオンにします。

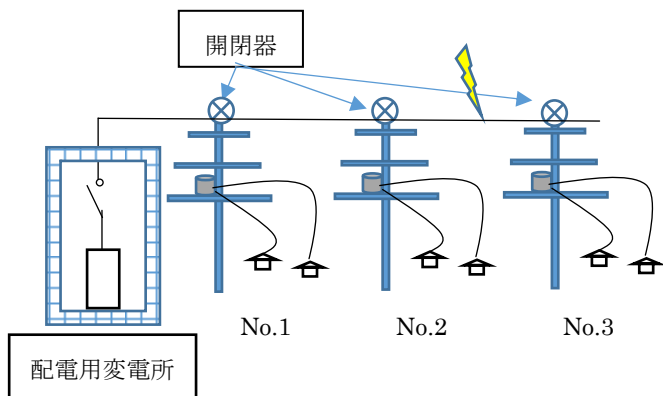


図 37 配電線と配電用変電所

この時点では、雷によるショート状態は解消されていますが、電柱の開閉器はまだオフのままですので、停電は続いています。

⁷² ショートなどの事故が生じた場合には、大きな電流が流れるため、配電柱の開閉器ではその電流を切れないので、大きな電流でも電流を切ることができる、遮断器が、まず動作します。

次に、配電用変電所の近くの No.1 の電柱に設置された開閉器から 10 秒程度の時間間隔で順番にオンにしていきます。

しかし、落雷ではなく、クレーン車が配電線に触れてしまった場合など、ショートした状態が続いている場合はどうなるでしょうか。その時には、No.2 の開閉器をオンにした途端、大きな電流が流れることとなります。すると、また配電用変電所では遮断器をオフにし、すべての開閉器もオフにします。この場合には、No.1 の電柱から電気を引いている家では、いったん電気が来たにも関わらず、また停電することになりますが、これはしかたありません。

しかし、この結果、事故が起こっている場所が No.2 の先だということが分かりました。そこで、また配電用変電所で遮断器をオンにし、次に開閉器を順次オンにしていくわけですが、No.2 の開閉器はオフのままにして、No.3 の方には電気を送りません。したがって No.3 の電柱につながっている家では停電のままですが、少なくとも事故が起こっていない No.2 のところまでは無事に電気が送れて停電が解消したわけです。

読者の皆さんの中には、停電して、一度電気がついたけれど、またすぐに停電したとか、道路の向かいの家は灯りがついたけれど、自分の家では停電のままといったことを経験したことはありませんか。それは、ここで説明したようなことが起こったのだと考えて下さい。

最近では、開閉器にセンサを設置して事故の起こった区間を見つけて、配電用変電所で遮断器をオフにせず、必要な開閉器だけをオフして停電をできるだけ減らすような工夫もなされています。

ループにして停電を防ぐ

現実の配電系統は図 37 のような単純な形でなく、もっと複雑な形をしています。事故が起こったら事故部分を切り離して、健全な地域は早く停電が復旧するようにしていることは変わりありません。さらに、配電線を網目のように構成し、そのどこかで雷による事故が起こっても、停電となる範囲をできるだけ小さくするように回路をつなぎ替えたり、また次章で説明する避雷器を電柱に取り付けて雷事故を防ぐなど、さまざまな工夫がなされています。

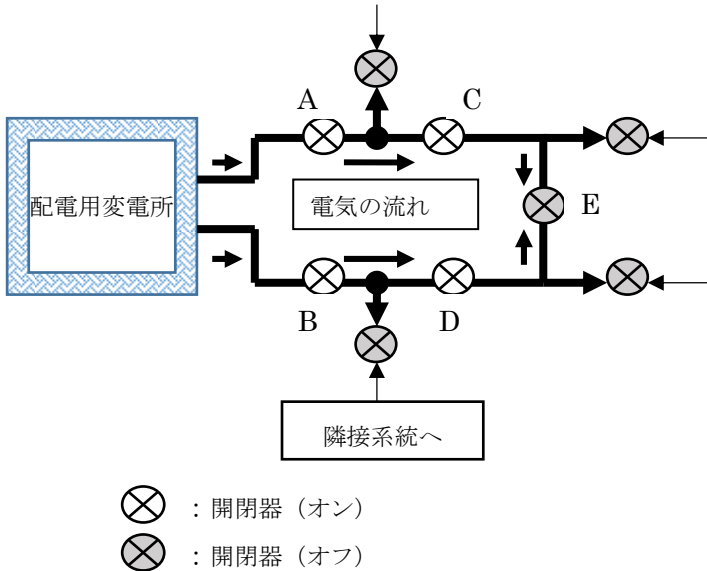
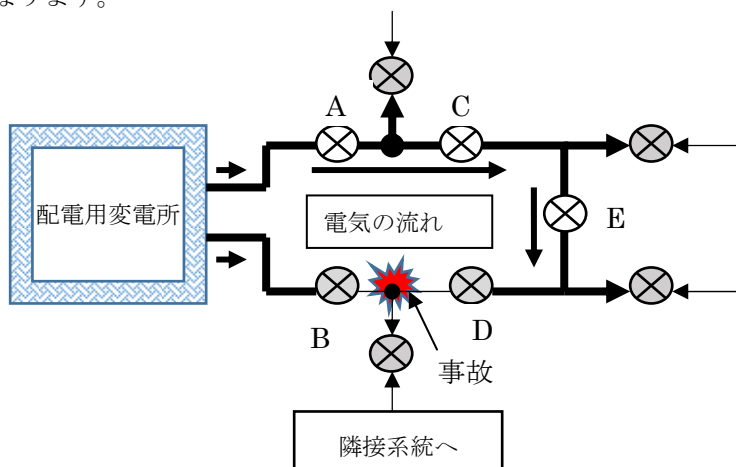


図 38 ループ方式の例

図 38 はループ方式と呼ばれる配電線の方式です。図の太い線の部分は電気が来ている電線です。この太い電線のあちこちからビルなどに電気が送られています。通常は、開閉器 A、C

および開閉器 B、D を通じて電気が送られています。しかし、例えば開閉器 B と D の間の電線で事故が起こった時には、まず開閉器 B、D をオフにしてショートしている電気の流れを止めます。そのままにしておくと、開閉器 D、E の間の太い電線から電気をひいているところは停電になったままです。そこで、常時はオフにしている開閉器 E をすぐにオンにして、図にあるような電気の流れを作り、開閉器 D、E の間の電線にも電気がいくようにしてやれば、その範囲は停電にはなりません。このようにして、停電の範囲を少なくするようにしているのです（図 39 参照）。なお、この場合は、開閉器 B、D の間は停電になっていますので、電力会社の人が駆けつけて対処することになります。



⊗ : 開閉器 (オン)

⊘ : 開閉器 (オフ)

図 39 事故が生じた時に回路を切り替えた例

これらの努力の結果、日本の高圧配電線の雷事故率は、平均して千 km あたり年間 0.5 件から 1 件程度になっています⁷³。

停電や瞬時電圧低下への使用者側での対策

これまで説明してきたように、仮に送電線や配電線などに雷があっても電気が送れなくならないように種々の対策がなされています。しかし、瞬時電圧低下を含めて、不測の停電を完全に避けることは困難です。

自分の大切な設備は自分で守る

現在の日本では、あらゆる場所と言ってよいほど、電気が使われています。そのため、停電や瞬時電圧低下によって大きな損害が起こり得る設備も少なくありません。例えば、人命を預かる病院などの医療設備、大型ビルや地下街など多くの人が集まる設備での照明や防火設備、交通網を管理する交通管制センター、道路設備で重要な信号機やトンネル内の照明、空港、災害時の応急対策拠点となる官庁施設、水道関係施設、銀行などのオンラインシステム、電話の基地局などを考えてみてください。もし、これらの施設や設備が停電や瞬時電圧低下でその機能を停止したならば、社会に与える影響は極めて大きなものとなるでしょう。また、半導体製造工場やプラント制御設備などでも、

⁷³ 出典：電力中央研究所総合報告 No.T69「配電線耐雷設計ガイドブック」平成 14 年

なお、ここに示した値は、図 29 にある送電線の雷事故率よりかなり少なくなっています。この違いは、配電線では、雷事故を単に遮断器を開いた回数ではなく、p.87 の「いったん切ってまたつなぐ」にあるように、遮断器を開いて、少し時間が経ってから再度つないだ時に、引き続き放電が起こって事故が継続した場合、つまり停電が発生した場合を、事故としているためです。

停電や瞬時電圧低下により大きな損害が生じる場合も少なくありません。

このような被害を防ぐために、これらの施設の多くには停電などが起こっても、それまでと変わらずに電気が使えるように非常用電源設備が設置されています。

非常用電源設備のいろいろ

主な非常用電源装置としては、以下のようなものがあります。

- 1) 無停電電源 (UPS : Uninterruptible Power Supply)
- 2) 非常用発電設備
- 3) 蓄電池設備

1)の無停電電源とは、蓄電池などに常時電気を貯めておき、停電などが起こった場合には、蓄電池から電気を供給するというものです。その例を図 40 に示します。

図 40 の太い線の部分は直流箇所です。図にあるように、常時は交流の入力を直流に変え、蓄電池を充電するとともに、直流を再び交流に戻して使用します。万一停電などが起こると、

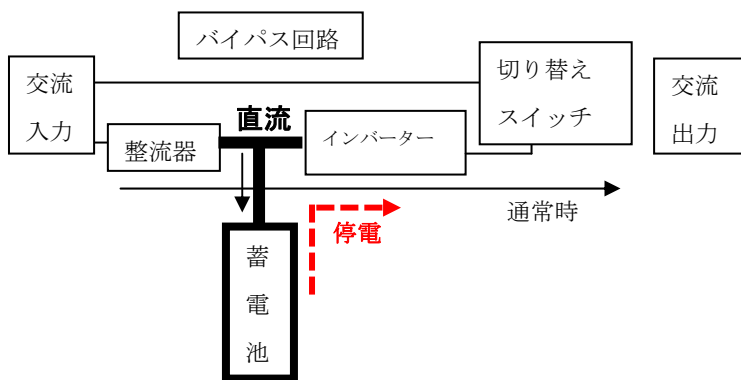


図 40 無停電電源装置の基本構成

交流入力は無くなるわけですが、その時は蓄電池に貯めておいた電気を交流に変えて出力します。

上部にあるバイパス回路はインバーター故障時などに使う他、常時はこちらを使っておいて電気を供給し、雷が発生して停電が起きそうな時だけ、下側の回路を使うという使い方もあります。しかし、長時間にわたり蓄電池から電気を供給し続けるためには蓄電池の容量をかなり大きくしておかねばならず、コストがかかります。

そこで、費用節約のため、このような無停電電源は重要な設備だけに設置し、あまり重要ではない設備は通常の交流電源を使うということも良くあります。

2) の非常用発電設備とは、ディーゼルエンジン発電機、ガスタービン発電機など、液体燃料による発電設備を用意しておき、停電時に稼働させて電気を供給するというものです。これ



図 41 空港に設置された非常用発電設備の例

(出典：国土交通省東京航空局空港部機械課－官庁業務合同説明会資料－「国土交通省航空局の業務概要（機械業務）」)

は、一般に蓄電池よりも長時間にわたって電気を供給することができます。図 41 に空港に設置されている非常用発電設備の例を示します。

しかし、このような発電機の始動には通常 10 秒～40 秒程度かかるので、停電が起こってからスイッチを入れたのでは、完全に停電時間をなくすわけにはいきません。そのため、停電が起こりそうな状況ではあらかじめ非常用発電設備を動かしておき、重要な設備は非常用発電設備からの電源に切り替えておいたり、非常用発電設備と通常の電源の両方を使っておいて、停電時には高速のスイッチで重要な設備だけ非常用発電設備に切り替えたりという方式が使われることもあります。

3) 蓄電池設備

建物のなかで、誘導灯、非常照明や非常警報設備などは短時間の停電も避ける必要があります。このため、停電時に瞬時に切り替えて給電を継続できる蓄電池設備が使われています。

最近是非常用発電装置として、燃料電池なども用いられるようになりました。また、大規模災害の時にはトラックなどに載せて運べる可搬型の発電設備を用いて、停電した地域に電気を供給することも行われます。

さらに、大きな施設では、電力会社からの電源線を 2 つの別の系統から取り入れて、停電の可能性を減らすような工夫もなされています。

いろいろな非常用電源設備を見てきましたが、ほとんどのものが目立たないところで働いています。身近なところで、消防用設備の例でどのように役立つのか考えてみましょう。



避難口誘導灯



屋内消火栓設備の外観と内部

図 42 さまざまな消防用設備

図 42 左側は、良く目にする避難口誘導灯です。ホテル、デパート、地下街、映画館など人が多く集まる場所で火災や事故などが発生した場合でも人々が速やか安全に避難できるように、非常用照明装置とともに設置が義務づけられています。停電時には瞬時に内蔵の電池などによる点灯に切り換えます。図 42 右側は、屋内消火栓設備の外観と内部の写真です。火災のときに人が操作して消火ポンプを起動させて貯水槽の水を放水し消火活動ができます。他に建物の種類や規模に応じて消防用設備や建築設備としてスプリンクラー設備、排煙設備、非常用エレベーター、自動火災報知設備、非常警報設備などが設置されています。これらは当然ながら停電時にも非常用電源設備により停電から瞬時または 40 秒以内に機能が維持できるように給電できるようになっています。これらの非常用電源設備や配線は火災時に機能を維持できるように電源設備は不燃材料で区画された専用の室などで、配線は耐火・耐熱配線で火災の熱から保護され機能の維持を図っています。

また、火災で多くの消防用設備が稼働中に停電し、始動した発電設備に切り替わるとき発電設備が過電流、過負荷で停止しないように負荷の始動順序をグループ分けするなどして発電設備の容量が決められています。この様に目に見えないところでさまざまな設備が人々を災害から守ろうとしていることを考えてみて下さい。

2 雷から建物や電気機器を守る

雷を全く落ちなくすることは現在の技術ではできませんが、雷が落ちた時の被害を減らすための装置が避雷器です。

避雷器

送電線に雷が落ちた場合には、送電線をショートさせるだけでなく、その雷が送電線を伝って変圧器などの機器まで来て、それらを壊してしまう可能性があります。また、一般家庭でもコンピューターやテレビ、ビデオなど電子機器が多く使われています。さらに最近では、電気炊飯器や洗濯機などもコンピューターで制御され、最高の条件で働くようになってきましたが、これらに使われているコンピューターも、電源線や信号線を通して外部から入ってくる過電圧には非常に脆弱です。

避雷器は雷を避けるスイッチ

このように雷が電線を伝わって来て機器を壊すのを防ぐには、雷が機器に届く前に雷を大地に逃がす必要があります。しかし、電線には機器を動かすための電圧が常にかかっているため、電線を直接大地につないでおくことはできません。避雷器は矛盾するこの二つの要求を満たすものです。

図 43 は避雷器の動作をイメージ化して表したものです。

避雷器は、通常は図 43(a)のようにスイッチが開いていて、大地とはつながっていない状態になっています。しかし雷が来た瞬間、避雷器は大地につながった状態になり、雷を大地に逃がします。そして、雷が通り過ぎると、すぐに最初の状態に戻ります。これで、雷が機器に入ることを防ぐのです。

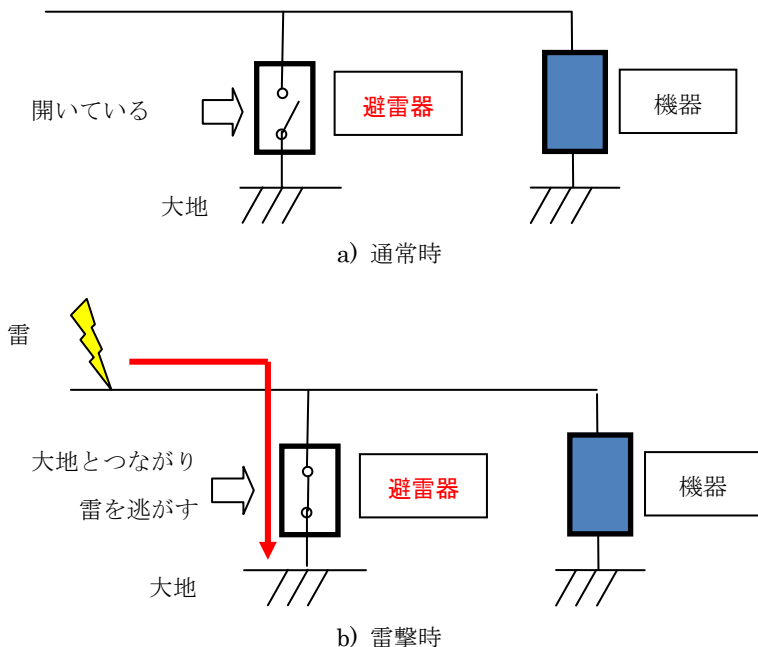


図 43 避雷器の動作 (イメージ)

酸化亜鉛 (ZnO) という奇妙な物質

図 43 はあくまでも説明用のイメージ図で、実際の避雷器にはこのような機械的なスイッチは入っていません。最初にエジソンが配電システムを作った時代には、適当なギャップを設置し、雷のような大きな電圧が入った場合には、そこが放電してショートすることで、一種のスイッチの役目を持たせていました。しかし、雷の過電圧がかかってからギャップが放電してショートするまでに時間がかかり、その間に機器が壊れる可能性があるなどの問題点がありました。

その後、単純なギャップの代わりになるいろいろな方式が検討されましたが、現在は酸化亜鉛（ZnO）という非常に特殊な素子が使われています。普通の物質では、かかっている電圧とそこに流れる電流は比例しています。しかし避雷器に用いる酸化亜鉛素子は、電圧が小さい時には、ほとんど電流を流しませんが、ある値以上の大きな電圧がかかると、電圧は一定に保ちつつ、いくらでも電流を流せるという、図 44 のような奇妙な特性を持っているのです。

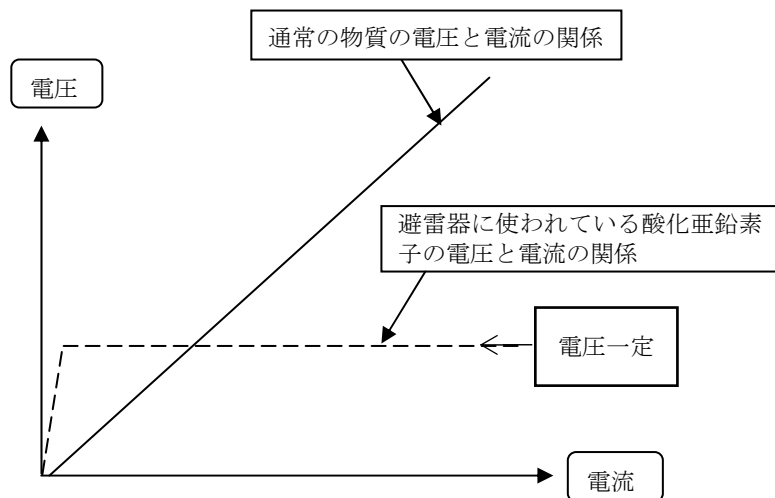


図 44 電圧と電流の関係を模式的に描いた図

このような特性を持っていると、ある電圧になると、図 43 にあるスイッチと同じように働きます。しかも、雷の電圧がなくなると、自動的に、電流をほとんど流さないという元の状態に戻りますので、普通の電気を送るのには、全く問題がないのです。

この酸化亜鉛素子は 1967 年に松下電器産業株式会社（現パナソニック株式会社）で発見され、株式会社明電舎によって電力設備用のものが開発された、まさに国産技術です。これは国際規格にも採用されており、現在、世界の電力用避雷器の主流になっています。また、実用化から 30 年以上を経過していますが、いまだにこれに替わる高性能な避雷器は開発されていません。

通常、変電所の入口には避雷器が設置されており（図 45）、送電線から変電所に雷が侵入してくるのを防ぐ働きをしています。

この避雷器の開発によって、落雷などにより発生する非常に大きな電圧を大地へ逃がし電力機器を確実に守れるようになり、停電事故の防止に大きく貢献しています。また、変電所の機器も小さい寸法でよくなり、経済的効果も大きいものがあります。

このような功績により、酸化亜鉛形避雷器は電気学会の認定する「でんきの^{いしずえ}礎」の一つとして、平成 21 年に顕彰されています⁷⁴。

⁷⁴ <http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/30-foundation/data02/ishi-02/ishi05.pdf>



図 45 変電所に設置された避雷器の例
(出典：発明と発見のデジタル博物館⁷⁵)

送電線や配電線にも避雷器が

避雷器は変電所だけではなく、送電線や配電線にも設置されており、送電線や配電線に雷撃が生じた時に、雷を安全に大地に逃がして、機器が破損したり、停電が起こったりするのを防いでいます。

図 46 に送電用避雷装置の例を、また図 47 には配電用避雷装置の例を示します。

⁷⁵ 発明と発見の博物館の URL は以下のとおりです。
<http://dbnst.nii.ac.jp/>

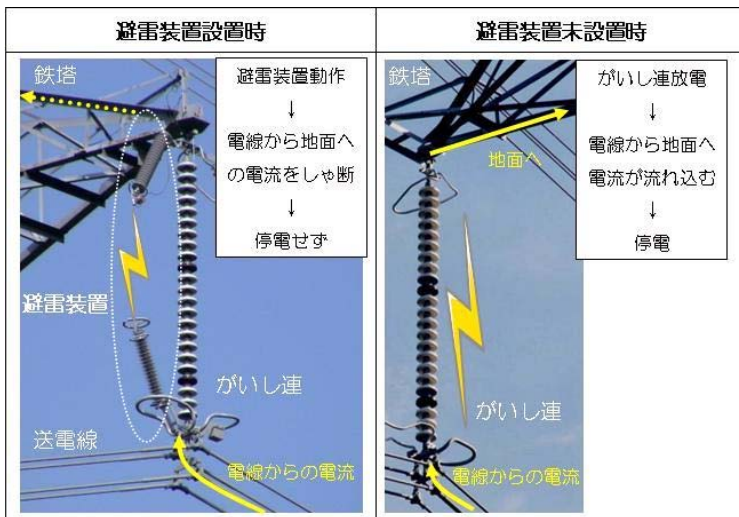


図 46 送電用避雷装置の例
(出典：発明と発見のデジタル博物館)

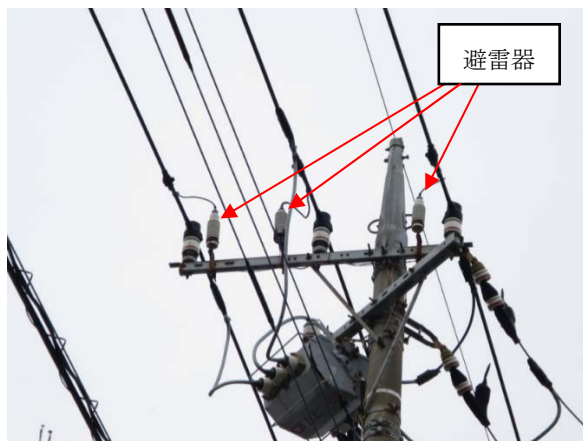


図 47 配電用避雷器の例
(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

最近は、家庭のコンピューターなどを雷から守るために雷保護装置付きのコンセントなども販売されていますが、これにも避雷器が使われています。原理は全く同じですが、このような小型の避雷器は SPD (Surge Protective Device) と呼ばれています。

避雷針

送電線では、電線への雷の直撃を防ぐため、通常、架空地線という接地された線を、電気を送る電線の上に張っています。これは言わば「避雷線」ですが、発電所や一般の建物では、雷の被害を防ぐために建物の上に避雷針を設置します。建築基準法でも、20m 以上の高さの構造物には、原則として避雷設備を設置することが義務付けられています。

避雷針が発明される以前には、教会などが落雷によって大き

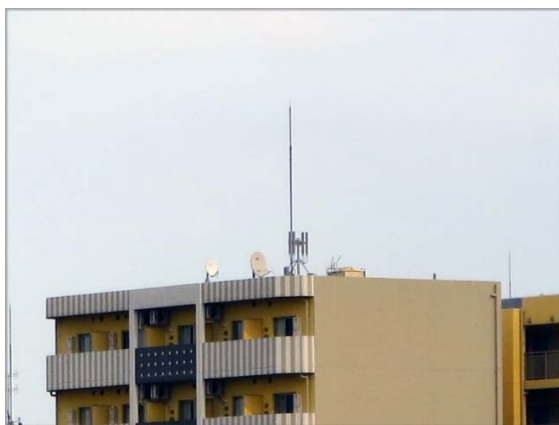


図 48 建物に設置された避雷針の例
(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

な被害を受けるということが、ヨーロッパのいろいろな国で頻繁に起こっていたのです。日本でも、大阪城や二条城など、有名な建築物が落雷によって火事になった例が数多くあります。

避雷針の発明者は、あのフランクリン

この避雷針を発明したのは、風をあげて雷が電気であることを発見した、あのベンジャミン・フランクリンです。それでも、最初にフランクリンが避雷針で雷の被害を防げるはずと言った時には、あまり信じてもらえなかったようです。神の御業^{みわざ}である雷を、たかが数 m の棒を屋根の上を立てたところで防げるはずはないという、18 世紀の人々にとっては至極当然な議論でした。しかし、フランクリンの住んでいたフィラデルフィアのある家がフランクリンを信じて避雷針を立て、たまたまそこに雷が落ちた時に何の被害もなかったことが分かってからは、避雷針は世界的に広まりました。

建物に避雷針を付けると雷が落ちやすくなるから避雷針を付けたくないという人がいます。実際に避雷針の機能が良く理解されていなかった時代、フランスで避雷針を自分の家に付けようとした人が、隣家から危険だということで、訴訟を起こされたということもありました。しかし、それは誤解であって、避雷針を立てたからといって、立てない場合に比べて雷が落ちやすくなったり落ちにくくなったりすることは通常ありません。

それでは、なぜ避雷針を立てるかと言えば、その建物に雷が落ちかけた時に避雷針で雷を受け止め、安全に地中に雷の電気を逃がし、建物やその中にいる人や機械に被害が無いようにするためです。その意味では、避雷針と呼ぶよりは誘雷針と呼ぶ

方が良いかもしれません。ちなみに英語では、Franklin rod (フランクリンの棒) や Lightning rod (雷の棒) と呼ばれており、「避ける」という意味の単語は使われていません。

もし避雷針が無く、建物に直接雷撃した場合には、建物のどこに雷が落ちるか、また、落ちた雷の電気がその後、どこをどう通っていくか分からないので、大変危険です。木造の建物の場合には火事になる場合もあるでしょうし、鉄筋の建物でも電気設備などに被害が発生することも十分起こり得ます。また、もし建物内に火薬や石油などの可燃物があつた場合、落雷で発生した火花がそれらに引火して大惨事になる可能性もあります。

避雷針はこのような目的で設置されるものですので、避雷針は建物全体を保護できるように、建物上部に適切な高さで、場合によれば複数設置する必要があり、それらの条件は規格で細かく決められています⁷⁶。

ちょっと話が横道にそれますが、昔、ある有名な大学の先生が、あるお寺の住職に、避雷針をお寺の軒下に外から見えないように取り付けられないかと相談されたことがあつたそうです。当然、そのような形では避雷針の効果がありませんので、屋根の上に付けなければダメだと言ったら、その住職はがっかりして帰っていったそうですが、後で話を聞いてみると、そのお寺では雷除けのお札を売っていたということです。

⁷⁶ 例えば、JIS Z 9290-3:2014 なお、規格では「避雷針」ではなく「雷保護システム」という名称を使用しています。

避雷針に話を戻しますが、避雷針は、単に金属の棒を建物の上に立てるだけでなく、雷の大電流に耐えられる太い金属線で地中に埋められた接地電極まで、しっかりとつなぐことになっており、これも規格で決められています。

このように、避雷針は建物を雷から守るのに必要不可欠のものでありますが、自然現象である雷が相手ですから、避雷針を設置したからといって、絶対に雷の被害が無いとは言い切れません。事実、2003年に国会議事堂に落雷があり、御影石が破損・落下するということが起こっています。もちろん、国の立法の要である国会議事堂ですから、規格どおりに避雷設備は設置されていたのですが、それでもこのようなことも起こるわけです。しかし1936年の国会議事堂の竣工以来、初めてのことでですから、極めてまれな現象であるとは言えるでしょう。

コラム：日本で最初の避雷針

明治時代になって、海外の技術や知識が日本に多く入ってくるようになりました。避雷針もその一つで、明治の初めに紹介されました。

日本で最も古い避雷針は、世界遺産にも指定された、群馬県の富岡製糸場に取り付けられたもので、当時は「除雷鍼（針）」と呼ばれていました。明治5年の創業時より建築物のほとんどに設置され、現在でも当時の姿をみることができます。



拡大



避雷針

東繭倉庫正面から見た避雷針（富岡商工会議所提供）

3 雷や感電から人を守る

雷から身を守るには

雷に打たれて人が亡くなったというニュースを時々聞くことがあります。実際に、雷による人身被害はどのくらい起きているのでしょうか。

明治 20 年から明治 27 年の 8 年間のデータでは、雷による年間の平均死者は約 46 名、負傷者は約 22 名という報告があります。ただし、この値は官報からまとめたものですから、多少の記録漏れはあるかもしれません。さらに年によつての違いも大きく、明治 22 年の死者数は 6 名ですが、明治 27 年には 126 名と、約 20 倍の差があります。ちなみに、そのデータによれば、牛や馬も、年平均で約 6 頭が雷で死んでいます。

しかし最近では、救急救命装置に対する知識も進んだためか、雷による死者は昔に比べると少なくなっています。図 49 は、警察白書のデータをまとめた⁷⁷ものです。年によつて雷の発生数自体が異なりますので、雷による死傷者数の年度変化も大きいのですが、1950 年代に比べて最近はかなり減少しており、雷による死者数は年間数名程度です。

このような雷による人身被害は、雷が人を直撃したというものもありますが、多くは「側撃」と「歩幅電圧」という二つの現象によるものです。以下、この二つについて説明します。

⁷⁷ 2008 年以降、警察白書には雷による死傷者の数が記載されなくなりました。

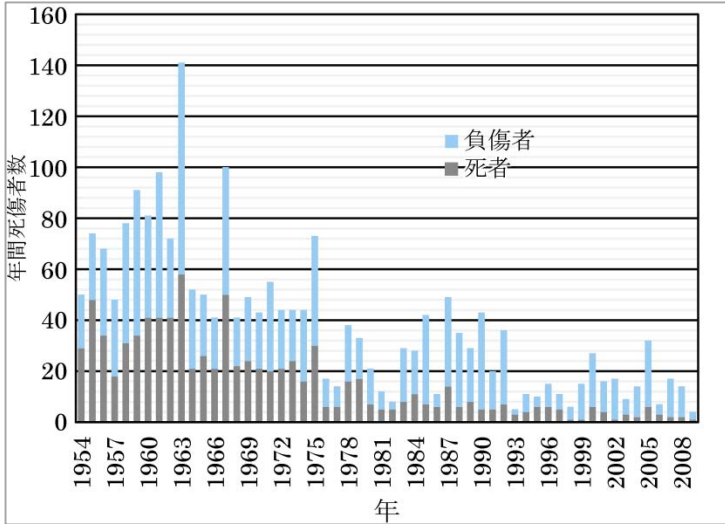


図 49 雷による人身被害者数の年度変化（警察白書のデータより）

側撃（雷が鳴ったら、木の側は危険！）

雷は高い物に落ちやすいもので、送電線などは格好の目標になります。しかし、近くに高い物がなければ、それほど高くない物にも落ちます。雷が落ちる物は、金属であるかどうかというよりは、むしろ周囲より高いかどうかによって左右されます。例えば、金属でない木にも雷が落ちることがあります。図 50 は雷が木に落ちて、木が二つに裂けた例です。

木に雷が落ちた時には、雷の電気は木を伝って大地に流れます。この時、木の側に人がいると、木から人に雷の電気が流れることがあります。この現象を、側方への雷撃という意味で、「側撃」と呼びます。図 51 は人工雷発生装置を使って、実際にこのような現象が起こるのかを確かめた実験の写真です。高い木の上部に高電圧を印加し、人間の代わりとして、木の近く



図 50 雷撃によって裂けた杉
(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

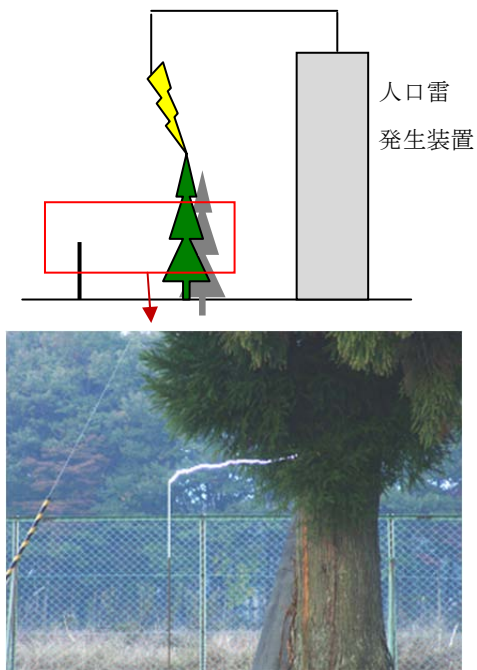


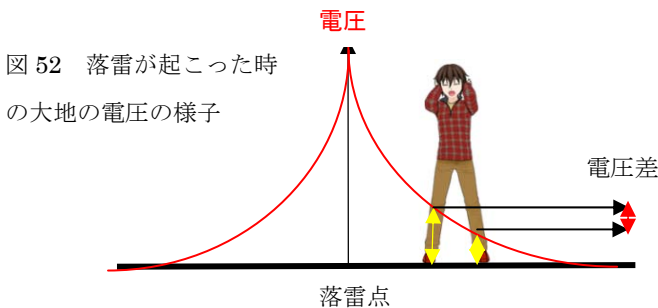
図 51 側撃のモデル実験

に接地された金属棒を置いて実験したのですが、木から接地電極へ放電が起こっていることが分かります。

なぜ、雷の電気が木を伝わって大地に流れず、木から側にいる人間に放電するかということですが、木は鉄塔などの金属ほど電気を通しやすくありません。一方、人間は水分が約 60%⁷⁸で、しかも体液は生理的食塩水、つまり塩水ですから電気を通しやすいのです。そのため、雷の電気は木を伝って流れず、人に放電して人を通じて大地に流れることが起こると考えられています。必ずしも雷のすべての電気が木の近くにある人体を通じて流れるとは限りませんが、雷の電流は、通常数万 A という巨大なものですから、そのごく一部が人体に流れたとしても、人を死に至らしめるには十分です。

足の間に発生する歩幅電圧

雷による人身被害のもう一つの要因は歩幅電圧です。雷が地面に落ちると、雷の電流は落雷した点から大地に放射状に広がります。この電流によって大地には落雷点を中心に図 52 のように電圧が発生します。



⁷⁸ 人間の体の中の水の割合は、乳幼児は約 80%ですが、成人で 55～60%、60 歳以上では 50%台に落ちます。

落雷した点の近くに人が足を広げていると、右足の位置と左足の位置の電圧に差がある（この電圧差を歩幅電圧と言います）ので、電流が片方の足からもう一方の足に流れて、電気ショックを受けることがあります。ただ、この場合には、電流は片方の足から腰を経由してもう一方の足へ流れるので、心臓の近くに流れる電流は少なく、致命的なことになることは少ないようです。ある医師の発言を借りれば、「たかだか下半身麻痺でしょう」、ということです。

人間の場合はそのとおりかもしれませんが、牛や馬のような4つ足の動物の場合、足幅が広く（さらに付け加えれば、たいいてい靴も履かずに、ぬかるんでいる地面に立っています）、前足から後足に電流が流れると、その途中には心臓がありますので、致命傷になる場合があります。時折、牧場で雷雨の後に多くの牛や馬が倒れていたと報道されることがありますが、その一因は歩幅電圧かもしれません。

雷が鳴ったら、身に着けた金属は離すべき？

雷で人身被害が起こるのは、ほとんどが屋外です。そのため、雷から身を守る一番の方法は安全な家屋に避難することです。安全な家屋とは、例えば鉄筋コンクリートの建物です。ハイキングコースによくある、木造で柱と屋根があるだけの、いわゆる^{あがまひ}東屋といったものは、雨宿りには使えますが、木の側にいるようなもので、側撃を受ける可能性があるので、安全とは言えません。

屋外で突然雷雨に遭って、近くに安全な建物が無い場合、大きな木の側で雨宿りするのは側撃の危険があるので、絶対に止めて下さい。

雷は金属に落ちやすいというので、雷が鳴ったら身に着けた金属（イヤリングやネックレス、腕時計など）をはずした方が安全と言われることがあります。それらは雷の落ちやすさには**全く関係ない**ので、それらを外す必要はありません。ただ、釣竿やゴルフクラブなどを高く掲げるのは、その分背が高くなったこととなりますので、危険が増えてしまいます。

もし、周りに何も無いところで雷雨に遭った場合には、身を低くして（雷は高い物に落ちやすい）、足を閉じて（歩幅電圧を小さくする）、耳をふさいで（雷鳴で鼓膜が破れるのを防ぐ）、しゃがむ姿勢がより安全とされています。

鉄筋コンクリートの建物の中は、鉄筋つまり金属に囲まれています。このような金属に囲まれた中では、仮に雷が落ちても金属を伝って雷の電気は流れ、中にいる人は安全です。このような金属の籠を「ファラデーケージ (Faraday Cage)」と呼びます。その意味では、ボディが金属である車の中も安全です。ただし、実際に車に雷が落ちると、強い光や音で運転を誤ったり、また車載の電子回路が故障したりする可能性もありますので、運転はすべきではありません。

感電を防ぐには

雷だけでなく、私たちが日常使っている電気も正しく使わないと危険な場合があります。経済産業省の電気保安統計によれば、年間数十名の感電死傷者が出ています。

接地（アース）は何のため？

家庭では、電気の使い過ぎや、漏電を検知して、事故が起きないように電気を切るブレーカーがつけられています⁷⁹。もし、家電機器が漏電していると、火事などの原因になるばかりでなく、人が触れた時に感電する場合があります。そのため、特に水を使う洗濯機などは接地（アース）をとる⁸⁰ことが望まれます。また、柱上変圧器の低圧側も図 53 にあるように接地がとられています。ここで接地の役割について説明しましょう。

まず、柱上変圧器の一次側（6600V 側）と二次側（100V 側）の間が何らかの事故でつながってしまった場合（これを混触と言います）、接地が無い場合には二次側に 6600V がそのまま加わってしまい、大変危険です。接地があれば、電気は接地を通じて大地に流れるので安全です。

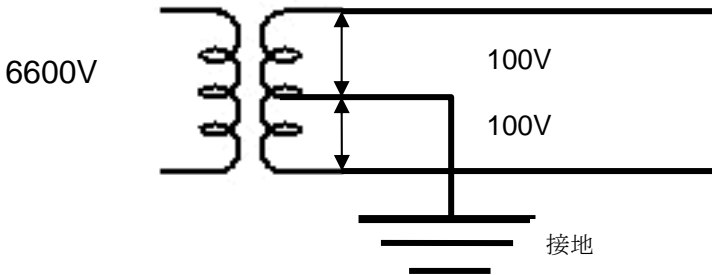


図 53 柱上変圧器の回路の例

⁷⁹ 詳しくは、Vol.3 の p.41～p.43 をご覧下さい。

⁸⁰ 「アースをとる」と言いますが、実際は機器のアース線をコンセントなどのアース端子につなげることです。

また、二次側で使っている機器の中で漏電が生じたとします。図 54(a)に示すように、機器に接地が無い場合には、機器に人が触れた場合、触れたところから人体を通して大地に電流が流れて感電する可能性があります。どのくらいの電流が流れるかは、漏電で発生した電圧と、人体の抵抗値(手が濡れているか、どのような靴を履いているかなど)によりますが、人体が危険であることは間違いありません。しかし、機器の接地をとった場合には、図 54(b)に示すように機器の接地を通じて大地に電流が流れるため、機器に触れても人体は安全です。

現在は、図 55 のようなアース端子付きのコンセントが増えましたが、昔は、アース線は水道管につながることが一般的でした。

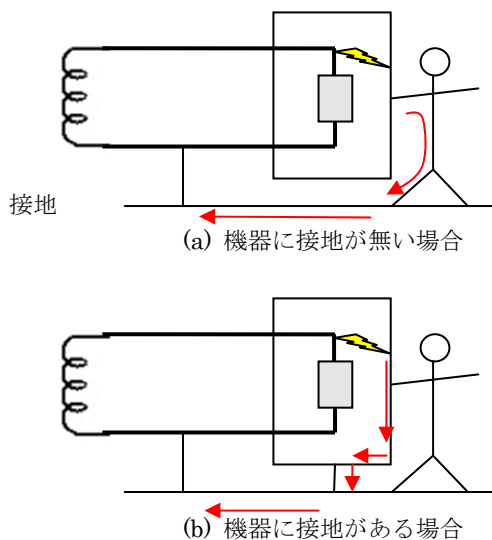


図 54 機器の接地の効果

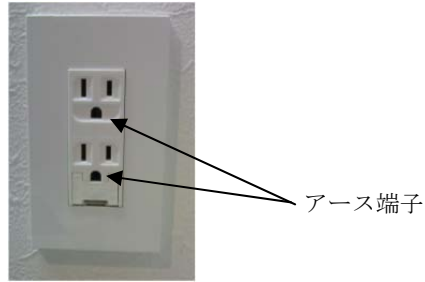


図 55 アース端子付きコンセント

もともとアース (earth) とは大地のことで、水道管は地面の中に埋められているので、水道管につなげば、大地に線をつないだのと同じ効果があるわけです。ただ、最近は水道管も金属ではなく、電気を通さないポリエチレンなどの樹脂も使われていますので、その場合には水道管につないでもアースの効果はありません。また、アースをとるといって部屋の中の植木鉢の土にアース端子を差し込んだ人がいますが、大地へ接続するのがアースの目的ですので、部屋の中の植木鉢ではアースをとったことにはなりません。

コラム：接地はアース？ グランド？

日本の法律や規格では、接地のことを「接地」と称していますが、電力分野の技術者は「アース」を、また通信・エレクトロニクスの分野の技術者は「グランド」という言葉を使うことが多いようです。ちなみに英語では、一般的に、英語圏の人達は Earthing、米語圏の人達は Grounding を使います。

電気分野の国際規格に IEC というものがありますが、そこにも接地に関する規格があり、いくつかの接地方式が示されています。それらの接地方式は TT、TN などと記載されているのですが、この T という文字が接地を意味しています。なぜ Earthing や Grounding の頭文字である E や G ではなく T が使われているかということですが、IEC の国際会議において、英国は Earthing の E を、米国は Grounding の G を強く主張し、収拾がつかなくなったため、仲介役としてフランスが T という妥協案を出して決着したという経緯があるそうです。T はフランス語で接地を表す (Terre) の頭文字です。

危険な電流、安全な電流

ところで、どのくらいの電流が流れると、ビリビリ感じるのでしょうか。表3は、電流の大きさと感じ方を大まかにまとめたものですが、10mA（ミリアンペア）、つまり0.01A以上の電流が流れると、筋肉が自由に動かせなくなります。つまり、うっかり電気のきている線を握ってしまって、10mA以上の電流が流れると、自分の意思では握っている線を離すことができなくなってしまうということです。

表3 人体への通過電流とその影響

電流値	人体への影響
1mA	最小感知電流といって、ビリビリ感じる。人に危険はない。
5mA	生理的に悪影響を及ぼさない最大の許容電流値である。 危険性の始まりである。
10～20mA	不随意電流といって、離脱の限界である。 持続して筋肉の収縮が起こり、握った電線を離せなくなる。離脱の限界である。
50mA	痛み、気絶、疲労、人体構造損傷の可能性、心臓の律動異常の発生、呼吸系統への影響が出る。 心室細動電流の発生ともいわれ、心拍停止の可能性がある。
100mA～3A	心室細動の発生、心拍停止が現れ、極めて危険である。
6A以上	心筋は持続的に収縮し続ける。呼吸麻痺による窒息、火傷。

(出典:公益社団法人日本電気技術者協会 HP 電気技術解説講座「感電災害の防止対策」)

一般に、小さな電流であれば、長時間人体に流れてもその影響は少なく、逆に大きな電流であれば短時間でも人体にとって

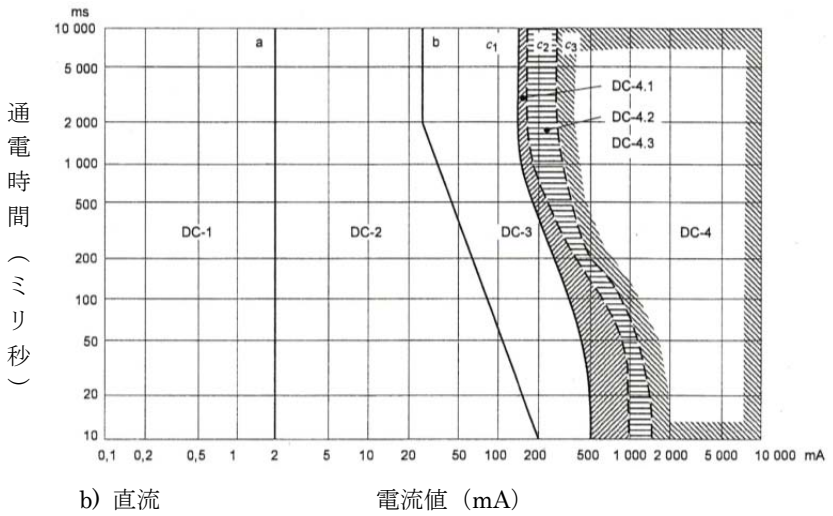
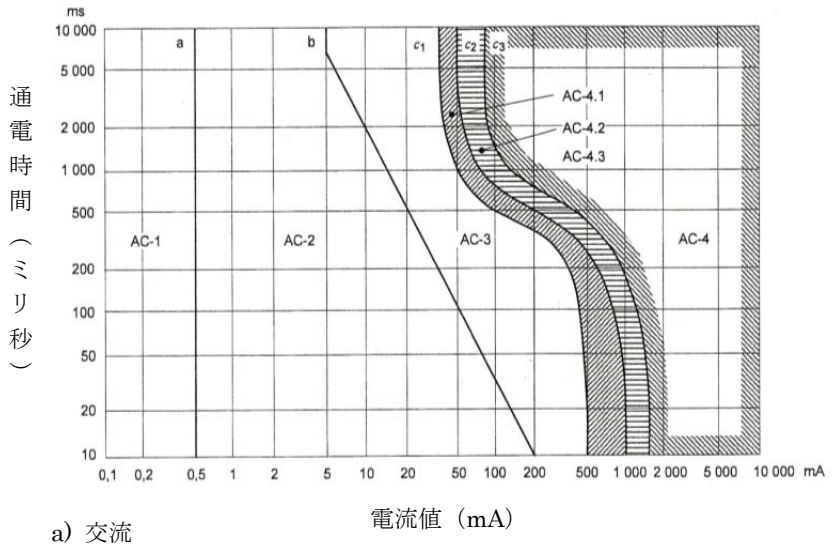


図 56 通過電流とその継続時間の人体への影響
(出典 : IEC/TS 60479-1 Ed.4.0:2005)

は危険です。その関係を示したものが図 56 です。

図 56 は IEC という電気関係の国際規格で示されているもので、交流と直流の例が示されていますが、数字の意味は以下のとおりです。

- 1 : 知覚するレベル
- 2 : 不随意筋収縮が起こるレベル (一般的には害が無いレベル)
- 3 : 不随意筋収縮が起こり、呼吸困難が発生するレベル
心臓の可逆的障害。
- 4 : 人体に異常をきたす可能性があるレベル。
 - 4-1 : 発生確率が 5%以下
 - 4-2 : 発生確率が約 50%以下
 - 4-3 : 発生確率が 50%以上

すなわち、AC3 や DC3 と書かれた領域から右の条件では、人体に大きな影響がでる可能性があります。このような特性を考えて、日本では、30mA・0.1 秒で漏電を検知し回路を遮断するようにしています⁸¹。

直流の場合も交流とほとんど同じですが、強いて言えば以下の違いがあります。

- 1) 知覚閾値は、交流の場合と同様に約 2mA のところにありますが、通電の開始と終端のみしか知覚されません。
- 2) 300mA 以下では本質的に離脱の閾値というものはなく、電流の投入と遮断の際に関節の痛みを感じ、また、100mA を超える場合には通電期間中に極端な熱さを感じます。300mA

⁸¹ ここで示している交流の電流値は実効値です。実効値の説明は、Vol.5 の「もっと知りたいあなたに (その 5)」にあります。

を超える領域では数秒または数分の通電期間の後に初めて離脱を不可能にするような筋肉痙攣が起きる可能性があります。

3) 心室細動が発生する電流値は、電流の通電方向に顕著な影響を受けます。

家庭の感電を防ぐには必要なアースをとるとともに、ぬれた手で電気器具を取り扱わない、コンセントからコードを外す時にはコードを引っ張らず、コードが傷まないようにコンセントのところでプラグを外す、コードに裂け目や傷がついていたら、すぐに新品に交換する、などの注意が必要です。

また地震や台風の後など、電柱の電線が切れて下に垂れ下がっていることがあります。このような線は電気がきている可能性があるので近寄らず電力会社の人に連絡して、絶対に触ってはいけません。また凧が電線にひっかかった時にも、自分でとろうとせず、電力会社の人に連絡して下さい。

通電火災

大地震に伴って火災が発生することがよくあります。阪神淡路大震災の時には、1万世帯あたりの出火率が2件～3件、東日本大震災の時には1万世帯あたりの出火率は約0.6件でした⁸²。東日本大震災の時には津波によって石油タンクなどから流出した燃料に着火し、それが漂流することで火災の範囲を大きくする、いわゆる津波火災でしたが、阪神淡路大震災の時には、通電火災がかなり発生したようです。

⁸² 1923年（大正12年）の関東大震災の時の出火率は阪神淡路大震災とほぼ同じですが、延焼面積は約50倍でした。

地震の後から起きる電気火災

通電火災では、家庭で使っていた電気ストーブ、白熱灯スタンド、オーブントースターなどの熱を出す機器が火元となります。しかし、なぜこのようなありふれた家電機器が火元となるかという疑問があるかもしれません。

大地震が起こると広範囲で停電が起こります。この時、機器のスイッチを切らず、ブレーカーも入れたままで避難してしまうと（そのようなことが実際は多いようですが）、停電が復旧して電気が再び来た時（通電時）には、このような発熱器具が再動作します。この時、地震で洗濯物がストーブにかかるなど、発熱器具の近くに可燃物があると、それに着火し、建物に火災が発生してしまうのです。また、地震で家電機器や屋内のコードが傷つき、通電時にショートして火花が発生し、それが火災の原因となることもあります。

そのため、地震が起こった時には、使用中の電気器具のスイッチを切り、電熱器具などの電源プラグを抜く、避難時には分電盤のブレーカーを切るなどの注意が必要です。しかし、大地震の最中、ブレーカーを落とすのは大変ですので、地震の揺れを感じて電気を切る、感振ブレーカーや感震コンセントの設置も推奨されています⁸³。

⁸³ 地震時の電気火災防止対策については、消防防災博物館にある「地震時における出火防止対策のあり方に関する調査検討報告書」の3章に詳しく記載されています。

(http://www.bousaihaku.com/cgi-bin/hp/index2.cgi?ac1=B208&ac2=B20801&ac3=2292&Page=hpd2_view)

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	臼田 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 Vol.7
スマートに安全・確実に電気を使う

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

