

# Nara Women's University

## エネルギー読本

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2021-08-10 キーワード (Ja): エネルギー, 化石燃料, 科学技術, 生活, 物理 キーワード (En): 作成者: 寺内, かえで, 寺内, 衛 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10935/5608">http://hdl.handle.net/10935/5608</a>

# LADy SCIENCE BOOKLET

6

## エネルギー読本

寺内かえで



CORE of STEM 2016

## はじめに

筆者が小学校6年生のとき、担任の教師（専門は理科）が授業で、イリーン、セガール著『人間の歴史』（岩波書店）という本の冒頭部分の一部を紹介してくれた。そのため自分でも読んでみたくなり、お小遣いで購入した。小学生にとってはなかなかの大作で、確かに読んだ記憶はあるが、全体の詳細な内容は覚えていない。しかし、冒頭部分の「人間－巨人」だけはその内容をよく覚えている。「人間の祖先は力弱い生きものであったが、手を働かせることを発見し、道具を使い、協力して働くことを覚えて以来、今日のような「巨人」にまで発展してきた」という趣旨である（岩波書店の本の内容説明から引用）。たぶん、この考え方が、その後の筆者の科学技術観の形成に大きな影響を与えたと思う。人類とエネルギーとの関わりはまさしく、その書籍の冒頭の記述そのものであろう。このブックレットの第1章では、筆者なりの視点から人類の歴史を著わすことを試みた。

第2章はエネルギーの概念、第3章は化石燃料、第4章では統計資料の入手・活用法を取り上げた。筆者はこの数年、物理学分野での理学博士号を持つ夫と、「“リテラシーとしての科学”の教育」を共通の目的として、共同執筆などを行ってきた。今回のブックレットの第1章と第4章には、これまでの共著論文をテキスト向けに改変して取り入れた。

今回公表する『エネルギー読本Ⅰ「基本編」』では、日進月歩の技術革新がめざましいエネルギー分野においても「今後も決して変わらない部分」を中心に記述した。また、一般的な教科書ではあまり扱わない、エネルギーの科学技術史や、エネルギー関連の資料の読み方などについて、少し詳しく記述し、いわゆる教科書とは全く異なるものとした。理数系にあまり馴染みのない人やどちらかというと不得意感が強い人には、エネルギーに関する読み物として、物理が得意な人には、狭い視野にとらわれないガイドとしてもらいたいと願っている。大学の教養課程でのテキストを想定したが、興味のある者なら、中学生であっても大筋がわかるようにと心がけた。また、より深い探求学習にも便利のように多くの注釈を設けた。さらに、公的機関等から公開されている諸々のエネルギー関連の統計データについても、付録に資料集として示した。

様々な分野を縦横に結びつけることにより、科学を少しでも身近なものに感じてもらえれば幸いである。今後、エネルギー読本Ⅰの続編として、エネルギーに関わる自然の性質や、日進月歩の技術革新に大きく依存した変化の激しい内容も多く取り上げてみるつもりである。

2016年2月

奈良女子大学・理系女性教育開発共同機構

特任講師 寺内かえで、博士(農学)

甲南大学マネジメント創造学部

准教授 寺内 衛、理学博士

## 目次

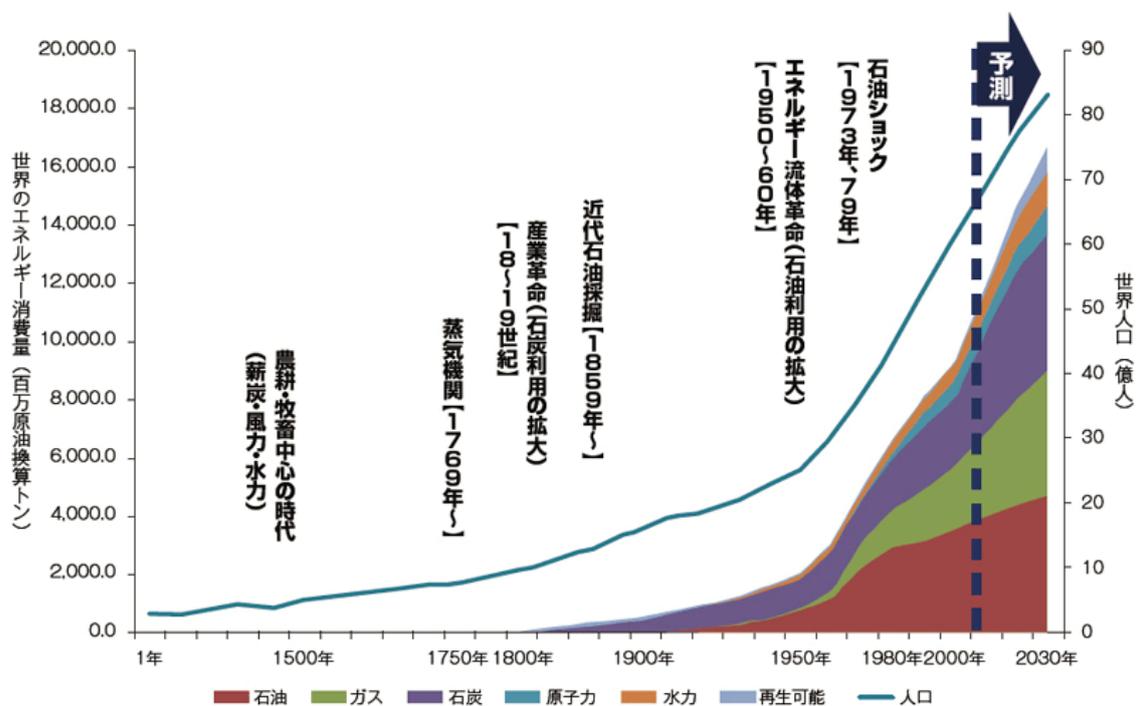
はじめに .....	i
1 章. エネルギーからみた科学技術の歴史 .....	1
§1.1 人類とエネルギーとの関わり .....	1
§1.2 産業革命とエネルギー .....	3
§1.3 電気科学の始まりと発達 19 世紀 .....	9
§1.4 産業革命の世界への波及 .....	14
§1.5 科学と技術の相互関係, そして人類 .....	17
2 章. エネルギーの物理的基礎 .....	19
§2.1 エネルギーとは何か .....	19
§2.2 エネルギーの種類は変換できる .....	20
§2.3 エネルギーの物理 .....	21
§2.4 エネルギーの単位 .....	27
3 章. 化石燃料とその化学 .....	35
§3.1 化石燃料 .....	35
§3.2 燃焼 .....	42
4 章. わたしたちの生活とエネルギー消費 .....	45
§4.1 エネルギーに関する情報はどこで調べるか .....	45
§4.2 エネルギー白書を読む .....	46
§4.3 統計データから情報を読み取る .....	62
§4.3.1 エネルギーバランス表を読み解く .....	62
§4.3.2 明治以降の日本の近代化とエネルギー消費 .....	69
§4.3.3 「再生可能エネルギー」の本質 .....	75
付録. エネルギー関連の資料集 .....	78

# 1 章. エネルギーからみた科学技術の歴史

## § 1.1 人類とエネルギーとの関わり

まず、最初に一つのグラフを紹介したい (図 1-1)。このグラフは、横軸は時間経過を表わし、西暦 2030 年までの約 2000 年間の、左側の縦軸には「世界のエネルギーの消費量」、右側の縦軸には「世界の人口」をとっている。

この図から何が読み取れるだろうか？



(出典) United Nations, "The World at Six Billion"  
 United Nations, "World Population Prospects 2010 Revision"  
 Energy Transitions: History, Requirements, Prospects  
 BP Statistical Review of World Energy June 2012  
 BP Energy Outlook 2030: January 2013

図 1-1 世界のエネルギー消費量と人口の推移

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 24 年度エネルギーに関する年次報告」  
 (エネルギー白書 2013) (図【第 111-1-1】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/1-1-1.html>

まず、左右の縦軸目盛りに示されているように、世界のエネルギー消費量と世界の人口とが時代と共に増加していったことがわかる（記録のない古い時代の数値については、推定値である）。しかもその増加傾向を示す曲線は非常に似ている。

エネルギー使用量の増加は人口増加に伴って増えているだけなのだろうか？そこで、一人当たりのエネルギー消費量にして比べてみよう（図 1-2）。

### 人類とエネルギーのかかわり

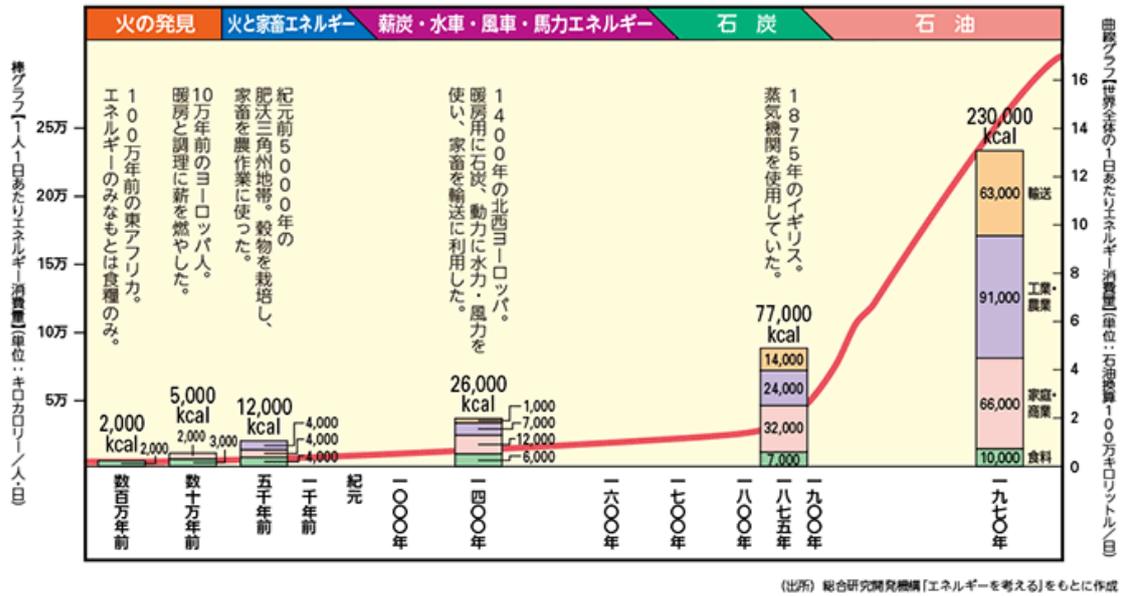


図 1-2 一人当たりのエネルギー消費量

（出典）資源エネルギー庁・エネルギー教育推進事業・中学生向け副教材「わたしたちの暮らしとエネルギー」【教師用解説編】，理科 3(1)人類の発展とエネルギー

<http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/tyousakouhou/kyouikuhukyu/fukukyo uzai/ck/3-1.html>

火を発見して利用するようになった紀元前数百万年前の時代(2,000kcal/日)から、家畜の持つエネルギーの利用を見だし、薪・水車・風車・馬力のエネルギーの時代(26,000kcal/日)に至るとい過程で、利用するエネルギーの種類が増えるにつれて、一人当たりのエネルギー消費量も増えている。そして、ジェームズ・ワットの発明した蒸気機関の使用が普及し始めたころ(1875年)には 77,000kcal/日に増えた。つまり、一人当たりのエネルギー消費量は、この数百万年の間に、38.5 倍に増加したことになる。なお、ここまでのエネルギー資源（一次エネルギー）は、木材（薪）や石炭である。そして、蒸気機関が機関車や蒸気船などの動力としてだけでなく、「電気エネルギー」（二次エネルギー）を得るための発電機にも利用されるようになる。さらに、石炭だけでなく、石油もエネルギー資源として使用するようになる。1970年には、一次エネルギーを変換した電気エネルギーの利用の増加に伴って、一人当たりのエネルギー消費量もど

らどんどん増え、230,000kcal/日、つまり、1875年の約3倍になった。注目すべきは、わずか100年の間に3倍近くのエネルギーを消費をするようになったということである。

もう一度、図1-1に戻ってみる。世界のエネルギー消費量が、横軸上に見えてくる時期に注目してみる。グラフ上で見える程度のエネルギー消費が、西暦1800年より少し前から始まったことがわかる。すなわち、産業革命により、石炭の利用が増大したためだと推察できる。

次に、どのような種類のエネルギー資源を主として利用しているかということに注目して、その推移を見てみる。最初は石炭から始まり、石炭が主流の時期が続く。1950年頃を境に石油の消費量が飛躍的に増加し、主流は石炭から石油へと変わる。この時期に何が起こったのかを見てみると「エネルギー流体革命」とある。これは、1859年に、アメリカで新しい石油の採掘技術が開発され、石油の大量生産が可能になると、その利用方法も急速に発展したことと、1950年代に中東地域やアフリカに相次いで油田が発見されたことにより、エネルギーの主役が石炭から石油へ移行したことを示す用語である。

つまり、「産業革命」や「エネルギー流体革命」では、主にテクノロジーの発達に起因してエネルギー消費量やエネルギー資源の主体の変化が起こったことを意味する。一方、1970年代に2度あった「石油ショック」は、中東産油国の政治情勢などに世界経済が左右されたもので、主役はテクノロジーではなく、国際政治となる。即ち、エネルギーの歴史というのは、単に科学技術の歴史ではなく、政治経済といった人間社会の営みに深く結びついていることがわかる。また、この「石油ショック」は、科学技術の分野にもフィードバックされ、新たなエネルギー資源の開発の必要性が認識された。

## §1.2 産業革命とエネルギー

図1-1でも明らかのように、産業革命はエネルギー消費の歴史において最大の出来事であった。産業革命とエネルギーの関わりについてももう少し詳しくみてみよう。

産業革命は16世紀のイギリスから始まった。2012年のロンドンオリンピックの開会式ではイギリスの歴史がオリンピックスタジアムの広い舞台の中で繰り広げられた。産業革命前の場面では、羊を放牧して暮らす農夫の牧歌的な情景であったが、一転して、工業により近代化した情景、産業革命の象徴となる蒸気機関と工場労働者の場面へと変わった。このことから、イギリスの歴史において、産業革命は大きな出来事であったことがうかがえる。図1-3の写真はロンドンにある、Science Museumの1階のフロアー(Energy Hall)ほぼ全面に、展示されている蒸気機関の現物の中の1つである。その大きさと、おそらくは荒野に使われずに放置されていたものをそのままそっくり持ってきて展示するという手法に度肝を抜かれたというのがその展示をこの目で見た際の正直な感想であった。同時に、現物の手前には縮小したカットモデルタイプの模型が展示

してあり、文字の解説、アニメーションでの解説なども充実していた。ここからも、イギリスにとって産業革命、その象徴である蒸気機関は特別なものなのだと感じた。

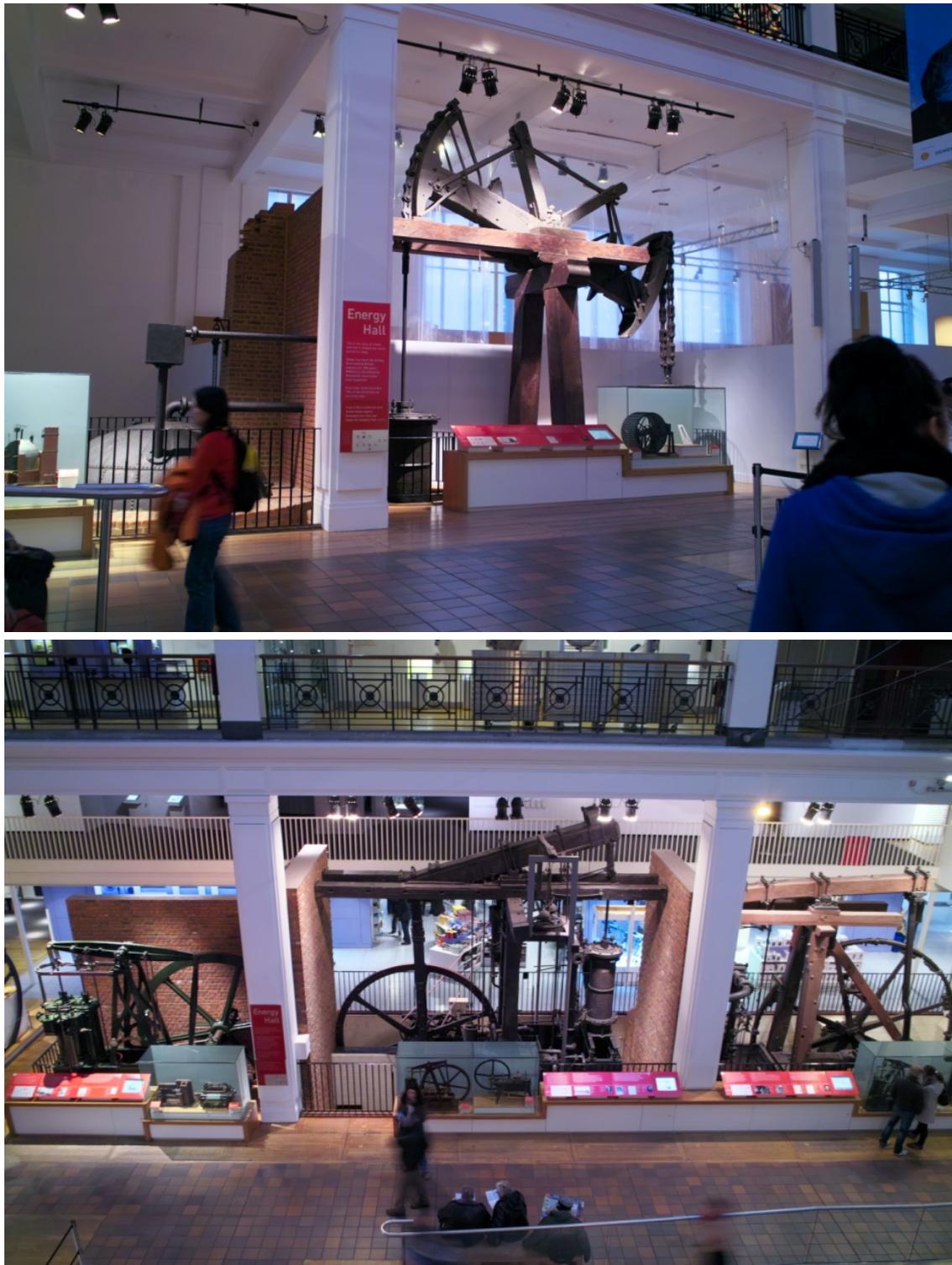


図 1-3 Science Museum (London) の Energy Hall(1 階)に展示された現物の蒸気機関 (2010 年 12 月, 筆者撮影)

また、産業革命と鉄鋼業の関係に述べた 1.4 節で述べるが、蒸気機関が使用され始めたことは、まだ鉄は貴重品であったか、品質的に強度が弱いものであったかのどちらかまたは両方であることが窺える。現代の常識なら、支柱は当然鉄鋼であろう。ところが図 1-4 を見ると、重い鉄の塊の本体を支える部分が頑丈そうな木材であることがわかる。



図 1-4 Science Museum (London) の Energy Hall(1 階)の蒸気機関  
(2010 年 12 月, 筆者撮影) 支柱や梁が木製であることに注目。

産業革命はなぜ 18 世紀のイギリスで始まったのだろうか？このことについては、近年出版された書物<sup>1)</sup>に詳しく記載されているそうである。同著者による論文<sup>2)</sup>"Why was the Industrial Revolution British?"を紹介した記事<sup>2)</sup>をもとに、本章では産業革命とエネルギーとの関係についての部分だけを要約して紹介する。まず、16 世紀後半から 17 世紀前半の間に全ヨーロッパに市場が生まれ、イギリスの羊毛繊維産業が勝者となり経済が繁栄した。さらに、アメリカとインドを含んだ大陸横断的な貿易 ネットワークを

<sup>1)</sup> Robert C. Allen "The British Industrial Revolution in Global Perspective"  
(英国産業革命の世界的展望) (Cambridge, Cambridge University Press, 2009)

<sup>2)</sup> Hi-Stat Vox No.9 (2009 年 6 月 23 日), Robert C. Allen (Oxford University) 「なぜイギリスで産業革命が起こったのか？」

<http://gcoe.ier.hit-u.ac.jp/vox/009.html>

(原文) "Why was the Industrial Revolution British?"

<http://www.voxeu.org/article/why-was-industrial-revolution-british>

築いて 17 世紀後半や 18 世紀に入っても世界経済におけるイギリスの主導的立場は続いた。英国貿易の成長によって重要な事が起こったが、その一つが、ロンドンの拡大によって木材燃料が不足し、石炭の利用がそれを補うように盛んになったことである。図 1-5 は、この時代のロンドンにおける、木材と石油に対する 100 万 BTU（英国熱量単位）当たりの実質価格を示している。15 世紀の間、木材と石炭とは同等の価格で取引されていたが、1500 年以降にロンドンが発展したことで木材燃料の価格は上昇し、16 世紀終わりまでには木炭や薪の価格は石炭価格の約 2 倍に増加した。この価格差により、消費者は木材利用から石炭利用へと乗り替え始めた。大きな居間の中心にある薪を燃料とする暖炉に代わって、石炭を燃やすために壁沿いに狭い暖炉と煙突を設置した家が建築された。このような変化により、イングランド北東部の石炭鉱山を採掘するようになり、海岸沿いを通してロンドンまで石炭が輸送された。

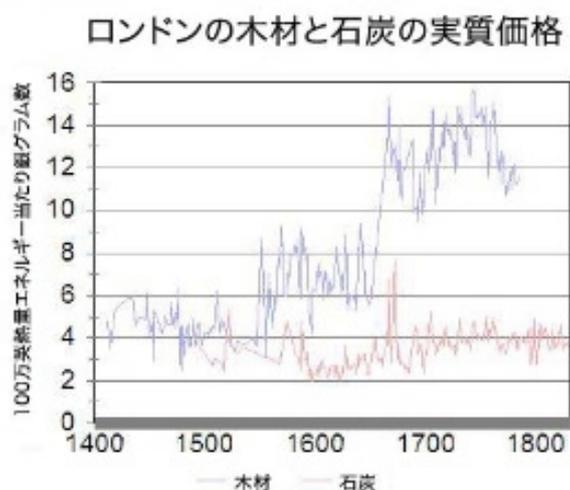


図 1-5 産業革命の時期のロンドンの木材と石炭の価格の推移  
(青線は木材， 赤線は石炭)

(出典) Hi-Stat Vox No.9 (2009 年 6 月 23 日), Robert C. Allen (Oxford University)

「なぜイギリスで産業革命が起こったのか？」,

<http://gcoe.ier.hit-u.ac.jp/vox/009.html>

(原文) "Why was the Industrial Revolution British?" ,

<http://www.voxeu.org/article/why-was-industrial-revolution-british>

石炭の採掘量が増えるに従い、地表近くだけでは需要に追いつかず、次第に地下深くまで採掘をするようになった。地下深く掘るようになると問題となってきたのは、浸水であった。石炭を掘り出すためには、水を汲み出す必要が生じ、揚水のための動力が必要となった。「必要は発明の母」という言葉はよく使われるが、ここでも必要性に応え

ようとセイヴァリが蒸気ポンプを発明(1698年)した。さらに、ニューコメン<sup>3)</sup>がこれを改良したものを発明した(1712年)。このニューコメンの蒸気機関は、馬力はそれなりにあったようであるが、如何せん、これを稼働させるには次の引用のように多量の石炭が必要であった：「鉱山主たちは、毎日 50 頭の馬で、この機関に使う石炭を運ばなければいけなかった。馬の飼料だけでも大きな費用がかかり、鉱山のもうけを馬が食ってしまうと言われるほどであった」<sup>4)</sup>。

このニューコメンの機関を改良したのがジェームズ・ワット<sup>5)</sup>である。彼は、スコットランド出身で、ロンドンに出て年季奉公をしてその間に機械工としての技術を身につけ、1756年に故郷のスコットランドに戻りグラスゴー大学付きの精密機械製造工(mathematical instrument maker)として働いた。大学からセイヴァリやニューコメンの故障した模型の修理を頼まれたとき、それらの効率が非常に悪いことに気づき、その改良を志し、成し遂げたのである。その「気づき」の背景には、ワットがグラスゴー大学で潜熱(latent heat)の名付けの親であるブラックから潜熱について学んでいたことが役立ったことは想像に難くない。ワットはこの発明について友人のジョン・ロビソンへ宛てて「蒸気がまったく無駄にならないエンジンを今作ったところさ。そのうちに、この話題でもちきりになるよ」と記しているそうである<sup>6)</sup>。彼は、1769年にこの発明で特許を取得した。ワットの蒸気機関の改良はその後も継続された。ピストンが上がったり下がったりする「複動蒸気機関」はさらに効率を高めた。蒸気機関が様々な産業で動力として用いられるようになった改良は、ピストンの直線運動を回転運動に変換する機構であった(回転式蒸気機関)。こうして改良を加えられた蒸気機関は、ニューコメンの蒸気機関より燃料使用効率において5倍高かった<sup>7)</sup>。馬力も18世紀末までは15馬力(ニューコメンの機関の2.5倍)だったが、19世紀になり、ワットの特許の期間が切

---

<sup>3)</sup> 『理化学事典(第5版)』(岩波書店)「ニューコメン」[Newcomen, Thomas]1663-1729. イギリスの技術者。最初の実用的な蒸気機関の発明者。鉄製品を作る小工場を営み、非国教派の活動も行ないながら1705年ごろから工夫を重ね、ピストンと蒸気発生用のボイラーを分離してはじめて実用的な蒸気機関(大気圧機関ともよばれる)を作った。この機関は1分間に14ストローク、約6馬力の出力で1回のストロークは6フィート以上という巨大なものであった。安定なこのニューコメン機関は、ワットの改良が行なわれるまでの約60年間、イギリスの鉱山における揚水機関として各地で活躍した。

<sup>4)</sup> (出典)平田寛著『図説 科学・技術の歴史』(1985), p.327「分離凝縮器つき蒸気機関(1765)」(朝倉書店)

<sup>5)</sup> 『理化学事典(第5版)』(岩波書店)「ワット」[Watt, James]1736.1.19-1819.8.19. イギリスの機械技術。蒸気機関の改良者。1757年グラスゴー大学の機械技師となり、ニューコメンの大気圧機関に着目して1759年その改良を始め、1765年小蒸気機関の改良製作に成功し、ブラックの示唆によって外部凝縮器に関する特許も得た(1800)。1774年、ボールドトン(Boulton, M.)の後援を得て機関の改良に従事し、バーミンガムに蒸気機関の製作工場を設立し、往復動機関、调速器および節気弁、蒸気圧力指示計を発明してその製造を行なわせた。複写用インクの発明もある。

<sup>6)</sup> ジャック・チャロナー編集『人類の歴史を変えた発明 1001』(2011), p.206 (ゆまに書房)

<sup>7)</sup> Wikipedia "James Watt", [https://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Watt](https://en.wikipedia.org/wiki/James_Watt)

れると普及が加速し、それとともに改良も進み、馬力も格段に向上した。蒸気機関を利用した発明には、蒸気船（1776）や蒸気機関車(1804)などがある。これらは、まもなく風景の一部になっていった（図 1-6）



図 1-6 風景に描かれた蒸気機関

(上) Jetty and Warf at Trouville<sup>8)</sup>(トゥルーヴィルでの栈橋と埠頭)  
Eugène Boudin, 1863 年  
National Gallery, Washington DC (2016 年, 筆者撮影)  
<http://www.nga.gov/content/ngaweb/Collection/art-object-page.61359.html>

(下) The Lackwanna<sup>9)</sup> Valley(ラッカワナ バレー)  
George Inness, 1855 年  
National Gallery, Washington DC (2016 年, 筆者撮影)  
<http://www.nga.gov/content/ngaweb/Collection/art-object-page.30776.html>

ワットに敬意を表して、現在も国際単位系の中で、仕事率・工率・電力の単位として「ワット(W)」が使われている。

### §1.3 電気科学の始まりと発達 19 世紀

化学でおなじみの、亜鉛と銅とを希硫酸の溶液に浸した「ボルタの電池」は 1799 年に、イタリアのアレッサンドロ・ボルタによって発明された。この発明は、“カエルの解剖をする際に、両足に二種類の異なる金属を差し込んでおくとカエルの脚が痙攣すること”に気づいたガルヴァーニ<sup>10)</sup>の研究を発展させたものである。この電池の発明以前、電気の研究は、摩擦によって起こる静電気や、自然現象である雷<sup>11)</sup>を対象としており、人為的な制御下で電気を利用する術はなかったと推測される。そこに登場した、利用したいときに電気を利用できるボルタの電池は、電気科学を発展させるのに大変な貢献をした。次に挙げるような電気科学上の発見または電気を利用した発見が次々になされた。

- ・ 1800 年 水の電気分解 (カールとニコルソン)  
電流に化学反応を起こす能力があることを発見
- ・ 1807 年-1808 年 電気分解による新元素の発見 (デービー)  
K, Na, Mg, Ca, Sr, Ba, B, I など
- ・ 1820 年頃 磁場と電気の関係の発見 (エールステッドとアンペール)  
配線導線を通る電流が配線の周りに磁場を生じさせ、2本の導電線が電流の方向によってお互いに引き寄せ合ったり反発したりする

<sup>8)</sup> Trouville は、フランスにあるイギリス海峡に臨む港町・保養地

<sup>9)</sup> Lackwanna は米国・ニューヨーク州西部エリー湖畔の町。米国有数の製鉄所がある。

<sup>10)</sup> 『理化学事典(第5版)』(岩波書店)「ガルヴァーニ」[Galvani, Luigi]1737.9.9-1798.12.4. イタリアの解剖学者、生理学者。生地ボローニャの大学をおえ、1755年同大学教授。1780年頃、解剖しておいたカエルの脚が、近くの起電機の放電で痙攣するのを発見した。空中電気でも同じ効果が生じると考え、皮をはいだカエルの脊髄を真鍮の鉤で庭園の鉄柵につるして実験を行なった。この研究のなかでガルヴァーニ電池とよばれる効果を発見したが、彼はそれを動物電気に帰した。しかしこの発見はヨーロッパの学界に非常に大きな刺激をあたえ、ボルタによる電池の発明に結実し、また動物電気の研究から電気生理学の発展をうながした。

<sup>11)</sup> ベンジャミン・フランクリンの研究などが有名

- 1821年 ゼーベック効果の発見 (独：ゼーベック)
  - 同一回路内の異なる金属の二つの接点の間に温度差があるとき、その接点間に電圧が発生する現象
  - 「熱電対」は、この効果を利用して温度を測る温度計である。
- 1821年 電動機 (モーター) の発明 (英：ファラデー)
  - 電気と磁石とを使って回転運動を生み出す
- 1827年 オームの法則 (独：オーム)
  - 導体を流れる電流の強さは、その両端における電位差に比例し、抵抗に反比例する ( $V = IR$ )
- 1831年 電磁誘導の発見 (英：ファラデー)
  - 2組のコイルを用い磁気的作用によって電流が誘導される
- 1831年 ダイナモの発明 (英：ファラデーとヘンリー)
  - 機械的エネルギーを電気エネルギーに変換する
- 1833年 電気分解の法則の発見 (英：ファラデー)
  - 「電気分解の作用は電気の一定量に対し常に一定で、電源や電極の大きさ、導体の性質などの条件には一切よらない」
  - 「電気分解によって生じる物質の量は、流れる電気量に比例」
- 1834年 ペルティエ効果の発見 (仏：ペルティエ)
  - 異種の導体の接点に電流を通すとき、接点でジュール熱以外に熱の発生または吸収がおこる現象。すなわち、ゼーベック効果の逆の現象。
  - この効果を利用した「ペルティエ素子」は電子部品の冷却や、電池で冷やせる冷蔵庫などに広く利用されている。
- 1840年 ジュールの法則の発見 (英：ジュール)
  - 導線内に流れる定常電流によって、一定温度に保たれた導線から一定時間内に発生するジュール熱の量は、電流の強さの2乗および導線の抵抗に比例する ( $Q = RI^2$ )
- 1845年 ファラデー効果の発見 (英：ファラデー)
  - 磁場内に置いたガラスに光を通すと偏光面が回転する
- 1875年 複屈折の発見 (英：カー)
  - 電場内においた等方性の透明物質に光を通すと屈折率が2つに分かれる

この略年表を見てわかることは、ファラデー<sup>12)</sup>の名前が何度も登場することである。ファラデーは鍛冶屋職人の息子として生まれ<sup>13)</sup>、学校にはほとんど通っていない。14

---

<sup>12)</sup> 『理化学事典 (第5版)』(岩波書店)「ファラデー」[Faraday, Michael]1791.9.22-1867.8.25. イギリスの化学者、物理学者。1813年3月王立研究所の助手となり、デービーの指導を受けた。1825年王立協会の会員に選ばれ、王立研究所の実験所長となって、終生在職。

歳のとき、近所で製本業と書店を営んでいた ジョージ・リーボー のところに年季奉公に入った。そこでは多くの本を読んで独学した。7年の年季奉公を終えた1812年、ファラデーは、化学者デービーの秘書として採用され、科学への道を歩み始めた。そして、王立協会の会員・王立研究所の所長にまで上り詰めた。多数の科学的偉業だけでなく、科学の啓蒙にも熱心であった。世界の優秀な科学者たちを集めた「金曜講話」、少年少女向けのクリスマス・レクチャーとして有名な「ロウソクの科学」などである。ファラデーが1860年のクリスマス・レクチャーとして英国王立研究所で連続講演した6回分の内容は『ロウソクの科学』として今も読み継がれている。

1821年の電動機（モーター）、即ち、電気エネルギーによって軸を回転させ機械的な仕事をさせる装置の発明は、その後の電気エネルギー無しでは成り立たない社会の始まりとも言えよう。1831年は、ファラデーが電磁誘導の法則という科学上の発見をしただけでなく、ダイナモの発明もしている。ダイナモは、機械的エネルギーを電気エネルギーに変換する装置であり、ファラデーとは別に同じ頃ジョセフ・ヘンリーも同様のものを製作した。

この10年の間に、蒸気機関の動力を用いて発電し（機械的エネルギーから電気エネルギーへの変換）、発電した電気エネルギーで機械的な仕事をさせることが、基本的に可能になったわけである。1832年にはピクシーは、ファラデーの発見を発展させ、ついに初の実用的な電流発生器（磁石発電機）を発明した。

ファラデーとヘンリーが製造したダイナモは、研究者の関心を引くものではあったが、実用的に広く使われはしなかった。大量の電気を安く作ることに成功したのは、ベルギーの実業家兼電気技師のゼノブ・テオフィル・グラムで、1869年に直流発電機を発明した。さらに、1873年に、グラムはフランス人技術者イボリット・フォンテーヌと協力して、発電機を回すと逆方向の電流が発生し、電動機としても使えることを発見した。同年に二人はウィーン国際博覧会に発明した発電機を出品し、容易に発電ができることだけでなく、得られた電力を利用して安定して作業ができることも人々に示した。この後フェランティらが開発した発電機(1880年)は、ロンドンの電力供給公社からから依頼され、1891年には世界初の近代的な発電所が完成した。この発電所は、高圧の交流電流を供給し、街に送られた段階で電圧を降下させ、消費者が使えるようなシステムを構築していた<sup>14)</sup>。同じ頃、大西洋を隔てたアメリカ合衆国では、エジソンが1879年白熱電灯を完成し、1882年はニューヨークに発電機6基による540kWの直流火力発電所を建設した。イギリスに導入されたフェランティの高圧交流システムは、やがて、トー

---

13) ファラデーの生い立ちについては、東北大学の創設者の一人、物理学の教授で、アインシュタインが訪日したときには通訳を務めている愛知敬一（1880年生、1923年没）氏の著書が、現在では無料の青空文庫で読める。青空文庫[図書カード No.46340]「ファラデーの伝」

<http://www.aozora.gr.jp/cards/001234/card46340.html>

14) 参考・引用文献 ジャック・チャロナー編集『人類の歴史を変えた発明 1001』（ゆまに書房）

マス・エジソンやウェスティングハウス・カンパニーが好んだ直流供給システムを越えるようになった<sup>15)</sup>。電気は都市部で、瞬く間に広く使用されるようになった（図 1-7）



図 1-7 電気のともしる市街地の風景

The city from Greenwich Village<sup>16)</sup>（グリニッチ・ヴィレッジからの見た都会）  
John Sloan, 1922 年  
National Gallery, Washington DC（2016 年，筆者撮影）  
<https://www.nga.gov/collection/gallery/gg71/gg71-52079.html>

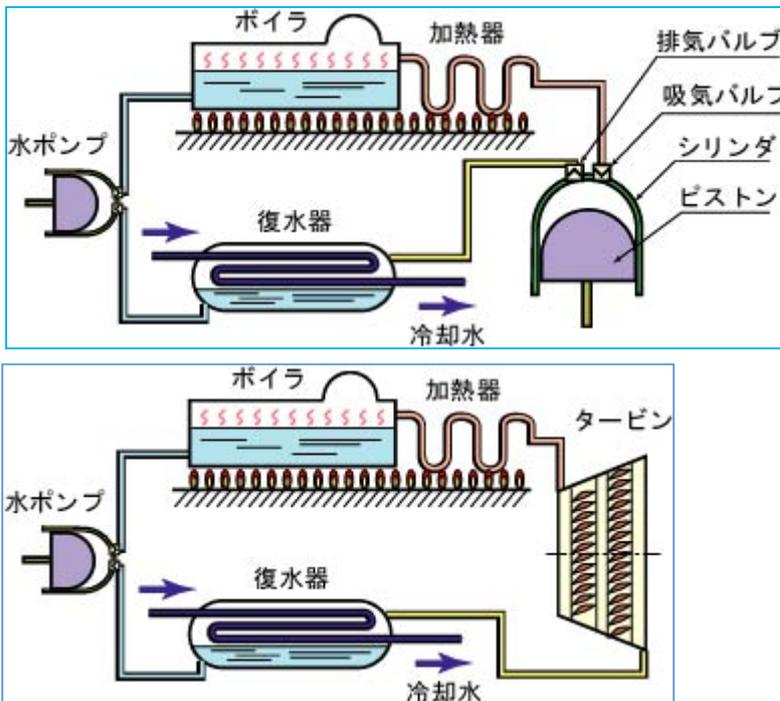
このように、発電機の動力として蒸気機関を利用し、石炭燃料を使用して電気エネルギーを作り出すという流れが完成したわけである。このことは、石炭使用量が増加し始めた 19 世紀後半（図 1-1）とよく合致している。

ここで、石炭を利用した蒸気機関と火力発電で使われる蒸気タービンの仕組みについて、模式図（図 1-8）を見て比較してみよう。両者の違いは、動力として用いる蒸気機関（往復動蒸気エンジン）では出力先はピストンとシリンダになっているところが、蒸気タービンではタービン（羽根車）になっているところである。蒸気タービンを回転さ

<sup>15)</sup> 高圧交流送電のメリットについては、2.3 節「エネルギーの物理」③電気エネルギー、のコラムを参照。

<sup>16)</sup> Greenwich Village は、ニューヨーク市マンハッタン区ダウンタウンにある地区の名称

せて発電する原理は、自転車のライトを点灯させるのと同じである。タービンの回転を発電機の軸に伝えて回転させ、発電している（図 1-9）。



蒸気タービンでは、往復動蒸気エンジンのピストン、シリンダの代わりにタービン（羽根車）としたのが蒸気タービンであり、火力発電所や原子力発電所などで使われている。往復動蒸気エンジンでは蒸気の静的な圧力を利用しているのに対して、蒸気タービンでは主として蒸気の熱エネルギーを直接運動エネルギーに変換して有効な機械的なエネルギーを発生している。どちらの場合も蒸気が膨張するとき生じるエネルギーを利用している。

図 1-7 蒸気機関(往復動蒸気エンジン)(上)と

火力発電所等で使われる蒸気タービン(下)の比較

(図の出展) (独)海上技術安全研究所 HP「各種エンジンの構造と原理」から引用、

[http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/engines/general\\_j.html](http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/engines/general_j.html)

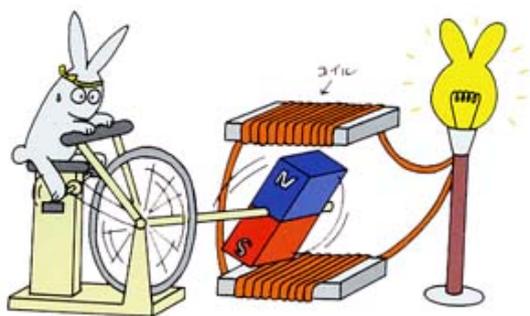


図 1-8 電気のできる仕組み

うさぎのがんばり＝蒸気力（圧力）  
クルクル回る車輪＝蒸気タービン  
コイルと磁石＝発電機

出典：東北地熱資源開発促進連絡協議会パンフレット

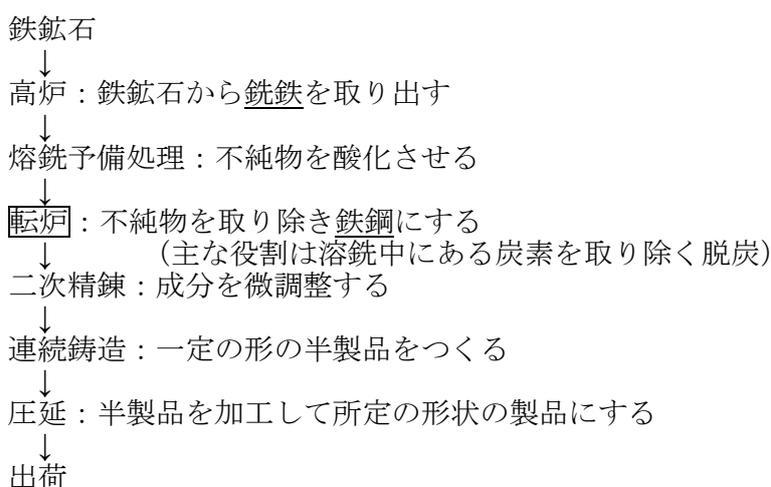
(出典) 資源エネルギー庁/ 資源・燃料/ 「電気のできるしくみ」

[http://www.enecho.meti.go.jp/category/resources\\_and\\_fuel/geothermal/explanation/mechanism/generation/001/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/geothermal/explanation/mechanism/generation/001/)

## §1.4 産業革命の世界への波及

イギリス本土から始まった産業革命は、ヨーロッパ大陸(特にドイツ)やアメリカへと波及していった。ドイツにおける産業革命は 1830 年頃からといわれている<sup>17)</sup>。開始時期が異なるだけでなく、その内容もイギリスでのそれとは異なってくる。

ドイツの産業革命は「鉄鋼業の発達」に象徴される。ここで少し、鉄がどのように生産されるかをみておこう。



従来法では、脱炭反応を促進させて煉鉄を得るため、熔銑を鉄の棒で攪拌 (Puddling) するパドル炉を用いていた。この炉は、燃料と熔銑との接触が無いとため、石炭を燃料とできるという長所がある。18 世紀後半に主にイギリスで使用され、イギリスの鉄生産量は急増した。

1860 年には、イギリスのベッセマーによりベッセマー転炉が発明され、パドル炉では数日要するところを、ベッセマー転炉を使うと 10 分で済むというほど時間が大幅に短縮された。一般的なベッセマー転炉は、25 トンの銑鉄をたったの 30 分で鋼鉄に転換できたそうである。こうして、それまでの何十倍の効率で鋼鉄が生産できるようになり、安価な鋼鉄が大量生産できるようになった。このことは、それまでは設計図上の世界だった鋼鉄の橋・鋼鉄の建築物の建造を可能にした。そして、高性能の鉄道レール、大型船、大規模工場が現実的なものとなった。こうして世界は「鉄の時代」から「鋼の時代」へと変わっていった。前述した、Science Museum に陳列された、製鉄技術の発展が進んでいなかった時期の蒸気機関には、支柱に木材が使われていたが (図 1-4) , このような事情があったことが想像される。

しかしこの炉には、リンを除去できない、という欠点があった。ヨーロッパ大陸の銑鉄石は大部分がリン鉱石であるが、リン鉱石に対しては、依然としてパドル炉が使用さ

<sup>17)</sup> 『広辞苑 (第 4 版)』(岩波書店)「産業革命」から引用

れた。1879年、ベッセマー転炉の欠点を改良し、リン鉱石にも使えるトーマス転炉が開発され、パドル炉からの転換がはかられた。この転換の意義は大きく、鋼の生産量が急増した。この炉を大規模に導入したのは既存設備が整っていなかった新規参入組みのアメリカとドイツであり、この結果として、イギリスの鉄鋼業は生産量においてドイツやアメリカに追い抜かれることとなった。この意義は、産業革命の後進国ドイツが、ヨーロッパ最大の鉄鉱生産国となったことである。

鉄鋼技術の装置系については上述のような矢継ぎ早の改良がなされていったが、科学の面ではどのようなことが起こっただろうか。既に指摘されていること<sup>18)</sup>であるが、18世紀から19世紀の産業革命の進展に合わせて“熱学”も発展した。容易に推察されるように、この“熱学”は、蒸気機関の発明の後になされた、蒸気機関の熱効率を向上させるための無数の技術的試行錯誤から得られた知見が体系化されたものである。つまり、産業上の要請(=可能な限り少ない燃料によって可能な限り多くの仕事をさせることができる熱機関を実現したい)が、それまでに知られていなかった自然の性質を明らかにし、新しい「科学」を誕生させたのである<sup>19)</sup>。

このことを具体的に見てみよう。鋼材は、鉄鉱石をコークス及び石灰石と混合して強熱することによって得られる<sup>20)</sup>が、温度と炭素含有量とに依存して、異なる性質を有する<sup>21)</sup>。従って、所望の性質を有する鋼材を得るためには、温度を正確に測定することが必須である。もちろん、この温度は極めて高温であるため、接触式の温度計は使用できない。鉄の温度が高くなるにつれて発光し、しかも色が温度と共に変化することはよく知られていたため、発光スペクトルを解析してその温度を求めようとする研究が行なわれるようになり、19世紀末にステファン・ボルツマンの輻射法則<sup>22)</sup>(1884年)並びにウィーンの輻射法則<sup>23)</sup>(1896年)が、熱学より発展した熱力学に基づいてそれぞれ提唱された。しかし、後から発表されたウィーンの輻射法則でも、観測される発光スペクトルを全波長域に亘って正確に再現することはできなかった。この問題に対する最終的な解を与えたのがプランクの輻射理論<sup>24)</sup>(1900年)である。

---

18) 佐々木力『科学論入門』第2章の4.

19) 科学と技術の関係についての考察は、以下の論文に詳述した：  
寺内衛・寺内かえで『教養としての科学—Newton 力学/古典電磁気学/量子力学と「技術」との関係について—』, Hiraos School of Management Review, 第5巻, pp.26-37(2015),  
<http://c-web.konan-u.ac.jp/hmr/HSMR/HSMR-2014-1-003.pdf>

20) 『理化学事典(第5版)』(岩波書店)「鉄」

21) 鉄の相図(炭素含有量と温度との関係)については、例えば  
<http://www.mmm.muroran-it.ac.jp/~isaos/page14/page18/files/FS090508.pdf> を参照.

22) [http://en.wikipedia.org/wiki/Stefan%E2%80%93Boltzmann\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Stefan%E2%80%93Boltzmann_law)

23) [http://en.wikipedia.org/wiki/Wien\\_approximation](http://en.wikipedia.org/wiki/Wien_approximation)

24) [http://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law)

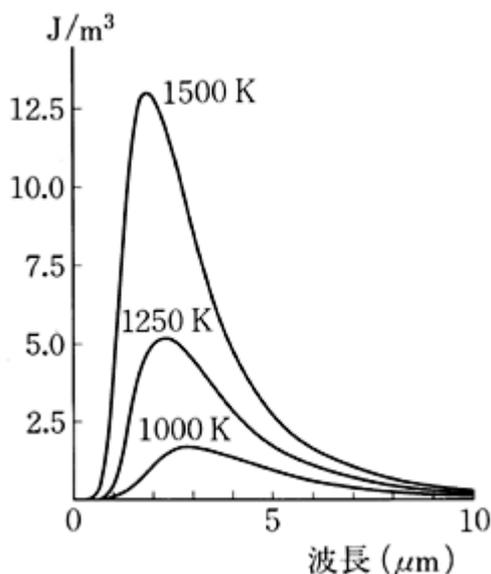


図 1-9 プランクの黒体放射のエネルギー分布

注)黒体とは、すべての波長の放射を完全に吸収する物体

(出典)『理化学事典(第5版)』(岩波書店)「プランクの放射法則」

物体の温度(図では絶対温度 K で表示)により、エネルギー分布が異なる(見える色が異なる)ことがわかる。このカーブは、プランクの導いた式をグラフに表わしたものである。

プランクの輻射理論は、“エネルギーのやりとりは連続的ではなく、最小単位を有する離散的なものである”というエネルギー量子仮説を採用し、当時、熱力学を包含する形で体系付けられつつあった“統計力学”に基づいて導出されたものである。このエネルギー量子仮説と、光電効果<sup>25)</sup>の説明のためにアインシュタインによって提出された光量子仮説<sup>26)</sup>(1905年)とが、ラザフォード<sup>27)</sup>による原子核の発見(1911年)を踏まえてボーア<sup>28)</sup>による前期量子論の確立(水素原子構造モデルの提唱)(1913年)に繋がった。

その後、原子より小さいサイズの世界での物理学が加速的に発展した。そして、1934年頃には、イタリアの物理学者フェルミが、中性子による元素の人工転換の実験を成功させた。フェルミは理論面及び実験面両者の成果により、1938年にノーベル物理学賞を受賞しているが、授賞式出席のためにストックホルムを訪れた際、アメリカに亡命した。フェルミがアメリカへ亡命してまもなく、ドイツのオットー・ハーンとリーゼ・マイトナーが、中性子による核分裂実験を成功させた<sup>29)</sup>。アメリカではフェルミらがシカゴ大学で人類初の原子炉「シカゴ パイル 1(CP1)」を完成させ、原子核分裂連鎖反応の人工的制御を成功させた。フェルミは、アメリカにおいて原子爆弾開発プロジェクト、マンハッタン計画、にも参画した。マンハッタン計画は成功を収め、1945年には広島と長崎に原子爆弾が投下された。原子爆弾は第二次世界大戦後も冷戦体制下で大量に製造され、また、民生化利用として原子力発電も始まった。原子力発電と火力発電との原理的な違いは、ボイラーで水を加熱する際に用いる熱が、石炭や石油を燃焼させた

<sup>25)</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect)

<sup>26)</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric\\_effect#20th\\_century](http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect#20th_century)

<sup>27)</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest\\_Rutherford](http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford)

<sup>28)</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Niels\\_Bohr](http://en.wikipedia.org/wiki/Niels_Bohr)

<sup>29)</sup> *Die Naturwissenschaften* **27**: 11. DOI:10.1007/BF01488241, Hahn, O.; Strassmann, F. (1939). "Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle"

ときに出る熱か、原子核分裂の際に放出される熱かの違いであり、蒸気でタービンを回転させる工程以降は同じである。こうして、人類は原子力も利用することが可能になった。

## §1.5 科学と技術の相互関係、そして人類

上述した科学技術の歴史をもう一度振り返ってみよう。“知識”の体系化によって形作られた「科学」と人類の“手の技(わざ)”を意味する「技術」とは互いに異なる範疇に属するものであるが、この両者は車の両輪の様に密接に結びついた関係、或いは、異なった個性のものが相互に影響を及ぼし合う関係であることがよくわかる。20世紀以降の科学と技術、そして社会(産業)との関係は、二度の戦争を契機としてより緊密になっていく。レーダー技術と電波天文学との関係、1980年代までの東西冷戦と高エネルギー実験物理学との関係などを思い出していただきたい。冷戦終結の結果、Superconducting Super Collider (SSC)計画が中止になったこと<sup>30)</sup>は、「科学」と「技術」のありように対する社会の影響を象徴的に表わしている

わたしたち人類の歴史は、科学と技術の相互の発達の中で、自然界にも影響を及ぼすような「巨人」となった。最近、学術論文で Anthropocene(人新世)という言葉を目にするようになった<sup>31)</sup>。人類が地球の生態系や気候に大きな影響を及ぼすようになった時代を指す言葉である。Wikipedia 英語版<sup>32)</sup>によれば、これは1980年代に大気化学者 Paul J. Crutzen らによって使われ広められた造語ということである。2015年3月12日付けの *Nature* 誌に掲載された「Defining the Anthropocene(人新世)を定義する」<sup>33)</sup>の要約記事<sup>34)</sup>を以下に引用する；

「完新世(Holocene)」はすでに終結し、人類が優占する新たな地質年代「人新世(Anthropocene)」が始まっているという考え方については、盛んに議論されている。人新世がいつ始まったと思われるのか、それについての正式な見解の一致にはまだ至っておらず、人新世を正式な地質年代単位としてその始期を規定するには、層序学的な媒体に記録されている地球の状態中に、時代の移行を示す全球的なマーカーを据えなければならない。S Lewis と M Maslin は今回、地質記録中の人類によって残されたことが明らかな痕跡を、新たな年代の承認に必要な公式要件と照ら

<sup>30)</sup> 山本均『SSC計画中止決定後の米国物理学界』「日本物理学会誌」第49巻第929-933頁(1994)。

<sup>31)</sup> *Science*. 2016 Jan 8;351(6269):aad2622. DOI: 10.1126/science.aad2622, "The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene."

*Nature*, 519, 171–180, (12 March 2015), DOI:10.1038/nature14258, "Defining the Anthropocene"

<http://www.nature.com/news/anthropocene-the-human-age-1.17085>, "The human age"

<sup>32)</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Anthropocene>

<sup>33)</sup> *Nature*, 519, 171–180, (12 March 2015), DOI:10.1038/nature14258

<sup>34)</sup> *Nature* ハイライト, cover story, <https://www.natureasia.com/ja-jp/nature/highlights/61700>

し合わせて評価し、西暦 1610 年 および 1964 年という 2 つの時点が人新世の始期を示す可能性があることを明らかにしている。

原文に当たると、1610 年には二酸化炭素濃度の極小点があり、また、1964 年には二酸化炭素濃度と気温の上昇が著しくなる変曲点がある。Anthropocene という言葉はまだ定着しているわけではないが、人類の活動の影響が地質年代区分でも議論されるようになってきたという事実はわたしたちも知っておかなくてはならないであろう。

## 2 章. エネルギーの物理的基礎

### §2.1 エネルギーとは何か

エネルギーという言葉聞いたことがない人はいないといってよいだろう。しかし、エネルギーとは何か、と問われると少しとまどうのではないだろうか。距離は物差しで測れる、質量ははかりで量れる、時間は時計で計れる、いずれも具体的なイメージがあるのに対して、エネルギーは具体的にイメージするのが難しい。エネルギーは具体的イメージというより、概念で定義される。エネルギーとは「仕事<sup>35)</sup>をする能力（物体を動かす能力）」である。光ったり、熱を出したり、動かしたり、音を出すためには、エネルギーが必要である。後の節で扱うように、仕事は、単位も存在する物理量である。

このようなエネルギーの概念を理解するために、まず、エネルギーの様々な種類について整理しておこう（表 1）。

表 2-1 エネルギーの種類

<b>力学的エネルギー</b> 運動する物体がもつ「運動エネルギー」と、高い位置にある物体や伸ばした（または縮めた）バネがもつ「位置エネルギー（ポテンシャルエネルギー）」がある。
<b>熱エネルギー</b> 熱は、物体を温めたりする能力である。物質の内部エネルギーのうち、物質を構成している原子や分子の熱運動によるエネルギーである。
<b>電気エネルギー</b> 電荷・電流などがもつエネルギーの総称。モーターを回したり電球を光らせたりする能力がある。電気製品は、電気エネルギーによって作動している。
<b>光エネルギー・電磁波のエネルギー</b> 電波（長波、短波、FM波など）、光（赤外線、可視光線、紫外線）、X線・ガンマ線はすべて電磁波とよばれる同じもので、波長が短いほどエネルギーが高い。植物が行なっている光合成、太陽電池、電子レンジなどは光（電磁波）のエネルギーを使用している。

<sup>35)</sup> ここでの「仕事」は、物理学で使う「仕事」である。物理学では、物体に力を加えて、その向きに動いたとき、力は「仕事をした」という。

$$\text{仕事} = \text{力} \times \text{距離}$$

### 化学エネルギー

ボルタの電池に始まり、現在使用されているアルカリ電池やリチウム電池などの化学電池では、化学反応によってエネルギーを得る道具である。また、石油は、酸素との化学反応で熱を発生する能力がある。私たちが摂取した食物は、ブドウ糖などの栄養素へと消化吸収され、各細胞内での代謝過程により ATP という生物共通のエネルギー物質が産生される。ATP を産生する過程や ATP を利用する反応も化学エネルギーを利用したものである。

### 原子力エネルギー・核エネルギー

ウランなどの重い元素の原子核に中性子を当てると分裂し(核分裂)、主に熱エネルギーが放出される。また、水素など軽い元素同士が融合して重い元素に変換するとき(核融合)ガンマ線などの放射線の形でエネルギーが放出される。このように、原子核が変化する際に放出されるエネルギーを原子力エネルギーまたは核エネルギーという。核分裂により発生する熱エネルギーを利用したのが原子力発電である。太陽の内部では、水素の核融合反応によって莫大なエネルギーが生み出され、太陽表面から輻射熱(太陽光)として宇宙空間に放出されている。我々地球上の生物はその恩恵を受けている。

## §2.2 エネルギーの種類は変換できる

エネルギーには様々な種類があるが、これらは必要に応じて“変換”することができる。たとえば、火力発電所では、化石燃料の持つ「化学エネルギー」を燃焼により「熱エネルギー」に変換し、さらに熱エネルギーを用いて水を液体から気体(蒸気)に変え、蒸気をタービンに吹き付けて回転させる。このとき、気体状態の水分子の「運動のエネルギー」はタービンの回転という「運動エネルギー」に変換する。タービンの回転は発電機の回転軸として伝わり、「電気エネルギー」へと変換される。火力発電におけるエネルギー形態の変換について以下にまとめる。

化学エネルギー → 熱エネルギー → 運動エネルギー → 電気エネルギー  
(燃焼) (タービン) (発電機)

2.1 節で挙げた様々な種類のエネルギーについて、エネルギーの変換をして利用している例を表 2-2 にまとめる。

いろいろな種類のエネルギーがあるが、そのままの形態では使いにくいエネルギーと使いやすいエネルギーがある。例えば、熱エネルギーや力学的エネルギーは最終的に利用されることが多いエネルギーである。また、電気エネルギーは、様々な形態のエネルギーに変換するツール(電気機器)が数多く開発されており、安全面でも優れているので使いやすいエネルギーとして、近年ますます利用されようになっている。

表 2-2 エネルギー変換の例

		初めのエネルギー形態					
		力学的	熱	電気	光・電磁波	化学	原子力・核
変換後のエネルギー形態	力学的		蒸気機関	モーター	光圧 <sup>36)</sup>	筋肉の運動	
	熱	摩擦熱		ヒーター	電子レンジ	燃焼	原子力発電, 太陽光
	電気	発電機	熱電対		太陽電池	電池	
	光・電磁波		白熱球	発光ダイオード		ホタルの光	放射線
	化学		冷えピタ(吸熱反応)	電気分解	光合成		
	原子力・核						

## §2.3 エネルギーの物理

エネルギーは、無から自然に発生するものではない。それぞれのエネルギーにはそれが発生する理由がある。ここでは、各種エネルギーの原理について知り、そのエネルギーを定量的に表わす方法を学ぶ。

### ① 力学的エネルギー mechanical energy

#### ①-1 位置エネルギー (ポテンシャルエネルギー(potential energy))

高い位置にある物体は、重力によって落下し、他の物体を動かす能力がある。位置エネルギーとは、このように、「物体が高い場所にあるときに蓄えているエネルギー」のことである。位置エネルギーは、質量に比例し、高さに比例する。質量 $m$ (kg)の物体が、基準面から高さ $h$ (m)の位置にあるとき、物体のもつ位置エネルギー $E_p$ <sup>37)</sup>(J)は、次のように表わされる。

$$E_p = mgh$$

また、位置エネルギーには、伸びたばね或いは縮んだばねが元に戻ろうとするとき、弾性力による位置エネルギーをもっていると考えることができる。ばねの弾性エネルギーは、伸びた(または縮んだ)の長さの2乗に比例する。自然長から $x$ (m)だけ伸びた(または縮んだ)ばねの弾性エネルギーは、ばね定数を $k$ (N/m)とすると、

<sup>36)</sup> 光圧：レーザービームでビーズを動かす技術など

<sup>37)</sup>  $E_p$ の下付き文字 $p$ はpotential energyの頭文字である。

$$E_p = (1/2)kx^2$$

で表わされる。

### ①-2 運動エネルギー (kinetic energy)

運動している物体は他の物体に対して仕事をすることができる。運動をしている物体が持っているエネルギーを運動エネルギーという。運動のエネルギーは、物体の質量に比例し、速さの2乗に比例する。質量 $m$ (kg)の物体が、速度 $v$ (m/s)で運動しているときの運動エネルギー $E_k$ <sup>38)</sup>(J)は、

$$E_k = (1/2)mv^2$$

となる。

### ①-3 力学的エネルギー保存の法則

ジェットコースターは、最初に高いところに引き上げられる。このとき、位置エネルギーをたくさん蓄えている。降下すると徐々にスピードが速くなる。この過程では位置エネルギーが減少し、運動エネルギーが増加していく。このとき、摩擦などの損失を考慮に入れなければ、位置エネルギーと運動エネルギーの和は一定に保たれている。これを力学的エネルギー保存の法則という。力学的エネルギー $E_m$ <sup>39)</sup>とすると、次のように表わせる。

$$E_m = E_p + E_k$$

### ② 熱エネルギー

熱エネルギーとは、原子や分子の運動エネルギーをいう。物質が熱を吸収すると、外部からエネルギーを得て原子や分子の熱運動が活発になり、これが温度上昇という現象で認識される。逆に、物質が熱を放出すると、原子や分子の熱運動が不活発になり、温度が下がるという現象で認められる。物質を熱したときに外部から物質へ移動したエネルギーが「熱」であり、その量を「熱量」という。熱量の単位にもエネルギーと同じジュール(J)<sup>40)</sup>を用いる。

### ③ 電気エネルギー

電流のする仕事のこと。金属線の両端に電池をつなぐと、導線内部に電界が生じる。負電荷を持つ自由電子は電界と逆向きの力を受けて加速し、運動エネルギーを得るが、

---

<sup>38)</sup>  $E_k$  の下付き文字  $k$  は kinetic energy の頭文字である。

<sup>39)</sup>  $E_m$  の下付き文字  $m$  は mechanical energy の頭文字である。

<sup>40)</sup> 熱量の単位として用いることの多いカロリー(cal)は慣用的な単位である。

熱運動する金属の正イオンに衝突して減速し、エネルギーを失う。導体内の自由電子は、このような加速と減速を繰り返しながら、全体としてある一定の平均速度で移動する。この負電荷の移動が電流である。電気エネルギーの量、電力量  $W$  (単位ワット秒(Ws),) は、電力  $P(W)$ <sup>41)</sup>と時間  $t(s)$ の積で求められる。

$$W = VI t$$

また、自由電子が、正イオンに衝突して減速するとき、運動エネルギーが熱エネルギーに変わる。このエネルギーを「ジュール熱」という。抵抗  $R(\Omega)$ に電圧( $V$ )を加えて電流( $I$ )が流れているとき、時間  $t(s)$ の間の発熱量は、

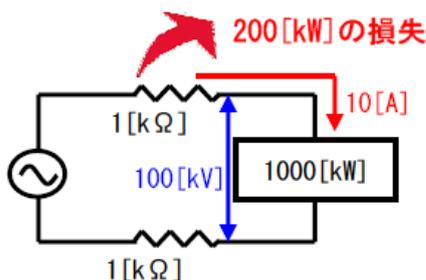
$$Q = VI t = RI^2 t = (V^2/R)t$$

で表わされる。これがジュールの法則である。

【コラム】なぜ高圧交流送電が採用されているのか？

まず、なぜ高圧で送電されるのだろうか。その理由は、「ジュール熱」の発生による電力損失を少なくするためである。例を計算しながら、理解してほしい。ここで必要とする知識は、電力  $P$  は電圧  $V(V)$ と電流  $I(A)$ の積であること( $P = V \cdot I$ )と、オームの法則( $V = I \cdot R$ )である。

1000kW の電力を供給する場合を考える。  
100kV の電圧で送電した場合と、1000kV の電圧(前者の 10 倍)で送電した場合の、線路の電力損失はそれぞれどのくらいか？ (線路の抵抗は 1k $\Omega$  とする)



【計算式】

線路に流れる電流は

$$P = VI \text{ より}$$

$$I = P/V$$

$$I = 1000k / 100k$$

$$I = 10 \text{ [A]}$$

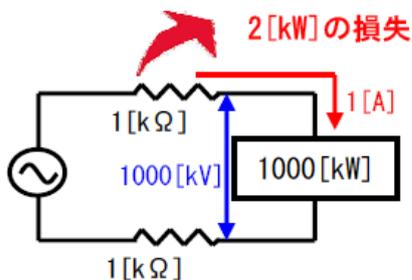
線路の電力損失は

$$P = VI \text{ より}$$

$$P = RI^2 \times 2$$

$$P = 1k \times 10^2 \times 2$$

$$P = 200 \text{ [kW]}$$



【計算式】

線路に流れる電流は

$$P = VI \text{ より}$$

$$I = P/V$$

$$I = 1000k / 1000k$$

$$I = 1 \text{ [A]}$$

線路の電力損失は

$$P = VI \text{ より}$$

$$P = RI^2 \times 2$$

$$P = 1k \times 1^2 \times 2$$

$$P = 2 \text{ [kW]}$$

100kV で送電した場合には電力損失(損失分はジュール熱となる)は 200kW であるが、

<sup>41)</sup> 電力  $P(W) =$  電圧  $V(V)$ と電流  $I(A)$ の積

1000kVで送電した場合の電力損失は2kWである。つまり、送電電圧が10倍になると、電力損失は100分の1になる。なぜ10分の1ではなく10<sup>2</sup>分の1なのか。それは、式を見てみると、電流の2乗で効いてくるからである。このように、高電圧で送電すると、発電所から送電する際の送電損失を少なくすることができる。

では、なぜ直流ではなく、交流が使われているのだろうか。それは、家庭一般で利用することを思い出してもらおうと、100Vの電源にプラグを差し込んで使用している。つまり、高電圧では使用していない。高電圧のまま家庭で利用することは危険である。そこで、送電された電圧（高電圧）を、低い電圧に下げてやる必要がある。このような電圧を変える仕組み（機器）を変圧器という。変圧器は、巻き数の異なるコイルを用いて電圧を変えるのであるが、変圧器は電磁誘導という自然の性質を利用しているため、原理的に直流では変圧器で電圧を変えられない。高電圧で送電した上で一般に使う電圧に下げるときに変圧器を使うため、交流で送電しなければならない。

—————コラム終わり—————

#### ④ 光(電磁波)エネルギー

電磁波とは、電磁場の振動が伝播する現象をいう。電磁波には、電波（長波、短波、FM波など）、光（赤外線、可視光線、紫外線）、X線・ガンマ線など様々なものがある<sup>42)</sup>。電磁波のエネルギーE(J)は、波長λ(m)が短いほど（振動数ν<sup>43)</sup>が大きいほど）エネルギーは大きくなる。

$$E = h \nu = hc / \lambda$$

ここで、hはプランク定数<sup>44)</sup>といい、単位は、ジュール秒(Js)である。cは真空中の光の速さである。

素粒子物理学などの分野では、エネルギーの単位に電子ボルト(エレクトロンボルト)を用いる。この場合には、波長にはナノメートル(nm (= 10<sup>-9</sup> m))を用い、プランク定数の値もこの単位に合わせたものとなる。

電磁波のエネルギーの理論的な根拠は、マックスウェルの方程式という、電磁気学の基本法則を表わす4個の方程式から導くことができる<sup>45)</sup>。

---

<sup>42)</sup> スペクトル上に様々な波長の電磁波が解説してある「一家に一枚光マップ」(文部科学省)は下記から無料でダウンロードできる。

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/20/04/08040301.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/04/08040301.htm)

<sup>43)</sup> 振動数ν = 光速c / 波長λ

<sup>44)</sup> プランク定数 h 6.6260755 × 10<sup>-34</sup>J・s

空中の光の速さ c 2.99792458 × 10<sup>8</sup>m/s

<sup>45)</sup> その導出方法については、東京工業大学の講義資料

([http://www.th.phys.titech.ac.jp/~muto/lectures/Gelmg06/Gem\\_chap13.pdf](http://www.th.phys.titech.ac.jp/~muto/lectures/Gelmg06/Gem_chap13.pdf))などを参照。それぞれの方程式がどのような自然現象を表現しているかについては、脚注19)に掲げた

<http://c-web.konan-u.ac.jp/hmr/HSMR/HSMR-2014-1-003.pdf>に詳述した。

⑤ 化学エネルギー

原子間の化学結合によって物質に蓄えられているエネルギーをいう。その一部は化学反応の過程で熱として解放され(例えば燃焼),あるいはまた電気エネルギーとしてとり出すことができる(例えば(化学)電池)。

⑥ 原子力(核)エネルギー

原子核を構成する陽子・中性子の結合状態の変化にともなって放出されるエネルギーをいう。核分裂や核融合の際に,核分裂前と後或いは核融合前と後の質量を比べるといずれも核反応前の質量の方がわずかに大きく,この質量欠損が核エネルギーとなる。原子力(核)エネルギーE(J)は,アインシュタインにより,特殊相対性理論の帰結として発表された質量とエネルギーの等価性により,質量 m(kg)と光速(c)の2乗の積として求められる。

$$E = mc^2$$

ここで,実際の数値を入れて,原子力(核)エネルギーの差を求めてみよう。

核分裂前の質量 ①(amu <sup>46</sup> )	核分裂後の質量 ②(amu)	質量欠損 ①-②(amu)
<sup>235</sup> U ; 235.124 中性子 1 個 ; 1.009	<sup>95</sup> Y ; 94.945 <sup>139</sup> I ; 138.955 中性子 2 個 2.018	
合計 ; 236.133	合計 ; 235.918	0.215

物質質量 1 モルの <sup>235</sup>U が物質質量 1 モルの中性子によってそれぞれ核分裂を起こしたとき,核分裂前の質量の総和は 236.133(g) であり,分裂して生じたものの総和は 235.918 (g),従って質量欠損は 0.215(g) である。放出されるエネルギーを求めてみると,

$$E(J) = 0.215 \times 10^{-3}(\text{kg}) \times (2.99792458 \times 10^8(\text{m/s}))^2 = 1.93 \times 10^{13}(\text{J})$$

である。

大規模な発電所の最大出力は 1000 メガワット時(1000MWh = 1GWh) である(単位の換算などについては次の節で解説する)が,

1 ワット秒(Ws)は, 1 ジュール(J)であり,

---

<sup>46</sup> amu は原子, 素粒子などの質量を表わす単位の 1 つで, 原子質量単位(atomic mass unit)。質量数 12 の炭素の同位体 <sup>12</sup>C の原子 1 個の質量の 1/12 に相当する。すなわち  $1.6605402 \times 10^{-24}\text{g}$  に等しい。

1 時間=60(分)x60(秒)=3600 秒なので,  $1\text{Wh} = 3600\text{Ws} = 1\text{J} = 3.6 \times 10^3\text{J}$

1 G=10<sup>9</sup>であるので,  $1\text{GWh} = 3.6 \times 10^{12}\text{J}$ である。

この発電所を 10 時間稼働させると, 発電できる電力量は,  $3.6 \times 10^{13}\text{J}$ となる。このエネルギーの大きさは, 1 モルの <sup>235</sup>U (235.124 g)全てが核分裂したときに放出されるエネルギーと同じオーダー(同程度ということ)になる。

## §2.4 エネルギーの単位

エネルギーには種類も多くあったが、単位も少々まごつき易いところがある。単位については、ただ「覚える」ということではなく、単位についての国際的な約束や、単位の換算をするときに役に立つ大きな数・小さな数の表わし方を知っておくと体系的に理解でき、覚えることも少なくなる。

そこで、まず、大きな数・小さな数の表わし方を記す（表 2-3）。

表 2-3 大きな数・小さな数の表わし方

SI 接頭語 <sup>47)</sup>	読み方	大きさ	10 の累乗	実数
E(大文字)	エクサ	100 京倍	$10^{18}$	1,000,000,000,000,000,000
P(大文字)	ペタ	1000 兆倍	$10^{15}$	1,000,000,000,000,000
T	テラ	1 兆倍	$10^{12}$	1,000,000,000,000
G	ギガ	10 億倍	$10^9$	1,000,000,000
M	メガ	100 万倍	$10^6$	1,000,000
k(小文字)	キロ	1000 倍	$10^3$	1,000
d	デシ	10 分の 1 倍	$10^{-1}$	0.1
c	センチ	100 分の 1 倍	$10^{-2}$	0.01
m	ミリ	1000 分の 1 倍	$10^{-3}$	0.001
μ	マイクロ	100 万分の 1 倍	$10^{-6}$	0.000001
n	ナノ	10 億分の 1 倍	$10^{-9}$	0.000000001
p(小文字)	ピコ	1 兆分の 1 倍	$10^{-12}$	0.000000000001
f	フェムト	1000 兆分の 1 倍	$10^{-15}$	0.000000000000001
a	アト	100 京分の 1 倍	$10^{-18}$	0.000000000000000001

10 のべき乗表記<sup>48)</sup>は、大きな数・小さな数は、実数で表わすより表記も容易で、ゼロの数の数え間違いもない便利な表記法である。単位では、10 のべき乗表記よりも「記号」を用いることが多い。10 のべき乗 ( $10^n$ ) で表わした数字でかけ算したり割り算し

<sup>47)</sup> SI 接頭語については、産業総合技術研究所・計量標準センターの下記 URL の表 3 に出ている。<https://www.nmij.jp/library/units/si/>

<sup>48)</sup> 指数表記ともいう。

たりすると、この標記法の便利さがよりわかるようになる。指数法則を簡単に復習しておこう。

$$10^n \times 10^m = 10^{n+m}$$

$$10^n / 10^m = 10^{n-m}$$

$$(10^n)^m = 10^{n \times m}$$

次に、国際的な単位についての約束を知っておこう。長さの単位として現在私たちはメートル(m)を使用している。しかし、伝統的な長さの単位として、一寸、一尺といった単位があることも知っていると思う<sup>49)</sup>。科学文献は世界の様々な人が読み、利用するものなので、それぞれの国で伝統的に使われていた単位を用いたのでは不便であったり、間違いを起こしたりもする。そこで、単位についての国際的な取り決めがある。これが国際単位系(SI<sup>50)</sup>)である。SIでは、7種類の物理量を基本量とし、それぞれに対応する7個の「基本単位」を決めている。

表 2-4 SI 基本単位

量	単位の名称	単位記号	次元の記号
長さ	メートル	m	L
質量	キログラム	kg	M
時間	秒	s	T
電流	アンペア	A	I
温度	ケルビン	K	Θ
物質質量	モル	mol	N
光度	カンデラ	cd	J

注) <sup>50)</sup>量の記号はイタリック体で次元の記号はサンセリフローマン体で常に表記される長さや電流の記述のように量にはいくつかの記号が使用される場合がある量の記号は推奨だけであるのに対し、単位のための記号と形式は必須であるという記述が本書中にある。(第5章参照) 次元の記号と指数は代数学のルールに則っている例を挙げると、面積の次元はL<sup>2</sup>、速度の次元はLT<sup>-1</sup>、

<sup>49)</sup> 米国では現在も mile, feet などが長さの単位として使われている。

<sup>50)</sup> SI は、フランス語の *Système international d'unités* に由来するが、これはメートル法がフランスの発案によるという歴史的経緯による。この国際単位系については、日本では、産業総合技術研究所・計量標準センターが取り扱いをしている。<https://www.nmij.jp/library/units/si/> 国際単位系についてビジュアルにまとめたパンフレット。

<https://www.nmij.jp/public/pamphlet/si/SI1002.pdf>

国際単位系を解説した日本語版も無料でダウンロードできる。

<https://www.nmij.jp/library/units/si/R8/SI8J.pdf>

<sup>51)</sup> 国際単位系(第8版, 2006), 日本語訳(産業総合技術研究所・計量標準センター訳・監修), p.15, 1.3 量の次元から引用。

<https://www.nmij.jp/library/units/si/R8/SI8J.pdf>

力の次元は $LMT^{-2}$ ，エネルギーの次元は $L^2MT^{-2}$  と記述される。

その他の物理量の単位については，物理学の方程式をつかって基本単位によって組み立てられる。組立単位の次元(dimension)は，組立単位と基本単位の関係式に従って，基本単位の次元の「べき乗」の積で表される。一般に，どんな物理量 $Q$ の次元も基本量の次元の積で次のように書ける。

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\varepsilon} N^{\zeta} J^{\eta}$$

ここで，指数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$  および $\eta$  は，正か負かゼロである小さい整数で，次元指数と呼ばれる。組立単位の次元が，組立単位と基本単位の関係について与える情報は，組立単位のSI単位がSI基本単位のべき乗の積で与えられる関係と同等である<sup>52)</sup>。

---

<sup>52)</sup> 同上

表 2-5 固有の名称とその独自の記号による SI 組立単位 (22 個)<sup>53)</sup>

量	単位の名称	単位記号	基本単位による表現
平面角	ラジアン	rad	$m \cdot m^{-1} = 1$
立体角	ステラジアン	sr	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率, 放射束	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンズ	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウェーバ	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}C$	K
光束	ルーメン	lm	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
吸収線量・カーマ	グレイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$ (=J/kg)
(各種の)線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$ (=J/kg)
酵素活性	カタール	kat	$s^{-1} \cdot mol$

まず, 仕事についてみてみよう。物理学では, 物体に力を加えて, その向きに動いたとき, 力は「仕事をした」という。

仕事(J) = 力<sup>54)</sup>(N) × 距離(m)

左辺 : (J)  $[m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}]$

右辺 : (N)  $[m \cdot kg \cdot s^{-2}] \times [m] = [m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}]$

<sup>53)</sup>産業総合技術研究所・計量標準センターの下記 URL の表 2 を引用。

<https://www.nmij.jp/library/units/si/>

<sup>54)</sup>力は, 静止している物体に運動を起し, また, 動いている物体の速度を変えようとする作用をいう。

力(N) = 質量 (kg) × 加速度 ( $m/s^2$ )

即ち力の単位(N)を基本単位による表現であらわすと, (N)  $[m \cdot kg \cdot s^{-2}]$

左辺と右辺の基本単位の次元は同じである。

【例題】

2.3 節①力学的エネルギーで出てきた位置エネルギーと運動エネルギーは下記の式で表せた。

$$\text{位置エネルギー } E_p = mgh$$

$$\text{運動エネルギー } E_k = (1/2)mv^2$$

両方の式について、左辺と右辺の基本単位の次元が等しくなることを確認せよ。

また、力学的エネルギー保存の法則（2.3 節①-3 参照）についても言及せよ。

---

次に、電力 P(W)について単位の観点から確かめておこう。表 2-5 では、電力という用語ではなく、「工率，放射束」という量を示す用語で出ている。

$$P(W) = I(A) \cdot V(V)$$

$$\text{左辺 : (W) } [m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}]$$

$$\text{右辺 : (A) } [A] \times [m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}] = [m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}]$$

左辺と右辺の基本単位の次元は同じである。

次に、エネルギー，仕事，熱量の単位ジュール(J)をみてみよう。基本単位による表現では $[m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}]$ である。次に、電力の単位ワット(W)に着目しよう。基本単位による表現では $[m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}]$ である。ジュール(J)とワット(W)の基本単位による表現を比較すると、ジュール(J)では秒(s)のべきがマイナス 2，ワットではマイナス 3 である。この両者の単位が基本単位の次元で等しくなるには、ワット(W)に秒(s)を掛けてやればよい。

$$(J) [m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}] = (W) [m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}] \times (s) [s]$$

ワットと秒の積の単位 Ws は電力量の単位である。つまり、仕事・エネルギーと電力量の関係は、

$$1(J) = 1(Ws)$$

となることがわかる。ちなみに、電気料金明細書では、使用した電力量の単位にはワット時(Wh)，1 時間(h)=3600 秒(s)の電力量，が使われている。即ち、

$$1(Wh) = 3600(J)$$

である。

先にみたように、仕事・エネルギーと電力量の関係は、

$$1(J) = 1(Ws)$$

である<sup>55)</sup>。

### 【例題】

2.3 節④光(電磁波)エネルギーでは、電磁波のエネルギーE(J)は、

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

であることを学んだ。また、同節の⑥原子力(核)エネルギーでは、原子力(核)エネルギーE(J)は、

$$E = mc^2$$

であることを学んだ。

基本単位による表現という考え方をを用いて、どちらの式の右辺も、ジュール(J) [m<sup>2</sup>·kg·s<sup>-2</sup>]と同じになることを確かめよ。

### 単位の換算

大きな数・小さな数の換算と、SI 組み立て単位の換算について上述したが、SI 基本単位でも組み立て単位でもないが、慣用的によく使われるエネルギーを示す単位、カロリー(cal)と電子ボルト (エレクトロンボルト, eV)についてみておこう。

カロリーは「熱量」をあらわす単位として現在でもよく使われている。特に、食品の栄養表示にはこの単位が使われている。カロリーの定義とジュールとの関係を以下に示す。一般的<sup>56)</sup>には、「1 カロリーは、純水 1g を 1 気圧下で 14.5~15.5° C にまで加温するのに要する熱量」と定義される。SI 単位系のジュールとは、

$$1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$$

の関係にある。この'4.2'という数値は、相等しいエネルギーの変化をもたらす仕事の量 A と熱量 Q との比であり、「熱の仕事当量」といわれる。熱の仕事当量を決定するための研究は、19 世紀前半に多くの科学者によって行なわれた。特に、電流が導体内を流

<sup>55)</sup> 電気の単位についてはこの節の最後のまとめを参照されたい。

<sup>56)</sup> 『理化学事典(第5版)』(岩波書店)「カロリー」によれば、次の5つがある。(1)気体を含まない純水 1g を 1atm の圧力下で 14.5°C から 15.5°C まで昇温させる熱量を 15 度カロリー、または水カロリーという。記号は cal<sub>15</sub>。任意の温度 t°C における同様な値の記号は cal<sub>t</sub>。1950 年の国際度量衡委員会は 1 cal<sub>15</sub> = 4.1855J と定義し、精密測定にはジュール(J)を用いるように勧告している。(2)国際蒸気表会議が 1956 年に採択したカロリー(table calorie)は記号 cal<sub>T</sub> で、1 cal<sub>T</sub> = 4.1868J と定義した。これの旧定義は当時の国際電気単位でのワット秒の 1/186 で 4.18605J にあたる。(3)1g の水を 1atm の圧力下で 0°C から 100°C に昇温する熱量の 1/100 を平均カロリーという。記号  $\overline{\text{cal}}$ 。1  $\overline{\text{cal}}$  = 4.1897J。(4)熱力学的な化学平衡論で用いられる熱化学カロリー。記号 cal<sub>thermochem</sub>。1 cal<sub>thermochem</sub> = 4.184J。(5)キロカロリー(kcal)を大カロリーとよんで Cal で表わすこともある。栄養学ではこれを単にカロリーとよぶのがむしろ普通である。

れる時に導体の電気抵抗によって発生する「ジュール熱」でその名を知られた、ジュール<sup>57)</sup>による羽根車による水の攪拌の実験（力学的エネルギーを熱エネルギーに変換）がよく知られている。

電子ボルト(eV)は素粒子物理などミクロの世界を扱う単位としてよく用いられる。「真空中で1ボルト(V)の電位差を通過している間に電子によって得られる運動エネルギー」と定義されている。SI単位系のジュールとは次の関係にある。

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J (ジュール)}$$

なお、エルグ(erg)という単位もエネルギーの単位として使われることがある。これは、ジュール(J)が長さの単位にメートル(m)を基準としているのに対して、エルグ(erg)ではセンチメートル(cm)を使用したものである。換算するための定数は必要ないが、次の関係がある。

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}, \quad 1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

電気の単位のまとめ<sup>58)</sup>

(A) 電気単位の定義に用いられる力学単位の定義：

**力の単位** — [MKS (メートル, キログラム, 秒)における] 力の単位は, 1 キログラムの質量に1 メートル毎秒毎秒の加速度を与える力である。

**ジュール(J) (エネルギーまたは仕事の単位)** — ジュールは, 1 MKS 単位の力[ニュートン]の作用点はその力の方向に1 メートルに等しい距離だけ移動するときになされる仕事である。

**ワット(W) (仕事率の単位)** — ワットは, 毎秒1ジュールに等しいエネルギーを生じさせる仕事率である。

(B) 電気単位の定義。国際度量衡委員会 (CIPM) は, 電気単位の理論的な大きさを定

---

<sup>57)</sup> 『理化学事典(第5版)』(岩波書店)「ジュール」[Joule, James Prescott]1818.12.24-1889.10.11. イギリスの物理学者。1834年ドルトンの下で教育を受け、数学、化学などを学んだ。ドルトンが会長であったマンチェスター文芸・哲学協会に出入して科学者の感化を受けた。電磁石やモーターに興味をもち、その効率を研究し、ファラデーに刺激されて、電流による発熱量を精密にしらべジュール熱の法則を導いた(1840)。つづいて電池ではなく発電機による電流の発熱量、すなわち熱の仕事当量Jの測定に入った。1845年には気体の原子論的な立場をとって、気体の膨張や圧縮の際の発熱量をはかり、Jの値を導いた。気体の自由膨張ではその温度が変わらないことを発見し(ジュールの実験),1847年にいたって羽根車をまわして水をかきまわす機械の実験によってJの値を測定した。この論文の発表はケルヴィンの注意をひき、おかげで学界の注目を集めてエネルギー保存則の確立に重要な役割を果たした。1861年いわゆるジュール-トムソン効果の測定を完成した。

<sup>58)</sup> 国際単位系 (第8版, 2006), 日本語訳 (産業総合技術研究所・計量標準センター訳・監修), p.57, 付録I, 「電気単位の定義」から引用。

<https://www.nmij.jp/library/units/si/R8/SI8J.pdf>

める次の提案を承認する：

**アンペア(A) (電流の単位)** — アンペアは、真空中に1メートルの間隔で平行に配置された、無限に小さい円形断面積を有する無限に長い2本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1メートルにつき力のMKS単位[ニュートン(N)]の $2 \times 10^{-7}$  倍の力を及ぼし合う一定の電流である。

**ボルト(V) (電位差及び起電力の単位)** — ボルトは、1アンペアの一定電流が流れている1本の導体の2点間で消費される電力が1ワットに等しいとき、その2点間に存在する電位差である。**オーム (電気抵抗の単位)** — オームは、起電力源を含まない1個の導体の2点間に加えられた1ボルトの一定電位差がこの導体中に1アンペアの電流を生じさせるとき、その2点間に存在する電気抵抗である。

**クーロン(C) (電気量の単位)** — クーロンは、1アンペアの電流によって1秒間に運ばれる電気量である。

※電子1個の電気量 =  $-1.602 \times 10^{-19}$ クーロン(C)。

従って、1クーロン(C)は電子 $6.242 \times 10^{18}$ 個分の電気量にあたる（ただし、電荷の符号は逆）。

**ファラド(F) (静電容量の単位)** — ファラドは、1クーロンに等しい電気量を印加されたとき、電極間に1ボルトの電位差が現れるキャパシタの静電容量である。

**ヘンリー(H) (インダクタンスの単位)** — ヘンリーは、一つの閉回路を周回する電流が1アンペア毎秒の割合で一様に変化するとき、内部に1ボルトの起電力が生じる閉回路のインダクタンスである。

**ウェーバ(Wb) (磁束の単位)** — ウェーバは、1回巻きの閉回路を貫く磁束を一様に減少させていって1秒間で消滅させるとき、1ボルトの起電力をそこに発生させる磁束である。

### 3 章. 化石燃料とその化学

#### §3.1 化石燃料

化石燃料(fossil fuel)は、その名のとおり、動植物などの遺骸が地質時代を通じて堆積物となり、地圧・地熱などにより変成してできた有機物である。石炭、石油、天然ガスなどがそれに当たる。

石炭：古生代の石炭紀などに生息した植物の遺骸などが地中に埋没し炭化したもの。

石油：石油はプランクトンなどが地下で高圧によって変化したもの。油井から採取されたままの石油を原油と呼ぶ。鉱床は、中生代(2.5 億年～6,500 万年前)が 55%，新生代第三紀(6,500 万年～160 万年前)が 31%で、全体の 86%を占め、古生代(5.7 億年～2.5 億年前)は 14%，新生代第四紀(160 万年前以降)は極めて少ない<sup>59)</sup>。

天然ガス：地中に埋もれた有機物がバクテリアによって分解されて生まれたもの。古生代 28%，中生代 44%，新生代第三紀 28%で、原油の場合に比べて古生代の地層にガス鉱床がよく発達している。ガス鉱床には原油の分解生成によるもののほかに、石炭が根源と考えられるものも多く、この点、石炭鉱床が古生代(石炭紀、二疊紀)によく発達していることと重要な関係がある<sup>60)</sup>。

ここに登場する、耳慣れない用語、古生代、中生代等は、地球の誕生後、最古の岩石または地層が形成されてから現在までの期間(地質時代<sup>61)</sup>)を区分する名称である。

代	紀	世	始まり (10 <sup>6</sup> 年前)	長さ
始生代 原生代	(先カンブリア時代)		4500 2500±	
古生代	カンブリア紀		564	↑ 3.2 億年 ↓
	オルドビス紀		500	
	シルル紀		436	
	デボン紀		409	
	石炭紀		360	
	ペルム紀		284	
中生代	三疊紀		242	↑ 1.8 億年 ↓
	ジュラ紀		208	
	白亜紀		140	
新生代	第三紀	晩新世	64	↑ 6200 万年 ↓
		始新世	54	
		漸新世	37	
		中新世	24	
		鮮新世	5	
	第四紀	更新世	1.7	
		完新世		

表 3-1

地質時代区分年表

『生物学事典(第4版)』(岩波書店)

「地質時代」から引用

<sup>59)</sup> 『石油便覧』 第4編第2章第1節 原油・天然ガス生産地の地質構造

<http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/part04/chapter02/section01.html>

<sup>60)</sup> 同上

<sup>61)</sup> 国際地質層序表は、日本地質学会のHPの下記URLからダウンロードできる。

<http://www.geosociety.jp/name/content0062.html>

原語版 <http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>

このように、**全ての化石燃料は最低でも数億年かけて生成されたもの**であり、もっと石油が必要だからと、すぐに作ることはできない。これが、再生産することのできない有限性の資源といわれる所以である。また、化石燃料が形成される条件を満たすことができる必要があるため、これらの資源が埋蔵している地域は地球上でも偏りがある。

エネルギー白書 2015 年版から、石炭 (図 3-1)・原油 (図 3-2)・天然ガス (図 3-3) の確認埋蔵量を見てみよう。

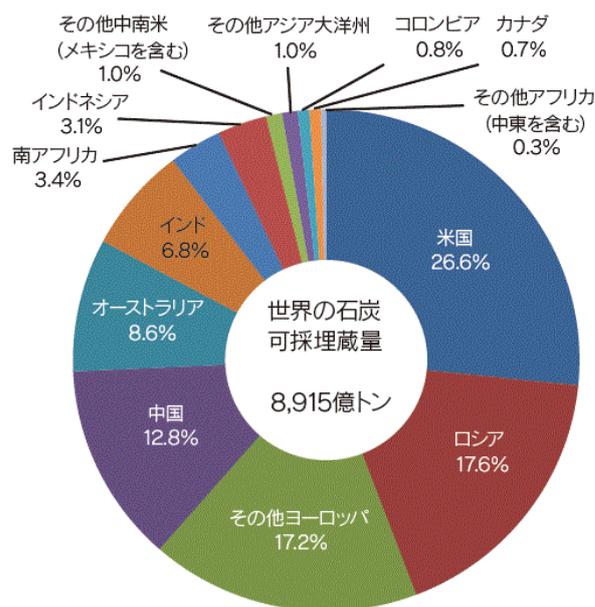


図 3-1 【第 222-1-29】  
世界の石炭可採埋蔵量 (2011 年末時点)

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」

(エネルギー白書 2015) (図【第 222-1-29】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-2-2.html>

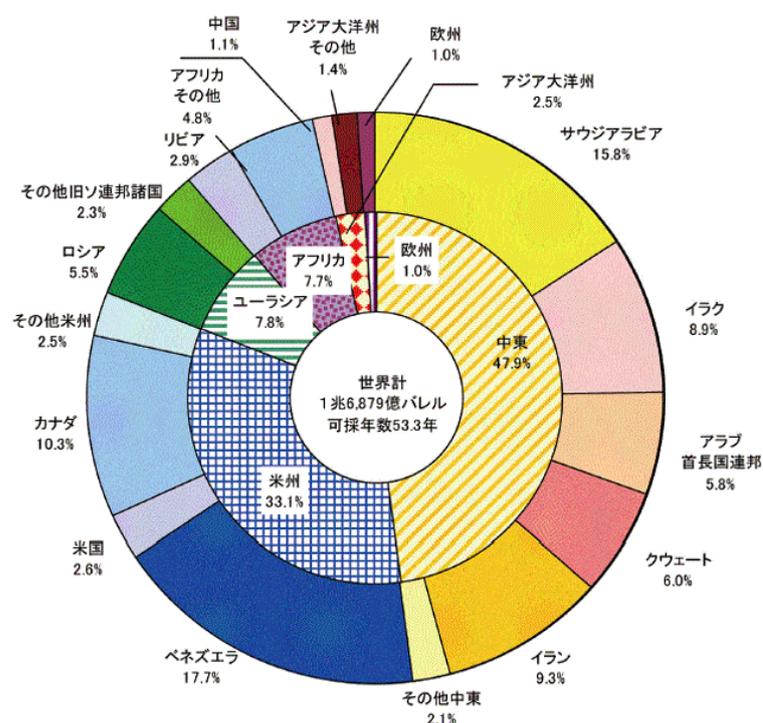


図 3-2 【第 222-1-1】  
世界の原油確認埋蔵量 (2013 年末)

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」

(エネルギー白書 2015) (図【第 222-1-1】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-2-2.html>

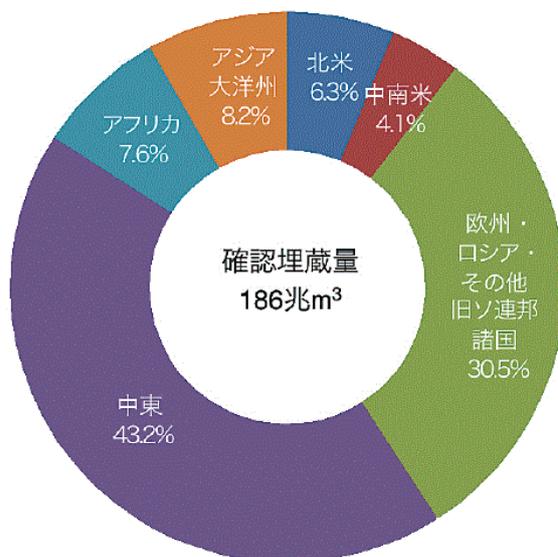


図 3-3 【第 222-1-10】  
地域別天然ガス埋蔵量 (2013 年  
末)

(出典) 経済産業省・資源エネ  
ルギー庁「平成 26 年度エネ  
ルギーに関する年次報告」

(エネルギー白書 2015) (図  
【第 222-1-10】)

[http://www.enecho.meti.go.jp/  
about/whitepaper/2015html/2  
-2-2.html](http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-2-2.html)

石炭は、北米、ユーラシア、ヨーロッパ、オーストラリア等など比較的広範囲に埋蔵しているが、石油は中東と北米・中米に偏在していることが分かる。

これらの化石燃料は、化学物質としてはどのようなものなのだろうか。

石炭: 黒色あるいは黒褐色の可燃性堆積岩であり、常温で固体の有機物である。炭素(C)、水素(H)、酸素(O)の他、窒素(N)や硫黄(S)などの元素も多く含み<sup>62)</sup>、特定の分子構造を持つ物質からできているわけではない。炭素含有量の差によって物理的・化学的構造が大きく異なり、泥炭(～60%)、亜炭(～70%)、褐炭(70～78%)、歴青炭(非粘結炭78～80%、弱粘炭80～83%、粘着炭83～85%、強粘炭85～90%)、無煙炭(90%～)に分類されている<sup>63)</sup>。

石油: 炭化水素を主成分とする、無数の化合物から成る液状の混合物である。原油には、炭素: 83～87%、水素: 11～14%、硫黄: 5%以下、窒素: 0.4%以下、酸素: 0.5%以下、金属: 0.5%以下が含まれる<sup>64)</sup>。炭素と水素以外の元素は、量的には炭素、水素に比べると少ないが、石油製品の品質に大きな影響を及ぼす。例えば、硫黄を含む化合物は、燃焼によって亜硫酸ガスとなって酸性雨、光化学スモッグ、PM2.5などにより大気環境を悪化させる原因となるため、石油を精製する工程において脱硫<sup>65)</sup>をする必

<sup>62)</sup> 窒素 (N)や硫黄(S)は、大気汚染物質である窒素酸化物(NOx)や硫黄酸化物(SOx)を発生させる原因となる。

<sup>63)</sup> 『理化学事典 (第 5 版)』(岩波書店)「石炭」

<sup>64)</sup> 『石油便覧』 第 4 編第 1 章第 1 節 石油の元素組成

<http://www.no.ej-group.co.jp/binran/part04/chapter01/section01.html>

<sup>65)</sup> 『石油便覧』 第 4 編第 4 章第 4 節 石油の生成⇒重質油の水素化脱硫に詳細が記載されている。<http://www.no.ej-group.co.jp/binran/part04/chapter04/section04.html>

要がある。石油を構成する炭化水素については、【コラム】「炭化水素」を参照されたい。石油は、含まれる分子の沸点の違いを利用して、蒸留装置により生成され製品となる（図3-4）。分子量の小さい、即ち炭素数の少ない炭化水素ほど沸点が低く、最も軽い成分は、メタン、エタン、プロパンなどの石油ガス留分となる。逆に、分子量が大きい、即ち炭素数が多い炭化水素ほど沸点が高くなり、最も重い成分は、重油やアスファルトなどの残油となる。自動車の燃料として使われるガソリンやポリエチレンなどの石油化学製品の原料となるナフサは、炭素数が4から10程度の炭化水素である。

### 蒸留装置のしくみ

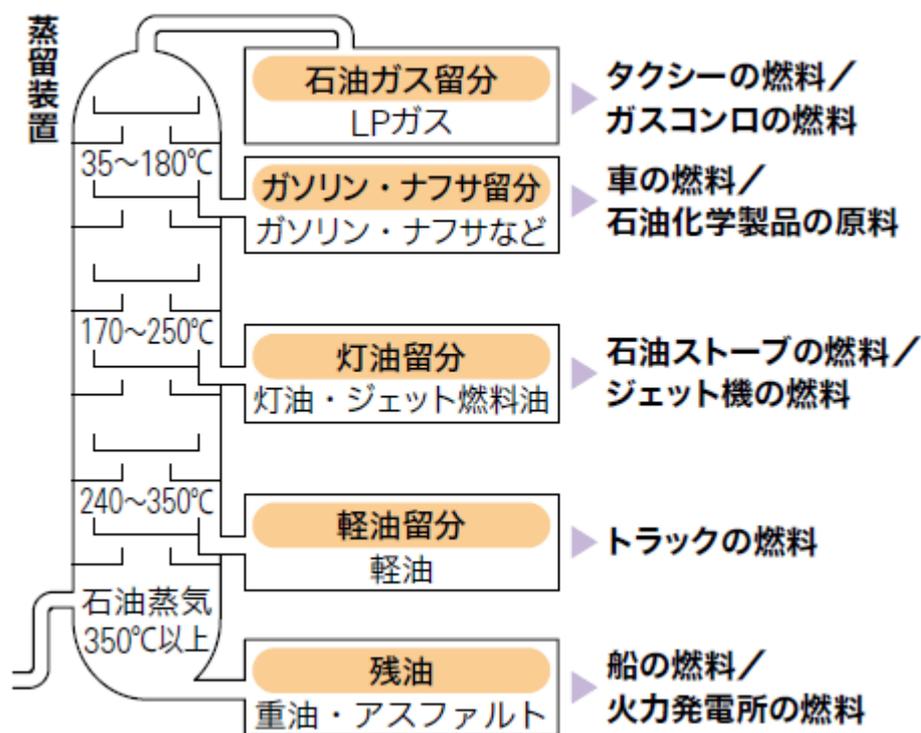


図 3-4 石油を精製する蒸留装置

(出典)資源エネルギー庁 エネルギー教育推進事業 副教材の作成(エネルギー教育)小学生向け副教材 かがやけ！みんなのエネルギー【教師用解説編】「ストーリー3 1, 電気やガスはどこからくるの？」 石油の精製

(図中、蒸留装置の中の数字は、分離される化合物の沸点の温度を示す)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-2-2.html>

天然ガス：炭素数の少ない炭化水素からなる気体である。炭素数 1 個のメタンを主成分とし、炭素数 2 個のエタン、3 個のプロパン等も含まれる。天然ガスを分離・精製し、マイナス 162℃に冷却して液化したものが液化天然ガス（LNG：Liquefied Natural Gas）である。液化することにより体積が約 600 分の 1 になり、運搬する

際にメリットとなる。都市ガスと称しているものは天然ガスであり、主成分はメタンである。

#### 【例題】

天然ガスは、化石燃料の中で一番クリーンだといわれる。その理由について調べよ。

---

#### 【応用】

LPG(Liquefied Petroleum Gas)は液化石油ガスのことであり、主成分がプロパンまたはブタンである。都市ガスを使用しない地域では、プロパンガスをボンベで設置して使用する。このボンベにはプロパンガスを液化したものが入っている。これは、常温・常圧では気体の石油ガスが、圧力をかけることで沸点よりも高い温度で液化することを利用して

ガス漏れを知らせるためのガス検知には LPG 用と LNG 用とがある。これは検知するガスの種類が異なるためである。両者は設置すべき位置（床からの高さ）が異なる。LPG 用は床に近い高さに設置し、LNG 用は高いところに設置する。この理由を説明せよ。

(ヒント；メタンとプロパンの分子量，アヴォガドロの法則，気体の密度)

---

#### 【発展】

化石燃料の埋蔵量は毎年減少していくが、資源探査技術や生産技術の開発及び発達により、近年新たに使用可能となったシェールオイルがあり、実用可能性は未定ではあるがメタンハイドレートなどの資源が見つかっている。①と②について答えよ。

①シェールオイルとメタンハイドレートについて、どのようなものを調べよ。

②シェールオイルの実用化のように新たな資源の実用化は、どのような分野にどのような影響を与えると考えられるか考察せよ。

---

#### 【コラム】炭化水素

(高校で「化学」(「化学基礎」ではない)を履修した人は、教科書の「有機化合物」の単元の中の炭化水素を併せて復習するとよい)

炭化水素は、炭素と水素だけからなる化合物の総称である。炭素は元素の周期表で14族の元素である。つまり、価電子が4個、4本の結合手をもつ。この炭素原子の4つの価電子が全て水素原子と結合する場合は、最もシンプルな炭化水素、メタン  $\text{CH}_4$  である。炭素原子の個数、その結合の仕方により、炭素と水素のたった2種類の元素で

無限種類の分子を作り出すことができる。そこで、炭化水素は、国際的な約束事により分類され、化合物の名前の付け方（命名法）が決まっている<sup>66)</sup>。学術雑誌に記載するときには、多くの場合はこの方法に従わなければならない。詳しいことは、脚注 66, または日本語で書かれた詳しいサイト<sup>67)</sup>を参照して欲しい。ここでは、最も基本的なことだけを記す。

まず、炭素原子のつながり方で、鎖状と環状の2つに分類できる。

鎖状、即ち炭素原子が閉じることなくつながった分子構造を持つ場合には、その炭素原子の鎖が枝分かれのない直鎖状ものと、枝分かれのあるものに分けることができる。ここでは、命名法の体系をイメージしやすい直鎖状のものだけを対象とする。

まず、炭素原子の結合の仕方が、単結合（構造式では炭素と炭素の結合が一本の結合で表わされる）だけか、二重結合（構造式では炭素と炭素の結合が二本の結合で表わされる）を含むか、三重結合（構造式では炭素と炭素の結合が三本の結合で表わされる）を含むかによる分類がある。表に示すように、単結合だけのときには化合物名の語尾が **-ane** となり、二重結合があるときには化合物の語尾が **-ene** となり、三重結合があるときには化合物の語尾が **-yne** となる。また、表 3-2 の一般式は化合物の化学式を炭素の数を **n** としたときのものを示しているが、アルケンでは二重結合が一つだけあるとき、アルキンでは、三重結合が一つあるときのものである。二重結合、三重結合が複数存在したり、これらの結合が混在したりする場合にはこの一般式は適用できない。

表 3-2 炭素原子の結合の仕方による分類

炭素と炭素の結合による分類	一般名（英語語尾）	一般式 (n は炭素数)	炭素数が3個(n=3)のときの化合物の例
単結合(C-C)のみ	アルカン (-ane)	$C_nH_{2n+2}$	プロパン (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )
二重結合(C=C)あり	アルケン (-ene)	$C_nH_{2n}$	プロペン (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )
三重結合(C≡C)あり	アルキン (-yne)	$C_nH_{2n-2}$	プロピン (C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> )

次に、炭素の数による名称の付け方の決まりについて記す（表 3-3）。IUPAC の規則は最も長い炭素直鎖の炭素の数に対応した下記表の数詞を化合物の頭につけて命名する。ただし、炭素の数が1から4までは、メタン(methane), エタン(ethane), プロパン(propane), ブタン(butane)とする。

<sup>66)</sup> IUPAC(International Union of Pure and Applied Chemistry)命名法 (1979年)

炭化水素についての URL [http://www.acdlabs.com/iupac/nomenclature/79/r79\\_2.htm](http://www.acdlabs.com/iupac/nomenclature/79/r79_2.htm)

<sup>67)</sup> 例えば, [pub.maruzen.co.jp/book\\_magazine/yuki/web/yuki-kagou/meimei.pdf](http://pub.maruzen.co.jp/book_magazine/yuki/web/yuki-kagou/meimei.pdf), [www.scc.kyushu-u.ac.jp/Yuki/classes/past\\_materials.../basic\\_org1.pdf](http://www.scc.kyushu-u.ac.jp/Yuki/classes/past_materials.../basic_org1.pdf)

表 3-3 炭素数による名称の付け方

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
mono	di	tri	tetra	penta	hexa	hepta	octa	nona	deca
モノ	ジ	トリ	テトラ	ペンタ	ヘキサ	ヘプタ	オクタ	ノナ	デカ

以上の規則をまとめ、アルカンについての具体名と、置換基としての名称を付けたものを示す。

<table border="1"> <thead> <tr> <th>炭素数</th> <th>命名</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>meth-</td></tr> <tr><td>2</td><td>eth-</td></tr> <tr><td>3</td><td>prop-</td></tr> <tr><td>4</td><td>but-</td></tr> <tr><td>5</td><td>pent-</td></tr> <tr><td>6</td><td>hex-</td></tr> <tr><td>7</td><td>hept-</td></tr> <tr><td>8</td><td>oct-</td></tr> <tr><td>9</td><td>non-</td></tr> <tr><td>10</td><td>dec-</td></tr> </tbody> </table>	炭素数	命名	1	meth-	2	eth-	3	prop-	4	but-	5	pent-	6	hex-	7	hept-	8	oct-	9	non-	10	dec-	+	<table border="1"> <thead> <tr> <th>結合の種類</th> <th>命名</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>アルカン</td><td>-ane</td></tr> <tr><td>アルケン</td><td>-ene</td></tr> <tr><td>アルキン</td><td>-yne</td></tr> <tr><td>アルキル基</td><td>-yl</td></tr> </tbody> </table>	結合の種類	命名	アルカン	-ane	アルケン	-ene	アルキン	-yne	アルキル基	-yl	→	<table border="1"> <thead> <tr> <th>炭素数</th> <th>アルカン</th> <th>アルキル基</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>メタン</td><td>メチル</td></tr> <tr><td>2</td><td>エタン</td><td>エチル</td></tr> <tr><td>3</td><td>プロパン</td><td>プロピル</td></tr> <tr><td>4</td><td>ブタン</td><td>ブチル</td></tr> <tr><td>5</td><td>ペンタン</td><td>ペンチル</td></tr> <tr><td>6</td><td>ヘキサン</td><td>ヘキシル</td></tr> <tr><td>7</td><td>ヘプタン</td><td>ヘプチル</td></tr> <tr><td>8</td><td>オクタン</td><td>オクチル</td></tr> <tr><td>9</td><td>ノナン</td><td>ノニル</td></tr> <tr><td>10</td><td>デカン</td><td>デシル</td></tr> </tbody> </table>	炭素数	アルカン	アルキル基	1	メタン	メチル	2	エタン	エチル	3	プロパン	プロピル	4	ブタン	ブチル	5	ペンタン	ペンチル	6	ヘキサン	ヘキシル	7	ヘプタン	ヘプチル	8	オクタン	オクチル	9	ノナン	ノニル	10	デカン	デシル
炭素数	命名																																																																				
1	meth-																																																																				
2	eth-																																																																				
3	prop-																																																																				
4	but-																																																																				
5	pent-																																																																				
6	hex-																																																																				
7	hept-																																																																				
8	oct-																																																																				
9	non-																																																																				
10	dec-																																																																				
結合の種類	命名																																																																				
アルカン	-ane																																																																				
アルケン	-ene																																																																				
アルキン	-yne																																																																				
アルキル基	-yl																																																																				
炭素数	アルカン	アルキル基																																																																			
1	メタン	メチル																																																																			
2	エタン	エチル																																																																			
3	プロパン	プロピル																																																																			
4	ブタン	ブチル																																																																			
5	ペンタン	ペンチル																																																																			
6	ヘキサン	ヘキシル																																																																			
7	ヘプタン	ヘプチル																																																																			
8	オクタン	オクチル																																																																			
9	ノナン	ノニル																																																																			
10	デカン	デシル																																																																			

次に、直鎖状アルカンの融点や沸点について示す（表 3-4）。

表 3-4 直鎖状アルカンの炭素数と物理的性質の関係

名称	分子式	沸点 (°C)	融点 (°C)	常温, 常圧での状態
メタン	CH <sub>4</sub>	-161	-183	gas
エタン	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-89	-184	gas
プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-42	-187	gas
ブタン	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-0.5	-138	gas
ペンタン	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	36	-130	liquid
ヘキサン	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	69	-95	liquid
⋮				
ヘキサデカン	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>		18	liquid
ヘプタデカン	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>		22	solid
オクタデカン	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>		28	solid

このように、炭素数が多いほど、即ち、分子量が大きいほど沸点や融点が高くなる。これは、化合物の一般的な性質として認められるものと同じである。石油の精製ではこの性質（炭素数と沸点の関係）を利用し、蒸留により分別している。

また、炭素数が多いほど、二重結合が多いほど、不完全燃焼によるススが出やすい。天然ガスがクリーンだといわれる理由の一つはこのことによる。

—————コラム終わり—————

### §3.2 燃焼

なぜ蒸気機関や火力発電では化石燃料を利用したのだろうか。それは、化石燃料は燃やすと熱を出すからである。化石燃料を燃やすとき起こる反応は「燃焼」である。燃焼では、反応によって熱を発生する。炭化水素を燃焼した場合、大気中の酸素と反応して、二酸化炭素と水が生じる。

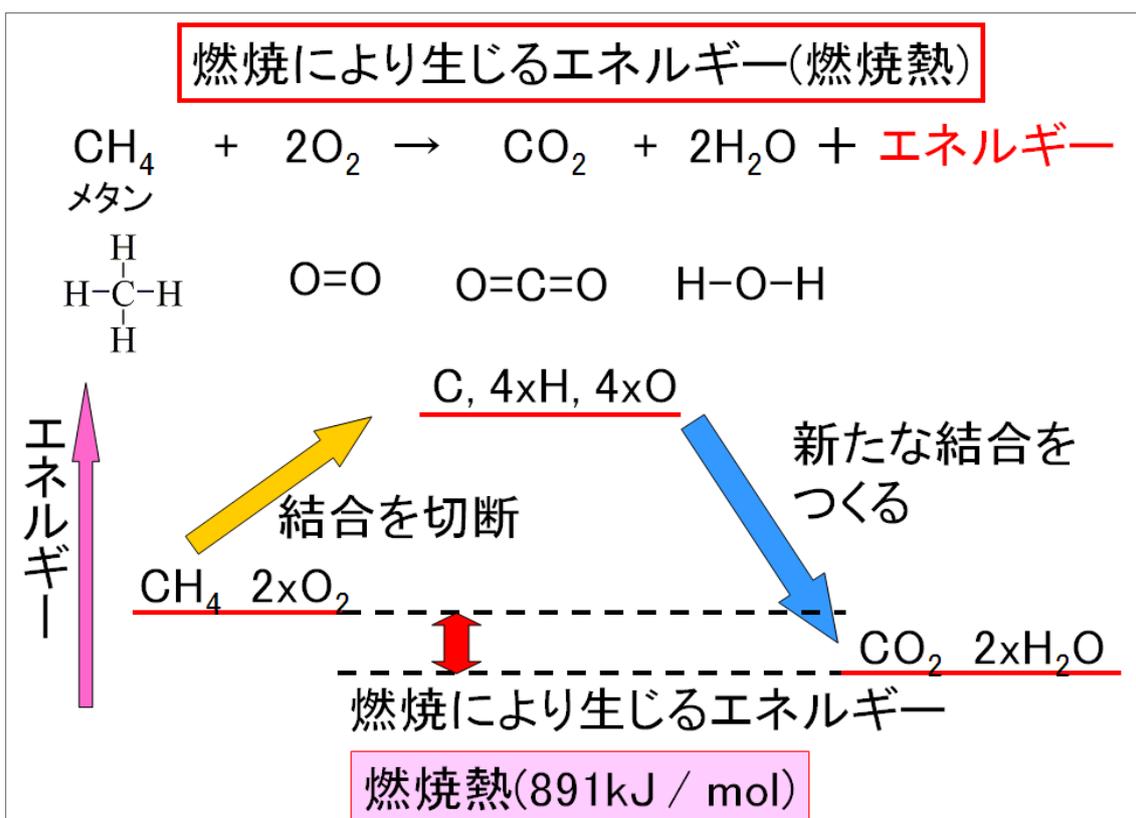


図 3-5 化石燃料の燃焼

燃焼の際に発生する熱エネルギーを燃焼熱という。定量的な意味で正確な定義は「物

質 1mol が完全燃焼するとき発生する熱量を燃焼熱<sup>68)</sup>という」である。メタンの分子量は 16.0 であるから<sup>69)</sup>、16.0 g のメタン (0℃, 1 気圧下で 22.4 L) を完全燃焼させたときに発生する熱量は 891 kJ/mol<sup>70)</sup>、これがメタンの燃焼熱である (図 3-5)。アルカンの一般式を用いて書き直してみる (化学反応式)。



### 【例題】

アルケン及びアルキンについても、一般式を用いて燃焼の化学反応式を書いてみよ。

図 3-5 は、最もシンプルな炭化水素、そして都市ガスの主成分であるメタンの燃焼を示している。この反応で何が起きているのかを考えてみよう。反応物であるメタンも、反応の結果生じた生成物の二酸化炭素と水も、常温・常圧で安定に存在している物質であるが、化学反応が起こるときには一旦原子間の結合を切断し、新たな結合を形成するという原子間の結合の組み替えが起こっていると考える。原子間の共有結合を切断するために必要なエネルギーを「結合エネルギー」(単位 kJ/mol) という。メタンの場合には、C-H 間の結合を 4 本切断しなければならない。酸素では O=O (酸素原子どおしの二重結合) を切断しなければならない。また、化学反応式から分かるようにメタン 1 分子に対して酸素は 2 分子必要である。つまり、個々の原子にばらばらにした状態にするには、

$$\begin{aligned} & (\text{C-H の結合エネルギー}(411 \text{ kJ/mol})) \times 4 \\ + & (\text{O=O の結合エネルギー}(494 \text{ kJ/mol})) \times 2 \end{aligned}$$

のエネルギー(2632 kJ/mol)が必要である。そして、ばらばらになった原子が新たに結合を形成するとき、今度は結合エネルギー分を放出する。即ち、二酸化炭素の生成については、C=O の結合エネルギー(799 kJ/mol)×2、水の生成については O-H の結合エネルギー(459 kJ/mol)×2 が 2 分子分放出される(3434 kJ/mol)。必要としたエネルギーと放出されるエネルギーとの差は 802 kJ/mol である。これが結合エネルギーから求められた燃焼で発生するエネルギーである。生成物を二酸化炭素と水、反応物をメタンと酸素とすれば、この過程は一般的に、

$$\text{(反応熱)} = \text{(生成物の結合エネルギーの和)} - \text{(反応物の結合エネルギーの和)}$$

<sup>68)</sup> 反応熱(heat of reaction)とは、化学反応に伴って、発生または吸収される熱量をいう。反応の種類によって生成熱(heat of formation)、燃焼熱(heat of combustion)、中和熱(heat of neutralization)、溶解熱(heat of dissolution)など、様々な名称で呼ばれる。即ち、燃焼熱は、燃焼という反応における反応熱ということもできる。

<sup>69)</sup> 原子量には、C=12.0, H=1.0 を用いている。

<sup>70)</sup> 燃焼熱などは、理科年表や各種データ集・資料集などで調べることができる。

とまとめることができる。

この考え方は、物質の反応で出入りするエネルギーを考えると広く適用することができる。

#### 【発展】

化石燃料に関わる環境問題として地球温暖化や海洋酸性化がクローズアップされている。これは、化石燃料を燃焼した結果大気中に排出される二酸化炭素に起因している。次の①～③について、調べよ。

※国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）の最新の評価報告書（2016年2月現在：第5次評価報告書）には必ず目を通すこと。

①大気中の二酸化炭素濃度は、産業革命前の2倍に達するといわれている。大気中の二酸化炭素の濃度について信頼できるデータを入手できるWEBのサイトを調べよ。その公開されているデータを基に、1750年以前と最近のものを実際に比較せよ。

②二酸化炭素濃度上昇と地球温暖化との関係について調べよ。（ヒント；温室効果ガス）

③海洋の酸性化とはどのようなことか調べよ。また、二酸化炭素濃度との関係を調べよ。

## 4 章. わたしたちの生活とエネルギー消費

### §4.1 エネルギーに関する情報はどこで調べるか

私たちは、自分の住む国日本がどの程度エネルギーを消費しているか、どのようなところにエネルギーを消費しているのかということについて意外と知らない。しかし、興味を持ったとき、疑問を持ったときにどのように調べればよいであろうか？そのようなことについて教育を受けた方は少ないのではないだろうか。この章では、政府機関が公表しているエネルギー関連の公的データはどこで入手できるのか、そのデータをどのように処理して自分の知りたい情報を得るのか、ということについて例を挙げてみる。もちろんこれは例であり、全てではないので、この章を参考に、是非自分でも興味を持ったことについて試してもらいたい。

まずエネルギー関係の公的データの入手先を知っておこう。公的データというと、ある種のアレルギーを起こす者もあるかもしれないが、個人で大規模な生データを得るための調査をするのは不可能である。意思の入らない、つまり処理をされていない生データを扱えばいいのである。

日本では、エネルギー関係の情報は、資源エネルギー庁が公表している<sup>71)</sup>。この章では、ビジュアルに情報をつかみ易い「エネルギー白書」と、基礎なデータ集である「総合エネルギー統計」についてみていく。

「エネルギー白書」<sup>72)</sup>は、エネルギーに関する年次報告であり、エネルギー政策基本法(平成 14 年法律第 71 号)第 11 条に基づき、政府がエネルギーに関して講じた施策の概況ついて、国会に提出する報告書である<sup>73)</sup>。年次報告なので毎年発行されている。どの年度のものも、エネルギーを巡る状況と対応としてその年度のトピックス、国内外のエネルギー動向、エネルギー需要に対して講じた施策の概況、で構成されている。どの年度も WEB 版(HTML)、PDF 版、概要版(PDF)が公開されており、見やすくまとめられたグラフと解説文とからなる。

次に「総合エネルギー統計」<sup>74)</sup>は日本のエネルギー需給の概要を示し、エネルギー・環境政策の企画立案やその効果の実測・評価などに貢献するとともに、エネルギー需要に対する定量的な理解や情勢判断を支援するために策定することを目的とし、日本に輸入され、あるいは国内で生産され供給された石炭・石油・天然ガスなどのエネルギー資

---

71) 資源エネルギー庁のホームページトップ <http://www.enecho.meti.go.jp/>

72) エネルギー白書 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>

73) 経済産業省のホームページ「お知らせ」

<http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150714001/20150714001.html>

74) 総合エネルギー統計

[http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html#headline2](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2)

源が、どのように転換され、最終的にどのような形態でどの部門や目的に消費されたかを定量的に示すものである。即ち、日本におけるエネルギー需給関連のデータを公開している。各年度とも、結果の概要(PDF)とエネルギーバランス表(エクセル表)が公表されている。「エネルギー白書」はこの基礎統計資料や他の統計資料等のデータをもとに作成される。エネルギー白書はよくまとまって見やすくはあるが、必ずしも私たちが知りたいと思っていることについてグラフ等にまとめたりしているわけではない。そこで、自分の知りたいことについてデータを得ようと思ったときには、基データに当たってみるのが一番よい。この章の4.3節では、基となる統計データから、情報を読み取る方法について、実例を通して説明する。

また、海外のエネルギー動向についての動向は、International Energy Agency (IEA)<sup>75)</sup>のEnergy Balance 統計データ<sup>76)</sup>が利用できる。エネルギー白書でもよく利用されている。どのようなことが調べたいかにより、適切な情報提供源を用いることが必要となるが、その際に、資源エネルギー庁が提供しているポータルサイト<sup>77)</sup>がよくまとまっているので便利である。

## §4.2 エネルギー白書を読む

まず「平成26年度エネルギーに関する年次報告」(エネルギー白書2015)を利用して実際に日本国内外のエネルギー動向をみてみよう。最初に世界のエネルギーについて見ておこう。図4-1(【第221-1-2】)は世界のエネルギー消費の推移を、石炭・石油・ガス・原子力・水力・新エネルギー<sup>78)</sup>・主にバイオマス燃料である「可燃性再生可能エネルギー他」の一次エネルギーについてエネルギー資源別に示したものである。この図は、「(出典)IEA「Energy Balance 2014」を基に作成」とあることから、前述のIEAの公表しているEnergy balance statisticsを基にしていることがわかる。この図から直接読

<sup>75)</sup> International Energy Agency トップページ <http://www.iea.org/>

<sup>76)</sup> IEA (Energy balance statistics) <http://www.iea.org/statistics/topics/energybalances/>

<sup>77)</sup> 資源エネルギー庁【統計ポータルサイト】各種データ(エネルギーに関する分析用データ)ポータルサイト <http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/analysis/>

<sup>78)</sup> 「新エネルギー」とは、太陽光発電や風力発電などの「再生可能エネルギー」のうち、地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出量が少なく、エネルギー資源の多様化に貢献するエネルギーを「新エネルギー」と呼んでいる。新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法(新エネ法)では、「技術的に実用段階に達しつつあるが、経済性の面での制約から普及が十分でないもので、非化石エネルギーの導入を図るために必要なもの」として、太陽光発電、風力発電、バイオマス発電、中小規模水力発電、地熱発電、太陽熱利用、バイオマス熱利用、雪氷熱利用、温度差熱利用、バイオマス燃料製造の10種類が指定されている。また、「新エネルギー」とは指定されていないが、技術革新の進捗や社会の需要の変化に応じて、「革新的なエネルギー高度利用技術」として普及促進を図ることが必要なものとして、ヒートポンプ、天然ガスコージェネレーション、燃料電池、クリーンエネルギー自動車等がある。

経済産業書・関東経済産業局 HP

([http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/enetai/index\\_shinene.html#e1](http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/enetai/index_shinene.html#e1))から引用。

み取れることは、1971年から2012年までの41年間に、世界のエネルギー消費量は約2倍に増えているということである。また、2012年については、最も消費量が多かったのは石油の31.4%であり、次いで石炭の29.0%であることがわかる。

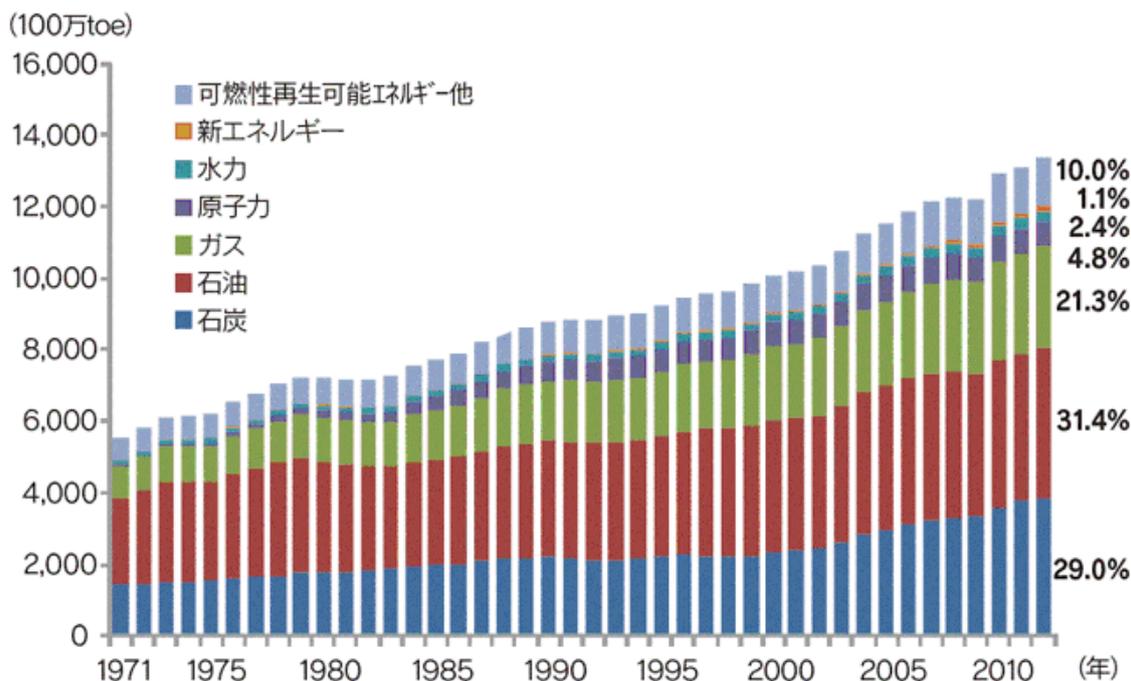


図 4-1 世界のエネルギー消費の推移

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」  
(エネルギー白書 2015) (図【第 221-1-2】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/1-1-1.html>

それでは、どのようなエネルギー資源の増加率が最も多いのだろうか。これを知るためには、この図だけでは不十分である。エネルギー白書の WEB 版で図の下に、図表番号と同じ名称でリンクされたエクセル表が付してあることがある。この図の場合にもそれがあるので、このエクセル表をみれば、グラフ作成に使用した数値を知ることができる。このエクセル表から、1971年から2012年までの間の、エネルギー資源別の増加率を求めてみると表 4-1 のようになる。

表 4-1 1971 年から 2012 年までの間の、エネルギー資源別の増加率

石炭	石油	ガス	原子力	水力	新エネルギー	可燃性再生可能エネルギー他	合計
269%	173%	318%	2218%	305%	3339%	216%	242%

ここから、どのエネルギー資源についても増加しているが、最も増加率が高かったのは新エネルギーであり、もっとも伸び率が小さかったのは石油であることがわかる。このような、図またはそこに付された数値データから読み取れる事実が何を意味するか、ということは、社会情勢等様々なことを考慮して解釈することになる。つまりデータを基に、意見形成をしたり、様々な方向に研究を発展させたりすることができるのである。エネルギー白書の文章部分には、読み取れることと、解釈とが簡潔に記載されている。

【例題】

どのような地域で増加が著しいのか、ということは、「エネルギー白書 2015」の図【第 221-1-1】に示されている。この図及び数値データから直接読み取れることはなんだろうか。また、「エネルギー白書 2015」の図【第 221-1-2】と合わせると、新たにどのようなことが読み取れるだろうか。

同様に、図 4-2(【第 221-1-3】)世界のエネルギー需要の推移を、産業用、輸送用、民生用、非エネルギー利用<sup>79)</sup>の部門別に最終エネルギー消費をみてみよう。

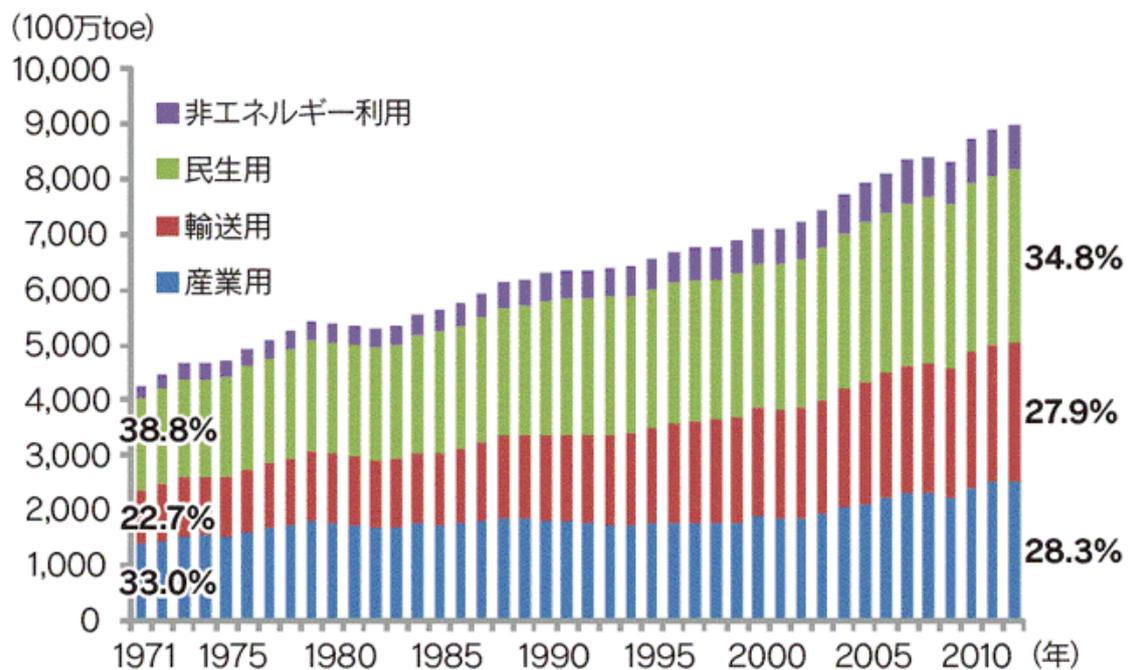


図 4-2 世界のエネルギー需要の推移

<sup>79)</sup> 「非エネルギー利用」とは、石油化学用ナフサ、建築用アスファルト、自動車用潤滑油等、エネルギー資源をエネルギー用途以外の原材料として用いる目的での利用である。  
<http://www.meti.go.jp/committee/downloadfiles/g40517b30j.pdf>

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」  
(エネルギー白書 2015) (図【第 221-1-3】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/1-1-1.html>

(注) 前表の消費量合計より少ないのは、本表には発電用及びエネルギー産業の自家使用等が含まれていないためである。

この図から直接読み取れることは、1971 年から 2012 年までの間に、産業用と民生用の占める割合はそれぞれ、4.7 ポイントと 4.0 ポイント減少し、輸送用は 5.2 ポイント増加していることである。グラフからはどの部門もエネルギーの消費は増加していることがわかるが、定量的なことは分かりづらい。そこで、前述したようにエクセルファイルの数値データを使って簡単な処理をしてみると、2015 年のエネルギー白書の文章に書かれているように「鉄鋼・機械・化学等の産業用エネルギー消費が 1.8 倍、家庭や業務等の民生用エネルギー消費が 1.9 倍であるのに対して、輸送用エネルギー消費は 2.6 倍も増加しました。」ということがわかる。

#### 【例題】

エネルギー白書 2015 の文章に書かれたことを、実際の数値データで確かめてみよ。

---

このような見方で、今度は「日本国内のエネルギー動向について知っておくべきこと」をピックアップしてみたい。図 4-3【第 211-1-1】によれば、日本国内でのエネルギー消費は 1973 年度から 2013 年度までの間に 1.3 倍に増加した。エネルギー消費量が最も多い部門は産業部門<sup>80)</sup>であるが、伸び率が最も大きな部門は業務他部門である。業務他部門は、事務所・ビル、デパート、卸小売業、飲食店、学校、ホテル・旅館、病院、劇場・娯楽場、その他サービス（福祉施設など）の 9 業種に大別される。

---

<sup>80)</sup>産業部門は農林水産鉱建設業と製造業の合計。

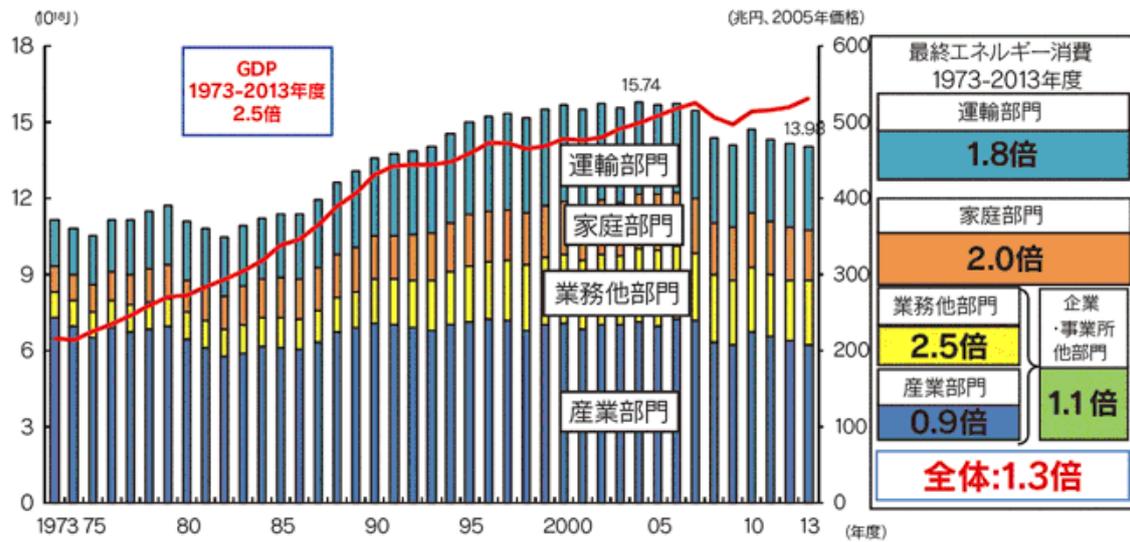


図 4-3 最終エネルギー消費と実質 GDP の推移

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」  
(エネルギー白書 2015) (図【第 211-1-1】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html>

図中赤線で書かれた国内総生産 GDP の変化と対応させてみると、GDP の増加とエネルギー消費は大まかに見ると同じような増加傾向を示しているが、もう少し詳細に見ると差違があることに気づく。この違いをエクセルファイルの数値データを使って、エネルギー消費量合計を実質 GDP で割り、GDP あたりのエネルギー消費量をグラフにしてみる (図 4-4)。

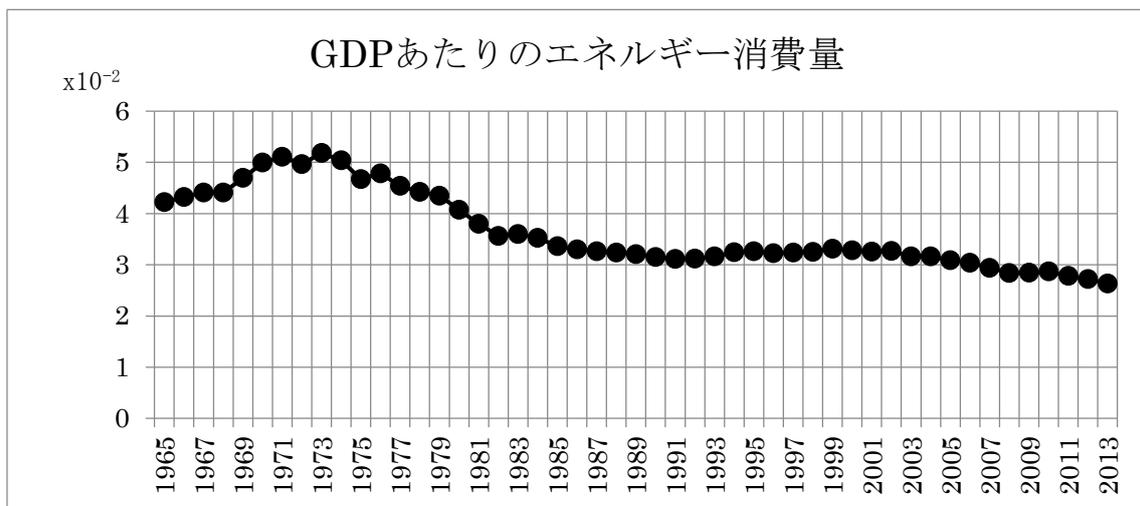


図 4-4 日本における GDP 当たりのエネルギー消費量

注) エネルギー白書 2015 の【第 211-1-1】の数値データをもとに作成した

このような簡単な処理を施すことにより、1973年をピークとして、GDP当たりのエネルギー消費量は減少し、1985年からほぼ20年間は大きな変化はなかったが、最近になって再びGDP当たりのエネルギー消費量は減少傾向にあることが分かる。このことから「エネルギー消費を抑制しながら、経済成長を果たすことができた」というエネルギー白書2015の第2部第1章の冒頭の部分の記載の根拠がわかる。

#### 【例題】

一番伸び率が大きかった、「業種他部門」について、エネルギー白書2015の図【第212-1-7】を用いて、1965年から1913年までで、どの業種が最もエネルギー消費の増加率が大きかったか。また、その理由はどのように解釈すればよいか。さらに、エネルギー白書2015の図【第212-1-9】を用いて、どのような用途が最もエネルギーが消費されているか、さらに、冷房用や暖房用としてのエネルギー消費量は2010年以降どのような傾向にあるかを調べよ。

#### 【例題】

1973年度から2013年度までの間にエネルギー消費が2倍になった「家庭部門」について、エネルギー白書2015の図【第212-2-4】を用いて、1965年度、1973年度、1913年度の用途別エネルギー消費の推移を分析せよ。

#### 【応用】

情報化社会を支えるIT機器や情報インフラは、統計データ上はどのようなエネルギー消費増加として現われるだろうか。あなたの考えたことを、実際のデータを基に確かめてみよ。

---

ここで日本と世界の比較をしてみよう。世界の中で、日本人はエネルギー消費が多い方なのだろうか、少ない方なのだろうか。図4-5は、国ごとの一次エネルギー供給量を人口で割った、一人当たりの一次エネルギー消費量を示したものである。

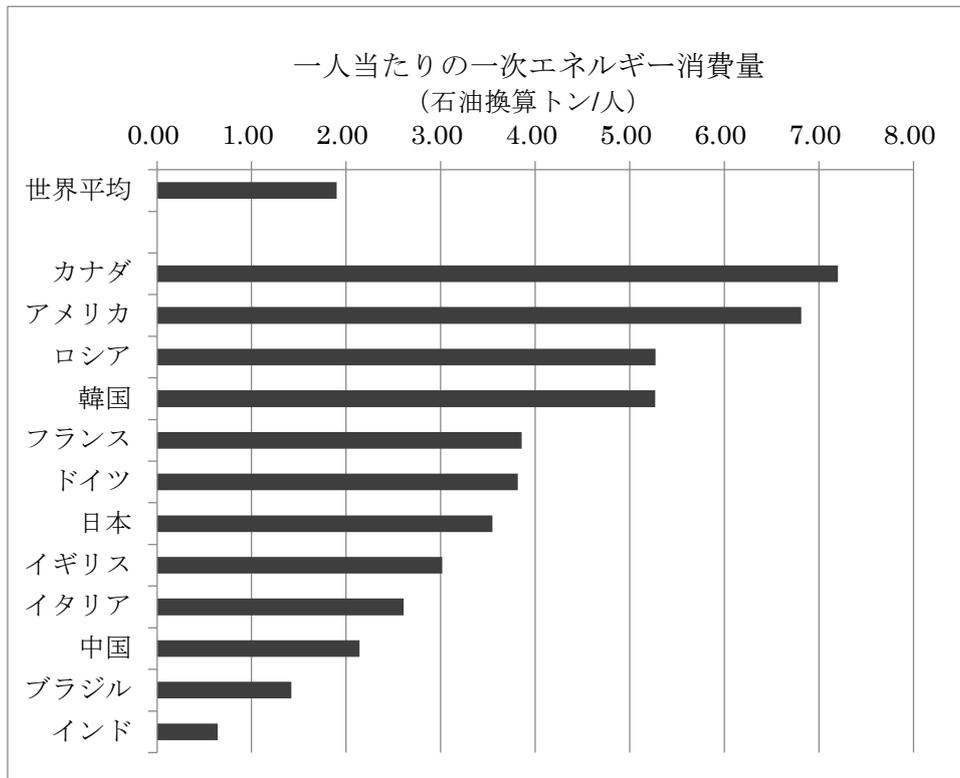


図 4-5 一人当たりの一次エネルギー消費量 (2012 年)

(出展) 電気事業連合会「原子力・エネルギー図面集 2015」の一人当たりの一次エネルギー消費量(2012) (IEA「ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES (2014 Edition)」「ENERGY BALANCES OF NON-OECD COUNTRIES (2014 Edition)」がデータの出典) の数値データを基に作成

一人当たりになると、世界平均の約 1.9 倍のエネルギー消費をしていることになる。最も一人当たりのエネルギー消費が多いのはカナダであり、世界平均の約 3.8 倍である。同様な工業先進国であるドイツとは、ほぼ同程度のエネルギー消費である。

日本におけるエネルギー使用の内訳は、前述した「総合エネルギー統計」(エネルギーバランス表)により知ることができる。しかし、この表は、一目見て分かるというものではない。そこで、エネルギー消費の流れが視覚的、直感的に分かるように工夫されたのが「エネルギーバランス・フロー図」(図 4-6)である。図の一番左側は石油や石炭などの一次エネルギーであり、左から右へと移っていき、一番右側は家庭や運輸・旅客など最終的なエネルギー消費を示している。そして、縦方向の幅(パイプの太さ)がエネルギー消費を定量的に反映している。例えば、発電(事業用と自家用)に使われる一次エネルギーの量に対して、電力として生産されるエネルギーは半分以下であることが目分量で分かる。これは、一次エネルギーが 100%電力に転換されるわけではなく、

「発電損失」が存在するためである<sup>81)</sup>。

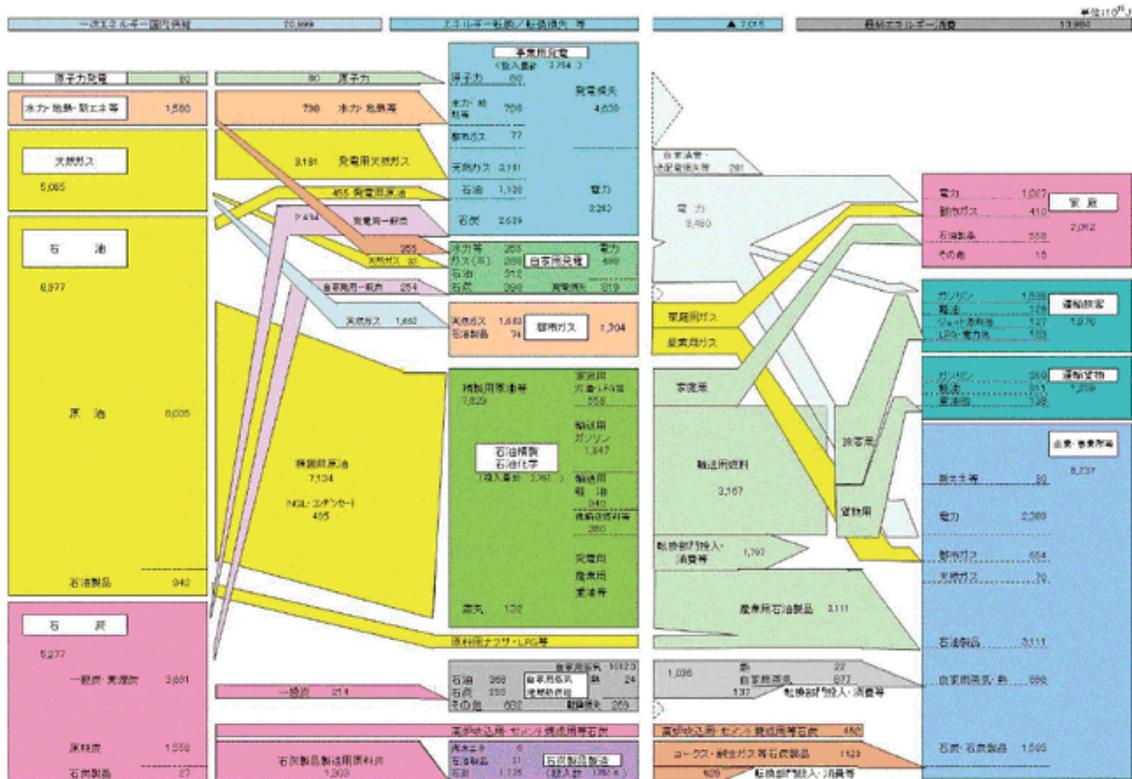


図 4-6 我が国のエネルギーバランス・フロー図概要

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」  
(エネルギー白書 2015) (図【第 211-1-2】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html>

この図は視覚的、直感的にわかりやすいが、細かい点については表現されていないことには留意すべきである。

次に日本の一次エネルギーエネルギー供給の現状を知っておこう (図 4-7)。

81) 数値での詳細な扱いについては第 4 章 4.3.1 節の「エネルギー転換」の解説を参照のこと。

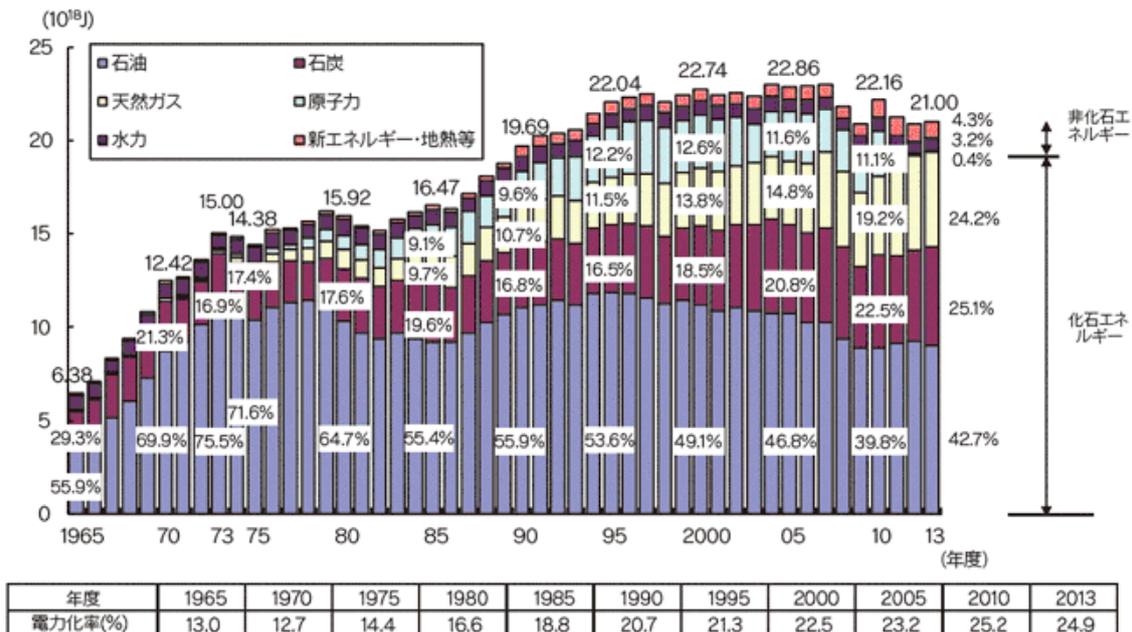


図 4-7 日本の一次エネルギー国内供給及び電力化率<sup>82)</sup>の推移

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」  
(エネルギー白書 2015) (図【第 211-3-1】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html>

1965 年から一貫して、日本の一次エネルギーの供給の中で石油が大きな割合を占めてきたことが分かる。しかし、1973 年には 75.5% が石油であったが、その後徐々に他の一次エネルギーの割合が多くなり、2010 年には 39.8% になった。これは、1973 年に起きた第 1 次石油ショックの際、あまりに石油依存率が高いことが危惧され、政策的に石油に替わるエネルギーへと転換した結果である。近年最も一次エネルギーに占める割合が高くなってきたのは天然ガスである。石油・石炭・天然ガスはいずれも化石燃料であり、原子力・水力・新エネルギー(太陽光、風力、バイオマス、地熱など)は非化石エネルギーである。

最終エネルギー消費量に占める電力消費量の割合を示す電化率は、1965 年から高くなり続けている。一次エネルギーを変換して得られる二次エネルギーである電気は、安全且つ使いやすく、また電化製品も豊富になってきたため家庭での需要が大幅に伸び、またオフィスなどの業務用としても需要が増加しているためであると考えられる。

#### 【応用】

1973 年、2000 年、2010 年、2013 年における、化石エネルギーと非化石エネルギー

<sup>82)</sup> 「電力化率」は、資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」の最終エネルギー消費量に占める電力消費量の割合を示す。

の使用比率をエネルギー白書 2015 の【第 211-3-1】のエクセル表の数値を用いて求めよ。求めた使用比率の推移から、どのようなことが考えられるだろうか。社会情勢等を調べて考察せよ。

次に、日本は自国でどの程度エネルギーをまかなっているのか、即ちエネルギー自給率について知っておこう（図 4-8）。

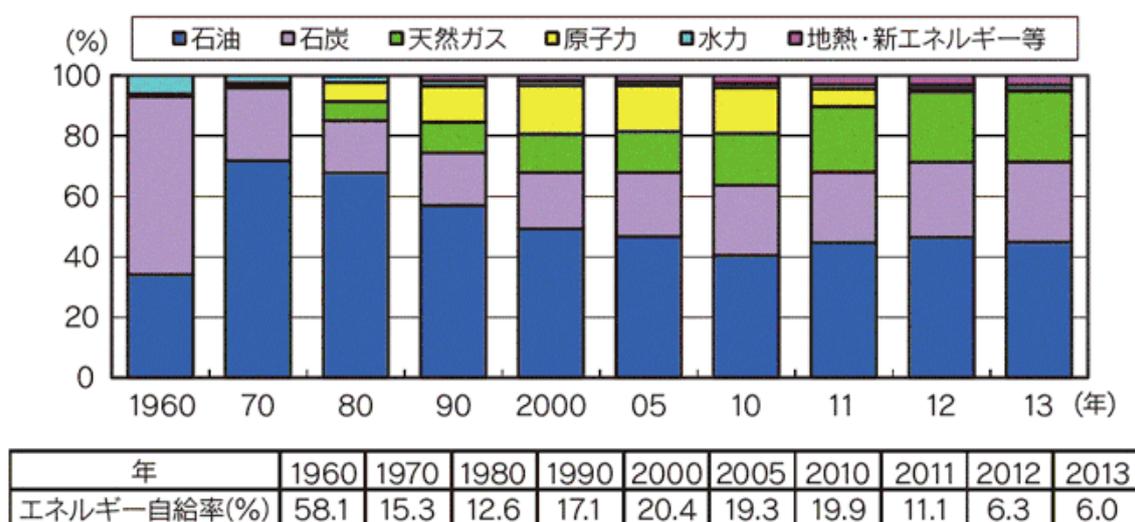


図 4-8 日本のエネルギー国内供給及び自給率の推移

(注 1) IEA は原子力を一次エネルギー自給率に含めている。

(注 2) エネルギー自給率 (%) = 国内産出 / 一次エネルギー供給 × 100。

(注 3) 2013 年は推計値である。

(出典) IEA 「Energy Balances of OECD Countries 2014 Edition」を基に作成

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」(エネルギー白書 2015) (図【第 211-4-1】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html>

ここで注意しておきたいのは、IEA では原子力を一次エネルギー自給率に含めている点である。従って 2000 年から 2010 年までのエネルギー自給率が約 2 割程度であるのは原子力の割合が相当にあるためである。確定値である 2012 年を見ると、原子力を使用していない場合の日本のエネルギー自給率はわずか 6% である。

それでは諸外国でのエネルギー自給率はどうなのだろうか。図 4-9 に示すのは、2013 年のエネルギー白書の第 1 章第 1 節の図【第 111-4-1】であり、2010 年における各国

のエネルギー自給率を比較したものである。

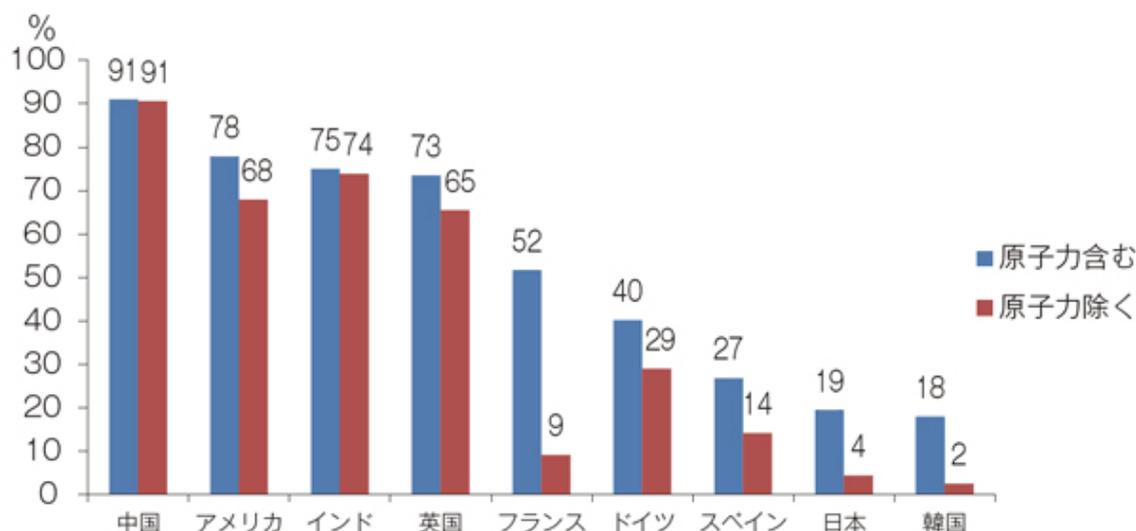


図 4-9 各国のエネルギー自給率の比較 (2010 年)

出典) IEA "Energy Balance of OECD Countries 2012"  
IEA "Energy Balance of Non-OECD Countries 2012"

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 24 年度エネルギーに関する年次報告」  
(エネルギー白書 2013) (図【第 111-4-1】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/1-1-1.html>

#### 【応用】

図 4-9 の 2010 年における各国のエネルギー自給率を見て、それぞれの国の特徴を読み取れ。また、読み取れることを基にして、これらの国を 3 つあるいは 4 つのカテゴリーに分類する場合、どのような分類の基準が考えられるか。

日本のエネルギー自給率の低さは、ほとんどの一次エネルギーを外国から輸入していることを意味する。それでは、日本は一次エネルギーをどこから得ているのであろうか。

原油 (図 4-10)、液化天然ガス(LNG) (図 4-11)、石炭 (図 4-12) の主要な化石燃料についてその輸入先を示す。

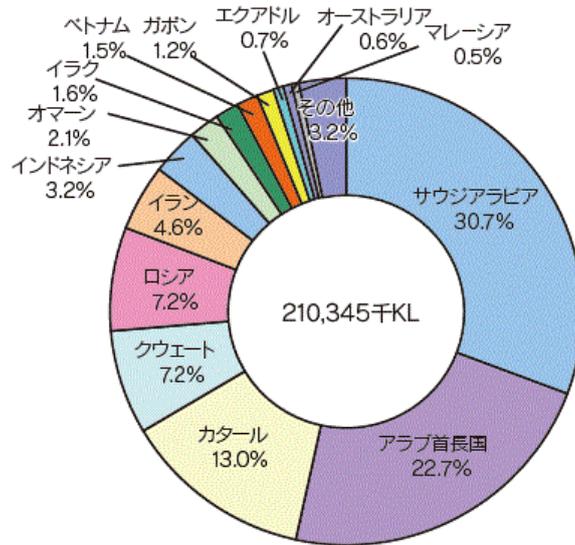


図 4-10 日本における原油の輸入先（2013 年度）  
 （出典）エネルギー白書 2015（図【第 213-1-3】）

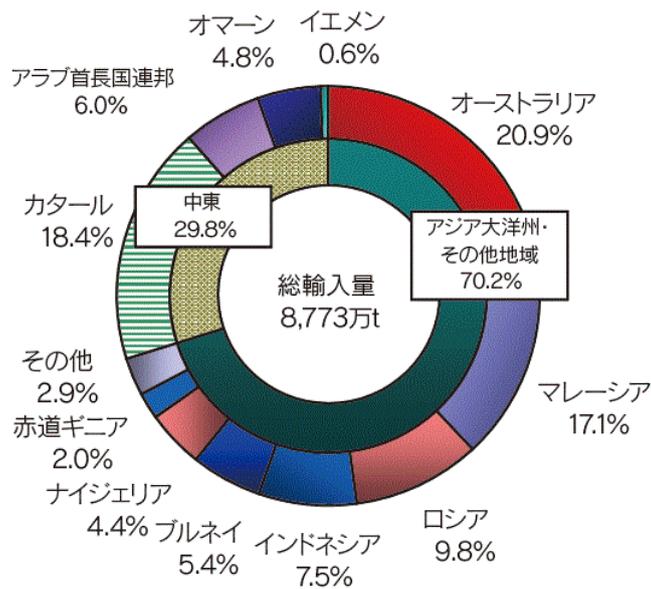


図 4-11 日本における液化天然ガス(LNG)の輸入先（2013 年度）  
 （出典）エネルギー白書 2015（図【第 213-1-9】）

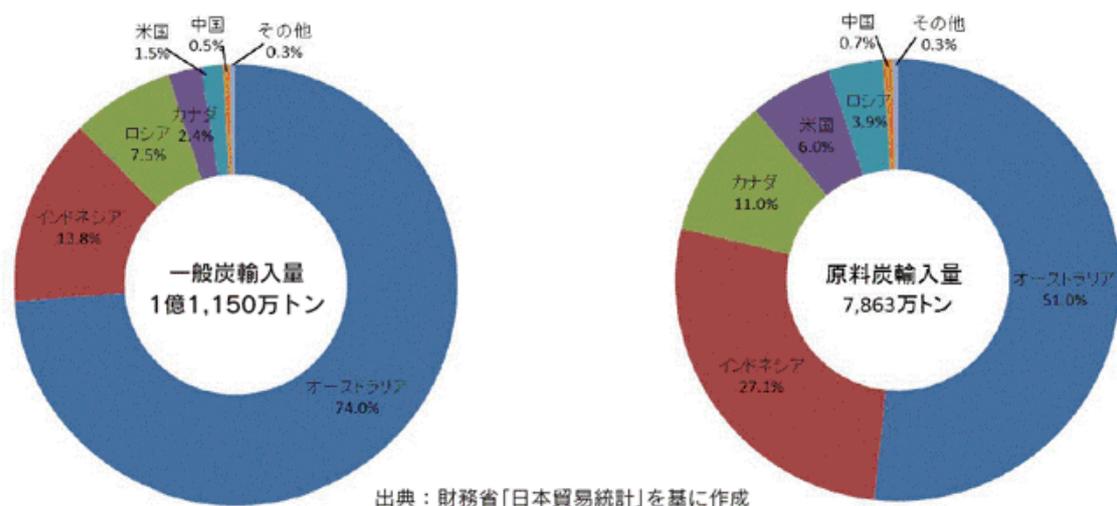


図 4-12 日本における石炭の輸入先 (2013 年度)

左：一般炭<sup>83)</sup>， 右原料炭<sup>84)</sup>

(出典) エネルギー白書 2015 (図【第 213-1-20】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-3.html>

原油については中東への依存度が極めて高いことが分かる。一方、LNG は中東依存度が約 3 割であり、7 割はオーストラリア、マレーシア、ロシアなどアジア太平洋諸国を主とした様々な国から輸入していることが分かる。石炭については、オーストラリアからの輸入が最も多く、半分以上を占めている。

次に一次エネルギーを変換して作られる二次エネルギー、特に電力についてみてみよう。図 4-13 は、電力の最終消費の推移を、運輸・産業・民生の 3 つの部門に分けて示したものである。運輸部門では 1965 年から消費電力に大きな変動はないが、民生部門では一定して増加をしており、2013 年には 1965 年の約 15 倍もの電力を消費している。一方、産業部門では、1991 年が電力使用のピークで、1965 年の約 3.8 倍であったが、その後電力消費は減少に転じ、2013 年には約 2.8 倍になった。このように民生部門での電力消費の増加は著しく増加しており、2013 年には電力消費において民生部門の占める割合は 7 割近くにまでなった。

83) 一般炭は、主に発電用のボイラー燃料として用いられている。

84) 原料炭は、主に高炉製鉄用コークス製造のための原料として用いられている。

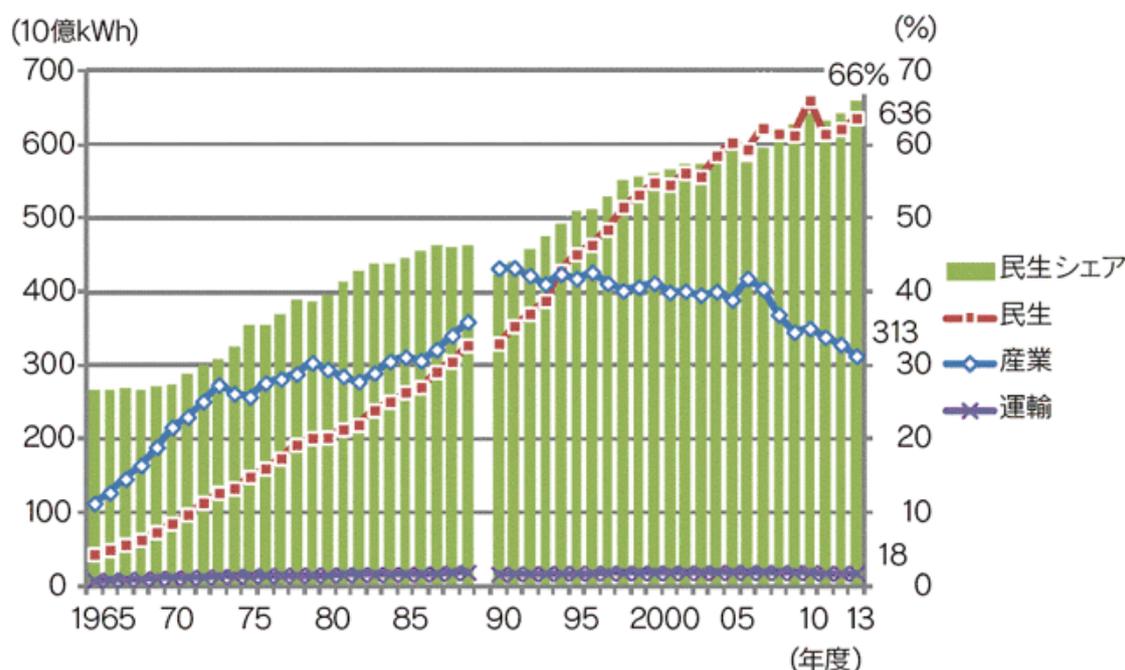


図 4-13 部門別電力最終消費の推移

左縦軸が、民生・産業・運輸部門での消費電力量

(出典) 経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」  
(エネルギー白書 2015) (図【第 214-1-2】)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-4.html>

電気は非常に使いやすいエネルギーではあるが、貯蔵しておくことができない。貯蔵するためには、リチウムイオン電池に充電するなど蓄電システムが必要となる。また、電力は、化石燃料のように火をつければすぐに熱が得られ(エネルギー生産がなされ)、火を消せば即座にエネルギー生産が止められるというわけにはいかない。このため、電力の生産は需要を見込んで行なわなければならない。そこで、最も電力需要が多いことが予想される夏の一日の電力使用量の推移(図 4-14)や、1 年間の電力使用量の推移(図 4-15)を調査し、把握しておく必要がある。さらに、例えば、原子力発電は、大出力の電力を安定して供給できるという長所がある一方、需要に合わせて短期間に出力を変化させることができないという短所もある。太陽光発電は、自然の恵みを利用した再生可能エネルギーであるが、一方、発電できるのは太陽光の利用できる昼間で天気のよいときに限定され、また太陽から受け取るエネルギー密度に限度があるため、大きな出力を必要とする場合は広い面積を必要とするという短所もある。例示したように、それぞれの発電方式には長所と短所がある。このような発電方式の特徴を考慮して電力生産計画はなされなければならない。

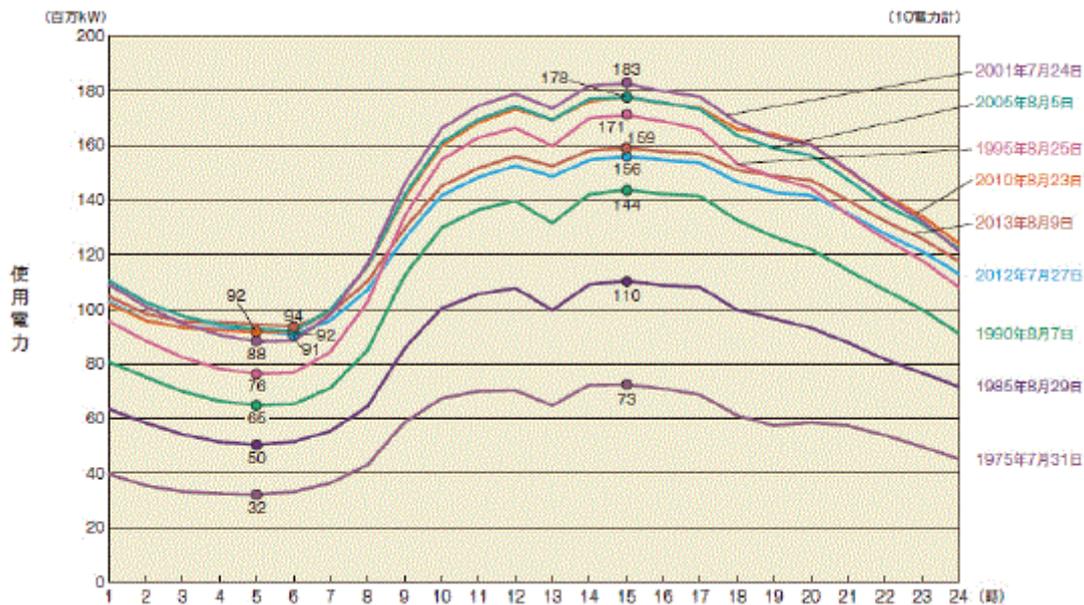


図 4-14 夏季 1 日の電気使用量の推移（年間最大電力を記録した日）（10 電力<sup>85</sup>計）

（注）1975 年度は沖縄電力を除く。

（出典）経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書 2015）（図【第 214-1-3】）

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-4.html>

図 4-14 を見ると分かるように、一日の間の電力使用力は大きく変化し、最も多い午後 15 時は最も少ない午前 5 時の約 2 倍の使用量となっている。この一日の中での電力使用量の変化をできるだけ小さくするようにと考えられたのが、電力消費の少ない深夜の電力の使用である。例えば、エコキュート<sup>85</sup>、EV（電気自動車）、蓄電システム、揚水発電<sup>86</sup>、などの例を挙げることができる。例示した中で、前者 2 つはピークを下げる工夫ではなく、新たな電力需要を作りだし、谷の部分を持ち上げて一日の使用電力変動を少なくしようという考え方である。後者 2 つはピーク時に電力を供給するために谷の時間帯の電力を使用するという考え方である。

<sup>85</sup> 北海道電力（株）、東北電力（株）、東京電力（株）、中部電力（株）、北陸電力（株）、関西電力（株）、中国電力（株）、四国電力（株）、九州電力（株）、沖縄電力（株）

<sup>86</sup> 揚水発電は、主として地下に造られる発電所とその上部、下部に位置する 2 つの池から構成される。昼間のピーク時には 上池に貯められた水を下池に落として発電を行い、下池に貯まった水は電力消費の少ない夜間に上池にくみ揚げられ、再び昼間の発電に備える。このように揚水発電は、池の水を揚げ下げして繰り返し使用する発電方式。

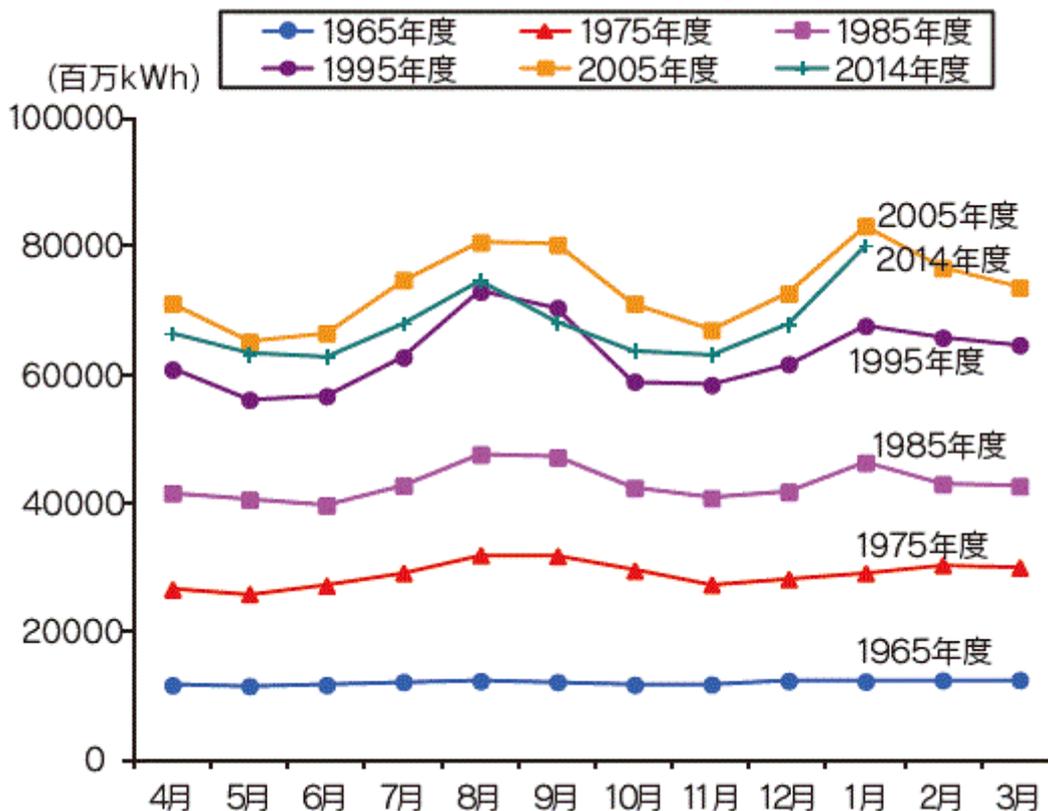


図 4-15 1年間の電気使用量の推移（10 電力計）

（注）1975、1985 年度は沖縄電力を除く。

（出典）経済産業省・資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書 2015）（図【第 214-1-4】）

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-4.html>

図 4-15 を見ると、1965 年には 1 年を通して電力使用量はあまり大きな変動はない。しかし、次第に夏季の 8 月と冬季の 1 月にピークが生ずるようになった。そのピークと谷の差は 1995 年からかなり大きなものになった。1995 年には夏のピークが際立っているのに対し、2000 年以降は冬のピークが大きくなってきた。これは、夏季の冷房は電気に依らなければならなかったため早くから電力使用のピークとして表われ、2000 年以降は、冬季の暖房にもエアコンやホットカーペットを用いたり、石油ストーブにもファンヒーターなど電力を必要とするタイプのものが多く使われたりするようになったためと推測される。

### §4.3 統計データから情報を読み取る

(『総合エネルギー統計』など基本データの利用例)

日本は、いったいどれだけの量のエネルギーをどのようなところで消費しているのだろうか？「日本は、必要とするエネルギーの多くを輸入に頼っている」という事実はよく報道されるが、その具体的な“数字”は、筆者の知る限り全くと言っていいほど報道されていない。家電量販店やホームセンターからは蛍光灯を利用する照明機器が姿を消し、「省エネルギー」を謳った LED 照明機器が同じ売り場を占領するようになったが、「年間〇×円の電気代削減になります」という宣伝文句は目立つものの、家庭における総電力消費量がどれだけ減少することになるのかはわからない<sup>87)</sup>。そもそも、照明機器によるエネルギー消費が家庭においてどのくらいの割合を占めているのか、が、一般には知られていない。

また、東日本大震災以降、日常的な報道においても「再生可能エネルギー」という言葉はよく聞かれるようになったが、一体どのようなものが「再生可能」なのだろうか？日本の持続可能性 (sustainability) を考える際、「日本において再生可能なエネルギー」の量を知ることは極めて重要であるが、それはいったいどれだけの量であって、今日の日本が日々消費しているエネルギー量に対してどのくらいの割合になるのだろうか？このような、私たちが知っておくべきでありながら、明示的な数値はこれまでほとんど語られてこなかった。

この節では、エネルギーに関する基本統計データ（いわゆる生データ）を用いて、自ら情報を得るということを試みてみよう。

#### §4.3.1 エネルギーバランス表を読み解く<sup>88)</sup>

表 4-2 は、資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』において公表されている 2013 年度の日本のエネルギーバランス表（確報値の Excel ファイル）から、日本におけるエネルギー需給の全体像を理解するために必要な部分を抜き出したものである。この表は、日本において 2013 年度に供給・転換並びに消費されたエネルギーの量を、石炭／石炭製品／原油／石油製品／天然ガス／都市ガス／再生可能・未活用エネルギー／事業用水力発電／原子力発電／電力／熱というエネルギー資源分類ごとに同一のエネルギー単位 (TJ ; tera joule (テラジュール) すなわち  $10^{12}$  J) に換算して集計したものである。各行で示されている項目は、国内供給／エネルギー転換／最終エネルギー消費の三つの大項目に大別されており、大項目のそれぞれが複数個の小項目にさらに分類されている。

<sup>87)</sup> 単位電力量当たりの電気料金は電力会社その他の人為的要因によって決められているだけなので、「年間〇×円の削減」という表現自体が相対的なものであり、絶対的な意味は持ち得ない。

<sup>88)</sup> 本節と次節は、寺内衛・寺内かえで『エネルギー環境教育研究』（日本エネルギー環境教育学会誌）第 10 巻，第 1 号，pp45-54(2016)から引用。

表4-2. 2013年度のエネルギーバランス表 (TJ)

	石炭	石炭製品	原油	石油製品	天然ガス	都市ガス	再生可能・未活用エネルギー	事業用水力	原子力	電力	熱	合計
<b>一次エネルギー供給</b>	5,249,399	64,217	8,028,993	2,016,385	4,953,470	0	908,577	671,641	80,002	0	0	21,972,684
国内産出	0	0	24,164	0	128,831	0	908,577	671,641	80,002	0	0	1,813,214
輸入	5,249,399	64,217	8,004,829	2,016,385	4,824,639	0	0	0	0	0	0	20,159,470
総供給	5,249,399	64,217	8,028,993	2,016,385	4,953,470	0	908,577	671,641	80,002	0	0	21,972,684
輸出	-56	-35,736	0	-1,175,492	0	0	0	0	0	0	0	-1,211,285
供給在庫変動 (+取崩 / -積増)	0	-1,036	6,143	100,856	132,011	0	0	0	0	0	0	237,973
<b>エネルギー転換</b>	-4,688,325	1,095,565	-8,069,222	5,942,040	-5,039,248	1,067,794	-862,134	-671,641	-80,002	3,396,479	899,634	-7,009,059
事業用発電	-2,433,680	-194,820	-454,903	-672,863	-3,180,742	-77,387	-170,193	-627,831	-80,002	3,262,618	0	-4,629,802
自家発電	-254,158	-136,172	-53	-311,940	-31,748	-228,669	-310,965	-43,810	0	498,094	0	-819,422
産業用蒸気	-213,975	-41,426	-66	-367,656	-22,153	-265,368	-370,475	0	0	0	1,012,264	-268,854
地域熱供給	0	0	0	-90	0	-15,929	-3,908	0	0	-3,878	23,900	94
一般ガス製造	0	0	0	-74,127	-1,661,654	1,703,910	0	0	0	0	0	-31,871
石炭製品製造	-1,724,586	1,708,864	0	-20,769	0	0	-6,231	0	0	0	0	-42,722
石油製品製造	0	0	-7,629,064	7,690,542	5,446	0	0	0	0	0	-131,593	-64,669
他転換・品種振替	0	0	0	18,519	0	0	0	0	0	0	0	18,519
純転換部門計	-4,626,399	1,336,446	-8,084,086	6,261,616	-4,890,851	1,116,557	-861,772	-671,641	-80,002	3,756,834	904,571	-5,838,727
自家消費・送配損失	-23,630	-238,681	-470	-344,921	-138,042	-48,762	0	0	0	-360,355	-4,938	-1,159,799
他転換増減 (+受入 / -払出)	0	0	0	18,519	0	0	0	0	0	0	0	18,519
消費在庫変動 (+取崩 / -積増)	-38,296	-2,200	15,334	25,346	-10,355	0	-362	0	0	0	0	-10,533
<b>最終エネルギー消費</b>	462,377	1,123,010	0	6,835,461	69,983	1,067,794	46,443	0	0	3,479,683	899,632	13,984,382
産業	462,336	1,123,010	0	3,110,906	69,983	654,160	29,828	0	0	2,388,735	898,462	8,737,420
民生	0	0	0	557,951	0	409,676	16,615	0	0	1,026,648	1,170	2,012,060
運輸	41	0	0	3,166,603	0	3,958	0	0	0	64,299	0	3,234,902
最終エネルギー-用途消費	462,377	1,106,096	0	5,244,447	50,972	1,067,794	46,443	0	0	3,479,683	899,632	12,357,444
非エネルギー-利用	0	16,914	0	1,591,013	19,011	0	0	0	0	0	0	1,626,938

[出所] 資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』エネルギーバランス表2013年度版

[http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html)

「一次エネルギー供給」は、各エネルギー資源が日本にそれぞれどのくらいの量だけ1年間に供給されたのかを表わしている。例えば、石炭は、2013年度にエネルギー量換算で5,249,399 TJ相当分が日本国内に供給されたが、それらは全て輸入であって国内産出はゼロである。同様に、原油は、2013年度にエネルギー量換算で8,028,993 TJ相当分が日本国内に供給されたが、そのうち、輸入分が8,004,829 TJ相当分であり、国内産出が24,164 TJ相当分である。なお、項目の定義から、

一次エネルギー供給量＝総供給量  
である<sup>89)</sup>。

表4-2で注意しなければならないことは、原子力発電によって供給されたエネルギーが「国内産出」扱いになっていることである<sup>90)</sup>。実際には、日本国内でのウラン鉱石の産出量は極めて少ない<sup>91)</sup>ため、核燃料として用いられるウランはそのほとんどが輸入に頼っていることを忘れてはならない。

「エネルギー転換」は、「一次エネルギー国内供給部門から国内に供給された各エネルギー源について、元のエネルギー源と異なるエネルギー源を製造・生成するために、燃焼・乾留・分解などの化学変化や熱交換・分離・混合などの物理変化のために用いられたエネルギー源の量(投入量)、生成したエネルギー源の量(産出量)及び損失したエネルギー源の量などこれに関連する量」<sup>92)</sup>を表わしている。すなわち、この項目においては、「国内供給されたエネルギー源が、電力・蒸気・ガソリン・都市ガスなど最終エネルギー消費において使用するために都合のよい形態のエネルギー源に変換されていく過程」<sup>93)</sup>が示されていることになる。石炭を例にとれば、国内供給された量の4割以上である2,433,680 TJ相当分が事業用発電に使用されて電力に変換され、また、32%強に相当する1,724,586 TJ分が石炭製品製造に使用されている(図4-16<sup>94)</sup>；図の見やすさを考慮して、表4-2の“石炭”の列に示されている数字を、1 PJ (= 1,000 TJ = 10<sup>15</sup> J)単位で表示した)。原油

<sup>89)</sup> 独立行政法人 経済産業研究所編『総合エネルギー統計の解説 / 2010年度改訂版』p.22

(<http://web.archive.org/web/20130607020239/http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2010EBXIGRF.pdf>)；この文書は、2015年7月15日現在公開が終了しているが、上記のURLでInternet Archiveから取得することが可能である。

<sup>90)</sup> 前記『総合エネルギー統計の解説 / 2010年度改訂版』pp.190-191によれば、「a. 燃料費寄与が小さいこと／b. 燃料供給への依存度が小さいこと／c. 原子力技術の役割が重要であること／d. 再処理による核燃料サイクルが可能であること、という四つの理由から、原子力発電を「準」国産エネルギーとして扱うことはIEAにおいて先進国間での国際共通理解とされている」とある。

<sup>91)</sup> 例えば、"OECD Uranium 2011: Resources, Production and Demand"pp.277-280を参照。なお、この文書は次のURLより入手できる：<http://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2012/7059-uranium-2011.pdf>

<sup>92)</sup> 前記『総合エネルギー統計の解説 / 2010年度改訂版』p.28

<sup>93)</sup> 同上

<sup>94)</sup> このようなエネルギーフロー図を描くためのツールとして、無料で利用できる以下のURLを紹介する：

<http://sankeymatic.com/build/>

は、国内供給量の 95 %が石油製品製造に用いられる一方で、事業用発電に用いられるのは 5 %である。天然ガスでは、64 %以上が事業用発電に用いられ、33 %以上が都市ガス製造に使用される。

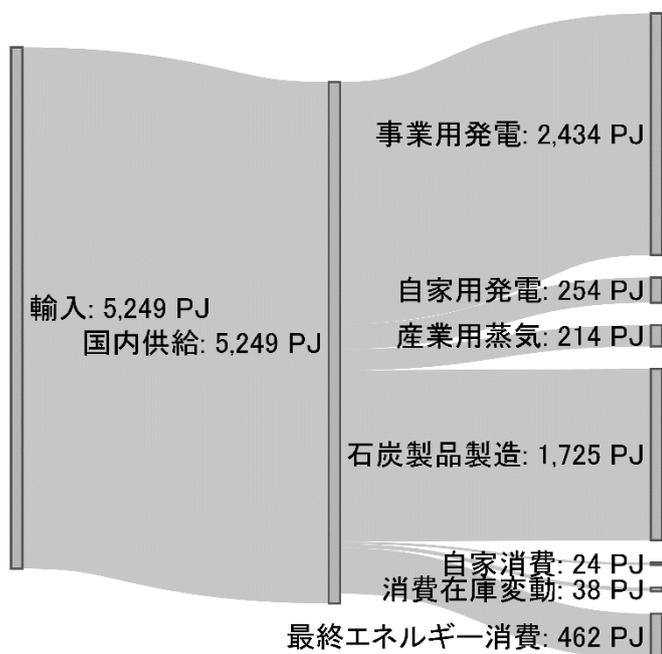


図 4-16 2013 年度の石炭の使用内訳

ここで留意すべきは、「エネルギー転換」の内訳の一つである事業用発電の総和（右端の合計列）が負数になっていて、その数値が大きいことである。すなわち、事業用発電に分類されるエネルギー転換において差し引き 4,629,802 TJ の“エネルギー損失”があることを意味しており、この量は、一次エネルギー供給の合計である 21,972,684 TJ の 21 % 以上に相当する。事業用発電に関する項目のうち、再生可能・未活用エネルギー／事業用水力発電／原子力発電の各項目は、それらを利用した事業用発電における変換効率を 100 %として算入している（というより、発電電力量をもって国内産出量を算出している）が、石炭や原油、天然ガスなどの化石燃料に係る項目に関しては、このエネルギー転換の項目で示されている数値は実際に発電に使用された化石燃料そのもののエネルギー量に対応している。よって、この 2013 年度のエネルギーバランス表に従えば、事業用発電に使用された化石燃料の総量は、

$$(2,433,680 \text{ TJ} + 194,820 \text{ TJ} + 454,903 \text{ TJ} + 672,863 \text{ TJ} + 3,180,742 \text{ TJ} + 77,387 \text{ TJ}) = 7,014,395 \text{ TJ}$$

であり、一方、化石燃料を使用した事業用発電で産出された電力は、

$$3,262,618 \text{ TJ} - (170,193 \text{ TJ} + 627,831 \text{ TJ} + 80,002 \text{ TJ}) = 2,384,592 \text{ TJ}$$

である。従って、発電効率は 34.0 %ということになる<sup>95)</sup> (図 4-17)。ここで示されたような「電気という、今日の日常生活を支えるために利用しやすい形態のエネルギーを産出するためにはかなり大きなエネルギー損失を出している」という状況は、国際エネルギー機関 (IEA) の統計によれば全世界的にも同様である<sup>96)</sup>。

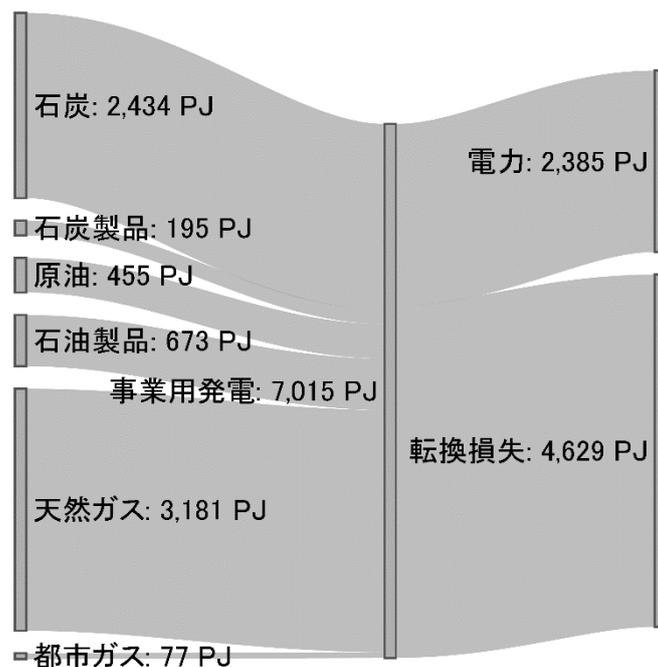


図 4-17 化石燃料による事業用発電 (2013 年度)

「最終エネルギー消費」は、「国内供給」されたそれぞれのエネルギー資源が「エネルギー転換」による損失を減じたのちに、それぞれどのくらいの量とその形態のエネルギー資源として消費されているかを表わしている。すなわち、2013 年度に日本国内で実際に消費されたエネルギー資源を表わすことになる。よって、最終エネルギー消費がゼロ

<sup>95)</sup> 前記『総合エネルギー統計の解説 / 2010 年度改訂版』 p.5 に明記されているように、総合エネルギー統計そのものは“有効数字 2 桁の原則”が謳われており、“3 桁目以降は参考表示”とされているため、表 1 に示したエネルギーバランス表でも、各項目の数字の総和と右端の合計とは、必ずしも全桁一致するわけではない。従って、本文中の加算例はあくまでも参考である。

<sup>96)</sup> 2012 年度の IEA の統計 (<http://www.iea.org/Sankey/index.html#?c=World&s=Balance>) によれば、発電所(power station)に供給されたエネルギー総量は (原子力や水力など、変換効率 100 % と見なしているものを含めて) 212,824 PJ (1 PJ (peta joule) = 1,000 TJ =  $1 \times 10^{15}$  J) であるが、その際のエネルギー損失量は 116,585 PJ となっている。なお、産出された電力量は 81,620 PJ とされており (発電効率はおよそ 38.4 %), 残りは熱源として利用されたもの及び自家使用分とされている。

とされている原油／事業用水力／原子力の項目は、それぞれ、原油／事業用水力／原子力として国内で消費された量がゼロであること、すなわち、国内に供給されたそれら一次エネルギー資源が、原油の場合は石油製品製造並びに事業用発電に、事業用水力及び原子力の場合は共に事業用発電にそれぞれ利用されて形態転換され尽くしてしまったことを意味している。

産業部門でのエネルギー消費は石油製品が全体の 35.6 % を占め、次いで電力が 27.3 %、石炭製品が 12.9 % である。また、民生部門でのエネルギー消費は電力が全体の 51.0 % を占め、次いで石油製品が 27.7 %、都市ガスが 20.3 % である。一方、運輸部門では石油製品の使用が 97.9 % と圧倒的であり、残り 2.1 % の大部分を電力が占めている。身の回りを見渡すことで容易に理解できるように、今日の日常生活は石油化学製品無しでは成り立たなくなっているが、このことは、表 4-2 において、石油製品の最終エネルギー消費量のうちの 23.3 % が非エネルギー用途に使用されている、すなわち、素材として使用されていることに明確に現われている。また、非エネルギー用途に使用されるのは、石油製品が大部分である (97.8 %) ことも明らかである。

次に、エネルギー資源自給率と転換損失量に着目してみる。

表4-3. 資源別国内産出量並びに国内供給量の年次推移

		石炭 (TJ)	石炭製品 (TJ)	原油 (TJ)	石油製品 (TJ)	天然ガス (TJ)	再生可能・ 未活用エネ ルギー(TJ)	事業用水力 (TJ)	原子力 (TJ)	合計 (TJ)	エネルギー 資源自給率
1990	国内産出	187,036	0	24,484	0	89,203	524,099	833,304	1,887,390	3,545,517	0.0844
	国内供給	3,346,859	-39,341	8,973,862	2,029,203	2,101,819	524,099	833,304	1,887,390	19,657,197	
2000	国内産出	66,013	0	28,034	0	106,340	616,335	778,417	2,873,130	4,468,269	0.0701
	国内供給	4,206,970	-3,821	9,645,079	1,512,049	3,133,054	616,335	778,417	2,873,130	22,761,213	
2010	国内産出	0	0	30,637	0	149,324	790,218	711,607	2,494,879	4,176,666	0.0763
	国内供給	4,967,395	14,115	8,134,605	694,281	4,232,115	790,218	711,607	2,494,879	22,039,215	
2011	国内産出	0	0	30,796	0	149,181	842,297	723,827	885,337	2,631,437	0.0826
	国内供給	4,661,198	-6,922	7,996,065	1,119,975	4,926,123	841,799	723,827	885,337	21,147,402	
2012	国内産出	0	0	27,343	0	142,181	841,101	657,830	138,907	1,807,361	0.0801
	国内供給	4,873,737	-11,896	8,063,504	1,158,333	5,097,424	841,101	657,830	138,907	20,818,939	
2013	国内産出	0	0	24,164	0	128,831	908,577	671,641	80,002	1,813,214	0.0825
	国内供給	5,249,343	27,445	8,035,136	941,749	5,085,481	908,577	671,641	80,002	20,999,374	

[出所] 資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』エネルギーバランス表 [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html)

表 4-3 は、資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』<sup>97)</sup>にまとめられている年度ごとのエネルギーバランス表から、各種エネルギー資源の国内産出量及び国内供給量を抜き出し、それらの過去 23 年間に亘る年次推移をまとめたものである。表 4-3 における国内供給は、表 4-2 の一次エネルギー供給から輸出や在庫変動分を減じたもので、純粋に国内に供給された量を表わしている。表 4-3 より、石炭／石炭製品／原油／石油製品／天

<sup>97)</sup> [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html)

この URL からは、1990 年度以降のエネルギーバランス表を入手することができる。

然ガスという化石燃料由来のエネルギー資源は、国内ではほとんど産出されず、国内供給量の大部分を輸入に依存していることが明確にわかる。右端の「エネルギー資源自給率」は、真の意味で国内産出分、すなわち、国内に供給されたエネルギー総量に対する、原子力以外のエネルギー資源の国内産出量の総和の比率を表わしたものである。1990年度以降、日本のエネルギー資源自給率はわずかに8%程度で推移している。

表4-4. エネルギー転換に伴う損失量の年次推移

年度	国内供給量 (TJ)	転換損失量 (TJ)	事業用発電に 係る転換損失量 (TJ)	最終エネ ルギー消費 量 (TJ)	最終電力 消費量 (TJ)	国内供給量 に占める転換 損失の割合	国内供給量 に占める最終 電力消費の 割合	最終エネ ルギー消費に 占める電力消費 の割合
1990	19,657,197	-5,896,853	-4,313,307	13,888,926	2,698,534	0.300	0.137	0.194
1995	22,001,126	-6,629,583	-4,895,399	15,318,190	3,090,955	0.301	0.140	0.202
2000	22,761,213	-6,815,890	-5,001,815	15,975,094	3,396,151	0.299	0.149	0.213
2005	22,756,844	-7,028,862	-5,071,412	15,996,487	3,515,694	0.309	0.154	0.220
2010	22,039,215	-6,864,986	-4,931,217	14,972,628	3,585,554	0.311	0.163	0.239
2011	21,148,218	-6,544,630	-4,680,059	14,529,349	3,364,041	0.309	0.159	0.232
2012	20,818,939	-6,375,409	-4,601,053	14,346,929	3,297,374	0.306	0.158	0.230
2013	20,999,374	-7,009,059	-4,629,802	13,984,382	3,479,683	0.334	0.166	0.249

[出所] 資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』エネルギーバランス表 [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html)

表 4-4 は、エネルギー転換に伴うエネルギー資源損失量の年次推移を表わしている。2011 年の東日本大震災及びその後の原子力発電所の稼働停止を受けて節電が声高に叫ばれた 2011 年度及び 2012 年度であっても、最終エネルギー消費に占める電力消費の割合は対 1990 年度比でそれぞれ 1.20 倍及び 1.19 倍に達して電力に対する依存度が低下していないこと、原子力発電所の稼働停止に伴って原子力による電力供給が大幅に減少したこと（表 4-3 参照）を補うために火力発電所での一次エネルギー消費が増大した結果、事業用発電における転換損失の転換損失総量に占める割合が 2012 年度は 2011 年度よりも増大していることなどが、表 4-3 の国内供給量の年次推移を踏まえた上で表 4-4 を検討することによって読み取れる。ちなみに 2013 年度はさらに電力への依存率が増加して対 1990 年度比 1.28 倍に、転換損失の割合は、休眠状態にあったエネルギー変換効率の低い、旧式の火力発電所を多く再稼働し始めたことから対 2012 年度比で 1.09 倍に増加した。

以上の表 4-2～表 4-4 に基づく記述は、全て資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』にまとめられているエネルギーバランス表に依拠しており、その入手に（ネットワーク接続料や電気料金以外の）費用が発生しない情報、つまり“無料で万人が入手可能な情報”に基づいたものである。ところが、このような統計表やその読み方は、2011 年の東日本大震災及び福島第一原子力発電所の事故から今日にいたるまで、全くと言っていいほど報道されていない。その理由の追究は筆者の能力を超えるが、このようなエネルギー消費の“定量的な現状認識”がなされなければ、将来のエネルギー供給のあり方への“定量的

な対応策”は論理的には導出され得ないものではないだろうか。本節がエネルギーリテラシー向上の一助になればと願っている。

#### §4.3.2 明治以降の日本の近代化とエネルギー消費

次に、資源エネルギー庁が『総合エネルギー統計』として公表している 1990 年度よりも前の年度からのエネルギー供給量／エネルギー消費量の年次推移を考察するため、(財)日本エネルギー経済研究所編『EDMC/エネルギー・経済統計要覧 (2015 年版)』に採録された統計表を利用する<sup>98)</sup>。

表4-5. 資源別エネルギー供給量並びに部門別最終エネルギー消費量の年次推移

年度	資源別エネルギー供給量 (PJ)							供給量 化石燃料 率	部門別最終エネルギー消費量 (PJ)					人口 (10月1日) (千人)	一人当たり の年間エネ ルギー供給 量 (GJ)
	水力	石炭	石油	その他	天然ガス	原子力	供給量 合計		産業	民生	運輸	非エネ ルギー	消費量 合計		
1880	0	24	2	146	0	0	172	0.151	-	-	-	-	-	36,649	4.7
1900	0	197	15	227	0	0	440	0.482	-	-	-	-	-	43,847	10.0
1920	57	789	23	145	1	0	1,015	0.801	-	-	-	-	-	55,963	18.1
1940	425	1,763	187	277	2	0	2,654	0.735	-	-	-	-	-	71,933	36.9
1955	731	1,268	472	204	10	0	2,685	0.652	-	-	-	-	-	89,276	30.1
1960	661	1,738	1,588	194	39	0	4,220	0.797	-	-	-	-	-	93,419	45.2
1965	751	1,911	4,214	109	85	0	7,071	0.878	2,840	783	798	123	4,543	98,275	72.0
1970	749	2,661	9,623	139	166	44	13,383	0.930	5,704	1,451	1,435	253	8,842	103,720	129.0
1975	805	2,511	11,245	145	386	237	15,330	0.923	6,235	2,075	1,938	263	10,510	111,940	136.9
1980	857	2,818	10,986	176	1,012	778	16,627	0.891	6,117	2,364	2,302	290	11,074	117,060	142.0
1985	799	3,299	9,546	221	1,600	1,503	16,967	0.851	5,800	2,754	2,465	306	11,325	121,049	140.2
1990	859	3,380	11,870	280	2,063	1,905	20,357	0.850	6,734	3,301	3,114	367	13,516	123,611	164.7
1995	791	3,763	12,708	296	2,467	2,743	22,768	0.832	7,109	3,942	3,627	341	15,019	125,570	181.3
2000	806	4,195	12,106	307	3,072	2,898	23,385	0.828	7,458	4,172	3,798	300	15,729	126,926	184.2
2005	713	4,884	11,769	334	3,299	2,685	23,685	0.842	7,038	4,301	3,788	224	15,352	127,768	185.4
2010	762	5,046	10,148	364	3,998	2,539	22,859	0.840	6,442	4,104	3,480	183	14,209	128,057	178.5
2011	773	4,731	10,195	370	4,687	897	21,652	0.906	6,196	3,920	3,406	175	13,697	127,799	169.4
2012	701	4,962	10,369	385	4,881	140	21,439	0.943	6,049	3,889	3,367	163	13,469	127,515	168.1
2013	709	5,350	10,076	460	4,944	81	21,620	0.942	6,157	3,814	3,311	156	13,438	127,298	169.8

[出所] 日本エネルギー経済研究所『EDMC/エネルギー・経済統計要覧』2015年度版より、「1 cal=4.18605 J」を利用して換算した。

表 4-5 は、『EDMC/エネルギー・経済統計要覧 (2015 年版)』に示された「資源別年間エネルギー供給量」及び「部門別年間最終エネルギー消費量」の年次推移を同一エネルギー単位 (peta joule (ペタジュール) ; 1 PJ = 1,000 TJ = 1x10<sup>15</sup> J) で表わしたものである<sup>99)</sup>。資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』の場合とは異なり、供給側は、

<sup>98)</sup> 2015 年 7 月 6 日付で、1989 年度～1953 年度のエネルギーバランス表が資源エネルギー庁 HP で公開されている。

<sup>99)</sup> 『エネルギー・経済統計要覧』では kcal 単位で表示されているが、「1 cal=4.18605 J」という変換式を用いて joule (J) 単位に変換した。

水力／石炭／石油／その他／天然ガス／原子力に分類されており、石炭／石油／天然ガスが化石燃料由来、水力／その他が再生可能エネルギーに分類されるべきものである（「再生可能」の意味するところについては3. で述べる）。“その他”には、薪や炭によるエネルギー生成成分が含まれていることに留意されたい。実際、第二次世界大戦前の統計では、その他の項目は“薪炭”となっている。なお、『EDMC/エネルギー・経済統計要覧（2015年版）』冒頭の解説にも明記されているように、『EDMC/エネルギー・経済統計要覧（2015年版）』採録のエネルギーバランス表の数値は、推計方法が異なるために、資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』として公表されているエネルギーバランス表とは分類が異なっており、また、同一名称が付されているものであってもその数値は必ずしも一致しない。

表4-5の消費側において「産業」としてまとめられているのは第一次産業及び第二次産業において消費されたエネルギー量、「民生」は家計による住宅内でのエネルギー消費量と第三次産業が消費したエネルギー量との総和、「運輸」は企業・家計が住宅・工場・事業所の外部で人・物の輸送・運搬に消費したエネルギー量である<sup>101)</sup>。表4-5には、各年の10月1日での人口<sup>102)</sup>及び人口一人当たりの年間エネルギー供給量の年次推移並びに供給量全体に占める石炭／石油／天然ガスの総和の割合を表わす「供給量化石燃料率」も同時に示してある。

表4-5より、以下のことが明らかである：

- ① 全エネルギー供給量のうちの化石燃料由来のものに占める割合（＝上述の「供給量化石燃料率」）は、日本への西欧文化の流入と共に増大し始め、第二次世界大戦後も増大して、二度に亘るオイルショックを契機として減少に転ずるが（ピークは1973年度の0.94378<sup>103)</sup>）、1985年度以降2010年度までは8割4分前後ではほぼ一定値を保っている。
- ② 2010年の「供給量化石燃料率」は、原子力発電によるエネルギー供給があったにも拘わらず、1960年代前半と同レベルである。
- ③ 「供給量化石燃料率」は、2011年度及び2012年度とも前年度比でそれぞれ1.08倍及び1.04倍に増大し、結果として、2012年度にはオイルショック前のピーク時に迫

<sup>100)</sup> 『EDMC/エネルギー・経済統計要覧（2015年版）』には以下の記載がある：

エネルギーバランス表関連については平成12年度までは、資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』を出所としております。平成13年度に『総合エネルギー統計』作成方法の変更があったため、同年度以降は日本エネルギー経済研究所計量分析ユニットの独自推計値を出所としております。本推計値は、従来の推計方法を踏襲し、過去系列との整合性を重視したものですので、これまでと変わりなくご利用いただけます。

<sup>101)</sup> 前掲『総合エネルギー統計の解説 / 2010年度改訂版』p.67, 81, 87

<sup>102)</sup> 『EDMC/エネルギー・経済統計要覧（2015年版）』V.超長期統計（4）各種経済指標採録の数値。

<sup>103)</sup> 『EDMC/エネルギー・経済統計要覧（2015年版）』p.318のエネルギー源別一次エネルギー供給（1880～2013年）<その3>によれば、総供給16,133PJのうち、石炭2,494PJ／石油12,484PJ／天然ガス248PJである。

る 0.94296 にまで増大した。これは、“休眠状態で維持してきた天然ガス火力発電所及び石炭火力発電所”<sup>104)</sup>を稼働させて必要とされる電力需要を賄っているためである。

- ④ 水力によるエネルギー供給量は、1955 年以降、殆ど増大していない。このことは、日本においては事業用発電用途に利用できるような大規模な水力発電所を建設するために適した河川がもはや存在しないことを意味している。但し、集落単位あるいはそれより小さな規模で必要とする電力を供給するための『小水力発電』に関しては、開発の余地があると言われている<sup>105)</sup>。

---

<sup>104)</sup> このことに関連して、筆者の一人 (MT) がかつて担当した公開講座にて、聴講して下さった方 (元電力会社勤務) よりいただいた手紙を掲載する (期日・個人名を除き、原文ママ) :  
MT 先生へ

某日のご講義は大変面白く、また興味深く聴かせて頂きました。その中で電力の需要と供給力の話があり、元電力会社に勤めていた私としては、ひと言思いを述べたいと思いここに失礼をわきまえて書いてみました。

1. 電力会社では、通常「二重の事故」までは発生することを考慮して、その最大の出力を持つ発電機がダウンしても供給に支障のないように計画する。特に現実の発電所建設が 10~20 年も掛かることを踏まえて、20~30 年先の需要を予測してその需要に見合う供給力を建設している。従って供給に支障となる事故が無い状態では常に需要より供給力が上回る。
2. この「二重の事故」の解釈であるが、今まで私がやってきた安定供給の条件はふたつあった。
  - 1) 発電機が二つ故障する。この場合電力会社が持っている発電機の中で最も大きいユニットを事故対象にする。
  - 2) 送電線がルート断 (発電所から送り出される送電線は 2 回線であるのでその 2 回線とも使えない状態 = 二重事故) する。この場合最も出力の大きい発電所を事故対象にする。この場合「発電機」で無いことに注意して下さい。なお、余談になるが、この想定事故を軽減するため、一つの発電所に送電線を 2 ルート作る考えがあり、現実に大出力の発電所はそのようになっている。
3. 今回起こった福島第 1 原子力発電所は上記の 2) の条件に当てはまります。ところが福島第 2 発電所も事故となり、地震の結果としては結局「想定外」ということとなります。
4. 一般にすべての人工物は必ず陳腐化する。発電所の場合は、新しいものほど熱効率が良く、したがって発電単価が安い。また結果として炭酸ガスの排出も少ない。
5. 発電機は法定償却年数は 22 年であるが、実際には約 40 年使える。しかし 20~25 年を過ぎる頃から次第に各機器が劣化してくるため更新する必要があり、結構維持費が掛かる。例えばボイラーなどは最もお金の掛かる蒸気管の肉厚が薄くなるのでそっくり取り替える。このため少なくとも 10 年以内に新しい熱効率の良い発電機に置き換えたい。結果としてこれが電気料金を安定化させる手段でもある。
6. それで、新しい発電機を建設する時は、古い発電機 (発電所) は廃止せずに眠らせておく。この発電機 (発電所) が「供給予備力」として電力会社の供給力リストに記載されている。実際に東京電力では川崎火力発電所という、もう捨てても良い発電所を持っている。これが今回の原子力事故で一躍「現役」に復帰した。わが中国電力でも「何時捨てても良い発電所」として水島火力発電所や玉島火力発電所を持っているが、実際に発電するのは「H3」(年間で最も需要の多い日より 3 日) 程度である。つまり 365 日のうち 360 日程度は使っていない。ところが島根原子力発電所でトラブルなどが出来使えなくなった時には熱効率が悪いのを承知で使うことになる。つまりこれが「安定供給に寄与する供給予備力」となる。
7. 結論として、電力会社では需要を上回る供給力を持っていないければ、安心して枕を高くして寝られないということである。

<sup>105)</sup> 例えば、環境省「小水力発電情報サイト」

<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/shg/page01.html>などを参照。

- ⑤ 「再生可能エネルギー」によるエネルギー供給量はオイルショック以降それなりに増大したが、2000年代になっても急速に増えている訳ではなく、2013年度においても水力による供給量の65%に過ぎない。特に、1940年時点での“その他(=薪・炭)”分類の供給量が林業による日本国内産の再生可能“バイオ燃料”-真の意味での“carbon-neutral”<sup>106)</sup>なエネルギー資源-によるものであったことを考えると、1940年には殆ど開発されていなかった太陽光・太陽熱・風力・地熱などのエネルギー資源による供給量が2013年度においても非常に少ないことが理解される。
- ⑥ 石油によるエネルギー供給量は、二度のオイルショックを経た1990年度以降においてもなお、オイルショック以前の1970年と同レベル以上で推移している。これは、日本において石油化学工業製品が製造され続けていることに対応しており、その大きな理由の一つが、ガソリンや軽油などの石油製品の有する“常温常圧で液体の燃料である”という性質が運輸部門で利用できるエネルギー資源に求められるものと合致している(=タンクに入れて容易に持ち運べる)からである。
- ⑦ 民生部門・運輸部門でのエネルギー消費量はオイルショック以降も増大し、特に、2000年度から運輸部門が減少に転ずる一方(ピークは1999年度の3,884 PJ<sup>107)</sup>)で民生部門は2005年度まで増大した。2013年度のエネルギー消費量は、民生部門・運輸部門がそれぞれピーク時の88.7%及び85.2%である。産業部門におけるエネルギー消費量は2000年度をピークに減少に転じ、2013年度ではピーク時の82.6%ほどになっている。
- 原子力発電所による電力産出に関しては、以下のことに留意しなければならない。原

<sup>106)</sup> 例えば、環境省「カーボン・オフセット制度」<http://www.jcs.go.jp/index.html>などを参照。植物由来のcarbon-neutralなバイオ燃料(=薪・炭など；植物が光合成によって空気中の二酸化炭素を炭水化物として固定し、それを燃焼しても吸収したものと等量の二酸化炭素しか大気中に放出しない)の最大の特徴は『長くても数十年で再生される』ことであり、これは化石燃料の生成に要した地質学的な時間(数百万年以上)に比べて極めて短い上に、それらcarbon-neutralなバイオ燃料が本当に『再生されること』を人類が自ら確認済みであることである。一般的に“再生可能エネルギー”と見なされている“バイオアルコール”や“バイオディーゼル燃料”などは、その製造過程において太陽光・太陽熱以外のエネルギーの供給を必要とするため、carbon-neutralではないことに留意されたい。実際、環境省では、2012年5月までは「カーボン・ニュートラル認証制度」<http://jcs.go.jp/cn/>を運用していたが、それ以降は、より“緩い”「カーボン・オフセット制度」へ移行してしまった。現行のカーボン・オフセット制度がカーボン・ニュートラル認証制度より“退行”していることは、カーボン・オフセット制度の目的(<http://www.jcs.go.jp/about.html>)として以下の文言が明示されていることから明らかである：

カーボン・オフセットの取組(カーボン・オフセットの取組を更に深化させたカーボン・ニュートラルの取組を含む。)に関する信頼性を構築し、カーボン・オフセットの取組に対する認識の向上、取組の促進、及び公正な市場形成に資することで、社会を構成する主体が地球温暖化を自らの問題として捉え主体的な排出削減努力を促進するとともに、国内外の排出削減・吸収プロジェクトを支援することを目的としています。

<sup>107)</sup> 『EDMC/エネルギー・経済統計要覧(2015年版)』p.40 I.エネルギーと経済 3.一次エネルギー供給と最終エネルギー消費 (4)部門別最終エネルギー消費

原子炉それ自体は、運転者の意図に沿って“臨界状態を保つ”ことを第一義としている。すなわち、原子炉の熱出力は一定であり、従って、原子力発電所で発電される電力量は一定であって、必要とされる電力量が減ったからといって発電電力量を絞ることは原理的にできない（その他の事業用発電方式では、発電電力量は基本的に制御可能である）。このことは、発電用原子炉運転者の集団である電気事業連合会が提示している資料<sup>108)</sup>からも明らかであり、「日変動の無い基礎部分を流込式水力発電と原子力発電とでまかなっていて、変動分は主として火力発電によって対応する」とされている。2015年7月現在では稼働している原子力発電所は一基も無いので、深夜に電力供給力が余ることを前提にした『家庭用深夜電力給湯器（エコキュート）』や『PHV（プラグインハイブリッド自動車）』さらには『EV（電気自動車）』への優遇制度（補助金や優遇税制など）は本質的には不要なはずだが、実際には廃止されていない<sup>109)</sup>。

表4-6. 民生部門・運輸部門の年間最終エネルギー消費量内訳の年次推移

年度	民生 (PJ)										家計/ 業務	運輸 (PJ)										旅客/ 貨物
	家庭					業務						旅客					貨物					
	冷房	暖房	給湯	厨房	照明他	冷房	暖房	給湯	厨房	照明他		自動車	タクシー	他	バス	鉄道	海運	航空	自動車	鉄道	海運	
1965	2	137	151	72	85	9	132	120	29	46	1.34	148	62	38	61	3	19	294	89	82	1	0.71
1970	7	293	204	103	160	24	291	240	35	94	1.12	436	82	50	58	5	40	534	51	177	3	0.87
1975	12	315	334	147	262	50	420	331	43	160	1.07	713	87	59	61	6	70	657	17	262	5	1.06
1980	9	345	430	149	328	49	417	315	61	260	1.14	942	78	56	63	5	99	791	13	244	9	1.18
1985	27	442	519	155	401	74	390	308	77	361	1.28	1,116	88	54	64	4	98	819	8	200	14	1.37
1990	40	437	614	159	524	123	400	386	97	521	1.16	1,513	100	64	77	7	119	1,058	7	151	17	1.52
1995	50	565	689	169	643	156	482	395	124	669	1.16	1,891	73	63	82	6	155	1,171	6	159	22	1.67
2000	58	583	657	179	728	216	444	376	147	783	1.12	2,075	64	58	81	9	145	1,116	6	221	24	1.78
2005	56	629	691	177	775	219	423	339	164	827	1.18	2,090	63	63	84	7	165	1,087	6	201	23	1.88
2010	66	608	632	178	800	229	282	242	161	905	1.26	1,918	54	68	83	6	168	1,020	5	136	21	1.94
2011	50	587	624	179	770	198	277	229	155	852	1.29	1,889	50	65	79	6	133	1,020	5	137	21	1.88
2012	48	567	608	178	766	197	282	228	155	860	1.26	1,858	50	67	79	6	125	1,019	5	137	21	1.85
2013	52	536	582	180	763	201	265	219	157	858	1.24	1,754	48	71	83	6	162	1,047	5	113	22	1.79

[出所] 日本エネルギー経済研究所『EDMC/エネルギー・経済統計要覧』2015年度版より、「1 cal=4.18605 J」を利用して換算した。

上記⑦に記述した事実をより深く理解するために、民生部門及び運輸部門でのエネルギー消費量の内訳を示したものが表 4-6 である。表 4-6 に示された数字は、表 4-5 と同様に『エネルギー・経済統計要覧（2015年版）』掲載の数値を PJ 単位に換算したものであり、表 4-5 の数値と表 4-6 の数値とは直接比較できる。民生部門の内訳のうち、“照

108) 電気事業連合会編『原子力・エネルギー図面集 2015』

p.1-2-11(<http://www.fepc.or.jp/library/pamphlet/zumenshu/pdf/all.pdf>)

109) 東電の電気料金値上げ申請に関して、エコキュートなどを含む「オール電化住宅」に対する割引を廃止するように経済産業省の電気料金審査専門委員会が 2012年7月3日に東電に対して求めた、という報道がなされた (<http://www.nikkei.com/article/DGXZDZ043315060T00C12A7EA2000/>) が、2015年7月の段階でも廃止されていない(例えば、「全電化住宅割引」の項目

<http://www.tepco.co.jp/e-rates/individual/menu/home/home01-j.html> を参照)。PHV/EV に関しては、「EV・PHV 導入補助金制度」

<http://www.meti.go.jp/policy/automobile/evphv/information/system.html> を参照。

明他”とある項目は，“冷房”用・“暖房”用・“給湯”用・“厨房”用とは分類され得ない全てのものを含んでいる<sup>110)</sup>。

表 4-6 からは様々な事実，例えば，2013 年度の家庭部門における冷房用エネルギー消費量が家庭部門全体の 2.5 %に過ぎないとか，業務部門における“照明その他”用のエネルギー消費量が業務の OA 化・電算化に対応して 1980 年代後半以降増加し続けている等の事実が読み取れる。但し，単に各項目の“増加率”に注目するだけではなく，総消費量に占める“絶対的な消費量”そのものにも注目しなければならない。その筆頭となる項目が「旅客輸送部門における自家用車によるエネルギー消費量」であり，例えば，2013 年度には 1980 年度比で 1.86 倍に増大して，1,754 PJ となっている。これは，運輸部門全体のエネルギー消費量の 52.9 %を超えており，当該年度のエネルギー消費量全体の 13.1 % (=1,754 PJ ÷ 13,438 PJ) に相当する。運輸部門のエネルギー消費量全体が 2000 年代後半以降は減少傾向になっている（表 4-5 参照）にも拘わらず，自家用車によるエネルギー消費量の割合はほとんど変化していない（2000 年度は 54.6 %，2005 年度は 55.1 %，2010 年度は 55.1 %）。

表4-7. 自動車保有台数(軽自動車含む)の年次推移

年度	乗用車	貨物車	乗合車	特種(殊)車	二輪車	合計
1965	2,289,665	4,689,368	105,386	163,608	875,069	8,123,096
1970	9,104,593	8,542,360	190,066	351,661	730,340	18,919,020
1975	17,377,551	10,212,704	219,945	595,798	737,447	29,143,445
1980	23,646,119	13,303,204	229,429	794,025	1,019,246	38,992,023
1985	27,790,194	17,251,695	230,783	943,801	2,024,082	48,240,555
1990	35,151,831	21,146,204	245,844	1,213,569	2,741,402	60,498,850
1995	45,068,530	20,235,051	242,907	1,524,405	3,035,643	70,106,536
2000	52,449,354	18,064,744	235,550	1,754,311	3,021,014	75,524,973
2005	57,097,670	16,707,445	231,696	1,618,698	3,336,551	78,992,060
2010	58,139,471	15,137,641	226,839	1,646,018	3,510,804	78,660,773
2011	58,729,343	15,008,821	226,270	1,645,449	3,502,701	79,112,584
2012	59,357,223	14,851,666	226,047	1,654,739	3,535,528	79,625,203
2013	60,051,338	14,749,266	226,542	1,669,679	3,575,746	80,272,571

〔出所〕 一般財団法人 日本自動車検査登録情報協会『車種別(詳細)保有台数表』

上述の旅客輸送部門における自家用車によるエネルギー消費量の増大は，日本国内における（旅客用）自家用車の保有台数の増加によるものである。表 4-7 は，自動車検査登録情報協会が公表している自動車保有台数の年次推移<sup>111)</sup>の抜粋であるが，貨物車（ト

<sup>110)</sup> 電気がなければ動作しない PC や携帯端末，音響映像機器に囲まれた現在の日常を鑑みれば，照明機器そのものによる電力消費量の“照明他”全体に占める割合が時代と共に低下していることは自明であろう。

<sup>111)</sup> <http://www.airia.or.jp/number/index.html>

ラックなど) や乗合車 (バス) の台数が 1980 年度以降大幅な増加を示していないのにも拘わらず、2013 年度の乗用車の保有台数は対 1980 年度比で 2.53 倍、対 1990 年度比でも 1.71 倍と突出した伸びを示しており、1990 年度よりも 2 千 5 百万台以上増加している。これは、上述した“旅客輸送部門における自家用車によるエネルギー消費量の増大”にまさに対応している。2013 年度の乗合車 (バス) の台数そのものが、対 1980 年度あるいは対 1990 年度で大きく変化していないことを踏まえると、この乗用車の保有台数の増加は、過疎地における路線バス廃止の影響を主因とするものではなく、日本人のライフスタイルそのものが、個々人が所有する乗用車による移動を前提としたものに変質してきていることを反映していることになる。エネルギー資源の 9 割以上 (表 4-3) を海外に依存する日本において、総エネルギー消費量の 13.1% ( $=1,754 \text{ PJ} \div 13,438 \text{ PJ}$ ) を自家用車による旅客輸送で消費している (2013 年度) という事実、しかもそのようなライフスタイルが、少なくとも本稿で示した 2013 年度までの範囲では、東日本大震災を経験したにもかかわらず変化する兆しが見られない (2010 年度の場合は 13.5% ( $=1,918 \text{ PJ} \div 14,209 \text{ PJ}$ ), 2011 年度では 13.8% ( $=1,889 \text{ PJ} \div 13,697 \text{ PJ}$ )) という事実は知っておくべきであろう。

#### §4.3.3 「再生可能エネルギー」の本質<sup>112)</sup>

一般に、「再生可能エネルギー」には、太陽光・太陽熱、風力、波力、潮汐力、地熱などが含まれると考えられている。このうち、地球上で風を起こすのは太陽からのエネルギーであり、大洋の波浪がその風によって引き起こされ、海流も太陽から得るエネルギーによって引き起こされていることを考えれば、風力発電・波力発電・海流発電などの多くの発電手段も、地球が太陽から受け取っているエネルギーを利用していることになる。このため、本稿では主として太陽光由来の「再生可能エネルギー」を考察する。

よく知られているように、

- ・宇宙空間における地球は、物質的にはほぼ孤立系であって、
- ・太陽から受け取るエネルギーと等量のエネルギーを宇宙空間に放出している。

但し、ここで留意しなければならないことは、

地球が太陽から受け取るエネルギーの総量と地球が宇宙空間に放出しているエネルギーの総量は同一であるが、地球が太陽から受け取る場合には「可視光」の範囲にそのエネルギーの中心がある電磁波 (=太陽表面温度である約 6000 K の黒体輻射に対応するスペクトルを有する電磁波) として受け取っているのに対し、地球が宇宙空間に放出する場合には「赤外線」の範囲にそのエネルギーの中心がある電磁波 (=地球表面の温度である約 300 K の黒体輻射に対応するスペクトルを有する電

---

<sup>112)</sup> 寺内衛・寺内かえで『大学の物理教育』(日本物理学会発行) 第 19 巻, 第 3 号, pp96-100(2013) から引用。

磁波)として放出している

という点である。太陽が「可視光」としてエネルギーを地球に降り注いでいるために、植物は光合成によって二酸化炭素を炭水化物に変え、太陽エネルギーを化学結合のエネルギーに変換して蓄えることが可能であり、また、太陽電池などを使用して発電することも可能である。一方、「赤外線」では植物は光合成を行なえず、また、太陽電池などで発電することはできない。

宇宙空間における地球の置かれた位置付けを上述のように認識すると、地球上で「持続的に利用可能な再生可能エネルギー」の最大量は、地球が太陽から受け取るエネルギーを超え得ないことが理解される。このような理解に基づいて、以下、地球が太陽から受け取るエネルギー量を考える：

太陽から、太陽-地球間の平均距離だけ離れた位置において、太陽からのエネルギーを残さず受け取ったとすると、その値はおよそ  $1360 \text{ W/m}^2$  ( $\sim 10^3 \text{ W/m}^2$ ) と推定されている<sup>113)</sup>。これは、太陽が真上から照りつけるところで、太陽が真上に来た瞬間(例えば、春分の日の赤道上で正午)に、1平方メートル当たり降り注ぐエネルギーの最大値であり、地球上でこの値を24時間常に観測し続ける場所は原理的に存在しない。この最大値を考えると、

100万 kW (=  $10^9 \text{ W}$ ) の発電所と同じだけのエネルギーを太陽から得るには、24時間太陽が真上から照りつける場所を仮定した場合に、およそ  $1 \text{ km}^2$  (=  $10^6 \text{ m}^2$ ) の面積が必要

となる。地球上には24時間太陽が真上から照りつける場所はなく、また、夜間の電力供給をどのようにまかなうかという問題もあり、例えば現実の総出力1万 kW の発電所では、20 ha (=  $2 \times 10^5 \text{ m}^2$ ) の面積を必要としている<sup>114)</sup>。比例計算が可能であると仮定すると、100万 kW の発電所1基  $\div$  20  $\text{km}^2$  の面積ということになる。この比例計算に従えば、2013年度に国内でエネルギー用途に消費された13,282 PJ (= 13,438 PJ - 156 PJ) というエネルギー量の全量に相当するエネルギーを太陽光発電所で発生させるために必要となる面積は少なくとも8,423  $\text{km}^2$  になるが、これは広島県全体の面積にほぼ等しい<sup>115)</sup>。

太陽からのエネルギーとは無関係に利用できる「再生可能エネルギー」には地熱が含まれるが、その利用可能性を考える際には「地熱を利用して発生することのできる水蒸気の温度」を考えなければならない。周知のように「熱機関の最大仕事効率 $\eta$ は、高温熱源の温度を  $T_1$ 、低温熱源の温度を  $T_2$  とした時に、 $1 - (T_2/T_1)$  より小さい」<sup>116)</sup>ため、低

113) 『理化学事典(第5版)』(岩波書店)「太陽全放射量」「太陽定数」

114) 例えば、以下の URL を参照：

<http://ja.wikipedia.org/wiki/米倉山太陽光発電所>

115) 国土地理院「平成25年全国都道府県市区町村別面積調」による

(<http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO/201310/opening.htm>)

116) 本エネルギー読本 I の続編(エネルギー読本 II)で扱う予定。

温熱源の温度を平均的な気温である  $T_2=300\text{ K}$  で固定して考えると、 $100^\circ\text{C}$ の水蒸気を用いた熱機関の最大仕事効率 は  $0.195$ 、 $300^\circ\text{C}$ の水蒸気を用いた場合では  $0.476$  である<sup>117)</sup>。もちろん、発電機を駆動して発電をする際には機械的なエネルギー損失などがあり、最終的な発電効率は最大仕事効率よりも小さな値になる。日本には地熱資源が豊富にある、というような報道では「総発熱量」のみを採り上げているものが大多数であり、高温熱源の温度としてどのくらいの値が実現できるか、すなわち、実際にどのくらいの温度の水蒸気を発生できてどれくらいの電力を発生させられるか、に関する言及は筆者の知る限りでは殆どなされていない。

---

<sup>117)</sup> 例えば、東京電力が有する「改良型コンバインドサイクル火力発電所」では、 $538^\circ\text{C}$ の水蒸気タービン+ $1300^\circ\text{C}$ のガスタービンが用いられているが、この発電所の発電効率は  $49\%$ とされている。

[http://web.archive.org/web/20051111100320/http://www.tepco.co.jp/custom/LapLearn/ency/fir01\\_02-j.html](http://web.archive.org/web/20051111100320/http://www.tepco.co.jp/custom/LapLearn/ency/fir01_02-j.html)

## 付録. エネルギー関連の資料集

### 資源エネルギー庁

- エネルギー白書 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>
- 統計・各種データ <http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/>
- 総合エネルギー統計 [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/)
- 統計ポータルサイト(国内・海外のエネルギー関連統計データなどを扱う機関へのリンク集) <http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/analysis/>

### 電気事業連合会

- 世界のエネルギー消費と資源 <http://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyoku/world/>
- 原子力・エネルギー図面集 2015(PDF) [http://fepc-dp.jp/pdf/07\\_zumenshu\\_j.pdf](http://fepc-dp.jp/pdf/07_zumenshu_j.pdf)
- 原子力・エネルギー図面集(デジタルパンフレット)  
<http://fepc-dp.jp/?type=menu&ID=7>
- 情報ライブラリー <http://www.fepc.or.jp/library/index.html>
- 各種デジタルパンフレット入り口(電子情報資料集) <http://fepc-dp.jp/>

### 環境省

- 環境白書・循環社会白書・生物多様性白書  
<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/index.html>

### 理科年表(丸善出版・国立天文台編)

- 理科年表オフィシャルサイト <https://www.rikanenpyo.jp/>

### 国際単位系(SI) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター

- <https://www.nmij.jp/library/units/si/>

### 石油便覧 <http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/index.html>

- 第4編 石油産業の活動  
<http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/part04/index.html>

### 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油・天然ガス用語辞典

- <http://oilgas-info.jogmec.go.jp/dicsearch.pl>

LADy SCIENCE BOOKLET 6  
エネルギー読本 I - 基本編 -

---

2016年3月15日発行

奈良女子大学 理系女性教育開発共同機構

CORE of STEM

Collaborative Organization for Research in women's Education of  
Science, Technology, Engineering, and Mathematics

〒630-8506 奈良市北魚屋東町

コラボレーションセンター Z207

TEL.&FAX 0742-20-3266

ladyscience@cc.nara-wu.ac.jp

---