

## まえがき

「エネルギー」という言葉で私たちは電気を思い浮かべるかも知れません。電気で電車が走るし、洗濯機やテレビなど電気製品が何でも使えます。ところが、明治初期までは電気はなく、「エネルギー」と言えば薪や炭で煮炊きしたり、移動手段に馬を使ったり風の力を利用した帆船を利用するぐらいでした。世界的に見ても18世紀まではエネルギーの利用に関しては似たような状況でした。ところが、18世紀に石炭を利用した産業革命が起これると、エネルギーの利用が増加の一途を辿りました。その後、エネルギーの利用は水力、石油、天然ガス、原子力と多様化しましたが、人々の暮らしの豊かさと便利さを支えるものとして飛躍的な拡大が続いています。

ところが、エネルギー利用の拡大と化石燃料の大量使用が続いた結果、公害、地球環境問題が浮上し、さらには化石燃料の枯渇が意識されるまでになりました。また、エネルギーの利用が進んだ結果、多様なエネルギー利用システムが登場しています。例えば、自動車では従来のガソリン車に加えて、ディーゼル車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車などの新しい方式が競合する状態になっています。家庭でも従来の電気・ガス製品に加えて、ヒートポンプ方式の機器、燃料電池を使ったエネファーム、照明におけるLEDなど多様な省エネ機器が登場しています。

人類は50万年前に火を使い始め、エネルギー利用を開始しました。しかし、エネルギーの大量使用の歴史はたかだか100年余りにすぎません。人類のエネルギー利用の仕方は、どちらかと言えば場当たりの、いまだに成熟しているとは言えません。今後も新しいエネルギー利用の方法が登場し、効率の悪いものは消えていくものと考えられます。私たちが享受している便利な生活を今後も続けるとすれば、また、開発途上国の人たちの今後の生活向上を認めざるを得ないとすれば、世界のエネルギー使用が今後も拡大し続けると考えなければなりません。その際、環境問題の悪化を防ぐ形でエネルギー利用を進めるにはよほどの開発、投資、政策的な後

押し、国際強調、さらには徹底した省エネの努力が必要となります。

2016年4月から電力の自由化がスタートします。また、2020年4月には電力会社の発送電分離が始まります。これらの動きは事業者にとっては大きなビジネスチャンスとなります。消費者にとっては、電力購入先を選ぶことができ、電気代が安くなる可能性が生じます。しかし、そのメリットを生かすためには、自分がどのような電気の使い方をしているかを分析し、どのような料金プランが自分に合っているかを知る必要があります。さらには、電力がどのようにして作られているかを知り、どのような発電方法が望ましいのか考えて行動することが求められます。ただ、再生可能エネルギーを主に供給している会社を選びたくてもそれが不可能という事態も予想されます。再生可能エネルギーはまだ量が少ないからです。

2011年3月11日の東日本大震災とそれに続く東京電力福島第一原発の事故は筆者にとって大きなショックでした。後者については、筆者が「原子核工学科」に教員として在籍していた経験があるため重いものがあります。その当時は基礎研究に携わっていたので、原発について勉強らしい勉強はしていませんでした。原発事故を受けて「専門バカであったことを反省し、自分にできることは何か」を考え、原発とエネルギーに関する勉強を始めました。以来、原発とエネルギーの問題が筆者の中で大きな位置を占めるようになっていきます。本書でもその問題意識が各所で現れていると思います。

福島第一原発の事故は放射能汚染と関東地方における計画停電をもたらし、原発の持つ問題性とエネルギー問題の重要性を浮き彫りにしました。私たちが原発を認めるにせよ認めないにせよ、使用済み核燃料の処理・処分、放射性廃棄物の処分、廃炉など原発の後始末をどのように行えばよいのかを考えなければなりません。さらに、どのような代替エネルギーがあり、それぞれがどのような特徴と問題点を抱えているのか、その問題点の克服のために、どのような開発や投資そしてどの程度の負担が必要なのかを考える必要があります。

本書は、私たちが日常出会っているエネルギーに関するちょっとした疑問や何気なく見過ごしている問題を、科学の眼で見ることを意図して書いたものです。私たちの住んでいる世界は好むと好まざるとにかかわらず、科学に関する関心と知識を必要としています。特に、エネルギーに関する問題は重要であるにもかかわらず、新しいものが次々に登場し、その知識の吸収は消化不良になりがちです。本書は、そのような問題に対する説明をなるべくわかりやすく、高校生程度の知識でわかるように、なおかつなるべく原理にまで遡って解説することを試みました。

本書は疑問形で書かれた話題に関して解説されていますが、始めから順に読み進めても良いし、関心がある話題について拾い読みしても良いようになっています。したがって、どこから読み進めても結構です。また、解説の終わりには「まとめ」が数行で書かれています。疑問形の問題に関する回答を自分で考えて「まとめ」を読んで比較するのも良いし、解説を読んで自分が理解した内容を「まとめ」と比較してみるのも良いかも知れません。

若者の読書離れ、理科離れが言われる今日、日常の何気ない現象に目をとめ、「なぜ?」という疑問を持つこと、そして子どもが発信してくる疑問に大人が答えることができることが求められます。その答え方次第で子どもたちは自然や身近で経験する現象に対する関心を深め、好奇心を広げ、世界の広がりや奥深さを感じるに違いありません。

本書の出版を認めてくださった技報堂出版(株)編集部長の石井洋平氏および直接編集に携わってくださり有益な助言を頂いた同社編集部の小巻慎氏に深く感謝したいと思います。

本書は、筆者の孫である三浦隆明君<sup>たかあき</sup>および稲場咲樹美ちゃん<sup>さきみ</sup>に捧げたいと思います。この4月に、隆明君は中学生、咲樹美ちゃんは3才になる予定ですが、二人を日本の将来を担い21世紀後半を生きるであろう少年少女の代表とさせて頂きたいと思います。

2016年3月

稲場 秀明

## 目 次

第1章 序 章 .....	1
1話 エネルギーとは? .....	2
2話 人類はエネルギーをどう使ってきた? .....	4
3話 エントロピーとは? .....	6
4話 エントロピーは減る? .....	8
5話 効率良いエネルギーの使い方は? .....	10
6話 太陽エネルギーの恩恵をどう受けている? .....	12
7話 なぜエネルギーが問題? .....	14
第2章 化石燃料 .....	17
8話 石炭利用の変遷は? .....	18
9話 石炭が世界で多く使われるわけ? .....	20
10話 石油利用の変遷は? .....	22
11話 発電需要が減っている石油はなぜ重要? .....	24
12話 天然ガスの供給と使用は? .....	26
13話 シェール革命によるエネルギー市場での影響は? .....	28
第3章 発 電 .....	31
14話 石炭火力発電技術の進歩は? .....	32
15話 天然ガス発電技術の進歩は? .....	34
16話 水力発電の動向は? .....	36
17話 自家発電の役割? .....	38
18話 ゴミ発電の現状? .....	40
第4章 再生可能エネルギー .....	43
19話 太陽光発電の仕組みと普及? .....	44

vi 目次

20 話	次世代の太陽光発電？	46
21 話	風力発電の仕組みと課題？	48
22 話	地熱発電の仕組みと課題？	50
23 話	海洋エネルギー発電の仕組み？	52
24 話	バイオマスエネルギーの開発状況？	54
<b>第5章 原子力エネルギー</b>		<b>57</b>
25 話	原子力発電の仕組み？	58
26 話	福島第一原発事故はどのように起きた？	60
27 話	福島原発事故後の世界のエネルギー動向？	62
28 話	放射線の人体への影響？	64
29 話	核燃料サイクルの現状？	66
<b>第6章 エネルギー貯蔵</b>		<b>69</b>
30 話	エネルギー貯蔵とは？	70
31 話	蓄熱とは？	72
32 話	NAS 電池とは？	74
33 話	ニッケル水素電池とは？	76
34 話	リチウムイオン電池とは？	78
35 話	超伝導エネルギー貯蔵の仕組みは？	80
36 話	圧縮空気をエネルギー貯蔵システムに？	82
<b>第7章 燃料電池</b>		<b>85</b>
37 話	燃料電池とは？	86
38 話	固体高分子形燃料電池の仕組みは？	88
39 話	ダイレクト燃料電池の仕組みは？	90
40 話	リン酸形燃料電池の仕組みは？	92
41 話	溶融炭酸塩形燃料電池の仕組みは？	94
42 話	固体酸化物形燃料電池の仕組みは？	96
43 話	各種燃料電池の比較は？	98

<b>第8章 送電と配電</b> .....	101
44 話 送電の現状は？ .....	102
45 話 直流送電の利点と欠点は？ .....	104
46 話 送電線地中化はどうか？ .....	106
47 話 送電ネットワークの働きは？ .....	108
48 話 変電所の役割は？ .....	110
49 話 変電所の設備はどのように働くか？ .....	112
50 話 鉄道変電所の役割は？ .....	114
<b>第9章 自動車とエネルギー</b> .....	117
51 話 ガソリン車とは？ .....	118
52 話 ディーゼル車とは？ .....	120
53 話 ハイブリッド車とは？ .....	122
54 話 プラグインハイブリッド車とは？ .....	124
55 話 電気自動車とは？ .....	126
56 話 燃料電池自動車とは？ .....	128
<b>第10章 水素エネルギー</b> .....	131
57 話 なぜ水素エネルギーが注目されるのか？ .....	132
58 話 化石燃料からどのように水素を得るのか？ .....	134
59 話 化石燃料以外からどのように水素を得るのか？ .....	136
60 話 どのように水素を貯蔵, 運搬するか？ .....	138
61 話 水素利用社会のイメージは？ .....	140
<b>第11章 環境とエネルギー</b> .....	143
62 話 環境問題とエネルギー問題の関係は？ .....	144
63 話 二酸化炭素が増えるとなぜ地球が温暖化するのか？ .....	146
64 話 大気中に浮遊する粒子状物質とは？ .....	148
65 話 火力発電の環境への影響は？ .....	150
66 話 自動車排気ガスの環境への影響は？ .....	152

<b>第12章 省エネルギー</b> .....	155
67話 日本におけるエネルギー消費の構造は？ .....	156
68話 発電部門での省エネは？ .....	158
69話 産業部門での省エネは？ .....	160
70話 運輸部門での省エネは？ .....	162
71話 業務部門での省エネは？ .....	164
72話 家庭部門での省エネは？ .....	166
<b>第13章 生物とエネルギー</b> .....	169
73話 人体のエネルギー収支は？ .....	170
74話 生物の細胞でのエネルギーのやりとりは？ .....	172
75話 筋肉と運動のエネルギーをどう得ているのか？ .....	174
76話 脳と精神のエネルギーはどう得られるのか？ .....	176
77話 植物はエネルギー変換をどのようにしているか？ .....	178
78話 植物はどのようにエネルギーを貯蔵し利用しているのか？ .....	180
<b>第14章 エネルギーの未来</b> .....	183
79話 化石燃料の未来は？ .....	184
80話 再生可能エネルギーの未来は？ .....	186
81話 燃料電池の未来は？ .....	188
82話 自動車の未来は？ .....	190
83話 電力自由化と発送電分離の未来は？ .....	192
84話 スマートグリッドの未来は？ .....	194

---

---

# 第1章 序 章

---

---

## 1 話 エネルギーとは？

エネルギーとは「物質に蓄えられた仕事をする能力」で、力とその向きに動いた距離の積として表される。系のエネルギーとは、系が他に対して仕事をする能力を言う。系は宇宙の一部で、私たちが考察の対象として部分のことである。エネルギーは、考察の内容に応じて力学系、生態系、太陽系、実験系エネルギー等がある。系でない部分は外界と言い、通常、系と比べて非常に大きく、外界の状態は常に一定に保たれると仮定されている。

一方、エネルギーという言葉は、「彼にはエネルギーがある」、「今日はエネルギーを消耗した」等のように、物理の用語としてのみでなく、精神的な意味を含めた「活力」、「物事を行う能力」を指し示す言葉としても用いられている。元々の意味は「仕事をする能力」から来ている。

位置エネルギーは、物体が「ある位置」にあることで物体に蓄えられるエネルギーのことで、ポテンシャルエネルギーとも呼ばれる。例えば、ある高さに持ち上げたボールを考えると、そのボールを静かに離すとボールは下に落ちる。これは地球による重力がボールに働くからである。ボールをある高さに持ち上げることで物体は位置エネルギーを得ることになり、ボールを支える手から離れた瞬間、位置エネルギーは運動エネルギーに変化し始める。ボールが落ちていくにつれて位置エネルギーは減少し、代わりに運動エネルギーが増えていく。位置エネルギー+運動エネルギーは物体が持つ全エネルギーで、力学的エネルギーと言う。

バネにつながれている物体は、自然長からずれた位置にある時、位置エネルギーを持つ。ここでの位置エネルギーは弾性エネルギーのことで、自然長からずれた位置で手を放すと、物体は単振動を始める。

人は寒い時に手を擦り合わせるが、その時の力学的エネルギーによって摩擦熱が発生し、熱エネルギーに変わる。その熱エネルギーは、手の皮膚にある分子の並進運動、回転運動、分子振動の形になっている。また、周囲の空気の温度が低いため、摩擦熱の一部は空気を温め、空気分子の運動エネルギーにも変化する。

火力発電所では、石炭や天然ガスを燃やす時の化学的エネルギーを使って熱エネルギーに変え、高温の水蒸気の力によりタービンを回転させて力学的エネルギーに変え、さらにタービンの回転力により電気エネルギーに変える。この時、燃料の化学的エネルギーは、力学的エネルギー、電気エネルギーへと変換されるが、その変

換の効率は100%ではない。それぞれの過程でエネルギー損失があり、損失分のエネルギーは、熱エネルギーとなって周囲に放散されることになる。

生物はエネルギーの多くを太陽に依存し、太陽光のおかげで地球の平均気温は15℃程度に保たれ、生物が生きていく環境が実現している。植物は、太陽光を利用して光合成を行い、海では太陽光を受けて水が蒸発して雲が発生し、雨が降る。そして、その雨水を生物が利用している。こう考えていくと、水力発電、風力発電も元は太陽光に依存している。

人はエネルギーを利用して日々生活している。食物を食べ、消化し、活動のエネルギーを得るが、その食物は植物と動物からのものである。動物は植物を食べるので、植物が食物の源である。植物は太陽エネルギーを利用して光合成を行っているので、太陽エネルギーが生命の源ということになる。

つまり、エネルギーは、光エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー、力学的エネルギー、電気エネルギー等のように形態が変わるが、人は必要に応じて自らが欲しいエネルギーの形態にして利用していることになる。



図1 火力発電におけるエネルギー形態の変化

**まとめ** 他に対して仕事をする能力をエネルギーと言う。物体が「ある位置」にあることで物体に蓄えられるエネルギーを位置エネルギーと言う。位置エネルギーと運動エネルギーの和を力学的エネルギーと言う。火力発電では、燃料の化学的エネルギーを燃焼によって熱エネルギーに変え、高温の水蒸気によってタービンを回転させる力学的エネルギーに変え、それを電気エネルギーに変える。このように、エネルギーの形態は変わるが、人は自分が欲しいエネルギーの形態を利用している。

## 第 2 章 化石燃料

# 2

## 8話 石炭利用の変遷は？

石炭は、古代の植物が完全に腐敗分解する前に地中に埋もれ、長い期間にわたって地熱、地圧を受け石炭化した植物化石である。古くは2億8千万年前頃の石炭紀（ヨーロッパ、北アメリカ）、新しくは7～2千万年前の新生代第三紀（ドイツ、北アメリカ、日本等）の地層から産出する。現在の地球上では、枯れて倒れた樹木は大半がシロアリ、キノコ等の菌類や微生物によって分解されるが、古生代ではそれら分解者がそれほど多くなく、大量の植物群が分解前に地中に埋没していた。湿原や湿地帯では、植物の遺体は酸素の少ない水中に沈むことによって生物による分解が十分進まず、分解されずに残った組織が泥炭となって堆積する。泥炭は年代を経るに従って地熱、地圧を受け、泥炭→褐炭→歴青炭→無煙炭に変わっていく。木材の成分セルロースやリグニンの構成元素は炭素、酸素、水素であるが、石炭化が進むに従って酸素や水素が減り、炭素濃度が増え、外観も褐色から黒色に変わり、硬くなる。炭素の含有量は、泥炭の70%以下から順次上昇し、無煙炭の炭素濃度は90%以上に達する。

石炭は、産業革命以後、20世紀初頭まで最重要の蒸気機関用の燃料として、そして、化学工業や都市ガスの原料として、黒いダイヤモンド、黒の宝石と呼ばれていた。都市の照明や暖房・調理用に石炭由来の合成ガスが使われていた。これは石炭の熱分解によって得られるガスで、最初はコークスを作る際にコークス炉から発生するメタン、水素を主成分とするガスで、ロンドンのガス灯等に使われた。その後もっと大量に生産できる都市ガスが開発された。灼熱したコークスに水をかけて得られる一酸化炭素と水素からなるガスで、日本でも大都市で1970年代まで使用された。便利ではあるものの毒性が強いため、現在では毒性の少ない天然ガスに切り替わっている。19世紀末から20世紀中頃にかけて、先進各国の都市では、工場や家庭で使用する石炭から出る煤煙による公害問題が大きくなっていった。

第一次世界大戦前後から艦船の燃料が石炭の2倍のエネルギーを持つ石油に切り替わり、戦後、中東で大量の石油が採掘されるようになると、産業分野においても石油の導入が進み、西側先進国では採掘条件の悪い坑内掘り炭鉱は廃れた。しかし、1970年代の2度の石油危機で石油がバレル12ドルになると、産業燃料や発電燃料は再び石炭に戻り、アメリカ、ドイツ、中国等では現在でも最も重要なエネルギー源である。だが、日本では国内炭鉱は復活しなかった。オーストラリアの露天掘り

等の採掘条件の良い海外鉱山で機械化採炭された安価な海外炭に切り替わっていたからである。海上荷動きも、原油に次いで石炭と鉄鉱石が多く、30万tの大型石炭船も就役している。

石炭は石油や天然ガスに比べ燃焼した際の二酸化炭素排出量が多く、地球温暖化問題の面からは不利だが、埋蔵量が110年程度と見込まれている。また、石油と違い、産炭国には政情の安定している国の埋蔵量が多く、価格も安定している。

石油が安価だった1960年代に重油製鉄も検討されたが、製鉄における石炭の優位は崩れなかった。重油ボイラを比較的簡単に微粉炭ボイラに改造できたため、第二次石油危機後の1980年代には、多くの発電燃料、産業燃料が石油から値段の安い石炭に回帰する動きが生じた。発電燃料、産業燃料においても、石炭を粉にして吹き込む微粉炭ボイラが開発され、手作業給炭は過去のものとなった。産業分野では石炭は今も主力エネルギーである。

自動車の普及した先進国では石油の占める割合が高いが、エネルギー消費の過半数を占める発電燃料、産業燃料では、コスト面の優位性から石炭が首位を奪還した国も多くある。北海油田を抱えるイギリスは産業燃料も天然ガスの比率が高く、フランスは原子力発電が8割を占めるが、ドイツでは国内石炭が首位で、シベリア天然ガスがそれに次いでいる。アメリカでも、発電燃料は石炭が圧倒的首位となっている。中国は、自動車の普及で石油輸入量が急増したが、依然として全エネルギーのうち7割以上を石炭が占めている。

**まとめ** 石炭は、古代の植物が完全に腐敗分解する前に地中に埋もれ、長い期間、地熱や地圧を受けて石炭化した植物化石である。石炭は、産業革命以後、20世紀初頭まで蒸気機関用の燃料、化学工業や都市ガスの原料として貴重であった。第一次世界大戦前後から、多くの燃料が石炭の2倍のエネルギーを持つ安価な石油に切り替わった。1970年代の石油危機で石油が高くなると、産業燃料や発電燃料は再び石炭に戻り、アメリカ、ドイツ、中国等では現在も重要なエネルギー源である。

---

---

# 14

第14章 エネルギーの未来

---

---

## 79 話 化石燃料の未来は？

石油と天然ガスの採掘可能年数は数十年と言われている。実際には、使用できる年数がその倍程度あるとしても、数十年後にはその価格は相当上がるとを覚悟しなければならない。今からそれに備えた技術開発を行う必要がある。

石油の中で最も消費量の大きいのはガソリンである。ガソリン消費を少なくするハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車等の開発を急ぎ、普及を図る必要がある。この分野をリードしている自動車メーカーが日本にはあり、今後の開発にも期待がかかる。メーカー側の努力だけでなく、充電スタンド、ワイヤレス充電、水素スタンド等の環境整備も重要である。また、ガソリン車に供給できるバイオ燃料の開発、水素燃料を安価に供給するシステム開発も重要である。ガソリンの値段が上がった時期の影響もあり、ハイブリッド車や燃費の良い軽自動車が高車販売のトップグループを占めるようになっている。

ここ数十年程度は、石油が値上がりした影響もあり、エネルギー消費に占める石油の割合が減少している。特に火力発電における石油のシェア低下は著しい。しかし、液体で扱いやすくすぐに使える利点がある石油は、すぐには使用を止めるのが困難な面がある。これは火力発電用だけでなく、石油を燃料とするあらゆる用途に言える。長期的には、石油を用いた火力発電等のように燃料として使うことは、廃止されることが望ましい。化石燃料保存の視点からも、地球環境保全の視点からもそうである。石油は、燃料として使うのではなく、プラスチック、ゴム、繊維、油脂、合成化学薬品等の原料として使用すべきである。石油精製の際、重油、灯油、軽油、ガソリン等が蒸留によって得られるが、これらはエチレン、プロピレン、ベンゼン、ブタジエン等の石油化学製品の原料として用いられることが望ましい。

LNG火力発電は、現在は最も二酸化炭素排出量が少ない火力発電として主力になっている。しかし、天然ガスも数十年後には価格が相当上がると考えられるので、使うとしても効率の良い方法を用いる必要がある。現在より高温化した複合発電で、総合効率70%以上を目指すべきであろう。その場合、発電用タービン材料のさらなる高温化と複合発電の技術開発がテーマとなる。総合効率70%以上を目指すには、耐熱合金では無理で、C/C(炭素繊維強化炭素)複合材料等の開発がカギとなる。

日本では天然ガス資源は少ないが、日本近海にはメタンハイドレートが大量に埋

蔵されている。メタンハイドレートを掘り出す方法が開発できれば、資源の少ない日本にとっては朗報となる。ただ、メタンハイドレートを海の底から経済的に可能な方法で掘り出すのは困難で、長期的な課題と言える。

現在、石炭発電は主として微粉炭を燃やして用いられているが、長期的な観点からは廃止すべきであると考えられる。石炭は採掘可能年数が最も長く、石油や天然ガスの代替燃料としての視点も重要である。そのような観点で、石炭は基本的に液化するかガス化すべきであると考えられる。

石炭の液化、ガス化は、固体燃料である石炭を灰分、硫黄分を除去したクリーンで取り扱いやすい液体燃料、気体燃料に転換することにより幅広い利用を可能にする。石炭液化は、石油に直接代替し得る液体燃料にする技術で、石油を輸入に頼っている日本のエネルギー供給構造を改善し、石油価格上昇の抑止力にもなる。石炭ガス化は、石炭から都市ガスあるいは複合発電システムに使用できる気体燃料を製造するもので、石炭を空気か水蒸気と反応させ、二酸化炭素等を除き、メタン、水素等の有用な燃料を得て、都市ガスや高効率の石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)に使用する。IGFCは発電効率が高く、相対的に二酸化炭素の排出を少なくすることができる。

**まとめ** 石油の中で最も消費量の多いのがガソリンで、ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車等の開発を急ぎ、充電スタンド、ワイヤレス充電、水素スタンド等の環境整備も重要である。石油は、火力発電のように燃やして使うのではなく、プラスチック、ゴム、繊維等の原料として使用すべきである。石炭は微粉炭を燃やして使っているが、長期的には液化するか、ガス化すべきである。石炭液化は、石油に直接代替し得る液体燃料にする。石炭をガス化して効率の高い複合発電システム等に使用することが望ましい。