



エコトピア科学シリーズ 3

EcoTopia

環境調和型社会のための
エネルギー科学

名古屋大学未来材料・システム研究所

編

コロナ社

エコトピア科学シリーズ編集委員

編集委員長	高井 治	名古屋大学エコトピア科学研究所
編集幹事		
1巻担当編集委員	田原 譲	名古屋大学エコトピア科学研究所
2巻担当編集委員	余語 利信	名古屋大学エコトピア科学研究所
3巻担当編集委員	長崎 正雅	名古屋大学エコトピア科学研究所
続巻担当編集委員	楠 美智子	名古屋大学エコトピア科学研究所
続巻担当編集委員	内山 知実	名古屋大学エコトピア科学研究所

(2012年3月現在)

執筆者一覧 (執筆順)

ながさき たかのり 長崎 正雅	名古屋大学	まえがき, 序章, 各章冒頭
もり たつお 森 竜雄	愛知工業大学	1章 (1.1節)
はせがわ ゆたか 長谷川 豊	名古屋工業大学	1章 (1.2節)
いたや よしのり 板谷 義紀	岐阜大学	1章 (1.3.1~1.3.4)
はせがわたつや 長谷川達也	名古屋大学	1章 (1.3.5~1.3.10)
かじた しん 梶田 信	名古屋大学	1章 (1.4節)
なるせ いちろう 成瀬 一郎	名古屋大学	2章 (2.1節)
もりた しげあき 森田 成昭	大阪電気通信大学	2章 (2.2節)
いとう たかし 伊藤 孝至	名古屋大学	2章 (2.3節)
はやかわ なおき 早川 直樹	名古屋大学	3章 (3.1節)
こじま ひろき 小島 寛樹	名古屋大学	3章 (3.1節)
はな い まさひろ 花井 正広	福岡大学	3章 (3.2節)

(2015年11月現在)

現在、私たちは環境問題、エネルギー問題、資源問題、災害・事故問題等々、さまざまな地球規模での問題に直面しており、その解決に急いで取り組まなければなりません。しかし、その解決策を得るには、学問、また技術の裏付けが必要です。そこで誕生したのが「エコトピア科学」です。全5巻にわたる本シリーズは、エコトピア科学がどのようなものであるかをわかりやすく解説しています。

本シリーズの執筆者は、名古屋大学エコトピア科学研究所の所員および共同研究者です。ここで、エコトピア、エコトピア科学およびエコトピア科学研究所について説明いたします。

私たちは、安全・安心で豊かな美しい社会を将来にわたって持続的に発展させていくためには、地球環境負荷を低減した環境調和型社会の実現が必須であると考えました。そして、このような社会は21世紀の私たちが目指す理想社会であると位置づけ、この社会を「エコトピア (EcoTopia)」と呼びます。エコトピアを築いて、明日の世代に手渡すことは、現代に生きる私たちに課せられた責務です。この実現のためには、「もの、エネルギー、情報の循環・再生と人間との調和」を切り口にして、自然科学のみならず、人文科学や社会科学をも含む、幅広い知の統合・融合が重要となります。このように、エコトピアを実現させるためには、現在の地球規模での諸問題を総合的に解析し、その問題を解くための幅広い知の統合・融合に基づく新しい科学の創成が必要になりました。そこでエコトピア実現に向けての新たな科学の誕生を願い、この科学を「エコトピア科学」と名付けました。「エコトピア科学研究所」は、エコトピア科学をささえる材料、エネルギー、環境、情報・通信等の基盤研究分野で従来から顕著な実績をあげてきている知と新たな文理融合型・理系横断型の知を結集し、2006年4月1日に名古屋大学に最大規模の部局横断型研究拠点を

になう附置研究所として創設されました。私たちは、この創設以来エコトピアの実現を目指す知の拠点として、この新しい科学の創成に挑んでおります。

本シリーズは、エコトピア科学がどのようなものであるかを知っていただくため、第1巻「エコトピア科学概論」、第2巻「環境調和型社会のためのナノ材料科学」、第3巻「環境調和型社会のためのエネルギー科学」、続巻の「環境調和型社会のための環境科学」、「環境調和型社会のための情報・通信科学」の5巻構成になっております。第1巻においてエコトピア科学について入門していただき、第2巻以降で各論を学んでいただきたく考えております。

最後に本書および本シリーズを刊行するにあたり、「エコトピア科学プロジェクト」を手がけられ、本書のきっかけを作られたエコトピア科学研究所の初代所長の松井恒雄名誉教授、副所長を務めました伊藤秀章名誉教授、北川邦行教授、片山新太教授、現職の田中信夫所長、大日方五郎副所長、片山正昭副所長に、また編集・刊行に御尽力いただきましたコロナ社に心より御礼申し上げます。

繰り返すようですが、エコトピアを築くことは、現在に生きる私たちの責務であります。次世代にエコトピアを手渡すため、本シリーズに皆様の御支援をよろしくお願いいたします。

2012年3月

編集委員長 高井 治

本シリーズは名古屋大学エコトピア科学研究所の編集書籍として発行を開始し、これまでに1、2巻を発行しましたが、2015年10月1日よりエコトピア科学研究所が未来材料・システム研究所へ改組したことに伴い、3巻「環境調和型社会のためのエネルギー科学」は、本研究所にて継続して発行することになりました。引き続き、本シリーズをご愛読ください。また、新体制の未来材料・システム研究所への一層のご支援をよろしくお願いいたします。

2015年11月

未来材料・システム研究所 所長 興戸 正純

現代の社会は、膨大なエネルギーを消費することで成り立っている。この物質的に豊かな社会を維持する、あるいはさらに発展させるためには、持続的なエネルギー源が不可欠である。ここで「持続的」とは、長期間継続的に使用するのに十分な量があり、かつ長期間継続的に使用しても地球環境に致命的な悪影響を及ぼさないという意味である。しかるに、現代のエネルギー消費の大部分を支えている化石燃料は、いずれは枯渇する。しかも現在進行している地球温暖化の元凶とも言われている。

では、将来、どのようなエネルギー源を使ってどのような社会を築いていくべきだろうか？ この問いについては、政治や経済から個人の価値観に至るさまざまな要素が関係しており、科学のみで答を出すことはできない。しかしながら、エネルギー問題について、科学的事実を無視した議論が散見されるのも事実である。そのような議論はやはり不毛と言わざるを得ない。

そこで本書では、科学的な見地から、新しい持続的エネルギー生産技術、新しいエネルギー変換技術、新しいエネルギー輸送・貯蔵・利用技術について、原理と特徴、開発の現状、および今後の課題を解説した。紙数に限りがあるので、関連技術を網羅することは意図していない。特に、対象とするエネルギーが少量にとどまる技術については、思い切って割愛した。ただし、現役の研究者が執筆にあたっていることを生かすため、各執筆者が実際の研究で見出した興味深い話題について、あえて紙数をさいて紹介したところもある。

本書が持続可能な環境調和型社会を築くための議論の一助となれば幸いである。

2015年10月

著者を代表して 長崎 正雅

序章 エネルギーの未来に向けて知っておくべきこと

1章 新しい持続的エネルギー生産技術

- 1.1 太陽電池と太陽熱発電 8
 - 1.1.1 太陽エネルギー 8
 - 1.1.2 太陽電池 12
 - 1.1.3 太陽熱発電 18
 - 1.1.4 太陽エネルギー発電の生産量とコスト 21
 - 1.1.5 資源としての太陽エネルギー 24
- 1.2 風力発電 25
 - 1.2.1 風力エネルギー利用技術 25
 - 1.2.2 風力発電導入促進への技術課題 33
 - 1.2.3 次世代風車にむけた技術開発 41
 - 1.2.4 風力発電の今後 51
- 1.3 バイオマス 51
 - 1.3.1 バイオマスの種類とエネルギー 51
 - 1.3.2 日本の地域分散バイオマスエネルギー動向 53
 - 1.3.3 バイオマスガス転換技術の分類と特徴 57
 - 1.3.4 日本のバイオガスエネルギー動向 61
 - 1.3.5 小規模バイオガス発生装置 63
 - 1.3.6 固定床式メタン発酵槽 68
 - 1.3.7 ANG 低圧メタン貯蔵装置 71
 - 1.3.8 メタン吸着剤 72
 - 1.3.9 バイオメタンエネルギーシステムのアジアにおける展開 76
 - 1.3.10 分散型バイオメタンエネルギーシステムの展望 79

1.4	核融合発電	80
1.4.1	核融合とは	81
1.4.2	核融合の反応を起こすには	82
1.4.3	1億℃のプラズマの制御	84
1.4.4	プラズマの加熱	85
1.4.5	核融合炉の安全性	86
1.4.6	核融合実験の現状	87
1.4.7	国際熱核融合炉 ITER 計画	89
1.4.8	ITER の計測開発	90
1.4.9	プラズマ・材料相互作用	92
1.4.10	ヘリウム照射金属研究	96

2章 新しいエネルギー変換技術

2.1	エネルギー変換システムの熱力学的解釈	98
2.1.1	プロセスの熱力学的表記	99
2.1.2	プロセスの熱力学からシステムの熱力学への展開	103
2.1.3	燃焼プロセスを利用した発電システムの熱力学的解釈	105
2.1.4	熱力学コンパスによる新プロセスの実現可能性評価	108
2.1.5	化石燃料による高効率エネルギー変換技術の現状と動向	111
2.2	燃料電池	120
2.2.1	燃料電池の原理と特徴	120
2.2.2	燃料電池の歴史と現状	128
2.2.3	燃料電池の今後の課題	135
2.3	熱電変換	136
2.3.1	熱電変換とは	136
2.3.2	熱電発電	142
2.3.3	熱電変換の課題と将来展望	162

3章 新しいエネルギー輸送・貯蔵・利用技術

3.1 エネルギーの輸送と貯蔵	166
3.1.1 エネルギー輸送技術	166
3.1.2 電気エネルギー貯蔵技術	180
3.2 エネルギーの効率的利用	186
3.2.1 機器の省エネ・高効率化	186
3.2.2 エネルギーシステムの効率化	201

引用・参考文献	213
---------	-----

索引	226
----	-----



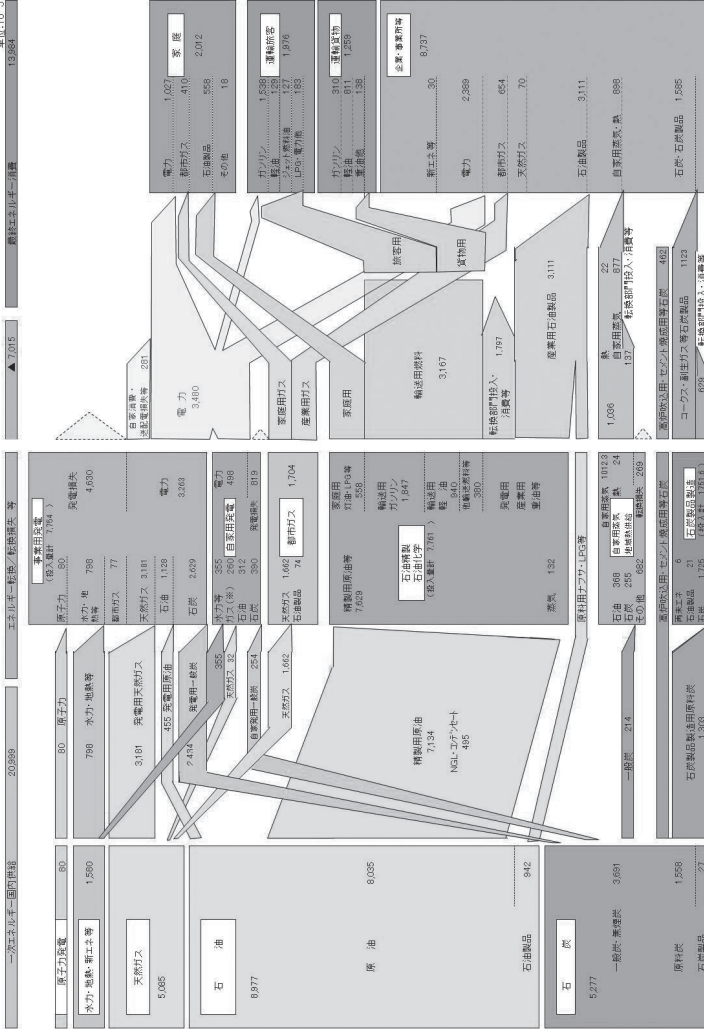
エネルギーの未来に向けて 知っておくべきこと

現代の社会は、きわめて大量のエネルギーを消費することで成り立っている。図 1¹⁾ は、わが国における 2013 年度 1 年間のエネルギーの流れを示したものである。最終エネルギー消費量は 1.3984×10^{19} J であり、これを 365 日 \times 24 時間 / 日 \times 3600 秒 / 時間 ($=3.1536 \times 10^7$ s) で割れば、最終エネルギー消費速度として 4.43×10^{11} W ($=443$ GW), さらに 2013 年の日本の人口 1.27298×10^8 人²⁾ で割れば、一人当りの最終エネルギー消費速度として 3.48 kW/人という値が得られる (ちなみに、生物としての人間のエネルギー消費速度は 100 W/人程度である)。かなり強烈な値だと思いがいかがだろうか？

kW という単位から電力を連想し、「えっ？ うちではそんなに電気使っていないよ？」と思う人もいるかもしれない。しかし、図 1 を見ればわかるように、家庭の消費電力量は全消費電力量の 30%, 最終エネルギー消費量の 7% にすぎない。すなわち、日本全体では、家庭で使用している電力量の 14 倍のエネルギーを消費しているのである。消費量に損失量を加えた一次エネルギー供給量を見れば、さらにその 1.5 倍である。

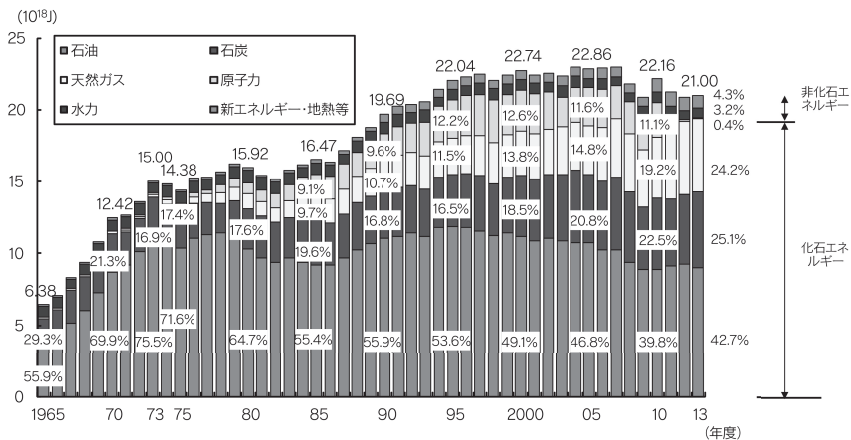
では、この大量のエネルギーをどうやってまかなっているのだろうか？ 図 2¹⁾ は、一次エネルギー国内供給の推移を示したものである。東日本大震災 (2011 年 3 月) の前でも、一次エネルギー供給量の 80% 以上をいわゆる化石燃料 (石炭, 石油, 天然ガス) に頼っていた。震災後、原子力発電所が停止したためにその割合はさらに大きくなり、2012 年度以降は 90% を超えている。しかも、日本はその化石燃料のほぼ全量を輸入しているのである。

化石燃料以外の一次エネルギーは、図 2 では「原子力」、「水力」、「新エネル



(注1) 本フロー図は、我が国のエネルギーフローの概要を示すものであり、(注3) 「石油」は、原油、NGL・コンデンサートのほか、石油製品を含む。
 (注2) 「未活エネ」は廃棄物エネルギー利用のことがである。(注4) 「石炭」は、一般炭・無煙炭、原料炭のほか、石炭製品を含む。
 (注5) 「自家発電用」は「ガス」は、天然ガス及び都市ガス。

出典：資源エネルギー庁ウェブサイト（資源エネルギー庁が「総合エネルギー統計」を基に作成）
図1 日本のエネルギーバランス・フロー概要（2013年度）



(注1) 「総合エネルギー統計」では、1990年度以降、数値について算出方法が変更されている。
 (注2) 「新エネルギー・地熱等」とは、太陽光、風力、バイオマス、地熱などのこと。

出典：資源エネルギー庁ウェブサイト¹⁾ (資源エネルギー庁が「総合エネルギー統計」を基に作成)

図2 一次エネルギー国内供給の推移

「新エネルギー・地熱等」に分類されている。太陽光、風力、バイオマス（生体由来有機物）等の自然エネルギーは、すべて「新エネルギー・地熱等」に含まれる。かなり身近になってきた太陽光発電や風力発電も、量的に見れば「その他諸々」のエネルギー源の一つにすぎない。

化石燃料は、太古の植物が太陽エネルギーを有機物として固定したことに由来する。現代に生きるわれわれからすると、過去何億年にもわたる「貯金」が残されている状況である。したがって、当然のことながら使えばなくなってしまふ。原子力発電の燃料であるウランも、地球誕生時に存在していたものが残っているだけであり、やはり使えばなくなってしまふ。

資源がどのくらい残っているかを示す指標の一つに可採年数がある。これは各年末における確認埋蔵量（現在の技術的・経済的条件のもとで、確実に回収可能と推定される埋蔵量）をその年の生産量で割った値である。表1に世界の化石燃料およびウランの消費量シェアと可採年数を示す。

新しい資源が発見されたり技術の進歩によって採掘コストが下がったりすれ

表1 世界のエネルギー資源の
消費量シェアと可採年数

種 別	消費量シェア [%]	可採年数 [年]
石油	32.3	53
天然ガス	23.6	54
石炭	29.9	110
ウラン	4.4	124

ウランの可採年数のみ 2012 年の値³⁾、
ほかは 2014 年の値⁴⁾

ば、可採年数は増加する。取引価格の上昇も可採年数を押し上げる要因である。逆に、経済発展で需要が高まり生産量が増えれば、可採年数は減少する。その結果として、例えば石油の可採年数は、1980 年代以降ほぼ 40 年程度で推移してきた。最近数年は、むしろ増加する傾向にある¹⁾。しかし、残っている資源が減少していることに変わりはなく、ひとたび確認埋蔵量の増加と生産量とのバランスが崩れれば、一気に枯渇に向かう可能性がある。実際、石炭の可採年数は、中国の消費量の急激な増加などによって、2002～2007 年の 5 年間で 199 年から 124 年へと、じつに 75 年(38%)も減少した⁴⁾。

また、原子力については、消費量シェアが低いことに注意する必要がある。高速増殖炉、トリウム燃料炉、海水からのウラン回収等の新しい技術が実用化されない限り、必ずしも化石燃料より資源が豊富とはいえない。

一方、太陽エネルギーは、われわれの時間感覚からすると無尽蔵とってよいだろう。持続可能な社会を実現するためには、その利用を進める必要がある。ただし、無尽蔵とっていても、単位時間当りに得られる量すなわちエネルギー生産速度には限りがある。ここで生産とは、いわばわれわれのエネルギー供給・消費システムの外にあったものを内に持ってくるプロセスである。太陽エネルギーについては、地球に降り注いでいる太陽放射のエネルギーを、電気や燃料などの利用できる形態に変換するプロセスである。

では、太陽エネルギーのエネルギー生産速度は、日本ではどれくらいなのだろうか？ 以下で大まかに見積もってみよう。地球と太陽の平均距離において、太陽光線に垂直な単位面積に単位時間当り入射する太陽の放射エネルギー

は、 1366 W/m^2 である。そのうち、直接あるいは大気などで散乱されて地上に到達する量は、緯度、季節、時刻、天候等によって異なるが、日本では平均 $130 \sim 160 \text{ W/m}^2$ 程度⁵⁾である。ここでは 150 W/m^2 とし、これに日本の陸地面積 $3.78 \times 10^{11} \text{ m}^2$ ⁶⁾を掛ければ、 $5.67 \times 10^{13} \text{ W}$ という値を得る。この太陽エネルギーを利用した代表的なエネルギー生産プロセスとしては、太陽光発電(太陽電池)、風力発電、バイオマスがある。

太陽光発電の場合、太陽電池の変換効率を20%とすれば、その単位面積当りエネルギー生産速度は 30 W/m^2 となる(実際の太陽光発電所の単位面積当りエネルギー生産速度は、例えば2015年1月に営業運転を開始した「メガソーラーしみず」で 7 W/m^2 程度⁷⁾である)。一方、日本のエネルギー最終消費速度は $4.55 \times 10^{11} \text{ W}$ であるから、かりにこれをすべて太陽電池でまかなうとすれば、太陽電池本体だけで $1.52 \times 10^{10} \text{ m}^2 = 15200 \text{ km}^2$ の面積が必要である。これは、日本の陸地面積の4%、可住地面積⁶⁾の12%に相当する。

風力発電の単位面積当りエネルギー生産速度は、風の状況、風車単体のエネルギー変換効率に加えて、風車の設置密度に依存する。風車の風下では風の状況が乱れるため、風車の設置密度には上限が生じる⁸⁾。その結果、単位面積当りエネルギー生産速度は、設備容量(設計上の最大発電量)で計算しても 10 W/m^2 程度⁹⁾である(日本における風力発電所の設備利用率は20%程度¹⁰⁾なので、実際の単位面積当りエネルギー生産速度は 2 W/m^2 程度となる)。

植物系バイオマスによるエネルギー生産速度は、基本的には光合成の効率で決まる。陸生植物の光合成の効率は、最適条件下で約3%であり、日本の気候では1%にも満たない¹¹⁾。単位面積当りエネルギー生産速度は高々 1 W/m^2 程度であり、太陽光発電よりもはるかに小さい(ただし、藻類の中には高い効率で光合成を行うものがあり、その利用をめざした研究が進められている)。

なお、その他の自然エネルギー(水力、地熱、波力、潮汐力、海洋温度差等)は、そもそもその賦存量(理論的なエネルギー生産速度)から考えて、日本のエネルギー供給の主役にはなり得ない¹¹⁾。

上述のエネルギー生産速度の見積りは、きわめて単純化したものである。そ

れでもなお、日本で消費しているエネルギーを太陽エネルギーでまかなおうとすれば、とにかく大きな面積が必要であることはわかっていただけるだろう。食料生産その他の土地利用とのバランスも考えつつ、そのような広大な土地を確保することは、日本のように国土が狭くかつ平地が少ない国では、きわめて困難な課題である。陸地だけでは非現実的であり、海上・海洋を活用することも必要と思われる。

核融合についても一言触れておこう。核融合炉はいまだ研究段階にあり、実用化の見通しは立っていない。しかしながら、重水素同士の核融合反応（D-D反応）を用いる核融合炉が実現できれば、燃料は海水から採ることができ、事実上無尽蔵となる。太陽や地球の営みとは関係のない人為的なエネルギー源として、唯一、持続的とみなせるものである。

もちろん、その他のさまざまな小規模分散型エネルギー源が無意味というわけではない。特に、大規模なシステムに比べて災害に強いことは重要な利点であり、災害時に最低限の生活や社会機能を維持するエネルギー源として期待される。また、一人当りのエネルギー消費速度の小さい発展途上国では、エネルギー消費のそれなりの部分をまかなえる可能性もある。ただ、現時点での知見に基づくと、日本のエネルギー生産に量的に大きな貢献が期待できる国産の持続的エネルギー源は、太陽光と風力しかない。将来性に注目しても、バイオマスと核融合が加わるだけである。このことは強調しておきたい。

図0.1からもう一つわかるのは、供給量と消費量に大きな差があることである。その最大の原因は、火力発電における損失である。燃料の燃焼によって得られた熱エネルギーを、発電機を回転させるための運動エネルギーに変換する際には、熱源の温度で決まる理論的な限界（カルノー効率）がある。そのため、例えば東京電力の火力発電所の平均熱効率は、2014年度でも48.1%（低位発熱量基準）にすぎない¹²⁾（原子力発電所の熱効率はさらに低く、例えば東京電力柏崎刈羽原子力発電所の熱効率は、34%程度¹³⁾である）。熱エネルギーの半分以上は、電気に変換されずに廃熱として環境に放出されているのである。また、図1には現れていないが、輸送用燃料の持つエネルギーのかなり

の部分、内燃機関などで運動エネルギーに変換される際に、熱エネルギーとして環境に捨てられていることにも注意が必要である。

これらの廃熱を減らすことあるいは利用することができれば、言い換えればこれまでエネルギー供給・消費システムの外に捨てていたものを減らすことができれば、新たなエネルギー源を獲得したことと同等になる。もちろん、エネルギーの生産から貯蔵、供給、消費に至るあらゆる過程について、同様のことがいえる。

以上のような現状認識に基づき、以降の各章では、新しいエネルギー生産技術、新しいエネルギー変換技術、および新しいエネルギー輸送・貯蔵・利用技術について、その原理と特徴、開発の現状および今後の課題をまとめた。

新しい持続的エネルギー生産技術

持続的な社会を実現するためには、持続的なエネルギー源が必要である。現在、利用あるいは開発が進められている持続的エネルギー生産技術のうち、近い将来、日本のエネルギー供給に量的にそれなりの寄与が期待できるものは、太陽光発電と風力発電しかない。本章では、その「二本柱」およびバイオマス、核融合発電を取り上げる。

バイオマスには多くの種類があるが、陸上でエネルギー生産専用の植物を栽培するのは、エネルギー効率が低いこと、食料生産と競合することから、得策ではない。現状ではむしろ、これまで廃棄物とみなされていたものをエネルギー資源として活用することに、バイオマスの意義がある。一方、核融合発電は、既に実用化されている太陽光発電や風力発電と比較できるような段階にない。しかしながら、太陽エネルギーとは起源を異にする持続的エネルギー源として、その将来に期待がかけられている。

1.1 太陽電池と太陽熱発電

1.1.1 太陽エネルギー

〔1〕 太陽

太陽は地球から平均距離 150 000 000 km（正確には 149 597 870 km であり、これを 1 天文単位、1 AU と呼ぶ）も離れているが、太陽から地球には約 174 PW (1.74×10^{14} kW) というエネルギーが降り注いでいる (図 1.1)。

このエネルギー源は、太陽内部で 1 秒間に 430 万 t の質量が熱核融合により失われ、 3.8×10^{26} J のエネルギーに変換されることによる。430 万 t (4.3

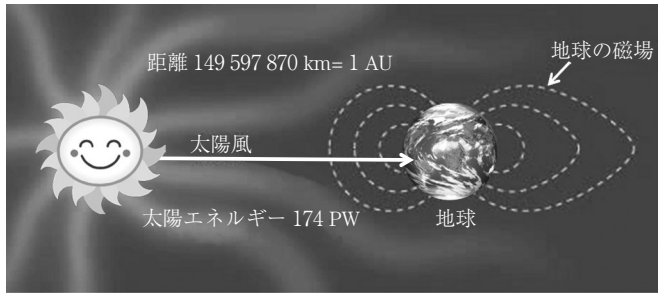


図 1.1 太陽と地球の位置関係

$\times 10^9 \text{ kg}$) というのは、あの小惑星イトカワの推定質量 ($3.5 \times 10^{10} \text{ kg}$) の約 $1/8$ である。現在の太陽の質量はおよそ $2 \times 10^{30} \text{ kg}$ であるので、このまま太陽が燃え続けていることができると考えれば残り約 1.5×10^{13} 年の寿命となる。地球の歴史はおよそ 46 億年 (4.6×10^9 年) といわれているので、これまでよりもはるかに長い年数に渡って地球に太陽エネルギーを与え続けてもらえる。

太陽エネルギーとして、地球には太陽中心核から発せられた電磁波（黒体放射）と核融合から生じたガンマ線やニュートリノが降り注ぐ。これら以外にプロトン、 α 粒子などの荷電粒子からなる太陽風が地球に到達する。電磁波以外は、地球の磁場、大気により地上への到達は大幅に制限されるので、われわれは幸運にも穏やかな電磁波のみを享受することができる。

〔2〕 黒体放射

黒体放射は、黒体（すべての波長の放射を完全に吸収する物体。それゆえ完全な黒体の存在は難しい）から発せられる熱放射のことである。その放射エネルギー S は絶対温度 T の 4 乗に比例し、式 (1.1) によって表される。

$$S = \sigma T^4 \quad (1.1)$$

ここで比例定数 σ をシュテファン-ボルツマン定数と呼び

$$\sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{60c^2 \hbar^3} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2) \quad (1.2)$$

である。ここで k_B はボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)、 c は光速 ($3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$)、 $\hbar = h/2\pi$ は換算プランク定数 ($1.05 \times 10^{-34} \text{ Js}$) である。

黒体放射から得られる電磁波のスペクトルは式 (1.3) の**プランクの法則**により得られる。

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} \quad (1.3)$$

$u(\lambda, T)$ は単位体積，単位波長当りのエネルギー密度， λ は波長である。このエネルギー密度を利用して，スペクトルを示したものが**図 1.2**である。温度の上昇とともに，ピーク波長が短波長側にシフトし，ピーク強度も増大していく。可視光領域（350～780 nm）にエネルギーがかかってくるのが， $T = 500$ K 程度からである。太陽の放射スペクトルは約 5800 K のスペクトルにほぼ一致する。そしてこのピーク波長が可視光領域となる。図を見れば明らかなように，ピーク波長がシフトするといっても横に平行移動するのではなく，温度上昇とともにより短波長側の波長強度が増大することでピーク波長がシフトする。そのため，長波長側の成分は減少するわけではないので，太陽光には可視光，赤外光と少量の紫外光が含まれる。

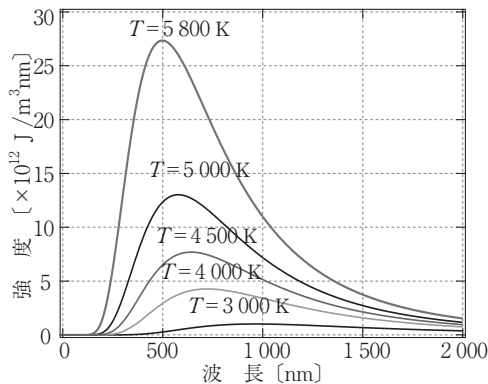


図 1.2 黒体放射における温度とエネルギースペクトル

〔3〕 太陽光スペクトル

図 1.3 は地上における**太陽光スペクトル**である。黒体放射スペクトルは連続であるが，図 1.3 のスペクトルにはかなり凹部が認められる。(太陽および宇

【あ】

アーキング	95
アノード	122
アノード分極	127
アポロ計画	128
アルカリ形燃料電池	128

【い】

イオン交換膜	124
一次エネルギー	131
一次電池	121
一酸化炭素	131
陰極	122
インバーター	193

【え】

エアマス	11
永久機関	131
永久磁石リラクタンس	
モータ	199
液化天然ガス	174
液相-固相反応	152
エクセルギー	100
エクセルギー減少則	101
エクセルギーロス	110
エコウィル	135
エネファーム	133
エネルギー基本計画	188
エネルギーコストCOE	37
エネルギーの使用の 合理化に関する法律	187
エネルギーレベル	100
エンタルピー	100, 127
エントロピー	100, 127
エントロピー増大則	101

【お】

オイルショック	129
---------	-----

オキシフェューエル 燃焼システム	118
汚泥系	52
オン抵抗	195

【か】

ガス拡散層	126
カスケード型	157
ガスタービン	113
カソード	122
カソード分極	127
活性炭	74
価電子濃度	150
カーボンナノチューブ	76
カルノー効率	107, 144
慣性閉じ込め方式	82
乾電池	120

【き】

擬ギャップ	150
期待可採量	54
ギブスの自由エネルギー	101
キャリア	137
吸着剤	72
極値風速	34

【く】

クラスレート化合物	149
グラファイト	75
グリッドパリティ	24
クリーンコール テクノロジー	115
クロスオーバー	127
クロスリーク	127

【け】

傾斜機能材料	154
結晶配向性	146

【こ】

高位発熱量	126
格子熱伝導率	147
光電流特性	16
高マンガンシリサイド 化合物	152
抗力	27
抗力型風車	27
国際熱核融合実験炉	81
黒体放射	9
コージェネレーション システム	176
固体高分子形燃料電池	120
固体酸化物形燃料電池	131
固定後流モデル	29
固定床式発酵法	69
コンバインドサイクル	113

【さ】

再生可能エネルギーの固 定価格買い取り制度	23
最大可採量	54
最大変換効率	144
作動円盤理論	28
サンシャイン計画	186
酸素	123
サンベルト地域	22
散乱光	21

【し】

自己加熱	85
自己点火条件	83
磁場閉じ込め方式	82
自由エネルギー	127
集光型集熱器	18
自由後流モデル	29
充電電池	120
省エネ法	187
触媒	126
食品系	52

自力型プロセス 102
シリコン太陽電池 12

【す】

水蒸気改質 131
水性ガスシフト反応 131
水素 123
水素脆化 126
垂直 Bridgman 法 152
垂直軸風車 27
スイッチング損失 195
水平軸風車 27
スクッテルダイト化合物 148
スタックセル 128
スマートグリッド 203
スマートコミュニティ 203
スマートシティ 78

【せ】

正極 122
性能指数 144
生物化学的ガス変換 60
セグメント型 154
セパレーター 126
ゼーベック係数 137
ゼーベック効果 136
セル構造 14
潜在賦存量 54

【そ】

ソフトエネルギーパス 202
損失エネルギー 111

【た】

ダイバータ 92
太陽光スペクトル 10
太陽電池 12, 121
太陽熱発電 18
他力型プロセス 102
単極アーク 95
タングステン 92

【ち】

地域熱輸送 176
畜産系 52
蓄熱技術 18, 20
チムニー・ラダー構造 152
伸介エネルギー 99
超電導 173
超電導ケーブル 173
超電導限流器 174
超電導磁気エネルギー貯蔵 174
直接メタノール形燃料電池 132
直達光 21
直達日射量 20
直流送電 172

【つ、て】

追尾式 18
低位発熱量 126
定態安定極限電力 171
電界電子放出 95
電気二重層キャパシタ 182

【と】

等価回路 16
トカマク方式 84
トップランナー 197
トップランナー方式 187
トムソン係数 139
トムソン効果 139
トムソン散乱計測 90
トリチウム 82

【な】

内部抵抗 127
ナノバブル 93

【に】

二酸化炭素 130
二次エネルギー 131
二次電池 121, 181

ニューサンシャイン計画 129

【ね、の】

熱起電力 137
熱効率 126
熱電腕時計 159
熱電現象 136
熱電対 141
熱電池 121
熱電発電 136
熱電変換 136
熱分解ガス化 57
熱力学コンパス 102
熱力学システムダイアグラム 103
熱力学の第一法則 103
熱力学の第二法則 101
燃料電池 120
農産系 52

【は】

バイオガス 65
バイオガス発生装置 63
バイオマス 51
バイオマスガス化方式 59
バイオメタン 66
II型モジュール 155
バイナリーサイクル発電 160
バイポーラプレート 128
白金 126
発動発電機 120
発熱量 61
ハードエネルギーパス 201
ハーフ・ホイスラー型化合物 151
パルス放電焼結 147
バンドギャップ 195

【ひ】

非集光型集熱器 18
非追尾式 18
ヒートポンプ 196

ヒートポンプシステム	107	放射束	192	(有効) 利用可能量	54
【ふ】		【ま】		【よ】	
ファンデルワールス結合	146	膜電極接合体	126	陽極	122
フォノン	145	マグネシウムシリサイド	151	洋上風車	43
負極	122	化合物	151	溶融炭素塩形燃料電池	131
福島第一原子力発電所	131	【み】		揚力	27
賦存量	54	水	123	揚力型風車	27
部分燃焼ガス化	58	【む】		揚力線理論	29
プランクの法則	10	ムーンライト計画	129, 186	揚力面理論	29
プリスタリング	93	【め】		【ら】	
プロセスベクトル	102	メカニカルアロイング	147	ラットリング	148
プロトン	124	メタン発酵装置	63	ランキンサイクル	161
【へ】		【も】		乱流強度	34
ヘリカル方式	84	木質系	52	【り】	
ペルチェ係数	138	モジュールの変換効率	17	理想熱効率	127
ペルチェ効果	138	【ゆ】		利用可能量	54
ペルチェ冷却装置	139	有効発熱量	52	リン酸形燃料電池	131
【ほ】		【れ】		レーザー損傷閾値	92
ホイスラー型化合物	150				

【A】		【H】		【P】	
Air Mass	11	Hindenburg 号爆発事故	131	PGEC	145
AM	11	H モード	88	phonon glass electron crystal	145
ANG	71	【I】		【S】	
ANG 貯蔵タンク	67	ITER	81	Shockley-Queisser の限界	17
【B】		【L】		Si-Ge 系合金	153
Betz の限界	33	LED	190	【T】	
【E】		【M】		TARGET 計画	129
edge localized mode	88	MHD 不安定性	88	【U】	
ELM	88	【N】		UHV 送電	169
【F】		Nafion	124		
FCG-1 計画	129				

環境調和型社会のための エネルギー科学

Energy Science for Sustainable Society

© 名古屋大学未来材料・システム研究所 2016

2016年1月28日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 名古屋大学
未来材料・システム研究所
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛 来 真 也
印 刷 所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06883-2 (中原) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします