



Renewable Energy Science Education Manual



再生可能エネルギー ～科学教育マニュアル～ (日本語訳)

CREDITS

Contributors/Reviewers
Colleen Spiegel Ph.D.

Horizon Design and Production Staff
Stone Shen, Miro Zhang, Dane Urry

Copyright c 2009 by Horizon Fuel Cell Technologies.
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Horizon Fuel Cell Technologies
Block 19, No.2 Suide Rd.
Shanghai 200331, P.R. China
<http://www.horizonfuelcell.com>

翻訳
坪田幸政，教育学博士
桜美林大学自然科学系教授

〒194-0294
東京都町田市常盤町 3758
電話 & FAX : 042-797-8563
電子メール : tsubota@obirin.ac.jp

第一章 環境と気候変化

- 1.1 はじめに
- 1.2 世界のエネルギー需要
- 1.3 地球温暖化
 - 1.3.1 温室効果
 - 1.3.2 海面レベル
 - 1.3.3 地球温暖化の影響
 - 1.3.4 私たちは地球温暖化を止められるか?
- 1.4 現代のエネルギー技術の不利な点
- 1.5 革新的グリーンテクノロジー
 - 1.5.1 太陽電池
 - 1.5.2 風力発電
 - 1.5.3 電気分解
 - 1.5.4 燃料電池
- 1.6 再生可能エネルギーの組み合わせによる水素クリーンエネルギー経済の未来像
- 1.7 結論
- 参考文献
- 図の出典



夜明けの地球

第一章 環境と気候変化

1.1 はじめに

エネルギーは、現代の社会において必要不可欠である。エネルギーは、日没後の生活や人々の移動や物流、そして技術の連続的な発展を可能にする。原油や天然ガスのような現在利用可能なエネルギー源は、定住人口の増加と人々の移動の目的では有利であった。しかし、発電に化石燃料を使用することは、負の副作用を多く引き起こした。それらには、深刻な汚染、世界の地下資源の広範な開発、豊富な資源を有する国々の政治的支配や優位性などがある。更に、地球的なエネルギーの需要は、世界の人口の連続的な増加のために急速に増加している。

化石燃料には供給面での限界がある。そして、世界の限られた地域にだけ産出する。これらのことが平和を脅かす戦争や地域的な紛争に発展する。限りある供給と大きな需要は、化石燃料の価格を連続的に高騰させる。それ故、低価格の石油時代は、急速に終局に近づいている。化石燃料は、私たちの現在の生活状態を維持するために必要とされている。しかし、化石燃料を利用することで、人類、植物、動物はそれらの副作用に苦しめられている。これら化石燃料から生成される廃棄物は地球の大気を加熱し、大気と水と大地を汚染する。そして、このことが地球上全ての種の生活環境を低下させている。代替エネルギー技術を開発する経済的、そして環境的理由が存在する。

代替エネルギー源への強い関心が最初に起こったのは、1970年代に原油が突然供給不足に陥った時である。当時、私たちは未だ多く化石燃料が埋蔵されていると認識していた。この出来事はそのような状況下で起こったのである。このことは、世界に化石燃料の供給には限度があり、最終的に無くなるという事実気づかせた。過去10年間、環境に優しく、より効率の良いエネルギー生産への関心が高まってきた。この関心は代替燃料やエネルギー資源についての研究を急速に拡大させている。化石燃料燃焼への依存は、酷い大気汚染と世界の石油資源の広範な採掘という結果をもたらした。私たちの生態系や多くの種の健康への危険があるということに加えて、汚染はまた世界の大気を変化させている。増加する世界の人口を維持するための電力を供給するために、化石燃料の燃焼を増加させることで、地球温暖化と呼ばれるこの傾向は、連続的に悪化している。世界は、増加する世界人口に対して、汚染物質の排出量が少なく、エネルギー効率の良い燃料を無尽蔵に供給できるエネルギー資源を必要としている

多くの代替エネルギー技術が研究され、開発されている。これらには、太陽、風、水力、生物エネルギー、地熱エネルギーなど、その他多くのものが含まれる。太陽電池は発電に太陽を利用する。風力発電は風の運動エネルギーからエネルギーを取り出す。生物エネルギーは植物から抽出する。また、再生可能エネルギーには、生物学的な廃棄物から気体として抽出するものもある。そして、海洋の波のエネルギーを利用することもある。これらの代替エネルギーひとつひとつに、それぞれ有利な点と不利な点があり、これらのエネルギーはそれぞれ異なる開発段階にある。図 1-1～図 1-3 に、風力発電と水力発電と太陽エネルギー利用を示した。



図 1-1. 風力発電



図 1-2. 水力発電



図 1-3. 太陽熱利用

私たちの地球とそこに住む全ての生物種が使うエネルギーを認識することは、有益なことである。再生可能エネルギーキットを利用して、風と太陽、電気分解槽、プロトン交換膜型燃料電池、水素貯蔵システムという基本的な再生可能エネルギー技術について探求できる。このキットは再生可能エネルギーをどのように変換し、利用できるかを演示できる。これらの再生可能エネルギーは、私たちの環境によって、自然に補充される。実験を通してこれらの技術について学ぶことで、生徒はこれらの技術がどのように機能するかを正しく学習することができる。私たちは、再生可能エネルギー教育キットを利用した実験指導をすることで、このキットに含まれるエネルギー技術について学ぶだけでなく、将来の代替エネルギー技術について探求し、考えることができる。これらの技術を調べる方法としては、TV のニュース番組や科学番組（サイエンス・チャンネル）を見るとか、友人とそれについて話し合うことなどが考えられる。このキットでエネルギー技術を学ぶことで、学習者により大きな実験器を製作したいと思わせるかもしれない。あるいは、いつの日か技術者や科学者としてこれらの技術を改良することに関わるかもしれない。

1.2 世界のエネルギー需要

20 世紀の間、化石燃料の使用量は急激に増加し、1970 年代から 2000 年で 4 倍になった。地球上の人類は、石油製品が形成される 10 万倍の速さで、それらを消費している [1, 2]。現在、中国は石油の世界 3 番目の大消費国だが、もしも、中国の国民一人ひとりが米国の国民一人と同じ量を消費したなら、中国はその需要に応えるために一日に 9 千万バレルの石油が必要となる。資料 [1] に従えば、1 日の典型的な石油生産量は約 8 千万バレルである。明らかにこの方程式には、どこか誤りがある。

英熱量単位 (BTU)：英熱量単位とは、仕事率、蒸気生成、暖房と空気調節産業などで使用されるエネルギー単位のことである。英熱量単位は多くの場合、国際単位系 (SI) のエネルギー単位であるジュール (J) に取って代わられたが、英国とニュージーランド、カナダ、米国のような国々では未だに使われている。

図 1-4 は 1980 年から 2030 年までの現在と将来の予想エネルギー消費量を示す [1]。国際的なエネルギー消費は、2003 年から 2030 年まで年率 2.0% で増加すると見積もられて

いる。世界全体でのエネルギー総エネルギー使用量は、2003年の421千兆BTUから2015年の563千兆BTU、2030年の722千兆BTUに増加すると予想される。

2003年から2030年までのエネルギー需要の最も急激な増加は、中国とインドを含むアジア、中央アメリカ、南アメリカ、中近東とユーラシアで予想されている [1, 2]。これらの国々に対するエネルギー必要量は、平均して年率5%で増加している。国・地域別のエネルギー需要を図1-5に示した。

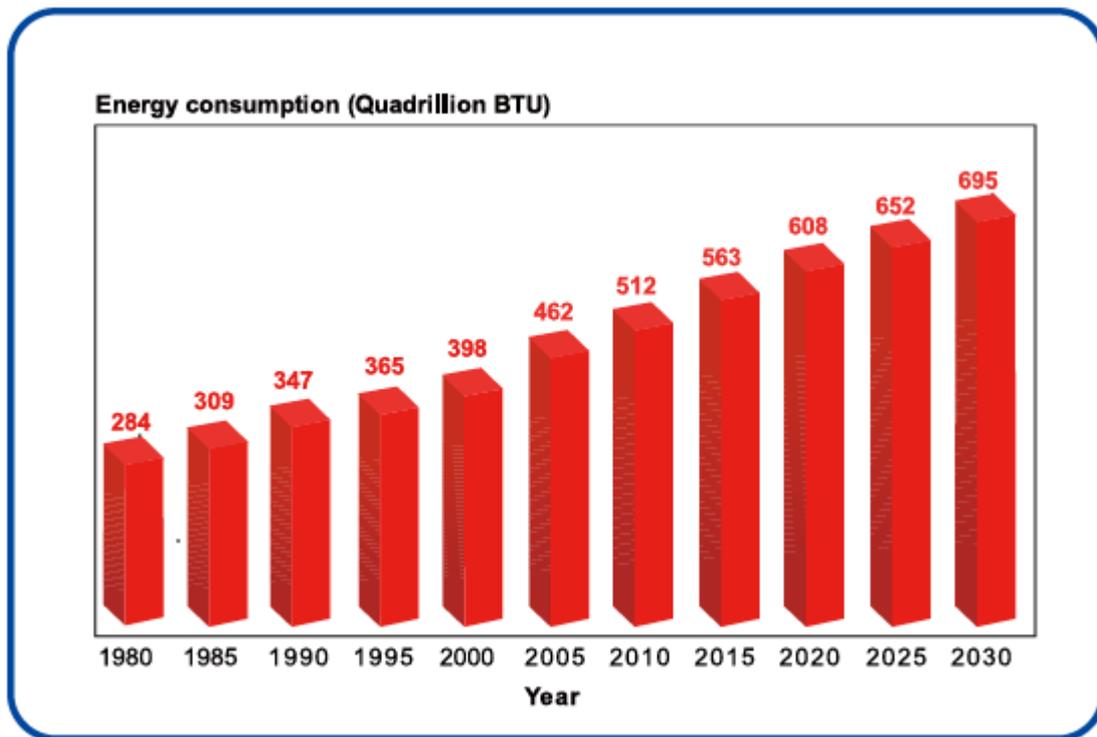


図 1-4. 世界のエネルギー消費，1980～2030

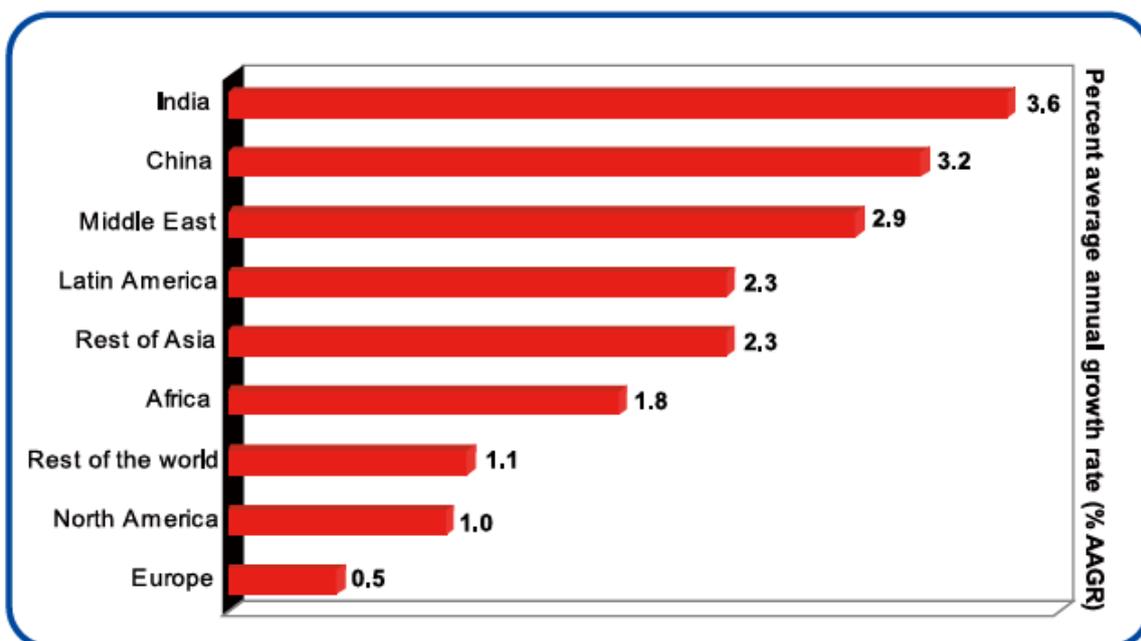


図 1-5. 地域別一次エネルギー需要（1980～2030の平均年成長率，%）

平均年成長率 (AAGR, %) : 平均年成長率とは、1年間に亘る成長率の平均である。平均年成長率は、各年の年成長率の算術平均を取ることで計算される。例えば、ある地域のエネルギー需要が1年間で10%の成長が予想され、次の1年が20%の成長予想の場合、2年間のAAGRは15%となる。

それぞれの国には、化石燃料の消費を削減するために化石燃料税を支持する集団がいる。また、代替エネルギー技術を主張する集団もいる。多くの専門家は、工業国での化石燃料消費の削減を奨励し、持続可能で再生可能なエネルギー源を利用する社会基盤構築を促進する。

世界人口の約43%は、電気エネルギーを獲得するための主要な手段として石炭を使用する(図1-6)。そして、天然ガスが22%でこれに続く。水力を中心とした再生可能エネルギーが14%であり、原子力が13%で、残りの8%が石油となる[1, 2]。

18世紀と19世紀、産業革命の間は石炭が主要な燃料であった。自動車と家庭用電気製品が一般的になる20世紀には、石油が主要な燃料となった。しかし、過去数年の間で、中国における化石燃料消費の増加のために、石炭は利用量が最も急速に増加する化石燃料となった。現在、再生可能な形態のエネルギーは、全エネルギー消費における割合が小さいけれども、それらは図1-7に示したようにその他のエネルギー形態と比較して、最も高いAAGRを有する。

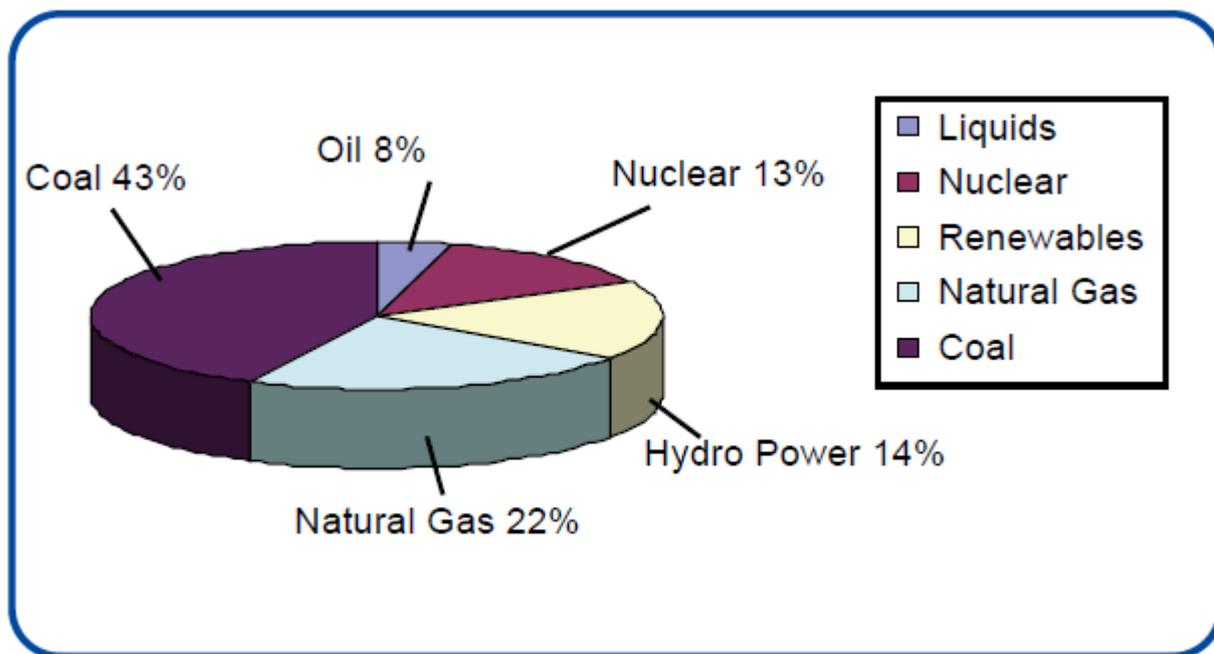


図1-6. 世界の燃料別発電量

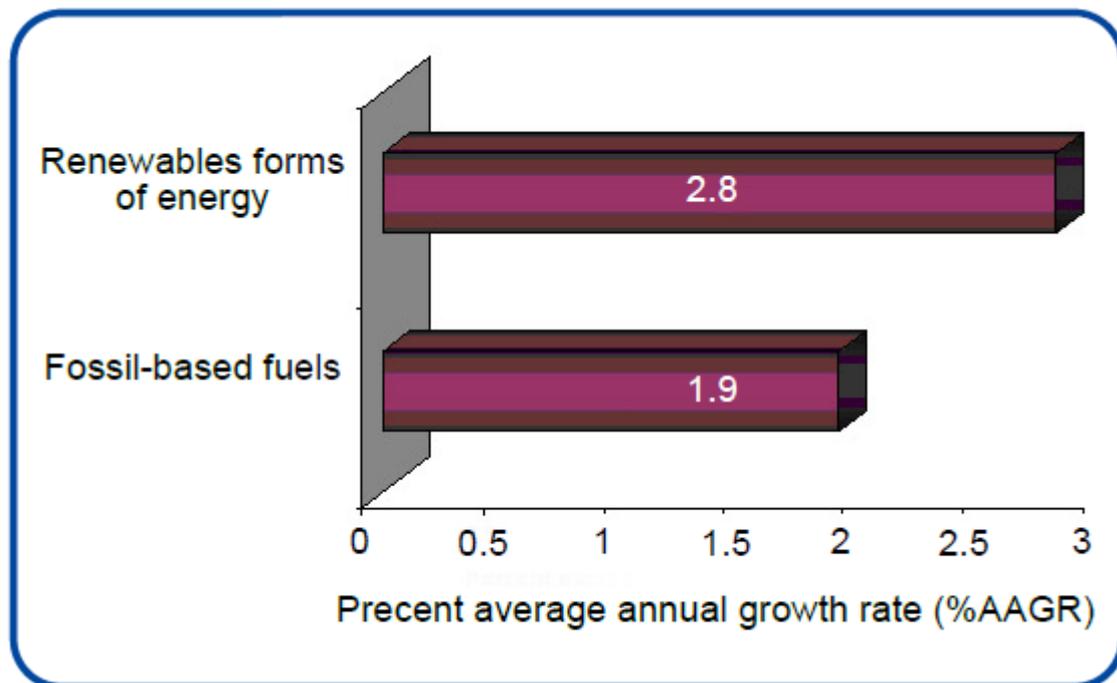


図 1-7. 再生可能エネルギーと化石燃料由来のエネルギーの平均年成長率 (%AAGR)

1.3 地球温暖化

地球温暖化という言葉は、ほとんどの人が聞いたことのある言葉であり、それが惑星「地球」の気温上昇を意味することを知っている。しかし、私たちの多くは、それが何であり、正確に何を意味するか、あるいはそれがどのように定量化されるのかを理解していない。

地球温暖化：人間活動の結果として、短時間に地球の気温が急激に上昇すること。

1 世紀で 0.4°C の気温上昇はかなり大きい。そして、地球温暖化は 1 世紀で 1°C の上昇と考えられる [3, 4]。気候の変化は、普通数千年の時間を要する。 1°C あるいは 2°C の変化は大きくは思えないが、小さな気温の変化が大きな影響を与えることがある。氷河時代について聞かれると、あなたは恐らく世界中が雪や氷で覆われると考えるだろう。氷河時代は 5 万年から 10 万年の周期で起こるが、氷河時代の全球平均気温は、現在に比べて僅か 5°C 低いだけである [3, 4]。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、世界中から集まった 2,500 人以上の科学者集団である。彼らは気候研究を進めるために 2007 年の会合に参加した。気温と海面レベルの変化に関する IPCC の発見を図 1.8 に示した。この会合の一つの結論は、過去 15 年間は 1850 年以降で最も暖かかったということである。

この会議中にまとめられたその他の事実には、次のことが含まれる [3, 4, 5]：

- ・氷河と雪は北半球と南半球で減少した。北極の平均気温は、過去 100 年間に全球平均の 2 倍の大きさに上昇した。
- ・降水量はアメリカ、北ヨーロッパとアジアの一部で増加した。南アメリカと地中海は乾燥傾向を経験した。
- ・暑い日の日数が増加し、寒い日の日数が減少し、その度合いもそれ程ではなくなった。

火山活動や太陽からの放射, 大気の化学組成などの変化による自然起源の気候変化では, 僅か 1°C の変化に時として数千年を要する [3, 4, 5].

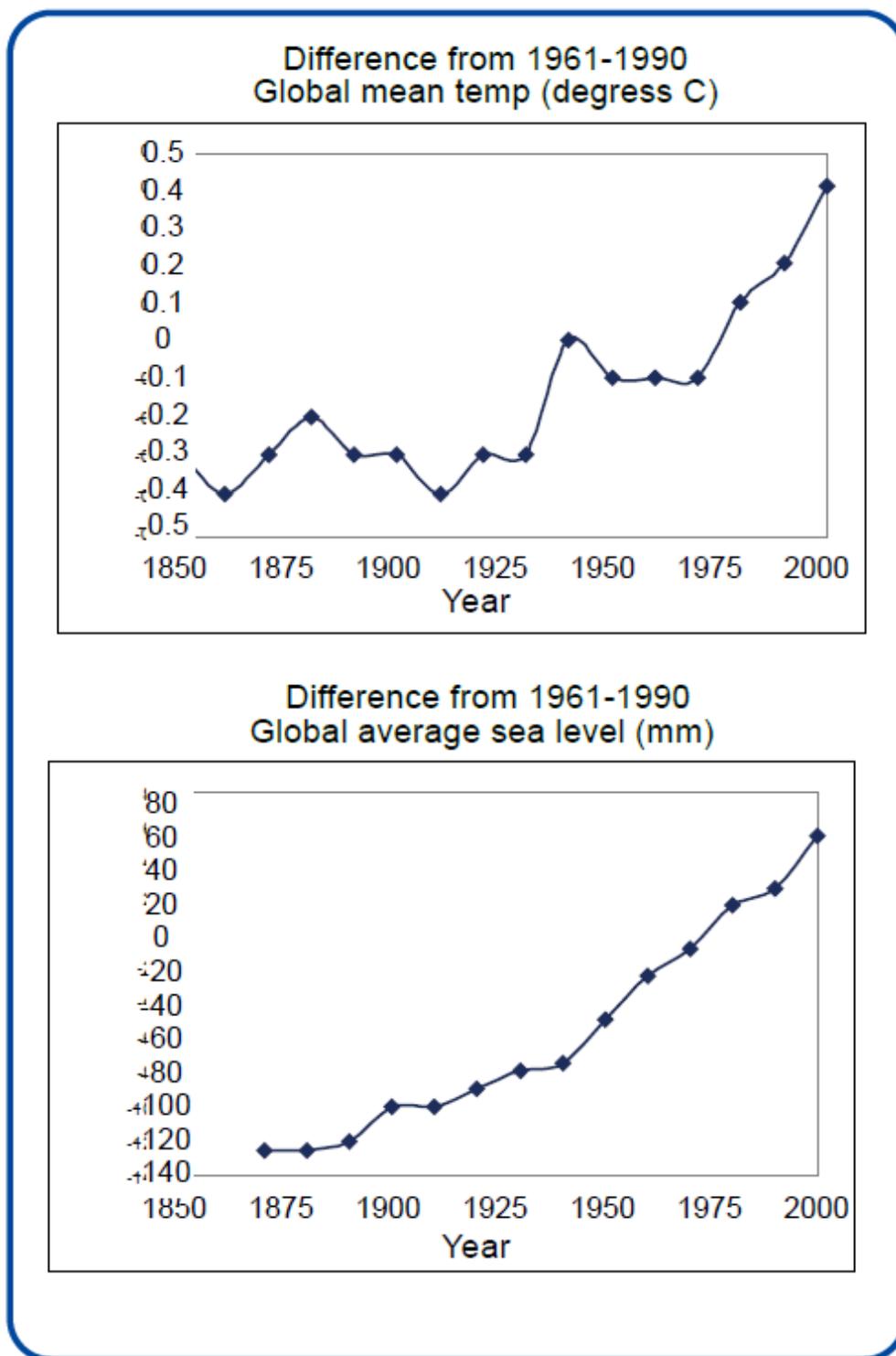


図 1-8. 気温(上)と海面レベル(下)の変化に関する IPCC の結論

1.3.1 温室効果

地球温暖化は**温室効果**が強まることが原因である。**温室効果**は地球上の生命の生存を可能にするように, 地球の暖かさを保っているのが一般的にはよい現象である。太陽のエネルギーが地球大気に入射したとき, 約 70%は惑星に留まり, 残りの 30%は宇宙に向けて反射される [5].

地球温暖化実験 惑星に残る熱は陸地，海洋，植物によって吸収され，最終的に海洋や大陸によって放射される．雲は宇宙への反射の原因である．熱のいくらかは大気中の二酸化炭素，メタン，水蒸気などの気体によって吸収される．この閉じ込められた熱が惑星を暖かく保っている．図 1-9 は太陽エネルギーの収支と温室効果を示す．もしも地球が温室効果を持たないとすると，地球は恐らく火星のようになるだろう．何人かの科学者は，火星の大気に十分な二酸化炭素と水蒸気を注入できれば，地表面で植物が生育できるように，気体（大気）が十分に厚くなることを提案する．これらの計画は最終的に酸素を生成する．火星の現在の状況を図 1-10 に示した．

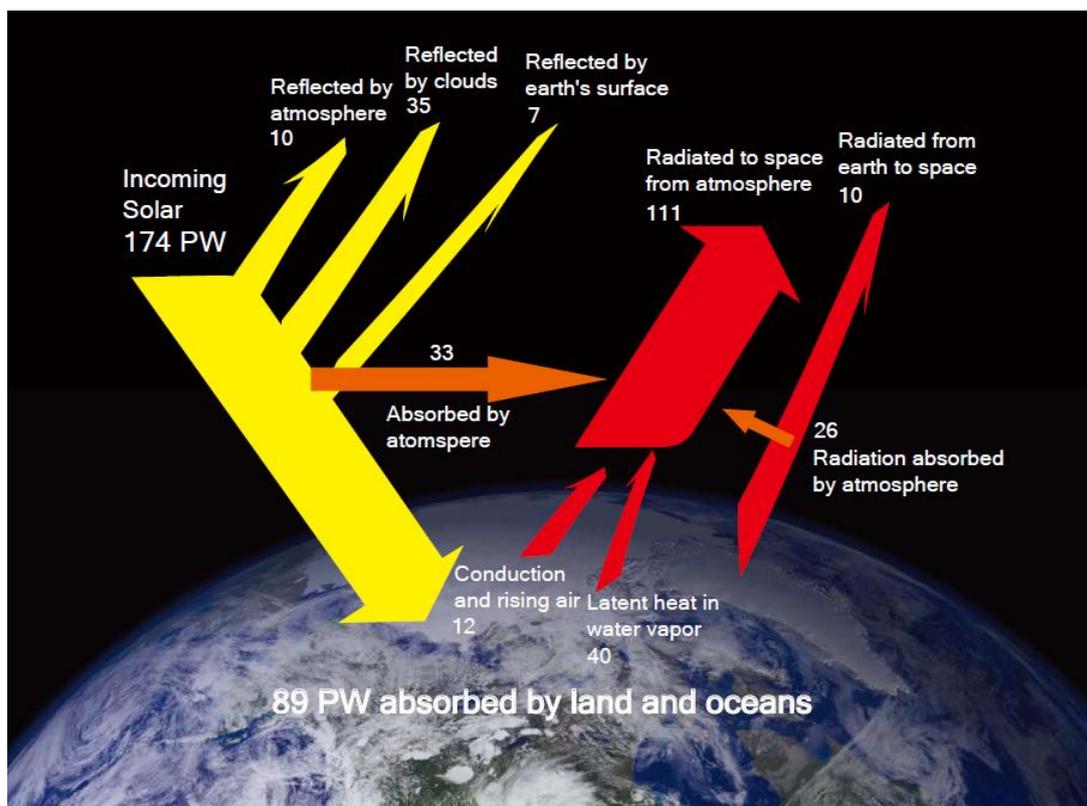


図 1-9. 太陽エネルギーと温室効果



図 1-10. 探査機バイキングによる火星表面の様子

産業革命以降，大量の気体が大気中に放出され，温室効果が強まった．これらには，次の気体が含まれる（図 1-11） [5]：

1. **二酸化炭素 (CO_2)**：二酸化炭素は無色の気体で，化石燃料を燃焼した時の副産物のひとつである．現在，大気中にある二酸化炭素の大部分は，数百万年前の火山噴火によって噴出したものであった．長年，私たちは二酸化濃度増加に加担してきた．二酸化炭素は赤外線を吸収するので，地球温暖化の主要な原因物質である．二酸化炭素の排出は，地球全体で 1900 年の 10 億トンから 2000 年の 80 億トンに増加した．IPCC の推定では，二酸化炭素の濃度 (ppm) は，1800 年代の 280ppm から 2005 年の 379ppm に増加している [5]．
2. **二酸化窒素 (NO_2)**：排出された二酸化窒素レベルは，二酸化炭素レベルよりも低い．しかし，二酸化窒素は二酸化炭素の約 270 倍の強さで赤外線を吸収する [5]．二酸化窒素も燃焼の副産物であり，燃焼により大量の二酸化窒素（窒素酸化物）が排出される．
3. **メタン (CH_4)**：メタンは天然ガスの主成分である．メタンは石炭の副産物であり，廃棄物の分解，大規模な家畜の群れなどからも生成される．メタンは二酸化炭素の約 20 倍以上の強さでエネルギーを吸収する．それ故，地球を加熱する [5]．
4. **水蒸気 (H_2O)**：水蒸気は温室効果を強める．しかし，それは人間活動による排出よりは，むしろ気候変化の結果であることが普通である．地球が加熱されると，水蒸気が発生し，上昇する．下層大気の気温は上空ほど低い．結果として，水蒸気は再び液体の水に戻るまで十分に冷却され，再び落下する．水蒸気が上昇し，その多くは雲として凝結し，入射する太陽放射を反射する．それ故，地球表面に届くエネルギー量を減少させる．水の蒸発と凝結，そして降水という水の循環を図 1-12 に示す．増加した水蒸気の正確な地球への効果について，科学者は確信がない．しかし，彼らは水蒸気の濃度が二酸化炭素量の増加と相関があると信じている．

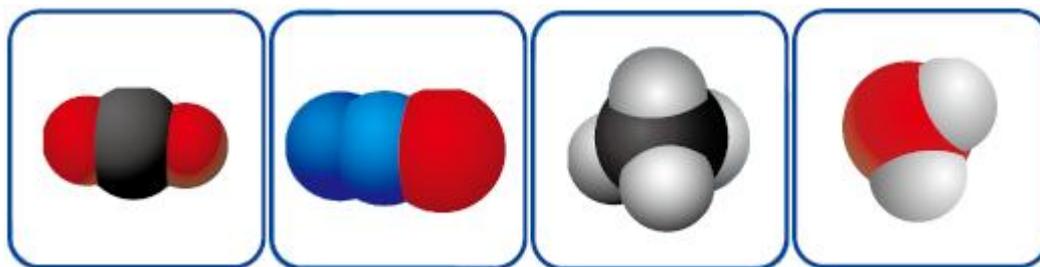


図 1-11. 気体分子（左から二酸化炭素，二酸化窒素，メタン，水蒸気）

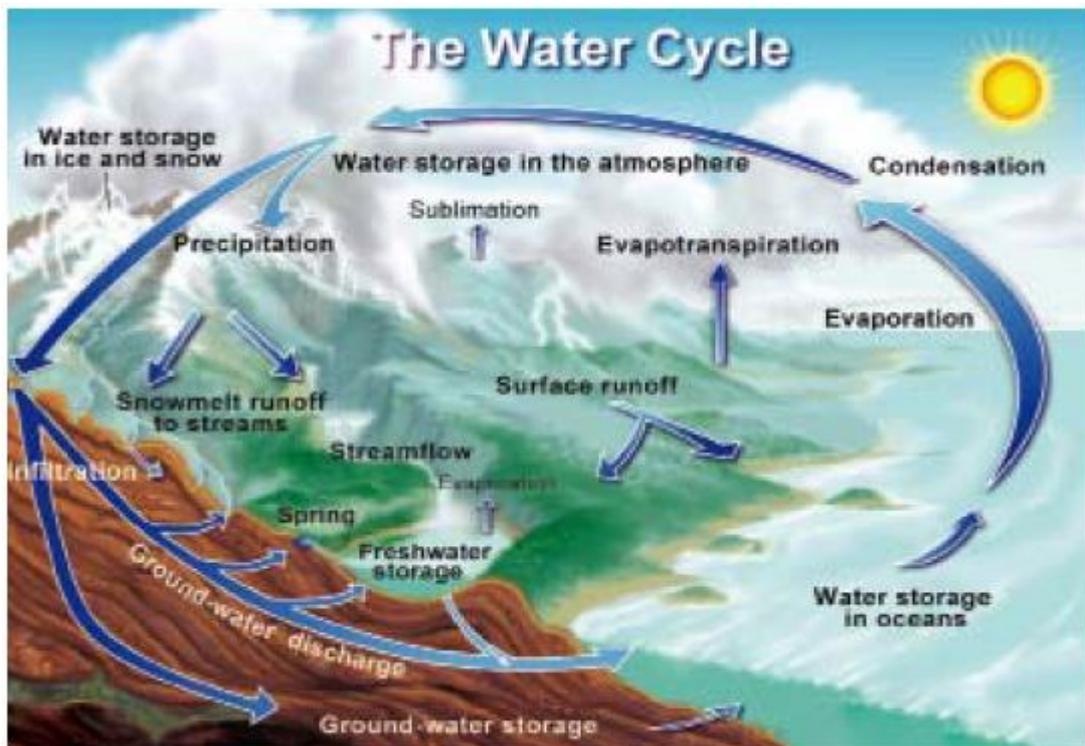


図 1-12. 蒸発と凝結と降水から成る水の循環

1.3.2 海面レベル

全球温度の上昇により、氷河や棚氷が図 1-13 に示したように融解する。大規模な氷塊の減少は、太陽エネルギーの反射が減少するという事実により、地球温暖化を加速することになるだろう。もちろん、氷塊の融解は海面レベル上昇の原因にもなるだろう。最初の上昇は、僅か 2.5cm あるいは 5cm ほどである。しかし、2.5cm あるいは 5cm でも海岸地方の低地では、洪水の原因となることが予想される。もし、南極大陸の西側の氷床が融け、海の中に崩壊すると、海面レベルが約 10m 上昇するだろう [2, 3, 5]。これにより多くの沿岸地域が海洋の下に消え去るであろう。

世界の最大の氷塊は、南極大陸にあり、世界の氷の約 90% を占める。この氷の厚さは約 2,133m である [5]。もし、この氷が全て融解すると海洋表面は約 61m 上昇する [5]。南極大陸の平均気温は -37°C であり、それ故、南極大陸が氷点以上になることは困難である [3, 5]。

北極の氷は南極ほど厚くなく、水の中に浮いている。もし、この氷が融けても、海面レベルは影響を受けない。グリーンランドもまた大規模な氷床で覆われている。もし、これが融けると海面レベルは約 7m 上昇するだろう [5] グリーンランドは赤道に近いので、氷点よりも高くなる可能性があり、それ故、最初に融解することが予想できるだろう。

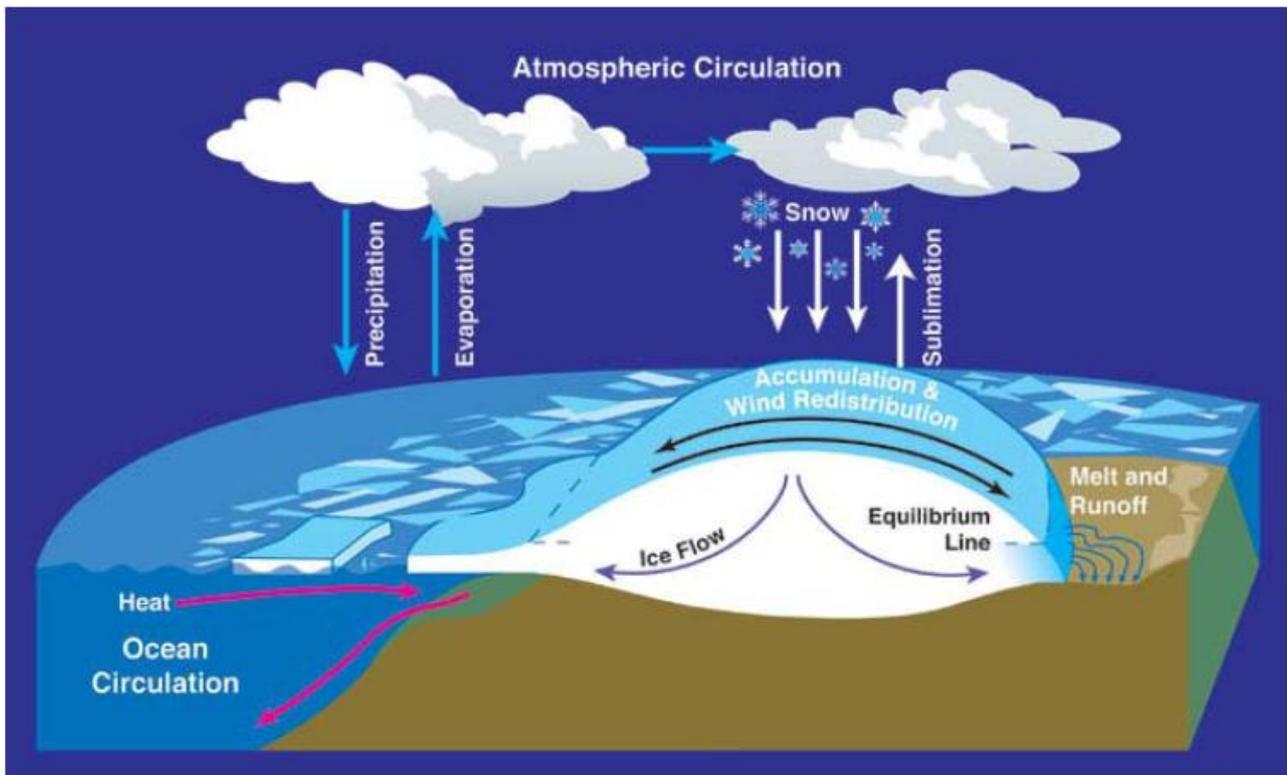


図 1-13. 海洋と大気と氷河の水循環

1.3.3 地球温暖化の影響

地球温暖化の生態系への影響を予想することは困難である。多くの生態系は、非常に繊細であり、小さな変化が生態系を劇的に変化させることがある。生態系はまた、相互に関係している。それ故、ひとつの生態系への変化は、確実に別の生態系に影響するだろう。気温の上昇あるいは雨の増加は、穀物の成長に影響を与える。地球温暖化により、穀物生産が1年間に約50億ドル減少すると予想される。温度が1℃上昇する毎に、穀物生産が3～5%減少することが予想されている [5, 6]。

生態系：生態系とは、ある環境における全ての生命体（植物と動物、そして微生物）と相互に協調して機能する非生命体である物理要因から構成されるシステムである。

1.3.4 私たちは地球温暖化を止められるか？

温室効果気体の排出は、健康問題や酸性雨、そしてオゾンの形成に直接的に関係する。中国とインドの多くの地域では、大気汚染が一般市民の健康問題となっている。大気中の二酸化硫黄 (SO_2) と三酸化硫黄 (SO_3)、それに二酸化窒素 (NO_2) が化学反応を起こし、酸性化合物を生成する時に酸性雨が生じる。これらの物質は雲の中で水滴に吸収され、地球に落ち、生態系の酸性度を上昇させる。このことが植物生命体や土壌、建物に被害を及ぼす。ほとんどの酸性化合物は汚染源近くに沈着するが、大気中を数百、数千キロも輸送されることもある。このことは、米国で生成された汚染物質が中国まで運ばれることや、またその逆のことも起こり得ることを意味する。

現在の二酸化炭素濃度は、氷床コアから決定された過去 65 万年間に亘る自然変動の範

囲（180～300ppm）よりもかなり高くなっている [3, 6]. もし, 二酸化炭素濃度が 400～440ppm まで上昇し, そのレベルを維持すると仮定すると, 最終的な気温上昇は約 2.4～2.8℃になるだろう [3, 4, 6].

百万分率（パート・パー・ミリオン, ppm）: 百万分率とは, 非常に低濃度の物質を表現する単位である. 同様の表現に 100セントに 1セント（米国通貨）があり, 百万分率（ppm）は, 百万分に占める割合で表現する. 1ppm は 10の水に対して 1mg (=0.001g) に相当する (mg/l). あるいは土壌中 1kg にある物質 1mg が含まれる濃度が 1ppm (mg/kg) である. [訳注] 10の水の質量は約 1000g (=1kg) のことである.

二酸化炭素濃度を安定化させるためには, 排出量の極大とそれに続く減少が必要である. これがより早く達成できれば, より低い極大と安定化レベルが期待できる. IPCC に従えば, CO₂ 換算濃度で 445～490ppm 周辺に安定化させるためには, 二酸化炭素の排出は, 最も遅くて 2015 年には極大にする必要があり, その後, 減少に転じ, 2050 年には 2000 年レベルから 50～85%の間まで減少させることが必要である [3, 4]. 極大がこれよりも遅れ, より高濃度となると, より大きな気温の上昇を招く. 図 1-14 は, 二酸化炭素濃度の年変化に伴う全球平均気温の上昇を示す.

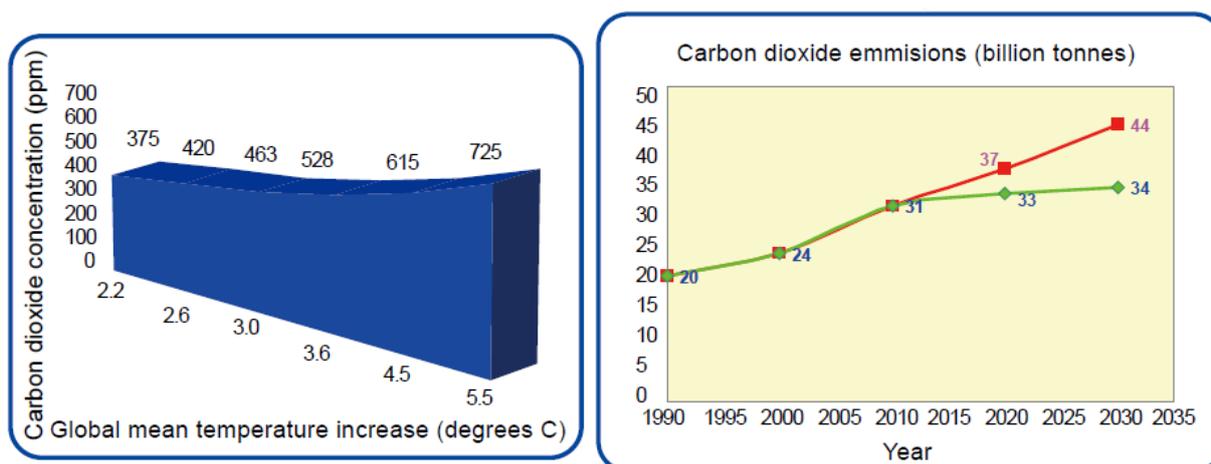


図 1-14. 二酸化炭素濃度と排出量

地球温暖化は, 大気中に既に放出された温室効果気体により, 数世紀の間継続する. 多くの被害が既に発生しているように思われるが, 私たちは色々な方法で私たちの排出を削減することができる:

- ・ **エネルギー効率の改善**: エネルギー効率は, 次に示すように装置に入力したエネルギーに対する出力されるエネルギーの割合のことである. そして, このエネルギー効率の改善により, 温室効果気体の排出を削減できる.

$$\text{エネルギー効率} = \text{エネルギー装置の出力} \div \text{入力したエネルギー}$$

全ての種類の道具は, 要求されるサービスを提供しつつ, その効率を改善できる. その結果, 化石燃料の使用を減らして, 温室効果気体の排出を削減する. エネルギー効率を改善する一つの方法として, あなたの運転する自動車を点検し, 適切に整備することが, 結果として, 排気ガスの発生を低減できる.

・**省エネルギー**：省エネルギーとは，エネルギーを必要とするサービスの利用を控えることで，エネルギー使用量を減らし，それ故，排出量を低減する．例えば， unnecessaryな電灯を消灯する．エアコンではなく扇風機を利用する．あるいは，熱湯ではなく，ぬるま湯の利用など，省エネルギーの方法は無限にある．

・**低炭素強度の化石燃料の使用**：もしも石炭浄化技術（クリーン・コール・テクノロジー）を利用せずに石炭を使用した場合，単位エネルギー当たり天然ガスよりも75%以上，石油よりも33%以上多くの炭素を排出する [5]．それ故，石炭を使用するかわりに，天然ガスを使用することは，消費される単位エネルギー当たりの排出を削減できる．

・**ゼロ・カーボン・エネルギー資源の利用**：風や太陽のような再生可能エネルギー資源と原子力発電は，全く二酸化炭素を発生しない．もしも持続可能な方法で（再生可能エネルギー教育セットのように）水素が獲得できれば，燃料電池もまた二酸化炭素を排出しない．これらのエネルギー源は，水を加熱し，水泳用プールで使用したり，一般家庭に電力を供給したり，商業活動のための電力を供給できる．

・**二酸化炭素の固定と貯蔵**：化石燃料を燃焼したときに排出される二酸化炭素を固定し，貯蔵する多くの技術がある．これらの技術は燃焼前もしくは燃焼後，あるいは前後共に利用できる．二酸化炭素を貯蔵できる場所には，枯渇した油田やガス田，岩塩洞窟，採掘不可能な石炭層などが考えられる．

私たちの汚染物質排出を十分に削減する最善の方法は，非化石燃料資源を開発することである．太陽や風や燃料電池のエネルギーのような代替エネルギー資源は，もしそれらが広く使用されるなら，温室効果気体の大規模な削減を実現できる．

1.4 現在のエネルギー技術の不利な点

現在のエネルギー技術には，熱機関と電池，そして石炭，石油，天然ガスなどの化石燃料が含まれる．世界の人口が急激に増加し，化石燃料使用量が増加するので，石炭と石油，そして天然ガスは，近い将来に供給不足となることが予見される．

化石燃料の可採年数の見積りには大きなバラツキがある．2005年の使用率が継続されると仮定すると，従来型の原油の可採年数は約40年，石炭では約150年である [4, 5]．残りの埋蔵量が次第に少なくなると，生産量が急激に減少するので，どちらも実際に枯渇することはないだろう．2005年の年間石油消費量は0.18ZJであった [8]．

これらの値にはかなりの不確実性を伴う．可採埋蔵量に今後11ZJの追加があるとするのは楽観的であろう [8]．図1-15は地球上の57ZJに及ぶ原油の内訳である．

ゼッタジュール (ZJ)：ゼッタジュールは，エネルギーの単位である． $1\text{ZJ} = 1,021\text{ J}$ ．

ジュール (J) は国際単位系 (SI) のエネルギーの単位である．1ジュールの大きさは，1Vの電位差の中を，1クーロンの電荷を移動させる時に必要な仕事の大きさと定義できる．1ジュールはまた，1ワットで1秒間にする仕事の大きさとも定義できる．

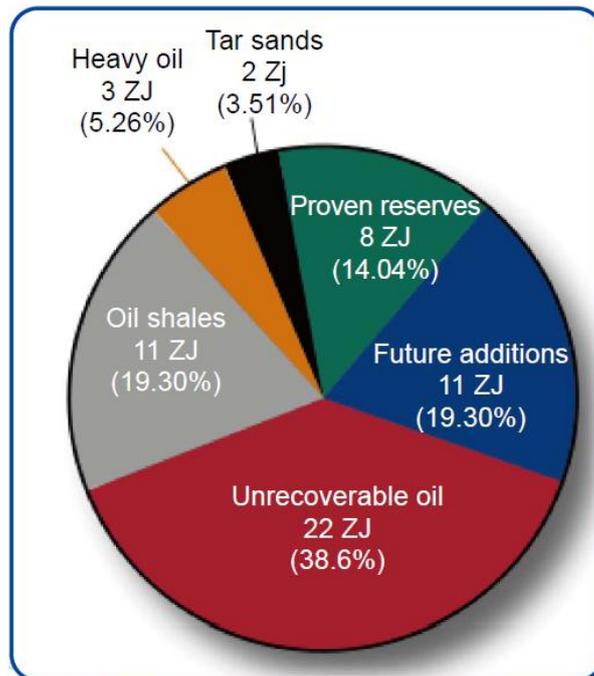


図 1-15. 地球上に残された 57 ZJ と推定される原油の内訳

私たちは既に化石燃料の不利な点について何回も議論したが、ここでは再び繰り返す。化石燃料の不利な点には次に示したことが含まれる：

- ・ **再生不可能**：化石燃料は、生成されるのに数百万年を要する再生不可能な資源である。それ故、埋蔵資源が一度枯渇すれば、それ以上獲得する方法はない。
- ・ **汚染**：化石燃料によって排出されるに二酸化炭素は、温室効果を担う中心的気体である。石炭は二酸化炭素と二酸化硫黄、それに三酸化硫黄を排出し、それらは酸性雨を形成する。酸性雨は森林破壊を引き起こし、石造建造物や岩石を浸食する。原油は有毒な化学物質であり、これを燃焼すると大気汚染の原因となる。
- ・ **土地の破壊**：石炭の採掘は、土地の破壊となる。
- ・ **危険**：石炭の採掘は、世界で最も危険な仕事の一つであると考えられている。
- ・ **施設の立地**：送電系統に電力を供給するために、また化石燃料を継続的に燃焼させるためには、定期的な貨物による燃料輸送が必要となる。それ故、このことは施設が化石燃料の貯蔵庫の近隣に設置されるべきであることを意味する。
- ・ **原油流出**：原油流出が発生すると周囲を汚染し、環境被害を引き起こす。それらは海洋生物に長年に亘る壊滅的な影響となる。
- ・ **政策**：油田を有する多くの国家は政治的に不安定である。油田を持たないけれども、原油に依存する国家は、自国の有利になるようにこれらの国々への政治的な影響を模索する。

燃料電池と電気自動車（EV）は内燃機関から汚染物質を生成しない。電動自動車では、蓄電池を充電するために、発電目的で化石燃料が使用される。燃料電池自動車で利用され

る水素は，一般的に化石燃料から作られる．それでは，これらのタイプの自動車は，どのように私たちにとって利益があるのだろうか？

もしも，電力あるいは水素が化石燃料から生産されたとしても，炭素の排出は半分である．そして，もしも電力あるいは水素が太陽パネルや電気分解層のような再生可能資源から生成されるなら，炭素の排出は 1%以下に削減できる．それ故，蓄電池によって駆動する電動自動車は，ガソリン駆動型の車よりもクリーンである．それに加えて，必要な電力あるいは水素の生成の価格は，現在のガソリン 1 ガロンよりも低価格である．図 1-16 に電動自動車と燃料電池車を示した．



(a)



(b)



(c)

図 1-16. (a) スバル R1e 電気自動車は一般家庭の電源から一晩で充電できる，(b) 本田 FCX コンセプト・カー，(c) ホライゾン社の 6kW 燃料電池を使用した都市用燃料電池車．

様々なタイプの自動車からの炭素排出を計算することは複雑ではある。しかし、自動車のタイプ別の炭素排出量を比較するために使用できる簡単な関係がいくつかある [9] :

$$PEF = Eg \times \frac{1}{0.15} \times AF \times DPF$$

ここで、 Eg は電力要因に対するガソリン相当のエネルギー定数、 $\frac{1}{0.15}$ は燃料使用係数、 AF は石油基礎アクセサリ係数、そして、 DPF は運転行動係数である。この方法論は、伝統的なガソリン車とハイブリッド車、そして電気自動車の燃料経済性を比較するために、米国エネルギー省によって開発された。

自動車からの排出を計算する単純な方法は、燃料タイプを基礎とする。燃料排出係数は、燃料の熱含有量、酸化される燃料内の炭素の割合、炭素含有量を基礎とする。これは次式で計算される [9] :

二酸化炭素の排出量 = 燃料消費量 × 発熱量 × 排出係数

この方程式は二酸化炭素排出量の概算値を得るためにしばしば利用される。

1.5 革新的グリーンテクノロジー

セクション 1.1 で言及したように、再生可能な「グリーンテクノロジー」には多くの種類がある。この再生可能エネルギーキットで実験できるテーマは、燃料電池、太陽電池、風力発電、電気分解である。これらの技術に関して、次からのセクションで簡単に説明する。

1.5.1 太陽電池

太陽からの熱と光は、無限のエネルギーを提供し、様々な形で利用できる。この太陽エネルギーの利点を活かした多くの技術には、太陽熱の集光システム、受動的な太陽加熱、日々の照明としての利用、太陽光発電、太陽給湯システム、太陽加熱システム、太陽による冷暖房などがある。

太陽光発電は、大規模でも小規模でも利用が可能である。ビジネスと産業はそのエネルギー源を多様化し、効率を改善し、太陽技術を選択することで支出を削減している。住宅所有者は太陽エネルギーを暖房と冷房、生産活動、電源、温水器などに利用できる。また、住宅所有者はまた、太陽技術を暖房、冷房、給湯システムとして利用するだけでなく、場合によっては家庭用電源として利用する程十分な発電量があり、地域の電力プログラムに依存するが、余剰電力を電力供給会社に販売することもできる。一般家庭や商業ビルをより効率よく維持し、生活あるいは働く場所としてより楽しく快適な場所とするために、太陽のいろいろな利用形態や戦略がある。

これらの太陽エネルギーの地域的な利用だけではなく、公共事業としての発電施設は、

太陽の豊富なエネルギー資源の利点を活用し、その顧客に太陽エネルギーの利益を提供する。集光型太陽エネルギー施設は、太陽から電力を大規模に取り出す発電施設の運用を可能とする。そのため、個人が太陽技術システムに投資することなく、顧客に太陽光発電の利点を提供することが可能となる。

集光型太陽発電システム (CSP)：集光型太陽発電システムとは、太陽を追尾し、レンズや鏡を利用して、広い範囲の太陽光を小さな領域に収束させる施設である。光のビームは伝統的な発電所の熱源として利用される。そこには、トラフ式やタワー式、それにパラボラ式の太陽集光装置など、多くの集光技術が利用される。

1.5.2 風力発電

風力発電機は、発電に風を使う。風力発電機は高いタワーに設置され、ほとんどのエネルギーを獲得する。地上から 30m あるいはそれ以上の高さでは、より強く、乱れのない風という利点を活用できる。発電機は風のエネルギーをプロペラのようなブレードによって獲得する。一般的に、2 枚あるいは 3 枚のブレードがシャフトに固定され、ローターを構成する。

ブレードは航空機の翼と同様の原理で働く。風が吹き付けると、ブレードの風下側に空気の低圧部ができる。この空気の低圧部がブレードをその方向に引き付け、ローターを回転させる。これは揚力と呼ばれる。ブレードの前面に働き、風圧と呼ばれる風の力よりも、この揚力は実際に強い。揚力と風圧の組み合わせが、プロペラのようにローターを回転させる。そして、シャフトが発電機を回転し、電気を発生させる。

風力発電機は単独で利用することもできるが、一般の送電網に接続することや、あるいは太陽光発電システムと組み合わせて利用することもできる。一般に送電目的（メガワットの規模）の風力発電施設では、たくさんの風力発電機を設置することで、ウィンドファームを構成する。今日、一般の電力供給会社のいくつかは、自分たちの顧客に風力発電施設から電力を供給している。単独の風力発電機は、揚水ポンプあるいはコミュニケーション用電源などとして利用させることが一般的である。

しかし、風の強い地域の住宅所有者や農夫、牧場主は、電気料金を低減するために風力発電機を利用することもできる。

1.5.3 電気分解

電気分解は、イオン媒体中の電流の働きが関係する。電流は電極において化学反応を引き起こす。金属の電極は電気をよく通すので、電解槽の電極として一般的に使用される。そこには固体と液体のイオン化合物があり、遊離したイオンが両方のタイプの中で電気を伝えることができる。

イオン：イオンとは、電氣的に帯電した（正あるいは負の電荷を有する）粒子あるいは、電子を余分に獲得あるいは放出した原子または分子のことである。

水の電気分解は、電気を利用して水分子を水素と酸素に分解する。純水の電気分解は、

海水の約 100 万分の 1 という伝導率の極端な低さから非常に困難である。電気伝導率は、酸や塩、それに塩基のような電解質を加えることで高めることができる。

電源装置からの電気は、水の中に置かれた二つの電極に接続される。水素は負に帯電した電極に発生し、酸素は正に帯電した陽極に発生する。発生する水素と酸素の量は、水の中を通す電荷の量に比例する。水素と酸素を集積させるためにエネルギーが要求されるので、それぞれの電極で電気分解が生じる。

1.5.4 燃料電池

燃料電池は化学エネルギーを直接、電気と熱に高い効率で変換する。これらの装置は、水素が供給される限り、どんなに長時間でも、必要であるならいつでもどこでも使用することができる。燃料電池は、電化製品を利用するために使用できる数少ない代替エネルギー装置の 1 つである。それは移動式電気製品、自動車、家、高層ビルや宇宙船（図 1-17 に NASA が開発した燃料電池を示した）にさえ電気を供給できる。燃料電池の背後にある基礎技術は単純であり、燃料電池は「挟まれた」多くの層からできている。燃料電池は、電解層とその両側に多孔質の陽極と陰極が接した構造体である。

陰極：電流を供給する燃料電池またはバッテリーの正に帯電した端子。

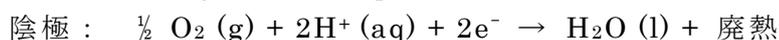
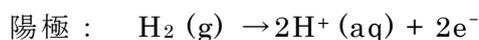
陽極：電流を供給する燃料電池またはバッテリーの負に帯電した端子。



図 1-17. 米国航空宇宙局（NASA）が開発した燃料電池

水素は陽極側で陽子と電子に分離される。そして、酸素は陰極で水を生成するために結合される。陽子は陽極から陰極に電解層を通して輸送される。電子は陰極へ外部回路を通して運ばれる。陰極では、酸素が陽子と電子に反応し、水を形成し、熱を生み出す [10]。陽極と陰極のどちらも、電気化学過程を加速するために触媒を含んでいる。

図 1-18 には、次の反応を利用するプロトン交換膜（PEM）型燃料電池の例を示した。



反応物は拡散と対流により、電気化学反応が生じる触媒作用のある電極表面に輸送される。半電池の反応は、その他の燃料電池のタイプと異なるけれども、全体としての電池の反応は、前述した全体の反応と同様であるべきである。燃料電池によって生成する水と廃熱は、継続的に除去されなければならない。この水と廃熱の除去が特定タイプの燃料電池利用上の重大な課題でもある [11]。

燃料電池は電気を得るために水素を、メタノール、化石燃料、バイオマス由来の物質などさまざまな燃料を利用できる。水素生成基盤施設が構築されるまでは、燃料電池の利用において、水素を生成するためにメタン、メタノールあるいはエタノールなどの化石燃料を使用することは、中間の方法と位置付けることができる。また、燃料は都市廃棄物、下水泥（スラッジ）、森林間伐材、ごみ廃棄物、農業と畜産業の廃棄物などからのメタンを含む多くのバイオマス資源から取り出すことができる。

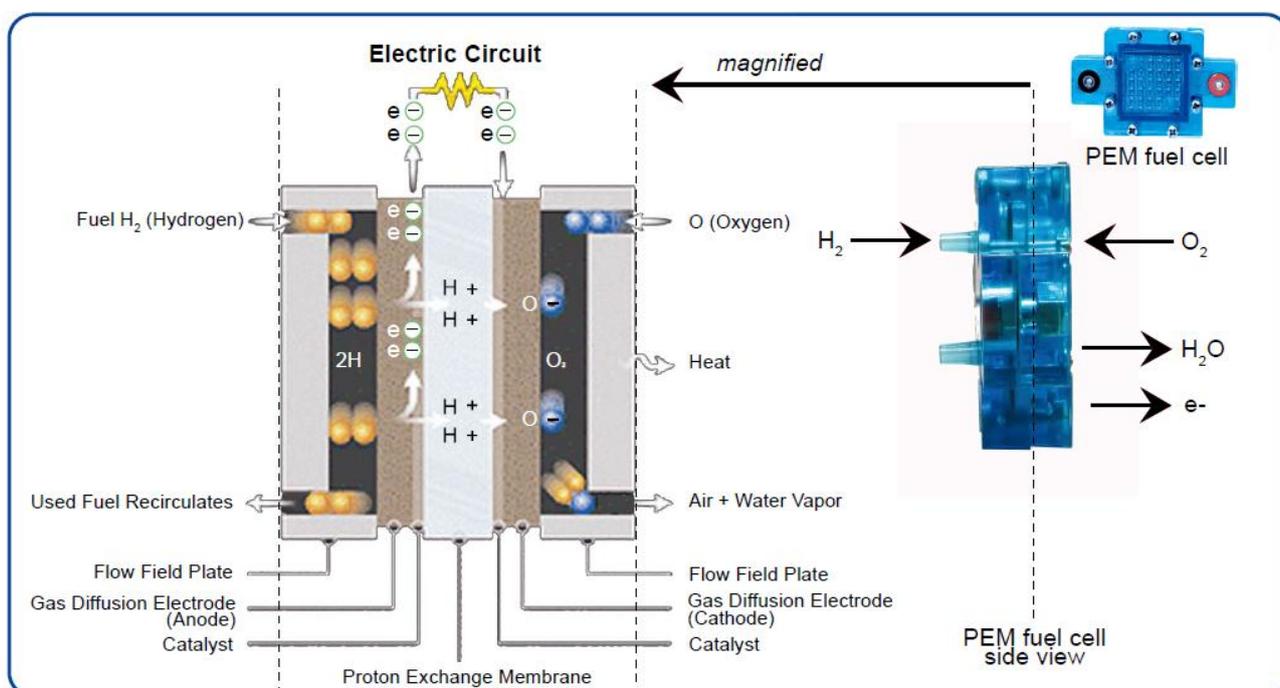


図 1-18. プロトン交換膜 (PEM) 燃料電池の構造

1.6 再生可能エネルギーの組み合わせによる水素クリーンエネルギー経済の未来像

現在、世界のエネルギー需要の大部分は、化石燃料によって賄われている。大規模な資金がシステムを計画し、構築し、維持するために使われてきたので、化石燃料は容易に獲得でき、貯蔵でき、そして輸送できる。現在の燃料配給システムが利用できたので、技術はこれまでの長い歴史の中でも、過去二世紀中により早いペースで進歩した。化石燃料が私たちの社会に提供するすべての優位性にもかかわらず、それはまた負の影響を環境面に持つ。それらのいくつかは未だに顕在化していないものもあるだろう。これらのいくつかは、排出ガスによる大気汚染と酸性雨、原油の流出と漏出による水と土壌汚染、大気中の二酸化炭素の蓄積などを含む危険な影響である。これらの汚染物質は、地球の大気を暖め、多くの種を消滅させる。

世界中のほとんどの国は、もしも化石燃料の供給が途絶えたら、その経済活動全体が停止する。そこでは、人々は働きに行くために自動車を運転することも、自宅あるいは職場で電力を使用することもできない。しかし、自動車はガソリンを燃焼し、大気汚染の原因となる。ガソリンを燃焼する過程で、一酸化炭素、二酸化窒素と燃焼しなかった炭化水素などを大気中に排出する。触媒装置は汚染物質の大部分を削減できるが、それらを完全に削減することはできない。現在、多くの都市は大気中のオキシダント濃度が危険なレベルとなっている。[訳注：日本のオキシダント濃度は、1970年代をピークに低下傾向にある。]

これらの化石燃料を使用することの環境への負の影響に加えて、化石燃料の供給が有限であることは、必然的に別のエネルギー源の使用に向わせる。エネルギーの需要もまた、世界人口の定常的な増加のために、連続的に増加する。

未来のエネルギー経済は、組み合わせて利用される多くの再生可能エネルギー技術から構成される。燃料に関する限り、水素は最も出力がある燃料のひとつである。これは、NASAの宇宙船で水素が主要燃料として利用されていることでも明白である。水素は宇宙に最も豊富な元素である。しかし、地球上には純粋な形では存在しない。それ故、水素は一般的な燃料、あるいは水から抽出しなければならない。最も頻繁に行われる水素の抽出過程は、天然ガス蒸気からの抽出である。水素は石炭、原子力、バイオ燃料あるいは廃棄物などからも抽出できる。

水素は電気分解の過程を利用することで、化石燃料なしでも生成できる。光電池、風、水力そして地熱などの再生可能なエネルギーは、電力生産への使用が増加している。これらの電力は、水を水素と酸素に分離するための電気分解に使用することができる。エネルギーシステムにおける水素利用の具体例を図 1-19 に示した。

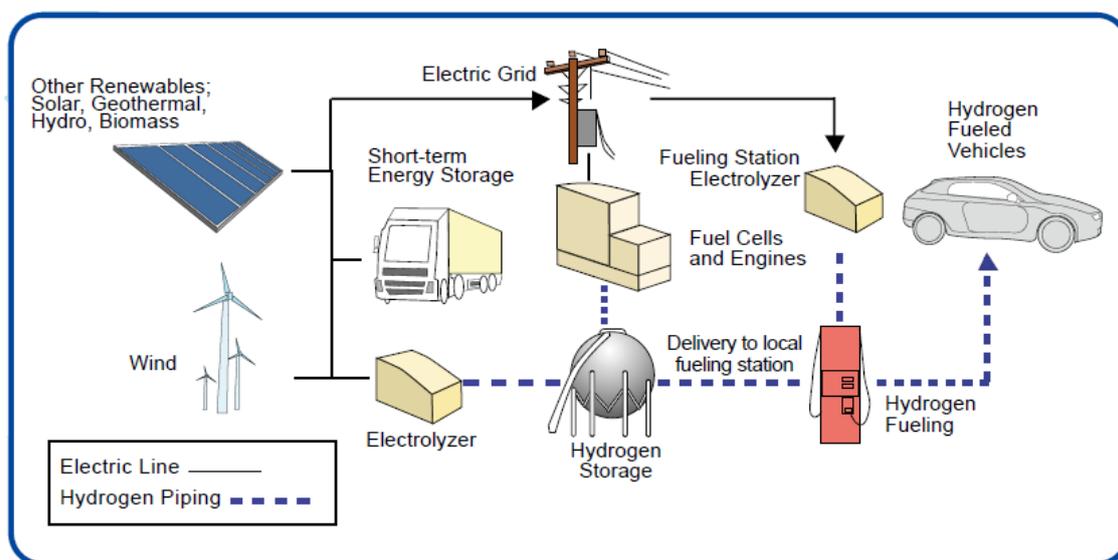


図 1-19. エネルギーシステムにおける水素の連関

再生可能エネルギーを基礎とする社会にするためには、再生可能エネルギーが断続的であるため、エネルギーを貯蔵する方法が必要となる。太陽と風のエネルギーは、どちらも自然資源からエネルギーを獲得するための優れた方法である。しかし、日射のレベルと風の強さは変動する。これらの資源が利用できないとき、電力を生産することはできない。多くの量のエネルギーが生産されたとき、水から水素を生成することができる。この水素

は、後で使用するために貯蔵される（図 1-20）。

燃料電池は、商用あるいは住宅用として、固定した使用形態で既に数十年間使用されている。ラップトップコンピュータ、カメラ、携帯電話のようなポータブル家電製品でも、水素を使用することで 10～20 倍長く継続使用することができる。主要な自動車メーカーの全てが、既に水素の燃料電池技術を利用した自動車へ重点的に資本投資している。再生可能エネルギーシステムのコストは未だかなり高価であるが、技術的なブレイクスルーにより大量に生産されれば、毎年劇的に価格を低減できる。

これに加えて、化石燃料の価格は近い将来継続的に上昇するだろう。再生可能エネルギー技術のコストが、上昇する原油価格と一度競争可能になれば、化石燃料を基礎とした経済は再生可能エネルギー経済に置き換わるだろう。

将来のエネルギー経済において、個々の家庭はそれぞれが独自にエネルギーを生産する。世界的な石油会社はそれほど多くの富や資源を制御できないので、これは電力の再配布を助ける。個々の家庭は、自分たちのエネルギーを送電網と共有し、気象条件によりエネルギー生産が少ない地域にエネルギーを配分することを可能とする。

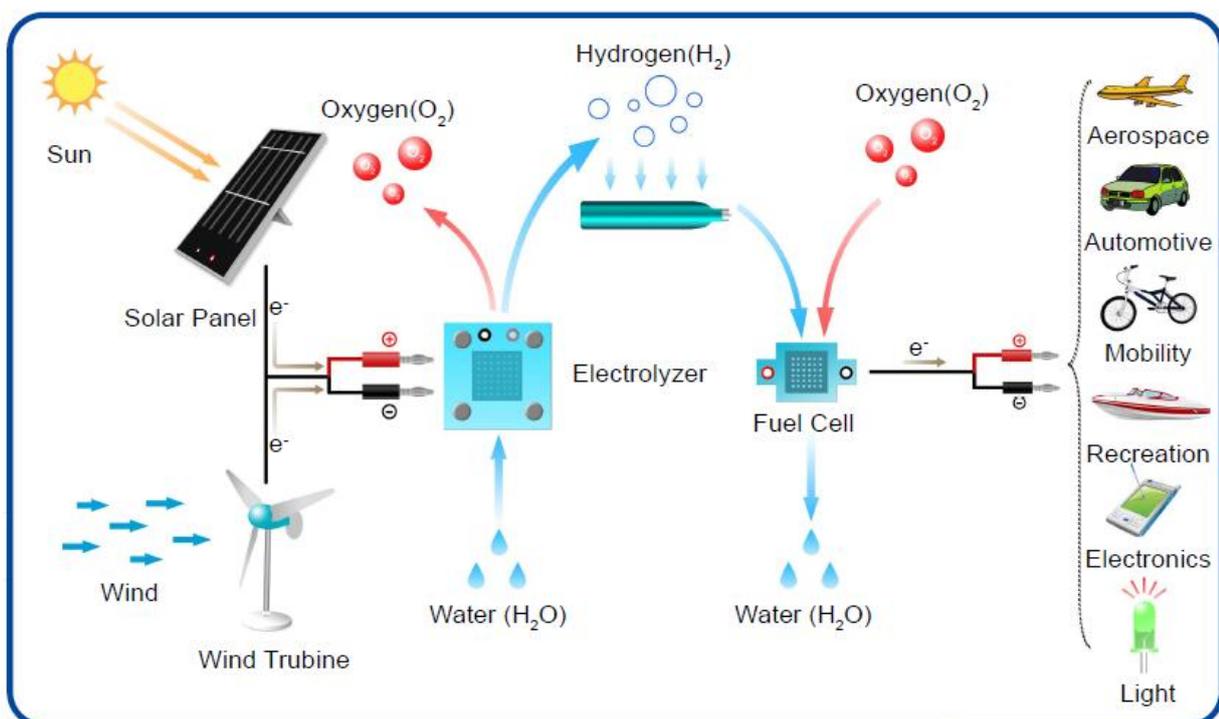


図 1-20. 再生可能物を利用した再生可能水素循環と電化製品

将来、自動車は家庭や事務所の電源に接続され、自動車と家屋の両方のために電気を生産する。一般家庭は、全体でも平均で僅か 10kW の電力が必要なだけである。一方、自動車は 40kW の電気を生産することができるので、自動車は家屋や事務所の発電所となるのである。利用者は自動車です仕事に出かけ、職場では自動車を電柱に接続し、建物に電力を供給する。水素経済へのこの転換は、重要な挑戦と機会を提供し、21 世紀の偉大な機会を提供する。

水素経済への転換は既に始まっている。今日、私たちは化石燃料を基礎とした経済であ

る。私たちは現在、水素経済に関連したコストを低減することに取り組んでいる。そこには、未だ改善されるべきことがある。しかし、私たちは素早く学習している・・・

1.7 結論

エネルギーは私たちの近代的な生活様式を維持するために必要である。化石燃料は私たちの技術、交通、そして近代的な生活のその他全ての点で、私たちの成長と進化を支えてきた。また、エネルギーは極度の汚染、広範な世界の地下資源の採掘、化石燃料資源を有する国々の政治的優位性というようなくつかの負の影響も残した。そして、エネルギーに対する需要は、世界人口の増加のために増大している。残された化石燃料の可採年数に関する見積りは変動するが、多くの専門家は残り約 30～40 年という値で一致している。それ故、石油の低価格時代の終焉は近づいている。化石燃料の利用によって発生した汚染は地球の大気に影響し、空気と水と大地を汚染する。それ故、再生可能エネルギー技術を開発する経済面からの理由と環境面からの理由の両方がある。それで多くのエネルギー技術が研究され、開発された。それらには、太陽、風、水力、生物エネルギー、地熱やその他多くがある。太陽電池は太陽を利用して発電する。風力発電は風の運動エネルギーを獲得する。生物エネルギーは植物から抽出する。これらの代替エネルギー資源には、それぞれ利点と不利な点があり、それぞれ異なる開発段階にある。

再生可能エネルギーキットは、太陽と風、そして電気分解槽を組み合わせた燃料電池などの複合的な再生可能エネルギーシステムを演示できる。この教育キットは、未来の再生可能エネルギー経済の背景にある基本原理を小さな規模で演示することができる。

現在、私たちは未来のエネルギー経済に関するコストを低減するように努めている。そこには、実現されることが必要な改善点が未だ多く存在する。私たちはこれらの技術をどのように改善するか急速に学習している。何故なら、未来はもう直ぐそこまで来ているから。

参考文献

[1] Energy Information Administration. (2008). International Energy Outlook 2008, Washington DC, November 2008 (No. DOE/EIA-0484(2008)). Retrieved January 25, 2009 from <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>

[2] International Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. (2008). World Energy Outlook 2008. Retrieved from <http://www.sourceoecd.com/>

[3] IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved February 4, 2009 from http://ipccwg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_SPM.pdf

[4] Hegerl, G.C., F. W. Zwiers, P. Braconnot, N.P. Gillett, Y. Luo, J.A. Marengo Orsini, N. Nicholls, J.E. Penner and P.A. Stott, 2007: Understanding and Attributing Climate

Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved February 4, 2009 from http://ipccwg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_Ch09.pdf

[5] Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds., 2008: *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.* Retrieved February 8, 2009 from <http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-change-wateren.pdf>

[6] Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: *Historical Overview of Climate Change.* In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved February 8, 2009 from http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_Ch01.pdf

[7] Carnegie Institution (2007, March 16). *Crops Feel The Heat As The World Warms.* ScienceDaily. Retrieved February 25, 2009, from <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/03/070316072609.htm>

[8] *World energy resources and consumption.* (2009, February 2). In Wikipedia, The Free 125 Encyclopedia. Retrieved 05:28, February 2, 2009, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=World_energy_resources_and_consumption&oldid=272714347

[9] Gray, D., White, C. & Tomlinson, G., National Energy Technology Laboratory. (2007). *Increasing Security and Reducing Carbon Emissions of the U.S. Transportation Sector: A Transformational Role for Coal with Biomass*, Washington DC, August 2007 (No. DOE/NETL-2007/1298). Retrieved January 28, 2009 from <http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/NETL-AF%20CBTL%20Study%20Final%202007%20Aug%2024.pdf>

[10] Spiegel, C.S. (2008). *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*, 1st Ed. New York: Elsevier Science.

[11] Spiegel, C.S. (2007). *Designing and Building Fuel Cells*, 1st ed. New York: McGraw-Hill.

図の出典

- P1 <http://www.istockphoto.com/> 夜明けの地球
- P2 <http://www.istockphoto.com/> 図 1-1～1-3
- P8 <http://www.istockphoto.com/> 分子構造
- 図 1-9 <http://space.lamost.org/>
- 図 1-8 <http://www.ipcc.ch/index.html>
- 図 1-10 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Viking2lander1.jpg>
- 図 1-11 http://en.wikipedia.org/wiki/File:Water_cycle.png
- 図 1-12 http://en.wikipedia.org/wiki/Sea_level
- 図 1-14 http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_demand
- 図 1-15 http://en.wikipedia.org/wiki/Subaru_R1e
http://en.wikipedia.org/wiki/File:FCX_Clarify.jpg
- 図 1-16 http://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/fuel_cells.html