

エネルギーと環境

広島大学名誉教授 菊地 義弘

1. はじめに

21世紀はエネルギーと環境の時代である。環境への悪影響をいかに抑制しつつ高効率のエネルギー利用を実現するかが問われている。産業革命以降、石炭や石油などの化石燃料の大量消費のため、エネルギー資源の枯渇が心配されるとともに、大気中には温室効果ガスが増大し、気温が上昇していると言われている。この人類誕生以来最大となりうる危機を回避するため、新たな科学技術の展開が必要である。それは、人々の欲望を満足するために売れる物を大量に生産し富を得てきた今までの経済活動とは異なり、環境を基軸にした循環型社会を構築するための新しい産業革命、まさに、山根一眞氏が言う「環境革命」に他ならない。

勿論、すでに日本は環境革命への道を歩み始めている。化石燃料への依存から脱却するため、太陽光や風力などの自然エネルギーの利用技術が進んでいる。また、廃棄物処理法の改正、容器包装類、家電、食品、建設などに対するリサイクル法の制定など循環型社会に向けた動きが活発になってきた。

本講では、エネルギーと環境の問題を考える上で注意すべき点について要述する。



2011年7月12日にTSS文化大学で講演する筆者

2. 化石燃料資源はいつまでもつのか？

人類が誕生して約400万年になる。産業革命以前の人類は風車や水車などを利用して、自然によって供給されるエネルギーの範囲においてのみ、すべての生産活動を営んでいた。しかし、ワットによる蒸気機関の発明による産業革命以来、人類の消費するエネルギー量は等比級数的(ねずみ算的)に増大してきた。その大部分を石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料に頼っている。

化石燃料などの埋蔵量と可採年数を表1に示す。可採年数とは、現在確認されている「埋蔵量」を現在の「年間消費量」で割ったものである。石油は46年、天然ガスは63年、石炭が一番多くて119年となっている。つまり、現状のままエネルギー消費を続ける限り、119年後に人類は化石燃料を食い尽くしてしまうのである。人によっては、119年間くらいはもつから自分たちの世代には関係ないとか、石油はいつでも30年から40年しかないといわれてきたと考えるかも知れない。しかし、化石燃料は人類全体に与えられた有限の資源である。これを末永く有効に活用することは、われわれ世代の責務であろう。

先進工業諸国ではエネルギー消費量の伸び率に鈍化のきざしがあるとはいえ、世界全体のエネルギー消費量は現在も増えている。これは、開発途上国の消費量の伸びが著しいからである。また、地球の人口は毎年約8千万人増加しているため、たとえ、新たな資源が発見されるとしても、原油生産余力が年々減少していることを勘案すると、現在のように化石燃料に依存した私たちの生活は今後数十年のうちに維持できなくなるだろう。

表1 世界のエネルギー資源確認可採埋蔵量

種類	埋蔵量	可採年数
石油	13,331億バーレル ^(注)	46年
天然ガス	188兆立方メートル	63年
石炭	8,475億トン	119年
ウラン	547万トン	100年

(注) 1バーレル=約159リットル

BP エネルギー統計 2010 などの資料をもとに作成。

3. 地球温暖化の主要原因は？

日本のエネルギー供給・消費の経路を図1に示した。燃焼などの化学変化などで得られたエネルギーで有効に使われるのは総量の1/3で、あとの2/3は利用されず捨てられている。有効利用されたエネルギーも最後には常温の排熱となって環境に排出される。エネルギーの変換過程において、95パーセント以上が熱エネルギーの形態を経ることを考えれば、熱を制するものはエネルギーを制すると言っても過言でない。

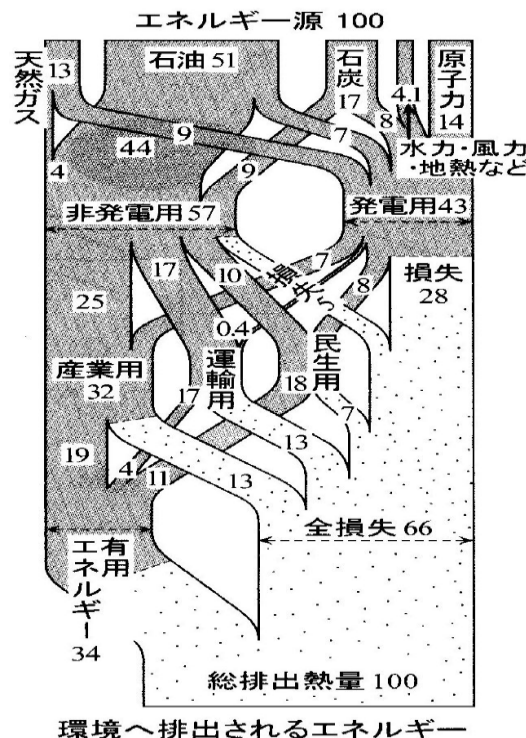


図1 日本のエネルギー供給・消費のフローチャート

ところで、近年、人類が排出する熱が急増し、ヒートアイランドなどの局所的な気候の変動や、地球の温暖化などの環境問題を引き起している。しかし、太陽から地球に到達するエネルギーが膨大なため、人類の熱排出量が2倍になっても地球全体の平均温度は0.006°Cしか増加しない。

むしろ、図2に示すように、二酸化炭素など温室効果ガスの排出量が増加し、地球の急激な温暖化を起していると言われている。2008年7月の洞爺湖サミットでも最重要課題として取り上げ

られたように、地球温暖化は 21 世紀初頭の世界を席卷している最大の問題であり、その社会的インパクトは比類のないものである。

しかし、このような温室効果ガスが主原因であると仮定する気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の考え方については、疑問を抱く科学者も少なくない。温室効果は、二酸化炭素の選択吸収、すなわち、波長の短い太陽光 (可視光) を吸収せずに、波長の長い地表からの熱線 (赤外線) を選択的に吸収するために生じる現象であるが、吸収の程度については、エネルギー・資源学会誌 (2009 年) の討論で見られるように、十分な科学的コンセンサスが得られていない状況である。アラスカ大学名誉教授の赤祖父俊一氏は、長年の観測データに基づき、気温上昇が 1400 年から 1800 年頃まで経験した「小氷河期」からの回復 (すなわち、温暖化率=0.5°C/100 年) によるものであるとの学説を展開している。直近の数年については、気象庁のホームページでも公表されているように、気温上昇が停滞しているので、今後の推移を見守る必要がある。また、純粋に科学的な検討を徹底的に行うことも重要である。

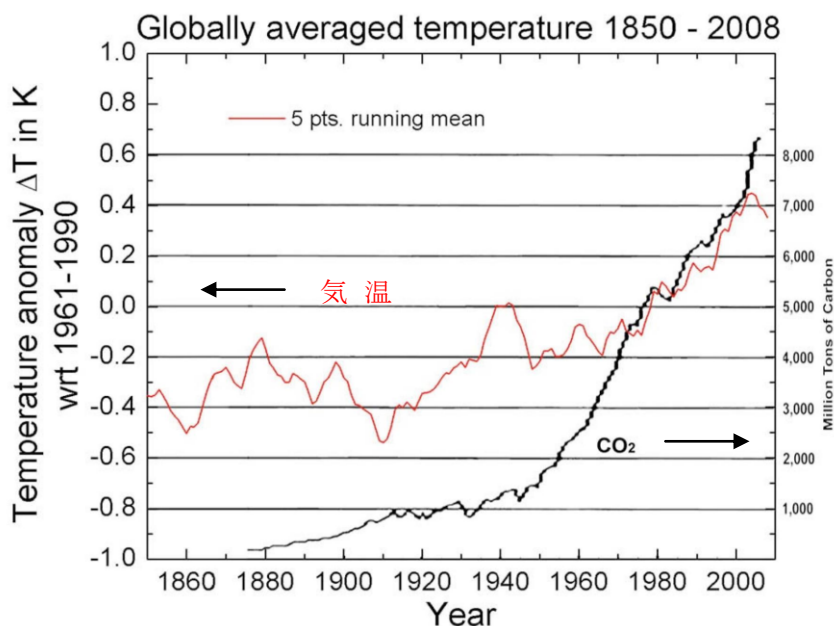


図 2 地球平均温度と CO₂ 濃度の変化

4. 再生可能エネルギーとして何がよいか?

日本の 2009 年度一次エネルギー総供給の状況を表 2 に示す。全体の 90%以上が化石燃料と原子力が占める。再生可能エネルギーは純国産エネルギーであり、日本がその比率を高めることは、エネルギーの安全保障、安定供給の観点から重要である。また、再生可能エネルギーの利用は、地域に根ざした地域経済の活性化、ひいては雇用創出にもつながる。再生可能エネルギーの代表格である太陽光発電や風力発電は公的支援もあり、近年急速に導入が進んでいるが、それでも再生可能エネルギーの供給量は全体の 1%にも満たない。

表 2 日本の一次エネルギー総供給

石油	9,834
石炭	4,408
天然ガス	3,781
原子力	2,411
水力	663
再生可能エネルギー	77
未活用エネルギー	577
合計	21,751

単位: 10¹⁵J (PJ)

4.1 太陽エネルギー

自然界からエネルギーを得る方法は限りなくあるが、表3を見れば明らかなように、太陽エネルギー量が桁違いに大きいことがわかる。地球全体に降り注ぐ太陽エネルギーの1時間の量が世界の年間のエネルギー消費量に匹敵する。

表3 自然エネルギー源の比較

エネルギー源	エネルギー量 (億 kW)
水 力	1
潮汐流	2
地 熱	18
風 波	210
太陽光	100,000

太陽エネルギーの利用には、太陽光を熱としてとらえる太陽熱温水器などのソーラーコレクターがすでに多くの家庭で普及しており、家庭用の温水源として有効に使われている。それに対し、太陽光から直接電気を得ることができる太陽電池が開発されてきた。

太陽熱温水器の性能を表す変換効率が50%を超えるのに対して、太陽電池のそれは低いことに注意する必要がある。しかし、太陽電池の変換効率は、1973年の石油危機の時点で13%であった単結晶シリコンの変換効率が最近では20%以上になり、多結晶シリコンでも15%を越えるまでに向上してきた。また、太陽電池の価格は性能向上とともに市場が拡大したため、標準家庭3kWのシステムで200万円以下にまで低下してきた。

最近、太陽光発電システムの広告を見かけるようになったが、これは法規制が緩和され、電力会社が商用電力系統に太陽光発電システムを接続し、余った電気を買電する制度ができたためである。つまり、天候の変化に応じ、太陽光発電で余れば配電線に逆送して売電し、足りなければ電力会社から買うことができるようになった。また、国や地方公共団体の補助、さらに大量生産によるコストダウンに伴い、10年以内に各家庭に広く普及することが期待される。

しかし、太陽光発電はお天気任せになるため、蓄電設備を併設して電力変動を少なくすることが望ましい。また、大規模発電所を設置するには広い面積が必要であり、たとえば、原子力発電をすべて太陽光発電で賄うとすると、東京都の面積が必要になる。

4.2 風力エネルギー

風力エネルギーは河川水力とともに人類が古くから利用してきたエネルギーであるが、自然エネルギーに共通なエネルギー密度の低さに加えて、変動が大きく持続性に欠けるといった難点があり、利用にあたってはその性質を十分に把握しておく必要がある。地表付近の風は局地性が強く、季節的、時間的に変化する。また、風力発電の設置面積は太陽光発電にくらべて10倍も大きくなり、自然環境破壊や低周波騒音についても注意が必要である。

世界の累積導入量の推移を図3に示す。風力発電は経済的に優れているため、導入量は、近年、約30%の割合で急増しており、世界風力会議の統計によると、2010年末現在で194.4GWとなっている。表3は各国の設備容量であるが、中国とアメリカが群を抜いていて、ドイツとスペインとが追いかけている。日本は2010年末現在で2.3GWで、12位に甘んじている。これは、発電資源量が北海道、東北、九州など地域的に偏在しているため、需要地との送電網の整備が不十分なためである。

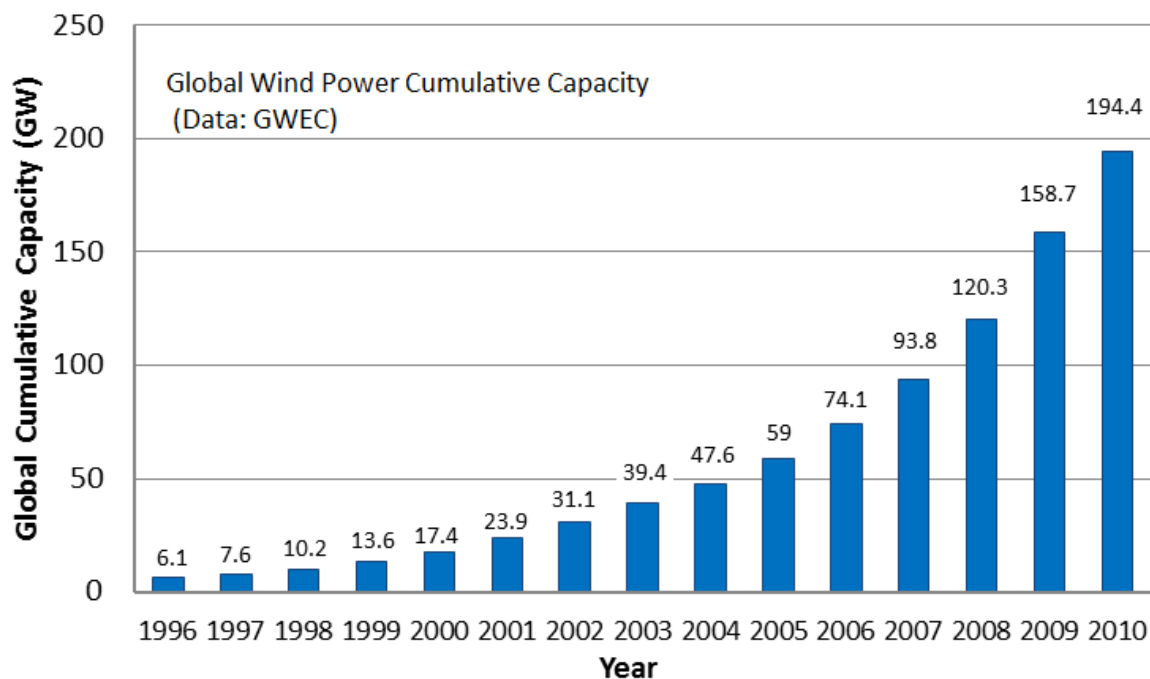


図3 世界の風力発電設備累積導入量

表4 国別の風力発電設備累積導入量

順位	国名	容量(GW)
1	中国	42.3
2	米国	40.2
3	ドイツ	27.2
4	スペイン	20.7
5	インド	13.1
6	イタリア	5.8
7	フランス	5.7
8	英国	5.2
9	カナダ	4
10	デンマーク	3.8
	その他	26.5
-	世界全体	194.4

4.3 バイオマスエネルギー

バイオマスとは植物や動物の活動によって作られるもので、エネルギーや工業原料に使える資源のことである。例えば、使い終わった天ぷら油を集めてメタノールと反応させると、ディーゼル自動車に使える燃料が得られる。あるいは、オガクズに熱をかけて圧縮すると、オガクズが固まってペレットと呼ばれる木製の燃料を得ることができる。このとき、天ぷら油はもともと菜種やひまわりから取った油、オガクズは木を切った残りである。どちらも植物から作られて、エネルギーに使われているから、バイオマスである。

石炭や石油と同様に、バイオマスも燃やして使うと二酸化炭素を発生する。ところが、バイオマスはもともとたどると植物が光合成してためた太陽エネルギーを使っている。光合成では大気中の二酸化炭素を吸収するから、結局バイオマスの利用を全体で考えると、もともと大気にあった二酸化炭素を吸収した分だけを放出することになる。もとなる植物を増やしてエネルギーとして使い続

ければ、二酸化炭素は吸収と放出とを繰り返すだけで、大気中にたまることはない。この特徴をカーボンニュートラル（炭素中立性、図4）と呼び、このために地球温暖化を進行させないエネルギーとしてバイオマスを使うことができる。

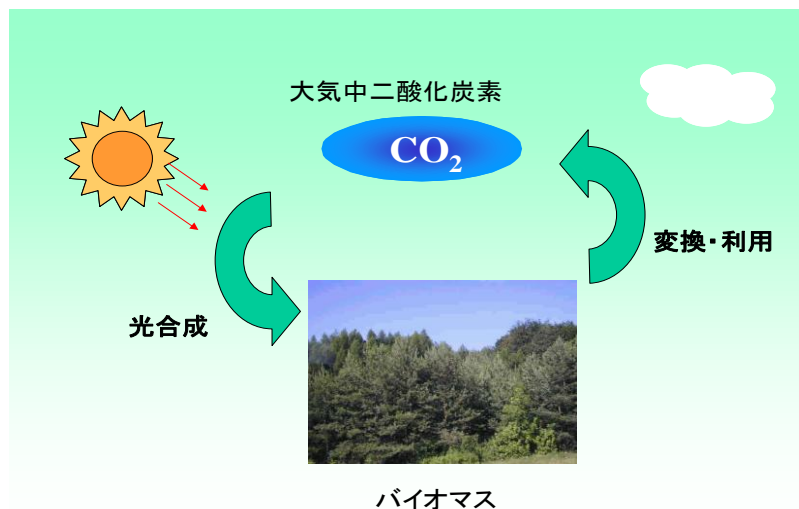


図4 バイオマスの炭素中立性

また、バイオマスには再生可能であるという特徴がある。石油や石炭は使ってしまうと、やがてなくなってしまうため枯渇型資源と呼ばれるが、これに対してバイオマスは植物を育てることによって作り出すことが可能である。炭素中立性と再生可能性の特徴を持っているバイオマスは、持続可能な社会を支えるエネルギーのひとつとして期待されている。とくに、自給率が20%台前半にまで低下した林業を大規模化、機械化、供給チェーンの統合によって復活させれば、自然エネルギー源としても大きな可能性が生じる。

しかし、バイオマスは、スチール缶、アルミ缶、ガラス瓶、古紙、使用済の家電や自動車、建設廃棄物などに比べて、発生量が多いにも拘わらず、リサイクル率が非常に低い。これは、その発生量や性状が不安定で、厄介者扱いされることが多かったからである。

バイオマスはその物理的な性質や化学的な性質が多岐にわたるため、これに応じて変換技術も多種多様である。比較的乾燥した木質系バイオマスは燃焼やガス化が適当であり、家畜排泄物や汚泥は含水率が高いのでメタン発酵が適している。一方、糖分を多く含むものはエタノール発酵してアルコール生産に使用するのが妥当であり、廃食用油、パーム油、菜種油のような植物油はエステル化してバイオディーゼルに変換するのが適当である。

広島大学バイオマスプロジェクト研究センターは、バイオマスをより効果的に使う方法を研究し、また、産業界、政策立案者、民間団体との協力の上にバイオマスの導入・普及に貢献していくことが重要と考えて2003年4月1日に設立された。

技術開発では、バイオマスをエネルギーに効率よく変換し、できたエネルギーの燃焼特性を調べる研究を行っている。例えば、水分が多く含まれている生ゴミや家畜の糞・尿、食品工場から出る廃棄物などのバイオマスを効率よく可燃性のガスにする超臨界水ガス化の研究(図5)、現在使われているメタン発酵の効率を高める研究、使用済みの油から作ったバイオディーゼルの燃焼特性の研究などを進めている。

一方で、技術があっても上手に使うための仕組みがないとバイオマスの利用は進まない。仕組みづくりのための研究や委員会活動も行っている。例えば、森から出るバイオマスをどのように収集すると安価に、効率よく集められるかなどの検討を交通工学の観点から進めている。また、中国地方や広島県、広島市などでバイオマスをどのように使うのがよいか議論する委員会でも学術的な立場、システム工学の立場から協力を行っている。

詳しくは、ホームページ <http://home.hiroshima-u.ac.jp/bprc/hp-j.html> を参照されたい。

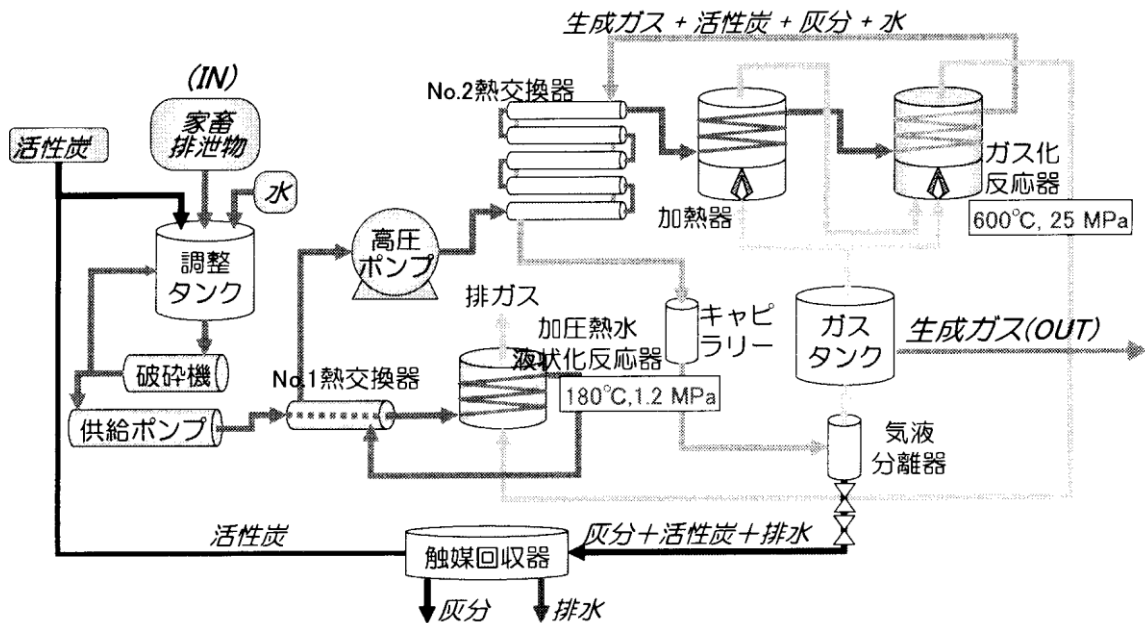


図5 バイオマスの超臨界水ガス化のパイロットプラント

5. 省エネルギーは何が有効か？

我が国は、2度の石油危機の経験により、エネルギーを効率的に使う技術を徹底的に追求した結果、省エネルギー関連技術は既に世界最高の水準に達している。そのため、産業部門のエネルギー消費は、省エネルギー設備や技術の積極的導入によって、現時点においても石油危機当時の水準に留まっているが、依然として全体の5割近く占めていることから、今後も一層の省エネルギー努力が必要である。

しかしながら、民生部門のエネルギー消費は、石油危機以降、一貫して増加している。家庭部門では、機器の効率化が進む一方で、世帯数の増加、機器の大型化・多様化、より快適な生活を求める国民のニーズを背景に、機器保有台数の増加や使用時間、使用条件の変化がエネルギー需要の増加要因と考えられる。このため、新たに普及が進んでいる機器に着目した対策や機器のエネルギー需要を適切に管理することが必要である。一方、業務部門においては、産業構造の変化などによるオフィスビルや商業施設などの床面積の増加がエネルギー需要の増加の主たる要因と考えられるが、一段と省エネルギーを推進するため、需要の適切な管理により、エネルギーの効率的利用を一層推進する必要がある。

ところで、一次エネルギー総供給量に占める発電用エネルギーの割合は年々増加傾向にあり、現時点では、40%を超えている。今夏は、3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故により、電力不足が懸念されているが、夏の日中（14時）の消費電力（全世帯平均）を表5に示す。これは5月13日に資源エネルギー庁から発表されたものである。エアコンと冷蔵庫が高い割合となっていることがわかる。これらの機器は、トップランナー方式による省エネルギー基準の設定もあって、効率が大幅に改善され、消費電力量が以前に比べて非常に少なくなった。たとえば、図6にP社の冷蔵庫の消費電力量の推移を示すが、2005年から2008年までの最近の3年間でも電力量が48%も削減されていることがわかる。

表5 夏の日中（14時頃）の消費電力（全世帯平均）

電気機器	割合 (%)
エアコン	53
冷蔵庫	23
テレビ	5
照明	5
待機電力	4
その他	10

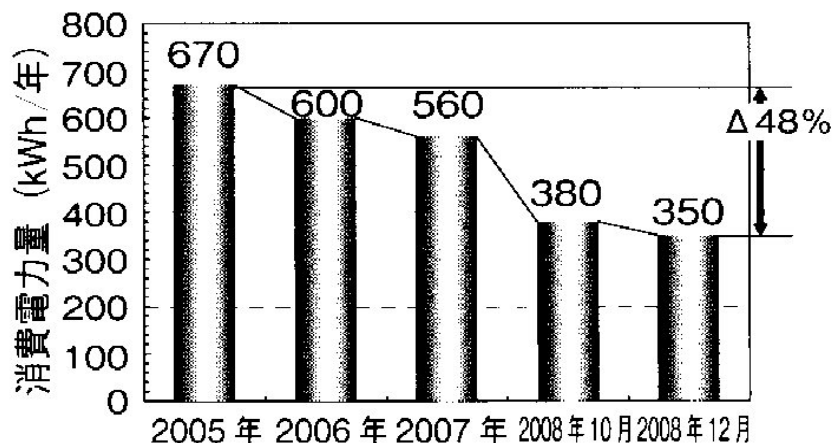


図6 冷蔵庫の消費電力量の推移

5. 生活水準は維持できるか？

2009年9月22日、当時の鳩山首相が国連において、温室効果ガスの排出を2020年までに1990年比で25%削減すると表明した。その後、温室効果ガスの排出削減に関する中期計画が世界各国から発表されたが、これらについて地球環境産業技術研究機構（RITE）が分析した結果を表6に示す。日本の中期目標は、1990年比／2005年比削減率、限界削減費用、GDP比対策費用のどの指標を見ても他国のそれに比べて意欲的な目標であることがわかる。しかし、これらを実行しようとする、省エネルギー率が既に世界最高の水準に達しているため、経済発展が阻害され、我々の生活水準を下げなければならないのではないかと懸念された。さらに、今年3月11に発生した東日本大震災以降、この中期目標の実現が困難視されるようになってきた。

最近、菅首相が1000万戸に太陽光発電装置を設置すること、太陽光や風力などで発電した電力の買い取りを電力会社に義務付ける内容の再生可能エネルギー特措法を早期に成立させことなどを言い出しているが、方向性としては間違っていないとしても、今、速やかに実行すべき政策より不確実性の大きい政策に拘泥するあまり、経済が停滞してしまい、震災の復旧・復興が遅れるのではないかと危惧されている。

表6 主要排出国の中期目標

	中期目標	1990年比 換算目標	2005年比 換算目標	限界削減費用 \$/tCO ₂	GDP比対策費用 %
日本	1990年比▲25%	▲25%	▲30%	476	1.13
EU	1990年比▲20% ～▲30%	▲20% ～▲30%	▲14% ～▲25%	48 ～135	0.08 ～0.26
米国	2005年比▲17%	▲3%	▲17%	60	0.29
中国	GDP原単位を2005 年比▲40%～ ▲45%	+327% ～+366%	+105% ～+88%	0～3	0～0.07
インド	GDP原単位を2005 年比▲20%～▲ 25%	+344% ～+373%	+142% ～+127%	0	0

参考図書

1. 学研まんがでよくわかるシリーズ 51 「エネルギーのひみつ[改訂版]」 学研パブリッシング (2010)
2. 「地球温暖化：その科学的真実を問う」 エネルギー・資源 30 巻 1 号 (2009)
3. 環境省「平成 22 年版環境・循環型社会・生物多様性白書」 (2010)
4. 経済産業省「平成 22 年版エネルギー白書」 (2010)
5. 資源エネルギー庁編「原子力 2009」 日本原子力文化振興財団 (2009)
6. 日本機械学会誌 112 巻 1087 号 (2009)
7. 菊地義弘・松村幸彦「伝熱学—基礎と要点—」 共立出版 (2006)
8. 「JSME テキストシリーズ 熱力学」 日本機械学会 (2002)
9. 「伝熱工学資料改訂第 5 版」 日本機械学会 (2009)

(本稿は、2011 年 7 月 12 日に T S S 文化大学で行った講演の概要である。)