

第3章 これからのエネルギーの確保と地球環境問題

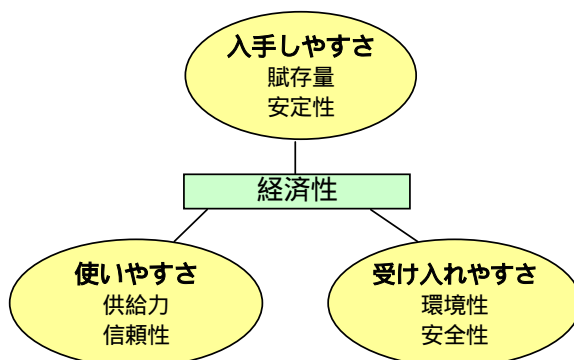
3-1 エネルギー供給に求められる基本要件

エネルギーは社会の産業活動と人々の暮らしを支えている。社会はエネルギーの供給を水や空気のように要求している。すなわち使いやすいエネルギーを安価にかつ大量に、また環境や安全に不安がないように供給することである。その基本要件は「入手のしやすさ」、「使いやすさ」、「受け入れやすさ」で表わすことができる。

「入手しやすさ」とは、社会に必要なエネルギー資源を長期にわたって安定に確保していくことで、それを満たすには資源量が豊富で供給途絶の不安や価格変動が小さい資源を利用していく必要がある。「使いやすさ」とは消費者に使いやすいエネルギーを送り届けることで、それは入手された資源を使いやすいエネルギー形態に変換し、消費者に供給の不足や停止が生じないようにしていくことである。「受け入れやすさ」とはエネルギーの供給システムである採掘、生産、流通の過程において環境や安全の面で人々に不安を与えないようにしていくことである。しかし、すべての要件を完全に満たすことはできない。エネルギーは消費者に安価に供給されなければならない、要件を満たそうとすると経済的な負担が大きくなって供給コストが高くなってしまう。消費者に安価なエネルギーを供給していくためには、経済性を考慮してそれぞれの基本要件を満たしていくことが必要になる。

社会で使われているエネルギー源には化石燃料、原子力、再生可能エネルギーがある。どのエネルギー源も異なる利点と欠点を持っておりエネルギー供給に求められている基本要件をすべて満たすことはできない。経済性という制約の下でそれぞれの利点を最大限に発揮することができる利用方法を考えていくことになる（図 3.1.1）。

図 3.1.1 エネルギー供給の3つの基本要件



[出典] 著者作成

入手しやすさ

入手しやすさとは、エネルギー資源の特性を「賦存量」と「安定性」によって表わしたものである。エネルギーは産業活動や人々の暮らしを支えていくのに不可欠なものとなり、社会は豊富な賦存量を持つエネルギー資源に頼らざるを得ない。化石燃料は比較的

安価に入手しやすいことから世界で最も広く利用されているエネルギー源となっている。化石燃料には石油、天然ガス、石炭があり、その可採年数¹は石油と天然ガスが数十年、石炭が200年以上になる。原子力のエネルギー源であるウランの可採年数は、石油や天然ガスとほぼ同じである。しかし、ウランからプルトニウムを生産し、あるいは海水からウランを採取して燃料として利用できるようになれば資源量は膨大になる。

もちろん、化石燃料とウランは枯渇資源であるために、長期的に見ればいずれはなくなってしまう資源である。それに対して太陽エネルギーなど再生可能エネルギーは枯渇する心配がない。地球表面に降り注ぐ太陽エネルギーは膨大で、その年間エネルギー量は世界のエネルギー消費量の約1万倍にもなっている。このように化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの資源量は豊富にあるために、当面はエネルギー資源の枯渇に対しての不安は考えられない。

エネルギー資源の中で化石燃料は、エネルギー密度が高く、採集、輸送、貯蔵において技術的、および経済的に優れた特性をもっている。現在、世界の商業用エネルギーの約9割が化石燃料によって供給されている理由がそこにある。優れたエネルギー特性をもっている化石燃料は、その資源が安定して利用できる間は社会の中心的なエネルギー源として役割を担っていくことは間違いない。化石燃料を利用し続けていく課題の1つに資源の地域的な偏在性がある。たとえば石油の場合、その確認埋蔵量の3分の2は中東地域に集中している。中東諸国の政治情勢は常に不安定で、わが国への輸送経路であるシーレーンの周辺国を含めて、石油の安定供給を脅かし価格を高騰させるといった不安が常にある。石油に比べて地域的に偏在していない天然ガスは、供給途絶や価格変動に対する不安が石油ほど大きくはないと考えられるが、長期にわたって安定して資源が確保できるという保証はない。石炭は化石燃料の中では資源の量が最も多く、埋蔵分布も広範囲なために供給途絶と価格変動への不安が小さい資源と考えられている。

原子力の燃料であるウランの資源量は、可採年数で61年となっており石油や天然ガスとほぼ同じような値である。現在の確認埋蔵量からみればウランは長期に安定して供給できる資源であるといはいえない。資源を安定に確保していくためには化石燃料と同じように常に資源を開発していかなければならない。新たな資源開発にはウラン鉱山の新規開発と海水中に含まれているウランを回収していく技術開発がある。また、資源量を増大する別の方法として、ウランからプルトニウムを製造する高速増殖炉などの技術開発がある。天然ウランの99.3%は、そのままでは核分裂しにくいウランの同位体であるウラン238である。ウラン238に中性子を照射するとプルトニウムが得られる。プルトニウムは軽水炉の中でも生産されているが高速増殖炉を使うことで燃えた燃料以上のプルトニウムを生産することができる。プルトニウムを軽水炉の燃料として利用していくプルサーマルは、既存の原子炉でプルトニウムを有効に活用する技術で、高速増殖炉はプルトニウムを積極的に利用していく技術である。高速増殖炉の燃料サイクルが確立されるとウランの資源量は約60倍にまで増大することになり、その結果、ウランの可採年数は現在の61年から4,000年近くにまでなる。わが国のエネルギー自給率を向上していく上で、プルサーマルと高速増殖炉の開発は重要な役割を担っている。

¹ 確認埋蔵量を年生産量で割った値

原子力は、わずかな燃料でエネルギーを大量に生産することができる技術である。原子力発電の発電コストに占めている核燃料サイクル費用は30%程度であるが、そのうち燃料費であるウラン精鉱費用は3%以下と小さい。原子力発電は、化石燃料に比べて燃料の価格変動によって発電コストが大きく上下する心配がなく、将来、高速増殖炉などの開発によってプルトニウムの利用拡大を図ることができればウランは純国産エネルギーとして利用でき、化石燃料がもつ供給途絶や価格変動といったエネルギーの不安問題を解消していけることになる。

再生可能エネルギーの特徴は豊富な資源量と供給途絶の不安がないことである。再生可能エネルギーには、水力、太陽光、太陽熱、風力、海洋エネルギー、地熱、バイオエネルギーなど、その種類は豊富である。しかし、入手できるエネルギーの量となると、気象など自然の影響を受けやすいために国や地域によってその量は大きく異なる。また、エネルギー密度が化石燃料やウランに比べて希薄であるために生産エネルギー量あたりのコストが高いといった問題を抱えている。さらにエネルギーを貯蔵したり輸送したりすることも技術的かつ経済的にみて容易ではない。経済性を考えると再生可能エネルギーは、入手できる場所で直接利用していくローカルエネルギーとしての普及が望ましい。それにはそれぞれの地域で資源のポテンシャルを技術的および経済的な面から見極めていくことが大切となる。

使いやすさ

使いやすさとは「供給力」と「信頼性」をいい、エネルギー技術の利用特性を指す。どのようなエネルギー源も、そのままの状態ですべて使っていくことは難しく、使いやすいエネルギー形態に変換している。エネルギーは需要に見合った供給力を常に確保しなければならない。また、エネルギーは、季節、月、日、時刻などでたえず変動するエネルギー需要に合わせて信頼性を損なうことなく供給していかなければならない。

エネルギーの供給力についてみると、化石燃料やウランのように燃料として供給するエネルギー源と太陽光や風力のように自然任せのエネルギー源との間には大きな違いがある。前者は供給力と信頼性の面で優れているが、その代わりに燃料を精製、貯蔵、輸送、変換する施設の建設が必要になる。後者には燃料を供給する施設はないが、反面、供給力と信頼性が劣ってしまう。

燃料の種類によっても供給力と信頼性は異なる。化石燃料の中で液体である石油は、貯蔵と輸送の特性に優れており供給力を最も確保しやすい燃料である。それに対して気体燃料である天然ガスは、燃料の輸送にパイプラインやLNG基地（液化設備と気化設備）を敷設しなければならない、固体である石炭は輸送船以外に運搬設備、貯炭場、灰捨て場といった施設が必要になる。

ウランを燃料とする原子力は、わずかな燃料でエネルギーを大量に発生することができる。たとえば、発電出力が100万kWの石炭火力発電所を1年間稼働すると約230万トンの石炭が必要になるが、原子力発電所の場合は同じ出力の発電所で必要になるウラン量は30トン程度であり、そのうち実際に燃えている量はわずか0.9トンである。

原子力発電にはわずかな燃料でエネルギーを大量に発生できるという利点があるが、一方で燃料の製造と廃棄物の取り扱いについては火力発電よりも複雑になるといった問題が

ある。鉱山で採掘されたウランは、発電用の燃料になるまでには精錬、転換、濃縮、再転換、加工といった過程を経なければならない。また発電した後に発生する使用済燃料は、一時的に貯蔵された後に、再処理によって有用なプルトニウム・ウランを取り出し、残りの高・低レベル廃棄物は処理処分されなければならない。またすべての施設で放射性物質を扱っているために施設の建設と運転には安全面において十分な対策を施しておく必要がある。

再生可能エネルギーはエネルギーの種類が多いために、使いやすさは種類によって異なっている。木材や有機廃棄物などのバイオマスは、化石燃料と同じように燃料として利用される。木材は伐採、採集・運搬、乾燥などの施設が、廃棄物は収集や分別、ものによっては燃料化の施設が必要になる。バイオマスのエネルギー密度は化石燃料に比べて小さいために、そういった燃料供給施設にかかる費用は化石燃料に比べて割高になる。

バイオマス以外の再生可能エネルギーである水力、風力、太陽光、地熱は、エネルギー源が燃料でないためにバイオマスのような燃料施設は要らない。しかし、太陽熱温水器や太陽光発電のようにその場で直接利用できるもの以外は、生産されたエネルギーは需要地まで運ばなければならない。エネルギーの輸送は、地熱のように熱として運ばれるものもあるが、その多くは電気のように価値の高い二次エネルギーに変換して運ばれている。

再生可能エネルギーの多くに共通した問題点は、希薄なエネルギー源と年間の設備利用率の低さによる発電コストの増加である。一般に、出力あたりでみた変換設備の費用は高く、また年間を通して常時、エネルギーが得られるとは限らないために、発電量あたりの変換設備の費用が割高になる。同じことは輸送設備についてもいえ、経済性を考えると再生可能エネルギーはできるだけローカルエネルギーとして利用していくことが望ましい。

現代社会では田舎で「晴耕雨読」の生活を営む人は極めてわずかである。ほとんどの人は、技術が高度に発達した都市で働きまた生活している。都市の活動と人々の生活は、電気やガス、ガソリンといったエネルギーを大量に消費することで支えられている。社会のエネルギーの使い方は季節、曜日、時間によって絶えず変動している。その変動に合わせてエネルギーは供給されなければならない。エネルギーの供給不足とならないように、燃料の貯蔵と供給設備の整備が必要になる。特にそのままの状態では貯蔵できない電気は、停電すると社会的な影響が大きいために、電力の最大負荷に合わせて電力設備を確保しておかなければならない。電力設備の建設には時間がかかるために、将来の電力需要をできるだけ正確に予測して適切な電源計画を事前に立てておく必要がある。社会の発展はより信頼性の高い電力供給を要求するようになってきている。情報化やロボット化といった高度技術社会を支えていくためには、電気の電圧や周波数に変動が小さい高品質の電気を送っていく必要がある。

化石燃料と原子力のように燃料を使って発電する技術は、需要の最大負荷に合わせて電気を供給することができる。再生可能エネルギーのうちバイオマス、水力、地熱も貯えられたエネルギーを利用していることから、需要の変動に合わせてある程度まで供給することができる。しかし太陽光や風力となると間欠的なエネルギーであるためにそうはいかない。風の運動エネルギーを動力に変換する風力発電は、気ままな風に合わせて発電するために電気の供給が自然任せとなってしまう。風力発電の電気出力は気象状態によって変動するため、最大負荷が発生する最も大切なときに発電できるという保証はない。また電気

の電圧や周波数も変動しやすいといった課題もある。間欠的なエネルギーである太陽光発電や風力発電によって社会に電気を安定して供給していくには、電力貯蔵技術やバックアップ電源といった補償設備を別に設置しなければならない。

受け入れやすさ

受け入れやすさとは「環境性」と「安全性」をいい、生産、製造、利用の過程においてエネルギーが人々の健康や生態系に与える影響の度合いである。化石燃料を使ったエネルギー技術は、利用時に窒素酸化物や硫黄酸化物といった大気汚染物質と、地球温暖化の原因といわれている二酸化炭素を放出する。現在、利用している化石燃料の多くは発熱量が高く不純物も少ない比較的良質のものであるが、その資源量には限りがある。私たちの子供や孫の時代になると、消費の増大が進んで良質な化石燃料の資源量も次第に少なくなり、次第に重質油やピートなど質の悪い資源に依存するようになっていく。その場合、化石燃料に含まれている有害物質や大気汚染物質、それに地球温暖化といった環境問題が深刻になっていくおそれがある。化石燃料の利用には事故への対策も必要となる。石油はタンカーの座礁、石炭は採鉱の爆発や落盤事故、天然ガスはガス漏れや火災といった事故が発生する可能性がある。人々が安心して化石燃料を利用していくには、事前に事故を防止する対策と事故が発生しても災害を最小限に食い止める対策が必要となる。

原子力の利用も放射性廃棄物の扱いと安全の問題に課題がある。原子力発電所から排出される核分裂生成物の正味の量は、発電出力が100万kWのプラントで1年間に約1トン程度である。同じ電気出力の石炭火力発電所を1年間運転すると、約400万トンのCO₂と30万トンの石炭灰が放出される。原子力発電の特徴は、火力発電に比べて廃棄物の量が非常に少ないことである。もちろん量は少ないとはいっても、放射能がある廃棄物は危険である。放射性物質は一旦、外部に漏洩すると長期にわたり生態系や人々の健康に影響を与える恐れがある。低レベル廃棄物と高レベル廃棄物の処分に対しては長期間にわたり放射性物質が外部に漏洩しないような対策が必要になる。また原子力施設の事故や、あるいは核拡散に対しても人々が安心できる徹底した対策を構築しなければならない。化石燃料とウランは「入手しやすさ」と「使いやすさ」では優れたエネルギーであるが、「受け入れやすさ」においては環境と安全を守るための対策が不可欠となり、そのための技術開発や制度造りを怠ってはならない。

受け入れやすさの点で優れているエネルギーは再生可能エネルギーである。多くの再生可能エネルギーは発電時に汚染物質を出すことはない。また原子力や化石燃料を使う設備よりも安全性は高い。もちろん環境への影響や安全性の問題が全くないわけではない。地熱発電の場合、地下から汲み上げた蒸気あるいは熱水中に環境汚染物質が含まれていることがある。ゴミ焼却炉からはダイオキシンが、バイオマスからは僅かではあるが有害物質や光化学スモッグの原因となる揮発性有機化合物が燃焼時に発生するおそれがある。水力発電はダムを建設すると生態系への影響や景観問題、あるいはダムの決壊といった事故が発生する可能性がある。太陽光発電は、電力系統の停電時や震災などの事故時、あるいは発電設備の廃棄時に自ら発電しているために保守員や作業員が知らずに感電する事故の心配がある（アイランディング事故）。また、半導体シリコンの製造時に洗浄に使用しているフロンの環境対策が必要になる。風力発電の場合は、渡り鳥の被害、高調波による電波障害、騒音、落雷といった問題を解決していく課題がある。

表 3.1.1 エネルギーの基本要件

	化石燃料	原子力	再生可能エネルギー
入手しやすさ (賦存量、安定性)	<ul style="list-style-type: none"> 石炭を含めた資源量は豊富でコストは安価。 石油の価格変動と供給途絶への不安がある。 	<ul style="list-style-type: none"> プルトニウムを含めた資源量は豊富でコストは安価。 燃料途絶の不安は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> 潜在的な資源量は豊富だがコスト高。 供給途絶がない
使いやすさ (供給力、信頼性)	<ul style="list-style-type: none"> 燃料を供給するインフラ施設の整備。 設備の信頼性と運用性に優れている。 電気の質も高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 核燃料サイクル施設の整備。 設備の信頼性と電気の質は高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 季節、週、日で出力が変動する。 電圧、周波数の変動がある。
受け入れやすさ (環境性、安全性)	<ul style="list-style-type: none"> 大気汚染と温室効果ガスの放出。 タンカーの座礁、ガス爆発、炭坑事故の不安がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性廃棄物の隔離。 重大事故と核拡散問題への不安がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 最もクリーンで安全と言われている。

[出典] 著者作成

3 - 2 エネルギー変換と動力機械

(1) 動力への変換

エネルギー資源には化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの3種類がある。エネルギー資源はそのままの状態では利用できず、使いやすいエネルギー形態に変換してから利用されている。エネルギー形態からエネルギーを分類すると、力学エネルギー、電気エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー、光エネルギー、核エネルギーなどがあり、それぞれのエネルギー形態は相互に変換し合うことができる。エネルギー形態の変換には、常にエネルギー損失がともなうために、できるだけ効率の良いエネルギー変換技術を開発していくことが望まれる。

社会で使われているエネルギーの用途で最も多いのは熱と動力である。動力への変換プロセスには様々な方法があるが、エネルギー資源を実用的な動力に変換していくプロセスでみるとその種類は限られている。社会の動力機械のほとんどは、風、水、水蒸気などの流体が持っている運動エネルギーを利用してタービンを駆動するものである。タービンの出力は、作動流体の種類によって異なる。作動流体は、風車が空気、水車が水、蒸気タービンが水蒸気である。

写真 3.2.1 風車(左),フランス水車(中央) 蒸気タービン(右)



[出典] 風車と水力 中部電力ホームページ、蒸気タービン 富士電機ホームページ

流体の運動エネルギーは作動流体の質量と速度の二乗に比例する。運動している流体から取り出される動力は作動流体の単位時間あたりの運動エネルギーで表される。作動流体がもっている運動エネルギーのすべてが動力に変換したとすると、その動力は作動流体の密度、作動面積、それに流体速度の3乗の積で表される²。これから動力は流体速度の3乗に比例することから、大きな動力を得るためには、流体の速度をできるだけ大きくしていくことが重要になる。風力、水力、火力について、理論的にみてどの程度の動力が発生できるのかを簡単に調べてみることにしよう。

風力発電は風の運動エネルギーを利用してタービンを駆動する発電技術である。風は大

² 作動流体が持っている運動エネルギーのすべてが動力に変換できたとすると理論動力 L_{th} は次式によって表わすことができる。

$$L_{th} = \frac{1}{2} m' v^2 = \rho A v^3 / 2$$

ここで、 m' : 作動流体の単位時間あたりの質量(= $\rho A v$)、 ρ : 作動流体の密度、 A : 流体の作動面積、 v : 作動流体の速度、である。上式から風力、水力、水蒸気によって得られる単位面積あたりの理論出力を計算することができる。

気圧の空気の流れであることから密度はほぼ $1.29[\text{kg}/\text{Nm}^3]$ となる。これからたとえば風速 $20\text{m}/\text{s}$ で風車を定格出力で駆動した場合、単位面積あたりに得られる理論出力は $5.16[\text{kW}]$ となる。水車は水の持っている位置エネルギーや運動エネルギーを利用して水車タービンを駆動することで動力を得る技術である。たとえば有効落差 $100[\text{m}]$ の水の位置エネルギーを運動エネルギーに変換すると流速は $44\text{m}/\text{s}$ となる。この運動エネルギーのすべてが動力に変換されたとすると、水の密度が $1,000[\text{kg}/\text{m}^3]$ であることから単位面積あたりの理論出力は $43,500[\text{kW}]$ となる。この数値は風力発電の $8,400$ 倍に相当している。

火力発電所で蒸気タービンのノズル内での水蒸気はタービン入口でマッハ数の 0.80 程度にもなっており、流速は $400\text{m}/\text{s}$ である。水蒸気の温度圧力を超々臨界圧まで高めると蒸気の密度は $74[\text{kg}/\text{m}^3]$ になる。蒸気の持っている運動エネルギーがすべて動力に変換できると仮定すると、単位面積あたりの理論出力は $2.37 \times 10^6[\text{kW}]$ にもなる。水蒸気によって得られる理論出力は大きく、その値は水車の 54 倍、風車の 46 万倍にもなっており、水蒸気を利用することが動力技術としていかに優れたものになるかがわかる（表 3.2.1）。

表 3.2.1 風力、水力、水蒸気の理論出力 [出典] 著者作成

	密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	流体速度 $[\text{m}/\text{s}]$	動力 $[\text{kW}/\text{m}^2]$ (倍率)
風力(風速 20m)	1.29	20	5.2 (1)
水力 (有効落差 100m)	1,000	44.3	43,500 (8,400)
水蒸気(超々臨界圧)	74	400	2.37×10^6 (460,000)

同じことは水蒸気に限らずガスエンジンやガスタービンについてもいえる。このように熱機関は、小さな設備でもって大きな動力を取り出すことができるといった特長がある。また風力や水力の場合は動力が得られる場所に制約があるが、熱機関の場合は燃料さえあれば好きなところで動力を得ることができることも大きな利点である。産業革命は熱機関による動力革命であり、産業革命以降の動力技術の発展は熱機関の発展といえる。熱機関を駆動する燃料として最も優れているのは、高温高压の高温ガスや水蒸気を生産することができる化石燃料と原子力で、今日の動力技術の大半がそういったエネルギー源に依存している理由となっている。

(2) エネルギーの変換と効率

図 3.2.1 は社会で利用されているエネルギー資源がどのような技術によって熱や動力、あるいは電気に変換されているかを示したものである。石油や石炭などの化石燃料は、ほとんどが一旦、高温高压の熱に変換されてから利用されている。同じように原子力や地熱、バイオマスも熱源としての利用になる。変換された熱は、直接利用される場合と動力用に利用される場合とがある。前者には、産業部門における加熱、乾燥、溶解などのプロセスヒート、民生部門における暖房、給湯、厨房などでの利用がある。後者の動力用は主に輸送と発電であって、その動力技術には内燃機関、ガスタービン、蒸気タービンなどがある。自動車や船などの駆動、それに電力生産に使われている動力機械は、高温高压の熱エネルギーを往復運動や回転運動の力学エネルギーに変換する技術である。

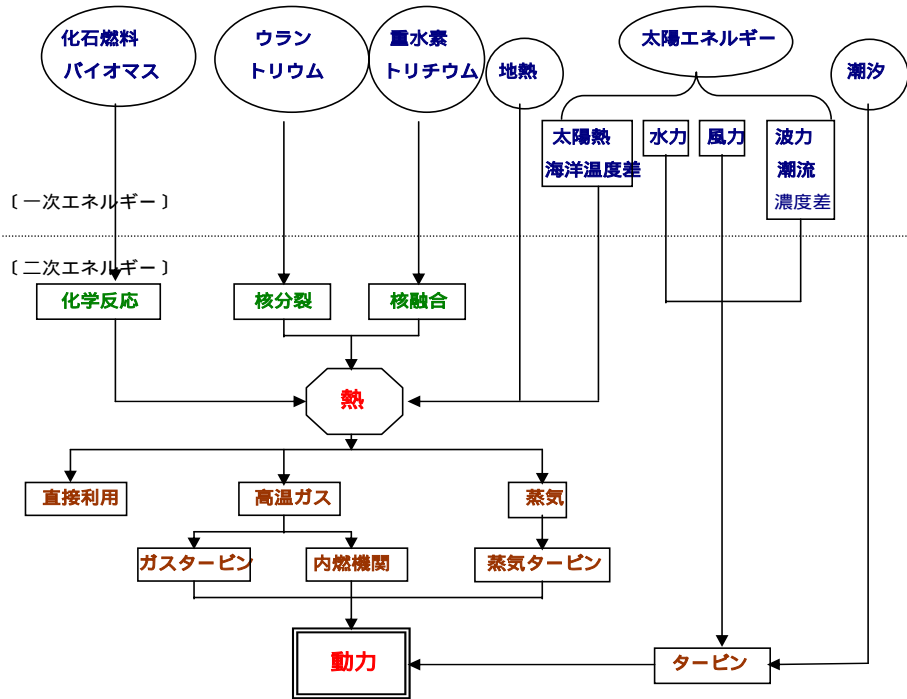
太陽エネルギーは、種類が多いためにエネルギーの変換プロセスが多様である。水力、風力、波力など流体が持っている並進の運動エネルギーは、タービンを用いて回転の運動エネルギーに転換され、その後は発電機によって電気に変換される。地球と太陽や月との引力で発生する潮汐エネルギーも同じような方法で電気に変換される。太陽エネルギーは、また太陽熱と太陽光として利用されている。前者の利用法には温水器で代表されるように、給湯や暖房の熱源としての利用になる。また、集光技術によって高温水蒸気を生産し、蒸気タービンを駆動して発電する太陽熱発電もある。後者の太陽光の利用には照明や殺菌などの用途があるが、最近は光電効果を利用した太陽光発電が広く普及し始めている。

電気は産業の活動と私たちの日常生活に欠かせないエネルギーとなっている。電気には電流の種類から交流と直流とがある。発電所で生産されている電気は、ほとんどすべてが交流である。発電所から遠く離れた需要地まで電気を送るためには高圧にして電力損失を小さくする必要がある。需要地に送り込まれた高圧電流は、変電所や変圧器によって降圧されなければならない、変圧できる電流として交流が使われている。

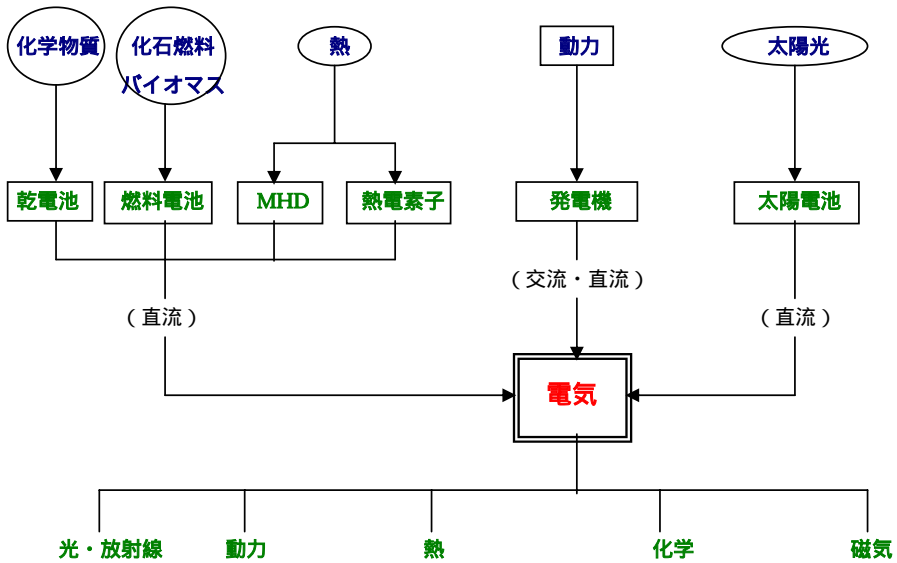
高圧の交流電流は、化石燃料や原子力を熱源として蒸気タービンやガスタービンを駆動することで生産されている。需要地では電気は、照明、モータ、空調機器、電解、情報・通信など様々な用途に利用されている。それは電気が、光、仕事、化学、磁気、熱など他のエネルギー形態に容易に変換でき、また利用時に石油や石炭のように大気汚染物質を放出しないなど環境特性にも優れているからである。

図 3.2.1 社会におけるエネルギー変換

(1) 熱と動力への変換



(2) 電気への変換と利用



[出典] 著者作成

電気は使いやすいことから消費量が年々増加している。エネルギー変換から見て火力発電と原子力発電の利点は大規模な発電出力が得られることであるが、欠点は変換時のエネルギー損失が大きいことである。水力発電の発電効率は90%以上であるが、火力発電の場合、最新鋭の蒸気タービンで43%、ガスタービンと蒸気タービンとを組み合わせた複合発電で55%程度である。原子力発電は安全性から火力発電よりも蒸気条件を落としており、発電効率は33%程度である。

電気を利用するときの効率にも問題がある。熱として利用すれば電気から熱への変換効率は100%になる。しかし、電気はもともと化石燃料や原子力から得られる熱源によって発電されているために、電気を熱として直接利用することは効率的な使い方とはいえない。電気から熱を効率的に生産するためにはヒートポンプを使っていくことが望まれる。電気の動力利用は比較的効率の良い利用法である。モータは大型になると効率が95%近くなる。最も効率が悪い利用方法は照明である。照明の効率は、蛍光灯で10~12%、白熱灯で2~5%である(表3.2.2)。貴重な資源を節約していくためにも、私たちはできるだけ省電気に心がけることが大切になる。

表 3.2.2 電気の変換効率

	変換	効率[%]
大型発電機	運動 電気	98-99
大型水力タービン	運動 電気	90-95
風力タービン	運動 電気	30-40
乾電池	化学 電気	85-95
天然ガス複合発電	化学 電気	50-55
大型蒸気タービン	化学 電気	35-43
大型ガスタービン	化学 電気	30-40
ディーゼルエンジン	化学 電気	30-35
太陽電池のセル効率	光 電気	20-30
電熱器	電気 熱	100
大型電動モータ	電気 運動	90-97
高圧ナトリウム燈	電気 光	15-20
蛍光灯	電気 光	10-12
白熱電球	電気 光	2-5

[出典] 著者作成

(3) 発電技術のエネルギー密度

エネルギーの消費は都市を中心に増え続けている。都市におけるエネルギー消費密度を敷地面積あたりの電力消費量で調べてみると、都内の8階建てのオフィスビルで約400 kWh/m²になり、郊外にある一戸建ての住宅で約35 kWh/m²になっている。電力の消費密度は、冷暖房機器や情報化機器の普及、大型住宅や事務所ビルなどの高層化によって今後

も高まっていくと予想される。

高まる電力の消費密度に対して、電力の供給密度はどのようになっているのだろうか。異なる発電技術について発電所の敷地面積あたりの電力供給密度を調べた結果を紹介しよう。表 3.2.3 は、わが国で設置されている太陽光発電、風力発電、水力発電、火力発電、原子力発電について求めた敷地面積あたりの電力供給密度である。

表 3.2.3 電力の供給密度と消費密度

	対象	電力密度 [kWh/m ² 年]	備考
供給密度	風力発電	21	アメリカ、ワシントン・ファーム、出力 275kW × 340 基 (3mile ²)、年設備利用率 20%
	太陽光発電	24	日本 (緯度 35 度)、年設備利用率 15%
	水力発電	100	日本の 100 箇所の水力発電平均 (湛水面積あたり)
	火力発電	9,560	碧南石炭火力発電所、70 万 kW × 3 基、年設備利用率 75%、敷地面積 133.6 万 m ²
	原子力発電	12,400	柏崎刈羽原子力発電所、821.2 万 kW、年設備利用率 75%、敷地面積 420 万 m ²
消費密度	オフィスビル	400	8 階建てオフィスビル、延床面積 3,000m ²
	家庭	35	一戸建て 2 階、敷地面積 165m ² 、契約電力 40A

[出典] 著者作成

表から風力発電や太陽光発電は供給密度が 20kWh/m² 程度で、それは家庭の電力消費量の 3 分の 2 を供給できる密度となっている。水力発電の供給密度は発電所によって大きく異なる。表の数値はわが国における 100 箇所の水力発電の供給密度を平均した値である。10,000 kWh/m² の高い密度を持つものから数 kWh/m² の密度のものまで大きくばらついているが、分布からみて 100kWh/m² 前後の発電所の数が最も多い。

石炭火力発電所は、貯炭場、発電・環境設備、管理棟、灰捨て場、構内の道路・緑地といった発電所にかかわる敷地を入れて計算しても 10,000kWh/m² 近い電力供給密度となっている。同じように原子力発電所も敷地面積に管理区域以外の構内緑地帯を含めても 12,000kWh/m² 以上の電力供給密度となっている。それらの数値は風力発電や太陽光発電の 500 倍にもなっており、原子力発電と火力発電がわずかな土地で大量の電気を供給できる技術であることがわかる。わが国は国土の 3 分の 2 が森林で覆われ、残った土地も農地、工場、住宅、道路などに使われている。原子力発電と火力発電は、限られた土地で電力を大量に供給していくのに優れた技術であることがわかる。

バイオマス発電の植林面積を含めた電力供給密度

バイオマスの中で森林バイオマスは資源の賦存量が群を抜いて多い。森林バイオマスを利用した発電設備としては木材燃焼発電が知られており、アメリカやブラジルなどではすでに実用化されている。それは木材をチップ状にして流動床ボイラーで燃焼し蒸気タービンを駆動して発電する方式である。森林バイオマスとしてポプラなど成長の早い樹種を利用すれば6年サイクルで植林と伐採を繰り返すことができるという。その場合、発電出力が10万kWの発電設備を造るのに必要となるプランテーションの面積は直径20kmと推定されている。これから、敷地面積あたりの発電出力を求めると 0.00032kW/m^2 となる。また、ポプラの発熱量を 20GJ/t(LHV) 、発電効率34%、ポプラの生産量を 0.105ト/km^2 と仮定すると、敷地面積あたりの電力供給密度は 1.98kWh/m^2 になる。森林バイオマスによる発電プラントの最も導入しやすい方法は、プラントをプランテーションに隣接して建設する場合である。しかし、プランテーションを含めてバイオマス発電の電力供給密度を計算すると、最も優れた条件（生長が速い、最新鋭の発電技術）であっても、風力発電や太陽光発電の10分の1、火力発電や原子力発電の5,000分の1にしかならないことがわかる。



写真 バイオマスチップ（出典：大阪府ホームページ）

(4) エネルギー技術の経済性

社会で人々が安心してエネルギーを使えるようにしていくには、エネルギー供給の基本要件である「入手しやすさ」、「使いやすさ」、「受け入れやすさ」をできるだけ満たしていくことが必要になる。しかし、基本要件を満たすには大変な費用がかかるといった経済的な制約があって、要件を完全に満たすことはできない。それぞれの基本要件を満たすのに要する経済的な負担は、エネルギー技術の種類によって異なる。

エネルギー密度の高い化石燃料やウランを使ったエネルギー変換技術についてみると、その経済性には次のような特徴がある。

エネルギー密度が高いことから単位出力あたりの建設費を安価にできる。

安全性と環境性への対策は建設費と運転保守費を高くする。

燃料を採掘してから発電所に運び入れるまでの燃料調達に設備の建設と運転の費用が必要となる。

廃棄物を処理処分するための費用がかかる。

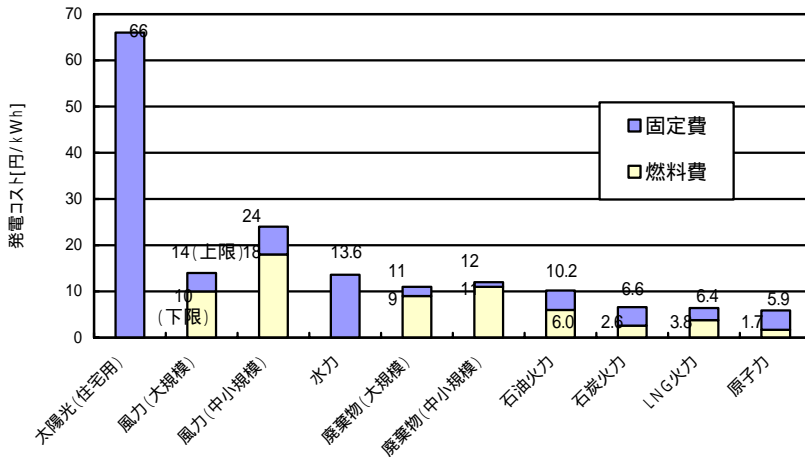
政治経済など社会情勢の変化で燃料価格に変動がある。

燃料は需要に合わせて供給できるため、設備の年間利用率が向上し、生産エネルギー量あたりの固定費を安価にできる。また、電力供給の場合は、電圧や周波数の変動を小さくして電気の質を高めることができる。

原子力発電所は火力発電所に比べて安全性に対しては厳しい建築基準が課されているために、一般に建設費が高い。原子力発電の経済性を高める方法の1つに設備の大型化がある。大型化による発電容量の増大は、出力あたりの建設費を安価にするだけでなく、原子炉へ装荷される燃料が増えることで発電量が多くなって発電コストも安価にする。

原子力発電所の燃料に使われているウランは、エネルギー資源の中で最も大きなエネルギー密度をもっている。ウランの質量あたりの発生エネルギーは化石燃料の数百万倍にもなり、わずかな燃料でエネルギーを大量に取り出すことができる。原子力発電所に使われているウランは発電に利用されるまでに採掘、精製、転換、濃縮、再転換、加工といった複雑な工程があるにもかかわらず経済的に成り立っている理由は、優れたエネルギー密度による。原子燃料サイクルの費用は、新規に建設した場合で、発電コストの30%程度である。それには再処理や放射性廃棄物の処理処分の費用も含まれており、そのうち正味の燃料費であるウラン精鉱の費用は3%程度である。それに対して火力発電の場合、発電コストに占める燃料費の割合は40~60%になっている(図3.2.2)。火力発電は、社会経済的な影響によって燃料価格が高騰すると、発電コストが大幅に上昇することになる。それに対して原子力発電は、ウラン精鉱の費用割合が小さいために燃料価格によって発電コストが大きく変動することがない。原子力発電は、発電コストが安価であるだけでなく経済的に安定した発電技術である。

図 3.2.2 発電コストの比較



[出典] 著者作成

再生可能エネルギーにはバイオマスを除いて燃料を使わないことによる経済的なメリットがある。しかし、一方では次に示すような課題がある。

発電費用のほとんどが初期投資額となる建設費である。

エネルギー密度が低いために単位出力あたりの建設費が高い。

年間の設備利用率が低いために単位電力量あたりの建設費が高い。

間欠的なエネルギーであるために最大負荷時において設備能力が低く、また電圧・周波数に変動があるために電気の質が低下する。

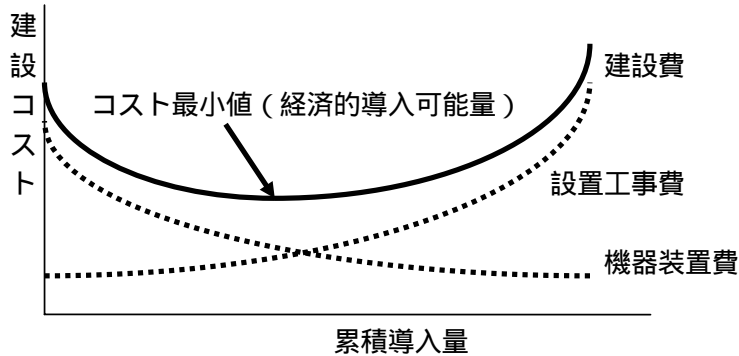
発電量が地域の特性に依存しており、場所によって設備工事費が高くなる。

再生可能エネルギーの経済性には、立地制約に伴う費用増の問題が大きい。太陽光発電や風力発電といった小規模分散型技術は、家電製品や自動車と同じように製品を量産することによってコストが安くなっていく可能性がある。将来は普及が進めば量産化の習熟効果によってコストが低減し、それによってさらに普及が拡大していくと期待されている。確かに太陽電池や風力発電の翼や発電機といった機器装置は、家電製品などと同じように量産化によってコストは低減していく。

再生可能エネルギー技術はエネルギーが生産できる場所に設備を建設しなければならず、設置場所の特性によって建設費が大きく変わる。たとえば、風力発電は設備の稼働率を高めるためには強風地点である岬や山岳地帯に導入していくことが望ましい。そういった地点は、一般に風車の翼やタワーなどの大型装置が搬入できる港湾施設や道路が整備されておらず、また立地点の基礎工事に手間がかかることが多い。導入初期であれば、そういった制約の少ない地点を選んで建設していくことができるが、普及が進むにつれて条件の悪い場所しか残らず、設置工事費が高くなるとともに風車を建設せざるを得なくなる。設置工事は機械電気装置のように工場で量産化できるものではないために、設置条件が悪い場所になるとその費用が高くなる。風力発電の建設費は、導入の初期段階では低下していくが、設備の累積導入量が多くなるとある段階から増加していく(図 3.2.3)。再生可能エ

エネルギーは、地域的な特性に依存するために、経済的に立地できる場所がどれだけあるかを見極めることが大切になる。

図 3.2.3 再生可能エネルギーの導入規模に対する建設コスト



[出典] 著者作成

再生可能エネルギーの導入はエネルギー供給力の確保というよりも、むしろ人々の意識を変革していくことに意義があると考えられる。太陽光発電や風力発電が身近に設置されれば、否応なしに電気を利用しているという意識は高まる。廃棄物やバイオマスエネルギーとして利用すればリサイクルの大切さが理解され、人々の間に環境を守っていかうという意識が芽生えていく可能性がある。そして身近なエネルギー源に触れることによって住民レベルで持続可能な発展に向けた”Think globally, act locally!”の精神が培われ、現代社会の大量消費と大量廃棄が見直されることが望まれる。

3 - 3 利用できるエネルギー資源の量

(1) 化石燃料

エネルギー資源には、化石燃料、原子燃料、再生可能エネルギーがある。化石燃料と原子燃料は枯渇性資源であるが、再生可能エネルギーは非枯渇性資源である。化石燃料は数億年以前から地層に堆積されて埋蔵された炭素と水素の化合物である石油、石炭、天然ガスで代表される。化石燃料は、世界で使われている商業エネルギーの約9割を供給している主要なエネルギー源となっており、21世紀も主要なエネルギー源として社会のエネルギーを供給し続けていくことは間違いない。

枯渇性資源である化石燃料の資源量を評価する指標に確認埋蔵量がある。確認埋蔵量とは現在の技術と経済性で採掘できる資源量をいい、その数値は技術進歩や燃料価格の影響を受けて変わる。現在の石油の確認埋蔵量は1.05兆バレル(1,430億トン)、天然ガスは155.1兆 m^3 、石炭は無煙炭と瀝青炭で5,191億トン、亜瀝青炭と褐炭で4,654億トンと推定されている(出典:BP Amoco 統計2002)。確認埋蔵量を年間の生産量で割った値である可採年数は、石油、天然ガス、石炭でそれぞれ40年、61年、227年となる。

化石燃料の資源分布は、地政学的にみて大きな隔りがある。石油は、中東という一地域に確認埋蔵量の65%が埋蔵されている。表3.3.1は、石油、天然ガス、石炭の確認埋蔵量と人口一人あたり確認埋蔵量を地域別に示したものである。表から、石油は中東地域に、天然ガスは旧ソ連・東欧と中東地域に、そして石炭はアジア・オーストラリア、北アメリカ、それに旧ソ連・東欧地域に確認埋蔵量の約3分の2が埋蔵されていることがわかる。確認埋蔵量を地域別に比較したとき、アジア・オセアニア地域の割合は、石油と天然ガスでそれぞれ4.2%と7.9%である。

埋蔵量をその地域の人口一人あたりにして計算すると、アジア・オセアニア地域は最も資源に恵まれていないことがわかる。アジア地域の石油の一人あたり埋蔵量は、西欧の約3分の1、北米の15分の1、中東の300分の1である。天然ガスは、アフリカ、中南米、西欧の約5分の1、北米の8分の1、中東の100分の1にすぎない。世界の埋蔵量の30%をアジア地域が占めている石炭(そのうちの3分の1はオーストラリア)でも、一人あたり埋蔵量でみると西欧の約3分の1、旧ソ連・東欧の7分の1、北米の10分の1になる。

化石燃料の埋蔵量を表す別の指標に究極可採埋蔵量がある。それは、最終的に回収する資源の総量をいい、過去において既に生産された資源量、現在ある資源で回収可能な確認埋蔵量、それに将来、新たに開発あるいは発見が期待される追加埋蔵量を足し合わせた値で表される。究極可採埋蔵量は予測が含まれているために、その推定の精度は確認埋蔵量よりは劣っている。石油の究極可採埋蔵量は1940年代前半から推定されており、現在、その値は5,319億 m^3 (石油4,803億 m^3 、天然ガス液515億 m^3)程度と推定されている。天然ガスの究極可採埋蔵量は、1950年代後半から推定が始まり現在の推定値は436兆 m^3 である。天然ガスは石油に比べて資源の地域的な偏在性が小さいにもかかわらず、資源開発に巨額の投資が必要となりコストの回収期間が長くなることが理由で開発が進まなかった。石油は既に究極可採埋蔵量の約30%程度がこれまでに生産されているのに対して、天然ガスはまだ10%程度である。しかしながら近年、二酸化炭素や硫酸化物の排出量が少ない燃料として、また発電効率に優れた複合発電の開発が進んだこともあって天然ガスへの関心が高まっている。

地域別にみた化石燃料の確認埋蔵量

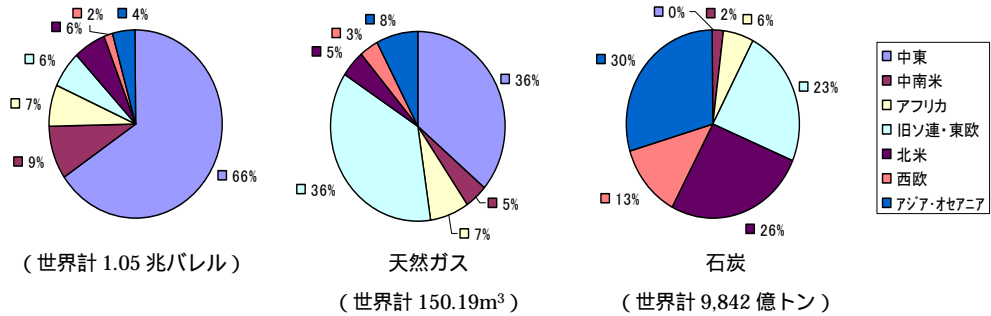
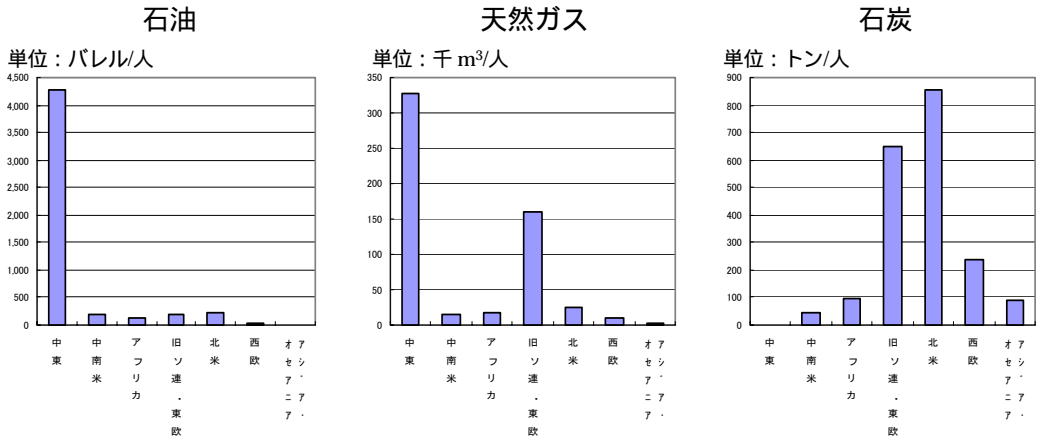


表 3.3.1 地域別にみた化石燃料の一人当たりの確認埋蔵量



) 石炭は褐炭も含む。1バレル=159リットル。

[出典] B P 統計(2001 年)の 2000 年埋蔵量と World Bank の 1998 年人口データから著者作成。

石炭は古生代から新生代にかけて地球上に繁茂していた巨大な樹木が埋没し、地下深部の地熱と地圧により炭化作用を受けて形成されたものである。亜炭、褐炭、瀝青炭、無煙炭の順に燃料に占める炭素の割合が高く、その順に古い石炭といわれている。石炭の特徴は、局地的な偏在がなく世界各地に広く賦存することと、石油や天然ガスに比べて埋蔵量が膨大なことである。究極可採資源量は世界全体で約 11 兆トンといわれており、その内訳は瀝青炭と無煙炭が 5.3 兆トンで亜瀝青炭と褐炭が 5.7 兆トンである。

これまで述べてきた究極可採資源量は、基本的に在来型資源を対象としているが、在来型資源の他に、非在来型と称される様々な潜在的資源がある。非在来型資源とは、現在、技術的、経済的理由により商業開発があまり進んでいない資源のことであり、資源量の膨大さが特徴である。非在来型石油資源の代表的なものとして、ヘビーオイル、タールサンド、オイルシェールが挙げられる。ヘビーオイルおよびタールサンドの公表されている資源量は、世界全体で 3,300 億～4,500 億 m³ であり、オイルシェールは 3,500 億～4,100 億

m³である。天然ガスの非在来型資源にはタイトサンドガス、シェールガス、コールベッドメタン、メタンハイドレートがあり、公表されている資源量はそれぞれ 210 兆 m³、460 兆 m³、260 兆 m³、21,000 兆 m³と見積もられている。これらの推定値は、地下に存在していると考えられる量であり、このうちどれだけ経済的に回収できるかはまだ明らかでない。特にメタンハイドレートについては、現状では商業開発が未だ実証されていないことから「夢のエネルギー資源」と呼ばれている。

表 3.3.2 は化石燃料の資源量として確認埋蔵量と未確認・未発見の埋蔵量である追加埋蔵量を在来型と非在来型について示したものである。表から地球上にある化石燃料の資源量は、在来型と非在来型を合わせて 36.65 兆バレル(石油換算)と膨大な量になることがわかる。そのうち石油と天然ガスの割合は 16%と 17%であるが、石炭は全体の 67%にもなっている。まだ当分の間は、化石燃料が世界の主要なエネルギー供給源として役割を担っていけることになる。しかし、問題はその大半の資源がまだ技術的かつ経済的に採掘できる保証はないということである。また質の悪い資源であるために、採掘時の有害物質などの環境汚染や大量消費による酸性雨や地球温暖化の問題が深刻になっていくおそれがある。

表 3.3.2 化石燃料の埋蔵量評価

単位：10 億ト [石油換算] (兆バレル)

	累積生産量	確認埋蔵量	追加埋蔵量	合計 (残存埋蔵量)
石油				
在来型	104(0.75)	150(1.08)	145(1.04)	295(2.12)
非在来型	-	193(1.39)	332(2.39)	525(3.78)
天然ガス				
在来型	41(0.30)	141(1.02)	279(2.01)	420(3.03)
非在来型	-	192(1.38)	258(1.86)	450(3.24)
石炭	125(0.90)	606(4.36)	2,794(20.12)	3,400(24.48)
化石燃料合計	270(1.95)	1,284(9.23)	3,808(27.42)	5,090(36.65)

[出典] H.-H. Rogner, "An Assessment of World Hydrocarbon Resources", IIASA, RR-98-6(1998)、ただし、メタンハイドレートを含まず。

(2) ウラン

原子燃料は化石燃料と同様に枯渇性資源である。原子燃料には核分裂性物質であるウランとトリウム、そして核融合の燃料となる重水素(デュートリウム)と三重水素(トリチウム)などがある。ウランは天然に存在する最も重い元素で、元素番号は 92、原子量は 238.03 である。ウラン鉱石にはケイ酸分に富む火成岩があり、代表的なものに閃ウラン鉱、コフィン石、ブランネル石、人形石などがある。ウラン鉱石をハロゲン化物にして溶融塩電解、あるいはアルカリ土金属にして還元して得られる金属ウランは、99.275%のウラン-238、0.72%のウラン-235、0.0057%のウラン-234 の 3 つの同位体から構成されている。

ウラン資源量の評価は、OECD/NEA と国際原子力機関 (IAEA) から出版されている「URANIUM 2001-Resources, Production and Demand」に取りまとめられている。それによると RAR と EAR- を合せた資源量は、\$130/kgU 以下のもので 3.943 百万ト-U になる。さらに未発見の推定量である EAR- と SR の資源量をすべて足し合わせたウランの総資源量は、現状では約 16.214 百万ト-U(海水からの採集ウランを除く)になる(表 3.3.3)。

表 3.3.3 ウランの資源量

単位：百万ト-U(金属)

	既知資源		未知資源	
	確認資源 (RAR ³)	推定追加資源 (EAR ⁴⁻)	推定追加資源 (EAR ⁴⁻)	期待資源 (SR ⁵)
\$80/kg 以下	2.242	0.865	1.480	9.939(**)
\$80 ~ 130/kgU	0.590	0.225	0.852	
合計	2.853(*)	1.090	2.332	

[出典] OECD/NEA-IAEA, "Uranium 2001: Resources, Production and Demand,

* : ルーマニアとタイの資源量を含む。 ** : \$130/kgU 以上の準経済的な資源を含む。

世界でウラン資源が多い地域を既知資源量で見ると、アジア OECD 地域が 63.1 万トンで最も多く、次いで旧ソ連、北アメリカ、ラテンアメリカの順位になっている。ウラン資源の主要保有国は、オーストラリア 71 万 t-U、カザフスタン 61 万 t-U、カナダ 38 万 t-U、米国 37 万 t-U、南ア 26 万 t-U で、この 5 カ国だけで全体の 74% を占めている。ウランはアジア地域のエネルギー安全保障にとって石炭に代わる重要な資源といえる。

ウランの可採年数の求め方は化石燃料とは異なる。化石燃料の可採年数は、確認埋蔵量を年生産量で割って求めることができる。しかしウランの場合は、生産したウランが実際に発電所で使われるようになるまでには、精製、濃縮、加工などの過程を経なければならず長期間を要する。また生産したウランは、比較的容易に貯蔵できるために、ウランの生産量と需要量は化石燃料のようなバランスが取れていない。2001 年における世界全体の天然ウラン生産量は約 35,000 トンであるのに対して需要量は 64,000 トンである。

需要量を基にして可採年数を計算してみると、既知資源については 61.1 年(RAR と EAR-)、未知資源を含めると 253 年(RAR, EAR, SR)となる。この結果からウランの可採年数は石油や天然ガスと同じ位になっていることがわかる。この可採年数はウラン 235 だけを利用した場合の値である。原子力による長期の安定供給にはウラン 238 をプルトニウムに転換して利用していくことが必要となる。高速増殖炉を使ってウランを有効に利用した場合、その可採年数は 60 ~ 90 倍になるといわれており、その値は数千年から 2 万年にもなる。

またウランは海水中に三炭酸ウラニルイオンの状態で溶存している。その濃度は海水 1 トンあたり 2 ~ 3mg である。その濃度は、地殻にあるウランのクラーク数に比べて千分の 1 程度であるが、総量としては 45 億トンにもなる。

³ RAR(reasonably assured resources) : 確認埋蔵量に相当しており、ここでは資源回収率を掛けた値を表示している。

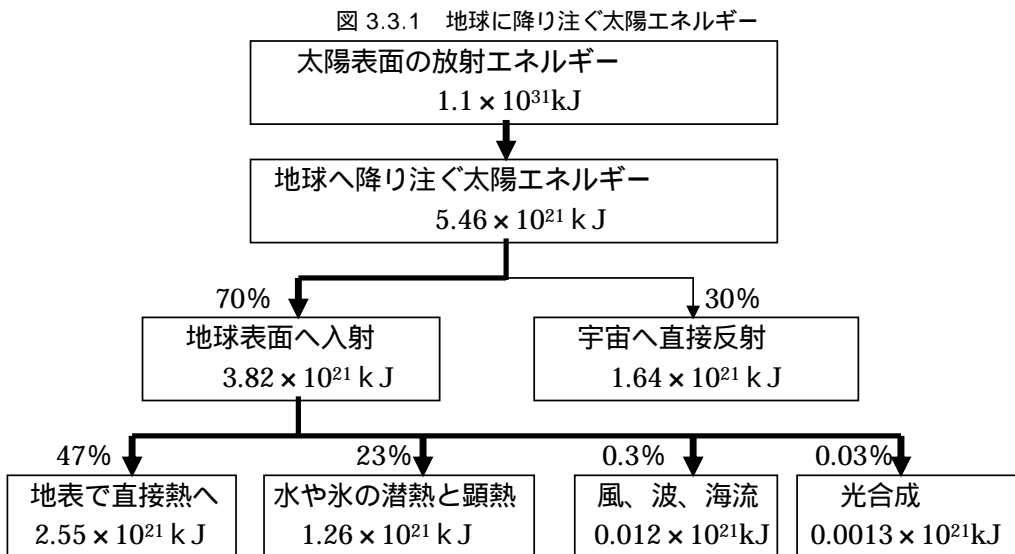
⁴ EAR (estimated additional resources) : 地質学的な調査で採掘可能とみなされた追加資源量。 は既知の資源量では未発見の推定量。

⁵ SR (speculative resources) : 未開発地域で採掘の可能性のある推測値。

(3) 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーは、化石燃料やウランのように枯渇する心配がなく、繰り返し使えるエネルギーである。再生可能エネルギーには、太陽熱・光、水力、風力、海洋、バイオマスといった太陽エネルギーのほかに、地下のマグマ熱である地熱エネルギー、それに月や太陽と地球との間に働く引力によって発生する潮汐エネルギーがある。このうち、水力、バイオマス、地熱は貯蔵されたエネルギーであるが、ほかのエネルギーは常に変動して供給される間欠的なエネルギーである。

地球が受けている太陽エネルギーは太陽が発するエネルギーの 22 億分の 1 である。地球に到達した太陽エネルギーは、その 3 割が地球を覆っている大気や雲によって地表面に到達する前に反射して宇宙空間に放出されてしまう（アルベド⁶）。地表面に到達する太陽エネルギーの出力は 947W/m^2 で、1 年間の入射エネルギーは $3.82 \times 10^{21} \text{ kJ}$ になる。そのエネルギー量は、世界で消費されている年間エネルギー量の約 1 万倍に相当している。入射エネルギーの約 3 分の 2 は熱に変換した後、輻射エネルギーとして宇宙空間に放出されている。残りの 3 分の 1 は地球表面で水の蒸発や風、波、海流などのエネルギーに変換され、一部は雨や雪により水力エネルギーとして、また植物や海藻によってバイオマスエネルギーとして貯えられている。風、波、海流などの運動エネルギーに変換する太陽エネルギーの割合は 0.3% 程度で、植物や海藻の光合成へ利用される割合は約 0.03% である（図 3.3.1）。



出典：Phillip G. Lebel, Energy Economics and Technology, the Johns Hopkins University Press, Baltimore and London(1982)

[出典] 著者作成

⁶ アルベド(Albedo)：太陽スペクトルを反射する程度を表わす量で、入射光の強さに対する反射光の強さの比をいう。

様々なエネルギーに変換した太陽エネルギーの分布は、地域によって大きく偏在している。日射量は赤道近傍の地域に多く、緯度が高くなるにつれて次第に少なくなる。降雪量と降雨量は地域や高度によって異なる。地球規模で見ると赤道から極に向かって生じている熱の対流によって偏西風と貿易風が発生している。また風は、陸と海の比熱の違い、地球の自転、地形などの影響を受けて変化するために、地域ごとの風の発生メカニズムを正確に把握することが難しい。地球の表面積の約7割を占める海には、いろいろなエネルギーがある。風によって起こる波浪エネルギー、黒潮のような海水の流れである海流エネルギー、海水塩分の濃度の違いによる濃度差エネルギー、それに表層の暖かい海水と深層の冷たい海水との温度差による温度差エネルギーがある。海洋エネルギーもほかの太陽エネルギーと同じように地域によってエネルギーの大きさが異なる。植物の光合成によって蓄えられるバイオマスエネルギーは、日射量の多い赤道周辺地域で多く生産されるが、場所によっては砂漠化が進んでいて生産できない地域もある。

太陽エネルギーの別の問題は、季節、時間、気象条件によってエネルギーの大きさが変動することである。日射量は夏と冬、昼と夜、晴れの日と雨の日によって大きさが異なり、また変動がある。風も台風やハリケーンが発生すると暴風となる。洪水時と渇水時で雨量は大きく異なる。そのほか、波浪、海流、海洋の温度差といった海洋エネルギー、それに植物の成長も季節や気象によって常に変動がある。

地球が受けている太陽エネルギーは膨大であるが、地域的な偏在性と時間的な変動によって実際には利用できるエネルギーは限られた量になってしまう。表 3.3.4 は、世界の各地域で潜在的に利用できると思われる再生可能エネルギーの量を潮汐と地熱を含めて表したものである。その数値は $1.145 \times 10^{22} \sim 6.421 \times 10^{22} \text{J}$ の幅にあり、世界で消費されているエネルギー量 $3.6 \times 10^{20} \text{J}$ の 32 ~ 178 倍に相当している。資源として潜在的に多いのは太陽熱・光、海洋温度差、地熱、風力である。

表 3.3.4 潜在的に利用可能な再生可能エネルギー

(単位： 10^{21}J)

太陽熱・光	水力	風力	海洋エネルギー				地熱
			波浪	海流・潮汐	濃度差	温度差	
1.575 ~ 49.837	0.146	1.8	0.065	0.079	0.083	7.2	0.5 ~ 5.0

[出典] UN Development Programme, UN Department of Economic and Social Affairs and World Energy Council, "World Energy Assessment", 2000 などのデータから著者作成

再生可能エネルギーには資源が豊富であるという利点のほかに、資源枯渇の心配がない、政治問題などによる供給途絶の心配がない、環境への影響が小さい、安全性が高い、といった利点を挙げることができる。しかし、実際の利用となると化石燃料やウランに比べてエネルギー密度が低く供給に変動があるために、エネルギーを送り届けるまでの輸送、貯蔵、変換の工程において技術的かつ経済的に解決すべき課題も数多い。そういった課題はすべてがコスト負担となり、経済的にみた再生可能エネルギーの利用量は限られたものとなる。

表 3.3.5 は経済的にみた資源評価について調査が最も進んでいる水力エネルギーの地域別資源量を示したものである。世界の包蔵水力は発電量で表されており、各地点の地上高度や地形を考慮して降雨・降雪量から理論的に推計して得られた理論的包蔵水力は 4.05×10^{13} kWh であり、その数値は世界の発電量 0.26×10^{13} kWh の約 15 倍に相当している。しかし、水力開発地点の立地、技術、環境面の制約を考慮した技術的包蔵水力になると資源量は 3 分の 1 にまで、また火力発電との経済的な競合を考慮して推計した経済的包蔵水力になると 5 分の 1 にまで減少してしまう。水力資源が豊富な地域は、中国などのアジア地域、旧ソ連、中南米であり、その 3 地域の経済的包蔵水力は世界の 54% を占めている。

表 3.3.5 地域別に見た理論的、技術的、経済的な包蔵水力の推計

地域	包蔵水力 [10 ⁹ kWh/年]			水力発電 (1997 年)		
	理論的	技術的	経済的	設備量 [GWe]	発電量 [10 ⁹ kWh/年]	建設中設備 [MWe]
北米	5,817	1,510	912	141	697	882
中南米	7,533	2,868	1,199	114	519	18,331
アフリカ	3,294	1,822	809	16	48	1,464
中東	195	216	128	9	27	7,749
西欧	3,258	1,235	770	14	498	6,707
東欧	304	171	128	21	66	1,211
旧ソ連	3,583	1,992	1,288	66	225	16,613
アジア 計画経済	6,511	2,159	1,302	64	226	51,672
南アジア	3,635	948	103	28	105	13,003
他アジア	5,520	814	142	14	41	4,688
太平洋 先進国	1,134	211	184	34	129	841
合計	40,784	13,945	6,964	655	2,582	124,161
合計 (*)	40,500	14,320	8,100	660	2,600	126,000

* : 地域別データの不足分および過大評価分を調整 [出典] World Atlas, 1998

再生可能エネルギーの中で太陽エネルギーを利用して蓄えられたエネルギーに水力とバイオマスがある。水力は雨や雪によって高い地点に蓄えられた水の位置エネルギーを利用するものである。雨や雪は元を辿れば太陽エネルギーによって水を蒸発させられたものである。バイオマスも水力と同じように太陽のエネルギーを利用して植物が光合成により有機物として、また動物の糞尿として蓄えられたものである。バイオマスには樹木、草本性植物、畜産廃棄物などの陸上バイオマスと海草や微細藻類などの海洋バイオマスとがある。1 年間に蓄えられるバイオマスのエネルギー量は純生産量と呼ばれており、陸上バイオマスの純生産量は 2.16×10^{21} J と推定されている。その値は世界のエネルギー消費量の 6 倍である。しかし、実際に利用できるエネルギーとなると、それは純生産量の 10 ~ 15%

程度と見積もられている。世界では開発途上国を中心に林地残材、穀類、家畜糞などの林業・農業廃棄物として約 0.3×10^{21} J の非商業用エネルギーが利用されている。その他に都市から廃棄されている一般ゴミがあり、世界が実際に利用しているバイオマスの量は約 0.35×10^{21} J になり、その数値は世界のエネルギー消費量の約 10% に相当している。

わが国の森林資源をすべてエネルギーに利用すると、どれだけのエネルギーを供給することができるだろうか。国連食料農業機構(FAO)の統計データ(1990年)によると、わが国の森林面積は 2,510 万 ha である。温帯林の純生産量(乾燥重量)は 13 トン/ha/年と見積もられており、木材が持っている平均的なエネルギー量を 18.8MJ/kg とすると、年間に得られるエネルギー量は 6.1×10^{18} J になる。この数値は、わが国の一次エネルギー総供給(2.3×10^{19} J:1999年)の 26% に相当する。もちろん、日本の森林は険峻地が多く、伐採や集積が困難であるために、実際にエネルギーとして利用できる森林の量は限られてしまう。また、大規模な森林伐採は、森林に生息する動植物にも大きな影響を与えるために、当面は、間伐材や下草を利用していくことが現実的である。

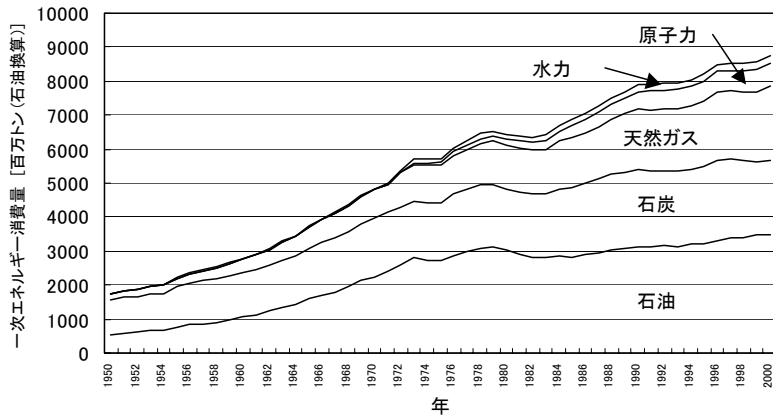
産業活動や日常生活から廃棄されるゴミもエネルギーとして利用できる。わが国で廃棄している可燃性のゴミは、家庭やオフィスなどから排出される一般廃棄物が約 5,000 万トン/年、廃油やゴムなど産業廃棄物が約 2,500 万トン/年になる。廃棄物の熱量は、一般廃棄物で 8.4MJ/kg、産業廃棄物で 16.7MJ/kg であることから、廃棄物をすべてエネルギーとして利用した場合、その量は 8.4×10^{17} J となり、わが国の一次エネルギー総供給の 3.7% に相当する。

3 - 4 世界とアジア地域のエネルギー需給展望

(1) 世界のエネルギー供給の動向

世界のエネルギー消費は、年々増加し続けている。図 3.4.1 は世界の一次エネルギー消費(商業用)について 1950 年から 2000 年現在までの推移を描いたものである。この間に世界のエネルギー消費量は約 5 倍にまで増加しており、2000 年現在の一次エネルギー消費量は石油換算で 87.5 億トンになる。増大してきたエネルギー需要の大半は石油によって供給されてきたが、1973 年と 1979 年の二度にわたる石油危機を契機にして天然ガスや原子力といった石油代替エネルギーの開発によって燃料の多様化が進んだ。現在、一次エネルギー消費量の約 9 割は石油、石炭、天然ガスの化石燃料によって供給されているが、石油のシェアは 40.0% にまで低下している。ついで石炭の 25.0%、天然ガスの 24.7%、原子力の 7.6%、水力の 2.6% の順になっている。

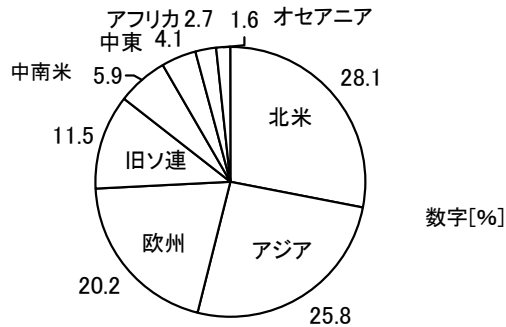
図 3.4.1 世界の一次エネルギー消費量の推移



[出典] BP 統計から著者作成

エネルギー消費を地域別にみると、最も多く消費している地域は北米地域で全体の 28% を占めている。ついでアジアの 26%、欧州の 20% の順で、3 地域だけで世界のエネルギー消費の 4 分 3 を消費している (図 3.4.2)。

図 3.4.2 地域別にみた世界の一次エネルギー消費量 [1998 年 : 86.0 億トン(石油換算)]



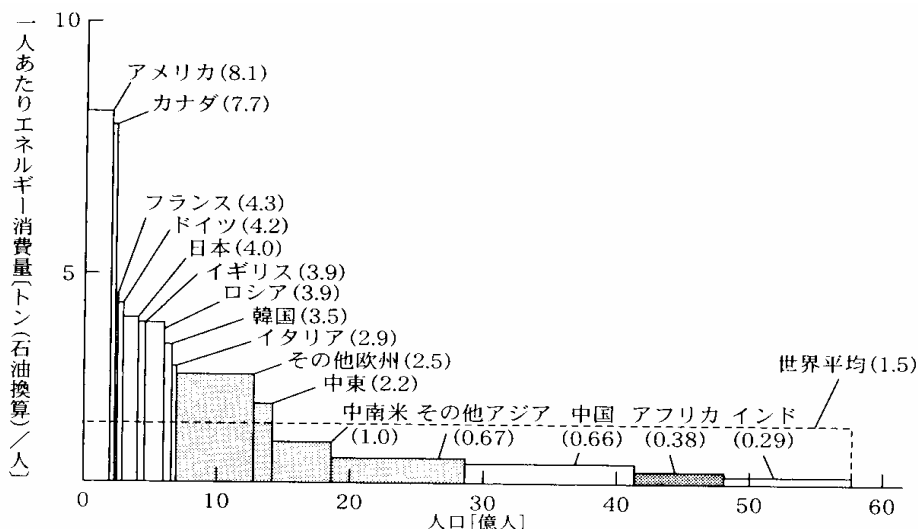
[出典] 著者作成

国別にみてエネルギー消費量が最も多いのはアメリカで、一国だけで世界の 25% を消費している。日本は中国、ロシアに次いで 4 番目のエネルギー消費大国で世界の消費量の 6% である。世界にある 189 カ国 (国連加盟国) のうちエネルギー消費量が多い上位 10 カ国だけで、世界の一次エネルギーの 65% を消費している。

エネルギー消費量を一人あたりにして比較してみると、国によって大きな格差がある。図 3.4.3 は、各国の一人あたりのエネルギー消費量を人口に対して描いたものである。縦軸に一人あたりのエネルギー消費量を示し、その数値が大きい順にそれぞれの国の人口を横軸にして棒グラフで示したものである。図から一人あたりの年間エネルギー消費量が最も多い国はアメリカで、その数値は石油換算で 8.1 トン / 人・年である。日本はアメリカ

の約半分の 4.0 トン/人・年で、フランス、ドイツ、イギリス、ロシアなどのヨーロッパ諸国とほぼ同じ値である。経済が発展している OECD 諸国は一人あたりエネルギー消費量が大きく、その数値は世界の平均値 1.5 トン/人・年を大きく上回っている。それに比べて、日本、韓国を除いたアジア、中南米、アフリカの国々は世界の平均値よりもかなり低い水準になっている。中国は世界で 2 番目のエネルギー消費大国であるが、一人あたりのエネルギー消費ではアメリカの 12 分の 1 である。また 6 番目の消費大国であるインドはアメリカの 28 分の 1 である。世界人口の 75% を占めている開発途上国は、世界のエネルギー消費量の 29% に過ぎず、一人あたりのエネルギー消費では先進国の 8 分の 1 である。

図 3.4.3 国別・地域別にみた人口と一人あたりのエネルギー消費量

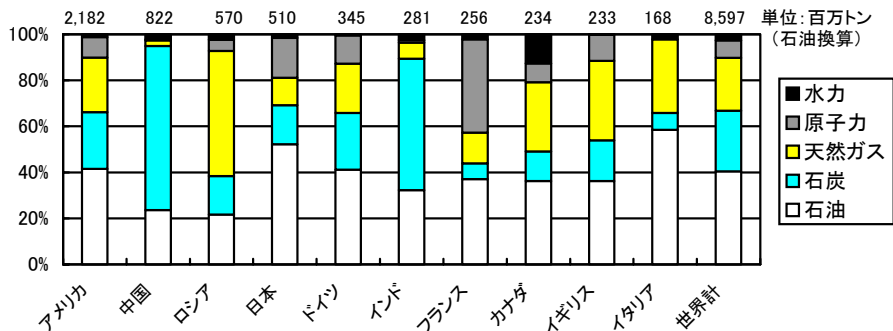


[出典] 著者作成

図 3.4.3 で棒グラフの面積の総和が世界のエネルギー消費量になる。現在、開発途上国は経済発展の最中であって一人あたりのエネルギー消費量が増加し続けており、縦軸の数値が年々大きくなっている。また将来の世界人口は、開発途上国を中心に増加していく傾向にあり、横軸の人口も拡大していくことが予想されている。図に示すグラフを将来について描くと、その面積は大きくなる。増大していく世界のエネルギー需要に対して供給源をどのようにして安定に確保していくことができるかがこれからの課題となる。

図 3.4.4 は世界でエネルギー消費量の多い上位 10 カ国の一次エネルギー構成を示したものである。一次エネルギーの供給構成は、世界平均でみると石油 40%、石炭 25%、天然ガス 25%、原子力 7%、水力 3% となっており、化石燃料が占める割合は全体の 90% になる。しかし、供給構成は国によって大きく異なっている。図に示す 10 ヶ国をみると、イタリアと日本は石油に大きく依存しており、中国とインドは石炭への依存度が大きい。ロシアは天然ガスに、そしてフランスは原子力に依存している。またカナダは水力の比率が高いといった特徴がある。このようにエネルギー事情は国によって異なっており、各国はそれぞれの立場から確保しやすいエネルギー供給源を選択していることがわかる。

図 3.4.4 主要エネルギー消費国（上位 10 カ国）の一次エネルギー構成(1998 年)



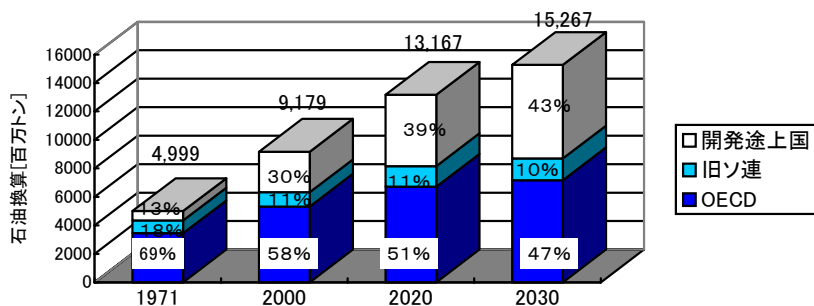
[出典] 著者作成

(2) 世界とアジア地域のエネルギー需給展望

社会のエネルギー消費は、経済活動、技術進歩、人々のライフスタイル、あるいは政治情勢の変化といった要因が複雑に絡んで決まるために、将来のエネルギー需要を正確に予測することは難しい。特に 30 年あるいはそれ以上の期間にわたる長期のエネルギー需要予測となると不確実性も大きくなり、予測機関によって推計の結果が異なることが多い。2000 年にブラジルで開催された世界エネルギー会議では、将来のエネルギー消費量は 2020 年で 113~172 億トン(石油換算)、2050 年には 140~250 億トンと予測されている。また、国際エネルギー機関(IEA)による予測では、2020 年と 2030 年の消費量はそれぞれ 131.7 億トンと 152.7 億トンである(図 3.4.5)。

IEA の予測によると、エネルギー需要の増加が最も大きい地域は、経済発展と人口増加が著しいアジア地域(日本を除く)である。この地域のエネルギー需要の伸びは、過去 30 年間の平均値で年率 5.2%となっており、世界平均値 2.1%を大きく上回っている。アジア地域のエネルギー需要は 2000 年現在で世界の 20%を占めているが、今後も年平均 3.2%の割合で増加すると予測されており、2020 年には需要が 1.9 倍にまで増加し、世界の 25%のシェアになるという。

図 3.4.5 IEA による世界のエネルギー需要予測



[出典] IEA

アジア地域はエネルギー需要の増加にともない石油資源が豊富にある中東への石油依存度を高めつつある。アジア地域の中東への石油依存度はすでに5割を超えており、それは西欧の3割、北米の1割に比べるとかなり高い数値になっている。資源が乏しいにもかかわらず経済発展と人口増加が著しいアジア地域では、中東への石油依存度が今後さらに高まっていくことが予想される。エネルギーを安定に供給していくにはアジア地域におけるエネルギー安全保障と代替エネルギー開発は不可欠であり、原子力開発を含めてエネルギー安全保障の確立に向けた地域間の協力体制を築いていくことが求められている。特にアジア地域は、欧米に比べるとエネルギー供給の基盤施設の整備が遅れている。表3.4.1はアジア地域に求められているエネルギー供給の基盤施設を示したものである。

表 3.4.1 アジア地域に求められているエネルギー供給基盤整備

	エネルギー供給基盤施設
石油	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製油所の建設 ・ 輸入原油・石油製品の受入施設 ・ 緊急時対策としての石油備蓄基地
石炭	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中国における鉄道など石炭輸送網の整備 ・ 輸入石炭の受入港湾施設 ・ 環境保全のためのクリーンコール技術開発
天然ガス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中国やインドなどへのLNG供給チェーン ・ 北東アジアからの広域天然ガス幹線パイプラインの整備 ・ 各国における天然ガスの基幹パイプラインと末端網の整備
電力供給	<ul style="list-style-type: none"> ・ 発電所の新設 ・ 幹線送電線と末端配電網の整備 ・ 長期的な視点からの原子力発電と再生可能エネルギーの導入

[出典] 著者作成

(3) 一瞬としての化石燃料消費

工業化による食糧や製品の大量生産は、人類のこれまでの歴史では考えられない豊かさをもたらし、数多くの人口を養えるようにした。世界人口は増え続けており、2050年に84億人、将来はおよそ90~95億人で飽和すると予測されている。それだけの人口を支え人々が豊かな生活を送っていくためには、更なる食糧や製品などの大量生産は不可欠で、それに必要となるエネルギーを大量に確保しなければならない。

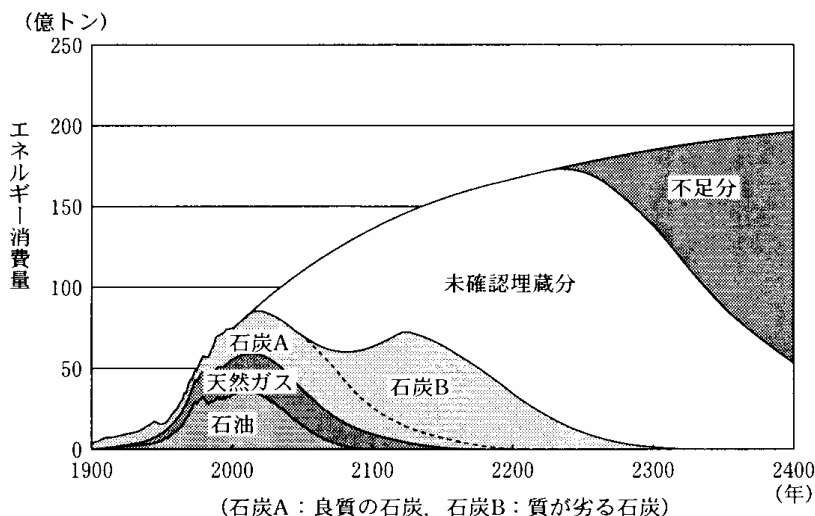
現在、エネルギーを利用して物質的に恵まれた生活を送っているのは先進国の人々に限られている。先進国(旧ソ連を含む)の人口は、世界人口約60億人の4分の1に過ぎないが、全体の70%ものエネルギーを消費している。一人あたりのエネルギー消費でみると開発途上国の8倍になる。国連によると世界の飢餓人口は7億9000万人という。エネルギーとして馬糞や牛糞、間伐材を利用して生活している人が10億人、電気を使えない人が18億人もいる。世界の持続可能な発展には、貧しい人々にも使える安価なエネルギーを大量に開発していくことが必要となる。

開発途上国の人々と、これから増えていく世界人口に対して、十分に供給していけるだ

けのエネルギー資源を確保していくことはできるのだろうか。化石燃料の確認埋蔵量は石油換算で石油が 1.08 兆バレル、天然ガスが 1.02 兆バレル、石炭が 4.36 兆バレルと推定されている。さらに未知資源量を加えると地球上で採掘可能な化石燃料は、石油系資源が 5.9 兆バレル、天然ガス系が 6.3 兆バレル、石炭など固形資源が 24.5 兆バレルと、全体で 36.7 兆バレルにもなると推定されている。それは現在の石油確認埋蔵量 1 兆バレルの 36 倍にも相当する膨大な量である。

将来も今と同じ割合で化石燃料を消費し続けたとすると、石油の生産は現在の確認埋蔵量が 2015 年をピークにして、さらに非在来型石油資源を含めると 2030 年頃をピークに減少していく。天然ガスの場合も、現在の確認埋蔵量でみると 2030 年頃から生産量を減少せざるを得なくなる。21 世紀の中葉になると世界は、そのエネルギー供給を液体系と気体系の化石燃料に頼れなくなる。それ以降は石炭などの固体系燃料に依存していくことになる（図 3.4.6）。石炭は資源量が豊富であるため、石油やガスの不足分を補填するだけでなく増大する世界のエネルギー需要を供給し続けていくことができる。しかし、その能力も 23 世紀の中葉になると限界が現れ始め、それ以降は減産せざるを得なくなる。化石燃料の不足分は、原子力と再生可能エネルギーによって供給していくことになる。

図 3.4.6 超長期にみた世界のエネルギー需要と化石燃料の供給曲線



[出典] 著者作成

社会のエネルギー源は、好むと好まざるとにかかわらず原子力に頼ることになる。原子力のようなエネルギー技術は、信頼性の確立が最も重要となる。その社会基盤施設の整備には時間がかかるため、危機が発生してから対策を立てても遅い。将来の危機回避はエネルギーに余裕がある今から行わなければならない。それには、人々が安心できる原子力技術の確立と放射性物質を安全に取り扱う技術開発を子孫のためにも今から行うべきである。

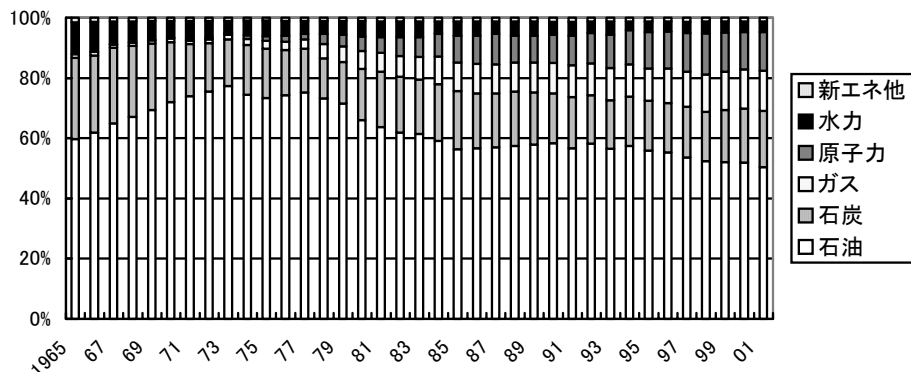
3 - 5 日本のエネルギー需給展望

(1) これまでのエネルギー需給の動向

日本のエネルギー消費量は、一次エネルギー総供給でみると年間 2.30×10^{16} kJ (1999年度)である。一次エネルギー総供給の大半は化石燃料であるが、そのシェアは、1980年度の89.2%から1990年度の85%、そして2001年度の82%へと少しずつ低下している。この間の脱化石燃料は原子力開発によるものである。

社会に供給しているエネルギー源の主流は時代とともに変化している。1955年頃までは石炭が主なエネルギー源であったが、その後、石油が安価にかつ豊富に供給されるようになり、1961年には石油のシェアが石炭を上回った。その後も、経済の高度成長と共に石油への依存は高まり、1973年に第一次石油危機が発生したときには、そのシェアは77.4%にまで高まった。しかし、二度にわたる石油危機で石油価格が急騰したことから、原子力やLNGなどの代替エネルギー開発が進み、石油のシェアは1980年度に66.1%、2001年度には50.4%にまで低下している(図3.5.1)。わが国の石油への依存度は、イタリアの60%に比べれば低い、他の先進国であるアメリカ、ドイツ、フランス、カナダ、イギリスの36~40%に比べれば大きく、さらに世界平均の40%に比べても大きな値となっている。

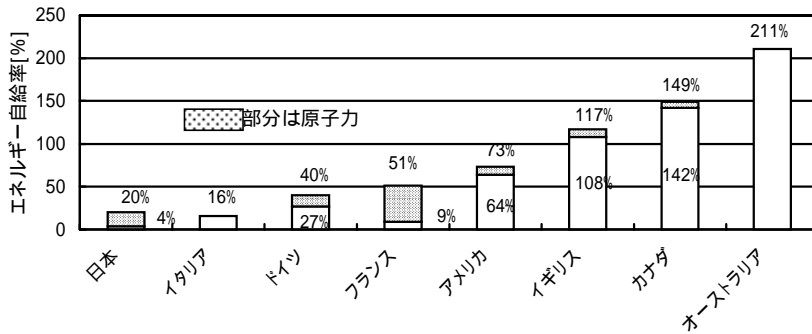
図 3.5.1 わが国の一次エネルギー総供給の推移



[出典] EDMC「エネルギー・経済統計要覧」から著者作成

図3.5.2はOECD諸国のエネルギー自給率を示したものである。わが国はエネルギーの大半を海外から調達している。エネルギーの自給率は4%で、原子力を国産エネルギーとすると20%になる。日本の自給率は、先進国の中でエネルギー資源に乏しいイタリアの16%に近い値である。先進国の中で国内に石油や石炭などの資源を豊富に持つアメリカの自給率は73%である。北海油田で豊富な資源を得ることができるようになったイギリスは117%でエネルギーの輸出国になっている。また水力と石炭の資源に恵まれているカナダと石炭資源が豊富なオーストラリアも自給率はそれぞれ149%と211%と高く、エネルギーを輸出している。

図 3.5.2 先進国のエネルギー自給率（2000 年）



[出典] OECD Energy Balances 2002

石油資源のないわが国では、消費している石油の 99.7%を海外から輸入している。石油の安定供給面から輸入先の多様化を進めているが、依然として UAE（アラブ首長国連邦）やサウジアラビアといった中東に大きく依存している。中東依存度は、石油危機をきっかけに 73 年度で 77.5%であったのが 87 年度には 68%にまで改善した。しかし、その後、石油の価格が低下し需給が緩んだことによって石油依存度は再び高まり始め、2001 年度現在で 87.9%になっている。中東原油の 27%は UAE から輸入されており、ついでサウジアラビアの 25%、イランの 14%が続いており、その 3 か国で全体の 3分の 2 を占めている。このように中東の一地域に石油を大量に依存しているということは、わが国にとって大きな不安要因となっている。中東における政治情勢の悪化は、石油の供給途絶や価格高騰によってわが国に大きな影響を与える可能性がある。エネルギーの海外依存からの脱却はわが国のエネルギー安全保障を確立していく上で重要な政策であり、その政策目標を達成する上で原子力の役割が不可欠となる。

（2）日本のエネルギー展望

エネルギーは、わが国の経済の持続的な発展を支える基盤であり、私たちの生活を支えている。エネルギーを安定に供給していくことは、国民が安心して生活を送るために重要である。しかし、わが国は全体のエネルギー消費の 83%を化石燃料に依存しており、そのほとんどが海外から輸入されている。特に石油についてみると、全体に占めている割合は 50%を超えており、その 90%近くの供給を中東地域に依存している。一方で、化石燃料の消費は二酸化炭素の排出に起因する地球温暖化問題とも不可分の関係にある。温暖化対策には、化石燃料のより効率的な利用と非化石燃料への転換が必要になる。わが国にとって経済成長(Economic growth)、エネルギーセキュリティの確保(Energy security)、環境保全(Environmental protection)という 3つの E を同時に達成させていくことがエネルギー政策の基本原則となっている。

この基本原則を目標に政府の総合資源エネルギー調査会は、1998 年 6 月に長期エネルギー需給見通しを取りまとめ、その後 2001 年 7 月にその内容の一部を改正した「今後のエネルギー政策」を報告した。それは、1997 年 12 月に京都で開催された COP3（気候変

動枠み組条約第3回締約国会議)において合意された温室効果ガス⁷の削減目標を達成していくことを基本としており、需要側では省エネルギーの強力な推進を、供給側では非化石燃料の積極的な導入、中でも原子力の着実な推進と新エネルギーの抜本的な導入促進を重要課題としたものである。

具体的には、需要面において57百万リットルの省エネルギーを達成する一方、供給面においては原子力10～13基の新增設、新エネルギーの導入を1996年時点の約3倍にまで高めるといった目標を掲げている。目標が達成されると、2010年度における最終エネルギー消費は409百万リットルと1990年度の349百万リットルより17.1%だけ増えることになる(表3.5.1)。それによって二酸化炭素の排出量は307百万トン(炭素換算)になり、1990年度レベルの287百万トンに比べて6.9%増になる。

表 3.5.1 最終エネルギー消費の見通し

単位：原油換算百万リットル(構成比%)

部門	1990年度	1999年度	2010年度		
			1998年度の見通し		2001年度 の見通し (基準ケース)
			自然体 ケース	対策 ケース	
産業	183 (52.5)	197 (49.0)	213(46.7)	192 (48.0)	187(45.8)
民生	85 (24.4)	105 (26.1)	131(28.7)	113 (28.3)	126(30.8)
{家庭	46 (13.3)	55(13.8)		60(15.1)	60(14.7)
{業務	39 (11.2)	50(12.3)		53(13.2)	66(16.1)
運輸	80(23.0)	100(24.9)	112(24.6)	95(23.7)	96(23.4)
{乗用車	39(11.0)	53(13.2)		48(12.0)	51(12.5)
{貨物等	42(12.0)	47(11.7)		47(11.7)	45(10.9)
合計	349(100)	402 (100)	456(100)	400 (100)	409(100)

[出典] 総合資源エネルギー調査会総合部会資料

表 3.5.2 は、将来の需要想定に対して検討した一次エネルギーの供給見通しを示したものである。それによると、脱化石燃料の傾向は今後も続く予想されており、2010年度の目標(基準ケース)では化石燃料の割合が80.1%、そのうち石油のシェアは45.0%になると見込まれている。石炭は二酸化炭素の排出量を抑制する立場からみれば、できるだけ消費を減らしていきたいが、化石燃料の中で最も安価で安定に供給されている燃料であるために削減していくことは難しい。1998年に報告された長期エネルギー需給見通しによると、石炭のシェアは2010年度の対策ケースで14.9%にするという目標を立てていたが、2001年の4月に改訂した目標では21.9%に上方修正されている。その理由は、代替電源として導入が期待されていた原子力発電の建設が思うように進まなくなってきたことによる。

⁷ 炭酸ガス、メタン、亜酸化窒素、フロンガス、6フッ化硫黄などの地球温暖化を引き起こす原因となるガス

天然ガスは、石油代替燃料として期待されているだけでなく、硫黄酸化物などの環境汚染の排出が少なく、かつ二酸化炭素の排出量も少ない燃料である。こういった優れた特性から、そのシェアは次第に高まっていくと予測されている。長期エネルギー需給見通しによると、天然ガスの供給シェアは基準ケースの場合で 1999 年度の 12.7% から 2010 年度には 13.2% にまで高まる。天然ガスは、わが国の場合、欧米と違ってパイプラインでなく - 162 にまで冷却して液体化した LNG (液化天然ガス) によって輸入されている。その利用には LNG 設備である液化設備、輸送船、貯蔵タンク・気化設備等に巨額な資金を要するために、将来の需要を考慮して計画的に進めていくことが大切となる。

表 3.5.2 政府の長期一次エネルギー供給見通し

単位：原油換算百万リットル (構成比%)

項目	1990 年度	1999 年度	2010 年度	
			前回(1998 年度)見通し (対策ケース)	今回(2001 年度)見通し (基準ケース)
石油	307(58.3)	308(52.0)	291(47.2)	280(45.0)
石炭	87(16.6)	103(17.4)	92(14.9)	136(21.9)
天然ガス	53(10.1)	75(12.7)	80(13.0)	82(13.2)
原子力	49(9.4)	77(13.0)	107(17.4)	93(15.0)
水力	22(4.2)	21(3.6)	23(3.8)	20(3.2)
地熱	1(0.1)	1(0.2)	4(0.6)	1(0.2)
新エネルギー	7(1.3)	7(1.1)	19(3.1)	10(1.6)
合計	526(100)	593(100)	616(100)	622(100)

[出典] 総合資源エネルギー調査会総合部会資料

原子力は、燃料の供給と価格の安定性において優れているだけでなく、発電時に二酸化炭素を出さないことから、エネルギーセキュリティと地球温暖化対策には不可欠なエネルギー源である。その一次エネルギー供給シェアは、天然ガスと同様に、1973 年度の 0.6% から 1980 年度 4.7%、1990 年度 9.4%、1999 年度 13.0% と着実に増加している。政府の見通しによると、2010 年度の発電電力量は 4,186 億 kWh で、15.0% の供給シェアになることが見込まれている。問題は大型技術であるために電力需要の伸びの低迷と電力自由化の流れの中で増設への経済的なメリットが薄れつつあることと、また原子力施設の事故への不安と放射性物質の取り扱いについて地元や国民からの理解が得られるかにある。

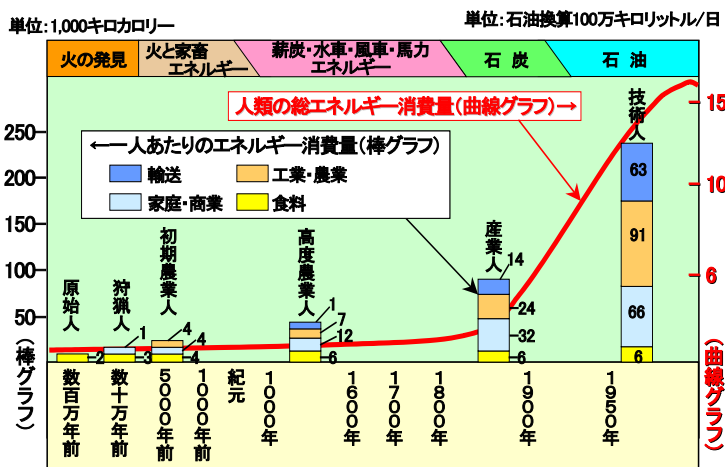
新エネルギーには、太陽光、風力、バイオマスといった再生可能エネルギー、廃棄物などのリサイクル型エネルギー、それに在来型エネルギーの新利用がある。新エネルギーは、エネルギー特性と経済性に課題が多く、現時点(1999 年度)での供給量はまだ約 7 百万リットル (原油換算) で、シェアは 1.2% と僅かである。政府は、2010 年度には 19 百万リットルで 3% のシェアになることを目標としている。

3 - 6 地球温暖化をどう防止するか

(1) 地球温暖化とは

人類は、産業革命以後石炭・石油・天然ガスなどの化石エネルギー資源を利用することにより巨大なエネルギーを取り出すことに成功した。そして技術革新により文明生活が進展し人口が急激に増加して、それが又エネルギー消費を増加させるという循環によって、異常とも言えるほどの速さで化石エネルギーを消費するようになった。その速度はあまりにもすさまじく、数千万年かかって作り出された化石エネルギー資源を、数百年という短期間で使い果たそうとしている。(図 3.6.1)

図 3.6.1 人類のエネルギー消費の歴史



[出典] NIRA 「エネルギーを考える」

その結果、炭酸ガスやメタンなどの地球温室効果ガスが短期間に多量に放出され、地球温暖化という地球規模の問題を引き起こすこととなった。

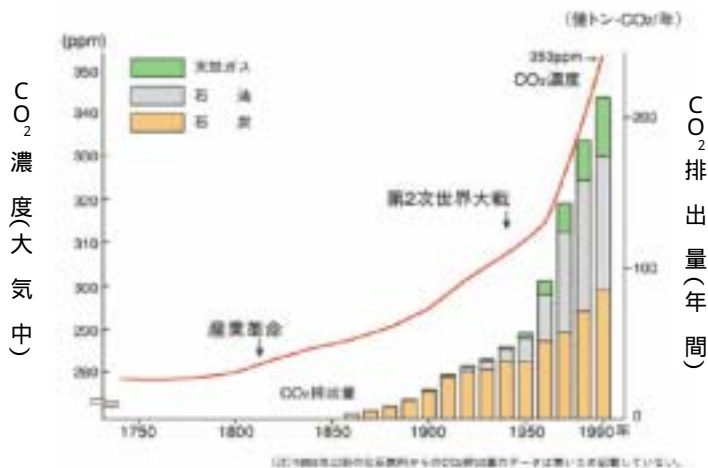
産業革命前の大気中炭酸ガス濃度は、数千年間にわたって 280ppm⁸前後で安定していた。これが 1957 年には 315ppm、1994 年には 358ppm と 28%の増加を示している。この増加傾向は、人類のエネルギー消費や化石燃料からの炭酸ガス排出量の変化ときわめて類似したものとなっている(図 3.6.2)。

また、地球上の平均気温は、過去 600 年間の北半球の平均気温で見ると、19 世紀までは上がり下がりやを繰り返しているが、20 世紀に入ると上昇を始め、ここ 100 年間は上がりっぱなしとなっている。特に、1950 年以降の上昇は急激である。この傾向も大気中の炭酸ガス濃度の上昇と一致した相関を示しており、地球温暖化は確実に起こっているという点で、専門家の意見は一致している。温暖化の影響を最も受けやすいのが地球の極で気温の上昇が大きい。事実北極観測の結果では、確実に北極海の氷が減少しており、また、世界各地の氷河が年々後退しつつあることが報告されている。これらの氷の融解による海

⁸ ppm : 100 万分の 1 の意 1 リットルの大気中に 0.28ml の CO₂ が含まれる。

水面の上昇は、海拔の低い小島諸島において地下水塩分濃度の増加や、海岸線の侵食などの被害を現実にも与え始めている。

図 3.6.2 CO₂ 排出量と大気中 CO₂ 濃度推移

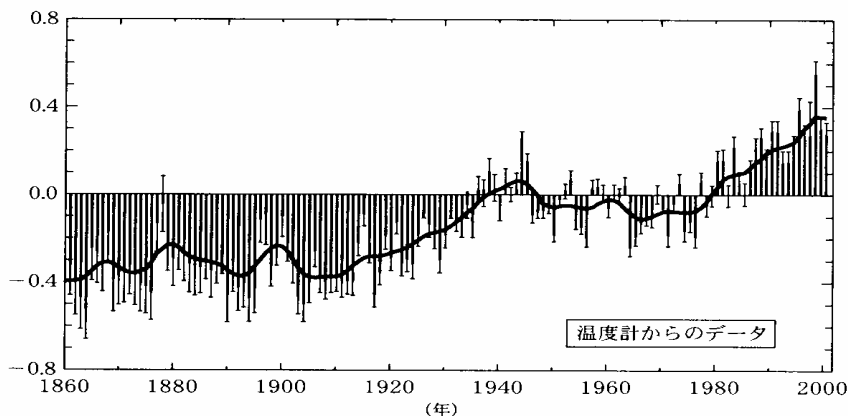


[出典] 環境省資料、気象庁資料、エネルギー経済要覧 2001 年鑑

また、海水温度の上昇によると思われる異常気象、例えば、台風・ハリケーンの大規模化と発生頻度の増加、局地的豪雨による洪水の増加、穀倉地帯の旱魃、森林の減少、砂漠化など多くの事例が報告されている。

地球温暖化は、このまま放置するとさらに被害が拡大し、遂には取り返しのつかない地球環境破壊を引き起こすと予測されており、対応策を急がなければならない大きな問題である。

図 3.6.3 地表面温度の変化 (過去 140 年間)



出典 : IPCC : *Climate Change 2001 Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press (2001)

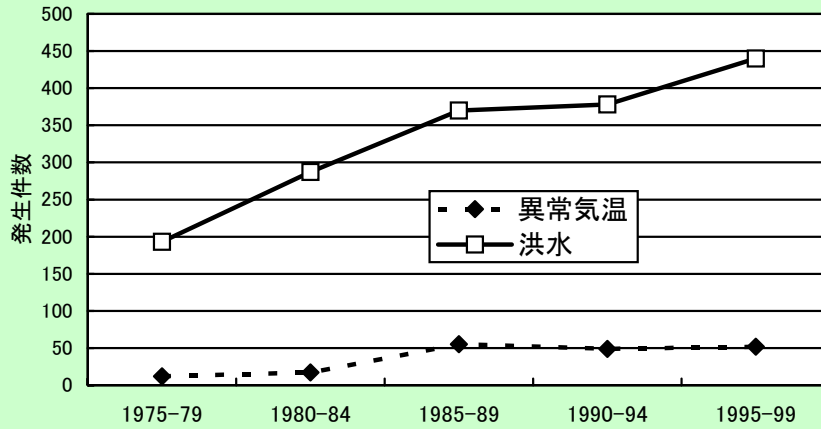
温暖化が進行すると、南極や北極の氷や山岳氷河の融解により海面水位が上昇する。IPCC の報告書によると、21 世紀末までに地球の平均気温は最大で 5.8 上昇し、それによって平均海面水位が 88 cm 上昇するという。世界の人口は 50～70% が沿岸域に居住し、大都市の多くが沿岸域に集中している。仮に海面が 40 cm 上昇すると、高潮によって 7500 万～2 億人の人々が浸水の被害を受けることになる。高潮の影響は地域的に差があり、洪水の危険性はアジアのインド洋沿岸、南地中海沿岸、アフリカ大陸沿岸、カリブなど小島嶼国において平均よりも大きくなる。海面が 1 m 上昇すると、マーシャル諸島の一部の島の 80% が、バングラディッシュでは国土の 18% が海に沈む。日本の砂浜は、50cm の海面上昇によって約 7 割が、1m の上昇で約 9 割が喪失する。

温暖化の影響は海面水位による被害だけではない。洪水、暴風雨、干ばつ、熱波といった気候変動を通して人々の健康や生態系に被害を及ぼす。世界気象機構 (WMO) によると、2003 年 5 月の世界の陸地の平均気温は 11.2 で、それは過去の同月の平均値を 1 度近く上回る観測史上最高を記録となっている。同年 6 月には欧州大陸は前年の水害とは打って変わって、各地で記録破りの猛暑となっている。スイスでは 6 月の最高気温が 35～36 にまで達し、過去 250 年で最も暑い 6 月となっている。熱波はフランス南部も襲い、6 月の平均気温は過去の平均値を 5～6 度も上回り、最高気温が 40 を超えたところもある。

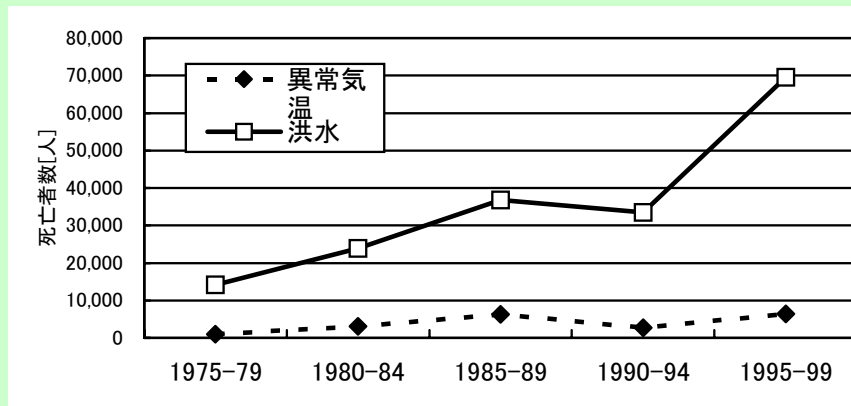
図 3.6.4 は世界で過去 25 年間に発生した異常気温と洪水について、それぞれの件数と被害者数を調べたものである。この期間で世界では異常気温の件数が 4 倍以上、洪水が 2 倍以上にまで増加していることがわかる。被害になると、過去 5 年間で異常気温による総死亡者数は 6,405 人、洪水で 69,529 人となっており、その数は 1975 年からの 5 年間と比べてそれぞれ 6.7 倍と 4.9 倍にもなっている。

図 3.6.4 世界の洪水と異常気温

(1) 洪水と異常気温の発生件数の推移



(2) 洪水と異常気温による死亡者数の推移



[出典] The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters(CRED)

(2) 温暖化のメカニズム

地球を含む惑星は太陽から降り注ぐエネルギーを吸収して暖まり、そして惑星から宇宙へ熱放射エネルギーを放出することで、気候のバランスを保っている。惑星が受けている太陽エネルギーは、太陽から惑星に降り注ぐ単位面積あたりのエネルギーと惑星の断面積をかけた値となる。しかし、太陽から惑星に入射するエネルギーの一部は惑星を覆っている大気や雲などによって反射されて宇宙空間に放出される。この反射される割合はアルベド⁹と呼ばれている。アルベドの値は惑星の地表面や大気などによる散乱や反射の大きさによって決まってくる。一般に、惑星の大気濃度が高くなるほど大きくなり、地球の0.3に対して大気濃度の高い金星では0.71、大気が希薄な火星では0.17である。

太陽から惑星の地表面に到達し吸収されたエネルギーは、地表面を温めた後、黒体輻射として地表面全体から再び宇宙に放出される¹⁰。太陽からの入射エネルギーと、惑星から宇宙への輻射エネルギーはバランスが取れている。表3.6.1は金星、地球、火星についてアルベドを考慮して惑星の地表温度を求めたものである。

表 3.6.1 惑星の気温

	金星	地球	火星
太陽定数 [W/m ²]	2,610	1,367	590
基本式温度 [K]	327	278	221
アルベド	0.71	0.3	0.17
アルベド考慮温度 [K]	240	255	215
実際の温度 [K]	703	288	228
温室効果 [K]	463	33	13
温室効果ガス	90 気圧の CO ₂	0.01 気圧の H ₂ O 0.0003 気圧の CO ₂	0.0055 気圧の CO ₂

[出典] 著者作成

地球に降り注ぐ太陽エネルギーは、地球のアルベド0.3を考慮すると957 W/m²になることから、地表温度は255 K(-18)なる。しかし、実際の温度は288 Kであることから33度の温度上昇がある。これは、大気中の温室効果によるもので、水蒸気や雲、酸素、二酸化炭素、メタンなどによって地表から放射される赤外線の吸収が原因となっている。温室効果は温室効果ガスの濃度が高いほど大きく、金星のように90気圧の二酸化炭素を大気とする惑星では463度の温度上昇がある。逆に0.0055気圧の二酸化炭素濃度の火星では13度である。

⁹ アルベド(Albedo) : 太陽スペクトルを反射する程度を表わす量で、入射光の強さに対する反射光の強さの比をいう。

¹⁰ 惑星に降り注ぐ太陽の入射エネルギーは、単位面積あたりの太陽エネルギーSに惑星の断面積 R^2 をかけた値となる。地球から宇宙への放射エネルギーは、ステファン・ボルツマンの法則により単位面積あたり T^4 で表わすことができる。宇宙空間へ放出されるエネルギーは、 T^4 に地表面積 $4R^2$ をかけた値となる。アルベドを考慮した惑星への入射エネルギーと放射エネルギーは等しいことから次式が成り立つ。

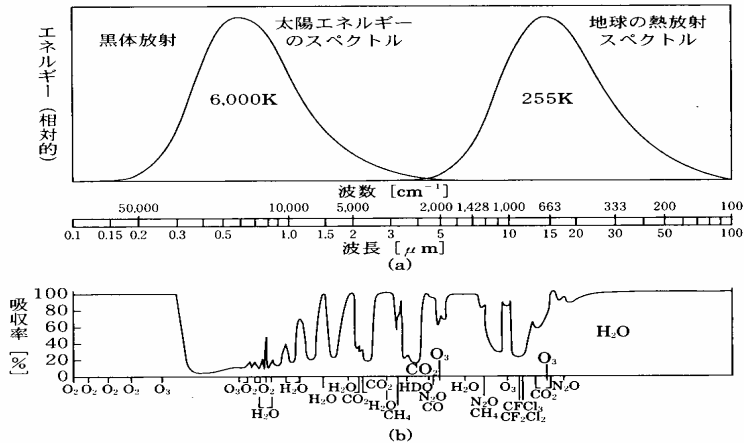
$$R^2 \times (1 - \alpha) \times S = 4 R^2 \times T^4$$

$$T = \{S(1 - \alpha) / (4 \sigma)\}^{1/4}$$

ここで、T : 地表面温度[K]、R : 惑星の半径[m]、S : 太陽定数(=1367W/m²)、 α : アルベド、 σ : ステファン・ボルツマン定数(=5.675 × 10⁻⁸W/(m²K⁴))である。

温室効果は、太陽から地球へ入射するエネルギーと地球から放射する熱エネルギーのスペクトル分布の差によって生じる。前者の太陽エネルギーは 6,000 K のスペクトル分布を持っており、後者の熱放射エネルギーは 255 K のスペクトル分布である (図 3.6.5)。地球に入射する太陽スペクトルの波長帯は、大気による吸収は小さい。それに対して、地球からの放射エネルギーである赤外領域の波長帯は、水蒸気、オゾン、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素など温室効果ガスによる吸収が大きい。

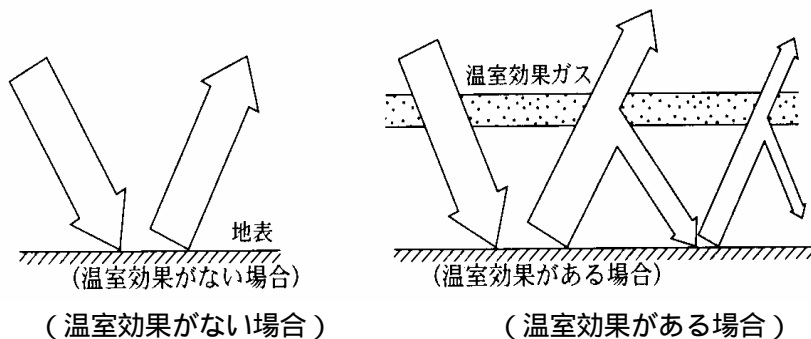
図 3.6.5 黒体輻射と地球大気による吸収率



出典 : M. C. MacCracken and F. M. Luther (Eds.), "Detecting the Climate Effects of Increasing Carbon Dioxide", Rep. DOE/ER-0235, US DOE, Washington, DC (1985)

地球から宇宙空間に向けて放出する赤外領域の熱放射エネルギーは温室効果ガスによって吸収され、それが地球に向けて再放出されることで地表を暖める温室効果のメカニズムが働くことになる。地球からの熱放射エネルギーは最終的には宇宙に放出されるが、その一部は温室効果ガスによって吸収と輻射を繰り返して地球の大気圏に熱を籠らせることになる (図 3.6.6)。

図 3.6.6 温室効果の概念図



[出典] 著者作成

温室効果ガスの中で水蒸気とオゾンは赤外線吸収力が大きい気体ではあるが、大気中濃度の増加を人為的な理由から特定することができない。それに対して、二酸化炭素やメタンなどは人間の社会活動による人為起源の温室効果ガスで、社会の経済活動の高まりとともに大気における濃度が増大しつつある。

表 3.6.2 は人為的に排出している温室効果ガスについて大気中の濃度を産業革命前と比較したものである。表から人為的に排出している温室効果ガスの大気中濃度は、産業革命前に比べると現在は大きく増加していることがわかる。たとえばメタンの濃度は、産業革命前に比べて2倍以上にまで高まっている。メタンの排出源は多様で、主に化石燃料の使用、反すう動物、米作、湿地帯、埋め立てなどである。

表には各温室効果ガスについて大気中の寿命と赤外線吸収力の値が示されている。二酸化炭素は他の温室効果ガスに比べると分子あたりでみた赤外線吸収力は小さいが、大気中の濃度が極めて高いために、温暖化に最も大きな影響を与えている気体となっている。二酸化炭素の大気中の濃度は、化石燃料の燃焼や森林破壊といった人間活動によって年々高まっている。過去20年間の人為起源による二酸化炭素排出量のうち約4分の3は化石燃料の消費によるもので、残りの大部分は森林伐採によるものである。この20年間で大気中における二酸化炭素濃度の平均増加率は1.5ppm/年となっている。

(温室効果ガスとその発生源)

二酸化炭素(CO₂): 化石燃料の燃焼、工業プロセス

メタン(CH₄): 家畜、水田、廃棄物、燃料の不完全燃焼

一酸化二窒素(N₂O): 燃料の燃焼、施肥、工業プロセス

ハイドロフルオロカーボン(HFC)、パーフルオロカーボン(PFC)^{11*}: 冷蔵庫、カーエアコン、半導体洗浄剤

六フッ化硫黄(SF₆): 電力用絶縁物質、半導体洗浄剤

表 3.6.2 人為的に排出されている温室効果ガス

温室効果ガス	大気中濃度[ppb]		大気中寿命** [年]	赤外線相対吸収力***	
	産業革命前	現在*		単位重量あたり	分子あたり
二酸化炭素	280,000	367,000	5 ¹⁾ (40%) 150 ²⁾ (60%)	1	1
メタン	800	1,720	10 ³⁾	21	58
亜酸化窒素	288	310	150 ⁴⁾	206	206
CFC-11	0	0.28	65 ⁵⁾	12,400	3,970
CFC-12	0	0.484	120 ⁵⁾	15,800	5,750

(*) 現在の大气中濃度: 二酸化炭素は2001年の値、他は1990年の値。

(**) 1) Oeschger et al., (1975)

2) 10yrs (Rodhe, 1990), 5-10yrs (Ramanathan, 1987),

8.1-11.8yrs (Cicerone & Oremland, 1988), 9yrs (Isaksen, 1990)

3) 150yrs (Rodhe, 1990), 150yrs (Wuebbles, 1989), 120yrs (Ramanathan, 1985)

4) Ramanathan, 1985

(***) Houghton et al., 1990

[出典] 著者作成

¹¹ 特定フロン(CFC, HCFC)の代替物質

温室効果ガスは、大気中に放出されると時間とともに崩壊していく。崩壊の速度は温室効果ガスの種類によって異なっている。二酸化炭素を基準にして温室効果ガスの温暖化影響の大きさを定量的に表わしたものを温暖化影響ポテンシャル(GWP : Global Warming Potential)という。地球全体で温暖化を考えたとき、各温室効果ガスの影響は GWP だけでなくそれぞれの大気中濃度も影響する。二酸化炭素の GWP の値は最も小さいが、大気中濃度はメタンの200倍以上にもなっているために地球全体でみた温暖化影響は最も大きくなっている。各温室効果ガスについて温暖化への寄与率を調べてみると、二酸化炭素、メタン、亜酸化二窒素、フロンおよび代替フロンの順になっており、その値はそれぞれ 64%、19%、6%、10%、1%と推定されている。

(3) 問題解決に向けた国際的な取り組みと第3回気候変動枠組み条約締約国会議

地球規模の環境問題について国際的に取り組もうとする動きは、1972年ストックホルムで行われた国連環境会議での人間環境宣言の採択から始まった。

最初はオゾン層保護問題が取り上げられ、1985年ウィーン条約採択、1987年モントリオール議定書採択を経て、現在では世界的に使用が禁止されているフロンガスの規制につながった。

地球環境問題は、特定の国だけが対応策を実施しても効果はなく、世界各国が共通の問題として協力し、国際的、かつ政治的に取り組まなければ解決できない問題である。このような機運が高まる中、1988年、トロントサミットに連動して開催された世界各国の科学者と政策決定者合同の大気変動国際会議で地球温暖化問題が論議され、初めて温暖化ガス削減指針が示された。また同時に、温暖化に関する知見がまだ不十分であることから、世界各国から専門家が政府の資格を持って集まり、科学的知見や影響の評価・分析を行い、対応策を検討する「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」を国連の下に設置することを提言し、1988年に設立された。

その後、数多くの国際会議や政府間交渉を経て、1992年リオデジャネイロの地球サミットにおいて気候変動枠組み条約が成立し、日本も含めて155ヶ国が署名、1994年3月に発効した。この条約の要旨は、次のとおりである。

先進国は、温室効果ガス排出量を、2000年までに1990年の水準に戻し安定化するための政策的措置をとること。また、その実施状況を、枠組み条約締約国会議に報告すること。

途上国は、経済成長に伴い増加する温室効果ガス排出量を通報すること。

この枠組み条約の具体的なルール作りのために、気候変動枠組み条約締約国会議(COP)が設置され、第一回会議がベルリンで行われた。

その後、1997年12月京都で開催された第三回気候変動枠組み条約締約国会議(以下COP3)においては、温暖化防止の必要性に対する認識は共通であるものの、各国の国内事情や外交上の思惑が絡み合い、多くの複雑な議論と政府間交渉が行われた。その結果、それまでは合意に導くことは大変難しいと見られていた先進国の炭酸ガス(以下CO₂)をはじめとする温室効果ガスの削減目標等が定められ、それらを盛り込んだ京都議定書が採択された。その主要点は以下のとおりである。

先進国全体で2008～2012年の温室効果ガスの平均排出量を、1992年比で5.2%

削減する。(以下 2008～2012 年の平均を 2010 年と表す)

削減対象温室効果ガスは、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、ハイドロフルオロカーボン(HCF)、パーフルオロカーボン(PHC)、6 弗化硫黄(SF₆)とする。(後者 3 ガスの削減基準年は 1995 年、他は 1990 年比)

排出削減目標量は、1990 年比日本・カナダ⁶ 6%、米国 7%、EU8%、ロシア・ニュージーランド 0%、オーストラリア+8%等とする。

その他、森林等による CO₂ 吸収源の算入、先進国間の排出権取引¹²、先進国間の削減プロジェクト共同実施による削減量の算入、途上国とのクリーン開発メカニズム(CDM)¹³を活用した排出削減量の算入を認める。(これを京都メカニズムという。

京都メカニズムについては参考資料で詳しく説明しているので参照されたい。)

この京都議定書は、55ヶ国の批准及び先進国のうち 1990 年の排出量の 55%を占める国の批准をもって発効する規定となっており、日本は 2002 年 6 月に批准し、国連への批准手続きも完了し、国際的に 6%の削減を公約した。しかし、世界最大の排出国である米国は、中国・インドなどの温室効果ガス大量排出国を含めた途上国が、共に削減計画に参加しなければ、実際の効果は上がらないことや、削減目標を達成するためには経済損失が大きすぎることを理由に、2002 年 2 月に独自の削減計画を発表し、事実上京都議定書からの離脱を宣言した。また、ロシア、カナダ、オーストラリア、ポーランド(-6%)などの批准も見通しが立っておらず、京都議定書は 2003 年現在まだ発効するに至っていない。

このように、温室効果ガス削減に対する各国の立場は、それぞれの国の経済情勢や産業構造、エネルギー供給構造などに差があるために、取り組み姿勢も異なっている。例えば、EUのうちドイツは、排出削減基準年(1990 年)以後に東西統一がなされ、旧東ドイツでの褐炭利用を止め、設備を近代化するだけで 28%削減可能、イギリスは、石炭を北海ガスに転換することにより 14%削減可能といわれている。世界一原子力発電比率の高いフランスは、削減目標の達成が非常に難しいが、産業界の努力により何とかしようという姿勢である。オーストラリアは、近年の人口増加と経済発展により、1990 年比の排出量が 17%も増加しており、目標達成は不可能としている。

一方、中国・インド⁷を含む途上国は、「先進国は、これまで多量の化石エネルギーを消費して経済発展をしてきた。人口が世界の 20%しかないのに世界の 60%の温室効果ガスを排出している先進国がまず削減すべきである。途上国にはこれから経済発展をする権利がある。」として、削減義務を否定している。

しかし、中国は 2010 年に人口が 15 億人になり、CO₂ 排出量は、全世界の 20%を超えると予測されている。また、アジア圏での人口増加と経済発展により、全世界の CO₂ 排出量は 60%増加するという予測もある。現在は、途上国問題を先送りした形で地球温暖化問題対応が進められているが、途上国の発展の状況によって、いずれ再検討が必要になってくると考えておかなければならない。

¹² 温室効果ガスの総排出量枠が設定されている先進国間で、総排出量枠の一部の移転または獲得を認める制度

¹³ 先進国が途上国において、温室効果ガスの排出削減事業を実施することにより生じた削減分を獲得することを認める制度

(4) わが国における温室効果ガスの削減計画と排出抑制

1) 我が国における温室効果ガス削減計画

COP3 の結果を受けて、政府は 1998 年「地球温暖化対策推進大綱」を決定し、これを推進するための法律を定めた。その中で、温暖化ガスをどのようにして 2010 年までに 6%削減すべきか、具体的な指針を示した。その概要は次のとおりである(表 3.6.4)。

表 3.6.4 COP3 の CO₂ 排出量削減内訳

温室効果ガス▲6%削減の内訳

▲2.5%	CO ₂ 、メタン、亜酸化窒素の排出抑制 うち 0%: エネルギー起源のCO ₂ 排出抑制 (エネルギー需給両面にわたる最大限の対策の積み上げ) ▲0.5%:メタン、亜酸化窒素の排出抑制 ▲2.0%:革新的技術開発や国民各層におけるさらなる努力
▲3.7%	土地利用の変化と森林活動による吸収
+2.0%	代替フロン等(HFC、PFC、SF ₆)の排出抑制
残り (▲1.8%)	共同実施、排出量取引などの活用

[出典] 総合資源エネルギー調査会総合部会資料

エネルギー起源の CO₂¹⁴は、1990 年と同じ水準にする。(1990 年比の削減量は 0%)

エネルギー起源の CO₂ については、既に 1999 年には 1990 年に比べて 8.9%増加しており、今後 2010 年までにこの増加分を削減することになる(図 3.6.7)。このため、省エネルギーの推進、新エネルギーの導入、原子力立地の推進など、エネルギー需給両面にわたる最大限の努力をしなければならない。産業部門のエネルギー消費は、石油危機以降ほぼ横ばいとどまっているが、主として経団連の環境自主行動計画の着実な実行と、更なる新技術開発の導入により CO₂ 排出量の削減に努める。一方、OA¹⁵や IT¹⁶化の進展やライフスタイルの変化に伴って、一貫してエネルギー消費の増加している民生及び運輸部門においては、機器のエネルギー効率や自動車の燃費に、トップランナー省エネルギー基準方式¹⁷を導入するなどにより、大幅な排出量削減を行う。

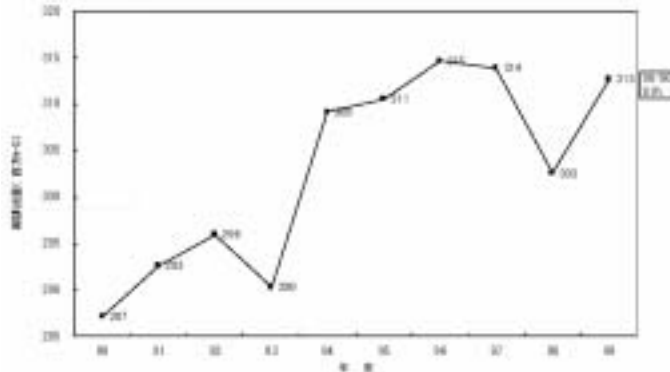
¹⁴ エネルギー(主に燃料)を消費することにより発生する CO₂ で、温室効果ガスの約 8 割を占める。

¹⁵ オフィスオートメーション

¹⁶ インフォメーションテクノロジー、情報技術(IT 革命、IT 戦略会議等に使われる)

¹⁷ 現在商品化されている製品のエネルギー消費効率の中で、最も優れている値を目標基準として、目標年度までにすべての製品をこの基準以上にしようとする仕組み。

図 3.6.7 我が国のエネルギー起源 CO₂ 排出量の推移



[出典] 総合資源エネルギー調査会総合部会資料

メタン、亜酸化窒素は、1990 年比 0.5%削減する。

メタンは、水田、炭鉱の縮小に伴い、減少傾向にあるが、ごみの直接埋め立ての縮減、畜産飼養管理の改善、炭鉱メタンの回収などにより、さらに削減を図る。また、亜酸化窒素については、工場の排出抑制装置設置、家畜糞尿の放置廃棄の禁止、廃棄物・下水汚泥の高温燃焼化によりさらに削減する。

革新的技術開発による削減を 2.0%とする。

超高効率太陽光発電¹⁸、燃料電池¹⁹、超伝導²⁰、革新的水素製造、CO₂貯留固定化²¹等の新しい技術開発・普及により実現する。

代替フロンガスの削減は、1990 年比 + 2.0%とする。

HFC、PFC、SF₆などの漏洩防止や回収再利用等の対策は推進するものの、今後、機器の廃品廃棄が増加するため、全体としては増加することは避けられない。

森林等吸収源による吸収は、1990 年比 3.7%とする。

2010 年頃の、わが国全体の森林等による CO₂吸収量は 3.7%と推定される。

京都メカニズムの活用による削減を 1.8%とする。

先進国間の温暖化ガス削減プロジェクトの共同実施、クリーン開発メカニズム制度を利用した、途上国との削減プロジェクト、温暖化ガス排出権取引などによる。

2) 温室効果ガスの排出抑制

温暖化問題はその影響が長期かつグローバルであるという特徴をもっている。また、想定される被害の種類も多様で、それらのいくつかは同時に発生する恐れもある。被害規模

¹⁸ シリコン半導体などに光が当たると電気が発生する現象を利用して、太陽エネルギーを直接電気に変換する発電方法。カドミウム・テルルなどの化合物を使うとエネルギー転換効率大幅に高くなる。

¹⁹ 水の電気分解の逆反応を利用し、水素と酸素を化学反応させて直接電気を発生する装置。環境汚染物質を発生せず、同時に発生する熱も利用するときわめて高いエネルギー効率が得られる。

²⁰ 物質がある温度(極低温)以下に冷やすと電気抵抗がなくなる現象。これを利用すると小型で高効率大容量の発電機や送電ケーブルなどを作ることができる。

²¹ 分離・回収された CO₂ を、海洋深層(溶解)、深海底(ハイドレード) 地中炭層(吸収)、地下深部(溶解)などへ長期間貯留・固定化する技術。

が大きいことから被害が発生してからの事後的対策では手遅れになる可能性もあるし、その対策には長い期間と多額の資金が必要になる。そのため対策は、事後対策よりも事前の予防保全が基本になる。事前の予防保全として考えられる対策を温室効果ガスである CO₂ について示すと、次のような具体例が挙げられる。

省エネルギー：省エネルギー対策の中で社会基盤施設を省エネルギー型に再構築していくことは、時間と費用がかかるが効果は最も大きい。産業、民生、運輸の各部門で使用しているエネルギー機器の効率改善は、わが国が最も得意とする分野である。その促進には新たな制度設計と、一部の省エネルギー機器の研究開発と利用の促進には補助金が必要となる。人々の省エネルギー意識の向上には啓蒙や教育活動を積極的に行っていく必要がある。

燃料転換：燃料転換は、天然ガスへの転換が経済的にみて最も実現性の高い方法である。問題はガス需要の伸びが低い中で、生産国での供給基地や国内のガスパイプラインなど高額なインフラ整備の資金をどのように調達できるかにある。電力・都市ガス部門だけでなく運輸部門も天然ガス自動車に切り替えるなど、各エネルギー業界が協力し合う総合的なエネルギー政策が必要になる。

非化石燃料の利用：非化石燃料の中で、原子力発電の導入は経済的に見ても最も効果が大きいと考えられる。しかし原子力技術の導入には社会的受容性が課題となっている。また、最近は電力需要の伸びの低迷と電力自由化の流れの中で大型技術開発への投資が控えられている。クリーンで安全性の高い再生可能エネルギーの開発が期待されているが、単位エネルギー当たりのコストが高いために当面は大きく寄与することは期待できない。普及には補助金等の助成策による地道な努力が必要となる。

CO₂ 回収処分：CO₂ 回収技術は回収に大きなエネルギーを要し発電効率を低下させるために、化石燃料の消費を加速する。実際に導入するとなると、コスト増の他に、海洋に投棄したときの海洋生態系への影響が問題となる。最も実現性のある方法は、油田近くの火力発電所から回収した CO₂ を油田の増進回収法に利用していくことである。

植林：植林は CO₂ 対策として最も経済的な選択肢と考えられている。今後の課題はその経済的なポテンシャルを見極めることにある。

その他の技術的対策：森林保全やセメント生産からの CO₂ 除去などがあるが、費用の負担が課題である。また、温暖化への適応と地球冷却はまだ基礎研究段階のもので実用化を評価できるようなものではない。

環境税：企業活動と人々の生活に大きな影響を与えるだけに慎重に検討していく必要がある。むしろ現行のエネルギー関連の税を環境保全や CO₂ 抑制に使えるように見直していくことが大切で、第一歩は増税なしで実行すべきである。環境産業の育成は最も望ましい対策で効果も大きい。実効あるものにしていくには、制度改革や税の優遇措置が必要となる。

京都メカニズム：クリーン開発メカニズムや共同実施など京都メカニズムによる海外での CO₂ 抑制策は、世界的な環境保全につながる有効な手段である。開発途上国やロシアへの技術移転は CO₂ 排出量を抑制するだけでなく国際貿易と国際秩序の形成にも役立つ。

(5) CO₂ 排出量の抑制に貢献する原子力発電

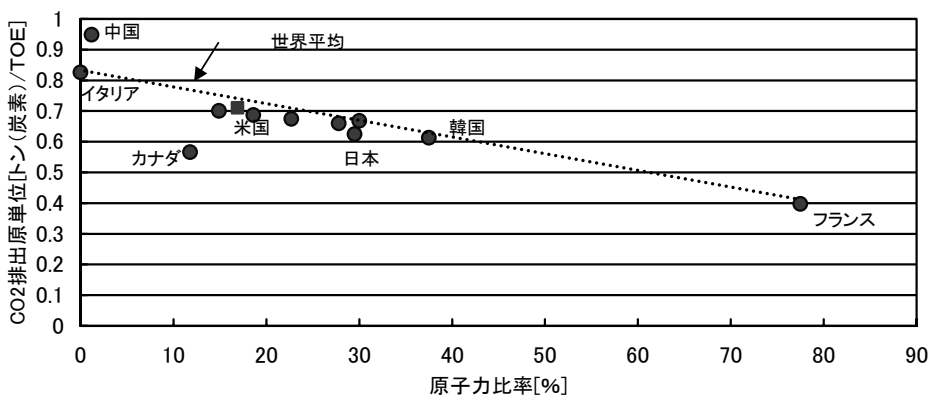
社会のエネルギー選択は国によって様々である。イタリアと日本は全体のエネルギーの5割以上を石油へ依存しており、中国とインドは6割以上が石炭に依存している。またロシアは5割が天然ガスに、そしてフランスは4割近くが原子力に依存している。さらにカナダは水力の比率が高いといった特徴がある。各国は国がおかれているそれぞれの立場を判断して確保できるエネルギー資源を選択している。

各国で消費されているエネルギーのCO₂ 排出原単位は、エネルギーの供給構成で異なってくる。化石燃料の中で天然ガスの割合が大きい国は排出原単位が小さくなる。また化石燃料を燃料とする火力発電に比べて原子力発電や水力発電の比率が高い国も排出原単位は小さくなる。その中で原子力発電がエネルギーのCO₂ 排出原単位を低減するのに役立っているのかを調べることは興味あることである。

世界には2001年末現在で432基の原子力発電が運転しており、その発電出力の合計は3億6,629万kWになり、全体の発電量の約20%を供給している。しかし、全体のエネルギー消費量でみれば、原子力の割合はまだ7.6%に過ぎない。原子力発電が導入されている規模を国別にみると、アメリカは発電出力で全体の28%を占め最も多く、次いでフランス、日本、ロシア、ドイツの順になっている。

図3.6.8は原子力発電を導入している国について、全体の発電量に占める原子力発電の比率と各国の一次エネルギー消費に対するCO₂ 排出量をプロットしたものである。図から両者の間には、原子力発電の発電比率が高い国ほど一次エネルギーのCO₂ 排出原単位が小さくなるといった強い相関関係があることが示されている。このように原子力発電は既に各国でのエネルギーのCO₂ 排出原単位の改善に大きく貢献している重要な電源である。また各国が今後、さらにCO₂ 排出原単位を改善していくためには、原子力発電に頼らざるを得ないことも明らかである。

図 3.6.8 各国における原子力の発電比率とCO₂ 排出原単位(2000年)



[出典] 著者作成

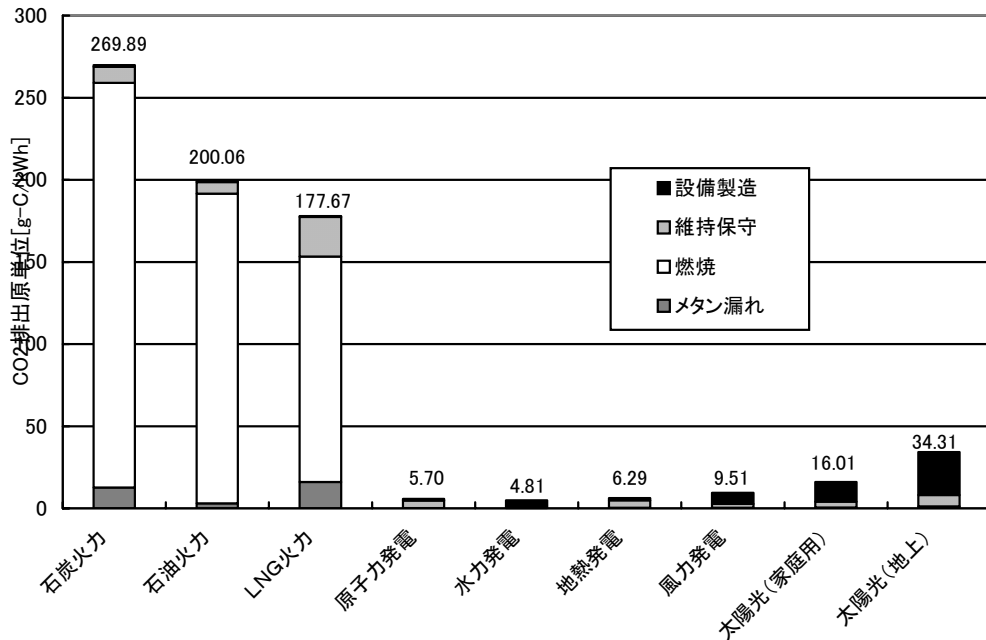
原子力発電は燃料サイクルが複雑で、ウランの濃縮、加工、再処理、放射性廃棄物の処理処分に大量のエネルギーが使われており、燃料サイクルを含めるとCO₂の排出量が多くなるのではないかという疑問がある。この疑問に応える方法にライフサイクル評価（LCA：Life Cycle Assessment）がある。LCAは社会で使われている製品や技術の環境診断法の1つとして有効な方法である。それは、現代の複雑な技術社会が生み出した諸問題を取り扱うシステム分析法の1つで、製品や技術について“ゆりかごから墓場まで”のライフサイクルにおける諸問題、特に環境問題について社会に与えている影響を総合的に分析し、環境負荷を低減する方策を検討していくものである。ここでは、発電システムの温室効果ガスの排出量をライフサイクルにわたり推計した結果を紹介する。

発電システムのような社会インフラ施設のライフサイクル分析は、一般の製品と違い検討範囲が複雑である。その対象は、発電設備だけでなく、燃料の採掘、変換、輸送、そして発電、さらには送変配電といった電力輸送設備も含まれる。そしてこの発電に必要な一連の設備である「水平システム」について、“ゆりかごから墓場まで”の「垂直システム」を検討することになる。すなわちそれぞれの設備について、建設、運転・保守、廃棄に係わる投入エネルギーや環境負荷を調べなければならない。

温室効果ガスには、単にエネルギー（石炭、石油、天然ガス、電力）の消費によって発生するCO₂だけでなく、天然ガスの採掘時に粗ガス中に含まれるCO₂、セメント製造時の化学反応で発生するCO₂、それに石炭や天然ガスの採掘時に大気中に漏洩するメタンなどがある。そういったガスの総排出量を発電システムのライフサイクルで求め、1kWhの電気を生産するのに排出したCO₂量で表わすと、異なる発電システムのCO₂量を比較することができる。

図3.6.9は発電システムのCO₂原単位を計算した結果を設備製造、運転保守、燃焼、メタン漏れに分けて示したものである。表の値はプラントの寿命30年間に発生する全CO₂量を、その間の発電電力量で割ったものである。

図 3.6.9 ライフサイクルからみた発電システムの CO₂ 排出量



[出典] 内山洋司、山本博巳「発電プラントの温暖化影響分析」電力中央研究所研究報告、Y91005(1992)

発電システムの温暖化影響は CO₂ 排出原単位の大きさに比例すると考えられる。表の結果をみると、水力が最も小さく、原子力、地熱、その他の自然エネルギー、そして火力発電の順に大きくなっている。特に火力発電の排出原単位は、原子力や自然エネルギーに比べてかなり大きい。それは発電時に燃料の燃焼から直接排出する CO₂ 量が、設備や運用、あるいはメタン洩れといった間接的な排出量に比べ圧倒的に多いためである。

火力発電だけを比較すると、石炭、石油、LNG の順に CO₂ 排出原単位は小さくなっている。その比率は発電用燃料だけで比べると 100:76:56 であるが、設備と運用、それにメタン洩れを含めて比較すると 100:74:66 と、石油火力がやや優位になり、逆に LNG 火力の優位性が小さくなっている。これは天然ガスの採集と液化に消費するエネルギーが大きく、かつ粗天然ガスに含まれる CO₂ が多いためである。液化時と粗天然ガス成分中の CO₂ 量は、発電時の燃料から発生する値の約 25% に相当している。

原子力発電は、燃料から CO₂ を排出しない分、温暖化影響が小さく、その値は LNG 火力の 1/30 である。原子力発電は核燃料サイクルが複雑であることから、それらの施設を建設するのに多くの資材とエネルギーが必要となる。しかし、扱っている燃料の重量は火力発電の燃料に比べると極めてわずかであるために、複雑な核燃料サイクルに投入されているエネルギーを設備の耐用期間で平均化しかつ発電所 1 基分相当にしてみると、それほど大きな値にならない。建設から排出する CO₂ に比べれば、燃料サイクルの運用エネルギーによって排出する量の方が大きく、特にウラン濃縮時に多量に消費される電力から排出される CO₂ 量は極めて大きい。

再生可能エネルギー技術も排出原単位が小さい発電システムである。特に水力発電と地

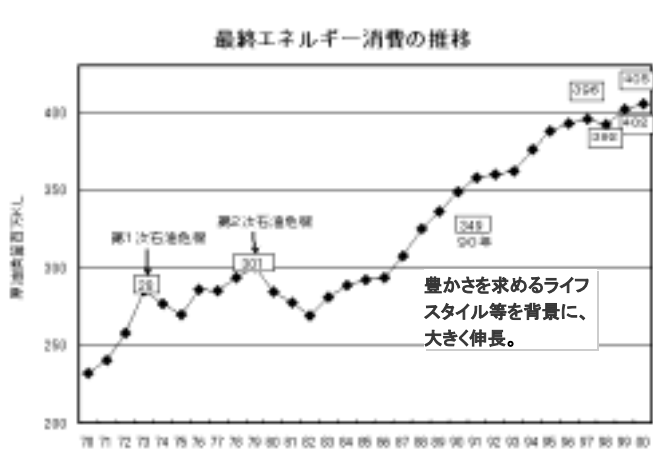
熱発電は原単位が小さく温暖化対策技術として優れている。太陽光発電の排出原単位は、原子力と水力よりは大きな値であるが、火力の値に比べるとかなり小さい。特に家庭の屋根に設置すれば、架台や基礎工事を必要とする電気事業用の導入に比べ原単位は半分以下にまで改善することになる。

原子力、水力、地熱は、電気を安定に供給できるだけでなく、比較的安価に大量の CO₂ を削減できる技術である。問題は建設の立地制約である。水力や地熱は国立公園での立地問題、原子力は人々の安全への不安や放射性廃棄物問題といった課題を抱えており、温暖化問題とは別の社会問題が技術導入の制約となっている。わが国の温暖化問題とエネルギーセキュリティの解決に対して、原子力、水力、地熱は必要な技術ではあるが、そのためにはより信頼性の高い技術開発だけでなく社会的な面からも国民レベルあるいは地域住民レベルで人々の理解を得ていくことが必要となる。

(6) 今後の展望

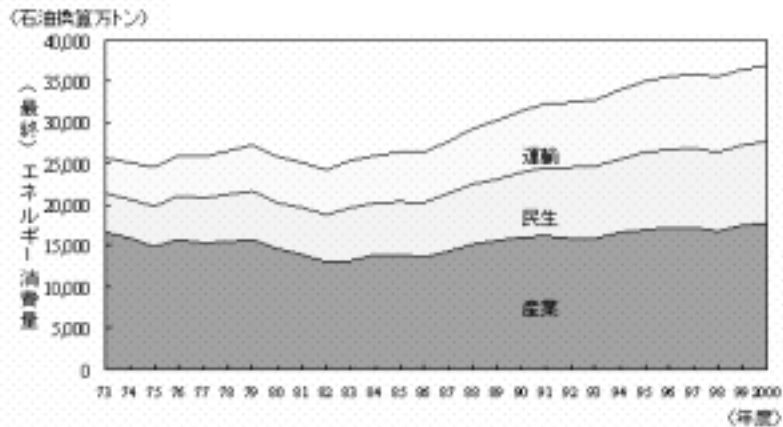
1972年の第一次石油危機を基点として、1999年までのわが国のエネルギー消費の動向を見ると、製造業を中心とする産業部門では、前半の経済成長分を省エネルギーや至近年の不況で相殺して、ほぼ横ばいにとどまっている。一方、豊かさを求めるライフスタイルの変化を背景に、乗用車がその大宗を占める運輸旅客部門や、OA、IT化の進展した民生部門では、1.9～2.2倍に伸びており、総合的な最終エネルギー消費は、近年の景気の動向にもかかわらず一貫して伸びて1.4倍になっている(図 3.6.10、3.6.11)。

図 3.6.10 最終エネルギー消費の推移



[出典] 総合エネルギー統計 (2000年度は速報値)

図 3.6.11 日本のエネルギー消費量の部門別推移



[出典] 総合エネルギー統計及び 2000 年度エネルギー需給実績 (速報)

このエネルギー消費の伸びに伴うわが国の温暖化ガス総排出量は、1990 年と比較して 1999 年は約 8% の増加となっている。したがって、その後のエネルギー消費が伸びなかったと仮定しても、わが国は 2010 年までに、国際公約した 6% とこの 8% の合計 14% を削減しなければならない。なお、1999 年のわが国の温暖化ガス総排出量は、全世界の総排出量の 5% になっている。また、排出量の順位では、米国 24%、中国 13%、ロシア 6% に次いで第 4 位となっている。

一方、2001 年の政府の長期エネルギー需給見通しによれば、これまでの温暖化ガス削減政策をそのまま維持していった場合の 2010 年の最終エネルギー消費は、409 百万 kl (原油換算) となり、1990 年 (349 百万 kl) の値に比べて 17.1% 増加すると予測している。この結果、エネルギー起源の CO₂ 排出量は 307 百万 t-c (炭素換算) となり、目標の 1990 年値 287 百万 t-c に比べて 20 百万 t-c (6.9%) 超過になると試算されている。

他方、供給面では、原子力発電所の新増設の減少が予想されている。発電中には CO₂ を発生しない原子力は、2002 年実績で、総発電電力量 (一般電気事業用) の 31.2% を供給する主要電源となっており、地球温暖化問題に対して重要な役割を果たしているが、ウラン加工施設の臨界事故やデータ虚偽記載事件などの影響で、今後、新規或いは増設地点の開発が困難になることが予想される。また、産業の国際競争力維持のために、エネルギーコストの低減が要請されており、自由化・規制緩和が進められているが、このために、CO₂ の発生量の最も多いが安価である石炭の使用量が増えることが予想される。これらは、わが国の温暖化ガス削減目標達成を阻害する大きな要因になる可能性がある。

このため政府は、今後のエネルギー政策の中で、全国民総力をあげての省エネルギー量の最大限の上乗せ、新エネルギーのコスト低減と普及拡大、更には、燃料の転換を求めている。また、当然のことながら、原子力がわが国のエネルギー供給において大きな役割を占めていることから、安全性を大前提として、引き続き積極的に導入を推進しなければならないとしている。

なお、近年一連のトラブル隠しに端を発して、東京電力の原子力発電所のほとんどが停止し、その代わりに火力発電所を運転したが、これにともなう CO₂ 排出増加量は、我が国

ギー技術が、投資額を容易に回収できないものばかりになっていたこともひとつの要因と考えられる。

バブル経済が崩壊し、経済停滞の時代になってからは、産業構造の転換が進められたこともあって、産業部門のエネルギー消費は微増或はほぼ横ばいで推移している一方で、国民生活の快適さ、利便性を求めるライフスタイルは相変わらずで、TV、エアコン、電子レンジ、OA・IT 機器等の家電・事務機器、及び自家用車などの保有台数の増加により、民生・運輸部門のエネルギー消費は、それまでと同様着実に伸びてきた。このため、経済不況の続く中で、全体のエネルギー消費は一貫して伸びる結果になっている。湾岸戦争の一時期を除いて、石油が安価で安定的に供給されてきたことで、エネルギーの節約に対する国民の意識が働きにくかったことも原因のひとつと考えられる。また、家電製品や事務機器の省エネルギー設計や自動車の燃費改善が進んでも、それらの保有台数が増えれば、簡単に省エネルギーにはつながらないことを示している。

このような情勢の中で、1997年 COP3 が開催され、地球温暖化ガス削減の国際的取り決めがなされて、エネルギー政策は大きく転換せざるを得なくなった。即ち、温暖化ガス削減がエネルギー政策上の第一のテーマとなったのである。

なお、地球温暖化問題として、バブル経済時代のエネルギー情勢を見ると、この時期わが国の原子力の稼働率が 80% 台に到達し、電力供給量の 30% 以上をまかなっており、供給面でその分化石燃料の使用量、即ち CO₂ の排出量を抑えていたことに留意しておく必要がある。

(2) 省エネルギーの目標と対応

現在のエネルギー政策の目標の一つは、わが国が批准した京都議定書に基づいて、2010年のエネルギー起源の CO₂ 排出量を、1990年レベルに戻して安定化させることにある。

表 3.7.1 現行及び新規省エネルギー対策の概要

部門	対 策 名	省エネ量 (原油換算)	部門	対 策 名	省エネ量 (原油換算)
産 業	<現行対策>	2,010万kl	運 輸	<現行対策>	1,590万kl
	○経団連環境自主行動計画等に基づく措置 (両方で)			○トプランナー規制による機器効率の改善	540万kl
	○中堅工場等における省エネルギー対策	2,010万kl		○クリーンエネルギー自動車の普及促進	80万kl
	<新規対策>	40万kl		○交通システムにかかる省エネ対策(注)	970万kl
	◎高性能工業炉(中小企業分)	40万kl		<新規対策>	100万kl
小 計	2,050万kl	◎トプランナー基準適合車の加速的導入	50万kl	◎ハイブリッド自動車等車種の多様化等の促進	50万kl
民 生	<現行対策>	1,400万kl	小 計	1,690万kl	
	○トプランナー規制による機器効率の改善	540万kl	分 野 横 断 計	○技術開発	100万kl
	○住宅・建築物の省エネ性能の向上	860万kl		・高性能ボイラー (産業関連技術)	40万kl
	<新規対策>	460万kl		・高性能レーザー (産業関連技術)	10万kl
	◎トプランナー機器の拡大	120万kl		・高効率照明 (民生関連技術)	50万kl
	◎高効率機器の加速的普及	50万kl		・クリーンエネルギー自動車の高性能化(運輸関連技術)	—
	◎待機時消費電力の削減	40万kl		(注)ハイブリッド自動車車種の多様化等の推進の内数	
	◎家庭用ホームエネルギーマネジメントシステム(HEMS)の普及	90万kl		小 計	100万kl
	◎業務用ビルエネルギーマネジメントシステム(BEMS)の普及	160万kl		<現行対策>	5,000万kl
	小 計	1,860万kl		<新規対策>	700万kl
		合 計		5,700万kl	

[出典] 著者作成

最新の長期エネルギー需給見通しによれば、2010年の最終エネルギー消費は原油換算で409百万klと予測されており、1990年値349百万klに比べて60百万kl増加するとされている。これによるエネルギー起源のCO₂排出量は、1990年値より2000万t-c(炭素換算)超過すると見積もられている。2010年までにこれを削減するために省エネルギーをはじめ新エネルギー、燃料転換、原子力等々の促進策が進められているが、省エネルギーについては、削減目標値は原油換算で5,700万klと設定されている。その内訳と推進施策は以下のとおりである(なお、5,000万klの省エネルギー量は、自家用車の年間総エネルギー消費量或は家庭における年間総エネルギー消費量に相当する)(表3.7.1)。

産業部門

産業部門のエネルギー需要は、石油危機以降の大幅な省エネルギーの進展や産業構造の転換により、1990年代に微増の傾向があったものの、至近年では概ね石油危機当時の水準に留まっている。しかし、このエネルギー需要は総需要の5割近くを占めており、従前から進められている経団連の温暖化防止自主行動計画のなお一層の推進を中心に、工場のエネルギー管理規制の強化、省エネルギー効果30%を誇る高性能工業炉の積極的な普及拡大等により、2050万kl(以下いずれも2010年の目標)を削減する計画である。

民生部門

産業界を中心にして行われてきた従来型の省エネルギーは、次第に限界に近づきつつあるといわれている中で、石油危機以降も一貫してエネルギー需要の増加している民生部門については、今後、より重点的に省エネルギーが推進されなければならない。しかし、この部門の省エネルギー対象は、機器単体、住宅、オフィスなど一対象あたりの省エネルギー量が小さいため、数量が成否を分けることになる。いかに広く国民が生活の場で省エネルギー意識を持ち、実行するかが最も重要な鍵である。家電製品をはじめとする機器については、トップランナー方式規制(3-5(4)A参照)の導入によるエネルギー効率の改善と対象機器の拡大、民生部門の2~3割の需要を占める給湯機器の効率改善と普及、家庭の年間使用電力の10%を占める機器の待機時消費電力の削減、住宅・建築物の断熱性能の向上、ITを活用した家庭・オフィスなどのエネルギー最適管理システムの導入普及(HEMS、BEMS)などの施策により、1860万klの削減を目標にしている。

運輸部門

運輸部門のエネルギー需要も石油危機以降一貫して増加しているが、特に、自家用車の伸びが著しく、1990年代の運輸部門におけるエネルギー需要増加の8割を占めており、今や、自動車は国民2人に1台の時代になっている。運輸部門の対策は、トップランナー規制による燃費効率の改善、クリーンエネルギー自動車²³の普及促進、ハイブリッド自動車²⁴の車種拡大、ATアイドリングストップ車の導入などが主要なものである。また、輸送需要を減らすことが究極の省エネルギーであることから、実質的な走行自動車台数を減らすための交通・物流の円滑化・効率化も重要な省エネルギー対策である。

²³ 電気自動車、ハイブリッド自動車、天然ガス自動車、燃料電池自動車などの、低公害でかつCO₂排出量の少ない高効率・省エネルギー自動車。

²⁴ 複数の動力源、例えばガソリンエンジンとバッテリー電動機を組み合わせた高燃料消費率の自動車

ITS²⁵の普及拡大、輸送効率の高い輸送手段への代替化の他、東京都が検討中のロードプライシング方式、高知県のデマンドバス、豊田市の電気自動車共同利用システムなどがモデルとなって、各地に普及していくことも期待されている。これらの対策により、運輸部門の省エネルギー量は、1690万klを目標に設定されている。

部門横断的技術開発による削減

技術開発は、それによるブレークスルーが大幅なエネルギー効率の改善につながる可能性があり、至近時点で開発を終了できると見込まれる技術として、高性能ボイラー、高性能レーザー、高効率照明、クリーンエネルギー自動車高性能化などの開発を促進させることとしており、これによる省エネルギー効果は100万klと見込まれている。

(3) 今後の展望

省エネルギーは、その達成した分エネルギー供給量を削減したことになり、最も優れたエネルギー安定供給策であるということが出来る。また、削減した分に相当する温暖化ガスの排出がないことから、最も優れた環境対策にもなるといえる。COP3以降、わが国のエネルギー政策においては、真っ先に省エネルギーを推進しようとしていることから、その有効性が理解できる。しかし、これからの省エネルギーは簡単のように見えて、実際に効果を上げることは容易なことではない。特に産業部門においては、石油危機以後、効果の大きい省エネルギー技術はほとんど実施済みである。したがって今後の対応策は、産業部門に更なる削減努力を求める一方、民生・運輸部門に多くを求めることになるが、この部門の省エネルギー対象のほとんどが国民個々人の生活に係るものであり、国民一人一人の省エネルギー意識が成果を左右するところに問題がある。言い換えれば、昨今のこの部門の需要の伸びは、国民個々人が原因者であるにもかかわらず、国民(消費者)の省エネルギー意識は、一般的にそれほど高くないと考えておかなければならない。これはこれからも、よほどのことがない限り急激に改善されることは期待できない。したがって、サマータム論議、地球温暖化問題の教育、啓蒙・広報活動など国民の意識を高める施策は不可欠であるが、同時に、消費者が、常時意識して省エネルギーに努力しなくても、自動的、継続的に省エネルギーの実効を挙げ得る対策を導入していくことが大切である。トップランナー方式は、消費者がそれを購入するだけで省エネルギーに結びつくが、これは、対策の第一歩であり最低線である。きめ細かい料金制度や、リアルタイムでエネルギー使用量をモニタリングしコスト表示することで、消費者のコスト意識を高める方法や、消費者が直接手を下さなくても、自動的に家庭やオフィスの省エネルギーを達成できる制御システムなどは効果的であり、大々的に普及させていく施策が必要である。

温暖化ガス削減問題は2010年で終わるものではない。将来にわたって続く問題である。予想を上回る需要の伸びが出てくれば、これらの対応策では不足になる。行政は、このような場合に備えて次なる策を考えておかなければならない。

以下は、或る識者が国民の省エネルギーに対する現状認識を示した言葉である。

「国民は、何の意識もなしに電気、ガス、ガソリンをジャブジャブ使って、快適な生活

²⁵ インテリジェントトランスポーターションシステムズ。次世代道路交通技術。道路側に交通状況検知の高度機能を、車両に周辺交通状況検知・通信機能を持たせ、これを組み合わせて次世代新交通システムを作るうとするもの。(ETC：ノンストップ自動料金収受システムもそのひとつ)

をエンジョイしており、省エネルギーは、メーカーがやるものと思い込んでいる。」「自分の子供たちに、余計な電灯は消せ、クーラーで必要以上に温度を下げるなど、躾ける親は極めて少ない。それどころか、夫々の子供に冷暖房、TV、パソコン付の個室を与えることが、最大の愛情だと思い込んでいる。」

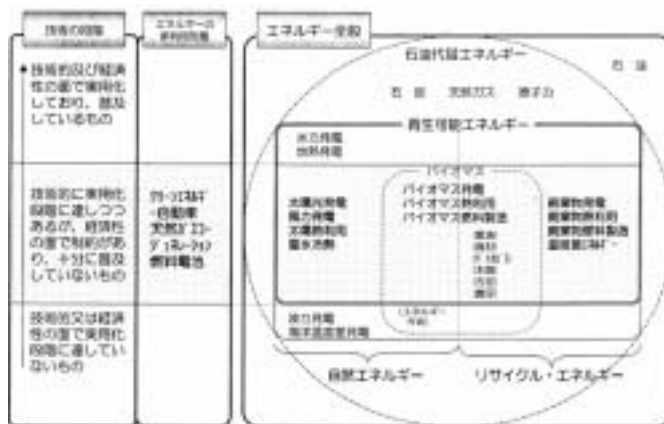
今、我々は真剣に省エネルギーについて考えなければいけない時期に来ている。

3 - 8 新エネルギーの展望

(1) 新エネルギーの種類とその特徴

新エネルギーとは、1997年に施行された「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」並びに「政令」の中で、石油代替エネルギーのうち、技術的に実用化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く、かつ、石油代替エネルギーの導入を図るために特に必要なもの、として、太陽光、風力、太陽熱、バイオマス²⁶などの再生可能エネルギー、廃棄物発電、同熱利用などのリサイクルエネルギー、クリーンエネルギー自動車、コージェネレーション²⁷、燃料電池などのエネルギー新利用形態に分類・定義されている。また、発電利用・熱利用のものを供給サイドのエネルギー、エネルギー新利用形態のものを需要サイドのエネルギーと呼ぶことがある。一方、諸外国の統計と合わせるために、供給サイドの新エネルギーと水力発電・地熱発電を合わせて、再生可能エネルギーと呼ぶことがある。なお、2003年にバイオマス・雪氷エネルギーが新エネルギーとして正式に位置づけられた(図 3.8.1)。

図 3.8.1 新エネルギーの位置づけ



[出典] 資源エネルギー庁ホームページ

新エネルギーは、エネルギー利用の過程で追加的な CO₂ の発生がなく、NO_x、SO_x²⁸の排出も少ないことから、化石エネルギーと比べて環境にやさしいクリーンな純国産エネルギーである。需要サイドの新エネルギーについても、その効率が高い分、化石エネルギーを低減することが出来る。また、新しい分野の技術として新たな産業や雇用の創出にもつ

²⁶ p.92 参照

²⁷ ガスタービン発電機で電気を作るときに発生する排気ガスの熱を、温水や蒸気形で同時に利用するシステム。

²⁸ NO_x、SO_x：化石燃料の燃焼過程で発生する窒素酸化物、硫酸酸化物。大気汚染の根源となる化合物。

ながることから注目されているエネルギーである。

一方、新エネルギーの中でも太陽光、風力などの自然エネルギーは、エネルギー密度が極めて薄く、太陽光エネルギーでは最大で1平方メートルあたり約1kW程度、風力エネルギーは太陽光のほぼ1桁低い。したがって、よほど条件の恵まれたサイトでない限り、大容量の発電には不向きである。同時にこれらは、自然条件に左右されるエネルギーで、出力が不安定になることが避けられない。これは、電力系統に連携される規模が大きくなると、電力の品質(電圧、周波数)を悪化させる要因になる。新エネルギーの現時点での最大の課題は経済性である。即ち、新エネルギーのコストは全般的に競合するエネルギーコストより高い。住宅用太陽光発電は家庭用電灯料金の3倍、中規模の風力発電単価は火力発電の2.5~3倍といったところである。更なる技術開発と大量生産により、いかに早期にコストダウンできるかが導入拡大の鍵である。

(2) わが国の導入目標と今後の見通し

新エネルギーは、環境負荷の少ないクリーンな石油代替エネルギーであることから、政府による制度的・財政的支援のもとで、積極的な導入普及が図られてきたが、主として経済性の面での制約のために、1999年時点での導入実績は、一次エネルギー総供給量に占める供給サイドの新エネルギーの割合で1%台にとどまっている。政府は、最新のエネルギー政策において、これを2010年度までに3%台にまで高め、新エネルギー総供給量を原油換算で1910百万klとする目標を設定している(表3.8.1)。

表 3.8.1 新エネルギー導入目標

	1999年度(実績)		2010年度				
	原油換算 (万kl)	設備規模 (万kw)	現行対策維持ケース		目標ケース		2010/ 1999
			原油換算 (万kl)	設備規模 (万kw)	原油換算 (万kl)	設備規模 (万kw)	
太陽光発電	5.3	20.9	62	254	118	482	約23倍
風力発電	3.5	8.3	32	78	134	300	約38倍
廃棄物発電	115	8	208	175	552	417	約5倍
バイオマス発電	5.4	—	19	16	34	33	約6倍
太陽熱利用	98	—	72	—	439	—	約4倍
未利用エネルギー (雷水冷却を含む)	4.1	—	9.3	—	58	—	約14倍
廃棄物熱利用	4.4	—	4.4	—	14	—	約3倍
バイオマス熱利用	—	—	—	—	67	—	—
国産・産材等	457	—	479	—	494	—	約1.1倍
新エネルギー供給計	693	—	678	—	1910	—	約3倍

[出典] 著者作成

以下に、現時点での主要な新エネルギーの今後の展開を考察する。(以下実績は1999年、目標は2010年の値を示す。)

太陽光発電

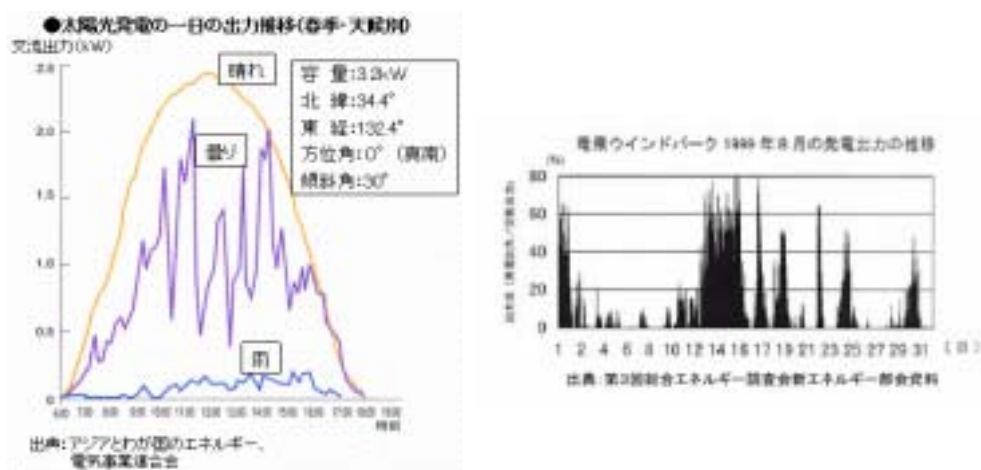
実績21万kWに対し、目標は23倍の482万kWである。一般的に、わが国の年間新築戸建住宅戸数は50~60万戸といわれている。この3~4戸に1戸が太陽光を採用しないと目標は達成できないことになる。太陽光発電の現在の価格は住宅用で30万円

1kW 程度であり、初期に比べれば数 10 分の 1 に下がったがそれでもまだ高い。コストダウンが導入目標達成の鍵である。工場の大量生産ラインが整備され、薄膜系、アモルファス、建材一体型など新技術製品が大量に市場に出回ってくれば、一般家庭用電気料金に近くなると期待されている。砂漠や宇宙での太陽光発電が実現すれば急速に市場が拡大するが、まだ課題が多く将来のことである。なお、現在の日本の生産高は世界一である。

風力発電

実績 8 万 kW に対して、目標は 38 倍の 300 万 kW となっている。近年コストダウンが進み、好風況・大規模立地点が開発され、開発量が急速に伸びて 2002 年末で 40 万 kW に到達している。しばらくはこのペースが続くと見られているが、狭隘な国土地形上の制約を考えると楽観は許されない。良好な立地条件サイトの減少、連携送配電線の長距離化、大型機材搬入路問題、環境問題の増加などの他に、出力不安定性による電気の品質低下問題のために、電力会社は、風力発電導入量に上限を設定し、買入れ電力価格の入札制を取り入れており、これらが制約条件になってくる。これからは、出力不安定対策、洋上風力への進出などを検討していかなければならない(図 3.8.2)。

図 3.8.2 太陽光発電および風力発電の出力変動



廃棄物発電

実績は 90 万 kW、目標は 5 倍の 417 万 kW である。小型プラントはエネルギー効率が低く採算が取れないため、現在発電型廃棄物焼却炉は、大型のものがほとんどである。今後、多くの小規模ごみ焼却場が建て替時期に到達するため(全国で 1500 箇所以上)、これを広域行政措置により集約化して、大規模発電型プラントに転換していく必要がある。ダイオキシン²⁹問題は技術的には解決されているが、立地点における反対活動に

²⁹ 廃棄物の焼却施設から、不完全燃焼等によって排出される有機塩素系化合物で、急性の毒性や発ガン性があり、分解しにくい。

は根強いものがあり、プロジェクトの合意形成が大きな鍵を握っている。近年、廃棄物を少ない酸素量で蒸し焼きにして、生成した可燃性ガスを利用して、発電すると共に灰を溶融しスラグ³⁰化する、ガス化溶融炉が注目されている。これは、ダイオキシンがほとんど残らず、灰を固形スラグとして再利用でき、金属類も回収できる利点がある。

バイオマス発電

籾殻、バガス、間伐材、汚泥、加工残渣、廃材、古紙、チップ、製紙黒液、家畜糞尿などの生物有機体のエネルギー資源を、一般的にバイオマスという。バイオマスは、光合成などにより CO₂ を取り込んで成長するので、バイオマスに固定された CO₂ とそれを利用するときには排出される CO₂ の量が同じであり、CO₂ の増加にならないことが最大の特徴である。

わが国では、製紙工場から排出する黒液以外はほとんど利用されておらず、実績はわずか 8 万 kW であるが、目標は 33 万 kW となっている。バイオマス資源は、年間数千万 t 発生しているといわれているが、きわめて広い地域に薄く賦存しており、資源量の安定的な集積が鍵となる。現在、各地で利用技術の開発・実証が行われているところである。

燃料電池

需要サイドの新エネルギーとして、将来最も期待されている技術である。水の電気分解の逆反応により発電するもので、外部から水素と酸素を供給すれば、連続的に電気と水が出来る。エネルギー効率が

高く、再生可能エネルギーによって作られた水素を使えば、環境にきわめて優しい新エネルギー発電装置になる。また、化石燃料による改質ガスを利用した場合には省エネルギー技術になる。リン酸型、溶融炭酸塩型、固体電解質型、固体高分子膜型の 4 種類があり、リン酸型を除いては、まだ開発途上にあるため、実績はわずか 1.2 万 kW

表 3.8.2 燃料電池種類一覧 [出典] 著者作成

	リン酸型 (PAFC)	溶融炭酸塩型 (MCFC)	固体電解質型 (SOFC)	固体高分子型 (PEFC)
電解質	リン酸水溶液	リチウム-ナトリウム系炭酸塩 リチウム-カリウム系炭酸塩	ジルコニア系セラミックス	高分子膜
作動温度	200℃	650~700℃	900~1000℃	70~90℃
燃料	天然ガス(改質) メタノール(改質)	天然ガス 石炭液化ガス	天然ガス 石炭液化ガス	水素 メタノール(改質) 天然ガス(改質)
発電効率 (HHV)	35~42%程度	45~60%	45~60%	改質ガスを用いた場合、30~40%
特徴	ほぼ商用化段階	高発電効率 内部改質が可能	高発電効率 内部改質が可能	低温で作動 高エネルギー密度 移動用動力源及び 小容量電源に適している

であるが、目標は 183 倍の 220 万 kW に設定されている。このうち固体高分子膜型(PEFC)は、ゼロエミッション自動車用として将来性が極めて高く、内外のメーカーが開発競争にしのぎを削っているが、まだ試乗用が完成した段階でコストもきわめて高い。しかし、コストダウンに成功すれば、爆発的に市場が拡大する可能性があり、現在最も脚光を浴びている機種である(表 3.8.2)。

³⁰ ガス化炉で発生する燃焼灰を、高温の燃焼熱により溶融し、これを急冷することによりガラス状の固形物にしたもの。灰の容積が約半分になり、閉じ込められた不純物が溶出することが無く、路盤材などにリサイクルすることが出来る。

(3) その他の再生可能エネルギー

水力発電と地熱発電があり、いずれも自然エネルギーを利用する環境負荷の小さい純国産の石油代替エネルギーで実績はそれぞれ 2015 万 kW (2002 年 3 月末現在) 52 万 kW である。水力発電については、比較的経済性の高い大規模地点はほとんど開発が終わっている。今後の開発は中小規模のものが中心になると見られているが、開発コストの低減や自然環境及び貴重鳥類保護などへの配慮が不可欠になっており、政府のエネルギー政策においては、2010 年までの開発量は 54 万 kW 程度と見込まれている。

わが国は、世界でも名だたる火山国でありながら、地熱発電は、自然公園法指定域での開発が出来ないこと、リードタイムが長いこと、開発コストが高いことなどの要因があり、政府のエネルギー政策における 2010 年までの量的な伸びは、2 万 kW 程度と見込まれている。

(4) 水素エネルギー

水素エネルギーそのものは新エネルギーではないが、燃焼しても水しか出さないクリーンで、しかも大量の輸送・貯蔵が可能な二次エネルギーである。しかし、水素を作るには、燃やして得られるエネルギーと同量のエネルギーが必要であり、このために化石燃料を使ったのでは意味がない。現在では価格が高価なため、ロケットや一部の工業用に使われているに過ぎないが、水力や太陽光などの自然・再生可能エネルギーにより安価な水素が製造できれば、上記のほかに、航空機、発電、自動車、燃料電池など広範囲な用途に利用される可能性があり、地球環境問題や化石燃料枯渇問題解決に貢献しうるエネルギーとして注目されている。水素は将来のエネルギーの本命であり、いずれ必ず水素時代が来ると言い切る識者もいるほどである。

地球規模で見ると、自然エネルギーの豊富な地域とエネルギー多消費地域は、多くの場合一致していないので、例えば、砂漠での太陽光や大規模な未開発水力資源のある地域で電力を生産し、これにより水を電気分解して水素を作り、液体水素・アンモニア・メタノールなどに変換してエネルギー多消費地域へ輸送し、多様な用途に利用するような、国際エネルギーネットワークを作る構想がある (World Energy Network)。この構想は、再生可能エネルギーの大規模活用による CO₂ の大幅削減、クリーンな水素エネルギーの世界規模での利用による地球環境の改善を狙ったものである。水素の製造・利用技術は、他の新エネルギー技術に比べて特段難しいものはないが、この構想を実現するためには国際協力が不可欠であり、長期的な視野で見ておかなければならないものである。

また、自然エネルギーや再生可能エネルギーと同等のきわめて少ない CO₂ 排出量で、高温で大量のエネルギーを高密度で発生させることができる高温ガス炉は、大量の水素を、集中的・安定的かつ安価に製造する手段として最も適していると考えられることから、わが国では日本原子力研究所で開発研究は進められている。

(5) 今後の展望

新エネルギーにはいろいろな種類があり、それぞれが一長一短の特色を持っている。太陽光・風力はクリーンで純国産のエネルギーであるが、エネルギー密度が薄いため例えば太陽光の場合、火力・原子力発電の一基分の100万kWを発電するためにJR山手線内側以上の面積を必要とする。また風力発電は、わが国には欧米のような好風況の大平原はなく、最大級規模地点でも数万kWオーダーのウィンドパークしか出来ない。また両者とも、出力が自然任せであるために、設備の稼働率が低く、設備容量に比べて発電電力量が極めて少なくなる(20%程度)。

廃棄物やバイオマス発電は、これまであまり利用されなかったエネルギー資源を環境への影響を最小限にして有効利用することが出来、また、発電電力量も比較的多いので化石燃料及びCO₂の削減効果は大きい。また、いろいろな制約により急速な発展は望み薄である。したがって、短期的に新エネルギーにあまり過大な期待をかけると、わが国のエネルギー問題の本質を間違えてしまう可能性があり、2010年に一次エネルギーの3%にしようとする政府の目標は、これを達成するためには相当の努力を必要とするものの、妥当なものであるということが出来る。

一方、わが国はエネルギー資源をほとんど持たない国であり、可能な限り多くのエネルギー選択肢を持たなければならない。太陽エネルギーはクリーンで無尽蔵であり、長期的に見れば非常に大きなエネルギー資源である。他の新エネルギーも含めて、可能な限りの工夫をして、利用していかなければならないエネルギーである。

3-9 3Eから見たエネルギー技術

(1) 3Eとは

エネルギーは、国民生活や産業活動にとって必要不可欠のものである。特にわが国のように、その大部分を輸入に頼らざるを得ない国にとって、エネルギーの安定供給の確保は、永遠の重要課題である。現在のエネルギー輸入依存度は81%、輸入原油の中東依存度は85%であり、今後の発展途上国の成長を考えると、エネルギー供給リスクは依然として高いと考えねばならない。

また、経済の停滞が長引く中でのエネルギーをめぐる問題は、自由化と規制緩和を通じた効率化によってエネルギーコストを低減し、国際競争力を維持して、持続的な経済成長を確保することである。

一方、地球温暖化をめぐる世界的な活動の中で、わが国はCOP3で合意されたエネルギー起源のCO₂の排出を2010年に1990年レベルに抑制し、全体で6%の温暖化ガス削減を世界に公約した。この目標を達成することがエネルギー政策の重要な課題である。

このように、エネルギー安定供給(Energy Security)、エネルギーコストの低減等による経済成長(Economic Growth)、地球環境保全(Environmental Protection)という、3つの要請(3E)を同時に達成することを基本原則にして、わが国のエネルギー政策は「環境保全や効率化の要請にこたえつつ、エネルギーの安定供給を実現する。」ことを目標に掲げているのである。この3つのEは、それぞれ相互に矛盾する側面を持っているために、その同時達成は容易なことではない。即ち、CO₂の排出を抑制するためにはエネルギー需要を抑えればよいが、経済を発展させれば、必然的に産業活動が活発化してエネルギー需要

は伸びてしまう。環境保全を優先させすぎると、それだけコストが上昇し、国際競争力が低下する。競争力を維持しつつ経済成長を図ろうとすると、低コストの石炭利用が増加してCO₂増加を招いてしまう。これらのことを考え合わせると、いかにしてこの3つのEをバランス良く同時に満たしていくかが、わが国のエネルギー政策の最も難しい、しかし最も大切なポイントとなることが分かる。

(2) 3E から見た各発電技術の考察

火力発電

火力発電は、石炭、石油、天然ガス等の化石燃料を使用するため、他の発電方式に比べると最もCO₂排出量が多い。しかし石油を除外すればコストが安く、燃料の長期安定供給が可能であり、わが国では、全発電電力量の60%を占める基幹電源となっている。発電効率を向上させると、その分燃料の削減即ち省エネルギーになり、同時にCO₂排出量を削減するため温暖化対策にもなる。

汽力発電所の場合、蒸気の圧力と温度を上げることが最も効率改善に効果があることから、石油危機以降競ってこのための技術開発に取り組んできた。その結果、現在では、3.1MPa、610 の超超臨界圧³¹に到達し、石炭火力では送電端効率が旧来のプラントに比べ10%も改善された(効率は42%)。しかし、これ以上蒸気条件を高めると、蒸気タービンなどの材料を高価なオーステナイト系に変更しなければならず、効率向上による利益より費用のほうが高くなるために技術的には可能であるが実際に採用されることはないと見られている。

従来の火力発電は、ボイラーで蒸気を作り、タービン発電機を回して発電しているが(蒸気単サイクル)、この方式での発電効率はすでに上限に達している。一方、液化天然ガス(LNG)火力の場合、最初にガスタービンで燃焼させて発電し、その高温の排気ガスで蒸気を作り、蒸気タービン発電機を回して発電させる二重複合発電(コンバインドサイクル)にすることにより、更に発電効率を高めることが出来る。例えば、ガスタービン入り口燃焼温度1300度で約48%、1500度では50%以上の高い効率にすることが可能である。LNG火力だけでなく、今後の石炭火力においても、石炭をガス化して複合発電にする方式が主流になると考えられている。この場合の効率も44~46%と高くなり、在来火力に比べて極めて大きな省エネルギーになると期待されている。

原子力発電

原子力発電は、発電の過程でCO₂を排出しないため、温暖化防止及び石油代替には最適のエネルギーである。発電所建設を含む全過程でのCO₂排出量比較でも、石炭火力の1/45である。発電コストも安く、すでにわが国の電力量の30%以上を供給する主要電源となっている。

原子力発電の燃料となるウランも枯渇資源のひとつであり、現状の使い方のままでは早晚枯渇する。(約61年といわれている。)しかし、高速増殖炉でプルトニウムを増殖させる使い方をすると、ウラン資源の寿命を飛躍的に延ばすことが出来る。この特徴

³¹ 沸騰中の液体の密度とその飽和蒸気の密度は、温度及び圧力の上昇と共に接近し、或る温度・圧力で等しくなる。このときの温度(圧力)を臨界温度(圧力)といい、この点以上の気体はいくら圧縮しても液化しない。これを超臨界状態という。(水の場合 374、225 kg/cm³)

は、化石エネルギー資源の枯渇時代には、きわめて有効なエネルギー供給手段となり得る重要な技術である。

一方、原子力発電は、大量の放射性物質を扱わざるを得ないため、一般国民に不安感を与えてしまうことが避けられない。特に近年、ウラン加工施設臨界事故等の原子力に対する信頼を損なう問題が多発しており、新規建設計画に大きな影響を与えている。これは、原子力発電の地球温暖化防止効果を考えると、エネルギー政策上極めて大きな問題であり、何よりも信頼性を回復することが優先されなければならない。

コジェネレーションと分散型電源

近年、ガスタービンやガスエンジンを使用したビル、病院、事務所、店舗向けの小型発電装置が急速に普及してきた。これは発電だけではなく、タービン・エンジンからの排気・廃熱を給湯、冷暖房などに利用して、総合エネルギー効率を70～80%に高めることが出来る装置で、コジェネレーションといわれるものである。マイクロガスタービンもこの一種で、家庭用にも適用できる機種である。これらは、装置の価格が数万円/kWと安くなってきたことと、高いエネルギー効率によってエネルギーコストが安価になることなどが普及拡大の要因である。但し、コジェネレーションは、電気と熱が同時に使われないと、電気だけでは高効率にならないことに注意が必要である。現在、技術開発の最終段階にあると見られている固体高分子膜燃料電池も同様の使い方が出来、将来、価格が数万円/kWに下がれば、爆発的に普及する可能性があるといわれている。

これらの小型発電装置は、オンサイト分散型電源とも呼ばれ、新たな送配電線の必要がないことが利点であり、比較的遠隔地に作られる大規模発電プラントの場合必ず発生する遠距離送配電線による損失(投資と電力損失)を回避することが出来るため、全国的に普及すれば高効率利用とも相まって、温暖化防止に大きな役割を果たすものと期待されている。なお、太陽光発電はコジェネレーションではないが、典型的な分散型電源である。

省エネルギー・新エネルギー

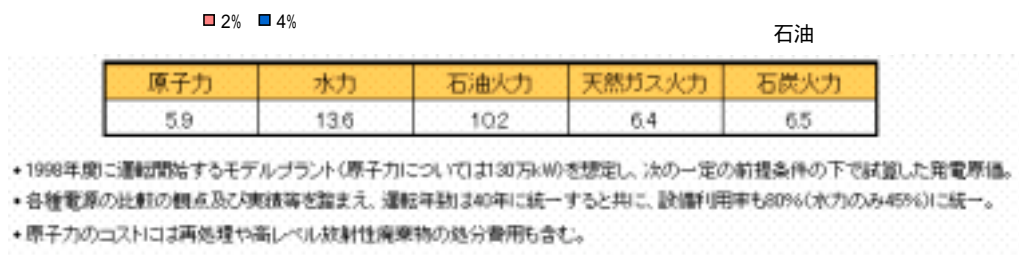
3Eの相互矛盾を解決する最良の手段は省エネルギー即ち、エネルギー利用効率をあげること、消費エネルギー量を減らすことである。しかし、世界最高レベルの省エネルギー達成国であるわが国では、これは容易なことではない。特に、近年のエネルギー消費の伸びの要因となっている民生・運輸部門においては、原因者が国民個人であるといっても過言ではなく、したがって、これからの省エネルギーは、国民一人一人のライフスタイル意識の改革にかかっているといえるからである。

CO₂をほとんど排出しないことが最大の特徴である新エネルギーは、一般的にまだ高価であり、急速な大量導入は期待できない。太陽光・風力発電については、出力不安定性のために常にバックアップ電源が必要であり、これを蓄電池でカバーすると更に高価になってしまう。しかし、自然エネルギーはクリーンで無尽蔵である。例え短期的に期待は出来なくても、持続性、将来性のある貴重なエネルギーとしてコストダウンを図りながら開発・導入を進めていくべきものである。

以上のように、それぞれのエネルギー技術は長所短所を持っており、3Eの矛盾を解決できる切り札となるようなものはない。石炭もガスも原子力も、更には省エネルギーや新

エネルギーも、すべてそれらの欠点が過度に現れないようにそして長所を最大限に生かし、その時々状況に合わせてバランス良く利用していく以外に方法はない(表 3.9.1)。

表 3.9.1 各発電方式の発電原価



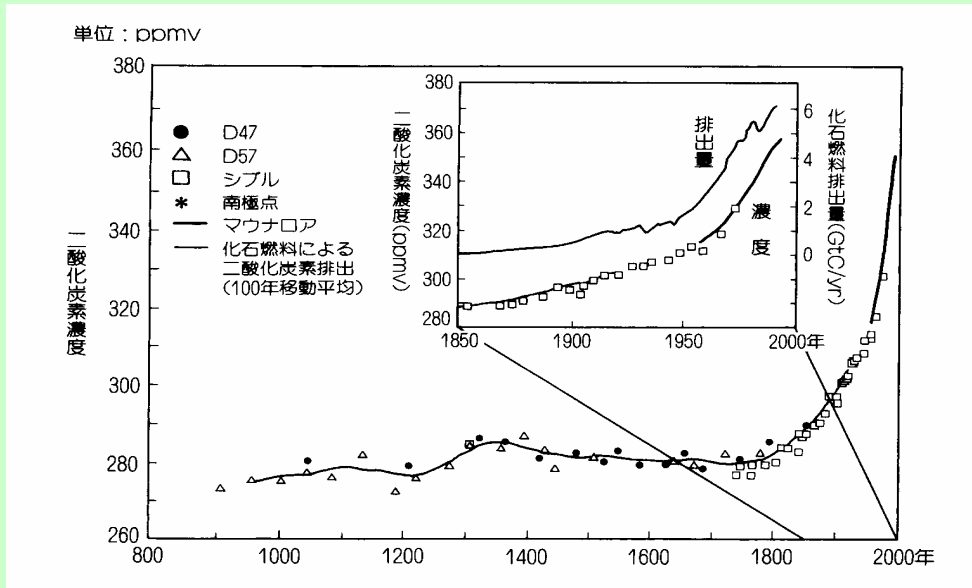
[出典] 総合エネルギー調査会原子力部会資料 (平成 11 年 12 月)

【参考資料】

[従来の環境問題と温暖化問題]

	従来の環境汚染問題	地球温暖化問題
影響物質	有害物質、汚染物質	温室効果ガス
発生源	工場、輸送機関	企業や国民など不特定多数
影響経路	大気、水、土壌	気候変動(気温上昇、水害・台風、干ばつ) 海面上昇、病害虫
影響範囲	発生源周辺、都市、国、地域	地球規模
影響期間	短・中期	長期
被害対象	健康、生態系、建造物	生態系、自然災害、健康、経済活動

[大気中の二酸化炭素濃度の変化]



[出典] 環境省「気候変化 2001、IPCC 第 3 次評価報告書：政策決定者向けの要約」

[温暖化影響ポテンシャル]

温室効果ガスの崩壊は、一般に次式で近似されている。

$$M = M_0 e^{-t/\tau}$$

M : t 年後の残存分子量[kg]、M₀ : t=0 での分子量[kg]
 τ : 分子の大気中寿命

前式から温室効果ガスが温暖化に与える影響は時間とともに変化していくことになる。二酸化炭素を基準に時間による濃度変化を考慮して温室効果ガスの温暖化への影響を表示したものを温暖化影響ポテンシャル(GWP : Global Warming Potential)という。GWPは、各温室効果ガスの重量あたりの温暖化影響を定式化したもので、次式で表わすことができる。

$$GWP = \int_0^t a_i M_i d / \int_0^t a_{CO_2} M_{CO_2} d$$

a_i : 温室効果ガス i の赤外線相対吸収力

M_i : 温室効果ガス i の t 年後の残存分子量

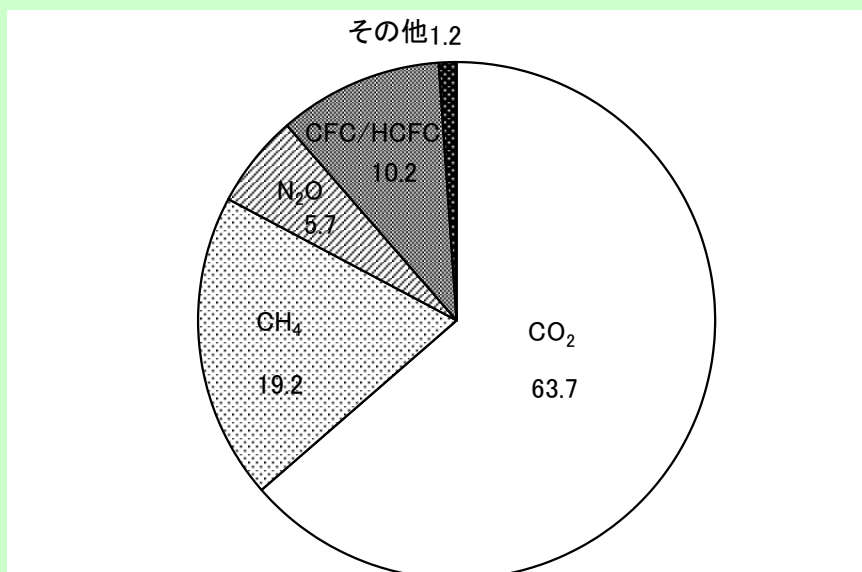
次表は上式を用いて評価期間を 20 年、100 年、500 年にしたときの GWP の数値を求めたものである。GWP はフロンが最も大きく、亜酸化窒素、メタン、二酸化炭素の順に小さくなっており、その数値は評価年数によって大きく異なっていることがわかる。

表 温室効果ガスの GWP

	GWP (評価期間)		
	20 年	100 年	500 年
二酸化炭素	1	1	1
メタン	62	25	8
亜酸化窒素	290	320	180
フロン及び代替フロン	300 ~ 8,100	93 ~ 11,700	29 ~ 13,600

[出典] 著者作成

[温室効果ガスの温暖化への寄与度]



[出典] IPCC 第二次評価報告書 (1995)

[気候モデルの不確実性について]

IPCC の第三次評価報告書に指摘されているように、人為的に排出される温室効果ガスの増加によって温暖化が進むことについては科学者の間では異論がなくなってきている。問題は、その影響を定量化するときの不確実性で、それには海洋の二酸化炭素の吸収メカニズム、温度上昇の大きさ、気候の変化、被害の大きさなどがあり、科学的に解明されていないことが数多く残されている。

温暖化による気候変化を地域ごとに明らかにしていくには、地域ごとに雲と降水、土壌水分や海面水温などを正確に把握しなければならない。しかし、現在の気候モデルでは、雲と熱放射や雲と降水との関係、さらに地球表面の70%を覆っている海面の果たしている役割は正確に捉えられていない。気候モデルによる予測は、まだ定量的に評価できるほど精度は高くなく、現段階では定性的にしか利用できない。気候モデルから得られる定性的な気候変化をまとめると以下ようになる。

温度上昇は海洋よりも熱容量の小さい陸上のほうが大きい。

温度上昇は南半球よりも陸地面積が大きい北半球のほうが大きい。

南極や北極など高緯度地帯の温度上昇が大きくなる。

夏よりも冬の気温上昇のほうが大きい。

全球平均の降水量は増加し、大陸中央部における降水量は減少する。

台風や集中豪雨についての正確な予測は難しい。

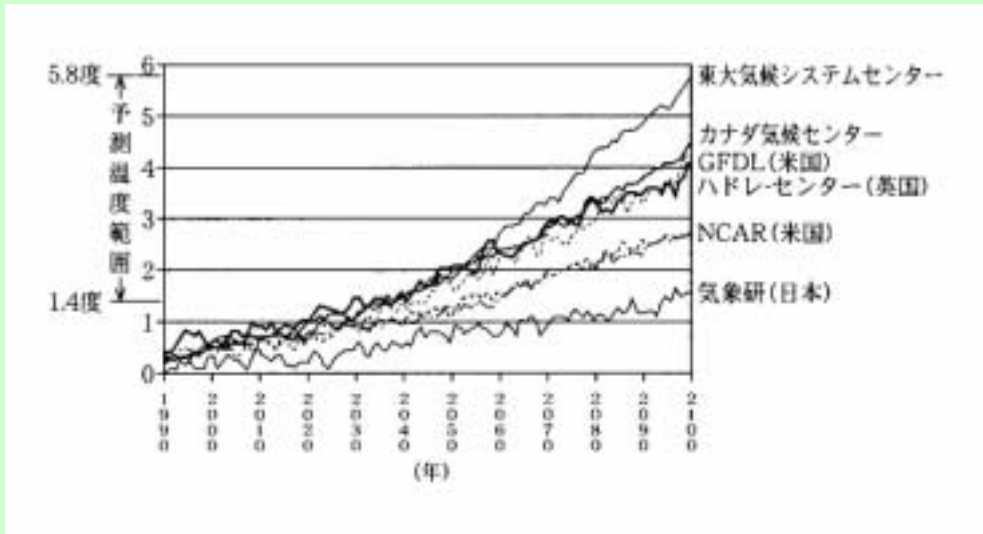
温暖化に伴い熱帯太平洋の海面水温が高まり、東太平洋の赤道域での海面水温が上昇するエルニーニョ的な現象が頻繁に発生する恐れがある。

山岳氷河や大陸氷床の融解により海水面が上昇する。

グリーンランドと南極付近で海流が沈み込む深層循環が弱まり、ヨーロッパ高緯度地域への熱輸送が減少する恐れがあるが、それによって高緯度地域が寒冷化する確率は低い。

温暖化の不確実性は、気候モデルに関するものだけでなく、世界のエネルギー消費についても考えられる。IPCC の報告書では世界のエネルギー消費動向について、いくつかのシナリオが想定されている。想定されたシナリオの範囲で将来の気候変化を、モデルを使って予測している。それによると地球の平均表面気温は2100年には1990年に比べて1.4~5.8度上昇し、地球の平均海面水位は2100年までに0.09~0.88m上昇するという(図1)。予測では温度上昇と降水量の値は地域によって異なると指摘しているが、その分析精度は気候の変化や影響による被害を地域ごとに明らかにしていけるほど高いものではない。

図 気候モデルの違いによる温度上昇



[出典] 環境省「気候変化 2001、IPCC 第三次評価報告書：政策決定者向けの要約」(2001)

[温暖化による異常気象]

(単純な異常気象)

21 世紀中に予測される異常気象	予測される影響の代表例
最高気温の上昇、暑い日や熱波の増加	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高齢者や貧困者の病気や死亡の増加 ・ 家畜や野生生物の熱ストレスの増加 ・ 保養地、観光地の変容 ・ 農作物被害の増大 ・ 冷房による電力需要の増大
最低気温の上昇、寒い日・霜日・寒波の減少	<ul style="list-style-type: none"> ・ 寒さによる死亡や疾病の減少 ・ 農作物被害の減少 ・ 一部の害虫や媒介動物の活動範囲が増大 ・ 暖房エネルギー需要の減少
降水量の増大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 洪水、地滑り、雪崩、泥流の増加 ・ 土壌侵食の増加 ・ 洪水流量の増加と灌漑影響 ・ 政府・民間の洪水保険システムや災害救済への圧力の増加

(複雑な異常気象)

21 世紀中に予測される異常気象	予測される影響の代表例
夏季の乾燥と干ばつリスクの増大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 農作物生産の減少 ・ 地盤変化による建築物基礎部の損傷 ・ 水資源量の減少と水質の低下 ・ 森林の火災リスクの増加
熱帯性低気圧の最大風速、平均・最大降雨の増大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人命リスク、伝染病リスク、その他のリスクの増加 ・ 沿岸侵食と沿岸部建築物への被害が増加 ・ 珊瑚礁やマングローブといった沿岸生態系の損害の増加
エルニーニョによる干ばつと洪水の発生頻度の増大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 干ばつ、洪水多発地域における農業と牧畜被害の増加 ・ 水力発電ポテンシャルの減少
アジア地域の夏季モンスーンの変動性	・ アジアの温帯、熱帯地域の洪水と干ばつの発生頻度と規模が増大
中緯度地域の暴風雨の増加	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人命と健康のリスクの増加 ・ 財産と社会基盤施設の損失 ・ 沿岸生態系の損害

[出典] 環境省「気候変化 2001、IPCC 第三次評価報告書：政策決定者向けの要約」(2001)

[温暖化による自然・社会システムへの影響]

図 地球温暖化問題



[出典] 著者作成

表 自然・社会システムへの影響

自然・社会システム	予測される影響事例
<p>水文および水資源 （降水量の変化による 河川流量や地下水への 影響）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 河川流量は高緯度地域と東南アジアで増大し、中央アジア、地中海沿岸、南アフリカ、オーストラリアで減少する。 ・ 中央アジア、アフリカ南部、地中海沿岸諸国など水ストレスのある国で、利用可能な水がさらに減少する。 ・ ほとんどの地域で洪水の規模と頻度が増大する。 ・ 冬季の降水量が増えて、河川流量のピークが春から冬へと移行する可能性がある。 ・ 灌漑に対し大きな影響を及ぼす可能性がある ・ 開発途上国や経済移行国での水資源管理が重要になる。
<p>農業および食糧安全保障 （種の栽培変種、土壌の 性質、害虫や病原菌、気 温、水ストレス、無機栄 養分など）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱帯農作物生産に悪影響となる。 ・ 先進地域では大きな収入増加をもたらす、開発地域ではわずかな増加または減少をもたらす。 ・ 食糧の需給均衡が崩れて価格が上昇する。 ・ 飢餓のリスクがある人々の絶対数を増加していく恐れがある。
<p>陸上および淡水生態系 （気温の上昇、土壌水分 の変化）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 種の構成と支配状況の変化が遅れて生じる。 ・ 植生変化が野生生物の分布、数、密度、行動に大きな影響を与える。 ・ 冷水性魚類の生息地を損失させ、暖水性魚類の生息地を拡大する。 ・ 「絶滅の危機に曝されている、または脆弱である」と分類されている種は絶滅に近づく。 ・ 世界的な木材供給の増加により、開発途上国の市場シェアが増加する。
<p>沿岸域と海洋生態系 （海面水位の上昇、海水 面積の減少、塩分・波浪 条件・海洋循環の変化）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 魚の種類が変り、漁獲量も変化する。 ・ 多くの沿岸部で洪水被害、浸食の加速化、湿地やマングローブの損失、淡水源への海水浸入が起こる。 ・ 高緯度沿岸地域での波浪被害や永久凍土の劣化による影響が現われる。 ・ 珊瑚礁のストレスが増大し、海洋での病害の頻度が増える。

（続き）

<p>人間の健康 (熱ストレスの期間、大気汚染の影響、暴風雨や洪水の影響、季節的な気候変動による伝染病への影響)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ マラリアとデング熱の伝染範囲が拡大する。 ・ 伝染病の発生数が増え、季節での発生期間が長くなる。 ・ 熱波による湿度上昇と大気汚染が都市環境を悪化する。 ・ 洪水の増加から、溺死、下痢や呼吸器疾患、開発途上国での飢餓や栄養失調が増大する。 ・ 熱帯/亜熱帯地域に住む低収入の人々への被害が大きくなる。
<p>人間住居、エネルギー、産業 (気候変化)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 河岸や沿岸の居住者のリスクが大きくなる。 ・ 都市の洪水頻度が増え、適応力の低い人々に被害をもたらす。 ・ 沿岸部の海面上昇や異常気象は観光地収入に大きな影響を与える。 ・ 気候に依存している一次産業(農業、林業、水産業)経済に影響を与える。 ・ エネルギー需要は、冷房に対して増大、暖房に対して減少が予測される。
<p>保険および他の金融サービス (財産/災害保険料、リスク管理)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 気象現象および異常気象によるコストが、ここ数十年で急速に増大しており、今後も増えていくと予想される。 ・ 保険料上昇への圧力が高まっていく可能性がある。

[出典] 環境省「気候変化 2001、IPCC 第三次評価報告書：政策決定者向けの要約」

[京都議定書と京都メカニズム]

地球温暖化の防止に向けた国際的な取り組みは、1992年6月にブラジル、リオデジャネイロで開催された「環境と開発に関する国連会議(地球サミット)」で採択された気候変動枠組み条約が基本になっている。同条約は大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させていくことを目標としており、1994年に発効し、すでに185か国の批准が得られている。同条約の目標達成に向けて、効果的な実施の促進と実施状況の定期的な検討を行う機関として条約締約国会議(COP; Conference of the Parties)が設立された。

1995年3月に第1回条約締約国会議(COP1)がベルリンで開催され、具体的措置について検討していく枠組みが「ベルリン・マンデート」として採択された。ベルリン・マンデートは、地球温暖化の防止に焦点をあてており、その長期的な取り組みを明確にしたもので、世界の持続可能な発展に向けて策定された最初の行動計画といってもよい。行動計画の具体的な内容についてはその後のCOPの活動に委ねられた。1997年12月に京都で開かれたCOP3では、法的拘束力のある先進国における温室効果ガスの削減目標を定めた京都議定書が採択された。採択された議定書の内容は以下の通りである。

対象ガスの種類と基準年：二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素(1990年を基準年とす

る)。HFC、PFC、SF₆ (1995年を基準年とすることができる)。

吸収源の扱い：土地利用の変化及び林業セクターにおける1990年以降の植林、再植林及び森林減少に限定する。農業土壌、土地利用変化及び林業の詳細な扱いについては、議定書の第1回締約国会合あるいはそれ以降のできるかぎり早い時期に決定する。

約束期間：第1期は、2008年2012年の5年間

附属書 国の削減目標(全体を平均すると-5.2%)：日本(-6%)、米国(-7%)、EU(-8%)、カナダ(-6%)、ロシア(0%)、ニュージーランド(0%)、ノルウエー(+1%)、豪州(+8%)

次期約束期間への借り入れ(ボローイング)：認めない。

共同達成：欧州共同体などのように複数の国が共同して数量目的を達成することを認める。

途上国への義務と実施の促進：途上国に対する削減目標は設定できなかったが、途上国を含む全締約国の義務として、吸収源による吸収の強化、エネルギー効率の向上等詳細に例示する。

発効要件：議定書を締結した国数が55カ国以上であり、かつ締結した附属書 国の1990年におけるCO₂の排出量が同年における附属書 国によるCO₂の総排出量の55%を越えること。

(京都議定書の附属書 国と非附属書 国)

附属書 国：京都議定書附属書Bに掲げられた排出削減に関する数量目標を有した3カ国

オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、クロアチア、デンマーク、欧州共同体、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本、ルクセンブルグ、オランダ、ニュー・ジーランド、モナコ、ノルウエー、ポルトガル、スペイン、スウェーデン、スイス、グレート・ブリテン及び北部アイルランド連合王国(英国)、アメリカ合衆国

(市場経済移行国)ベラルーシ、ブルガリア、チェコ、ハンガリー、ラトヴィア、リヒテンシュタイン、リトアニア、ポーランド、ルーマニア、スロヴァキア、ウクライナ

非附属書 国：発展途上国であり、排出削減に関する数値目標を有していない71カ国

京都議定書には、先進国に対して国内における温室効果ガスの削減目標と森林の吸収措置にほかに、弾力性のある国際的措置として京都メカニズムが制定された。京都メカニズムとは温室効果ガスの移出削減であり、限界費用が低い国から高い国に移転することによって費用対効果の高い排出削減を可能にする国際的な取組み制度である。とりわけ、諸外国に比べて既に相当程度の省エネルギー対策が推進されているわが国にとっては、京都メカニズムの活用は目標達成に伴うわが国経済への影響を最小限にする上で不可欠である。

京都メカニズムには各国の政府のみならず、民間企業も広く参加することが想定されている。わが国においても民間企業が創意工夫を活かして、京都メカニズムに基づくプロジェクトの実施やクレジット取引を進め、温室効果ガス削減に向けた自主的取組みの

一環として活用していくことが期待されている。

京都メカニズムには、議定書第 6 条に基づく共同実施(JI: Joint Implementation)、議定書 12 条に基づくクリーン開発制度(CDM: Clean Development Mechanism)、議定書 17 条に基づく排出量取引の 3 つがある。

共同実施 (J I)

附属書 国間で省エネプロジェクトや植林プロジェクト等を共同で実施し、当該プロジェクトから得られる温室効果ガスの追加的削減量の全部又は一部をクレジット(ERU)として当事者間の合意に基づき移転する仕組み。ERU はプロジェクトを受け入れる附属書 国(ホスト国)の保有する AAU、RMU の一部を変換することによって発効され、投資国に移転されることになる。このため、ERU 移転前のホスト国、投資国の AAU、RMU の合計と、ERU 移転後のホスト国、投資国の AAU、RMU と投資国に移転した ERU の合計は変わらない。

各種クレジット

- ・ AAU(Assigned Amount Unit) : 京都議定書 3 条 7 項、8 項に基づいて計算された附属書 国の初期割当量に相当するクレジットを、第 1 約束期間前に当該附属書 国が国家登録簿内に発効。
- ・ ERU(Emission Reduction Unit) : 共同実施を通じて発効されたクレジット
- ・ CER(Certified Emission Reduction) : CDM を通じて発効されたクレジット。
- ・ Rmu(Removal Unit) : 京都議定書第 3 条第 3 項、第 4 項に基づく吸収源活動による附属書 国のネットの吸収量であって、京都議定書第 8 条の専門家チームのレビューで認められたものに相当するクレジットを、当該附属書 国が国家登録簿内に発効。

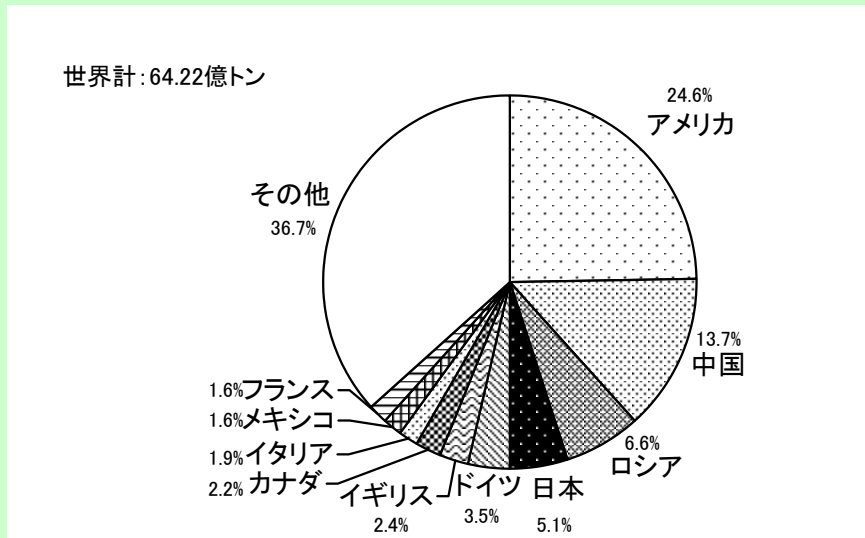
クリーン開発制度 (CDM)

非附属書 国(途上国)において附属書 国が省エネプロジェクト等を実施し、当該プロジェクトから得られる温室効果ガスの追加的削減量を第三者機関が認証してクレジット(CER)を発効し、その全部又は一部を当事者間の合意によって、移転する仕組み。J I で発効される ERU はホスト国の AAU もしくは RMU の一部が変換するものであり、ホスト国、投資国間のクレジットのやりとりはゼロ・サムであるが、CDM では AAU の存在しない非附属書 国で CER というクレジットが新たに生まれるために、ホスト国、投資国間のクレジットのやりとりはプラス・サムになる。

排出量取引

附属書 国間で職割当量の一部や共同実施、クリーン開発制度を通じて獲得したクレジットを売買する仕組み。各附属書 国が保有する AAU、RMU や J I、CDM を通じて海外から調達した ERU、CER が附属書 国間で売買されることになる。附属書 国全体で保有され、取引される AAU、ERU、RMU の合計は約束期間を通じて変わることはないが、CDM プロジェクトによってより多くの CER が非附属書 国で創出されれば、附属書 国間で取引可能なクレジットの総量は増大することになる。

[世界のCO₂排出量(2000年:炭素換算)]



[出典] EDMC「エネルギー・経済統計要覧(2003)」から著作作成

[CO₂排出に関係する要因]

人為的に排出されている温室効果ガスの中で温暖化に最も大きな影響を与えているのがCO₂である。社会におけるCO₂排出は、エネルギー消費量、経済成長、人口など様々な要因による影響を受けているが、それらをまとめると次式によって整理することができる。

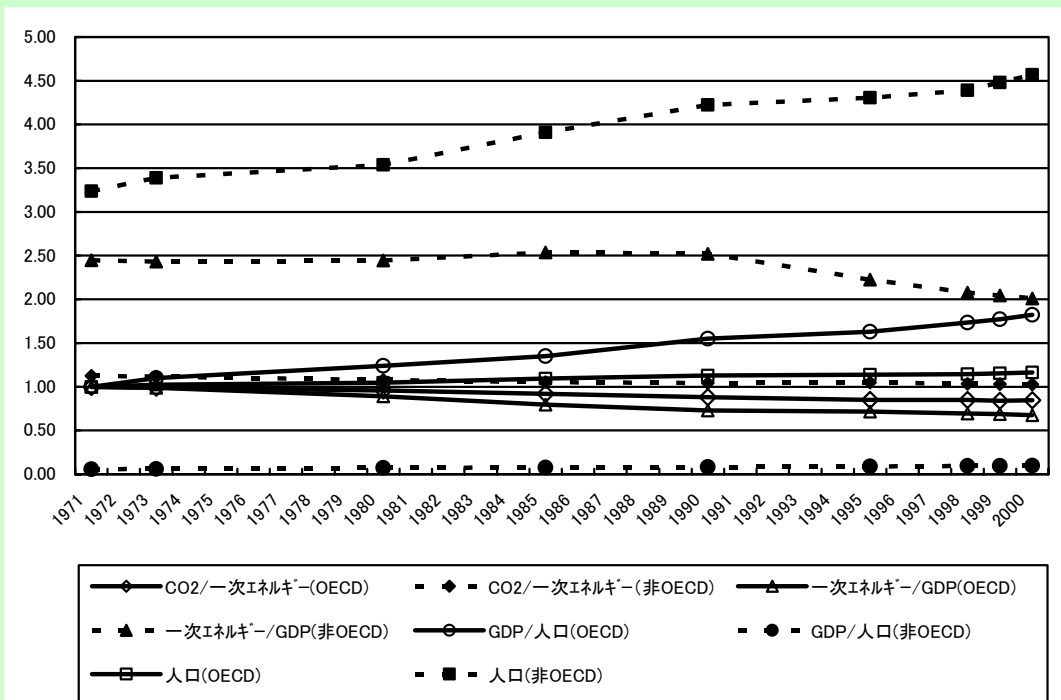
$$CO_2量 = (CO_2量 / 1人あたり消費量) \times (1人あたり消費量 / GDP) \times (GDP / 人口) \times (人口)$$

$$= [炭素強度] \times [エネルギー強度] \times [経済発展の度合] \times [人口]$$

CO₂排出量の要因として、人口、一人あたりの国内総生産(GDP)、単位国内総生産あたりのエネルギー消費量(エネルギー強度: Energy Intensity)、それにエネルギー消費量あたりのCO₂排出量(炭素強度: Carbon Intensity)に分解することができる。式で示されているそれぞれの要因を掛け合わせるとCO₂排出量となる。

図7は先進国(OECD)と開発途上国(非OECD)について、各要因の推移を過去30年間にわたり描いたものである。実線で示された先進国の要因を見ると、人口はほぼ横ばい状態で推移している一方で、一人あたりのGDPは増加傾向にあることがわかる。また、炭素強度とエネルギー強度については、わずかではあるが減少傾向にある。それに対して開発途上国の状態を先進国と比べてみると、人口の絶対数が多いだけでなく増加傾向にある一方で、一人あたりGDPは20分の1程度で低迷している。炭素強度は先進国よりもやや悪い値ではあるが、それほど大きな差はない。しかし、エネルギー強度は先進国の値の2~2.5倍にもなっており、GDPの低さがエネルギー強度を悪化させている。

図 先進国(OECD)と開発途上国(非 OECD)における、人口、GDP/人口、エネルギー強度、および炭素強度の推移 (1971年の OECD の値を 1.00)



[出典] 著者作成

社会が物質的に成熟化している先進国において、今後、CO₂排出量をできるだけ少なくしていく対策としては、エネルギー強度(Energy Intensity)と炭素強度(Carbon Intensity)の改善が求められる。エネルギー強度の改善には、省エネルギーの促進とエネルギー寡消費産業であるサービス産業や情報産業の育成が大切になる。炭素強度は、天然ガスへの燃料転換や原子力や再生可能エネルギーの普及によって改善することができる。

開発途上国は先進国に比べると一人あたりの国内総生産がこれまでは小さかったが、21世紀には経済成長と人口の増大が予測されている。世界のCO₂排出量は、開発途上国の経済成長と人口増加によって増大していくことは間違いない。その増加を抑えていくためには開発途上国が自ら削減する努力が必要になるが、先進国も開発途上国に対してCO₂排出量の少ない産業を育成したり技術を移転していくことが望まれる。