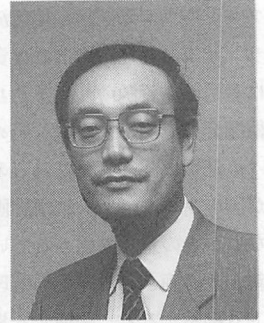


## ■ 展望・解説 ■

CO<sub>2</sub>削減から見た発電プラントの将来展望Overview of Electric Power Generating Plants to Reduce CO<sub>2</sub> Emission

内 山 洋 司\*

Yohji Uchiyama



## 1. はじめに

世界の人口とエネルギー消費量が急増している。戦後からの約50年間に世界人口は2.3倍に、エネルギーは5.4倍にまで増え、特にエネルギー消費の増加が著しい。中でも、世界人口の僅か15%に過ぎない先進諸国(OECD)におけるエネルギー消費は、世界が一年間に消費するエネルギーの50%以上にもなっており、南北格差も大きな問題である。我が国のエネルギー消費量は、一人一日あたり石油に換算して5.5リットルで、この値は西欧の国々とはほぼ同じである。

現代の技術文明は、人々を肉体労働から開放し、より快適な生活ができるよう発展している。機械化、自動化、そして情報化は、企業における省力化を促進し、肉体労働から精神労働へと労働の質を変えている。また家庭においても、電気製品や調理食品の普及によって主婦の家事労働は軽減され、教育や余暇への活動時間が増えている。しかし、考えてみると、そういった生活はすべて大量のエネルギー消費に支えられている。スイッチさえ押せば、灯りがとまり、湯が沸き、テレビや音楽を楽しむ便利な生活を私たちは送っているが、そのためには発電所や工場などで大量のエネルギーを消費しなければならず、それによって自然環境に大きな負荷を与えている。現代文明が産み出す快適さと環境汚染・破壊はまさにトレードオフの関係にある。

地球規模の温暖化が騒がれ、CO<sub>2</sub>を削減しない環境にクリーンな新しいエネルギー源が注目されている。自然エネルギーや原子力は、発電時に化石燃料を消費しないエネルギーである。しかし、そういったエネルギー源もプラントの建設や運転にエネルギーを消費しており、間接的に見れば温暖化影響ガスであるCO<sub>2</sub>を排出している。環境を汚染しない完全にクリーンな

エネルギー源などは、今日のような大量エネルギー消費社会には存在しない。

こういった間接的なCO<sub>2</sub>排出量が、化石燃料を用いた火力発電プラントの発電時に発生するCO<sub>2</sub>量に比べどの程度になるかは興味あることだ。そのためには、プラントの建設や運転に投入する資材とエネルギーを調べる必要がある。本稿は、火力、原子力、自然エネルギーの各種発電プラントについて、プラントの建設と運転における投入エネルギーとCO<sub>2</sub>排出量を調べたものである。調査は、単に発電プラントだけでなく、燃料の採掘・加工・輸送、あるいは廃棄物の処理処分など発電のトータルシステムとライフサイクルに係わるすべてのプロセスについて行なっている。また、今後の技術進歩が発電プラントのCO<sub>2</sub>排出量をどこまで削減し得るか、そしてCO<sub>2</sub>を1トン削減するに要する費用も各発電プラントについて求めている。

## 2. 発電プラントの温暖化影響

検討した発電プラントの電気出力と年間の設備利用率を表1に示す。対象技術は電気事業用の実用プラントで、それは現状の性能と技術レベルで建設できるものである。大型プラントとして火力(石炭、石油、LNG)と原子力発電、自然エネルギーは電気事業用の商用規模のプラントである<sup>1)</sup>。

発電プラントから排出されるCO<sub>2</sub>量は、各プロセスのライフサイクルで発生する量であり、それはプラントの建設時と寿命期間中の運転に消費する資材およびエネルギーの種類と量を明らかにすれば計算できる。検討プロセスを大別すると、燃料供給、発電設備、廃棄物処分とに分類できる。例えば原子力発電の場合、燃料供給はウランの採掘から精鉱、濃縮、加工などのアップストリームのプロセスを指し、廃棄物処分は再処理、放射性廃棄物の処理処分や廃炉などダウンストリームのプロセスである。自然エネルギー発電のシステムは最も単純で、検討プロセスは発電設備だけで、

\* 財団法人電力中央研究所 経済研究所経済部

エネルギー研究室専門役

〒100 東京都千代田区大手町1-6-1大手町ビル7F

表1 検討した発電プラント

大型プラント				
	石炭火力	石油火力	LNG火力	原子力発電
設備容量 (発電端) [MW]	1,000	1,000	1,000	1,000
設備利用率 [%]	75	75	75	75
発電効率 (発電端) [%]	39	39	39	33.5
所内率 [%]	7.4	6.1	3.5	3.4

自然エネルギー

	中小水力	地熱	風力	波力	潮流	海洋温度差	太陽熱	太陽光
設備容量 [kW]	10,000	10,000	100	1,000	3,000	2,500	5,000	1,000
設備利用率 [%]	45	60	35	25	40	80	30	15
所内率 [%]	0.25	7	10	30	30	50	5	5

その建設と寿命期間中の運転に消費するエネルギーを分析すればよい。

発電プラントの温暖化影響を分析したフレームワークを図-1に示す。分析は、最初に設備の建設と運転に使われている資材とエネルギーを、各プロセス設備の積み上げ計算により求めている。投入資材と運用エネルギーを熱量換算し、その値と発電の産出エネルギーとの比で発電プラントのエネルギー収支が得られる。通常のエネルギー収支の投入エネルギー計算には、発電に直接、使われる燃料は含まれないことから、産出エネルギーは投入エネルギーより大きな値となる。

エネルギー収支で求めた投入エネルギーから発電プラントのCO<sub>2</sub>排出原単位が求まる。設備と運用の間接的なCO<sub>2</sub>排出量は、設備の建設や運用に投入したエネルギーを石炭、石油、天然ガス、電力に分類し、

それらに各エネルギー源のCO<sub>2</sub>原単位を掛けることで求まる。すなわち、求めた資材とエネルギー量に産業連関表などで予め算出したエネルギー原単位とCO<sub>2</sub>原単位とを掛け合わせることで、プラント全体の投入エネルギー量と間接的に排出されるCO<sub>2</sub>量が得られる。そして、その値に発電時の燃料から排出するCO<sub>2</sub>量を加えれば、直接間接に排出する全てのCO<sub>2</sub>量が求まることになる。

CO<sub>2</sub>は、それ以外に、セメント製造の化学反応過程での排出分、ガス田の粗天然ガス中に含まれている分、天然ガスの採集や石炭の坑内掘りの際に大気中に洩れるメタンの温暖化影響をCO<sub>2</sub>量に換算した分も検討した。発電プラントの温暖化影響は、集計したライフサイクルの直接間接に発生するCO<sub>2</sub>量を、発電電力量 (送電端) で割り、kWh 当りのCO<sub>2</sub>原単位で

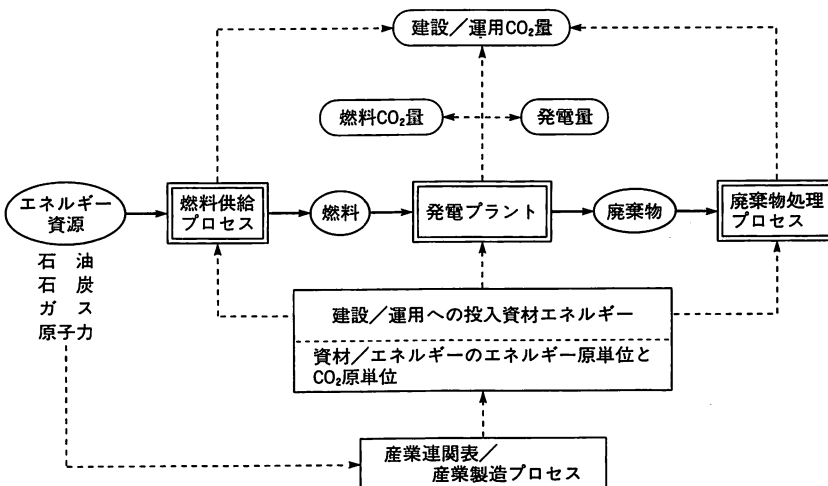


図-1 発電プラントの温暖化影響分析<sup>2)</sup>

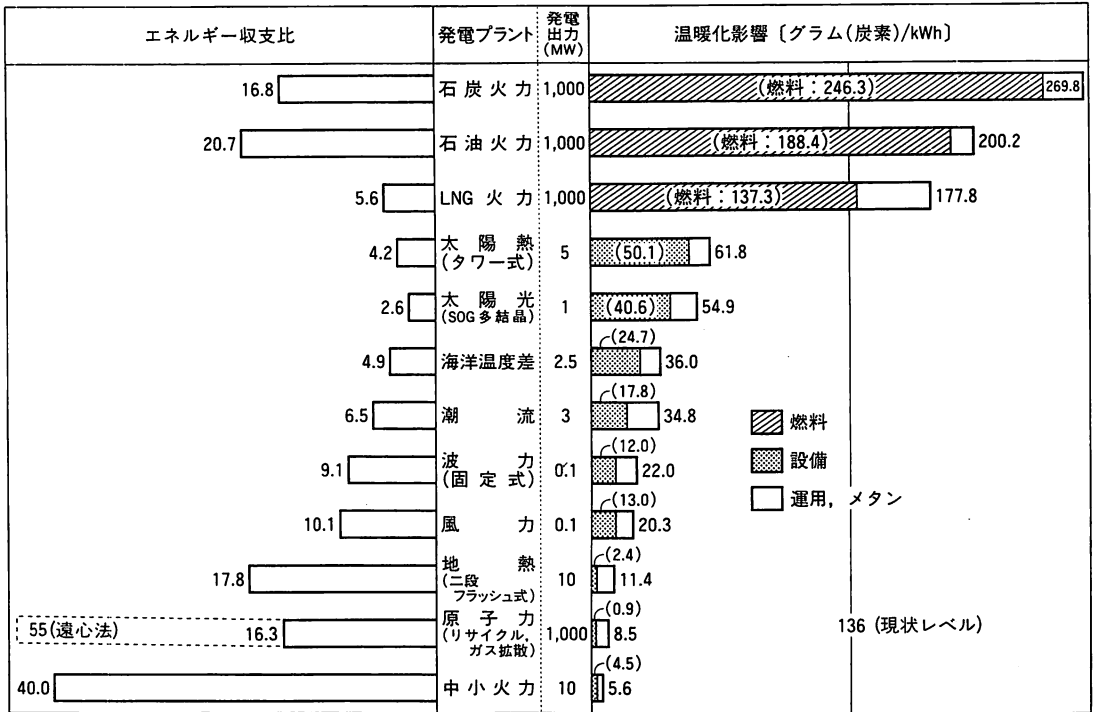


図-2 各種発電プラントのエネルギー収支と温暖化影響

表している。

図-2は、各種発電プラントのエネルギー収支比と温暖化影響の結果である<sup>3,4)</sup>。図の結果は、発電プラントの寿命を30年とし、その期間中に消費するエネルギーを基に計算したものである。

結果からエネルギー収支比は、水力、地熱、原子力、石油、石炭といったエネルギー密度の大きい発電プラントほど優れている。それに対し、水力と地熱を除く希薄なエネルギー源である自然エネルギーや、ガス田で実際にはエネルギー密度の小さいLNG火力は劣っている。原子力発電のエネルギー収支は、ウランの濃縮法に大きく影響を受け、ガス拡散法で16であったのが遠心法になると55にまで向上する。その場合、原子力発電は水力発電を越え最も優れたプラントとなる。自然エネルギーの中で、水力と地熱がエネルギー収支に優れている理由は、エネルギー密度が比較的高いことによる。水力発電は、自然の作用で水を高い位置に貯え、そのエネルギーを利用して発電する。地熱発電は、地下の高温の熱源を汲み出し、それを利用する発電方式である。

発電プラントの温暖化影響で設備の建設と運用から排出するCO<sub>2</sub>量は、エネルギー収支の結果にほぼ反比例している。図から原子力、中小水力、地熱、その

他の自然エネルギー、そして火力発電の順に、CO<sub>2</sub>排出原単位が大きくなっている。特に火力発電の温暖化影響は、原子力や自然エネルギーに比べ極めて大きな値である。これは、発電時に燃料から直接排出されるCO<sub>2</sub>量が、設備や運用、あるいはメタン洩れといった間接的な値に比べ圧倒的に多いためである。

自然エネルギーと原子力のCO<sub>2</sub>原単位は、我が国における現在の電源構成全体から求めた電力の平均値136 g-C/kWhより小さい。すなわち、自然エネルギー発電と原子力発電は、我が国の発電による温暖化影響をトータルシステムから見ても小さくするプラントになる。我が国のCO<sub>2</sub>排出量の30%を占める電力部門において、今後、CO<sub>2</sub>を抑制していくためには原子力発電と自然エネルギーの導入が不可欠である。

自然エネルギーの中でエネルギー密度が高い水力と地熱は、エネルギー収支と同様に、温暖化影響においても優れている。水力発電のCO<sub>2</sub>排出原単位は5.6 g-C/kWhとLNG火力の約1/30である。原子力発電は、自然エネルギーと同様、温暖化影響が小さい。その値はウラン濃縮法で大きく異なるが、LNG火力に比べガス拡散法で1/15、遠心法で1/60である。原子力の発電システムは、燃料サイクルが複雑で、そのプラント建設に多くの資材とエネルギーを必要とし

ている。しかしその投入エネルギーは、耐用期間で均等にし、かつ発電所1基分相当の値にすると、年間投入エネルギー（燃料を除く）の10%程度であって、それほど大きな値ではない。むしろ燃料サイクルの運用エネルギーの方が大きく、特にウラン濃縮に使われる電力は全体の約80%（ガス拡散法）にもなる極めて大きな割合である。燃料サイクルをワンス・スルーとプルトニウムリサイクルの2つのシステムについて分析したが、結果はリサイクルの方がやや有利になっている。

3. CO<sub>2</sub> 対策技術とその効果

CO<sub>2</sub> 排出量が少ない発電プラントは、水力、原子力、地熱、その他の自然エネルギー、そしてLNG、石油、石炭の火力発電の順になる。CO<sub>2</sub> を抑制するには、その順番に発電プラントの開発を優先していけばよいことになる。しかし実際には立地問題や経済性等から必ずしもCO<sub>2</sub> 排出量が小さいプラントだけが建設できるとは限らず、火力プラントについてもCO<sub>2</sub> を削減する技術開発が求められている。

今回の分析結果から分かるように、CO<sub>2</sub> の排出割合はプラントによって異なっており、火力は燃料から、自然エネルギーは設備から、原子力は運用から排出するCO<sub>2</sub> 量が多い。このことは発電プラントのCO<sub>2</sub> を削減するには、排出割合の大きい箇所に重点を置いて技術開発をすればよいことになる。図-3は発電プラントの各種対策技術が、エネルギー収支とCO<sub>2</sub> 削減

にどの程度まで貢献できるか、分析した結果を示したものである。

図の結果を火力プラントと自然エネルギーとに分けて説明すると以下ようになる。

①火力プラント

火力プラントのCO<sub>2</sub> を削減するのは、燃料を節約する技術開発が最も効果的である。その対策として、発電効率の向上とエネルギーの有効利用がある。効率向上は発電量を増やすため、CO<sub>2</sub> 原単位を小さくするだけでなくプラントのエネルギー収支も良くする効果がある。石炭火力の効率向上の技術開発には、超々臨界圧発電（発電端効率：43.0%）と石炭ガス化複合発電（同：45.2%）が実用化プラントとして期待されている。そのCO<sub>2</sub> の削減割合は、超々臨界圧発電で9%、石炭ガス化複合発電で17%になる。

LNG火力の場合は、高効率複合発電の他に、燃料電池などコージェネレーションもエネルギーを有効に使うシステムである。図のLNG複合発電は最新鋭のプラントでガスタービン入口温度は約1,300℃である。燃料電池は発電出力10万kWのリン酸型のコージェネレーションで、熱供給も含めたプラントの総合効率は75%と仮定している。コージェネレーションのCO<sub>2</sub> 原単位は、熱供給に利用した分のエネルギーに相当するガスの消費量が削減できるという前提で計算している。図から発電効率の向上やコージェネレーションによるエネルギーの有効利用は、LNG火力のCO<sub>2</sub> 排出量を大幅に削減できることがわかる。特に

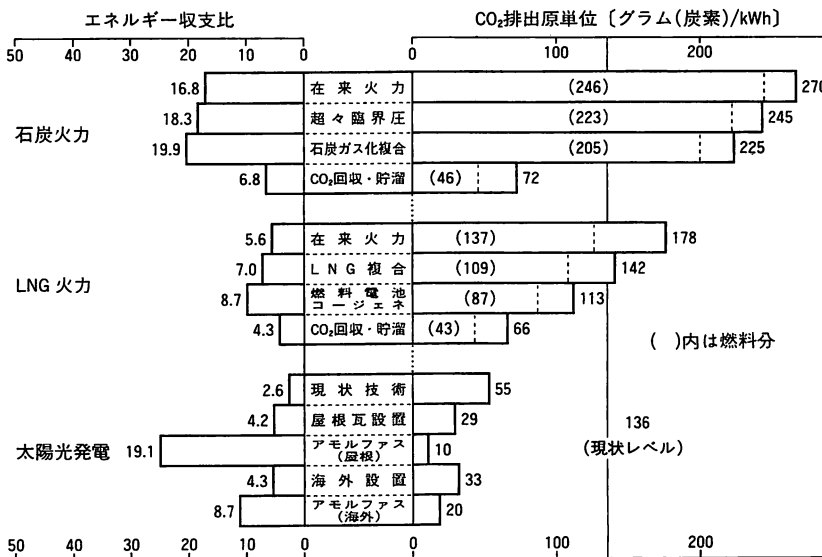


図-3 対策技術によるエネルギー収支の改善とCO<sub>2</sub>削減効果

コージェネレーションは、CO<sub>2</sub>原単位を36%も削減している。

火力プラントにCO<sub>2</sub>回収設備を併設することで排ガス中のCO<sub>2</sub>を回収し、それをタンカーで運んで深海に貯溜する技術開発が行なわれている。CO<sub>2</sub>回収技術には化学吸収法、物理吸着法、膜分離法などがあるが、効率が良くかつ実現性の高い方法として、LNG火力に対してPSA (pressure swing adsorption) 法、石炭火力に対してはO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃焼法が考えられている。また深海へのCO<sub>2</sub>貯溜は、回収したCO<sub>2</sub>をタンカーで日本から3,000km離れた海洋に運び、そこで深さ3,000mの海底にポンプを使って液体CO<sub>2</sub>を投棄することを想定している。

図の結果は、排ガス中のCO<sub>2</sub>を90%回収し貯溜したときのエネルギー収支とCO<sub>2</sub>原単位の計算値を示したものである。しかし回収のためには、多量にエネルギーを消費するため、実際に削減できるCO<sub>2</sub>量は、LNG火力で63%、石炭火力で72%になる。回収/貯溜システムは、火力プラントのCO<sub>2</sub>を削減する効果は大きいですが、問題はエネルギー収支を悪化してしまうことである。それは、結果として経済性を悪くし、かつ化石燃料の資源枯渇を早めることになる。

#### ②自然エネルギー

自然エネルギーは設備のCO<sub>2</sub>比率が高いため、その対策としては設備の簡素化、寿命延伸、効率向上、エネルギー消費の少ない新材料といった技術開発が望まれる。太陽光発電のCO<sub>2</sub>削減策は、セル開発と設置方法とに大きく分けられる。セル開発には、多結晶シリコン (solar grade silicon) の高効率化と薄型化、エネルギー消費が少ないアモルファスセルの開発がある。設置方法には家屋の屋根瓦や高速道路の防音壁などとの兼用で基礎や架台を省いたり、我が国より優れた日照条件の低緯度地域への普及がある。図の結果は、将来、性能の優れたセルが開発され、また家庭の屋根瓦に導入したとき、太陽光発電のエネルギー収支とCO<sub>2</sub>排出原単位がどれだけ改善されるか計算したものである。

図から太陽光発電は、将来、目標とするセル効率を達成できれば、そのエネルギー収支とCO<sub>2</sub>原単位が大幅に向上することが分かる。改善効果は家庭の屋根瓦への設置が大きく、特に家庭用に高性能アモルファスセルが導入できれば、原子力発電にも劣らないエネルギー収支とCO<sub>2</sub>原単位になる。また、太陽光発電を日照条件の良い中近東や米国の砂漠地帯など海外の

低緯度地域に導入すれば、年間設備利用率が日本の2倍の30%にもなることから、さらにエネルギー収支とCO<sub>2</sub>原単位は向上する。

#### 4.CO<sub>2</sub>削減費用の比較

発電プラントの発電コストが分かれば、既に求めたCO<sub>2</sub>排出原単位とからCO<sub>2</sub>の削減コストが計算できる。削減コストは、CO<sub>2</sub>を1トン削減するに要する費用で、現在の我が国の電源構成を基準に、次式により求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{削減コスト} [\text{円}/\text{トン}-\text{CO}_2] \\ &= \text{コスト増分} [\text{円}/\text{kWh}] / \text{CO}_2 \text{削減量} [\text{トン}-\text{CO}_2 / \text{kWh}] \\ &= \text{対象プラントの発電コスト} [\text{円}/\text{kWh}] / \\ &\quad (\text{基準CO}_2 \text{原単位} [\text{トン}/\text{kWh}] \\ &\quad - \text{対象プラントのCO}_2 \text{原単位} [\text{トン}/\text{kWh}]) \end{aligned}$$

コスト増分は、既存設備に比べた新設設備の発電コスト増になる。しかし、それは、将来、電源の設備拡大が必要な場合は、単に新設設備の発電コストと考えることもできる。我が国の電気事業の電源計画を見ると、現在の総設備量17,507万kWで2000年には24,026万kWの計画である。このように将来もかなりの設備増が見込まれるため、ここでは、コスト増を新設設備の発電コストとして計算した。計算した発電コストは、電気事業が導入を検討している商用プラントのコストで、火力、原子力などの在来技術は現状の値を、新技術については商用5号基程度のコスト習熟が進んだ値を用いた。CO<sub>2</sub>の排出原単位は、基準値については現在の電源構成から求めたkWh当りの値である。その値は、発電で発生する化石燃料のCO<sub>2</sub>量に運用エネルギー分を加えて136 g-C/kWhとなる (燃料だけでは119 g-C/kWh)。対象プラントのCO<sub>2</sub>排出原単位は、本来、基準値より小さな値になることが望まれるが、石炭火力などは大きくなるため、その場合、CO<sub>2</sub>削減コストは負の値となる。

発電プラントのCO<sub>2</sub>削減コストは、表2に示す前提条件を基に計算した。火力プラントの燃料費は、1991年の年平均CIF価格を用いた。その値は、石油25,525円/kl (発熱量: 9,800kcal/l)、LNG24,664円/トン (同: 13,000kcal/kg)、石炭8,462円/トン (同: 6,200kcal/kg) である。年経費率は、償却・金利については法定耐用年数の均等化計算で求めた。

図-4は、現在の電力CO<sub>2</sub>原単位に対するCO<sub>2</sub>削減量と発電コストの関係を、各発電プラントについて示

表2 環境コスト計算の前提条件

プラント名	発電出力 [MW]	効率 [送電端] [%]	所内率 [%]	設備利用率 [%]	建設費 [万円/kW]	年経費率 [%]	発電コスト [円/kWh]
石油火力	1,000	36.6	6.1	75	18	16.35	10.89
LNG火力	1,000	37.6	3.5	75	21	16.35	9.76
石炭火力	1,000	36.1	7.4	75	25	16.35	9.97
原子力	1,000	32.4	3.4	75	32	17.75	10.04
中小水力	10	—	0.25	45	50	10.24	13.02
地熱	10	—	7.0	60	30	18.35	11.26
風力	0.1	—	10	35	100	14.61	52.95
海洋温度差	2.5	—	50	80	150	14.61	62.54
太陽熱	10	—	5	30	250	14.61	146.3
太陽光 (電気事業)	1	—	5	15	150	14.61	175.6
太陽光 (住宅屋根)	0.003	—	0	15	100	14.61	111.2

したものである。図の左上にあるプラントほど優れており、小さな費用でCO<sub>2</sub>を大きく削減する。図から、原子力、地熱、水力、他の自然エネルギー、火力発電の順に優れていることになる。

発電コストは法定耐用期間15年の均等化コストで、大型火力発電と原子力発電の値はほぼ同じである。それに対し地熱と水力の発電コストは、10~30%程度だけ大きい、他の自然エネルギーの発電コストは5~18倍にまでなっている。火力プラントは、石油、LNG、石炭すべての場合で基準値より原単位は大きく、CO<sub>2</sub>削減量はマイナスの値である。

火力発電を除く発電プラントについて、CO<sub>2</sub>削減コストを求めた。図-5はその結果で、削減費用が最も少ないプラントは原子力発電で次いで地熱発電、水力発電の順となった。地熱と水力の削減コストは、24,600

円/トン-CO<sub>2</sub>と27,000/トン-CO<sub>2</sub>で、その値は原子力の削減コストの20~30%程度の増加で、ほぼ発電コストの増加分に相当している。それに対し、他の自然エネルギーの削減コストは、原子力発電の6倍から30倍近くにまでなっている。このことは、1トンのCO<sub>2</sub>を削減するには原子力発電に比べて6倍から30倍近いコストの負担が必要であることを意味している。太陽光発電は、家庭などの屋根に設置し架台や基礎が省ければ、削減コストも半分程度になるが、それでもまだ原子力発電の14倍にもなる。もちろん、風力や太陽光など自然エネルギーは、原子力で問題になっている安全性や放射性廃棄物に対する不安はない。しかし、その不安解消に対して負担する費用は巨額になる。

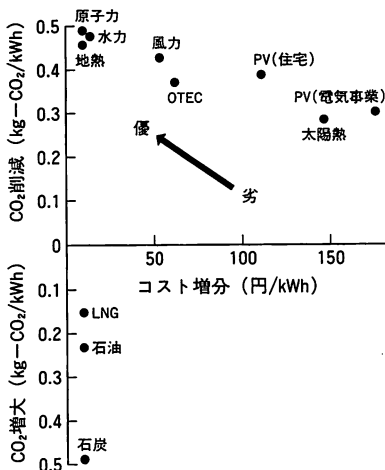


図-4 発電プラントのCO<sub>2</sub>削減量と発電コスト

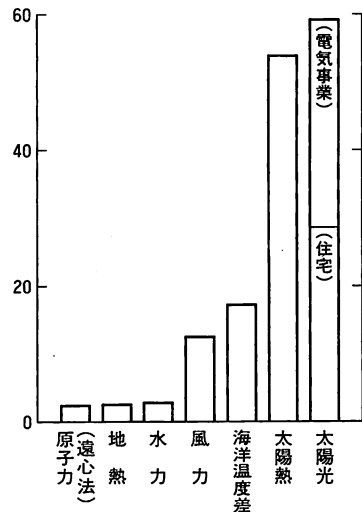


図-5 発電プラントのCO<sub>2</sub>削減コスト

## 5. おわりに

報告は、トータルシステムから見て発電プラントのエネルギー収支と温暖化影響を客観的なデータに基づき定量的に分析したものである。結果から原子力、水力、地熱は、温暖化影響が最も小さく、CO<sub>2</sub>削減のための経済負担も小さいことが明らかになった。それらは、温暖化の抑制技術としての役割だけでなく、供給信頼性の高い安定したベース用電源でもある。しかし、導入において立地問題は、共通した大きな課題である。もし現在あるいは将来のエネルギー政策において、立地問題を解消する技術開発と社会的受容が確保できなければ、社会のエネルギー消費を削減しない限り温暖化の抑制は不可能なことになる。

自然エネルギーの中で、太陽光は住宅などの屋根瓦に電池パネルを設置できればCO<sub>2</sub>の削減効果が大きくなる。太陽光発電は、昼間に発電できるピーク用電源で、電力の負荷率の改善や貴重な石油資源を節約する効果もある。ただ問題は経済性と供給信頼性で、太陽光発電の大量導入には大きな経済負担と系統電源の電圧・周波数変動を伴うといった問題があることを理解しなければならない。太陽光発電が、原子力発電のようにベース用電源として社会に普及する可能性はない。それぞれの特徴を生かして、互に棲み分けて導入することが大切である。

社会の経済成長は、これまで量的拡大志向型であった。それは、基本的にはエネルギー消費を増大し、環

境を汚染かつ破壊して成り立っている。急増する世界のエネルギー消費は、自然の浄化作用による環境維持の限界を越えてしまっている。今後、途上国も含めて今までと同じ経済発展を目指すなら、温暖化問題は深刻になり、地球環境は破壊し、人類の存続も危ぶまれることになる。増大するエネルギー需要に対し、環境保全を供給技術だけで解決するのは不可能である。大量のエネルギー消費で成り立つ今の産業構造を環境調和型に変換しなければならない。そのためには、私たちの生活を省エネルギーを重視したライフスタイルに見直していくことも大切だ。また社会から出る廃棄物を最小限にとどめるため、リサイクル重視の製品設計や素材開発も重要である。そして、エネルギー源も再生可能な自然エネルギーや燃料のリサイクルが可能な原子力を開発していくことが望まれる。

## 引用文献

- 1) 内山洋司, 山本博巳; 発電プラントのエネルギー収支分析, 電力中央研究所研究報告 Y90015(1991)
- 2) 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(1991)
- 3) 内山洋司; トータルシステムから見た各種発電プラントの温暖化影響, エネルギーフォーラム(1992年8月号)
- 4) 内山洋司; CO<sub>2</sub>削減に向けた発電プラントの技術開発, エネルギーフォーラム(1992年9月号)
- 5) 内山洋司; トータルシステムから見た発電プラントのCO<sub>2</sub>/コスト分析, 第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス予稿原稿(1993年1月)

