

発電技術の環境対策コスト分析

Economic study on CO₂ mitigating measures of power generation systems

温暖化対策技術, 発電技術, コスト分析, ライフサイクル分析

内 山 洋 司

1. はじめに

CO₂ 問題を技術的に解決するには、省エネルギー、原子力・自然エネルギーなど非化石燃料への転換、大気中の CO₂ を固定する森林造成や藻類による光合成、それに火力プラントなど排ガス中の CO₂ を選択除去する回収技術などがある。それらは、CO₂ の発生前後で大きく分けられる。前者は、抑制技術でそれには、エネルギー代替、燃料転換、省エネルギーといった CO₂ を排出しない、あるいは排出量が少ないエネルギーへの転換、また排出量を少なくする技術開発がある。後者は、防除技術であって、発生した CO₂ を回収したり固定化するものである。

我が国の CO₂ 排出量は、産業部門で全体の約 70% を占めている。産業部門のうち電力部門の排出割合は最も多く、全体の 30% にもなっている。電力部門における CO₂ 削減は我が国の排出量の抑制に大きな影響を与える。今後、我が国の発電部門からの CO₂ を削減していくには、各種対策技術の温暖化影響を明らかにし、その可能性と寄与量を明らかにしなければならない。

本報告は、CO₂ を抑制する各種発電プラントについてエネルギー収支と CO₂ 排出原単位を計算している。そして、CO₂ 回収・貯留を含めて各種 CO₂ 対策法についてそれぞれの経済性を分析したものである。

2. 発電プラントの温暖化影響

2.1 温暖化影響分析

火力、原子力、自然エネルギーの各種発電技術の環境影響を理解するには、燃料サイクルも含めたトータルシステムのライフサイクルについて分析する必要がある。温暖化影響のライフサイクル分析は、発電に係わる諸過程の建設、運用において消費するエネルギーを詳細に調べ¹⁾、それから発生する CO₂ 量を計算するだけでなく、燃料採掘時の温室効果ガスの 1 つであるメタン洩れについても CO₂ 量に換算して温暖化影響を明らかにする。

図 1 は発電プラントの温暖化影響の分析法を示したものである。ある特定の発電プラントの温暖化影響は、そのプラントに係わる諸過程の技術特性を明らかにし、それぞれについて直接・間接に排出する CO₂ 量を積み上げ法で分析していく必要がある。その分析手順は以下の通りである。

(1) 発電プラントの燃料採掘から輸送、精製、発電、廃棄物処理に至る全てのプロセスの特性を明確にする。

(2) 各プロセスの建設と運用に必要な資材とエネルギー量を調べる。

(3) 産業連関表あるいは製品製造プロセスから資材のエネルギーと CO₂ 原単位を求める。

(4) 発電プラントについてライフサイクルで見た各プロセスの投入エネルギーの総和と発

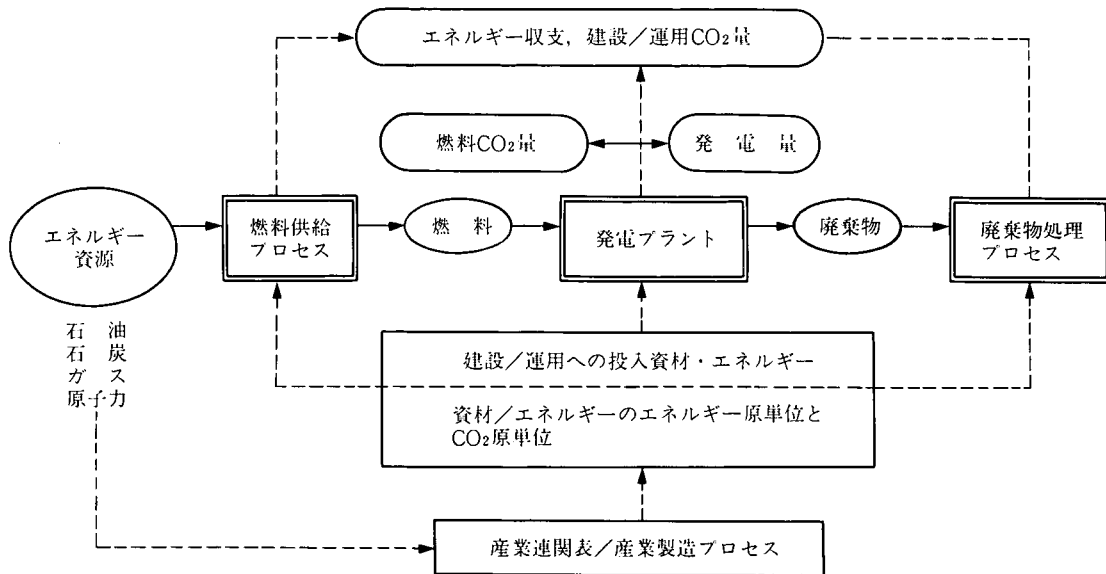


図1 発電プラントの温暖化影響分析法^[2]

発電電力量とから両者を比較するエネルギー収支が求まる。

(5) ライフサイクルで各プロセスから直接、間接に排出する温室効果ガスと発電時の燃料から排出するCO₂量を足し合わせることで、発電プラントの温暖化影響が単位発電量 kWh 当たりのCO₂量の値で求まる。

積み上げ法による分析は、前提として分析の検討範囲を正確に設定しなければならない。検討内容は、できるだけ詳細に調査することが望ましいが、それには限界がある。調査の無駄を省くには、予め調査するプロセスの投入エネルギーについて概略の数値を求め、その大きさに比例して精度を高めて求める必要がある。

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温暖化影響が分析できる。検討した温暖化影響はCO₂排出量で、単に投入したエネルギー(石炭, 石油, 天然ガス, 電力)の消費から発生する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による温暖化影響もCO₂に換算して求めている。

CO₂ 排出原単位

$$= \frac{\text{寿命期間中のCO}_2\text{排出量(設備建設} \\ + \text{設備運転} + \text{発電用燃料} + \text{メタン洩れ)}}{\text{寿命期間中の発電電力量[送電端]}} \dots\dots(1)$$

メタン洩れは採掘地点で大きく異なるが、我が国に輸入しているガス田と炭鉱について調べると、天然ガスで生産ガス量の1%, 坑内掘りで石炭1トンあたり約7.3kgのメタン洩れがあるといわれている。漏洩メタンの温暖化影響はCO₂に比べ大きい。それは、メタンが時間とともに分解していくため積算年数によって異なる。今回の検討では積算年数を100年とし温暖化ポテンシャルをCO₂の21倍として計算した。

図2は、発電プラントの温暖化影響を分析した結果である。図の温暖化影響は、プラントの寿命30年間に発生するCO₂量を、その間の発電電力量で割ったものである。温暖化影響には、燃料採掘時のメタン洩れ、発電時の燃料燃焼、プラントの建設に要する設備エネルギー、それに燃料を採掘して発電所に搬入しかつプラントを運用する過程で消費する運用エネルギーとから求めたCO₂量が含まれている。

温暖化影響は、CO₂排出原単位の大きな値

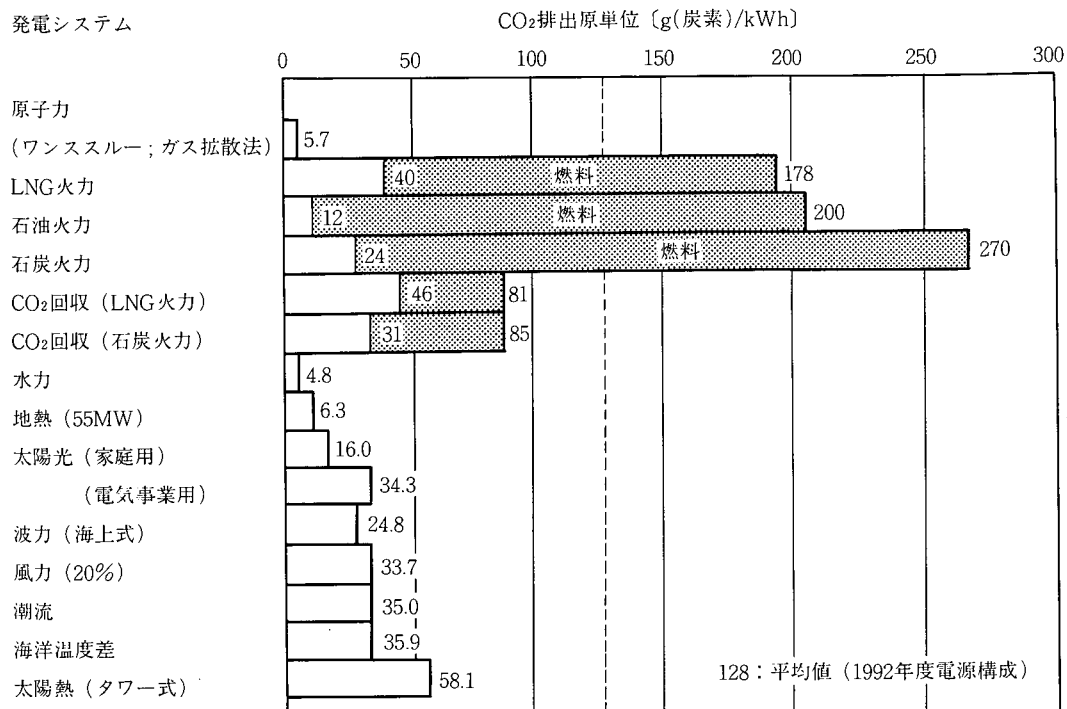


図 2 発電プラントの温暖化影響

ほど大きいとみなされ、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影響が大きくなっていることが分かる。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かなり大きい。これは、発電時の燃料から直接に排出する 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 CO₂ の値に比べ圧倒的に多いためである。火力発電の相互比較では石炭、石油、LNG の順に CO₂ 排出原単位は小さくなる。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、石油火力はやや優位になり、逆に LNG 火力の優位性はかなり小さくなっている。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、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。しかしそれは耐用期間で均等化しかつ発電所 1 基分相当の値として求めると、結果的には大きなエネルギー投入量になっていない。むしろ燃料サイクルの運用エネルギーの方が大きく、特にウラン濃縮時の消費電力は極めて大きい。

2.2 新技術による CO₂ 抑制効果

図 2 から CO₂ 排出量は、水力発電が最も少なく、原子力、地熱、その他の自然エネルギー、そして LNG、石油、石炭の火力技術の順になっていることが分かる。発電技術の CO₂ 抑制は、CO₂ 排出原単位が小さい順に、その導入を検討すればよいことになる。しかし、水力や地熱、原子力発電といった CO₂ 抑制効果が大きい電源を設置しようとしても、実際には立地上の制約が大きく導入できるとは限らない。火力プラントに関しても、CO₂ を削減する技術開発努力が求められる。

火力プラントの CO₂ 排出量を削減するには、

表 1 火力新技術の概要

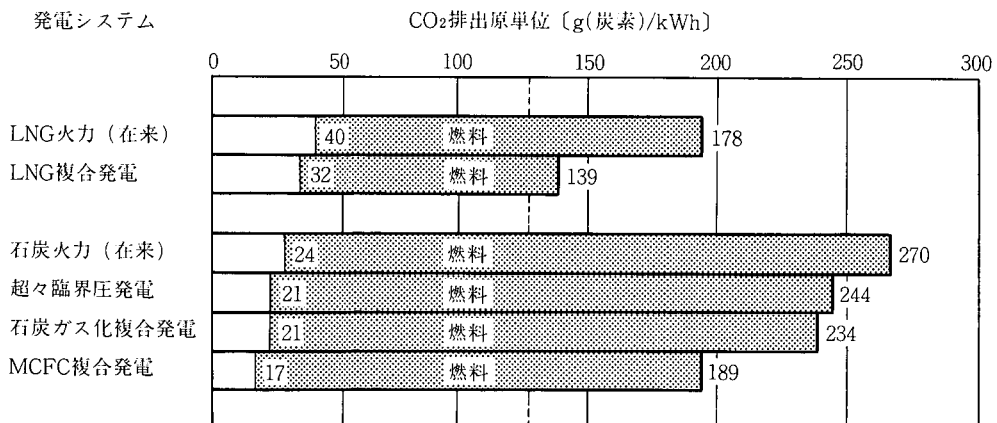
[LNG]	
LNG複合発電：(ガスタービン) 1,350°C	(発電端効率) 50%
[石炭]	
超々臨界圧発電：(蒸気条件) 351気圧, 649/595°C	(発電端効率) 43%
石炭ガス化複合発電：(ガス化炉) 1,300°C, ドライ供給, 空気吹き, 乾式ガス精製	(発電端効率) 45%
石炭ガス化 MCFC 複合発電：(ガス化炉) 上に同じ	(発電端効率) 55%

燃料を節約することが大切であって、それには高効率発電やコージェネレーションのような技術開発がある。このうち、発電効率を向上する技術開発には、LNGを燃料とするLNG複合発電、石炭を燃料とする超々臨界圧発電、石炭ガス化複合発電、それに石炭ガス化溶融炭酸塩型燃料電池などがある。それぞれの新技術に様々な方式が開発中であるが、我が国では表1に示す比較的効率の高い方式について、その導入に向けた開発を行っている。

図3は表1の新技術についてCO₂排出原単位が、在来技術に比べどの程度まで低減するか分析した結果を示したものである。通常、効率を向上する新技術は、燃料費を削減するが設備費を増大する。しかし、それをエネルギー収支からみると、建設時に設備へ投入するエネルギーの増加割合は極めて少なく、効率向上による燃料の削減効果が圧倒的に大きくなる。その結

果、LNG複合発電の例からも分るように、CO₂原単位は在来火力であるLNG火力に比べ22%も低減する。その値139 g-C/kWhは、現時点(1992年)の電源構成の平均値128 g-C/kWhにほぼ近い値になっている。石炭火力の場合、新技術による排出原単位の低減効果は、超々臨界圧発電、石炭ガス化複合発電、MCFC複合発電で、それぞれ10%、13%、30%である。発電効率向上による燃料の節約効果は大きく、原単位の低減効果は、発電効率の大きさにほぼ比例して大きくなっていることが分る。

原子力発電は、その燃料サイクルシステムを含めてもCO₂排出量が極めて少ない発電システムである。現在、我が国では使用済みのウラン燃料を再処理してプルトニウムを取り出し、それを燃料として再利用するプルサーマルの燃料サイクルシステムについて開発が進んでいる。またウランの濃縮にしても、これまでの海



128：平均値(1992年度電源構成)

図 3 火力新技術のCO₂排出量

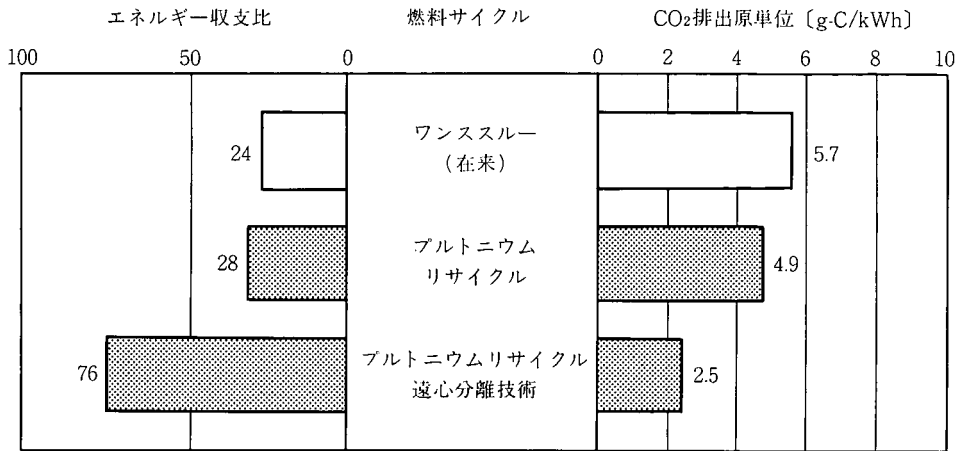


図 4 軽水炉の燃料サイクルによるエネルギー収支と CO₂ 排出量

外のガス拡散法などによる濃縮ウランの購入から、我が国の独自技術である遠心分離法を用いた濃縮プロセスの建設が計画されている。こういった技術が、原子力の発電システムのエネルギー収支や CO₂ 排出量にどういった影響を与えるかを調べることは興味あることである。

図 4 は、その分析結果を示したものである。現在のワンスルーの燃料サイクルに対し、プルトニウムのリサイクルシステムと、さらに遠心分離法によるウラン濃縮を取入れたときのエネルギー収支と CO₂ 排出量の値が示されている。図の結果には、やはり、火力発電と同様に燃料を節約する技術開発の有用性が現われている。プルトニウム燃料のリサイクルは、再処理など燃料サイクルシステムが複雑になるが、それらの設備建設に投入するエネルギー増加量は、リサイクルによって燃料を節約しアップストリーム工程の投入エネルギーが削減された量に比べてみると小さくなる。

原子力の発電システムのうち最もエネルギーが投入されている工程はウラン濃縮の運転工程である。特にガス拡散法はワンスルーシステム全体の 81% ものエネルギーがウラン濃縮の運転に消費されている。それに対し、遠心分離技術の運転エネルギーはガス拡散法の 10 分の 1 程度と看做されており、その導入は原子力発電システムのエネルギー収支を改善するだけで

なく CO₂ 排出量も小さくする効果がある。図 4 には遠心分離法によるウラン濃縮の効果を示しており、その効果はエネルギー収支を 76 と 3 倍にまで向上し、CO₂ 排出原単位を 2.5 g-C/kWh にまで低減することが分る。遠心法の導入によって、原子力発電は、これまでの発電システムの中で最も優れていた水力発電のエネルギー収支 50 と CO₂ 原単位 4.8 g-C/kWh を越え、エネルギー収支と CO₂ 原単位において最も優れた発電システムになることが分る。

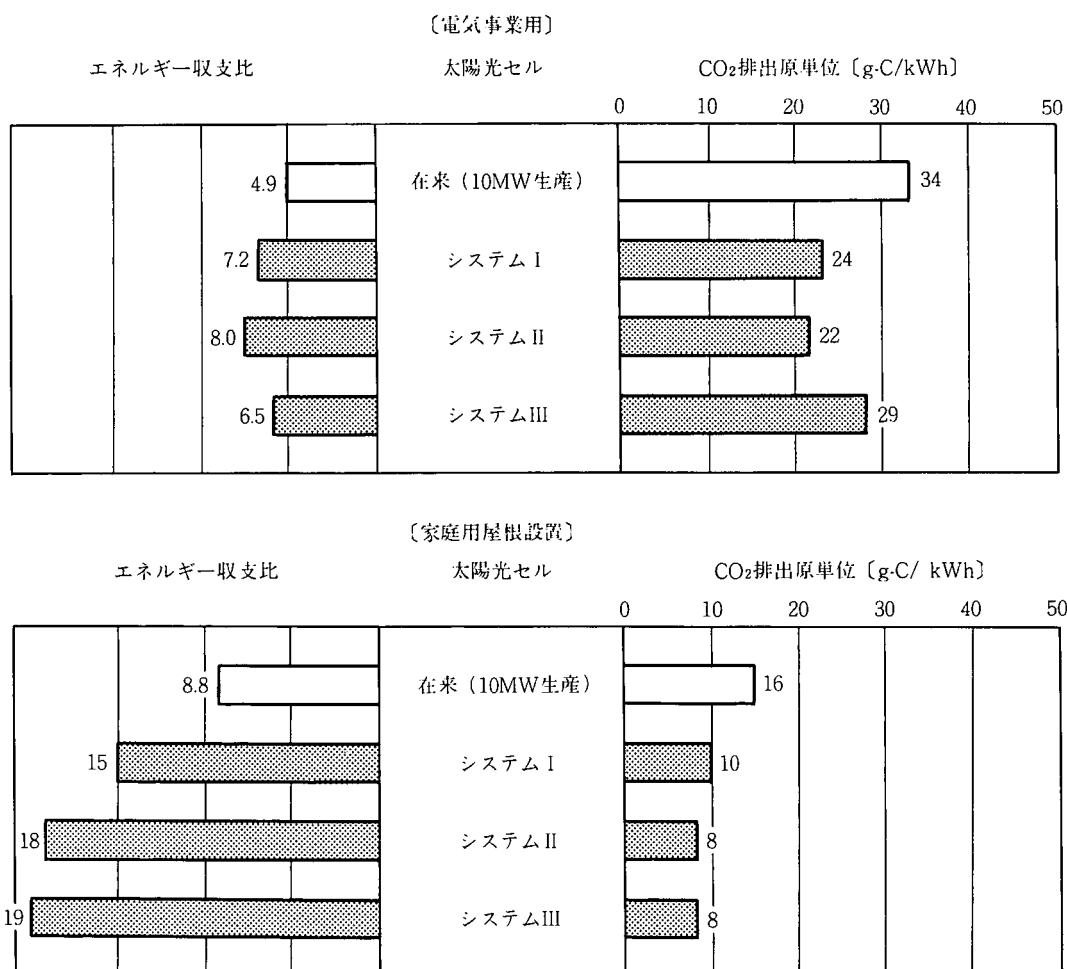
太陽光発電は、CO₂ 排出量を抑制する発電システムである。将来の技術進歩と設置方法の工夫は、経済性の向上だけでなく CO₂ の抑制効果を高めることができる。ここでは、これまでに検討した太陽光セルの生産規模とセル効率を目標とする数値に変更したとき、エネルギー収支と CO₂ 排出量がどのように変わるかを分析した。図 2 の CO₂ 排出原単位で得られた太陽光発電システムの値は、太陽光セルの年生産規模を 10 MW としセル効率を 17% にして計算したものである。ここでは、政府の目標とする多結晶シリコンのセル効率 20%、シリコン層厚 150 μ、およびアモルファスシリコンのセル効率 12.6% が達成でき、さらに年間生産規模が 1 GW まで増えてセル生産の合理化が図れるようになったという条件のもとで計算した (表 2)。

表 2 太陽光発電の技術進歩

	年生産規模	セル効率	シリコン層厚
システム I	1GW 多結晶シリコン	20%	300 μ
システム II	1GW 多結晶シリコン	20%	150 μ
システム III	1GW アモルファスシリコン	12.6%	

図 5 は表 2 に示す前提条件をもとにエネルギー収支と CO₂ 排出原単位を太陽光新技術について計算した結果である。計算は電気事業への 1,000KW 設備と、家庭の屋根に設置する 3KW 設備の両方について行っている。後者は、屋根設置であることから、設備の基礎や架台が節約できる特徴を持っている。電気事業用の太陽光発電の場合、多結晶シリコンのセル効率の向上は、エネルギー収支を改善し、CO₂ 排出量を 30% 近くも低減する効果があることが分かる。アモルファスシリコンの場合は、効率が向上し

ても多結晶シリコンに比した CO₂ 低減量はそれほど大きくない。これは、セル効率の違いによるもので、効率の低いアモルファスセルはパネル面積が大きくなり、架台と基礎に使う鉄やコンクリート量が増え、結果として CO₂ 削減が僅かしか図れなくなってしまう。しかし、もしアモルファスセルを架台や基礎を必要としない家庭の屋根に設置したとすれば、アモルファスセルの製造エネルギーの小さい効果が現れ、図 5 の下図に示すようにエネルギー収支と CO₂ 排出量は大幅に改善する。

図 5 太陽光セル技術の進歩によるエネルギー収支比と CO₂ 排出量

3. 発電システムの環境対策コスト

発電プラントの CO₂ 排出原単位は、火力プラントを除くと、現在の電源構成から得られる平均値より小さな値である。すなわち、原子力と自然エネルギーによる発電プラントは、我が国の電源計画に導入すれば CO₂ を削減するプラントになる。

ここでは、CO₂ を削減する発電プラントの導入効果を経済性の面から比較するため、1トンの CO₂ を削減するのに要する増分費用を削減コストとして求めた。それは、現在の我が国の電源構成から得られる電力の発電コストと平均 CO₂ 原単位とから求まる。すなわち、現在の電力の平均 CO₂ 排出原単位より小さい排出原単位を持つ発電プラントを新規に建設したとき、その CO₂ 削減効果をキロワット時で計算した値である。その値は、次式に示すように新設プラントの発電コストから既存電源の平均発電コストを引いた値を、電源構成から求まる平均 CO₂ 原単位と新設プラントの CO₂ 原単位との差で割ったものである。

$$\text{温暖化対策コスト} = \frac{\text{費用増分}}{\text{CO}_2 \text{ 削減量}} \quad \dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} \text{費用増分} &= \text{対策技術の発電コスト} \\ &\quad - \text{平均発電コスト} (*) \\ &\quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

* : 8.86 円 [1992 年度平均発電コスト]

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 削減量} &= \text{平均 CO}_2 \text{ 原単位} (\#) \\ &\quad - \text{対象技術の CO}_2 \text{ 原単位} \\ &\quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

: 468 g-CO₂/kWh [1992 年度平均原単位]

検討対象となる新設プラントの発電コストは、電気事業が導入を検討している商用化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。既存電源の平均発電コストは、1990 年度の経常発電費用 6.4 兆円を発電量 7,215 億 kWh で割った 8.87 円/kWh である。CO₂ の排出原単位の基準値は、現在の電源構成から求めた kWh 当りの値である。その値は、化石燃料から発生する CO₂ 量に運用エネルギー分を加えて 1990 年の電源構成から求めると 468 g-CO₂/kWh となる (燃料だけでは 110.6 g-CO₂/kWh [405.5 g-CO₂/kWh])。

検討した発電プラントは、電気事業用のプラントで、表 3 には対象プラントの設備容量と発電コストを示す。

図 6 は、原子力と自然エネルギーそれに CO₂ 分離回収について、それぞれの CO₂ 削減コストを求めたものである。原子力発電の環境コストは、検討プラント中で最も小さく 2,700 円/トン-CO₂ である。エネルギー密度が比較的大きい地熱と水力もコストは小さいが、原子力の値に比べると、それぞれ 1.3 倍と 3.6 倍にな

表 3 検討した発電プラントの建設費と発電コスト

発電技術	建設費 [万円/KW]	発電コスト [円/kWh]
原子力	32	10.0
地熱	28	10.5
水力	50	13.0
CO ₂ 回収 [LNG]	28	14.6
CO ₂ 回収 [石炭]	28	17.5
海洋温度差	150	63
風力	100 (50)	88 (44)
太陽熱	250	146
太陽光 [家庭用]	200 (80)	222 (89)
太陽光 [電気事業]	250 (130)	292 (152)

* CO₂ 回収は純酸素燃焼法, () 内は将来のコスト低減

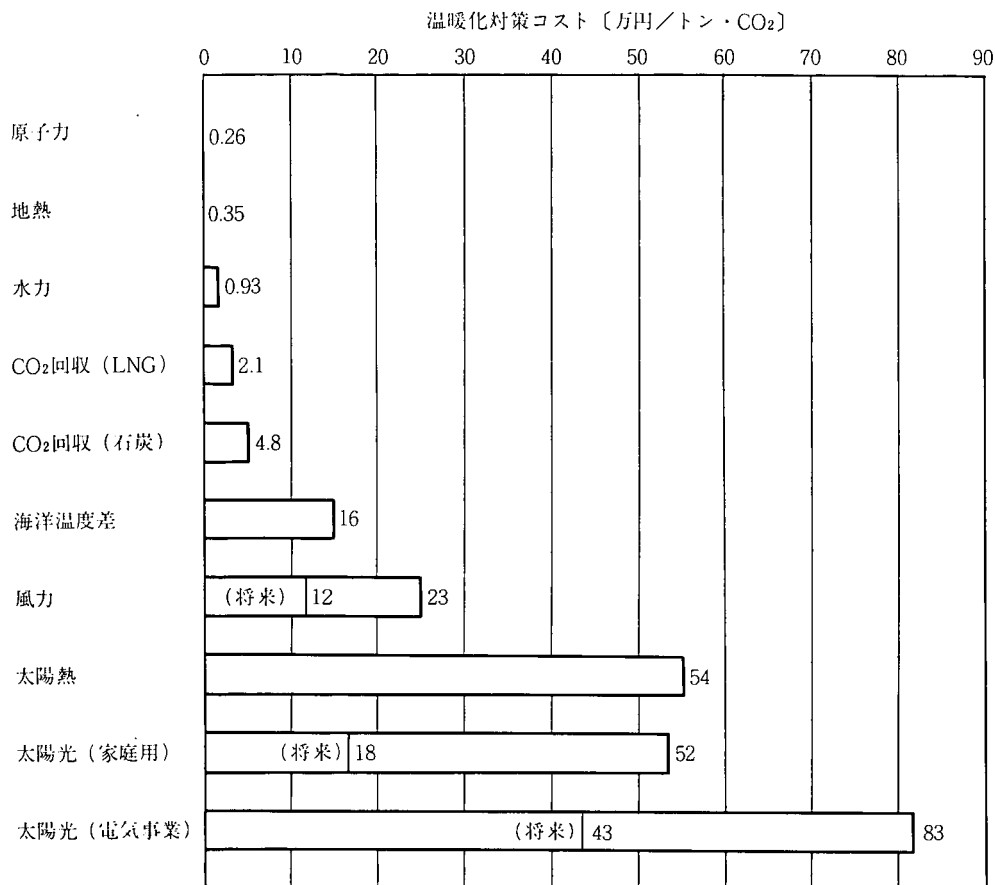


図 6 発電プラントの CO₂ 対策コスト

る。CO₂ の回収・貯溜は、回収に多量のエネルギーを消費し、かつ設備費と運転費を追加しなければならない。それは、環境コストを大きくし、原子力にくらべ LNG 火力の併設で 8.1 倍、CO₂ 処理量の多い石炭火力への併設では 18 倍になる。それに対し、地熱と水力を除く自然エネルギーの環境コストは、原子力発電の 61～320 倍にもなっている。もちろん、将来、自然エネルギーの技術が進歩し設置方法の工夫で建設費が低減すれば、その格差は小さくなる。例えば太陽光発電の場合、家庭の屋根などに設置して基礎工事や架台を省略し、かつ設備費が 80 万円/KW まで低減すれば、その対策コストは原子力発電の 20 倍にまで低減する。さらに技術が進歩して、セル効率が 20% (現状では 17%) になり、できるようになれば、自然エネルギーによる CO₂ 削減には膨大なコスト

負担を伴うことを理解する必要がある。

図 6 の結果を他の経済的な手段による費用と比べることは興味ある。比較した経済的な手段は、課徴金と植林、それに燃料転換による CO₂ 抑制である。課徴金を用いて我が国の CO₂ 排出量を 2005 年までに 1990 年排出レベルにまで安定化するには、化石燃料に掛ける課徴金は年平均を徐々に高め、2005 年で CO₂ 1 トンあたり 14,000 円 (1985 年価格) になるという分析結果がある¹³⁾。また 1 トンの炭素を植林で固定するのに掛る費用は、アメリカや東南アジアなどでは 150～550 円程度、日本では 5,500～8,000 円といわれている。これから、技術による CO₂ 抑制は、原子力、地熱、水力の場合で課徴金より安く、日本における植林と比べると原子力と地熱は安価であるが水力は高くなってしまう。

次に燃料転換の CO₂ 抑制費用を計算することにする。火力発電所の燃料転換は、燃料が持つ CO₂ 排出原単位の小さいものへの転換が基本で、それには石炭火力→LNG 火力、石炭火力→石油火力、石油火力→LNG 火力が考えられる。発電用燃料の平均価格（1992 年）は、石炭が 3.25 円/kWh、石油が 6.12 円/kWh、LNG が 4.34 円/kWh である。また図 2 で求めた各火力発電システムの CO₂ 排出原単位は、石炭火力が 268.8 g-C/kWh、石油火力が 199.5 g-C/kWh、LNG 火力が 177.1 g-C/kWh である。CO₂ 排出原単位は、既存設備の燃料転換が設備の改良なしに行えるという前提で求めており、設備に投入した資材・エネルギーからの間接的な CO₂ 排出量は値に考慮していない。発電所の燃料転換による CO₂ 抑制費用は、石炭火力→LNG 火力：3,200 円/トン-CO₂、石炭火力→石油火力：11,300 円/トン-CO₂、石油火力→LNG 火力：21,700 円/トン-CO₂ となる。実際には燃料転換は、設備の改良なしには行えないため、抑制コストは求めた値より大きくなると考えられる。燃料転換の CO₂ 抑制コストは、石炭火力の LNG 燃料への転換が最も安価で、それは地熱発電の抑制コスト程度であ

ることが分かる。最も高いのが石油火力で石油から LNG への燃料転換で、その値は LNG 火力に CO₂ 回収装置を併設した場合の値とほぼ同じである。

4. おわりに

今回の研究は、トータルシステムから見た発電プラントのエネルギー収支、温暖化影響、および環境コストを分析したもので、以下に示すことが明らかになった。

- ①電力を社会に大量にかつ安定に供給するには、火力発電と原子力発電の導入は不可欠である。
- ②火力技術の効率化は、火力発電所からの CO₂ 削減と燃料節約に大切な技術開発である。
- ③原子力、水力、地熱は総合的に見て温暖化への影響が最も小さいプラントで、僅かな環境コストで CO₂ を大量に削減する効果がある。早期の温暖化抑制に寄与するには、そういったプラントの役割は大きく、今後は我が国の電源構成にその比率を高めていくことが望まれる。
- ④CO₂ 回収と海洋投機は、火力プラントの CO₂ 削減に大きく貢献できる。しかし、原子

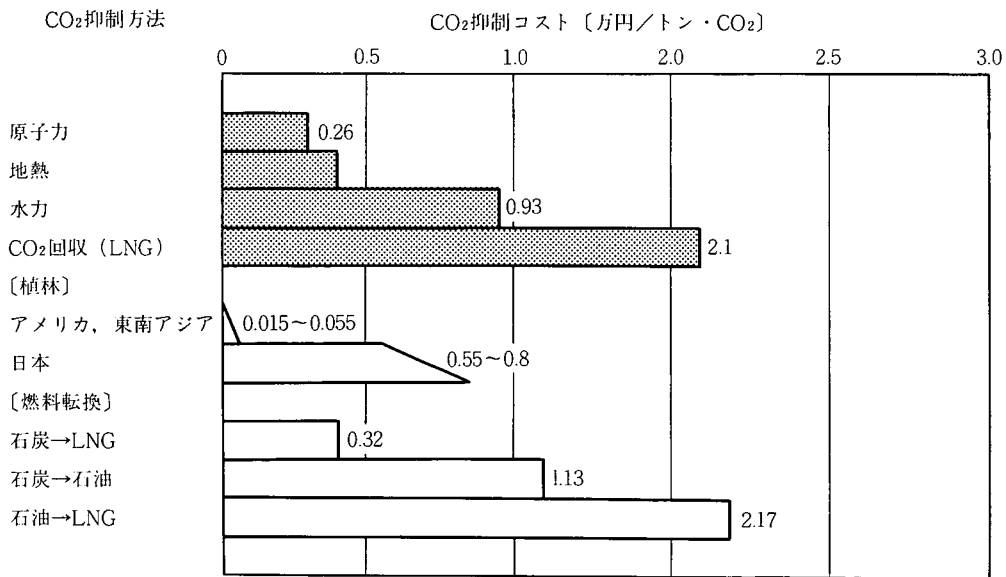


図 7 CO₂ 抑制コストの比較

力発電に比べ 8～18 倍の環境コスト、化石資源枯渇の加速、海洋への環境影響問題といった多くの課題がある。CO₂ 回収・貯溜は、緊急避難的に CO₂ を抑制するには有効な手段であるが、今後は回収エネルギーの削減と回収した CO₂ を再利用する新しい技術開発が望まれる。

⑤水力と地熱を除く自然エネルギーは、CO₂ 抑制効果は大きいですが、その大量導入は膨大なコスト負担を伴う。今後は、セル効率の向上や家庭の屋根などに設置して架台や基礎工事を節約することで、コスト低減に向けた一層の開発努力が望まれる。

エネルギー技術の選択は、今回検討した温暖化以外に、他の環境問題、それに資源、立地、安全性、経済性など総合的な視点から考えていかなければならない。本研究は発電プラント評

価の一側面を分析したに過ぎないが、この結果が環境性を評価する際の基礎になり、将来のエネルギー技術の在り方を考える上で役にたてば幸いである。

[引用文献]

- [1] 内山洋司, 山本博巳 (1991) 「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 Y 90015
- [2] 内山洋司 (1992) 「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
- [3] 永田豊, 山地憲治, 桜井紀久 (1991) 「課徴金による CO₂ 抑制効果と経済的影響の分析」電力中央研究所研究報告 Y 91002

(うちやま ようじ
技術評価グループ)