

## ■ 展望・解説 ■

## 二酸化炭素排出削減のためのエネルギー・技術選択

—OECD/IEA/ETSAP付属書Ⅳ研究の成果から—

Energy and Technology Options for Reducing CO<sub>2</sub> Emissions

—The Results of the OECD/IEA/ETSAP Annex IV Study—



安川 茂\*・佐藤 治\*\*・田所 啓弘\*\*\*・本地 章夫\*\*\*・梶山 武義\*\*\*\*

Shigeru Yasukawa Osamu Sato Yoshihiro Tadokoro Akio Honji Takeyoshi Kajiyama

## 1. 二酸化炭素問題への挑戦

戦後の世界経済は燃料の流体化の波に乗りながら大きな発展を遂げた。しかし、それとは裏腹に酸性雨や砂漠化、温暖化等の地球規模の環境問題を露呈した。ちなみに世界のエネルギー消費量(1992年)をみると、一次エネルギー換算で79億3400万トン(石油換算)、その内の約90%を石炭や石油、天然ガス等の化石燃料に依存している。環境排出量は二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)で64.2億トン(炭素換算)、硫酸酸化物、窒素酸化物でそれぞれ0.67億トン(硫黄換算)、0.25億トン(窒素換算)であった。

温暖化はなかでも最も厄介な環境問題である。先のブラジル・リオデジャネイロでの国連環境会議で諸国の見解にみられたように背後には国家間の利害が絡んでいる。それは現下の世界のエネルギーシステムが化石燃料利用に深く根ざし、CO<sub>2</sub>の環境排出が長期的に避けられず、大量に排出されたCO<sub>2</sub>は大気を広く覆い、滞留時間も長く、その影響が多様で不可逆的であることに基いている。

経済協力開発機構(OECD)の国際エネルギー機関(IEA)では、エネルギー環境問題は最も基本的な課題であるとの認識の下に、機関の設立後の間もない頃からシステム解析の機能を導入して「エネルギー技術システム解析プログラム(Energy Technology Systems Analysis Programme, 略称ETSAP)」を実施してきた。ETSAPは付属書ⅠからⅣを経て現在付属書Ⅴの研究を実施中である(参考1参照)。付属書Ⅳ(1990-1993年)での研究課題は「二酸化炭素排出削減のためのエネルギー選択」であり、一昨年の暮れから昨年にかけて総合報告書及び国別報告書を第1巻、第2巻としてまとめ、公開された<sup>1,2)</sup>。この機会に報告書の概要を以下に紹介する。

なお、ETSAP研究へはIEA域内の12カ国と欧州共同体委員会(CEC)が参加し、執行委員会、運営事務局を維持しながら参加国内で分析チームを編成して課題分析に当たってきた。わが国の場合、付属書ⅠからⅢまでは通産省工業技術院、科学技術庁が合同で運営に当たり、研究実務は電子技術総合研究所、新エネルギー・産業技術総合開発機構、及び日本原子力研究所が分担した。しかし、付属書Ⅳの段階からは運営には科学技術庁が、研究実務は日本原子力研究所が当たった。また、本研究は政策課題を含む学際的な研究であることから、研究指導のために科学技術庁内に「エネルギー環境システム解析研究会(主査 茅 陽一東大教授)」が設けられ、学術上の知見、分析の照査、政策

\* 日本原子力研究所 高温工学部

エネルギー評価システム研究室室長

\*\* " " " 主任研究員

\*\*\* " " " 研究員

\*\*\*\* " " " 課長代理

面からの助言, 等の研究支援を受けた(参考1参照)。

## 2. 増え続ける炭酸ガス—超長期の展望—

対策を何ら講じない場合, CO<sub>2</sub>の排出は今後どの程度増加するだろうか? 排出削減の検討に先立ってまずこの問いに答える必要がある。最初に, 将来の人口, 経済成長率などをどのように想定したかを説明する。人口については, 各国・地域とも今後の増加はきわめて小さく, ETSAP諸国全体として2020年までの年平均伸び率は0.4%と想定している。絶対数でみると, 1990年の4億3500万人から2020年4億9000万人へと12.5%の増加である。

経済成長率は, 大部分の国で徐々に低下していくと想定している(表1)。ETSAP諸国全体の2020年までの年平均伸び率は2.35%である。比較的高率なのが日本とオンタリオ, 逆に低率なのがノルウェーとスイスである。なお, 日本を含む6カ国は高成長と低成長の二つのシナリオを検討している。このほか, 化石燃料価格は1990年価格表示で上昇し, 特に石油価格は石炭価格よりも急速に上昇する。また, 天然ガス価格は石油価格に連動すると想定している。

これらの前提条件の下で, MARKALモデル(参考2参照)を用いて最も経済的な燃料及び技術選択を行い, 将来のエネルギー需給量とその構成を求めた。以下, このケースを基準ケースと呼ぶ。まず, 一次エネルギー供給量をみると, 絶対量は1990年の117EJ(E=10<sup>18</sup>)から2020年の165EJへと41%増加する。一方, GDP当たりの供給量は, 産業構造の変化, エネルギー変換・利用技術の効率向上等を反映し, 全体として2020年には1990年水準より30%低下している。これは年平均1.2%の省エネルギー率に相当する。

一次エネルギーの構成においては, 化石燃料シェアと化石燃料ミックス(石炭, 石油, 天然ガスの構成比率)が重要な指標となる。化石燃料シェアは, 上昇する国と低下する国とがあり, それらを平均すると2020年までほぼ一定である。一方, 化石燃料ミックスは, 石油から石炭にシフトするが, 同時に天然ガスも若干増加する。その結果, 化石燃料平均のCO<sub>2</sub>排出係数は微増に留まっている。以上からETSAP諸国全体としては, 一次エネルギー当たりのCO<sub>2</sub>排出量は2020年までほぼ一定であり, 結局一次エネルギー量に連動して排出量が増加する結果となった。

一人当たりCO<sub>2</sub>排出量の推移を表2に示した。2020年の排出量は1990年の25%増となる。国・地域別では

表1 国内総生産の1990年値と将来成長率

国・地域	1990年 10億\$	10年毎の年平均成長率(%)			
		90-00	00-10	10-20	20-30
米 国 (低成長)	5510.0	2.33 (1.57)	2.23 (1.47)	1.97 (1.20)	1.77 (1.00)
ケベック州 (低成長)	134.7	2.72 (2.17)	2.22 (1.37)	2.06 (1.43)	- (-)
オンタリオ州 (低成長)	241.0	3.27 (2.52)	2.71 (1.93)	2.54 (1.81)	- (-)
日 本 (低成長)	2943.9	3.50 (2.84)	2.75 (1.65)	2.08 (1.11)	1.72 (1.00)
ベルギー	194.7	2.35	2.40	1.50	1.50
オランダ (低成長)	251.9	1.94 (1.94)	2.19 (1.58)	2.00 (1.35)	1.74 (1.24)
ノルウェー	105.7	2.00	1.70	1.70	1.70
スウェーデン (低成長)	226.7	2.30 (1.00)	2.30 (1.00)	2.30 (1.00)	2.30 (1.00)
スイス	195.2	1.55	1.25	1.25	-
合計/平均	9804.5	2.69	2.39	2.01	-

注: 1990年値と成長率はともに1990年価格に基づく。

表2 CO<sub>2</sub>の一人当たり排出量(基準ケース)

国・地域	1990年 t/CO <sub>2</sub>	指数(1990年=100)			
		2000年	2010年	2020年	2030年
米 国 (低成長)	19.5	101 (98)	107 (92)	120 (98)	130 (100)
オンタリオ州 (低成長)	14.3	115 (109)	157 (132)	190 (157)	- (-)
オランダ (低成長)	10.8	93 (93)	102 (90)	110 (88)	115 (90)
ベルギー	10.5	108	105	107	108
ケベック州 (低成長)	9.7	109 (101)	126 (110)	137 (114)	- (-)
日 本 (低成長)	9.1	106 (103)	111 (102)	123 (110)	135 (121)
ノルウェー	8.3	109	112	116	120
スイス	6.4	97	101	102	-
スウェーデン (低成長)	6.3	110 (94)	116 (78)	148 (103)	169 (115)
平 均	15.2	103	110	125	-

オンタリオが極端に増加するほか, スウェーデン, ケベックの増加が大きい。逆にスイス, ベルギー, オランダの増加は小さい。また排出の絶対量では, 1990年にはCO<sub>2</sub>換算量で66億トン(同年の世界全体の約3分の1)であるが, 2020年には41%増加し, 93億トンもの規模となる。では, このCO<sub>2</sub>をどのような方法で, どの程度まで削減できるのだろうか?

## 3. 排出削減への道筋—手段と戦略—

### 3.1 如何なる手段が有効か

CO<sub>2</sub>の排出量は次式を用いて表現できる。

$$\text{CO}_2\text{排出} = \text{人口} \times \frac{\text{GDP}}{\text{人口}} \times \frac{\text{TPER}}{\text{GDP}} \times \frac{\text{TFOS}}{\text{TPER}} \times \frac{\text{CO}_2}{\text{TFOS}}$$

ただし, TPER=一次エネルギー量

TFOS=化石エネルギー量

これは「茅の式」と呼ばれ、CO<sub>2</sub>排出量を①人口、②一人当たりGDP、③GDP当たり一次エネルギー量、④化石燃料シェア、⑤化石燃料の平均CO<sub>2</sub>排出係数の積の形で表現している。このうち③、④、⑤はそれぞれ省エネルギー（産業構造変化等を含む）、原子力及び自然エネルギー利用、化石燃料ミックス（及びCO<sub>2</sub>の回収・隔離・再利用）の寄与を表している。最大削減ケースの結果を、この式に沿って以下に吟味する。

まず省エネルギーによる寄与である。既述のとおり、GDP当たりの一次エネルギー量は基準ケースで既に年率1.2%で大幅に低下する。CO<sub>2</sub>削減ケースでは、更に低下する国と逆に上昇する国があるが、更に低下する場合もその程度は小さい。つまり省エネルギー手段の多くは基準ケースで既に実施されており、CO<sub>2</sub>の排出を制約した場合に追加的に実施し得る省エネルギー手段はあまり残されていない。

次にエネルギー利用の構造的変化による削減の可能性である。図-1には横軸に化石燃料のCO<sub>2</sub>平均排出量、縦軸に化石燃料シェアをとり、1990年値、基準ケースの2020年値（矢印の屈折点）、最大削減ケースの2020年値（矢印の先端）を国・地域ごとに示した。両軸とも対数表示であり、したがって図中の対角線は両軸の積、すなわち一次エネルギー当たりのCO<sub>2</sub>排出量を表している。各国とも一次エネルギー当たりの排出量を削減しているが、削減の手段は国ごとに大きく異なっている。

オランダとベルギーは天然ガス利用の増加（及びCO<sub>2</sub>の回収・隔離の導入）によって化石燃料のCO<sub>2</sub>平均排出係数を低下させている（矢印が左向き）。これに対し、ノルウェーとケベックは、水力利用を拡大して化石燃料シェアを低下させ（矢印が下向き）、CO<sub>2</sub>を削減している。また、スウェーデン、スイス、及びオンタリオは化石燃料シェアと化石燃料構成の双方に依存しているが、原子力発電量の増大等により前者への依存がやや強い。

日本と米国は二つの削減手段を偏りなく利用して、CO<sub>2</sub>を削減している。日本では原子力、自然エネルギー利用が増大するほか、化石燃料の中ではLNGのシェアが大きくなる。米国では、基準ケースで漸減傾向にあった原子力利用が増加に転じるとともに、自然エネルギーが大幅に拡大する。また石炭は石油と天然ガスによってほぼ完全に代替される。

一人当たり一次エネルギー消費量と一次エネルギー

当たりCO<sub>2</sub>排出量をそれぞれ横軸と縦軸にしたのが、図-2である。ここでは対角線は一人当たりCO<sub>2</sub>排出量を表す。2020年の排出量を1990年値と比較すると、排出削減の大きい国は水力資源をもつケベック、CO<sub>2</sub>隔離用の帯水層と枯渇ガス田をもつオランダ、原子力利用のオンタリオ、原子力を利用しつつ帯水層をもつベルギーで、削減率は40~50%である。一方、ノルウェーとイタリアは削減率が最も小さく、日本、米国等はこの中間に位置している。

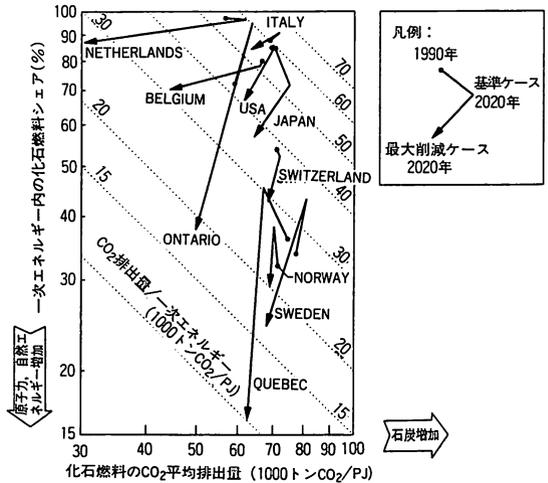


図-1 化石燃料利用レベルと構成

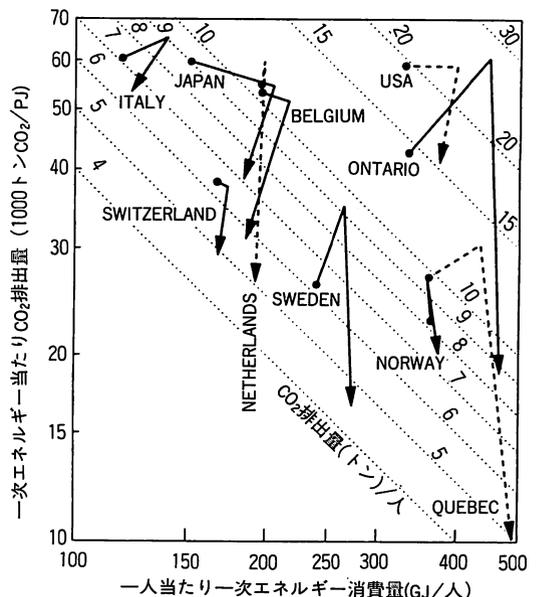


図-2 CO<sub>2</sub>の一人当たり排出量

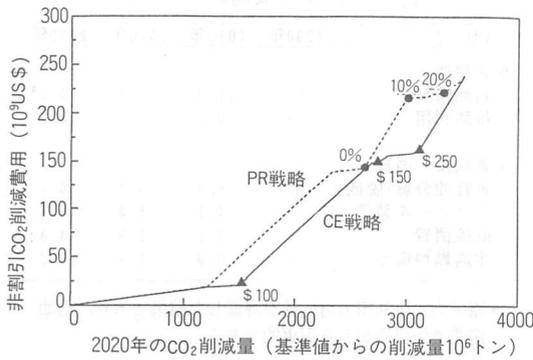


図-3 CO<sub>2</sub>削減量対システム費用トレードオフ関係にみられる割当戦略 (PR) と限界価格戦略 (CE) の比較

なお、最大削減ケースにおけるETSAP諸国全体のCO<sub>2</sub>排出量は、計算期間を通じて1990年水準以下に抑制されている。削減率 (1990年比較) は2010年に6%、また2020年には12%である。

### 3.2 公平性と効率性—削減への戦略—

CO<sub>2</sub>排出削減の戦略が実効的であるためには、戦略がもたらす結果が公平で効率的である必要がある。何故なら、世界の如何なる地域の人々に対しても発展への機会は平等であり、資源利用や環境影響の制約が厳しくなればなるほど社会経済活動に高い効率性が求められるからである。

削減の手段としては、経済循環を重視した「価格メカニズム」の活用、例えばCO<sub>2</sub>排出抑制の限界価格または炭素税を利用する方法とか、あるいは直接の削減目標を「割当」によって与える方法等が考えられる。そのような手段の戦略的な意味合いと実効性を評価する指標として「限界価格」とか「平均価格」を用いる選択があり得る。そこで本研究の結果をこのような視点から眺めてみることにしよう。

公平性については“CO<sub>2</sub>排出量/人 (t-CO<sub>2</sub>/cap)”をみるのが最も分かりやすい。図-2に示したように、1990年時で10を超えている国、地域はアメリカ、オンタリオ、オランダ、ベルギーである。しかし、2020年の時点にもなるとアメリカを除いて他のすべての地域は10~4の範囲に入り公平性にあまり隔たりが生じない。

効率性の計測には“CO<sub>2</sub>排出量/GDP (kg-CO<sub>2</sub>/US\$)”が良い指標である。この指標値が最も高い国は現在 (1990年) アメリカで0.886であり、低い国はスイスで0.220である。わが国は0.381で解析諸国全体

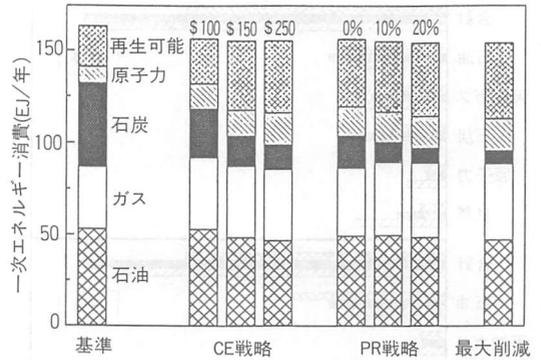


図-4 2020年の一次エネルギー構成 (PR戦略, CE戦略)

の平均値0.680より低い。2020年時では、この指標値は平均して30%ほど更に改善ができ、諸国間の隔たりは縮小してゆく。

限界価格抑制によるCO<sub>2</sub>削減と割当による削減の比較を図-3にそれぞれCE戦略、PR戦略として示した。前者はCO<sub>2</sub>排出限界価格 (\$/t-CO<sub>2</sub>) を100から250まで高めてCO<sub>2</sub>排出を抑制している。後者はCO<sub>2</sub>排出水準を1990年の水準に保つ場合、つまり排出の安定化を行った場合、及び2020年までに1990年水準の10%削減の水準になるようリニアに低減する場合、同じく20%削減水準になる場合を解析している。図で明らかのように、割当削減よりも限界価格による抑制の方がCO<sub>2</sub>排出量は多く削減でき、且つ削減の費用も少なくてすむ。

このような結果がもたらされる理由は、CE戦略では限界価格に見合う費用のエネルギー設備機器が選択されてCO<sub>2</sub>削減に対応できるのに対して、PR戦略ではCO<sub>2</sub>排出削減が優先されて設備機器が選択され、つまりカードの使い急ぎが過ぎて結果的には費用高、及び削減ポテンシャルを減じるのである。図-4に示すようにPR戦略では早いうちから費用高の再生可能エネルギーが多く投入されている。このことが上記理由の一因である。

## 4. 削減がもたらすインパクト

### 4.1 天然ガスと非化石エネルギーへ

CO<sub>2</sub>排出削減対策を施すと、一次エネルギー消費量の減少、一次エネルギーに占める化石エネルギーの割合、並びに化石エネルギーのCO<sub>2</sub>排出強度の低下によって、CO<sub>2</sub>排出量が減少する。

ここでは、まずCO<sub>2</sub>排出削減による一次エネルギー

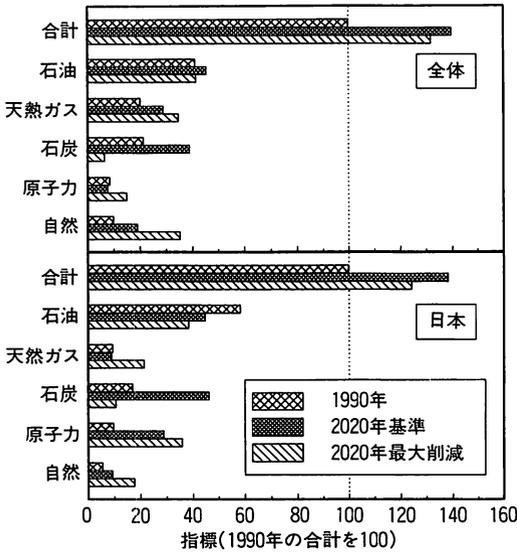


図-5 一次エネルギー消費量

消費構造の変化をみる。ETSAP参加国全体と日本における一次エネルギー消費量の変化を図-5に示す。全体でみた場合、石油は最大削減ケースではほぼ1990年レベルにまで減少するのに対し、天然ガスは基準ケースの場合には1990年の45%増、最大削減ケースで78%増と大きく増加する。一方、石炭は基準ケースでは80%増となるが、最大削減ケースでは逆に70%減と、増減が入れ替わる。日本の場合は石油依存度が高いため、石油は基準ケースにおいても23%減、最大削減ケースでは34%減となる。天然ガスは基準ケースでは1990年レベルのままであり、最大削減ケースで2.3倍に増加する。石炭は基準ケースでは2.7倍と著しく増加するが、最大削減ケースでは37%減となる。

原子力についてみると、全体では基準ケースで1990年よりも減少し、最大削減ケースで約2倍に増加する。日本の場合には、基準ケースにおいても1990年の3倍、最大削減ケースでは3.7倍と大幅に増加する。日本では基準ケースにおいても原子力の導入促進が想定されているため、CO<sub>2</sub>削減による原子力の増加の割合は小さい。全体でみた場合に、CO<sub>2</sub>排出削減に対する寄与の大きい原子力の伸びが意外と小さいのは、原子力発電を拡大する国と段階的に撤去していく国があること、2010年頃まで原子力発電所建設予定のない国があるためである。

自然エネルギーは、全体及び日本ともに1990年には全一次エネルギーの10%以下を占めるにすぎない。しかし、2020年には基準ケースで約2倍、最大削減ケー

表3 日本の水素需給バランス

(Mtoe)	1990年	2010年	2020年	2030年
<b>水素製造</b>				
石油精製	5.2	11.3	7.1	0.0 <sup>*</sup>
核熱利用	-	0.9	14.4	35.8
<b>水素転換・消費</b>				
重質油分解・脱硫	5.2	6.6	5.7	4.1
メタノール製造	-	4.1	6.2	16.6
直接消費	-	0.6	2.7	4.8
水素燃料電池	-	0.9	6.9	10.3

\*原子力共生利用の可能性を評価した結果であり、石油産業での自給がより現実的である。

スで3～4倍に増える。技術進歩とエネルギー価格の上昇により、自然エネルギーが価格競争力を有するようになるからである。日本が全体と比べて自然エネルギー消費量の割合が低いようにみえるが、これはカナダやノルウェーのような水力資源に恵まれた国のデータが含まれるためである。

CO<sub>2</sub>排出削減により、化石エネルギーから自然及び原子力エネルギーへの転換、及び化石エネルギーの中でもCO<sub>2</sub>排出強度の大きい石炭から小さい天然ガスへの代替が進む。

次に、CO<sub>2</sub>排出削減による最終需要部門のエネルギー消費構造の変化を見てみる。産業部門では、鉄鋼や石油化学工業のようなエネルギー多消費産業のシェアが減少し、加工業やサービス業のようなエネルギー消費の少ない産業のシェアが増えており、全体的にエネルギー消費量は減少傾向にある。また、省エネルギーは電力消費よりも化石燃料消費で多く進行するので、結果として電力消費割合が増加する。品質やプロセス管理の容易さも電力消費増大の一因となる。

CO<sub>2</sub>排出削減が実施されると、更に二つの相対する変化が生じる。一つは電力価格の高騰によりもたらされる節電と機器の効率改善であり、他方はプロセス用の熱、暖房、輸送等に用いられていた燃料が電力に置き換わることである。どちらが優勢になるかは、CO<sub>2</sub>排出量の少ないあるいは排出しない発電技術の導入と電力価格に依存することになる。

最終需要部門での化石燃料直接利用は、CO<sub>2</sub>排出制約が厳しくなるにつれて減少し、バイオマスや水素の利用が可能になるとさらに減少する。天然ガスが利用可能であれば、その消費量は多くなる。但し、いずれも相対的なエネルギー価格や機器の技術進歩に依存する。

水素に関しては、CO<sub>2</sub>回収と組み合わせた化石燃料

からの水素製造（オランダ、ベルギー）、高温核熱利用による水素製造（日本）、サハラ砂漠で光発電により製造した水素をパイプラインで輸送するシステム（オランダ、ベルギー）等が組み込まれている。水素は天然ガスを代替することができる。自動車や飛行機の燃料としての利用も考えられている。

日本のモデルには、高温ガス炉（VHTR）を中心にした統合エネルギーシステム（IES）による水素製造が組み込まれている。原子力共生利用時のCO<sub>2</sub>排出削減ケース（2030年に課徴金額が250 \$/t-CO<sub>2</sub>）における水素需給バランスを表3に示す。VHTR導入開始の2010年以降、水素製造が核熱利用に切り替わって行き、メタノール製造、燃料電池等に利用されるようになる。

## 4.2 主役となる技術

### (1) 発電技術

原子力発電は安価な水力発電が大量に利用可能なケベックを除いて、ベルギー、スウェーデン、スイス、日本などで導入規模が拡大し、軽水炉（LWR）が大部分を占めている。水力発電はノルウェー、ケベックでは電力需要増とともに更に増加し、スウェーデン、スイス、オンタリオ等でも未開発資源の利用が進む。太陽光発電は米国のみで競争性があり、他地域ではCO<sub>2</sub>削減の許容コストが高まった段階で寄与していく。風力、地熱、波力などの自然エネルギーも拡大する。特に風力は地域の風況に強く依存し、スウェーデンとオランダではCO<sub>2</sub>排出を厳しく抑制する場合のみに選択される。火力発電は複合サイクル技術を中心にオランダ、ベルギー等で大量に導入されてくる。

### (2) 合成燃料製造技術

バイオマス燃料は米国では木材や草本作物等からの合成燃料がCO<sub>2</sub>削減ケースで寄与する。ノルウェーとオランダでは、CO<sub>2</sub>削減コストが200 \$/t-CO<sub>2</sub>以上のときに小規模ではあるが麦藁が輸送用メタノールを合成するのに用いられる。ベルギーは40-60%CO<sub>2</sub>削減の場合、CO<sub>2</sub>削減限界コストが125 \$/t-CO<sub>2</sub>になると、南欧諸国の小麦から生産されるエタノールを輸入できるとしている。

ベルギーとオランダでは更に太陽エネルギーの活用から生産される水素を考えている。サハラ砂漠に大型の太陽PVアレイを建設し、太陽光による水の電気分解を行う。生産された水素は長距離パイプラインで地中海を横断して北欧へ移送される。PVセルの将来コストがかなり安価になったとしても、配送先の水素の

コストは2030年で30 \$/GJ（石油価格170 \$/bblに相当）と高くなるため、非常に高いCO<sub>2</sub>削減コストが許容される場合にのみ実現可能になる。

石炭や天然ガスを原料とする場合には、改質過程で予めCO<sub>2</sub>を除去して水素とメタノールが生産される。既にオランダとベルギーでは、火力発電所と化学工業プロセスからの供給原燃料の改質過程で発生するCO<sub>2</sub>を除去している。このため化石燃料からの合成燃料はCO<sub>2</sub>の貯蔵コストに依存し、20%CO<sub>2</sub>削減以上の場合に導入量が増大する。

### (3) 需要技術

家庭と業務部門では、暖房用のエネルギー需要のシェアが高い。技術としては高効率ボイラー、改良型断熱材、種々のヒートポンプなどが選択される。動力と照明の需要も今後増大し、効率のより良い照明器具、改良型の冷蔵庫、冷凍装置、食器洗い器、洗濯機などの技術が選択される。

輸送部門では、乗用車、トラック、及びその他の輸送手段において将来的に効率改善が進められる。他方、代替燃料自動車や電気自動車も導入される。

代替燃料は原料にもよるがアルコールや水素は石油製品と比較してCO<sub>2</sub>排出量が低い。特に圧縮天然ガス（CNG）自動車は約22%ほどCO<sub>2</sub>排出量が少ない。しかし、気体燃料を内燃機関に用いる自動車は、燃料噴射装置と貯蔵タンクに追加コストが必要になる。このため、例えばノルウェーでは400 \$/t-CO<sub>2</sub>課税ケースから導入が開始される。また、バイオマスからのアルコール燃料（米国、ノルウェー）やCO<sub>2</sub>を予め除去した石炭からのメタノール（オランダ）が利用できるようになれば、これらの燃料も自動車用代替燃料として使用される。

電気自動車は、改良型バッテリーと低CO<sub>2</sub>排出原単位の電気を利用できるようになれば、輸送部門でのCO<sub>2</sub>排出を低減することに寄与する。従来の自動車と比較してコストと効率はかなり劣るため、厳しいCO<sub>2</sub>削減目標が課せられる場合に導入可能になる。特に、短距離型で一夜充電で走行できる都市型自動車は、バッテリーパックを補充所で交換する従来のタイプの電気自動車より導入されやすい。

### (4) 回収隔離技術

CO<sub>2</sub>を排ガスから回収するには化学吸収、物理吸収、深冷分離、膜分離などの種々の方法があるが、CO<sub>2</sub>濃度が低いいためかなりのコストとエネルギーを費やす。この欠点を解消するために、酸素で燃焼させる方法、

化石燃料の改質過程で予めCO<sub>2</sub>を除去しておく方法、HYDROCARBプロセスを用いる方法などがある。

酸素燃焼法は排ガス中のCO<sub>2</sub>濃度を高めて分離を容易にする。予めCO<sub>2</sub>を除去しておく方法は、シフト反応によりCO<sub>2</sub>と水素の濃度を高めてCO<sub>2</sub>のみを改質過程で回収するものであり、燃焼排ガスからCO<sub>2</sub>を分離回収する従来の方法と比較してコスト、投入エネルギー、効率の面で優れている。HYDROCARBプロセスは化石燃料やバイオマスから得られたメタンを熱分解してカーボンブラックと水素に分離し、固体炭素として回収する方法で、米国で研究が進められている。

CO<sub>2</sub>の隔離候補地として深海、枯渇ガス・油田、及び帯水層が考えられている。深海へはCO<sub>2</sub>を高圧にしてパイプラインで移送する。しかし、CO<sub>2</sub>の拡散、深海流の影響などがある。また、酸性度の上昇による生態系への影響などもある。深海へ移送する他の方法としてドライアイスにして処理する計画もある。

枯渇ガス・油田へはCO<sub>2</sub>を高圧で注入する。岩石の亀裂からのわずかな漏洩や爆発に匹敵する急激な放出などの不確実性があるが、当面は最も適切なCO<sub>2</sub>貯蔵の候補地とみられている。帯水層はCO<sub>2</sub>の一部を水に溶かし、気体は外部へ漏洩しやすく、水も地層と平行に流出する可能性があるとして指摘している。

#### 4.3 負担すべき費用

排出削減の費用には、広い意味ではすべての経済的負担を含める必要があるが、ここではMARKALモデルで計量されるエネルギーシステムの費用のみに着目する。排出削減の対策を講じないケースと排出量を削減したケースとを比較すると、後者では排出削減のためにより高価な燃料、技術オプションの利用が強いられ、エネルギーシステムの総費用が増大する。すなわち、後者における費用の増加分が、排出削減を実現するために負担すべき費用となる。

排出削減費用の対GDP比率（2020年値）を表4に示した。ここでは、排出削減の方法としてCE戦略をとり排出削減の限界価格を100, 150, 250 \$/t-CO<sub>2</sub>とした場合、PR戦略をとり安定化、10%削減、20%削減を行った場合、及び国ごとに最大限削減した場合に関して、ETSAP諸国全体（日本を除く）の平均値とばらつきの範囲とを比較した。

最大削減ケースでの削減費用はGDPの1.75%相当に達する。ただし、これはすべての需要技術の費用を含めた場合であることに注意を要する。需要技術の多くはエネルギー消費部分とその他部分との明確な区分

が困難であり、費用の定義に任意性が大きい。そこで、需要技術のなかで独立したエネルギー機器とみなせるものみの費用に着目した日本の場合（最適化時にはすべての技術の費用を考慮）には、削減費用がGDPの0.2%以内に留まっている。なお、CE戦略の場合には、PR戦略に比べて小さな費用で同率の削減が可能なることも表4に示されている。

表4 CO<sub>2</sub>削減費用のGDP比率（2020年）

解析ケース		平均	範囲
CE戦略	100\$/t-CO <sub>2</sub> まで	0.14%	0.0 -0.72%
	150\$/t-CO <sub>2</sub> まで	1.10%	0.0 -1.41%
	250\$/t-CO <sub>2</sub> まで	1.16%	0.25-1.41%
PR戦略	安定化まで	1.07%	0.02-1.27%
	10%削減まで	1.63%	0.02-1.94%
	20%削減まで	1.67%	0.19-1.94%
最大削減ケース		1.75%	0.46-1.94%

次に、この削減費用を費用要素の観点から検討する。エネルギーシステムの費用は燃料費（一次燃料の入手に要する費用）、設備・機器の運転維持費、同建設費に大別される。CO<sub>2</sub>排出量を抑制していくと、石炭から天然ガスへの切り替えのように燃料費が増加する要因もあるが、特に建設費の増大が著しい。これは排出削減のために、高効率の設備・機器の導入、化石燃料技術に比べて総費用に占める建設費のシェアが大きい原子力、自然エネルギー技術の利用が拡大するためである。したがって、国民経済への影響の観点からは、上記削減費用の多くの部分が投資に向けられ、特に総投資額が増大する形で影響が表れることになる。

## 5. まとめと残された課題

この研究で得られた結果を総合すると、次のようにまとめることができる。第一に、ETSAP諸国でCO<sub>2</sub>排出対策を何等講じないとすると2020年頃の排出量は1990年水準よりも更に約40%程増加する。第二に、排出削減の対策を施せばETSAP諸国全体のCO<sub>2</sub>排出量は1990年水準以下に下がり、最大削減率（1990年基準）は6%（2010年）から12%（2020年）である。第三に、最も費用が少なく最も削減率が高まる方策は「割当」によるよりも「限界価格」による誘導の方が効果的である。第四に、対応策としてはETSAP諸国全体としてまだ年率1.2%の省エネルギーポテンシャルがあること、化石燃料内での切り替え、原子力、自然エネルギー利用への転換、CO<sub>2</sub>の回収隔離、等の方策があり、

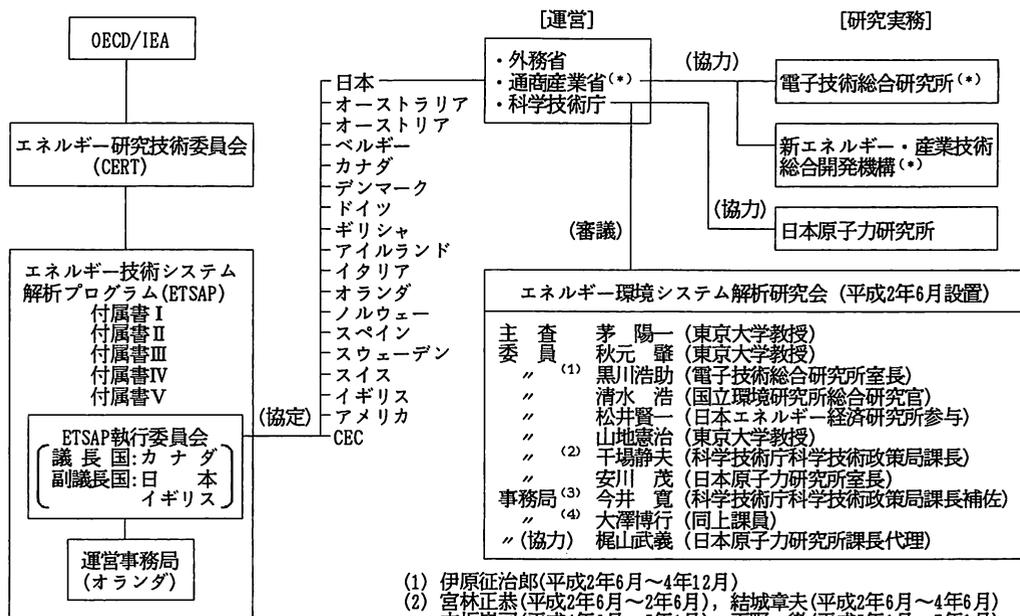
一部の国においては80%までのCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルのあることが示されている。

温暖化の原因ガスには、ほかにメタン (CH<sub>4</sub>) や亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) 等40種近くものガスがあり、これらの微量ガスをも含めてシステム解析を行うことが必要とされる。また、エネルギー利用は経済活動と不可分の関係にあるので、エネルギー経済相互作用を踏

まえた分析が必要である。さらに、今後のエネルギー技術の評価には設備機器の資材の構成、製造、建設、運転、廃止措置、廃棄物の再利用、等の活動をトータルシステムのフレームの中で分析する「生涯年評価分析 (LCA)」もまた重要な分析課題である。ETSAP付属書Vの研究はこのような課題分析も進められている。

表A. 1 ETSAP研究の経緯

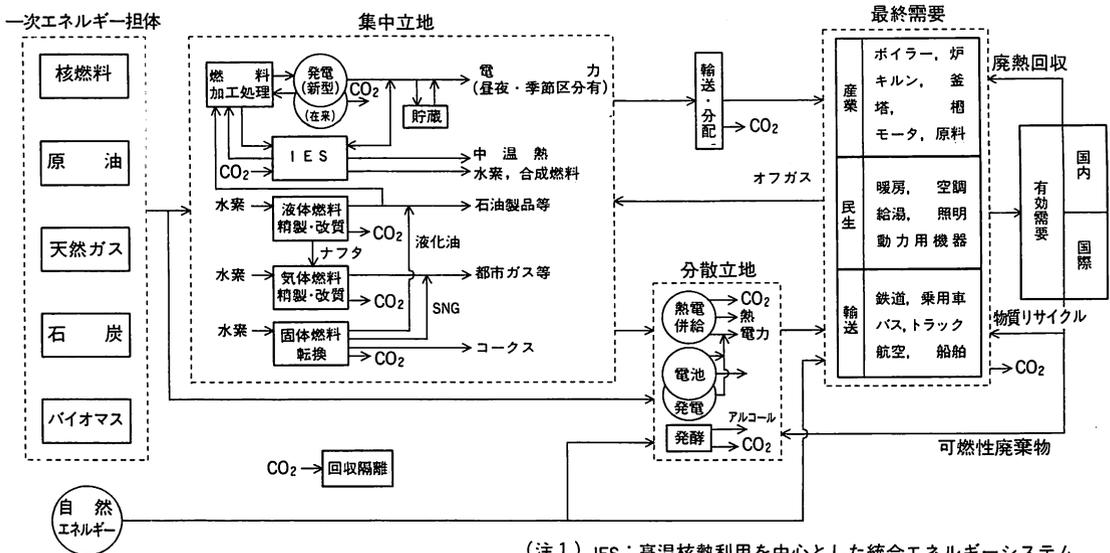
フェーズ	参加国・機関	目的・課題	成果 (主要報告書)
第1期 (1976. 3-1977. 3)	16カ国 1機関	・IEAエネルギーRD&D戦略策定のための基礎情報収集 ・西暦2000年に至るエネルギー需給予測	・「エネルギー研究開発の国際戦略を目指して」(1977) ・「将来エネルギーシステムと新技術インパクトに関する国際協力研究」(1977)
第2期 (1977. 4-1979. 12)	16カ国 1機関	・IEAエネルギーRD&D戦略策定 ・共通分析手法MARKALの開発・整備	・「エネルギー研究開発及び実証のためのグループ戦略」(1980)
第3期 (1980. 11-1983. 5) ETSAP-付属書I	17カ国 1機関	・80年代以降のエネルギーRD&Dのあり方 ・参加国におけるエネルギーシステム解析能力向上 ・システム解析研究における国際協体制維持	・「80年代以降のエネルギー」(1983) ・「MARKAL-長期エネルギーシステム解析のための線形計画モデル」(1982) ・「エネルギー技術の特性化 - 総括報告書」(1982)
第4期 (1983. 7-1986. 6) ETSAP-付属書II	16カ国	・エネルギーシステムに内在する制約因子の検討 ・エネルギーシステムのモデル化、分析、技術評価等に関する情報交換	・「エネルギー技術システム解析プロジェクト付属書II最終報告書」(1987)
第5期 (1986. 10-1989. 9) ETSAP-付属書III	9カ国 1機関	・環境影響を踏まえたエネルギー技術の将来的あり方及び燃料利用の方向に関する分析 (SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 等環境排出の長期予測と排出低減方策の費用効果)	・「エネルギーシステムからの環境排出 - 抑制費用と効果」(1989)
第6期 (1990. 1-1993. 6) ETSAP-付属書IV	11カ国 1機関	・CO <sub>2</sub> 等の温室効果ガスの排出削減のための技術と費用 (参加国の解析の他、途上国・東欧圏の解析支援を含む)	・「二酸化炭素排出削減のためのエネルギー選択」(1994) (第1巻:総報告書, 第2巻:国別報告書)
第7期 (1993. 1-1995. 12) ETSAP-付属書V	12カ国 1機関	・持続的開発のためのエネルギーオプション-技術的解答、経済インパクト、排出削減戦略 (エネルギー・経済相互作用を踏まえたCO <sub>2</sub> 抑制分析)	・「エネルギー相互経済作用分析を中心とした手法開発」(予定) ・「各国の分析結果」(予定)



(\*) 付属書I～IIIまでは運営，研究実務を合同で担当した。

- (1) 伊原征治郎(平成2年6月～4年12月)
- (2) 宮林正恭(平成2年6月～2年6月), 結城章夫(平成2年6月～4年6月), 木坂崇司(平成4年6月～5年1月), 天野 徹(平成5年1月～7年1月)
- (3) 楠原裕二(平成2年6月～3年10月), 鈴木 貢(平成3年10月～5年1月)
- (4) 江藤 学(平成2年6月～2年7月), 塚本俊郎(平成2年7月～4年7月)

図-A. 1 ETSAPの運営体制



(注1) IES: 高温核熱利用を中心とした統合エネルギーシステム。  
 (注2) 脱硫, 脱硝技術は表示していない。

図-A. 2 基準エネルギーシステム (RES)

謝辞

本報告に当たり、東京大学教授 茅 陽一先生をはじめエネルギー環境システム解析研究会の諸氏、科学技術庁科学技術政策局計画課長天野 徹氏及び同課の皆様、ETSAP運営事務局（オランダECN）の事務局長Tom Kram氏に深く謝意を表します。

参考1：ETSAP研究の概要

OECD/IEAは、域内におけるエネルギー研究開発及び実証(RD&D)のためのシステム解析研究を1976年3月より進めている。既に第6期研究までを終了させ、現在は第7期研究を実施中である。ETSAP研究はこの第3期目に発足しており、以後各期ごとの研究プログラム(付属書I~Vで規定)の下で研究が進められている(表A.1参照)。

運営は、OECD/IEAのエネルギー研究技術委員会(旧・エネルギー研究開発委員会)の下でプロジェクト形態をとり、執行委員会の管理の下で行われている。現在、ETSAP協定への加盟は17カ国1国際機関であるが、研究プログラムへの参加は付属書ごとに異なり、付属書Vでは12カ国1国際機関(日本、ベルギー、カナダ、ドイツ、イタリア、オランダ、ノルウェー、スウェーデン、スイス、トルコ(準参加)、イギリス、アメリカ、欧州共同体委員会(CEC))となっている。図-A.1にETSAP運営体制を示す。

参考2：MARKALモデルの概要

MARKAL (MARKet ALlocation) モデルは、一国の全エネルギーシステムを対象として全エネルギー種を取り扱い、想定した社会経済発展シナリオに基づいて有効需要を外生的に与え、資源利用、技術利用等に課せられる制約条件下で線形計画法(Linear Programming)を用いてエネルギー需給システムの最適化を行う計算プログラムである。

このモデルの特徴は、基準エネルギーシステム(RES)と呼ぶネットワークを構築し、エネルギーの供給、変換、需要を関連技術(設備、機器)に体化させて技術の挙動を通じてとらえることにある。対象となる期間中の全エネルギー需要及び制約条件を満たすエネルギー供給形態のうちで目的関数(システムコスト、一次エネルギー供給量、環境排出量等の他、それらの一次結合を選ぶこともできる)が最適となる解が同時に最適化により一度に求められる。

ネットワークは必要に応じて構築することが可能であるため、いかなる国にも適用できると同時に、短期ないし長期にわたる最適化計算も可能な、きわめてフレキシブルな構造を有している。また、他モデルと比べてユニークな点は、エネルギーに対する需要を有効需要の概念でとらえていることであり、最終需要部門におけるエネルギー効率の高い代替技術の導入効果を、省エネルギーとして評価できる。

日本の解析に使用したMARKALモデルのRESを

図-A.2に示す。一次エネルギーの取得から二次エネルギーへの転換、貯蔵、分配を経て、産業、民生、輸送部門からなる最終需要に至るまでの全過程を含んでいる。電気及び低温熱等の117種類のエネルギー担体が、357種類のエネルギー技術（エネルギー変換技術39種類、プロセス技術121種類、最終需要技術197種類）と30種類の需要部門を連結している。エネルギー変換技術には、集中型及び分散型発電技術、熱供給技術、並びに熱電併給技術がモデル化されている。日本のRESの特徴はエネルギー多消費産業を陽表的に取り扱い、モデル内に統合エネルギーシステム（IES：Integrated Energy System）が組み込まれていることである。IESでは、核熱による水素を媒介として、化石燃料、バイオマスとの共生利用の可能性を考慮している。水素利用に関しては、製鉄用還元ガス製造、メタノール合成、また各種タービンや燃料電池による発電、熱化学ヒートパイプによる中温熱供給を考慮している。

SO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>の対策に関しては、燃料脱硫、排煙脱硫、排煙脱硝、低NO<sub>x</sub>バーナー、自動車排ガス浄化を、また低硫黄燃料への切り替え、代替技術をも考慮に入れている。また、リサイクルに関しては、鉄、アルミ、プラスチック、故紙等の再利用の他、火力発電所から排出されるCO<sub>2</sub>の回収と再資源化並びに隔離もモデル化している。

#### 参考文献

- 1) T.Kram, "National Energy Options for Reducing CO<sub>2</sub> Emissions, Volume 1 : The International Connection" A Report of the Energy Technology Systems Analysis Programme/Annex IV (1990-1993), ECN-C-93-101 (1993/December).
- 2) T. Kram (Editor), "National Energy Options for Reducing CO<sub>2</sub> Emissions, Volume 2 : Country Studies" A Report of the Energy Technology Systems Analysis Programme/Annex IV (1990-1993), ECN-C-94-024 (1994/March).

### 他団体ニュース 「(財)地球環境産業技術研究機構

### 研究員公募」について

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 募集人員 研究員1名</li> <li>2. 所 属 地球環境システム研究室</li> <li>3. 専門分野 地球環境対策技術に関する諸プロセスのシステムの解析（化学工学・化学・機械工学・電気工学等専攻）</li> <li>4. 応募資格 修士課程修了もしくは同等以上の研究能力を有する方。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>5. 着任時期 平成7年7月以降</li> <li>6. 応募締切 平成7年6月20日</li> <li>7. 資料送付及び問い合わせ先<br/>〒619-02 京都府相楽郡木津町木津川台9-2<br/>(財)地球環境産業技術研究機構<br/>地球環境システム研究室 松本成司<br/>Tel 0774-75-2304, Fax 0774-75-2317</li> </ol> |
|---|---|