

■ 懸賞論文会長賞内容紹介 ■

# エネルギーと地球環境の同時解決を目指して

Approach toward Compatible Solution for Energy and Global Environmental Problems

佐野 寛\*・石井 英一\*\*

Hiroshi Sano Eiichi Ishii

植物合成/年	300
水力/年	12
地熱/年	約14 ?
ウラン( <sup>235</sup> U)	約 200

砂漠～準砂漠面積見積りは、真砂漠24, 半砂漠18, サバンナ15, 温帯草原9(×10<sup>6</sup>km<sup>2</sup>)である。

## 2.1 新エネの直接利用/矮小利用に局限

光・熱として使用するのには、太陽熱温水器のように現地使用に限られる。そして、日本国内の太陽エネルギー源は、中高緯度・晴天日少、などのため低質であり、地価が高いため適地も少ないので、補助的な使用には向いていても、地球環境対策のように巨大な化石代替用途(総エネルギー使用量の2～3割は欲しい)には全く適合しない。風力・地熱なども同様である。

ここはどうしても、地球上で最も巨大な、「砂漠の太陽エネルギー」を獲得し日本へ運ぶ有効な手段を案出する必要がある。

## 2.2 新エネの間接利用

以前は、太陽エネルギーは希薄(1KW/m<sup>2</sup>)であってその固定・回収は大変困難であった。光エネルギー変換効率が低ければ(例:植物栽培1%以下)莫大な地面が必要になり実施不可能である。ところが近年、日本のサンシャイン計画などによる太陽電池開発の急進展により、事情は変わりつつある。

太陽電力、太陽エネルギーの電力変換は将来、太陽電池20%、太陽熱発電30%と高効率期待できるし、植物光合成のほぼ10倍の効率という点でも、地球の表面利用の有効度で優位にある。

ここで、1)の植物光合成では栽培に大量の灌漑水

## 1. はじめに

21世紀を目前にした今、化石エネルギー資源の枯渇が皆の視野に入ってきたが、人類はこれに対する明確な答をまだ用意できていない。さらに、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)温室効果による地球環境問題が化石燃料を直撃しつつある。

最も便利な化石燃料に代替すべき新エネルギーを見出すのは容易なことではない。しかし、2025年前後で石油や天然ガスはピークを越し、漸減へ向かうことは確実であり、その対策に待時間は少ない。

一方、化石燃料が炭素化合物であるため、CO<sub>2</sub>発生は本質的に不可避で深刻な難題となる。後述のように、化石燃料中では最も資源的に有望な石炭も、CO<sub>2</sub>地球環境問題では逆に最も有害で不利な壁に突き当たる。

本稿は、新エネルギー開発のネックおよびCO<sub>2</sub>抑制のネックを見定め、その両者の問題点を組合わせて解決する道を探り、その視点から新エネルギー利用によるCO<sub>2</sub>リサイクル・システムの有望性について提言する。

## 2. 新エネルギー展開への諸課題

### —移動しつつある新エネ・ネック—

地球上の新エネルギー(太陽・地熱・風力・波力・エネルギー作物など)は資源的に豊富である。特に太陽は最も巨大で、現在の化石燃料相当の供給には、砂漠への入射エネルギーの僅か0.4%を獲得すれば充分である\*。

\*脚注。主要なエネルギー資源量(10<sup>15</sup>Kcal)

化石燃料消費/年	70
太陽/年	1.3×10 <sup>6</sup>
風波/年	2700

\* 通産省工業技術院大阪工業技術試験所機能応用化学部長  
\*\* " 主任研究官

〒563 池田市緑ヶ丘1-8-31

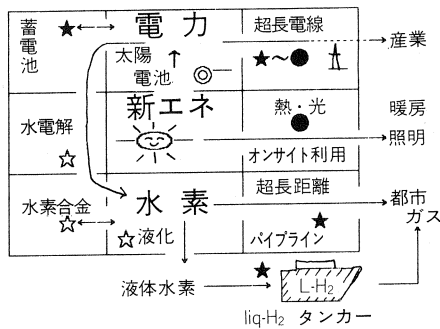
表1 太陽エネルギー回収法の比較

手 段	光変換効率	化石代替所要面積
1) 植物栽培	0.1 ~ 1 %	砂漠の 4倍~40%
2) 太陽電池	約 10 %	砂漠の 4 %
3) 同(実験)	約 20 %	砂漠の 2 %

(回収植物体の数万倍)を必要とするのでその面からも絶望的である。

なお、CO<sub>2</sub>地球環境対策で政府間の化石燃料カット議論では、21世紀初頭で1/5、21世紀後半で1/2程度といわれるので、表1の砂漠利用面積よりずっと少なくて良く、エネルギー獲得量については現実性が出てきた。

しかし、新エネルギーの多くは、自然エネルギーの共通の欠点として、時間・空間的に供給ムラが大きい。電力に換えても、地球を半廻りする長大な送電線は、建設負担が過大だけでなく、抵抗ロスで日本は大したエネルギーを入手できない。電力を水素のような2次エネルギーに変換しても尚、その輸送には困難が多く、需給対応が難しい(図-1)。



◎, ○:有効, ☆:課題有, ★:難題, ●:無効  
図-1 新エネ利用ルートを選択枝

すなわち、今や新エネルギーの技術ネックは、エネルギー源の確保から、その輸送貯蔵性の改善へと移転しつつある。

太陽水素 次の手段として、電力を化学物質エネルギーに換え、より輸送・貯蔵性を改善する水素エネルギーシステムが提案(例:日本のサンシャイン計画, ECのサハラ水素計画)される。

水素の長距離輸送法には、①ガスのパイプライン、②液化水素(L-H<sub>2</sub>)タンカー、③水素吸蔵合金(MH)ばら積みタンカー、などが考えられる。しかし、①は超長距離電線より幾分ましな程度、②は容積的に見てLNGタンカーの3倍以上コスト高で危険も過多、③は容積こそ液化水素の2割減だが重量は数十倍と、いずれも負担が大き過ぎる。

2.3 エネルギー・バイオマスの可能性

植物は低効率である。しかし、化石燃料からのCO<sub>2</sub>発生量の200億t/年に対し、植物の年間固定量はそれより一桁大きい。すなわち植物の年間固定可能量は、約15億t-CO<sub>2</sub>/年・100万km<sup>2</sup>であって、余剰CO<sub>2</sub>

全量を吸収するためには計算上オーストラリア大陸全土緑化が必要である。これには次のような問題がある。

●1. 灌漑用水を海水の淡水化により造水→給水(その際化石エネルギー使用不可)。

●2. 生成植物体の全量を収穫・永久保存(または、毎年、新しく豪大陸相当の土地を開発)。

さらに、植物が太陽電池の1/10と低い光エネ固定率であることから、限られた大地の浪費ともいえよう。地上の遊休地は砂漠だけである。それに比べて太陽電池に水が不要ことは強みとなる。

2.4 その他の2次エネルギー

ここまで、新エネルギーの使い易さの改善を目指して  
太陽→電力→水素→・・・?

とたどってきたが、まだ終点とはいえない。

水素は周知のように、重要な化学工業原料の一つであり、これを出発点として多くの化成品へ誘導することが可能である。5章に、その道を探そう。

3. 炭酸ガス問題は化石燃料の根底を揺する

3.1 化石燃料危機小史

この1世紀、化石燃料の使用は種々の障害や困難にぶつかっては、そのつど、人類の智慧をしばって切り抜けて来た。そして今、化石燃料は公害、枯渇につぐ第3の危機に直面している。

★危機I. 燃焼公害(SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>) 1965~1975年

→◎脱硫の成功, 燃焼制御。

★危機II. 資源枯渇・価格上昇(石油ショック)

1次: 1974年, 2次: 1979年。

→○省エネの進展, 石炭の復活。

★危機III. CO<sub>2</sub>地球環境問題(CO<sub>2</sub>放出

→温室効果) 1990~21世紀?

→☆対策未確定?

化石燃料は炭素化合物であるから、物質不滅の法則が破れぬ限り、燃焼CO<sub>2</sub>発生は不可避である。その点で、危機I(SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>)のように微量有害元素を相手にする処理と根本的に異なる。すなわち、危機Iでの諸対策〔◎排煙脱硫, ◎重油脱硫, ○排煙脱硝〕などは今回すべて通用しない。

危機II(石油ショック)に対し、世界は◎省エネの徹底、および○石炭転換、によって乗り切った。これは危機IIIにおいても、部分的には通用するが逆な対応もある。石炭は資源として豊富だが、燃焼によりCO<sub>2</sub>を最も多く発生する燃料なので、今回は逆に「×石炭転換」となる。

3.2 省炭燃料転換とその限界

危機Ⅲ (CO<sub>2</sub>地球環境)の局面での新しい対策項目の一つは少炭素燃料への転換である。少炭燃料転換の効果を定量的に見るために、代表的燃料の元素組成、CO<sub>2</sub>カロリー比、炭素カロリー比などを、表2に示す。数値が大きいほど、エネルギー当たりの炭酸ガス発出量が大きくなることを示す。

表2 燃料転換の省炭効果

	木	石炭	石油	天然ガス
組成 (概算)	(CH <sub>2</sub> O) <sub>n</sub>	(C <sub>3</sub> H) <sub>n</sub>	(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>	CH <sub>4</sub>
CO <sub>2</sub> 熱比	400	380	300	210 (g-CO <sub>2</sub> /Mcal)
炭熱比	105	100	80	57 (g-C/Mcal)

石炭を天然ガス転換すればCO<sub>2</sub>は約半減する。もし天然ガス資源が沢山あれば、今すぐにもでも代替したい。残念ながら天然ガスの可採資源量は100兆m<sup>3</sup>に過ぎず、世界の現消費は1.8兆m<sup>3</sup>/Yであるから、もし石炭代替を今世紀末までに進めるとすれば、天然ガス資源は2015年(!)頃に使切ってしまう。むしろ、温存をはかるべき貴重な資源ではないかと思われる。

なお、石炭の液化・ガス化などによって、より少炭型燃料を合成できるが、これは製造に使うエネルギーを石炭でまかなう限り、トータルでは却ってCO<sub>2</sub>/calが増大する。

3.3 省エネとその限界

日本の省エネの進展はすでに採算ぎりぎりまで詰めている。石油ショックの時の省エネ優等生の日本としては、産業での大口浪費はもはやほとんど残っていない。今後に期待できる限度は、せいぜい経済成長率なみの省エネの進展速度(年率1~2%)であって、これでは、CO<sub>2</sub>放出総量を微増か、現状維持に抑えるのがせい一杯であり、積極的に数割のCO<sub>2</sub>カットをもたらす可能性は到底、望めない。

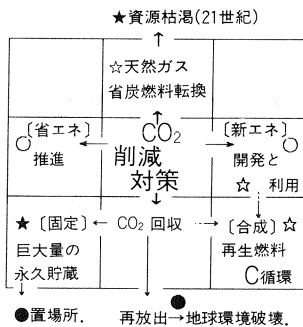


図-2 各種CO<sub>2</sub>抑制技術の選択枝

今の所、国際的なCO<sub>2</sub>抑制目標が「来世紀初頭までに20%削減」であるとして、これを念頭に、各種CO<sub>2</sub>抑制技術を図2で比較検討して見よう。

4. CO<sub>2</sub>回収とその行先

—永久貯蔵か循環利用か—

4.1 貯蔵型回収

ボイラ排煙(約10%CO<sub>2</sub>含有)からCO<sub>2</sub>を可逆的に回収する技術は、さほど困難でない。しかし石灰石排煙脱硫に倣って、CO<sub>2</sub>中和除去→廃棄を目指す「排煙脱炭酸」は、次の矛盾のため、全く成立しない。

- 1. 石灰石(炭酸石灰)を焼成、同量のCO<sub>2</sub>を放出して吸収剤(消石灰)を作るという自己矛盾を内蔵している。
- 2. 発生する廃物(炭酸石灰)量が膨大(排煙脱硫石膏のケースの50倍以上)なので、置く場所が手当てできない。

可逆的なアルカリ吸放出法では、発電コストの50% upの負担でいと試算されている。PSA法や膜分離法が実用されれば、さらに改善されよう。

回収システムの完結性としての最大の問題は回収CO<sub>2</sub>の行方である。回収CO<sub>2</sub>がもし短期間で環境中へ再放出されれば、地球環境対策としては全く無意味となる。永久とは言わぬまでも、化石燃料衰退期まで、あと半世紀は保存しなければならない。

排出CO<sub>2</sub>回収処理の選択枝の良否を判定して、図-3に示す。

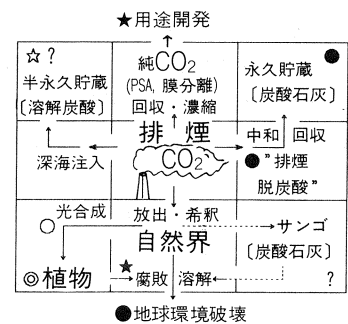


図-3 排出CO<sub>2</sub>回収処理の選択枝

したがって、回収CO<sub>2</sub>の半永久貯蔵が条件となる限り、回収法の改善では展望は拓けない。表3に、その視点での評価をまとめる。排煙のCO<sub>2</sub>処理法の総合的な環境インパクトをCO<sub>2</sub>再放出時間について定性的な評価を表示した。

もう一つの選択枝は循環利用である。もし化石燃料が循環利用の分だけ代替・削減されれば、最良の解決



した新エネルギーの輸送貯蔵性を改善する方向が、基本的な新戦略となる。いろいろな選択枝がある。

5.1 CO<sub>2</sub>光還元

: on site 新エネ利用に限定

光半導体触媒によるCO<sub>2</sub>還元は、まだ低効率過ぎる。葉緑素などによる光合成も、太陽電池に効率的に遠く及ばない。何よりも、新エネルギー発生地点でしか実施できないことが難点である。

5.2 CO<sub>2</sub>の電解還元

次の候補は2次エネルギーである電力(地域集中使用が可能)の直接利用である。CO<sub>2</sub>の電解還元は、ギ酸・CO・メタン・エチレンなどを得るが、今は収率・選択性とも低く(電気エネルギーの1/3でいどの変換)、未来技術である。

5.3 CO<sub>2</sub>の水素還元

新エネルギーから電解水素へ誘導すれば、さらに広い合成反応への道が開ける。既に電力→水素のエネルギー移転率は、サンシャイン計画の成果で90%を越しているの、エネルギーシステムとしての水素ルートは可能性が保証されている\*\*。

\*\*脚注。電解の電力転換効率では十分な達成をみて、現在は高密度電解と長寿命に課題が移行している。(水素エネルギー読本, p.38, オーム社(1982).)

CO<sub>2</sub>の水素還元反応は収率・選択性が高く、可能性・信頼性も高いと予想される。

例: メタノール合成。



上の反応では、新エネ水素の保有エネルギーの94%が、生成メタノール(液体)へ移行する。(従来型メタノール合成のSyngas〔一酸化炭素+水素〕系の合成ではこの2倍の熱損失がある)\*\*\*

\*\*\*脚注。原料ガスの発熱量(171.3kcal)のうち10 Kcalを反応熱として失い、エネルギー歩留りは94%。従来型Syngasからのメタノール合成では、反応熱が22kcalで、エネルギー歩留りはもっと低く88%になる。

いわゆるNew Syngas〔炭酸ガス+水素〕からは、メタノールのほか、ギ酸、メタン、メタノール、DME、ガソリン、FT油、...などの合成が可能であるが、何を選ぶべきかは、次のような指針でできる。

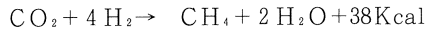
- ①製品の輸送・貯蔵性 (cal/ℓ, cal/g, 固・液・気状態などにより評価)
- ②合成技術の難易 (収率, 選択性, 触媒種)

- ③新エネ→製品→需要までのエネ減損度
- ④製品の需要規模 (化石燃料の数割を目標)

製品の輸送・貯蔵性からは、液体燃料、あるいは少なくとも液化可能物が望ましい。以下に合成物候補を吟味する。

○メタノール CH<sub>3</sub>OH: 石油タンカーで大量輸送が可能。高压合成だが、高収率・高選択性が期待できる。誘導体への出発点としても好適。

★メタンガス CH<sub>4</sub>: 既設のLNG基地隣接地域に限り、採用可能性がある。しかし合成反応熱損失(下式)が最大なので、トータルエネルギーとしては著しく不利である。



☆ギ酸 HCOOH: 炭酸塩水溶液に触媒下、水素を常温常圧吸収して生成。しかし、担持エネルギー量が少ないので、むしろ誘導体への出発点と考えられる。

○DME (ジメチルエーテルガス)(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>O: 代替LPガス。(メタノールから誘導) LPGタンカーで運べる。

◎ガソリン (およそ (CH<sub>2</sub>-<sub>n</sub>)<sub>n</sub>組成): モビル法(メタノールから誘導)の系統技術を改良して活用できる。cal/ℓ評価が優れている。市場性が最もよい。

○FT油 (およそ (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>組成): パラフィン系油で混合物。輸送安全性などで優れているが、用途が狭い。

合成原料の水素と炭酸ガスのいずれを合成工場へ運んでくるのが妥当か、はその発生点の相対的位置関係によって決まる。液化炭酸のほうが遥かに安全で取扱が容易であるが、重量は重い。図-5にシステム概念図を示す。

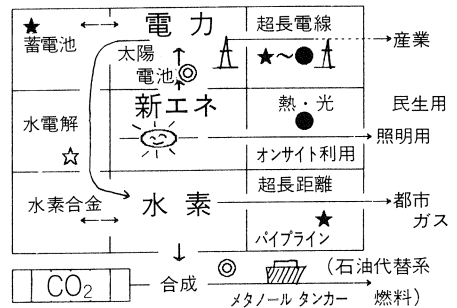


図5 新エネ+CO<sub>2</sub>結合による選択枝の拡大

7. 国際的エネ・資源の需給システム構築へ  
—砂漠国の新エネ資源と  
消費国CO<sub>2</sub>資源との連係—

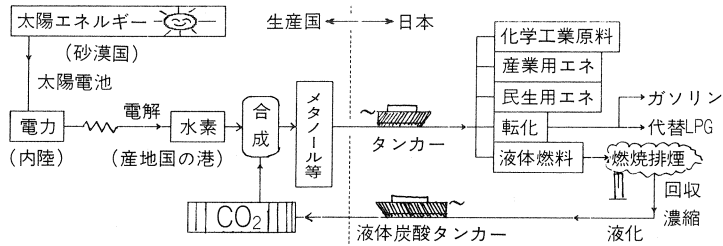


図-6 地球的エネルギー・炭酸ガス互惠システム

砂漠は、あり余る太陽エネルギーを保有しているが、水がないため有史以来、不毛の地であった。一方、太陽電池はエネルギー固定に水を必要とせず、光固定率は植物の10倍以上であるから、日射量の最も多いアラブ・アフリカ・オーストラリアなどの砂漠圏は（ポスト石油時代には）太陽エネルギーの輸出域となり得る。ただし、どのような形でその獲得エネルギーを輸出できるようにするかが、大問題である。その輸送形態候補としては、次のようなものがある。

- ①光：—●超長距離光ファイバー輸送
- ②電力：—●超長距離電線、●蓄電池輸送
- ③水素：—●超長距離ガスパイプライン、  
△液体水素タンカー
- ④有機液体（メタノールなど）：—○油タンカー

①は、今のところ情報輸送などノーブルユースにしか見込がない技術であり、エネルギー巨大輸送には適しない。②は、ジェネシス計画などで検討されており、室温超伝導が成功した暁には有力になるであろう。③は、サハラ→ヨーロッパのように比較的近接した条件では、かなりの可能性がある。

わが日本のように、産地—消費地が遠隔な場合、④の道が最有力候補とみなされよう。

日本は、エネルギーに関しては過去・現在・未来を通じて輸入国であることは認めなければならない。しかし、炭素源については、部分的に輸出国の役割も可能である。

有機液体（メタノールなど）を合成するには、エネルギーだけでは不可能で、炭素源が不可欠である。ところが、ポスト化石時代にはもはや、炭素源に化石燃料を使用することは許容されない。今や、炭酸ガスは貴重な炭素資源となる。一方、消費国では大規模燃焼からのCO<sub>2</sub>を30%（低コスト回収）～70%（高コスト回収）で回収できる見通しなので、これを炭素資源として当て込むと好都合である\*\*\*\*。幸いCO<sub>2</sub>は加

圧液化でき、LPGタンカーで長距離輸送に耐えられる。図-6に、その国際的なシステムの概念図を示した。

\*\*\*\*脚注。火力発電の排煙からの回収。発電コストの増加率で表示すると、CO<sub>2</sub>除去率50%で化学吸収法36%、膜分離法77%などのSteinbergの試算がある。その後、大幅コストダウンを目指した離回収技術の研究が開始されている。（内山洋司、エネルギー・資源、1989-4、38；伊東速水、化学工学、1990-1、38）

産エネ国、消費国、両サイドから見たこのシステムの利用価値についてまとめる。特に代表的な産油国の多くが砂漠国であることを考慮して例示する。

#### ☆砂漠産油国：

○石油輸出国からメタノール輸出国へ、ソフトランディングが可能になる（石油生産減少に合わせてメタノール生産へ切換え）。

◎農業国の植物生産よりも遥かに高い土地生産性を確保できるので、砂漠国は地球表面の最有効利用国になる。

○油田経営からの副産CO<sub>2</sub>を使って、早い時期からメタノール生産へ立ち上がることも可能である。

#### ☆消費国：

◎化石燃料が全滅しないうちに徐々にこのCO<sub>2</sub>回収システムを立ち上げれば、環境放出CO<sub>2</sub>の削減に直接、貢献できる。

○資源的に豊富な石炭の利用が、このCO<sub>2</sub>回収システムの稼働によって、全面禁止を免れることができる。

◎石油タンカーに代わってメタノールタンカーが入津すれば、エネルギー体系の混乱は最小限に止まり、石油枯渇にさいしての大きなショックを避けられる。

○この国際システム完成時には、日本はエネルギー消費国であると同時に、物質資源（CO<sub>2</sub>）供給国の一つとして認知され、CO<sub>2</sub>供給責任と権利を行使でき、バーゲニングパワーの点でも、一方的な国際関係に陥らずに済む。