

地球温暖化への対応

山田 興一

1. はじめに

エネルギー消費量は人口の増加，社会・経済の発展とともに急速に増加しており，商業燃料として消費された量は年間 100 億 toe（石油換算トン）にもなっている。このエネルギーの 90%近くは化石燃料によって賄われている。太陽光発電，風力，地熱，バイオマスなどによる新エネルギーの占める割合は水力を加えても 5%以下である。

この年間消費エネルギー量 100 億 toe の他に，約 10 億 toe のバイオマスエネルギーが非商業燃料として消費されている。

このように化石燃料が大量に消費されているため，資源枯渇，環境問題が引き起こされている。これら問題を解決するためには，再生可能エネルギー利用やエネルギー有効利用を推進する必要がある。現在，世界各国で数多くの新エネルギー技術，システムの開発が行われ，その実用化も進められている。しかし，経済的，社会的な障壁があるためにその使用量や実用化速度は低く，また人間活動の活発化が進んでいるため持続性社会構築は簡単ではない。このような状況下で，化石燃料燃焼に伴う二酸化炭素（CO₂）を中心とした温室効果ガス（GHG）の大気中の排出量が増大し，地球温暖化が進行している。この進行の認識が高まり，2007 年にドイツ・ハイリゲンダムで開催された世界主要国会議でも，日本が提案した「2050 年までに世界の GHG 排出量を半減する」を真剣に検討するとの声明が出された。

しかし世界経済不調の状況にあるため，本来 11 月メキシコで開催される国連気候変動枠組み条約第 16 回締約国会議(COP16)では京都議定書の延長の方向の議論がされる可能性がある。このような延長が決まると日本のみが経済的に大きな負担を負うことになる。日本が CO₂ 排出削減を進めることは重要であり，低炭素化を進めることにより経済的にも活発な明るい社会につなげることは可能になる。しかし，そのためには国際的な動向に調和し，日本の基盤強化にもつながる案を COP 16 でも主張せねばならない。

IPCC（後述）第 4 次報告書（AR4）^{1)~3)}を中心とした地球温暖化の現状と将来とその影響について述べる。

さらに，温暖化防止のための CO₂ 排出削減シナリオ，省エネルギー，再生可能エネルギー，CO₂ 分離回収・貯留（Carbon dioxide Capture and Storage：CCS）を中心とした対策技術について説明する。

2. 地球温暖化の現状と将来

世界の科学者が温暖化問題に対して議論する場として，国連と世界気象機関が 1988 年に「気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）」を設立した。そこで 2007 年に 3 つの作業部会 WG 1(自然科学的根拠)WG 2(影響・適応・脆弱性)、WG 3(気候変更緩和策)から AR 4 が発行された。その中で 20 世紀前半の自然要因、後半の人為的要因の説明がつくようになり、これまでより強く人間活動により地球温暖化が進行しているとの認識が示された。

2.1 . CO2 排出量増大による大気中濃度上昇と気温上昇の現状

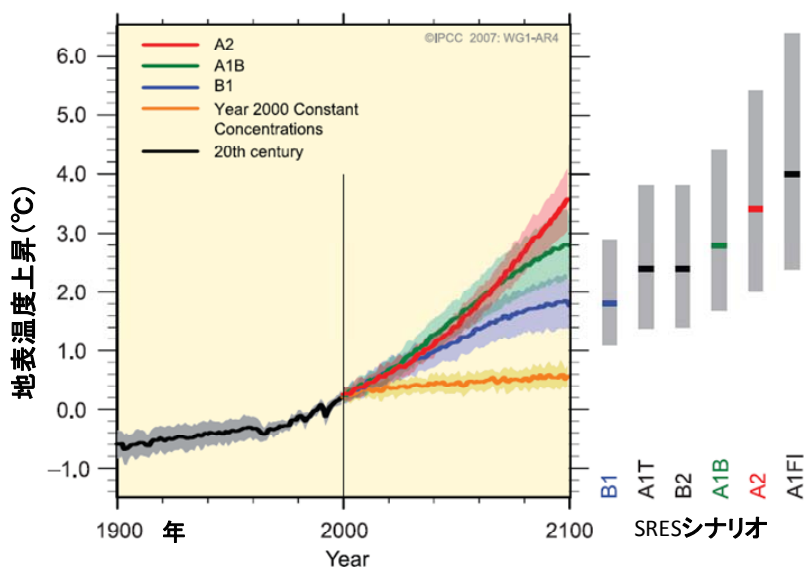
主に化石燃料起源のCO₂ 排出量は、1990年に212億tCO₂(tCO₂は二酸化炭素換算トン)、2000年に234億tCO₂、2007年には288億tCO₂と急増している⁴⁾。これに森林の農地化など土地利用変化のために年間59億tCO₂が排出されている。そのため、CO₂大気中濃度は産業革命時の値280ppmから2005年には379ppmに増加した。他のGHGも同様に上昇しており、現在の人為起源のCO₂、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)、ハロカーボン類の放射強制力はそれぞれ1.66、0.48、0.16、0.34 W/m²となっている¹⁾。このようなGHG濃度上昇によって、世界平均気温は過去100年間(1906年～2005年)で0.74℃上昇している、

2.2 . 今後のCO2 排出量と気温上昇

GHG排出量が今後どのように推移し、それにより気温がどう上昇していくかを知るために、IPCCでは2100年までのSRES (Special Report on Emissions Scenarios) シナリオ⁵⁾を作成した。

それは経済成長、世界人口、グローバル化、技術導入、環境対応などの異なった6つのシナリオグループに分類されている。それらのシナリオに対して2100年までの全球的温度上昇結果(第1図)がAR4WG1から出された。

その値は、2100年には最小排出量シナリオに対して1.8℃(1.1℃～2.9℃)、最大排出量シナリオに対して4.0℃(2.6℃～6.4℃)であり、最良推定値は3.0℃である。しかし、どのシナリオを取っても今世紀もエネルギー源の主力は化石燃料である時代が続くことになっている。



第1図 気候変動の将来予測¹⁾ (IPCCAR4, WGI)

2.3 . 温暖化の影響

気候変化と自然環境、人間環境で観測された変化との関連性に関する研究の数が増え、データセットの精度も高まった。今回の AR4 (WG1) には気温上昇によって自然システムが影響を受けている確信度は高くなっており、水、生態系、食糧、沿岸域、健康面などへの影響は 1980 年～1999 年の世界平均気温より 1°C 上昇すると生態系に現れ、3°C も上昇すると全世界で影響が大きくなることが記されている。

現在のペースでGHG排出が続くと 22 世紀初めには世界の国内総生産 (GDP) の 5%～20% が失われるが、GHG濃度を産業革命時の 2 倍程度で安定させるための費用はGDPの 1%程度であると Sternが報告する⁶⁾など、温暖化の経済への影響の議論が盛んになっている。Nordhouseらは 2.5°Cの上昇によりGDPは 1.5%減少すると述べている⁷⁾。

温暖化による経済的損失の精度はその影響の予測のむずかしさのため緩和策の経済評価精度より低くなっている。しかし今後大規模に緩和策を社会に取り入れても温度上昇は避けられない。そのため温暖化緩和策と適応策を総合的に考えて、研究開発、計画、社会での実施を進める必要がある。特に超高齢化社会に突入している日本では、活性化に向けて街、都市、地域を再構築せねばならず、その際に低炭素化と気候変動への適応を組み合わせることが重要である。

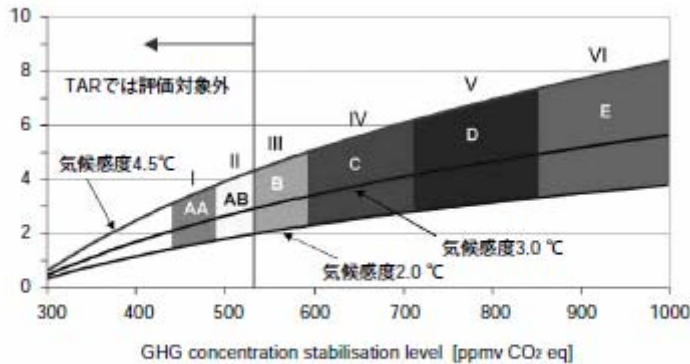
3 . CO₂ 排出削減シナリオ

CO₂ 安定化濃度と気温上昇の関係が第 2 図に示すように AR 4 では大気中CO₂ 濃度が 2 倍になった場合の温度上昇幅(気候感度)は 2～4.5°C と見積もられた。前節 2 に示したように将来世界が進むシナリオによって変動する温度上昇や気候感度幅の大きさを考えると、CO₂ 濃度をどの程度で抑え、CO₂ 排出量をどの程度にするかが直ちにはわかり難い。Mattheusら⁸⁾は多くのモデルをまとめた結果、累積CO₂ 排出量と気温上昇がほぼ直線関係(1.7°C/TtC, 0.46°C/TtCO₂)であることを報告している。この関係を使い、SRESシナリオのCO₂ 排出量の低いB 1 から高いA1Cの 2000 年から 2100 年の間の累積CO₂ 排出量と気温上昇を計算した結果を第 3 図に示した。

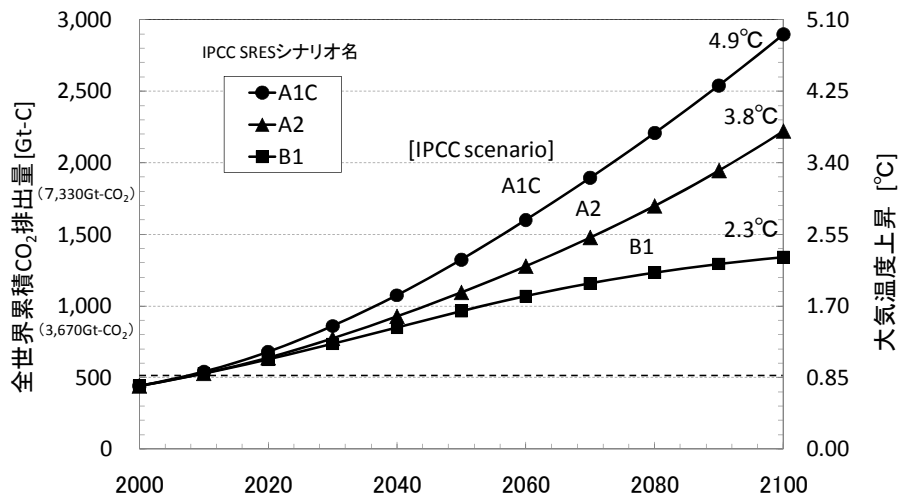
2100 年までに非 OECD 国の 1 人当たり GDP を現状の OECD と同一水準にするにはこれまで OECD の全 GDP の約 4.3 倍の値になる。OECD の CO₂ 排出量を今後 0 にしてもこれまで主に OECD が排出した累積 CO₂ 量の 1.5 倍の排出量で GDP を 4.3 倍にすることに相当し、これは容易でない。

EU が主張している気温上昇 2°C安定化は、目標値としては、厳しい値であることがわかる。

第 3 図は 2100 年以後 CO₂ 排出量を 0 にすれば 2100 年時点での気温上昇で安定化するというものであり、以後も CO₂ を排出すればその量に応じて気温上昇が続く。



第2図 産業革命時よりの地球平均気温上昇とGHG安定化濃度¹⁾



大気温度上昇[°C]= 累積CO₂排出量 [Tt C] × 1.7 [°C/Tt C]から算出
(TtC=10¹²t炭素換算量)

第3図 産業革命からの累積CO₂排出量と大気温度上昇の関係

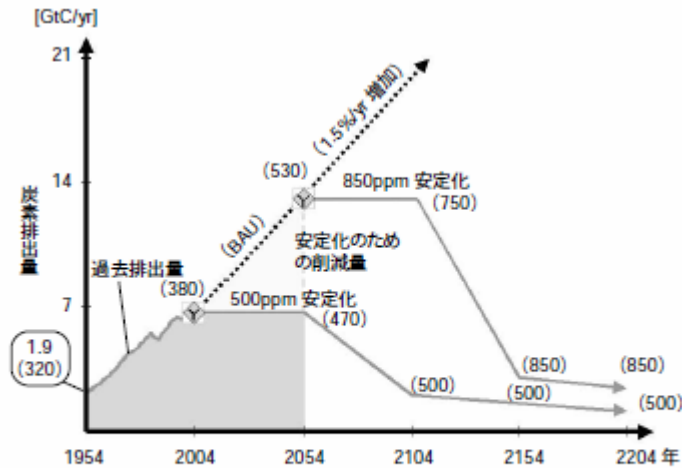
3.1 . CO₂ 500ppm 安定化シナリオ

CO₂ 安定化濃度を 500ppmとした場合、直ちに削減量の大きな対策を導入しないと安定化は困難になるというシナリオである⁹⁾。第2図の2004年から2054年間の排出量である三角形面積で示されているように、今後50年間で通常の方針(BAU)しか取らない場合に比べて25 GtC(92GtCO₂)削減する必要がある。今、直ちに削減対策技術を導入し、その削減量を50年間直線的に増加させるとすると50年後に7 GtC/y(25.7GtCO₂)を削減する必要がある。1 GtC/yの対策技術を7つ適用すればよいことである。

現在の技術水準で適用可能で、しかも1 GtC/y(3.67GtCO₂)の削減ポテンシャルのある技術として、①20億台の自動車の効率を2倍にする(13 km/l→25 km/l)、②建物、家電エネ

ルギーの費量を 25%削減する, ③1400 GW の石炭火力発電所を天然ガス発電所にする, ④ 800 GW 石炭火力発電所に CO₂ 分離回収・貯留 (CCS) を導入する, ⑤700 GW の石炭火力発電所を原子力発電所にする, ⑥700 GW の石炭火力発電所を太陽光発電システムにする, ⑦熱帯林減少を 0 にし, 300 Mha の植林もする, など 16 項目を例示している。

このような大規模システムを今から 50 年間導入し続け, その後も 2054 年以降の線で示されているように更に CO₂ 排出削減対策を強化し, 例えば 2080 年の CO₂ 排出量は 1990 年の 40%に削減する必要がある。

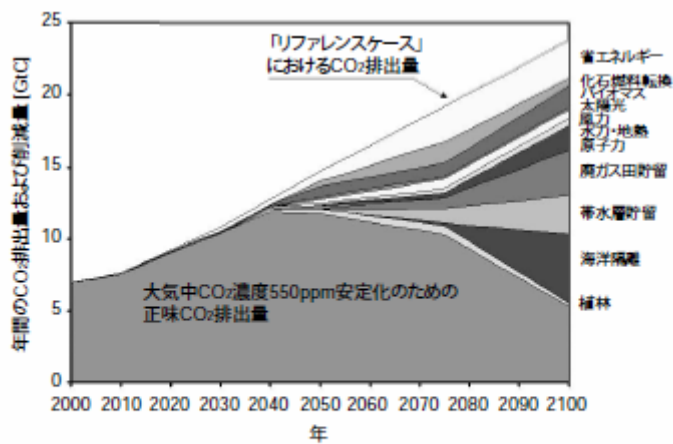


第 4 図 CO₂ 削減への挑戦⁹⁾

3.2 . CO₂ 550ppm 安定化

2100 年時点で大気中 CO₂ 濃度を 550ppm で安定化させるためのシナリオが茅らにより報告されている¹⁰⁾。

対策技術の導入時期, 導入の割合は, エネルギーコストを最小化するモデルシミュレーションより決定されている。第 5 図に示すように, 2100 年での対策の 55% が火力発電所排ガスなどからの CO₂ 分離回収・貯蓄 (CCS) の導入になっている。2100 年の一次エネルギー消費量は 213 億石油換算トン (890 EJ) で SRES の B1 シナリオ⁵⁾ (514 EJ) よりは高く, 2007 年の一次エネルギー消費量の約 1.9 倍にもなっている。



第5図 再生シナリオにおける対策技術別のCO₂排出削減量¹⁰⁾

4. CO₂削減技術

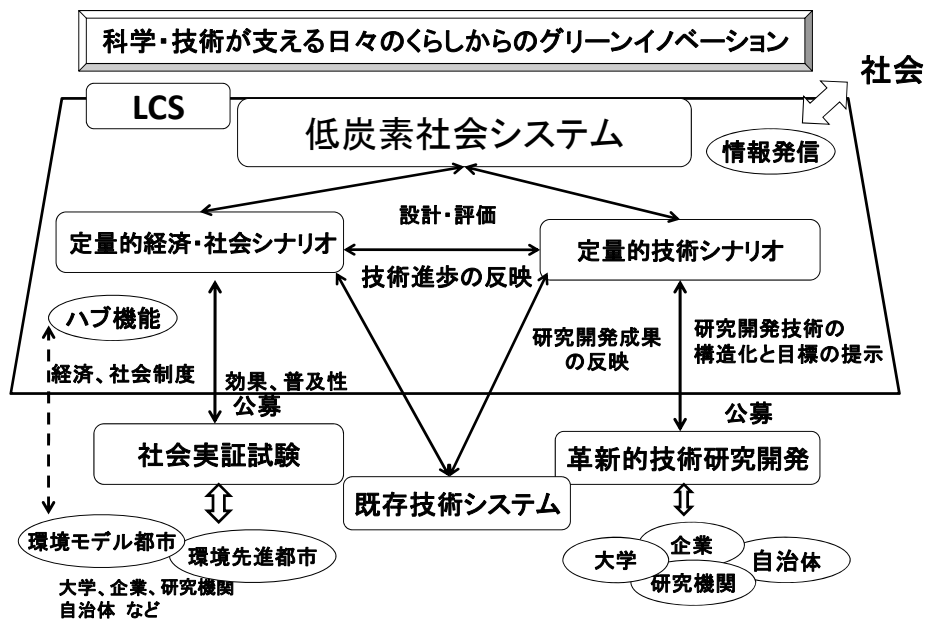
前章で述べたように、CO₂削減対策技術は多くある。

コスト最小化シミュレーション結果¹⁰⁾からでも、コストを考慮せずCO₂削減ポテンシャルの高い技術を選択した結果⁹⁾からでも、今後50年～100年の期間で重要なCO₂削減技術、システムは、①省エネルギー、②再生可能エネルギー、③CCS、④植林であることがわかる。

これらの中で①、②は化石燃料消費量は削減される。しかし、③CCSはCO₂排出量は削減されるが、回収、貯蓄のためのエネルギーを消費するため化石燃料消費量は増加し、資源問題は増幅されてしまう。

日本では、省エネルギー技術が世界で最高レベルに達しており、生産部門でのCO₂削減が容易ではない。CO₂排出量を大幅に削減するには「日々の暮らし」の視点が重要である。昨年2020年に1990年比で25%のCO₂削減という鳩山プランが出された。国際的に不利になるような取り扱いをしてはならないが、短期間に大幅削減という高いハードルをどう越すかを考えることにより、世界に先駆けて明るい低炭素社会を築く機会となる。この機会を生かすために科学技術振興機構に低炭素社会戦略センター(LCS)が2009年12月に設立され、筆者もそのメンバーの1人となっている。

LCSの活動の概要を第6図に示す。活動の詳細な説明はホームページ¹¹⁾に譲る。以下に省エネルギー、再生可能エネルギーの代表として太陽光発電CCSについて述べる。



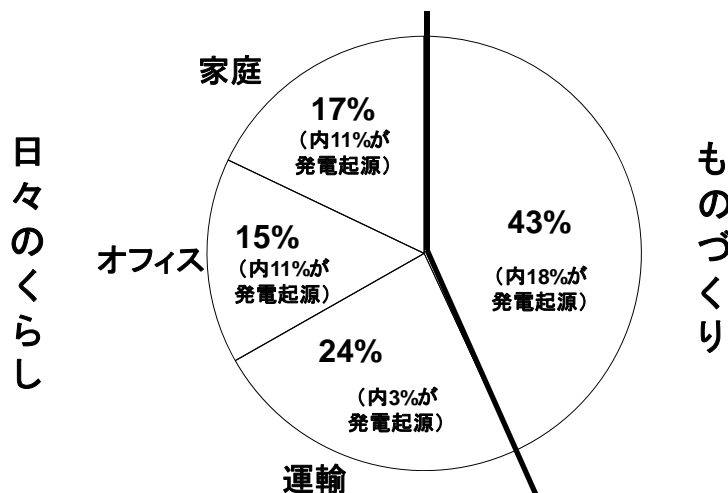
第6図 グリーンイノベーションに向けた低炭素社会戦略センターの活動

4.1 . 省エネルギー

CO₂ 排出量の大きい部門として、従来の分類では鉄鋼などの産業部門、業務・家庭などの民生部門、自動車・航空などの運輸部門となる。しかし、「日々の暮らし」と「ものづくり」の分類にすると第7図の示すように CO₂ 排出量はそれぞれ 57%, 43%の比率となり、「日々の暮らし」は豊かな低炭素社会を考える領域であることがわかる。この領域では供給エネルギーの効率向上による低炭素化として発電効率の向上、送電効率向上、電力と熱の供給源としての燃料電池利用などがある。これらの対策は技術的に進んでおり飛躍的な効率向上は難しい。それでも時間はかかるが、10%オーダーの CO₂ 排出削減は可能である。

それに比べると需要側の家庭、オフィスで使用している冷暖房、照明、給湯の効率向上の余地は大きい。更に、住宅の断熱化による省エネルギーも大きい。

また、全 CO₂ 排出量の 20%を占める自動車の省エネルギーポテンシャルは高い。日本の自動車は他国のものに比べて効率が高く低燃費である。外国車比で、燃費は同一重量車で 80%となっている。それでも走行に利用されているエネルギーはガソリン燃焼熱の 15%程度であり、省エネルギーの余地が大きい。車体軽量化、最適タイヤ設計による接地抵抗摩擦の低減や車体デザイン改良による流体摩擦抵抗の低減による走行エネルギーの削減とともに、プリウスに代表されるガソリンエンジンー電池の組み合わせによるハイブリッド車、燃料電池車、電気自動車などの利用により、エネルギー効率が向上し、単位走行距離当たりの CO₂ 排出量も現状の 1/5 以下になるであろう。最終的には電気自動車が主力になるであろうが、そのためには電池の性能向上、例えば高エネルギー密度化(1kWh/kg)、長寿命化(10年)、低コスト化(10円/kWh)など高い障壁がある。



2008年度 最終消費量340Mtoe、CO₂排出量:1100Mt (エネルギー・経済統計要覧⁴⁾)

第7図 日本の部門別CO₂排出割合

4.2 . 再生可能エネルギー

水力発電，太陽光発電，風力発電，バイオマスエネルギーなど，多くの再生エネルギー利用システムがあるが，大規模利用の進んでいる水力発電と古くからの薪炭エネルギーを除くと，他の再生エネルギーシステムの規模は未だ小さい。

太陽電池は各国での支援制度と技術開発，市場拡大によりコストが下がり，生産量は年率45%（1999年～2009年）もの高さで増加し続けている。その発電量は総発電量の0.1%と上昇している。

太陽電池利用はCO₂削減に効果があり，コストを下げれば社会発展にも役立つ。CO₂削減のためにLCSでは2020年に30～40GW，2030年には60GW以上の発電を目標にしている。そのために発電コストを先ず家庭買電価格の約20円/kWh，最終的には火力発電コストの5～10円/kWhを目標にせねばならない。どのような方向で技術開発を進めれば目標を達成するのかLCSで検討をしている。

我々は15年程前に将来のSi太陽電池の環境，経済性評価した。プロセス設計をして，主要機器の材質重量，エネルギー消費量，コストを求めて太陽電池モジュールのCO₂コストなどを算出した¹²⁾。生産量は当時の最大規模であった10MW/年を基準に10,000倍の100GW/年まで広げた。Siの製造法は現在と違うSiO₂の炭素還元法にしたが，この結果を使って現在のSi太陽電池を考察することはできる。結果の一つである生産規模，発電効率，製造技術進歩(装置大型化，生産速度向上)とコストの関係を第8図に示す。スケールメリットは1GW/年までは大きいですがそれ以上では小さかったモジュール発電効率が17%になると年産1GWでも100円/W程度になり，このモジュールを家庭で使うと20円/kWh程度にはなるので第1目標には到達する。モジュールのコストを詳細に見るとモジュール化時のガラス，アルミなどの材料費が総コストの50%以上となる。

そのため大幅なコストダウンには効率向上による軽量化(材料削減)が必要である。将来の 50%以上の効率が期待される量子ドット太陽電池の詳細なコスト計算などをLCSで進めている最中であるが大雑把に云えば、製膜速度が非常に速ければ 50 円/W以下のコストになり得る。これを使えば 10 円/kWh 以下の発電コストも可能となる。無毒、安定、資源量の多い材料から高効率太陽電池を製造し、モジュール材料も軽量化するなどの開発を進めて、5 円/kWh 以下の発電コスト低下に向かう必要がある。

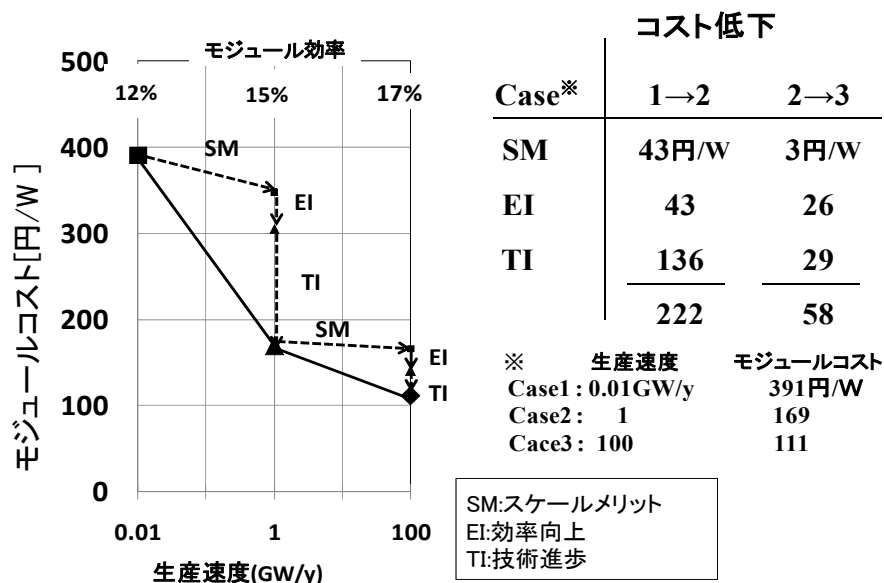
太陽集光により、太陽電池の面積を小さくし発電効率も高めることには可能であるが、集光器の材料は必要で、その重量は集光発電のない場合の太陽電池モジュールの重量と同程であるため、発電コスト低下に大きくは効かない。

さて、太陽光発電の導入比率が高くなると既存の系統連携電力網の安定性を乱す。この導入比率の影響については、供給、需要構造により変化するため¹³⁾、LCSでも定量的な検討をしている。日本で 60GWの太陽電池を設置すると総電力の約 5%となる(2030 年)。この場合 5 月の連休時などの特異日に太陽光電力が使い難く、その太陽光による余分の電力は年間発電量の 1%程度で、その分を蓄電するには最低 2 時間分(60GW×2h=120GWh)の蓄電池が必要であろう。現状の蓄電池コストだと投資額は 10 兆円にもなる。

それに比べると余分の電力コストは 100 億円総額である。どちらの方法も社会全体の最適解ではない。

太陽光電力比率を高めても環境性、経済性、利便性の高い社会構築のために家庭、運輸、製造業などのエネルギーを最適に組み合わせて、制御するスマートグリッドへの展開は低炭素社会に有効である。

話題は変わるが、バイオエタノールやバイオディーゼルが注目を浴びている。しかし、インドネシアやタイの泥炭湿帯開発地からのオイルパームのディーゼルは低 CO₂ 排出燃料ではない。それは開発された乾燥地では泥炭が酸化され、そこで生成した CO₂ を計算に入れるとバイオディーゼルが石油からのディーゼル油よりクリーンとは言えないからである。バイオマス燃料の CO₂ 排出量についてはその生産地の状況についても考慮し、評価する必要がある。



第8図 多結晶Si太陽電池のコストと生産規模・技術

4.3 . CO₂分離回収, 貯留 (CCS)

21世紀も化石燃料の時代が続くと予想されるため、CO₂削減のために削減ポテンシャルの大きいCCSが注目を浴びている。

しかし、日本ではCCSを導入すると化石燃料の輸入量が増加する。また、回収CO₂を枯渇油田に注入することにより石油回収を増進(EOR)する経済性の高い方法や枯渇天然ガス田に貯留する方法があるが、日本ではそのような方法を適用する所がない。

CO₂削減ポテンシャルは大きいですが、資源、環境性などの点から実際の適用の方向を決めるには更に検討を続ける必要がある。

[1] CO₂分離回収技術

代表的なCO₂集中排出源の一つが火力発電所である。1GW(100万kW)の石炭火力発電所からは年間炭素換算で160万t(1.6MtC)ものCO₂が排出される。

このように大量に発生するCO₂を分離する方法としては、化学吸収法、物理吸収法、吸着分離法、膜分離法、深冷分離法などがあるが、大型化が容易でスケールメリットもある化学吸収法は石油増進回収法(EOR)やLNGからのCO₂分離法への使用実績も多く、その改良も進められている。

物理吸収法は、化学吸収に比べると吸収液とCO₂との親和エネルギーが低く運転エネルギーを低くすることが容易であるが、吸収速度を高めるために高圧での吸収が必要である。そのため、高圧の合成ガス製造工程では実用化もされている。

ここでは、通常は常圧燃焼排ガスの出る火力発電所への適用が容易な化学吸収法について説明する。

化学吸収法は、アルカノールアミンなどアミン系水溶液が、CO₂と反応しやすい性質を利用して、排ガス中のCO₂を分離する技術である。排ガス中に8%~14%程度含まれている

CO₂は約 50°Cの吸収塔内でアミン系水溶液と接触して、その 90%以上がアミン炭酸塩を形成し吸収液中に固定される。このアミン炭酸塩の水溶液は、加熱され（110°C～130°C）、アミン水溶液と CO₂に分離され、前者は循環使用され、後者は回収される。回収された CO₂の純度は 99%以上にすることも可能である。

この方法によりCO₂を分離回収するコストは、スケール、エネルギーコストにより異なるが、日本の立地では 4000 円/tCO₂～7000 円/tCO₂と言われている¹⁴⁾。このコストのうち、1000 円/tCO₂が固定費であり、残りの 3000 円/tCO₂～6000 円/tCO₂がエネルギー費用を主とした変動費である。このように、コスト面からもプロセスの省エネルギー化が重要課題である。吸収液としてモノエタノールアミン（MEA）を使用した現状技術でのエネルギー消費の内訳、その消費量と理論値の比較を以下に示す。

10%の CO₂を含有する排ガスから 1 t の CO₂を分離する消費エネルギーは約 2.7 GJ であり、その内訳は吸収液からの CO₂の脱着に 68%、吸収液加熱に 27%、吸収液循環動力に 5%となっている。理論 CO₂分離エネルギーは 0.19GJ/tCO₂であり、分離エネルギー効率は 7%（=0.19/2.7）と非常に低い。

石炭を燃やし、その排ガスから CO₂を分離すると、燃焼エネルギーの 28%が分離のために消費され、その余分の消費が石炭資源寿命の短縮を招く。そのため、分離回収エネルギー効率の向上はコスト低減と省資源化に大きく貢献することが明らかである。分離エネルギー低減のための最重要項目は、CO₂脱着エネルギーの低下である。CO₂吸収を低温で、脱着を高温で進めるため、吸収反応熱の回収ができない。省エネルギー化のためには、CO₂と吸収液の反応熱を下げる必要がある。

種々の改良によりこの分離回収、貯留全コストを 2015 年までに 3000 円/tCO₂、2020 年以降には 2000 円/tCO₂に下げることが目標とされ、ロードマップが作られている¹⁵⁾。

[2] CO₂ 地中貯留

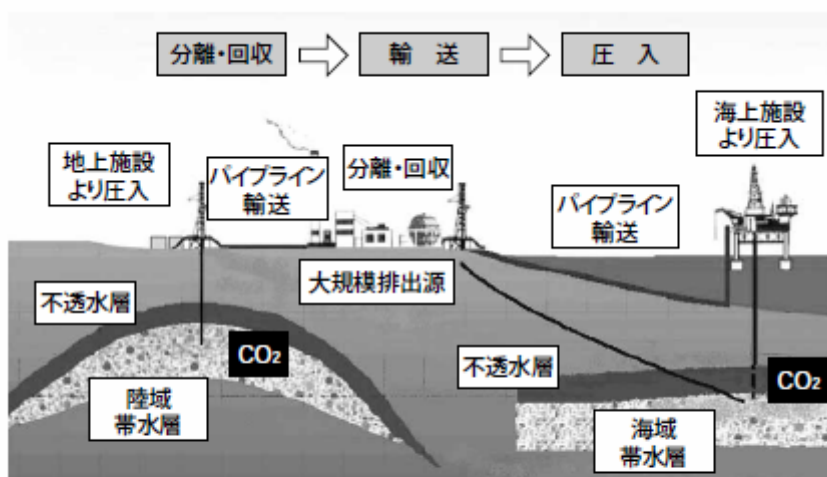
CO₂の貯留場所としては、海洋と地中の 2 つがある。海洋は貯留ポテンシャルが大きく、一時貯留研究は進んだが、欧米主導の 2000 年以後は地中貯留が実用化の主力として商業化プロジェクトが進められている。

地中貯留層の候補としては油田およびガス田、炭層、帯水層があり、それぞれの世界貯留容量は 675 GtC～900GtC、3 GtC～200 GtC、1000 GtC～10000 GtC（それぞれの数値を 3.7 倍するとGtCO₂となる）大きなポテンシャルが報告されている¹⁶⁾。

日本の貯留ポテンシャルは 40 GtC¹⁷⁾と、現在の日本のCO₂排出量の 100 年分程度である。

帯水層の貯留技術は第 9 図に示すように、不透水層に挟まれた空隙のある砂岩や堆積炭と、その空隙を満たす水からなる帯水層へCO₂を圧入し、貯留するものである。帯水層中へのCO₂貯留法の長期間安定性、立地選択に対して、天然ガス田でのCO₂と貴ガス同位体の測定によりCO₂溶解、析出挙動を考察して、CO₂溶解水移動の重要性が示された¹⁸⁾。CCS全コストを現状の 15000 円/tCO₂から 2000 円/tCO₂へのコストダウンに向かって開発が進められている。これは石炭火力の場合、CO₂排出を 90%削減するために必要な上乗せコストを 1 kWhあたり 13 円から 2 円程度にすることに相当する。

地中貯留の実用化には技術開発による数分の 1 以下へのコストダウンも重要であるが、同時に社会受容性を高める必要がある。



第9図 CO₂ 地中貯留（帯水層貯留）技術の概要¹⁴⁾

5. まとめ

IPCC報告書内容の信頼性をより高めるためには報告書にする組織の、統治法、透明性の改善は必要であるが、AR4 で述べられた人為的要因で温暖化が進行しているとの説明は正しいとの認識は確認された¹⁹⁾。

平均気温上昇を 2℃～3℃に抑制することは容易なことではない。しかし、温暖化抑制のために豊かな低炭素社会を設計することにより、再生可能エネルギー利用、省エネルギー化などが進み、エネルギー分野を中心に広く産業分野での構造変化が起こり、それらを明るい日々の暮らしに結びつけることも可能になる。その基盤は科学技術である。

参考文献

- 1) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press) (2007)
- 2) Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press) (2007)
- 3) Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press) (2007)
- 4) 日本エネルギー経済研究所：エネルギー・経済統計要覧（省エネルギーセンター，2010）.
- 5) IPCC: Emissions Scenarios (Cambridge Univ. press) (2000).
- 6) <http://www.sternreview.org.uk/> (参照 2007.9.5).
- 7) W. D. Nordhouse, et al. : Warning the World - Economic Models of Global Warming. (MIT press, London) (2000).
- 8) H.D. Mattheus et al. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. Nature 829~832, 459 (2009)
- 9) S. Pacala, et al. : Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. Science 305, pp.968-972 (2004.8).
- 10) RITE : 「地球再生計画」の実施計画策定に関する調査事業
<http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/systemken.html> (参照 2007.9.5).
- 11) <http://www.jst.go.jp/lcs/>
- 12) 山田興一・小宮山宏：太陽光発電工学(日経B P 2002).
- 13) 萩本和彦他，太陽光発電を含む表期電力需給計画手法，
IEEJ Trans.PE,130,575-583(2010)
- 14) 地球環境産業技術研究機構：CO2 貯留テクノロジー（工業調査会）(2006).
- 15) 経済産業省産業技術環境局：二酸化炭素の分離回収・地中貯留の現状と今後の方向について CCS2020 (平成 18 年 5 月 17 日).
- 16) B. Metz, et al. : Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. (Cambridge press) (2005).
- 17) RITE/ENAA：二酸化炭素地中貯留技術開発 平成 17 年度報告書(2006).
- 18) S.M.V.Gilfillan et al. Solubility trapping in formation water as dominant CO2 sink in nature gas fields, Nature 458, 614~618(2009)
- 19) Nature 467,14(2010)

《プロフィール》

山田興一（やまだこういち）

1962 横浜国立大学工学部卒業，東京大学工学博士（1982）
1962-1996 住友化学工業（株）
1967-1968 マックスプランク研究所（金属）客員研究員
1991-1996 東京大学（工）地球環境工学寄附講座客員教授
1996-1999 東京大学工学系研究科化学システム専攻教授
1999-2004 信州大学繊維学部精密素材工学科教授
2004-2006 奈良先端科学技術大学院大学客員教授
2004-2008 成蹊大学工学部特別研究招聘教授
2006～ Edith Cowan University(オーストラリア)客員教授
2005-2006 地球環境産業技術研究機構理事
2005- 2009 東京大学理事
2009～ 東京大学総長室顧問
科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター副センター長

専門： 電気化学，化学工学，地球環境工学

主な著書： エコマテリアル入門（オーム社，1999）
新エネルギー自動車の開発（CMC，2001）
太陽光発電工学（日経BP，2002）