

地球温暖化 緩和技術とその評価

2007年、「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」は、第1作業部会報告書(自然科学的根拠)、第2作業部会報告書(影響・適応・脆弱性)、第3作業部会報告書(気候変動の緩和策)および、これらの内容を分野横断的、有機的に取りまとめた統合報告書から構成される第4次評価報告書を取りまとめました。その中で、地球の気候システムに温暖化が起これ、その原因がほぼ間違いなく人為起源の温室効果ガスの増加によるものであると発表しています。さらに、適切な緩和策の実施によって世界の温室効果ガス排出量の伸びを相殺、削減できることについて強く言及しています。産総研では、地球温暖化対策に関連した政策立案や政策遂行を支援するための提言を積極的に行うとともに、「第2期研究戦略(環境・エネルギー分野)」(平成17年4月策定)の中で温暖化防止とその評価への貢献を目指す戦略目標を掲げ、多岐に渡る研究分野において緩和技術やその評価研究に取り組んでいます。この特集では、まず始めにIPCC第4次評価報告書における調査結果と、産総研の研究者もその執筆に深く関与したIPCCの2つの特別報告書の概要を紹介し、国際的な枠組における温暖化緩和策の議論や取り扱いの現状等を解説します。また、さまざまな分野において温暖化の緩和に資する技術が提示・実用化される中、それらの技術や環境への影響についての適切な評価が求められています。ここでは、有望な緩和策として期待されている二酸化炭素回収貯留技術および、すでに実用化が進んでいるクリーンエネルギーや再生可能エネルギーの利用技術などについて、産総研が取り組んでいる評価研究の成果についても紹介します。

特集企画担当

神本 正行 研究コーディネータ(環境・エネルギー担当)
鈴村 昌弘 (環境管理技術研究部門)
佐野 泰三 (イノベーション推進室)

持続的な世界での気候変化の緩和

— IPCC 第4次評価報告書における調査結果 —

2007年10月に開催された「産総研 環境・エネルギーシンポジウムシリーズ 特別講演会 IPCC WG IIIの活動と第4次評価報告書の取りまとめ」において、IPCC第3作業部会共同議長であるBert Metz 博士(オランダ環境評価局)がIPCC第4次評価報告書について講演しました。以下はその講演をまとめたものです。



Bert Metz 博士

気候変化は持続的発展を脅かすだろうか？

現在の世界の平均気温は、すでに産業革命前よりも約0.7℃高くなっています。これにより、降水のパターンが変わってきているほか、氷河の後退、北極氷、グリーンランド氷床などの融解が起これています。サンゴ礁が絶滅の危機に瀕しているように、生態系にも著しい影響が見られるようになりました。熱波、干ばつなどの極端な気象現象が頻繁になり、熱帯低気圧の激しさは増えています。気温の上昇とそれ

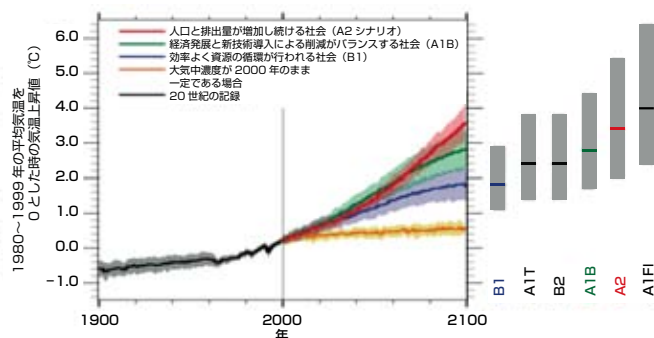


図1 さまざまなシナリオにおける将来の気温上昇の予測

に伴う現象の原因は、ほぼ間違いなく(90%以上の確率で)、人間活動によって急激に増加した温室効果ガスである

と結論づけられました。

将来の社会について予想したシナリオで検討してみると、地球の平均気温



は、2100年までに1980～1999年よりも1.1～6.4℃上昇すると予想されています(図1)。これらの気候の変化がもたらす影響は深刻であり、人類の対応能力を超えてしまう恐れがあります。数度の気温上昇で、熱帯域での食料生産性は減少し、より多くの人々が渇水と洪水に直面し、生態系が危機に瀕し、疾病が増える可能性があります。このように気候変化の影響は持続的発展にとって重大な脅威となり、経済的に表現すると、世界のGDPの5%を帳消しにしてしまうと考えられています。

温室効果ガスの排出抑制技術は、持続的な将来のために気候変化を抑制できるか？

温暖化ガスの排出を抑制したり、生物圏による二酸化炭素(CO₂)の吸収を増加させるための技術が利用可能になってきています。たとえば、高効率な電灯や自動車、風力、バイオマス、原子力、地熱、太陽光などの低炭素発電技術、メタン、窒素酸化物の発生を回避する技術、森林破壊防止技術、農地や森林の管理技術などです。また、自動車用の燃料電池、廉価な太陽電池、新たな省エネルギー技術や潮力・波力エネルギーなどが開発中です。これらの技術革新のシナリオに基づくと、大気中の温室効果ガス濃度を450 ppmv(CO₂換算、現在は380 ppmv)程度に安定化させることが可能だと考えられています。

新しい技術を受け入れることは社会的、経済的な理由から時間がかかることですから、450 ppmvが達成できる最少レベル(最も高い目標)であろうと思われます。これを達成するには2050年までに現在より排出量を50%減少させる必要があり、大きな努力をすぐに

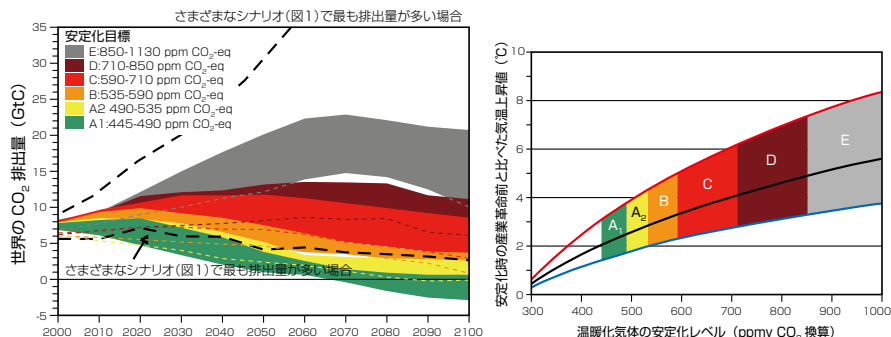


図2 温室効果ガス排出量と安定化大気中濃度との関係

開始しなければいけません。しかし、450 ppmvレベルで安定化しても、平均気温は約2℃上昇するので(図2)、ある程度影響を受けることが懸念されます。いくつかの国と環境NGOは、持続的な発展のために2℃程度の気温上昇にとどめるべきであると主張しています。有効な戦略を立てて実行すれば、この削減シナリオは年間の経済成長に数割の減少をもたらす程度ですが、一方で排出抑制策が成長の大きな妨げになるという主張もあり、このような排出抑制シナリオを現実のものにすることは、大変な挑戦です。

持続的発展のために何が求められているか？

このようなことから、純粋に気候問題に挑む政策だけで十分な効果を発揮できるかは、疑わしいと言わざるを得ません。しかし幸いにも、各国の発展を犠牲にすることなく、温暖化気体の排出を抑制させることができる多くの手法があると思われます。それらの例を列挙してみました。

- ・ マクロ経済政策：税金、補助金やほかの財政政策の設計、構造調整
- ・ 貿易政策：低炭素製品に対する障壁の排除、国内のエネルギー源の促進

- ・ エネルギー安全保障政策：効率的なエネルギーの利用、国内のエネルギー源の促進
- ・ 近代的エネルギーへの転換を向上させる政策：バイオエネルギー、貧困の関税
- ・ 大気質に関する政策：クリーン燃料、非化石燃料
- ・ 銀行貸出政策：高効率、再生可能エネルギーへの融資、発展途上国で旧来の技術に留まってしまうことを防ぐための融資
- ・ 保険政策：保険料の差別化、損害賠償責任保険の除外、グリーン製品に対する条件の見直し

また、気候変化に弱い部分を補強するために、社会基盤設備の整備を再考したり、農業、沿岸開発などの政策を充実させることができるでしょう。

気候変化の危険性を避け、世界の真の持続的発展を現実化するためには、このようにさまざまな手段を使った戦略が必要です。地球温暖化問題は、気候変化に対する直接的な対策のみでは解決することができないのです。

環境管理技術研究部門長
原田 晃

オゾン層に関する IPCC/TEAP 特別報告書 (2005) の概要

特別報告書作成の経緯^[1]

1987年に採択された「モントリオール議定書」は、オゾン層破壊物質(ODS^[2])の段階的全廃を義務付けています。議定書制定前には約180万 t生産されていたODSは1995年末の先進国の全廃を契機として、2005年には約9万 tまで減少しました。この削減に大きな役割を果たしたのが、非フッ素系の代替技術とならんで「代替フロン」と呼ばれるハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)およびハイドロフルオロカーボン(HFC)でした。なかでもCFC-12(CCl₂F₂)の代替品であるHFC-134a(CF₃CH₂F)はカーエアコン用冷媒として急速に普及してきました。ところが、このHFCはパーフルオロカーボン(PFC)などとともに温室効果ガスとして「京都議定書」では削減対象となっていて、産業界では両議定書の狭間にあって対応に苦慮しています。

2002年に国連気候変動枠組条約加盟国ならびにモントリオール議定書締

約国は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)および国連環境計画(UNEP)の技術・経済アセスメントパネル(TEAP)に対して、「オゾン層と地球気候システムを守る：HFCおよびPFCに係わる課題」をまとめた特別報告書の作成を要請しました。この決定を受けて、両機関(IPCCおよびTEAP)は約140名の執筆者を決定し、5回にわたる執筆者会合を経て2005年秋に特別報告書が刊行されました。

特別報告書の概要

この報告書は、Part A：オゾン層と気候システム、Part B：ODSからの切り替えに伴う温室効果ガス(GHG)の排出削減の方策、Part C：HFCおよびPFC使用可能量の将来見積もり、という構成になっていますが、内容的にはGHGとして温暖化に影響を及ぼすCFC、HFCならびにHCFCの排出動向とその対策に焦点を絞ってまとめられました。

(1) Part A：オゾン層と気候システム

図1はオゾン層の破壊と回復傾向を示したもので、楽観的には2050年前後には回復すると予測されていましたが、2007年のモントリオール議定書締約国会合では、途上国におけるHCFCの排出量の急激な増加傾向と気候変動のオゾン層への影響の不確実性を考慮すると、回復は2065年頃まで遅延の恐れがあると報告されました。図2はCFC、HCFCおよびHFCの排出動向を炭酸ガス相当 t に換算して、化石燃料由来の炭酸ガス総量と比較したものです。1990年には約7.5兆 t (化石燃料由来の炭酸ガス総量の約33%) あったフロン類の排出量は、2000年には約2.5兆 t (化石燃料由来の炭酸ガス総量の約10%) まで大幅に減少していることがわかります。すなわち、ODSであるCFCは強力な温室効果ガスでもあり、CFCの全廃はオゾン層の回復のみならず、温暖化防止にも大きく貢献していることになります。

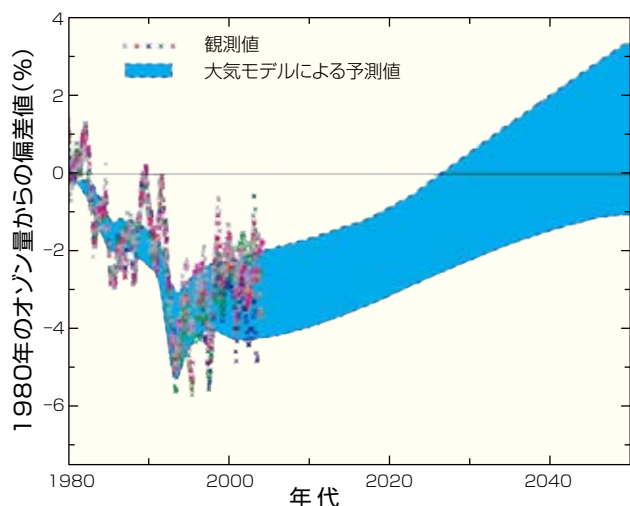


図1 オゾン層の破壊と回復傾向

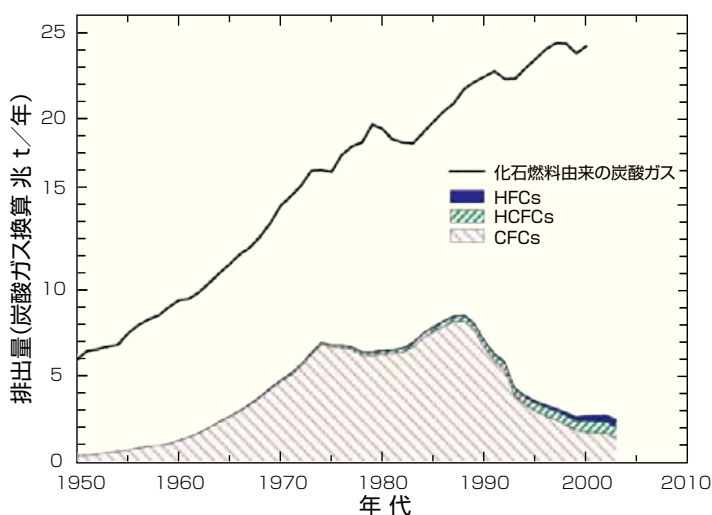


図2 フロン類の排出動向

表 フロン類の排出削減効果

排出量 (炭酸ガス換算 兆 t/年)	2002年	2015年 対策なし(BAU)	2015年 対策後
CFC/HCFC/HFC	2.5	2.4	1.2
CFC/HCFC	2.1	1.2	0.7
CFC	1.6	0.3	0.2
HCFC	0.5	0.9	0.5
HFC	0.4	1.2	0.5

ハイリゲナムサミットにおける首脳宣言から

2007年6月に開催されたサミットで世界経済における成長と責任に関する「サミット首脳宣言」が採択されました。その第59項（気候変動への適応）を以下に引用しますが、まさに「モントリオール調整」はこの精神に則って決議されたものであることがわかります。

“我々はまた、モントリオール議定書の下に、エネルギー効率と気候変動の目標を整合させながら、HCFCの段階的廃止を加速することでオゾン層の回復を達成するよう努力する。オゾン層の回復の加速という共通の目標に向けて協力する際に、我々はクリーン開発メカニズムがオゾン層破壊物質の排出に影響を与えることを認識する。”

(2) Part B、C：フロン類の排出動向と排出削減対策

2002年から2015年までのCFC、HCFCおよびHFCの排出動向を推算していますが、排出源としてこれらのガスの生産、輸送、使用時の排出に加えて、特に今後バンク（bank：貯蔵・溜まり）^[3]として長期間機器、装置中に保持されるHCFCおよびHFC量が増加傾向にあり、その使用終了後のバンク処理の重要性が指摘されています。バンク量を考慮した排出量の2002年の実績、対策をとらない場合の2015年の推算、ならびに対策検討後の排出削減可能量の推算結果を対比してまとめたのが表です。対策を講じなかった場合、2002年に比して2015年にはHFCは3倍、HCFCは約2倍、CFCは約5分の1となり、フロン類合計では横ばいですが、対策を講じた場合には排出量の半減が可能になると推定しています。2015

年に向けてのODSの全廃とHCFC、HFCの排出削減は、(1) 封じ込め技術の改良、(2) 回収・再利用および破壊、(3) 非フロン系あるいはGWP（Global Warming Potential：地球温暖化係数）が小さい代替物質の採用、(4) 革新的な新技術の導入などにより実現できるとこの報告書は結論付けています。

特別報告書の活用

モントリオール議定書では、HCFCは先進国では2020年に全廃、途上国では2040年に全廃と決められていましたが、ここで問題となるHCFCは冷媒あるいはフッ素化学品の原料として有用なHCFC-22（CHClF₂）、発泡剤のHCFC-141b（CH₂ClCF₂）などです。なかでもHCFC-22は生産時に強力な温室効果ガスHFC-23（CHF₃：GWPは14,800）を副生します。このHFC-23の分解装置の設置が京都議定書に定め

られたCDM（クリーン開発メカニズム）の認定を受ければ、大量のクレジットが発生し高額の収入が得られるため、中国などの途上国においてHCFC-22の製造プラントが相次いで新設され、すでに10以上のプラントでCDM認定を受けている状況にあります。この特別報告書ではこのような不必要とも思えるHCFC-22の増産傾向について大いなる懸念が表明されています。2007年9月の議定書制定20周年記念の締約国会合では、この報告を基にしてHCFCの前倒し規制の必要性が議論された結果、途上国においても段階的削減を導入しかつ全廃を10年前倒しして2030年とする画期的な「モントリオール調整」が採択されました。

研究コーディネータ
（環境・エネルギー担当）

山辺 正顕

関連情報

[1] 筆者はCLA（統括執筆責任者）の1人として参加

[2] CFC（クロロフルオロカーボン）、HCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）などの特定フロンおよび四塩化炭素、メチルクロロホルム、メチルブロマイド、ハロンなど

[3] 発泡剤や冷媒に使われるフロン類が使用中の断熱材や冷蔵・冷凍機器中に長期間貯蔵される状態をバンクと呼んでいる。

二酸化炭素の回収隔離に関する特別報告書 (SRCCS) の概要

はじめに

CO₂回収貯留(隔離)技術(CCS)は、図に示すように、火力発電所などから排出される二酸化炭素(CO₂)を分離回収、輸送し、地中や海洋などに長期的に隔離し大気中CO₂濃度の増加を抑制する技術です。2001年のCOP7における勧告を受けて、2005年に発行されたCCSに関する特別報告書(SRCCS)は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)でも初めて特定の「技術」を対象として包括的な評価を示したものであり、各国におけるCCSの政策課題化や気候変動に関する国際連合枠組み条約(UNFCCC)における交渉活動などにも影響を及ぼしています。

IPCC 特別報告書の内容

表にSRCCSの目次を示しますが、その概要は、政策決定者の観点から見た重要な論点に定める形式でとりまとめられた政策決定者向け要約(SPM)に示されています。以下、その主要点について記述します。

(1) CCS 技術とは？ またそれがどう気候変動の緩和に寄与するのでしょうか？

大気中濃度安定化に必要なレベルの温室効果ガス(GHG)の排出削減には緩和策のポートフォリオが必要ですが、CCSは排出削減コストを低減し、対策の柔軟性を増す可能性があります。

(2) CCS 技術の特徴は？

発電所にCCSを付加することで、ほぼ10～40%の追加的エネルギーが必要となりますが、そのほとんどが回収にとまなう損失です。

(3) CCS 技術の現状は？

CCSを構成する要素技術のレベルはさまざまであり、統合システムの例はほとんどありません。

(4) CO₂ の発生源と隔離可能場所の地理的關係は？

CO₂の大規模発生源は、主要な工業地域や都市部に集中しており、その多くは地中隔離に適した地質構造を有す

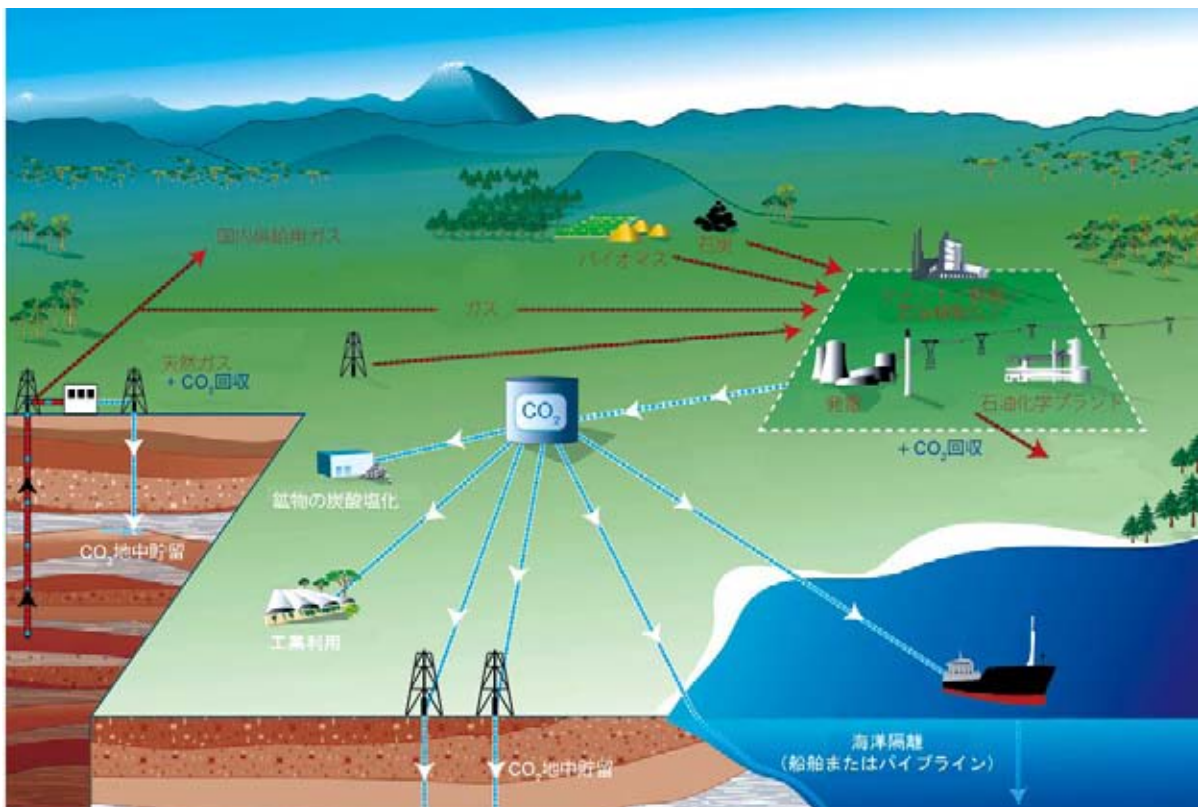


図 二酸化炭素回収隔離システムの概念 (IPCC SRCCSより)

表 IPCC特別報告書の目次

第1章	序論
第2章	CO ₂ の排出源
第3章	回収
第4章	CO ₂ の輸送
第5章	地中隔離
第6章	海洋隔離
第7章	鉱物の炭酸塩化及び産業利用
第8章	コスト及び経済的ポテンシャル
第9章	温室効果ガス排出インベントリ及びアカウンティングにおけるCCSの意味
付録A I	CO ₂ 及び炭素系燃料の物性
付録A II	用語、略語など

る区域から300 km以内にあります。

(5) CCSのコスト、及び技術的・経済的貯留ポテンシャルは？

CCSを発電システムに適用した場合の発電コストは、ほぼ0.01～0.05 \$/kWh上昇し、ほとんどの場合、CO₂回収（および圧縮）に要するコストが支配的となります。

世界中での地中隔離の技術的貯留ポテンシャルは、66～90%の確率で約2,000 Gt CO₂、海洋隔離の場合は、大気中CO₂濃度の安定化レベルに依存し、数千 Gt CO₂となります。

ほとんどの安定化シナリオ（450～750 ppm）において、CCSの経済的貯留ポテンシャルは、220～2,200 Gt CO₂（2000～2100年累積）となり、世界中の緩和策の15～55%に貢献し、安定化のためのコストは30%以上低減します。

(6) CCSに伴う局所的な、健康、安全及び環境へのリスクは？

適切なサイト選定、モニタリング計画、法規制、CO₂が漏洩した場合の修復措置などにより、地中隔離の

リスクは現在の天然ガス貯蔵、EOR（Enhanced Oil Recovery：石油増進回収技術）、酸性ガスの地中処分と同等となります。

(7) 隔離CO₂の物理的漏洩により、気候変動緩和策としての効果が低減するのでしょうか？

適切に選定され管理された地中隔離場所にCO₂が留まる割合は、100年後に99%以上である確率は90～99%であり、1,000年後に99%以上である確率は66～90%です。また、海洋の隔離量は、100年後で65～100%、500年後で30～85%と算定されています（低い方の値は注入深度が1,000 m【筆者註：正しくは800 m】の場合、高い方は3,000 mの場合）。

(8) CO₂隔離を実施するための法規制問題とは？

長期的なCO₂隔離のための法規制を策定している国はほとんどありません。また今のところ、海底下の地中や海洋へのCO₂の注入が国際法の特定の規制の対象となるか否かといった点に

ついて、合意の得られている解釈は存在しません。

(9) 排出インベントリ及びアカウンティングにおけるCCSの意味は？

現行【筆者註：SRCCS発行時】の1996年版IPCCインベントリガイドラインは、CCSに関する手法を含んでいませんが、2006年改訂版で取り扱われることになっています。

おわりに

私がCCSに携わるようになった約20年前から見るとCCSを巡る状況には隔世の感があり、わが国においてもCCSが政策課題として論じられるようになってきました。しかし、CCSがCO₂排出削減策として実質的に機能するためには、さまざまな課題があり、技術はその一部に過ぎません。すなわち、技術開発による効率向上やコスト低減のほかにも、法規制を含めた制度整備、CDMへの適用、あるいはCCSを正当に扱えるCDM（クリーン開発メカニズム）に替わる新しい国際的枠組みの検討や経済面での補助などを含めたインセンティブの付与、社会的受容の獲得など、非技術面での課題も山積しているというのが国際的な共通認識です。このような背景の下、わが国においてもCCSを政策的オプションとして採択するならば、単なる研究開発のみでなく、実現に向けた環境整備や制度設計について検討し、具体的施策を打ち出す時期に来ているように思われます。

エネルギー技術研究部門
赤井 誠

CCS 技術開発と評価

CO₂ 地中貯留技術の現状と展望

地球温暖化対策が待ったなしの状況になっている現在、量的に最も温室効果が大きな二酸化炭素 (CO₂) の大気中への放出をおさえる方策は早期の実用化が求められています。大規模排出源から排出される CO₂ を回収して大気から隔離・貯留する CCS (Carbon Capture and Storage) 技術は大気中の CO₂ 削減効果の大きな技術であり、貯留場所として地層 (帯水層) 中への貯留 (CO₂ 地中貯留) が注目されています。

わが国で CO₂ の大規模排出源が立地する大都市地域は、海岸沿いの平野部にあり、地下には比較的単純な構造の若い地層が広がります。その深部の地層は、長期間にわたって停滞する、水資源として利用できない水質 (多くは塩水) の地下水に満たされています。CO₂ 地中貯留技術は、このような深い地層中に気体と液体の中間の性質を持った CO₂ (体積が小さく粘性が低い超臨界 CO₂) を圧入することにより大気からの隔離を行おうとするものです。このような試みはすでに各国で実施さ

れており、ノルウェーでは年間 100 万トンの CO₂ が地中に貯留されています。2005 年度のわが国の温室効果ガスの総排出量 (確定値) は 13 億 6 千万トンですが、CO₂ 地中貯留可能量 (概算) は 1,461 億トンと試算されており、わが国周囲にも十分な貯留量があると考えられます。

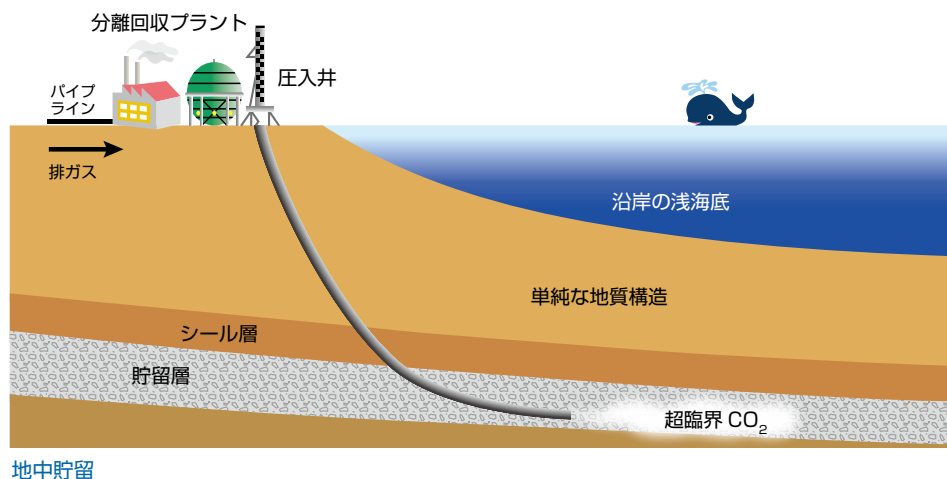
深い地層に流体を圧入する技術自体は、天然ガスの地下貯留や石油の増進回収法で蓄積された技術の延長にあり、また、単純な地質構造のもと地質流体が地下に何十万年もの長期にわたって貯留される現象として「水溶性天然ガス」の存在があることから、地中貯留が即戦力のある現実的な温暖化対策であることが理解できます。しかし地中貯留の事業化に向けては、1) CO₂ を圧入した地下ではどのようなことが起きているのか (挙動の科学的把握)、2) どのようにして CO₂ は地下に留まるのか (貯留メカニズム)、3) 圧入された CO₂ の地層中の動きをいかにして把握するか (モニタリング)、など解明あるいは整備すべき多数の課題が存

在することも確かです。これらの課題は、CO₂ 流体と地下の岩層そして深部地下水という 3 者の相互作用を解明するという共通の性格をもっており、地化学的や岩石力学的実験による基礎データの収集、地下水の観測による広域地下水流動の把握、シミュレーションによる数値計算、過去の事例からの^{えんえき}演繹的類推など地球科学のさまざまな手法を用いた研究・技術開発が求められています。

大気中への CO₂ 排出増加による地球温暖化は、大気や海洋の問題と考えがちですが、対策としての CO₂ 地中貯留は CO₂ と地球内部との相互作用が重要になります。産総研地質調査総合センターは、わが国随一の地質に関わる研究機関として、地球科学に関して蓄積して来た知見をもとに、CO₂ 地中貯留という切り口から温暖化の問題解決に貢献しています。

地圏資源環境研究部門

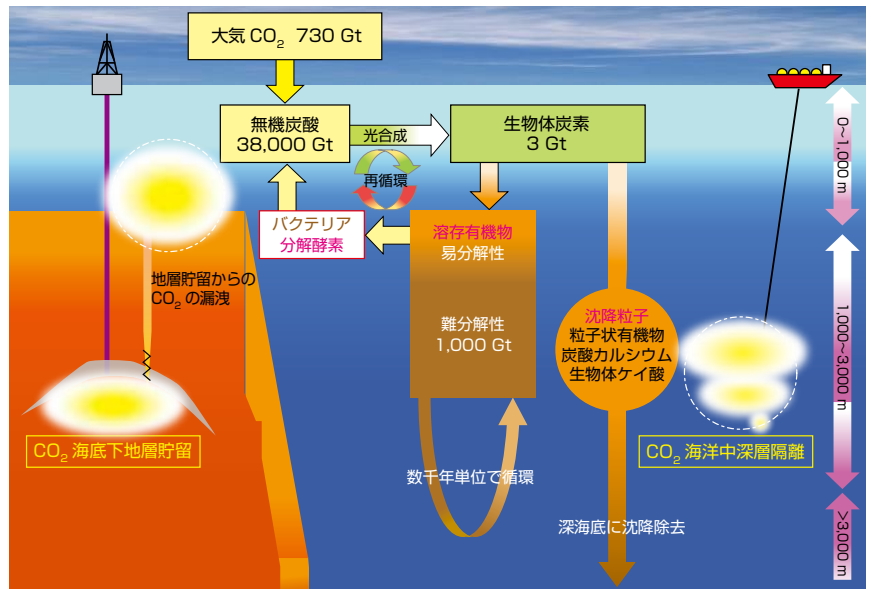
當舎 利行
奥山 康子



海洋におけるCO₂隔離とその環境影響評価

海洋は地球表面積の70%を占め、海水中には大気CO₂の50倍以上のCO₂が溶け込んでいます。また、海洋は人間活動により大気に放出されたCO₂の30%相当分を吸収・貯蔵していることが分かっています。CO₂の海洋隔離(1,000～3,000 mの中深層への隔離)は、このように、きわめて大量のCO₂を溶かし込むことができる海洋の能力を積極的に利用しようとする技術です。地中貯留技術では閉じられた空間にCO₂を留め置くことを目的としているのに対し、中深層隔離は海洋といういわば開かれた空間を利用してCO₂を長期間滞留させることにより大気CO₂濃度の急激な増加を抑制する技術です。開かれた環境を直接利用する分、中深層隔離に対してはより厳密な環境影響評価が求められます。

中深層隔離ではCO₂を海洋の中深層に広く薄く溶かし込むことによって海洋環境への影響を最小限にしますが、大規模で長期間にわたる事業を想定すると、海の炭素貯蔵能を支える生態系と物質循環過程への長期的な影響を適



海洋における物質(炭素)循環過程とCCSの模式図

切に評価することが不可欠です。これまで、中深層はきわめて生物の少ない世界と考えられていましたが、実は細菌など種々の微生物群集が存在し、それらが海洋における有機物(炭素化合物)の再生や難分解化(貯蔵)に大きく貢献していることが分かってきました。また中深層は沈降粒子(炭酸カルシウムなど)の溶解の場としても重要です。私たちはCO₂の注入に伴う海水のCO₂濃度の増加およびpHの低下による物質

循環過程(有機物の分解や粒子の溶解)への影響を評価するために、中深層の海水を採取し細菌の活性などを直接調べる実験や、深海の圧力を再現する特殊な高压装置を用いた研究を行っています。

2007年11月、海洋環境の保全を目的とした国際的枠組(ロンドン条約1996年議定書)においてCO₂海底下地層貯留の実施に向けたガイドラインが策定されました。その中で、地中から海水中にCO₂が漏洩する可能性を考慮した環境影響評価の実施が規定されています。ここで得られた研究成果はCO₂の中深層隔離技術にとどまらず、海底下地層貯留技術に対する事前評価の先導的研究としても重要な知見を提供します。



0日目



4日目

炭酸カルシウム沈降粒子(有孔虫殻)の高压溶解実験
球形の殻がCO₂濃度の高い海水に晒され急激に溶解している。

環境管理技術研究部門
鈴木 昌弘

太陽光発電の LCA 評価

導入の進む太陽光発電

地球温暖化を防ぎ、持続可能な社会を実現するために不可欠な再生可能エネルギー資源として、クリーンで無尽蔵な太陽エネルギーへの期待が高まっています。中でも太陽光発電は、太陽光のエネルギーを直接電力エネルギーに変換するシステムで、タービンの様な動く部分がないため保守・管理が容易であること、電卓から大規模発電所までさまざまな規模・形態での応用が可能であることなどの特長があります。

第1次オイルショックを契機として1974年にスタートした長期国家プロジェクトであるサンシャイン計画以来、産官学を挙げた研究開発と導入普及施策が功を奏してコスト低減が進み、近年急速に生産量・導入量が増加しています。図1に示すとおり、わが国は世界最大の太陽電池生産国となっています。

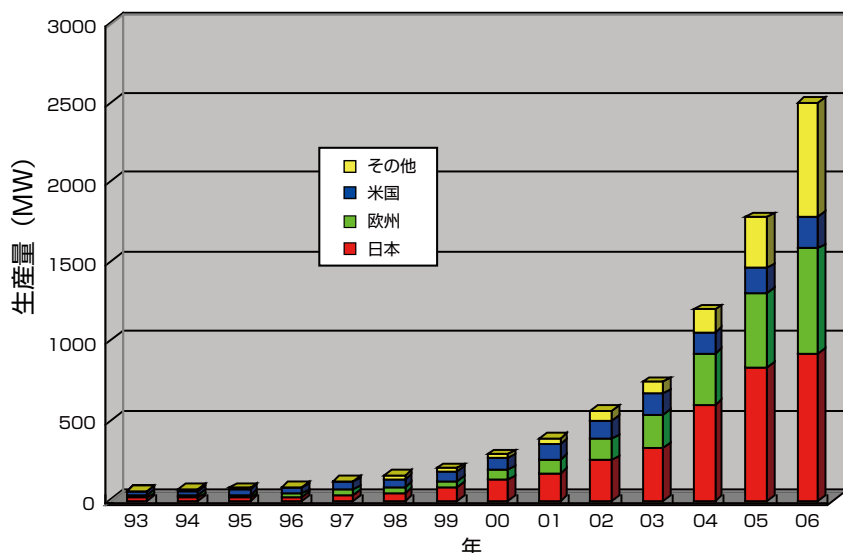


図1 世界の太陽電池生産量の推移

ライフサイクルアセスメント

このように、太陽光発電システムは地球温暖化防止にきわめて有効なエネルギー源ですが、システムを構成する太陽電池やインバータなどの構成機器を製造するにも一定量のエネルギーが必要であり、当然それに伴い二酸化炭素 (CO₂) も排出されます。この投入エネルギーの回収、および製造時排出分のCO₂削減に必要な時間は、それぞれエネルギーペイバックタイム (EPT)、CO₂ペイバックタイム (CO₂PT) と呼ばれています。これらがシステムの寿命に比べて十分短くなければ、エネルギー生産技術としての意味がありません。これらを分析・評価するライフサイクルアセスメント (LCA) は、エネルギー技術の評価に不可欠な重要な視点です。

図2に多結晶シリコン太陽電池の製造工程の例を示します。製造時の投入エネルギーとCO₂排出量を正確に見積

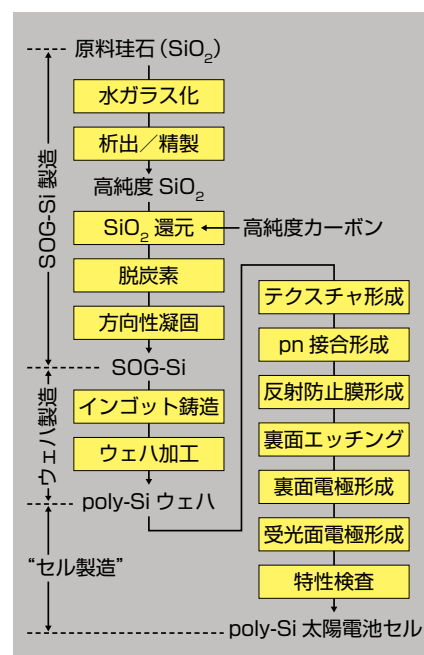


図2 多結晶シリコン太陽電池の製造工程

もるためには、これらの各工程で投入される材料と加工のために必要なエネルギーとを積み上げる必要があります。

太陽光発電システムのペイバックタイムは、このような太陽電池をはじめとするシステム構成機器類全ての製造エネルギーや製造時のCO₂排出量と、システムから毎年得られる発電量やCO₂削減量の比率から計算されますが、前者は新しい太陽電池の開発や製造技術の改良、製造規模の拡大などによって次第に減少し、後者は太陽電池の変換効率やシステムの利用効率の改善によって増大するため、技術革新の途上にある太陽光発電のペイバックタイムは年々急激に短くなっています。しかしながら、最新のペイバックタイムの値の周知が不十分なこともあり、10年以上も前の古いデータ¹⁾を基に、今で

も時として太陽光発電のペイバックタイムは10年以上であるという間違っただ指摘がなされることがあります。

現在、わが国において公表されている最新の値（住宅用屋根設置の場合）は、EPTについては、多結晶シリコンで1.5年、アモルファスシリコンで1.1年、化合物薄膜（CIS）で0.9年、CO₂PTについては、多結晶シリコンで2.4年、アモルファスシリコンで1.5年、化合物薄膜（CIS）で1.4年です^[2]。ただし、結晶シリコンについて、本報告の計算では原料シリコンの製造方法として現在開発中の新製法が想定されており、現状に即した製造法から算出するとEPTは約2.0年、CO₂PTは約2.7年となります（図2）。欧米でもほぼこれに近い値が報告されています。太陽電池の寿命は、少なくとも20～30年程度と考えられていますので、最新のデータに基づくEPT、CO₂PTはともに寿命に比べて十分短く、太陽光発電はLCA評価の観点からも優れた発電システムであるといえます。

持続可能社会の実現を目指して

今後のわが国のエネルギー政策の基本方針として2006年5月に取りまとめられた「新・国家エネルギー戦略」の4本柱の1つの「新エネルギーイノベーション計画」においても、太陽光発電のコストを2030年までに既存の火力発電並みにすることが目標として明記

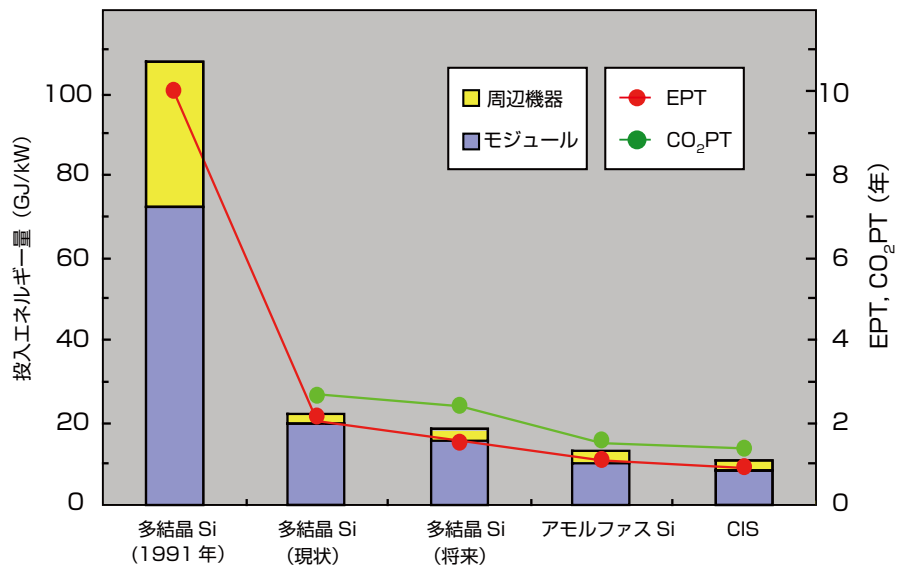


図3 太陽光発電システムの製造時投入エネルギーとペイバックタイム

算出条件：

多結晶Si (1991年) 地上設置1 MW、生産規模=不明、運用エネルギー=1%^[1]
 その他 住宅用3 kWシステム、生産規模=100 MW/年、運用エネルギー=省略^[2]
 ※多結晶Si (現状)の値は、文献^[2]を元に再計算を行ったもの。

されています。2004年に作成された太陽光発電に関する研究開発長期ロードマップ（PV2030）では、2030年における累積導入量として、総電力需要の10%程度を賄える100 GW（1億 kW）が想定されています。

これらの導入目標を達成するためには、太陽電池のさらなる効率向上とコストダウン、および応用分野や設置場所の拡大を可能とする新しいシステムコンセプトの導入などを旨とした研究開発が不可欠です。それとともに、太陽光発電が新しいエネルギー技術とし

て国民の理解を得るためには、ここで紹介したLCA評価による環境効果の見積もりについても、研究開発の進展による新しい製造技術の導入や生産規模の拡大などによる変化を随時取り入れ、常に最新の情報を提供して行くことが重要と思われます。

太陽光発電研究センター
作田 宏一

参考文献

- [1] 内山、ほか、電力中央研究所研究報告 Y90015 (1991.11)
 [2] NEDO成果報告書「太陽光発電評価の調査研究」、太陽光発電技術研究組合、(2001.3)

バイオマス利活用のライフサイクルアセスメント (LCA)

ライフサイクルアセスメント (LCA) とは

LCAは、製品などの環境への影響を定量的に評価する手法です。例えば、その製品に必要な素材やエネルギーの製造・輸送から、その製品の生産、流通、消費、さらには最終的に廃棄、処理されるまでの製品の生涯（ライフサイクル）での環境負荷を調べ、影響を評価し、環境負荷の少ない社会形成に資することが期待されるツールの1つです。現在、製造業を中心に適用が広がり、消費者も行動を決める1つの要素として、LCAの結果を活用する段階にあると言えます。

バイオマス利活用へのLCAの適用

バイオマスは、その生育時に二酸化炭素 (CO₂) を固定することから、燃焼時のCO₂排出が相殺されるという考え方が広く受け入れられており、地球的な温室効果ガス (GHG) 排出抑制の観点から、バイオマスの利活用が期待されています。それを定量的に評価するため、LCAを適用し、一層、環境負荷の少ない利活用に向けた必要な取り組み

を明らかにしていくことが求められています。

産総研ライフサイクルアセスメント研究センターでは、バイオマスの一種である有機廃棄物（家畜排せつ物や生ごみ、食品産業廃棄物、建築廃材など）の有効利用を地域的に評価する手法の開発を進め、地域的に最適化する手法“RCACAO”を開発し、公開しています¹⁾。また、アジアの国々の研究者と連携して大規模なバイオマス利活用を対象にLCA評価を行うとともに、持続可能なバイオマス利活用像の検討を行っています。これらの成果の中から、ここでは大規模プランテーションを対象にしたLCA評価の例について紹介します。

バイオエタノールのケーススタディ

タイはブラジル、インド、中国に次ぐ世界第4位のサトウキビ生産国で、大規模にエタノールを生産し、利用することが期待されています。同国内の研究者と連携し、同国でサトウキビからエタノールを製造し、わが国に輸送

して純度を高めて直接ガソリンに混合して利用するケースを想定してライフサイクルでのGHG排出量の試算を行いました。

対象とする利活用のシステムでは土地や気候などによる収量の変動、施肥量のばらつき、生産地による輸送経路の違い、エタノール原料を絞った残渣（バガス）を利用した発電効率の差異など多くの不確実性を持っています。それらの影響を定量的に把握できるよう、それらの分布を分析あるいは推測して評価を行いました。1 MJの無水エタノールを製造、利用するライフサイクルでのGHG排出を試算しました。その際、不確実性を持ったデータに対し、ランダムに生成された値を割り当てることを繰り返してモデルをシミュレートする方法（モンテカルロ法）を適用した結果を図1に示しています。この結果から、95%信頼区間では、約44 gから78 gの排出となっています。ここでは主に収量や施肥量の違いによる不確実性が反映され、広い分布を示す結果となっています。

その中央値について、排出の内訳を表したものが図2で、耕作段階での排出が大きいことが示されています。これは、肥料製造や畑地からの亜酸化窒素 (N₂O：温暖化への影響がCO₂の約300倍あるといわれています) 排出、農作業に使われる機械の燃料消費が大きく影響しています。次いで、わが国への輸送過程や無水化過程からの排出が大きくなっています。エタノール製造過程で余ったバガスを利用した発電によるGHG排出削減効果（図2で負の値として示されています）も大きく、発

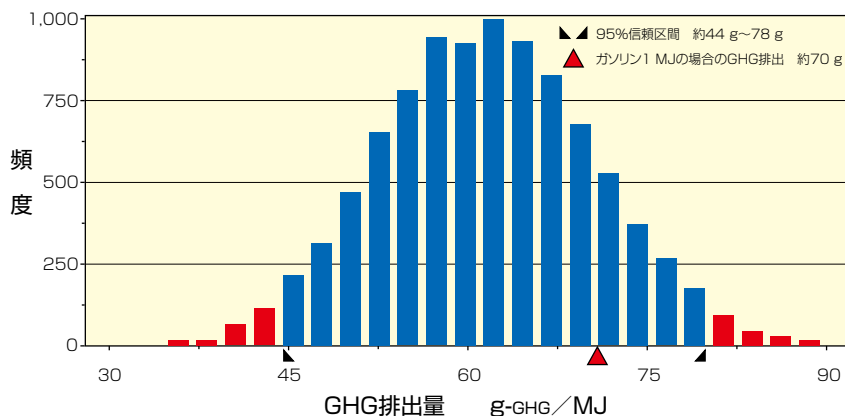


図1 バイオエタノールのライフサイクルGHG排出量と出現頻度 (例)

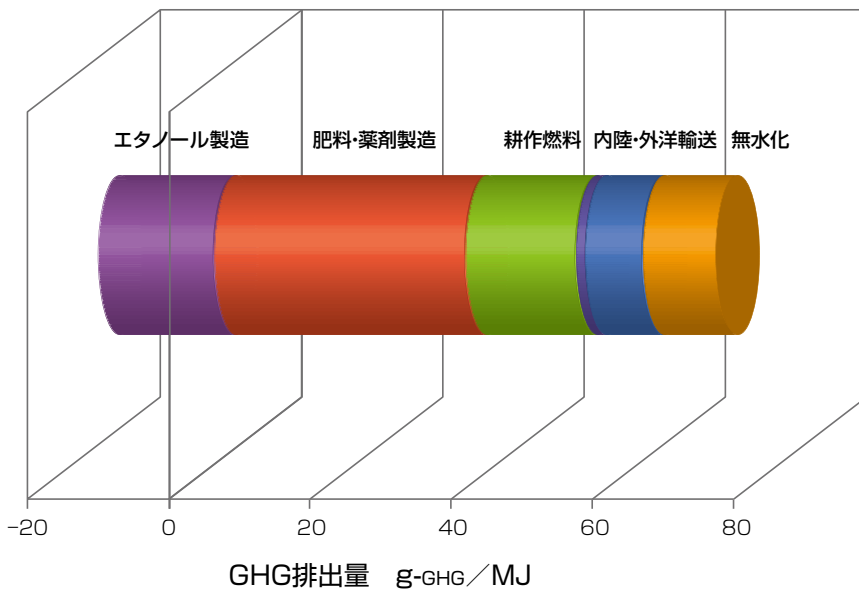


図2 GHG排出内訳



タイの製糖工場に運び込まれるサトウキビ



刈取直前のサトウキビ (タイ)

電効率やエタノール製造効率の向上により、この削減量をさらに増大できる可能性も推察されます。

同じ1 MJのガソリンを原油生産、輸送から精製、利用までの過程で排出するGHGは私たちの試算では約70 g/MJです。それと今回の結果を比較すると、バイオマス起源のエタノールでも、耕作の条件が悪かったり、利活用の効率が低いと化石燃料を上回るGHG排出がある可能性が示唆されています。

LCA 結果からみた、バイオマス利活用の方向と今後

バイオエタノールについては、今後、効率的なエタノール変換技術や無水化

技術の開発、さらには適切な施肥管理、生産管理、消費方法、といった技術開発と管理手法の発展によりGHG排出は低下する方向にあり、それらの開発を一層進めていくことが重要になります。

また、意思決定にこのLCA結果を使うには、確実な結論を導く必要があります。実際に利用するバイオマスを生産する地域や、適用プロセス、消費形態に基づくデータを収集、分析することにより、ここで得られている排出量の分布を狭め、確実な結論を導くことができます。

現在、ライフサイクルアセスメント研究センターではこのケーススタディに対して適用した肥料製造起源のGHG

排出データや、エタノール製造プロセスの不確実性のデータ追加など、結果の精度を高める調査を進めています。その他、バイオディーゼルの評価、利用プロセスの組み合わせや地域内での利用システム化などによるGHG排出低減に向けた方向を明らかにする評価研究を推進しています。さらに、GHG排出以外の土地利用も含めた環境負荷の評価、さらにはバイオマス生産地域の社会発展も評価指標に加えた研究をアジア各国と共同して推進し、地域での先導役を果たしています。

ライフサイクルアセスメント研究センター
 匂坂 正幸

参考文献

- [1] 志水、楊、井原、玄地、ライフサイクルを考慮した家畜排せつ物の地域内処理システム設計手法、環境システム研究論文集、vol.33、pp241-248 (2005)

バイオマスのシステム評価

地球温暖化対策や農山漁村の活性化の観点からバイオマス（生物資源）の利活用が注目されています。私たちは利活用システム全体をプロセス設計の観点からとらえ、経済性や環境性の評価技術の研究開発を行っています。

簡易経済性シミュレータ

バイオマス利活用の普及を促進するには、その経済性や環境性を簡便に評価する支援技術が必要です。私たちは別に作成しているバイオマスデータベースをもとに、バイオマス利活用のこれまでの技術である燃焼熱利用、燃焼発電利用、メタン発酵利用の3方式の簡易経済性シミュレータを開発し、ホームページ上で公開しています^[1]。経済性は原料コスト、製品価格、投資（建設費）回収年の関係として表現されます。利用者からのコメントをもとに、

内部利益率（IRR）の表現を加えるなどの改良もしています。バイオマス利活用の導入時におけるベース検討や新しい技術開発におけるこれまでの技術との経済性比較が可能です。

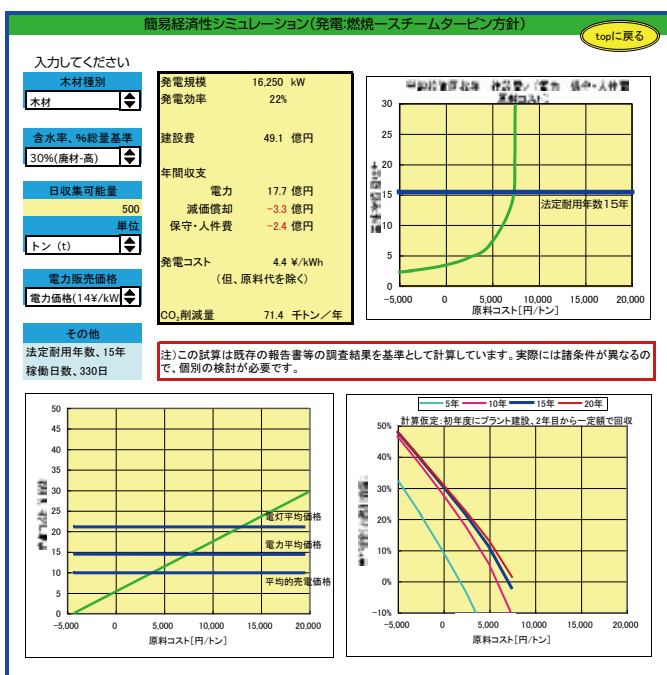
日本におけるバイオエタノール生産の経済性評価

最近、サトウキビや穀物（トウモロコシ、米など）から作られたエタノール（バイオエタノール）がガソリン代替として関心を集めていますが、産総研バイオマス研究センターでは、食糧と競合しないという観点から、木材やわらなどのセルロース系バイオマスからエタノールを製造する研究開発を重点的に行っています。セルロースから得られるエタノールを第二世代バイオエタノールと言い、世界中で研究開発が進んでいます。私たちは、この第二世

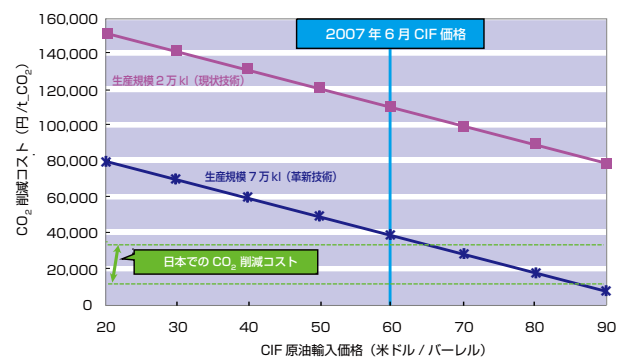
代バイオエタノールを日本で生産した場合の生産コストと二酸化炭素（CO₂）削減コストの分析を行いました。半径50 km圏内のバイオマスを収集してエタノールを生産するケースの場合、現在の技術レベルでは年間2万 klの生産量であり、CO₂削減方法としては割高になるのに対し、技術革新が進めば年間7万 klの生産が可能になり、原油価格が70ドル/バーレルを超えてくれば、省エネなどほかのCO₂削減方法の削減コスト並みとなることが示唆されました。

なお、この報告はディスカッションペーパーとして公開しています^[2]、多くの皆さまからコメントをいただければ幸いです。

バイオマス研究センター
美濃輪 智朗



公開している簡易経済性シミュレータ



国産セルロース系バイオエタノールのCO₂削減コスト分析

関連情報

- [1] http://unit.aist.go.jp/btrc/ci/simulation/systemteam_gaiyou
- [2] http://unit.aist.go.jp/btrc/ci/research_result/documents/DISCUSSIONPAPER.pdf

森林の CO₂ 吸収量評価

森林の CO₂ 吸収能力

森林は、太陽の光を受けると光合成により大気から二酸化炭素 (CO₂) を吸収します。同時に、土壌中の微生物の活動や植物の呼吸によって常に大気へ CO₂ を放出しています。森林による CO₂ の吸収・放出速度は、日射量や気温などの気象条件の影響を受けて時々刻々変動するほか、森林伐採や火災のような攪乱を受けると短時間で大量の CO₂ が放出されるなど、大気中 CO₂ 濃度の変動に大きな影響を与えます。変動する森林の CO₂ 吸収能力を正確に測定する技術は、大気中 CO₂ 濃度の将来予測のためにも、CO₂ 排出量削減効果の正確な見積もりのためにも必要不可欠です。



森林の観測タワー

アジア陸域における CO₂ 吸収能力の観測網

現在、微気象学的方法(空気中の CO₂ 濃度と風速の変動量から CO₂ 吸収量を算出する方法、渦相関法)に基づく陸域生態系での CO₂ 吸収・放出量の長期観測ネットワークが世界的に構築されており、アジアのネットワーク(アジアフラックス)も1999年に活動を始めました。

私たちのグループは、これまで国内外の研究機関と連携して渦相関法によりアジア10数カ所の森林の CO₂ 吸収量を長期的に求め、その地理的分布や経年変化の特徴を明らかにしてきました。その結果、熱帯林は年間の総光合成量が日本の2~3倍に達する一方、総呼吸量も多いため、正味の吸収量は場所や条件による違いが大きいこと、日本の常緑林は1 haあたり年間およそ3~5 tの炭素を吸収すること、中・高緯度に生育するカラマツ林は短い夏の間のみ顕著に高い吸収速度を示すことなどがわかってきました。

CO₂ 吸収量測定技術のアジアへの普及

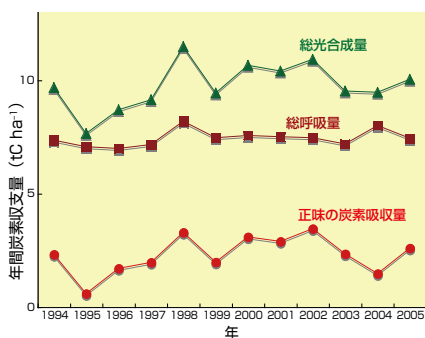
渦相関法は、高度な気象観測と多量のデータ処理を行う技術が必要とします。このため、こうした技術をもつ人材の育成は、アジアでは日本や韓国の一部の研究機関でしか行われてきませんでした。そこで私たちのグループは、さまざまな生態系でこれまで CO₂ 吸収量評価技術の改良に取り組んできた経験を生かし、トレーニングコースを毎年主催するなどアジア諸国への技術普及に取り組んでいます。

こうした観測技術の教育・普及活動は、アジアにおける CO₂ 吸収量の組織的な観測データの蓄積とデータ品質の向上を進めるとともに、アジアの研究者および政策担当者の連携強化に対して貢献することが期待されます。

環境管理技術研究部門
三枝 信子



CO₂濃度変動の測定装置



岐阜県の落葉広葉樹林で観測された、1 ha、1年間あたりの総光合成量、総呼吸量および正味の炭素吸収量 (= 総光合成量 - 総呼吸量) の経年変化