

Title	地球温暖化対策技術の評価
Sub Title	Long-range technology strategy for mitigating global warming
Author	山地, 憲治
Publisher	慶應義塾経済学会
Publication year	1999
Jtitle	三田学会雑誌 (Keio journal of economics). Vol.92, No.2 (1999. 7) ,p.296(56)- 312(72)
JaLC DOI	10.14991/001.19990701-0056
Abstract	
Notes	小特集：低環境負荷型社会の構築に向けて
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-19990701-0056

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

地球温暖化対策技術の評価

山 地 憲 治

1. 不確実性下における地球温暖化対策

1997年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3と略称）で、我が国は2010年を中心とする5年間の平均で、温室効果ガスを1990年実績に対して6%削減することとなった。この削減の焦点となるのは言うまでもなく二酸化炭素であり、大量に二酸化炭素を排出するエネルギーシステムは大きな課題を背負うことになった。エネルギーの大量使用は、ロンドンやロスアンジェルスの大気汚染、我が国の公害問題などを引き起こし、エネルギーの環境問題は長い歴史を持つ重大問題であり、最近では酸性雨問題も深刻になっている。しかし、21世紀のエネルギーシステムを考える上で最大の環境問題は地球温暖化である。

地球温暖化問題への取り組みを難しくしている最大の要因は科学上の不確実性である。今分かっている科学的知識では、「CO₂排出量（我々がコントロールできる政策変数）」・「大気中のCO₂濃度」・「地球平均気温の上昇」・「地球温暖化による被害（これを小さくすることが政策目標）」という連鎖のすべての関係において、それぞれ大きな不確実性がある。しかも、連鎖の中には数十年から数世紀という大きな時間的遅れを伴う場合もある。これは、いかなるタイミングでどのような対策をとれば、どの程度損害が避けられるのかを科学的に正確には評価できないことを意味する。ただし、IPCCの第二次評価報告書に述べられているように、不確実性の範囲を考慮しても、今後百年程度のうちに、地球は過去1万年で最も急速な温度変化を経験するという事は確かである。

以上のような認識の下でまず行うべきことは、地球温暖化対策のメニューをできるだけ広範囲に設定することである。CO₂の排出抑制以外にも地球温暖化対策は数多く存在する。メタンなどCO₂以外の温室効果ガスの排出を抑制することも重要であるし、大気中から温室効果ガスを積極的に除去するという手段もある。また、農業生産における品種改良や都市構造・沿岸構造の変革などによって、温暖化する地球に適応するという対策も考えられる。さらには、人為的な地球冷却など、大規模に気候を制御する技術の開発も長期的には想定できる。

対策オプションの評価に際して、地球温暖化対策として特に考慮すべき事項は、先に述べた科学的不確実性の下での有効性である。一般に、不確実性の下での有効性は、ミニマムリグレット基準によって判定することができる。ミニマムリグレット基準とは、不確実性の範囲内で最も都合の悪い状態が発生した場合に失うもの（リグレット＝後悔）が一番小さいオプションを選ぶということである。これはゲーム論で用いられる概念で、起こり得る最大の損失が最小になるように選択することである。

この基準に従えば、例えば、海洋に大量にCO₂を投棄したり、大気中のエアロゾルを人工的に増加させて地球冷却を図るなどの対策は、失敗した場合や温暖化の被害コストが予想より小さかった場合の正味コスト（リグレット）が大きいため、今直ちに着手すべき対策からは除外されることになる。ただし、これはこのようなタイプの対策技術の研究開発まで否定するものではない。今後の状況次第では出番が来ることも考えられるからだ。

ミニマムリグレット基準に照らせば、今推進すべき地球温暖化対策は、第一にエネルギー効率の向上である。エネルギー効率の向上は、CO₂抑制だけでなく、エネルギー資源の節約にもなるし、地球温暖化以外の環境影響も小さくできる。もちろんエネルギー効率向上が本当にCO₂削減になっているかどうかは、いわゆるライフサイクル解析によって、省エネ設備の生産に必要なエネルギー等を含めて慎重に評価すべきであるが、これが確認され、しかも経済性が成立するならば、エネルギー効率向上はリグレット無しでネガティブコストの理想的なCO₂対策といえる。

エネルギー効率向上による省エネルギーは、世界的視野に立てば、まだまだ大きな改善余地が見いだせる。また、乾いたタオルを絞ると形容されるほど省エネは追求され尽くしたとされるわが国においても、産業部門はともかく、交通部門、ビルや住宅などの民生部門にはまだ余地は残されている。問題はそれを如何に推進するかであり、供給サイドに偏っていたエネルギー政策の重心を需要サイドに移す方策が重要である。

また、フロン全廃や森林破壊の防止、植林もミニマムリグレット基準からみて魅力的な対策オプションだ。これらの対策は、単に温暖化防止に役立つというだけでなく、オゾン層破壊や森林破壊といった他の環境問題の解決にも寄与するからだ。同じように、天然ガスの導入促進も、化石燃料の中ではエネルギー生産あたりのCO₂排出量が少なく、しかも、利用効率も高く窒素酸化物以外の大気汚染物質を放出しないという魅力がある。ただし、天然ガスの主成分であるメタンは強力な温室効果を持っているので、採掘から利用までのプロセスにおいてガスの漏洩があれば、CO₂排出削減のメリットは大いに減殺される。また、在来型の天然ガス資源に限れば、資源賦存量からみて長期的な供給力には不安がある。

2. 脱化石燃料へ向けての技術開発

前項で指摘した、省エネや植林、天然ガス転換のようなミニマムリグレット基準で正当化される対策だけでは、地球温暖化問題の下でのエネルギーの持続的な発展は望めない。省エネや植林には限界があるし、天然ガス転換ではCO₂発生がゼロになるわけではない。大気中のCO₂濃度の安定化（これが地球サミットで合意された気候変動枠組条約の最終目的である）を実現するには、CO₂排出量の安定化に留まらず、削減にまで進む必要がある。そのためには、長期的にはどうしても、化石燃料に代わる新しいエネルギー源が必要になる。

これに応えられるのは、核エネルギーと太陽に基本的に依存する再生可能エネルギー以外にはない。現在、核エネルギーは主として軽水炉を用いた原子力発電により、また再生可能エネルギーは水力発電により、各々世界の一次エネルギー供給の約5%を担っている。薪や動物の糞、農業廃棄物などの形態で使われている非商業エネルギーのバイオマスも再生可能エネルギーとして勘定すれば、再生可能エネルギーの供給シェアは更に約10%増える。

しかし、再生可能エネルギーを今以上に増やすことは、第一にコストが高くて経済面でのリグレットが大きい上に、現実的な供給力に問題がある。太陽が地球に降り注ぐエネルギーは現在の世界のエネルギー所要量の1万倍を越えているが、実際に利用可能な形態となるとごく限られたものになる。例えば、わが国の一戸建て住宅の屋根のすべてに3kW（約30平方メートルの面積を要する）の太陽電池を設置したとしても、発電容量で1億kW程度であり、しかも太陽電池では年間の運転時間が大幅に限られる（フルパワーでの運転時間で比較すると原子力発電所の約7分の1になる）のでエネルギー（kW時）の供給では原子力発電所約1500万kW分程度（我が国で1999年現在運転中の原子力発電所約4500万kWの約3分の1の規模）にしかない。これは小さい値ではないが、これだけでは、とてもわが国の電力需要はまかなえない。世界的にみれば、砂漠での太陽エネルギーやアフリカやシベリアでの水力など、供給力の点では有望な地域もあるが、それを利用するためには大量で長距離のエネルギー輸送が必要になる。

バイオマスエネルギーについては、現在のような利用方式では効率が悪く、環境にも人の健康にも害を与えている。また、途上国で大量に使われている薪は森林破壊の原因の一つとなっている。つまり、ストックとしての森林を消費しているわけで、このようなバイオマス利用は持続可能とは言えない。今後、バイオマスのエネルギーとしての利用を拡大していく場合には、食糧生産や森林保全との調和を忘れず、真に持続可能な形態で利用しなければならない。

一方、実用化している核エネルギー、つまり現在の原子力発電には社会的不安がある。しかも、今実用化している軽水炉では、ウラン資源の利用効率が悪く、石油と同程度の供給力しか期待できない。核エネルギーを21世紀の主要なエネルギー源とするには、増殖炉あるいは核融合炉の開発が

必要である。核エネルギーは人類の英知が見出した技術エネルギーとして人々を魅了するが、一方で、その開発には巨大な組織が必要で、安全性の確保にも幅広く高度な技術基盤と社会組織を形成しなければならない。また、核エネルギーの利用から必然的に発生する放射能には極めて長期の管理が必要であり、核の軍事利用の防止には機微な技術と核物質の世界規模での管理機構が必要である。つまり、核エネルギーを人類が安心して利用するためには、それを受け入れる社会に高度の技術管理能力が要求されることを忘れてはならない。

結局、地球温暖化対策には、単独ですべてを解決できるような切り札は存在しない。長期的かつグローバルな視座に立ち、複数の対策を組み合わせる必要がある。そのためには、21世紀のエネルギーシステムは大きく変貌しなければならない。地球温暖化は人類の文明が地球規模の有限性に直面しつつあることの最初の予告である。地球温暖化対策を、21世紀のグローバルなエネルギーシステムのあり方を考える契機とするのが生産的である。

3. 「地球再生計画」に見る21世紀のグローバルエネルギーシナリオ

地球温暖化対策としては、COP3で議論の焦点となった2010年頃の排出量制限というような短期的な目標を言い合うよりも、21世紀の百年間を通して長期的なCO₂排出量の削減を着実に実現する方が有効である。この点では、我が国の通商産業省が1990年に提案した「地球再生計画」が注目される。地球再生計画は、100年程度の超長期の見通しの下に、世界的な省エネルギーの推進、原子力や再生可能エネルギーなど大気汚染の面でクリーンなエネルギーの大幅導入、CO₂吸収源の拡大、さらには核融合や宇宙発電など革新的エネルギー技術開発を内容とする世界規模での研究開発ビジョンである。この構想はOECDに引き継がれ、1995年にベルリンで開催された気候変動枠組条約の第1回締約国会議で、気候変動技術計画(CTI: Climate Technology Initiative)として取り上げられた。ただし、提案当初の地球再生計画は構想のみで、具体的・定量的な技術シナリオは全く出来ていなかった。

ここでは、地球環境産業技術研究機構(RITE)の報告書(NEDO-GET-9718(1))に基づき、数理モデル(DNE21: Dynamic New Earth 21)の適用により、資源の枯渇に伴う価格上昇やCO₂制約を考慮して描き出された「地球再生計画」の定量的な姿を紹介する。

3. 1 DNE21モデルの概略

DNE21モデルは、NE21(NE21: New Earth 21は地球再生計画の英語名でもある)と名付けられたモデル(2)を改良して作成された最適型の世界エネルギー需給モデルである(3)。来世紀末までを展望した各種CO₂対策技術の総合的評価と将来の具体的な対策シナリオの作成とを目的にしている。このエネルギーモデルは、全世界を対象にしつつ、工学データに基づいた詳細な技術のモデル化に

より、特に供給サイドにおいてCO₂問題対策技術のボトムアップアプローチによる評価ができる。また、世界地域分割を行っているので地域特性を考慮でき、地域間のエネルギー長距離輸送の可能性及び排出権取引の評価も可能としている。

DNE21モデルの特徴を簡単に記すと次のようになる。

- ・ 詳細な工学的データに基づいた定式化を行っているので、変換効率や経済性を基準に各対策技術の優劣を決定でき、通常の計量経済モデルと比較して、対策技術の導入論理が明瞭である。
- ・ 西暦1990年から2100年までの超長期の期間を対象に、CO₂の排出量や大気中濃度の制約下においてエネルギーシステムコストを最小にする動的最適シナリオを描くことができる。
- ・ 新エネルギー供給コストや需要端での消費者効用の損失などを非線形関数で表現しているので、システムパラメータの微小な変化に対する各対策技術の導入量の極端な変化をかなりの程度緩和できる。
- ・ 全世界を10地域（Annex 1地域：北米、西欧、日本、オセアニア、旧ソ連・東欧；Non-Annex 1地域：計画経済圏アジア、その他アジア、中東・北アフリカ、サハラ以南のアフリカ、ラテンアメリカ）に分割したモデル化により、エネルギーシステムの地域別の差異を考慮できる。また、地域間のエネルギー輸送距離も考慮に入れて、各地域のエネルギーシステム間のリンケージも考慮できる。
- ・ CO₂排出量を入力として、大気中濃度および温度上昇を計算する簡易気候モデルをサブモデルとして統合している。そのため、大気中濃度や温度上昇幅に制約を設定したシナリオをフレキシブルに生成することが可能である。
- ・ 炭素税、排出量規制、濃度規制、温度規制の4種類の政策オプションを複合して実施した場合のシミュレーションが可能である。
- ・ Annex 1地域と Non-Annex 1地域など地域ごとに異なる排出規制を課したシミュレーションを行え、複数の排出権市場を考慮できる様になっている。

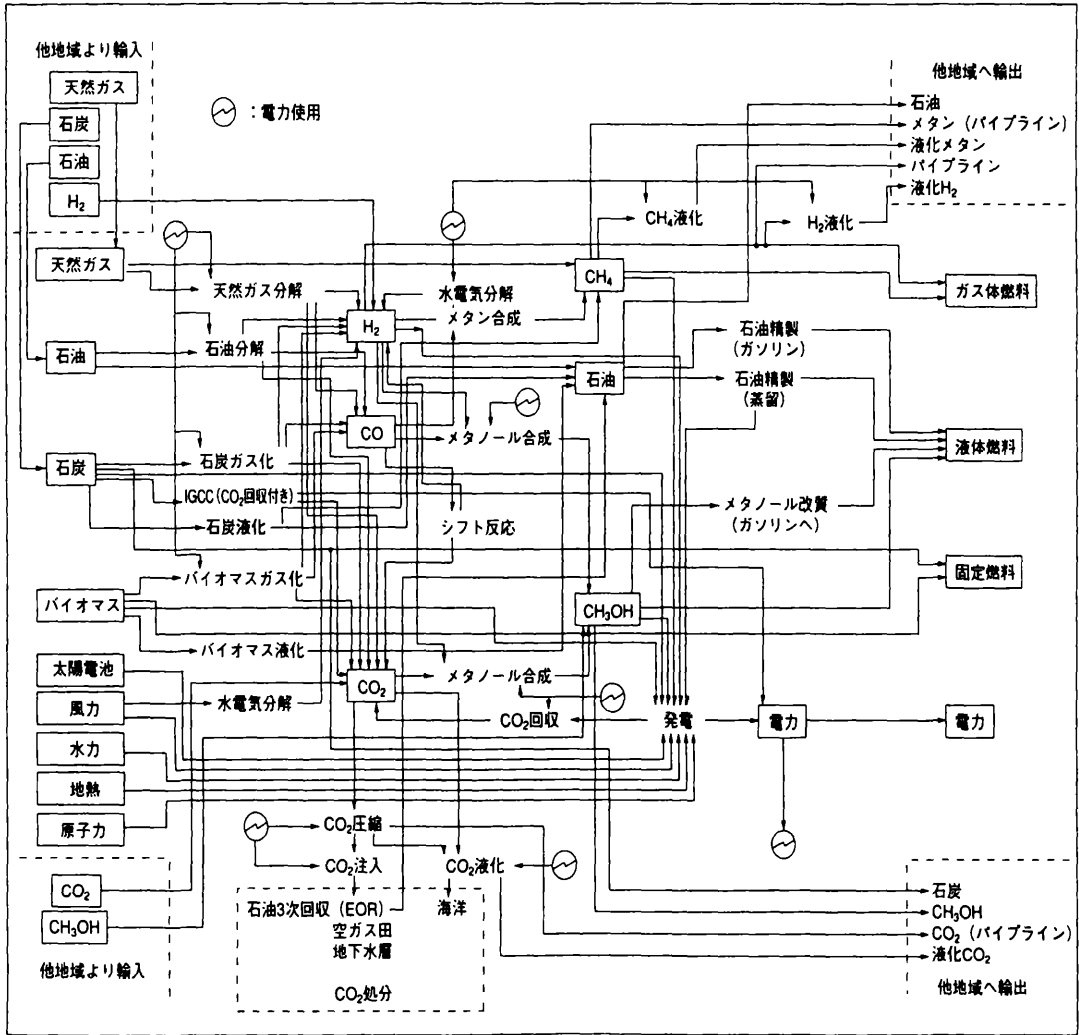
3. 2 CO₂対策技術のモデル化

DNE21モデルが表現しているエネルギーとCO₂のフローを図1に示す。モデルの基本構造は次の様になっている。

・ 省エネルギー

DNE21モデルでは、将来の潜在的なエネルギー需要はIPCCのIS92aシナリオに基づいて外生的に与えている。CO₂制約のないBAUケースについては与えた潜在需要が実現するとし、それ以外のCO₂制約のあるケースでは、仮定した需要曲線の特性にしたがって、二次エネルギー価格上昇に応じて需要が削減されると仮定している。省エネのコストは需要減に伴う効用損失で計算さ

図1 DNE21モデルにおけるエネルギーと回収CO₂のフロー構造



れる。

・燃料転換

化石燃料（石炭、石油、天然ガス）については地域毎に、資源枯渇に伴うコスト上昇をモデルで表現した。原子力以外の非化石エネルギーとしては、水力発電、地熱発電、森林バイオマス、太陽光発電、風力発電の5種類の自然エネルギーを考慮することにした。これらの自然エネルギーの資源の経済性にはまだ多くの不確実性があるが、最近の知見に基づき入力条件を設定した。なお、太陽光発電と風力発電は出力が間欠的になることから、電力系統の供給信頼性を保つために、それぞれの系統連系量を総発電電力量の一定比率以下に制限されるとした。しかし、水の電気分解プラントや電力貯蔵装置へ供給される電力に対してはこの制約条件は適用されない。なお、原子力は、発

電容量に上限値を設定して、最適化の対象としてモデルに取り込むことにした。今回の検討で想定したこの上限値としては、世界全体で原子力発電設備容量は2050年までに15億 kW のレベルまで拡張可能（その後はこの上限値以下に制約）と想定している。

・CO₂の分離・回収・処理

DNE21モデルではCO₂の分離回収方法として、発電所排ガスからの化学吸収法と、ガス化プラント及び石炭ガス化複合発電プラントからの物理吸収法とを考慮している。回収されたCO₂の処理については、(1)石油の増進回収(EOR)用に油田に圧入する方法、(2)枯渇した天然ガス田に圧入する方法、(3)地下の帯水層に圧入する方法、及び(4)海洋貯留(海水への溶解と深海底での貯留があり得るが後者)を想定した。なお、回収されたCO₂の一部をメタノール合成に利用する可能性も考慮している。

・革新的エネルギー技術

核融合、宇宙太陽光発電などの革新的な新エネルギー供給技術や省エネルギー技術の開発・導入も長期的には期待される。DNE21モデルでは、現在では技術の詳細は明らかではないこのような革新的技術によるCO₂排出削減における貢献分を、最終需要端におけるエネルギー消費の削減という形で表現している。このような革新的なエネルギー技術の寄与は最適化の対象とするのではなく、予めシナリオとして外生的に与えるものとし、今回紹介するシミュレーションで革新的技術の導入を仮定するケースでは、全地域全部門について一律に、2075年において各潜在需要の10%、2100年において20%とした。なお、結果の表示においては、革新的なエネルギー技術の寄与は等価な供給量として表現している。

・その他の対策技術

地球規模で最適なエネルギーシステムの構築を目指すとなると、在来の石油や天然ガスに加え、新しい2次エネルギー媒体としての水素やメタノール、そして回収されたCO₂の長距離輸送が重要な役割を演ずると考えられるのでこれらを考慮した。また石炭や石油などの燃料から、水素、メタン、メタノールなどのCO₂放出係数の小さい燃料を生成すれば、さらなるCO₂排出量の削減が期待できる。もちろん水素などを製造する過程で発生するCO₂の回収が前提となる。ここでは、化石燃料やバイオマスなどの各種炭化水素資源をH₂、CO、CO₂に分解し、その後シフト反応などを介して水素、メタン、メタノールを製造する統合型エネルギーシステムを想定した。

3. 3 計算ケースと結果

(1) 計算ケース

RITEの報告書(1)ではCOP3に対応したCO₂排出規制、2100年のCO₂濃度制約、CO₂回収・処分と革新技術の有無等を組み合わせて作成した多数のケースについてシミュレーションを行っているが、本稿ではこれらの中から代表的な表1に示す5ケースについて紹介する。

表1 計算ケース一覧

	ケース記号	ケース名	内 容
1	ケース A	BAU ケース	ベースケース (CO ₂ 排出に制約を課さず、費用最小化基準により将来のエネルギーシステムを選択する)
2	ケース B	COP3 対応標準ケース	Annex 1 地域のみ COP3 対応による排出規制, 途上国は制約無, CO ₂ 処分有, 革新技術無
3	ケース C	Non-Annex 1 300% ケース	ケース B に加えて途上国 (Non-Annex 1) も 1990 年の CO ₂ 排出量の 300% 以下の排出規制 CO ₂ 処分有, 革新技術無
4	ケース D	550ppm 革新技術ケース	ケース B に加えて 2100 年における CO ₂ 濃度を 550ppm に制約 CO ₂ 処分無, 革新技術有
5	ケース E	550ppm 処分技術ケース	ケース B に加えて 2100 年における CO ₂ 濃度を 550ppm に制約 CO ₂ 処分有, 革新技術無

BAU ケース (ケース A) では、CO₂制約無しの条件下で、エネルギーシステムコストの現在価値換算総額を最小にするように技術が選択される。

このケースに COP3 に対応する規制を Annex 1 の地域に設定したケースをケース B とする。このケース B をここでは COP3 対応標準ケースと呼ぶことにする。COP3 対応標準ケースでは 2010 年時点の Annex 1 地域の CO₂ 排出量を京都で行われた COP3 の合意に沿って制約し (1990 年比、北米 - 7%、西欧 - 8%、日本 - 6%、オセアニア + 8%、旧ソ連・東欧 0%)、2020 年以降は Annex 1 地域合計として 1990 年比 20% 削減とした。2020 年以降の Annex 1 地域全体への総量制約の各地域への配分は費用最小化によって行われる。つまり、Annex 1 地域内で取引手数料無しの理想的な排出権市場を想定したことになる。

ケース C は COP3 対応標準ケース (ケース B) に加えて、途上国 (Non-Annex 1 地域) も CO₂ 排出制約を設けるケースであり、途上国全体として 1990 年レベルの 300% 以下としたケースである。

ケース D は COP3 対応標準ケース (ケース B) に加えて、2100 年の大気中の CO₂ 濃度を 550ppm に制約し、CO₂ 処分技術は無く、革新技術が利用できるケースである。

ケース E は COP3 対応標準ケース (ケース B) に加えて、2100 年の大気中の CO₂ 排出量濃度を 550ppm に制約し、CO₂ 処分技術が利用でき、革新技術は無しの場合である。

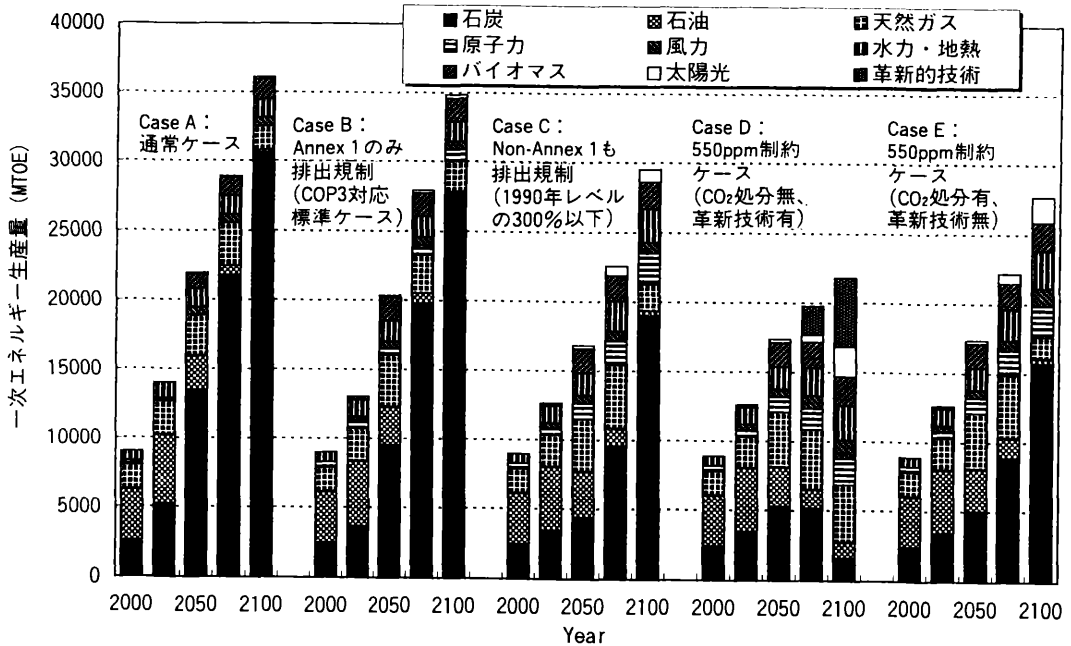
(2) 結果

a. 一次エネルギー生産量

各ケースの一次エネルギー生産量を図 2 に示す。

CO₂ 制約を課さないケース A では、石炭生産量の伸びが顕著である。2000 年では、全一次エネルギーの 29% にすぎないが、2050 年で 61%、2100 年時点では 85% までシェアを伸ばしている。これは石油、天然ガスに比べ石炭の資源量が多く価格も安いいため、石油、天然ガスに替わって石炭の消

図2 各ケースの一次エネルギー生産量 (World)



費が伸びるためであると考えられる。先進国だけに排出規制を課す COP3 対応標準ケース（ケース B）も同じような傾向となっているが、2020年頃からケース A より石炭生産量は約10%くらい少なくなっている。またケース A より原子力が伸びている。

ケース C はケース B に加えて途上国も1990年の CO₂ 排出量の30%に規制したもので、2050年時点では、総生産量はケース B に比べ17%減少し、天然ガスと石油が増加し、石炭が構成比で21%も減少する。非化石エネルギーはそれぞれ少しづつ伸びているが、特に原子力は構成比で約3倍になっている。なお、2100年時点ではケース B に比べ総生産量は15%減少しているが、石炭の構成比はケース C においても増大し、2050年時点と比べて増加するのに対し、天然ガスと石油のシェアは減少している。非化石エネルギーのうち、太陽エネルギーと原子力だけは伸びているが、そのほかは若干減少している。これは、ケース C では21世紀末にかけて大幅な CO₂ 回収・処分が行われていることを示唆している。

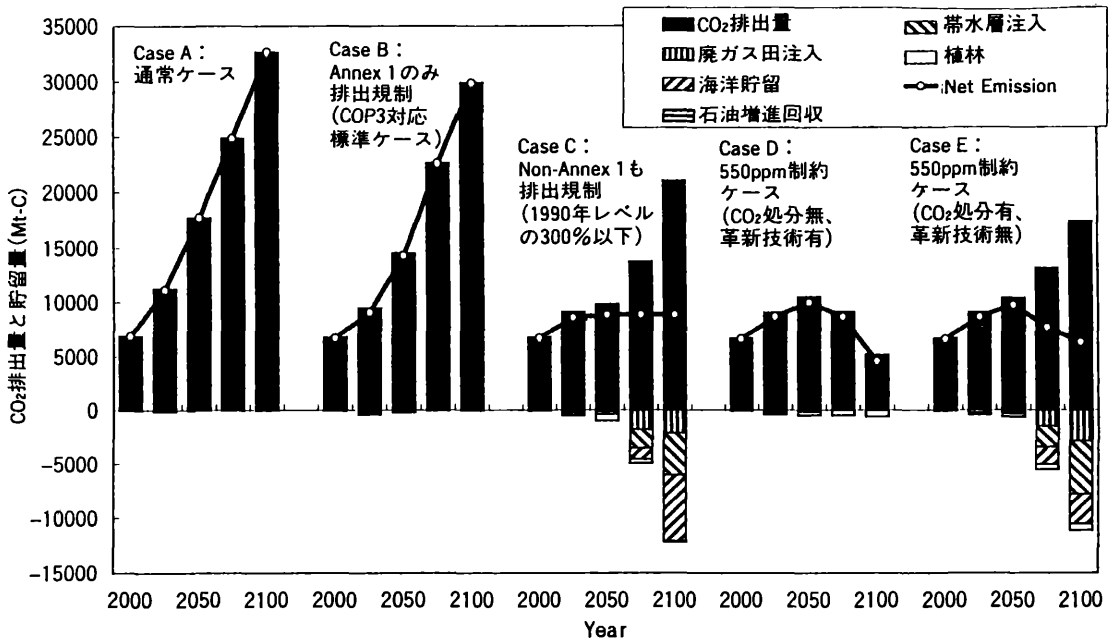
ケース D では、一次エネルギー生産量の構成が、ケース B に比べ相当に変化している。総生産量が減少し、その中で天然ガスの生産構成比は増加し、石炭は減少している。また原子力及び太陽エネルギーの伸びが大きい。またこのケースの仮定により2075年から革新技術が入ってくる。

ケース E では、BAU ケースと比べると石炭が減少するが、それでも、2100年で57%のシェアを保つ。これは、CO₂ 回収・処分技術が利用できるためである。

b. CO₂ 排出量と処分量

各ケースの CO₂ 排出量と処分量を図3に示す。

図3 CO₂排出量と貯留量 (World)



ケース A では、CO₂正味排出量は2000年で7,000Mt-C、2050年で17,000Mt-C、2100年では33,000 Mt-C にまで増加する。その内訳は大部分が石炭起源の CO₂によるものであり、石炭の生産量の比率に比例して年々増加していく。2100年には石炭からの CO₂が全排出量の95%を越える。

COP3 対応のケース B はケース A と比べて、石炭の生産量が押さえられ、省エネルギー、原子力、バイオマスと若干の石油増進による CO₂の回収・処分により CO₂の排出量を押さえている。CO₂正味排出量は2000年で7,000Mt-C、2050年で11,000Mt-C、2100年では31,000Mt-C となり、ケース A より2,000Mt-C 低くなるが、もちろんこれでは地球温暖化対策としてはまったく不十分である。

ケース C のグロスの CO₂排出量は石炭の生産量を抑えたり、再生エネルギーや原子力を増やすことによりケース A より、2100年時点で30%強減少し22,000Mt-C となる。このようにグロスの CO₂排出量の削減はそれほど大きくないが、2040年より帯水層注入での CO₂処分を始め、2075年にはそれに加えて廃ガス田注入と海洋貯留により、正味 CO₂排出量は2000年で7,000Mt-C、2030年で9,000Mt-C、2100年で9,000Mt-C と、2030年から2100年まで横這い状態になる。2075年時点の CO₂処分量は4,000Mt-C で総排出量の27%を処分している。同じように2100年での CO₂処分量は13,000Mt-C で、総排出量の60%になる。CO₂処分量を見てみると、2075年では帯水層注入による処分が一番多く、2100年には海洋貯留が6,000Mt-C で次に帯水層注入の5,000Mt-C、廃ガス田注入の2,000Mt-C と続いている。

ケース D は2000年から2050年にかけて、CO₂排出量は増加するが、2050年から2100年にかけて

減少する。CO₂回収・処分技術が利用できないと仮定しているため、化石燃料を抑え非化石燃料を増加させることでCO₂排出量を抑えている。ケースEでは、革新的技術は利用できないがCO₂回収・処分が可能と仮定しているため、回収・処分に大きく依存する結果となり、2100年時点でのCO₂総排出量18,000Mt-Cに対してCO₂処分量は11,000Mt-Cであり、正味排出量は7,000Mt-Cとなっている。

c. 各種CO₂削減対策の寄与

大幅にCO₂排出が抑制されるケースC, D, Eについて、ケースAのCO₂排出量からのCO₂削減に対する各種対策の寄与を図4, 図5及び図6に示す。

どのCO₂抑制ケースにおいてもエネルギーの高価格化に伴う省エネルギーの寄与は大きい。CO₂回収・処分技術の導入を想定しないケースDでは2100年における省エネルギーによる寄与が全削減量の半分近くまで大きくなり、CO₂回収・処分技術が利用できるケースC, Eでは25~30%の寄与になっている。

ケースC(図4)では、海洋貯留と、帯水層注入、廃ガス田注入などのCO₂処分が最も大きな寄与をしてCO₂正味排出量を押し下げている。正味排出量は2030年よりほぼ横ばいのまま2100年まで推移する。2100年にはCO₂処分の中でも海洋貯留が他の処分量より多くなっている。なお、CO₂回収・処分による寄与は2050年以降に発生している。

ケースD(図5)では2050年頃まで正味CO₂排出量は増加し、21世紀後半になって大幅な削減により減少していく。革新技術が導入されると仮定しているので、太陽光など再生可能エネルギーの寄与の一部が代替されている。

図4 CO₂削減対策効果 (Case C)

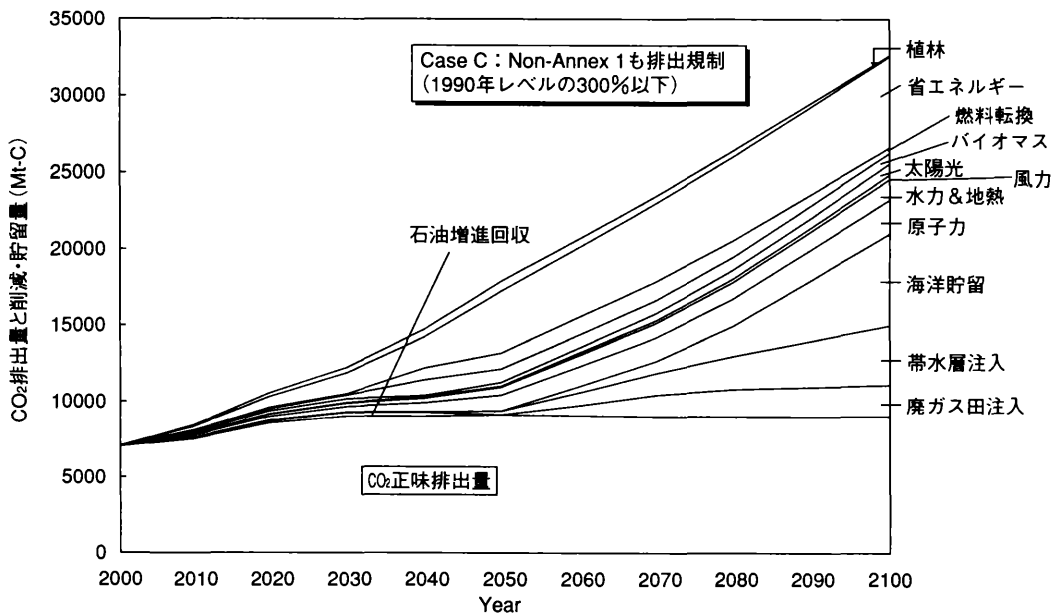


図5 CO₂削減対策効果 (Case D)

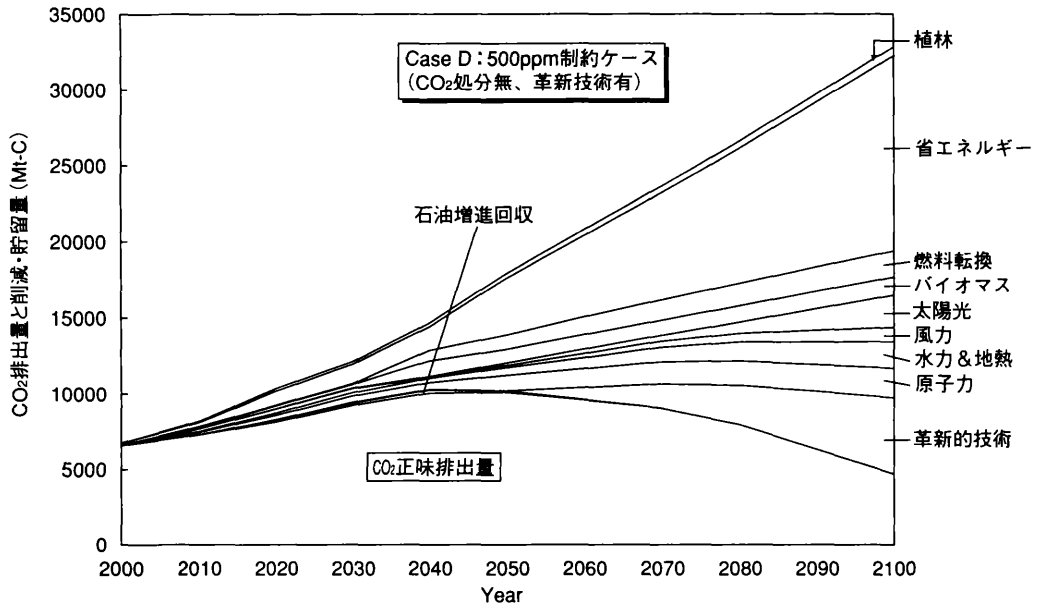
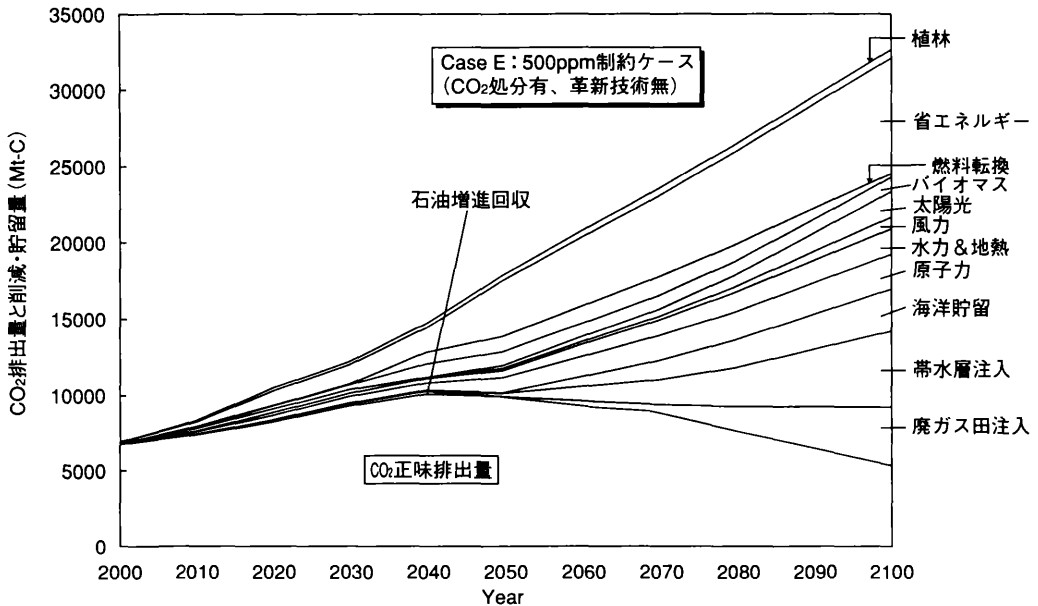


図6 CO₂削減対策効果 (Case E)

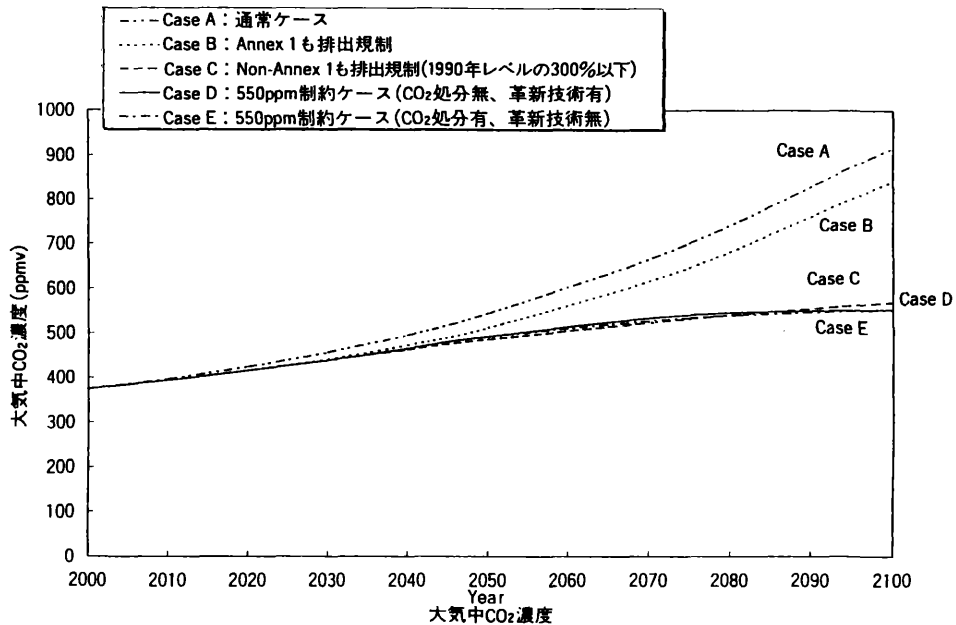


ケース E (図6) の結果は、2040年頃まで正味 CO₂排出が増大し、21世紀後半には大幅に削減する。省エネ、再生可能エネルギー、原子力、CO₂貯留とすべての対策技術が用いられるが、2100年には高価な CO₂処分技術である帯水層処分の役割が相対的に大きい。

d. 大気中の CO₂濃度

各ケースにおける大気中 CO₂濃度の推移を図 7 に示す。ケース A では、2100年における CO₂濃度は900ppm を越えている。Annex 1 のみ排出規制のケース B では、2100年の大気中 CO₂濃度は約840ppm となり、ケース A と比べてほとんど改善されていない。これは地球温暖化防止の観点からは許されない水準であろう。21世紀後半には発展途上地域からの CO₂排出が先進諸国を遙かに上回り、先進諸国だけの一方的な CO₂削減では地球温暖化の防止は不可能なのである。

図 7 各ケースにおける大気中 CO₂濃度



Non-Annex 1 にも CO₂排出規制をかけるケース C では、ケース B と比べ2040年以降 CO₂排出量が減り、2100年には約550ppm に抑制できる。

2100年の大気中濃度を550ppm に制約するケース D, E では2050年近くまでの濃度変化の推移はケース B とほぼ一致した濃度推移をたどる。つまり21世紀前半まで先進国を中心とする CO₂削減努力で、濃度上昇に若干ブレーキがかけられており、21世紀後半からは途上国も含めた全世界的に強力な CO₂削減によって550ppm での大気中濃度安定化を実現するという見通しが得られるのである。

e. 先進国と途上国の CO₂削減の分担

各ケースにおける CO₂の排出量と回収・処分量を、先進地域 (Annex 1) と発展途上地域 (Non-Annex 1) に分けて各々図 8 と図 9 に示す。

図 8 に示す Annex 1 においては、ケース A の CO₂排出量は2000年から増え続け2100年には 14,000Mt-C 以上と大量の CO₂排出量になる。そこで排出量に規制を課すと各ケースとも正味排出

図8 CO₂排出量と貯留量 (Annex 1)

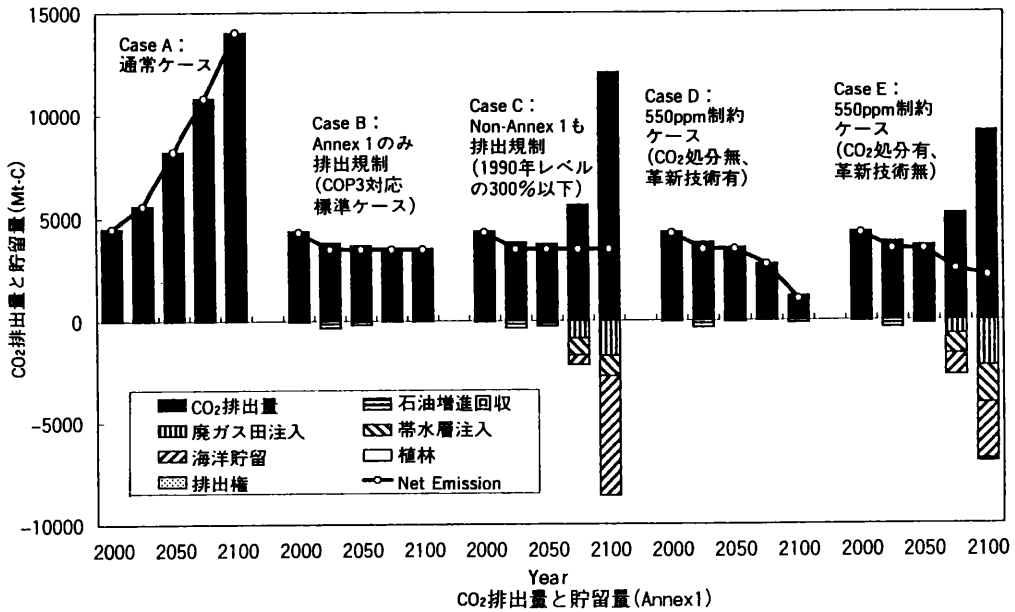
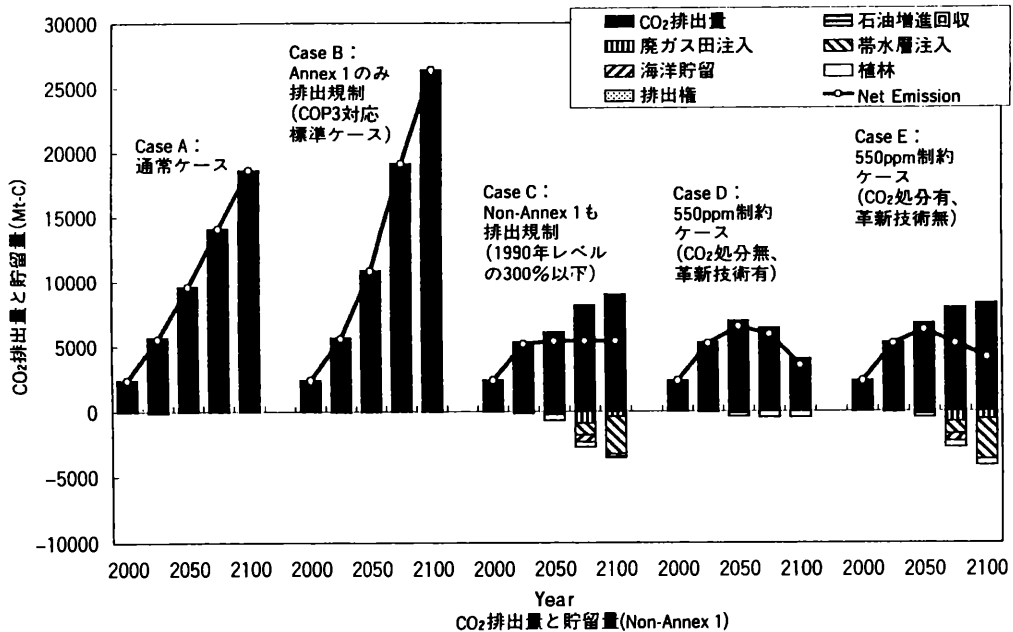


図9 CO₂排出量と貯留量 (Non-Annex 1)



量は2000年をピークに横ばいか、減少する。COP3の制約に対応するケースBではCO₂回収・処分はほとんど行われない。途上地域にも排出制約を課したケースCでは、先進地域では天然ガスと石炭からメタノールを合成して途上地域にも輸出するが、それにより増えたCO₂排出量は回収・処

分を行うことで正味排出量を減らしている。2100年にはCO₂排出量は13,000Mt-CにもなりケースAの排出量に近くなるが、大量にCO₂回収・処分を行って正味排出量は2020年より横這いの状態に保っている。CO₂回収・処分の方法としては海洋貯留が最も多く行われている。世界全体として2100年の濃度を550ppmに抑制するケースDとEでは、CO₂処分技術が使えないと仮定したケースDではCO₂排出量は一方的に減少するが、ケースEはケースCに似た傾向を示す。

一方、図9のNon-Annex 1を見ると、ケースBでは2075年でケースAの2100年の水準を上回り、2100年には莫大な量になってしまう。つまり、先進地域だけにCO₂排出規制をかけると途上国では排出が増えてしまうのである。これは、先進国だけにCO₂規制を課すと、化石資源の消費が一時的に抑制されるために石炭や石油の価格はケースAより安くなり、規制のかかっていない途上国ではCO₂排出量は逆に増加するのである。これは、炭素リーケージとして知られている効果である。更に、先進国で使用するメタノールを途上国が石炭を原料にして増産するなどの技術選択がこの効果を増幅している。そこでNon-Annex 1地域の排出も規制するケースCの場合を見ると、正味CO₂排出量は2000年から2030年頃まで増え続けるが、後は2100年まで横ばいになっている。2100年のCO₂濃度を制約するケースD、Eでは、途上地域の正味CO₂排出量は2050年頃をピークとする曲線になる。処分技術の使えるケースEではケースCとほぼ同じ規模のCO₂回収・処分が行われる。

図8と図9を比較すると、途上地域では2000年のCO₂排出量は約2,500Mt-Cで、先進地域の約半分であるが、2030年頃には5,000Mt-Cを上回り急激に増加するのに対し、先進地域の正味CO₂排出量は、ケースAを除いてすべてのケースで2030年以降は5,000Mt-Cを下回っていることが分かる。つまり、2030年頃から後では、世界のCO₂排出量の主体は途上国からのもので構成される。

3. 4 考察

以上のように世界エネルギーモデルによって地球全体として長期的に費用最小な二酸化炭素排出削減対策を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ・CO₂に制約を課さない場合（ケースA）では、石炭が主要な一次エネルギー源として採用されるため、2100年のCO₂濃度は900ppmを越える。これが地球温暖化防止の観点から許容できないことは明らかである。
- ・COP3で採択された先進国だけに排出規制を課す場合（ケースB）も上記ケースAと殆ど変わらず、むしろ、先進国だけに排出規制を課すと途上国の排出量は増大する恐れが強い。
- ・COP3の合意に加えて途上国の排出量を1990年実績の3倍以下に規制すれば2100年の大気中CO₂濃度は約550ppmに抑制できる。この場合、先進国においてもCOP3で合意した以上のCO₂排出を削減することが世界的に費用最小となる。

- ・CO₂削減は省エネルギー，燃料転換，非化石エネルギーの大量導入及びCO₂回収・処分というすべての対策を組み合わせる方が効率的である。CO₂回収・処分は21世紀後半になって大きな寄与が期待される。
- ・長期的に費用最小となる地球温暖化対策において，当初は省エネルギーが重要な役割を独占するが，殆どのケースで2030年～2050年頃からCO₂回収・処分を含めた供給側の対策技術の効果が急速に拡大する。地球温暖化対策の究極的な目的である大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させるための効率的な技術戦略の展開には，このように長期的な展望の下で，最終的に経済性の高い技術・資源を活用する視点が重要である。ただし，このような技術戦略を実現可能なものとするためには，多様な選択肢をタイミングよく用意できるよう，技術開発投資を今から十分に行って将来に備えなければならない。

4. おわりに

地球温暖化対策技術には，単独ですべてを解決できるような切り札は存在しない。長期的かつグローバルな視座に立ち，省エネから各種自然エネルギー，原子力，そしてCO₂回収処分技術を含め，複数の対策を組み合わせる必要がある。

地球温暖化問題は人類全体につきつけられた地球規模の大難問であるが，エネルギーモデルによる解析の結果は2つの希望を示唆している。一つは，長期的に，例えば2100年での大気中のCO₂濃度の安定化を目標とすれば，短期的に直ちにCO₂削減に向かわず，技術開発の成果を待って，21世紀の中盤から大幅にCO₂を削減することが最適な対応になるという点である。つまり，CO₂対策には時間軸上のフレキシビリティがあり，これを活用することで，対策コストは大幅に下がる。勿論，CO₂削減に向けて今何もしないということが正当化される訳ではなく，技術開発投資を今から十分に行って将来に備えなければならない。二つ目は，発展途上地域と先進地域が協力すれば，より多くの費用の安い削減方策を実現できるということである。途上国地域では一般に，太陽エネルギーは豊富だし，バイオマス資源の生育条件も良く，エネルギー利用効率改善の余地も大きい。京都議定書で導入が決められたCDM (Clean Development Mechanism) や「共同実施」のような技術移転を含む国際的なエネルギー開発は今後ますます重要性を増すと思われる。また，メタノールや水素など新しい2次エネルギー媒体による長距離エネルギー輸送を実現して，グローバルなエネルギーネットワークを形成することも長期的な国際開発プロジェクトとして有望である。

地球温暖化対策を通して21世紀のエネルギーシステムは持続可能な形態へと大きく変貌して行くことが期待される。

(東京大学大学院新領域創成科学研究科教授)

引用文献

- (1) (財)地球環境産業技術研究機構：「地球再生計画」の実施計画作成に関する調査事業，平成9年度調査報告書，NEDO-GET-9718 (1998)
- (2) 藤井康正，茅陽一：世界エネルギーシステムにおけるCO₂対策技術の可能性評価，電気学会論文誌B，Vol. 113, No.11, pp. 1213-1222 (1993)
- (3) Y. Fujii and K. Yamaji: Assessment of technological options in the global energy system for limiting the atmospheric CO₂ concentration, Environmental Economics and Policy Studies, Vol. 1, No. 2, pp. 113-139 (1998)