慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	二酸化炭素濃度安定化における技術の役割
Sub Title	Role of thechnologies for stabilization of atomospheric carbon dioxide concentration
Author	秋元, 圭吾(Akimoto, Keigo) 友田, 利正(Tomoda, Toshimasa)
Publisher	慶應義塾経済学会
Publication year	2005
Jtitle	三田学会雑誌 (Keio journal of economics). Vol.98, No.2 (2005. 7) ,p.191(53)- 202(64)
JaLC DOI	10.14991/001.20050701-0053
Abstract	京都議定書が発効し, 温暖化抑制に向け大きな一歩を踏み出した。一方, 最大の排出国である米国が議定書から離脱し, また, 今後排出の増加が見込まれる途上国が排出削減義務を負わないなどの課題も抱えており, 京都議定書以降の排出削減枠組が重要である。その際, 二酸化炭素濃度安定化など長期的な視点で対策を考える必要があり, そこでは, 長期的かつグローバルな視点から技術の果たす役割を評価しておくことが, 適切な枠組・目標を設定するために不可欠である。それを怠れば, 実効ある削減枠組・目標を構築できないばかりか, 不用意に大きなコスト負担をもたらし, 世界の持続的な発展を阻害し, 温暖化以外の大きなリスクを引き起こす恐れもある。本稿では, 高い地域解像度を有するエネルギーシステムモデルによって, 二酸化炭素濃度安定化のための技術の役割を定量的に評価し, それを通して, 長期的な排出削減枠組・目標のあり方を議論する。 With the enactment of the Kyoto Protocol, a big step was taken toward reducing global warming. On the other hand, with problems such as the withdrawal from the protocol by the largest emission country, the United States, coupled with the fact that developing countries, which are projected to increase emissions, are not obligated to reduce emissions, the nature of the emissions reduction framework established after the Kyoto Protocol is important. In doing so, it is necessary to consider measures from a long-term perspective such as CO2 concentration stabilization, for establishing an adequate framework and goals, while evaluating the role technology plays from a long-term global perspective. If this is neglected, not only is the construction of an effective reduction framework and objective impossible, but it also introduces the possibility of producing inadvertently large cost burdens, potentially inhibiting the sustainable development of the world and causing other risks greater than warming. In this study, we employ an energy system model with a high regional resolution to quantitatively evaluate the role of technologies for CO2 concentration stabilization and discuss the ideal form of a long-term emissions reduction framework and goals.
Notes	小特集 : 環境政策のフロンティア
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-20050701-0053

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.

二酸化炭素濃度安定化における技術の役割

Role of Technologies for Stabilization of Atmospheric Carbon Dioxide Concentration

秋元 圭吾(Keigo Akimoto)
友田 利正(Toshimasa Tomoda)

京都議定書が発効し，温暖化抑制に向け大きな一歩を踏み出した。一方，最大の排出国である米国が議定書から離脱し，また，今後排出の増加が見込まれる途上国が排出削減義務を負わないなどの課題も抱えており，京都議定書以降の排出削減枠組が重要である。その際，二酸化炭素濃度安定化など長期的な視点で対策を考える必要があり，そこでは，長期的かつグローバルな視点から技術の果たす役割を評価しておくことが，適切な枠組・目標を設定するために不可欠である。それを怠れば，実効ある削減枠組・目標を構築できないばかりか，不用意に大きなコスト負担をもたらし，世界の持続的な発展を阻害し，温暖化以外の大きなリスクを引き起こす恐れもある。本稿では，高い地域解像度を有するエネルギーシステムモデルによって，二酸化炭素濃度安定化のための技術の役割を定量的に評価し，それを通して，長期的な排出削減枠組・目標のあり方を議論する。

Abstract

With the enactment of the Kyoto Protocol, a big step was taken toward reducing global warming. On the other hand, with problems such as the withdrawal from the protocol by the largest emission country, the United States, coupled with the fact that developing countries, which are projected to increase emissions, are not obligated to reduce emissions, the nature of the emissions reduction framework established after the Kyoto Protocol is important. In doing so, it is necessary to consider measures from a long-term perspective such as CO2 concentration stabilization, for establishing an adequate framework and goals, while evaluating the role technology plays from a long-term global perspective. If this is neglected, not only is the construction of an effective reduction framework and objective impossible, but it also introduces the possibility of producing inadvertently large cost burdens, potentially inhibiting the sustainable development of the world and causing other risks greater than warming. In this study, we employ an energy system model with a high regional resolution to quantitatively evaluate the role of technologies for CO2 concentration stabilization and discuss the ideal form of a long-term emissions reduction framework and goals.

「三田学会雑誌」98 巻 2 号（2005 年 7 月）

二酸化炭素濃度安定化における技術の役割

秋　元　圭　吾
友　田　利　正

要　　旨

京都議定書が発効し，温暖化抑制に向け大きな一歩を踏み出した。一方，最大の排出国である米国が議定書から離脱し，また，今後排出の増加が見込まれる途上国が排出削減義務を負わないなどの課題も抱えており，京都議定書以降の排出削減枠組が重要である。その際，二酸化炭素濃度安定化など長期的な視点で対策を考える必要があり，そこでは，長期的かつグローバルな視点から技術の果たす役割を評価しておくことが，適切な枠組・目標を設定するために不可欠である。それを怠れば，実効ある削減枠組・目標を構築できないばかりか，不用意に大きなコスト負担をもたらし，世界の持続的な発展を阻害し，温暖化以外の大きなリスクを引き起こす恐れもある。本稿では，高い地域解像度を有するエネルギーシステムモデルによって，二酸化炭素濃度安定化のための技術の役割を定量的に評価し，それを通して，長期的な排出削減枠組・目標のあり方を議論する。

キーワード

地球温暖化，二酸化炭素濃度安定化，京都議定書，温暖化対策技術，技術評価

1.　はじめに

ロシアの批准により，京都議定書が 2005 年 2 月 16 日に発効し，温暖化抑制実施に向け大きな一歩を踏み出した。容易な目標ではないが，これを着実に実行することが今後の温暖化抑制にとって重要である。しかし一方，最大の排出国である米国が議定書から離脱し，また，今後，排出の増加が見込まれる途上国が排出削減義務を負わないなど，多くの課題を抱えており，実効ある温暖化対策のためには京都議定書以降の排出削減枠組が重要となってくる。

2005 年中に京都議定書以降の枠組の議論が開始されることとなっており，COP10 においては 2005 年 5 月に政府専門家セミナーが開催されることが決まった。英国は別途，2050 年までに 1990 年比約 60 %排出削減を目標として掲げる[1)] と共に，2005 年英国で開催される G8 サミットでも温暖化問題を最重要議題の 1 つとするとしているなど，積極的な排出削減姿勢を見せている。一方，米国は，京都議定書には否定的ではあるが，CO_2 回収・貯留技術や水素技術の技術開発などには比較的積極的で，CSLF（Carbon Sequestration Leaders Forum）などの技術開発に関する国際協力は重要

視する傾向にある。また，排出が今後伸びると見込まれる途上国においては，経済成長が最優先と見なされ，温暖化対策が経済成長の阻害要因となることに強い警戒感を抱いている。更には，アフリカなど，排出が極めて小さい一方，温暖化影響を大きく受けそうな地域は，適応策を重要視し，先進国にそのための資金提供を求める傾向にある。

このように，様々な国々の異なった思惑の中で，実効ある温暖化抑制を実現するためには，やはり技術の果たす役割が大変重要である。しかし，一方，各国によって適した技術は異なっているため，どういった技術を，どの国において利用すべきかの定量的な方策を示すことは，今後の排出削減枠組の構築にあたっても重要となる。そこで，本研究では，世界を多地域に分割したエネルギーシステムモデル DNE21+[2,3,4] を用いた分析結果を基に，京都議定書以降の長期的な二酸化炭素排出抑制のための技術の役割について述べる。そして，それらの分析結果を基に，京都議定書以降の排出削減枠組のあり方について考察する。

2. 評価のためのモデル概要

DNE21+は，長期的な温暖化対策技術の評価に適したモデルであり，世界全体のエネルギーシステムコストを最小化する動学的な線形計画モデルとして定式化している。これによって，各種温暖化対策技術が，コストやポテンシャルなどを勘案して整合的に評価することができる。

本稿で用いた評価対象期間は 2000 年から 2100 年までの 100 年間であり，最適化代表時点は 2005，2010，2015，2020，2025，2030，2040，2050，2075，2100 年の 10 時点としている。また，エネルギーの偏在性や CO_2 貯留ポテンシャルの分布，地域間のエネルギー・CO_2 輸送等を詳細に評価するために，世界全体を国レベルでは 54 地域，アメリカや中国などの国土の大きな国については更に一国内を分割し，計 77 地域の地域分割を行っている。

エネルギー供給技術（各種発電技術，石油精製，石炭ガス化技術等）や二酸化炭素回収・貯留技術については，各技術のコストや効率等を明示的にモデル化している。一次エネルギー種としては，石炭，石油，天然ガス，水力・地熱，風力，太陽光，バイオマス，原子力の 8 種を考慮している。一方，エネルギー需要側の技術については，長期に亘る評価において，具体的な技術を明示的に扱うことが困難であるため，固体，液体（ガソリン，軽質油，重質油），気体，電力の 4 種の燃料種別に集約化し，長期価格弾性値を利用してトップダウン的にモデル化している。なお，電力需要については，瞬時ピーク，ピーク，中間及びオフピークの 4 時間帯に区分し，各時間帯で需給バランスがとれるようにモデル化している。CO_2 回収技術としては，燃焼後回収として化学吸収法を，燃焼前回収としては物理吸収法を想定した。一方，CO_2 貯留技術としては，地中貯留（石油増進回収（EOR），廃ガス田，帯水層，炭層メタン増進回収（ECBM））と海洋隔離を想定した。石油増進回収また，分割地域間の輸送は，石炭，石油，天然ガス，電力，メタノール，水素，CO_2 をモデル化し，それぞれ

について，鉄道輸送，パイプライン，タンカー輸送などを明示的にモデル化している。

なお，DNE21+モデルはエネルギーシステムモデルであり，土地利用変化による CO_2 排出やセメント生産における石灰石起源の CO_2 排出は考慮していない。

3. モデル分析の主な前提条件

本モデルは，各種エネルギー資源量・供給コスト，CO_2 貯留ポテンシャル・コストや，エネルギー

表 1　世界全体の各種化石燃料資源量の想定

	無煙炭，瀝青炭		亜瀝青炭	褐炭
石炭	424		208	253
	在来型			非在来型
	確認埋蔵量	未発見資源量（陸域）	未発見資源量（海域）	
石油	137	60	44	2,342
天然ガス	132	59	52	19,594

単位：Gtoe（gigatons of oil equivalent）
出典：WEC 5）；USGS 6）；Rogner 7）

表 2　CO_2 回収技術のコストと回収効率の想定

	設備費（US$/ (tC/day)）	所要動力（MWh/tC）
石炭燃料発電からの CO_2 化学吸収	59,100 – 52,000	0.792 – 0.350
天然ガス燃料発電からの CO_2 化学吸収	112,500 – 100,000	0.927 – 0.719
ガス化プラントからの CO_2 物理吸収	14,500	0.902 – 0.496
	設備費（US$/kW）	発電効率（% LHV）
CO_2 回収付石炭ガス化複合発電（物理吸収）	1,700 – 1,470	34.0 – 49.0

注：時点と共にコストは低減，エネルギー効率は向上するものと想定
出典：David et al. 8）；Fujii et al. 9）

表 3　世界全体の CO_2 貯留ポテンシャルと貯留コストの想定

	貯留ポテンシャル（GtC）	貯留コスト†（$/tC）
油田（石油増進回収）	30.7	81 – 118‡
廃ガス田	40.2 – 241.5††	34 – 215
炭層（炭層メタン増進回収）	40.4	113 – 447‡‡
帯水層	856.4*	18 – 143
海洋	–	36**

† CO_2 回収コストは別途考慮
‡ 回収された石油売却利益は別途考慮
†† 40.2 は 2000 年の初期値であり，天然ガス生産と共に貯留ポテンシャルは増大
‡‡ 回収されたガス売却利益は別途考慮
* 「実際的」なポテンシャルであり，「理想的」なポテンシャルの陸域は 10 %，海域は 20 %として算出
** CO_2 液化コストを含む
出典：e.g., USGS 6）；IEA-GHG 10）；Akimoto 2）

変換・CO_2 回収技術特性，既存のエネルギー変換設備のヴィンテージ，最終エネルギー需要等を前提条件として，コスト効率的な燃料種別の一次エネルギー生産量・消費量，発電電力量，発電設備容量，最終エネルギー消費量，CO_2 排出量，CO_2 回収・貯留量，CO_2 排出削減限界費用，地域間のエネルギー・CO_2 輸送量などが算出される。

表 1 にはモデルで想定した化石燃料資源量を，表 2 には CO_2 回収技術のコストと回収効率を，表 3 には，CO_2 貯留ポテンシャルと貯留コストの想定を示す。なお，エネルギー資源量や CO_2 貯留容量などの想定は，GIS データに基づいて行っているため，様々な地域解像度に対応可能としている。一方，風力，太陽光のコストは，2050 年までそれぞれ 1.0 %/yr，3.4 %/yr で低減するものと想定した[11)]。

最終エネルギー需要の想定は，国別人口，地域別一人当たり GDP 成長率，地域別・燃料種別の GDP 当たり最終エネルギー需要成長率（以上，IPCC SRES[12)] より），及び，GDP と燃料種別の最終エネルギー需要の 2000 年実績値（IEA 統計）より，本モデルの世界分割地域別の推定を行った。本稿での分析における具体的な最終エネルギー需要想定は後述する。

4. モデル分析のためのケース想定

本稿では，以下のケースについてモデル分析を行うことによって，コスト面から見た京都議定書以降の長期的な温暖化抑制における対策技術の役割を評価した。

まず，長期的な対策技術の役割を見るために，CO_2 濃度安定化目標として，650，550，450 ppmv に安定化の 3 ケースを想定して 2100 年までの分析を行った。なお，分析のための排出経路については，IPCC WGI のシナリオ[13)]（S650，S550，S450）を利用した。しかしながら，技術の役割は，濃度安定化目標のみならず，人口，経済成長などの CO_2 排出に対する推進力によっても大きく異なってくる。そこで，濃度安定化目標と共に，ベースライン（CO_2 抑制制約がない場合）の最終エネルギー需要想定（実際には，それを導く人口，一人当たり GDP 成長率，燃料種別の GDP 当たり最終エネルギー需要成長率の想定）について，IPCC SRES A1（低人口成長，高経済成長），B2（中位人口成長，中位経済成長）の 2 ケースについてそれぞれ分析を行った。図 1 に SRES A1 と B2 ベースの最終エネルギー需要想定を示す。

次に，地域別の対策コストの差異を評価するために，SRES B2 ベースの 550 ppmv 安定化ケース（S550）について，地域別の CO_2 排出量に対して以下の想定を行って分析を行った（図 2 参照。本ケースにおいては 2050 年までの期間に限定して分析・評価を実施）。このケースでは，排出量取引を想定しない評価を行った。

・2010 年：米国を除く附属書 I 国は，京都議定書の目標達成を目指す。EU は 15 ヶ国で共同達成（EU バブル）。米国は GDP 当たり CO_2 排出量を 10 年間で 18 %削減（米国独自目標）

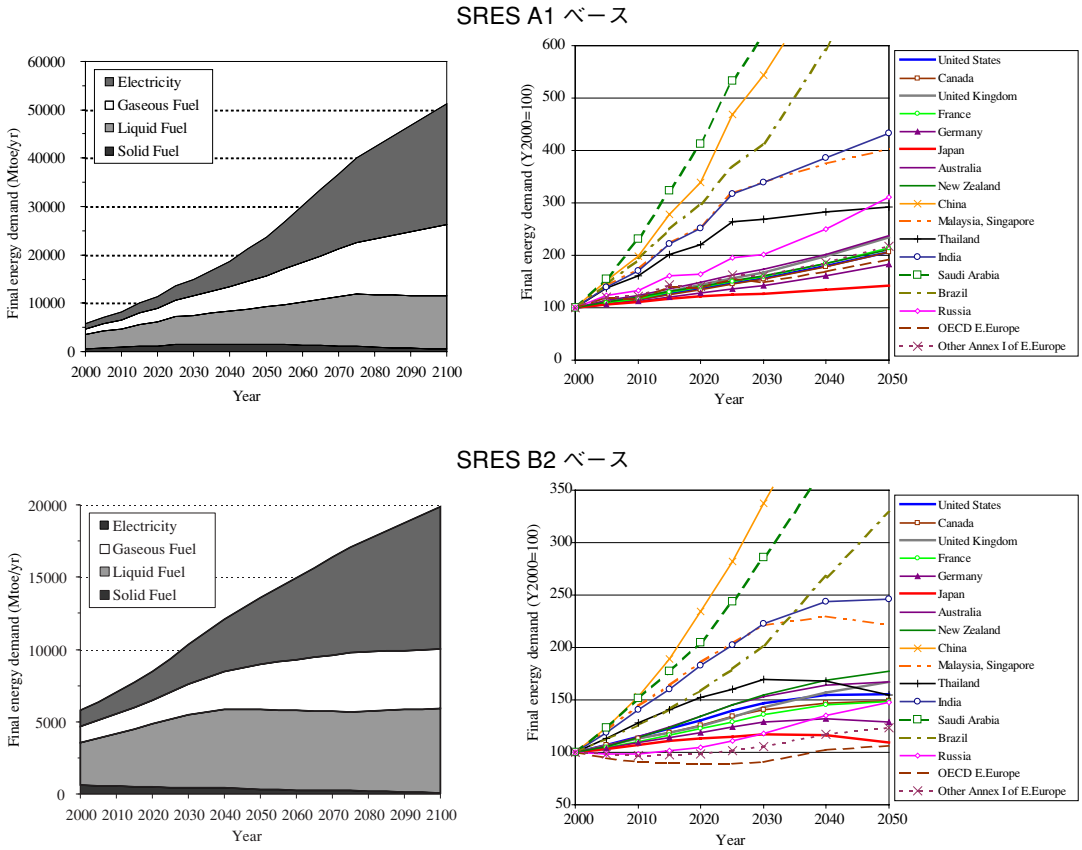

図 1　最終エネルギー需要（燃料種別と地域別）の想定

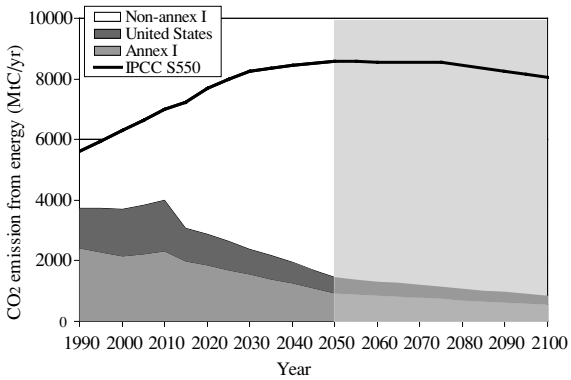

図 2　想定した CO_2 排出量制約（550 ppmv 安定化，排出量取引無）

・2015 年（2013–2017 年）以降：附属書 I 国は英国提案目標（年々排出削減し，2050 年では 1990 年比約 60 %削減）に従う。EU は 27 ヶ国で共同達成。非附属書 I 国は世界全体で S550 の排出許容量を超えない範囲に抑制。ただし，非附属書 I 国内の排出割当は 1990 年排出実績比とした。

5. モデル分析結果

5.1 2100 年までの長期的分析

まず，ベースライン（SRES A1，B2）別，CO_2 濃度安定化レベル別の CO_2 限界削減費用を図 3 に示す。これを見ると，ベースラインの違いが濃度安定化レベル以上に限界削減費用に大きく影響することがわかる。直接的な CO_2 抑制政策のみならず，間接的な政策が温暖化対策に与える影響も大きいと言える。京都議定書以降の枠組・目標の議論においても，長期的な安定化目標値を議論するのみならず，途上国を中心とした効率的なエネルギー利用など，直接的な温暖化対策とは離れた議論も同時に進めることが，実は温暖化対策としても極めて大事であり得ることを示唆している。一方，ベースラインとして，IPCC のシナリオの中で比較的中位的なシナリオである SRES B2 に限ってみた場合，650 と 550 ppmv 濃度安定化は，比較的，限界削減費用が近いものの，450 ppmv 濃度安定化になると，550 ppmv に比べ大きなコスト上昇が見られる。CO_2 濃度をどの程度に安定化すべきかは，温暖化影響の大きさも踏まえて議論すべきであり，緩和策の評価のみを行う本研究ではそれに対する回答は用意し得ない。しかし，緩和コストの面のみからは，550 ppmv よりも低い濃度での安定化は，世界的に大きなコスト負担が発生する可能性があり，550 ppmv 程度までの濃度安定化が現実的なレベルとも考えられる。

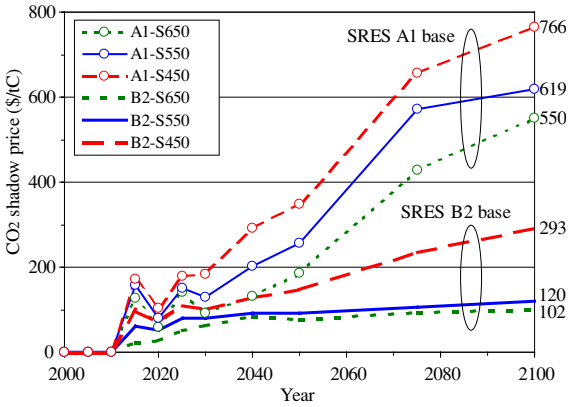

図 3　濃度安定化目標別の CO_2 限界削減費用

また，図 4 には，SRES B2 ベースにおける濃度安定化レベル別，対策技術別の 2050 年と 2100 年における CO_2 排出削減効果を示す（削減効果算出の定義式は文献 14）を参照されたい）。CO_2 回収・貯留は，2050 年，2100 年共に，濃度安定化レベルが低くなるに従い，利用量が大きくなっている。一方，再生可能エネルギーは，550 ppmv までは，それほど大きな効果を持たないものの，450 ppmv

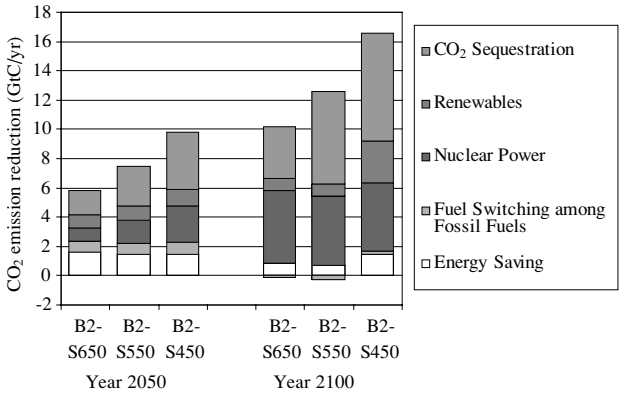

図 4　濃度安定化目標別，対策技術別の排出削減効果（SRES B2 ベース）

濃度安定化ケースの 2100 年の削減効果では，比較的大きな削減効果を有していることがわかる。なお，省エネルギーの効果は，2050 年よりも 2100 年が小さくなっているが，これは，最終エネルギー消費における利用は小さくなる一方，CO_2 回収・貯留技術の大幅な利用に伴って，回収動力を要するために，増エネルギーとなるためである。CO_2 回収・貯留技術は，濃度安定化のためのコスト効率的なオプションの 1 つとして有効である一方，増エネルギーをもたらすという点は常に留意しなければならない。

これらの分析から，650～450 ppmv といった濃度安定化レベルをコスト効率的に実現するためには，省エネルギーはもちろん重要であるが，いずれのレベルにおいても，原子力や CO_2 回収・貯留の積極的な利用が必要であると言える。ただし，本モデルは，コスト面から対策を整合的に評価するものであり，導入に関する社会的な障壁までを評価しておらず，原子力や CO_2 回収・貯留といった大規模な技術については，導入の社会的障壁が大きいことも十分考慮する必要がある。

5.2　地域的な視点からの分析（排出量取引無ケース）

次に 550 ppmv 濃度安定化において，地域別の排出上限を想定したケース（排出量取引無）についての分析結果を示す（2050 年までの期間の分析・評価）。図 5 に，温暖化対策技術別の CO_2 排出削減効果を示す。なお，本分析では，図 2 のような CO_2 排出制約を想定しているが，排出量取引がないものとしているため，想定した排出上限に達していない地域も存在し，より多くの排出削減が達成される結果となっていることに注意されたい。本ケースでは，2010 年や 2015 年といった比較的近い時点においても，省エネルギーや燃料転換のみならず，CO_2 回収・貯留技術の利用がコスト効率的な対策となっている。すなわち，排出量取引がなく，附属書 I 国に大幅な排出削減義務を想定したケースの場合には，特に，省エネルギー等の対策余地が小さい附属書 I 国は，比較的近い時点であっても，CO_2 回収・貯留技術による削減がコスト効率的な対策として必要となってくることがわ

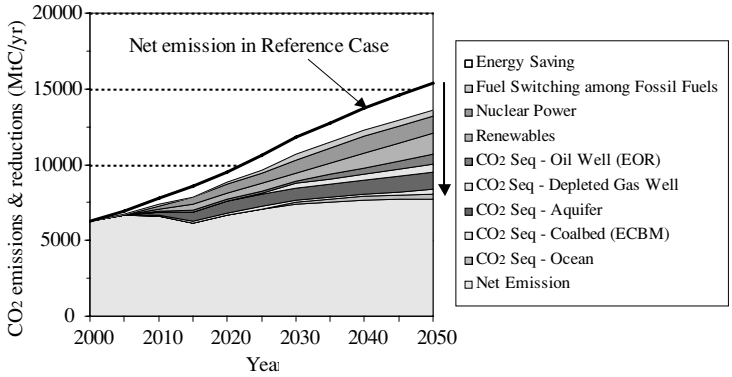

図 5　世界全体の温暖化対策技術別の CO_2 排出削減効果
（SRES B2 ベース，550 ppmv 濃度安定化，排出量取引無）

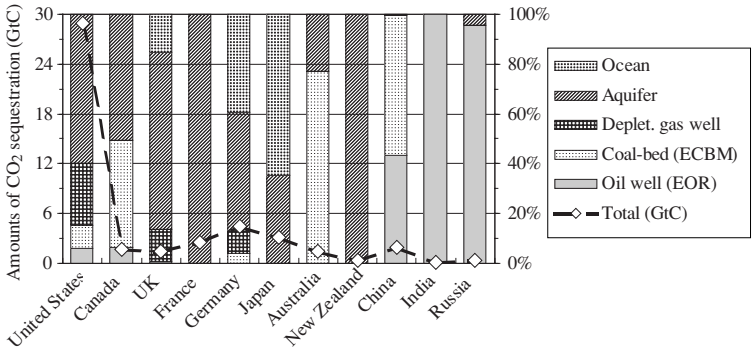

図 6　地域別，貯留オプション別の 2000～2050 年の累積 CO_2 貯留・隔離量
（SRES B2 ベース，550 ppmv 濃度安定化，排出量取引無）

かる。

図 6 には，地域別，オプション別の 2000～2050 年の 50 年間に亘る累積 CO_2 貯留量を示す。地域別に見ると，米国での貯留量が非常に大きいことがわかる。また，オプション別に見ると，米国では様々な地中貯留オプションの利用が，日本では帯水層貯留，海洋隔離の利用比率が大きく，中国，ロシアなどでは，石油やメタン回収といった副次的効果がある EOR や ECBM の比率が大きい。このように，CO_2 回収・貯留技術に限定しても，地域に適したオプションは更に異なり，地域に即した対策を行うことが重要である。

地域的な対策技術利用の差異をよりマクロ的な指標で把握するために，図 7 に国別のエネルギー原単位を，図 8 には同じく国別の CO_2 排出原単位を示す（ただし，表示の都合上，一部の国・地域のみ）。エネルギー原単位は，下記の茅恒等式[15] 右辺の第 1 項目，CO_2 排出原単位は第 2 項目に相当し，エネルギー原単位の低減は省エネルギーによる CO_2 排出削減寄与を，CO_2 排出原単位の低減は燃料転換や CO_2 回収・貯留による CO_2 排出削減寄与を示す。なお，第 3，4 項目は，ここでの

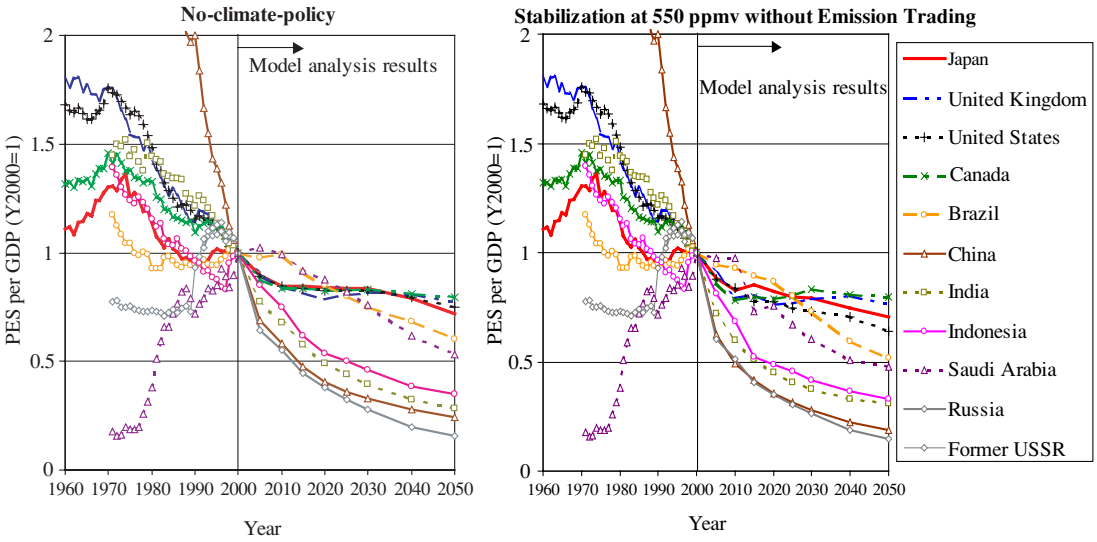

図 7　国別のエネルギー原単位の推移（SRES B2 ベース）

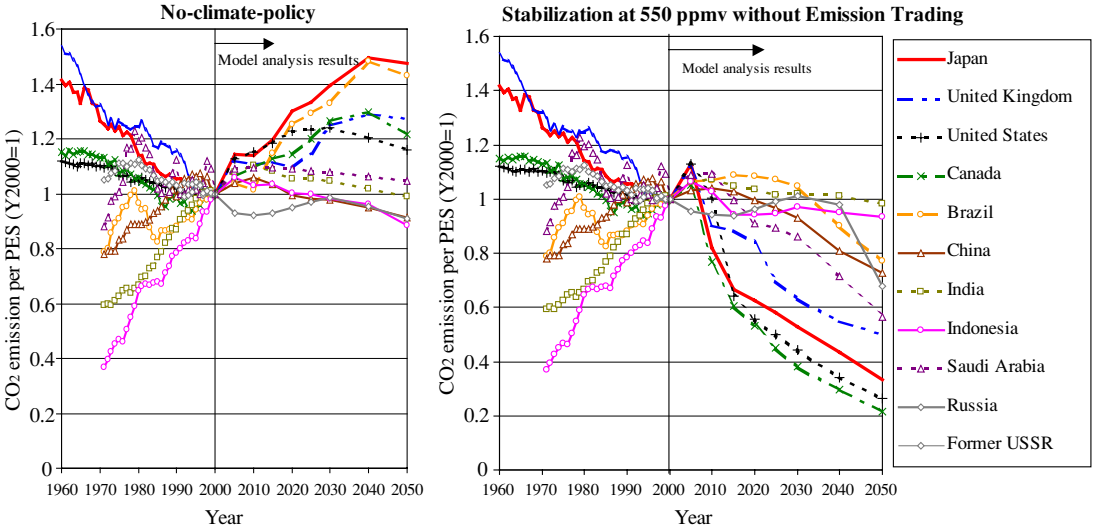

図 8　国別の CO_2 排出原単位の推移（SRES B2 ベース）

モデル分析の直接的な対象外であり，ベースライン（ここでは SRES B2 ベース）としての基本想定部分となる。

$$CO_2Emissions = \left(\frac{CO_2Emissions}{Energy}\right) \times \left(\frac{Energy}{GDP}\right) \times \left(\frac{GDP}{Population}\right) \times Population$$

まず，図 7 を見ると，特に途上国において，排出削減を行わないケースにおいても，2050 年にかけてエネルギー原単位の大幅な低減が見られる。また，ここで想定した排出削減ケースにおいては，

先進国，途上国共に，排出削減を行わないケースに比べてエネルギー原単位の低減を行うこと（10%前後の改善）がコスト効率的であることが示されている。一方，図 8 の CO_2 排出原単位の推移を見ると，排出削減を行わないケースでは，石油や天然ガスの価格上昇に対応して，より安価な石炭へ移行することがコスト効率的となり，むしろ，CO_2 排出原単位が上昇する傾向が見られるが，排出削減ケースでは，特に先進国において CO_2 排出原単位を大きく低減させることが，コスト効率的な対策であることが示されている。このように，先進国において CO_2 排出原単位の低減，一方途上国ではエネルギー原単位の低減が主にコスト効率的な対策であることがわかる。図 6 とも合わせ言えることはコスト効率的な排出削減は地域によって大きく異なり，その特性も踏まえつつ，2013 年以降の排出削減枠組を模索することが重要と考えられる。また，この結果から，エネルギー原単位の低減は，より高い生産性をもたらす可能性が高く，途上国が排出削減枠組に加わり，世界全体で削減に取り組むことになれば，CO_2 排出原単位の低減が主要な対策となる先進国に対して，途上国が比較優位となることが十分考えられる。よって，例えば，途上国には，省エネルギーの促進や，副次的効果がある石油増進回収や炭層メタン増進回収を促すような協力関係を結ぶ一方，先進国は，多様な技術オプションの中で地域に即した技術を選択し，エネルギー原単位，CO_2 排出原単位双方の更なる改善を進めることが，温暖化緩和にとって実質的に効果的な方策であるように考えられる。

6. まとめ

本研究では，京都議定書以降の長期的な温暖化抑制における対策技術の役割について，世界エネルギーシステムモデルを用いて分析・評価を行った。国によって適切な対策は異なり，また，温暖化問題に対する各国の思惑は異なるので，地域性を考慮した評価が重要である。本稿で行った分析によると，

- CO_2 濃度安定化目標のみならず，ベースラインが，CO_2 排出削減コストに及ぼす影響が大きい
- ベースラインが SRES B2 ベースの場合，550ppmv 濃度安定化を超えると急激にコスト上昇の恐れあり
- 長期的には，原子力，CO_2 回収・貯留技術の果たす役割は大きい（これらは，削減ポテンシャルとコスト両者のバランスが良い）
- 21 世紀半ば頃までは，地域的に見ると，特に，先進国では原子力や CO_2 回収・貯留技術による CO_2 原単位の低減，途上国では省エネルギーによるエネルギー原単位の低減がコスト効果的
- 少なくとも 21 世紀半ば頃までは，先進国と途上国では求められる主要オプションは異なるため，世界全体の排出削減は，省エネルギーが主要な対策となり得る途上国にとって先進国に対する生産性の比較優位を生む可能性もある。

といった知見が得られた。

京都議定書以降の排出削減枠組を考えるとき，長期的な視点に立ち，真に実効ある温暖化抑制を目指すことが重要である。上記の知見から考えられ得ることとして，長期的な安定化目標値を議論することも当然重要であるが，それのみならず，途上国を中心とした効率的なエネルギー利用など，直接的な温暖化対策とは離れた議論も同時に進めることが，実効ある排出削減に重要である。そしてまた，例えば，途上国には，省エネルギーの促進や，副次的効果がある石油増進回収や炭層メタン増進回収を促すような協力関係を結ぶ一方，先進国は，多様な技術オプションの中で地域に即した技術を選択し，エネルギー原単位（省エネルギーの促進），CO_2 排出原単位（燃料転換，CO_2 回収・貯留技術の促進）双方の改善を進めることも，途上国の排出削減への参加を比較的容易にし，温暖化緩和にとって効果的な方策であるように思われる。

謝辞

本研究は，NEDO から RITE が受託した「2013 年以降の温暖化対応方策に関する調査研究」の成果の一部である。なお，茅陽一 RITE 研究所長，経済産業省坂本敏幸氏はじめ，多くの方々から有益な助言を頂いた。深く感謝申し上げる。

（（財）地球環境産業技術研究機構　主任研究員）

（（財）地球環境産業技術研究機構　主席研究員）

参　考　文　献

1） UK Defra; The scientific case for setting a long-term emission reduction target（2003）. http://www.defra.gov.uk/

2） K. Akimoto, et al.; Role of CO_2 sequestration by country for global warming mitigation after 2013, Proceeding of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Vol.1: Peer-reviewed Papers and Plenary Presentations（2005）.

3） 佐野他,「京都議定書以降の温暖化緩和策 — 地域別のコストと技術の役割 —」, 第 21 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，13–3（2005）.

4） K. Akimoto and T. Tomoda; Costs and Technology Role for Different Levels of CO_2 Concentration Stabilization, International Synposium: Avoiding Dangeourous Climate Change, Exeter, UK（2005）.

5） WEC; Survey of Energy Resources 2001（CD-ROM）,（2001）.

6） USGS; U.S. Geological Survey World Petroleum Assessment 2000–Description and Results,（2000）.

7） H-H. Rogner; An assessment of world hydrocarbon resources, Annual Review of Energy and Environment, Vol.22（1997）, 217–262.

8） J. David and H. Herzog; The Cost of Carbon Capture, Proc. of 5th Conference of Greenhouse Gas Control Technologies,（2000）, 985–990.

9) Y. Fujii and K. Yamaji; Assessment of technological options in the global energy system for limiting the atmospheric CO_2 concentration, Environmental Economics and Policy Studies, Vol.1 (1998), 113–119.
10) IEA-GHG; Barriers to overcome in implementation of CO_2 capture and storage (1) –Storage in disused oil and gas fields, PH3/22, (2000).
11) EPRI/DOE; Renewable Energy Technology Characterizations, EPRI Topical Report, TR-109496 (1997).
12) N. Nakicenovic et al. (eds.) ; Special Report on Emissions Scenarios, (2000), Cambridge University Press.
13) IPCC WGI; Radiative Forcing of Climate Change. In: Climate Change 1994, (1995), Cambridge University Press.
14) K. Akimoto, T. Tomoda, Y. Fujii, K. Yamaji; Assessment of Global Warming Mitigation Options with Integrated Assessment Model DNE21. Energy Economics, Vol.26 (2004), 635-653.
15) Y. Kaya; Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios, Intergovernmental Panel on Climate Change/Response Strategies Working Group, May (1989).