

「地球再生計画」の実施計画作成に関する調査事業の要約

(1) 本調査研究の目的

経済成長と環境保護の両立を確保するためには、技術によるブレークスルーの推進やエネルギー効率の一層の向上が必要不可欠であるとの認識から、日本政府は、1990年のヒューストン・サミットにおいて、「地球再生計画」を提唱した。それは、100年という長期的なタイムスパンにおいて、温室効果ガス排出削減のための新しい技術開発及び技術移転による問題の解決を目指したものである。しかしながら、その具体的なシナリオは描けていなかった。そこで、本調査研究では、地球温暖化問題にとって極めて重要である長期的かつグローバルな視点に立ち、エネルギー、環境、経済等、さまざまな視点から可能な限り定量的な検討を行い、世界レベルで推進されるべきCO₂削減シナリオを構築することによって、「地球再生計画」の具体的な実施計画作成に有用な知見を提供することを目的とし、調査・検討を行った。

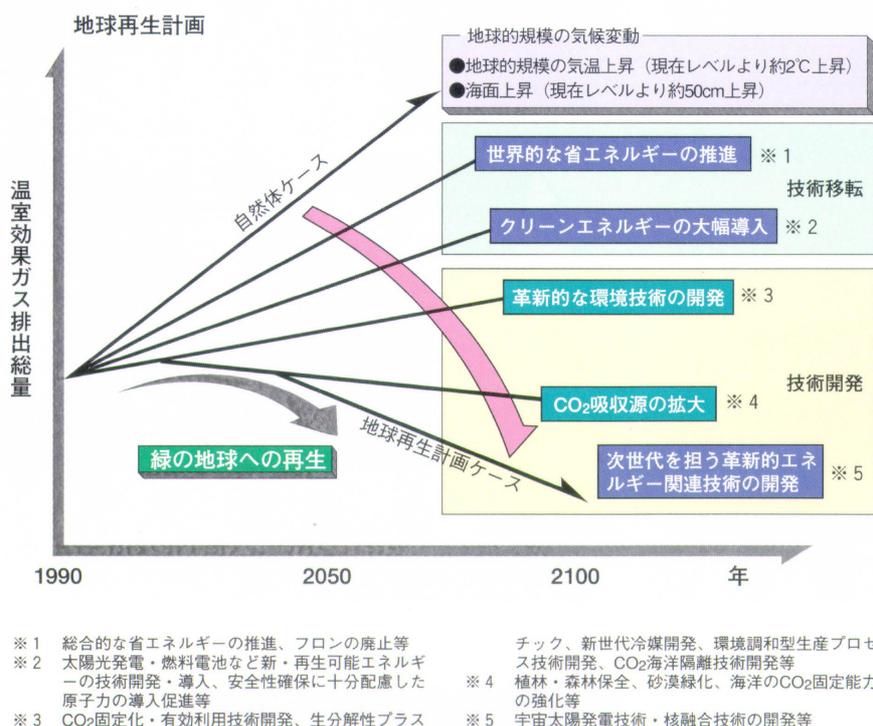


図1 「地球再生計画」の概念

(2) 「地球再生」シナリオ

CO₂濃度や気温上昇をどの程度に抑制すべきなのかは、本調査研究を含め世界の多くの研究によっても、この10年間でわからないままであった。そこで、CO₂濃度を550ppmv（産業革命以前のCO₂濃度約275ppmvの2倍）に安定化するためのシナリオを「地球再生シナリオ」とし、それを実現するための具体的なシナリオを提示する。なお、「地球

再生計画」における「次世代を担う革新的エネルギー関連技術」については、本調査研究において定量的な評価も行ったが、現時点では不確実性が極めて大きいと考えられるため、ここで示すシナリオでは評価に含めていない。

「地球再生シナリオ」作成のためのコンピュータモデル

地球温暖化問題は、人類活動の基盤であるエネルギー利用と密接に関わっている等、非常に複雑かつ広範囲に亘る問題である。その対策シナリオを統合的かつ定量的に作成するためには、コンピュータモデルを用いることが不可欠であるため、本調査研究では、温暖化対策技術等の調査・整理を行うと共に、Dynamic New Earth 21 (DNE21)モデルと呼ぶモデルを利用してシナリオ構築を行った。

DNE21 モデルは、エネルギー生産、変換、消費および CO₂ 回収、貯留・隔離等のプロセスを詳細に記述した「エネルギーシステムモデル」を中心に、マクロ経済全体を把握する「マクロ経済モデル」、CO₂ 濃度や気温上昇等を算出可能な「気候変動モデル」を一体化した最適化型のモデルとなっている。最適化型モデルは、エネルギーシステムコスト最小化や、消費効用最大化などを実現する効率的な方策を導出できる。ここでは、2000～2100年までの100年間の消費効用を最大化するコスト効率的な温暖化対策シナリオを提示する。なお、消費効用の最大化は、エネルギーシステムコストも含んだ、より広範な経済システムの最適化を意味する。また、これによって得られるシナリオは、100年間に及ぶ期間を同時に考慮したものであり、例えば、計算により得られた2010年の温暖化対策は、2100年までの将来世代の負担も考慮した上でのコスト効率的な対策を意味する。そして上述の通り、本モデルの主要な特徴としては、特にエネルギー供給サイド（発電やその他のエネルギー変換等）とCO₂回収、貯留・隔離技術に関して、詳細な技術のモデル化を行っており、具体的なCO₂削減対策技術を提示することが可能な点にある。

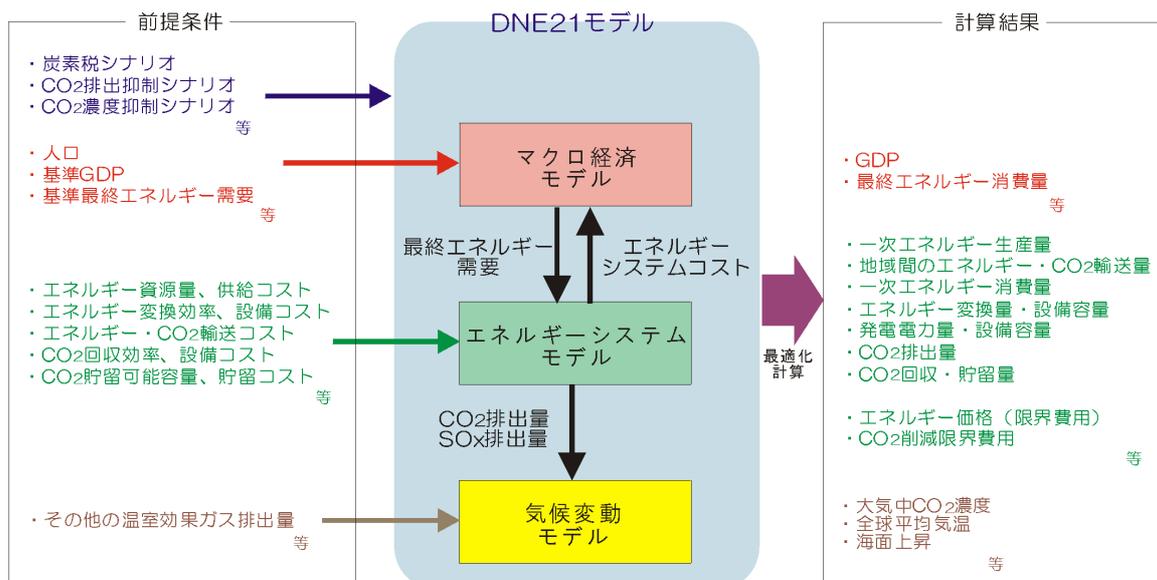


図 2 DNE21 モデルの構成概略と主な入出力

「地球再生シナリオ」の主な前提条件

モデル計算によって描き出されるシナリオは、整合性を持ったコスト効率的なシナリオであるが、それは、モデルの前提条件によって異なったシナリオが得られる。ここでは、モデルで想定している前提条件のうち、特に重要なデータについて示す。前提条件は、多くの調査を通して得られた最も信頼性の高いと考えられるデータを用いているが、将来の推定であるため、不確実性は避けられない。よって、モデル計算の前提条件を理解しておくことは重要である。

マクロ的なフレームを決定する人口、GDP、最終エネルギー需要の基準値は、最新の IPCC の特別報告書における中位的なシナリオ（SRES B2）に依った（表 1）。

表 1 「リファレンスケース」における主な前提条件

	1980	2000	2020	2050	2100
人口（億人）					
世界全体	43.9	60.2	76.4	93.7	104.1
日本	1.1	1.3	1.2	1.0	0.6
		1980-2000	2000-20	2020-50	2050-2100
GDP 成長率（%/年）					
世界平均	-	2.7	2.8	2.4	1.5
日本	-	2.7	1.4	0.2	0.0
		1980-2000	2000-20	2020-50	2050-2100
最終エネルギー消費の伸び（%/年）					
世界平均	-	1.4	1.8	1.6	0.8
日本	-	2.0	0.6	-0.3	-0.7

出典) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の Special Report on Emissions Scenarios (SRES) の B2 シナリオ、国際エネルギー機関 (IEA) の Energy Balances of OECD/Non-OECD Countries, 1999-2000 (2002 Edition) 記載の実績値を基に設定。日本の人口については、人口問題研究所による平成 14 年の中位推計

化石燃料資源量については、世界エネルギー会議 (WEC) や BP 等のデータを基にして Rogner らによってまとめられた資源量を想定した。また、化石燃料の供給コストについては、国際応用システム分析研究所 (IIASA) と WEC の研究による推定コスト (表 2 の資源量に対応したもの) を用いた。一方、発電設備コストについては、主に IEA/NEA によってまとめられているデータを基に想定した (表 3)。また、風力、太陽光発電については、今後もコスト低減が進むと考えられるため、それぞれ -1.0%/yr、-3.4%/yr で 2050 年まで発電単価が低減すると想定した。なお、原子力発電については、社会的受容性を鑑み、設備容量に上限値を設けた。想定した上限値は、世界全体では 2050 年時点で 920GW、2100 年時点で 1450GW である。

CO₂ 固定技術としては、油田へ CO₂ を注入することにより石油を増進回収する技術、廃ガス田、地下帯水層での CO₂ 貯留、海洋隔離、植林のオプションを考慮している。これらのコストと世界全体での CO₂ 固定可能量を表 4 に示す。

表 2 化石燃料資源量の想定

	在来型		非在来型
	確認回収可能埋蔵量	その他推定埋蔵量	
石油	150	145	2,343
天然ガス	129	265	19,306
	石炭	褐炭	
石炭	5,646	599	

単位) Gtoe (石油換算 10 億トン)

出所: H-H. Rogner, 1997

表 3 発電技術に関する想定

	建設単価 (\$/kW)		
	2000	2030	2100
天然ガス	500 - 1060	500 - 780	500
石油	270 - 410	270 - 350	270
石炭 (脱硫装置付)	970 - 2050	1010 - 1550	1050
CO ₂ 回収装置付石炭ガス化複合発電	1240 - 2170	1260 - 1770	1300
バイオマス	1230	1000	1000
メタノール	1200	900	600
水素	1100	800	500
原子力	1790 - 2620	1840 - 2260	1900
電力貯蔵 (揚水)	1000 - 1500	1000 - 1300	1000
	発電単価 (\$/MWh)		
	2000	2030	2100
水力・地熱	10 - 180	10 - 180	10 - 180
風力	70 - 340	52 - 251	42 - 206
太陽光	235 - 469	83 - 166	42 - 83

注) 建設単価、発電単価の幅は、モデルの 10 地域分割における差異もしくは地域内におけるコスト分布による。

表 4 CO₂ 固定技術に関する想定

	CO ₂ 固定単価 (\$/tC)	CO ₂ 固定可能量 (GtC)
石油増進回収	87 - 125 ^{†,‡}	9.2
廃ガス田注入	46 [†]	8.2 ^{††}
地下帯水層注入	10 - 150 [†]	499.0
海洋隔離	25 ^{†,‡,‡‡}	-
植林	10 - 30	32.5

[†] CO₂ 回収コスト、貯留・隔離地点までの輸送コストは別途考慮している。

[‡] 回収される石油の売却益は別途考慮している。

^{††} 2000 年時点の初期値であり、2000 年以降の天然ガス採掘量に依存して増加する。

^{‡‡} 陸上での CO₂ 液化コストと洋上処理施設コストの合計額である。

DNE21 モデルの計算による「地球再生シナリオ」

上記のような前提条件の下で、DNE21 モデルによって導き出された消費効用を最大限確保しつつ、CO₂濃度を 550ppmv に安定化する「地球再生シナリオ」を示す。

CO₂濃度は、産業革命以前の 275ppmv 程度の濃度から、化石燃料排出と共に、徐々に上昇してきており、2000 年には約 370ppmv 程度にまで上昇した。このまま CO₂ 排出抑制を行わなければ、2100 年には約 740ppmv に達し、全球平均気温は産業革命時の気温比で約 3.7 (1961-1990 年平均比で約 3.3) の上昇になると推定される。一方、大気中 CO₂ 濃度を 550ppmv に安定化させる場合、特に 21 世紀後半に大きく CO₂ 排出量を抑制することがコスト効率的となる。このとき、2050 年の世界全体の CO₂ 排出量を「リファレンスケース」比で 20%程度、2100 年の排出量を「リファレンスケース」比 80%程度 (2000 年比で 20%程度) 削減する必要がある。そして、これにより 2100 年における全球平均気温は産業革命時の気温比で約 2.7 (1961-1990 年平均比で約 2.3) の上昇幅で抑制できる。

CO₂削減の内訳であるが、一人当り世界総生産の年成長率は、「リファレンスケース」比で年率 0.1%程度の低下に留まっている。また、産業のエネルギーへの依存度を示すエネルギー原単位は、「リファレンスケース」よりも更に年率 0.1%程度加速して低減させ、より省エネルギーな社会とする必要がある。一方、CO₂にどれだけ依存したエネルギーシステムかを示す指標である CO₂ 排出原単位は、「リファレンスケース」ではほとんど改善が求められないものの、「地球再生シナリオ」では、例えば 2020~2050 年では-0.5%、2050~2100 年においては-2.4%と著しい改善が求められる。

これを実現するのは、図 4 で見られるように、石炭から天然ガスへの化石燃料転換、そして、バイオマス、風力、太陽光といった再生可能エネルギー、更には原子力の増大という一次エネルギー構成の変化であり、また、図 5 で示されているような各種の CO₂ 貯留・隔離技術の大規模な導入である。例えば、2000 年では世界の一次エネルギー消費において、石炭 22%、石油は 36%程度を占めているが、2050 年にはそれぞれ 15%、32%程度までシェアを減少させることがコスト効率的な CO₂ 削減対策となっている。一方、風力や太陽光発電は共に、2100 年には現在の世界における水力発電や原子力によるエネルギー供給量を超える 4,000TWh/yr 規模の供給を行うことがコスト効率的となっている。また、残渣系バイオマスの利用拡大は特段の CO₂ 排出抑制を行わない「リファレンスケース」でもコスト効率的であると共に、550ppmv に安定化させる「地球再生シナリオ」では、プランテーション系バイオマスの大規模な利用もコスト効率的となる。そして、特に 21 世紀後半における CO₂ 削減に大きく貢献するのは、CO₂ の地中貯留や海洋隔離技術であり、これらの技術による 2100 年までの累積の CO₂ 処理量は 190GtC 程度にも上る。このように、ここで示した 550ppmv 安定化のためのシナリオは、適切な各種温暖化対策技術を、適切な時期に、適切な場所で導入することにより、世界総生産の低減を最小限に押さえ込みつつ、CO₂ 濃度の安定化を実現できることを示している。

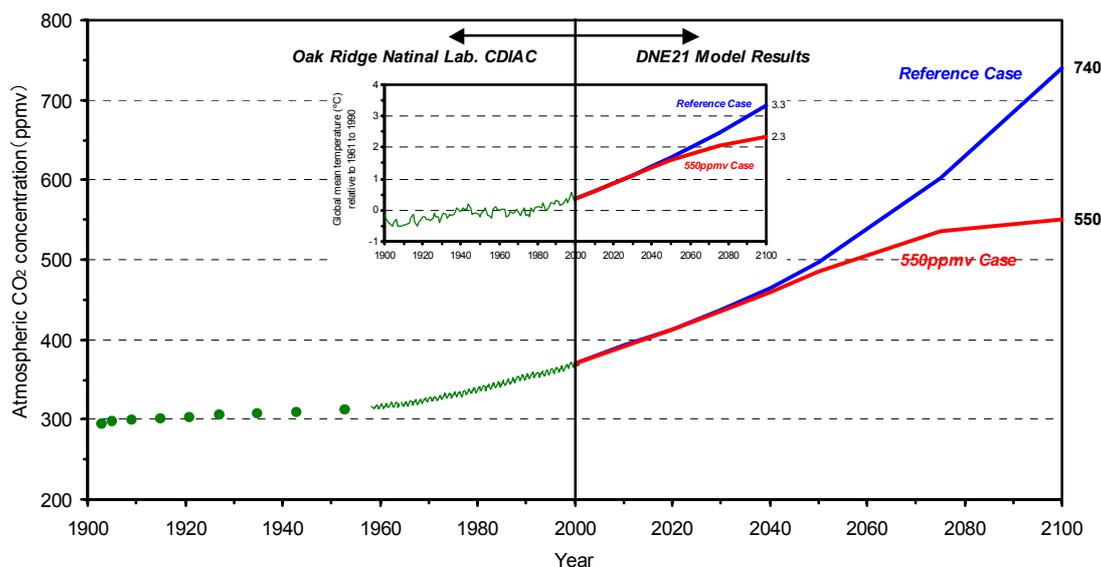


図3 「リファレンスケース」と「550ppmv 濃度安定化ケース」における
大気中 CO₂ 濃度推移と全球平均気温上昇推移

出典) 2000年以前の値については、米国オークリッジ国立研究所の二酸化炭素情報分析センター (CDIAC) のデータ
注) 全球平均気温上昇は1961-1990年平均との差異。また、気温上昇の推定においては、気候感度 (CO₂ 濃度倍増時の気温上昇) を2.5 とした。

表5 「リファレンスケース」と「550ppmv 濃度安定化ケース」における主要指標

	1980-2000	2000-20	2020-50	2050-2100
世界人口成長率 (%/年) リファレンスケース、濃度安定化ケース	1.6	1.2	0.7	0.2
世界平均一人当たり GDP 成長率 (%/年) リファレンスケース 濃度安定化ケース	1.1	1.6 1.6	1.7 1.6	1.3 1.2
世界平均エネルギー原単位の伸び率 (%/年) リファレンスケース 濃度安定化ケース	-1.0	-1.5 -1.5	-1.0 -1.1	-0.5 -0.6
世界平均 CO ₂ 排出原単位の伸び率 (%/年) リファレンスケース 濃度安定化ケース	-0.3	0.2 0.2	-0.0 -0.5	0.0 -2.4
世界 CO ₂ 排出量の伸び率 (%/年) リファレンスケース 濃度安定化ケース	1.3	1.5 1.5	1.5 0.9	1.2 -1.5

注1) 表中の 印の値はモデル計算の前提条件であり、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の Special Report on Emissions Scenarios (SRES)の B2 シナリオ、国際エネルギー機関 (IEA) の Energy Balances of OECD/Non-OECD Countries, 1999-2000 (2002 Edition)記載の実績値を基に設定した。

注2) 「エネルギー原単位」は GDP 当りの一次エネルギー生産量を、「CO₂ 排出原単位」は一次エネルギー生産当りの CO₂ 排出量を表す。茅恒等式より、CO₂ 排出量の伸び率は、人口成長率、一人当たり GDP 成長率、エネルギー原単位の伸び率、CO₂ 排出原単位の伸び率の合計値と理論的に一致するが、四捨五入の関係上、必ずしも一致していない。

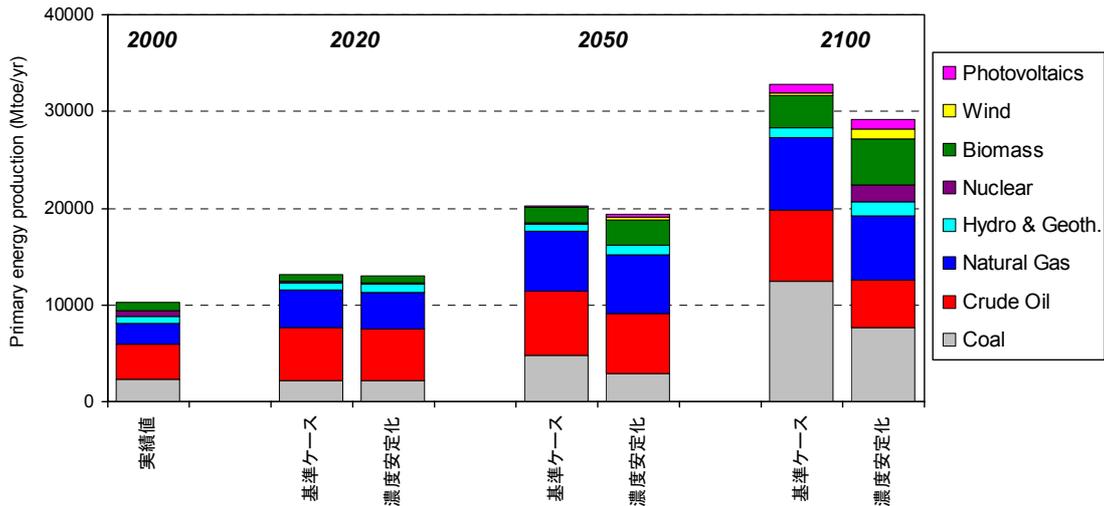


図4 「リファレンスケース」と「550ppm濃度安定化ケース」における世界一次エネルギー生産量

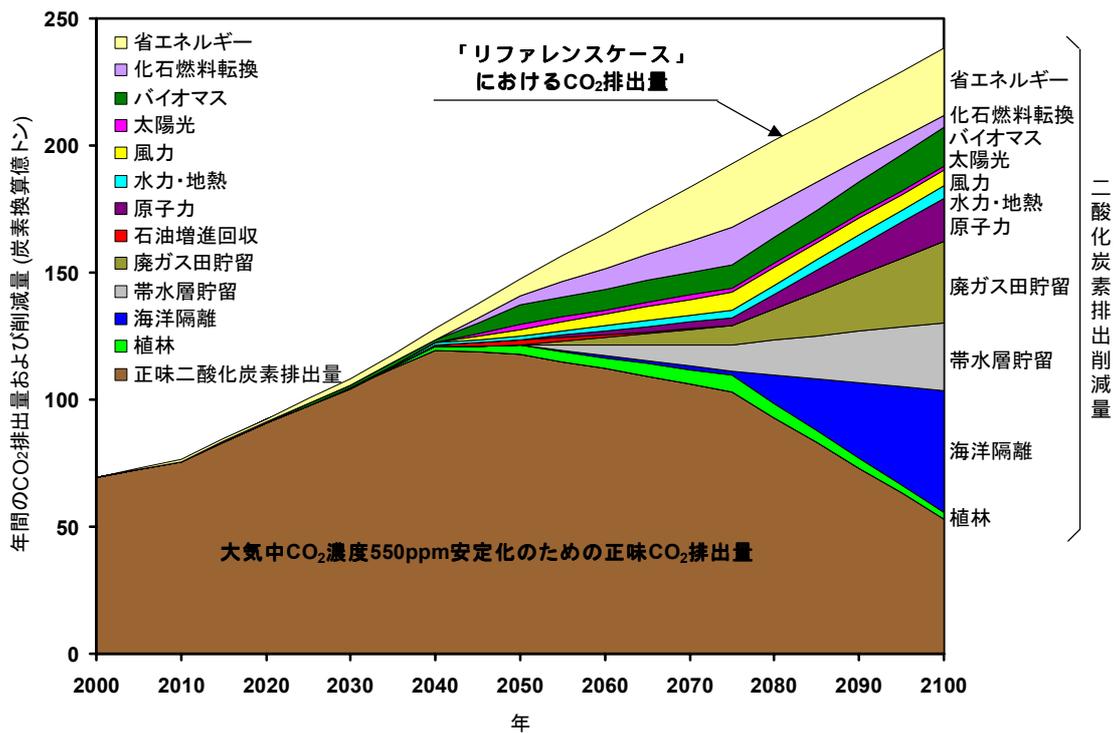


図5 大気中CO₂濃度550ppm安定化のための対策技術別CO₂排出削減量

(3) 主要な政策的知見

< 2013 年以降の削減目標 >

今後、先進国よりも、途上国の CO₂ 排出が大幅に増大すると見込まれるため、COP3 で合意された附属書 I 国のみでの排出抑制では、温暖化の進行をほとんど抑制できない。また、この COP3 合意による排出抑制の場合には、非附属書 I 国に限れば、化石燃料価格の下落により、むしろ排出が増大する恐れすらある。そのため、今後、途上国に関しても何らかの排出抑制を義務付ける方向への誘導が是非とも必要である。

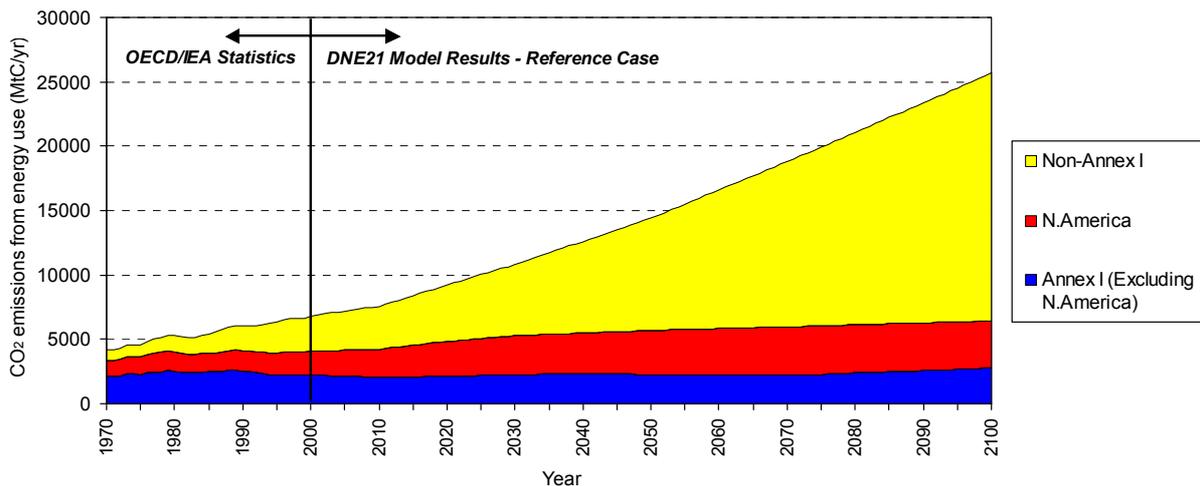


図 6 「リファレンスケース」における CO₂ 排出量推移

< CO₂ 回収・貯留の重要性 >

CO₂ 貯留技術の利用は、温暖化対策実施のコスト的な困難さを大きく緩和し得る。例えば CO₂ 濃度を 550ppmv に安定化する目標下における 2100 年の CO₂ 限界削減費用は、CO₂ 貯留技術を利用する場合には約 450 US\$/tC であるのに対して、利用しない場合には約 840US\$/tC と大きく上昇する。すなわち、CO₂ 濃度を 550ppmv に安定化するためには、CO₂ 貯留を利用するとしても、同時に、省エネルギー、再生可能エネルギーの導入等もかなり推進しなければならない。仮に CO₂ 貯留を利用せずに、550ppmv 濃度安定化の目標を実現しようとする、CO₂ 貯留分を補うべく、更に一層厳しい省エネルギー等を押し進めざるを得ず、そのための CO₂ 削減限界費用は劇的に上昇する恐れがあることが示唆されている。今後、安全性の確立等の研究開発が必要であるが、コスト面から見ると CO₂ 貯留は非常に有望な対策と考えられる。

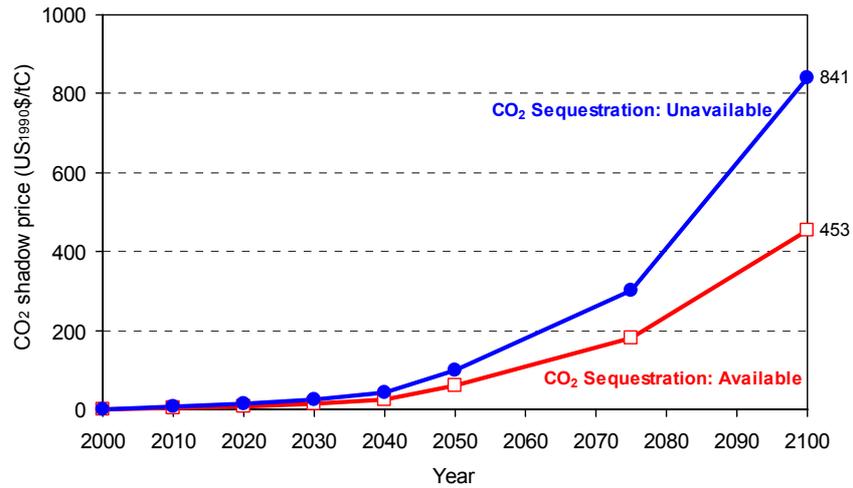


図7 「550ppmv 濃度安定化ケース」における CO₂ シャドープライス（限界削減費用）の推移

< 省エネルギー推進の重要性 >

省エネルギーの推進は、これまでも CO₂ 排出抑制に重要な役割を果たしてきたし、今後もその推進は極めて重要である。CO₂ 濃度を 550ppmv に安定化するケースにおいては、CO₂ 排出抑制政策をとらないケースに比べ、最終エネルギー需要において、2020 年では 4%程度、2050 年では 5%程度省エネルギーを促進させることがコスト効率的である。ただし、この数値は、CO₂ 排出抑制政策に対応した追加的な省エネルギーであり、CO₂ 排出抑制政策をとらなくても自発的に推進される省エネルギーへの上積み分である。因みに、CO₂ 排出抑制政策をとらない場合でも、世界総生産あたりの世界最終エネルギー需要は、2000 年比で、2050 年に 70%以下、2100 年には 50%以下にまで減少すると見込んでいる（IPCC SRES B2 の想定）。そのため、それを含めて考えると、極めて強力な省エネルギー推進が必要と言え、途上国への技術移転の促進、更なる省エネルギー機器の技術開発の推進が強く望まれる。

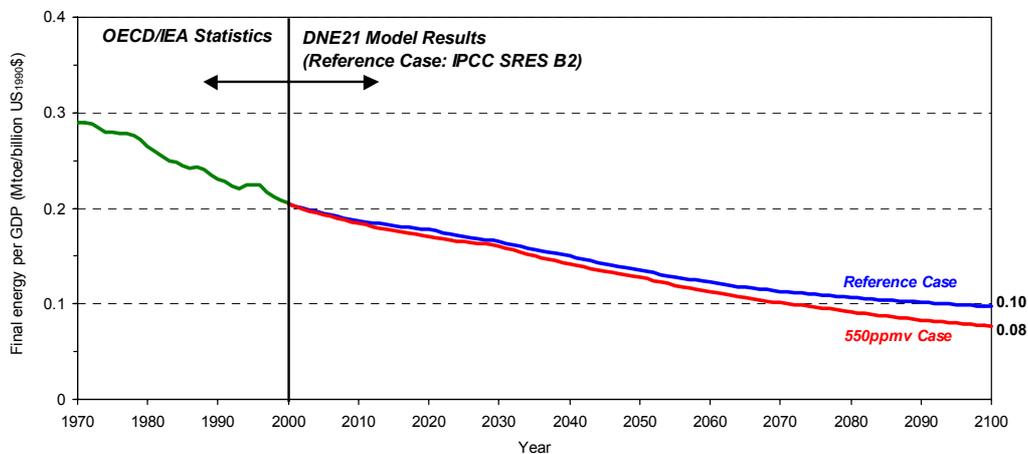


図8 GDP 当たりの最終エネルギー需要の推移（世界平均）

(4) その他の主な調査研究内容

「地球再生計画」は、2100年という長期的なタイムスケールにおいて、技術開発及び技術移転によって地球を再生しようとするものである。しかし、当然、資金には限りがあり、その資金を如何に地球温暖化対策に有用な技術に投資するかは重要な問題である。そこで、本調査研究においては、上記の「地球再生シナリオ」で取り上げた技術以外にも、「地球再生計画」における「CO₂吸収源の拡大」、「次世代を担う革新的エネルギー技術」などに分類される沙漠などにおける大規模植林、海洋生態系を利用したCO₂固定促進技術、高速増殖炉、核融合、宇宙太陽発電、メタンハイドレート、アルベドコントロール等の長期将来技術についても、CO₂削減ポテンシャルやそのコスト見通し、そして、環境等への副次的な影響等について調査し、整理・比較を行った。

また一方、上記の分析では、世界を10地域に分割したコンピュータモデルを用いて導き出された「地球再生シナリオ」を提示したが、今後、グローバルなエネルギー・CO₂の輸送がより重要性を増すと共に、温暖化対策に関するスタンスが、地域的、国家的により細分化する傾向も出てきている。そういった今後の情勢に対し、有力な分析・評価が可能とすべく、世界を50地域以上に分割した世界地域細分化エネルギーモデルの開発も行った。これは、世界の最先端をいく大規模かつ精緻なモデルであり、今後の更なる活用が期待できる。

(5) 開発した温暖化対策評価モデルの特徴

本調査研究では、評価目的に応じて、表6に示すような3種類のコンピュータモデルを開発した。先述の(2)において概説したモデルは「統合評価モデルDNE21」であるが、表6に示すいずれのモデルも、2100年もしくはそれ以上の期間について複数時点を同時に最適化する動的的最適化型モデルであり、将来世代の負担も考慮した上でのコスト効率的な温暖化対策を導出可能である。また、いずれのモデルも特にエネルギー供給側技術、CO₂回収・貯留技術といった温暖化対策技術が詳細にモデル化されているため、具体的な対策技術の評価が可能である点に特徴を有している。更に、3種類のモデル別にも、表5で示すような特徴を有しており、今後も評価目的に合わせて、適宜、適切なモデルを選択して分析することが可能である。

表6 開発した温暖化対策評価モデルの特徴

モデル名	モデル構造	3種類のモデル間の特徴
統合評価モデルDNE21	非線形最適化形モデル 地域分割：世界10地域	気候変動、マクロ経済モデルの統合に特徴。温暖化対策に伴うGDP損失等も算出可能。
LDNEモデル	線形最適化形モデル 地域分割：世界10地域	核燃料サイクルなどの長期将来技術の評価が可能。短時間でモデル計算可能なため、多くの感度解析が実施可能。
世界地域細分化エネルギーモデル	線形最適化形モデル 地域分割：世界50地域以上	世界に類を見ない詳細な地域解像度を有する。地域解像度を生かしたエネルギー・CO ₂ の長距離輸送や地域的な評価に有用。

(6) 外部への貢献他

本調査研究で開発した DNE21 モデルとそのファミリーモデルの計算結果は、IPCC の第 3 次評価報告書で取り上げられるなど、国際的にも貢献した。また、米国の Energy Modeling Forum(EMF)やヨーロッパの ACROPOLIS プロジェクト等に対しても、DNE21 モデルの計算結果を提供し国際的な貢献を行った。また、一方で、平成 8~9 年にかけて産業構造審議会環境部会にモデル計算結果を提供するなど、政策立案に関連する貢献も行った。

そして、DNE21 モデルを中心とした開発モデルは、温暖化対策立案への知見提供のみならず、気候変動やマクロ経済モデルの統合等、モデル構造の面においても、世界の温暖化対策評価モデル研究に対し、大きな貢献を果たしたと考えられる。また、本調査研究における DNE21 モデルのための前提条件データ、長期将来技術に関するデータ、世界地域細分化エネルギーモデルのための詳細な地域別のデータ等、データの蓄積・整理は、地球温暖化問題の客観的把握にも大いに貢献したものと考えられる。更に、これらの蓄積データは、今後の更なる温暖化分析・評価に大いに役立つと考えられる。