

環境省 地球環境研究総合推進費 戦略研究開発プロジェクト

日英共同研究「低炭素社会の実現に向けた脱温暖化 2050 プロジェクト」

# 2050 日本低炭素社会シナリオ： 温室効果ガス 70%削減可能性検討

2007 年 2 月

2008 年 6 月改訂

「2050 日本低炭素社会」シナリオチーム

国立環境研究所・京都大学

立命館大学・みずほ情報総研



## 主要な結論

本研究は、日本を対象に、2050年に想定されるサービス需要を満足しながら、主要な温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>を1990年に比べて70%削減する技術的なポテンシャルが存在することを明らかにしている。

### 研究体制

1. 本研究は、2050年日本において、主要な温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>排出量を1990年に比べて70%削減した低炭素社会実現の可能性について検討した。
2. 本研究は、環境省地球環境研究総合推進費によるもので、研究所、大学、民間からの、環境、エネルギー、経済、産業、交通、都市、国際政治など幅広い分野の研究者約60人が参加している。

### 削減の前提

3. 低炭素社会の実現に当たっては、以下の前提を掲げている。
  - ◇ 一定の経済成長を維持する活力ある社会。
  - ◇ 社会シナリオによって想定されるエネルギーサービスの維持。
  - ◇ 水素自動車などの革新的な技術の想定、ただし核融合などの不確実な技術は想定しない。
  - ◇ 原子力など既存の国の長期計画との整合性。
  - ◇ 本研究の対象は削減ポテンシャルの実証であり、その具現化のために必要となる炭素排出コストの市場への内部化などの政策措置については、言及していない。

### 70%削減の可能性・コスト・分野

4. そのような前提のもとで、CO<sub>2</sub>排出量70%削減は、エネルギー需要の40%削減とエネルギー供給の低炭素化によって、可能となる。
5. この2050年CO<sub>2</sub>排出量70%削減に関わる技術の直接費用は、年間約7兆円～9兆9千億円である。これは想定される2050年のGDPの約1%程度と見られる。
6. 需要側のエネルギー削減は、一部の部門でエネルギー需要増があるものの、人口減や合理的なエネルギー利用によるエネルギー需要減、需要側でのエネルギー効率改善で可能となる。
7. 各部門でのエネルギー需要量削減率（2000年比）は以下のように見積もられる。幅は、想定した2050年社会のシナリオによる差である。
  - 産業部門：構造転換と省エネルギー技術導入などで30～40%
  - 運輸旅客部門：適切な国土利用、エネルギー効率、炭素強度改善などで80%
  - 運輸貨物部門：物流の高度管理、自動車エネルギー効率改善などで50%
  - 家庭部門：建て替えにあわせた高断熱住宅の普及と省エネ機器利用などで40～50%
  - 業務部門：高断熱ビルへの作り替え・建て直しと省エネ機器導入などで40%
8. エネルギー供給側では、低炭素エネルギー源の適切な選択（炭素隔離貯留も一部考慮）とエネルギー効率の改善の組み合わせで、低炭素化が図られる。

### 低炭素社会実現のために

9. 必要とされるであろうエネルギーサービスを維持しつつ低炭素社会を実現するためには、今後当然見込まれる産業構造転換や国土インフラ投資を早期から低炭素化の方向にむけて粛々と進めていかねばならない。その上に、省エネルギー・低炭素エネルギー技術開発と投資、利用を加速する必要がある。政府が強いリーダーシップを持って、早期の目標共有、社会・技術イノベーションに向けた総合施策の確立、削減ポテンシャルを現実のものとするための強力な普及・促進策の実施、長期計画にもとづく確実な政府投資の実施と民間投資の誘導を推進してゆくことが必要である。



## 1. 低炭素社会シナリオ検討手順：バックキャストの手法を適用

本研究は、2050年日本において、主要な温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>を1990年に比べて70%削減するような低炭素社会を実現させることが可能かどうか検討したものである。今後、半世紀の間に社会は変化する。変化の幅は大きく、場合によっては低炭素社会の実現は不可能かもしれないし、可能でも、社会変化に対応した何らかの準備が必要であろう。

このような将来の幅を前提とし、そのうえで低炭素社会実現の方策を検討するアプローチ法として、本報告ではバックキャストイングの方法を採用した。図1にその要点を示す。すなわち、①日本社会経済が2050年に向けてどのような方向に進むかについて、幅を持った将来像（たとえば経済発展・技術志向のシナリオA、地域重視・自然志向のシナリオB）を想定し、専門家のブレインストーミングによって、それら二つの社会を定性的に描く（叙述ビジョン）。②シナリオA、Bそれぞれの社会像で家庭生活（時間の使い方、どのようなサービスを必要とするか）、都市・交通形態（どのような都市・住宅に住んでいるか、移動が必要か）、産業構造（多部門一般均衡モデルを用い構造変化を推定）を定量化し、その想定下でのエネルギーサービス需要（例えば冷房カロリー、給湯何リットル、粗鋼生産何トン、交通量トンキロなど）を推計する。次いで、③それぞれの社会における経済・社会活動を支え、かつ、温室効果ガス排出量70%削減を満足させるエネルギーサービス需要と、エンドユース・エネルギー技術（エアコンや断熱、給湯器、製鉄プラント、ハイブリッド自動車など）、供給エネルギー種、エネルギー供給技術の組み合わせを、エネルギー供給可能量（⑤）、経済性および政策的実現性を考慮して探索し、エネルギー需要・供給技術の種類とシェアを同定する。そして、④その時の一次および二次エネルギー量と排出CO<sub>2</sub>量を集計した。

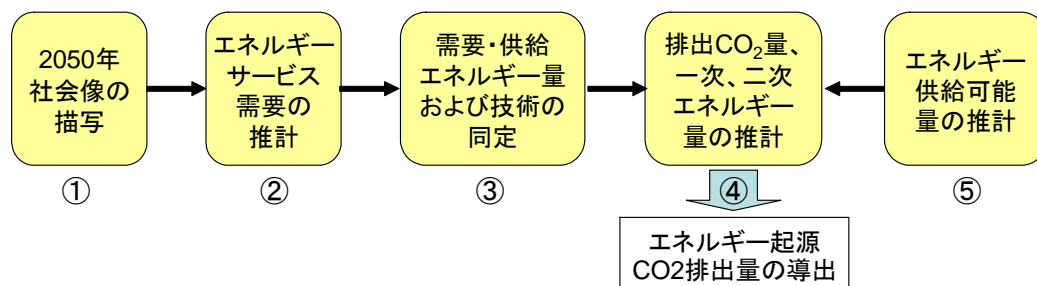


図1 低炭素シナリオ検討手順

## 2. 2050年の日本：ありうる社会のシナリオと産業構造変化を想定

将来日本二つの姿：50年後に考えられる日本社会の姿とそれに至るまでの道筋を、専門家の討論などに基づき、シナリオA、Bの二通りで設定した（表1、2）[図1の手順①]。シナリオA（活力、成長志向型）は、活発な、回転の速い、技術志向の社会であり、シナリオB（ゆとり、足るを知る型）は、ゆったりでややスローな、自然志向の社会である。こうした設定や指標の推移は、従来のさまざまな日本社会長期将来見通しと大差なく、諸想定

範囲内に収まっている。実際には、この両シナリオが調和しながら混在しつつ進行するものと思われる。

シナリオ A では一人当たり GDP の成長率を年率 2% に、シナリオ B では 1% と想定しているが、エネルギー消費に直結するサービス（暖房や移動、オフィス環境など）は、利用する人々の姿を想像しながら、現状よりも適度に向い上げられる程度に設定した。つまり、24 時間冷暖房がつけっぱなしの住宅や人々がどこでも好きなところに住むことで多くの長時間移動が発生するような都市構造など、過度なサービスの供給は想定していない。

表 1 国土・都市のシナリオ

キーワード	シナリオ A	シナリオ B
国内人口移動 人口減少社会の下 あらゆる地域で人 口減少	都市居住選好志向や利便性・効率性の追 求から都心部への人口・資本の集中が進 展	ゆとりある生活を求めて、都心から地方・ 農山村への人口流出が進み、人口や資本の 分散化が進展
都心部		
中心	土地の高度利用（高層化、地下化）が進 む。職住近接が可能になり、郊外から利 便性が高い中心部に移り住む人々の比率 が増加。	自らのライフスタイルに合った地域に移 り住む人が増加し中心部の人口減少。首都 など主要都市においては適正な規模と密 度が維持されており、過度なインフラ投資 は行わない。
郊外	都心部へ人口が流出するが、計画的で効 率の良い都市計画により、アミューズメ ント施設や自然共生地を適切に配置。	地方への人口・資本流出が大幅に進む。こ の結果、都市部郊外というよりは独立性高 い都市としての再生が図られる。
地方都市		
中心	人口が大幅に減少するため、中核都市と しての機能を果たせない都市が増加する が、土地や資源を利用したビジネス（大 規模農業、発電プラント等）の拠点とし て再生される都市も現れる。	地方においても十分な医療サービスや教 育を受けることが可能になり、人口の減少 がある程度抑制される。地域の独自性や文 化が前面に出され、活気ある地方都市が数 多く現れる。地域社会の意思決定の過程に は、NGO や市民が積極的に参加し、理想の 地域を自ら作る意欲に満ち溢れている。
農地・山間	農地、山間部においては過疎化が進展し、 人口が大幅に減少する。地域の特性に応 じた、土地や資源の効率的な利用に向け た取り組みが進められる。農業・林業・ 漁業などは民間会社などによって大規模 経営され、機械化などによって大幅に省 力化される中、ヒト・モノ・カネといっ た資源の効率的な利用が進む。一方で、 国立公園に指定される地域も増加する。	農林水産業に対する魅力性が高まり、農村 や山村、漁村への人口回帰が進む。低い地 価を利用した個人・地域経営のもと、工夫 を凝らした「おもしろい」一次産業を営む 人も現れる。農業を職業として営む人のみ ならず、自然が豊かな地域に自宅とオフィ スを構え、SOHO によって収入を得ながら、 自ら家庭菜園を営み、おいしく、安全な食 と健康的な生活を求める家族も現れる。

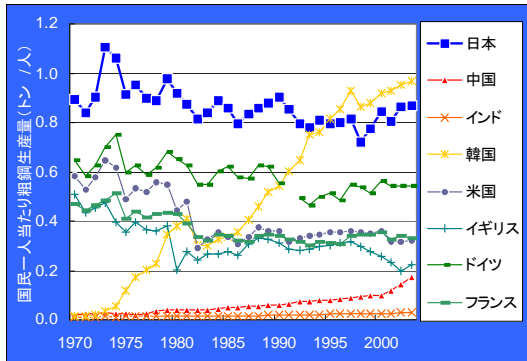
人口・世帯の推計：「日本の将来推計人口（2002 年；国立社会保障・人口問題研究所）」で  
行われている将来人口の推計方法や想定値を参考に、シナリオ A および B の将来シナリオ

(表 1) に基づいて都道府県別に出生率、死亡率、移動率、世帯主率等を想定した。人口は、2000年に1億2千7百万人だったのが、少子高齢化の継続により2050年にはシナリオ A で9千5百万人、Bで1億人まで減少する。世帯数は、高齢者や未婚者等の単身世帯の割合が増加するため、1世帯あたりの構成員が減少するため、減少率は人口より小さくなると推計した。2000年で4千7百万世帯が、2050年シナリオ A で4千3百万世帯、Bで4千2百万世帯になる。

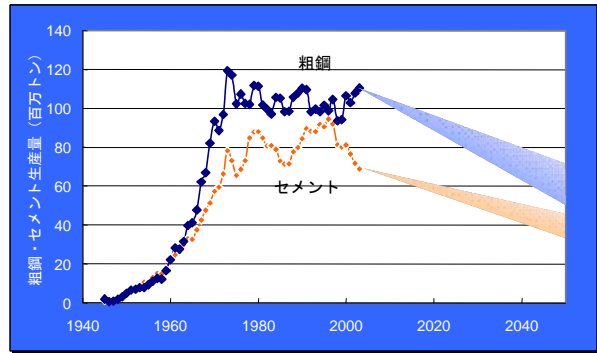
表 2 経済・産業に関する叙述シナリオ

キーワード	シナリオ A	シナリオ B
<b>経済</b>		
成長率	・一人あたり GDP 成長率 2%	・一人あたり GDP 成長率 1%
技術進歩	・高い	・シナリオ A ほど高くない
<b>産業</b>		
市場	・規制緩和進展	・適度の規制された市場ルール浸透
第一次産業	・シェア低減	・シェア回復
	・輸入依存率の増加	・農林水産業復権
第二次産業	・高付加価値化進展	・シェア低減
	・生産拠点の海外移転	・地域ブランドによる多品種少量生産
第三次産業	・シェア増加	・シェアやや増加
	・生産性向上	・ボランティアなどが普及

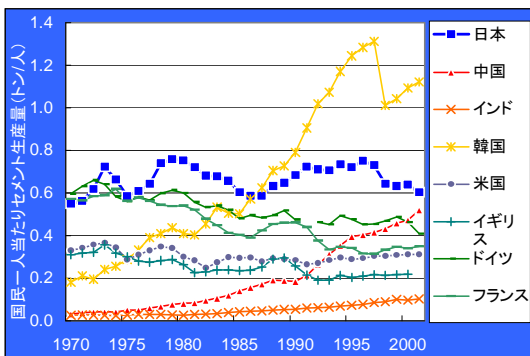
国民一人当たり粗鋼生産量



日本の粗鋼・セメント生産量



国民一人当たりセメント生産量



出典：

(粗鋼生産量、セメント生産量)

Industrial Commodity Production Statistics (United Nations)、World Development Indicators (World Bank) より推計

(日本の粗鋼・セメント生産量)

総合エネルギー調査会需給部会中間報告(1998、2004、2005)、日本エネルギー経済研究所(2002)：わが国の長期エネルギー需給展望をもとに想定

図 2 素材生産量推定のベース

産業構造の推計：「新産業創造戦略（2004年；経済産業省）」に示された2025年の産業構造を念頭に、2050年の産業構造を設定した。エネルギー多消費産業である鉄やセメントの国民一人当たり生産量は、現在、欧米先進国の2倍程度である（図2）。公共事業は鉄やセメントに対する需要が大きいですが、2050年になると公共投資は一巡し新規需要が大幅に減少すると想定した。また、アジア地域の需要に対しては日本企業による現地生産が増加すると想定した。これによって、2050年の日本の粗鋼生産は6～7千万トン、セメント生産量は約5千万トン程度になり、国民一人当たり生産量はおおむね欧米先進国レベルになる。

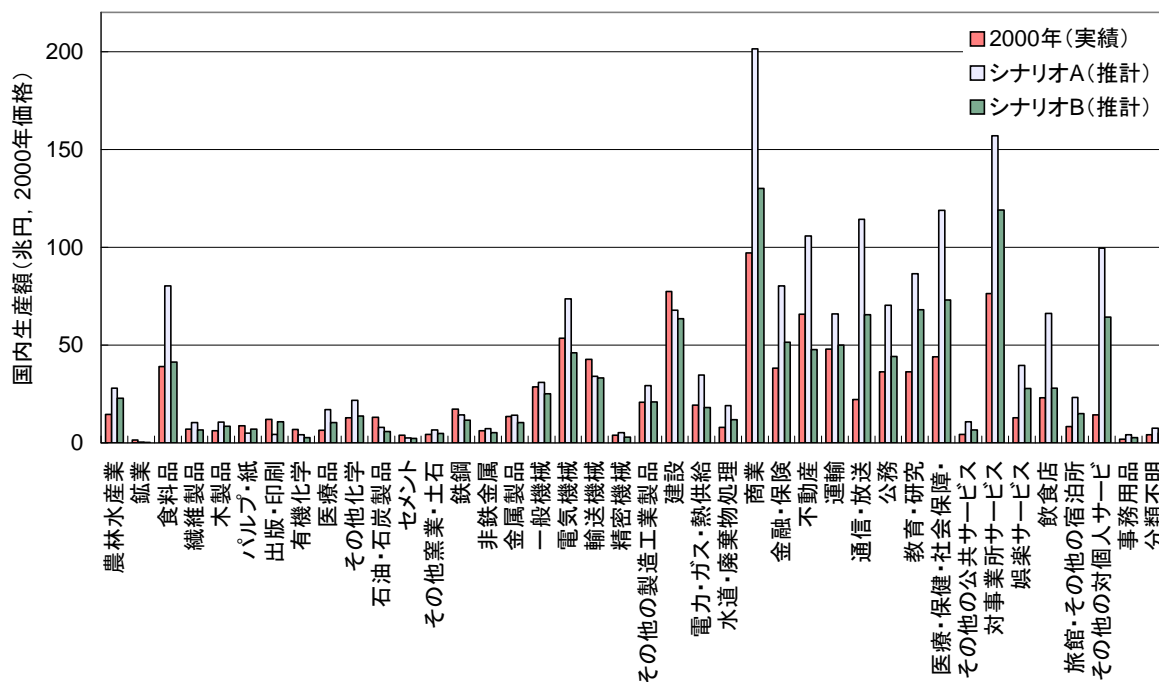


図3 2050年における産業部門別国内生産額

シナリオAおよびBでは、一人当たりGDP成長率を2%と1%と想定しているため、2050年の部門別国内生産額は全般的にシナリオAの方が大きい。現在の輸出の稼ぎ頭である電気機械や輸送機械が引き続き増加するほか、エネルギー集約度の低いサービス産業の生産額が拡大すると想定した。

低炭素化目標を織り込んだ2050年の産業構造を、57部門からなる応用一般均衡モデルを用いて推計する。表2の叙述シナリオや図2に示された素材生産量に関する検討と整合するように、マクロ経済指標及び部門別生産量を推計した。2050年の人口構成と整合する労働力や、生産性を踏まえた資本ストックの規模を想定している。エネルギー需要については、効率変化（低炭素化目標に欠かせない技術の導入によるエネルギー効率改善や、脱物質化の進展等）やエネルギー供給形態、人口構成や社会構造の変化に基づく需要関数の変更、ストックの更新に伴って発生する素材の再生利用の拡大、前項で示した素材生産の変化、インフラの維持管理に重点を置いた公共投資への転換、生産拠点の移転に基づいた貿易構造の変化など、2050年の社会を記述する主要なパラメータを想定する。2050年までには、生産設備は概ね置き換わっていると考えられることから、ここでは経年的な変化を考慮せず、2050年の社会像のみを試算している[図1の手順②]。図3はその結果を40部門



に集約したものである。シナリオ A、B 共通してサービス業の進展、電気機械・輸送機械産業の増加、エネルギー多消費型産業の縮小がみられ、これは従来の諸見通し（「日本 21 世紀ビジョン（2005 年；内閣府）」等）と大差ない。活発社会（シナリオ A）での、商業等のサービス業、電気機械・輸送機械等の製造業の伸びが顕著である。以下の定量的な分析では、この試算結果を前提に低炭素社会の実現に向けた対策の直接的な効果のみを評価する。対策に伴う誘発効果など間接的な影響は分析していない。

### 3. 低炭素社会の可能性：現状のサービスレベルを確保・改善しながら、合理的な利用でエネルギー需要の 40%の削減、供給側の低炭素エネルギー選択で、CO<sub>2</sub>排出量 70%削減は実現可能である。

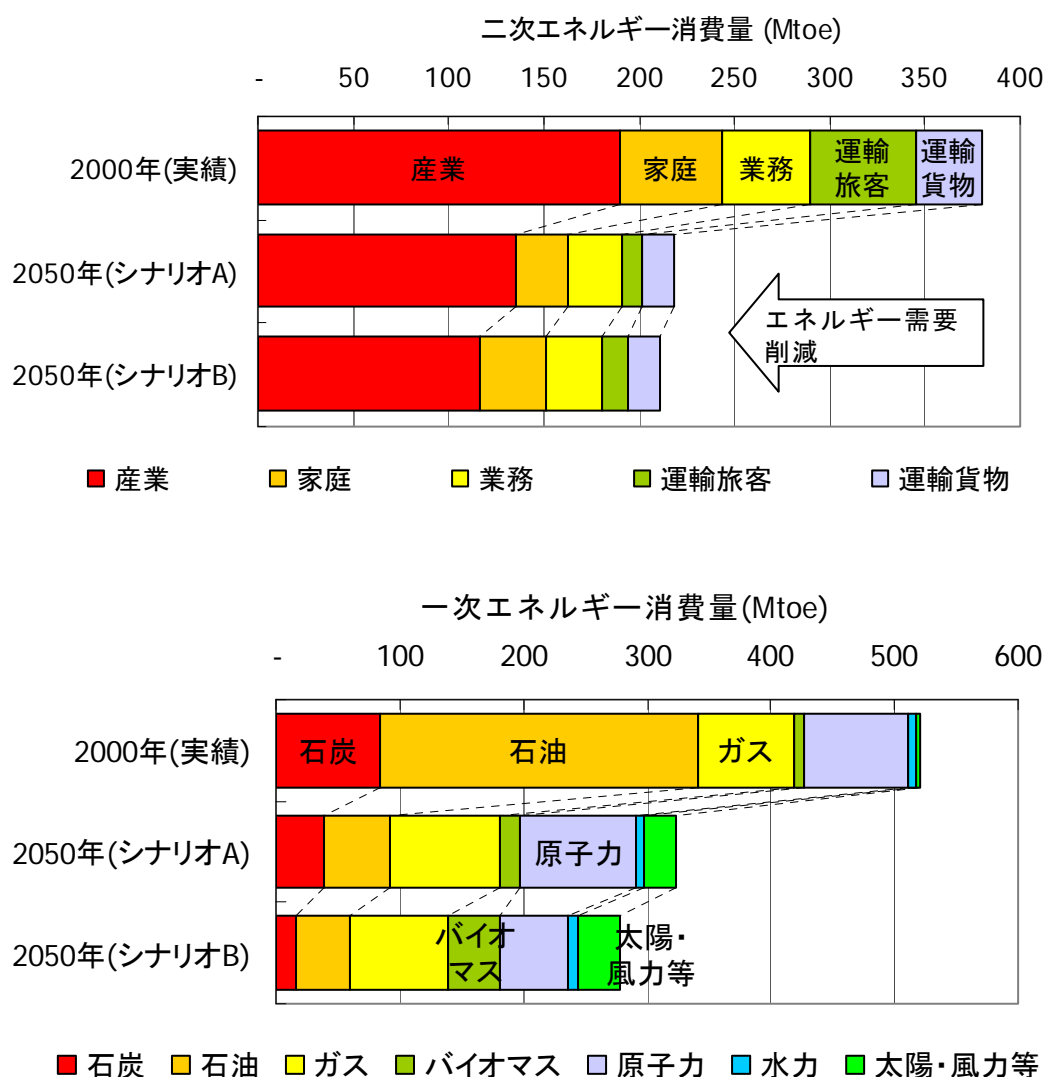
低炭素社会の需要側技術選択：シナリオ A、B それぞれにおいて、2050 年の時間断面で推計された産業構造下（図 3）で各種生産を行うための技術を、約 600 の技術リスト（主要なものを表 3 に例示）から選択した[図 1 の手順②]。個別技術の進歩見通しは「技術戦略マップ（エネルギー分野）～超長期エネルギー技術ビジョン～（2005 年；経済産業省）」などを参考にした。そして、それらの技術を稼働させるのに必要なエネルギー需要量を二次エネルギー形態（電力、液体、ガス、その他）で推計した[図 1 の手順③]。各種需要側技術の効率改善予測や、適切な技術の選択に関して、専門家の助言を得ながら行った。

表 3 主な対策技術のリスト（環境オプションデータベース）

部門	主要な対策技術リスト
家庭・業務部門	高効率ヒートポンプエアコン、高効率電気給湯器、高効率ガス給湯器、高効率石油給湯器、太陽熱給湯器、高効率ガスこんろ、高効率電気調理器、高効率照明、高効率映像機器、高効率冷蔵庫、高効率搬送動力、燃料電池コジェネ、太陽光発電、BEMS、高断熱住宅、エコライフナビゲーションシステム、嵩高紙、電子新聞・電子雑誌など
運輸部門	高効率レシプロエンジン自動車、ハイブリッドエンジン自動車、バイオアルコール自動車、電気自動車、プラグインハイブリッド自動車、天然ガス自動車、燃料電池自動車、自動車車両の軽量化、自動車車両の空気抵抗低減、低転がりタイヤ、高効率鉄道、高効率船舶、高効率航空機、高度道路交通システム、リアルタイム&セキュリティ交通システム、サプライチェーンマネジメント、バーチャルコミュニケーションシステムなど
産業部門	高効率ボイラ、高効率工業炉、高効率モーター、高効率自家発電装置、次世代コークス炉、廃プラスチック原燃料化、エコセメント、接触分解プロセス、メタンカップリング、黒液ガス化発電など
エネルギー転換部門	高効率石炭火力発電（石炭ガス化複合、アドバンスド加圧流動床、バイオマス混焼など）、高効率天然ガス火力発電、高効率バイオマス火力発電、風力発電（陸上・洋上）、原子力発電、水力発電、副生水素、天然ガス改質水素製造、バイオマス改質水素製造、電気分解水素製造、水素ステーション、水素パイプライン、水素タンクローリー、CCS（炭素隔離貯留）など

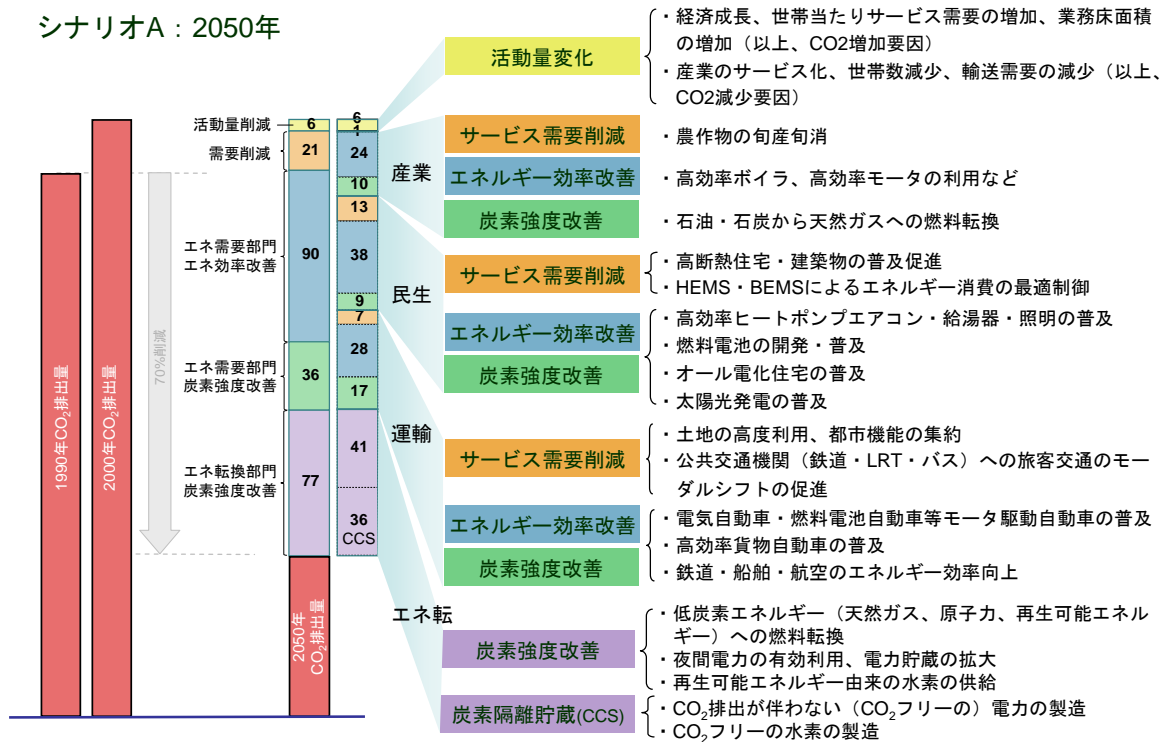
現時点で開発が予想される対策技術を示している。2050 年になるとこの表では示さなかった様々な技術イノベーションが起こっているかもしれない。これらの技術は必ずしも低炭素化のためでなく、他の目的によって開発されることも十分ありうる。

供給側低炭素エネルギー源の選択：形態別の二次エネルギー需要を満足し、かつ一次エネルギー供給制約範囲内で、供給側エネルギーの組み合わせを選択した（図4）【図1の手順④と⑤】。経済性のみならず、技術進歩の確実性、社会受容性など、2章で想定した叙述シナリオの文脈に合うよう専門家の判断に従って決めたものである。経済成長を担保しながらも、様々なイノベーションによって2050年に必要となるエネルギー需要量は2000年に比べて約6割程度になると推計<sup>1</sup>したが、さらにエネルギー供給の脱炭素化が必要になる。様々な組み合わせが考えられる（7章）が、シナリオAでは原子力、炭素隔離貯留（CCS）や水素など大規模なエネルギー技術が、シナリオBでは太陽光や風力、バイオマスなど比較的規模の小さい分散的なエネルギー技術が受け入れられやすいと想定した。



<sup>1</sup> 作業の都合上、エネルギーに関するポテンシャルの計算は、2000年比で示されている。しかしCO<sub>2</sub>排出量の総量は1990年比70%削減に対応している。

### シナリオA : 2050年



### シナリオB : 2050年

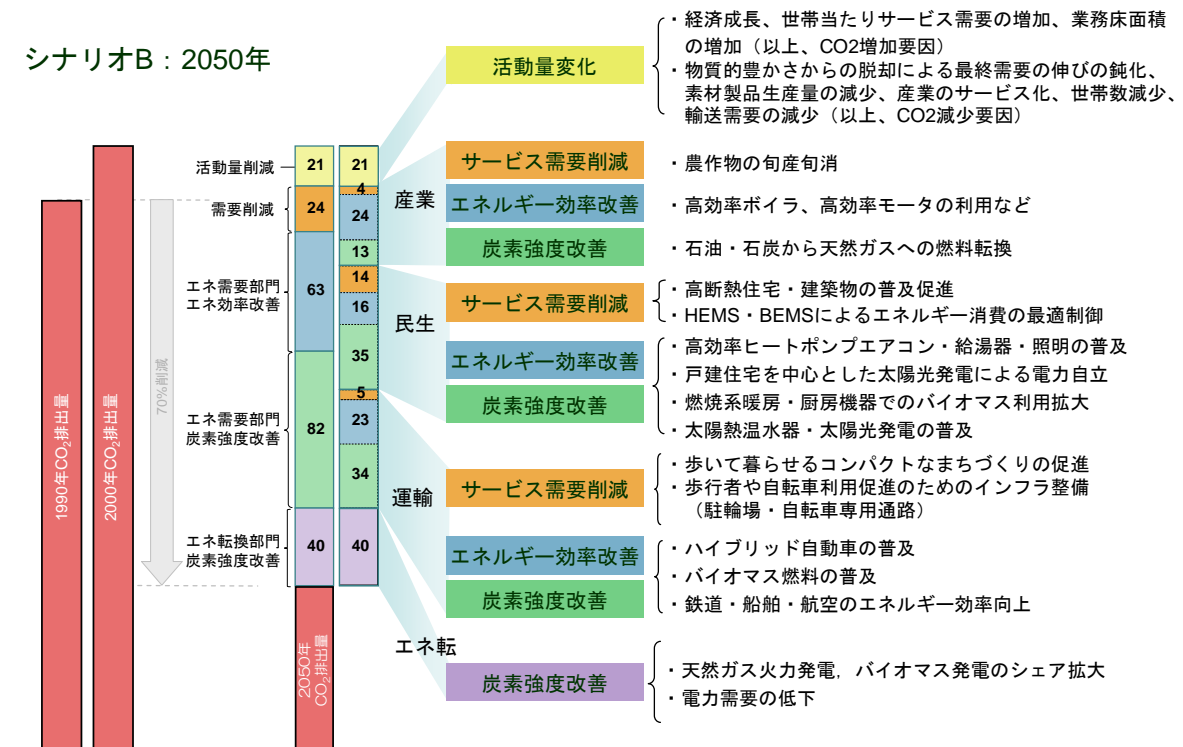


図5 2050年CO<sub>2</sub>排出量70%削減を実現する対策オプションの検討(シナリオAとB)

Aでは都市機能の集中により集合住宅やコンパクトシティにおける対策が有効だが、Bでは地方分散により戸建住宅や自動車単体対策が有効。需要での削減余地が大きい。両シナリオで共通の対策も多い。

低炭素社会は可能：その結果、2050年時点で、両シナリオが想定するいずれの社会においても、技術開発利用の加速によりCO<sub>2</sub>を70%削減することは可能との結論を得た（図5）。シナリオA、Bともに、GDPは2000年に比べて2.0倍と1.5倍に増加すると想定したが、各種イノベーションにより、サービスレベルを低下させず、しかしエネルギー需要を約40%削減することは可能である。さらに供給側の低炭素化により1990年比でCO<sub>2</sub>排出量の70%削減は可能である。試算したいずれのケースでも、合理的な利用による需要減少、需要側省エネ技術の開発と選択、供給源エネルギーの低炭素選択、を混合した総合戦略が必要である。

シナリオAでは、家庭・業務や産業、運輸での高効率機器の導入など需要側のエネルギー効率改善と原子力や水素利用による供給側のエネルギー転換での低炭素エネルギー利用の効果が大きい。シナリオBでは、交通や家庭・業務、産業でのバイオマス利用や太陽エネルギーの利用などの需要側での低炭素エネルギー利用の効果が大きい。

このようにシナリオにより部門間での削減量に差はあるが、選択された技術には共通のものが多く、低炭素化目的でなくともエネルギーコストの節約だけで得をするいわゆるノーリグレットな対策もあり、積極的な技術開発・普及が望まれる。また需要側機器の動作に必要な二次エネルギー（ガス・水素、液体、電力、その他）および一次エネルギーであるバイオマス、太陽・風力、原子力など、計画的な導入を要する対策については、将来の不確実性を勘案しながらも、早期の方向決定が必要である（図4）。

#### 4. 低炭素社会での技術費用：低炭素技術の直接費用は少なくとも7兆円から9兆9千億円。

将来の対策費用は想定する社会・経済の発展方向によって違ってくる。2050年において想定した社会を実現させるには、産業転換や国土交通におけるインフラ投資を、今から適切に誘導する必要がある。これらの投資は必ずしも温暖化対策として実施されるものではなく、国際競争力強化、将来の安全・安心で住みやすく移動しやすい街づくり、あるいはエネルギー安全保障などのためにいずれにしても実施されるものである。ここでは、結果的に低炭素社会の構築にも貢献する投資が低炭素社会をも目指してタイミングよく行われるということを前提にしており、低炭素社会での技術費用としては組み込まない。

こうした投資が当然行われるとして、そこで低炭素社会を実現するには、さらに低炭素技術の導入を加速していく必要がある。ここでは、2050年時点で、両シナリオでの70%削減低炭素社会における低炭素技術の直接費用を集計した。2050年に必要な低炭素技術の年間直接費用合計額は、表4に示すように、シナリオAで9兆円～9兆9千億円、シナリオBで7兆円～7兆9千億円と推定される。技術導入に関する追加費用は既存技術と低炭素技術の費用の差として推計した（図6）。この追加費用はシナリオAで1兆円～2兆円、シナリオBで7千億円～1兆9千億円と推定される。対応する平均削減費用は、それぞれ概ね25,200～38,900円/tC、25,000～39,900円/tCと推定した。

表 4 低炭素社会での技術費用

	シナリオ A	シナリオ B
年間直接費用 (GDP 比)	9 兆 0 千億円 (0.83%) ～9 兆 9 千億円 (0.90%)	7 兆 0 千億円 (1.01%) ～7 兆 9 千億円 (1.12%)
年間追加費用	1 兆円～2 兆円	7 千億円～1 兆 9 千億円
平均削減費用	25,200～38,900 円/tC	25,000～39,900 円/tC

平均削減費用＝追加費用/それにより追加的に削減した温室効果ガス排出量。

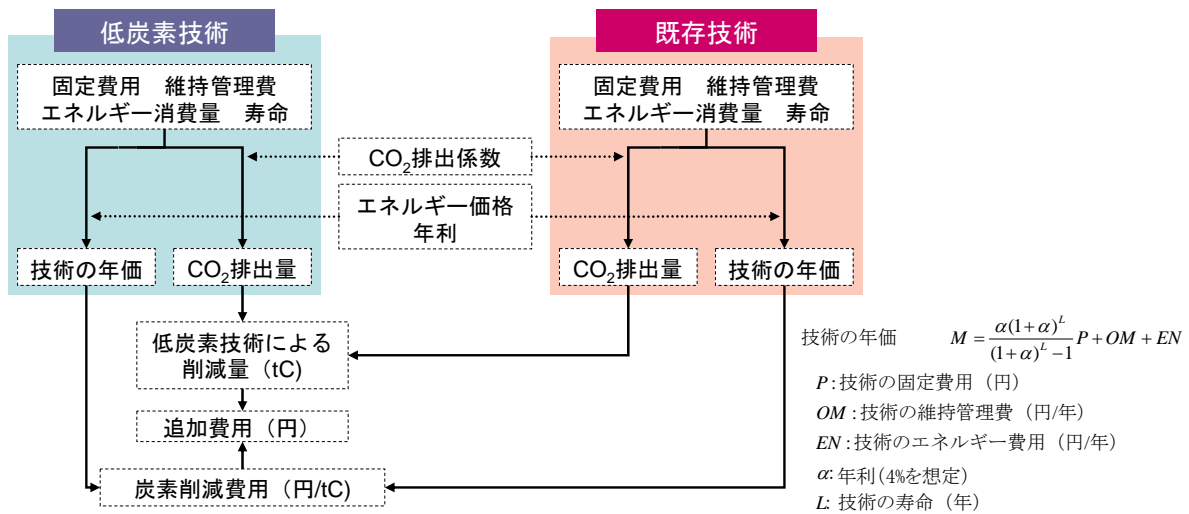


図 6 70%削減実現に向けての技術対策の追加費用算定の考え方

既存技術（低炭素社会に向けた対策をとらないときに導入される現存する技術）と低炭素技術（70%削減を実現するために必要な技術）の差額が追加費用。

### 5. 2050 年までの技術導入道筋：早期省エネ投資で長期節約効果大

初期的な検討では、2000 年から 2050 年までの対策の最適な（経済的に最もロスが小さい）経路を算出する動的最適化モデルを用いて、2050 年だけの排出削減目標を設定して分析を行った。ここで注意すべきは、本分析は表 3 や図 5 で示した技術群を対象としており、不確実性の極めて高い対策は対象からはずしている点である。試算の結果、資本の耐用年数などを踏まえて、目標年のみならず早期に省エネ投資を進めることが最適な対策の経路であるという結果が得られた。省エネ投資の導入を遅らせて削減目標を達成する場合、より限界費用の高い技術の導入が必須となり、早期投資より損失が大きくなると推定される。本モデルでは、省エネ製品の普及による価格の低下といった効果を盛り込んではいないが、こうした効果を勘案すると、さらに早期の対策が選択され、経済的な損失を抑えるものと思われる。一方投資額自体は、省エネ投資導入による追加的な費用が発生する。既存投下資本の効率的利用を考えると、設備置き換えには時間がかかるため、新投資の機会を逃すことなく省エネ投資を入れていくことが肝要である。

本格的な低炭素社会への取り組みについては、将来の方がより技術革新が進み対策費用も安くなることが予想されるため、今すぐに費用の高い対策を行うよりも将来の費用の安い対策の開発を待って行ったほうが良い、という主張がある。しかし、本試算結果からみると、この主張は当たっていないことになる。

## 6. 技術と社会の変革速度から見た可能性：従来の改善速度より一層の加速が必要

この70%削減の試算で採用した技術群によって実現されるエネルギー集約度（エネルギー量/GDP）および炭素集約度（炭素排出量/エネルギー量）の改善速度は、それぞれこれまで世界が成し遂げてきた改善速度<sup>2</sup>をやや上回るものとなる（図7）。特に、エネルギー集約度に関しては、2%/年程度（従来最大1.5%/年程度）にまで加速の必要があり、炭素強度に関してはCCSの利用が無ければ、従来の改善率を越える。2050年に60%~80%の削減を目指す欧州諸国の技術改善目標も、日本と同程度を必要とする。一方で、資源制約による脱物質化の要請により、GDPとエネルギーサービス量とのデカップリング（例えば、シナリオBではGDPが1.5倍のびているにも関わらず、図5で示されるように、必要とされるエネルギーサービス量は伸びない）が必然になることは見逃せない。これによりエネルギー集約度改善速度の0.5~1%が達成できる。今後は熾烈な社会変革および技術競争が始まる（図7および表5）。

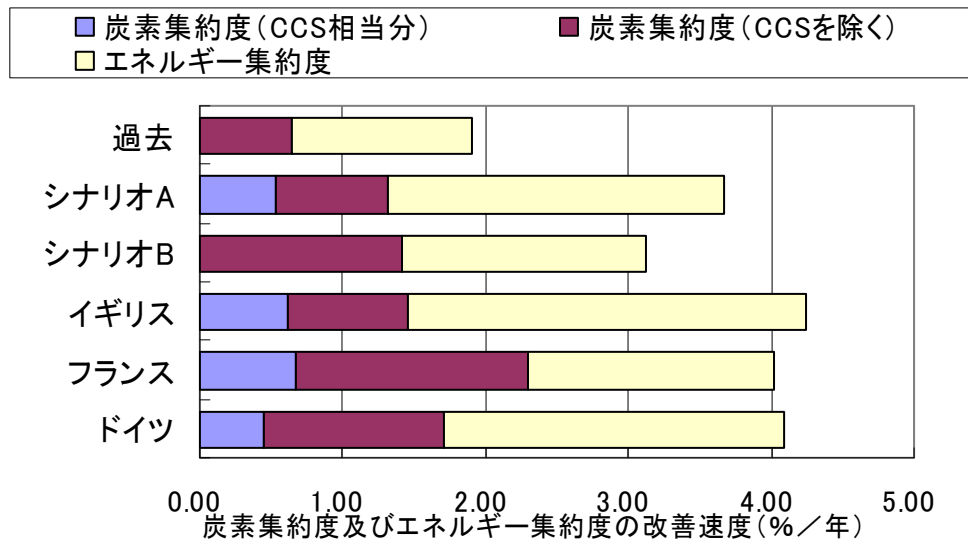


図7 低炭素社会実現に必要な技術と社会の変革速度

CO<sub>2</sub>を2050年までに60~80%削減するような低炭素社会を実現させるには、今までに経験した最大またはそれ以上のエネルギー集約度（少ないエネルギーでGDPを稼ぐ）および炭素集約度（CO<sub>2</sub>排出の少ないエネルギーに転換する）の改善を継続しなければならない。

<sup>2</sup> オイルショック後、日本では10年間で3%/年のエネルギー集約度改善率を達成した時期もあったが、50年を越える範囲で表5に求められる改善速度を経験したことはない。2050年まで高い改善速度を継続するには、社会構造として、高い変革性を受け入れ続けるシステムを取っておかなければならない。

表 5 低炭素社会実現に必要な 2000 年から 2050 年にかけての改善速度

		エネルギー集約度の改善率 (%/年)	炭素集約度の改善率 [内 CCS 分] (%/年)	想定 GDP 成長率 [一人当たり GDP 成長率] (%/年)	2050 年の削減目標[2000 年基準の削減率] (%)
過去の変化率の幅	世界	1.0~1.5	0.3~0.4		
2050 日本低炭素社会シナリオ試算 (1990 年基準)	シナリオ A	2.4	1.3 [0.5]	1.4 [2.0]	70 [68]
	シナリオ B	1.7	1.4 [0]	0.5 [1.0]	70 [73]
欧州諸国	イギリス	2.6~2.9	1.2~1.8 [0.3~0.9]	2.2~3.0 [2.1~2.8]	60 [60]
	ドイツ	1.8~2.8	1.3~2.3 [0~1.4]	1.4 [1.7]	80 [75]
	フランス	1.3~2.3	1.7~2.6 [0~2.0]	1.7 [1.7]	75 [70]

イギリスは現状 (1997 年) から、ドイツ、フランスは 1990 年を削減目標の基準年としている。

出典:

(過去の世界) IPCC 第三次評価報告書

(イギリス) Dept. of Trade and Industry (DTI) in UK, 2003; Future Energy Solutions: Options for a low carbon future, DTI. Economic Paper No. 4., DTI, London.

(ドイツ) Deutscher Bundestag in Germany, 2002; Enquete Commission on Sustainable Energy Supply Against the Background of Globalisation and Liberalisation: Summary of the Final Report.

(フランス) Interministerial Task Force on Climate Change (MIES) in France, 2004; Reducing CO<sub>2</sub> emissions fourfold in France by 2050 -Introduction to the debate-.

## 7. エネルギー供給面から見た可能性：供給制約の見極めと早期の路線選択が必要

どの一次エネルギーを供給するかは、図4で示したシナリオA及びBおよび図8で示した様々な供給パターンで示したように、いろいろな組み合わせが可能である。ただし、どの一次エネルギーを選択するにしても、その供給ポテンシャルと需要側から必要とされる二次エネルギー（ガス・水素、液体、電力、その他）の需給両面からの制約を受ける。たとえば、原子力は、立地・受容・リードタイムのほかに需要側の電力負荷率が制約になる。バイオマスは、国内資源だけでなく国外からの輸入可能量に制約があり、自然エネルギーには供給ポテンシャルおよび出力の不安定性など本質的な制限がある。水素供給にはまだ殆ど建設されていない水素インフラが必要になる。

早期の一次エネルギー供給見通し、二次エネルギー形態の検討、エネルギー供給・利用面での分散多様化による、エネルギー安全保障面と低炭素化目標達成の両立を見据えた早期の路線決定が望まれる。

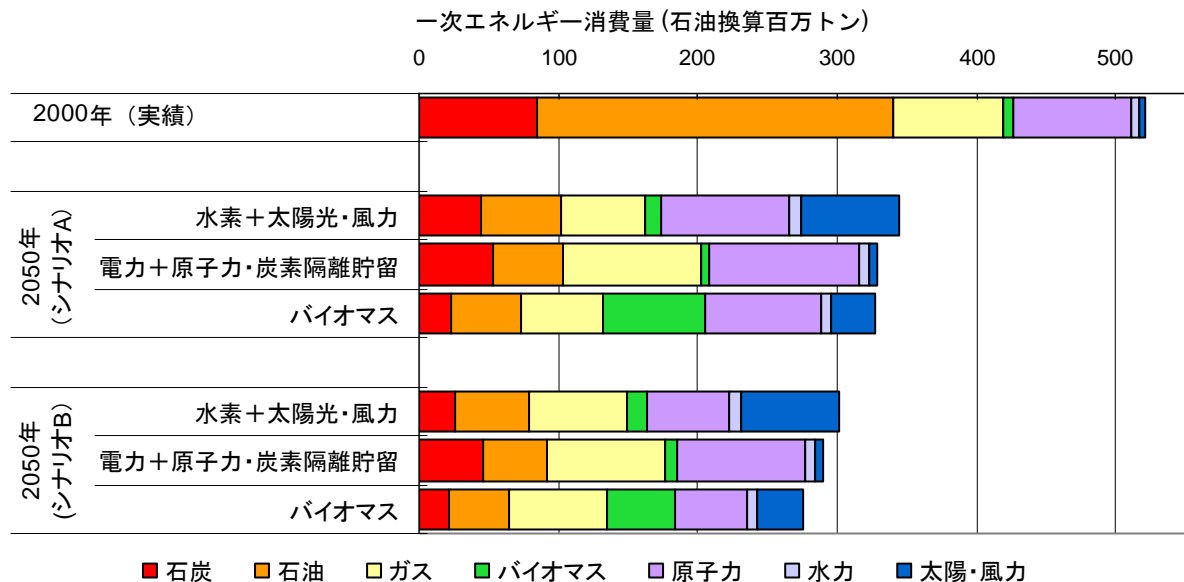


図8 2050年CO<sub>2</sub>排出量70%削減を可能にする供給側エネルギー構成例

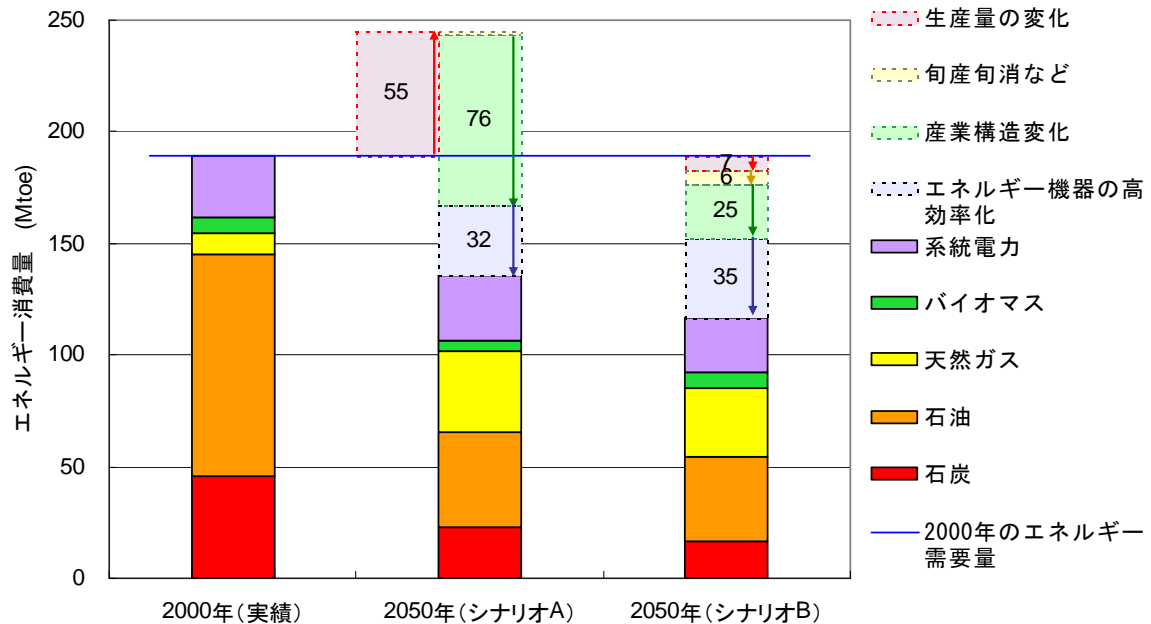
3つの極端な供給側エネルギー構成を示した。水素+太陽光・風力ケースでは、水素・燃料電池の導入を促進し、マイクログリッドシステムの運用を容易にすることで、太陽光・風力が最大ポテンシャルまで導入を進める。電力+原子力・炭素隔離貯留ケースでは、最終需要部門において電化率を高め、発電部門において原子力及び火力+CCSの比率を高める。バイオマスケースでは、最終需要部門、発電部門ともにバイオマス燃料の依存率を高める。A、Bシナリオはどちらも上記の供給シナリオの間を想定している。



## 8. 部門別エネルギー需要削減可能性：それぞれの分野で大幅な削減が可能

適切なインフラ整備、産業構造転換に加え、低炭素社会に向けた社会・技術イノベーションおよびエネルギー技術進歩を加速させることで、産業・運輸・家庭・業務部門における2050年のエネルギー需要量の合計を、2000年に比べて40%削減することができる。

### 産業部門：構造転換と省エネルギー技術導入で30-40%のエネルギー需要削減



生産量の変化：第一次産業と第二次産業の国内生産額合計値の変化

産業構造の変化：第一次産業と第二次産業内の産業構造変化

エネルギー機器の効率化：高効率工業炉、高効率モーター等

図9 産業部門におけるエネルギー需要削減

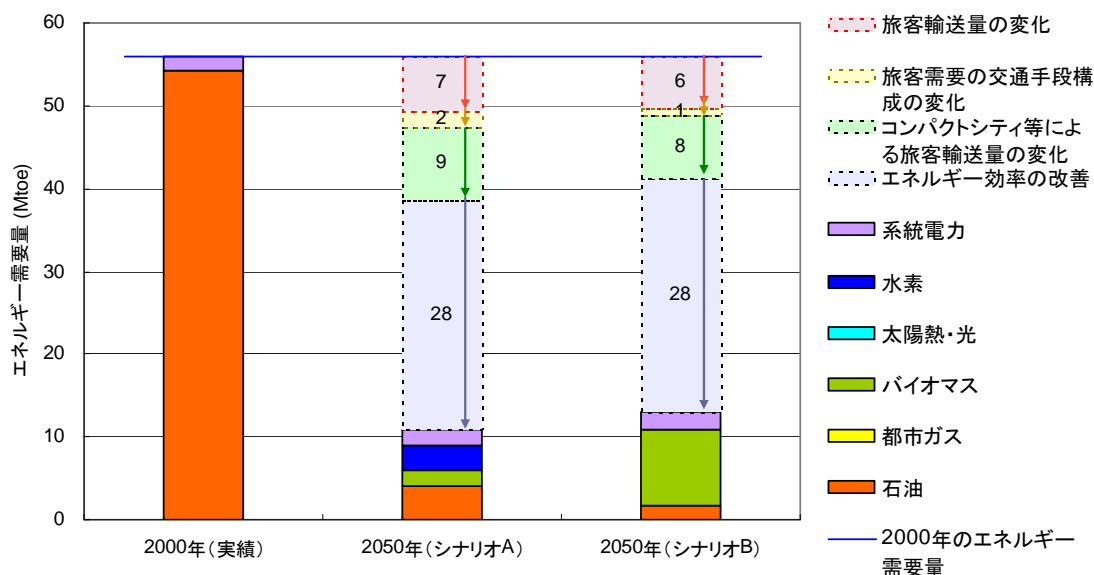
今後、産業構造はサービス産業へと比重を移す（図3）。省エネルギー社会でのモノづくりによる産業競争力増強に向けて、電機・機械産業の出荷が増す。エネルギー集約度の高い素材産業に関しては、2050年までにはさらに社会資本の整備が進み、鉄やセメントなど素材製品のインフラ内ストック量が大幅に増加している。産業部門の技術イノベーションにより、こうして蓄積された製品を高品質用途に再利用できるリサイクル技術が開発される。この技術の普及により、素材製品の循環利用率が大幅に向上する。

工業品製造におけるエネルギー需要の用途は、大別すると直接加熱用、蒸気用、動力用、還元用、精錬用、その他となる。これらの用途を満たす技術である、工業炉、ボイラ、モーター等のエネルギー効率は、今後の技術開発・普及に伴い、大幅に改善される。

一人当たりGDP成長率を2%と想定しているシナリオAにおいては、モノづくりによる産業競争力の確保を目指すため、第一次産業と第二次産業の国内生産額合計値は増加する。しかし、製造段階でエネルギーを多く需要する素材生産の減少などの脱物質化によって、76Mtoeの削減が見込まれ、さらに、エネルギー機器効率の改善で32 Mtoeが節約され、合

計して 2000 年より 30%のエネルギー削減が可能と見られる。シナリオ B では、産業構造転換や機器効率の改善により、40%の削減が見込まれる（図 9）。

### 運輸旅客部門：適切な国土利用、エネルギー効率改善で 80%のエネルギー需要削減



運輸旅客輸送量の変化：人口減少による移動総量の減少

旅客需要の交通手段構成の変化：公共交通機関（LRT や福祉乗り合いバス含）によるモーダルシフト

コンパクトシティ等による旅客輸送量の変化：目的地が近在化することによる必要移動距離の減少

エネルギー効率の改善：自動車などの旅客輸送機器の効率改善（ハイブリッド化、軽量化等）

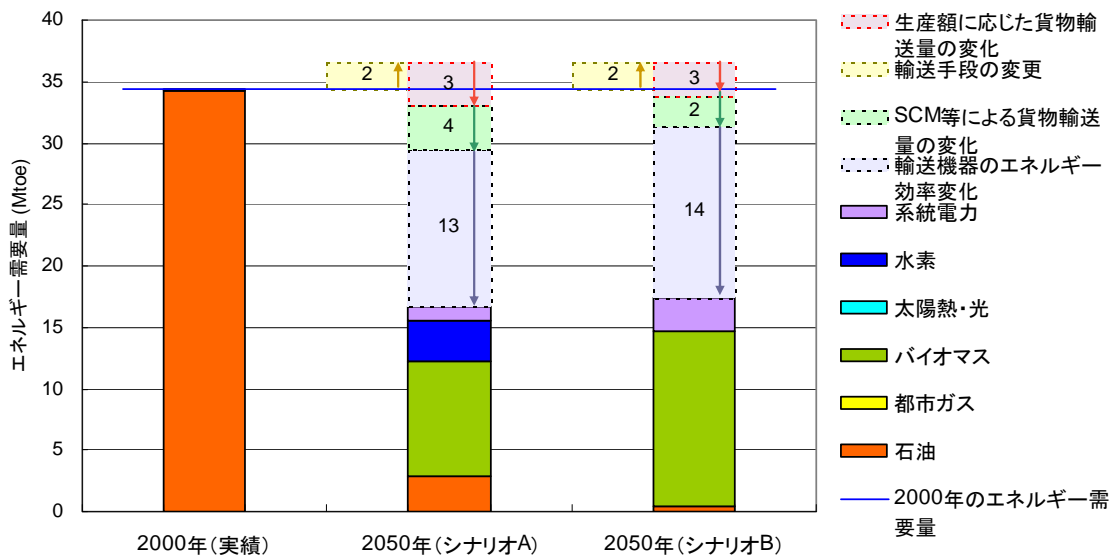
図 10 運輸旅客部門におけるエネルギー需要削減

今後、交通需要は少子化による人口減少、安全安心な街づくりに向けたコンパクトシティ化による必要な移動距離の減少、交通弱者を配慮した街づくりに資する公共交通機関（LRT や福祉乗り合いバス導入を含む）の利用促進によるモーダルシフト等を組み合わせることで減少する。更にハイブリッド化やモーター化による自動車燃費の大幅な向上と燃料の低炭素化（電気、水素、バイオマス）により、交通関連からの CO<sub>2</sub> 排出の 80%削減は可能である（図 10）。

A シナリオでは B シナリオと比べて都市部に住居、オフィス、商業施設が集中している。そのため、もともと移動距離が短く、かつ、公共交通機関のシェアが高い。運輸旅客部門エネルギー需要削減では、集中効果は 7 Mtoe、モーダルシフトの効果は 2 Mtoe 削減である。これに加えて両シナリオでコンパクトシティ化を推進することで、さらに移動距離の短縮、公共交通機関シェアが向上し、エネルギー需要を 8~9 Mtoe 削減することができる。

ただし、公共交通機関のシェアを高めても 2050 年において最も大きなシェアを占める移動体は自動車であろう。電気自動車や水素燃料電池自動車が普及、軽量化、抵抗改善、ハイブリッドエンジン搭載などの技術イノベーションによって A シナリオ、B シナリオともに 28 Mtoe のエネルギー需要を削減することができる。

運輸貨物部門：輸送システムの効率化、輸送機器のエネルギー効率改善で 50%のエネルギー需要削減



生産額に応じた貨物輸送量の変化：2050年の生産物を2000年と同じシステムで輸送した時の変化分

輸送機器構成の変化：モーダルシフト等による輸送手段の変化分

SCM等による貨物輸送量の変化：合理的な物流システムの導入により変化する分

輸送機器のエネルギー効率変化：自動車などの貨物輸送機器の効率改善

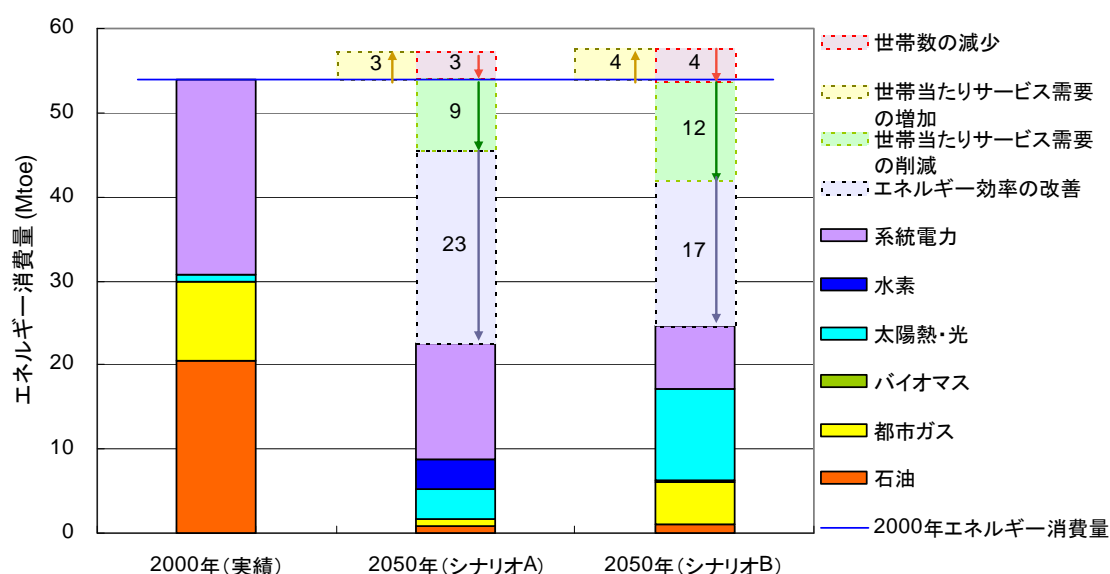
図 11 運輸貨物部門におけるエネルギー需要削減

今後、ICT等を活用した合理的な物流システムの構築、トラックなどの輸送機器のエネルギー効率改善等によりシナリオA、シナリオBともに50%のエネルギー需要削減が可能である(図11)。

ICT等によってあらゆる製品の需要・供給の的確な把握、効率的な流通経路の探索などSCM(Supply Chain Management)が行われることで、廃棄品や返品ゼロ化や積載効率が向上する。また、流通網の高度管理はトラックによる小口輸送と船舶・鉄道による大口輸送の接続を容易にし、モーダルシフトを促進させる。これらの効果によってAシナリオ、Bシナリオ、それぞれ4Mtoe、2Mtoeのエネルギー需要が削減される。

大幅な自動車のエネルギー効率の改善により、Aシナリオでは電気自動車や水素燃料電池自動車普及し13Mtoeのエネルギー需要が削減される。Bシナリオでは、抵抗改善、エンジン効率改善などによって現在より5割程度エネルギー効率を高めた自動車がバイオマスエネルギーを燃焼させながら走行することで14Mtoeのエネルギー需要が削減される。

家庭部門：利便性の高い居住空間と省エネルギー性能が両立した住宅への誘導でエネルギー需要を40～50%削減



世帯数の減少：2050年に向けて、A、B両シナリオとも世帯数は減少  
 世帯あたりサービス需要の増加：利便性の高い生活の追及により増加  
 世帯あたりサービス需要の削減：高断熱住宅、魔法瓶浴槽、HEMS等により節約  
 エネルギー効率の改善：エアコンやヒートポンプ、給湯器やコンロ、照明の効率改善、待機電力削減など

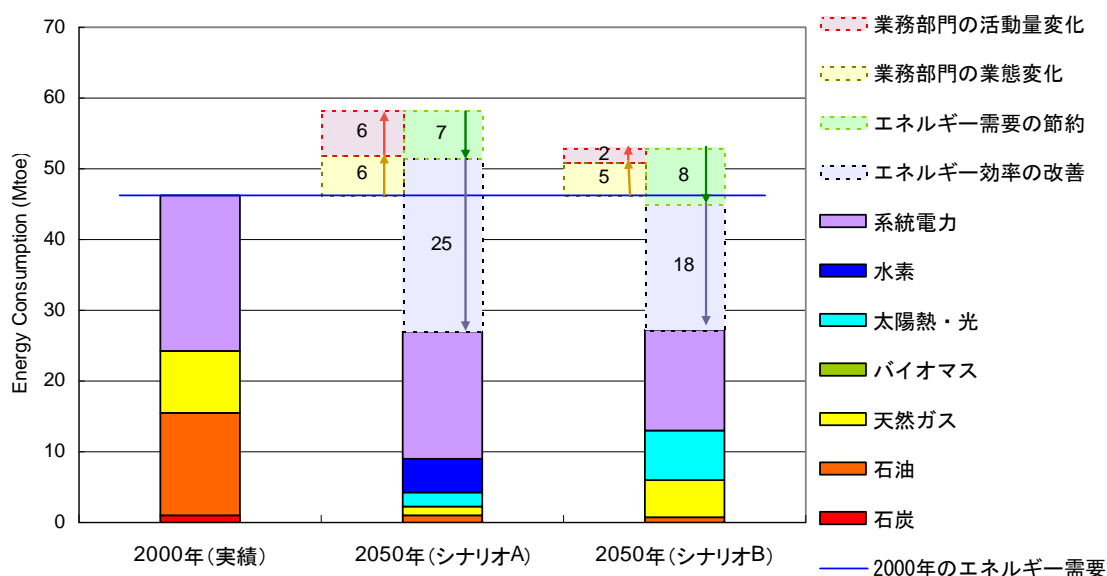
図 12 家庭部門におけるエネルギー需要削減

我が国の住宅平均寿命は35年程度であり、2050年には現存する住宅の多くが建て替わられている。このため、今後の建て替え需要を見込んで、寒くなくて過ごしやすい省エネルギー型高断熱住宅へと誘導して行くことによって、快適性の高い居住空間と省エネルギー性能が両立した良質の住宅ストック構築が可能となる(図12)。

サービス需要の増加に伴いエネルギー需要は増加するが、その分を世帯数減少がほぼ相殺している。利便性の高い生活を追及するシナリオAがゆとり生活を嗜好するシナリオBと世帯当たりのサービス需要が同程度であるのは、快適な生活の追及によって冷暖房需要や家電製品利用が増える一方で、外食率や集合住宅率の増加によって、エネルギーサービス需要が抑制されるためである。

高断熱住宅など寒くない家に作り変えることで、約10Mtoeの需要を削減することができる。さらにエアコンや電気給湯器のヒートポンプの効率、給湯器やコンロの燃焼効率、照明の効率、待機電力消費率を大幅に改善するような各種技術イノベーションを行うことで、2050年のエネルギー需要合計が2000年に比べて40～50%にまで削減することができる。英国「40%House(2005年; Boardman等)」、日本「自立循環型住宅に向けたガイドライン(2005年; 国土交通省総合技術開発プロジェクト)」でも同様のことが示されている。さらに、シナリオAでは利用段階でCO<sub>2</sub>を排出しない電気や水素の利用割合を、シナリオBでは太陽熱・太陽光、バイオマスなどの分散型再生エネルギーの利用割合を増加させることで、家庭部門からのCO<sub>2</sub>排出量は殆どなくなる。

業務部門：快適なサービス空間／働きやすいオフィスと省エネ機器の効率改善・選択でエネルギー需要を 40%削減



業務部門の活動量変化：活動量増加に伴い必要なオフィス等が増加  
 業務部門の業態変化：ホテルやレストランなどエネルギー需要量の多い業態の割合が増加  
 エネルギー需要の節約：高断熱建築物、BEMS等により必要な需要を減少  
 エネルギー効率の改善：効率空調、高効率給湯器、高効率照明等により少ないエネルギーで需要を充足

図 13 業務部門におけるエネルギー需要削減

産業構造のサービス化により、シナリオ A および B とも業務部門の売上高が増加し（図 3）、オフィス需要が増加する。しかし、人口減少のため、売上高の伸びほど業務部門で労働する人口は増加しない。オフィス自体はより働きやすい環境を提供するため必要な機器は増加するが、高断熱化や BEMS、利用する機器の省エネ性の向上により、2050 年に 40% のエネルギー削減が見込める（図 13）。

A シナリオでは活発な消費活動に伴い、単位床面積当たりエネルギー需要量の大きいホテル、レストラン、娯楽場等の活動量が特に増加する。それらの影響によって 12Mtoe のエネルギー需要量が増加する。一方、冷暖房の負荷の極めて小さい高断熱建築物に作り変え、BEMS を普及させることで、7Mtoe の需要を削減することができる。さらに高効率空調、高効率給湯器、高効率照明などにより 25Mtoe の需要を削減することができる。

## 9. 低炭素化社会実現への誘導：早期の目標共有と総合施策確立、計画的実施が必要

国民福祉を維持したうえで、適切な産業構造転換、国土整備、技術革新により低炭素社会を実現する技術的なポテンシャルが存在することを示した。しかしその実現には、国民の気候変化に対する危機の共有、低炭素社会への合意、温室効果ガス排出に伴う外部経済の内部化を初めとする政策措置を強力なリーダーシップの下に実行することが必要である。

特に早期の対策が効果的であり、経済的であることに着目すべきである。産業の転換や技術開発、利用は個々の企業の選択であるが、政府として低炭素社会に向けた早期のシグナルを明示するとともに、温室効果ガスの削減を行った企業が経済的に報われる社会システム作りが必要である。また、政府の早期の統一した方針により、これまでの高炭素排出社会構造から抜け出し、低炭素排出に向けた都市・交通関連インフラ投資を粛々と進めてゆく必要がある。

低炭素社会の実現は、後戻りできない世界的な潮流となりつつある。この現実を直視し、わが国は、低炭素社会の到来を見通した技術イノベーションの推進によって、国際競争力を高めていく戦略をとるべきである。

2050年までの様々な資本形成投資や技術開発投資の機会を逃すことなく低炭素社会へ導くために、低炭素社会の必然性への確固たる認識に基づく、早期の国家目標（削減数値目標というより、低炭素社会イメージ）の共有、削減計画設定と、温室効果ガス排出の外部不経済が内部化された社会の実現が必要である。その過程で、低炭素世界での国際競争に打ち勝てる社会・技術イノベーションがもたらされよう。

## 10. 気候変動防止 Global Participation 促進としての研究：アジア、世界の低炭素社会の手本となる「美しい国」日本を目指して

本研究は国際協調の下にすすめられており、UNFCCCでの交渉と平行して先進国・途上国共通の未来にむけた低炭素世界づくりを、草の根的に推進している。研究チームはアジア諸国の研究者へ低炭素化技術選択モデルを供与して、アジア途上国での低炭素社会の可能性比較、国際協力の有効性検討を行っている（図14）が、エネルギーの逼迫傾向もあり政府計画にも結果が取り入れられつつある。

環境省と英国環境・食糧・農林地域省（Defra）により、日英共同研究プロジェクト「低炭素社会の実現に向けた脱温暖化 2050 研究プロジェクト」が 2006 年 2 月 16 日の開始以来進められてきた。本研究チームは、この共同研究プロジェクトに当初よりたずさわって、20 カ国を超える国々から専門家を集め、三回の国際ワークショップ（第1回、2006年6月、東京、第2回、2007年6月、ロンドン、第3回、2008年2月、東京）を開催した。三回にわたる国際ワークショップの集大成として「Call for Action（行動の呼びかけ）」、第3回ワークショップの「Executive Summary（概要）」をまとめ、2008年3月14-16日に千葉県で開催された「気候変動、クリーンエネルギー及び持続可能な開発に関する第4回閣僚級対話（グレンイーグルス対話）」、また2008年5月24-26日に神戸市にて開催されたG8環境大臣会合において紹介された。また、本研究チームが編集に携わった国際学術誌

Climate Policy 増刊号「Modeling Long-Term Scenarios for a Low Carbon Society」が 2008 年 6 月に発行されたところである。

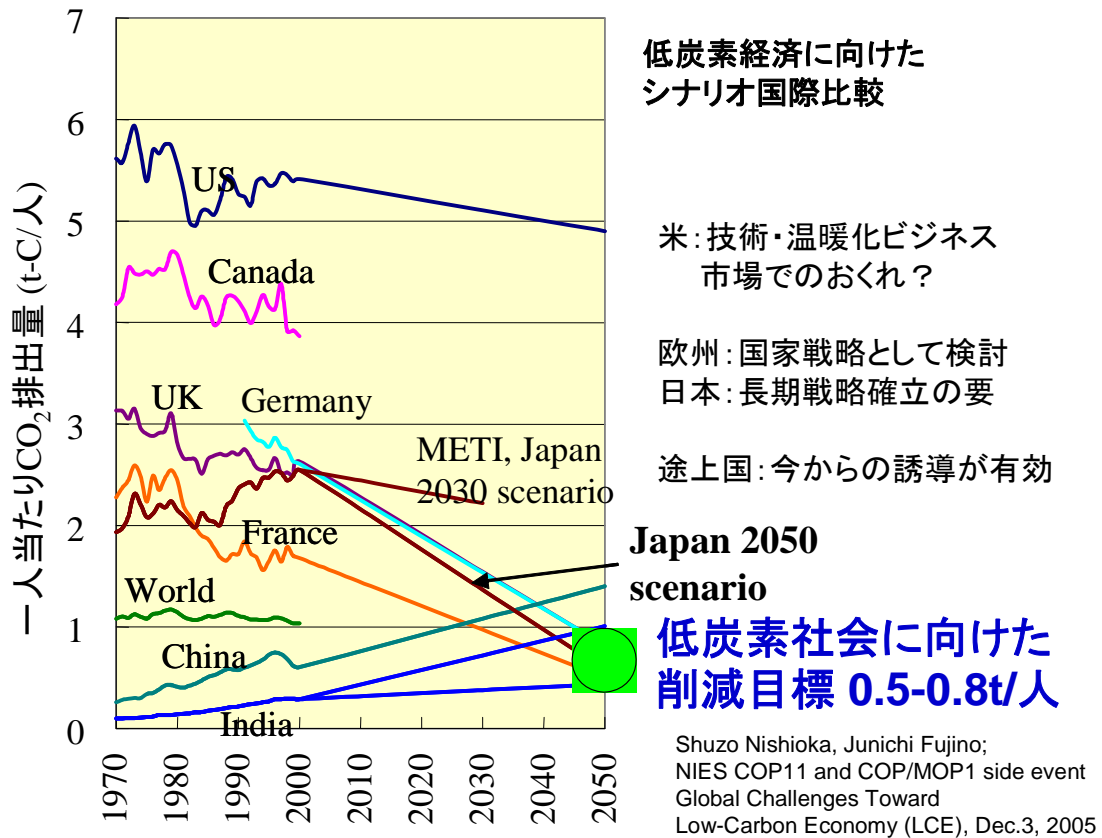


図 14 低炭素社会に向けたシナリオ国際比較

欧州および日本で、低炭素社会に向けた検討が進められている。米国・カナダでも、排出量取引などの検討が進められている。一方、一人当たり CO<sub>2</sub> 排出量の少ない中国やインドは経済発展によって大幅に CO<sub>2</sub> 排出量を増加する可能性が高い。中国やインドなどの途上国が、自動車依存型システムなどの高炭素インフラにロックインされることなく、先進国の経験を活かした技術・社会イノベーション等によるリープフロッグにより、豊かで質の高い低炭素社会に方向転換する方法はないか？