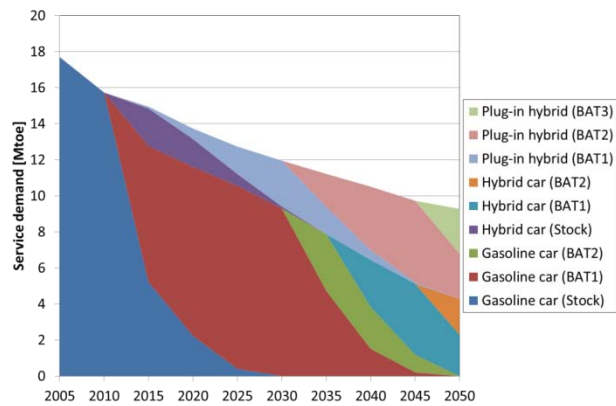
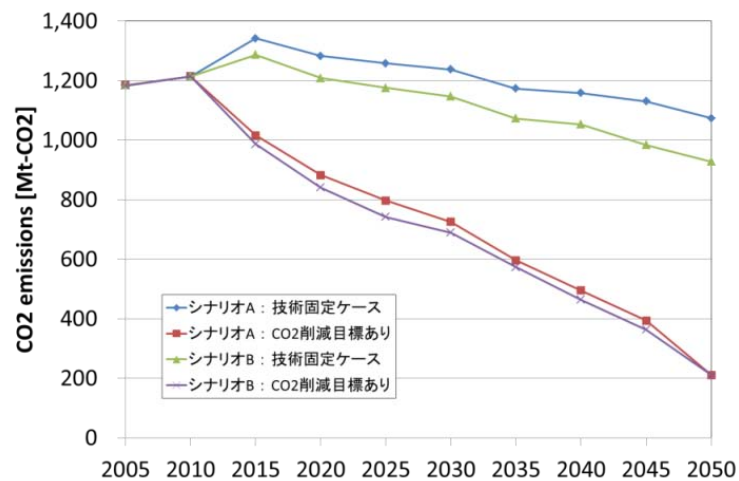


日本低炭素社会に向けた道筋検討：

2050年CO₂排出量80%削減社会実現に向けて



2010年12月

国立環境研究所 AIM プロジェクトチーム

1. 緒言

本研究は、技術進歩と市場普及とを多段階で考慮でき、バックキャスト手法を取り入れたエネルギー技術評価モデルを開発し、わが国を対象に所要のサービス需要を満たしつつも 2050 年までに CO₂ 排出量を 1990 年比で 80%削減した社会（低炭素社会）を実現する道筋検討へ適用したものである。

本研究で目標とする CO₂ 排出量は 1990 年 1,058 Mt-CO₂¹ から 80%削減した 212 Mt-CO₂ である。これを 2050 年までに達成するためには、2008 年の CO₂ 排出量 1,135 Mt-CO₂ からマイナス 3.7%/年の削減速度を要する。これを、各項の変化率にて表した茅恒等式（式 1）にて要因分解すると、GDP 成長率を+0.4~+1.6%/年の幅で想定した場合、中長期ロードマップ検討会にて想定した 2 つの社会像を実現するためには、エネルギー強度（Energy/GDP）の改善率は 1.4~1.9%/年、炭素強度（CO₂/Energy）の改善率は 2.7%/年が必要とされる。経済成長しつつも石油危機により省エネルギーや石油代替エネルギー開発が急速に進んだ期間を含む 1973 年~1990 年の平均値は、エネルギー強度改善率、炭素強度改善率それぞれ 2.2%、0.7%である。これと比較すると、2050 年までに CO₂ 排出量を 1990 年比で 80%まで削減した社会に向かうためのエネルギー強度の改善率は同程度、炭素強度の改善率では 4 倍もの速度が必要となる。

$$\Delta\text{CO}_2 = \Delta\text{GDP} + \Delta\left(\frac{\text{Energy}}{\text{GDP}}\right) + \Delta\left(\frac{\text{CO}_2}{\text{Energy}}\right) \quad (1)$$

2050 年までに低炭素社会を実現するためには、都市のコンパクトシティ化や高断熱住宅の普及などの社会インフラの大幅な転換も必要であるが、エネルギー利用技術のさらなる革新が不可欠である。温暖化対策においては、将来の技術開発の実現を待って対策を実現すればよいとする意見がある。しかしながら、そうした革新的な技術の実現には、それまでの技術の蓄積や、制度の変更、新技術を受け入れるための社会インフラの整備などが必要である。例えば、電気自動車の大規模普及には、事前に電気供給スタンドが整備されている必要がある。あるいは、地域の気候特性に合致しつつ最大限エネルギー需要を抑制できる省エネルギー住宅の普及には、断熱基準を現在のものよりもさらに詳細な区分で整備し、第三者機関による省エネルギー性能評価システムを構築しておくことなどさまざまな制度の変更が必要となる。

さらに、同じ技術であっても、段階的にかつ継続的に技術開発がなされなければ、将来必要とされる技術水準に到達することは難しい。Fujino ら²は、2050 年の日本を対象に、CO₂ 排出量を 1990 年比で 70%まで削減した社会を検討しているが、家庭用エアコンの COP（成績係数）は、ストックベースで COP（冷暖房成績係数）を 8 まで向上させることとしている。2007 年の家庭用エアコンのストック COP は、暖房が 4.26、冷房が 3.85 であり³2050

年の目標値達成にはおよそ2倍まで技術改善が進む必要があるが、突然にCOPが8のエアコンが市場投入されるのではなく、COP6、COP7と段階的に効率が向上したエアコンが市場投入され、それが普及するその帰結としてCOP8のエアコンの市場投入と普及が達成されると考えられる。また当然ながら、市場投入された高効率機器を消費者が選択しなければ、以降の技術革新ならびにさらなる高効率エアコンの市場投入はおぼつかない。

筆者らは、Ashinaら⁴にて日本を対象に2050年までにCO₂排出量を1990年比で70%まで削減するための対策及び政策の導入道筋を、バックキャストイング手法を用いたモデル（バックキャストイングモデル）により定量的に検討した成果を報告した。本研究は、バックキャストイングモデルを改良し、技術進歩と段階的な市場普及ならびにそのための政策効果とを加味した評価を可能とし、G8ラクイラサミット⁵や2009年11月13日に発表された「気候変動交渉に関する日米共同メッセージ」⁶にて、日本の2050年における温室効果ガス排出量の削減目標を2050年に80%削減の目標に合意したことを受け、2050年の目標を1990年比で80%削減として、その実現への道筋を検討したものである。

2. 道筋検討手法

2.1 バックキャストモデルの概要

本モデルは、シナリオとして描かれた将来の社会・経済活動を実現するために、基準年から対象年までにエネルギーサービス需要を満足しつつ、どのような施策（対策および政策）を、いつどれだけ導入すればよいかをある基準のもと評価し、CO₂排出パス、投資パス等を提示するものである。モデルではエネルギーシステムを、活動量（外生条件）、サービス需要、需要側技術選択、二次エネルギー源選択、供給技術選択、一次エネルギー源選択の6段階に分類してモデル化し、CO₂排出量は一次エネルギー消費量に排出係数を乗じて求めるものとしている（図1）。

基準年のエネルギー消費や産業構造、CO₂排出構成は、既存統計^{1,7}をもとに設定する。対象年のエネルギー消費や産業構造、CO₂排出構成は、Fujinoら²の手法を用いて設定する。中間年における各部門の活動量は、シナリオそれぞれの社会変化や人口構成変化等を加味して設定し、外生条件として与えるが、エネルギー消費や技術構成、CO₂排出構成は内生的に推計する。定式化には混合整数計画法を用い、最適解の導出には汎用最適化プログラムGAMS（General Algebraic Modeling System）のCplexソルバを用いた。本モデルにおける推計フローの概要を図2に示す。

本研究では、基準年および目標年をそれぞれ2005年、2050年とし、5年ごとに2050年のCO₂排出量制約の下、活動量を維持しつつ、解析期間中の現在価値で合計した総費用が最小となるように、各年のCO₂削減対策への投資やエネルギー消費量、電力需要を推計して、将来目標であるCO₂排出量が1990年比80%削減できる社会を実現するための道筋を検討した。

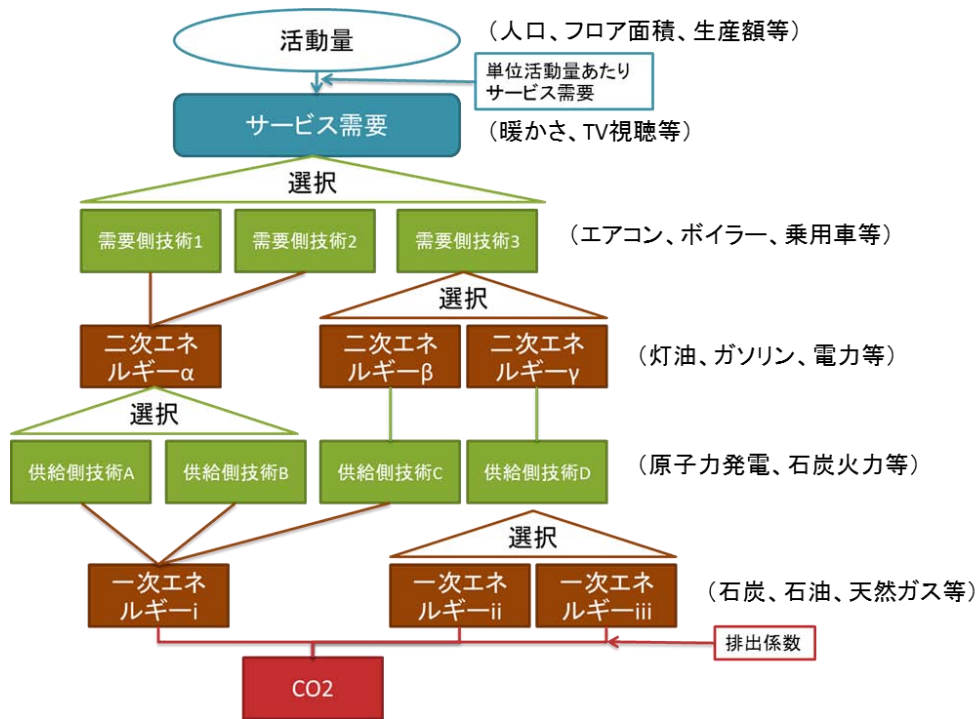


図1 バックキャストモデルの構造

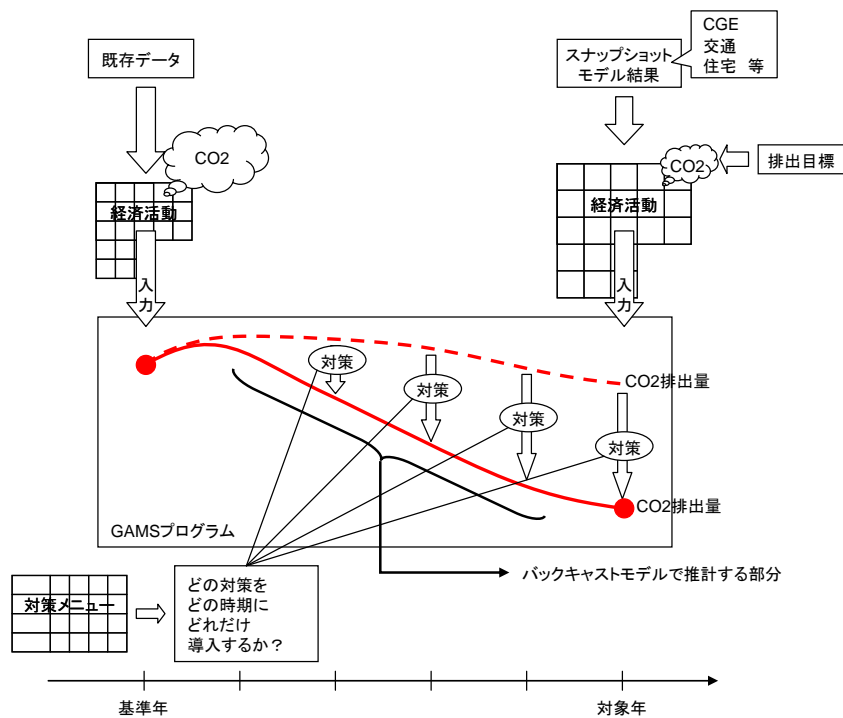


図2 バックキャストモデルにおける推計フローの概要

2.2 バックキャストモデルを用いた評価の概要

2050年CO₂排出量80%削減への道筋検討は、具体的には以下の4ステップによりモデルシミュレーションの条件を揃え、解析を実施した。以降において、大文字は内生変数、小文字はインデックスと外生変数を表す。

- 1) 対象年における将来像の検討
- 2) 将来サービス需要量の想定
- 3) 対策技術の定量データの整備
- 4) 対策技術それぞれの将来技術進歩の想定

(1) 対象年における将来像の検討

2050年に向けて、日本の社会経済がどのような方向に向かうかを正確に予測することは難しい。そこで、幅を持った将来像を2つ設けてそれぞれに80%削減への道筋を検討し、もってわが国における2050年CO₂排出量80%削減の実現可能性と道筋を示すこととした。

将来像の検討手法は、Fujinoら²と「2050日本低炭素社会」シナリオチーム⁸の手法を用いることとした。具体的には、(i) 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、幅を持った将来像を置き、(ii) 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、移動は必要か）、産業構造（多部門一般均衡モデルを用いて構造変化を推定）を定量化し、その想定下でのエネルギーサービス需要（例えば冷暖房需要量・給湯需要量（カロリー）、粗鋼生産量（トン）、交通量（人-km, t-km）など）を推計する。ついで、(iii) それぞれの社会におけるエネルギーサービス需要を満たし、かつ、温室効果ガス排出量80%削減を達成するエンドユース・エネルギー技術（エアコンや給湯器、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、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し、80%削減した社会像を定量的に描くものである。

本研究では、経済発展、技術志向のシナリオ（以降シナリオAとする）と地域重視・自然志向のシナリオ（以降シナリオB）の2つを置き、80%削減への道筋を検討することとした。表1に、想定したシナリオそれぞれの社会像の概要を、表2に代表的な社会指標をまとめて示す。また、エネルギー供給に関わる再生可能エネルギー導入可能量、原子力発電、炭素隔離貯留（Carbon Capture and Storage、CCS）の想定を表3にまとめる。

本解析では、CO₂削減技術として現在見通しが立っているもののみを対象とし、宇宙太陽光発電などCO₂削減に有望と指摘されているが、依然実現可能性の見通しが不透明な技術については対象外とした。具体的には、たとえば、家庭部門においては高効率エアコンやLED照明など、産業部門では革新的製造プロセス、高性能工業炉や燃料転換、運輸部門ではハイブリッド自動車や電気自動車、エネルギー供給部門では高効率火力発電やCCS併設

火力発電などであり、全部門合わせて約 470 種の技術を想定した。本研究で対象とした対策技術のうち、主なものを部門別に表 4 に示す。

このような想定のもと、1990 年比で CO₂ 排出量を 80%削減した社会について、一次エネルギー消費量ならびに CO₂ 排出量の構成を検討した結果を図 3、図 4 に示す。

表 1 想定した 2050 年の将来像の概要

概要	
シナリオ A	<ul style="list-style-type: none"> ・利便性・効率性の追求から都心への人口・資本の集中が進展。 ・集合住宅居住比率が高く、世帯当たりの居住人数は少ない。 ・GDP 成長率 1.0%/年（一人当たり 1.7%/年）を達成 ・高品質なものづくり拠点となる。
シナリオ B	<ul style="list-style-type: none"> ・ゆとりある生活の追及により、地方に人口・資本が分散化。 ・集合住宅比率はやや増加するが、家族とともに暮らす傾向。 ・GDP 成長率 0.5%/年（一人当たり 1.0%）を達成。 ・物質的豊かさから脱却した成熟社会を形成。

表 2 想定した 2050 年の将来像における代表的な社会指標のまとめ

	2005 年 (実績値)	2050 年	
		シナリオ A	シナリオ B
人口 (千人)	127,768	94,480	100,297
世帯数 (千世帯)	48,962	43,195	42,065
集合住宅比率 (%)	43	58	50
業務床面積 (百万 m ²)	1,759	1,721	1,781
GDP (10 億円)	506,000	770,000	596,000
粗鋼生産量 (千 t)	112,720	106,787	77,519
セメント生産量 (千 t)	73,931	50,680	44,643
自動車保有台数 (千台)	73,888	63,900	63,900
旅客交通需要 (百万人 km)	825,687	572,091	572,091
貨物交通需要 (百万 t-km)	334,979	246,176	246,176

表3 エネルギー供給面での主な条件

	単位	2005年	2050年	
		(実績値)	シナリオA	シナリオB
再生可能エネルギー	万kl	2808	14108	15712
太陽光発電	万kl	35	4227	4931
	[万kw]	[144]	[17300]	[20180]
風力発電	万kl	44	2525	2525
	[万kw]	[109]	[5000]	[5000]
水力(中小含む)	万kl	1660	3664	3664
	[万kw]	[2061]	[3656]	[3656]
地熱	万kl	76	515	515
	[万kw]	[53]	[361]	[361]
バイオマス発電	万kl	462	1002	1002
	[万kw]	[409]	[886]	[886]
太陽熱	万kl	61	490	490
バイオマス熱利用	万kl	470	1687	2587
原子力発電容量	万kW	4947	6806	6806
設備利用率	%	72	90	90
CCS	MtCO ₂	-	200	200

表4 低炭素社会実現に向けた主な対策技術

主な対策技術	
民生部門	高効率空調、地域熱供給(冷房・暖房・給湯)、電気ヒートポンプ給湯器、燃料電池給湯器、太陽熱温水器、高効率照明、高効率家電製品、高効率業務用電力機器など
運輸部門	電気自動車、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車、燃料電池自動車、自動車の燃費改善(軽量化等)、高効率鉄道、高効率船舶、高効率航空、バイオ燃料など
産業部門	革新的鉄鋼製造プロセス、革新的化学製造プロセス、紙パ製造プロセスの高効率化、セメント製造プロセスの高効率化、高性能工業炉、高効率モータ、高効率ボイラ、自家発高効率化、燃料転換など
エネルギー供給部門	高効率石炭火力発電、高効率天然ガス火力発電、原子力発電、一般水力発電、中小水力発電、地熱発電、太陽光発電、陸上風力発電、洋上風力発電、バイオマス発電、廃棄物発電、化石燃料改質水素製造、電気分解水素製造、炭素隔離貯留技術など

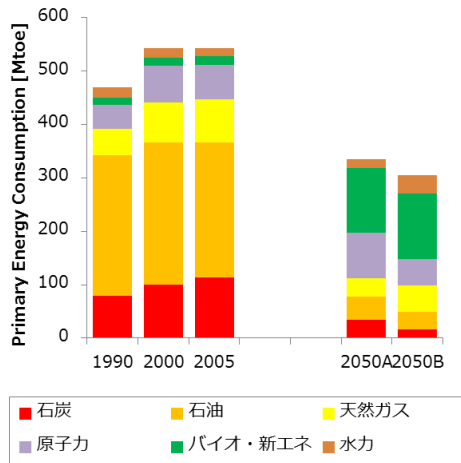


図 2 2050 年 CO₂ 排出量 80%削減社会における一次エネルギー消費量

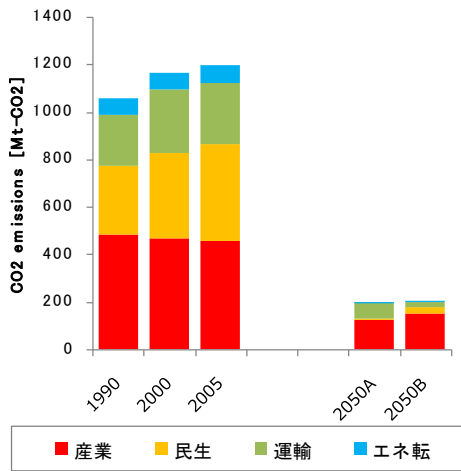


図 3 2050 年 CO₂ 排出量の構成

(2) 将来サービス需要量の想定

部門 i (産業部門、家庭部門など) のサービス j (冷房需要、普通自動車旅客需要など) における将来のサービス需要量は、シナリオ A、B それぞれの社会想定に応じて外生的に設定する。たとえば、鉄鋼部門については将来の鉄鋼生産量であり、家庭部門については、世帯数と世帯あたりの活動量から算出する。一例として、シナリオ A における家庭部門のサービス需要量の推移を図 5 に示す。

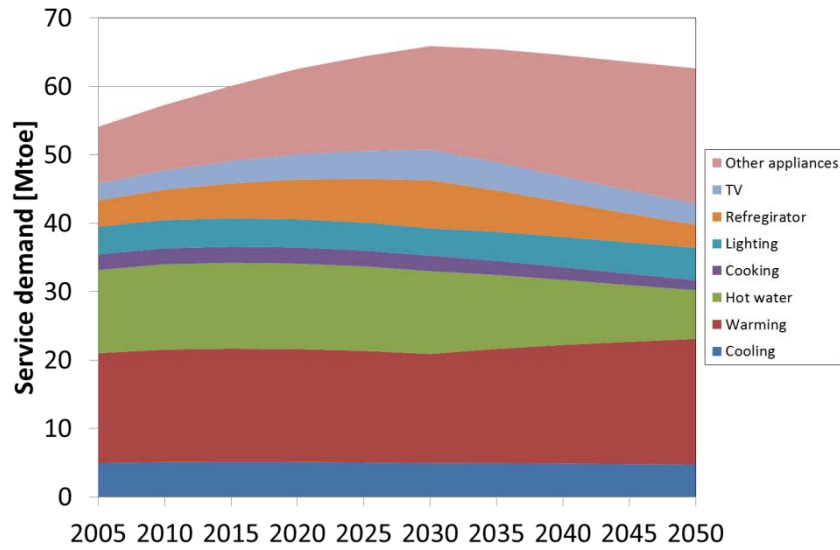


図5 家庭部門のエネルギーサービス需要（シナリオ A）

(3) 対策技術の定量データの整備

対策技術それぞれについて、(i) 初期ストックや設備利用率、効率といった技術特性に関わるデータ（図6）と、(ii) 導入に要する期間（最短導入年数）、(iii) 導入に要する費用を整備する。技術特性に関するデータは、経済産業省のまとめた超長期エネルギー技術ビジョン⁹等を参考に設定した。

なお、本モデルでは廃棄される設備の割合は設備導入からの経過年数を変数とした Weibull 分布に従うものとし、導入からの年数が対策技術の寿命の2倍に達した時点で完全に廃棄されるものと仮定した（式2）。ここで、 $S_m(t, h)$ は、コホート h の対策技術 m の t 期時点での残存率であり、 t_h はコホート h の導入年、 l_m は寿命を表す。 α_m 、 β_m は Weibull 分布の形状パラメータであり、対策技術ごとに外生的に与える。

$$S_m(t, h) = \begin{cases} \exp\{-\alpha_m \times (t - t_h)^{\beta_m}\} & (\text{if } t - t_h \leq 2 \times l_m) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha_m = \frac{\log(2)}{l_m^{\beta_m}} \quad (3)$$

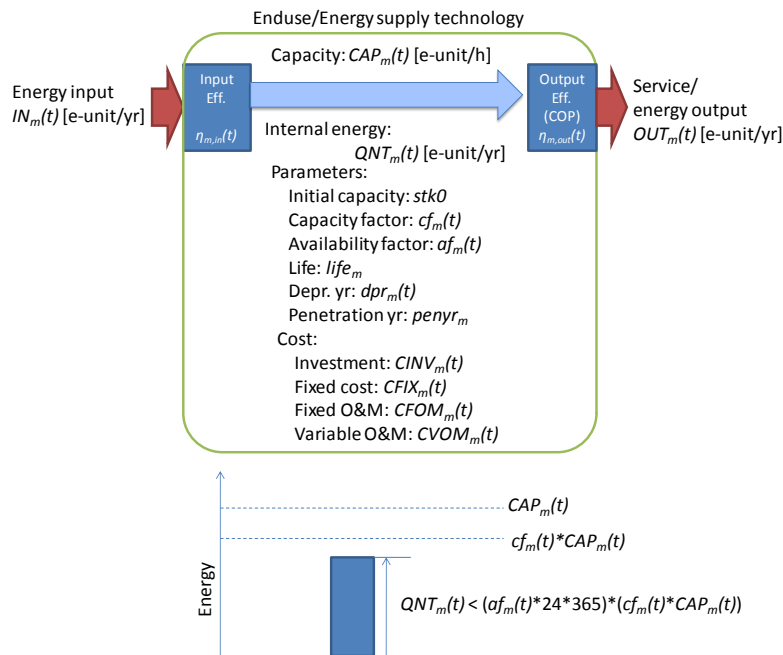


図 6 本研究における技術のモデル化と所要パラメーター一覧

対策技術の中には、輸入バイオ燃料の導入など即時実施が可能なものもあるが、多くの場合普及には数年～数十年を要する。また、過度な速度での対策技術の導入促進は、不要な資源消費の増加を招き、かえって環境に負荷を与える可能性もある。そこで、対策技術それぞれについて導入や普及に要する最短年数を、原則的に寿命と想定しつつ、不明なものについては適宜各種資料や専門家インタビュー等を通じて収集、整備した。道筋検討にあたっては、この対策技術導入に要する期間よりも短期での普及率増加は不可能として制約条件のひとつとして組み入れている（図 7）。

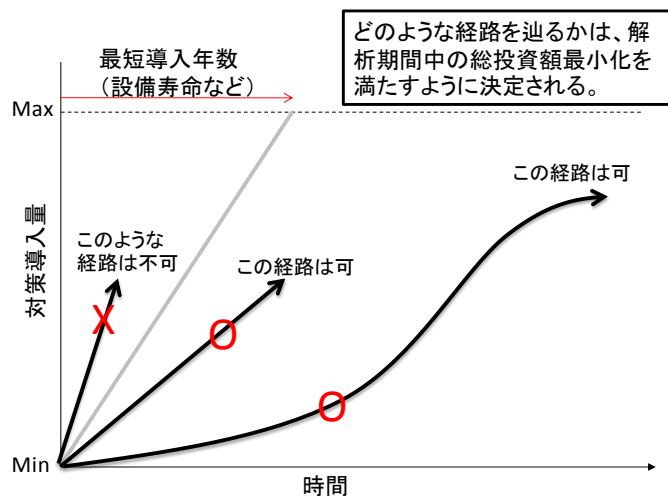


図 7 実施に要する期間と対策技術導入経路評価の関係

対策導入に要する費用は、(i) 投資コスト（設備費）、(ii) 運転維持費（固定分）、(iii) 運転維持費（変動分）、(iv) エネルギーコスト（燃料費）の4種を考慮した。本モデルで想定しているキャッシュフローの例を、図8に示す。最適化計算では、各年の総和を利率3%にて割引した値の期間合計値を最適化の基準として用いている。

対策技術それぞれの投資コスト、運転維持費は、省エネルギーセンター¹⁰、国際エネルギー機関（IEA）¹¹、環境省¹²、中央環境審議会資料、日本自動車工業会¹³等に加え、市場調査を実施して設定した。

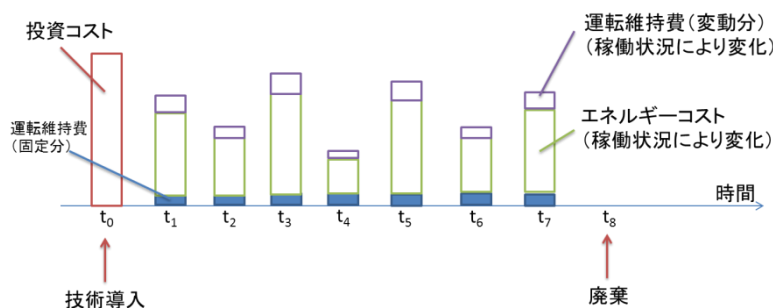


図8 本モデルにおけるキャッシュフローの一例

(4) 対策技術それぞれの将来技術進歩の想定

ある対策技術に関するさらなる技術進歩や、現在のものよりもさらにエネルギー効率の高い技術の市場投入には、消費者がエネルギー効率の高い技術への選好を示すことがひとつのきっかけであると考えられる。そこで、本研究では対策技術それぞれについて現時点のストック平均技術、現時点でのBAT技術（Best Available Technology）、将来のBAT技術の3分類を設け、それぞれに2.2(3)で述べた定量データを整備するとともに、現時点でのBAT技術がある程度市場シェアを獲得しなければ、将来のBAT技術は市場投入されないとの条件を置いて解析した。なお、将来のBAT技術は必ずしもひとつのみではなく、技術開発の見通しによっては、複数の将来BAT技術を想定した対策技術もある。将来BAT技術の市場投入時期は、超長期エネルギー技術ロードマップ⁹にて示された時期よりも前倒しされることはないとして設定した。

図9は、バックキャストモデルに新たに組み込んだ技術進歩プロセスの模式図である。現時点あるいは将来のBAT技術の市場シェアが、ある閾値を超えると次のBAT技術が市場に投入され、同時に最も古い技術が退出する。消費者が積極的にBAT技術を選択する場合（図9(a)）は、 t_0 期と t_1 期にはストック技術と現時点BATのみが市場に存在し、消費者はいずれかを選択する。 t_1 期に現時点BAT技術が閾値を超えると、 t_2 期の市場には将来BAT技術が新たに選択可能となるとともにストック技術が市場からなくなり、消費者が選択できるのは現時点BAT技術か将来BAT技術のいずれかとなる。さらに t_2 期において将来BAT技術のシェアが閾値を超えていることから、 t_3 期には将来BAT2技術が新たに選択可能とな

る。いっぽう消費者が BAT 技術の選択に消極的なケース（図 9(b)）では、 t_1 期でも多くの消費者はストック技術を選択していることから、新たな技術の市場投入が見送られ、 t_2 期でようやく現時点 BAT 技術の市場シェアが閾値を超えることから、 t_3 期に将来 BAT 技術の市場投入とストック技術の退出となり、将来 BAT②技術は現れないままとなる。

本研究では、次世代技術が市場投入される閾値を 16%と置いた。これは、Rogers¹⁴において、新製品の爆発的普及は全消費者の 2.5%を占めるイノベーターと 13.5%を占めるアーリーアダプターに普及して以降、すなわちアーリーマジョリティ層からとしていることから、この閾値（16%）を超えた段階で次の新製品の市場投入がなされるであろうと想定したものである。

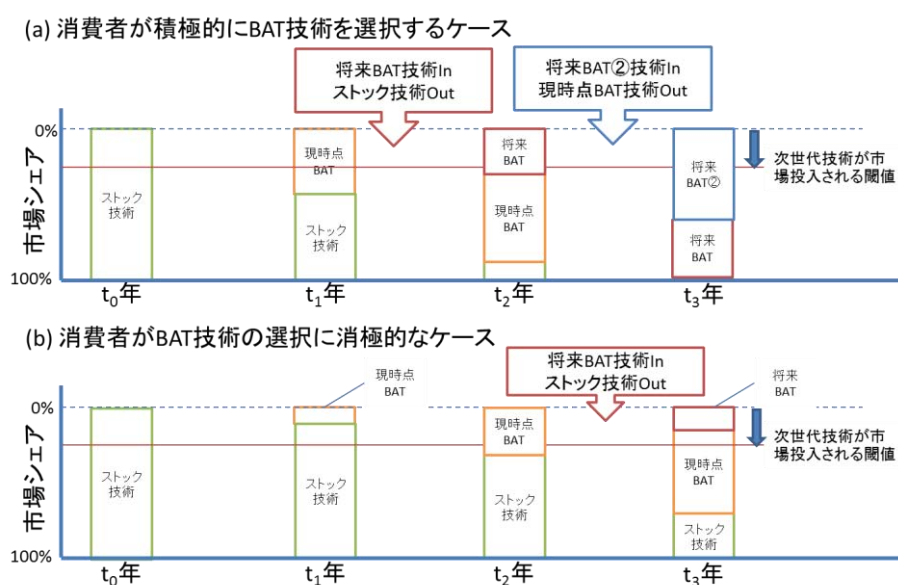


図 9 技術進歩プロセスの模式図

2.3 バックキャストモデルを用いた定量検討

(1) モデルにおける前提条件

本道筋検討にあたっては、基準年 t_0 を 2000 年とし目標年を 2050 年として解析を実施した。なお、計算上は終端効果を除くため最終年度 t_L を 2070 年とし、2050 年以降のサービス需要量は 2050 年までの傾向を外挿して設定し、CO₂ 削減制約は 2050 年と同様と置いた。なお、すでに 2010 年も大部分過ぎていることから、2008 年から 2009 年の傾向を外挿して 2010 年を想定し、解析では 2005 年ならびに 2010 年は所与の外生条件として取り扱うこととした。

また、公表されているエネルギーに関わる政策の目標値も所与の条件として取り扱うこととし、また、公表されているエネルギーに関わる政策の目標値も所与の条件として取り扱うこととし、本研究では、2020 年の再生可能エネルギー導入比率を一次エネルギー供給比 10% 以上との制約条件を設けた。なお、再生可能エネルギーには、太陽光、風力、バイオマス、太陽熱、地熱、中小水力お

よび大規模水力を含む。

(2) 最適化における目的関数

各期の対策技術 m の対策導入フロー量 $CAP_{f,m}(t)$ [unit] とサービス種 j へのサービス供給量 $OUT_m(t, j)$ [Mtoe] は、原則的には解析期間中の費用最小化を通じて計算される。対策導入量の単位 (unit) は、エアコンや冷蔵庫、自動車では台を、発電設備では kW と対策技術ごとに異なるが、サービス供給量や一次エネルギー消費量は Mtoe で計るものとしている。

費用は投資コスト (設備費)、運転維持費 (固定分および変動分)、燃料費を対象として、割引率 $r=3\%$ で現在価値に換算して評価した。

$$\min TC = \sum_{\tau=t_0}^{t_f} \left\{ \frac{1}{(1+r)^{\tau-t_0}} \times \sum_m (INV_m(\tau) + FOM_m(\tau) + VOM_m(\tau) + VAR_m(\tau)) \right\} \quad (4)$$

TC : 解析期間中の費用総計 [円]

$INV_m(t)$: 対策技術 m の t 期の投資コスト (設備費) [円]

$FOM_m(t)$: 対策技術 m の t 期の運転維持費 (固定分) [円]

$VOM_m(t)$: 対策技術 m の t 期の運転維持費 (変動分) [円]

$VAR_m(t)$: 対策技術 m の t 期の燃料費 [円]

対策技術 m の投資コスト (設備費) $INV_m(t)$ [円] は、 t 期の対策導入フロー量 $CAP_{f,m}(t)$ [unit] に単位設備容量あたりの費用 $ucfix_m$ [円/unit] を乗じて求める。

$$INV_m(t) = ucfix_m \times CAP_{f,m}(t) \quad (5)$$

運転維持費 (固定分) $FOM_m(t)$ [円] は、 t 期に残存する設備容量 $CAP_m(t)$ [unit] に、単位設備容量あたりの運転維持費 $ucfom_m$ [円/unit] を乗じることにより算出する。

$$FOM_m(t) = ucfom_m \times CAP_m(t) \quad (6)$$

運転維持費 (変動分) $VOM_m(t)$ [円] は、サービス供給量 $OUT_m(t, j)$ [Mtoe] と単位サービス供給量あたりの運転維持費 $ucvom_m$ [円/Mtoe] より求める。

$$VOM_m(t) = ucvom_m \times OUT_m(t, j) \quad (7)$$

なお、燃料費 $VAR_m(t)$ [円]は、エネルギーシステム全体の一次エネルギー供給量から求めることとし、個々の対策技術での燃料費は、最適解導出後に求めることとしている。

(3) サービス需要の算出

サービス需要 $d(t,i,j)$ [Mtoe] は、部門 i サービス種 j の活動量 $a(t,i,j)$ [unit] (unit は活動ごとに異なり、家庭部門では世帯数、業務部門では床面積などである) に、単位活動量あたりのサービス需要 $u(t,i,j)$ [Mtoe/unit] を乗じて求める。

$$d(t,i,j) = a(t,i,j) \times u(t,i,j) \quad (8)$$

低炭素社会に向けた対策の中には、高断熱住宅の普及やコンパクトシティ化による旅客・運輸交通需要の削減など社会インフラの転換に関する対策も不可欠であるが、本研究ではそれらはエネルギー需要に織り込み、モデルでは主として対策技術の導入に絞って検討することとしている。

(4) エネルギー消費量のバランス

道筋検討に当たっては、CO₂ 制約の有無にかかわらず外生的に与えたサービス需要を満足し、かつ対象とするエネルギーシステム全体でエネルギーの需要と供給が等しくなくてはならない。すなわち、すべての対策技術からのエネルギーサービス供給量 $OUT_m(t)$ [Mtoe] の総和は、エンドユース技術においてはサービス需要 $d(t,i,j)$ [Mtoe] と、エネルギー供給技術ではエンドユース技術の燃料需要 $IN_m(t)$ [Mtoe] と一致する。

For enduse technology:

$$\sum_{m \in \text{Enduse technology}} OUT_m(t) = d(t,i,j) \quad (9)$$

For supply-side technology:

$$\sum_{m \in \text{Supply technology}} OUT_m(t) = \sum_{m \in \text{fuelk}} IN_m(t) \quad (10)$$

(5) CO₂ 排出量

t 期の CO₂ 排出量 $CO2(t)$ [Mt-CO₂]は、エネルギー供給技術における一次エネルギー消費量 $IN_m(t)$ [Mtoe] に、一次エネルギー種 r ごとの CO₂ 排出係数 emf_r [Mt-CO₂/Mtoe] を乗じて求める。

$$\sum_r \left\{ emf_r \times \left(\sum_{m \in \text{Supply technology}} IN_m(t) \right) \right\} = CO2(t) \quad (11)$$

なお、一次エネルギー種ごとの CO₂ 排出係数 emf_r [Mt-CO₂/Mtoe] は解析期間を通じて一定とおいた。

道筋検討にあたっては、2050 年以降の CO₂ 排出量 $CO2(t)$ [t-CO₂] に 1990 年の CO₂ 排出量 $CO2_{1990}$ [MtC] のマイナス 80% 以下になるように制約条件を課した。

$$CO2(t)_{t \geq 2050} \leq (1 - 0.8) \times CO2_{1990} \quad (12)$$

(6) 対策技術導入量に関する制約

t 期における対策技術 m の設備容量 $CAP_m(t)$ [unit] は、追加的な制約のない場合にはその期に稼働しているコホート h のストック $CAP_{m,h}(h,t)$ [unit] の総和にて表される。ここで、 H_t は t 期に稼働可能なコホートを表す集合である。

$$CAP_m(t) = \sum_{h \in H_t} CAP_{m,h}(h,t) \quad (13)$$

各期に稼働しているコホート h のストック $CAP_{m,h}(h,t)$ [unit] は、コホート h の対策導入フロー量 $CAP_{m,f}(h)$ [unit] に、残存率 $S_m(t,h)$ [-] を乗じて求める。

$$CAP_{m,h}(h,t) = S_m(t,h) \times CAP_{m,f}(h) \quad (14)$$

コホート h の対策技術導入フロー量 $CAP_{m,f}(h)$ [unit] は、対策技術の最短導入年数 s_m [年] に基づく制約条件を課した。具体的には、各年の部門 i サービス j のエネルギーサービス需要の総和を最短導入年数 s_m [年] で除して年あたりの最大導入可能量（フロー）を求め、対策技術導入フロー量はそれ以下になるように制約している。

For enduse technology:

$$CAP_{m,f}(h) \leq \frac{\sum_{i,j} d(t,i,j)}{s_m} \quad (15)$$

For supply-side technology:

$$CAP_{m,f}(h) \leq \frac{\sum_{m \in \text{fuel}k} IN_m(t)}{s_m} \quad (16)$$

2050年の対策技術からのサービス供給量 $OUT_m(2050)$ [Mtoe] は、2.2(1)にて検討した 2050年将来像における対策技術別サービス供給量 $q_{m,2050}$ [Mtoe]に合わせる。

$$OUT_m(2050) = q_{m,2050} \quad (17)$$

3. CO₂ 排出量 80%削減社会への道筋検討結果

3.1 CO₂ 排出量およびエネルギー消費構造の変化

2.2 節にて検討したシナリオ A、B に沿って、サービス需要を満足しつつ 2050 年 CO₂ 排出量 80%削減を実現するための道筋を、期間中の総費用最小化を目的関数としたバックキャストモデルを用いて検討した（図 10）。なお、図中に示した技術固定ケースとは、2050年の CO₂ 削減制約を置かず、機器の新規導入に当たって 2050 年までずっと 2005 年の機器のみが選択可能な状態と想定したケースである。なお、2.3 節にて述べたように、エネルギーサービス需要量は、高断熱住宅の普及や都市のコンパクト化による交通需要の削減、交通流対策など需要削減対策の一部を織り込んだものになっており、これは技術固定ケースでも同様である。また、2020 年の再生可能エネルギー導入目標（一次エネルギー比 10%）制約も課しており、技術固定ケースは厳密に CO₂ 排出量削減目標を持たない場合の結果ではないことに注意されたい。

技術固定ケースでは、シナリオ A、B とともに CO₂ 排出量は 2015 年をピークに減少し、2050 年にはシナリオ A（固定ケース）で 1,075 Mt-CO₂（1990 年比プラス 2%）、シナリオ B では 930 Mt-CO₂（同マイナス 12%）と、需要削減対策の影響を織り込み済みではあるものの、目指すべき 80%削減の達成にはほど遠い。

2050 年に CO₂ 削減目標として 1990 年比 80%削減制約を課したケースでは、シナリオ A、B とともに 80%削減に至るパスは類似の傾向になる。CO₂ 削減に貢献する対策技術の導入は 2010 年以降から開始され、1990 年比で見た削減率は、シナリオ A～B の幅で、2020 年にはマイナス 16%～20%、2030 年にはマイナス 31%～35%、2040 年にはマイナス 53%～56%となる。

CO₂ 削減制約を課したケースについて、部門別の CO₂ 削減量を図 11 に示す。CCS を除くと、シナリオ A、B 共に電力部門での削減量が最も大きく、以降産業部門、運輸部門、家庭部門、業務部門と続く。これは、最終需要部門における電力需要削減による CO₂ 削減効果を電力部門における削減と見なしていることも一因である。また、いずれの部門でも CO₂

削減は解析期間初期から開始される。CCS は 2030 年以降徐々に導入されるが、2050 年のエネルギー構造の違いや想定した活動量の違いにより、2050 年の CCS による CO₂ 隔離量は、シナリオ A では 200 Mt-CO₂ に対してシナリオ B では 167 Mt-CO₂ にとどまっている。

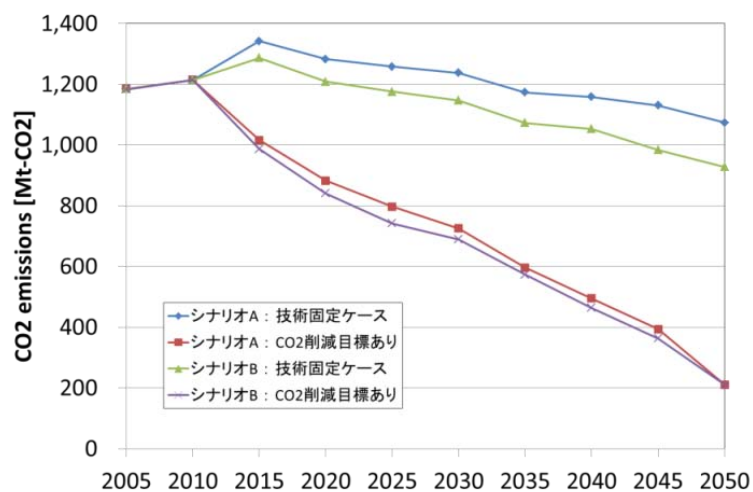
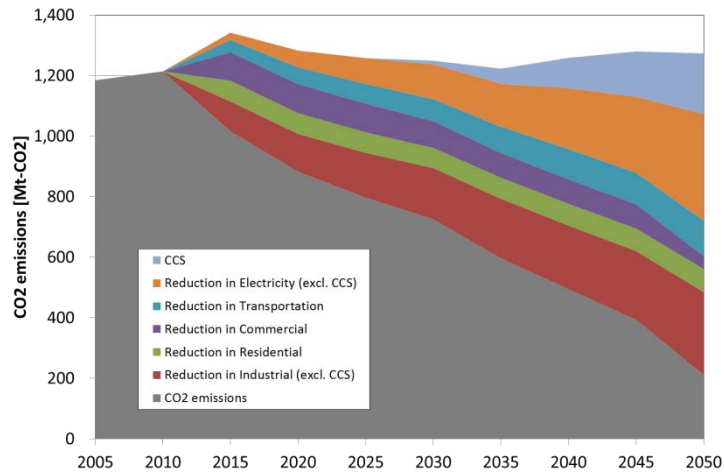
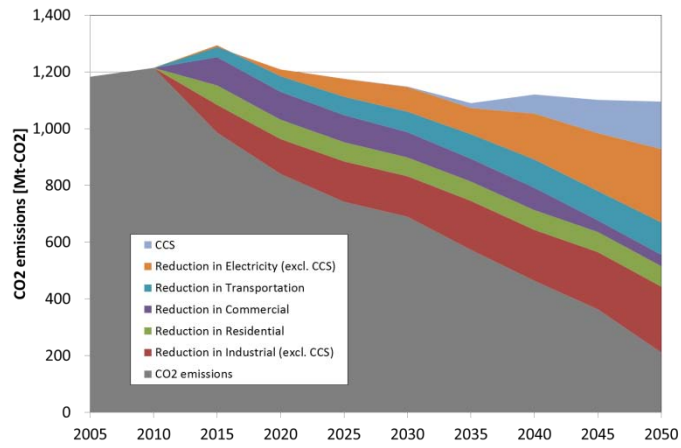


図 10 2050 年 CO₂ 排出量 80%削減社会を実現するための CO₂ パス



(a) シナリオ A



(b) シナリオ B

図 11 部門別 CO₂ 削減量の推移 (技術固定ケース比)

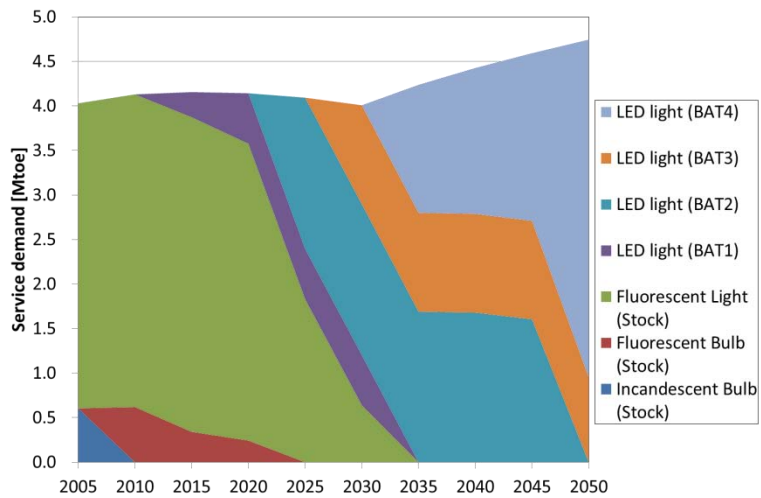


図 12 家庭部門照明サービス需要における Enduse 技術構成の推移

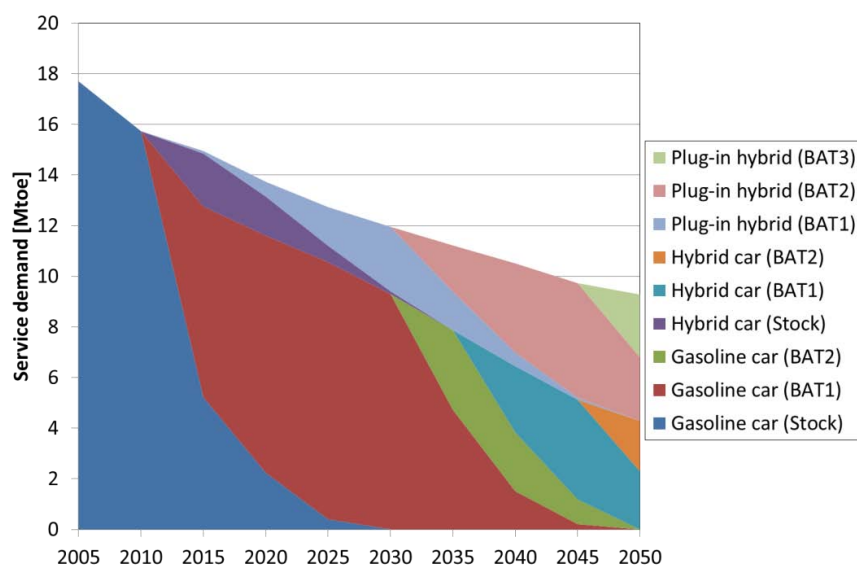


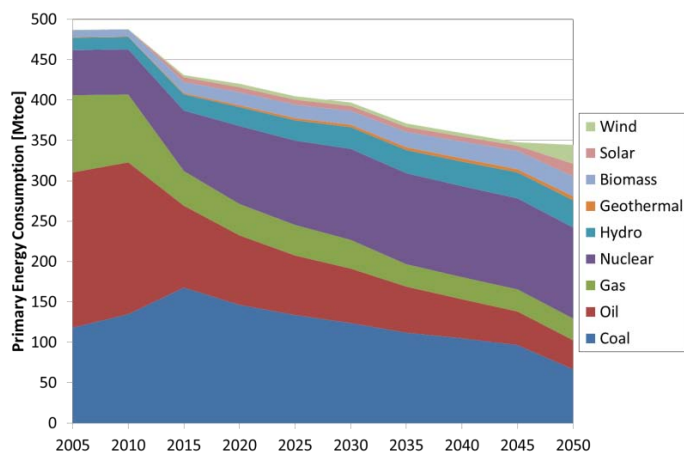
図 13 旅客普通自動車サービス需要における Enduse 技術構成の推移

CO₂削減目標を課すことによる対策技術普及の様子について、産業部門農業サービス需要を図 12 に、旅客普通自動車サービス需要を図 13 に例として示す。サービス需要の総量は所与であり、CO₂削減目標の有無により変わることはないとしている。

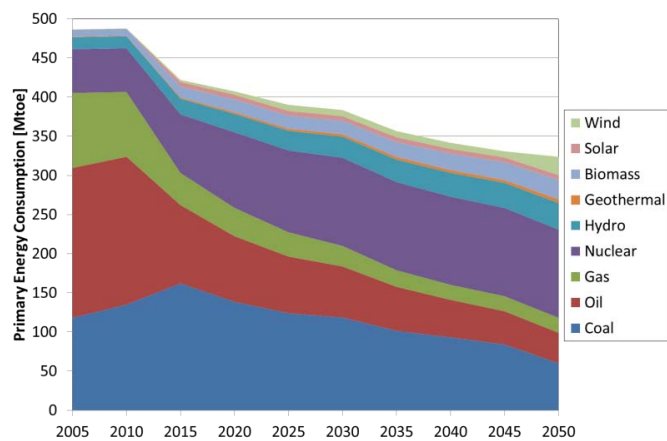
いずれでも、技術固定ケースでは 2005 年の技術別シェアを保ったまま 2050 年まで推移する。CO₂削減制約を課すことにより、解析期間初期から BAT 技術の導入が進み、複数の BAT 技術を想定している場合には、市場投入が可能となった時期から順次普及が開始される。これは、他部門、他サービス、シナリオ A、B 問わず同様の傾向を示す。

2050 年 CO₂排出量 80%削減に至る一次エネルギー消費量の推移を、燃料源別・シナリオ別に図 14 に示す。原子力発電および再生可能エネルギーについては、EDMC¹と同様に 2,105 kcal/kWh（発電効率 40.88%）を用いて一次エネルギー換算した。

いずれのシナリオでも、解析において BAT 技術を想定していることに加え、解析期間初期には早期対策の実施により BAT 技術の導入が 2010 年以前と比較して急激に進むため、他の期間と比較して高い省エネが達成されている。シナリオ A では、原子力発電および CCS 併設設備導入の影響が大きく、再生可能エネルギーは 2050 年直前にならないと導入されない。シナリオ B では、シナリオ A と同様原子力発電と CCS 併設設備の導入が進んでいるが、相対的に早い時期から再生可能エネルギーの導入が進む。



(a) シナリオ A



(b) シナリオ B

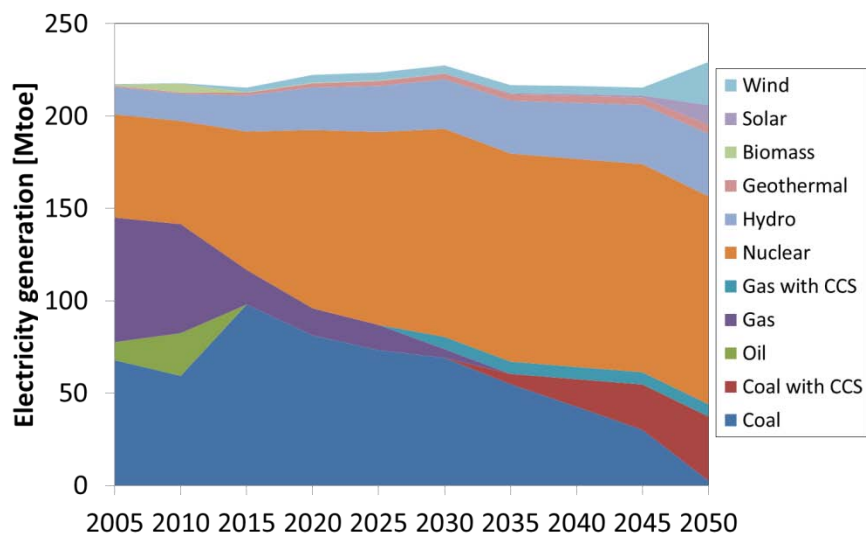
図 14 2005 年から 2050 年までの一次エネルギー消費量の推移

図 15 には、シナリオ A、B それぞれの発電構成の推移を示す。一次エネルギー消費量とは異なり、CO₂ 排出量の削減制約を課しても電力需要総量はほぼ横ばいとなる。これは、CO₂ 削減制約を課すことにより、最終需要部門において灯油暖房や石油ボイラといった化石燃料直接利用技術から、エアコン、ヒートポンプ熱源のような電力利用機器への転換（電化）が進むことを示している。

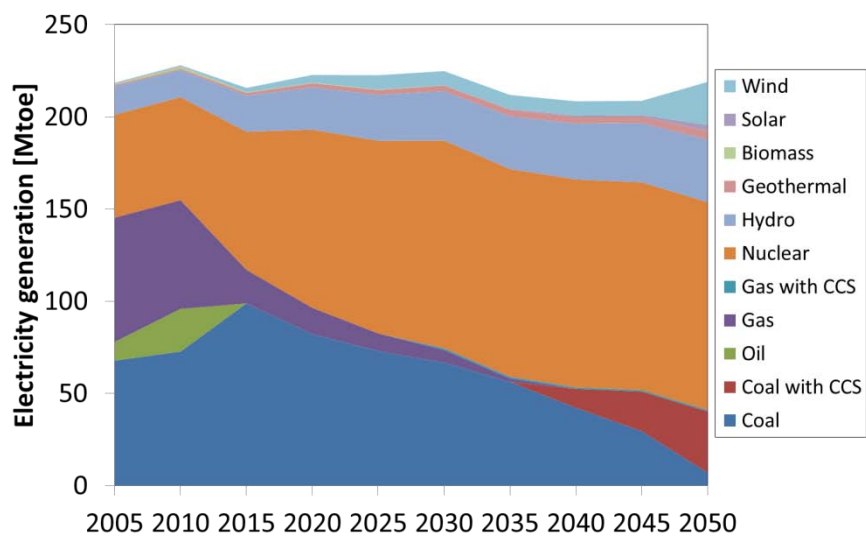
シナリオ A、B とともに 2050 年に向けて化石燃料を用いた火力発電所の割合が低下し、原子力発電所や再生可能エネルギー、特に水力発電（中小規模）の割合が高まる。また、2035 年からは、CCS 併設の石炭火力発電所や天然ガス火力発電所の導入が進む結果、2050 年にはいずれのシナリオでも発電部門はほぼゼロエミッション化される。

なお、2010 年は、2008 年および 2009 年の実績値を延伸して想定しているため、原子力発電所の稼働率を 62%と低く想定している。そのため、石油火力発電所の発電量増加により電力需要を満たしている。これは、2007 年の実績において原子力発電所の発電量低下分

を石油火力発電所の稼働によりまかなう対応がなされており、想定に沿った妥当な結果と考えられる。



(a) シナリオ A



(b) シナリオ B

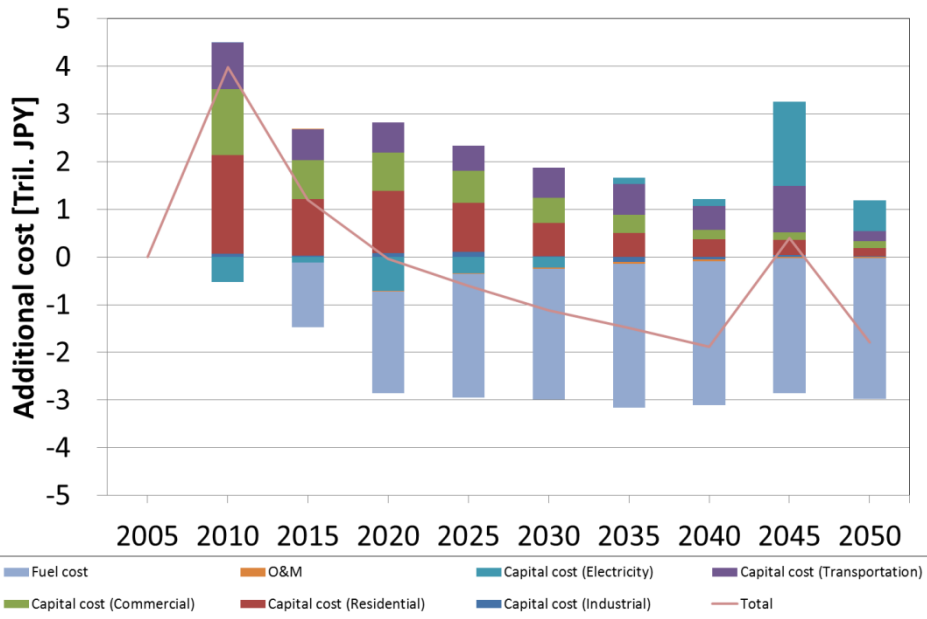
図 15 2005 年から 2050 年までの発電構成の推移

3.2 80%削減に至るコスト

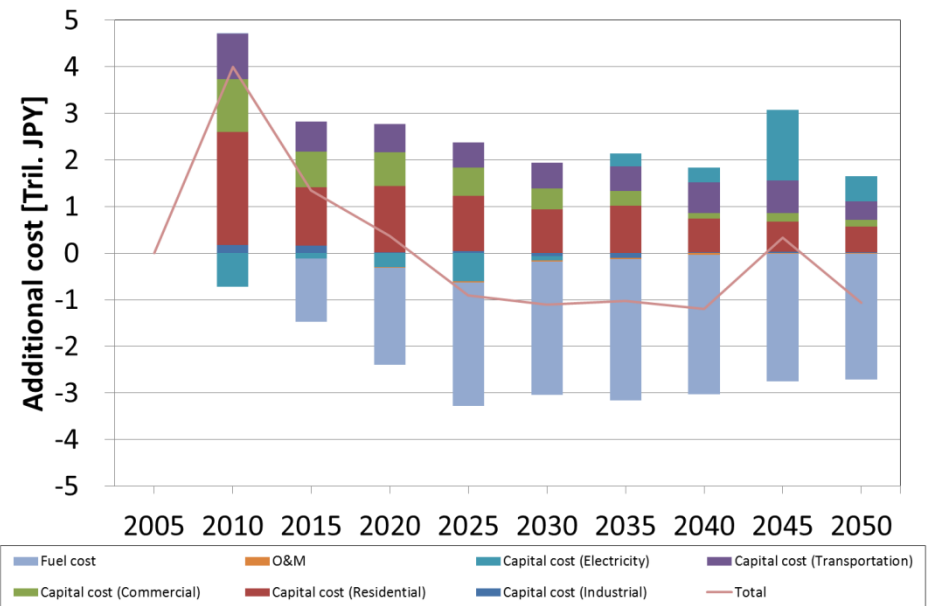
2050年CO₂排出量80%削減社会実現に要する総費用最小化の観点から得られた道筋について、技術固定ケースと比較した年間追加投資額の推移に着目すると、シナリオA、Bのいずれでも2010年には4兆円程度の追加投資を要する（図16）。なお、この投資額には、高断熱住宅・建築物の費用や、コンパクトシティ化のような都市インフラの変更に要する費用は含めていない。また、再生可能エネルギー導入量が拡大することによって必要となる、周波数変動や電圧変動吸収のための系統電力対策費用も対象としていないことに留意が必要である。

部門別に見ると、家庭部門への追加投資額が最も大きく、業務部門、運輸部門、産業部門と続く。2015年以降は、年間の追加設備費は2兆円～3兆円となるが、エネルギー消費量削減により燃料費が2兆円～3兆円節減できることもあり、追加費用の総額ではシナリオAは最大マイナス2兆円、シナリオBではマイナス1兆円となり、エネルギーシステム全体で見ると技術固定ケースと比較して安価になる可能性が高いことが示唆されている。発電部門の設備費は、技術固定ケースと比較して電力需要が減少するために解析期間初期には0.5兆円程度の削減となる。しかし、2050年に近づくにつれてCCS併設火力などの高額な設備の導入が進むために、追加設備費を要することとなる。2045年には、特に発電部門にてCO₂削減に有効であるが設備費の高額な対策技術が導入されることにより追加設備費が3兆円程度必要となるため、追加費用の総額ではシナリオAで0.5兆円、シナリオBで0.3兆円となる。

2050年までに必要な設備費の追加分は、年平均2.2兆円（シナリオA）～2.4兆円（シナリオB）である。いっぽうでシナリオA、Bともに燃料費節減分が年平均2.3兆円見込めるために、追加費用全体で見るとシナリオAでマイナス0.15兆円、シナリオBで0.09兆円となる。本研究では、対策技術の投資費用に関する習熟効果を見込んでいないが、今後学習効果が働くことにより対策技術の投資費用通減が見込めるならば、CO₂排出量80%削減制約を課すケースの方が、技術固定ケースと比較してエネルギーシステム全体の費用では安価になる可能性がある。



(a) シナリオ A



(b) シナリオ B

図 16 年間追加投資額の推移 (技術固定ケース比、割引率 3%)

4. まとめ

日本において、将来予期されるサービス需要を満たしつつ、2050年までにCO₂排出量を1990年比で80%削減した社会（低炭素社会）は実現可能である。本解析を通じ、実現に要する総費用を最小化する観点では、2050年低炭素社会の実現にはシナリオA～Bの幅で、2020年にはマイナス16%～20%、2030年にはマイナス31%～35%、2040年にはマイナス53%～56%の削減率を達成しておくことが望ましいことが明らかとなった。このとき、短期的には特に民生部門と運輸部門において大きな投資が必要となるが、長期的に見るとエネルギー消費量の削減分により回収が可能である。さらに将来において技術の習熟効果が起こるならば、投資額を超えたリターンを得ることが可能であることも示唆されている。

CO₂削減対策に関するモデル分析結果の中には、将来の技術開発の進展を待ってから対策をした方がよい、と指摘を行っているものもある。しかし、技術開発や市場投入の可能性は市場における消費者の嗜好によっても左右されること、現在の太陽電池市場で見られているような技術普及の習熟効果、建築物や都市システム、道路・鉄道等の交通システム、発電所や送電線、ガスパイプラインなどのエネルギーインフラなどを低炭素インフラに変えていくためのリードタイムなどを考慮すると、早めにCO₂削減に取り組むことが低炭素社会実現の可能性を高めることにつながる。さらに、2050年までの累積CO₂排出量が将来の気温上昇に与える影響まで加味すると、早期の対策開始の必要性の論拠が強まることが予想されるが、本件等では分析・評価の対象に含めていない。

本研究を通じてわかったことは、コスト効率的に低炭素社会を実現するためには、早い段階で民生部門の高効率機器や、運輸部門の次世代自動車など、今後の技術革新により効率改善の余地が大きい技術に集中的に投資を行い、市場を拡大し効率を高めた将来技術の投入を促していくことが極めて重要であるということである。また、技術の習熟効果も加味すると、早期の技術投入は、将来技術の費用低減にもつながり、よりコスト効率的な低炭素社会構築に寄与する可能性が高い。長期の視点を俯瞰的に見据えた科学的な知見に基づき、政治のリーダーシップにより正しい方向に最初の一步を踏み出すことが重要である。

謝辞

本研究は、環境省の環境研究総合推進費戦略的研究開発領域（S-6）の支援のもと実施されたものである。また、検討においては環境省の中長期ロードマップ検討会、特にマクロフレームワーキンググループの委員の皆様より多くの貴重な知見をいただくことができた。関係各位のご支援、ご協力に感謝申し上げます。

参考文献：

1. Energy Data and Modeling Center, *Handbook of Energy & Economic Statistics in Japan*. Energy Conservation Center: Tokyo, 2010.
2. Fujino, J.; Hibino, G.; Ehara, T.; Matsuoka, Y.; Masui, T.; Kainuma, M., Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050. *Climate Policy* **2008**, 8, (Supplement), S108-S124.
3. The Energy Conservation Center Japan, Residential Energy Statistics Yearbook 2009. **2009**.
4. Ashina, S.; Fujino, J.; Masui, T.; Fujiwara, K.; Hibino, G.; Kainuma, M.; Matsuoka, Y., Japan roadmaps toward low-carbon society by backcasting: Optimal CO₂ reduction pathways and investment timing for low-carbon technologies. *Journal of Renewable and Sustainable Society* **2010**, 2, (3), 031001-1-17.
5. G8 L'Aquila Summit, Responsible Leadership for a Sustainable Future. **2009**.
6. Japan-U.S. Summit Meeting, Japan-U.S. Joint Message on Climate Change Negotiations. **2009**.
7. Japan Statistics Bureau, Japan statistical yearbook. **2010**.
8. "2050 Japan Low-Carbon Society" scenario team, Development of Narrative Visions for Low-Carbon Societies (LCSs). **2009**.
9. Institute of Applied Energy, Strategic Technology Roadmap in Energy Field -Energy Technology Vision 2100-. **2006**.
10. Energy Conservation Center, *Energy Conservation Catalog [in Japanese]*. 2009; Vol. 2009.
11. International Energy Agency, Energy Technology Perspective. **2009**.
12. Ministry of Environment, Technology assessment for mitigation of global warming. **1995**.
13. Japan Automobile Manufacturers Association Inc., Automobile guidebook [in Japanese]. **2008**.
14. Rogers, E. M., Diffusion of Innovations, 5th Edition. **2003**.