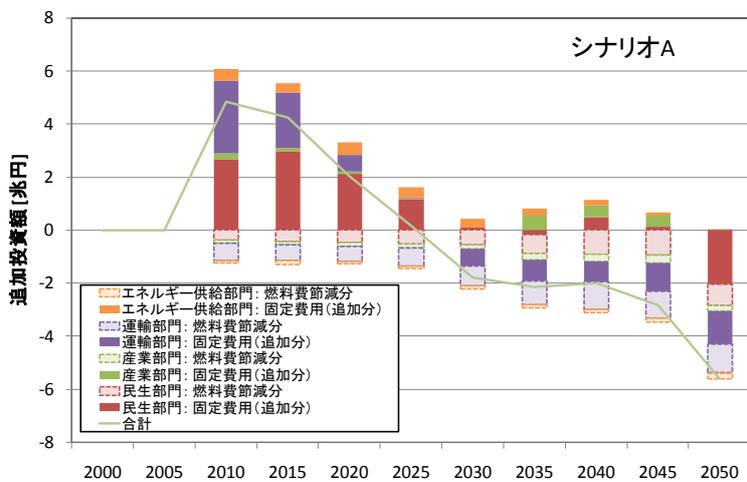
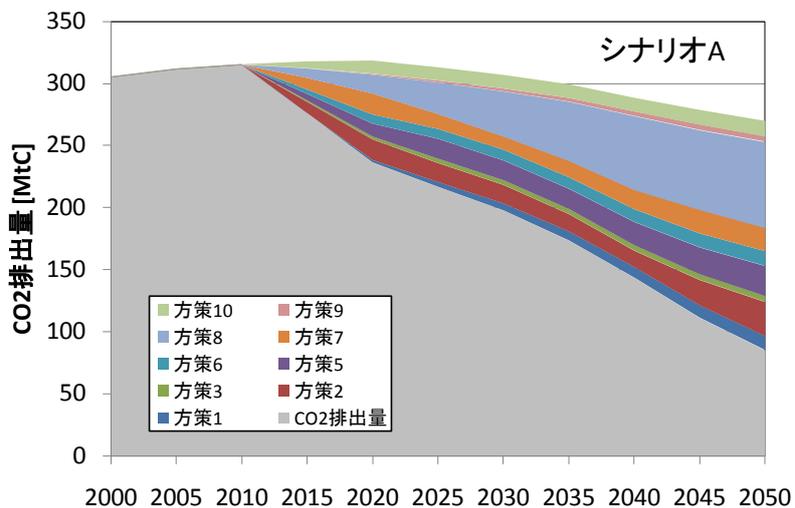


低炭素社会に向けた道筋検討



2009年8月

「2050 日本低炭素社会」シナリオチーム

(独) 国立環境研究所・京都大学・みずほ情報総研 (株)

主要な結論

本研究は、日本を対象に 2050 年までに二酸化炭素 (CO₂) 排出量を 1990 年比で 70%まで削減するための対策および政策の導入道筋を定量的に検討したものである。本報告書では、「2050 日本低炭素社会」シナリオチームが 2007 年 2 月に作成した報告書「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」のシナリオ A、B に基づき、2008 年 5 月に発表した「低炭素社会に向けた 12 の方策」にて挙げられた施策（対策および政策）の導入道筋を定量的に検討した成果を報告する。

検討の前提

- 本研究では、シナリオ A、B で想定される将来サービス需要は満足しつつ、日本にて 2050 年 CO₂ 排出量 70%削減を実現するために、2000 年から 2050 年までに要する総費用が最も少ない道筋はいかなるものかを検討した。
- 検討にあたっては、約 600 種の施策（約 400 種の対策と約 220 種の政策からなる）を考慮し、それぞれに導入に要する期間と導入に要する費用を、各種資料、専門家ヒアリング、市場調査により設定した。

検討手法の概要：バックキャストモデルによる検討

- バックキャストモデルは、サービス需要を満足しつつ施策導入に要する総費用を最小にするように、投資を異時点間に配分する線形最適化型モデルをベースとして、「12 の方策」で検討した施策と、各施策の関係性を勘案した評価が可能となるように拡張したものである（モデル構造の詳細は Appendix を参照）
- モデルでは、将来の技術革新による性能向上と、累積導入量拡大によって生じる固定費用の習熟効果を考慮している。
- 評価結果としては、最適化基準に合致した CO₂ 削減道筋、各年の投資額推移、施策の実施タイミングと工程表が得られる。

道筋検討から見えてきたもの

- 2050 年までの道筋を検討した結果、低炭素社会に向けた各種対策の実施は、実現に要する総費用最小化の観点からは早期対策が望ましいことが明らかとなった。
- 早期対策となるのは、主に下記 5 点の理由による。
まず本モデル分析の結果、明らかになったこととして、
 1. 技術には習熟効果があり、対策導入量拡大に伴い CO₂ 削減技術の追加費用は安価になる
 2. 後送りすると習熟効果が十分働かないこともあり、低炭素社会実現までに要する総投資額が高額になる

3. インフラ整備はすぐには実施できないため、2050 年直前に低炭素型へ転換することは困難である
4. 将来の技術開発には不確実性があり、ある低炭素型技術の開発が予定通りに進まないなどの理由により予期していた導入量が確保できないことが明らかになった時に、別の技術に乗り換えて普及を進めるだけの機会を確保する必要がある
また、それ以外の検討項目として、
5. 温暖化の抑制には累積排出量が影響することから、2050 年単年の CO₂ 排出量を削減したのみでは、低炭素社会の目指す気候安定化は達成できない

早期対策の費用

- 2050 年低炭素社会を早期対策で実現するためには、初期段階での大規模投資が必要で、特に民生部門に対しては 2010 年から 2025 年にかけて毎年 2.5 兆円、運輸部門に対しては 2010 年から 2015 年にかけて毎年 2.5 兆円の投資を要する。
- 早期に投資することは、国内需要のみで技術革新を起こすことにつながることに加え、世界的な低炭素社会実現のトレンドの中では国際競争力強化につながる。
- 対策を後送りする場合には、他国で低炭素技術への投資と習熟が進む可能性が高く、2050 年直前に導入される低炭素技術は海外製となり、結果として日本の国内産業の衰退に結びつく可能性もはらんでいる。

日本低炭素社会実現に向けて

- 低炭素社会構築への挑戦は、短中期的な視点だけでなく、高効率エネルギー・環境技術の徹底普及、都市インフラの低炭素化などの構造転換を含む長期にわたる俯瞰的な取組が必要になる。
- 技術普及の習熟効果、現在のインフラなどを低炭素型インフラに変えるためのリードタイム、革新的 CO₂ 削減技術に関する研究計画・実用化の遅れなどによる不確実性を考慮すると、早期対策の方が低炭素社会を実現できる可能性が高まる。
- 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、早期の対策の必要性の論拠が強まることが予想されるが、本検討では分析・評価の対象に含めていない。
- コスト効率的な低炭素社会を実現するためには、民生部門の高効率機器や高断熱住宅、運輸部門の次世代自動車など、エネルギー効率改善の余地が大きく、コスト低減が見込める対策に早期の集中的な投資を行うことで、市場を拡大し効率を高め費用を安くすることが、極めて重要である。
- 長期の視点を俯瞰的に見据えた科学的な知見に基づく定量的な分析を基盤とした政治のリーダーシップによって、いち早く目標となるビジョンを描き、正しい方向に最初の一步を踏み出すことが大切である。

1. バックキャストリングモデルの役割

環境省地球環境研究総合推進費で行われた脱温暖化 2050 研究プロジェクトでは、バックキャストリングの手法を用いて、2050 年に低炭素社会を実現するために必要な道筋を定量的に明らかにすることを目的として研究を実施してきた。バックキャストリングとは、現状の対策を積み上げて将来像を描く（フォアキャスト）のではなく、実現したい（時には避けたい）将来像を明らかにし、それを実現するために必要な対策を検討することである。

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施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だけの社会インフラの整備など、様々な要素を勘案する必要がある。本項で示すバックキャストリングモデルは、こうした様々な要因も考慮に入れた上で、個々の対策を導入するタイミングを検討するものである。

分析にあたってまず、2050 年のわが国を対象に低炭素社会として 2 つのシナリオを描写し、様々なモデルを用いて 2050 年の二酸化炭素排出量を 1990 年比 70%削減する社会の姿を定量的に示した。これを、バックキャストリングにおいて目標とする将来像とした。次に、そうした社会を実現するために必要となる施策（対策および政策）の組合せを「12 の方策」として提示した。「12 の方策」は、低炭素社会の実現に寄与する施策は様々なものがあるが、それらを網羅的に取り上げ、個々の施策の関連（施策間の親和性や経年的な関係）から整理したものである。ただし、「12 の方策」では、これらの施策をいつ、どのタイミングで、どれだけの強度で導入すればよいかについて定量的な検討は示されていない。本報告書は、バックキャストリングモデルを用いてこれらの施策の効果的な実施手順について評価を行い、その分析結果をとりまとめたものである。以下では、これまでの研究成果の検討手順と本報告書の内容についてより詳細に解説を行う。

2. 2050 年低炭素社会シナリオ開発の手順

脱温暖化 2050 研究プロジェクトでは、第一段階として 2050 年に低炭素社会を実現するために必要となる要件を明らかにした。世界の平均気温が産業革命前と比較して 2°Cを超えないことを目標に、将来の温室効果ガスの排出経路を明らかにし、2050 年の日本の二酸化炭素排出量の削減目標を 1990 年比で 60~80%削減することとした。

第二段階では、文献調査や専門家のインタビューなどに基づいて、2050 年の日本の社会・経済の姿を異なる 2 つのシナリオとして叙述的に示した（表 1）。シナリオ A は、活発な、回転の速い、技術志向の社会であり、シナリオ B は、ゆったりでややスローな、自然志向の社会である。さらに、2050 年を対象としたスナップショットモデルを用いて、これらの異なる 2 つのシナリオにおいて、二酸化炭素排出量を 70%削減する対策の組合せがあることを確認した。

表 1. 脱温暖化 2050 研究で示した 2 つの将来シナリオ

シナリオ A	シナリオ B
活力、成長志向	ゆとり、足を知る
都市型／個人を大事に	分散型／コミュニティ重視
集中生産・リサイクル 技術によるブレークスルー	地産地消、必要な分の生産・消費 もったいない
より便利で快適な社会を目指す	社会・文化的価値を尊ぶ
GDPは1人あたり年平均2%成長	GDPは1人あたり年平均1%成長
農林水産物の輸入依存度の増加	農林水産業の復権
グローバル化による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
市場の規制緩和が進展	適度に規制された市場ルールが浸透

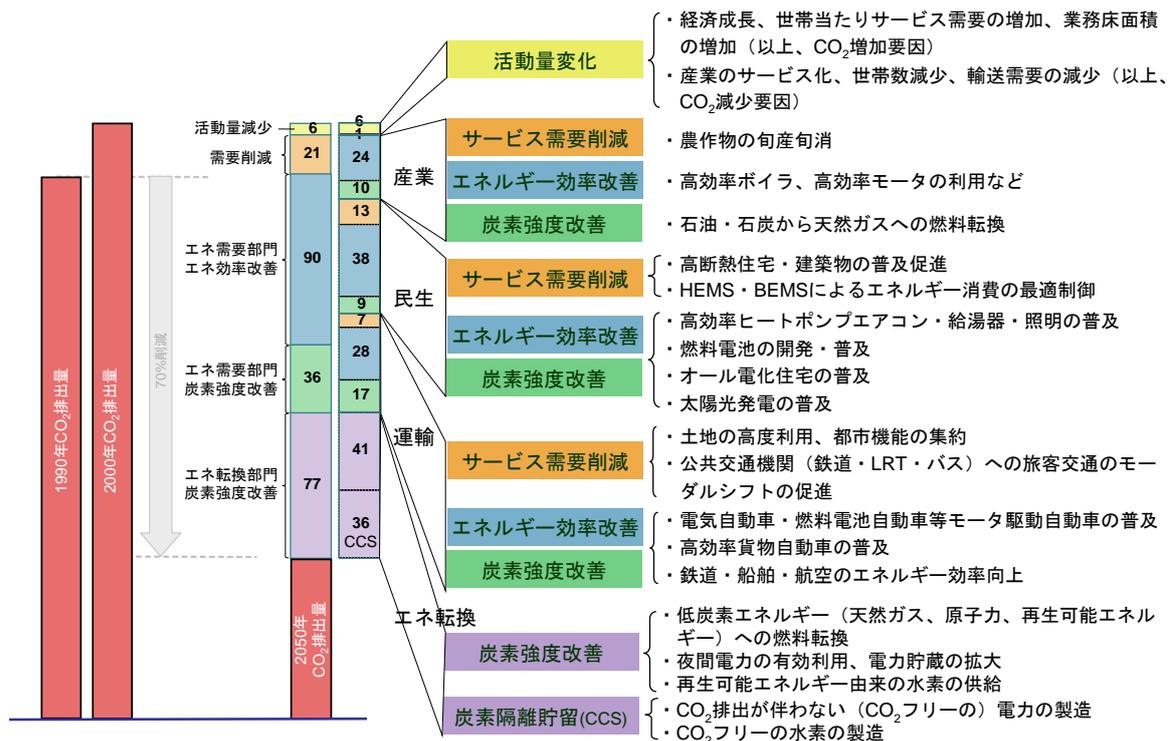


図 1. 2050 年における CO₂ 排出量と削減要因 (シナリオ A)

図 1 に示すシナリオ A では、以下の要因により二酸化炭素削減が進むとしている。

- 一人当たり GDP が年率 2% で成長し、人口が 2000 年比で 20% 減少し、産業構造が欧米並みにサービス化する社会を想定すると、サービス需要の総量は 2000 年とほぼ同じと想定される。

- こうした社会を前提に、歩いて暮らせる街づくりや省エネなどの需要削減により、二酸化炭素を1990年比で約40%削減、再生可能エネルギー、原子力、炭素隔離貯留などによるエネルギーの低炭素化で1990年比で約30%削減で合計70%の削減が可能となる。
- 需要部門の二酸化炭素削減量（1990年比約40%）のうち、9%は電気自動車などの高効率輸送機器の普及、7%は産業部門における省エネ機器の普及、3%は住宅・オフィスにおける太陽光発電等の導入である。残りの21%は、既存の技術や2050年に商用化が見込まれる技術など合計で5分野、約400種の要素技術とその合理的な普及を想定している。
- エネルギー生産部門においては、風力の大規模な利用や原子力発電の安全な利用を推進し、石炭・石油火力発電から高効率のガス火力発電への代替を進め、火力発電所に炭素隔離貯留施設を併設することによって、70%削減のうちの30%削減を実現できると見積もっている。

第三段階では、2050年の二酸化炭素排出量を1990年比70%削減するために必要となる対策や政策を網羅的に抽出し、個々の施策の関係性、親和性等の観点から、個別施策を「低炭素社会に向けた12の方策」として整理した（図2）。削減に向けては、いくつかの技術的社会的障壁があり、それらを取り除くには、順序だった手順で時間をかけてそれらを取り除いてゆく必要がある。こうした相互関係を念頭に置きながら、効果の大きさを勘案して程よいくりでまとめたものを「方策」と呼んでいる。個々の方策は、それぞれ目指す将来像、実現への障壁と段階的戦略、定性的工程表からなる。目指す将来像では、2050年どのような社会システムを作ろうとする方策なのかを記述し、実現への障壁と段階的戦略では、目指す将来像に到達するために技術的あるいは社会システムの障壁を取り除くための戦略を記述している。定性的工程表では、対策や政策を時系列的に組み合わせた結果を示している。

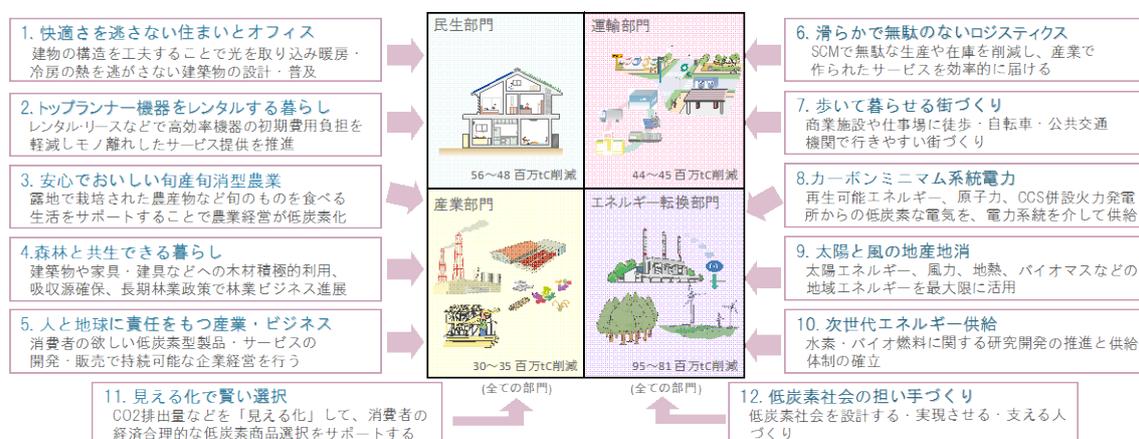


図2. 「12の方策」と2050年のCO₂削減量

12 の方策にて示した個々の施策の組合せの経年的な姿は定性的なものであり、施策の実現においては、これらを定量的に明らかにする必要がある。そうした要請に応えるものがバックキャストモデルであり、このモデルによる道筋の同定が、脱温暖化 2050 研究プロジェクトによるシナリオ開発の最終段階になる。すなわち、2050 年に低炭素社会を実現するための道筋（施策の導入経路）を、シナリオ A、B それぞれについて定量的に示すものである。モデルは、サービス需要を満足しつつ施策導入に要する費用全体を最小にするように、投資を異時点に配分する線形最適化型モデルをベースとし、これに、「12 の方策」で検討した個別の施策を評価することが可能となるように組み込んだものである。これを用いて 2050 年の排出削減目標を制約条件として設定して施策の導入道筋解析を行った。つまり、2050 年の二酸化炭素排出量の削減目標の達成のために、「12 の方策」で検討した各施策をどのタイミングでどれだけの量を導入する必要があるかを、対策費用最小化（最適化）の視点で検討するものである。

3. バックキャストモデルによる 2050 年 70%削減への道筋検討

70%削減レポートのシナリオ A、B に沿って、サービス需要を満足しつつ 2050 年 CO₂ 排出量 70%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描いた（図 3）（想定した個別の施策に関するデータや、モデル構造の詳細は付録を参照のこと）。CO₂ 削減目標を設けないケースでは、それぞれのシナリオにより若干の差はあるものの、世帯数の変化および産業構造の変化によりおおむね 2020 年頃をピークに CO₂ 排出量は減少する経路を辿り、2050 年の CO₂ 排出量は 1990 年と同程度となる結果が示された。これは、目標とする 70%削減にはほど遠い結果であったため、2050 年における CO₂ 排出量に制約条件を課して検討を行った。

2050 年の CO₂ 削減目標として 1990 年比 70%削減を課したケースでは、シナリオ A、B ともに 70%削減に至るパスはほぼ同様であり、対策は 2010 年から導入が進み、2020 年には 1990 年比-17%、2030 年には 1990 年比-30%を通る早期削減対策パスが、総費用最小化の観点から最適であることが示された。

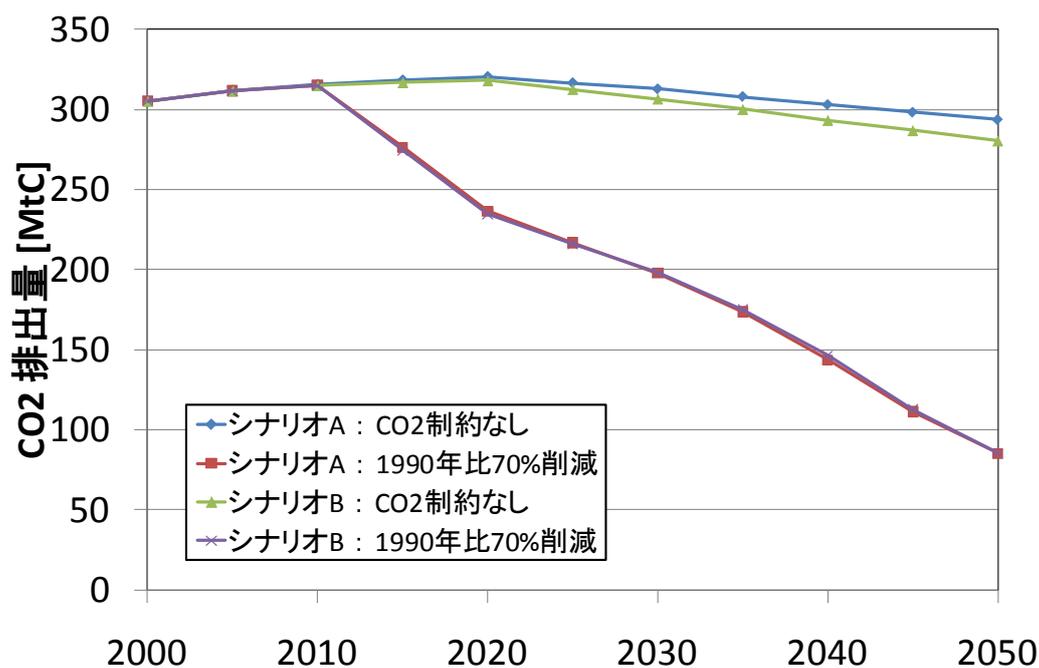


図 3. 2050 年 70%削減に至る CO₂ 排出量の道筋

CO₂ 削減制約を課したケースについて、図 2 の「12 の方策」で示した各方策における削減効果を示すと、図 4 のようになった。なお、方策 4 は方策 1、2 に含まれ、方策 11、方策 12 は横断的方策であることから図中には明示的に削減量を示していない。いずれの方策も、解析期間初期から導入が開始されることがわかった。

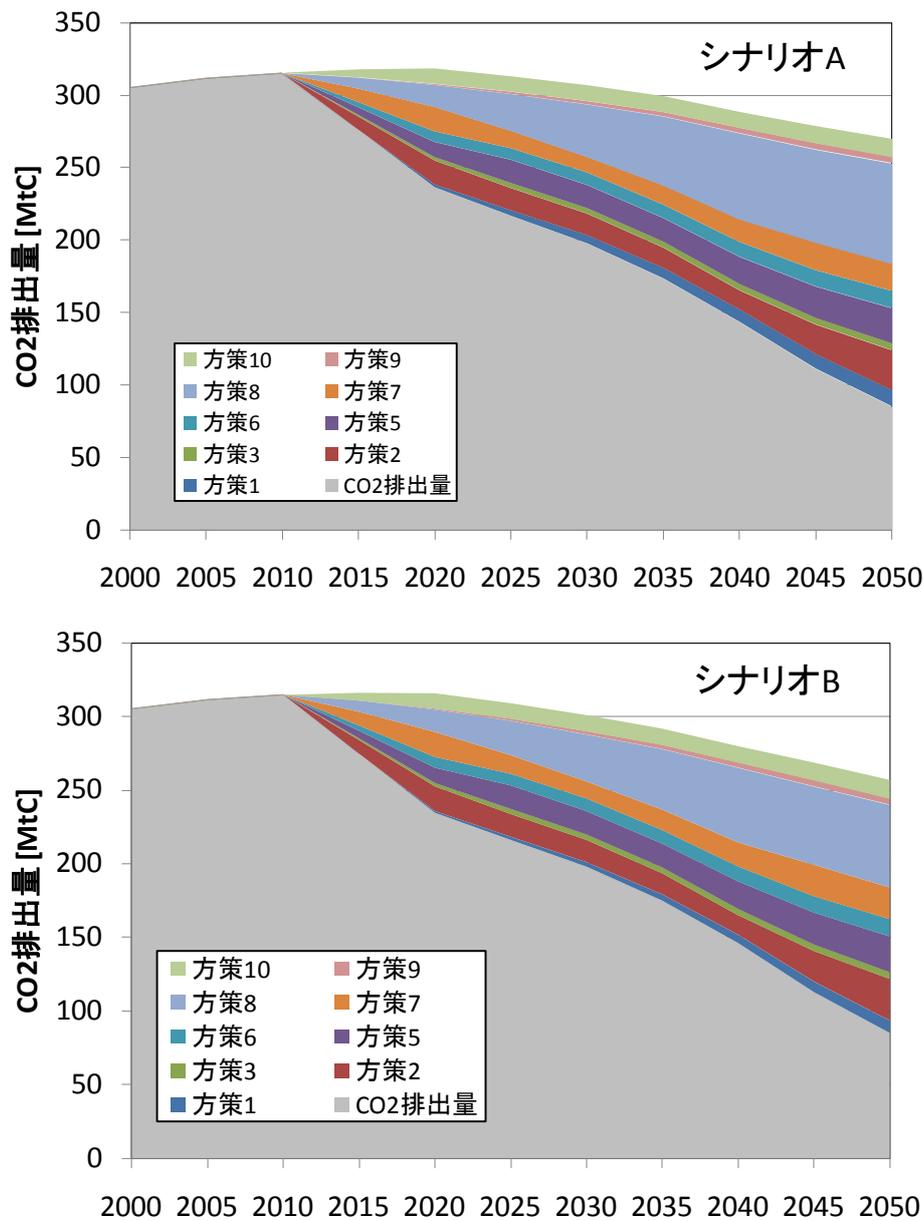
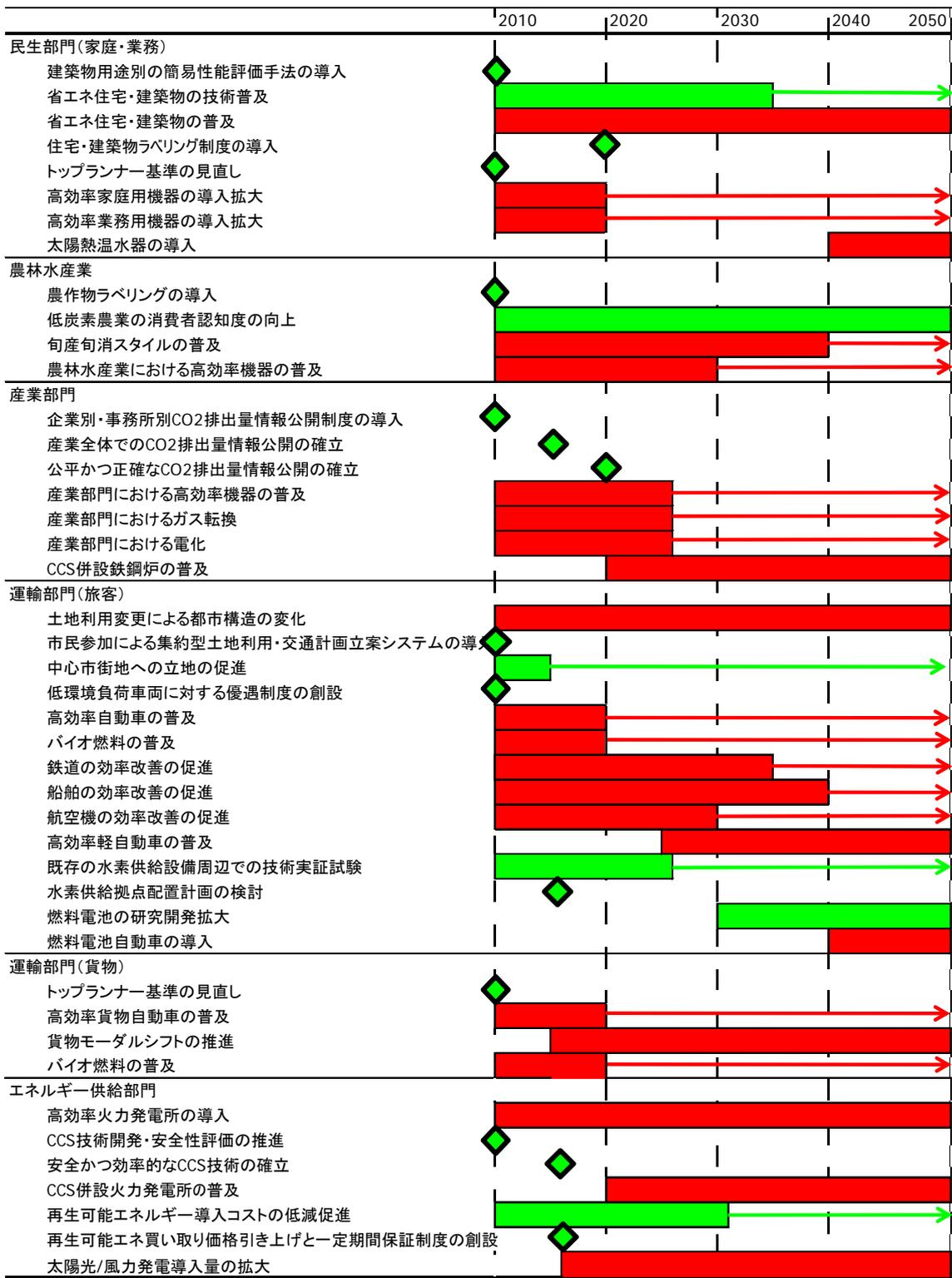


図 4. シナリオ A、B それぞれの方策別 CO₂ 削減効果の内訳

想定した施策がどの時期に導入されるかを工程表として整理すると、図 5 のようになった。図中にて、赤色は対策を表し、緑色は政策を表す。幅のある直線で示されている期間は、対策はその普及を積極的に進める期間、政策は全国へ浸透させる期間を表す。矢印で表されるのは、対策についてはその普及率を維持する期間であり、政策については継続して実施し続ける期間を表す。菱形は、政策が立案・実施されるタイミングを表す。なお、図中の高効率家庭用機器などは、実際には高効率エアコン、高効率石油給湯器等具体的な複数の技術別にデータを準備し、解析を実施したが、解析結果は同様の傾向を示していたことから、工程表上では大きくまとめて示した。



図中の色について：赤色は対策を表し、緑色は政策を表す。
 直線の幅について：幅のある直線で示されている期間は、対策はその普及を積極的に進める期間、政策は全国へ浸透させる期間を表す。矢印で表されるのは、対策についてはその普及率を維持する期間であり、政策については継続して実施し続ける期間を表す。菱形は、政策が立案・実施されるタイミングを表す。

図 5. 2050 年 CO₂ 排出量 70%削減に向けた施策の工程表 (シナリオ A)

4. 道筋検討に必要な視点：早期対策の5つの理由

2050年までの道筋を検討した結果、低炭素社会に向けた各種対策の実施は、実現に要する総費用最小化の観点からは早期対策が望ましいことが明らかとなった。この理由をまとめると、下記5点となる。一方で、早期対策の実現には初期の投資をどのように捻出するかが課題であることも明らかとなった。

低炭素社会に向けた道筋検討に必要な視点

- 1) 技術には習熟効果があり、対策導入量拡大に伴いCO₂削減技術の追加費用は安価になる
- 2) 後送りすると習熟効果が十分働かないこともあり、低炭素社会実現までに要する総費用が高額になる
- 3) インフラ整備はすぐできないため、2050年直前に低炭素型へ転換することは困難である
- 4) 将来の技術開発・普及には不確実性があり、ある低炭素型技術の開発が予定通りに進まないなどの理由により予期していた導入量が確保できないことが明らかになった時に、別の技術に乗り換えて普及を進めるだけの機会を確保する必要がある
- 5) 温暖化の抑制には累積排出量が影響することから、2050年単年のCO₂排出量を削減したのみでは、低炭素社会の目指す気候安定化は達成できない

以下、それぞれの項目について定量的分析を含めた検討を行った。なお項目5については、本報告書では問題点を挙げるのみで、詳細な分析は行っていない。

1) 習熟効果

技術には一般に習熟効果があり、導入量増加に伴ってコストが低下することが知られている（図6）。例えば太陽光発電を例にとると、習熟率（累積導入量が2倍になるごとに、低下するコストの割合）はおおよそ20%であるとされている（図7）。このような習熟効果には技術によって幅があり、一概には言えない。しかし様々なエネルギー機器（需要側・供給側）の習熟効果に関する研究を収集し、とりまとめた文献¹によると、太陽光発電以外にも様々な技術における習熟効果が報告されている（表2）。道筋の検討にあたっては、低炭素型技術の固定費を対象に累積導入量が増加するに従って（習熟が進むに従って）安価になると想定した。

¹ Alan McDonald, Leo Schratzenholzer (2001) “Learning rates for energy technologies” Energy Policy 29 (2001), PP 255-261

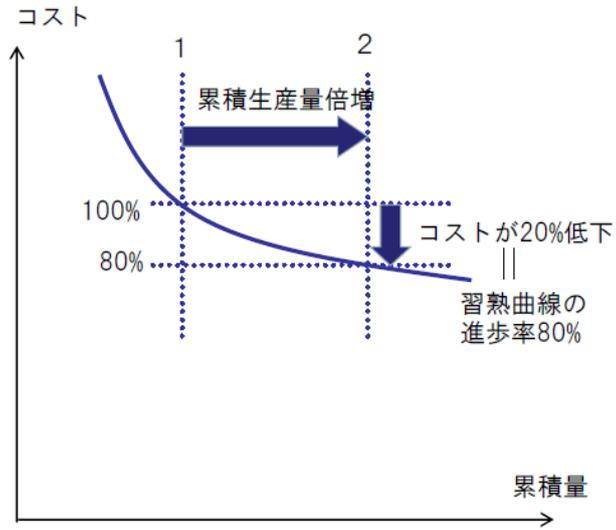


図 6. 習熟効果のイメージ

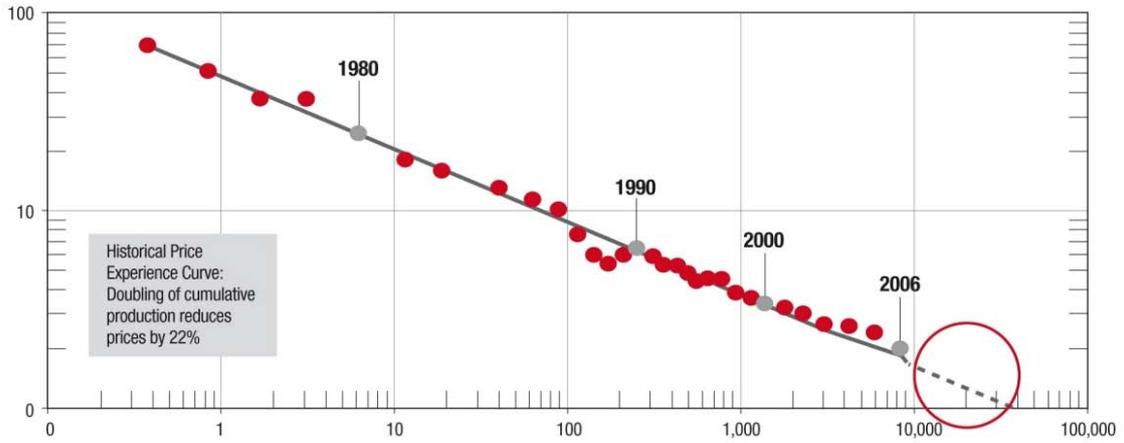


図 7. 太陽光発電の習熟曲線²

² EPIA (2009) "Set for 2020 Solar Photovoltaic electricity: A mainstream power source in Europe by 2020"

表 2. 既存文献におけるエネルギー機器の習熟効果の例³

技術名	国・地域	期間	習熟率(%)	R ²
ガスタービン	世界	1958-1980	13	0.94
原子力発電	OECD	1975-1993	5.8	0.95
水力発電	OECD	1975-1993	1.4	0.89
石炭火力発電	OECD	1975-1993	7.6	0.90
ガスタービンコンバインドサイクル (GTCC)	OECD	1984-1994	34	0.78
風力発電	OECD	1981-1995	17	0.94
太陽光発電	世界	1968-1998	20	0.99
エタノール	ブラジル	1979-1995	20	0.89
電球型蛍光灯	米国	1992-1998	16	0.66
エアコン	日本	1972-1997	10	0.82

習熟効果を考慮するかしないかは、施策実施に要する費用の見積もりとその導入タイミング評価に大きく影響する。習熟効果の有無により、CO₂削減施策の導入費用がどのように異なるかを、家庭部門の給湯機器を例に図 8 に示す。習熟効果があるケースでは、2010 年から対策が導入されることに伴い、2015 年頃から徐々に導入費用は逡減することがわかる。

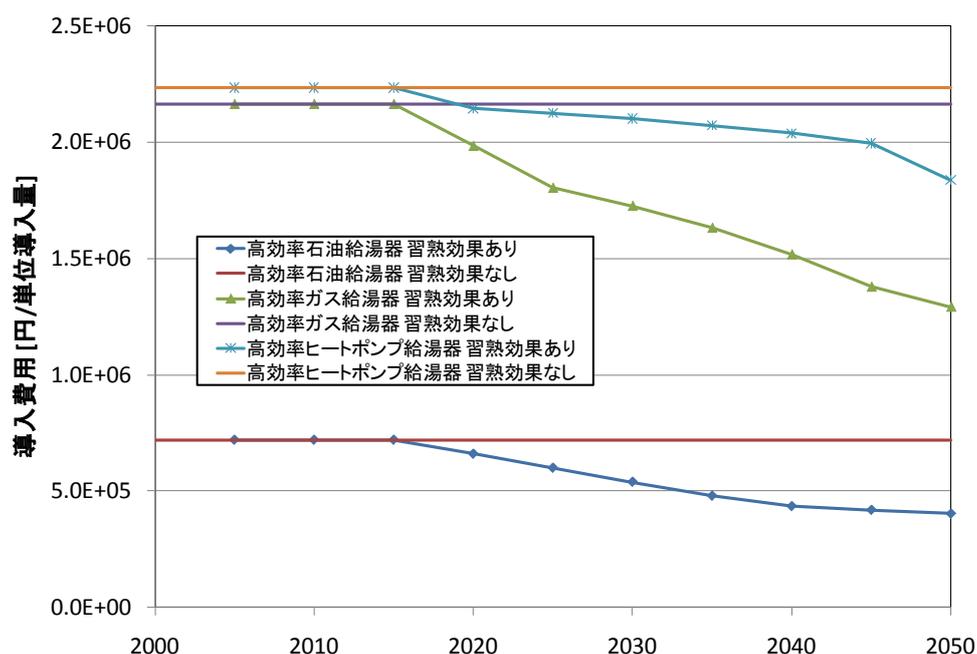


図 8. 習熟効果の有無による将来の導入費用の違い（家庭部門給湯機器、シナリオ A）

習熟効果の有無で将来の導入費用が異なることは、施策の導入タイミングにも影響し、CO₂削減パスは習熟効果のないケースの方が習熟効果のあるそれよりも後送りの結果となる（図 9）。しかし、2000 年から 2050 年までの累積追加投資額では、燃料費の節減分も加

³ Alan McDonald, Leo Schratzenholzer (2001) “Learning rates for energy technologies” Energy Policy 29 (2001), PP 255-261

味するとシナリオ A では習熟効果のあるケースが 12 兆円に対して習熟効果のないケースは 34 兆円と 3 倍近い差が生まれる（割引率は 3% と想定している）。これは、シナリオ B にて も同様である。

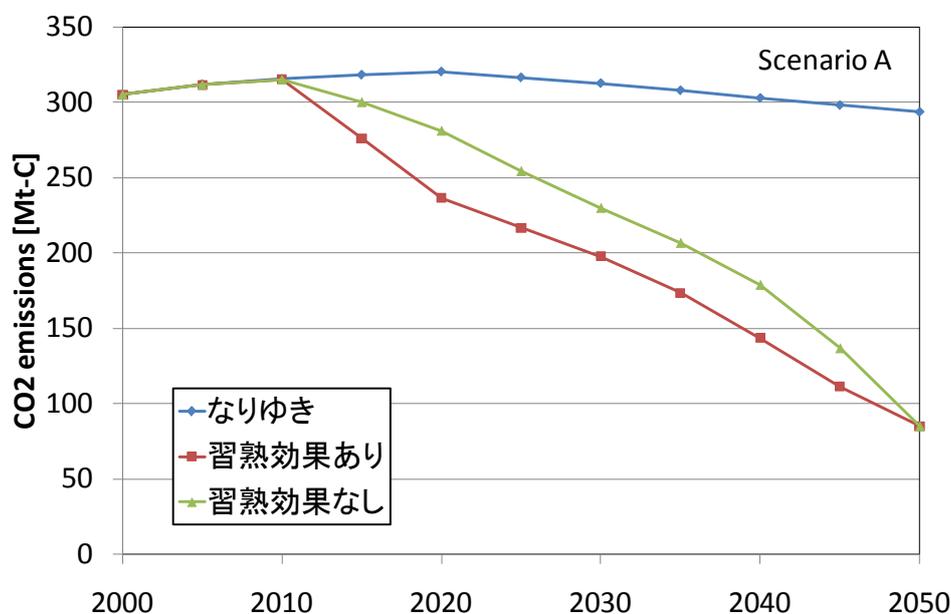


図 9. 習熟効果の有無による CO₂ 削減パスの比較

早期に投資をして高額ではあるが CO₂ 削減効果の高い対策を導入しておくことは習熟効果により費用が逡減できるのみならず、低炭素社会に向けた投資額の抑制につながる。また、本解析では CO₂ 削減目標は 2050 年 70%削減のみを与えているが、地球温暖化に関する科学的知見がさらに積み上がり、国際交渉が進展するにつれて 2050 年以降もさらなる削減が求められる可能性は高く、そういった際にも早期投資と習熟効果による費用節減は有利となると考えられる。

2) 施策開始の遅れは費用増加につながる

対策開始が遅れると、習熟効果が十分働かず総追加投資額が増加する可能性が高い（図 10）。本解析では、投資額に設備費などの固定費用と、エネルギー消費量削減による燃料費節減分を考慮し、割引率 3% にて現在価値換算して総投資額を求めている。追加投資額とは、固定費用については従来型機器との差分を、燃料費については節減分そのものを指す。

早期対策のケースでは、2010 年から 2050 年までの累計で施策の固定費用（追加分）がシナリオ A で 80 兆円、シナリオ B では 62 兆円となる。年平均では、シナリオ A は 2 兆円、シナリオ B は 1.55 兆円である。これに燃料費節減分がそれぞれマイナス 68 兆円、マイナス 69 兆円となるために、追加費用合計ではシナリオ A で 12.7 兆円、シナリオ B では 7 兆円と

なる。いっぽう、2020 年から開始するケースでは、習熟効果が十分働かないために追加投資額（固定費用）の総額が増加してシナリオ A では 93 兆円、シナリオ B では 91 兆円となる。また、施策開始が遅れることから燃料費節減分はシナリオ A/B とともに 54 兆円まで低下する。その結果として、2000 年から 2050 年までの総追加費用はシナリオ A、B それぞれ 39 兆円、37 兆円に増加する。

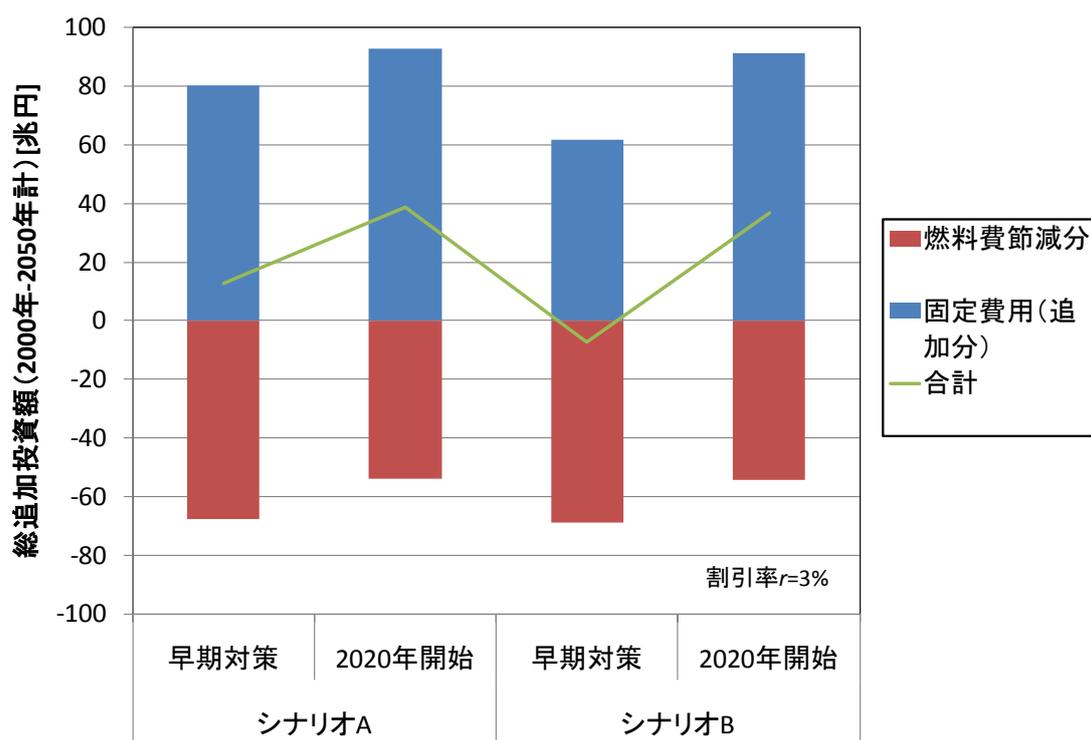


図 10. 早期対策と 2020 年開始の総追加投資額の比較

3) インフラ整備には時間がかかる

一般に社会インフラ（都市構造・交通インフラ・エネルギーインフラ・建築物など）は耐用年数が長いため、一旦整備されてしまうと途中で大幅に変えることは容易ではない。例えば、「日本の社会資本」（内閣府政策統括官（2007））によると、道路、および地下鉄の部門別の平均耐用年数⁴はそれぞれ 51 年、34 年であり、他の部門においてもそのほとんど

⁴部門別平均耐用年数：社会資本（インフラ）は、耐用年数が異なる多数の構成資産から成り立っているため、各部門の平均耐用年数を決定するために構成資産のうち代表的な資産の耐用年数をウェイトにより合成して算定したもの。算定方式としては、様々なものがあるが、いずれの方式を用いる場合でも、特定年次を計算するのではなく、長期間複数年次において計算を行い、その結果を単純平均している。データとしては、財務省令「減価償却資産の耐用年数等に関する省令（昭和 40 年 3 月 31 日大蔵省令第 15 号）」を基礎として部門別の平均耐用年数を算出した上で、さらにより実際の現場感覚に近いと思われるデータを収集し、試算的に耐用年数の見直しを行ったものである。

が40年近い値、もしくはそれ以上となっている⁵（表3）。そのため、インフラの置き換えタイミングを逃してしまうと、2050年までに所要の低炭素型インフラに転換することが困難になり、結果的にCO₂排出量の目標に到達できない可能性が高まっていく（表4）。

表3. 社会インフラの部門別平均耐用年数

部門	平均耐用年数
道路	51年
港湾	49年
航空	16年
旧国鉄	22年
日本鉄道建設公団等	26年
地下鉄等	34年
旧電電公社	18年
下水道	57年
廃棄物処理	40年
水道	39年
都市公園	43年
文教施設（学校施設・学術施設）	39年
文教施設（社会教育施設・社会体育施設・文化施設）	41年
治水	85年
治山	50年
海岸	30年
農林漁業（農業）	44年
農林漁業（林業）	49年
農林漁業（漁業）	50年
郵便	18年
国有林	47年
工業用水道	38年

表4. インフラ整備の遅れと2050年CO₂削減可能性（MtC）

	インフラ整備の遅れ				
	遅れなし	2020年開始	2030年開始	2040年開始	2050年開始
シナリオ A	85.2	86.7	109.5	134.6	161.3
（1990年比）	（-70%）	（-69.5%）	（-61.4%）	（-52.6%）	（-43.2%）
シナリオ B	85.2	85.2	106.2	131.7	158.3
（1990年比）	（-70%）	（-70%）	（-62.6%）	（-53.6%）	（-44.3%）

⁵上記の部門別平均耐用年数は、既存文献に示される耐用年数をあくまで参考として示したものであり、本検討におけるモデル計算の前提条件として想定した値を示したのではない。

また、社会インフラ整備には基本的に膨大な投資が必要であることを鑑みると、可能な限り開発投資を行うときやインフラ設備の更新のタイミングで低炭素型のデザインをしておくことが低炭素社会構築のための投資コストを最小化させることは明らかである。

このように、現在整備したインフラの一部は2050年においてもまだ利用されている可能性が極めて高く、我々は既に低炭素社会の骨格作りに着手していると考えられるべきであろう。

4) 将来の技術開発・普及には不確実性がある

技術開発・普及は次の4段階からなる：開発（Development）、実証（Demonstration）、市場投入（Deployment）、普及（Diffusion）。日本では、これまでに水素技術、燃料電池技術、核燃料サイクルなどさまざまな技術がプロジェクトとして最終段階の普及を目指した技術開発を進めて来た。いくつかの技術については、当初の目的通り普及しているものの、いくつかの技術開発プロジェクトは予定通りに進まず、未だ市場投入にたどり着いていないものもある。

たとえば、近年特に脚光を浴びている燃料電池技術は、1961年に米国航空宇宙局（NASA）で技術開発が開始されており、技術としてさほど新しいものではない。日本では、1981年から1986年にわたりムーンライト計画としてリン酸型燃料電池（PAFC）の開発プロジェクトを実施し、1990年には実証試験を終了して基本的技術の確立に成功している。以降、ニューサンシャイン計画、日本ガス協会による定置型PEFC ミレニアム事業（2000年～2004年）などいくつかの事業が実施されているが、燃料電池の国内導入台数は国のプロジェクトによるテスト的導入や電力会社・ガス会社のデモンストレーション用が中心であり、市場で確実な地位を確立しているとは言い難い状況にある。このような状況は、核燃料サイクル技術の開発や、原子力の導入などさまざまに見られる。

3章で示した結果は、技術開発・普及がすべて順調に進んだ想定のもと解析した結果である。技術開発・普及の進展が想定より10年ずれ込むと、早期対策の場合には2050年のCO₂排出量はシナリオAで97.7 Mt-C（1990年比-65.6%）まで削減できるが、2020年から対策を開始するケースでは107.0 Mt-C（1990年比-62.3%）までしか削減できない（図11）。30年も遅れるケースでは、早期対策の場合には116.6 Mt-C（1990年比-59.0%）まで削減できるのに対して、2020年から開始するケースでは125.9 Mt-C（1990年比-55.7%）と1990年比で見て5%近い差が生まれる。これは、早期対策の場合には仮にある低炭素技術の開発が予定通りに進まないとしても、他の技術へ乗り換える機会があるためである。低炭素社会に向けてそれに大きく貢献しうる対策を早めに市場に導入することは、より積極的な技術開発を促してより効率向上が進み、習熟効果によって費用が低減できるのみならず、施策のポートフォリオを広げて将来の不確実性に備えることにもつながり、結果としてコスト効率的な低炭素社会の実現の可能性が高まる、ということである。

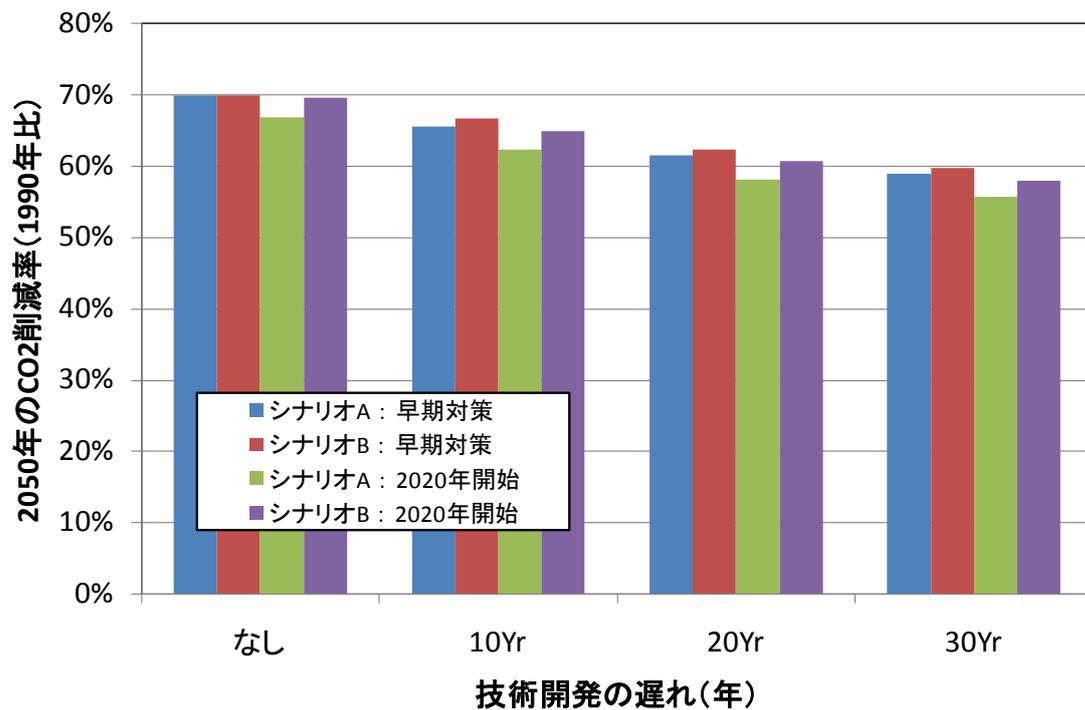


図 11. 技術開発の遅れと 2050 年の CO₂ 削減率

以上のような理由で低炭素社会実現には早期対策が必要であることが明らかとなったが、それには、初期段階での追加投資が必要になる。

初期段階での大規模な追加投資が必要

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年間投資額の推移に着目すると、シナリオ A、B のいずれでも初期には燃料費節減分を加味しても年間 5 兆円程度の追加投資を要する（図 12）。固定費用の追加分のみでは、2010 年にはシナリオ A、B 問わず民生部門に年間 2.5 兆円、運輸部門に年間 2.5 兆円を要する。運輸部門については、習熟効果と都市構造の変化などによる運輸需要低下もあり以降急激に低下して 2020 年にはほぼゼロとなるが、民生部門については引き続き 2030 年頃まで 2 兆円程度を要する。これらの投資は、民生部門では高効率機器や高断熱住宅、運輸部門では次世代自動車など、効率改善の余地が大きく、コスト低減が見込める対策に向かっている。

期間全体から見ると、習熟効果などにより固定費用の追加分が逡減するために、2010 年から 2050 年までの総追加投資額は、シナリオ A で 12.7 兆円、シナリオ B では 7 兆円となる。特にシナリオ B では従来型機器への投資と比較して安価になる可能性が示唆されているが、初期の大規模な投資による高額な低炭素型技術の導入なしにはその先には進まない。

世界的に低炭素社会実現のトレンドが形成されつつあることを鑑みると、日本が低炭素化技術へ投資しない場合には、他国で低炭素技術への投資と習熟が進み、将来的にわが国の産業が国際競争力を失う可能性もある。

また、将来における新たな産業の確立という意味でも、低炭素技術の継続的な研究開発・投資は重要である。最近の例を挙げれば、日本、ドイツ、米国において太陽電池産業が新たな産業として根付いた背景には、太陽光発電の研究開発を長期間にわたり実施し、産業基盤を作り上げてきたことがあげられる。いっぽう、近年、強力な政策導入によって、急速に太陽光発電の導入量を増やした国では、その多くを輸入に依存している。具体的には、スペインでは 2004 年までの導入量は累積でわずか 22 MWであったのが、2008 年までの 4 年間で 100 倍以上の 3,166 MWにまで拡大⁶し、日本を抜く導入量となった。しかし、2008 年度は生産が追いつかず導入された太陽光発電の一割も国内で生産されていない。スペインでは太陽光発電の買取価格を高くして導入を促進しており、結果的に海外の製品を大量に導入するために多くの社会的コストを費やしたことになる。

仮に 2050 年近くになってから、急激な導入普及政策を導入しても、技術普及のためには継続的な開発と、普及のための生産基盤の整備を行っていなければ、国際的な企業のコスト競争に参入することはできず、結果的に海外の企業に資金が流出することになる可能性が高くなるといえよう。対策を後送りすることは他国で低炭素技術への投資と習熟が進む可能性を高めることでもあり、結果として国内産業の衰退に結びつく可能性もはらんでいる。その観点では、わが国が率先して低炭素技術への投資をする、あるいは他国よりも先に厳しい環境規制をかけることによって早期に低炭素技術への投資を促して技術習熟を進めることは、国内産業の国際競争力の強化につながるものであるともいえる。

⁶ IEA PVPS (2008) “Trends in photovoltaic applications -Survey report of selected IEA countries between 1922-2007-” および EPIA (2009) “Global Market Outlook for Photovoltaics until 2013”

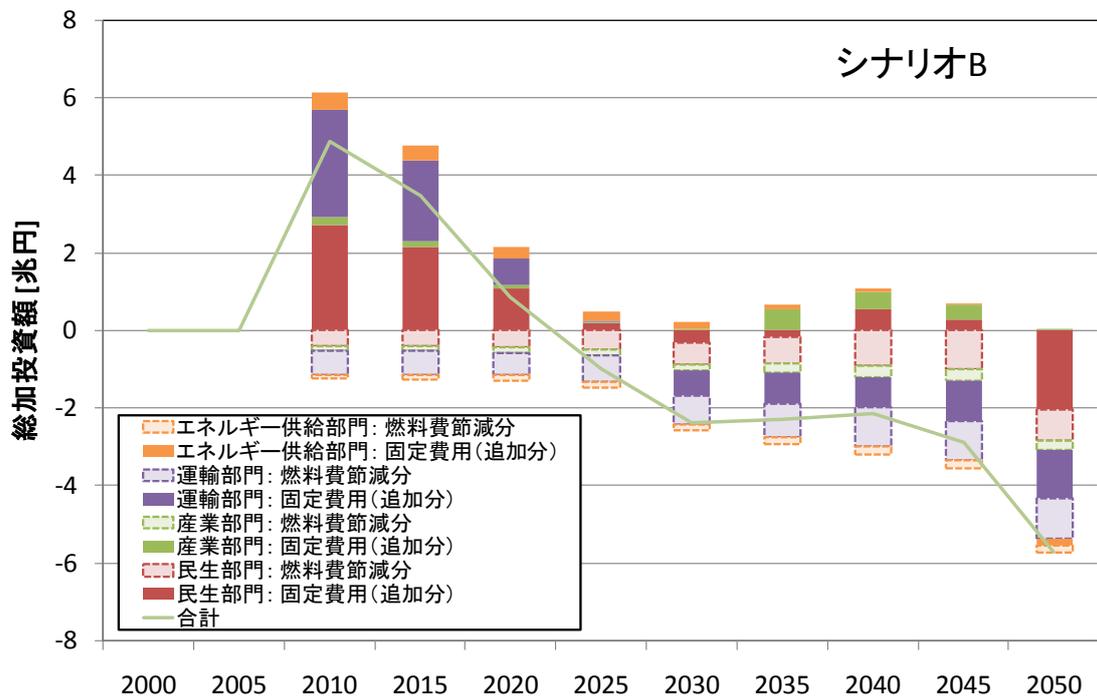
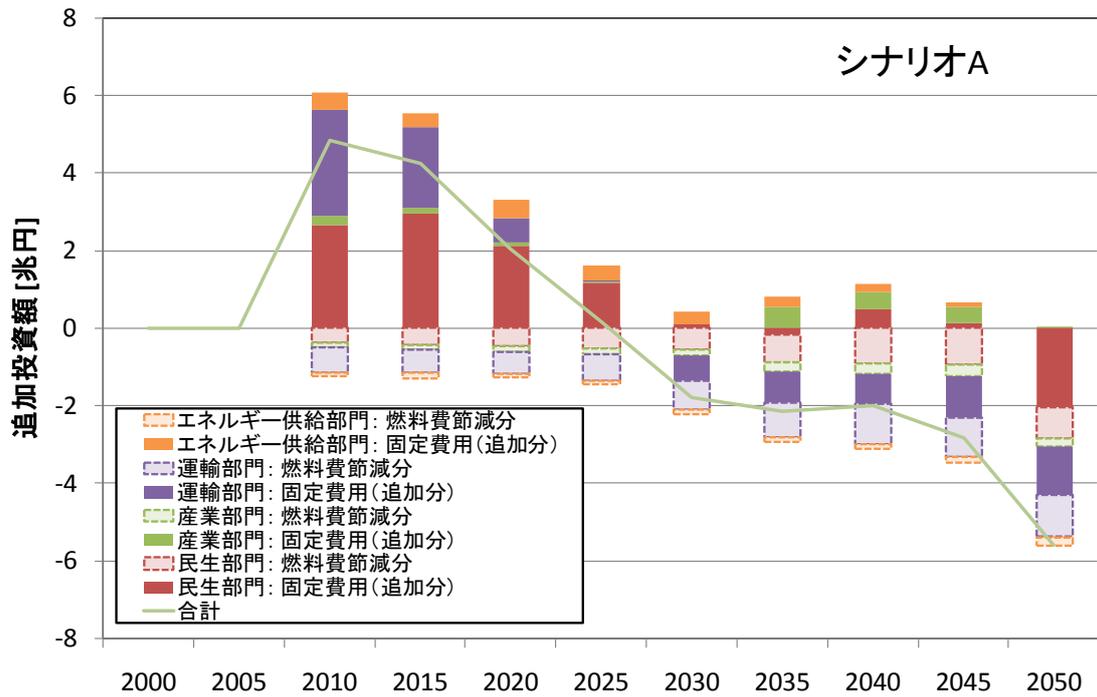


図 12. 実現に要する総費用最小化の観点から得られた道筋の追加投資額の推移

5. おわりに

低炭素社会構築への挑戦は、京都議定書や中期目標のような短中期的な視点だけでなく、2050年までにCO₂排出量を1990年レベルに比べて70%削減するような、高効率エネルギー・環境技術の徹底普及、都市インフラの低炭素化などの構造転換、サービス産業へのソフト・農林水産業への一部回帰などの社会経済構造の低炭素化など、長期にわたる俯瞰的な取組が必要になる。

本報告書は、2007年2月に報告した2050年70%削減の技術的実現可能性、2008年5月に報告した70%削減を実現するための具体的な解決策としての12の方策の提案、に対していつ、どのような手段で、どれだけの対策を行えばよいのかを、技術的可能性および経済性の観点から定量的に分析したものである。

エネルギー技術モデルによる分析結果の中には、「技術は将来安くなるのだから、技術開発の進展およびコスト低減を待ってから対策をした方がよい」、という指摘を行っているものもある。しかし、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、燃料電池自動車で見られるような研究計画・実用化の遅れなどによる将来の技術開発の不確実性を考慮すると、早めの対策を行ったほうが温暖化対策を実現できる可能性が高まることがわかった。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、早期の対策の必要性の論拠が強まることが予想されるが、本検討では分析・評価の対象に含めていない。

これらの結果からわかることは、コスト効率的な低炭素社会を実現するためには、民生部門の高効率機器や高断熱住宅、運輸部門の次世代自動車など、効率改善の余地が大きく、コスト低減が見込める対策に早期の集中的な投資を行うことで、市場を拡大し効率を高め費用を安くすることが、極めて重要であるということである。長期の視点を俯瞰的に見据えた科学的な知見に基づく定量的な分析に基づいた政治のリーダーシップによって、いち早く目標となるビジョンを描き、正しい方向に最初の一步を踏み出すことが大切である。

Appendix : バックキャストモデルによる定量評価

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、現在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、投資パスや定量的データを加味した工程表等を提示するものである。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。基準年と対象年のエネルギー消費や産業構造、CO₂排出構成はエネルギー・スナップショット・ツール（Energy Snapshot Tool、ESS）やCGEモデルを入力値とし、その他の年（中間年）について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。

本研究では、基準年及び目標年をそれぞれ2000年、2050年とし、5年ごとに2050年のCO₂排出量制約の下で活動量を維持しつつ解析期間中の総費用を現在価値で合計して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バランスなどを推計して将来目標であるCO₂排出量が1990年比70%削減できる社会（シナリオA、B）を実現するための道筋を検討した。

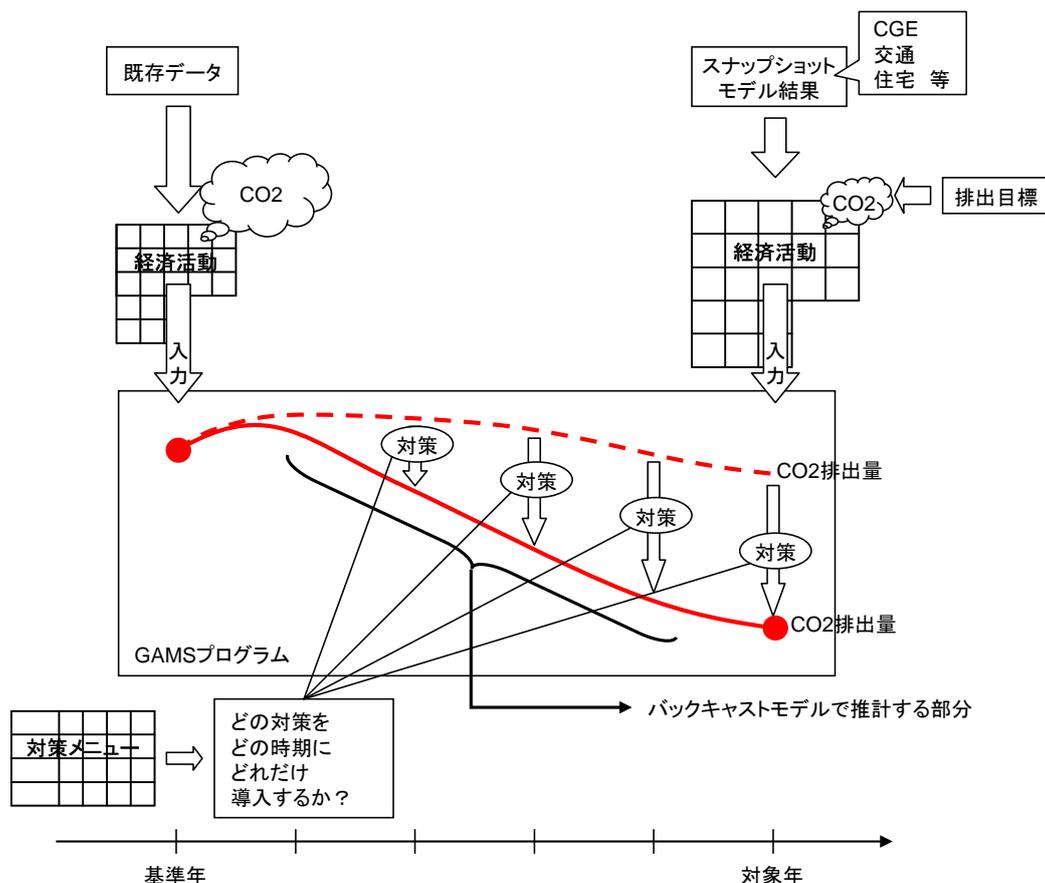


図 A.1 バックキャストモデルにおける推計フローの概要

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70%削減への道筋検討は、具体的には以下の5ステップにより実施した。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) 将来サービス需要量の想定
- 2) 将来シナリオ実現のための対策のリストアップ
- 3) 対策の定量データの整備
- 4) 対策間の関係性の付与
- 5) バックキャストモデルを用いた定量検討

2.1. 将来サービス需要量の想定

部門*i*のサービス*j*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。

2.2. 将来シナリオ実現のための施策のリストアップ

2050年低炭素社会実現にどのような施策が必要であるかを、対策については主に「70%削減レポート」から、政策については主に「12の方策」から列挙する。たとえば、家庭部門については70%削減レポートから対策として「省エネ住宅の導入」「高効率エアコンの普及」などを、12の方策から「住宅ラベリング制度の創設」「トップランナー基準の改正」などの政策が得られる。表A.1に、本解析にて準備した施策を方策別にまとめる。

表 A.1 施策まとめ（主として属する方策でカウント、重複なし）

方策	政策	対策
1. 快適さを逃さない住まいとオフィス	19種	5種
2. トップランナー機器をレンタルする暮らし	45種	48種
3. 安全でおいしい旬産旬消型農業	15種	8種
4. 森林と共生できる暮らし	13種	—
5. 人と地球に責任をもつ産業・ビジネス	9種	112種
6. 滑らかで無駄のないロジスティクス	11種	16種
7. 歩いて暮らせる街づくり	11種	26種
8. カーボンミニマム系統電力	28種	14種
9. 太陽と風の地産地消	14種	6種
10. 次世代エネルギー供給	32種	32種
11. 見える化で賢い選択	10種	—
12. 低炭素社会の担い手づくり	12種	—
合計	219種	267種*

*：異なる部門間での重複を許すと約400種

2.3. 施策の定量データの整備

それぞれの施策について、(1) 導入に要する期間（最短導入年数）と (2) 導入に要する費用を整備する。

(1) 導入に要する期間

施策には、制度の創設のようにすぐにできるものもあれば、省エネ住宅の普及のように完了まで数年～数十年を要するものもある。施策それぞれについて、実施には最短でどの程度の年数を要するかを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。検討にあたっては、原則的に対策については寿命を、政策については過去の実績を踏まえて検討開始から施行されるまでの平均年数を置いている。道筋検討にあたっては、この施策実施に要する期間よりも短期に対策導入できないとして制約条件のひとつとして用いている（図 A.2）。

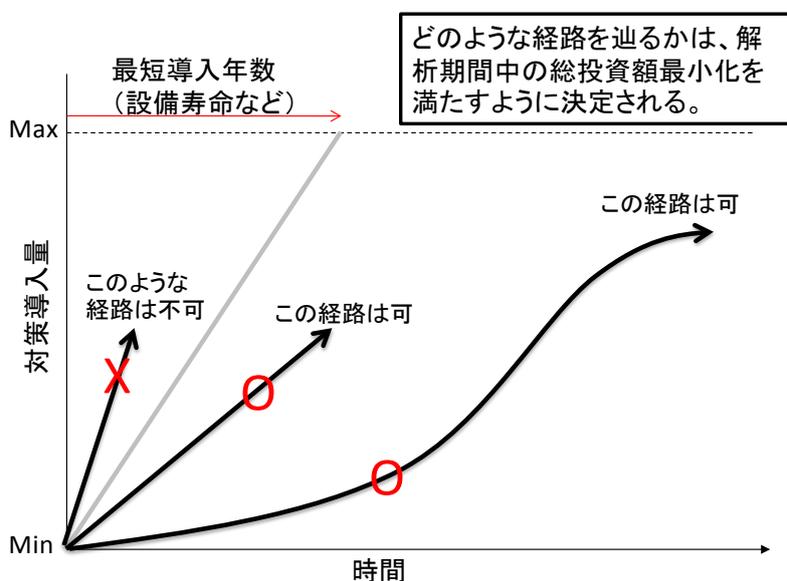


図 A.2. 実施に要する期間と対策導入経路評価の関係

(2) 導入に要する費用

施策導入に要する費用として固定費と燃料費の 2 種を考慮し、それぞれ従来型との差分を対策導入タイミングの評価基準として用いている。なお、政策については、政策の検討・立案に要する費用が明らかなものについては固定費として計上し、燃料費は考慮しない。

毎年の固定費用は、習熟効果を勘案した評価によりモデルにて内生的に決定されるが、その初期値 $c_{f,init}$ [円/unit] は、対策の初期固定費用 $f_{lcs,init}$ [円/unit] と従来型 f_{conv} [円/unit] との差分により外生的に設定する。

$$c_{f,init} = f_{lcs,init} - f_{conv} \quad (A.1)$$

従来型の扱いについては、施策の種類ごとに異なる想定を置いている。具体的には、効率向上対策については、現行の機器のストック平均費用を従来型と見なし、燃料転換対策については燃料転換前の機器の費用、CCSについてはCCS非併設火力発電所の費用をそれぞれ従来型として固定費用を算出している。政策については、従来型の費用はすべてゼロと見なしている。対策の初期固定費用と従来型の固定費用は、省エネセンター「省エネカタログ（2000/2005/2008）」、IEA「Energy Technology Perspective（2008）」、環境省「地球温暖化対策技術評価調査」、中央環境審議会資料、日本自動車工業会「自動車ガイドブック（2007-2008）」、電動車輦普及センターHP等に加え、市場調査を実施して設定した。

2.4. 施策間の関係性の付与

ある施策の導入を開始するためには、事前に別の施策が導入されている必要がある、といった状況は多い。この事前に導入しておくべき施策のことを、プレリクエスト施策と呼ぶ。たとえば、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が必要などさまざまである。本解析では12の方策をもとに、完全型関係と部分型関係の2種類の関係性を設けてそれぞれの施策についてプレリクエスト施策との関係を付与した。

完全型関係とは、プレリクエスト施策の導入が終了しないと当該施策の導入が開始できない関係であり、プレリクエスト施策が政策である場合にこの関係性が当てはまることが多い（図A.3）。

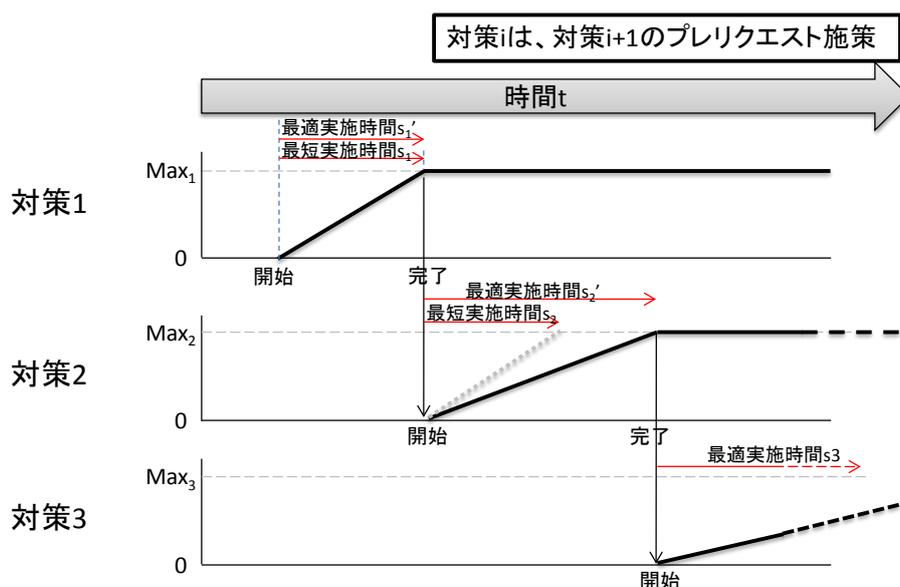


図 A.3. 完全型関係の概要

部分型関係は、プレリクエスト施策の t 期の導入量が、 $t+1$ 期の施策導入量を制約する関係である (図 A.4)。たとえば、 t 期に電気供給スタンドが全国の 1 割の地域に敷設されたならば、 $t+1$ 期にはその 1 割の地域で電気自動車の普及が可能といった状況を表現する。

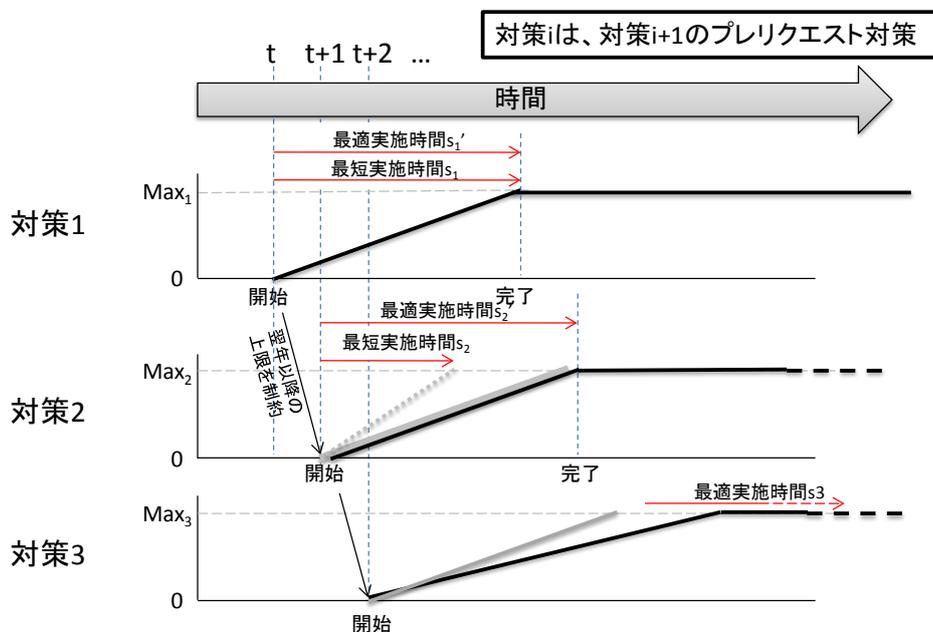


図 A.4. 部分型制約の施策導入量評価

2.5. バックキャストモデルを用いた定量検討

(a) 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。

(b) 最適化における目的関数

各期の施策 m の導入フロー量 $Q_{f,m}(t)$ は、原則的には解析期間中の費用最小化を通じて決定される。本モデルでは、「対策導入フロー量」は t 期の低炭素型技術の導入台数あるいは普及割合の増加分を表し、「政策導入フロー量」は低炭素社会に関連する政策の検討進展具合を表すこととした。

費用は固定費と燃料費を対象とし、割引率 $r=3\%$ で現在価値に換算して評価した。

$$\min T_C = \sum_{\tau=t_0}^{t_L} \left\{ \frac{1}{(1+r)^{\tau-t_0}} \times \sum_m (F_m(\tau) - V_m(\tau)) \right\} \quad (\text{A.2})$$

- T_C : 解析期間中の費用総計 [円]
 $F_m(t)$: 対策 m の t 期の総固定費用 (追加分) [円]
 $V_m(t)$: 対策 m の t 期の総燃料費節減分 (節減分は正とする) [円]

各年の総固定費用 (追加分) $F_m(t)$ は、 t 期の施策導入フロー量と t 期の習熟効果を加味した固定費用 $C_m(t)$ [円/unit] から以下のように算出する。なお、政策については固定費用算出にあたって習熟効果は考慮しない。

$$F_m(t) = (C_m(t) - f_{conv}) \times Q_{f,m}(t) \quad (\text{A.3})$$

燃料費追加分は、 t 期に稼働しているコホート h の施策ストック $Q_m(h)$ [unit] に、コホート別単位導入量あたりの部門 i のサービス j で使用される燃料 k のエネルギー消費量削減分 $e_{red,m}(h,i,j,k)$ を乗じ、 t 期の燃料種 k の価格 $p_k(t)$ を加味して求める。施策ストックに関し、「対策ストック」は t 期に導入されている対策の総台数もしくは総普及率を表し、「政策ストック」は t 期の政策検討状況そのものを表すこととした。ここで、 H_t は t 期に稼働しているコホートを表す集合である。

$$V_m(t) = \sum_k \left\{ p_k(t) \times \sum_{i,j} \left(\sum_{h \in H_t} e_{red,m}(h,i,j,k) \times Q_m(h) \right) \right\} \quad (\text{A.4})$$

(c) 習熟効果の評価

一般に、初期費用を c_0 、累積導入量を $QCUM(t)$ 、習熟率を p としたときの t 期の費用 $c(t)$ は

$$c(t) = c_0 \times QCUM(t)^{\frac{\log p}{\log 2}} \quad (\text{A.5})$$

にて表される。これは非線形式であり、本モデルでは習熟曲線を線形化して用いることとした。具体的には、習熟曲線を複数の直線で分割し、その和により習熟効果が起こった場合の費用逡減の状況を表現する。なお、習熟効果は対策のみを対象とし、政策は習熟効果がなく常に一定の固定費用を要すると想定した。たとえば図 A.5 は、習熟曲線を 6 本の直線で分割した様子を示す。この方式では、累積導入量が 1 以下の領域にて理論値よりも高額な費用が算出されることになるが、これを避けるためにさらに累積導入量が 1 以下の領域

に対して 1 本直線を追加して、累積導入量が小さな範囲で理論値との整合を取るようになっている。

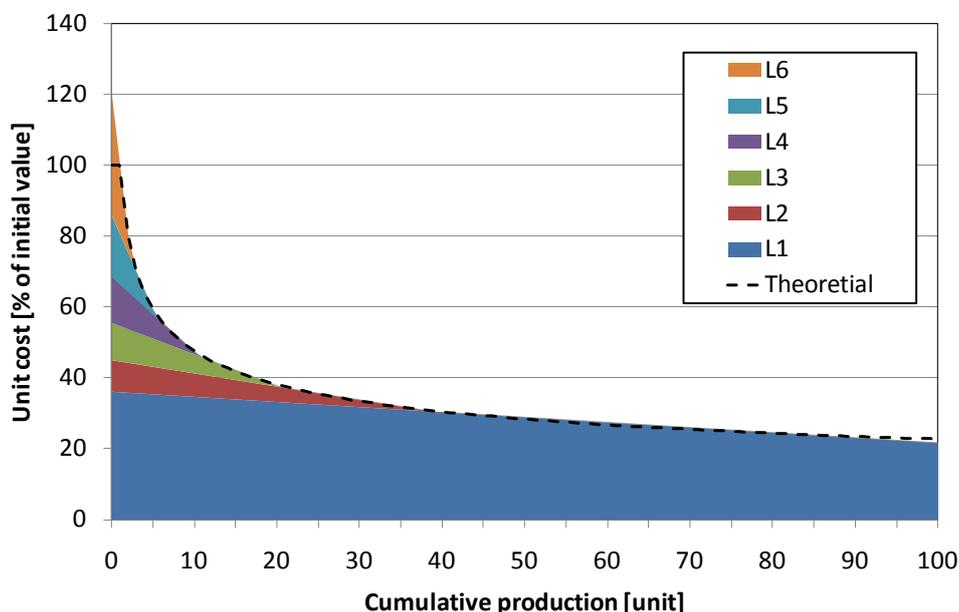


図 A.5. 習熟曲線線形化手法の例

具体的には、施策 m の t 期時点での固定費用 $C_m(t)$ [円/unit] は、初期値 $f_{lcs,init}$ [円/unit] に、習熟曲線を線形化した l 個の直線 $L_l(t)$ に、累積導入量が 1 以下の領域を補正するゼロ以下の値のみを持つ傾き g_c 、切片 n_c の直線 $L_c(t)$ の和を乗じて算出する。それぞれの直線 $L_l(t)$ は、 t 期の累積導入量 $QCUM_m(t)$ [unit] と習熟曲線線形化によって得られた傾き g_l と切片 n_l より求める。ただし、 $L_l(t)$ はゼロ以下にはならないものとしている。

$$C_m(t) = f_{lcs,init} \times \left(\sum_l L_l(t) + L_c(t) \right) \quad (A.6)$$

$$L_l(t) = g_l \times QCUM_m(t) + n_l \quad (\text{if } > 0), 0 \text{ (otherwise)} \quad (A.7)$$

$$L_c(t) = g_c \times QCUM_m(t) + n_c \quad (\text{if } < 0), 0 \text{ (otherwise)} \quad (A.8)$$

(d) エネルギーサービス供給・CO₂排出量

道筋検討にあたっては、施策の導入有無にかかわらず外生的に与えたサービス需要量を満足させる必要がある。本モデルでは、サービス需要量は直接扱わず、すべてエネルギー消費量に変換して定式化している。

具体的には、図 A.6 に示すように①活動量をすべて従来型で満足させたと仮定して t 期の

部門 i サービス種 j のエネルギーサービス需要量 (BAU) $d_{BAU}(t,i,j)$ [Mtoe] と、燃料種 k ごとのエネルギー消費量 (BAU) $e_{BAU}(t,i,j,k)$ [Mtoe] を算出し、②従来型のエネルギー消費量 $E_{conv}(t,i,j,k)$ [Mtoe] と導入された対策のエネルギー消費量 $E_{lcs}(t,i,j,k)$ [Mtoe]、対策導入によるエネルギー消費削減分 $E_{red}(t,i,j,k)$ [Mtoe] の総和がエネルギー消費量 $e_{BAU}(t,i,j,k)$ [Mtoe] に等しくなるように対策導入量を決定し、③対策導入後の CO_2 排出量 $CO_2(t)$ [t- CO_2] を求める、3段階により CO_2 排出量変化を算定した。

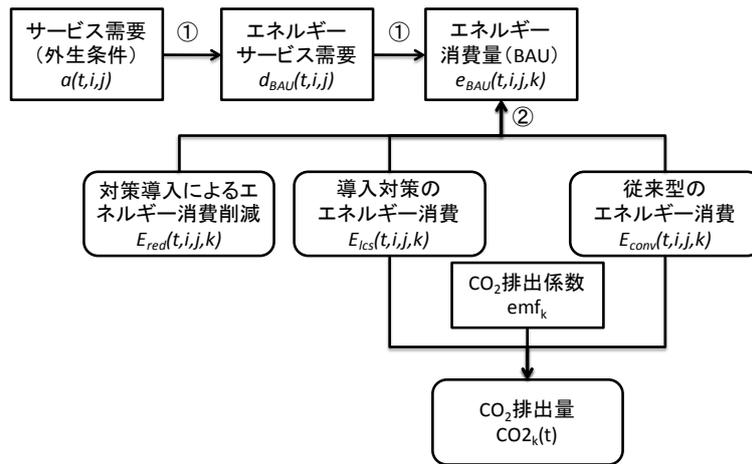


図 A.6. CO_2 排出量算定フロー

①エネルギーサービス需要および消費量 (BAU) の算出

エネルギーサービス需要 (BAU) $d_{BAU}(t,i,j)$ [Mtoe] は、部門 i サービス種 j のサービス需要量 $a(t,i,j)$ [unit]に、単位サービス需要量あたりのエネルギーサービス需要 $u(t,i,j)$ [Mtoe/unit] を乗じて求める。

$$d_{BAU}(t,i,j) = a(t,i,j) \times u(t,i,j) \quad (A.9)$$

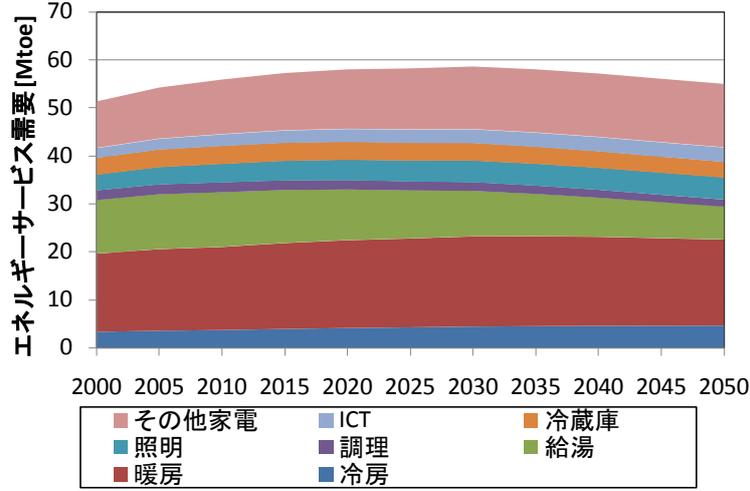


図 A.7. 家庭部門のエネルギーサービス需要 (BAU) (シナリオ A)

一例として、家庭部門のエネルギーサービス需要 (BAU) (シナリオ A) を図 A.7 に示す。施策の中には、エネルギーサービス需要変化に直接寄与するものもあるが、本モデルではそれらの施策もエネルギー消費量変化に再解釈して取り扱うこととしている。

次に、エネルギーサービス需要をすべて従来型にて供給したと仮定してエネルギー消費量 $e_{BAU}(t,i,j,k)$ [Mtoe] を求める。具体的には、エネルギー需要 $d_{BAU}(t,i,j)$ [Mtoe] に、従来型の平均効率 $\eta_{conv}(t,i,j,k)$ [-] と燃料シェア $s_{conv}(t,i,j,k)$ [-] を乗じて求める。

$$e_{BAU}(t,i,j,k) = d_{BAU}(t,i,j) \times \eta_{conv}(t,i,j,k) \times s_{conv}(t,i,j,k) \quad (A.10)$$

②エネルギー消費量のバランス

エネルギー消費量 (BAU) $e_{BAU}(t,i,j,k)$ [Mtoe] は、従来型のエネルギー消費量 $E_{conv}(t,i,j,k)$ [Mtoe] と対策 m のエネルギー消費量 $E_{lcs,m}(t,i,j,k)$ [Mtoe] に対策導入によるエネルギー消費量削減分 $E_{red,m}(t,i,j,k)$ [Mtoe] を加えたものに等しくなくてはならないとした。

$$E_{conv}(t,i,j,k) + \sum_m (E_{lcs,m}(t,i,j,k) + E_{red,m}(t,i,j,k)) = e_{BAU}(t,i,j,k) \quad (A.11)$$

ここで、対策導入によるエネルギー消費量削減分 $E_{red,m}(t,i,j,k)$ [Mtoe] は、 t 期に稼働しているコホート h の施策ストック $Q_m(h)$ [unit] に、コホート別単位導入量あたりのエネルギー消費量削減分 $e_{red,m}(h,i,j,k)$ [Mtoe/unit] を乗じて求めるものとする。

$$E_{red,m}(t,i,j,k) = \sum_{h \in H_t} e_{red,m}(h,i,j,k) \times Q_m(h) \quad (A.12)$$

民生部門や産業部門などの需要部門にて電力消費量を変化させる施策については、エネルギー消費量を下式を用いて電力需要全体に対する対策導入による電力消費量変化割合 $S_{red}(t, Ele)$ [-] に変換し、電力部門のエネルギー消費量変化と見なしてエネルギーバランスおよび CO₂ 排出量変化を評価している。

$$E_{red,m}(t, Ele, j, k) = eBAU(t, Ele, j, k) \times (1 + S_{red}(t, Ele)) \quad (A.13)$$

$$S_{red}(t, Ele) = \sum_{i,j} \left\{ \frac{\sum_m \left(\sum_{h \in H_t} e_{red,m}(h, i, j, Ele) \times Q_m(h) \right) - e_{BAU}(t, i, j, Ele)}{eBAU(t, i, j, Ele)} \right\} \quad (A.14)$$

③CO₂ 排出量

t 期の CO₂ 排出量 $CO2(t)$ [t-CO₂] は、従来型のエネルギー消費量 $E_{conv}(t, i, j, k)$ [Mtoe] と対策 m のエネルギー消費量 $E_{lcs,m}(t, i, j, k)$ [Mtoe] に CO₂ 排出係数 emf_k [t-CO₂/Mtoe] を乗じて求める。

$$\sum_k \left\{ emf_k \times \sum_{i,j} \left(E_{conv}(t, i, j, k) + \sum_m E_{lcs,m}(t, i, j, k) \right) \right\} = CO2(t) \quad (A.15)$$

なお、燃料種ごとの CO₂ 排出係数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 70% 以下になるように制約条件を課した。

$$CO2(t)_{t \geq 2050} \leq (1 - 0.7) \times CO2_{1990} \quad (A.16)$$

(e) 施策導入量に関する制約

t 期における施策 m のストック $Q_m(t)$ [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 のストックの総和にて表される。

$$Q_m(t) = \sum_{h \in H_t} Q_m(h) \quad (A.17)$$

対策のストック $Q_m(t)$ [unit] は、2050年70%削減シナリオ検討にて示された導入量 $q_{max,m}$ [unit] を上限とする制約を課した。

$$Q_m(t) \leq q_{max,m} \quad (A.18)$$

また、プレリクエスト施策 m_p がある場合には、その関係性に応じてストック量に制約条件を課している。

完全型関係については、 t 期にプレリクエスト施策が完了しているかどうかのフラグ $P_{mp}(t)$ [-] を設けて、フラグが1になった場合（完了している場合）には $t+1$ 期のストック量は上限 $q_{max,m}$ まで導入可能とし、0の場合（途中の場合）には $t+1$ 期のストック量はゼロに制約することとしている。なお、ひとつの対策に複数の完全型関係があることを想定して、完全型関係にあるプレリクエスト施策のフラグのうち、最小のものを制約条件として用いる。

$$Q_m(t+1) \leq q_{max,m} \times \left(\min_{m' \in m_p} P_{m'}(t) \right) \quad (A.19)$$

$$P_m(t) = 1 \text{ (if } Q_m(t) = q_{max,m} \text{)}, \quad 0 \text{ (otherwise)} \quad (A.20)$$

部分型関係は、プレリクエスト施策の t 期のストック量が、 $t+1$ 期のストック量の上限として機能する関係である。ここでは、ストック量をその最大導入量で規格化して制約条件化することとした。なお、完全型関係と同様に、ひとつの対策に複数の部分型関係があることを想定して、部分型関係にあるプレリクエスト施策の対策ストックのうち最小のものが制約条件となるようにした。

$$Q_m(t+1) \leq q_{max,m} \times \left(\min_{m' \in m_p} \frac{Q_{m'}(t)}{q_{max,m'}} \right) \quad (A.21)$$

t 期の対策導入量（フロー）については、対策の実施期間 s_m [年] に基づく制約条件を課した。具体的には、最大導入量 $q_{max,m}$ [unit] を対策の実施期間 s_m [年] で除して1年あたりの最大導入可能量（フロー）を求め、対策導入量（フロー）はそれ以下になるように制約している。

$$Q_{f,m}(t) \leq \frac{q_{max,m}}{s_m} \quad (A.22)$$

問い合わせ先

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2
独立行政法人 国立環境研究所
地球環境研究センター
主任研究員 藤野純一 (fuji@nies.go.jp)



<http://2050.nies.go.jp>