

日本の2050年の長期エネルギー需給シナリオ - CO₂ 排出量の長期目標と大幅削減の可能性に関する試算¹

小宮山 涼一

(財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット付
米国エネルギー省ローレンスバークレー国立研究所客員研究員

要約

本分析では、2050年の日本のエネルギー需給とエネルギー起源のCO₂排出量を予測した。各種シナリオの下での分析の結果、日本の2050年のCO₂排出量は、現状比(2005年度比)で約26%から約58%削減される可能性のあることが示された(図1)。これらの結果から、2050年のCO₂排出量の長期削減目標として、現状比約3割〜約6割削減を目標とすることが一つの可能性として考えられる。この中で、2050年のCO₂排出量を現状比で約60%削減するための方策をエネルギー需給面から見ると、省エネルギーの推進と非化石エネルギーの導入拡大が特に必要になる。2005年から2050年にかけて、ほぼ石油危機後の省エネペースに匹敵する年率1.9%にて省エネを推進するとともに、2050年の一次エネルギー供給に占める原子力の構成比を約3割、新エネルギーと水力・地熱等を約2割、非化石エネルギー合計で約5割まで拡大する必要がある。また2050年の電源構成(発電量構成)を見ると、原子力の構成比が6割、太陽光発電等の新エネ発電が約2割、水力が1割、火力発電が約1割となり、電力供給の大幅な脱炭素化が必要となる。これらを踏まえ、2050年のCO₂排出量を2005年比約60%削減する、対策技術別のCO₂排出削減効果をみると、省エネルギーの寄与が最も大きく、次いで太陽光、原子力、その他新エネルギーがCO₂排出量の大幅削減に大きく貢献する(図2)。ただし同シナリオの実現については、原子力や革新的技術の大規模な導入等、現実的には大変厳しい技術的、経済的課題を克服することが必要である。また、本分析結果は、将来の経済情勢や技術開発動向により、大きく変化することに留意する必要がある。

図1 2050年のCO₂排出量の見通し

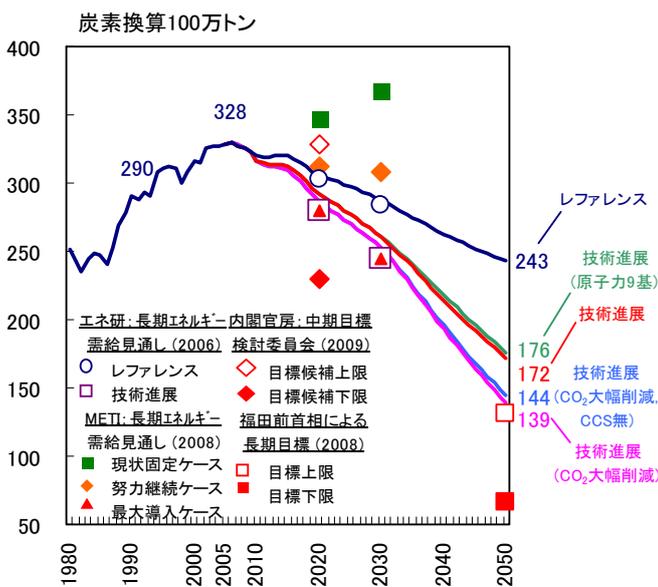
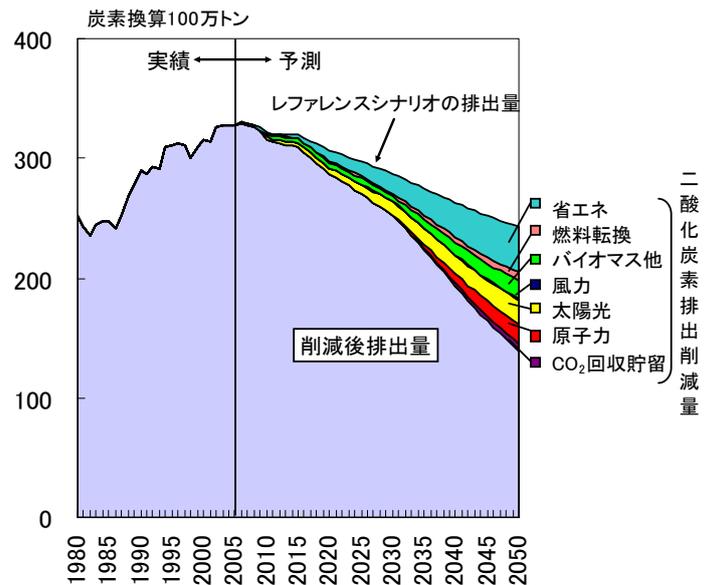


図2 対策技術別のCO₂排出削減効果
- 2050年のCO₂排出量を2005年比約60%削減する場合 -



¹本分析は、(財)日本エネルギー経済研究所、並びに、米国エネルギー省(U.S. Department of Energy, DOE)省エネルギー再生可能エネルギー局(Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE)計画・分析・評価部門(Planning, Analysis, and Evaluation section) (ファンド番号 No.DE-AC02-05CH11231)の支援の下で行った。両機関に深く謝意を表す。

1. はじめに

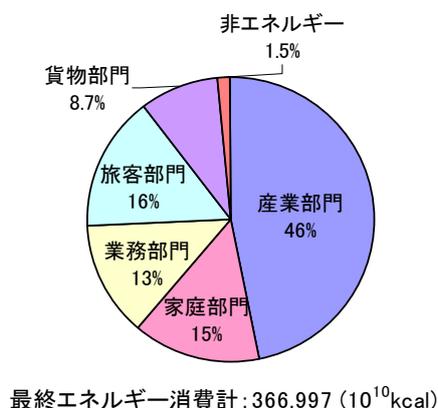
現在、中国、インドなどアジアを中心としたエネルギー需要の増大、中東、ロシア等エネルギー生産国における資源ナショナリズムの台頭、ポスト京都議定書を巡る国際交渉に見られるように、エネルギーや地球環境問題を巡る国際情勢が大きく変化している。こうした状況の中、国内資源に乏しい日本は、エネルギー安全保障の確保と地球温暖化問題の解決に向けて、エネルギーの需要面と供給面から見てバランスの取れた長期的なエネルギー戦略を描くことが求められている。この中で特に、エネルギー・環境技術の展望を描くことが、エネルギー・環境問題を解決する上で重要であると考えられる。新しい技術の研究開発、普及を促進すれば、省エネルギー、エネルギー自給率の向上、CO₂排出削減の実現に複合的に貢献すると同時に、優れたエネルギー技術の輸出等を通じた日本の産業の国際競争力強化など、持続的な経済発展にも寄与すると考えられる。そこで本稿では、今後の研究開発の進展により普及可能性のあるエネルギー・環境技術を考慮に入れて、2050年という長期的なタイムスパンで日本のエネルギー需給のアウトラインを示しながら、これらの技術が日本のエネルギー需給の安定化やCO₂排出量の削減に寄与するポテンシャルを整合的に検討する。

2. 日本のエネルギー消費構造とCO₂排出量

2-1 日本のエネルギー消費

日本の最終エネルギー消費構成(2006年)を見ると、産業部門が46%を占め、民生部門(家庭、業務)が28%、運輸部門(旅客、貨物)が25%を占める(図2-1)。最近のエネルギー消費の伸びを見ると、産業部門はほぼ横ばい、家庭部門や業務部門は増加傾向、旅客部門、貨物部門は減少傾向にある。

図2-1 日本のエネルギー最終エネルギー消費(2006年)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編「エネルギー・経済統計要覧」(文献(1))

2-2 産業部門

長期的な視点で各部門のエネルギー消費を横断的に展望すると、産業部門での大幅な省エネルギーの実現や、省資源、環境負荷の低減、石油代替資源の確保には大変な企業努力を要するものと考えられる。産業のエネルギー消費はこれまで、高付加価値を有する製品の製造等を中心に産業活動を拡大しつつ、高効率設備の導入普及を進めてエネルギー原単位の悪化を抑制し、エネルギー消費量をほぼ横ばいに維持してきた。長期的観点から見た場合、大幅な省エネルギーを実現する次世代産業プロセスには、革新的な技術開発が求められ、その実現に向けた研究開発には特に多くの時間やコストが必要であると考えられる。また産業部門に対する大幅な省エネルギーを求める省エネルギー基準等の規制の制定等は、生産コストの増加等を通じて日本の産業活動に悪影響を及ぼし、持続的な経済成長を阻害しかねない。長期的な、製造コストの上昇、国際的な産業競争力の低下、産業拠点を日本から海外に移動させる産業活動の空洞化などが、日本の経済成長の下振れリスクとなる可能性がある。日本のGDPを支出面から見た場合、企業の経済活動を反映する民間企業設備投資がGDPに占める割合は15%程度で

あるが(文献(2))、約 6 割を占める民間最終消費支出等への波及効果の面において、日本の経済成長をけん引する大変重要なドライバーであり、民間投資を阻害する産業部門の省エネルギー規制の制定には細心の注意を払うことが必要である。また、高効率設備導入等をはじめとする地球温暖化対策には、経済的な負担が必要であり、設備投資の拡大等を通じた持続的な経済成長なしには地球環境対策も進まない。そのため、経済成長と環境保全の同時達成を念頭に置いた政策的配慮が、産業部門には特に必要であると考えられる。

2-3 家庭部門、業務部門

家庭部門のエネルギー消費を長期的な視点で見ると、世帯数、機器効率、所得水準等の推移が重要な要素となる。家庭部門のエネルギー消費は過去、機器効率は向上したが、所得の増加、世帯数増加により保有台数が増加し、結果的にエネルギー消費量が増加してきた。しかし世帯数は今後、日本の人口減少を背景に、2015 年をピークとして減少に転じると予測されている(文献(3))。また、家庭部門の用途別需要を見た場合、暖房、冷房など空調需要が約 25%、給湯需要が約 30%、照明・動力需要が 35%を占める(文献(1))。長期的に見た場合、これらの 3 つの用途での大幅な省エネルギーを実現する、現段階で有望な技術がいくつか存在する。空調需要では、企業の技術開発、省エネルギー基準等を背景にエアコンの効率向上が見込まれ、給湯需要では高効率ヒートポンプ給湯器、動力照明では LED 照明など、既存技術に比較して大幅な効率向上を達成する技術が存在する。よって、家庭部門の省エネポテンシャルは大きいと考えられるが、所得水準の向上に伴う機器保有台数や機器稼働時間の増加により、空調、動力需要自体が増加する上振れ要因も存在する。

業務部門ではこれまで、事務所ビルをはじめとする延床面積の増加、情報機器の普及による電力需要の拡大を反映して、エネルギー消費量が増加しており、エネルギー消費原単位も改善していない。今後も日本の経済構造におけるサービス産業の増加に伴い、情報機器の増加が継続し、エネルギー消費の増加要因になる可能性が高い。ただし延床面積は今後伸びが飽和し、延床面積の増加がエネルギー消費の増加に大きく寄与する可能性は低いと見られる。業務部門のエネルギー消費量の約 2 割を占める事務所ビルの用途別需要を見ると、約 4 割が空調需要、約 2 割が照明、約 3 割が動力需要である(文献(4))。業務部門全体でも、約 3 割が空調需要、動力照明が半分近くを占め(文献(1))、高効率空調機器、LED 照明、低消費電力情報機器等の導入による省エネルギーの推進が特に重要な課題となる。また、建築物の新築、改修の際に、断熱対策や、省エネ換気/自然照明の採用などパッシブ対策の強化も有効である。ただし一般に、ビルや住宅等の建築物の寿命は長いこと、パッシブ対策の効果の波及速度は限定的ではあるが、家庭部門、業務部門ともに高断熱性能、高機密性能を備えた建築材や断熱窓の導入は、大幅な省エネルギーを実現する上で重要である。またオンサイト電源として、住宅の屋根やビルの屋上に太陽光発電設備を設置し、CO₂排出量の削減や、建築物のエネルギー自給率の向上を図ることも重要なオプションとなる。既存の省エネ技術と太陽光発電の設置により、ビル建築物の正味のエネルギー消費をゼロ(ZEB: Net Zero-Energy Building)にする概念が提唱されており、民生部門における大幅な省エネポテンシャルが推計、報告されている(文献(5))。また熱需要の大きいホテル、病院や住宅に高効率コージェネ(燃料電池等)を設置することも有効である。発電に伴う排熱の有効利用により、発電、熱供給の総合効率を飛躍的に高め、燃料消費の大幅削減に貢献することが期待されている。また、IT 社会の進展により、パソコンやデータセンター等の IT 機器保有台数が今後ともオフィス等民生部門で増加すると予測されるため、これらの省エネルギーも重要な政策課題となる。特に情報のデジタル化に伴い増加すると見込まれるデータセンターは、電力消費とともに、空調用エネルギー消費が大きく、その規模はほぼ電力消費と同量に達すると推定される(文献(6))。そのため、空調エネルギーの省エネルギー化も含めた総合的対策が必要となる。2005 年の日本のサーバーによる直接電力消費は 65 億 kWh、周辺機器、空調需要による電力消費も合わせると直接消費の 2 倍に相当する 129 億 kWh に達すると推定されている(文献(6))。2005 年の業務部門の電力消費量は約 2,900 億 kWh であり、サーバーの電力消費が占める割合は約 4%に達すると推定されるため、データセンターの省エネルギー対策も重要な課題となる。

2-4 旅客部門、貨物部門

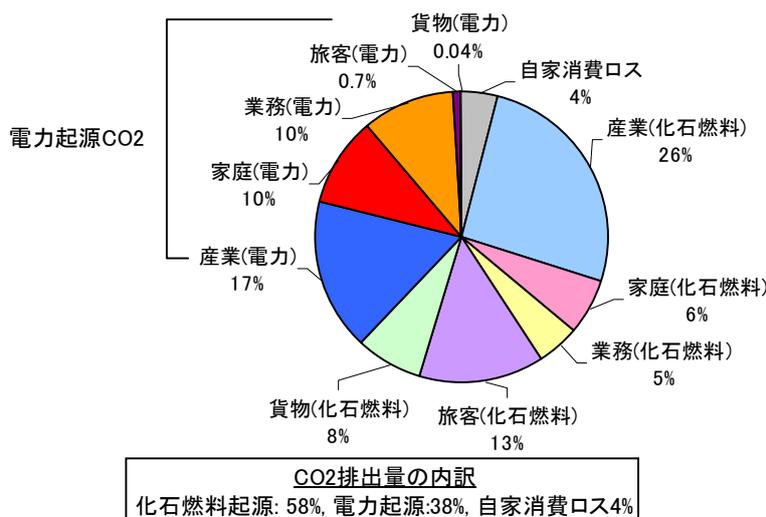
運輸部門ではこれまで、自動車の燃費効率向上が急速に改善したものの、自動車保有台数の増加や大型化によ

り、エネルギー消費量が増加してきた。貨物部門では、製造業の軽薄短小化など、産業構造の変化を受けやすく、近年のエネルギー消費は減少傾向を続けている。運輸部門では、長期的に、燃費効率の改善と、安定供給の視点から、石油代替燃料の導入が重要となる。ハイブリッド自動車の普及拡大による飛躍的な燃費効率改善や、バイオ燃料、電気自動車、天然ガス自動車、プラグイン・ハイブリッド車、燃料電池自動車など石油系燃料を直接消費しない技術の普及や、先進的な公共交通システム等をはじめとする石油をより消費しない交通体系へのシフトを通じて、石油消費を抑制することが重要な課題となる。電気や水素を燃料とする自動車の普及のためには、それらを供給するインフラの整備や貯蔵するための技術開発(蓄電池、水素貯蔵合金等)も必要となる。バイオエタノール等のバイオ燃料は、食糧問題との競合を回避して普及すれば、石油代替燃料の1つの有力な選択肢になりうる。バイオ燃料の増産が、原料となるトウモロコシなどの穀物価格高騰の原因となりうるため、食糧や原材料利用との競合を緩和する技術開発が重要である。このため、農作物でも商品価値が無い茎や、エネルギー作物と呼ばれる原料作物など、食糧問題と直接競合しないセルロース系のバイオマスを分解、発酵させてエタノールを作る技術開発や、食糧生産に適さない土地でバイオ燃料の原料作物を栽培する研究開発が重要となる。また、天然ガスから製造される合成燃料である DME や GTL の技術開発も、液体燃料の安定供給の面から重要な技術オプションとして位置づけられる。

2-5 CO₂ 排出量

エネルギー起源の CO₂ 排出量を減少させるには、省エネルギー、燃料転換を進める必要がある。重要なポイントは、これらの削減施策を、それぞれの経済的コストを見ながら、ベストミックスを図ることである。例えば、需要サイドにおいて省エネルギーのみを徹底的に進め、エネルギー消費量を可能な限りゼロに近づけることができれば CO₂ 排出量はほぼゼロにはなるが、現実的には、熱力学の法則から来る物理的境界、コスト上昇に伴う経済成長への悪影響を伴うため、省エネルギーのみを進めることは得策ではない。また、供給サイドから見れば、エネルギー供給を全て再生可能エネルギーで賄えば、省エネを進めなくても CO₂ 排出量をゼロにはできるが、現段階では、再生可能エネルギーの経済面、物理的制約から見れば、その供給力は依然として限定的であり、無理に進めればエネルギー価格の上昇を引き起こし、経済成長への悪影響を及ぼす。このため省エネ、燃料転換をバランスよく組み合わせた地球環境政策の施行が必要となる。

図2-2 日本の CO₂ 排出量の内訳(2006 年)

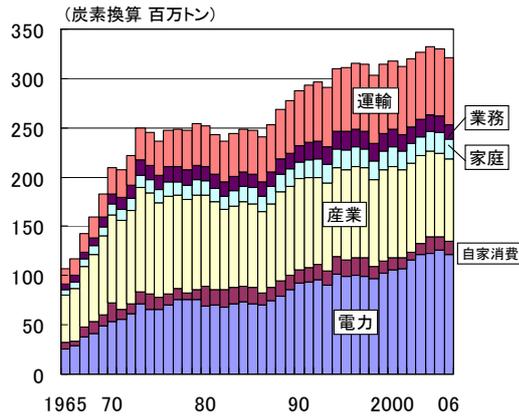


(出所) (財)日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編「エネルギー・経済統計要覧」(文献(1))

日本の CO₂ 排出量の内訳を見ると、化石燃料直接消費由来の排出量は全体の約 6 割、電力消費起源は約 4 割で

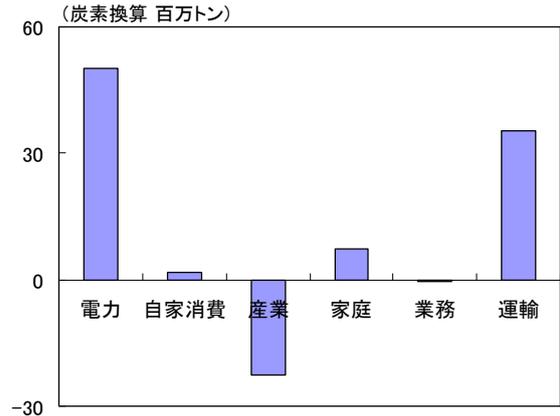
ある(図 2-2)。例えば、供給面で太陽光発電や原子力発電などゼロエミッション電源の導入を進め、需要面で省エネ機器の導入を進めれば、この約 4 割を占める電力起源の排出量を大幅に削減することが可能となる。化石燃料起源の CO₂ 排出に関しては、産業部門が約 3 割で太宗を占めるが、これを減らすためには、革新的な工業プロセスの開発、導入が必要であり、短期的な大幅削減は困難であると考えられ、長期的対応が必要である。運輸部門の化石資源の消費に関しては、長期的に見れば、既に普及しつつあるハイブリッド自動車導入等による燃費効率改善、バイオ燃料導入、既に開発されている電気自動車、プラグイン・ハイブリッド車など、化石資源を直接消費しない自動車の導入可能性があり、運輸部門が占める約 2 割分も長期的に大幅削減が可能であると考えられる。

図2-3 日本の CO₂ 排出量の推移(部門別)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編「エネルギー・経済統計要覧」(文献(1))
 (注) 図中の“電力”以外の CO₂ 排出量の増減は全て化石燃料の消費の増減に由来する。

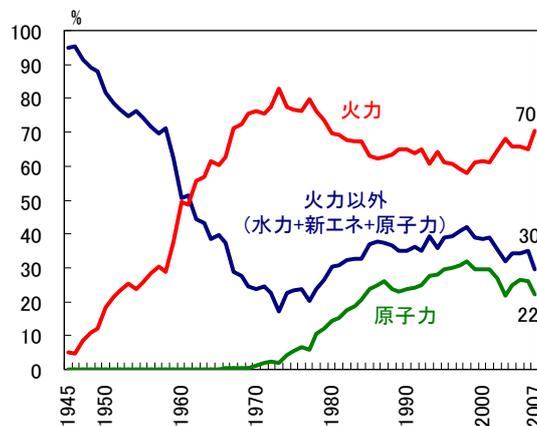
図2-4 日本の CO₂ 排出量の伸び(1973 年～2006 年)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編「エネルギー・経済統計要覧」(文献(1))
 (注) 図中の“電力”以外の CO₂ 排出量の増減は全て化石燃料の消費の増減に由来する。

部門別 CO₂ 排出量を見ると、電力や運輸部門における CO₂ 排出量の伸びが顕著である(図 2-3、図 2-4)。このため CO₂ 排出量を大幅に削減するには、電力機器の省エネの推進、発電部門の脱炭素化、自動車の燃費効率向上、次世代自動車の導入等の対策が特に重要である。家庭や業務部門における化石燃料由来の CO₂ 排出量は相対的に大きな伸びを見せていない。産業部門では大きく減少しており、家庭や業務においても相対的にほとんど増加していない。電力部門における CO₂ 排出量の増加は、供給サイドでは依然として火力発電が供給の中心にあること(図 2-5)、需要サイドでは、産業部門における高付加価値を有する製品、業種へのシフト、業務部門における情報機器の普及進展、家庭部門における電力消費機器保有台数の増加等に大きく依存していると考えられる。

図2-5 発電量構成の推移



(出所) 電気事業連合会統計委員会編、「電気事業便覧」、2008 年(文献(7))

3. シナリオ分析の枠組み

エネルギー需給予測は、内外の経済情勢や、国際エネルギー情勢、技術開発動向等の背景要因によって大きく変動する。2050年というタイムスパンで予測する場合、これらの前提条件が大きく変わる可能性が存在するため、複数の将来像を描くことが重要である。本分析では、標準的なエネルギー環境技術の展開を見込んだレファレンスシナリオと、新技術の普及や機器効率の改善がより一層進展する技術進展シナリオの下で、将来のエネルギー需給シナリオを描くこととする。

●レファレンスシナリオ

現在の内外の経済社会情勢、現行の技術体系を前提として、蓋然性が高いと考えられる各種の想定のもとで趨勢的に推計したエネルギー需給シナリオである。

●技術進展シナリオ

技術進展シナリオでは、現在、研究開発段階、あるいは導入初期段階にあるエネルギー環境技術が、レファレンスシナリオよりも飛躍的に市場に導入され、機器効率等の技術パフォーマンスが大幅に向上すると想定した。

またこれらのシナリオは、エネルギー経済・技術モデル(文献(9))を用いることにより作成した。

4. 主要前提

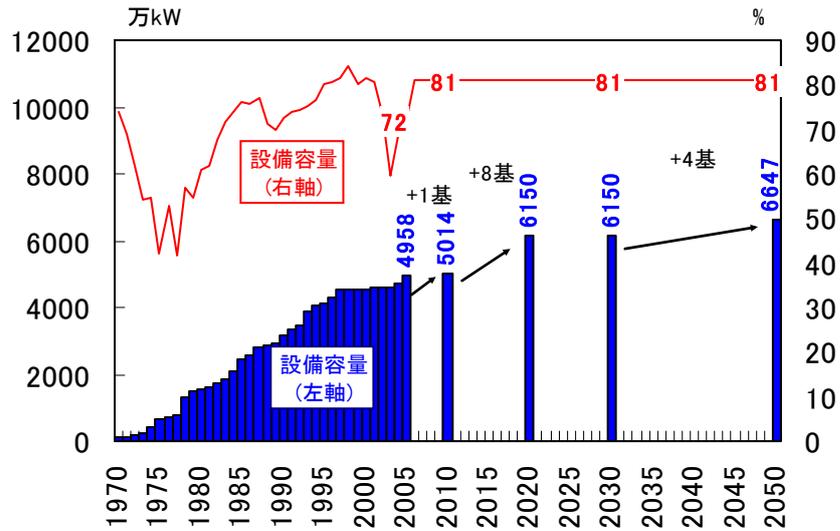
4-1 経済成長等

経済成長、人口、原油価格、素材生産、建築物床面積等の主要前提条件は文献(8)、文献(9)をほぼ踏襲する。経済成長率(実質 GDP 成長率)は2005年から2050年にかけて年率1.3%、人口は2005年約1億2,777万人から2050年には9,515万人へ減少する。輸入原油価格は、米国エネルギー省の想定(2005年の約53ドル/bbl(米国輸入原油価格、2006年実質価格)から2050年には約78ドル/bblへ上昇(文献(10)))を参考に設定する。各種技術の効率改善や新技術の導入開始時期など技術全般の想定は、エネルギー総合工学研究所により作成されたエネルギー技術ロードマップ(文献(11)、文献(12))や経済産業省による「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」(文献(13))を参考に設定する。これらの前提条件は、レファレンス、技術進展シナリオともに同一の前提条件として用いる。

4-2 原子力発電

原子力発電の見通しは、政府の電力供給計画(文献(14))、長期エネルギー需給見通し(文献(8))を下に設定する。平成20年度電力供給計画における原子力発電所開発計画によれば、計13基(1,723万kW)の原子力発電設備の建設が計画され、今後10年間で新たに運転開始する予定となっている原子力発電所は、9基計約1,226万kWである。政府の長期エネルギー需給見通しでは、約9基が2030年までに建設されると想定されている。そこで本分析におけるレファレンスシナリオと技術進展シナリオでも、同見通しを踏襲し、2030年にかけて約9基が建設されると想定した。2030年以降については、電力供給計画において開発が計画されている13基の内、残り約4基が全て建設されるものと想定した(図4-1)。政府の長期エネルギー需給見通しでは、日本原子力発電所敦賀1号(35万7,000kW)の2010年度の営業運転停止が考慮されていることから、本シナリオでも考慮に入れる。その他の原子力発電所については、高経年化対策の実施により、運転停止や廃炉は行われぬものと想定する。この結果、原子力設備量は、レファレンス、技術進展シナリオ共に、2005年4,958万kWから2050年には6,647万kWまで拡大する。設備利用率については、将来の定期検査の法的枠組みの変更により、利用率がさらに上昇することも考えられるが、レファレンス、技術進展シナリオともに、2050年まで約80%を仮定する。ただし、定期検査のあり方により、設備利用率が想定値よりも向上すれば、原子力による発電量も変化することに留意する必要がある。

図4-1 原子力発電設備(レファレンス、技術進展シナリオ)



(出所) 電力供給計画等を下に筆者想定

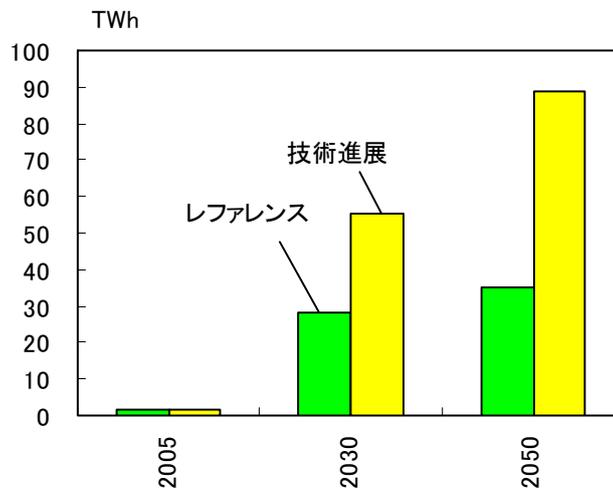
4-3 新エネルギー

新エネルギーは、エネルギー安全保障の確保、地球温暖化対策の強化を背景に、導入が拡大している。太陽光発電、及び風力発電は、発電効率向上など技術開発の進展、量産効果を背景とした製造コスト低下により、導入量が着実に増加するものと想定した。

太陽光発電

太陽光発電に関しては、日本の建築物の屋根等を利用した場合の物理的設置可能量は現行効率(10%~15%)で、約 80 億 kW、発電量で約 8 兆 kWh/年であると推計され、日本の一次エネルギー供給量は約 6 兆 kWh(530Mtoe)であるので、十分国内需要をまかなえる(文献(11))。

図4-2 太陽光発電の想定



(出所) NEDO による推計を下に筆者想定

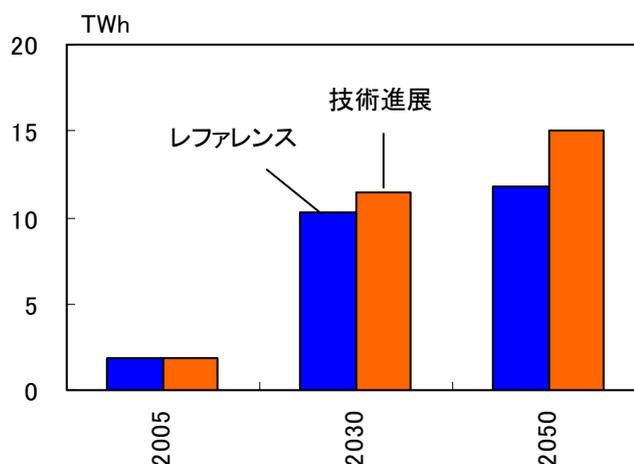
NEDO によれば、住宅など民生建築物の屋根や壁等を利用した最大ポテンシャルとしての設置可能量は約 2 億

kW(発電量約 2,000 億 kWh)と推定されている(文献(15))。また、太陽光発電の技術開発とその実用化が順調に進んだ場合、2030 年頃までの導入目標量として、約 1 億 kW(発電量約 1000 億 kWh)が掲げられている。そこで本分析では、民生部門における導入量を、2005 年 15 億 kWh から、レファレンスシナリオで 2030 年 280 億 kWh、2050 年 350 億 kWh とし、技術進展シナリオで 2030 年 550 億 kWh、2050 年 890 億 kWh とした。レファレンスシナリオでは、2050 年に大方の戸建住宅に太陽光が導入され、2050 年の太陽光発電設備容量は約 4,000 万 kW(最大ポテンシャルの約 5 分の 1)に達する。技術進展シナリオでは、2050 年にほぼ全ての設置可能な住宅、建築物に太陽電池が導入されると想定し、2050 年の太陽光発電設備容量は約 1 億 kW(最大ポテンシャルの約半分)に達するものと想定した。

風力

日本の風力エネルギーのポテンシャルは、陸上 3,500 万 kW、洋上 2 億 5,000 万 kW という試算がある(文献(11))。2020 年に 1,000 万 kW、2030 年に 2,000 万 kW を導入するという目標値も存在する(2,000 万 kW のうち、700 万 kW が陸上風力の目標値、1,300 万 kW が洋上風力の目標値である)(文献(16))。稼働率 24%と想定すれば、NEDO による 2030 年の陸上風力の発電目標は 150 億 kWh、洋上風力は 270 億 kWh、計 420 億 kWh となる。本分析では、レファレンスシナリオにおいて、2005 年の 19 億 kWh から 2050 年に約 120 億 kWh、技術進展シナリオにおいて 150 億 kWh と想定した。技術進展シナリオにおける風力発電導入量は、2050 年にほぼ陸上風力のポテンシャルに達すると仮定し、2050 年の風力発電設備量は約 700 万 kW に達すると想定した(レファレンスシナリオの 2050 年の風力発電設備量は約 560 万 kW と想定)。日本の風力発電は、台風等による自然災害により長期停止する場合もあり、自然環境に適合した設置導入が求められる。フローティング式風力発電の開発、実用化が進めば、洋上への設置が進み、さらに導入量が増加する可能性も存在する。また、風力発電は電力系統へ通常接続されるため、導入量の増加に伴い、系統連携のための適切な技術措置も不可欠となる。

図4-3 風力発電の想定



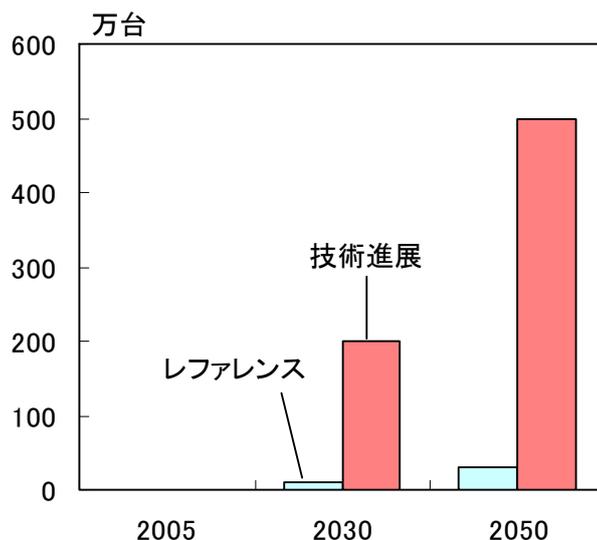
(出所) NEDO による推計を下に筆者想定

燃料電池等

建築物への分散型電源導入に関しては、建築物のエネルギー自給率向上による送配電設備への投資の節約、化石燃料系の大型電源を代替する場合には CO₂ 削減への貢献、発電に伴う廃熱を給湯需要などに有効利用できれば総合エネルギー効率の改善等の各種のメリットがある。家庭部門では、固体高分子形燃料電池(PEFC)コジェネのさらなる低コスト化、長寿命化がすすめば、大きな普及が期待されている。業務部門では、既存技術であるガスエンジンコジェネ等の効率化や、熔融炭酸塩型燃料電池(MCFC)コジェネ、固体酸化物方(SOFC)コジェネの開発・導入が期待される。例えば、発電効率 30%、廃熱利用効率 40%の燃料電池により、家庭部門の全ての給湯需要

を供給する例を考える。現在の家庭部門の給湯需要は 17Mtoe(石油換算 100 万トン)、電力需要は 19Mtoe である。燃料電池の廃熱でこの給湯需要を全て賄う場合、発電所の熱効率を 40%とすれば、家庭部門の給湯、電力需要を供給するために必要な燃料は 58Mtoe(=17/0.4+(19-17*0.3/0.4))となる。一方、電力会社からの購入電力とボイラー(効率 80%)で同じ給湯、電力需要を供給する場合、必要な燃料は 69Mtoe(=17/0.8+19/0.4)となる。よって、前提条件、稼動条件により大きく変わらうが、家庭用の給湯需要を全て燃料電池で賄うことにより、既存のシステムに比較して、単純計算ではあるが、約 15%(=(69-58)/69)の省エネ効果が期待できることになる。

図4-4 家庭用定置型燃料電池の想定



家庭用定置型燃料電池は、レファレンスシナリオでは、2030年以降導入が始まり、2050年には30万台(約30万kW)に達するものと予測した(図4-4)。技術進展シナリオでは、技術開発の進展により、機器価格の低コスト化と寿命の延伸などの諸課題が解決され、2020年以降に導入が開始され、2050年において500万台(約500万kW)導入されるものと想定した。

自動車用バイオ燃料については、ブラジルなどバイオエタノール生産国の輸出能力などを勘案し、レファレンスシナリオではE3(エタノールが3%混合されたガソリン)、技術進展シナリオではE10が導入されるものと想定した。また技術進展シナリオにおいて、バイオディーゼルを5%含む軽油が導入されると仮定した。雪氷熱などの未利用エネルギーは、供給ポテンシャルは大きいエネルギー密度が極めて希薄であること、利用のためには転換、輸送インフラにコストがかかるため、本分析では大規模な導入は想定していない。

5. 試算結果

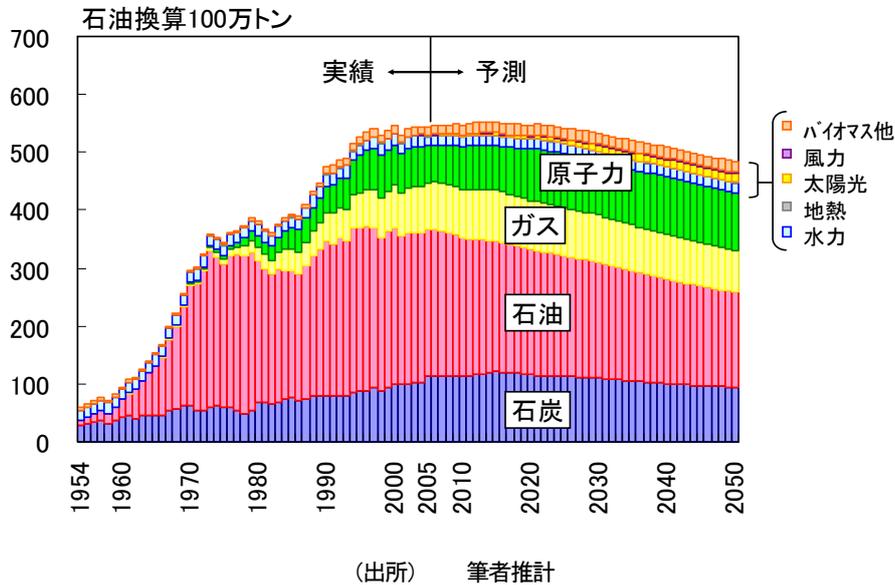
5-1 レファレンスシナリオ

5-1-1 一次エネルギー供給

日本の一次エネルギー供給(一次エネルギー国内供給)は、1980年代においては、石油危機後に省エネルギーが進化した結果、経済成長率の半分程度のテンポで増加した。しかし1990年代は、経済成長の伸びがバブル経済崩壊により停滞したが、石油危機後の省エネ努力が一巡したため、民生部門、運輸部門のエネルギー消費の増加を背景として、GDP原単位は悪化した。しかしその後、2000年前後から、原油価格高騰を背景とするエネルギー安全保障問題や、国際的な地球環境問題への関心を契機とした省エネルギー対策の強化を背景に、一次エネルギー供給の伸びは徐々に小さくなっている。レファレンスシナリオでは、持続的な経済成長、需要面、供給面に

おける省エネルギー対策、経済・産業構造のシフト、人口減少等を背景に、日本の一次エネルギー国内供給は 2050 年度に向けて緩やかに減少する(図 5-1)。

図5-1 一次エネルギー供給(レファレンスシナリオ)



エネルギー消費の動向の背景要因を把握するために、予測した一次エネルギー供給の推移を、GDP 当たり一次エネルギー供給(GDP 原単位)、一人当たり GDP、人口の 3 要因に分解する(表 5-1)。1990 年代は、経済成長が停滞したにも関わらずエネルギー消費が増加したことから、GDP 原単位の改善は限定的となった。しかし、2050 年にかけて、省エネルギー技術の導入を背景として、GDP 原単位は、石油危機後の 1980 年代とほぼ同じテンポで改善する。そして、一人当たり GDP は増加を続け、一次エネルギー供給の増加に寄与する一方、人口減少も、GDP 原単位の改善とともに、2050 年にかけて大きく一次エネルギー供給の減少に寄与する。2050 年の GDP 原単位は、2005 年比でほぼ半減する(表 5-2)。

表5-1 一次エネルギー供給の要因分解(レファレンスシナリオ)

(単位: 年率%)

	1980~ 1990年	1990~ 2005年	2005~ 2030年	2030~ 2050年	2005~ 2050年
全変化	2.1	1.0	▲ 0.1	▲ 0.5	▲ 0.3
原単位要因	▲ 1.8	▲ 0.2	▲ 1.7	▲ 1.4	▲ 1.6
一人当たりGDP要因	3.4	1.0	2.1	1.9	2.0
人口要因	0.5	0.2	▲ 0.4	▲ 1.0	▲ 0.7

(出所) 筆者推計

一次エネルギー供給をエネルギー源別に注目すると、石油は、特に自動車部門における省エネルギーの進展と、民生部門、産業部門および発電部門での石油シェアの低下により減少する(表 5-2)。現在、一次エネルギー供給の約 5 割を占める石油は、目下の需要が既に減少傾向にある。今後もこの趨勢は続き、2030 年の石油依存度は 4 割を下回ると見られる。2030 年における一次エネルギー供給に占める石油のシェアは 37%、2050 年には 30% 台前半(34%)まで減少し、石油の相対的な供給構成比は大きく減少する見通しである。需要減の背景は、産業・民生部門における電力等への燃料転換、自動車用燃料の減少である。産業部門の石油は、特に化学原料用の需要減を背景に減少し、民生部門では、暖房・給湯需要の電力化により減少する。運輸部門でも、自動車保有台数の減少や燃費効率の改善によって、石油需要は減少する。

表5-2 一次エネルギー供給、CO₂排出量(レファレンスシナリオ)

	実 績				予 測				年平均伸び率(%)			
	1990年度		2005年度		2030年度		2050年度		2005/ 1990	2030/ 2005	2050/ 2030	2050/ 2005
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
石 炭	80	17	114	21	110	18	95	20	2.3	-0.1	-0.7	-0.4
石 油	264	57	253	46	200	37	164	34	-0.3	-0.9	-1.0	-1.0
天然ガス	49	11	81	15	82	18	72	15	3.4	0.0	-0.6	-0.3
原子力	46	10	64	12	92	20	100	21	2.3	1.5	0.4	1.0
水力・地熱	21	4	17	3	18	4	18	4	-1.5	0.2	0.0	0.1
新エネルギー	6	1	15	3	31	3	35	7	6.3	2.8	0.6	1.9
一次エネ供給	466	100	543	100	532	100	484	100	1.0	-0.1	-0.5	-0.3
実質GDP(兆円)	451		540		815		975		1.2	1.7	0.9	1.3
GDP原単位 (1990年度比)	100		97		63		48		-0.2	-1.7	-1.4	-1.6
CO ₂ 排出量 (炭素換算百万トン)	290		328		287		243		0.8	-0.5	-0.8	-0.7
(1990年度比)	100		113		99		84					

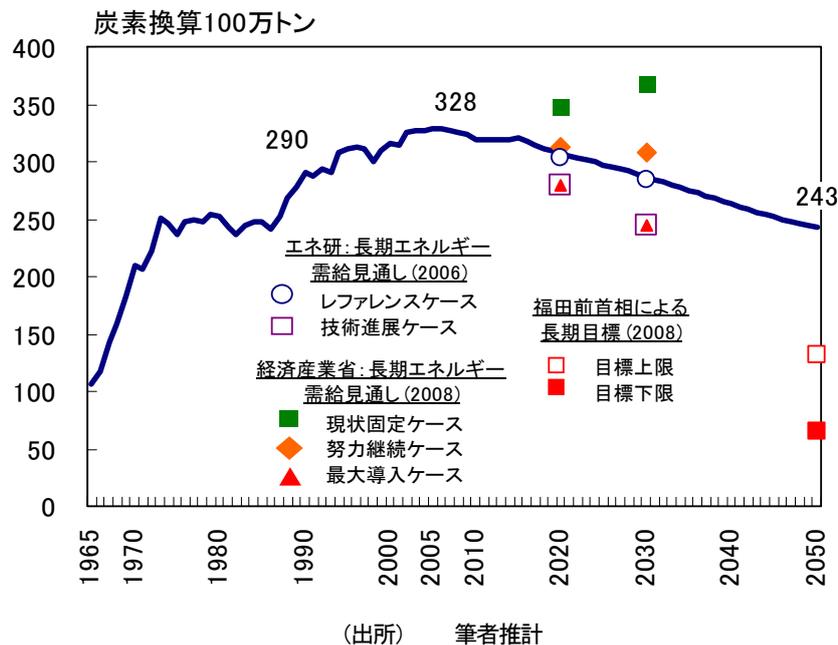
(出所) 筆者推計

石炭の消費量は、石炭火力発電量の減少、発電効率の上昇、産業部門におけるコークス製造効率の上昇等を背景に、2050年に向けて緩やかに減少する。産業部門では、鉄鋼やセメント生産の減少などにより、徐々に減少する。主に鉄鋼製造用の原料炭は、高炉鋼生産そのものが減少するほか、微粉炭吹込みや次世代コークス炉導入等の省エネ技術の進展により、消費量は減少していく。発電用燃料である一般炭は、環境対策の観点から大幅な増加はあまり見込めないものの、供給の安定性や経済性などから、今後も安定的な需要が期待される。このため、2050年度においても一次エネルギー供給に占めるシェアは、現在の構成比とほぼ同じ約2割を維持する。天然ガスは、2030年にかけて、その利便性、環境性から、LNG火力発電量の増加等に伴い、ほぼ横ばいで推移するものの、2030年以降、LNG火力の発電効率の上昇や最終消費における電力シェアの増加を背景に、2050年にかけて緩やかに減少する。一次エネルギー供給に占める構成比は2005年で15%であるが、2050年にも同等のシェアで推移する。原子力は、原子力開発計画に基づき、そのシェアは2005年の12%から、2050年には約2割(21%)まで上昇する。同じく、太陽光などの新エネルギーも2005年度の3%から2050年度には7%までシェアを拡大する。この結果、一次エネルギーに占める非化石エネルギー(原子力、水力地熱、新エネルギー)の構成比は、2005年度の約2割(18%)から2050年度には約3割(32%)まで増加し、一次エネルギー供給の脱炭素化が2050年に向けて徐々に進展する。

5-1-2 CO₂排出量

1990年以降、エネルギー起源のCO₂排出量は、一次エネルギー供給とほぼ同率で増加しており、エネルギー供給の脱炭素化はこれまであまり進展していない。2005年度のCO₂排出量は炭素換算約3億2,800万トンであり、1990年度比で13%増加している。レファレンスシナリオでは、燃料転換の進展、原子力の構成比の増加を背景に、2030年のCO₂排出量は1990年とほぼ同水準まで低下し、2050年には1990年度に比較して約16%減少する(2005年度に比較すると約26%減少する)(図5-2、表5-2)。2030年の一次エネルギー供給量は、1990年度を上回るが、非化石エネルギーのシェアが1990年度よりも拡大するため、CO₂排出量はほぼ同水準となる。

図5-2 CO₂ 排出量(レファレンスシナリオ)



CO₂ 排出量を一次エネルギー供給当たり CO₂ 排出量(一次エネルギー供給の化石燃料への依存度を表す指標)、GDP 当たり一次エネルギー供給(省エネルギーの指標)、経済成長に要因分解すると、経済規模は 2050 年にかけて年率 1.3%で拡大するものの、1990 年代に改善が停滞した省エネルギーが着実に進展するため、経済成長要因を相殺する年率 1.6%の減少として寄与する(表 5-3)。脱炭素化は年率 0.4%の減少で CO₂ 排出量削減に寄与する。

表5-3 エネルギー起源二酸化炭素排出量の要因分解(レファレンスシナリオ)

(単位: 年率%)

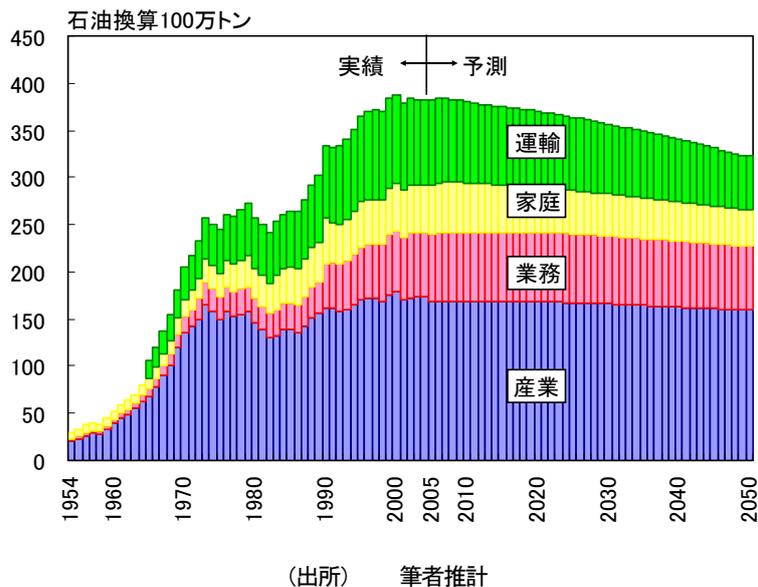
		1973~ 1990年	1990~ 2005年	2005~ 2030年	2030~ 2050年	2005~ 2050年
全変化		0.9	0.8	▲ 0.5	▲ 0.8	▲ 0.7
	脱炭素化	▲ 0.7	▲ 0.2	▲ 0.4	▲ 0.4	▲ 0.4
	省エネルギー	▲ 2.1	▲ 0.2	▲ 1.7	▲ 1.4	▲ 1.6
	経済成長	3.8	1.2	1.7	0.9	1.3

(出所) 筆者推計

5-1-3 最終エネルギー消費

1990 年前後を境に、省エネルギー対策の一巡を背景に、最終エネルギー消費は再度大きく増加をはじめた。1990 年代は経済の停滞にも関わらず、公共投資に支えられた素材生産の増加や、自動車保有台数の堅調な増加から、最終エネルギー消費は着実に増加した。しかし、2000 年前後より、省エネルギー対策の強化により、最終エネルギー消費の伸びは緩やかに推移している。長期的には人口減少、省エネルギー対策の強化、経済・産業構造のサービス産業へのシフト等を背景に、最終エネルギー消費は 2050 年度にかけて減少を続ける(図 5-3)。

図5-3 最終エネルギー消費(部門別、レファレンスシナリオ)



(出所) 筆者推計

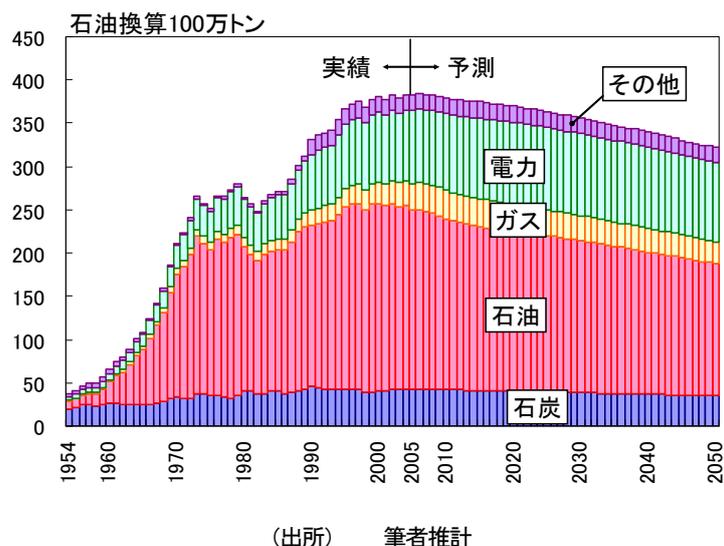
産業部門のエネルギー消費は、長期的には緩やかに減少する。日本経団連自主行動計画などの省エネルギー対策の継続、産業構造のサービス化・高付加価値化などにより、エネルギー消費の増加は限定的である。産業構造の転換(素材系4業種のエネルギー消費シェアの低下等)、各業種における省エネルギーの進展が、産業部門エネルギー消費の増加を抑制する。民生部門のエネルギー消費は、省エネルギー基準による電気機器等の機器効率の改善、人口・世帯数の減少、業務建築物床面積の伸びの頭打ちを背景に、増加が抑制される。業務部門のエネルギー消費は増加を続けるものの、民生部門合計では2010年以降に減少に転じる。運輸部門のエネルギー消費は、輸送需要が伸びない中で、燃費や輸送効率の改善等により、予測期間を通して減少を続ける見通しである。乗用車の保有台数は、普及率の飽和や人口減少により頭打ちとなり、貨物車保有台数は、貨物輸送の効率化などから既に1990年をピークに減少に転じているが、今後も同様の傾向が継続される。乗用車の平均走行距離は、セカンドカーの増加等により、短くなる傾向にある。一方、貨物車の平均走行距離は、稼働率の向上が図られ長くなる傾向にあるが、貨物輸送需要も経済のサービス化等を背景にはば横ばいで推移する。

表5-4 最終エネルギー消費(レファレンスシナリオ)

	実績				予測				年平均伸び率(%)			
	1990年度		2005年度		2030年度		2050年度		2005/1990	2030/2005	2050/2030	2050/2005
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
産業部門	161	48	168	44	166	48	159	50	0.3	0.0	-0.2	-0.1
民生部門	97	29	124	32	114	30	104	32	1.7	-0.3	-0.4	-0.4
家庭部門	48	14	52	14	42	15	36	11	0.5	-0.9	-0.7	-0.8
業務部門	48	14	72	19	72	15	68	21	2.7	0.0	-0.3	-0.1
運輸部門	77	23	91	24	74	22	57	18	1.1	-0.8	-1.3	-1.0
最終消費	334	100	382	100	354	100	321	100	0.9	-0.3	-0.5	-0.4

(出所) 筆者推計

図5-4 最終エネルギー消費(エネルギー源別、レファレンスシナリオ)



最終エネルギー消費をエネルギー源別に見ると、石油消費は減少を続ける。産業部門の石油は、重油を中心とした他燃料への転換、エチレン生産用の原料需要の縮小により減少する。家庭、業務部門の石油消費も、暖房機器や給湯機器の効率改善、電力消費へのシフトなどにより減少し、大幅な増加は見込めない。運輸部門の石油消費の減少は、エネルギー消費の約8割を占める自動車によるものである。既に商品化されているハイブリッド自動車は、従来型内燃機関自動車との価格差も縮小していくことから、乗用車を中心に普及が進み、2050年にかけて大きく省エネに貢献する。また、バイオ燃料(バイオエタノール等)については、エネルギー安定供給の確保、地球環境温暖化対策として国際的に導入が進められており、日本でもE3(エタノールが3%混合されたガソリン)の導入が認められたことから、徐々に導入が進み、この結果、石油は減少傾向を続ける。電力消費は、民生部門の動向が大きく影響する。家庭部門や業務部門では、家電、IT機器を中心とする機器保有台数の増加、新たな電気機器の普及等が増加要因となり、利便性、安全性の高い電力へのシフトが進むが、省エネルギー基準等の省エネルギー対策の強化を背景に2050年にかけては、緩やかな増加となる見込みである。

5-2 技術進展シナリオ

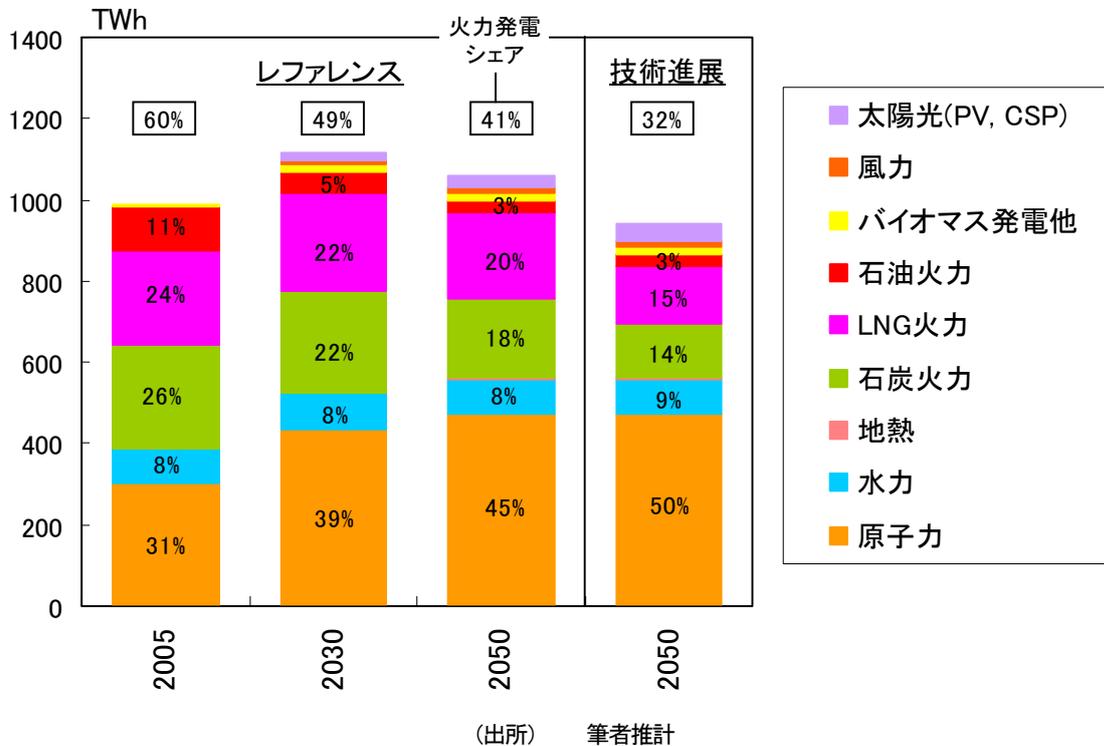
5-2-1 電源構成(電気事業者)

2050年という長期的視点で見ると、全体的にエネルギー需要が伸びない中で、各需要部門で電力化が進むことから、電力需要は今後も堅調に推移する。電気機器効率の向上は電力需要を押し下げる要因となるが、これを上回る需要増加要因、すなわち利便性、高付加価値を有する電気製品や、産業構造のシフト(電気機械工業の増加等)といった要因が需要を押し上げる。産業部門では、製造時に電力を多消費する電気機械系製品の生産が増加することから、電力需要は増加する。家庭、業務部門でも、省エネルギー基準等により省エネが進むが、電気機器、IT機器の増加、石油、ガス消費からのシフト等により電力需要は堅調な伸びを示す。民生部門の電力需要は、季節や時間による空調や動力照明需要の変化が大きく、民生部門の電力需要の増加は負荷率低下へ作用するが、本分析では、揚水発電など既存のピーク需給調整手段により、負荷率の変動に対応できるものと想定した。

電気機器の省エネ、電力化の進展等を背景に、レファレンスシナリオでは、2005年から2050年にかけての電力需要の伸び率は年率0.2%の増加となる。原子力発電設備が2050年にかけて追加的に約13基建設されることから、2030年の原子力発電のシェアは約4割、2050年には46%まで増加し、2050年にかけて電力供給における原子力の重要性が高まる(図5-5)。水力発電は、包蔵水力の大半が開発済みであり、環境影響への配慮より、設備容量の大幅な拡大の可能性は低い。化石資源を燃料とする火力発電は、原子力発電の増加に伴いシェアは縮小し、2030年には約5割(49%)まで低下し、2050年には41%まで減少する。石炭火力は、環境負荷が他の火力発

電に比較して大きいですが、供給安定性、経済性を有しており、重要なベースロード電源としての役割を果たす。火力発電の中では環境負荷の小さい LNG 火力発電は、地球環境問題への対応に向けた不可欠な電源であり、1,500℃級コンバインドサイクル発電等の導入により発電効率が向上する。石油火力は、ピーク対応や緊急時対応電源として運用されるが、LNG 火力がピーク電源としても活用されることから、発電量は徐々に減少する。

図5-5 電源構成(発電量)



技術進展シナリオでは、高効率発電技術、新エネルギー活用の拡大を見込んでいる。原子力発電は、需要端における省エネ、太陽光発電の導入拡大を背景に発電量が減少する結果、原子力の比率が高まり、2050年には総発電量の50%まで拡大する。石炭火力は、超々臨界圧発電や1700℃級ガスタービンIGCCなどの高効率発電技術が導入され、2050年には発電効率が約50%に達すると想定し、LNG火力発電は、1,700℃級コンバインドサイクル発電の導入により、2050年にかけて発電効率が55%まで上昇すると想定した。また、電気事業者の電源構成においても、大規模太陽光発電や集光型太陽熱発電等の再生可能エネルギーを活用した発電技術が拡大すると想定した。この結果、2050年の火力発電のシェアは、約3割(32%)まで低下し、技術進展シナリオでは、非化石エネルギーを燃料とする発電技術による発電量が拡大し、電力供給における脱炭素化がレファレンスシナリオに比較してより一層進展する。

5-2-2 民生部門

民生部門で長期的視点で抜本的に化石燃料消費の削減を実現するためには、既存技術の機器効率の向上、建築物の断熱化/気密化、再生可能エネルギーの普及拡大を一体的に進める必要がある。家庭、業務部門のエネルギー消費の約3割は冷暖房など空調需要であることから、建築物の断熱対策と空調機器の高効率化が重要な課題となる。住宅や事務所ビル等の建築物の寿命は40年前後と長く、毎年建築物ストックのごく一部しか更新、改修されないため、建築物の断熱対策の強化には長いタイムスパンを要する。このため建築物の更新テンポを加速化させるために、補助金等の経済的措置が有効である。また、建築物の場合、開口部に起因する熱負荷が多くなるため、開口部の断熱等が省エネルギーを進める上で重要であり、複層ガラス窓の採用等も重要である。また省エネ換気による空調負荷の削減、自然通風による冷房負荷削減も重要な省エネ施策として位置づけられる。

図5-6 給湯機器構成(家庭部門)

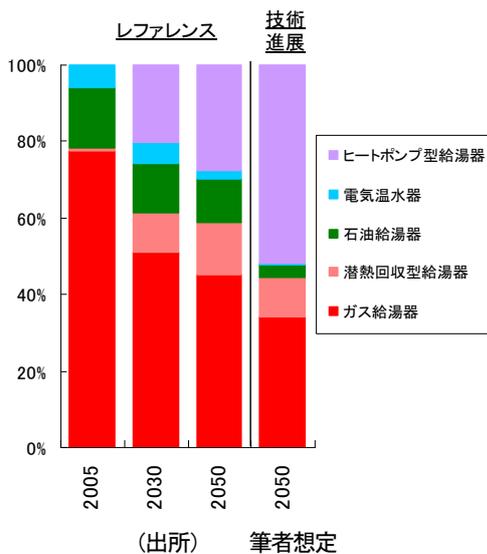
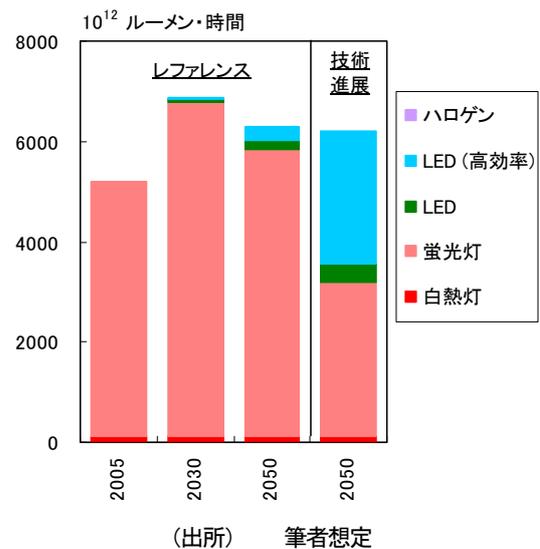


図5-7 照明需要(業務部門、家庭部門)



民生部門における有力な空調機器に注目すると、高効率ヒートポンプが挙げられる。研究開発や省エネ基準などの施策を背景に、住宅用空調機器(エアコン)の効率は、急速に改善した。化石燃料の燃焼による暖房効率は1.0(COP)が物理限界のため、COP が約 3.0 以上であれば、火力発電の平均効率を考慮しても省エネルギー性能を確保できる(現状の発電効率約 $0.4 \times 3.0 = 1.2 > 1.0$)。技術進展シナリオでは、個別空調の COP が 2050 年に 7.0 まで上昇すると仮定した。ただし、ライフスタイルの変化により、冷暖房の運転時間が増加する可能性もあり、空調機器の省エネルギー化は引き続き重要な課題となる。また、未利用熱源である地中熱をヒートポンプの熱源として利用すれば、外気温度による COP の低下がなく、とくに寒冷地での暖房や給湯の効率改善が期待されるため、地中熱利用ヒートポンプの開発も重要な課題である。技術進展シナリオにおいて、2030 年以降、COP で 5.0 の地中熱利用ヒートポンプの導入が開始するものと仮定した。また家庭部門では、エネルギー消費の約 3 割が給湯用途で消費されるため、高効率給湯器の普及による省エネが重要な課題となる。なかでも、ヒートポンプ型給湯器では、COP で 4.0 以上の CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯器が実現されており、一次エネルギー換算でも省エネ、CO₂ 削減に大きく寄与する。貯湯式は、ユーザー側から見れば深夜電力利用により割安な夜間電力料金が適用されること、電力供給側から見れば負荷平準化に貢献し、需給両面でメリットが大きいため、普及が拡大している。技術進展シナリオでは、高効率ヒートポンプ給湯器の COP が 2050 年にかけて 6.0 まで改善し、ヒートポンプ給湯器が家庭用給湯器に占めるシェアは、2050 年に約 5 割まで拡大すると想定した(図 5-6)。

また、民生部門では照明に多くのエネルギーが消費される。事務所ビルではエネルギー消費の約 2 割が照明に使用されているため(文献(4))、長期的には高効率光源普及による省エネの推進、自然光による照明需要の削減が重要となる。高効率光源として、現在、蛍光灯(発光効率: 80-100 lm/W)が普及しているが、発光効率が 15-25 lm/W 程度の白熱電球に対する需要が依然として大きく、照明のエネルギー利用効率は改善の余地が大きい。長期的には、LED 照明(現在約 50 lm/W)の普及や、有機 EL 照明の開発が重要となる。自然光利用は、日中の照明を最小限に抑制するため、自然光をより有効に利用する技術開発、建築物の開発が重要である。本分析では、高効率 LED の継続的な研究開発を背景に、LED 照明の発光効率は 2050 年にかけて 200 lm/W まで改善すると想定した。LED 照明推進協議会の見通しでは、一般照明用白色 LED の発光効率は、2015 年ごろに 150 lm/W に達すると想定されている(文献(17))。既存照明の発光効率を、白熱灯 15 lm/W、電球型蛍光 70 lm/W、蛍光灯 100 lm/W と仮定すれば、長期的に到達すると見込まれる 150 lm/W~200 lm/W の LED 照明に置き換えた場合、それぞれ約 10~13 倍、2~3 倍、1.5~2 倍の効率改善が期待される。大まかに見積もれば、現在、日本の蛍光灯による年間電力消費量約 1,000 億 kWh が全て効率 100 lm/W の蛍光灯によるものだと仮定すれば、150 lm/W の LED 照明に全て置き換えることができれば、約 340 億 kWh の省エネが実現できることになる。本分析の技術進展シナリオ

では、2050 年の照明需要の約 5 割が高効率 LED 照明により満たされるものと想定した(図 5-7)。

5-2-3 運輸部門

自動車消費するエネルギーは運輸部門全体の約 8 割に達する。そのため、自動車の省エネルギー対策は最も重要な技術課題として位置づけられている。特に自動車部門のエネルギー消費を長期的に大幅に削減するためには、クリーンエネルギー自動車の普及が鍵を握る。クリーンエネルギー自動車が 2050 年の乗用車保有台数に占めるシェアは、レファレンスシナリオではハイブリッド自動車が約 4 割、技術進展シナリオではプラグイン・ハイブリッド自動車、燃料電池車、そして電気自動車など石油製品を消費しない自動車を中心に約 8 割を占めると想定した(図 5-8)。この結果、2050 年における乗用車の石油消費は、レファレンスシナリオにおいて 2005 年比で約 4 割削減、技術進展ケースにおいて約 6 割削減される(図 5-9)。

図5-8 乗用車の保有構成

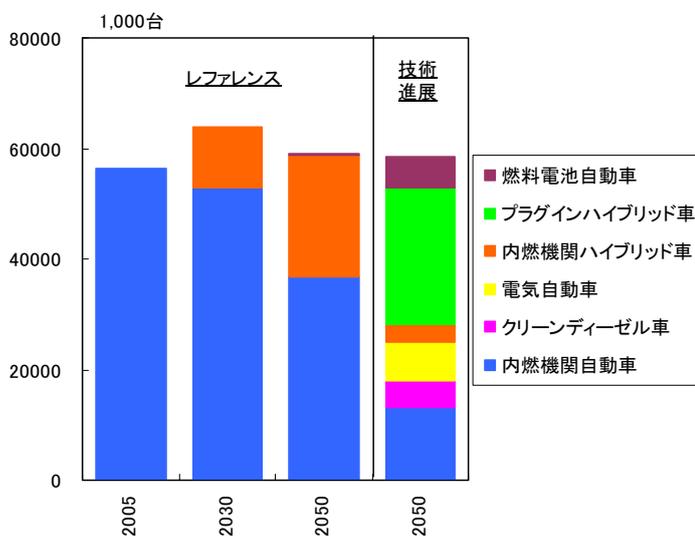
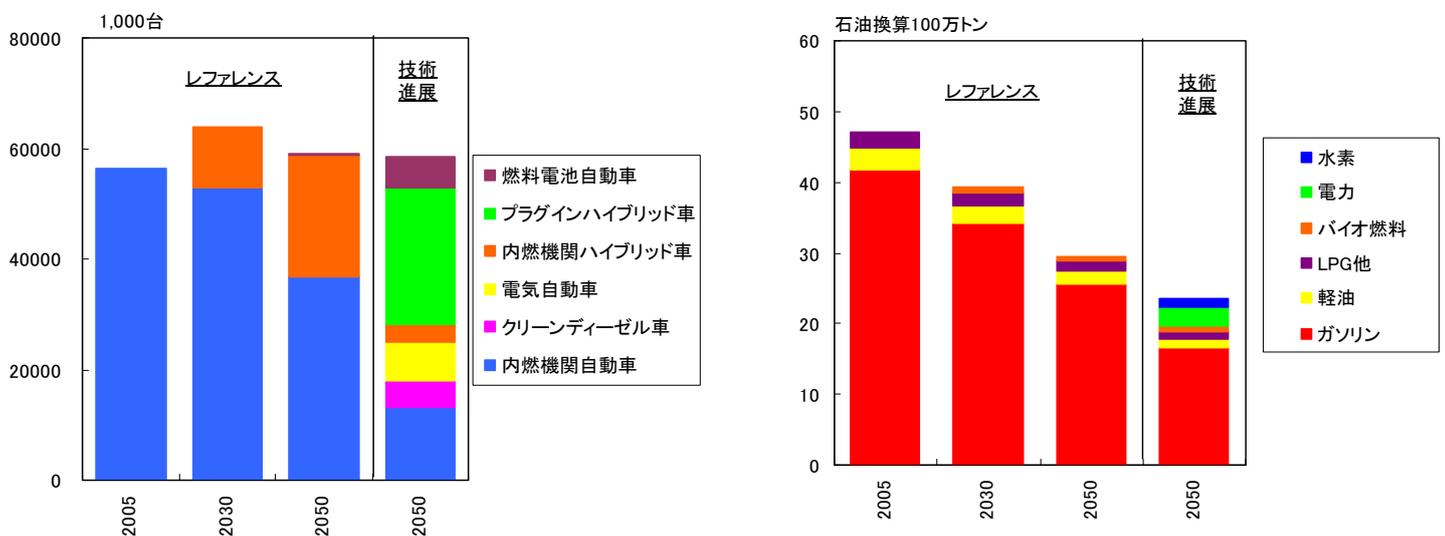


図5-9 乗用車の燃料構成



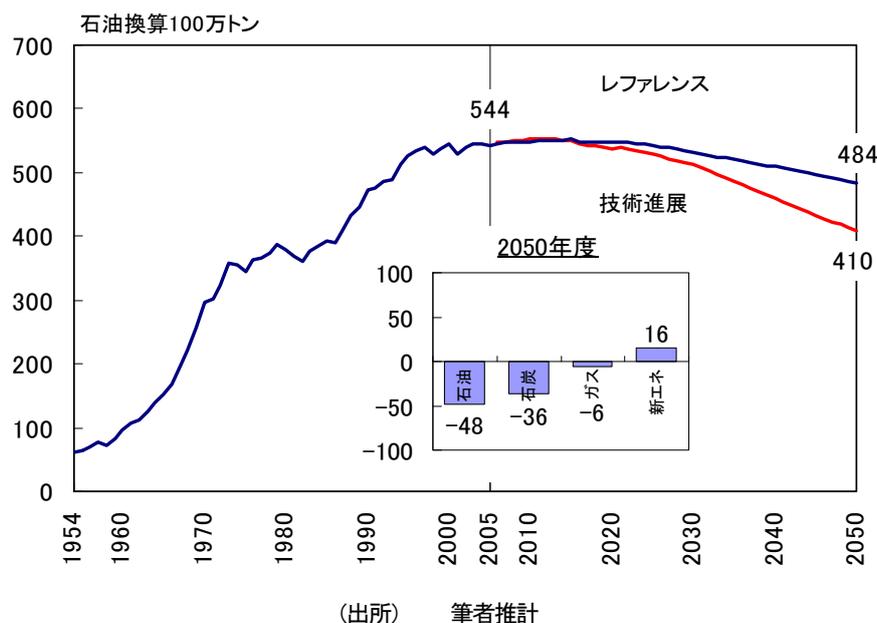
レファレンスシナリオでの普及を見込んだハイブリッド技術は、制動時のエネルギー回収が可能になる等、大幅な効率向上が可能となる技術であり、あらゆる次世代自動車の動力源の効率向上に寄与できる技術である。既存のガソリンエンジンと比較すると、走行条件に大きく依存するが、その燃費効率は約 2 倍に達し、大きな省エネ効果が見込まれる。また、技術進展シナリオでは、バッテリー技術の進展により、バッテリーへの充電を電力系統から供給可能となるプラグイン・ハイブリッド車や、電気のみで走行する電気自動車の普及が促進されると想定した。同技術は、エネルギー安定供給確保(石油消費削減)と CO₂ 排出量低減の観点から将来性のある技術である。ただし、技術的にはコスト、電気消費による走行距離等の課題もあり、普及のためには、バッテリー等蓄電装置の電力貯蔵密度の向上と耐用年数の伸長、およびコスト低減が重要な課題となる。プラグイン・ハイブリッド車の燃費効率は、走行条件に依存するが、電力による走行時では既存ガソリン車の約 4 倍、ガソリン消費による走行時ではハイブリッド技術により約 2 倍の燃費効率が期待でき、石油消費削減に大きく貢献する。例えば、走行条件により大きく変化するが、走行距離の 40%を電力消費、60%をガソリン消費により走行する場合、既存のガソリン自動車と比較して、 $60\% (= 1 - (0.4/4 + 0.6/2))$ の省エネになり、ガソリン消費量は $70\% (= 1 - (0.6/2))$ 節約される。ハイブリッド自動車に対しても $20\% (= 1 - (0.4/2 + 0.6))$ の省エネが可能となり、ガソリン消費量は $40\% (= 1 - 0.6)$ 削減される。さらにバッテリー技術の電力密度向上を背景に電力消費による走行距離距離を伸ばすことができれば、更なる省エネが可能となる。また、電気自動車による CO₂ 削減効果は、電力 CO₂ 原単位と電気自動車の走行エネルギー効率に依存する。現状での日本の電力 CO₂ 原単位(0.41kg CO₂/kWh、電気事業連合会、2006 年度)、ガソリンの CO₂ 原単位(約 0.24kg CO₂/kWh)、電気自動車の燃費効率がガソリン車の約 4 倍とすれば、走行距離

あたりの CO₂ 排出量は、ガソリン車の約 4 割となる(0.41kg CO₂/kWh/(4*0.24kg CO₂/kWh)=0.43)。将来、CO₂ 排出原単位の少ない電源のシェア拡大に伴い、電力 CO₂ 原単位が低減されれば、さらに CO₂ 排出削減効果が大きくなる。燃料電池自動車に関しては、Tank-to-Wheel 効率でみると、現状で約 40%、ハイブリッド技術を搭載した FCHV は約 50%、将来的には 60%が期待できる技術として位置づけられている(文献(11))(内燃機関(ガソリンエンジン)では 16%)。燃料電池自動車の普及のためには、燃料電池の高性能化、低コスト化、水素貯蔵技術の開発が重要な課題として位置づけられている。技術進展シナリオでは、運輸部門での燃料電池自動車の導入開始は 2030 年を想定し、2050 年に向けて拡大すると想定した。水素の製造に関しては、水蒸気改質、水電気分解、各種の産業における副生水素(コークス炉、石油精製等)の活用が重要になると考えられる。そこで技術進展シナリオでは、水蒸気改質、水電気分解、コークス炉副生水素により、それぞれほぼ同量が供給されると想定した。

5-2-4 一次エネルギー供給

技術進展シナリオにおける一次エネルギー供給は、省エネ効果により、2050 年にかけて減少する。2050 年では、レファレンスシナリオに比較して、石油換算 7,400 万トンの省エネルギーが実現する(図 5-10)。一次エネルギー供給の減少量は、発電部門等の転換部門における省エネルギーも加算されることから、後述する最終エネルギー消費の省エネルギー量 4,300 万トンよりも大きい。

図5-10 一次エネルギー供給(レファレンス、技術進展)



技術進展シナリオでは、2050 年の石油消費の構成比は 3 割を下回り(図 5-11)、石油消費量は 2005 年比で 54% 減少し(図 5-12)、第一次石油危機以前の 1960 年代後半の消費水準まで減少する。プラグイン・ハイブリッド自動車等のクリーンエネルギー自動車の普及拡大、バイオ燃料の導入、産業・民生部門における電力・都市ガスへの一層の燃料転換を背景に、石油消費は大幅に削減される。石炭需要は、主に鉄鋼製造用の原料炭は、微粉炭吹込み、次世代コークス炉の導入拡大等により、消費量は減少する。発電用燃料である一般炭は、石炭火力の高効率化により減少する。天然ガスに関しては、LNG 火力発電所の発電効率の上昇、家庭部門におけるヒートポンプ給湯器のシェア拡大を背景に減少する。一方、新エネルギーは、太陽光発電を中心に大きく導入量が拡大する。レファレンスシナリオにおける非化石エネルギーのシェアは約 2 割(18%)から 2050 年に約 3 割(原子力 21%+その他 11%)まで増加するが、技術進展シナリオでは、省エネルギーのより一層の推進、新エネルギーの拡大により、2050 年には約 4 割(原子力 24%+その他 16%)まで増加し(図 5-11)、エネルギー供給の脱炭素化が一層進む。

図5-11 一次エネルギー供給構成(レファレンス、技術進展)

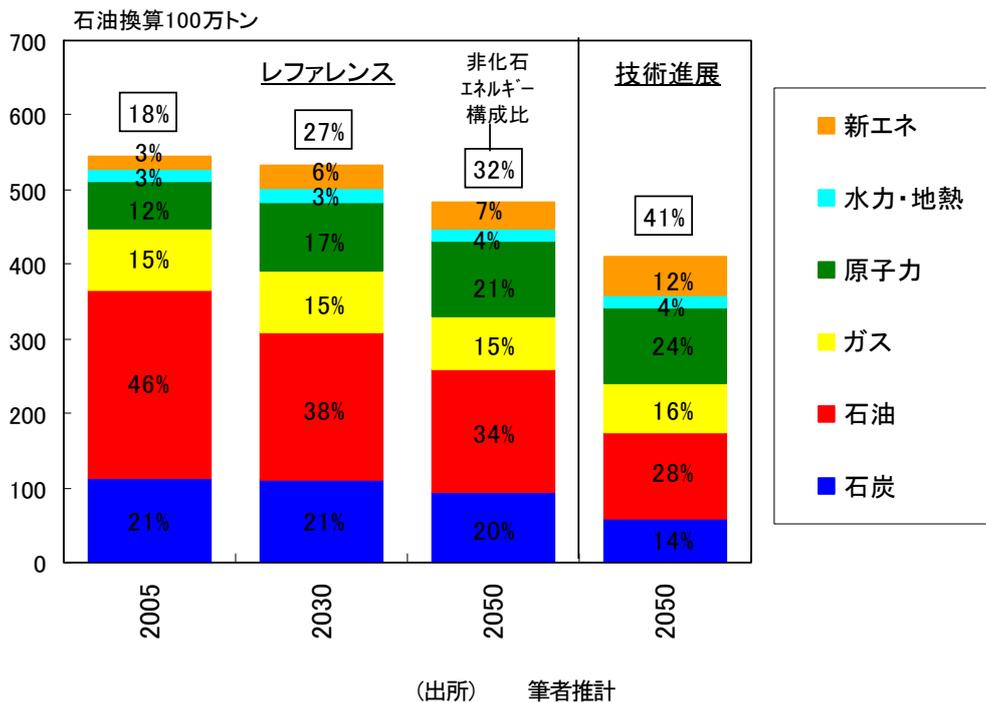
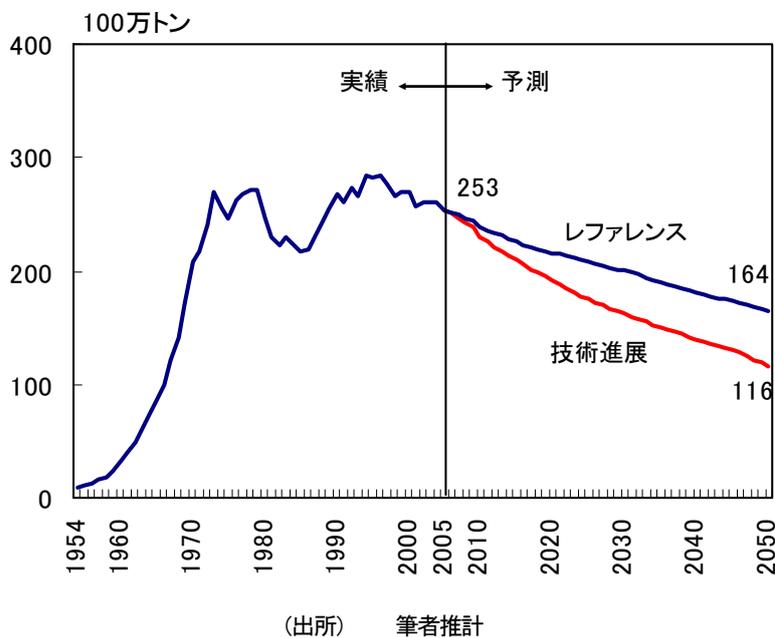
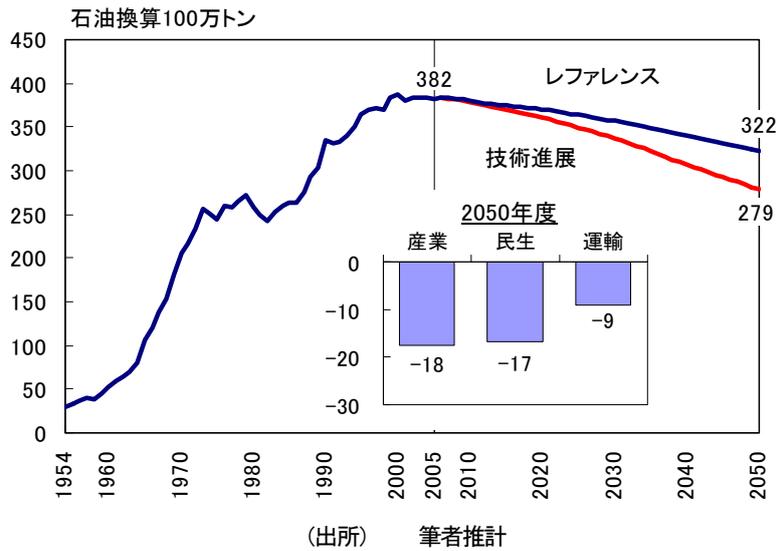


図5-12 石油消費量(レファレンス、技術進展)



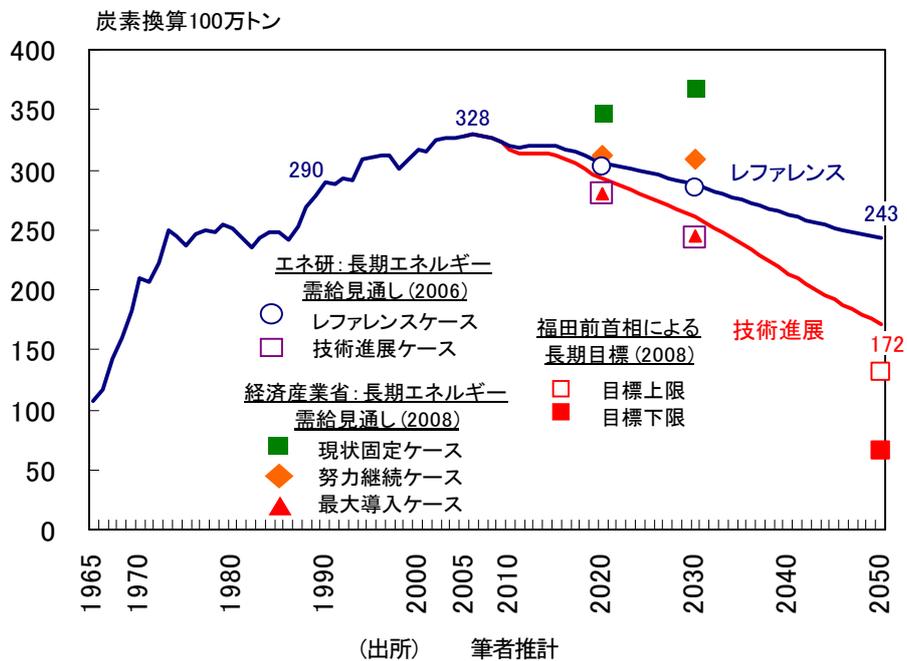
技術進展シナリオにおける最終エネルギー消費は、2050年において、レファレンスシナリオに比較して、石油換算約4,300万トン減少する(図5-13)。最終エネルギー消費を部門別に見ると、産業部門では2050年にかけて、既存プロセスの改修改善に加えて、コークス炉など次世代技術導入による飛躍的な効率改善により、石油換算1,800万トンが削減される。民生部門では空調機器の効率向上、次世代照明の普及促進、高効率ヒートポンプ給湯器のシェア拡大等を背景に、同1,700万トンが削減される。運輸部門では、クリーンエネルギー自動車の普及により同900万トンの節減となる。

図5-13 最終エネルギー消費(レファレンス、技術進展)



エネルギー起源の二酸化炭素排出量は、2050年でレファレンスシナリオに比較して炭素換算7,100万トン削減される(図5-14)。2005年のCO₂排出量に比較すると、技術進展シナリオでは、約5割(約48%)の削減となる。1990年比の場合は、約4割(約41%)の削減となる。

図5-14 CO₂排出量(レファレンス、技術進展)



CO₂排出量を要因分解すると、技術進展シナリオでは、2050年にかけて省エネルギーのテンポはレファレンスシナリオよりも0.3ポイント、脱炭素化のテンポは0.4ポイント上昇する(表5-5)。技術進展シナリオにおける省エネルギー、脱炭素化のテンポは、いずれも石油危機後のペースに匹敵する規模になる。技術進展シナリオでは、レファレンスシナリオに比較して大幅な再生可能エネルギーの導入や燃料転換が必要になる。

表5-5 エネルギー起源二酸化炭素排出量の要因分解(レファレンス、技術進展)

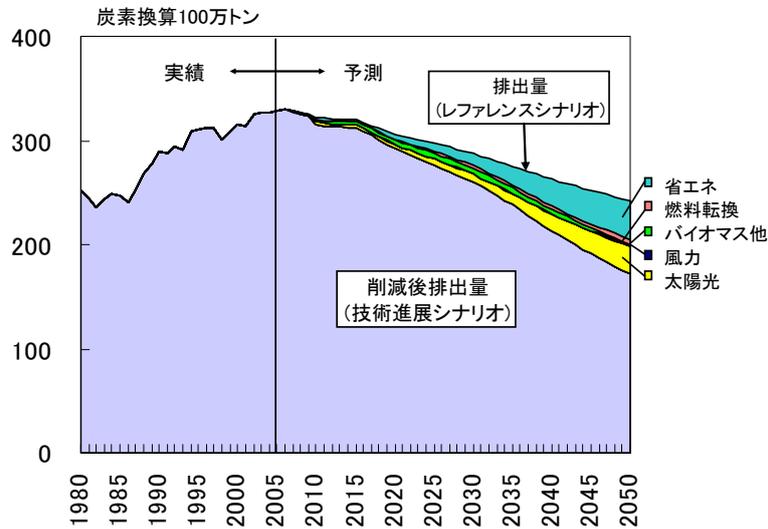
(単位: 年率%)

	1973~ 1990年	1990~ 2005年	2005~2050年	
			レファレンス	技術進展
CO2排出量変化	0.9	0.8	▲ 0.7	▲ 1.4
脱炭素化	▲ 0.7	▲ 0.2	▲ 0.4	▲ 0.8
省エネルギー	▲ 2.1	▲ 0.2	▲ 1.6	▲ 1.9
経済成長	3.8	1.2	1.3	1.3

(出所) 筆者推計

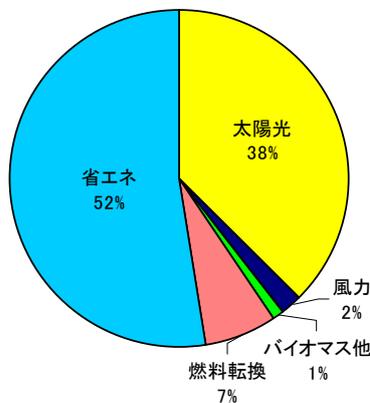
CO₂排出削減への各技術の貢献度を見ると、省エネルギーと太陽光発電の寄与が大きい(図 5-15)。2050 年における省エネによる CO₂削減量は、全体の約 5 割(52%)を占める(図 5-16)。続いて太陽光が約 4 割(38%)の CO₂削減に貢献している。その他では、燃料転換が 7%寄与している。

図5-15 対策技術別の CO₂ 排出削減効果(技術進展シナリオ)



(出所) 筆者推計

図5-16 2050 年の対策技術別の CO₂ 排出削減効果(技術進展シナリオ)



2050 年の CO₂ 削減量 : 炭素換算 7,100 万トン

(出所) 筆者推計

5-3 原子力、ならびに CO₂ 排出量の大幅削減に関するシナリオ

5-3-1 シナリオの想定

本節では、技術進展シナリオの結果を受けて、以下の 2 つのシナリオについて追加的に試算を行う。

●技術進展シナリオ(原子力 9 基)

技術進展シナリオでは、最終消費部門における電力機器の省エネの進展、ならびに太陽光発電等の分散型電源の導入拡大に伴い、電気事業者の販売電力量が減少する。そのため 2050 年の総発電量に占める原子力の割合は 50% にまで達するが、電源構成の約 5 割まで原子力の比率を高めることには、技術的、経済的観点から見れば、その実現可能性については不確実性が存在する。実際、より一層の省エネが進めば、将来の原子力開発計画にも影響を及ぼすことも考えられる。そこで本シナリオでは、政府の長期需給見通しと同じく、電力供給計画において定められている 13 基の原子力建設計画の内、約 9 基の原子力発電が 2005 年から 2050 年に建設されると想定した。

●技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)

同シナリオでは、前節までの技術進展シナリオに、追加的に、主として、原子力の一層の導入拡大、CO₂回収貯留(CCS)等を考慮する(表 5-6)。原子力については、電源運用上の技術経済的な観点から、原子力発電の最大限の導入を想定する。すなわち、発電量ベースで、2050 年の総発電量の 60%が原子力発電により供給されると想定する。そのために必要になる 2050 年の原子力発電設備量は、設備利用率を約 80%と想定すると、約 7,750 万 kW となる(図 5-17)。同設備量を実現するためには、現行の原子力開発計画計 13 基に加え、さらに追加的に約 8 基(1 基 138 万 kW 換算、設備利用率約 80%を想定)、計約 21 基(=13 基+8 基)の建設が必要になる。そこで技術進展シナリオでは、2030 年までにレファレンスシナリオと同じく約 9 基、2030 年以降、現行の電力供給計画における原子力開発計画の 4 基に加えて、更に約 8 基相当が建設されると想定した。ただし、定期検査のあり方により、設備利用率が想定値よりも向上すれば、建設基数も変化することに留意する必要がある。また同シナリオでは、CO₂回収貯留(CCS)を想定する。CCS に関しては、2030 年以降、石炭火力、LNG 火力発電において段階的に導入が開始され、2050 年には石炭火力、LNG 火力の燃焼に伴う CO₂排出量の約 30%が回収され、国内の安定隔離領域に貯留されるものと想定した。さらに電気事業者の発電量において、再生可能エネルギー(水力、地熱除く)が約 2 割まで拡大すると想定した。

図5-17 原子力発電設備(レファレンス、技術進展シナリオ)

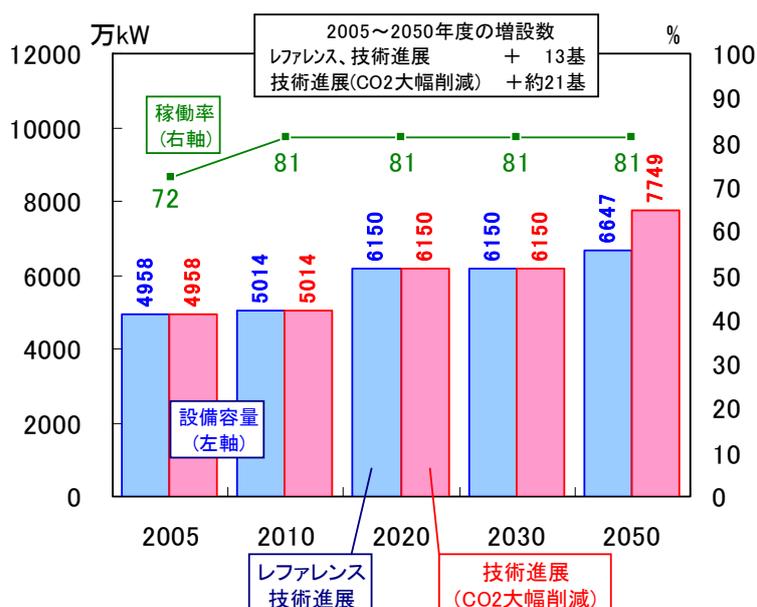


表5-6 各シナリオの主要前提

	レファレンスシナリオ	技術進展シナリオ	技術進展シナリオ (CO ₂ 大幅削減)
高効率機器、新技術の導入	趨勢的な導入ペース	導入ペースの加速化、高効率照明(LED照明等)、高効率ヒートポンプ(ヒートポンプ給湯器COP:6.0、空調ヒートポンプCOP:7.0へ向上)、地中熱利用ヒートポンプ、BEMS導入等	技術進展シナリオと同じ
クリーンエネルギー自動車	2050年時点で約2,200万台(ほぼ全てがハイブリッド車)	2050年時点で約4,500万台 プラグイン・ハイブリッド車: 約2,500万台 電気自動車: 約700万台 燃料電池車: 約600万台	技術進展シナリオと同じ
新エネルギー	2050年時点 太陽光発電: 約4,000万kW 風力発電: 約560万kW	2050年時点 太陽光発電: 約1億kW 風力発電: 約700万kW	技術進展シナリオと同じ
定置用燃料電池	2050年時点で約30万kW	2050年時点で約500万kW	技術進展シナリオと同じ
事業者電源	趨勢的な発電効率改善	石炭火力、LNG火力における一層の発電効率改善(超々臨界圧発電、1700℃級ガスタービン石炭IGCC、1,700℃級コンバインドサイクルLNG発電の導入等)	技術進展シナリオの前提に、さらに新エネルギー発電の導入拡大を追加
原子力発電	2005年～2050年: 13基建設	2005年～2050年: 13基建設	2005年～2050年: 約21基建設
CO ₂ 回収・貯留(CCS)	考慮せず	考慮せず	2030年以降導入開始、2050年に石炭、LNG火力のCO ₂ 排出量の約30%が回収、貯留

(注) 技術進展シナリオ(原子力9基)の前提は、技術進展シナリオと同一の前提の下で、2005年～2050年までの原子力建設基数を約9基に変更したシナリオである。

CO₂回収・貯留技術(CCS)に関しては、エネルギー総合工学研究所(文献(11))によると、日本の場合、CO₂の地中への隔離可能量は、安定的隔離としてCO₂換算35億トン、漏洩する可能性を含んだカテゴリーまで加えると同約915億トンである。日本の現在のCO₂排出量が、CO₂換算約13億トンであるので、安定的隔離領域の容量は、日本の現在の年間排出量の2.7年分、漏洩する可能性を含んだ領域まで加えれば、70.4年分の貯留量が存在する。本分析では、2030年以降、石炭火力、LNG火力発電において段階的にCCS導入が開始されると想定した。CO₂隔離可能量としては、不確実性を考慮に入れ、安定的隔離領域35億トンのみを仮定する。そして、2050年には石炭火力、LNG火力燃焼に伴うCO₂排出量の約3割が回収され、国内の安定的隔離領域に貯留されるものと想定した。

5-3-2 電源構成(発電量)、一次エネルギー供給

電源構成(発電量)を見ると、技術進展シナリオ(原子力9基)では、2050年の原子力のシェアは、46%に低下し、レファレンスシナリオとほぼ同じ水準まで低下する(図5-18)。一方、技術進展シナリオ(CO₂大幅削減)では、原子力の一層の推進、新エネルギー活用拡大を見込んでいる。原子力発電は想定通り、2050年には発電量の60%まで拡大し、太陽光発電技術やバイオマス発電、廃棄物発電等の再生可能エネルギーを活用した発電技術が約2割まで増加する。この結果、火力発電のシェアは、約1割(13%)まで低下し、同シナリオでは、非化石エネルギーを燃料とする発電技術が主流となり、電力供給における脱炭素化が一層進展する。

一次エネルギー供給を見ると、技術進展シナリオ(CO₂大幅削減)では、2050年の原子力の割合は約3割(28%)まで増加し、新エネルギーの割合も、電源構成における増加を背景として、約2割(17%)まで拡大する(図5-19)。この結果、水力・地熱(2050年構成比4%)も考慮に入れば、2050年の一次エネルギー供給に占める非化石エネルギーの割合は、約5割(49%)に達し、エネルギー供給の脱炭素化が一層進展する。ただし、技術進展シナリオ(CO₂大幅削減)では、2050年時点においても依然として、化石燃料はエネルギー供給の約5割、石油は原子力と

並ぶ約3割(約28%)を占める最も重要なエネルギー源であり、エネルギーの安定供給確保は、引続き、エネルギー政策上の重要な課題として位置づけられる。

図5-18 シナリオ別の電源構成(発電量の構成)

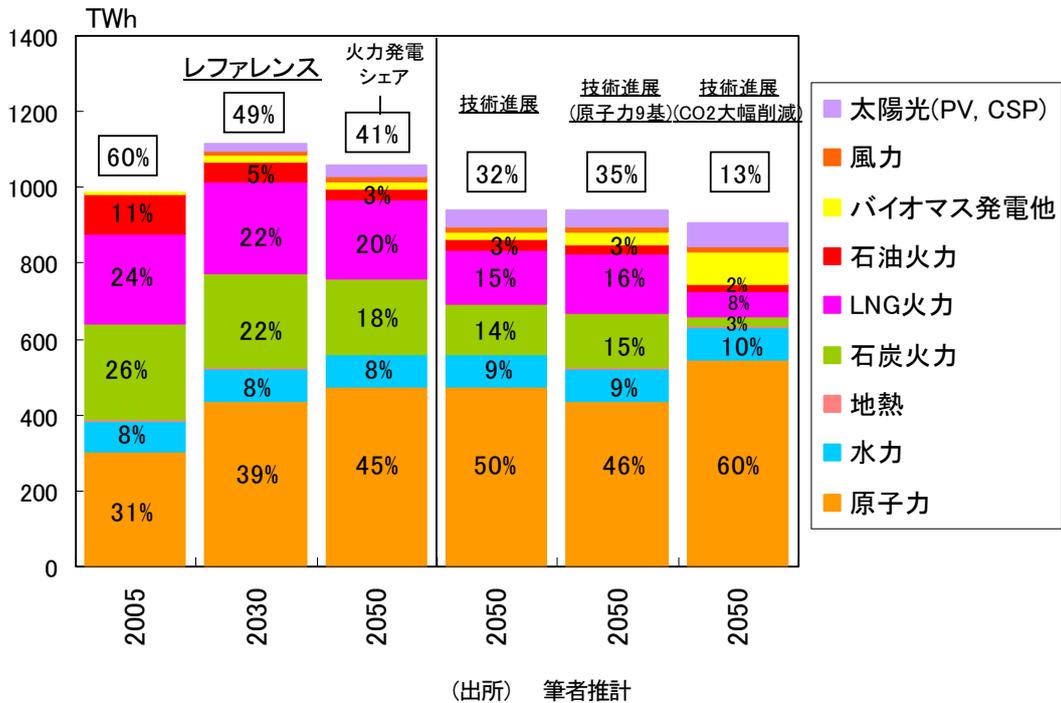
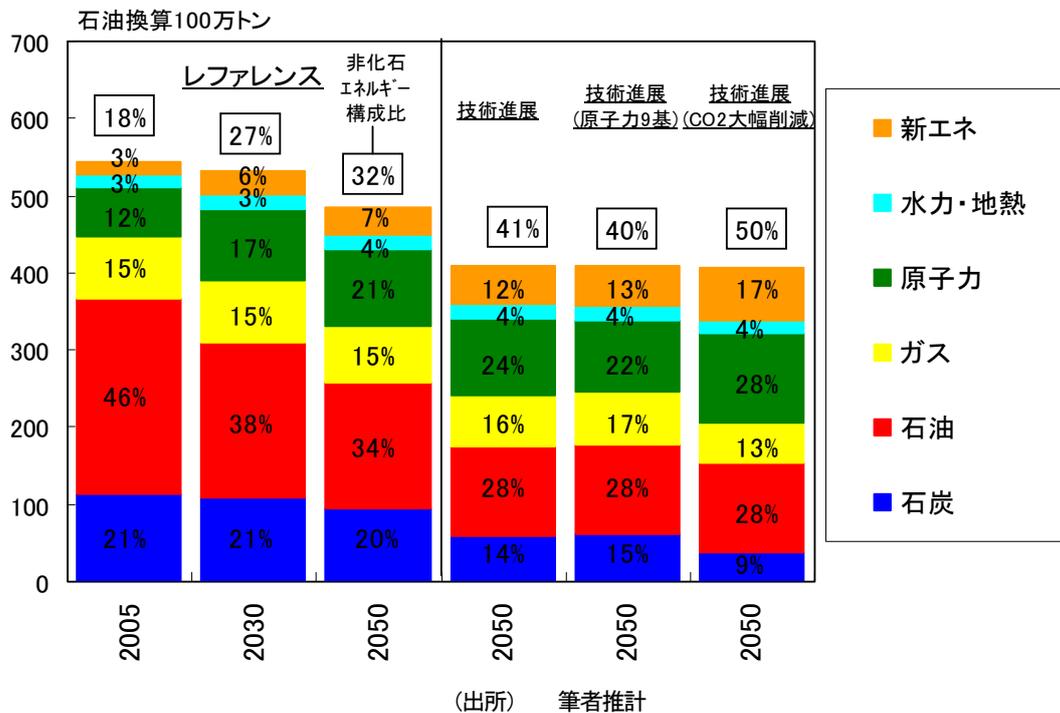
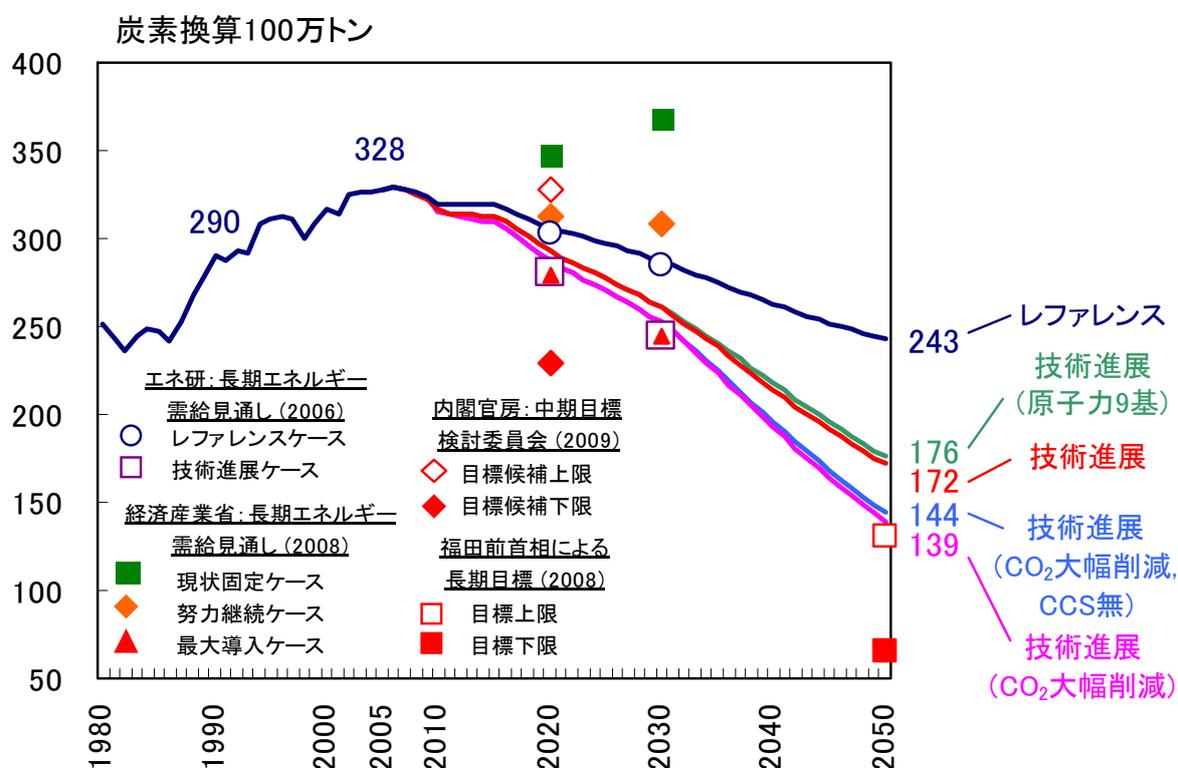


図5-19 シナリオ別の一次エネルギー供給



5-3-3 CO₂ 排出量

2050 年のエネルギー起源の二酸化炭素排出量を見ると、技術進展シナリオ(原子力 9 基)では、技術進展シナリオと比較すると原子力が 4 基少なくなるため、CO₂ 排出量も炭素換算 400 万トン増加する(図 5-20)。一方、技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)の 2050 年の CO₂ 排出量は、2005 年の CO₂ 排出量と比較すると、約 6 割(58%)の削減となる(CCS を考慮しない場合も約 6 割(56%)削減(図 5-20)。1990 年比の場合は、約 5 割(52%)の削減となる(CCS を考慮しない場合も約 5 割(50%)削減)。また、技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)では、2030 年以降、CO₂ 回収、貯留が開始されると仮定している。2040 年に年間 0.1 億 CO₂ 換算トン(日本の現在の年間排出量の約 0.7%)、2050 年に年間 0.19 億 CO₂ 換算トン(同約 1.5%)の規模で LNG、石炭火力発電から CO₂ 回収、貯留が行われ、2050 年の累積貯留量は CO₂ 換算約 2 億トンとなり、2050 年までに、日本国内に存在する安定隔離可能量(35 億トン)の約 6%まで貯留が行われると想定した。

図5-20 シナリオ別の CO₂ 排出量

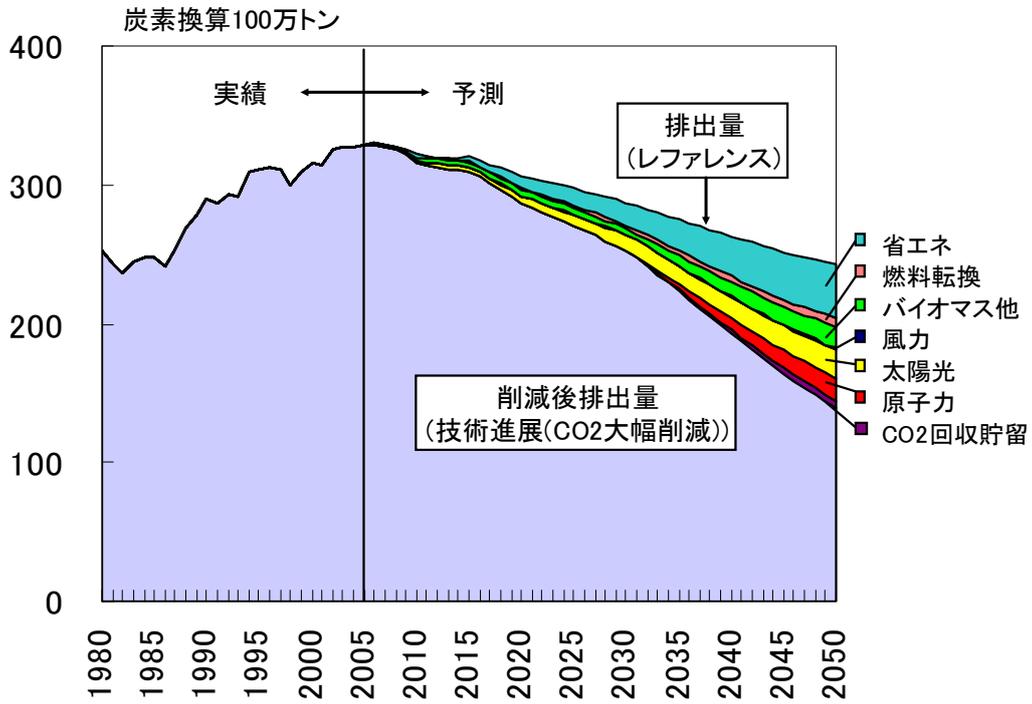
(出所) 筆者推計

(注) エネ研見通しは「日本エネルギー経済研究所、わが国の長期エネルギー需給展望—環境制約と変化するエネルギー市場の下での2030年までの見通し、2006年」、経済産業省見通しは文献(8)、中期目標検討委員会目標候補は「内閣官房、地球温暖化問題に関する懇談会第7回資料、2009年」、福田前首相による目標値は「首相官邸、福田内閣総理大臣スピーチ「低炭素社会・日本」をめざして、2008年」を参照。

技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)における CO₂ 排出削減への各技術の貢献度を見ると、省エネルギーの寄与が最も大きく 37%を占める(図 5-21、図 5-22)。続いて太陽光が 20%、原子力が 16%、バイオマス等再生可能エネルギーが 15%で削減に貢献している。その他では、燃料転換が 6%、CO₂ 回収貯留が 5%を占める。

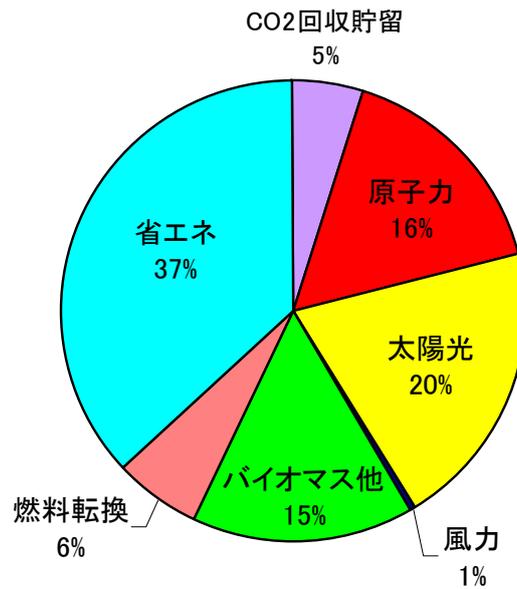
CO₂ 排出量を要因分解すると(表 5-7)、技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)では、2050 年にかけて省エネルギーのテンポはレファレンスシナリオよりも 0.3 ポイント、脱炭素化のテンポは 0.9 ポイント上昇する。技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)における脱炭素化のテンポは、これまでに例の無い急速なペースとなる。

図5-21 対策技術別の CO₂ 排出削減効果 (技術進展シナリオ(CO₂大幅削減))



(出所) 筆者推計

図5-22 2050年の対策技術別の CO₂ 排出削減効果 (技術進展シナリオ(CO₂大幅削減))



2050年のCO₂削減量：炭素換算1億400万トン

(出所) 筆者推計

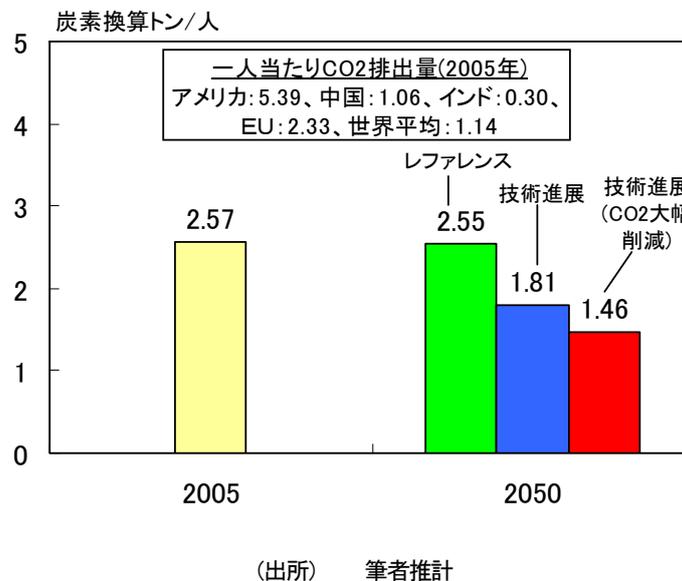
表5-7 エネルギー起源二酸化炭素排出量の要因分解 (シナリオ別)

(単位: 年率%)

	1973~ 1990年	1990~ 2005年	2005~2050年			
			レファレンス	技術進展	技術進展 (原子力9基)	技術進展 (CO2大幅削減)
CO2排出量変化	0.9	0.8	▲ 0.7	▲ 1.4	▲ 1.4	▲ 1.9
脱炭素化	▲ 0.7	▲ 0.2	▲ 0.4	▲ 0.8	▲ 0.8	▲ 1.3
省エネルギー	▲ 2.1	▲ 0.2	▲ 1.6	▲ 1.9	▲ 1.9	▲ 1.9
経済成長	3.8	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3

(出所) 筆者推計

一人当たり CO₂ 排出量は、2005 年は 2.57 炭素換算トンであるが、2050 年ではレファレンスシナリオで 2.55 トン、技術進展シナリオで 1.81 トン、技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)で 1.46 トンへ推移する(図 5-23)。技術進展シナリオでは、EU(EU15)の一人当たり CO₂ 排出量を下回る。

図5-23 一人当たり CO₂ 排出量

ただし、技術進展シナリオや、技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)等の実際の実現可能性については、克服すべき数多くの課題が考えられ、技術的、経済的ハードルがかなり高いと考えられる。

特に技術進展シナリオ(CO₂ 大幅削減)では、原子力が大規模に導入され、2050 年には日本の一次エネルギー供給に占める構成比は石油とほぼ同じ約 3 割まで拡大し、石油とならび最も重要なエネルギー源となる。このため、資源利用率の向上、使用済み燃料等の放射性廃棄物の低減、プルトニウムの安全管理等、最重要エネルギー源としての安全性、信頼性の向上、他のエネルギー源と競合できる高い経済性を確保し、原子力の社会的受容性を高めることがこれまで以上に重要な目標になると考えられる。また、電源構成においても 6 割まで構成比が上昇するため、負荷追従運転など技術的課題の克服や、大規模電力貯蔵技術の開発等をはじめ、様々な技術的、経済的課題が存在し、原子力の大規模導入には大きな不確実性が残る。さらに、一次エネルギー供給ならびに発電量構成に占める新エネのシェアも約 2 割まで拡大し、新エネの導入対策も必要となる。太陽光発電、風力発電、家庭用燃料電池など、発電出力が制御できない発電設備の容量が増加すると、電力品質や電力システムの安定化に関する問題への対策も必須になり、系統連係近傍での電圧変動対策や、系統周波数への影響緩和が重要な課題となる。

6. まとめ

本稿では、2050年までの日本のエネルギー需給とCO₂排出量の予測を行った。その結果、基準となるレファレンスシナリオでは、日本の2050年のCO₂排出量は、現状比(2005年度比)で約3割(26%)削減、各種エネルギー・環境技術が普及拡大する技術進展シナリオでは、現状比(2005年度比)約5割(48%)削減、さらに原子力等が一層拡大する技術進展シナリオ(CO₂大幅削減)では、現状比(2005年度比)約6割(58%)削減されることが示された。これらの結果から、2050年のCO₂排出量の長期削減目標として、現状比(2005年比)で、約3割~約6割削減を目標とすることが一つの可能性として考えられる。

2050年のCO₂排出量を現状比で約6割削減するシナリオ(技術進展シナリオ(CO₂大幅削減))では、2005年から2050年にかけて、年率1.9%にて省エネルギー(GDP当たり一次エネルギー供給の減少)が進むと同時に、2050年の一次エネルギー供給に占める原子力の割合が約3割(28%)、新エネルギーと水力・地熱を合わせて約2割(21%)、非化石エネルギー合計で約5割まで拡大する。また同シナリオにおける2050年の電源構成(発電量ベース)では、原子力の構成比が6割、太陽光発電等の新エネルギー発電が約2割、水力が1割、火力発電も約1割となる。また、CO₂排出削減への各技術の貢献度を見ると、省エネルギーの寄与が最も大きく37%を占める。続いて太陽光が20%、原子力が16%、バイオマス等再生可能エネルギーが15%でCO₂削減に大きく貢献し、燃料転換、CO₂回収貯留も重要な削減オプションとなる。

図6-1 長期的に重要なエネルギー技術とエネルギー政策



(出所) 筆者作成

技術進展シナリオ(CO₂大幅削減)は、CO₂を大幅に削減(現状比約60%削減)する上での一つのシナリオとして考えられる。ただし、同シナリオは、エネルギーの需給面から作成したシナリオであり、実現可能性については、数多くの技術的課題が考えられ、不確実性が大きい。原子力の大規模導入、革新的技術開発など、大変厳しい技術的、経済的課題を克服することが求められる。同シナリオでは、原子力が大規模に導入され、2050年には日本

の一次エネルギー供給に占める構成比は石油とほぼ同じ約 3 割まで拡大し、石油とならび最も重要なエネルギー源となる。このため、資源利用率の向上、使用済み燃料等の放射性廃棄物の低減、プルトニウムの安全管理等、最重要エネルギー源としての安全性、信頼性の向上、他のエネルギー源と競合できる高い経済性を確保し、原子力の社会的受容性を高めることが最重要目標になると考えられる。また、電源構成(発電量)においても原子力の構成比が 6 割まで上昇するため、負荷追従運転など技術的課題の克服や、大規模電力貯蔵技術の開発等も重要な課題に挙げられる。さらに、一次エネルギー供給ならびに電源構成(発電量構成)に占める新エネのシェアも約 2 割まで拡大し、新エネの導入対策も必要となる。太陽光発電、風力発電、家庭用燃料電池など、発電出力が制御できない発電設備の容量が増加すると、電力品質や電力システムの安定化に関する問題への対策も必須になり、系統連係近傍での電圧変動対策や、系統周波数への影響緩和が重要な課題となる。このため、太陽光発電、風力発電など、出力制御ができない発電設備の出力を平滑化するための蓄電池など電力貯蔵設備の導入や、分散型電源の大量連携を可能にする技術(電力制御技術、限流器などの保護設備関連技術、故障検出技術、スマートグリッド技術等)の確立が必要になる。

今後のエネルギー安定供給の確保、地球温暖化問題の解決に資するエネルギー、環境政策を考える場合、産業、民生、運輸部門など最終消費部門や、発電部門等の転換部門など、あらゆる消費段階で省エネを進めることと、新エネルギー技術の導入拡大や、CO₂回収・貯留技術の開発を進めることが重要となる(図 6-1)。これらを積極的に推進するためには、政策的なバックアップが不可欠であり、エネルギー効率基準・ラベリング制度(S&L 制度)や、税制、取引許可証、料金制度等の経済的手法、エネルギー環境教育の普及やエネルギー環境技術開発支援等が重要な役割を果たすと期待される。また、技術進展シナリオ(CO₂大幅削減)では、2050 年の CO₂ 排出量は現状比で約 60%削減されるが、2050 年時点においても依然として、化石燃料はエネルギー供給の約 5 割、石油は原子力と並ぶ約 3 割を占める最も重要なエネルギー源である。よって化石資源のほぼ全量を海外からの輸入に依存するわが国の場合、引続き、エネルギー資源生産国との協力関係強化など、エネルギー安定供給の確保が重要な課題として考えられる。また、2050 年の国際エネルギー需給では、中国、インド等の発展途上国のエネルギー消費が大幅に拡大すると予想されるため、先進国だけの CO₂削減だけでは温暖化に対処することはできず、CO₂ 排出量の急増が予想されるアジア途上国の協力が必要になる。これらの途上国では、低コストで実施可能な省エネや CO₂ 排出量削減の潜在量が大きいため、CDM 等の京都メカニズムを活用することにより、日本の省エネ、CO₂ 排出量削減対策にかかるコストを大幅に低減できる可能性も定量的に指摘されており(文献(18))、技術移転を含む国際的なエネルギー協力はより一層重要性を増すと考えられる。日本は省エネ技術協力、S&L 制度の構築支援、原子力や太陽光発電等の技術支援など、自国で培った知見、ノウハウの国際的な移転を通じて、国際的なエネルギー安定供給確保や、地球温暖化問題に積極的に貢献することが重要な課題となる。

参考文献：

- (1) (財)日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編、「エネルギー・経済統計要覧」、省エネルギーセンター、2008 年
- (2) 内閣府、「国民経済計算年報」、2008 年
- (3) 国立社会保障・人口問題研究所、「日本の世帯数の将来推計(全国推計)」、2008 年
- (4) 省エネルギーセンター、「オフィスビルの省エネルギー」(http://www.eccj.or.jp/office_bldg/index.html : アクセス日 2008 年 12 月 28 日)
- (5) Griffith, B., Long, N., Torcellini, P., Judkoff, R., Crawley, D., Ryan, J., 「Assessment of the Technical Potential for Achieving Net Zero-Energy Buildings in the Commercial Sector」 Technical Report, NREL/TP-550-41957, 2007 年
- (6) Jonathan G. Koomey, 「ESTIMATING REGIONAL POWER CONSUMPTION BY SERVERS: A TECHNICAL NOTE」, 2007 年
- (7) 電気事業連合会統計委員会編、「電気事業便覧」、2008 年
- (8) 総合資源エネルギー調査会需給部会、「長期エネルギー需給見通し」、2008 年
- (9) 小宮山、「Japan's Energy Outlook for 2050 with Stochastic Sectoral Energy」、日本エネルギー経済研究所、2008 年

- (10) EIA/DOE、「Annual Energy Outlook 2008」、2008 年
- (11) 財団法人エネルギー総合工学研究所、「超長期エネルギー技術ロードマップ報告書（超長期エネルギービジョン 2100）」、2006 年
- (12) 財団法人エネルギー総合工学研究所、「エネルギー分野における技術戦略マップ（エネルギー技術戦略 2007）」、2007 年
- (13) 経済産業省、Cool Earth-エネルギー革新技术計画、2008 年
- (14) 経済産業省 資源エネルギー庁、平成 20 年度電力供給計画の概要、2008 年
- (15) NEDO、「2030 年に向けた太陽光発電ロードマップ（PV2030）」、2004 年
- (16) NEDO、「風力発電ロードマップ」、2005 年
- (17) LED 照明推進協議会、「白色 LED の技術ロードマップ」、2008 年
- (18) 小宮山、「京都メカニズムのマクロ的定量分析ー中国、アジアに向けた日本の CDM 展開による CO₂ 限界削減費用の評価ー」、日本エネルギー経済研究所、2007 年

お問い合わせ : report@tky.ieej.or.jp