

2050年までの世界のエネルギー需給見通しと 低炭素社会実現に向けた課題

松尾 雄司*

要 約

本稿では、世界を30の国・地域に分割し、計量経済型モデルを用いて2050年までのエネルギー需給見通しを試算した。各国が今後特段のCO₂削減対策を講じない「レファレンスケース」では、今後2050年までの間に世界の一次エネルギー消費は1.8倍に、エネルギー起源CO₂排出量は1.7倍に増大する。これは地球環境問題の面からも、また各国のエネルギーセキュリティや資源開発の面からも持続的なシナリオではないと考えられる。これに対して、世界各国が今後最大限のエネルギー・環境政策を実施し、また革新的技術の開発・導入が加速すると想定した「技術進展ケース」では、2050年のCO₂排出量は2005年比で16%減となる。

国際エネルギー機関(IEA)による同様の試算では、2050年までに2005年比で世界のCO₂を50%減とするシナリオを描いている。この試算は「CO₂半減」という目標を先に置いて計算したものであり、その前提には非常に楽観的なものが多いが、その結果は筆者らの試算結果と共通する部分も多く、これらと比較することにより今後世界の低炭素化のために、何をすることが必要かを考えることができる。今後もこれらの試算を例としつつ、更に個々の技術や各国・地域の特性等をより詳細に評価することにより、CO₂削減のための方策を更に探っていくことが必要である。

キーワード: 地球環境問題, 低炭素社会, エネルギー需給, 再生可能エネルギー, 原子力

1. はじめに

地球温暖化等の気候変動問題に対して、人為起源の温室効果ガス排出の影響が国際的に議論され、その削減の必要性が論じられるようになって久しい。特に近年では温室効果ガス削減に向けた国際政治的動向が複雑化する一方、世界がより根本的な社会構造の変革も含めた「低炭素社会」実現のための取組みを行い、温室効果ガス排出量を大幅に削減することの必要性が認識されるようになっており、2050年までに世界の温室効果ガス排出を現状から半減するという目標が広く共有さ

れつつある。中でもエネルギー起源の二酸化炭素排出量は温室効果ガス排出量のかなりの部分を占めるため、このような「低炭素社会」の実現可能性を検討するに当たり、今後のエネルギー需給や技術開発・普及等を詳細に検討し、長期にわたるシナリオを描くことが不可欠であると言える。

国際エネルギー需給は生産国と消費国との需給バランスの上に成り立つものであり、それぞれの国・地域の需給特性や、エネルギー政策、資源開発の動向、新規技術の導入・普及状況等を適切に把握した上で、それらを定量的に評価することが必要となる。この目的のため、本稿では筆者らがこれまでに行った長期エネルギー需給モデル分析¹⁾²⁾³⁾⁴⁾をもとに2050年までの長期エネルギー需給シナリオを試算し、更に国際機関による最新の分析結果との比較により、低炭素社会に向けた課題について考察した。

2010年11月29日受付

* 江戸川大学 経営社会学科非常勤講師, 財団法人日本エネルギー経済研究所・主任研究員
e-mail matsuo@edmc.ieej.or.jp

2. 2050年までの世界のエネルギー需給試算

2.1 モデルの構造

シナリオ作成にあたり、モデルとして、アジア及び世界の各主要国を対象として、長期エネルギー需給を総合的、統合的に分析する計量経済型エネルギー需給モデルをコアとした、統合型エネルギー経済モデルを構築した。これはマクロ経済モデル、エネルギー需給モデルや、技術評価モデル（自動車、民生部門エネルギー消費機器）のサブモデルから構成されており、経済とエネルギー需給の関係を統合的に取り扱っている。モデルの全体像は図1の通りである。

(1) マクロ経済モデル

マクロ経済モデルは原油価格や経済・財政・金融関連の国内政策を前提条件として与え、GDPコンポーネント（需要項目）を統合的に算出し、そこからエネルギー需要に直接、間接的に影響を与える各種の経済活動指標を推計するものである。マクロ経済モデルは実質支出ブロック、2次エネルギー価格ブロック、産業活動ブロック、輸送活動ブロック等の各ブロックから構成されている。

マクロ経済モデルの主要なアウトプットは、GDPコンポーネント、自動車保有台数（旅客、貨物）などの輸送活動指標、粗鋼生産量などの生産活動指標、各種物価指数、2次エネルギー価格などで、

これらの将来推計を前提条件として下記のエネルギー需給モデルによる計算が行われることとなる。

(2) エネルギー需給モデル

エネルギー需給モデルはエネルギー需給分析の中核をなすモデルである。ここで用いる基礎データとしてはIEAのエネルギーバランス表⁵⁾⁶⁾を採用し、これを適宜集約・加工して各国のエネルギー需給の実績値をデータベース化した上で、将来推計を行うことができるようにした。

モデル内では最終エネルギー消費（産業、民生、運輸の各部門のエネルギー消費）、エネルギー転換（発電、石油精製、都市ガス製造など）及び一次エネルギー供給に関する計算を扱った。即ち、マクロ経済モデルより得られる諸指標を前提としてまず各部門の最終エネルギー消費を推計し、その需要を満すために必要なエネルギー転換部門の推計を行うことで一次エネルギー供給を統合的かつ総合的に評価した。また後述の技術進展ケースにおいては、次に述べる技術評価モデル等を用いて、各技術の最終エネルギー消費・エネルギー転換の各部門における省エネルギー量を推計し、それをレファレンスケースのエネルギー消費量から差引くことにより評価を行った。予測期間としては、IEAデータの実績最新値の翌年（2008年）以降、2050年までを対象としている。

(3) 技術評価モデル

本分析では、自動車、民生部門エネルギー機器、再生可能エネルギー及び原子力発電の将来予測を、別途、ボトムアップ的に推計し、この推計値をエネルギー需給モデルに入力することにより、革新的技術の省エネ等の導入効果を考慮している。自動車の普及見通し、省エネ効果の推計に関しては、日本エネルギー経済研究所が構築した詳細な自動車導入モデル⁷⁾を用いている。民生部門のエネルギー消費機器（冷蔵庫、エアコン等）の普及による省エネ効果は、文献⁸⁾を元に、対象地域における当該機器の普及と廃棄を考慮に入れた積上げ型モデルを構築し、保有台数ベースでのエネルギー効率をエネルギー需給モデルに入力する

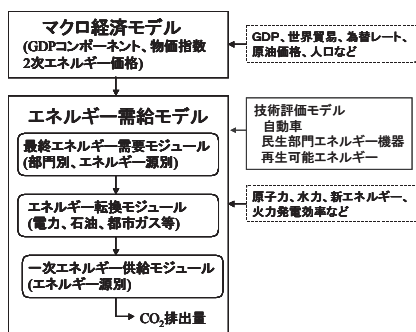


図1 計量モデルの構造

ことにより、高効率技術の省エネ効果を考慮している。再生可能エネルギーに関しては、既存文献⁹⁾における既存技術とのコスト競合効果を考慮に入れた技術評価モデルを参照し、普及パターンを計算している。原子力については、既存文献¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾における導入見通しを参考とした上で、現在の世界各国の原子力政策や原子力開発計画を反映させ、国ごとに原子力発電設備容量の見通しを作成し、それを集計してモデルの入力条件とした。

(4) 地域区分

本研究では、地政学的要因や各地域のエネルギー需給構造を考慮することにより、図2のように30の国もしくは地域に世界を分割してエネルギー需給予測を行った。特に、アジア地域のエネルギー需給を詳細に分析することを目的として、同地域を14の国・地域に分割している。

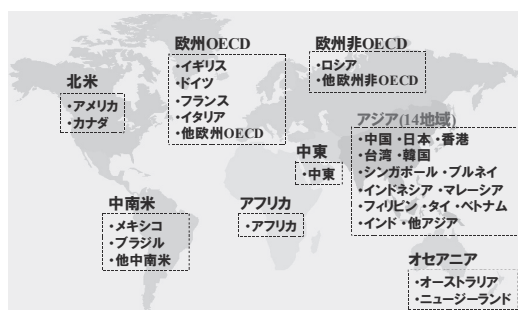


図2 計量モデルに用いた地域区分

2.2 試算の前提

(1) 人口及び経済成長の見通し

人口については国連による最新の将来予測（中位推計）を参照し、図3の通り想定した。経済発展に伴い発展途上国の出生率は低下する傾向にあるが、世界全体では人口は今後も年平均1%弱の増加基調で推移し、2007年の66億人から、2050年には92億人まで増加する。うちアジア人は47億人である。中国では2030年前後にピークを迎え、インド等のアジア諸国でも2050年には増加は頭打ちとなる。

経済成長の見通しを図4に示す。世界全体の

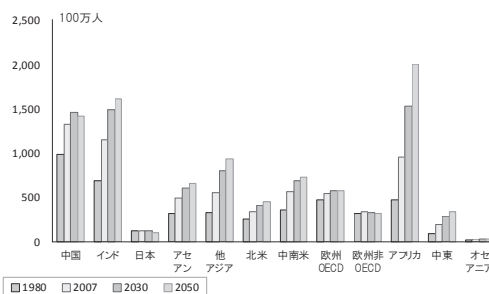


図3 人口の想定

2050年までの平均成長率は2.5%と試算された。人口が微増あるいは減少する先進国における平均成長率は1.7%にとどまる。一方、今後も人口が大きく伸びる途上国では4.0%の高水準を維持する。2030年以降に人口が減少に向かう中国の経済成長率は大きく低下するが、人口増の続くインドでは高成長を維持すると見込まれる。

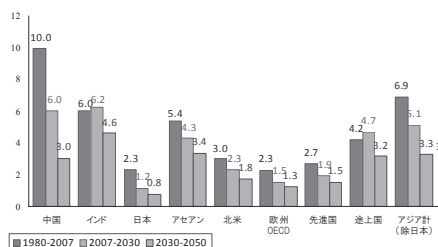


図4 GDP成長率（年率％）の想定

(2) ケース設定

ケース設定に関しては、レファレンスケース及び技術進展ケースの2つのケースを想定した。

レファレンスケースは、世界各国が現状以上に特段の環境対策・省エネルギー対策を行わないケースである。この場合には後述のように、世界のエネルギー消費は2050年まで直線的に増加を続け、それに伴ってエネルギー起源CO₂排出量も増加を続ける。これに対して、技術進展ケースでは世界各国が地球温暖化対策の強化やエネルギー安定供給の確保等に資するより一層のエネルギー・環境政策を実施し、また今後革新的技術の開

発・導入が加速すると想定した。このケースでは基本的には世界各国・地域のエネルギー政策を反映して諸前提を設定しているが、政策議論が進んでいないアジア等の途上国においては、先進国からの技術移転促進によりエネルギー効率の向上や非化石エネルギー導入が進むと想定している。技術進展ケースにおいて想定した技術は表1の通りである。

表1 技術進展ケースにおける技術の想定

| 環境規制や国家目標の導入・強化 | 技術開発強化や国際的な技術協力の推進 |
|---|---|
| 環境税、排出量取引、再生可能エネルギー導入基準、補助金・助成制度、固定価格買取制度、省エネ基準、燃費基準、低炭素燃料基準、省エネ環境ラベリング制度、国家的戦略・目標設定等 | 研究開発投資の拡大、国際的な省エネ技術協力(鉄鋼、セメント分野等)や省エネ基準制度の構築支援等 |
| 【需要サイドの技術】 ■ 産業部門 セクトラルアプローチ等により最高効率水準(ベストプラクティス)の産業プロセス技術(鉄鋼、セメント、紙パルプ、石油精製)が世界的に普及 ■ 運輸部門 クリーンエネルギー自動車(低燃費自動車、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車、電気自動車、燃料電池自動車)の普及拡大 ■ 民生部門 省エネ家電(冷蔵庫、テレビ等)、高効率給湯器(ヒートポンプ等)、高効率空調機器、高効率照明の普及拡大、断熱強化 | 【供給サイドの技術】 ■ 再生可能エネルギー 風力発電、太陽光発電、太陽熱発電、バイオマス発電、バイオ燃料の普及拡大 ■ 原子力導入促進 原子力発電建設加速化、設備利用率向上 ■ 高効率火力発電技術 超々臨界圧石炭火力、石炭IGCC、石炭IGFC、天然ガスMACCの普及拡大 ■ 二酸化炭素回収・貯留(CCS) 発電部門(石炭火力、ガス火力の新設、既設設備)、産業部門(鉄鋼、セメント等大規模排出源)での導入拡大 |

2.3 結果・考察

2.3.1 一次エネルギー消費の見通し(レファレンスケース)

図5に地域別にみた世界の一次エネルギー消費の見通しを示す。

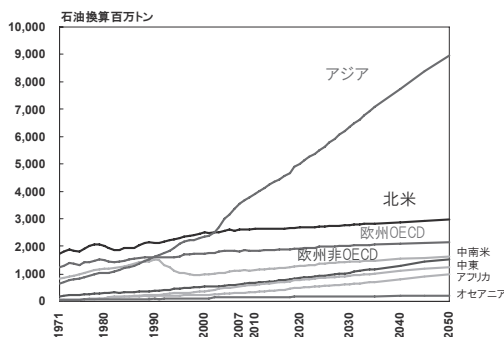


図5 地域別一次エネルギー消費の見通し

レファレンスケースでは、世界の一次エネルギー消費は2007年から2050年まで年率1.4%で増

加し、2007年の石油換算111億トンから2050年には204億トンまで拡大する。2007年から2050年までのエネルギー消費増加量の約9割が、発展途上国(非OECD諸国)において生じる。特にアジア地域は年率2.3%の経済成長により世界のエネルギー消費増加量の約6割を占め、同地域における増加が世界のエネルギー消費を牽引する。中でも中国・インドの成長が著しく、この2国で世界の一次エネルギー消費の約3割を占める。

図6にエネルギー源別に見た世界とアジアの一次エネルギー消費の見通しを示す。エネルギー源別に見ると、世界では2050年まで依然として石油が最も構成比率の大きいエネルギー源として着実に増加するとともに、天然ガスの消費量が急増し、石油に続く比率を占める。原子力及び再生可能エネルギー等の普及進展に伴い化石燃料の比率は89%から83%まで低下するものの、依然として主要なエネルギー源として位置づけられる。

アジアでは、2007年に52%を占める石炭、31%を占める石油の比率は2050年にはそれぞれ38%、26%まで低下するものの、エネルギー消費自体が急速に伸び続けるため、ともに消費量は大きく増加する。特に、現時点から2050年まで総発電量の半分以上を石炭火力が占める見込みである。一方、化石燃料の中では天然ガスへのシフトが明確となり、一次エネルギー供給に占める天然ガスの比率は2050年には19%まで拡大する。化石燃料合計の比率は2007年の94%に比較すると若干低下するものの、2050年においても80%以上を占める。

2.3.2 燃料別需給の見通し

(1) 石油

図7に世界の石油消費の見通しを示す。レファレンスケースでは、世界の石油消費量は2007年の8,500万バレル/日から2050年には1億2,900万バレル/日へ、年率1.0%で増加する。地域別ではこの増加量の7割がアジアで生じ、部門別では6割が運輸部門に起因する。既に先進国(OECD)の石油需要は2005年以降減少を続けており、2050年まで年率マイナス0.2%で減少する

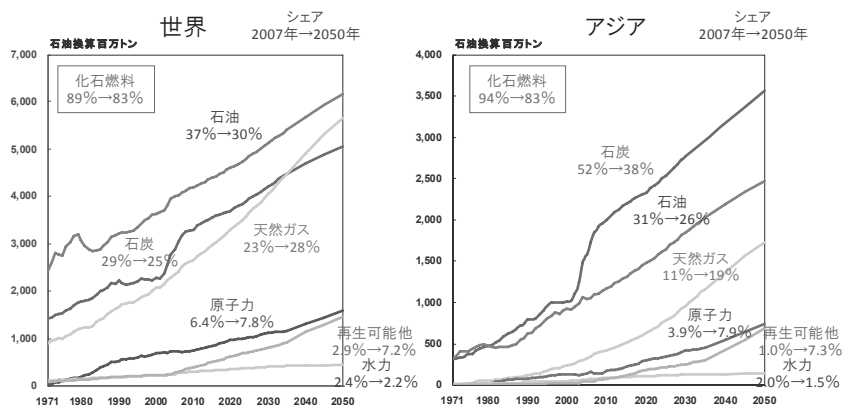


図6 エネルギー源別一次エネルギー消費の見通し

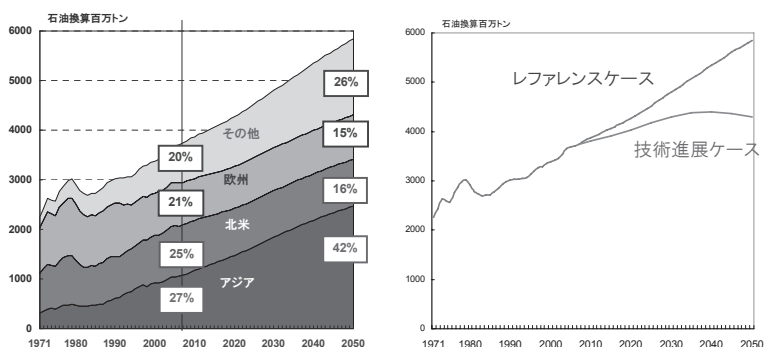


図7 石油消費量の見通し（左：レファレンスケース，右：ケース間比較）

一方、途上国（非 OECD）では年率 2.1% で増加する。今後既存油田は生産量が減退に向くと想定されるため、レファレンスケースでは非在来型資源も含めた投資を大幅に増強し、資源の確保に努めることが急務の課題となる。また、需給の逼迫に伴う原油価格の高騰も懸念される。技術進展ケースでは、運輸部門での次世代自動車普及などの効果により、世界の石油消費量は 2040 年頃に頭打ちを迎える。このケースでも積極的な資源開発は必要であるものの、レファレンスケースと比較すると資源需給は大幅に緩和されると想定される。

(2) 天然ガス

図 8 に世界の天然ガス消費の見通しを示す。天然ガス消費量は、レファレンスケースでは 2007 年の 2 兆 8,000 億立方メートルから、2050 年に

は 6 兆 3,000 億立方メートルへと年率 1.9% で増加する。石油と同様、途上国、特にアジア地域において高い伸びを示す。技術進展ケースでは、天然ガス消費量はレファレンスケースに比べ 2050 年に 16% 程度の減少となるが、石油消費量と異なり、このケースにあっても 2050 年までにピークアウトを迎えず、なお増加傾向が続く。このため、非在来型資源を含む資源開発は今後も不可欠であり、適切な投資の継続が求められる。

(3) 原子力発電及びウラン

図 9 に世界の原子力発電設備量の見通しを示す。世界の原子力発電設備量は、2007 年の 392GW から、2050 年にはレファレンスケースで 897GW、技術進展ケースで 1,122GW まで拡大する見通しである。特に中国・インド等の国で急速

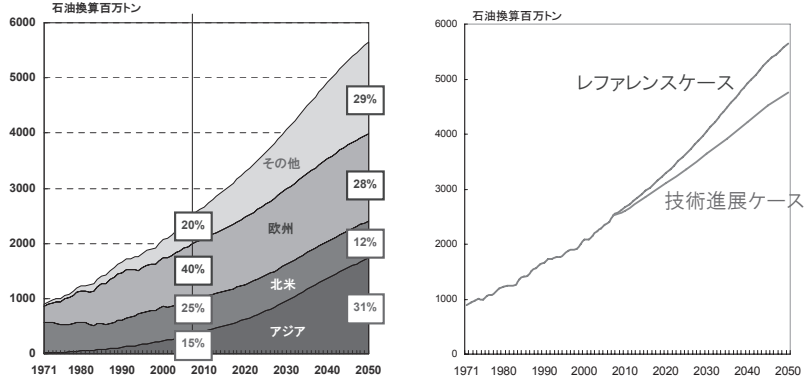


図8 天然ガス消費量の見通し（左：レファレンスケース，右：ケース間比較）

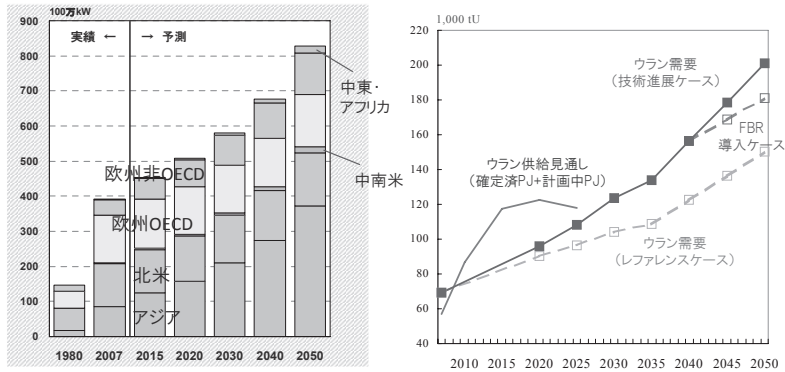


図9 原子力発電容量及びウラン需給の見通し

な進展が見込まれるとともに、東南アジア・中東等の国でも新規の発電所建設が行われる。

これに伴い、ウランの需要量も増大する。テイル濃度（ウラン濃縮を行った際に副産物として生じる劣化ウランの濃度）を0.3%とした場合、世界のウラン需要量は2007年の約7万トンから、2050年にはレファレンスケース、技術進展ケースでそれぞれ15万トン、20万トンに達する。一方で、近年のウラン価格の上昇により現在多くの国で資源開発が積極的に行われており¹⁴⁾、中期的にはウラン需要の増大にもかかわらず需給は極度には逼迫しない見通しである。しかし長期的には、技術進展ケース相当に発電所建設が進んだ場合には天然ウランもしくは濃縮役務の需給に逼迫が生じる可能性も高く、核不拡散問題等に十分な

考慮を払いつつ、生産・濃縮等の施設を急速に拡充することが必要である。

2.3.3 エネルギー起源 CO₂ 排出量の見通し

図10にレファレンスケースと技術進展ケースのエネルギー起源 CO₂ 排出量の見通しを示す。

レファレンスケースでは2007年の288億トンから、2050年には485億トンまで排出量が増大する。技術進展ケースでは、省エネルギー、原子力・再生可能エネルギーの導入、燃料転換、CCS（二酸化炭素回収・貯留）等により排出量は228億トンまで減少する。2050年でのレファレンスケースから技術進展ケースへの削減量257億トンのうち、約7割が途上国によるものである。また技術対策別に見ると、同削減量の約4割が機器効

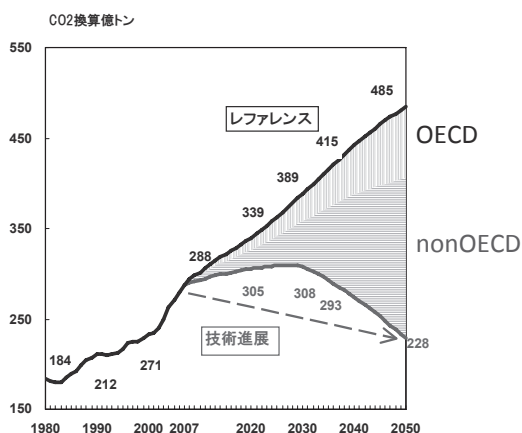


図10 世界のエネルギー起源CO₂排出量の見通し

率向上等の省エネルギーによる効果となっている。

3. 国際エネルギー機関 (IEA) による試算結果との比較

3.1 IEA による試算の概要

国際エネルギー機関 (International Energy Agency : IEA) は2年に一度、2050までの技術導入シナリオ (Energy Technology Perspectives : ETP) を発表している。その最新版である ETP 2010 は今年7月に発表されており¹⁵⁾、以下に示す2つのシナリオについて各エネルギー技術の導入を評価し、各部門・エネルギー源別のエネルギー消費量やCO₂排出量等を推計している。

① ベースライン・シナリオ

政府がエネルギーと気候変動に関する新政策を導入しないと想定したシナリオ。同機関の発表した2030年までの需給見通し World Energy Outlook (WEO) 2009のレファレンス・シナリオを2050年まで延長させたもの。

② BLUE Map シナリオ

世界のエネルギー起源CO₂の排出量を2050年に2005年比で半減させるための最も低コストな方法を検討した、「目標指向的」なシナリオ。

ベースライン・シナリオでは、世界のエネルギー起源CO₂排出量は2050年に57Gtに達するとされる。それに対し、BLUE MapではCO₂排出量は2015年から2020年の間にピークアウト、その後低減に向って行く。このピークアウト時期が遅くなればなるほど削減対策コストは上昇し、目標の達成は難しくなる、と述べられている。また、各国がコペンハーゲン合意での目標削減量 (Pledge) を達成した場合には2020年までCO₂は微増を続け、同年のCO₂排出量はBLUE Mapを1Gt上回るとされるため、世界で半減を目指すためにはより野心的な目標が必要、もしくはその後の対策費用が非常に高価になる、と述べられている。

43Gtの削減の内訳は、CCSが19%、再生可能エネルギー (発電部門・バイオ燃料含む) が19%、原子力が6%、発電部門の効率向上及び燃料転換が5%、最終消費での燃料転換が15% (うち電気自動車・燃料電池車の導入がそれぞれ7%・4%)、最終消費での効率向上が38%となっている。

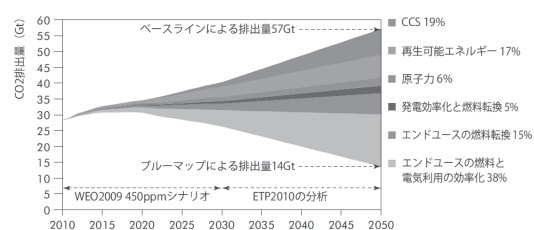


図11 IEA 試算でのCO₂排出量の推移

世界半減を実現するためには、各種技術に対する政府の支援や実証試験の実施、CO₂削減のためのインセンティブの導入 (炭素価格、取引制度、減税措置、補助金、規制、自主的削減プログラムの実施など) や、その他技術の普及への障壁をなくす様々な手段が必要である、とされる。特に、CO₂削減のためには175ドル/tCO₂ (2008年実質価格。以下同様) までのコストをもつ対策が必要である、とされる。

BLUE Mapを実現するために必要な投資額は、ベースライン・シナリオに対し2050年までの累計で46兆ドルの増となっている。このうち50%

は次世代自動車等に関するコスト増など運輸部門におけるものとなる。これらの投資に対し、省エネルギーによるコストメリットが112兆ドル得られるため、割引率を考慮しない場合には差引き66兆ドルのメリットがある。仮に割引率を3%とするとこのメリットは32兆ドル、10%とすると8兆ドル程度になる。

CO₂削減のための鍵となるのは発電部門における低炭素化である。ベースライン・シナリオでは、2050年に発電電力量の44%を石炭火力が、23%をガス火力が占め、全体の68%を火力発電が占めることとなる。これに対してBLUE Mapでは、48%が再生可能エネルギー（うち、太陽光・太陽熱・風力が25%、水力が14%）、24%が原子力により賄われている。また、石炭火力の9割、ガス火力の3割に対してCCSが導入され、その結果として電力の排出係数（発電端）は67gCO₂/kWhまで低減する。BLUE Mapのパリエーションとして、CCSを用いないケース、原子力や再生可能エネルギーがより進展したケース及び低い割引率（3%）を想定したケースが検討されているが、例えば原子力進展ケース（hi NUC）では原子力発電のシェアは39%に、再生可能進展ケース（hi REN）では再生可能エネルギーのシェアは75%にまで達する。

IEAの発する主要なメッセージの一つは、途上国における削減の重要性である。先進国(OECD諸国)は現在エネルギー起源CO₂の45%を排出しているが、ベースライン・シナリオでは新興国等の需要の急増に伴い、このシェアは2050年に1/3以下まで低減する。従って2050年に世界でCO₂を半減するためには、途上国(非OECD諸国)においても相応の努力がなされなくてはならない。BLUE MapではOECD諸国平均で2050年に2005年比77%の削減、非OECD諸国平均で同24%の削減(中国では30%減、インドでは10%増)となっている。ベースラインからBLUE Mapまでの削減量のうち、OECD諸国によるものは28%に過ぎず、残りは非OECD諸国となっている。このように、CO₂削減は先進国のみの問題ではなく、世界規模で取組むべき問題であるこ

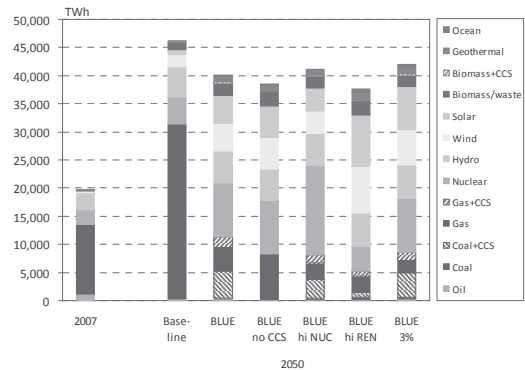


図12 2050年の電源構成

とが、ETP 2010では再三強調されている。

3.2 筆者らによる試算との比較

以下、IEAによる試算結果を筆者らによる試算結果と比較し、2050年の低炭素社会実現のための方策について検討する。

3.2.1 CO₂排出量の推移

筆者らによる試算では図10に示すように、技術進展ケースで2050年にレファレンスケースから26Gtの削減が行われる。同年のCO₂排出量は22.8Gtとなっており、これは2005年比で16%減に相当する。この試算でのCO₂排出係数は2050年に世界で168gCO₂/kWhとなっており、仮に発電部門の更なる低炭素化によりこれをIEAと同等の67gCO₂/kWhまで低減させたとすると、CO₂排出量は18.8Gt、2005年比で31%減となる。

削減量の内訳は表2の通りである。ここから読み取れるように、まずIEAでは筆者らと比較して再生可能エネルギー・原子力ともに大きく積み増すことで、電源の低炭素化を達成する姿としている。

更に、最終消費における燃料転換及び省エネルギーによる効果の差も大きい。このように、IEAは「発電部門の低炭素化を極限まで進めることでその排出係数を小さくし、その上で電化を進展させる」ことをCO₂削減の方策の大きな柱としている。その上で、更に需要部門での大規模な省エ

表2 各対策による削減量内訳の比較

| | IEA | 今回試算 |
|-------------|-----|------|
| CCS | 8 | 10 |
| 再生可能 | 7 | 2 |
| 原子力 | 3 | 1 |
| 発電効率と燃料転換 | 2 | 3 |
| エンドユースの燃料転換 | 6 | 9 |
| エンドユースの省エネ等 | 16 | |
| 計 | 43 | 26 |

エネルギーを想定し、最終的に世界全体で半減という目標を達成する姿を描いている。

3.2.2 電源構成の問題

このように、世界でCO₂半減というような極端に厳しい削減目標を本気で目指す場合には、「発電のCO₂排出係数を可能な限りゼロに近づけること」は殆ど不可欠であると言ってよい。これと同様のことは国内での削減についても言うことができ、例えば日本で目標とされている(60%~)80%以上の温室効果ガス削減を行うためには電力からのCO₂排出をほぼゼロとすることが必要である、と言われている¹⁶⁾。しかし実際には、世界全体でそのような目標を達成することは決して容易ではないと思われる。

IEAでは、電力のCO₂排出係数は、2007年の500gCO₂/kWh程度から、2050年には67gCO₂/kWhまで低減させることとなっている。このためにはOECD諸国でこの値をほぼゼロに、非OECD諸国であっても100gCO₂/kWh程度まで低減させることが必要である。筆者らによる試算でも、世界の電力のCO₂排出係数は168gCO₂/kWhまで低減する見通しとなっており、CO₂排出量削減のために発電部門の大幅な低炭素化が必要であることは確実であると考えられる。

IEAでは、図12のように、原子力及び再生可能エネルギーを大きく積み増すことによってこの電力排出係数の低減が達成される姿となっている。

原子力については、現状で374GW(ネット)の原子力発電設備容量が、2050年にはBLUE

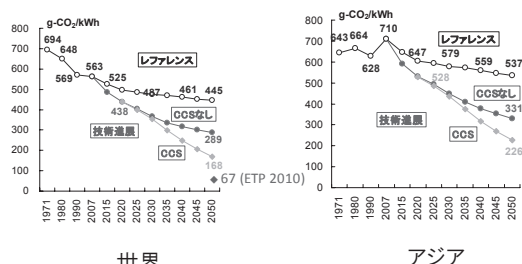


図13 筆者らの試算での電力のCO₂排出係数見通し

Mapで1200GW、原子力進展ケースでは2000GWまで拡大するものとされている。これは、2010年から2050年まで毎年平均でそれぞれ30GW及び50GWの発電プラントを建設する想定となる。BLUE Mapの想定は筆者らの想定よりもやや大きく、NEA (OECD/Nuclear Energy Agency)等の想定よりもやや小さい程度であるが、原子力高ケースの想定はそれらをはるかに上回る。過去世界で原子力設備容量が最も急速に増加した1980年代でもそのペースが30GW/年を上回ることはなく、平均して20GW/年程度であった。このことから、2010年からの平均で30GW/年というBLUE Mapの想定はかなり野心的な目標、50GW/年という原子力高ケースの想定は絶対に不可能とは言えないものの、その実現性が危ぶまれるほどの目標であると言えるだろう。またETP 2010の本文中でも原子力高ケースではウラン資源の需給逼迫が懸念されFBR等のより先進的な炉の導入が必要になると述べられるとともに、高レベル放射性廃棄物や国際的な核不拡散の取り組みも重要となる、と述べられている。

再生可能エネルギー発電については、2007年の発電量に対して、2050年にベースライン・シナリオで太陽光・太陽熱190倍、風力12倍、水力を除く再生可能合計で9倍に増大する想定となっており、これは筆者らの見通し(レファレンスケース)とほぼ同程度のものとなる。これに対してBLUE Mapでは太陽光・太陽熱1000倍、風力28倍、水力を除く再生可能27倍、更に再生可能進展ケースでは太陽光・太陽熱2000倍、風力47

倍、水力除く再生可能で44倍の導入量となっている。

このように、BLUE Mapでは原子力及び再生可能エネルギー、特に再生可能を非常に大きく積み増すことにより電力の排出係数を極度に小さくし、それによってCO₂排出量を大きく削減する姿となっている。

世界全体でCO₂を半減するという目標を達成するためには、電力のCO₂排出係数を現状から極端に低減させ、世界平均で100gCO₂/kWh程度を下回るようにする必要がある、ということは恐らく正しい。しかしそれは非常に難しい問題である、ということも十分に認識しなくてはならない。これを実現するための手段として、我々は再生可能エネルギー・原子力・CCSの3種類のものしか持っていない。ETP 2010で54億トンの捕集が想定されている発電部門でのCCSの導入目標がもし達成されなかった場合には、原子力及び再生可能に求められる役割は更に大きなものとなる。この難しさは、2050年で世界半減という目標を考える際には常に認識する必要があるものだと思う。

3.2.3 電力系統及び蓄電池の問題

上記のように再生可能・原子力を大幅に導入した際に問題となるのは、電力系統の問題である。一般に風力発電や太陽光発電は発電量が時間に応じて大きく変動するため、現状のままではその導入には強い制約が課せられる。また、原子力発電は現在ベース電源として用いられているが、例えば我が国では現状で電力の負荷に追従した運転を行うことができないため、発電電力量全体に占めるそのシェアを極度に引き上げた際にはやはり系統運用上支障を来すことになる。

発電量の変動の大きな風力・太陽による発電のシェアは合計でBLUE Mapで24%、再生可能進展ケースでは46%にも及ぶ（但しこのうち太陽熱発電については、今後の蓄熱技術の進展により「変動の大きな電源」ではなくなる、と想定されているかもしれない）。BLUE Map程度のシェアであっても、これにより安定的な電力供給を行う

ためには送配電網の強化、需要側の制御、蓄電能力の強化などの対策が必要になる。

ETP 2010では第4章にこの問題が扱われており、BLUE Mapではベースラインに比べて追加的に3.9兆ドルの投資が必要となる、とされている（但しこれは、系統対策コスト等の増加から、電力の省エネによる必要投資額の減少分を差引いたものである）。但し、系統対策の正確なコストはまだわかっていない、との注釈もつけられており、文中ではスマートグリッドがピークロードを下げ、エネルギーの利用効率を上げることからトータルでは既存のグリッドよりも安くなる可能性もある、と記されている。しかし逆にBLUE Map、更に再生可能進展ケースのような高い比率で再生可能エネルギー発電を導入したケースは未だないものであり、実際には全世界で3.9兆ドルの投資では済まない可能性も考えなくてはならないだろう。いずれにせよ、電力系統の問題を解決することが2050年の低炭素化に向けて必須の課題であることは間違いないだろう。

3.2.4 削減コスト及び投資の問題

今回のBLUE Mapでは、175ドル/tCO₂までの削減コストによって世界でCO₂半減を行うことが可能、との結果になっている。前回のETP 2008ではこれは200ドル/tCO₂程度とされており、その削減コストカーブが図14のように記載されていた。

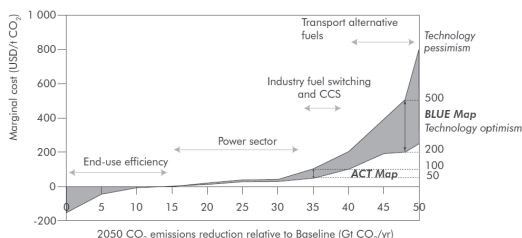


図14 限界削減費用コストカーブ (ETP2008)

この図からわかるように、200ドル/tCO₂というコストは”Technology optimism”の想定に基づいたものであり、”Technology pessimism”

の想定に立った場合にはこのコストは500ドル/tCO₂程度まで上昇する。今回のETP 2010にはコストカーブの図は記載されておらず、ベースラインのCO₂が下がったことと化石燃料価格の想定が上がったことにより限界削減費用が200ドル/tCO₂から175ドル/tCO₂まで低減した、と記されているのみであるが、やはりより「楽観的でない」想定をした場合には、このコストは数倍に上昇する、と考えて良いであろう。このように、ETP 2010で記されているコストはあくまでも最低値であり、実際にかかる費用はより高くなる可能性があることを認識する必要がある。

またETP 2010では、BLUE Mapで必要な投資コスト46兆ドルに対して112兆ドルのコストメリットが見込まれるため、ネットでは対策は負担ではなく利益をもたらすものであり、従って適切な政策等により早期に対策の導入を促すことが必要である、との主張が再三なされている。しかしこの112兆ドルのコストメリットとは、世界全体の一次エネルギー消費の変化からトータルでのエネルギーコストの削減分を評価したものに過ぎない。実際の削減のためには個々の対策の一つ一つを行う必要があり、それらのうち多くは、図14に示すように（仮に楽観的な想定を置いたとしても）ネガティブコスト、即ち省エネメリットが投資コストを上回るものでは決してない。また同図に示されるように、種々の対策中、エンドユースにおける省エネルギーは多くがネガティブコストとなると想定されていると思われるが、例えば実際に日本では既築住宅の断熱改修には200～300万円のコストがかかると言われ、元々の暖房用エネルギー消費が欧州等に比べて低い水準にある日本では、そのコストは必ずしもネガティブではない（ETP 2010においても、住宅の断熱コストは国により、プラスからマイナスの幅広い値をとると説明されている）。結局エンドユースの需要家にとって重要なのはコスト及びその回収期間であるが、これは技術により、またその技術が導入される地域により大きく異なるものとなる。エンドユースにおける実際の対策の進展を考える際には、上記のような世界全体のエネルギーコスト

メリットのみではなく、個々の具体的な対策について十分な検討を行い、CO₂半減に向けた経済性をより詳細に評価することが求められる、と言えるだろう。

4. 結論

本稿では、需給モデルをコアとした計量経済型モデルにより2050年までの世界のエネルギー需給シナリオを作成した。今後2050年までの間に、アジア諸国を中心とした人口増加や経済成長によりエネルギー消費量は急速に拡大する。これに対して特段の対策を講じないレファレンスケースでは、二酸化炭素の排出量が増加を続けると同時に、石油等の資源消費も増大し、需給の逼迫・エネルギー価格の高騰等が懸念される。このため、温室効果ガス削減及び資源制約の両面から、レファレンスケースは持続可能ではないと考えられ、より省エネルギー・CO₂排出削減のための努力が求められる。

しかし今後見込まれる技術の最大限の普及を想定した技術進展ケースにおいても、2050年のCO₂排出量は2005年比で16%減（1990年比では8%増）に止まり、現在国際的な合意の一つとされている「2050年に世界全体で半減」には到達しない結果となった。

また、IEAによる最新の見通しであるETP 2010は「2050年にCO₂を世界で半減」という目標を達成するための姿を描いたものであるが、その姿勢は一言で言うと「非常に楽観的」である。ETP 2010における各シナリオは「予測」ではなく、「より安全で持続可能なエネルギーの未来をつくり出すための道筋や機会を明示するもの」である、と述べられており、その意図するところは必しも明確ではないが、これらのシナリオは「世界半減が可能である」ということを積極的に主張しているというよりは、「仮に世界で半減を行うためにはこのようなことがなされなくてはならない」ということを述べている、と見るべきである。「BLUE Mapでは世界のCO₂排出量は2020年までにピークアウトを迎える。もしこれ

が実現できない場合には、その後の負担は更に大きなものとなる」という記述も、そのような文脈のもとで読まれるべきであろう。

ETP 2010 から得られる最大のメッセージは、もし世界が本気でCO₂の半減を目指すなら、現在各国で検討されている削減目標や、現在行われている省エネ・低炭素投資は全く不十分であり、より一層の国際協調・政策の進展と投資の拡大が、今すぐに求められる、ということである。その計算の前提や具体的な削減方法については種々の異論が提示されるものであるにせよ、このような「非常に楽観的」な想定に基づいてさえ、現在の対策導入は不十分である、ということを経量的・整合的に示したことは大きな価値であると言えるだろう。

2050年までのエネルギー需給・技術進展の予測は不確実性が大きく、評価・分析に用いるツールやそれを実施する人の立場によっても結果は大きく異なる。しかしそれらを比較・検討することにより、現状で見通される限りにおいて確実に言えることも多くある、と考えられる。今後もこれらの試算を例としつつ、更に個々の技術や各国・地域の特性等をより詳細に評価することにより、CO₂削減のための方策を更に探っていくことが求められる。

謝辞

本研究の一部は、環境省の環境研究総合推進費(S-6-1:アジア低炭素社会に向けた中長期的政策オプションの立案・予測・評価手法の開発とその普及に関する総合的研究,「アジアを対象とした低炭素社会実現のためのシナリオ開発」)の支援により実施された。環境省に対し、深い謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 松尾, 小宮山, 永富, 末広, 沈, 森田, 伊藤; 2050年の低炭素社会実現に向けたアジア・世界のエネルギー需給見通しに関する分析, エネルギー・資源学会誌に投稿中.
- 2) Komiyama, R., Li, Z. and Ito, K.; World energy outlook in 2020 focusing on China's energy impacts on the world and Northeast Asia, International Journal of Global Energy Issues, Vol. 24, Nos. 3/4 (2005), 183-210.
- 3) 小宮山; 温室効果ガス主要排出国のエネルギー需給の長期展望, 石油学会誌ペトロテック, VOL.33, No.5 (2010), 49-53.
- 4) 小宮山, 呂, 青島, 松尾, 永富, ガン, 土井, 末広, 森田, 伊藤, 李; アジア/世界エネルギーアウトック 2009, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2010).
- 5) IEA; Energy Balances of OECD Countries, (2010), IEA Publications.
- 6) IEA; Energy Balances of Non-OECD Countries, (2010), IEA Publications.
- 7) 末広, 小宮山, 松尾, 永富, 森田, 沈; 自動車部門におけるCO₂排出削減効果, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス論文集, (2010).
- 8) M. A. McNeil, V. E. Letschert, S. R. Can; Global Potential of Energy Efficiency Standards and Labeling Programs, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), LBNL-790E, (2008).
- 9) (財)日本エネルギー経済研究所; 超長期の世界エネルギー需給・地球環境に関するモデル分析, (1995).
- 10) (財)日本エネルギー経済研究所; 各国における原子力発電所の建設に関する実態調査報告書, 経済産業省・平成19年度軽水炉改良技術確証試験, (2008).
- 11) 松尾, 河野, 村上; 東南アジアにおける原子力発電導入の見通し, エネルギー経済, vol. 34, No.4 (2008), 59-76.
- 12) 村上, 松尾, 永富; 欧州諸国のエネルギー政策に見る原子力政策変遷と産業界の動向展望, エネルギー経済, vol. 35, No.4 (2009), 1-29.
- 13) IAEA; Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030, (2009), IAEA.
- 14) OECD/NEA; Uranium 2007: Ressources, production et demande, (2008), OECD Publications.
- 15) IEA; Energy Technology Perspectives 2010, (2010), IEA Publications.
- 16) (財)日本エネルギー経済研究所; 第6回中期目標検討委員会資料, (2009), 内閣官房ホームページ.