

新たな気候変動レジームのための 世界共有できる中長期ビジョンの検討

Examination of a Globally Sharable Mid- to Long-Term Vision for a New Climate Regime

段 烽 軍 *・ 湯 原 哲 夫 *・ 氏 田 博 士 **・ 都 筑 和 泰 ***
Fengjun Duan Tetsuo Yuhara Hiroshi Ujita Kazuhiro Tsuzuki

(原稿受付日 2012 年 11 月 6 日, 受理日 2013 年 4 月 12 日)

This paper examines a post-Kyoto regime against global warming. Global emission pathway, so called Z650, is determined based on the new progress of climate science. Focusing on the energy related CO₂ emissions that accounts for most of the anthropogenic greenhouse gas emissions, global optimization scenarios are analyzed through numerical experiments based on an energy model. The results suggest a sustainable long-term energy vision based on existing and predictable technologies, through which Z650 is achievable. Cost-benefit analyses of global and regional energy system indicate the economic rationality of the global optimization scenario. Compared with the reference case, the additional investments in Z650 could be covered by the fuel savings during the following 40 years (2010-50) both globally and regionally. Regional emissions resulted from global optimization show equitability between industrialized and developing countries. Both emissions per capita and emissions per unit GDP converge towards the end of the century. Deployment of low carbon technologies plays an essential role in the global optimization scenario. Therefore, a technology oriented international cooperation mechanism is necessary for the practical approach to the global vision.

1. はじめに

1992年6月の地球サミットにおいて気候変動枠組条約が採択されて以降、温暖化抑制に係わる国際的な議論が進められてきている。1997年の第三回締約国会議(COP3)においては京都議定書が採択され、初めて法的拘束力のある数値目標が設定された。その後、第一約束期間が終了する2012年に向けて、新たな気候レジームの検討が行われてきた。しかし、2009年のCOP15で予定していた国際合意が達成できず、それ以降気候変動に関する国際交渉は混迷状態に陥っている。2010年のカンクン合意と2011年のダーバン合意が得られ、排出量測定・報告・検証(MRV)、適応、資金等の個別分野で一定の進展がみられたが、新たな気候レジームの確立には至っていない。その原因の一つは、共通目標の不在である。産業革命前のレベルからの温度上昇を2℃以内に抑えるべきであるという数値目標はある程度共有されてはいるが、それを実現するための温室効果ガス排出経路について共通認識が得られていない。G8サミットでは、IPCC第四次評価報告書を根拠に、2050年には1990年あるいは近年レベルに比し温室効果ガス排出を50%削減との目標を提唱したが、実現可能性が低いと同時に、科学的な検証が不十分と指摘されている。

一方、最近の気候変動科学の分野では、IPCCの従来型安定化シナリオと異なるアプローチの研究が多く行われ¹⁾³⁾、長期的な気温上昇を支配するのは主に累積排出量であり、排出経路依存性はあまり高くないということが指摘された。すなわち、当面の排出量が大きくても、将来における低排出が実現できれば、長期的な気温上昇を既存の低排出シナリオと同等以下にできる可能性があるということになる。Matsuno⁴⁾は、このいわゆるオーバーシュートシナリオを進展させ、近い将来に排出総量が地球吸収能力以下に低減できれば、大気中の温室効果ガス濃度も気温も長期的に緩やかに減少すると指摘し、22世紀の半ばにゼロエミッションの実現を前提として21世紀における累積CO₂排出総量制約を650GtCにするZ650シナリオを提案した。このシナリオの将来気候変動を簡易気象モデルにより検証した結果、21世紀初期における多くの排出により、大気中のCO₂濃度は一度530ppm程度に上がるが、その後的大幅排出削減によって徐々に低下していき、長期的に380ppm程度に安定することが示された。対応する気温上昇については、短期的には産業革命前のレベルから2.3℃に達するが、その後徐々に低下していき、1.8℃前後に安定する。このような温度上昇から引き起こされるグリーンランド氷床融解や海面上昇などの長期的気候変動影響の面から比較すると、従来のIPCC450ppmシナリオと同程度とすることが可能となる。

* キヤノングローバル戦略研究所
〒100-6511 東京都千代田区丸の内1-5-1 新丸の内ビル11階
E-mail: fengjun.duan@canon-igs.org

** 東京工業大学

*** 財団法人エネルギー総合工学研究所

第28回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンスの内容をもとに、新たな分析を加えて作成されたもの

すなわち、Z650 シナリオは、長期的な気候変動被害が小さく見積もられ、近未来においては CO₂ 排出制限が緩やかに設定できることから、国際的な合意に達する可能性も高い。本稿では、このシナリオをベースに、エネルギーシステムの解析により世界共有できる中長期ビジョンを構築する。第2章では、本研究で用いるエネルギーモデルの構成と諸条件を説明し、分析するシナリオの設定を明らかにする。第3章では、シナリオ分析から得られたエネルギービジョンについて、実現可能性、国際衡平性、経済性の評価を行う。第4章では、提案するビジョンを共有するための現実的な実現ルートを検討する。最後の第5章では、本稿のまとめと今後の課題を議論する。

2. エネルギーモデルとシナリオ

エネルギーシステム解析には、地球環境総合評価モデル GRAPE⁵⁾ (Global Relationship Assessment to Protect Environment) のエネルギーモジュールを用いる。世界全体のエネルギーシステムが線形計画法によりモデル化されており、長期にわたるエネルギー需給とエネルギー技術の経済合理的な導入規模が決定されるモデルである。計算期間は2000年から2150年であり、目的関数は、全計算期間における割引後のシステム総コスト(割引率は5%)である。エネルギー需要をシナリオで与えると同時に、資源量制約、エネルギー需給バランス制約、CO₂ 排出量制約等を条件として、エネルギーコストを最小化するように、エネルギー供給構造と転換構造を求める。

2.1 モデル基本設定

世界を図1のように、①カナダ(CAN)、②米国(USA)、③西欧(WEU)、④日本(JPN)、⑤オセアニア(OCE)、⑥中欧(CEU)、⑦東欧(EEU)、⑧ロシア(RUS)、⑨中国(CHN)、⑩インド(IND)、⑪東南アジア(SEA)、⑫中東北アフリカ(MEA)、⑬サハラ以南アフリカ(SSA)、⑭ブラジル(BRA)、⑮その他ラテンアメリカ(OLA)の15地域に分割し、それぞれの人口と経済の見通しを国際機構の予測⁶⁻⁹⁾に基づいて作成した(図2、3)。人口の見通しは国連の中位推計に準拠し、経済成長も中庸成長を仮定して、しかも途上国における一人当たりGDPが先進国にキャッチアップするように設定した。なお集計分析のために、京都議定書のAnnex I国とNon Annex I国の定義に従って、上述したカナダからロシアまでの8国(地域)を先進国とし、残りの7国(地域)を途上国としている。

2.2 パラメータ設定

モデルで想定したエネルギーシステム、資源ポテンシャル、技術オプション及びコストパラメータは以下の通りである。

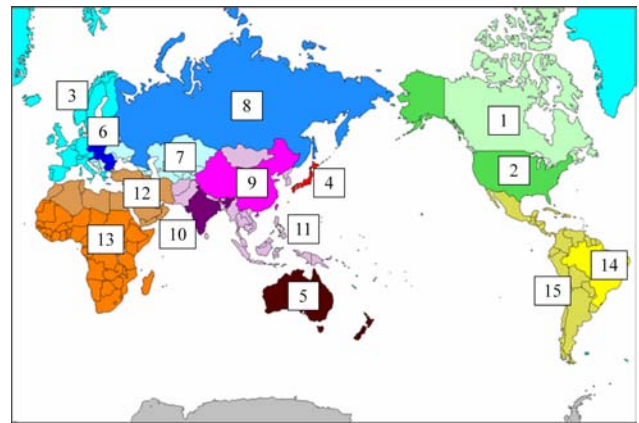


図1 エネルギーモデルにおける地域設定

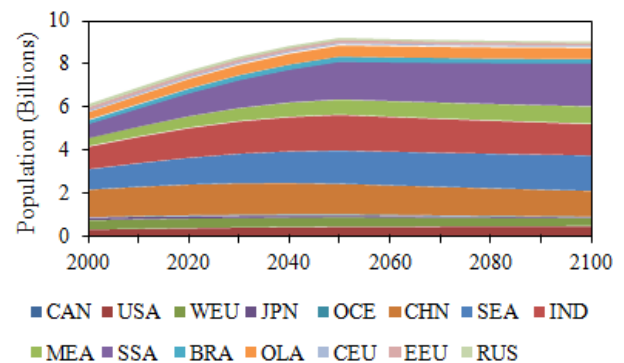


図2 エネルギーモデルにおける人口推移

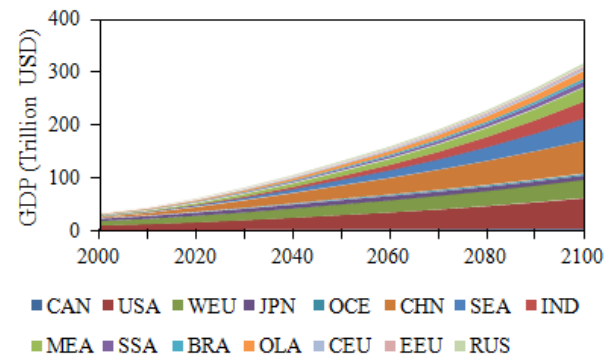


図3 エネルギーモデルにおける経済見通し

一次エネルギー供給には、石炭、原油、天然ガス、天然ウラン、バイオマス、水力、地熱、太陽光、風力を扱う。化石燃料の資源量は、既存研究^{10)、11)}を参照して、上述した15地域ごとに10段階の生産コストを設定した。その供給コストは、生産地は生産コストのみとし、生産地以外ではロイヤリティ及び地域間輸送コストを加算する。天然ウランの資源総量は1,500万トンで、5段階の生産コストに分けており、供給コストに全地域共通で鉱石生産コストの他に燃料サイクルコストを計上している。再生可能エネルギーの資源量は、World Energy Council 2007¹²⁾、NEDO¹³⁾、山田ら¹⁴⁾などの文献を参考して作成している。バイオマス資源は残さ系(森林系、食料系及び廃棄物系)と作物系を考慮

しており、その供給コストは化石燃料と同様に、地域ごと生産量ごとの生産コストを設定している。その他の再生可能エネルギーの供給コストは計上しておらず、転換コストに一本化している。

発電技術には、石炭火力、石炭ガス化複合（IGCC）、石油火力、天然ガス火力、バイオマス火力、原子力、水力、地熱、太陽光、風力、燃料電池が考慮されており、CO₂回収貯蔵（CCS）の適用が2030年から導入開始、高速増殖炉（FBR）技術が2050年から導入開始¹⁵⁾と想定している。化石燃料、原子力、バイオマスなどのプラント型発電設備の稼働率は85%と設定しており、耐用年数は原子力の50年の他は、全て30年に設定している。燃料電池発電の設備利用率は25%にしている。軽水炉（LWR）とFBRの燃料増殖率は、それぞれ0.152と1.219に設定している。これらの技術オプションの発電効率とコストパラメータは、既存研究^{16), 17)}に基づいて設定している（表1）。発電効率と資本費の幅は、計算期間中の技術進歩を表しており、また途上国グループは2070年に先進国グループにキャッチアップすると想定している。

表1 プラント型発電技術のパラメータ設定

	発電効率 (%)	資本費 (ドル/kW)	年経費率 (%)
石炭火力	42-50	1,050	17
石炭火力+CCS	37-40	1,800	17
IGCC	44-65	1,260	17
IGCC+CCS	37-57	1,650	17
石油火力	42-62	550	17
石油火力+CCS	47-57	950	17
天然ガス火力	51-65	450	17
天然ガス+CCS	47-57	850	17
バイオマス	34-55	2,000	17
原子力（LWR）	34-45	1,800	17
原子力（FBR）	42-48	2,700-5,130	17
燃料電池	35-65	480-3,000	25

水力、地熱、風力と太陽光発電のコスト計算は、発電量ベースで行われている。水力と地熱の発電コストは、西欧で3.6, 5.5, 12.7セント/kWh、日本で7.2, 11.5, 15.8セント/kWh、その他の地域で1.2, 7.5, 13.8セント/kWhとそれぞれの三段階に設定している。風力発電のコストは、計算当初に8セント/kWhと設定し、その後年率1%減少して、2050年以後に一定と想定している。計算当初の太陽光発電コストは、2000年日本の47.2セント/kWhより、日射量に参考して各地域のコストを算定している。また、国際エネ

ルギー機構（IEA）¹⁷⁾に基づいて2050年までのコスト減少を設定し、それ以後は一定にしている。計算当初のコスト試算には、風力の稼働率が20%、太陽光の稼働率が日本に12%、他の地域に日射量に比例して算出している。風力と太陽光発電に関して、出力安定化技術として、2030年から発電量の半分、2040年以後全ての発電量に蓄電池併設と想定している。計算当初の蓄電池コストは18セント/kWhに設定しており、その後の減少は太陽光と同様に想定している。これらのコストパラメータに基づいて、さらに既存研究¹⁸⁾に参考して地域ファクターを作成し、各地域の発電コストを計算している。

発電以外のエネルギー転換には、石油精製、バイオマス液化（エタノール製造）、石炭液化（メタノール製造）、水素製造が考慮されている。水素製造には、天然ガス改質、石炭ガス化、電気分解などの技術オプションを想定し、転換効率とコストを設定している（表2）。発電または水素製造時に回収されたCO₂はEOR、ECBM、廃ガス田、帯水層により貯留すると想定している。そのため、パイプラインと船舶によるCO₂輸送の単位コストは、固定費用（設備費用）と変動費用（運転費用）に分けてそれぞれ想定している。陸上と海上の固定費用はトンカーボン当たりそれぞれ11.3ドルと65.8ドルに設定しており、変動費用はトンカーボン・千キロ当たりそれぞれ54ドルと15.7ドルに設定している。貯留コストとして、EORは難易度により87-113ドル/トンカーボン、ECBMは地域と難易度により30-700ドル/トンカーボン、廃ガス田は46ドル/トンカーボン、帯水層は難易度により10-110ドル/トンカーボンにそれぞれ設定している。また、地域毎の技術別貯留ポテンシャルは、既存研究^{10), 19)}により設定している。

表2 エネルギー転換効率のコスト設定

	転換効率 (%)	コスト (ドル/TOE)
石油精製	90	33
バイオマス液化	75	200
石炭液化	61.2	387
水素製造	天然ガス改質	80-90
	石炭ガス化	70-80
	電気分解	80-90

最終エネルギー需要は、運輸需要、定置需要（産業と民生の非電力）、電力需要に分類する。電力需要は、上記した発電技術の組合せで供給するが、各電源の総電源に占めるシェアの上限を、化石燃料火力に70%、原子力に40%、水力地熱に60%、バイオマスに70%、太陽光に30%、風力に

25%とそれぞれ設定している。運輸需要は、燃料として石油、エタノール、メタノール、水素、電気自動車用電力が消費される。そのため、各種燃料に対応する自動車の車両コストを計算している。定置需要は、石油、天然ガス、石炭、バイオマス、メタノール、水素が消費される。また、ヒートポンプ（HP）の導入により電力を熱に変換して定置需要の省エネを実施するため、HPの導入コストをモデル化している。

2.3 シナリオ設定

本研究で外生的に作成した三つのシナリオ（表3）について、それぞれの長期エネルギー需要を仮定し、供給と転換構造を予測する。

BAUは、現在までのエネルギーと環境政策の継続を仮定するシナリオである。最終エネルギー需要は、過去のトレンドの延長で、GDPの成長とともに増加する。世界全体の総エネルギー需要は、2000年の6.8ギガトン石油換算（GTOE）から、2030年に12GTOE、2050年に15.5GTOE、さらに2100年に22GTOEへと増加していく。現在の国際エネルギー需給情勢から見ると、このシナリオは実現性が極めて低く、本研究での位置付けはあくまで参照ケースである。

表3 シナリオ設定

シナリオ	政策	省エネ	CO ₂ 排出制約
BAU	既存政策継続	なし	なし
REF	省エネ推進	あり	なし
Z650	温暖化抑制	あり	世界全体でZ650

REFは、各地域において需要サイドの省エネが推進されるが、温暖化抑制のための積極的なCO₂排出削減策は実施しないシナリオである。省エネの度合いは、既存研究²⁰⁾²²⁾を参照しつつ、現状想定されているような技術開発が着実に実現・普及していく程度のもを想定している。世界全体の総エネルギー需要は、2030年に11.1GTOE、2050年に13.7GTOE、2100年に17.8GTOEとなっており、BAUと比べて最終的に約2割の省エネが実現できている。このシナリオが、本研究の基準ケースになる。

Z650は、REFをベースに、すべての地域で厳しい温暖化対策を実施するシナリオである。新たに提案されている科学的シナリオに従って、21世紀における世界の累積CO₂排出総量が650GtC以内に抑制する。本研究はエネルギーシステムのみを解析するため、上記のCO₂排出総量から、土地利用などによる排出分を差し引いたエネルギー起源CO₂排出の許容量を算出し、エネルギーモデルの制約条件としている。なお、本研究で分析するCO₂削減は、各地域内における技術対策のみであり、国際排出権取引やグリー

ン開発メカニズム（CDM）などを考慮していない。最終エネルギー需要をREFと同様に仮定している。

3. 結果と考察

上記した超長期のシミュレーションの結果について、2100年までのエネルギービジョン、2050年までのCO₂排出及び経済性を検討していく。

3.1 長期エネルギービジョン

図4には、三つのシナリオにおける世界の一次エネルギー構成の推移を示している。

BAUでは、化石燃料を中心に一次エネルギー供給総量が大幅に増加していき、2100年には2000年の3倍以上となり、その大部分は化石燃料によって供給されている。このようなエネルギー構成は、数字の上では実現可能であるが2150までに総化石資源量の約7割を使い果たすことになるため、需給バランスの逼迫による価格上昇や資源争奪によるエネルギーセキュリティ等の経済社会の持続可能性を脅かす問題が容易に予想できる。

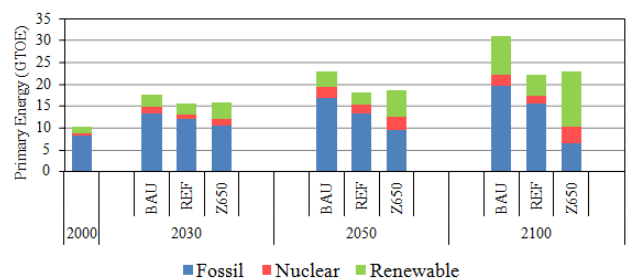


図4 各シナリオにおける世界の一次エネルギー構成

一方、REFでは、各地域における省エネの推進により、一次エネルギー供給総量は、急速増加の後緩やかに増加していき、2030年、2050年と2100年にそれぞれ2000年の1.5、1.8と2.2倍になる。この効果は、主に産業における高効率生産プロセス、民生における省エネ家電や断熱建築、運輸における燃費向上とハイブリッドなどによって実現できている。しかし、CO₂排出制約がないため、エネルギー構成には、依然として化石燃料が中心となる。消費量が減っている分利用可能期間が長くなるが、枯渇性の化石エネルギー依存の問題が解決できていないため、いずれBAUと同じ問題に直面することになるだろう。

これらのシナリオに対して、Z650では、一次エネルギー供給総量こそREFと同等であるが、CO₂排出が制約されるため、エネルギー構成は顕著に非化石燃料化していく。化石燃料と原子力並びに再生可能エネルギーの割合は、2000年の8:1:1から、2030年の7:1:2、2050年の5:2:3、2100年の3:2:5へと移っていく。原子力の役割も増えつつある

と同時に、再生可能エネルギーの大規模利用により、脱化石燃料が着実に進められている。

この一次エネルギー構成を実現するために、運輸部門において、乗用車などのライトデューティビークル（LDV）の電化とトラックやバスなどのヘビーデューティビークル（HDV）のバイオ燃料シフトが必要になる。また、産業民生の熱源について、ガスシフトやバイオ燃料及び水素の利用と産業 CCS の推進が不可欠である。純粋に石油を消費する内燃機関車が LDV に占めるシェアは、計算当初のほぼ100%から、2030年に90%、2050年に67%と減少していき、2100年に1%未満になる。電気も石油も消費するプラグインハイブリッド車は、中間代替となっており、同シェアが2050年に20%を超え、2070年のピーク時に50%強に達するが、2100年に14%前後に留まる。純電動自動車のシェアは、2050年に9%弱であるが、その後急激に増加し、2100年時点で約85%になる。

電力部門に必要な努力は、電源構成（図5）から分析できる。全体として、2000年の化石燃料中心から、クリーン化していくと同時に、多元化していく傾向がみられる。化石燃料の利用は、2040年にピークに達してから徐々に減少するが、電源の1割以上を維持する。しかし、利用技術が大きく変化し、2040年に半分強、2050年以後にほぼすべてが CCS をつけなければならない。原子力発電は着実に増加していくが、2070年代を境に LWR 中心から FBR 中心に転換する。風力が2020年から大幅に導入し、次第にシェアを拡大していく、太陽エネルギーが今世紀後半に主要電源の一つとなる。再生可能エネルギーは、2050年に電源の4割弱から2100年の約6割を占める。出力が安定する原子力、CCS 付きの化石燃料火力、水力と及びバイオマス火力が、基幹電源になっている。

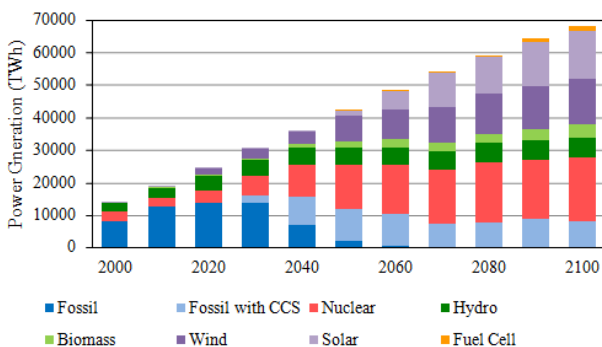


図5 Z650における世界の電源構成

地域別の一次エネルギー構成は、図6に示す。先進国のエネルギー需要は、21世紀中にほぼ一定しているが、化石燃料が占めるシェアが徐々に低下し、その代わりに再生可能エネルギーの割合が増加していく。原子力は、前期に少し

ずつ増えて、2050年には2000年レベルからほぼ4割増になり、その後安定する。一方、途上国において、エネルギー需要が大幅に伸びていて、前半には化石燃料が主役になるが、2040年前後にピークしてから徐々に減少する。それに対して、後半の主役である再生可能エネルギーは、2020年から大幅導入が始まり、その後次第に拡大していく。原子力の急速な普及は、2030年から始まり、安定する後半の規模は2000年レベルの50倍ほどに上る。

上述したように、現状技術と将来見通しのある技術に基づいて想定したエネルギーモデルの最適化により、気象科学の最新研究結果により提示された CO₂ 排出制約を満たす長期エネルギービジョンは得られた。しかし、それを実現するために、産業民生と運輸部門における燃料転換を推進するとともに、電力部門において原子力と再生可能エネルギーの大規模導入が不可欠であり、CCS の早期導入も必要である。また、これらの努力は、先進国と途上国ともに実施しなければならない。

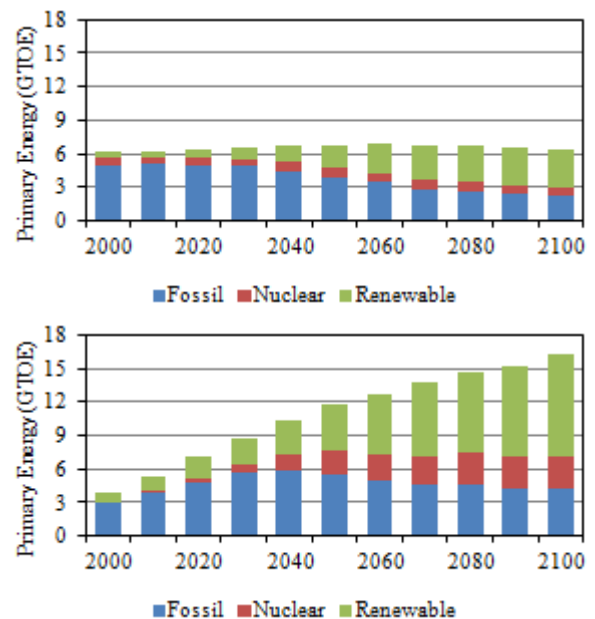


図6 Z650における地域の一次エネルギー構成
(上：先進国；下：途上国)

3.2 エネルギー起源 CO₂ 排出推移

各シナリオにおける2050年までの CO₂ 排出量の計算結果は、図7に示している。化石燃料中心にエネルギー消費が大幅に増加する BAU では、エネルギー起源 CO₂ 排出量も大幅に伸びていく。世界の排出総量は、2000年の230億トン弱から、2030年の420億トン強、さらに2050年の540億トン弱に増えつつある。それに対して、各地域で積極的に省エネを推進する REF では、エネルギー起源 CO₂ の排出量の増加率が低くなるものの、傾向は変わっていない、2030年と2050

年にそれぞれ330億トンと420億トンになる。一方、21世紀中の排出総量を制約する Z650では、エネルギー構成のクリーン化により、エネルギー起源 CO₂排出が大幅に抑制できる。当面の増加傾向が続くが、2020年代中に310億トン前後のピークに達してから減少していき、2050年の排出量は190億トン前後になり、1990年比と2005年比に換算すれば、それぞれ1.00と0.75になる。つまり、エネルギーシステム総コスト最小化により、2050年時点の全世界エネルギー起源 CO₂排出総量は、1990年レベルに抑えれば、あるいは2005年と比べて25%削減すれば、長期的な排出制約条件を満たせる。この結果は、前述した G8サミットで挙げられていたダブル・フィフティの政治目標を無理して実現させる必要がないことを示唆している。

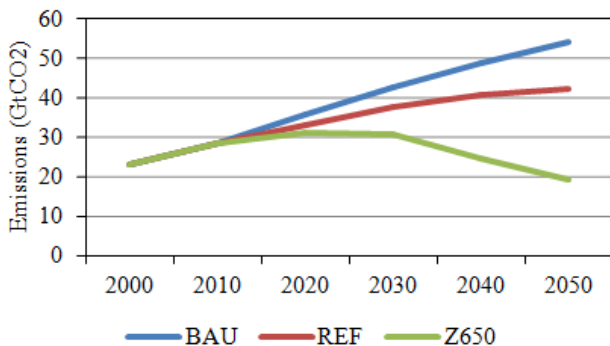


図7 各シナリオにおける CO₂排出量

図8に地域別のエネルギー起源 CO₂排出量の推移を示す。先進国における排出量は、21世紀初期に少し増えるが、2010年代にピークアウトし、その後大幅に減少していく。2005年比で見ると、2030年と2050年において、世界全体のそれぞれの1.20と0.75に対して、0.95と0.48になっている。一方、途上国において、排出量は21世紀初期に大幅に増加し、2030年前後にピークを達してから、徐々に減少傾向に入る。2030年と2050年の2005年比は、それぞれ1.54と1.12になっている。即ち、2050年において、2005年レベルよりも多く排出できる。途上国に対する大きな経済成長に伴う排出枠を与える結果になっている。また、地域間の排出量割合の推移は、2000年に先進国が6割強を占めていた状況から、2020年にほぼ半分ずつになり、2050年に途上国が6割強を占める状況になる。

主な先進国・地域と途上国・地域におけるエネルギー起源 CO₂排出量の推移は、表4にまとめて示した。各自の2005年排出レベルとの比率で見ると、主な先進国・地域間には2030年において現存技術の Lock-in の影響で少し差が見られるが、2050年において完全に収束している。一方、途上国・地域間には、経済成長レベルの差により、大きな違いがある。中国は、2030年こそ途上国平均レベルを少し下回

るが、2050年においてむしろ先進国の水準に近い。インドとアセアン諸国は、成長段階が遅れているため、2030年と2050年とも、途上国の平均よりもはるかに高い水準の排出を維持していく。

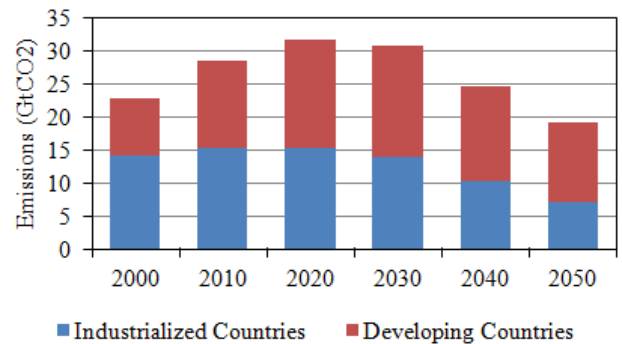


図8 Z650における先進国と途上国の CO₂排出量

表4 Z650における世界、先進国と途上国の削減率 (2005年比)

地域	2030	2050
世界	1.20	0.75
先進国	0.95	0.48
米国	0.96	0.47
西欧	0.86	0.45
日本	0.79	0.47
途上国	1.54	1.12
中国	1.48	0.82
インド	1.91	1.57
アセアン諸国	1.64	1.50

さらに、地域間排出配分の衡平性を検証するために、Z650における先進国と途上国のエネルギー起源 CO₂排出原単位を算出した (図9)。一人当たり排出量について、2010年時点で先進国が約12トン CO₂となっているが、2050年にかけて急激減少し、その後も徐々に下げている。途上国において、初期段階に2010年の約2.3トン CO₂から少し増えて、2030年を境に緩やかな減少に入る。その結果、2100年までに完全収束にならないが、かなり近づいている。一方単位 GDP 当たり排出量に関しては、先進国も一貫して減少するが、途上国が後発優勢により、先進国の2倍もあるレベルから急速に改善し、21世紀の終わりごろにほぼ先進国のレベルにキャッチアップする。これらの結果により、Z650において、世界全体の低炭素化が同時に進め、先進国と途上国間の衡平性が達成できていると言えよう。

3.3 必要なエネルギー起源 CO₂削減

では、このグローバル的な衡平性を持つ CO₂排出経路は、どうやって実現するだろうか。即ち、現在のエネルギーと環境政策を継続する BAU から、地球温暖化抑制できる

Z650へ実現するために、どこでどのようにエネルギー起源CO₂排出を削減しなければならないだろうか。シナリオ解析の結果は図10と11に示されている。

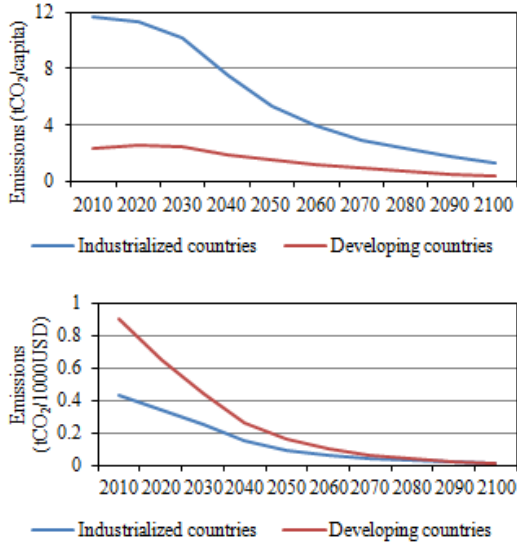


図9 先進国と途上国排出原単位の比較
(上：一人当たり排出量；下：単位GDP排出量)

まず、地域別で見ると、これから経済が大きく成長していく途上国における貢献度が大きく、特に中国、インドとアセアン諸国における削減量が、2050年にそれぞれ削減総量の31%、13%と8%を占める(図10)。即ち、エネルギー消費が大幅に増加していく国の低炭素化が、温暖化抑制のカギを握っている。先進国では、アメリカの削減量が一番多く、2050年に削減総量の14%を占める。日本における削減量は、2050年までの削減総量の1%台に推移している。これは、先進国間においても、経済成長と人口推移の違いによるエネルギー消費の伸び率の違いや、エネルギー構成とエネルギー効率の差などにより削減ポテンシャルの違いを示している。

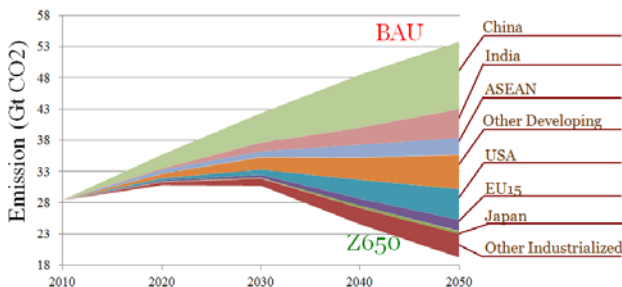


図10 地域別エネルギー起源CO₂排出削減量

また、技術別の削減量から見ると、省エネ効果の割合が一貫して大きく、2030年と2050年においてそれぞれ削減総量の42%と32%を占める(図11)。次に重要なのは発電技術

の燃料転換であり、2030年と2050年においてそれぞれ削減総量の25%と27%を占める。再生可能エネルギーの役割が中心であるが、後半になると、原子力の貢献度も高くなる。CCSは、2030年に導入されてから大きく貢献し、2050年に削減総量の27%を超え、省エネに続いて貢献度が二番目となる。運輸部門と産業民生部門における燃料転換による削減は、資源と技術の制約により貢献度が最も低い結果になっている。

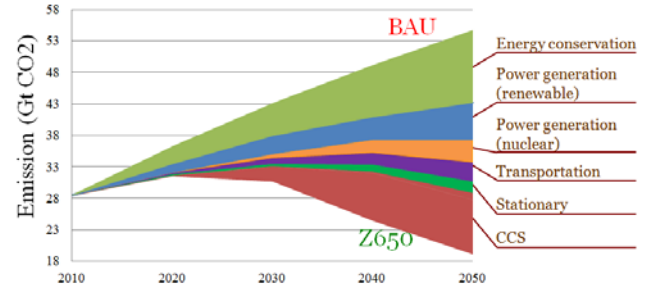


図11 部門別エネルギー起源CO₂排出削減量

以上まとめると、2050年までにおいては、Z650を実現するために、途上国の省エネ、すなわち、産業の高効率化、火力発電所効率向上、運輸の燃費向上などの推進が最も重要であるが、世界範囲で再生可能エネルギーと原子力の大規模利用と同時に、適切な条件を備えた地域においてCCSの展開も必要である。

3.4 経済性評価

設備投資の高い再生可能エネルギーや原子力、また追加コストのかかるCCSなどの技術の大規模利用は、エネルギーシステムの経済性に大きなインパクトを与えるだろう。それを評価するために、エネルギーシステムのコスト・ベネフィット解析を行った。

省エネ推進のREFと温暖化抑制のZ650のそれぞれについて、2010-50年の期間中、エネルギーシステムにおける累積の初期設備投資総額を計算し、同時に累積燃料消費量も計算した。また、化石燃料消費量から、現在の燃料価格ベースで燃料コストを計算した。これらの結果は表5にまとめた。前述したシナリオ設定により、この二つのシナリオの違いは、CO₂排出抑制策の有無のみである。従って、設備投資の差分はCO₂削減に必要な追加投資となっており、燃料コストの差分はCO₂排出抑制の取組ともなう燃料節約になる。

まず、REFにおいて、40年間の世界全体の累積で、129兆ドル(2005年ドル、以下同)の設備投資が必要である。その内、半分以上の69兆ドルは先進国における投資となっており、途上国の投資額は60兆ドルとなっている。一方、同時に世界全体で179兆ドルの燃料が必要であり、先進国と

途上国はそれぞれ約45%の82兆ドルと55%の97兆ドルの燃料を消費している。また、温暖化対策を進めていないため、世界全体で1,462GtCに相当するエネルギー起源CO₂を排出し、先進国と途上国はそれぞれ622と840GtCを排出している。

表5 世界と地域の削減追加投資と省エネベネフィット

シナリオ	CO2 排出量 (2005 年比)		排出量 GtC 2010-50	投資 T\$ 2010-50	燃料費 T\$ 2010-50
	2030	2050			
REF					
世界	1.5	1.6	1,462	129	179
先進国	1.1	1.0	622	69	82
途上国	2.0	2.5	840	60	97
Z650					
世界	1.2	0.75	1,100	140	165
先進国	1.0	0.5	508	73	77
途上国	1.5	1.1	592	67	88

それに対して、低炭素シナリオ Z650を実現するために、世界全体のエネルギー起源CO₂排出量は1,100GtCに制約し、先進国と途上国はそれぞれ114と248GtCを削減しなければならない。そのため、世界、先進国と途上国において、前述した新技術の大規模利用により、それぞれ11兆、4兆と7兆ドルの追加投資が必要となる。これは、REFにおける投資総額の8.5%、5.8%と11.7%に相当し、特に途上国の方が大きな負担になる。一方、新技術導入の効果として、化石燃料の消費量が大幅に低減することによって、それぞれ14兆、5兆と9兆ドルの燃料費が節約できる。即ち、40年間のタイムスパンで見れば採算が取れる。地域別で見ても、主な先進国・地域と途上国・地域のいずれも、追加投資を上回る燃料節約が実現できる(図12)。これらの結果は、低炭素シナリオ Z650の優れた経済性を示している。

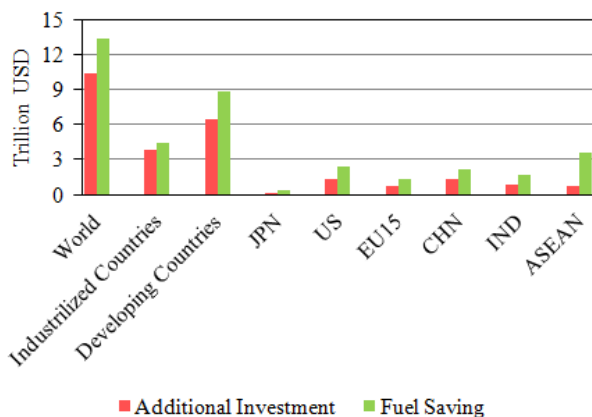


図12 世界と地域の追加投資と省エネベネフィット

4. 実現ルートの検討

気象科学の検証により提示された新たな地球温暖化抑制のための二酸化炭素排出経路について、エネルギーモデルを用いたシナリオ解析の結果、既存あるいは将来見通しのある技術により達成できると同時に、エネルギーシステムの持続可能性と経済性とも優れており、また世界全体で最適化すれば地域間の衡平性も実現できる。しかし、それを実際に推進するに当たって、二つの大きな課題を解決しなければならない。

一つ目は、地域間技術力の違いである。本研究のモデル解析においては、必要な地域に適切な技術が必要な時期に導入できることになっている。しかしながら、Antoine Dechezlepretreらにより行われた気候緩和技術革新と移転の調査分析²³⁾によると、1998-2003年の間、世界の約66%の技術革新が日本、アメリカとドイツの三カ国においてされ、また、技術移転の約76%は先進国間で実施されていた。つまり、高効率のエネルギー利用、高効率のエネルギー転換、新エネルギー利用などの中心技術は、現状ではほとんど先進国にあることになる。そのため、本稿で議論した世界ビジョンを達成するためには、低炭素技術の普及を推進していくための国際メカニズムを整備しなければならない。

二つ目は、地域間の資金力の違いである。前節の経済性評価において、追加投資と燃料節約の比較の視点から、先進国と途上国のいずれも、採算性のある取組で省エネシナリオから低炭素シナリオに移行できることを示した。しかし、この解析は長期間における燃料節約の累積が初期投資を上回る事業採算性を示しているが、膨大な初期投資がどのように実現できるかは課題として残されている。表6に示しているように、今後40年間において、世界全体のCO₂削減に必要な追加投資総額は同時期のGDP総額の0.28%になるが、先進国と途上国の同割合は、それぞれ0.18%と0.43%となっている。即ち、経済規模を考慮すると、途上国の投資負担が先進国よりかなり大きいと言える。しかも、経済成長段階が低ければ低いほど、相対負担が大きくなる。この資金力のギャップを埋めるために、先進国から途上国のエネルギーインフラへの投資を促進するための国際協力メカニズムが必要となる。

世界主要国と地域が、各自の経済事情とエネルギー事情により、公式あるいは非公式に国内目標を提出している。表7にはREFとZ650における世界及び主要な先進国と途上国の排出量、並びに各国と地域の国内目標をまとめている。

主要先進国は、米国が2010年のAmerica Power Act、EUが2009年のEC Commitment、日本が2010年にエネルギー基本計画の中の絵姿、それぞれをベースに試算した。いずれも、Z650のシミュレーション結果以上に、国内目標を出している。主要途上国は、中国が国家発展改革委員会エネルギー

ギー研究所の2050 CEACES の研究結果²⁴⁾、インドが TERI の研究結果²⁵⁾、それぞれをベースに試算した。いずれも、REF のシミュレーション結果と合うような数値目標を制定している。即ち、先進国は世界協調で温暖化対策を実施するシナリオに相当する途を描いて、途上国は上述した二つの課題により、CO₂削減策を含まない省エネを推進していく途を設計している。従って、新たな二酸化炭素排出経路の実現には、国際協力によって技術力と資金力の二つの課題の解決を図り、途上国における省エネシナリオと排出抑制の低炭素シナリオの差を埋めなければならない。(図13)。

表6 世界と地域の累積追加投資

地域	累積追加投資額 (T\$) (2010-50年)	GDP に占める シェア (%)
世界	11	0.28
先進国	4	0.18
米国	1.30	0.14
西欧	0.75	0.11
日本	0.15	0.05
途上国	7	0.43
中国	1.28	0.20
インド	0.80	0.49
アセアン国	0.77	0.29

5. 結論

気候変動科学の最新研究は、地球温暖化抑制のための新たな二酸化炭素排出シナリオとして、長期的な気候変動被害が避けられると同時に、短期的により多くのCO₂を排出できるZ650を提示した。このシナリオをベースに、エネルギーモデルを用いて世界全体のエネルギーシステムコスト最小化により世界共有できる中長期ビジョンを検討した。

モデル解析で得られた長期的エネルギー構成は、現在の化石燃料中心から低炭素化かつ多様化する方向に変化していく。その中で、再生可能エネルギーとともに原子力も重要な役割を果たす。化石燃料と原子力並びに再生可能エネルギーの割合は、2000年の8:1:1から、2030年の7:1:2、2050年の5:2:3、2100年の3:2:5へと移っていく。このビジョンは、現状政策の延長で得られるエネルギー構成より持続可能性が遥かに高く、しかも現状技術と将来見通しのある技術によって実現可能である。また途上国において、エネルギー構成の低炭素化と多様化プロセスが先進国より数十年遅れるが、経済成長に伴うエネルギー消費の大幅増加することもあり、長期的には先進国同等あるいはそれ以上の低炭素化と多様化が必要となる。

このエネルギービジョンに基づいたエネルギー起源CO₂の排出量は、中長期的に現在の政治目標として挙げられて

いるダブル・フィフティより実現しやすく、2050年に2005年レベルから25%削減となっている。地域別の排出量経済成長段階の違いを十分反映できており、2050年における2005年比の排出伸び率は先進国の5割減に対して途上国が1割増となっている。また人口当たりとGDP当たりの二つの排出原単位とも、今世紀終りに向けて収束していく。即ち、世界全体の低炭素化が進めると同時に、先進国と途上国間全体の低炭素化が進むと同時に、先進国と途上国間の公平性が達成できる。

表7 主な地域のシナリオ解析結果と国内目標
(2005年比)

		2030	2050
REF	世界	1.5	1.6
	先進国	1.1	1.0
	米国	1.1	1.0
	EU15	0.9	0.8
	日本	0.9	0.7
	途上国	2.0	2.5
	中国	2.0	2.2
インド	2.6	4.3	
Z650	世界	1.2	0.75
	先進国	1.0	0.5
	米国	1.0	0.5
	EU15	0.9	0.4
	日本	0.8	0.5
	途上国	1.5	1.1
	中国	1.5	0.8
インド	1.9	1.6	
国内 目標	先進国		
	米国	0.8	0.4
	EU15		0.5
	日本	0.6	0.2
	途上国		
中国	2.1	2.3	
インド	2.7	4.1	

このビジョンの実現に向けて、最終消費部門、特に途上国の産業化プロセスにおける省エネが最も重要であるが、世界全体で再生可能エネルギーと原子力の大規模利用と同時に、適切な条件を備えた地域においてCCSの展開も必要である。これらの新技術の導入により、エネルギーシステムにおける初期設備投資は途上国を中心に大幅に増加するが、2010-50の40年間の累積から見ると、主な先進国と途上国のいずれにおいても、追加投資を上回る燃料節約ができ、

経済的採算性が取れる。

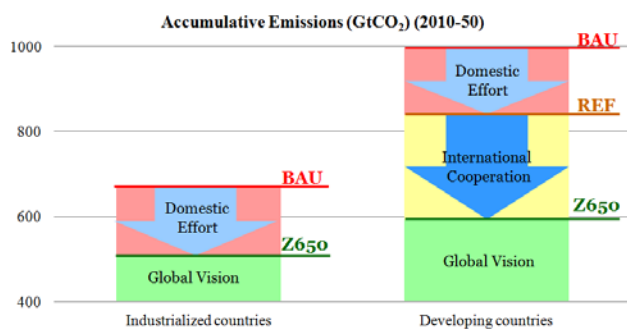


図 13 実現ルートイメージ

これらの結果は、上記のビジョンが、実現可能性、国際衡平性、経済性のいずれも優れていることを示しており、世界共有ビジョンになり得るとことが期待される。しかし、現状では途上国と先進国の間に、技術力と資金力の差が大きい。すなわち、高効率のエネルギー利用、高効率のエネルギー転換、新エネルギー利用などの中心技術が、ほとんど先進国にあり、かつ、本研究のモデル解析に得られた追加投資は、経済規模を考慮すると、途上国の投資負担が先進国よりかなり大きい。しかも、経済成長段階が低ければ低いほど、相対負担が大きくなる。この二つの課題を反映するように、各国が提出している国内目標は、先進国では温暖化対策を実施する低炭素シナリオに相当するのに対して、途上国では CO₂削減策を含まない省エネ推進シナリオと同等である。

従って、本研究で提案する世界ビジョンに関して国際合意形成のために、この途上国における省エネシナリオから低炭素シナリオへのギャップを埋められることが必要不可欠である。そこで中心課題になるのは、低炭素技術の最大限に貢献できる技術普及と先進国から途上国のエネルギーインフラへの投資を促進する国際協力メカニズムの構築である。現在、京都メカニズム (CDM) が実施されているが、これまでの実績を考えると、途上国における大規模削減に繋がるのが容易ではないと考えられる。既存 CDM の進化あるいは新たな国際協力メカニズムの構築が期待される。

6. 謝辞

この研究の一部は、キャノングローバル戦略研究所のエネルギー2050研究会の議論に基づいている。研究会のメンバーである青柳由里子氏、大山健氏、小宮山涼一氏、新藤紀一氏、田下正宣氏、藤井康正氏、松井一秋氏、横山隆壽氏に感謝する。

参考文献

- 1) UKCCC. The 2050 target, building a low-carbon economy – the UK's contribution to tackling climate change; 2008.
- 2) Allen MR, Frame DJ, Hemingford C, Jones CD, Love CD, Meinshausen M, and Meinshausen N. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tone. Nature 2009;458, 1163-1166.
- 3) Committee on Stabilization Targets for Atmospheric Greenhouse Gas Concentration; National Research Council. Climate stabilization targets: emissions, concentrations, and impacts over decades to millennia. The National Academies Press 2010.
- 4) Matsuno T, Maruyama K, Tsutsui J. Stabilization of atmospheric carbon dioxide via zero emissions – An alternative way to a stable global environment. Proceedings of the Japan Academy; Series B 2012;88:368-395.
- 5) Kurosawa A, Yagita H, Weisheng Z, Tokimatsu K, Yanagisawa Y. Analysis of carbon emission stabilization targets and adaptation by assessment model. The Energy Journal 1999;20 (Special I), 157-176.
- 6) United Nations. Dept. of Economic and Social Affairs. Population Division. World population to 2300. United Nations, 2004.
- 7) United Nations. World population prospects, the 2006 revision. Online Database, 2007, <http://esa.un.org/unpp>.
- 8) International Monetary Fund, World Economic Outlook Database, October 2008 Edition. Online Database. <http://www.imf.org/external/data.html>.
- 9) IEA. World Energy Outlook 2009.
- 10) USGS, World petroleum assessment 2000, USGS digital data series DDS-60, 2000.
- 11) Rogner H-H, An assessment of world hydrocarbon resources, Annu. Rev. Energy Environ. 22, 217-262, 1997.
- 12) World Energy Council 2007, 2007 survey of energy resources.
- 13) NEDO. 平成 15 年下期「2013 年以後の温暖化対応法則に関する調査研究」報告書, 2004
- 14) 山地憲治, 山本博巳, 藤野純一. バイオエネルギー. ミオシン出版, 2000.
- 15) IEA. Energy Technology Perspectives 2010.
- 16) IEA. World Energy Investment Outlook 2003.
- 17) IEA. Solar PV Roadmap targets. 2010.
- 18) IEA. Prospects for Hydrogen and Fuel Cells. 2005.
- 19) IPCC Special Report. Carbon Dioxide Capture and Storage.

- 2005.
- 20) IEA. Investments and Mitigation Costs, Mitigation costs in the WEO 2009 450 Scenario, Potential and costs to reduce fuel consumption in passenger car transport. 2009. <http://www.iea.org/weo/investments.asp>.
- 21) Fulton L, Eads G. IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection. 2004.
- 22) IEA. Technology Roadmap, Electric and plug-in hybrid electric vehicles. 2009.
- 23) Antoine Dechezlepretre, Matthieu Glachant, Ivan Iascic, Nick Johnstone, Yann Meniere. Invention and Transfer of Climate Change Mitigation Technologies on a Global Scale: A Study Drawing on Patent Data. FEEM Working Paper No. 82. 2009.
- 24) The Energy Research Institute, National Development and Reform Commission: China's low carbon development pathways by 2050 (in Chinese), Science Press, 2009.
- 25) TERI Presentation, India's energy sector options & challenges, Joint TERI ETSAP Workshop, Energy modeling tools & techniques to address sustainable development & climate change, 21st January 2010.