

地球温暖化防止のための長期エネルギービジョン

第1回 長期ビジョンに基づくエネルギーシステム構成

キヤノングローバル戦略研究所 氏田 博士，段 烽 軍，湯 原 哲 夫

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排出を許容する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のコストをミニマムとする最適化により世界で共有できる2100年までの長期ビジョンを検討した。その考え方と検討プロセスを概説する。モデルシミュレーションで得られた長期的な一次エネルギー構成は、現在の化石燃料中心（8割）から、2100年には再生可能と原子力エネルギーによる低炭素化かつ多元化する方向（合計7割）に変化していく。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高く、しかも現状と将来見通しのある技術によって実現可能である。

I. 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、適応、資金、検証方式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、科学的な検証が不十分と指摘されている。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、気候変動政府間パネル(IPCC)第四次評価報告書を根拠に、2050年に1990年ベースで温室効果ガス排出を50%削減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、長期的な気温上昇は、排出経路の依存性はあまり高くないとむしろ累積排出量に主に支配されるということが、気候変動政府間パネルの第5次報告、IPCC-AR5²⁾において明確に指摘された。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。Matsunoら³⁾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に、21世紀における累積CO₂排出総量制約を650GtCに抑える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、その後の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℃のピークに達するが、その後徐々に低下していき1.8℃前後に安定する。このようにすることで、地球温暖化の主要な影響要因であるグリーンランド氷床融解や海面上昇などに対して、従来のIPCC450ppmシナリオと同程度とすることが可能となる。

Examination of a Globally Sharable Mid- to Long-Term
Vision for a New Climate Regime (1) Long-Term Energy
System Composition: Hiroshi UJITA, Fengjun DUAN,

Tetsuo YUHARA

(2014年6月2日受理)

即ち、Z650シナリオは、長期的な気候変動被害が小さく、~2050年においてはCO₂排出制限が緩やかであることから、国際的な合意に達する可能性も高い。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で共有できる長期ビジョンを構築した⁴⁾。シリーズ1（本稿）では、その概要を、シリーズ2（次回）では様々なサーベイと考察を述べる。

II. 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。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（割引率は世界共通で5%）である。エネルギー需要をシナリオで与えるとともに、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、エネルギーの供給構造と転換構造を求める。

1. モデル基本設定

世界を、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連合などの予測⁶⁾に基づいて作成した（第1、2図）。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。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。

2. パラメータ設定

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^{7)、8)}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。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 2007⁹⁾などの文献を参考にして作成しており、バイオマス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。

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年から導入開始と想定している。

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。発電または水素製造時に回収されたCO₂は、石油増進回収法、廃ガス田、帯水層などにより貯留すると想定している。

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、熱需要）、電力需要に分類する。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。

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に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。

成行き、Business As Usualシナリオ（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12 Gtoe、2050年に15.5 Gtoe、さらに2100年に22 Gtoe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、あくまで参照ケースである。

参考とする省エネ、Referenceシナリオ（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、IEAの研究¹⁰⁾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のを想定している。世界全体の総エネルギー需要は、2030年に11.1 Gtoe、2050年に13.7 Gtoe、2100年に17.8 Gtoe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、21世紀における世界の累積CO₂排出量を650GtC以内に抑制するシナリオである。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、排出権取引やグリーン開発メカニズム(CDM)などの国際協調の枠組みは考慮していない。最終エネルギー需要をREFと同様に仮定している。

Ⅲ. 結果と考察

上記した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。

1. 長期エネルギービジョン

第3図には、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年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。

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。

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、エネルギー構成は顕著に非化石燃料化していく。化石燃料と原子力と再生可

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になる。

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の電氣化とトラックやバスなどのヘビーデューティビークル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と水素の利用また産業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が乗用車に占めるシェアは、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。電氣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。電氣自動車のシェアは、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第4図に示す電源構成から分析でき、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年以後にはほぼすべてが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年代を境に軽水炉(LWR)中心からFBR中心に転換する。風力は2020年から大幅に導入し次第にシェアを拡大していき、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年には約6割を占める。原子力、CCS付きの火力、安定している水力及びバイオマスが、基幹電源になっている。

地域別の一次エネルギー構成を第5図に示している。先進国のエネルギー需要は、21世紀中には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もだが、途上国ではさらなる努力が要求される。

2. エネルギー起源CO₂排出推移

CO₂排出量の目標は主に2050年までで議論されている。ここでは、各シナリオにおける2050年までのCO₂排出量を、第6図に示す。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らず、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、エネルギー構成の脱炭素化により、エネルギー起源CO₂排出が大幅に抑制できる。当面は増加傾向が続くが、2020~2030年に310億トン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排出総量を、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、G8サミットで挙げられていた2050年に50%削減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。

IV. まとめ

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ミニマム最適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な一次エネルギー構成は、現在の化石燃料中心(8割)から2100年では低炭素化か

つ多元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(5割)とともに原子力(2割)も重要な役割を果たす。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高く、しかも現状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元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元化が必要となる。

— 参考資料 —

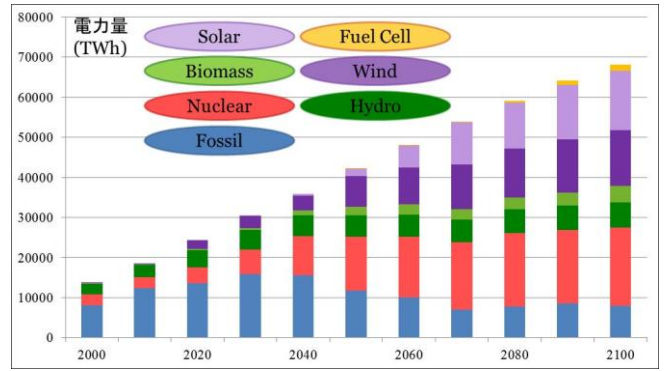
- 1) Committee on Stabilization Targets for Atmospheric Greenhouse Gas Concentration; National Research Council. Climate stabilization targets: emissions, concentrations, and impacts over decades to millennia. The National Academies Press 2010.
- 2) Summary for Policymaker of Fifth Analysis Report on Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- 3) 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.
- 4) 段烽軍, 湯原哲夫, 氏田博士, 都筑和泰, 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, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 34, No. 3.
- 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) IEA. World Energy Outlook 2009.
- 8) Rogner H-H, An assessment of world hydrocarbon resources, Annu. Rev. Energy Environ. 22, 217-262, 1997.
- 9) World Energy Council 2007, 2007 survey of energy resources.
- 10) 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>.

著者紹介

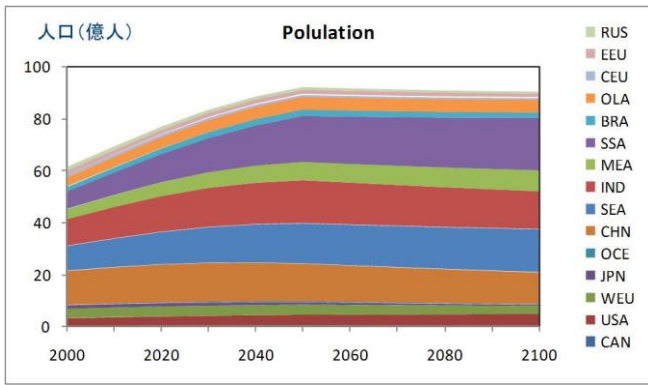
氏田博士 (うじた・ひろし)
 キヤノングローバル戦略研究所
 (専門分野/関心分野) 地球温暖化問題、リスク論

段峰軍 (だん・ほうぐん)
 キヤノングローバル戦略研究所
 (専門分野/関心分野) 地球温暖化問題、海洋

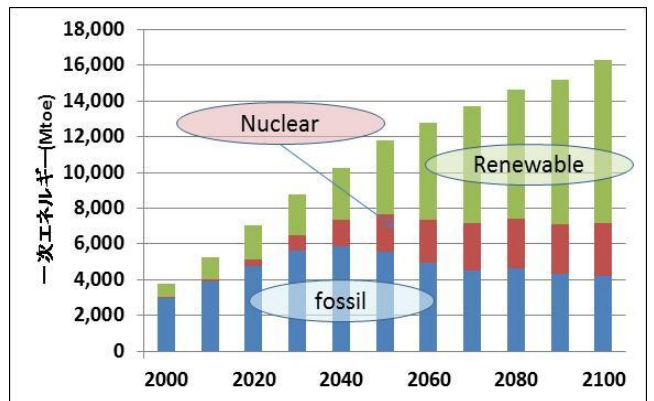
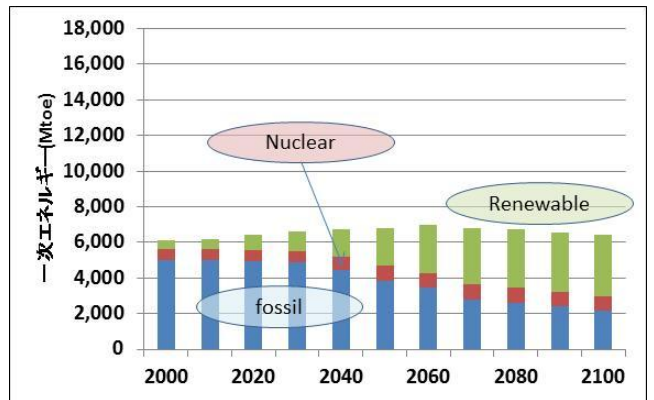
湯原哲夫 (ゆはら・てつお)
 キヤノングローバル戦略研究所
 (専門分野/関心分野) 地球温暖化問題、構造力学、海洋



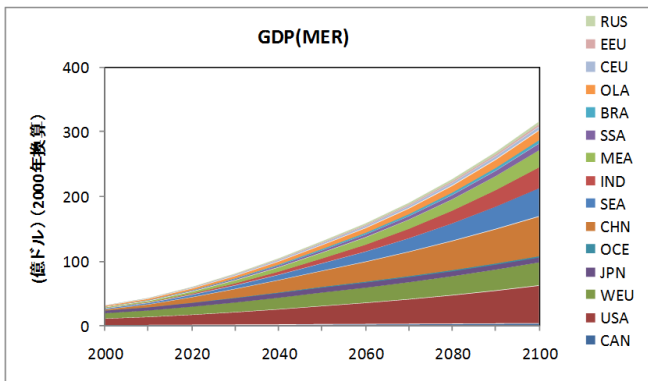
第4図 Z650における世界の電源構成



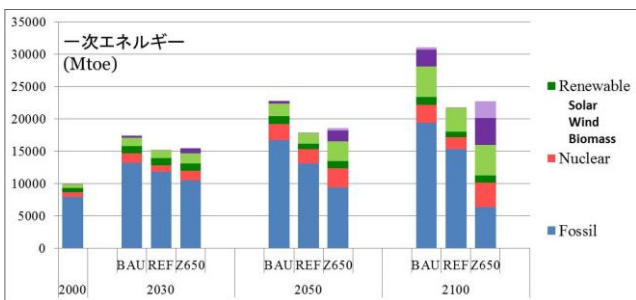
第1図 エネルギーモデルにおける人口推移



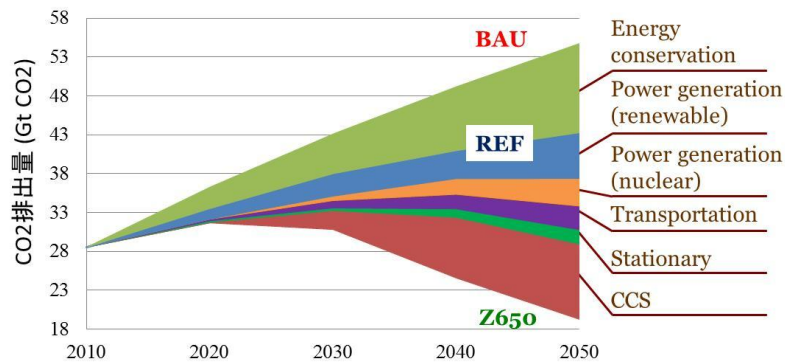
第5図 Z650における地域の一次エネルギー構成 (上: 先進国; 下: 途上国)



第2図 エネルギーモデルにおける経済見通し



第3図 各シナリオにおける世界の一次エネルギー構成



第6図 各シナリオにおけるCO₂排出量