

## CIGS 地球温暖化シンポジウム

2013年7月10日(水) 13:00-18:00  
経団連ホール(千代田区大手町1-3-2)

### エネルギービジョンの実現可能性

東京大学 准教授 小宮山涼一

世界の温室効果ガス排出量のほぼ大部分は化石燃料の消費に起因する。そのため、超長期にわたる温室効果ガス大幅排出削減の道のりを示した「Z650 シナリオ」を実現するためには、再生可能エネルギー導入や省エネ促進により化石燃料への依存度を低減し、持続可能なエネルギーのベストミックスを構築することが重要となる。本発表では、GRAPE モデルにより計算された Z650 シナリオ(21 世紀半ばまでに世界の温室効果ガス排出量を半減し、以降、大幅削減)を実現するためのエネルギー需給見通しの実現可能性について検討を行う。

#### 1. 一次エネルギー供給構成

気候変動の抑制とエネルギー安定供給の確保を図り、持続可能な社会発展を実現するためには、化石燃料への依存度を低減することが重要である。現時点で世界の一次エネルギー供給に占める化石燃料の比率は約 9 割(87%)に達する。化石燃料への依存度低減のためには、省エネ促進とともに、とくに再生可能エネルギー等の非化石エネルギーの導入拡大が重要な課題となる。省エネには物理的限界があり、それだけで温室効果ガスの大幅削減の実現は難しい。超長期的視点からみれば、技術を応用して温室効果ガス排出が少ない自前の資源を作り出すこと、すなわち、エネルギー利用の脱炭素化とエネルギー自給率向上を進めることが、化石資源の枯渇化や気候変動問題へ同時に対応する上で、重要な課題となる。この要請に応じる技術は、再生可能エネルギーと原子力以外に存在せず、これらを将来のエネルギー供給の中核とする革新的エネルギー技術開発が重要となる。

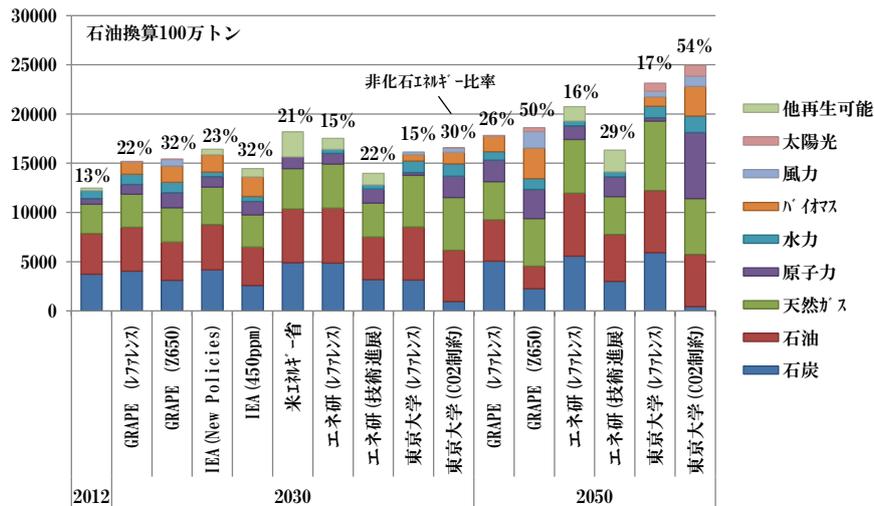


図1 一次エネルギー供給構成

出所: (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (米エネルギー省)DOE/EIA:International Energy Outlook 2011, (エネ研)日本エネルギー経済研究所: アジア/世界エネルギーアウトック 2012, (東京大学) 東大藤井研:地域細分化型 DNE モデルによる計算結果

図1にZ650シナリオと諸機関で計算された2050年までの一次エネルギー供給構成を示す。Z650シナリオでは、再生可能エネルギーと原子力の導入により、2050年における非化石エネルギーの比率が5割まで拡大しているが、依然として化石資源への依存度が5割に達しており、高水準である。また諸機関での温室効果ガス排出削減を指向したシナリオにおいても、2050年時点で化石燃料への依存度が約5割～7割に達している。

上記の計算結果より、温室効果ガス排出制約下でのシナリオにおいても、長期的に化石燃料への一定の依存が不可避な情勢である。これらのことから、経済合理性、現実性、革新的技術の商業化までに要する時間も合わせて考慮すれば、化石燃料の安定供給確保を図ると共に、化石燃料をクリーンで高効率な形態で利用することが、エネルギー安全保障、環境保全、経済性の観点から不可欠であると考えられる。

## 2. 石油需給の展望

世界経済の持続的な発展のためには、エネルギーは必要不可欠な資源である。なかでも石油は、世界の一次エネルギー消費の中で最大の比率を占めること(33%、2012年)、原油価格が他のエネルギー源の価格や需給動向に影響を強く及ぼすこと、さらに、原油価格が世界経済や国際政治の動向にも影響を及ぼすため、最も重要な資源として位置づけられている。現在、先進国の石油消費は燃費効率のよい自動車の普及等を背景にすでに減少傾向にあるが、中国など新興国での消費増加をうけて、世界の石油消費は依然として増加基調にある。石油需給が他のエネルギー源や経済活動に及ぼす影響が大きいことから、将来のエネルギー需給を見通す上でも、まず石油需給の趨勢を理解することは特に重要である。

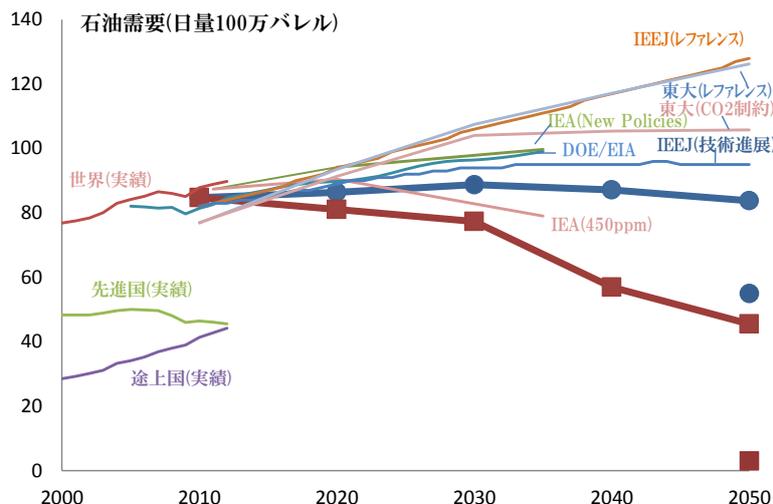


図2 石油需給の展望

出所: (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (DOE/EIA) 米エネルギー省:International Energy Outlook 2011, (IEEJ) 日本エネルギー経済研究所:アジア/世界エネルギーアウトック 2012, (東大) 東大藤井研:地域細分化型DNEモデルによる計算結果

図2にZ650シナリオと諸機関での長期的な石油消費の展望を示す。世界の石油消費は、新興国での旺盛な消費増加を背景に、2012年において日量約8,980万バレルまで増加している。世界の石油消費のうち、5割が自動車用燃料など運輸部門、2割が化学製品製造など産業部門、1割強が暖房用燃料など民生部門において消費されており、とくに運輸部門での石油消費の動向が、石油市場に与える影響が大きい。石油消費の面で影響の強い要因として、燃費基準(CAFE基準等)、クリーンエネルギー自動車(ハイブリッド車、ディーゼル車、EV、PHEV、CNG、FCV等)、バイオ燃料、途上国での燃料補助金、モーダルシフト(公共交通等)等の動向が挙げられ、石油供給の面では、Easy Oilの枯渇化、非在来型石油(Tar Sand, Tight Oil)、大水深開発、産油国(中東、アフリカ、中南米、ロシア)の投資環境や地政学リスク、探鉱・開発コストの動向、産油国の寡占化(中東産原油比率の拡大)、OPEC原油への需要(Call on OPEC)と生産調整の行方、シーレーン(Sea lane)の安全保障等が重要な考慮事項である。

諸機関の見通しでは、2050年の世界の石油消費は日量約9,000万バレルから1億2,000万バレルの間で推移すると見込まれており、とくに自動車販売台数の拡大が続く新興国での将来の石油消費の伸びの見方が重要な鍵となる。中国など新興国で燃費効率の高い自動車の普及が拡大し、自動車販売台数増加もある程度一服すれば、新興国の石油消費の伸びが飽和し、先進国での減少基調と相まって、世界全体の石油消費が減少に転じる可能性も存在すると言えよう(消費のピーク論)。Z650シナリオでは、バイオ燃料や電気自動車の大量導入により、2050年の世界の石油消費は現在の日量約9千万バレルから日量約5千万バレルまで大きく減少する結果となっている。セルロース系エタノール生産など持続的なバイオ燃料生産の動向や電気自動車の技術開発動向と市場への普及テンポ等が、Z650シナリオでの石油消費の実現可能性を論じる上で重要な要因となる。

### 3. 天然ガス需給の展望

天然ガスは、発電用燃料、都市ガス用原料、産業用燃料として幅広く利用されている。現在、世界の天然ガス需要のうち、発電用に4割、民生部門で3割、産業部門で3割が消費されているが、最近では発電用燃料の消費の伸びがとくに大きい。天然ガスは石油に比べて、資源が世界に広く分布し、利用可能な資源量も大きいため、1970年代の石油危機以降、石油代替燃料として急速に利用が拡大した。また、環境負荷が少なく、最近では気候変動問題への関心の高まりとともに、利用が着実に増加している。将来は、天然ガスを燃料とする分散型電源や燃料電池自動車の普及により、天然ガスの利用分野がさらに拡大する可能性が指摘されている。また近年では「シェールガス革命」(天然ガス生産での水平掘削、水圧破砕などの技術革新に伴うガス生産の急増)により、成熟したガス利用国である米国の天然ガス自給率はほぼ100%に達し、米国産ガスの他国への積極的な輸出も検討され、さらに、豊富な供給量による米国の天然ガス価格の大幅な低下が、競合エネルギー源(原子力、再生エネ、石炭等)の開発にも影響しはじめており、天然ガスが世界第2位のエネルギー消費国である米国のエネルギー情勢に大きな影響を及ぼしつつある。

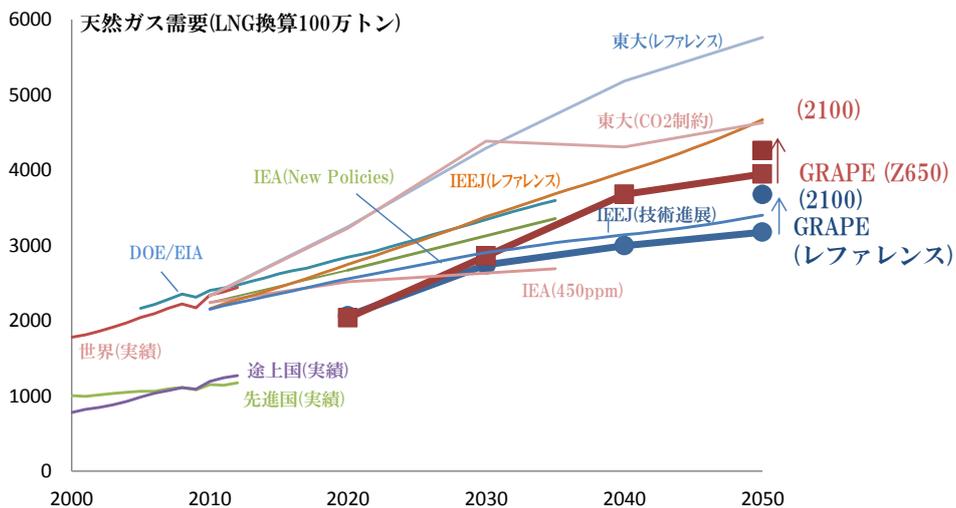


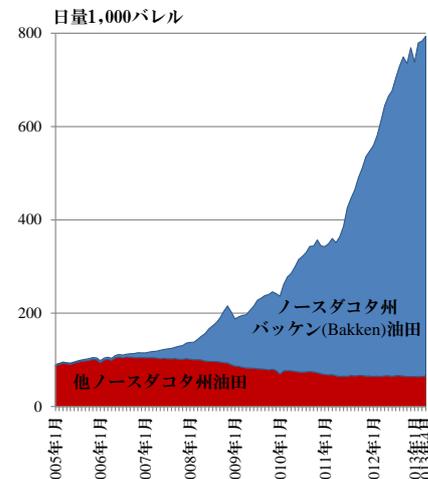
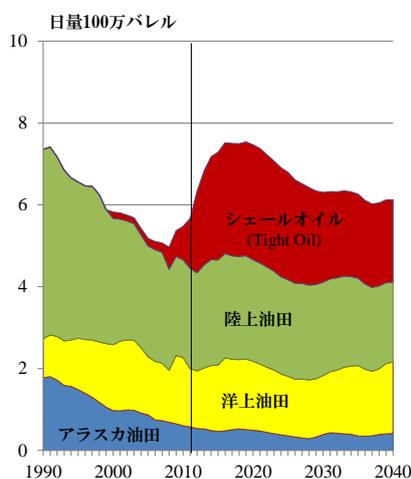
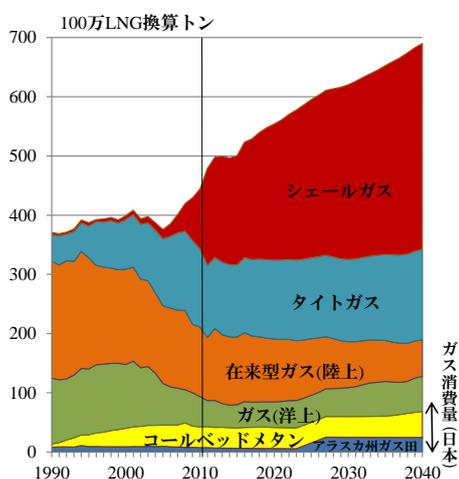
図3 天然ガス需給の展望

出所: (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (DOE/EIA) 米エネルギー省:International Energy Outlook 2011, (IEEJ) 日本エネルギー経済研究所:アジア/世界エネルギーアウトック 2012, (東大) 東大藤井研:地域細分化型DNEモデルによる計算結果

図3にZ650シナリオと諸機関での長期的な天然ガス消費の展望を示す。近年、国際的に環境対策として優位性のある燃料として天然ガス消費は伸びている。図3より、将来も気候変動対策の有無にかかわらず、天然ガス消費は唯一、長期的に見てもほぼ増加基調で推移する可能性が計算されている。厳しい温室効果ガス排出制約が課されるZ650シナリオにおいても、世界の天然ガス消費は継続的にさらに増加する見込みとなっている。また、天然ガスの供給面から見ても、在来型資源に加え、非在来型資源(シェールガス、CBM等)の資源ポテンシャルが大きい。ただし天然ガス利用の欠点として、パイプラインやLNG関連施設などインフラへの大規模投資が必要である点が挙げられるが、安定的な価格形成の下でこれらの投資が国際的に順調に進めば、十分な天然ガス供給力確保は可能であると考えられる。

【米国シェール革命】

「シェール革命」を受けて、米国ではシェールオイルが石油生産の約 3 割に達し、シェールガスが天然ガス生産の約 4 割に達しており、これらの非在来型資源の生産が急増している。米国の天然ガス生産は 2005 年以降 33%増加し、現在、天然ガス自給率は 94%まで上昇し、ほぼ自給自足を達成している。旺盛な国内生産を背景に、同国の天然ガス価格は低位水準で安定しており(原油価格の約 4 分の 1)、また、ガス開発事業者が採算改善を図ること等を目的に数多くの LNG 輸出プロジェクトが計画されている(9 計画、計 1 億トン以上)。日本のエネルギー市場にも関係があり、2013 年には米エネルギー省(DOE)が Freeport LNG 輸出計画(大阪ガス、中部電力)を認可し、2017 年に輸出開始が見込まれ、その他にも日系企業が関わる 2 計画(計 1500 万トン)が申請・認可待ちの状況にある。これらのプロジェク



付図 3-1. 米国天然ガス生産の展望

付図 3-2. 米国石油生産の展望

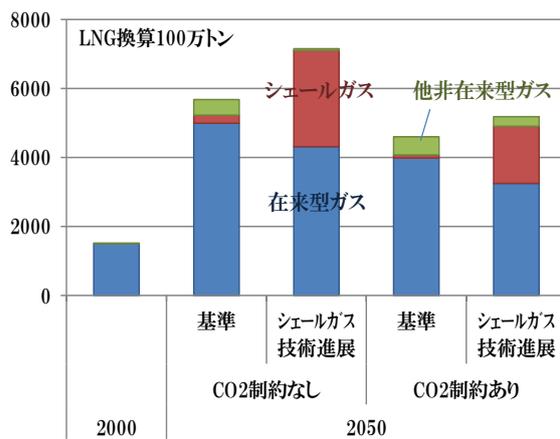
付図 3-3. ノースダコタ州石油生産

(出所) 米国エネルギー省、ノースダコタ州鉱物資源省

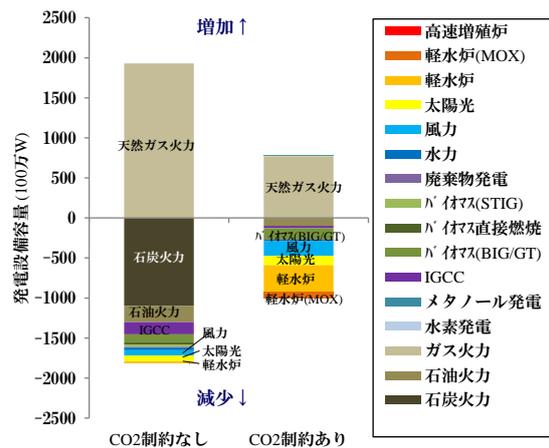
トが実現すれば、日本の LNG 総輸入量の約 2 割を米国産 LNG が占めるため、日本の天然ガス安定供給に大きく貢献することが期待されている(また、米国産 LNG 輸出には不確実性もあるが、輸入サイドにとっては、米国産 LNG を他の LNG 契約の新規約定や更新時の交渉材料とすることで、LNG 価格決定方式を割高な原油価格リンクから米国ガス価格(Henry hub)リンクに変更することや、価格自体の低減に貢献する可能性もある)。また、米国ではシェールオイル、タイトオイルと呼ばれる非在来型石油生産も増加している。米国の石油生産は日量 1,000 万バレルを上回り(2014 年見込)、サウジアラビア(同 1,150 万バレル)、ロシア(同 1,060 万バレル)に匹敵する産油国に回帰する可能性がある。また、米国内石油生産は過去 5 年で約 4 割増加する一方、消費は約 1 割減少しているため、石油輸入依存度は 62%から 43%へ大きく低下し、石油の安全保障面での改善が見られている。また、社会経済への影響として、安価な石油化学原料(エチレン工場新增設)の調達が可能になったことや電気料金の低下等により、製造業が米国内へ回帰傾向を示し、また、石油輸入量減少とガス輸出増



これらのことから、シェールガスの生産コスト低下が進めば、石炭資源等の枯渇性資源を代替する可能性があり(付図 3-6)、シェールガス資源の導入拡大に向けた技術開発等の取り組みは、他の競争力のある資源の温存、長期的活用を可能にするという意味での国際エネルギー市場の長期的安定化をもたらすことが考えられる。そしてシェールガスは、原子力、太陽光等のゼロエミッション技術も代替することから、CO<sub>2</sub> 削減に資する次世代技術の研究開発、商業化に時間的猶予を与えるという“架け橋”になりうるという意味で、長期的なエネルギー・技術開発の強化に貢献することが期待される。



付図 3-5. 世界の天然ガス生産の展望

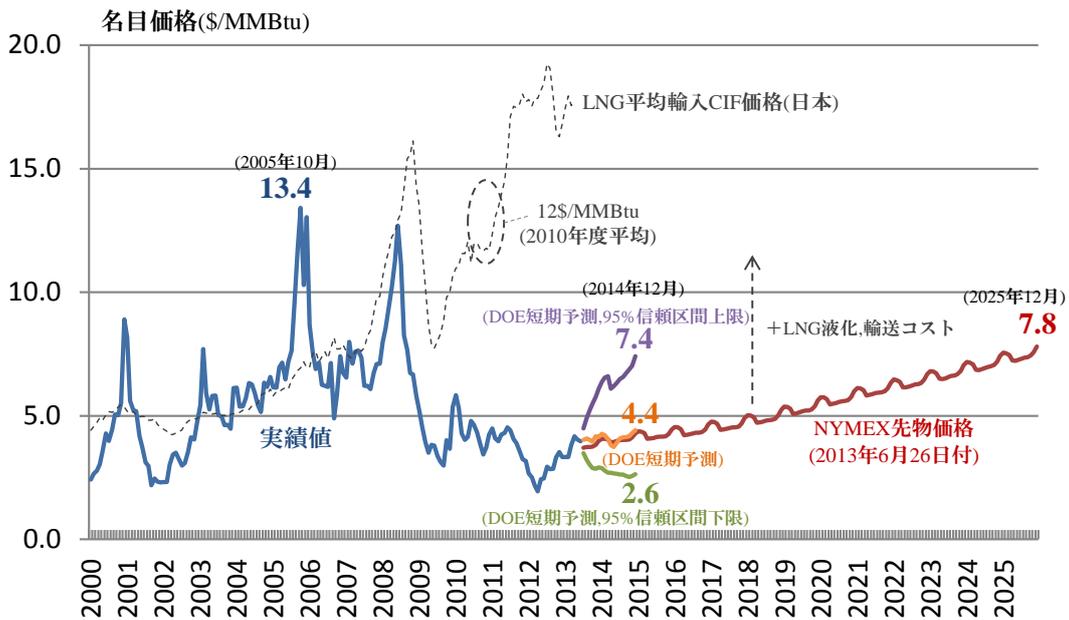


付図 3-6. シェールガス増産に伴う世界の電源構成の変化(2050年)

(出所)小宮山,細谷,藤井,古川,西村,吉崎,第 30 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集,pp.85-88,2011

【天然ガス価格の展望】

米国の天然ガス価格はシェールガス生産増加が当面見込まれるが、NYMEX での先物取引価格や米国エネルギー省の予測からみても、現状の 100 万 Btu あたり約 4 ドルから 2030 年にかけて同約 8 ドルまで長期的に緩やかな上昇基調で推移する見通しである(付図 3-7)。



付図 3-7. 米国天然ガス価格(Henry hub, pipeline)の現状と見通し

(出所)米国ガス価格実績値：EIA/DOE, DOE 短期予測：EIA/DOE STEO, NYMEX 先物価格:NYMEX Market Data,

LNG 価格(日本): (一財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット EDMC データバンク、より報告者作成

現在、豊富な天然ガス供給力を背景に米国の天然ガス価格が低下し、ガス事業者の採算が悪化し、採算改善等のために米国産 LNG 輸出への機運が高まり、2010 年代後半以降、日本向け米国産 LNG 輸出が計画されている。ただし、同時期におけるシェールガス由来の日本の米国産 LNG 輸入価格に関しては、米国天然ガス価格の不確実性や日本向け輸送コスト(100 万 Btu あたり約 6 ドル)等も踏まえれば、東日本大震災前の LNG 平均輸入価格水準(同 12 ドル)と同程度かそれを上回る可能性もある。そのため、米国産 LNG の経済性に関しては、今後も慎重に注視する必要がある。

【シェールガスの環境問題(温室効果ガス排出、地震、水)】

シェールガスの代表的な環境問題として、採掘工程でのメタンガス等の大気中への放散が挙げられる。コーネル大学の論文ではシェールガスのライフサイクルでの GHG(温室効果ガス)排出量が石炭を上回る可能性が指摘されたが(Howarth et al, 2011)、最近の研究では石炭、石油を下回ると評価されている(Skone et al, 2011; Jiang et al, 2011 等)。コーネル大の論文ではシェールガス生産工程でのベント率を 100%(水圧破碎工程の GHG が全て大気に放散)と設定するなど、掘削実態から見て乖離した想定を置いたことが原因であると考えられる(HIS CERA,2011 等)。MIT の研究では、実際の GHG 排出量は 100%大気放散した場合に比較して約 2 割程度(Barnett、Marcellus 等)と報告されている(MIT,2011)。また、水圧破碎後のフローバック水中の溶解メタンが大気中に放散する可能性も指摘されているが、米国環境保護庁(EPA)がメタンガスや、VOC を回収するガス回収設備導入を事業者に義務付けていること、また事業者も自発的に同設備導入に取り組んでいることから、その可能性は低いものと考えられる。

また、シェールガス採掘が地震誘発リスクを高めることも指摘されている。しかし、米国の研究評議会(National Research Council)が、過去の地震を発生要因別(石油・ガス採掘、石油二次回収、廃水地下注入、地熱、水圧破碎)にリスク評価を実施したところ、水圧破碎による地震リスクは低いと評価されている(National Research Council,2011)。ただし、廃水地下注入は一定のリスクがあると評価されており、廃水地下注入の規制が強化され、浄化処理と放流を通じた処理にシフトする可能性もある。

そして、シェールガス生産工程での地下水汚染のリスク(水圧破碎工程の流体、メタンガスの地下・地表水への混入)も以前から指摘されている。しかし、MITの研究報告(MIT,2011)等におけるシェール層深度と地下水脈深度の評価では、シェール層の深度が1000m~2000mであるのに対して、地下水脈の深度は200m~400mであり、汚染水の混入リスクは低いと報告されている(例:Barnett:シェール層 2000-2600m,地下水脈 370m, Marcellus:シェール層 1200-2600m,地下水脈 260m)。またシェールガスが生産される各州で規制措置が実施されており、地下水の事前調査、添加物の情報開示、廃水処理等が義務付けられ、また、廃水の地下注入自体、既に連邦政府の規制対象(UIC: Underground Injection Control)となっている。そして、地下水貯留容量も不足していること、微小地震発生リスク等により、廃水を浄化処理して河川へ放流する処理方法へシフトする可能性もある。また、水圧破碎時での多量の水消費が懸念されているが、シェール開発地域の水消費の1%以下であり、影響は小さいとの報告も行われている(MIT,2011 等)。米国環境保護庁(EPA)は地下水汚染評価に関して2014年に最終報告を行う予定となっている。

#### 4. 石炭需給の展望

石炭は国際的に生産、利用されている地産地消型の資源で、発電、製鉄用に消費されている。石炭は、石油や天然ガスに比較して、世界的に広く分散して存在すること、資源量も豊富に存在すること、価格面で低廉であり価格安定性が高いという特徴がある。ただし石炭は、気候変動の原因と言われる二酸化炭素の排出原単位が石油やガスに比べて大きく、硫黄酸化物や窒素酸化物を排出するという問題もある。しかし、石炭はエネルギー安定供給確保の観点から見ても重要なエネルギー源であり、地球環境保全に適合した石炭利用技術の開発、普及が望まれている。現在、世界の石炭消費の7割以上が発電部門で消費され、2割が産業部門で利用されており、特に発電部門での利用動向が、石炭消費に大きな影響を及ぼす。世界の発電電力量に占める石炭火力の割合は4割を上回り、石炭資源が豊富な中国、インドはこの比率が7割付近にあり、世界最大のエネルギー消費国、アメリカでも発電量の約5割を占める。中長期的に見ても、世界の発電電力量に占める石炭火力の割合は約4割で推移し、石炭火力発電は今後とも世界の電源構成の主力電源であり、石炭は引き続き重要な資源として位置づけられる。

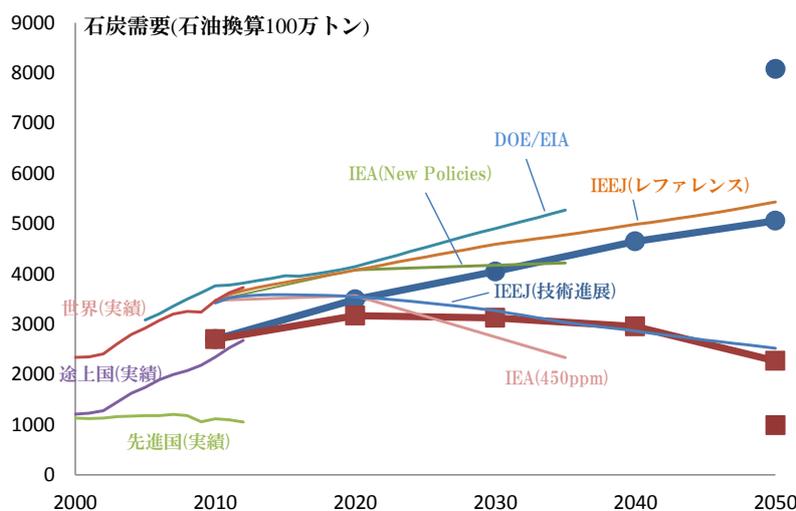


図4 石炭需給の展望

出所: (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (DOE/EIA) 米エネルギー省: International Energy Outlook 2011, (IEEJ) 日本エネルギー経済研究所: アジア/世界エネルギーアウトック 2012, (東大) 東大藤井研:地域細分化型 DNE モデルによる計算結果

図4に Z650 シナリオと諸機関での長期的な石炭消費の展望を示す。気候変動対策が特段講じられないシナリオでは、石炭消費は世界的に増加するが、気候変動対策を考慮に入れたシナリオでは、発電部門での燃料転換(石炭からガス、原子力等への転換)が進み、世界の石炭消費は今世紀前半にピークを迎え、その後、低下する。石炭消費に影響を及ぼす要因として、高効率技術(石炭 IGCC)の開発、供給インフラの整備状況、国際的な気候変動枠組の実現に関する不確実性、CCS 等に関する技術開発動向の不確実性の存在等が挙げられる。

## 5. 原子力発電の展望

世界的に見た原子力発電の規模は、1970～80年代には非常に高い成長率を維持したが、チェルノブイリ原子力事故等を背景に、1990年代には成長率は低下し横ばいで推移した。また、2011年3月の日本での東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故に伴い、安全性の問題が国際的に認識され、日本や欧州諸国の原子力政策に影響を与え、欧州の一部の国では原子力依存度を低減する政策がとられることとなった。一方、原子力発電をこれまで堅持している米国、フランス、ロシア、韓国や、電力需要が急増する中国・インド等の新興国では、エネルギー安全保障や気候変動問題への対応、原子力産業育成を通じた国際競争力の確保という視点から、原子力政策に顕著な変更は現れていない。現在世界で 429 基約 3 億 8,800 万 kW の原発が運転中にあるが、福島原発事故を経た 2013 年時点においても、世界で 76 基 7,800 万 kW の原発が建設中であり、さらに 97 基 1 億 1,100 万 kW が計画にある。



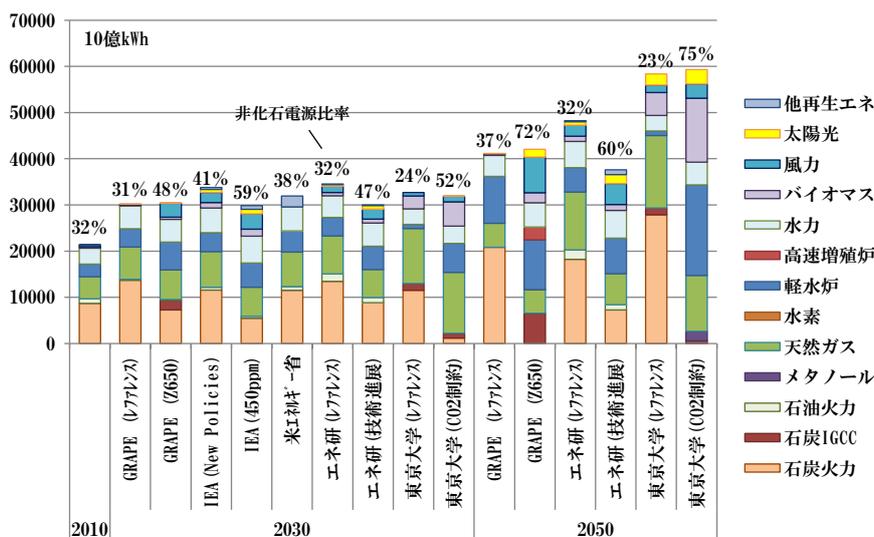


図6 電源構成の展望

出所: (IEA) IEA:World Energy Outlook 2012, (米エネルギー省)DOE/EIA: International Energy Outlook 2011, (エネ研)日本エネルギー経済研究所: アジア/世界エネルギーアウトック 2012, (東京大学) 東大藤井研:地域細分化型 DNE モデルによる計算結果

このように、一次エネルギー供給に占める電力供給へのエネルギー投入比率が構造的に上昇するとみられることから、世界の温室効果ガス排出量を効果的に削減するためには、電源構成の低炭素化が必要な課題となる。図6にZ650シナリオと諸機関での2050年までの世界の電源構成の展望を示す。Z650シナリオでは発電量の約7割を原子力と再生可能エネルギーが占めており、他の諸機関における非化石電源が拡大するシナリオでも、電源構成の約6割から7割を原子力や再生可能エネルギーが占める結果となっている。これらの結果から、再生可能エネルギー電源(風力、太陽光等)や原子力発電等の非化石電源の比率を電力システムの中でどこまで拡大できるかが重要なポイントとなる。ただし、出力変動の大きい風力発電や太陽光発電といった間欠性電源の大量導入実現には需給両面での複合的対策が重要となる。とくに、火力発電(天然ガス火力等)による出力調整やバックアップ、電力貯蔵システム(バッテリー(Li-ion, NAS 電池等)、水素貯蔵、揚水可変速運転など)の活用、デマンド・サイド・マネージメント(可制御負荷(電気自動車, 電気ヒートポンプ給湯器等)導入による demand extension や BEMS, HEMS 等)、出力抑制(PCS, 双方向通信技術の活用)、電力流通設備(送配電網等)の増強、広域にわたる需給調整(広域運用)など、が間欠性電源の大量導入に不可欠であると考えられる。図7に日本全体や東北地域における太陽光、風力大量導入時での電力需給運用シミュレーション結果を示しているが、太陽光や風力の出力抑制、電力貯蔵装置や火力発電の負荷追従運転等が大規模に行われており、従来の電力需給運用計画とは異なる運用が必要になると考えられる。

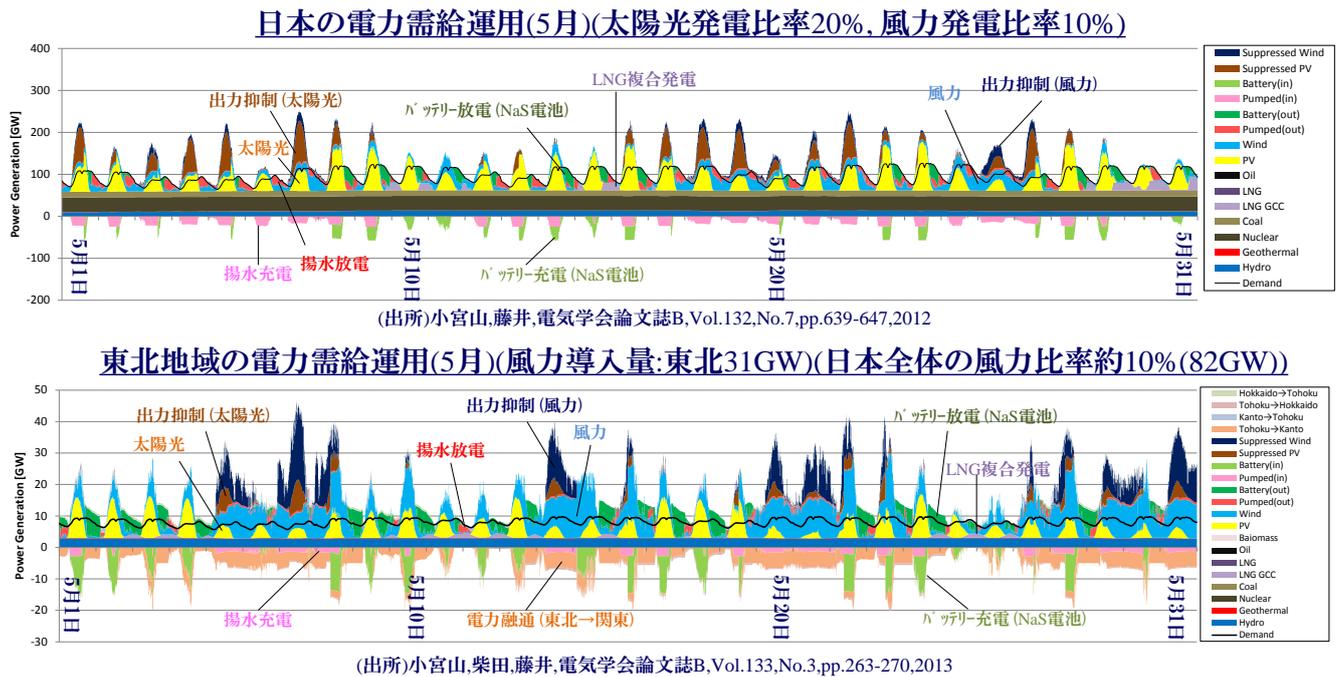


図7 日本の太陽光・風力大量導入下での電力需給運用

(出所)小宮山,藤井,電気学会論文誌 B,Vol.132,No.7,pp.639-647,2012、小宮山,柴田,藤井,電気学会論文誌 B,Vol.133,No.3,pp.263-270,2013

### 7. エネルギーシステムレジリエンス

気候変動対策強化とともに、リーマンショックや東日本大震災を踏まえ、エネルギーシステムの強靱化、すなわち、リスクに対する備えの重要性が強く認識されつつある。有事や災害に伴う外乱や変動(燃料供給途絶、原発停止、原油価格急騰など)が発生しても、エネルギーの安定供給が確保され、社会経済活動を滞りなく維持することが重要となる。様々なリスク、変化する社会経済環境の中で、エネルギーシステムが機能を維持、発展するために必要な対策を横断的に考えることが必要であり、エネルギーのリスクマネジメントに対する新たなアプローチが重要である。このような視点からみれば、経済や環境の観点で持続可能なエネルギーシステムを構築するためには、主に以下の2点の特性(「エネルギーシステムレジリエンス」と定義する)を併せ持つエネルギーシステムの構築が重要となる。

- 有事、災害に伴う外乱や変動(燃料供給途絶、原発停止、原油価格高騰など)がエネルギーシステムに与える影響を吸収し、早期に回復できるシステムの能力
- 気候変動や資源枯渇など長期にわたる緩やかな環境変化にも適応できるシステムの能力

前者の特性を強化するためには、多様化、冗長化、緊急時対応能力の強化等が重要な政策課題となる。エネルギーシステムの多様化を図るためには分散型電源の拡大など、冗長化のためには石油備蓄・天然ガス備蓄やエネルギーインフラの整備など、緊急時対応能力強化のためには緊急時需給調整などの整備強化などが挙げられる。現在日本では、長期的

に石油依存度を低減する政策がとられているが、東日本大震災では災害救助や復旧、緊急時における発電用燃料として石油が不可欠な資源であることが強く再認識された。緊急時に必要不可欠な石油を、気候変動やエネルギー安全保障といった政策の中でどのように位置づけるのか、バランスをとるのかが、今後の重要な研究課題の一例として挙げられる。



図8 エネルギーシステムレジリエンスの概念図

また後者の特性を強化するには、持続可能性、自給率、経済性向上を目的として、CO<sub>2</sub> 回収貯留技術や革新的原子力技術などの低炭素化技術の開発が重要であると考えられる。

有事、災害に伴う外乱や変動にも速やかに対応可能で、なおかつ、長期にわたる緩やかな環境変化にも適応可能なシステムを、技術や政策のベストミックスで実現するビジョンを示すことが、重要な研究課題として考えられる。また、長期的なエネルギー需給見通しを考える上で、単に各エネルギー源の比率など表面上の数値のみを論じるのではなく、そのエネルギー構成の「レジリエンス」の評価も重要であることに留意する必要がある。