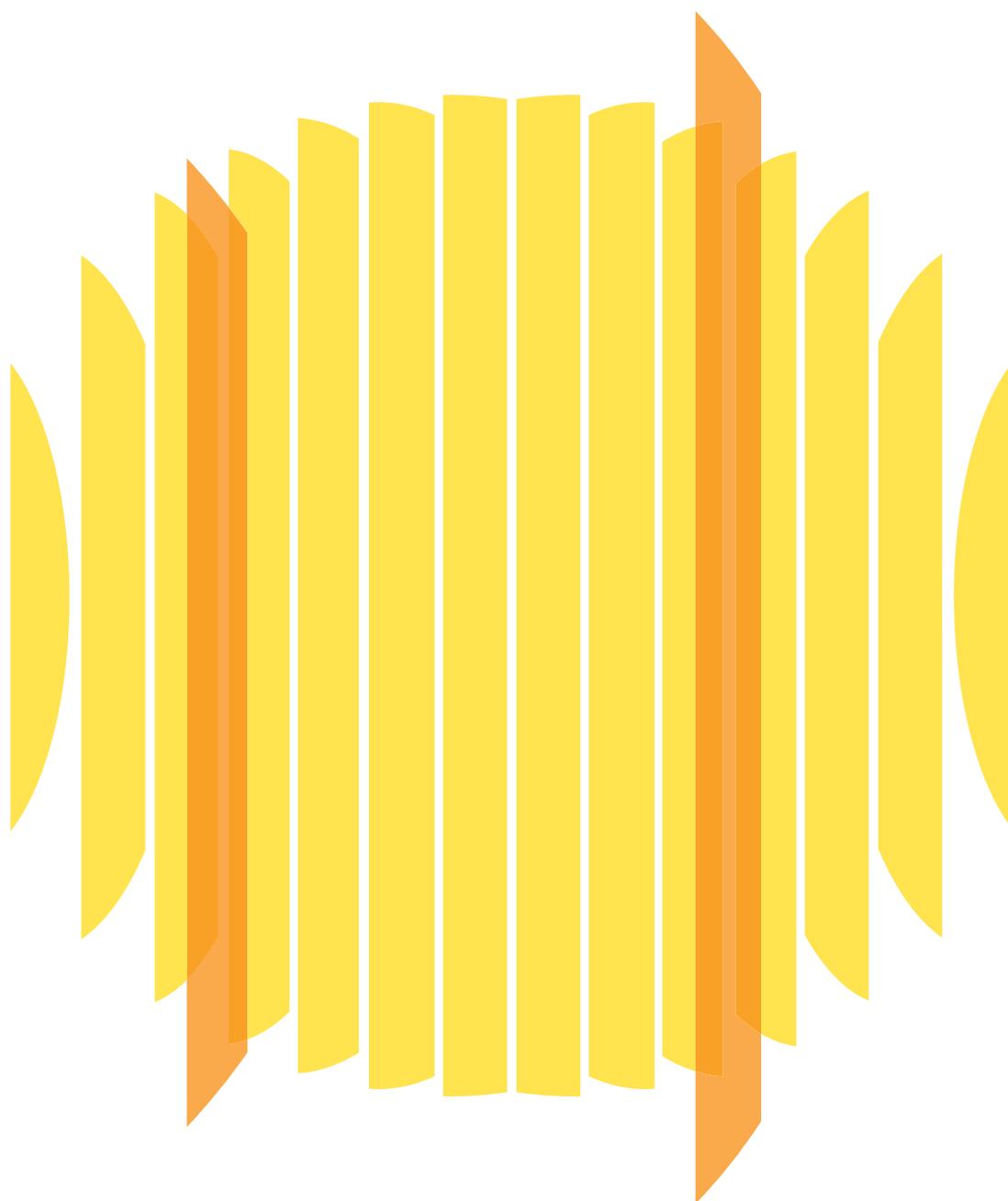


季報 エネルギー総合工学

Vol. 44 No. 3 2021. 10



一般財団法人 エネルギー総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

【巻頭言】

カーボンニュートラルに関する出版にあたって

(一財) エネルギー総合工学研究所 研究理事 黒沢 厚志 …………… 1

【寄稿】

バイデン新政権の誕生, 脱炭酸ガスへの動きと

米国のシェール・ガス革命, シェール・オイル革命の最新動向

和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一 …………… 3

【調査研究報告】

COVID-19 対策に伴う社会経済活動の変化と

そのエネルギー需要への影響

プロジェクト試験研究部 主任研究員 井上 智弘 …………… 26

【調査研究報告】

2050 年カーボンニュートラルを目指す欧州連合の

エネルギー戦略と CCUS 取り組み状況

プロジェクト試験研究部 部長 橋崎 克雄 …………… 37

【調査研究報告】

多様性を増す蓄エネルギー技術～再エネ大量導入時代の選択肢～

プロジェクト試験研究部 副部長 主管研究員 川村 太郎

プロジェクト試験研究部 主管研究員 岡崎 徹

プロジェクト試験研究部 主任研究員 徳永 貴道

プロジェクト試験研究部 副参事 渡邊 建次 …………… 47

【研究所のうごき】 …………… 57

【編集後記】 …………… 60

巻頭言

カーボンニュートラルに関する出版にあたって

黒沢 厚志 (一財) エネルギー総合工学研究所
研究理事



近年、地球温暖化問題がますます強く意識され、2015年に採択されたパリ協定を受け、世界各国で、今世紀中葉にCO₂などの温室効果ガス排出量実質ゼロが目標として示されている。わが国でも、2020年10月に菅首相が「カーボンニュートラル宣言」を行い、2050年における排出量実質ゼロ（ネットゼロ排出）を目指すことになった。また、新しいエネルギー基本計画を踏まえた2030年の温室効果ガス排出量は、2013年比で46%削減とする新しい中間目標も提示された。

1970年代のオイルショック、2011年の東日本大震災などは、社会やエネルギーの方向性を根本的に大きく変えた。「カーボンニュートラル社会」への移行は、気候変動の影響を抜本的に低減するため、温室効果ガス排出のトレンドを増加からピークアウト、さらに減少に向かわせることを世界全体の方向性とするという、新しい社会的なターニングポイントである。

ネットゼロ排出の達成は、負の排出であるネガティブエミッション技術の採用や、各種技術の大量導入が必須になるなどの点で、従来の取り組みと比較して、質および量の両面で大きく異なったアプローチが必要となる。カーボンニュートラルのコンセプトは、エネルギー政策やビジネスの方向性を抜本的に変え、化石燃料に依存してきた産業の脱炭素システムへの移行や、移動や居住といったライフスタイルの変革にまで影響を与える。低炭素から脱炭素へ向かう「トランジションシナリオ」の実現は容易ではないが、同時にエネルギーセキュリティ、経済効率性および安全性といった環境以外の目標の重要性が低下したわけではない。技術と制度に関する方策を総動員するとともに、企業や消費者を含めた社会的な取り組みが必須である。

当研究所では、これまで行ってきた研究部門の幅広い知見を総括して情報発信することにより社会貢献を行うため、本年9月に『図解でわかるカーボンニュートラル』を技術評論社から出版した。本書は、視点を、昨年出版した『図解でわかるカーボンリサイクル』

で取り上げた炭素資源循環からエネルギー全体に拡大し、カーボンニュートラル実現技術の現状と将来展望、およびその背景について、幅広い読者を対象として解説したものである。本書では、世界や主要国のカーボンニュートラル目標を概説し、エネルギー供給として再生可能エネルギー、原子力、炭素資源利用について述べるとともに、エネルギーキャリアやシステムの視点からは、電力システム、水素、エネルギー貯蔵、ネガティブエミッションについて触れた。また、運輸・民生・産業のエネルギー需要についても解説した。さらに、カーボンニュートラル取り組み事例、ファイナンスにも言及した。

是非、ご一読いただき、カーボンニュートラルを考える上でのご参考にしていただくとともに、率直なご意見をいただければ幸いである。

[寄稿]

バイデン新政権の誕生，脱炭酸ガスへの動きと，米国のシェール・ガス革命，シェール・オイル革命の最新動向

岩間 剛一（和光大学 経済経営学部 教授）



1. はじめに

世界は、2020年における新型コロナウイルスのパンデミック（世界的大流行）を経て、従来のエネルギー大量消費、炭酸ガス大量排出というライフ・スタイルを見直し、脱炭酸ガスへの動きを加速している。さらに、国際金融市場においても、ESG（環境・社会・企業統治）投資、SDGs（持続可能な開発目標）の考え方が浸透して、燃焼時に炭酸ガスを排出する石油、石炭、天然ガスをはじめとした化石燃料の開発への投資と融資を抑制する動きが強まっている。米国のシェール・ガス、シェール・オイル開発についても例外ではなく、米国の新規油田・新規天然ガス田開発への投資の抑制、融資審査の厳格化により、2021年春以降も、米国のシェール・オイルの生産量が伸び悩んでいる。他方、世界的なワクチン接種によって、経済活動が活発化し、人の行動制限が緩和され、自動車、航空機の利用が戻り、石油需要が増加している。

現在の人類の技術においては、自動車、航空機、船舶の燃料としては、量的にも、コスト的にも、石油以外に最適なエネルギーはない。もちろん、トウモロコシ等の穀物からつくるバイオ燃料は少量が生産されているものの、コスト的にも、量的にも、米国だけで1,000万バレル/日 (b/d) に達するガソリン需要を満たすことはできない。航空機用のジェット燃料についても、藻、木材等からバイオ燃料を生産する試験も行われているものの、石油

と比較して、10倍以上ものコストがかかり、現実的な燃料とはいえない。そのため、「脱炭酸ガス政策として期待される抑制された」石油供給と、「現実に求められている」石油需要の間に、乖離が発生し、「意図せざる」原油価格高騰が生じている。2021年9月時点において、米国の指標原油であるWTI（ウェスト・テキサス・インターメディアート）原油価格は70ドル/バレルを超え（図1参照）、米国のルイジアナ州ヘンリー・ハブ渡しの天然ガス価格は百万Btu（英国熱量単位）当り5ドルを超えている。極東アジアの液化天然ガス（LNG）スポット価格は百万Btu当り20ドル超、豪州のニューカッスル港渡しの発電用一般炭価格も1トン当り150ドル超と、2020年春のコロナ禍におけるマイナス原油価格の発生を経験して、資源エネルギー価格は高騰している。まさに、脱化石燃料政策の過度な実行が、石油、石炭をはじめとした化石燃料の供給を抑制し、逆に化石燃料価格の上昇をもたらすというジレンマが発生している。

米国のシェール・ガス、シェール・オイルの開発、生産についても、バイデン政権の誕生とともに、開発規制が強化され、シェール・ガスの生産量、シェール・オイルの生産量が伸び悩んでいる。従来は、サウジアラビアをはじめとした石油輸出国機構（OPEC）加盟国と、ロシアをはじめとした非OPEC加盟国によるOPECプラスが協調減産を行い、原油価格が上昇すると、米国のシェール・オイルの生産量が増加し、原油価格の上値を抑える



図1 主要原油価格の推移 (2008年1月～2021年8月)

役割を果たしてきた。しかし、バイデン政権の誕生と脱炭酸ガスへの動きにより、原油価格が上昇しても、米国のシェール・オイルの生産量が伸びにくくなっている。

以下、こうした米国のシェール・ガス、シェール・オイルの最新動向について考察する。

2. バイデン政権の誕生とカーボンニュートラル

2021年1月のバイデン米国大統領の誕生とともに、米国は、地球温暖化対策の国際的な枠組みであるパリ協定に復帰し、2050年にカーボンニュートラル（炭酸ガス排出実質ゼ

ロ：人為的な経済活動による炭酸ガス排出量と森林による炭酸ガス吸収量を等しくする）政策を打ち出した。

パリ協定は、地球の大気の気温上昇を、産業革命前から2℃未満、できれば1.5℃以内とすることを目標としており、地球の大気の気温上昇を1.5℃以内とするためには、21世紀の半ばには、炭酸ガスの濃度上昇を止める必要があり、そこから2050年におけるカーボンニュートラルが導き出されることとなる。地球の炭酸ガス濃度は、18世紀後半の産業革命前の280ppmから、2021年9月には410ppmを超えている（図2参照）。

2020年秋に行われた米国大統領選挙は、共

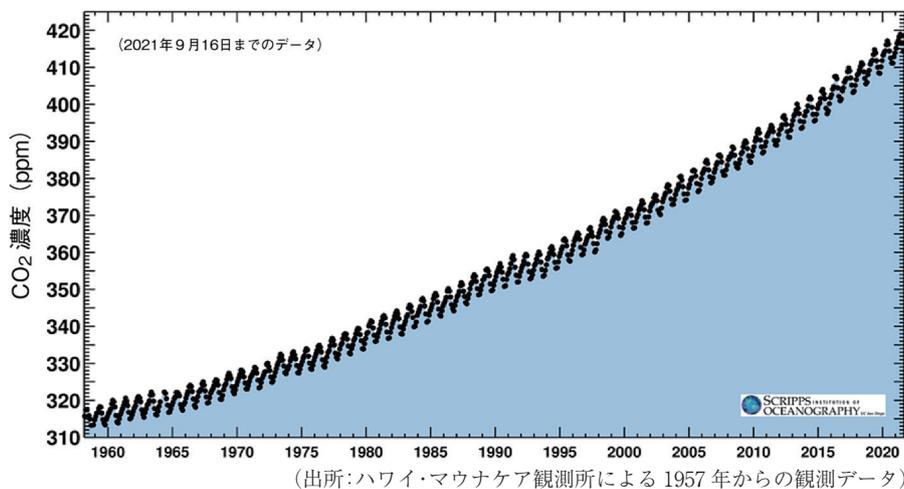


図2 地球の炭酸ガス濃度

和党トランプ候補と民主党バイデン候補の戦いというよりも、有権者の憎悪と偏見を煽り、白人の労働者の支持を集めるという選挙戦術をとり、異端の大統領ともよばれるトランプ候補の4年間の信任投票としての性格をもった。色々な意味において、トランプ米国前大統領が行ってきた政治手法、エネルギー政策、環境政策を含めた政策に対して、民主党支持者が危機感を持ち、民主党の穏健派から極端なりべラル左派の人々が結束して、トランプ候補の再選阻止で動いたことが、米国大統領選挙の実態である。そのため、バイデン新大統領とトランプ候補のエネルギー政策、環境政策は、大きく異なっている（表1参照）。

トランプ前大統領の政策は、端的に言えば、米国の保守的な白人層の意見を代表している。エネルギー業界寄りの政策を行い、シェール・オイル生産企業の幹部とも親密な関係を構築

している。人類の経済活動による地球温暖化はないという立場にあり、パリ協定は、米国の経済成長を阻害し、米国の雇用を減らすとして反対する。米国のシェール・ガス、シェール・オイルの生産拡大は、米国のエネルギーの自立を実現し、シェール・オイルの開発規制を緩和することによって、産油州の繁栄と雇用の創出をもたらすと考えている。

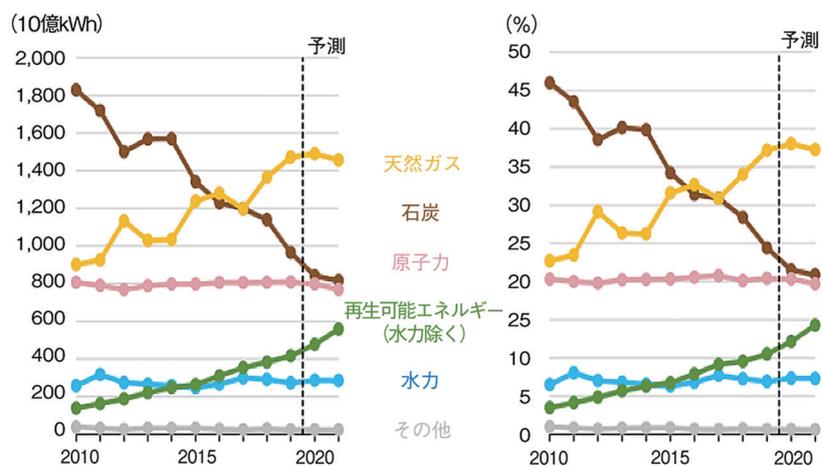
例えば、ノース・ダコタ州の経済も、バッケン・シェール・オイル油田の開発によって、大きな繁栄を遂げた。人為的な地球温暖化がない以上、石炭開発を制約する必要はなく、白人の石炭労働者の雇用を守ることを主張する。実際に、米国におけるシェール・ガス革命により、米国の天然ガス価格が下落し、米国の天然ガス火力発電が、石炭火力発電を追い抜き、米国の石炭産業と石炭労働者は苦境に陥った（図3参照）。

米国は、もともと世界最大の石炭埋蔵国と

表1 2020年大統領選におけるトランプ候補とバイデン候補の政策対立

	トランプ政権	バイデン政権
パリ協定	雇用を減らすことから離脱	地球環境保護のため復帰
化石燃料	石炭など化石燃料産業保護	環境インフラに4年間で2兆ドル投資
炭酸ガス	地球温暖化はない	2050年までにカーボンニュートラル
環境規制	オバマ政権時代の環境規制緩和	2035年までに発電部門からの炭酸ガス排出ゼロ
シェール・オイル	政府保有地の環境規制緩和	政府保有地の開発規制
自動車	排出ガス規制を緩和	電気自動車普及
再生可能エネルギー	安定供給を損なう	再生可能エネルギーに積極投資
人権外交	権威主義的政権との融和	人権保護を強調
イラン	核合意破棄	核合意復帰

(出所：各種新聞報道)



(出所：米国エネルギー情報局 (EIA) 統計)

図3 米国の電源構成

して、電力の5割を石炭火力発電が占めていた。しかし、シェール・ガス革命により、天然ガス火力のコスト競争力が増し、石炭火力発電は、天然ガス火力発電に対するコスト競争力を失い、脱炭酸ガスの動きも加わって、2020年の電源構成に占めるシェアは25%を割り込んでいる。米国の石炭生産量は、2005年と比較して、2020年は半分以下にまで落ち込み、米国の石炭産業と石炭労働者は、深刻な雇用の危機に直面している（図4参照）。

米国の新自由主義経済学は、国際競争力を失った産業から、成長性のある産業へと労働者が転職することによって、経済成長を実現し、資源配分の最適化が達成できると主張してきた。しかし、20年間～30年間と米国の鉱山労働に従事してきた白人の石炭労働者に対して、「石炭労働者から転職して、カリフォルニア州のシリコン・バレーのIT技術者としてベンチャー企業の成功者を目指せ」と言っても、それは事実上不可能である。IT企業、電気自動車企業、再生可能エネルギー（再エネ）企業の成功と、ベンチャー企業に相次いで富裕層が誕生する社会において、石炭労働者は、米国社会から取り残されたという不満が強くなるだけである。

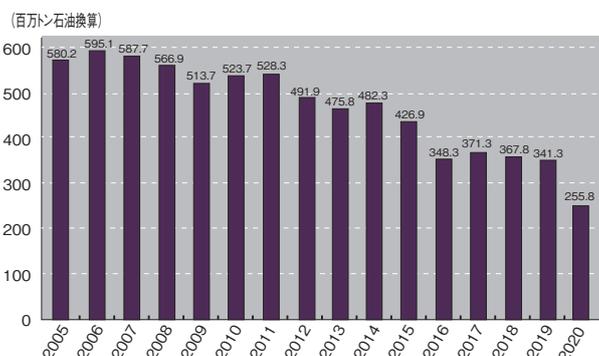
こうした危機に直面した石炭産業と石炭労働者に対して、救いの手を差し伸べたのがトランプ前大統領であった。トランプ前大統領は、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命が、米国の繁栄をもたらす反面、白人保守層が中心

として働く石炭産業が繁栄から取り残されて、不満を募らせていることを見抜いていた。

さらに、トランプ前大統領は、石油の消費量の減少につながりかねない再エネの普及についても、地球温暖化対策のもと、再エネを促進することは、電力の安定供給を阻害するとして、慎重な姿勢を示している。2021年冬に勃発したテキサス州の電力危機についても、過度な風力発電の普及により、未曾有の寒波の来襲により、風力発電機が凍結したことにより、電力不足が発生したのであり、自然の猛威に左右される再エネの普及ではなく、供給の安定性がある石油、石炭、天然ガスを利用すべきであるとしている。さらに、エネルギー業界寄りの政策とともに、米国の国民生活に直結するガソリン価格にも敏感であり、ガソリン価格の高騰につながる原油価格の上昇については、反民主主義的な政策、人権抑圧を欧米諸国から非難されるサウジアラビアのムハンマド皇太子とも融和的な政策を取り、原油価格の上昇を抑制するために、OPEC加盟国の協調減産に対して、米国大統領としては異例の介入を行い、米国国民の歓心を引きつける政策をとってきた。

それに対して、バイデン新大統領のエネルギー政策は、トランプ前大統領の政策とは180度異なる（表2参照）。

バイデン大統領は、もともと民主党の穏健派に位置し、トランプ前大統領のエネルギー政策から、極端な政策変更を行わず、穏健な



（出所：BP統計，2021年7月）

図4 米国の石炭生産量推移

表2 バイデン政権のエネルギー政策（2021年）

項目	概要
シェール・オイル	政府保有地の開発規制強化
シェール・ガス	政府保有地の水圧破砕の禁止
油田開発	油田開発時のメタン排出規制強化
LNG プロジェクト	LNG 輸出は米国の貿易収支改善となる
パイプライン	原油・天然ガスを輸送するパイプライン環境規制
石炭	石炭火力発電の排出規制
発電部門	2030年までに炭酸ガス排出ネット・ゼロ
エネルギー全般	再生可能エネルギーに2兆ドル投資
原油価格	OPEC プラスに強硬に介入しない
新型コロナウイルス対策	新型コロナウイルス感染拡大防止に万全
自動車	電気自動車の普及に補助金
気候変動	大統領就任とともにパリ協定復帰
水素	水素社会の実現
再生可能エネルギー	再生可能エネルギーを主力に
環境保護庁	地球温暖化対策は人類の課題

（出所：各種新聞報道）

政策を続けると考えられてきた。しかし、バーニー・サンダースをはじめとした民主党環境左派の支持を受けて民主党が一致して大統領選挙を勝利した経緯もあり、予想よりも気候変動対策に軸足を置いたエネルギー政策、環境政策等のリベラルな政策を行っている。政権発足とともに、パリ協定に復帰し、世界の脱炭酸ガス政策を主導することを表明し、政府保有地における、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発の規制を強化する動きを見せている。バイデン大統領は、トランプ前大統領とは異なった、リベラルな立場を鮮明にしており、黒人、ヒスパニック、女性等のマイノリティーの権利を擁護し、多様性を重視する立場にある。そのため、主要閣僚についても、女性、黒人、アジア系等のマイノリティーの登用を行っている（表3参照）。

トランプ前大統領が、国務長官に、石油メジャーのエクソンモービルの最高経営責任者（CEO）だったレックス・テイラーソンを指名し、エネルギー業界支持を前面に打ち出したのとは対照的に、バイデン大統領は、アジア系の黒人女性、カマラ・ハリスを副大統領に指名し、マイノリティー支持を鮮明にしている。バイデン大統領の政策は、民主党リベラルに位置し、炭酸ガス排出による地球温暖化は人類にとって大きな課題であり、女性、黒人等のマイノリティーの権利を尊重し、シェール・オイルをはじめとした化石燃料の大量消費を基礎としたライフ・スタイルの変革を求め、発電部門においては、2035年に炭酸ガス排出ネット・ゼロを掲げ、太陽光発電、風力発電をはじめとした再生可能エネルギーに2兆ドルの投資を行い、炭酸ガスを排出し

表3 バイデン政権の主要閣僚（2021年）

閣僚	現職	来歴
副大統領	カマラ・ハリス	インド系黒人、女性
国務長官	アントニ・ブリンケン	元国務副長官
国家政策会議委員長	スーザン・ライス	黒人、女性、元国連大使
国防長官	ロイド・オースティン	黒人、元中央軍司令官
財務長官	ジャネット・イエレン	女性、元連邦準備制度理事会（FRB）議長
米通商代表部（USTR）代表	キャサリン・タイ	アジア系女性
厚生長官	ハビエル・ペセラ	ヒスパニック、カリフォルニア州司法長官

（出所：各種新聞報道）

ない電気自動車を増加させ、地球環境保護と経済成長を両立させる産業の創出を行う。さらに、トランプ前大統領とは異なり、権威主義的な体制を維持する中東産油国とは距離をとり、原油価格の上昇を抑制するために、OPEC加盟国に積極的な働きかけを行うことはせず、米国の石油・天然ガス企業とも親密な関係を構築しない。そして、トランプ前大統領は正反対の意欲的な脱炭素政策を行うことを表明している（表4参照）。

表4 バイデン政権の脱炭素政策（2021年）

概要
● 気候変動対策を外交の中心に
● 気候変動サミットの開催
● 温暖化ガス排出削減目標の設定
● 2035年までに発電部門の炭酸ガス排出ネット・ゼロ
● 政府保有地における石油・天然ガスの新規開発停止
● 洋上風力発電を2030年までに2倍

（出所：各種新聞報道）

上述のように、バイデン大統領は、かなり意欲的な脱炭酸ガス政策を表明しており、脱石油、脱炭素、脱ガソリン車への動きに対して、テキサス州等の産油州は反発を強めている。もともとテキサス州、ルイジアナ州、オクラホマ州等の産油州は、共和党の支持基盤であり、バイデン大統領の過度ともいえる脱炭素政策、脱化石燃料政策によって、石油企業の株価は低迷し、シェール・オイルの新規開発への投資資金調達が難しくなり、テスラ等の電気自動車企業、再エネ関連企業の株価が高騰している。

シェール・ガス革命、シェール・オイル革命によって、中東への関心が低下し、中東の安全保障のために、巨額の軍事費を投入し、米兵の生命を危険にさらす必要はないという政策により、アフガニスタンから撤退政策を行った。その結果として、2兆ドル（約220兆円）もの軍事費を投入した20年にわたるアフガニスタンとの戦いも、米国の事実上の敗北に終わり、米国の威信は大きく傷ついた。米軍の撤収にあたり、イスラム教原理主義組

織による自爆テロによって、米兵の犠牲者を多数だすこととなり、米国の保守派の反発が拡大し、2022年の中間選挙においては、民主党が敗北する可能性が強まっている。

3. 新型コロナウイルス禍からのシェール・ガス、シェール・オイルの動き

新型コロナウイルスのパンデミックは、世界経済のみならず、エネルギー政策、環境政策にも大きな変革をもたらしている。21世紀の高度文明社会においても、新型コロナウイルスの感染拡大に対しては、ヒトの動きをとめ、ヒトとヒトとの接触を回避するという前近代的な対策しか方法がない。ワクチン接種が始まっているとしても、ワクチン接種後も、ブレーク・スルー感染があり、ワクチン接種が普及したイスラエルにおいても、感染爆発が発生しており、ヒトの行動制限が必要とされる。ヒトの行動が制約されると、自動車用ガソリン、航空機用ジェット燃料の需要が減少する。石油の用途の6割は、自動車用ガソリンをはじめとした輸送用燃料であり、世界の石油需要は減少する。2020年第2四半期には、2,000万b/d～3,000万b/dもの石油需要が一瞬で蒸発した（図5参照）。

新型コロナウイルスの感染拡大にもかかわらず、2020年春のOPECプラスの協調減産交渉は決裂し、サウジアラビア、ロシア、米国は、2020年4月に1,000万b/dを超える原油生産競争を行ったことから、国際石油需給は大幅に緩和し、WTI原油先物市場において、2020年4月20日の決済期日に、原油先物の買い手である投機資金は、現物の受け取りに窮して、先物における投げ売りをを行い、終値がマイナス37.63ドル/バレルと歴史上初めてのマイナス原油価格が発生した。マイナス原油価格は、国際原油市場に大きな衝撃を与え、2020年5月には、OPECプラスは、970万b/dという過去最大の協調減産を実施し、原油価格は回復基調となった。しかし、2020年を通じ

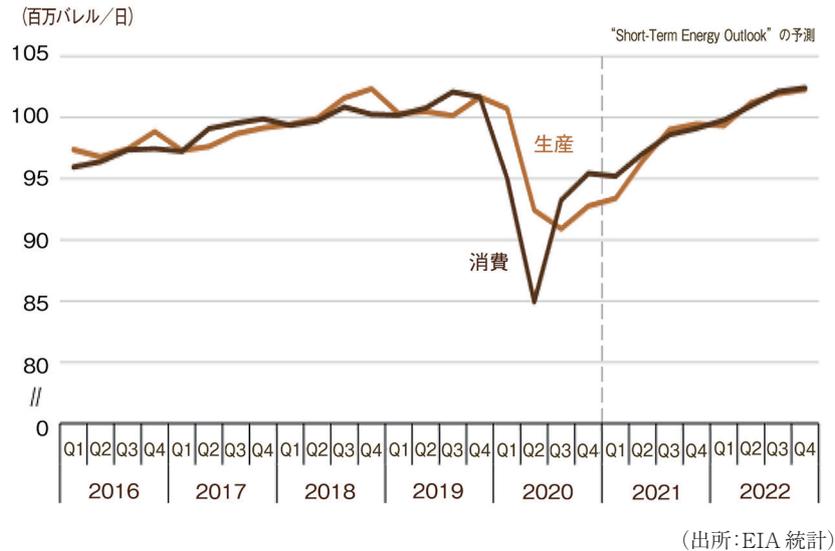


図5 世界の石油需給

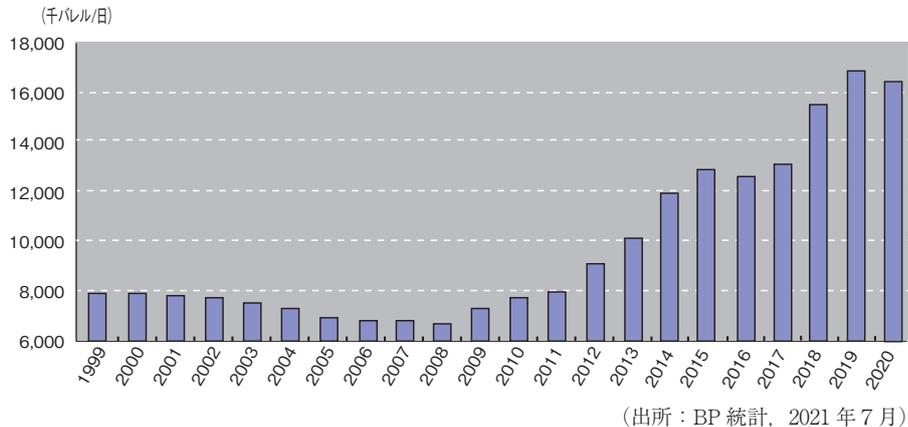


図6 米国の原油生産量推移 (1999年～2020年)

た原油価格の低迷により、米国の原油生産量は、2020年には減少している（図6参照）。

新型コロナウイルスの感染拡大にともなう原油価格の下落により、米国におけるシェール・オイル、シェール・ガスの開発活動は停滞し、米国の原油生産量は、2020年に減少したものの、2020年における米国の原油生産量は1,100万 b/d を超え、天然ガス液 (NGL) を含めた石油生産量は1,600万 b/d を超えていることから、サウジアラビア、ロシアの二大産油国をおさえて、米国は依然として世界最大の原油生産国としての位置を守っている（図7参照）。

さらに、原油生産量に天然ガス生産量を加えた石油・天然ガス・エネルギー生産量も、

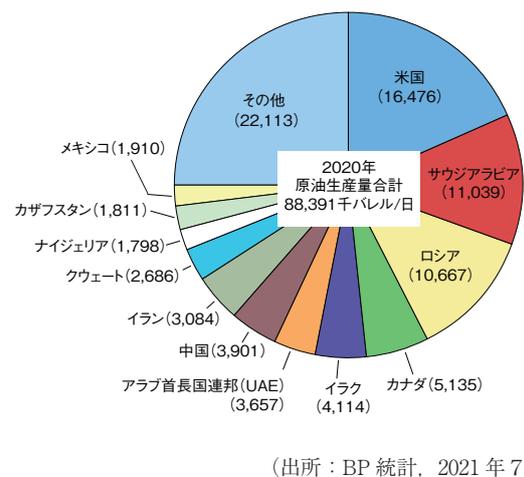


図7 国別原油生産量 (2020年)

ロシア、サウジアラビアを抜き、世界最大の地位を誇っている（図8参照）。

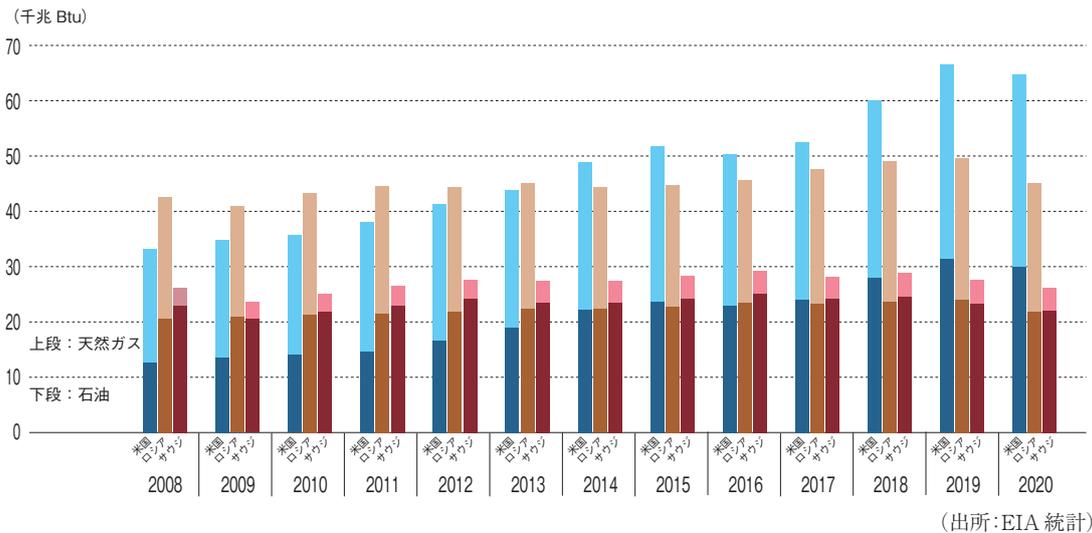


図8 主要国（米国，ロシア，サウジアラビア）の石油・天然ガス生産量比較

4. 米国を震源地とするシェール・ガス革命，シェール・オイル革命の留意点

2021年9月時点における，米国を震源地としたシェール・ガス革命，シェール・オイル革命の3つのポイントは，第一に主として米国においてのみ成功した，現実の石油・天然ガス革命であり，米国を世界最大の原油生産国，天然ガス生産国におしあげたこと。中国等においても，シェール・ガス開発が行われているものの，中国の地質構造が複雑であり，大きな埋蔵量を把握できないという技術的な課題もあって，現時点においては顕著な成果

を取っていない。第二に米国は，世界最大の石油消費国，天然ガス消費国として，中東からの原油輸入に大きく依存していた。しかし，米国は2019年にはエネルギーの自立を果たし，サウジアラビアをはじめとした中東産油国からの原油輸入が，急速に減少している。最新のEIAの統計によると，米国は，2005年に1,010万b/dの原油を輸入し，その48%はOPEC加盟国から輸入していた。それに対して，2020年の原油輸入量は590万b/dに減少し，OPEC加盟国が占める割合は14%に過ぎない（図9参照）。

中東の原油に依存する必要性がなくなると，

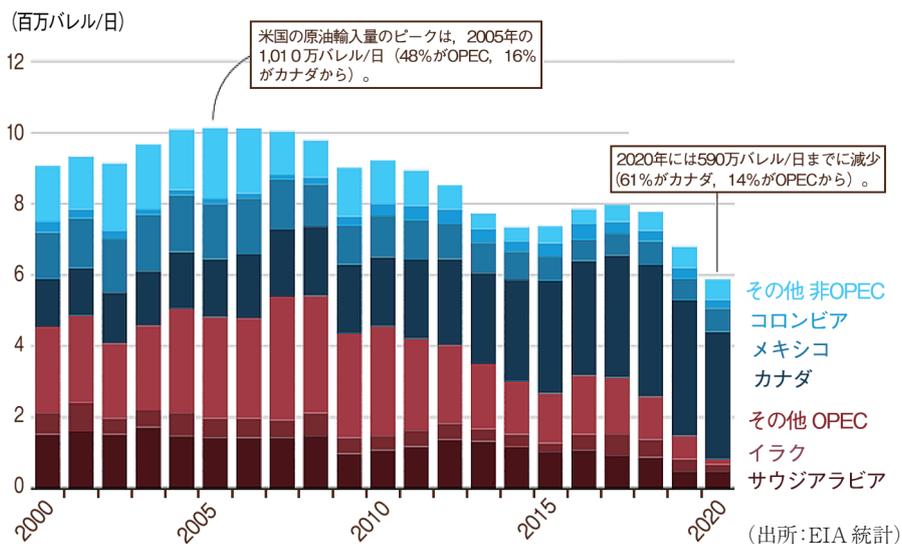


図9 米国の原油輸入量の推移

中東の安全保障に対する関心も低下する。1991年の湾岸戦争、2003年のイラク戦争は、米国が中東からの石油の安定供給を守ることを目的とした、「石油のための戦争」であった。しかし、中東の石油に依存する必要がなくなると、巨額の軍事費を投入し、米国人の生命を危険にさらしてまで、中東地域の安定に米国が関与する必要はないという議論が強まる。こうした議論は、日本のエネルギー安全保障にも大きなインパクトを与える。米国が、中東産原油依存から脱却したこととは対照的に、日本は原油輸入の8割以上を中東産油国からの輸入に依存している（図10参照）。

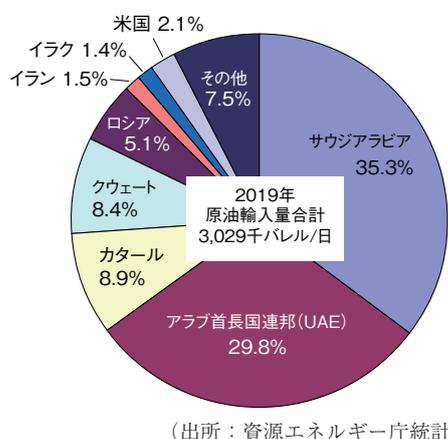


図10 日本の国別原油輸入割合（2019年）

日本は、これまで米国の軍事力という傘のもと、中東産油国からの原油輸入を安定的に行い、いわば米国の安全保障政策にタダ乗りしてきた面がある。しかし、米国による中東の安全保障への関与が低下すると、米国の政策担当者から、中東の原油を必要とする国（つまり日本）が、自ら安全保障への負担をすべきであるという議論となり、日本はホルムズ海峡通過リスク、石油タンカーへのミサイル攻撃への自衛隊の派遣等、新たな安全保障政策と巨額の財政負担を考える必要がでてくる。つまり、米国のシェール・オイル革命による米国のエネルギーの自立は、日本の外交政策、エネルギー安全保障政策をも揺るがす結果をもたらす。また、こうした世論を背景として、

米国は、シリア、アフغانستان、イラク等に駐留する米軍を撤退させるという政策をとっている。しかし、米国の強大な軍事力によって、かろうじて安定していた中東地域の情勢は、米軍の撤退によって不安定化する。2021年8月に実施された、アフغانستانからの米軍撤退においても、欧米諸国の想定を上回るスピードで、親米政権が崩壊し、イスラム主義組織タリバンが国家を掌握し、周辺地域においても、イスラム原理主義にもとづくテロ組織の動きが活発化している。9.11同時多発テロから20年を経過し、2兆ドルという巨額の軍事費を投入し、テロの撲滅、民主主義の定着を目指したことは、中東地域の安定を通じて、米国が中東の石油を確実に調達することも、大きな目的であった。しかし、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、米国のエネルギー安全保障の基盤を強固なものとした反面、中東地域の今後の不透明感を増すという皮肉な結果となっている。

他方、米国は、シェール・ガス、シェール・オイルの輸出拡大によって、貿易収支が改善している。シェール・ガスを原料としたLNGの輸出、シェール・オイルの輸出によって、エネルギー部門の貿易収支は、1975年以来の黒字となっている（図11参照）。米国がエネルギーの自立を果たし、貿易収支が改善することは、米国経済をより強靱なものとする。その反面、米国が海外からの輸入に依存しなくなると、米国国内だけにこもる米国第一主義、内向き指向となる。トランプ前大統領が主張してきたように、米国だけが世界の安全保障の負担を行い、米国国民が他国のために損を被ることがないように、日本、ドイツをはじめとした同盟国も、世界の安全保障に対する応分の負担を求める考え方は、バイデン大統領も踏襲している。

シェール・ガス革命、シェール・オイル革命によって、米国が中東地域に資金と軍事力を投入する必要がなくなり、新たに直面する中国の脅威に対しては、日本、英国、豪州等

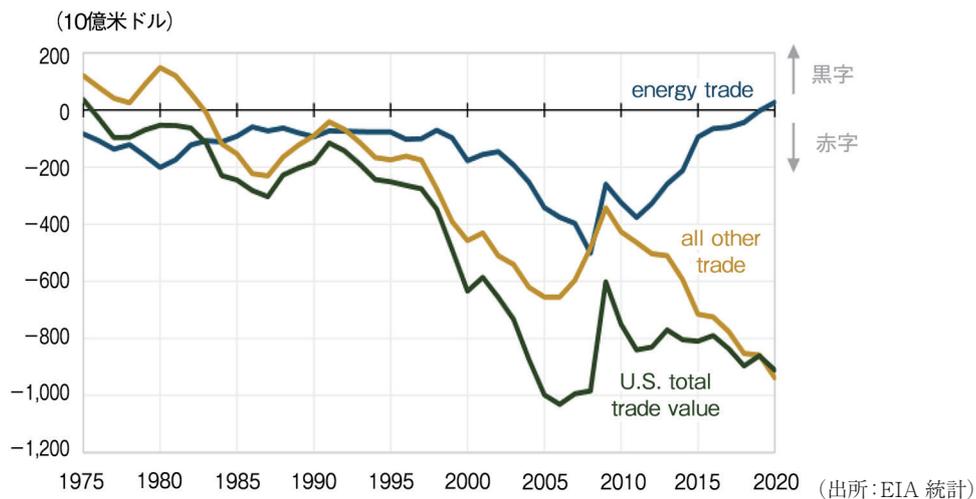


図 11 米国の貿易収支

の民主主義の価値観をともにする国々と負担を分け合いながら、米国が中国と対峙するという点は、バイデン大統領も、トランプ前大統領と同じである。米国は、1957年以來62年ぶりに、石油、天然ガスをはじめとしたエネルギー生産がエネルギー消費を上回った(図12参照)。

エネルギーと食糧という、人間が生きていくうえでもっとも重要なものを100%自給できた米国は、他国との外交関係を気にすることなく、保護貿易主義に傾き、政策の軸足を

国内に向ける。2016年のトランプ前大統領の勝利によって明白となった国内世論の分断、格差の拡大という状況において、「世界のためではなく、米国国民のために」政治を行うという色彩を強くしている。こうした姿勢は、トランプ前大統領とは異なり、イランとの核合意復帰をはじめ、国際協調を重視するバイデン大統領も基本的には変わらない。日本も、米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命を経て、新たな外交を求められている。

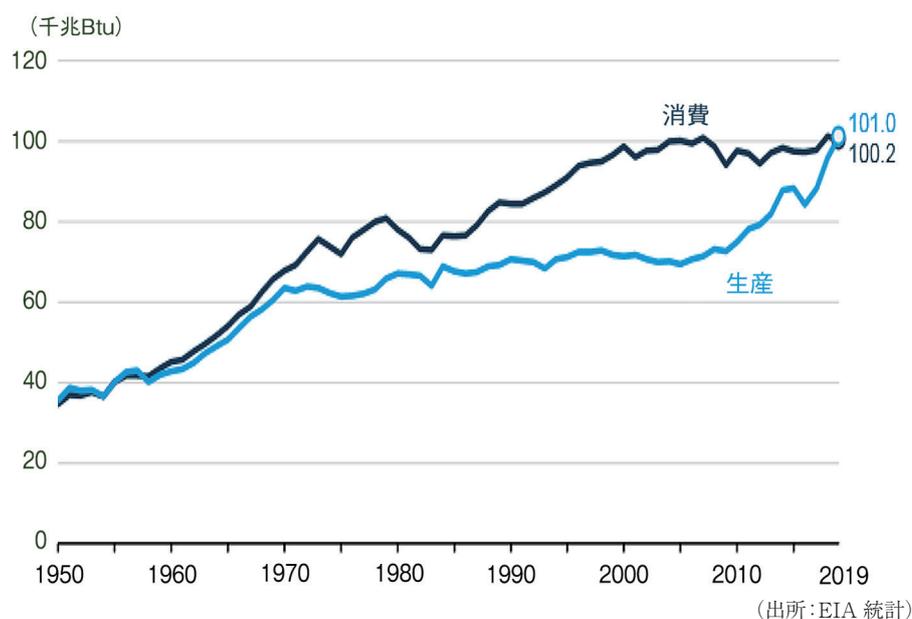


図 12 米国のエネルギー生産とエネルギー消費

5. シェール・ガス, シェール・オイル 開発の今後

米国は、石油と天然ガスの100%自給を達成したものの、2021年の足元においては、シェール・オイルの生産が伸び悩んでいる。2020年における、新型コロナウイルスの感染拡大による石油需要の減少、原油価格の低迷により、2020年の米国の原油生産量は、2019年の1,220万b/dから2020年には100万b/d程度減少し、1,130万b/dにとどまっている(図13参照)。

2021年9月時点においても、米国のシェール・オイルの開発活動は活発ではなく、原油価格の上昇にもかかわらず、シェール・オイルの生産量は、顕著に増加していない。今後のシェール・ガス、シェール・オイルの生産

については、エネルギーの専門家の間では、強気と弱気の両方の見方がある。強気の見方としては、①米国においては、依然として有望なシェール・オイル鉱区が数多くあり、今後の開発活動によって、2021年秋以降は、米国の原油生産量は1,300万b/dを超える。②米国のリグ(新規油田開発のための掘削装置)の稼働数は伸び悩んでいるものの、新規の1井戸当りの生産性は向上しており、より効率良くシェール・オイル生産ができるようになっており、等が挙げられる。米国のエネルギー情報局(EIA)も、2021年の最新の見通しにおいては、米国のシェール・オイルの開発が進展し、米国の原油生産量は1,400万b/dに達し、2050年まで、米国の原油生産は、好調が続くと見込んでいる(図14参照)。



図13 米国の原油生産量

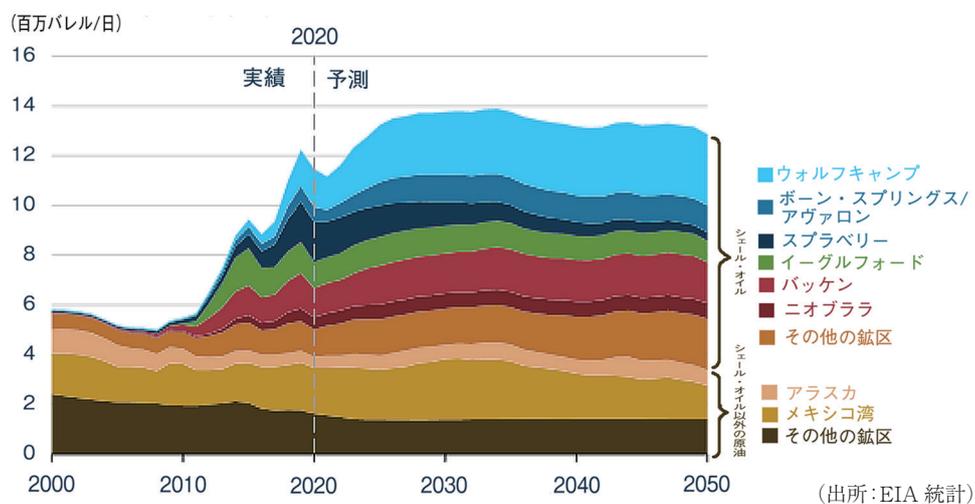


図14 米国の原油生産量見通し

他方、弱気の見方としては、①原油価格の低迷、脱炭酸ガスへの動きから、米国の中堅・中小石油企業は、資金調達に困難を抱えており、新規のシェール・オイル油田の開発が停滞すること。②米国の金融市場が、シェール・オイル生産企業を、「炭素銘柄」として低く評価し、株価も低迷して、シェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業が、新規開発に慎重となり、米国のシェール・オイル生産量は伸び悩む。等が挙げられる。今後のシェール・ガス、シェール・オイルの開発については、①シェール・ガス、シェール・オイルの開発規制をはじめとした米国のエネルギー政策が、どのようなものとなるのか。②米国の金融機関・投資家が、シェール・オイル開発企業に対して、どのような投資・融資姿勢を示すのか。③カーボンニュートラルの動きにおいて、原油価格、天然ガス価格がどのように動くのか等によって、左右される面があると考えられる。しかし、米国においては、有望な鉱区は多く、以下に述べるように、割安となったシェール・ガス資産、シェール・オイル資産のM&A（合併・買収）が活発に行われている。

6. 割安となったシェール・オイル権益のM&Aの動き

2020年に原油価格が低迷し、油田開発の魅力が低下したと思われることが多いものの、逆に割安なシェール・ガス資産、シェール・オイル資産が増加したとして、シェブロン社をはじめとした石油企業は、シェール・ガス

鉱区、シェール・オイル鉱区のM&A（合併・買収）を活発化している（表5参照）。

シェブロン社、コノコフィリップス社をはじめとした石油メジャーは、新型コロナウイルスの感染拡大にともなう原油価格の低迷により、パーミアン鉱区をはじめとした優良なシェール・オイル鉱区を、割安な価格で取得できるとして、積極的な資産買収を行っている。

シェール・ガス、シェール・オイル資産の買い手にとっては、バッケン、イーグルフォード、パーミアンの「ビッグ・スリー」と呼ばれる優良鉱区は、これからのシェール・ガス生産、シェール・オイル生産のポテンシャルがあり、好条件で取得できると考えられる。他方、シェール・ガス、シェール・オイル資産の売り手としては、第一に、これまでのシェール・ガス・ブームの時期に高値で資産購入し、その後の原油価格、天然ガス価格の低迷により損失計上を余儀なくされたことから、買い手がいるうちに売り抜きたいという思惑がある。第二に、2021年9月のロイヤル・ダッチ・シェル社による、パーミアン鉱区の石油・天然ガス資産の95億ドル相当での売却に見られるように、欧州系の石油メジャーは、脱炭酸ガスの流れのなか、燃焼時に炭酸ガスを排出するシェール・ガス事業、シェール・オイル事業から撤退し、売却によって得た資金を、風力発電等の再エネ投資に振り向けたいという経営戦略をもっている（表6参照）。

エクソンモービル社をはじめとした石油メジャー（国際石油資本）では、米系のエクソンモービル社、シェブロン社等と、地球温暖

表5 シェール・ガス、シェール・オイルM&Aの最近の動き（2020年7月～2021年9月）

年 月	概 要
2020年7月	シェブロンがノーブル・エナジーを50億ドルで買収することを発表
9月	米国のデボンがWPXと合併、EOGリソースに次ぐ第2位企業に
10月	コノコフィリップスが、コンチョ・リソースを97億ドルで買収することを発表
10月	パイオニア・リソースが、45億ドルでパースリー・エナジーを買収することを発表
12月	ダイヤモンドバック・エナジーが、22億ドルでQEPリソースを買収することを発表
2021年4月	パイオニア・リソースが、64億ドルでダブルポイント・エナジーを買収することを発表
9月	シェルが、パーミアンの石油・天然ガス資産を95億ドルでコノコフィリップスに売却表明

表6 シェール・ガス, シェール・オイルの交錯する動き (2016年～2021年9月)

年 月	概 要
2016年1月	米国のシェール・オイル輸出開始
2月	シェニエールがシェール・ガスを原料としたLNG輸出開始
2月	エクソンモービルが120億ドルの社債発行計画, シェール権益取得
3月	グッドリッチ・ベトロリアムが利払い延期
4月	BPが中国のCNPCと四川省のシェール・ガス開発で提携
4月	グッドリッチ・ベトロリアム, エナジーXXIが経営破綻
4月	エクソンモービルが60年ぶりにトリプルAから格下げ
6月	パイオニア・ナチュラル・リソースがパーミアン鉱区を取得
6月	マラソンがオクラホマ州スタック鉱区を取得
6月	東京ガスがイーグルフォード鉱区を取得
9月	カナダのエンブリッジが, パイプライン企業スペクトラ・エナジーを280億ドル買収
9月	トータルがバーネット鉱区を追加取得
12月	三井物産が米国ペンシルバニア州のシェール・ガス権益を240億円で売却
2017年1月	エクソンモービルが, パーミアンのシェール・オイル鉱区を66億ドルで買収
2018年2月	エクソンモービルが米国国内のシェール・ガス, シェール・オイル開発に5年間500億ドル投資
3月	国際石油開発帝石がカナダのシェール・ガス事業で760億円の減損計上
3月	丸紅が米国のシェール・ガスとシェール・オイルの権益売却
6月	大阪ガスがテキサス州でシェール・ガス権益を取得
7月	住友商事が米国テキサス州のシェール・オイル権益を50億円で取得
7月	BHPビリトンが米国シェール事業をBP等に108億ドルで売却
2019年5月	シェブロンとオキシデンタルがアナダルコの争奪戦, オキシデンタルが買収
5月	サウジアラムコが, シェール・ガスを原料としたLNG権益を25%取得
8月	BPがアラスカ事業を売却し, シェール・オイル開発投資
12月	シェブロンがアパラチア鉱区等のシェール・オイル油田の100億ドルの減損計上
2020年4月	中堅石油企業のホワイティング・ベトロリアムが経営破綻
5月	エクソンモービル, シェブロンがパーミアン鉱区の開発投資を縮小
6月	名門石油企業チェサピークが連邦破産法11条の申請
7月	シェブロンがノーブル・エナジーを50億ドルで買収することを発表
7月	東京ガスが, シェール・ガス企業キャスルトン・リソースを子会社化
9月	住友商事がマーセラスのシェール・ガス権益を売却
9月	米国のデボンがWPXと合併, EOGリソースの次ぐ第2位企業に
10月	コノコフィリップスが, コンチョ・リソースを133億ドルで買収することを発表
10月	パイオニア・リソースが, 45億ドルでバースリー・エナジーを買収することを発表
12月	ダイヤモンドバック・エナジーが, 22億ドルでQEPリソースを買収することを発表
2021年4月	パイオニア・リソースが, 64億ドルでダブルポイント・エナジーを買収することを発表
9月	シェルが, パーミアン鉱区の石油・天然ガス資産を95億ドルでコノコフィリップスの売却表明

化対策を重視する欧州系のロイヤル・ダッチ・シェル社, BP社等とでは, シェール・ガス, シェール・オイルの開発について温度差がある。欧州系のBP社等は, 2020年頃から,

2050年にカーボンニュートラルを掲げている(表7参照)。ちなみに, 上述のScope 1, Scope 2, Scope 3等の定義は, 国際的に決められている(表8参照)

表7 欧米石油企業の脱炭酸ガス目標 (2021年)

企業名	概 要
レプソール	2019年に2050年までにカーボンニュートラル
BP	2020年8月にScope 3までネット・ゼロを表明
トータル	欧州地域のみScope 3
シェル	2050年までにScope 3でネット・ゼロ
エクソンモービル	Scope 1, Scope 2を目標
シェブロン	Scope 1, Scope 2を目標、株主総会はScope 3を対象に

表8 脱炭酸ガスの Scope の定義

レベル	概要
Scope 1	事業者自らによる温室効果ガス排出→燃料の燃焼, 生産プロセス
Scope 2	他社から供給された電気, 熱, 蒸気の使用による温室効果ガス排出
Scope 3 上流	購入した製品, サービスに関する温室効果ガス排出
Scope 3 下流	販売した製品, サービスに関する温室効果ガス排出→石油製品の消費者による燃焼

もっとも炭酸ガス排出ゼロを徹底した Scope 3 とは、石油企業が販売した石油製品の燃焼時に発生する炭酸ガスの排出までゼロとすることを意味し、シェール・オイル開発時に発生する炭酸ガスを回収して、地下貯留する CCS の 10 倍以上もの炭酸ガスの排出をゼロとする必要がある。

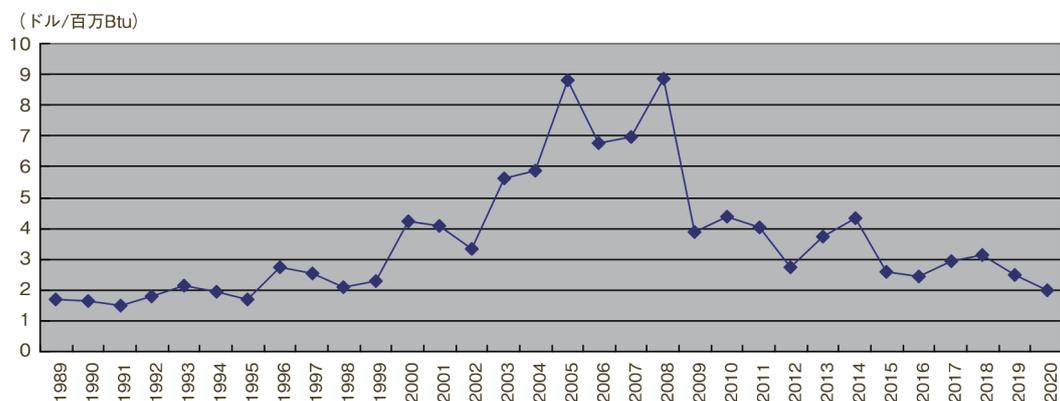
BP 社、ロイヤル・ダッチ・シェル社等の欧州系石油企業は、販売した石油製品、天然ガスを、企業、消費者が燃焼した場合の炭酸ガス排出もネット・ゼロとすることを目標としており、シェール・ガス鉱区、シェール・オイル鉱区を売却して、炭酸ガスを排出しないアンモニア、水素、再エネに注力する方向性を示している。

それに対して、エクソンモービル社、シェvron社等の米系石油企業は、シェール・ガス、シェール・オイルの生産時に発生する炭酸ガス排出をネット・ゼロとすることだけを表明しており、今後もシェール・ガス、シェール・オイルの販売が増加すると見込んでおり、シェール・ガス資産、シェール・オイル資産取得の好機と考え、資産購入を積極化している。

7. シェール・ガスを原料とした LNG 輸出の今後

米国においては、シェール・ガスの生産量の増加により、国内の天然ガス需給が緩和し、天然ガス在庫が増加した。歴史的に見ても、米国のヘンリー・ハブ渡しの天然ガス価格が大幅に下落するとともに（図 15 参照）、国内において消費しきれない余剰な天然ガスを原料として、LNG を生産し、アジア大洋州、欧州諸国に輸出する計画が相次いで立ち上がっている（表 9 参照）。米国の 2020 年の LNG 輸出量は、年間 4,476 万トンとなり、豪州、カタールに次ぐ世界第 3 位の LNG 輸出国にまで成長している。米国の LNG 生産能力は年間 1 億トンを超え、2025 年には豪州、カタールを抜いて、世界最大の LNG 輸出国となると予測されている。

現時点においても、米国の LNG 輸出量は、2020 年の米国国内のシェール・ガス生産量の 1 割程度にとどまり、米国国内の天然ガス需給を逼迫させ、天然ガス価格の上昇をもたらすような米国の消費者に不利益を与えるもの



(出所：BP 統計，2021 年 7 月)

図 15 米国の天然ガス価格 (ヘンリー・ハブ渡し)

表9 米国 LNG 輸出プロジェクト (2021 年)

地 域	プロジェクト名	事業主体	液化能力 (単位: 百万トン)
アラスカ	ケナイ LNG	コノコ・フィリップス, マラソン	20.0
ルイジアナ	サービンパス LNG	シェニエール・エナジー	22.5
テキサス	フリーポート LNG	フリーポート, 豪州マッコリー	13.9
テキサス	コルバス・クリスティー LNG	シェニエール・エナジー	9.0
ジョージア	エルバ・アイランド LNG	キンダー・モーガン	2.5
メリーランド	コーブ・ポイント LNG	ドミニオン	5.25
ルイジアナ	ドリフトウッド LNG	テルリアン	26.0
ルイジアナ	レイク・チャールズ LNG	サザン・ユニオン, シェル撤退 2020 年 4 月	15.0
テキサス	コルバス・クリスティー LNG	シェニエール・エナジー	4.5
ルイジアナ	キャメロン LNG	センブラ・エナジー	13.5
テキサス	ポート・アーサー LNG	センブラ・エナジー	11.0
テキサス	ゴールデン・パス LNG	エクソンモービル, QP	18.1
オレゴン	ベレセン LNG	ベレゼン	7.8

ではない。むしろ、米国の貿易収支を改善することが期待されている。米国が世界最大の LNG 輸出国となり、日本にとって有力な LNG 調達先となる意味は大きい。①米国は中東産油国と異なり地政学リスクが小さい。ホルムズ海峡、マラッカ海峡等、輸送上のチョークポイントがない。②ルイジアナ州ヘンリー・ハブ渡しの先物価格を指標とし、その価格に液化コストと輸送コストが上乗せされることから、価格の透明性が強まる。③また、豪州、中東から輸入する原油価格連動の LNG と競合させることによって、日本は価格スキームを多様化でき、国際原油価格の状況によって、より割安な LNG を機動的に購入することがで

きる。④転売を禁止する仕向け地条項がなく、米国から購入した LNG を、日本の LNG 需給状況、より有利な価格で転売できる地域に LNG を売却し、ディーリング益を上げることが可能となる。⑤必ず決められた数量の LNG を受け取る必要 (Take or Pay) がなく、スポット取引が多い。特に、太陽光発電、風力発電をはじめとした再エネの普及により、LNG 需給状況を前もって予想することが難しくなっている日本の電力企業は、米国の LNG を機動的に需給調整に活用することが可能となる。国際 LNG 市場において、スポット取引、短期取引は、増加基調にある (図 16 参照)。

米国の LNG 輸出は、2021 年時点において

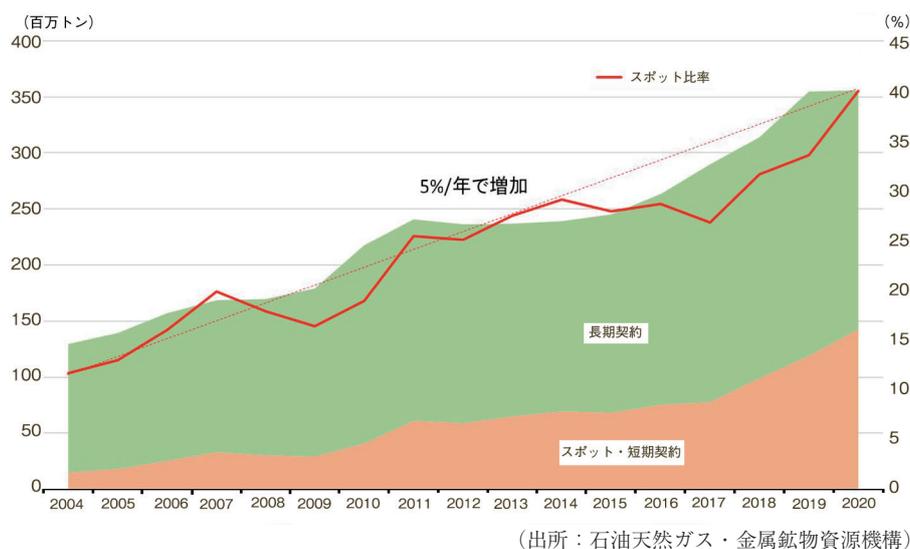


図 16 国際 LNG 市場のスポット取引の量と割合

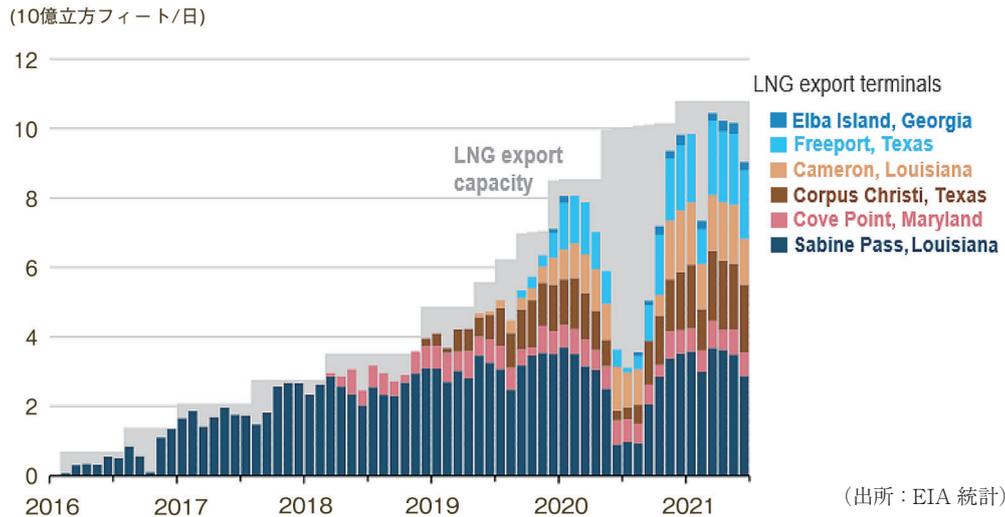


図 17 米国の LNG 輸出货量

も好調であり、2021 年上半期の LNG 輸出は、史上最高を記録している（図 17 参照）。

8. 脱炭素政策で逆に高騰した原油価格

米国において、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命が現実のものとなり、米国の原油生産量が増加し、米国のシェール・オイルの生産量増加に対抗するために、生産コストが割高な米国のシェール・オイル生産企業潰しを目的として、2014 年から始まったサウジアラビアをはじめとした OPEC 加盟国との消耗戦が続くなか、長期的な傾向としては、WTI 原油価格は下落基調となっていた（図 18 参照）。将来的にも、米国のシェール・オイルの生産量

増加が続く限り、原油価格は長期間にわたり低迷し、それに脱炭酸ガスの流れが加わるものと考えられてきた。

米国という新たな大産油国が誕生し、サウジアラビア、ロシアをはじめとした OPEC プラスとの消耗戦を続け、国際原油需給に余剰感が醸成され、原油価格が下落するなか、脱炭素政策が各国において強化されるようになると、米国のシェール・オイルは、座礁資産となると考えられるようになった。米国のシェール・ガス、シェール・オイルの資産価値が失われ、原油価格、天然ガス価格が暴落すると予測された。特に、新型コロナウイルスの感染拡大により、世界の石油需要は減退し、石油の大量消費というライフ・スタイル

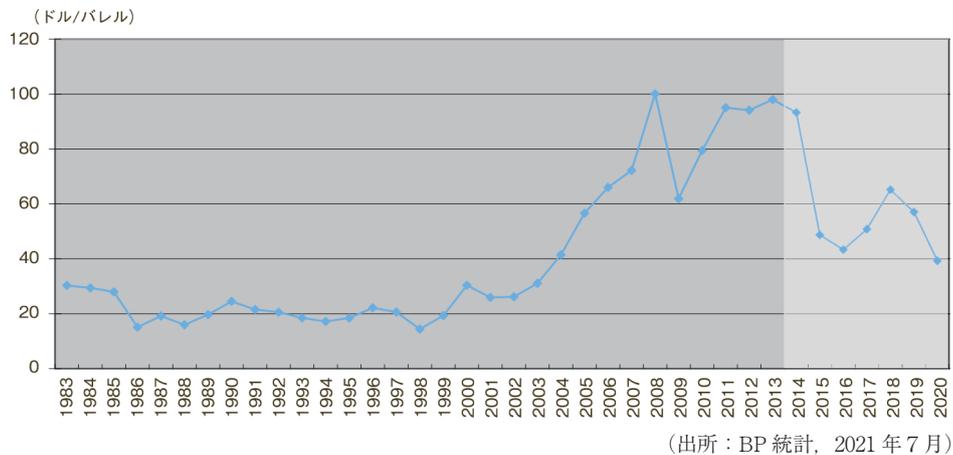


図 18 WTI 原油の価格推移

が見直され、世界は脱石油、脱シェール・オイルに向かうという見方が有力であった。

しかし、原油価格の下落論に対して、筆者は、2021年春ころから原油価格、天然ガス価格が上昇するのではないかという見方をしていた。現実には、2021年春以降から、原油価格、天然ガス価格は上昇基調にあり、2021年9月時点において、WTI原油価格は70ドル/バレルを超え、天然ガス先物価格は5ドル/百万Btuを超えている。これは、ハリケーンの来襲による米国南部産油州の油田の操業停止、コロナアル・パイプラインへのサイバー攻撃、2021年冬のテキサス州における歴史的寒波等の要因が重なっているものの、より構造的な要因として考えられるのは、2021年時点の人類の技術においては、自動車、航空機、船舶等の輸送用燃料としては石油以外に優れたエネルギーがなく、冷暖房用として、安価かつ出力変動がな

いエネルギーは天然ガス以外にないことから、「脱炭素の理念による石油・天然ガス供給抑制」と、「現実求められる石油・天然ガス需要」との乖離が発生していることが挙げられる。欧米先進国における、ワクチン接種により、世界経済は回復基調にある（表10参照）。

世界的な景気回復により、米国をはじめとした欧米先進国、中国をはじめとした途上国において、自動車用のガソリン需要、航空機用のジェット燃料需要が増加している。米国は、ワクチン接種により、人々の行動が活発化し、2021年夏のガソリン需要は1,000万b/dを超え、国内便の乗客の回復により、ジェット燃料需要も新型コロナウイルス感染拡大前のレベルまで戻りつつある（図19参照）。

航空業界において、脱炭酸ガス政策から、SAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能な航空燃料）と呼ばれる、藻、穀物、木材等か

表10 IMF世界経済見通し

(%)

	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
世界	3.4	3.2	3.8	3.6	2.8	-3.2	6.0	4.9
日本	1.1	1.0	1.9	0.3	0.0	-4.7	2.8	3.0
米国	2.6	1.5	2.2	2.9	2.2	-3.5	7.0	4.9
ユーロ	2.0	1.8	2.4	1.9	1.3	-6.5	4.6	4.3
中国	6.9	6.7	6.8	6.7	6.0	2.3	8.1	5.7
インド	8.0	7.1	7.2	6.1	4.0	-7.3	9.5	8.5
ブラジル	-3.8	-3.5	1.1	1.3	1.4	-4.1	5.3	1.9
アセアン5	4.9	4.9	5.3	5.3	4.9	-3.4	4.3	6.3
中東中央アジア	2.7	4.9	2.1	1.8	1.4	-2.6	4.0	3.7

(出所：国際通貨基金（IMF）『世界経済見通し』、2021年7月)

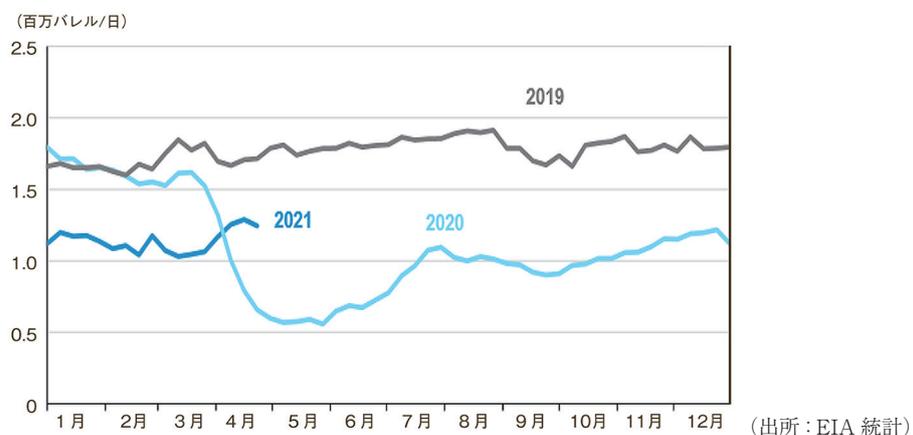


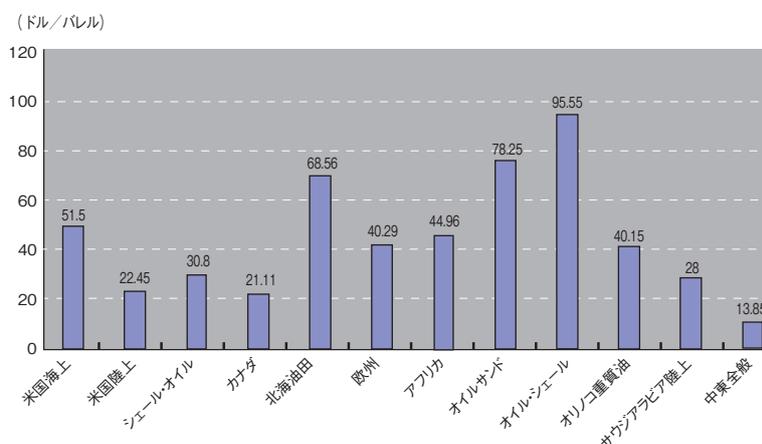
図19 米国のジェット燃料供給量

ら生産されるバイオ燃料を利用することが始まっている。航空機の場合には、技術的に再生可能エネルギーによる電気を利用した電動化は難しく、単位体積当りのエネルギー密度が高い液体燃料が必要とされ、育成時に光合成により炭酸ガスを吸収するカーボンニュートラルなバイオ燃料が部分的に利用されているものの、供給量、コスト面において、シェール・オイルとの競争力はない。藻、木材等から生産されるバイオ燃料の生産コストは、1,500円～2,000円/ℓ以上と推計されており、コスト競争力のあるジェット燃料とはいえない。現実に利用できるものは、石油から生産されるジェット燃料だけである。

脱炭素政策の実行によって、逆に炭酸ガスを排出する原油価格が上昇するという矛盾の発生に関して考えると、従来であれば、原油価格が上昇すると、米国のシェール・オイル生産企業がシェール・オイルの生産量を増加させて、原油価格の上値を抑える役割を果たしてきた。もともと、シェール・オイルは、生産コストが30ドル/バレル程度と、サウジアラビアの陸上油田と比較して割高であるものの（図20参照）、WTI原油価格が50ドル/バレルを超えると利益がでることから生産が増加する。しかし、WTI原油価格が70ドル/バレルを超えても、米国のシェール・オイルの生産が伸び悩んでいる。米国のシェール・

オイル生産企業が生産量を増加させない理由としては、まずシェール・ガス、シェール・オイル生産の特徴を考慮に入れる必要がある。シェール・ガス、シェール・オイルは、井戸を掘削して、1～2年程度で生産量が5割以上減退することから、生産量を維持するために、恒常的に新規の井戸を掘削する必要がある。最近においては、技術革新により、1井戸の掘削が10日前後に短縮され、新規油田の開発開始から3カ月程度でシェール・オイルの生産量は増加するようになった。それに加えて、既存油田（レガシー）の1井戸当りの生産性を向上させ、原油価格低迷時に掘削だけしておいて、抗井仕上げを原油価格上昇時に行う、未稼働の在庫ともいえるシェール・オイル油田 DUC（Drilled but Uncompleted Well）を生産開始させることによって、短期間のうちにシェール・オイルの生産量を増加させることができ、原油価格の動きに応じた、機動的なシェール・オイル生産が可能となってきた。

シェール・ガス、シェール・オイルの開発の特徴を考慮に入れながら、原油価格が上昇しても、米国のシェール・オイル生産企業が、シェール・オイル生産を増加させない理由としては、2021年に入ってから米国のシェール・オイル生産企業の経営戦略が挙げられる。第一に、生産量という量よりも、利益という



(出所：専門機関資料を元に筆者推計)

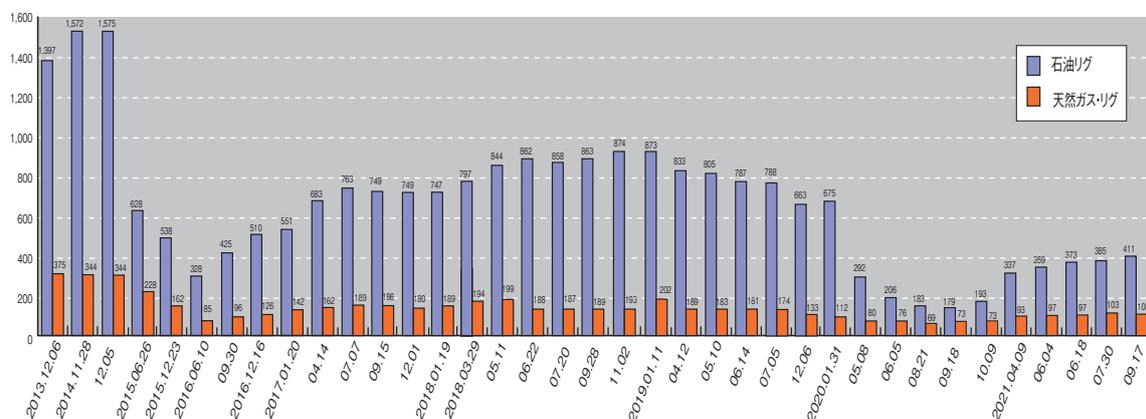
図20 地域別油田発見・生産コストの比較

質を優先し、従来の変動費だけ回収できれば生産量を増加するという、固定費を含めた赤字を承知のうえの生産量増加政策をとらず、十分な利益を得るために、生産量増加のための新規油田開発を抑制している。第二に、投資家、金融機関からの要請もあり、財務体質改善のために、内部留保を拡大し、借入金を返済し、株主への還元を目的として、株主への配当の引き上げ、自社株買いの増加等を重視し、投資支出を抑制している。第三に、バイデン政権による環境政策の強化から、米国の石油・天然ガス政策の動き、石油需要の今後の動向を慎重に見極めており、従来のような積極的な新規開発投資を抑制している。トランプ政権時代とは異なり、米国のシェール・ガス、シェール・オイル企業の幹部は、バイデン大統領と親密な関係にはなく、バイデン大統領からも、シェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業にアプローチする姿勢を見せていない。むしろ石油業界は、民主党の過度ともいえる気候変動対策への危機感を持っている。こうした理由から、原油価格が上昇しても、シェール・オイルの生産増加に踏み込めない。原油価格の上昇にもかかわらず、米国におけるリグ稼働数は、伸び悩んでいる（図 21 参照）。

9. 脱炭酸ガスとシェール・ガス、シェール・オイルの未来

これまでも、米国のシェール・ガス開発、シェール・オイル開発については、①米国国内の有望な鉱区は掘り尽された。②資金力がない中堅・中小の石油企業は資金調達に難航している。③生産コストが割高なシェール・オイルの生産企業は、原油価格の下落により経営破綻する。等の理由から、シェール・ガス、シェール・オイルの生産量は減退するという悲観論を、シェール・オイルの生産量増加という事実によって、ことごとく覆してきた。米国には、エクソンモービルをはじめとした超巨大石油企業から、家族経営の小企業まで含めると、3,000社程度のシェール・オイル生産企業が存在する。新型コロナウイルスの感染拡大による石油需要の減少、金融機関による融資審査の厳格化にもかかわらず、2020年に経営破綻したシェール・オイル生産企業は40社を超える程度と、シェール・オイル生産企業には、意外な底力がある。米国は、1859年の世界最初の商業油田となったドレーク油田以来、160年を超える石油産業の歴史をもっており（図 22 参照）、シェール・オイル生産企業の裾野は広く、奥行きは深い。

米国のシェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業は、①オーナー所有の自己資



(出所：ベーカー・ヒューズ社統計)

図 21 米国のリグ稼働数推移 (2013年～2021年)

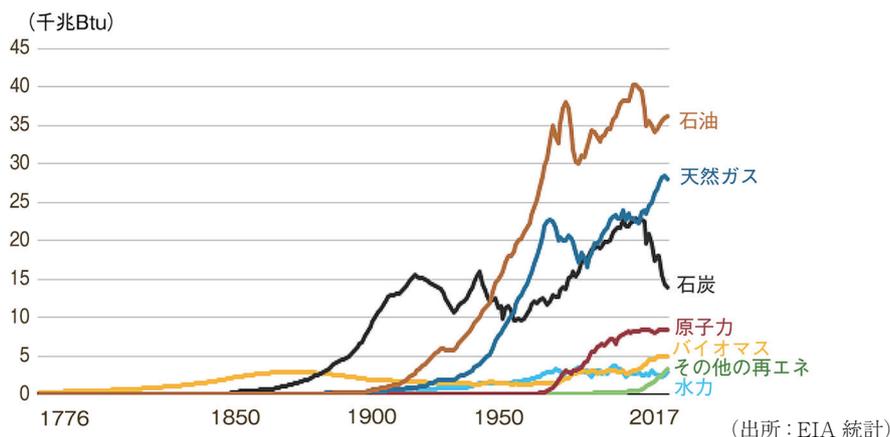


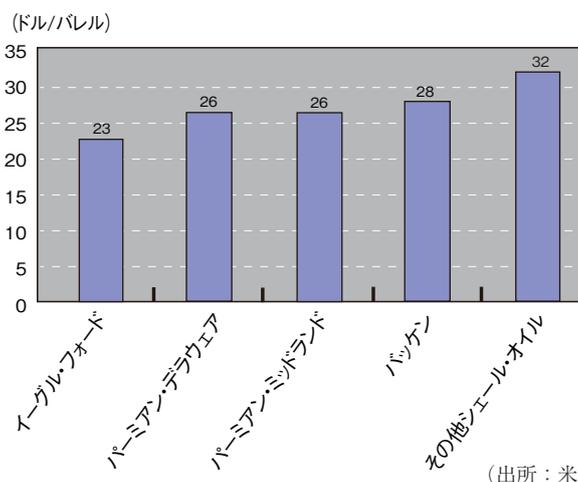
図 22 米国のエネルギー消費の歴史

金により経営する企業、②ジャンク債（低格付け債券）の発行、銀行借入により資金調達する企業、③プライベート・エクイティ・ファンドにより設立された企業であり、開発に成功した場合には、高値で他の石油企業に事業売却される、④エクソンモービルをはじめとした超巨大石油企業が、幅広い事業の一環として、シェール・ガス資産、シェール・オイル資産を保有する、等の様々な企業形態があり、原油価格の乱高下、金融市場からの資金調達難にも耐性がある。米国の金融市場は、日本と異なり、直接金融が主体となっており、リスクのあるベンチャー企業に投資するファンドも多く、ハイリスク・ハイリターン型のシェール・ガス開発、シェール・オイル開発にファイナンスする金融環境が整備されてい

ることも、米国のシェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業の事業展開を後押ししている。米国には、テキサス州からニューメキシコ州にまたがるパーミアン鉞区をはじめとして、生産コストが割安な有望鉞区が数多くある（図 23 参照）。

米国のシェール・ガス生産、シェール・オイル生産は、未開発の鉞区の探鉞活動により、これからも生産量を増加させることができるポテンシャルが潤沢にあるといえる。

米国におけるシェール・ガス革命、シェール・オイル革命により、人類は石油・天然ガスに係わる陰鬱な枯渇論から解放され、安価な石油・天然ガスの安定供給を手に入れることに成功した。しかし、石油という資源の枯渇論から解放されたと同時に、近代文明にとって



（出所：米国ダラス連邦銀行調査）

図 23 シェール・オイル油田別鉞・生産コスト

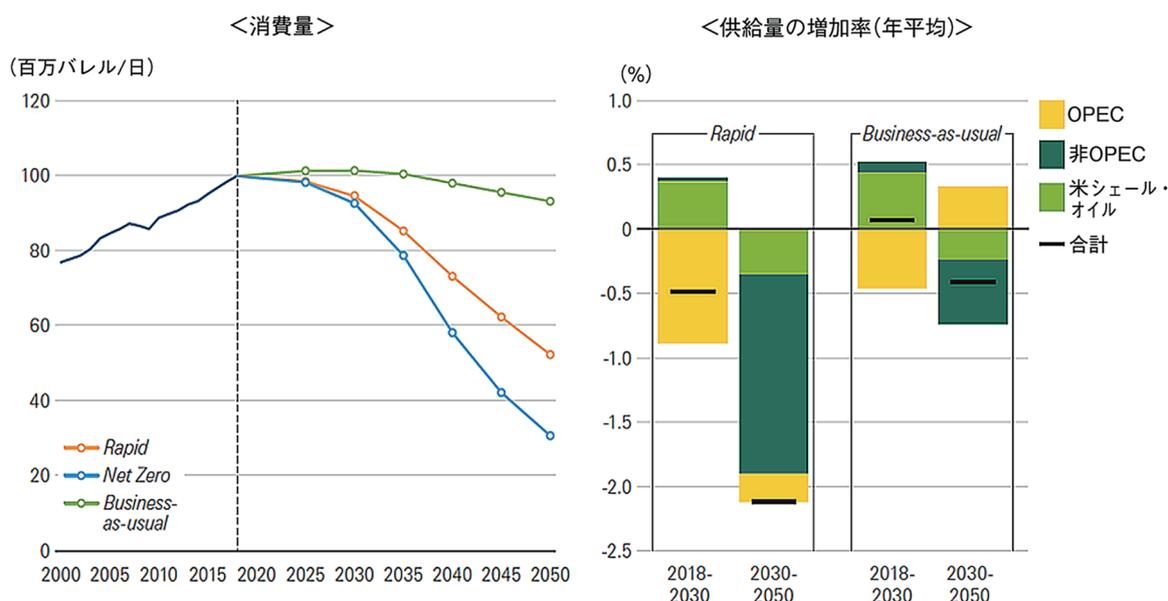
の未知なる脅威といえる新型コロナウイルスの感染拡大を経て、人々のエネルギーの大量消費、石油化学製品の大量廃棄というライフスタイルの見直しが求められるようになり、脱炭素、脱石油の実現が人類にとって喫緊の課題となってきた。石油メジャーの1つであるBP社は、振り返れば、2019年が世界の石油需要のピークであったという予測を公表している（図24参照）。

国際エネルギー機関（IEA）をはじめとした国際機関も、2021年に入って、炭酸ガス・ネット・ゼロに向けて、世界の石油需要は大幅に減少するという見通しを出しはじめている。「石器時代が終わったのは石がなくなったからではない。石に代わる、青銅器、鉄器の技術ができたからであり、石油も同じ」という、サウジアラビアのヤマニ元石油大臣の有名な言葉がある。石油についても、電気自動車の普及、再エネの技術革新により、シェール・ガス、シェール・オイルの豊富な埋蔵量が、なんの利益も生まない座礁資産となる可能性も考えられる。ただし、2021年9月時点の人類の技術を検討すると、電気自動車のリチウム・イオン電池の体積、重量当りのエネルギー

密度は、ガソリンと比較すると大幅に低く、価格面、利便性において、電気自動車は、ガソリン車に歯が立たない。7人の家族が乗れる、航続距離500キロメートル超という100万円の自動車を、電気自動車ではつくことはできない。

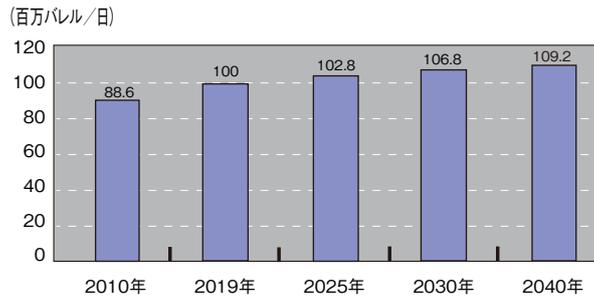
炭酸ガスを排出しないクリーン・エネルギーとして期待されているアンモニア、水素についても、グリーン・アンモニア、グリーン・水素と呼ばれる、再エネによる電気を利用した電気分解によって生産される、カーボン・フリーなアンモニア、水素の生産コストは、原油の生産コストの20倍～30倍以上に達する。加えて、現時点においては、実証実験の状況にあり、商業化のメドはたっていない。IEAも、2020年秋時点においては、2050年に向けて、世界の石油需要は増加するという予測を出している（図25参照）。

脱炭酸ガス、カーボンニュートラルの動きは、2021年における、1つのファッションという見方もできる。変化のスピードが速くなった21世紀において、5年後、10年後にも、気候変動対策、脱炭酸ガスが人々の話題のぼっているのかは、誰にも分からない。筆者



（出所：BP 石油需要見通し，2020年）

図24 BPによる2050年への石油需要見通し



(出所：IEA『世界エネルギー見通し』，2020年10月)

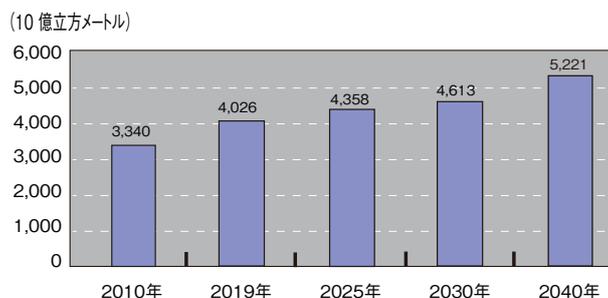
図 25 世界の石油需要見通し

が子どものころ、1964年の東京オリンピックの時代には、21世紀には、月旅行は当たり前のこととなり、火星への宇宙飛行も可能となると考えられてきた。しかし、21世紀に入って20年が経過するものの、人類は1人として、月に到達しておらず、核融合も、遠い未来のこととなっている。原理的に可能なことと、技術的、コスト的にできることとは異なっており、そのために、東京-ニューヨーク間を数時間で飛行できるSST（超音速旅客機）の実現もできなかった歴史を考える必要がある。アンモニア社会、水素社会が、2050年に実現できるのかは、現在の私たちには分からない。ただ、炭酸ガス排出削減への社会的要請にシェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業が応えることを求められていることは間違いなく、気候変動対策は、エネルギー企業の社会的責務であることも確かである。米国に豊富に存在するシェール・ガス埋蔵量、シェール・オイル埋蔵量をどのように有効に活かすのか。2022年の中間選挙、2024年の大

統領選挙において、共和党が勝利すると、米国のエネルギー政策、環境政策は大きく変貌することが予想される。状況によっては、パリ協定離脱の可能性も考えられる。アジアをはじめとした途上国においては、コストの面からも、需要増加の面からも、ガソリン車の需要、LNG火力発電の需要は、今後も堅調に増加することが見込まれている。IEAも、アジア大洋州の天然ガス需要は、堅調に増加すると予測している（図 26 参照）。

繰り返しになるが、脱炭酸ガスは、2021年における、1つのファッションである。このファッションのもと、2021年以降も、エネルギー専門機関は、今後の石油需要見通し、天然ガス需要見通しを下方修正していくことが見込まれる。しかし、2030年、2050年に、脱石油の技術がコスト的、量産的に完成しなかった場合には、石油の需要の増加に対して、供給が不足し、原油価格、天然ガス価格の高騰が発生することが可能性として考えられる。

2021年秋における、LNGスポット価格の高



(出所：IEA『世界エネルギー見通し』，2020年10月)

図 26 世界の天然ガス需要見通し

騰は、炭酸ガスの排出量が少ないLNGへと、石炭、重油から燃料を切り替える動きに対して、LNGの供給量が不足していることが根底にあるといえる。

米国のシェール・ガス、シェール・オイルの未来は、生産量を増加させるポテンシャルを持ちながら、米国のエネルギー政策の動向、国際金融市場の炭酸ガス排出企業へのダイベストメント（投資撤退）の動き、石油企業の株価動向による新規油田投資のインセンティブ（誘因）、リチウム・イオン電池、洋上風力発電の技術革新等、様々なパラメーター（変数）によって、異なる姿となることが見込まれることとなるのである。

COVID-19 対策に伴う社会経済活動の変化と そのエネルギー需要への影響

井上 智弘 (プロジェクト試験研究部
主任研究員)



1. はじめに

2020年に世界的に広がった新型コロナウイルス感染症(COVID-19)に対する感染拡大対策としての人の移動や企業活動の制限は、社会経済活動に大きな変化をもたらした。移動制限から交通量が激減し、経済活動も停滞した。特に、人が集まる店舗・施設、観光や娯楽のサービス産業といった特定業種の活動が著しく制限された。他方、テレワーク・オンライン会議等による勤務場所の変更、オンライン購入によるEコマース市場の拡大など、新たな社会活動の形態も促進されている。

エネルギー需要は社会経済活動と密接に関係しており、2020年のエネルギー需要の変化は、働き方の変化、社会経済活動量の変化を反映している。本稿では、人流データ^{注1}や経済指標などの社会経済活動のデータを用いた日本のエネルギー需要データの分析結果⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾を紹介し、COVID-19対策による社会経済活動影響およびエネルギー需要の変化要因について解説する

2. COVID-19 対策に伴う社会経済活動 の変化

第1回緊急事態宣言の発令された2020年4

月、東京駅の人出は平常時より75%以上減少した。移動制限に加え、人の集まる施設や店舗の使用制限が求められ、社会経済活動は著しい停滞を余儀なくされた。それから1年半が経ち、部分的な活動抑制と繰り返しながらバランスの取れた対策の模索が続いている。この間に何が起こったのかについて、データに基づいて紐解いてみる。

(1) 政府の対応

2020年2月末の全国の小中高校の一斉休校から行動抑制の要請が始まった。その後、2021年9月現在までに以下の4回の緊急事態宣言が発出された。感染状況と病床数などの関係から都道府県別に行動抑制を伴う地域が指定された。

- 第1回：2020/4/7～5/25 (4/16～5/14 全国)
- 第2回：2021/1/8～3/21
- 第3回：2021/4/25～6/20
- 第4回：2021/7/12～9/30

図1に、COVID-19に対する各国政府の対応を指標として示した厳格度指標^{注2、(5)}を示す。2020年2月末から行動抑制が始まり、第1回緊急事態宣言の全国を対象とした期間に指標は47まで上がり、その後6月末には25まで下がる。7月後半から9月にも帰省や

注1：人流データとは、携帯電話の位置情報を個人情報に配慮して用いた、人の動きの情報である。新型コロナウイルス感染症対策ホームページ(内閣官房)⁽⁶⁾では、観光地、繁華街、主要駅の人出の変化について情報公開している。国内ではAgoop(ソフトバンク子会社)、Docomoが、世界ではGoogle、Appleなどがそれぞれ公益のために人流データの分析結果を期間限定で公開している。

注2：学校・職場・施設の精査、渡航禁止令等を含む9つに分類される対応指標に基づく0-100で示す複合的な指標。国と地方レベルで指標が異なる場合はより厳しい指標が示されている。

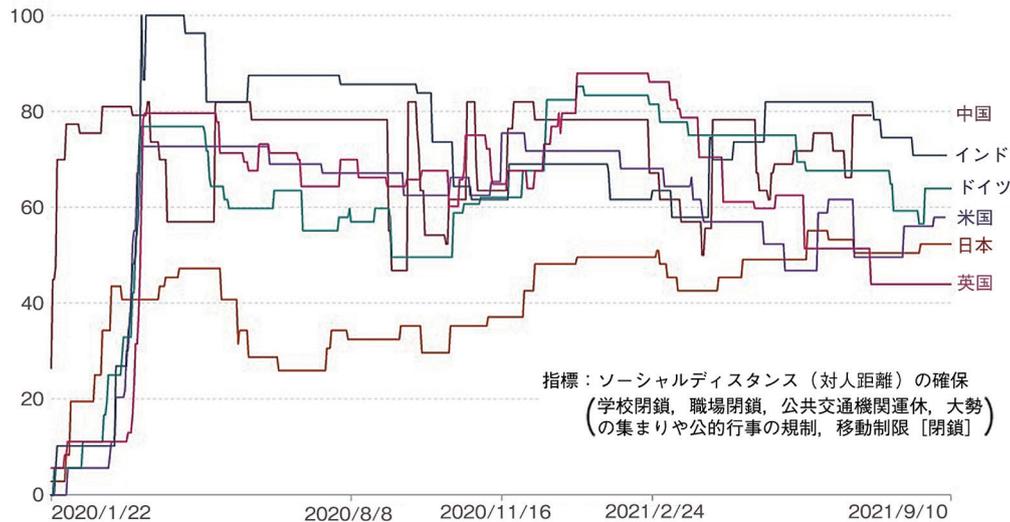


図1 COVID-19での政府対応の厳格度指数 (5)

観光の自粛などの要請を発している期間も指標が上昇している。ロックダウン（都市封鎖）とは、外出・移動・企業活動を強く制限する状況であり、法的処罰も伴う。比較として示した欧米中印はロックダウンにより買い出しや通院を除く外出に対する罰則を伴う禁止義務、原則100%の在宅勤務の事業者への義務付けなど、厳格な制約があった。一方、入国制限が限定的で、行動抑制も自粛要請に留まる日本ではその制約は緩やかであったことが窺える。日本の厳格度指標の推移を見ると、2021年は緊急事態宣言の発出に伴い、1年を通して人の集まる場所や移動を伴う社会経済活動の制限の要請により、移動制限がなされていることが示されている。なお、この指標は国内のより厳しい地域の指標が選択されるため、特に東京都等の都市部に対する制約として捉えられる。

(2) 人流データの変化率

政府の要請に対する人の行動変化を人流データから見るができる。図2に、日本全国、都市部（東京都）、観光地（沖縄県）、

地方（岩手県）の人流データ^{注3, (7)}の変化率（7日間移動平均）を示す。人の動きの分類のうち、乗換駅を中心とした人流データを「人出」の変化、自宅にいる時間を「在宅時間」の変化として示している。過去4回の緊急事態宣言期間を黄色で示している。

人流の変化率は2020年2月末より急激に減少してきており、全国の人出が20%減少する。その後、緊急事態宣言の発出が示された3月末よりさらに人出は減少し、大型連休には全国の人出は60%減少した。7月末から9月にかけては、全国の人出の減少は限定的であったが、都市部では45%減（東京都8月）、観光地では60%減（沖縄県9月）などと一時的に大きく減少した。2020年10月以降20%減にまで回復していた人出も、2021年の緊急事態宣言の度に30～40%減に減少しているが、その減少幅は徐々に小さくなってきている。一方で、車の移動を主とし、感染拡大が緩やかであった地方では人出の減少率は緩やかであった。ゴールデン・ウィークには地方の人出は約50%減（岩手県）へと減少したが、その後の連休では平日と比較して増加する傾向

注3：Googleの人流データ。2020年1月から2月中旬の人流データの中央値を曜日別に基準値として比較したもの。曜日特性は考慮されるが祝日は考慮されないため祝日には人出は減少、在宅時間は増加の傾向を示すことに留意する必要がある。また、時間と人数の比率であるため、もともと在宅時間は長いいため変化率は、他の指標と比べて小さくなる傾向がある。都道府県別データから、特徴的なデータを示す東京都（緊急事態宣言が長い。通勤に公共交通の利用が多い）、岩手県（車の移動が多い。感染拡大が緩やか。）、沖縄県（観光客が多い。観光地として移動の制限が強い）を選択した。

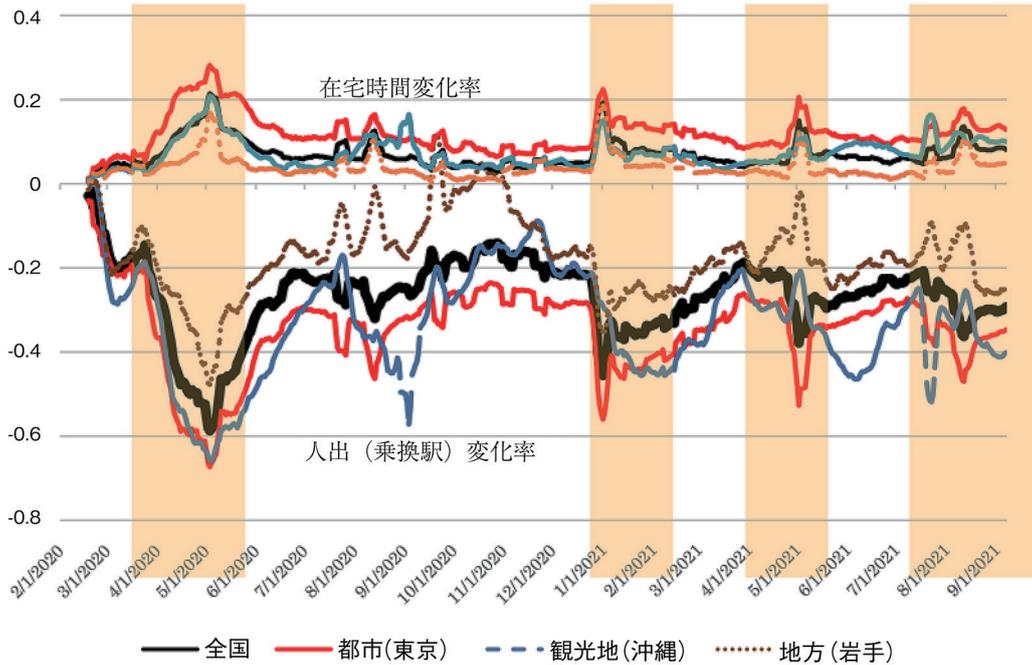


図2 人流データ(乗り換え駅, 在宅時間)の変化率⁽²⁾

がみられた。地方部では通勤に車の利用する割合が高く、相対的に変化が少なかった可能性がある。

在宅勤務や外出自粛に伴い、在宅時間は増加する。4回の緊急事態宣言および2020年夏季には、特に都市部や観光地における人出の減少が著しい。地方、観光地では、連休には通常では観光客の流入などから人出は増加するが、移動抑制が要請されている期間では増加率が少ないか減少傾向がみられた。人流データによる変化について以下にまとめる

- 全国の人出の減少率はピークとなった第1回緊急事態宣言時に最大60%減、その後も20%減。第2～4回の緊急事態宣言では20～40%減の範囲。
- 都市部では全国より人出減少。ピーク時70%減、その後も25～50%減。
- 地方部では車の移動が多く感染も緩やかであったこともあり、減少率は緩やか。ピーク時50～60%減、その後も20～30%の減。
- 在宅時間の増加は都市部ではピーク時に30%増、その後も8～15%増。地方の在宅時間はピーク時で15%増、その後3～8%増。
- 2021年の在宅時間の増加率は都市部で顕著だが地方では限定的。

3. 2020年のエネルギー需要の変化

次に、2020年にエネルギー需要がどのように変化したのか、セクター別、エネルギー種類の需要変化を解説する。

(1) 2020年の世界のエネルギー需要の特徴

2020年の世界の年間エネルギー需要は5%減、電力需要は2%減と過去に例のない減少幅となった⁽⁸⁾。特に石油、石炭の需要が減少した。3月以降のロックダウンに伴う週間エネルギー需要の減少率は、日本を含む緩い規制の地域では10%程度、部分的なロックダウンの地域では17%、ロックダウンの地域では25%程度であり30%以上の減少率の地域もあった⁽⁹⁾。

図3に欧印各国の電力需要の変化率⁽¹⁰⁾を示す。点線は2020年3～4月のロックダウン期間を示しており、各国の前年度比の週平均電力需要は15～30%減少した。ロックダウン期間の後半からは電力需要は回復傾向を示し、ロックダウン解除後2、3カ月程度となる3月後半には一時例年並みに回復し、その後10月現在まで欧州各国では2～10%程度の需

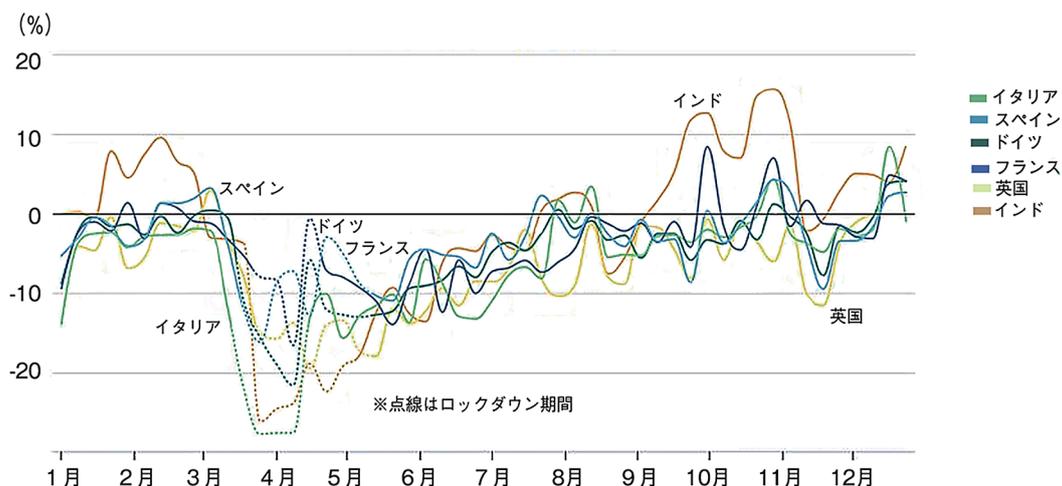


図3 2020年の週間電力需要(海外)の前年からの変化率⁽¹⁰⁾

要減少で定常化している。中国では4月から、インドでは8月から、その他新興国でも電力需要は前年度比で増加に転じており、社会活動が回復する傾向にある。

COVID-19対策の電力需要に対する影響評価⁽¹¹⁾から、欧州ではスペイン、イタリア、ベルギー、英国などの厳しい制限のある国では、平日の消費量が20%以上減少し、休日の電力水準よりも小さくなったことが示されている。時間帯別には、朝の電力需要の立ち上がり数が数時間ずれ、夕方の需要も減少した。日負荷曲線は平坦になり、特に昼間の電力需要が低下した⁽¹²⁾。また、週後半の方が需要の減少が大きくなるなど、在宅勤務へと変更した影響が顕著に表れる事例もある⁽¹³⁾。電力需要に影響を与える公的データとして、人流データ、衛星画像、気象データ、公衆衛生データなどをクロスドメイン分析⁽¹⁴⁾では、電力需要の分析から、特に人口の密集した地域や大型商業施設のある地域に影響が大きいことが示された。

欧州では再生可能エネルギー(再エネ)の発電を優先するため、電力需要減少に伴い火力発電の発電量が減少した。このため、再エネの電力需要に対する比率が一時的に100%を超える国・地域もあった。太陽光発電、風力発電は変動性電源(VRE)と呼ばれ、電力

需要におけるVREの比率が送電系統安定性の面から重要な要素となる。COVID-19対策の影響で電力需要が減少する中で、このVREの比率が高まったことから、系統安定の議論も加速している。また、2030年の電力需要比率に近づいたことによる再エネ導入目標の前倒しの議論と、ポストコロナの経済政策としての再エネへの投資、グリーンリカバリーなどの議論も伴い、再生可能エネルギー導入拡大の機運が高まっている。

(2) 2020年の日本のエネルギー需要の特徴

図4に2020年の日本のエネルギー需要の変化率を示す。エネルギー需要は、5～7月に電力、都市ガス、石油ではそれぞれ9%、16%、19%まで減少し、9月に向けて増加する。電力、都市ガスでは夏と冬の需要増がみられた。本節では、月別のエネルギー需要データと経済指標データを用いた分析結果⁽⁴⁾に基づき、エネルギー需要の変化要因をセクター別に解説する。

① 家庭部門のエネルギー需要

家庭部門の電力需要は、緊急事態宣言下の4月、特に気温が高い8～9月に8%程度増加した。また、暖房需要となる灯油も4月、11～12月に20%程度増加した。在宅勤務な

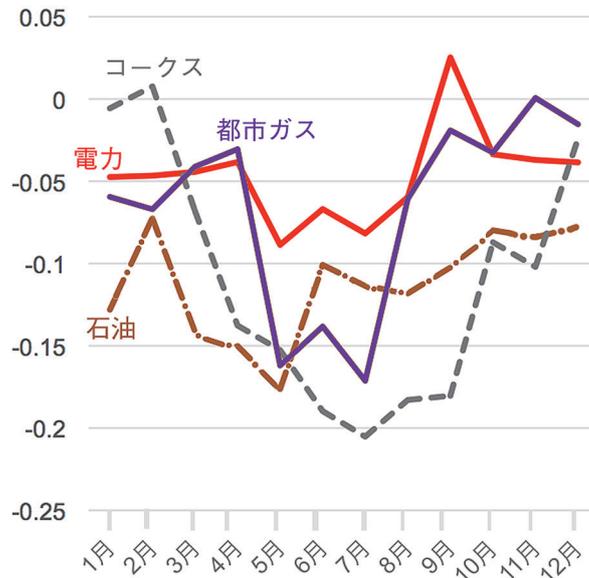


図4 2020年の日本のエネルギー需要（直近3年同月比）

どの増加に伴うエネルギー需要増に加え、気温変化の大きい夏・冬にはエネルギー需要はさらに増大した。

② 民生業務部門のエネルギー需要

民生業務部門では電力需要と都市ガス需要が大きい。緊急事態宣言の影響は5月が最も大きく、電力需要で13%減、都市ガス需要で38%減であった。6月以降徐々に回復し、8月以降の電力需要は1～6%程度の減少率で推移した。都市ガスは9月に15%減と、減少率は大きく、11月以降4%減程度に回復した。施設の閉鎖や宿泊、飲食、娯楽等の業種の経済活動の停滞の影響によるエネルギー需要減の影響がみられた。

③ 産業部門のエネルギー需要

産業部門では、2020年5月に電力需要、都市ガス需要はそれぞれ15%減、26%減であった。その後8月より回復し電力需要は5～7%減、ガス需要は9～14%減で推移した。民生部門のエネルギー需要の回復に対して、エネルギー需要回復は遅く、特に鉄鋼・機械製造業当の業種の需要回復の遅れが顕著であった。コークスの需要回復の遅れは、鉄鋼業等の経済指標に追従している。

④ 運輸部門のエネルギー需要

運輸部門では、旅客部門で大幅な利用減少があり、特にジェット燃料の5月の減少率は82%減、9月に54%減と大きく減少した。6月以降ジェット燃料の減少率は50%以下に回復するものの、航空運輸業の活動指数は停滞しており、航空機の飛行の燃料を利用しつつも満席ではなく効率が悪い状況が続いていることを示している。ガソリンは5月に25%減少の後、10%減程度で推移しており、道路旅客部門の減少に対応している。一方で軽油は5%程度の減少で推移しており、道路貨物運送業の減少が少なく、貨物輸送では鉄・機械等の製造業用製品が減少するが情報通信産業や宅配等の業種は増加した。在宅時間の増加に伴い、Eコマース市場の拡大傾向が窺える。

4. 電力需要データを用いた社会経済活動影響の詳細分析

(1) 第1回緊急事態宣言の影響

人の移動の変化に対し、電力需要は生活や社会経済活動の変化を表す。電力需要データは2016年4月より送電会社別に1時間値のデータが公開されており、気象データ、人流データを用いることにより細かい変化を分析

することが可能である注4. (1) - (3)。

直近3年(2017～2019年)と第1回緊急事態宣言下の2020年の電力需要を比較するため、図5に、直近3年(実線)および2020年(点線)の4月の平日・休日・大型連休の関東地域の1日の電力需要の変化を示す。直近3年4月の1日の電力需要をみると、朝の活動開始から増加し日中にピークとなり、夕方から夜間にかけて電力需要は減少する電力負荷曲線が描かれる。休日では多くの人が仕事を休むことから特に日中の電力需要量は少なくなる。4月の電力需要では、休日の電力需要は平日の電力需要に比べて10%程度少ない。大型連休には工場や施設ごと休みとなるため、休日と比べて1日の電力需要は7%減少する。特に夜間の電力需要も減少していることが特徴的である。

2020年4月の電力需要は、平日・休日ともに日中の電力需要が減少していることから、日中稼働するオフィス・商業施設などが閉まっていたことがわかる。平日の電力需要減少率は最大8%減であり、休日の電力需要並みまでには減少していなかったことから、施設の閉鎖は部分的であったともいえる。

各時間帯別の電力需要の分析結果から、3月初旬以降、8～9時の電力需要の減少が確

認でき、時差出勤や在宅勤務の移行の影響がみられた。日中はピーク時電力需要の増減にあわせて需要が低下した。夕方は特に17時～19時の夕方ピークとなる需要が大幅に減少しており、飲食業などの電力需要の低下がみられた。大型連休に向けて全体の電力需要が下がっており、夜間の電力需要減少から工場や施設などの稼働停止による影響がみられた。

(2) 関東地域の電力需要の変化

図6に、2020年の関東地域の気温・休日変化を考慮した電力需要の変化率と、人流データの変化要因による電力需要変化率を示す。気温・人流・電力需要データの分析結果から、気温・暦歴・人出の影響とその他の要因に分解して説明することができる。以下、(A)～(I)まで期間別の分析結果⁽³⁾を解説する。

(A) 人出が減少した2月、3月は、朝と夕方の時間帯による変化が現れたが電力需要全体の変化は少なかった。第1回緊急事態宣言(東京都含む7都府県：4/7、全国：4/16)以降に急激に電力需要が減少した。工場や施設の稼働停止を伴う産業・民生部門の電力需要の影響が大きかった。

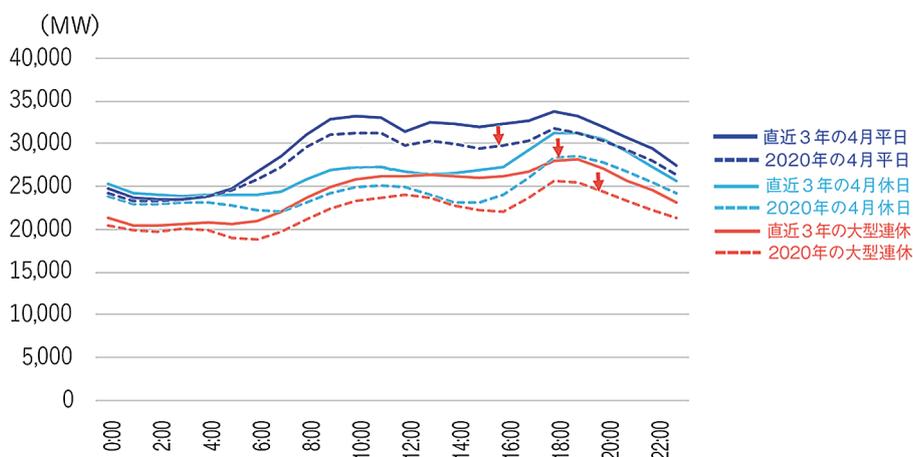


図5 関東地域における第1回緊急事態宣言の電力需要負荷曲線(気温補正後)への影響

注4: 既報では、気温データ、曜日、連休などの暦データを用いた回帰分析による推計と、人流データ変化率データを用いた重回帰分析によって地域別の電力需要データを分析した。

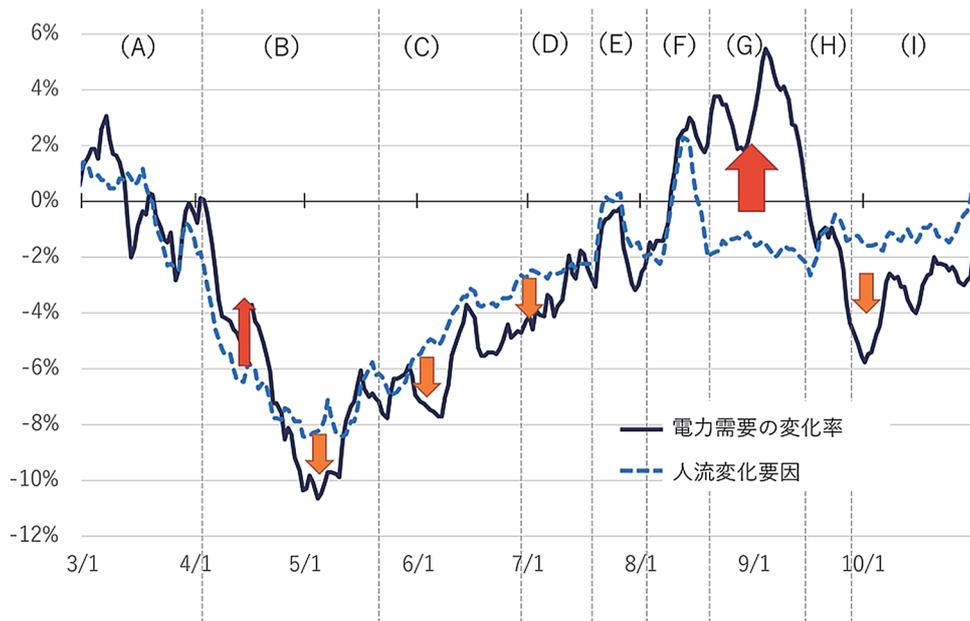


図6 関東地域の電力需要（気温・休日補正後）の変化率の推移

(B) 大型連休では電力需要が大きく減少しており、人出の減少に伴う減少率より2ポイント程度大きい。これは大型施設や工場などの停止に伴う追加的な電力需要低下と推測される。特に、昼間の電力需要の低下が大きく、サービス産業の活動が低下した影響が大きいと推測される。

(C) 大型連休後は人出が回復するが、電力需要の回復は2～3日遅れて回復する。夜間の電力需要は大型連休後(5/7)より回復するが、日中の電力需要の回復は緩やかである。工場や施設等が大型連休後に稼働し、夕方の電力需要も徐々に回復するが、日中の電力需要は緊急事態宣言解除の方針が定まった5月後半以降となり、産業の活動が戻るのには少し時間を要していたと推測される。

(D) 6月以降は人出も安定して回復しており、電力需要は8月後半まで徐々に回復していく。6月上旬、7月上旬の需要増は平均気温が25度以上となり、冷房需要が増加したことが要因と推測される。

(E, H) 7月、9月の連休は、連休特有の人

出の減少と共に電力需要も減少する特徴がみられる。

(F) 8月中旬は盆休みの前後で例年より夜間の電力需要が低下していることから、施設などの停止の伴う休みであったと推測される。一方で日中の電力需要は例年並みであった。

(G) 8月後半は電力需要が例年より大きくなっている。盆明けに夜間電力が大きく回復し例年並みの電力需要となっている。人出の変化量に大きな変化はないが、特に夜間電力需要も増加しており、産業活動が回復してきたと推測される。日中の電力需要も大きく増加しているが、特に8月後半は気温上昇により10時～18時の電力需要が増加する傾向があり、日中の冷房需要が増加したとみられる。

(I) 10月は人流データも電力需要も2～4%程度の減少率で定常化している。

以上のデータをまとめると、以下のことが分かる。

- 人出が 20～30% 減少している外出自粛の状況下では電力需要は 2% 程度の減少
- 緊急事態宣言に伴う工場・施設の停止によって電力需要は最大 10% 程度減少
- 連休中の工場・施設の稼働停止や産業活動の回復の遅れに伴う電力需要の減少幅は約 2 ポイント程度
- 在宅勤務の増加に伴い、夏・冬のエネルギーを利用する時期に電力需要が 4～8% ポイント程度増加

(3) 地域別の電力需要の変化

図 7 に地域別の 2020 年の電力需要の変化率を 7 日間移動平均で示す。3 月以降、電力需要が減少し、緊急事態宣言以降、大型連休にかけて電力需要が 5～20% 減少し、その後需要が回復するが、盆休みに再び減少し、10 月には 2～5% の減少率で定常化する。

関東、関西は概ね傾向が同等であるが、中部、北陸、中国の地域では減少率が大きく、産業活動に対する影響が大きいと推測される。九州、沖縄は、平均気温が高く冷暖房需要が異

なること、太陽光発電の自家消費などの影響による違いと推測される。

5. エネルギー需要変化の寄与度

COVID-19 対策による経済影響は、地域や特定業種に偏っていた。特に宿泊、飲食、娯楽、観光関連等の業種の経済指標の低下は著しかった。一方で、鉄鋼、機械製造業などのエネルギー需要の大きい業種の経済活動の停滞もエネルギー需要に与える影響は大きい。図 8 に、2020 年の電力需要の業種別寄与度^{注 5}の推計を示す。

電力需要の減少では、電力需要の 3 分の 1 を占める製造業の影響が大きい。特に鉄鋼・金属・非金属業、機械工業の影響が大きく、施設や工場稼働の停止、生産量の減少の影響が推測される。生活関連・娯楽業、宿泊飲食業はそれぞれ電力需要の 3% 程度であるが、経済指標は

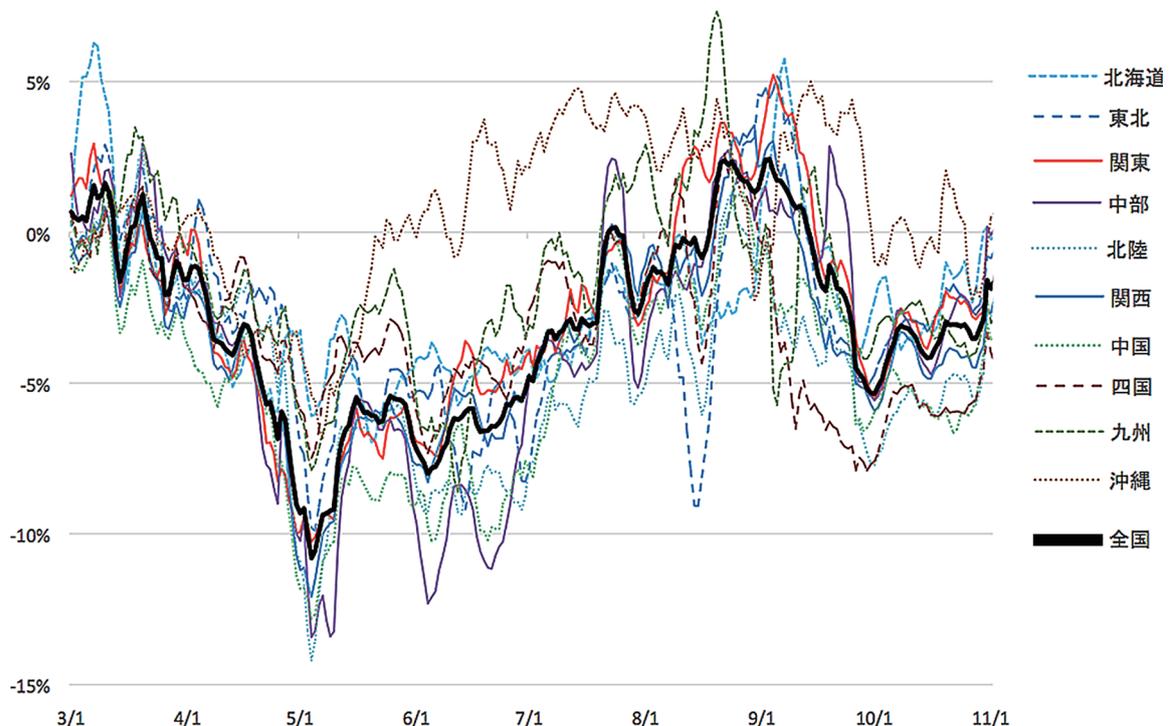


図 7 全国の電力需要の減少率

注 5：経済指標として、第 3 次産業活動指数と鉱工業生産指数を用い、エネルギーバランス表から業種別のエネルギー需要原単位を用いてエネルギー需要全体に対する変化率を計算したもの。分析手法は巻末参考文献（6）参照

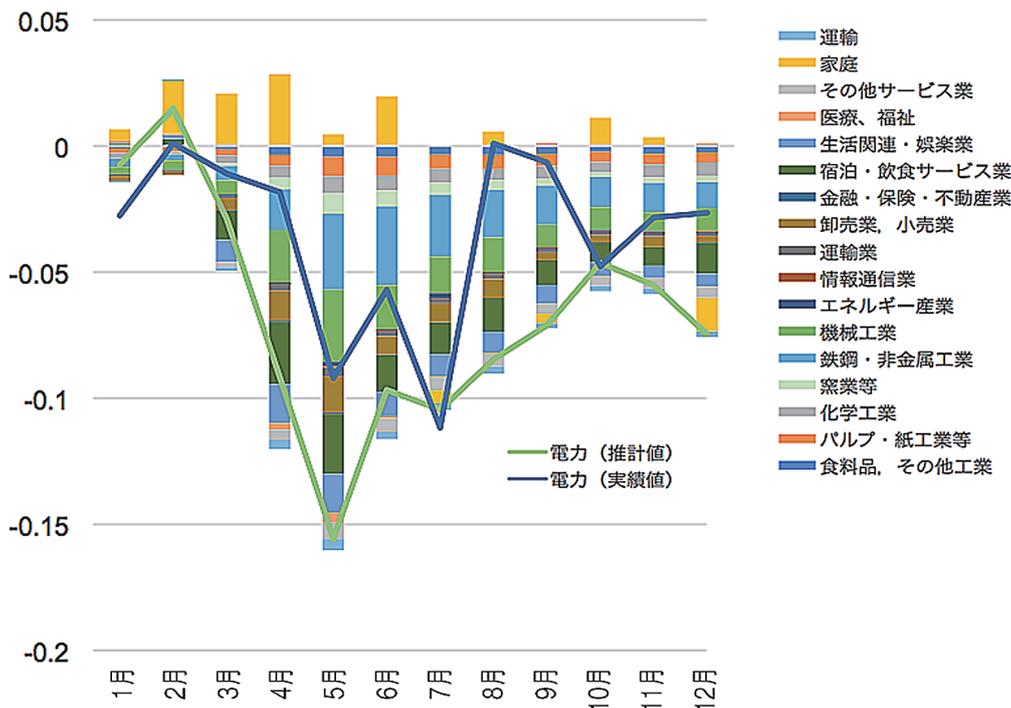


図8 2020年の電力需要の業種別寄与度の推計 (4)

80%減少したため、寄与度が大きい。この推計値は過去のエネルギー消費原単位を用いているため、推計値と実績値の違いは、エネルギー消費原単位の変化を示す。電力需要では4～6月に6%程度、夏と冬に10%程度推計値の方が多く減少していた。これは在宅時間の増加や、経済停滞で集客が少なくても施設稼働させたことなどの要因からエネルギー消費原単位が増加した結果と推測される。

以上のエネルギー需要の分析結果から、以下のことが分かる。

- 在宅勤務などの増加に伴い、民生家庭・業務部門でエネルギー需要が増加した。特に気温変化の大きい夏・冬にはエネルギー需要はさらに増大した。
- 産業部門ではエネルギー需要の減少の回復が遅くなる傾向があった。
- 運輸部門では、旅客部門のエネルギー減少が著しく、回復後もエネルギー効率が悪い（満席ではないなど）状況が継続している。一方貨物部門は減少が少なく、Eコマース市場などは拡大している。
- エネルギー需要変化の寄与度は、エネルギー消費の大きい製造業と、経済停滞の大きいサービス業の影響が同程度に大きかった。

6. おわりに

(1) 分析結果のまとめ

本COVID-19対策に伴い社会経済活動は急激な変化を示した。日本では自粛要請によって2020年5月には人出は50～75%にまで減少し、在宅時間は10～30%増加した。その後も人出は30～50%減少し、在宅時間は2～10%増加している。地域による影響の差が大きく、特に都市と観光地では社会経済活動の変化が大きい。エネルギー需要は2020年3月以降大幅に減少し、特に第1回緊急事態宣言の影響が大きく、5月には電力、都市ガス、石油はそれぞれ9%、16%、19%減少した。移動に伴う運輸旅客の減少はジェット燃料84%減、ガソリン25%減であった。一方、軽油は5%減と運輸貨物に対する影響は軽微であり、宅配業では増加傾向を示した。これは、在宅の増加に伴うネット販売の増加からEコマース市場が拡大した影響と推定される。宿泊・飲食・娯楽・観光業等のサービス業に対する影響は大きく、エネルギー需要変化の寄与度

の半分を占める。エネルギー消費の大きい製造業の活動停滞の要因も大きく、エネルギー需要変化の寄与度の残り半分は鉄鋼・機械製造業であった。また、製造業はエネルギー需要の回復に2～3カ月遅れることも特徴としてみられた。2020年5月に経済活動指数が増加したのは通信産業、医療、宅配業であったが、エネルギー需要変化の寄与度は1ポイント未満と軽微であった。

在宅時間の増加から、家庭部門のエネルギー需要が増大しており、特に気温変化の大きい季節の需要変化が大きい。在宅勤務による活動地域が分散することにより、冷暖房をより多く使う時期に、エネルギー需要の増加が顕著に表れる。

(2) 急激に変容する社会システム分析に対する課題

最後に、本研究から得られた知見と課題を基に、これからの社会システムを分析する課題について紹介したい。

第一に、劇的に変化する社会において多角的視野からの分析と検証の必要性である。COVID-19対策は予期せぬ事象に対応するため、社会経済活動の強制的な大きな変化を余儀なくされた。その間、科学的な知見や客観的データが蓄積され、様々な議論が喚起された。不十分なデータも少しずつ精度が向上していった。今後、デジタルトランジションや脱炭素化に伴い、社会システムが大きく変容する社会が十年単位の短い期間で訪れる。グローバル化の進む中で、パンデミックの再来は現実的な課題であり、社会システムの頑強性、レジリエンス（強靭性）の確保とともに、社会システムを評価する分析の発展が望まれる。

第二に、強靭な社会システムを構築するための具体的な手法としてのシナリオ分析の活用である。幅広い選択肢と複合的課題を有する複雑な将来シナリオの構築、想定外を想定した将来シナリオの構築が必要となる。すべ

での事象に対処することは不可能ではあるため、それぞれの専門的な知見を活かしたシナリオを階層的かつ有機的にソフトリンクさせた分析を人材と時間をかけて実施することが求められる。例えば、電力需給においても、これまでにない変化をいくつか経験した。再生可能エネルギーの割合の急な増加、厳冬における天然ガス供給逼迫、原子力発電比率の低下など、需給バランスにおける課題が同時に発生し、それに対処する中で、将来の電力システム設計に対する議論も加速していった。このような複合的視点を統合して評価し多様な社会に柔軟に対応する頑強なシナリオ構築が必要となろう。

第三に、多様な視点の分析を支える公開データの拡充が必要である。IT技術の発展から、人流データの公共利用目的とした公開などが迅速になされた。オンライン会議や在宅勤務なども比較的速やかに対応がなされた。一方で、他国に比べて公開データの整備と活用が進んでいないため、分析可能な範囲は限定的であった。本研究では、エネルギー需要データ・人流データ・経済指標を用いて社会の変化要因を分析したが、データの粒度、互換性、入手困難さなどの多くの課題があった。社会システムを分析するために活用可能なデータとして、様々なデータが使いやすい形で公開されることが望ましいと考える。

第四に、日本の社会情勢の違いによる技術普及の遅れに対する認識である。COVID-19対策では、世界のロックダウンの伴う変化は厳しく、日本が感じている変化より大きく、危機感や閉塞感も強い、ということがある。社会の変化を感じる度合いが強いほど、障壁を打ち破る力も強くなるとすれば、例えばCOVID-19対策をきっかけとして、E-コマース市場などを含むデジタル分野に関する技術も世界ではより急速に拡大する。実際に、注文するアプリの種類や普及、対応する店の拡大などに差が生じているように見受けられる。これは、脱炭素社会における日本の論争と技

術普及にも当てはまることかもしれない。日本の技術開発と普及に対する速度は「世界に比べて遅い」という可能性に留意して、これからの変化を見ていく必要があると考える。

本稿では、COVID-19 対策に伴う社会経済活動の変化とその影響として現れた電力需要の変化要因について紹介した。2020 年は短期的にも劇的な変化が生じたが、今後は産業構造、需要構造、設備やインフラ変化などの長期的な影響も現れてくると推測される。様々な分野の多角的視野と融合し、長期的視点からのエネルギー需要分析も今後の研究課題である。本稿の紹介した研究が多分野に跨る今後のエネルギー戦略の一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 井上智弘, 加藤悦史, 黒沢厚志, 「2020 年電力需要分析手法の再検討 - COVID-19 の社会活動影響を考慮するための分析課題 -」, 令和 2 年電力・エネルギー部門大会論文集, 電気学会, 127, (2020), 5WEB1 11-12
- (2) 井上智弘・加藤悦史・黒沢厚志, 「COVID-19 対策に伴う社会活動の変化と電力需要への影響評価」, 第 39 回エネルギー・資源学会研究発表会, 講演論文集, 6- 3, (2020), p152-157
- (3) 井上智弘・加藤悦史・黒沢厚志, 「人流データと電力需要データを用いた COVID-19 対策に伴う社会活動の影響評価」, 第 40 回エネルギー・資源学会コンファレンス, 講演論文集, 7- 2, (2021), p163-168
- (4) 井上智弘・加藤悦史・黒沢厚志, 「COVID-19 対策に伴う社会活動の変化とエネルギー需要への影響評価」, 第 40 回エネルギー・資源学会研究発表会, 講演論文集, 2- 3, (2021), p31-36
- (5) Our World Indata :
<https://ourworldindata.org/> (アクセス日 2021.9.15)
- (6) 内閣官房; 新型コロナウイルス感染症対策; <https://corona.go.jp/> (アクセス日 2021.9.15)
- (7) Google COVID-19: コミュニティ モビリティ レポート;
<https://www.google.com/covid19/mobility/> (アクセス日 2021.9.15)
- (8) IEA; Global Energy Review 2021, 2021
- (9) IEA ; World Energy Outlook 2020, 2020
- (10) IEA ; COVID-19 electricity consumption impact, 2021
- (11) A. Bahmanyar, A. Estebansari, D. Ernsta; The impact of different COVID-19 containment measures on electricity consumption in Europe, Energy Research & Social Science, 68 (2020) , 101683
- (12) I. Santiago, A. Moreno-Munoz, P. Quintero-Jiménez, F. Garcia-Torres, M.J. Gonzalez-Redondo ; Electricity demand during pandemic times: The case of the COVID-19 in Spain, Energy Policy, 148 A (2021), 111964
- (13) A. Abu-Rayash, I. Dincer ; Analysis of the electricity demand trends amidst the COVID-19 coronavirus pandemic, Energy Research & Social Science, 68 (2020) , 101682
- (14) G. Ruan, D. Wu, X. Zheng, Haiwang Zhong, C. Kang, M. A. Dahleh, S. Sivaranjani, L. Xie ; A Cross-Domain Approach to Analyzing the Short-Run Impact of COVID-19 on the US Electricity Sector, Joule, 4-11 (2020), pp. 2322-2337

[調査研究報告]

2050年カーボンニュートラルを目指す欧州連合のエネルギー戦略とCCUS取り組み状況

橋崎 克雄 (プロジェクト試験研究部 部長)



1. はじめに

欧州連合 (EU) では、2005年から火力発電や鉄鋼・セメントなどの産業分野、域内の航空便などエネルギー集約産業を対象に二酸化炭素 (CO₂) 排出量に上限を設け、それを超える場合は排出枠を購入できる EU 排出量取引制度 (ETS) を運用してきた。そして、今年7月14日、EUの政策執行機関である欧州委員会 (EC) は、2030年のCO₂を含む温室効果ガス (GHG) の削減目標を1990年比で最低40%から55%以上とするために、ETSの改正も含む包括的な気候変動政策パッケージ“Fit for 55”を公表した。これは、2050年までに気候中立を達成する目標を掲げた「欧州グリーン・ディール」(2019年12月)を推進する包括パッケージとなっている。

この「欧州グリーン・ディール」は、気候変動だけを解決しようとしているのではない。EU域内の多くの産業で製品や製法が環境に影響を及ぼさないものになっていくことにより、EUが「持続可能な社会」を目指す世界のルールメーカーになろうとする、環境保護を謳った成長戦略なのである。

その「持続可能な」経済活動への独自の投資基準として、2022年1月から「EUタクソノミー」の適用を開始しようとしているが、そこに「原子力」が適合するのかが大きな争点となっている。昨今、欧州議会の約90名の

議員が原子力の投資に不利益が生じないように要請を行っているが、電力の一次エネルギー源における原子力の依存度(47%)を考えれば、容易に結論を出せない大きなジレンマであることは間違いない。

本稿では、EUのCO₂排出量の推移、エネルギーフローと削減戦略について日本と比較しながら紹介し、削減策として進行中の炭素回収・利用・貯留 (CCUS) プロジェクトを紹介する。

2. EUのセクター別CO₂排出量

欧州の27カ国^{注1}で構成されるEUを一国と捉えた場合、2019年のGHG排出量(CO₂換算)は図1に示すように約38億7,000万トンとなる⁽¹⁾。図2に示すようにCO₂のみの排出量は、日本の約2.5倍に相当する約30億

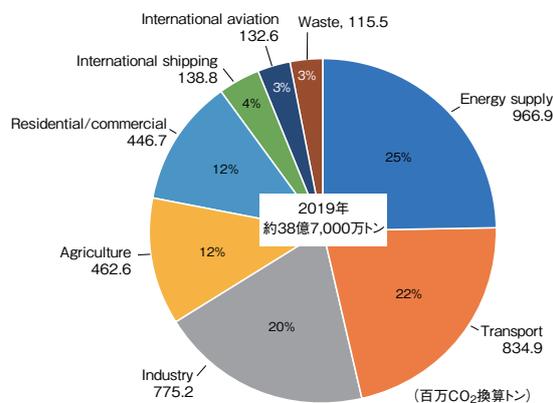


図1 EUの部門別GHG排出量(2019年)

注1: フランス、ドイツ、イタリア、ベルギー、オランダ、ルクセンブルク、デンマーク、アイルランド、ギリシャ、スペイン、ポルトガル、オーストリア、スウェーデン、フィンランド、キプロス、チェコ、エストニア、ハンガリー、ラトビア、リトアニア、マルタ、ポーランド、スロバキア、スロベニア、ブルガリア、ルーマニア、クロアチア

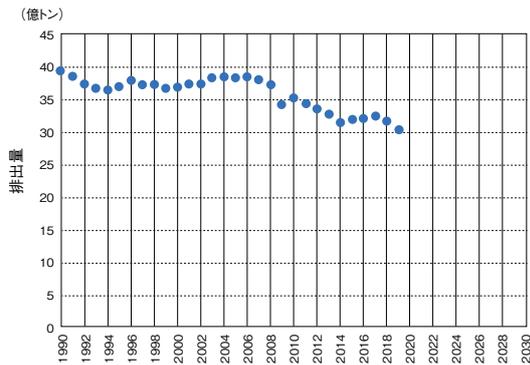


図2 EUのCO₂排出量の推移

トンである。日本の分類で比較すると、産業、運輸の各部門のCO₂排出量はほぼ同じである。次いで、その他/民生部門が続くが、運輸や民生・家庭部門からのCO₂排出量の比率が日本より高いことが伺える。

なお、農業部門などでは、メタン(CH₄)が多くカウントされており、欧米の環境保護団体などから、CH₄の温室効果についても指摘がされており、対処を望む声も聞かれているが、本稿では農業部門は考察の対象としない。

問題は、これらCO₂排出部門に対するEU

のエネルギーフロー構造と内訳が、気候・地勢状況の違う日本とどう異なっているかである。それによりCO₂削減策も異なるはずで、まったく同じになるとは考え難い。

3. EUのエネルギーフローとCO₂排出量削減戦略

欧州27カ国も各国によりエネルギー事情が異なっている。特に、ポーランドやドイツの石炭火力からの脱却政策には一部強引とも思える廃止処置がとられている。なぜこのような施策をうつほどの決断ができるのであろうか。EUのエネルギー事情はどのような構造になっているのであろうか。

図3と図4に、EUの供給側エネルギーフローと需要側エネルギーフローを示す⁽²⁾。

図5には、図3の③④、図4の⑧~⑪でのエネルギー源の構成比を示す。EUの一次エネルギー源は、図5-aに示す通り、約82,800 PJ(輸出18,600 PJがあるので実質64,200 PJ)で、

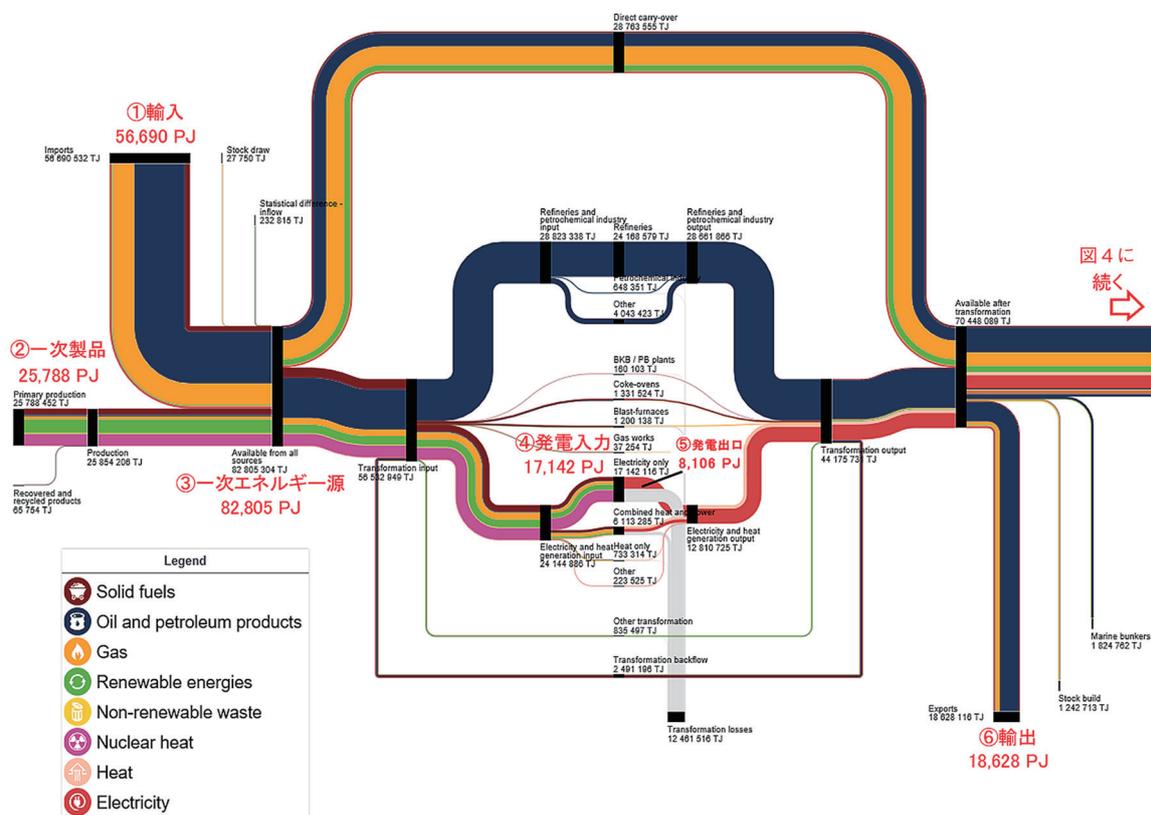


図3 2019年のEUのエネルギーフロー（供給側）

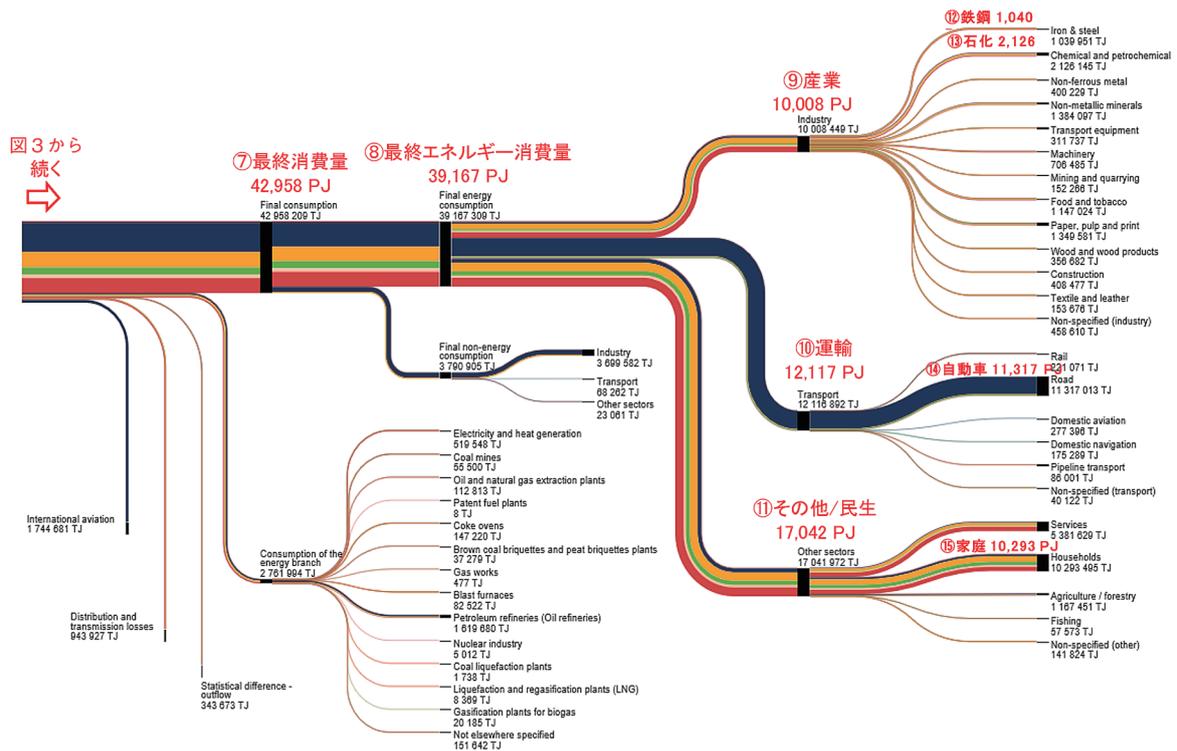


図4 2019年のEUのエネルギーフロー（需要側）

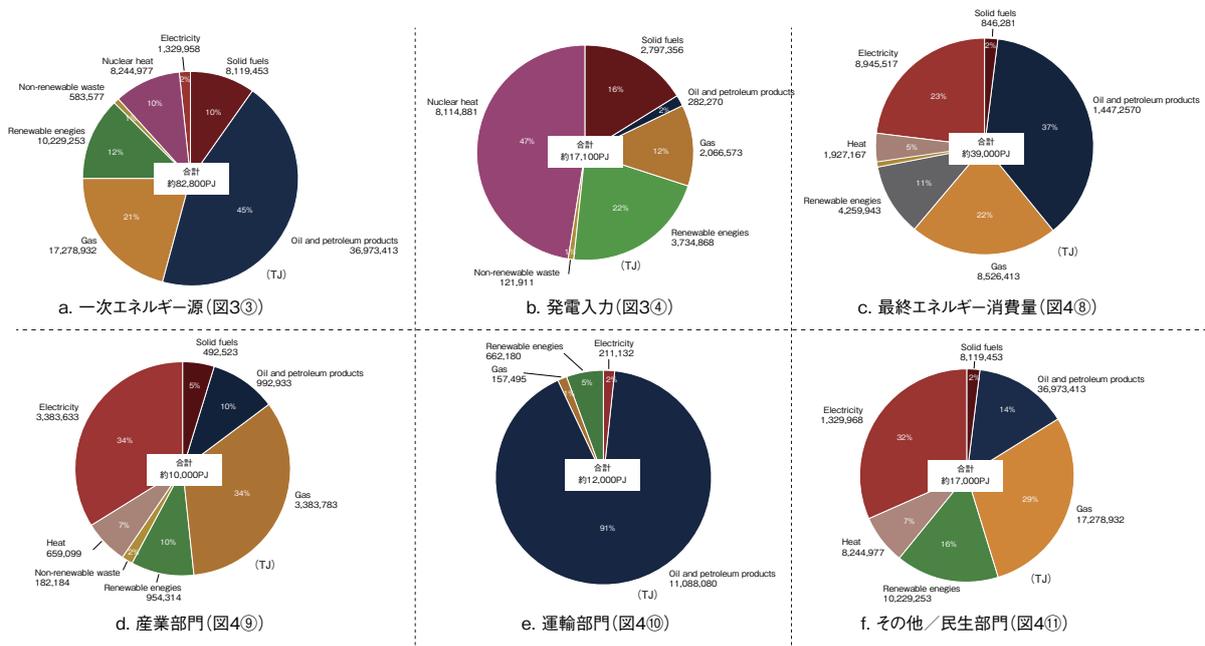


図5 エネルギーフローの各所におけるエネルギー源の構成比

日本の実質約3.3倍である。2019年のEUの名目国内総生産(GDP)は、16兆4,520億ユーロ、日本は5兆1,550億ドルであるから⁽³⁾、エネルギー消費量がGDPの比にもよく反映されていることが伺える。

注目すべき点は、EUの発電用燃料源である。

図5-bに発電入力側のエネルギー源の構成とエネルギー量を示す。約17,100PJのエネルギー入力量に対し、実にその50%近くを原子力に依存し、かつ20%強は、その多くをバイオマスとする再生可能エネルギー(再エネ)に依存しているのである。従って、EUの電力の約

70%はすでにカーボンフリーになっていると言える。これにより、残り16%程度を占める石炭の使用を是が非でも最初に止めようとする意識が働いているのではないかと推測される。

これに対し、日本の現在の発電入力側のエネルギー量は約7,900 PJ程度で、その80%以上が天然ガス、石炭といった化石燃料に依存している⁽⁴⁾。

EU対日本でカーボンフリー競争をすれば、現状のままでは負け戦でしかないことがよく分かる。ドイツ、そしてポーランドでさえ石炭火力が廃止処置に追い込まれてしまうこともよく理解できる。そして、その代替エネルギー源として北海・バルト海の洋上風力を主とする再エネにシフトしようとしているのである。

しかし、そのEUにもアキレス腱はある。特に、図5-dに示す産業部門の天然ガス(34%)、図5-eに示す運輸部門の石油(91%)、そして、図5-fに示すその他/民生部門の天然ガス(29%)である。日本は、産業部門で石炭が多いため天然ガスの比率は低い⁽⁴⁾。これはCO₂排出の観点では日本の弱点でもある。しかし、EUの産業部門では天然ガスの比率が日本の2倍と高くなっている。

また、EUの一次エネルギー源に対する発電入口に向かうエネルギー源の比率27%(17,100 PJ / 64,200 PJ)は、日本の41%(7,900 PJ / 19,284 PJ)よりもかなり低い。日本の発電によるCO₂排出量の比率の高さ、運輸部門での低さの要因はここにある。逆に、これはEUでは、運輸部門のCO₂排出量比率が高くなるということであり、このことは図1からも理解できる。

さらに、日本は、発電入口に向かう一次エネルギー源の比率が高いことから、需要サイドでの電力消費量が大きくなると言える。これは、図5(f)に示すように、EUのその他/民生部門での電力の割合が32%に留まっているのに対し、日本では50%を越えていることから理解されるところである⁽⁴⁾。

以上の状況をまとめると表1の通りとなる。

EUの排出CO₂削減戦略では、まさに天然ガスのグリーン水素への転換、カーボンフリー電源を活用した自動車の電動化が主力になるのは間違いないと思われる。グリーン水素を利用した燃料電池自動車の導入も考えられるが、インフラ投資と開発に時間を要するため、まずは電動化が優先施策になるのではないかと考えられる。

このままでは日本がEUにCO₂削減競争で負けてしまうことは明白で、裏を返せば、これは脱炭素・グリーン経済成長という名の下で資金を集める枠組みを作ろうとする欧州の戦略に対して大きな後れを取っているとみてもいいだろう。元々、カーボンニュートラルを達成するためにはEU内の公的資金だけでは達成し得ないことは明らかであり、欧州域外からも民間資金を持ってこないと成立しない戦略である。この資金集めのツールが炭素税、炭素排出権、炭素国境税と言えるであろう。EU内の企業にしてみれば、将来的に欧州に資金が集まってくるということでwin-winな関係にあることから、政治主導の下、一部強引とも思える施策が次々と打ち出せているのだと思われる。

欧州の政策では、よく“ambitious”という言葉が乱舞する。これは数値目標に対する「野

表1 EUと日本の現状のエネルギー事情の比較

	EU	日本
一次エネルギー源	7割がカーボンフリー	カーボンフリーは2割未満
産業部門	天然ガスの比率が高い(日本の2倍)	石炭と天然ガスの合計比率がEUとほぼ同等
運輸部門	石油エネルギー使用量が日本の4倍(約12,000PJ)	石油エネルギー使用量が約3,000PJ
その他/民生部門	電化率が約30%	電化率が約50%

心」という意味ではなく、「欧州グリーン・ディール」によって、世界における持続可能社会のルールメーカー、そして、そのリーダーになろうとする欧州の成長戦略に対する「野望」だと言えるであろう。そう捉えると、中国が取り組んでいる「一帯一路」政策にも類似した感じもあるが、そこには「グリーン」という文字はない。そこが欧州らしい大きな違いであろう。

4. 2050年カーボンニュートラル達成のための欧州のCCUSプロジェクト

2050年カーボンニュートラルに向け欧州各国でCCUSプロジェクトは着々と進められている。図6にCCUSプロジェクトの実施場所分布を示す。

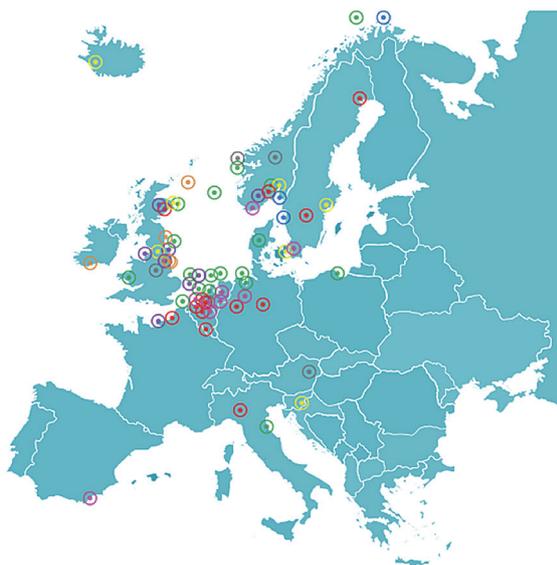


図6 欧州のCCUSプロジェクトの実施場所

CCUSプロジェクトは、CO₂を海洋の地下に貯蔵隔離する関係もあり、その多くは北海周辺に集中していることがわかる。

これらの中から主要プロジェクトを選出し、以下にその内容を紹介する

(1) ArcelorMittal Steelanol Ghent⁽⁵⁾

鉄鋼業から排出される炭素の一部を回収し、微生物による発酵機能を利用して高品位の燃料エタノールを作ろうとするものである。図7に全体のシステムフローを、図8には搬送中の発酵槽を示す。

このプロジェクトには、ArcelorMittal社、LanzaTech社、Primetals Technologies社、E4tech社が参画している。開発資金として、EU・イノベーションプログラム「Horizon 2020」の助成を受けている。プロジェクト期間は、2015年5月1日～2021年12月31日である。

ArcelorMittal社のGhent製鉄所から排出される高濃度(24～56%)CO含有排出ガスの約90%を取り込み、製鉄1トン当たり約50kgのバイオマス(主にバイオエタノール)をLanzaTech社の微生物発酵槽を用いて生産する。Ghent製鉄所には年間約25,000トンのエタノールを生産できる実証プラントを建設している。ArcelorMittal社は実証機の運用・保守、Primetals Technologies社はエンジニアリング、および試運転、そしてE4tech社がライフサイクルアセスメント(LCA)評価、エタノールの環境影響評価などを行う。

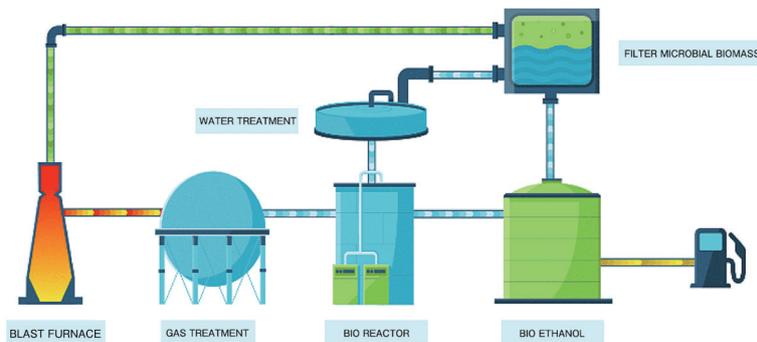


図7 Steelanol全体システムフロー



図8 運搬中の Steelanol 発酵槽

(2) Power-to-Methanol Antwerp BV (6)

回収したCO₂と、再生可能エネルギー電力(再エネ電力)から生成した水素を組み合わせ、メタノールを製造するものである。図9に構想を示す。

プロジェクトには、ENGIE社、Fluxys社、Indaver社、INOVYN社、Ooltanking社、Participate maatschappij Vlaanderen (PMV)社、Port of Antwerpが参画している。



図9 Power-to-Methanol Antwerp 構想

INOVYN社のScheldelaan地区に、2022年からデモプラントの建設を開始する予定である。年間8,000トンのサステイナブルなメタノールの生産を目指している。

地元のフランドル政府から100万ユーロの資金提供を受けている。プロジェクト期間は、2019年第2四半期から2023年までで、今年度から設計・製作に入る予定である。

(3) CarbFix Project (7)

大気中のCO₂を分離・回収して炭酸水を作り、地下岩盤に注入することで岩石中のCa, Mg, Feなどと炭酸塩鉱物を形成させ、地下で永久固定しようとするものである。従来の地層のキャップロックに依存するCO₂地下貯留とは異なるものである。図10にCarbfixのプロセスを示す。

このプロジェクトは、2006年にReykjavik Energy社、アイスランド大学、フランス国立科学研究センター(CNRS)、コロンビア大学によって始められた。以後、EU資金によるサブプロジェクトとして基礎研究が続けられていた。2012年、ON Power社の協力の下、Hellisheidi発電所から排出された73トンの75%CO₂-25%H₂S混合ガスを水に溶解させ地下に注入したところ、注入したCO₂が急速(2年以内)に鉱化していることが確認されたという。このCarbfixプロセスは、鉄鋼、鉄、セメント製造などの他のCO₂排出産業にも適用可能であり、現在いくつかのプロジェクトが進行中である。

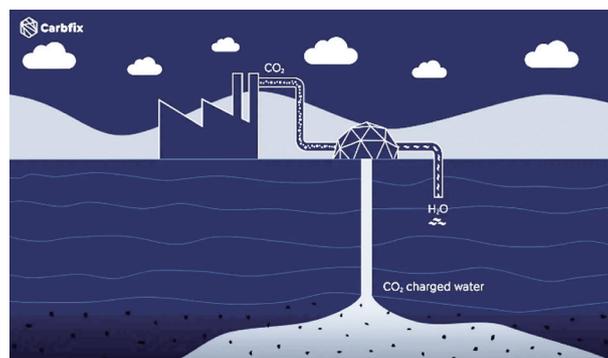


図10 Carbfixのプロセス

Carbfix は、2019 年末に Reykjavik Energy 社の子会社として設立され、2020 年 1 月 1 日には独立企業として事業を開始している。同社は、現在 10 億トンの CO₂ の永久貯蔵を目指している。

なお、2017 年 8 月 1 日から 2021 年 1 月 31 日まで、EU 資金を用いて Carbfix2 プロジェクトが行われた。これは、スイスの Climeworks 社の空気直接回収 (DAC) 技術を用いて大気中 CO₂ の鉱床への固定を目指したもので、その有効性が実証できたとして、現在、年間 4,000 トンの CO₂ を回収する Orca プロジェクトが進行中である。

理論的には、少なくとも欧州で 4,000 億トン、アメリカで 7,500 億トンを蓄えることができると言われている。

(4) Hydrogen 2 Magnum (H2M) ⁽⁸⁾

オランダにある Vattenfall 社の子会社 Nuon 社が所有する Magnum 発電所 (1.32GW、3 基のガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)) の 1 基を 2023 年までに水素焚に変換し、年間 130 万トンの CO₂ 排出量の削減を目指そうとするものである。図 11 に発電所の外観を示す。

2017 年 7 月に Nuon 社、Gasunie 社、Equinor 社 (旧 Statoil 社) の間で、カーボンフリーガス発電プロジェクト開発の覚書が交わされ、2018 年 3 月には、三菱パワー (旧 MHPS) 社が 100% 水素発電の実現可能性調査とそのタービン技術の開発が任されている。



図 11 Nuon Magnum 発電所の外観

Equinor 社は、ノルウェーの天然ガスからの水素製造、Gasunie 社は、発電所での水素輸送・貯蔵の開発を行う。水素製造の際、発生する CO₂ は、ノルウェー沖の地下施設に貯蔵する。将来的には Nuon 社は、再エネ電力で製造した水素を利用する予定である。

(5) Norsk e-fuel ⁽⁹⁾

ノルウェーの再生可能エネルギーを利用して、CO₂ と H₂O を燃料に転換しようとする独自のプロセスだという。ノルウェーに設立された e-Fuel 社の Power-to-Liquid を実現させるために、(高温)電解技術、燃料合成技術を有す Sunfire 社、DAC 技術を有す Climeworks 社、および工業化に向け EPC パートナーとして Paul Wurth 社 (SMS グループ) がコンソーシアムに入っている。図 12 に Norsk e-fuel の構想を示す。

今後 3 年以内にノルウェーの Herøya 地区に年間 1,000 万リットルの再生可能燃料製造デモプラントを作るとしている。

さらに、スケールアッププラントとして年間 1 億リットルの生産能力を持つ工場を全国に展開していくとしている。

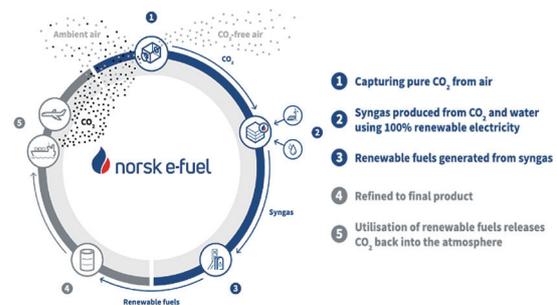


図 12 Norks e-fuel 構想

(6) Northern Lights ⁽¹⁰⁾

ノルウェー政府が進める本格的な CO₂ 回収・貯留プロジェクトである。CO₂ 貯留施設「オーロラ」は、史上初の国境を越えたオープンソースの CO₂ 輸送・貯留インフラネットワークである。プロジェクトの第 1 段階は 2024 年半ばに完了する予定で、年間最大 150 万トンの CO₂ を貯蔵することができる。

陸上で回収されたCO₂は、新設計の船舶でノルウェー西部のオイガルデン市にあるNaturgassparken工業地帯の敷地内に設置されるCO₂受入ターミナルに輸送される。そこからCO₂は北海の海底2,600メートルの深さに注入され永久に貯蔵される。図13にターミナルの想像図を、図14にCCSバリューチェーン構想を示す。

このCO₂貯留施設は2019年1月に「オーロラ」と名付けられ、2021年3月にはNorthern Lights JVが発足している。

今後、市場の需要に応じて、さらに500万トンまで容量を拡大することも考えられている。

この中で、ロングシッププロジェクトは、2024年までにノルウェーで本格的な液体CO₂輸送と貯蔵というCCSバリューチェーンの構築の可能性を欧州や世界に示すという役目を担っている。Northern Lights社が輸送と貯蔵の部分を請け負う。このロングシップによる年間80万トンのCO₂に加え、欧州各国からのCO₂も「オーロラ」は受け入れる予定だという。



図13 ターミナルの想像図

(7) FReSMe^{(11) (12)}

鉄鋼業の高炉排ガスからCO₂や水素を回収し、船舶輸送分野の燃料として使用されるメタノール燃料を生産するためのプロセス全体を実証することを目的としている。このプロセスでは、電解水素を必要としていない。本プロジェクトは約5年の歳月を経て、2021年6月に終了したばかりである。ルレア（スウェーデン）に建設されたパイロットプラントでは、最大800m³/hの高炉ガスを処理し、最大50kg/hのメタノールが生産された。ここには、CRI-Carbon Recycling International社の水素をメタノールに転換するEmission-to-LiquidsTM (ETL)技術が採用されている。この実証プロジェクトにより製造されたメタノールは、スウェーデンのフェリー会社Stena社の所有する旅客船“Stena Germanica”に世界で初めて船舶燃料として利用され、船舶輸送用の燃料として十分利用できることが実証されたとしている。図15にCRI社のETL装置の外観を、図16にFReSMeの構想を示す。

FReSMeプロジェクトには、i-deals社、CRI社、SSAB社、Tata Steel社、TNO、NIC、Stena Rederi社、Array Industries社、SWERIM社、Politecnico di Milano社、Kisuma Chemicals社が参画した。

EUの「Horizon 2020」プログラムの下で1,100万ユーロの助成金が投入されている。

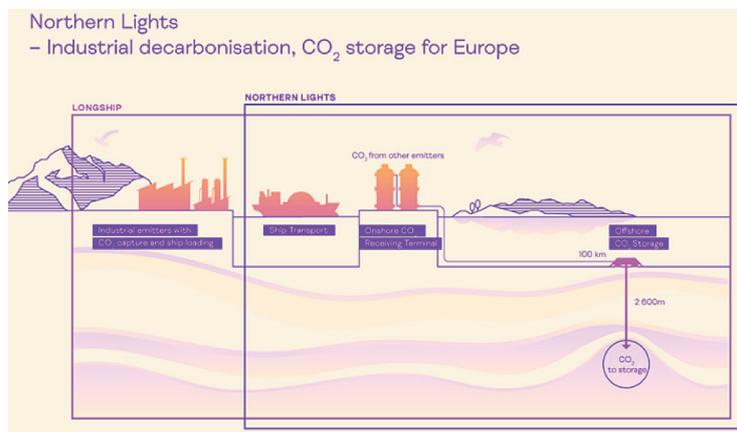


図14 Northern Lights CCSバリューチェーン構想



図 15 CRI 社 ETL 装置の外観

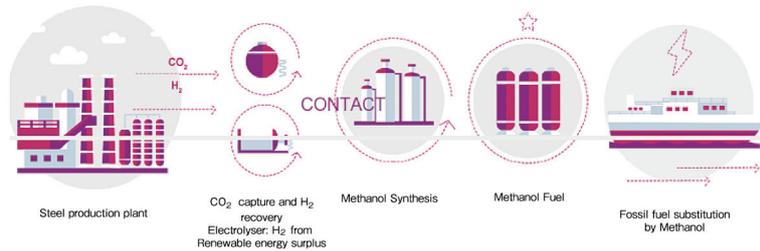


図 16 FReSMe 構想

(8) Net-Zero Teesside⁽¹³⁾ /Humber Zero⁽¹⁴⁾

この2つのプロジェクトは、イングランド北東部のティースサイドとハンバーをそれぞれ拠点とする炭素回収・利用・貯蔵 (CCUS) プロジェクトである。両地域で回収されたCO₂は、輸送され英国最大のCO₂貯蔵用塩水帯水層として評価されているエンデュランスの地下深くに永久に貯蔵される。図 17 にプロジェクトの全体構想を示す。

Net Zero Teessideでは、CO₂の回収・貯蔵を行う柔軟性のあるガス火力発電所を新たに開発する。また、CO₂を集めるネットワークを構築し、ティースサイド地域の産業の脱炭素化、水素製造・発電の導入を目指していく。このプロジェクトは、BP社主導の下、Eni社、Equinor社、Shell社、Total社と提携し、2026年の操業開始を目指して、フロントエンドエンジニアリング

デザイン (FEED) を進めている。

Humber Zeroでは、世界初の低炭素水素製造プラントの1つである“H2H Saltend”を開発し、ハンバー地域の工業用地やガス・バイオマス発電所を結ぶCO₂と水素のパイプライン・ネットワークを構築して、排出物の回収や低炭素水素への切り替えを行っていく。

この2つのプロジェクトは別に北海の海底パイプライン網と地中貯留の開発を加速するためにBP社主導の下、Equinor社、Eni社、National Grid社、Shell社、Total社によるNorthern Endurance Partnershipが2020年に設立されている。

Industrial Decarbonisation Challenge fundから資金が出ており、この3件において、民間と公的資金を合わせて総額2億2,900万ポンド (3億1,800万ドル) が投下されている。

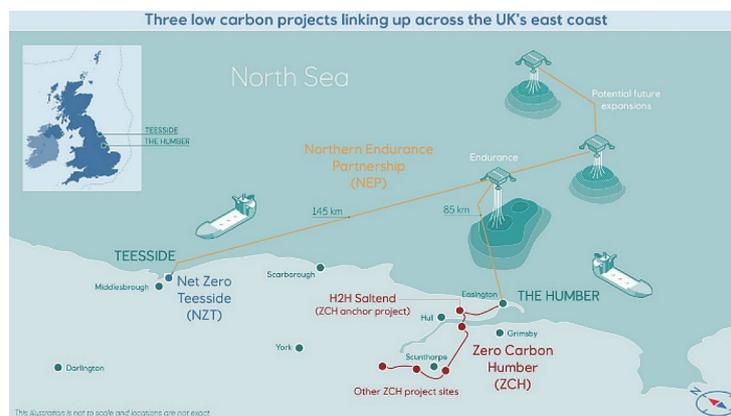


図 17 Net-Zero Teesside/Humber Zero の全体構想

5. おわりに

EUを一国とみなせば、その電力のカーボンフリー電源化はかなり進んでいることがわかった。

今年4月、ECが公表した投資基準「タクソノミー」に合致した企業活動リストから、原子力、天然ガス火力に関連する活動は外され、議論は先送りされている。しかし、昨今、一部情報では、天然ガス火力については基準が一部緩和されタクソノミーに合致する方向性になると聞かれる。原子力については、どのような評価が下されるのか。評価次第で日本の原子力政策にも大きな影響を与える可能性があると共に、それは世界のルールメーカー、リーダーになろうとする自らの「野望」をも打ち砕きかねない大きな判断にも成り得る。

そういう意味において、今回紹介した欧州の再エネの活用、CCUS技術をベースとしたエネルギー供給システムの構築こそ日本も注力していかなければならない方向性なのではなかろうか。

参考文献

- (1) eurostat, Greenhouse gas emissions by source sector.
- (2) eurostat, Energy flow diagrams.
- (3) 日本貿易振興機構 (JETRO), 概況・統計資料
- (4) 電力時事通信, 「カーボンリサイクル社会構築に向けて—前編」2021年1月6日, 第8032号
- (5) <http://www.steelanol.eu/en>
- (6) <https://powertomethanolantwerp.com/>
- (7) <https://www.carbfix.com/>
- (8) <https://www.nsenenergybusiness.com/projects/nuon-magnum-power-plant/>
- (9) <https://www.norsk-e-fuel.com/en/>
- (10) <https://northernlightsccs.com/what-we-do/>
- (11) <http://www.fresme.eu/>
- (12) <https://www.carbonrecycling.is/projects>
- (13) <https://www.ogci.com/funding-secured-for-net-zero-teesside-and-other-uk-hubs/>
- (14) <https://www.gazettelive.co.uk/news/teesside-news/teesside-humber-unite-beis-bid-21008246>

多様性を増す蓄エネルギー技術

～再エネ大量導入時代の選択肢～

川村 太郎 [※] (プロジェクト試験研究部
副部長 主管研究員)



岡崎 徹 ^{※※} (プロジェクト試験研究部
主管研究員)



徳永 貴道 ^{※※※} (プロジェクト試験研究部
主任研究員)

渡邊 建次 ^{※※※※} (プロジェクト試験研究部
副参事)

1. はじめに

2050年までに温室効果ガスの排出量実質ゼロを目指すことが、2020年10月の菅内閣の所信表明で宣言された。2021年7月の「第6次エネルギー基本計画」の素案では、電源構成に占める再生可能エネルギー（再エネ）の割合を、2030年目標で36～38%としており、現在、実現のための具体的な方策が各方面で議論されている。

再エネのうち、主要な役割を担う太陽光や風力は、いわゆる変動性の再エネであり、出力が日照や風況に影響される。また、設備利用率は太陽光で13%、風力で20～30%程度であり、その出力だけで電力需要を安定的に賄うのは難しい。電源構成における変動性再エネの割合が少ない段階では、火力発電などの調整力で電力の需要と供給をマッチさせることができる。

しかし、変動性再エネの導入量は2030年以降も増え続けると予測され、これらが主力電源として機能するためには、デマンドレスポンスなどの需給調整方法に加え、電力のエネルギー貯蔵技術が必要となると考えられる。現状で、代表的なエネルギー貯蔵技術は蓄電池や揚水だが、それ以外にも、例えば大容量

や長時間のエネルギー貯蔵に向く蓄エネルギー技術が開発・実用化されている。将来の変動性再エネ大量導入時代においては、これらの技術を適材適所で配置し、電力系統全体の安定性を確保することが現実的といえる。

本稿では、比較的大容量・長時間のエネルギー貯蔵のニーズに応えるための、有力な選択肢として期待される、蓄熱や圧縮空気による蓄エネルギー技術について紹介する。

2. 各種蓄エネルギー技術の特徴と役割

代表的な蓄エネルギーとして、蓄電池、揚水、水素のほか、蓄熱や圧縮空気によるものが挙げられる。蓄熱や圧縮空気による蓄エネルギー技術の詳しい原理や特徴は、次章以降に述べるが、いずれも電力をいったん熱や圧縮空気の状態で貯蔵し、必要時に発電に利用するものである。発電には蒸気タービンや膨張機を用いるものが主で、一般に、蓄熱による技術は「蓄熱発電」、圧縮空気による技術は「圧縮空気エネルギー貯蔵」(CAES)と呼ばれる。

各種の蓄エネルギー技術は、出力および容量によって、得意とする領域が異なっている⁽¹⁾⁽²⁾。図1に、各技術が担う領域を示す。蓄熱

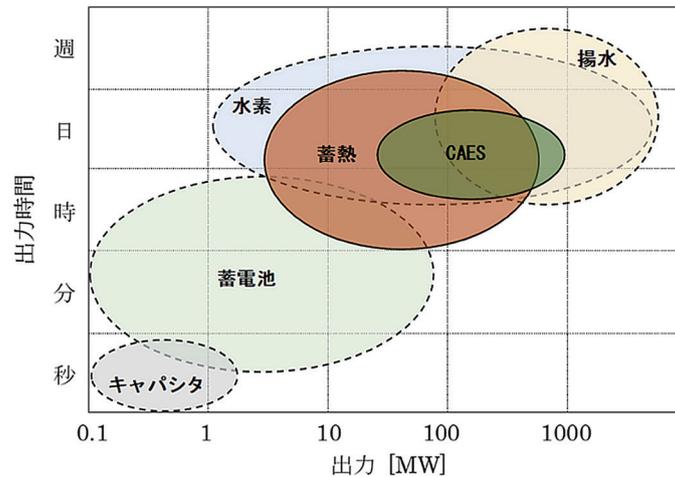


図1 各種蓄エネルギー技術が担う領域

発電は、出力が数 MW ～数百 MW，出力時間は数時間～数十日（容量では数十 MWh ～TWh 程度），CAES は，出力が数十 MW ～数百 MW，出力時間は数時間～数日（容量では数十 MWh ～数 GWh 程度）の使用に向いている。蓄熱発電や CAES は，蓄電池に比べて高出力，揚水や水素よりは小容量の用途に適しているとされ，設備コストが安価なことから，蓄電池よりも効率が低くとも経済的な使用方法があるとして，開発が急速に進行しつつある。

なお，蓄熱発電や CAES の時間応答性は，0 → 100% 出力が数秒～数分程度とされている。一方，蓄電池は数十ミリ秒以下であることから，変動性再エネ大量導入時の系統安定性への寄与を考えると，瞬時の変動よりも数分～数時間程度の変動を緩和する用途に適していると考えられる。

3. 蓄熱

(1) 原理，特徴，課題

① 概要

蓄熱は身近で，生活の中にも利用されている。湯たんぽや，昔のアイロンなどがその最たるものであろう。魔法瓶もある種の蓄熱である。これらは，最初に機器や媒体が使用に最適な温度に熱せられ，徐々に温度が下がっていく。温度が下がると言うことは，その熱の価値

も下がると言うことで，これらの蓄熱方法は，発電用途や工業用途には用いられない。

発電用途としての蓄熱は，一定時間，一定温度を出すように工夫されている⁽³⁾。そこには様々な蓄熱原理（顕熱，潜熱，化学反応など）が用いられており，多種多様な技術がある。また，様々な形式が提案されており，2つに分類できるものでもないが，ここではシステム構成の視点から，以下に代表的な2タンク型と1タンク型を紹介する。

② 2タンク型

2タンク型は太陽熱発電で10年以上の実績を持つ商用技術である。

その動作原理は図2のとおりで，蓄熱前には低温タンクには低温の熱媒が満たされている。蓄熱時には，再エネ電力をヒータで変換した熱や工場廃熱などで，この低温タンクから取り出された熱媒を暖める。暖められた熱媒は高温タンクに貯蔵される。放熱時にはこの熱媒がポンプで吐出され，熱交換器で高温

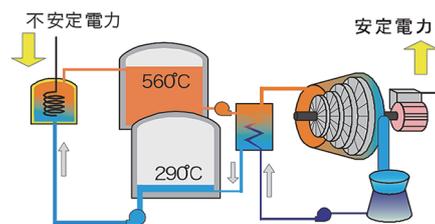


図2 2タンク型の蓄熱原理

高圧蒸気を発生させ、蒸気タービンを駆動することで熱エネルギーを電気エネルギーに変換する。この部分は石炭火力と同じである。プロセス応用でも熱交換器で必要温度を取り出すことができる。この過程をへて冷えた熱媒は、再び低温タンクに導入され、貯蔵される。

熱媒には硝酸塩混合物が用いられることが多い。これは、硝酸塩混合物は肥料にも使われており安価・安全なためである。この高温タンクは米国の大型太陽熱発電所にて直径40mのものが建設されており、600℃近くの熱媒温度を保持しながら、放熱損失は1日1%以下である。非常にタンクが大きく、貯える量に対して表面積が小さいため、なかなか放熱しない。

高温タンクと低温タンクが分かれているため、蓄エネルギー量の把握が容易で、かつ最後まで一定の温度を放出することができる。また、蓄熱と放熱の動作を同時に行える。豊富な実績から、安心して建設できることも1つの長所であろう。以前、米国の太陽熱発電所で施工ミスに起因するトラブルがあったが、その経験を元に建設された太陽熱発電所は、当初想定よりも良い運転実績を出している⁽⁴⁾。

課題は、硝酸塩を使ったシステムは既に開発し尽くされた感があり、今後の大きなコストダウンの可能性が少ない、ということであろう。これに対して、塩化物塩や炭酸塩を用い、より高温で蓄熱することで、エネルギー密度を上げ、かつ、熱電変換の高効率化を目指す開発も行われている。前述のように熱電変換部は石炭火力と同じであり、蒸気温度を上げるほど効率が向上するためである。石炭火力と親和性が高いため、既存の石炭火力を蓄熱発電に転換するプロジェクトも進められている。

③ 1タンク型

1タンク型は、2タンク型よりも安価な蓄熱を狙ったものであり、近年、開発が盛んになっている。1タンク型は、発電目的としては商用化されていないが、製鉄業などで熱風炉、ある

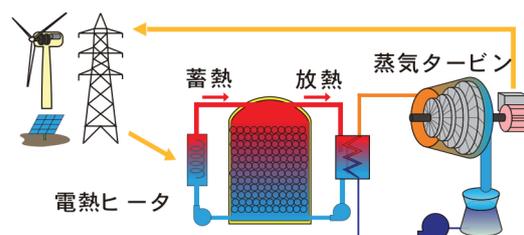


図3 1タンク型の蓄熱原理

いはリジェネレータなどとして実用化されている。蓄熱時には、図3のように蓄熱材の満たされたタンクの片端からヒータや工場廃熱で熱せられた気体あるいは液体の熱媒体を注入し、タンクに詰められた蓄熱材を順に暖めていく。蓄熱材を逆の端まで暖めれば蓄熱完了である。蓄熱材の中で、温度勾配が生じるため「サーモクライン型」とも言われる。放熱時には、蓄熱時と逆の端から低温の熱媒体を注入し、高温に暖めて取り出す。その後の熱電変換の工程は前述の2タンク型と同じである。1タンク型の場合は、蓄熱と放熱は同時に行えない。

2タンク型と比べてタンクが1つで済むことや、蓄熱材に安価な砕石や砂、コンクリートなどを採用することができるため、高い経済性が得られると考えられている。現実には商用レベルの物はまだ稼働していないため、その経済性は確認出来ていない。安全性については、2タンク型以上に高いと期待される。

課題としては、全ての蓄熱エネルギーを放熱しようとする、終了間際で出力温度が低下すること、長期保存すると、タンク内が均熱化してしまう点が上げられる。また、「サーマルラッチェットング」という、内蔵する蓄熱材の熱膨張・収縮の繰り返しによるタンクの損傷の恐れがあること、蓄熱材そのものの劣化（微小片化）が懸念される。

(2) 開発状況と実施例

最新の民間による開発例を表1に示す。一部、後述の圧縮空気によるエネルギー貯蔵等も含むが、いずれも何らかの蓄熱を利用している。特筆すべきは、民間でも電力会社が積

表1 世界の民間蓄熱発電の開発状況

	研究段階	パイロット	技術的に完成
発電専用	MALTA/ <u>Duke Energy</u> Energy-Dome <u>中部電力</u>	Siemens-Gamesa <u>Seas-nve</u> HighView/ <u>Enlasa</u> (チリ) HighView/住友重機 EPRI/ <u>Southern Co.</u> Brenmiller/ <u>NYPA</u> 神戸製鋼所 (A-CAES)	硝酸塩2タンク <u>RWE</u> (蓄熱部として) MOLTEX, TerraPower, Terrestrial, 東芝/富士電
電熱併給		1414degrees EnergyNest/Siemens-Energy Eco-Tech-Ceram SaltX/ <u>Vattenfall</u> TEXEL	STORASOL Azelio
確認中	247Solar, aalborgCSP, Almina, Antora, Brayton, CCT, CHESTER, Ecogen, Ecovat, Element16, Graphite Energy, KELVIN, Kraftblock, KYOTO, Lumenion/ <u>Vattenfall</u> , MAN/ABB, MGA, Pintail, Quantum Graphite, Stiesdel		

極的に関わっている点で、表の中では下線を引いて示した。

電力会社主導案件の中で最も進んでいるのは米国電力研究所 (EPRI/Southern) によるもので、2019年に検討を開始し、2021年に試験運転開始の予定で進んでいる。規模は10MWhで、後述のシーメンスーゲームサ社の130MWhと比べて10分の1の大きさであるが、実際の火力発電所に導入して試験するという意味は大きい。ここは耐熱コンクリートを蓄熱材に採用した1タンクシステムで、蓄エネルギーコストを大きく下げることが目標としている。ニューヨーク州電力公社 (NYPA) はその米国電力研究所に近いシステムである。デュー

ク・エナジー社は、送電端-送電端の蓄エネルギー効率が60%近いとの情報もあるマルタ社の技術を検討している。ここは600℃近い蓄熱と、マイナス100℃程度の蓄熱の両方を採用することで、この温度帯の熱機関としては破格の高効率を得られる、としている。

欧州ではシーメンスーゲームサ社の岩石による蓄熱発電が最も進んでおり、2019年よりハンブルクにて、図4に示す130MWh (熱) クラスのパイロットプラントを運転しており、2021年中には準商用機を建設するとされている⁽²⁾。面白いのは、同じグループのシーメンスーエナジー社が岩石ではなくコンクリート蓄熱の技術を保有するエナジーネスト社と組



(出所：シーメンスーゲームサ社)

図4 シーメンスーゲームサ社の碎石蓄熱発電設備

んでいることで、蓄熱発電は、用途によって最適なシステムが異なる、ということである。

技術的にこなれた2タンクシステムは、原子力の分野で、主に小型モジュール炉 (SMR)、あるいは次世代原子炉と呼ばれるシステムに併設されようとしている。原子炉は定常運転するのが最も経済性がよく、需要に合わせた発電をするのは得策ではない。そこで低需要時には蓄熱し、高需要時には炉と蓄熱の両方からの熱を蒸気タービンに導入することで、変動する需要に対して合わせた発電をする。

蓄熱発電は、蓄電池と比べて効率が低く、非合理的に見える。しかしある一定時間以上の蓄エネルギーを行うには蓄エネルギーコストが圧倒的に安い蓄熱発電が有利となる。これを傍証するものとして、太陽熱発電と太陽光発電のハイブリッドを建設する動きを紹介する⁽⁵⁾。ここでは太陽光発電の出力も熱に変換し、蓄熱して安定発電させる。世界の脱化石燃料の潮流より、トルクメニスタンのような世界第12位の天然ガス生産国でさえ、太陽熱発電の導入を検討し始めた⁽⁶⁾。太陽光発電と蓄電池の組み合わせでは、日没後4時間までしか安定発電できないからである。他にも、何らかの補助金は受けて居るのであろうが、ヨルダンの難民キャンプでは太陽光発電による夜間電力確保のため、アゼリオ社の蓄熱発電を導入することが計画されている⁽⁷⁾。アゼリオ社のシステムは潜熱利用で、上記システムとはかなり構成が異なるが、13kWと小さな容量をモジュールとして追加することでスケールアップが可能であり、かつ、高温の廃熱も利用できるため、バイオディーゼルの製造工場にも納品しようとしている。

4. CAES

(1) CAESの原理、特徴、課題

CAESは、1978年にドイツで初めて商用化されたが、当時のシステムは、火力発電所のガスタービン発電設備に併設するものであり、圧

縮空気エネルギー貯蔵-ガスタービン (CAES-GT)と呼ばれる。通常のガスタービン発電では、燃焼器に燃料と圧縮空気を送り込むが、CAES-GTでは、この圧縮空気を一時的に空気の貯蔵設備に貯めておき、必要時に燃焼器へ送り込む。これにより、電気料金が安い時間帯に空気を貯め、高い時間帯には圧縮機の動力を節約しつつ高压ガスが得られるため、経済性が向上する。ただし、燃料を使用するために、発電には二酸化炭素排出を伴う。

2005年頃からは、二酸化炭素排出抑制と蓄エネルギー技術の開発という社会的要請から、化石燃料を用いないCAESの開発が進行している。これは、「断熱圧縮空気エネルギー貯蔵」(A-CAES)および「等温圧縮空気エネルギー貯蔵」(I-CAES)と呼ばれる。

A-CAESは、電力を使って圧縮機を運転し、空気を4~7 MPa程度(もしくはそれ以上)に圧縮する。それを、高压の状態に空気の貯蔵設備に蓄え、発電時には、この高压空気で膨張機を運転することで電力を取り出す。これにより、蓄電池のように電力を一時的に蓄え、必要時に電力を得ることが可能となる。さらに、充放電効率向上のため、空気を圧縮する過程で生じる熱を再生熱として蓄熱槽に蓄え、膨張前にその熱で圧縮空気の温度を上昇させてから膨張させる仕組みを備えるシステムも開発されている。再生熱を利用しない場合は、充放電効率は30%程度であるが、再生熱を利用すると、充放電効率が50~60%程度まで向上させることが可能であり、現状ではこちらが主流となっている。A-CAESの概念図を図5に示す⁽⁸⁾。

I-CAESは、空気の圧縮-膨張と、空気貯蔵設備により、充放電する仕組みはA-CAESと同様であるが、界面活性剤を添加した水と、気泡となっている空気を一緒に圧縮することで、発生した熱を水にも蓄え、膨張時にはその熱を利用する。これにより、等温変化に近い圧縮・膨張過程を実現している。A-CAES同様に、このように熱をうまく利用するこ

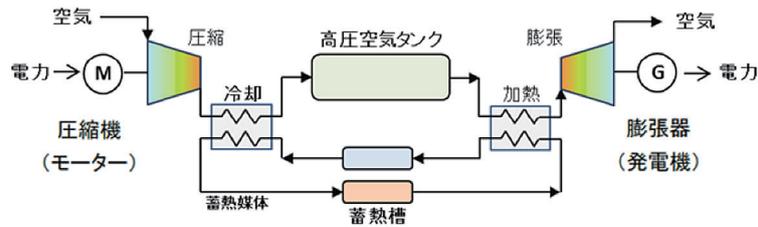


図5 A-CAESの概念図 (8)

とで、充放電効率が50～60%に向上するとされている。

商用化と普及の拡大を見据えた場合、課題となるのは、空気の貯蔵スペース・貯蔵方法と設備費のコストダウンであろう。

圧縮空気の貯蔵には、地下の岩塩層を用いるのが一般的である。岩塩層による空気貯蔵は、岩塩を採掘した後の空洞を利用するもので、北米や欧州では多く存在することに加えて、空洞が巨大であり、気体が漏れにくい構造をしていることから、使い勝手が良い。しかし、日本のように岩塩層がない地域においては、別の空気貯蔵方法を選択する必要がある。岩塩層以外の空気貯蔵方法としては、地下の帯水層や枯渇油ガス田を利用する方法、地下にコンクリートなどで構造物を設置する方法、海底や湖底で風船状の貯蔵設備を設置する方法、地上に高压タンクを設置する方法などが挙げられる。表2にそれぞれの特徴を示すが、空気貯蔵方法により、技術的困難さとコストが大きく変わる。したがって、地理的条件を考慮したうえでの空気貯蔵方法の選

択や、逆にコストの安い空気貯蔵方法が適用できる地域を探ることが事業採算性の確保と普及において重要となる。

なお、類似の技術として空気を液化して貯蔵するシステムもある。これは、「液化空気エネルギー貯蔵」(LAES)と呼ばれるもので、圧縮空気を4～7 MPaで貯蔵する場合、体積は常圧の空気に比べて約40分の1～70分の1となるが、液化空気の場合は、およそ700分の1の体積で貯蔵することができる。つまり、空気貯蔵設備がコンパクトであることが大きな特徴である。一方で、空気を液化するため、再生熱の利用や圧縮膨張のためのシステムが、CAESに比べて複雑になる。ここでは詳細は割愛するが、LAESは欧州や中国などで建設が進んでおり、普及の拡大が期待されている。表2にLAESの空気貯蔵の特徴もあわせて示す。

また、圧縮機、膨張機、発電機、再生熱利用システムなど、個別の構成要素は、各々ある程度成熟した技術であるが、例えば圧縮機と膨張機を共用にして、充電・放電時に切り

表2 空気貯蔵方式とその特徴

空気貯蔵方法	設置の容易さ	設備コスト	実績
岩塩層	比較的容易	1～10ドル/kWh	ほとんどの商用機で採用
帯水層	地質構造の調査が必要	地質調査により比較的高額	天然ガス貯蔵で実績あり
地下構造物	構造物の建設が必要	構造物建設により比較的高額	一部の商用機で採用
枯渇油田ガス田	比較的容易	岩塩層と同程度の可能性あり	天然ガス貯蔵で広く実績あり
水中	水中に構造物が必要	地下構造物と同程度と予測	ハイドロスター社が技術保有
地上タンク	比較的容易	土地代により比較的高額	実証機で広く採用
液化空気	比較的容易 設置スペース小	付帯設備により比較的高額となる可能性	複数の商用機の建設・運転が進行中

替えることで設備費を縮小するなどの工夫が重要となる。再生熱利用においては、蓄熱の媒体として混合塩類、加圧水や砕石などの顕熱を利用する方法や、無機塩類などの相変化による潜熱を利用するもの、顕熱と潜熱を組み合わせたものなどが検討されており、初期の設備コストや材料費を押さえつつ、効率的に熱利用する技術の開発が求められる。

(2) 開発状況

① CAES-GT

1978年にドイツ連邦共和国のハントルフにおいて世界初の大型商用CAES-GTが建設された。空気貯蔵は、地下600m、容積310,000 m³の岩塩層で行い、圧縮空気を4.8-6.6 MPaで貯める。発電はガスタービンにより出力290 MWであり、圧縮空気による発電時間は2時間、充放電効率は42%程度とされている⁽⁹⁾。

1991年には、米国アルバータ州マッキントッシュで、CAES-GTが運転開始された。空気の貯蔵はハントルフと同様に岩塩層であり、地下450mに、容積538,000 m³、圧力4.5～7.6 MPaで貯蔵する。発電出力は当初は110 MW、圧縮空気による発電時間は26時間だったが、1998年に設備が拡大され、総出力226 MWとなっている。ハントルフの設備との違いは、ガスタービンからの排熱を、圧縮空気の予熱に用いることで、これにより、充放電効率が52%程度まで向上している。なお、上記2つの設備は現在も稼働しており⁽¹⁰⁾、CAES-GTに限らず、CAES全般に共通して、

耐用年数は30～50年と長い。

日本では、1990～2001年に、通商産業省が新エネルギー財団に委託し、北海道上砂川町で実証試験が行われた。空気の貯蔵は、炭鉱跡にゴムライニングで気密性を確保した空洞が用いられ、4～8 MPaで貯蔵された。圧縮にはレシプロ圧縮機を使用し、発電出力はガスタービンにより2 MW、圧縮空気による発電時間は3.5時間であり、2001年に390時間余りの運転を行った⁽¹¹⁾。

② A-CAES および I-CAES

日本では、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の「電力系統出力変動対応技術研究開発事業／風力発電予測・制御高度化／蓄エネルギー技術を用いた出力変動制御技術の開発」(2014～2019年)において、早稲田大学、(一財)エネルギー総合工学研究所、(株)神戸製鋼所の共同により、出力1 MW、容量0.5 MWhのA-CAESを静岡県賀茂郡河津町で実証した⁽¹²⁾。圧縮機および膨張機にはオイルフリーのスクリュウ式を採用し、空気の貯蔵には地上タンクを用いた。

本実証試験により、風力発電の変動緩和にA-CAESが有効であることを示すとともに、商用機においては圧縮機と膨張機を共用することや、空気貯蔵には地下空洞を利用することの重要性などが確認された。実証試験施設の概観を図6に示す⁽⁸⁾。

現在、世界で稼働中または稼働予定の主なA-CAESの施設を表3に示す。



図6 NEDO 事業による CAES 実証試験施設の外観⁽⁸⁾

実証機では空気貯蔵に地上タンクを用いているが、商用機では岩塩層や地下空洞が採用されている。図7にハイドロスター社のA-CAES設備の概念図を示す⁽¹³⁾。同社は、表中のカナダのオンタリオ州と、オーストラリアの南オーストラリア州のプロジェクト手掛けているが⁽¹⁴⁾、空気貯蔵に地下空洞に設けた空気の貯留槽の圧力を、静水圧で一定に保持する仕組みを採用しているのが特徴である。これにより、一定圧力の圧縮空気を膨張機に導入することができ、発電出力を安定的に得るのに有利となる。ただし、地上に水圧維持用の水だまりを設けるため、土地と静水圧を地下の構造物に伝えるためのシステムが

必要となることから、単純な岩塩層の空気貯蔵と比べて設備コストが高くなり、技術的にも難易度が増す。

再生熱利用システムでは、実証、商用とも、ほとんどが顕熱方式を採用している。これは、顕熱を利用したシステムで、これまでに集光型太陽熱発電プラントで多く採用されており、運転実績が豊富であることが大きな理由と考えられる。

一方、潜熱を利用したシステムは、一定温度の熱出力が得られやすいことや、エネルギー密度が高く、設備をコンパクトにできるメリットがあることから、今後の技術開発の進展次第で潜熱を採用する事例が増える可能性がある。

表3 世界で稼働中または稼働予定の主な A-CAES 施設

プロジェクト名	場所	目的	開始年	出力(MW)	容量(MWh)	空気貯蔵	再生熱蓄熱
TICC-500	中国 精華大	実証	2014	0.5	0.5	地上タンク	顕熱
Chinese Academy of Sciences, CAES demonstration plant	中国 Guizhou	実証	2017	2.8(充電) 10(放電)	40	地上タンク	顕熱
Pilot scale demonstration of AA-CAES	スイス Biasca	実証	2017	0.7	-	岩塩層	潜熱, 顕熱 および ハイブリッド
Zhongyan Jintan CAES	中国 Jiangsu	商用	2017	50-60	200-300	岩塩層	顕熱
Goderich A-CAES facility	カナダ Ontario	商用	2019	22(充電) 1.75(放電)	7	岩塩層 (静水圧)	顕熱
Feicheng A-CAES Centre	中国 Shandong	商用	2019	50-1250	7500	岩塩層	顕熱
Angas A-CAES facility	オーストラリア South Australia	商用	2022 (予定)	5	10	亜鉛層 (静水層)	顕熱



図7 ハイドロスター社のA-CAES概念図⁽¹³⁾

I-CAESについては、ここ数年での大型実証は、2013～2015年にサステインエックス社（SustainX）がアメリカ政府の補助を受けて実施した、1.5 MWの実証例にとどまる。I-CAESは前述のように水と空気を一緒に圧縮／膨張させて、加温された水と空気を一緒に貯蔵槽に貯める。この実証例では、地上のタンクを採用したが、商用化を見据えた地下設備で実施するには、放熱などの問題が懸念される。現状でI-CAESの開発は、A-CAESに比べて遅れているといわざるを得ないが、今後の技術開発の進展によっては、再び注目を浴びる可能性もある。

5. 蓄熱技術の電力平準化における役割

上述のとおり、太陽光発電や風力発電といった変動性再エネの出力は日照や風況に影響される。図8は2017年4月30日の九州地方の電力の需要と供給を示したものである⁽¹⁵⁾。現状の変動性可能エネルギーの導入量でも、昼間の太陽光発電の出力増により需要に対して供給が大幅に上回るケースがある。このような場合、優先給電ルールに基づき、揚水動力の活用や火力発電所の出力抑制・停止、他エリアを結ぶ連系線を活用することで需要と供給をバランスさせている。そのような対応をしてもなお供給が需要を上回る場合には、太陽光発電や風

力発電の出力制御を行っている。

今後は、2030年、更には2050年へ向けて、変動性再生可能エネルギーが大量に導入されていくことで、出力抑制される電力量が大幅に増加することが懸念される。そのようなとき、数十MWh～TWhという比較的大容量の蓄エネルギーに向いている蓄熱やCAESといった蓄エネルギー技術は、これらの電力を大量吸収(蓄エネルギー)するニーズに応える、有力な選択肢と考えられる。

加えて、大容量の蓄エネルギーに向き、かつ設備コストが安価な蓄熱やCAESのような技術については、貯めた電力を当日に開放するといった使い方だけではなく、数日～数週間程度先に電力を開放するといった運用方法も可能である。これは、電力の平準化のみならず、蓄エネルギーした電力を卸電力市場のスポット価格が高い時に合わせて売電するといった新たなビジネスモデルの形成に寄与する可能性もある。

6. まとめ

蓄熱およびCAESについて、特徴や課題、実施例などについて紹介した。将来の変動性再エネ大量導入時代において、蓄エネルギー技術は必須であり、各種の蓄エネルギー技術の開発が進められている。蓄熱やCAESは、

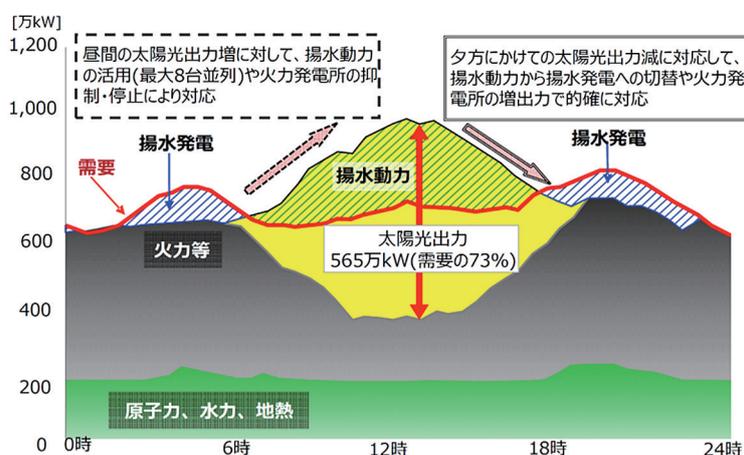


図8 九州の電力需給実績（2017年4月30日）⁽¹⁵⁾

比較的高出力、大容量の蓄エネルギーに向いており、電力平準化においては蓄電池と水素・揚水の中間的な領域で、その特徴が活かされるであろう。

また、これまで、蓄エネルギー技術は、それ自体が電力を生み出すわけではないため、ともすれば電力系統における「お荷物」のような扱いであったが、蓄熱やCAESは容量あたりの設備コストが安価である利点もあるため、電力価格の変動や、各種の電力市場を利用した新たなビジネスモデルが創出される可能性もある。

ここ数年の蓄熱およびCAESの技術開発の進展は目覚ましく、急速に技術の成熟も進んでおり、今後の動向が注目される。

参考文献

- (1) 米国立再生可能エネルギー研究所, "Energy Storage Possibilities for Expanding Electric Grid Flexibility, Analysis Insights," 2016
- (2) シーメンス・ゲームサ社ホームページ, <https://www.siemensgamesa.com/explore/innovations/energy-storage-on-the-rise>
- (3) 岡崎 徹, "蓄熱発電の最新開発動向," 化学工学, Vol. 83 No.9, 2019, pp.521-523
- (4) ソーラーペースホームページ, <https://www.solarpaces.org/moroccos-ourazazate-noor-iii-csp-tower-exceeds-performance-targets/>
- (5) HELI SCSP ホームページ, <https://helioscsp.com/morocco-pioneers-pv-with-thermal-storage-at-800-mw-midelt-coconcentrated-solar-power-project/>
- (6) ファイナンシャルエクスプレスホームページ, <https://thefinancialexpress.com.bd/views/can-solar-energy-be-generated-in-old-gas-power-plants-1629037918>
- (7) ベストホームページ, <https://www.bestmag.co.uk/industry-news/azelio-plans-25-mw-energy-storage-installations-jordan>
- (8) NEDO ニュースリリース, "圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES) システムの実証試験を開始", 2017年4月20日 https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100756.html
- (9) Crotogino F, Mohmeyer KU, Scharf R, "Huntorf CAES: more than 20 years of successful operation," Solution Mining Research Institute Spring Meeting, 2001
- (10) Foley A, Díaz Lobera I, "Impacts of compressed air energy storage plant on an electricity market with a large renewable energy portfolio", Energy, 57, 2013
- (11) 中北智文, 小林英夫, 奥原巖, 高橋克行, 安田友芝, 「圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン (CAES-G/T) の開発」,

石川島播磨技報, 43 (3), 2003, pp.102-107

- (12) (国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 「電力系統出力変動対応技術研究開発事業, 風力発電予測・制御高度化/予測技術系統運用シミュレーション (I) 風力発電予測・制御高度化 (3) 蓄エネルギー技術を用いた出力変動制御技術の開発」, 平成26年度~平成30年度成果報告書, 2019年2月
- (13) Lobner P, "New Grid-scale Energy Storage Alternatives to Batteries", The Lyncean Group of San Diego, 2021
- (14) ハイドロストアー社ホームページ, <https://www.hydrostor.ca/>
- (15) 資源エネルギー庁, 「なぜ、太陽光などの『出力制御』が必要になるのか? ~再エネを大量に導入するために」, https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/qa_syuturyokuseigyo.html

研究所のうごき

(令和3年7月1日～9月30日)

◇ 第25回賛助会員会議 (賛助会員デー)

日 時：9月28日 (火) 11:00～17:00

プログラム：

- 開会挨拶 (理事長 寺井 隆幸)
- 最近の事業活動について (常務理事 玉川 博美)
- 賛助会員サービスの活用について (企画部長 兼 情報センター長 茶木 雅夫)
- カーボンニュートラル社会におけるセクター トランジション戦略 (地球環境グループ 研究 理事 黒沢 厚志)
- 再エネ主力エネルギー化に向けた国内外の蓄 エネルギー技術とシステム適用について (新エ ネルギーグループ 部長 森山 亮)
- 再エネ主力電源化に向けた次世代電力ネット ワーク構築への取組み (電力システムグループ 部長 炭谷 一朗)
- カーボンニュートラル社会実現のための水素 の役割 (水素エネルギーグループ 理事 飯田 重樹)
- カーボンニュートラル社会を支える炭素循環 エネルギーシステムの構築に向けて (炭素循環 エネルギーグループ 部長 橋崎 克雄)
- 将来にわたる原子力利用を見据えた取組み (原子力チーム 部長 都筑 和泰)
- 原子力施設の廃止措置のニューウェーブに備 えて (廃止措置チーム 部長 堀川 義彦)
- エネルギー・環境分野での熱や流れの解析に ついて (安全解析チーム 部長 手塚 健一)
- 閉会挨拶 (専務理事 中村 幸一郎)

◇ 月例研究会

第411回月例研究会

日 時：7月15日 (木) 14:00～15:00

テーマ：

2021年度 供給計画の取りまとめの概要～
今後の設備形成の動向なども交えて～
(電力広域的運営推進機関 理事 寺島一希 氏)

第412回月例研究会

日 時：9月10日 (金) 14:00～15:00

テーマ：

1. 脱炭素化に蓄エネルギー必須
(一財)エネルギー総合工学研究所 プロジェ クト試験研究部 主管研究員 岡崎 徹)
2. 圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES) 装置の 紹介
(株)神戸製鋼所 機械事業部門 開発センター 開発企画室 坂本佳直美 氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：木野 千晶

テーマ：Preliminary investigation of contamination mechanism around a shield-pug in Unit-2/3 using SAMPSON code

発表先：OECD/NEA ARC-F プロジェクト本会議
発表日：7月5～7日

講演者：黒沢 厚志

テーマ：新型コロナウイルス感染症による人流・ 物流変化とカーボンニュートラル社会に おける天然ガストラックの役割

講演先：天然ガス自動車フォーラム 研究会
日 時：7月28日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクル社会に向けて
講演先：大成建設 技術センター (於東戸塚)
日 時：8月20日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクル社会に向けて
講演先：大成建設 技術センター (於東戸塚)
日 時：9月16日

講演者：酒井 奨

テーマ：CO₂分離回収・利用・貯留 (CCUS) の国 内外の最新動向から現状の課題と展望
講演先：カーボンニュートラル・二酸化炭素関連 セミナー (情報機構主催)

日 時：8月24日

講演者：坂田 興

テーマ：水素エネルギー大量導入の意義

講演先：国際フロンティア産業メッセ 2021

日 時：9月2日

講演者：坂田 興

テーマ：トコトンやさしい「水素」の話と水素導入の意義

講演先：フォーラム・エネルギーを考える（代表：神津カンナ）

日 時：9月8日

講演者：茶木 雅夫, 木野 千晶, 手塚 健一

テーマ：過酷事故解析コード SAMPSON の最新動向

講演先：日本原子力学会 2021 秋の大会（Web 開催）

日 時：9月10日

講演者：坂田 興

テーマ：Hydrogen as a solution to meet low-carbon energy needs（低炭素エネルギー需要に対する解としての水素）

講演先：ROSATOM event on the IAEA General Conference sidelines in Vienna（国際原子力機関（IAEA）ウィーン総会におけるロスアトム主催のサイドイベント）

日 時：9月21日

講演者：坂田 興

テーマ：Opening Keynote: Latest Research and Study on the hydrogen-related Industries（基調講演：水素関連産業における最新の研究動向）

講演先：ROSATOM event on the IAEA General Conference sidelines in Vienna（国際原子力機関（IAEA）ウィーン総会における ROSATOM 主催のサイドイベント）

日 時：10月13日

[学会発表]

発表者：黒沢 厚志, 加藤 悦史, 井上 智弘

テーマ：COVID-19 対策に伴う社会活動の変化とエネルギー需要への影響評価

発表先：第 40 回エネルギー・資源学会 研究発表会
主催者：エネルギー・資源学会

発表日：8月2日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：産業脱炭素化の課題と地域内連携

発表先：第 40 回エネルギー・資源学会 研究発表会

主催者：エネルギー・資源学会

発表日：8月3日

発表者：黒沢 厚志, 加藤 悦史, 井上 智弘（以上エネルギー総合工学研究所）, 荻本 和彦, 岩船 由美子（以上東京大学）

テーマ：ソフトリンクによる 2050 年のエネルギー需給分析（1）エネルギーシステムモデル

発表先：第 40 回エネルギー・資源学会 研究発表会

主催者：エネルギー・資源学会

発表日：8月3日

発表者：荻本 和彦, 岩船 由美子, 占部 千由（以上東京大学）, 東仁（JPOWER ビジネスサービス）, 黒沢 厚志, 加藤 悦史, 井上 智弘（以上エネルギー総合工学研究所）

テーマ：ソフトリンクによる 2050 年のエネルギー需給分析（2）電力システムモデル

発表先：第 40 回エネルギー・資源学会 研究発表会

主催者：エネルギー・資源学会

発表日：8月3日

発表者：手塚健一, 木野千晶

テーマ：

- (1) SAMPSON コードによる福島第一原子力発電所の事故進展および FP 挙動評価
- (2) SAMPSON による 3 号機圧力挙動
- (3) 福島第一原子力発電所での放射性核種の短長期挙動の評価
- (4) 事故シナリオ分析に基づく建屋内線量分布に関する現象論的考察（3号機）

発表先：日本原子力学会 2021 年秋の大会

発表日：9月7～9日

[寄稿]

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：水素利用技術

寄稿先：日本機械学会『機械工学年鑑 2021』

発行月：8月

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：2020 年における重要なエネルギー関連

事項 (Annual Energy Reviews 2020) 水素
寄稿先：日本エネルギー学会機関紙『えねるみく
す』 9月号 (100 巻 5 号)

[投稿]

投稿者：坂田 興

テーマ：水素エネルギー大量導入の意義

投稿先：一般社団法人水素エネルギー協会 (HESS)
会誌『水素エネルギーシステム』 Vol.46,
No. 3

発行日：9月30日

編集後記

ここ1年、「2050年カーボンニュートラル」に向けた世界的な動きが加速している。一方で、化石燃料の価格や需給バランスの急激な変化に加え、寒波等の異常気象がエネルギー安定供給に影響を及ぼす事案も世界的に発生した。化石燃料に関しては、本号最初の記事に詳しい。簡潔に言えば、「脱炭素の理念」と「現実の需給」の乖離が化石燃料の需給バランスを崩している主因であろう。現在の脱炭素の動きは、1つの「ファッション」との見解もある。

エネルギー需給に関しては様々な要因が関係する。直近で前例のない大きな要因は、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)である。世界的にその影響の検討が開始されており本号でも2番目の記事で考察した。今回は幸いにも稼働中の発電所への影響は原子力含めてほぼ無かったようであるが、需要側では分野によっては大きな影響を受けた。化石燃料については供給側の米国、中東、ロシア等の思惑も絡み今後も見通しは立ちにくい。脱炭素で最先端を行く欧州もこれからの冬に向けて燃料価格の高騰や供給難が問題となりつつある。欧州のマクロなエネルギー状況に関して

は、本号3番目の記事をご参照頂きたい。

エネルギー需給の不確定性の高さを指摘したが、2050年に向けて、脱炭素の動きは大きくは止まらないであろう。その中で、「カーボンニュートラル」は極めて野心的な目標である。使える技術を総動員しての取り組みが必須となる。本号最後の記事は、水素や蓄電池と比べ大きくは注目されていないが、近年関心が高まっている再生可能エネルギーの大量導入時に活用可能な蓄エネルギー技術の記事である。

偶然かもしれないが、本号の記事では日本の影が薄い。国内で再生可能エネルギーを増やしても、エネルギー供給の一定割合は海外に頼るであろう日本の将来は、やはり「技術立国」が1つの柱である。巻頭言に記載した通り、本年9月、当研究所はカーボンニュートラル実現技術の現状と将来展望、およびその背景について、幅広い読者を対象として解説した図書『図解でわかるカーボンニュートラル』を技術評論社から出版した。技術の観点で本号の記事と合わせて活用頂くことで皆様の今後の事業活動に少しでもご参考となれば幸いである。

編集責任者 茶木雅夫

季報 エネルギー総合工学 第44巻第3号

令和3年10月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

<https://www.iae.or.jp/>

(印刷) 株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。