



カーボンニュートラルの実現に向けた エネルギーtransition

近年のエネルギー価格の高騰を踏まえたエネルギーシステムの視点

庵原 一水、片桐 豪志、丹羽 弘善、加藤 健太郎、越智 崇充、三瀬 農士、森 啓文、
福嶋 勇太、濱崎 博、高野 惇、ヴィクトル ルフランソワ荒井、光井 智恵

デロイトトーマツグループ
2022年10月1日

目次

0. はじめに	3
1. エネルギー問題の現状とは？	4
2. 今後想定されるエネルギーの変革とは？	7
3. エネルギートランジションの考え方とは？	10
3.1. 基本方針	10
3.2. システム視点での検討：長期的な視点（2040年～2050年）	12
3.3. 推奨する4つの視点：中期的な対応（～2030年）	17
4. エグゼクティブサマリー	26

0. はじめに

～本資料の狙い・概要～

近年、世界各国のカーボンニュートラル化や化石燃料の高騰などにより、エネルギーシステムの将来的な在り方や将来に向けてのトランジションに変化が生じてきています。そのため、本資料では、近年の動向や今後想定される課題を示しつつ、将来のエネルギーシステムの在り方を検討する際の視点を示すとともに、トランジション期において優先度が高くなっている活動について紹介します。

なお、本資料では事例として、日本のエネルギーシステムの分析や動向を取り上げていますが、カーボンニュートラル化に向かう様々な地域で適用できる考え方を想定して整理しています。本資料が将来のエネルギーシステムの考え方や追加で必要となる対策のアイデアとして活用されることが本資料の狙いです。

将来のエネルギーシステムは、カーボンニュートラル、エネルギーセキュリティ、安心安全、大規模投資・技術開発によるさらなる経済成長等の様々な評価指標を考慮にいれなければならない、技術のイノベーション・エネルギーの分散化・デジタル化・セクターカップリングなどを踏まえた在り方を検討する必要があり、複雑化することが想定されます。そのため、全体最適を目的としながら、個別の取り組みがどのようにその他の取り組みに影響するのか、全体最適に影響を与えるのか等を考慮する「システムの視点」が必要となると考えています。

例えば、再生可能エネルギー発電の導入拡大は、電源のカーボンフリー化を促進するとともに、立地条件のよい地域においては発電コストの低コスト化にも寄与する可能性があります。他方で、大陽光、風力等は自然変動型電源であることから、電力の需給量を一致させるため（系統安定化）の対応により追加コストが発生します。また、太陽光パネルの廃棄処理等の対策も必要となります。結果として、CO₂削減やエネルギー自給率を向上させる一方、電力コストは増加する可能性があります。システムの視点がない場合、評価指標間、技術間のトレードオフを考慮しない個別最適に陥る可能性があるため、留意が必要です。システムの視点を実現する手段として、エネルギーインフラ全体をシミュレートすることが有効であり、トレードオフの原因、評価指標の定量的な評価によって、意思決定を支援することが可能となります。本資料では一例として、日本のエネルギーの需給構造全体をシミュレートした事例を紹介いたします。

また、将来的にはカーボンニュートラルを実現しつつ、短期的には化石燃料の高騰への対応や資源・エネルギーセキュリティへの歩みの加速化を実現するためには、これまで以上に、①エネルギーシステムの変革（分散化・デジタル化・セクターカップリング）、②最大限の省エネの実施、③サーキュラーエコノミー（資源・エネルギーの循環）、④ネガティブエミッション技術（NETs）の推進（国際連携の枠組みの構築）が必要となると考えています。本資料では、4つの活動の概要についても解説します。

1. エネルギー問題の現状とは？ ～今何が起きているのか？～

各国でカーボンニュートラル化が進展しており、再生可能エネルギー（再エネ）やクリーン水素等の脱炭素技術の社会実装に積極的に取り組んでいます。一方、特に欧州では天然ガスへの燃料転換を特定国に依存してきたことがエネルギー安全保障上の課題として改めて認識されています。

2015年のパリ協定の採択以降、カーボンニュートラル（CO₂のネットゼロ排出、脱炭素社会ともいう）を目指す国が増加し、2018年に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）により「1.5℃特別報告書」が発表されると、さらにその国数が増加しました。2021年においては、カーボンニュートラルを目指す国は世界の排出量の7割以上を占めています（図1）。

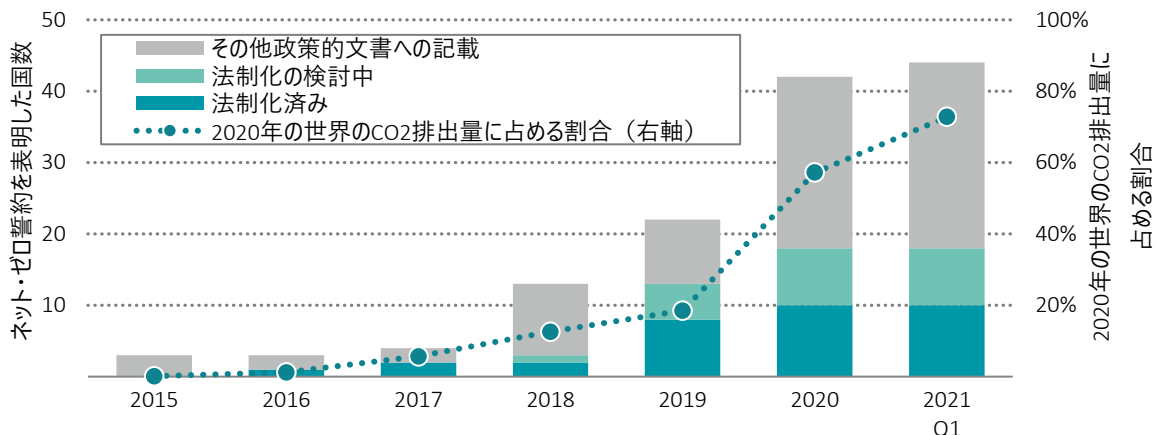
これにより、各国はカーボンニュートラルを実現するための施策（法制度、技術開発、市場設計等）を新しく打ち出しています。

エネルギー移行に関する世界の投資額は2000年代から増加傾向にあります。2004年の民間による投資額は320億ドル、2010年では2,100億ドル、2020年に5,950億ドルまで増加しました。さらに2021年にポストコロナのグリーンリカバリーに向けた投資が追加され、全世界の投資額は計7,550億ドル（約98兆円相当）まで増加しました。エネルギー移行に関する世界の投資額の内、まず再エネと運輸の電化が大半を占めており、続いて熱の電化、原子力、サステナブル素材等の分野が挙げられます。

別の指標として環境技術に係る公的機関の予算を確認しても、2000年代から増加傾向にあります。世界32か国+欧州委員会の2000年の予算が100億ドルであったのに対して、2010年では160億ドル、2020年に220億ドル（約2.9兆円相当）まで増加しました。内訳は大きい順に省エネルギー、再エネ、原子力、電力・エネルギー貯蔵、水素・燃料電池、その他となっています。

各国はカーボンニュートラル化を目指しており、再エネやクリーン水素等の脱炭素技術の社会実装に積極的に取り組んでいます。

図1 ネット・ゼロ誓約の広がり



出所：International Energy Agency「Net Zero by 2050」（2021年）、BloombergNEF（2022年1月）「Energy Transition Investment Trends 2022」、IEA（2022年5月3日更新）「Energy Technology RD&D Budgets」

各国がカーボンニュートラルの実現を目指している理由は環境保護のみならず、埋蔵量が大きく偏在しており、エネルギー安全保障上の課題となっている化石燃料からの脱却という目的もあります。

欧米は過去に二度のオイルショックを経験した結果、特に原油からの脱却を急務と捉えており、近年では天然ガスへの燃料転換が進んでいます。天然ガスは地球温暖化排出係数が低く、石炭からの燃料転換にも活用されています。

欧州と日本は世界有数の石油・ガス・石炭資源国であるロシアからの天然ガスの輸入を増やしてきました。欧州は特にロシアからのエネルギー輸入に大きく依存しています。欧州の石油の23%、天然ガスの34%、石炭の42%がロシアから輸入されています。日本では、石油の4%、天然ガスの9%、石炭の11%がロシアから輸入されています。日本はロシア産化石燃料輸入への依存度は高くないものの、そもそもエネルギー自給率が低い（11%）ため、エネルギー調達戦略が極めて重要です。

そのため、ロシアからの燃料の供給が滞った場合、経済活動や人々の生活に大きな影響を与えてしまいます。なお、化石燃料輸出はロシアの歳入の約4割を占めています。

世界有数の石油・ガス・石炭資源国であるロシアが軍事行動に出たことを受けて、各国はエネルギー安全保障の重要性を改めて評価しています。

ロシアへの経済制裁を強化するため、そしてロシアの経済影響圏からの脱却を図るため、各国はロシア産石炭の輸入停止を短期的に実現し、天然ガスと石油の輸入停止を中長期的に実現することを目指しています。

日本を含むG7は2022年4月7日にロシアからの石炭輸入禁止や段階的削減、エネルギーにおけるロシア依存低減の取り組み強化、ロシアへの新規投資の禁止等を発表しました。5月8日にはさらにロシアからの石油輸入禁止に取り込むことを発表しました。

ロシアへのエネルギー依存度が高い欧州においても、天然ガス等、ロシア産化石燃料への依存を2030年までに脱却する計画「REPowerEU」が発表されました（3月9日）。また、ロシアのエネルギー産業への投資、エネルギー産業に必要な物品や技術の輸出を原則禁止しました（3月15日）。

米国政府はロシアからの原油・石油製品・LNG・石炭の輸入やロシアのエネルギー産業への新規投資を禁止しました（3月8日）。また、欧州へのLNG供給量を増やすことも表明しました（3月25日）。

欧州連合（EU）を始めに、ロシア産天然ガスから他国のLNG輸入へ段階的にシフトする動きも確認されています。例えば、ドイツがカタールとLNG供給契約を締結することが報道されました。一方、世界的に化石燃料の供給能力が大きく増加する余地がないと言われており、輸入国間の競争が激しくなることが予想されます。日本は化石燃料の輸入に大きく依存しており、そういった需給の変化によって燃料価格が変動（増加）し、日本国内へ影響（需要家の負担増）することが十分想定されます。

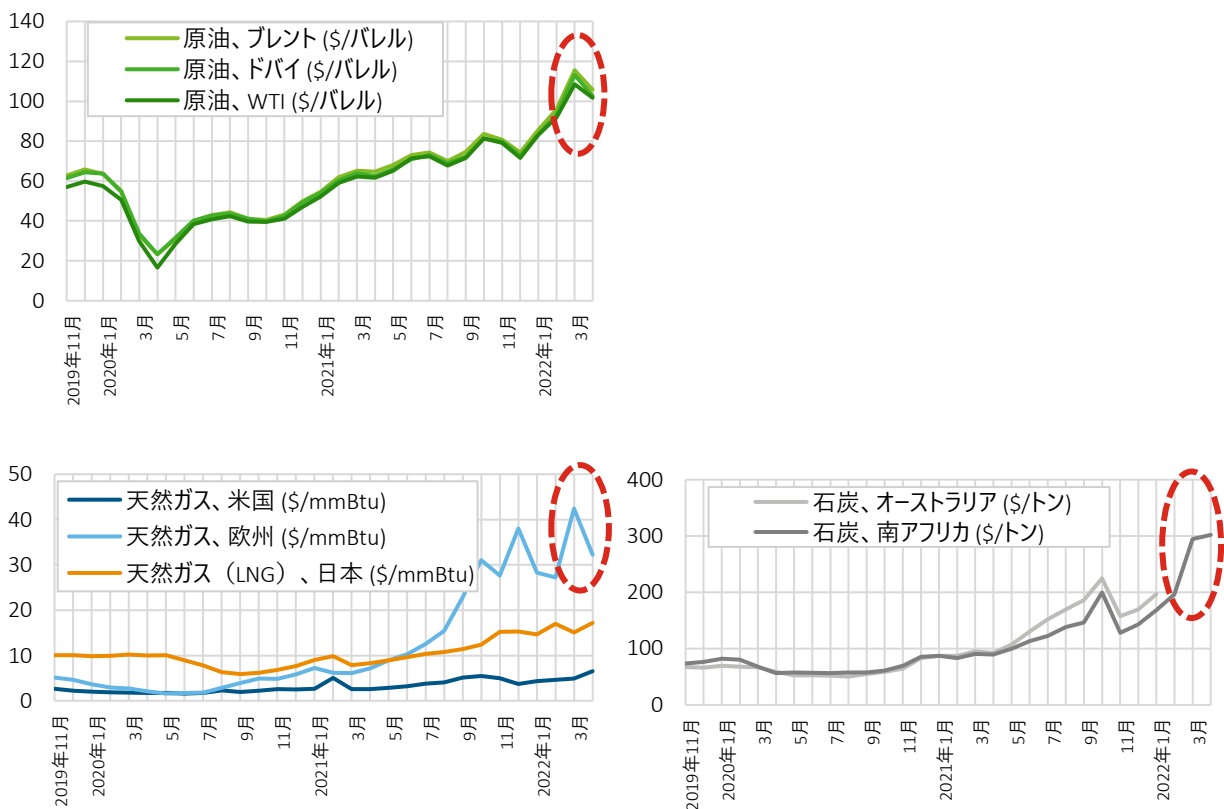
カーボンニュートラル化の歩み及び特定国への過度な依存脱却を図る目的で、各国は、短期的には石炭、中長期的には天然ガス・石油から脱却していくことが見込まれます。

化石燃料価格はポストコロナの経済回復と需給ひっ迫によって2021年から高騰していました。

ロシアは世界有数の石油・ガス・石炭資源国であり、一部の国においてロシア産燃料への依存度が高い状態です。そのため、2022年2月のロシアによるウクライナへの軍事的侵攻により、以降、各種燃料の輸入価格がさらに急騰しました（図2）。LNGスポット価格は過去最高値を更新し、この価格の高騰は、供給途絶の懸念やロシア以外の燃料調達先への切り替えの動きを引き出しています。

エネルギー安全保障の懸念が強まり、世界的に燃料価格が高騰しております。

図2 ウクライナ危機と燃料価格への影響
（単位：米ドル、名目値）



出所：世界銀行（2022年5月3日）「Commodity prices」

2. 今後想定されるエネルギーの変革とは？

～今後、何が起きるのか？～

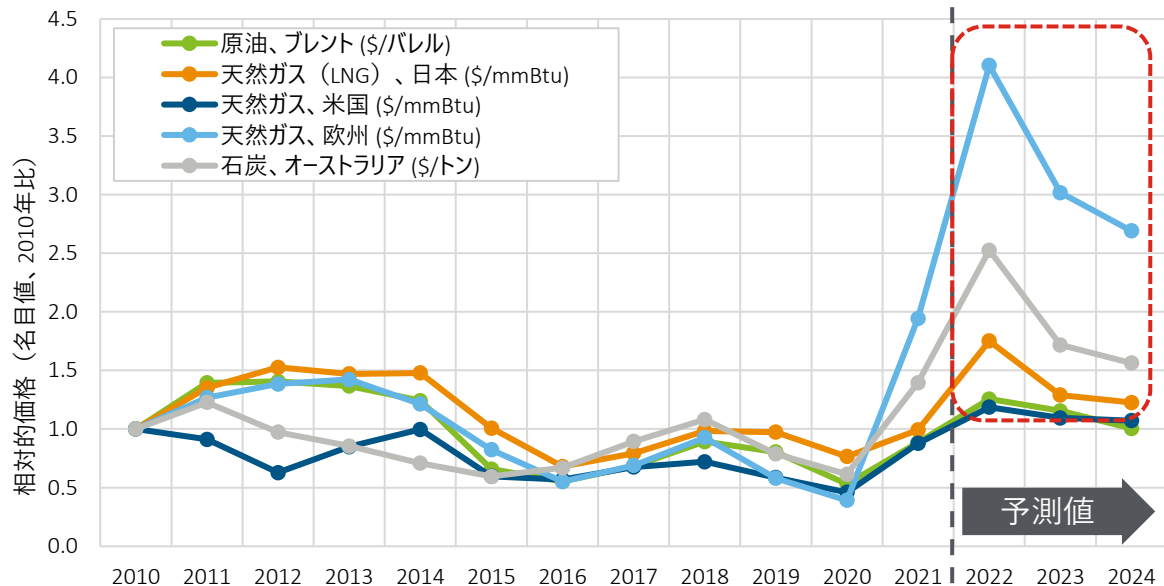
各国が地政学リスクを有する地域へのエネルギー依存から脱却しようとしていることもあり、化石燃料価格は今後数年間、高水準で推移することが想定されます。そのため、エネルギー自給率の向上にも貢献できる再エネ等の展開が早まる可能性もあります。ただし、低炭素技術の製造原料についても、特定の国に偏ったサプライチェーンが一部存在しており、化石燃料と同様にエネルギー安全保障の確保が必要になります。

前述の供給途絶の懸念やロシア以外の燃料調達先への切り替えの動きは、今後しばらく続く見込みであり、世界銀行の予測では、化石燃料価格は2022年に急騰した後、数年をかけて減少していくとされています。ただし、少なくとも2024年までは2021年の水準に戻らず、高止まりする見通しが示されています（図3）。

一方、燃料価格の長期的な見通しについては、ロシアによる軍事的侵攻後ではまだ作成・公表されていませんが、2021年に公表されたIEA（国際エネルギー機関）の長期見通し「World Energy Outlook 2021」においては、化石燃料の価格は脱炭素化の進捗具合に左右されることが示されています。脱炭素の取り組みが大きく進まない「既存政策シナリオ」では、各種化石燃料の輸入価格は上昇若しくは横ばいで推移し、逆に2050年に世界的に脱炭素社会を実現する「ネット・ゼロ・エミッション シナリオ」においては化石燃料の輸入価格は減少すると見込んでいます。原油と天然ガスは特にシナリオによって将来の予想価格が大きく左右されます。

燃料価格はしばらく高止まりする見通しです。

図3 燃料価格の短期予測



出所：世界銀行「Commodity Markets Outlook – April 2022」

化石燃料の輸入価格の高騰への対応、エネルギー安全保障の一層の確保やロシアへの経済制裁を果たすため、各種取り組みが必要となります。

EUでは2030年までにロシア産化石燃料への依存から脱却するための施策をREPowerEUにおいて整理しています。計画が実現されれば、ウクライナ危機は欧州のエネルギーミックスに中長期的な影響を残す可能性があります。

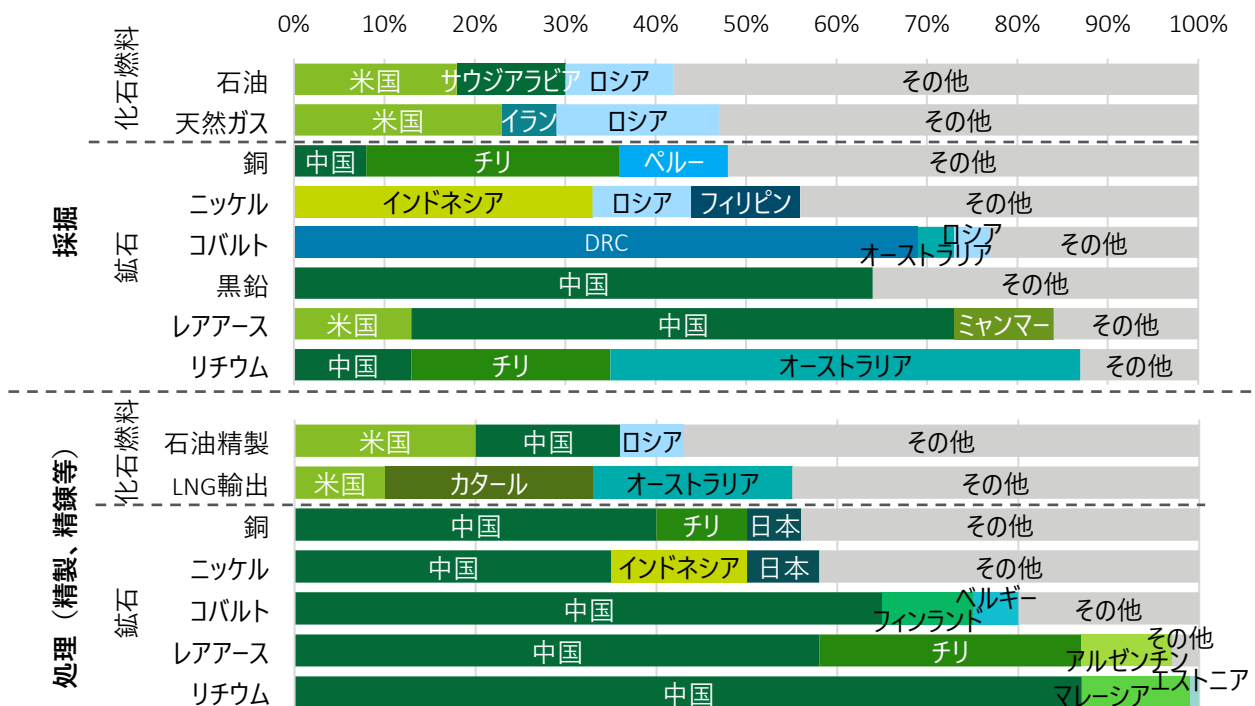
REPowerEUでは、燃料調達先の多様化の他に、省エネルギーと再エネの導入加速に関する施策を挙げています。具体的には省エネルギー目標の引き上げ（2030年に9%から13%へ）、再エネ導入目標の引き上げ（2030年に40%から45%へ）、電化と水素化による産業部門の脱炭素化、バイオガス生産量の増加、新たな水素関連プロジェクトの発足、再エネの許認可手続きの加速化や再エネ由来水素の調達目標の引き上げ（2,000万トン/年へ）等を掲げています。また、「再エネ等に必要な製造能力、重要鉱石へのアクセスの確保」という施策も含まれています。

電気自動車、風力発電、太陽光発電や水素関連技術は従来技術より多くの鉱石を利用します。そのため、パリ協定の目標達成を想定したIEAの持続可能な開発シナリオ（SDSシナリオ）では、クリーンエネルギー技術による鉱石需要は2040年まで、レアアースとマンガンは現状の7倍前後、ニッケル、コバルト、黒鉛は現状の20倍前後、リチウムは現状の42倍まで増加する見通しです。

大幅な供給能力の開発が必要である一方、足元ではサプライチェーンが少数の国に偏っており、鉱石資源についても安全保障の課題が懸念されています（図4）。

今後のエネルギー安全保障は、燃料調達のみならずクリーンエネルギー技術に必要な貴金属・レアアースも十分考慮すべきです。

図4 化石燃料・鉱石の生産量シェア（2019年）



出所：IEA（2021年5月）「The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions」、欧州委員会（2022年5月18日）「REPowerEU」

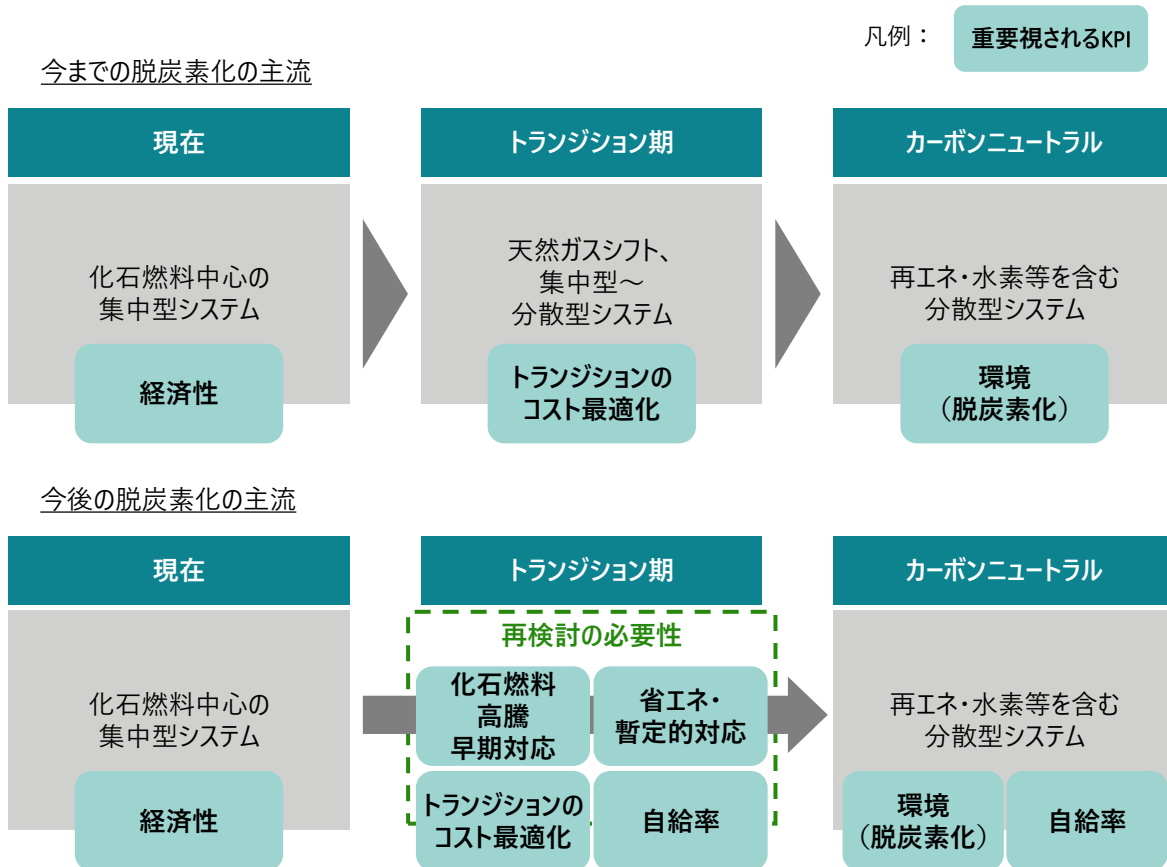
これまでは、現状から円滑にカーボンニュートラルに移行するため「化石燃料⇒低炭素化（天然ガスシフト等）⇒脱炭素化」の流れが主流であったと思われます。

他方、昨今の状況を踏まえると、低炭素化から一足飛びにカーボンニュートラルに移行する可能性も考えられます。また、KPIとして自給率の重要性が増してくると想定されます。

そのため、特に短中期的な転換期については、再検討が必要だと考えます（図5）。節電・省エネ対策と再エネシフトの加速化、エネルギー資源外交、鉱石資源の確保に関して十分な検討が必要です。

2050年カーボンニュートラルの実現とともに化石燃料の価格高騰への対応や自給率の向上を図るべく、特に短中期的なエネルギー転換を再検討する必要があります。

図5 今後想定されるエネルギー転換への影響



3.1. エネルギートランジションの考え方とは？

～エネルギートランジションの視点：基本方針～

世界的にエネルギートランジションの再検討が加速化すること想定されます。再検討にあたって、複数の評価指標を設定しつつ、システムの視点により全体最適を目指すことが重要です。その際、シミュレーション等によって全体を分析することが有効です。

近年の潮流により、目指すエネルギーの在り方として、これまでのカーボンニュートラルをコスト最適に進める考え方から、エネルギー的・資源的安全保障も重視することにシフトしてきています。また、各地で大型の自然災害もみられるようになってきているため自然災害にも耐えられるような強靱なインフラが求められています。また、近年、カーボンニュートラル化等に寄与するための様々な革新技術が研究・開発されています。そのため、全体最適を目指すためには、革新技術間のトレードオフ・相互作用を考慮しながら、社会実装を進めていく必要があります。

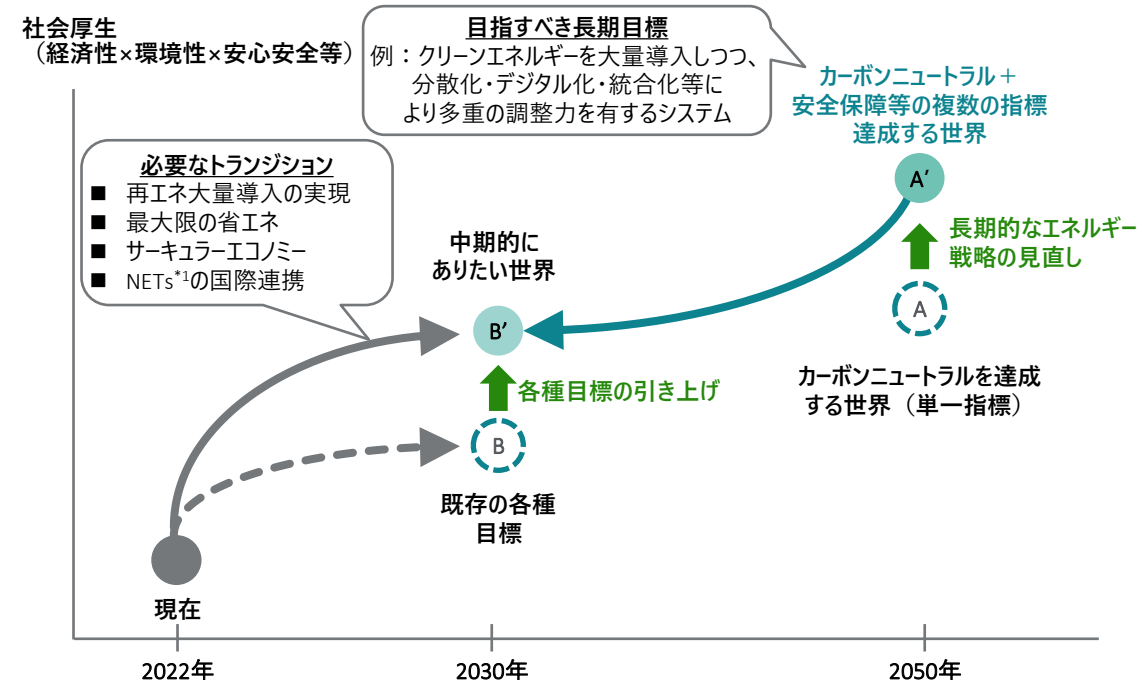
将来の目指すべき姿として、すべての評価指標で満点をとることは困難です。例えば、自給率100%を目指し、すべてを国産の再生可能エネルギー（太陽光・風力発電）にした場合、災害に対する強靱性やエネルギーコストについては、犠牲にしなければなりません。他方、海外からの安いクリーンなエネルギー（グリーン水素や化石燃料+CCS等）に依存した場合、エネルギーコストは多少の上昇にとどまる可能性

はありますが、エネルギーセキュリティの観点や高いエネルギー価格のボラティリティの観点で懸念が残存します。

そのため、エネルギーの在り方については、複数の評価指標を設定しつつ、多様な技術の組み合わせによる最適解を探していく必要があります。また、それに合わせて中期的なトランジション期も再検討していく必要があります。例えば、日本のエネルギー政策においては、安全性を前提とした上で、エネルギーの安定供給を第一とし、経済効率性の向上による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に環境への適合を図る、S+3Eの視点が重要とされています。このような考え方を基本としながら、将来の姿やエネルギートランジション戦略を具体化していく必要があります。

環境性・コスト・セキュリティ等を踏まえ、トランジション戦略を見直すことが必要です。

図6 今後のエネルギーの在り方の視点



*1：Negative Emissions Technologies：負の排出技術/二酸化炭素回収（Carbon Dioxide Removal: CDR）技術

複数の評価指標を設定しつつ、多様な技術の組み合わせによる最適解を探索していくためには、全体最適を目的としながら、個別の取り組みがどのようにその他の取り組みに影響するのか、全体最適に影響を与えるのか等を考慮する「システムの視点」が必要となります。例えば、再生可能エネルギー発電の導入拡大は、電源のカーボンフリー化を促進するとともに、立地条件のよい地域においては発電コストの低コスト化にも寄与する可能性があります。他方で、大量光、風力等は自然変動型電源であることから、電力の需給量を一致させるため（系統安定化）の対応により追加コストが発生します。また、太陽光パネルの廃棄処理等の対策も必要となります。結果として、CO2削減やエネルギー自給率を向上させる一方、電力コストは増加する可能性があります。システムの視点がない場合、評価指標間、技術間のトレードオフを考慮しない個別最適に陥る可能性があるため、留意が必要です。

システムの視点を実現する手段として、エネルギーインフラ全体をシミュレートすることが有効であり、トレードオフの原因、評価指標の定量的な評価によって、意思決定を支援することが可能となります（図7）。

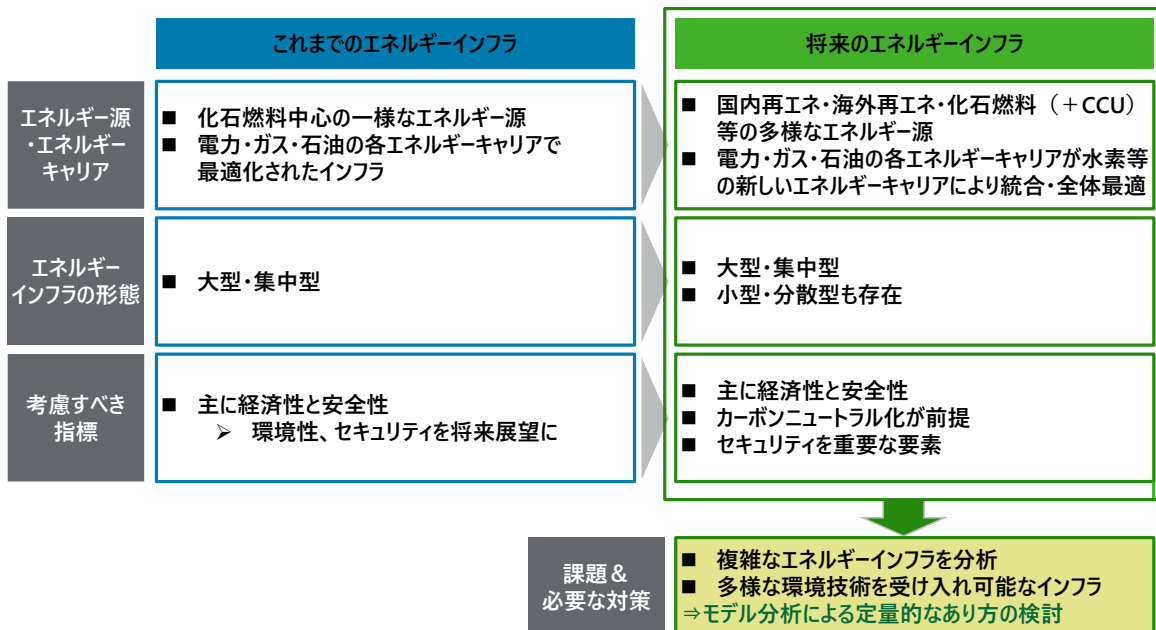
複雑なエネルギーの在り方の検討には、エネルギーシステムシミュレーションが有効です。

将来に向けた共通の対策として、①エネルギーインフラの変革、②最大限の省エネ、③サーキュラーエコノミー、④国際的なNETs事業の推進が有効です。

多様な評価指標を設定したとしても必要な共通の対策も存在します。例えば、従来より再生可能エネルギーの導入は確実に増えていき分散化しつつ、デジタル技術の導入により、マネジメントも高度化していきます。そのため、効率的な分散化・デジタルインフラは必要となります（①）。また、化石燃料の高騰を回避しつつ、将来のエネルギーコストを削減するため、化石燃料価格の高止まりやCO2削減対策コスト（カーボンプライシング）を前提とした省エネ対策が重要です（②）。さらに、資源・エネルギーの有効活用・自給率の向上のためのサーキュラーエコノミーも重要です（③）。

将来カーボンニュートラルを達成させるためには、負の排出であるネガティブエミッション技術（NETs）も有効です。NETsの適地は、世界的に遍在しているため、世界全体の資源として国際的な協力が必要不可欠であると考えます。

図7 現在と将来のエネルギーインフラの変革の想定と必要な対策



3.2. エネルギートランジションの考え方とは？

～システム視点でのエネルギーの在り方の検討：長期的な視点～

システムの視点により全体最適を目指す一例として、日本のエネルギーの需給構造全体をシミュレートした事例を紹介します。

例えば、再エネはカーボンニュートラルと自給率向上の両方に貢献するが、電力の需給量を一致させるため（系統安定化）の対応により大きなコストを必要とすること、システム全体が複雑になることが見込まれます。

これまでの概観を踏まえた上で、長期的なエネルギーの在り方を分析するため、日本をモデルとして2030年及び2050年におけるエネルギーインフラのシミュレーションを行いました。

本シミュレーションでは、日本をベースに脱炭素社会実現とエネルギー自給率の両面より評価を行いました。その際、CO₂削減目標は、2030年に46%削減（2013年比）、2050年にカーボンニュートラルを達成と仮定し、森林吸収量は4,700万トン-CO₂、エネルギー自給率は、50%、75%、90%の3ケースとしました（図8）。

エネルギーシステムの高度なシミュレーションツールを用いてカーボンニュートラル社会の将来像を描きました。

主なシミュレーション結果は、以下の通りです。

- 同じカーボンニュートラルを実現する前提でも、エネルギー自給率によって世界観が大きく変わります
- エネルギー自給率90%という高い自給率も、物理的に実現可能です（洋上風力の大量導入が必要）
 - 自給率が高いほど、電力の水素化、蓄電池等の調整力の大量導入、系統拡充が必要となります
 - また、エネルギーシステムが複雑になり、各設備の稼働率が低下するため、高コストになります
- そのため、カーボンニュートラルとエネルギー自給率の両立を目指すためには、省エネによるエネルギー需要の抑制を促しつつ、技術開発による調整技術の性能改善とコスト削減や分散型リソース（EV、家庭用蓄電池、デマンドレスポンス）の効率的な活用（制度改革、デジタル化）が重要になります。

図8 シミュレーションの主な前提条件

CO ₂ 削減目標	2030年：46%削減（2013年比） 2050年：カーボンニュートラル（森林吸収量約4,700万t-CO ₂ を考慮）
エネルギー自給率	50%、75%、90%
原子力	再稼働あり、ただし建て替えなし。設備使用年数は60年
再エネ	導入量：CO ₂ 削減目標に合わせてコスト最小化計算 導入ポテンシャル：国内で公開されている日射量情報や風況マップを基に作成
水素	国内水電解水素：エネルギー消費量4.3kWh/Nm ³ (アルカリ、2030)、コスト22.3万円/Nm ³ /h（アルカリ、2030）、電力調達価格は内生的に計算 輸入水素価格：2050年にCIF価格15円/Nm ³
系統拡充	あり

自給率の目標の違いによる電源構成に係るシミュレーション結果を比較したのが以下の図9になります。まず注目すべきは、自給率の違いにより再エネ導入割合が大きく異なる点です。この割合の違いは海外からのガス火力（グリーン水素又は天然ガス+CCS）の導入割合によるものです。ただし、自給率を90%にした場合においても、ガス火力は一部残存します。これは、ガス火力による系統安定化機能が経済的に合理性を有しているからだと思います。

また、自給率90%と自給率50%を比較すると、自給率90%の方は洋上風力の割合が比較的大きくなっています。これは、発電コスト的に比較的優位である太陽光のポテンシャルが頭打ちし、コストは多少かかるが導入ポテンシャルの大きい洋上風力の導入が進んだものと思われる。

図9 電源構成の想定（2050年）

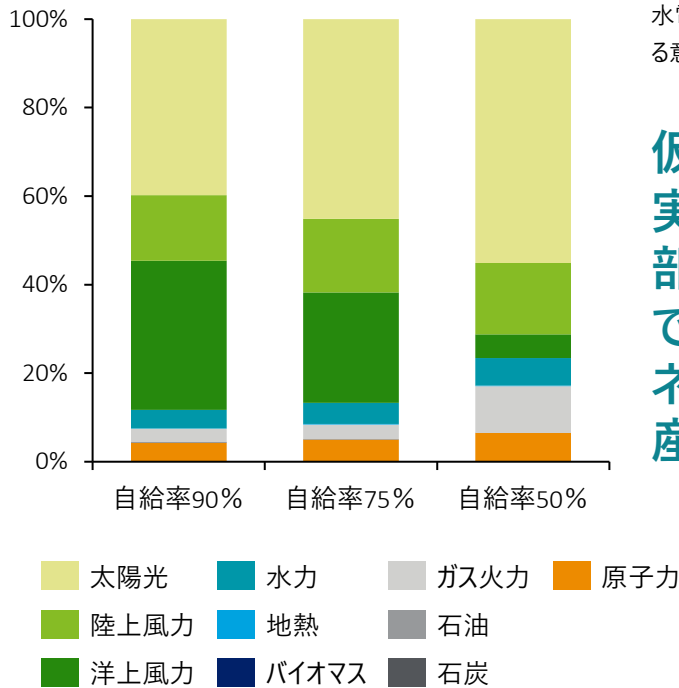


図 10、11は、サンキーダイアグラムと呼ばれ、左側がエネルギーの供給を示し、右側が最終エネルギー消費を示します。中間は、発電部門、水電解による水素製造、コージェネによる熱電併給等、エネルギー転換プロセスを示しています。図の上部にある輸入エネルギーは従来型のサプライチェーンにより供給される一方、図の下部にある国産エネルギーはエネルギー転換や貯蔵、コージェネレーション等の中間的なプロセスが多くなります。

エネルギー自給率50%のシミュレーション結果では、主に再エネによる電力システムの脱炭素化によって実現できることがわかります（図10）。

他方、エネルギー自給率90%の場合、水電解による水素製造の役割が大幅に高まることになります。鉄鋼部門は高炉においてコークスを利用して還元鉄の製造を行います。カーボンニュートラル社会実現のために水素を利用した還元反応を行うことでCO2排出をゼロとすることが可能となります。水電解は再エネシェアが高まることによる余剰電力を貯蔵する意味でも有効であると考えられます（図11）。

仮にエネルギー自給率90%を実現しようとする場合、産業部門の燃料の国産化が必要であり、そのため、国内の再エネを源とする水素の大量生産が必要となります。

図10 エネルギー自給率50%シナリオのサンキー・ダイアグラム、2050年

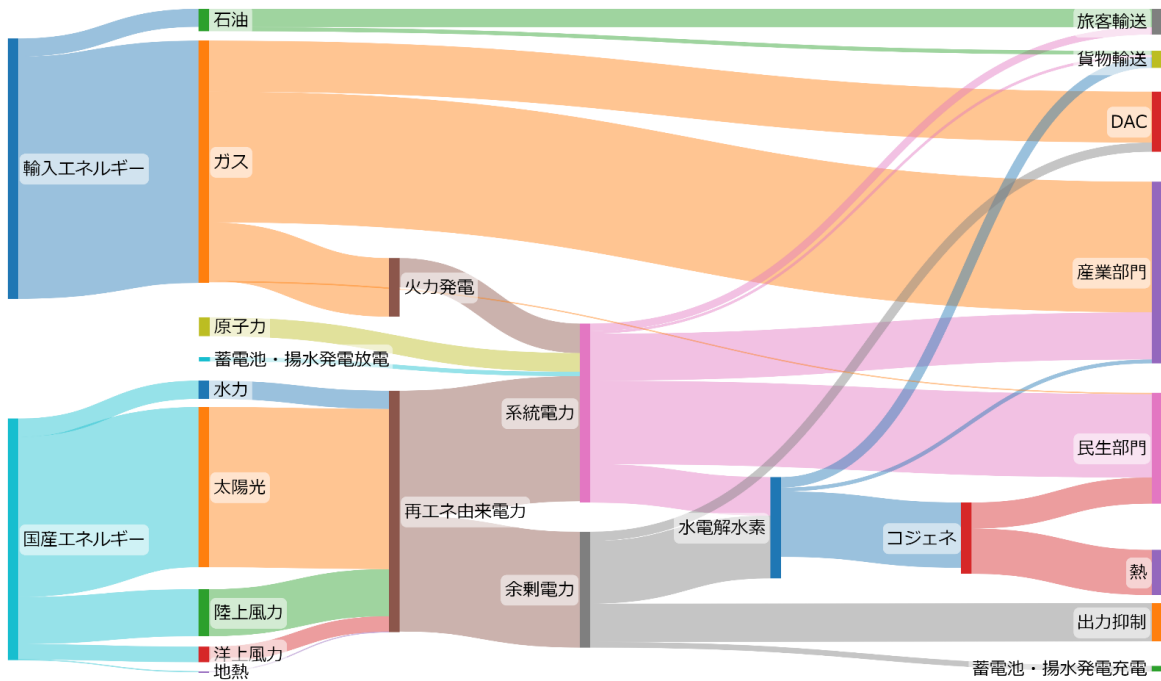
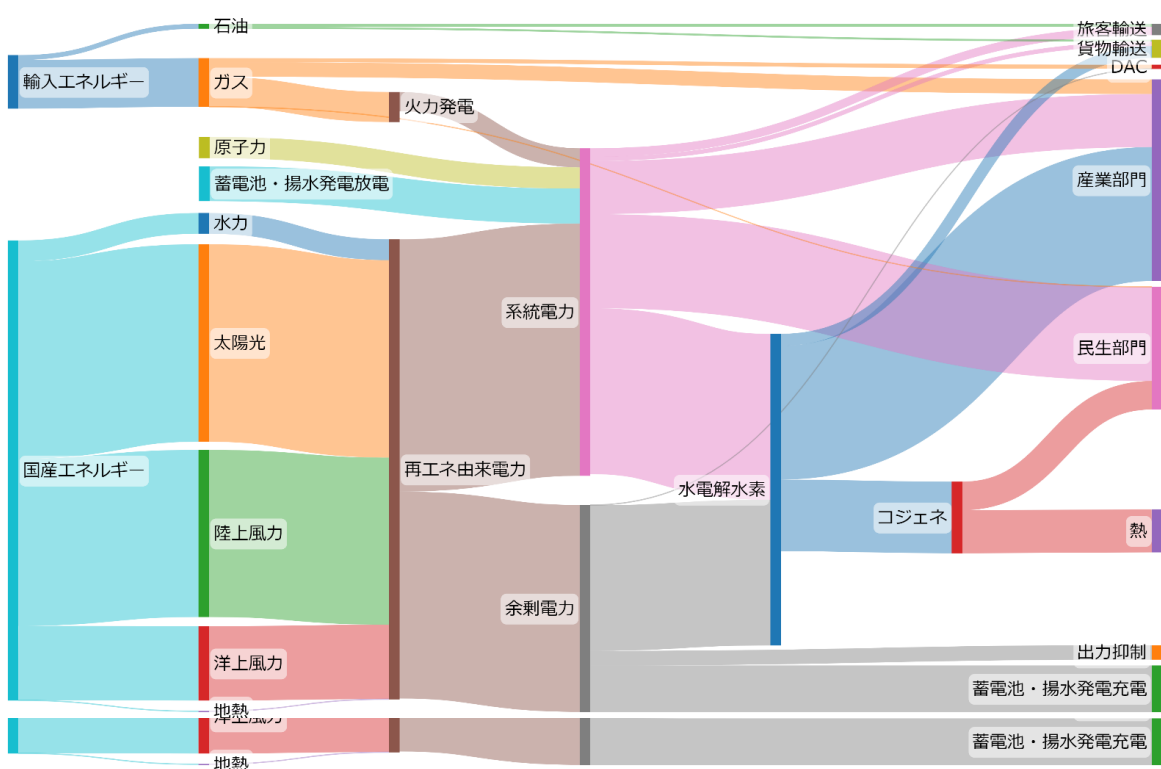


図11 エネルギー自給率90%シナリオのサンキー・ダイアグラム、2050年



※本シミュレーションでは、輸送部門のうち、鉄道・船舶・航空は対象外としている（図10、図11共通）。
また、海外からのガスについては、コスト等の条件次第で水素に代わる可能性があることに留意いただきたい。

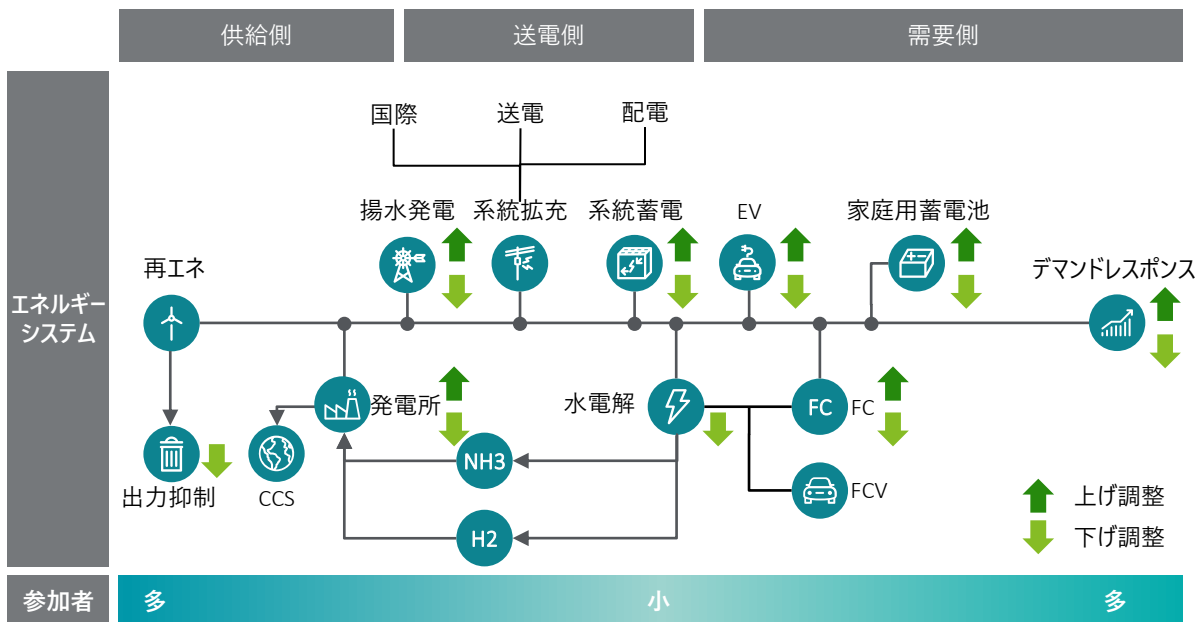
カーボンニュートラル時代のエネルギーシステムでは、大量導入が見込まれる再生エネルギーの発電量の自然変動に対応するため、電力供給側、送電側及び需要家側のそれぞれにおいて調整力を提供する仕組みを導入することが重要です。例えば、供給側では、揚水発電の稼働の見直し、水・アンモニア発電の導入等が考えられます。また、送電側では、系統蓄電や水電解装置等が考えられます。さらに、需要家側は家庭用蓄電池やエネルギー・マネジメントによる調整力の提供が考えられます（図12）。

複雑さが大幅に増していくエネルギーシステムは、デジタル化による各種システムの連携と制御が必要となります。

これらの導入や加速が進んだエネルギーシステムでは、垂直統合型の企業を含む既存の集中型エネルギーシステムより、関連する事業形態と事業者が多くなり、システム全体が複雑になることが見込まれます。

そのため、脱炭素時代のエネルギーシステムは、セクターカップリングや分散化によって複雑さが大幅に増すことへの対応として、デジタル化による各種システムの連携と制御が必要となります。また、エネルギーの分散化も進展し、大規模な発電所に依存することなく、地域単位でエネルギーの供給、輸送、消費を行う小規模なエネルギーネットワークも注目されてくることが想定されます。

図12 将来のエネルギーシステムのイメージ（多重な調整力の提供イメージ）



再エネによる自給率を高めるためには、蓄電池や燃料電池等電力システムの柔軟性に寄与する設備を導入していく必要があります。例えば、自給率90%の世界では蓄電池は215GW必要となります。これらは、電力システムのコストを上昇させる原因となり、かつ、レアアース等の安定供給の課題の原因となります（図13）。

高い自給率を達成するためには、蓄電池等や系統増強等の柔軟性対策を推進する必要があります。

自給率25%と比較して自給率90%では、地内系統の送電容量は3倍以上、地域間連系線の送電容量は約7倍高める必要があります。

既に、北海道・東北、九州での風力発電が大量に建設される見込みですが、北海道・東北から東京圏へ大量に電力融通を行うことが必要となり、地域間連系線はもとより、地内系統の整備が必要となることがわかります。系統整備は一朝一夕でできるものではないため、脱炭素のみならず、エネルギー安全保障の観点から今後のエネルギー将来像を見据え適切な整備計画を定めたり、利害関係者間の調整を行う必要があります（図14）。

図13 柔軟性対策の容量と稼働率（2050年、単位：GW、%）

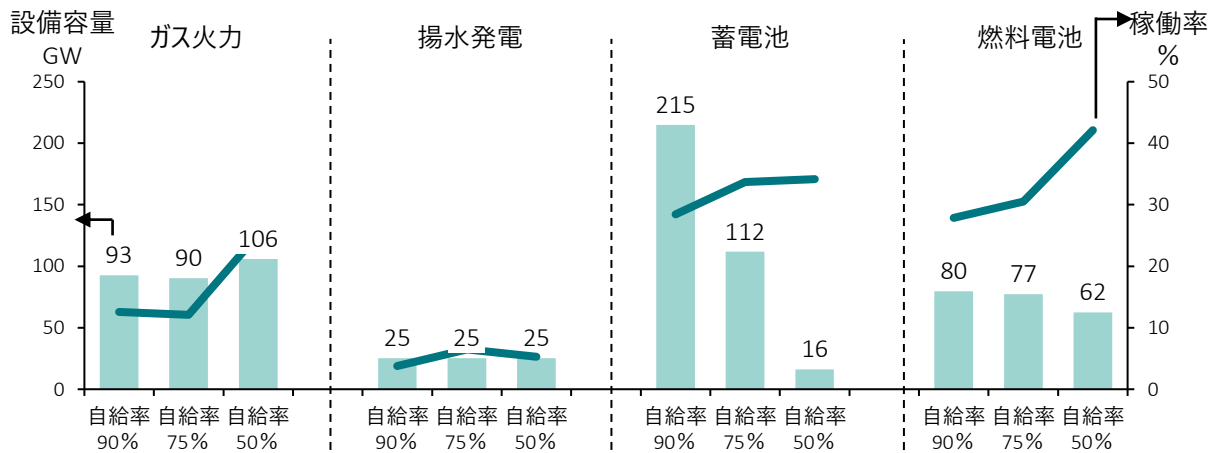
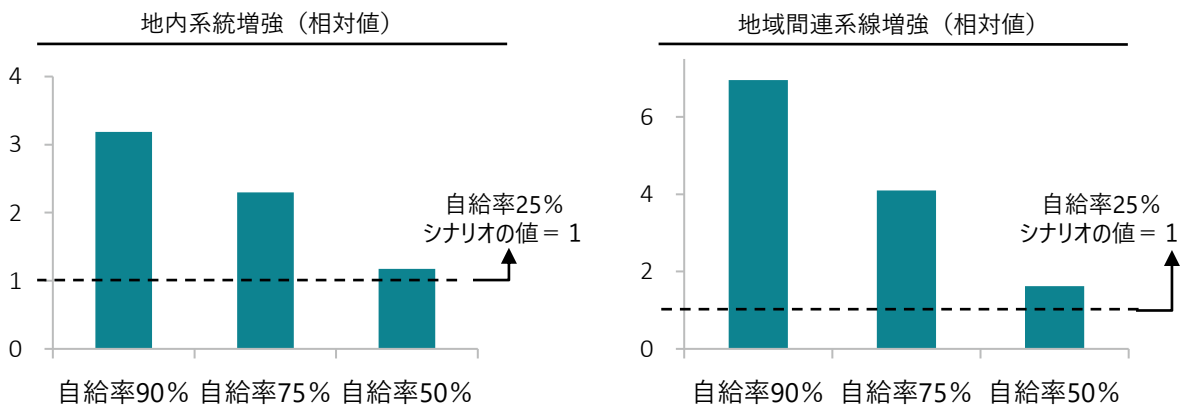


図14 系統送電容量（2050年、単位：相対値）



3.3. エネルギー転換の考え方とは？

～必要となる4つの視点：中期的な対応：①エネルギーインフラの変革～

再エネをこれまで以上に導入するためには、エネルギーインフラに係るイノベーションが必要であり、セクターやエネルギー種を超えた需給調整システムの確保、デジタル技術を活用したデマンドレスポンス、水素によるセクターカップリング及び再エネの導入拡大を前提とした規制改革が必要です。

変動性再エネの出力抑制を最小限にとどめるとともに、導入ポテンシャルを最大限に引き出すためには、大容量蓄電池の導入拡大、既存揚水発電のさらなる利活用、水素等のエネルギーキャリアへの転換が提唱されているものの、いずれもコストの高さや設置場所の制約、エネルギーロスの発生が課題となっています。

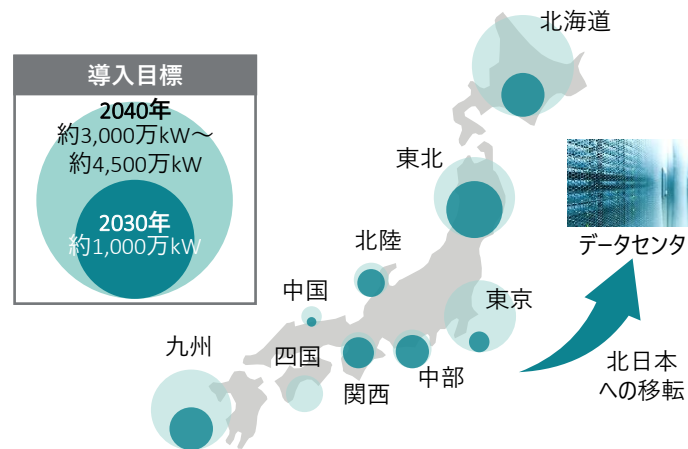
そのため、余剰再エネが生じる時間帯については、住宅・オフィスの熱需要やEV充電器等を活用して電力需給を調整しつつ、e-fuelといった合成燃料の製造や地域熱供給へ活用する等、セクターやエネルギー種を超えた相互融通が必要となります。

さらに、今までは労働者の活動時間にあわせて発電所を稼働させてきましたが、今後は自動化や無人化が進むとみられる工場の稼働を再エネの発電状況に合わせて調整するなど、エネルギーの供給状況にあわせて産業活動を制御することも、費用対効果の観点から有効であると考えられます。

特に省人化が先行しているデータセンタについては、稼働時間を制御するだけでなく、再エネポテンシャルの高い地域に移転することで、需給調整の負荷や送電コストの低減が可能となります（図15）。

再エネを今まで以上に導入し、カーボンニュートラル化に寄与していくためには、セクターやエネルギー種を超えた需給調整システムが必要です。

図15 洋上風力の導入ポテンシャルに応じた立地選定イメージ



出所：経済産業省（2020年12月）「第一次洋上風力産業ビジョン」を参考にデロイト作成

脱炭素の実現に向けては、まず化石燃料の直接燃焼に頼るストーブや給湯器、自動車等の電化を進めることが現実的となります。これは、電力については現時点でも再エネ由来のものを調達することが可能であることに対して、ガソリンや都市ガスについてはe-fuelやメタネーションといった技術の研究が進められているものの、経済的なコストの達成や大量生産の見通しが立っていないためです。

また、こうした電化促進については、エネルギー効率が高まることに加え、充電や給湯のタイミングを遠隔制御することが可能となり、変動性再エネの発電状況に対して調整弁として活用できるメリットもあります。例えば、エコキュートをはじめとする電気式給湯器によるお湯の焚き上げ時間やEVの充電時間を遠隔制御することで、エネルギー需要を平準化したり、日中の太陽光発電による電力を余すことなく活用することが可能となります（図16）。

技術の導入のみならず、脱炭素の実現に向けては、電力システムに係る制度面での様々な対策が必要となっています。例えば、システムの増強計画・運用に関しては、従来、発電事業者からの要請で増強を検討していたところを将来の再エネ

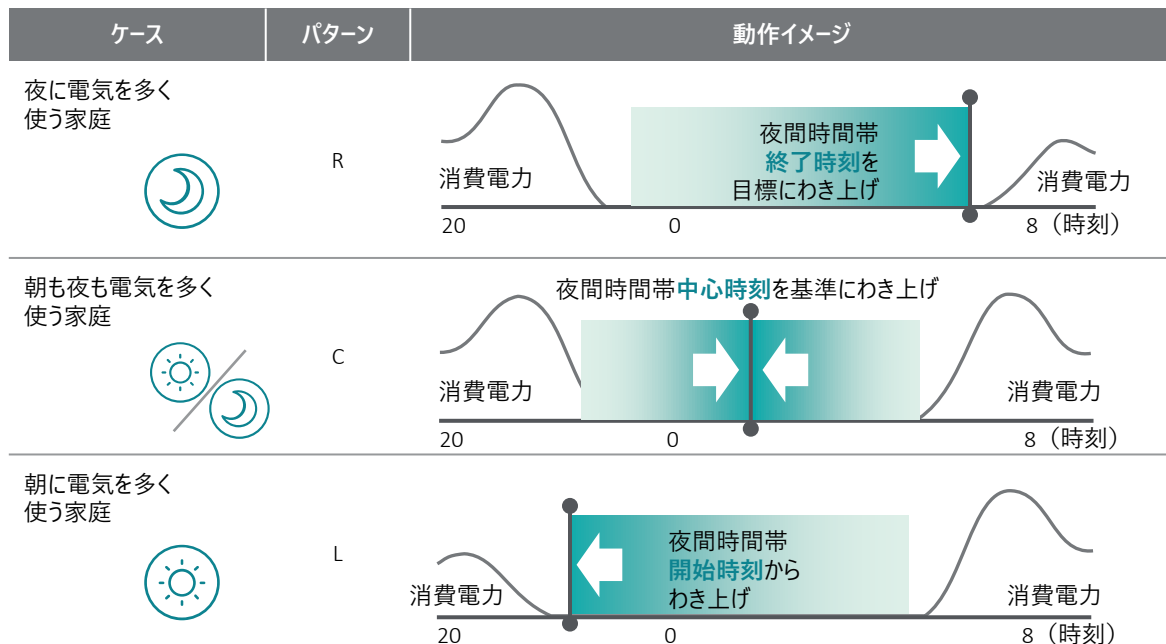
脱炭素化には電化促進が必要であり、変動性再エネの有効活用にもつながります。

エネルギーシステムの変革には効率的な系統増強、高度な系統運用、電力市場の改革等が必要です。

の導入ポテンシャルを踏まえ、送配電事業者による主体的な取り組みへの転換（プッシュ型の広域系統整備計画）を実現し、個別最適から全体最適へ転換する必要があります。また、接続地点（ノード）毎に異なる地点別限界価格（LMP）を採用することによって、市場メカニズムを活用した混雑管理（混雑が発生した系統の需要過多側のLMPを高く設定する）も重要な施策になり得ます。さらに、調整力を確保するための施策として、蓄電池、EVや需要側設備制御による調整力の確保も重要です。火力や原子力等、従来の発電機が備えていた慣性力による系統の周波数維持も、非同期電源（変動性再エネ）の増加により、将来その割合が低下することは電力インフラの課題となります。そのため、慣性力を取り戻すための市場の創出や慣性力を疑似的につくりだすスマートインバーターの導入も重要な施策です。

その他、従来の集中型から分散型への移行に伴う既存火力電源の収益性低下やkWh市場・ΔkW市場の最適運用を目的とした施策等が必要になります。

図16 電化によるエネルギー需要の平準化イメージ
(グループごとに電気式給湯器の焚き上げ時間を最適化するイメージ)



出所：一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター、令和3年度デマンドサイドマネジメント表彰（2022年2月16日参照）

従来の電力システムに水素キャリアのシステム（余剰電力等を水電解し水素製造、製造した水素をモビリティや産業熱等で活用する）を導入することにより、よりモビリティや産業部門での脱炭素化が加速していきます。またガスネットワーク等の既存のエネルギー関連設備を利活用することにより、トランジションの加速化にも貢献します。

水素利活用も含むセクターカップリングの実現に向けては、エネルギー需給の最適化やレジリエンス強化の観点で、個別最適だけでなく地域単位でのエネルギーシステム最適化が重要となります。具体的には再エネ導入と地産地消を併せて推進することや、地域単位でのエネルギー貯蔵・需給調整機能導入、地域冷暖房導入による廃熱・未利用熱の有効活用等が挙げられます（図17）。

セクターカップリングの実現は、脱炭素だけでなく新しいビジネスの創出にも寄与します。従来、各サービス（電力、ガス等）は専用のプラットフォームを有しておりましたが、セクターカップリングに係る取り組みをきっかけに、共通のプラットフォームを活用しつつ、サービスのラインナップを増やしていく戦略がその一案です。これにより、プラットフォームの形成・維持に係る費用を抑えつつ、様々なサービス展開により売り上げを拡大することが可能となります。将来は、従来のエネルギー事業が総合プラットフォーム事業に発展し、高い生産性により競争力を有する事業者が勝ち残っていくように思います。仮にセクターカップリングが実現しなかった場合、各サービスでの個別最適・各サービス単位でのプラットフォームの整備が必要となり、

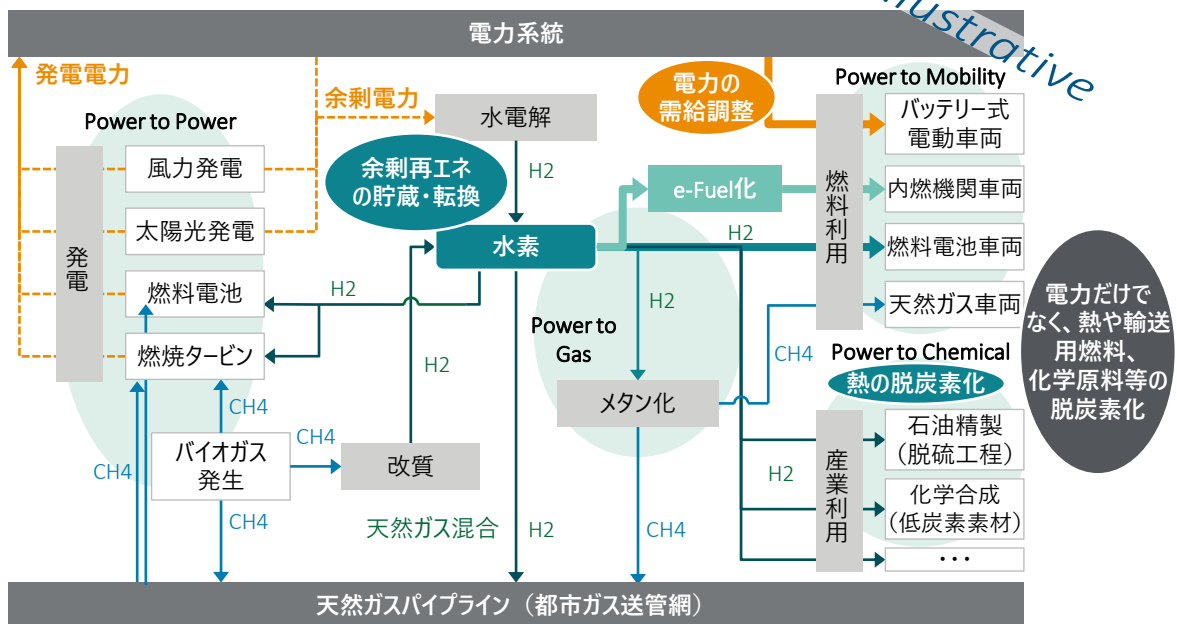
高い収益性の実現が困難になると想定されます。

地域単位でのエネルギーシステム最適化の視点を持つことは、トランジション前倒しや実現に向けた課題の解決につながる可能性があります。例えば、再エネ導入推進は出力変動への対応が必要となりますが、複数の再エネ電源と需要家を巻き込んだシステム設計を行うことで、需給ギャップ対応の柔軟性が向上します。また、プロシューマーの増加による新たなエネルギー需給調整機能が必要となりますが、複数のエネルギー供給者・需要家を巻き込んだシステム設計とすることで、電力・熱が余った場合の最適利用につながります。他には、新技術導入を進める場合はインフラ立ち上げ費用負担が大きくなりますが、地域単位で必要な機能の検討と導入を進めることにより、負荷分散やスケールメリット享受を図ることができます。

以上のように、個々の取り組みや分野の垣根を越えた視点で、セクターカップリングやカーボンニュートラルの実現に向けて重要となります。

水素は異次元のセクターカップリングを実現するために必要不可欠なエネルギーキャリアです。

図17 今後のエネルギーシステムのイメージと水素の役割



3.3. エネルギー転換の考え方とは？

～必要となる4つの視点：中期的な対応：②最大限の省エネ～

化石燃料の価格高騰対応及びカーボンニュートラル化への貢献には、効率的な省エネ策を用いた総需要の抑制が初期的には有効であり、電力・熱を含むエネルギー全体の最適解の探索やエネルギーを質でとらえる視点が有効です。

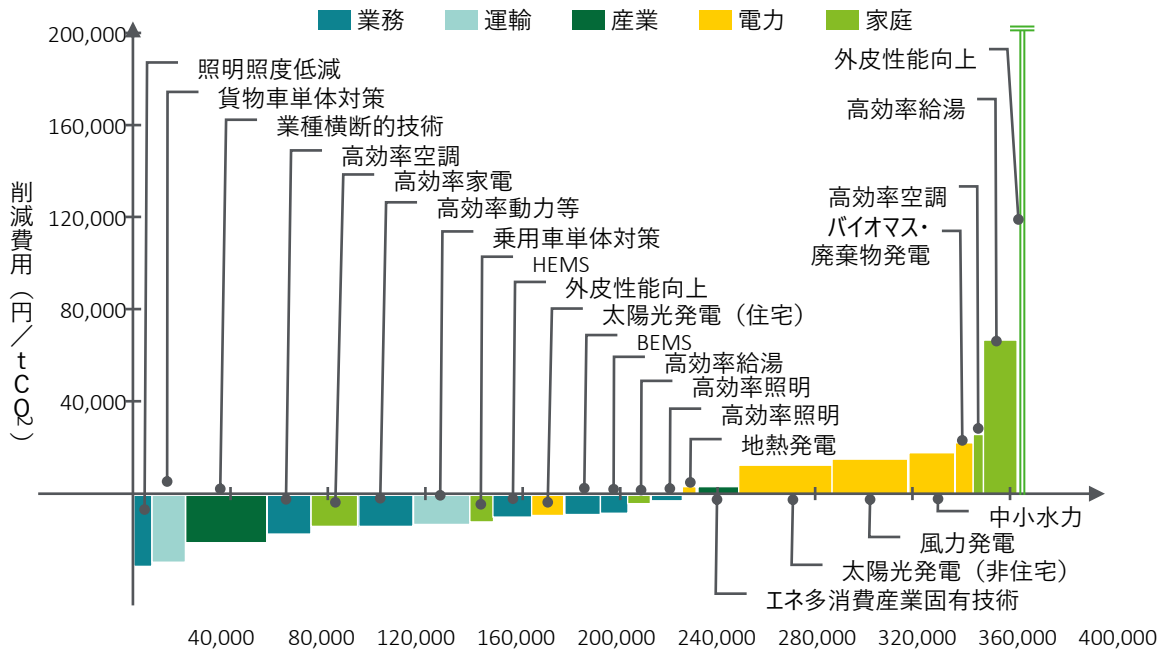
前述の通り、最大限の電化を進めた場合、変動性再生エネの有効活用にはつながるものの、電力需要の総量の増加が懸念されています。国内外の脱炭素施策のコスト評価においては、新規の再生エネ電源の開発よりも、省エネ対策の方が費用対効果（CO₂を1トン削減することに要する対策コスト）が高いとされており、マクロ的なCO₂削減ポテンシャルも大きい省エネ対策を進めることが重要です（図19）。

例えば、日本の環境省の試算によると、自動車分野やオフィス等の業務部門においては、設備更新によって大きな省エネ効果が期待できるため、民間主体の投資を加速させる仕組みが重要となります。一方で、費用対効果が相対的に低い対策についても、大きなCO₂排出源となっている給湯等については、前述の通り再生エネと電化をセットで推進することで、高いCO₂削減効果を得られるため、積極的な財政措置を講じて対策の推進が求められます。

また、こうした対策はハードウェアの更新だけでなく、センサ類を用いた制御や消費者行動の変革を通じた省エネ化も含まれ、従来からこうした対策を進めてきた日本企業の海外展開の後押しが期待されます。具体的には、赤外線センサやCO₂センサ、RFID（Radio Frequency Identifier）を用いて、室内の人数や居場所を特定し、使用状況にあわせて照明や空調利用を最適化すること等が考えられます。

化石燃料の価格高騰対応及びカーボンニュートラル化の実現は、効率的な省エネ策を用いた総需要の抑制が重要です。

図19 脱炭素施策の費用対効果の試算例



出所：環境省、2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会における議論を踏まえたエネルギー消費量・温室効果ガス排出量等の見直し

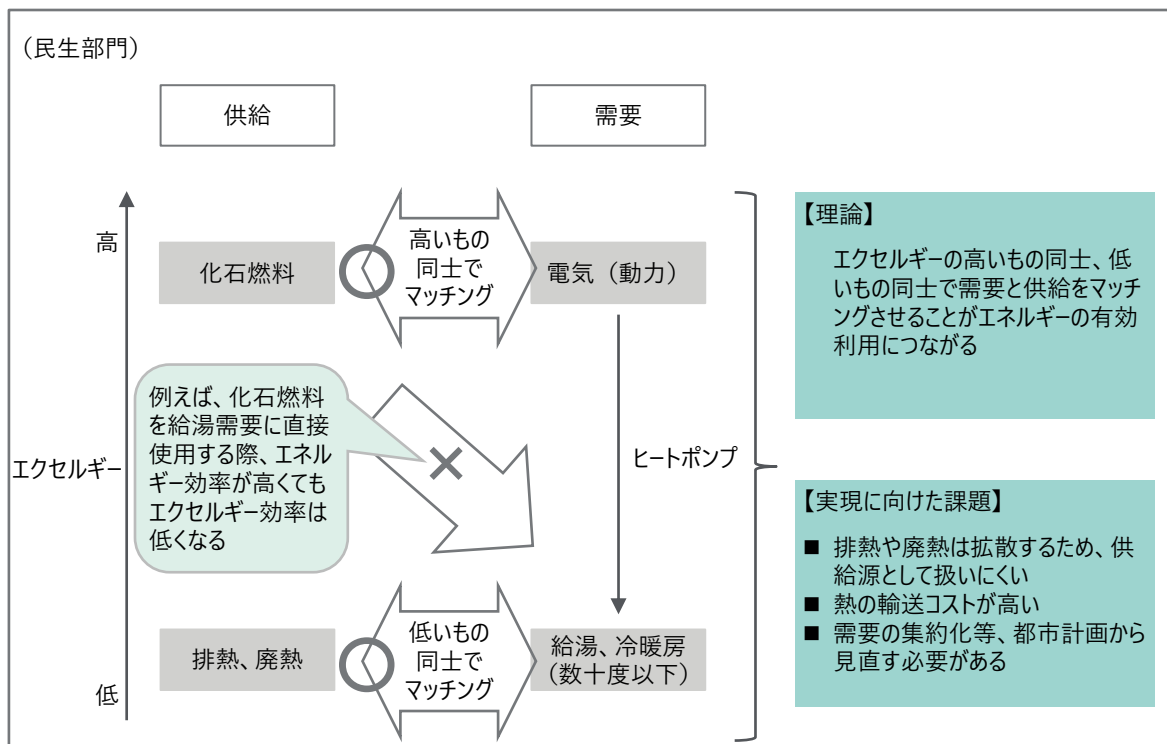
社会全体で無駄なエネルギー消費を削減し、エネルギーの適材適所を実現していくためには、エネルギーの量だけでなく、その質に着目する必要があります。そこで、仕事として取り出し得る最大のエネルギー量である「エクセルギー」の概念を用いて、需要と供給のマッチングを図ることが重要であります。具体的には、エクセルギーの高いもの同士、低いもの同士で需要と供給をマッチングさせることによって無駄なエネルギーの利用を抑制することができます（図20）。

例えば、数十度以下の熱需要（給湯、冷暖房）に対して、化石燃料を直接利用することは、エクセルギーの大幅なロスとなってしまいます。エクセルギーの高い化石燃料は電気を使用し、数十度以下の熱需要には、排熱等のエクセルギーの低いエネルギー源を利用することが望ましいです。

実現に向けた課題としては、廃熱や排熱は拡散するため、供給源として扱いにくく、熱の輸送コストが高いことにあります。これを解決するためには、エネルギー需要を集約する等が考えられ、今後の都市計画の重要な検討項目として扱うことが考えられます。

電力・熱を含むエネルギーシステムの最適化のためには、エネルギーの量だけでなく、質（エクセルギー）も考慮する必要があります。

図20 エクセルギーによる需要と供給のマッチング



3.3. エネルギー転換の考え方とは？

～必要となる4つの視点：中期的な対応：③サーキュラーエコノミー～

エネルギー及び資源のサーキュラーエコノミーを推進することで、エネルギーの転換が経済的にも推進可能になります。

気候変動問題と経済成長の同時実現を目指すには、なるべく資源を循環させ、資源効率を高めていくことが重要です。これは、地政学的リスクによって資源の採掘量及び価格の不確実性が高まる世の中において、国家及び企業のレジリエンスには必須の概念であると考えられます。

資源循環でポイントとなるのは、エネルギーに関わる資源のインプットを減らすだけでなく、エネルギーのカスケード利用や、廃棄物の活用等、エネルギーを取り巻くバリューチェーンシステム全体での資源効率の最適化を目指すことであります（図21）。

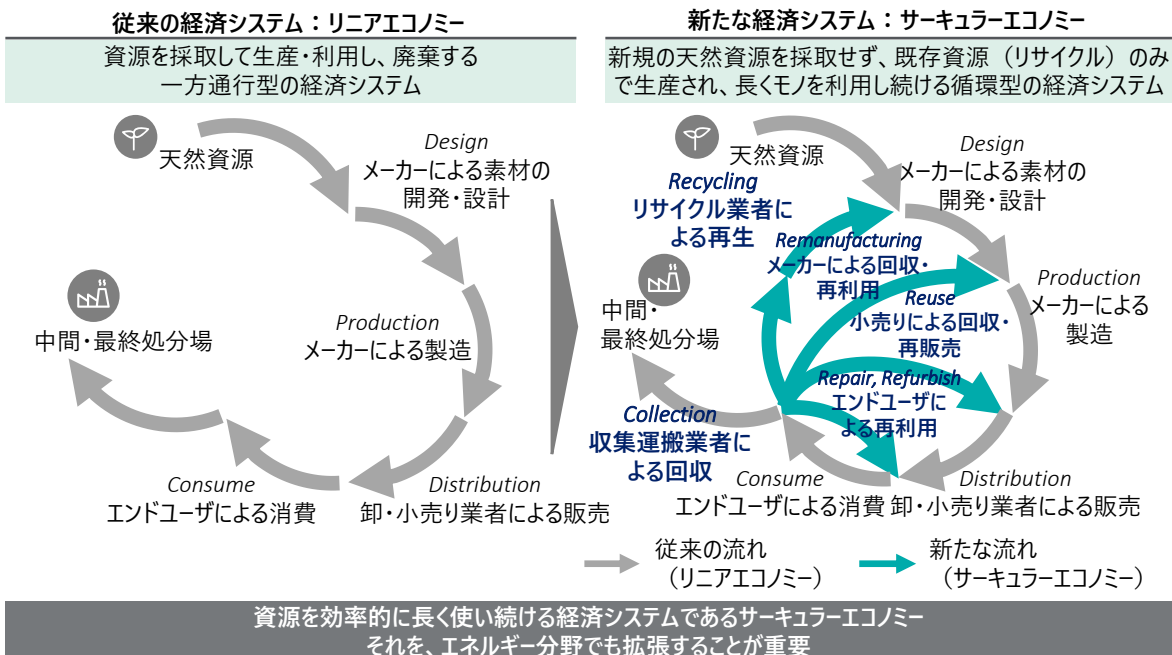
環境負荷の低減について、製造業のサプライチェーンを例に考えてみた場合、サプライチェーンには製造、輸送、販売、利用、廃棄といったプロセスがあります。この中で環境負荷を最小限にするためには、まずプロセス内でのエネルギー使用について見直すことが必要です。昨今はバイオマスや水素のような環境負荷が低いエネルギーの使用や、CCUS（CO₂の回収・有効利用・貯留）といった手法がトレンドとなっており、様々な企業・機関が研究を進めています。

特に太陽光エネルギーで水から水素を取り出したり、水素とCO₂からプラスチックの原料を製造したりする技術において、日本は高い国際競争力を誇っています。

しかしながら、エネルギーの脱炭素化だけでは、効果は限定的なものに留まってしまいます。「1.5°Cシナリオ」実現のためには、物質（原材料や製品）に起因する環境負荷にも目を向けるべきであります。原材料をムダなく使う、あるいはなるべく使わない、できあがった製品はなるべく長く使う、壊れたら修理し、修理できなければメーカーが回収して再生・再販売する、というように、有限の資源をひたすら循環させて使用し、環境に新たな負荷をかけないようにすることを考えなければなりません。

サーキュラーエコノミーを推進することで、エネルギーの転換が経済的にも推進可能になります。

図21 サーキュラーエコノミーとは

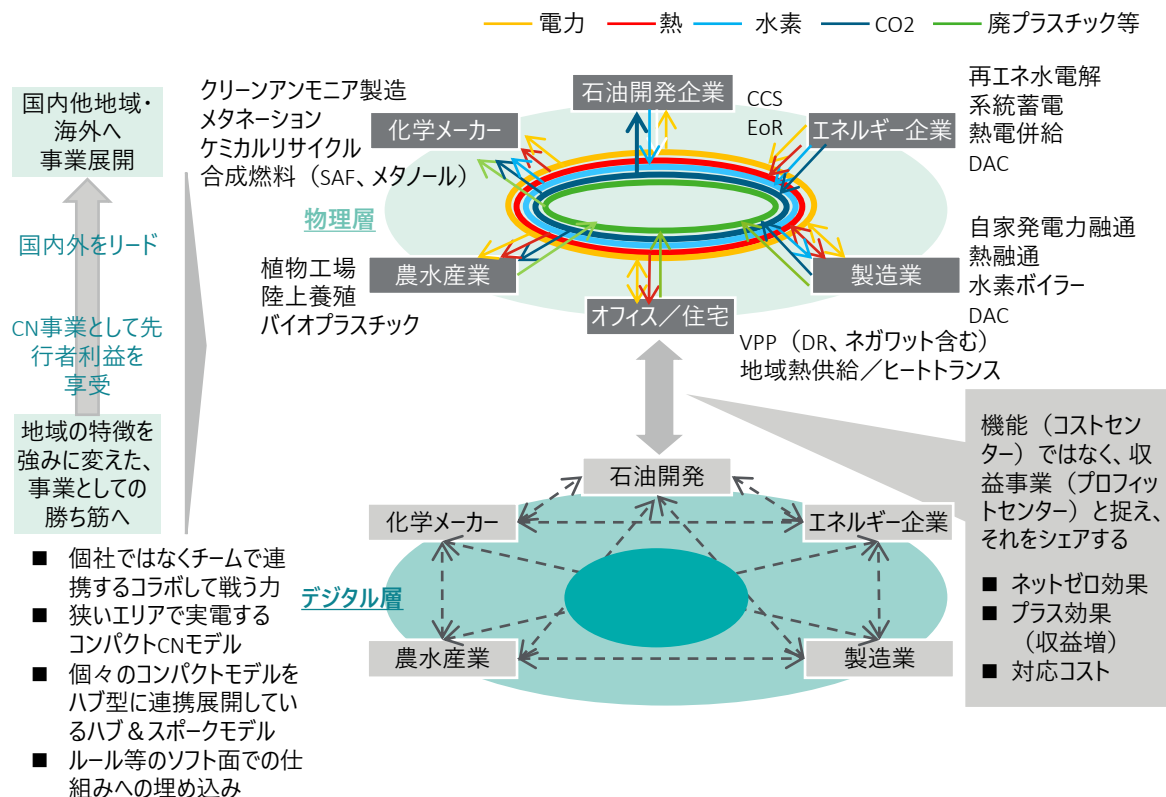


バリューチェーン全体でのシステム設計、資源の最適化においては、エネルギーだけではなくCO2も含めた循環も必要となります。CCU等の技術により排出されたCO2を回収し、エネルギー資源として再利用する、その際のエネルギー効率の最適化を図ることは今後のチャレンジとなると考えられます。

カーボンニュートラル達成に必要なのは、再エネ導入による脱炭素化だけではありません。そもそものエネルギーの需要量を減らす省エネ、ヒートポンプや電気自動車を活用したエネルギー転換等も脱炭素化に貢献する取り組みであります。これらをエネルギー需給の特性や地域特性を考慮しながら、最適に組み合わせていくことが重要となります（図22）。

エネルギー分野でのサーキュラーエコノミーは、CO2の効率的な循環も含めてビジネスを組み立てる必要があります。

図22 サーキュラーエコノミーによるトランジションの推進



3.3. エネルギー転換の考え方とは？

～必要となる4つの視点：中期的な対応：④NETsの国際連携～

各国連携して、既存の国家間協力枠組みも参考にしながら、NETs技術の導入を進めていくことが世界全体の脱炭素化に貢献します。

将来カーボンニュートラルを達成させるためには、負の排出であるネガティブエミッション技術（NETs）も有効です。NETsの適地は、世界的に偏在しているため、世界全体の資源として国際的な協力が必要不可欠であると考えます。

同様の取り組みとして、先進国・新興国間でのCO2削減支援メカニズムであるクリーン開発メカニズム（CDM）があり、ボランティア*1の枠を超えて、NETs技術のための同様の国際的に協力する枠組みを設けることが一案です（ただし、モニタリングの手続きが煩雑であり、プロジェクト登録にかなりの期間を要するため、算定を保守的にしつつ簡易に算定するような制度設計が必要です）。

NETsの技術体系は4つに大別され、「森林」、「海洋」、「自然風化」及び「その他」となり、「森林」に該当するNETsについては、森林吸収の促進を通してCO2の貯留量の増加を図る「植林・再生林」や、バイオマス中の炭素を土壌に貯留する「土壌炭素貯留」、バイオマスを炭化することで炭素を貯留する「バイオ炭」が具体的な技術として類型されます。

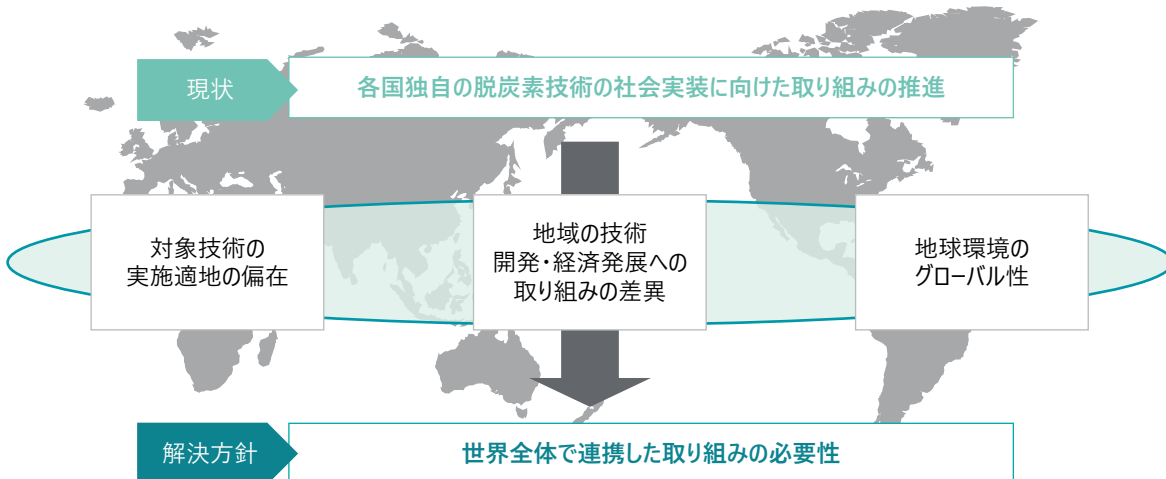
「海洋」に該当するNETsには、海洋中の植物残差に含まれる炭素の固定化や、海洋中の生物の生産促進によるCO2吸収量の増加等の「ブルーカーボン」があり、海水にアルカリ性の物質を添加することで海洋の炭素吸収を促進する「海洋アルカリ化」も当該類型の技術として含まれます。

「自然風化」は、玄武岩等の鉱物の風化を人工的に促進することでCO2を固定化する「風化促進」があります。「その他」に類型されるNETsとしては、工業的なCO2地下貯留等を行う技術が含まれます。

上述のNETsにおいて、「森林」や「海洋」のうち「ブルーカーボン」、「その他」のCO2地下貯留を伴う技術は、物理的特性より実施適地が世界的に偏在しています。また、地域に応じて技術開発や経済発展の度合いにも差異があることから、NETs適地において必ずしもこれらの技術の事業化が進むとは限りません*1。これらのことから、グローバル規模の社会課題である地球温暖化の抑制へ有効策となり得るNETsの普及拡大・市場化に向け、特にNETs適地を公的資源と捉えた場合、各国独自での取り組みではなく、世界全体で連携したNETs導入支援に係る協力枠組みの構築が施策の一案として考えられます（図23）。

各国連携してNETs技術の導入を進めていくことが世界全体の脱炭素化に貢献します。

図23 脱炭素技術の普及に向けた国際的な協力枠組みの必要性



*1：DACCSによる排出削減量のボランティアクレジット取引がマイクロソフト社をはじめとして既に行われており、NETsの価値は既に評価されている

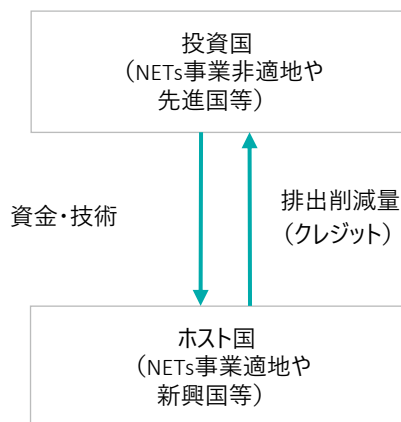
他方で、NETsの有効性や気候変動以外の影響（特に負の影響）については、検証が必要です。ですので、技術の有効性に係る研究開発やNETsを導入することによる倫理的・法的・社会的等の新たな課題を引き起こさないための検証を短期的に進めていく必要があります。また、GHG削減量の定量化に係る方法論の開発も課題です。具体的には各国のGHG排出量を算定する方法論に整合的であつ、現在の技術で測定可能で一定の信頼性を担保できる算定・測定方法を確立する必要があります。

NETs事業を具体的に展開する前に、NETs技術の環境十全性、GHG削減量の定量化に係る方法論を開発する必要があります。

既存の国際的協力枠組みである、国家間の技術供与や資金提供を通して森林保全や排出削減を進めるスキームとして、先進国・新興国間での森林保全・排出削減メカニズムであるREDD+、先進国・新興国間でのCO2削減支援メカニズムであるCDMがあります。

NETsの適地偏在性を踏まえて世界レベルでのより強固な排出削減を実現するためには、NETs事業へ資金を提供し、排出削減効果の算定・認証を行い、国際的な排出権取引メカニズムに組み込まれた国際的な協力枠組みが必要と考えます。このような枠組みは、NETsの限界排出削減コストの均等化・最小化にもつながり得ます（図24）。

図24 NETsの国際協力枠組みのイメージ



このようなNETsの国際的協力枠組みには可能性がある一方、高度な調整を必要とします。市場の機能と整合性の確保には、資金動員のための投資スキーム、炭素削減・吸収量の算定方法論と国家間の分配等における仕組みづくりが課題として挙げられ、国際的な協調が必要不可欠となります。以下に、それぞれの可能性と課題・留意点の例を示します。

- 資金動員における可能性：
 - 国際機関や世界銀行等の国際公的機関を通してNETs基金を設立し、参加国や企業から拠出を募り資金動員^{*1}
 - NETsの炭素削減・吸収効果を、炭素クレジットを含む枠組みにて取引し、排出権取引を通じた資金動員^{*2}
- 削減・吸収量の算定・分配における可能性：
 - 参加国・企業の拠出規模に応じて、NETs事業による炭素削減・吸収量を配分。また、NETs事業に係る技術や資金を一部新興国へ提供することで、実施インセンティブを付与し、国際的なNETs拡大に寄与
- 削減・吸収量の算定・分配における課題と留意点：
 - 二国間クレジット制度の国際的ルール（パリ協定における第6条）への準拠
 - NETsの炭素削減・吸収量の算定方法の確立と標準化、NETsの炭素吸収効果の非永続的リスク管理
 - 国家インベントリに反映可能な方法論の必要性、炭素クレジット取引者間の二重計上の防止

既存の国家間協力枠組みも参考にしながら、NETs事業の資金提供スキームや削減効果の算定・認証方法の開発、排出権取引への連携に資する国際協力が必要です。

*1：気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）下のGreen Climate Fund（GCF）や世界銀行のBio Carbon Fund Initiative for Sustainable Forest Landscape（ISFL）が例

*2：VerraのVerified Carbon Standard（VCS）や二国間クレジット制度（Joint Crediting Mechanism: JCM）が例

4. エグゼクティブサマリー

システムの視点により、複雑化・多様化する将来像を検討するとともに、将来共通して必要となる再エネの導入拡大、省エネ、サーキュラーエコノミー、NETsを進めていくのが必要であると考えます。

～背景・課題提起～

エネルギー情勢は、カーボンニュートラル社会への潮流やウクライナ危機によるエネルギー安全保障の見直しにより大きく変化しています。具体的には、再エネやクリーン水素等の環境技術への投資が拡大する一方、足元の石炭・石油・天然ガスのエネルギー価格は上昇し、今後も当面需要過多の影響により高止まりが懸念されます。

また、各国従来の転換戦略の見直しや将来目標の前倒し、短期的なリスクを回避しようとする流れがあることから、長期的なエネルギーシステムの姿や今後の必要な転換を考え直す必要があると想定されます。

将来のエネルギーシステムは、カーボンニュートラル、エネルギーセキュリティ、安心安全、大規模投資・技術開発によるさらなる経済成長等の様々な評価指標を考慮にいれなければならない。技術のイノベーション・エネルギーの分散化・デジタル化・セクターカップリングなどを踏まえた在り方を検討する必要があり、複雑化することが想定されます。

そのため、全体最適を目的としながら、個別の取り組みがどのようにその他の取り組みに影響するのか、全体最適に影響を与えるのか等を考慮する「システムの視点」が必要となると考えています

～今後必要な考え方・取り組み～

全体最適を目的としながら、個別の取り組みがどのようにその他の取り組みに影響するのか、全体最適に影響を与えるのか等を考慮する「システムの視点」を実現する手段として、エネルギーインフラ全体をシミュレートすることが有効であり、トレードオフの原因、評価指標の定量的な評価によって、意思決定を支援することが可能となります。

長期的なエネルギーシステムの姿を実現するための転換として、①エネルギーインフラの変革、②最大限の省エネ、③サーキュラーエコノミー、④NETs（ネガティブエミッション技術）の国際連携を推進していく必要があると考えています。それぞれの説明は以下に示す通りです。

- ①エネルギーインフラの変革：
 - 電化・水素化を推進しつつ、セクターカップリングを実現。また、エネルギーの分散化や規制改革を進める
- ②最大限の省エネ：
 - センサ類を用いた制御や消費者行動の変革を通じた省エネ
- ③サーキュラーエコノミー：
 - 資源を効率的に長く使い続ける経済システムであるサーキュラーエコノミーにより、資源の安全保障を確保
- ④ NETsの国際連携：
 - 国際的に連携したNETsの取り組みにより、地球規模の課題である気候変動対策を効率的に実施

参考文献

International Energy Agency (2021), “Net Zero by 2050”

BloombergNEF (January, 2022), “Energy Transition Investment Trends 2022”

International Energy Agency (May, 2022), “Energy Technology RD&D Budgets”

World Bank (May, 2022), “Commodity prices”

World Bank, “Commodity Markets Outlook – April 2022”

International Energy Agency (May, 2021), “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions”

European Commission (May, 2022), “REPowerEU”

経済産業省「第一次洋上風力産業ビジョン」

一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター

令和3年度デマンドサイドマネジメント表彰（2022年2月16日参照）

環境省「2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会における議論を踏まえたエネルギー消費量・温室効果ガス排出量等の見通し」

用語集

BECCS	Bio Energy with Carbon Capture and Storageの略。バイオマスエネルギー利用時の燃焼により発生したCO ₂ を回収・貯留する技術
CCS	Carbon Capture and Storageの略。二酸化炭素回収・貯留
CCU	Carbon Capture and Utilizationの略。二酸化炭素回収・有効利用
CDM	Clean Development Mechanismの略。クリーン開発メカニズム。先進国・新興国間でのCO ₂ 削減支援メカニズム
CN	Carbon Neutralityの略。温室効果ガス（GHG）排出量を削減しつつ、森林等による吸収量を増加させ、温室効果ガスの排出量を全体として実質ゼロにすること
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storageの略。大気中のCO ₂ を直接回収し貯留する技術
DR	Demand Responseの略。デマンドレスポンス。電力需要パターンを変化させ需要家側の電力を制御すること
e-fuel	再生可能資源由来の電力から作られる合成燃料
IEA	International Energy Agencyの略。国際エネルギー機関
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changeの略。気候変動に関する政府間パネル
NETs	Negative Emissions Technologiesの略。負の排出技術/二酸化炭素回収（Carbon Dioxide Removal: CDR）技術
VPP	Virtual Power Plantの略。仮想発電所。電力系統に直接接続されている発電・蓄電設備の所有者や第三者（リソースアグリゲーター）が、エネルギーリソースをまとめて制御することで、発電所と同様の機能を提供すること
セクターカップリング	建物、運輸、産業を含むエネルギー消費セクターを電力セクターと連携する、社会インフラ改革の考え方

謝辞

本レポートの草稿執筆にあたり、草稿に関するインサイトや思慮に富んだフィードバックをご提供いただいたHino, Tomoya氏及びOkura, Ichiro 氏に感謝いたします。

執筆者について



庵原 一水 (Issui Ihara) | iihara@tohatsu.co.jp

Partner, Government & Public Services Division デロイトトーマツコンサルティング合同会社



片桐 豪志 (Tsuyoshi Katagiri) | tsuyoshi.katagiri@tohatsu.co.jp

Partner, Government & Public Services 有限責任監査法人トーマツ



丹羽 弘善 (Hiroyoshi Niwa) | hniwa@tohatsu.co.jp

Partner, Sustainability Unit デロイトトーマツコンサルティング合同会社



加藤 健太郎 (Kentaro Kato) | kentakato@tohatsu.co.jp

Partner, Sustainability Unit デロイトトーマツコンサルティング合同会社



越智 崇充 (Takamichi Ochi) | takochi@tohatsu.co.jp

Director, Sustainability Unit デロイトトーマツコンサルティング合同会社



三瀬 農士 (Atsushi Mise) | atsushi.mise@tohatsu.co.jp

Director, Operational Risk 有限責任監査法人トーマツ



森 啓文 (Keibun Mori) | kmori@tohatsu.co.jp

Senior Manager, Sustainability Unit デロイトトーマツコンサルティング合同会社



福島 勇太 (Yuta Fukushima) | yfukushima@tohatsu.co.jp

Senior Manager, Sustainability Unit デロイトトーマツコンサルティング合同会社



濱崎 博 (Hiroshi Hamasaki) | hhamasaki@tohatsu.co.jp

Specialist Director, Sustainability Unit デロイトトーマツコンサルティング合同会社



ヴィクトル ルフランソワ荒井 (Victor Le Francois Arai) | vlefrancoisarai@tohatsu.co.jp

Specialist, Sustainability Unit デロイトトーマツコンサルティング合同会社



光井 智恵 (Chie Mitsui) | cmitsui@tohatsu.co.jp

Senior Consultant, Sustainability Unit デロイトトーマツコンサルティング合同会社

問い合わせ先

当社のインサイトを活用し、変化を生かした企業活動の実現をお手伝いいたします。貴社の課題解決に役立つ斬新なアイデアをお探しでしたら、ぜひお問い合わせください。

庵原 一水 (Issui Ihara)

Partner, Government & Public Services Division デロイト トーマツ コンサルティング合同会社

iihara@tohatsu.co.jp

建設コンサルタント、総合シンクタンクを経て現職。エネルギー・地球温暖化対策を中心とする環境分野のコンサルティングに20年間従事。中央省庁の政策立案・実行支援から企業の戦略立案・R&D支援等を幅広く手掛けており、官民双方の立場からの政策実現に取り組む。特に、再エネ・省エネ技術に関する高度な専門的知見を有しており、国内外の最新のビジネス・政策動向を踏まえた政策／戦略立案、エネルギーシミュレーションに基づく政策／事業評価、官民連携によるR&Dや社会実証のコーディネートを得意とする。

Deloitte.

デロイト トーマツ

デロイト トーマツ グループは、日本におけるデロイト アジア パシフィック リミテッド および デロイト ネットワーク のメンバーであるデロイト トーマツ 合同会社 ならびに そのグループ 法人（有限責任 監査 法人 トーマツ、デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社、デロイト トーマツ ファイナンシャル アドバイザリー 合同会社、デロイト トーマツ 税理士 法人、DT 弁護士 法人 および デロイト トーマツ コーポレート ソリューション 合同会社 を含む）の総称です。デロイト トーマツ グループは、日本で最大級の プロフェッショナル グループ のひとつであり、各 法人 がそれぞれの 適用 法令 に従い、監査・保証 業務、リスク アドバイザリー、コンサルティング、ファイナンシャル アドバイザリー、税務、法務 等 を提供 して います。また、国内 約 30 都市 以上に 1 万 5 千 名 を 超える 専門 家を 擁し、多国籍 企業 や 主要 な 日本 企業 を クライアント として います。詳細 は デロイト トーマツ グループ Web サイト（www.deloitte.com/jp）をご覧ください。

Deloitte（デロイト）とは、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド（“DTTL”）、その グローバル ネットワーク 組織 を 構成 する メンバー フォーム および それらの 関係 法人（総称 して “デロイト ネットワーク”）の ひとつ または 複数 を 指 します。DTTL（または “Deloitte Global”）ならびに 各 メンバー フォーム および 関係 法人 は それぞれ 法的 に 独立 した 別個 の 組織 体 であり、第三者 に関して 相互 に 義務 を 課 した または 拘束 さ せる こと は あり ませ ン。DTTL および DTTL の 各 メンバー フォーム ならびに 関係 法人 は、自らの 作為 および 不作為 について のみ 責任 を 負い、互い に 他 の フォーム または 関係 法人 の 作為 および 不作為 について 責任 を 負う ものでは あり ませ ン。DTTL は クライアント への サービス 提供 を 行い ませ ン。詳細 は www.deloitte.com/jp/about を ご覧ください。

デロイト アジア パシフィック リミテッド は DTTL の メンバー フォーム であり、保証 有限 責任 会社 です。デロイト アジア パシフィック リミテッド の メンバー および それらの 関係 法人 は、それぞれ 法的 に 独立 した 別個 の 組織 体 であり、アジア パシフィック における 100 を 超える 都市（オークランド、バンコク、北京、ハノイ、香港、ジャカルタ、クアラルンプール、マニラ、メルボルン、大阪、ソウル、上海、シンガポール、シドニー、台北、東京 を含む）にて サービス を 提供 して います。

Deloitte（デロイト）は、監査・保証 業務、コンサルティング、ファイナンシャル アドバイザリー、リスク アドバイザリー、税務、法務 など に 関連 する 最先端 の サービス を、Fortune Global 500® の 約 9 割 の 企業 や 多数 の プライベート（非公開）企業 を 含む クライアント に 提供 して います。デロイト は、資本 市場 に対する 社会的 な 信頼 を 高め、クライアント の 変革 と 繁栄 を 促し、より 豊かな 経済、公正 な 社会、持続 可能 な 世界 の 実現 に向けて 自ら 率先 して 取り組む こと を 通じて、計測 可能 で 継続 性 の ある 成果 を もたらす プロフェッショナル の 集団 です。デロイト は、創設 以来 175 年 余り の 歴史 を 有し、150 を 超える 国・地域 に わたって 活動 を 展開 して います。“Making an impact that matters”を パーパス（存在 理由）として 標榜 する デロイト の 約 345,000 名 の プロフェッショナル の 活動 の 詳細 については、（www.deloitte.com）を ご覧ください。

本資料 は 皆様 への 情報 提供 として 一般的 な 情報 を 掲載 する のみ であり、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド（“DTTL”）、その グローバル ネットワーク 組織 を 構成 する メンバー フォーム および それらの 関係 法人（総称 して “デロイト ネットワーク”）が 本資料 を もって 専門 的 な 助言 や サービス を 提供 する ものでは あり ませ ン。皆様 の 財務 または 事業 に 影響 を 与える よう な 意思 決定 または 行動 を さ れる 前に、適切 な 専門 家 に ご相談 ください。本資料 における 情報 の 正確 性 や 完全 性 に関して、いかなる 表明、保証 または 確約（明示・黙示 を 問い ませ ン）を する ものでは あり ませ ン。また DTTL、その メンバー フォーム、関係 法人、社員・職員 または 代理人 の いずれ も、本資料 に 依拠 した 人 に 関係 して 直接 また 間接 に 発生 した いかなる 損失 および 損害 に対して 責任 を 負い ませ ン。DTTL ならびに 各 メンバー フォーム および それらの 関係 法人 は それぞれ 法的 に 独立 した 別個 の 組織 体 です。

©2022. For formation, contact Deloitte Tohmatsu Group.



Member of
Deloitte Touche Tohmatsu Limited