

2050年カーボンニュートラルの社会・経済への影響

株式会社三菱総合研究所（本社：東京都千代田区、代表取締役社長：藪田 健二）は、2050年に向けた日本の四つの将来シナリオを設定し、カーボンニュートラルが社会や経済に与える影響について試算しました。その結果を踏まえ、脱炭素社会への円滑な移行に向けて必要となる対策の方向性を提言します。

中長期的な脱炭素の潮流はむしろ強固に

2022年2月のウクライナ侵攻は、世界的なエネルギー価格の高騰に拍車をかけるとともに、エネルギー安全保障の問題を改めて世界に突きつけることになった。欧州各国では石炭・天然ガスの備蓄や、調達先の多様化も含めた対策に乗り出しているが、これは化石燃料への単純な回帰を意味している訳ではない。欧州全体では域内エネルギー自給率を高めるため再生可能エネルギー・省エネルギー（再エネ・省エネ）の普及を加速させており、中長期的な脱炭素化の流れはむしろ強固になってきている。

世界ではカーボンニュートラル（CN）を宣言する国・地域が130カ国を超え、実際のビジネスルールへの落とし込みが進んでいる。CNは社会全体に大きな構造変化をもたらすドライバーであり、日本においてもその影響を矮小（わいしょう）化することなく捉える必要がある。

行動変容と技術革新の相乗効果が、円滑なCN移行への鍵に

CNを目指すシナリオは1つではなく複数が考えられる。どのシナリオにおいても再エネの最大限の導入、需要側の省エネ・電化は必須となり、足元からエネルギー需給構造は大きく変わることになる。また、電源構成では再エネ大量導入を支えるための調整力確保として、水素・アンモニアへの燃料転換など火力電源の脱炭素化等も避けられない。他方、シナリオによる違いが表れるのは、温室効果ガスの削減可能量・削減費用であり、「行動変容」と「技術革新」を組み合わせることが円滑なCN移行のために重要となる。

CNに伴う構造変化は、資源循環や人材戦略にも波及

エネルギー・経済安全保障の観点では、再エネ導入拡大に伴いエネルギー自給率は向上することになる。他方、送電線や再エネ、蓄電池等に必要とされる資源は地理的に偏在しており、化石燃料に比べて寡占的かつ権威主義国に偏るものもある。太陽光・風力発電部品などは現状では海外依存度も高く、CN移行に伴い経済安全保障のリスクがより深刻となり、資源循環・サーキュラーエコノミーの重要性が増すであろう。

脱炭素化は経済全体でみた場合は、日本国内にプラスの波及効果をもたらすことが期待される。ただし、その波及は一律ではなく、電力関連産業が増大する一方、旧来の自動車関連産業は縮小するなど、産業構造は大きく変化する。円滑な脱炭素化社会への移行のためには、必要とされる産業への業種を超えた雇用移動が前提となる。加えて、デジタル人材などをはじめ、脱炭素化での成長産業に必要な専門性の高い人材や、創造的な業務に従事する人材を中長期的な観点から育成していくことも重要となる。家計への影響では、電気料金の上昇やそれに起因する物価上昇がもたらす負の影響を最小化するため、分配のあり方が今後の重要な課題となる。

行動変容の実現には、適切な情報提供がまだまだ必要

脱炭素化に向けた行動変容は最も早期に取り組む必要があるが、企業・消費者へのアンケート結果からは、再エネ電力への切り替えやオンサイト発電の導入といった対策は、期待される効果に比して取り組み意向が低い状況にある。この理由には初期費用や設備上の制約等から選択肢がないことに加えて「取り組みの効果がよく分からない」という回答も多く、十分な選択肢や情報の提供によって行動変容が促される余地がまだ大きいことが示唆されている。

原子力利用のオプションを捨てず、再エネとの共存を

原子力利用については、足もとのエネルギー市場の混乱や 2030 年温室効果ガス削減目標達成という比較的至近の課題だけに捉われるのではなく、長期的な目線に立ち原子力というオプションを「日本に残す」というメッセージを明確に発することが重要となる。

そのためには、技術・人材の維持、そして原子力自体のイノベーションが必要となる。前者は安全基盤の継続だけではなく経済安全保障の観点からも重要となり、後者は安全性の更なる向上や、再エネ大量導入時代に即した原子力利用（負荷追従、水素製造、熱利用等）がポイントとなる。また、原子力を取り扱う事業者に対する不信感払しょくのための業界構造の変革、企業ガバナンスへの対応、継続的な社会との対話等に真摯に取り組むことも必須となる。

情報爆発や災害対応は「起こるもの」とした対応が必要

グレー・リノ（灰色のサイ）とは「発生する確率が高くインパクトが大きいにも関わらず、見かけの緊急性が低いために軽視されがちな事象・問題」を指す。その一つが情報爆発であり、社会のデジタル化に伴い加速度的に情報量が増加するなか、エネルギー消費量の増大を相殺するだけの技術革新が今後も続くかが論点となる。地域で追加的に発生する電力需要と、再エネをはじめとした地域電源を組みあわせるなど、分散型のアーキテクチャを情報通信とエネルギーで一体的に考えることが重要になる。

また、気候変動に伴う風水害激化に加えて、南海トラフ地震、首都直下地震の発生も懸念されており、こうした自然災害についても、今後起こるものという前提で脱炭素化を進めていく必要がある。有事だけでなく平時も含めた対策が重要になるほか、備蓄性・可搬性に優れた燃烧系エネルギーの脱炭素化も意義を有している。

領域横断的な取り組みのもと、CN を日本の新たな産業競争力に

上述のように CN が日本の社会・経済に与える影響は広範であり、エネルギー関連産業だけにとどまるものではない。CN 移行に伴う資源需要の増加は新たな地政学リスクをもたらし、産業構造変化は雇用政策に直結する。情報爆発による電力需要の過度な増加は CN・DX の両方の足かせになる可能性もある。これらはすべて旧来の業界・官庁の縦割りの範囲で収まるものではなく、領域横断的な取り組みが不可欠であることを示している。

産業構造における製造業比率の高さ、火力発電比率の高さ、国内脱炭素エネルギーの乏しさ、再エネ適地の少なさ、大規模災害の多さなど、日本の CN 達成のハードルは多く存在するが、同様の課題に直面している国は他にもある。上記のような課題をクリアできれば、それは新たな事業機会や競争力となり他国の CN 達成に貢献する道筋も考えられる。世界全体の脱炭素化は幾つかの揺り戻しはあったとしても、中長期的には不可逆的に進んでいくと想定される。世界の潮流に受け身になることなく、産官学のステークホルダーが一体となって、CN による社会変化を日本の新たな産業競争力につなげることが求められる。

目次

1. はじめに： カーボンニュートラル（CN）を巡る概況	1
2. 2050 年に向けた四つの将来シナリオ	3
2.1. 将来シナリオの考え方	3
2.2. 四つの将来シナリオの世界観	4
3. CN がもたらす構造変化	7
3.1. エネルギー需給構造への影響	8
3.2. エネルギー・経済安全保障への影響	10
3.3. 産業・雇用への影響	12
4. CN 移行において「今」考えるべき論点	16
4.1. 行動変容の顕在化	16
4.2. 原子力の位置づけ	19
4.3. 「グレー・リノ」への対処	21
5. おわりに： CN による社会変化を新たな産業競争力に	25
参考資料	26

1. はじめに： カーボンニュートラル（CN）を巡る概況

2020年10月末に菅前首相が所信表明演説にて「2050年までにカーボンニュートラル（CN）の実現を目指す」と宣言してから約一年半が経過した。その間、世界の脱炭素潮流は大きく加速し、2022年現在、期限付きのCNを宣言する国・地域は130カ国を超え、世界全体のGDPの9割以上を占めている¹。

政治的なアジェンダからビジネスルールへ

脱炭素潮流の加速を象徴する出来事の一つが、2021年10月末から英国グラスゴーで開催された第26回気候変動枠組条約締約国会議（COP26）である。同会議では石炭火力の段階的削減も含め、以前よりも踏み込んだ議論がなされた。その中で、特筆すべき内容の一つが「産業革命以降の平均気温上昇を1.5°C未満に抑える」という従前の努力目標が、目指すべき共通のゴールとして事実上格上げされたことであろう。これまで議論の中心であった「2°C目標」とは0.5°Cの違いではあるが、温室効果ガス排出量で見るとその差は約15Gt-CO₂eq/年に相当する²。これは、2020年度の日本全体の温室効果ガス排出量約1.15Gt-CO₂eqの10倍以上の規模となる追加削減を意味している。今後、先進国では、1.5°C目標と整合するより野心的なNDC（国別排出削減目標）の提示、新興国への資金協力が求められることになる。

加えて、脱炭素潮流は単なる政治的なアジェンダではなくビジネスルールや政策への落とし込みも進んでいる（図表1-1）。金融関連では大きく、リスク管理、財務会計・開示、投融資適格性、といった分野でそれぞれルール形成が進んでおり、通商関連ではEUにて炭素国境調整措置導入に伴う報告義務が2023年から開始される。脱炭素化の潮流はあらゆる産業を包み込み、大きな構造変化を迫っている状況にある。

図表 1-1 金融・通商ルールへの落とし込みが進む

金融	リスク管理	● 金融当局は気候関連リスクを「システミックリスク」と認識し、 金融機関へのリスク管理を要請（2020年1月～）
	財務会計・開示	● 気候関連情報は自主開示（TCFD）から義務開示の流れ
	投融資適格性	● EUタクソミー等、サステナブルファイナンスの定義が固まる方向 ● 世界の主要金融機関は2050年までにポートフォリオからの温室効果ガス排出量のネットゼロを宣言（GFANZ）
通商	炭素国境調整措置	● EU域外からの輸入に対して排出量に応じた価格調整を実施 ● 2023年より報告義務開始、2026年より支払義務化

出所：三菱総合研究所

足もとでエネルギー市場は不安定化、世界的なインフレの一因に

他方で、足もとのエネルギー市場は大きく混乱しており、加速する脱炭素潮流と現実の諸問題とのギャップはいまだ開いたままである。

2021年半ば頃から、コロナ禍からの経済回復や脱炭素潮流に伴う上流投資の停滞等を背景に化石燃料価格は記録的に高騰していたが、2022年2月のロシアのウクライナ侵攻がさらに拍車をかける形になった（図表1-2）。WTI原油価格は2022年3月に2008年以来の高騰となる130ドル台を記録し、その後も不安定な価

¹ Net Zero Tracker, <https://zerotracker.net/>, (2022年6月20日閲覧)をもとに三菱総合研究所にて一部修正

² UNEP, 2021, Emissions Gap Report, <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>

格推移が続いている。エネルギー価格の高騰は物価全般に影響を与えており、2021年3月以降、消費者物価上昇率に占めるエネルギー価格の寄与は日米欧平均で約4割を占めるまでになっている。

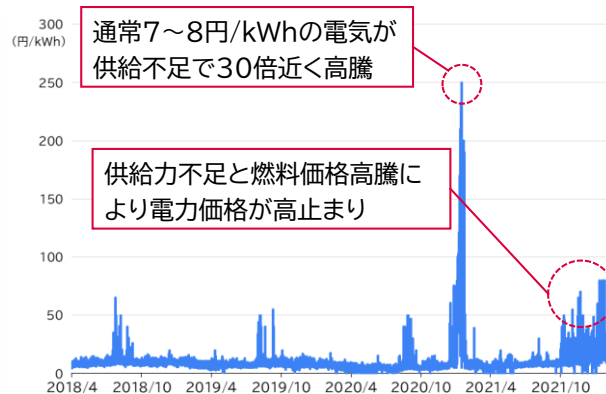
日本においてもガソリン価格の高騰が続いているほか、卸電力価格の乱高下も大きな問題となっている。2020年度冬季も非常に大きな価格スパイクがあったが、2021年度冬も供給力不足と燃料価格により卸電力価格の高騰が長期間継続し、一部の事業者や需要家に大きな影響を与えている。

図表 1-2 エネルギー価格の乱高下が続く

化石燃料の価格指標推移



日本における卸電力価格の推移



出所： IMF, Primary Commodity Prices、日本卸電力取引所データより三菱総合研究所作成

脱炭素化とエネルギー安全保障の両立へ

ウクライナ侵攻は、「エネルギー安全保障」という昔からの命題の重要性を改めて認識させることになった。例えばドイツではロシアへのエネルギー依存を下げるため LNG も含めた調達が多角化、石炭・天然ガスの国家備蓄などの検討が進み、英国では北海油田での国産エネルギーの位置づけが再認識されている。

しかし、安全保障意識の高まりは、化石燃料への単純な回帰を意味している訳ではない。欧州委員会が2022年3月8日に発表した“REPowerEU”では、再エネを中心とした次世代エネルギーへの転換、省エネルギーへの取り組みこそが、欧州域内のエネルギー自給率を高めるものと位置づけている。中長期的には脱炭素化の流れはむしろ強化されており、各国は脱炭素化とエネルギー安全保障の両立に向かっていく、と捉えることが重要だろう。

エネルギー自給率が1割程度しかない日本にとっても、エネルギー安全保障は国家の命運を左右する課題である。世界情勢の先行きはますます不透明であり、世界全体の中長期の脱炭素潮流が強まるなかで2050年という長い将来の絵姿を見通すことは容易ではない。

CN は社会全体に大きな構造変化をもたらすドライバーであり、日本においてもその影響を矮小（わいしょう）化することなく、全体感を持って捉えることが重要となる。2021年9月発表の三菱総合研究所「2050年カーボンニュートラル実現に向けた提言」³では、①需要側の行動変容、②電力部門の早期ゼロエミッション化、③戦略的なイノベーションの誘発、を時間軸に沿って取り組むことの重要性を示した。本稿ではそこからの発展形として、2050年に向けた日本の将来シナリオを設定し、エネルギー需給の変化や、それに伴う広範な社会・経済影響について分析した。

³ <https://www.mri.co.jp/knowledge/insight/20210907.html>

2. 2050 年に向けた四つの将来シナリオ

2050 年 CN による社会影響の分析を行うため、今後の不確実性を踏まえた四つの将来シナリオを設定した。本章では定量分析の前提となるそれぞれのシナリオについて説明する。

2.1. 将来シナリオの考え方

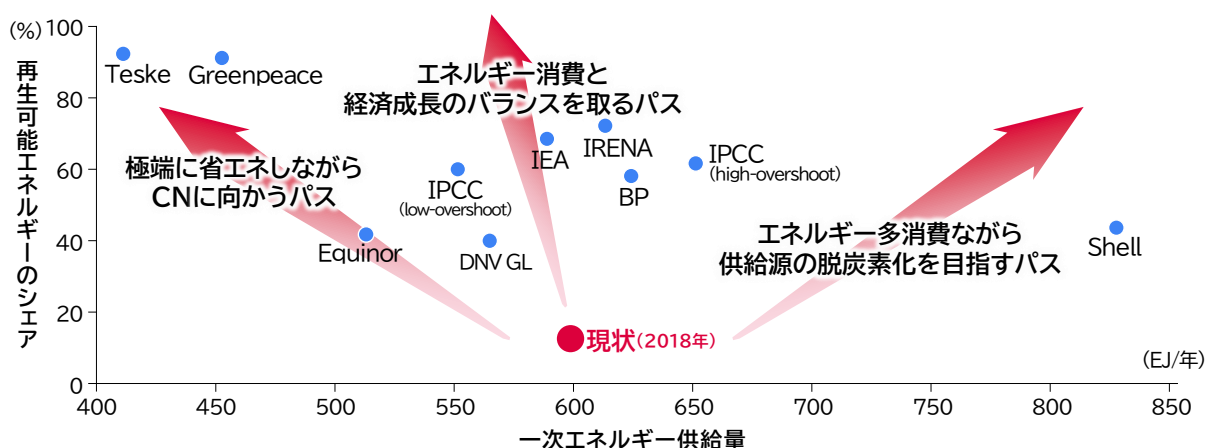
CN を目指すパスは 1 つではない

日本は 2050 年に向けて CN を目指すが、それを達成するパスとして複数の道筋が考えられる。世界ではこれまでに多くの研究機関が CN 達成時のエネルギー需給構造の分析を実施してきた。各機関の分析結果を一次エネルギー供給量と再エネの軸で比較すると、その絵姿は多種多様であることがわかる（図表 2-1）。

既往研究のシナリオの特徴を大別すると、「エネルギー多消費ながら供給源の脱炭素化を目指すパス」、「極端に省エネしながら CN に向かうパス」、「エネルギー消費と経済成長のバランスを取るパス」の三つのタイプがある。ゴールとして共通して CN を目指していても、需要側の省エネルギー量や供給側の技術革新の想定によって複数のパスが存在することがわかる。

図表 2-1 CN に向かう道筋は複数存在する

各国研究機関・エネルギー企業の「ネットゼロシナリオ」（世界全体）



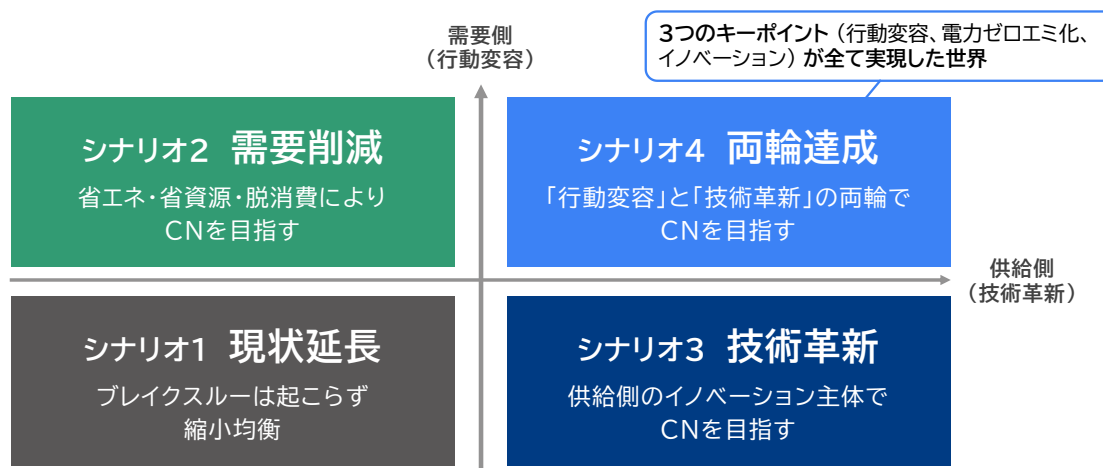
出所： IRENA, World Energy Transition Outlook 2021 より三菱総合研究所作成

「需要」×「供給」の軸から日本において四つの将来シナリオを想定

世界における既往研究の動向を踏まえつつ、本稿では「需要側の行動変容」および「供給側の技術革新」の軸により四つの将来シナリオを想定した（図表 2-2）。

シナリオ 1 は行動変容・技術革新のブレイクスルーは起こらず、現状延長のまま 2050 年に到達して縮小均衡の日本となるシナリオであり CN は達成されない。シナリオ 2 および 3 では、行動変容と技術革新がそれぞれ片方のみ実現する。シナリオ 2 は省エネルギー・省資源・省消費によって CN を目指すが、大規模な技術革新は起こらないシナリオである。対してシナリオ 3 では、供給側のイノベーションが実現するが行動変容は起こらずに大量消費のまま CN を目指す。最後にシナリオ 4 が行動変容および技術革新の両輪で CN を実現する世界である。シナリオ 4 は昨年発表した「2050 年カーボンニュートラル実現に向けた提言」の 3 つのキーポイントである①需要側の行動変容、②電力部門の早期ゼロエミッション化、③戦略的なイノベーションの誘発、のすべてが実現した世界を想定している。

図表 2-2 需要側行動変容と供給側技術革新の軸で四つの将来シナリオを想定



出所：三菱総合研究所

2.2. 四つの将来シナリオの世界観

シナリオ1 現状延長：ブレイクスルーは起こらず縮小均衡へ

シナリオ1では現状延長のまま2050年に向かう世界を描いた。三つのキーポイントはいずれも実現せず、2050年CNも達成されないシナリオである。2050年までの実質GDP成長率は+0.01%/年であり、2050年の最終エネルギー消費量は2013年比▲34%、温室効果ガス削減量は2013年比▲48%にとどまる。



3つのキーポイントの実現状況

行動変容	×
電力ゼロエミ化	×
イノベーション	×

実質GDP成長率 (2022~50年平均) **+0.01%**

最終エネルギー消費 (2013年比) **▲34%**

温室効果ガス削減率 (2013年比 CO₂回収・貯留前) **▲48%**

→ CN達成せず

シナリオ2 需要削減：省エネ・省資源・脱消費によりCNを目指す

シナリオ2では省エネルギー・省資源・脱消費によってCNを達成する世界を描いた。三つのキーポイントのうち行動変容が実現され、電力ゼロエミッション化は一定程度進展するが大規模な技術イノベーションは起こらないシナリオである。2050年までの実質GDP成長率は▲0.13%/年であり、2050年の最終エネルギー消費量は2013年比▲50%、温室効果ガス削減量は2013年比▲83%となり、ネガティブエミッションを活用してCNを達成する。



3つのキーポイントの実現状況

行動変容	●
電力ゼロエミ化	▲
イノベーション	×

実質GDP成長率 (2022~50年平均) **▲0.13%**
シナリオ1比 2050年▲22兆円

最終エネルギー消費 (2013年比) **▲50%**

温室効果ガス削減率 (2013年比 CO₂回収・貯留前) **▲83%**

➡ ネガティブエミッションを活用しCN達成

シナリオ3 技術革新：供給側のイノベーション主体でCNを目指す

シナリオ3では技術革新によって大量消費型社会のままCNを達成する世界を描いた。三つのキーポイントのうち電力ゼロエミッション化およびイノベーションが実現する一方で、行動変容は起こらないシナリオである。2050年までの実質GDP成長率は+0.10%/年であり、2050年の最終エネルギー消費量は2013年比▲48%、温室効果ガス削減量は2013年比▲89%となり、ネガティブエミッションを活用してCNを達成する。



3つのキーポイントの実現状況

行動変容	×
電力ゼロエミ化	●
イノベーション	●

実質GDP成長率 (2022~50年平均) **+0.10%**
シナリオ1比 2050年+14兆円

最終エネルギー消費 (2013年比) **▲48%**

温室効果ガス削減率 (2013年比 CO₂回収・貯留前) **▲89%**

➡ ネガティブエミッションを活用しCN達成

シナリオ4 両輪達成：行動変容と技術革新の両輪でCNを目指す

シナリオ4では行動変容と技術革新が同時に実現されることによりCNを達成する世界を描いた。三つのキーポイント全てが実現される、目指すべき社会のシナリオである。2050年までの実質GDP成長率は+0.06%/年であり、2050年の最終エネルギー消費量は2013年比▲54%、温室効果ガス削減量は2013年比▲90%となり、ネガティブエミッションを活用してCNを達成する。



3つのキーポイントの実現状況

行動変容	●
電力ゼロエミ化	●
イノベーション	●

実質GDP成長率 (2022~50年平均) **+0.06%**
シナリオ1比 2050年+8兆円

最終エネルギー消費 (2013年比) **▲54%**

温室効果ガス削減率 (2013年比 CO₂回収・貯留前) **▲90%**

➡ ネガティブエミッションを活用しCN達成

各シナリオのパラメータ設定の概要

それぞれのシナリオの世界観に基づきマクロフレーム・活動量水準・供給技術等について具体的なパラメータを想定した(図表 2-3)。マクロフレームについては人口・世帯数は各シナリオ共通であり、実質 GDP は後述する経済・雇用分析の結果から導出される。

シナリオ 1 では多くの活動量水準や供給技術について現状トレンドの延長としてパラメータを設定した。シナリオ 2 では各需要セクターの活動量水準がシェアリング、サーキュラーエコノミー、デジタル化などの影響で変化する効果を織り込んだ。シナリオ 3 では再エネ、水素、製鉄・自動車分野等における技術革新を各パラメータで表現しており、シナリオ 4 ではシナリオ 2, 3 における行動変容・技術革新の効果を同時に反映した。それぞれのパラメータ詳細設定については本稿末の参考資料に記載している。

図表 2-3 各シナリオの世界観に基づいて具体的なパラメータを設定

		CN達成を目指す世界			
		シナリオ1 現状延長	シナリオ2 需要削減	シナリオ3 技術革新	シナリオ4 両輪達成
マクロフレーム		人口・世帯数は各シナリオ共通、実質GDPは経済・雇用分析結果より導出(サービス需要計算の基礎となるGDPは共通) 燃料価格は世界銀行(Commodity Price Forecast)の想定に基づき設定			
活動量水準 (サービス需要)	産業	現状延長水準	シェアリング、サーキュラーエコノミーの進展により最終製品、素材系ともに減少	シナリオ1と同様。ただし、特に鉄鋼については日本のCN技術の優位性を活かし、輸出が増加	シナリオ2とシナリオ3が同時に進展
	民生	現状延長水準	リモートワークの進展で、オフィスは減少、家庭は増加 省エネ機器への買替加速により、高効率製品が早期に普及	シナリオ1と同様。ただし、技術革新により機器がより高効率化(普及スピードはS1と同様)	
	運輸	現状延長水準	デジタル技術の積極導入により旅客は減少、貨物は増加	シナリオ1と同様	
電力	電力需要・火力	モデルにて内生的に計算			
	原子力	各シナリオ共通(新規制基準合格したプラントのみ稼働。新增設・リプレースは想定せず)			
	再エネ	現状延長水準	政府検討水準	次世代再エネ(ペロブスカイト太陽電池等)による更なる普及 国産調達比率の向上	
水素利用		競争力のある水素技術は実現せず		安価な水素輸入が可能(20~30円/Nm ³)	
鉄鋼		革新技術は実現せず既存製鉄方法が継続		水素還元製鉄が実現して高炉を代替可能	
自動車		次世代自動車コストは下げ止まり 長距離輸送の脱炭素代替技術も実現せず		EV・FCVがガソリン車と同程度のコスト水準に 長距離輸送にFC技術の適用が可能	

出所：三菱総合研究所

3. CN がもたらす構造変化

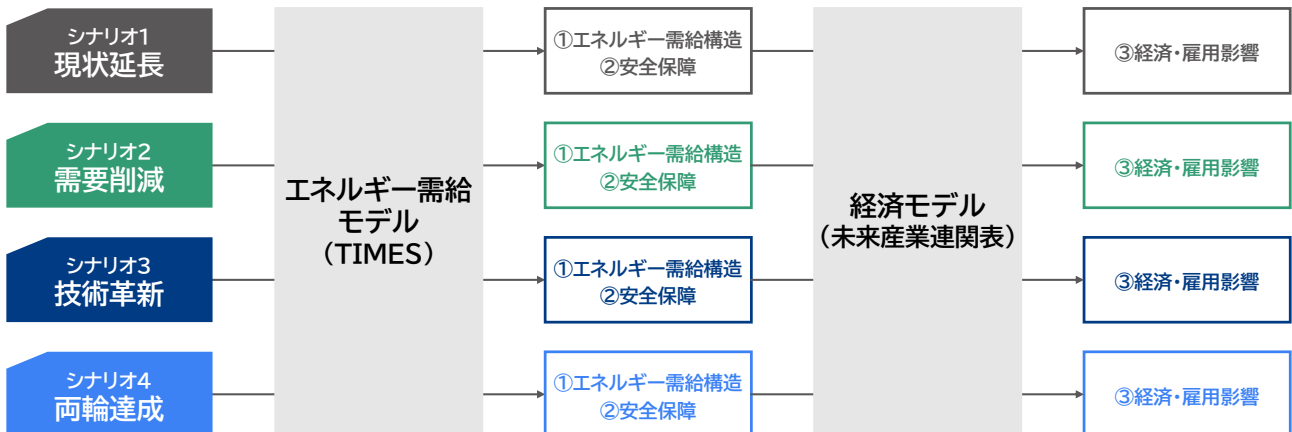
前章では日本における四つの将来シナリオを示したが、それぞれの世界のあり様は何が共通項として現れ、何が差異となるのだろうか。本章では、三菱総合研究所にて構築したエネルギー需給モデル（TIMES）と経済モデル（未来産業連関表）を用いて、①エネルギー需給構造、②エネルギー・経済安全保障、③経済・雇用の三つについてその絵姿を定量的に示す。

図表 3-1 は具体的な分析フローを表している。まず、各シナリオの世界観に応じて設定したマクロフレーム・活動量水準・供給技術等のパラメータを TIMES へ入力する。TIMES は電力セクターのみならず日本全体のエネルギー需給構造をバックキャストアプローチで分析可能なモデルであり、3.1 節、3.2 節では TIMES のアウトプットに基づいて「エネルギー需給構造」および「エネルギー・経済安全保障」の分析を実施した。

さらに、エネルギー需給構造の変化が経済・雇用に与える影響を分析するため、3.3 節ではシナリオごとに未来産業連関表を作成し、TIMES により得られた結果をもとに、経済波及効果分析を実施した。具体的には、各シナリオに沿い、統合的な産業間の投入産出構造を調整することで産業連関表（未来産業連関表）を作成し、経済波及効果（産出高、付加価値および就業者数）を算出した。なお、経済波及効果については二次波及効果までを想定している。

TIMES モデル・産業連関分析の詳細については本稿末の参考資料に記載している。

図表 3-1 エネルギー需給モデル（TIMES）・経済モデル（未来産業連関表）により CN の社会影響を定量化



出所：三菱総合研究所

3.1. エネルギー需給構造への影響

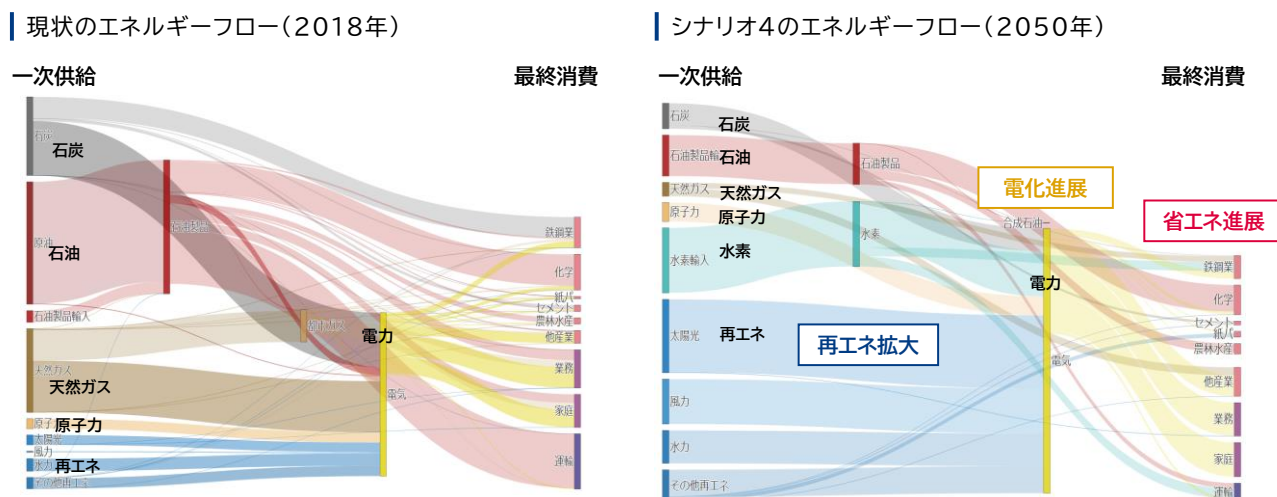
本節では CN 達成時のエネルギー需給構造の絵姿について、その主要ポイントを説明するとともに、各シナリオの共通項や差異の観点から分析を行う。

CN 達成時のエネルギー需給構造は足もとから大幅に変化

CN に向けて 2050 年のエネルギー需給構造は現状から大きく変わる（図表 3-2）。その需給構造変化のポイントとして、大きく 3 点があげられる。

まずは再エネを中心とした脱炭素エネルギーが主体となる供給構造への変化である。足もとでは一次エネルギー供給の 8 割以上を化石燃料が占めるが、シナリオ 4 では 2050 年に脱炭素エネルギーが約 8 割を占めることになる。次に、需要側の省エネルギーが大きく進展する。シナリオ 4 における最終エネルギー消費量は現状に対して約半減の水準となる。さらに、エネルギー需要として電化が大幅に進む。現状では最終消費に占める電力の比率（電化率）が 26%であるが、2050 年には 52%とほぼ倍になる。

図表 3-2 CN 達成時の需給構造は足もとから大幅に変わる



出所：三菱総合研究所試算 実績値は資源エネルギー庁 総合エネルギー統計より
 ※縦軸のスケールは一次エネルギー供給の合計を 100%として示したもの。

CN 達成シナリオには一定の共通項が存在

CN に至るパスは複数存在するが、シナリオ 2~4（CN 達成シナリオ）のエネルギー需給構造を分析すると一定の共通項が確認される。

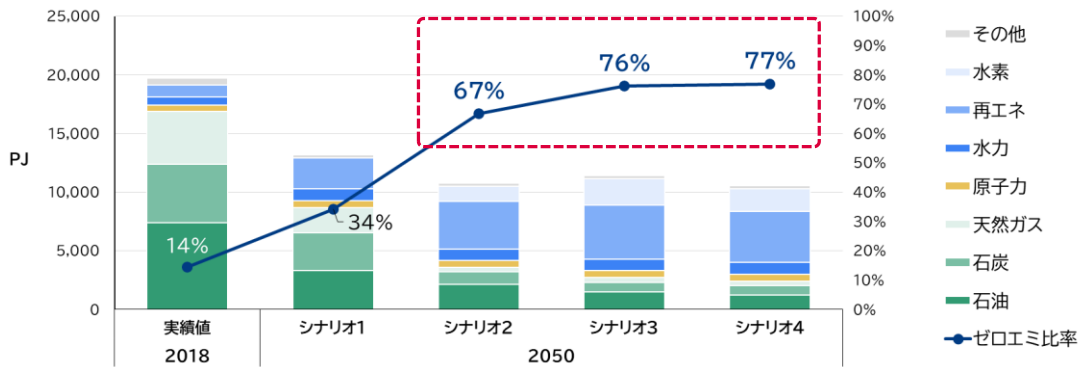
まず、一次エネルギー供給に占める脱炭素エネルギー比率は CN 達成シナリオにおいて 7~8 割であり、特に再エネがいずれのシナリオにおいても主体となる（図表 3-3）。需要側の省エネルギーや電化が大幅に進展する点もシナリオ共通であり、各シナリオとも最終エネルギー消費が現状から約半減、電化率は約倍増する（図表 3-4）。

また、電源構成に占める再エネ比率もシナリオ 2~4 で共通して 7 割程度となるが、再エネの主力電源化に伴い電力システムにおける調整力の確保が必要になる。MRI 電源モデル⁴による評価では、一定の電力系統増強や蓄電池増加等を見込んだとしても、約 3 割の火力系電源が残る結果になった（図表 3-5）。調整力として水素やアンモニア発電など火力系電源の脱炭素化も CN 達成に向けての必須要素となる。

⁴ 連系線制約の下で地域別に 1 時間単位で需給マッチングを行う広域シミュレーションモデル

図表 3-3 一次エネルギー供給構造は再エネ主体に

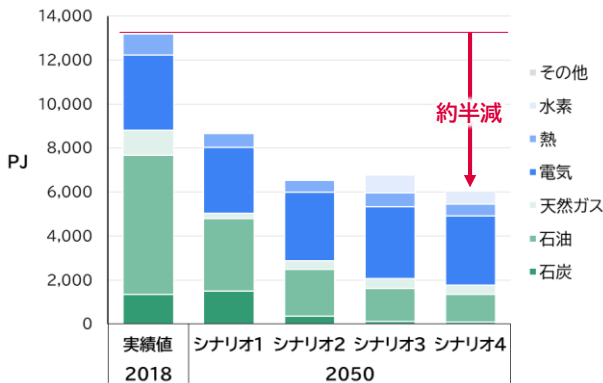
一次エネルギー供給量の変化



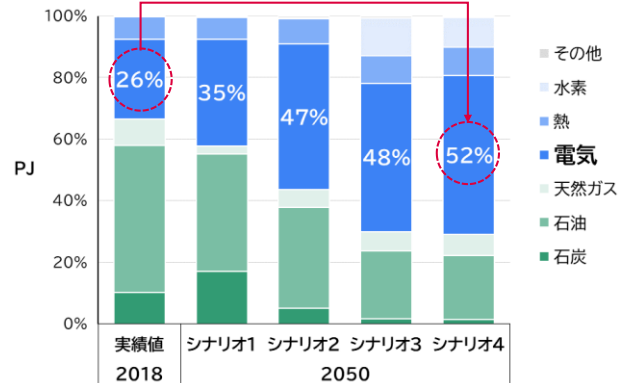
出所：三菱総合研究所試算 実績値は資源エネルギー庁 総合エネルギー統計より

図表 3-4 需要側では大幅な省エネと電化が進展

最終エネルギー消費量



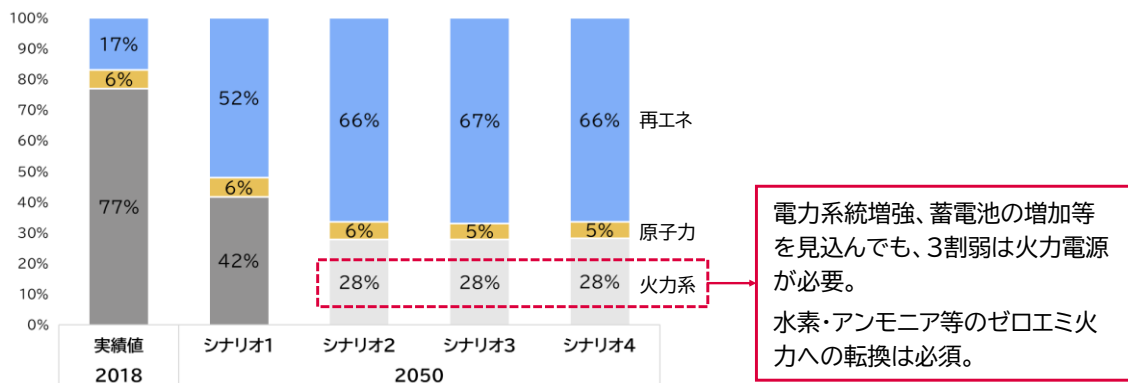
最終エネルギー消費構成比



出所：三菱総合研究所試算 実績値は資源エネルギー庁 総合エネルギー統計より

図表 3-5 火力系電源のゼロエミ化が必須

発電電力量構成 (MRI電源モデルにて試算)



電力系統増強、蓄電池の増加等を見込んで、3割弱は火力電源が必要。
水素・アンモニア等のゼロエミ火力への転換は必須。

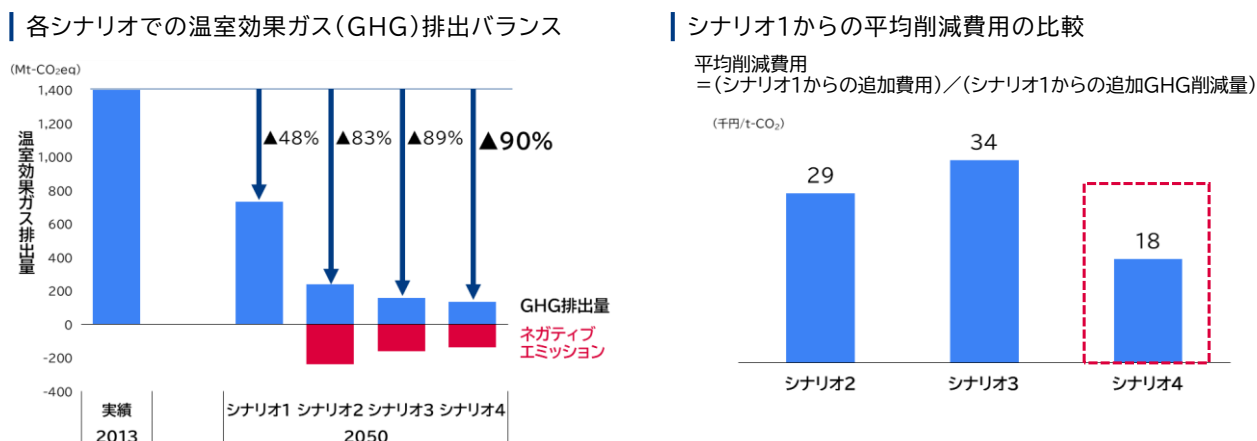
出所：三菱総合研究所試算 実績値は資源エネルギー庁 総合エネルギー統計より

行動変容と技術革新の両輪で CN 達成を

ここまで CN 達成シナリオの共通項について確認してきたが、シナリオ間での差異も存在する。特に排出削減の観点では行動変容と技術革新を組み合わせたシナリオ 4 においてその相乗効果が確認される。ネガティブエミッション前の温室効果ガス削減率はシナリオ 4 において最も高く、2013 年度比 90%減となる (図

表 3-6)。これはCN 達成のためのネガティブエミッションの必要量が少ないことを意味する。技術革新を中心としたシナリオ3でも温室効果ガス削減率は同様に高いものの、平均削減費用を比較すると両輪達成のシナリオ4が最も安価な結果となり、行動変容と技術革新を組みあわせながらCNを目指すことの重要性が示唆される⁵。

図表 3-6 シナリオ4では行動変容と技術革新の相乗効果



出所：三菱総合研究所試算 GHG 排出実績値は国立環境研究所温室効果ガスインベントリデータより

※シナリオ3では平均削減費用は高いものの産業競争力に結び付く可能性もあり、全体の経済影響としてマイナスという意味ではないことに留意。上記はネガティブエミッション前のグロス排出量の削減費用での比較。

3.2. エネルギー・経済安全保障への影響

CN時代のエネルギー・経済安全保障では従来とは異なる考え方が必要になる。本項では3.1節の結果を踏まえながら、それぞれの安全保障の観点から分析を行う。

CN時代の経済安全保障は新たなフェーズに

化石資源に乏しい日本では、再エネや原子力といった脱炭素エネルギーの増加はエネルギー自給率の改善に寄与する。現状2割程度のエネルギー自給率はCN達成シナリオにおいて6割程度まで改善する結果となった(図表3-7)。他方、太陽光や風力などの再エネの部材は海外依存の割合が高いため、国内調達を考慮した技術自給率の観点も重要である。エネルギー自給率と同時に国内調達比率も向上させなければ、技術自給率がエネルギー自給率ほどには改善しない可能性もある。

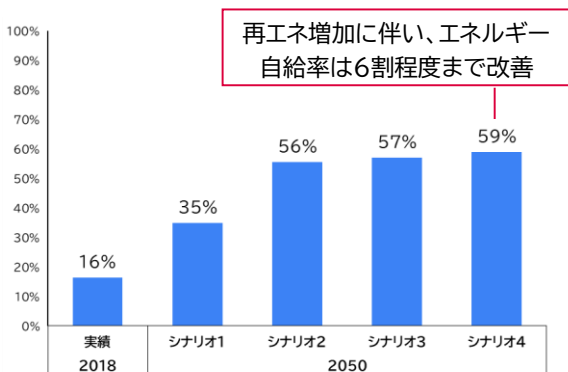
また、脱炭素エネルギーシステム構築に必要な資源と、化石燃料資源の特性の違いも重要である。脱炭素エネルギーは低密度・分散型の傾向があるため、エネルギー密度の高い化石燃料中心のエネルギーシステムに比べて多くの資源が必要になる。さらに、送電線や再エネ、蓄電池に必要なとされる資源は地理的に偏在しており、化石燃料に比べて寡占的かつ権威主義国に偏る資源も確認される(図表3-7)。

エネルギー供給と部材・資源供給では途絶リスクの時間軸が異なるが、脱炭素社会の構築に向けてはこのように従来のエネルギーシステムとは異なる視点でのエネルギー・経済安全保障の考え方が重要になることが示唆される。

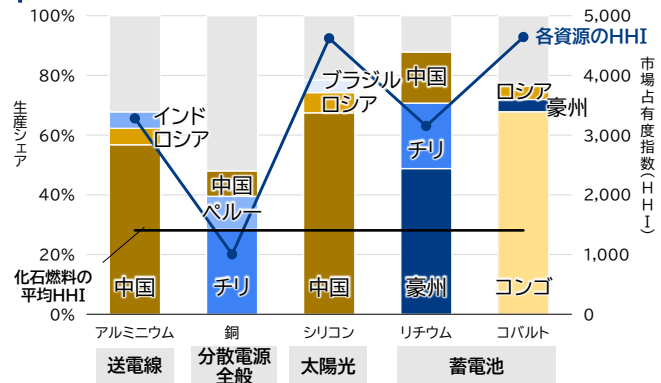
⁵ 加えて、需要側の行動変容は早期に実現可能であることから、シナリオ3とシナリオ4の2050年までの累積での温室効果ガス削減量を比較すると、シナリオ4の方が大きくなるという特徴がある。

図表 3-7 CN時代の安全保障は新たな視点が必要に

エネルギー自給率



CN資源の生産シェアと市場占有度



出所：（左図）三菱総合研究所試算（右図）U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries および、BP, Statistical Review of World Energy 2021 より三菱総合研究所作成⁶

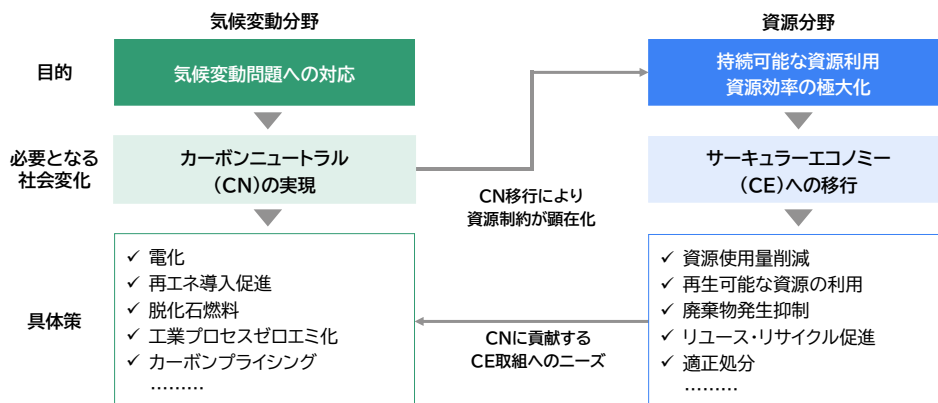
資源制約がサーキュラーエコノミーを加速

前述のとおり脱炭素社会の構築に向けては、大量に必要となる偏在資源を安定的に確保することが極めて重要な論点となる。今後、資源制約の顕在化が懸念される中でCNを契機としてサーキュラーエコノミーへの移行が加速される可能性がある。また、CNを目指して炭素負荷を低減する試みとしても循環型社会の構築が期待される（図表 3-8）。

持続可能な資源利用に向けた効率極大化の追求、および将来の安定供給の不確実性という観点から、金属資源については二次資源⁷の供給・利用を前提とした産業構造へのシフトが考えられる。資源制約やカーボンプライスを背景に金属価格が高騰すると、二次資源が天然資源に対して価格優位性を持つ可能性もある。

また、プラスチックは燃焼時にCO₂を排出することから、代替素材への転換や燃焼回避のためのリサイクルが進展するだろう。プラスチックの主原料は石油精製時の副産品であるナフサであるが、CN実現に向けて脱炭素化が進むことで、従来型の産業が大きな方針転換を迫られる可能性もある。このようにCNを起点としてサーキュラーエコノミーが加速されることで、サプライチェーンのあり方の重要性が増すとともに、脱炭素社会の構築に向けた論点が一層多面的になることが予想される。

図表 3-8 CNに伴う資源制約がサーキュラーエコノミーを加速させる



出所：三菱総合研究所作成

⁶ HHI（ハーフィンダール・ハーシュマン指数）は上位3か国でのシェアの二乗から算出。黄色系は権威主義国、青色系は民主主義国を示す。権威主義国・民主主義国の類型化はEconomist Intelligence Unit（EIU）に準拠

⁷ 使用済製品等からのリサイクルによって活用可能な資源

3.3. 産業・雇用・家計への影響

CN への移行はエネルギー需給構造だけでなく、産業全体に対しても大きな影響を与える。本節では前述のように産業連関分析を用いて、産業・雇用および家計といった面での影響を分析する。

脱炭素化による産業影響はプラスとマイナスの両面に

脱炭素化に伴う産出高・付加価値額の変化をみるにあたり、ここではシナリオ4（技術革新と行動変容の両輪達成）とシナリオ1（現状延長）の比較を行った。まず、シナリオ4とシナリオ1の全体像をみると、シナリオ4が産出高では19.6兆円増、付加価値が8.1兆円増となり（いずれもシナリオ1比、直接効果+一次波及+二次波及）、両輪達成（シナリオ4）により経済にプラスの影響をもたらされることが分かる。

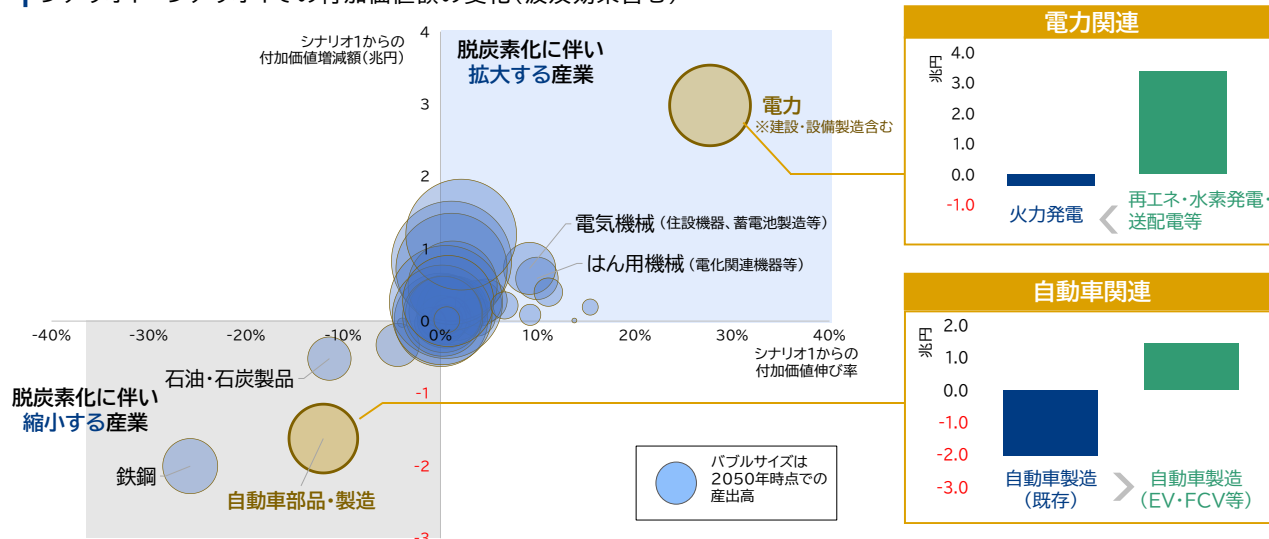
ただし産業別では、脱炭素化に伴い拡大する産業と縮小する産業に分かれ（図表3-9）、産業構造が大きく変化するとの結果が得られた。

拡大する産業として特に注目すべきは電力関連産業である。シナリオ4では、火力発電のマイナス効果はあるものの、それを再エネや水素発電産業のプラス効果はるかにしのぐ結果となった。特に既存電力の送配電設備・施設建設や太陽光や風力等の施設建設や部品関連産業で大きな波及効果が見込まれる。汎用機械や電気機械、電子部品には洋上風力設備等の機械関連が含まれることから付加価値はプラスとなった⁸。

一方、縮小する産業として代表的なものが自動車関連産業である。もちろん、EVやFCV化の進展に伴うプラスの波及効果はあるものの、既存の自動車製造や自動車部品、自動車用内燃機関のマイナス分はそれをしのぎ、結果として付加価値は大きくマイナスとなる⁹。また電炉化や水素還元製鉄技術の実装が進む鉄鋼業関連（鉄鉄や粗鋼（転炉）、石油・石炭製品などの産業においても大きなマイナス波及が見込まれる。

図表 3-9 脱炭素化によって拡大する産業と縮小する産業が存在

シナリオ1→シナリオ4での付加価値額の変化(波及効果含む)



注) シナリオ4とシナリオ1での比較・波及効果を含む。

出所：早稲田大学・スマート社会技術融合研究機構・次世代科学技術経済分析研究, 2015年次世代エネルギーシステム分析用産業連関表をベースとして三菱総合研究所試算。付加価値は直接効果+一次波及+二次波及の合計

⁸ なお、EVやFCV関連で成長が期待される蓄電池産業も産業分類上は電気機械産業に含まれる。

⁹ ただしEVやFCVへのシフトはカーシェアリング等の普及による影響など、サービス産業を中心としたプラスの効果も見込むことができる。

構造変化により雇用ギャップ⁶が大きな課題に

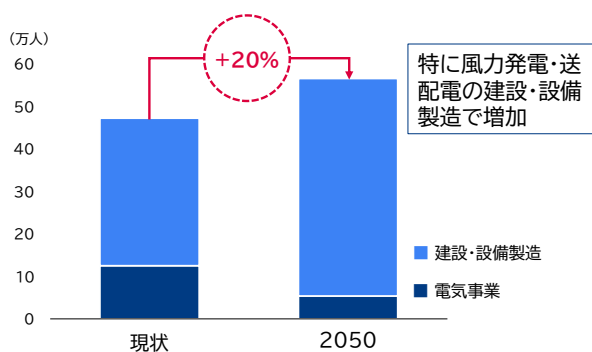
脱炭素化に伴う産業構造の変化は、雇用にも影響を与える。今回、シナリオ別に算出した経済波及効果に産業別の雇用係数（各産業の雇用者数を対応する産業の生産額で除したものであり、1 単位の生産を行うために投入される労働量を示す指標）とシナリオ分析で設定した各産業別の活動量を適用することで、就業者数への影響を確認した。雇用係数については、総務省「産業連関表」（2015 年表）、早稲田大学次世代科学技術経済分析研究所の「次世代エネルギーシステム分析用産業連関表」（2015）¹⁰の付帯表、および太陽光、風力関連では松本・本藤¹¹、EV、FCV については ERIA¹²を参考に、変化要因を検討し産業別に設定した。

図表 3-10 は、今回の計算結果から現状比で雇用影響の特に大きい電力関連産業と自動車関連産業を抽出し、示したものである。電力関連産業の電気事業では、火力から再エネへのシフトに伴い、現状比で減少するが、建設・設備製造分野では風力発電や送配電の建設・設備製造を中心に大幅に増加する。その結果、電力関連産業全体としては約 10 万人の増（20%増）が見込まれる。

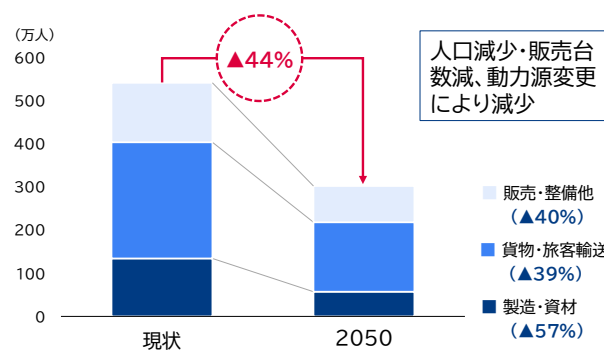
一方、自動車関連産業では、少子高齢化の進展とシェアリング等による販売減、動力源の変更等の要因が相まって、大幅なマイナスの雇用影響が発生する。ここで自動車関連産業としては、製造、貨物・旅客輸送、販売・整備に大別されるが、いずれも大きく減少（製造・資材（57%減）、貨物・旅客輸送（39%減）、販売・整備他（40%減））し、自動車関連産業全体として労働需要ベースでは現状の 550 万人から 300 万人強（44%減）になるとの結果が得られた¹³。以上の例からもわかるように、産業構造の変化には大きな雇用シフトを求められる。脱炭素化に伴う産業構造変化を促進するために、いかに成長産業への人材移動を円滑に進めることができるかが今後の大きな課題である。

図表 3-10 電力関連産業と自動車関連産業の雇用人数増減（シナリオ 4）

電力関連産業の雇用人数増減（シナリオ 4）



自動車関連産業の雇用人数増減（シナリオ 4）



出所：早稲田大学・スマート社会技術融合研究機構・次世代科学技術経済分析研究，2015 年次世代エネルギーシステム分析用産業連関表をベースとして三菱総合研究所試算

注）現状値は日本自動車工業会発表資料より作成。2050 年（シナリオ 4）は人口減やシェアリング等の影響による販売台数・生産台数減少も加味。TIMES 計算結果より 2050 年 EV 販売比率は短距離用途乗用車を 100%と想定。

¹⁰ 早稲田大学社会科学総合学術院、次世代科学技術経済分析研究所「拡張産業連関表」

<https://www.f.waseda.jp/washizu/table.html>

¹¹ 松本直也，本藤祐樹（2011）「拡張産業連関表を利用した再生可能エネルギー導入の雇用効果分析」日本エネルギー学会誌 2011 年 90 巻 3 号 pp.258-267.

¹² ERIA（2020），「Impacts on Industry by xEV Penetration, in Suehiro, S. and A.J. Purwanto (eds.), The Influence on Energy and the Economy of Electrified Vehicle Penetration in ASEAN. ERIA Research Project Report FY2020 no.14, Jakarta: ERIA, pp.28-57.

¹³ 本文記載の通り、自動車関連産業については脱炭素化影響（GX）だけではなく、人口減等による販売台数、シェアリング等の影響も含めたものであることに留意。

特にデジタル人材のニーズはCN 領域でも顕著

今回試算した脱炭素化に伴う雇用構造の変化には、デジタルトランスフォーメーション（DX）の雇用影響は含まれていないが、再エネの大量導入には、デジタル化による低コスト化・省人化が不可欠である。例えば太陽光発電の導入と就業者数の関係をみた図表 3-11 からは、欧州を中心に先進国では太陽光導入量あたりの就業者数が低いことがみてとれる。しかし日本では、先進国の 3 倍程度と、省人化が進んでいない。実際、業界団体や事業者へのインタビューからもデジタル人材や、新技術に対応できる人材の不足が指摘されている。

本研究と連携した「DX・GX 実現に向けたキャリアシフト」¹⁴では、産業構造を変化させる 2 大潮流である DX（企業、産業、社会全体を巻き込んだデジタル社会実現への変革）とグリーントランスフォーメーション（GX）（脱炭素化を実現するための社会変革）を実現するカギが、人材流動性と人的資本投資の促進にあるとした。そして、そのためには、長期にわたる専門職業訓練を進める「再チャレンジ型」と、DX・GX の実現に必要な中核人材・変革人材の育成を目指す「創造人材育成型」の 2 つのキャリアシフトが特に重要であると指摘している。産業構造の転換を見据え必要な人材像を明確化したうえで、中長期的な観点から官民あげて人材を育成していくことが脱炭素化の推進の前提条件となる。

図表 3-11 デジタル人材は根強い不足感が続いている

再エネ業界でのデジタルスキル不足（インタビュー）



業界団体

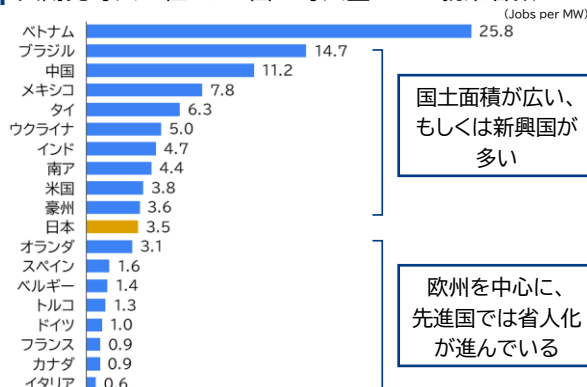
- FIT(全量買取制度)が終わり、太陽光も事業運営が重要に
- 他方、ドローン利用や発電量予測に対応できるデジタル人材が非常に少ない



事業者

- 保安上、電気主任技術者が必要だが、高齢技術者(電力会社OB)が多く、新しい技術への移行が進まない

太陽光導入上位20か国の導入量あたり就業者数



国土面積が広い、もしくは新興国が多い

欧州を中心に、先進国では省人化が進んでいる

出所：（左図）三菱総合研究所にてインタビュー実施（右図）国際再生可能エネルギー機関（IRENA）データより三菱総合研究所作成

家計負担は増加の見込み、分配のあり方も論点に

脱炭素化の進展は、化石燃料の輸入減少等、変動費（燃料費）の減少は見込まれるものの、新規設備投資に起因する資本費が大幅に増加することから、全シナリオで電気料金は現在より上昇する蓋然（がいぜん）性が高い。シナリオごとの電気料金単価をみると、シナリオ 2（行動変容主体）が最も高く、シナリオ 3（技術革新のみ）、シナリオ 4（行動変容と技術革新の両輪達成）、シナリオ 1（現状延長）の順である（図表 3-12）。電気料金単価の上昇は、一般家庭が電気料金として直接負担する分の増加にとどまらず、エネルギーコストの増加に伴い物価全般が上昇することによる間接負担の増大ももたらす。これら電気料金の上昇に起因する物価上昇に関しては、以下 2 点への対応が必要である。

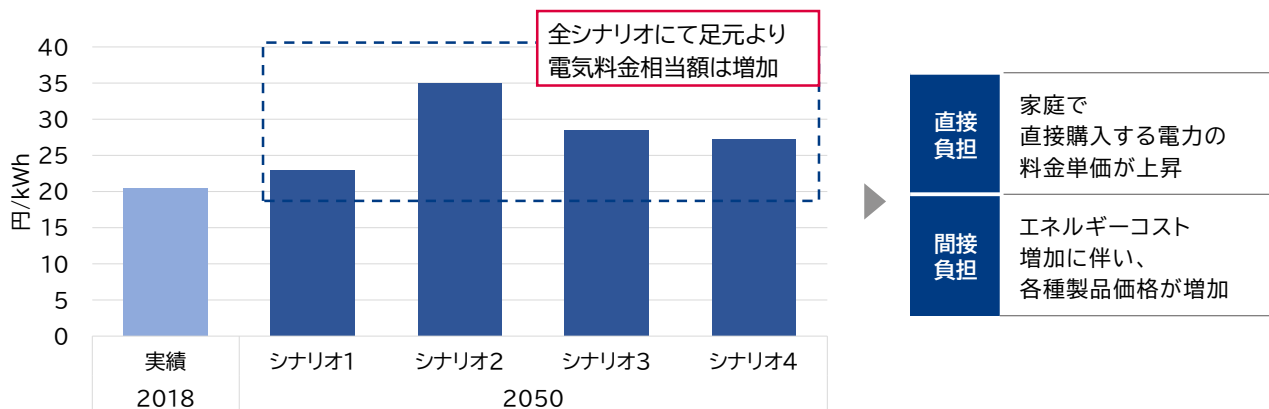
第 1 に、公平性かつ透明性のある料金設計である。電気料金の変化は、幅広い財・サービスの物価上昇および物価体系の変化をもたらす。企業、家計からなる経済主体は、その物価体系の下で最適化を図る。その

¹⁴ 山藤昌志（2022）「DX・GX 実現に向けたキャリアシフト」MRI マンスリーレビュー、2022 年 4 月号 特集 1 <https://www.mri.co.jp/knowledge/mreview/202204.html>

際、経済主体の総余剰を最大化し、効率的な資源配分を達成するには、公平かつ透明性の高い料金設計により市場のひずみを最小化することが求められる。

第2に、逆進性への配慮である。電気料金とともに、エネルギーコスト増に伴う価格増が見込まれる製品には必需財も多く含まれるため、逆進性の問題が生じうる。エネルギー価格以外の要素も踏まえて、適切な分配のあり方を検討していくことも今後の重要な論点となろう。

図表 3-12 電気料金は増加する蓋然（がいぜん）性が高い



出所： 将来値は三菱総合研究所試算。実績値は2018年度電力取引報、および、再生可能エネルギー発電促進賦課金より試算。上記の値は電灯・電力を総合した単価であり、消費税分は含まれない。

4. CN 移行において「今」考えるべき論点

2～3章ではシナリオ分析を通して 2050 年の CN 達成の絵姿を複数想定したが、円滑な脱炭素社会への移行のためにはクリアすべき課題が多く存在する。本章では、その中でも特に「今」検討すべき課題として、(1)行動変容をいかに顕在化させていくか、(2)原子力の位置づけをどう考えるか、そして、(3)認識されながら対処が遅れがちな問題（グレー・リノ）にどう取り組むべきか、の3点に着目した。

4.1. 行動変容の顕在化

前述のように 2021 年 9 月発表の「2050 年カーボンニュートラル実現に向けた提言」では、①需要側の行動変容、②電力部門の早期ゼロエミッション化、③戦略的なイノベーションの誘発、の三つをキーポイントとして掲げているが、そのなかでも「需要側の行動変容」は最も早期に取り組むべきものと位置づけている。

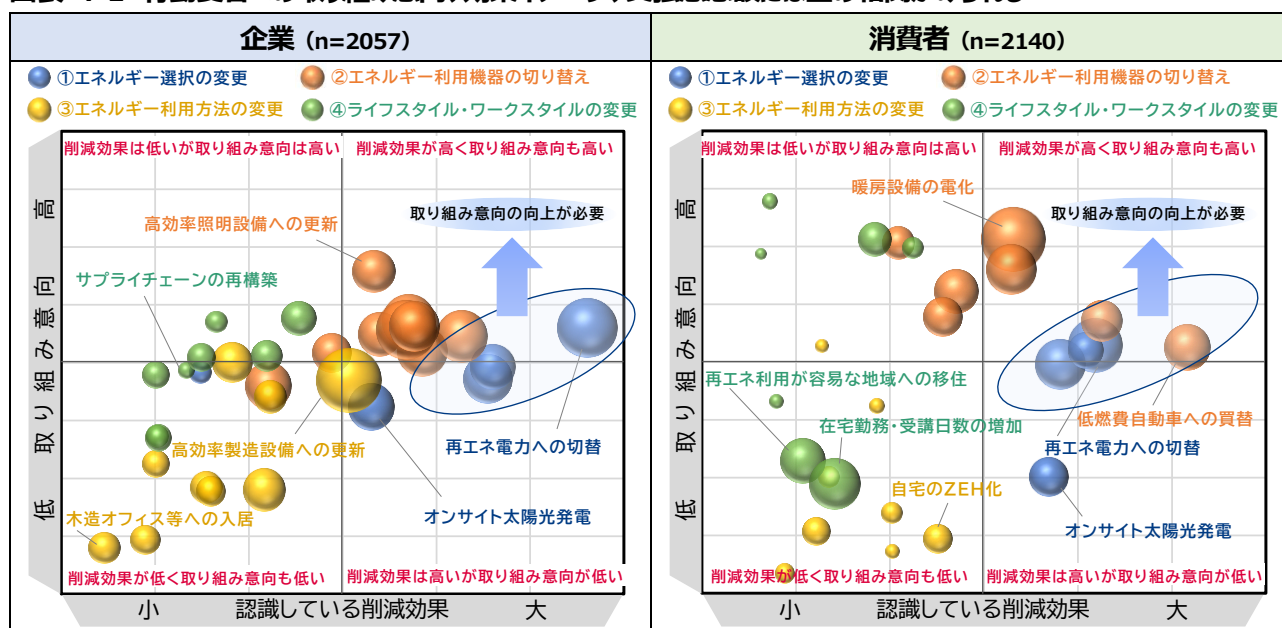
企業では RE100、SBT、TCFD 等のイニシアチブへの参加、一般消費者ではエシカル消費の拡大など、足もとでも既に脱炭素化に向けた行動変容は顕在化している。しかし、現段階では取り組み意向が低く、効果が認識されていない対策も一部あり、無対策のままでは行動変容が停滞してしまう可能性がある。CN への円滑な移行のためには、行動変容の阻害要因を特定し、適切な「後押し」を設計していくことが求められる。

効果が大きいと認識している行動変容への取り組み意向や支払意思額は高い

需要家による行動変容に対する取り組み意向やその阻害要因、行動変容の促進に効果的な施策などを分析するため、行動変容の具体的な内容を例示（企業には 31 種類、消費者には 26 種類）したうえで、日本全国の企業・消費者に対するアンケート調査を 2022 年 4 月に実施した。

まず、図表 4-1 に各行動変容の項目ごとの取り組み意向、認識している削減効果、取り組みに対する支払意思額を示す。

図表 4-1 行動変容への取り組み意向、効果イメージ、支払意思額には正の相関がみられる



企業・消費者ともに削減効果が大きいと認識している行動変容ほど取り組み意向が高く、支払意思額も大きい傾向がみられる。一方で、オンサイト太陽光発電のように、削減効果は大きく、一定の支払意思はあるものの、取り組み意向が相対的に低くなっている項目も存在している。このような行動変容については、何が阻害要因となっているのか、どのような促進策が効果的かということをつまらかにする必要がある。

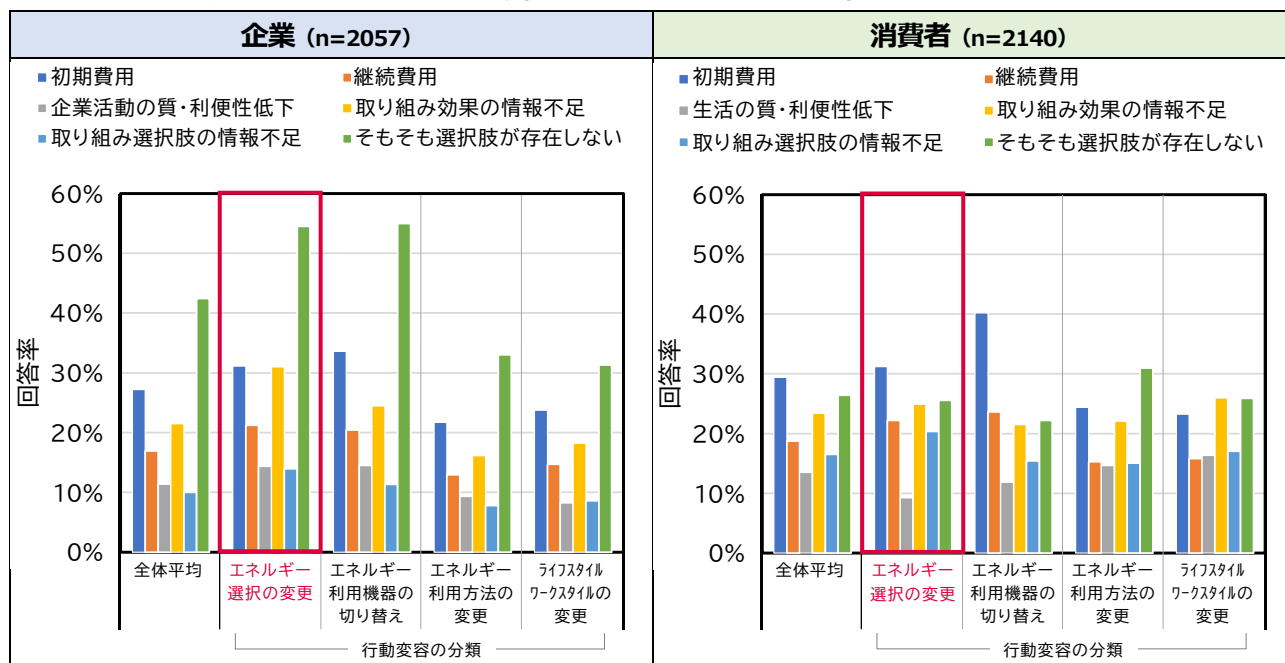
また、行動変容を4分類¹⁵して傾向を分析すると、「エネルギー選択の変更（再エネ電力切り替え、オンサイト発電等）」は削減効果が大きいと捉えられているが取り組み意向は低く、特に対策が必要と考えられる。

企業・消費者ともに「そもそも選択肢が存在しない」「初期費用」「取り組み効果の情報不足」が主な阻害要因

続いて、各行動変容への取り組みの阻害要因について、「初期費用」、「継続費用」、「企業活動・生活の質・利便性低下」、「取り組み効果の情報不足」、「取り組み選択肢の情報不足」、「そもそも選択肢が存在しない」といった6つの要因に関する分析を行った（図表 4-2）。

企業ではどの行動変容の分類においても「そもそも選択肢が存在しない」が最も大きな阻害要因となっている。一方、消費者では行動変容の分類によって最も大きな阻害要因は異なっている。企業・消費者のいずれにおいても、「初期費用」、「そもそも選択肢が存在しない」、「取り組み効果の情報不足」を含めた3つが相対的に大きな阻害要因であることがわかる。前述した削減効果は大きい取り組み意向が低い行動変容の分類である「エネルギー選択の変更」においても同様であり、企業・消費者の両者ともこれらが上位3つの阻害要因としてあげられている。

図表 4-2 「選択肢の有無」「初期費用」「取り組み効果の情報不足」が主な阻害要因



出所：三菱総合研究所

エネルギー選択の変更には「十分な選択肢や情報の提供」が最も効果的

各行動変容を促進するための施策として、「経済的なインセンティブ」、「投資家からの評価（企業向け）」、「取り組みに対する充実感や達成感の付与（消費者向け）」、「十分な選択肢や情報の提供」といった促進策を

¹⁵ 2021年9月発表の三菱総合研究所「2050年カーボンニュートラル実現に向けた提言」では、需要側の行動変容に関して、①エネルギー選択の変更（再エネ電力への切り替え等）、②エネルギー利用機器の切り替え（電化、高効率化）、③エネルギー利用方法の変更（省エネ行動の強化）、④ライフスタイル・ワークスタイルの変更の4つに分類している。

実施した場合の取り組み意向の変化（増加率）について分析を行った（図表 4-3）。

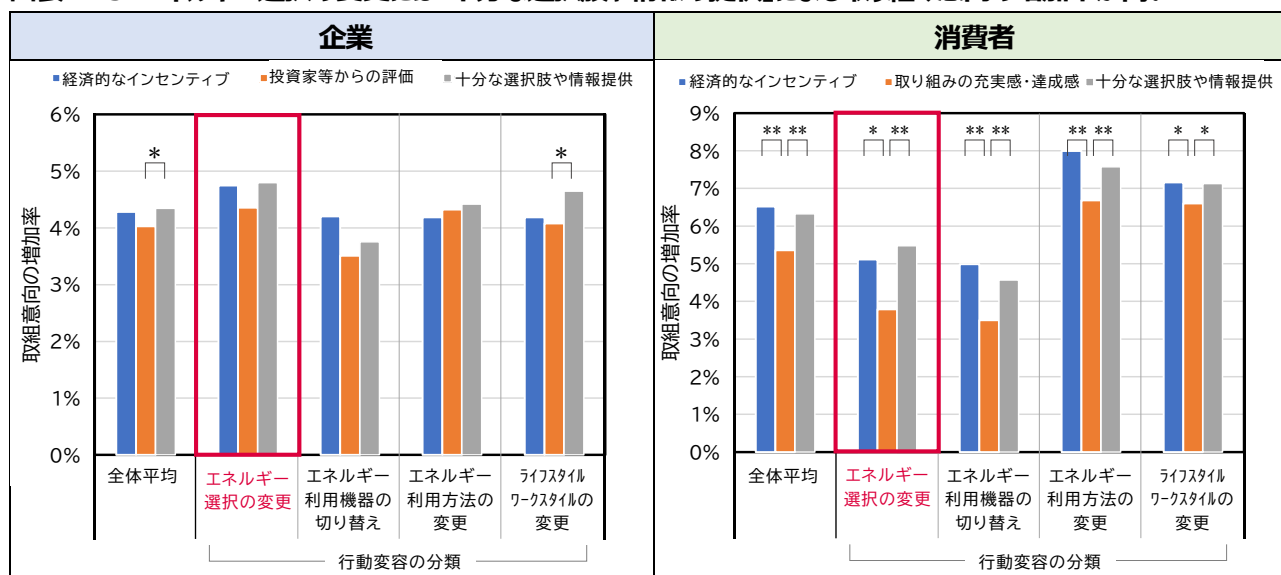
企業においては、3つの手法に有意差はなく、効果的な促進策は必ずしも「経済的なインセンティブ」に限らず複数の手法が有効であると言える。一方、消費者においては、いずれの行動変容の分類においても「経済的なインセンティブ」「十分な選択肢や情報の提供」が効果的との結果となっている。

なお、「投資家等からの評価（企業向け）」や「取り組みの充実感や達成感（消費者向け）」のような他者との比較や評価に関する施策については他の施策に比べて効果は限定的ではあるものの、企業と消費者の回答を比べると、企業の取り組み意向に対する効果の方が相対的に高い傾向にある。他のステークホルダーからの評価や他者との比較による促進策については、企業に対してより有効であると考えられる。

取り組み意向の増加率に着目すると、「エネルギー選択の変更」の促進策としては、企業・消費者を問わず「十分な選択肢や情報提供」による増加率が最も大きくなっている。阻害要因としても初期費用に加え、選択肢不足、取り組み効果の情報不足があげられていることから、選択肢と効果に関する情報の提供をこれまで以上に進めていくことによる行動変容の「後押し」効果には、まだ大きな余地があるものと考えられる。特に、脱炭素化への先進的な取り組みを行うイノベーターやアーリーアダプターにおいては、自ら情報を収集し取り組みを進めていくことが期待できる一方で、裾野の広いマジョリティーに向けては丁寧でわかりやすい情報を届けていく必要がある。例えばエネルギー選択の変更に対する情報提供としては、再エネ電力の発電所の情報を一覧化して提示することで、需要家が自らの志向に合った電源を選びやすくするといった方向性も考えられる。このような情報提供を行政や各種イニシアチブを取りまとめる団体、エネルギー選択のサービスを提供する企業等が行っていくことが求められていくのではないかと考えられる。

今回のアンケート調査結果から、行動変容を促す施策によって、企業・消費者に対して一定の「後押し」が期待できることが示唆されている。ただし、より効果的な施策は行動変容の具体的な内容ごとに異なるものであると考えられ、需要家の行動変容を停滞させないためには、需要家の種類や行動変容の内容に応じた効果的な施策を実施することが必要である。

図表 4-3 エネルギー選択の変更には「十分な選択肢や情報の提供」による取り組み意向の増加率が高い



出所：三菱総合研究所

注：* 5%水準で有意な差 (p<0.05)、** 1%水準で有意な差 (p<0.01)

分析対象は行動変容の具体的な項目ごとに「取り組み済み」、「取り組みたくても取り組めない」と回答したサンプルを除く。そのため、n数は行動変容の項目ごとに異なる (n=1000~1500程度)。

4.2. 原子力の位置づけ

CN 移行に大きな影響を与える項目の1つに、原子力発電がある。東京電力福島第一原子力発電所（以下、福島第一）事故以降11年経過した現在においても、再稼働したプラントは10基であり、廃炉を決定したプラントを除くと、26基のプラントが停止しており、原子力発電の活用は先行き不透明な状況が続いている。

しかしながら、前述のように2022年2月のウクライナ侵攻により化石燃料の価格高騰に拍車がかかり、世界中でLNG供給不足が懸念されるなど、エネルギー・経済安全保障は各国にとって喫緊の課題となっている。原子力利用には社会からの信頼回復、放射性廃棄物の処理処分等、解決すべき課題は多くあるものの、安定電源・カーボンフリーという特徴を有しているほか、準国産エネルギー¹⁶としての位置付けや、高い国内部品調達率等¹⁷からエネルギー・経済安全保障への寄与も期待され、現況においてその意義が問い直されつつある。

再エネ大量導入時代においては原子力と再エネとの共存が不可避

原子力発電を積極的に活用した場合には、安定的な脱炭素電源が増え、CN移行の面では有利になるように見える。だが、具体的にはどのような影響があるのだろうか。

上記の影響を確認するため、原子力の稼働年数や稼働基数を変えた4つのケース¹⁸をもとに感度分析を実施した（図表4-4）。ここでは、電力需要や太陽光発電、風力発電、火力発電等の他電源の設備容量など原子力以外の要因については、各ケース共通としている。また、MRI電源モデルを用いることで、第3章同様に地域間連系線の影響、1時間ごとの地域別の需給一致、調整力の確保等を考慮している。

図表4-5は各稼働ケースの発電構成・再エネ出力抑制率、および、エネルギー自給率を示している。原子力発電の稼働が増加するにつれ、火力発電の稼働が抑制され、全発電量に占める火力発電の比率は減少していく。他方、火力だけではなく再エネの発電比率も減少し、太陽光・風力といった変動性再エネの出力抑制率は、原子力の稼働にあわせて増加していく。これは、本検討では原子力発電の出力を一定と想定しており、調整力として機能していないことに主に起因している。なお、エネルギー安全保障の観点では、原子力の稼働が進むにつれ、燃料輸入量が減少しエネルギー自給率の向上が表れている。

前述のようにCN移行には再エネの大量導入が必要となり、安定供給のための調整力確保が必須となる。仮に原子力の活用が進んだ場合でも、現状の出力一定の発電方法では、変動性再エネの抑制率は増加することになり、電力システム全体の効率性が下がってしまう。脱炭素化とエネルギー・経済安全保障の両立において原子力は重要なオプションとなるが、再エネ大量導入時代においては、負荷追従運転による発電量の調整や、水素製造や熱利用によるエネルギー変換での調整を含め、再エネとの共存を前提とした原子力利用が求められる。

¹⁶ 原子力発電の燃料となるウランは、エネルギー密度が高く備蓄が容易、使用済燃料の再処理により資源燃料として再利用可能、発電コストに占める燃料費割合が小さいこと等から、資源依存度が低い「準国産エネルギー」と位置づけられている。

¹⁷ 資源エネルギー庁、今後の原子力政策について、令和4年2月、

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/024_03_00.pdf

¹⁸ 日本においては、東京電力福島第一原子力発電所事故後、プラントの運転期間を原則40年とし、その満了までに原子力規制委員会の認可を受けた場合には、1回に限り最大20年の運転延長を認める「運転期間延長認可制度」が導入された。日本では高浜1、2号機、美浜3号機、東海第二原子力発電所で60年の運転が認可されている。米国では、2021年4月時点で、80年運転の認可を取得した炉が4基あり、また、6基が審査中であることも踏まえて80年運転をここでは想定。

¹⁹ 資源エネルギー庁、原子力のポテンシャルの最大限発揮と安全性の追求、令和3年4月

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/023_03_00.pdf

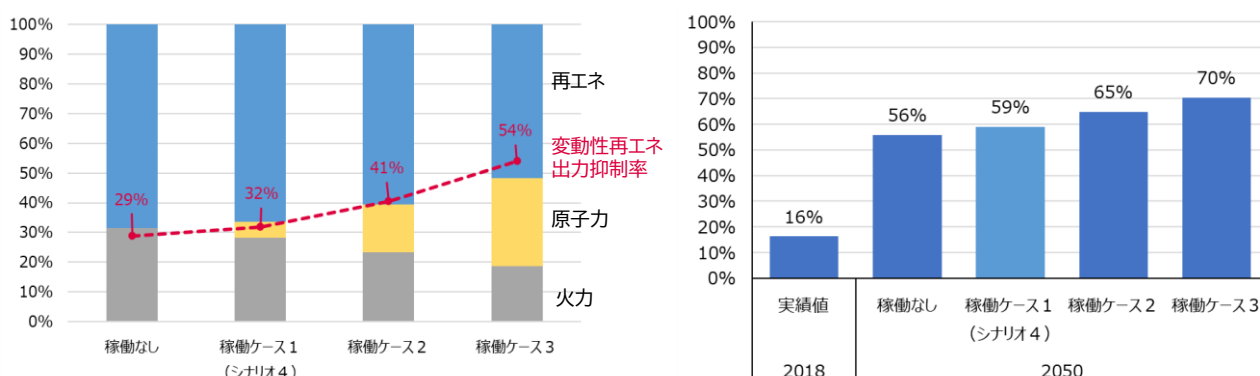
図表 4-4 原子力稼働の異なる4つのケースを想定

ケース名	概要	2050年設備容量
稼働なし	2050年時点で原子力発電は稼働ゼロ	0 GWe
稼働ケース1	第2章で述べたシナリオ4のケース	9 GWe
稼働ケース2	2022年5月時点で廃炉以外のステータスとなっている炉 ²⁰ が運転開始より60年間運転すると仮定したケース	25 GWe
稼働ケース3	2022年5月時点で廃炉以外のステータスとなっている炉が運転開始より80年間運転すると仮定し、過去に建設計画が議論された7基の新設(設備容量10.2GWe)を2040年から運転開始すると想定したケース	47 GWe

図表 4-5 原子力導入によりエネルギー自給率が向上する一方、再エネ出力抑制率も向上

各ケースにおける発電構成・再エネ出力抑制率

各ケースにおけるエネルギー自給率



出所：三菱総合研究所作成

2050年以降を見据え、技術・人材の維持と原子力のイノベーションを

前述の通り、ウクライナ侵攻によりエネルギー・経済安全保障の問題が深刻になっていることに加え、日本の2030年温室効果ガス削減目標(13年比▲46%)達成という観点から、新規制基準に適合した原子力の活用は至近の時間軸において現実的な選択肢となっている。

しかしながら、今般のような安全保障上のリスクはウクライナ問題が収束すれば今後もなくなくなるものではなく、国際情勢の変化に応じて常に顕在化・深刻化する可能性を有している。また、CNも2050年だけをクリアすれば良いわけではなく、2050年以降も継続していくことが前提となる。脱炭素と安全保障を長期的に担保する目線がエネルギー政策において必要不可欠であり、原子力というオプションを「日本に残す」というメッセージを明確に出すことが重要ではないだろうか。

その際には、多くの論点の中でも、技術・人材の維持と、原子力自身のイノベーションが特に重要な点になる。前者は安全基盤の継続だけではなく経済安全保障の観点からも重要となり、毀損した日本の原子力サプライチェーンを再強化し、安定的な稼働実績を積み重ねることで国内技術・人材を残すことが急務になる。後者は、安全性の更なる向上や、前述のような再エネ大量導入時代に即した原子力利用(負荷追従、水素製造、熱利用等)等、長期的な視野に立った原子力のイノベーションを追求していくことが必要だろう。

なお、上記の前提として、原子力を取り扱う事業者に対する不信感払しょくのための業界構造の変革、企業ガバナンスへの対応については真摯に取り組むことが必須となる。また、言うまでもなく原子力利用において社会受容は極めて重要な問題である。福島第一の廃止措置、既設プラントの安全運転、放射性廃棄物の処理処分について継続的に社会との対話に取り組むことが求められる。

²⁰ 資源エネルギー庁、原子力発電所の現状、2022年5月16日時点、

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf

4.3. 「グレー・リノ」への対処

「グレー・リノ（灰色のサイ）」とは米国の政策アナリストである Michele Wucker が提起した言葉で「発生する確率が高くインパクトが大きいにも関わらず、軽視されがちな事象・問題」を意味している。グレー・リノの例としては気候変動問題の他にも、不良債権問題、少子高齢化などもあげられ、時間軸が長く（見かけの）緊急性が低いために、その重要性を認識していながらも対応が後手になることが多い。

しかしながら、灰色のサイは顕在化した場合、大きな危機を生み出す。CN への移行を考えるにあたってはこれらの先送りされがちな問題を「今から」検討することが重要となる。

（１）デジタル化に伴う情報爆発

一つ目のグレー・リノとしては情報爆発が挙げられる。今後、社会のデジタル化が急速に進むことで、データの処理量・通信量は爆発的に増加することが予測される。これまでの推移では、情報通信関連の電力消費量の増加量は、通信のトラフィック量ほど増加していないが、これは小型化も含めた技術進展により電力消費原単位の削減が現れた結果となっている（図表 4-6）。

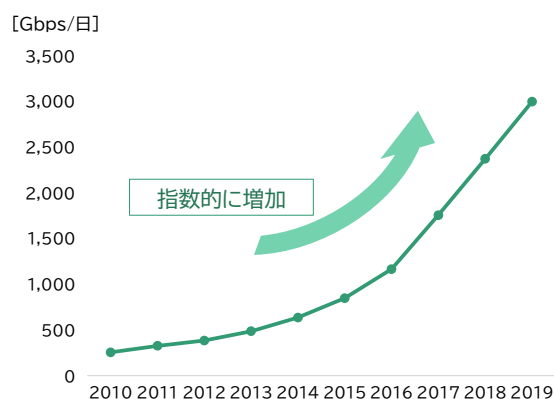
しかしながら、今後も同様の傾向が続くかは楽観視できない。NTT 社の IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想など省エネルギーネットワーク技術の開発も進んでいるものの、自動運転やメタバースの社会実装には大量のデータ処理・通信を必要とする。情報量の加速度的な増加を相殺しうる電力消費原単位の改善が今後数十年間続くかは不透明であり、情報爆発は電力需要の大幅な増加を招く可能性を有している。

図表 4-6 情報通信関連の電力消費はトラフィック量ほど増加していない

通信業の電力消費推移



平均トラフィック量推移



出所：総合エネルギー統計「通信業」²¹における電力消費、および、総務省「わが国のインターネットにおけるトラフィックの集計・試算」より三菱総合研究所作成

過度な電力需要増加は CN・DX の両方の足かせに

仮に情報爆発が起こり、それを相殺するだけの電力消費原単位の改善に失敗した場合、エネルギー需給構造にはどのような影響が起こりうるのか。

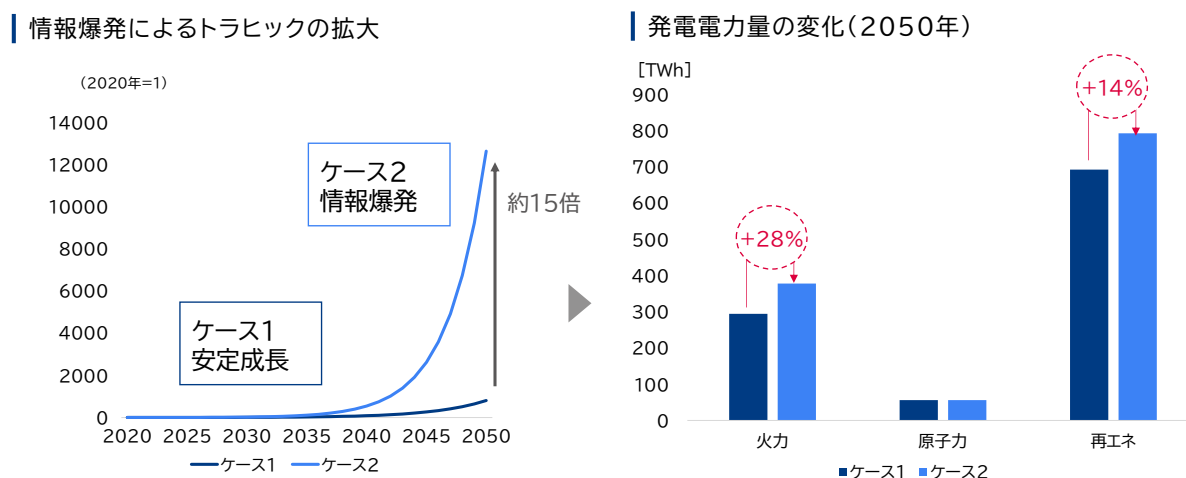
図表 4-7 は以下の前提条件のもと、情報爆発が発生した場合の、電力需要の伸びとその発電構成を簡易的に示したものである。仮に電力消費原単位の改善が同じで、安定的にトラフィックが増加したケース 1 と情報

²¹ 総合エネルギー統計の「通信業」は、有線、無線、その他の電磁的方式により情報を伝達するための手段の設置、運用を行う事業所が分類され、データセンターやネットワークセンター等も含まれる

爆発によりトラヒックが大幅に増加したケース2を比較すると、トラヒック量は約15倍、日本全体の電力需要は約200TWh近く上振れることになる²²。これは現状の日本全体の電力需要の約2割の規模感となるが、増加した電力需要を賄うためには再エネだけでなくゼロエミ火力も必要となり、その発電量の増加幅は再エネよりも大きくなる²³。設備新設や水素輸入増加によりエネルギー需給にかかる総コストは約3兆円上昇し、エネルギー・経済安全保障の観点からも海外依存度が増えることになる。

上記は2050年まで原単位の改善が継続した場合であり、技術開発が停滞した場合はさらに爆発的に電力需要が増えることになる。ある一定ラインを超えると、電力供給が追い付かずエネルギー需給上の制約によって情報通信産業の成長が鈍化、または、他産業への悪影響の可能性も想定される。電力供給上の制約によって、DXのみならずCN移行にとっても足かせになってしまうリスクがある。

図表 4-7 情報爆発によって追加的な発電設備・燃料輸入が必要に



ケース1 安定成長	技術開発やデータ活用環境整備、コスト低減が十分に進展せず、革新的ユースケースの普及は限定的となるが、4G・5G時代と同程度の成長率が維持される
ケース2 情報爆発	技術開発進展とデータ活用不安の解消により、2040年までに自動運転・メタバース・ライフログ等の革新的ユースケースが広く一般に普及し、データ需要を大きくけん引

出所：三菱総合研究所

技術革新とあわせて、分散型のアーキテクチャが重要に

社会のデジタル化とそれに伴う情報量の増加は不可避であり、上記のような事態を避けるためにはデータセンター、ネットワーク、エンドユーザー機器のそれぞれでの継続的な省エネと、それを支える技術革新は必須となる。

加えて、アーキテクチャとしては情報通信・エネルギーの両方にとって「分散化」が重要なキーワードになる。情報通信側では、今後は自動運転などをはじめとして低遅延が求められるユースケースの割合が増え、プライベートネットワークを含むローカルトラヒックが増加し、地域内でのデータ活用が進むと考えられる。このことは電力側では地域内での電力需要増を意味しており、再エネ導入が進む地域では出力抑制を減らす機会にもつながりうる。地域との共生は今後の再エネ普及の大きな課題であるが、こうした情報通信側での分散化と、地域活用電源との組みあわせなど地域のエネルギー需給のあり方を一体的に考えることが重要な視点となる。

²² トラヒック量以外にも情報通信の電力需要に影響する要素はあるが、本試算では影響を概算するためトラヒック量あたりの電力消費を原単位（年率20%改善）と想定。ケース1では年率25%、ケース2では年率37%のトラヒック増加を想定。

²³ 原子力は政策要因が大きいことから稼働容量は変化させていない。原子力の稼働影響については次節（4.2節）を参照。

(2) 自然災害の多発・激甚化

もう一つのグレー・リノの例は災害対応である。日本は、国土面積は世界全体の0.25%程度にも関わらず、災害被害額は世界全体の2割程度を占める災害大国である²⁴。2011年の東日本大震災の被害はいうまでもないが、それ以降も、この11年間で震度6弱以上の地震が約30回発生しており、2022年3月16日に発生した福島県沖地震においても都内を含む広域で最大約220万戸の停電が発生している。CN達成を目指す2050年までの間にも、南海トラフ地震、首都直下地震が発生する確率は70%程度と試算されていることに加え、気候変動の影響による風水害の頻発化・激甚化も懸念されている。大規模な災害発生は「起こるかもしれない」ではなく「今後起こるもの」という前提で脱炭素化を進めていく必要がある。

燃焼系エネルギーの脱炭素化はレジリエンスの観点からも重要

CN移行に伴い、①再エネの大量導入、②需要側の電化・省エネが不可避となるが、両者ともレジリエンスの観点から「燃焼系エネルギーの脱炭素化」が重要となる。

まず、①再エネの大量導入については短期・長期の出力変動が一つのポイントとなる。2022年3月22日に発生した東日本での電力需給のひっ迫は、地震による発電所停止・連系線運用容量の低下、急激な気温低下による電力需要増等に加え、悪天候による太陽光発電の出力大幅減少が一つの要因になっている。今後、太陽光・風力を中心とした再エネの大量導入に伴い、こうした出力変動の幅が大きくなることも安定供給を考える際の重要な論点となる。3.1節で触れたとおり、再エネ大量導入時代においては出力変動を補完するためのゼロエミ火力が必要となり、燃焼系エネルギーの脱炭素化が必須となる。しかしながら、上記のような太陽光・風力を中心とした数分から数時間の「短期の変動」だけでなく、風況悪化の継続、水力発電の渇水などによっては数カ月から年単位での「長期な変動」のリスクも今後顕在化することが想定される。

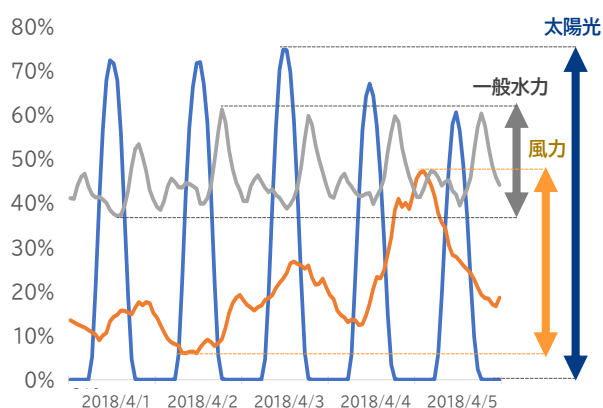
図表4-8は1時間単位と1カ月単位での太陽光・風力・一般水力の設備利用率推移を示している。太陽光は短期スケールでは変動が最も大きいですが、長期スケールでは比較的安定している。対して、季節変動・渇水等の影響により一般水力は逆の傾向を示している。再エネの出力変動リスクを補うためには、特定電源への過度な依存を避けたポートフォリオを構成することに加えて、バックアップとなる電源・エネルギー源の確保が重要となる。蓄電池等による比較的短期の変動吸収も必要不可欠だが、加えて、比較的長期の出力不足に備えて水素や合成燃料などについて一定のエネルギー備蓄もあわせて重要となる。

また、②需要側の電化・省エネも脱炭素社会の構築には不可避だが、寒冷地に住む需要家や、商品の製造プロセスなど、居住地域や設備制約から電化が難しい需要家も一定程度存在する。南海トラフ地震、首都直下地震といった大規模災害発生時には局所的な停電の発生も考えられ、最終消費として可搬性・備蓄性に優れた燃焼系エネルギーの活用可能性も無視すべきではない。

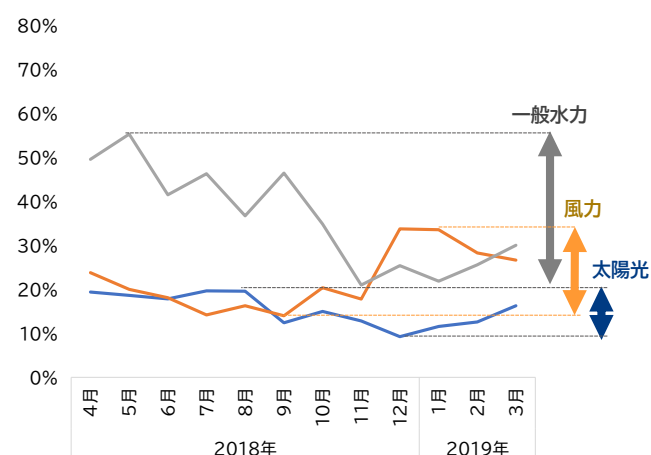
²⁴ 内閣府、防災白書(令和2年版・平成18年版) <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/index.html>

図表 4-8 再エネの出力変動の時間軸は再エネ種によって異なる

1時間単位での設備利用率変化



1か月単位での設備利用率変化



出所：一般送配電事業者エリア需給実績、資源エネルギー庁電力調査統計等をもとに三菱総合研究所作成

需要側対策は平時と有事の両方を想定した「備えない備え」が重要に

大規模災害のような有事だけでなく平時も含めたレジリエンス確保が重要となる²⁵。大規模災害への対応は、2020年6月成立の「エネルギー供給強靱化法」の法改正の背景の一つとなっており、同法成立により、災害時の連携強化、送配電網の強靱化、災害に強い分散型電力システムの構築、といった観点での各種施策が実施されることとなった。他方、これらの取り組みは供給側での対策といった意味合いが強く、太陽光を中心とした自家用電源の拡大や、需要家の安全・防災意識への高まりも受け、今後は需要側も含めた需給一体でのアプローチがより重要となってくる。

需要側の対策を考える際に重要となるのが、「備えない備え」、すなわち平時での利用が主目的ながら有事での備えを有するアプローチである²⁶。例えば、電気自動車（EV）の普及はCN実現の重要なコンポーネントの一つだが、主目的であるモビリティとしての利用以外にも、移動可能な蓄電池としての意義も有している。有事の際の非常用電源としての活用や、平時においても需要側リソースとして安定的な系統運用への寄与も期待される。家庭用を中心とした自家用太陽光発電も、経済性・環境性がその価値の中心ではあるものの、自立運転機能を持つことで停電時での活用が可能になる。

従来、BCP（事業継続計画）を含め需要側のレジリエンス向上策はコストとして捉えられ、その社会的な意義や中長期的な企業価値への貢献はなかなか評価されず、「防災はビジネスになりにくい」とされてきた側面もある。今後はこうしたレジリエンスの価値を正しく評価し、自律分散型の「備えない備え」の普及に向けた需要家の行動変容を後押しする施策が重要になるだろう。また、こうした取り組みを各需要家の個別対策から、地域単位でのレジリエンス向上につなげるとともに、エネルギー以外のインフラも含めた一体的な防災の取り組みも重要となる。

前述のような可搬性・備蓄性に優れた燃焼系エネルギーの脱炭素化に加えて、エネルギー供給体制の強靱化、需要側のレジリエンス向上策への働きかけをそれぞれ同時に進め、二重三重にレジリエンスを確保することが重要となる。

²⁵ 資源エネルギー庁で定義したエネルギーレジリエンスにおいても、2020年4月にAPECで合意された「エネルギーレジリエンス原則」に基づき、有事・平時の両方でのエネルギー安定供給が包含されている。

²⁶ 三菱総合研究所、備えない「備え」によるレジリエンスの実現（2022年3月発表）、

<https://www.mri.co.jp/knowledge/mreview/202203.html>

5. おわりに： CN による社会変化を新たな産業競争力に

本稿では、CN への移行はエネルギー需給のみならず、日本の社会構造全体に変革を迫るものとの課題意識から、シナリオ分析を通じてその影響を定量化するとともに、CN 移行において今考えるべき論点について問題提起とその解決の方向性について提言を行った。

CN が日本の社会・経済に与える影響は広範であり、エネルギー関連産業だけにとどまるものではない。CN 移行に伴う資源需要の増加は新たな地政学リスクをもたらし、産業構造の変化はそのまま人材移動やリスキリングといった雇用政策に直結する。情報爆発による電力需要の過度な増加は CN・DX の両方の足かせになる可能性があり、災害対応についてはエネルギー以外のインフラも一体的に考えることが必要となる。これらはすべて旧来の業界・官庁の縦割りの範囲で収まるものではなく、領域横断的な取り組みが不可欠であることを示している。

産業構造における製造業比率の高さ、火力発電比率の高さ、国内脱炭素エネルギーの乏しさ、再エネ適地の少なさ、大規模災害の多さなど、日本の CN 達成のハードルは数多く存在するが、同様の課題に直面している国は他にもある。上記のような課題をクリアできれば、それは新たな事業機会や競争力となり他国の CN 達成に貢献する道筋も考えられる。

世界全体の脱炭素化は幾つかの揺り戻しはあったとしても、中長期的には不可逆的に進んでいくと想定される。世界の潮流に受け身になることなく、産官学のステークホルダーが一体となって、CN による社会変化を日本の新たな産業競争力につなげることが求められる。

参考資料

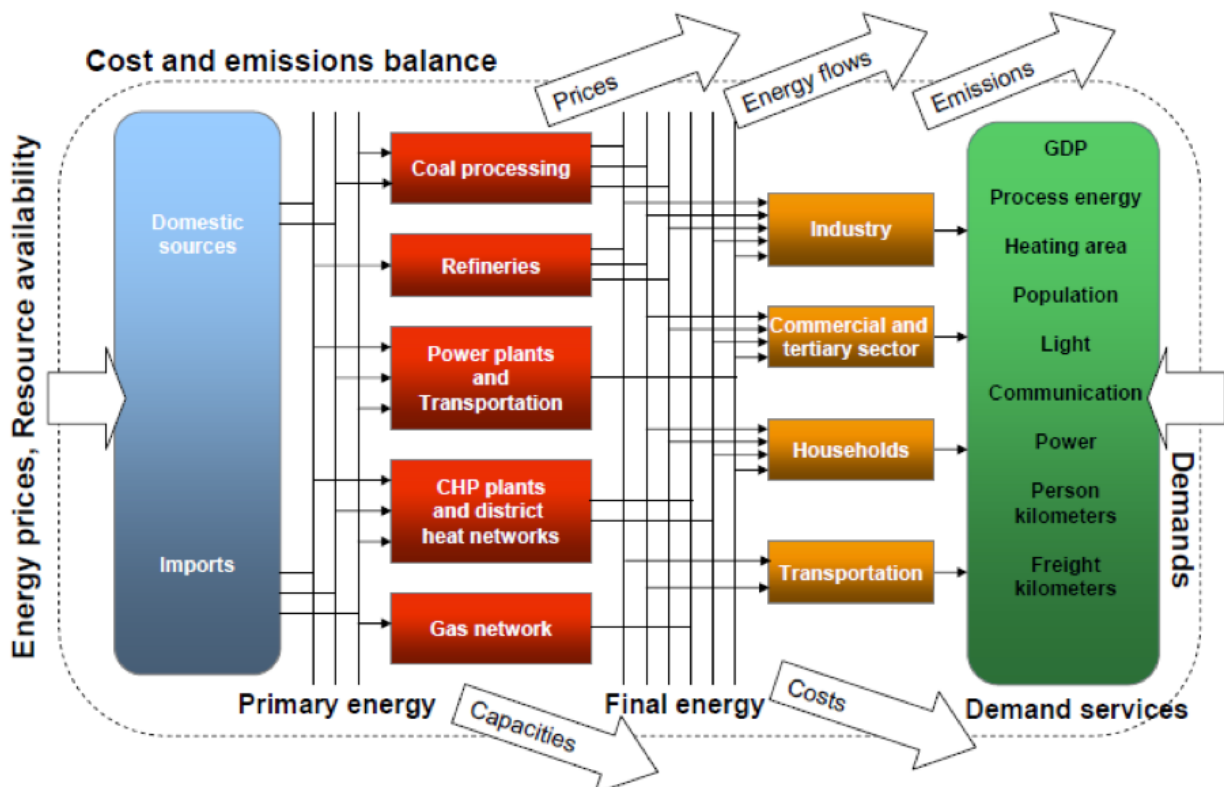
エネルギー需給モデル (TIMES) の概要

TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) モデルは国際エネルギー機関 (IEA) で開発されたモデルフレームワークであり、同機関をはじめ多くの研究機関で採用されるエネルギー需給モデルである。TIMES は工学的アプローチと経済的アプローチを組み合わせて構築されたモデルであり、多数の制約式の下で対象期間におけるエネルギーシステムコストが最適となる絵姿を線形計画法により分析することが可能である。

電力セクターのみならずエネルギー需給全体の評価ができる点が TIMES の特徴であり、エネルギーの供給側 (一次エネルギー供給、各種転換プロセス、輸送) および需要側 (産業、業務、家庭、運輸) の全ての要素を含む構成となっている。資源・技術のコストや供給制約、サービス需要などをインプットとして与えることで、TIMES により最適解としての設備容量・構成、エネルギーコスト・フローや排出量を求めることができる。

TIMES はシナリオ分析ツールとして活用されることが多く、本稿では4つの将来シナリオに基づいてインプットデータを用意したうえで、2050年CNのエネルギー需給の絵姿を分析した。具体的なインプットデータについては「各シナリオの主な前提条件」を参照されたい。

TIMES モデルの概要



出所： 国際エネルギー機関 (IEA) Energy Technology Systems Analysis Program

各シナリオの主な前提条件

本稿では四つの将来シナリオを描いて 2050 年 CN の社会影響を分析した。各シナリオにおける需要側活動量水準および供給側技術の主な前提条件を以下に示す。

現状延長のシナリオ 1 では需要側・供給側ともに足もとのトレンド延長の考え方をベースに諸元を設定した。需要削減のシナリオ 2 では各需要セクターの活動量がシェアリング、サーキュラーエコノミー、デジタル化などの影響で変化する効果を織り込んだ。例えば自動車の国内生産台数は約 320 万台、粗鋼生産量は約 5,800 万トン、業務床面積は 1,440 百万 m² などである。技術革新のシナリオ 3 では再エネ、水素、製鉄・自動車分野等におけるイノベーションの効果を見込んだ。例えば太陽光発電の導入上限は 416GW、輸入水素は 30 円/Nm³、水素還元製鉄や次世代自動車が既存技術との競争力を持つ水準の諸元を設定した。両輪のシナリオ 4 ではシナリオ 2,3 の効果を同時に織り込んでいる。

主な需要側活動量水準のパラメータ設定

		CN達成を目指す世界				
		シナリオ1 現状延長	シナリオ2 需要削減	シナリオ3 技術革新	シナリオ4 両輪	
活動量水準 (2050時点)	産業	自動車 国内生産台数	約520万台	約320万台 サーキュラーエコノミー進展、シェアリング進展による需要減	約670万台 イノベーションによる輸出増、国内需要はS1と同様	約460万台 S2とS3が同時に進展
		鉄鋼 粗鋼生産量	約6,400万t	約5,800万t 自動車等最終製品需要減による素材としての鉄鋼需要減少、電炉比率は増加	約7,700万t 自動車等最終製品需要増による素材としての鉄鋼需要増加、電炉比率はS1と同様	約7,200万t S2とS3が同時に進展
		その他	自動車や鉄鋼と同様の考え方で増減			
	民生	業務 延床面積	約1,800百万m ²	約1,440百万m ² リモートワーク進展、デジタル技術積極活用によりオフィス需要や実店舗、病院等の需要が減少	約1,800百万m ² S1と同様	約1,440百万m ² S2と同様
家庭 在宅ワーク 世帯比率		在宅:非在宅=20:80	在宅:非在宅=45:55 リモートワーク進展により在宅世帯の比率が増加、世帯数自体はS1と同様	在宅:非在宅=20:80 S1と同様	在宅:非在宅=45:55 S2と同様	
機器効率 主にHP機器		2050年にかけて効率が増加	S1よりも10年早く高効率機が普及 効率の上限はS1と同様	S1よりも2050年時点での効率が1.1倍向上 普及スピードはS1と同様	S2とS3が同時に進展	
運輸 旅客・貨物需要の変化率 (2020=100%)	旅客:100%、貨物:100%	旅客:70%、貨物:120% デジタル技術の積極活用により旅客需要減、貨物需要増	旅客:100%、貨物:100% S1と同様	旅客:70%、貨物:120% S2と同様		

出所：三菱総合研究所作成

主な供給側技術のパラメータ設定

		CN達成を目指す世界			
		シナリオ1 現状延長	シナリオ2 需要削減	シナリオ3 技術革新	シナリオ4 両輪
電力	原子力	シナリオ共通で9GW (新規制基準合格したプラントのみ稼働。新增設・リプレースは想定せず)			
	太陽光	上限	116GW (住宅17GW 事業99GW)	260GW (住宅53GW 事業207GW) ※参考値ベース	416GW (住宅141GW 事業275GW) ※環境省ソーニング調査を基にペロブスカイト太陽電池等の技術革新を想定
		コスト	17万円/kW (住宅は23万円/kW) ※コスト検証WGの2030年想定		10万円/kW ※コスト検証WGの2020→2030年コスト低減を2050年まで延長
	風力	上限	62GW (陸上40GW 洋上22GW)	90GW (陸上45GW 洋上45GW) ※参考値・官民協議会ベース	135GW (陸上45GW 洋上90GW) ※陸上は参考値ベース踏襲、洋上は業界目標水準官民協議会
コスト		25万円/kW ※コスト検証WGの2030年想定 (洋上は51万円/kW)		15万円/kW ※コスト検証WGの2020→2030年コスト低減を2050年まで延長 (洋上はLCOE10円/kWh相当の固定費を設定)	
輸入水素		100円/Nm ³ ※相当程度高いコスト水準として設定		30円/Nm ³ (S3)、20円/Nm ³ (S4) ※政府目標水準を参照しつつ、S3の方が世界需給がタイトな状況を想定	
水素還元製鉄		想定無し ※革新技術は実現せず既存製鉄方法が継続		足下の高炉製鉄と同水準コストを想定 ※Lund大学の文献値を基に設定	
次世代自動車		EV、FCVともに2030年水準のコスト横置き (EV300万円弱、FCV400万円弱)		EV、FCVともにICEVと同程度のコスト水準まで低減 (200万円程度)	

出所：総合資源エネルギー調査会発電コスト検証WG報告書等から三菱総合研究所作成

産業連関分析の概要

本稿で行った産業連関分析は、大きく「拡張産業連関表の作成」「未来の産業連関表の作成」「経済・雇用への影響分析」の3段階からなる。以下、産業連関分析の概略を示す。

拡張産業連関表の作成

産業連関表を作成するにあたり、まず、必要な産業分類を検討し、ベースとなる産業連関表²⁷に追加する産業の投入ベクトル（産業連関表の縦）と産出ベクトル（産業連関表の横）を精査しつつ、行、列に取り込んだ。以下に、新たに追加した業種と、投入ベクトル、産出ベクトルの設定法を記した。

拡張産業連関表で追加した業種と投入・産出ベクトルの設定法

業種	投入ベクトル	産出ベクトル
①水素 (水素製造、輸入水素)	<ul style="list-style-type: none"> 「石炭・原油・天然ガス」と同様のベクトルを設定 水素製造にかかる電気代は再エネ余剰電力を使うとして0 	<ul style="list-style-type: none"> 「天然ガス」と同様のベクトルを設定
②水素製造装置 (アルカリ水電解装置)	<ul style="list-style-type: none"> 早大の方法を踏襲 費目に対し、PCI28の比率でウェイト付け 	<ul style="list-style-type: none"> 「既存火力発電設備」と同様のベクトルを設定
③水素還元製鉄	<ul style="list-style-type: none"> 「シャフト炉（高炉）+電炉」と見なして設定 「銑鉄+電炉」で生産量によりウェイトを案分 原料は石炭を水素として調整 	<ul style="list-style-type: none"> 「銑鉄+粗鋼」のベクトルで設定
④水素還元製鉄設備	<ul style="list-style-type: none"> 「シャフト炉（高炉）+電炉」と見なして設定（海外事例のシャフト炉、電炉の原単位をもとに、合算したものをベクトルとして設定） 	<ul style="list-style-type: none"> 「銑鉄+粗鋼」のベクトルで設定
⑤FCV	<ul style="list-style-type: none"> 早大の方法を踏襲 HV（早大2005年版）のうちエンジン、ガソリントankをFCV用スタック、水素タンクに置き換え 	<ul style="list-style-type: none"> 「乗用車」と同様のベクトルを設定
⑥FCVトラック	<ul style="list-style-type: none"> 「乗用車」と「その他自動車」の対応関係からFCVをもとにベクトル設定 	<ul style="list-style-type: none"> 「その他自動車」と同様のベクトルを設定
⑦水素発電	<ul style="list-style-type: none"> 「既存火力発電」と同様のベクトルを設定 石炭火力に代替するとして燃料部分を調整 	<ul style="list-style-type: none"> 「既存火力発電」と同様のベクトルを設定
⑧水素発電設備	<ul style="list-style-type: none"> 早大の方法と同様の方法による（既存火力と同様） 	<ul style="list-style-type: none"> 「既存火力発電設備」と同様のベクトルを設定
⑨EV	<ul style="list-style-type: none"> 早大の2011年版のベクトルを設定 （早大の2015年版には明示されていない） 	<ul style="list-style-type: none"> 早大の2011年版のベクトルを設定 （早大の2015年版には明示されていない）
⑩EVトラック	<ul style="list-style-type: none"> 「乗用車」と「その他自動車」の対応関係からEVをもとにベクトルを設定 	<ul style="list-style-type: none"> 「その他自動車」と同様のベクトルを設定

出所：三菱総合研究所作成

²⁷ 早稲田大学次世代科学技術経済分析研究所の「次世代エネルギーシステム分析用産業連関表」（2015）をベースとした。

²⁸ 日本機械輸出組合によるプラントコストインデックスPCIのことで、一般的な化学プラントを建設する際の目安となる費目構成が掲載されている。

未来の産業連関表の作成

拡張産業連関表の作成においては、新たに業種を追加し、シナリオごとに各業種の数値を設定した。しかし、その状態では、産業連関表の縦（中間投入、付加価値、産出高）と横（中間需要、最終需要、産出高）の整合性が取れておらず、分析を行う産業連関表としては不十分である。そこで、拡張産業連関表で設定した予測データに、Stone et al. (1963)²⁹により確立された投入係数行列予測手法であるRAS法³⁰を適用し、脱炭素化シナリオごとに整合的な産業連関表（未来の産業連関表）を作成した(S1, S2, S3, S4の4種類)。

この方法は、基準とする投入係数行列 A^0 につき、行方向の修正行列R（中間需要の変化を示す係数を要素とする対角行列）と列方向の修正行列S（中間投入の変化を示す係数を要素とする対角行列）を用い、行列積RASから予測時点の投入係数 A' を求める方法であり、以下の式が基本となる。

$$\begin{pmatrix} a'_{11} & \cdots & a'_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a'_{n1} & \cdots & a'_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & r_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^0_{11} & \cdots & a^0_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a^0_{n1} & \cdots & a^0_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & s_n \end{pmatrix}$$

その計算に際しては、産出額（行和、列和）に制約を与え、制約を満たすまで行と列の両面から行列をスケールリング（Matrix Balancing）し収束計算を行い、投入係数を導き出す。ここでは紙幅の都合上、RAS法に関する詳細な説明は省くが、RAS法の解説やその応用、活用事例については、高川・岡田(2004)³¹や佐野(2016)³²等を参照いただきたい。

経済・雇用への影響分析

経済波及効果分析を行うにあたっては、シナリオごとに作成した未来の産業連関表の逆行列係数表（ある部門に最終需要が一単位生じた場合に各部門の生産額が何単位誘発されるかを示す係数）を求め、産出高、付加価値、雇用への影響を試算した³³。

① 経済波及効果：産出高

産出高への波及効果を計測するにあたり、シナリオごとに得られた未来の産業連関表の最終需要額と逆行列係数表を用いた。具体的には、シナリオ1からシナリオ4に移行する場合の経済波及効果を計測する場合、シナリオ4とシナリオ1の最終需要額の変化を示す列ベクトルを、先の逆行列係数表に乗じることで、生産誘発額（産出高誘発）を計測（一次波及効果）する。また、一次波及効果により生じた雇用者所得の一部は消費増をもたらす、その消費需要がさらなる生産誘発をもたらす。ここでは、各シナリオの産業連関表を用い、一次波及効果による産出高増をもたらす雇用者所得増、および雇用者所得増をもたらす各産業の需要増分を求めたうえで、最終需要額の変化ベクトルを作成し、それに逆行列係数表を適用することで、二次波及効果としての生産誘発額（産出高誘発）を計測した。

²⁹ Stone, R., J. Bates, and M. Bacharach (1963), *Input-Output Relationships, 1954-1966*, Chapman and Hall.

³⁰ RAS法は日本のJIPデータベース（RIETI）や途上国IO作成等にも活用されている。

³¹ 高川泉、岡田敏裕（2004）「国際産業連関表からみたアジア太平洋経済の相互依存関係—投入係数の予測に基づく分析—」．日本銀行ワーキングペーパーシリーズ、No. 04-J-6、2004年3月

³² 佐野敬夫（2016）「各国産業連関表の延長推計の方法」．金森・玉村編『アジア国際産業連関表の作成—過大と拡張—中間報告書』調査研究報告書 アジア経済研究所 2016年

³³ 産業連関表を用いた波及効果の計算は需要起点である（供給制約は考慮外）。それゆえ、自動車の需要減は自動車製造関連産業の産出を減少させるが、自動車の減少による自動車を用いる産業の産出高減少は算出されない点には留意が必要である。

例えば、自動車を使う産業の需要が減少する設定を行えば、波及効果として自動車のマイナスの産出効果が計算される。

② 経済波及効果：付加価値

GDP に相当する付加価値については、各シナリオの未来の産業連関表から産業ごとの付加価値係数（産出高に占める付加価値の割合）を計測し、それを①の経済波及効果：産出高に適用することで、付加価値への波及効果を計算した。なお、産出高の結果に基づくため、付加価値においても一次波及分と二次波及分について計算している。

③ 雇用への波及効果

基本的には①で波及効果を算出した産出高に雇用係数（各産業の就業者数を対応する産業の生産額で除したものであり、1単位の生産を行うために投入される労働量を示す指標）を乗じることにより、雇用への波及効果を算出した。

その際、基本的には、従来型産業の雇用係数は総務省「産業連関表」（2015年表）の数値を、再エネを含むエネルギー関連分野については、早稲田大学次世代科学技術経済分析研究所の「次世代エネルギーシステム分析用産業連関表」（2015）³⁴の付帯表の値を参考に、産業ごとの変化傾向や変化要因を加味しつつ設定している。特に精査が必要な太陽光、風力に関連する産業小分類は松本・本藤(2011)³⁵、EV、FCVについてはERIA(2020)³⁶の研究を参考に、雇用係数を設定した。

³⁴ 早稲田大学社会科学総合学術院、次世代科学技術経済分析研究所。「拡張産業連関表」

<https://www.f.waseda.jp/washizu/table.html>

³⁵ 松本直也、本藤祐樹（2011）「拡張産業連関表を利用した再生可能エネルギー導入の雇用効果分析」日本エネルギー学会誌 2011年 90巻 3号 pp. 258-267.

³⁶ ERIA (2020), 'Impacts on Industry by xEV Penetration, in Suehiro, S. and A.J. Purwanto (eds.), The Influence on Energy and the Economy of Electrified Vehicle Penetration in ASEAN. ERIA Research Project Report FY2020 no.14, Jakarta: ERIA, pp.28-57.

担当者

志田龍亮、小川崇臣、石田裕之、川合康太、酒井博司、清水紹寛

本件に関するお問い合わせ先

株式会社三菱総合研究所

〒100-8141 東京都千代田区永田町二丁目 10 番 3 号

【内容に関するお問い合わせ】

政策・経済センター

電話：03-6858-2717 メール：pecgroup@mri.co.jp

【報道機関からのお問い合わせ】

広報部

メール：media@mri.co.jp