



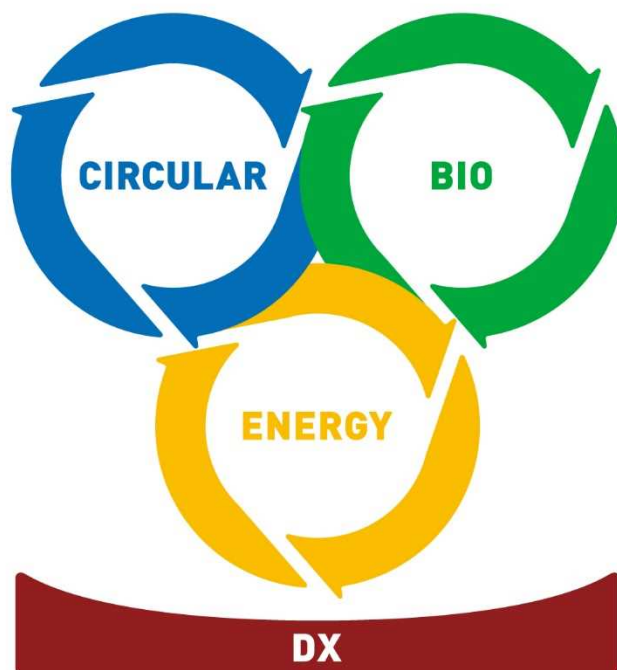
技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

2023年8月

持続可能な社会の実現に向けた 技術開発総合指針 2023

持続可能な社会を実現する3つの社会システム



TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター(TSC)

エグゼクティブサマリー

〈 1 章 〉 持続可能な社会の実現に向けて

・目指す未来像

我々の目指す未来像は、将来にわたり、世界が経済的に豊かで、環境に優しく、自然と共生し、自然界・生態系の多様性が維持、発展され、現世代の社会的ニーズを満たしつつ、将来世代にとってより良い社会である。そのためには、気候変動問題は克服しなくてはならない課題であり、持続的に発展し続ける社会の実現を目指すことが求められている。

・脱炭素社会の実現に向けた動き

気候変動問題が深刻化する中において、2020 年に入り世界各国から 2050 年カーボンニュートラルを基調とする温室効果ガス(GHG)削減目標が発せられ、取り組みが急激に加速されている。我が国でも 2020 年 10 月に、『2050 年カーボンニュートラル』が宣言され、2023 年 2 月には、2050 年カーボンニュートラル等の国際公約と経済成長・産業競争力強化を共に実現するために『GX 実現に向けた基本方針』が、取りまとめられた。さらに、サプライチェーンでのセキュリティリスクが、同時に克服すべき社会課題として顕在化している。

脱炭素社会を実現する技術開発や社会実装の取り組みは、こういった社会課題と気候変動問題の根本的な解決の手段であり、より一層の推進が求められる。

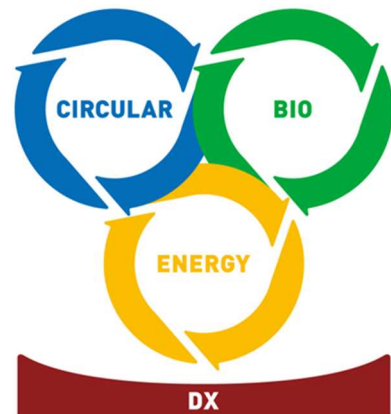
・持続可能な社会を実現する 3 つの社会システムとそれを支える DX

持続可能な社会の実現に向けては、「3 つの社会システム」、すなわち

- ◆サーキュラーエコノミー
- ◆バイオエコノミー
- ◆持続可能なエネルギー

の一体的な推進が鍵であり、如何にこの 3 つを統合的に捉え、非連続な技術革新につなげ、経済合理性をもって社会実装を実現させていくかが重要である。さらに、これら 3 つの社会システムを一体的かつ継続的に発展させていく上では、それを支える基盤となる、

◆デジタルトランスフォーメーション(DX)
が欠かせない。



・総合指針 2023 策定のねらい

総合指針 2023 では、気候変動問題の解決に資するために開発・実証に取り組むべき技術を特定していく上で、《3 つの社会システムとそれを支える DX》に関連する技術を全体的に俯瞰し、その上で 2050 年のカーボンニュートラルを見据えてそれらの CO₂ 削減効果を総合的・客観的に評価することを提唱する。また、最新の社会動向・技術動向に基づいて重要性の増した技術を拡充し、いくつかの技術について具体的な試算を提供することにより、開発・実証に取り組むべき技術の評価の一助となることを目的としている。なお、総合指針では、GHG のうち最も排出量の多い CO₂ 排出の削減を中心に検討を行う。

〈 2 章 〉 温室効果ガス排出量及び限界削減コスト

カーボンニュートラルを達成する限界削減コストは、従来技術の延長だけでは、5 万円/tCO₂ を上回る水準となる。世界が受容できるレベルにまで引き下げるには、従来技術の延長だけでは不可能であり、非連続な技術革新とその社会実装によるイノベーションが不可欠である。

特に《重要な取り組み》として、《使用するエネルギーの脱炭素化》、《最終エネルギー消費の削減》、《ネガティブエミッション技術の導入》、《非エネルギー起源の GHG 削減》を進める必要がある。

〈 3 章 〉 3 つの社会システムとそれを支えるデジタルトランスフォーメーションの動向と展望

カーボンニュートラルの実現に向けて開発すべき技術の特定に向けて、最新の動向を踏まえて、2 章で挙げた《重要な取り組み》を着眼点として《3 つの社会システムとそれを支える DX》に関連する技術を俯瞰し、重要技術を提示する。

《重要な取り組み》を持続的に展開するためには、《3 つの社会システムとそれを支える DX》の連携が不可欠である。

〈 4 章 〉 重要技術の評価について

3 章で提示した技術を中心として、《CO₂ 削減ポテンシャル》と《CO₂ 削減コスト》を試算した結果およびその試算根拠を示す。

この試算は、技術進展の速度や技術革新等の技術的な要因に加えて、導入政策や社会的な受容性などの社会環境の変化によって増減し得ることから、関係者の知見を持ち寄り継続的な検証が不可欠である。

〈 5 章 〉 イノベーションを促す仕組み作りへの期待

2050 年カーボンニュートラルに向けて、先進国を中心として、研究開発から社会実装フェーズにつながる大胆な政策支援が相次いで打ち出されており、こうした取り組みの成否が企業・国家の競争力に直結する時代に突入している。

我が国においても、官民の投資を促しカーボンニュートラルを推し進める政策が数多く打たれている。このような取り組みの基盤として、研究開発成果の創出とその社会実装により、イノベーションを創出していく包括的な仕組み作りが必要である。その中においては、優れた研究人材に加えて、ビジネスモデルや投資、国内外の政策・技術動向を踏まえたルールメイキングを推し進める人材が求められ、産学官が各々の立場で果たすべき役割を着実に実行していくことが期待される。

〈 6 章 〉 まとめ

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、イノベーションが必要不可欠である。持続可能な社会の実現に向けた《3 つの社会システムと DX》の一体的推進に向け、技術開発・実証に取り組むべき技術の評価において、《CO₂削減ポテンシャル》など定量的な評価に基づいた議論をすることが重要である。

今後も、取り組むべき技術の特定に資するべく、総合指針 2023 で提唱する考え方に則り、また最新の情報・データに基づいて、技術評価を継続していく必要がある。そのために、外部機関との連携を図りながら、評価手法の向上や客観性の確保に努め、また、総合指針 2023 が政策等に活用されるよう努めていく必要がある。

NEDO は、政府、関係機関と連携して、カーボンニュートラルに向けた一連の取り組みの一翼を担うべく、これからもイノベーションの芽を見出し、社会実装する「イノベーション・アクセラレーター」としてその役割を強化し、「世界の気候変動問題の解決」、「持続可能な社会の実現への貢献」を目指し、社会課題の解決に一層貢献していく。

目次

はじめに.....	6
1 章 持続可能な社会の実現に向けて.....	7
1-1 目指す未来像.....	7
1-2 脱炭素社会の実現に向けた動き.....	7
1-3 炭素循環から見た社会システム.....	10
1-4 持続可能な社会を実現する3つの社会システムと それを支えるデジタルトランスフォーメーション.....	11
(1)サーキュラーエコノミー(ブルー).....	12
(2)バイオエコノミー(グリーン).....	13
(3)持続可能なエネルギー(オレンジ).....	13
(4)デジタルトランスフォーメーション(ワインレッド).....	14
1-5 総合指針 2023 策定のねらい.....	14
2 章 温室効果ガス排出量及び限界削減コスト.....	16
2-1 温室効果ガス排出量の現状.....	16
2-2 温室効果ガス排出量の見通し.....	18
2-3 限界削減コストの推定.....	18
2-4 カーボンニュートラル達成への重要な取り組み.....	20
3 章 3つの社会システムとそれを支える デジタルトランスフォーメーションの動向と展望.....	23
3-1 サーキュラーエコノミー.....	23
3-2 バイオエコノミー.....	24
3-3 持続可能なエネルギー.....	26
3-4 3つの社会システムの一体的取り組みの重要性.....	28
3-5 デジタルトランスフォーメーション.....	29
4 章 重要技術の評価について.....	32
4-1 重要技術の考え方.....	32
4-2 CO ₂ 削減ポテンシャルとCO ₂ 削減コストの試算の考え方.....	33
4-3 CO ₂ 削減ポテンシャルの試算例.....	35
4-4 CO ₂ 削減コストの試算例.....	40
4-5 戦略的な技術開発の推進に向けて.....	45
5 章 イノベーションを促す仕組み作りへの期待.....	48
6 章 まとめ.....	50
付録 1 CO ₂ 削減ポテンシャル.....	53
付録 2 CO ₂ 削減コスト.....	93

はじめに

世界の平均気温は、産業革命が始まった 18 世紀後半から上昇し続けている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第 6 次評価(AR6)の報告¹では、1850～1900 年と比較して、2011～2020 年の平均気温が 1.09°C 上昇していることが示され(図 1)、人為的な温室効果ガス(GHG)の排出が地球温暖化の要因となっていることは疑う余地が無い、とされている。同報告の気候変動シミュレーションの結果によれば、向こう数十年の間に GHG 排出が大幅に減少しない限り、21 世紀中に 1.5°C および 2°C を優に超える地球温暖化に至ることが示された¹。人類が排出する GHG による気候変動問題は世界共通の喫緊の課題であり、世界が一致協力して、カーボンニュートラルの実現を目指す必要がある。

また、気候変動問題に限らず、「持続可能な開発目標(SDGs)」が 2030 年に向けた国際目標として定着するなど、持続可能性を重視する考え方が国際社会において浸透している。国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会議(COP26)、同第 27 回締約国会議(COP27)での議論・合意においても、発展途上国支援等が、気候変動対策と同時に取り組むことが訴求されている。

我が国は、こうした環境問題に対する世界の潮流を的確に捉え、気候変動問題以外の SDGs の要素とも整合を図りながら、地球環境問題の解決に貢献するイノベーションの創出を推進し、自国のみならず世界の GHG の削減に積極的に貢献していくことが求められている。

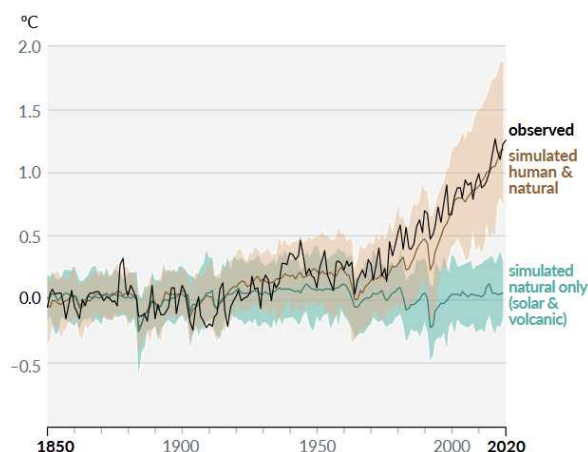


図 1 1850～1900 年を基準とした世界平均気温の変化

出典: Summary for Policymakers, IPCC AR6 WG1

¹ Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

1 章 持続可能な社会の実現に向けて

- 世界各国の気候変動対策の目標が 2050 年カーボンニュートラルへと高められ、その取り組みが急激に加速されている。
- 気候変動問題を克服し持続可能な社会を実現するには、《サーキュラーエコノミー》、《バイオエコノミー》、《持続可能なエネルギー》の 3 つの社会システムの一体的な推進、ならびにその基盤となる《デジタルトランスフォーメーション》が不可欠である。
- 2050 年カーボンニュートラルを実現する技術開発や社会実装に取り組むことは、気候変動問題の解決に向け極めて重要であり、総合指針 2023 では GHG のうち、最も排出量の多い CO₂ の排出削減技術を中心に検討を行う。

1-1 目指す未来像

我々の未来には無限の広がりがある。

- ・ 100 年後も、200 年後も、その先も、世界が経済的に豊かで、環境に優しく、自然と共生した社会であり続けるために；
- ・ 将来にわたり、自然界、生態系の多様性が維持、発展され続けることを担保するために；
- ・ 現世代の社会的ニーズを満たしつつ、将来世代の社会的ニーズを損なわず、むしろ将来世代により良い社会として引き継ぐために；

気候変動問題は克服しなくてはならない課題である。たとえ大きな困難が伴ったとしても、我々には、この気候変動問題を乗り越え、環境、経済、社会が調和を形成し、新しい価値が創造され続け、持続的に発展し続ける社会、すなわち、《持続可能な社会》の実現を目指していくことが求められている。

1-2 脱炭素社会の実現に向けた動き

深刻化する気候変動問題の克服に向けて、世界の脱炭素の取り組みが、近年、急激に加速している。表 1 に、『パリ協定』以降の気候変動問題に関する動きをまとめた。特に、2020 年に入り新型コロナウイルス感染症による世界経済への影響（コロナ危機）が深刻視される中、気候変動対策が経済復興さらには成長戦略として位置づけられるようになったことは大きな転換点であった。EU では、2020 年 5 月に『Next

Generation EU』が発表され、さらに翌 2021 年 7 月に発表された『Fit for 55』²において、EU の 2030 年の CO₂ 削減目標 55%達成へ向けた具体的な政策が示された。米国においても 2021 年 1 月にはバイデン政権がパリ協定へ復帰を果たし、2021 年 4 月には気候変動リーダーサミット(気候サミット)を主催した。同気候サミットでは、多くの国が 2050 年のカーボンニュートラル達成を目指す GHG 削減目標を国が決定する貢献(NDC:Nationally Determined Contribution)として示した³。その後、国際機関や研究機関等から 2050 年のカーボンニュートラルを基調とするシナリオが続々と公表された。国際エネルギー機関(IEA)が 2021 年 5 月に 2050 年の実質的な CO₂ 排出をゼロとするシナリオ(Net Zero Emission by 2050)を発表した他⁴、国際再生可能エネルギー機関(IRENA)⁵等からも 2050 年頃にネットゼロに至るシナリオが示された。IPCC からは AR6 が 2021 年から 2022 年にかけて発表され、1.5°C 目標を達成することの重要性が改めて強調された。このような中、2021 年 10 月から 11 月に英国で開催された COP26 においてはグラスゴー気候合意が採択され、IPCC AR6 で示された科学的知見を基に、1.5°C 目標への努力継続を世界全体の長期的な目標とする決意が示された。また同合意においては、イノベーションの加速による課題解決の方向性に加え、途上国への支援の重要性、国・地方・地域・世代・ジェンダー・政府・非政府・民間といったあらゆるレベルでの協調の必要性が強調された。翌 2022 年 11 月にエジプトで開催された COP27 では、COP26 の結果を踏襲しつつ、1.5°C 目標の重要性を再確認し、パリ協定の気温目標に整合的な 2030 年目標の強化に合意するとともに、気候変動の悪影響に伴うロス&ダメージに関する基金の創設が合意されるなど、排出の削減のみならず、気候変動による影響への対応も含めて、国際社会での議論が進んでいる。

我が国においても、気候変動問題を世界の喫緊の課題と捉えた取り組みが加速されている。2020 年 10 月には『2050 年カーボンニュートラル』を宣言、同年 12 月には「経済と環境の好循環」を目指す『2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(グリーン成長戦略)』が策定され、翌 2021 年 3 月にはグリーンイノベーション基金が造成された。さらに同年 4 月には気候サミットに先駆けて、2030 年に 2013 年比 46%の CO₂ 排出を削減する NDC が発表され、同年 6 月にはグリーン成長戦略を改定し、2050 年カーボンニュートラル達成に向けたより具体的な施策が示された。また、同年 10 月に閣議決定された『第 6 次エネルギー基本計画』においては、「S+3E(安

² 'Fit for 55' (European Commission, 2021) <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

³ 気候サミットを振り返り、新排出量削減目標を点検する(米国)(日本貿易振興機構、2021) <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2021/0401/9ac24934b1ca2265.html>

⁴ Net Zero by 2050 (IEA, 2021) <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

⁵ World Energy Transitions Outlook (IRENA, 2022) <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>

全性: Safety、安定供給: Energy Security、経済効率性: Economic Efficiency、環境への適合: Environment)」を確保するとともに、GHG 排出削減目標の実現に向けたエネルギー政策の道筋が示されている。

このようなカーボンニュートラルに向けた機運の高まりに対し、2022 年 2 月に勃発したロシアのウクライナ侵略が大きく影を落としている。ロシア・ウクライナ産資源の供給途絶を端緒として、それまでのコロナ危機による物流停滞等の要因も重なり、世界は化石燃料をはじめとする様々な資源・物資の供給不安・価格高騰に見舞われ、世界的なエネルギー安全保障の重要性や、サプライチェーンのセキュリティリスクが改めて浮き彫りになった。特にこれまでロシアからのエネルギー資源に高く依存してきた欧州においては、ロシア産の原油・天然ガスの供給途絶への対応として、原子力発電の稼働延長や石炭火力発電の再稼働といった措置が実施された。こういった現実解としての緊急措置を許容しつつも、カーボンニュートラルの達成に向けたクリーンエネルギーへの移行を推し進めることが、エネルギー安全保障確保や気候変動といった社会課題の根本的な解決につながるとの認識から、欧州を中心に、これに則る政策が打たれている。例えば、EU では先述の『Fit for 55』を拡大・加速・前倒しした『REPowerEU』⁶を策定し、エネルギー資源の脱ロシア化と、省エネルギーの促進、再生可能エネルギー(再エネ)の拡大、水素の普及等を通じたエネルギー安全保障確保とカーボンニュートラルの実現の両立を目指す施策が打ち出されている。この中で、クリーンエネルギー移行に不可欠な重要鉱物等のサプライチェーンの強靱化の対応も求められている。

このような中で我が国においても、エネルギーの安定供給を大前提に、排出削減と経済成長・産業競争力強化を共に実現していくために、2023 年 2 月に『GX 実現に向けた基本方針』が閣議決定され、その実行に必要な法制上の措置を行うための『脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律』(GX 推進法)および『脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律』(GX 脱炭素電源法)が 2023 年 5 月に成立した。

今後は、『GX 実現に向けた基本方針』に基づき、化石燃料への過度な依存から脱却し、危機にも強いエネルギー需給構造を構築するため、徹底した省エネの推進に加え、再エネや原子力などの脱炭素電源への転換の推進が図られ、国が GX 経済移行債を活用して 20 兆円規模の先行投資支援を行うとともに、カーボンプライシングを導入し、意欲ある企業の GX 投資を強力に引き出すことで、10 年間で 150 兆円超の GX 投資を実現する構想が具体化される。

⁶ REPowerEU (European Commission, 2022)
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131

表 1 パリ協定以降の気候変動問題に関する動向

2015年11-12月	COP21にて『パリ協定』を採択。
2016年4月	内閣府総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）により『エネルギー・環境イノベーション戦略（NESTI 2050）』策定。
2018年10月	IPCCが1.5°C特別報告書を公表。
2019年6月	『パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略』が閣議決定。
2019年12月	欧州委員会が『欧州グリーンディール』を発表。
2020年1月	『革新的環境イノベーション戦略』を策定。
2020年2月	NEDOが『持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針2020（NEDO総合指針2020）』を発行。
2020年3月	WHOが「COVID-19がパンデミック（世界的大流行）の状態にある」と宣言。
2020年5月	欧州委員会が新型コロナ危機からの経済復興へのイニシアチブ『Next Generation EU』を発表。7月には欧州理事会で復興基金と長期予算が承認。
2020年10月	『2050年カーボンニュートラル』を宣言。
2020年12月	経産省が経済と環境の好循環を目指す『2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略』策定。
2021年1月	米国で環境政策掲げるバイデン政権発足、パリ協定復帰。
2021年4月	2030年までに2013年比46%のCO ₂ 排出量を削減するNDCを発表。
2021年4月	米国の主催する気候変動リーダーサミット開催（日本もNDCをアピール）。
2021年5月	IEAが2050年の実質的なCO ₂ 排出をゼロとするシナリオ（Net Zero by 2050）を公表。（同年10月公表のWEOでも脱炭素の基本シナリオとして提示）
2021年6月	経産省が『2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略』改訂版を発表。GI基金発足。
2021年7月	欧州委員会が欧州グリーンディールを包括的に推進する政策パッケージ『Fit for 55』を発表。
2021年8月	IPCCが第6次評価報告書（第1作業部会：自然化学的根拠）を公表。
2021年10月	『第6次エネルギー基本計画』が閣議決定。
2021年10-11月	COP26が英国で開催。
2022年2月	IPCCが第6次評価報告書（第2作業部会：気候変動・影響・適応・脆弱性）を公表。
2022年2月	ロシアがウクライナ侵略を開始。
2022年4月	IPCCが第6次評価報告書（第3作業部会：気候変動・気候変動の緩和）を公表。
2022年5月	欧州委員会が『RepowerEU』を発表。
2022年11月	COP27がエジプトで開催。
2023年2月	『GX実現に向けた基本方針』が閣議決定。
2023年5月	『GX推進法』および『GX脱炭素電源法』が成立。

注：赤字は日本国内の動向

1-3 炭素循環から見た社会システム

GHG 排出量の大部分を占める CO₂ の大幅削減の道筋について、CO₂ 排出削減、貯蔵・固定化、再利用を全て考慮する炭素循環という観点で捉えた社会システム（図2）に基づいて検討した。

青色のエネルギー需要部分での CO₂ 排出量は、省エネルギーの進展により削減される。また、再エネや水素、バイオマスなどの持続可能なエネルギーを最大限利用することにより、化石燃料使用を削減して CO₂ 排出量を低減することができる。このように、『持続可能なエネルギー』を推進していくことが、CO₂ 排出量の低減に必須である。

次に、エネルギー利用により排出される CO₂ は、Direct Air Capture (DAC) などによって最大限分離回収し、CO₂ 回収貯留技術 (CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage) による地中への貯留や、カーボンリサイクル技術 (CR: Carbon Recycling) に

よる化学物質や鉱物等への貯蔵をすることができる。これらの技術によって、大気に排出される CO₂ を大幅に低減することができるとともに、リサイクルやシェアリングによりエネルギーや物質の需要を削減することが可能となる。このように、物質資源の循環利用を最大化する《サーキュラーエコノミー》を推進していくことが、CO₂ 排出量の低減に必須である。

さらに、大気中の CO₂ は、光合成により、植物に固定化させることができる。加えて、カーボンニュートラルなバイオマスエネルギーや物質生産に活用することにより、CO₂ の排出量を削減することが可能となる。このように、バイオマスを最大限活用し、大気中の CO₂ 量を低減させる《バイオエコノミー》を推進していくことが、CO₂ 排出量の低減に必須である。

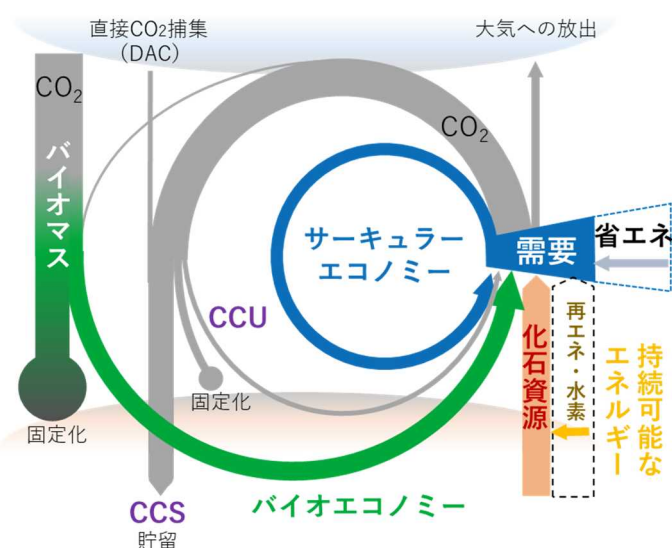


図 2 炭素循環から見た社会システムの概念図

1-4 持続可能な社会を実現する 3 つの社会システムとそれを支えるデジタルトランスフォーメーション

前節で述べたように、脱炭素社会の実現に向けた動きを踏まえて、持続可能な社会を実現していくには、3 つの社会システム、すなわち、(1)サーキュラーエコノミー、(2)バイオエコノミー、(3)持続可能なエネルギー、が継続的に発展していくことが不可欠である。そして、この 3 つの社会システムを統合的に捉え、非連続な技術革新につなげ、経済合理性をもって社会へ実装させていくことが重要である。

これら 3 つの社会システムを一体的に推進するためには、それを支える基盤として (4) デジタルトランスフォーメーション (DX: Digital Transformation) の存在は欠かせな

い。図3は、持続可能な社会の実現に不可欠な3つの社会システムが継続的に発展し、互いに関連し合い、影響し合い、最適な調和が図られているとともに、これらの基盤としてDXが支えている状態を表現したものである。以下、3つの社会システム、およびDXについて説明する。

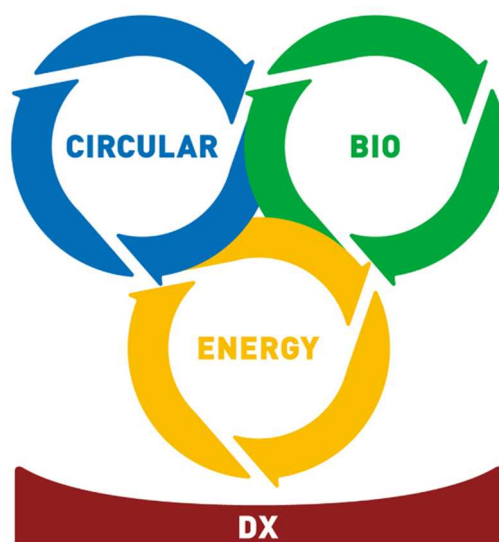


図3 持続可能な社会を実現する3つの社会システムとそれを支えるデジタルトランスフォーメーション

(1) サーキュラーエコノミー(ブルー)

我々は、地球上に存在する様々な物質資源を利用して、経済社会活動を営んでいる。サーキュラーエコノミーとは、これらの物質資源が、最大限循環され、かつ、新たな消費が最小化された社会システムのことであり、シェアリングエコノミーの推進などの概念をも含み、地球から産出される物質資源の利活用を最大化させることを目標としている。図では地球の象徴であるブルーで表現している。

サーキュラーエコノミーは省資源・資源安全保障や廃棄物削減の手段として元来重視されてきたが、新たな消費を抑制することによるCO₂排出削減の効能も、気候変動対策の観点で重要である。例えば、鉄鋼・セメント・化学・非鉄金属といった素材産業では、生産過程でのCO₂排出量が多く、抜本的な対策が困難とされる。3R(Reduce、Reuse、Recycle)に代表される施策は、こういった素材の消費を抑制することで、CO₂排出削減に寄与する。また、シェアリングなど需要サイドの新たなビジネスモデルも、物品・製品の消費抑制に加え、輸送システム等の最適化による利用時のCO₂削減が期待される⁷。さらにはCO₂を炭素資源と捉えてこれを回収し、

⁷ ITF Transport Outlook 2017 (OECD, 2017)
https://www.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2017_9789282108000-en

多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルが将来の CO₂ 削減策として望まれる。また、排ガス中の窒素酸化物は GHG の一つであり、これを回収無害化して再利用する窒素循環も有効な地球温暖化対策として期待される。なお、廃水中の窒素酸化物を含めた窒素循環は、プラネタリーバウンダリー（地球の限界）問題解決の観点からも注目されている。

(2) バイオエコノミー（グリーン）

地球上には、ヒト以外にも様々な生物が息づいており、これらの生物はそれぞれの生命維持活動の中で、他の生物にとって有用な食料等の物質を生み出す共存関係にある。バイオエコノミーとは、これらの生物が生み出す物質が最大限活用され、かつ、生物が形成している生態系への負荷が最小化された社会システムのことであり、生態系機能の最大限の発揮や生物資源の貢献を最大化させることを目標としている。図では、生物の象徴であるグリーンで表現している。

バイオエコノミーは、生物資源の生産・利用・保全・再生を、関連する知識・科学・技術・イノベーションの適用により増大することで、経済圏内外を含めた地球規模での持続可能なソリューション（情報、製品、プロセス、サービス）を提供する^{8,9}。特に、エネルギー消費の少ないバイオプロセスの導入、大気中の希薄な CO₂ の光合成による効率的な固定、CO₂ を固定した生物資源（バイオマス）を適切に活用したバイオ製品による化石原料からの代替などにより、バイオエコノミーは CO₂ 削減にも貢献する。バイオテクノロジーやバイオリソースに関する新たな発見やゲームチェンジとなり得る新技術・革新的技術の開発も継続的に起こっており、経済的、社会的、および生態系の回復力を高めながら、都市部と農村部の両方のコミュニティが繁栄する社会実現への貢献が、さらに期待されている。

(3) 持続可能なエネルギー（オレンジ）

地球上には、化石燃料以外にも、太陽の地球への放射や地球内部の熱などに基づく太陽光、風力、地熱、海洋など多くの自然由来のエネルギー源が存在している。社会システムとしての持続可能なエネルギーとは、これらの自然由来のエネルギー源の利用が最大化され、かつ、地球環境への負荷が最小化された社会システムのことであり、長期にわたり安定的なエネルギーの供給と利用を実現することを目標としている。図では、エネルギーの象徴であるオレンジで表現している。

⁸ The Bioeconomy to 2030 (OECD, 2009)

https://www.oecd-ilibrary.org/economics/the-bioeconomy-to-2030_9789264056886-en

⁹ バイオ戦略 2019（内閣府、2019） <https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html>

産業革命以降、急速に拡大したエネルギー需要のほとんどが石炭や石油・天然ガス等の化石燃料によって賄われてきた。一方、これらは枯渇性の資源であることに加え、資源採掘や燃焼時に大量の温室効果ガスを排出する。したがって、持続可能な社会の実現には、従来の化石燃料によるエネルギー供給システムから持続可能なエネルギーシステムへの転換が必要となる。具体的には、一次エネルギーとしての再エネ利用技術、それらを転換・輸送・貯蔵するための二次エネルギー関連技術、それらの技術を統合しエネルギーの利活用の最適化を目指すエネルギーマネジメント技術、そしてエネルギーを可能な限り効率的に利用する省エネルギー関連技術の開発を進めることで低コスト化を実現し、できる限り早期に社会実装に結び付けることが重要である。

(4) デジタルトランスフォーメーション(ワインレッド)

20 世紀末から IT が飛躍的に発展し、人々の生活は便利で豊かなものとなり、ビジネスは効率化とともにグローバル化とアジャイル化が進んできた。その結果、ビジネスにおいては、世界の今後の様々な変化に対応して優位性を確保するために、デジタルトランスフォーメーション(DX)が求められるようになった。DX は、3 つの社会システムを具現化し、連携させるための基盤であることから、図では 3 つの社会システムの下にワインレッドで表現している。

DX に至るまでには大きく 3 つのレベルがあり、それぞれデジタイゼーション(Digitization)、デジタルライゼーション(Digitalization)、そして DX である。デジタイゼーションは、物理的・アナログ的な作業をデジタル化し、業務を部分的・局所的にデジタル化することをいう。デジタルライゼーションは、各作業のデジタル化によって得られたデータから、有機的なつながりを見つけ、業務プロセス全体をデジタル化することをいう。DX は、デジタル化を踏まえてビジネスの在り方を変革し、社会に新しい価値を提供することをいう。一方で、IT に関わるグリーン化はこれまで、IT を活用して脱炭素化を実現するグリーン by IT と、IT 自身の電力消費を削減するグリーン of IT として議論されてきた。グリーン by IT は広義の DX の結果と位置づけることができる。

1-5 総合指針 2023 策定のねらい

NEDO は、《サーキュラーエコノミー》、《バイオエコノミー》、《持続可能なエネルギー》の《3 つの社会システム》の一体的な推進を実現し、世界でのカーボンニュートラルの実現を目指す技術開発や社会実装に取り組むことは、気候変動問題の解決に向け極めて重要であると考え、『持続可能な社会の実現に向けた技術開発総

合指針 2020(以下、総合指針 2020)』を 2020 年 2 月に策定した(表 1)。その後、『3 つの社会システム』に類するコンセプトが各所での開発戦略や取り組み方針等に表されるなど、気候変動問題の解決に向けた同様の考え方が広がっている^{10,11}。しかしながら気候変動を取り巻く状況は深刻さを増すばかりであることから、世界各国で 2050 年カーボンニュートラルを基調とする NDC に基づく取り組みが急激に加速している。

そこで、最新の情勢や技術動向の分析に基づき、『持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2023(以下、総合指針 2023)』を策定することとした。総合指針 2023 においては、GHG 排出の削減に効果のある技術を総合的・客観的に評価するという基本的な考えを総合指針 2020 より踏襲する。さらに、2050 年カーボンニュートラル実現を見据えて新たに重要視される技術を提示し、GHG 削減効果の具体的な試算と試算根拠を提供する。これにより、NEDO が開発・実証に取り組むべき技術の評価の一助となることを目的とする。

気候変動問題の克服に資する重要な技術を提示していくには、『サーキュラーエコノミー』、『バイオエコノミー』、『持続可能なエネルギー』の 3 つの社会システムに加えて、これらを支える『デジタルトランスフォーメーション』に関わる技術を最新の社会動向・技術動向に基づいて全体的に俯瞰するとともに、その上で、どの技術がどれだけの GHG 排出を削減でき、どのくらいの費用で、いつ実現できるのかを定量的に評価していくことが必要である。総合指針 2023 では、GHG のうちで最も排出量の多い CO₂を中心に検討を行い、その他の GHG については CO₂換算で評価を行う。将来を見据えた定量的な議論に資するべく、CO₂削減に貢献する技術の『CO₂削減ポテンシャル』と『CO₂削減コスト』を見積もる。

2050 年カーボンニュートラルを実現して気候変動を抑制するためには、総合指針 2023 で検討した技術以外にも、更に多くの技術を検討する必要がある。また、総合指針 2023 に基づき、気候変動問題の解決に資する技術に CO₂削減ポテンシャルなどの定量的な評価をすることにより、取り組むべき技術の更なる特定を進めていくとともに、我が国で開発された技術が世界中で広く普及し活用されることで、気候変動問題の解決に貢献することが期待される。

¹⁰ タイの BCG 経済モデル、スマートファームিংやバイオ技術に商機 (日本貿易振興機構、2021)
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2021/81285571d8e6c862.html>

¹¹ 西村環境相との懇談会を開催 (週刊経団連タイムス、3579 号、2023)
https://www.keidanren.or.jp/journal/times/2023/0216_01.html

2章 温室効果ガス排出量及び限界削減コスト

- 温室効果ガス削減対策と経済性の関係において、カーボンニュートラルの達成には、CO₂削減量 1トンあたりに要するコストは 5 万円を上回る水準が示された。
- この限界削減コストは総合指針 2020 時点の分析より低減しており、技術開発の成果により、太陽光発電や蓄電池の単価が低下したことが反映されたものと考えられる。
- 限界削減コストを世界が受容できるレベルにまで引き下げるには、非連続な技術革新とその社会実装によるイノベーションが不可欠である。

2-1 温室効果ガス排出量の現状

IPCC 第 6 次評価第 3 部会 (WG3) の報告書¹²によると 2019 年における世界の GHG 排出量は CO₂ 換算で約 590 億トンであり、そのうち CO₂ が 75%を占め、残りは CH₄ (18%)、N₂O (5%)、フロン等のフッ素系ガス (2%)となっている (図 4)。1990 年以降、世界の GHG 排出量は増加し続けており、2010~2019 年にかけては鈍化の傾向は見られるものの、いまだ減少に転じていない (図 6)。IEA の World Energy Outlook 2022¹³ (WEO 2022)によると、2020 年における世界の CO₂ 排出量は、コロナウイルスの感染拡大に伴うエネルギー需要の低迷により 5.2%減少したが、翌 2021 年には GDP 成長率の回復とともに 6.1%増加した。並大抵の努力ではカーボンニュートラルを実現することは困難であることが示唆される。

日本の GHG 排出量は 2019 年の実績で約 12 億トンと、世界の GHG 排出量の約 2%に相当し (図 5)、2013 年をピークとして減少に転じている (図 7)。日本の GHG 排出量が世界に占める割合は比較的低いですが、気候変動問題は地球規模の問題であることから、我が国は自国のみならず世界の GHG 排出削減に貢献することが極めて重要である。

¹² Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022) <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>

¹³ World Energy Outlook 2022 (IEA, 2021) <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

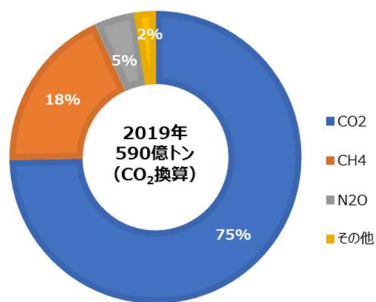


図4 世界の温室効果ガス排出量

出典: IPCC AR6 WG3 を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

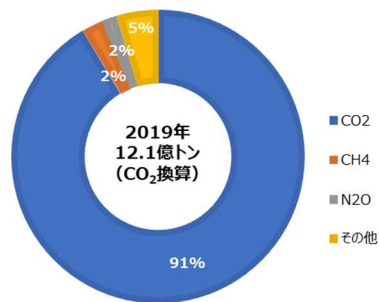


図5 日本の温室効果ガス排出量

出典: 2020 年度温室効果ガス排出量(確報値)概要(環境省、2022)を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

Global net anthropogenic emissions have continued to rise across all major groups of greenhouse gases.

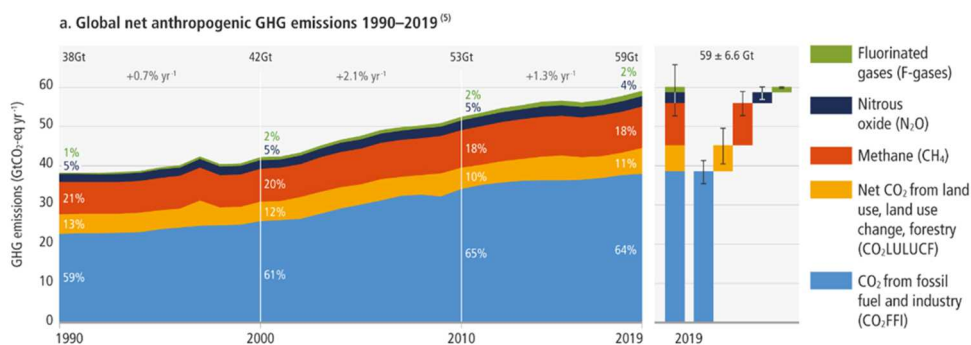


図6 世界の温室効果ガス排出量の推移

出典: IPCC AR6 WG3 報告書

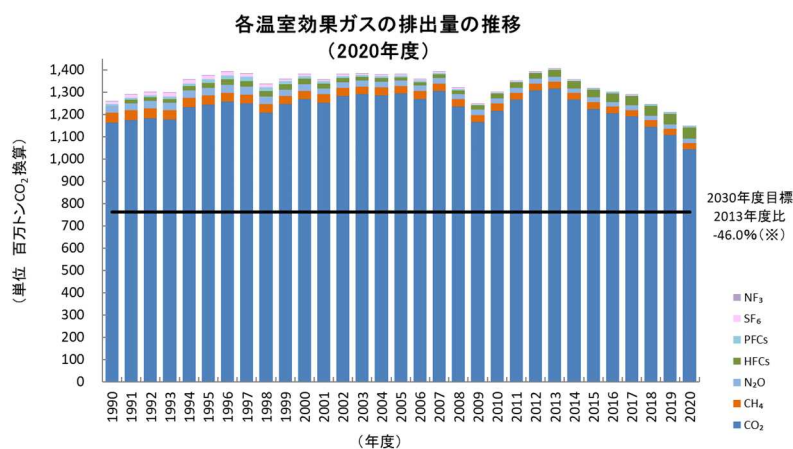


図7 日本の温室効果ガス排出量の推移

出典: 日本の温室効果ガス排出量データ(1990~2020 年度) 確報値(国立環境研究所、2022)

2-2 温室効果ガス排出量の見通し

世界の多くの研究機関において、様々な GHG 排出経路に基づくシナリオが想定され、シナリオごとでのエネルギー消費、CO₂ 排出、削減コスト等の分析がなされている。IEA による WEO 2022 では、CO₂ に限定して、現在の政策に基づいて CO₂ 削減が進むシナリオである Stated Policies Scenario (STEPS)、ネットゼロを達成するシナリオである Net Zero emissions by 2050 Scenario (NZE) が示されている(図 8)。2050 年における CO₂ 排出量は STEPS で約 320 億トンであり、パリ協定以前の政策に基づく対策が実施された場合の Pre-Paris baseline に比べ、220 億トン程度の削減を見込んでいる。しかしながら、ネットゼロ達成に向けては、STEPS から更に 320 億トンの CO₂ 排出削減が必要であり、経済合理性を有する革新的な技術を導入することが不可欠となる。

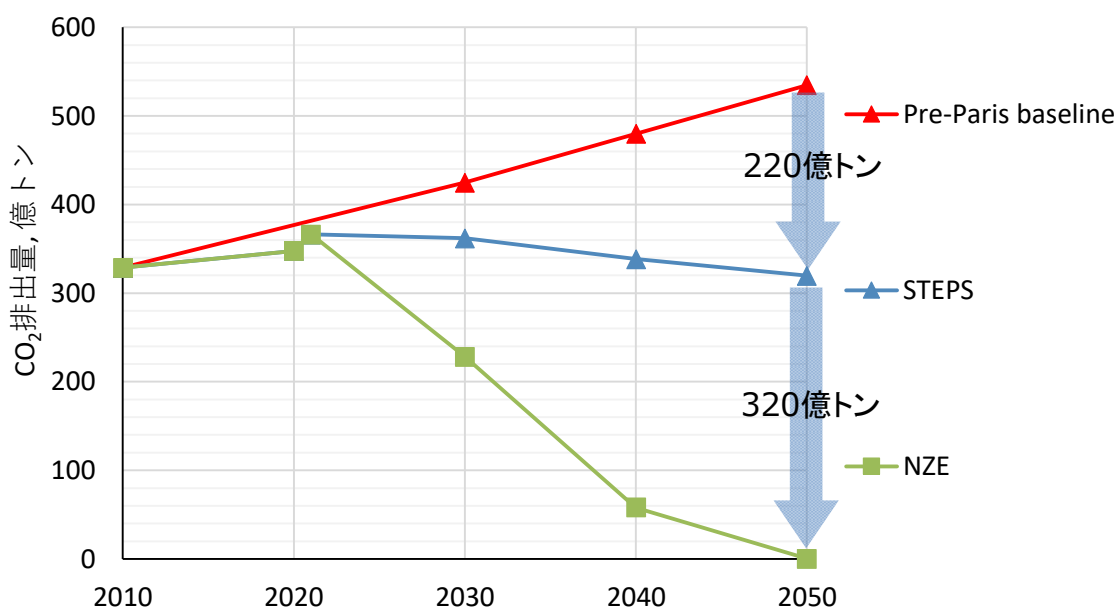


図 8 IEA による代表的なシナリオ

出典: IEA WEO 2022 を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2022)

2-3 限界削減コストの推定

気候変動に関する世界の研究機関が複数のシナリオに基づいたシミュレーションを行い、GHG 排出量(または CO₂ 排出量)と限界削減コストとの関係を示している。なお、限界削減コストとは、CO₂ 排出を追加的に 1 トン削減するために要する費用を意味し、単位は円/tCO₂(もしくは USD/tCO₂)で表される。この限界削減コストは、ある排出量における CO₂ 削減に係る経済合理性という観点でのハードルの高さに対応し、今後の CO₂ 削減に関する技術開発の目標となる重要な指標である(詳細は 4 章)。総

合指針 2020 を発行して以降、各国の気候変動対策の強化や技術開発の進展により、各機関のシナリオが見直されている。

総合指針 2023 においては、IPCC AR6 WG3 の報告書に基づき、温度上昇を 1.5°C に抑えるための限界削減コストについて解析を行った。AR6 の WG3 報告書では、審査を通過した 1,202 個のシナリオを、2100 年までの温暖化予測に応じて 8 つのカテゴリ(C1～C8)に分類している(表 2)が、このうちの温度上昇を 1.5°C に抑えるシナリオである C1、C2 を対象として世界全体の GHG 排出量と限界削減コストとの推計値の関係を分析した。

表 2 AR6 WG3 報告書における GHG 排出シナリオのカテゴリ

カテゴリ	温暖化予測	シナリオ数
C1	1.5°C (オーバーシュート無 or 低オーバーシュート)	97
C2	1.5°C (高オーバーシュート)	133
C3	2°C (> 67%)	311
C4	2°C (> 50%)	159
C5	2.5°C	212
C6	3°C	97
C7	4°C	164
C8	> 4°C	29

出典: IPCC AR6 WG3 報告書を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

回帰分析結果を図 9 に示す¹⁴。青の線の近似値が示すように、GHG 排出量の低下に伴い限界削減コストは指数関数的に増加しカーボンニュートラルの達成までに限界削減コストは 5 万円/tCO₂(1 USD=100 円)を上回る水準となる。

ここで、総合指針 2020 で行った同様の分析で得られた近似線である黒の破線と比較すると、GHG 排出量ネットゼロ付近の限界削減コストが低くなっていることが分かる。AR6 の WG3 報告書で取り上げられたシナリオでは、2010 年から 2019 年にかけて太陽光発電(85%)、風力発電(55%)、リチウムイオン電池(85%)の単価が継続的に低下したことが反映されており、これがカーボンニュートラル付近での限界削減コスト低下の一因である。限界削減コストを世界が受容できるレベルにまで引き下げるためには、引き続き技術革新やイノベーションが不可欠である。

¹⁴ 各研究機関のコストに関する基準年が異なる場合はインフレ率で補正した。また、CO₂に限定している IEA のデータは IPCC が示す複数の排出経路から推定した CO₂以外の GHG の値を加算している。

限界削減コストと GHG 排出量との関係を示す近似式は、下記の通りである。

C1+C2 限界削減コスト[USD/tCO₂]=665.42×exp(-0.0066G)、G: GHG 排出量[億 tCO₂]
 総合指針 2020 限界削減コスト[USD/tCO₂]=2061.2×exp(-0.0086G)、G: GHG 排出量[億 tCO₂]

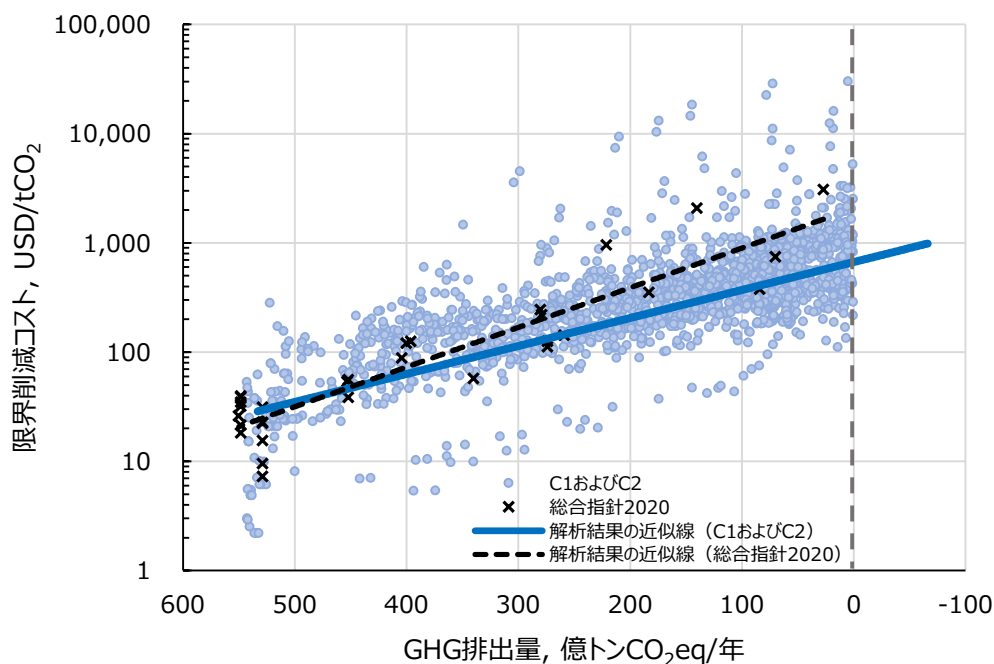


図9 GHG 排出量と限界削減コストとの関係

出典: IPCC AR6 WG3 報告書、総合指針 2020 を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

2-4 カーボンニュートラル達成への重要な取り組み

AR6 の WG3 報告書では、温度上昇を 1.5°C に抑える例示的な緩和経路 (IMP: Illustrative Mitigation Pathway) として、Extensive use of Renewables (Ren)、Low Demand (LD)、Shifting Pathways (SP)、Net Negative Emissions (Neg) の 4 つのシナリオが示された(表 3)。

表 3 AR6 WG3 報告書に示された温度上昇を 1.5°C に抑える例示的な緩和経路

シナリオ	特徴	カテゴリー
Ren	再生可能エネルギー重視	C1
LD	低エネルギー需要重視	C1
SP	持続可能な開発経路重視	C1
Neg	ネガティブエミッション重視	C2

出典: IPCC AR6 WG3 報告書を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

いずれの緩和経路も速やかで大幅な GHG 排出削減といった共通の特徴を持つが、その緩和戦略は大きく異なっている。図 10 は、温度上昇を 1.5°C に抑える 4 つの例示

的緩和経路での一次エネルギー供給量、ならびにネガティブエミッション技術（NETs）による CO₂ 削減量を比較したものである。これらの特徴的なシナリオの比較から、カーボンニュートラルを達成するための取り組みとして、《使用するエネルギーの脱炭素化》、《最終エネルギー消費の削減》、《ネガティブエミッション技術の導入》の重要性が示唆される。

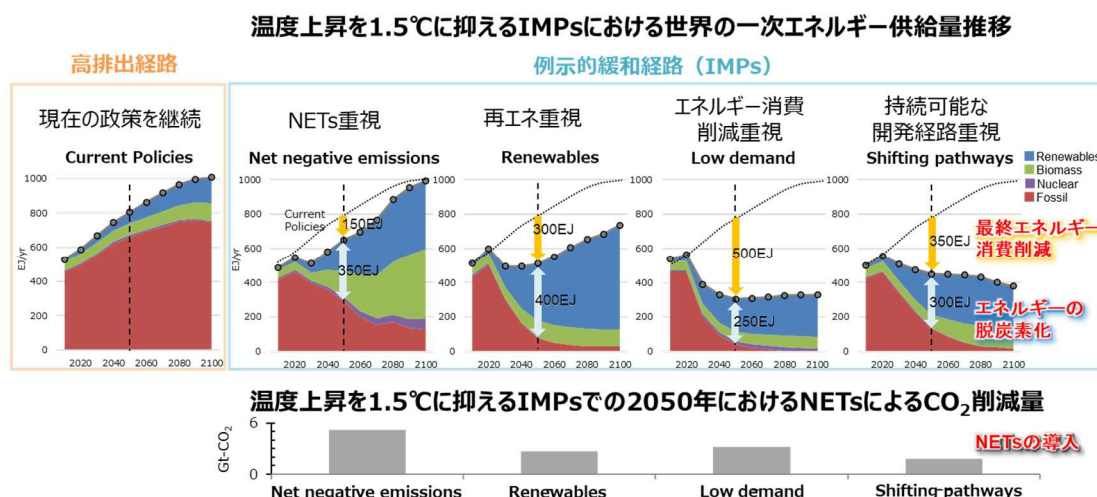


図 10 温度上昇を 1.5°Cに抑える例示的緩和経路における世界の一次エネルギー供給量と NETs による CO₂ 削減量

出典: IPCC AR6 WG3 報告書を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2022)

《使用するエネルギーの脱炭素化》は、炭素排出を伴わない再生可能エネルギー（再エネ）等のエネルギー源への転換を意味しており、カーボンニュートラルを達成する上での根幹をなす取り組みである。Ren、LD、SP シナリオにおいて、2050 年時点の太陽光発電の発電量は 60～169EJ、風力発電は 76～96EJ と想定されている。このように、再エネが特に電力分野で拡大する。変動電源の大量導入に伴って蓄電池の普及も大幅に拡大し、電化が飛躍的に進むことも想定されている。また、電化が進展するとともに、水素、アンモニア、合成メタン、合成燃料への燃料転換も必要であり、GHG 排出を伴わない製造技術の開発や利用技術の開発が重要である。

《最終エネルギー消費の削減》は、GHG 排出削減に要する CO₂ 削減技術の導入目標を緩和し、資源・費用の投入を抑制する効果やエネルギー価格変動の影響を抑える効果が期待される。LD、SP、Ren シナリオにおいて、世界の最終エネルギー消費は現在の 430EJ から 2050 年に 245～370EJ までの削減が想定されている。省エネルギー技術には CO₂ 削減コストが比較的安く、実用段階のものが多く、炭素排出の早期ピークアウトの観点で、積極的な導入の推進が期待されている。また、最終エネル

ギー消費の抑制には、サーキュラーエコノミー(CE)の推進も有効である。CE の推進により製品、素材の生産量を削減することで、エネルギー消費を抑制することが期待できる。

《ネガティブエミッション技術の導入》は、様々な策を講じても2050年までに削減が困難なGHG排出を相殺するものである。特にNegシナリオで重視され、他の多くのシナリオでもNETsの利用が想定されている。ただし、これらのシナリオにおいて想定されているNETsは、Bioenergy with Carbon Capture and Storage(BECCS)、Direct Air Carbon Capture and Storage(DACCS)や植林等のAgriculture, Forestry, and Other Land Use(AFOLU)といった、技術成熟度やコストの観点で実現可能性が比較的明らかな技術にとどまっている。カーボンニュートラルの実現に向けて、その他のNETsについても技術を確立し、社会実装への取り組みを加速していくことが重要である。また、自然界にCO₂を貯留する技術は、低濃度のCO₂を低コストで固定できる能力を持つことや貯留に伴うコベネフィット(共利益)が期待できるが、環境影響やCO₂削減効果についての定量的な理解が不十分となっており、今後の社会実装に向けて科学的な評価が必要である。さらにNETsは、カーボンニュートラル達成後には、排出量を超える量のGHGを分離・貯留することで正味排出を負にすること(Net Negative)を可能とする。これにより、大気中のGHG濃度を低下させ気候変動の更なる抑制が可能となると考えられている。

なお、IPCC AR6においては、非エネルギー分野において、セメントや化成品の原料転換、農業分野でのメタン・N₂O排出の削減の必要性が挙げられている。したがって、上述の3つの取り組みに加えて、《非エネルギー起源のGHG削減》も重要な取り組みとして捉えることができる。

3章 3つの社会システムとそれを支えるデジタルトランスフォーメーションの動向と展望

- 2章で抽出した、《使用するエネルギーの脱炭素化》、《最終エネルギー消費の削減》、《ネガティブエミッション技術の導入》、《非エネルギー起源のGHG削減》の重要な取り組みを着眼点としつつ、最新の社会動向・技術動向を踏まえて3つの社会システムとDXに関連する技術を俯瞰し、重要技術を提示した。
- 持続的な社会を実現するためには、重要な取り組みを継続的に展開していく必要があり、そのためには3つの社会システムとDXの一体的な推進が不可欠であることが明確となった。

3-1 サークュラーエコノミー

カーボンニュートラルに向けたエネルギー転換・脱炭素の取り組みが加速される中においては、サーキュラーエコノミー(CE)によるバージン材製造の削減が、《最終エネルギー消費の削減》につながる取り組みとして重要視されている。SITRA(フィンランドのイノベーションファンド)の報告では、素材のリサイクルに、製品の生産効率やシェアリングなどビジネスモデルによる効果も加味することで、主要素材を製造する分野での56%のCO₂排出削減が可能といった試算が示されている(図11)。IEAのNZEシナリオではリサイクル比率の飛躍的な向上が求められており、製鉄業における原料スクラップの使用比率を現状の32%から2050年には46%に、プラスチックの再利用率を17%から54%に向上するといった数値が示されている。

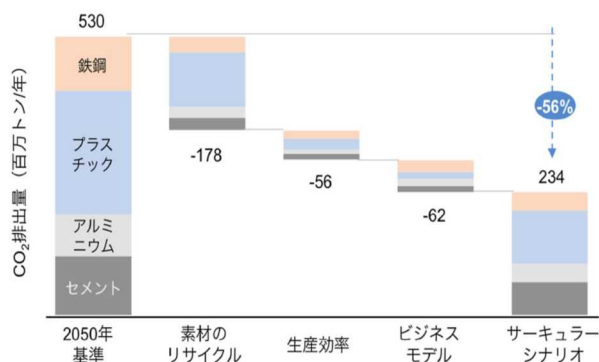


図11 CEによるCO₂削減ポテンシャル

出典: The Circular Economy (SITRA, 2018)¹⁵を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

¹⁵ The Circular Economy (SITRA, 2018) <https://www.sitra.fi/app/uploads/2018/06/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation.pdf>

バージン材の削減の具体的手段としては、3R(Reduce、Reuse、Recycle)だけでなく、製品の長寿命化、修理・再製品化、シェアリングなど、様々な手法が挙げられるが、CEには、これらの手法に基づく新たな事業や雇用の創出も期待され、カーボンニュートラルを成長の機会と捉える潮流とも整合する。

リサイクルにおいては、リサイクル後に回収する部品や素材の品質を維持することが重要であり、そのためには製品の設計情報や素材や部品に関する情報の活用と、ロボット等による自動化を組み合わせることで、適切かつ効率的に解体・選別することが求められる。さらに、解体、破碎/粉碎、選別しやすい製品設計やリサイクルがしやすい材料選択など動脈産業側の配慮も重要なポイントとなる。

カーボンリサイクルは、CO₂を資源と捉えた資源循環の一つと位置づけられる。バイオマスや、産業排ガス、大気から回収したCO₂を炭素化合物やコンクリート等の原料として用いるもので、《非エネルギー起源のGHG削減》に資する技術として重要視されている。CO₂を燃料や基礎化学品に転換利用するためには、合成ガスからの転換技術が共通技術として重要になる。一方、CO₂を原料として利用する機能性化学品・セメント原料の中には水素を必要としないものもあり、それらについては早期に実装が進むことが期待される。

3-2 バイオエコノミー

世界各国で、カーボンニュートラル実現に向けたバイオ戦略を加速する動きが見られる。EUでは、『欧州グリーンディール』関連施策の中で、「Promoting Clean Energy(クリーンかつ入手可能で十分なエネルギー供給)」、「Striving for Greener Industry(産業のクリーンかつ循環型継続への移行)」など、バイオエコノミーの寄与が期待されている。米国は、『The Bioeconomy: A Primer』においてバイオエコノミーの定義を明確化、さらに『国内バイオ産業振興に関する大統領令』には、「バイオものづくり(バイオマニュファクチャリング)が、今後10年以内に世界の製造業の生産高の3分の1以上(約30兆ドル相当)を占める可能性があることを示唆」するファクトシートが付され、戦略的分野としての大きな期待がうかがわれる。

一方、我が国においても、近年多くの施策が打たれている。2022年6月に閣議決定された『新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画』においては、バイオものづくり分野を重点的投資対象と位置づけた。また、農水省の『みどりの食料システム戦略』においては、2050年までの「農林水産業のCO₂ゼロエミッション化」を目標として掲げた。内閣府のムーンショット型研究開発では、「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現する」という目標の達成に向けて、生物機能を活用した技術を含むネガティブエミッション技術が追加拡充された。環境省において

は、『プラスチック資源循環促進法』の中で、2030年までにバイオプラスチックを約200万トン導入するという目標が掲げられている。

このように、2020年以降、カーボンニュートラル実現へ向けた気運の高まりの中で、生物による自然現象を有効に活用したCO₂の固定化、さらに生物機能を有効に活用した有用物質や機能性物質の生産による経済価値の創出、有機系廃棄物を資源として生物機能を用いて再利活用する資源循環経済化など、バイオエコノミーへの期待が高まっている(図12)。特に注目される技術として、合成生物学を活用したバイオものづくり、フードテックやアグリテックが挙げられる。

合成生物学を活用したバイオものづくりは、多様な再生可能原料から様々な物質を生産することが可能であり、化学産業などの脱炭素化が難しいとされる産業でのカーボンニュートラル実現のために重要である。特に、木質・草本系バイオマスや農業廃棄物などのグリーンカーボン、海藻、海草などのブルーカーボンは、希薄な状態のCO₂(例えば大気中のCO₂)を植物機能(光合成)によって低投入エネルギーで固定する。一部をバイオマスとして活用することで炭素循環を回しつつCO₂の削減に貢献し得るもので、《ネガティブエミッション技術》、《最終エネルギー消費の削減》ならびに《非エネルギー起源のGHG削減》につながる技術として位置づけられる。

フードテックやアグリテックについては、農林水産業がGHGの吸収源であり排出源ともなる点に留意した様々な取り組みとして注目されている。CO₂を農地等へ貯留する《ネガティブエミッション技術》につながるとともに、バイオ炭などの活用による土壌改良やスマートフードチェーンなど食品生産業における《最終エネルギー消費の削減》への寄与が期待できる。

バイオエコノミーは、自然を基盤とした解決策(NBS: Nature-Based Solution)と親和性が高く、自然環境の保全と経済価値の創出に大きく貢献する。しかしながら、成熟度の低い技術も多く、継続的に投資を呼び込むために、提供価値の可視化や経済価値への転換が必要不可欠である。これらの実現に向けては、生物によるCO₂固定量の計測技術とともに、バイオエコノミー関連技術のLife Cycle Assessment(LCA)やNBSによる相乗便益のインパクト評価手法などを確立する必要がある。このような技術を開発、活用することにより、バイオエコノミーにおける、《ネガティブエミッション技術》や《最終エネルギーの消費の削減》の効果を科学的に立証することが可能となる。

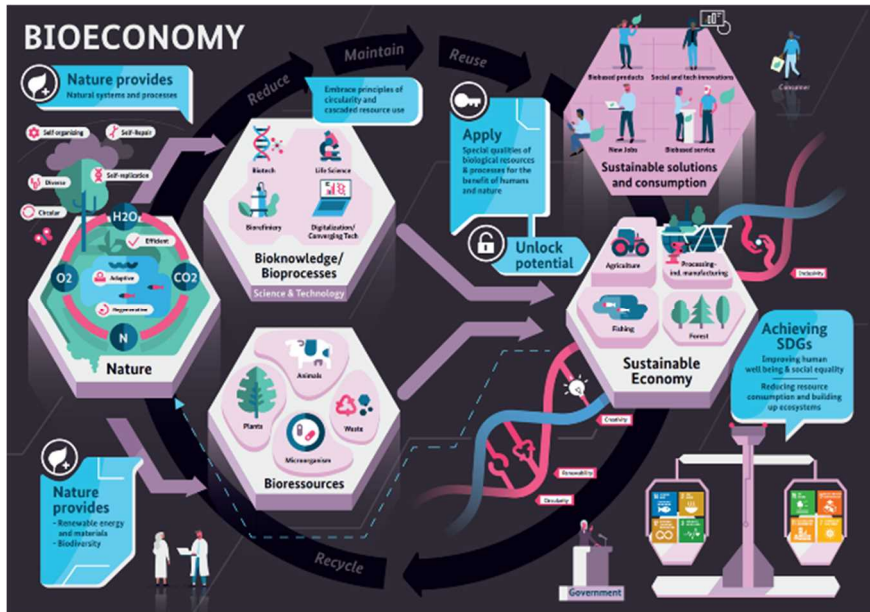


図 12 バイオエコノミーの展開

出典: Communiqué of the Global Bioeconomy Summit 2020¹⁶ (Berlin, 2020)

3-3 持続可能なエネルギー

世界の CO₂ 排出量は、2021 年の実績で約 366 億トンであり、エネルギー供給・消費に関連する主な内訳は、電力供給部門で約 144 億トン、最終エネルギー消費においては運輸部門で約 77 億トン、産業部門で約 93 億トン、民生部門で約 30 億トンなどとなっている¹⁷。

このような現状を踏まえ、カーボンニュートラルを達成するためには、電力供給部門においては《使用するエネルギーの脱炭素化》が重要な取り組みとなる。国際機関等のシナリオや各国の施策の大多数では、再生可能エネルギー(再エネ)(太陽光、風力、地熱、海洋など)利用の最大化が大前提となっている。電力供給部門で再エネ発電を最大限活用したクリーン電力に置き換えていくためには、太陽光発電、風力発電の発電コストを低減するとともに、電化を並行して進めていくことが求められている。IEA の NZE シナリオにおいては CO₂ 排出がネットゼロに至る 2050 年に、電化率は 50%強、電源構成再エネ比率は 80%以上にも達することが求められている(図 13)。

¹⁶ https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2020/11/GBS2020_IACGB-Communique.pdf

¹⁷ IEA WEO 2022 および 2021。

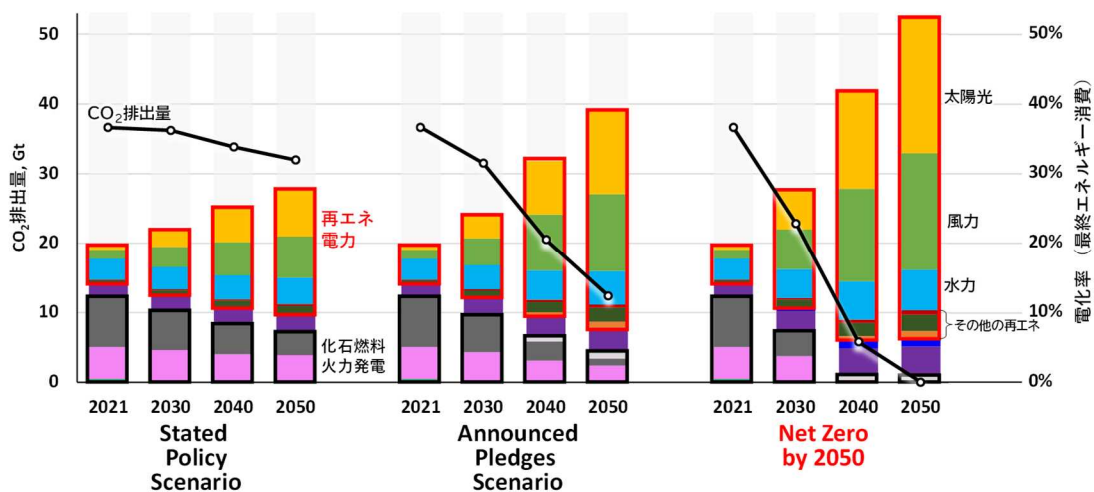


図 13 IEA WEO 2022 のシナリオごとの CO₂ 排出量、電化率、電源構成の見通し

出典: IEA WEO 2022 を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2022)

こうして大量に導入した再エネを長期安定的に最大限利用していくには、その変動性・分散性・偏在性に高度に適応したエネルギーシステムを実現する必要がある。このためには、二次エネルギー関連技術(貯蔵・輸送・転換)、エネルギーマネジメント技術、省エネルギー関連技術の開発が重要である。

二次エネルギー関連技術(貯蔵・輸送・転換)では、特に電化の拡大を踏まえて、高度な蓄電技術が必要不可欠である。また電力以外での貯蔵・輸送・転換も重要であり、よりエネルギー密度の高いエネルギーキャリアを利用する技術が必要である。バイオジェット燃料に代表されるバイオマスや微生物等を使った代替燃料の製造・利用技術に期待がかかる他、再エネ電力を利用した水素・アンモニアなどのカーボンフリー燃料へ転換し利用する技術が重視されている。

エネルギーマネジメント技術には、変動・分散・偏在する再エネの供給と需要のミスマッチを解消することが求められる。分散型エネルギーリソース(DER)を活用した電力ネットワークシステムその他、需要側を能動的にマネジメントするデマンドレスポンスの導入が必要となるが、他産業と連携したアグリゲーションビジネスとしての導入といった、新たな形での社会実装が模索されている。

省エネルギー関連技術は、既に実装段階にある技術も多いことから、いち早く着実に普及が拡大することで足下の《最終エネルギー消費の削減》に寄与することが求められている。さらに、将来のエネルギートランジションに要するリソースの消費とコストを抑制するために、パワーエレクトロニクス、ヒートポンプなど個別技術の開発に加えて、二次エネルギー関連技術やエネルギーマネジメント技術との組み合わせによる社会全体のエネルギー利用の合理化が求められる。

3-4 3つの社会システムの一体的取り組みの重要性

2章で挙げられた重要な取り組みは、それぞれ個別の社会システムの中で完結するものではない。

運輸部門や産業部門などでは、CO₂排出を完全にゼロにすることが難しい分野もあり、排出せざるを得ないCO₂を削減するためには《ネガティブエミッション技術》で相殺する必要があり、代表例がBECCSとDACCSである。BECCSはカーボンニュートラルなエネルギー利用としてバイオマス由来の燃料を燃焼して生じるCO₂を回収・貯留することで、ネガティブエミッションが達成される。また、BECCSに限らず、《バイオエコノミー》で取り上げたブルーカーボンやグリーンカーボンも、《サーキュラーエコノミー》の重要技術であるカーボンリサイクルの考え方が、《バイオエコノミー》との連携により具現化したものであると捉えられる。バイオマスや廃棄物等は、低いエネルギー投入で燃料や化学品に転換することが期待でき、カーボンリサイクルにとって貴重な炭素源であり、《バイオエコノミー》の進展に合わせて、サーキュラリティーを考慮した素材開発や使用後の資源循環技術とのカップリングが進むことで《最終エネルギー消費の削減》ならびに《非エネルギー起源のGHG削減》への寄与が期待できる。DACCSについては、どこでもCO₂回収できる利点があるが、従来技術ではCO₂回収に大量のエネルギーが必要となっている。実用化に向けては、技術革新によるエネルギー消費の低減とともに、《使用するエネルギーの脱炭素化》が必要であり、《持続可能なエネルギー》との連携が重要と言える。

《使用するエネルギーの脱炭素化》の取り組みは、カーボンニュートラルに向けて、いずれの《社会システム》を推進するためにも必要であり、エネルギー転換が前提となる。エネルギー供給設備の再エネ利用への置き換え・新設を世界的に展開していくには、原料・材料・エネルギーといったあらゆる資源が膨大に必要となることから、資源の安定調達が不可欠である。ロシアのウクライナ侵略で顕在化したセキュリティリスクの観点からも、サプライチェーンの多様化・非局在化を通じた安定化が望まれる。そのため、単位容量当たりの資源使用量の削減や代替材料・新材料の開発といった再エネ技術での技術革新に加えて、《サーキュラーエコノミー》によるリサイクルがサプライチェーンの中で社会システムとして機能することが求められる。加えて、再エネ利用を拡大する際には、陸域・海域の広範に開発が及ぶことから、生態系・生物多様性への影響や地域との共生を考慮する必要がある。さらに、発展途上国を中心に今後も増加が予測される人口を支える上で重要な食料供給のための土地利用への配慮も不可欠となっていることから、《バイオエコノミー》の視点に則った開発が求められる。

このように、《使用するエネルギーの脱炭素化》、《最終エネルギー消費の削減》、《ネガティブエミッション技術の導入》、《非エネルギー起源のGHG削減》の重要な取り組みを継続的に展開するためには、《サーキュラーエコノミー》、《バイオエコノミー》、《持続可能なエネルギー》の3つの社会システムを一体的に統合して推進することが極めて重要になる(図 14)。またこうした《3つの社会システム》を一体的に推進する上で、基盤となるDXが不可欠であり、その役割を次節に述べる。

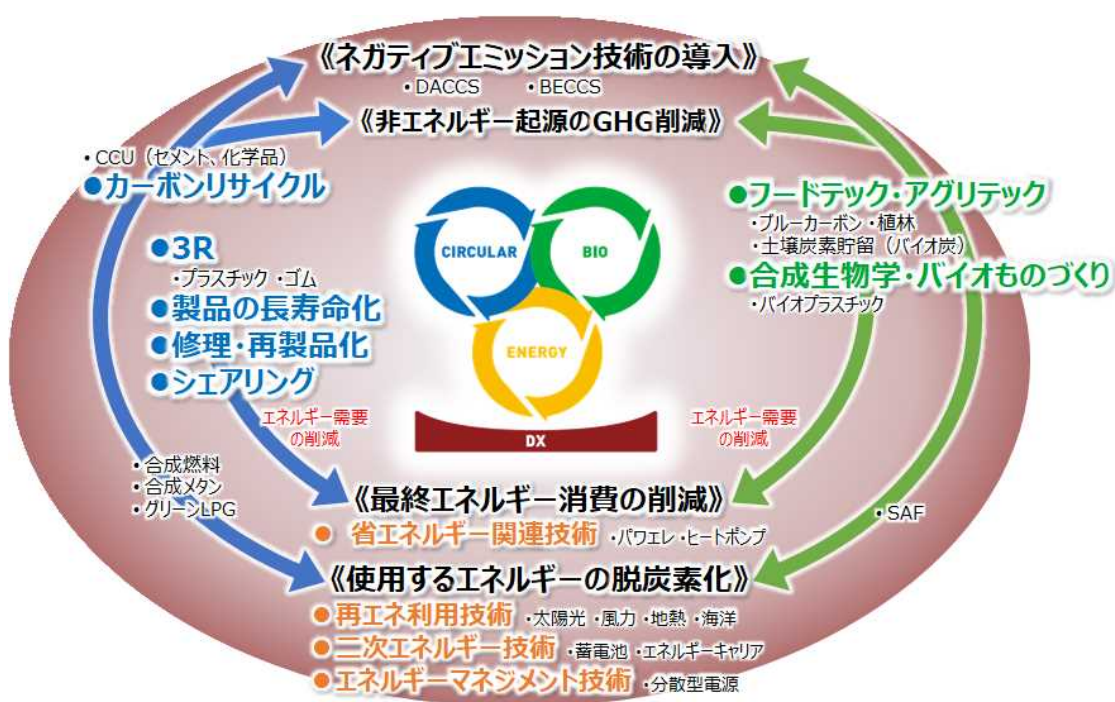


図 14 カーボンニュートラルに向けた《3つの社会システム》の一体的な取り組み

3-5 デジタルトランスフォーメーション

カーボンニュートラルは、DXの成果によって生み出される新たな価値の一つである。ただしDXは、カーボンニュートラル実現の直接的な手段に相当するわけではなく、カーボンニュートラルを実現するための様々な手段を下支えするものと位置づけられる。『2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略』においても、カーボンニュートラル実現にはDXが必要であることが明確に謳われている。

ITを活用して事業活動におけるカーボンニュートラルを進める《グリーン by IT》が導入されている。生産設備の稼働状況や在庫状況などを可視化するデジタイゼーションのレベルの《グリーン by IT》や、可視化したデータに基づく製造プロセス効率

化や在庫適正化といったデジタライゼーションのレベルの《グリーン by IT》がこれに相当するが、これらの導入は個々の社内あるいは工場内にとどまっている。多くの産業は、複数の会社が有機的に連結されたサプライチェーンの上で成り立っているため、社会全体のカーボンニュートラルを達成するためには、サプライチェーン全体でのグリーン by IT、すなわち DX のレベルでのグリーン by IT を達成する必要がある。《サーキュラーエコノミー》においては、リサイクルされる製品の情報を可視化して動脈産業と静脈産業で共有することで、GHG 排出を最小化するための設計やリサイクル工程の高度化、資源循環のトレーサビリティ確保への活用が期待される。また、《持続可能なエネルギー》においては電力ネットワークシステム上でのデータ連携に基づくエネルギーの需要・供給バランスの適正化、《バイオエコノミー》においてはフードチェーンなどに関わる企業間のデータ連携による LCA 評価や生産効率化への展開が考えられる。また、こうした DX による情報の可視化と正確な評価は、GX に要する技術的な実装を支えることに加えて、GX の取り組みへのインセンティブが適正に機能する上でも不可欠である。

DX によってサプライチェーン全体における《グリーン by IT》をどのように発展させていけば良いか、については、一般社団法人電子情報技術産業協会が示している¹⁸。生産設備や倉庫などに設置した IoT デバイスで消費電力量・生産量・GHG 排出量などを計測し、リアルタイムに集中管理サーバに集約する。集約されたデータに基づいて、電力量の調整・融通や、今後の需要予測に基づく生産計画調整などを行う。

《グリーン by IT》の取り組みの進展に合わせて、IT 機器そのものの消費電力を抑える《グリーン of IT》の取り組みも進められている。IEA の報告¹⁹によれば、2010 年から 2020 年の 10 年間でインターネットのトラフィックは 16 倍、データセンターの処理容量は 6 倍に増えたが、データセンターの消費電力は約 6% の増加にとどまっている。この理由は、従来のデータセンターからハイパースケールデータセンターへ置き換わりが進んだことで、電力効率が改善したから、と説明されている。しかしながら同機関は、2020 年代には 200 億台以上の IoT 機器と 60 億台のスマートフォンが常時接続されると予測しており、今後の動向を引き続き注視していくと述べている。

これまで述べたように、真の意味でカーボンニュートラルを実現するためには、グリーン by IT と、グリーン of IT の両立が必要であるが、両者を統合的にマネジメントする DX の推進が重要である。サプライチェーン上で関連する工場や同種の工場におい

¹⁸ 一般社団法人電子情報技術産業協会 (JEITA) ホームページ. Green × Digital コンソーシアム
<https://www.jeita.or.jp/japanese/pickup/category/2022/green-digital.html>

¹⁹ Data Centres and Data Transmission Networks (IEA, 2022)
<https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

て、グリーン by IT とグリーン of IT を統合的にマネジメントする DX を推進するには、次の 3 つの方法が必要になる(図 15)²⁰。

1. IT 機器の稼働に太陽光や風力といった地産地消の再エネを極力利用する。
2. 工場・製品ごとでの計測データを共有し、サプライチェーン全体の LCA 評価、電力需要予測、エネルギー配分最適化を進める。
3. データセンターを当該地域に設置し、ここでも再エネを活用する。

これらの方法は、3 つの社会システムの連携を進展させるグリーン of IT そのものといえる。

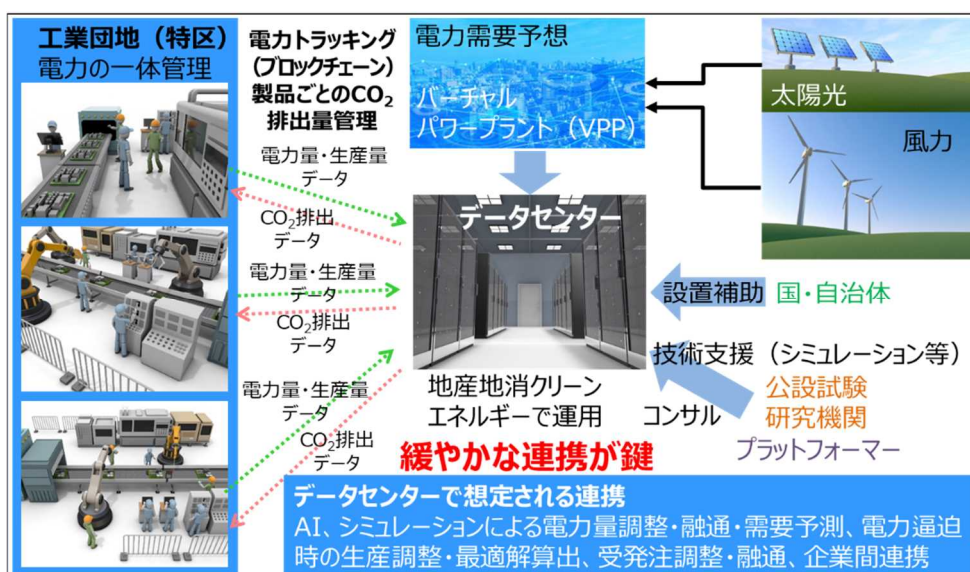


図 15 持続可能な生産を実現する地域連携 DX インフラの例

²⁰ TSC Foresight 短信「ものづくり分野における DX」(NEDO、2022)
https://www.nedo.go.jp/library/ZZNA_100071.html

4 章 重要技術の評価について

- 分野を超えて客観的に技術を判断するための評価の考え方として、《CO₂削減ポテンシャル》、《CO₂削減コスト》は重要な要素である。
- CO₂ 排出量削減に資する技術のうち、3 章で提示した技術を中心に、その《CO₂削減ポテンシャル》と《CO₂削減コスト》の試算を行った。
- このような試算は、技術的な要因に加えて、導入政策や社会受容性などの環境の変化によって増減し得ることから、関係者の知見を持ち寄り継続的な検証が重要である。
- エネルギー・環境分野の技術は、技術開発着手から経済効果発現まで 20 年近くかかることから、技術開発に早急に取りかかり、イノベーションを推進することが重要である。

4-1 重要技術の考え方

カーボンニュートラルの実現に向けて開発に取り組むべき重要技術を特定する際には、《CO₂削減ポテンシャル》と《CO₂削減コスト》を定量的に把握する必要がある。本章では、3 章において 3 つの社会システムと DX を《カーボンニュートラル達成への重要な取り組み》の着眼点で俯瞰して提示された重要技術領域を中心として、NEDO が技術開発内容を把握でき、その効果を試算できる個別の重要技術を選定し、その《CO₂削減ポテンシャル》と《CO₂削減コスト》の試算を行った。表 4 に、試算対象として選定した重要技術を示す。CO₂削減ポテンシャルを評価するにあたり、エネルギー供給部門の技術については発電分野に限定し、その他のエネルギー技術は最終消費段階での CO₂排出量削減への寄与として整理することとした。

表 4 試算対象として選定した重要技術

重要な取り組み	技術領域	重要技術	重要な取り組み	技術領域	重要技術
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術	次世代太陽光発電	使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	船舶 - アンモニア燃料
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術	次世代風力発電	最終エネルギー消費の削減	省エネルギー技術	次世代パワエレ
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術	次世代地熱発電	最終エネルギー消費の削減	省エネルギー技術	超電導
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術	海洋エネルギー発電	最終エネルギー消費の削減	省エネルギー技術	高効率冷房機器
使用するエネルギーの脱炭素化	省エネルギー技術	高効率火力発電	最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	カーボンサイクル	CCUS/カーボンリサイクル全般
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	水素発電	最終エネルギー消費の削減	カーボンサイクル	カーボンリサイクル - 基礎化学品
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	アンモニア発電	最終エネルギー消費の削減	カーボンサイクル	カーボンリサイクル - 機能性化学品
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	熱需要（産業） - 水素・アンモニア	最終エネルギー消費の削減	カーボンサイクル	カーボンリサイクル - 炭酸塩
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	水素還元製鉄（高炉法）	最終エネルギー消費の削減	リサイクル	タイヤリサイクル
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	熱需要（産業） - 合成メタン	最終エネルギー消費の削減	リサイクル	アルミニウムリサイクル
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術・省エネルギー技術	熱需要（民生・業務） - 再生熱	最終エネルギー消費の削減	リサイクル	プラスチックリサイクル
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	熱需要（民生・業務） - 合成メタン	最終エネルギー消費の削減	合成生物学・バイオものづくり	バイオ化成品
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	熱需要（民生・業務） - グリーンLPG	最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	合成生物学・バイオものづくり	セルロースナノファイバー
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	定置用燃料電池	最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	合成生物学・バイオものづくり	バイオプラスチック
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	自動車 - 燃料電池	ネガティブエミッション技術	フードテック・アグテック	ブルーカーボン
使用するエネルギーの脱炭素化	蓄電技術	自動車 - 次世代蓄電池	ネガティブエミッション技術	フードテック・アグテック	バイオ炭
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	自動車 - 合成燃料	ネガティブエミッション技術	フードテック・アグテック	植林・再生林
使用するエネルギーの脱炭素化	蓄電技術	航空機 - 次世代蓄電池	非エネルギー起源のGHG削減	フードテック・アグテック	農畜産業からのメタン
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	航空機 - バイオジェット燃料	非エネルギー起源のGHG削減	フードテック・アグテック	農耕地の亜酸化窒素（N ₂ O）
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	航空機 - 水素	最終エネルギー消費の削減	Green of IT	AIチップ
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア利用技術	船舶 - 水素燃料			

技術領域の色分け：サーキュラーエコノミー、バイオエコノミー、持続可能なエネルギー、デジタルトランスフォーメーション

4-2 CO₂削減ポテンシャルとCO₂削減コストの試算の考え方

総合指針 2023 で取り上げたいいくつかの技術に関しては、それぞれ技術の成熟度や社会的な背景が異なっている。ここでは、この異なる背景を考慮し、これらの技術を以下の4つの考え方に基づきCO₂削減ポテンシャルを試算した。

- A) 技術の普及率を仮定して試算したケース
- B) 専門機関の試算を参考にしたケース
- C) 政府や業界の目標もしくは見通しに基づいて試算したケース
- D) 最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

CO₂削減ポテンシャルは、技術進展の速度や技術革新等の技術的な要因に加えて、導入政策や社会的な受容性などの社会環境の変化によって増減する可能性がある。このような不確かさを考慮できる場合には、技術ごとに普及率等複数のシナリオを想定し、以下の算出式1を用い、2050年におけるCO₂削減ポテンシャルの試算を行った。

なお、付録には総合指針 2020 から総合指針 2023 にわたって検討した技術の CO₂ 削減ポテンシャルの試算結果と諸元の一覧を記載している。

総合指針の CO₂ 削減ポテンシャルの試算においては、各技術の成熟度に違いがあり、技術間で重複する部分もあるため、これらの合計値の扱いには注意が必要である。また、前述のように今回の試算は NEDO が技術開発内容を把握でき、その効果を試算できた技術のみを対象にしており、CO₂ 削減に資する全ての技術を含んでいない。

しかしながら、ここで挙げた技術の CO₂ 削減ポテンシャルは数億トンから数十億トンと高いレベルにあり、技術開発の推進によって、CO₂ 排出量の大幅削減に寄与することが期待される。

CO₂ 削減コストは、CO₂ 排出量を 1 トン削減するために要する費用であり、単位は円/tCO₂ で表される。総合指針では、将来開発される新たな CO₂ 削減技術(新技術)の社会実装による CO₂ 削減コストを、以下の算出式 2 を用い、試算を行った。

技術開発によって新技術のコストを十分に低減できれば、社会実装が加速されその結果 CO₂ 排出量の大幅な削減が可能になる。

また、今回取り上げた技術に関しては、CO₂ 削減ポテンシャルと同様に、それぞれ技術の成熟度や社会的な背景が異なっているため、ここでは以下の4つの考え方に基づき、CO₂ 削減コストの試算を行った。

- A) 学習曲線等の実績から想定されるケース
- B) 専門機関の試算を参考にしたケース
- C) 政府や業界の目標もしくは見通しに基づいて試算したケース
- D) その他のケース

式 1

$$\begin{aligned} & \text{CO}_2 \text{削減ポテンシャル}[\text{tCO}_2] \\ & = \text{導入量}[\text{固有単位}\ast] \times (\text{従来技術の排出原単位} - \text{新技術の排出原単位})[\text{tCO}_2/\text{固有単位}\ast] \\ & \ast \text{固有単位: Wh、J、t 等} \end{aligned}$$

式 2

$$\begin{aligned} & \text{CO}_2 \text{削減コスト}[\text{円}/\text{tCO}_2] \\ & = \frac{(\text{新技術の単価} - \text{従来技術の単価})[\text{円}/\text{固有単位}\ast]}{(\text{従来技術のCO}_2 \text{排出原単位} - \text{新技術のCO}_2 \text{排出原単位})[\text{tCO}_2/\text{固有単位}\ast]} \\ & \ast \text{固有単位: Wh、J、t 等} \end{aligned}$$

4-3 CO₂削減ポテンシャルの試算例

① 次世代太陽光発電

IEA WEO 2022 によれば、NZE シナリオでの 2050 年時点の、世界での太陽光発電(PV)による年間総発電量は 27,006TWh とされている。既往の技術の普及ならびに政策の継続を前提とする STEPS シナリオとの差分は 14,888TWh であり、これを次世代 PV 技術によるものと考え、化石燃料火力発電を置き換える想定で CO₂削減ポテンシャルとして試算すると約 91 億 tCO₂に相当する。

今後の技術開発により、超高効率、超軽量、柔軟性、高い意匠性などを兼ね備えた次世代 PV モジュールを実現し、設置・運用の技術が向上することで、従来技術では困難と考えられてきた様々な場所・用途への PV の大幅な導入拡大が可能となる。個別の設置場所・用途として、建物壁面(1.68TW)、車載(0.56TW)、農地(5TW)、内陸水上(2.3TW)への導入を想定し、それぞれで稼働率を勘案して発電量を算出し、CO₂削減ポテンシャルとして積み上げると 63 億 tCO₂となる。今後カーボンニュートラルの実現に向けて更なる CO₂削減ポテンシャルの積み増しが必要であり、道路等の都市インフラ、洋上、電動航空機などの新用途での利用拡大が考えられる。

② 水素発電

火力発電で使用される化石燃料を、水素に置換あるいは混焼することで、CO₂排出量を削減することが期待される。

水素は天然ガス火力発電での燃料置き換え・混焼が想定される。IEA WEO 2022 の STEPS シナリオでの 2050 年時点の天然ガス火力による発電量は 6,658TWh/年と見込まれており、このうち 5~15%が水素発電に置き換わると仮定して CO₂削減ポテンシャルを試算すると、1.07 億~3.20 億 tCO₂となる。この場合の水素導入量は、熱効率や燃焼時の発熱量から換算すると、1,370 万~4,111 万トンに相当する。

なお、この数値は利用段階のみの試算結果であり、水素製造、輸送・貯蔵、供給における CO₂排出量は今回試算していない。

③ 水素還元製鉄(高炉法)

従来の高炉による製鉄を水素還元製鉄に置き換えることで、CO₂排出量を削減することが期待される。

IEA Net Zero by 2050⁴によれば、2050年の世界の鉄生産量は2020年の実績17.87億t/年²¹に対して約10%増加し、このうち29%が水素還元製鉄に置き換わるとされ、水素還元製鉄の導入量は5.7億t-鉄/年に相当する。

従来技術の排出原単位は、現状の高炉(Blast Furnace)-転炉(Basic Oxygen Furnace)法の最新技術(Best Available Technology)の製造原単位を仮定すると、2.0 tCO₂/t-鉄²²となる。これに対して、新技術として COURSE50 における水素還元製鉄(高炉法)を考える。COURSE50 は従来の高炉技術比で30%のCO₂排出の削減が期待されており、2030年頃までに技術を確立し、2050年までの実用化・普及を目指している。これに相当する排出原単位は1.4 tCO₂/t-鉄²³となる。新技術の最大のポテンシャルとして水素還元製鉄の全てが COURSE50 の高炉法技術になると仮定する。

以上より、水素還元製鉄(高炉法)によるCO₂削減ポテンシャルを試算すると、3.4億tCO₂/年となる。

④ カーボンリサイクル／基礎化学品

石油等の化石燃料を原料とする従来基礎化学品製造を、Carbon Capture and Utilization(CCU)による基礎化学品製造に置き換えることでCO₂排出量を削減することが期待される。本試算で取り扱う基礎化学品は、C₂オレフィン(エチレン)とC₃オレフィン(プロピレン)である。

IEA The Future of Petrochemicals²⁴におけるClean Technology Scenario(CTS)では、2050年時点のエチレンとプロピレンの世界需要は合計で3.7億t-オレフィン/年と予測される。最大限の利用ポテンシャルとして考えれば、この世界需要の全量がCCUによる生産に置き換わる想定となる。

新技術ではCO₂を原料として固定しておりカーボンニュートラルと考えられるため、新技術によるオレフィンの排出原単位をゼロとした。なお、輸送・貯蔵におけるCO₂排出量については今回の試算には含めていない。

²¹ World Steel in Figures 2021 (World Steel Association, 2021)
<https://worldsteel.org/world-steel-in-figures-2021/>

²² Net-Zero Steel Sector Transition Strategy (Mission Possible Partnership, 2021) <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/10/MP-Steel-Transition-StrategyFinal-1.pdf>

²³ 日本鉄鋼連盟 COURSE50 <https://www.course50.com/>

²⁴ The Future of Petrochemicals (IEA, 2018)
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>

従来技術の排出原単位は、ナフサからの製造におけるエチレン、プロピレンの組成比²⁵と LCI データベース²⁶から 1.5tCO₂/t-オレフィンとした。

以上より、CCU による基礎化学品(C₂ オレフィン、C₃ オレフィン)の製造による CO₂ 削減ポテンシャルを試算すると、5.6 億 tCO₂/年となる。

⑤ プラスチックリサイクル

プラスチックは、使用後に焼却処分された場合、原料採掘から製品製造までの工程と同程度の CO₂ を排出するため、リサイクルによる大きな CO₂ 削減効果が期待される。ただし、現在でもプラスチックリサイクルは実施されているものの、CO₂ 削減の観点では効果の低いリサイクルプロセスも多い。今後、選別、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、エネルギー回収の各プロセスにおいて、技術革新が為されることで CO₂ 排出の削減が進むことが期待される。

IEA The Future of Petrochemicals²⁴では、2050 年のプラスチック生産量(PE、PP、PET、PS)が 4 億 t/年となる見通しが示されている。このうちの 10~30%が革新的なリサイクル技術に置き換わるとすると、導入量は 0.4~1.2 億トンとなり、CO₂ 削減ポテンシャルとして試算すると 1.1 億~3.2 億 tCO₂/年となる。

⑥ ブルーカーボン

ブルーカーボンは海洋生態系の生物活動により隔離・貯留される炭素の総称である。ブルーカーボンとしての炭素の隔離・貯留は、大気中の CO₂ が光合成によって主に浅海域に生息するブルーカーボン生態系に取り込まれることに始まり、その後の漂流や海底での埋没の過程など、一連の炭素の隔離・貯留のメカニズムは複雑である²⁷。そのため緩和ポテンシャル(CO₂ 削減ポテンシャルと同義、本項目のみ)の定量的評価は容易ではなく、いまだ大きな不確実性を伴っているのが現状である。

以下、最新の研究成果の一つとして、2022 年に ICEF から発表された報告書²⁸を引用する。同報告書では、同一のブルーカーボン生態系についても「生態系の損失と退化の阻止による緩和ポテンシャル(保全)」と、「生態系と生物の修復と回復による緩和ポテンシャル(修復)」を区別し、保全活動と修復活動による緩和

²⁵ TSC Foresight 「基礎化学品(ゴム原料の C4、C5)の原料多様化分野の技術戦略策定に向けて」(NEDO、2022) <https://www.nedo.go.jp/content/100952690.pdf>

²⁶ LCI データベース IDEA ver3.2.0 (2022/4/15), 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ

²⁷ 国土交通省ホームページ。ブルーカーボンとは「3. ブルーカーボンのメカニズム」
https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk6_000069.html

²⁸ Blue Carbon Roadmap (ICEF、2023)
https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2022_roadmap_Blue_Carbon.pdf

ポテンシャルを個別に試算している。2050 年までの緩和ポテンシャルとして、マングローブ、塩性湿地/干潟、海草藻場の保全と修復による緩和ポテンシャル、ならびに水産養殖による大型海藻類生産の増加による緩和ポテンシャルを積み上げて、ブルーカーボン全体の緩和ポテンシャルとして、5.0～13.8 億 tCO₂eq/年と試算している。なお、天然の大型海藻の保全・修復の効果は科学的情報に乏しいことから算出されていないが、ブルーカーボン生態系の中でも規模が大きく、大きな緩和ポテンシャルが期待されている。

⑦ バイオ炭

世界の土壌の炭素貯留量は約 1,700 GtC²⁹(約 62,000 億 tCO₂に相当)といわれ、陸域において最大の貯留量となっている^{30, 31}。また、これまで過去 12,000 年の間に、人為的な理由により、土壌に貯留されていた 133 GtC(約 4,900 億 tCO₂に相当)が失われたともされる³²。これらを踏まえて、土壌炭素貯留のポテンシャルは膨大と考えられ、その活用が望まれる。そのためには、土壌に投入された有機物が分解されて CO₂ が大気中へ放出されることを防ぐ必要がある。これを実現する様々な方法が考え得る中で、先進的な技術の一つとしてバイオ炭の施用が期待される。

バイオ炭は、バイオマス原料を熱分解して得られる炭化物の総称であり、100 年単位の長期にわたり難分解炭素として土壌に残存(炭素貯留)することで、大気への CO₂ 放出を抑制する。土質や土地利用状況、環境影響等への受容性などの条件によって導入可否が決まるため見込まれる導入可能量に大きな不確実性があり、各所で試算されている CO₂ 削減ポテンシャルには大きな幅がある。世界規模でのバイオ炭施用による CO₂ 削減ポテンシャルとしては、第 6 回グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループにおいて、26 億 tCO₂/年(3 億～750 億 tCO₂/年)程度と想定されている。また、IPCC「土地関係特別報告書」(第 50 回 IPCC 総会承認、2019 年)³³においては、0.3 億～66 億 tCO₂/年との試算が示されている。

²⁹ なお、1850～2019 年の世界の累積 CO₂ 排出量は約 24,000 億トンとされる (IPCC AR6 WG3)。

³⁰ Global Carbon Budget 2021 (Global Carbon Project, 2022)

<https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022/essd-14-1917-2022.pdf>

³¹ Chapter5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks, in: IPCC AR6 WG1

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter05.pdf

³² Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration (National Academies, Sciences, Engineering, and Medicine, 2019)

<https://nap.nationalacademies.org/read/25259/chapter/1> (2022 年 8 月アクセス)

³³ 正式名称:「気候変動と土地: 気候変動、砂漠化、土地の劣化、持続可能な土地管理、食料安全保障及び陸域生態系における温室効果ガスフラックスに関する IPCC 特別報告書」

⑧ 農畜産業からのメタン

農林水産業から排出されるメタンは、主に環境中や家畜の消化管内の微生物群の働きに起因する。この微生物群の働きを良好に制御することでメタン排出を抑制することが考え得る。特に、稲作、消化管内発酵、家畜排泄物の管理および排水処理からのメタンの排出は、発酵生物等が関与するものであり、生物関連資材等の機能性素材を活用する新技術によるメタン発生の抑制が期待される。

日本国温室効果ガスインベントリ報告書(2022年)³⁴によれば、日本のメタン排出(0.286億tCO₂eq/年)の約8割が農業分野による。このうち、消化管内発酵、家畜排泄物の管理、稲作でのメタン排出(合計0.22億tCO₂eq/年)が、新技術による削減の対象として考え得る。国内外での機能性素材等の活用によるメタン排出削減事例を参考に50%の削減効果を仮定し、さらに技術の導入率を20%と仮定すれば、日本国内の削減ポテンシャルは0.022億tCO₂eq/年となる。

世界の農業分野におけるメタン排出の状況は微生物群が置かれる環境の違いにより様々であると想定される。仮に家畜の消化管内発酵由来のメタンに限っては発酵環境の差異が小さいとし、世界での消化管内発酵由来のメタン発生量28.5億tCO₂eq/年³⁵から、国内ポテンシャルと同様の削減効果・導入率を仮定して世界での削減ポテンシャルを試算すると、約2.9億tCO₂eq/年となる。

ただし、メタン排出削減の事例は、研究初期段階のものも多く、実現性について継続的な注視が必要である。

⑨ 農耕地の亜酸化窒素 N₂O

IPCCの第5次評価報告書によれば、人為由来のN₂O排出の59%が農業由来とされる³⁶。さらに国連食糧農業機関(FAO)のインベントリデータ(2017年)によれば、農業分野でのN₂O排出は世界で730万t/年(約22.6億tCO₂eq/年³⁷)であり、その31.2%が化学肥料由来、9.9%が作物残渣由来である³⁵。農業分野におけるN₂O排出削減の従来技術は、適用できる作物種が限定されていることから、2050年においても現状の普及率(1%以下)が向上する見込みが小さく、従来技術によるN₂O排出削減ポテンシャルは無いに等しいと言える。N₂O還元作用を持つ特殊な根粒菌や、効果が高く汎用的な硝化抑制剤等を組み合わせ

³⁴ 日本国温室効果ガスインベントリ報告書(国立環境研究所、2022)

https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm10000017uzyw-att/NIR-JPN-2022-v3.0_J_G10web.pdf

³⁵ FAO インベントリ (FAOSTAT) <http://www.fao.org/faostat/en/#data>

³⁶ Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013)
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

³⁷ FAOSTAT (2021年アクセス)よりN₂OのGWPとしてIPCC第2次評価報告書(SAR)に基づく値(310)を使用。

るなどの新技術の導入により、食糧生産に影響することなく化学(窒素)肥料と作物残渣由来の N₂O 発生を劇的に削減することが期待される。

FAO によると、世界の農業由来の N₂O 排出の約 20%は Low-Income Food Deficit Countries(LIFDC)に占められる。N₂O 排出削減ポテンシャルを考える上で、収入や食糧事情の差を考慮し、こうした国々での新技術の普及が困難とすれば、80%の排出削減が上限となる。N₂O 源として作物残渣(2.2 億 tCO₂eq/年)と化学肥料(7.0 億 tCO₂eq/年)(以上 FAO 公表のデータ(2017)に基づく³⁸)に加えて、化学肥料合成時に発生する CO₂(4.5 億 tCO₂/年)³⁹を想定し、その 80%が削減されるとすると、最大の削減ポテンシャルとして 8.8 億 tCO₂eq/年となる。

土壌中の微生物反応(硝化・脱窒等)による直接的な N₂O 排出に限って考えると、作物残渣由来の 1.56 億 tCO₂eq/年、化学肥料由来の 4.58 億 tCO₂eq/年^{36, 40}が対象に考えられる。微生物反応の直接的な制御による N₂O 排出削減が期待されており、同じく 80%削減を前提とした削減ポテンシャルは 3.9 億 tCO₂/年となる。

4-4 CO₂削減コストの試算例

① 次世代太陽光発電(車載用 PV)

PV の均等化発電原価(LCOE: Levelized Cost of Electricity)の世界平均(約 5.3 円/kWh)⁴¹は既に化石燃料火力を下回っており、CO₂削減コストとしては既にマイナスの域にある(図 16 中の赤線)。日本国内でもコスト低減は着実に進み、事業用 PV については kWh 当たり 9 円台に突入している⁴²。今後も PV 製品の製造効率や発電効率の向上により、更なるコスト低減が可能とされる。その一方、PV の飛躍的な導入拡大には、適地制約の解消が重要な課題であり、設置場所・用途の拡大に資する超高効率・超軽量・柔軟性等の付加価値を有する次世代 PV が望まれる。ここでは、車載用 PV を対象とする試算例を示す。

IEA Energy Technology Perspectives 2016 によれば、2030 年の電動車の累積導入量は 140 万台、2050 年では 900 万台と見通される。仮に、PV 搭載率を仮

³⁸ FAOSTAT(2021 年アクセス)より N₂O の GWP として IPCC 第 2 次評価報告書 (SAR) に基づく値 (310) を使用。

³⁹ Industrial Ammonia Production Emits more CO₂ than any other Chemical-Making Reaction. C&EN. v. 97 Iss. 24 (2019)

<https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/Industrial-ammonia-production-emits-CO2/97/i24>

⁴⁰ FAOSTAT(2022 年 11 月アクセス)より N₂O の GWP として IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) に基づく値 (265) を使用。

⁴¹ Renewable Power Generation Cost in 2021 (IRENA, 2022)

<https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>

⁴² 第 82 回 調達価格算定委員会資料 1 (資源エネルギー庁、2022)

<https://www.meti.go.jp/shingikai/santei/082.html>

定し(2030年時点に1%、2050年に10~30%)、この間の年代を補間して積算すれば、車載用PVの累積導入量を算出できる。さらに業界のコストターゲット等を参考に新技術の普及開始時期の単価を仮定し(2030年に40万円/kW⁴³)、その後は累積導入量に従い一定の学習率(80%)で製造コストが低減されると想定できる。車載用PVの仕様についてはNEDOでの既往研究での検討に基づけば、容量1kW、稼働率10%⁴⁴が想定される。本試算では、以上に加えて、車載PV平均利用期間を12年と仮定し、発電コストを算出した。車載用PVに置き換えられる従来技術には、電動車の充電に使われる系統電力が相当する。図16に示すとおり、本試算の例では、導入開始から10~20年かけて、現在の太陽光発電と同等の域にまで低減される結果となっている。

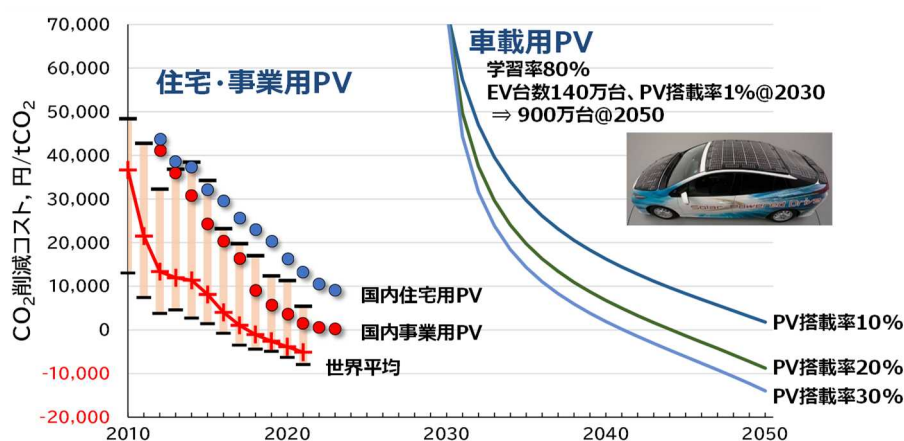


図 16 太陽光発電の CO₂ 削減コストの推移(実績と試算例)

出典: Renewable Power Generation Cost in 2021 (IRENA、2022)、第 82 回調達価格算定委員会資料 1(資源エネルギー庁、2022)、Energy Technology Perspectives 2016⁴⁵(IEA、2016)等を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2023)

② 水素発電

水素は『グリーン成長戦略』(経済産業省、2021年6月策定)において、供給コストを2030年に30円/Nm³、2050年に20円/Nm³まで低減することを目標としている。「発電コスト検証ワーキンググループ」(経済産業省、2021年9月報告書発行)に基づき、これらの水素コストを発電コストに換算するとそれぞれ17.2円/kWh、12.1円/kWhとなる。この政策目標をもとに、国内における水素発電の

⁴³ e.g. “Analysis for Potential of High-Efficiency and Low-cost Vehicle Integrated Photovoltaics” (Yamaguchi et al., 2022, WCPEC-8 講演内容)

⁴⁴ 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書 (NEDO、2018)
<https://www.nedo.go.jp/content/100873452.pdf>

⁴⁵ Energy Technology Perspective (IEA, 2016)
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2016>

CO₂削減コストを整理した(表 5)。2030 年時点では約 257,000 円/tCO₂程度となる。2050 年に水素コスト 20 円/Nm³を達成した場合の CO₂削減コストは 98,000 円/tCO₂となる⁴⁶。

このようなコスト低減の実現には、水素発電技術(燃焼器や更なる効率向上)の開発はもとより、水素調達(製造、輸送・貯蔵等)に係る技術開発も重要である。また、再生可能エネルギー(再エネ)由来の電力から水電解により水素製造を行う場合等においては、その再エネ電力コストが水素コストに大きく影響を与えることにも留意が必要である。

表 5 水素発電の CO₂削減コスト試算例

種別	水素発電		LNG 火力 (従来技術)
	30 円/Nm ³ ※1	20 円/Nm ³ ※1	
発電コスト(円/kWh)	17.2※2,3	12.1※2,3	9※6
CO ₂ 排出量(g/kWh)	0※4	0※4	318※5
CO ₂ 削減コスト(円/tCO ₂)	257,000	98,000	-

試算の詳細は付録に記載。

③ 水素還元製鉄

式 2(4-2 節)に従って CO₂削減コストを評価する上では、従来技術と新技術の双方の単価と CO₂排出原単位の数値が必要である。ただし、ここで新技術として対象とする水素還元製鉄(高炉法)については、いずれの数値も現時点で不確実性が大きく、CO₂削減コストを一意に評価することが困難である。そこで、新技術の CO₂削減コストを、新技術によるコスト増分(従来技術比)と CO₂排出原単位を変数とする、関数として評価することを考える。新技術によるコスト増分は式 2 の右辺の分子に相当する。従来技術の排出原単位としては、現状の高炉(Blast Furnace)-転炉(Basic Oxygen Furnace)法の最新技術(Best Available Technology)として 2.0 tCO₂/t-鉄²²が知られている。したがって、水素還元製鉄の導入によるコスト増分を c [円/t-製品]、CO₂排出原単位を p [tCO₂/t-製品]と置くと、CO₂削減コストは、

$$c/(2.0-p) \text{ [円/tCO}_2\text{]}$$

と表される。

以上により、水素還元製鉄(高炉法)の CO₂削減コストを、そのコスト増分と CO₂排出原単位の関数として表すと図 17 のようになる。ここでは水素還元製鉄

⁴⁶ 2022 年の EU 域内排出量取引制度 (EU-ETS) はおよそ 9,500 円/tCO₂~13,000 円/tCO₂程度を推移している。

の CO₂ 排出原単位を従来技術の 50%以上 100%未満の範囲として評価した。革新技術の排出原単位と、設備投資、製鉄プロセスコスト等に依存するコスト増分が決まれば開発目標としての CO₂ 削減コストを定量化できる。国によって異なるコストを負担するための制度や代替対象となる従来技術などによって導入可否が決定されることになると考える。

水素還元製鉄

従来技術（高炉-転炉）：2.0tCO₂/t-製品

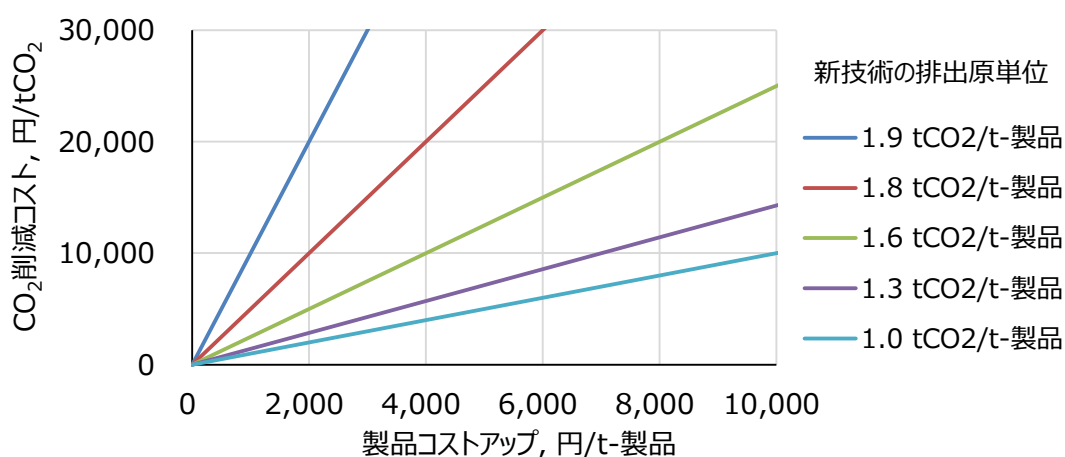


図 17 水素還元製鉄の CO₂ 削減コスト

出典：NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

④ カーボンリサイクル／基礎化学品

新技術として、代表的な基礎化学品である C₂ オレフィン(エチレン)、C₃ オレフィン(プロピレン)を CCU により製造することを想定し、この場合の CO₂ 削減コストを、CO₂ 排出原単位[tCO₂/t-製品]と製品コスト増分[円/t-製品]の関数として評価する。CCU による製造での CO₂ 排出原単位は、単位の製品製造プロセスでの CO₂ 排出量から、単位の製品に取り込まれる CO₂ の量を差し引いて考える。製造プロセスでの CO₂ 排出量は変数として p[tCO₂/t-製品]と置く。単位製品に取り込まれる CO₂ の量は、エチレン、プロピレンの分子量と、取込んで利用できる CO₂ 分子量の割合から算出し、いずれも 3.14 tCO₂/t-オレフィンとなる。ただし、CO₂ の分離回収に必要なエネルギーを 1.0 GJ/tCO₂ とし⁴⁷、これを天然ガス(50 kgCO₂/GJ⁴⁸)で賄うとすると、CO₂ 分離回収の排出原単位は 0.05 tCO₂(排出)

⁴⁷ カーボンリサイクル技術ロードマップ（経済産業省、2019）
<https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf>

⁴⁸ 算定・報告・公表制度における算出方法・排出係数一覧（環境省、2020）
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf

/tCO₂(回収)となる。これは、製品に取り込まれた CO₂ の 95%が削減に寄与することを意味する。以上より、CCU による基礎化学品製造での CO₂ 排出原単位は、 $p - 3.14 \times 95\%$ [tCO₂/t-オレフィン]となる。従来技術の排出原単位は、ナフサからの製造におけるエチレン、プロピレンの組成比²⁵と LCI データベース²⁶から 1.5 tCO₂/t-オレフィンとした。製品コストアップを c [円/t-製品]と置くと、式 2 (4-2 節)より、CCU による C₂オレフィン(エチレン)ならびに C₃オレフィン(プロピレン)の製造での CO₂削減コストは、

$$\frac{c}{1.5 - (p - 3.14 \times 95\%)} = \frac{c}{4.48 - p} \text{ [円/tCO}_2\text{]}$$

となる。

以上より、基礎化学品の C₂オレフィン(エチレン)、C₃オレフィン(プロピレン)について、CO₂削減コストと製品コストアップの関係を図 18 に示す。CCU による製造プロセスでの CO₂排出原単位は、下限を従来技術、上限を従来技術の排出原単位に製品取込分 CO₂を加えた値程度とした。この上限より大きければ CO₂は削減されない。革新技術の排出原単位と、設備投資、反応温度、触媒コスト等に依存する製品コストアップが決まれば開発目標としての CO₂削減コストを定量化できる。国によって異なるコストを負担するための制度や代替対象となる従来技術などによって導入可否が決定されることになると思われる。

C2, C3オレフィン

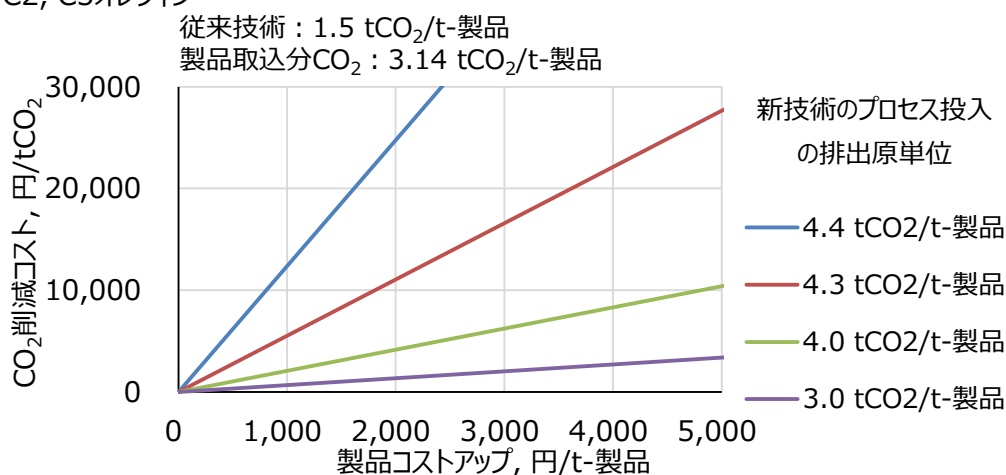


図 18 カーボンリサイクル/基礎化学品の CO₂削減コスト

出典: NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

⑤ プラスチックリサイクル

EU の試算¹⁵によるとプラスチック循環に関する様々な対策の削減コストは比較的安く、-10,000～5,700 円/tCO₂(1 USD=100 円で換算)の範囲である。この中でそのまま利用する農業分野のラッピングのリユースは最も低く-10,000 円/tCO₂、ケミカルリサイクルで 5,500 円/tCO₂、容器包装のパッケージングのリユースで 5,700 円/tCO₂などと試算されている。なお、回収したプラスチック製品をそのまま利用するリユースは、化学合成や成形加工プロセスが不要なため、バージンプラスチックからの製造品(従来技術)より安価となる。したがって、削減コストはその定義式からマイナスの値となる。このことは、経済合理性を有しつつ、CO₂の削減が可能であることを意味している。

4-5 戦略的な技術開発の推進に向けて

表 6 において、付録に掲載した技術も含めて、総合指針 2020 から総合指針 2023 にわたって試算した CO₂ 削減ポテンシャルを一覧表として示す。CO₂ 削減ポテンシャルを合計すると、431 億～888 億 tCO₂ 換算/年となることから、ここに挙げた技術が、カーボンニュートラルに向けて大きく寄与することが期待される。ただし、4-2 節にも述べたとおり、各技術の成熟度・確実性には違いがあり、競合技術間で重複する部分もあるため、合計値の取り扱いには注意を要する。成熟度・確実性の観点では、ネガティブエミッション技術の評価については、合計で 100 億 tCO₂ を超える大きな CO₂ 削減ポテンシャルが計上されたことから重要性が改めて示唆される一方で、炭素貯留メカニズムに関する理解やライフサイクルでの評価の不足などにより不確実性が大きい傾向にある。重複の観点では、蓄電池/各種合成燃料/水素/アンモニアは、熱需要/自動車/航空機/船舶といった同一の用途に利用される競合技術であり、想定している導入量に重複する部分がある。今後、カーボンニュートラルを確実に達成するためには、全ての重要な取り組み課題についてより広範に重要技術を抽出して技術革新と社会実装に取り組むことが重要である。

表 6 CO₂ 削減ポテンシャルの試算結果一覧

重要な取り組み	重要技術	億tCO ₂ /年	類型	重要な取り組み	重要技術	億tCO ₂ /年	類型
使用するエネルギーの脱炭素化	次世代太陽光発電	63~91	B	使用するエネルギーの脱炭素化	船舶 - アンモニア燃料	4.23	A,B
使用するエネルギーの脱炭素化	次世代風力発電	78	B	最終エネルギー消費の削減	次世代パワエレ	10.3~11	A
使用するエネルギーの脱炭素化	次世代地熱発電	2.5~2.7	B	最終エネルギー消費の削減	超電導	0.3	A
使用するエネルギーの脱炭素化	海洋エネルギー発電	0.2	B	最終エネルギー消費の削減	高効率冷房機器	5.3	A
使用するエネルギーの脱炭素化	高効率火力発電	0.9~2.8	A	最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	CCUS/カーボンリサイクル全般	76	B
使用するエネルギーの脱炭素化	水素発電	1.07~3.2	A	最終エネルギー消費の削減	カーボンリサイクル - 基礎化学品	5.6	D
使用するエネルギーの脱炭素化	アンモニア発電	2.96~8.89	A	最終エネルギー消費の削減	カーボンリサイクル - 機能性化学品	0.5	D
使用するエネルギーの脱炭素化	熱需要（産業） - 水素・アンモニア	26.1	A	最終エネルギー消費の削減	カーボンリサイクル - 炭酸塩	3.17	D
使用するエネルギーの脱炭素化	水素還元製鉄（高炉法）	3.4	D	最終エネルギー消費の削減	タイヤリサイクル	0.15	D
使用するエネルギーの脱炭素化	熱需要（産業） - 合成メタン	13.1	A	最終エネルギー消費の削減	アルミニウムリサイクル	0.7~1	A
使用するエネルギーの脱炭素化	熱需要（民生・業務） - 再生熱	9	B	最終エネルギー消費の削減	プラスチックリサイクル	1.1~3.2	A
使用するエネルギーの脱炭素化	熱需要（民生・業務） - 合成メタン	5.3	A	最終エネルギー消費の削減	バイオ化成品	1.23	A
使用するエネルギーの脱炭素化	熱需要（民生・業務） - グリーンLPG	5.3	A	最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	セルロースナノファイバー	2.2~2.7	A
使用するエネルギーの脱炭素化	定置用燃料電池	19.9	A	最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	バイオプラスチック	4.5~6.7	A
使用するエネルギーの脱炭素化	自動車 - 燃料電池	5.5~9.8	A	ネガティブエミッション技術	ブルーカーボン	5~13.8	B
使用するエネルギーの脱炭素化	自動車 - 次世代蓄電池	0.43~3.7	A	ネガティブエミッション技術	バイオ炭	26	B
使用するエネルギーの脱炭素化	自動車 - 合成燃料	4.6~6.9	A	ネガティブエミッション技術	植林・再生林	23	B
使用するエネルギーの脱炭素化	航空機 - 次世代蓄電池	1.2~2.81	A	非エネルギー起源のGHG削減	農畜産業からのメタン	2.9	D
使用するエネルギーの脱炭素化	航空機 - バイオジェット燃料	3.2~7.5	A	非エネルギー起源のGHG削減	農耕地の亜酸化窒素 (N ₂ O)	3.9~8.8	A,B
使用するエネルギーの脱炭素化	航空機 - 水素	5.9~13.7	A	最終エネルギー消費の削減	AIチップ	2.09~378	A,B
使用するエネルギーの脱炭素化	船舶 - 水素燃料	1.56	A,B				

2章に示したように、カーボンニュートラルの達成時には、CO₂削減量1トン当たり
に要するコストは5万円を上回る水準となり、CO₂削減コストの大幅な削減が急務で
ある。図19に新技術のCO₂削減コスト(赤線)と従来技術によるCO₂限界削減コスト
(青線)との関係を模式的に示す。図中①の赤の線のように技術開発で新技術のCO₂
削減コストが低減されれば、従来技術の限界削減コストを下回る時点から、急激に新
技術の普及が進む。それによって図中②の青の破線のように限界削減コストを低減
することが可能になる。図19は1つの新技術の例であるが、2050年にカーボンニュ
ートラルを達成するためには、あらゆる新技術においてイノベーションを実現すること
が求められる。

今後の技術開発においては、産業競争力の基本となる高性能化、低コスト化、信
頼性・安全性向上等の視点に、CO₂削減ポテンシャル、CO₂削減コスト、実用化時期、
技術開発の有効性等の分析も加えて総合的に判断し、重点化した戦略的取り組みが
行われていくことが重要である。特に、実用化時期については、NEDOのプロジェクト
を対象とした追跡調査⁴⁹において、エネルギー・環境分野の技術が、技術開発着手から

⁴⁹ 中長期研究開発プロジェクトにおけるアウトカムに関する考察：NEDO追跡調査データに基づく分析（N
EDO、2018） <https://dspace.jaist.ac.jp/dspace/handle/10119/15606>

経済効果発現まで 20 年近くかかることが示されている。したがって、イノベーションを実現する時期を考慮して早期に技術開発に取りかかることが重要である。

その一方で、省エネルギー技術など、技術成熟度が実装段階にあるにもかかわらず、導入にかかる初期コストが大きく投資回収に長い年月を要することなどを理由に、積極的な導入・普及に至っていない既往技術が、これまでの NEDO の開発成果においても散見されるのが実状である⁵⁰。カーボンニュートラルに向けたトランジションをいち早く進めていくには、こうした既往技術についても更なる初期コストの抑制や機器の耐久性・効率・利便性の向上といったブラッシュアップを図り、あらゆる技術を総動員することが重要である。

もっとも、カーボンニュートラルは、我が国だけで達成できるものではない。実用化された新技術については、日本国内で速やかに社会実装を進めるとともに、それらの技術が必要とされる世界各地に普及させていくことが重要である。日本が技術開発で世界全体の持続可能な社会の実現に貢献していくことが期待される。

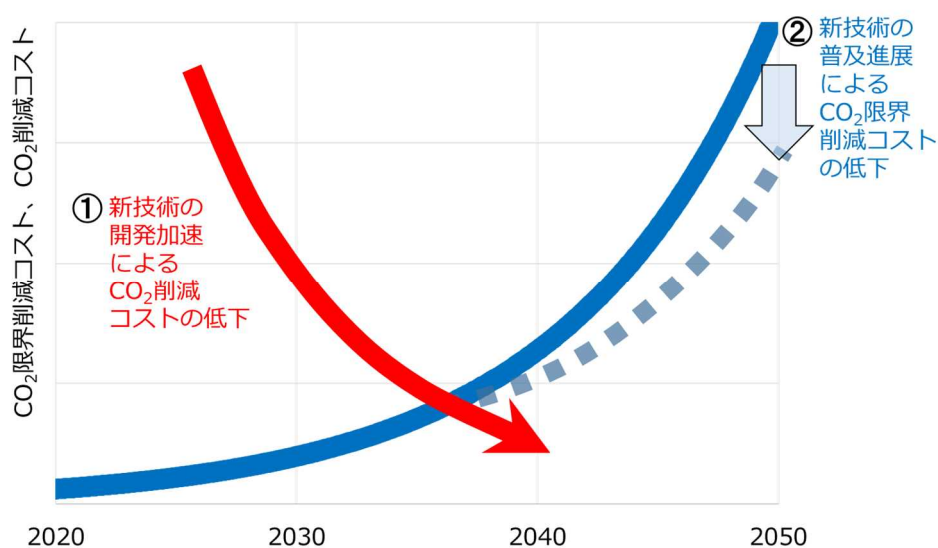


図 19 技術開発によるコスト低減との関係

出典：NEDO 技術戦略研究センター作成（2023）

⁵⁰ 石油プラントへの低位熱発電システムの適用（永田英紀、日本機械学会熱工学部門第 2 回湘南ワークショップ、2009） <https://www.jsme.or.jp/ted/WS2/nagata.pdf>

5章 イノベーションを促す仕組み作りへの期待

- 2050年カーボンニュートラルの実現に向けた大幅なCO₂排出量削減は、技術的にも経済的にも極めて高いハードルである。研究開発成果の社会実装によってイノベーションを創出するための包括的な仕組み作りが必要不可欠である。
- 世界各国で、研究開発から社会実装に進展させる大胆な政策支援が相次いで打ち出されている。我が国でも、2021年度からグリーンイノベーション基金事業をNEDOにおいて推進するとともに、政府においては、2050年カーボンニュートラル等の国際公約と経済成長・産業競争力を共に実現していくため、『GX実現に向けた基本方針』が閣議決定された。

これまで見てきたように、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、大幅なCO₂排出量の削減が必要であるが、これは技術的にも経済的にも極めて高いハードルである。多くの省エネ技術等既に確立している技術の着実な導入と技術開発によるコスト削減に加えて、社会を大きく変える可能性を有する革新的な技術については、研究開発成果の創出とその成果の社会実装を確実に進め、イノベーションを創出していくことが必要不可欠である。このため、総合的・客観的な評価の下で、気候変動問題の解決に資する有望技術を特定し、社会実装を強く意識した研究開発の推進とともに、研究開発成果の社会実装に関する制度面の支援策を充実し、イノベーションが創出される包括的な仕組み作りも必要である。

2050年カーボンニュートラルを目標に掲げた先進国を中心として、研究開発フェーズから社会実装フェーズにつなげる大胆な政策支援が相次いで打ち出されている。こうした取り組みはカーボンニュートラルを目指すと同時に、新たな産業・雇用の創出、水素等新たなエネルギー・産業インフラの整備、資源循環による資源確保等の側面を有し、その成否が企業・国家の競争力に直結する時代に突入している。

欧州では、『Horizon Europe』で総額955億ユーロによる基礎研究から実証、さらに実装までの支援のうち35%超を気候変動対策に寄与するものとして推進している。また、『欧州イノベーションファンド』においては、10年間で100億ユーロを投じ、製油所等のエネルギー多消費型産業、再生可能エネルギー、水素等によるエネルギー貯蔵、CCUS分野を対象として、温室効果ガス削減技術の実証を支援している。米国では、エネルギーセキュリティ確保と脱炭素化に3,690億ドルを投じる『インフレ抑制法(IRA: Inflation Reduction Act)』、CCUSやDAC等の研究開発、クリーンエネルギー実証や

電力インフラの強靱化・スマート化に総額 880 億ドルを投資する『インフラ投資雇用法』など、実証・導入支援に多くの予算を投入して社会実装を推進することとしている。

我が国では、2020 年 10 月『2050 年カーボンニュートラル』を宣言し、2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする目標を掲げた。従来の政府方針を大幅に前倒すこの目標は並大抵の努力で実現できるものではなく、エネルギー・産業部門の構造転換や、大胆な投資によるイノベーション創出といった現行の取り組みを一層加速することが必要となる。これを受けて、2021 年には、NEDO に 2 兆円のグリーンイノベーション基金を造成し、官民で野心的かつ具体的な目標を共有した上で、これに経営課題として取り組む企業等に対して、最長 10 年にわたる研究開発・実証から社会実装までの継続的な支援を開始した。さらに、2023 年 2 月には、エネルギー安定供給を前提に、2050 年カーボンニュートラル等の国際公約と経済成長・産業競争力を共に実現すべく、『GX 実現に向けた基本方針』が閣議決定された。同方針では、GX の実現に必要な今後 10 年で 150 兆円超の官民の関連投資を達成するために、GX 経済移行債を活用した国による 20 兆円規模の大胆な先行投資支援などの「成長志向型カーボンプライシング構想」を実現・実行するとされている。

このような取り組みの基盤として、産学の英知が集中して注入されるような魅力的な研究環境の整備に継続的に取り組むことが政府およびその関係機関に期待されている。研究開発を担う人材としては、エネルギー、バイオテクノロジー、サーキュラーエコノミー分野等における高い専門性を有しながら、情報技術を活用し専門領域を超える俯瞰的な視野を持った研究人材が必要である。さらに、研究成果・新技術は我が国だけにとどまらず世界に実装・普及されることが求められる。そのためにはプレーヤーとなる企業がグローバル市場を見据えた新たな事業を率先して展開していくことが求められる。ビジネスモデルの構築や投資、国内外の政策動向を踏まえたルール等の制度設計に積極的に関与していく人材、さらには分野・業種・国の垣根を越えた連携を牽引するリーダーシップを発揮する人材も必要である。こうした一連の課題に対して、産学官が各々の立場で果たすべき役割を着実に実行していくことが重要である。

こうした我が国の取り組みの中で、NEDO は、イノベーションの芽を見出し、社会実装するため「中長期技術開発の方向性提示」に取り組んでいる。総合指針 2023 は、最新の科学的知見を踏まえ、持続可能な開発の実現に向けた中長期技術開発の方向性を示したものである。このような中長期技術開発の方向性を踏まえつつ、世界に先んじてイノベーションの予兆をつかみ、日本の強み、優位性を活かした技術戦略の策定や政策エビデンスの提供等を通じて、産学官連携によるプロジェクトの実施につなげていく。そして、研究開発成果の社会実装を促進する「イノベーション・アクセラレーター」としての役割を強化し、今後も社会課題の解決に一層貢献していく。

6章 まとめ

総合指針の目的は、カーボンニュートラルに向けて、開発・実証に取り組むべき技術の評価の一助となることにある。そのために、《3つの社会システムとそれを支えるDX》に関連する技術を俯瞰し、その上でCO₂削減効果を総合的・客観的に評価することの重要性を提唱するとともに、最新動向に基づいて重要性の増した技術を提示し、《CO₂削減ポテンシャル》および《CO₂削減コスト》の試算の根拠と結果を示した。

持続可能な社会の実現のために、気候変動問題は世界共通の課題である。また世界がカーボンニュートラルへ加速する中、途上国支援やサプライチェーンでのセキュリティリスク等の社会課題が新たに顕在化している。脱炭素社会を実現する取り組みが一連の社会課題と気候変動問題の根本的な解決の手段であると改めて認識し、我が国が率先してイノベーションを創出する技術開発を推進することが求められる。

持続可能な社会の構築には、《3つの社会システムとそれを支えるDX》の一体的推進が不可欠であり、カーボンニュートラルに向けた重要な取り組みとして、《使用するエネルギーの脱炭素化》、《最終エネルギー消費の削減》、《ネガティブエミッション技術の導入》、《非エネルギー起源のGHG削減》を進めていく必要がある。

最新データの分析により、カーボンニュートラルを達成するための限界削減コストは低減傾向にあることが確認できたが、引き続き限界削減コストの削減に向けて、あらゆる技術を総動員してイノベーションの実現に取り組む必要がある。エネルギー・環境分野の技術は効果発現までに約20年かかることを念頭に、早期の開発着手が必要である。並行して、省エネ等の既往技術についても、トランジションの加速に向けて、更なる初期コストの抑制などのブラッシュアップを図る必要がある。さらに、カーボンニュートラルの先を見据えた Net Negative に資する技術開発についての議論を先行することも重要である。

また、カーボンニュートラルの実現に向けて、研究開発成果を実装してイノベーションを創出するための包括的な取り組みが必要である。

NEDO は、開発・実証に取り組むべき技術を特定していくために、今後も継続的に国内外の最新技術動向の把握とともに、外部機関との連携を図りながら、評価手法の向上や客観性の確保に努めていく。また、得られた結果や手法は、各方面の様々な評価に活用されるよう、NEDO の技術戦略等において定量的な評価を行うとともに、様々な NEDO の研究開発支援制度に総合指針が活用されるよう努めていく。

NEDO は、これからもイノベーションの芽を見出し、育て、社会実装する「イノベーション・アクセラレーター」としてその役割を強化し、「世界の気候変動問題の解決」、「持続可能な社会の実現への貢献」を目指し、社会課題の解決に一層貢献していく。

付録索引

重要な取り組み	技術領域	重要技術	CO ₂ 削減ポテンシャル	CO ₂ 削減コスト	重要な取り組み	技術領域	重要技術	CO ₂ 削減ポテンシャル	CO ₂ 削減コスト
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術	次世代太陽光発電	p.53	p.93	使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	船舶 - アンモニア燃料	p.71	
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術	次世代風力発電	p.54		最終エネルギー消費の削減	省エネルギー技術	次世代パワエレ	p.72	
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術	次世代地熱発電	p.54		最終エネルギー消費の削減	省エネルギー技術	超電導	p.74	
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術	海洋エネルギー発電	p.55		最終エネルギー消費の削減	省エネルギー技術	高効率冷房機器	p.79	
使用するエネルギーの脱炭素化	省エネルギー技術	高効率火力発電	p.55		最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	カーボンリサイクル	CCUS/カーボンリサイクル全般	p.80	p.105
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	水素発電	p.56	p.94	最終エネルギー消費の削減	カーボンリサイクル	カーボンリサイクル - 基礎化学品	p.80	p.96
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	アンモニア発電	p.56		最終エネルギー消費の削減	カーボンリサイクル	カーボンリサイクル - 機能性化学品	p.81	p.98
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	熱需要（産業） - 水素・アンモニア	p.57		最終エネルギー消費の削減	カーボンリサイクル	カーボンリサイクル - 炭酸塩	p.83	p.100
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	水素還元製鉄（高炉法）	p.58	p.104	最終エネルギー消費の削減	リサイクル	タイヤリサイクル	p.84	p.102
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	熱需要（産業） - 合成メタン	p.59		最終エネルギー消費の削減	リサイクル	アルミニウムリサイクル	p.85	
使用するエネルギーの脱炭素化	再生利用技術・ 省エネルギー技術	熱需要（民生・業務） - 再生熱	p.60		最終エネルギー消費の削減	リサイクル	プラスチックリサイクル	p.85	p.105
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	熱需要（民生・業務） - 合成メタン	p.61		最終エネルギー消費の削減	合成生物学・ バイオものづくり	バイオ化成品	p.86	
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	熱需要（民生・業務） - グリーンLPG	p.62		最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	合成生物学・ バイオものづくり	セルロースナノファイバー	p.87	
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	定置用燃料電池	p.63		最終エネルギー消費の削減 ネガティブエミッション技術	合成生物学・ バイオものづくり	バイオプラスチック	p.87	
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	自動車 - 燃料電池	p.65		ネガティブエミッション技術	フードテック・ アグリテック	ブルーカーボン	p.88	
使用するエネルギーの脱炭素化	蓄電技術	自動車 - 次世代蓄電池	p.66	p.95	ネガティブエミッション技術	フードテック・ アグリテック	バイオ炭	p.89	
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	自動車 - 合成燃料	p.67		ネガティブエミッション技術	フードテック・ アグリテック	植林・再生林	p.89	
使用するエネルギーの脱炭素化	蓄電技術	航空機 - 次世代蓄電池	p.68		非エネルギー起源のGHG削減	フードテック・ アグリテック	農畜産業からのメタン	p.90	
使用するエネルギーの脱炭素化	代替燃料利用	航空機 - バイोजェット燃料	p.69		非エネルギー起源のGHG削減	フードテック・ アグリテック	農耕地の亜酸化窒素（N ₂ O）	p.91	
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	航空機 - 水素	p.70		最終エネルギー消費の削減	Green of IT	AIチップ	p.92	
使用するエネルギーの脱炭素化	水素・アンモニア 利用技術	船舶 - 水素燃料	p.71						

付録1 CO₂削減ポテンシャルの試算例

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
次世代太陽光発電	63~91	A, B	<p>614 gCO₂/kWh × 9,720 TWh/年 + 188 gCO₂/kWh × 1,840 TWh/年 = 63 億 tCO₂/年</p> <p>614 gCO₂/kWh × 14,888 TWh/年 = 91 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/kWh (発電段階のみを想定)</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: 614 gCO₂/kWh (火力発電の平均 CO₂排出原単位) ※1、 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位) ※2</p> <p>c) 導入量, 置換量 (発電量): ~14,888 TWh/年</p> <p>d) 補足説明: ・ 91 億 tCO₂/年: IEA World Energy Outlook (WEO) 2022 の Net Zero Emission by 2050 (NZE)シナリオ(2050年)の太陽光発電の発電量 27,006TWh と同 Stated Policy Scenario (STEPS) シナリオにおける 12,118TWh の差 14,888TWh を次世代太陽光発電のポテンシャルと仮定し、火力発電を置き換える位置づけとして試算した。STEPS と NZE の差分として、例えば日本においてはグリーン成長戦略に基づく取り組みが述べられており、適地制約を解消する技術により後述の水上・農地・壁面・車載といった領域へ PV の導入を拡大することなどが考え得る。</p> <p>・ 63 億 tCO₂/年: 次世代太陽電池モジュールの導入を想定し、世界の内陸水面 1%で 2.3 TW、農地の 0.1%で 5 TW、建物壁面で 1.68 TW、車載で 0.56 TW が見込まれる。また、設備利用率は、それぞれ 15.2% (水上・農地)、9.6% (壁面)、8.7% (車載) と仮定した。内陸水面、農地については火力発電を直接置き換えるもの、壁面・車載は系統電力の消費を抑制するものと位置づけて整理。</p> <p>(水上) 2.3 TW × 24 時間 × 365 日 × 15.2% = 3,062.5 TWh (農地) 5 TW × 24 時間 × 365 日 × 15.2% = 6,657.6 TWh (水上+農地: 火力発電置き換え) 9,720 TWh (壁面) 1.68 TW × 24 時間 × 365 日 × 9.6% = 1412.8 TWh (車載) 0.56 TW × 24 時間 × 365 日 × 8.7% = 426.8 TWh (壁面+車載: 系統電力消費を抑制) 1,840 TWh</p> <p>※1 火力発電平均 CO₂排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS (2050年)での世界の火力発電の CO₂排出量 (7,891 MtCO₂) と発電量 (12,862 TWh) から算出。 ※2 系統電力消費の CO₂排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS (2050年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
次世代風力発電	78	B	<p>614 gCO₂/kWh × 12,776.9 TWh/年 = 78 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/kWh</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: 614 gCO₂/kWh (火力発電の平均 CO₂ 排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (発電量): 12,776.9 TWh/年</p> <p>d) 補足説明: IEA WEO 2022 の NZE シナリオ (2050 年)の風力発電の年間発電量 23,486.3 TWh と同 STEPS シナリオにおける 10,691.4TWh の差分 12,776.9 TWh を次世代風力発電のポテンシャルと仮定し、火力発電を置き換える位置づけとして試算した。 STEPS と NZE の差分として、例えば日本においてはグリーン成長戦略に基づく取り組みが述べられている。次世代風力発電の技術分野には、浮体式等の新技術や着床式のコスト低減の技術などが考えられる。</p> <p>※1 火力発電平均 CO₂ 排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS (2050 年)での世界の火力発電の CO₂ 排出量 (7,891 MtCO₂) と発電量 (12,862 TWh) から算出。</p>
次世代地熱発電	2.5~2.7	B	<p>614 gCO₂/kWh × 399~434 TWh/年 = 2.5 億~2.7 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/kWh</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: 614 gCO₂/kWh (火力発電の平均 CO₂ 排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (発電量): 399~434 TWh/年</p> <p>d) 補足説明: ・ 2.5 億 tCO₂/年: IEA WEO 2022 の NZE シナリオ (2050 年)の地熱発電の発電量 857 TWh と同 STEPS シナリオにおける 458 TWh の差を超臨界地熱や EGS (Enhanced Geothermal System) 等の次世代地熱発電のポテンシャルと仮定し、火力発電を置き換える位置づけとして試算した。 ・ 2.7 億 tCO₂/年: GeoVision, 2019 (https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/06/f63/GeoVision-full-report-opt.pdf) で検討されている「Deep EGS」の見通し 322 TWh に加えて、日本や欧州等で超臨界地熱や EGS の 30 万 kW 級の発電所が 50 か所程度 (112 TWh, 稼働率 85%) 導入されると想定した。</p> <p>※1 火力発電平均 CO₂ 排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS (2050 年)での世界の火力発電の CO₂ 排出量 (7,891 MtCO₂) と発電量 (12,862 TWh) から算出。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
海洋エネルギー発電	0.2	B	<p>614 gCO₂/kWh × 36.91 TWh/年 = 0.2 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/kWh</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: 614 gCO₂/kWh (火力発電の平均 CO₂ 排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (発電量): 28.44 TWh/年</p> <p>d) 補足説明: IEA WEO 2022 の NZE シナリオにおける 2050 年の海洋エネルギー発電の発電量 124.58 TWh と同 STEPS シナリオにおける 96.14 TWh の差を次世代型海洋エネルギー発電技術のポテンシャルと仮定し、火力発電を置き換える位置づけとして試算した。同 WEO 2022 において海洋エネルギー発電の次世代技術への明確な言及は為されていないが、海流、波力、潮流といった様々な発電方式での技術成熟度を高めて競争力のある発電コストを実現することが考えられる※2。</p> <p>※1 火力発電平均 CO₂ 排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS (2050 年) での世界の火力発電の CO₂ 排出量 (7,891 MtCO₂) と発電量 (12,862 TWh) から算出。 ※2 TSC Foresight Vol. 28, 「海洋エネルギー分野の技術戦略策定に向けて」(NEDO, 2018) https://www.nedo.go.jp/content/100880816.pdf</p>
高効率火力発電	0.9~2.8	A	<p>(362 - 295) gCO₂/kWh × 333~999 TWh/年 + (890 - 650) gCO₂/kWh × 295~884 TWh/年 = 0.9 億~2.8 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 295 gCO₂/kWh (天然ガス)、650 gCO₂/kWh (石炭)</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: 362 gCO₂/kWh (天然ガス)、890 gCO₂/kWh (石炭)</p> <p>c) 導入量, 置換量 (発電量): 333~999 TWh/年 (天然ガス)、295~884 TWh/年 (石炭)</p> <p>d) 補足説明: 再生可能エネルギーの大量導入に伴い、今後の火力発電には、高効率化のみならず、機動性、部分負荷、最低稼働などの特性向上が求められるため、新技術開発が必要である。新技術の排出原単位は、「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」想定天然ガス火力では GTCC と GTFC の平均値 (効率 60% 相当)、石炭火力では IGCC と IGFC の平均値 (効率 50% 相当) を採用した。 従来技術の排出原単位は IEA WEO 2022 の STEPS の天然ガス火力、並びに、石炭火力それぞれの発電量と CO₂ 排出量から求めた。 導入量は IEA WEO 2022 の STEPS で想定している天然ガス火力で 6,658 TWh、石炭火力で 5,892 TWh の 5~15% が新技術に置き換わると仮定した。 なお、機動性、部分負荷、最低稼働などの特性向上は、結果として太陽光発電等の変動性再生可能エネルギーの導入量を増やすことになるが、それらの効果は本試算に含まない。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
水素発電	1.07~3.20	A	$362 \text{ gCO}_2/\text{kWh} \times 294.6 \sim 883.8 \text{ TWh/年} = 1.07 \text{ 億} \sim 3.20 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ a) 新技術の排出原単位: 0 gCO ₂ /kWh (利用段階のみとして仮定) b) 従来技術の排出原単位: 362 gCO ₂ /kWh c) 導入量, 置換量 (発電量): 294.6~883.8 TWh/年 d) 補足説明: IEA WEO 2022 の STEPS シナリオ (2050 年)の天然ガス火力 (CO ₂ 回収無し) の発電量は 6,658 TWh/年と試算されており、このうち 5~15% (294.6~883.8 TWh/年) が水素発電に置き換わると仮定した。 ・天然ガス火力発電の CO ₂ 排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS (2050 年)での世界の天然ガス火力発電の CO ₂ 排出量と発電量から算出。 ・c) 導入量【参考値: 水素導入量換算】: 経済産業省令和 3 年度発電コスト検証ワーキンググループにて記載されている、天然ガス火力の熱効率 54.5%が水素発電にも適用されると仮定し、水素の高位発熱量 142 MJ/kg を利用して算出。 $294.6 \sim 883.8 \text{ TWh/年} \div 54.5\% \div 142 \text{ MJ/kg}$ $= 1,370 \text{ 万} \sim 4,111 \text{ 万 tH}_2/\text{年}$ なお、水素の製造・輸送・貯蔵における CO ₂ 排出量については今回の試算には含めていない。
アンモニア発電	2.96~8.89	A	$890 \text{ gCO}_2/\text{kWh} \times 332.9 \sim 998.7 \text{ TWh/年} = 2.96 \text{ 億} \sim 8.89 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ a) 新技術の排出原単位: 0 kgCO ₂ /kWh (利用段階のみとして仮定) b) 従来技術の排出原単位: 890 gCO ₂ /kWh c) 導入量, 置換量 (発電量): 332.9 ~ 998.7 TWh/年 d) 補足説明: IEA WEO 2022 の STEPS シナリオ (2050 年)の石炭火力 (CO ₂ 回収無し) の発電量は 5,892TWh/年と試算されており、このうち 5~15% (332.9~998.7 Wh/年) が、アンモニア発電に置き換わると仮定した。 ・石炭火力発電の CO ₂ 排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS (2050 年)での世界の石炭火力発電の CO ₂ 排出量と発電量から算出。 ・c) 導入量【参考値: アンモニア使用量換算】: 経済産業省令和 3 年度発電コスト検証ワーキンググループにて記載されている、天然ガス火力の熱効率 54.5%がアンモニア発電にも適用されると仮定し、アンモニアの高位発熱量 22.5 MJ/kg を利用して算出。 $332.9 \sim 998.7 \text{ TWh/年} \div 54.5\% \div 22.5 \text{ MJ/kg}$ $= 9,773 \text{ 万} \sim 2 \text{ 億 } 9,320 \text{ 万 tNH}_3/\text{年}$ なお、アンモニアの製造・輸送・貯蔵における CO ₂ 排出量については今回の試算には含めていない。

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
熱需要 (産業) ・水素・アンモニア	26.1	A	<p>52.2 億 tCO₂/年 × 1/2 = 26.1 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/MJ (利用段階のみとして仮定) b) 従来技術の排出原単位: N/A (様々な利用形態が想定され、データなし) c) 導入量, 置換量: 当該分野で消費される化石燃料の 1/2 を置換 d) 補足説明: "Global industrial CO₂ emissions in the Sustainable Development Scenario, 2019-2070" (IEA, Last updated 26-Oct-2022)において、各産業の"Process Emission" (エネルギーではなく原料由来排出) および"Steel" (熱およびプロセス要求上の石炭消費が主と考えられ、前者は別途「水素還元製鉄」の項目で議論)を除いた、熱需要による CO₂排出は、43.1 億 tCO₂。 同文献に記載のチャートにおいては、2019 年実績から 2050 年 STEPS にかけて Process Emission を含む Direct Emission 全体が約 1.21 倍になるとの予測 (90.2 億 tCO₂→109.2 億 tCO₂) なので、すべての排出源からの排出量が一律に 1.21 倍になるとの仮定を置き、上記 43.1 億 tCO₂にこれを乗じた 52.2 億 tCO₂が削減ポテンシャルの最大値であると試算した。 脱炭素化に向けては、電化・水素・アンモニア・バイオ燃料・合成メタンなど多様な選択肢が考えられるが、水素・アンモニア燃焼による脱炭素の寄与は最大で 1/2 程度であると仮定し、52.2 億 tCO₂ × (1/2) = 26.1 億 tCO₂が削減ポテンシャルであると試算した。 ・c) 導入量【参考値:水素・アンモニア使用量換算】: 削減ポテンシャル 34.8 億 tCO₂を算出の後、これらの排出がすべて天然ガスで賄われていたと仮定し、必要水素量を概算した。天然ガスの排出係数は 0.0135 tC/GJ (環境省)、水素の単位発熱量は 120 MJ/kgH₂ (低位発熱量) を使用した。 34.8 億 tCO₂ × (12/44) ÷ 0.0135 ÷ 120 MJ/kgH₂ = 5.85 億 tH₂/年</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
水素還元製鉄 (高炉法)	3.4	D	<p>570 百万 t/年 × (2.0 tCO₂/t - 1.4 tCO₂/t) = 342 百万 tCO₂/年 = 3.4 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 1.4 tCO₂/t-鉄 b) 従来技術の排出原単位: 2.0 tCO₂/t-鉄 c) 導入量, 置換量 (製鉄生産量): 570 百万 t-鉄/年 d) 補足説明: CO₂削減ポテンシャル [tCO₂/年] = 導入量[t/年] × (従来技術の排出原単位 - 新技術の排出原単位) [tCO₂/t] において、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 導入量(c): IEA Net Zero by 2050^{※1}における、2050年の製鉄生産量は2020年比約10%増加との記述(Figure 3.15)と、2050年の水素還元製鉄のシェア予測値29%の記述 (Table 3.3) 、並びに、2020年の世界の鉄生産量^{※2} 1,787 百万 t/年より試算した。 導入量 = 1,787 百万 t-鉄/年 × 1.1 × 29% = 570 百万 t-鉄/年 ・ 従来技術の排出原単位(b): 現状の高炉(Blast Furnace)-転炉(Basic Oxygen Furnace)法の最新技術(Best Available Technology)の製造原単位として 2.0t CO₂/t-鉄とした^{※3}。 ・ 新技術の排出原単位(a): COURSE50 における水素還元製鉄 (高炉法) ^{※4}の目標より、従来の高炉技術の30%削減の1.4 tCO₂/t 鉄とした。 ・ 普及率として、世界の水素還元製鉄のすべてが COURSE50 の高炉技術になると仮定した。 <p>※1 : Net Zero by 2050(IEA, 2021) https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf ※2 : World steel association, World Steel in Figures 2021 https://worldsteel.org/world-steel-in-figures-2021/ ※3 : Net-Zero Steel Sector Transition Strategy(Mission Possible Partnership, 2021) https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/10/MP-Steel-Transition-StrategyFinal-1.pdf ※4 : 日本鉄鋼連盟、COURSE50 : https://www.course50.com/technology/</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
熱需要 (産業) 、 合成メタン	13.1	A	<p>52.2 億 tCO₂/年 × 1/4 = 13.1 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/MJ (バイオマスから生成することを仮定) b) 従来技術の排出原単位: N/A (様々な利用形態が想定され、データなし) c) 導入量, 置換量: 当該分野で消費される化石燃料の 1/4 を置換 d) 補足説明:</p> <p>"Global industrial CO₂ emissions in the Sustainable Development Scenario, 2019-2070" (IEA, Last updated 26-Oct-2022)において、2019 年における各産業の"Process Emission" (エネルギーではなく原料由来排出) および"Steel" (熱およびプロセス要求上の石炭消費が主と考えられ、前者は別途「水素還元製鉄」の項目で議論)を除いた、熱エネルギー需要による CO₂排出は、43.1 億 tCO₂。同文献に記載のチャートにおいては、2019 年実績から 2050 年 STEPS にかけて Process Emission を含む Direct Emission 全体が約 1.21 倍になるとの予測 (90.2 億 tCO₂→109.2 億 tCO₂) なので、すべての排出源からの排出量が一律に 1.21 倍になるとの仮定を置き、上記 43.1 億 tCO₂にこれを乗じた 52.2 億 tCO₂が削減ポテンシャルの最大値と計算できる。</p> <p>本技術分野の合成メタンは、バイオマス由来の CO₂と、バイオマス由来あるいは再エネ由来の H₂から生成されることを想定する。このため、ここでの合成メタンはカーボンニュートラルとみなし※、排出原単位は 0 gCO₂/MJ とした。なお、合成メタンの製造・輸送・貯蔵における CO₂排出量については今回の試算には含めていない。</p> <p>脱炭素化に向けては、合成メタンの他にも、電化・水素・アンモニアなど多様な選択肢が考えられるが、バイオマス由来合成メタンの寄与は最大で 1/4 程度であると仮定し、43.1 億 tCO₂ × (1/4) × 1.21 = 13.1 億 tCO₂が削減ポテンシャルであると試算した。</p> <p>・ c) 導入量【参考値: 合成メタン導入量換算】: 削減ポテンシャル 17.4 億 tCO₂を算出の後、これらの排出がすべて天然ガスで賄われていたと仮定し、必要バイオマスエネルギーを概算した。天然ガスの排出係数は 0.0135 tC/GJ (環境省)を使用した。 34.8 億 tCO₂ × (12/44) ÷ 0.0135 = 35 EJ/年 これは、NEDO 再生可能エネルギー白書に示されている持続可能な資源利用を前提とした世界のバイオマスポテンシャル 200~500 EJ/年の範囲である。 また、メタンの低位発熱量 49.67 MJ/kg より、合成メタンの導入量は、7 億 t-CH₄/年と算出される。</p> <p>※2018 年度成果報告書 戦略策定調査事業/再生可能エネルギー由来水素等を活用する低環境負荷な内燃機関自動車用燃料に関する調査 (NEDO, 2020)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
熱需要 (民生・業務) ・再エネ熱	9	B	<p>(53.9 - 0) MtCO₂/EJ × (9.5 + 2.05) EJ/年 + (53.9 - 20.5) MtCO₂/EJ × (2.05 + 6.9) EJ/年 = 9 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 MtCO₂/EJ (バイオマス・太陽熱)、20.5 MtCO₂/EJ (地中熱・地域熱供給) (いずれも利用段階のみを考慮)</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: 53.9 MtCO₂/EJ</p> <p>c) 導入量, 置換量 (当該分野で消費される化石燃料の置換量): 9.5 EJ (バイオマス)、2.05 EJ (太陽熱)、2.05 EJ (地熱・地中熱)、6.9 EJ (地域熱供給での再エネ熱)</p> <p>d) 補足説明: ・ a) 再エネ熱の排出原単位: 地中熱・地域熱供給: ヒートポンプ使用が主と想定し、概算として一律に COP=3 を仮定、さらに IEA WEO 2022 の STEPS シナリオ (2050 年) より推定した電力消費の排出原単位 (61.6 MtCO₂/EJ) から、61.6 MtCO₂/EJ ÷ 3 = 20.5 MtCO₂/EJ ・ b) 従来技術の CO₂ 排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS (2050 年) で Building sector が約 30 EJ の天然ガスと約 9 EJ の石油を消費しており、これを代替することを想定し、燃料消費での発熱量当たりの CO₂ 排出量 (都市ガス: 49.8 MtCO₂/EJ、灯油: 67.8 MtCO₂/EJ、環境省^{※1}) の加重平均により算出 (従来技術の熱利用効率を 100% と仮定していることに相当する)。 (49.8 MtCO₂/EJ × 30 EJ + 67.8 MtCO₂/EJ × 9 EJ) ÷ (30 EJ + 9 EJ) = 53.9 MtCO₂/EJ ・ c) 再エネ熱の導入量: "World Energy Transitions Outlook 2022" (IRENA) の 1.5°Cシナリオを参考に導入量を推定した。ただし従来技術を基本とするような BAU シナリオについては言及されておらず、ここでは 1.5° シナリオでの 2019 年から 2050 年に新たに導入される技術を新技術と仮定した。 ・ 太陽熱: 2.05 EJ (3.1 EJ@2050, 1.05 EJ@2019 の差分として^{※2}) ・ バイオマス: 9.5 EJ (1.5° シナリオ 2050 年時点のバイオマス導入量は 2019 年までの伝統的なバイオマスの利用が、モダンバイオマスに全て置き換わったものとして、その全量を計上) ・ 地熱/地中熱: 2.05 EJ (3.1 EJ@2050, 1.05 EJ@2019 の差分として^{※2}) ・ 地域熱供給での再エネ熱利用: 6.9 EJ (7.3 EJ@2050, 0.4 EJ@2019 の差分として)</p> <p>※1: 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (環境省) ※2: "World Energy Transition Outlook 2022" (IRENA) では太陽熱と地熱/地中熱の導入量の合計値だけが記載されており、その割合は不明である。ここでは等分と仮定した。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
熱需要 (民生・業務) ・合成メタン	5.3	A	<p>{(0.0498 kgCO₂/MJ × 30 EJ/年) + (0.0678 kgCO₂/MJ × 9 EJ/年)} × 1/4 = 5.3 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 kgCO₂/MJ (バイオマスから生成することを仮定) b) 従来技術の排出原単位: 49.8 gCO₂/MJ (都市ガス), 67.8 gCO₂/MJ (灯油) c) 導入量, 置換量: 当該分野で消費される化石燃料の 1/4 を置換 d) 補足説明: STEPS シナリオでは 2050 年において Building sector は 30 EJ の都市ガスと 9 EJ の石油を使用しているが、これらが CO₂ 排出を伴う民生・業務部門の熱需要であると仮定した。これら都市ガス・石油による CO₂ 排出量計算においては日本国内の都市ガスおよび灯油を排出係数^{※1}として設定し、この総排出量のうち約 1/4 が合成メタンに置き換わる(残りが、水素、グリーン LP ガス、およびヒートポンプ含む電力)と考え、冒頭式のように CO₂ 削減ポテンシャルを試算した。本技術分野の合成メタンは、バイオマス由来の CO₂ と、バイオマス由来あるいは再エネ由来の H₂ から生成されることを想定する。このため、ここでの合成メタンはカーボンニュートラルとみなし^{※2}、排出原単位は 0 kgCO₂/MJ とした。なお、合成メタンの製造・輸送・貯蔵における CO₂ 排出量については今回の試算には含めていない。 合成メタンに置き換わる 9.8 EJ (= (30 EJ + 9 EJ) × 1/4) は、NEDO 再生可能エネルギー白書に示されている持続可能な資源利用を前提とした世界のバイオマスポテンシャル 200~500 EJ/年の範囲である。 ・c) 導入量【参考値: 合成メタン導入量換算】: 合成メタンの単位発熱量は、天然ガスの発熱量である 54.6 MJ/kg を使用した(環境省データ)。 {30 EJ (都市ガス) + 9 EJ (灯油)} × 25% ÷ 54.6 MJ/kg = 7.1 億 t/年</p> <p>※1 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧(環境省) ※2 2018 年度成果報告書 戦略策定調査事業/再生可能エネルギー由来水素等を活用する低環境負荷内燃機関自動車用燃料に関する調査(NEDO, 2020)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
熱需要 (民生・業務) ・グリーン LPガス	5.3	A	<p> $(49.8 \text{ gCO}_2/\text{MJ} \times 30 \text{ EJ}/\text{年} + 67.8 \text{ gCO}_2/\text{MJ} \times 9 \text{ EJ}/\text{年}) \times 1/4$ $= 5.3 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ </p> <p> a) 新技術の排出原単位: 0 kgCO₂/MJ (バイオマスから生成することを仮定) b) 従来技術の排出原単位: 49.8 gCO₂/MJ (都市ガス)、67.8 gCO₂/MJ (灯油) c) 導入量, 置換量: 当該分野で消費される化石燃料の 1/4 を置換 d) 補足説明: STEPS シナリオでは 2050 年において Building sector は 30 EJ の都市ガスと 9 EJ の石油を使用しているが、これらが CO₂ 排出を伴う民生・業務部門の熱需要であると仮定した。これら都市ガス・石油による CO₂ 排出量計算においては日本国内の都市ガスおよび灯油を排出係数^{※1}として設定し、この総排出量のうち 1/4 がグリーン LP ガスに置き換わる(残りが、水素、合成メタンおよびヒートポンプ含む電力)と考え、冒頭式のように CO₂ 削減ポテンシャルを試算した。 本技術分野のグリーン LP ガスは、バイオマス由来の CO₂ と、バイオマス由来あるいは再エネ由来の H₂ から生成されることを想定する。このため、ここでのグリーン LP ガスはカーボンニュートラルとみなし^{※2}、排出原単位は 0 kgCO₂/MJ とした。なお、グリーン LP ガスの製造・輸送・貯蔵における CO₂ 排出量については今回の試算には含めていない。 グリーン LP ガスに置き換わる 9.8 EJ (= (30 EJ + 9 EJ) × 1/4) は、NEDO 再生可能エネルギー白書に示されている持続可能な資源利用を前提とした世界のバイオマスポテンシャル 200~500 EJ/年の範囲である。 ・c) 導入量【参考値: グリーン LPG 導入量換算】: グリーン LP ガスの単位発熱量は、一般的な LP ガスの発熱量である 50.8 MJ/kg を使用した(環境省データ)。 $\{30 \text{ EJ (都市ガス)} + 9 \text{ EJ (灯油)}\} \times 25\% \div 50.8 \text{ MJ/kg} = 7.7 \text{ 億 t/年}$ </p> <p> ※1 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧(環境省) ※2 2018 年度成果報告書 戦略策定調査事業/再生可能エネルギー由来水素等を活用する低環境負荷な内燃機関自動車用燃料に関する調査(NEDO、2020) </p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
定置用燃料電池	19.9	A	<p>19.9 億 tCO₂/年 (= ①10.6 億 + ②4.7 億 + ③4.6 億 tCO₂/年)</p> <p>本試算では、燃料として水素を利用する定置用燃料電池による熱供給に絞って、CO₂排出削減効果の試算を行った。なお新技術である定置用燃料電池の排出源単位は、製造段階での CO₂排出を考慮し、ライフサイクルでの CO₂排出源単位を算出した。</p> <p>①家庭部門：(51.9 - 5.5) kgCO₂/GJ × 22.9EJ/年 = 10.6 億 tCO₂/年 a-① 新技術の排出原単位：5.5 kgCO₂/GJ b-① 従来技術の排出原単位：51.9 kgCO₂/GJ c-① 導入量, 置換量：22.9 EJ d-① 補足説明： 新技術の排出源単位は『平成 19 年 定置用燃料電池システム及び燃料電池自動車のライフサイクル評価に関する調査』より、熱出力 1.4kW の定置用燃料電池における製造時 CO₂排出量は 1,105 kgCO₂、運転時間は 4 万時間であることから熱の総出力は 5.6 万 kWh (=200 GJ) であり、これらの数値から排出源単位は 5.5 kgCO₂/GJ と算出した。 従来技術は既存の家庭用ガス給湯器として排出源単位は IEA WEO 2022 の STEPS に記載の天然ガス燃焼時の値を採用した。 世界の家庭部門のエネルギー量として、WEO 2022 の STEPS より、Residential の最終消費エネルギー量 106 EJ を引用した。また、資源エネルギー庁令和 2 年度におけるエネルギー需給実績より、日本の家庭部門の用途別エネルギー割合は給湯 27.4%、暖房 26.5%であり、これを世界における家庭部門の用途別エネルギー割合に代替した。ここで、家庭部門で導入される競合技術としてエコキュートとヒートポンプを考慮し、導入比率を以下の通り仮定した。日本ではヒートポンプの普及が進むと予想されるものの、世界では日本と比較して寒冷地が多いため以下の割合とした。 (暖房) エネファーム：ヒートポンプ = 30 : 70 (給湯) エネファーム：エコキュート = 50 : 50 よって、定置用燃料電池 (エネファーム) の導入量は暖房・給湯合計で、22.9 EJ と推定した。</p> <p>②業務部門：(56.4 - 5.5) kgCO₂/GJ × 9.2 EJ = 4.7 億 tCO₂/GJ a-② 新技術の排出原単位：5.5 kgCO₂/GJ b-② 従来技術の排出原単位：56.4 kgCO₂/GJ c-② 導入量, 置換量：9.2 EJ d-② 補足説明： 定置用燃料電池の排出源単位は①家庭部門で述べたとおりである。 従来技術は既存の暖房・給湯に使用される各燃料 (石炭、石油、ガス、電力) とし、それぞれの排出源単位は WEO 2022 の STEPS の値を採用した。また『図解エネルギー・経済データの読み方入門』(一般財団法人日本エネルギー経済研究</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
定置用燃料電池 (続き)	19.9	A	<p>所、2017) より、暖房・給湯使用時のエネルギー源割合を引用し、それぞれの排出原単位を乗じたものを従来技術の排出原単位とした。</p> <ul style="list-style-type: none"> 各燃料の排出原単位 (kgCO₂/GJ) 石炭：88.9、石油：56.3、天然ガス：51.9、電力消費：61.6 暖房使用時のエネルギー源割合 (%) 石炭：1.6、石油：58.4、ガス・熱：29.7、電力：10.3 給湯使用時のエネルギー源割合 (%) 石炭：7.7、石油：31.1、ガス・熱：55.0、電力：6.2 <p>『エネルギー経済統計要覧』（一般財団法人日本エネルギー経済研究所、2022）より、日本の暖房用・給湯用のエネルギー消費量はそれぞれ 48.7Pcal、49.1Pcal である。ここで、業務部門で導入される競合技術としてヒートポンプを考慮し、導入比率を以下の通り仮定した。</p> <p>(暖房) 定置用燃料電池：ヒートポンプ=50：50 (給湯) 定置用燃料電池：ヒートポンプ=80：20</p> <p>よって、定置用燃料電池の導入量は暖房・給湯合計で 266PJ と推定し、世界の最終エネルギー消費量（民生・農業・他）は日本が世界の 2.9% であることから、世界の暖房用・給湯用のエネルギー消費量を 9.2EJ と概算した。</p> <p>③産業部門：(51.9 - 5.5) kgCO₂ × 10.0 EJ = 4.6 億 tCO₂/GJ</p> <p>a-③) 新技術の排出原単位：5.5 kgCO₂/GJ b-③) 従来技術の排出原単位：51.9 kgCO₂/GJ c-③) 導入量, 置換量：10.0 EJ d-③) 補足説明： 定置用燃料電池の排出原単位は①家庭部門で述べたとおりである。 従来技術をボイラーとして、排出原単位は WEO 2022 の STEPS に記載の天然ガス燃焼時の値を採用した。 WEO 2022 の STEPS より 2050 年の産業全体のエネルギー量は 209 EJ であり、IEA Insight Series 2017 Renewable Energy for Industry From green energy to green materials and fuels より産業部門の最終エネルギー消費のうち熱利用の割合は 24% であることから、産業部門の熱による消費エネルギー量は 50.2 EJ と推定した。さらに、産業熱需要のうち燃料電池に置き換えることができる温度帯を 400°C 以下とすると、その割合は全体の 25% であり、定置用燃料電池に代替可能な熱エネルギー量は 12.5 EJ となる。 なお、産業部門に導入される競合技術として高温ヒートポンプが挙げられ、導入比率を以下の通り仮定した。 定置用燃料電池：高温ヒートポンプ=80：20 よって今回の試算における導入量は、10.0 EJ となる。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
自動車・燃料電池	5.5～9.8	A	<p>5.5 億～9.8 億 tCO₂/年 (= ①1.0～3.0 億 + ②4.5 億～6.8 億 tCO₂/年)</p> <p>① LDV (Light Duty Vehicle) $(38.7 - 2\sim4) \text{ gCO}_2/\text{km} \times 2.75 \text{ 兆}\sim 8.25 \text{ 兆 km/年} = 1.0 \text{ 億}\sim 3.0 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ a-① 新技術の排出原単位: 2～4 gCO₂/km b-① 従来技術の排出原単位: 38.7 gCO₂/km c-① 導入量, 置換量 (燃料電池自動車 (LDV) の合計走行距離): 2.75 兆～8.25 兆 km/年 d-① 補足説明 燃料電池自動車のうち、乗用車 (Light Duty Vehicle) を対象とし、試算した。 燃料電池自動車の排出原単位は、「The MIRAI LCA レポート」(トヨタ自動車、2015) より、2～4 gCO₂/km を引用した。 従来技術の排出原単位は、WEO 2022 の STEPS における CO₂ 排出量 24.7 億 t/年と、Energy Technology Perspective(ETP) 2017 の Reference Technology Scenario(RTS)における 2050 年予測の LDV の年間走行距離から求めた。年間走行距離を算出する際、LDV の輸送人員は 1 人、LDV の貨物重量は 1 t とした。その結果、2050 年度の LDV の年間走行距離の合計値は 63.9 兆 km/年となり、この値から排出原単位を求めた。 なお、ETP 2017 の RTS より、LDV のストック 25 億台の内訳は、内燃機関車 (HV も含む) と電動車 (EV、PHEV、FCEV) で、それぞれ 86%と 14%となっている。本試算では、内燃機関車を燃料電池自動車に代替するとした。したがって、置き換え対象である内燃機関車の年間走行距離の合計は 55.0 兆 km/年となる。更に、燃料電池自動車 (LDV) の普及率は内燃機関車の 5～15%と仮定し、燃料電池自動車の合計走行距離を試算した。 燃料電池自動車の全台数の合計走行距離 = 内燃機関車の年間走行距離の合計 × 燃料電池自動車の普及率 = 55.0 兆 km × 5～15% = 2.75 兆～8.25 兆 km/年</p> <p>② HDV (Heavy Duty Vehicle) $(287 - 2\sim4) \text{ gCO}_2/\text{km} \times 1.6 \text{ 兆}\sim 2.4 \text{ 兆 km/年} = 4.5 \text{ 億}\sim 6.8 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ a-② 新技術の排出原単位: 2～4 gCO₂/km b-② 従来技術の排出原単位: 287 gCO₂/km c-② 導入量, 置換量 (燃料電池自動車 (HDV) の合計走行距離): 17.8～26.6 兆 km/年 d-② 補足説明: 燃料電池自動車のうち、バス・トラック (Heavy Duty Vehicle) を対象とし、試算した。 燃料電池自動車の排出原単位は、「The MIRAI LCA レポート」(トヨタ自動車、2015) より、2～4 gCO₂/km を引用した。 従来技術の排出原単位は、WEO 2022 の STEPS における CO₂ 排出量 24.4 億 t/年と、ETP 2017 の RTS における 2050 年予測の HDV の年間走行距離から求めた。年間走行距離を算出する際、HDV バスの輸送人員は 50 人、HDV トラックの貨物</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
自動車・燃料電池 (続き)	5.5~9.8	A	<p>重量は 10 t とした。その結果、2050 年度の HDV の年間走行距離の合計値は 8.5 兆 km/年となり、この値から排出原単位を求めた。なお、ETP 2017 の RTS より、HDV のストック 2.4 億台の内訳は、内燃機関車 (HV も含む) と電動車 (EV、PHEV、FCEV) で、それぞれ 95%と 5%となっている。本試算では、内燃機関車を燃料電池自動車に代替するとした。したがって、置き換え対象である内燃機関車の年間走行距離の合計は 8.1 兆 km/年となる。更に、燃料電池自動車 (HDV) の普及率は内燃機関車の 20~30%と仮定し、燃料電池自動車の合計走行距離を試算した。</p> <p>燃料電池自動車の全台数の合計走行距離 = 内燃機関車の年間走行距離の合計 × 燃料電池自動車の普及率 = 8.1 兆 km × 20~30% = 1.6 兆~2.4 兆 km/年</p>
自動車・次世代蓄電池	0.43~3.7	A	<p>(46.9 - 36~45) gCO₂/km × 22.5 兆~33.7 兆 km/年 = 0.43 億~3.7 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 36~45 gCO₂/km b) 従来技術の排出原単位: 46.9 gCO₂/km c) 導入量, 置換量 (次世代蓄電池搭載の EV の合計走行距離): 22.5 兆~33.7 兆 km/年 d) 補足説明: 「革新的環境イノベーション戦略」においては、自動車から排出される CO₂ に対し、電動化や燃料の低炭素化等のあらゆる対策を講じた際の CO₂ 削減量は 60 億 t と試算されている。ここでは、家庭での充電を想定した EV (乗用車) を対象に次世代蓄電池の CO₂ 削減ポテンシャルを試算した。</p> <p>・EV の排出原単位は、2018 年時点の EV の単位走行距離当たりの電力使用量 0.19~0.24 kWh/km (5%の充電ロスを含む、IEA Global EV Outlook 2019) と、電力の排出原単位である 0.188 kgCO₂/kWh (WEO 2022 STEPS) から求めた。</p> <p>EV の排出原単位 = EV の単位走行距離当たりの電力使用量 × 電力の排出原単位</p> <p>・従来技術の排出原単位は、WEO 2022 における 2021 年の LDV からの CO₂ 排出量 30 億 t/年と、ETP 2017 における年間走行距離から求めた。年間走行距離を算出する際、LDV の輸送人員は 1 人、LDV の貨物重量は 1 t とした。その結果、2050 年度の HDV の年間走行距離の合計値は 63.9 兆 km/年となり、この値から排出原単位を求めた。</p> <p>なお、LDV のストック 24 億台の内訳は、内燃機関車 (HV も含む) と電動車 (EV、PHEV、FCEV) で、それぞれ 88%と 12%となっている。本試算では、内燃機関車を次世代蓄電池搭載の EV に代替するとした。したがって、置き換え対象である内燃機関車の年間走行距離の合計は 56.2 兆 km/年となる。更に、次世代蓄電池搭載の EV の普及率は内燃機関車の 40~60%と仮定し、次世代蓄電池搭載の EV の合計走行距離を算出した。</p> <p>(次世代蓄電池搭載の EV の合計走行距離) = (内燃機関車の年間走行距離の合計) × (次世代蓄電池搭載 EV の普及比率) = 56.2 兆 km/年 × 40~60% = 22.5 兆~33.7 兆 km/年</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
自動車 ↓ 合成燃料	4.6～6.9	A	<p>(287 - 0) gCO₂/km × 1.6 兆～2.4 兆 km/年 = 4.6 億～6.9 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/km (バイオマスから生成することを仮定)</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: 287 gCO₂/km</p> <p>c) 導入量, 置換量 (合成燃料を使用する貨物トラックの合計走行距離): 1.6 兆～2.4 兆 km/年</p> <p>d) 補足説明: 「革新的環境イノベーション戦略」においては、自動車から排出される CO₂ に対し、電動化や燃料の低炭素化等のあらゆる対策を講じた際の CO₂ 削減量は 60 億 t と試算されている。ここでは、バイオマス由来の CO₂ を原料として製造された合成燃料を使用するバスや貨物トラックなど HDV (Heavy Duty Vehicle) の CO₂ 削減ポテンシャルを試算した。 合成燃料 HDV の排出原単位は、合成燃料をバイオ由来としていることから、カーボンニュートラルとみなし※、0 gCO₂/km とした。なお、合成燃料の製造・輸送・貯蔵における CO₂ 排出量については今回の試算には含めていない。 従来技術の排出原単位は、WEO 2022 の STEPS における CO₂ 排出量 24.4 億 t/年と、ETP 2017 の RTS における 2050 年予測の年間走行距離から求めた。年間走行距離を算出する際、HDV バスの輸送人員は 50 人、HDV トラックの貨物重量は 10 t とした。その結果、2050 年度の HDV の年間走行距離の合計値は 8.5 兆 km/年となり、この値から排出原単位を求めた。 なお、ETP 2017 の RTS より、HDV のストック 2.4 億台の内訳は、内燃機関車 (HV も含む) と電動車 (EV、PHEV、FCEV) で、それぞれ 95%と 5%となっている。本試算では、内燃機関車を合成燃料 HDV に代替するとした。したがって、置き換え対象である内燃機関車の年間走行距離の合計は 8.1 兆 km/年となる。更に、合成燃料 HDV の普及率は内燃機関車の 20～30%と仮定し、合成燃料 HDV の合計走行距離を試算した。 合成燃料 HDV の全台数の合計走行距離 = 内燃機関車の年間走行距離の合計 × 合成燃料 HDV の普及率 = 8.1 兆 km × 20～30% = 1.6 兆～2.4 兆 km/年 WEO 2022 の STEPS における HDV の消費エネルギーは、39 EJ/年である。これは、NEDO 再生可能エネルギー白書に示されている持続可能な資源利用を前提とした世界のバイオマスポテンシャル 200～500 EJ/年の範囲である。</p> <p>※ 2018 年度成果報告書 戦略策定調査事業/再生可能エネルギー由来水素等を活用する低環境負荷な内燃機関自動車用燃料に関する調査 (NEDO、2020)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
航空機・次世代蓄電池	1.20～2.81	A	<p>1.95 億～4.55 億 tCO₂/年 × (1 - (231 gCO₂/kWh ÷ 603 gCO₂/kWh)) = 1.20 億～2.81 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 231 gCO₂/kWh b) 従来技術の排出原単位: 603 gCO₂/kWh c) 導入量, 置換量 (代替されるジェット燃料の CO₂ 排出量): 1.95 億～4.55 億 tCO₂/年 d) 補足説明: 「革新的環境イノベーション戦略」においては、IATA の長期目標に基づき、航空産業分野での電動化や燃料の低炭素化等の対策を講じた際の CO₂ 削減ポテンシャルは 20 億 t (経済産業省試算) となっている。ここでは、電動航空機の寄与分を試算する。次世代蓄電池を用いた国内線向け電動航空機として、系統電力から充電した次世代蓄電池のみで 1,000 km 程度飛行できると仮定した。なお、本試算では航空機の飛行に使われるエネルギー量までを考え、航空機と電動航空機の飛行に使われるエネルギー量を同じとした。</p> <p>電動航空機の排出原単位は、電力の排出原単位の 188 gCO₂/kWh (WEO 2022) に、電動航空機のエネルギー効率を 81% (モータ効率 95%、エネルギー変換効率 95%、蓄電池の充放電効率 90%として試算) と仮定して求めた。</p> <p>(電動航空機の排出原単位) = (電力の排出原単位) ÷ (電動航空機の効率) 従来技術の排出原単位は、ジェット燃料のカーボン排出原単位 0.0183 tC/GJ (環境省資料, https://www.env.go.jp/council/16pol-ear/y164-04/mat04.pdf) に基づき、0.0671 tCO₂/GJ とした。更に、航空機のジェットエンジン効率を 40% と仮定し、0.278 Wh/kJ の変換係数を用いて試算した。</p> <p>従来技術の排出原単位 = ジェット燃料の排出原単位 ÷ ジェットエンジンの効率 / 0.278 Wh/kJ 2050 年のジェット燃料による CO₂ 排出量は、2019 年 9 月欧州議会の公式見解 (欧州議会の見解: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2019/640169/EPRS_ATA(2019)640169_EN.pdf) で引用されている ICAO 合意の CO₂ 予測増加率 (2016 年) 「2005 年比で 300% ~ 700% 増加と予測」と IATA の報告書にある 2005 年のジェット燃料の CO₂ 排出量 6.5 億 t (IATA Airline Industry Economic Performance, https://www.iata.org/publications/economics/Reports/Industry-Econ-Performance/Central-forecast-midyear-2018-tables-v1.0.pdf, 2018) から試算した。2050 年のジェット燃料による CO₂ 排出量は、2005 年からの増加率 300% で 19.5 億 tCO₂/年、増加率 700% で 45.5 億 tCO₂/年。エネルギー消費量の割合は、国内線の半分、電動航空機が普及するとし、かつその普及率を国内線の 1/4 と仮定し、10%とした。なお、国内線でのエネルギー消費量の比率は、総消費量の 40% (IATA, Air Passenger Market Analysis, (October, 2020)) とした。</p> <p>代替されるジェット燃料の CO₂ 排出量 = 2050 年のジェット燃料による CO₂ 排出量 × 電動航空機の普及率 = 6.5 億 tCO₂/年 × 300~700% × 10% = 1.95 億～4.55 億 tCO₂/年</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
航空機・バイオジェット燃料	3.2～7.5	A	<p>(0.0671 - 0.03 tCO₂/GJ) × 8.75～20.35 EJ/年 = 3.2～7.5 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0.03 tCO₂/GJ b) 従来技術の排出原単位: 0.0671 tCO₂/GJ c) 導入量, 置換量 (代替されるジェット燃料): 8.75～20.35 EJ/年 d) 補足説明:</p> <p>「革新的環境イノベーション戦略」においては、IATA の長期目標に基づき、航空産業分野での電動化や燃料の低炭素化等の対策を講じた際の CO₂削減ポテンシャルは 20 億 t (経済産業省試算) となっている。ここでは、バイオジェット燃料の寄与分を試算する。バイオジェット燃料と水素は同じ領域での利用が想定されるので、おのおの半分ずつ、とする。2050 年にバイオジェット燃料と水素が普及し、国際線の消費量 (60%: IATA (2017) https://www.iata.org/contentassets/9faa9f69011d46c484d93e6dd97a7f52/passenger-analysis-jul-2017.pdf) の半分をバイオジェット燃料が担う、とする。バイオジェット燃料の CO₂排出原単位は、原料や製法によって様々である。本試算では、昨今の評価結果を※を参考に 0.03 tCO₂/GJ と仮定した。現状のジェット燃料の CO₂排出原単位は、ジェット燃料のカーボン排出原単位 0.0183 tC/GJ (環境省資料, https://www.env.go.jp/council/16pol-ear/y164-04/mat04.pdf) に基づき、0.0671 tCO₂/GJ としている。2050 年のジェット燃料の使用量については、CO₂排出量の予測を基に試算した。具体的には、2019 年 9 月欧州議会の公式見解 (https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2019/640169/EPRS_ATA(2019)640169_EN.pdf) で引用されている ICAO 合意の CO₂予測増加率 (2016 年) 「2005 年比で 300% ~ 700% 増加と予測」にある 300% ~ 700% の増加率を用いた。なお、2005 年のジェット燃料の CO₂排出量は 6.5 億 tCO₂/年である (https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airline-industryeconomic-performance---2018-mid-year---table/)。したがって、2050 年の国際線でのジェット燃料による CO₂排出量は、300% 増加率で 11.7 億 tCO₂/年、700% 増加率で 27.3 億 tCO₂/年となる。CO₂排出原単位の 0.0671 tCO₂/GJ を用いると、エネルギー消費量は 17.5～40.7 EJ/年となる。この半分なので、8.75～20.35 EJ/年となる。</p> <p>※ 例えば、令和元年度燃料安定供給対策に関する調査等 (経済産業省、2020) https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000447.pdf</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
航空機・水素	5.9~13.7	A	<p>$(0.0671 - 0.0 \text{ tCO}_2/\text{GJ}) \times 8.75 \sim 20.35 \text{ EJ}/\text{年} = 0.59 \text{ 億} \sim 1.37 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 tCO₂/GJ (利用段階のみとして仮定) b) 従来技術の排出原単位: 0.0671 tCO₂/GJ c) 導入量, 置換量 (代替されるジェット燃料): 8.75~20.35 EJ/年 d) 補足説明: 「革新的環境イノベーション戦略」においては、IATA の長期目標に基づき、航空産業分野での電動化や燃料の低炭素化等の対策を講じた際の CO₂削減ポテンシャルは 20 億 t (経済産業省試算) となっている。ここでは、水素燃料の寄与分を試算する。バイオジェット燃料と水素燃料は同じ領域での利用が想定されるので、おのおの半分ずつ、とする。2050 年にバイオジェット燃料と水素が普及し、国際線の消費量 (60%: IATA (2017) https://www.iata.org/contentassets/9faa9f69011d46c484d93e6dd97a7f52/passenger-analysis-jul-2017.pdf) の半分を水素が担う、とする。 水素の CO₂排出原単位は、ゼロである。 現状のジェット燃料の CO₂排出原単位は、ジェット燃料のカーボン排出原単位 0.0183 tC/GJ (環境省資料, https://www.env.go.jp/council/16pol-ear/y164-04/mat04.pdf) に基づき、0.0671 tCO₂/GJ としている。 2050 年のジェット燃料の使用量については、CO₂排出量の予測を基に試算した。具体的には、2019 年 9 月欧州議会の公式見解 (https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2019/640169/EPRS_ATA(2019)640169_EN.pdf) で引用されている ICAO 合意の CO₂予測増加率 (2016 年) 「2005 年比で 300% ~ 700% 増加と予測」にある 300% ~ 700% の増加率を用いた。なお、2005 年のジェット燃料の CO₂排出量は 6.5 億 tCO₂/年である (https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airline-industryeconomic-performance---2018-mid-year---table/)。したがって、2050 年の国際線でのジェット燃料による CO₂排出量は、300% 増加率で 11.7 億 tCO₂/年、700% 増加率で 27.3 億 tCO₂/年となる。CO₂排出原単位の 0.0671 tCO₂/GJ を用いると、エネルギー消費量は 17.5~40.7 EJ/年となる。この半分なので、8.75~20.35 EJ/年となる。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
船舶・ 水素燃料	1.56	A, B	<p>(9.2 億 - 0.0 億) tCO₂/年 × 17% = 1.56 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/MJ (利用段階のみとして仮定)</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: N/A</p> <p>c) 導入量, 置換量 (船舶部門のエネルギー消費): 17%</p> <p>d) 補足説明: IMO(国際海事機関)の第4次 GHG 調査 (2020, https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx) における Option1 の船舶ベース手法の整理で、2018 年は 9.2 億 t 排出。一方、2023 年の IMO 第 80 回の海洋環境保護委員会で、2050 年に、GHG 排出ネットゼロが決定されたので、新技術の排出はゼロと仮定した。</p> <p>他方、"Net Zero by 2050"(IEA, 2021)の NZE シナリオによれば、運輸部門 (船舶) のエネルギー消費の 17%が水素となっている。この比率を、上記 CO₂ の「削減可能な最大値」に対して乗じると、冒頭式のように CO₂削減ポテンシャルを試算できる。</p> <p>・ c) 導入量【参考値: 水素導入量換算】: 削減ポテンシャル 1.56 億 tCO₂を算出の後、これらの排出がすべて天然ガスで賄われていたと仮定し、必要水素量を概算した。天然ガスの排出係数は 0.0135 t-C/GJ (環境省)、水素の単位発熱量は 120 MJ/kg-H₂ (低位発熱量) を使用した。</p> <p>$1.56 \text{ 億 tCO}_2 \times (12/44) \div 0.0135 \div 120 \text{ MJ/kg-H}_2 = 2,630 \text{ 万 t-H}_2/\text{年}$</p>
船舶・ アンモニア燃料	4.23	A, B	<p>(9.2 億 - 0.0 億) tCO₂/年 × 46% = 4.23 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0 gCO₂/MJ (利用段階のみとして仮定)</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: N/A</p> <p>c) 導入量, 置換量 (船舶部門のエネルギー消費): 46%</p> <p>d) 補足説明: IMO の第 4 次 GHG 調査 (2020, https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx) における Option1 の船舶ベース手法の整理で、2018 年は 9.2 億 t 排出。一方、2023 年の IMO 第 80 回の海洋環境保護委員会で、2050 年に、GHG 排出ネットゼロが決定されたので、新技術の排出はゼロと仮定した。</p> <p>他方、"Net Zero by 2050"(IEA, 2021)の NZE シナリオによれば、運輸部門 (船舶) のエネルギー消費の 46%がアンモニアとなっている。この比率を、上記 CO₂ の「削減可能な最大値」に対して乗じると、冒頭式のように CO₂削減ポテンシャルを試算できる。</p> <p>・ c) 導入量【参考値: アンモニア導入量換算】: 削減ポテンシャル 4.23 億 tCO₂を算出の後、これらの排出がすべて天然ガスで賄われていたと仮定し、必要アンモニア量を概算した。天然ガスの排出係数は 0.0135 t-C/GJ (環境省)、アンモニアの単位発熱量は 18.6 MJ/kg-NH₃ (低位発熱量) を使用した。</p> <p>$4.23 \text{ 億 tCO}_2 \times (12/44) \div 0.0135 \div 18.6 \text{ MJ/kg-NH}_3 = 4.59 \text{ 億 t-NH}_3/\text{年}$</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
次世代 パワエ レ	10.3~11.0	A	<p>188 gCO₂/kWh × 5,462~5,843 TWh/年 = 10.3 億~11.0 億 t/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位： 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力削減量)：5,462~5,843 TWh/年 (= ①1,010 + ②428~809 + ③4,024 TWh/年)</p> <p>d) 補足説明： ① 分散電源用インバータ (世界: 1,010 TWh/年) IEA WEO 2022 の NZE シナリオから、2050 年の世界の太陽光発電の発電量を 27,006TWh、風力発電の発電量を 23,486TWh とした。更に、Si から SiC への置換による効率改善を 2%※2,3 と推定するとともに、2050 年時点での SiC への置換率を 100%と仮定し、消費電力削減量を試算した。 (27,006 + 23,486) TWh/年 × 2% = 1,010 TWh/年</p> <p>② 電動車 (世界: 492~930 TWh/年) IEA ETP 2017 によると、LDV ストック 24 億台の内訳は、内燃機関車 (HV も含む) が 88%と電動車 (EV、PHEV、FCEV) が 12%となっている。このうちの 40~60%を、次世代パワエレを搭載した EV に置き換えることを想定する。同じく ETP 2017 によれば、LDV の年間走行距離の合計値は 63.9 兆 km/年となっており、次世代パワエレ搭載 EV の年間走行距離は次の通り求められる。 (次世代蓄電池搭載の EV の合計走行距離) = (LDV の年間走行距離の合計) × (内燃機関車の割合) × (次世代パワエレ搭載 EV の普及比率) = 63.9 兆 km/年 × 88% × 40~60% = 22.5 兆~33.7 兆 km/年 電動車 (EV) の単位走行距離当たりの電力使用量は 0.19~0.24 kWh/km (5%の充電ロスを含む、IEA Global EV Outlook 2019) とし、Si から SiC への置換による効率改善を 10%※4、2050 年時点での SiC への置換率を 100%と仮定し、消費電力削減量を試算した。 (EV の消費電力削減量) = (EV の単位走行距離当たりの電力使用量) × (次世代蓄電池搭載の EV の合計走行距離) × (パワエレによる効率向上) = 0.19~0.24 kWh/km × 22.5 兆~33.7 兆 km/年 × 10% = 428~809 TWh/年</p> <p>③ その他：国内の推計に基づく項目 (世界: 4,024 TWh/年) 世界の電力削減量の推定が難しい以下の項目においては、一旦、日本国内の消費電力削減率(消費電力削減量÷発電量)を推定し、世界の発電量を乗ずることで推定した。世界および日本の発電量は、IPCC AR6 の 1.5°Cシナリオ (C1、C2) から 2050 年の世界と日本の発電量を抽出して平均値として求めた。 消費電力削減量 (世界) = 消費電力削減量 (日本) ÷ (日本の発電量) × (世界の発電量) = 82 TWh/年 ÷ 1,219 TWh/年 × 59,821 TWh/年 = 4,024 TWh/年 なお以下、2050 年時点での Si から SiC への置換率を 100%と仮定して試算した。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
次世代パワエレ (続き)	10.3~11.0	A	<p>③-1 家電 (エアコン、冷蔵庫) (日本国内) 2050年時でのエアコン、冷蔵庫一台あたりの年間電力消費量をそれぞれ950 kWh、520 kWh、各機器のストック台数を100百万台、60百万台と仮定した。更に、Si から SiC への置換による効率改善を6%^{※2}と仮定した。 $(950 \text{ kWh} \times 100 \text{ 百万台} + 520 \text{ kWh} \times 60 \text{ 百万台}) \times 6\% = 7.6 \text{ TWh}$</p> <p>③-2 コンピュータ関連 (日本国内) 予想生産量21.5百万台、ライフサイクルを3年としてストック量65百万台、消費150W、年間使用時間2,000時間とした。更に、Si から SiC への置換による効率改善を5%^{※5}と仮定した。 $0.15 \text{ kW} \times 2,000 \text{ h} \times 65 \text{ 百万台} \times 5\% \times 100\% = 1 \text{ TWh}$</p> <p>③-3 無停電電源装置 (日本国内) 無停電電源装置の消費電力を300W、年間使用時間8,760時間、年間生産台数が約20万台 (経済産業省生産動態統計)、耐用年数5年とするとストックは100万台と推計され、更にSi から SiC への置換による効率改善5%^{※5}を仮定した。 $0.3 \text{ kW} \times 8,760 \text{ h} \times 1 \text{ 百万台} \times 5\% \times 100\% = 0.1 \text{ TWh}$</p> <p>③-4 産業機器インバータ代替 (日本国内) 産業用電力需要が約3,500億 kWh、業務用電力需要が約2,000億 kWh (電気事業連合会、2010年度分電力需要実績、平成24年4月) に対し、モータでの電力使用比率がそれぞれ約70%と約60%と推計される^{※6}ため、モータの電力使用量は3,650億 kWhと予想される。また、汎用三相モータのインバータ化率は約37%^{※7}、Si から SiC への置換による効率改善を2%^{※2,3}と仮定した。 $3,650 \text{ 億 kWh} \times 37\% \times 2\% = 2.7 \text{ TWh}$</p> <p>③-5 インバータ化率向上 (日本国内) 産業機器インバータ代替(③-4)での試算と同様にモータの電力使用量は3,650億 kWhと予想される。Si から SiC への置換による小型化で、小型ポンプなどでもインバータ化が進むことが期待される。現在のインバータ化率37%^{※7}が80%に向上し、その際のインバータ化による省エネ効果が45%^{※7}と仮定した。 $3,650 \text{ 億 kWh} \times (80-37)\% \times 45\% = 70.6 \text{ TWh}$</p> <p>※1 系統電力消費のCO₂排出原単位: IEA WEO 2022のSTEPS(2050年)での世界の電力消費(151 EJ = 41,962 TWh)と発電部門全体のCO₂排出量(7,899 MtCO₂)から算出。 ※2 三菱電機技報 Vol.90, No.5, P.7-10, (2016) ※3 三菱電機技報 Vol.92, No.7, P.46-49, (2018) ※4 トヨタ自動車 2014年5月20日発表 (https://global.toyota.jp/detail/2657262) 等より推測 ※5 日立インダストリアルプロダクツ (https://www.hitachi-ip.co.jp/products/ups/products/uniparamini/index.html) 等より推測 ※6 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査 ((財)新機能素子研究開発協会、2009) ※7 日本電気工業会「持続可能な社会に貢献するインバータ」2021~2022年版</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
超伝導 (高圧地中送電ケーブル)	0.0051	A	<p>188 gCO₂/kWh × 2.73 TWh/年 ≒ 0.0051 億 tCO₂/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位： 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力削減量)：2.73 TWh/年</p> <p>d) 補足説明： 【1km あたりの省エネ量 (MWh/(年・km))】 ・省エネ量 = (現行ケーブルシステム損失量) - (超電導ケーブル通電損失量) - (冷却システム動力) である。275kV(POF)ケーブルと 66kV(POF)ケーブルの2種類の更新を想定する。文献※2 より、以下のように評価される。 ・275kV/1kA、3回線、送電容量 1,440MVA の老朽更新として、同じケーブルではなく、超電導ケーブル 66kV/4.0kA、3回線、送電容量 1,440MVA で更新する場合、359,784 MWh/(30年・20km)※2 ≒ 600 MWh/(年・km) ・66kV ケーブルの老朽更新として、同じケーブルではなく超電導ケーブル 66kV で更新する場合、文献※2 の 275kV/1kA、3回線、送電容量 1,440MVA を超電導ケーブル 275kV/1.5kA、2回線、送電容量 1,440MVA で更新する場合の 1/4 と同じ効果があると暫定的に仮定する。つまり、66kV/1kA、3回線、送電容量 360MVA を 66kV/1.5kA、2回線、送電容量 360MVA で更新すると考えると、51,496 MWh/(30年・20km)※2 の 1/4 で、≒ 21.5 MWh/(年・km) 【省エネ量 (TWh/年)】 最大導入ポテンシャルを計算する。 ・最大導入ポテンシャル (国内)：約 15,000km (275kV 級：約 1,800km、66kV 級：約 13,200km) (77kV 以上の地中電線路互長：1,770km、66kV 以下の地中電線路互長：13,200km より) ※3 ・599.6 MWh/(年・km) × 1,800 km + 21.5 MWh/(年・km) × 13,200 km ≒ 1,360 GWh/年 普及率を 50%と仮定すると、 ・最大導入ポテンシャル (国内) = 1,360 GWh/年 × 0.5 = 0.68 TWh/年 ・最大導入ポテンシャル (世界)：文献※4 より、国内の 4 倍とすると、680 GWh/年 × 4 ≒ 2.73 TWh/年</p> <p>※1 系統電力消費の CO₂排出原単位：IEA WEO 2022 の STEPS(2050年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。 ※2 平成 24 年度成果報告書 高温超電導電力機器の適用拡大と標準化に資するケーススタディ (NEDO) ※3 電気事業便覧 (平成 26 年版) ※4 「平成 26 年度 超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書 (NEDO)」における地中送電線の海外市場規模が国内比約 3 倍であるため、海外における地中送電線導入量は国内の 3 倍、すなわち世界は国内の 4 倍と仮定</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
超電導 (鉄道用直流電線)	0.028	A	<p>188 gCO₂/kWh × 14.9 TWh/年 ≒ 0.028 億 tCO₂/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位: 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力削減量): 14.9 TWh/年</p> <p>d) 補足説明: 【1km あたりの省エネ量 (GWh/(年・km))】 ・省エネ量: = (現行ケーブルシステム損失量) - (超電導ケーブル通電損失量) - (冷却システム動力) である。 直流電区間の、電圧: 1,500 V、電流値: ≦12 kA/1 回線の老朽更新を想定する。 同じケーブルで更新するのではなく、超電導ケーブルで更新すると、 69,589 MWh ÷ (30 年 × 3 km) (イ) ≒ 773 MWh/(年・km) 【国内の省エネ量 (TWh/年)】 最大導入ポテンシャル: 773 MWh/(年・km) × (6,354.5 + 5,452.0) km × (人口集中地区割合 66%) (ロ) ≒ 6,020 GWh/年 普及率を 50%と仮定して、 ・最大導入ポテンシャル (国内) = 6,020 GWh × 0.5 ≒ 3.0 TWh/年 【世界の省エネ量 (TWh/年)】 最大導入ポテンシャル: 国内省エネ量(3,010 GWh/年) × (世界の総線路長 1,370,000km/日本の総線路長 27,672 km) × (人口集中地区割合 10%) (ハ) = (3,010 GWh/年) × 49.5 × 0.1 ≒ 14,900 GWh/年 ・最大導入ポテンシャル (世界) = 14,900 GWh/年 = 14.9 TWh/年 <算出根拠> (イ) について 文献※2より CO₂削減量 (26,096 t-CO₂/3km) と CO₂排出原単位 (0.375 kg-CO₂/kWh)をもとに省エネ量 (kWh) を算出 (ロ) について 国内直流電化線路長: JR→6354.5km、民鉄→5452.0km。うち人口集中地区に導入されることを想定。人口集中地区は全長の 66%と想定※3。 (ハ) について 世界の総線路長で按分して推計。都市地区に導入されることを想定。総線路長のうち、人口集中地区の割合は 10%と仮定※3。</p> <p>※1 系統電力消費の CO₂排出原単位: IEA WEO 2022 の STEPS(2050 年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。 ※2 平成 24 年度成果報告書 高温超電導電力機器の適用拡大と標準化に資するケーススタディ (NEDO) ※3 平成 26 年度 超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書 (NEDO)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
超伝導 (MRI)	0.0001	A	<p>188 gCO₂/kWh × 0.055 TWh/年 ≒ 0.0001 億 tCO₂/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位： 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂ 排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力削減量)：0.067 TWh/年</p> <p>d) 補足説明： 【国内における省エネ量 (TWh/年)】 低温超電導 MRI の老朽更新として、同じ MRI ではなく、高温超電導 MRI で更新したとすると、 低温 MRI にて冷却に用いる年間消費電力 (kWh/(台・年)) × 1/1000³ (TWh に変換) × (保有台数 6,996 台) × (1 - 高温超電導冷却時温度 (°C) / 冷却時の液体ヘリウム温度 (°C)) = 78,840 (kWh/(台・年)) × 1/1000³ × 6,996 台 × (1 - 263°C/269°C) (i) ≒ 0.012 TWh/年 【世界における省エネ量 (TWh/年)】 (0.012 TWh/年)/0.222 (r) ≒ 0.055 TWh/年 <算出根拠> (i)について 現行 MRI にて冷却に用いる年間消費電力は企業ヒアリングによる。我が国における MRI 保有台数は 6,996 台と仮定※2。 (r)について 世界の MRI 年間販売台数に占める日本の割合：22.2%※3。</p> <p>※1：系統電力消費の CO₂ 排出原単位：IEA WEO 2022 の STEPS(2050 年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂ 排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。 ※2：OECD Health Statistics 2021 (https://www.oecd.org/els/health-systems/health-data.htm)の 2020 年データより ※3：平成 30 年度日系企業のモノ、サービス及びソフトウェアの国際競争ポジションに関する情報収集 (NEDO)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
超電導 (磁気誘導加熱装置)	0.013	A	<p>188 gCO₂/kWh × 7.03 TWh/年 ≒ 0.013 億 tCO₂/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位： 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力削減量)：7.03 TWh/年</p> <p>d) 補足説明： 【国内の省エネ量 (TWh/年)】 磁気誘導加熱装置の老朽更新として、同じ装置ではなく、超電導コイルを有する装置で更新したとすると、 [(磁気誘導加熱装置に超電導を適用することによる機器の省エネ量) (i) - (20~30K 程度に HTS コイルを保つための冷凍機損失)] (ii) × 1000 台 (iii) = [(5MW × 8,760h/年 × 0.2 × 0.25) - (0.00724MW × 1 × 8,760h/年)] × 1000 ≒ (2,190 - 63) MWh/年 × 1000 = 2,130 GWh/年 【世界における省エネ量 (TWh/年)】 2,130 GWh/年 × 2.3 + 2,130 GWh/年 (iv) = 7.03TWh/年 <算出根拠> (i)について ・ 設備容量 5 MW (1~10MW の中間値) ・ 稼働率 20%と仮定 ・ 省エネ率 25% (コイル部の消費電力が 20~30%) (ii)について ・ 冷凍機損失(kW) = 7.2 + 0.04 = 7.24 (冷凍機稼働率 100%) ただし、HTS コイルの励磁電源の消費電力は考慮しない。 (iii)について ・ 導入台数は 1,000 台と仮定※2。 (iv)について ・ 海外は日本の 2.3 倍と仮定※2。 <補足> ・ 使用冷凍機は SRP-082B2S-F70H (住友重機械工業、冷却能力 40W@77K の熱負荷に対応) を想定 ・ 消費電力は 7.2 kW (50Hz) ・ 定格通電電流は 300~450 A ・ 冷凍機損失 = 冷却機消費電力+電流リード損失。300K→77K の侵入熱に対する冷却機消費電力を想定。電流リード損失は 36~40 W 程度。 ・ コイル間接続部の発熱、クライオスタットの侵入熱については、いずれも電流リード侵入熱に比べて桁違いで小さいため、無視。</p> <p>※1：系統電力消費の CO₂排出原単位： IEA WEO 2022 の STEPS(2050 年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。 ※2：平成 26 年度 超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書 (NEDO)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
超電導 (産業用モーター)	0.13	A	<p>188 gCO₂/kWh × 68 TWh/年 ≒ 0.13 億 tCO₂/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位： 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力削減量)：68 TWh/年</p> <p>d) 補足説明： 【国内の省エネ量 (TWh/年)】 産業用モーターの老朽更新として、同じモーターではなく、超電導モーターで更新したとすると、 現行産業用モーターの年間消費電力 (MWh/年) (i) × 超電導化による効率向上分 (n) × 1/1000 (GWh に変換) - (20~30K 程度に HTS コイルを保つための冷凍機損失) = [(0.7MW × 0.65 × 8,760h/年 × 25,500 台) × 0.025 + (2.5MW × 0.65 × 8,760h/年 × 10,400 台) × 0.035] × 1/1000 - (0.00724MW × 1 × 8,760h/年 × 35,900 台) × 1/1000 ≒ 5.44 TWh/年 【世界における省エネ量 (TWh/年)】 5.44 TWh/年 ÷ 0.08 (h) ≒ 68 TWh/年 <算出根拠> (i)について ・ 0.7MW 機が 2.55 万台、2.5MW 機が 1.04 万台導入されていると仮定※2。 ・ 年間稼働率：65%と仮定 (n)について ・ 高温超電導モーターによる単位当たり効率向上 - 0.7MW 機 2.5%/台 - 2.5MW 機 3.5%/台 (h)について ・ 日本のモーターは世界のモーターの 8%と仮定※2。</p> <p>※1：系統電力消費の CO₂排出原単位：IEA WEO 2022 の STEPS(2050 年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。 ※2：平成 26 年度 超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書 (NEDO)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
超電導 (発電機)	0.12	A	<p>188 gCO₂/kWh × 65 TWh/年 ≒ 0.12 億 tCO₂/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位： 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力削減量)：65 TWh/年</p> <p>d) 補足説明： 2050 年の世界発電量合計 49,845 TWh※2 のうち、火力、水力、原子力等のタービン発電機によるものを 65%とし、その発電機部分に超電導を適用することにより、発電効率が 1%向上※3 すると仮定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最大導入ポテンシャル：49,845 TWh/年 × 0.65 × 0.01 ≒ 324 TWh/年 普及率を 20%と仮定すると、 ・最大導入ポテンシャル (世界) = 324 TWh/年 × 0.2 = 65 TWh/年 <p>※1：系統電力消費の CO₂排出原単位：IEA WEO 2022 の STEPS(2050 年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。</p> <p>※2：IEA, WEO 2022 の STEPS の 2050 年の数値より</p> <p>※3：武居秀実、「超電導発電機」、電気学会誌、124 巻 7 号、2004 年</p>
高効率冷房機器	5.3	A	<p>188 gCO₂/kWh × 2,800 TWh/年 ≒ 5.3 億 tCO₂/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位： 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位) ※1</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力削減量)：2,800 TWh/年</p> <p>d) 文献※2 より、高効率冷房機器の導入により世界のエアコン用の電力需要が 2,800 TWh 削減できると仮定した。</p> <p>ここで期待される冷房機器の高効率化は 2050 年において SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) が 5.5 程度から 8.5 程度への改善に相当する。</p> <p>※1：系統電力消費の CO₂排出原単位：IEA WEO 2022 の STEPS(2050 年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。</p> <p>※2：The future of cooling (IEA, 2018)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の類型

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位：kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
CCUS	76	B	d) 補足説明： IEA Net Zero by 2050 に示される、2050 年の NZE シナリオにおける CCUS による削減ポテンシャルとして 76 億 tCO ₂ /年と試算した。
カーボンリサイクル ー基礎化学品	5.6	D	<p>370 百万 t/年 × 1.5 tCO₂/t = 555 百万 tCO₂/年 = 5.6 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位： 0 tCO₂/t-オレフィン b) 従来技術の排出原単位： 1.5 tCO₂/t-オレフィン c) 導入量, 置換量： 370 百万 t-オレフィン/年 (2050 年世界需要予測) d) 補足説明： 従来技術として、石油を原料とする基礎化学品の製造を対象とし、新技術として、CCU (Carbon Capture and Utilization) による基礎化学品製造での CO₂削減を考える。基礎化学品は、C₂オレフィン (エチレン)、C₃オレフィン (プロピレン) を対象とし、世界で最大限利用する場合を考える。 CO₂削減ポテンシャル [tCO₂] = 導入量[t] × (従来技術の排出原単位 - 新技術の排出原単位) [tCO₂/t] において、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ c) 導入量： 最大限の利用ポテンシャルとして、IEA The Future of Petrochemicals における、CTS(Clean Technology Scenario)による 2050 年世界需要予測のエチレン分とプロピレン分を加えた値とした^{※1}。世界需要の全量が CCU による生産に置き換わると仮定し、エチレン 220 百万 t/年 + プロピレン 150 百万 t/年 = 370 百万 t-オレフィン/年を導入量とする。 ・ 新技術の排出原単位 (a)：CO₂を原料として固定しておりカーボンニュートラルと考えられるため、新技術によるオレフィンの排出原単位をゼロとした。なお、輸送・貯蔵における CO₂排出量については今回の試算には含めていない。 ・ 従来技術の排出原単位 (b)：ナフサからの製造におけるエチレン、プロピレンの組成比^{※2}と LCI データベース^{※3}から 1.5 tCO₂/t-オレフィンとした。 <p>※1：The Future of Petrochemicals(IEA、2018) https://iea.blob.core.windows.net/assets/bee4ef3a-8876-4566-98cf-7a130c013805/The_Future_of_Petrochemicals.pdf ※2：TSC Foresight Vol. 109, 「基礎化学品(ゴム原料の C4、C5)の原料多様化分野の技術戦略策定に向けて」(NEDO、2022) https://www.nedo.go.jp/content/100952690.pdf ※3：LCI データベース IDEA ver3.2.0 (2022/4/15), 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
カーボンリサイクル 機能性化学品	0.5	D	<p>○ポリカーボネート(DPC) 19百万 t/年 × 0.20 tCO₂/t = 3.7百万 tCO₂/年 = 0.04億 tCO₂/年 a) 新技術の排出原単位: 7.49 tCO₂/t-DPC b) 従来技術の排出原単位: 7.69 tCO₂ eq/t (ポリカーボネート CFP) c) 導入量, 置換量: 19百万 t/年 (2050年世界需要予測) d) 補足説明: 製品取込分 CO₂: 0.21 tCO₂/t-DPC</p> <p>○ポリウレタン(MDI) 76百万 t/年 × 0.33 tCO₂/t = 25.3百万 tCO₂/年 = 0.25億 tCO₂/年 a) 新技術の排出原単位: 4.30 tCO₂/t-MDI b) 従来技術の排出原単位: 4.63 tCO₂eq/t (ポリウレタン(軟質)CFP) c) 導入量, 置換量: 76百万 t/年 (2050年世界需要予測) d) 補足説明: 製品取込分 CO₂: 0.35 tCO₂/t-MDI</p> <p>○高吸水性高分子(アクリル酸) 28百万 t/年 × 0.58 tCO₂/t = 16.2百万 tCO₂/年 = 0.16億 tCO₂/年 a) 新技術の排出原単位: 1.64 tCO₂/t-アクリル酸 b) 従来技術の排出原単位: 2.22 tCO₂eq/t (アクリル酸 CFP) c) 導入量: 28百万 t/年 (2050年世界需要予測) d) 補足説明: 製品取込分 CO₂: 0.61 tCO₂/t-アクリル酸</p> <p>CO₂フリー水素の調達が必要で、早期の社会実装が期待される機能性化学品のCCUとして代表されるポリカーボネート、ポリウレタン、高吸水性高分子(SAP)について、以下の仮定の元で試算した。 CO₂削減ポテンシャル [tCO₂] = 導入量[t] × (従来技術の排出原単位 - 新技術の排出原単位) [tCO₂/t] において、 ・ 導入量(c): 2050年世界需要予測値を算出^{※1}。最大限の利用ポテンシャルとして、世界需要の全量をCCUすると仮定。 ・ 従来技術の排出原単位(b): 代表的化合物のカーボンフットプリント(CFP)^{※2}それぞれ、ポリカーボネート、ポリウレタン(軟質)、並びにSAP原料のアクリル酸のカーボンフットプリントとした。 ・ 新技術の排出原単位(a): 新技術の排出原単位 = CO₂分離回収の排出原単位 + 新技術のエネルギー投入の排出原単位 - 製品に取り込まれるCO₂原単位である。ここで、新技術のエネルギー投入の排出原単位は従来技術の排出原単位と同等とした。よって、 (従来技術の排出原単位 - 新技術の排出原単位) = (製品に取り込まれるCO₂原単位 - CO₂分離回収の排出原単位) ・ 製品に取り込まれるCO₂原単位は、代表原料化合物の分子量と取込まれるCO₂の分子量の割合から求めた。それぞれの製品に対する代表化合物は -ポリカーボネート: ジフェニルカーボネート(DPC):Mw = 214.2 -ポリウレタン: ジフェニルメタンイソシアネート(MDI):Mw = 250.25</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明																														
カーボンリサイクル 機能性化学品 (続き)	0.5	D	<p>-SAP：アクリル酸:Mw = 72.06 とした。CO₂はDPC、MDI、アクリル酸にそれぞれ1分子に対して1分子、2分子、1分子取り込まれる。製品に取り込まれるCO₂原単位は、それぞれ0.21 tCO₂/t-DPC、0.35 tCO₂/t-MDI、0.61 tCO₂/t-アクリル酸となる。</p> <p>・CO₂分離回収に必要なエネルギーは1.0 GJ/tCO₂とした^{※3}。ここでエネルギーは天然ガスエネルギー利用時の排出原単位^{※4} 50 kgCO₂/GJを用い、分離回収の排出原単位は0.05 tCO₂(排出)/tCO₂(回収)を用いた。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th rowspan="2">CO₂由来成分割合 Wt% 代表例化合物</th> <th colspan="2">2018年世界需要^{※1}</th> <th rowspan="2">2050年 需要予測 百万 トン</th> <th rowspan="2">CO₂削減 ポテンシャル 百万tCO₂/年</th> <th rowspan="2">Mw</th> </tr> <tr> <th>百万トン</th> <th>成長率 %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ポリカーボネート</td> <td>20.5</td> <td>4.6</td> <td>4.5</td> <td>19</td> <td>① 3.7</td> <td>CO₂: 44.01 DPC: 214.2</td> </tr> <tr> <td>ポリウレタン原料 (ポリオール、 イソシアネート)</td> <td>22.4</td> <td>21.6</td> <td>4</td> <td>76</td> <td>② 25.3</td> <td>2CO₂: 88.02 MDI: 250.25</td> </tr> <tr> <td>SAP原料 (アクリル酸)</td> <td>61.2</td> <td>6.8</td> <td>4.5</td> <td>28</td> <td>③ 16.2</td> <td>CO₂: 44.01 アクリル酸: 72.06</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>※1：2015年エンブラ市場の展望とグローバル戦略,炭素繊維強化プラスチック (CFRP)の開発と市場2020, CMCリサーチ, 日本プラスチック工業連盟 プラスチック原材料販売実績, 2019 ポリウレタン原料・製品の世界市場(富士経済), 化学工業日報社「化学経済」2018年3月 第65巻第4号 (世界化学工業白書), 日本触媒資料「新生日本触媒2020 NEXT」</small></p> <p>※1：2015年エンブラ市場の展望とグローバル戦略,炭素繊維強化プラスチック (CFRP)の開発と市場2020, CMCリサーチ, 日本プラスチック工業連盟 プラスチック原材料販売実績, 2019 ポリウレタン原料・製品の世界市場(富士経済), 化学工業日報社「化学経済」2018年3月 第65巻第4号 (世界化学工業白書), 日本触媒資料「新生日本触媒2020 NEXT」</p> <p>※2：CFPプログラム「CO₂換算量共通原単位データベース」(2020年7月アクセス) https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/database2012-2.html</p> <p>※3：カーボンリサイクル技術ロードマップ(経済産業省、2019)を参考 https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf</p> <p>※4：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧(環境省) https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf</p>		CO ₂ 由来成分割合 Wt% 代表例化合物	2018年世界需要 ^{※1}		2050年 需要予測 百万 トン	CO ₂ 削減 ポテンシャル 百万tCO ₂ /年	Mw	百万トン	成長率 %	ポリカーボネート	20.5	4.6	4.5	19	① 3.7	CO ₂ : 44.01 DPC: 214.2	ポリウレタン原料 (ポリオール、 イソシアネート)	22.4	21.6	4	76	② 25.3	2CO ₂ : 88.02 MDI: 250.25	SAP原料 (アクリル酸)	61.2	6.8	4.5	28	③ 16.2	CO ₂ : 44.01 アクリル酸: 72.06
	CO ₂ 由来成分割合 Wt% 代表例化合物	2018年世界需要 ^{※1}				2050年 需要予測 百万 トン	CO ₂ 削減 ポテンシャル 百万tCO ₂ /年				Mw																						
		百万トン	成長率 %																														
ポリカーボネート	20.5	4.6	4.5	19	① 3.7	CO ₂ : 44.01 DPC: 214.2																											
ポリウレタン原料 (ポリオール、 イソシアネート)	22.4	21.6	4	76	② 25.3	2CO ₂ : 88.02 MDI: 250.25																											
SAP原料 (アクリル酸)	61.2	6.8	4.5	28	③ 16.2	CO ₂ : 44.01 アクリル酸: 72.06																											

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
カーボンリサイクル ー炭酸塩	3.17	D	<p>10.3 億 t-石灰石/年 × (0.44 - 0.132) tCO₂/t-石灰石 = 3.17 億 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 0.132 tCO₂/t-石灰石代替炭酸塩 b) 従来技術の排出原単位: 0.44 tCO₂/t-石灰石 c) 導入量, 置換量: 10.3 億 t/年 d) セメント製造時、石灰石(CaCO₃, MgCO₃)の焼成時に CO₂が発生するため、天然石灰石の代替として、廃棄物由来の Ca, Mg に CO₂を吸収させ炭酸塩化して利用する新技術を想定する。</p> <p>CO₂削減ポテンシャル [tCO₂/年] = 導入量[t/年] × (従来技術の排出原単位 - 新技術の排出原単位) [tCO₂/t] において、</p> <ul style="list-style-type: none"> 従来技術の排出原単位(b): 石灰石を加熱した場合に脱離するプロセス由来 CO₂を想定した排出原単位を採用した。石灰石成分組成として、CaCO₃:MgCO₃ = 99:1 の重量比率とし、加重平均して 0.44 tCO₂/t-石灰石と算出した^{※1}。 新技術の排出原単位(a): 0.44 tCO₂stored/t-石灰石 × 0.30 tCO₂emi./tCO₂stored = 0.132 tCO₂/t-石灰石代替炭酸塩。 廃棄物由来の CaO, MgO から 1 t の石灰石代替のため炭酸塩物質を製造する場合、化学量論的に石灰石の加熱時に脱離するのと同量の 0.44 t の CO₂を吸収するため、排出原単位は差し引き 0 となる。ただし、新技術の反応過程での電力や熱についてはカーボンフリーとならない限り、CO₂排出は不可避であることと考慮し、CO₂分離回収と炭酸塩化反応での CO₂吸収損失分を 30%と想定し 0.3 tCO₂排出/tCO₂固定として排出源単位を算出した。 導入量(c): 47 (億 t-セメント/年) × 1.1 t-石灰石/t-セメント × 0.2(普及率) = 10.3 億 t/年 IEA・セメントロードマップより、2050年時点での世界セメント生産量は約 47 億 t/年^{※2}であり、セメント 1 t 当たり、石灰石の使用量は 1.1 t として換算した。また普及率は、2030年時点から年 1%のペースで徐々に普及が進むとし、2050年時点で 20%とした。 <p>※1：環境省資料, https://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h2303/1.pdf ※2：Technology Roadmap. Low-Carbon Transition in the Cement Industry (International Energy Agency (IEA) & Cement Sustainability Initiative (CSI)、2018)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
タイヤリサイクル	0.15	D	<p>9.3 百万 t/年 × (6.54 tCO₂/t - 4.98tCO₂/t) = 15 百万 tCO₂/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 4.98 tCO₂/t-タイヤ (製造 ゴム分ケミカルリサイクル) b) 従来技術の排出原単位: 6.54 tCO₂/t-タイヤ (製造+焼却処分) c) 導入量, 置換量: 9.3 百万 t/年 (廃タイヤの焼却処分量) d) 世界で焼却処分される廃タイヤのゴム分全量をケミカルリサイクルによりタイヤとして資源循環する場合を考える。</p> <p>CO₂削減ポテンシャル [tCO₂/年] = 導入量[t/年] × (従来技術の排出原単位 - 新技術の排出原単位) [tCO₂/t] において、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 導入量(c): 世界の廃タイヤ処分量 3,090 万 t × 焼却処分率 15%^{※1} × 2050 年移動輸送増加 2 倍 = 9.3 百万 t/年を導入量とする。 ・ 排出原単位は、タイヤの LCCO₂算定ガイドライン ver. 2.0^{※2}並びに、カーボンフットプリントデータベース^{※3}の値から試算した。 ・ 従来技術の排出原単位(b): タイヤ製造 + タイヤ焼却時の CO₂排出量とした。ここで、天然ゴム分はカーボンニュートラルとせず排出に含めた。 ・ 新技術の排出原単位(a): タイヤのケミカルリサイクル時もカーボンブラックなどゴム分以外は利用できず燃焼されるとした。原料代替としてタイヤ中のゴム分 (天然ゴム + 合成ゴム) を利用するケミカルリサイクルであるが、技術は確立されていないため、ケミカルリサイクルによる合成ゴム原料製造における CO₂排出が石油を原料とする従来技術と同等とした。すなわち、従来技術と新技術の排出原単位の差は、原料代替したゴム分に由来するタイヤ燃焼時の CO₂排出量とした。 <p>※1 : World Business Council for Sustainable Tire Industry Project, "Global ELT Management - A global state of knowledge on regulation, management systems, impacts of recovery and technologies", 2019 ※2 : タイヤの LCCO₂算定ガイドライン ver. 2.0 (日本自動車タイヤ協会、2012) https://www.jatma.or.jp/environment/pdf/lcco2guideline.pdf ※3 : CFP プログラム「CO₂換算量共通原単位データベース」(2020年7月アクセス) https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/database2012-2.html</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
アルミニウムリサイクル	0.7~1.0	A	$(7.2 - 0.3 \text{ tCO}_2/\text{t-アルミニウム}) \times (0.106 \text{ 億} \sim 0.147 \text{ 億 t/年})$ $= 0.7 \text{ 億} \sim 1.0 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ a) 新技術の排出原単位: 0.3 tCO ₂ /t-アルミニウム b) 従来技術の排出原単位: 7.2 tCO ₂ /t-アルミニウム c) 導入量, 置換量: 0.106 億~0.147 億 t/年 d) 排出原単位は電力配布後の値で、従来技術の排出原単位は効率向上および電力の低炭素化の影響を含む(現状: 12 tCO ₂ /t → 2050年: 7.2 tCO ₂ /t、排出原単位の出典: SITRA、The Circular Economy 2018)。2050年アルミ需要は、World-Aluminium による 2017年実績と 2040年予測から得られる成長率 2.41%を用い、2.11 億 t と仮定した。 導入量は新技術による 2 次材使用の増加量が 5~7%であると仮定した
プラスチックリサイクル	1.1~3.2	A	$(4.48 - 1.85 \text{ tCO}_2/\text{t-プラスチック}) \times (0.4 \text{ 億} \sim 1.2 \text{ 億 t/年}) = 1.1 \text{ 億} \sim 3.2 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ a) 新技術の排出原単位: 1.85 tCO ₂ /t-プラスチック b) 従来技術の排出原単位: 4.48 tCO ₂ /t-プラスチック c) 導入量, 置換量: 0.4 億~1.2 億 t/年 d) 回収プラスチックの 25%がマテリアルリサイクル、25%がケミカルリサイクル、残りの 50%がエネルギー回収により処理されると仮定した。 新技術の排出原単位 (1.27、0.48、2.83 tCO ₂ /t) は各技術の前記比率による加重平均とし、同様に従来技術も排出原単位 (3.72、3.28、5.46 tCO ₂ /t) に基づき試算した(各技術の排出原単位は NEDO/TSC による試算値)。 導入可能量は 2050年のプラスチック生産量 (PE、PP、PET、PS) 4 億 t/年 (IEA, The future of Petrochemicals, 2018) に対し、0.4 億~1.2 億 t (比率 10~30%) を範囲と設定した。

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
バイオ化成品	1.23	A	<p>化成品の中でも、ポリウムが比較的大きく、石油由来からバイオマス由来の原料への置き換えにより大きな CO₂削減が見込まれる、アクリル酸とフェノールを対象として選択した。</p> <p>○アクリル酸 $(8.77 - 1.25 \text{ tCO}_2/\text{t-アクリル酸}) \times (0.07 \text{ 億 t/年}) = 0.52 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ a) 新技術の排出原単位: 1.25 tCO₂/t-アクリル酸 b) 従来技術の排出原単位: 8.77 tCO₂/t-アクリル酸 c) 導入量, 置換量: 0.07 億 t/年 d) 補足説明 ・革新技術の排出原単位(a): バイオマスからアクリル酸を生産する際の、中立的な仮定である 50%の生産変換率における GHG 排出量^{*1}。 ・従来技術の排出原単位(b): 化石資源からアクリル酸を生産する際の GHG 排出量^{*1}。 ・導入量(c): 2018 年 アクリル酸世界需要 680 万 t^{*2}、および市場成長率 4.5%^{*3}をもとに試算した 2050 年 世界需要予測 2,800 万 t/年に対し、革新技術への置き換え率を 25%と仮定した値 (日化協が掲げるバイオ由来製品の置き換え率^{*4})。</p> <p>○フェノール $(6.69 - 2.21 \text{ tCO}_2/\text{t-フェノール}) \times (0.16 \text{ 億 t/年}) = 0.71 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$ a) 新技術の排出原単位: 2.21 tCO₂/t-フェノール b) 従来技術の排出原単位: 6.69 tCO₂/t-フェノール c) 導入量, 置換量: 0.16 億 t/年 d) 補足説明 ・革新技術の排出原単位(a): バイオマスからフェノールを生産する際の、中立的な仮定である 50%の生産変換率における GHG 排出量^{*1}。 ・従来技術の排出原単位(b): 化石資源からフェノールを生産する際の GHG 排出量^{*1}。 ・導入量(c): 2020 年 フェノール生産能力 1,363 万 t^{*5}、および 2022~2027 年の市場成長率 5.37%^{*6}をもとに試算した 2050 年 世界需要予測 6,546 万 t/年に対し、革新技術への置き換え率を 25%と仮定した値 (日化協が掲げるバイオ由来製品の置き換え率^{*4})。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
バイオ化成品 (続き)	1.23	A	<p>※1: ACS Sustainable Chem. Eng. 2021, 9, 43, 14480-14487</p> <p>※2: 日本触媒資料「新生日本触媒 2020 NEXT」</p> <p>※3: 化学工業日報社「化学経済」2018年3月 第65巻第4号 (世界化学工業白書)</p> <p>※4: 日本化学工業協会「カーボンニュートラルへの化学産業としてのスタンス」 https://www.nikkakyo.org/system/files/20210518CN.pdf</p> <p>※5: 重化学工業通信社「化学品ハンドブック 2021」</p> <p>※6: IMARC Services Private Limited「フェノール市場：世界の産業動向、シェア、規模、成長、機会、2022-2027年の予測」</p>
セルロースナノファイバー	2.2~2.7	A	<p>1.5 tCO₂/台 × (18億~22億台) ÷ 12.44年 = 2.2億~2.7億 tCO₂/年</p> <p>d) 補足説明： 「革新的環境イノベーション戦略」においては、自動車から排出されるCO₂に対し、電動化や燃料の低炭素化等のあらゆる対策を講じた際のCO₂削減量は60億tと試算されている。</p> <p>ここでは、セルロースナノファイバー (CNF) とプラスチックの複合材料による軽量化によるCO₂削減ポテンシャルを試算した。自動車のライフサイクル全体でのCO₂排出削減量は1台あたり1.5 tCO₂との試算 (J. Jpn. Inst. Energy, 95, 8, 2016) があり、かつ、自動車の耐用年数は12.44年と仮定されている。</p> <p>PricewaterhouseCoopers 社によれば、2050年の世界の自動車保有台数は20.1億台と予測されている。2億台の振れ幅を仮定し、自動車保有台数を18億~22億台と設定した。</p>
バイオプラスチック	4.5~6.7	A	<p>11.24億 t/年 × (20~30%) × 2 tCO₂/t-プラスチック = 4.5億~6.7億 tCO₂/年</p> <p>c) 導入量, 置換量 (置換されるプラスチックの割合) : 20~30%</p> <p>d) 補足説明： エレンマッカーサー財団の報告書 (The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics) によれば、2050年のプラスチック生産量は11.24億 t/年と予測されている。一方、有機資源協会によれば、プラスチック原料を石油からバイオマスに置き換えた場合のCO₂排出削減量はプラスチック重量の1.4~2倍程度とされている。</p> <p>2050年に全プラスチックの20~30%をバイオマス由来に置き換え、CO₂排出削減量をプラスチック重量の2倍と仮定し、CO₂削減ポテンシャルを4.5億~6.7億 tCO₂と試算した。</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
ブルーカーボン	5.0~13.8	B	<p>d) 補足説明： ブルーカーボンは海洋生態系の生物活動により隔離・貯留される炭素の総称である^{※1}。ブルーカーボンとしての炭素の隔離・貯留は、主に大気中のCO₂が光合成によって浅海域に生息するブルーカーボン生態系に取り込まれることに始まる。ただし、ブルーカーボンとしての炭素の隔離・貯留のメカニズムは複雑であり、緩和ポテンシャルの定量的な評価には現状として大きな不確実性を伴う。例えば、枯死したブルーカーボン生態系の海底への堆積・埋没による効果、岩礁に生育する海藻の葉状部が潮流の影響により外洋に流され、分解されながらも長期間にわたって水深が深い中深層などに留まる効果などが考えられている^{※2}。</p> <p>本試算では、最新の研究成果の一つとして、ICEF「Blue Carbon Roadmap- Carbon Captured by the World's Coastal and Ocean Ecosystems」2022年11月18日 (https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2022_roadmap_Blue_Carbon.pdf) で示された試算値を引用する。</p> <p>なお、ブルーカーボンは、CO₂を排出する特定の従来技術を代替する物ではなく、大気中のCO₂濃度を削減するものである。同引用文献をはじめ、多くの文献において、その定量的な効果は「緩和ポテンシャル」と呼称されている。</p> <p>2050年緩和ポテンシャル（総計：5億~13.8億 tCO₂eq/年）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 生態系の損失と退化の阻止による緩和ポテンシャル（シナリオ1：保全） マングローブ：0.2億~0.4億 tCO₂eq/年 塩性湿地/干潟：0.4億~0.7億 tCO₂eq/年 海草藻場：1.9億~6.5億 tCO₂eq/年 ● 生態系と生物の修復と回復による緩和ポテンシャル（シナリオ2：修復） マングローブ：1.6億~2.5億 tCO₂eq/年 塩性湿地/干潟：0.1億~0.3億 tCO₂eq/年 海草藻場：0.3億~0.5億 tCO₂eq/年 ● 水産養殖による大型海藻類生産の増加：0.5億~2.9億 tCO₂eq/年 <p>これらの結果から、ブルーカーボン全体のポテンシャルは5.0億~13.8億 tCO₂eq/年と試算される。</p> <p>なお大型海藻の保全・試算の効果は科学的情報に乏しいことから算出されていないが、ブルーカーボン生態系の中でも規模が大きく、大きな緩和ポテンシャルが期待されている。</p> <p>また、2019年に発表されたIPCCの『海洋・雪氷圏特別報告書』によれば、世界全体でのブルーカーボンによる緩和ポテンシャルとして、世界全体のGHG年間排出量の0.5%程度に相当するとみられる。</p> <p>※1：国連環境計画（UNEP）報告書（2009） ※2：国土交通省ホームページ「ブルーカーボンとは：3. ブルーカーボンのメカニズム」https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk6_000069.html</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明																																				
バイオ炭	26	B	<p>d) 補足説明： 第6回 グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/006.html) で示された近年の報告に基づく試算値を引用した。</p> <p>同ワーキンググループにおいて、日本国内で利用し得るバイオマス資源の賦存量から積み上げた CO₂削減ポテンシャルとして約 0.14 億 tCO₂/年と試算されている。また、近年の報告に基づき、世界の CO₂削減ポテンシャルを推定し、26 億 tCO₂/年 (3 億~750 億 tCO₂/年) 程度と想定されている。</p> <p style="text-align: center;">国内でのバイオ炭の農地施用による CO₂削減ポテンシャル</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>利用可能なバイオマス量 (万 t)</th> <th>炭化物収率 (%)</th> <th>バイオ炭の炭素含有率</th> <th>バイオ炭の100年後炭素残存率</th> <th>CO₂吸収量 (万 t) *¹</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>木材 (林地残材等)</td> <td>750</td> <td>40</td> <td>0.77</td> <td>0.89</td> <td>763</td> </tr> <tr> <td>竹</td> <td>256</td> <td>27</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0.439*²</td> <td>113</td> </tr> <tr> <td>稲わら</td> <td>751</td> <td>50</td> <td>0.49</td> <td>0.65</td> <td>439</td> </tr> <tr> <td>もみ殻</td> <td>200</td> <td>50</td> <td>0.49</td> <td>0.65</td> <td>117</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: right;">合計</td> <td>1,432</td> </tr> </tbody> </table> <p>*¹ CO₂吸収量 (万 t) = 利用可能なバイオマス量 × 炭化物収率 × バイオ炭の炭素含有率 × バイオ炭の100年後残存率 × 44/12 (CO₂換算) *² 炭素含有率と炭素残存率を包含した値に対応。</p> <p>また、IPCC「土地関係特別報告書」(2019)においても、世界での土壌へのバイオ炭施用による CO₂削減ポテンシャルとして同規模の 0.3 億~66 億 tCO₂/年と推定している。</p>		利用可能なバイオマス量 (万 t)	炭化物収率 (%)	バイオ炭の炭素含有率	バイオ炭の100年後炭素残存率	CO ₂ 吸収量 (万 t) * ¹	木材 (林地残材等)	750	40	0.77	0.89	763	竹	256	27	0.439* ²		113	稲わら	751	50	0.49	0.65	439	もみ殻	200	50	0.49	0.65	117	合計					1,432
	利用可能なバイオマス量 (万 t)	炭化物収率 (%)	バイオ炭の炭素含有率	バイオ炭の100年後炭素残存率	CO ₂ 吸収量 (万 t) * ¹																																		
木材 (林地残材等)	750	40	0.77	0.89	763																																		
竹	256	27	0.439* ²		113																																		
稲わら	751	50	0.49	0.65	439																																		
もみ殻	200	50	0.49	0.65	117																																		
合計					1,432																																		
植林・再生林	23	B	<p>d) 補足説明： 第6回 グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/006_03_01.pdf) で示された近年の報告に基づく試算値を引用した。</p>																																				

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
農畜産業からのメタン	2.9	D	<p>約 2.9 億 tCO₂eq/年</p> <p>a) 新技術の排出原単位: 新技術による削減効果として 50%を仮定。 c) 導入量, 置換量: 新技術の普及率として 20%を仮定 d) 補足説明: 国内の農業分野にて生物関連資材等の機能性素材の活用により削減が期待されるメタンとして、消化管内発酵由来: 7.63 百万 tCO₂eq/年、家畜排泄物の管理: 2.39 百万 tCO₂eq/年、稲作: 12.00 百万 tCO₂eq/年を積み上げた、約 0.22 億 tCO₂eq/年を対象として国内ポテンシャルを試算。 0.22 億 tCO₂eq/年 × 50% × 20% = 0.022 億 tCO₂eq/年</p> <p>国内と世界での農業分野におけるメタン排出源の状況は同一ではないが、消化管内発酵由来のメタンについては、同様の前提で試算が可能と考えられる。世界の消化管内発酵由来のメタン発生量 28.5 億 tCO₂eq/年に対して、メタン削減効果を 50%、実装率を 20%と仮定して世界のポテンシャルを試算。 28.5 億 tCO₂eq/年 × 50% × 20% = 2.85 億 tCO₂eq/年</p> <p>削減効果 50%については、以下の事例等を参考とした。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・家畜飼料への海藻添加 (1%) により、メタン排出を約 60%抑制 (カリフォルニア大学 Davis 校) https://animalscience.ucdavis.edu/news/research-led-ermias-kebreab-tests-if-seaweed-cuts-methane-emissions-dairy-farms ・家畜飼料へのカシューナッツの殻から抽出した植物油添加によりメタン排出を約 90%抑制 (出光興産、農業・食品産業技術総合研究機構、北海道大学) https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2030873698.pdf ・家畜飼料へのアミノ酸添加により、メタン排出を 12.5%~50%程度抑制 (ドイツ: Evonik、住友化学) https://www.nikkakyo.org/sites/default/files/ICCA_GasReduction_Guidelines_200dpi_300316.pdf ・ケープル細菌の添加によりイネ植生土壌の硫酸塩量を 5 倍に増加させ、93%メタン排出を抑制 (デンマーク: Aarhus 大学) https://www.nature.COM/articles/s41467-020-15812-w/ ・水田土壌への稲藁バイオチャー添加により 39.5%メタン排出を抑制 (中国国立自然科学財団、浙江省自然科学財団) https://europepmc.org/article/pmc/4835783 ・「国際連携による農業分野における温室効果ガス削減技術の開発」プロジェクト成果 灌漑水田における節水栽培技術 AWD (Alternate Wetting and Drying) により GHG を 30%以上削減するという目標を 4 か国の現地試験で達成 (農林水産省) https://www.affrc.maff.go.jp/docs/project/seika/2018/attach/pdf/seika2018-41.pdf

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位: kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
農耕地の亜酸化窒素 (N ₂ O)	3.9～8.8	A, B	<p>d) 世界の農耕地からの N₂O 発生を 80%削減できる技術を想定して試算。</p> <p>●見積もられる最大の削減ポテンシャル 専門機関として、農研機構の協力のもと行った試算結果を掲載。 削減対象の N₂O 発生源としては、作物残渣 (2.2 億 tCO₂eq/年) と化学肥料 (7.0 億 tCO₂eq/年) (以上 FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)公表のデータ (2017) に基づく) ※¹。さらに化学肥料合成時に発生する CO₂※² (4.5 億 tCO₂/年) も削減対象に含む。 本技術の普及先として、地域による収入や食料事情の差を考慮し、Low-Income Food Deficit Countries (LIFDC) に該当する国 (全体の N₂O 排出量の 20%に相当) 以外に普及させることが可能と仮定し、8.8 億 tCO₂/年を試算した。</p> <p>●作物残渣及び化学肥料のうち、微生物反応 (硝化・脱窒等) の直接的な制御による削減ポテンシャル 削減対象の N₂O 発生源としては、作物残渣と化学肥料の投入により、微生物反応により直接的に排出される N₂O とする。 ・作物残渣 (1.56 億 tCO₂eq/年)、化学肥料 (4.58 億 tCO₂eq/年) (以上 FAO 公表のデータ (2017) に基づく) ※³ 本技術の普及先として、地域による収入や食料事情の差を考慮し、LIFDC に該当する国 (全体の N₂O 排出量の約 20%に相当する 1.25 億 tCO₂eq/年を排出) 以外に普及させることが可能と仮定し、3.9 億 tCO₂/年を試算した。</p> <p>※¹ N₂O の GWP(Global Warming Potential)として IPCC 第 2 次報告書にもとづく値 (310) を使用。(FAOSTAT へ 2021 年アクセス) ※² https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/Industrial-ammonia-productionemits-CO2/97/i24 ※³ N₂O の GWP として IPCC 第 5 次評価報告書にもとづく値 (265) を使用。(FAOSTAT へ 2022 年 11 月アクセス)</p>

表 CO₂削減ポテンシャルの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：技術の普及率を仮定して試算したケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：最大の技術の普及または設備設置を想定したケース

技術分野	CO ₂ 削減ポテンシャル 億 tCO ₂ /年	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減ポテンシャルの計算根拠 a) 新技術の排出原単位, b) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) c) 導入量, 置換量 (固有単位), 固有単位 : kWh, GJ, kg, t 等, d) 補足説明
AIチップ	2.09~378	A, B	<p>188 gCO₂/kWh × 1,113.6 TWh/年 = 2.09 億 t/年 188 gCO₂/kWh × 200,800 TWh/年 = 378 億 t/年</p> <p>b) 従来技術の排出原単位 : 188 gCO₂/kWh (系統電力消費での CO₂排出原単位^{※1})</p> <p>c) 導入量, 置換量 (電力消費の削減量) : 1,113.6 TWh (2030 年想定) ~ 200,800 TWh (2050 年想定)</p> <p>d) 補足説明 : CPU や GPU 等の汎用プロセッサが搭載されたチップに比べて、特定用途での処理効率に優れた AI チップ等の特定用途向けチップの普及により電力消費が削減され CO₂削減に寄与することが期待される。</p> <p>・ c) 置換量 (世界の電力削減量) データセンター内で稼働する AI サーバの特に演算装置での電力消費は、2030 年時点で 1,320 TWh/年、2050 年時点で 251,000 TWh にまで拡大するとの見通しがある^{※2}。これが汎用プロセッサとして現在一般的な GPU (電力効率 : 2 TOPS/W^{※3}) によるものと仮定し、さらにこれが現在開発中の最新の AI チップ (電力効率 : 10 TOPS/W) ^{※4} に全て置き換わることで電力消費の削減量は、2030 年時点で換算すると、 1,320 TWh × (1 - 2/10) = 1,113.6 TWh 2050 年時点で換算すると、 251,000 TWh × (1 - 2/10) = 200,800 TWh となる。</p> <p>データセンターないしそこで稼働する AI サーバの利用規模についての今後の見通しは、DX の進展度合いに大きく依存するもので不確実性が大きい。ここでは、2030 年時点と 2050 年時点の見通しから算出した値をポテンシャルとして計上したが、その有意性については引き続き検証が必要である。また、従来技術・政策に基づく BAU シナリオである STEPS 等ではこのようなデータセンターでのエネルギー消費の大幅な拡大は盛り込まれていないと考えられ、他の試算結果との直接的な比較をすることは適切で無い。</p> <p>※1 : 系統電力消費の CO₂排出原単位 : IEA WEO 2022 の STEPS(2050 年)での世界の電力消費 (151 EJ = 41,962 TWh) と発電部門全体の CO₂排出量 (7,899 MtCO₂) から算出。 ※2 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.2)(JST 低炭素社会戦略センター、2020) https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-03.pdf ※3 TOPS/W : OPS (operations per second) は 1 秒当たりの命令実行回数、性能を表す指標の一つであり、単位消費電力あたりの OPS (OPS/W) が電力効率を表す指標として用いられる。1[TOPS/W] = 10¹² [OPS/W]。 ※4 NEDO ニュースリリース、従来技術に比べて最大 10 倍の電力効率を実現した人工知能 (AI) チップを開発 https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101596.html</p>

付録2 CO₂削減コストの試算例

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A: 学習曲線等の実績から想定されるケース、B: 専門機関の試算を参考にしたケース
C: 政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D: その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
次世代太陽光発電 (車載用PV)	-13,900～ 1,810	A	$(6.99 \sim 9.96 - 9.62) \text{ 円/kWh} \div (188 - 0) \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ $= -13,900 \sim 1,810 \text{ 円/tCO}_2$ <p>a) 6.99～9.96 円/kWh b) 9.62 円/kWh c) 0 gCO₂/kWh (PVの利用段階のみを想定) d) 188 gCO₂/kWh e) 充電に要する系統電力消費を従来技術に位置づけ。車載用PVの普及拡大にともなうコスト低減の経年推移を推計し、上記は2050年の数値を抽出したもの。 ・ a) 新技術の単価 IEA ETP 2016によれば、2030年の電動車の累積導入量は140万台、2050年では900万台と見通されており、このうち、2030年時点でのPV搭載率を1%、2050年時点では10～30%とし、この間の年代を線形で補間して積算することで、車載用PVの累積導入量を算出。 業界のコストターゲットを参考に、新技術の普及開始時期2030年の単価40万円/kW^{※1}と仮定し、その後は累積導入量に従い一定の学習率(80%)で製造コストが低減されると想定。 NEDOでの既往検討^{※2}を参考に、車載PV容量1kW、稼働率10%、平均利用期間12年と仮定し、均等化発電原価として算出。ちなみにこの場合の年間発電量は876kWh/年となり、例えば、電動車の電費として12.5km/kWhが実現すれば、1日の平均走行距離30kmに要する電力に相当する。 ・ b) 従来技術の単価 IEA WEO 2022のSTEPSシナリオでの世界各地の発電量、発電コストから加重平均にて概算。 ・ d) 系統電力の排出原単位 IEA WEO 2022のSTEPSで系統電力使用量と電力部門の排出量より算出。</p> <p>※1 e.g. “Analysis for Potential of High-Efficiency and Low-cost Vehicle Integrated Photovoltaics” (Yamaguchi et al., 2022, WCPEC-8 講演内容) ※2 「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書」(NEDO, 2018)</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位、d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
水素発電	9,800 ～25,700	C	<p>(17.2～12.1 - 9) 円/kWh ÷ (318 - 0) gCO₂/kWh = 9,800～25,700 円/tCO₂</p> <p>a) 12.1～17.2 円/kWh b) 9 円/kWh (LNG 火力) c) 0 gCO₂/kWh (利用段階のみ想定) d) 318 gCO₂/kWh (LGN 火力) e)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ a) 新技術の単価 『グリーン成長戦略』（経済産業省、2021）に掲げられる目標コストである、30 円/Nm³（2030 年）および 20 円/Nm³（2050 年）を基本に想定し、「発電コスト検証ワーキンググループ」（経済産業省、2021）に掲載の「LNG 火力発電」の項目に記載の内容に基づき算出。 水素発電効率は 2030 年の LGN 発電効率目標と同じ 57.0%（HHV）、所内率 2.3%とした。 また燃料費及び燃料諸経費（石油石炭税、輸入手数料、荷揚げ役料、気化費用など）以外の費用は LNG 火力と同じとした。 なお、水素発電のコストには港湾等のインフラ・土地代や技術開発にかかる費用等は含まれていない。 ・ b) 従来技術の単価 発電コスト検証ワーキンググループ」（経済産業省、2021）に掲載の「LNG 火力発電」の項目に記載の内容に基づき算出。 ただし、燃料コストについては運転期間を通じて一定額（10 USD/MMBtu、1 USD = 110 円）で調達するものとした。 ・ d) 従来技術の排出原単位 「標準発熱量・炭素排出係数（総合エネルギー統計）」（経済産業省、2020）および「発電コスト検証ワーキンググループ」（経済産業省、2021）より算出。

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
自動車・次世代蓄電池	ICEVとEVの車両価格差との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>e) 従来の自動車として内燃機関車 (ICEV) を想定し、次世代蓄電池を搭載した電気自動車 (次世代 EV) で置き換えることを想定する。次世代 EV の CO₂削減コストは、ICEV を次世代 EV で代替するときに発生する追加コストを CO₂排出削減量で除したものと定義される。追加コストは車両価格の差と、ライフサイクルでの走行で消費したエネルギーのコストの差を合わせて考える必要がある。CO₂排出についても走行と車両製造の両方の過程を考える必要がある。総じて次世代 EV の CO₂削減コストの計算式は次式の通りとなる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ CO₂削減コスト (円/tCO₂) = ライフサイクルでの追加コスト(円) ÷ ライフサイクルでの CO₂排出削減量(tCO₂) ・ ライフサイクルでの追加コスト(円) = 総走行距離 × {(電費 × 電気料金) - (燃費 × 燃料料金)} + 車両価格差 ・ ライフサイクルでの CO₂排出削減量 = 総走行距離 × {(燃費 × 燃料の CO₂排出原単位) - (電費 × 電力の CO₂排出原単位)} + 車両製造での CO₂排出量の差 <p>ICEV 燃費 19.6 km/l (GEVO(Global EV Outlook 2019)、EV 電費 5.3 km/kWh (充電効率 95%を仮定し内包, GEVO2019)、燃料料金 160 円/l (2022 年日本の市場価格から)、電力料金 24 円/kWh (電中研(2018)主要 10 国電力料金の中央値)、ライフサイクルでの総走行距離 23,000km^{※1}、車両製造での CO₂排出量の差 7.54 t/台(EV1, コンパクトカー)^{※2}として、次世代 EV と ICEV での車両価格の差の関数として CO₂削減コストを表すと下図のようになる。同様の手続きで、より車格の大きい EV2 の場合も併記した。</p> <p>この 2 つの例(EV1, EV2)の場合、電動車の運航費用である電気代が液体燃料代よりも安い場合、電動車が内燃機関車より車両価格が 80~100 万円高かったとしても、CO₂削減費用はマイナスになることがわかる。換言して、価格差が 80~100 万円あったとしても積極的に電動車にすることが望ましい。一方、価格差が 120 万円の場合、CO₂削減費用は 1~3 万円/ton-CO₂となる。</p> <div data-bbox="598 1541 981 1848" style="text-align: center;"> </div> <p>※1 J. Buberger et al., Renewable and Sustainable Energy Reviews 159 (2022) 112158 ※2 GEVO2019: Global EV Outlook 2019</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価、b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位、d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
カーボンリサイクル／基礎化学品	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>基礎化学品のC₂オレフィン（エチレン）、C₃オレフィン（プロピレン）について、新技術として、CCUによる製造を考え、製品コストアップ（円/t-製品）に応じたCO₂削減コストにおいて、新技術の排出原単位を適切な範囲で変化させて試算した。</p> <p>c) 新技術の排出原単位：{ [CO₂分離回収の排出原単位(tCO₂/t-製品)] + [新技術プロセスの排出原単位(tCO₂/t-製品)] }となる。ここで、新技術プロセスの排出原単位はエネルギー投入として排出されるCO₂から原料として製品に取り込まれるCO₂を引いた値となる。即ち、 [新技術の排出原単位] = [CO₂分離回収の排出原単位] + [新技術プロセスの投入の排出原単位] - [製品に取り込まれるCO₂原単位] である。</p> <p>d) 従来技術の排出原単位：1.5 tCO₂/t-オレフィン。ナフサからの製造におけるエチレン、プロピレンの組成比^{*1}とLCIデータベース^{*2}から算出。</p> <p>e) 補足説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> CO₂分離回収の排出原単位は、CO₂分離回収に必要なエネルギーを1.0 GJ/tCO₂とし^{*3}、1 GJを天然ガスで供給した場合のCO₂排出(50 kgCO₂/GJ^{*4})より得られる0.05 tCO₂(排出)/tCO₂(回収)を用いた。つまり、製品に取り込まれたCO₂の95%が削減に寄与することとなる。 製品に取り込まれるCO₂原単位は、エチレン、プロピレンの分子量と、取込で利用できるCO₂分子量の割合から算出した。いずれもそれぞれ3.14 tCO₂/t-オレフィンとなる。 以上より、製品コストアップをc（円/t-製品）、新技術のプロセス投入の排出原単位をp（tCO₂/t-製品）、とすると、CO₂削減コスト[円/t-CO₂]は $C_2, C_3 \text{ オレフィン} : \frac{c}{1.5 - (p - 3.14 \times 95\%)} = \frac{c}{4.48 - p} \text{ 円/tCO}_2$ となる。 新技術のプロセス投入の排出原単位は、下限を従来技術、上限を従来技術の排出原単位に製品取込分CO₂を加えた値程度とした。この上限より大きければCO₂は削減されない。 以上より、基礎化学品のC₂オレフィン（エチレン）、C₃オレフィン（プロピレン）について、CO₂削減コストと製品コストアップの関係を図に示す。新技術の排出原単位と、設備投資、反応温度、触媒コスト等に依存する製品コストアップが決まれば開発目標としてのCO₂削減コストを定量化できる。国によって異なるコストを負担するための制度や代替対象となる従来技術などによって導入可否が決定されることになるが、このように、環境価値を定量化することは開発者にとって、有用な指標になると考える。

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

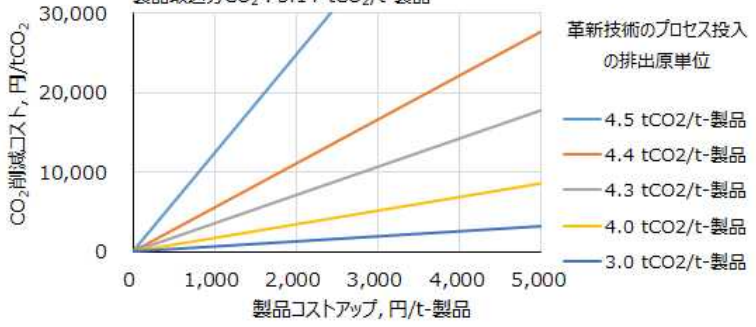
技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
カーボンリサイクル/基礎化学品(続き)	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>C2, C3オレフィン 従来品Carbon Foot Print : 1.6 tCO₂/t-製品 製品取込分CO₂ : 3.14 tCO₂/t-製品</p>  <p>図 カarbonリサイクル/基礎化学品のCO₂削減コスト</p> <p>※1：TSC Foresight Vol. 109 「基礎化学品(ゴム原料のC4、C5)の原料多様化分野の技術戦略策定に向けて」(NEDO、2022) https://www.nedo.go.jp/content/100952690.pdf</p> <p>※2：LCI データベース IDEA ver3.2.0 (2022/4/15), 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ</p> <p>※3：カーボンリサイクル技術ロードマップ(経済産業省、2019) https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf</p> <p>※4：算定・報告・公表制度における算出方法・排出係数一覧(環境省、2020) https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
カーボンリサイクル/機能性化学品	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>ポリカーボネート、ポリウレタン、高吸水性高分子(SAP)について、新技術として、CCUによる機能性化学品製造を考え、製品コストアップ(円/t-製品)に応じたCO₂削減コストにおいて、新技術の排出原単位を適切な範囲で変化させて試算した。</p> <p>c)新技術の排出原単位(tCO₂/t-製品)：{ [CO₂分離回収の排出原単位(tCO₂/t-製品)] + [新技術プロセスの排出原単位(tCO₂/t-製品)] }となる。ここで、新技術プロセスの排出原単位はエネルギー投入として排出されるCO₂から原料として製品に取り込まれるCO₂を引いた値となる。即ち、 [新技術の排出原単位] = [CO₂分離回収の排出原単位] + [新技術プロセスの投入の排出原単位] - [製品に取り込まれるCO₂原単位] である。</p> <p>d)従来技術の排出原単位(tCO₂/t-製品)：それぞれポリカーボネート、ポリウレタン(軟質)、SAP原料のアクリル酸のカーボンフットプリントとした^{*1}</p> <p>e)補足説明</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ [CO₂分離回収の排出原単位]：CO₂分離回収に必要なエネルギーは1.0 GJ/tCO₂とし^{*2}、1 GJを天然ガスで供給した場合のCO₂排出(50 kgCO₂/GJ^{*3})より得られる0.05 tCO₂(排出)/tCO₂(回収)を用いた。 ・ [製品に取り込まれるCO₂原単位]：ポリカーボネートは主原料のジフェニルカーボネート(DPC)、ポリウレタンはジフェニルメタンイソシアネート(MDI)、SAPはアクリル酸の分子量と、取込んで利用できるCO₂分子量の割合から算出した。それぞれ0.21 tCO₂/t-DPC、0.35 tCO₂/t-MDI、0.61 tCO₂/t-アクリル酸となる。 ・ [CO₂削減コスト(円/tCO₂)] = [製品コストアップ(円/t-製品)] ÷ {[従来技術の排出原単位(tCO₂/t-製品)] - [新技術の排出原単位(tCO₂/t-製品)]}において、製品のコストアップをc(円/t-製品)、新技術のプロセス投入の排出原単位をp(tCO₂/t-製品)とすると、CO₂削減コスト(円/tCO₂)は ポリカーボネート：$\frac{c}{7.69-(p-0.21 \times 95\%)} = \frac{c}{7.89-p} \text{ 円/tCO}_2$ ポリウレタン：$\frac{c}{4.63-(p-0.35 \times 95\%)} = \frac{c}{4.96-p} \text{ 円/tCO}_2$ アクリル酸：$\frac{c}{2.22-(p-0.61 \times 95\%)} = \frac{c}{2.80-p} \text{ 円/tCO}_2$ <p>となる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ [新技術プロセスの投入の排出原単位]：下限を従来技術、上限を従来技術の排出原単位に製品取込分CO₂を加えた値程度とした。この上限より大きければCO₂は削減されない。 ・ 各化合物について、CO₂削減コストと製品コストアップの関係を図に示す。下図の通り、新技術の排出原単位と、設備投資、反応温度、触媒コスト等に依存する製品コストアップが決まれば開発目標としてのCO₂削減コストを定量化できる。国によって異なるコストを負担するための制度や代替対象となる従来技術などによって導入可否が決定されることになるが、このように、環境価値を定量化することは開発者にとって、有用な指標となると考える。

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A: 学習曲線等の実績から想定されるケース、B: 専門機関の試算を参考にしたケース

C: 政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D: その他のケース

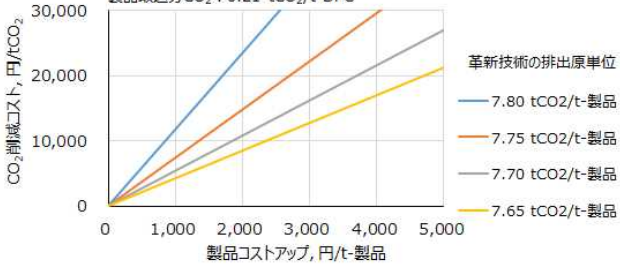
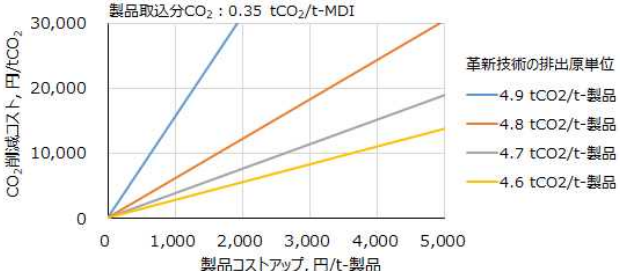
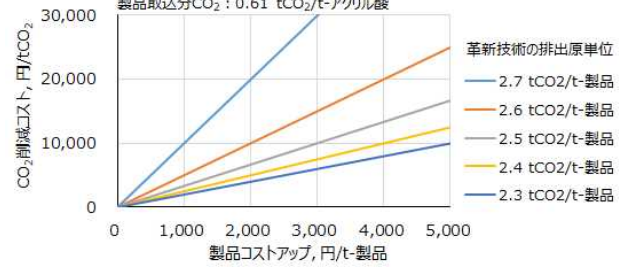
技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
カーボンリサイクル/機能性化学品 (続き)	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>ポリカーボネート 従来品Carbon Foot Print: 7.69 tCO₂/t-製品 製品取込分CO₂: 0.21 tCO₂/t-DPC</p>  <p>革新技術の排出原単位 — 7.80 tCO₂/t-製品 — 7.75 tCO₂/t-製品 — 7.70 tCO₂/t-製品 — 7.65 tCO₂/t-製品</p> <p>ポリウレタン(軟質) 従来品Carbon Foot Print: 4.63 tCO₂/t-製品 製品取込分CO₂: 0.35 tCO₂/t-MDI</p>  <p>革新技術の排出原単位 — 4.9 tCO₂/t-製品 — 4.8 tCO₂/t-製品 — 4.7 tCO₂/t-製品 — 4.6 tCO₂/t-製品</p> <p>高吸水性高分子原料(アクリル酸) 従来品Carbon Foot Print: 2.22 tCO₂/t-製品 製品取込分CO₂: 0.61 tCO₂/t-アクリル酸</p>  <p>革新技術の排出原単位 — 2.7 tCO₂/t-製品 — 2.6 tCO₂/t-製品 — 2.5 tCO₂/t-製品 — 2.4 tCO₂/t-製品 — 2.3 tCO₂/t-製品</p> <p>図 カーボンリサイクル/機能性化学品のCO₂削減コスト</p> <p>※1: CFP プログラム「CO₂換算量共通原単位データベース」(2020年7月アクセス) https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/database2012-2.html ※2: カーボンリサイクル技術ロードマップ(経済産業省、2019) https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf ※3: 算定・報告・公表制度における算出方法・排出係数一覧(環境省、2020) https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calcul/itiran_2020_rev.pdf</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
カーボンリサイクル/炭酸塩	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>セメント製造時、石灰石(CaCO₃, MgCO₃)の焼成時にCO₂が発生するため、天然石灰石の代替として、廃棄物由来のCa, MgにCO₂を吸収させ炭酸塩化して利用する新技術を想定する。該当の新技術の炭酸塩排出原単位と現在の石灰石の市場価格(円/t-石灰石)の上昇に対する許容値の関係式①(以下)から、CO₂削減コストを簡易的に見積もり下図に示した。</p> <p>関係式①：[CO₂削減コスト(円/tCO₂)] = [市場価格上昇に対する許容値(円/t-石灰石代替炭酸塩)] ÷ {[従来技術の排出原単位(tCO₂/t-石灰石)] - [新技術の排出原単位(tCO₂/t-石灰石代替炭酸塩)]}</p> <p>a) 新技術のコスト：新技術の適応を反映した市場価格として、CO₂削減コスト30,000円/tCO₂程度をカバーするよう、従来技術のコストの1~8倍を想定した。</p> <p>b) 従来技術のコスト(円/t-石灰石)：石灰石の市場価格とした。市場調査レポート^{*1}を参考に世界生産量(2019年)として69億t/年、世界総収益(2019年)として73,015百万USDから、市場価格を1,000円/t-製品とした(1USD=100円で換算)。</p> <p>d) 従来技術の排出原単位(tCO₂/t-石灰石)：石灰石を加熱した場合に脱離するプロセス由来CO₂を想定した排出原単位を採用した。石灰石成分組成として、CaCO₃：MgCO₃=99：1の重量比率と想定し、加重平均(以下の式)から0.44tCO₂/t-石灰石と算出^{*2}</p> $\text{CO}_2 \text{の分子量} \div \text{CaCO}_3 \text{の分子量} \times \text{CaCO}_3 \text{の含有率} + \text{CO}_2 \text{の分子量} \div \text{MgCO}_3 \text{の分子量} \times \text{MgCO}_3 \text{の含有率}$ $= (44.0 \div 100.1) \times 0.99 + (44.0 \div 84.3) \times 0.01$ <p>c) 新技術の排出原単位(tCO₂/t-石灰石代替炭酸塩)：従来技術の0.44tCO₂/t-石灰石の排出原単位に対し、70~10%の排出抑制を達成したと考え、0.04~0.31tCO₂/t-石灰石代替炭酸塩の範囲を想定した。</p> <p>e) 補足説明：本試算の想定では、石灰石(炭酸塩)の焼成時にプロセス由来CO₂を排出するものの、廃棄物から得たカルシウム等にCO₂を吸収させ炭酸塩化利用し原料として利用する事で、天然の石灰石を使用せず、実質的に大気中へのCO₂排出を回避できると考えた。この際、化学量論的には1トンの石灰石代替炭酸塩を製造した場合、0.44tのCO₂を利用するため、排出源単位は実質0となる。ただし、新技術の反応過程での電力や熱についてはカーボンフリーとならない限り、CO₂排出は不可避なため、排出源単位として従来技術の70~10%を範囲として想定した。</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
カーボンリサイクルへ炭酸塩 (続き)	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>図 廃棄物等由来の炭酸塩を利用したセメント製造のCO₂削減コスト 出典：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021)</p> <p>任意のCO₂削減コストを想定した場合、CO₂削減効果が高い技術であるほど市場価格の上昇が大きくても許容される関係を示している。仮にCO₂削減コストとして2万円を社会が受け入れ可能な場合、図の青線のケースとして、排出原単位を0.04 tCO₂/t-製品まで下げた場合には、約8~9倍(8,000~9,000円)の市場価格上昇が許容されると考えることができる。</p> <p>※1：Limestone Market Analysis (Grand View Research, Inc. 2020) https://www.gii.co.jp/report/grvi963076-limestone-market-size-share-trends-analysis-report.html 2019年世界生産量 6,924.8 百万 t/年と2019年での世界での利益 73,015.3 百万 USD から市場価格を約1,000円とした。この際、1 USD=100円とした。</p> <p>※2：平成22年度温室効果ガス排出量算定方法検討会 エネルギー・工業プロセス分科会 (環境省, 2011) https://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h2303/1.pdf</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース


技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
タイヤリサイクル	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>タイヤゴムの焼却処分を、新技術によりケミカルリサイクルする場合の製品コストアップ (円/t-製品) に応じた CO₂削減コストを、新技術の排出原単位を適切な範囲で変化させて試算した。本試算では廃タイヤからケミカルリサイクルによってブタジエン等の合成ゴムモノマーを製造する工程を対象とするため、従来技術と新技術との差を取る場合、新技術では従来技術でのモノマー製造及びゴム分の焼却にかかわる CO₂排出が削減され、ケミカルリサイクルによるモノマー製造分の増加を考慮すればよい</p>  <p>図 ケミカルリサイクルによる CO₂削減効果のイメージ 出典：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021)</p> <p>d) 従来技術の排出原単位(tCO₂/t-製品)：原料採掘からブタジエン製造までに 1.92 tCO₂/t-ブタジエンが排出されている^{※1}</p> <p>c) 新技術の排出原単位(tCO₂/t-製品)：ケミカルリサイクルによる CO₂ 排出原単位をパラメータとした。下限をタイヤ中のゴム以外成分由来の焼却時の CO₂ 排出量に、ケミカルリサイクル反応相当分としてブタジエンからの合成ゴム製造の排出量を足した値程度、上限を従来技術とした。この上限より大きければ CO₂ は削減されない。</p> <p>e) 補足説明： ・ [CO₂削減コスト(円/tCO₂)] = [製品コストアップ(円/t-製品)] ÷ {[従来技術の排出原単位(tCO₂/t-製品)] - [新技術の排出原単位(tCO₂/t-製品)]}において、分母の排出原単位の差は、従来技術でのモノマー製造の排出原単位とゴム分焼却の排出原単位との和から新技術のケミカルリサイクルによる排出原単位を減じた値となり、ケミカルリサイクルの排出原単位を e(tCO₂/t-タイヤ)、製品コストアップを c(円/t-タイヤ)とすると、</p> $\frac{c}{1.92 \times 35\% + 1.56 - e} = \frac{c}{2.23 - e} \text{円/tCO}_2$ <p>となる。ここで、タイヤ中に含まれる合成ゴム分を 35%、ゴム分焼却由来 CO₂ を 1.56 tCO₂/t-タイヤとした。また、パラメータとしたケミカルリサイクルによる CO₂ 排出原単位の下限を、モノマー製造の排出原単位とゴム分焼却の排出原単位との和である 2.23 tCO₂/t-タイヤの 1/2 の 1.1 tCO₂/t-タイヤ、上限を同等の 2.2 tCO₂/t-タイヤとした。</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
タイヤリサイクル (続き)	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>・CO₂削減コストと製品コストアップの関係を図に示す。新技術の排出原単位と、設備投資、反応温度、触媒コスト等に依存する製品コストアップが決まれば開発目標としてのCO₂削減コストを定量化できる。国によって異なるコストを負担するための制度や代替対象となる従来技術などによって導入可否が決定されることになるが、このように、環境価値を定量化することは開発者にとって、有用な指標となると考える。</p> <p style="text-align: center;">タイヤ</p> <p style="text-align: center;">従来技術 (モノマ-製造+ゴム分焼却) : 2.23tCO₂/t-製品</p> <p style="text-align: center;">図 タイヤゴムのケミカルリサイクルにおけるCO₂削減コスト 出典：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021)</p> <p>※1：CFP プログラム「CO₂換算量共通原単位データベース」(2020年7月アクセス) https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

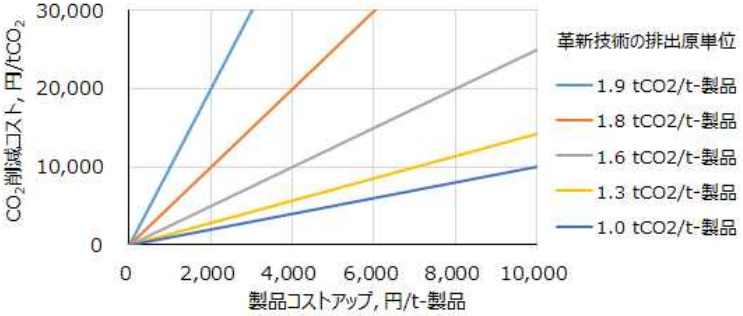
技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 類型 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明
水素還元鉄 (高炉法)	新技術による製品コストアップと排出原単位との関係としてCO ₂ 削減コストを試算	D	<p>高炉法の製鉄について、新技術として、水素還元製鉄（高炉法）による製造を考え、製品コストアップに応じたCO₂削減コストにおいて、新技術の排出原単位を適切な範囲で変化させて試算した。</p> <p>c) 新技術の排出原単位：下限を従来技術の半分、上限を従来技術の値程度とした。この上限より大きければCO₂は削減されない。</p> <p>d) 従来技術の排出原単位：2.0 tCO₂/t-鉄、現状の高炉(Blast Furnace)-転炉(Basic Oxygen Furnace)法の最新技術(Best Available Technology)の製造原単位とした^{※1}。</p> <p>e) 補足説明： ・製品コストアップをc (円/t-製品)、新技術の排出原単位をp (tCO₂/t-製品)、とすると、CO₂削減コストは $\text{水素還元製鉄のCO}_2\text{削減コスト} = \frac{c}{2.0-p} \text{ 円/tCO}_2$ となる。 ・水素還元製鉄（高炉法）について、CO₂削減コストと製品コストアップの関係を図に示す。新技術の排出原単位と、設備投資、製鉄プロセスコスト等に依存する製品コストアップが決まれば開発目標としてのCO₂削減コストを定量化できる。国によって異なるコストを負担するための制度や代替対象となる従来技術などによって導入可否が決定されることになるが、このように、環境価値を定量化することは開発者にとって、有用な指標になると考える。</p> <p>水素還元製鉄 従来技術（高炉-転炉）：2.0tCO₂/t-製品</p>  <p>革新技術の排出原単位 1.9 tCO₂/t-製品 1.8 tCO₂/t-製品 1.6 tCO₂/t-製品 1.3 tCO₂/t-製品 1.0 tCO₂/t-製品</p> <p>図 水素還元製鉄のCO₂削減コスト</p> <p>※1：Net-Zero Steel - Sector Transition Strategy -, Box1(Mission Possible Partnership, 2021) https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/10/MP-Steel-Transition-StrategyFinal-1.pdf</p>

表 CO₂削減コストの例示とその諸元

(※) 試算の種類

A：学習曲線等の実績から想定されるケース、B：専門機関の試算を参考にしたケース

C：政府目標や業界目標に基づいて試算したケース、D：その他のケース

技術分野	CO ₂ 削減コスト 円/tCO ₂	試算 種類 (※)	CO ₂ 削減コストの計算根拠 a) 新技術の単価, b) 従来技術の単価 (円/固有単位) c) 新技術の排出原単位, d) 従来技術の排出原単位 (tCO ₂ /固有単位) e) 補足説明																																		
プラスチックリサイクル	-10,000 ～5,700	A	<p>e) 補足説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> EU の試算^{※1}によるとプラスチック循環に関する様々な対策の削減コストは比較的安く、-10,000～5,700 円/tCO₂ (1 USD = 100 円で換算) の範囲である。この中でそのまま利用する農業分野のラッピングのリユースは最も低く-10,000 円/tCO₂、ケミカルリサイクル 5,500 円/tCO₂、容器包装のパッケージングのリユース 5,700 円/tCO₂ などと試算されている。なお、回収したプラスチック製品をそのまま利用するリユースは、化学合成や成形加工プロセスが不要なため、バージンプラスチックからの製造品（従来技術）より安価となる。したがって、削減コストはその定義式からマイナスの値となる。このことは、経済合理性を有しつつ、CO₂の削減が可能であることを意味している。 <p>※1：The Circular Economy, A Powerful Force for Climate Mitigation (SITRA, 2018) https://www.sitra.fi/app/uploads/2018/06/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation.pdf</p>																																		
CCS	7,050 ～12,400	B	<p>e) 補足説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> CCS の CO₂削減コストについて Global CCS Institute^{※1} が詳細に分析したレポートからの抜粋を表に示す。CO₂濃度が極端に高いアンモニア製造および随伴ガスを除き、2017 年時点では 7,050～12,400 円/tCO₂(1 USD = 100 円で換算) の CO₂削減コスト^{※2}であり、将来技術開発により 20～30%のコストダウンが期待されている。 <p>表 CO₂ 排出源毎の削減コスト^{※3}(USD/tCO₂)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="4">発電</th> <th colspan="3">製造業</th> <th rowspan="2">随伴ガス</th> </tr> <tr> <th>微粉炭 超臨界</th> <th>酸素燃焼 超臨界</th> <th>IGCC</th> <th>NGCC</th> <th>鉄鋼</th> <th>セメント</th> <th>アンモニア</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>従来技術</td> <td>78.5</td> <td>70.5</td> <td>97.0</td> <td>89.0</td> <td>77.0</td> <td>124.0</td> <td>25.4</td> <td>21.5</td> </tr> <tr> <td>将来</td> <td>55.0</td> <td>52.0</td> <td>46.0</td> <td>43.0</td> <td>65.0</td> <td>103.0</td> <td>23.8</td> <td>20.4</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：Global costs of carbon capture and storage 2017を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)</p> <p>※1：Global Cost of Carbon capture and Storage (Global CCS Institute, 2017) https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/201688/global-ccs-cost-updatev4.pdf</p> <p>※2：カーボンリサイクル技術ロードマップにおいては、CO₂分離回収のみで、2050 年以内に 1,000 円以下/tCO₂をターゲットとしている。</p> <p>※3：米国内、パイプライン輸送、CCS を前提としている。</p>		発電				製造業			随伴ガス	微粉炭 超臨界	酸素燃焼 超臨界	IGCC	NGCC	鉄鋼	セメント	アンモニア	従来技術	78.5	70.5	97.0	89.0	77.0	124.0	25.4	21.5	将来	55.0	52.0	46.0	43.0	65.0	103.0	23.8	20.4
	発電				製造業			随伴ガス																													
	微粉炭 超臨界	酸素燃焼 超臨界	IGCC	NGCC	鉄鋼	セメント	アンモニア																														
従来技術	78.5	70.5	97.0	89.0	77.0	124.0	25.4	21.5																													
将来	55.0	52.0	46.0	43.0	65.0	103.0	23.8	20.4																													

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

持続可能な社会の実現に向けた
技術開発総合指針 2023

2023年 8月 22日発行

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター(TSC)

■センター長 岸本 喜久雄

■センター次長 植木 健司
飯村 亜紀子 (2023年7月4日まで)

■総合指針チーム

相沢 一宏、阿部 真也、伊坂 美礼、伊藤 智、岩崎 亮太、宇木 俊晴、

榎本 啓士、岡田 満利、國谷 昌浩、熊野 裕介、小林 和輝、坂本 友樹、

櫻谷 満一、佐藤 優芽、寒川 泰紀、高 裕輔、徳弘 雅世、中村 勉、

仁木 栄、二関 洋子、正影 夏紀、増淵 耕平、松田 好司、水無 渉、

南 誓子、柳瀬 公紀、矢部 彰、山口 浩、山田 英永

(五十音順)

●本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

●本書は以下 URL よりダウンロードできます。
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。