

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau National Diet Library

論題 Title	脱炭素技術を実装するために必要な社会技術の諸課題
他言語論題 Title in other language	Challenges in Bridging Gap between Decarbonization Technologies and Society
著者 / 所属 Author(s)	岸本 充生 (KISHIMOTO Atsuo) / 大阪大学データビリティフロンティア機構教授・大阪大学社会技術共創研究センターセンター長・国立国会図書館客員調査員
書名 Title of Book	脱炭素社会の技術と諸課題 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Technologies for Decarbonized Society and Related Issues)
シリーズ Series	調査資料 2021-5 (Research Materials 2021-5)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2022-03-29
ページ Pages	143-156
ISBN	978-4-87582-892-1
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	様々な「脱炭素技術」が社会実装され、規制措置の導入が進むことを見越し、「技術と社会」及び「技術と政策」の間に存在するギャップを埋めるための「社会技術」を展望する。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

脱炭素技術を実装するために必要な社会技術の諸課題

大阪大学データリテリフロンティア機構 教授
大阪大学社会技術共創研究センター センター長
国立国会図書館客員調査員 岸本 充生

目 次

はじめに

I エマージングテクノロジーとしての脱炭素技術

- 1 リスクガバナンスの枠組み
- 2 脱炭素技術と労働安全衛生リスク

II 脱炭素技術のリスクとガバナンス

- 1 気候介入技術
- 2 太陽放射改変（SMR）におけるリスクトレードオフ

III 脱炭素技術のための規制と評価

- 1 規制影響評価（RIA）
- 2 メタン排出規制の費用と便益
- 3 温室効果ガスの社会的費用

おわりに

【要 旨】

脱炭素社会に向かうという強い社会的要請を受け、これから様々な「脱炭素技術」が社会実装され、脱炭素を目的とした規制措置の導入が進むことが想定される。こうした動向を見越して、技術と社会、及び、技術と政策の間に存在するギャップを可視化し、それらを埋めるための「社会技術」を展望した。社会技術には様々なツールやアプローチが含まれる。脱炭素技術が「脱炭素」であるか否か、またどの程度かを測定するライフサイクルアセスメント（LCA）もその一つである。本稿では、脱炭素技術の新興技術（エマージングテクノロジー）としての側面に着目し、ホライゾン・スキニングなどを利用して、倫理的・法的・社会的課題（ELSI）のリスクを早期に発見・対応することに焦点を当てた。その際にリスクトレードオフを解析するとともに、リスクガバナンスの枠組みを考慮する必要があることを、労働安全衛生と太陽放射改変（SRM）技術を例に示した。また、規制措置を用いる場合に必要となる規制影響評価（RIA）を取り上げた。温室効果ガスの排出抑制規制については、そのスコープや割引率などの論点があるものの「1トン排出削減費用」が有効な指標になるという特徴を持つ。

はじめに

2021年はグローバルレベルで「脱炭素」がアジェンダの最上位に躍り出た年となった。持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）やESG投資も追い風となり、あらゆるレベルの組織において脱炭素の優先順位が上がり、「脱炭素技術」に注目が集まっている。脱炭素技術とされているものの多くは同時に新興技術（エマージングテクノロジー）でもあることから、それらを社会実装するためには、他の新興技術と同様、安全性、セキュリティ、倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues: ELSI）などへの対応といった「社会技術」の開発と実装が必要不可欠である⁽¹⁾。後述するように、環境に優しい技術が、自動的に安全であったり、健康に良かったりする保証は全くないにもかかわらず、私たちは健康・環境・安全という互いに独立である属性を相互に関連付けてしまいがちである。本稿は、脱炭素技術が社会実装される際に、また脱炭素技術の社会実装を政策として推進するために必要となる社会技術について議論を整理することを目的としている。

脱炭素技術という言葉は、風力発電や太陽光発電、燃料電池車や電気自動車、二酸化炭素回収・有効利用・貯留（Carbon Capture, Utilization and Storage: CCUS）といった技術があらかじめ想定されており、意味を明確に定義されずに使われていることが多い。「脱炭素技術」は、量子技術やAI技術のように技術そのものの特性によって定義されるのではなく、達成目標によって定義されていることに特徴がある。そのため、技術単体で「脱炭素」であるかどうかを定義することは本来困難である。エネルギーには、直接的なエネルギー源である一次エネルギーと、一次エネルギーから製造される二次エネルギーがある。電気や水素は後者に含まれる。電気や水素は使用時には二酸化炭素を排出しないために、脱炭素技術の代表的なものとして挙げられることが多いが、これらの二次エネルギー技術が実際に「脱炭素技術」であるかどうかを確認するためには、ライフサイクル全体における炭素排出量を調べる、すなわち、原料となる

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和4（2022）年1月28日である。

(1) 新興技術を社会実装する際に生じる様々な課題については、岸本充生「新興技術を社会実装するということ」国立国会図書館調査及び立法考査局編『ゲノム編集の技術と影響—科学技術に関する調査プロジェクト2020報告書—』（調査資料2020-5）国立国会図書館，2021，pp.101-121。<https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11656216_po_20200508.pdf?contentNo=1>を参照。

一次エネルギーが何であり、どのように消費地まで運搬されるのかといった情報を得ることが不可欠である。このように、技術が実装される文脈や、どういう技術を代替するのかによって脱炭素の程度は大きく異なってくる。当該技術が、脱炭素か否か、あるいは脱炭素の程度がどれくらいかは、ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment: LCA）を適用して初めて評価が可能となる⁽²⁾。また、脱炭素技術は表面的には「炭素排出量」という一つの変数のみで定義されているが、他の変数についてどこまで配慮すべきか自明ではない。原材料の採掘や輸送における安全性、製造やリサイクルの現場での労働安全衛生、有害化学物質の排出や曝露（ばくろ）といった、炭素排出量以外に考慮すべき変数が多数あることを忘れてはならない。これらの変数と、脱炭素との間にリスクのトレードオフが存在する場合は、脱炭素という単純な見方は意思決定に有効でない可能性が高い⁽³⁾。

さらに、脱炭素を政策的に推進する場合は、規制という手段が取られることになるが、規制の内容や強度が適切であるかどうかを客観的に判断する基準が必要になる。このためのツールが規制影響評価（Regulatory Impact Assessment: RIA）であり、規制を遵守するためにかかる費用と想定される効果／便益を事前に可能な限り定量的に示すものである。エビデンスに基づく政策決定（Evidence-Based Policy Making: EBPM）の観点からも各国で規制意思決定に活用されている。

本稿のⅠでは、脱炭素技術の新興技術（エマージングテクノロジー）としての側面に焦点を当て、社会実装するために必要な条件を考察する。特に、見過ごされがちな労働安全衛生への影響に焦点を当てる。Ⅱでは、グローバルレベルでのガバナンスが課題となりそうな気候介入技術を取り上げ、リスクとガバナンスの問題について検討する。特に、太陽放射改変（Solar Radiation Modification: SRM）に焦点を当てる。Ⅲでは脱炭素を目的とした規制の在り方に焦点を当て、特に便益がグローバルであることから生ずる実務上の課題について、最近の米国でのメタン排出規制に関わる議論を例に論点をまとめる。

Ⅰ エマージングテクノロジーとしての脱炭素技術

1 リスクガバナンスの枠組み

脱炭素技術の中には既に社会において利用されているものもあるが、新しい技術、すなわち初めて社会実装されたり、既存の技術であるが新しい文脈で利用されたりするケースも多い。そうした場合、他の技術と同様、新興技術の社会実装という側面についても十分な検討が必要となる。

新しい技術が社会に実装される際には、新しいタイプのリスク（新興リスク、すなわちエマージングリスク）が生じることを想定しておく必要がある⁽⁴⁾。これらに事前に対応する準備ができていなければ、既存の法規制やルールに合わず社会実装が断念されてしまったり、逆にルール不在のまま社会実装されて事故や事件を引き起こしてしまったりすることになりかねない。新しい技術による事故や事件は社会からの注目を集めやすく、結果として過剰な規制が導入さ

(2) 本報告書の玄地裕「脱炭素技術のライフサイクルアセスメント」を参照。

(3) 原子力発電技術が典型的な例であるが、太陽光発電でも、水力発電でもリスクトレードオフは存在する。

(4) 新興リスク全般については、岸本充生「エマージングリスクという新知見—どう発見し、どう社会に生かすか—」『学術の動向』vol.25 no.12, 2020.12, pp.26-29などを参照。

れたり、人々の拒否反応を招いたりすることになり、技術の普及、すなわちイノベーションを妨げることになる。こうした可能性は脱炭素技術においても例外ではない。次節で取り上げるように、グリーンであることと安全であることは無関係であるにもかかわらず、グリーンであるものは安全であるかのように想定されがちである。風力発電が騒音や低周波の問題、あるいは鳥類への被害をもたらすことや、太陽光発電パネルの設置が環境破壊を招いたり、災害リスクを高めたり、廃棄物の問題を引き起こしたりすることも近年では認知されてきたものの、導入当初は政治や行政も含め、社会のリスク認知は極めて小さかったように思われる。

かつて米国でヒトゲノムを解読するプロジェクトが開始された際に、全てが解読されたとき生じうる影響をあらかじめ想像し、事前に対処しておくために、倫理的・法的・社会的含意（Ethical, Legal and Social Implications: ELSI）と呼ばれる研究プログラムが立ち上げられた。例えば、遺伝子情報による差別が起こり得ることを見出し、社会としての対応が必要であることが提案された。同様に、脱炭素技術についても社会実装された際に生じ得る ELSI を事前に見出し、それらへの対応をあらかじめ検討し、実施することが求められる。学術系 NPO である国際リスクガバナンス委員会（International Risk Governance Council: IRGC）はエマージングリスクのガバナンスのためのガイドラインを公表している⁽⁵⁾。ガイドラインでは次の五つのステップを繰り返すことが提案された。

第一ステップ：現在を理解し、将来を探索する。

第二ステップ：モデルと物語（ナラティブ）に基づいたシナリオを作成する。

第三ステップ：リスク管理オプションを生成し、戦略を策定する。

第四ステップ：戦略を実行する。

第五ステップ：リスクの進行と意思決定を再検討する。

第一ステップでは環境変化を予想し、それに伴って生じる可能性のある脅威と機会を見出し、それらの中の優先順位を付けて第二ステップで検討すべきものを選定する。このプロセスはホライゾン・スキヤニングと呼ばれる。第二ステップではそれらの脅威や機会が増幅又は低減するような複数のシナリオを、形式的なモデリングとストーリーテリングを組み合わせる形で策定する。第三ステップでは第二ステップで策定されたシナリオに従ってシナリオごとに適用可能な複数のリスク管理オプションを特定し、評価した上で戦略を策定する。第四ステップでは採用された戦略が実施される。第五ステップでは、萌芽的であったリスクと機会がどのように展開したかをモニターするとともに、意思決定の適切さや実績が検証され、必要に応じて第一ステップから改訂される。これらのプロセスは、ホライゾン・スキヤニングやテクノロジーアセスメントの方法と、リスクマネジメントの手順が組み合わさった枠組みとみなすことができる。脱炭素技術オプションについても、こうした繰り返しプロセスの対象とされることが望ましい。

2 脱炭素技術と労働安全衛生リスク

脱炭素技術に関連した労働についても上述と同じことが当てはまる。欧州労働安全衛生庁（European Agency for Safety and Health at Work: EU-OSHA）では、2000 年代初頭、欧州リスク

(5) International Risk Governance Council, *IRGC guidelines for emerging risk governance: guidance for the governance of unfamiliar risks*, 2015.

観測所 (European Risk Observatory) を設置し、体系的にエマージングリスクに対応することを開始した。その中で最初に取り上げられたテーマが「グリーンジョブ」であった。グリーンジョブとは、太陽光発電やリサイクルといった環境に優しい新規技術に関わる仕事のことであり、地球温暖化対策等で新しいグリーンジョブが急速に増えたことが、労働安全衛生分野に多くのエマージングリスクを生んでいるのではないかという懸念が高まったことを受けた取組である。文献レビューや専門家、労働安全衛生の管理者などへのインタビューに始まり、三つのフェーズから成る「フォーサイト」プロジェクトが実施された。結果として八つの技術分野について、それぞれ複数の変化が生じることで顕在化する可能性のある労働安全衛生上の課題が抽出された⁽⁶⁾。「脱炭素」が世界のトレンドとなり、さらに「グリーンジョブ」が増えつつある現在から見ると非常に先見の明かつ先進的な取組であった。

欧州委員会は、2019年に発表した「欧州グリーンディール」に基づき、2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとするカーボンニュートラルを目標とし、2030年までに排出レベルを1990年比で55%削減するための政策パッケージ (Fit for 55) を2021年7月、発表した⁽⁷⁾。これを受けて、EU理事会は「気候中立 (climate neutral) に向けた公正な移行の社会及び労働の側面への取組に関する勧告」を発表するために「エビデンス」の募集を行った。EU-OSHAはこれに対して以下のような意見書を提出した⁽⁸⁾。意見書の一部を以下に引用する。

「環境に良いことが、グリーンな仕事に従事している労働者や、気候中立への移行に伴って仕事が増える労働者の安全や健康にとっても良いとは限らない。この課題は、最近発表された「労働における健康と安全に関するEU戦略枠組み2021-2027」でも認識されている。環境を保護するために作られた規制や技術が、結果として労働者をより大きな危険にさらすというケースも既に見受けられている。例えば、埋立地に送られる廃棄物の量を減らした結果、その処理を仕事とする労働者の事故や病気の発生率が高くなった。また、建物のエネルギー効率を上げるための改修は、欧州で年間88,000人の命を奪っているアスベストに作業員が曝露することになる。

気候中立への移行に伴う新規の技術や作業プロセスは、新たな危険性をもたらす可能性があり、それに対処するための新しいスキルの組合せを必要とする。「古い」労働安全衛生 (OSH) の知識をそのまま転用することはできない。例えば、太陽熱温水器の設置には、屋根職人、配管工、電気技師のスキルの組合せが必要である。

デジタル技術は、欧州がより循環型経済に移行する上で重要な役割を果たすだろう。実際、欧州連合 (EU) は、「デジタル時代にふさわしい欧州 (a Europe fit for the Digital Age)」という密接に関連した政策プログラムを進めており、これは特に「循環型経済を支援する」ことを意図した取組である。デジタル化は、カーボンニュートラルな経済への移行とOSHの両方に機

(6) 詳しくは、岸本充生「エマージング・リスクの早期発見と対応—公共政策の観点から—」『保険学雑誌』642号、2018.9, pp.37-60. 5.1節「欧州労働安全衛生庁 (EU-OSHA) の取り組み」を参照。EU-OSHAによる文献は、European Agency for Safety and Health at Work, *Green jobs and occupational safety and health: Foresight on new and emerging risks associated with new technologies by 2020*, 2013.

(7) European Commission, “European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions,” 14 July 2021. <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3541>

(8) “Feedback from: European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA),” 11 November 2021. <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13247-Council-Recommendation-on-addressing-social-and-labour-aspects-of-the-just-transition-towards-climate-neutrality/F2751282_en>

会を提供できる。例えば、廃棄物処理におけるスマートロボットの使用による作業の自動化は、労働者を危険な状況から解放できる。しかし、デジタルな作業工程は、OSH、特に労働者のメンタルヘルスに対する懸念と同様に、法的な、規制上の、倫理的な問題を生じさせる可能性もある。したがって、気候中立に向けた公正なデジタル移行においてOSHを適切に管理する必要がある。

グリーン経済が拡大すると予想されるスピードは、スキルギャップを引き起こし、経験の浅い労働者が訓練を受けていないプロセスに関与し、その結果、安全や健康を危険にさらす可能性がある。また、労働者のスキルに対する二極化が進み、低スキルの労働者はより劣悪な労働条件を受け入れざるを得なくなる可能性もある。最後に、経済的・政治的圧力により、OSHの懸念が見過ごされる可能性がある。(後略)」

国内においても例えば、2000年代初期、環境に優しい技術として導入された、ごみ固形燃料(Refuse Derived Fuel: RDF)の焼却・発電施設において爆発事故が相次いだ⁽⁹⁾。しかし、これらの事象が、新興技術の社会実装に伴うエマージングリスクという枠組みで理解され、早期発見・対策のためのプロセスの実装が必要であるという議論に結びつくことはなかった。

Ⅱ 脱炭素技術のリスクとガバナンス

1 気候介入技術

脱炭素技術というくりに含めるかどうかは議論があり得るが、CO₂排出量削減が間に合わない際の緊急避難的な対策として、気候介入(climate intervention)技術への注目も高まっている⁽¹⁰⁾。これまでは「ジオエンジニアリング」と呼ばれることも多かったが、専ら気候変動の文脈で用いられるため、気候工学や気候介入と呼ばれることが多くなっている⁽¹¹⁾。地球温暖化を防ぐ目的で実施される、地球の気候システムへの意図的で大規模な介入と定義される⁽¹²⁾。気候介入技術は大きく2種類に分けられる。二酸化炭素除去(Carbon Dioxide Removal: CDR)と太陽放射改変(SRM)⁽¹³⁾である。両者を比較すると、リスク、ベネフィット(便益)、ガバナンス、ELSIのそれぞれの観点から全く異なっている。前者は大気から直接CO₂を回収して処理する技術であり、後者は地球の気候を冷却する技術である。CDRは手法で分類すると、生物学的な方法(植林、海藻栽培、海洋への鉄散布など)、工学的な方法(直接空気回収など)、化学的な方法(海洋をアルカリ化する方法など)に区別される。SRMは場所で分類すると、宇宙(太陽光反射など)、成層圏(エアロゾル注入など)、地表(屋根の反射率増加など)に区別される。CDRでは、海洋を広く使う方法以外は、地域が限定されるため、ガバナンス上の課題が比較的少ないと考えられるが、CCUS(二酸化炭素回収・有効利用・貯留)として検討するならば、回収から利用までに多数の工程を経る必要があるため、工程ごとに様々な法規制が関わってくることになる。これらの法規制が複雑で、新しい技術に十分に対応できていない

(9) 安原昭夫「ごみ固形燃料(RDF)の火災危険性と事故原因について」『安全工学』43(6), 2004, pp.392-399.

(10) American Geophysical Union, *Position Statement: Climate Intervention Requires Enhanced Research, Consideration of Societal and Environmental Impacts, and Policy Development*, 2018.

(11) 気候工学については詳しくは、杉山昌広『気候を操作する—温暖化対策の危険な「最終手段」—』KADOKAWA, 2021を参照。

(12) UNEPのウェブサイトによる。<<https://leap.unep.org/knowledge/glossary/geoengineering>>

(13) 後者はアルベド改変(Albedo Modification: AM)とも言われている。

こと、すなわち法規制ギャップが社会実装の妨げになっていることも指摘されている⁽¹⁴⁾。CDR に対して、宇宙や成層圏を利用する SRM は、関係するステークホルダーも多く、国際的な意思決定プロセスや意図しない影響のあった場合の対応など、検討しなければならない課題がより多く複雑である。実践した場合に生じるかもしれない意図せざる影響については次節で SRM を例に示す。

こうした技術に対しては、地球温暖化そのものの根本要因に対処できないことに加えて、研究すること自体が個人レベル及び政治レベルでの排出抑制インセンティブを損なってしまう、すなわちモラルハザードを招くという指摘もある⁽¹⁵⁾。しかし、同様の懸念は、気候変動への「適応 (adaptation)」についても過去に指摘されていたが、近年では軽減策とは別に、適応策の重要性についての認識も高まっている。適応策よりも一層不確実性が高い SRM について研究がなされないことは、将来の SRM の適用を抑制するどころか、SRM を実施せざるを得ない場合に、無知のまま実施される可能性を高めるだけになりかねないことが指摘されている⁽¹⁶⁾。しかし、大学や研究機関における、研究倫理審査を含む研究ガバナンスは、現状、影響が広範囲かつ長期間に渡り得る SRM 研究に適したガバナンスとしては明らかに足りておらず、研究そのものと同時並行で研究ガバナンスについての研究も推進する必要がある⁽¹⁷⁾。

2 太陽放射改変 (SRM) におけるリスクトレードオフ

気候変動がもたらすリスクを減らすために利用する SRM 技術もまたリスクをもたらす可能性があることから、片方のリスクだけを見てはその可否を判断することはできず、両方のリスクを比較する枠組みが必要となる。あるリスク (目標リスク) を減らそうとして別のリスク (対抗リスク) が増える事象は「リスクトレードオフ」と呼ばれ、過去にも様々なケースで顕在化している⁽¹⁸⁾。ジョン・グレアム (John D. Graham) とジョナサン・ウィナー (Jonathan B. Wiener) は、両方のリスクのタイプと影響を受ける集団に着目して、リスクトレードオフを 4 種類に分類した (表 1)。この表は、リスクトレードオフを分析する際の基本的な視座を与え

表 1 リスクトレードオフの分類

		目標リスクと対抗リスクのタイプ	
		同じタイプ	異なるタイプ
目標リスクに対して、対抗リスクがどこに影響するか？*	同じ集団	リスク相殺	リスク代替
	異なる集団	リスク移転	リスク変換

*目標リスク = 対策によって減らそうとするリスク、対抗リスク = 代替によって新たに生じるリスク

(出典) John D. Graham and Jonathan B. Wiener, *Risk vs. Risk: tradeoffs in Protecting Health and the Environment*, Harvard University Press, 1995 の Table 1.2 を基に筆者作成。

(14) 「欧米主導の CO2 貯留 日本勢に商機も国内に「法制の壁」」『日本経済新聞』(電子版) 2021.9.13. <<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC1195Q0R10C21A8000000/>>

(15) Duncan McLaren, “Quantifying the potential scale of mitigation deterrence from greenhouse gas removal techniques,” *Climatic Change*, 162, 2020, pp.2411-2428. <<https://doi.org/10.1007/s10584-020-02732-3>>

(16) Matthias Honegger, “Addressing risks and trade-offs in governance,” Marie-Valentine Florin et al. eds., *International governance issues on climate engineering Information for policymakers*, Lausanne: EPFL International Risk Governance Center, 2020, pp.72-90.

(17) Duncan McLaren and Olaf Corry, “The politics and governance of research into solar geoengineering,” *WIREs Climate Change*, vol.12 no.3, May / June 2021. <<https://doi.org/10.1002/wcc.707>>

(18) John D. Graham and Jonathan B. Wiener, *Risk vs. Risk: Tradeoffs in Protecting Health and the Environment*, Harvard University Press, 1995; ジョン・D. グラハム・ジョナサン・B. ウィナー編著、菅原努訳『リスク対リスク—環境と健康のリスクを減らすために』昭和堂、1998

るものである。

また、SRMの中でも代表的な手法であり、太陽光を減衰させる物質を成層圏に噴霧することで日射量を低減する手法である「成層圏へのエアロゾルの注入 (Stratospheric Aerosol Injection: SAI)」について、アラン・ロボック (Alan Robock) は、6分野にわたる28種類の懸念すべきリスクを列挙している (表2)⁽¹⁹⁾。

表2 成層圏へのエアロゾルの注入 (SAI) による潜在的なリスクのリスト

物理的及び生物学的 気候システム	①アフリカとアジアにおける干ばつ
	②乱反射する放射による生態系の攪乱 (かくらん)
	③オゾン層破壊
	④海洋の酸性化の進行
	⑤追加的な酸性雨と酸性雪
	⑥氷床の融解が止まらない
	⑦対流圏化学への影響
	⑧中断された際の急速な温暖化
人への影響	⑨太陽光発電の減少
	⑩太陽熱利用の質の低下
	⑪成層圏を飛行する飛行機への影響
	⑫大気の電気特性への影響
	⑬衛星のリモートセンシングへの影響
	⑭陸地の光学天文学の質の低下
	⑮日焼けの増加
美観	⑯注入技術の環境影響 (例えば地域的汚染、騒音、CO ₂ 排出)
	⑰より白い空
未知	⑱星を観察することがより困難に
	⑲実施中のヒューマンエラー
ガバナンス	⑳予期せぬ帰結
	㉑影響を急に止められない
	㉒商業的なコントロール
	㉓温度調節器 (サーモスタット) をコントロールするのは誰か
	㉔社会的混乱、国同士の対立
	㉕現行の条約との齟齬 (そご)
倫理	㉖モラルハザード (効果が出そうな見込みが軽減策への動機付けを弱める)
	㉗技術の軍事利用
	㉘道徳的権限 (人類はこれを実施する権利があるのか)

(出典) Alan Robock, “Benefits and Risks of Stratospheric Solar Radiation Management for Climate Intervention (Geoengineering),” *The Bridge*, vol.50 no.1, Spring 2020, p.65 の Table 2 を基に筆者作成。

(19) Alan Robock, “Benefits and Risks of Stratospheric Solar Radiation Management for Climate Intervention (Geoengineering),” *The Bridge*, vol.50 no.1, Spring 2020, pp.59-67.

リスクを検討する際にはベネフィット（便益）の検討も同時に必要である。SRMの主要なベネフィットは当然、地表面での気温を下げることであり、結果として洪水等のハザードを減らすことであるが、副次的なベネフィット（これは「コベネフィット」と呼ばれる。）の考慮も同時に必要である。ロボックは、SRMのコベネフィットとして、植物の生産性が上がったたり、日没の美しい情景が取り戻されたりといった事項も挙げている。こうした複雑なリスク状況に対しては、リスクガバナンスの枠組みと手順を用意し、それに基づいた分析が必要となる。カラ・グリーガ（Khara D. Grieger）らは、上で紹介した国際リスクガバナンス委員会（IRGC）によるガイドラインが提案した五つのステップを、成層圏エアロゾル注入（SAI）技術の社会実装に当てはめることでSRMガバナンスの在り方を検討した⁽²⁰⁾。

Ⅲ 脱炭素技術のための規制と評価

1 規制影響評価（RIA）

脱炭素技術の開発とイノベーションの促進のためには、研究開発や社会実装に対して金銭的なインセンティブを付与するだけでなく、炭素の大気中への排出に対して規制的措置を導入することも必要になるであろう。規制が導入される際には、利用可能な脱炭素技術が参照されると同時に、規制導入自体が脱炭素技術の研究開発を促進する側面も期待できる。発電所におけるCO₂の排出係数、自動車や建物の燃費などを規制しようとする場合、規制の内容や強度が社会全体にとって適切なものであるかどうかは、規制策定前に実施される規制影響評価（RIA）によって判断される⁽²¹⁾。RIAは1980年代初頭に米国で制度化されて以来、OECD加盟国で様々な形で制度化されてきた。日本は、OECD加盟国の中では最も遅く、行政機関が行う政策の評価に関する法律（平成13年法律第86号）の施行令が2007年に改正され（平成19年4月4日政令第157号）、法律と政令の策定時にはRIAを実施・公表することが義務付けられた（同施行令第3条第6号）。

最も早くRIAを導入してきた米国では、1981年から健康・安全・環境といったいわゆる「社会的規制」に対してRIAの実施が義務付けられている。根拠となった大統領令12291号は、1993年に公布された大統領令12866号に置き換えられ、現在でもこれが適用され続けている⁽²²⁾。この中に「各行政機関は、意図する規制の費用と便益の両方を評価し、一部の費用と便益は数量化が困難であることを認識しつつ、意図する規制の便益がその費用を正当化する旨の合理的な決定に基づいてのみ、規制を提案又は採用しなければならない。」という条文がある（Section 1.(a)）。特に、経済への影響が1億ドル以上と見込まれる規制は「重要規制」として、詳細な費用と便益の見積りが求められる（Section 3.(f)(1)）。

⁽²⁰⁾ Khara D. Grieger et al., “Emerging risk governance for stratospheric aerosol injection as a climate management technology,” *Environment Systems and Decisions*, vol.39, 2019, pp.371-382.

⁽²¹⁾ 国内の規制影響評価（RIA）については所管官庁である総務省行政評価局によるガイドライン「規制の政策評価の実施に関するガイドライン」（平成19年8月24日政策評価各府省連絡会議了承、平成29年7月28日一部改正）<https://www.soumu.go.jp/main_content/000499513.pdf>を参照。諸外国でのRIAの動向については、岸本充生「規制影響評価（RIA）の活用に向けて—国際的な動向と日本の現状と課題—」『経済系：関東学院大学経済経営学会研究論集』275号、2018.11, pp.26-44を参照。

⁽²²⁾ Executive Order 12866 of September 30, 1993, Regulatory Planning and Review, *Federal Register*, Vol.58 No.190, October 4, 1993, pp.51735-51744.

温室効果ガスの排出規制ももちろん RIA の対象である。脱炭素技術の社会実装を対象とする RIA において、規制遵守費用は重要な変数である。有害大気汚染物質などの場合は、人への曝露の大きさがリスクの大きさの鍵となるため、人々がどれくらい当該物質を摂取しているかを見積もる曝露評価が必須であるのに対して、温室効果ガスは地球上のどこで排出してもその影響（排出を削減すれば「効果」）は同じと考えて差し支えないことが特徴である。そのため、計算が比較的容易な「温室効果ガス（通常は二酸化炭素換算される）1 トンを排出削減するためにかかる費用」を用いて、値の小さい（安い）対策から順番に導入していくことで、理論上は、最も効率的な温暖化対策になる。この「1 トン排出削減費用」は、経済学では「限界排出削減費用」と呼ばれ、排出削減を進めるにつれて逡増していくことが知られている。政策上は もちろん、どこまで対策を進めるべきかについての線引きは必要となる。その線引きは、1 トンの排出を削減することで得られる便益の大きさであり、詳細は第 3 節で取り上げる。次節では、最近米国で規制案が公表されたメタンガスの排出規制の RIA を題材に論点を整理する。

新興技術である脱炭素技術を社会実装する際に既存の規制が障壁になることもあるため、規制緩和が必要な場面もあるだろう。しかし逆に、規制そのものが存在しないことが、脱炭素技術の適正な利用の妨げになることもあり、規制拡充が必要なこともある。これら両方の側面をうまく分析できるように RIA を始めとする規制管理ツールの在り方も見直していく必要があるだろう。

2 メタン排出規制の費用と便益

メタンは温暖化係数が CO₂ よりも大きく、全体としても CO₂ に次いで地球温暖化への影響が大きいとされている⁽²³⁾。ジョー・バイデン (Joe Biden) 大統領は就任直後の 2021 年 1 月、大統領令 13990 号「気候危機に取り組むために公衆衛生と環境を保護し、科学を取り戻すことに関する大統領令」を公表し、ドナルド・トランプ (Donald Trump) 政権で導入された全ての措置を本大統領令の第 1 節で定義された環境正義 (environmental justice) との整合性の観点から審査し、問題がある場合は停止・改訂・廃止を検討するよう要請した⁽²⁴⁾。バイデン大統領は 2021 年 9 月、世界全体でのメタンの排出量を 2030 年までに少なくとも 30% 削減することを目標とすることを発表し、英国グラスゴーで開催された国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会議 (COP26) において多くの国が賛同した⁽²⁵⁾。2021 年 11 月にはバイデン政権は、石油産業と天然ガス産業からのメタン排出を抑制するため、環境保護庁 (Environmental Protection Agency: EPA) による排出規制案を発表した⁽²⁶⁾。EPA は、州が既存の排出源について実施しなければならないモデル規制政策を定めた「排出ガイドライン」を提案した。大気清浄法⁽²⁷⁾の下では、連邦政府が新規排出源を直接規制できるのに対し、州には、EPA が設定する最低基準に従って既存排出源を規制する権限が与えられている。規制案では、新たに連邦政府の最低

(23) 「地球温暖化係数 (GWP) について」全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト <<https://www.jccca.org/faq/15950>>

(24) Executive Order 13990 of January 20, 2021, Protecting Public Health and the Environment and Restoring Science To Tackle the Climate Crisis, *Federal Register*, vol.86 No.14, January 25, 2021, pp.7037-7043.

(25) Patrick Wintour, "Biden unveils pledge to slash global methane emissions by 30%," *Guardian*, 2021.11.2. <<https://www.theguardian.com/environment/2021/nov/02/joe-biden-plan-cut-global-methane-emissions-30-percent>>

(26) "EPA Proposes New Source Performance Standards Updates, Emissions Guidelines to Reduce Methane and Other Harmful Pollution from the Oil and Natural Gas Industry," November 2, 2021. U.S. Environmental Protection Agency website <<https://www.epa.gov/controlling-air-pollution-oil-and-natural-gas-industry/epa-proposes-new-source-performance>>

(27) Clean Air Act, 42 U.S.C. § 7401 et seq. (1970)

基準の対象となる既存施設をどのように規制するかについては州がある程度の柔軟性を持つものの、州はその計画を EPA に提出して承認を得なければならないという建付けであるため、実質的には連邦政府による規制として機能することになる。規制案の公表と同時に、RIA も公表され、費用と便益の推計結果は表 3 のようになった。便益については、世代を超えた影響であることを考慮して、将来に発生する費用や便益を現在価値に換算するための割引率を、通常の 3% と 7% の 2 種類⁽²⁸⁾ではなく、2.5%、3%、5% 及び、3% の 95 パーセンタイル値の 4 種類が採用され、ここでは 3% の数値のケースが代表値として掲載されている。規制の遵守費用は通常どおり 3% と 7% の 2 種類の割引率で計算された。差引きの遵守費用（純遵守費用）は、天然ガスの回収から得られる収益を、遵守費用から差し引いた値となり、気候変動対策の便益（気候便益）からこれを引いた値が純便益 (Net Benefits) とされた。結果は、割引現在価値 (Present Value: PV) と 1 年当たりの価値 (Equivalent Annualized Value: EAV) の 2 とおりで示されている。気候変動対策の便益（気候便益）を計算する際の単価である、メタンを 1 トン排出削減することの金銭的価値は、「メタンの社会的費用 (SC-CH₄)」と呼ばれる（後述）。

表 3 メタン排出規制による便益と費用の推計のまとめ (2023~2035 年)

		3%の割引率			
		PV	EAV	PV	EAV
気候便益		\$55,000	\$5,200	\$55,000	\$5,200
		3%の割引率		7%の割引率	
		PV	EAV	PV	EAV
純遵守費用		\$7,200	\$680	\$6,300	\$760
	遵守費用	\$13,000	\$1,200	\$10,000	\$1,200
	天然ガス回収による収益	\$5,500	\$520	\$3,900	\$470
純便益		\$48,000	\$4,500	\$49,000	\$4,500
定量化及び金銭価値化されていない便益		メタン排出削減によるオゾン健康便益			
		VOC 排出削減による PM2.5 及びオゾン健康便益			
		HAP 排出削減による HAP 健康便益			
		視界の改善による便益			
		植物への影響の削減			

(注 1) 単位は 100 万ドル (2019 年価値)。

(注 2) PV は現在価値、EAV は等価 1 年価値。

(注 3) VOC：揮発性有機化合物、HAP：有害大気汚染物質。

(出典) “Table 1-6, Projected Benefits, Compliance Costs, and Emissions Reductions for the Primary Proposed NSPS OOOOb and EG OOOOc, Options 2023–2035 (million 2019 \$),” U.S. Environmental Protection Agency, *Regulatory Impact Analysis for the Proposed Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review*, EPA-452/R-21-003, October 2021, p.1-13 を基に筆者作成。

(28) 米国の RIA は、大統領府にある行政管理予算庁 (Office of Management and Budget: OMB) によるガイドライン (Circular A-4) に基づいて作成される。割引率については、3% と 7% の 2 種類を使うことが定められている。U.S. Office of Management and Budget, Circular, A-4 “Regulatory Analysis,” September 17, 2003. <https://obamawhitehouse.archives.gov/omb/circulars_a004_a-4/>

3 温室効果ガスの社会的費用

気候変動対策の中でも軽減策は、便益の受け手はグローバルであるのに対して、費用の担い手がローカルになるという非対称性がある。そのため、RIAにおいて採用される費用便益分析の範囲が常に問題になる。温室効果ガス対策の便益は通常、排出削減トン数に排出1トン削減の金銭的価値を掛け合わせることで求められる。米国では、RIAにおいて省庁横断的に利用できる「1トン削減の金銭的価値」の公式値を決めるために、政府内に2009年、省庁間作業グループ（Interagency Working Group: IWG）が設置された。2010年に「炭素の社会的費用（SC-CO₂）」が、主要な三つの統合評価モデルで算出された値の平均値として公表され、2013年に値が更新された。二酸化炭素以外の温室効果ガスについても、2016年には「メタンの社会的費用（SC-CH₄）」と「亜酸化窒素の社会的費用（SC-N₂O）」が同様の方法を用いて算出された。しかし、トランプ大統領は2017年、就任直後に公布した大統領令13783号においてIWGを廃止した上で、地球温暖化対策の便益の推計範囲を米国内に限定するとともに、割引率を通常の3%と7%に戻す形でSC-CO₂の値を変更した⁽²⁹⁾。その結果、SC-CO₂公式値は以前に比べて一桁小さくなり、すなわち気候変動対策の便益もおよそ一桁小さく見積もられることとなった。こうして、オバマ（Barack Obama）政権において導入された既設の石炭火力発電所におけるCO₂排出規制が、トランプ政権において廃止されたが、両者ともにRIAを用いて費用を便益が正当化すると主張するという興味深い結果となった⁽³⁰⁾。つまり、オバマ政権では規制導入の便益が、トランプ政権では規制廃止の便益が費用を上回るという費用便益分析の結果が示されたのである。

2021年1月にバイデン大統領は大統領令13990号を公布することで、大統領令13783号を廃止するとともに、IWGを復活させ、最新の知見を用いて、CO₂を始めとする温室効果ガスの社会的費用の公式値を更新するように求めた。各種温室効果ガスの社会的費用の計算に当たっては、その範囲が再びグローバルに拡大され、割引率も以前の4種類に戻された。社会的費用の暫定値は大統領令に従って、2016年の数値に基づき、2021年2月に公表され、前節で紹介したRIAにも採用された（実際の数値は表4）。各種温室効果ガスの社会的費用の完全版は2022年に発表される予定である。

(29) Executive Order 13783 of March 28, 2017, Protecting Energy Independence and Economic Growth, *Federal Register*, vol.82 No.61, March 31, 2017, pp.16093-16097.

(30) 詳しくは、岸本充生「環境規制における規制影響分析（RIA）の活用と役割—米国の石炭火力発電所規制を例に—」『環境情報科学』vol.48 no.1, 2019, pp.49-54を参照。気候便益の範囲と割引率以外には、同時に排出削減されるPM2.5による健康便益をコベネフィットとして含めるべきかについても論点となった。

表4 メタンの社会的費用 (SC-CH₄) の暫定値 (1 トン当たり、2019 年価値)

年	割引率と統計値			
	5% 平均	3% 平均	2.5% 平均	3% 95 パーセントイル
2023	\$750	\$1,600	\$2,100	\$4,300
2024	\$770	\$1,700	\$2,200	\$4,400
2025	\$800	\$1,700	\$2,200	\$4,500
2026	\$830	\$1,800	\$2,300	\$4,700
2027	\$860	\$1,800	\$2,300	\$4,800
2028	\$880	\$1,900	\$2,400	\$4,900
2029	\$910	\$1,900	\$2,500	\$5,100
2030	\$940	\$2,000	\$2,500	\$5,200
2031	\$970	\$2,000	\$2,600	\$5,300
2032	\$1,000	\$2,100	\$2,600	\$5,500
2033	\$1,000	\$2,100	\$2,700	\$5,700
2034	\$1,100	\$2,200	\$2,800	\$5,800
2035	\$1,100	\$2,200	\$2,800	\$6,000

(出典) Interagency Working Group, *Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990*, 2021.2, Table A-2 を基に筆者作成。

おわりに

本稿では、脱炭素技術や脱炭素を目的とした規制措置の導入が進むことを見越して、技術と社会、及び、技術と政策の間のギャップ部分に焦点を当てた。生体認証技術⁽³¹⁾においても、ゲノム編集技術⁽³²⁾においても、新興技術については、技術そのものの開発と並行して、技術と社会、及び、技術と政策の間のギャップを埋めるための「社会技術」の研究開発及び社会実装が必要不可欠である。新型コロナウイルス感染症対策においても、接触確認アプリ COCOA の作成と、それが感染拡大を防ぐことの間には大きなギャップがあったことは誰の目から見ても明らかであった。両者をつなぐためには、人々にダウンロードしてもらうための知恵、感染対策として使ってもらえるような工夫に加えて、アプリの使い方、いわばその「トリセツ」も同時に作成することが必要であった⁽³³⁾。

本稿では脱炭素技術と社会、あるいは、脱炭素技術と政策の間のギャップを可視化し、そのギャップを埋めるための様々な「社会技術」を展望した。まず、「脱炭素技術」というやや特殊なくくりの技術群について、「脱炭素」であるか否か、また「脱炭素」の程度を測定する社

(31) 国立国会図書館調査及び立法考査局編『生体認証技術の動向と活用—科学技術に関する調査プロジェクト 2018 報告書—』(調査資料 2018-6) 国立国会図書館, 2019.

(32) 国立国会図書館調査及び立法考査局編『ゲノム編集の技術と影響—科学技術に関する調査プロジェクト 2020 報告書—』(調査資料 2020-5) 国立国会図書館, 2021.

(33) 岸本充生・工藤郁子「接触確認アプリと ELSI に関する 10 の視点 Ver.1.0～読み比べ編～」『ELSI NOTE』No.4, 2020.6.18. <<https://elsi.osaka-u.ac.jp/research/443>>

会技術としてライフサイクルアセスメント（LCA）が不可欠であることを指摘した。二つ目は、新興技術として、ホライズン・スキャニングなどを利用して、倫理的・法的・社会的課題（ELSI）を早期に見つけて対応することが必要であることを、労働安全衛生リスクを例に示した。三つ目は、脱炭素技術には多様なリスクをもたらすことが想定されるものも多く、リスク同士のトレードオフ構造を解析するとともに、リスクガバナンスの枠組みに基づいた対応が必要となることを指摘した。特に、多様なステークホルダーが関係する場合、例えば太陽放射改変（SRM）技術などでは、総合的なガバナンスアプローチが必要不可欠である。最後に、規制措置を用いる場合に規制影響評価（RIA）を活用すべきことを指摘した。温室効果ガスの排出抑制を対象とする規制については、「1トン排出削減費用」が有効な指標になることを示すとともに、効果のスコアや割引率の値、コベネフィットの扱いなどについて争点があることを指摘した。このような一連の社会技術も同時に社会実装されることなしに脱炭素技術の社会実装がうまくいくことはない。社会技術の研究開発も含めた、脱炭素技術の研究開発及び社会実装が望まれる。

（きしもと あつお）