



脱炭素化の 最適解とは

温室効果ガス排出量を劇的に減らすには、コストを長期的視点でとらえることが重要だ。

ケネス・ギリンガム

科

学界のコンセンサスは明白だ。干ばつ、山火事、ハリケーン、沿岸部の洪水氾濫といった自然災害の増加や深刻化は、気候変動と関係している。経済損失の規模は正確にはわからないが、きわめて甚大であることを示す有力な証拠がある。政策当局者にとって難しいのは、温室効果ガスの排出抑制策にどれだけ投資すべきか判断することだ。そのためには再生可能なエネルギー源から電気自動車まで、様々な選

択枝のコストを比較できるようにする必要がある。

政策決定の緊急性は一段と高まっている。気候問題の研究者は急激かつ大幅な排出抑制を訴え、遅くとも2050年までに正味ゼロ排出を目指すべきだと主張する(Millar and others 2017)。この目標はすでに多くの国々が積極的に受け入れているが、実現には世界経済のエネルギー源を抜本的に変える必要があり、通常の技術進歩ではとても間に合わない。事実、アメリカのエネルギー情報局の2019年版『世界エネルギー見通し』は、2050

短期的にはコスト高に見えても、 長期的にはイノベーションを誘発し、 コストが低くなる選択肢もある。

年の時点でも電源の57%は化石燃料が占めると予測している。

通常の技術進歩にとどまらず、「2050年に正味ゼロ排出」の目標達成に近づくためには、どれだけの費用がかかるのか。この問いに答えるには、短期的コストと長期的コストを区別することが重要だ。短期的に見ると、コストをかけずに排出量を抑える方法はいくつかあるが、大幅な削減を目指そうとすると、すぐにコスト上昇という壁にぶつかる。しかし新たな低炭素技術を使った方法など、短期的にはコスト高に見えても、長期的にはイノベーションを誘発し、コストが低くなる選択肢もある。つまり、排出抑制策の長期的コストは、一般に考えられているよりも低くなる可能性がある。

技術の短期的コスト

経済学者が温室効果ガスの排出抑制策の短期的コストを算出する際には、先行投資を見積もり、それを削減できる二酸化炭素(換算)のトン数で割るという方法をとる。たとえば、政府が風力発電プラントの設置を促進するために2,000万ドルを支出し、その結果、二酸化炭素排出量が100万トン減少すれば、抑制策の短期的コストは1トンあたり20ドルとなる。この方法は様々な抑制策のコストを比較するのに役立つ。

もちろん特定の技術や政策だけを切り離し、結果を分析するには注意が必要だ。たとえば様々な政策は相互に影響しあうこともある。また、技術に付随するコストは立地や導入の仕方によって変わってくる。しかもコストは毎年変化する。太陽光発電や風力発電のコストはここ10年で急速な低下が進み、その傾向は今後も続きそうだ。

私は同僚のジェームズ・ストックとともに、最近の経済学の文献や米エネルギー情報局の2018年版『年次エネルギー展望』をもとに、温室効果ガスの排出を抑制する様々な技術について補助金抜きのコストを評価した(図表1)。コストは現在の石炭火力発電との比較で表している。石炭は最も多く炭素を排出する燃料であることから、有効な比較対象と言える。多くの国の政策当局者は、脱炭素化に向けて既存の石炭火力発電所を閉鎖すべきか、判断を迫られるだろう。ここに挙げた評価はアメリカの平均値であり、他国に当てはめる際には注意が必要だ。

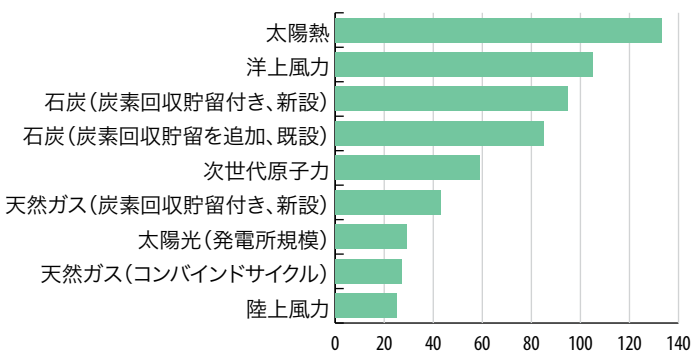
ここから読み取れる最も驚くべき事実は、再生可能エネルギー技術は最もコストの低い部類に入るとのことだ。こうした技術のほとんどは市場がグローバル化しているため、算出結果は他国にも応用可能である。直接的あるいは間接的な補助金を含めれば、太陽光や風力発電のコストはさらに低くなるかもしれない。とはいえ、試算では再生可能エネルギーの間欠性は考慮していない。結局のところ、太陽は常に照っているわけではなく、風も常に吹いているわけではない(Joskow 2019)。再生可能

図1

電源のコスト比較

再生可能エネルギーは既存の石炭を使った発電技術と比べて最もコストが低い部類に入る。

(二酸化炭素1トンあたりの金額、2017年)



出所: Kenneth Gillingham and James H. Stock, "The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions," *Journal of Economic Perspectives* 32, no. 4 (Fall 2018): 53-72.

注: 推計値は米エネルギー情報局の2018年版『年次エネルギー見通し(Annual Energy Outlook)』より引用。コストは2022年に稼働する設備に関する予測値。コストには連邦政府の再生可能エネルギーに対する税額控除その他の補助金を含まない。

エネルギーの構成比を高めるには、揚水水力発電や蓄電池のような蓄電技術、あるいは風や太陽光が弱まったときに迅速に不足を埋められる何らかの発電手段で補う必要がある。

アメリカの場合、石炭に代わる低コストで低炭素の選択肢となるのは「コンバインドサイクル発電」だ。ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせて発電効率を高める仕組みで、水圧破碎技術によって安価かつ豊富に供給されるようになったシェールガスを活用する。ただし、ここには注意点がひとつある。1トンあたり27ドルという評価コストは、ガス井、パイプライン、あるいは貯蔵施設からメタンガスが一切漏れないことを前提としている。メタンガスは温室効果がきわめて大きい。2015年のカリフォルニア州アライソ溪谷での大量ガス漏れ事故からも明らかのように、天然ガス発電には大量の温室効果ガスが発生し、削減される温室効果ガス1トンあたりのコストが高くなるリスクがある。

社会的コスト

こうした排出抑制策に投資することがどれだけ理にかなっているか判断する方法のひとつが、炭素の社会的コストと比較することだ。社会的コストとは、二酸化炭素などの温室効果ガス1トン大気中に放出することで損害がどれほど増えるかを定量化したものだ。たとえば、地球温暖化による農業収入の減少（北方の気候では増加になることもある）、潮位上昇による洪水の被害、熱帯サイクロンの大型化や山火事の増加による損害などである。アメリカのオバマ政権時代に作成された中位推計では、2019年の社会的コストは二酸化炭素1トンあたり50ドルとなっている。

この社会的コストの推計値と比較してみると、炭素による損失よりコストが低い排出抑制技術（つまり当然導入すべき技術）がいくつかある一方で、太陽熱発電や洋上風力発電など割高なものもある。1トンあたり50ドルという推計値以外にも、参考になるベンチマークは存在する。たとえば国際通貨基金（IMF）はこのほど、二酸化炭素1トンあたり75ドルの税金を世界一律で適用すると、工業化以前と比較した世界の平均気温上昇を摂氏2度未満に抑えるというパリ協定の目標が実現可能になるとの試算を示した。50ドルではなくこの75ドルという推計値と比較すると、次世代原子炉も炭素の社会的コストより割安な選択肢になる。

表1

政策によってコストは大きく異なる

二酸化炭素の排出抑制策の短期的コストには大きな違いがあることが、経済分析から明らかになっている。

政策	二酸化炭素の排出削減コストの推計値 (1トンあたりの金額、2017年)
行動科学的省エネ	-190
コーンスターチ・エタノール	-18~+310
森林再生	1-10
再生可能エネルギー・ポートフォリオ基準	0-190
企業別平均燃費（CAFE）基準	-110~+310
風力発電補助金	2-260
クリーンパワープラント	11
ガソリン税	18-47
メタン燃焼規制	20
連邦政府の石炭リース削減	33-68
農業による排出規制	50-65
全米クリーンエネルギー基準	51-110
土壌管理	57
家畜管理規制	71
集光型太陽熱発電の拡大	100
再生可能燃料補助金	100
低炭素燃料基準	100-2,900
太陽光発電システム補助金	140-2,100
バイオディーゼル	150-420
省エネプログラム	250-300
エコカー買い替え補助金	270-420
耐候化補助プログラム	350
専用バッテリー電気自動車補助金	350-640

出所: Kenneth Gillingham and James H. Stock, "The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions," *Journal of Economic Perspectives* 32, no. 4 (Fall 2018): 53-72.

注: 表中の政策は世界各国で導入されているが、大部分はアメリカのものである。二酸化炭素以外の温暖化ガスのコストは、その物質の温暖化効果に基づいて二酸化炭素に換算した。推計値は個別の研究あるいは複数の研究に基づいている。

政策の短期的コスト

ここまで見てきたのは、様々な「技術」の補助金を除いた現在のコストである。これは近い将来、市場がどの方向へ進むかを理解する上で参考になる。旧世代の発電所が老朽化のため閉鎖され、新しい発電所の建設が進む中で、政府がどのような政策をとるにかかわらず再生可能エネルギーへの転換が進むことは明らかだ。しかしこの転換は、各国政府が野心的目標を定め、こうした目標にしたがって行われるときほどは速く進まない可能性がある。このため政府が選択しうる様々な「政策」の排出抑制コストも理解することが重要だ。

経済学の文献を見ると、政府が実施し、評価対象となった政策のコストには非常に幅があることがわかる(表1)。最も安価なのは省エネを促す政策的介入で、コストが増えるどころかむしろ抑えられる。こうした介入は行動経済学で「ナッジ」と呼ばれる政策手法であり、提供する情報の内容や見せ方を変えるだけで、人々のエネルギー消費にかかわる意思決定を環境にやさしい方向へとそっと押す(ナッジする)ことを意味する。電気料金の請求書に、その家庭の電力消費量が近隣の家庭と比べてどうかというレポートを同封するというのが有名な例だ。こうした介入にはさほど費用がかからず、電力消費量を約2%抑える効果もあり、差し引きコストはマイナスになる。こうした手法は費用の持ち出しはないものの、排出抑制効果はわずかで、思い切った脱炭素化への貢献は比較的小さい。

一方、最もコストが高い選択肢には、短期的な静的コストだけを見ると非常に割高な印象を与える政策が並ぶ。

特に目立つのが、再生可能エネルギーの発電を増やすための政策と、輸送手段の脱炭素化を促す政策だ。最もコストが高いのは、電気自動車への補助金である。それは充電スタンドに化石燃料で発電した電気が使われるケースが多く、それによって排出抑制効果が減じられるためだ。

しかし突き詰めていくと、こうした選択肢のコストは表1に示された短期的推計よりも低い可能性がある。その多くには大気汚染の低減などの副次的効果があるので、費用の高さを差し引いても魅力があるかもしれない。それに加えて長期的に見ると、政策が誘発する技術革新の波及効果によって、排出抑制効果や炭素1トンあたりのコスト減はまったく違ってくる可能性がある。

長期的な動的成本

なぜイノベーションの波及効果によって、大きな違いが出てくるのか。二酸化炭素は大気中に何百年、何千年ととどまるため、気候変動は複数世代にまたがる長期的問題である。このため技術の変化やイノベーションは、化石燃料の代替手段を開発し、気候変動を緩和する長期的な取り組みにおいて重要な意味を持つ。炭素排出を大幅に減らせる技術はすでに存在するが、エネルギーシステムには慣性が非常に強く働く。また新技術のコストは下落する余地も大きい。こうした特性を踏まえると、今日新たな技術に投資することで将来の排出削減コストが低下することを考慮に入れた、長期的かつ動的な視点を持つべきであることがわかる。

長期的かつ動的な視点がふさわしい理由はいくつかある。経済学者は企業の研究開発には波及効果があることを知っている。技術を開発した企業はたいいてい、その恩恵の一部しか手に入れることができないからだ。たとえば、ある特許が失効すれば、この特許に関連するイノベーションをどの会社も利用できるようになる。新たな技術の製造方法や管理方法が改善することでそのコストが低下し(よく「実践を通じた学習」と呼ばれる)、コスト減の一部が他の企業に波及するケースもある。たとえば半導体産業では、企業が各世代の半導体製造に習熟するとともに製造コストが下落し、下落したコストが同業他社にも広がるという証拠がある(Irwin and Klenow 1994)。単一の規格を採用した恩恵が社会全体に波及するなど、正のネットワーク効果が生じるケースもある。たとえば単一のプラグですべての電気自動車を充電できるようにすることだ。ここに挙げた3種類の波及効果はいずれも他の企業がコストを抑えることを可能にする。それによって社会は豊かになり、政策当局者には波及効果を生み出すような政策を慎重に設計しようとする経済的動機づけが働く。

波及効果に加えて、最近のクリーンエネルギー・イノベーションに関する経済学の研究は、短期と長期では最適な政策は大きく変わってくる可能性があることを強調してきた。今日の支出には長期的効果をもたらす可能性があるというシンプルな理由からだ。短期的にはお金のかかる排出抑制方法が、イノベーションを誘発し、長期的には現行の方法よりコストが低くなるかもしれない。その好例が目下、蓄電池など急速に技術が向上している電気自動車への補助金だ。今クリーン・テクノロジーを支援する政策をとることで、将来コストを大幅に削減できるならば、現時点でコストの高い選択肢を選ぶこと

技術の変化やイノベーションは、化石燃料の代替手段を開発し、気候変動を緩和する長期的な取り組みにおいて重要な意味を持つ。

は理にかなっているかもしれない(Acemoglu and others 2016; Vogt-Schilb and others 2018)。理論上この考えは低炭素のイノベーションを採用する会社が1社しかなくイノベーションの波及効果がゼロであっても正しいが、現実にはほぼ確実に波及効果が生じ、長期的コストは低下する。重要なのは、社会が気候変動への最適な対策を選択する際、長期的な最適解は短期的かつ近視眼的な判断とは異なる可能性があるということだ。もちろん技術がどのような進歩を遂げるかを見きわめるのは難しく、あらゆる判断に不確実性はつきものだ。ただ成熟した技術には登場したばかりの技術ほど大きな飛躍は見込めないことはわかっている。このため長期的視点が当てはまるのは、比較的新しく、将来的なコスト削減の余地が大きい低炭素技術だけである。

ゲームチェンジャー

ここで最初の問いに戻ろう。2050年に温室効果ガスの正味ゼロ排出を達成できるほどの大幅な脱炭素化は可能だろうか。答えはイエスであり、現時点でも実現可能である。技術はすでに存在するからだ。とはいえ、エネルギーシステムのそれほどの大転換は一気に進めようとするコストが大きく困難だろう。化石燃料への依存度の高い発展途上国では短期的に莫大な移行コストがかかることを考えれば、なおさらだ。すぐに実行できる安価な対策は確かにある。省エネ対策、効率的なエネルギー使用を促すナッジ、老朽化した化石燃料の発電所を再生可能燃料のものに置き換えることなどだ。炭素の社会的コストの推計値をもとにすると、こうした対策のコストはそれによって回避できる気候変動被害をすでに下回っている。一方、他の多くの対策は短期的にかなりコスト負担が大きい。新たな低炭素技術を推進するための取り組みは特にそうだ。しかし政策によってイノベーションが誘発される可能性が大きければ、長期的なトータルコストは大幅に低下するかもしれない。気候変動対策を検討する上では、イノベーシ

ョンを念頭に置いた長期的視点が欠かせない。小型モジュール原子炉や炭素捕捉技術のようなイノベーションは、状況を一変させる「ゲームチェンジャー」となり、低コストで温室効果ガス排出ゼロを実現する原動力となるかもしれない。もちろんデンマークの物理学者、ニールス・ボーアの言うように「こと未来については、予測を立てるのはきわめて困難である」。技術が将来にわたってどのように進歩するかは未知数であり、正味ゼロに到達するための最終的コストは推測するしかない。しかし経済全体でカーボンプライシング(炭素価格付け)を進めると同時に新技術に思慮深く投資するなど、低コストの温室効果ガス抑制策と低炭素型イノベーションの両方にインセンティブを付与することで、悔いなく未来に備えることはできるはずだ。FD

ケネス・グリーンガムはイェール大学准教授で、専門は環境経済学とエネルギー経済学。本稿は2018年にジェームズ・H・ストックと執筆しJournal of Economic Perspectivesに掲載された論文「The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions」に加筆したものである。

参考文献

- Acemoglu, Daron, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley, and William Kerr. 2016. "Transition to Clean Technology." *Journal of Political Economy* 124, no. 1: 52–104. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/684511>
- Irwin, Douglas, and Peter Klenow. 1994. "Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry." *Journal of Political Economy* 102, no. 6: 1200–27. <https://doi.org/10.1086/261968>
- Joskow, Paul L. 2019. "Challenges for Wholesale Electricity Markets with Intermittent Renewable Generation at Scale: The US Experience." *Oxford Review of Economic Policy* 35, no. 2: 291–331. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grz001>
- Millar, Richard J., Jan S. Fuglestedt, Pierre Friedlingstein, and others. 2017. "Emission Budgets and Pathways Consistent with Limiting Warming to 1.5°C." *Nature Geoscience* 10: 741–47. <https://www.nature.com/articles/ngeo3031>
- Vogt-Schilb, Adrian, Guy Meunier, and Stephane Hallegatte. 2018. "When Starting With the Most Expensive Option Makes Sense: Optimal Timing, Cost and Sectoral Allocation of Abatement Investment." *Journal of Environmental Economics and Management* 88: 210–33. <https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2017.12.001>