

論 文

エネルギー投入と経済成長*

～日本経済の経験から何を学ぶか？～

野村 浩二**

＜要旨＞

適切なエネルギー環境政策を導くために、戦後日本の経済成長に伴い持続的に実現してきたエネルギー生産性の改善（energy productivity improvement: EPI）の経験から何を学ぶことができるだろうか。本稿は、マクロ的に観察される EPI のグロス指標の内に含まれる構造変化、とくに 2000 年代後半からの EPI 加速要因を考察しながら、政策的なインプリケーションを導くことを目的としている。本稿での測定によれば、戦後日本の持続的な EPI の実現において、政策的な推進による加速はとくに認められず、むしろ 2000 年代後半までの改善スピードは半世紀にわたり大きく逡減してきたことが見いだされる。そして近年の EPI 加速は、エネルギー多消費的な財の海外生産シフトによって嵩上げされており、またエネルギー消費の抑制を求められた国内産業は資本生産性や労働生産性を犠牲とする反作用を伴うものとなったと評価される。エネルギー価格変化を含む評価では、2021–22 年において日本経済の直面する実質単位エネルギーコストは急激に上昇し、エネルギー価格高騰への脆弱性は戦後最大レベルにまで高まっていることが示される。数十年を要するエネルギー転換において、国内での拙速な排出削減に執着せずに、移行期の経済効率を確保することが求められる。

JEL Classification Codes : D24, L60, O44, P18, Q43

Keywords : エネルギー生産性の改善（EPI）、全要素生産性（TFP）、実質単位エネルギーコスト（RUEC）、実効輸入依存度（EID）

* 本稿は、日本のエネルギー投入と経済成長および生産性に関する実証分析として、野村（2021）からの 2015 年基準国民経済計算への対応による遡及推計、また計数の更新推計をした Nomura（2023）に基づき、近年のエネルギー生産性改善の加速要因とその政策的インプリケーションを中心に論じたものである。本稿における誤りはすべて筆者の責に帰す。

** 野村 浩二：内閣府経済社会総合研究所客員主任研究官、慶應義塾大学産業研究所教授。

**Energy Input and Economic Growth:
What Can We Learn from the Japanese Economic Experiences?**

By Koji NOMURA

Abstract

What can we learn from the experiences of sustained energy productivity improvement (EPI) in the economic growth and structural change of the postwar Japanese economy to guide appropriate energy and environmental policies? This paper aims to derive implications for policy by discussing the structural factors contained within the macro-observed EPI gross indicators, especially the factors behind the acceleration of the EPI since the late 2000s. The measurements in this paper show that there has been no policy-driven acceleration in the sustained realization of the EPI in the postwar Japanese economy, but rather a significant diminution in the speed of improvement over the past half-century until the late 2000s. The acceleration of the EPI in recent years has been accompanied by a shift of energy-intensive goods to overseas production, and domestic industries that are required to curb consumption have been forced to lower their capital and labor productivity. The evaluation, including price changes, shows that the real unit energy cost facing the Japanese economy rose sharply in 2021–22, increasing its vulnerability to energy price hikes. In an energy transition that will take decades, it is necessary to ensure economic efficiency during the transition period without obsessing over poor domestic emission reductions.

JEL Classification Codes: D24, L60, O44, P18, Q43

Keywords: Energy productivity, Total factor productivity (TFP), Real unit energy cost (RUEC),
Effective import dependency (EID)

1. はじめに

エネルギー投入のコストは、国内総生産（GDP）の数パーセントに過ぎないが、経済成長におけるエネルギーの重要性はその見かけ上の数値をはるかに上回る。エネルギーはすべての生産および消費活動に利用されており、その価格高騰は経済体系へと直接・間接的に広範な影響を与える。そしてより重要なことは、安価で安定的なエネルギー供給が損なわれることに対する懸念は、国内の資本蓄積を停滞させ、労働生産性の改善スピードを大きく低迷させることである。資本（機械設備、建設物、ソフトウェアなど）の稼働にはエネルギーが不可欠である。労働者は、自らの人的能力を高めることよりも、より多くの、そしてより質の高い資本を利用することで、その生産性を高めてきた。それが経済成長の主要なエンジンであった（Jorgenson 2009, Gordon 2016）。

とくに質の高いエネルギーとして、電力の役割は強調される。エネルギー資源分野において著名な米国の経済学者 Sam Schurr は、20 世紀の米国経済におけるその貢献を分析し、電力を「技術進歩の仲介者（agent of technological progress）」と称した（Schurr et al. 1990）。技術は資本に体化され、資本の稼働には 2 次エネルギーとしての電力が必要となる。経済成長において電力の役割がとくに強調され始めたのは、米英の 1920 年代後半から 1950 年代初めである¹。1952 年、英国電気開発協会（Electrical Development Association）の Percy Dunsheath 会長は、安価で十分な電力供給による産業における生産性改善の重要性を強調した（Dunsheath 1952）。直接的にはその影響は見えづらいが、電力の低廉な価格による安定供給は、中長期の経済成長のスピードを定める要因ともなっている。

1990 年代からの気候変動への問題意識の高まりは、大気というグローバル・コモンズの地球規模での管理の方法についての探索を求めてきた。さまざまな政策手段が考えられ、また実行されてきたが、これまでその有効な管理へと至らなかった最大の障害はフリーライディング（free-riding）への強固な誘因であった（Nordhaus 2015）。パリ協定のような世界の排出削減に向けた現在の枠組みも、フリーライダーテストを満たすとは言えない（Yale Center of the Study of Globalization 2015）。各国の削減目標における限界的な削減費用は依然としてきわめて大きな跛行性が存在している。他方、この 4 半世紀に深化したグローバルな生産ネットワークの存在は、国境をまたいだ生産移転のためのコストを大きく減じさせ、フリーライダーとなる障壁を低下させてきた。対策を強化した国から、環境対策が取られないか、あるいは軽微で抜け穴が多い経済圏への生産シフトを防ぐことは机上の理論では可能であっても、現実的に難しいことは強く認識されてきている。この 4 半世紀に実現してきたことは、日本や他の先進国から中国などへの生産シフトと、そしてカーボンリーケ

¹ 米国経済の長期にわたる成長過程を分析した Gordon（2016）は、1920 年代末から 1950 年代初めの急速な TFP 上昇を可能としたもっとも重要な要因は機械の品質向上であるとし、それを裏付けるものとして電力消費の拡大を指摘する。米国で最初に発電所が開設されたのは 1882 年だが、製造業をはじめ米国経済全体に電力が完全に普及したのは 1929–50 年であり、それが生産性革命を可能とした要因として評価されている。

ージ（炭素の漏れ）である。本稿で分析されるように、気候変動対策としての国内でのエネルギー消費削減への注力は、設備投資を抑制させ、エネルギー多消費的な国産財の輸入への切り替えを強いるものとなってきた。

かつて「石油の1滴は血の1滴」（Georges Clemenceau 仏首相）とされたエネルギーの重要性に関する認識は、日本では薄れてきたのかもしれない。それを導いた経済的な背景には、本稿で論じられるように、戦後日本経済において持続的に実現してきたエネルギー生産性の改善（energy productivity improvement: EPI）、そしてエネルギー多消費的な産業が相対的に縮小するような構造変化により、一国経済の成長に必要なエネルギーコストの実質的な負担が逓減してきたことがある。しかしそのことは、省エネ政策がこれまで有効であり、また将来も有効であることを意味するものではない。無駄遣いを無くすというような消費者による儉約精神や、経済合理的に導入されるエネルギー節約的な技術への代替といったイメージとはまったく異なった要因により、マクロの EPI は大きく影響される。

日本政府によるグリーン成長への期待（日本政府 2019, 2020, GX 実現会議 2022）は、官需および政策的に誘発された民需の拡大など、需要サイドに置かれている。需要拡大は経済成長を牽引するが、その裏面には、非効率投資や重複投資により、中長期的に生産性の改善スピードを停滞させかねない弊害があることは忘れられている。拙速なエネルギー転換が導く供給サイドにおける生産性リスクの懸念は、すでに顕在化している。現在の脱炭素ブームの中では、「待ったなし」とも、それを国内で実現しなければ「競争力を失う」とも表現されるが、国際交渉や企業連合の場における表面的な賛意とは異なり、炭素排出削減の持つ価値には世界的な調和も形成されておらず（Akimoto 2022）、不安定なままである。優れた経済理論家たちが 1990 年代初めから洞観していたように²、フリーライダーテストが満たされないままでは世界の削減コストは莫大となり、それによる経済停滞はむしろ健全なエネルギー転換から遠ざけるものとなろう。集団浅慮に陥り、見切り発車をするものの弊害は、日本でこそ大きいかもしれない。

本稿は、長期の日本経済におけるエネルギー投入と経済成長の分析に基づき、その構造変化を総括的に考察する。はじめに第2節では、一国経済における長期の経済成長に伴う資本・労働・エネルギー投入によるそれぞれの生産性の推移を論じる。日本でマクロ的に観察されるエネルギー生産性は第2次世界大戦まで低下を続け、戦後には持続的な EPI が観察される。長期に U 字型となるエネルギー生産性は、経済成長に伴い必要とされる資本蓄積やエネルギー消費の拡大、そして生産における全体効率の視点から考察される。

第3節では、細分化した測定により、戦後日本経済において持続的に実現した一国経済のグロス EPI（第2節）の内にある構造要因の変化へと接近する。考慮される構造要因の第1はエネルギー品質の変化である。電力化などエネルギー構成の変化は、エネルギー生

² 1995 年には日本でも、東京大学の宇沢弘文教授の呼びかけにより日本開発銀行設備投資研究所主催での国際コンファレンスが箱根で開催され、海外からは Kenneth J. Arrow, Partha Dasgupta, Dale W. Jorgenson, William D. Nordhaus, Martin L. Weitzman などの錚々たる教授たちが来日した（JDB Research Center on Global Warming 1996）。

産性の測定値にも大きな影響をもたらしてきた。第2の視点は産業構造の変化である。一国経済のグロス EPI はエネルギー多消費型製造業の生産縮小による影響を多分に含んでいる。第3の視点は製品構成の変化である。急速なグロス EPI は2010年代初めから観察されるが、その大きな要因はエネルギー多消費的な財の輸入依存の拡大である。それは産業や企業という主体レベルよりも、生産物（製品）のレベルで進行してきた。国際的な送電網へと接続しない日本では電力は輸入されない。しかし、中間財や最終財の輸入を通じては電力を間接的に輸入していると解される。日本経済ではこの4半世紀に、電力の間接的な輸入依存度が高まってきたことが実測される。

第4節では、経済成長に要するエネルギーコストの実質的な負担として、戦後日本経済の経験を論じる。エネルギー価格高騰に対する一国経済の脆弱性を評価する指標は、実質単位エネルギーコスト（real unit energy cost: RUEC）である。RUECの上昇とは、実質エネルギー価格の上昇がEPIによる緩和効果を上回り、価格高騰に対するマクロ経済の耐性が脆弱化したことを意味する。COVID-19 パンデミックからの世界的な回復やロシアによるウクライナ進行によるエネルギー価格高騰を受け、RUECは2021-22年に大きく上昇し、近年の日米 RUEC 格差は戦後60年間のピークに達している。最後に、第5節では本稿の測定に基づく政策的なインプリケーションを論じる。

2. 長期の経済成長とエネルギー生産性

2.1 資本、労働、エネルギー生産性

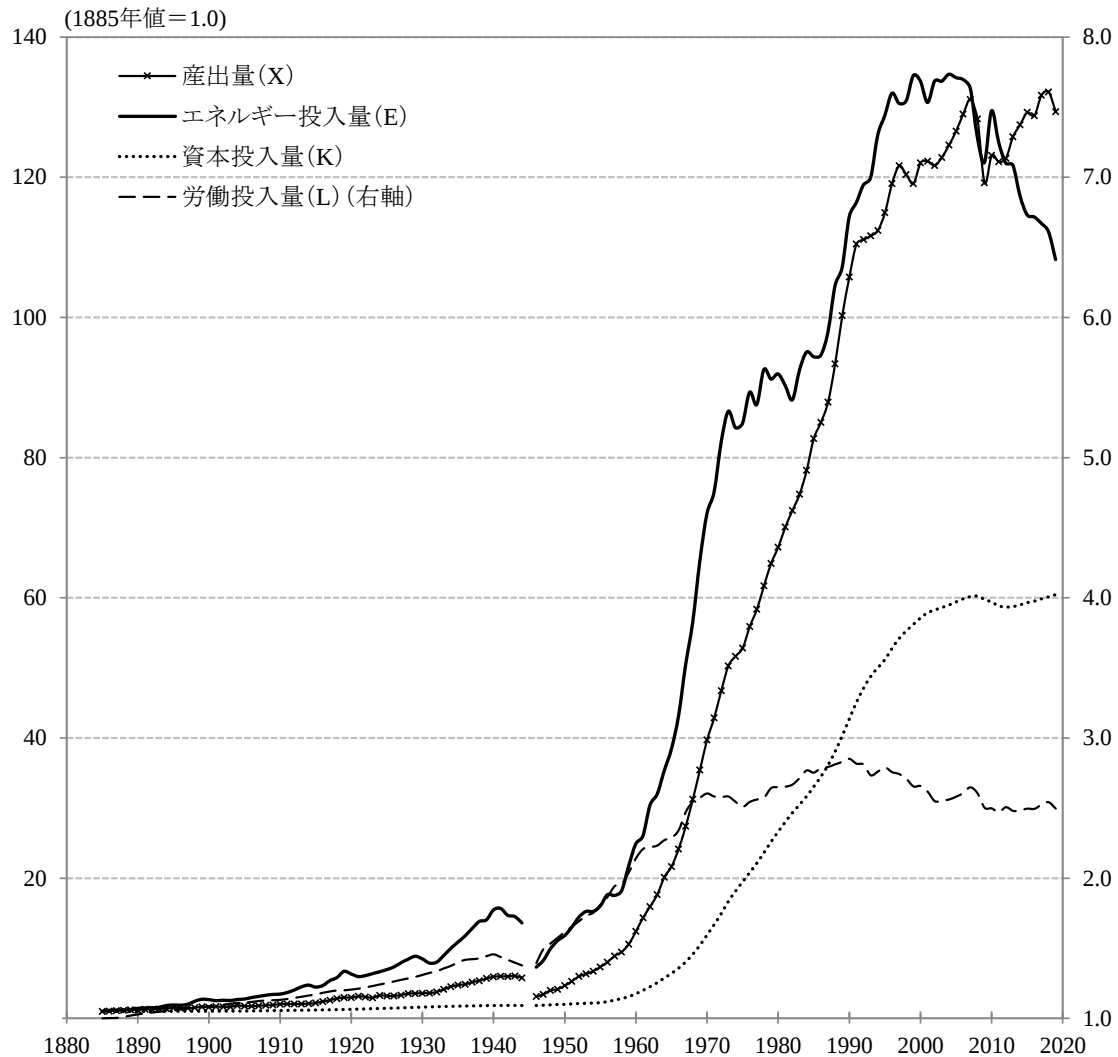
はじめに19世紀の終わりから、日本経済における長期の経済成長とエネルギー投入の関係を概観しよう。図表1は、1885（明治18）年から2019（令和元）年までを測定期間とし、日本経済における産出量（実質 GDP: X）、資本（K）、労働（L）およびエネルギー（E）それぞれの投入量の推移を比較している³。集計産出量および各投入量は、1885年値を1.0とした指数によっている（労働投入量のみ桁が異なるので、その単位は右軸に示されている）。

この135年間の経済成長の歴史において、集計レベルでの産出量は129倍へと拡大した。この期間に総人口も3.3倍へと増加していることから、1人あたり産出量は39倍である。こうした集計産出量の拡大を実現するため、資本投入量（生産的資本ストック）は60倍、労働投入量（労働投入時間）は2.5倍へと拡大してきた。それは、この期間に資本生産性は2.1倍、労働生産性では52倍にまで改善したことを意味している。同期間、最終エネルギー消費量（1次エネルギー換算値）は労働と資本の拡大を上回り、108倍にまで増加し

³ 2.1 節での資本投入量は土地・在庫を除く実質純資本ストック、労働投入量は投入労働時間によっている。資料は2015年基準国民経済計算（内閣府経済社会総合研究所 2022）およびそれに準拠して1955年まで遡及推計されたKEOデータベース（黒田他（1997）および野村（2004）の更新推計値）である。なお1954年以前の遡及推計値は、大川・高松・山本（1974）、大川・石渡・山田・石（1966）に基づく簡易推計値である。

ている。図表 1 にみるように、とくに 19 世紀後半から 20 世紀後半までの 1 世紀以上にわたり、日本の経済成長の実現には、生産拡大とほぼ比例的なエネルギー消費の拡大が必要であった。

図表 1：長期の経済成長、資本・労働とエネルギー投入（1885–2019 年）

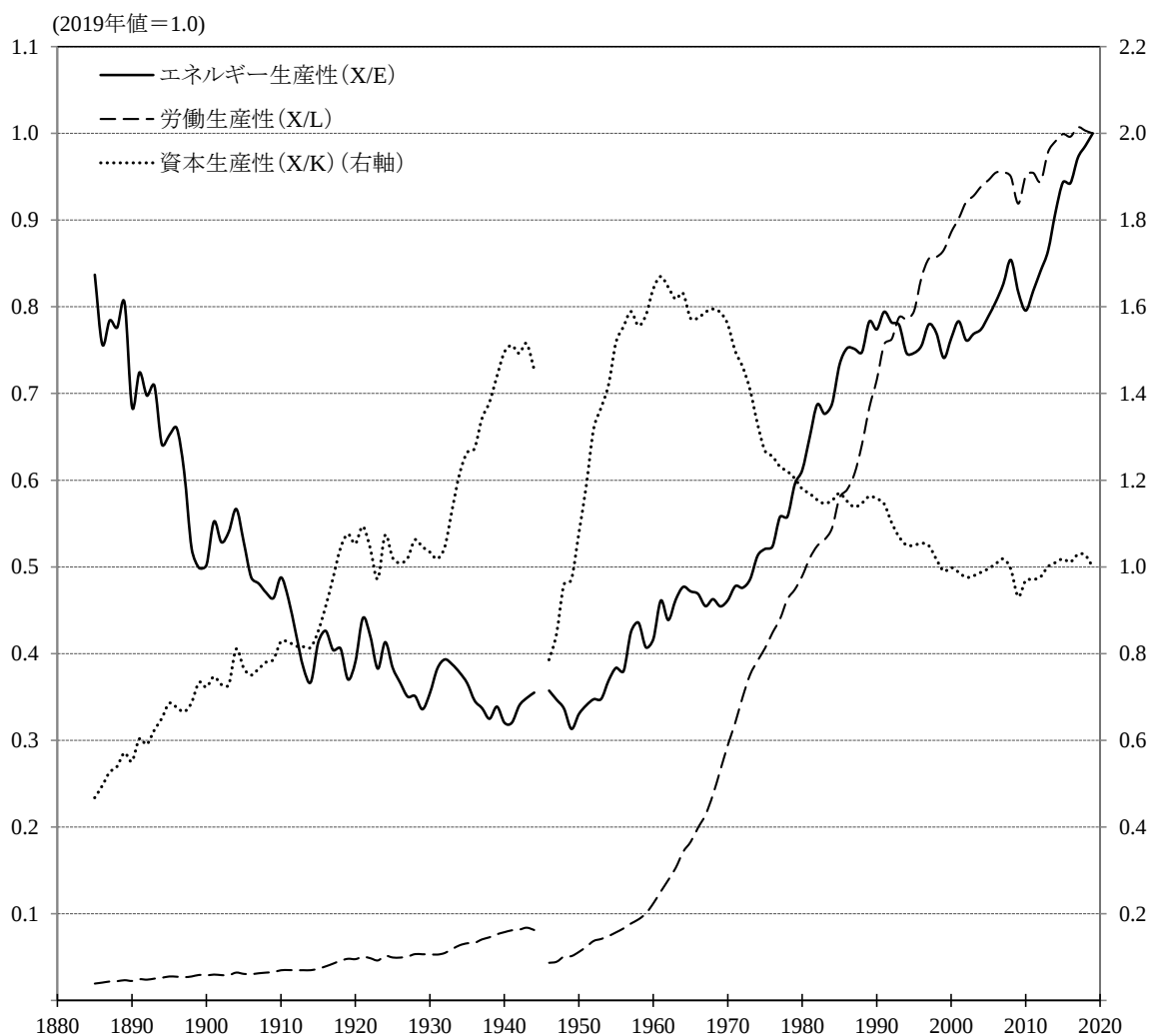


単位：1885 年値=1.0（1885–2019 年）。
注：労働投入量のみ単位は右軸。資料は脚注 3 参照。

経済成長とエネルギー消費は同様な拡大を示すが、この間、エネルギー生産性 (X/E) は大きく変化している。図表 1 と同じデータに基づき、資本、労働そしてエネルギー、それぞれの生産性（単要素生産性）としての推移を示したものが図表 2 である。ここでは 2019 年値を 1.0 とした指数によるが、資本生産性 (X/K) のみ単位を右軸としている。全観察期間となる 1885–2019 年の 135 年間における大きな特徴は、第 2 次世界大戦時における断層や、いくつかの短期的な景気変動の影響はあるが、日本経済では持続的な労働生産性 (X/L)

の改善が見いだされることである。単調な改善を実現してきた労働生産性に対し、エネルギー生産性は第2次世界大戦をボトムとして大きくU字型（生産性が悪化するフェーズから改善するフェーズへ）を示し、対照的に資本生産性（右軸）は逆U字型（改善から悪化へ）の形状となっている。

図表2：長期のエネルギー生産性と資本・労働生産性（1885–2019年）



単位：2019年値=1.0（1885–2019年）。

注：資本生産性のみ単位は右軸。資料は脚注3参照。

U字型となるエネルギー生産性において、右半分となる戦後日本経済では持続的なEPIが実現している。EPIにより（生産量一定のもとでは）直接的にエネルギー需要は減少する。そのことはエネルギーの市場価格を低下（あるいは価格上昇を抑制）させながら、生産拡張によるさらなるエネルギー需要を通じてエネルギー消費量を押し上げていく。そうしたマクロ経済としてのフィードバック効果は20世紀にわたり主要先進国でも強固であ

り、カッシューム・ブルックス仮説（Khazzoom-Brookes postulate）と呼ばれてきた⁴。戦後の日本経済でも、EPI は持続的でありながらも（図表 2）、20 世紀後半まではエネルギー消費量もまた拡大しており（図表 1）、カッシューム・ブルックス仮説が適合していたことを示している。

近年の大きな変化は、2000 年代後半以降、世界金融危機によるエネルギー需要の落ち込み（図表 1）や稼働率の低下によるエネルギー生産性の悪化（図表 2）が一時的には見られるが、その後には力強く EPI が加速し、またエネルギー消費量も急速に減少していることである。第 1 次オイルショック後の経験値にも類似する近年の EPI の加速は、「エネルギー効率向上・省エネへの取組が実を結んでいる」（内閣府 2021）と、日本政府による省エネ政策やカーボンプライシング政策への自信を与えてきたと言えよう。

2.2 U 字型エネルギー生産性の形成

しかし近年の EPI 加速では、同時期に労働生産性の改善も低迷しているように（図表 2）、その要因が問われなければならない。一般にエネルギー環境分野では、エネルギー生産性やエネルギー効率といった指標は、エネルギーと産出（粗産出量あるいは実質付加価値）の関係として、資本や労働投入とは独立に捉えられている。しかし第 1 節に論じたように、資本と労働はエネルギーと不可分に繋がっており、生産の全体効率を定める要因として一体とした理解が必要である。省エネは生産効率を高め成長力を強化するとも主張されるが、それは資本や労働から独立にみた部分的な評価に過ぎないのである。

経済成長に伴うエネルギー生産性の変化を説明する要因を、野村（2021、第 4 章）は大きく 3 つの効果に分解している⁵。第 1 は「省エネ」の効果である。ここでは資本の稼働に使用するエネルギー量をどれだけ減じることができるかを示す指標として、資本エネルギー比率（K/E）の上昇によって総合的な省エネ性能を評価する。第 2 は経済成長（生産拡大）に伴う「増エネ」の効果であり、1 人の労働者が使用するエネルギー量の拡大を労働エネルギー比率（L/E）の低下によって評価する。Smil（2017）は産業革命以来の持続的な労働生産性の改善は、エネルギー投入量の拡大によるものと指摘する。それは長期にわたる労働エネルギー比率の低下であり、直接的にはエネルギー生産性を悪化させる要因となる。しかし労働がより多くの資本とエネルギーを利用することにより、生産における全体的な効率が改善することで EPI も実現する。そうした「全体効率」の指標が第 3 の全要素生産性（total factor productivity: TFP）の改善による寄与である。第 2 の「増エネ」効果は直接的にはエネルギー生産性を悪化させるが、もたらされる TFP の改善が間接的に実現しうる EPI への貢献が第 3 の効果である。

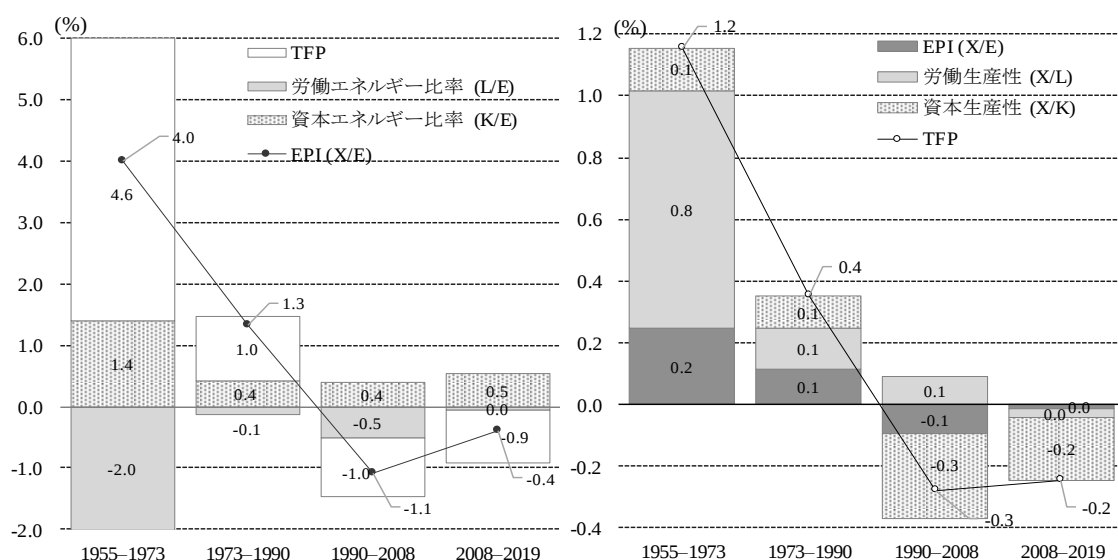
⁴ より大きな文脈ではジェボンズ・パラドックス（Jevons paradox）とも呼ばれる。同仮説の有効性に関する英国貴族院での議論は House of Lords of the United Kingdom（2005）を参照。

⁵ ここでの EPI は、2.1 節でのマクロ的に観察されるグロス EPI から、エネルギー種別構成や産業構造などの変化を考慮した上での調整済み EPI に基づいた分析である。構造変化の統御によっても、エネルギー生産性は U 字型の推移をとる。構造変化の統御によるグロス EPI への影響は第 3 節を参照。

1 例として、図表3は戦後の鉄鋼業での測定値を示している。高度成長期（1955–73年）は、構造変化を調整した真のエネルギー生産性（第3節）ではマクロ経済として史上もっとも高いEPIを実現したが、その最大の貢献は鉄鋼業であった。この期間、鉄鋼業では旺盛な内需拡大に対して資本能力増強が求められ、生産性の向上やコスト削減を主目的としてLD転炉や連続鋳造などが導入されている。それは大幅な増エネをもたらしたが、労働生産性が大きく改善しながらTFP成長も年率1.2%と高く（図表3右）⁶、そのことが年率4.0%もの高いEPIを実現させている（図表3左）。

また第1次オイルショック後（1973–90年）には、エネルギー価格の急激な上昇により、鉄鋼業では省エネとしての経済合理性を持ちながらコークス乾式消化設備（CDQ）や高炉炉頂圧発電（TRT）などが導入されている。重要なことは、その期間には資本生産性を犠牲とすることなく（むしろ改善させながら）TFPを改善させ（図表3右）、省エネ要因（資本エネルギー比率の拡大）とともにTFP改善がEPIを実現させたことである（図表3左）。

図表3：鉄鋼業におけるEPIと生産効率（1955–2019年）



単位：％（年成長率）。

注：経済と環境の循環構造を評価するものとして、左図はTFP成長がEPIに与える影響であり、右図はEPIがTFP成長に与える影響の評価である。そのフレームワークは野村（2021, 4.2節）を参照。

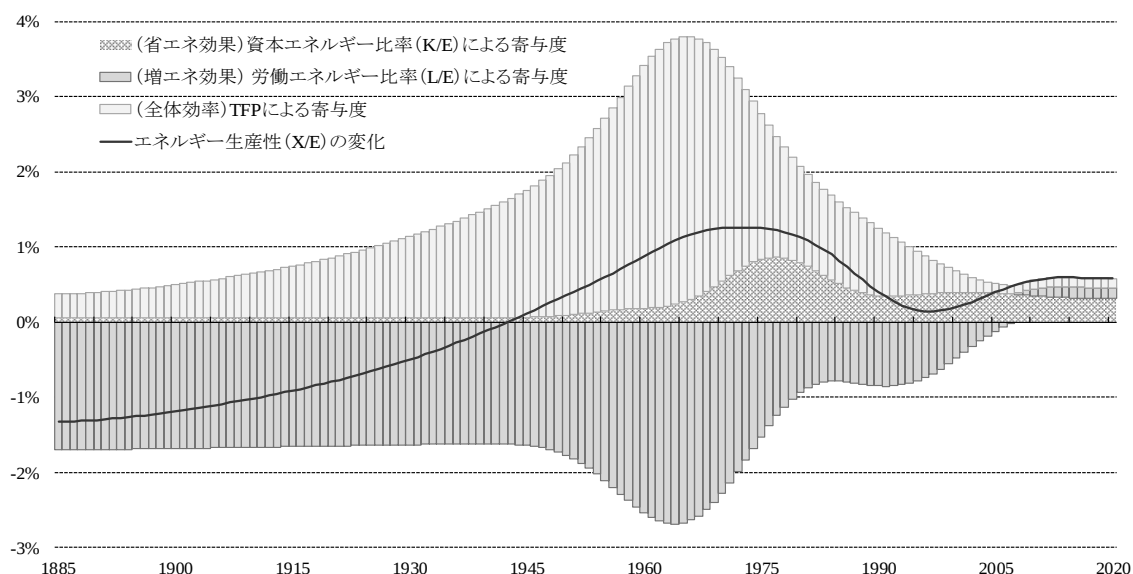
安価な技術導入機会が存在するならば、そこには経済（生産効率）と環境（エネルギー消費抑制やCO₂排出削減）の両立しうる姿を見出すことができる。しかし日本の鉄鋼業でも1990年代に入ると、地球温暖化対策としての排出削減が求められる中で省エネ投資が

⁶ 一般にTFPは、資本や労働といった投入の拡大によって説明されない生産拡大として残差として理解されるが、TFP成長率は労働生産性、資本生産性、そしてエネルギー生産性などの単要素生産性の変化の加重平均値としても理解される（野村 2021, 4.2節）。図表3右はそうした分解を示しており、本稿の文脈ではEPIによるTFPへの貢献を評価している。ただし、こうした効果はエネルギー多消費産業以外ではかなり限定的である。

拡大（資本エネルギー比率は上昇）するが、それは資本生産性を大きく毀損させ、TFP を悪化させている（図表 3 右）。省エネ投資の拡大に関わらず、生産の全体効率の毀損により、総合的な効果としてのエネルギー生産性もむしろ悪化するものとなった（図表 3 左）。省エネが生産効率を高めるということは、一般法則ではなく、コスト合理的に利用可能な省エネ技術が存在するという状況のもと、限られた産業での限られた期間に見いだされる例外的な現象である。

マクロの経済成長に伴う長期エネルギー生産性の変化は、実測データに基づく大きな傾向として図表 4 のように描写される（Nomura 2023）。一般に EPI は省エネ投資によって実現されるとのイメージを抱くが、図表 4 は、省エネ投資の拡大（資本エネルギー比率の上昇）による効果はオイルショック後の限られた期間に見いだされる限定的な要因に過ぎないことを示している。EPI に寄与するはるかに大きな要因は、TFP による全体効率の改善である。経済成長に伴い労働者の利用するエネルギー量は大きく増加（労働エネルギー比率は低下）してきたが、それによる TFP の改善は第 2 次世界大戦後には直接的な増エネの効果を上回るもの（線グラフがマイナスからプラスの領域へ移動）となっている。そのことがマクロ的に、U 字型の長期エネルギー生産性（図表 2）を形成させた要因である。

図表 4：経済成長に伴う長期エネルギー生産性変化要因（1885–2019 年）



単位：％（年成長率）。

注：フレームワークの詳細は Nomura（2023, Chapter 4）を参照。長期傾向の把握のためスムージングされている。

1990 年代からは日本経済は低成長期へと入り、図表 4 にみるように、増エネ要因が抑制され始める。そして 2000 年代後半から観察されることは、サービス業などを中心として労働エネルギー比率がむしろ上昇（1 人あたりの労働者がより少ないエネルギーを利用）す

るという「逆行」であり、そして労働生産性改善の停滞（図表2）である⁷。一国経済にも見いだされる増エネ効果の逆行は、経済成長における長期経験とは反して、エネルギー生産性という一面の生産性をむしろ改善させる要因となっている。しかしそのことは国内における資本蓄積の低迷を通じて、EPIの最大の牽引役であったTFP改善による効果を大きく減じているのである。

3. 構造変化とエネルギー生産性

3.1 半世紀のEPI通減

2000年代後半以降、日本のエネルギー消費量は大きく減少した（図表1）。その持続可能性を評価するには、マクロで観察されるグロスEPIの詳細を分析する必要がある。エネルギー分析用に拡張された生産性勘定により、細分化した分析が可能となる1955（昭和30）年以降を測定期間として、大きく4つの期間ごとに一国経済のグロスEPIの構造変化要因を分解したものが図表5である⁸。各期間においてグロスEPIの年平均成長率が線グラフによって描かれ、それはエネルギー品質変化（転換要因と高度化要因）と産業構造変化の両者を統御したもとの調整済みのEPIへと分解される。ここでの「転換要因」とは、最終エネルギー消費量を生産するために投入された1次エネルギー消費量の指数であり、発電や石油精製などのエネルギー転換における効率性を示している。また「高度化要因」は、最終エネルギー消費量から品質調整済みエネルギー投入量への変換係数であり、電力などのより質の高いエネルギー利用の拡大を反映している。

第1期（1955–73年）はエネルギー品質（とくにエネルギー転換要因）の改善が顕著であり、エネルギーの転換要因と高度化要因によって、グロスEPI（年率1.2%）はそれぞれ1.3ポイントと0.5ポイント過大評価されている。それはエネルギー品質の改善により、観察されるグロスEPIは（真のEPIに比して）大きく嵩上げされていたことを示している。他方、高度経済成長を実現したこの期間の産業構造変化として、エネルギー多消費型産業が大きく拡大したことにより、（産業構造変化を無視した）グロスEPIは年率2.0ポイント

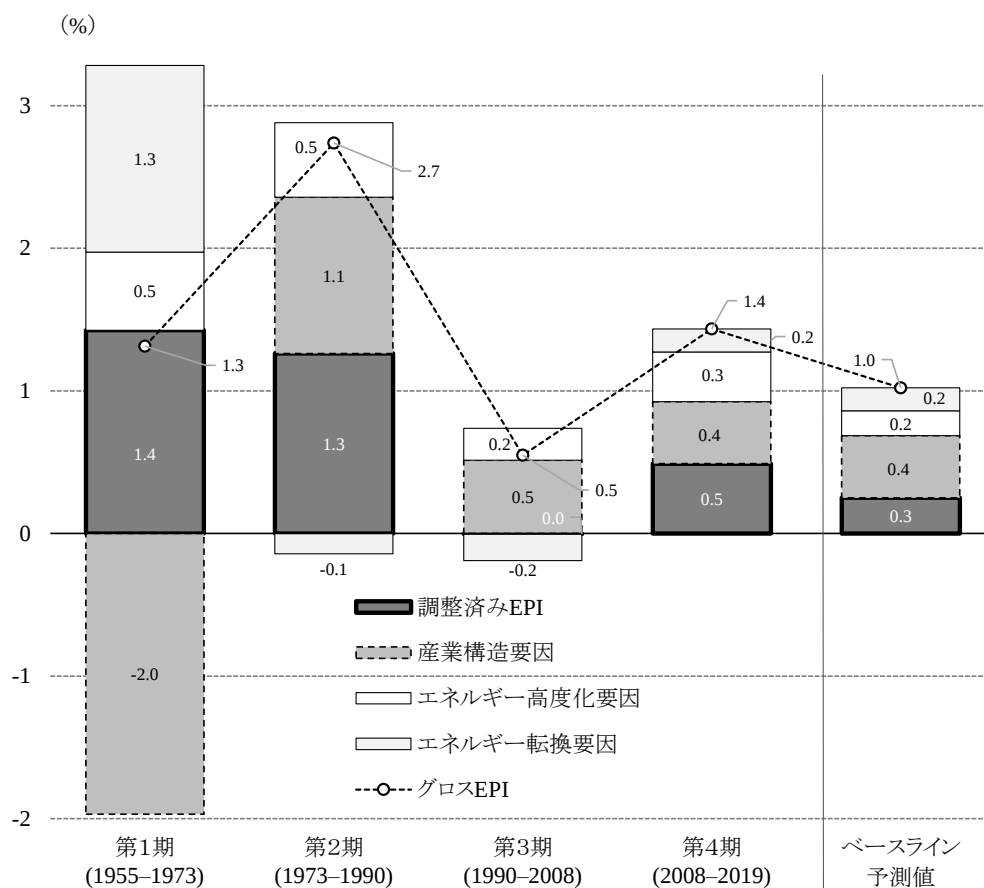
⁷ こうした「逆行」（L/Eの上昇）に相応する直接的な現象は、過度の省エネ行動による労働生産性の低下である。エネルギー消費量の削減のための反作用として、同じ仕事量により多くの労働時間を必要とする懸念は大きい。1例として、2019年の夏に兵庫県姫路市役所が室内温度を25度に設定したところ（環境省は冷房使用時の室温を28度に推奨）、光熱費は約7万円の増加となったが、前年比で総残業時間は14.3%減少し、人件費を約1400万円削減できたと評価される（神戸新聞2019年10月8日）。また、企業における省エネ担当者の設置・増員、省エネ診断士の増加、あるいは顧客の光熱水費などの経費削減実績から対価を得るようなESCO事業などの拡大もこの4半世紀に進行しており、必ずしも企業・産業レベルやマクロでの全体効率の改善に寄与していない懸念は大きい。活動の導入初期には省エネとともに全体効率を高めるものであっても、そうした効果は急減速し、硬直化した活動はむしろ労働生産性を低下させている。こうした直接要因に加え、労働が資本使用（エネルギー使用を伴う）を抑制せざるを得ないという資本深化の停滞により、生産効率の改善を低迷させる間接要因はより大きいかもしれない。

⁸ グロスEPIの要因分解のフレームワークは野村（2021, 2.2節）、エネルギー分析用に拡張された生産性勘定の概要は同章補論Bを参照。なお2015年基準JSNAに基づく資本概念などの改定により、本稿での計数は1955年に遡って改訂されている。

ほど過小に評価されている。この時期の重工業化という産業構造の変化は、真のエネルギー生産性の改善を見えづらくしているのである。この期間、エネルギー品質要因と産業構造要因は互いに相殺するが、両者を調整した真の EPI は年率 1.4%の改善となり、グロス EPI（年率 1.3%）をわずかに上回る。

オイルショックによる原油価格高騰とその適応を示す第 2 期（1973–90 年）では、産業構造変化による影響は（第 1 期の）マイナスからプラスへと転じている。産業構造変化とエネルギー高度化によって、グロス EPI（年率 2.7%）はそれぞれ年率 1.1 ポイントと 0.5 ポイント過大に評価されており、調整された EPI（ τ_* ）は年率 1.3%にまで大きく下方に改訂される。そうした構造変化調整後の EPI は、第 1 期の水準（年率 1.4%）を下回る。グロス EPI によれば、日本経済の黄金期は 2 度のオイルショックによる影響を含む第 2 期にみられるが、構造変化を統御して調整された真の EPI のピークはむしろ高度成長の第 1 期にあったと言える。黄金期とも見えた第 2 期のグロス EPI は、重工業化の（相対的な）後退という産業構造変化によって大きく嵩上げされているのである。

図表 5：エネルギー生産性改善の要因分解（1955–2019 年）



単位：％（年平均期間成長率）。

注：最右系列は、化学業内での製品構成変化による影響（3.2 節）を考慮したもとで、将来の日本経済のベースラインとなる EPI の予測値であり 3.3 節に論じられる。そこで政策ターゲットとした年率 2.5%は、2030 年度の削減目標（2013 年比▲46%）に相応している。

第3期（1990–2008年）には、構造変化の統御によっては真のEPIはほぼゼロにまで減速し、日本経済のEPI低迷は顕著となった。とくに第3期後半では、エネルギー価格が大きく上昇した局面にあったことは強調されるべきだろう。2000年代に入り原油価格は上昇を開始し、そのピークとなる2008年には1990年代後半に比して6倍ほどにまで上昇した。賃金率や生産価格におけるデフレ傾向のなかで、実質エネルギー価格の上昇率では、第3期にはむしろ（2度のオイルショックを含む）第2期を上回るものとなった（野村 2021, 3.4 節）。そうした実質的なエネルギー価格の上昇に直面しようとも、この期間のEPIがほぼゼロに留まったことは、安価に利用可能な省エネ技術・機会が多くの産業で減少していることを示唆している。

省エネ法（エネルギーの使用の合理化等に関する法律）の制定は1979年であるが、その後には大規模な改正が何度かおこなわれ、とくに第3期の後半からは気候変動問題への対応から積極的な省エネ推進がおこなわれている。ミクロ的には省エネ規制や補助金行政が有効であるような評価もあるが、一国集計レベルでは真のEPIは第2期から大きく減速し、改善は見られない⁹。産業構造要因によって、見かけ上のグロスEPI（年率0.5%）が年率0.5ポイント嵩上げされているのみである。第1期から第3期まで半世紀ほど続く真のEPIの逡巡傾向は、省エネ法の施行・改正¹⁰、また産業界の自主的な取り組みはあろうとも¹¹、経済合理的に利用できる安価な省エネ技術・機会の枯渇を示唆している。

そして第4期（2008–19年）のグロスEPI（年率1.4%）は、第1期（年率1.3%）を上回った。しかしそれは、第2期と第3期から続く産業構造の変化により0.4%、エネルギー高度化により0.3%、エネルギー転換により0.2%過大評価されている。真のEPIは年率0.5%と評価され、グロスEPIの3分の1近くまで縮小される。構造要因の統御によっては大きく低下するが、第3期との比較では2000年代後半からは真のEPIが回復基調にあるとも解される。そのEPI加速要因を理解するには、ここでの産業レベルでの構造要因の統御では不十分であり、産業内の製品構成変化を捉えるさらなる細分化が必要となる。

⁹ Murtishaw and Schipper（2001a, 2001b）は米国経済におけるエネルギー生産性変化（本稿でのグロスEPIに相応）の要因を分析し、1994–98年の改善は、それまでの1970年代や1980年代とは異なり、そのほとんどが構造変化によって説明されると評価している。それはエネルギー寡消費的な（とくに情報技術関連の）製造業のGDPシェア拡大に加え、自動車利用や家電所有あるいは家庭暖房面積などが経済成長ほどに拡大しなかったことによる。本稿の構造変化要因とはその前者のみであり、後者の効果は含まれていない（真のEPIの内に含まれる）。

¹⁰ 省エネ法の1993年改正では、遵守すべき「基準部分」と努力目標としての「目標部分」に整理され、1998年改正では「基準部分」の遵守状況調査を通じた遵守担保措置が取られている。杉山・野田・木村（2010）はインタビュー調査などにより、優れたエネルギー管理をおこなっている企業では、この時期には省エネ法の規制内容を上回る対策がすでに実施済みであり、省エネ法改正の影響はほとんどなかったと指摘する。産業レベルでの測定（野村 2021, 2.4 節）でも、この時期に省エネ法改正による製造業への影響を見出すことはできない。

¹¹ 経団連では、1997年12月の京都議定書合意に先立つ1997年6月に「環境自主行動計画」を策定し、各業界・企業による温室効果ガス排出削減への積極的な取り組みを推進してきた。2013年1月には「低炭素社会実行計画」を策定したが、2020年10月に菅義偉内閣が掲げた2050年のカーボンニュートラル宣言を受け、2021年11月には「カーボンニュートラル行動計画」へと改訂されている（経団連 2022）。

3.2 近年の EPI 加速要因

近年に観察される EPI 加速の要因を理解するために、はじめにその産業起因をみよう¹²。図表 6 は第 4 期（2008–19 年）における、一国経済における品質調整済みのエネルギー消費量への産業別寄与度を左図に、エネルギー品質や産業構造変化を統御した真の EPI への産業別寄与度を右図に描いている。この期間の品質調整済みエネルギー消費量は、44.医療保健や 42.教育業などを除くほとんどの部門で第 3 期より減少し、一国全体では年平均マイナス 0.8%と戦後はじめて減少した。この期間、グロス EPI は年率 1.4%にまで回復したが、第 2 期、第 3 期に続き、第 4 期でもエネルギー多消費産業の相対的な生産縮小が継続し、グロス EPI は年平均 0.4 ポイントの過大評価となっている。また同期間のエネルギー品質変化もグロス EPI を年率 0.5 ポイント過大評価する要因であり、両者の影響を考慮すれば調整済み EPI は年率 0.5%となる（図表 5）。

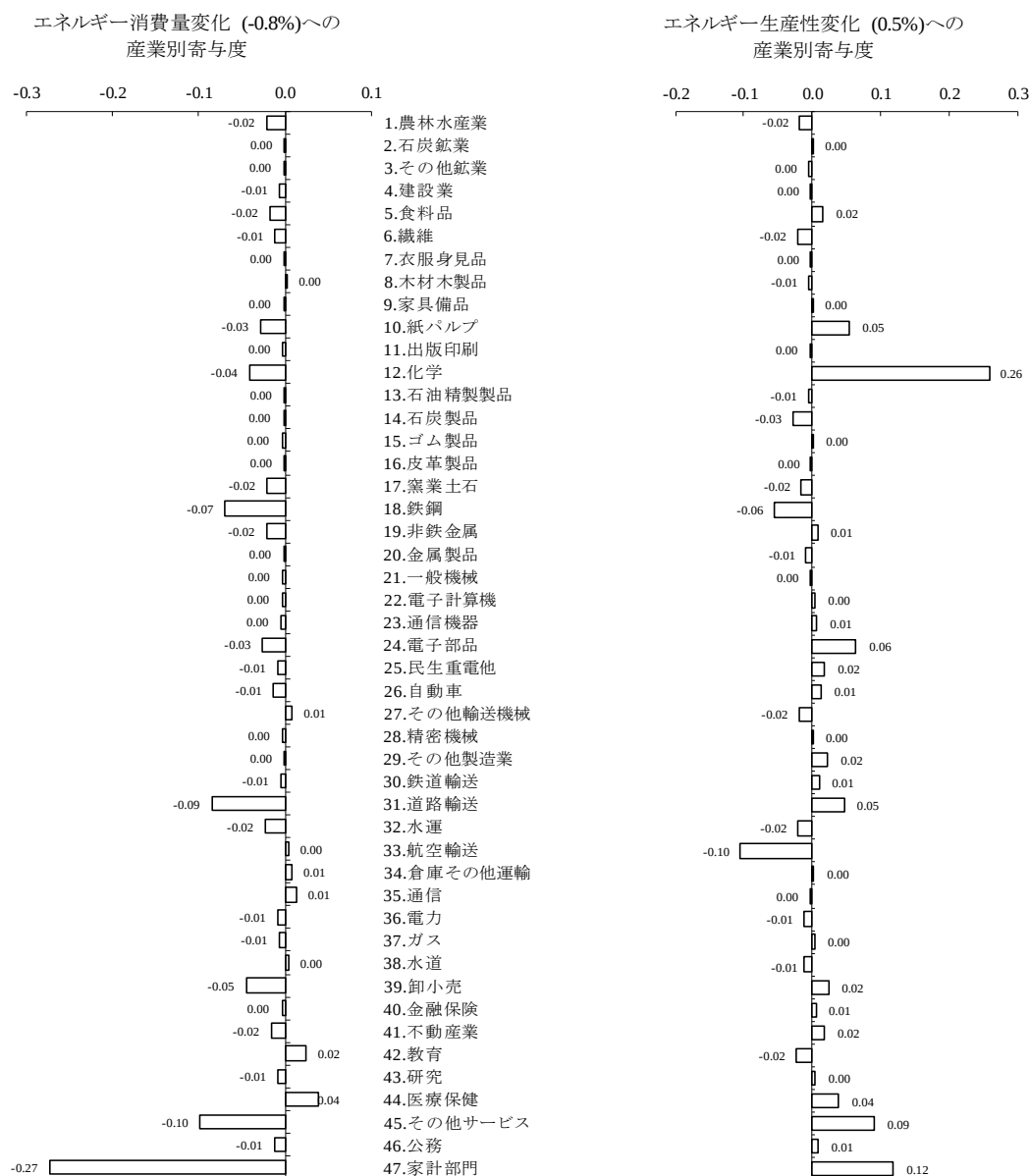
構造変化を考慮すれば、真の EPI は年率 0.5%へと大きく低下するが、第 3 期のゼロ水準からの回復とも評価できる。第 1 期から第 3 期まで続いた EPI の低下傾向に対し、第 4 期における EPI の回復はどう解釈されるだろうか。その回復に大きく寄与したのは、図表 6 右にみるように 12.化学業である。当該産業の EPI は、一国全体の調整済み EPI の 53%、非家計部門における EPI の 70%を説明している。多くの製造業において安価な省エネ技術の利用が飽和状態にある中で、この力強い EPI は例外的である。

化学業の EPI は、第 1 期には年率 3.6%、第 2 期 3.1%、そして第 3 期には 0.3%と逡減したものの、第 4 期には 2.1%と再び大きく改善している。澤田（1998）は、エチレンでは 1990 年代後半でもすでに「極限に近い段階まで省エネルギー化が進んでいる」と評価しており、1980 年代半ば以降では技術的に顕著なエネルギー原単位の改善も見いだせない。省エネの進行した 1 つの要因は、米国のシェールガス由来の安価な汎用化学品が日本へと流入することを意識して、2014 年頃からエチレン事業の再編が進んだこともある。一般に、化学工業では設備稼働率の変化がエネルギー生産性に大きく影響し、合理化による稼働率の向上は EPI に寄与する。日本化学工業協会（2022）によれば、化学工業のエネルギー原単位は第 4 期（年度ベース）では年率 0.6%の改善である。しかしこれは、本稿でこの期間に観察される高い EPI（年率 2.1%）の 3 割ほどの水準に過ぎない¹³。

¹² 一般にエネルギー生産性の変化は産業、運輸、民生家庭などの部門ごとに評価される（内閣府（2021）など）。それぞれの活動指数（産出量に相応）の選択には恣意性が残り、またマクロの観察値（図表 2 など）は個別部門の寄与と整合的に理解することはできない。そのことが産業構造変化などによる影響を含んだグロス EPI の変化要因が考慮されずに、政府による省エネへの過度の楽観と誤謬を含む政策評価を導いてきた。本稿の測定では、家計部門を自己所有住宅に加え耐久消費財サービスの自家生産（および自家消費）をおこなう主体として定義し、産業部門と並列に扱う生産勘定を構築したうえで（野村 2021, 2.2.2 節）、その稼働に必要なエネルギー消費量との関係性として家計部門の EPI が定義されている。また各部門の産出指標は、時系列的に一貫して構築された勘定に基づき測定された実質付加価値であることから、一国経済の EPI 変化は部門別の寄与度の完全な集計値として捉えることができる（図表 6）。

¹³ 合理化に加え、2017–19 年度の堅調な需要増も高い稼働率へと寄与している。逆にパンデミックの影響によっては、2019 年から 2020 年にかけての国内生産は年度ベースで 10.3%減少し、その結果としてエネルギー原単位は 5.7%もの悪化となっている（日本化学工業協会 2022）。こうした影響を含み測定期間を 1 年延長するだけで、2008–20 年のエネルギー原単位の改善は年平均 0.05%にまで低下する。このように、

図表 6：エネルギー消費および EPI の産業起因（2008–19 年）



単位：パーセンテージ・ポイント（一国全体の集計量への部門別寄与度）。

注：ここでのエネルギー消費量は品質調整済みエネルギー投入量として測定されており、調整済み EPI はそれに基づく産業別 EPI の寄与度である。そのフレームワークは野村（2021, 2.2.2 節）を参照。

第 4 期に化学業の EPI が年率 2.1%へ回復したもう 1 つの理由は、当該産業内における製品構成の変化である。図表 7 は、産業連関表で定義される 25 の化学製品ごとに細分化して、横軸にベンチマーク年（2011 年）におけるエネルギー生産性水準（エネルギー消費量あたりの付加価値額）の自然対数値、縦軸には第 4 期における各製品の実質粗生産額の年

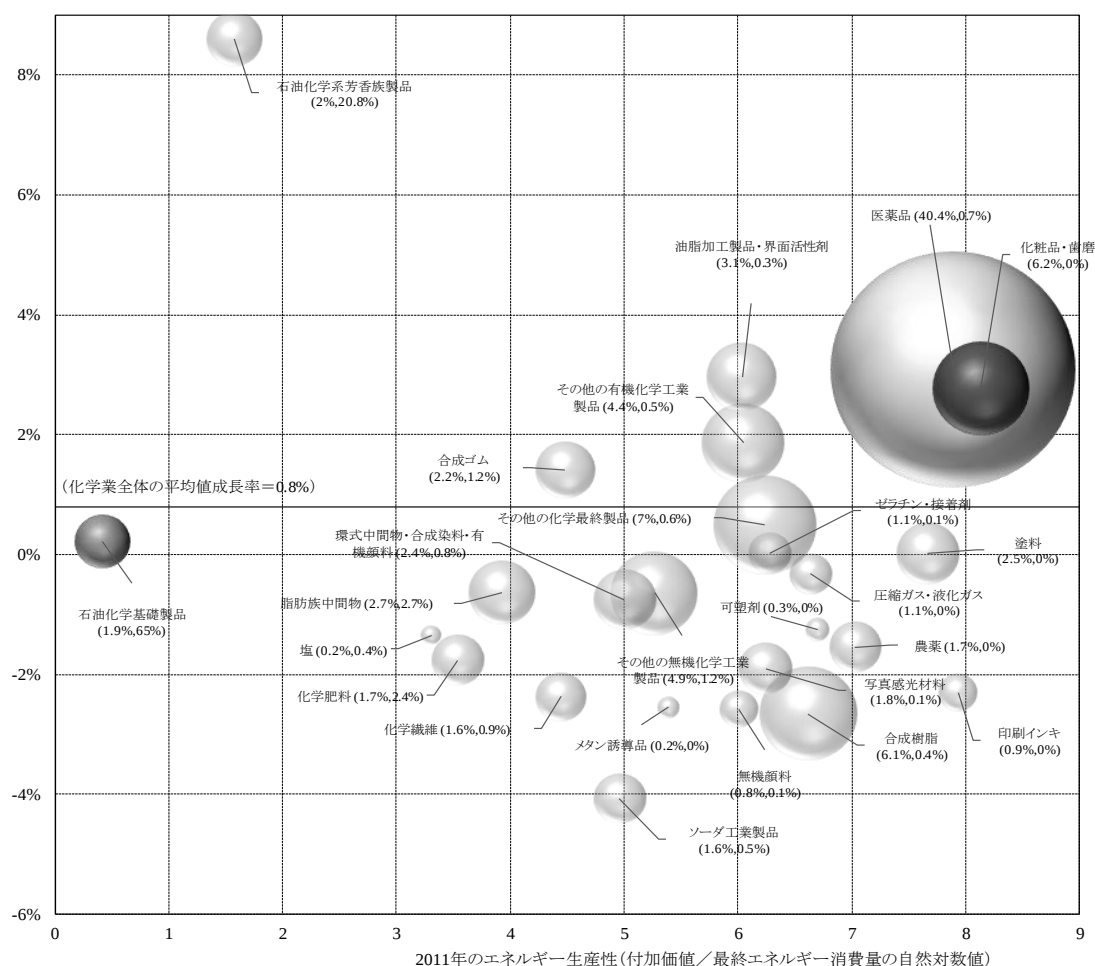
エネルギー生産性が稼働率に大きく依存する産業では、測定期間また会計年度と暦年との相違が大きな乖離を生じさせることがある。またそこでのエネルギー原単位と本稿のエネルギー生産性は、化学工業の活動範囲や生産量・エネルギー投入量の定義が異なるため、おおよその比較であることに留意されたい。

平均成長率をとっている。また各バブルの大きさは 2011 年における付加価値の大きさを示す（各製品の名称における括弧内には、2011 年における各製品の付加価値シェアとエネルギー消費シェアを示している）。

2011 年の 12.化学製品製造業における最大の付加価値シェアとなる部門は医薬品であり、化学全体の粗付加価値総額の 40.4%を占めている。他方、エネルギー消費の視点からみれば、石油化学基礎製品が化学業全体の 65.0%を占める。対照的に、医薬品のエネルギー消費シェアはわずか 0.7%であり、石油化学基礎製品の付加価値シェアは 1.9%に過ぎない。こうした際立った対照は、化学業全体としてのエネルギー生産性の変化に大きな影響を与える源泉となっている。

図表 7：化学製品のエネルギー生産性と生産量変化（2008-19 年）

国内生産変化率（第 4 期: 2008-19 年平均成長率）



出典：「2011 年産業連関表」（総務省）および「物量表（付帯表）」、内閣府経済社会総合研究所（2022）、「工業統計」（経済産業省）、「国内企業物価指数」（日本銀行）などにより作成。

注：図中におけるバブルの大きさは各製品製造における 2011 年における付加価値であり、製品名称の括弧内は同年の（付加価値シェア、エネルギー消費シェア）を示している。

第4期における粗生産の年平均実質成長率では、医薬品は年率3.1%増加したが、石油化学基礎製品は0.2%増として化学業の平均値を0.6ポイント下回った。エネルギー消費シェアの3分の2を占める石油化学基礎製品の生産拡大が当該産業の平均を下回り¹⁴、付加価値シェア最大の医薬品が平均を大きく上回る成長となることで、化学業全体のエネルギー生産性指標では見かけ上の改善を生じさせている。図表7の計数に基づき簡易的な試算をおこなえば、化学業におけるエネルギー生産性の成長率（年率2.1%）のうちの1.7ポイントは、こうした化学製品の構成変化によって説明される。そのもとでは、化学業としての調整されたEPIは年率0.4%にまで低下し、同産業による一国経済のEPIへの寄与度（0.26ポイント）も0.05ポイントへと縮小する。

化学業に次いで一国経済全体のEPIへの寄与度が大きいのは家計部門であり、その寄与度は0.12ポイントである（図表6右）。東日本大震災による節電・省エネへの努力要請によるEPIへの効果の多くは一時的であったと考えられるが、第3期の年率0.4%から第4期には0.5%へと、わずかながらも加速したと評価される¹⁵。しかしこうした控えめなEPIの加速は、戦後初めて減少した家計部門のエネルギー消費量（年率-0.8%）の主要因ではない。その多くは、耐久消費財のサービス量が第3期の年率1.8%増から第4期には0.4%減へと大きく抑制されたことにある。産業では設備投資が低迷したように、家計では耐久消費財の購入も抑制されてきた。

サービス業では、45.その他サービス業、33.航空輸送業、39.卸小売業では一国レベルのEPIを0.04-0.09ポイント改善させる要因となっている（図表6右）。日本政府観光局によれば、訪日外国人旅行者数では2008年の835万人から2011年には622万人へと減少したが、2013年には1036万人、2019年には3188万人にまで大きく拡大した¹⁶。それは旅行業や飲食宿泊業（ここでは45.その他サービス業に含まれる）や航空輸送業における稼働率の改善となり、エネルギー生産性を改善させている。

39.卸小売業では年率0.4%のEPIとなり、一国全体のEPIの2%を説明する。2010年4月には省エネ法が改正された。改正省エネ法では、「業務その他部門（サービス業・店舗・病院など）」における適用対象範囲が拡大され、企業全体での取り組みを促すものとなっている。従来は年1500kl（原油換算）以上消費する工場・事業場単位を対象としていたが、それは事業者単位へと変更され、個々の工場や支店などが対象とならずとも事業者の合計値として、またフランチャイズチェーンを運営する企業では加盟店も含めた合計値として、省エネ法の適用を受けることとなった。

この期間、流通部門では照明用電力消費などを中心として順調に省エネが進行してきた

¹⁴ 石油化学工業協会によると、日本の国内需要に占めるエチレン輸入の割合は、2008年の9.7%（541千トン）から2019年には17.0%（800千トン）に増加している。

¹⁵ ここでの家計部門EPIの測定値には、家計による自家用車利用の抑制や冷暖房する住環境エリアの縮小など、エネルギー・サービス自体を抑制する行動変化も含まれている。

¹⁶ パンデミックの影響により2020年には412万人、2021年には246万人まで減少しており、測定期間の拡張はエネルギー生産性の大幅な悪化を導く。

と考えられるが¹⁷、市場の構造変化も見いだされる。日本国内の消費者向け電子商取引（BtoC-EC）の市場規模は2010年の7.8兆円から2019年には19.4兆円へと拡大している（経済産業省 2021a）。こうした電子商取引の拡大は、一般にエネルギー生産性を改善させると考えられるが、その影響は近年の測定値からみても軽微である（図表6右）。とくに小売業では電子商取引にシェアを奪われようとも、リアルな店舗におけるエネルギー消費量は営業時間などに応じて減少させることは難しく、むしろ少なくとも過渡期では、小売業としての重複投資によりエネルギー生産性を悪化させている可能性も大きい。

3.3 EPI 政策目標との乖離

2030年における国内の温室効果ガス排出目標（2013年比▲46%）や2050年におけるカーボンニュートラルは、合理的な積み上げによる基盤を持つものではない。目標が先決され、原子力や再エネなど低炭素電源の拡大により補えない排出分は、最終的にエネルギー需要の縮小という目標として押し付けられてきた。それがEPIの政策ターゲットである。

比喩的に言えば、釣り竿の先端の高さを（効率改善なきままの）将来におけるエネルギー需要量とし、先端から針までの釣り糸の長さをEPIによる削減量とすれば、その両者が合理的に推計されれば、針に装着された餌の位置（効率改善後のエネルギー消費量）は自ずと定まる。しかしこのとき、餌は水面（排出目標）より上に位置するかもしれない。数量的なターゲットを持つエネルギー環境政策では、水面を下回るべく餌の位置は野心的なターゲットとして先決され、釣り竿の先端からの距離を調整するため、その合理的な予測値を超えて不釣り合いに長い釣り糸（EPIの政策目標）が設定されてきたのである。

将来のエネルギー生産性は技術や価格などの条件に依存するが、第4期（2008–19年）に観察された産業別エネルギー生産性の寄与や構造変化に基づき、またこの期間における一過性の現象を除くと、マクロ的なベースライン推計値としてどのようなEPIの見通しが得られるだろうか。2030年の政策ターゲットを評価するため、簡易な試算をおこなう。

第4期のEPIにもっとも寄与した12.化学業では（図表6右）、前節のように化学製品構成の変化を統御することによって、一国全体のEPIへの寄与度は0.21ポイント縮小（図表5ではその縮小分だけ産業構造要因が拡大）すると評価される。第4期において寄与度が大きいもう1つの部門は47.家計部門である。一国集計レベルのEPIへの0.12ポイントの寄与度は、東日本大震災後の節電・省エネの要請を反映したものと捉えられるが、その持続可能性には疑問が残る。家計部門において省エネ機器の購入が前倒しで実施されたとすれば、この時期のEPI観測値はベースラインとして過大評価かもしれない。簡易に第3期の寄与度（0.09ポイント）をベースラインとすれば、縮小幅は0.03ポイントとなる。この2部門を合わせるのみでも0.24ポイントの縮小となり、第4期のEPI（年率0.49%）から導かれる、将来のベースライン推計値は年率0.25%へと半減する。

¹⁷ 低炭素社会実行計画では流通部門の多くがエネルギー原単位を目標指標とするが、その進捗報告によれば、2020年・2030年目標は2015年にはすでに達成されている。

グロス EPI の見通しでは、上記の真の EPI (0.25%) のベースライン推計値に、構造変化による影響を加算する必要がある。第4期におけるエネルギー高度化要因による改善(年率 0.35 ポイント)は、再生可能エネルギー発電の推進や電力網への統合コストの拡大による電力料金の上昇を考慮すると、約半分ほどまでの減速を余儀なくされるかもしれない。エネルギー転換要因(0.17 ポイント)、産業構造変化による効果(0.44 ポイント)が今後とも継続すると仮定すれば、一国集計レベルのグロス EPI のベースライン推定値は年率 1.02% と評価される。

3.1 節に示した図表5の最右系列は、このベースライン予測値を2030年に向けた日本の政策ターゲットと比較している。グロス EPI は将来も持続すると予測されるが、政策目標はそれをはるかに上回るレベルに設定されている。本稿のベースライン試算(1.0%)は、2015年のパリ協定締結時に政府が設定した2030年目標(2013年から2030年まで年率2.0%)の半分である¹⁸。両者の乖離は大きい。政府はより野心的な目標に移行した。2050年までのカーボンニュートラル目標により、2021年7月に岸田内閣が閣議決定したエネルギー基本計画(経済産業省2021b)では、EPI 目標を2013年から2030年として年率2.5%へと深めている。

技術的な裏付けがないままに省エネ規制を強化すれば、ここで見いだされるベースライン試算値と政策目標値とのギャップは、生産拠点のさらなる海外移転やエネルギー多消費的な中間財の輸入拡大(3.4 節)によって補われ、国内の経済成長を毀損させる懸念は大きい。そしてこうして実現される国内的な EPI とは、(産業構造変化や製品構成変化といった要因による)見せかけに過ぎず、世界全体の温室効果ガスの排出量の削減を約束するものではない。第4期(2008-19年)において日本や欧州が生産をシフトさせてきた経験は、自らの経済域内における経済成長とエネルギー消費の見かけ上のデカップリング(図表1)を演出しながらも、むしろ世界の排出総量を増大させてきたのである。

3.4 拡大する電力の間接輸入

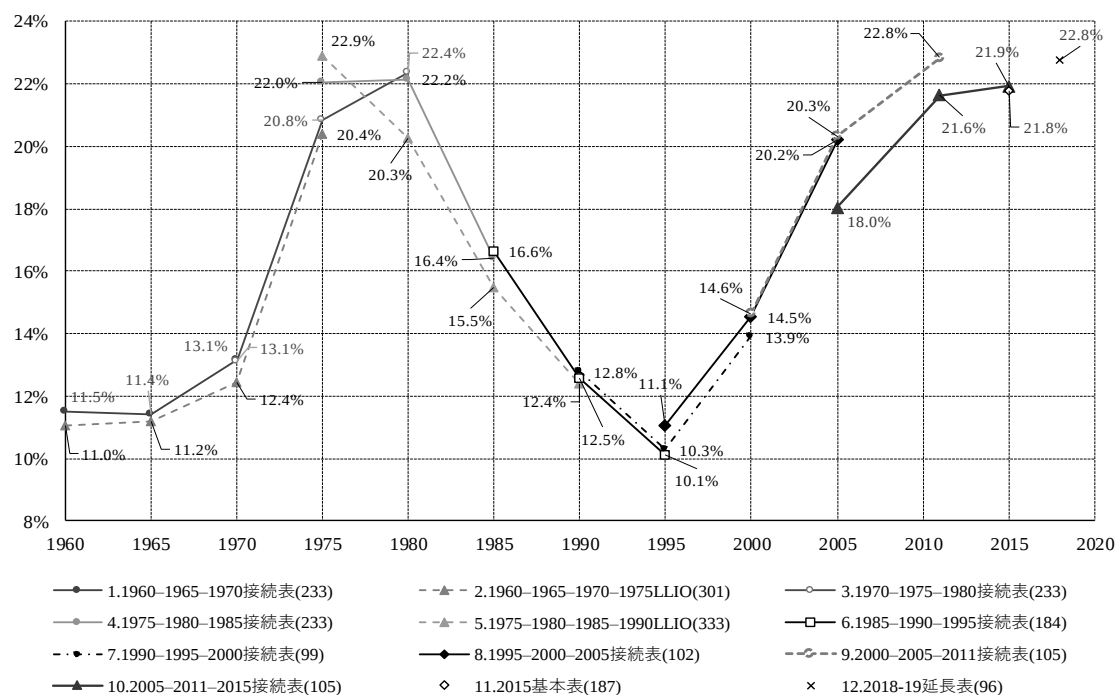
3.2 節の製品構成変化による影響は、化学業という主体に着目した評価であった。本節では産業レベルでの測定から離れ、生産物(製品)レベルでのエネルギー多消費財の輸入拡大による効果を評価しよう。とくに電力に着目すれば、国際的な送電網に接続しない日本では、電力消費における直接的な輸入依存はゼロである¹⁹。しかし、電力多消費的である中間財や最終財の国内生産を縮小し輸入財へ切り替えることは、間接的に電力を輸入しているものと解される。それは統計によって直接に観察されない変化である。

¹⁸ 年率 1.0%のベースライン推計値は省エネ法の目標値とも類似するが、本稿でのそれは制度単位(経済主体)レベルではなく、産業構造変化の影響などを含むマクロ的なグロス水準であることに留意されたい。産業レベル(化学業の製品構成のみを統御)では0.25%であり、個別単位におけるEPIのベースライン推計値は平均的にはその程度であると考えられる。

¹⁹ わずかに統計上、海外での日本の居住者による電力消費(直接購入)や船舶・航空機による電力消費(特殊貿易)が計上されるに過ぎない。

本節では、生産物間の相互依存関係を描写するレオンチェフ生産体系に基づき（Leontief 1951, 1986; Dietzenbacher and Lahr 2004）、経済体系内のすべての間接的な電力輸入量を評価する指標として実効輸入依存度（effective import dependency: EID）を測定する²⁰。一国経済の電力 EID として、さまざまな時点の産業連関表に基づく推計値を比較したものが図表 8 である。最新のベンチマーク年産業連関表となる 2015 年基本表（総務省 2019）の統合小分類（187 分類）に基づく測定では、一国経済の電力 EID は 21.8%と推計される。EID は総供給量（国内生産量と輸入量の合計）に対する輸入量のシェアとして定義されており、国内生産量に占める実効輸入比率は $EID/(1 - EID)$ によって算定される。2015 年における一国経済の電力 EID 推計値（21.8%）は、間接的な電力輸入量が国内生産量の 28.1%に相当することを意味する。当該年における日本の電力需要量 1.02 兆 kWh（発電端）によって換算すれば、本稿で測定される電力の間接輸入量は 2900 億 kWh ほどと解される。言い換えれば、マクロの電力 EID における 1 ポイントの上昇は、国内電力需要を 100 億 kWh ほど減少させる効果を持っている。

図表 8：一国経済の電力 EID（1960–2018 年）



単位：％。

注：産業連関表の接続表および基本表に基づく推計値（ただし 2018 年表のみ経済産業省「延長表」に基づく）。各産業連関表の括弧内は分析における統合商品分類数を示している。

ここでの観察期間では、電力 EID の転換年は 1970 年、1980 年、そして 1995 年である。電力 EID は 1960 年代における 10%前半の水準から、高度成長の終焉から第 1 次オイルシ

²⁰ EID のフレームワークは野村（2021, 5.2 節）を参照。なお本節での図表 8 の電力 EID は暦年値、図表 9 の電力需要実績は年度値であるが、後者では前者の暦年値を近似として対応づけている。なお煩雑となるため本文中では年表記で統一している。

ショックの影響により、1970年からわずかに5年ほどの期間において一気に20%を超えるまで上昇している。調整には時間を要するが1980年を転換期として、電力EIDは下降を続け、1995年には1960年代の水準をわずかに下回る10.3%へと大きく低下させている。EID抑制という成果には、日本経済におけるサービス化の進行など需要面の影響もあるが²¹、原子力やLNG火力による石油代替の実現、停電時間の劇的な減少など²²、電力事業者による安定供給への信頼形成が大きいだろう。しかし1995年から電力EIDは再び上昇し、2018年には22.8%へと1970年代後半の水準に逆戻りしている。

ベンチマーク年および2018年の延長年において測定された電力EIDに基づき、それぞれの中間年次は直線補間し、2018年以降は固定したものを時系列的な電力EIDの推計値としよう。図表9は、観察される日本の電力需要実績（a系列）と、（時系列EID推計値に基づく）観察されない間接的な電力輸入量を含む推計値（b系列）を2022年までの推計値によって比較している。日本経済が中間財・最終財の貿易を通じて輸入されたと解される電力量は大きく、電力EIDが上昇へと転じる転換期となる1995年には1133億kWh、電力需要がピークとなる2007年には2845億kWhへと拡大し、2022年にも3021億kWhの規模があると評価される。

仮想的に、近年の電力需要のピークとなる2007年の電力EID（19.2%）を固定して、2022年までの電力需要量の推計値を示したものが図表9のa1系列である。2007年から2022年にかけての電力需要実績の減少幅は1706億kWhであるが、そのうちの582億kWhは間接的な電力輸入量の拡大に起因すると評価される。近年の国内電力需要実績は、政府によるかつての需給見通しの野心的な削減目標を大きく上回って減少してきたが、その減少幅の3分の1は間接的な電力輸入の拡大によって説明されるのである。

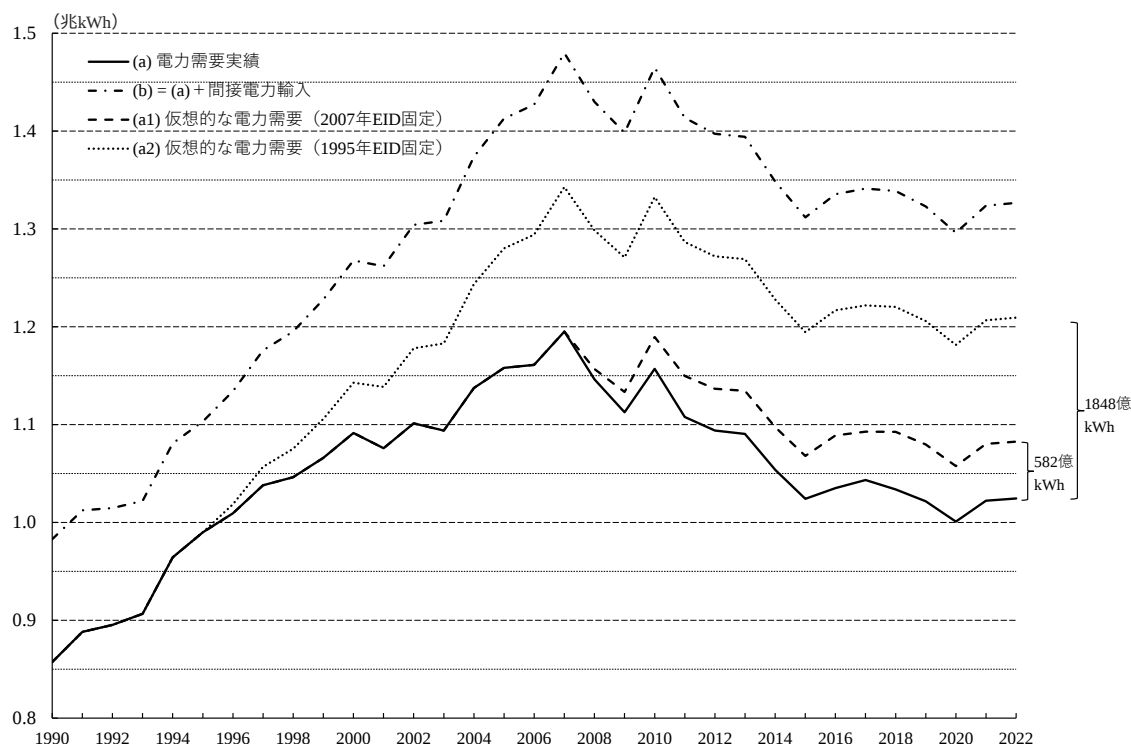
2007年のEIDはすでに上昇したレベルにあり（図表8）、それまでの間接的な電力輸入の拡大によってピーク水準自体が抑制されてきたとすれば、上記の試算は控えめな評価である。より長期として、電力EIDの再上昇への転換期となった1995年値（10.3%）を固定したもとで、2022年までの電力需要量の推計値を評価したものが図表9のa2系列である。そうした2022年の仮想需要値は実績値を1848億kWh上回る。もし1995年以降に進行した電力の輸入比率における上昇がなければ²³、現在の日本経済の最終需要構造のもとでも1.21兆kWhの電力需要（2007年の実績値でのピークをわずかに上回る水準）が存在していたと解されるのである。

²¹ サービス化が電力需要を低下させるのではなく、総じてサービス業では間接的にも電力を輸入しづらいという性質による。

²² 低圧電灯需要家1軒あたりの年間停電時間では、1980年度の237時間（年間停電回数では1.38回）から1995年度には10時間（同0.20回）へと劇的な改善を実現している（電気事業連合会「電気事業のデータベース」）。

²³ 近年の電力EID上昇の転換期は、日本経済の実質単位エネルギーコスト（RUEC）が上昇へと転じた期間とも重なる（第4節）。RUECは、エネルギー価格差の拡大などを受けたエネルギー生産性の改善や、中間財の輸入代替などによる緩和効果を織り込んだ後の指標であるが、実質エネルギー価格の上昇や日米RUEC格差の拡大は電力EIDを高める効果を持っていたと考えられる。

図表 9：電力需要実績と間接的な電力輸入量（1990–2022 年）



単位：兆 kWh（発電端、自家発電を含む。年度値）。

注：(a)系列では、1990–2020 年度は日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット（2022）などによる実績値、2021–22 年度は 2022 年 12 月公表の ECM（脚注 24）での速報値および 2022 年 12 月以降は同年度 11 月までの月次対前年成長率の平均値による簡易推計による。(b)および(a1)と(a2)系列は、本稿での電力 EID 推計値からの簡易的な時系列推計値。

この期間における需要構造の変化としては、経済のサービス化の進行とともに、（最終需要別には電力 EID が相対的に高い）設備投資も低迷し、一国経済の電力 EID を低下させる方向にあったと考えられる（野村 2021, 5.3 節）。電力 EID 再上昇の要因は供給サイドにある。安価に利用可能な省エネ・低炭素技術が制約的なものとなり（3.1 節）、省エネ投資が生産の全体効率を毀損させる懸念はすでに健在化している（2.2 節）。そのもとで、省エネや CO₂ 排出削減のための国内対策の強化、電力価格の高騰や安定供給の毀損を導く再エネ推進など、そうした政策の反作用として、国内企業は海外生産へのシフトによる適応を強いられてきた。そのことが生産物レベルでの電力 EID を持続的に上昇させた要因である可能性は大きい。

重要なことは、電力消費者である企業を直接に知る電力会社でも、企業内の生産における中間財の輸入シフトといった変化を窺い知ることはほとんど困難なことである。電力の間接的な輸入比率の高まりは見えないままに、目に見える電力需要の低下は、やむを得ない景気後退や経済構造の変化か、あるいは節電努力の成果であると捉えられてきた。後者は政府にさらなる規制強化への自信も与えている。しかしそれが誘発する有効需要の漏れは、日本経済の長期停滞を導く強固なデフレ要因ともなってきたのである。

4. 実質単位エネルギーコスト

エネルギー生産性という実物面での考察に対し、本節では価格面における変化を含め、エネルギー価格高騰に対する日本経済の耐性を評価しよう。耐性評価のための指標は実質単位エネルギーコスト（RUEC）である。エネルギー価格が高騰しようとも、もしそれを国内産出価格へと完全に転嫁できる状況にあれば、経済への影響は相殺される。またエネルギー価格とは独立に、競争力のある日本の生産物への海外需要の高まりなどにより国内産出価格が上昇すれば、エネルギー価格高騰に対する耐性もまた強化される。逆に、日本経済の競争力喪失から生産物が陳腐化し、その産出価格が低下を余儀なくされるような状況では、名目エネルギー価格が一定であろうとも、実質エネルギー価格は高まる。技術力の喪失はRUECを高め、エネルギー安全保障のリスクを増大させる。

欧州委員会は、1995–2009年を測定期間として、世界主要国の製造業においてRUECの上昇傾向がみられ、エネルギー価格の変動に対する脆弱性が増大していると警笛を鳴らした（European Commission 2014）。図表10は日本のRUECの長期推移として1955年から2022年までの推計値を比較している。図では米国水準との比較²⁴、また下部には参考として国際的な月平均原油価格の変動を示している。日米両国ともに、2度のオイルショックはRUECをおおむね倍増させる影響を持つが、それにより高められた脆弱性は、1980年代から1990年代初めまでの10年間で、両国ともに大幅に緩和させることに成功している。1970年代初めからの20年間、RUECの水準においても日米両国間の乖離は限定的である。この間に日米RUEC格差が抑制されてきたことは、米国の2倍を超える実質エネルギー価格に直面してきた日本が、米国に比して2倍以上に高いエネルギー生産性水準の実現によって十分に緩和してきたことを示している²⁵。

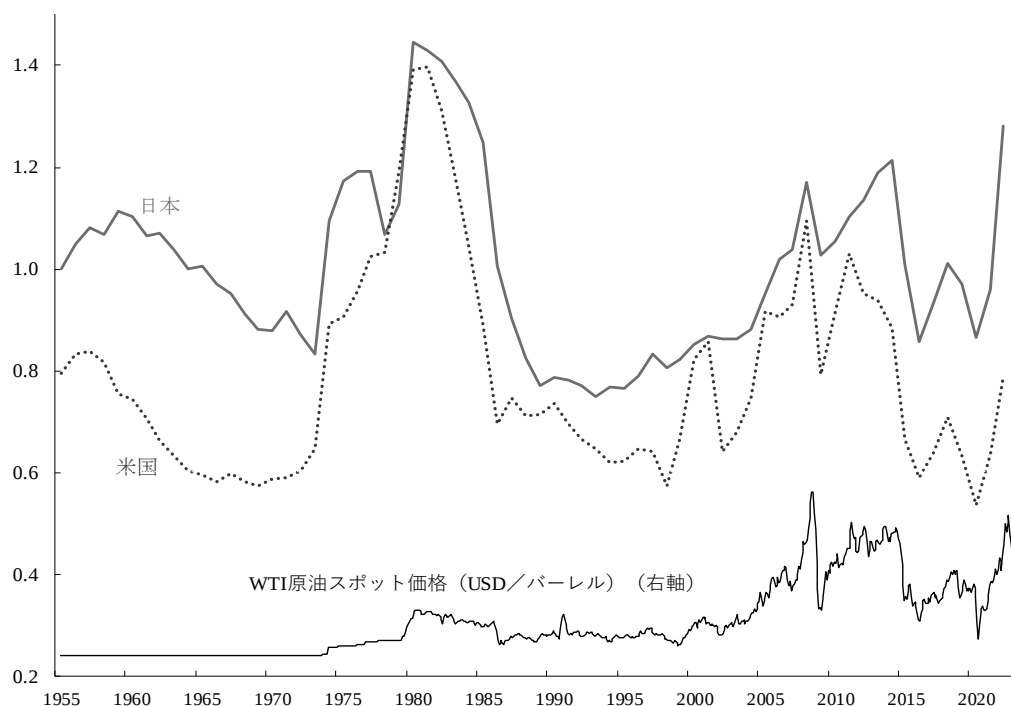
欧州委員会による分析結果と類似して、1995年からのRUECは、日米両国ともに2000年代後半まで上昇傾向にある（図表10）。2000年代に入ってからの上昇は原油高の影響が大きい。RUECの上昇は2度のオイルショック期のピークに比して、およそその半分ほどの水準に抑制されている。2009–10年および2014–15年における2度の原油価格低下による変動はあるが、2009年ほどから米国ではシェール革命の恩恵が表れており、原発停止や再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）による負担を強いられた日本のRUECの

²⁴ 1955–2019年のRUECは、日本は野村（2021, 3.4節）の更新推計値であり、米国はDale Jorgenson研究室のデータに基づく野村（2021, 3.3節）の更新推計値による。ただし米国とは概念差がありおおまかな比較である。2020–22年のRUECは、著者の研究室において2022年1月から構築を開始したエネルギーコスト・モニタリング（ECM）の月次推計値に基づく。なお2022年値は2022年12月28日公表ECMの11月までの推計値から、12月分を延長推計している。現行ECMの対象国は日本に限られるが、別途構築中である米国の暫定推計値によって図表10では2022年まで延長推計している。

²⁵ ここでのエネルギー生産性水準は、両国の産業構造の相違を考慮していないグロス指標での理解による。もし3.2節のように両国の産業構造要因を考慮できれば、エネルギー生産性格差は大きく縮小すると考えられる。日本がより高い実質エネルギー価格に直面することにより断念せざるをえなかったエネルギー多消費的な生産の存在は、グロスのエネルギー生産性格差として、日本の優位性を過大評価している。また産業構造変化による寄与のタイミングは両国で異なり、米国でもグロスEPI内の構造変化による影響は大きい（脚注9）。

低下スピードを上回り、日米格差は再び拡大した。2020年にはパンデミックによる原油価格の急落によって両国の RUEC は大きく低下したが、日本では2020年11月をボトムとして再び上昇へと転じ、2022年の予測値では近年におけるピーク（2014年値）を超過する見込みである²⁶。日米 RUEC 格差では、2022年に60%を超え、1960年代の戦後ピークに達するほどに拡大している。

図表 10：日米の RUEC（1955–2022 年）



単位：日本 1955 年値=1.0（1955–2022 年）。

注：日米データは脚注 24 を参照。下部には価格的な変動による影響のため、対応する期間における West Texas Intermediate (WTI or NYMEX) の月平均原油価格を示している（1955 年 1 月から 2022 年 12 月まで）。

日本経済におけるエネルギー生産性改善に向けた努力は継続されてきたものの、近年の EPI のスピードは米国経済の半分以下である。安価となっていく省エネ技術は資本財へと自ずと体化され、必ずしも省エネ投資を目的とせずとも、更新投資のタイミングなどにより経済体系へ組み込まれていく。また世界的な実質エネルギー価格の上昇を受け、米国においても経済合理性を持つこととなった省エネ技術も導入・普及し、日米のエネルギー生産性ギャップの格差を縮小させる方向に作用している²⁷。

²⁶ 2022 年における日本の RUEC は、エネルギー価格において石油への補助金や電力の規制料金の存在による緩和効果を含むが、電力では十分な価格転換が進んでいないこと（事業者の収益を圧迫）による GDP デフレーター低迷は RUEC を上昇させている。2023 年には、電力負担などへの一時的な補助が決定されるが、依然として RUEC が上昇する懸念は大きい。

²⁷ 野村（2021, 3.3.2 節）では、日米生産性水準の格差として、1995 年には 60%ほどあった日本のエネルギー生産性水準としての米国に対する優位性は、2019 年にはその半分ほどまで縮小したと評価している。米国エネルギー効率経済協議会（American Council for an Energy-Efficient Economy）はエネルギー効率に関

5. 結び—政策へのインプリケーション

「研究者が公の討論にもたらし得る何か有益なものがあるとすれば、それは、他の人々が持っているよりも純粋なモラルでも、より上質なイデオロギーでもない。そうではなくて、物事の渦中にある人びと自身が、情動に突き動かされ、しばしば漠然としていたり完全に無意識であつたりする選好に動かされる結果、気づかずにいる諸事実についての客観的な解釈である。」

(Emmanuel Todd 2015)

適切なエネルギー環境政策を導くために、戦後日本の経済成長に伴い持続的に実現してきた EPI の経験に基づき、「諸事実についての客観的な解釈」をいかに形成し、またそこから何を学ぶことができるだろうか。本稿ではマクロ的に観察されるグロス EPI 内に含まれる構造変化を考察しながら、とくに 2000 年代後半からの日本経済の EPI 加速要因とその弊害について論じてきた。

本稿での測定によれば、戦後日本の持続的な EPI の実現において、政策的な推進による加速は認められず、2000 年代後半までの改善スピードは半世紀にわたり大きく逡減してきたことが見いだされる。そして近年の EPI 加速は、エネルギー多消費的な財の海外生産シフトによって嵩上げされており、また国内産業では資本生産性や労働生産性を犠牲とせざるをえない反作用を伴うものとなったと評価される。他方、日本経済の RUEC は、パンデミックからの世界需要の回復とロシアのウクライナ進行を受け 2021–22 年において急速に上昇し、エネルギー価格高騰に対する耐性はきわめて脆弱なものとなっている。

再エネでは、この 4 半世紀、太陽光発電の国内導入におけるコスト逡減は、過去に想定していたスピードと同様に（あるいはそれを少し上回って）進行した²⁸。しかしそれは再エネ発電の内外価格差の縮小とはならず、自然変動に従う間欠性のある再エネ電源の拡大に

する国別ランキングを発表しており、2015 年の総合評価（国家努力、建築物、産業、輸送の 4 分野）として独国を 1 位に、日本を 2 位、英国を 5 位、そして米国を 8 位と位置付けている（Kallakuri et al. 2016）。2018 年では、総合評価（国の取り組み、建物、産業、交通の 4 分野で構成）として、日本を 5 位、米国を 11 位とそれぞれランクダウンされている（Castro-Alvarez et al. 2018）。日本の順位が相対的に低いのは、（北海道を除き）温暖である気候条件が考慮されずに、建築物の分野で 15 位（米国は 12 位）と大きく評価を落としていることによる。

²⁸ 2008 年末、中期目標検討委員会（茅 2009, 福井 2009）のモデル評価において外生とされた再エネの価格将来見通しはほぼ適切であったと評価されるが、それは日本の需要拡大によって実現されたとは言えない。太陽電池の世界市場における生産価格の低下として、Nemet (2006) は大きく 4 つの段階に分離する。第 1 段階は 1980 年代までの米国を中心とした研究開発による技術プッシュ期、第 2 段階は 1980 年代から 1990 年代までの日本を中心とした政策主導によるニッチ市場の形成期、第 3 段階は 2000 年代のドイツによる再エネ推進による需要拡大期、そして第 4 段階が 2010 年代以降の世界市場規模の拡大と中国企業などを中心とした低価格競争期である。日本の役割は第 2 段階にあり、日本が FIT を導入した 2012 年はすでに世界的に市場が成熟した第 4 段階にあった。そのような価格見通しのもとでは経済モデルによる最適化は、（自らの需要拡大に関わらず）価格が低下すると期待される財の蓄積を先送りすることであつたろう。同じコストで数倍もの導入が可能となるからである。当時もそうした主張はあつたが、現実には拙速な国内導入により、累積して 10 兆円を超える追加的なコスト負担を現在の日本経済に強いるものとなった。

に伴い、さらなる送電網の建設や系統安定化（火力発電によるバックアップ）のための統合コストの増大が強く懸念されるものとなった。また集中豪雨による土砂崩れや河川の汚染などをもたらしたと疑われる事例、銅線の盗難例などは枚挙に暇がなく、拙速な導入に隠れていた費用はすでに顕在化している。さらなる拙速な再エネの大量導入は、日本経済においてこの数年に急速に高まった RUEC を長期的に硬直化させる懸念は大きい。

再エネの大量導入に対する懸念拡大に対し、省エネへの懸念の声は小さい。両者ともに建設や関連サービスの国内需要を創出する面もあるが、省エネはその見かけ上の善良さに反し、直接・間接に労働生産性を低下させ、そして国内生産と資本蓄積とを躊躇させる、静かながらも強固なデフレ要因となった。1世紀にもわたり米国に比して2倍以上の高いエネルギー価格に直面することを強いられた日本では、エネルギー生産性を高めるインセンティブは長期にわたり組み込まれてきている。エネルギー投入による生産性という一面の重要性を政策が優先して高める必要はなく、それは全体効率としての犠牲を導くものとなっている。

観察されやすい国内エネルギー消費量の減少のみを見て、それが省エネ政策の成果であると誤認し、安価に利用可能な技術的な裏付けなしに政府がその目標値をさらに高めていくのであれば、その虚構と現実とのギャップを埋めるために、日本企業は不必要な水準の海外への生産移転をさらに強えられるものとなろう。そうした適応は静かに進行し、マクロ経済は観察しづらい強固なデフレ要因を抱えたままとなる。そして、こうしたことは世界の排出削減に寄与するものでもなく、この20年間に中国などへの生産移転を大きく促してきたように、むしろ世界の排出総量を増大させる可能性が大きいのである。

気候変動問題に対し、日本経済はどのような対応をとるべきだろうか。経済成長に伴うCO₂排出が温暖化効果を持つとしても、気候システムの理解には依然として科学的な論争が多く、カリフォルニア工科大学の著名な物理学者 Steven E. Koonin (2021) はより「慎重」な行動を求めている。またこの4半世紀の経験が照らすことは、フリーライダーテストを満たさない状況下での緩和（mitigation）のコストは膨大となり、適応（adaptation）のコストはそれを大きく下回る（国の跛行性は大きい）ことである。日本では、主要先進国に比して前者のコストは相対的に大きく、後者のコストは相対的に小さいものとなろう。低炭素・脱炭素技術というグローバルなコモンズの形成へと向けた研究開発への貢献、また自然災害に対する耐性が脆弱な途上国への技術的・経済的支援として、日本が果たすべき役割は大きい。数十年を要するエネルギー転換における日本の課題は、国内での拙速な排出削減に執着せずに、移行期の経済効率性を確保することである。

2022年12月、政府はGX（グリーン・トランスフォーメーション）の基本方針として、脱炭素のベースロード電源としての原発の位置づけを明確にし、コスト上昇を抑制した安定供給への一步を再び歩み始めた（GX実行会議2022）。こうした政策転換は、戦後最高水準に接近するまで増大したエネルギー価格高騰に対する日本経済の脆弱性を緩和することが期待される。基本方針によればカーボンプライシングも導入されるという。中長期的には、エネルギー環境政策のターゲットを、これまでの省エネ量、CO₂削減量、再エネ導入

量といった数量面から、税収中立的なカーボンプライシングという価格面の設定へと軸足を移す必要があろう（野村 2021, 6.4 節）。数量面での目標値の「野心」を競い、国内排出量を削減していくという数十年継続してきた政策は、すでに機能不全に陥っている。しかし規制する側のみならず、規制される側もそれが機能しているかのように振る舞う虚構性がある。

現行政策の方向性に対する懸念は大きい。GX で示される「炭素に対する賦課金」は実質的には炭素税であるが、そうした名称となったのは税率変更を容易にするためという。現行のエネルギー環境政策の虚構性を放置したままに、政治と一部企業の夢に振り回され、炭素税率を高めながら二重の配当（double dividend）を振りかざしてその税収を非効率な使途への打ち出の小槌とし、国内の排出削減目標ばかりに執着して規制を強化するのであれば、日本経済の抱く生産性リスクは増大するに違いない²⁹。政府による国内対策が（自らが官需として創出する以外の）国内生産と資本蓄積を抑制的なものとすれば、デフレ圧力の継続は日本のエネルギー転換と世界への貢献をはるかに困難なものとする。難しい舵取りの軸を定めるには、日本のエネルギーと経済成長に関する諸事実について客観的な解釈と理解が求められている。

参考文献

- 大川一司・石渡茂・山田三郎・石弘光（1966）『長期経済統計（3）資本ストック』東洋経済新報社。
- 大川一司・高松信清・山本有造（1974）『長期経済統計（1）国民所得』東洋経済新報社。
- 茅陽一編（2009）『CO₂ 削減はどこまで可能か—温暖化ガス▲25%削減の検証』（慶應義塾大学産業研究所選書），エネルギーフォーラム社。
- 黒田昌裕・新保一成・野村浩二・小林信行（1997）『KEO データベース—産出および資本・労働投入の測定—』慶應義塾大学産業研究所。
- 経済産業省（2021a）「令和2年度 我が国経済社会の情報化・サービス化に係る基盤整備（電子商取引に関する市場調査）」7月。
- 経済産業省（2021b）「エネルギー基本計画」10月。
- 経団連（2022）「経団連カーボンニュートラル行動計画：2050年カーボンニュートラルに向けたビジョンと 2022年度フォローアップ結果総括編（2021年度実績）[速報版]」11月。

²⁹ 世界的な脱炭素化の流れが加速すれば、省エネ性能の高い機器やグリーンスチールなどの素原材料などへの需要増による一部の日本企業への恩恵は期待されよう。しかし性能としては完全代替に近い（あるいは劣る）グリーン製品がどれほどのシェアにまで拡大するか、政策が創造する需要にどこまでの継続性があるか、依然として不透明さは拭えない。企業にとっては、ニッチ市場への傾斜や両面の戦略性が経営上の難しい課題となるが、国内外の生産地の選択はもう1つの難問となっている。政府には、その後者において、企業の信頼を失うことなく国内生産の選択を導く政策が求められる。

- 澤田豊（1998）「化学工業における省エネルギー対策への取り組み」『紙パ技協誌』第 52 巻 11 号.
- GX 実行会議（2022）「GX 実現に向けた基本方針（案）」内閣官房, 12 月.
- 杉山大志・野田冬彦・木村幸（2010）『省エネルギー政策論—工場・事業所での省エネ法の実効性』エネルギーフォーラム.
- 総務省（2019）「平成 27 年産業連関表」6 月.
- 内閣府（2021）『令和 3 年度 年次経済財政報告（経済財政政策担当大臣報告）—レジリエントな日本経済へ：強さと柔軟性を持つ経済社会に向けた変革の加速—』9 月.
- 内閣府経済社会総合研究所（2022）『2021 年度国民経済計算年報』内閣府.
- 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット（2022）『EDMC エネルギー・経済統計要覧』省エネルギーセンター.
- 日本化学工業協会（2022）「化学産業における地球温暖化対策の取組み」1 月.
- 日本鉄鋼連盟（2022）「地球温暖化対策への取組状況について」産業構造審議会 産業技術環境分科会 研究開発・評価小委員会 鉄鋼ワーキンググループ、3 月.
- 日本政府（2019）「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」6 月.
- 日本政府（2020）「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」12 月.
- 野村浩二（2004）『資本の測定—日本経済の資本深化と生産性』慶應義塾大学出版会.
- 野村浩二（2021）『日本の経済成長とエネルギー：経済と環境の両立はいかに可能か』慶應義塾大学出版会.
- 福井俊彦編（2009）『地球温暖化対策中期目標の解説』ぎょうせい.
- Akimoto, Keigo (2022) “Evaluation and implication for NDCs by 2030,” The 2021 ALPS International Symposium-Strategy for NDCs in 2030 & Impact on International Competitiveness, Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE). March 8.
- Castro-Alvarez, Fernando, Shruti Vaidyanathan, Hannah Bastian and Jen King (2018) *The 2018 International Energy Efficiency Scorecard*, American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), Report I1801.
- Dietzenbacher, Erick and Michael Lahr (eds.) (2004) *Wassily Leontief and Input-Output Economics*, Cambridge University Press.
- Dunsheath, Percy (1952) “Electricity’s Role in Industry—Contribution to Raising Productivity,” *Financial Times*, October 30.
- European Commission (2014) *Energy Economic Developments in Europe*, European Economy 1, Brussels: European Commission.
- Gordon, Robert J. (2016) *The Rise and Fall of American Growth*, Princeton University Press. (高遠裕子・山岡由美訳『アメリカ経済—成長の終焉』日経 BP 社、2018 年).
- Herring, Horace (2006) “Energy Efficiency—A Critical View,” *Energy*, Vol.31, Issue 1.
- House of Lords of the United Kingdom (2005) *Energy Efficiency, Science and Technology Committee*,

UK Parliament.

JDB Research Center on Global Warming (eds.) (1996) *Symposium on the Environment and Sustainable Development: Roles for Japan with Regard to Global Environmental Issues*, The Japan Development Bank.

Jorgenson, Dale W. (2009) *The Economics of Productivity*, International Library of Critical Writings in Economics, 236.

Jorgenson, Dale W., Koji Nomura and Jon D. Samuels (2016) “A Half Century of Trans-Pacific Competition: Price Level Indices and Productivity Gaps for Japanese and U.S. Industries, 1955–2012,” in D. W. Jorgenson, et al. (eds.) *The World Economy – Growth or Stagnation?*, Cambridge University Press, Chap.13.

Kallakuri, Chetana, Shruti Vaidyanathan, Meegan Kelly and Rachel Cluett (2016) “The 2016 International Energy Efficiency Scorecard,” American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), Report E1602.

Koonin, Robert E. (2021) *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*, BenBella Books. (三木俊哉訳 (2022) 『気候変動の真実：科学は何を語り、何を語っていないか?』 日経 BP 社).

Leontief, Wassily (1951) *Structure of the American Economy, 1919–39: An Empirical Application of Equilibrium Analysis*. Oxford University Press.

Leontief, Wassily (1986) *Input-Output Economics (Second Edition)*. Oxford University Press.

Murtishaw, Scott and Lee Schipper (2001a) “Energy Saving and Structural Changes in the US Economy: Evidence from Disaggregated data Using Decomposition Techniques,” Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, LBNL-48786, September.

Murtishaw, Scott and Lee Schipper (2001b) “Disaggregated Analysis of US Energy Consumption in the 1990s: Evidence of the Effects of the Internet and Rapid Economic Growth,” *Energy Policy*, Vol.29, Issue 15.

National Academy of Sciences (1979) *Alternative Energy Demand Futures to 2010*, The Report of the Demand and Conservation Panel to the Committee on Nuclear and Alternative Energy Systems, Washington, D.C.: National Academy of Sciences.

Nemet, Gregory (2006) “Beyond the Learning Curve: Factors Influencing Cost Reductions in Photovoltaics,” *Energy Policy*, Vol. 34, No. 17.

Nomura, Koji (2023) *Energy Productivity and Economic Growth—Experiences of the Japanese Industries, 1955–2019*, Springer.

Nordhaus, William D. (2015) “Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy,” *American Economic Review*, Vol.105, No.4.

Schurr, Sam H., Calvin C. Burwell, Warren S. Devine and Sidney Sonenblum (eds.) (1990) *Electricity in the American Economy—Agent of Technological Progress*, Contributions in Economics

and Economic History, No. 117, New York: Greenwood Press.

Smil, Vaclav (2017) *Energy and Civilization: A History*, Cambridge: The MIT Press. (塩原通緒訳 (2019) 『エネルギーの人類史』 青土社).

Todd, Emmanuel (2015) *Qui est Charlie?* (堀茂樹訳 (2015) 『シャルリとは誰か?』 文春新書).

Yale Center of the Study of Globalization (2015) *Global Harmonization Carbon Pricing: Looking Beyond Paris*, International Conference held on May 27–28.