

特集 産業電化が拓く省エネ・低炭素社会

産業電化の生産性便益と脱炭素化に向けた取組の検討

Beneficial Electrification in Industry and Policy Framework for Decarbonization

向 井 登 志 広*

Toshihiro Mukai

1. 序論

1.1 産業の脱炭素化

菅首相は2020年10月の所信表明演説で、成長戦略の柱に経済と環境の好循環を掲げ、2050年までに脱炭素社会の実現を目指すことを宣言した。脱炭素化を達成する上で、我が国の最終エネルギー消費におけるCO₂排出量の半分近くを占める産業部門の取組は重要であるものの、その一方で、製造工程や製造技術の多様性・複雑さ等により、民生・業務・運輸などの他部門と比べて取組が遅れがちになる傾向がある。従来型の省エネ・省資源化は変わらず必要だが、それらのみで産業の脱炭素化は実現不可能であり、再生可能エネルギー電源等の導入拡大と、最終エネルギー消費における電化・水素化などに対する促進取組を検討していかなければならない。

1.2 費用便益評価の必要性

産業の脱炭素化を推進する上で、取組費用と期待される便益を定量的に理解し、そのバランスを見極めながら推進していくことが重要である。例えば、米国では、“効率的な電化”(Efficient electrification)と呼ばれ、費用・便益の定量化を通じた費用対効果の最大化が志向されており、表1に示すように電化に関する費用便益とその定量化の難易度が整理されている¹⁾。

電化・水素化など脱炭素化に貢献しうる技術群は膨大であるため、技術群を広範かつ漏れなくリストアップし、個別技術の費用便益に関する定量的理解を随時アップデートしていくことが、産業の脱炭素化を効率的に促進していく上で重要である。例えば、水素化技術と比べた際、電気加熱などの電化技術は、適用可能な産業分野・製造工程に限界があるものの、一方で、商用化初期段階にある技術も多く、適切な支援策により性能向上と市場拡大の好循環を短期間で実現できる可能性がある。

1.3 本稿の構成

以上の問題意識を念頭に、本稿では、以下2点について述べる。まず次章では、産業電化に伴う品質向上・生産量

増・作業環境改善といった生産性便益に関する既往調査²⁾を紹介する。生産性便益は、産業部門における省エネ対策の非エネルギー便益(Non-energy Benefit, NEB)の一つとして認識されてきたが^{3~4)}、最近では産業電化の促進ドライバーとして注目を集めている⁵⁾。

続いて3章では、産業の脱炭素化に向けた取組検討のため、米国や欧州など各国で議論されている論点を概観する。電化・水素化など多様な革新のイノベーション・社会定着を促進するような取組は前例がないため、取組枠組を丁寧に議論する必要がある。米国や欧州の既往文献は参考になる点も多いと考える。

表1 電化に係る費用便益の全体像(出典:文献¹⁾)

主な費用便益	定量化難易度
①エネルギー事業者(電力・ガス会社など)	
電力需要増・化石燃料需要減	○(可能)
発電容量増に係る投資費用	○(可能)
送配電システムの増強投資費用	○(可能)
既存設備の回収不能費用	△(やや困難)
エネルギー市場価格の不確実性	△(やや困難)
②電化事業の実施主体(国・エネルギー事業者など)	
事業運営に係る費用 (マーケティング・効果検証)	○(可能)
導入インセンティブに係る費用 (補助金・リベートなど)	○(可能)
③電化事業の参加主体(工場など)	
電化設備導入に係る初期費用	○(可能)
設備の運用保守費用の抑制	△(やや困難)
製品品質・生産量向上など	×(困難)
作業員の健康改善に伴う医療費減	△(やや困難)
作業員の快適性向上	×(困難)
④地域・社会全体	
室内・屋外の空気質改善	△(やや困難)
雇用増減	△(やや困難)
経済成長	△(やや困難)
エネルギーセキュリティ	×(困難)
公衆衛生の改善	×(困難)

2. 生産性便益の評価方法:現状と課題

本章では、筆者らが2020年4月に公開した研究資料²⁾を紹介する。当資料の目的は、電気加熱の導入による省エネ効果や生産改善効果の評価事例を収集し、評価方法や結果について傾向把握するとともに、生産性便益の評価方法について、現状と改善点を検討することである。

*一般財団法人 電力中央研究所 社会経済研究所
 〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1
 E-mail: mukai@criepi.denken.or.jp

2.1 評価事例の収集

生産性便益の評価事例は、日本エレクトロヒートセンターが隔月で定期刊行している機関誌『エレクトロヒート』の特集記事から収集した。同誌記事には、導入技術・導入工程・導入後の省エネ効果/生産性便益を詳細に報告しているという利点がある。

多様な電気加熱について最新事例を収集するため、2016年から2019年までに刊行された特集記事にて報告されている事前・事後評価事例、計70件を収集した。評価事例を表2に示す。食品・鉄鋼非鉄・機械・電子・化学・紙パルプなどの産業分野の評価事例が含まれている。

表2 評価事例の産業分野と工程 (出典：文献²⁾)

産業分野	技術を適用した工程など
①抵抗加熱	
食品	貯蔵糖液保温, 液体調理
鉄鋼非鉄	アルミ溶解保持, 鋼材部品の浸炭処理
②プラズマ加熱	
鉄鋼非鉄	溶解
③過熱水蒸気加熱	
食品	食品凝縮・乾燥・焼成
電子	基板乾燥
機械	部品加熱・乾燥, 部品洗浄乾燥
④赤外線・遠赤外線加熱	
食品	食品乾燥, 味付乾燥, ペットフード乾燥
電子	基板用材料塗膜の乾燥
機械	自動車塗装乾燥, 部品の粉体塗装乾燥
化学	プラスチックのアニール(歪み取り)処理, 樹脂成型品の水性塗装乾燥
紙パルプ	印刷乾燥
⑤マイクロ波加熱	
食品	膨化乾燥
鉄鋼非鉄	ロストワックス鋳造乾燥
化学	脂肪酸エステル製造
⑥高周波誘電加熱	
化学	フィルム塗工樹脂の乾燥
⑦誘導加熱	
鉄鋼非鉄	高圧ボンベ加工, 溶解, キューボラ製造
機械	金型コーティング
化学	廃プラスチック熱分解, 樹脂成型加工
⑧ヒートポンプ	
食品	蒸留による廃液メタノール回収, 洗浄液加温, 飲料充填後ビンの殺菌(バストライザー), 排水温度調節, 殺菌排水熱ボイラ利用, 圧縮空気製造(コンプレッサー)室の温度調整, 麹・醗酵タンク冷却, 食品工程の冷却・給湯利用
機械	塗装処理前の脱脂・湯洗・化成, 含侵廃水濃縮, 機械部品の塗装乾燥
電子	精密加工室などの温湿調整, クリーンルーム空調
紙パルプ	乾燥(ドライラミネート)
⑨MVR	
食品	海水濃縮, 糖液濃縮, 調味料濃縮, 麦汁煮沸, 蒸留によるアルコール精製, 蒸留による廃液メタノール回収
電子	メッキ排水濃縮による産廃減容化, 蒸留による有機溶剤分離
紙パルプ	トナー原料製造時の排水濃縮

2.2 省エネ便益・生産性便益の傾向比較

まず、省エネ効果の指標として採用されやすいエネルギー使用量削減率やランニングコスト削減率について評価結果を報告した事例を集計した。その結果、ヒートポンプやMVR (Mechanical Vapor Recompression)^{注)}に関する事例が多めであった。一方で、生産性便益の中でも定量評価事例が多い加熱時間短縮効果については、赤外・遠赤外線加熱、マイクロ波加熱、高周波誘電加熱、誘導加熱など電磁波加熱の評価事例や、抵抗加熱、過熱水蒸気加熱の評価事例に関して見られた。特に短縮効果が高いのは電磁波加熱の評価事例であった。

2.3 生産性便益の集計結果

次に、生産性便益を①生産工程、②運用保守、③作業環境に分類した(表3)。その結果、生産工程に関する便益に比べて運用保守・作業環境に関する報告例は少なめであった。理由として、電気加熱の種類によって生産性便益が異なる点や、評価者が運用保守・作業環境に関する便益を評価対象に含めていない点が考えられる。

更に、生産性便益を定量評価の3段階「金銭評価」「非金銭評価」「定性評価」にて分類した(表4)。その結果、生産性便益の報告には定性的な記述が多い一方で、非金銭評価や金銭評価の事例は少なめであった。生産性便益は技術導入を決定づける重要な要因となるため、評価結果や計測データを積極的に公開していく必要がある。

この点、生産性便益の金銭評価をした数少ない例として、プラスチック成形時のアニール(歪み取り)処理装置の評価事例⁶⁾が参考になる。本事例では、3種類の工場への導入を想定した事前評価結果を示しており、開発機導入による①設備償却費の増加、②省エネによるランニングコスト削減、③時間短縮による人件費削減、の3要因について製造原価に占める割合変動が金銭評価されている。当事例では、加熱時間短縮による人件費削減効果が、省エネによるランニングコスト削減効果を上回っており、時間短縮効果の経済的メリットの高さを示唆している。

2.4 小括

現状では、電気加熱の導入効果を事前・事後評価する際、定量化がしやすい省エネ便益を定量評価の対象とする場合が多い傾向にある。しかし、省エネ以外の生産性便益が得られやすい電磁波加熱などの電化技術は、導入メリットが認知されず、技術普及を阻害する懸念が生じる。

企業の生産管理の視点に立つと、設備投資計画の実施判断は投資回収期間により判断される。投資回収期間は、投資額を投資によって得られるキャッシュフローの平均値で

注) ヒーターで蒸発させた蒸気を蒸気圧縮機によって断熱圧縮して昇温し、その高温蒸気を自己のヒーターの加熱源として再利用することで潜熱利用する蒸発装置。

表3 電気加熱の種類別の生産性便益 (出典：文献²⁾)

種類	便益①生産工程	便益②運用保守	便益③作業環境
抵抗加熱	加熱時間短縮, 焦げ・加熱温度ムラの低減, 品質安定化, 品質向上, 自動化, 設備コンパクト化	省メンテナンス, 清掃頻度減, 炉体長寿命化	放熱ロス減少
プラズマ加熱	—	—	—
過熱水蒸気加熱	加熱時間短縮, 加熱温度ムラの低減, 少量多品種生産への対応, 水分・栄養素・風味が逃げにくい, 省スペース化, 室温上昇抑制	安価洗浄剤へ代替, 廃棄物処理コスト減	食品加工時の臭み除去, 引火性がないため安全
電磁波加熱	赤外・遠赤外線加熱	加熱時間短縮, 生産工程長の短縮, 設備コンパクト化, 塗装性能向上, 製品寸法精度向上, 省人化, 温度制御性向上, 不良品発生率の減少, 製造原価減	—
	マイクロ波加熱	加熱時間短縮, 設備コンパクト化, 添色抑制による品質向上, 多品種化	—
	高周波誘電加熱	加熱時間短縮	—
	誘導加熱	加熱時間短縮, 再塗布回数の減少, 品質向上, 生産量増	—
ヒートポンプ	工程の安定化, 工程制御性向上, 除湿能力向上	省メンテナンス	—
MVR	分離性能向上, 工程の自動化, 工程の安定化, 品質安定化, 製造原価減	—	臭気減少

表4 評価事例における指標別の生産性便益 (出典：文献²⁾)

種類	便益の例 (評価指標)
金銭評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 工程省人化による人件費減 (円/個) ・ 不良品発生率の減少による製造原価減 (円/個) ・ 濃縮廃液の有価引取り実現による収益増 (円)
非金銭評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 加熱時間短縮 (分, 時) ・ 設備のコンパクト化・工程の短縮化 (m, m², m³) ・ 省メンテナンス (回/日)・清掃頻度減 (回/日) ・ 工程安定性 (mmAq; 圧力制御) ・ 作業エリア放熱減 (°C) ・ 作業エリア騒音減 (dB) ・ 揮発性有機化合物 (VOC: Volatile organic compounds) の排出減 (g/m²) ・ 生産量増 (数量/日)
定性評価 (要約)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生産工程関連: 品質向上, 品質安定化, 加熱温度ムラの低減, 少量多品種生産 ・ 運用保守関連: 加熱設備の長寿命化, 稼働停止リスク減, 安価洗浄剤への代替 ・ 作業環境関連: 引火性がなく安全, 作業エリア臭気減, 作業員の満足度向上

割ることで算出する。キャッシュフローには、エネルギーコスト削減以外にも、品質・品種・数量・価格といった生産活動のアウトプット関連の要素や、労働時間・労働効率・設備・原材料といった生産活動のインプット関連の要素がある。生産性便益を企業の意思決定に組み込んでいくためには、これら生産要素に関連づけて定量評価していくことが効果的であると考えられる。

定量評価する上では、生産要素別の金銭評価の難易度を考慮する必要がある。第1に、金銭評価は可能だが報告事例が少ない項目がある。例えば、加熱時間短縮・省人化による人件費削減効果や、省資源化によるランニングコスト削減効果などが当てはまる。これらは、金銭評価事例を増やし、評価の必要性について認知度を高めていくことが有効であると考えられる。

第2に、成果出現までに長期間を要する項目がある。例えば、品質向上・少量多品種生産・生産量増による売上増

や、製造原価減による利益増などが含まれる。これら生産性便益が企業利益にどの程度寄与するかは、営業努力や市場環境にも影響を受けるため、電気加熱の導入後数年間のフォローアップ調査が必要になるものと考えられる。

第3に、非金銭的な定量評価自体が困難な項目がある。例えば、作業環境改善や従業員の満足度向上による労働効率の改善などが含まれる。工場環境では、温湿度・工場の断熱性・空気質・騒音・明るさ・安全性といった工場独自の要素が従業員満足度やモチベーションに影響している可能性があり、工場環境の特徴を踏まえた定量評価手法の検討が必要である。

3. 産業脱炭素化に向けた政策枠組の検討

前章で述べた生産性便益は、産業電化技術の普及促進ドライバーとして重要ではあるものの、一方で、産業部門には技術転換に係る様々な阻害要因が指摘²⁾されており、適

切な促進取組の検討が必要になる。本章では、米国や欧州など各国で議論されている論点を概観するとともに、我が国への示唆を考察する。

3.1 Rightor らによる産業電化の便益調査

2020年7月、Rightorらは、産業電化を促進するドライバーとして生産性便益に焦点を当てた報告書を公開している⁵⁾。当文献では、産業電化の促進に向けて、以下5点の提言をまとめている。

- 産業の脱炭素化に向けて電化促進が必要
- 産業分野に依らない横断的な電化技術として、低中温の電気加熱技術、機械動力、電気/ガスのハイブリッド・ボイラなどが有望
- 生産性便益は導入促進要因となるため、技術開発や実証研究の段階から生産性便益の評価結果や計測データを公開することが望ましい
- 産業電化の加速化・スケール化のため、当該分野に対する公的予算拡充が必要である
- 産業電化の実現には、安定した継続的な政策支援と民間投資が必要

これらの提言は、我が国においても同様に重要な指摘となりうる。例えば、2点目の分野横断技術に対する理解促進や、3点目の生産性便益の評価結果や計測データの公開は、我が国の産業電化を促進する上でも重要だろう。

3.2 Nilsson らによる政策枠組検討

一方で、政策枠組を検討する上では、論点をより具体化する必要がある。例えばNilssonらは、欧州産業の脱炭素化に関する最新文献をレビューした上で、政策枠組に含めるべき6つの項目を指摘している⁷⁾。

- 方向性の明確化 (Directionality)：政府目標、産業団体による長期計画の策定支援など
- イノベーション (Knowledge creation and innovation)：民間のR&D投資が少ないエネルギー多消費産業等に対する手厚い公的R&D支援を通じた民間投資の喚起、産業電化に伴う発送配電等のエネルギーインフラ投資計画に対する社会的合意形成など
- 市場形成 (Creating and re-shaping markets)：商用化初期段階の脱炭素化製品に対する導入補助などの供給側対策、低炭素建材の利用促進に向けた建物基準などの需要側対策など
- キャパシティ形成 (Building capacity for governance and change)：従来型の省エネ政策検討から、多様な産業政策と整合性の取れた包括的な産業脱炭素化政策の検討へ
- 国際的整合性 (International coherence)：国際社会と足並みを揃え、競争力低下や炭素リーケージを回避
- フェーズアウト産業への対策 (Phase-outs and socio-

economic implications)：化石燃料からのフェーズアウトに伴い経済的影響を被る企業・地域・労働者の特定と対策検討

Nilssonらの論じる政策枠組の中で特に注目したいのは、我が国でも重要性が認識されているイノベーション戦略に加えて、市場形成に関連する政策の必要性を指摘している点である。イノベーションや市場形成を促進していくためには、個別技術の技術水準の把握が不可欠である。

3.3 国際エネルギー機関による技術成熟度の評価事例

技術成熟度の評価事例として、国際エネルギー機関(IEA)⁸⁾による、技術成熟度水準 (Technology Readiness Level, TRL) 指標がある。TRL指標は、1970年代にアメリカ航空宇宙局(NASA)によって開発された指標であり、その後、2014年の欧州研究開発枠組計画「Horizon 2020」などで航空宇宙分野以外の技術評価にも適用されている。

IEA⁸⁾は、技術成熟度を6段階に分類するとともに、各段階を更に細分化し合計11項目でTRL指標を構成している。第1段階が、初期アイデア(TRL-1)・コンセプト形成(TRL-2)・検証用コンセプト(TRL-3)といった「コンセプト」段階、第2段階が「プロトタイプ初期」(TRL-4)段階、第3段階がプロトタイプ拡大(TRL-5)・プロトタイプ完成(TRL-6)といった「プロトタイプ拡大」段階、第4段階が商用化前実証(TRL-7)・商用化初期(TRL-8)といった「実証」段階、第5段階が性能向上余地のある限定的な商用利用(TRL-9)・社会統合余地のある限定的な商用利用(TRL-10)といった「早期導入」段階、第6段階が市場拡大中の商用化技術(TRL-11)を指す「成熟」段階である。各技術は、技術デザイン成熟度・コスト・性能向上目標・技術開発プロジェクト最新動向などを総合的に考慮して評価されている。

また、IEA⁸⁾はNilssonら⁷⁾と同様、政策枠組に関する提言をしている。すなわち、早期導入・成熟段階にある技術群は、温室効果ガス排出削減を短期的に実現する上で重要であり、その一方で、中長期的にはプロトタイプ・実証段階の技術が必要になるため、個別技術の成熟度に適合した政策支援が必要だと指摘している。

IEA⁸⁾の評価対象となっている脱炭素化技術は合計400種類以上あり、そのうち、産業部門に紐付けられている技術としては84種類がある。例えば、前章で述べた電磁波加熱は、分野横断的な生産技術に分類されており、以下の通り評価されている。

- 誘電加熱：コンセプト段階 (TRL-3)
- 赤外線加熱：コンセプト段階 (TRL-3)
- マイクロ波加熱：プロトタイプ拡大段階 (TRL-5)
- 誘導加熱：早期導入段階 (TRL-10)

表5 省エネ・電化技術の多面的な評価例（出典：文献⁹⁾から、成熟段階に到達していない技術を一部抜粋）

技術例	便益	省エネ技術	電化技術	TRL
電磁波加熱による乾燥処理	乾燥時間短縮, 生産量増		○	4-8
超音波を援用した乾燥技術	加熱時間短縮, 加熱温度低減	○		7
オーム加熱	加熱ムラ低減, 加温制御性向上, 加熱時間短縮		○	8
パルス電界殺菌	処理時間短縮, 食品風味劣化の抑制	○	○	8
超音波による攪拌等	攪拌効率化, 加熱温度低減, 生産量増	○	○	8

日本の産業部門において電気加熱技術の成熟度を評価した場合、IEA⁸⁾と同様の評価結果が得られるかについては議論の余地があろう。例えば、ニュージーランド政府省エネルギー局（EECA, Energy Efficiency and Conservation Authority）は、同国の主要産業の一つである食品産業に絞り、脱炭素化に貢献する乾燥・殺菌関連技術をレビューするとともに、個別技術について、生産性便益、省エネ・電化の別、技術成熟度などを整理している（表5）⁹⁾。当事例は、同国の産業構造や技術市場実態を踏まえ、対象技術の選定や成熟度評価がなされている。

4. おわりに

前章までの議論を踏まえ、我が国の産業部門における脱炭素化に向けた取組検討への示唆を2点述べる。

第一に、産業の脱炭素化に向けた電化技術の役割について認識を改め、支援方法の在り方を検討すべきである。従来の産業エネルギー政策は、省エネ効果の多寡に基づいて支援の在り方が議論されてきており、省エネ効果が限定的な一部の産業電化技術は支援対象になりにくいという課題があった。しかし、IEA⁸⁾やEECA⁹⁾等の海外事例では、再生可能エネルギー電源等の導入拡大を前提に、省エネ効果が限定的な電化技術についても、支援方法の在り方を検討している。

第二に、日本の製造業における電化技術の便益・費用・成熟度などの実態を踏まえ、支援方法の検討が必要である。赤外線・遠赤外線加熱を例に見ると、IEA⁸⁾ではコンセプト段階に分類されているが、我が国の評価事例を見ると、食品・電子・機械・化学・紙パルプなど、多様な産業分野で評価事例があり、より成熟度の高い段階に位置づけるべき技術である可能性もある（表2）。コンセプト・プロトタイプ段階の技術については、ラボ実験や実証事業などを通じたイノベーション支援が必要であるのに対して、早期導入段階の技術については、商用化と性能向上・社会実装の好循環を生み出すような市場形成支援が必要になる。

我が国では、例えば2020年1月に決定された革新的環境イノベーション戦略¹⁰⁾で、「温室効果ガス排出削減量が大きく、

日本の技術力による大きな貢献が可能な」技術が示され、産業部門では、水素技術・炭素回収・リサイクルなど7種類が示されている。一方で、前述の通りIEA⁸⁾では脱炭素化に貢献する技術がリストアップされており、そのうち産業部門では、電気加熱を含む84種類が脱炭素化技術として成熟度評価対象になっている。我が国においても、産業電化技術を含む広範な技術群に対して、費用・便益・成熟度などの多面的な視点から技術評価を行い、個別技術の実態に合わせた政策支援の在り方を検討していくことが、産業の脱炭素化を効率的に促進する上では重要である。

参考文献

- 1) Electric Power Research Institute ; The Total Value Test : A Framework for Evaluating the Cost-Effectiveness of Efficient Electrification, EPRI (2019).
- 2) 向井登志広・安岡絢子；産業部門における電気加熱の生産性便益—評価方法の現状と課題—, 電力中央研究所研究資料 Y19505, (2020).
- 3) International Energy Agency ; Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency, IEA (2015).
- 4) Worrel, E., Laitner, J.A., Ruth, M. & Finman, H. ; Productivity benefits of industrial energy efficiency measures, Energy 28, (2003), pp.1081-1098.
- 5) Rightor, E., Whitlock, A., Elliott, R.N. ; Beneficial Electrification in Industry, ACEEE Research Report (2020).
- 6) 河村和彦；赤外線加熱によるプラスチック製品のアニール(歪取り)および“えびせんべい”の味付け乾燥への適用について, エレクトロヒート 206 (2016), pp.36-40.
- 7) Nilsson, L.J., Åhman, M., Bauer, F., Ericsson, K., Johansson, B., van Sluisveld, M., Vogl, V., Andersson, F. N. G., Bataille, C., du Can, S. R., Hansen, T., Lechtenböhmer, S., Schiro, D. ; A European industrial development policy for prosperity and zero emissions, ECEEE Industrial Summer Study Proceedings 457-466 (2020).
- 8) International Energy Agency ; Energy Technology Perspectives 2020, IEA (2020).
- 9) Energy Efficiency and Conservation Authority ; International technology scan - Alternative technologies for process heat, (2019).
- 10) 統合イノベーション戦略推進会議；革新的環境イノベーション戦略, (2020).