

使用済み太陽光発電モジュールの排出量予測と廃棄税シミュレーション

～太陽光発電大量廃棄問題にむけて～

大阪大学法学部 国際公共政策学科4年 学籍番号02B18032

鯉沼花帆(こいぬまかほ)

大阪大学経済学部 経済経営学科4年 学籍番03A18113

谷川翠(たにがわみどり)

大阪大学法学部 国際公共政策学科3年 学籍番号02B19010

遠藤瑞季(えんどうみずき)

大阪大学法学部 国際公共政策学科3年 学籍番号02B19035

佐藤優樹(さとうゆうき)

要旨

本稿は、近年の太陽光発電導入に積極的な政策に対し、太陽光発電の大量廃棄問題の観点から同時に進めるべき政策提言を目指している。

よって本稿の分析では、第一に、現在検討されている様々な太陽光発電導入政策を実行した場合の太陽光発電モジュール排出量を予測した。ここでは、2050年までに各省庁などにおいて検討されている様々な施策をもとに、導入シナリオを作成し、シナリオ別に排出量予測を行った。これより、今後導入が見込まれる太陽光発電促進政策を実施した場合、2040年後半をピークに使用済み太陽光発電モジュール排出量は大幅に増加することが分かった。第二に、廃棄物関係の環境問題に対する政策として主流である廃棄税に焦点をあてた。廃棄税を導入した使用済み太陽光発電モジュールのリサイクル選択モデルを構築・考察し、現実のデータを用いたシミュレーションを行うことでその導入の方向性を検討した。これより、現時点で比較的实现可能性が高いリサイクル技術のコストと税率で達成できるリサイクル率は小さいことが分かった。さらに、社会全体で達成可能なリサイクル率をあげる必要があり、そのためには廃棄税による価格調整よりも低コストなリサイクル技術の開発が効果的であると分かった。これより、廃棄税の導入にあたってはその税収を活用したリサイクル促進に力を入れるべきである。

つまり、近年の太陽光発電導入に積極的な政策を実行するにあたって太陽光発電の大量廃棄問題への対策は急務であり、その対策として使用済み太陽光発電モジュール一時集積保管所の設置と、太陽光発電モジュール廃棄税の導入が有効であると結論づけた。

1. はじめに

2015年のパリ協定採択以降、カーボンニュートラルに向けた動きが加速している。日本においても、2020年10月菅義偉内閣総理大臣が「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、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言している（首相官邸, 2020）。カーボンニュートラルの達成のためには事業用、非事業用の利用ともに大幅な生活変容を求められ、特に発電分野での脱炭素化は急務となった。これを受け、環境省をはじめとする関連省庁は再生可能エネルギー導入を促進する様々な施策を検討しており、他エネルギーに比べ普及が進んでいる太陽光発電については「最大限」の導入に取り組むことを発表している（環境省, 2021）。ゆえに、今まで以上に太陽光発電の導入を促進する施策が講じられており、太陽光発電がもたらす影響力は拡大すると考えられる。これより、デメリットに関する議論を十分に行う必要があるが、特に太陽光発電モジュールの廃棄に関しての議論は不十分である。

則ち、使用済み太陽光発電モジュールの廃棄によって最終処分場が一時的に逼迫する問題である。ただしこの問題は、太陽光発電は他のどの発電源よりも発電量あたりの廃棄物量が多いと考えられており、大量導入の主目的である持続可能性に疑問が生じることが最も重要な点だ。太陽光発電が循環型社会を支える再生可能エネルギーの成功例となるため、太陽光発電モジュールは廃棄量を削減する適切な廃棄処理システムが求められている（Baldwin et al, 2015）。

しかし、使用済み太陽光発電モジュールの廃棄量を削減する適正処理システムの構築に関しては法制度の改革の着手やガイドラインの作成にとどまり、具体的な規制や政策には至っていない。そのため、太陽光発電の導入を押し進めるにあたり、それが廃棄問題の将来予測に及ぼす影響の調査は勿論、廃棄削減政策として主流な廃棄税に関する議論が太陽光発電モジュールに関しても必要である。

2. 先行研究と本稿の位置づけ

2. 1. 先行研究

太陽光発電モジュールの廃棄全般に関する論文には、Majewski, et al (2021) などがある。Majewski, et al (2021) は太陽光発電の導入先進国の事例を元に、各国の太陽光発電モジュールの排出量予測を論じている。同論文は、欧米では廃棄に関する枠組みが完成しているのに対し、日本には太陽光モジュールの廃棄に関する専門の取り組みが存在しないことが課題として指摘されている。尚、排出量推計は他にワイブル関数の故障確率を使用した推計（IRENA, 2016）や、NEDOによる出力低下とFIT買取期間終了に起因する排出量の推計が行われている（資源エネルギー庁, 2018）。

廃棄量を減らす手段としてリサイクルがあり、その正の外部性を認めた述べた論文として、湯浅, 他 (2017) がある。同論文では使用済み太陽光発電モジュールのガラス再資源化による環境負荷削減効果を定量的に分析しており、ガラスをタイル、ブロック、防音モジュール等の建材に利用することで現状工程と比較し10%以上の二酸化炭素削減効果が得られることを示して

いる。現在、リサイクル技術は主にNEDOに委託され開発されており、その経済的側面や環境的側面からみた効果・影響も同様に分析されている(NEDO, 2020b)。

また、リサイクルの促進に関して、システム構築については環境省を中心に議論されている一方、それらを促進する具体的な政策に関する議論や研究はされていない。

2. 2. 本稿の位置づけ

太陽光発電の積極的な政策をとるにあたって、太陽光発電の大量廃棄問題の観点から同時に進めるべき政策提言を目指している。ゆえに、まず、使用済み太陽光発電モジュールの処理の現状について整理し、次に2050年カーボンニュートラルにむけて現在検討されている太陽光発電導入政策を実行した場合の使用済み太陽光発電モジュール排出量を予測する。最後に、その予測結果を用いて、廃棄物関係の環境問題に対する政策として主流である廃棄税を導入した理論モデルを構築・考察し、シミュレーションを行うことでその導入の方向性を検討する。

尚、日本の2050年カーボンニュートラルに向けた太陽光発電の導入政策を考慮した排出量予測や、使用済み太陽光発電モジュールのリサイクル促進政策に関する理論モデルはまだ存在しておらず、本論文はその点において独自性を持つ。

3. 使用済み太陽光発電モジュールの処理

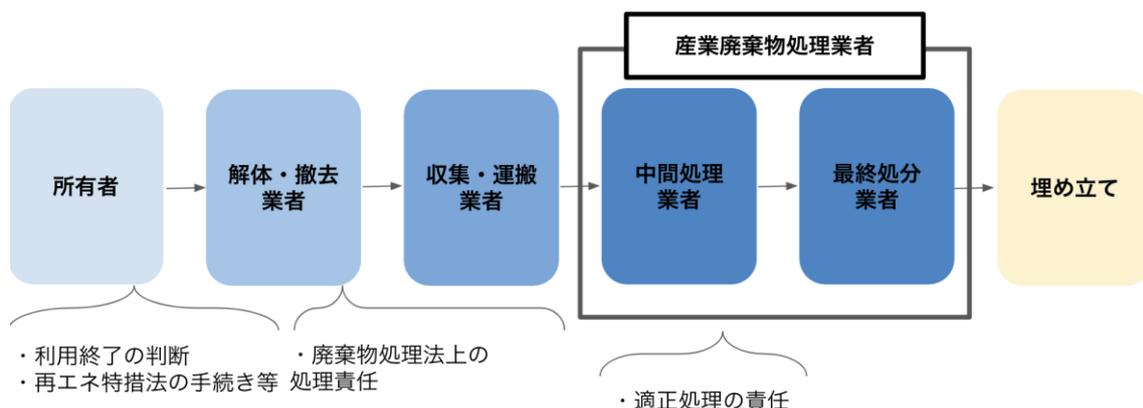
本節では、使用済み太陽光発電モジュールの大量廃棄問題について考えるために、その処理の現状について整理する。

3. 1. 使用済み太陽光発電モジュールの処理フロー

現行制度において太陽光発電モジュールは最終的に埋立処分されている。廃棄処理法により、住宅用のものを使用者自らが取り外すケースを除き、基本的には産業廃棄物に該当するためである。なお、屋根設置・地上設置によらず、建設資材として解体工事の対象となるが、建設リサイクル法で分別解体と再資源化が義務付けられている特定建設資材には該当しない(環境省, 2015)。

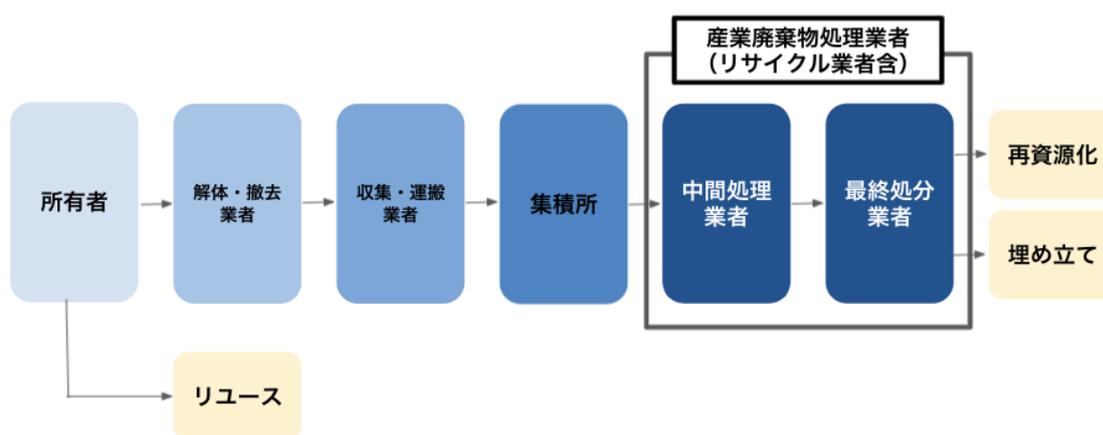
具体的に、太陽光発電モジュールは産業廃棄物の品目である「金属くず」、「ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くず」、「廃プラスチック類」の混合物として取り扱われるため、それらの許可品目を持つ収集運搬業者や処理業者に委託しなければならない(環境省, 2018)。以下図1は、太陽光発電モジュールの処理の現状の全体像をまとめたものである。

図1 太陽光発電モジュールの処理の現状¹



これに対し、循環型社会形成推進基本法にのっとり太陽光発電モジュール適正処理の全体像は以下の図2の通りである。このシステムの中核となるのは太陽光発電モジュールから有用な素材を選抜・分離し再利用するリサイクルである。しかし現在、埋立処理の過程で一部の資源が回収されている例もあるが、未だ多くの有用な資源が分離・回収されていない状況で、リサイクルシステムの構築には程遠い。以下図2は、太陽光発電モジュール適正処理の全体像である。

図2 太陽光発電モジュールの適正処理の全体像²



3. 2. 太陽光発電モジュールのリサイクル技術

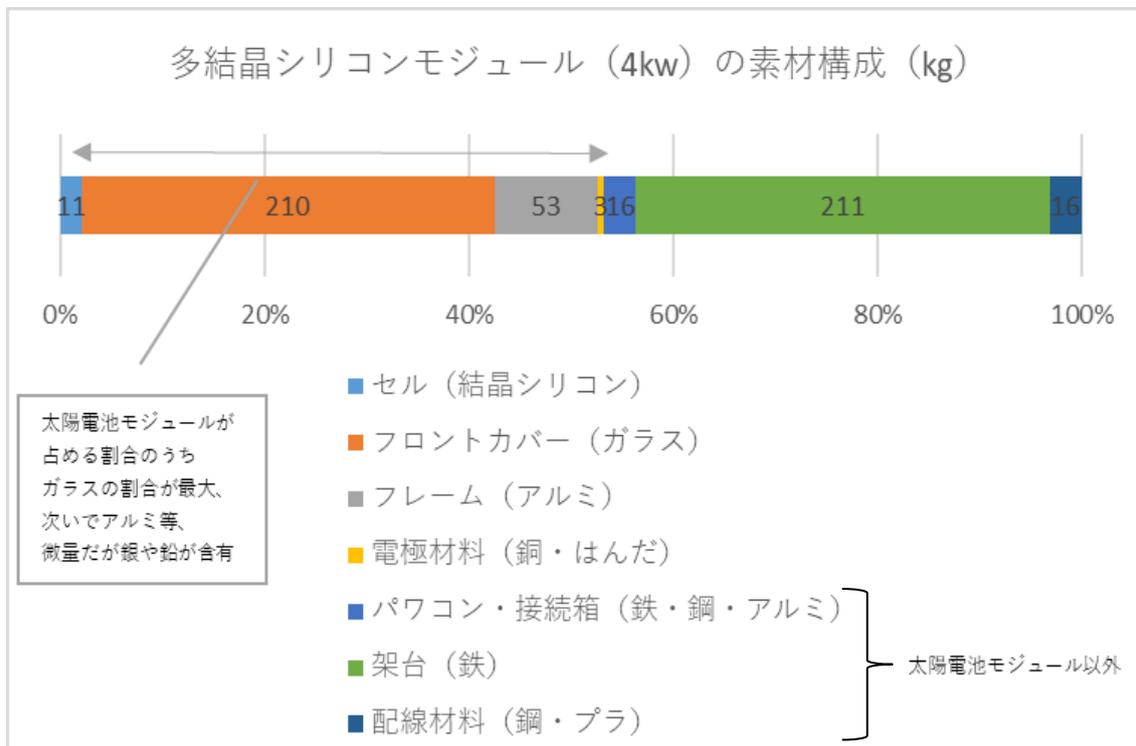
太陽光発電モジュールのリサイクル技術は、ヨーロッパ、日本、アメリカを中心に研究されており、日本は研究が進んでいる国のひとつである (Xu, et al, 2018)。図3は、一般的な太陽光発電モジュールの構造である。これらを、1) モジュール分離技術によって分離し、2) マテリアルリサイクル技術によって有用資源を回収・再資源化する。現在、NEDOや環境省はリサイクル技術開発支援やモデル事業を実施しており、リサイクルビジネスの事業化を目指す企業は複数存在している。ただし、リサイクルの方法は各社によって異なり、破碎の有無や選別技術)

¹ 環境省 (2018) より筆者作成。

² 環境省 (2018) より筆者作成。

に特徴があるが、現時点では技術の優劣は明確となっていない。全体として、それらのリサイクル技術は順調な開発計画がみられるものも、現状としての技術成熟度は低く、リサイクルビジネスとして成立している例はない。

図3 多結晶シリコンモジュールの素材構成³



1) モジュール分離技術

太陽光発電モジュールを図3の素材ごとに分離させ、そのまま再利用するか、貴金属やシリコンの回収を目指す。

NEDOは日本における太陽光発電モジュールのリサイクル技術開発を牽引しており、特にモジュール分離技術で成果をあげている。2020年に分解処理コスト5円/Wのモジュール分離技術の開発を達成した (NEDO, 2020d)。特に、ガラスとシリコンセルの間の封止剤 (EVA) 層を加熱した刃で切断し、ガラスやシリコンセルを破碎せずに分離回収できる「ホットナイフ分離法」は注目を集めた。現在も開発は進行中で、NEDO (2021) によると、2023年度末までに資源回収率80%、3円/Wを目指して開発を行っており、順調であると報告している。ただし、運用・普及の段階には未だ遠く、その点において技術成熟度は低いとされる。

2) マテリアルリサイクル技術

太陽光発電モジュールから貴金属をリサイクルする手法は、数多く研究対象になっている。これは、太陽光発電モジュールの資源価値のほとんどが貴金属 (現在は主に銀) で決まるためである。しかし、これらの技術はモジュール分離技術ほど太陽光発電モジュールのリサイクル技術としての開発は進んでいない。NEDO (2021) において、リサイクル部材(ガラス、樹脂材

³ Xu, et al (2018) より筆者作成。

など)の用途開発として、コンクリート評価、カバーガラス単体の水平リサイクル検討を開始すると述べられているに過ぎない。

つまり、使用済み太陽光発電モジュールの排出は、現状それを埋立処分するしか選択肢がないことが問題であり、解決にはリサイクル促進が重要である。以降では、その問題の逼迫度を排出量予測を通して考察し、廃棄税のシミュレーションを通してリサイクルを促進する方法を模索する。

4. 分析

4. 1. 使用済み太陽光発電モジュールの排出量予測

本節では、2050年カーボンニュートラルを目標とする積極的な太陽光発電導入促進施策を考慮し使用済み太陽光発電モジュールの排出量を予測する。近年、カーボンニュートラルにむけた太陽光発電導入の具体的施策や目標値は表1、2に示すように各省庁などで様々なものが考えられている。ゆえに、ここではそれらをもとに導入シナリオを作成し、シナリオ別に排出量予測を行う。導入シナリオは以下表3の通りである。

省庁	施策	追加導入量 (GW)
経済産業省	FIT既認定 未稼働の稼働	18.0
経済産業省,他関係省庁	現行努力の継続	13.8
環境省	公共部門の率先実行	6.0
環境省	民間企業や住宅での自家消費の推進	10.0
環境省	地域共生型太陽光発電の推進	4.1
国土交通省	空港の再エネ拠点の推進	2.3

表1 2030年を目標に実行が進められている施策と、それによる追加導入量⁴

⁴ 経済産業省 (2021b) , 環境省 (2021) , 国土交通省 (2021) より著者作成。

	想定稼働容量（想定発電量）	
	2030年度	2050年度
野心的目標：2050年カーボンニュートラル実現からのバックキャスト	125GW (AC) (約1,530億kWh)	300GW以上 (AC) 2040年代に前倒し達成
太陽光発電協会（JPEA）ビジョン：GHG80%削減目標	100GW (AC) (約1,230億kWh)	300GW (AC) (約3,900億kWh)
新規開発低迷トレンドが続いた場合	82GW程度？	

表2 一般社団法人太陽光発電協会（JPEA）の目標別太陽光発電想定稼働容量⁵

①	FIT既認定未稼働分の稼働
②	①+ 現行の政策努力継続
③	②+ 環境省の政策（i）～（iii）+ 国土交通省の政策（※2030年以降は現行JPEAビジョンの達成）
④	JPEA野心的目標の達成

表3 太陽光発電の導入シナリオ⁶

4. 1. 1. 予測手法

IRENA,2016 の予測方法参考にし改定したものを使用する。

$$W = \sum_{t=0}^{40} \left(() - (- 1) \right) + * 0.001$$

W_n ：n年の太陽光発電設備の排出量（t）

X_n ：n年の太陽光発電設備の導入量（t）

$F(i)-F(i-1)$ ：導入後経過i年目の故障確率

4. 1. 2. 使用するデータ

1) 導入量

導入量は、1993年～2020年までは「資源エネルギー庁 エネルギー白書2018」のデータを用い、それ以降は導入シナリオにのっとり算出する。なお、1980年から1992年までは1980年時点での累積導入量を0とし、1992年にかけて二次関数的に増加すると仮定し算出する。

2) $W \rightarrow t$ への変換

⁵ JPEA（2021）より筆者作成。

⁶ 筆者作成。

発電力に関しては、以下の通り重量に直す。太陽光発電モジュールの重量あたりの発電ポテンシャルは技術革新に伴い向上するため、導入量を予測するにあたって、表4に示す2基準を用いる。

		参考
2019年以前	1MWあたり100t	Sander他 (2007)
2020年以降	1MWあたり60t	国内太陽光発電モジュール出荷量シェア上位5企業（パナソニック、京セラ、SHARP、東芝、三菱電機）の現在の住宅用太陽光発電モジュールの電力あたり重量

表4 W→t への変換基準⁷

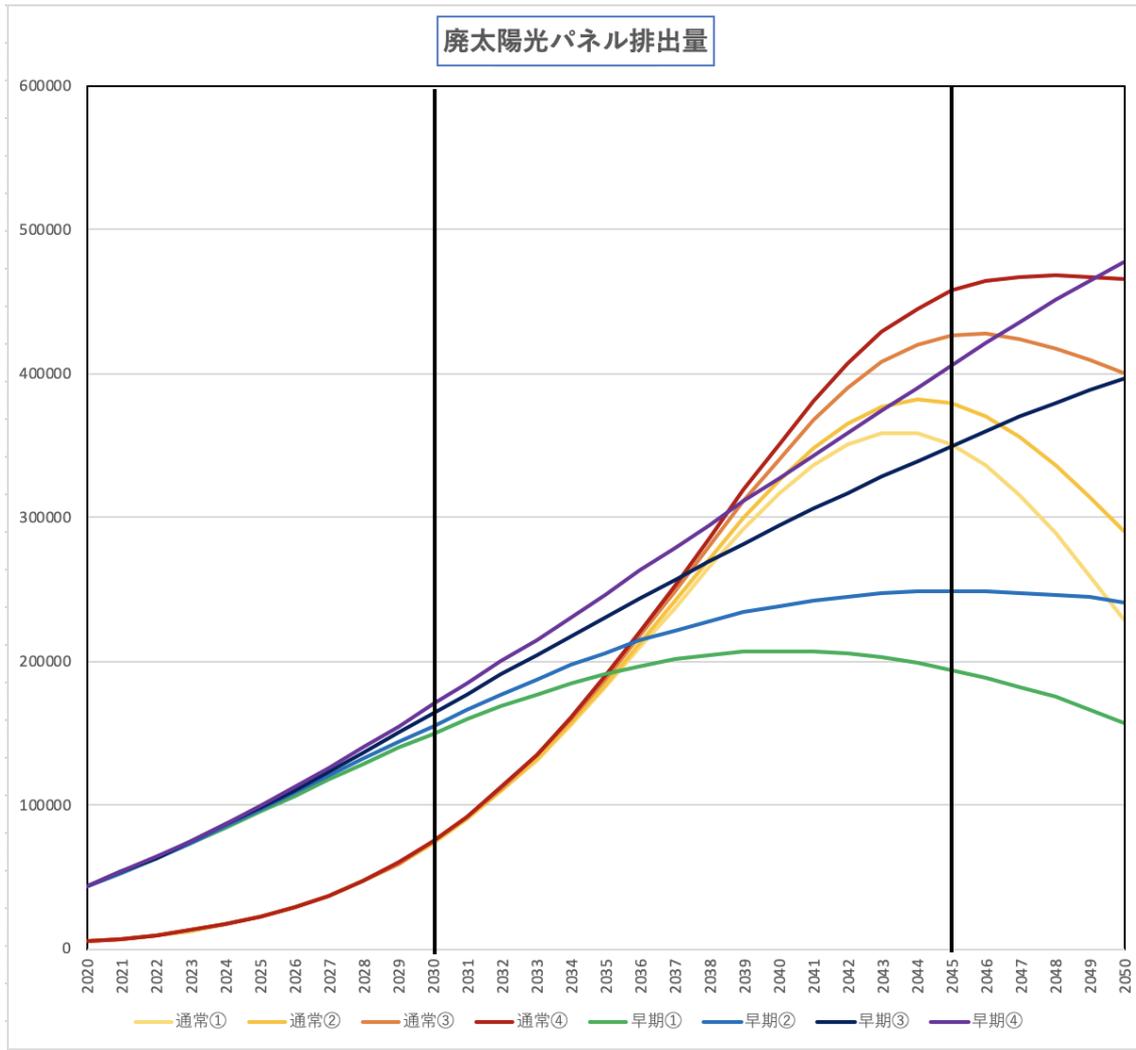
4. 1. 3. 予測結果と解釈

予測結果は、以下の図4の通りである。

この結果より、早期③④モデル以外はいずれも2040年代後半にピークが訪れているのが分かる。また、通常損傷モデルの場合、2030年度頃までは増加が緩やかであるが、2030年度以降、急速に排出量が増加することが分かる。一方、早期損傷モデルの場合、比較的早い段階から一定程度の排出があることが分かる。ゆえに、現行の処理フロー通り排出された太陽光発電モジュールを全て埋立処分した場合、最終処分場の埋立圧迫度は太陽光発電モジュールの排出量の増加に伴い、急速に上昇することが分かる。つまり、太陽光発電の大量廃棄問題は太陽光発電の導入政策によってすぐに逼迫した問題になる可能性もあり、早急に対策が必要である。

⁷ 筆者作成。

図4 使用済み太陽光発電モジュール排出量⁸



⁸ 筆者作成。

4. 2. 太陽光発電モジュール廃棄税のシミュレーション

本節では、まず、使用済み太陽光発電モジュールのリサイクル選択モデルを廃棄税を導入した形で構築する。次に、モデルを活用したシミュレーションを行う。これにより、廃棄税で使用済みモジュールのリサイクルを促進するために必要な要素について検討する。

4. 2. 1. 理論モデル

以下では、使用済みモジュールのリサイクル選択モデルを廃棄税を導入した形で構築する。

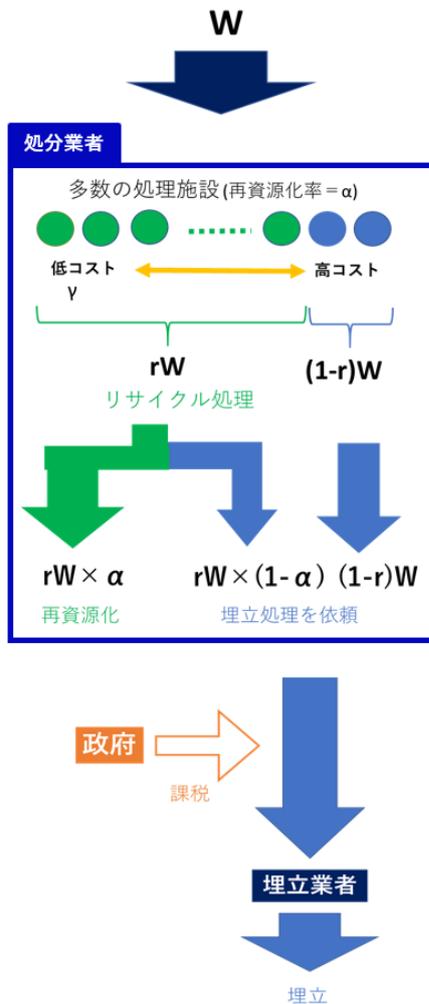
1) 基本モデル

まず、経済は一つの処理業者、埋立業者、政府で構成されているとする。廃棄物の処理という経済の静脈に焦点を絞って分析を行うため、財の生産・消費という経済の動脈は考えないものとする。

産業廃棄物処理業者（以下処理業者）は、使用済みモジュールをリサイクルするか、埋立処分するかを判断すると考える。本来であれば、撤去・解体事業者が排出業者として廃棄物処理法上の処理責任を負い、収集運搬業者や中間処理業者、最終処理業者に処理を委託する。しかし、ここで考える使用済みモジュールのリサイクルとはモジュールを分解し再資源化することであり、現在行われている埋立前処理の延長として普及していくと考えられる。ゆえに、本モデルは処理業者が排出業者から使用済みモジュール処理を委託される段階に始まり、リサイクルを行う場合はリサイクル費用をかけて自らリサイクルを、埋立処分をする場合には埋立業者に委託するとする。

各主体の仮定は図5の通りである。

図5 各主体の仮定⁹



【処分業者】

- 全国で排出される使用済みモジュールを取り扱う
- 全国に多数の処理施設をもち、その処理施設を利用してリサイクルを行う
 - 各処理施設が扱える使用済みモジュール量は同量程度に決まっている
 - 各処理施設が持つリサイクル技術の再資源化性能は等しい
 - 各処理施設が持つリサイクル技術がリサイクル処理に要するコスト（コスト効率性）は様々である
- 処分業者は各処理施設のコスト効率性によって、各処理施設で扱う使用済みモジュールをリサイクル処理するか埋立業者に埋立を依頼するか選択する
- リサイクル処理にまわされた使用済みモジュールのうち一部は再資源化されず埋立処理される（リサイクル技術の再資源化性能による）

【政府】

埋立処理を行う使用済みモジュールに廃棄物税を課税する
 （排出業者に埋立処理を選択するコストを増加させ、リサイクル促進を目指している）

【埋立業者】

営利を目的としない公営企業である

処理業者は年間 W の使用済みモジュールを取り扱う。ここでは、経済を代表する一つの処理業者を仮定しているため、 W は外生的に与えられる使用済みモジュールの年間排出量である。

次に、処理業者は W の使用済みモジュールについて、リサイクルを行うか埋立業者に埋立を依頼するかを選択を行うと考える。このリサイクル処理をする処理施設選択率（以下、リサイクル選択率）を r ($0 \leq r \leq 1$) とおくと、処理業者は rW をリサイクル処理、 $(1-r)W$ 埋立処分にまわすと表せる。

このとき、処理施設が持つリサイクルの再資源化性能を再資源化率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) で外生的に与えられるとすると、 rW のうち $(1-\alpha)rW$ は再資源化されず埋立処分される。これを後期埋立処分と呼ぶことにする。また、リサイクル率を R として、以下のように表せる。

⁹ 筆者作成。

= *
 式①

2) 処理業者の費用最小化問題

廃棄物の処理という経済の静脈に焦点を絞って分析するため、処理業者の行動は使用済みモジュールの処理にかかる費用最小化問題で考える。

リサイクル処理

処理業者は各処理施設のコスト効率性によって各処理施設で扱う使用済みモジュールをリサイクル処理するか埋立業者に埋立を依頼するか選択するため、処理業者のリサイクル量が少ない状態とは、低コストでリサイクルを行う技術をもつ処理施設のみでリサイクルを行っている場合である。逆に言えば、処理業者がリサイクル量を増加させるには、よりコスト効率性の低い処理施設でもリサイクルを行う必要があり、これより、限界リサイクル費用はリサイクル量が増加すると増加する。ゆえに、 rW の量の使用済みモジュールをリサイクル処理するのにかかる費用 C_1 は、限界リサイクル費用の大きさを表すパラメータを $a (>0)$ とおき、以下のように表せる。ただし、モデルの簡単化のため、限界リサイクル費用は比例増加すると考え、その大きさを表すパラメータ a は正の定数を仮定する。

$$C_1(r) = (ar)^2/2$$

ここで、各処理施設のコスト効率における格差が大きいほど a は大きい値をとると考えられる。ゆえに、その時点のコスト効率の高いリサイクル技術（以下、低コスト技術）の普及率を考える。普及率は、 $0 \leq r \leq 1$ の範囲で「各処理施設が様々なコスト効率性を場合の費用曲線 C_1 」が「全処理施設が低コスト技術を持つ場合の費用曲線」にどれだけ近いかで表した。即ち、低コスト技術の普及率を β 、低コスト技術の単位費用を γ とおいて、

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} * 1 / \int_0^1 C_1(r) (r) \\ &= 3 / \end{aligned}$$

これより、 a について以下の関係式が導ける。ただし、 γ の定義より $0 < \beta \leq 1 \Leftrightarrow 0 < aW \leq 3\gamma$ と仮定する。

$$= 3 /$$

.....式

②

埋立処分（後期埋立処分を含む）

使用済みモジュールは一単位あたりpの価格で埋立業者に有償回収され、埋め立てられるとする。仮定より、pは使用済みモジュール一単位あたりの埋立費用（以下、埋立費用）と言い換えることもでき、外生的に決定する。

また処理業者は、政府によって廃棄税として使用済みモジュール一単位あたりτの税を徴収されるとする。これより、処理業者が(1-r)Wの使用済みモジュールを廃棄するのにかかる費用C₂は以下のように表せる。

$$C_2((1-r)W) = \{(1-r)W + (1-r)W\} * (p + \tau)$$

ただし、簡単化のため後期埋立処分の単位埋立費用と廃棄税を、リサイクル処理を経ずに埋立処分される場合と同じと仮定した。現実には、リサイクル処理を経て埋立処分される場合、処分の品目が異なり単位埋立費用は一致しないと考えられる。また、廃棄税に関しては、適切にモニタリングを行うことが難しくなると考えられる。

費用最小化

処理業者は費用最小化問題の解、則ち、リサイクル選択率の追加的な増加によるリサイクル処理費用の増加と埋立費用の減少が等しくなる点でリサイクル率を決定する。ただし、0≤r≤1の範囲での内点解条件は(1+α)(p+τ)≤aWであり、これらの現実データはその条件を満たすと考えられる。

$$(r^*): C_1 + C_2$$

つまり、最適なりサイクル選択率r*は、以下のように表わせる。

$$r^* = (1 + \alpha)(p + \tau) / aW$$

$$= (1 + \alpha)(p + \tau) / 3 \quad (\because \text{式②})$$

これより、最適なりサイクル選択率は廃棄税が高いほど大きくなると分かる。また、外生変数とリサイクル選択率の関係について、現実に矛盾しない。則ち、埋立費用、リサイクル技術の

再資源化率、低コスト技術の普及率が高いほど、そして低コスト技術の単位費用が小さいほど、リサイクル選択率は大きくなることが読み取れる。ゆえに、モデルと現実との整合性が認められる。

このとき、社会全体のリサイクル率R*は、

$$R^* = (1 + \dots) / 3 \quad (\because \text{式①}) \dots \dots \dots \text{式③}$$

となる。以下のシミュレーションではこの式を活用していく。

4. 2. 2. シミュレーション手法

構築したモデルを活用し、太陽光発電モジュールのリサイクルのシミュレーションを廃棄税を導入して行う。具体的には、式③の外生変数 (p、α、β、γ) や内生変数 (τ) に具体的なデータをいれ動かすことで、リサイクルを促進するために必要な要素についての分析を行う。

4. 2. 3. 使用するデータ

表5のようなデータを想定し、使用した。

			現実的				非現実的	
p	埋立費用	円/t	14,000					
τ ※	廃棄物税	円/t	1,000	1,500	2,000	30,000	5,000	10,000
γ	低コスト技術のリサイクル費用	円/t	50,000	30,000	20,000	15,000	10,000	0
			低レベル				高レベル	
α	再資源化率	0 ≤ α ≤ 1	0.5					0.8
β	低コスト技術の普及率	0 ≤ β ≤ 1	0.3					0.8

※ τ はモデルにおける内生変数

表5 廃棄税のシミュレーション¹⁰

p：環境省（2015）の使用済みモジュールリサイクルの費用便益計算を参考にした。埋立費用は今後も変動が小さいと考え、シミュレーションを通して固定した。

τ：倉坂（2003）によると、既存の一般的な産業廃棄物税率は1000円/tである。ゆえに、これより高い廃棄税は負担や抵抗感が強いと考えた。

γ：

¹⁰ 筆者作成。

日本の使用済みモジュールリサイクルを牽引するNEDOは2020年に分解処理コスト5円/W（1 MW=100t換算で50,000円/t）のモジュール分離技術の開発を達成、2023年度末までに3円/Wを目指してモジュール分離技術の開発を行っており、順調であると報告している。ただし、この技術はマテリアルリサイクル段階を含んでいない。これより、低コスト技術は、50,000円/tから現実的であると考えた。

また、埋立費用が14000円/tであることを鑑みて、リサイクル費用を10000円/tまで下げることが難しいと想定している。

α ：再資源化率は、リサイクル技術として0.5以上である必要があると考えた。また、NEDOが開発しているモジュール分離技術の資源回収の目標値が0.8であるため（NEDO, 2021）、再資源化率が0.8を満たす技術はかなり高レベルであるとした。

β ：一般的に技術の普及率は0.3は低い水準で、0.8は高い水準であると考えた。

4. 2. 4. シミュレーション結果と解釈

1) リサイクル率と廃棄税

【内容】

外生変数に現時点で実現可能性が高いと考えられるデータをいれ、リサイクル率と廃棄税の関係のシミュレーションを行った（シミュレーション1）。ここでは、現実的な廃棄税で達成されるリサイクル率と、太陽光発電導入の節目となる2030年、2040年、2050年の最終処分場の圧迫度から推計した目標リサイクル率を比較している。

最終処分場圧迫問題の視点における目標リサイクル率は以下の通りとなった。これは、環境省の最終処分場埋立圧迫度の算出手法と本稿の排出量予測を参考にし、2030年と2040年、2050年における最終処分場埋立圧迫度を0.5%～1%（2020年周辺の値）となるように設定したものである。

2030年：R=0.4 2040年：R=0.6 2050年：R=0.7

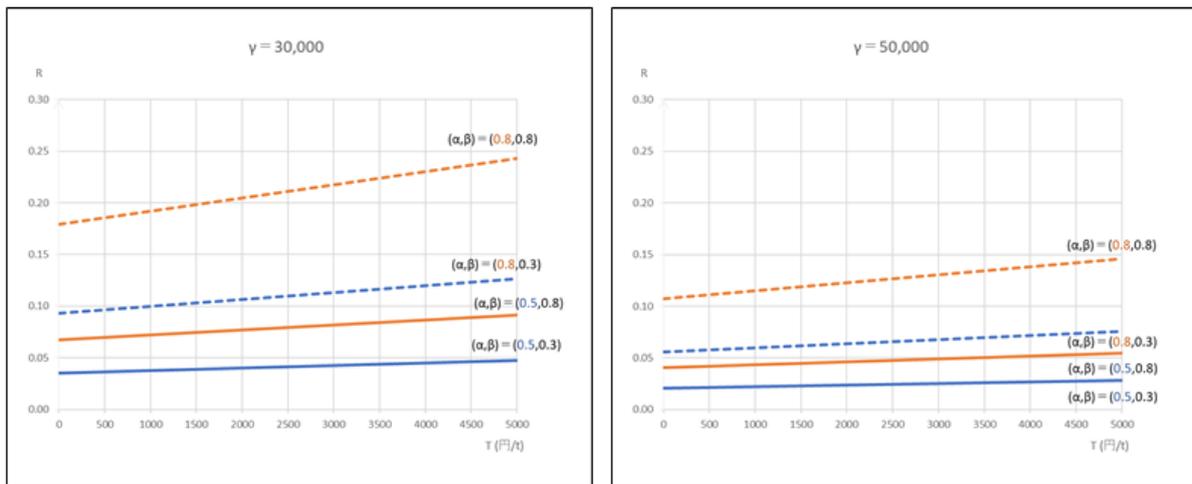
【結果】

シミュレーションの結果は図6の通りである。かなり非現実的な廃棄税を課したとしても、リサイクル率は2030年目標を大きく下回ることが分かった。

【解釈】

現時点で比較的实现可能性が高いリサイクル技術のコストにおいて、現実的な税率で達成できるリサイクル率は非常に小さいことが分かった。特に、廃棄税による効果のみで2030年、2040年、2050年の各年に最終処分場の圧迫を回避するのは不可能である。

図6 シミュレーション1の結果¹¹



2) リサイクルを促進するために必要な要素（技術開発）

【内容】

z軸にリサイクル率、x軸に低コスト技術の普及率、y軸にその技術の再資源化率をとり、廃棄税と低コスト技術の単位費用を動かすシミュレーションを行った（シミュレーション2）。これにより、ある廃棄税と低コスト技術で実現可能なリサイクル率の集合をみることができる。

【結果】

図7のような結果が得られた。普及率、再資源化率が非常に高い場合（ $\alpha = \beta = 1$ ）でも、達成できるリサイクル率は低コスト技術が50,000円/tの場合低い（図7-①）。この状況を打破する方向性として、低コスト技術のコストを下げることに考えられるが、前者の方が効果的であった（図7-②～⑤）。廃棄税を非現実的なほど高くする（図7-⑤）より、低コスト技術のコストをある程度実現可能だと考えられる段階まで下げる（図7-④）方が達成可能な最大リサイクル率が40%以上高い。

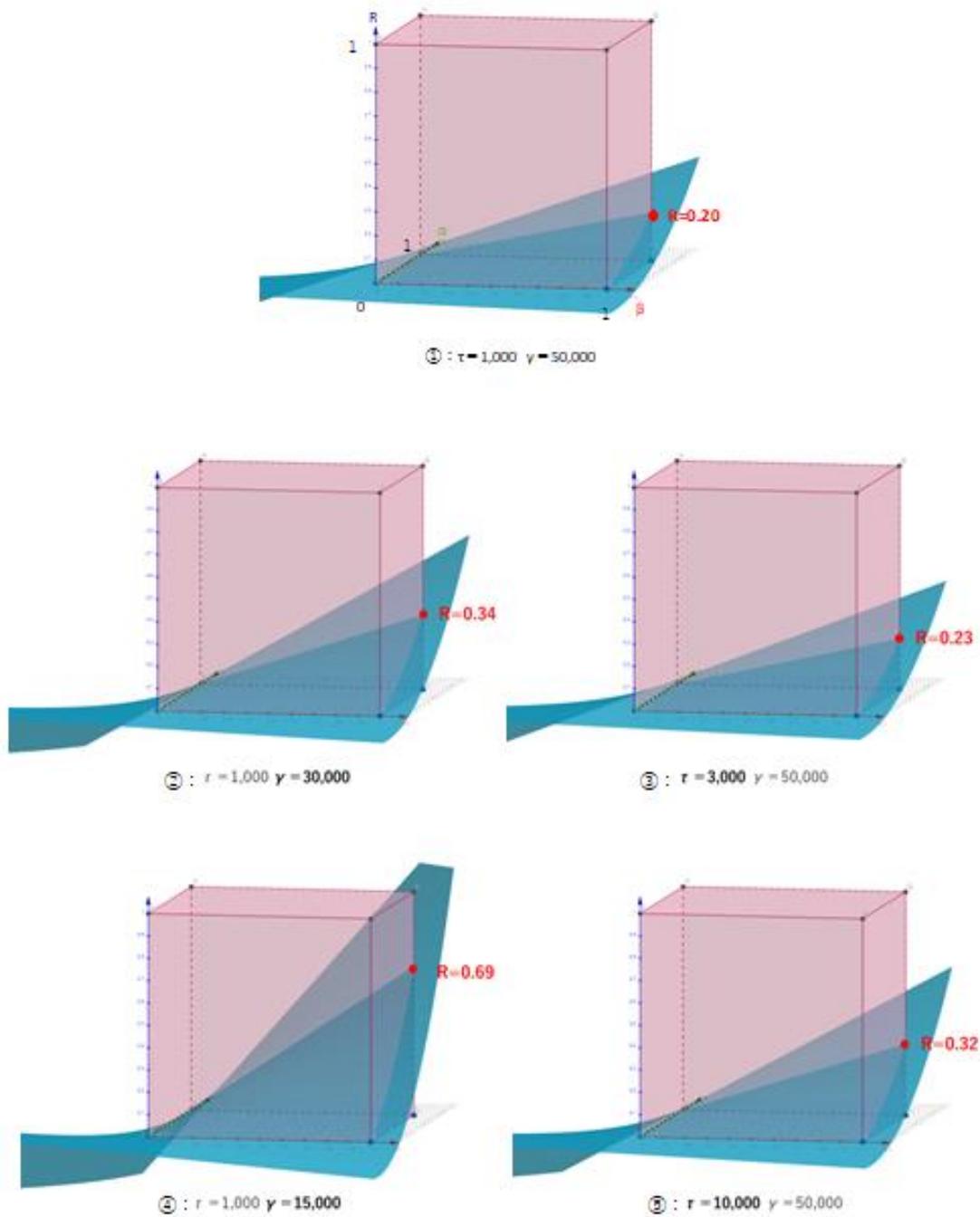
【解釈】

まず、社会全体で達成可能なリサイクル率をあげる必要があり、そのためにはリサイクル技術の開発が最も効果的である。リサイクルコストの低下は万単位で可能なのに対し、廃棄税を上げることは万単位の場合、（現実負担が大きくなるとも）抵抗感が強く非現実的とされるためだと考えられる。

これは、廃棄税による埋立費用の増加がリサイクル率に影響を与えるには、コスト面においてかなり高水準のリサイクル技術が必要と解釈できる。つまり、廃棄税はコスト面からリサイクル促進効果を得る条件が高いということである。この一因としては、埋立処分の必需的性質から価格弾力性が低いことが考えられる。

¹¹ 筆者作成。

図7 シミュレーション2の結果¹²



3) リサイクルを促進するために必要な要素（開発技術の普及）

【内容】

¹² 筆者作成。

廃棄物導入下で、あるコストと再資源化率を満たす低コストリサイクル技術が開発されたとき、各税率におけるリサイクル率と開発技術の普及率の関係を式③から算出した（シミュレーション3）。

【結果】

以下の表6,7のような結果が得られた。表6は税率が低い場合と高い場合、表7は税率をコスト低下に伴い引き上げた場合である。青と緑の値は該当リサイクル率を達成する普及率の中で、実現可能性のある（1以下の）ものであり、緑の値は廃棄税を上げることで実現可能になった箇所である。

【解釈】

目標リサイクル率における普及率をみることで、ある開発技術と税率でその目標リサイクル率の実現可能かを判断できると解釈した。その目標リサイクル率の実現時における普及率が低いほど実現は容易であると考えられる。

これより、高いリサイクル率実現には再資源化率が高い技術であることが必須であると分かる。逆に言えば、再資源化率が低い状態は多くのモジュールをリサイクル処理していても全体として30%にも満たない低いリサイクル率しか達成できないことを意味する。

また、リサイクル率60%を超える高いリサイクル率は埋立費用と同等程度の低コスト技術の開発と廃棄税による課税で実現すると考えられる。リサイクル技術の低コスト化には限界があるが、コストが埋立費用（14,000円/t）に近づくほど埋立処分とリサイクル処理の区別がなくなり、課税によって高水準のリサイクルの実現可能性を高めることができるためである。

開発技術		政策			
コスト(円/t)	再資源化率	税率(円/t)	開発技術の普及率		
γ	α	τ	β		
			リサイクル率 (R)		
			0.1	0.3	0.6
50,000	0.5	1,000	1.33		
		3,000	1.18		
	0.8	1,000	0.69		
		3,000	0.61		
30,000	0.5	1,000	0.80	2.40	
		3,000	0.71	2.12	
	0.8	1,000	0.42	1.25	
		3,000	0.37	1.10	
20,000	0.5	1,000	0.53	1.60	3.20
		3,000	0.47	1.41	2.82
	0.8	1,000	0.28	0.83	1.67
		3,000	0.25	0.74	1.47
15,000	0.5	1,000	0.40	1.20	2.40
		3,000	0.35	1.06	2.12
	0.8	1,000	0.21	0.63	1.25
		3,000	0.18	0.55	1.10
10,000	0.5	1,000	0.27	0.80	1.60
		3,000	0.24	0.71	1.41
	0.8	1,000	0.14	0.42	0.83
		3,000	0.12	0.37	0.74

開発技術		政策			
コスト(円/t)	再資源化率	税率(円/t)	開発技術の普及率		
γ	α	τ	β		
			リサイクル率 (R)		
			0.1	0.3	0.6
50,000	0.5	1,000	1.33		
		1,500	1.29		
	0.8	1,000	0.69		
		1,500	0.67		
30,000	0.5	1,000	0.80	2.40	
		1,500	0.77	2.32	
	0.8	1,000	0.42	1.25	
		1,500	0.40	1.21	
20,000	0.5	1,500	0.52	1.55	3.10
		2,000	0.50	1.50	3.00
	0.8	1,500	0.27	0.81	1.61
		2,000	0.26	0.78	1.56
15,000	0.5	3,000	0.35	1.06	2.12
		5,000	0.32	0.95	1.89
	0.8	3,000	0.18	0.55	1.10
		5,000	0.16	0.49	0.99
10,000	0.5	3,000	0.24	0.71	1.41
		5,000	0.21	0.63	1.26
	0.8	3,000	0.12	0.37	0.74
		5,000	0.11	0.33	0.66

表6,7 シミュレーション3の結果¹³

4. 2. 5. 留意事項

本モデルでは、全ての処理施設の再資源化率が一定と仮定しているが、現実には様々な再資源化率のリサイクル技術をもつ。また、処理施設の数や各処理施設で処理できる限界量を定義していない。これより、少ない処理施設で多量のリサイクル処理を行う場合をモデルはうまく説明できない。さらに、低コスト技術の普及率は本来の意味を表すものではなく普及を近似するパラメーターという定義がより正確であり、現実との齟齬が生じる可能性がある。

5. まとめ

本稿では、低炭素社会実現を目標に進む太陽光発電大量導入の陰に潜む、太陽光発電廃棄問題に着目し分析を行った。

現状、大量廃棄に対するリサイクル技術の成熟度が低く、分析よりその促進が大量排出に間に合わないという結果を得た。そして、太陽光発電モジュール廃棄量削減のためには、リサイクル技術の開発によりリサイクル技術のコストを下げるのが効果的であると分かった。しかし、リサイクル技術の開発途上の段階では、増加する使用済み太陽光発電モジュールを埋立処分しないようにするための政策が必要である。

よって、分析から、使用済み太陽光発電モジュールの大量廃棄による最終処分場埋立圧迫問題の解消とリサイクルシステムの構築のため、使用済み太陽光発電モジュール一時集積保管所の設置と、太陽光発電モジュール廃棄税の導入が必要であると考え。集積所の設置により、リサイクルシステムの構築が太陽光発電モジュール排出のスピードに追いつかず、埋立処分量が増加してしまうという課題を解消する。課税により、初期段階では集積所の設置、及び低コスト技術開発促進のための資金の確保、技術開発後には埋立処分のコストをあげることによるリサイクル技術の導入促進の実現が期待される。

課題として、モデルの仮定やデータの信頼性の問題が残る。モデルにおいて、リサイクル技術の再資源化率は各処理施設によるべきであり、また、設備投資費や処理施設の数等についても考慮することが望ましい。また、シミュレーションで使用するデータがより具体的な実現値、或いは目標値であれば、より綿密な政策目標を提言できる。これには、太陽光発電モジュール廃棄に関連するデータの蓄積が必要であり、それが実現した後の展望としてより定量的な分析を行いたいと考えている。

¹³ 筆者作成。

最後に、本研究が太陽光発電モジュールのリサイクルを促進し、太陽光発電が真に持続可能性を持つ一助となることを願い、本稿の締めとする。

引用・参考文献

- Baldwin et al (2015) , Quadrennial technology review: an assessment of energy technologies and research opportunities, Department of Energy, USA.
- Fernandez, L.J., Ferrer, R., Aponte, D.F., Fernandez, P. (2011) , Recycling silicon solar cell waste in cement-based systems, Sol. Energ. Mat. Sol. C. 95, 1701–1706.
- Granataa, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., Toro, L. (2014) , Recycling of photovoltaic panels by physical operations, Sol. Energy Mater. Sol. Panels 123, 239–248.
- IRENA (2016) , END-OF-LIFE MANAGEMENT Solar Photovoltaic panels.
- IRENA (2020) , "Renewable Power Generation Costs in 2020,"IRENA.
- isep (2021) , 【速報】国内の2020年度の自然エネルギー電力の割合と導入状況, 特定非営利活動法人 環境エネルギー政策研究所.
- JPEA (2020) 『太陽光発電の状況』
- JPEA(2021), 2050年カーボンニュートラル実現に向けて 太陽光発電の2030年稼働目標とチャレンジ, 総合エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会, 第26回, 資料5
- Lin, W., Chen, E., Sun, Y.L. (2011) , Analysis of old photovoltaic component junction box disassembling mode, Sol. Energy 7, 26–29.
- NEDO (2016) 太陽エネルギー技術研究開発/太陽光発電システム次世代高性能技術の開発/広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理手法に関する研究開発
- NEDO (2020a) , 太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト／太陽光発電リサイクル動向調査／太陽光発電リサイクルに関する国内動向調査、分布調査及び排出量予測, 株式会社三菱総合研究所.
- NEDO (2020b) , 太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト太陽光発電リサイクル動向調査 太陽光発電リサイクルに関する動向および評価手法の調査, みずほ情報総研株式会社.
- NEDO (2020c) 太陽光発電開発戦略 2020
- NEDO (2020d) , 「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」事後評価報告書（案）概要, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会.
- NEDO (2021) , 「太陽光発電主力電源化推進技術開発」実施方針：2021年度版, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構.
- Peter Majewski, Weam Al-shammari, Michael Dudley, Joytishna Jit, Sang-Heon Lee, Kim Myoung-Kug, Kim Sung-Jim (2021) , Recycling of solar PV panels- product stewardship and regulatory approaches, Energy Policy 149 (2021) , 112062.
- Sander, K., et al. (2007), Study on the Development of a Takeback and Recovery System for Photovoltaic Modules, European Photovoltaic Industry Association, German Solar Industries Association, Berlin.
- Stiglitz (2003) , 公共経済学.

Yan Xu, Jinhui Li, Quanyin Tan, Anesia Lauren Peters 1, Congren Yang (2018) , Global status of recycling waste solar panels: A review, Waste Management (2018) , 450-458.

マヘシュ・モルジャリア (2019) 「「メガソーラーは系統の安定運用に貢献できる」、米ファースト・ソーラー技術幹部に聞く」日経BP総研 クリーンテックラボ

河本 (2018) , 欧米における使用済み太陽電池モジュールリサイクル等推進への取組み, 『生活と環境』2018年9月号, 一般財団法人日本環境衛生センター.

環境省 (2000) 環境政策の各手法の特徴と有効性、環境省。

環境省 (2015) , 太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書, 使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討会.

環境省 (2018) , 太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン.

環境省 (2019) 「地域における再生可能エネルギー事業の事業性評価等に関する手引き (金融機関向け) ~太陽光発電事業編~」環境省大臣官房環境経済課

環境省 (2021) , 再エネの更なる導入に向けた 環境省の取組方針, 環境省 地球環境局

金均虎, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2019) , 太陽光・風力発電設備の廃棄に伴う二酸化炭素排出量の推計.

経済産業省 (2018) , 今夏の太陽電池発電設備の事故の特徴について, 産業保安グループ電力安全課, 新エネルギー発電設備事故対応・構造強度ワーキンググループ, 第14回, 資料1

経済産業省 (2018) , 平成29年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2018) , 経済産業省 資源エネルギー庁.

経済産業省 (2021a) 『発電コスト検証に関する これまでの議論について』

経済産業省 (2021b) , 2030年における再生可能エネルギーについて, 経済産業省, 資源エネルギー庁

国土交通省 (2021) , 国土交通省における 再エネの導入・利用拡大に関する取組概要, 国土交通省

国立環境研究所 (2021) 『太陽光発電施設による土地改変-8,725施設の範囲を地図化、設置場所の特徴を明らかに-』

佐々木 健 (2020) , 使用済太陽光パネルの大量廃棄問題, 立法と調査 (430) , 137-142.

佐藤, 他 (2013) , 太陽電池パネル廃棄量の将来推計と再資源化のための輸送計画, 土木学会論文集G (環境) , Vol.69, No.6 (環境システム研究論文集 第41巻) , II_293-II_299.

砂田達輝, 乗越晃, 狩野公俊 (2018) , 廃太陽光パネルのリサイクルシステムの構築, 第29回廃棄物資源循環学会研究発表会.

産業技術総合研究所 (2009) 『実環境における発電量』

資源エネルギー庁, 2020, 『エネルギー白書2020』

資源エネルギー庁 (2018) , 『太陽光発電設備の廃棄対策について』.

資源エネルギー庁 (2018) 『2040年、太陽光パネルのゴミが大量に出てくる? 再エネの廃棄物問題』

首相官邸 (2020) 『第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説』

小川 祐貴 (2018) , 再生可能エネルギーへのエネルギー転換の経済効果~日本における多面的定量評価~

倉阪秀史(2003), 産業廃棄物税の動向と論点, 廃棄物学会誌, 第 14 卷, 第 4 号, pp. 171-181
湯浅和博, 鶴崎敬大, 山崎 成 (2012), 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化による環境
負荷削減効果, 日本建築学会環境系論文集, 82 (741), 949-955.
農林水産省 (2021), 再生可能エネルギー導入促進にむけた取組について, 農林水産省.
福山, 内藤 (2002), 産業廃棄物の処理・リサイクルと産業廃棄物税の使途選択問題, 地域学研
究 33(1), 183-198, 2002, 日本地域学会.
野田 (2019) 廃棄太陽光パネルのリサイクルシステム構築に向けて, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.
30, No. 6, pp. 387 -392, 2019.

付録

排出量予測のデータ

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/17CpyiBTwK8AZ7j-iHJ7isv9zupCSu0JM/edit?usp=sharing&ouid=114157325528954203224&rtpof=true&sd=true>

シミュレーション1: リサイクル率と廃棄物税の関係

<https://www.geogebra.org/graphing/kngtcer9>

シミュレーション2: $R(\beta, \alpha)$

<https://www.geogebra.org/m/fbw2gwhs>