



The Canon Institute for Global Studies

CIGS Working Paper Series No. 26-0010J

メガソーラーによる湿原損失のライフサイクル CO2 分析

杉山 大志 (キャノングローバル戦略研究所)

2026. 6

※Opinions expressed or implied in the CIGS Working Paper Series are solely those of the author, and do not necessarily represent the views of the CIGS or its sponsor.
※CIGS Working Paper Series is circulated in order to stimulate lively discussion and comments.
※Copyright belongs to the author(s) of each paper unless stated otherwise.

General Incorporated Foundation

The Canon Institute for Global Studies

一般財団法人 キャノングローバル戦略研究所

Phone: +81-3-6213-0550 <https://cigs.canon/>

メガソーラーによる湿原損失のライフサイクル CO2 分析

要約

湿原を破壊してメガソーラーを建設する場合に、温暖化対策としての効果がどの程度損なわれるかを概算する。太陽光発電は発電時に CO2 を直接排出しないが、設備の製造には CO2 排出が伴う。さらに湿原、とくに泥炭を含む低層湿原では、長い年月をかけて蓄えられた炭素が、造成、排水、乾燥化によって大気中に放出されるおそれがある。また、湿原が毎年 CO2 を吸収・蓄積する働きも失われる。

計算では、環境省資料に示された低層湿原の炭素蓄積量と CO2 吸収量を用い、事業用太陽光発電の発電量は政府資料に基づいて設定した。評価では、太陽光設備の製造に伴う排出、湿原に蓄えられた炭素の放出、湿原の年間 CO2 吸収機能の喪失を分けて扱った。

湿原に蓄積されていた炭素が全量 CO2 となって放出されると想定した場合、太陽光発電による CO2 削減でそれを取り返すまでの年数は、政府計画における 2030 年の電力排出係数を用いると約 15 年から 21 年となった。発電量が低い場合の感度分析では、約 22 年から 31 年に延びる。これは、湿原を改変してメガソーラーを建設すると、温暖化対策としての効果が大きく損なわれる可能性が高いことを示している。

キーワード：メガソーラー、湿原、泥炭、ライフサイクル CO2、炭素ストック、環境影響評価

目次

要約.....	1
1. はじめに	3
2. 湿原の炭素機能：ストックとフローを分ける	3
3. 使用する数値	4
4. 計算方法	5
5. 主計算結果	7
6. 発電量に関する感度分析	7
7. 土地利用密度に関する感度分析	8
8. メタン等の扱い	8
9. 結果の解釈	9
10. おわりに	10
参考文献	10

1. はじめに

太陽光発電は、発電時に CO₂ を直接排出しない。このため、太陽光発電の導入拡大は温暖化対策として評価される。しかし、発電設備の製造段階では温室効果ガスが排出される。さらに、メガソーラーは広い土地を必要とするため、森林、草地、湿原などの自然資本を改変する場合には、土地利用変化に伴う炭素収支も考慮しなければならない。

本稿では、低層湿原を改変してメガソーラーを建設する場合を対象に、太陽光モジュール製造時排出、湿原炭素ストックの放出、湿原の CO₂ 吸収フロー喪失を組み込んだ CO₂ 回収年数を概算する。ここでいう CO₂ 回収年数とは、建設前後に発生または失われる累積的な炭素負債を、太陽光発電による年間の CO₂ 削減量によって何年で相殺できるかを示すスクリーニング指標である。

本稿の計算は、個別地点の実測値に基づく確定評価ではない。湿原の泥炭深、炭素密度、地下水位、排水設計、造成方法、積雪、出力抑制、メンテナンス状況等によって、実際の値は大きく変わり得る。したがって、本稿の目的は、湿原改変を伴う太陽光発電事業について、事業者、行政、地域社会が個別案件で確認すべき論点とそのオーダーを示すことにある。

2. 湿原の炭素機能：ストックとフローを分ける

湿原の炭素機能は、少なくとも二つに分けて評価する必要がある。第一は、すでに泥炭層に蓄積されている炭素ストックである。環境省資料は、湿原には未分解の植物遺骸等で構成される泥炭層が形成され、この泥炭層に炭素が蓄積されることを説明している。また、泥炭層を持つ湿原が乾燥化すると、蓄積された炭素が CO₂ として大気中に排出されることを述べている[1]。

第二は、湿原が毎年 CO₂ を吸収・蓄積するフローである。環境省資料では、湿原タイプ別に単位面積あたりの CO₂ 吸収量を計算している。低層湿原については、コムケ湖湿原の 3 地点で測定された炭素蓄積速度の平均値 107.07gC/m²/年を CO₂ 量に換算し、3.9259t-CO₂/ha/年としている[1]。

この二つは性質が異なる。炭素ストックの放出は、造成時または造成後の一定期間に発生する累積的な炭素負債である。他方、CO₂ 吸収フローの喪失は、湿原機能が損なわれている限り毎年発生する機会費用である。このため、本稿では、初期炭素負債と年間純 CO₂ 削減量を明確に分けて扱う。

$$\text{初期炭素負債} = \text{太陽光モジュール製造時排出} + \text{湿原炭素ストック放出}$$

$$\text{年間純 CO}_2 \text{削減量} = \text{太陽光発電による代替発電 CO}_2 \text{削減量} - \text{湿原 CO}_2 \text{吸収フロー喪失}$$

メタン等の非 CO₂ 温室効果ガスは重要であるが、本稿の主計算には含めない。IPCC 湿地補足ガイドラインは、排水された内陸有機質土壌について、CO₂、CH₄、N₂O、排水路からの CH₄、溶存有機炭素由来の CO₂、泥炭火災による CO₂・CH₄ 等を推計対象として整理している[2]。これらは地点ごとの水位、泥

炭深、排水設計、植生、造成方法に強く依存するため、本稿では個別案件で追加的に評価すべき項目として扱う。

3. 使用する数値

本稿では、評価単位を 1MW-AC の事業用太陽光発電設備とする。太陽光発電側の発電量は、政府資料に示された事業用太陽光の設備利用率 17.2%を直接用いて計算する[8]。すなわち、年間発電量は次の通りである。

$$1,000\text{kW} \times 8,760 \text{時間/年} \times 17.2\% = 1,506,720\text{kWh/MW-AC/年}$$

2020 年の電力排出係数は、電気事業低炭素社会協議会の 2021 年度フォローアップ資料に示された 2020 年度の調整後 CO2 排出係数 0.441kg-CO2/kWh を用いる[9]。2030 年については、政府の 2030 年度エネルギー需給見通しに基づく全電源平均排出係数 0.250kg-CO2/kWh を用いる[10]。したがって、主計算における太陽光発電による年間 CO2 削減量は、2020 年排出係数では 664.5t-CO2/MW-AC/年、2030 年排出係数では 376.7t-CO2/MW-AC/年である。

太陽光モジュール製造時排出については、中国製単結晶シリコン PERC モジュールについて示された 433kg-CO2e/m2、出力 197.84Wp/m2 を用いる[4]。これを DC 出力あたりに換算すると、2.1886kg-CO2e/Wp-DC である。発電コスト検証ワーキンググループ資料は、太陽光の諸元が AC ベースであることを明記した上で、参考値として事業用太陽光の過積載率を 130%としている[8]。そこで本稿では、1MW-AC あたりの太陽光モジュール容量を 1.30MWp-DC とし、太陽光モジュール製造時排出を 2,845t-CO2e/MW-AC とする。

ここで重要なのは、過積載率を発電量に重ねて乗じないことである。政府資料の設備利用率 17.2%は AC ベースの値であるため、過積載の影響を含んだ発電量指標として扱う。過積載率 130%は、AC 容量 1MW の設備に搭載される DC モジュール容量を推計し、製造時排出を計算するためにのみ用いる。

土地利用密度は、経済産業省資料が森林改変面積から太陽光発電容量を推計する際に用いた 0.067GW/km2 を単位換算し、0.67MW/ha とする[11]。したがって、1MW-AC あたりの占有面積は 1/0.67=1.4925ha である。

表 1 主計算の前提

項目	値	出所・計算方法
評価単位	1MW-AC	発電コスト検証 WG 資料では、太陽光の諸元は交流側出力 (AC) で整理。本稿の 1MW は認定・認可出力 1MW を指す[8]。
主計算の設備利用率	17.2%	発電コスト検証 WG 資料の事業用太陽光モデルプラントの設備利用率[8]。
主計算の年間発電量	1,506,720kWh/MW-AC/年	認定・認可出力 1,000kW × 8,760 時間 × 17.2%。
2020 年排出係数	0.441kg-CO2/kWh	2020 年度の電気事業者の調整後 CO2 排出係数[9]。

2030年排出係数	0.250kg-CO2/kWh	2030年度エネルギー需給見通しを踏まえた全電源平均排出係数[10]。
年間CO2削減量(2020年)	664.5t-CO2/MW-AC/年	1,506,720kWh × 0.441kg-CO2/kWh ÷ 1,000。
年間CO2削減量(2030年)	376.7t-CO2/MW-AC/年	1,506,720kWh × 0.250kg-CO2/kWh ÷ 1,000。
モジュール製造時排出原単位	2.1886kg-CO2e/Wp-DC	中国製単結晶シリコン PERC モジュールの文献値を出力あたりに換算：433kg-CO2e/m ² ÷ 197.84Wp/m ² [4]。
過積載率	130%	発電コスト検証WG資料の参考値。50kW以上・2020年設置FIT案件の中央値[8]。
太陽光モジュール製造時排出	2,845t-CO2e/MW-AC	1MW-ACあたり1.30MWp-DCのモジュールを搭載すると、2.1886kg-CO2e/Wp-DC × 1,300,000Wp。
土地利用密度	0.67MW/ha	経産省資料の0.067GW/km ² を換算：0.067GW/km ² = 67MW/km ² = 0.67MW/ha[11]。
1MWあたり占有面積	1.4925ha/MW-AC	1 ÷ 0.67MW/ha。
低層湿原のCO2吸収量	3.9259t-CO2/ha/年	環境省資料の低層湿原のCO2吸収量[1]。
低層湿原の炭素蓄積量	1,855-3,343t-CO2/ha	環境省資料に示された種富湿原・コムケ湖湿原の低層湿原事例値[1]。
低層湿原のCO2吸収フロー喪失	5.86t-CO2/MW-AC/年	1.4925ha/MW-AC × 3.9259t-CO2/ha/年。
低位発電量ケース	設備利用率12%	NEDO資料で国内非住宅用太陽光の2012年実績が12%とされるため、低位発電量の感度分析として使用[12]。

環境省資料における1,855t-CO2/haおよび3,343t-CO2/haは、低層湿原の二つの事例値であり、環境省資料自身も「上限値、下限値を表すものではない」としている[1]。本稿では、この二つを便宜的に低位・高位ケースとして扱うが、個別案件では現地調査によって泥炭深、炭素密度、含水率、地下水位を確認する必要がある。

また、太陽光モジュール製造時排出は文献上CO2換算量、すなわちCO2eで示されている。本稿では、湿原炭素ストックおよびCO2吸収フローと合わせて比較するため、表ではt-CO2eまたはt-CO2と表記する。主計算の目的は、精密な温室効果ガスインベントリではなく、湿原改変を伴う太陽光発電事業について、無視し得ない炭素負債の大きさを示すことである。

4. 計算方法

メガソーラーのAC設備容量を1MW、土地利用密度をD(MW/ha)とする。1MWあたり占有面積Aは、

$$A = 1 / D$$

である。主計算ではD=0.67MW/haであるから、

$$A = 1 / 0.67 = 1.4925\text{ha/MW-AC}$$

となる。低層湿原の炭素蓄積量をS(t-CO2/ha)、そのうち大気中に放出される比率をρとすると、湿原炭素ストック放出量E_stockは、

$$E_stock = A \times S \times \rho$$

である。S=1,855-3,343t-CO₂/ha、A=1.4925ha/MW-AC であるから、ρ=1、すなわち全量放出の場合には、

$$E_{\text{stock}} = 1.4925 \times 1,855-3,343 = 2,769-4,990\text{t-CO}_2/\text{MW-AC}$$

となる。太陽光モジュール製造時排出を E_{p_v}=2,845t-CO₂e/MW-AC とすると、初期炭素負債 E_{initial} は、

$$E_{\text{initial}} = E_{\text{pv}} + E_{\text{stock}}$$

である。湿原の CO₂ 吸収フロー喪失 E_{flow} は、低層湿原の CO₂ 吸収量 F=3.9259t-CO₂/ha/年を用いて、

$$E_{\text{flow}} = A \times F = 1.4925 \times 3.9259 = 5.86\text{t-CO}_2/\text{MW-AC/年}$$

となる。太陽光発電による年間 CO₂ 削減量を R とすると、メタン等を主計算から外した場合の年間純 CO₂ 削減量 N は、

$$N = R - E_{\text{flow}}$$

である。したがって、CO₂ 回収年数 T は、

$$T = E_{\text{initial}} / N$$

となる。なお、この計算では、湿原炭素ストックの放出を初期炭素負債として扱っている。実際には、泥炭炭素の酸化は造成時に一括して起きるとは限らず、排水後に長期間継続する場合がある。したがって、T は厳密な年次排出経路ではなく、累積炭素負債を用いたスクリーニング指標である。

5. 主計算結果

表 2 に、湿原炭素ストック放出率を 0%、25%、50%、100%とした場合の CO2 回収年数を示す。主計算の設備利用率は 17.2%であり、年間発電量は 1,506,720kWh/MW-AC/年である。

表 2 湿原炭素ストックを考慮した CO2 回収年数（1MW-AC あたり、設備利用率 17.2%）

湿原炭素ストック放出率 ρ	湿原炭素ストック放出量	初期炭素負債	回収年数：2020 年排出係数	回収年数：2030 年排出係数
0%	0t-CO2	2,845t-CO2e	4.3-4.3 年	7.7-7.7 年
25%	692-1,247t-CO2	3,537-4,093t-CO2e	5.4-6.2 年	9.5-11.0 年
50%	1,384-2,495t-CO2	4,230-5,340t-CO2e	6.4-8.1 年	11.4-14.4 年
100%	2,769-4,990t-CO2	5,614-7,835t-CO2e	8.5-11.9 年	15.1-21.1 年

湿原炭素ストックを全く考慮しない場合でも、湿原の年間 CO2 吸収フロー喪失を差し引くと、2030 年排出係数での回収年数は 7.7 年である。これは、太陽光モジュール製造時排出だけを初期炭素負債に入れ、湿原炭素ストック放出をゼロとした場合の値である。

湿原炭素ストックの 25%が放出されるだけでも、2030 年排出係数での回収年数は 9.5-11.0 年となる。50%放出では 11.4-14.4 年、全量放出では 15.1-21.1 年となる。すなわち、湿原改変を伴う場合には、太陽光モジュール製造時排出だけを見た場合よりも、CO2 回収年数は大きく延びる。

この結果の直観は明確である。湿原の年間 CO2 吸収フロー喪失は 5.86t-CO2/MW-AC/年であり、年間の太陽光発電による CO2 削減量に比べると小さい。しかし、泥炭に蓄積された炭素ストックは 2,769-4,990t-CO2/MW-AC という規模であり、太陽光モジュール製造時排出 2,845t-CO2e/MW-AC に匹敵する。したがって、湿原 LCA の中心論点は、年間吸収フローの喪失よりも、むしろ泥炭炭素ストックの放出である。

6. 発電量に関する感度分析

主計算では、政府資料に基づく事業用太陽光の設備利用率 17.2%を用いた[8]。一方、NEDO 資料では、国内非住宅用太陽光発電の設備利用率について、2012 年に 12%、その後 2018 年に 15.9%まで上昇した値が示されている[12]。このため、本稿では 12%を現在の標準値としてではなく、発電量が低い場合の感度分析ケースとして用いる。

設備利用率 12%では、1MW-AC あたり年間発電量は 1,051,200kWh であり、2020 年排出係数 0.441kg-CO2/kWh で 463.6t-CO2/MW-AC/年、2030 年排出係数 0.250kg-CO2/kWh で 262.8t-CO2/MW-AC/年の CO2 削減となる。表 3 に、湿原炭素ストック全量放出の場合について、発電量前提を変えた感度分析を示す。

表 3 発電量前提による感度分析（湿原炭素ストック 100%放出）

ケース	設備利用率	年間発電量	年間 CO2 削減量： 2020 年	年間 CO2 削減量： 2030 年	回収年数：2020 年	回収年数：2030 年
主計算	17.2%	150.7 万 kWh/MW-AC/ 年	664.5t-CO2/年	376.7t-CO2/年	8.5-11.9 年	15.1-21.1 年
低位発電量ケース	12.0%	105.1 万 kWh/MW-AC/ 年	463.6t-CO2/年	262.8t-CO2/年	12.3-17.1 年	21.8-30.5 年

この感度分析は、湿原立地の案件評価では重要である。北海道東部のような地域では、積雪、日射、設備設計、出力抑制、メンテナンス等により、実際の設備利用率が案件ごとに異なる。仮に設備利用率が 12%にとどまるなら、2030 年排出係数を用いた CO2 回収年数は 21.8-30.5 年まで延びる。これは、太陽光発電設備の事業期間・パネル寿命と同程度になり得る。

7. 土地利用密度に関する感度分析

土地利用密度も結果に大きく影響する。主計算の 0.67MW/ha は、1MW-AC あたり約 1.49ha である。仮に土地利用密度が 0.45MW/ha に低下すると、1MW-AC あたりの占有面積は 2.22ha に増える。これは、管理道路、排水溝、法面、残土置場、送電・接続設備等を広く含める場合、または湿原上で施工上の制約が大きい場合に起こり得る感度分析上の仮定である。

表 4 土地利用密度に関する感度分析（湿原炭素ストック 100%放出、設備利用率 17.2%）

ケース	土地利用密度	1MW あたり占有面積	湿原炭素ストック放出量	湿原 CO2 吸収フロー喪失	回収年数：2030 年
主計算	0.67MW/ha	1.49ha	2,769-4,990t-CO2	5.86t-CO2/年	15.1-21.1 年
低密度ケース	0.45MW/ha	2.22ha	4,122-7,429t-CO2	8.72t-CO2/年	18.9-27.9 年

土地利用密度が 0.45MW/ha で、湿原炭素ストック全量放出を仮定すると、湿原炭素ストック放出量は 4,122-7,429t-CO2/MW-AC となる。主計算と同じ設備利用率 17.2%を用いても、2030 年排出係数での CO2 回収年数は 18.9-27.9 年となる。したがって、湿原改変を伴うメガソーラーでは、単に設備容量だけでなく、1MW あたり何 ha の湿原機能を失わせるかが決定的に重要である。

8. メタン等の扱い

本稿の主計算では、メタン、亜酸化窒素、溶存有機炭素、泥炭火災を数値に含めていない。これは、これらの項目が重要でないからではなく、個別地点の水位、泥炭深、排水設計、植生、土壌温度、造成方法に強く依存し、環境省資料の値だけでは一律に置けないためである。

IPCC 湿地補足ガイドラインは、排水された内陸有機質土壌について、オンサイトの CO2 排出、排水中の溶存有機炭素に由来するオフサイト CO2 排出、CH4 排出、排水溝からの CH4 排出、N2O 排出、泥炭火

災による CO₂・CH₄・CO 排出を整理している[2]。したがって、個別案件の LCA では、少なくとも以下を確認すべきである。

1. 造成・排水による水位低下の範囲と継続期間
2. 泥炭層の深さ、炭素密度、含水率
3. 排水溝、沈砂池、調整池等からの CH₄ 排出可能性
4. 乾燥化による N₂O 排出増加可能性
5. 溶存有機炭素の流出と下流での CO₂ 化
6. 泥炭火災リスク
7. 工事後の湿原復元可能性と、その時間スケール

メタンを CO₂ 換算する場合には、IPCC AR6 の 100 年地球温暖化係数を用いるなら、生物起源 CH₄ は 27 を用いる[3]。すなわち、年間の追加メタン排出量を ΔCH₄ (t-CH₄/MW-AC/年) とすれば、CO₂ 換算の追加排出量は次のようになる。

$$E_{\text{CH}_4} = 27 \times \Delta\text{CH}_4$$

たとえば追加的な CH₄ 純排出が 0.5t-CH₄/MW-AC/年であれば、CO₂ 換算で 13.5t-CO₂e/MW-AC/年となる。これは湿原 CO₂ 吸収フロー喪失 5.86t-CO₂/MW-AC/年を上回る。したがって、メタンは主計算から外してよい小さな項目ではなく、実測または保守的な感度分析が必要な項目である。

一方で、湿原を排水すると、自然湿原からの CH₄ 排出が減る場合もあり得る。この場合、CH₄ だけを見れば温室効果を下げる方向に働く可能性がある。しかし、その代わりに泥炭の好氣的分解による CO₂ 排出と、場合によっては N₂O 排出が増える。したがって、湿原改変の温室効果ガス収支は、CO₂、CH₄、N₂O を統合して評価しなければならない。

9. 結果の解釈

本稿の主計算から、三つの示唆が得られる。第一に、湿原メガソーラーの LCA では、泥炭炭素ストックが支配的な項目になり得る。低層湿原の事例値を用いると、1MW-AC あたりの湿原炭素ストックは 2,769-4,990t-CO₂ であり、これは太陽光モジュール製造時排出 2,845t-CO₂e/MW-AC に匹敵する。湿原炭素ストックを無視すれば、ライフサイクル CO₂ は大きく過小評価される。

第二に、電力排出係数が低下するほど、太陽光発電による年間 CO₂ 削減量は小さくなり、初期炭素負債の回収に時間がかかる。2020 年排出係数では湿原炭素ストック全量放出の回収年数は 8.5-11.9 年であるが、2030 年排出係数では 15.1-21.1 年となる。脱炭素化が進むほど、自然資本を破壊して再エネを導入することの炭素上の正当化は難しくなる。

第三に、湿原の年間 CO2 吸収フロー喪失は、単独では数 t-CO2/MW-AC/年規模であり、太陽光発電の年間 CO2 削減量に比べると小さい。しかし、これは湿原の価値が小さいことを意味しない。湿原の炭素価値の中心は、長期に蓄積された泥炭炭素ストックにある。また、湿原は CO2 吸収以外にも、水量調整、水質浄化、生物多様性保全、景観、観光、地域文化等の生態系サービスを持つ[1][13][14][15]。炭素だけの LCA は、湿原損失の社会的費用の一部にすぎない。

10. おわりに

本稿は、湿原改変を伴うメガソーラーについて、環境省資料の低層湿原の数値と、政府資料に基づく事業用太陽光の設備利用率を用いて、ライフサイクル CO2 収支を概算した。主計算では、設備利用率 17.2%、土地利用密度 0.67MW/ha、1MW-AC あたり占有面積 1.4925ha とした。低層湿原の炭素ストックは 2,769-4,990t-CO2/MW-AC となる。これが全量放出される場合、太陽光モジュール製造時排出を含む初期炭素負債は 5,614-7,835t-CO2e/MW-AC となり、2030 年排出係数を用いた CO2 回収年数は 15.1-21.1 年となる。設備利用率 12%の低位発電量ケースでは、回収年数は 21.8-30.5 年に延びる。

この結果は、湿原メガソーラーが常に CO2 削減にならないことを示すものではない。しかし、湿原炭素ストックを無視したまま「再エネだから環境に良い」と評価することが不適切であることは明らかである。湿原を破壊して太陽光発電を設置する場合には、太陽光モジュールの LCA だけでなく、泥炭炭素ストック、CO2 吸収フロー、メタン等の温室効果ガス収支、生態系サービスの喪失を統合して評価しなければならない。

政府・自治体および事業者は、湿原破壊による CO2 排出量の見積もりを案件ごとに明示すべきである。温暖化対策を名目として湿原を改変するなら、その事業が本当にどの程度 CO2 削減に寄与するのかを住民・自治体・国に説明する責任がある。回収年数が 10 年以上にもなるようであれば、その事業を温暖化対策として正当化することは難しいのではないか。

温暖化対策の名の下に、温暖化対策上重要な湿原を破壊することは、本末転倒になり得る。今後の再エネ政策では、発電設備単体のコストや発電時 CO2 だけでなく、立地による自然資本損失とライフサイクル CO2 を明示的に組み込む必要がある。

参考文献

[1] 環境省自然環境局 (2014) 「湿地が有する生態系サービスの経済価値評価 (試算結果詳細)」。本稿では、低層湿原の CO2 吸収量 3.9259t-CO2/ha/年、低層湿原の炭素蓄積量 1,855 および 3,343t-CO2/ha、湿原乾燥化による炭素放出の説明を用いた。 <https://www.env.go.jp/content/900521348.pdf>

[2] IPCC (2014), 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Chapter 2: Drained Inland Organic Soils. 本稿では、排水された内陸有機質土壌の CO2、CH4、N2O、DOC、泥炭火災等の扱いを参

- 照した。 https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/pdf/Wetlands_separate_files/WS_Chp2_Drained_Inland_Organic_Soils.pdf
- [3] IPCC (2022), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report, Annex II: Definitions, Units and Conventions. 本稿では、生物起源メタンの GWP100=27 を参照した。
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Annex-II.pdf
- [4] Breakthrough Institute (2022), Solar greenhouse gas payback time calculation FINAL. 本稿では、中国製単結晶シリコン PERC モジュールの 433kg-CO₂e/m²、197.84Wp/m² という値を用いた。 <https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uploads.thebreakthrough.org/Solar-greenhouse-gas-payback-time-calculation-FINAL.pdf>
- [5] Fan, M., Yu, Z., Ma, W., and Li, L. (2021), “Life cycle assessment of crystalline silicon wafers for photovoltaic power generation,” *Silicon*, 13, 3177-3189. Breakthrough Institute[4]付録における中国製シリコンウェハ工程の主要参照文献。
- [6] Müller, A., Friedrich, L., Reichel, C., Hecceg, S., Mittag, M., and Neuhaus, D. H. (2021), “A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, 111277. Breakthrough Institute[4]付録におけるセル・モジュール製造等の主要参照文献。
- [7] UNECE (2021), Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources. Breakthrough Institute[4]付録における BOS、インバータ、系統接続、O&M の参照文献。 <https://unece.org/sustainable-energy/publications/carbon-neutrality-unece-region-integrated-life-cycle-assessment>
- [8] 総合資源エネルギー調査会 発電コスト検証ワーキンググループ (2021) 「発電コスト検証に関する取りまとめ (案)」 第 8 回会合資料。事業用太陽光の設備利用率 17.2%、稼働年数 25 年、太陽光諸元が AC ベースであること、事業用太陽光の過積載率参考値 130%を参照した。
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/2021/data/08_05.pdf
- [9] 電気事業低炭素社会協議会 (2022) 「電気事業における地球温暖化対策の取組み」 2021 年度フォローアップ結果。2020 年度の調整後 CO₂ 排出係数 0.441kg-CO₂/kWh を参照した。 https://e-lcs.jp/assets/2021FU_torikumi1.pdf
- [10] 環境省 (2025) 「関連資料 2 2030 年度排出削減目標に関する対策・施策の一覧」。2030 年度の全電源平均の電力排出係数 0.25kg-CO₂/kWh を参照した。 <https://www.env.go.jp/content/000290553.pdf>
- [11] 経済産業省 (2024) 「地域条例・建物特性を考慮した太陽光発電の導入ポテンシャル評価」 総合資源エネルギー調査会資料。森林改変面積から太陽光発電容量を推計する際の 0.067GW/km² を参照した。
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/067_03_00.pdf
- [12] NEDO (2020) 「太陽光発電開発戦略 2020 (NEDO PV Challenges 2020)」。国内非住宅用太陽光発電の設備利用率について、2012 年 12%、2018 年 15.9%という比較表を参照した。 <https://www.nedo.go.jp/content/100926249.pdf>
- [13] de Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., et al. (2012), “Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units,” *Ecosystem Services*, 1(1), 50-61. DOI: 10.1016/j.ecoser.2012.07.005.
- [14] Brander, L., Brouwer, R., and Wagtendonk, A. (2013), “Economic valuation of regulating services provided by wetlands in agricultural landscapes: A meta-analysis,” *Ecological Engineering*, 56, 89-96. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.104.
- [15] 栗山浩一 (1998) 「CVM による釧路湿原のレクリエーション価値の評価」 *林業経済研究*, 44(1), 63-68.