小水力発電のライフサイクル CO₂排出量の計測

中野 諭・本藤 祐樹・森泉 由恵

本研究は、小水力発電のなかでも相対的に規模の大きな出力200～1,000kW未満の技術を対象にライフサイクルCO₂排出量を計測し、CO₂排出削減ポテンシャルを推計したものである。ヒアリングや公表データから小水力発電の施設建設及び運用アクティビティを作成して総務省「産業連関表」を拡張し、産業連関分析のオープンモデルによって小水力発電のライフサイクルCO₂排出量を計測している。その結果、小水力発電(200～1,000kW未満)のライフサイクルCO₂排出量は28.1g-CO₂/kWhであり、先行研究と比較すると、相対的に規模の小さな小水力発電のライフサイクルCO₂排出量よりも小さいが、一般水力発電よりは大きくなることが明らかにされた。また、河川部における小水力発電のCO₂排出削減ポテンシャルは、概して首都圏を除く東日本で大きいことが示された。

1. はじめに

小水力発電とは、出力(発電容量)の小さな水力発電のことであるが、その定義は明確ではない。環境省の小水力発電情報サイト¹⁾によれば、出力10,000～30,000kW以下を中小水力発電と呼ぶことが多いこと、「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法(新エネ法)」

の対象のように出力1,000kW以下を小水力発電と呼ぶことがあることが紹介されている。また、「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」(以下、固定価格買取制度)における中小水力発電の買取価格は、出力200kW未満、200～1,000kW未満、1,000～30,000kW未満の3区分で設定されている。これらを鑑み、本研究では小水力発電の定義を出力1,000kW未満の水力発電とする。

中野 諭 労働政策研究・研修機構 副主任研究員 E-mail: nakano@jil.go.jp
本藤 祐樹 横浜国立大学大学院環境情報研究院 教授
森泉 由恵 横浜国立大学大学院環境情報研究院 産学連携研究員

小水力発電を含む再生可能エネルギーは、発電プロセスで化石燃料起源の CO_2 がほとんど排出されないことから温暖化対策技術として、とりわけ 2011 年の東日本大震災以降は地域のエネルギー需要を満たす自律的でレジリエントな技術、あるいは地域経済を活性化させる技術として注目されている。再生可能エネルギーのなかでも小水力発電はベースロード電源であり、太陽光発電や風力発電のような変動型電源とは異なり、1 日を通して安定的なエネルギー供給が可能な特徴をもっている。

2015 年 7 月に公表された経済産業省「長期エネルギー需給見通し」によれば、ベースロード電源を確保して原発依存度を低減するために、地熱、バイオマスと並んで水力を積極的に拡大することが盛り込まれている。同見通しによれば、2030 年度までの大規模水力の導入見込みが 19 万～79 万 kW 増であるのに対し、中小規模水力の導入見込みは 16 万～201 万 kW 増であり、中小水力発電を導入するポテンシャルは相対的に大きい。

再生可能エネルギーのうち太陽光、風力、地熱及びバイオマスによる発電のライフサイクル CO_2 排出量を計測する研究の蓄積は進んでいる。たとえば、太陽光、風力、地熱発電の研究事例として本藤他 (2000) や今村・長野 (2010)、バイオマスによる発電の研究事例として兵法他 (2014) や Nakano et al. (2015) がある。

しかし、小水力発電はエネルギーの安定供給と CO_2 排出削減効果が期待される一方で、有効落差、流量等の自然条件の違いによって構造が変化するためモデルケースを想定することが難しいこともあり、ライフサイクル CO_2 排出量を評価した事例は限られる (岡田他 (2013)、稲垣 (2013) 等)。そのため、小水力発電の CO_2 排出削減ポテンシャルを推計する際には、小水力ではない大規模な一般水力発電のライフサイクル CO_2 排出量 (今村・長野 (2010) 等) を使用したり、施設建設時に排出される CO_2 を考慮せず運用時に事業用電力を代替する効果

のみを計上したりする 경우가多い。もちろん、このような方法では精緻な評価は困難であり、稲垣 (2013) もこの現状に問題があることを指摘している。

本研究では、小水力発電の導入による CO_2 排出削減ポテンシャル (事業用電力を代替することによる CO_2 排出削減量) を推計する際に目安となる情報を提供することを目的に、小水力発電のライフサイクル CO_2 排出量を計測する。ただし、本研究では、先行研究が対象とする農業用水等既存設備に設置する小規模 (200kW 未満) な従属発電としての小水力発電ではなく、単独で電気事業として成り立つ程度の規模 (200～1,000kW 未満) の小水力発電を対象とする。

本稿の構成は、以下の通りである。次節では、産業連関分析のオープンモデルを用いて小水力発電のライフサイクル CO_2 排出量を計測する方法について述べる。第 3 節では、小水力発電の施設建設及び運用アクティビティの作成に用いたデータについて解説している。第 4 節では、小水力発電のライフサイクル CO_2 排出量の計測結果を先行研究との比較とともに示し、第 5 節では、第 4 節の結果を用いて河川部における小水力発電の CO_2 排出削減ポテンシャルを都道府県単位で推計している。

2. ライフサイクル CO_2 排出量の計測方法

小水力発電のライフサイクル CO_2 排出量は、小水力発電の施設建設及び運用 (発電) アクティビティを総務省「産業連関表」に組み込んだ表を用い、産業連関分析のオープンモデル ((1) 式) によって計測する。産業連関分析のオープンモデルによって発電技術のライフサイクル CO_2 排出量を計測した例に、吉岡他 (1994) がある。具体的には、 $[\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{M}) \mathbf{A}]^{-1}$ 型の逆行列を算出し、施設建設あるいは運用の 100 万円の最終需要ベクトル $\mathbf{f}$ を乗じて生産誘発額を計測する。なお、小水力発電の施設建設及び運

用の輸入係数は、ゼロと想定する。次に、生産誘発額に CO₂排出係数 (CO₂排出量を生産額で除したもの) を乗じ、誘発 CO₂排出量を計測する。

$$c = e(I - (I - M)A)^{-1}f \quad (1)$$

ただし、 c : CO₂排出量、 e : CO₂排出係数 (生産額当たりの CO₂排出量) ベクトル、 I : 単位行列、 M : 輸入係数行列、 A : 投入係数行列、 f : 最終需要ベクトル

施設建設時の発電量 (kWh) 当たりの誘発 CO₂排出量は、以下のように計測する。施設建設の 100 万円の最終需要を出力 (kW) 当たりの建設費で除すことで 100 万円分の出力を求め、年間時間数 (24 × 365)、設備利用率及び耐用年数を乗じて稼働開始から廃棄されるまでの総発電量を算出する。施設建設の誘発 CO₂排出量をこの総発電量で除して、施設建設時の発電量当たりの誘発 CO₂排出量を計測する。一方、運用時の発電量当たりの誘発 CO₂排出量は、以下のように計測する。運用の 100 万円の最終需要を発電量当たりの電力価格で除して 100 万円分の発電量を求め、運用の誘発 CO₂排出量をこの発電量で除して、運用時の発電量当たりの誘発 CO₂排出量を計測する。ライフサイクル CO₂排出量は、施設建設時と運用時の発電量当たりの誘発 CO₂排出量の合計である。なお、本研究で計測するライフサイクル CO₂排出量の範囲は、小水力発電の施設建設及び運用であり、廃棄されるプロセスを含んでいない。

3. データ

基礎となるデータは、総務省「2005 年産業連関表」である。すでに 2011 年産業連関表が公表されているが、対応する部門別 CO₂排出量の情報が現時点で入手できないため、2005 年産業連関表を使用する。小水力発電の施設建設及び運用における資材投入のプロセスデータから小水力発電の施設建設及び運用アクティビ

ティを作成し、2005 年産業連関表 (基本分類を正方化した 403 部門) に組み込む。結果として、産業連関表は正方化された 405 部門となるが、小水力発電の施設建設及び運用の各部門への産出はゼロとする。

資材投入のプロセスデータの収集方法は、2 つに大別される。1 つは、ヒアリングによって小水力発電事業を実施している事業者の収支決算書や発電設備の建設事業者の工事見積書・請求書の費目別データ (以下、ヒアリングデータ) を入手する方法である。もう 1 つは、公表されている積算資料、報告書、統計データ等 (以下、公表データ) を基にデータを作成する方法である。前者は実際に発生した費用データに基づいている点でメリットがあるが、日本全国の発電事業者からデータを入手することは困難であるため代表性に欠ける点でデメリットがある。後者は実績に基づいた経験式を用いている点である程度の代表性は確保されと考えられるが、推計値であるため、必ずしも実態に即していない可能性がある。以上の特徴を踏まえ、本研究では 2 つの方法を組み合わせデータを集集、作成している。

本研究における小水力発電の施設建設及び運用アクティビティは、次のように作成している。施設建設については出力 (kW) 当たりの建設費を、運用については発電量 (kWh) 当たりの価格を決定し、ヒアリングデータの費目を産業連関表の部門分類に対応付けたものに基づいてそれぞれ分割する²⁾。アクティビティの基本的な作成方法については、森泉他 (2015) を参照していただきたい³⁾。

3-1 施設建設アクティビティの作成

小水力発電の建設費は、発電方式や建設場所の地理的条件によって大きく変動するため、本研究で収集されたヒアリングデータのみから平均値を求めると本来の平均値から乖離する可能性がある。そこで、本研究における出力当たりの建設費を、平成 27 年度調達価格等算定委員会において固定価格買取制度開始後に得られた

表1 小水力発電 (200～1,000kW 未満) の出力 (kW) 当たり施設建設アクティビティの構成

順位	部 門	費用 (万円)	順位	部 門	費用 (万円)
1	タービン	13.44	28	固定電気通信	0.37
2	土木建築サービス	10.65	29	石油製品	0.34
3	プラスチック製品	9.20	30	セメント	0.32
4	回転電気機械	8.66	31	光ファイバケーブル	0.32
5	卸売	8.59	32	不動産賃貸業	0.29
6	物品賃貸業 (除貸自動車)	3.57	33	舗装材料	0.25
7	開閉制御装置及び配電盤	3.36	34	小売	0.25
8	その他の一般産業機械及び装置	2.70	35	ボルト・ナット・リベット及びスプリング	0.24
9	銅管	2.63	36	機械修理	0.23
10	その他の一般機械器具及び部品	2.09	37	その他の窯業・土石製品	0.23
11	道路貨物輸送 (除自家輸送)	1.63	38	廃棄物処理 (公営) ★★	0.19
12	生コンクリート	1.28	39	建物サービス	0.18
13	熱間圧延鋼材	1.25	40	洗濯業	0.18
14	電線・ケーブル	1.22	41	鋳鉄品及び鍛工品 (鉄)	0.18
15	建設用金属製品	1.15	42	自家輸送 (旅客自動車)	0.18
16	その他の電気通信機器	1.09	43	素材	0.16
17	企業内研究開発	0.98	44	ポンプ及び圧縮機	0.16
18	鉄道旅客輸送	0.83	45	塗料	0.15
19	法務・財務・会計サービス	0.68	46	移動電気通信	0.15
20	事務用品	0.57	47	事業用電力	0.15
21	損害保険	0.56	48	建築用金属製品	0.14
22	砂利・採石	0.47	49	製材	0.13
23	その他の対事業所サービス	0.41	50	倉庫	0.13
24	化学機械	0.41	/	上記以外の内生部門計	2.07
25	セメント製品	0.39		粗付加価値部門計	43.42
26	広告	0.39		合 計	129
27	金融	0.38			

200～1,000kW 未満の小水力発電の資本費の平均値である 129 万円/kW (公表データ) と想定する。

建設費を産業連関表の部門別に分割する際には、ヒアリングデータの出力 (kW) 当たり平均値を用いる。データが詳細な品目別に得られる場合には、それぞれの品目を産業連関表の部門分類に対応付けることが可能であるが、必ずしもそうとは限らないため、以下の4つの作業が必要である。

第1に、工事見積書・請求書では事業者の利益という費目は存在せず、各品目に含まれていると考えられる。そこで、ヒアリングに基づいて企業の利益は一般管理費と合わせて総事業費

の15%と想定し (合わせたものを一般管理費等と呼ぶ)、総事業費の15%から工事見積書・請求書にすでに計上されている一般管理費を差し引いた分だけ各品目から同じ比率で分割する。集計された一般管理費等は、内訳が入手できたヒアリングデータで各品目に分割している。

第2に、たとえば「取水口工事一式」というように産業連関表の複数の部門が集計された形でしかデータが入手できない場合が存在する。この場合、工事名から内容が推測可能なものについては、内訳が入手できたヒアリングデータで各品目に分割する。内訳がわからないものは、当該工事の標準歩掛と労務・資材単価 (公

表データ) から工事費を積算して分割する。

第3に、産業連関表の複数の部門が集計された他の例として、労務費や据付費を含む形で材料費や機器費が計上されている場合がある。この場合、労務費や据付費を外数として計上しているヒアリングデータを用いて分割する。参照可能なデータがない場合には、労務費や据付費の比率を材料費や機器費の50%と想定する。

第4に、「共通仮設費」、「直接経費」、「その他工事」、「現場管理費」のように内訳がわからない費目については、産業連関表の類似する建設部門である「電力施設建設」の投入係数を用いて分割する。なお、「系統連系費」は、エネルギー・環境会議(2011)『コスト等検証委員会報告書』における電源線の建設費2,400万円/km(公表データ)と距離1kmから算出し、活動範囲に送配電設備の建設が含まれる電力施設建設部門の投入係数を用いて分割している。

表1は、上記の方法によって産業連関表の基本分類ベースで作成された小水力発電の出力当たり施設建設アクティビティの構成を示したものである。発電機器、導水路、調査・設計等に関連する部門が上位を占める。

3-2 運用アクティビティの作成

小水力発電の発電量(kWh)当たりの価格は、固定価格買取制度における200~1,000kW未満の小水力発電の買取価格(公表データ)である29円/kWh(税抜)、30.45円(税込、本研究は2005年時点で評価するため消費税率を5%と想定)とする。

出力(kW)当たりの運用費は、ヒアリングデータの平均値を用いて、産業連関表の部門別に整理する。ただし、運用費に含まれる5つの費目については、以下のような想定をおいて算出している。

1つ目は、修繕費である。ヒアリングデータの基準修繕費の平均値を1年目の基準修繕費とし、2年目以降、耐用年数の20年目まで劣化係数2.0%の分だけ基準修繕費が前年より増加すると想定する。これにより20年間分の基準

修繕費を算出し、年平均値を運用アクティビティに使用する。基準修繕以外の修繕として、主要機器のオーバーホールのような大規模な修繕を10年に1度、台風等の被害による修繕を20年に1度行うと想定してそれぞれの費用を推計している。これらの修繕費や保守点検費は、内訳が入手できたヒアリングデータで各品目に分割している。

2つ目は、一般管理費であり、『コスト等検証委員会報告書』の想定に基づき、直接費(人件費、修繕費、諸費の合計)の14.0%と想定して算出する。一般管理費は、内訳が入手できたヒアリングデータで各品目に分割している。

3つ目は、減価償却費であり、資産の取得額、つまり小水力発電の建設費に定額法の償却率5.0%(耐用年数20年より)を乗じて算出する。

4つ目は、固定資産税であり、課税対象となる固定資産の残存簿価、つまり小水力発電の建設費から減価償却費分を毎年差し引いたものに税率1.4%を乗じて算出する。これにより20年間分の固定資産税を算出し、年平均値を運用アクティビティに使用する。

5つ目は、電気事業税であり、固定価格買取制度の下での売電による収入に税率0.7%を乗じて算出する。

なお、出力(kW)当たりの運用費を発電量(kWh)ベースに変換するための設備利用率は、2015年3月31日現在で既開発の出力1,000kW未満の水力発電の総出力225,106kWと総発電量1,405,373MWh(資源エネルギー庁の公表データ⁴⁾)より71.3%と想定する。また、小水力発電の発電量当たりの価格と運用費の合計との差は、営業余剰に計上している。

表2は、上記の方法によって産業連関表の基本分類ベースで作成された小水力発電の発電量当たり運用アクティビティの構成を示したものである。大半が粗付加価値であるが、内生部門では損害保険料の費用が突出している。

また、小水力発電の運用及び「2005年産業連関表」の事業用電力アクティビティの構成を

表2 小水力発電(200~1,000kW 未満)の発電量(kWh)当たり運用アクティビティの構成

順位	部 門	費用 (円)	順位	部 門	費用 (円)
1	損害保険	0.5421	28	その他の対事業所サービス	0.0014
2	法務・財務・会計サービス	0.0534	29	茶・コーヒー	0.0013
3	卸売	0.0251	30	洗濯業	0.0013
4	事務用品	0.0220	31	電線・ケーブル	0.0012
5	石油製品	0.0175	32	熱間圧延鋼材	0.0010
6	ベアリング	0.0173	33	化学機械	0.0010
7	自家輸送(旅客自動車)	0.0164	34	建設用金属製品	0.0010
8	出版	0.0153	35	事業用電力	0.0009
9	土木建築サービス	0.0145	36	郵便・信書便	0.0009
10	その他の一般産業機械及び装置	0.0134	37	道路輸送施設提供	0.0008
11	タービン	0.0127	38	印刷・製版・製本	0.0008
12	ポンプ及び圧縮機	0.0125	39	広告	0.0008
13	その他の電子部品	0.0119	40	ボルト・ナット・リベット及びスプリング	0.0007
14	不動産賃貸業	0.0114	41	鉄道旅客輸送	0.0007
15	開閉制御装置及び配電盤	0.0101	42	舗装材料	0.0005
16	回転電気機械	0.0082	43	金融	0.0005
17	小売	0.0076	44	光ファイバケーブル	0.0005
18	電池	0.0058	45	倉庫	0.0003
19	固定電気通信	0.0052	46	そう菜・すし・弁当	0.0003
20	情報サービス	0.0045	47	労働者派遣サービス	0.0003
21	銅管	0.0042	48	セメント製品	0.0003
22	道路貨物輸送(除自家輸送)	0.0039	49	その他の産業用電気機器	0.0002
23	物品賃貸業(除貸自動車)	0.0031	50	インターネット附随サービス	0.0002
24	変圧器・変成器	0.0027		上記以外の内生部門計	0.0031
25	その他の電気通信機器	0.0027		粗付加価値部門計	29.5826
26	その他の一般機械器具及び部品	0.0024		合 計	30.45
27	その他のゴム製品	0.0017			

比較したものが表3である。先に触れたように小水力発電の運用に占める粗付加価値の割合は97.15%と非常に大きいのに対し、事業用電力に占める粗付加価値の割合は47.16%と半分程度となっている。事業用電力で構成比がもっとも高いのは石炭・原油・天然ガスであるが、これは火力発電の燃料である。同じようにサービス部門が上位に入っているが、小水力発電の運用では損害保険、法務・財務・会計サービス、土木建築サービス、事業用電力では金融、企業内研究開発、その他の事業所サービス、情報サービス等と内容が異なっている。小水力発電の運用ではベアリング、その他の一般産業機械及び装置、タービン等機械設備や部品が上位に入

っているが、事業用電力には入っていない。代わりに、事業用電力では建設補修や機械修理が入っている。これは、小水力発電の運用アクティビティを作成する際に、補修や修理の内容がわかるものは、それらに使用される財・サービスを対応付けたためである。

3-3 施設建設及び運用アクティビティの直接エネルギー消費係数及びCO₂排出係数

小水力発電の施設建設及び運用アクティビティの直接エネルギー消費係数及びCO₂排出係数(直接エネルギー消費量及びCO₂排出量をそれぞれ生産額で除したものは、各アクティ

表3 小水力発電（200～1,000kW 未満）の運用と事業用電力アクティビティの構成の比較

順位	小水力発電（200～1,000kW 未満）の運用		事業用電力	
	部 門	構成比 (%)	部 門	構成比 (%)
1	損害保険	1.78	石炭・原油・天然ガス	15.14
2	法務・財務・会計サービス	0.18	建設補修	5.29
3	卸売	0.08	機械修理	5.07
4	事務用品	0.07	石油製品	3.95
5	石油製品	0.06	事業用電力	3.81
6	ベアリング	0.06	金融	3.59
7	自家輸送（旅客自動車）	0.05	企業内研究開発	1.97
8	出版	0.05	卸売	1.58
9	土木建築サービス	0.05	その他の対事業所サービス	1.57
10	その他の一般産業機械及び装置	0.04	情報サービス	1.32
11	タービン	0.04	物品賃貸業（除貸自動車）	1.19
12	ポンプ及び圧縮機	0.04	石炭製品	0.83
13	その他の電子部品	0.04	広告	0.75
14	不動産賃貸業	0.04	廃棄物処理（産業）	0.63
15	開閉制御装置及び配電盤	0.03	道路貨物輸送（除自家輸送）	0.59
16	回転電気機械	0.03	自然科学研究機関（産業）	0.46
17	小売	0.02	自家輸送（旅客自動車）	0.43
18	電池	0.02	不動産賃貸業	0.42
19	固定電気通信	0.02	倉庫	0.38
20	情報サービス	0.01	港湾運送	0.34
	上記以外の内生部門計	0.13	上記以外の内生部門計	3.54
	粗付加価値計	97.15	粗付加価値計	47.16

注：事業用電力は、総務省「2005年産業連関表」より作成

ビティの燃料の物的な投入係数（投入係数（の分子）を燃料単価で物量単位に変換したもの）に温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度における燃料種別の発熱量（GJ/物量単位）及び炭素排出係数（t-CO₂/GJ）を乗じ、すべての燃料について合計することで算出する。燃料単価の情報がヒアリングデータから得られない燃料については、経済産業省資源エネルギー庁の「石油製品調査」や『ガス事業便覧』、日本エネルギー経済研究所の『エネルギー・経済統計要覧』や「(石油情報センターの) 価格情報」等からヒアリング対象地域の価格データを抽出して用いている。

なお、小水力発電アクティビティ以外の既存のアクティビティの直接エネルギー消費係数及びCO₂排出係数については、国立環境研究所「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）」の2005年データを使用する。

4. ライフサイクル CO₂排出量の計測結果

3節のデータを用いて計測された小水力発電（200～1,000kW 未満）のライフサイクル CO₂排出量は 28.1g-CO₂/kWh であり、その内訳は施設建設が 26.8 g-CO₂/kWh、運用が 1.2 g-CO₂/kWh と施設建設時の CO₂排出が大半である。

表4は、先行研究における小水力発電のライフサイクル CO₂排出量を整理したものである。いずれも廃棄時の CO₂排出を含んでいないという境界は共通であるが、評価手法やデータベースは必ずしも同じではないため、厳密な比較は難しいが、概して以下のような点が確認される。

本研究の想定（200～1,000kW 未満）よりも出力の小さな小水力発電のライフサイクル CO₂排出量は、岡田他（2013）の 210.0g-CO₂

表 4 小水力発電のライフサイクル CO₂排出量の比較

	小水力				一般水力
	本研究	岡田他 (2013)	稲垣 (2013)	鷺津他 (2015)に基 づき推計	今村・長野 (2010)
出力 (kW)	200~1,000	2.2	200	200	10,000
設備利用率 (%)	71.3	45.5	60	60	45
耐用年数 (年)	20	20	30	22	40
ライフサイクル CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /kWh)	28.1	210.0	6.0	59.9	10.6

注：稲垣（2013）では耐用年数が明示されていないため、ライフサイクル CO₂排出量の総排出量を年間排出量で除して逆算している

表 5 小水力発電（200~1,000kW 未満）の部門別誘発 CO₂排出量の上位 20 部門

順位	施設建設時の誘発 CO ₂ 排出量 (a)		運用時の誘発 CO ₂ 排出量 (b)		ライフサイクル CO ₂ 排出量 (a + b)	
	部門	CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /kWh)	部門	CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /kWh)	部門	CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /kWh)
1	鉄鉄	6.96	事業用電力	0.27	鉄鉄	7.2
2	セメント	5.67	鉄鉄	0.19	セメント	5.7
3	事業用電力	3.83	自家輸送（旅客自動車）	0.17	事業用電力	4.1
4	自家発電	1.51	自家発電	0.10	自家発電	1.6
5	小水力発電施設建設	0.99	洋紙・和紙	0.06	小水力発電施設建設	1.0
6	自家輸送（旅客自動車）	0.61	石油製品	0.06	自家輸送（旅客自動車）	0.8
7	道路貨物輸送（除自家輸送）	0.58	バルブ	0.05	道路貨物輸送（除自家輸送）	0.6
8	自家輸送（貨物自動車）	0.49	道路貨物輸送（除自家輸送）	0.03	自家輸送（貨物自動車）	0.5
9	粗鋼（転炉）	0.47	小水力発電運用	0.02	粗鋼（転炉）	0.5
10	熱間圧延鋼材	0.42	損害保険	0.02	熱間圧延鋼材	0.4
11	石油製品	0.36	自家輸送（貨物自動車）	0.02	石油製品	0.4
12	洋紙・和紙	0.31	粗鋼（転炉）	0.01	洋紙・和紙	0.4
13	石炭製品	0.27	航空輸送	0.01	バルブ	0.3
14	銅管	0.27	セメント	0.01	石炭製品	0.3
15	鋳鉄品及び鍛工品（鉄）	0.26	熱間圧延鋼材	0.01	銅管	0.3
16	バルブ	0.25	沿海・内水面輸送	0.01	鋳鉄品及び鍛工品（鉄）	0.3
17	土木建築サービス	0.20	石炭製品	0.01	土木建築サービス	0.2
18	タービン	0.19	法務・財務・会計サービス	0.01	タービン	0.2
19	廃棄物処理（公営）★★	0.17	鋳鉄品及び鍛工品（鉄）	0.01	冷間仕上鋼材	0.2
20	冷間仕上鋼材	0.17	冷間仕上鋼材	0.01	廃棄物処理（公営）★★	0.2
	上記以外の部門	2.87	上記以外の部門	0.15	上記以外の部門	3.08
	合 計	26.83	合 計	1.22	合 計	28.05

/kWh (2.2kW)，鷺津他（2015）に基づいて推計した 59.9g-CO₂/kWh (200kW) と本研究よりも大きな値となっている⁵⁾。参考までに掲載した中規模ダム水路式の一般水力発電 (10,000kW) のライフサイクル CO₂排出量は 10.6 g-CO₂/kWh (今村・長野 (2010)) であり，本研究を含めた以上の 3 つの小水力発電のライフサイクル CO₂排出量よりも小さい。したがって，小水力発電の CO₂排出削減ポテンシャルを推計する際に一般水力発電のライフサイクル CO₂排出量を用いると，過大評価にな

ってしまう。また，同じ小水力発電であっても出力によってライフサイクル CO₂排出量は異なるため，評価対象となる小水力発電の出力に適したライフサイクル CO₂排出量を参照するべきである。なお，稲垣（2013）は，耐用年数を他の研究よりも長く想定していると推測されること，また一般水力発電の原材料別原単位を用いているため規模の効果が過大に反映されていると考えられることから，ライフサイクル CO₂排出量が非常に小さな値になっているものと思われる。

表6 小水力発電（200～1,000kW 未満）の運用と事業用電力の誘発 CO₂排出量に占める上位 20 部門の比較

順位	小水力発電（200～1,000kW 未満）の運用		事業用電力	
	部門	CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /kWh)	部門	CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /kWh)
1	事業用電力	0.27	事業用電力	416.04
2	銑鉄	0.19	石油製品	1.47
3	自家輸送（旅客自動車）	0.17	石炭製品	1.20
4	自家発電	0.10	自家輸送（旅客自動車）	0.99
5	洋紙・和紙	0.06	銑鉄	0.87
6	石油製品	0.06	自家発電	0.71
7	パルプ	0.05	廃棄物処理（産業）	0.48
8	道路貨物輸送（除自家輸送）	0.03	セメント	0.46
9	小水力発電運用	0.02	道路貨物輸送（除自家輸送）	0.45
10	損害保険	0.02	沿海・内水面輸送	0.42
11	自家輸送（貨物自動車）	0.02	自家輸送（貨物自動車）	0.41
12	粗鋼（転炉）	0.01	洋紙・和紙	0.24
13	航空輸送	0.01	パルプ	0.19
14	セメント	0.01	建設補修	0.16
15	熱間圧延鋼材	0.01	企業内研究開発	0.16
16	沿海・内水面輸送	0.01	自然科学研究機関（産業）	0.15
17	石炭製品	0.01	航空輸送	0.13
18	法務・財務・会計サービス	0.01	粗鋼（転炉）	0.06
19	鋳鉄品及び鍛工品（鉄）	0.01	熱間圧延鋼材	0.06
20	冷間仕上鋼材	0.01	冷間仕上鋼材	0.05
	上記以外の部門	0.15	上記以外の部門	1.27
	合 計	1.22	合 計	425.99

注：小水力発電（200～1,000kW 未満）の運用は再掲

次に、本研究で計測された小水力発電のライフサイクル CO₂排出量について、排出量の多い上位 20 部門に注目する（表 5）。施設建設時の発電量（kWh）当たり誘発 CO₂排出量が多かったのは銑鉄（6.96g-CO₂/kWh）であり、次いで、セメント（5.67g-CO₂/kWh）、事業用電力（3.83g-CO₂/kWh）が多い。一方、運用時の発電量当たり誘発 CO₂排出量が多かったのは事業用電力（0.27g-CO₂/kWh）であり、銑鉄（0.19g-CO₂/kWh）、自家輸送（旅客自動車）（0.17g-CO₂/kWh）が続く。

さらに、小水力発電の運用時と「2005 年産業連関表」の事業用電力の発電量当たりの誘発 CO₂排出量に占める上位 20 部門を比較したものが表 6 である。いずれも事業用電力が多かったのは事業用電力（0.27g-CO₂/kWh）であり、銑鉄（0.19g-CO₂/kWh）、自家輸送（旅客自動車）（0.17g-CO₂/kWh）が続く。

の誘発 CO₂排出量に占める事業用電力の割合は 97.7%であるのに対し、小水力発電の運用時では 22.2%と異なる。これは、事業用電力に含まれる火力発電の燃料起源の CO₂排出量が非常に大きいからである。鉄鋼製品、運輸、紙製品、セメントが上位にあるのは共通であるが、小水力発電の運用では損害保険や法務・財務・会計サービスが上位に入っているのに対し、事業用電力では企業内研究開発や自然科学研究機関（産業）が上位にある。これらは、表 3 で見たコスト構成比の高い部門である。

5. 小水力発電の導入による CO₂排出削減ポテンシャル

環境省（2012）『平成 23 年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書』では、設置可能面積、河川流量等から理論的に算出することができる中小水力発電のエネルギー資源量のうち発電コストが 500 円/

表7 小水力発電の導入ポテンシャル

	河川部	
	地点数	出力 (kW)
100kW 未満	4,614	288,810
100~200kW	4,431	644,934
200~500kW	5,604	1,793,230
500~1,000kW	3,059	2,129,111
1,000~5,000kW	1,878	3,350,279
5,000~10,000kW	83	529,799
10,000kW 以上	17	246,277
計	19,686	8,982,440

注：環境省（2012）『平成 23 年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書』より作成

(kWh/年)を上回るものを除いた「賦存量」、賦存量のうち自然条件として最大傾斜角が 20 度未満、社会条件として国立・国定公園等の法規制を満たさないものを除いた「導入ポテンシャル」、導入ポテンシャルのうち固定価格買取制度（報告書作成時は固定価格買取制度が始まる前であったため、買取価格と買取期間について複数のシナリオを用意）や発電設備費・土木工事費を低減させる技術革新によって事業が成立する可能性の高い「シナリオ別導入可能量」が推計されている。

実現可能性の観点からはシナリオ別導入可能量を利用して小水力発電の導入による CO₂排出削減ポテンシャルを推計することが望ましいと考えられるが、現在の固定価格買取制度と完全に一致するシナリオがないこと、報告書において都道府県別導入可能量が出力別に公表されていないことから、本研究では導入ポテンシャルを用いる。したがって、本研究で推計する CO₂排出削減ポテンシャルは、事業性を検討していない分だけ過大評価になる点には注意していただきたい。

表7は、河川部における小水力発電の導入ポテンシャルを整理したものである。本研究で対象としている 200~1,000kW 未満の小水力発電の河川部における導入ポテンシャルは、地点数で 8,663、出力で 3,922,341kW である。

200~1,000kW 未満の小水力発電の CO₂排出削減ポテンシャルは、本研究で想定している設

備利用率 71.3%を用いて河川部における導入ポテンシャルの出力を発電量に換算し、事業用電力の CO₂排出係数から 4 節で求めた小水力発電のライフサイクル CO₂排出量を差し引いたものを乗じて算出する（(2)式）。

$$d = (c_b - c_s)p \quad (2)$$

ただし、 d ：CO₂排出削減ポテンシャル、 c_b ：事業用電力の CO₂排出係数（発電量当たりの CO₂排出量）、 c_s ：小水力発電のライフサイクル CO₂排出量、 p ：小水力発電の導入ポテンシャル（発電量ベース）

事業用電力の CO₂排出係数は電気事業者の発電技術や電源構成によって変化するため、いつの時点の CO₂排出係数で評価するかによって、CO₂排出削減ポテンシャルは変わらう。そこで本研究では、以下のような 2 つの事業用電力の CO₂排出係数を用いる。1 つは、事業用電力の CO₂排出係数の現状値である。今後、事業用電力の CO₂排出係数は小さくなっていくことが予想されることから、この現状値を用いて推計される CO₂排出削減ポテンシャルは、最大値に近いものと考えられる。もう 1 つは、事業用電力の CO₂排出係数の将来目標値である。発電の技術革新やより化石燃料に依存しない電源構成への移行が達成されることを想定したものであるため、この目標値を用いて推計される CO₂排出削減ポテンシャルは、最小値に近いものと考えられる。

事業用電力の CO₂排出係数の現状値には、2015 年 9 月に公表された電気事業連合会の「電気事業における環境行動計画」から得られる 2014 年度の一般電気事業者の実排出係数（固定価格買取制度等の調整を行っていない排出係数）である 556g-CO₂/kWh を使用する。また、2030 年度目標値には、2015 年 7 月に電気事業連合会・電源開発株式会社・日本原子力発電株式会社・特定規模電気事業者有志 23 社によって策定された「電気事業における低炭素社会実行計画」における 2030 年度目標値である 370 g-CO₂/kWh（使用端）を使用する⁶⁾。

図1 小水力発電（200～1,000kW 未満）の都道府県別 CO₂排出削減ポテンシャル（河川部，単位：万 t-CO₂）

なお、いずれも施設建設時及び廃棄時の CO₂ 排出量は含まれていない。

前述したように小水力発電は特に自然条件等に依存するため、本来は個別の事情を考慮して CO₂ 排出削減ポテンシャルを評価すべきである。しかし、小水力発電の導入に当たって技術的な検討に入る前に CO₂ 排出削減ポテンシャルを概算する、あるいは市町村や都道府県等一定の地理的範囲の CO₂ 削減ポテンシャルを推計する場合には、次善の方法として個別の事情に依存しない標準的なライフサイクル CO₂ 排出量を活用することが現実的である。ただし、本研究において出力の規模によってライフサイクル CO₂ 排出量が異なることが確認されているため、導入を検討する小水力発電の出力に応じて、適切なライフサイクル CO₂ 排出量を使用する必要がある。

以上を踏まえ、河川部における 200～1,000kW 未満の小水力発電の CO₂ 排出削減ポテンシャルは、事業用電力の現状の CO₂ 排出

係数で評価すると 1,292.8 万 t-CO₂、2030 年度の目標値で評価すると 837.4 万 t-CO₂ と推計される。国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスによれば、2014 年度の日本の CO₂ 排出量は 12 億 6,549 万 t-CO₂ であり、これらの削減ポテンシャルはそのうち 0.7～1.0% という規模である。

図1は、河川部における 200～1,000kW 未満の小水力発電の CO₂ 排出削減ポテンシャル（2030 年度の目標値で評価）を都道府県別に示している。CO₂ 排出削減ポテンシャルは、概して首都圏を除く東日本の都道府県で大きくなっている。また、この CO₂ 排出削減ポテンシャルの上位 20 都道府県を抽出したものが、表8である。CO₂ 排出削減ポテンシャルがもっとも大きい都道府県は北海道で 95.7 万 t-CO₂ であり、次いで福島県（68.4 万 t-CO₂）、岐阜県（67.2 万 t-CO₂）、新潟県（66.5 万 t-CO₂）となっている。

表 8 小水力発電 (200~1,000kW 未満) の CO₂排出削減ポテンシャル (河川部) の上位 20 都道府県

順位	都道府県	削減 ポテンシャル (万 t-CO ₂)	順位	都道府県	削減 ポテンシャル (万 t-CO ₂)
1	北海道	95.7	11	静岡県	23.7
2	福島県	68.4	12	山梨県	23.2
3	岐阜県	67.2	13	福井県	22.1
4	新潟県	66.5	14	熊本県	19.6
5	長野県	56.1	15	高知県	18.4
6	群馬県	50.4	16	宮崎県	15.3
7	山形県	42.8	17	宮城県	12.3
8	秋田県	38.5	18	青森県	11.7
9	岩手県	34.6	19	鳥取県	11.6
10	富山県	26.5	20	石川県	10.2

6. おわりに

本研究では、小水力発電のなかでも相対的に規模の大きな 200~1,000kW 未満の技術に焦点を当て、そのライフサイクル CO₂排出量の計測と CO₂排出削減ポテンシャルの推計を行った。

本研究で計測された小水力発電のライフサイクル CO₂排出量は、多部門経済モデルを用いた小水力発電等の環境保全型技術の導入シミュレーションを行う際に、CO₂排出原単位データとして活用することができる。また、ライフサイクル CO₂排出量から推計される CO₂排出削減ポテンシャルは、国や地域がエネルギー戦略や具体的な再生可能エネルギーの導入計画を策定する際の基本情報となりうる。

最後に、今後の課題を挙げる。本研究では複数のヒアリングデータを利用することで可能な限り偏りのないアクティビティを作成しているが、今後もヒアリングデータを収集し、アクティビティの精緻化を目指したい。また、廃棄時の CO₂排出量の計測も課題である。そして、本研究では 200~1,000kW 未満の小水力発電を取り上げたが、同様に固定価格買取制度の対象となっている 200kW 未満の小水力発電や 1,000~30,000kW 未満の中規模水力発電についてもアクティビティの作成を検討したい。

[謝辞]

本研究は、環境研究総合推進費「再生可能エネルギー技術の価値評価と導入戦略のための基盤構築」(課題番号: 2-1302) の一環で実施されたものである。本研究の実施に当たり、再生可能エネルギー発電事業者や地方自治体等の方々よりデータの提供を受けた。ここに記して感謝したい。

[注]

- 1) 環境省 小水力発電情報サイト
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/shg/page01.html>
- 2) ヒアリングは、山梨県、長野県、富山県、和歌山県、鳥根県、熊本県、鹿児島県に立地する 8 つの水力発電所について訪問調査 (一部、電子メールによる調査) によって実施した。全国小水力利用推進協議会等の専門家の意見を踏まえ、これらのうち標準的な 2 つの発電所のデータを選択した。
- 3) 環境研究総合推進費「再生可能エネルギー技術の価値評価と導入戦略のための基盤構築」(課題番号: 2-1302) の成果として、本研究で扱った小水力発電を含む再生可能エネルギーについて拡張された産業連関表が Web サイト (<http://www.hondo.ynu.ac.jp/renewables/index.html>) にて公表されている。
- 4) 資源エネルギー庁 Web サイト「出力別包蔵水力 (一般水力)」http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/hydroelectric/database/energy_japan006/
- 5) 鷲津他 (2015) に基づく小水力発電のライフサイクル CO₂排出量は公表されていないため、本研究において次のように計測する。鷲津他 (2015) の作成した産業連関表は、早稲田大学次世代科学技術経済分析研究所の Web サイト (<http://www.f.waseda.jp/washizu/index.html>) より入手可能である。小水力発電の施設建設及び運用アクティビティの投入係数は、「2030 年再生可能エネルギー想定取引額表」より得られる。ただし、同表はエネルギー・環境会議による 2030 年の電源構成を前提としているため、電源別の電力投入を合計し、2005 年時点の電源構成で分割する。このような修正を行った小水力発電の投入係数を「2005 年送配電分離表」に組み込み、本研究と同様の方法で小水力発電のライフサイクル CO₂排出量の計測をしている。なお、CO₂排出係数の情報は、「付帯表」にある。
- 6) 2011 年の東日本大震災以降、日本の電源構成は大きく変わったため、産業連関表から計測可能な 2005 年における事業用電力の発電量当たりの誘発 CO₂排出量 (表 6 で示される 425.99g-CO₂/kWh)

ではなく、より直近の電源構成を踏まえた 2014 年度の一般電気事業者の実排出係数を現状値として採用している。また、電気事業連合会の 2030 年度目標値は、「長期エネルギー需給見通し」で示される電源構成や電力需要を踏まえて算出された値であり、政府の目標と整合的であるため、将来の目標値として適切であると考えた。

●参考文献

稲垣守人 (2013) 「小水力発電システム概論」国立大学法人福島大学『再生可能エネルギー事業プランナー—地域イノベーション戦略実現のための人材育成プログラム—』第 10 章, pp.234-275.

今村栄一・長野浩司 (2010) 『日本の発電技術のライフサイクル CO₂排出量評価—2009 年に得られたデータを用いた再推計—』電力中央研究所報告: Y09027.

岡田浩一・山崎智雄・鶴田祥一郎・中野勝行・金岩貢・平野彰秀・岡村鉄兵 (2013) 「ライフサイクル CO₂排出量による地中熱利用事業及び小水力発電事業の評価」『地球環境シンポジウム講演集』第 21 巻, pp.43-48.

エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会 (2011) 『コスト等検証委員会報告書』, http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02_hokoku.html.

環境省地球環境局地球温暖化対策課 (2012) 『平成 23 年 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書』, <https://www.env.go.jp/earth/report/h24-04/>.

経済産業省資源エネルギー庁ガス市場整備課商務流通

保安グループガス安全室監修 (各年) 『ガス事業便覧』日本ガス協会.

日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編 (各年) 『エネルギー・経済統計要覧』省エネルギーセンター.

兵法彩・本藤祐樹・工藤祐揮 (2014) 「バイオマスプラント建設の GHG 排出量推計に向けた産業連関表の実用的な利用」『日本 LCA 学会誌』第 10 巻第 1 号, pp.13-24.

本藤祐樹・内山洋司・森泉由恵 (2000) 『ライフサイクル CO₂排出量による発電技術の評価—最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響—』電力中央研究所報告: Y99009.

森泉由恵・本藤祐樹・中野諭 (2015) 「再生可能エネルギー部門拡張産業連関表の開発と応用」『日本エネルギー学会誌』第 94 巻第 12 号, pp.1397-1413.

吉岡完治・内山洋司・菅幹雄・本藤祐樹 (1994) 「環境分析用産業連関表の応用(5) —火力・原子力発電の CO₂排出量の計算—」『産業連関』第 5 巻第 1 号, pp.31-56.

鷺津明由・中野諭・新井園枝 (2015) 「スマートエネルギー社会の産業連関分析に向けて—一次世代エネルギーシステム分析用産業連関表の作成と応用—」『経済統計研究』第 43 巻Ⅲ号, pp.12-31.

Nakano, S., A. Murano and A. Washizu (2015), "Economic and Environmental Effects of Utilizing Unused Woody Biomass," *Journal of the Japan Institute of Energy*, 94(6), pp.521-531.