

各発電システムの外部費用：再生可能発電システム

External Costs of Electric Power Generation Systems : Renewable Energy in ExternE

西村 一彦*

Kazuhiko Nishimura

1. はじめに

ここでは、再生可能エネルギーとして、水力、太陽光、風力、ごみ、バイオマスの5つの発電システムに関して、ExternEにおいて評価された外部費用の試算結果を紹介する。これらの発電システムは、EU諸国の地勢の特徴を反映して導入されるという特徴があり、また外部性の評価項目も技術の特徴が反映されている。

2. 水力発電

水力発電の燃料サイクルは、発電段階よりも建設や廃棄の段階における外部費用がより重要であるため、ライフサイクルアプローチを採用する。水力の外部性は負の側面だけでなく、洪水防止・河川の移送を制御、灌漑や国内の安定した水の提供等、プラスの側面を持ち合わせることも留意すべき点である。

水力の燃料サイクルの負荷は、河川の水流システム・その地域の植物層、動物層の変化による河川生態系への影響等、ほとんどがローカルな環境に対しての損害である。また、ランドスケープやリクリエーション活動の変化によるアメニティー損失、巨大ダム建設時における河川の流れの変化による渇水リスクの上昇等も重要な見地である。燃料サイクルの上流では、素材加工や発電所建設時における汚染物質の負の影響が大きい。

これらの結果は類似しているが異なる方法論によって推計されている。例えば、オーストリアのケースでは生態系影響がまったく推計されずに、洪水に対する保護や航行と回漕への効果という便益のみが計上されている。ポルトガルに関しては、生態影響とレクリエーション効果の双方が量化されていない。イタリアの損害はすでに内部化されているかもしれない修復費用

をベースにしている。スウェーデンやノルウェーの結果は条件依存法（CVM）に、フランスの結果はキャックボート遊びに関するトラベルコスト法に基づくものである。そのため、代表的な値を評価することは困難である。

3. 太陽光発電

現段階では、ドイツにおいてのみの実施で、二種類の発電機の評価がなされている。一つは、家の電力需要目的の（余剰電力は送電線へ供給）総定格出力4.8 kWp、96多結晶モジュールの屋根設置型発電機で、もう一つは、オフィスビルの壁面への組み込みで、総面積155m²、総定格出力13kWp、200多結晶モジュールのバイエルフェルトである。モジュールの生産から設置に至る局面での大気汚染物質に加えて、PVモジュールの生産の間に環境に放出される物質や素材（SO₂、NO_x排出量、微粒子物質、CO₂、シリコンや銅などの特定の素材）を定量化した。

関連した問題としての視界への影響は負の効果なしに建築物にPVモジュールを組み込むような新技術の開発により同定せず、土地利用に関しては今回のケースでは当てはまらないため省いた。

太陽光発電燃料サイクルの外部費用は、ほとんどがPVモジュールを生産する段階で生成される大気排出物である。

4. 風力発電

風力発電の燃料サイクルは、風車の建造と操業の二つの段階に要約され、水力と同じ理由でライフサイクルコストを採用する。風車製造時において生み出される間接的な汚染物質に高位の損害が認められるが、他の燃料サイクルと比較すると無視可能と見なせる程度のものである。また、操業段階における騒音や視界への影響は、人口が集中している場所から離れての立地、環境価値がもともとないような場所への立地により負

* 財団法人電力中央研究所 経済社会研究所主任研究員
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 大手町ビル7F

表1 水力の評価結果の概要

	サイト・規模*1	技術	発電			他の段階*2		小計
			アムニティ	生態影響	その他	人間の健康	その他	
AUT	Greifenstein 293MW	自流式	Ng	Ng	0.7-8 (便益)*3	0.04	Ng	0.6-8 (便益)*3
FR	LaCreuse	貯水式	6.01	Ng	Ng	0.01	Ng	6
GR	Nestos 420MW	貯水式	0.1	3.7	0.31	1	—	5.1
IT	Alta Veltellina (8 Power plant) 680MW	貯水式	0.01	2.9	0.1	0.25	—	3.4
NO	Sauda 517MW	自流式	2.3	—	0.03	0.04	—	2.3
PT	Lourizela 5 MW	貯水式	Ng	Ng	0.03	0.21	0.01-0.12	0.2-0.5
SE	Kilpen 28MW	自流式	—	—	—	—	—	0.04-7.2

※1 カッコ内=発電規模MW(以下同様)。 ※2 他の段階=発電以外の燃料サイクル(以下同様)。 ※3 (便益)はマイナスの費用とする。

表2 太陽光発電の評価結果の概要

	サイト・規模	視界への影響	地球温暖化	人間の健康	その他	小計
GE	Emstal 4.8kWp Roof	Ng	0.2-7.7	0.9	0.02	1.1-8.1 (1.9-3.3)
GE	Beilefeld 13kWp Facade	Ng	0.2-7.0	0.3	0.02	0.6-7.6 (1.4-2.8)

表3 風力発電の評価結果の概要

	サイト・規模	発電			他の段階		小計
		騒音	視界への影響	その他	人間の健康	その他	
DE	Nordfriesland 11.25MW	0.064	0.06	Ng	0.31	0.03-1	0.37-1.3 (0.47-0.67)
DK	Tuno Knob 5 MW off-	4*10-3	Ng	9*10-3	0.5	0.1-3	0.6-3.6 (1-1.6)
DK	Fialdene 9 MW	0.02	0.2	2*10-3	0.3	0.1-0.2	0.6-2.5 (0.9-1.3)
ES	Cabo Villano 3 MW	8*10-3	Ng	0.95	0.8	0.02-0.7	1.7-2.7 (1.8-1.9)
GR	Andros 1.6MW	1.12	Ng	0.14	0.9	0.03-1.14	2.2-3.3 (2.4-2.6)
NO	Vikna 2.2MW	Ng	Ng	0.003	0.4	0.06-2.1	0.5-2.5 (0.5-1.1)
UK	Penrhyddlan 3.1MW	0.07	Ng	0.2	0.8	0.03-1.3	1.2-2.4 (1.3-1.5)

表4 ごみ発電の評価結果の概要

	サイト・規模	技術	発電			他の段階		ダメージ*1	ダメージ*2
			人間の健康	地球温暖化	その他	地球温暖化	その他	小計	小計
ES	Mataro 12MW	S	20.2	3-118	0.46	0.06-2.1	1.5	26-143	10-55 (15-24)
FR	Paris 3 MW	S E W	120.1	8-283	1.82	—	—	130-405	55-172 (67-92)
IT	Milano 239kt waste	S	28.2	5-182	0.9	0.002-0.09	2.4	37-214	30-179 (46-77)

S=蒸気サイクル型, E=電気集塵機, W=湿式スクラパー ※1単位: kWhあたり, ※2単位: tonあたり

表5 バイオマス発電の評価結果の概要

	サイト・規模	技術*1	ソース*2	発電			他の段階		小計
				人間の健康	地球温暖化	その他	地球温暖化	その他	
AUT	Reuthe 1.2MW W CHP	S E	W	23.8	0.02-0.8	0.2	Ng	Ng	24-25-24
DK	Ribe 1 MW CHP	G	B	8.6	0.3-11	0.4	-0	6.5	3.2-15 (12-14)
DE	Tubingen 20MW CHP	F	F	23	0.1-3	0.2	0.06-2.2	3.9	27-32 (28-29)
ES	Almazan 20MW	F bg	F 1	12.5	3-111	0.2	1.2	0.06-2.2	17-127 (29-52)
FI	Fressa 17MW CHP	F E	W	5.1	0.3-10	0.6	0.03-1.0	1.1	7-18 (8-11)
FR	Aibi 40MW	BG	E	5.3	0	0.12	0.07-2.5	0.14-0.41	5.6-8.1 (5.9-6.7)
GR	Orchomenos 30MW	A	E	6.5	0	0.06	0.7-2.5	0.12	7-9 (7-8)
GR	Orchomenos 40MW	Ga	E	1.5	0	0.06	0.5-1.8	0.12	1.7-3.4 (1.8-2.2)
GR	Orchomenos 20MW	Ga	A	2.6	0	0.08	0.04-	—	2.7-2.8 (2.7-2.7)
GR	Crete 30MW	A	E	2.9	0	0.04	0.8-2.8	0.04	2-5.7 (3.3-3.9)
GR	Crete 40MW	Ga	E	0.9	0	0.12	0.6-2	0.04	1-3.0 (1.2-1.6)
GR	Crete 10MW	Ga	A	1.1	0	0.12	0.01-0.4	—	1.2-1.6 (1.2-1.3)
NL	Amsterdam 20MW	P,E,N,F	E	1.3	0	0.2	0.1-3.8	1.9	3.6-7.3 (4.0-4.8)
NL	Ernshaven 36MW	BC	E	2.4	0	0.2	0.1-4.1	2.5	5.1-9.1 (5.6-6.5)
NO	Tofre 5 MW	S E	W	2.2	0	0.2	Ng	Ng	2.4
PT	Figueira 17MW	S E	W	10.5	0	0.6	0.03-1.4	5.9	15-30 (17-18)
PT	Figueira 17MW	S E	E	7.8	0	0.6	0.07-2.7	4.3	11-29 (14-15)
SE	Norkoping 100MW	S,E,SC	W	1.7	0	0.03	0.05-1.9	0.8	2.5-4.3 (2.7-3.0)
UK	Egborough 8 MW	Ga E	E	2.7	0	0.1	0.06-2	2.1	5.1-7.2 (5.3-5.7)

※1 S=system cycle, G=Gas engine, F=FBC, E=ESP, BG=BIG/GT, BC=BIG/CC, N=lowNOx, SC=SCR, Ga=ガス化, A=新型燃焼, FG=FGD, bf=バグフィルタ

※2 W=木材残渣, E=Energy crops, A=農業残渣, F=森林残渣, B=汚泥からのバイオスラリー, l=褐炭

荷削減が可能である。鳥の数への影響に関しても鳥の数の多いサイト、渡り鳥のルートが発電所が遮るサイトにおいては影響が大きくなるが今回のケースにはいずれも当てはまらない。電磁波影響、土地利用等のような他の影響は、無視可能である。

風力エネルギーサイクルもローカルな環境で生産されるので、サイトに特性的な損害が極めて大きくなる。例えば、ギリシャとイギリスの風力発電所は、人口集中地域付近に立地しており、アメニティー、特に騒音の損害を大きくしており、他方デンマークの海上沖発電はそうした効果がより小さい。サイトに特性的に推計されていることを考慮に入れても指摘されるべき異常値がスペインの風力発電所の0.95mEU/kWhでO & Mのスタッフが移動する距離が長いために起こる職務上の事故によって作り出されたものである。

5. ごみ発電

ごみ発電燃料サイクルは、ごみの集積から、リサイクル・堆肥化・焼却の各工程に分かれたMSW (Municipal Solid Waste) プラントで発電されるまでの過程である。最も重要な負荷は発電段階における大気排出で、MSWプラントが人口集中地域付近に立地されるため影響を受ける受容者数が大きく、これらの大気汚染物質の影響をさらに悪化させている。大気汚染物質の中でもダイオキシンとフランについては、厳しい法律により測定困難な低いレベルにまで押さえられているため、NO_xや煤塵の影響が大きい。発電段階以外では、ごみがプラントまでかなりの距離を運ばれてくるため道路損害や事故も重要なインパクトとして確認されている。また、範囲の限定された負荷として、MSWプラントから至近距離の受容者への騒音と悪臭が挙げられる。

MSWプラントは発電や熱供給のために効率的利用が図られているのではなく、ごみ除去目的であるので、kWhあたりの損害で比較するのではなくごみ処理1tあたりの損害を用いるのが適切である。ミラノとパリのプラントではkWhあたりの損害の結果は異なるが、ごみ1tあたりの損害の結果は近似値である。

6. バイオマス発電

バイオマスの発電プラントの規模は燃料を経済的に輸送する距離の制約から30MWまでと非常に小さい。ほとんど森林残さ燃料を用い、稀にエネルギー作物・製材残さを用いている。スペインのケースでは、森林残さは褐炭とともに混合燃料としている。燃焼段階においてCO₂排出が見られるが、植物の成長過程で固定するCO₂によって相殺されると仮定し、考慮に入れない。同様にSO₂排出は、植物体の硫黄含量微量のため低排出で無視可能程度であるが、スペインにおける実施、エネルギー作物を用いたギリシャのケース、フィンランドのケースなどにおいてはCHP (Combined Heat and Power, 熱併給発電) プラントにおける発電と熱供給における排出物の割り当てが問題となっている。他方、最も重要な排出は、NO_x、VOCs等のオゾン前駆物質である。排出規模は燃料と技術によるため、ガス化や流動床等の新技術によりNO_x削減可能である。上流段階における外部費用には、バイオマスの輸送による道路への損害やバイオマスの伐採による生態系への問題、土壌からの栄養分の損失、土壌浸食等がある。

全般的にかなり低い損害であるが、その中で大きな損害は発電段階におけるNO_xと煤塵の排出によるものである。上流段階においては、主に輸送によって引き起こされる損害で、発電段階よりは小さい。オランダにおける適用では、非常に低い排出原単位が想定されているので上流での損害が大きい。地球温暖化の損害は、CO₂を相殺する特徴により一般的に小さく、唯一デンマークでは相殺されるとして無視した地球温暖化ガスの排出が考慮されたため逆の結果となっている。ここまでのまとめの例外としてスペインのケースが挙げられるが、これはバイオマスと褐炭の混合であり、褐炭により損害がかなり上昇している。

本稿執筆にあたり、西口有希氏(筑波大学)に多大な協力をいただいた。ここに深く謝意を表したい。