

環境影響評価の方法論

Methodology of Environmental Impact Assessment

内山 洋 司*

Yohji Uchiyama

1. 発電システムの外部性とExternE プロジェクト

エネルギーは、現代社会の産業活動と人々の生活を支える上で不可欠な要素である。社会のエネルギー供給には、経済的に豊富な資源の確保、消費者にとって利用しやすいエネルギーサービス、そして人々が安心して受け入れられることのできる安全性や環境性に優れたエネルギー技術の確立が求められている。「入手しやすさ (Accessibility)」、「使いやすさ (Availability)」、「受け入れやすさ (Acceptability)」の3Aは、エネルギー供給における基本要件である。

これら3Aの基本要件を満たすために、エネルギー供給システムには様々な費用が使われているが、まだ現実の価格に反映していない要因もある。燃料サイクルを含めた電力施設について、内部費用と外部費用の状況を3Aに分けて調べてみると次のようになる。

- ①入手しやすさ：燃料供給、発電、および送変配電を含めた電力供給の建設と運転に要する基本的な費用。機能として必要な要素はすべて内部化しているが、燃料途絶への対策、資源探査、新技術の研究開発といった将来の安定供給を脅かす不安要因に対しては、まだ内部化されていないものもある。特に、中東の政治情勢の変化による石油供給の途絶など突発的な事態に備えた外部費用の見積もりが問題となる。
- ②使いやすさ：消費者が使いやすい信頼性の高い電力を供給するために要する費用。具体的には、停電対策や電圧、周波数の安定化などに必要となる費用である。燃料として貯蔵できる化石燃料やウラン燃料を使った発電技術は、大きな費用負担なしで需要家のニーズに合わせて質の高い電気を供給することができる。しかし、水力発電や太陽光発電の場合は、

濁水や気象変化によって供給が不安定となり、信頼性の確保には蓄電池などの費用が必要となる。間欠的にエネルギーを供給する再生可能エネルギーには、長期濁水、あるいは逆に長雨といった異常気象など予期できない事態に対処する外部費用が考えられる。

- ③受け入れやすさ：環境への悪影響や事故を発生させないための費用。外部費用としては、二酸化炭素による温暖化や浮遊粒子状物質による健康被害、あるいは微量の放射性物質による被爆影響、さらに予期できない事故（タンカー事故、原発事故など）が発生した場合の対策費用などがある。一方で、発電所の建設に伴う雇用機会の増大など正の外部性もある。問題となっている発電システムの外部性のほとんどは、発生時には莫大な被害が予想されるものであるが、不確実性が大きく、かつ発生確率の低い要因である。また、外部性の中で燃料供給途絶や重大事故といった要因は、消費者への電力供給を停止する恐れがあるので、「入手のしやすさ」と「受け入れやすさ」は、波及的に「使いやすさ」に影響を与えている。

本報は、不確実性がまだ大きい発電システムの外部性、特に環境影響評価を中心に、既往の研究がどの程度まで進んでいるのかを紹介するものである。紹介する内容は、ヨーロッパ15カ国が参加して国別実施した“ExternE”プロジェクトの概要である。このプロジェクトは、60ケースもの発電システムについて外部性と外部費用を明らかにしたもので、現時点では外部性研究の中で最も豊富な内容となっている。

2. ExternEプロジェクトの環境影響評価

2.1 概要

発電システムの外部性は、環境外部性と非環境外部性に大別できる。

①環境外部性

- ・発生源：大気／水系への放出、廃棄物（放射性物質を含む）、騒音

* 筑波大学機能工学系教授

〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1

表1 発電システムにおける優先度が高い外部性項目

外部性の項目		石炭火力	石油火力	オリマルジョン	天然ガス	原子力	水力	太陽光	風力
大気汚染	健康影響(公衆)	●	●	●	●			●	
	建築素材	●	●	●	●			●	
	穀物	●	●	●	●			●	
	森林	●	●	●	●				
	淡水魚類	●	●	●	●				
	野生生態系	●	●	●	●				
	視界影響								●
温室効果ガス	●	●	●	●	●		●	●	
化学物質								●	
排水	健康影響(職業人)								
	生態系	●	●	●	●				
土地利用	野生生態系		●		●		●		
	農業, 森林, 水資源						●		
放射性物質	健康影響(職業人, 公衆)					●			
	職業人, 公衆影響	●	●	●	●	●			
騒音	健康影響	●	●		●		●		●
	個別特有の影響	● 採掘	●	●	●				

・影響対象：健康，農業／漁業／生態系，建築素材，アメニティ，地球温暖化

②非環境外部性

- ・事故による影響（職業人，一般公衆）
- ・経済的な波及効果
- ・正当な値段がついていない道路等の公共財使用
- ・税金等の政府によるエネルギー産業に対する諸規制
- ・エネルギーセキュリティへの影響
- ・核拡散上のリスク等

環境外部性は、コントロールコスト法や影響経路法などで評価できるが、非環境外部性は不確実性が大きいため客観的かつ定量的な評価が難しい。ここでは、上述の外部性から環境影響評価に関係する要素である大気汚染物質、放射線、地球温暖化を選び、それらについて解説する。紹介するExternEプロジェクトは、ヨーロッパ数カ国における発電システムを対象にして、環境汚染物質の放出を詳細に調べ、可能な限り各々の外部費用を推計したものである。発電システムには、発電だけでなく燃料サイクルに関する主要なプロセス（燃料採掘と処理、輸送、プラント建設、発電、廃棄物処理と処分等）がすべて含まれている。分析方法は、各プロセスから排出される環境負荷に対して、人々

の死亡・健康影響や建築物損傷、あるいは生態系への影響を定量化し、最終的には外部費用を導出するというボトムアップ・アプローチである。表1は、ExternEプロジェクトで評価されている優先度の高い外部性項目を各発電システムについて示したものである。

2.2 大気汚染物質の影響

大気汚染物質の環境影響は、Stuttgart 大学が開発したEcoSence モデルが、ExternEプロジェクトで共通に利用されている。このモデルは、環境影響を分析する様々なモデルを1つのシステムとして統合したもので、13種類の大気汚染物質による健康、穀物、建設素材、森林資源、および生態系に対する環境影響および外部費用を評価するものである（図1）。また、周辺および広域地域の環境影響をエネルギー供給施設のサイト毎の環境負荷データによって分析でき、対象とする地域における標準的な外部費用が算出できるといった特徴がある。ただし、重大事故、地球温暖化および放射性物質の影響は含まれていない。

モデルの基本構成は、影響経路法、線量応答関数、損害関数、および価値付けによる外部費用の算出から成っている。すなわち、標準的な拡散方程式や化学反応式によって環境影響をモデル化し、線量応答関数に

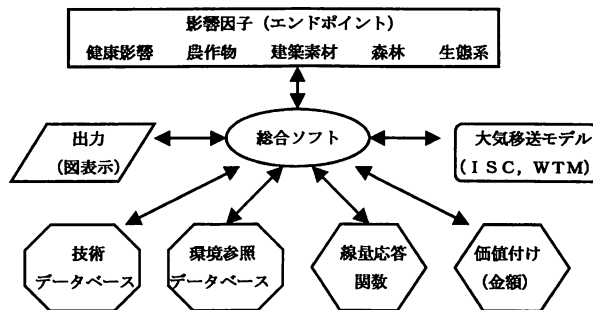


図1 EcoSenceモデルの枠組み

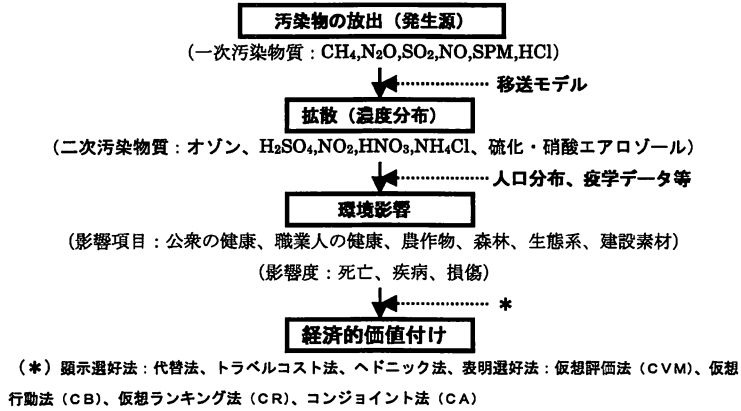


図2 影響経路法の概要

よりそれぞれの影響度を定量化し、さらに損害関数等により金額として価値付けしている。これらに必要となる一連の手法とデータベースが構築されている。発電システムの各プロセスから排出される大気汚染物質は、影響経路法 (Impact Pathway Method) によって分析されている (図2)。

発電システムから放出される大気汚染物質の大半は、発電所の煙突からのものである。大気汚染物質は、風によって運ばれて拡散し、地上に落ちるまでに大気中の濃度は減衰していく。発電所の煙突から放出される汚染物質は、地上百数十メートルの高さから放出するために、自動車や家庭といった地表面から排出される汚染物質とは挙動が異なっている。その移送モデルは、化学特性の違いによって大きく3つに分類できる。

①直接影響を及ぼす化学的に安定した浮遊粒子状物質 (SPM) と二酸化硫黄

発電所に近い10~50kmの範囲では、大気中の化学反応は主要な汚染物質 (NOとその酸化物NO₂はNO_xとして要約されている) の濃度にほとんど影響を与えない。高い発電所の煙突から排出される高さによって、煙突に近い所でのこれら主要な汚染物質の地表大気中濃度は、垂直方向で実際に交換される大気の状態に大きく依存する。

大気中での拡散式の基礎となるのは、フィックの法則である。拡散は地面に対し鉛直方向、水平方向、流れ方向におこり、拡散係数の値もそれぞれの方向と位置により異なる。これを考慮すると基礎式の一般形は偏微分方程式となり、解は複雑なものになる。ガウス拡散モデルは、点源としての連続的な排出物質が地域的に広がっていく濃度を見積もるのによく使われている。風下、水平、鉛直方向にそれぞれ座標をx, y, z

ととり、拡散係数はy, z方向のみを考え一定値として解を求めると、xのある点における濃度分布は、分布の様相をガウス分布とみなし、拡散係数の代わりに標準偏差 (拡散幅) を用いて表すことができる。大気に連続的に放出される汚染物質の地表面における濃度分布は、以下の式で表わされる。

$$c = Q / (2 \pi u \sigma_y \sigma_z) \cdot \exp(-y^2 / \sigma_y^2) \cdot \exp(-h^2 / 2 \sigma_z^2)$$

ここで、c: 大気中の濃度, Q: 排出速度[m³/s], u: 風速[m/s], h: 煙突高さ [m], σ_y : 風方向断面の標準偏差, σ_z : 垂直方向の標準偏差

②酸性雨によって影響を及ぼす二次汚染物質

発電所からの距離が離れるにつれ、汚染物質は大気の乱れで垂直かつ水平方向に広がっていく。周辺地域の外 (煙突から50kmを越えた距離) では、汚染物質は一般に大気混合層の高さによって垂直に混合されると仮定できる。対照的に、化学的成分置換 (chemical transformation) と析出過程は、この地域規模ではもはや無視できることになる。広域的な汚染を評価する効率的な方法は、化学反応についての詳細な記述はないが輸送を単純に表現したモデルである。

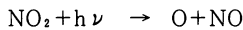
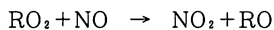
オゾンを除く広域影響のある主な物質は、SO₂やNO_xによって形成されている酸化汚染物質である。酸化物質の沈着モデルは、汚染物質の排出、拡散、地球規模での大気輸送、化学的成分置換と乾・湿沈着過程とった発生源とレセプタとの間の複雑な過程を定式化している。ExternEプロジェクトで使っているモデルは、Harwell Trajectory Modelである。このモデルは、元々、DerwentとNodop (1986) が大気中の窒素化合物に対して検討したレセプタ・オリエンテッドなラグランジュ型プルームモデルである。

③太陽光によるオゾン生成

火力発電所の排出物が原因で発生するオゾン生成は、最も複雑なモデルである。オゾン生成の複雑な過程に対して100前後の化学反応式を用いた研究もある。光化学現象は、様々な汚染物質とその時の気候条件によって影響の大きさが異なる。最も影響の大きい要因として以下に示すものがある。

- ・化学反応を惹き起こす太陽光線
- ・拡散を抑える低風速（0-5 m/s）
- ・発生源を蓄積する制限された境界層深さ
- ・炭水化物の蒸発排出物を高め、化学反応を促進する高温空気温度（20℃以上）

オゾンの化学的生成を大まかに見ると、NO_x、炭水素類（RH）、温度、紫外線が大きく関与している。その生成の主なルートは、NOをNO₂に変換するプロセスである。



ここで、気温が高いほど反応が活発になり、さらに紫外線により促進される。RHは、NO、NO₂の酸化によるオゾン生成に関与するだけでなく、有機過酸化ラジカルとなって、それ以外の経路でも反応に関与している。その結果、オゾンの消費なしにNO₂が生成されるようになってオゾンの濃度が高まっていく。

影響経路法で拡散した汚染物質がレセプタに与える影響の大きさは、線量（暴露）応答関数と損害関数によって見積られる。レセプタには、農作物、建築素材、森林、生態系、および健康影響がある。その中で健康に与える影響は、呼吸機能障害、生体化学変化、空気伝染による感染症などのメカニズムを考慮した気管支炎、喘息、咳などの症状が発生する割合を推計し、最終的には罹患率と死亡率を求めて評価されることになる。評価された被害は、生命の統計的価値、社会活動が制限される価値、喘息日数の価値など経済的な価値付けによって金額で表わされる。損害費用の結果は、被害を受ける地域の人口密度によって大きく影響される。

2.3 放射性核種の健康影響

放射性物質には半減期の長いものがあるため、様々な経路によって人間への健康に影響を与える可能性がある。発電および関連施設から環境へ放出される放射性物質は、気体、液体、固体のいずれかの状態が考えられる。気体で放出された放射性核種の人間への健康

影響は、空気を介する場合、一旦、地上に堆積して水を介した場合、また農作物・魚介類を介した場合が考えられる。液体で排出される放射線核種は、河川、地下水、海の中で拡散され魚や海産物、農作物を介して人間に摂取される。人間への健康影響は、他の汚染物質の影響経路にも見られる食物連鎖によるものである。固体廃棄物は、土壌に排出されたものが外部被曝として影響を及ぼすものと、農作物を介して影響を与えるものがある。

放射線による健康影響は、確定的影響と、確率的影響の2つに分けられる。確定的影響は、ある一定のしきい値以上で起きる健康影響である（例えば、白内障など約1 Svの被曝で起きる）。影響は、被曝線量が大きいほど深刻になり、その度合いはシグモイド線量応答関数で表される。

しきい値以下での影響は、確率的影響の範疇となる。しきい値以下の線量では放射線による確定的な影響は現在までのところみられていない。確率的影響では、放射線量は影響の深刻さに関係しない。ガンは、確率的影響の一つの例である。線量レベルは、病気発生確率に影響する。しきい値以下の線量が影響を及ぼさないかどうかは不明のため、慣例としてしきい値は存在せず、線量応答関数も直線的であると仮定している。

2.4 地球温暖化影響

研究の対象となった温室効果ガスは、CO₂、メタン、N₂Oである。NO_xは、大気中におけるメタンの寿命を短くし、OHラジカル濃度を高めて、グローバルな冷却効果をもたらすといわれているが、この効果を定量化する方法はまだない。SO₂は温室効果ガスではないが、それは硫化エアゾールを生成する役割がある。エアゾールは太陽光線を反射するため、それによって冷却効果があるが、エアゾールによる太陽光線の変化はまだ正確には観測されていない。NO_xとSO₂による温暖化影響は、不確実性が大きいためにExternEの研究では検討していない。

排出される温室効果ガスが影響を与える温暖化は、気候モデルの既存パッケージソフトであるSTUGEモデル（Houghton et. al., 1990, Wigley et al., 1991）を最初の100年間について、それ以降はスプレッドシート法によって解析している。STUGEモデルは、元々IPCCにおいて気候変動を科学的に解明するために開発されたもので、炭素循環モデルと海洋モデルとを結びつけることで、赤外線放射の時間変化を考慮した気温変化が推計できる特徴を有している。炭素循環

モデルでは、過去のCO₂排出量であるバックグラウンドに依存しており、それは大気濃度、赤外線放射、気温の変化に大きな影響を与えている。バックグラウンドは、IPCCが設定したCO₂排出量を1990年の数値に維持する「一定排出」シナリオに設定している。バックグラウンドに対して、CO₂排出量の増分が常に一定となるシナリオを別途設定し、両者の差から増分排出量の影響が計算できることになる。

スプレッドシート法は、放出される温室効果ガスであるCO₂、CH₄、N₂Oの崩壊速度と海洋吸収から大気中濃度を推計し、各温室効果ガスの赤外線吸収能力と輻射の熱平衡の関係式から気温の上昇温度を求めるものである。スプレッドシート法の最も大きな欠点は、上昇温度を求める際にグローバルな温度変化を遅らせる海洋の効果を考慮していないことである。STUGE法とスプレッドシート法の結果の違いについて調べると、100年後の場合で見ると、気温はスプレッドシート法が約25%大きくなっている。

温室効果ガスの影響は、地球規模であるため排出源の地域性を考慮する必要はない。しかし、地球温暖化による影響とみなされているグローバルな温度上昇と地域気候変化は、長期にわたる様々な要因によって複雑化しており不確実性が大きいため、被害を具体化していくことが難しい。ExternE計画では、地球温暖化による被害の値を主に文献レビューによって分析している。

文献レビューは、対象とする発電所から排出される温室効果ガスの大気中濃度から気温上昇を評価し、その気候変化による被害額を既存文献（Cline, 1992; Fankhauser, 1993; Hohmeyer and Gartner, 1992; Tol, 1995）から推計するものである。既往の研究は、CO₂濃度が産業革命以前の2倍になったときの被害額を推計しており、第一次近似での評価によると、世界の総生産額の1~3%とみなされている（Cline, 1992, Fankhauser, 1993）。しかし、ExternEの研究で、最近、同じような分析を行なった結果（Tol, 1995）、その影響はもう少し大きくなっている。これらの見積りで最も議論のあるところは、人口規模での健康と福祉に対する影響である。事実、シナリオや分析の仮定によっては外部費用の値が文献値よりも数桁も大きくなる。特に、開発途上国では、穀物の不作や干ばつが死亡率に最も大きな影響を与えており、シナリオによっては際立った結果となってしまう。

個々の影響を統合化するモデルによる分析が、影響経路手法を使って最近、行なわれつつある。1つはアムステルダムのVrije大学のTolの開発したFUND法で、もう1つは英国Oxford大学のDowningが開発したOpen Framework法である。両者の計算モデルによる分析結果の違いを表2に示す。

表2 計算モデルによる温室効果ガスの温暖化外部費用の違い

温室効果ガス	FUND	Open Framework
CO ₂	170ECU/t-C	160ECU/t-C
CH ₄	520ECU/t-CH ₄	400ECU/t-CH ₄
N ₂ O	17,000ECU/t-N ₂ O	26,000ECU/t-N ₂ O

条件：割引率1%、IPCC IS92aシナリオ、1995~2005年までのガス放出2100年までの損害を計算

両者の数値は、よく一致しているが、もともと前提において大きな違いがあり、偶然の一致と評価されている。数値に影響を与える要因として割引率の影響が最も大きく、95%の信頼度で評価すると、温暖化の外部コストは割引率5%の最小値で14（ECU/t-C）、割引率1%の最大値で510（ECU/t-C）の値となる。

3. おわりに

ExternEの環境影響評価は、発電システムの環境影響と外部費用をサイト毎のプロセス技術について分析できる点に特徴がある。しかし、推計は、独自の手法やデータによるものではなく、すべてが他の文献からの引用である。このため、検討項目が不十分であるだけでなく、線量応答に対するサイト固有性、非線形性、しきい値の有無といった実際の状況やデータが正確に反映されていないといった問題が残されている。環境問題の高まりの中で、わが国においても外部性の研究は次第に重要になっていくものと思われるが、わが国に適用する場合、電源構成とエネルギー供給構造、環境規制、臨海性、気象条件、人口密度など欧州との違いを整理して検討していく必要がある。