

総論：エネルギー外部性研究の概要

Overview of Study on Externalities of Energy

伊 東 慶 四 郎*

Keishiro Ito

1. 転換期を迎えた外部性研究

近年、エネルギーシステムの外部費用、なかでも発電のそれが、様々な角度から注目を集め始めてきている。それは、近年の環境関連諸科学の進歩や経験の蓄積により、エネルギー利用が、人の健康、自然生態系及び人工環境を含む広範な受容体に様々な損害を引き起こすものであることが、次第に明らかになってきたからである。しかも、これらの損害の多くが、商品の市場価格に反映されていない外部費用であり、それが各国の環境政策や競争政策の決定過程に、また社会的な選択の過程に適切な形で反映されていないのではないかと、との懸念が高まってきたからである。また、このような動向を背景にして、わが国でも電力市場の自由化、環境税や排出権取引等の導入支援、エネルギー・環境規制の政策評価等の様々な分野でエネルギー外部性に対する関心が急速に高まってきたからである。

しかし、この問題に立ち入るにあたって歴史的に留意しておくべき点がある。それはこの問題が、ビッグの外部不経済論などエネルギー・環境政策の原点ともいえる重要な課題でありながら、その計測の困難さ故に、過去数十年もの長きにわたって保留され続けてきた課題であるという点である。それが、近年の欧州連合のエネルギー外部性“ExternE: Externalities of Energy”研究(1991-98)¹⁾において、また米国環境保護庁の修正大気浄化法1990に基づく環境規制の費用便益分析(1997, 1999)²⁾等において、何故、計測可能になってきたのであろうか。それは、かつて環境影響の解析や損害の価値付けを阻んできた科学的知識の欠落や不確実性の壁が、近年の情報処理技術の飛躍的進歩を背景とした、種々の環境影響解析モデルの開発やデータベースの整備、低濃度域の曝露・応答関数

の決定に必要な膨大な疫学研究成果の長期的蓄積や広範な関連諸科学の進歩、及び統計的生命的価値や環境資産等の価値付けに係わる理論や手法の発展等により、次第に克服可能となってきたからである(本特集の関連稿参照)。また、東西冷戦の終焉期を迎え、従来看過されがちであった広域・複合型大気汚染の健康被害、発電システムに関する様々な重大事故、及びオゾン層の消滅や気候変動などの地球規模の環境問題が、国際政治の表舞台でも取り上げられるようになり、エネルギー外部性、なかでも人の命や健康、農林漁業、自然生態系等に及ぼす影響の評価に向けた社会的ニーズが急速に高まってきたからである。

本稿では、以下、このような歴史的転換期を迎えた外部性研究の現状を踏まえつつ、まずこの研究の歴史的背景や欧州連合における“ExternE”研究のスコップを紹介する。そして、この研究において得られた発電用燃料サイクルの外部費用試算結果とその特徴や問題点を概括した後、わが国における外部性研究の今後の推進面からみた政策的示唆を提示し、各界における今後の外部性研究展開の一助としたい。

2. エネルギー外部性研究の歴史的背景

2.1 広域複合汚染と科学的立証の困難さ

大気汚染問題が、典型的な外部性問題の一つとして、OECD主要国で共通の政治的争点になり始めたのは1960年代である。それは、工業化・都市化の進展と大量消費社会への移行に伴い、これら諸国における化石燃料消費量と大気汚染物質排出量が急激に増加し、深刻な健康被害の発生や大気汚染の差し止め訴訟(わが国では四日市・川崎・尼崎等)が頻発したからである。この結果、1970年頃、米国では国家環境政策法が制定され、わが国では環境政策法体系の整備が図られた。また、1972年には国際的な環境倫理や越境汚染に対する国際法整備を訴えた国連人間環境会議の「人間環境宣言」が、1974年にはOECDから「汚染者支払原則

* 助政策科学研究所 エネルギー・環境政策担当首席研究員
〒100-0014 東京都千代田区永田町2-4-8

東芝EMI永田町ビル5 F

の実施に関する理事会勧告」が出されるにいたった。この勧告は、その生産ないし消費の過程において汚染を引き起こす財やサービスの価格に、「公的機関により定められた受忍可能な状態に環境を保つ」上で必要な諸措置の実施費用を反映させることにより、環境資源の合理的利用と国際経済の適切な競争秩序の維持を両立させようとしたものである。この結果、OECD諸国の大気汚染状況は次第に改善されるにいたった。しかし、この勧告は、反面、各国の政治経済的調整の産物としての「受忍可能な状態に環境を保つ上での環境基準や排出基準」に抵触しない限り、汚染負荷は相当量排出しても構わないことを示唆した（例えば、超高層煙突による広域・越境拡散、無数の移動排出源による汚染負荷など）。その結果、比較的低濃度ではあるが広域の複合大気汚染の進行をとどめることができず、欧米のような大陸国家（中国も同様）、特に米国においては問題が深刻化し、慢性疾患を主体とした膨大な健康被害の発生を招くこととなった^{2,3)}。そして、このような事態の進行を許した背景要因として指摘されるのが、広域の低濃度・複合汚染による健康影響に関する科学的立証が、当時の時点では著しく困難であった点である。

2.2 O. Hohmeyer らの先駆的研究とその問題点

一方、中東戦争を引き金とした石油危機の発生（1973）は、エネルギー安全保障とコスト競争力の両面から主要国に原子力発電の導入を促した。だが、TMI原発の炉心溶融事故（1979）や体制災害としてのチェルノブイリ原発事故（1986）の発生は、重大事故を最大の外部性要因としてクローズ・アップし、原子力の平和利用に複雑な影を投げかけるにいたった。特に、ドイツのO. Hohmeyer らがチェルノブイリ原発事故の2年後に刊行した「エネルギー消費の社会的費用」⁴⁾は、次の点で衝撃的なものであった。それは、まず、この研究の基本スタンスが、論理的には正当なピグーの外部不経済論の見地、すなわち深刻な市場の欠陥により相当の社会的費用が発生し、資源の最適配分が保証されないような場合には、政府は適切な政策手段によりそのような費用を内部化すべく市場メカニズムを正さなければならない、との観点に立っていたこと、そして、この研究の成果が、従来困難とされてきた発電システムの外部費用を系統的に推計した最初の重要な試みの一つであったからである。一方、この研究で実際に適用された外部費用の推計手法は、具体的な技術的諸条件やサイト条件の違いを捨象し、

しかもアプリアリな枠組みや粗い仮定のもとで、極めて過大な、あるいは過小な推計を恣意的に行い、社会や政策決定者の判断を決定的に誤らせかねないような結論を導き出していたからである（本特集の重大事故の稿参照）。

これらの点は、欧州委員会が、米国エネルギー省の協力も得つつ、様々な発電用燃料サイクルの外部費用推計手法の組織的な研究開発の立ち上げを迫られるに至った主な背景要因であるといえる。なお、米国では、その前年、修正大気浄化法1990において、環境規制の費用便益分析の実施とその議会への報告が、環境保護庁に対し制度的に義務付けられていた。

3. “ExternE” 研究の目的と範囲

欧州委員会は、“ExternE” 研究を、1991～97年の7ヶ年、3期にわたって展開した。第Ⅰ期（91～92）は、欧州委員会と米国エネルギー省の共同研究として、環境影響の解析や価値付け手法など発電システムの外部費用計測方法論の開発やデータベースの整備に重点がおかれた。その後、“ExternE” 研究は、欧州連合設立条約、欧州委員会の白書「成長、競争力、雇用及び21世紀への進路」や第5次環境行動計画「持続可能性に向けて」等における明確な位置づけのもとで推進されることになった⁵⁾。この第Ⅱ期（93～95）には、主な発電方式（石炭と褐炭、石油、ガス、原子力、水力、風力）を対象とした方法論の継続開発と適用可能性の実証研究が行われた。そして第Ⅲ期（96～97）には、欧州15ヶ国から50以上のチームが参加し、方法論の拡張検討と“ExternE”の方法論の「国別実施」⁶⁾が行われ、各国や欧州連合における現実の政策形成の支援に役立てられる段階に入った¹⁾。

3.1 “ExternE” 研究の目的

この“ExternE”研究の目的は、概ね、以下の3点にある。第1は、大気汚染物質、温室効果ガス、放射性物質等の環境影響の解析とその価値付けに必要な統合的な方法論や解析手法の開発、曝露・応答関数の系統的な整備、及び広域の環境データベースの構築である。これは従来計測が困難であるとされてきた限界外部費用の定量化を目指したものである。第2は、様々な発電システム増設時の外部費用評価にこの方法論を適用し、社会の適切な意思形成の支援に役立つ資料を提供する点である。この点は、米国の下院科学委員会が“Unlocking Our Future : Towards a New Science Policy”（1998）において打ち出した安全・

健康・経済に続く科学の第4の役割—社会の適切な意思決定の支援—に関するものである。第3は、費用便益分析など政策選択への外部費用の内部化や政策手段の最適化の支援である。

3.2 “ExternE” 研究の範囲—壮大なスコープ

欧州委員会が、米国エネルギー省の協力も得つつ、“ExternE” 研究に7ヶ年もの歳月を要した理由は、研究対象領域や解析・評価方法論からみたその俯瞰性、統合性、先端性、不確実性、広域性、長期性など、従来、前例をみないようなスコープの大きさによって、それは、第1に、現状及び近い将来の主要発電システムの全プロセスがその対象とされたこと、第2に、大気汚染物質に関しては、欧州連合全域を対象とした拡散・反応・移送等の広域解析モデルの研究開発が求められたこと、第3に、様々な環境負荷の健康影響に関して長期にわたる疫学研究や先端的な基礎医学研究もそのレビュー対象に含まれていたこと、第4に、様々な環境負荷の人工環境や自然環境への影響に関して広範な環境関連諸科学の先端的成果がそのレビュー対象に含まれていたこと、第5に、人の健康・農作物・建築材料・森林等に関する曝露・応答関数の設定、及び地域気象を含む多岐にわたる広域的な環境データベースの構築が求められたこと、第6に、重大事故の評価、特に原子力のそれに関しては、個別の事故事象の影響解析や確率論的リスク評価に留まらない新たな評価方法論の検討が求められたこと、第7に、気候変動問題など予防原理に基づくグローバルで不確実なリスクの影響解析と独自の価値付けが求められたこと、第8に、健康損害や環境損害の価値付けにあたっては、統計的

生命の価値や環境資産の価値など、新たな経済的価値付け理論や手法のレビューとその体系化が求められたこと、等によっている。

4. “ExternE” における外部費用試算結果

“ExternE” の国別実施プロジェクト（1996-97）には15ヶ国が参加し、60ケースを超える適用研究が行われた。これには次の12の発電システム—①化石燃料：石炭・褐炭・ピート・石油・オリマルジョン・天然ガス、②原子燃料：軽水炉（PWR）、③再生可能エネルギー：バイオマス・水力・風力・太陽光（PV）、④その他：都市ゴミ発電、が含まれる¹⁾。ここで各国が取り上げた電源は、発電技術や公害防止技術面で非常に幅があるのみならず、立地面でも欧州大陸の中央部と周縁、都市部と農村部などの違いがあるため、その外部費用は、結果的に著しく異なったものとなっている（表1）。

ちなみに、人口分布等の地理的要因の違いが排出NOx1トン当たりの損害（損失余命の価値基準）に与える影響（石炭・ガス火力の場合）を見てみると、大陸周縁の英国が約5,800ECUであるの対し、大陸中央部のドイツでは約13,500ECUと英国の2.3倍にも達している^{7,8)}。また、各国の電力システム全体の外部費用が各国のGDPに占める比率も、西独0.7-1.2%（1990）、東独27-30%（1990）、英国1.9-2.4%（1995）、フランス0.5-0.6%（1995）で、国によって大きく異なっている⁶⁾。

ここでは、多排出源EcoSenseモデルを駆使して国別実施研究に最も力を入れた英国の試算例（図1、表

表1 “ExternE” における発電用燃料サイクルの損害試算結果（mECU/kWh）

国名	石炭 褐炭	泥炭	石油 オリマル ジョン	ガス	原子力	バイオマス	水力	太陽光 PV	風力	都市ゴミ (ECU/t- waste)
オーストリア				11-26		24-25	0.04**			
ベルギー	37-150			11-22	4.0-4.7					
ドイツ	30-55		51-78	12-23	4.4-7.0	28-29		1.4-3.3	0.5-0.6	
デンマーク	35-65			15-30		12-14			0.9-1.6	
スペイン	48-77			11-22		29-52*			1.8-1.9	(15-24)
フィンランド	20-44	23-51				8-11				
フランス	69-99		84-109	24-35	2.5	6-7	6			(67-92)
ギリシャ	46-84		26-48	7-13		1-8	5.1		2.4-2.6	
イタリー			34-56	15-27			3.4			(46-77)
オランダ	28-42			5-19	7.4	4-5				
ノルウェー				8-19		2.4	2.3		0.5-2.5	
ポルトガル	42-67			8-21		14-18	0.3			
スウェーデン	18-42					2.7-3	0.04-7			
イギリス	42-67		29-47	11-22	2.4-2.7	5.3-5.7			1.3-1.5	
			31-52***							

*: 褐炭と混焼されたバイオマス **: 便益(0.78-8.3mECU/kWh)を含まず ***: オリマルジョン
出典) European Commission: ExternE: Externalities of Energy. Vol.10 National Implementation, (1999), 6.

表2 発電用燃料サイクルの外部費用試算結果(英国)

項目	石炭	石油	オリマルジョン	ガス	原子力	風力	バイオマス
公衆の健康	23.50	19.80	17.30	3.30	2.08	0.78	4.70
職業人の健康	0.85	0.26	0.01	0.10	0.10	0.26	0.01
農作物	0.79	0.28	0.44	0.16	0.00	0.00	0.15
建築材料	0.65	0.41	0.34	0.03	0.00	0.00	0.02
騒音	0.15	0.15	0.15	0.03	0.00	0.07	0.10
地球温暖化*	28.70	20.90	23.60	12.90	0.37	0.25	0.49
その他	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq
小計	54.6	41.8	41.8	16.5	2.55	1.36	5.47

*: 割引率3%ケースと1%ケースの値の中央値、 nq: 定量化されず

出典) J E Berry et al.; Power Generation and the Environment—a UK Perspective, (1998), AEA Technology.

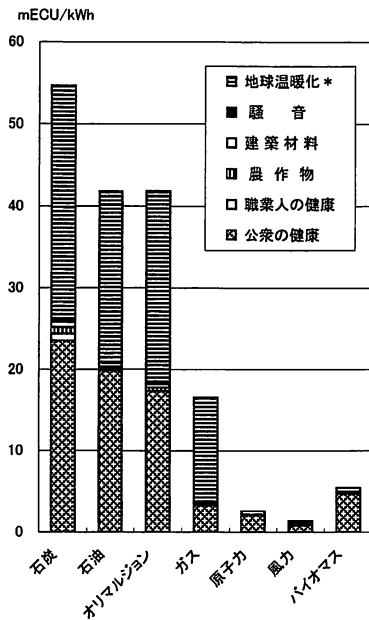


図1 燃料サイクル別外部コストの比較(英国)

2)を取り上げ、各発電システムの外部費用の水準や構成がいかなるものか、またその問題点は何か、を明らかにして今後の外部性研究の一助としたい、

①まず、外部費用の集計費目であるが、公衆の健康、職業人の健康、農作物、建築材料、騒音、地球温暖化、その他の7つに区分されている。そして将来の損害の現在価値への割引条件としては、地球温暖化の場合、割引率3%ケースと1%ケースの中央値が、また放射線による公衆の健康損害(評価期間1万年)の場合、割引率0%の値が採用されている⁷⁾。ここで後者の割引率0%は、経済学的判断と言うより倫理的な選好によっており、今後見直しを要する点の一つである。

②石炭と石油の発電システムの外部コスト(55&42m ECU/kWh)は、英国における電気事業の発電コスト(30~45m ECU/kWh)⁷⁾と同等か、やや上回るほど大きい。また、これらの電源の外部コストは、大

気汚染によるものと地球温暖化によるものとがほぼ同等である。これらの外部コストを全面的に内部化した場合、これらの電源は競争力を失い急速にフェーズアウトされる。これは、米国DOE/EIAの下院科学委員会報告(1998)⁹⁾が、米国では炭素排出権取引価格の内部化のみで同様の事態が発生すると指摘している点も考慮すると、確度の高い見通しであるといえる。

③天然ガス発電システム(CCGT)の外部コストは、16.5m ECU/kWh(石炭の30%)で、この内、地球温暖化損害が78%、公衆の健康損害が20%を占めている。この内、大気汚染による健康損害は、主にPM2.5(硫酸塩、硝酸塩等)やオゾンといった二次生成物質によっている。この外部コストを全面的に内部化した場合、英国の天然ガス発電費用は、概ね、4割前後上昇するものと想定される。なお、地球温暖化損害の割引率1%及び3%時の外部コストは、それぞれ22及び11m ECU/kWhである。

④原子力発電システムの外部コストは、2.55m ECU/kWh(石炭の4.7%)で、この内、公衆の健康損害が81%、職業人の同損害が4%、気候変動損害が14%を占めている。ここで公衆の健康損害2.08m ECU/kWh(評価期間1万年、割引率0%)の92%は、通常運用時のウランの採掘・精錬段階において排出されるラドンによっている。この損害は割引率3%の場合、約1/400の0.005m ECU/kWhに急減し⁷⁾、全外部コストも0.5 m ECU/kWhとなる。なお、英国は重大事故の外部費用を試算していない。従って、この点に関しては、確率論的リスク評価に基づくドイツの試算結果0.0034m ECU/kWh(割引率0%)⁸⁾等を参照しつつ、別途検討を深める必要がある。

⑤バイオマス発電システムの外部コストは、5.47m ECU/kWh(石炭の10%)で、公衆の健康損害が86%、農作物の損害が3%、地球温暖化損害が9%を占めている。地球温暖化損害は再生可能燃料であるため

少ないが、公衆の健康損害は比較的大きい。これは、今後実用化が期待されているガス化複合発電システム（8 MW）の採用に伴い、その環境影響がクリーンな天然ガス複合火力をかなり上回らざるを得ないからである。

⑥風力発電の外部コストは、1.36mECU/kWh（石炭の2.5%）で、この内、公衆の健康損害が57%、職業人の同損害が19%、地球温暖化損害が18%を占めている。なお、風力発電や太陽光発電等については、外部費用評価の歴史が浅いため、今後、さらなる評価事例の蓄積が期待される。

5. わが国への政策的示唆—今後の研究推進の方向

エネルギー外部性研究は、欧米では90年代前半に制度的に位置づけられ、各国の環境政策や競争政策の適正化など現実の政策形成に役立てられる段階に入っている。またこのような動向を背景にして、わが国でもその位置づけや内部化に向けた研究ニーズが様々な分野で高まりつつある。それは、第1に社会的意思形成の支援分野、なかでも様々な技術の社会的選択過程への環境上の配慮の組み込み、第2に電力市場の自由化分野、なかでも各発電システムの外部費用の内部化により電源間競争の公正性を担保すべき分野、第3に経済的手段の導入支援分野、なかでも大気汚染物質や温室効果ガスの排出低減に向けた環境税や排出権取引等の導入支援分野、第4に政策評価分野、なかでも環境・安全規制やエネルギーセキュリティ政策に関する費用便益分析作業の支援分野、最後に、異時点間外部性分野、なかでも世代間公平性に配慮した持続可能なエネルギー利用の実現分野、などである。ここでは、今後わが国でこのような研究ニーズへの対応を図っていく上で検討を深めていくことが望まれる主要課題を、以下に整理し提言する。

5.1 持続可能な発展に向けた外部性概念枠組みの再定義—第2段階の“ExternE”研究の展開

21世紀におけるわが国のエネルギー安全保障や国際社会の持続可能な発展等の要請に的確に答えていくためには、環境外部性のみならず異時点間外部性や公共政策の役割をも明確に位置づけた、外部性概念の再定義作業を押し進めていくことが必要となる。ここで異時点間外部性とは、現世代の行動が将来世代の行動に影響を与えることをいい、その狙いは、気候変動リスク、原子力バックエンド、持続不能な資源利用等の負

の外部性を包括的に取り扱う新たな概念枠組みや価値規範を創設する点にある。この概念枠組みの再定義作業は、第2段階の“ExternE”研究展開の学術的な基礎作業として位置づけられる。

また、この作業と並行して、外部費用の内部化方策についても、多様で創意性にあふれた対応を包摂するような新たな概念枠組みの形成が期待される。ここでは、自己責任原則を基本とした当事者間での対処方策、政府による課税・補助金、政府による規制等の外部性内部化最適ミックスの新たな枠組みの探求とその実現可能性の評価が課題となる。

5.2 環境外部費用計測上の重点研究開発課題

今後、わが国においてエネルギー外部費用の計測を可能とするためには、以下の点に重点をおいて研究開発を進めていくことが望まれる。

- 大気汚染の広域的な影響解析：広域の環境データベースの構築と適用モデルの開発・運用
- 気候変動損害の検討：多元的なシナリオ分析による地域別損害の推計と不確実性分析
- 放射線影響や原子力重大事故の評価：低線量放射線影響に関する基礎研究の推進、多元的なシナリオ分析に基づく共進化的な社会的評価枠組みの創出
- 統計的生命の価値や環境資産等の価値付け：欧米の研究成果のレビューと変換転利用、わが国におけるオリジナルな価値付け研究の継続的展開と知識ベースの構築

5.3 産業界、学会及び政府の相補的な研究推進枠組みの確立

エネルギー外部性研究は、その附随性、統合性、先端性、不確実性、広域性、長期性など、わが国の従来行政・社会体質とは、どちらかといえば馴染みにくい性格を有している。従って、今後、わが国で外部性研究を根付かせていくには、以下に示すような相補的な研究推進枠組みの確立を図り、社会全体として創発的かつ効果的な研究環境が醸成されるよう努めていくことが望まれる。

- 電気事業等民間レベルでのネットワーク型研究推進枠組みや評価委員会の創設
- 関係学会や学術会議等における外部性研究連絡会の組織化と多角的な学術研究の推進
- 政府の主要研究機関との重点課題に関する補完的な研究協力体制の確立
- 内閣府レベルでのエネルギー外部性研究推進枠組みの確立

参考文献

- 1) <http://externe.jrc.es/infos.htm>
- 2) US-EPA ; Final Report to Congress on Benefits and Costs of the Clean Air Act, 1970 to 1990, (1997) and 1990 to 2010, (1999).
- 3) Richard Rhodes and Denis Beller ; The Need for Nuclear Power, Foreign Affairs, 79- 1 (2000), 32.
- 4) O. Hohmeyer ; Social Costs of Energy Consumption, (1988), Springer-Verlag.
- 5) European Commission ; ExternE : Externalities of Energy, Vol. 2 Methodology, (1995), 1.
- 6) European Commission ; ExternE : Externalities of Energy, Vol. 10 National Implementation, (1999), 6, 8, 126.
- 7) J E Berry et al.; Power Generation and the Environment- a UK Perspective, Vol. 1, (June 1998), 41, 102, 135, 169, AEA Technology.
- 8) Wolfram Krewitt et al.; ExternE National Implementation Germany, Nov. 1997, 34, 126, University of Stuttgart IER.
- 9) US-DOE/EIA ; Impacts of the Kyoto Protocol on U. S. Energy Markets and Economic Activity, (Oct. 1998).

共催行事ごあんない

「第38回日本伝熱シンポジウム研究発表募集」

主 催 日本伝熱学会

開催日 平成13年5月13日(水)~25日(金)

会場 大宮ソニックシティ (埼玉県大宮市桜木町1-7-5)

申込締切 平成13年1月初旬予定

申込方法 ホームページ (<http://ht.t.u-tokyo.ac.jp>) にある研究発表申込ページをご利用頂くか、所定の研究発表申込用紙等をご請求下さい。

連絡先 〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16

東京農工大学工学部 機械システム工学科内

第38回日本伝熱シンポジウム実行委員会 委員長 望月貞成

Tel & Fax : 0423-88-7088

E-mail : motizuki@cc.tuat.ac.jp