

重大事故リスクの評価

A Review of Severe Accident Assessment

川 島 啓*

Kei Kawashima

はじめに

原子力発電の外部費用評価の上で最も難しい問題の一つは、重大事故リスクの評価付けである。国際原子力事象評価尺度 (INES) に従えば、外部環境や公衆健康に影響を及ぼす原子力発電システムの事故事象とは、第一に放射性核種の大量の外部放出、第二に設備 (原子炉等) の重大な損傷、従業員の被曝によって定義づけられる。放射性核種の外部放出という観点から見た場合には、1995年の旧動燃もんじゅナトリウム漏洩事故はここで定義する事故事象の範疇には含まれない。INESの定義する重大事故とは、ヨウ素131等価で数万テラベクレル相当以上の放射性物質の外部放出、その結果として過酷な健康影響、環境影響を引き起こすレベル7に該当し、1986年のチェルノブイリ原発事故だけが事例として挙げられるのみである。また、1979年のスリーマイルアイランド (TMI) 炉心損傷事故はレベル5に該当するものとされている。

重大事故が一度発生すれば、その影響は非常に重大かつ広範囲にわたり、多大な損害を与えることになる。例えばレベル5のTMI事故時において、現実に支払われた損害賠償額の支払総額は1999年2月時点で約7,000万ドル (1ドル105円換算で約74億円)、支払が約束されている準備金が約4,000万ドル (約42億円)、合計約1億1千万ドル (約116億円) となっている¹⁾。TMI事故の場合は半径25マイル (約40km) を対象とした逸失利益を含む損害に対して賠償しているが、この範囲よりも広く、影響の甚大な事故の場合には、賠償額の積み上げだけでも数千億円か、それ以上に昇る可能性がある。こうした巨額な損害は原子力発電特有

の外部性である。同様に、化石燃料サイクルには地球温暖化リスクや大気汚染リスクがあり、大規模ダムによる水力発電には生態系破壊のリスクがある。様々なリスクをkWhあたりの貨幣換算額において比較することはエネルギー外部性研究の主要な領域であり、そのようなリスクに対してどのような評価付けを行うかは社会における選択の問題である。本論では、これまでの主要な重大事故リスクの研究事例を概観する。次にその問題点・課題について期待効用理論を用いた経済学の枠組みの中で考察し、今後の展望を述べることにする。

1. 原子力重大事故の評価事例

重大事故リスクに関して議論が集中しているのは原子力発電所における大規模事故の影響についてである。しばしば引用される評価例として影響力のある初期の研究にHohmeyer (1988) がある。Hohmeyerはチェルノブイリ事故で計測された集団線量 (2.4百万人Sv) を用いてドイツにおける原子炉事故の外部費用を推計した。彼のアプローチは現在ではトップダウン型アプローチと呼ばれるもので、集団線量に人口密度比を掛けることによって影響量を特定し、ガン患者の発生確率 (Hohmeyerではシナリオに依存した患者数) にコスト要因を乗じて外部費用を計算した後に、事故発生確率を掛けるという一連の手続きを含むものである。それに従えば、ドイツにおいてチェルノブイリ級の原発事故が起きた場合 (もっとも被害が大きいケース) のkWhあたりの外部費用は12.0ペニヒ (Pf) と推計されており、以下のように導かれている。

$$2.4 \text{ 百万 (人} \cdot \text{Sv)} \times 10 \text{ (人口密度の比)} \times 100,000 \text{ (ガン患者発生数)} \times 0.75 \text{ (百万マルク)} \times 1 / 2,000 \text{ (回/炉} \cdot \text{年)} \div 7.5 \text{ (TWh)} = 12.0 \text{ Pf/kWh}$$

事故確率を1/20,000 (回/炉・年) とした下位推計では推計値が一桁落ちて1.2Pf/kWhとなっている。同様の研究にPACE (1990) が挙げられる。PACEレ

注1) 原子力損害調査研究会資料 (2000.3) より

* 働政策科学研究所 研究員

〒100-0014 東京都千代田区永田町2-4-8

東芝EMI永田ビル5F

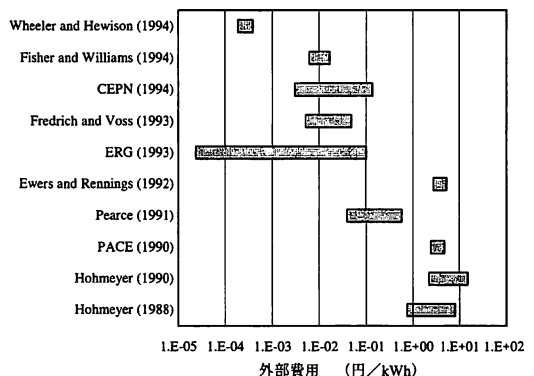
ポートの基本的な方法論はHohmeyer (1988) に従っているが、仮説的な原子炉（定格1,000MW, プラント寿命30年）における大規模な放射性核種の放出の頻度を3,333炉・年に1回と仮定し、健康影響（ガンの発生件数）の他に農作物への影響を損害額として見積もっている。その結果、重大事故リスクの外部費用を2.3 cents/kWhと推計している。

HohmeyerもPACEも、事故時に放出される集団線量にチェルノブイリ事故での値を西側先進国の原子力発電所のリスク評価に適用している。しかしながらチェルノブイリ原発を含む旧ソ連型黒鉛減速炉（RBMK）は格納容器を備えていない、安全性が著しく劣った原子炉である。この二つのレポートは炉心損傷事故と、その制御不能な状態の延長にある壊滅的な重大事故とを混同した分析方法になっている。このことは現在のINESに照らし合わせれば、大規模な放射性核種放出事故（レベル7）と炉心損傷事故（レベル4～5）とを同一の仮定で評価していることになる。基準となる放射性核種の放出量で3桁オーダーもの開きがあるために、事故の影響量も発生確率も過大評価となっている。現在ではこの推計結果は初期の参考事例として挙げられるにとどまり、その妥当性は疑問視されている。

こうした批判を受けて、Friedrich and Voss (1993) はチェルノブイリ事故のデータではなく、確率論的安全評価手法(PSA)²を部分的に用いて重大事故の外部費用を推計した。PSAとは個々の機器や設備の信頼性、運転員の誤操作などの確率を積み上げて、プラントの事故発生頻度や進展状況を解析する手法である。その結果、重大事故リスクは0.008～0.07 pf/kWhと推計され、Hohmeyer (1988) よりも4桁オーダーで低い値となっている。また、カナダのオンタリオ・ハイドロ社がERGに委託した研究では、原子力の外部性を通常事故から重大事故まで5つのカテゴリーに分け、PSAを用いてカナダにある実際の5基の重水炉を対象に推計を行っている（実際には個別プラントの評価は1基だけで、他のサイトにその結果を応用している）。その結果は0.002～0.051 cent/kWhとなっている（ERG, 1993）。

発電電力量の約8割を原子力発電に依存しているフランスでは、欧州合同原子核研究機関（CEPN）がPSAと損害額の両方に関する計算コードであるCOS

YMAを用いて原子力事故リスクを推計している。同研究はExternEのPhase II段階での評価手法開発に利用された研究である。COSYMAには関連する経済データベースが含まれており、ドイツの理論上の加圧水型（PWR）プラントを対象に炉心損傷事故を評価している。その推計結果は0.0023～0.104mECU/kWhとなっており、損害額としては公衆の健康損害が支配的となっている。また同様の研究に、Fisher and Wikkiams (1994) が挙げられる。やはり理論上のPWRプラントを対象に、米国内の二カ所のサイトで4つの事故シナリオを評価している。計算にはMACCSコードが用いられており、CEPNと同様に圧力隔壁内の炉心溶解事故を評価した（事故確率は 4.6×10^{-5} ）。その結果、事故リスクの損害額は一方で0.0059 cent/kWh, 他方で0.0103 cent/kWhとなった。CEPNと異なる点は、損害額の支配的要因が健康影響以外（農作物損害など）であることである。



【出所】 OECD-NEA (2000)

※1994年3月の為替レート（1 \$ = 103.9円）で換算

図1 原子力重大事故の外部費用評価事例

図1は近年の重大事故に関する外部費用評価事例における推計額を円/kWhで比較したものである。最も低い推計額で 1.35×10^{-5} 円/kWh（ERG, 1993）、最も高い値はHohmeyer (1990) の13.08円/kWhであり、オーダーに関して7桁の開きがある。

最近の事例では、ExternE Phase III (1997)の国別実施プログラムにおいてドイツが重大事故リスクを評価している。評価している損害事象は致死性ガン、非致死性ガン、遺伝的影響であり、放射線被曝に関するICRP (1990) のリスク係数を利用することで死亡率、罹病率を推計している。その手続きは6つの事故シナリオに基づいて放出されるインベントリを決定

注2) 確率的リスク評価手法（PRA）という場合もある

し、それぞれの事故確率を乗じた後に拡散モデルと影響経路モデル、地域人口メッシュデータを用いて集団線量を確定している。集団線量(人Sv)あたりのガン発生率をICRPリスク係数を利用して計算し、それに損失余命の価値(Yoll)もしくは、統計的生命の価値(VSL)を乗じることで損害額を推計している。その結果、重大事故ケースの損害費用は割引率3%、Yollベースで 2.33×10^{-4} mECU/kWh (3.36×10^{-5} 円/kWh)、VSLベースでは 3.03×10^{-4} mECU/kWh (4.37×10^{-5} 円/kWh)と推計されている。

このような事例研究の推計額に関して共通なことは、事故事象の直接的な費用(主に健康損害)に限定していることである。営業損害や休業補償などの逸失利益、慰謝料などの精神的苦痛へ支払など、間接的な費用を含む損害額の推計は、それらがどこまで賠償責任の範囲にあるかという問題も含めて、今後検討されなければならない課題である。

2. 専門家による重大事故評価の限界

PSA手法以降の重大事故に関する損害額評価値は他の外部性要因と比較して無視できるほどの小さな値としてしか推計されていない。ExternE Phase IIIにおけるドイツの例では原子力発電の外部費用全体に占める重大事故リスクの外部費用の比率は高く見積もった場合でも0.02%にも満たない。PSAを利用する限り、こうした推計結果が得られるのはそもそも自明の理である。なぜならば、重大事故とは、考えられる事象のうち当該施設の安全設計基準事象をはるかに越えるものの連続事象として捉えられるために、その発生確率は限りなく0に近づくからである。

典型的な燃料サイクル分析において損害額は事象の確率と、その大きさに関する専門家の判断を信頼して、その期待値を単純に貨幣換算することによって推計される。こうした専門家の期待値に基づく損害額(ED: Expert Expected Damages)のアプローチでは、リスクに対するいくつかの重要な要因が考慮されていないために、損害額が過小評価となる可能性がある。ここでは一般的な経済学の観点から、EEDアプローチの問題点を述べる。

2.1 リスク回避の無視

EEDアプローチで評価された損害額は、貨幣価値と効用(満足度)との間に比例的な関係を暗黙理に想定している。この想定の下では損害額の大きさに応じて効用水準が決定される。しかし、ある危険を伴う意

思決定において、多くの人々が全く同じ期待値(期待収益)を持っていたとしても、それに対処する人々の行動はそれぞれ異なる。あるいは、全く同じ期待収益を持つ投資銘柄が二つあったとして、それらが投資家にとって全く無差別である、という現実はあり得ない。なぜならば、個々の人々、個々の銘柄は実現する期待値まわりの分散が異なるからである。

同じ期待値でもより分散の小さいものを選好する行動をリスク回避型行動と呼ぶ。社会全体においてリスク回避の度合いが強い場合には、期待される損害額に対して強く忌避感が働くために、事故事象に対する感覚的評価が損害額を常に上回ることになる。EEDアプローチの一つの欠点は、こうした危険に対する人々の姿勢を考慮し得ないことである。発電システム全体のkWhあたりの損害額が全く同じであり、その他の条件がそれほど変わらない発電技術が選択肢としてある場合、リスク回避のために、原子力発電は他の電源より損害の評価が大きくなる。とりわけ、原子力発電に関してはその固有のイメージにより、住民のリスク回避の度合いが強い。

2.2 個人の意思決定における事前的見通しの無視

EEDアプローチによる損害額は、経済学の立場からみれば事後的(ex-post)なりリスク評価であると言える。事後的なアプローチとは、事象の確率が既知であり、それから得られる結果についても予想可能である場合に、そのような状況下で期待される効用を最大化する考え方である。EEDによる事故リスク評価とは、事故の発生確率を専門家が与え、その下で社会が代替可能な状態において実現することのできる満足度を最大にしようとする問題と解釈することができる。だがもし仮に、社会が事故による結果をある程度把握できて、その損害について主観的であるにしろ見積もることができるとしたら、そうした事故事象のリスク評価に人々が事前的(ex-ante)な見通しを用いて意思決定を行っていると考えの方が、より民主的な社会を想定していることになる。事前的アプローチとはリスクを評価する個人が、事象の起こった場合とそうでない場合との効用を主観的な事故確率で重み付けすることで期待効用を最大化するという考え方である。この場合、主観的な事故確率は事故事象に対する忌避感を表しているといえる。こうした事故確率の期待値が社会全体でどのように振れるかは興味深い問題である。

しかしながら、原子力重大事故の場合、一般の人が経験から主観的な確率を見いだすことは困難であり、

参照とする事例が少ないために、事故が発生した場合の損害額を見積もることも難しい。ExternE Phase II では、事故確率を同一にして、損害の見積もり額のバリエーションで評価した事前の評価と事後の評価とのシミュレーション分析を行っているが、二つの損害額の推計値にはそれほどの差異は見出されていない (EC, 1995a)。このシミュレーション結果ではむしろ、事故確率をどのように捉えるかが最も大きな変動要因となっている。それは以下に述べる重大事故リスクをどのように認識するか、という問題である。

2.3 専門家と一般人のリスク認知バイアス

リスクをどのように見積もるかに関しては前節の事後の評価と事前の評価の項で簡単に触れた。しかし、ある事故事象に対して事前的に見積もる主観的なリスクがどのように分布しているかについては、他の事故リスクを評価する時のように単純な確率論の問題ではなく、構造的な問題を孕んでいる。原子力のシステム分析に携わる専門家によって表現されるリスクと、一般人が認識している原子力のリスクとの間に大きな乖離が存在しているのである (Kasperson, 1992)。

専門家がPSAによる事故シナリオの詳細な分析から、原子力発電所の事故リスクは他の燃料サイクルの構成要素からのリスクよりも軽微であることを総合的に見出しているにも拘わらず、対照的に、一般人々は原子力発電所の事故のリスクをまるで核戦争のリスクに例えるかのように教わってきた (ExternE, 1995)。このような認識に基づく限り、専門家の評価を無視するか、全く信用しないという状況がもたらされる。

専門家と一般人の間でのこうした技術のリスクに対する認識の隔たりについては多くの文献が言及している。例えばKasperson (1992) は、危険 (hazard) の「技術的 (technical)」分析と「社会的 (social) あるいは知覚的 (perceptual)」な分析との間の隔たりについて言及し、その2つの乗算として定義された「リスク」をもって、事象の確率とし、それらの結果の大きさに焦点を当てるように提言した。さらにまた、社会的な反応を形づくるような、リスクについての「定性的な特性 (qualitative properties)」に言及して、一部の分析者に技術的計算の修正を求めるよう注意を促している。しかし、Kasperson は技術的リスクと知覚的なリスクとを掛け合わせることに理論的な根拠は乏しいことを認め、リスクの技術的および社会的側面を統合する論理的枠組みの必要性を指摘している。

Bradbury (1989) は技術的リスクを客観的リスク (objective risks) とし、社会的リスクを個々人の価値や判断を含む「精神測定的リスク (psychometric risks)」と、リスクの社会的構造を強調する「文化的リスク (cultural risks)」とに分けている。あるいは単に、客観的リスク対主観的リスク、または実際のリスク対感覚的リスクとの二分法を用いた分類も多い。こうした知覚的なリスクに関する名称は、専門家が分析を行う際には、様々な事故の確率と結果について説明力のある確実性は存在するが、他方、一般人々によるリスクの評価に関してはほとんど論理性あるいは合理性が存在しない、という印象を与えかねない。しかしながら、この問題は一方が正しい認識で他方が誤った認識である、ということ述べているのではなく、社会の中に対立した二つの評価基準が存在し、互いにどのような関係にあるかを明らかにすることが重要であると強調するものである。「現実にはリスクは存在するが、それらがどのようなものであるかを正確に知る人はいない」というFischhoff (1989) の見解は、まったくもって説得力があるといえよう。

2.4 社会的リスク評価への試み

ExternE (1995) では、これまで述べてきたリスク回避、事前の評価、リスク認知バイアスに関して以下のような効用関数を仮定することで、EEDアプローチによる損害額推計値がどのように変化するかをシミュレーションしている。

$$q = (m \cdot q_e + \beta \cdot q_g) / (m / \beta)$$

$$V = q \cdot v(M \cdot A) + (1 - q) \cdot v(M, 0)$$

ここで q は事故事象の生起確率であり、 q_e は専門家期待値、 q_g は一般人の期待値、 m と β はウェイトである。また貨幣価値で表した社会全体の間接効用 V は、現時点での所得 M の下で、事故が発生した場合の損害額 A と、事故が生じない場合の損害額 (0 円) との期待効用で表している。シミュレーションでは効用関数 V の関数型³を与えて、リスク回避の度合いは V の曲率⁴で表し、事前の評価と事後の評価の変化については A の見積もり額及び q_e のバリエーションで評価している。また認知バイアスの程度に関しては m と β の変化で見ることができる。

結果、EEDアプローチで評価した損害額は、関数形やパラメータの値にも依存するが、2桁から3桁の

注3) リスク回避型の効用関数の条件は $V_m (V$ を M で微分) > 0 , V_{mm} (2階微分) < 0

注4) V の曲率 (リスク回避係数) : $-V_m / V_{mm}$

推計値の増加を伴うことが導かれており、中でも一般人のリスク回避係数が大きければ大きいほど、またリスク認知バイアスのウェイト (β) が大きければ大きいほど、推計額は大幅に増加する傾向が確認されている。

現実問題として、極めて社会心理的な問題に帰属するために、このようなパラメータを実証的に定量化することは難しい。ExternE Phase III においても従来のEEDアプローチが採用されているのは、この問題に関して決定的な評価方法が見出されていないことによるものである。

おわりに

原子力重大事故の外部性評価においては、リスク回避やリスク認知バイアスをどのように定量化して評価するか、またそうした要因をどの程度改善することができるかについての実証的な研究の蓄積が待たれている状態である。エネルギー外部性研究において、重大事故リスクを貨幣価値換算するという試みはまだ途上であるといえる。

参考資料

• Hohmeyer (1988), Social Costs of Energy Consumption ;

External Effects of Electricity Generation in the Federal Republic of Germany".

- Friedrich and Voss (1993), External Costs of Electricity Generation, Energy Policy, 21 (1993), pp. 114-122.
- PACE (1990), Environmental Costs of Electricity.
- ERG (1993), Calculation of Environment Externalities for Ontario Hydro's Nuclear Plants.
- CEPN (1995), European Commission, DG XII, Science, Research and Development, JOULE, Externalities of Fuel Cycles 'ExternE', Project, Report NO. 5 Nuclear, EUR 16524 EN.
- Fisher and Wikkiams (1994), Social Costing Approach for Nuclear Power Plant Accidents.
- OECD-NEA (2000) Methodologies for Assessing the Economic Consequences of Nuclear Reactor Accidents.
- ExternE Phase II (1995), Methodology, vol. 2
- ExternE Phase III (1997), A Country Report for National Implementation Program, Germany.
- Kasperson (1992), The Social Amplification of Risk, In, Krimsky and Golding (eds) Social Theories or Risk.
- Bradbury (1989), The Policy Implications of Differing Concepts of Risk, Science, Technology and Human Values, 14, NO4, pp 380-400.
- Fischhoff (1989), Risk ; A Guide to Controversy in Improving Risk Communication, NRC, pp 211-319.
- 国連放射線防護委員会 (ICRP) 1990年勧告
- 原子力損害調査研究会 (2000. 3) 『(株) ジェー・シー・オー東海事業所核燃料加工施設臨界事故に関わる原子力損害調査研究報告書』

共催行事ごあんない

IMS2000第5回資源循環型生産システムシンポジウム

〔主催〕 第5回資源循環型生産
システムシンポジウム実行委員会
〔会期〕 2000年12月14日(月)～15日(金)
〔場所〕 産業技術記念館大ホール
(名古屋市西区則武新町)
〔参加費〕 無料

〔問合せ先〕
財名古屋都市産業振興公社産業育成課
〒460-0008 名古屋市中区榮三丁目18-1
デザインセンタービル6F
TEL : 052-265-2008
FAX : 052-265-2044