

# 原子力発電に伴う事故リスク対応コストの 評価方法に関する検討

松尾 雄司\*

## 要旨

本稿では原子力事故に伴うリスク対応のコストに焦点を当て、日本及び海外の試算例について整理し、考察を行った。従来、事故リスク対応コストについては事故の発生頻度と事故被害額とから損害期待値を求める方法と、発生頻度と直接的に関係しない一定の期間を想定した積立を想定し、割引計算を行って単価を算出する方法が提示されている。国民負担の評価という観点からは、前者の方式がより適切であると思われる。但しその際大きな課題となるのは発生頻度の評価の不確実性である。本稿ではこれについて、ベイズ統計を援用した評価方法を含め、既往の研究事例を参考に検討した。

## 1. はじめに

福島第一原子力発電所事故の後の 2011 年末、政府によって組織されたコスト等検証委員会において、原子力を含む各種発電方式による発電コストの評価が改めて試みられた。その結果として原子力発電のコスト（発電単価）は 8.9 円/kWh 以上とされたが、福島事故相当を想定した事故被害額が確定していないことにより、確定した値とはされなかった。具体的には想定された事故被害額 5.8 兆円が追加的に 1 兆円増加すると、8.9 円/kWh のうち 0.5 円/kWh を占める事故リスク対応コスト（単価）が追加的に 0.09 円上昇するものとされている<sup>1)</sup>。2015 年に総合資源エネルギー調査会の下に設置された発電コスト検証ワーキンググループの評価<sup>2)</sup>においても同様の方法が踏襲され、事故の被害額 9.1 兆円に対して事故リスク対応単価は 0.3 円/kWh、被害額が 1 兆円増加すると単価は 0.04 円/kWh 上昇するものとされた。

実際には、これらの試算で確定されていない要素は原子力の事故被害額に限った話ではない。例えば事故リスクに伴う発電単価上昇寄与の計算方法自体が、コスト等検証委員会や発電コスト検証ワーキンググループでは暫定的なものであったと言わざるを得ない。また原子力発電に限らず、例えば再生可能エネルギー発電に伴う系統安定化のためのコストなど多くのものが未評価、もしくは暫定的な評価のまま残されている。

これらの不確定なコストの多くは、一般的に「外部コスト」と呼ばれている<sup>3)</sup>。即ち発電に伴うプラント建設の費用や運転維持費、燃料費等のものは電気事業者の支出として計上され、電力の市場価格に反映されるコストであるのに対し、「外部コスト」と呼ばれるものは国の財政的支出や環境への悪影響を通じて国民に不利益をもたらすものであるにもかかわらず、電気事業者の支出とならないために、直接的に市場価格には反映されない。このようなコストについては諸外国、特に欧州では従来から評価の試みが続けられており、日本の福島事故の影響を受けた試算方法の再検討の動きも見られる。但しここで注目すべきことは、欧米の多くの事例においては原子力のみでなく全ての電源について、事故リスクコストのみでなくその他の外部コストをも含めて総体的に評価することが目指されている、という点である。これはコスト評価というものが主に異なる電源間の相対的優位性を推定することに用いられる以上、極めて当然の姿勢であろう。

別稿で述べた通り<sup>4)</sup>、本来、明確に定義の可能な発電コストとは「狭義」の発電コスト、即ち発電主体となる電気事業者等が発電を行う際に必要とした費用（もしくはそれを発電電力量で除した値）である。この定義のもとでは「事故リスク対応コスト」とは事業者が支払う保険料と同義になり、多くの場合それは発電コスト全体に比して微小な値となる。一方でそれを国全体、もしくは人類全体の観点からみてどの程度のコストとなるかを「広義」のコストとして評価する場合に初めて、事故リスクコストを含むいわゆる外部コストの評価が大きな課題と

\* (一財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット 研究主幹

なる。この「広義の発電コスト」を評価することは、その見かけほど容易ではない。第一にこれらのコスト全ての電源について評価することは、上述の通り従前から欧米では試みられていたことであるが、しかし極めて広範に広がるその領域を全て適切に評価することは殆ど不可能に近い。第二に、そもそも「費用」というものはそれを払う主体と受け取る主体とが明確となって初めて意味をもつものであり、例えば原子力に係る立地補助金のように国内で富が移転する場合、また火力の燃料費のように富が海外に移転する場合について、それらをどう扱うか、どう区別するかに関して、実は明確な基準が得られていない。

このような状況から、発電に伴う「広義」のコストを評価する試みは未だ検討の初期の段階にあると言える。本稿ではこの点を認識しつつも、まずは外部コストの一部である事故リスク対応コストに焦点を当て、欧州を中心に既存の評価の事例について整理した上で、今後日本においてこの問題をどう考えるべきかについて考察を試みる。それが発電コスト評価全体の中でどう位置づけられるかについては、別途検討を続ける必要がある。

## 2. 事故リスク対応費用の評価例

本節ではまず、日本政府による発電コスト評価（コスト等検証委員会及び発電コスト検証ワーキンググループ）における事故リスク対応費用の考え方について概要をまとめた上で、欧州における同様の評価事例について概観する。

### 2-1 日本政府の審議会等における評価

2011 年のコスト等検証委員会による試算<sup>1)</sup>では、まず福島第一原子力発電所事故の被害額について、当時判明している限りの金額として 5.8 兆円以上、との評価がなされた。これは東京電力や環境省の報告資料等をもとに、追加的廃炉費用や損害賠償費用・除染関連費用などを評価したものである。

次いで「相互扶助」の考え方による試算が示された。これは「事業者間での相互扶助の考え方に基づき、損害額を事業者同士で一定期間で支払う場合のコストを算出」するものであるとされ、事故による損害費用を支払期間及び年間発電量で除したものが事故リスク対応費用の単価である、とされた。具体的には支払期間については 40 年、発電電力量については 2010 年の日本全体の原子力発電量 2,882 億 kWh が用いられ、5.8（兆円）÷40（年）÷2,882（億 kWh/年）として 0.5 円/kWh 以上、との評価がなされている。この結果として下限値とされる事故被害額 5.8 兆円が追加的に 1 兆円増加するごとに、発電単価への寄与は 0.09 円/kWh ずつ上昇する、という評価となった。

このような評価方法が採用された理由として、事故リスク対応費用を事故発生頻度×事故被害額の「期待値」で評価することの難しさが認識されていたことが挙げられる。同委員会においては表 2-1 に示す通り事故の発生頻度の評価が試みられたが、これらのうちの期待値を用いるのが妥当であるか、もしくはどれも妥当ではないのかについて意見の合意が見られることはなく、また低頻度・高被害額のリスクを評価する際には期待値による評価は妥当ではないのではないか、との意見も提示され、結果としてこれらの頻度値が明示的に事故リスク費用の評価に利用されることはなかった。その代りとして上述の通り「相互扶助」の考え方による試算が示され、金額上は 40 年に 1 度事故が発生する確率での期待値を、割引計算なしに評価したことと同等の値とされた。

表2-1 事故発生頻度の評価例

事故発生頻度	説明
$1.0 \times 10^{-5}$ / 炉・年	既設炉の早期大規模放出に対するIAEAの安全目標に基づく頻度。 福島事故の教訓を反映し、今後建設される炉のシビアアクシデント発生頻度が、少なくともIAEAの安全目標を達成すると想定。
$2.1 \times 10^{-4}$ / 炉・年	福島第一1～3号機とも東日本大震災の大津波を起因としていることから、本事故を1事象とし、TMI(スリーマイル島)2号機、チェルノブイリ4号機事故とともに3事故として、世界の商業炉の運転年数から算定した頻度。 福島第一と同じ旧タイプの炉を、今回の事故経験を踏まえた安全対策を行わずに供用し続けることと同義。
$3.5 \times 10^{-4}$ / 炉・年	福島第一1～3号機の事故発生確率を独立事象とし、TMI2号機、チェルノブイリ4号機事故とともに5事故として、世界の商業炉の運転年数から算定した頻度。 福島第一と同じ旧タイプの炉を、今回の事故経験を踏まえた安全対策を行わずに供用し続けることと同義。
$6.7 \times 10^{-4}$ / 炉・年	福島第一1～3号機とも東日本大震災の大津波を起因としていることから、本事故を1事象として国内商業炉の運転年数から算定した頻度。 福島第一と同じ旧タイプの炉を、今回の事故経験を踏まえた安全対策を行わずに供用し続けることと同義。
$2.0 \times 10^{-3}$ / 炉・年	福島第一1～3号機の事故発生を独立事象として国内商業炉の運転年数から算定した頻度。 福島第一と同じ旧タイプの炉を、今回の事故経験を踏まえた安全対策を行わずに供用し続けることと同義。

(出所) コスト等検証委員会<sup>1)</sup>

2015年の発電コスト検証ワーキンググループでは上記と同様の考えのもと、最新の情報を踏まえて評価の見直しが行われた。即ち、まず2012年以降に判明した福島事故への対応費用を考慮して、1回の事故の被害額が9.1兆円へと引き上げられた。一方でこの試算では新たな規制基準に対応するための追加安全対策に相当する費用を1基当たり601億円と見込んでおり、このような膨大な対策を見込む以上、何らかの程度で事故の発生頻度の低減が考慮されるべきである、との意見が示された。この問題について同ワーキンググループの委員の間で完全な意見の合意が見られることはなかったが、結論としては、ある一つの安全対策を追加的に実施することにより事故の発生頻度が概ね半分程度になり得る、というPRA(確率論的リスク評価:後述)の感度分析結果を参考に、4,000炉年に1度の「算定根拠」をもとに試算を行うこととされた。具体的には、9.1兆円の被害額を1つのモデルプラントの年間発電量(7.06TWh)と4,000炉年とで除することにより、事故リスク対応単価が0.3円/kWhと見積られ、被害額が仮に追加的に1兆円増加すると単価は0.04円/kWh上昇するものとされた。但しこの「4,000炉年」の位置づけは必ずしも明確でなく、今後もより適切な評価のために検討を続けることが必要である。

これらの検討においては事故リスクというもの原子力に特有のものではないことも認識はされており、例えばコスト等検証委員会の第4回会合<sup>2)</sup>では「他の電源に関する事故リスクへの対応コストについて」として2010年のOECD/NEAによる評価例<sup>3)</sup>が引用されている<sup>1)</sup>。しかし実際に公表された報告書においては、原子力以外の事故リスク対応費用は一切計上されていない。このような対応となった背景としては福島事故後、国民の関心が特に原子力事故に向けられていたという特殊要因が挙げられるであろうが、それとともに、仮に死亡者数を単純に貨幣価値に換算した場合には、死亡者数の非常に多い非OECD諸国の水力発電(主にダムが決壊等による)以外ではその単価は大きなものにはならない、ということも考えられる<sup>2)</sup>。但し説明上の公平性の観点から、事故による死亡も含むコストの全体について、全ての電源に対して評価がなされることが本来は望ましいと言える。

<sup>1)</sup> ここでは過去1969年～2000年の間に5人以上の被害者を出した事故を対象に推計が行われている。例えばOECD諸国平均では発電量1GWy当り石炭で0.16人、石油で0.13人、天然ガスで0.08人、水力で0.003人、原子力で0人、非OECD諸国平均では石炭で0.60人、石油で0.90人、天然ガスで0.11人、水力で10.3人、原子力で0.048人の人的被害が発生した、としている。

<sup>2)</sup> 例えばOECD平均で比較的高い石炭火力の0.16人/GWyを用い、1人の価値を仮に5億円と想定しても、発電単価への上昇寄与は0.01円/kWh程度に止まる。

## 2-2 欧州における評価例

原子力発電を含む各種発電のいわゆる「外部コスト」については、従来欧米において詳細な検討がなされており、その一部として事故リスクに係る費用についても評価が試みられている。以下、欧州の事例について概要を記載する。

### 2-2-1 経済協力開発機構・原子力機関 (OECD/NEA : 2003)

欧州では 1990 年代初頭より欧州委員会 (EC) によって ExternE と称するプロジェクトが立ち上げられ、検討が行われた<sup>7)</sup>。ここで検討された事項は各種汚染物質の放出や放射線影響による経済への影響や健康被害、温室効果ガス排出による気候変動への影響、原子力及びそれ以外の発電に伴う事故の被害など多岐にわたるが、原子力事故に関しては損害期待値によって評価がなされていることが特徴的である。即ち或シナリオでの事故発生頻度を  $P_i$ 、その際の事故被害額を  $C_i$  としたときに、事故リスクコストは単純にその乗数の合計値

$$(\text{事故リスクコスト}) = \sum_i P_i \cdot C_i$$

で与えられる。ここで事故の発生頻度についてはまず最新鋭の原子炉を想定して 10 万炉年に 1 度とし、その事故 (炉心損傷) が発生した上で、更に原子炉格納容器が健全性を失い、大規模な放出が起きる確率 (即ち後述の CDF÷LERF の比) を米国原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission: NRC)<sup>8)</sup> に基づき 19% と想定している。このようにして計算された事故リスクコスト (例えば 1 炉年当りの事故被害額期待値) を発電量 (例えば 1 つの原子炉の年間発電量) で除することにより、事故リスク単価 (発電単価に対する事故リスクコストの寄与) が求められる。

このような損害期待値による方法を採用した場合に問題とされるのは、人は常に期待値を指標として行動するわけではない、ということである。例えば私が自動車損害賠償保険に加入する場合、私が支払う金額の期待値 (つまり累積の保険料) は一般的に、対象となる経済的損失 (自動車の事故による賠償額) の期待値よりも大きくなる。それにもかかわらず私がそのような保険に加入するということは、私は高頻度かつ少額の損失よりも低頻度かつ高額な損失の方をより大きなリスクとして認識している、ということに他ならない。特に原子力事故のような極めて低頻度・極めて巨額な損失を考える場合には、この乖離をどう考えるかは重要な課題になる。ExternE においてもこの問題の存在は十分に認識されているものの、この効果を定量化しようとする試みは未だ成功していない、と述べられており、今後も検討が必要であるとされている。

この方法による試算結果例は、OECD (経済協力開発機構) の専門機関である原子力機関 (Nuclear Energy Agency: NEA) によるレポートに見ることができる<sup>9)</sup>。ここではフランスを対象とし、上記 10 万炉年に 1 度の事故発生頻度と 171 億ユーロの直接被害額を想定、原子炉 1 基当りの年間発電量を 7 TWh とすることにより、直接事故被害コストを 0.00046 ユーロセント/kWh と計算している。更にこれに対し、間接的な経済影響の効果を含めて 1.25 倍、また上述の「低頻度・高被害額」によるプレミアム分を仮に 20 倍と見込むことで、事故リスク単価について 0.012 ユーロセント/kWh との評価を行っている (この「20 倍」の根拠は明確ではない)。

なおこの事故リスク単価は、原子力発電の外部コストの中では比較的小さな比率を占めるものに過ぎない。即ち同文献では ExternE の結果として、ウランの採掘から最終処分に至るまでの各段階につき (事故がない通常の操業での) 放射線の影響による健康被害等について評価を行った結果が示されており、その合計額はフランスの場合に割引率 0% の条件下で 0.25 ユーロセント/kWh と、事故リスクコストよりも大きなものとなっている。

### 2-2-2 ライプチヒ保険フォーラム (2011)

ドイツの民間シンクタンクであるライプチヒ保険フォーラム (Versicherungsforen Leipzig) は 2011 年、ドイツ再生可能エネルギー事業連合会 (Bundesverband Erneuerbare Energie e.V.: BEE) の委託により、原子力発電に伴う保険の観点から事故リスクを評価した報告書をまとめた<sup>9)</sup>。ここではまず仮に大事故が発生した場合の

被害額が試算された上で、低頻度・大規模の事故であることによるプレミアム分の評価がなされ、原子力発電単価への寄与が評価されている。

一度の事故の被害額については既往の評価事例等をもとに、複数の項目ごとに複数のケースを想定した評価が行われた。例として最も金額の大きな致死性の癌については、800 億ユーロ～7.5 兆ユーロの 20 通りの評価結果が提示されている（この最大のケースでは 168 万人に対し、それぞれ 450 万ユーロ（約 6.5 億円）の金額を補償する想定である）。その上で「最悪のケース想定を反映するために」、20 ケースのうち最大の 1 ケースに対してのみ加重 0.5、残りの 19 ケースに対してそれぞれ  $0.5 \div 19$  の加重を与え、加重平均をとることにより 4.4 兆ユーロとして計上している。同様に事故被害の合計額は単純な平均では 2.5 兆ユーロ程度であるが、加重平均の操作により 5.9 兆ユーロとなる。表 2-2 に示す通り、事故被害額に対する大半の寄与は癌によるものである。168 万人の死亡という事態は福島事故とは比較にならないほど大きな事故を想定しているようにも考えられ、上述の加重平均の方法の是非も含め、これらの想定 of 妥当性については検証の余地があろう。

表2-2 事故被害額の評価例（ライプチヒ保険フォーラム：Grohnde 発電所の例）

	単位：10億ユーロ	
	平均被害額	加重被害額
癌(致死)	1,679	4,440
癌(非致死)	518	756
遺伝子損傷	33	77
避難区域のGDPロス	258	595
食品への影響	38	38
避難に係る費用	2	2
合計	2,528	5,908

(出所) ライプチヒ保険フォーラム<sup>9)</sup>

ライプチヒ保険フォーラムはこのような評価をドイツ国内の全 17 基に対して行った上で、事故被害額の確率分布をベータ分布で近似し、平均的な被害額を 5.9 兆ユーロ、その標準偏差を 0.03 兆ユーロとしている。更に、原子力事故を含む低頻度・高被害額のリスクに対する保険プレミアムを評価する手法として事故被害額分布の(平均値+6×標準偏差)の値を用いることを提案し、これにより試算に供する事故被害額を 6.09 兆ユーロとしている。原子力事故の被害額のように評価・変動の幅が大きい(ライプチヒ保険フォーラム自身、上述の通り致死性の癌について 100 倍近い差をもつ評価を行っている)事項に対して、このように小さな標準偏差を想定することは奇異である。このような評価に至った背景としては、ここでは 17 基の原子炉に対して表 2-2 に示される各項目のうち GDP ロスを除く全てについて同一の値を想定し、GDP ロス分のみが異なる 17 の被害合計額データを用いて統計分析が行われていることが考えられる。この点についても評価手法を再検討する余地があるものように思われる。

このレポートでは更に、事故の発生頻度についても、テロによる攻撃やコンピュータ・ウイルスの要因等も踏まえて評価を行っている。しかしその事故発生頻度の評価結果は、事故リスクコストの評価には全く用いられていない。その代りとしてライプチヒ保険フォーラムは後述のフランス会計検査院等の評価と同様の手法を用い、2%の利率とある一定の年数の想定のもとで上記の 6.09 兆ユーロを積立てるとして単年の積立額を算出した上で、それを単年の原子力発電量(2010 年のドイツの原子力発電量 1,400 億 kWh)で除することにより発電量当りの単価への寄与を計算している。但し、ドイツ国内に存在する 17 基の原子炉に対して 1 つのプールで積立を行うか、または 1 基ごとに 1 つ、合計 17 のプールで積立を行うかで評価結果は異なる、としている。例えば積立期

間を 100 年、プール数を 1 とすると発電単価への寄与は 14 ユーロセント/kWh となる。積立期間を 10 年、プール数を 17 とすると、その寄与は 6,730 ユーロセント/kWh に上る。

### 2-2-3 放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN : 2012 及び 2013)

フランス放射線防護・原子力安全研究所 (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire: IRSN) は、フランス国内で大規模な原子力事故が発生した場合の被害額の評価を行った。但し 2012 年に発表された文献<sup>10)</sup>と 2013 年に発表された文献<sup>11)</sup>とは、若干であるが数値が異なる。

2013 年の文献による事故被害額は表 2-3 の通りである。ここでは過酷事故 (Accident grave : 炉心溶融が発生し、放射性物質が放出) と重大事故 (Accident majeur : 炉心溶融が発生し、最悪のケースとして炉心内容物の 3 分の 1 が放出) の二つのケースについて事故被害額の評価が行われている。この表のうちサイト関連コストとは事故発生サイトの撤去・除染等に係る費用、汚染地域コストとは立入禁止区域を土地所有者から買い上げるとともに、放射線管理区域を原状に復旧するための費用である。その他オフサイトにおける各種放射線影響に関連するコストや、イメージコスト (観光・輸出等への経済影響)、電力系統への影響 (電力系統関連設備の修復費用や既設原子力設備の廃止に伴う損失) などが含まれている。過酷事故・重大事故ともに、イメージコストの比率が大きくなっていることが特徴的である。

表2-3 事故被害額の評価例 (IRSN)

	単位 : 10億ユーロ	
	過酷事故	重大事故
サイト関連コスト		
復旧コスト	5	5
リプレースコスト	6	9
その他	-	-
計	10	15
汚染地域コスト		
立入禁止区域	-	13
放射線管理区域	11	98
計	11	110
オフサイト放射線関連コスト		
緊急時対応	-	3
公衆衛生	-	10
精神的影響	0	17
農業生産物の損失	9	14
移転費用	0	10
計	9	54
イメージコスト		
農業生産品への需要低下	13	60
観光への影響	25	75
その他製品の輸出影響	12	46
計	50	180
電力系統への影響	44	88
合計	120	450

(出所) IRSN<sup>11)</sup>

2-2-4 Rabl 他 (2013)

Rabl らは 2013 年、原子力発電を停止させることが環境や人の健康に対するリスクを低減するのか否かを評価することを目的として、原子力発電とその代替電源の外部コストを評価、比較した<sup>12)</sup>。ここで代替電源としては風力発電及びそのバックアップとしての天然ガス火力発電を想定し、原子力発電の稼働率 90% に対して風力の稼働率を 25%~35% と想定、その差の分が天然ガス火力によって賄われるものと想定している。価格のケースとしては低位ケース、中位ケース及び高位ケースの 3 つが想定されており、表 2-4 に示す通り、例えば中位ケースでは原子力の外部コスト 0.79 ユーロセント/kWh に対して代替電源の外部コストは 1.22 ユーロセント/kWh と、後者の方がより高価であるという結果になっている。

代替電源（風力+天然ガス火力）の外部コストの内訳としては、まず温室効果ガス（GHG）排出コストについて 8.3~75 ユーロ/tCO<sub>2</sub> の炭素価格と 0.5 kg/kWh の CO<sub>2</sub> 排出原単位（天然ガス火力発電）の想定に基づき評価がなされている。また健康被害コストについては、ExternE による最新の評価結果<sup>13)</sup>に従い 0.2~1.8 ユーロセント/kWh と想定されている。

原子力発電については割引率 5% の想定のもと、まず通常の運転に伴う外部コストが文献 13) に基づき 0.21 ユーロセント/kWh（中位ケース）とされ、低位及び高位ケースではその 1/3 倍及び 3 倍と想定されている。この外部コストは発電所の運転に伴う放射線からの健康被害コストの他に、上流過程（ウラン採掘等）での被害コストをも含む。また廃棄物処分コストについては、会計検査院<sup>14)</sup>の評価額 0.3 ユーロセント/kWh の一部として、事業者等の積立による内部化が行われなかった部分について 0.1~0.3 ユーロセント/kWh と想定している。

表2-4 原子力及び代替電源の外部コスト (Rabl 他: 2013)

	単位: ユーロセント/kWh						
	原子力				代替電源 (風力+天然ガス火力)		
	通常運転に伴う 外部コスト	廃棄物処分 コスト	事故リスク コスト	計	GHGコスト	健康被害 コスト	計
低位ケース	0.07	0.10	0.08	0.25	0.26	0.12	0.38
中位ケース	0.21	0.20	0.38	0.79	0.83	0.40	1.22
高位ケース	0.63	0.30	2.29	3.22	2.74	1.31	4.05

(出所) Rabl 他<sup>12)</sup>

事故被害額の評価方法（中位ケース）は以下の通りである。まず癌による死亡については、1 度の事故で 1 万人が発癌、一人の価値を 500 万ユーロと評価し、事故発生時からおよそ 20 年後に発癌するものとしている。また 6 GW の発電設備損失に対して 1 GW 当り 50 億ユーロの損失とし、更に電源が 15,000 時間（年間 3,000 時間 × 5 年間）にわたって喪失することで 1 kWh 当り 0.2 ユーロの被害がもたらされる、としている。除染については福島での実績推定額をもとに 300 億ユーロと想定、住民の避難については半径 30 km の範囲内の 50 万人が避難し、1 人当り 50 万ユーロのコストになると想定している。また農作物については、1000 km<sup>2</sup> の範囲内で 100 年間の間作物が採れないものとし、1 km<sup>2</sup> 当り年間 7.5 万ユーロの損失になるとしている。

表2-5 原子力事故の被害額 (Rabl 他: 2013)

	被害額、10億ユーロ						合計	事故リスク コスト、 ユーロセント /kWh
	発癌による 死亡	発電設備の 損害	電源の 損失	除染	避難	農作物		
低位ケース	10	20	10	20	100	5	165	0.08
中位ケース	18.8	30	18	30	250	7.5	354	0.38
高位ケース	50	40	50	200	1,000	50	1,390	2.29

(出所) Rabl 他<sup>12)</sup>

これらの被害額想定をもとに、Rabl らは以下のように事故リスク単価を評価した。まずチェルノブイリ事故 (1986 年) と福島事故 (2011 年) の間隔を参考に、中位ケースでは全世界で 25 年に 1 度、大事故が発生するものとする。表 2-5 に示される 1 度の事故の被害額をこの 25 年と 2008 年の世界の原子力発電量 (2,100 TWh) で除し、更に 5% の割引率を用いて将来の被害額を現在価値に換算することにより、0.38 ユーロセント/kWh という評価結果が得られる。同様に低位ケースでは 40 年に 1 度、高位ケースでは 15 年に 1 度の事故を想定し、それぞれ 0.08 ユーロセント/kWh 及び 2.29 ユーロセント/kWh となる。但しこれらの結果は概算として幅を示したものであり、本来であれば各項の組合せを考慮するためにモンテカルロ法を用いて不確実性の評価を行うべきである、と Rabl らは述べている。

#### 2-2-5 Lévêque (2013) 及び D'haeseleer (2013)

Lévêque は 2013 年 5 月に発表したレポート<sup>15)</sup>の中で、仮に事故の発生頻度を 10 万炉年に 1 度 (Areva 社の想定する頻度の 100 倍) とし、事故の被害額を 1 兆ユーロ (福島事故の想定被害額の 10 倍) としても、年間 1 TWh の発電をする原子炉の事故リスク単価は 1 ユーロ/MWh (0.1 ユーロセント/kWh) 程度になると述べている。次いで同年 6 月に発表したレポート<sup>16)</sup>の中で、事故の発生頻度についてベイズ統計の方法を用いた評価を行った。

ベイズ統計では何らかのパラメータ、例えば事故の発生確率  $p$  を評価するために、実測のデータとともに何らかの事前情報を利用する。例えば今日、何らかの試行を 100 回行ってある事象が 5 回生じたとすれば、そのデータのみから「推定」される事象の発生確率は  $p = 5 \div 100 = 0.05$  となる。但し例えば私が昨日までにその試行を既に 1000 回実施しており、その中で 80 回の事象の発生を見ていた (従って事象の発生確率は 0.08 であると推定していた) ならば、今日私が推定するその事象の発生確率は、この事前情報により 0.05 よりも大きくなる。最も単純には昨日までと今日との試行から推定される発生確率は  $85 \div 1100 = 0.077$  となり、新たな実測データを踏まえて確率が昨日までの 0.08 から若干低下したことになる。このように、我々が事前にもつデータと新しい実測データの双方を踏まえてより適切な評価を行う試みをより一般化したものが、ベイズ統計による手法である。

Lévêque が行ったことは、我々が「事前」の確率として確率的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment: PRA)<sup>3)</sup> の評価結果をもっていたと想定し、更に福島事故を含む実際の原子力事故の発生という経験からの情報を踏まえた上で、「事後」確率として最も信ずるべき値は何かを評価することであった。このような評価を行うこと理由の一つとしては、この場合の実測データとなる実際の事故の発生回数が極めて低いことが挙げられる。即ち、後述の通り実際の事故発生件数のみから事故の発生回数を評価しようとする試みは、その結果の幅が広すぎて評価としての役には立ちにくい。このためそれ以外のデータを併用することにより、何とかしてより「妥当」な評価を行おうと試みるのは当然のことであろう。Lévêque 自身はこれについて、我々は経験的なものであろうと、理論的なものであろうと、利用し得る全てのデータを用いて判断を行うべきである、と述べている。

<sup>3)</sup> 事故の原因となる事象から過酷事故や放射性物質の大量放出に至るまでの一連の系列 (イベントツリー) を詳細に設定し、それを用いて事故の発生確率を定量的に評価する方法。米国では 1970 年代から継続的に検討・評価が進められている。



Lévêque が事前情報として用いたのは、米国原子力規制委員会 (NRC) のレポート (NUREG-1560) に見られる炉心損傷頻度 (Core Damage Frequency: CDF) の評価結果であった<sup>17)</sup>。具体的な方法等については補論に詳述する。Lévêque によれば過去の世界の原子力発電所の運転年数  $n$  はおよそ 14,400 炉年、その中で炉心が損傷した事例数  $y$  は 11 例であり、即ち炉心損傷事故の発生頻度は  $y \div n = 7.6 \times 10^{-4}$  回/炉年となる。これは PRA (NUREG-1560) の結果から得られる頻度 ( $6.5 \times 10^{-5}$  回/炉年) と比べて 10 倍程度高い値である。そこで NUREG-1560 のデータを用いて事前分布 (事故発生頻度の確率分布) をベータ分布で近似し、それに 11 例の事故発生データを考慮することにより、ベイズ更新を経た事後の発生頻度は  $3.2 \times 10^{-4}$  回/炉年程度である、とした。但し 11 の炉心損傷事例のうち福島事故の 3 例を除いて多くは原子力利用の歴史の初期に発生しており、経験の蓄積に伴う安全性の向上が反映されていないこと、また 11 例の事故が全て独立していると想定していることなどにより、この推計は幾分の過大評価になっている、とも Lévêque は述べている。

Lévêque の計算は上述の通り炉心損傷頻度 (CDF) の評価を行ったものであり、これはいわゆるレベル 1 の PRA に該当する。実際の事故では炉心が損傷した上で、更に格納容器の損傷等が発生して放射性物質の大量放出に至る (レベル 2 の PRA に該当)。この頻度は早期大規模放出頻度 (Large Early Release Frequency: LERF) と呼ばれている。D'haeseleer は 2013 年に発表した論考の中で、Lévêque の計算例を引用した上で以下の 2 点において修正がなされるべきである、とした<sup>18)</sup>。

- 11 例の炉心損傷は重大事故に至り得ない事例も含んでおり、実際には 5 例 (スリーマイル島、チェルノブイリ 4 号機及び福島 1~3 号機) のみが NRC の定義する CDF に対応する。
- 事故リスクの評価のためには CDF ではなく LERF を用いる必要がある。一般的に LERF は CDF の 0.1 倍程度とされている。

これらにより、まず D'haeseleer は 11 例ではなく 5 例を用いて CDF の事後確率を同様に計算し、 $1.7 \times 10^{-4}$  回/炉年という結果を得た上で、0.1 を乗じることにより LERF を「およそ  $2 \times 10^{-5}$  回/炉年」であるとしている<sup>4)</sup>。D'haeseleer は更に 2012 年の IRSN による重大事故の被害額試算結果 4,300 億ユーロを引用し、1 基の原子力発電所の年間発電量を 10 TWh と想定することにより、事故リスクコストを 0.086 ユーロセント/kWh と評価している。

これらの推定方法や結果については、多少の疑念を免れない部分もある。例えば Lévêque の示す  $p = 3.2 \times 10^{-4}$  回/炉年の事故発生頻度 (CDF) を信じるならば、14,400 炉年の試行を行って実際に (Lévêque が用いた「実測値」である) 11 回以上の事故が発生する確率は  $\sum_{k=11}^{14400} C_k p^k (1-p)^{14400-k}$  で表され、これは纔かに 0.8% 程度

となる。同様に D'haeseleer の計算した LERF ( $2 \times 10^{-5}$  回/炉年) を用いて放射性物質の大量放出を伴う事故が 4 回以上発生する確率を計算すると、纔かに 0.02% 程度となる。これらの試算結果は実測データを用いたはずであるにもかかわらず、その実測データを説明するためには非常に低い確率が前提となるということは、用いたデータもしくは方法論そのものに対する疑念を抱かせる。一つの要因は福島事故を「3 度」の独立した事象と見做していることであろう<sup>5)</sup>。またデータの扱い方 (例えば Lévêque が指摘するように、上記の方法は近年の安全性向上の傾向を織り込んでいない) や推計方法自身の問題も考えられる。このような問題は存在するものの、Lévêque (及び D'haeseleer) の方法はデータ数の少なさというこの問題に内在する根本的な課題を認識した上で、より広い視点に立って評価を行うことを試みたものであり、本稿で引用する他の試算例とは異なる意義を見出すこと

<sup>4)</sup> この方法では LERF/CDF 比の 0.1 はベイズ更新を経していないことになるため、実際には CDF ではなく LERF で計算を行う方が適切である。但し PRA の結果は炉型によって異なるため一概には計算できず、そのため上記の通り計算した上で、値を上方に丸めた、と D'haeseleer は述べている。

<sup>5)</sup> 確率論において事象 A と事象 B が独立であるとは、A と B とがともに生起する確率  $p(AB)$  が、それぞれの生起する確率  $p(A)$  及び  $p(B)$  の積として  $p(AB) = p(A)p(B)$  と表されることを意味する。これは A が生起した条件のもとでの B の生起確率  $p(B|A)$  が  $p(B)$  に等しいことを意味しており、例えば福島第一発電所 1 号機 (A) 及び 2 号機 (B) における事故発生確率に対しては、明確に当てはまらない (3 つの炉心が一度に損傷したということ自体が、それらの事象が実際に独立でないことを統計的にも示すと言えるであろう)。このためもし福島事故を「3 例」として計上するならば、単機の事故発生確率  $p(A)$  と条件付き確率  $p(B|A)$  とを区別して扱うことが必須となり、より複雑な定式化が不可欠になる。

ができる。

#### 2-2-6 D'haeseleer (2013)

D'haeseleer は 2013 年に原子力発電のコストを包括的に記述したレポートを公表した<sup>18)</sup>。この中で彼は事故リスクコストについて、7つの例について概要を述べている。7つの例の中には上述の OECD/NEA、Rabl 他、IRSN 及び Lévêque の 4 つの評価事例が含まれており、その他に Torfs (2001)<sup>19)</sup>、NewExt (2004)<sup>20)</sup>及びシユトウトガルト大学エネルギー経済・省エネルギー研究所 (IER: 2013)<sup>21)</sup>の 3 例について言及がなされている。

Torfs はベルギーを対象とし、事故リスク単価を  $8 \times 10^{-5} \sim 3.5 \times 10^{-2}$  ユーロセント/kWh と評価した。NewExt は 1969～2000 年の間に死者 5 人以上を出した大事故 (石炭 1,221 件、石油 397 件、天然ガス 125 件、LPG 105 件、水力 11 件、原子力 1 件) のデータをもとに、非 OECD 諸国での事故リスク単価を  $5.74 \times 10^{-4}$  ユーロセント/kWh と評価した。また IER はドイツを対象としてシナリオ別に事故リスク単価の評価を行うことにより、 $1.3 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-2}$  ユーロセント/kWh との結果を得ている。

これらの評価結果を総合して、D'haeseleer は事故リスク単価は概ね 0.1 ユーロセント/kWh 程度と見るのが妥当であるとし、暫定的にその 1/3 を下限値、3 倍を上限値と想定している。そしてこの問題については更に研究を継続することが必要である、と述べている。

#### 2-2-7 フランス会計検査院 (2014)

フランス会計検査院 (Cour des comptes) は 2012 年及び 2014 年に、同国内における原子力発電関連のコストを網羅的に評価したレポートを公表した<sup>14)22)</sup>。この中で、定量的に正確な評価が困難な例の一つとして事故リスク単価の算出が試みられている。

ここでは、事故の被害額については上述の IRSN による 2013 年の評価結果を参照している。まず事故の被害額としては表 2-3 に示す過酷事故の 1,200 億ユーロを想定する。この金額を原子力発電所の運転年数である 40 年で積立ると想定し、年率 5%の利率を想定すると単年の積立額は 9.9 億ユーロとなる。これをフランスの年間原子力発電量 410 TWh で除すると、0.24 ユーロセント/kWh となる。

この試算で過酷事故の被害額のみを用い重大事故の被害額を用いなかった理由として、後者の発生確率が極めて小さいと考えていることが推察される。しかし一方でそれを全く無視して良いという理由もつきにくいように思われる。いずれにせよ同レポートにおいては、この試算はあくまでも仮のものであり、例えばこの試算値と同額の資金積立を行うことを推奨するものではない、とも強調されている。

### 2-3 事故リスクコスト評価例のまとめ

以上述べた諸試算例をまとめると図 2-1 の通りとなる。これらの評価結果はそれぞれ異なる基準年の価格で記述されているが、基準年が明記されていない試算もあるためここでは物価の換算は行っていない (但し試算の相違による評価の幅を考えると、物価の差による影響は軽微なものと思われる)。また日本の試算例としては発電コスト検証ワーキンググループによる想定を記載したが、その際 2015 年 5 月時点の為替レートとして 1 ユーロ=130 円を採用した。

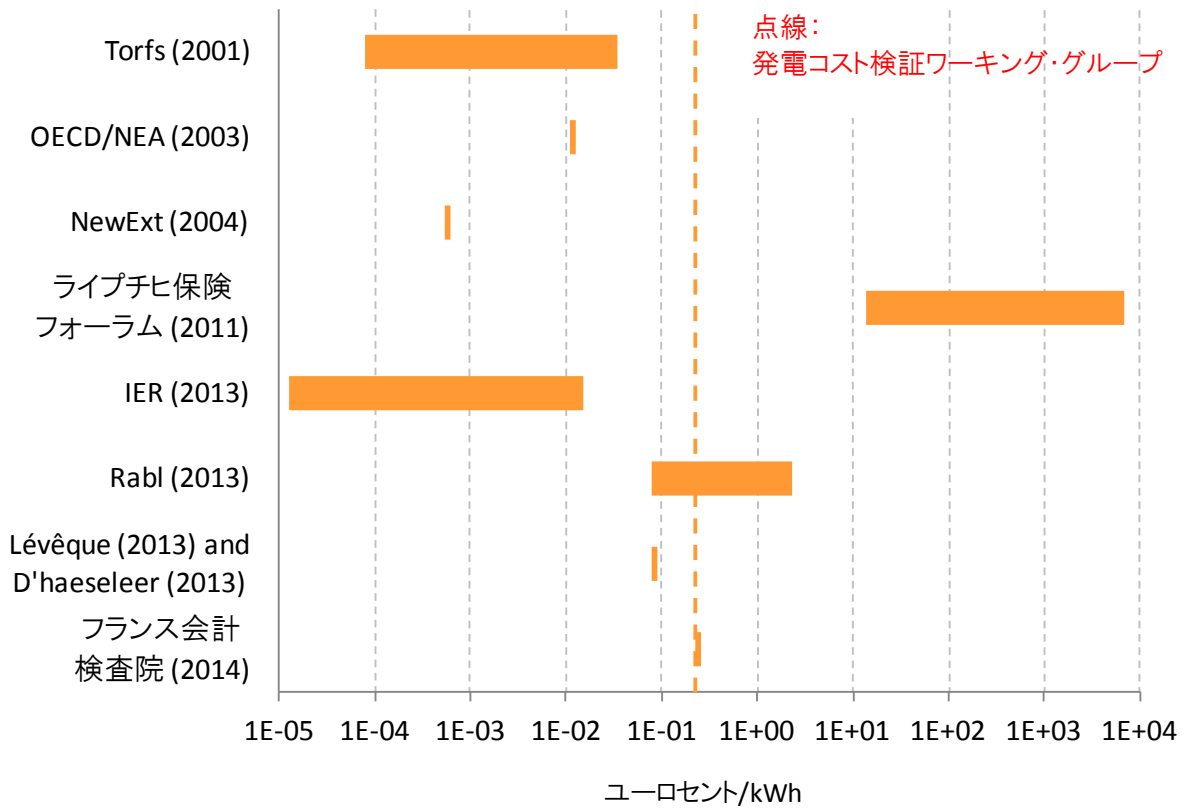


図2-1 事故リスクコスト評価結果の比較

ここに示されるように、事故リスク対応コストの評価の結果には非常に大きなばらつきがある。同じドイツを対象とした試算の間でも、IERの最小値とライプチヒ保険フォーラムの最大値とでは実に5億倍の差が見られる。但し福島事故前の評価は概ね0.1ユーロセント/kWh未満の低い値であったのに対して、福島事故後の評価ではIERを除き比較的高い値となっているなど、ある程度の傾向は読み取れる。IERの評価は事故の発生頻度としてPRAの評価結果、即ち10~1,000万炉年に1度という値を用いており、著者らによれば福島の事故は明らかな「設計ミス」であるために、必要な安全対策を全て講じた場合にはこれらの小さな値を用いることが依然として適切である、という<sup>18)</sup>。それに対し、福島事故以後に示された他の試算例ではPRAの結果をそのままは用いていないために、より大きな事故リスクコストとなっている。

図2-2は各試算で用いられている事故発生頻度をまとめたものである。ここで積立期間を設定して評価を行っている例(ライプチヒ保険フォーラム:10~100年、フランス会計検査院:40年)については、その想定する積立年数と原子炉基数の積の逆数を発生頻度相当値(1/炉年)として表示した。ここでも試算によるばらつきは非常に大きい。但しPRAの結果等のアприオリな想定値を用いているOECD/NEAやIERでは10万炉年に1度以下の低い値を用いている一方で、それ以外の試算ではライプチヒ保険フォーラムを除き、概ね1,000~10万炉年に1度の間に入っている。

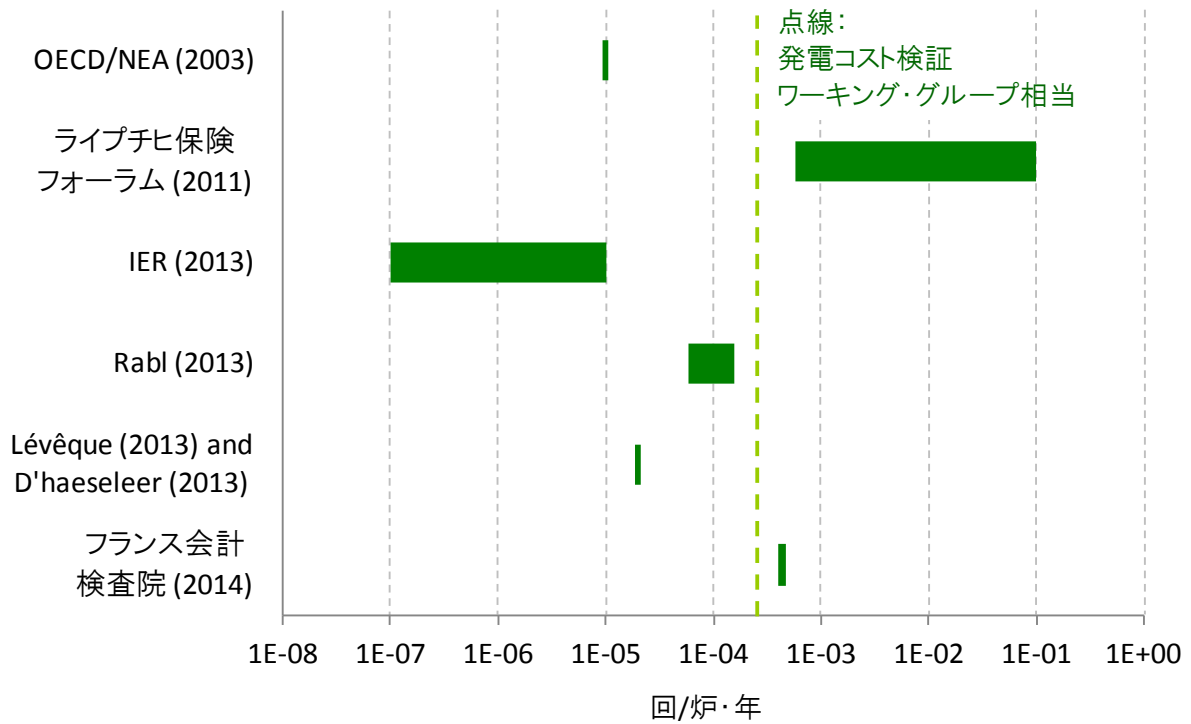


図2-2 想定された事故発生頻度の比較

### 3. 事故リスクコストの評価方法に関する考察

このように、事故リスク単価の評価は試算を実施する専門家・機関によって大きく異なる。但し試算の方法や前提条件を確認することで、多少ともこの問題を考えるための指針を得ることができる。まず明らかに考えられることは、図 2-2 に示す事故発生頻度の大きな差が事故リスク単価の評価結果のばらつきに大きな影響を与えている、ということであろう。上述の通り PRA の評価結果や IAEA による安全性目標値を用いている例 (OECD/NEA や IER) では想定する発生頻度が比較的 low、実測のデータを使用している例 (Rabl や D'haeseleer) では比較的高くなっている。明らかに特異なのはライプチヒ保険フォーラムによる試算であり、実際ここで用いられているものはそもそも「事故の発生頻度」ではない。まずはこの観点から、評価の方法自体を改めて考察する。

#### 3-1-1 評価方法の分類

##### (1) 損害期待値方式と積立方式

第 2 章で概要を記した諸試算例では、事故リスク単価の算出に際して以下の二つの異なる手法が用いられている。

##### ① □ 損害期待値による単価算出方式

この種のコスト計算で通常用いられる手法は、いうまでもなく損害の期待値、即ち 1 回の事故発生時の被害額に事故の発生頻度を乗じて得られる値を用いることである。ここでは事故の被害額と事故の発生頻度、ないしはその確率分布を適切に評価しなくてはならない。また、2-2-1 節で述べた「低頻度・高被害額」のコストをどう評価するか、という点が常に疑問として挙げられる。

## ② 積立による単価算出方式

仮に原子力事故の発生する頻度が 1000 年に一度であった場合、実際に事故が発生するのは 1000 年後とは限らない。それは 10 年後に起るかも知れないし、50 年後に起るかも知れない。そのため事故の発生頻度がどの程度であるかには関係なく、ある一定の年限までに事故被害額相当の金額が積み上がるように単年の積立額を設定し、そこから発電量当りの単価を設定しようというのがこの単価算出の方法である。上記のフランス会計検査院による試算では原子力発電所の稼働年数相当の 40 年を積立期間と設定しており、一方でライプチヒ保険フォーラムの試算では 10 年もしくは 100 年と設定がなされている。当然ながらこのような評価が行われるのは、平均的な事故の発生間隔が積立期間に比べて有意に長いと見なし得る場合に限られる。そうでなければ積立中に事故が(場合によっては何度も)発生してしまい、積立の意味がなくなるからである。

②に属するのはフランス会計検査院とライプチヒ保険フォーラムの試算であり、その他の試算例の多くは①に属する。実際の計算に際しての①と②との相違は、前者における事故は費用の発生と「同時に」、潜在的に或る確率で生じるのに対し、後者においては積立を行う時点と積立が完了する時点との間に時差が生じる、ということである。このため一般的に①では事故の被害額にそのまま事故発生頻度が乗じられる一方、②では或る一定の割引率を用いた現在価値への換算、もしくは一定の利率を用いた複利計算が必要になる。実際に②の方法を用いたフランス会計検査院及びライプチヒ保険フォーラムの試算では、それぞれ 5%及び 2%の利率が想定されている。

やや特異に感じられるのは、Rabl らによる試算である。ここでは 5%の割引率を用いて試算が行われているが、論文の記述の中には例えば「25 年に一度発生する事故に備えて積立を行う」というような記載はなく、むしろ「比較の開始年以降、毎年一定の確率で事故が発生する」と述べられている。逆にコスト等検証委員会や発電コスト検証ワーキンググループでは②に近い「相互扶助の考え方」に基づき試算を実施した、とされているが、計算上は利息の計算なしに、被害額を発電量で除した値が事故リスク対応コストとして採用されている。このように、実質的には事故の発生頻度(もしくは積立年数)に実測もしくは PRA 等の頻度を用いるか否か、また利息もしくは割引の計算を行うか否かによって①と②との分類がなされるが、説明の上では逆に①に該当するものが積立方式、②に該当するものが損害期待値方式とされる場合もあることには注意が必要である。

図 2-1 に示す諸例の中では事故リスク単価が比較的高いライプチヒ保険フォーラムやフランス会計検査院、Rabl らが②の方法を採用しており(少なくとも割引率を用いた計算をしており)、その他の事例では①の方法が採用されている。これは積立を行う期間が、一般的には事故の発生頻度から求められる平均的な事故発生間隔よりも短く設定されることから自然であろう。但しその結果は事故発生頻度ないし積立期間の長さ、事故被害額そのものの想定に依存するものであり、試算方法のみによるのではないことは言うまでもない。

## (2) どちらの方式が妥当であるのか

②の積立方式による試算のうち、例えばフランス会計検査院とライプチヒ保険フォーラム(の最大値)の結果に見られる 2 万 8 千倍の相違については、そもそもの事故被害額の想定が 51 倍程度異なることが最も大きな要因と言える。その他に積立期間(40 年及び 10 年)で 5.5 倍、利率(5%及び 2%)で 2.0 倍、年間発電量想定(フランスで 410 TWh、ドイツで 140 TWh)で 2.9 倍、プール数で 17 倍の相違が発生している。事故被害額については上述の通り両者ともに問題があり、より適正な試算に近付けるための努力が必要、かつその余地があるであろう。一方で問題となるのは積立期間による影響であり、仮に 2%の低い利率を想定したとしても、100 年で計算した場合に比べて 40 年及び 10 年で計算した場合にはそれぞれ単価が 5 倍及び 29 倍になる。

特に注意すべき点は、事故被害額の推定における相違は評価の精度による差であると考えられるのに対し、この 5 倍ないし 29 倍といった差は、あくまでも積立制度のあり方のみによる差である、という点である。別稿<sup>4)</sup>で論じた通り、いわゆる外部コストも含む「広義の発電コスト」の中には当該技術そのものの特性によって必要となる費用のみを含むべきであり、それ以外の社会的・政治的等の要因で必要となる費用負担は計上されるべきではない<sup>6)</sup>。この観点から、積立方式によって評価された事故リスクコストは原子力という技術に特有のもので

<sup>6)</sup> このことは、発電コストの評価が政策上、主に将来の電源選択の評価のために用いられる、という観点から理解することができる。即ちある発電技術がその特性によって必然的に高価であった場合にはその技術そのものの選択が回避されるべきであるが、技術の特性ではない社会的等の要因によって高価であった場合には、まずはその要因を除去する可能性が考慮されるべきである。この目的の

はなく、あくまでも制度のあり方に依存するものであって、従って広義・狭義の「発電コスト」の中には含まれるべきではない、ということになる。

積立方式による評価結果を広義の発電コスト(事故リスクに係る国民負担)と見なすことが適切でない理由は、他にもある。ここでは3つの点について述べる。まず第一に、ライブチヒ保険フォーラムの計算は「保険料」の算定を念頭に置いたものであるが、そもそも保険料の算定と国民負担の評価とは別のものであるためにそれらを混同することは好ましくない、という点が指摘される。例えば仮にライブチヒ保険フォーラムに準じて10年間で積立を行い、かつ事故発生頻度としては10年間に事故が発生する確率よりも発生しない確率の方が相当程度高い、と想定しよう。そして10年後の時点で未だ事故が発生しなかった場合には、事故被害額と同額の金額が既に積上ったことになり、その後に更に積立を行うのか否か、という判断に迫られる。そしてもしそこで積立をやめた場合には、その後に行われる原子力発電量に対しては事故リスクコストが一切かからない、ということになる(即ちより長期にわたる平均で見れば、結局は損害期待値による評価額と全く同じ金額がコストとしてかかるという結果になる)。これは10年という短い年数を想定した場合に顕著にわかることであるが、原子力発電の継続を想定する限りにおいて、運転寿命(40年)相当で評価を行ったとしても原理的には同じであろう。これが保険料の評価であればその積立相当分は高いリスクを冒した保険会社の利益となり、11年目以降も同様の積立を継続する、ということになるであろうが、国全体で積立を行う場合にはそれは当てはまらない。即ち国民負担を論じる場合には本来、原理上は科学的に推定可能な損害期待値をもとに評価を行うべきであり、積立方式で評価すべきではないことがわかる。

第二に、一般的な感覚からすれば原子力発電所の稼働数が増加すればそれに比例して事故リスクが増大し、事故リスクコストも上昇する、と考えるのが普通であろう。しかし積立方式によればそのような結果にはならず、ライブチヒ保険フォーラムの試算に見られるように、単純にプール数の「想定」に依存する。第三に、積立方式による評価は事故の発生頻度を用いない。即ち安全対策をいくら向上させ、発生頻度を低減させても事故リスクコストは全く変化しない、という結論にもなってしまう。

このようなことから、原子力損害保険の評価の際は別として、少なくとも国民負担を論じる際にあっては、上記②の方式(事故の発生頻度とは関係のない積立期間を想定し、割引計算を行う方式)ではなく、①の方式(発生頻度と事故被害額とから評価を行う方式)によって試算を行う方がより適切である。その際問題になるのは事故の被害額及び発生頻度をどう評価するかということと、「低頻度・高額損失」という原子力事故の特質をどう考えるか、ということであろう。これらについて次節以下で論じる。

### 3-1-2 損害期待値方式と事故発生頻度の評価

上述の通り、損害期待値による方法では事故リスク単価は本質的に一度の事故の被害額とその事故の発生確率から求められる。問題はその両者ともに正確な評価が難しいことであるが、これについて何らかの評価を行わない限り事故リスク対応コストの評価はできない。

事故の被害額については、例えばコスト等検証委員会では福島事故の被害額を評価・使用している。これについてはその後の情報を踏まえ、評価を更新することは可能であろう。但し福島事故はあくまでも福島事故であって、将来発生するかも知れない事故はそれと同一ではない。原子力事故を含むいわゆる「外部性」の評価のためにはMACCS<sup>23)</sup>、COSYMA<sup>24)</sup>、OSCAAR<sup>25)</sup>などの計算コードが開発されており、これによってより一般的な事例を想定した評価が可能となっている。即ち本来であれば福島事故の被害額をそのまま用いるのではなく、その経験を一つのサンプルとし、これらのコードの計算精度向上に役立てた上で、改めて適切な条件設定のもとで評価を行うことが望ましい。

より深刻な問題は事故発生頻度の評価であり、ここでの評価の不確実性は図2-2に示す通り事故被害額そのものよりも遥かに大きい。以下これについて検討を行う。

---

ために、技術そのものに起因する「発電コスト」と、それ以外の費用負担とは分けて評価されなくてはならない。例えば固定価格買取(FIT)制度の促進に伴う追加的費用は太陽光発電等の「発電コスト」そのものではなく、発電コストに適正な利潤を上乗せして賦課される国民負担分として位置づけられることに着目されたい。

## (1) 事故の発生頻度の評価に関する不確実性

IAEA の安全目標や PRA の結果として示される事故発生の頻度の値は、実際の事故の発生確率に対して一定の目安を与えるものである。むしろ後者は我々が合理的に把握できるほぼ唯一の確率評価手法であり、これについては今後も更に精度を向上させ、より適正な評価が行われるよう検討を続けるべきであろう。

但し PRA の結果は幾ら精緻であっても結局はモデルの試算結果なのであって、モデルである以上は実測のデータとの整合のチェックが必要となる。このため日本では福島事故、世界ではチェルノブイリ及び TMI 事故という限られた事故発生例と、日本ないし世界の累積原子炉運転年数から発生頻度を求めようとするのは自然な行為であるが、そこで誰もが懸念するのは対象とする事故の発生事例の少なさであろう。これが適切な懸念であることは、以下の簡単な検討からもわかる。

IAEA によれば、2013 年 12 月 31 日現在の原子炉累積運転年数は日本で 1,646 炉年、世界で 15,661 炉年である<sup>26)</sup>。但しここで日本の原子力発電所は福島事故の後に順次稼働を停止し、2014 年 12 月現在で 1 基も稼働していないにもかかわらず、停止後も「定期検査中」と見なされて運転年数に含まれている。仮に福島事故後に定期検査に入った時点以降の運転年数を炉年として計上しない場合には、運転年数は 1,460 炉年程度になる。そこで以下の計算では日本の累積運転年数として 1,460 炉年を使用し、それとの整合上、世界の累積運転年数としてその差分を減じた 15,470 炉年を使用する。

日本では 1,460 炉年の間に 1 度、福島相当の事故が発生した<sup>7)</sup>。この場合、事故の発生頻度は逆数を取って  $6.8 \times 10^{-4}$  炉年と計算される。同様に世界で仮に 3 度の事故と想定すると<sup>8)</sup>、事故発生頻度は  $1.9 \times 10^{-4}$  炉年となる(表 2-1 との微細な差は、日本では上記の通り福島事故後の稼働停止を考慮していることと、世界では 2011 年以降に運転経験が蓄積されていることによる)。

仮にこの日本の  $6.8 \times 10^{-4}$  炉年の発生頻度を用い、2011 年のコスト等検証委員会に準じて発電設備容量 1.2 GW、設備利用率 70%、事故被害額 5.8 兆円として(割引計算なしに)事故リスク単価を計算するとおよそ 0.54 円/kWh となり、ほぼ同委員会の数字と整合する<sup>9)</sup>。但し実際にはもしかしたら事故の「本当の」発生頻度はもっと低く、偶々 1,460 炉年に 1 度事故が起きてしまったのかも知れないし、或いは逆にそれは実はもっと高く、幸運にも 1,460 炉年に 1 度で済んだのかも知れない。いま 95% の信頼区間を採用し、古典的な統計学における Clopper-Pearson の信頼区間を求めると、「1,460 炉年に 1 度」事故が起きたという実績から推定される事故の発生頻度は  $1.7 \times 10^{-5} \sim 3.8 \times 10^{-3}$  炉年の間となり、上下限值で 200 倍以上もの相違があることになる(事故リスク単価の推定値はおおよそ 0.01~3.0 円/kWh となる)。

このレベルの幅をもつ推定をどう見るかは、それを用いてどのような比較をするかに依存する。例えばコスト等検証委員会の試算に準じるならば、原子力の発電単価は事故リスクコストを除いて 8.4 円/kWh である。これに上記の事故リスクコストを加算すると 8.4~11.4 円/kWh となる。少なくともこの試算に準じる限り、原子力の発電単価は事故リスクを含んだとしても、最低で 12.1 円/kWh (2030 年、価格の低減を見込んだケース)とされる太陽光発電よりは安価である、とは言えるかも知れない。しかしこの結果をもって例えば 2010 年時点で 9.5 円/kWh とされる石炭火力よりも高いと主張することは誤りであって、実際にはその比較については何も言うことができない。一般的には、これだけの幅をもつ推定結果は意味のあるものではない、と見るべきであろう<sup>10,11)</sup>。

<sup>7)</sup> 上述の通り福島第一原子力発電所の 1~3 号機を「3 つ」の事故例と見る場合、条件付き確率を用いた定式化が必要となる。その場合、事故発生確率のみでなく事故の被害額の想定に際しても、単一事故の場合と複数の原子炉の事故の場合とで異なる金額を想定することが必要となる。実際にはそもそも単基の事故発生頻度さえ正確に評価できない以上、それを更に進めた確率論が意味のあるものになるとは想定しにくい。いずれにせよ、何も事故がない状態から何らかの条件によって事故が発生する頻度は、日本では福島事故の「1 例」のみをもって評価すべきである。

<sup>8)</sup> ここでは 1971 年のスリーマイル島 (TMI) 発電所事故、1986 年のチェルノブイリ発電所事故及び 2011 年の福島第一発電所事故の 3 例を想定している。実際には TMI 事故では格納容器の破損は生じておらず、またその事故被害額はチェルノブイリ事故と比べて 1~2 オーダー程度小さなものと評価されているため<sup>27)</sup>、これらを同列に比較することの妥当性は疑問である。但しここではあくまでも仮に、TMI 事故を含めて 3 例と数えている。

<sup>9)</sup> 2015 年の発電コスト検証ワーキンググループでは上述の通り、追加的安全対策に応じた事故発生頻度の低減を暗に見込んでいるため、ここでは 2011 年のコスト等検証委員会試算に準じて記述する。但し仮に 2015 年試算の数値を用いたとしても、本節での論旨が大きく変化することはない。

<sup>10)</sup> 2-1 節で述べた通り、コスト等検証委員会では事故リスク単価の不確実性要因として福島事故の被害額が未確定であることが指摘され、仮に 5.8 兆円の被害額が 6.8 兆円に増加すると事故リスク単価は 0.50 円/kWh から 0.59 円/kWh に上昇する、とされた。確率

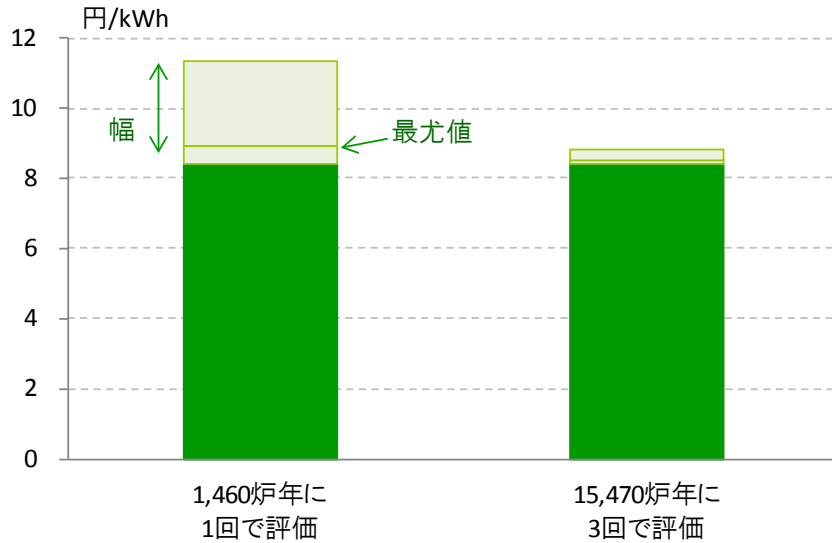


図3-1 事故被害額を 5.8 兆円とした場合の原子力発電単価（事故リスク含む）

「世界の 15,470 炉年の中で 3 回」で計算するとどうであろうか。1 回の発生回数が 3 回に増えただけで不確実性の幅はかなり縮小され<sup>12</sup>、95%の信頼区間での発生頻度は  $4.0 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-4}$  炉年、事故リスク単価の推定額は最尤値で 0.15 円/kWh、実際には 0.03~0.45 円/kWh と 10 倍強の幅となる。原子力発電単価に直すと 8.4~8.8 円/kWh、最尤値で 8.6 円/kWh である。これも十分に満足できる結果とは言い難いが、1 例のみで評価を行うことに比べれば不確実性の幅がかなり小さくなっていることは、図 3-1 から読み取れる。発電コスト評価というもの自体（事故リスク対応コストに限らず）の誤差から考えて、0.3 円/kWh 程度の不確実さであればぎりぎり許容しえる範囲内であるとも考えられよう。

## (2) 「低頻度・高被害額」の損失をどう考えるか

仮に原子力事故の被害額と発生頻度とがある説得力をもって評価されたとした場合、それが「低頻度・高被害額の損失」であるという観点からそのリスクはより大きなものとなる、という論点についてはどう考えるべきであろうか。即ちその高リスク分を何らかの形で評価して、損害期待値よりも高価な事故リスクコストを想定することは、どの程度妥当であるのか。この問題を考える際には、まず「高額であること」の意義はその主体の経済規模に依存する、という点を認識する必要がある。例えば私が自動車保険に加入する場合、数千万円ないし数億円という賠償額が私にとっては極めて「高額」である一方で保険会社にとってはそうではないため、私にとって

論的な観点からは、この言明も有意味ではないように思われる。5.8 兆円が 8 兆円になろうと 10 兆円になろうと、事故発生頻度の 100 倍の不確実さの影響の方がはるかに大きいからである。

<sup>11</sup> このような評価に際しては時に、原子力事故のリスクを「安全側」に見るという観点から、例えば 95%値をもって事故リスクを評価するのが適切である、というような主張がなされる場合がある（例えばライブチヒ保険フォーラムによる文献などからはこのような傾向が窺える）。但しこれは適切な評価ではないことを指摘しておきたい。一般的に原子力発電に限らず、例えば何かの機器の安全性を評価する場合には、そのような「安全側」の評価が行われる。これはある基準値を挟んで片方に「安全」があり、片方にのみ「危険」があるためにそのような評価が正当化されるものである。これに対し、コスト評価というものは本質的に両側に「危険」が存在するものである（例えば事故リスクに関して言えば、それを過小に評価することは事故が発生した際の経済影響が多くなるというリスクにつながる一方で、それを過大に評価することはより高価な他電源を誤って選択してしまうというリスクにつながる）。従って経済性を評価する際に、どちらかの方向にのみ偏った評価をすることは適切ではない。このような場合、まずは純粋に経済性のみからリスクを適切に評価した上で、もし（原子力の場合のように）それ以外のリスクが存在する場合には、それも含めて改めて政策的な判断がなされるべきであろう。

<sup>12</sup> これは我々の日常的な感覚からも想像される。仮に私が不注意によって交通事故を 20 年間に 3 回起した場合、「注意しないとまた何年後かには事故を起すだろう」と考えるのは自然である。しかしある人と別れてから 20 年後に、偶々どこかでその人とすれ違った場合に「20 年に一度会ったから次はまた 20 年後に会うだろう」と考えるとしたら、それは確率論ではない何かを信じていることになる。



のみ賠償のリスクは単純な期待値よりも大きなものとして認識され、その乖離によって保険の契約が双方を益するものとして成立する。この場合、本来私にとっての自動車損害賠償のリスクは保険金額よりも大きいにもかかわらず、保険に加入した場合には、それは累積の保険金額相当（一般的には賠償額の期待値よりも大きい）として価値換算されることになる。

この観点に立って、もし仮に電気事業者が何らかの保険制度によって原子力発電の事故リスクを外部に預けることができた場合には、事業者にとっての事故リスクは累積の保険金額として評価される。実際にいわゆる「狭義」の発電コストを考える場合には、そのような評価が妥当であろう。しかしより「広義」の発電コストとして国民全体の負担を評価しようとする場合には、状況は大きく異なる。即ちここでは逆に国の経済規模が保険会社の規模に比べて遥かに大きいために、国が保険会社にそのリスクを預けることは現実的ではなく、また仮想される保険金額によって事故リスクに係る国民負担を評価しようとするのも妥当ではない。実際、仮に一度の事故の被害額が累計で 10 兆円程度であった場合には、それは年間 500 兆円の GDP をもつ日本の経済全体を根底から覆す規模のものではなく（年収 500 万円程度の家計において、極めて低い頻度で 10 万円の損失が生じるような事態を想像されたい）、従ってそのリスクは概ね損害期待値に近いものとして評価されるであろう。

但し福島事故の被害額が仮に 10 兆円程度の規模で収まったとしても、将来発生するかも知れない別の事故の被害がそれと同等程度であるとは限らない。そしてそれが国の経済規模を遥かに超えるものとなる可能性が全くないわけではない以上、それが高額であることの「プレミアム」分が全くないと言うこともできない。但しそれは実際には貨幣価値に換算し得るものではなく、従って原理的に評価の対象とし得ないものと言うべきであろう（より詳細には別稿<sup>4)</sup>を参照されたい）。いずれにせよ原子力事故に係る国民負担を評価するためには、やはり事故被害額の期待値を算出し、適用することが最も適切であるように思われる。

### (3) 事故発生頻度の評価手法

(1) で述べた通り、原子力発電に伴う事故リスクの評価に当たって最も大きな不確実性となるのは事故の発生頻度の評価である。では、我々はそれをどのように評価することが適切であろうか。

我々が日常的に抱く「リスク」の観念が、往々にして合理的な判断に基づいたものでないことは広く認識されている。例えば D'haeseleer<sup>18)</sup>は飛行機事故と自動車事故の比較について、以下のように述べている。即ち 400 人の死者を伴う 1 回の飛行機事故は、1 人の死者を伴う 400 回の自動車事故よりも「深刻な」もののように考えられている。しかし実際に親しい知人にその事故が起きてみれば、自動車事故による死亡であろうと、飛行機事故による死亡であろうと全く同じように悲惨であることが理解される。このようなリスクに対する日常的な感覚の齟齬から、実際には車に乗ることの方が飛行機に乗ることよりもリスクが高いにもかかわらず、（恐らくは D'haeseleer 自身や筆者をも含め）大抵の人は飛行機に乗る際に漠然とした危険性をより強く感じるようになる。これと同様のリスクに対する認識のずれが、原子力発電について時に顕著に表れていることは極めて理解し易い。しかし一方では実際に存在するリスクについて、故意に過小に評価をすることもあってはならない。

では想定される事故の発生頻度として、我々はどうのようなデータを用いることができるであろうか？それを可能な限り客観的に評価しようとした試みが、上述の確率論的リスク評価（PRA）であることは言うまでもない。即ちこれは、理念的には想定し得る全ての事故発生パスについて一々の事象の生起確率を評価し、その総体として事故の発生頻度を評価するものであり、もしそれが妥当でないと判断される正当な理由があるのであれば、それも含めて改めて評価がなされるべきものである（補論に述べる通り、もし我々がそもそもこのような科学的な手法を信じないというのであれば、その「信じない」という根拠自体が改めて評価されなくてはならない）。即ち我々の努力はまず第一に PRA の精度の向上に向けられるべきであって、それによってより確実な評価を行うことが目指される必要がある。この PRA の評価結果と実測の事故の発生回数に関する（数少ない）情報とが、事故の発生頻度を評価するために用いることのできる情報の全てであると言える。

もし仮に我々が原子力発電の運転実績を持っていなかったとしたら、我々にとって妥当な事故リスクの評価は PRA の情報のみに基づいてなされるであろうし、それ以上に原子力の事故リスクが高いと主張することも、低いと主張することも根拠のないものとなるだろう。実際には我々は既に数十年にわたる原子力発電の実績をもち、数が少ないとはいえ事故の発生も経験しているために、その経験によって PRA の情報を評価し、修正することができる。そして実際の事故の発生頻度が（極めて幅の大きな不正確なデータながらも）PRA の評価結果よりも

高いように見えることにより、「本当の」事故発生頻度は PRA の評価よりも高いのではないかと、という懸念を多くの人が抱いている、というのが現状であると認識される。この観点からは、現在我々がもつ科学的な知識を集約したものとして PRA の結果を捉え、それと実測の事故発生頻度とを併用することによって現段階での最も合理的な評価を行おうとした Lévêque の考えも方向性としては適切なものであろう。但しベイズ統計の手法を用いた事故発生頻度の評価手法については、例えば我々が想定し得ない要因によって事故が発生するリスクについてどう考えるかなど、手法自体に関して更に検討を行うことが必要であると思われる。具体的には補論において述べる。

次いで生じる問題は、追加的な安全対策の効果をどう見るか、という問題である。例えば北海道電力泊発電所 3 号機では、格納容器破損頻度 (Containment Failure Frequency : CFF) について  $2.1 \times 10^{-4}$  回/炉年という評価結果が PRA によって示されている<sup>27)</sup>。これは福島事故後の追加的な安全対策を行わない場合の CFF であり、従って概ね 1,460 炉年に 1 回という実測の事故発生回数と比較することはできるかも知れない。しかし実際に、日本の原子力発電所では福島事故を踏まえて追加的な安全対策を実施している。その目的が事故発生頻度を低減させることである以上、安全対策後に予期される事故発生頻度が対策前に比べて全く低下しないと考えるのは不合理である。その低減の程度を評価するためには、PRA による評価が一定の役には立つであろう。但しその安全対策後の実際の事故発生頻度については、我々は何の実測データも持っていない。このため、実測されたデータと PRA の結果とをどのように扱うかについては、更に検討を行うことが必要となる。

#### (4) 安全性の確保と事故リスクコスト

このような検討は引き続き進められるべきであるし、その結果を踏まえて事故リスク対応コストについても常に適切な評価がなされ、更新されるべきであろう。ここでの我々の目標は、事故発生頻度の不確かさを可能な限り低減させることである。ここで図 3-1 に示す評価の幅を改めて見てみたい。我々が事故リスクをより高く評価するための材料は、この図の左に示す 1,460 炉年に 1 回という実測の事故発生頻度以外に存在しない。このため仮に事故の被害額がコスト等検証委員会の想定値よりも相当程度大きくなったとしても、それが原子力の発電単価に対して「実際に有意な影響を与える」ということを、明確な根拠をもって主張することは難しいように思われる (逆に評価の幅が小さくなる場合には、有意な影響を「与えない」ということを主張できる可能性はある)<sup>13)</sup>。ではもし何らかの方法で事故発生頻度の評価の幅が、例えば図 3-1 の右に示す程度まで低減された場合、事故のリスクは原子力の利用にとって大きな懸念事項とはならないと言えるのだろうか。明らかにそうではない、ように思われる。発電単価への寄与の大小にかかわらず、原子力事故は回避されるべく、最大限の努力が払われなくてはならないからである。

いま仮に、10 兆円の事故被害額を想定しよう。2,000 炉年に 1 度 (50 基の原子炉であれば 40 年に 1 度) の発生頻度を想定すると 0.7 円/kWh となる事故リスク単価が、10 万炉年に 1 度 (2,000 年に 1 度) ではわずかに 0.01 円/kWh となる。ここで考えられるべきことは、もし本当に 40 年に 1 度もの頻度で福島事故のような問題が発生するのであれば、コスト以前の問題として、原子力の利用は避けるべきである、ということであろう。そもそも原子力発電所の稼働に際しては安全対策等により事故の発生確率が著しく低減されることが前提となるのであって、もしそうであるならば事故リスクコストは極めて小さくなり、原子力の経済性に対して有意な影響を与えない。即ち、我々が原子力の利用の是非を考えるに当たって考慮すべきことは、事故リスクのコストではなく、むしろ安全性の確保が可能であるか否かという問題そのものである、と言える。

<sup>13)</sup> このことは、今後どんな場合にでも事故リスク対応コストを考える必要がない、ということの意味しない。補論において述べるように、もし今後再び、もしくは三たび福島レベルの事故が発生した場合には、少なくともベイズ統計的な意味での「主観的確率」としての事故発生確率 (頻度) は顕著に上昇する。

#### 4. まとめ

本稿では原子力発電の事故リスク対応コストについて欧州の事例を中心に既存の評価例をまとめた上で、その方法について整理し、今後この問題をどのように捉えるべきかについて考察を行った。事故リスクコストを評価する上で最も大きな問題となるのは、事故の発生頻度の評価の不確実性である。この評価の方法は未だ十分に確立されたものとは言えず、今後も検討が必要である。

但しそもそも原子力の利用継続のためには安全対策によって事故の発生確率を十分に低減することが不可欠なのであって、その前提のもとでは事故リスクのコストは原子力発電単価に対して大きな影響を与えない。一般に原子力を含む各種発電源の優劣を比較する際、コストの評価は多くの場合非常に強力な判断の根拠となる。しかしそのみが判断の根拠となるわけでは決してなく、我々は常にその他の要因をも含めて総合的に判断を行わなくてはならない。実際に今後、日本で原子力発電を行うことが適切であるか否かは、そこに十分な安全性を確保し得ると信じられるか否かにかかっている。まずはその点について十分な考慮を払った上で、その経済性については改めて考察がなされるべきであろう。

## 補論 ベイズ統計の手法を用いた事故発生確率の評価

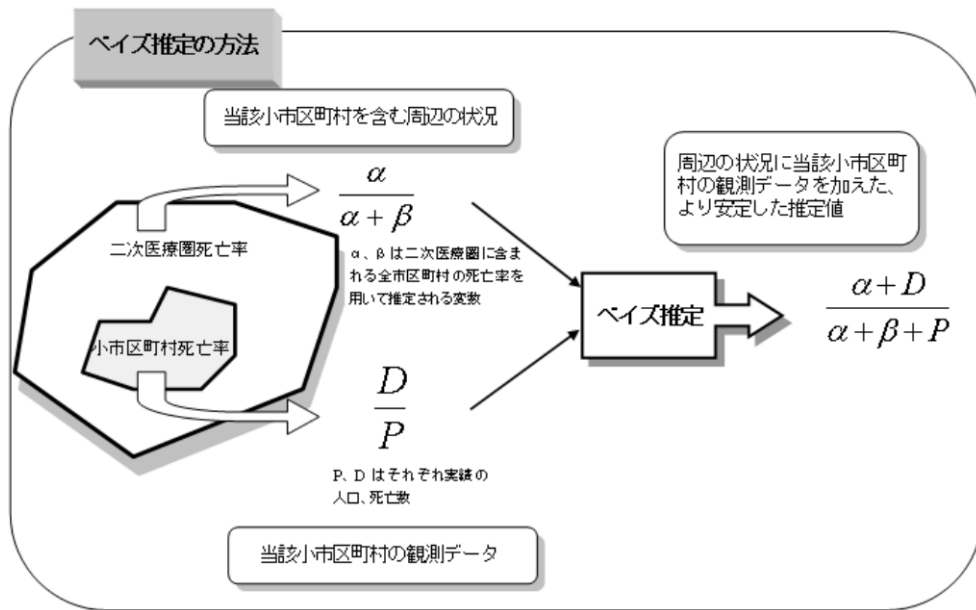
### (1) 主観的確率とベイズ統計

一般的に確率とは、事象の発生頻度のことを意味するものと理解されている。例えば何らかの試行を 100 回行ってある事象が 5 回生じた場合、その事象の発生確率は  $5 \div 100 = 0.05$  とされる。この理解のもとでは、確率を評価するためにはある回数にわたって繰り返された試行が必要となる。しかし実際には我々は、そもそも反復が不可能なものについてその「確率」を論じることがある。その例として、神の存在／非存在という本質的に反復されない(一度限りの)事象について確率を考えようとしたブレイズ・パスカルの議論を Lévéque は挙げている。パスカルに言及するまでもなく、日常を振り返れば我々は例えば明日という特定の日に〇〇という特定の事象が起きる「確からしさ」という、決して反復し得ない事象が生起する可能性について日々考えつつ生活を営んでいることがわかる。このような確率は、反復される試行における客観的な発生頻度とは異なるという意味において「主観的」な確率と呼ばれる。そしてベイズ統計とはこの「主観的確率」を扱う統計であると理解されている。

ベイズ統計ではある事象が起きた際に、その結果のデータを条件付き確率の定式化を用いて処理することにより、原因となる確率もしくは確率分布を推定することができる。例えば試行を 100 回行って 5 回の事象が生じた場合、その事象の発生頻度は 0.05 であり、そしてこの事象の発生確率は 0.05 であると「推定」される。ここで推定されるのは、その確率の最尤値(最もありそうな値)が 0.05 であるということであって、実際には 0.03 の確率であったものが偶々 5 回発生したのかも知れないし、0.1 の確率であったものが偶々 5 回しか発生しなかったのかも知れない。もしその「確率」についてより確実に評価したい場合には、我々は通常、より多くの試行を行うであろう。そして更に 900 回試行して 47 回の事象発生を見たならば、我々のもつその事象の(主観的な)発生確率は 0.05 から 0.052 へと上昇する<sup>14</sup>。

このような単純な試行の例では、主観的な確率(の最尤値)は結局は素朴な発生頻度と一致する。主観的確率の理論が効果を発揮するのは、その発生頻度とは異なる情報を、我々が予め何らかの形で持っている場合である。例えば我々が過去の情報からその事象の発生確率(の最尤値)は 0.1 だと評価していた場合、更に 100 回の試行を行って 5 回のみ事象発生を見たとすれば、その経験により我々の主観的確率は 0.1 よりも低下し、一般的には 0.1 と 0.05 との間の値となる。この方法を用いる利点として、第一には我々のもつ事前情報と、新たな経験による発生頻度という二つの異なる種類の情報を利用し、総合的な評価を行うことができる。第二には、仮に新たな経験での発生回数が少なく、従ってそれのみでは統計的に有意な結果が出にくい場合でも、事前情報を援用することによってある程度不確実性の小さな評価を行うことができる。例えば厚生労働省では事象の発生回数が少なく安定した値が出にくい小さな市町村の死亡率等のデータについて、当該市町村を含むより広い地域のデータを事前情報として用いることにより、ベイズ推定の手法を用いてより安定した評価を行っている<sup>28)</sup>。

<sup>14</sup>主観的確率とは我々が持っている情報を最大限に利用した場合に(あくまでも「客観的な」方法論に基づいて)推定される確率であって、我々の思い込みのようなものではないことに注意されたい。この意味において、例えば 3-1-2 節で述べた飛行機事故に対するリスク感覚のような、「主観的」な確からしさとは異なる。



(出所) 厚生労働省ウェブサイト

図 A-1 ベイズ統計による市区町村別死亡率の推定方法

ベイズ推定の具体的な計算方法については、関連する書籍を参照されたい<sup>15</sup>。一般的にはある「事前分布」(上述の事前情報を表現する母数の確率分布)に尤度関数(母数がある値をとる際に、実測されたデータが発生する条件付き確率)を乗じ、規格化を行うことにより求める事後分布(結果として得られる母数の確率分布)が計算される。

(2) 既存データを用いた事故発生頻度の評価

いま、原子力事故の発生頻度(1 炉年当りの事故発生確率)についてどう評価すべきかを考える。この評価のために我々が現在持っている情報を改めてまとめると、表 A-1 の通りとなる。

表 A-1 事故発生頻度と PRA による評価結果

	運転経験 (炉年)	事故発生 回数	事故発生頻度 (回/炉年)	95%値
事故発生実績(世界)	15,470	3	$1.9 \times 10^{-4}$	—
事故発生実績(日本)	1,460	1	$6.8 \times 10^{-4}$	—
PRA評価結果(例:米国、CDF)	—	—	$6.5 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-4}$
PRA評価結果(例:泊3号機、CFF)	—	—	$2.1 \times 10^{-4}$	$7.7 \times 10^{-4}$

(出所) NRC<sup>17)</sup>、Lévêque<sup>16)</sup>、北海道電力<sup>27)</sup> 及び筆者作成

ここで米国のPRAの結果はCDFの値であり、LERFの値はその0.1倍程度とされることに注意が必要である。また日本については福島事故の後に改めて各発電所で PRA が実施されているが、ここでは例として北海道電力

<sup>15</sup> 例えば繁樹算男『ベイズ統計入門』, 東京大学出版会。

泊 3 号機の結果を記載している。但し泊 3 号機の PRA 評価結果は追加的安全対策前のものであり、従って以下評価が試みられる事故発生確率は「追加的安全対策を行わなかった場合」の確率であることには注意を要する。いずれにせよこれらの PRA と事故発生回数の情報のみから、可能な限り適切と思われる方法を用いて事故リスクを評価しなくてはならない、というのが現在我々に与えられた課題である。

### (3) Lévêque の方法とその適用

Lévêque は NRC の示す CDF の値及びそのその 95% 値 (95% の蓋然性で発生頻度とその値以下となる数値) を用いて、ベイズ推定における事前分布を次のベータ分布によって近似した。

$$\pi_0(p) = Be[st, s(1-t)] = \frac{p^{st-1}(1-p)^{s(1-t)-1}}{B(st, s(1-t))} \quad (1)$$

ここで  $p$  は事故発生頻度、 $t$  は発生頻度の期待値を示すパラメータ ( $6.5 \times 10^{-5}$ )、 $s$  は分布の「強度」を示すパラメータ (24,869)、 $B$  はベータ関数である。

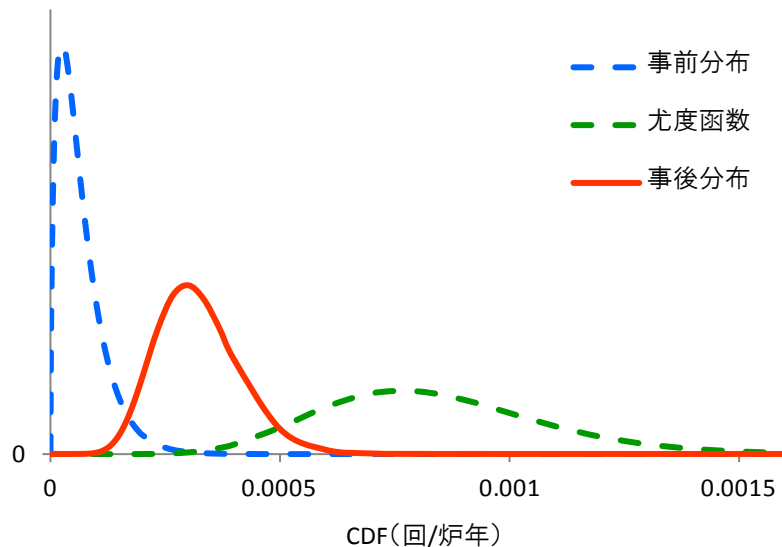
この事前分布に対し、Lévêque は実測の事故発生データとして、過去の世界の原子力発電所の運転年数  $n$  を延べ 14,400 炉年、その中で炉心が損傷した事例数  $y$  を 11 例として用いた。即ち炉心損傷事故の発生頻度は  $7.6 \times 10^{-4}$  回/炉年となり、PRA の結果から得られる頻度 ( $6.5 \times 10^{-5}$  回/炉年) と比べて 10 倍程度高いことになる。これによりベイズ更新を行って事故発生頻度の事後分布を求めると、その結果はやはりベータ分布となり

$$\pi_1(p | y) = Be[st + y, s(1-t) + n - y] \quad (2)$$

と表される。これによって示される事故発生頻度の期待値は

$$E(p | y) = \frac{y + st}{n + s} \quad (3)$$

である。上記の数値を代入すると、実際の運転 (及び事故) の経験を踏まえた事故発生頻度の平均値は  $3.2 \times 10^{-4}$  回/炉年となる。この方法により Lévêque は、PRA による (より低めの) 事故発生頻度と実測の (より高めの) 発生頻度との両方のデータを用い、それらの中間的な値として、総合的に評価される事故発生頻度を求めたことになる (図 A-2)。



(註) 本図では比較のため、事前・事後分布の他に尤度函数も 1 に規格化されている

図 A-2 Lévêque による CDF の評価例

ここでの問題は、もしこの  $3.2 \times 10^{-4}$  回/炉年という CDF の平均値を点推定値とした場合、この値は 14,400 炉年中 11 例という「実測データ」のみから推定される CDF の 95%信頼区間下限を下回る、ということである。勿論 95%という信頼水準は便宜的に置いたものには過ぎないが、いずれにせよもし仮に CDF が  $3.2 \times 10^{-4}$  回/炉年であれば、14,400 炉年の間に 11 例またはそれ以上の事故が発生する確率は非常に低い (2-2-5 節に述べた通りそれは 0.8%である)。ここで何が生じているかは図 A-2 を見ればわかる。即ち元の前提となる PRA データによる分布と 11 例の実測データから推定される分布とが交わる部分は非常に小さく、互いにほとんど相容れない状況になっている。この状況から考えられることは、事前分布である PRA のデータが信頼できないものであったか、実測のデータが適切なものでなかったか、もしくは事前分布と実測のデータが異なるものを見ていたか、の何れかである。

「14,400 炉年中 11 例」というカウントの仕方が適切でないということは十分に考えられる。Lévêque 自身の説明によれば、11 例の事故の大半は原子力利用の初期に起きたものであり、その後の運転経験の蓄積に伴い安全性が向上している。また 2-2-5 節で述べた通り、D'haeseleer は CDF の定義上、11 例のうち 5 例のみがカウントされるべきものだとしている。更に、そもそも同節の脚註で述べたように、福島第一原子力発電所の 1 号機～3 号機の炉心損傷は独立な事象でないため、それを独立であるかのように推計することは適切ではない。これらの要因を考慮することによって「実測」の事故発生回数が 11 例よりも小さく見積もられるならば、図 A-2 に示す尤度函数はより PRA の分布に近いものとなり、上述の問題は緩和される。また一方で、PRA のデータの信頼性に問題があり、実際の CDF はより高いところにあった、という可能性も否定はできないであろう。

このような問題はあっても、今のように我々が PRA と実測のデータ以外の情報を持っていない場合、それらを繋ぎ合わせる方法の一つとしてこの方法を考えることは確かであろう。以下、これを我々の持つ情報に合わせてそのまま踏襲した場合、どのような結果となるかを考える。

D'haeseleer が述べた通り、事故リスクの評価に当っては CDF ではなく、LERF を用いなくてはならない。但し D'haeseleer の修正では CDF/LERF 比はベイズ更新を終えた後の値に外生的に乗じられており、この意味においてベイズ更新を経していない。本稿では概念上、事故被害に結び付く LERF を直接の対象として評価を行うこととする。このように「炉心」ではなく「大規模事故の発生回数」でカウントをすることにより、福島を「1 例」の事故と見做し、2-2-5 節の脚註で述べた条件付き確率の問題を回避することができる。

これらの点を踏まえて改めて事故発生頻度 (LERF) を評価すると、以下の通りとなる。まず事前分布は NRC

に基づき式 (1) と仮定されるが、ここで  $t$  は CDF/LERF 比を考慮して  $6.5 \times 10^6$  とする。問題となるのは  $s$  の設定であり、Lévêque は事前函数の 95% 値が PRA のそれと一致するように  $s$  を設定した。もし CDF/LERF 比が 0.1 で固定した値であれば  $t$  と同様に 95% 値も 0.1 倍となるように設定すれば良いこととなるが、実際には CDF/LERF 比にもばらつきがあることが予想される。この比についてはかつて ExternE においては 1/5 程度 (0.19 程度) と置かれていたが、その後この比の評価結果は低減し、近年では 0.1 以下程度とされている。ここでは仮に、CDF の 95% 値の 1/5 が LERF の 95% となるように  $s$  を設定しよう (具体的には  $s=32,500$ )。これに対し、表 A-1 に示す世界の原子炉運転経験 ( $n=15,470$ ) と事故発生回数 ( $y=3$ ) を踏まえ、事後分布及び事故発生頻度の期待値は式 (2) 及び (3) によって計算され、最終的に得られる LERF の点推定値 (平均値) は  $6.7 \times 10^{-5}$  回/炉年となる。これは 2-2-5 節に示す D'haeseleer の評価結果よりも 4 倍程度大きな値である。即ち D'haeseleer は LERF に相当する事故発生実績として実質的に 5 件  $\times$  0.1 (=0.5 件相当) としているのに対し、本試算では 3 件としているために、より大きな評価結果となっている。95% の信頼区間での LERF の値は  $1.5 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-4}$  回/炉年となる。

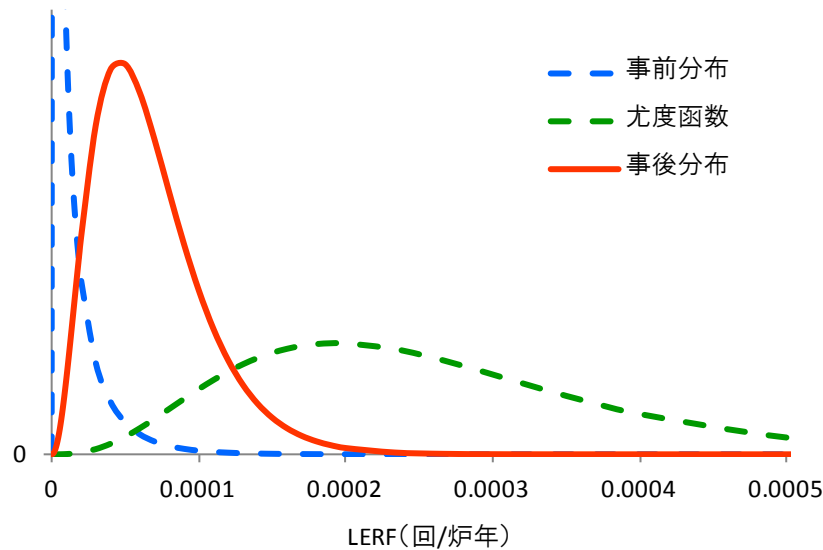


図 A-3 LERF の評価例

LERF の点推定値  $6.7 \times 10^{-5}$  回/炉年は実測データのみから推定される LERF の 2.5% 値  $4.0 \times 10^{-5}$  回/炉年よりもやや大きく、その点において上述の Lévêque の推計結果に比べるとデータ間の齟齬は少ないと言える。但し事前分布の 97.5% 値よりも大きいことになりはなく、従ってこの点推定値の LERF の値を信ずることは、同時に PRA の結果を幾分とも疑うことであるように思われる。これに対処する方法の一つは、実測のデータを改めて見直すことである。例えばここで 3 例としている原子力事故の件数から TMI 事故を除いて 2 例とする、もしくは 2-3 節で述べた評価例のように、福島事故は明らかな「設計ミス」であると見做し、PRA が想定する正当な設計がなされた上で発生した事故のみを評価の対象とする、などである。もう一つの方法は、文字通り PRA のデータの信頼性自体を疑う要因を組み込んで、モデルを構築することである。

実際、上述の定式化において LERF の点推定値が PRA の結果と実測の頻度との中間のどこに位置するかは、PRA の結果 (95% 値) から推計される強度パラメータ  $s$  に依存する。この方法では PRA の結果がより幅の狭い、即ち 95% 値が平均値に近い結果であるほどこの結果はより「確かな」ものと評価され、従って LERF の計算結果は実測の事故発生頻度よりも PRA の結果により近い値となる。この PRA における評価の幅は、その計算過程での個々の事象の評価の幅を総合したものである。しかし我々が実測の事故発生頻度をもとに PRA の結果に疑問を抱き、その数値を修正しようと試みる場合、我々が問題とするのは必ずしも PRA を構成する個々の事象の評価幅ではなく、PRA という評価方法そのものの信頼性なのではないだろうか？ 換言すれば、我々が原子力事故というものに対して漠然とした、しかし決して拭い去ることのできない不安を覚えるのは、PRA やその他の評価で予期されていなかった「想定外」の事態が常に起り得るという意識を、我々が根強く持っているからではない



だろうか。実際に我々が想定する以上の地震動が発生する可能性は福島事故以前から「残余のリスク」として認識はされていた。そして想定されない事象が発生し、重大な原子力事故につながる可能性があるのは地震に限ったことではない。我々が原子力について抱く最も本質的な懸念は、我々が理解する原子力発電というシステムの「外部」から襲来する危険に関するものである。この要因に関する評価を行うことが、我々が原子力に関して抱く不安を説明するためには必要であると思われる。

このような問題意識のもとで、新たな定式化を行うことは可能である。詳細は別項に譲るが、例えばまず外部要因に関する  $\omega$  という 2 値変数を考え、 $\omega=0$  の場合には PRA による評価は有効なものとされる一方で、 $\omega=1$  の場合には PRA で想定しない「外部要因」によって事故が発生する、とする。この「外部要因」は我々が事前に認知し得るものではなく、従ってその発生確率についても何の情報も知り得ない。そして  $\alpha_0$  を「PRA の事前信頼度」とし、事前分布では  $\omega=0$  の領域の積分値は  $\alpha_0$ 、 $\omega=1$  の領域の積分値は  $(1-\alpha_0)$  となるようにする。具体的に、例えば我々が PRA という特殊科学にある程度の信頼を置くものとし、事前信頼度  $\alpha_0$  を 0.8 と設定しよう。

これに対して実測のデータを用いてベイズ更新を行うと、事後信頼度として例えば  $\alpha = 0.29$  といった値が得られる。即ちこの例では事前分布と実測データとの乖離が大きいため、PRA に対する信頼度が大きく低下しており、PRA による事前分布と事後分布、外部要因による事後分布と加重平均によって与えられる最終的な事後分布は下図のようになる。

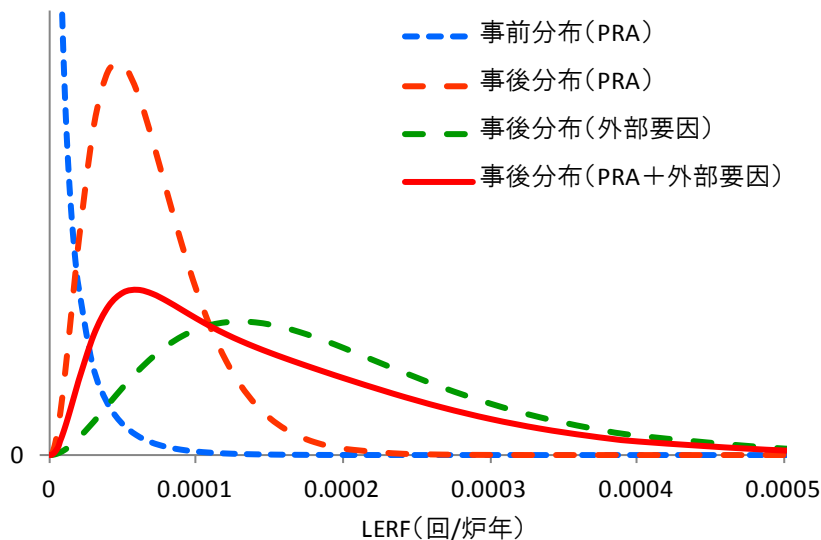


図 A-4 外部要因を考慮した LERF の評価

#### (4) 事故発生頻度の評価：日本の事例

以上述べた事故発生頻度の評価手法を日本の事例に適用すると、例えば以下の通りとなる。まず実測の事故発生頻度については、上述の通り  $n=1,460$ 、 $y=1$  と想定する。PRA については福島事故の後電力各社によって評価が行われているが、ここでは例として北海道電力・泊発電所 3 号機の評価例のデータを用いる<sup>27)</sup>。

福島事故後の日本の PRA では、一般的に LERF ではなく格納容器破損頻度 (Containment Failure Frequency : CFF) が評価されている<sup>16)</sup>。ここではこの CFF を評価の対象とする。泊 3 号機のデータは表 A-1 の通りである。この平均値及び 95% 値に適合するようにベータ分布のパラメータを定めると、 $t = 2.1 \times 10^{-4}$ 、 $s = 2,710$  となる。

<sup>16)</sup> 格納容器が破損することは事故後の早期に大規模放出が生じることに對してほぼ必要條件であるのに対し、十分條件ではないため、一般的に CFF は LERF よりも大きい。LERF を評価する「レベル 2 の PRA」に対し、CFF を求める PRA は「レベル 1.5 の PRA」と呼ばれる。

まずはこれらのパラメータを用い、Lévêque の方式に準じて事後分布を作成すると、事後分布における CFF の期待値は  $3.8 \times 10^{-4}$  となる。これに対し、前節で述べたように仮に PRA への事前信頼度を 0.8 としてベイズ推定を行うと、事後信頼度は 0.88、CFF の期待値は  $4.4 \times 10^{-4}$  となる。即ちこの場合は前に述べた事例とは異なり、1,460 年に 1 回の事故が PRA の信頼度を損ねず、逆に信頼度を高めていることがわかる。また 95% 信頼区間は  $3.2 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-3}$  となり、エラーファクター (EF : 信頼区間の上下限値の比の平方根) は 5.7 と、PRA を考慮に入れない場合 (EF=12.1) に比べてかなり誤差の幅が低減される。

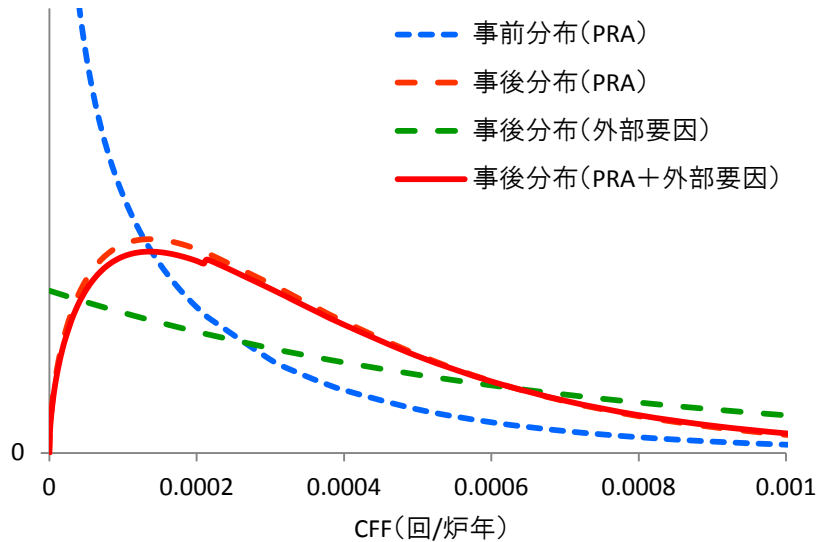


図 A-5 外部要因を考慮した CFF の評価

この例では、外部要因を考慮に入れた場合と入れない場合の結果がそれほど大きく変わらない。しかし事故の発生回数  $y$  の値を変化させると、両者の差はより大きくなる。即ち図 A-6 に示す通り、 $y$  が大きくなるにつれて外部要因を考慮に入れた CFF 値は外部要因がない場合に比べてより急速に大きくなり、素朴な事故発生頻度により近づくことになる。実際、もし今後国内で原子力発電所を稼働させ、その上でもし万一大きな事故が再び・三たび連続して発生したような場合には、人々の多くは PRA を信頼せず、従って人々の想定する CFF は素朴な事故発生確率により近くなるであろう。外部要因を考慮することにより、そのような状況についてより適切に表現できることが図 A-6 から読み取れる。

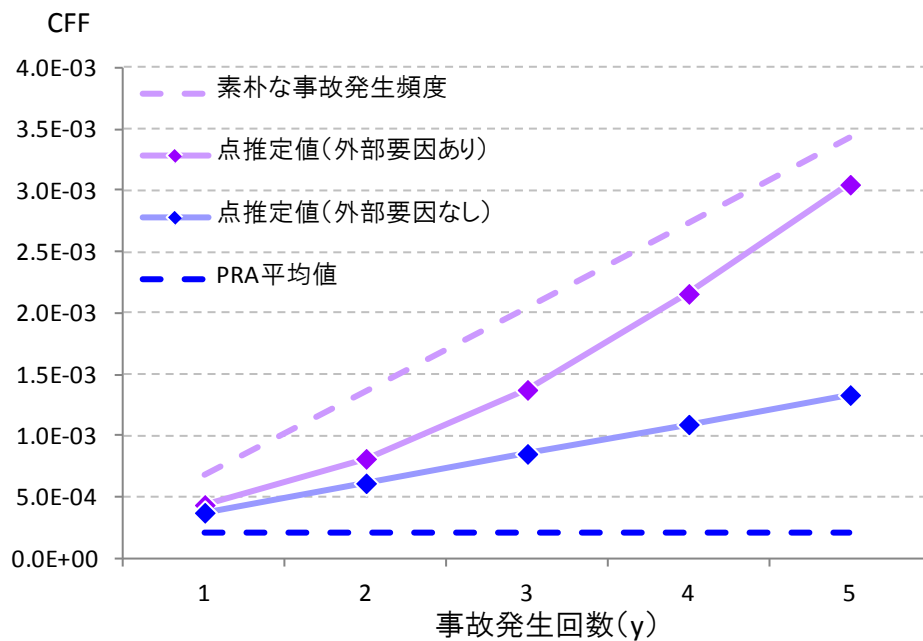


図 A-6 事故発生回数  $y$  の変化による影響

(6) まとめ

以上述べたように、ベイズ統計の手法を用いることにより、PRAによる事故発生頻度の評価結果と実測の事故発生頻度双方を考慮して事故発生頻度を推定することができる。またそれにより、評価の不確かさはある程度緩和される。但しその結果は事前分布の置き方のみならず、試算方法そのものにも依存して大きく変化する。適切な方法については今後も検討が必要であろう。

## 参考文献

- 1) コスト等検証委員会, 「コスト等検証委員会報告書」, (2011).
- 2) 発電コスト検証ワーキンググループ資料, 2015 年 5 月,  
[http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/#cost\\_wg](http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/#cost_wg)
- 3) OECD/NEA, “Nuclear Electricity Generation: What are the External Costs?”, (2003).
- 4) 松尾雄司, 下郡けい, 鈴木敦彦, 「原子力発電コストに係る主要な論点とその評価」, 日本エネルギー経済研究所 HP, (2014).
- 5) コスト等検証委員会, 「事故リスクへの対応コストについて」, 第 4 回委員会配布資料 4, (2011).
- 6) OECD/NEA, “Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources”, NEA No.6861, (2010).
- 7) European Commission, “ExternE Externalities of Energy Methodology 2005 Update”, EUR 21951, (2005).
- 8) U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), “Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants: Final Report”, NUREG-1150, (1990).
- 9) Versicherungsforen Leipzig “Calculating a risk-appropriate insurance premium to cover third-party liability risks that result from operation of nuclear power plants”, (2011).
- 10) L. Pascucci-Cahen and M. Patrick, “Massive radiological releases profoundly differ from controlled releases”, EUROS SAFE conference, (2012).
- 11) Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), “Méthodologie appliquée par l’IRSN pour l’estimation des coûts d’accidents nucléaires en France”, (2013).
- 12) A. Rabl and V. A. Rabl, “External costs of nuclear: Greater or less than the alternatives?”, *Energy Policy*, 57, (2013), pp.575-584.
- 13) A. Markandya, A. Bigano and R. Roberto Porchia, *The Social Costs of Electricity: Scenarios and Policy Implications*, Fondazione Eni Enrico Mattei, Edward Elgar Publishing Ltd, (2010).
- 14) Cour des comptes, “The costs of the nuclear power sector”, Thematic public report, (2012).
- 15) F. Lévêque, “Estimating the cost of nuclear power: benchmarks and uncertainties”, Working Paper 13-ME-01, (2013).
- 16) F. Lévêque, “The risk of a major nuclear accident: calculation and perception of probabilities”, Working Paper 13-ME-02, (2013).
- 17) U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), “Individual Plant Examination Program: Perspectives on Reactor Safety and Plant Performance”, Final Summary Report, NUREG-1560, (1997).
- 18) W. D. D’haeseleer, “Synthesis on the Economics of Nuclear Energy”, Study for the European Commission, DG Energy, Final Report, (2013).
- 19) R. Torfs, “Externe kosten van elektriviteitsproductie – Fase 3 van het CO<sub>2</sub>-project”, (2001).
- 20) NewExt, “New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies”, EU FP5 Project, Final Report, (2004).
- 21) P. Preiss, S. Wissel, U. Fahl, R. Friedrich and A. Voß, “Die Risiken der Kernenergie in Deutschland im Vergleich mit Risiken anderer Stromerzeugungstechnologien”, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, (2013).
- 22) Cour des comptes, “Le coût de production de l’électricité nucléaire Actualisation 2014”, (2014).
- 23) D. Chanin and M.L. Young, “Code Manual for MACCS2: Volume 1, User’s Guide”, NUREG/CR-6613, (1998).
- 24) J.A. Jones et al., “PC Cosyma (Version 2): An accident consequence assessment package for use on a PC”, EUR 16239 EN, (1996).
- 25) T. Homma, K. Tomita and S. Hato, “Uncertainty and sensitivity studies with the probabilistic accident

consequence assessment code OSCAAR”, *Nuc. Eng. and Tech.*, 37(3), (2005), pp.245-258.

- 26) International Atomic Energy Agency (IAEA), “Nuclear Technology Review 2014”, GC(58)/INF/4, (2014).
- 27) 北海道電力株式会社, 「泊発電所 3 号機確率論的リスク評価 (PRA) について 補足説明資料」, 第 55 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, (2013).
- 28) 府川哲夫, 清水時彦, 「小地域生命表のベイジアン・アプローチ」, 『人口学研究』, 13, (1990), pp.37-49.

お問い合わせ: [report@tky.iecej.or.jp](mailto:report@tky.iecej.or.jp)