

■ 展望・解説 ■

原子力安全評価について

佐藤 一 男*

Kazuo Sato

1. はじめに

原子力は、我国においても既に総発電量の26%程度を占め、今や不可欠のエネルギー源となっている。然し、最近のソ連のチェルノブイリ事故を待つまでもなく、原子力の利用には、安全確保が大前提であることは、開発の当初から意識され、努力もされてきたところである。一体、現在の原子力の安全性はどの程度のもなのだろうか。原子力の危険性は、容認できる程低いものなのだろうか。これらの疑問に答えるためには、原子力安全性の評価の方法についての理解と合意が必要である。

ところで、「安全」という言葉は、様々な場所で様々な意味で使われている。従って、原子力安全を論ずる場合には、そこで言う「安全」の意味を明確にする必要がある。また、「安全性評価」とは、何をどのように定量化すれば良いのかを明らかにしておく必要がある。本稿では、先ずこの点から議論を始め、続いて現在の原子力界における安全評価の考え方を紹介することとする。

2. 原子力安全の特徴

安全とは、一般にはある危険にたいして、人あるいは物を保護することと解されるが、原子力においては、この保護の主要な対象は、一般の公衆であるとされている。(もちろん、このことは、従事者の保護は無視しても良いなどと言う意味ではない。)従って、原子力安全を論ずる時には、注目している施設と、周辺の社会とを並置して、その相関関係を念頭に置く必要がある。換言すれば、施設と社会の相関の度合いが低いということは、施設の安全性の一つの重要な要素になりうると言うことで、従って、立地選定と立地評価は、安全性重要な因子になると言うことになる。

更に、原子力に限らず、一般に人間の活動の規模がある程度以上増大すると、安全に対する社会の要求の内容が変化することは、しばしば経験されることである。原子力においても、施設の基数容量の増大にとともに、安全上の要求も一層厳しくなる傾向があり、同時に安全評価の精度の確度に対する要求も厳しくなっていく傾向が認められる。特に最近、事故の影響が場合によっては全地球的規模に達しうることから、国際協調と整合の必要性が叫ばれている。

最後に指摘しておくべき点は、原子力安全では、考察の対象となる危険は専ら放射線被曝に係わるものだという点である。この、やや特殊とも言える危険を対象とするところに、原子力安全の特徴があり、他の様々な危険と比較する際に、時として困難が生ずることがある。例えば、放射線は原子力施設がなくとも既に天然に相当量存在しているのであるが、この事実は意外に知られておらず、放射線の危険(これを軽視するつもりは毛頭ないが)が他の危険に比べて過大に受け取られている例にしばしばお目にかかるのである。

3. 安全評価上の主要因子

3.1 事故時の安全性

原子力施設の代表的なものは原子炉であるが、その安全性を論ずる場合には、主として事故時の影響が取り上げられ、従って安全性の評価も、事故の解析に基づくことが多い。この主な理由は、平常時の公衆の放射線被曝が、既に極めて低いレベルになっていることであり、平常時の安全は十分に達成されているということである。ちなみに、平常時の公衆の線量目標値は、軽水炉の場合全身5ミリレム、甲状腺15ミリレムで、現実の被曝はこれより更に低い、これを天然の放射線による被曝約100ミリレムと比較すれば上に述べたことは明白であろう。

事故や異常状態には、その発端に原因となるべき事象(起因事象)があり、それが収束するまでに一連の

日本原子力研究所原子炉安全工学部長
〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

事象の連鎖がある。この一連の事象連鎖を「事故シーケンス」と呼んでいる。同じカテゴリーの起因事象にたいして、無限の異なる事故シーケンスが生じうる。従って、すべての事故シーケンスを事前に取り上げて検討しておくということは、原理的に不可能であり、ある特定の事故シーケンスが現実には発生する確率はゼロである。これを要するに、事故というものは、常に「不測の事故」である。このことは、我々が事故というものを考える時に忘れてはならないことである。

3.2 代表事象の選定—DBE—

すべての事故シーケンスを事前を考えることは不可能であるが、一方、事故対策をたて、これを評価するには、何か具体的なシーケンスを与える必要がある。そこで、あるカテゴリーに属するシーケンスについて、少数の代表事象を想定し、これについて考察するのが普通である。設計のために想定される事象を、設計ベース事業（Design Basis Event, DBE）と呼んでいる。DBEは、この事象に対して対策を講ずることによって、現実には生ずる事故シーケンスのある範囲（これを「設計ベースによって包絡される範囲」と呼ぶ）に対して有効な対策が用意されることとなることを意図して定められるもので、この目的に沿って、場合によっては非現実的な仮定を含むことがある。いわゆる安全審査で評価されるのは、概ねDBEの解析結果である。

実際の事故が生じた時に、これを設計ベースによって包絡されている範囲に留めるためには、次の三つの安全機能が特に重要とされている。すなわち

- ①核分裂反応の停止
- ②炉心の冷却
- ③放射性物質の閉じ込め

この三つの機能の意味は次のとおりである。安全確保とは、結局は放射性物質の環境への放散を防止することであるが、そのために何重もの防壁（これについては後述）を設けることになる。しかし、炉心で発生しているエネルギーは膨大なもので、この極く一部でこれら防壁を破壊することができる。そこで、まず炉心のエネルギー発生を停止することが大切になる。ただし、核分裂反応は停止しても、炉心にある放射性物質の崩壊熱だけでも、防壁を破壊するには十分なので、停止後も炉心の十分な冷却は不可欠である。また、防壁の一部が、何らかの理由で壊れることそのものが、起因事象になりうるので、その時にも他の防壁が機能することが必要である。

3.3 苛酷事故

各種の安全対策により、事故が発生してもこれを設計ベースの範囲内に留めるよう万全の対策を講ずることとするが、場合によっては事故が設計ベースの範囲を超えてしまうこともある。このような事故を、最近では、苛酷事故（Severe Accident, SA）と呼んでいる。TMI事故やチェルノブイリ事故はDBEを超えたSAの典型的例である。このような事故の可能性は、古くから意識されてきたが、特にTMI事故以降世界的に研究が進展している。

SAのシーケンスも極めて多様であるが、典型的なプロセスは次のようなものである。何らかの理由で炉心の冷却が極めて不十分なまま推移すると、燃料温度が上昇し、遂には炉心の崩壊、熔融にいたる。それでも熔融物が原子炉圧力容器内に留まっている間は、放射性物質の環境への放出は限られたものとなる。TMI事故がその例である。しかし、圧力容器が破壊されると、最後の防壁である格納容器の機能が喪失する確率が高まり、極めて大量の放射能放出に至る可能性が増大する。このようなことから、SAの評価上の重要因子は次のようなものである。

- ①設計ベースを超える要因は何か、その発生確率はどの程度か。
- ②炉心損傷のプロセスと損傷炉心の冷却可能性。
- ③格納容器内の現象と格納容器の健全性。
- ④以上のプロセスにおける放射性物質の挙動。

この中でも、最近では、最終的に環境に放出される放射エネルギー（ソースターム）とこれに対する主要決定因子である格納容器の健全性に関心が集中している。

4. 安全確保の基本的アプローチ

4.1 多重FP障壁

DBEの範囲であれ、これを超えるものであれ、原子力安全の目標が結局は公衆の放射性被曝を防止低減することにあるので、安全確保の再重要項目は、施設内の放射性物質、中でもその大部分を占める核分裂生成物（FP）を如何に閉じ込めるかということである。FPの放散を防止するために、何重もの「障壁」が設けられており、これを「多重FP障壁」と呼んでいる。これらの障壁が健全であれば、周辺の公衆の被曝量は極めて低い水準に維持できる。これらの障壁は、もちろん何の理由もなく健全性を失うことはありえず、機能喪失に至るには、何らかの異常な力やエネルギーなどが加わる必要がある。見方を変えれば、最終的には

多重障壁に脅威を与えるような事象が事故であるとも言える。従って、安全評価の核心をなすものは、多重FP障壁にどのような力やエネルギーが加わり、障壁がこれに対してどこまで健全性を維持できるかを明らかにすることであると言える。

4.2 多重防護 Defence in Depth

多重FP障壁の健全性を維持するための対策をたてるに当たっての指導原理とも言べき考え方は、多重防護(Defence in Depth)である。この考え方は、安全確保対策の多層構造を求めるもので、具体的には次の三つのレベルから構成される。

- ①第1のレベル：異常発生の可能性の低減
- ②第2のレベル：異常の波及拡大の防止
- ③第3のレベル：異常拡大時の影響の緩和

この基本的考え方が、どのように具体化されているかを調べることも、安全評価における重要な部分である。そこで、最近のチェルノブイリ事故について、これを見てみよう。

この事故は、「反応度事故」と呼ばれるものの典型的例であるが、反応度事故そのものは、かなり古い研究の歴史があって、事故時の各部の挙動等もかなり良く調べられており、防止対策も良く知られているものである。それにもかかわらずこの事故が発生したのは、運転員の重大な規則違反が直接の原因とされているが、この炉のかなりユニークな特性(この炉はボイド係数が正であるなど動特性や安定性に問題がある)が背景になっており、これに対して、このような特性の炉では特に重要な緊急停止系の設計には疑問を呈する意見が多い。すなわち、緊急停止機能が、運転員の判断と操作に大きく依存しており、これに対してインターロック、警報あるいは自動停止などのバックアップが何も用意されていなかったのである。このため、運転員の規則違反により、原子炉が極めて不安定な状態になったことに加えて、停止系の機能が大きく阻害された状態になり、事故に至ったものである。これが、多重防護の思想と合致しているかは、当然疑問視されるところで、事実、ソ連も事故後にいくつかの改善策を発表している。一方、多重防護によって、事故の拡大防止や影響緩和が可能になった事例は多数に上り、例えばTMI事故もその一つであると言え、多重防護の考え方の正しさをむしろ裏書した事例であるとも考えられている。

5. 評価と解析の方法

5.1 決定論的評価

以上を踏まえて、安全評価を行うために、多くの場合大規模な解析計算を行うことになるが、その際に二つのアプローチがある。一つは、決定論的評価と呼ばれるものであり、他は確率論的評価である。決定論的評価では、着目する事故などの事象の発生を前提として、この事象に対する安全系の動作条件も仮定して計算を行うもので、DBE解析や立地評価解析などはこの代表的なものである。例えば、軽水炉の代表的事故である、冷却材喪失事故(LOCA)では、原子炉冷却系配管の任意の場所に様々な大きさ、体様の破断が、何らかの理由で生じたことを前提にして、これに対する安全系統、例えばECCSの機能と性能を評価する。安全系統は、外部電源の喪失を仮定し、更に系統内に結果をもっとも厳しくする故障を少なくとも一つ仮定して解析を行うことが安全審査における設計評価では求められている。

原子力安全の分野では、従来この決定論的評価にも二通りあった。一つは、評価モデル(EM)による評価で、解析の対象である施設等が、一定の基準等を十分な余裕をもって満足していることを論証する為のものである。このために、解析すべき事象の仮定や、解析モデル、データなどにあらかじめ安全裕度を盛り込んだ「保守的」な計算がなされる。安全審査などで参照される解析は概ねこの種のものである。EMによる解析は、事故の経過や、その解析方法に不確実性が多かった時代には、安全評価の為の最も確実な、そしてほとんど唯一の手法であった。これに対して、もう一つの方法は、最適推定解析(BE)と呼ばれるもので、現在の知見から、量も確からしい予測を行うことを目標とする。実験の解析などは、当然のことながら、BE解析である。このような二種類の評価法が存在した理由は、解析の対象が原子力発電所のような複雑巨大なものであり、しかも解析すべき現象が激しい過渡変化を伴う事故であるため、現象そのものの把握が困難であるばかりでなく、モデルに含まれる相関式等の適用限界や、実際にプラント内に存在する様々な状況等の不確実性が大きいこと、更に、評価結果に基づく意志決定が極めて重大であることから、評価の包摂性と信頼性が極めて高いことが必要なことによる。然し、最近では解析モデルの開発や計算機の進歩などにより、BEの信頼性が著しく向上し、EM計算でも、不必要な保守性を削除して、BEに接近する傾向が顕著である。

5.2 確率的な安全評価

決定論的評価では、事象の発生とプラントの状況を一義的に定めるために、個々の事故シーケンスの進展状況とその結果は明確であるが、取り上げている事象相互の関係、発生頻度などは不明であり、その結果、プラント全体としての「安全像」が必ずしも明らかにならない。例えば、安全確保の基本原則である多重防護では、異常発生を防止することが重要とされているが、事故等の発生を最初から仮定する決定論的評価では、この点が十分には評価されない嫌いがある。特に、設計ベースを超えるシビア・アクシデントの評価では、事故が設計ベースを起える要因として、設計で前提していた以上の多数の故障の同時発生などを仮定しなければならないが、このような仮定は、その発生頻度を考慮しなければ、技術的には余り意味のないものになることが多い。

この点を補うものとして事故の発生確率とその影響をあわせて考察する確率論的安全評価（PSAあるいはPRA）が最近脚光を浴びつつある。この考え方による、最初の総合的安全評価を行ったが、WASH-1400（いわゆるラスムセン研究）で、1975年に公表された。

この評価法では、起因事象をいくつかに分けて、その後の事象の進展を決定する因子となる安全系の機能の成功、失敗による分岐図（イベントツリー、ET）を作成し、次に各分岐の分岐確率を推定する。確率推定には、フォールトツリー（FT）などの信頼性解析手法が応用される。ETの分岐ごとに事故解析を行い（この解析そのものは、決定論的な解析と基本的には変わらない）その結果と各分岐の確率の積（これを通常リスクと呼んでいる）を求める。また、リスクを直接求めなくても、この手法を適用することにより、プラント各系統機器の安全上の重要度が明確になるばかりでなく、設計の弱点や盲点を抽出することができる。事実、そのようにして弱点が抽出され、プラントの改善につながった事例も多数報告されている。

このように確率論的評価は、最近では安全評価に不可欠な強力な武器と認められるに至ったが、技術的にはまだ開発的要素を多数抱えており、その有効性に疑問を呈する人も多い。確率論的評価に対する疑問の代表的なものをいくつか挙げると、先ず総合的リスク評価に当たって、リスクに有意な寄与をする事故シーケンスをすべて取り上げたかという、安全性に対する疑問がある。この疑問に直接答えることは困難であるが、

元来ETは、有意な事象を系統的に同定する手法であって、これを用いずに直観的に事象を選定するよりは、完全性を満足する条件をより多く持っていると言える。次の疑問は、不確定性の問題である。この不確定性には二つの原因があり、一つは機器の故障データなどに必然的に存在する統計上の不確定性である。これは、基本的には、データを更に収集して、データベースの充実を図る以外に方策はない。もう一つの不確定性は、取り扱う事故シーケンスの不確定性である。リスクに対して有意の寄与をするシーケンスは、炉心溶融—格納容器機能喪失に到るものがほとんどであるが、このような苛酷事故には、未だ研究途上の部分も多々あり、これが評価の不確定性をもたらすことになる。ただし、この種の不確定性は、確率論的評価だけにつきまとうものではない。最後に述べておくべきものは、次節で議論する人的因子に関するものである。安定評価上、人的因子は無視できないことは当然であるが、DBE評価などでは、これが表面化しないことが多い。これにたいして、特に総合的リスク評価では、人的因子をエクспリシットに取り扱わざるを得ず、問題の困難さが表面化することになる。

このような、幾つかの問題点はあるものの、確率論的評価の有用性を全く無視する人は今日ではほとんどいなくなったといつて良い。確率論的評価は、決定論的評価と相補いながら、今後とも安全評価の重要な一部をなしていくことであろう。

5.3 人的因子

TMI事故や、チェルノブイリ事故のような大事故ばかりでなく、運転中にしばしば経験される異常等を見ると、現場の要員の判断と行動が決定因子の少なくとも一部になっている事例が極めて多い。ある場合には、人間が異常や事故の直接の原因になり、あるいは事態を悪化させる決定的役割を果たし、ある場合には、異常に直面して設計者さえ気づかなかった対策を発見して危急を救ったなどの報告は、枚挙に暇がない。原子力に限らず、大規模な施設の安全評価をするのに、人的因子は無視できない要素である。

人的因子のうち、ネガティブな寄与と因子について見ると、先づ単純な錯覚、誤操作の類いが挙げられるが、これらは、インターロック、自動化、操作者の配置や計器表示の改善などでかなりの程度対応できる。これに対して、プラントの状況誤認に基づく一連の誤った行動に対する対策は、より困難な問題が多い。計算機を応用した情報処理・表示システム、異常診断システム

など、運転員の判断を支援するシステムの開発が進められており、一部は既に実用化されているが、更に一層の研究開発が必要である。それにも増して難しいのは、このようなシステムも含めて、人間の信頼性を（それも異常や事故に直面して極度の緊張状態にある時の）どのように評価するかということである。前述のWASH-1400は、THERPという手法を用いて、人間の信頼度の定量化を試み、これを総合的リスク評価に始めて取り入れたし、原研でも、DEBDAという評価手法を開発したが、いずれも手法自体完成されたものとは到底言えず、国際的にも多大の努力がなされているが、克服すべき課題は依然として多い。

一方、ポジティブな寄与因子について見ると、様々な考えられるものの、従来の安全評価ではこれを一種の安全余裕として取り扱い、評価上は無視するのが通例であった。しかしながら、事故が設計ベースを超えてから、炉心溶融—格納容器機能喪失に至るまでの広範な事故スペクトルにおける確率分布を推定する場合（例えば、TMI事故のように、溶融した炉心が圧力容器内に留まる確率を求めるには、これが必要である）などには、ネガティブな寄与因子だけでなく、ポジティブな寄与因子を評価に取り入れることが必要である。更にこのような評価によって、運転員の事故時の対処能力の向上につながることも期待できる。そのためには、人的因子評価の新しい手法の研究開発を、更に促進する必要がある。

6. 安全目標

人間の造り出すものに「完全」というものはあり得ず、原子力においても、最善の努力を払ってもリスクが全くゼロになることはない。とすれば、どこまで安

全にすればこれを受容できるか—How safe is safe enough?—という疑問が常に付いてまわることになる。この問いに対して、すべての当事者が満足できるような答えを出すことは容易ではない。しかし、安全確保対策をより一貫した合理的なものにし、同時にパブリック・アクセプタンスを高めることを目的にして、明示的かつ定量的な安全目標を定めようという動きが、TMI事故以降幾つかの国で顕著になっており、すでに米国では、二年間の試用期間を経て、最近正式にこれを決定採用した。

米国の安全目標は、原子力発電によって有意の個人的、社会的リスクの増大をもたらさないことを基本的な理念とし、これを裏づけるために、発電所近傍又は周辺の公衆の急性死亡又はガン死の増加は、既存のそれらの0.1%以内とするなどの定量的目標を掲げている。

このような安全目標が、今後国際的にも、国内でも、どうなっていくかについては、明確な予測はできないが、少なくともこの種のものが意味をもつためには、幾つかの条件がある。その中でも最も重要なものの一つは、目標が達成されているか否かを、十分に説得力のある方法で論証できなければならないということである。安全目標が、具体的な形で議論されるようになったのは、PSAなどの評価手法の開発が進展し、総合的安全評価に対する信頼度が高まったことが背景となっている。見方を変え、評価というものは、それに基づく判断と意志決定がなされることが前提になっている。安全目標の場合は、評価手法の発展が、より高度の意志決定を可能とし、そのための判断基準の策定を促したものとえよう。

