

エネルギーシステムのリスク評価 ——その方法と課題——

Methodology for Risk Assessment of Energy Systems

近 藤 駿 介*

Shunsuke Kondo

1. はじめに

安全性はエネルギーシステムにとって信頼性、経済性に優先する重要な供用機能である。システムが安全であるとは、当該システムが運転員ならびに公衆に被害を与えるおそれが十分小さい（と思われる）ことをいう。この判断を行ない、あるいはこのことを第三者に伝えるためには、そのもたらす被害とその発生頻度の関数として定義されるリスクが良い指標となる。リスク評価とは、システムの設計あるいは運転段階において、この目的で当該システムのリスクを求め、これに対する対応を検討する作業をいう。

ところで、近年、システムのリスクレベルは安全設計のみならず運転管理、つまり使用方法や保全方式によって時々刻々変るものであることが強く認識されるようになってきている。このことは、リスク評価を一過性のものとはせず、継続的に行うことが必要であることを意味する。この考え方にたってリスク評価の役割を模式的に整理すると図-1のようになる。このようなリスクへの対応の仕方をリスク管理（マネジメント）ということがある。

システムの安全性を論ずるためにリスクを定量化する試みは、環境問題に関する関心が高まった1970年代初期から盛んになり、1975年にはラスムッセン研究と呼ばれる原子力発電所の確率的リスク評価〔1〕の結果が公表された。これが公表されるやそこで使われている方法、結果の取扱い方等をめぐって激しい議論が巻き起こったが、ここで開発された手法はその後着実に利用が進められ、いまや原子力分野では安全設計、安全評価の標準的手法としての地位を確立している。一方Inhaber氏は、エネルギー供給システムをリスクの観点から比較検討する場合には、その供給施設の運転がもたらすリスクのみならず、これの原料や燃料を

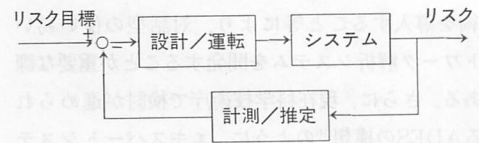


図-1 リスク管理（マネジメント）の概念

鉱山で採取し、輸送し、工場で加工し、さらに当該施設を建設、解体するという一連の過程における従業員ならびに公衆のリスクを総合して比較するべきとし、代表的なエネルギーシステムについてこの総合リスクの分析を行なった〔2〕。この研究はリスクが小さいと思われていた太陽光（熱）発電所でもエネルギーあたりのリスクが原子力発電所のそれよりかなり大きいことを示したため、その根拠となるデータや方法論について多くの批判が提出された。これ以後はこの流れにそった研究はあまり行なわれていないが、こうした評価は依然として重要であると考える。

一方、これと平行してリスクに対する人々の態度についての研究も盛んになったが、その結果、人々の安全性に対する判断はリスクの大小のみならず他の多くの因子に依存することが分かってきており、関連してリスクコミュニケーション、つまり、公衆にリスクの実体をいかなる観点で整理して伝えるかという問題も議論されている。この過程で米国ではRisk Analysisという定期刊行物が発刊され、リスク学会も誕生して、こうした議論のフォーラムとしての役割を果たしている。本文は、以上の様な背景を有するリスク評価の方法について概説し、最近の話題を述べるものであるが、筆者の専門は原子力工学であるから、記述がこの分野に偏ってしまうことをあらかじめお断りする。

2. リスク分析

一般にあるシステムのリスクは、それに発生する事故によりもたらされる被害の大きさCとその発生頻

* 東京大学工学部原子力工学科教授
〒113 東京都文京区本郷7-3-1

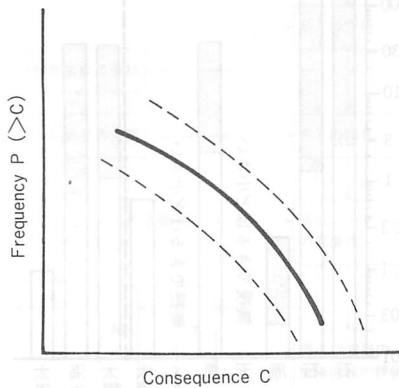


図-2 リスクプロファイルによるリスクの表現
(不確かさ幅を付すこともある)

度Pの関数 $R=R(C, P)$ と与えられる。この関数Rの最も簡単な形が被害の期待値 $R=P \times C$ であるが、いろいろな大きさの被害 C_i が頻度 $P_i (i=1, N)$ で予想されるときの評価指標 $R=R(P_i, C_i; i=1, N)$ のあり方については様々な主張があり、定まらない。むしろ図-2に示す超過確率(C以上の被害が発生する確率)

$$P(>C) = \sum P_i \text{ (ただし } C_i > C \text{)}$$

とCの関係をリスクプロファイルと呼んで、これにてリスク特性を論ずることが多い。

ところで、我々の社会では鉱工業その他エネルギー生産を含む様々な活動が行なわれており、そこでは不幸にして労働災害や、事故等による公衆災害が発生している。従ってこうした状況を整理すると、単位の材料生産、輸送活動、あるいはエネルギー発生活動あたりの労働災害ならびに公衆災害の大きさが推定できる。より具体的な作業の手順は以下の様である。

(1) 分析対象とするエネルギーシステムを図-3のように認識し、これにより単位のエネルギー生産に必要な設備を構成する材料、建設労働、燃料の採取労働と

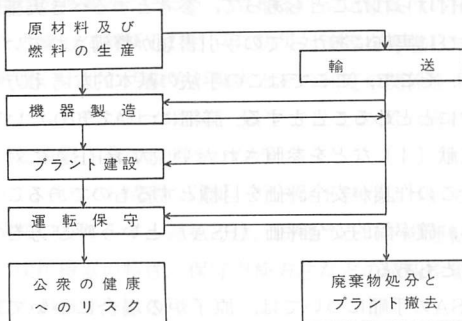


図-3 エネルギー生産に係わるリスクの要素

輸送量を分析する。

(2) 労働災害統計等から単位の物量生産、輸送、あるいは建設、燃料採取労働時間あたりの災害発生件数を求める。

(3) これから建設、燃料入手に係わるリスクを順次算出して、さらにプラント運転に係わる労働リスク、放出物による公衆リスクをこれに加えて総合リスクとする。

この方式でInhaber氏により計算された結果の一部を図-4に示す〔2〕。図-4は各エネルギーシステムに必要な材料取得と建設労働量の要約、図-5はリスク要素の相対値の要約、図-6は1000MW年あたりの職業人の死亡リスク、図-7は公衆の死亡リスクの要約である。

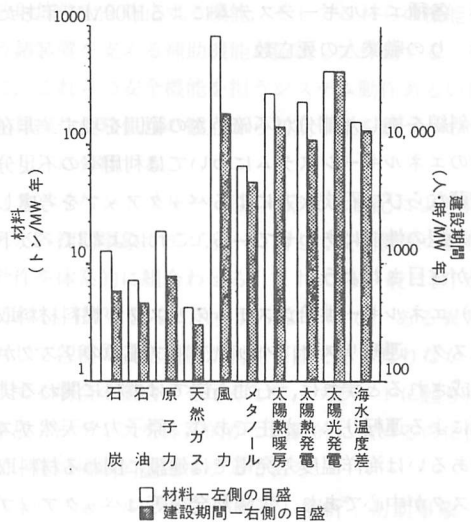


図-4 各種エネルギーシステムに必要な材料と労働量

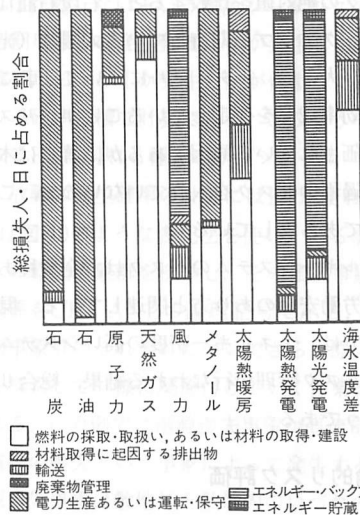


図-5 各種エネルギーシステムのリスクに対するリスク要素の相対的寄与

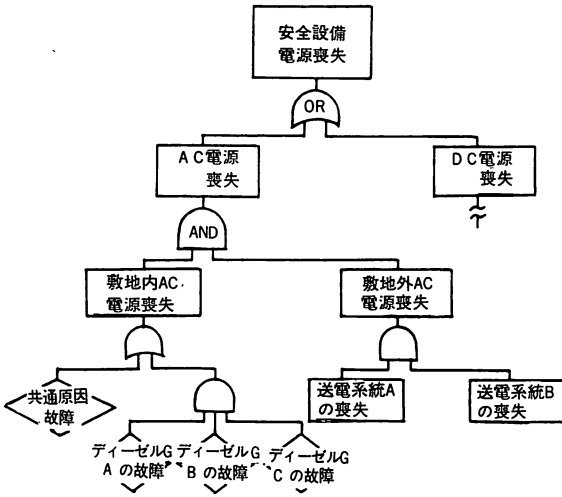


図-10 フォールトツリーの例

このFTは、頂上事象の発生確率がわかればいいのだから、故障率が知られている事象に至るまで展開すればよい。このような事象を基本事象というが、これを使って言換えれば、FTは頂上事象の発生をもたらす基本事象間の論理的関係を得て、この関係に基本事象の発生確率を代入することにより頂上事象の発生確率を得ることに使われるといえる。

(5) 故障率データの入手：初期事象ならびにET見出し事象の発生頻度／確率をFTにより計算するのに必要な基本事象の発生頻度は、運転経験、同種のサブシステム、機器、部品の故障記録の統計分析から入手する。標準的な部品や機器ならばこうした記録が整理されていることもあるが、特殊なものについてはなかなかデータがない。従って、個別のプラントについてPSAを実施する場合には、当該プラントの機器について故障率を求めなければならない。

(6) 共通原因故障：一般にある機能の信頼性を高くするには同一の機能を有する系統を独立に2ないし3系統並列に用意すればよい。例えばある機能が2系統並列になっている場合には各系統が機能を果たさない確率が 10^{-3} ／要求と計算された時、2系統とも同時に働かない確率は $(10^{-3})^2 = 10^{-6}$ ／要求という小さな値になるからである。ところが、もしこれらが電源あるいはシール水系や潤滑油系を共有していたら、この計算は成立しない。このことは双方に使われている部品が同一の工場で作製され、共通の欠陥を持つときも同様である。このように一つの故障が多重系全体の使命故障を招く場合、その故障を共通原因故障という。通常

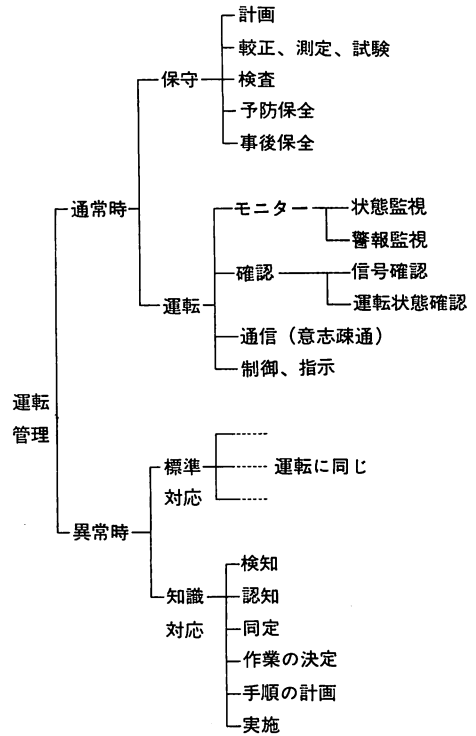


図-11 プラント運転管理における人間の役割

個々の系統の故障率にこうした共通原因故障の占める割合を β で表わす。上の例で β が0.1とすれば、二系統とも要求に応じない確率は $10^{-3}\beta$ と計算できるから、 10^{-4} となり、独立性を仮定した場合の 10^{-6} より100倍も大きくなる。従って、冗長系の解析にあってはこの共通原因故障をもたらすシナリオを見出し、FTの中に組み入れておくことが極めて重要で、この種故障への配慮が不十分な解析はほとんど意味がない。

(7) 人間の過誤の取扱い：システム的设计によってはその信頼性が運転員の操作の確実さや点検・保守の信頼性にも依存する。図-11にはシステム安全に対する人間の関わり方を要約してある。こうした作業で起きる可能性のある人間のミスは第一のタイプは、行なうべきことをしないこと(omission error)であるが、原因でみると単調な作業を繰り返していて注意力が散漫になり忘れるうっかりミス(slip)と、短時間のうちに多くのあるいは重大な判断を求められる場合に多い認識の誤り(mistake)とがある。第二のタイプのエラーは思い違いで、やるべきことを取違えてしまうもの(commission error)であるが、この原因にも上の二つが考えられる。さらに人間は1つのことを忘れると以下全ての関連作業を忘れてしまうとか、途中でな

んらかの刺激で思い出して回復動作をおこなうなどの性格もある。こうしたことから人間の過誤については、定性的にはその存在を議論することができて、定量評価は難しく、現状のリスク評価では第一種類のエラーのみが考慮されている状況である。評価手法としては、幾つか提案されているが〔5〕、基本的にはマニュアルに指定されている仕事を実施しない可能性を、予想される運転員の緊張状態、シフトの構成、作業環境を分析して、文献〔6〕に示されているデータを利用して評価するものである。

してはならないことをするとか悪意をもった活動を行う可能性についてはモデル化が困難であるが、そのような可能性は元来機器設計で排除（十分低い確率になるように）されているべきである。

（8）公衆影響の計算：つぎに各事故シーケンスについて、公衆に被害をもたらす流出物（原子力発電所の場合には放射性物質）の放出量ならびにこうして放出された流出物が環境中を移動し人間に与える影響を解析する。原子炉の場合には、溶融炉心物質の移動、コンクリートと溶融燃料の相互作用といったおよそ非日常的な現象についてもある程度の精度で分析し、結果として放射性物質が大気中に放出される時間経過を計算している。

（9）外部事象の分析：この解析の中でやや特異な位置を占めるのが外部事象によるリスクの解析である。外部事象の代表は地震であるが、サイトによっては洪水、火災なども扱う。これらは共通原因故障の一つの原因になり得るので、そのことに注目して施工欠陥の存在、耐震設計のグレードの違いによる構造物間の動的相互依存関係などを、現場で注意深く分析する必要がある。現場視察の結果中央制御室の天井のパネルの支持強度が弱いことが見出され、直ちに改良が行われた例もある。

（10）不確かさ解析：以上述べてきた手順から分るように、この分析にはデータやモデルそして解析の便利のために設けられた仮定に係わる不確かさが入り込む。これは対象システムに対する我々の知識の現状を反映するものとも言えるので、これを分析推定してリスク曲線に不確かさの巾を示しておくことが大切である。

なお“全ての有意な事象を扱っているか”という間に代表される完全性の問題は、システム評価作業に常につきまとう基本的な問題である。これについては解決の妙案があるわけではない。作業結果を専門家にレビューさせることにより、当事者の判断の妥当性、

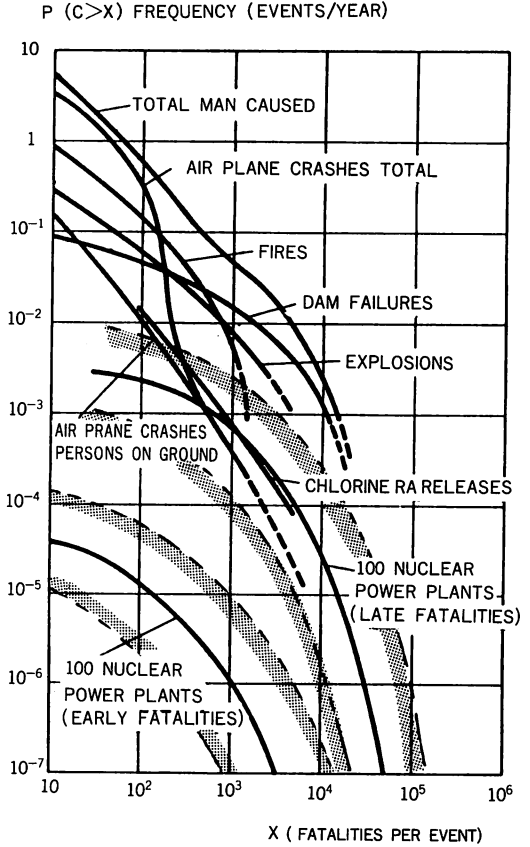


図-12 100基の原子力発電所のリスクと他の人工リスクとの比較

見落しの有無をチェックすることが現在利用されている唯一の対応方法である。

以上の方法論により得られた原子力発電所のリスクプロファイルの1例を図-12に示す。これはRasmussen Study〔1〕の結果の一部である。ハッチ部分は90%の不確かさの範囲を表わす。

4. リスク管理

原子力分野では、ラスマッセン報告以来様々のPRAが実施されてきており、それらの経験から次の様な認識が成立しつつある。

（1）方法論は成熟してきており、その結果をリスクの定性的あるいは定量的理解のために使うことができる。

（2）しかし、ある数値目標とその結果を比較して当該システムの適合性を判断するという絶対値に基づく利用は、不確かさの評価を含む完全性の問題が完全には解決できないことから、慎重であるべきである。

(3) その結果を相対的な意味で使う時は不確かさの影響が小さくなるので、設計や運転管理方式の比較を含む次のような利用には有力である。

- ・ 運転操作、事故対応操作マニュアルの整備
- ・ 保安規定等の有り方の検討
- ・ 施設改良の費用有効性の検討
- ・ 運転経験、異常な運転、故障等の評価
- ・ 運転員やプラントのスタッフの訓練
- ・ 試験、保守、修理の方針の検討

ところでこうした対応の検討には図-1に示したように定量的安全目標が必要である。一般には当事者間でリスクの上限値と下限値を定めて、上限を超える場合には直ちに対策をとり、下限値を下廻る場合には問題なしとするような管理方式が採用されている。最近では放射性物質の大規模放出に至る事故が一年間のうちに一回以上発生する確率についての下限値としては百万分の1というのがよく使われている。

これを定量的安全目標として法制化するべしという提案もないわけではないが、第1に現代社会において技術システムが有すべき安全水準についてコンセンサスがあるわけではないこと、第2にもしこれがあつたとしても、統計的な検証が出来るものならよいが、確率的なものについては上に述べた検証可能性の問題が残ることから、現実的ではない。

5. 結論

社会の全ての人々は安全を欲しているはずであるが、現実には交通事故で年間一万人以上の人が死んでいるにも拘らず車を放棄するでもないし、たばこの害が疫学的には立証されているにもかかわらず、これが禁止

されるでもない。これは社会が、特に日本においてそうであるが、建前として災害の発生可能性を許してこなかったからである。従ってそこではリスクを定量化しこれを管理する考え方も生れ得なかった。しかし、リスクフリーな社会は明らかに存在しないし、しかもこの認識に立って積極的にリスクを評価し管理していく方が、高い安全性を効率的に達成できることが明らかである。定量的リスク評価実際の利用は始ったばかりであるが、今後諸方面でこれが使われるとともに、これに基づくリスク管理について議論が深化することを期待したい。

参考文献

- (1) USNRC, Reactor Safety Study-An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400(NUREG-75/014), Washington DC, 1975.
- (2) ハーバート・インハイパー; 各種エネルギー源のリスク評価, 原子力資料 No.102日本原子力産業会議, 1978.
- (3) 近藤 駿介; 確率論的リスク評価—その手法と有用性, 本誌 8-1 (1987).
- (4) USNRC, PRA Procedures Guide-A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plants, NUREG/CR-2300, Washington DC, 1982.
- (5) E. M. Doughty, Jr. and J. R. Fragola; Human Reliability Analysis, John Wiley & Sons, 1988
- (6) A. D. Swain and H. E. Guttman; Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Applications, NUREG/CR-1278, Sandia National Laboratories, 1983.

