

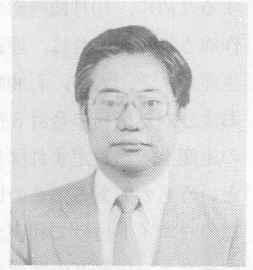
■ 解 説 ■

確率論的リスク評価—その手法と有用性

Probabilistic Risk Assessment: Methodology and its Effectiveness

近 藤 駿 介*

Shunsuke Kondo



1. はじめに

近年大規模システムを社会に導入するについては、事前に各種のアセスメントが実施されている。リスクアセスメントとは、このうち安全性に関するものを指す。環境アセスメント等は一端当該システムが導入されてしまうと環境に不可逆的变化が加えられるので事前評価が大切であるが、安全性については当該システムの運用の段階でもアセスメントの結果によってシステムに変更を加えることができるので、リスクアセスメントは運用中のシステムについても実施されることが多い。

確率論的リスク評価(Probabilistic Risk Assessment:PRA)というのは、当該システムに発生するかも知れない大事故に至るシナリオを体系的かつ全体的に見出し、その発生頻度を計算し、そのもたらす被害の大きさを推定するもので、プラントの設計、運転方法、機器信頼性、人間の関与の仕方、プラント内の物理現象の進展、そして健康影響の発生に至る様々な情報をできるだけ現実に即して総合していく方法論といってもよい。

ここでリスクというのは発生するかもしれない損害のことで、一般には事故事象の発生により予想される被害の大きさ C とその発生頻度 P の関数 $R = R(C, P)$ である。この関数 R の形式は最も簡単な形が $R = P \times C$ であるが、様々な事故シナリオ S_i による被害 C_i が確率 P_i ($i=1, N$) で予想されるときには評価の指標としてどのような $R = R(P_i, C_i; i = 1, N)$ を使えばよいかについては様々な主張がある。

確率論的リスク評価の考え方は、航空機産業やその他巨大システムの設計現場で古くから使われていたようであるが、原子力施設に適用されるようになってフィールドデータとの照合が厳しく求められ、方法論の進化(深化)が進んできている¹⁾。

本文では、この方法論がエネルギーシステムの安全性評価にも重要な役割を果たしていくことが期待されるとの立場から、原子力個有の問題はなるべく除いてこのPRA手法の有用性を一般的に解説する。なお、参考文献は最小限にとどめていること、まとまった解説としては文献(4)、(5)があることを申し添える。

2. リスク評価の手順

PRAの実施方法については様々の報告があるが、特に原子炉施設のPRAについてはPRA Procedures Guide²⁾に詳しい。それによって手順の概要を順を追って簡単に示せば以下ようになる。

(1) プラント情報の収集

プラント特性についての情報をできるだけ収集する。設計情報のみならず、運転方法、同種プラントの運転経験、使用機器の特性、保守点検方法なども貴重なデータとなる。

(2) 事故シーケンスの解析(i) イベントツリー分析

次にプラントに望ましくない事故の発生するシナリオ S_i を求める。これにはイベントツリーとフォールトツリーが使われる。

イベントツリーは「ある故障・異常またはその組合せでどんな事象が発生するか?」という問に答える一種の帰納的論理モデルで、図-1に示すようにある望ましくない初期事象に始まって、関連システムの動作・不動作の組合せによってプラントにもたらされる事態(outcome)の集合ならびにそれに至るシナリオ S_i を分析する手段である。このイベントツリーを作製するポイントは、望ましくない事態に至るプロセスを支配するサブシステムを機能別にまとめ整合的にならべることであり、そうすることによってある事態(outcome)に至るシナリオを条件付確率で結合される一連の事象シーケンスとして得ることができる。

ここで整合的にならべるといのは、論理的整合性や、時間的整合性、あるいは物理的整合性に十分配慮

* 東京大学工学部付属原子力工学研究施設教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

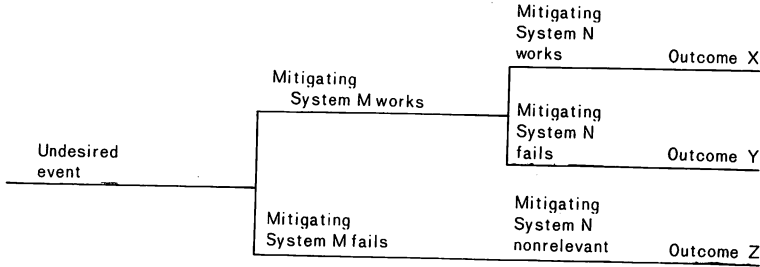


図-1 イベントツリーの構造

すべしということである。論理的整合性というのは緩和系Mが故障した結果として緩和系Nがその機能を発揮できないようになっている時は図-1のように緩和系Mの故障の下流では緩和系Nの成功・失敗の分岐を設けないことで、これにより不合理な組合せの発生を防止できる。また時間的整合性とはM、Nの順序を現実には作動すべき順序にならべることで、Nの作動後にMが不作用になるといった時間的に不自然なシナリオを排除することをいう。また物理的整合性とはAの故障がBの故障を招くという因果関係があればこれを再現できるようにすることをいう。さて、初期事象（望ましくない事象）Iが発生し、緩和系Mは作動したがNは作動しなかったというシナリオの（これが事態Yをもたらすとすれば事態Zの）発生頻度 P_Y は）

$$P_Y = (\text{初期事象 I の発生頻度})$$

$$X \text{ (I が発生した時 M が作動する確率)}$$

$$X \text{ (I が発生し M が作動した時、N が故障するあるいは故障している確率)}$$

で計算できることがわかる。図-2には軽水炉における冷却材配管破断に関するイベントツリーを示す。

(3) 事故シーケンスの解析 (ii) フォールトツリー分析
一方、フォールトツリーはイベントツリーに示さ

れたサブシステム（機能）の異常・故障がどのような事象によってもたらされるかを分析する手法で、図-3のような表記法を使う。この例では頂上事象である（イベントツリーの見出し事象である）電源喪失という事象が、直流電源の喪失あるいは交流電源の喪失によって発生すること。交流電源としては敷地外と敷地内に供給源をもっているため、両方ともだめになった時に交流電源喪失に至ることを同位事象群と論理記号のOR、ANDで上部事象と関係づけて示している。このツリーは、図の下端に至っても、それではなぜ故障するかと考え、その下に部品の故障を展開追求していくと限りなくマイクロなレベルまで原因分析を行うことができるのであるが、通常は故障率が普通知られている事象のところまで展開を中止する。このような事象を基本事象ということがある。この言葉をつかえば、フォールトツリー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る手段といえる。

こうして得られたフォールトツリーに基本事象の発生頻度を入力して示されている論理計算を実施してやれば頂上事象の発生頻度を計算することが可能である。具体的には、例えばモンテカルロ法を用いてまさしく

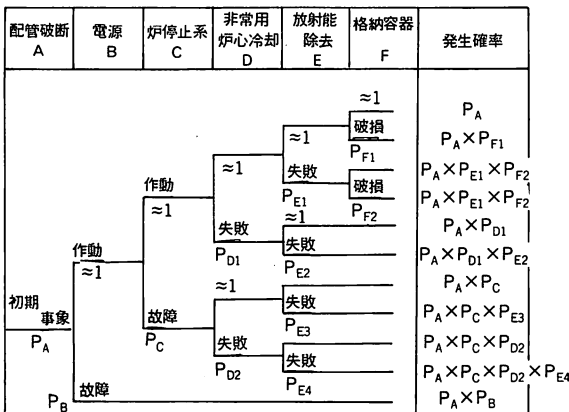


図-2 冷却材配管破断事象に関するイベントツリー

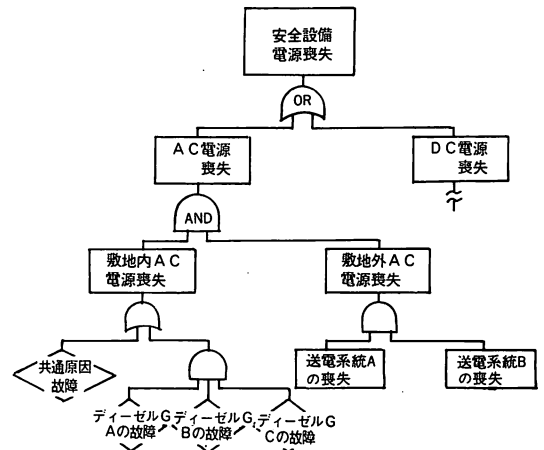


図-3 簡単なフォールトツリーの例

フォールトツリーそのものをシミュレートすることもあるが、一般にはまず頂上事象を発生せしめる基本事象の組合せ（最小切断集合と呼ばれる） MCS_i を論理演算により求め、そのそれぞれの発生確率の確率和を計算するようにしている。それはMCS、自体がそれなりに検討すべき内容を含んでいるからである。

(4) 事故シーケンスの解析 (iii) 故障データの入手

このフォールトツリーによるイベントツリー見出し事象の発生頻度/確率を計算するのに必要な基本事象の発生頻度は、運転方法、同種のサブシステム、機器、部品の故障記録の統計的分析から入手する。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。このため原子力発電所については各国ともこのデータの収集に苦労しているところである。我国では、日本原子力研究所や電力中央研究所の原子力情報センターがこの方面の努力を行っている。

(5) 事故シーケンスの解析 (iv) 共通原因故障

ところで、このような方法で冗長系の信頼度解析を行うとその非信頼度（あるいはその系の機能が失われる確率）は極めて小さく計算されることが多い。

例えば、非常時に注水する系統が二重になっている場合を考えよう。注水要求に対して各系統が応じない確率が 10^{-3} /要求と計算された時、二系統とも応じない確率は $(10^{-3})^2 = 10^{-6}$ /要求という小さな値になる。ところが、ここでもしこれらが電源を共有していたら、あるいはシール水系や潤滑油系を共有していたら、さらには部品が同一ロットから供給されていたから、この計算が成立しないことはすぐ分るのである。つまり要求のあった時電源やシール水系や潤滑油系が故障している確率、あるいは双方の部品が同じような欠陥をもっている確率が合せて 10^{-3} のうち割合 β を占めるとすれば、二系統とも要求に応じない確率は $\beta \times 10^{-3} + \dots$ となるが、 β は一般に充分注意しても1%以上であることが多いので第一項が大きく、大体 $10^{-3}\beta$ になってしまうのである。このように多重系あるいは広く複数の系統を同時に不動作にするような故障を共通原因故障という。

従って、冗長系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、フォールトツリーの中に論理化しておくことが極めて重要で、この故障への配慮が不十分な解析は図-4から分かるようにほとんど使いものにならないのである。

特に注意の必要なのが、系統の配置上は物理的に分

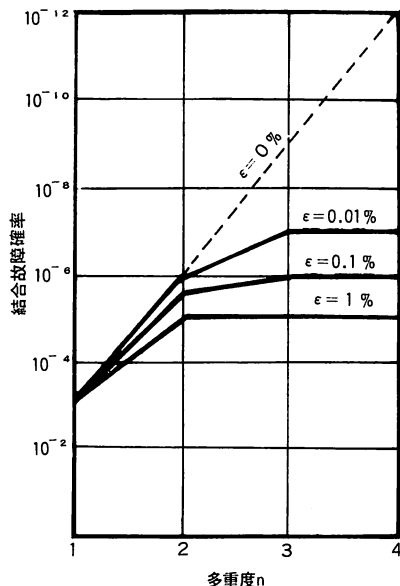


図-4 故障確率 10^{-3} の機器を1out of n(並列)結合した場合の総合故障確率(共通原因故障の占める割合 ϵ をパラメータとする)

離が完全になされていても、雰囲気が共通している場合、交換部品等が共通に管理されている場合、運転要員や保守要員が共通している場合等である。

特に最近ではシステムの作動に人間の関与する場合は注目されている。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ことがある反面、途中で思い出して回復動作を行うこともあるため、正確なモデル化が難しい。現状では定められたことを行わない場合についてはある程度保守的な解析モデルが提案利用されているが、定められてい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。もっともそのような可能性は、機器設計で排除することによって未然防止をはかるべきであろう。いずれにしても、原子力発電所のトラブル報告の50%は人間が関与しているというのが定説であり、これをうまくモデル化しないと解析の精度はいつもオーダの程度しかないとわざるを得ない。

以上の作業によって解析者はプラントがある望ましくない事態に立ち至るシナリオ S_i とその発生頻度 P_i の組合せを多数入手できることになる。

(6) 公衆影響の計算 (i) 流出物の解析

ここで必要なことはこの事態で公衆に迷惑をもたらす流出物(原子力発電所の場合には放射性物質)の放出量の解析である。これは各事故シナリオ S_i のもとで

のプラントの振舞を解析して得られる。原子炉の場合には炉心の溶融とか、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建屋や容器から漏洩あるいは破損口を通じて、大気中にどれほどどのような時間経過で放出されるかを計算している。

(7) 公衆影響の解析 (ii) 公衆の被害の解析

次にこうして放出された流出物によってうける公衆の被害 C_i を解析する。これには流出物が大気中に放出され、風によって運ばれつつ拡散し、あるいは雨によって沈降する様子を定量的に分析できるモデルが必要である。これについても気象統計の整備と相まって次第に精密なモデルが作製されるようになってきている。

(8) 外部事象の分析

この解析の中でやや特異な位置を占めてい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り、状況に応じて洪水、火災なども扱うことになる。これらは一種の共通原因故障の原因なので、そのことを念頭において構造物間の相互依存関係などを注意深く分析する必要がある。ある研究では、中央制御室の天井のパネルの支持強度が弱く、地震時に操作に不都合が生じることを見出し、評価に取入れている。

(9) 結果の表示法

以上の作業により (S_i, P_i, C_i) の組合せが多数得られることになる。これを表示し、あるいは他のリスクデータと比較するためには、被害 C_i に着目し、

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

という量を計算する。これは C 以上の被害が発生する確率であり、 C と $P(>C)$ の関係を図にすると図-5のように右下りの曲線になる。このようにして得られた原子力発電所のリスク曲線の1例を図-6に示す。これはこの種分析を本格的に行った最初の研究として知られているMITのRasmussen教授のグループの研究結果³⁾の一部である。

(10) 不確かさ解析

以上述べてきた手順から分るように、この種分析に様々な不確かさが入り込むのは避けられない。そ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が、これをできるだけ分析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。

不確かさの原因はデータやモデル、仮定、そして大切なことの見落としにある。データの不確かさによる結果

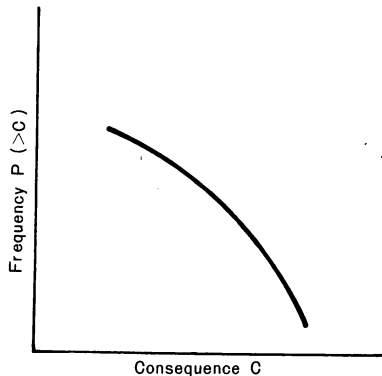


図-5 $P(>C)$ と C の関係：リスク曲線

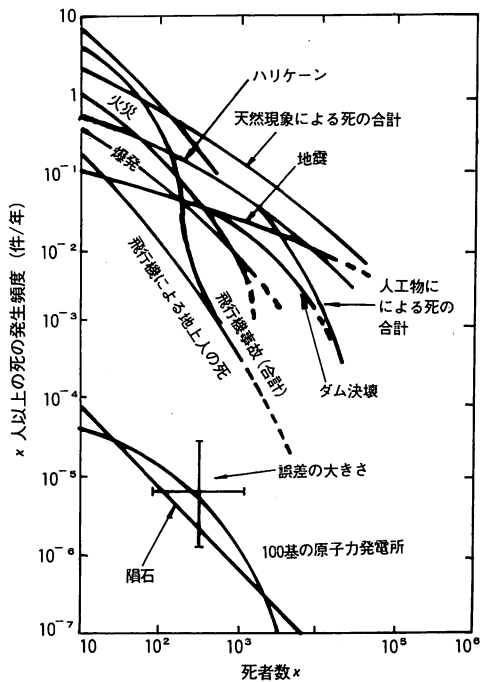


図-6 原子力発電所のリスク評価結果の例

の不確かさは比較的直接的に計算できる。発生頻度の計算であれば、各個の事象の発生確率のもつ不確かさについてモンテカルロ法で評価すれば最も直接的である。モデルや仮定の不確かさについては感度解析によって比較的感度が大きい要素について統計的あるいは工学的判断によりその考えられる範囲を限定し、全体の結果の不確かさの評価に反映することが試みられている。

上述の図-6の場合不確かさは確率についてファクター5、結果(被害)についてファクター5とされていたが、モデルや仮定の不確かさから実際にはもっと大

きく、いずれもファクター10位といわれている。

完全性の問題は、要すれば“全ての可能な現象を扱っているか”という問である。これは、決定論的なアプローチでは保守的になるような工夫を行った事故解析を行い、この問題を避けるわけであるが、PRAにおいてはそれぞれの入力を最尤値にとりつつ評価するので、予想外のシナリオを結果において包絡できないおそれがあるので、そうしたシナリオの見直しには気を配るべきである。勿論システムの特性理解という点では、決定的アプローチは非現実的なシナリオを追っていることになるのに対して、PRAの方は分る範囲で全てを分析するのであるから、有用性が高いとはいうまでもない。

3. 原子力分野の経験からみたPRAの有用性

ラスムッセン報告以来原子力分野では様々なPRA研究が行われてきた。それらの経験から得られた結論を要約すると次のようになる。

- 1) 方法論は比較的成熟してきており、こ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、その結果をある数値目標と比較して適合性を判断するという絶対値を利用するような形で使うには完全性の評価法、不確かさを完全に理解していないことから注意が必要である。(もっともこれはそれが現実の姿と理解すべきで、方法の問題というより、強みということもできる)
- 3) 米国炉では炉心溶融確率が 10^{-5} ~ 10^{-3} /炉年と計算されているが、これらは大体1桁の不確かさを有する。地震などの被害を考えると小さい方の値はもっと不確かさが大きいという人もいる。
- 4) 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。従って設計の比較や事故のマネジメントの観点から利用するには有力である。
- 5) 具体的な利用分野としては、事故防止の観点からは次のようなものが考えられる。

- ・主要事故シーケンスの同定
- ・安全上重要なシステム/機器の同定
- ・保安規定等のあり方の検討
- ・既存施設の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

また事故影響の緩和という観点ではPRAから事故

時の運転員の対応について様々のヒントが得られる。一般に最適な事故対応はプラント毎に異なることが多いので、主要事故シーケンスに関連して事故の兆候とすべきものをPRAの結果から分析し、これをもとに運転員の判断を助けるいわゆる運転員支援システムを充実していくことが重要とされ、一部行われている。

6) 安全目標の制定

PRAの結果は当該プラントの安全水準を示すものであるから、逆に社会において技術システムが有すべき安全水準を定め、これに適合することをもって許認可の根拠とする。あるいは少なくともシステムの改善等の参考にすると、という考え方が生れてくるのは当然であるし、また合理的でもある。これが安全目標の問題、つまり“How safe is safe enough?”という問に答えていくことである。原子力施設については各国各様の目標が設定されているが、大部分は法律ではなく行政上の判断内規として利用している。その形式は大体図-5のようである。米国では一歩進めて安全の原則を“原子力発電所のリスクは個人の通常の癌死亡確率の1/1000を超えないこと”とすることにしている。

このような安全目標を定めて厳格に運用するとなると解析の不確かさをどのように扱うかが問題になり、時期尚早の声もある。しかし、この不確かさは我々の知識の不確かさを表わしているものでもあるから、それなりに受けとめて、例えば90%信頼度上限値を判断に使うとか工夫をしていくのが採るべき道であろう。

4. エネルギーシステムへの応用

この手法を原子力以外のエネルギーシステムの開発利用に利用していくことについては、原子力分野の経験によれば特に問題はない。その利用法の第一は、種々の設計代替案の比較検討ならびに改良策発見の手段としてである。開発段階でデータが不足していても、許認可に係わる安全性の評価をするのではなく設計相互の比較を行うのであるからデータの不確かさの影響は一般に小さい。更にPRAの特性からして、安全性だけではなく各システムのアベイラビリティについての検討も可能である。

第2の利用法は、問題領域を全体的見地から特定することである。特に様々な学問あるいは技術領域が相互に関係してシステムを成立させている場合に、いわゆるSystem Interaction(つまりサブシステム間の相互干渉)が信頼性、安全性を悪化させることが少なくない。PRAによりシステム安全性を全体的見地から

分析することによりこの問題の発見と対策の用意が可能となる。

第3には、こうした分析・評価を通じて、プラントの安全性・信頼性向上の真の対策を発見することである。これはやや楽観論といわれるかも知れないが、例えば多重の安全設備のもつ限界の認識から新型安全系の開発を促したり、地震リスクの検討に基づく新しい建屋/構造の提案があったりしている現実をみると、このような期待をすることはあながち間違いではないと言える。また、そうしたことが契機となって、各種施設の許認可業務においても即物的でない、安全性や信頼性確保の原理に根ざした柔軟性のある基準が用意される可能性も拓けてくるであろう。

第4の利用法は、特定のプラント設計の安全性と信頼性の評価である。1つのプラントの安全性と信頼性について理解するためには、早い段階からモデル化の研究とともに各種データの収集が必要である。そうした研究等の必要性を理解し、同時に当該設計についての正しい認識（運転方法、保守方法のあり方も含まれる）を設計者ならびに顧客が得るためには、当初は定性的であってもPRAの継続的実施が極めて有効である。

第5の利用法は、当該システムのパブリックアクセプタンスの確保である。結局のところ新しいシステムが市民権を得ていくためには当該システムが社会に存在することが必要であるが、現代の成熟社会においては新規参入障壁が高い。この壁を突破するためには、高い安全目標を設定しこれを達成できる技術であることを内外に示していくことが大切であり、PRA手法はこれに関して多くの人々の批判に耐えられる結果を提示するのに有用である。

5. 意志決定PRA

以上の説明の中でPRAは様々な意志決定に用いられ得る（あるいはこれに有用なデータを提供し得る）と述べてきたが、ここではそうした決定に際して生じる判断の困難性を指摘したい。

PRAの結果がA、B2つのオプションについて図-7の実線A、Bの結果を与え、不確かさについて図中の点線のような信頼度分布が示されていればリスクを小さくする観点からはオプションBが優先することが自明である。

しかし、図-8のように実線A、Bが交差すると優先順位は自明とはならない。中立派はリスクの積分値を比較することで判断しようとするかも知れないが、大被害の発生確率の小さい方がいいという立場をとる人からすればAの方が優先されよう。実際公衆は破局的な事故によるリスクが通常リスクの1/30以下であることを要求しがちと述べている研究もある。

これに不確かさが加わると判断はさらにやっかいになる。人は不確かさの故に平均リスクが低くてもそのオプションを嫌うことすらあり得るからである。このような潜在的な大事故や不確かなものに対する嫌悪感はこのことを批難するべき筋のものではない。大切なのはこうした特性の認識にもとづく積極的なコミュニケーションと思慮深い決定過程の採用であろう。

6. 結論

原子力施設の安全性について分析検討する手法として発展してきた確率的リスク評価手法について解説した。この手法は、エネルギーシステムの安全性のみならず信頼性ひいては経済性の評価に適切かつ有用な

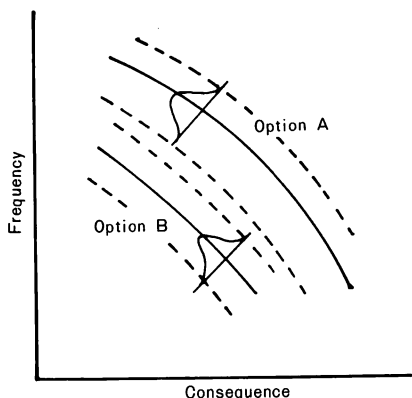


図-7 二つのオプションの比較：曲線が交わらない場合

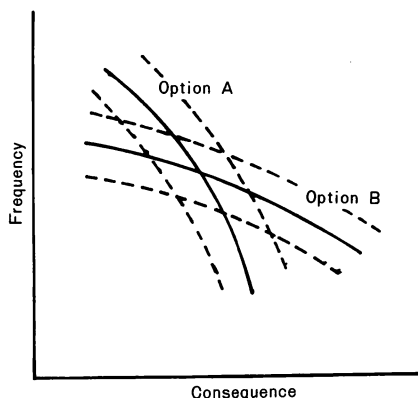


図-8 二つのオプションの比較：曲線が交わる場合

手法である。

PRA手法をエネルギーシステムに適用することにより、様々な設計オプションの比較を体系的に行うことができ、問題領域を特定することができる。特に複雑なサブシステム相互間の関係が安全性に与える影響を分析し、あるいは進んで問題の単純化の道を発見することに寄与することもできるかも知れない。

もとよりPRA手法はマジックではないのであってその有効性は使い手にかかっているが、利用すべきであり、その苦勞は報われるものである、と申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) Probabilistic Risk Assessment (PRA) Reference Document, NUREG-1057 (1984).
- 2) PRA Procedures Guide, NUREG/CR-2300 (1983).
- 3) Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plant, WASH-1400 (NUREG 15/014), NTIS Oct. 1975.
- 4) 柴田他, 原子力発電所の地震時危険度の確率論的評価, 日本原子力学会誌, 28, 1 (1986).
- 5) 近藤他, 原子力発電所の確率論的安全評価, 同上, 29, 1 (1987).

協賛行事

第6回「光がかかわる触媒化学シンポジウム」について

共 催 理化学研究所, 触媒学会

協 賛 日本化学会, 高分子学会, 電気化学協会, エネルギー・資源研究会

趣 旨 光触媒作用を理解するには、光励起、電荷分離、電子移動などの機構を探ることが特に重要であり、前回までのシンポジウムではこれについて掘り下げた議論を重ねてきました。次回もこれに沿って更に一層掘り下げた議論を展開したいと思います。

一方、光触媒作用には今後は特に応用面での進展が期待されます。例えば、無機半導体や金属錯体による太陽エネルギー変換や光センサーの開発、光電極反応による選択的有機合成や環境浄化、更には生物学や医学関連領域への応用などです。それで特定の分野にとらわれずに、種々の観点から光触媒作用を眺め直し、その応用範囲の拡張に資するような議論も行ってみたいと考えています。

例年通り一般講演を公募しますので、各方面からの多数のご応募をお待ちしております。

日 時 昭和62年6月12日(金)

会 場 理化学研究所(埼玉県和光市)

特別講演

東工大工 大倉一郎

「ヒドロゲナーゼを用いる光水素発生反応」

理 研 青柳克信

「光を用いた半導体材料の結晶成長」

一般講演申込締切 昭和62年2月28日(土)

題目、所属、氏名、連絡先、400字程度の講演要旨(プログラム編成用)を記してお申し込み下さい。講演時間は討論を含めて1件20分程度の予定。

講演要旨締切 昭和62年5月20日(水)

講演申込者に所定の原稿用紙(40字×37行×4枚)を送付。

参加要領

登録無料。要旨集は当日会場にて配布(2000~3000円の予定)。葉書に宛先を書いて6月5日までに申込、料金後納可。懇親会は当日会場で受付。会費未定。

世話人

斉藤泰和(東大生産研)、大倉一郎(東工大工)、大沢吉直(化技研)、山田 瑛(理研)、吉良 爽(理研)、田中一範(理研)、

申込先 351-01 埼玉県和光市広沢2-1 理化学研究所触媒研究室 田中一範

(電話 0484-62-1111, 内3561)