

## □原子力発電所の確率論的安全評価(PSA)

原子力発電技術機構 平野光將

### はじめに

原子力発電所は放射性物質を内蔵し潜在的に大きなリスクを有しているため、その潜在的风险を顕在化させないよう、一般の産業施設以上に安全確保対策が施されている。すなわち、原子力発電所においては、平常運転時における放射性物質の環境への放出をできる限り低減するだけでなく、多重防護の考え方に基づき、「故障やトラブルなどの異常の発生を防止する対策」、「異常の拡大および事故への発展を防止する対策」、「放射性物質の異常な放出を防止する対策」などの安全防護対策を並行して実施するとともに、設計基準事象を想定して原子力発電所の挙動や周辺環境への影響を評価し、それらの安全防護対策の妥当性を確認している。設計基準事象としては、工学的に想定される数多くの異常・事象のうち、事象の進展や影響の包絡性を考慮して、保守的な条件を仮定(例えば、最も効果のある事故緩和系に単一故障を仮定)した少数の代表シーケンスを選定している。

近年、原子力発電所の安全性評価には、上記の決定論的安全評価に加えて、安全性

を総合的かつ定量的に評価できる確率論的安全評価(PSA)が活用されている。

### 1. 基本的考え方

PSAは、理論的に考え得るすべての事故シーケンスを対象とし、異常・故障などの起因事象の発生頻度、事象の及ぼす影響を緩和する安全機能の喪失確率および事象の進展・影響を定量的に分析・評価することにより、事故の発生確率や影響の大きさ、あるいは両者の積(リスク)をもとに総合的な安全性を評価するものである。すなわち、PSAは複雑な原子力発電所システムについて、系統間の相互依存性、機器間の共通原因故障、人間と機械の相互関係、運転経験、事故時に発生する物理・化学現象等を体系的に考慮しながら、考え得るすべての事故シーケンスの発生頻度と影響を定量的に評価するので、例えば、既に決定論的手法により安全性に係わる判断が下されている稼働中の原子力発電所についても、

PSAの結果を直接的あるいは間接的に用いて、安全確保をより確実とするプラント

改造や運転方法の改良を図ることが出来る。なお、PSA 結果に含まれる不確かさは主として我々の知識の限界に由来するもので、決定論的手法においては一般に保守的な条件を課すことによって処理してきたものである。PSA は不確かさの寄与因子とその重要度を明らかし、不確かさを意思決定に用いるための戦略作成の枠組みを提供する。

特に PSA は、発生確率が極めて小さいが、事象の進展が広範・多岐にわたるシビアアクシデントの発生防止や影響緩和の諸対策の効果を総合的に評価する上で有効である。

## 2. 評価手法

PSA は、図 1 に示すように、原子力発電所を構成する系統、機器の信頼性を分析し、炉

心損傷事故の発生頻度までを評価するレベル 1PSA、多量の放射性物質が施設外へ放出される事故の発生頻度とソースターム（放射性物質の種類、放出量、放出時期など）までを評価するレベル 2PSA、さらに公衆のリスクまでを評価するレベル 3PSA の3段階に分けられる。世界各国で最も活用の進んでいるレベル 1PSA の具体的な作業項目と手順を図 2 に示す。

作業は、まず評価の対象とする原子炉の設備、特性を調査することから始める。つぎに炉心損傷に至る可能性のある事故シーケンスの引き金となる起因事象を選定し、そのおのおのに対して事象の拡大防止や影響緩和のための原子炉停止や炉心冷却などを行うシステムが成功または失敗する組合せをイベントツリー (ET) やフォールトツリー (FT) を用いて図式表現し、炉心損傷に至る

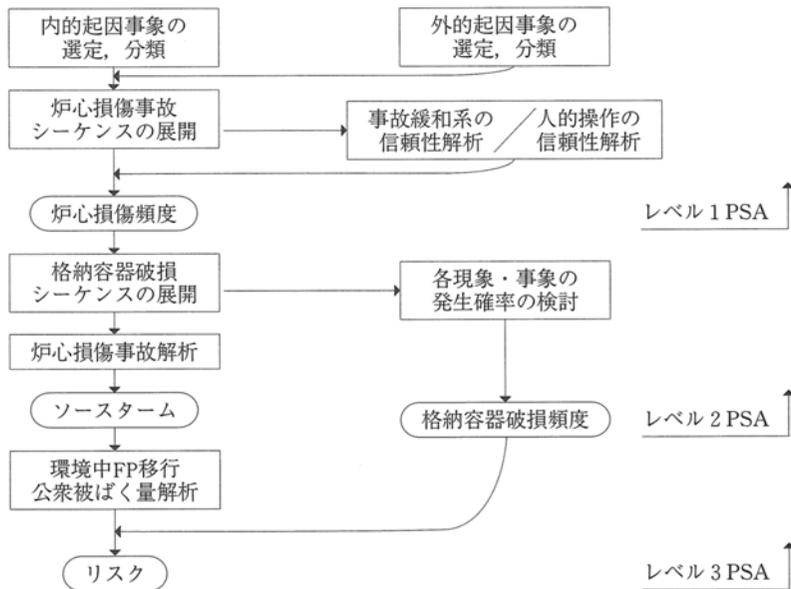


図 1 原子炉施設に対するPSAの手法

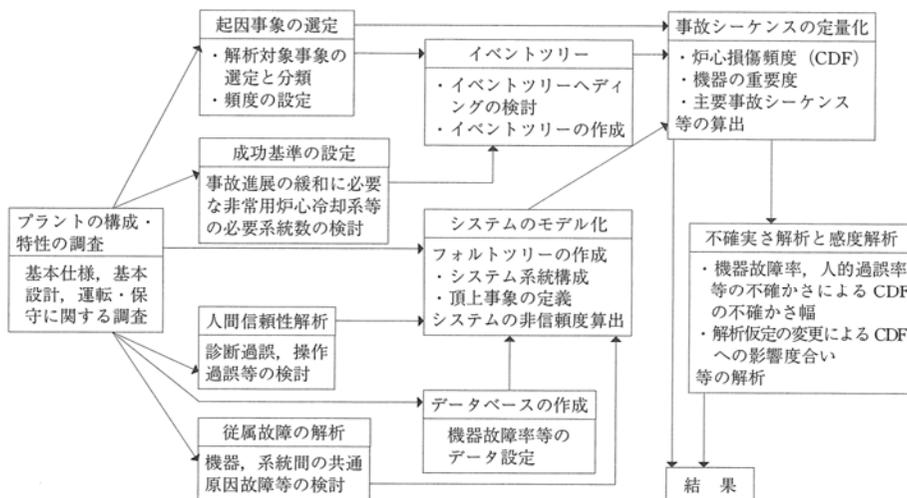


図2 レベル1 PSAの概要

シーケンスを検討する。この検討に際しては、例えば、炉心冷却を達成するためには最低限何ループの非常用炉心冷却系(ECCS)が事故発生後何分以内に作動すれば良いかなどを検討することによって、現実的な成功または失敗の組合せを決定する。この作業では対象とする原子力発電所の設置許可申請書などを参考にしつつ、熱水力解析コードを用いて最適推定解析を数多く行う。これを「成功基準の解析評価」と称している。なお、ETとは、起回事象を出発点に、事象がどのように進展して最終状態に至るかを、ほぼ時系列的に解析していく樹木状の論理構造図のことであり、またFTとは、システムの成功基準を考慮して決定された解析対象の事象(一般に失敗事象)を頂上において、その事象が生じるための要因をつぎつぎと図式展開し、それぞれの間を成功または失

敗のゲートで結合していく論理構造図のことである。ETおよびFT展開の過程で、プラントの設計や運転管理方法を詳細に分析し、機器の従属故障や人的過誤を考慮する。最後に事故シーケンスの発生頻度を機器故障率、人的過誤率などのデータを用いて計算するとともに、データの不確かさ幅やモデル上の仮定が結果に与える影響を把握するための不確かさ解析や感度解析を実施する。

PSA技術はユ960年代頃から開発が進められ、1975年に米国で公表された原子炉安全研究(WASH-1400)においてその骨格が確立した。PSA技術は近年かなり成熟したが、例えば、レベル1PSAにおける機器の共通原因故障率、人的過誤率などのデータベース、レベル2PSAにおけるデブリ冷却などの物理現象の把握、地震を対象としたPSAにおける地震危険度の評価方法などは現状では十分

とはいえない。これらは専門家の工学的判断に基づき保守的な取扱いをしたり、あるいは不確かさ解析や感度解析を行い PSA 結果の不確かさ幅を把握することとしている。

### 3. 活用

原子炉安全研究が欧米型軽水炉の最大の事故といわれる 1979 年の TMI-2 事故の類似事象を取り扱っていたことから、これ以降、原子力発電所の総合的な安全評価、安全性向上に PSA が多用されることとなった。すなわち、PSA を実施して、原子力発電所の現在の安全確保対策の妥当性を確認するとともに、潜在的なリスク要因を摘出して、安全性をさらに向上させるコスト効果の良い対策を立案するのに用いている。また、最近では、PSA により得られる知見を活用して、系統、機器、運転手順等に安全上の重要度付けを行い、重要度に応じて必要な性能を設定することにより、原子力発電所の高い安全性を維持しながら、人的、資金的資源を効果的に活用するリスク情報を考慮に入れた安全確保活動

(RiskInformedSafetyManagement) が、欧米諸国を中心に多くの国で取り入れられてきている。

PSA は、原子力発電所の基本設計、詳細設計と建設および運転のプラントライフサイクルの全ての段階において、具体的には以下のように活用され得る。

まず基本設計の段階では、複数のシステム構成案に対して簡易的な PSA 手法を採り入れた相対的評価を実施し、安全性に加え

て通常運転時の運転員負担や経済性も考慮して最適な案を選択する。さらに、選定された設計案について安全裕度を確認するとともに、相対的に脆弱な部分(機器や系統)を摘出し、これを強化する。ついで、詳細設計と建設の段階では、詳細設計に基づく PSA を実施し、基本設計の具体化の確認、サポート系や系統間依存性などを詳細に考慮した安全裕度の総合的評価、試験と保守の手順や周期の最適化、通常時および異常時の運転手順書の整備、さらにはアクシデントマネジメント(AM)計画の作成やサイト内外における緊急時計画の立案に活用する。また運転段階では、機器故障や運転管理などの実績を反映した当該発電所の固有データを用い、周期的あるいは設計や運転手順の変更を検討する際に PSA を実施し、上記の詳細設計と建設段階で PSA を活用した各事項について運転実績に基づいた妥当性の確認を行うとともに、必要な改良整備などを行う。最近では、PSA 技術を用いて計画的な試験、保守或いは故障発生に基づく系統構成変更によるリスクの増加をオンラインで算出するリスクモニターを設置し、運転管理の判断情報に活用する原子力発電所が増えてきている。

我が国においても安全規制当局の強い奨励を踏まえて、電気事業者の自主的な安全管理活動において PSA の活用は活発となってきており、最近では以下がある。

- ・各原子力発電所の特徴を把握し効果的な AM を整備するために PSA を実施するとともに、AM 整備後に PSA を用いてその定量的有効性を確認している。

- ・10年毎の定期安全レビューにおいて、各原子力発電所の安全上の特徴を総合的に把握し、必要なら対策を講じるためにPSAを実施している。
- ・冗長性を持つ安全系の1系統を待機除外にしたままの原子力発電所の運転継続を許容する時間などを、PSAによるリスク情報に基づき設定する。

#### 参考文献

- 1) 原子力安全研究協会: 確率論的安全評価実施手順に関する調査検討—レベル1PSA, 内的事象—(1992), —レベル2PSA, 内的事象—(1994)
- 2) 平野光将: 確率論的安全評価の原子力発電所への適用事例, システム/制御/情報, 36, 3(1992)

