

AESJ-SC-TR010 : 2015



日本原子力学会
標準委員会 技術レポート

外部ハザードに対するリスク評価手法に関する
手引き : 2015

2016年3月

一般社団法人 日本原子力学会

まえがき

本資料は、外部ハザードに対する原子力発電所のリスク評価を実施するにあたり用いられる一般的なリスク評価手法について、提示するものである。

リスク専門部会では、原子力発電所に対して脅威を与える可能性のある潜在的な外部ハザードを同定し、発生頻度とプラントに対する影響の観点から、それらの外部ハザードに関するリスク評価方法を選定するプロセスを作成し、**外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準：2014**（以下、“**外部ハザード選定標準**”という）として発行している。本資料は、**外部ハザード選定標準**に基づいて実施する潜在的な外部ハザードの同定及び特性分析による選別、並びに**外部ハザード選定標準**に則り選定された定量的リスク評価方法に対して用いられるリスク評価手法に関して、一般的なリスク評価手法をその適用可能性に着目して整理したものである。

平成 27 年 12 月
標準委員会 リスク専門部会
部会長 山口 彰

標準委員会，専門部会，分科会 委員名簿

標準委員会

(順不同，敬称略)
(2015年12月11日現在)

委員長	関村 直人	東京大学	委員	谷本 亮二	三菱マテリアル(株)
副委員長	有富 正憲	東京工業大学	委員	津山 雅樹	(一社)日本電機工業会
幹事	山口 彰	東京大学	委員	鶴来 俊弘	中部電力(株)
委員	青柳 春樹	元日本原燃(株)	委員	寺井 隆幸	東京大学
委員	姉川 尚史	東京電力(株)	委員	中井 良大	国立研究開発法人
委員	井口 哲夫	名古屋大学			日本原子力研究開発機構
委員	伊藤 裕之	(一社)原子力安全推進協会	委員	西野 祐治	原子燃料工業(株)
委員	上田 親彦	九州電力(株)	委員	萩原 剛	(株)東芝
委員	大鳥 靖樹	(一財)電力中央研究所	委員	藤森 治男	(株)日立 GE ニュークリア・ エナジー
委員	岡本 孝司	東京大学	委員	本間 俊充	国立研究開発法人
委員	岡本 太志	富士電機(株)			日本原子力研究開発機構
委員	小原 徹	東京工業大学	委員	吉原 健介	関西電力(株)
委員	河井 忠比古	(一社)原子力安全推進協会	委員	渡邊 宏	日揮(株)
委員	清水 直孝	日本原子力保険プール			
委員	高橋 久永	三菱重工業(株)			

旧委員 (所属は委員退任時)

喜多尾 憲助 (ISO/TC85・IEC/TC45 国内委員会)

フェロー委員

成合 英樹 (元筑波大学)，宮野 廣 (法政大学)

常時参加者

鈴木 理一郎 (原子燃料工業(株))

リスク専門部会

(順不同, 敬称略)
(2015年12月3日現在)

部会長	山口 彰	東京大学	委員	高田 毅士	東京大学
副部会長	山本 章夫	名古屋大学	委員	竹山 弘恭	中部電力(株)
幹事	成宮 祥介	関西電力(株)	委員	中田 耕太郎	(株)東芝
委員	青木 繁明	三菱原子燃料(株)	委員	松本 精二	日本エヌ・ユー・エス(株)
委員	阿部 博	(株)テプコシステムズ	委員	丸山 結	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
委員	岡本 孝司	東京大学	委員	村田 尚之	(一社)原子力安全推進協会
委員	北村 豊	(株)三菱総合研究所	委員	山岸 誠	三菱重工業(株)
委員	桐本 順広	(一財)電力中央研究所	委員	山中 康慎	東京電力(株)
委員	倉本 孝弘	(株)原子力エンジニアリング	委員	吉田 一雄	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
委員	栗坂 健一	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構	委員	Steven Woody Epstein	Curtiss-Wright Co.
委員	越塚 誠一	東京大学			
委員	鈴木 雅克	日本原子力発電(株)			
委員	武部 和巳	日本原燃(株)			
委員	曾根田 秀夫	日立 GE ニュークリア・ エナジー(株)			

常時参加者

菅谷 淳子 (日本エヌ・ユーエス(株)), 鈴木 俊一 (東京大学), 野村 治宏 (関西電力(株))

目 次

1	はじめに	1
2	リスク評価手法	1
2.1	リスク評価手法の概要	1
2.2	外部ハザードに対するリスク評価への適用性	12
3	まとめ	20
	参考文献	20

1 はじめに

本資料は、原子力発電所（以下、“プラント”ともいう）の安全性に脅威を与える可能性のある外部ハザードを網羅的に同定し、リスクとして炉心損傷を対象とし、シナリオ、発生頻度、プラントに対する影響の観点から、外部ハザードに関するリスク評価方法を選定する手順を規定した、**外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準：2014**⁽¹⁾（以下、“**外部ハザード選定標準**”という）に基づき実施される潜在的な外部ハザードの同定、特性分析による選別及び**外部ハザード選定標準**に則り選定された4つの定量的リスク評価方法において用いられるリスク評価手法の例を示すものであり、**JIS Q 31010:2012 リスクマネジメントーリスクアセスメント技法**⁽²⁾（以下、“**JIS Q31010**”という）の附属書に示された31のリスクアセスメント技法について、原子力発電所の外部ハザードに関するリスク評価への適用性の観点から整理している。

本資料に記されたリスク評価手法を、評価対象とする外部ハザード、リスク評価方法及び求める評価結果の詳細さに応じて、評価者が適切に組み合わせることで、リスク評価を実施できる。また、本資料で扱う手法は外部ハザードに関するリスク評価のみならず、原子力発電所を対象とした内的事象に関するリスク評価、原子力発電所以外の原子力施設を対象としたリスク評価等、その他のリスク評価においても用いることができるものであり、本資料において整理した各リスク評価手法の特徴等を参考とすることができる。

なお、本資料においては、**JIS Q 0073:2010 リスクマネジメントー用語**⁽³⁾で定義するところのリスクアセスメント技法をリスク評価手法と記載している。

2 リスク評価手法

2.1 リスク評価手法の概要

本資料において扱う31のリスク評価手法について、その概要と、外部ハザードに対するリスク評価に適用する際に参考となる記述について、**1)～31)**に示す。

1) ブレインストーミング

【手法の概要】

ブレインストーミングは、知識のある人々のグループ間に自由な会話を促し、奨励して、潜在的故障モード及び関連するハザード、リスク、意思決定のための基準、及び／又は対応選択肢を明らかにする作業である。ブレインストーミングは、人々の想像力がグループの他人の考え及び意見によって確実に誘発されるように努める特殊な技法を含む。

この技法では有効な議事進行が極めて重要であり、議事進行には、最初の討議のきっかけを与えること、定期的にグループに他の関連分野への参画を促すこと、及び（通常は極めて活発な）討議からもち上がる問題の把握を含む。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

定性的及び定量的なリスク評価全体にわたり、支援技法として適用できる。他のリスクアセスメント技法と併用することが可能である。

2) 構造化又は半構造化インタビュー

【手法の概要】

構造化インタビューでは、インタビューを受ける個々の人々に、回答記入シートにあるあらかじめ用意した一連の質問をして、異なる視点からその見解を求め、その視点からリスクを特定する。半構造化インタビューもこれと類似するが、提起された問題の究明について自由に会話する余地を残している。

構造化インタビュー及び半構造化インタビューは、ブレインストーミングセッションのために人を集めることが難しい場合、又はグループでの自由な討議が状況的に若しくは参加する人々に不都合な場合に役立つ。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

定性的及び定量的なリスク評価全体にわたり、支援技法として適用できる。他のリスクアセスメント技法と併用することが可能である。

3) デルファイ法

【手法の概要】

デルファイ法は、専門家のグループから信頼性のある意見の一致を得る手順である。デルファイ法では、専門家が、プロセスが進行するにつれて、他の専門家の見解を確認しながら、自分の意見を独自に匿名で表明する。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

定性的及び定量的なリスク評価全体にわたり、支援技法として適用できる。他のリスクアセスメント技法と併用することが可能である。

4) チェックリスト

【手法の概要】

チェックリストは、所定の検討項目をリスト化して纏めたもので、必要な検討事項の漏れを防ぐために用いることができる。リスト化する検討項目は、経験に基づき、随時改定することで質の高いリストとすることができる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザード選定標準の“表F.1 外部ハザードに係る特性分析要素の選定の例示”には外部ハザードの例示が幅広く纏められている。また、特性分析要素として、発生、到達、影響のどの観点に着目した検討をすればよいかが示されている。外部ハザードに対するリスク評価をする場合、これらを参考にチェックリストを準備することが推奨される。

定量的な評価はできない。

5) 予備的ハザード分析(Preliminary hazard analysis:PHA)

【手法の概要】

詳細な設計情報や運用の情報がまだ定まっていない計画設計段階やプロジェクトの初期段階において、システムや施設に影響する可能性が考えられるリスクを抽出するとともに、考えられる影響、対策案などをワークシートにまとめながら検討する手法。

定性的な評価にとどまるが、安全対策の検討や、詳細設計段階での定量評価の優先順位の決定などに活用できる。

具体的な分析方法としては、潜在的なリスク、前提となる運転状態、想定される原因、影響度、対策案をワークシートに整理して考察する例があげられる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

定量的な評価はできない。

6) HAZOP (Hazard and Operability) スタディーズ

【手法の概要】⁽⁴⁾

計画中または既存の、製品、プロセス、手順またはシステムの系統的な調査を行い、所定の動作目的に対するリスクを特定する分析手法。

分析にあたっては、Guide Word(*)を用いて、着目するプロセスやシステムの流量、圧力、温度といったパラメータの変動(Deviation)を想定し、変動の原因(機器の故障、誤操作、等)、所定の動作目的に対して予想される影響・結果を考察するとともに、安全対策案を考案し、ワークシートに整理する。

(*) Guide Word は、Deviation の設定に役立つ語句として HAZOP で一般に用いられる。No, より多く, より少なく, と同様に, の一部, 逆または反対, 以外, 適合性が代表例。これにシステムパラメータを加えることで Deviation を想定する。例えば, 配管の流量 (システムパラメータ) に着目して, 流量なし (設計で意図したことが起こらない) (=”No”+流量), 高流量 (=”より多く”+流量), 低収量 (=”より少なく”+流量), 逆流 (=”逆”+流量) を変動 (Deviation) として想定し, 検討に用いる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

HAZOP は, 再処理施設, ウラン加工施設におけるリスクの検討に活用されている。

一般に, HAZOP では一度に一つの故障を想定するので, 多重故障や共通原因故障の評価には適していない。

外部ハザードに対するリスク評価に適用する場合は, Deviation として潜在的な外部事象を選定し, 予想される影響, 防止策, 緩和策を検討してワークシートに整理することが考えられる。

7) ハザード分析及び必須管理点 (Hazard analysis and critical control points:HACCP)

【手法の概要】

食品の安全管理の目的で整理された手法。食品の製造プロセスのなかで製品の品質及び安全に重大影響を与えるパラメータ（温度，濃度等）を管理点として設定し，そのパラメータを常時監視することでリスクを管理する。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

製造プロセスのリスク管理に用いられる手法であり，外部ハザードのリスク管理には適さない。

8) 環境リスクアセスメント

【手法の概要】

化学薬品，微生物等の環境ハザードへのばく露に対する，動植物及び人に対する影響を分析する手法。動植物及び人の潜在的なばく露の程度の評価，ばく露の程度に対する影響の大きさの評価を行い，環境ハザードによる影響の程度を評価する。環境ハザード一般に適用可能であり，被ばく評価，被ばく管理で用いられている手法と類似している。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

化学物質等のばく露による影響や，ばく露にいたる経路が明らかであり，長期間のばく露によるリスクを評価する手法であり，ばく露に至る経路やその可能性についても評価の必要な外部ハザードについては，適用が難しいものと考えられる。

9) 構造化“What-if 手法”(Structured “What-if” Technique:SWIFT)

【手法の概要】

“もし～ならばどうなるか”という問いかけ(What-if)をチームで行い，リスクの要因となる事象とその結果を分析する。この手法の特徴は，What-ifの問いかけに対して，問いかけるべき標準的な語句リスト（ガイドワード）が整備されており，構造的なアプローチが可能な点にある。

この手法は，要因が複雑に絡み合う事象等の，詳細な分析には適さない。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザードの定性的なリスク評価にあたり，当該手法の構造的アプローチを参考にすることができる。

10) シナリオ分析

【手法の概要】

現在あるリスク及び別のリスクの将来の進展を検討し，その影響を調べることによって，リスクを特定する，記述的モデル展開を行う分析手法である。

シナリオ分析は、脅威及び機会の両方がどのように進展するかの予想に使用でき、時間枠が短期と長期のあらゆる種類のリスクに使用できる。ただし、時間枠が短期かつデータが良質な場合に比べ、時間枠が長期又はデータが貧弱な場合には、評価者の想定・仮定がより多く含まれたものとなる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザードが原子力発電所にどのように作用を及ぼすか、設備機能に影響が出た場合事象がどのように進展するかを分析するときに利用することができる。

11) 事業影響度分析(Business impact analysis :BIA)

【手法の概要】

事業影響度分析は、主要な事業プロセス等の中断がどのように組織の運営に影響するのか分析を行い、組織の運営管理に必要な能力を明らかにする手法。

事業影響度分析は、アンケート、インタビュー、構造化ワークショップ、又はこれらの組み合わせを用いて実施し、組織運営における重大なプロセス及び関連する相互依存性、プロセスの損失の影響、復旧時間等に対する理解を得ることができる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

組織の運営への影響を評価する手法であり、外部ハザードに対するリスク評価への適用は難しい。

12) 根本原因分析 (Root cause analysis :RCA)

【手法の概要】

事象や不具合が発生した後に、事象等の背景にある構造や人的原因などの根本的な原因を明らかにし、再発防止につなげるための手法。対象となる事象等のデータ及び証拠を基に、原因を究明するために特性要因図、故障モード・影響解析(FMEA)、故障の木解析(FTA)等を用いて構造化分析を実施し、解決策を立案する。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

発生した事象等の原因分析及び解決策を立案する手法であるため、潜在的な外部ハザードに対するリスク評価には適さない。

13) 故障モード・影響解析 (Failure mode and effects analysis :FMEA) /故障モード・影響及び致命度解析 (Failure mode, effects and criticality analysis :FMECA)

【手法の概要】⁽⁵⁾

故障モード・影響解析は、コンポーネント、システム又はプロセスが、どのように設計の意図を満たすことに失敗するかを明らかにするために用いる技法である。故障モード・影響及び致命度解析は、FMEAを拡張し、明らかになった故障モードを、更にその重要性又は致命度によって分類するものである。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザードがある機器に影響を与えた場合、それによりシステムにどのように影響を受けるか、プラントがどのような影響を与えるかを解析することができる。確率論的リスク評価（PRA）において起因事象を特定する際に用いられるが、他のリスク評価方法においても、同様の分析を行う際に用いることができる。

14) 故障の木解析(Fault tree analysis:FTA)

【手法の概要】⁽⁶⁾

故障の木解析は、その発生が好ましくない事象（頂上事象）について、発生に繋がる全ての要因、発生経路を分析するための手法である。要因は演繹的、論理的に展開していき、頂上事象とその要因との相互関係を樹形図で図示する。定性的評価及び定量的評価に用いることができる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

望ましくない事象がどのように発生するか、その経路を分析するために用いることができる。また、機器の故障率等を用いて起因事象の発生頻度を求めることができるため、PRAにおいて事象の木解析（ETA）におけるシナリオの分岐確率や起因事象発生頻度を求める際に用いられる。

15) 事象の木解析(Event tree analysis:ETA)

【手法の概要】

事象の木解析は、起因事象が発生したとして、それに続く事象の進展を分析し、図示する技法である。起因事象からスタートし、起因事象に続く事象の影響を緩和するために設計されている様々なシステムの成否を 2 通りの分岐によって結んでいき、どのような事象（状態）に進展するかを分析する。分岐は成功か失敗の 2 通りであるため、部分的な成功を表現することはできないが、定性的評価及び定量的評価のいずれの場合にも用いることができる手法である。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

事故シーケンスの分析において使用することができ、各シーケンスの発生頻度についても評価できる。

16) 原因・結果解析

【手法の概要】

原因・結果解析は事象の木解析(ETA)と故障の木解析(FTA)を組み合わせた技法である。決定事象から始めて、発生可能性がある条件又は起因事象の結果を緩和するように設計されたシステム等の失敗を表す分岐ゲートの組み合わせによって結果を解析する。アウトプットは、どのようにシステムが故障するか、その原因と結果との両方を示す図表であり、

ET図の分岐点にあたるには、特定の条件(Success criteria 等)を記載したボックスで示す。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

ETAとFTAの組み合わせであることから、外部ハザードによるシステム機能喪失のシナリオ分析に用いることができる。

17) 原因影響分析

【手法の概要】

原因影響分析は、好ましくない事象又は問題について、考えられる原因を究明する技法である。ある事象等に対する原因及びそのまた原因を分析し、その関係性を特性要因図又は樹形図の形で示す。原因は主要なカテゴリに分けることによって構造化する。原因影響分析は一般的に定性的に使用するものであり、発生確率を付与することもできるが、原因影響の関係性及び要因間の相互作用を表現するものではないため、定量化は妥当ではない。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザードに引き起こされる事象が、発電所にどのような影響を与えるかについて分析することができる。

18) 防護層解析 (Layer of Protection Analysis: LOPA)

【手法の概要】

防護層解析 (LOPA) は、事象又はシナリオに付随するリスクの半定量的な算定方法であり、リスクを抑制又は緩和するため十分な対策であるか否かを解析する。原因・結果の対からリスクの原因を防ぐための防護層を特定し、リスクを許容水準まで低減しているかどうかを判定するための等級計算を実施する。各防護層によるリスク低減度を解析することで、リスクの低減に要する資源を有効に配分するための判断情報として使うことができる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

運転、システム及びプロセスを対象とした解析ができ、これらの有するリスクに対して最も重要な防護層を明らかにすることで、資源の最適配分に資することができるが、適用できるのは一つの原因・結果の対及び一つのシナリオであり、共通原因故障などを含む複雑な相互作用には適さない。

19) 決定木解析

【手法の概要】

決定木は、不確かな結果を考慮して順番に置いた選択肢及び結果を表す。起因事象又は最初の決定で始まり、発生する可能性がある事象及び決定の選択肢による異なる経路及び結果をモデル化する。不確かさがある場合に最善の行動方針の選択に用いることができ、プロジェクトリスクの管理などにも使用される。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

リスク評価においては、事象の木解析（ETA）に含まれる。

20) 人間信頼性アセスメント (Human Reliability Assessment: HRA)

【手法の概要】

人間信頼性アセスメント（HRA）は、運転、システム及びプロセスに及ぼすヒューマンエラーの影響評価に用いることができる。定性的な HRA をエラーの可能性及びその原因分析の目的で使用すれば、エラーの低減に寄与することができる。定量的な HRA を使用すれば、ヒューマンエラーに関する確率を故障の木解析（FTA）又はその他の手法に提供できる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

リスク評価において広く適用されており、詳細なリスク評価を始め各種のリスク評価手法に適用することができる。

21) ちょう(蝶)ネクタイ分析

【手法の概要】

ちょう(蝶)ネクタイ分析は、原因から結果までのリスクの経路を記述し、分析する簡易な図式方法である。事象[ちょう(蝶)ネクタイの結び目で表す]の原因を分析する FTA の考え方（左側）と、結果を分析する ETA（右側）とを組み合わせたものと見ることができる。ただし、ちょう(蝶)ネクタイ分析で重要なのは、原因とリスクとの間、及びリスクと結果との間のバリアである。ちょう(蝶)ネクタイ図は、FT 図及び ET 図を起点に構成できるが、ブレーンストーミングで検討し、直接描くことのほうが多い。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

基本的に FT 図及び ET 図と同等の表現方法であり、FT 図及び ET 図で代替できるため、新たなリスク評価方法や分析方法とは言えないと考えられる。

22) 信頼性重視保全(Reliability centred maintenance: RCM)

【手法の概要】

RCM は、あらゆる種類の機器に要求する、運転の安全性、アベイラビリティ及び経済性を効率的かつ効果的に達成するように、故障の管理において実現するとよい方針を明らかにする方法である。RCM は、現在、幅広い様々な産業界が用いる実証済みの方法である。RCM では、リスク分析として、保全を行わないときの各故障の頻度の推定と故障影響を組み合わせたリスクマトリックスによってリスクレベルのカテゴリを定める。これらの結果から、機器に適用可能で有効な予防保全要求事項並びにその故障の原因となる劣化機構を特定するための決定プロセスを提供する。このプロセスを通じた作業の最終結果は、保全作業の実施又は運用の変更のような他の対策の必要性に関する決定である。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

RCMの目的は、保全方法の検討、策定であるが、リスクアセスメントの基本ステップを踏むことから、リスクに基づいた技法といえる。FMECAと同じ種類のリスクアセスメント技法であるが、その中間的成果として、各故障の頻度の推定と故障影響を組み合わせたリスクマトリックスによってリスクレベルのカテゴリを定めることから、外部ハザードによる故障が特定できれば、そのリスクの簡易評価として利用可能と思われる。ただし、頻度と影響をカテゴリ分けする際の客観的な判断基準の設定が課題と思われる。

23) スニーク解析(Sneak analysis: SA) 及びスニーク回路解析(Sneak circuit analysis: SCA)**【手法の概要】**

SAは、設計エラーを発見するための方法である。スニーク状態とは、ハードウェア、ソフトウェア又はこれらの組合せが、コンポーネント故障では発生しない、好ましくない事象を発生する又は好ましい事象の発生を阻害する潜在的な状態のことである。この状態は、偶発性があり、最も厳格な標準のシステム試験でも発見できない特徴をもつ。

SAは、様々なツール(ネットワークツリー、ネットワークツリー群、及び分析者によるスニーク状態の発見を支援する手がかり又は質問)を使って特定の種類の問題を発見する。ネットワークツリー及びネットワークツリー群とは、実際のシステム上のネットワークポロジの分類であり、各ネットワークツリーとシステムの特定のアウトプットに寄与するネットワークツリーを組合せて構成したものがネットワークツリー群である。適切なネットワークツリー群は、システムのアウトプットを、関連する全てのインプットによって示す。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

システム内の予期しない経路又は論理フローであり、一定の条件下で、望ましくない機能を始動したり、又は必要な機能を阻害したりするスニーク状態を検出するための技法であるが、各要素(ハードウェア、ソフトウェア、オペレータの動作、又はこれらの要素の組合せ)間の因果関係を詳細に把握する必要があることから、影響の詳細を特定しにくい外部ハザードのリスク評価への適用は難しいと思われる。

24) マルコフ解析**【手法の概要】⁽⁷⁾**

マルコフ解析は、システムの将来の状態が現在のシステムの状態だけに依存している場合に使用する。マルコフ解析プロセスは、定量的技法であり、状態間の変化の確率(遷移確率)が離散的でも連続的でも適用可能である。この方法は、高次のマルコフプロセスを採用することによって、より複雑なシステムに拡張できる。マルコフ解析は手計算でも実施できるが、この技法の性質上、コンピュータプログラムの使用に向いている。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザードが顕在化した後にシステムが取りうる状態間の遷移確率が、直前の状態のみに依存しているのならば、外部ハザードに対してもマルコフ解析の手法は適用可能である。

25) モンテカルロシミュレーション

【手法の概要】

多くのシステムは、非常に複雑であるため、解析的技法を用いて不確かさの影響をモデル化することができないが、モンテカルロシミュレーションでは、インプットを無作為の変数とみなし、インプットのサンプリングによつて多数回のシミュレーションを実行し、多数個の出力を得ることによって、様々な状況でのシステムへの不確かさの影響を評価できる。この技法は、解析的技法では解くことが極めて難しい複雑な状況を取り扱うことができる。モンテカルロシミュレーションは、異なる次の二つの目的に使用できる。

- － 解析的モデルにおける不確かさの伝ば(播)
- － 解析的技法を用いることができないときの発生確率計算

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

モンテカルロシミュレーションは、地震等の外部事象 PRA においても有用なツールであり、実際に地震ハザードやフラジリティあるいは炉心損傷確率の評価等に活用されている。

26) ベイズ統計及びベイズネット

【手法の概要】

ベイズ統計は、既知の情報(事前分布)をその後の測定(事後分布)と組み合わせることにより、発生確率を設定できるとする考え方である。ベイズ統計では、全ての分布パラメータが固定されておらず、パラメータは確率変数であるとする点において、古典的統計と異なっている。ベイズ確率は、客観的証拠を論拠とする古典的確率と異なり、ある事象について人が信ずる度合い(確率の主観的解釈)と考えると容易に理解できる。また、ベイズネットは、グラフモデルを使用して変数の集合及びその確率論的關係を表す。ネットワークは、確率変数を表すノードと、親ノードと子ノードとをつなぐ矢印とで構成される。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

PRA の分野においては、ベイズ統計は、個別プラントの故障率等を算出する際に、他プラントの故障率(一般パラメータ)を事前分布として、個別プラントの故障率分布(事後分布)を算出する等の際に用いられる。外部ハザードについても、適切に事前分布を設定することができれば、原理的には本手法を適用可能と考えられるが、現時点で適用された事例は知られていない。

27) FN 曲線

【手法の概要】

FN 曲線は、リスク分析結果を表現する方法であり、横軸に“指定されたレベルの危害”をとり、縦軸に“その危害の発生する頻度”をとったグラフとして表すものである。横軸に死傷者数(N)、縦軸に N 人以上の死傷者数が発生する頻度(F)を示し、右下がりのグラフになって表れることが多い。

ある母集団に対し類似の性質のリスクの比較に適している。また、リスクの許容範囲を FN 曲線で表現することにも使われている。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザード源によるリスク評価結果の比較において、FN 曲線を活用できる。

28) リスク指標

【手法の概要】

リスク指標は、リスクの大きさを順序付けする数字であり、定性的な尺度（評点）を表す。あるシステムに対する様々なリスクを順序付けるには、まずリスクを構成する要素を分析し、それら構成要素に発生確率や影響度に応じた評点を与え、構成要素間の関係に基づき評点を加減乗除することにより当該リスクの指標を算出する。評点の与え方や計算方法には任意性があるため、既知のシステムに適用して妥当性を確認するとか、感度解析により敏感な要素を見つけて評点を調整するなど、適切さを確認することが望ましい。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザード源が複数あるときに、それらの発生確率と被害の大きさに評点を与えることでリスク指標を計算し、どの外部ハザードが重要かを順序付けることに活用できる。

29) リスクマトリックス

【手法の概要】

リスクマトリックスは、リスクレベルを定性的に順位付ける方法であり、横軸に被害の大きさ、縦軸に起こり易さをとったマトリックスで表現する。横軸と縦軸は各々5段階程度で表現するのが一般的である。

マトリックスを受容性の度合いで領域分けすることで、受容できない領域のリスクに対しては起こり易さを下げるか被害を小さくする対策を打つことにより、受容可能な領域へ移すといったリスクマネジメントの手段として活用することができる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

外部ハザード源によるリスク評価結果をマトリックスにあてはめることにより、外部ハザードのリスクプロファイル表現に活用できる。

30) 費用／便益分析(Cost and benefit analysis:CBA)

【手法の概要】

費用／便益分析は、事業の社会的便益と社会的費用を金銭的価値に置き換えて計測することで、事業によって社会全体としてどの程度の純便益が見込まれるのかを考察するものである。事業の妥当性を判断する方法として注目されているが、費用と便益を正確に金銭的価値に置き換えることが出来るかどうか、すなわち事業に含まれるリスクや、事業によって得られる便益を正確に把握し金銭に置き換えることができるかが課題である。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

リスクを把握出来ていることが前提の評価手法であり、リスクが潜在的なすなわち認知出来ていないハザードの評価には適用出来ない。

31) 多基準意思決定分析(Multi-criteria decision analysis:MCDA)

【手法の概要】

多基準分析とは、複数の基準で代替案を評価し選択を支援しようとする分析手法の総称である。リスクや効率性だけでなく、被ばくや作業環境といった時として相反する複数の目的が意思決定において考慮されなければならない環境下で意思決定の支援のために用いられる手法である。課題としては、最終的な判断のために複数の基準で評価された評価値を統合するが、その統合に当たって恣意的にならないようにすることが挙げられる。

【外部ハザードに対するリスク評価への適用】

複数の代替案の中から意思決定をしていくための評価手法であり、外部ハザードの評価には適用出来ない。

2.2 外部ハザードに対するリスク評価への適用性

JIS Q31010 の附属書にリスクアセスメント技法として記載された 31 の各リスク評価手法について、外部ハザード選定標準における以下のリスク評価方法への適用性を表 1 に示す。

- a) 潜在的な外部ハザードの同定、特性分析による選別
- b) ハザード発生頻度分析若しくは影響度分析によるリスク判断
- c) 裕度評価
- d) 決定論的 CDF 評価
- e) 詳細なリスク評価

ここでは、外部ハザード選定標準のリスク評価において、何らかの利用が可能であると考えられる JIS Q31010 のリスク評価手法を“○：適する”，利用可能性のないリスク評価手法を“\：適さない”，また、リスク評価実施自体ではなく、評価結果の検討・分析に利用するといった外部ハザード選定標準のリスク評価の目的外のリスク評価手法について

は“N/A：適用範囲外”と整理している。

さらに、外部ハザード選定標準のリスク評価において利用が可能であると考えられる **JIS Q31010** のリスク評価手法のみを抜き出し、外部ハザード選定標準の各リスク評価との対応関係を **表 2** に示す。

ここでは、外部ハザード選定標準のリスク評価において、何らかの利用が可能であると考えられる **JIS Q31010** のリスク評価手法を、**JIS Q31010** で分類される以下のリスクアセスメントのタイプ毎で整理を行っている。

- － 洗い出し法
- － 支援法
- － シナリオ分析
- － 機能分析
- － 管理策のアセスメント
- － リスク結果の分析・管理策の選択判断

表 1-1 リスク評価手法まとめ表（「外部ハザード選定標準」のリスク評価方法としての適用性）

リスク評価手法名*	リスク評価手法の説明	「外部ハザード選定標準」のリスク評価方法としての適用性 (○：適する \：適さない N/A：適用範囲外)				備考
		潜在的な外部ハザードの同定, 特性分析による選別	ハザード発生頻度分析若しくは影響度分析によるリスク判断	裕度評価	決定論的CDF評価	
<洗い出し法>						
4) チェックリスト	リスク特定の簡単な方法。検討すべき典型的な不確かさのリストを作る技法。ユーザは、あらかじめ作成されたリスト、コード又は規格を参照する。	○	/	/	/	/
5) 予備的ハザード分析 (PHA)	簡易な帰納的分析法であり、その目的は、ハザード及び危険な状態、並びに所定の活動、施設又はシステムに危害を引き起こす可能性のある事象を明らかにすることである。	○	/	/	/	/
<支援法>						
1) アレンストレーミング	大量のアイデア及び評価を集め、チームによってその順位付けを行うための手段。ブレインストーミングを、助言又は一対一及び一対多のインタビュウ法によって促進させることがある。	○	○	○	○	
2) 構造化又は半構造化インタビュウ	原因及び影響の究明、発生確率及び結果の推定、並びにリスク評価を支援することがある専門家の意見を集約する手段。専門家の間でコンセンサスを築くための技法。独立した分析及び専門家による投票を含む。	○	○	○	○	
3) デルフアイ法	SWIFTはチームで行う調査のために開発された手法である。ファシリテータ及びチームは、標準的な「What-if」形式の語句をガイドワードと組み合わせて使用して、システム、組織または手順が、正常な運転及び行動からの逸脱によってどのように影響されるか調査する。	○	○	○	○	詳細なリスク評価に必要な、リスク及びハザードの特定に使用できる。
9) 構造化「What-if」技法 (SWIFT)	人間信頼性アセスメント (HRA) は、システム性能に及ぼす人間の影響を取り上げ、システムへのヒューマンエラーの影響の評価に用いることができる。	/	/	/	/	/
20) 人間信頼性アセスメント (HRA)		/	/	/	/	/
<シナリオ分析>						
12) 根本原因分析 (RCA)	発生した単一損失は、誘発原因を理解し、どのようにすればシステム又はプロセスを改善し、同じような損失が将来起きないようにすることができるとかを理解するために分析する。分析では、損失が発生した時点でどのような管理策が設けられており、どのように管理策を改善すればよいかを検討しなければならない。	N/A				リスク評価結果からの改善検討・分析に関する手法であり、適用範囲外。

* リスク評価手法名の前に記載した番号は本文 2.1 と対応する。

リスク評価手法名	リスク評価手法の説明	「外部ハザード選定標準」のリスク評価方法としての適用性 (○：適する \：適さない N/A：適用範囲外)				備考
		潜在的な外部ハザードの同定, 特性分析による選別	ハザード発生頻度分析若しくは影響度分析によるリスク判断	裕度評価	決定論的CDF評価	
<シナリオ分析>						
10)シナリオ分析	現在あるリスク及び別のリスクを検討し、類推又は推定によって起こる可能性がある将来のシナリオを特定する方法。形式の整った手法に従ってもよいし独自の手法に従ってもよい。定性的なものもあれば定量的なものもある。	○	○	○	○	
8)環境リスクアセスメント（毒性アセスメント）	動植物及びび人に対するリスクを評価する手法。ハザードを明らかにし、分析して、動植物及びび人がハザードにばく（曝）露される経路を明らかにする。ばく（曝）露レベルに関する情報と一定レベルのばく（曝）露に起因する危害の性質とを組み合わせて、指定の危害が発生する確率の尺度を策定する。	N/A				動植物及びび人に対するリスクを評価する手法であり、外部事象がプラントへ与える影響の評価に用いることはできない。
11)事業影響度分析（BIA）	主要な中断リスクがどのような組織の運営に影響するかの分析を行い、組織の運営管理に必要となる能力を明らかにして、それを定量化する。	N/A				
14)故障の木解析（FTA）	好ましくない事象（頂上事象）から始めて、それが発生する全ての筋道を決める技法。その筋道は、論理的な樹形図で図示する。故障の木（fault tree: FT 図, 以下 FT 図という。）が作成されたら、考えられる原因/発生源の削減又は除去方法を検討することが望ましい。			○	○	
15)事象の木解析（ETA）	機能的推理によって、様々な起因事象の確率を可能性のある結果に翻訳する。			○	○	
19)決定木解析	決定木は、不確かな結果を考慮した、順番に置いた決定のための選択肢及び結果を表す。起因事象又は最初の決定で始まり、発生することがある事象及び下すことがある様々な決定の結果としての、異なる経路及び結果をモデル化する点でETAに似ている。					
16)原因・結果解析	FTA と ETA とを組み合わせたもので、時間の遅れの算定が可能となる。起因事象の原因と結果との両方を検討する。			○	○	
17)原因影響分析	影響の要因は幾つか考えられ、その要因は様々なカテゴリに分類できることがある。要因はブレインストーミングによって明らかとなることが多く、樹形図又は特性要因図で示される。	○	○	○	○	

リスク評価手法名	リスク評価手法の説明	「外部ハザード選定標準」のリスク評価方法としての適用性 (○：適する \：適さない N/A：適用範囲外)				備考
		潜在的な外部ハザードの同定, 特性分析による選別	ハザード発生頻度分析若しくは影響度分析によるリスク判断	裕度評価	決定論的CDF評価	
＜機能分析＞						
13)故障モード・影響解析 (FMEA)	FMEA (故障モード・影響解析) は、故障モード及びメカニズム並びにその影響を明らかにする技法である。FMEA には数種類のものがある。コンポーネント及び製品用の設計 (又は製品) FMEA, システム用のシステム FMEA, 製造組立プロセス用のプロセス FMEA, サービスマ FMEA 及びソフトウェア FMEA である。FMEA に続いて、各故障モードの重大さを定性的、半定量的又は定量的に定義する致命度解析 (FMECA) を行うことがある。致命度解析は、故障モードがシステム故障に至る発生確率、又は故障モードに関連するリスクレベル、若しくはリスク優先順位番号を基に行ってもよい。	○	○	○	○	
22)信頼性重視保全 (RCM)	あらゆる種類の機器で、要求される運転の安全、アベイラビリティ及び経済性を効率的かつ有効に達成するように、故障を管理するために実施することが望ましい方針を明らかにする方法。	N/A				リスク活用の手法であり、適用範囲外。
23)スニーク回路解析 (SCA)	設計エラーを発見する方法。スニーク状態とは、ハードウェア、ソフトウェア又はこれらの組合せが、コンポーネント故障では発生しない、好ましくない事象を発生する又は好ましい事象の発生を阻害する潜在的な状態のことである。これらの状態は、その偶発性、及び最も厳格な標準システム試験での検出のしにくさによって特徴付けられる。スニーク状態は、異常動作、システムアベイラビリティの損失、プログラムの遅延、又は要員の死若しくは傷害を引き起こすことがある。	○	○	○	○	
6)HAZOP スタディーズ	予想又は所定の性能からの、考えられる逸脱を定義するための一般的なリスク特定プロセス。ガイドワードに基づくシステムを使用する。逸脱の重大性を査定する。	○				
7)ハザード分析及び必須管理点 (HACCP)	決められた限界内にあることが要求される特定の特性の測定及びモニタリングによって、製品の品質、プロセスの信頼性及び安全を確保するための	N/A				製造プロセスのリスク監視 (モニタリング) の手法

リスク評価手法名	リスク評価手法の説明	「外部ハザード選定標準」のリスク評価方法としての適用性 (○：適する \：適さない N/A：適用範囲外)				備考
		潜在的な外部ハザードの同定, 特性分析による選別	ハザード発生頻度分析若しくは影響度分析によるリスク判断	裕度評価	決定論的CDF評価	
＜リスク結果の分析・管理策の選択判断＞						
27)FN 曲線	FN 曲線は、指定されたレベルの危害を指定の母集団に引き起こす事象の発生確率を図に表したものである。所定の数の死傷者が出る頻度を指すことが最も多い。	N/A				リスク結果の分析・管理策の判断選択に関する手法であり、適用範囲外。
28)リスク指標	リスク指標は、順序尺度を用いた採点方式を採用して導出する推定値であり、リスクの半定量的尺度である。	N/A				リスク結果の分析・管理策の判断選択に関する手法であり、適用範囲外。
29)リスクマトリックス	リスクマトリックスは、リスクレベル又はリスクの等級化を決めるために、結果の定性的又は半定量的等級化と起こりやすさを結合する手段である。	N/A				リスク結果の分析・管理策の判断選択に関する手法であり、適用範囲外。
30)費用/便益分析 (CBA)	CBA は、最善の、又は最も利益がある選択肢を選択するために、予想費用と予想便益とを比較検討するリスク評価に用いることができる。	N/A				リスク結果の分析・管理策の判断選択に関する手法であり、適用範囲外。
31)多基準意思決定分析 (MCDA)	一連の選択肢の総合的価値を客観的かつ分かりやすく評価するために、様々な基準を使用する分析。一般に、全体の目標は、利用可能な選択肢の選考順序を定めることである。	N/A				リスク結果の分析・管理策の判断選択に関する手法であり、適用範囲外。

表 2- JIS Q31010 におけるリスク評価手法と外部ハザード選定標準におけるリスク評価方法の対応

JIS Q31010 「リスクマネジメント-リスクアセスメント技法」のリスク評価手法					
洗い出し法	支援法	シナリオ分析	機能分析	管理策のアセスメント	リスク結果の分析・管理策の選択判断
「外部ハザード選定標準」のリスク評価方法	<ul style="list-style-type: none"> ・洗い出し法の 2 技法 (4), (5) は、ハザードの特定 (定性的評価) において利用できる。 ・支援法の 4 技法 (1), (2), (3), (9) は、リスク評価全体にわたって、支援技法として利用できる。 ・20) (人間信頼性分析) は、定量的評価以降での利用となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・10) (シナリオ分析), 17) (原因影響分析) の 2 つのシナリオ分析技法は、リスク評価全体で利用できる。 ・シナリオ分析の 4 技法 (14), 15), 16), 19) は、定量的評価以降での利用となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・6) (HAZOP スタディーズ) は、ハザード特定 (定性的評価) において利用できる。 ・機能分析の 2 技法 (18), 23) は、影響度分析 (定性的評価) 及び定量的評価以降での利用となる。 ・管理策のアセスメントの 3 つの技法 (24), 25), 26) は、詳細なリスク評価 (PRA) での利用となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・特性分析において利用できる管理策のアセスメントに関する技法は特になし。 ・18) (防護層解析), 21) (蝶ネクタイ分析) の 2 つの管理策のアセスメント技法は、影響度分析 (定性的評価) 及び定量的評価以降での利用となる。 ・管理策のアセスメントの 3 つの技法 (24), 25), 26) は、詳細なリスク評価 (PRA) での利用となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・リスク結果の分析・管理策の判断選択に関する技法は特になし。 ・リスク評価自体において利用できる技法は特になし。
潜在的な外部ハザードの同定、特性分析による選別	<ul style="list-style-type: none"> 4) チェックリスト 5) 予備的ハザード分析 	<ul style="list-style-type: none"> 1) プレレンスミーティング 2) 構造化又は半構造化インタビュー 3) デルファイ法 9) 構造化 “What-if” 技法 	<ul style="list-style-type: none"> 6) HAZOP スタディーズ 10) シナリオ分析 17) 原因影響分析 	<ul style="list-style-type: none"> 6) HAZOP スタディーズ 13) 故障モード・影響解析 23) スニーク回路解析 	<ul style="list-style-type: none"> -
ハザード発生頻度分析若しくは影響度分析によるリスク判断	<ul style="list-style-type: none"> 1) プレレンスミーティング 2) 構造化又は半構造化インタビュー 3) デルファイ法 9) 構造化 “What-if” 技法 20) 人間信頼性分析 	<ul style="list-style-type: none"> 10) シナリオ分析 17) 原因影響分析 14) 故障の木解析 15) 事象の木解析 19) 決定木解析 16) 原因・結果解析 	<ul style="list-style-type: none"> 13) 故障モード・影響解析 23) スニーク回路解析 	<ul style="list-style-type: none"> 18) 防護層解析 21) 蝶ネクタイ分析 24) マルコフ解析 25) モンテカルロシミュレーション 26) ベイズ統計及びベイズネット 	<ul style="list-style-type: none"> -
裕度評価	-	-	-	-	-
決定論的 CDF 評価	-	-	-	-	-
詳細なリスク評価	-	-	-	-	-

注) ここでの JIS Q31010 におけるリスク評価手法は、表 1 における適用性説明において「○：適する」とした手法のみを記載している。

3 まとめ

原子力発電所の外部ハザードに関するリスクは、外部ハザード選定標準の規定及び本資料で示したリスク評価手法を適切に組み合わせることによって評価できる。

参考文献

- (1) 日本原子力学会標準, AESJ-SC-RK008:2014 外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準 :2014
- (2) 日本工業規格 JIS Q 31010:2012 リスクマネジメントーリスクアセスメント技法
- (3) 日本工業規格 JIS Q 0073:2010 リスクマネジメントー用語
- (4) IEC61882, Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide
- (5) JIS C 5750-4-3,ディペンダビリティ マネジメント-第 4-3 部 : システム信頼性のための解析技法-故障モード・影響解析 (FMEA) の手順
- (6) JIS C 5750-4-4,ディペンダビリティ マネジメント-第 4-4 部 : システム信頼性のための解析技法-故障の木解析 (FTA)
- (7) IEC61165, Application of Markov techniques

AESJ-SC-TR010:2015

日本原子力学会技術レポート

外部ハザードに対するリスク評価手法に関する手引き：2015

2016年3月14日 初版 第1刷発行

発行所 一般社団法人 日本原子力学会
(〒105-0004) 東京都港区新橋 2-3-7
(新橋第二中ビル 3階)
電話 (03)3508-1263 ; FAX (03)3581-6128
振替 00130-5-55932 番