

PRAの動向とリスクマネジメントへの展開

井手 善広* 氏田 博士**

PRA Status and Expansion to Risk Management

Yoshihiro Ide* and Hiroshi Ujita**

本稿では、PRAに関する最近の日本原子力学会の動向と当社の業務実績を紹介した後、リスクマネジメントとしてのヒューマンパフォーマンス向上活動について解説し、PRAとリスク分析技術の今後の課題を示す。

Keywords: PRA、リスクマネジメント、リスク低減、ヒューマンパフォーマンス向上、一般産業

1. PRAに関する最近の日本原子力学会の動向と当社の業務実績

1.1. はじめに

当社は日本原子力学会リスク部会の活動に設立時（2017年）より参加しており、また、日本原子力学会「確率論的リスク評価の活用及び手法調査」研究専門委員会の活動にも参加した。本稿では、これらのうち「確率論的リスク評価の活用及び手法調査」研究専門委員会での議論の中からわれわれが重要だと考えるトピックスを紹介し、また、最近の当社の業務実績について紹介する。

1.2. 「確率論的リスク評価の活用及び手法調査」研究専門委員会[1]

2019年4月1日から2021年3月31日まで、日本原子力学会「確率論的リスク評価の活用及び手法調査」研究専門委員会が設置された。本委員会の目的は次の3つであった。

- ・リスク情報の活用を進めるための提言
- ・活用に参照されるPRAに必要な技術開発

*アドバンスソフト株式会社 第4事業部

4th Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 リスク研究開発センター

Risk Research and Development center, AdvanceSoft Corporation

の方針の策定に資すること

- ・PRAに携わる若い世代の研究者・技術者の育成にも寄与すること

本委員会では、次の項目について各委員の知見や調査結果を持ち寄り、6回の会合に渡って議論を実施した。

- ・PRA手法に関する最新知見の調査
- ・PRAの活用に係わる調査及び課題の抽出
- ・PRAに関する研究及びPRAの実施を担う人材の育成
- ・上記研究活動成果の発信

本稿では、われわれも参加した本委員会での議論のうち、当社が特に重要だと考えるテーマについて紹介する。

マルチユニットPRAに関しては、地震、津波等の大規模な災害の場合、50～70km圏内が同時に被災する可能性があるため、サイトレベルではなく、エリアレベルでの安全目標や防災の議論が必要との意見が出された。我が国では若狭湾のように原子力発電所が集中しているエリアがあり、そこに地震及び津波が襲来する可能性を考えると、エリアレベルでの防災の議論は重要なテーマであると考えられる。

人間信頼性解析（HRA）に関しては、人間の緊急時の認知メカニズムやレジリエンス能力を考

慮したモデルの開発と実プラントにおける対応データの収集が必要であり、定量化手法と定性分析結果とのギャップの取り扱いは今後の検討課題であるとの意見が出された。われわれはこれまで、PRAの結果として得られるリスク情報の不確実性の大部分がHRAの結果の不確実性に起因するものであること[2]や、HRAにおけるデータ収集においては実プラントだけでなく運転訓練センターの訓練シミュレータ等を活用した実験も考えられること[3]等、HRAには重要な課題があると主張してきた[4-8]。

1.3. 最近の当社の業務実績

当社では地震PRAや津波PRA等の学会標準を常備し、当面はHRA、レベル1～2PRAや外的事象PRAを中心とした業務を実施しつつ、将来的にはマルチユニットPRAに関する業務を進めていきたいと考えている。

2. リスクマネジメントとしてのヒューマンパフォーマンス向上活動

2.1. 技術システムと事故の様相の変化と安全のスコープの広がり[9]

図1に示すように、技術システムが現代のように複雑ではなかった時代には、技術の欠陥が問

題の発生源であり、技術的対応によって事故を防止できると考えられていた。しかしシステムがより複雑になるにつれて、それを操作する人間の能力限界に突き当たるようになり、ヒューマンエラーによる事故が起きるようになってきた。その典型が、1979年にスリーマイル島(TMI)原子力発電所事故です。このため、エラーを犯す個人が問題の発生源と考えられ、要員の適切な選抜と訓練によって要員の能力向上を図り、またインタフェース設計を適切に行うことが、エラー防止に有効と考えられるようになった。

その後、原子力発電所や交通システムなどの巨大複雑システムが構築されたことにより、技術、人間、社会、管理、組織などの多様な要素の複雑な相互関係による事故が発生するようになり、次に問題となったのが社会と技術の相互作用である。さらには、プラントや企業の内部のみでなく、外部の関係者や組織との関係不全が問題の発生源となる事故が目立つようになり、組織間関係も含めた包括的問題解決の枠組みが必要になってきた。事故の形態が、複合要因により発生しその影響が社会的規模に至るいわゆる組織事故が最近の事故の特徴である。このため近年では、IAEAやJEAC4111などにおいて、MTO（人、技術、組織を総合的にとらえる）というシステム全体を見

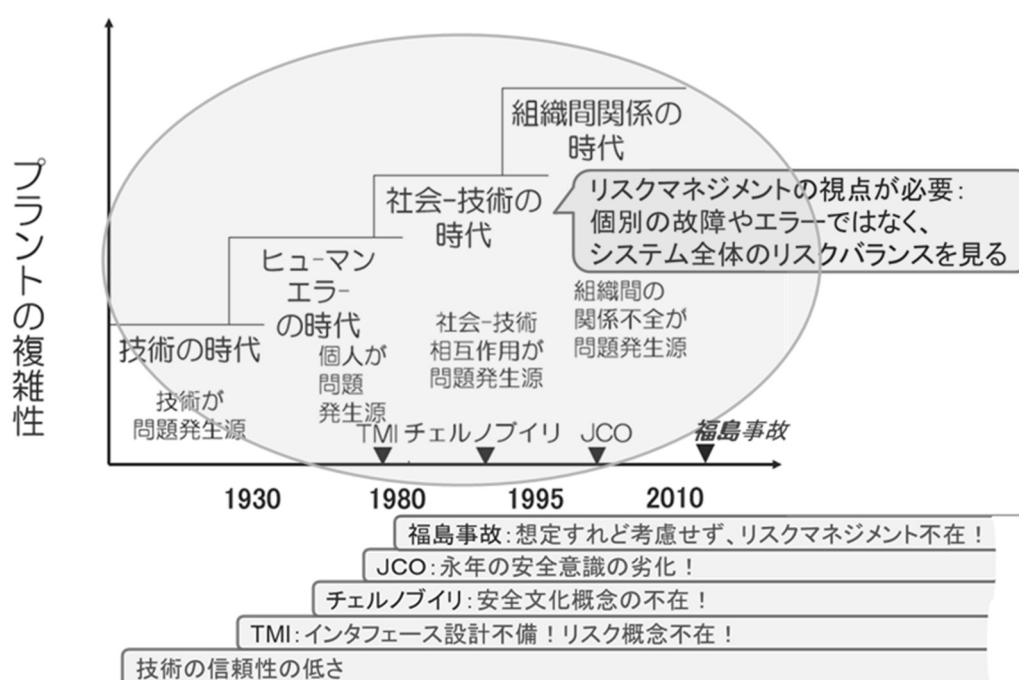


図1 技術システムの変遷と安全問題のスコープの広がり

表 1 事故・エラーのモデルと分析方法・対策の関係

事故のモデル	エラーのモデル	探索原理、分析方法	解析の目標、対策
基本のモデル： ドミノ (故障の連鎖)	機器故障と ヒューマンエラー	原因 - 結果の 因果関係	原因と連鎖の排除
スイスチーズ (多様性の喪失)	システムエラー (共通原因故障)	リスク分析 リスク評価	防護とバリアの維持
組織事故 (深層防護の誤謬)	組織の安全意識の 劣化	行動科学 安全文化チェックリ スト	組織文化のモニタと 制御 (RMによる制御)

↑ 設計
↓ 運用

て安全対応するアプローチが重要視されるようになってきた。

2.2. 事故とエラーのモデルの変遷[9]

表 1 に、事故とエラーのモデルの変遷をまとめる[10]。これまでの事故モデルは、故障やエラーの因果関係を分析し対策する「ドミノモデル」である。そのモデルでエラー分析には、従来のヒューマンファクターで扱っていた現場の作業で発生する不安全行為の分類である、スリップ（操作誤り）、ラプス（記憶誤り）、ミステイク（判断誤り）が使われている。規則違反を認識した上で行った行為は、バイオレーションと呼ばれ、JCO 事故を含め最近起きた社会的事故を契機として、考慮せざるを得なくなってきた。

最近発生する事故は、深層防護の設計思想が確立されたこともあり、多様なシステムのエラーの重畳が原因となっている。この「スイスチーズモデル」[11]による分析には、従来のエラー分析に加え、組織過誤の分析も必要となる。ここでは、エラー分析も重要だが、効果的な対策立案のために確率論的安全評価手法、PRA が広く使われている。

組織事故は、深層防護の誤謬により、組織の内部あるいは組織間における相互依存が累積されひいては安全文化の劣化の問題となる。これも、元を辿ればリスクマネジメント（R M）の欠陥であり的確に制御することが望まれる。ここで安全文化の評価やその対策には、行動科学などの組織分析に基づく組織管理が必要となってきた。

1 つの事故には、この 3 つの事故モデルの特徴

を有しており、またドミノモデル（参考文献[9]）的な部分が多いので、かなりの部分は従来の分析手法で対応できる。さらに、複雑な関係性がある部分は、FRAM [11]などネットワークモデルの併用などで対応できると考えられている。

2.3. ヒューマンファクター（HF）とヒューマンパフォーマンス向上（HPI）の考え方

人間とは、ある確率で必ずエラーをするが、どのような事態が発生しても創意工夫により対応することができる融通の効く存在でもある。HF とは、人間の特性を理解して環境を整えることにより、人間のもつエラーの特性を抑え、良い特性を伸ばす、人間特性を理解し最適化する学問領域である[12]。

他方、HPI とは、人間特性を最適化する活動であると言え、人間を取り巻く環境や管理システムを人間特性に合わせて、能力を遺憾なく発揮させることにある。さらに本質的な相違としては、システム全体から事前にリスクを見つけ、優先順位に基づき合理的にリスク低減対策、対策の弊害（新たなリスクの発生）への考慮、をすることである。すなわち、リスクマネジメントの発想に基づく活動である。

人間のもつ状況（コンテキスト）に応じて柔軟に対応する認知特性（アフォーダンスやナッジ等）を引き出すヒューマンパフォーマンス向上（HPI）ツールとは、個別対応（例、エラーに関連する手順書に対策を記述する）でなく現場に共通な行動特性に適合するツールを利用することにより実

効性の高い対策を採るためにある。

2.4. ヒューマンファクターを考慮したリスク低減の方策 - リスク分析と原因分析

リスク低減の手法としては、過去に起こったエラーを分析してフィードバックする原因分析と将来のリスクを予測するリスク分析（確率論的リスク評価、人間信頼性評価、リスクマトリクス、等）があるが、ここではまず、リスク低減のためのリスク分析方法の特徴を以下に示す。

- リスクを安全性の尺度として用いることによって、対象システムの安全性を確率として定量的に、そしてより具体的に検討できる
- リスクは、対象システムの安全性の改善目標の決定や技術システムの選択においても重要な役割を果たす
- 技術システムの安全性をどこまで改善する必要があるかは、リスク解析の結果と安全目標の比較により定まる
- さらなる安全性の向上を必要とするかどうかは、コストベネフィット解析によって判断され、さまざまな代替案の中から最適改善案の選択はリスクの改善度合いとそれに要するコストとのトレードオフに基づき決定できる
- ある技術システムが社会に受け入れられるか否かは、技術システムがもつリスクとベネフィットとのトレードオフに係る

次に、原因分析について記述する。原因分析の目的は、システムの脆弱性を見つけることであるので、トラブルがどのような原因（背後要因）で発生したかを分析し、どこを改善していくかを見つけ、対策を実施する必要がある。因みに、根本原因分析（Root Cause Analysis : RCA）は、原因分析の詳細分析手法の一つの位置付けである。背後要因とは、トラブルが発生した直接の原因（ヒューマンエラー等）を誘発した以下のようなシステムの脆弱性である。

- ハードの防御機能の欠陥

- 不適切なマネジメント

- ミスを誘発しやすい作業環境 etc....

このためには、「人」がどのような性質をもち、どのような思考をするか（ヒューマンファクター）を考慮しなければ、トラブルを防止できない。ヒューマンファクターの分析の視点を与えるモデルとして、m - SHEL（マネジメント、ソフトウェア、ハードウェア、環境、本人、周りの人）モデルがある。このモデルは、人間と人間を取り巻く環境要因を説明したもので、分析者が抜け落ちのない分析と整合性の取れた対策立案をするための分析ガイドとして有効である。4M（マン、マシン、メディア、マネジメント）モデルも基本的には同じ考え方のものである。

2.5. 「リスクマネジメント」「リスク低減」「ヒューマンパフォーマンス向上」の関係性

総括として「リスクマネジメント」「リスク低減」「ヒューマンパフォーマンス向上」の関係性について述べる。

巨大複雑システムにおける「リスクマネジメント」とは、「部分最適が全体最悪をもたらす」ことがないように、過不足のないバランスの取れたシステムの設計（ハード/ソフト）と運用（人間）により安全性向上を実現しようとする活動と言える。言い換えれば、それは、リスクの優先順位に基づき、コストも考慮して合理的な範囲で脆弱性をつぶしていく「リスク低減」活動である。

ところで、今ある巨大複雑システムは、深層防護や設計基準事故などの安全の論理に基づくハード設計や品質保証活動を通じて、ハードに起因するあるいは関わるリスクは2割程度まで低減しているので、残ったリスクは人間が絡んだ事象と言える。このため、リスク低減活動は、リスクに係る人間行動を良い方向に誘導する「ヒューマンパフォーマンス向上」活動という言い方もできる。さらには、業務プロセスにおける脆弱性を見つけつぶしていく活動を継続することによって初めて「安全文化の維持向上」にもつながっていくものと考えられることができる。

2.6. リスクマネジメント

「リスク(risk)」の語源は、「絶壁の間を船で行く」という意味だと言われている。たとえ兩岸が絶壁であっても、あえてそこを越えないことにはチャンスに巡り合う可能性もない、しかしそれは将来という不確定なものである。

米国の経済学者フランク・ナイトは、不確定なことについて確率によって計測できるものをリスクと呼んでいる。

一般に、リスクには、健康に対するリスクのみならず、環境リスク、投資リスク、企業経営リスク、政治リスク等さまざまなリスクがある。

また、個人のリスクと社会のリスクの分類もあり、さまざまな指標が使われている。

原子炉リスク、放射線リスク、環境リスク、労働災害リスク、等がある。

リスクの定義は、時代によって変遷している。

- ISO/IEC Guide51 (JIS Z 8051:2004)

リスクとは「危害の発生確率及びその被害の程度の組み合わせ」、危害(harm)とは「人の受ける身体的傷害もしくは健康被害、または財産もしくは環境の受ける害」とされ、人に加えて、財産、環境も対象になっている。

- リスクマネジメント用語規格 (ISO/IEC

Guide 73: 2009)

リスクの再定義によって、リスクは「事象の発生確率と事象の結果の組み合わせ」、結果は「事象から生じること」と定義された。事象の結果には、好ましくない影響と好ましい影響の両方が含まれ、また期待値から乖離しているものとなっている。

リスクマネジメントの全体像を図 2 に示す。

2.7. リスク対応の検討には

リスク対応を検討するには、何らかの定量的な尺度が必要であり、このため表 2 に示すようなリスクマトリクスの利用は必須となる[13]。この表は、リスクをどこまで下げれば良いのかの指標である安全目標に基づき作成され評価される。緑の領域は安全目標を満足しており対策不要、オレンジの領域は最低限の限度も達成しておらず対策は必須、水色の領域はその中間で可能な限り達成可能な対策を採るべき (As Low As Reasonably Practicable) 領域と呼ばれる。

ポイントは、分析や対策に入る前のその必要性の評価及び対策後の効果の評価の両方が必要なこと、対策では、汎用性と実効性と恒久性を考慮して検討することが重要である。

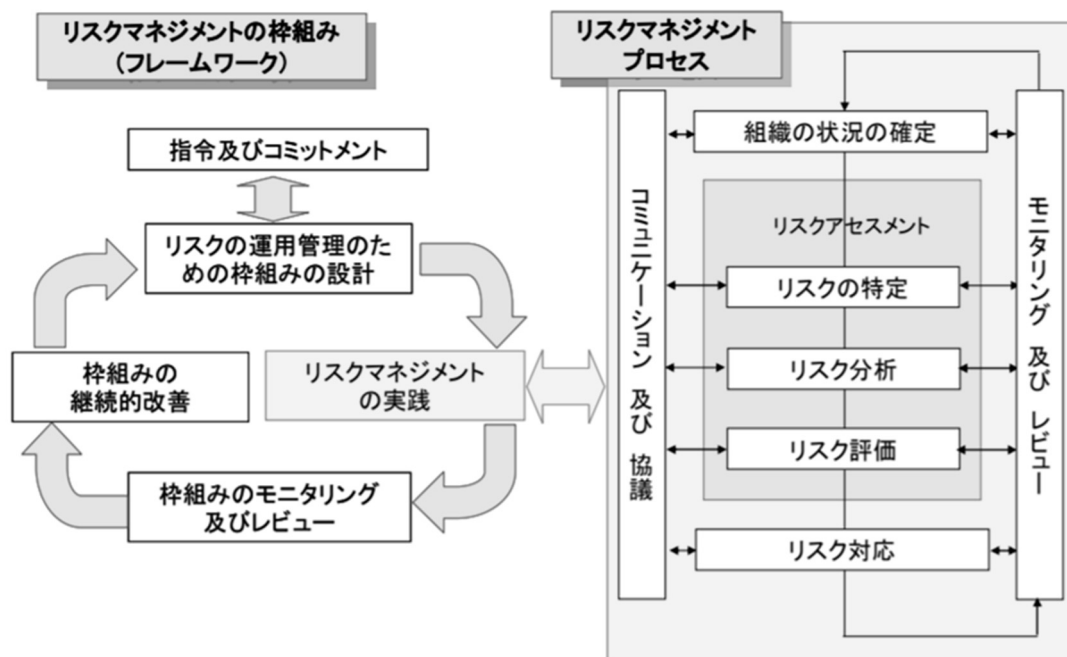
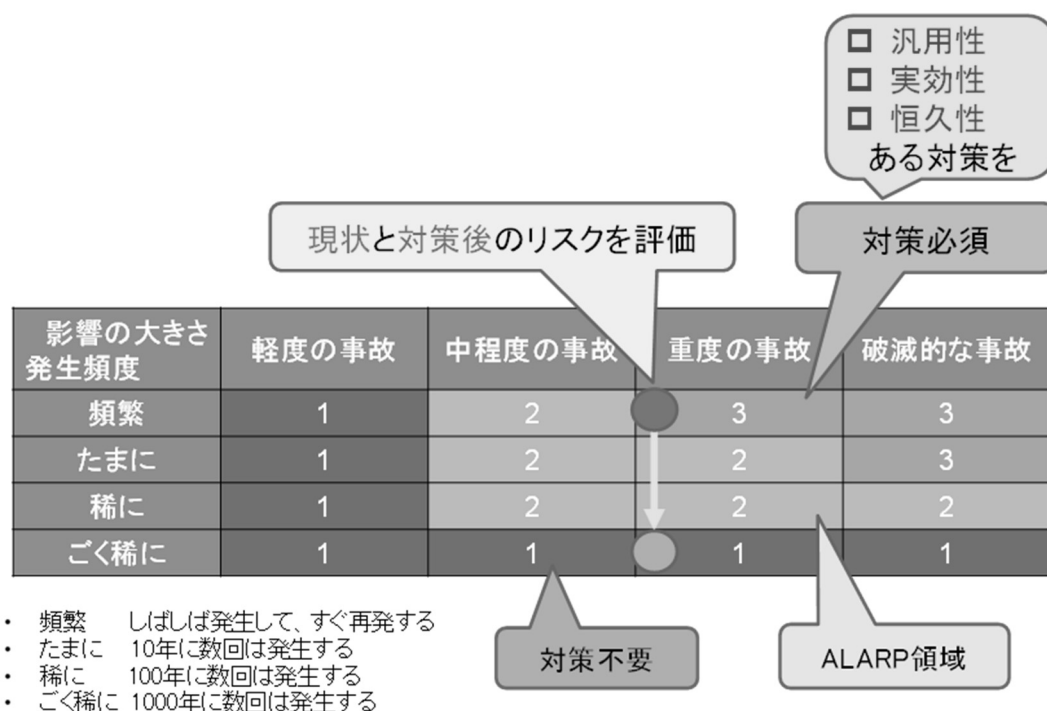


図 2 リスクマネジメント、JIS Q31000 の全体像

表 2 リスクマトリクスの利用方法



2.8. PRA の合理的な活用を図るために[14]

わが国では PRA は、合理的な安全性の確保・向上活動のツールとして PRA を定着させるために、内的事象のアクシデントマネジメントの参考として実施されたが、なかなか、その活用は広がらなかった。しかし、現在は、その障害の最も重要なものであったと考えられる外的事象の PRA 手法がかなり整備され、規制上も要求される状況となったので、それを定着させる条件ができたと考えられる。

この状況を前向きに捉え、合理的な活用を図るには、PRA の多面的な活用の試行による運用方法の確立を図ることが適切である。PRA の手法やデータの整備は、PRA を実際の運転管理に用いる試行と並行して進めることが最も効果的である。そのような使い方には、次のような方法があるが、これらについて、可能なものから実用又は試行を進めて行くことが考えられる。

① 重要なリスク寄与因子の探索

- ・ 見落とし（想定外事象）をなくすために、探索の幅を広げ、現在の安全対策の下でのリスク寄与を評価し、過大なものがあれば対策を講じる

② 安全性向上策の有効性の評価

- ・ 対策のオプションの効果を比較し、効果の高いものを選定する

③ 構築物・系統・機器の重要度・寄与度の評価

- ・ 設備のリスク重要度を評価し、品質保証、保全活動などに役立てる

④ 安全向上活動の全体としての達成度の評価

- ・ 全体としてのリスクの低減を継続的に評価する。

⑤ 設備の信頼性及び全体のリスクへの影響を監視する

- ・ 系統、機器、構築物（SSC）の試験、検査、故障記録等を収集/蓄積することによって設備の信頼性のトレンド分析を行うとともに、プラント全体の安全性に関する PRA のモデルを活用して、将来の信頼性低下がリスクに与える影響を評価して、これらの情報を保守活動に役立てる。

⑥ リスクの監視

- ・ 要素の性能劣化を監視し、劣化に対してリスクへの影響を評価する。

なお、こうした活動を進める上で、何らかの定量的な安全目標を定めておくことは有用でありかつ必要である。

3. PRA とリスク分析技術の今後の課題

福島第一原発事故では、1 号から 3 号までの 3 つのユニットが同時に炉心損傷を起こすといった、かねがね問題点が指摘されていた事象が発生してしまった。世界においても特に日本においては、マルチユニットさらにはマルチサイトが普通であり、福島第一原発事故以降は、原子力の安全にとって最大の課題と言って良い。このため、そのリスクがどの程度かを定量的に判断するための、マルチユニット PRA (MUPRA) 手法の確立が急務である。われわれはこの活動に寄与するべく検討を進めるつもりである。

PRA は、巨大複雑プラントのリスクを定量的に把握するための非常に有効な道具ではあるが、一般産業においては「牛刀」のごとき存在であり、直接的な活用は難しい。しかし、われわれの知識はリスク分析の高度な扱いに長けているということができ、他分野にもリスクの考え方やリスク分析手法を普及していくことができ、さまざまな分野のリスクマネジメントに寄与できるものと考えている。

参考文献

- [1] https://www.aesj.net/sp_committee/com_riskanalysis
- [2] 氏田 博士、「リスクに基づき安全を考える」、アドバンスシミュレーション Vol.28 (2020)
- [3] 井手 善広、「PRA の手法」、アドバンスシミュレーション Vol.28 (2020)
- [4] 井手 善広、下村 海、岡本 明、氏田 博士、森田 秀利、「HCR/ORE 手法の課題の検討」、日本原子力学会 2018 年春の年会
- [5] 氏田 博士、井手 善広、「人間信頼性評価手法の比較・検討と課題の抽出」、日本原子力学会 2019 年春の年会
- [6] 高田 孝、桐本 順広、真塩 健二、氏田 博士、「『確率論的リスク評価における人間信頼性解析』パネルディスカッション」、日本原子力学会 2019 年春の年会
- [7] Yoshihiro Ide and Hiroshi Ujita, “Ideal Way of

Method and Data Issues in Human Reliability Analysis (HRA) (1) Extraction of HRA Method Issues by Comparison Analysis”, ASRAM2020.

- [8] Hiroshi Ujita and Yoshihiro Ide, “Ideal Way of Method and Data Issues in Human Reliability Analysis (HRA) (2) Extraction of Method and Data Issues from Research Survey”, ASRAM2020.
- [9] 氏田、柚原、「リスクマネジメント学 文理融合の新たな専門知」、海文堂出版、2015.
- [10] Hollnagel, E.著、小松原監訳：「社会技術システムの安全分析」、2013.
- [11] Reason, J.著、高野、佐相訳：「組織事故」、日科技連出版、1999.
- [12] キヤノングローバル戦略研究所 原子力安全研究会、「原子力のリスクと対策の考え方」 - 社会との対話のために -、2016.
- [13] リスクアセスメント・ハンドブック {実務編}、経産省、2011.
- [14] USDOE, Human Performance Improvement Handbook, Volume 1&2, DOE-HDBK-1028-2009.

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイル(カラー版) がダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)