

| | | | |
|------------|-------------------------------|--------------|----------------|
| 氏名 | たまうち よしかず | | |
| 授与学位 | 玉内 義一 | | |
| 学位授与年月日 | 博士(工学) | | |
| 学位授与の根拠法規 | 平成24年3月27日 | | |
| 研究科, 専攻の名称 | 学位規則第4条第1項 | | |
| 学位論文題目 | 東北大学大学院工学研究科(博士課程)量子エネルギー工学専攻 | | |
| 指導教員 | 再処理工場におけるリスク評価手法の研究開発 | | |
| 論文審査委員 | 主査 | 東北大学教授 若林 利男 | 東北大学教授 石井 慶造 |
| | | 東北大学教授 橋爪 秀利 | 東北大学准教授 高橋 信 |
| | | 東北大学准教授 金 聖潤 | 東北大学准教授 人見 啓太郎 |

論文内容要旨

確率論的安全評価(PSA)から得られるリスク情報を活用した運転・保守管理の適正化に関する取り組みが活発化しており、再処理工場においても試行的なリスク情報活用が検討されている。リスク情報活用の目的は、再処理工場において想定される多種多様の事故を対象にしたアクシデントマネジメントの検討や、科学的合理性を有する運転・保全活動を行うための保全重要度把握である。必要なリスク情報を整備するためには、多種多様な事故を効率的に評価可能であり、且つ、機器単位の重要度を把握可能な手法が必須である。また、再処理工場を対象としたリスク評価を系統的に行うための信頼性データ、放射性物質放出量評価のためのデータを体系的に整備することが重要である。従って、本研究では上述の特徴を有するリスク評価手法を開発し、リスク評価に必要な信頼性データの整備方針および放射性物質放出量評価のために必要な物質移行率などに関するデータの選択方針を提案することにより、再処理工場を対象としたリスク評価手法を体系化することを目的とした。本論文はその成果をまとめたものであり、全文6章より構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、多種多様な事象を効率的に評価するためにモデル構築時間を短縮可能であり、詳細なリスク情報を得ることが出来る新たなリスク評価手法の開発を目的とした。この目的のために、フォールトツリー、イベントツリーの構築が不要なリスク評価手法、QSA(Quantitative Safety Assessment)の提案を行った。また、QSAでは計算を簡略化するためにFU(Functional Unit, QSAにおける最小事象であり複数の機器を機能単位で纏めて扱う)を用いることから機器個別の重要度を得ることが出来ないが、FUのリスク重要度から機器個別のリスク重要度を得るための重要度分解式を新規に導出した。導出に当たっては、簡易なモデルから導出される重要度の定義式を機器単位の場合、FU単位の場合について計算し、機器単位の定義式をQSAから得られる情報で表すことを考案した。その後、重要度を導出するためのFTモデルを拡張することによって一般式を推定した。この重要度分解式は第一階層の1)並列構造、2)直列構造および3)直列構造が2重化されている場合に機能毎に基事象をまとめる簡

略モデルの3つの構造を対象として適用できる (Fig. 1 参照)。

並列構造に関する重要度分解式を式(1), (2)に示す。

$$I^{FV}(x_j) = I^{FV}(X) \quad (1)$$

$$I^{RAW}(x_m) = \prod_{i=1, i \neq m}^n x_i (I^{RAW}(X) + I^{FV}(X)) + \frac{1}{1 - I^{FV}(X)} - \prod_{i=1, i \neq m}^n x_i \quad (2)$$

直列構造に関する重要度分解式を式(3), (4)に示す。

$$I^{FV}(x_m) = I^{FV}(X) - \left(\prod_{i=1, i \neq m}^n x_i (I^{FV}(X) + I^{RAW}(X)) - \prod_{i=1, i \neq m}^n x_i \right) \quad (3)$$

$$I^{RAW}(x_m) = I^{RAW}(X) + \prod_{i=1, i \neq m}^n x_i (I^{FV}(X) + I^{RAW}(X)) - \prod_{i=1, i \neq m}^n x_i \quad (4)$$

直列構造が2重化されている場合に関する重要度分解式(共通原因故障に着目)を式(5), (6)に示す。

$$I^{FV}(x_n, \beta) = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} \sum_j x_i x_j + x_n^2 + Q_{sys}' (1 - I^{FV}(X_1))}{Q_{sys}' + \sum_{i \neq j} \sum_j x_i x_j} \quad (5)$$

$$I^{RAW}(x_n, \beta) = \frac{\sum_{i \neq j} \sum_j x_i x_j + Q_{sys}' (1 - I^{FV}(X_1)) + 1 + x_n^2}{Q_{sys}' + \sum_{i \neq j} \sum_j x_i x_j} \quad (6)$$

ここで、 $I^{FV}(x_i)$ は機器 x_i のFussell vesely 指標、 $I^{RAW}(x_i)$ は機器 x_i のRAW重要度(-)、 n は分解対象の機器の総数、 x_i は機器 x_i の非信頼度(-)、 Q_{sys}' はFUの非信頼度(-)である。

PSA 用解析ツール FT-FREE を用いてフォールトツリーを作成し、得られた重要度を実際に分解し、別に FT-FREE で求めた重要度と比較することで検証を行った。適用性判断の基準は、その誤差が0.1%以内であることとした。検証は QSA における評価モデルを想定して並列構造で5の基事象、直列構造で20の基事象、直列構造が2重化されたモデルにおける機能数で8まで実施し、適用範囲はそれぞれ5、12、8であることを明らかにした。さらに、具体的な評価事象として、「高レベル濃縮廃液沸とう事故」を取り上げ、PSA から得られる結果と QSA から得られる結果の比較を行った。その結果、PSA と QSA の評価結果はほぼ一致することを確認し、QSA の評価の妥当性を明らかにした。最後に、PSA、QSA について経験を有する専門家を対象

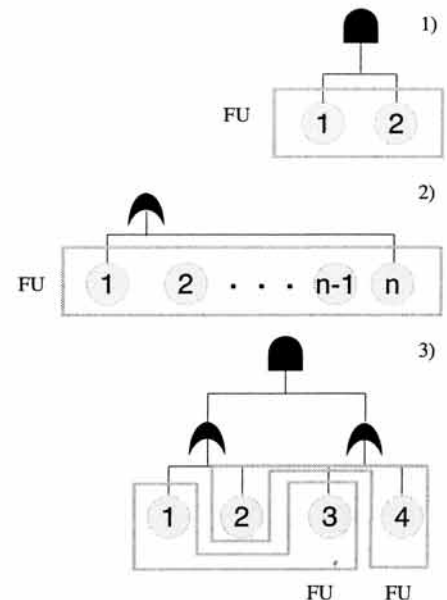


Fig. 1 QSA におけるFUのパターン

として双方の手法の作業量に関するアンケートを行い、QSA の作業量は PSA の 1/4 に低減されていることを示した。

第3章では、リスク評価に必要な発生頻度評価のためのデータベースの整備を目的として、機器故障率、人的過誤率の設定方針の検討および利用可能なデータベースの整備を実施した。試運転段階の工場には、事故発生頻度を評価するために必要な故障率などを整備するための十分な統計データがないことから、公開文献を引用する必要がある。このため、工場の試運転段階の事故発生頻度評価に適用可能な機器故障率を整備するための公開文献引用方針を検討し、利用可能なデータベースを調査、分析した。分析結果を元に、試運転段階で使用可能な機器故障率のデータベースを整備した。人的過誤率については、操作毎に運転手順書に対応した HRA (Human Reliability Analysis)を実施することが望ましいが、多数の事象を網羅的、効率的に評価するために、操作の種類を警報の認知や指示値の確認、現場における弁操作のような形式化したタスクとして規定し、これらを対象として THERP(Technique for Human Error Rate Prediction)を適用し、人的過誤率を定量化した。このようにして定量化した人的過誤率を試運転段階の基礎データとして整備した。また、操業後のリスク評価を想定して、個別プラントの運転実績を取り入れることが可能である自然共役事前分布を用いた簡易的なベイズ更新手法を採用した機器故障率、人的過誤率の設定方針を提案した。

第4章では、事故時の放射性物質放出量を評価するための手法として5因子法を取り上げ、評価に必要なデータを設定するための方針を提案することを目的とした。評価対象とする事故は、再処理施設的设计基準事象の選定結果を取りまとめた報告書、「再処理施設的设计基準事象選定」に基づき設定し、それらを網羅する5因子法のデータ選定方針(MAR、DR、ARF、LPF、RFの選定フロー)について検討を行った。このため、核燃料施設を対象とした事故時影響評価ハンドブック(NUREG/CR-6410)を中心とした文献調査を実施し、必要なデータを抽出した。抽出したデータを再処理工場に適用できるように補正する方法を考案し、再処理工場で想定される事象である火災事象、爆発事象、臨界事象、漏えい事象、機能喪失事象、落下事象についてデータ選定方針を提案し、フロー化した。本検討結果を用いれば、放射性物質放出量評価に当たっては一定の品質を保つことが可能であると考えられる。また、選択方針をフローとして示したことにより、透明性を維持することが可能であり、最新知見の導入を行い、被ばく影響を再評価する際にも網羅的にデータの変更を行うことが可能になると考えられる。

第5章では、第2～4章で得られた成果を用いて、再処理工場において想定される「硝酸プルトニウム溶液貯槽における水素掃気機能喪失事象」および「精製建屋プルトニウム精製塔セルにおけるセル内有機溶媒火災」に対してQSAを用いてリスク評価を実施し、PSAの結果と比較することによって本手法の適用性を検証した。QSAの結果はPSAとほぼ一致し、QSAによりPSAと同程度の精度でリスク評価が可能であることを明らかにした。さらに、「高レベル濃縮廃液沸とう事故」および「硝酸プルトニウム溶液貯槽における水素掃気機能喪失事象」を対象として、長時間の外部電源喪失事象へ本手法を適用し、時間に依存したリスクの変化を評価した。この結果

から、事故時対策の立案や有効性確認に本手法が適用可能であることを明らかにした。

第6章では、本研究の結論と今後の展望を述べている。本研究により、再処理工場において想定される多種多様の事象を効率よく評価可能なリスク評価手法を開発するとともに、リスク評価に必要な信頼性データおよび放射性物質放出量評価のためのデータ選定方針を提案することにより、再処理工場におけるリスク評価手法を体系化した。本研究成果は、再処理工場を対象としたリスク評価手法として国内の標準的手法を確立するための基礎として貢献すると考えられる。QSAの頻度評価部分については、類似の特徴を持つ他産業のプラントへの活用が可能であると考えられる。

一方、リスク評価の信頼性は、評価対象とする事故の要因である起因事象の網羅的な検討、事故に至りうるシナリオ検討の網羅性に左右される。網羅性によって、未然防止できる事故の範囲が決定するが、シナリオ検討の段階で、発生頻度が極めて小さいと考えられるパスはしばしばスクリーニングされる。これにより重大な事象が引き起こされることもあり、2011年3月11日の事象もその一例であると考えられる。このようなことが起こらないように、ボトムアップ的に事象を抽出するリスク評価に加えて、トップダウン的なアプローチ、すなわち予想外の事象の発生を前提として、どのような対策を講じることができるかを主眼としたリスクアセスメントを組み合わせるなど、リスク評価手法自体の増強が必要であると考えられる。

今後は、このような手法の組合せなどによってリスク評価の限界を狭め、リスク情報を事故の未然防止のみならず、大規模プラントの経済的な運営に寄与できるようなリスク評価の思想を構築することが重要であると考えられる。

論文審査結果の要旨

確率論的安全評価 (PSA) から得られるリスク情報を活用した運転・保守管理の適正化に関する取り組みが活発化しており、再処理工場においても試行的なリスク情報活用が検討されている。リスク情報活用の目的は、再処理工場において想定される多種多様な事故を対象にしたアクシデントマネジメントの検討や、科学的合理性を有する運転・保全活動を行うための保全重要度把握である。必要なリスク情報を整備するためには、多種多様な事故を効率的に評価可能であり、且つ、機器単位の重要度を把握可能な手法が必須である。また、再処理工場を対象としたリスク評価を系統的に行うための信頼性データ、放射性物質放出量評価のためのデータを体系的に整備することが重要である。従って、本研究では上述の特徴を有するリスク評価手法を開発し、リスク評価に必要な信頼性データの整備方針および放射性物質放出量評価のために必要な物質移行率などに関するデータの選択方針を提案することにより、再処理工場を対象としたリスク評価手法を体系化することを目的としている。本論文はその成果をまとめたものであり、全文6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章においては、再処理工場を対象として開発したQSA (Quantitative Safety Assessment) の概要を述べるとともに、機器単位の重要度を得るために新規に開発した重要度分解式の概要を述べ、その適用範囲を明らかにした。さらに、「高レベル濃縮廃液沸とう事故」を具体例として取り上げて手法の適用性を検証した。また、PSAと比較してQSAの作業量がどの程度効率化されたかを定量的に評価し、QSAの作業量は従来の手法と比較して1/4に低減したことを明らかにした。

第3章においては、事故発生頻度評価のための機器故障率、人的過誤率の設定方針を提案し、利用可能なデータベースを整備した。具体的には、個別プラントの運転実績を取り入れ、一貫して信頼性データを得ることが可能となるよう、簡易的なベイズ更新手法を採用した機器故障率、人的過誤率の設定方針を提案した。

第4章においては、多様な事故の放射性物質放出量を評価するための5因子法で用いるデータの選択方針を策定し、再処理工場で想定される事象である火災事象、爆発事象、臨界事象、漏えい事象、機能喪失事象および落下事象について、データ選択方針を提案し、フロー化した。

第5章においては、第2章～第4章で得られた成果を用いて、再処理工場で想定される代表的な事象のリスクを評価し、本手法の適用性を明らかにした。さらに、長時間の外部電源喪失事象へ本手法を適用し、時間に依存したリスクの変化を評価することにより、事故時対策の立案などに本手法が適用可能であることを明らかにした。

第6章では、本研究の結論と今後の展望を述べている。

以上、本論文では、再処理工場において想定される多種多様な事象を効率よく評価可能なリスク評価手法を開発するとともに、リスク評価に必要な信頼性データおよび放射性物質放出量評価のためのデータ選定方針を提案することにより、再処理工場におけるリスク評価手法を体系化した。本論文は、再処理施設におけるリスク情報を整備するための基盤になり、再処理施設の安全性向上に貢献するのみならず、原子力安全工学の発展に大いに寄与するものである。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。