

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04932

研究課題名（和文）原子力プラントの内外構成要素間の相互作用を考慮したPRA手法の開発

研究課題名（英文）Development of a PRA methodology that takes into account the interaction between the internal and external components of a nuclear power plant.

研究代表者

牟田 仁（Muta, Hitoshi）

東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：20710297

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地震を想定した原子力施設における第4層及び第5層の事故及び対策の特徴を踏まえると、従来のPRA手法では不十分である。このため、従来のPRA手法とSTAMP/STPA手法、プロセスシミュレーションを連携することにより、第4層及び第5層の事故及び対策の分析を可能とするリスク評価手法の基本設計を行った。また、時系列に沿った放射性物質の挙動解析と住民避難シミュレーションを重ね合わせ、避難行動時の被曝線量を評価する枠組みを検討した。また、原子力関連施設の重大事故時の施設の周辺住民の避難行動におけるリスクを評価するための避難行動のシミュレーション体系の構築を行い、全体を統合したリスク評価手法の礎を築いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深層防護第4層及び第5層の喪失に相当する原子力関連施設の事故時を想定した際に、周辺住民の安全を確保するための避難行動等の防災行動は非常に重要であるが、現状、原子力関連施設内外の状況を考慮した避難行動中のリスクを評価する枠組みは存在しない。事故時の避難計画の策定においては避難行動中のリスクを明確にする必要があり、本研究の目的はまさにこの点にある。また、本研究は、避難計画の策定以外にも、避難行動中のリスクの明確化により、ステークホルダー間のリスクコミュニケーションに不可欠の要素である、周辺住民が考えるリスク、即ち自身が被る可能性のある被害を明確に扱うことを可能にするという意義を併せ持っている。

研究成果の概要（英文）：Given the characteristics of level 4 and level 5 accidents and countermeasures in seismically vulnerable nuclear facilities, conventional PRA methods are not sufficient. Therefore, a basic design of a risk assessment method that enables the analysis of accidents and countermeasures at levels 4 and 5 was carried out by combining the conventional PRA method, the STAMP/STPA method and process simulation. A framework for the assessment of radiation doses during evacuation actions was also investigated by superimposing the analysis of the behaviour of radioactive material along a time series and the simulation of the evacuation of the population. In addition, an evacuation behaviour simulation system was constructed to assess the risk of evacuation behaviour of residents in the vicinity of nuclear facilities in the event of a major accident, thus laying the foundation for a risk assessment method that integrates the entire risk assessment system.

研究分野：原子力安全工学

キーワード：原子力関連施設 深層防護 避難行動リスク PRA STAMP/STPA プロセスシミュレーション エージェントモデル

### 1. 研究開始当初の背景

現状の PRA は、リスク評価が未来の予測を行うが故に本質的に持たざるを得ない様々な不確実さを含んだ評価体系となっている。不確実さは、「日本原子力学会、原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2013（レベル 1PRA 編）(AESJ-SC-P008:2013)」に記載されるように、いくつかのカテゴリーに分類できるが、この中でモデルが現実を単純化していることによる不確実さ、或いはモデルが不完全であることによる不確実さは扱いが難しいために、これまで、PRA モデル上では割り切った取り扱いをしてきた経緯がある。

今後、継続的に原子力発電所の安全性を向上させるためには、このような不確かさに対しきちんと向かい合い、まだ見えていない現実の姿を解き明かし、そのリスクを明示的に示さなくてはならない。特に、深層防護第 4 層及び第 5 層の喪失に相当する原子力関連施設の事故時を想定した際に、周辺住民の安全を確保するための避難行動等の防災行動は非常に重要であるが、現状、原子力関連施設内外の状況を考慮した避難行動中のリスクを評価する枠組みは存在しない。事故時の避難計画の策定においては避難行動中のリスクを明確にする必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、原子力関連施設のリスクマネジメントの基盤技術である確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment : PRA) において、より現実的なリスクの把握に必須となる複雑な発生イベントを動的に解析できる評価手法の枠組みの確立及び解析システムの開発を行う。

具体的には、地震や津波等の外的事象による原子力関連施設内外への影響を考慮し、複数プラントの炉心損傷、放射性物質放出事象を対象とした事故シナリオの解析モデルをベースに、原子力関連施設の周辺住民の安全を確保するために、様々な設備、組織、社会インフラ、人、交通における相互作用、相関性を考慮した動的解析による発電所周辺住民のリスク評価を可能とする手法を考案し、この手法に基づくシミュレーション体系の開発を行う。

これにより、現行の原子力安全規制にて活用される PRA の継続的な改善に寄与し、原子力関連施設並びに施設周辺住民への安全性向上に大きく貢献することが可能となる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 研究方法の全体概要

本研究では、a. 確率論的リスク評価 (以下、PRA) の拡張アプローチ、b. フィールドワークによるアプローチの両方の観点を取り入れる。a. では、従来の PRA を事故発生後に住民が避難中に直面する可能性のあるリスクを可視化できるように拡張する。b. では、住民の原子力に対する不安及び不満を聞き取り、住民側の視点に立ったリスク像を明らかにする。a. と b. の検討結果より、住民の視点に基づくリスク像を定義し、これに基づく原子力関連施設事故時の住民の避難計画の策定に寄与することを最終的なゴールとするが、本研究では a. の手法を構築し、周辺住民のリスクを定義することを目的とする。

#### (2) PRA の拡張アプローチ

従来の PRA では、炉心損傷までを取り扱うレベル 1PRA、格納容器機能喪失までを取り扱うレベル 2PRA、放射性物質放出後の一般公衆の健康被害リスクを取り扱うレベル 3PRA という枠組みで構成されていた。主に、原子力施設の運営側が考えるリスクの観点で安全性を向上させるために実施するものであり、原子力関連施設の事故時に最も重要視すべき周辺住民のリスクを必ずしも明確にするものではない。

本研究では、従来のレベル 1~3PRA で時間的・空間的な断面として静的に評価されていた一般公衆のリスクを、地震津波等の外部自然事象を起因とする原子力発電所の事故進展、付随して発生する外部環境の経時変化、自治体が発出する避難指示等の情報伝達の相互作用、放射性物質放出の経時的な挙動並びに住民の避難行動を考慮したシナリオに対するひばく評価に基づく動的かつ包括的な一般公衆のリスクを明らかにする手法 (拡張 PRA) を構築する。図 1 に拡張 PRA の概要図を示す。

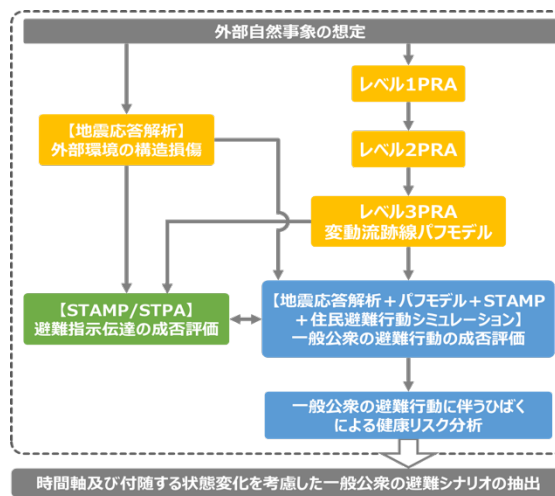


図 1 拡張 PRA の概要

#### 4. 研究成果

##### (1) 拡張PRAを用いたリスク定義手順

周辺住民の考えるリスク像を定義するための手順を以下に示す。

###### ① リスクマップの作成

住民が被るリスクに影響を与える項目を考慮して、リスクの大まかな枠組みを定義する。本研究でリスク定義に影響を与える項目は事故シーケンス、住民の個人属性・状態（避難住民はどこに住んでいる、どのような人物なのか）、住民避難のタイミングの3つである。この3つの項目を考慮し、外部自然事象発生以降全てのタイミングで住民が被るリスクを大まかに定義する。詳細なリスク抽出は手順②で行う。

###### ② 拡張PRAを用いた住民避難シナリオの抽出

拡張PRAの残りの要素技術であるレベル1,2PRA及びSTAMP/STPA相互作用分析結果に基づくレベル3PRAと住民避難行動を組み合わせたひばく評価手法の整備を行うとともに、住民の避難シナリオ及び健康リスクを導出する。手順②で抽出する住民避難シナリオ及び健康リスクは、避難行動中に生じる可能性がある事象のみとする。

###### ③ 住民避難シナリオ分析によるリスク像の定義

手順②で抽出した住民避難シナリオ及び健康リスク分析結果を手順①で構築したリスクの定義図と照らし合わせ、どのリスクに該当するかを分析する。分析した結果から、それぞれのリスクを更に細かく分け、どのようなリスクが存在しているのか、影響の大きさはどの程度なのかを定義する。

事故進展や避難者の属性といった避難に影響する条件を分析し、住民が被るリスクを定義した。

「PAZ内に住む、避難行動を一人でできる人」が被るリスクを大まかに定義した図を示す（図2）。しかしながら、ここで定義したリスクは例示であり、その他にも多くのリスクが存在していると考えられる。

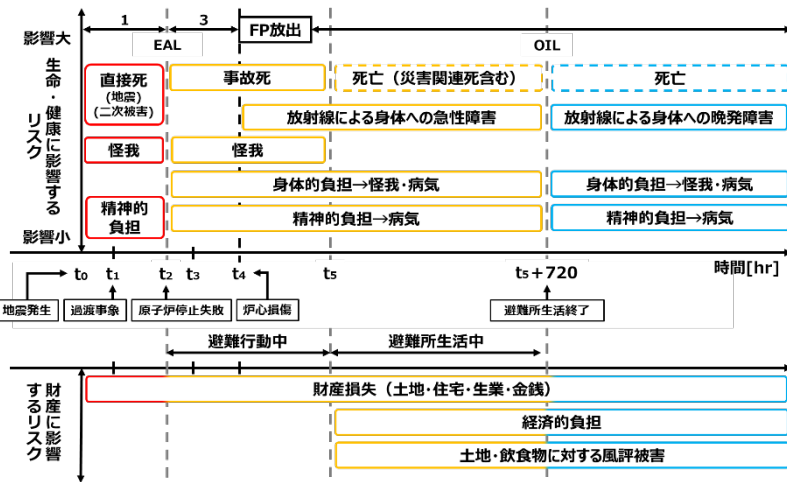


図2. リスクの定義図（事故シーケンス：TC）

##### (2) 拡張PRAによるシナリオ分析

避難行動中の住民が被るリスクに焦点を当て、拡張PRAによる避難行動シナリオ分析を行う。拡張PRAとは、レベル1,2PRAの技術、STAMP/STPAによる住民避難指示等の情報伝達の相互作用、放射性物質の時系列に沿った挙動（レベル3PRA）及び住民の避難行動を組み合わせて、シナリオを抽出することで、住民が被る可能性があるリスクを明らかにするものである（図1参照）。ここでは数多のリスクより、周辺住民が被るひばくのリスクを選定し、検討を行った。

STAMP/STPAに基づく自治体の情報伝達の相互作用分析結果を用いて、残る要素技術であるレベル3PRAと住民避難行動を組み合わせたひばく評価を行った。ひばく評価には、日本原子力研究開発機構（JAEA）が開発する確率論的事故影響評価コード「OSCAAR」を用いた。屋外に7日間滞在した場合の実効線量を評価した結果を示す（図3）。図3に住民の避難経路を重ね合わせ、住民が避難中に通過した各メッシュのひばく線量値を積算することによ

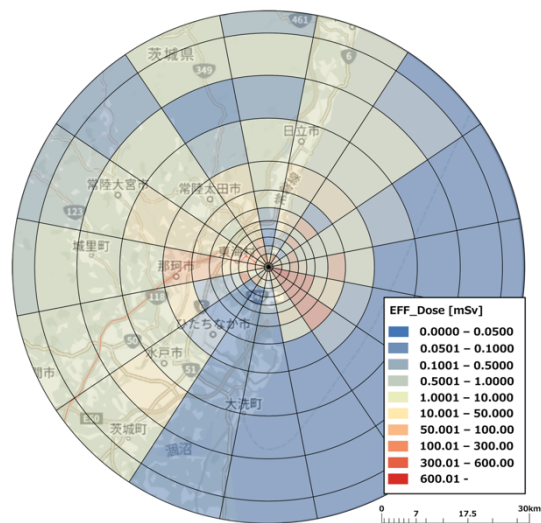


図3. 東海第二原子力発電所における実効線量（事故シナリオ：TC-DWF）

←

って、住民が被る健康リスクを導出した。その結果、最も厳しいシナリオでも早期ひばく線量は1.055[mSv]となった。この値は ICRP103 に記載される緊急時ひばく状況において計画される最大残存線量の参考レベル (20~100mSv/1年の範囲) 以下であるため、健康への影響は限りなく小さいと求められた。この結果はあくまで一例であり、事故シナリオの相違や気象条件、避難時のインフラの状態、交通状況、人間行動の様態によって左右されるものであり、総括的な評価によって意思決定がされなくてはならないのは言うまでもないが、本研究の成果からは、全ての要素技術 (レベル1~3PRA, 住民避難行動, STAMP/STPA 相互作用分析) を考慮した住民の避難行動中のひばくによるリスク評価が可能であることが確認できた。

### (3) 結論

本研究によって、拡張 PRA の評価体系は、住民の避難シナリオ及び健康リスクを導出することが可能であると見通しを得た。避難行動・避難環境の変化に応じて、ひばく線量は変動する可能性があり、本手法は様々な状況に適用性があると考えられる。更には、拡張 PRA の評価結果を用いて、避難中に住民が被るリスクをより具体的に定義することが期待できる。

#### <参考文献>

- 1) 山口晋一. “システム理論に基づく安全解析手法 (STAMP/STPA) の要件定義工程への適用評価”. 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科博士論文. 2019年9月.
- 2) 原子力規制委員会. “事故シーケンスグループの抽出及び重要事故シーケンスの選定について”. <<https://www.da.nra.go.jp/file/NR000082508/000176487.pdf>> p.8.
- 3) 城島 洋紀他. “重大事故の事故シーケンスグループに係る事故進展解析”. 原子力規制委員会. 令和2年6月. p.70.
- 4) 原子力規制委員会. “原子力災害対策指針”. 令和元年7月. p.52.
- 5) 原子力規制委員会. “原子力災害対策指針”. 令和元年7月. p.5~10.
- 6) 原子力規制庁. “原子力災害対策指針の主なポイント”. <<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai32/sankou7.pdf>> 平成25年9月
- 7) 日本原子力研究開発機構. “原子力災害で環境に放出される放射性物質による被ばく線量を評価 -確率論的事故影響評価コード「OSCAAR」の公開- ” <<https://www.jaea.go.jp/02/press2020/p20042301/>> 2024年1月17日最終アクセス
- 8) 放射線安全・防災研究グループ. “OSCAAR コードパッケージの使用マニュアル”. 日本原子力研究開発機構. 2020年3月. p.3~7.
- 9) 本間 俊充他. “軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対する環境影響評価”. 日本原子力研究所. 2000年12月. p.16~20.
- 10) 日本原子力発電株式会社. “東海第二発電所重大事故等対処設備について”. 平成29年6月. p.17-34.
- 11) 日本原子力研究開発機構. “令和2年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (被ばく解析手法の整備) に関する研究”. 令和3年3月. p.40.
- 12) 日本原子力研究開発機構. “令和3年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (被ばく解析手法の整備) 事業”. 令和4年3月. p.93~105.
- 13) 日本原子力研究開発機構. “令和3年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (被ばく解析手法の整備) 事業”. 令和4年3月. p.4~27.
- 14) 東海村防災原子力安全課. “東海村広域避難計画 (案)”. 平成28年5月. p.4~6.
- 15) 社団法人日本アイソトープ協会. “国際放射線防護委員会の2007年勧告”. 2007年3月. p.59~70.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kenji Mori, Hitoshi Muta & Yasuki Ohtori	4. 巻 58
2. 論文標題 Development of interaction model on the risk assessment method for nuclear facilities using a system model with a multi-layer structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 542-566
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2020.1845838	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Sakura Fukue, Hitoshi Muta, Yasuki Ohtori
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF THE RISK ASSESSMENT METHOD TO SUPPORT THE OPTIMIZATION OF EMERGENCY PREPAREDNESS AGAINST NUCLEAR DISASTER
3. 学会等名 ASRAM 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Riku Hatanaka, Hitoshi Muta, Yasuki Ohtori
2. 発表標題 A Study of Human Behavior Evaluation Methods for Assessing the Risk of Resident Evacuation in Defense in Depth Level 5 Situations
3. 学会等名 ASRAM 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牟田 仁, 大鳥 靖樹, 福江 さくら, 山岸 昇平, 馬淵 倉一, 田向 剛, 高田 毅士, 西田 明美, 肥田 剛典
2. 発表標題 原子力防災計画の俯瞰的・統合的な最適化を支援するリスク評価手法の構築その1：全体計画
3. 学会等名 日本原子力学会 2022 年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山岸 昇平, 田向 剛, 馬淵 倉一, 牟田 仁, 大鳥 靖樹, 福江 さくら, 高田 毅士, 西田 明美, 肥田 剛典
2. 発表標題 原子力防災計画の俯瞰的・統合的な最適化を支援するリスク評価手法の構築 その2: 住民避難リスク評価モデルの開発
3. 学会等名 日本原子力学会 2022 年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森憲治, 牟田仁, 大鳥靖樹
2. 発表標題 外的事象を対象とした統合的リスク評価手法の開発 その4: インタラクションマルチレイヤーモデルを用いた動的リスク評価手法の検討
3. 学会等名 日本原子力学会 2020 年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Mori, Hitoshi Muta & Yasuki Ohtori
2. 発表標題 Application of Interaction Model Impacting on Accidents Caused by Earthquake in Nuclear Facilities
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Mori, Hitoshi Muta & Yasuki Ohtori
2. 発表標題 Study on Quantitative Evaluation Method of Interaction Multi-Layer Model for Nuclear Fuel Facilities Considering External Natural Hazard
3. 学会等名 the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (ESREL2020-PSAM15) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Mori, Hitoshi Muta & Yasuki Ohtori
2. 発表標題 Study on Quantitative Evaluation Method of Interaction Multi-layer Model for Accidents in Nuclear Fuel Facilities Caused by Earthquake
3. 学会等名 Asian Symposium on Risk Assessment and Management 2020 (ASRAM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森憲治, 牟田仁, 大鳥靖樹
2. 発表標題 外的事象を対象とした統合的リスク評価手法の開発, その2: 原子力施設の事故に影響するインタラクションモデルの提案
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大鳥 靖樹  (Ohtori Yasuki)  (60371431)	東京都市大学・理工学部・教授   (32678)	
研究分担者	竹澤 宏樹  (Takezawa Hiroki)  (20756712)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授   (12608)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------