

Oral presentation | IV. Nuclear Plant Technologies : 403-1 Risk Assessment Technology, Application of Risk Information

📅 Wed. Sep 10, 2025 9:35 AM - 10:45 AM JST | Wed. Sep 10, 2025 12:35 AM - 1:45 AM UTC 🏠 Room I(AIM3F Exhibition Hall E)

[1I01-04] PRA Application

Chair:Satoshi Takeda(Osaka Univ.)

9:35 AM - 9:50 AM JST | 12:35 AM - 12:50 AM UTC

[1I01]

Study on efficient fault tree analysis using Brute Force MCSs generation method

*Tomoki Soga¹, Tomohiro Endo¹, Akio Yamamoto¹, Tomomi Hanai², Akinori Kobayashi², Kensuke Toyoshima², Takamasa Kurokawa² (1. Nagoya Univ., 2. NEL)

9:50 AM - 10:05 AM JST | 12:50 AM - 1:05 AM UTC

[1I02]

Quantitative Analysis of Radionuclide Contributions to Effective Dose Focusing on Wide-Range Accident Scenarios

*Kodai Wadayama^{1,2}, Chihiro Suzuki², Retsu Kojo², Takafumi Narukawa¹, Takashi Takata¹ (1. UTokyo, 2. NRA)

10:05 AM - 10:20 AM JST | 1:05 AM - 1:20 AM UTC

[1I03]

Tokai No. 2 Power Plant : Simulation of Radioactive Material Dispersion in Severe Accidents

*Masanori Katsube¹, Tsukasa Jinno¹, Yoshihiro Ogata¹, Shunsuke Minoura¹, Katsura Morii¹, Masakatsu Suzuki¹ (1. JAPC)

10:20 AM - 10:35 AM JST | 1:20 AM - 1:35 AM UTC

[1I04]

Estimation of large break LOCA frequency for Japanese plants based on PFM analysis

*Akihiro Mano¹, Yoshihito Yamaguchi¹ (1. JAEA)

10:35 AM - 10:45 AM JST | 1:35 AM - 1:45 AM UTC

Time reserved for Chair

BFMCS 法を用いた確率論的リスク評価におけるフォールトツリー解析高速化

Study on efficient fault tree analysis using Brute Force MCSs generation method

*曾我 知生¹, 遠藤 知弘¹, 山本 章夫¹, 花井 智海², 小林 章紀², 豊嶋 謙介², 黒川 貴正²

¹名古屋大学,²原子力エンジニアリング

フォールトツリー解析によるミニマルカットセット出力において、網羅的な組み合わせ作成と発生確率に基づいたカットオフを組み合わせた BFMCS 法を考案した。42 個の基事象を持つ FT に対して提案手法を適用し、従来アプローチに基づく既存アプリケーションによる解析と同等の結果を得ることができた。

キーワード: 確率論的リスク評価(PRA), フォールトツリー解析(FTA), ミニマルカットセット(MCS), BFMCS 法

1. 緒言 確率論的リスク評価におけるフォールトツリー(FT)からのミニマルカットセット(MCSs)生成に要する時間は、従来アプローチでは一般に FT に含まれる基事象及びゲートの数が増加すると指数関数的に増加する。本研究では、従来アプローチとは異なるアルゴリズムによって MCS 生成を高速化する手法について検討した。発生確率に基づくカットオフを適用しながら網羅的に基事象の組み合わせを探索し、頂上事象を発生させる組み合わせを MCS として出力する BFMCS 法を考案した。42 個の基事象を持つ FT に対して本手法を適用し、計算精度と計算時間の調査を行った。

2. 計算手法 BFMCS 法では発生事象の網羅的な探索によって MCS 候補の出力を行う。図 1 にて、発生確率が 10^{-3} の基事象 3 つで構成された FT に対して BFMCS 法を適用する例を示す。初めに、解析対象とする FT の基事象数と同じ要素数を持ち、値が全て False の配列を作成する。続いて、1 番目の基事象から探索を開始する。1 番目の基事象を True とした組み合わせ①を作成した後に組み合わせの発生確率を算出する。発生確率がカットオフ値より大きい場合は組み合わせを FT に適用し、頂上事象が発生するか判断する。頂上事象が発生する場合は、その組み合わせを MCS 候補として保存した後、探索を打ち切る。頂上事象が発生しない場合は、さらに 2 番目の基事象を True とした組み合わせ②を作成し、以下同様の手順で組み合わせを作成していく。組み合わせの発生確率がカットオフ値を下回った場合はその組み合わせは破棄し、それ以上の組み合わせも探索しない。例えば、カットオフ値を 10^{-7} とすると、③の組み合わせは破棄される。以上の手順を全ての組み合わせについて行った後、MCS 候補が出力される。最後に、より基事象数が小さい他の MCS 候補で表現できる MCS 候補(MCS ではないもの)を削除する。このようにして残った組み合わせの発生確率を合計して、頂上事象の発生確率として出力する。

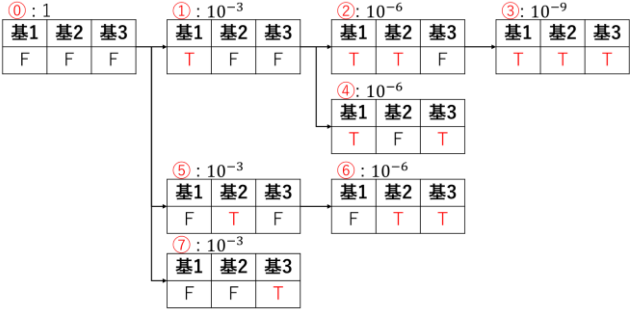


図 1 組み合わせの作成手順(基事象数 3 つ)

場合は組み合わせを FT に適用し、頂上事象が発生するか判断する。頂上事象が発生する場合は、その組み合わせを MCS 候補として保存した後、探索を打ち切る。頂上事象が発生しない場合は、さらに 2 番目の基事象を True とした組み合わせ②を作成し、以下同様の手順で組み合わせを作成していく。組み合わせの発生確率がカットオフ値を下回った場合はその組み合わせは破棄し、それ以上の組み合わせも探索しない。例えば、カットオフ値を 10^{-7} とすると、③の組み合わせは破棄される。以上の手順を全ての組み合わせについて行った後、MCS 候補が出力される。最後に、より基事象数が小さい他の MCS 候補で表現できる MCS 候補(MCS ではないもの)を削除する。このようにして残った組み合わせの発生確率を合計して、頂上事象の発生確率として出力する。

3. 計算結果 解析対象とする FT の基事象数は 42 個であり、各基事象の発生確率は 10^{-3} から 10^{-6} 程度である。また、ハウスイベントとしては BO-SEQ(全交流電源喪失)と SI-SEQ(ECCS 動作)の 2 つが存在し、BO-SEQ を True とする LOSEP(外部電源喪失)事象と SI-SEQ を True とする SLOCA(小破断 LOCA)事象を想定した。発生確率を解析する頂上事象は AFW-ECCS(補給給水系による二次冷却失敗と ECCS による注水失敗が同時に発生する事象)とした。2 つの事象について BFMCS 法を適用して頂上事象の発生確率を算出した結果、従来アプローチを用いた既存アプリケーションと同一の結果を得ることができた(表 1)。また、カットオフ値を引き上げることで計算時間を 10 万分の 1 以下まで短縮できることを確認した。今後は基事象数がより多い FT に対する本手法の適用可能性について検討を行う。

表 1 AFW-ECCS 発生確率(カットオフ値 10^{-30})

	参照解	提案手法
LOSEP	1.4805E-05	1.4805E-05
SLOCA	1.0028E-06	1.0028E-06

*Soga Tomoki¹, Tomohiro Endo¹, Akio Yamamoto¹, Tomomi Hanai², Akinori Kobayashi², Kensuke Toyoshima² and Takamasa Kurokawa²
¹Nagoya Univ., ²Nuclear Engineering, Ltd

広範な事故シナリオに着目した実効線量への核種寄与の定量的分析

Quantitative Analysis of Radionuclide Contributions to Effective Dose

Focusing on Wide-Range Accident Scenarios

*和田山 晃大^{1,2}, 鈴木 ちひろ², 小城 烈², 成川 隆文¹, 高田 孝¹

¹東大, ²規制庁

原子力災害時の事前対策に向け、多様な事故シナリオを対象としてガスとエアロゾルの実効線量寄与を体系的に把握することが重要である。本研究では NUREG-1465 の BWR Early in vessel の炉心放出割合に対しエアロゾル核種のみに除染係数を適用した感度解析を実施し、シナリオごとの実効線量核種寄与分析を行った。

キーワード：希ガス, エアロゾル, 事故シナリオ, 実効線量

1. 緒言

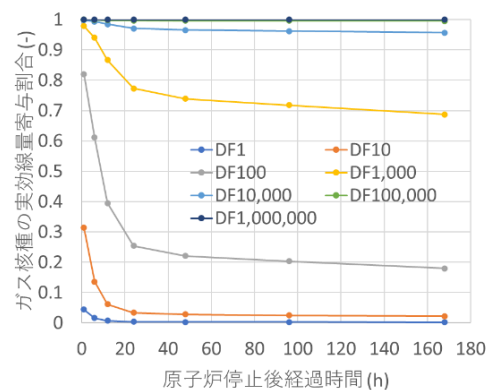
原子力災害の事前の備えとして、放射性物質放出源からの距離と、風下の実効線量の関係を表す Dose-Distance 曲線 (D-D 曲線) の形状を理解し、距離に応じた対策を取ることが重要である。D-D 曲線の形状を決める要因の一つとして、実効線量に対するガス状の核種 (ガス核種) 及びエアロゾル状の核種 (エアロゾル核種) の寄与割合が挙げられる。すなわち、それぞれの核種の寄与に応じて適切な D-D 曲線の選択が重要である。しかし、多様な事故シナリオについて寄与割合を体系的に評価した研究は限られている。そこで、本研究では多様な事故シナリオに対応するソースタームを除染係数 (DF) を用いて簡易的に表現し、実効線量への寄与が支配的な核種がガスからエアロゾルに変化する DF の条件を明確化することを目的とした。

2. 解析条件

DF は、燃料から格納容器へのエアロゾル核種放出量と格納容器から環境へのエアロゾル核種放出量との比、すなわち格納容器内でのあらゆる緩和効果を考慮したものと定義した。NUREG-1465[1]の BWR Early in vessel の炉心放出割合に対して、エアロゾル核種のみ DF=1~1,000,000 とした場合におけるソースタームを仮定し、1 km 地点における実効線量を評価した。希ガスはどのケースにおいても DF を考慮せず格納容器から全量放出されるものとした。さらに、放出タイミングによる核種の減衰の影響を考慮した。

3. 結果と考察

DF が 10,000 を超える解析ケースは、Kr-88 や Xe-133 といったガス核種の実効線量への寄与割合が 90%以上であった。DF が 100 及び 1,000 の解析ケースにおいては、ガス核種とエアロゾル核種どちらが実効線量の支配要因かは放出タイミングに依存する結果となった。DF が 1 及び 10 の場合は、ガス核種の実効線量寄与割合が小さく、I-131 をはじめとするエアロゾル核種の影響が有意であった。今回対象とした条件下では、格納容器内における DF が概ね 1,000 以上の場合はガス核種の寄与が支配的であり、DF が 100 を下回る場合にはエアロゾル核種の寄与が支配的となることが示唆された。



参考文献

[1] U.S. NRC, "Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants", NUREG-1465, (1995).

*Kodai Wadayama^{1,2}, Chihiro Suzuki², Retsu Kojo², Takafumi Narukawa¹ and Takashi Takata¹

¹UTokyo, ²NRA.

東海第二発電所 重大事故を想定した拡散シミュレーション

Tokai No.2 Power Plant : Simulation of Radioactive Material Dispersion in Severe Accident

*勝部 真徳¹, 神野 職¹, 小形 好弘¹, 箕浦 駿介¹, 森井 桂¹, 鈴木 雅克¹

¹ 日本原子力発電株式会社

東海第二発電所の重大事故を想定した放射性物質の拡散シミュレーションの結果及び当該シミュレーションの条件設定の考え方, 妥当性を確認するために実施した感度解析等について報告する。

キーワード: 重大事故, 拡散シミュレーション

1. 東海第二発電所の拡散シミュレーションについて

当社は, 自治体からの要請を踏まえ, 「発電所から 30km 周辺まで避難・一時移転の対象となる区域が生じ, かつその区域が最大となると見込まれる事故・災害を想定する」との前提で, 東海第二発電所の重大事故を想定した放射性物質の放出量, 気象条件等を検討し, 発電所外への放射性物質の大気拡散シミュレーションを行い, 原子力災害対策指針の示す運用上の介入レベル (OIL) に基づき相当する区域を評価した^[1]。

新規制基準に基づき強化した安全対策が機能する場合, 大破断 LOCA と全ての非常用炉心冷却系 (ECCS) の機能喪失が発生しても OIL2 の初期設定値 ($20 \mu\text{Sv/h}$) を超える区域が生じない結果となった。このため, 工学的には考えにくいものの, 位置的分散等を考慮した常設の安全対策設備が一斉に機能喪失し, フィルタベントも機能せず格納容器破損に至るなどの仮想条件を設定した。気象条件は, 避難・一時移転の範囲が広範となるよう, 実観測データから同一風向の継続時間及び降雨の有無をもとに 11 ケースを選定した。

2. 拡散シミュレーションの結果及び妥当性の確認

拡散シミュレーションの結果の一部を図 1 に示す。本シミュレーションで設定した気象条件について, 降雨の量や開始時間, 風速等のパラメータを仮想的に変化させた感度解析により, 各パラメータが避難・一時移転の範囲に及ぼす傾向を確認した。また, 選定した気象条件の妥当性を確認するため, 年間の気象データからランダムにサンプリングした 200 ケースの気象条件による評価から避難・一時移転の対象範囲に対する累積確率を求めた結果, 11 ケースのうち範囲が最大となったケースの累積確率は 99.8% となり, 図 1 に示す避難・一時移転の範囲が最大と見込まれる結果であることを確認した (図 2)。

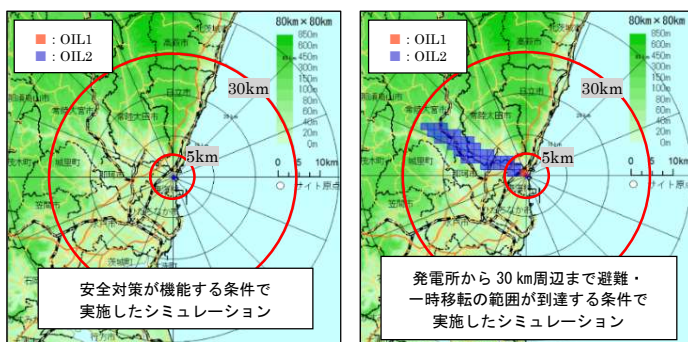


図 1. 拡散シミュレーションの結果 (抜粋)

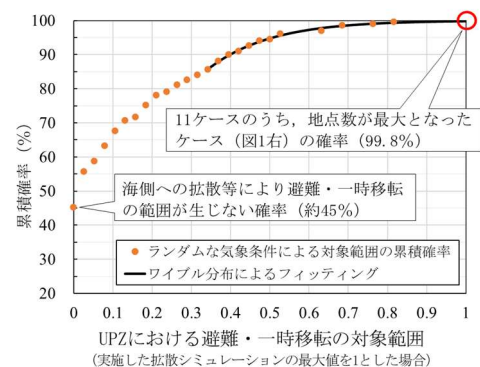


図 2. ランダムな気象条件による避難・一時移転の対象範囲の累積確率分布

参考文献

[1] 東海第二発電所拡散シミュレーションの実施結果について (2022 年 12 月 23 日, 日本原子力発電株式会社)

*Masanori Katsube¹, Tsukasa Jinno¹, Yoshihiro Ogata¹, Shunsuke Minoura¹, Katsura Morii¹, Masakatsu Suzuki¹

¹Japan Atomic Power Company

PFM 解析に基づく国内プラントを対象とした大破断 LOCA 頻度の検討

Estimation of large break LOCA frequency for Japanese plants based on PFM analysis

*真野 晃宏¹, 山口 義仁¹

¹原子力機構

近年米国では、最新知見に基づく確率論的破壊力学（PFM）解析により、大破断冷却材喪失事故（LBLOCA）の発生頻度の再評価が行われている。これを踏まえ、本研究では、PFM 解析により、一般的な国内 PWR プラントを対象とした LBLOCA 頻度を求めた。

キーワード： 確率論的破壊力学、LBLOCA 頻度

1. 緒言

LOCA の発生頻度はリスク評価への重要な入力情報の一つであり、国内のリスク評価では、20 年ほど前に米国の専門家によって破断サイズごとに設定された LOCA 頻度[1]が参照されている。この参考文献[1]中の LBLOCA の頻度について、米国では、最新知見に基づく PFM 解析による再評価が行われている [2]。本研究では、その事例を参考に、一般的な国内 PWR プラントを対象として、PFM 解析コード PASCAL-SP2 により LBLOCA 頻度を求め、破断サイズとの関係性を評価することを目的とした。

2. LBLOCA 頻度の評価

PFM 解析の対象として、口径が相対的に小さく、破断の発生頻度が高くなると考えられる約 12 インチのサージ管台を選定した。経年劣化事象として、PWR1 次冷却系におけるニッケル合金の応力腐食割れ（PWSCC）による亀裂の発生及び PWSCC と疲労による亀裂の進展を考慮した。米国での再評価事例[2]では米国 PWR を包絡するように解析条件が設定されたことを踏まえ、国内 PWR の条件を包絡するように、高経年化技術評価に係る文書等を参考に配管の寸法や応力等の条件を設定した。亀裂進展及び配管破断は、国内学協会規格に定める方法に従って評価した。評価に含まれる不確実さについては、米国での再評価事例[2]を参考に、物性値に関わるものを偶然的な不確実さに、亀裂の発生及び進展に関わるものを認識論的な不確実さにそれぞれ分類したうえで、国内データに基づき設定した。

図 1 に、破断サイズと LOCA の発生頻度との関係を示す。文献値[1]は 95%片側信頼区間の上限値である。本研究で得られた値は、文献値よりも二桁程度低かった。

3. まとめ

PWR のサージ管台を例として、国内プラントを包絡する条件での PFM 解析によって LBLOCA 頻度を算出した。今後、様々な一次系配管を対象に評価を行うことで、破断サイズと発生頻度の関係を得る。本研究は、原子力規制庁「令和 6 年度原子力施設等防災対策等委託費（検査のためのリスク評価手法開発）事業」の成果である。

参考文献

[1] NUREG-1829 [2] EPRI MRP-480 Product ID. 3002023895

*Akihiro Mano¹ and Yoshihito Yamaguchi¹

¹Japan Atomic Energy Agency

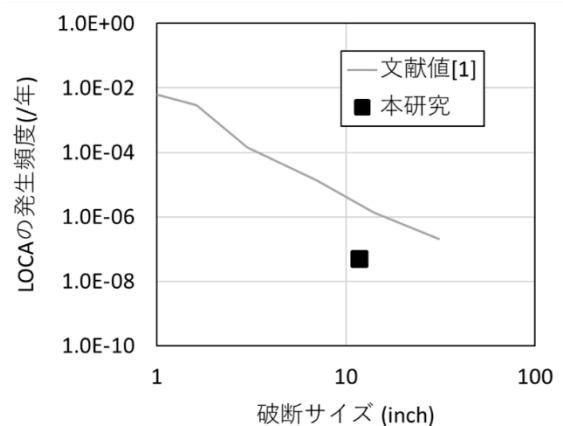


図 1 破断サイズと LOCA 発生頻度との関係