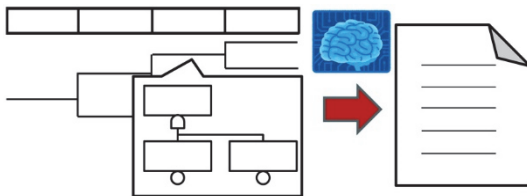


AI 技術を活用した 確率論的リスク評価(PRA)解析結果の妥当性確認手法

A Validation Method for Results of PRA Using AI Technique



網谷 達輝*¹
Tatsuki Amitani

平井 俊輔*²
Shunsuke Hirai

尾崎 和基*³
Kazuki Ozaki

藤井 康文*⁴
Yasufumi Fujii

森田 克明*⁵
Katsuaki Morita

原子力プラントの重大事故に至るリスクは、確率論的リスク評価手法を用いて評価される。原子力プラントは多数の設備・機器、配管並びに電気系から構成される複雑なシステムであるため、評価対象となる事故シナリオは膨大である。確率論的リスク評価の結果として得られる重大事故に至る故障の組合せの妥当性は、設計・運用・実績から想定される故障モード等と照らし合わせて起こりうる事象であるかを確認することで担保される。これらの組合せは無数にあるが、評価結果への寄与が大きい部分を確認することで結果は十分に担保される。しかしながら、確認する範囲を拡大できれば、評価結果の信頼性を更に向上できる。そこで、AI 分野の一つである自然言語処理技術を用いて効率的かつ網羅的に計算結果の適切性確認が可能な手法を開発した。

1. はじめに

自主的かつ継続的に原子炉施設の安全性を向上させることを目的として、原子力事業者は、安全性向上評価を実施している。その一環として、機器の損傷等により重大事故に至る頻度を算出するために確率論的リスク評価(Probabilistic Risk Assessment, 以下 PRA)が実施されている。PRA は、イベントツリーとフォールトツリーを用いて、重大事故の原因となる異常な事象(以下、起因事象)の発生頻度、及び重大事故から原子炉や格納容器を守るための緩和機能の失敗確率を解析することによって実施される。イベントツリーは、評価の対象とするプラントの系統、施設等の構成要素の運転状況によってどのように起因事象発生後の事象が進展するのかを、緩和機能毎の成否に基づいて樹木状の論理構成図で表現したものであり、起因事象と緩和機能の関係を示している。図 1 にイベントツリーの例を示す。一方でフォールトツリーは、イベントツリーにおける各緩和機能の失敗原因を分析するため、緩和機能の失敗を頂上事象として、その失敗要因を詳細化し、各要因の因果関係を論理展開したものである。図 2 にフォールトツリーの例を示す。

イベントツリー・フォールトツリーを解析することで、重大事故に至る機器の故障や操作の失敗(以下、基事象)の組合せであるカットセットが得られる。各カットセットの発生頻度を合計することで、PRA の目的である重大事故に至る頻度が計算できる。図 3 にカットセットの例を示す。ここで、基事象に固有の ID を割り振ることで、カットセットは重大事故等に至るシナリオを ID 列で表したものになる。

カットセットの妥当性は、設計・運用・実績から想定される故障モード等と照らし合わせて起こりうる事象であるか確認することで担保される。原子力プラントのシステムの複雑性から、得られるカットセットは無数にあるが、評価結果の寄与が大きい主要な部分を確認することで結果は十分に担保される。しかしながら、確認する範囲を拡大できれば、評価結果の信頼性を更に向上させる

*1 原子力セグメント 炉心・安全技術部

*2 原子力セグメント SRZ 室

*3 三菱重工コンプレッサ株式会社 経営統括センター

*4 エナジードメイン GTCC 事業部 プラント技術部

*5 デジタルイノベーション本部 EPI 部 主席部員

ことが可能である。

今回は効率的な確認方法の開発のため、AI 分野の一つである自然言語処理技術の活用を検討した。自然言語処理技術の一つには Word2Vec⁽¹⁾があり、これは文章に含まれる各単語を近傍の単語との関係性に基づいて数値ベクトルに変換し、そのベクトルを演算するとともに、各ベクトル間の距離を比較することで文章同士の意味の近さを把握できる手法である。この Word2Vec によってカットセット(文字列)をベクトル変換することにより、効率的かつ網羅的なカットセットの妥当性確認が可能となる手法を開発した。

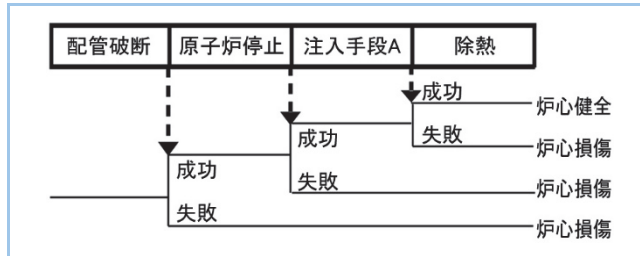


図1 イベントツリーの例

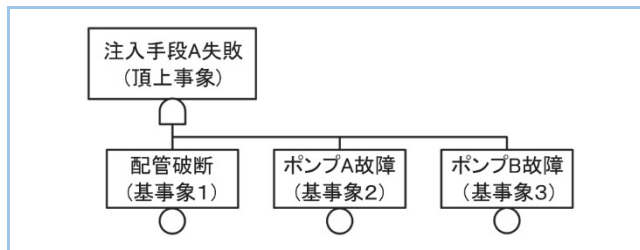


図2 フォールトツリーの例

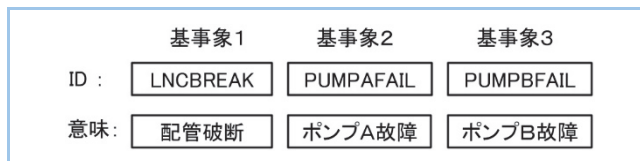


図3 カットセットの例

2. 開発手法

2.1 自然言語処理を用いたカットセットのクラスタリング

先述のとおり、原子力プラントの PRA のカットセットは重大事故に至るシナリオを文字列によって表したものである。カットセットを構成する基事象は機器の故障や操作の失敗を表しており、類似の基事象には類似の ID を与えるため、類似の事故シナリオは類似のカットセットを持つ。そのため、Word2Vec を用いてカットセットをベクトル空間上にプロットすると、図 4 の模式図のとおり、類似の事故シナリオを表すカットセットが類似のベクトル値を持つ。よって、類似のベクトル値を持つカットセットをクラスタリング(グループ化)すると、類似の事故シナリオを意味するカットセットのクラス(グループ)を形成する。

PRA モデルに不適切な箇所が含まれることによるカットセットへの影響は、以下の 2 パターンが考えられる。

- ① 本来出現すべきではない不適切なカットセット(以下、不適切カットセット)が出現するパターン
- ② 本来は出現すべきカットセットが出現しない(以下、未出現カットセット)パターン

今回、先述したカットセットをベクトル化し、クラスタリングしたものの特性を利用して、それぞれのパターンに対応する妥当性確認手法を考案した。

なお、原子力プラントの PRA においては、取り扱う PRA モデルは巨大なイベントツリー及びフォ

ールツリーを有し、1つのシステムに対し数十～数百個の基事象が関与しているため、一か所のPRAモデル上の誤りによって同規模の数のカットセットが影響を受けることとなる。今回開発した手法は、クラスタリングが正しく行われるほどPRAモデル上の誤りに対して高い検出率を示すことが期待できるが、PRAモデル上の不適切な箇所を特定するには影響を受けたカットセットすべてを同定する必要はなく、1つ以上の影響を受けたカットセットが発見できればPRAモデルからその原因を辿れる。したがって、今回開発した手法による検出率は、AIによるクラスタリングの一般的な精度よりも高くなると期待できる。

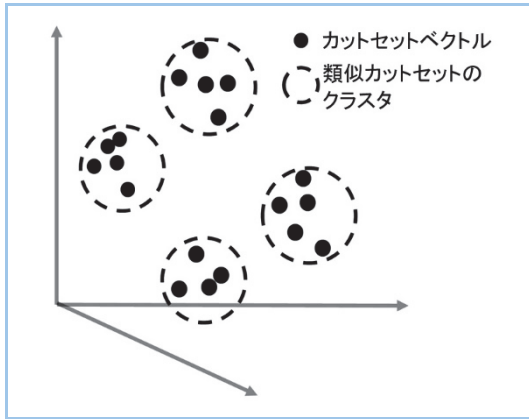


図4 ベクトル化したカットセットの模式図

2.2 不適切カットセット特定手法

本手法は、評価対象プラントの特徴から本来得られるべきでない不適切カットセットを特定するため、技術者が妥当性を確認すべきカットセットを絞り込む手法である。ここで、本来得られるべきでない不適切カットセットとは、例えば自動でポンプを起動するシステムに対し、ポンプ起動操作失敗（ヒューマンエラー）を含むカットセットを指す。手法の概念図を図5に示す。本手法では、過去に妥当性が確認されているカットセット（以下、正解データ）群及び妥当性確認対象のカットセット群をまとめてベクトル化及びクラスタリングする。正解データが含まれたクラスタは、その正解データと類似のカットセットで構成されているため、妥当性確認が不要と判断される。一方で、正解データが含まれないクラスタは、これまでに妥当性が確認されていないカットセットで構成されるため、プラントの特徴からこれらのカットセットは妥当か従来通り技術者が確認することで、不適切カットセットを特定できる。

なお、各クラスタは同種のカットセットで構成されるため、すべて確認する必要はなく、各クラスタについて数個のカットセットを確認すればクラスタ全体の妥当性が確認できる。

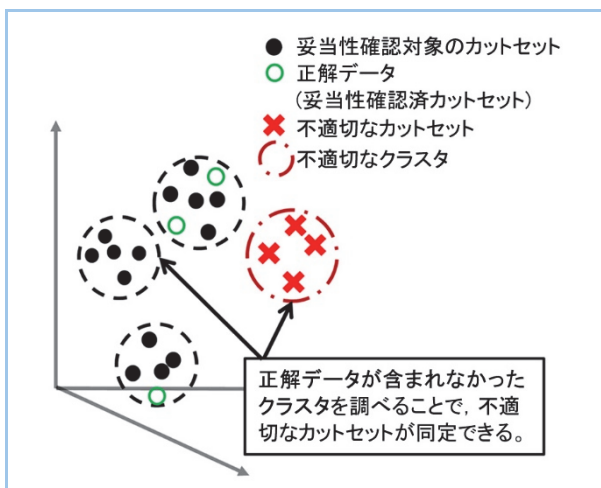


図5 不適切カットセット特定手法の概念図

2.3 未出現カットセット特定手法

本手法は、未出現カットセットを特定するため、既に妥当性が確認されたプラントのカットセットと比較する手法である。手法の概念図を図 6 に示す。本手法では、妥当性が確認された PRA モデル(先行モデル)のカットセット群と評価対象 PRA モデルのカットセット群をまとめてベクトル化及びクラスタリングする。クラスタリングすることで、先行モデルで出現している一方で妥当性確認対象のカットセット群に出現していないカットセットのクラスが抽出できる。抽出されたクラスは本来評価対象プラントで出現すべきか技術者が精査することによって、評価対象プラントで出現すべきカットセットのうち出現していないものが存在するか判別できる。

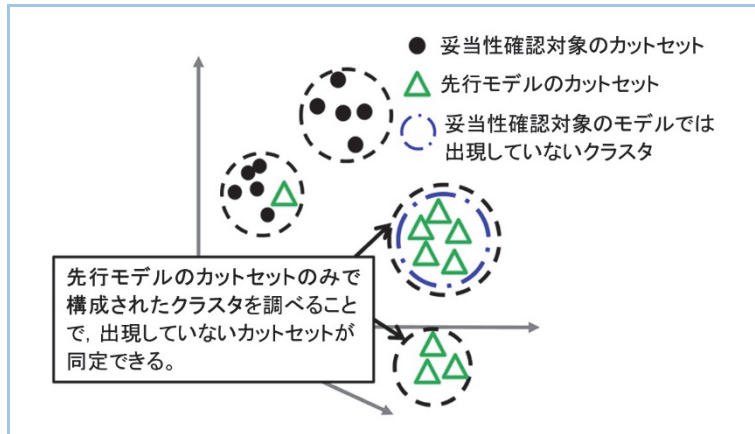


図6 未出現カットセット特定手法の概念図

3. 開発手法の有効性検証

3.1 不適切カットセット特定手法の検証

内的事象 PRA モデルに含まれるフォールトツリーの構造を意図的に変更し、約 5 万個のカットセットの中に 1%程度の数(500 個程度)の不適切カットセットを生成した。本手法を用いて、不適切なカットセットが含まれている疑いのあるクラスターの絞り込みを実施したところ、妥当性確認を要するクラスターが 5 つ抽出され、その中から不適切なカットセットを発見できた。図 7 に検証のイメージを示す。全体に対して 1%程度しか含まれていない不適切なカットセットを効率的に特定でき、本手法の有効性が確認できた。

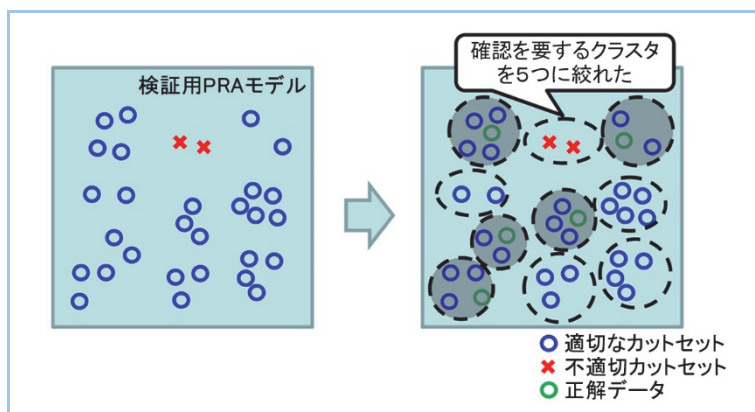


図7 不適切カットセット特定手法検証のイメージ

3.2 未出現カットセット特定手法の検証

検証用 PRA モデルのカットセットを様々なパターンで不足させ、4 つの先行モデルのカットセットと比較することによって、カットセットの不足が検出可能か確認した。図 8 に検証のイメージを示す。検証対象の事象と事象進展の組合せは計 4 種類(内的事象・地震事象×レベル 1PRA・レベル 2PRA)とし、カットセットの不足パターンは事象と事象進展の組合せごとに 30～70 種類用意し

た。検証の結果、一部の事象と事象進展の組合せでは検出率が97%であったが、それ以外の組合せでは全ての未出現カットセットを特定でき、全体の検出率は99%となった。AIを使用することによって、従来以上の範囲のカットセットを確認し、高い検出率で未出現カットセットを特定可能になったことから、本手法の有効性を確認できた。

なお、今回の検証においては、不適切カットセット特定手法と未出現カットセット特定手法を個別に検証したが、実際にはフォールトツリー及びイベントツリーを用いた評価の特徴から、PRAモデルの誤り箇所に紐づいたカットセットすべてが誤りによる影響を受けるため、不適切カットセットと未出現カットセットは同時に発生することが多いと考えられる。よって、いずれかの手法で誤り箇所が発見できればその箇所は修正されることから、両方の方法を併せて使用することで実質的な検出率は更に高められる。

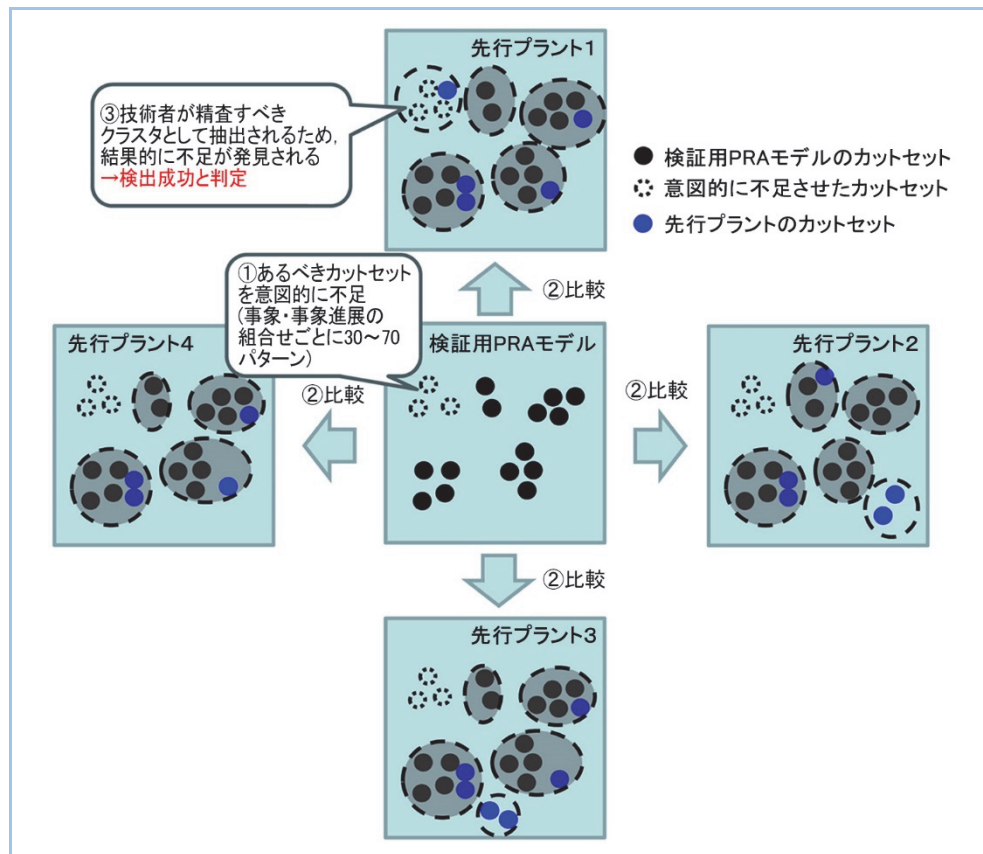


図8 未出現カットセット特定手法検証のイメージ

4. まとめ

PRAの品質を更に向上させるため、自然言語処理を活用した2種類の妥当性確認手法を開発し、有効性を確認した。前述のとおり、原子力プラントはシステムが複雑であることから、得られるカットセットは数万～数十万規模である。これに対し、本手法を適用することで、従来は実施できなかった網羅的な確認を現実的に対応可能な時間で実施できるようになった。PRAの妥当性確認に本技術を適用することで、評価の信頼性向上を見込む。

参考文献

- (1) T. Mikolov et al., Efficient estimation of word representations in vector space, (2013), arXiv preprint arXiv:1301.3781