文部科学省　原子力システム研究開発事業（ボトルネック課題解決型）

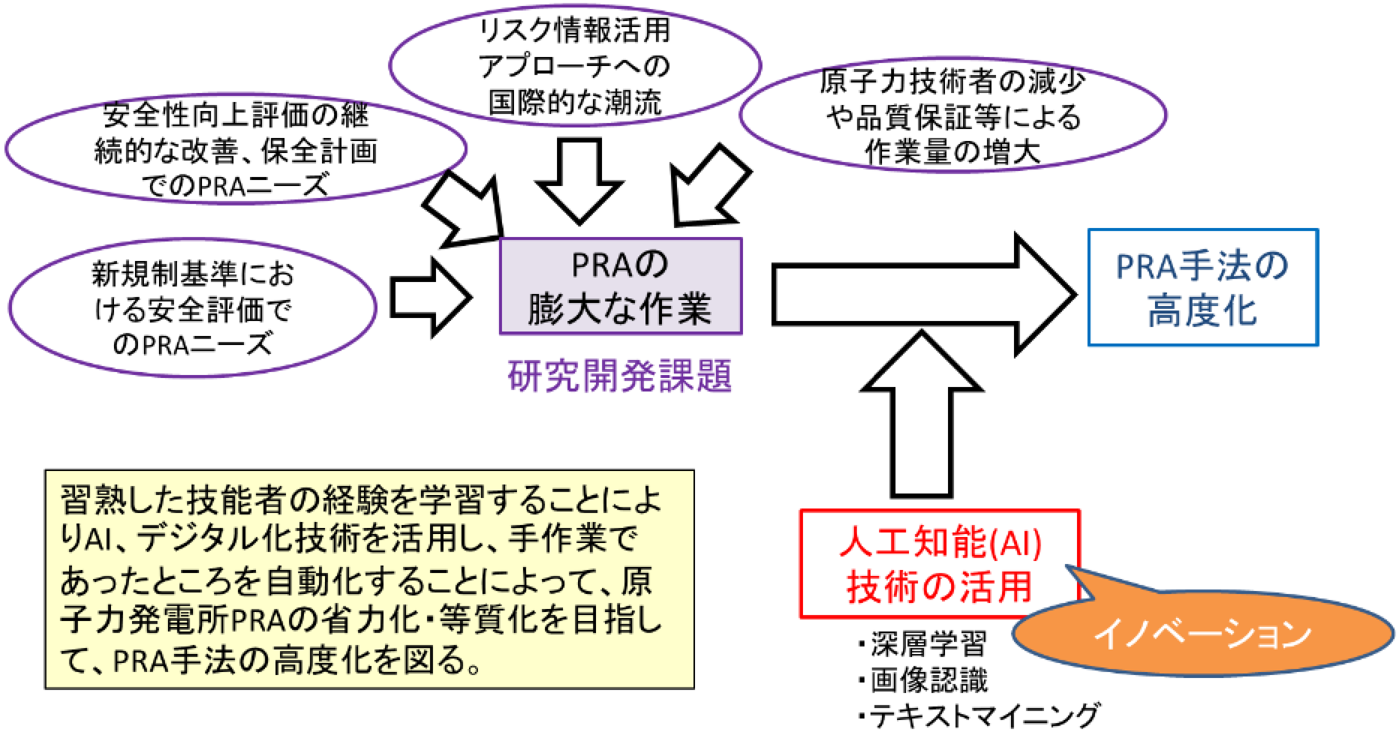
AI技術を活用した確率論的リスク評価手法の高度化研究

二神　敏[1], 栗坂　健一[1], 山野　秀将[1], 西野　裕之[1], 近藤　佑樹[1],
氏田　博士[2], 森本　達也[2]

[1]日本原子力研究開発機構
[2]アドバンスソフト株式会社

背景

- 原子力発電所の確率論的リスク評価(PRA)は、1F事故後にその重要性が再認識され、ニーズが高まっている一方で、解析作業が膨大であり、事業者の負担となっていることから、研究開発段階にある新型原子炉、特に革新的原子力システムを採用した場合においても必須かつより膨大な作業となるPRAの効率化は解決すべき研究開発課題である。
- 一方、近年の深層学習、画像認識、テキストマイニング等の人工知能(AI) は、その技術の進展と実用展開により各方面でイノベーションとして大きな影響を与えている。



PRAにおける課題とその解決方策のイメージ

研究目標

原子力発電所のPRAの効率的・効果的な社会実装を目指したイノベーションを創出するため、AI、デジタル化技術を活用した以下のAIツールを開発して、PRA手法を高度化することを目的とする。

【フォルトツリー(FT)自動作成手法】

画像認識等のAI技術を活用し、系統図等の設計図書からFT作成に必要な情報を抽出し、FTを自動的に作成する手法を開発する。

【信頼性データベース構築のための自動故障判定手法】

テキストマイニングや深層学習等のAI技術を活用し、各原子力プラントの故障及びトラブル情報から、PRAに必要な故障を自動的に判定する手法を開発し、信頼性データベース構築に資する。

全体研究実施工程と進捗

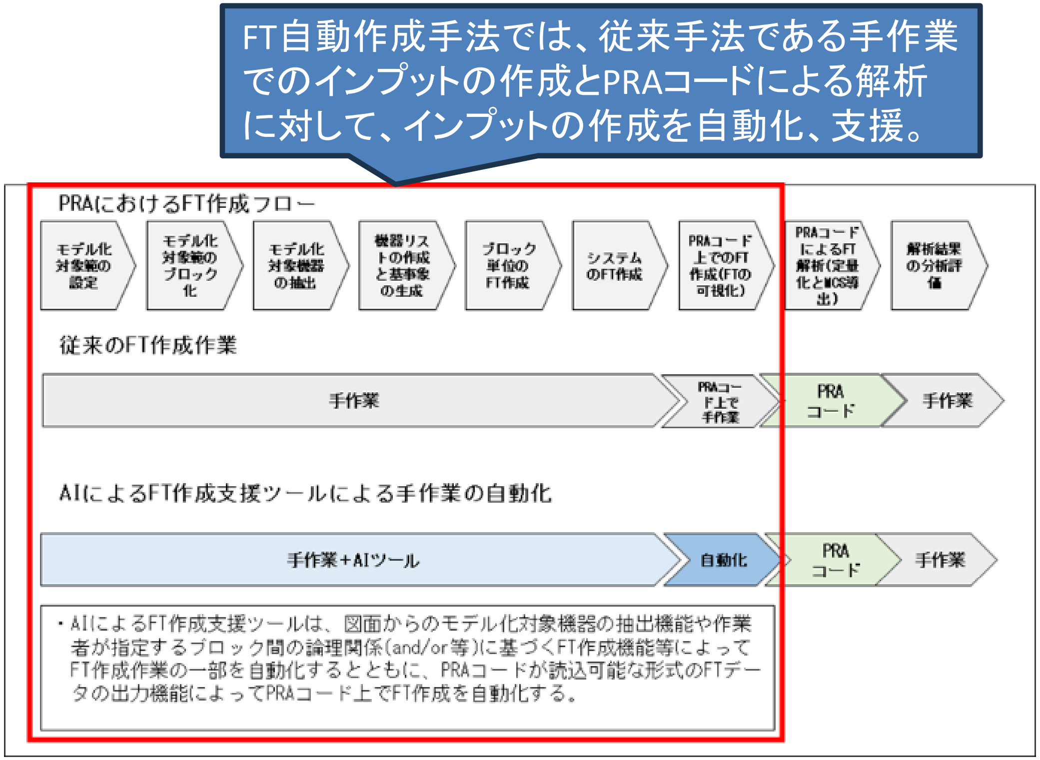
項目 ＼ 年度	令和４年度	令和５年度	令和６年度
(1)運転時PRAに関する研究			
①フォルトツリー自動作成手法の開発	分析調査、方法論構築	試作、試適用	妥当性確認、課題整理
②信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発（原子力機構）	信頼性データベース 根拠データ整理	試適用、妥当性確認	試適用、課題整理
（再委託先：アドバンスソフト）	方法論構築、試作	機能追加	機能追加 妥当性確認、課題整理
(2)研究推進	レビュー委員会の開催 まとめ・評価	レビュー委員会の開催 まとめ・評価	レエビュー委員会の開催 まとめ・評価

←→ 計画
⟸⟹ 進捗

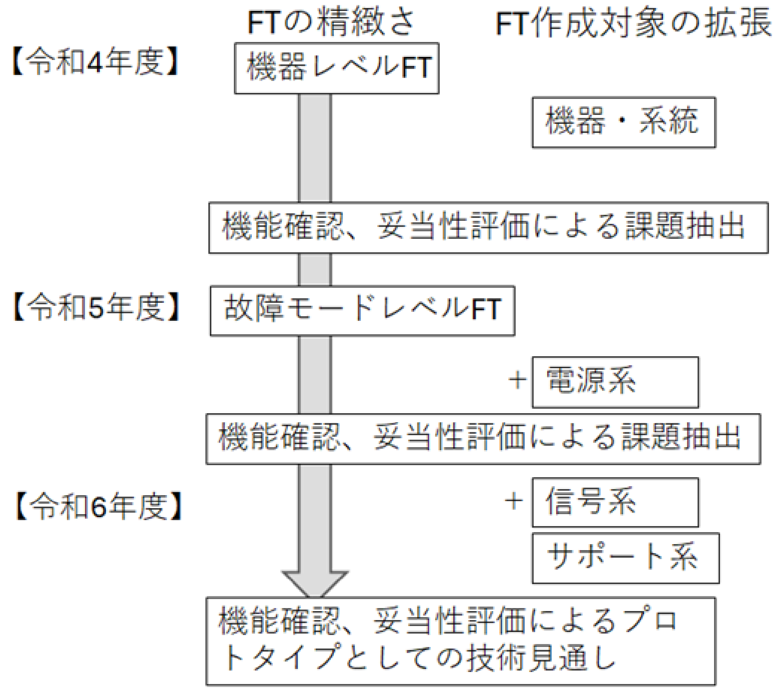
研究成果＜研究項目①　FT自動作成手法の開発＞

FT自動作成手法として、画像認識等のAI技術を活用し、系統図等の設計図書からFT作成に必要な情報を抽出し、FTを自動的に作成する手法を開発。FT自動作成ツールは、視覚的にFTの作成作業を行うことができるため、チェック負荷も低減。

開発にあたっては、段階的にFTの精緻化とFT作成対象の拡張を実施。FTの精緻さについては、機器レベルから故障モードレベルに精緻化し、機能拡張については、対象とする系統をフロントライン系からサポート系を考慮したFTまで機能を拡張。



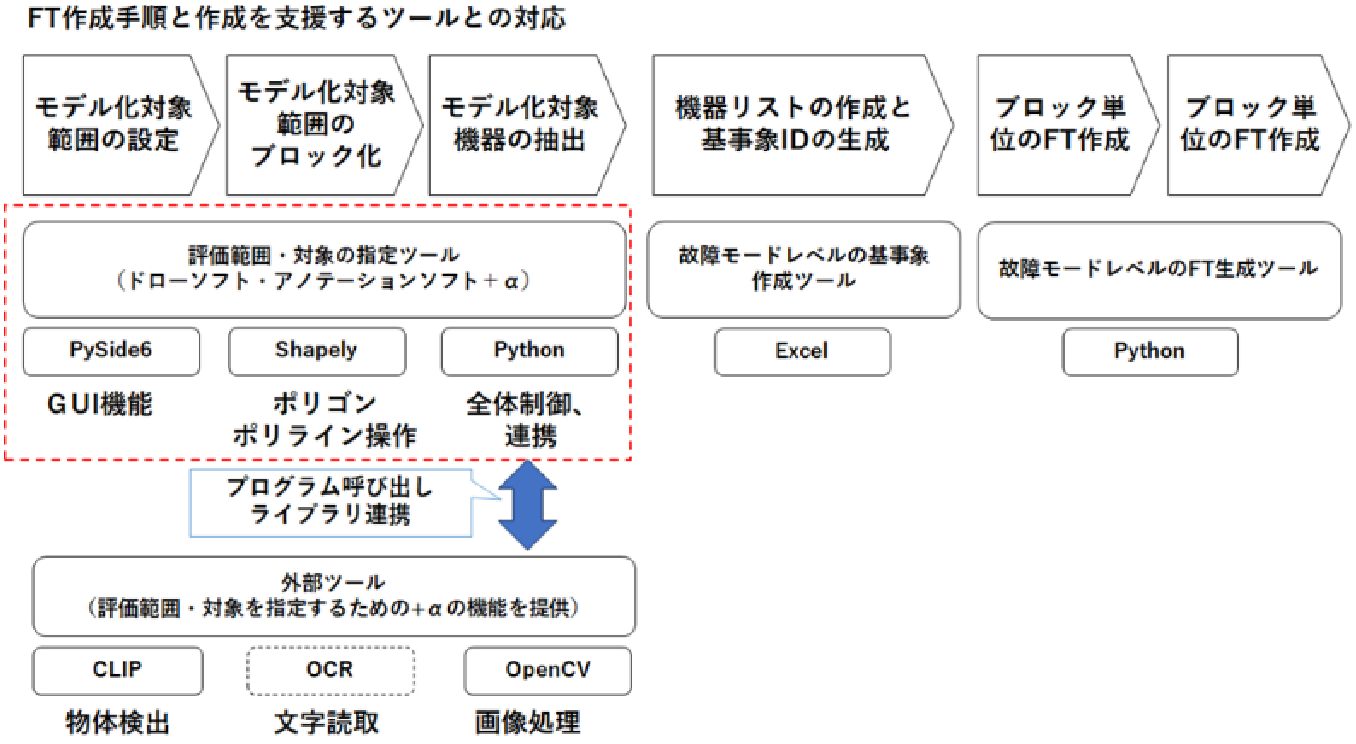
FT自動作成ツールの適用範囲



FT自動作成手法の開発手順

研究成果＜研究項目①　FT自動作成手法の開発＞

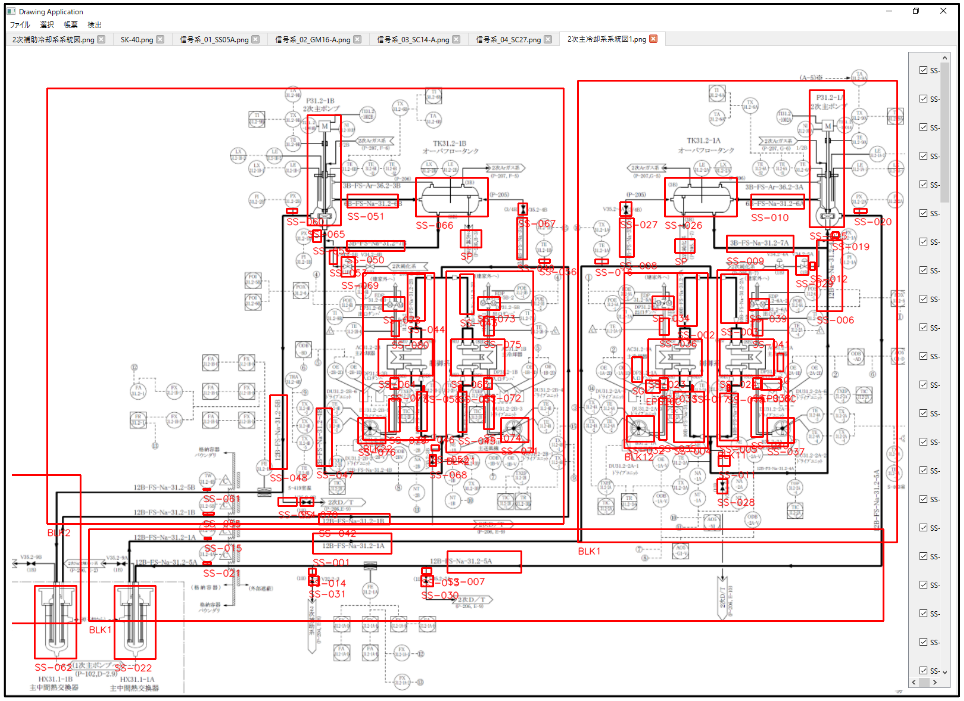
図面類からの機器検出には、テンプレートマッチングまたはビジョントランスフォーマーを採用して自動化(学習が不要な物体検出技術の活用も期待できることから、将来の技術進展に応じて外部AIツールの切り替え、進歩にも柔軟に対応可能)。機器検出後のチェック、モデル化対象範囲、ブロック指定をアノテーションツールのGUI画面で支援。機器情報をエクセル出力し、基事象IDとの紐付けを支援。作成データをPRA解析コードの入力データとして出力。



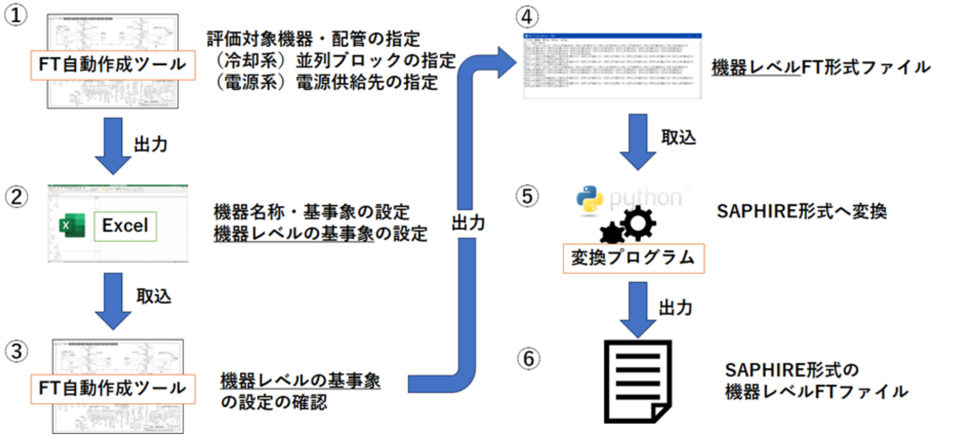
FT作成手順とFT自動作成ツールの機能

研究成果＜研究項目①　FT自動作成手法の開発＞

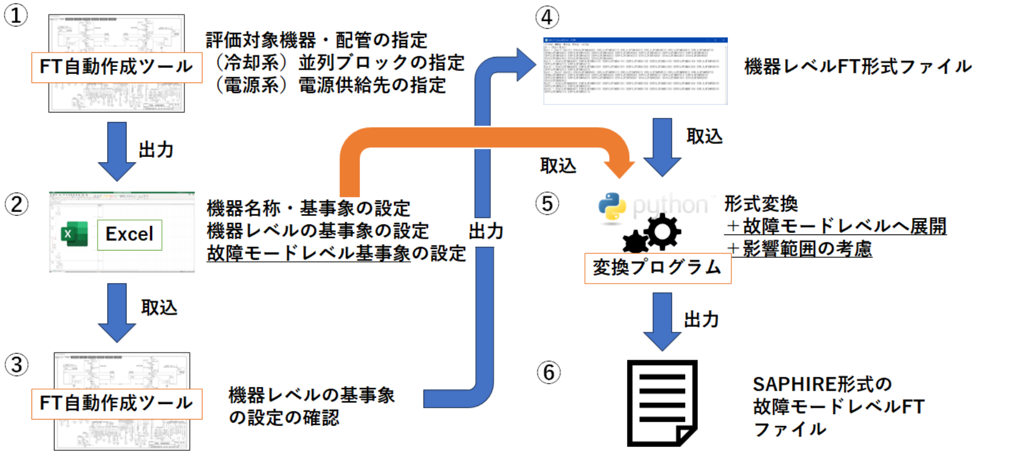
FTの精緻さについて、機器レベルから故障モードレベルまで対応できるよう、機器及び配管を対象として、令和4年度から令和5年度にかけて段階的に精緻化。



評価対象機器及び配管の選択結果
(2次主冷却系)



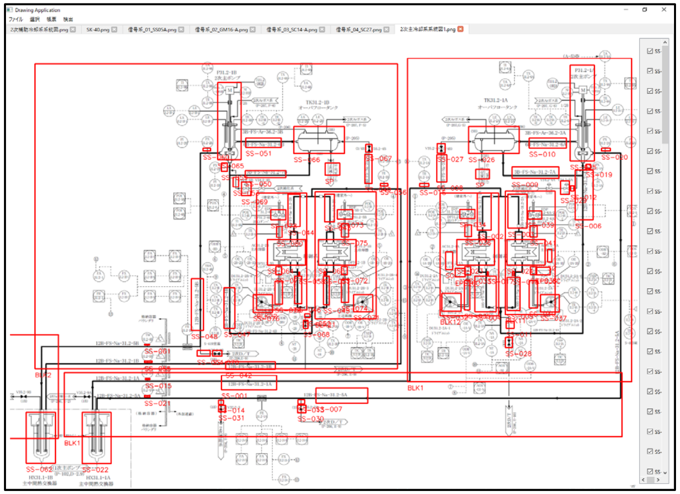
機器レベルのFT作成ツール



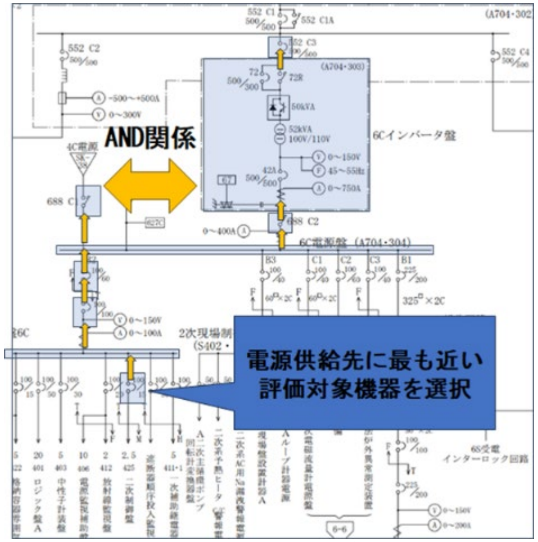
故障モードレベルのFT作成ツール

研究成果＜研究項目① FT自動作成手法の開発＞

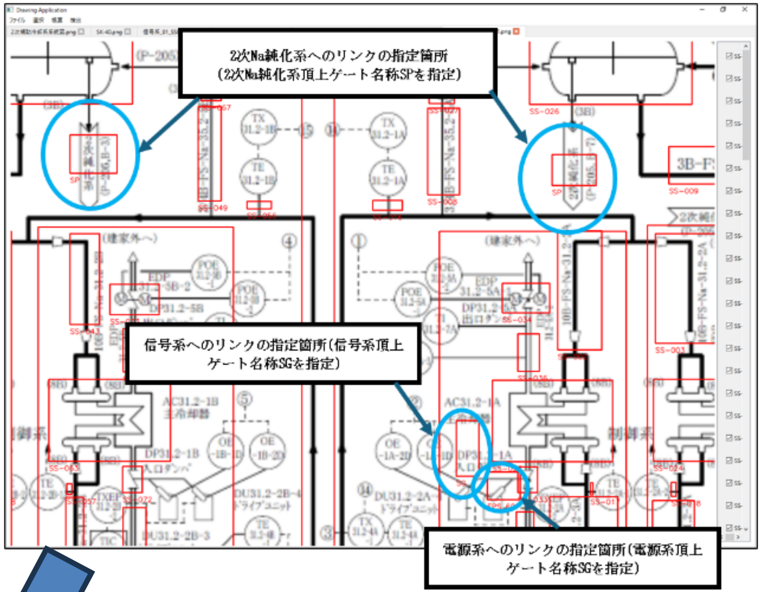
FT作成対象を、令和4年度から令和6年度にかけて機器及び配管、電源系、信号系、サポート系に段階的に拡張。



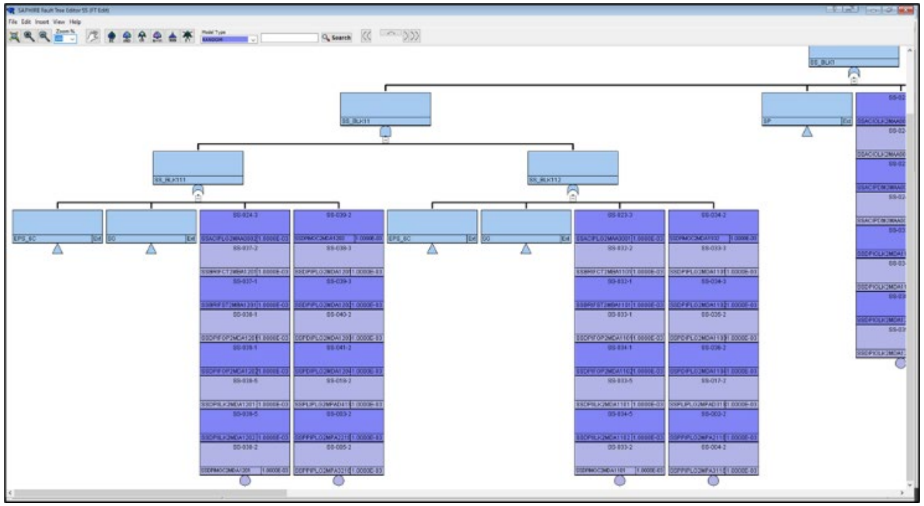
機器及び配管の例



電源系の例



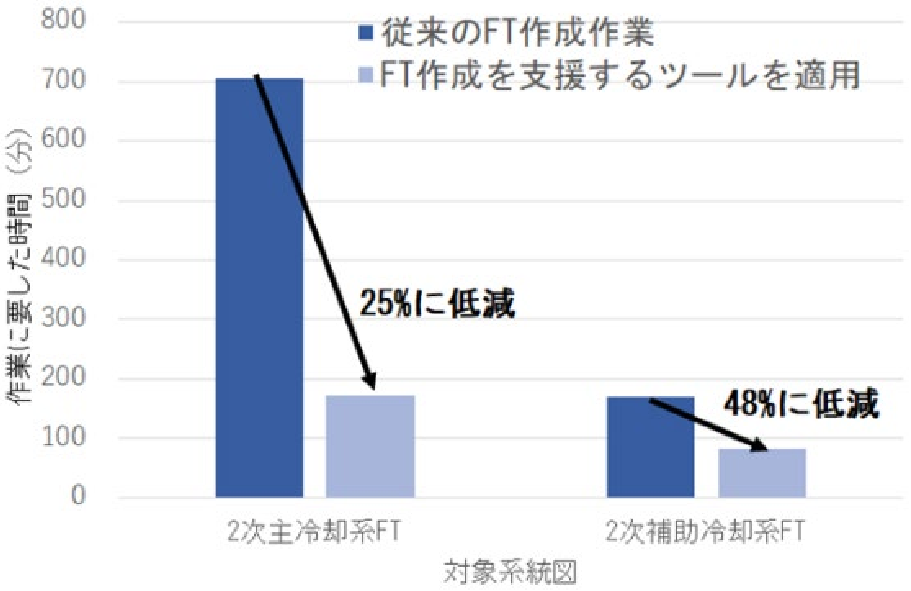
サポート系等とのリンク例



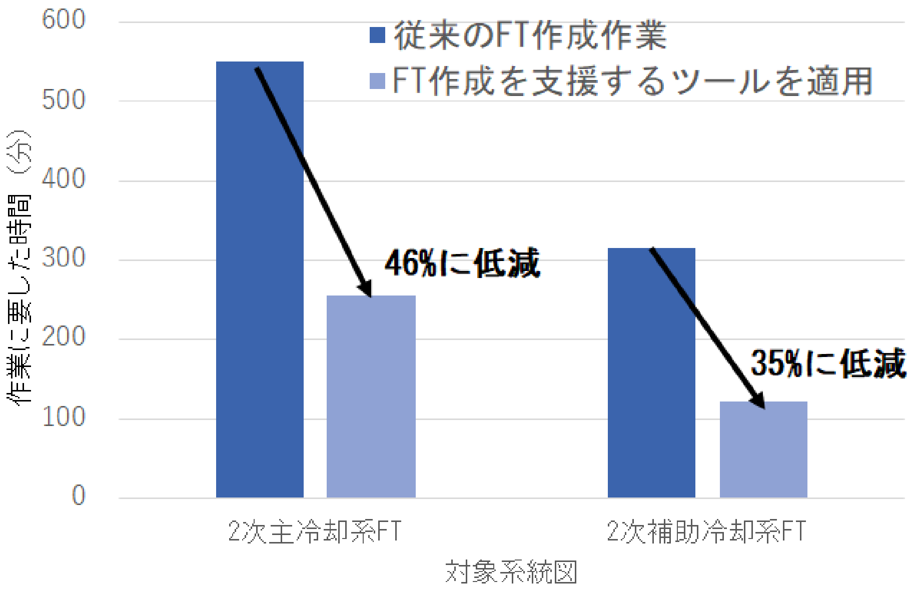
トランスファーゲートを含む故障モードレベルのFT例

研究成果＜研究項目①　FT自動作成手法の開発＞

本手法を機器レベル、故障モードレベルのFT作成に適用し、本手法を適用して得たFTと従来手法で得たFTとのPRA評価結果の比較等により、両FTが整合していることを確認。また、FT作成手順への試適用により作業時間の低減効果を把握。



機器レベルFTの作業時間の低減効果例

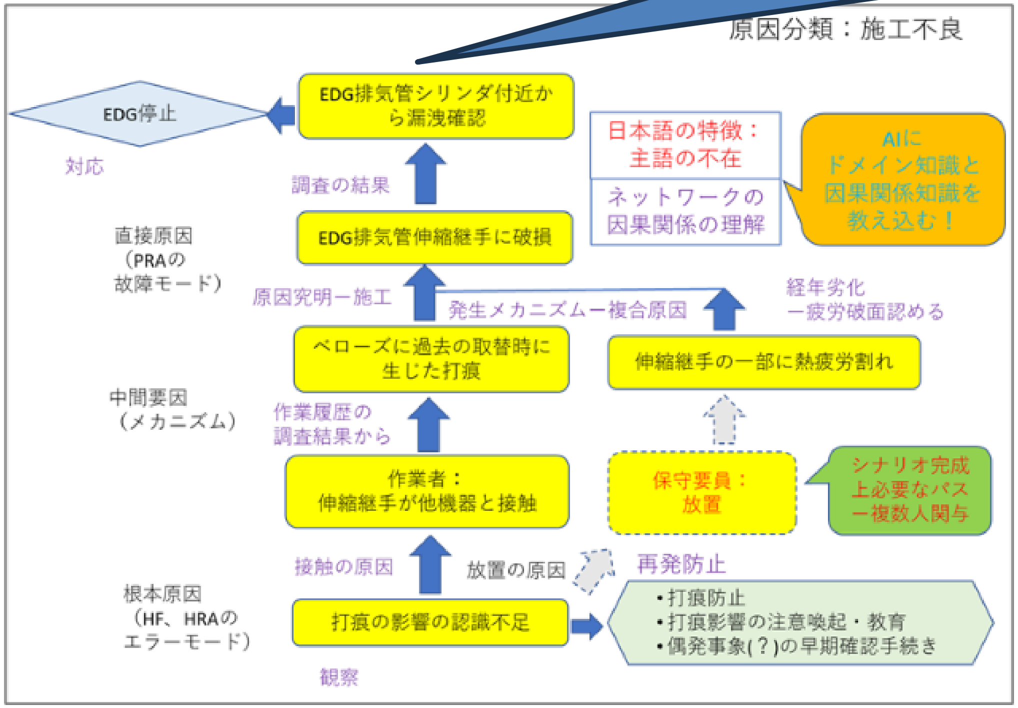


故障モードレベルFTの作業時間の低減効果例

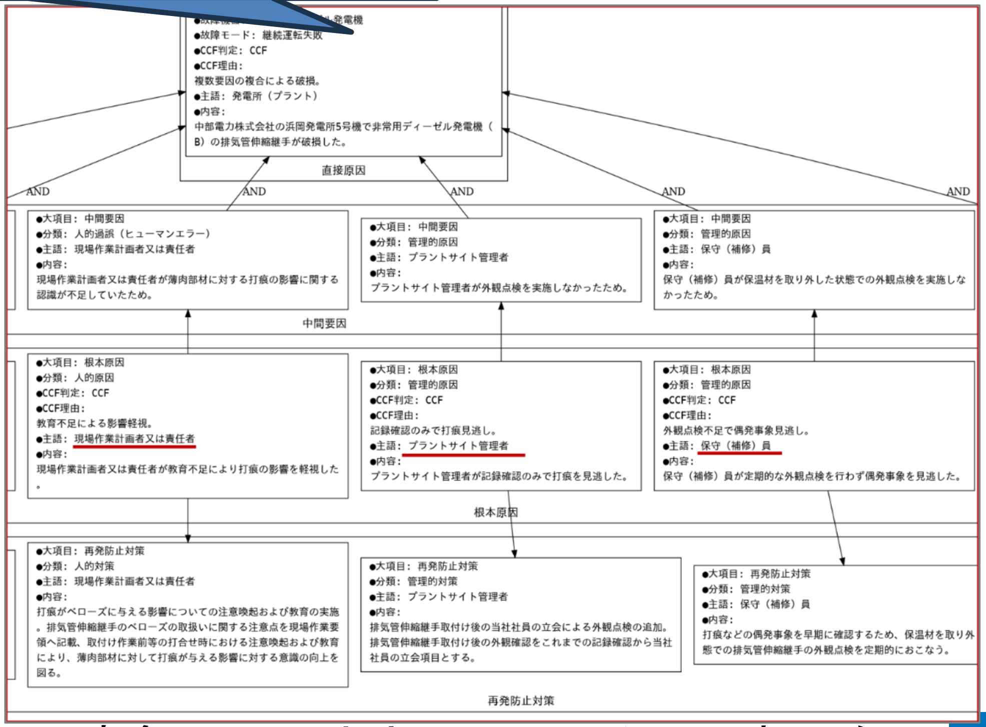
研究成果＜研究項目②　信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発＞

信頼性データベース構築のための自動故障判定手法として、段階的に課題を解決しながら整備し、ルールベース、従来の自然言語処理ベースから大規模言語モデルによるマルチエージェントシステムを用いた手法に至った。大規模言語モデルによるマルチエージェントシステムについて、タスク・ドメインオントロジーを設定したプロンプトにより、NUCIA報告書に対する時間的・空間的特徴抽出の分析(2次分析)の能力向上を実現。

信頼性データベース構築のための自動故障判定手法に関しては、従来、人(専門家)が実施していた補修情報を用いた信頼性データベース構築のための故障判定(1次分析)と時間的･空間的特徴抽出の分析(2次分析) を自動化、支援。



事象シナリオの専門家分析例



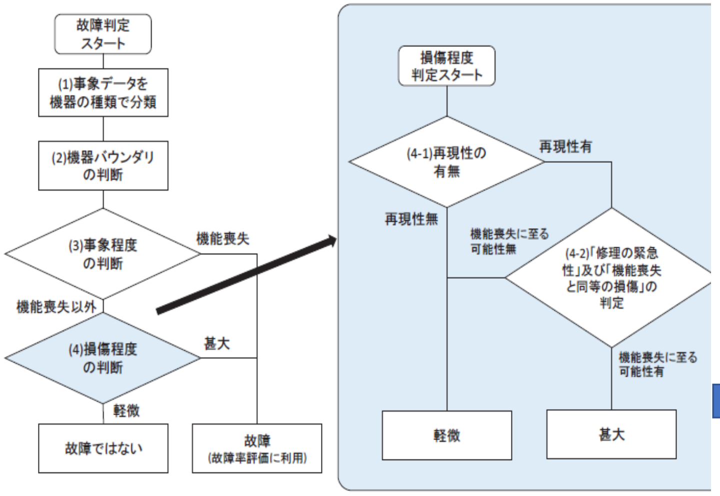
事象シナリオネットワークの可視化例

研究成果＜研究項目② 信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発＞

開発にあたっては、高速炉用のCORDS及び軽水炉用のNUCIAを対象とした。CORDSは整った現場ローデータに加え、教師データとして専門家分析データがあるが、NUCIA は整っていない現場ローデータのみであることから、それぞれデータの特徴に応じたAIツールを開発。

事象データ（修理報告書）：機器、事象タイプ・モード・原因のコードあり、事象の記述もあり

機器バウンダリの定義 （非常用ディーゼル発電機の例）
- 機器本体では、バウンダリ内に、ディーゼル機関、発電機、励磁機、その他があり、バウンダリ外にはなし
- 機器本体以外に、潤滑油系・燃料系・機器冷却水系・給排気装置・始動用空気系・計測制御装置・サポート類・母線・ケーブルとの接続がある

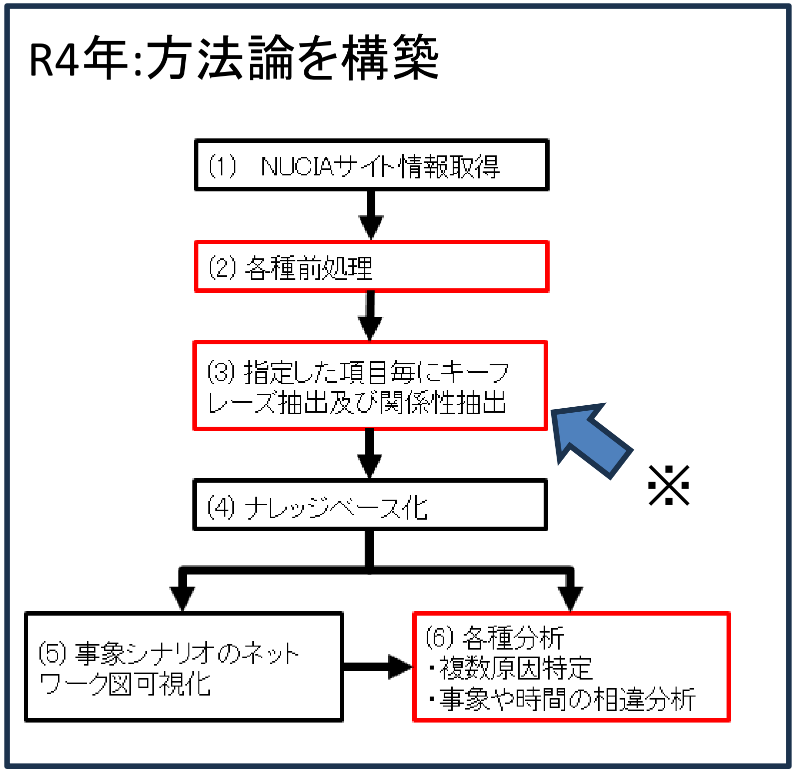


専門家による故障判定フロー

機器		故障モード
機械品（ナトリウム）	電動ポンプ(Na 用)	運転失敗
		軸固着
		クラッチ接続失敗
		ポニーモーター起動失敗
	電磁ポンプ	運転失敗
		起動失敗
		外部漏洩
		閉塞
	電動弁(Na 用)	開失敗・閉失敗
		内部漏洩
	逆止弁(Na 用)	開失敗
		閉失敗
		内部漏洩
	手動弁(Na 用)	開失敗・閉失敗
		内部漏洩
	空気作動弁(Na 用)	誤動作
		開失敗・閉失敗
		内部漏洩
	弁類(Na 用)	外部漏洩
		閉塞
	タンク類、原子炉容器、ガードベッセル	外部漏洩
		閉塞
	熱交換器(Na 用)	伝熱管漏洩
		伝熱管閉塞
	配管（＜4 inch）	外部漏洩
		閉塞
	配管（≧4 inch）	外部漏洩
		閉塞

機器ごとの故障モードの定義

CORDSにおける事象分類イメージ

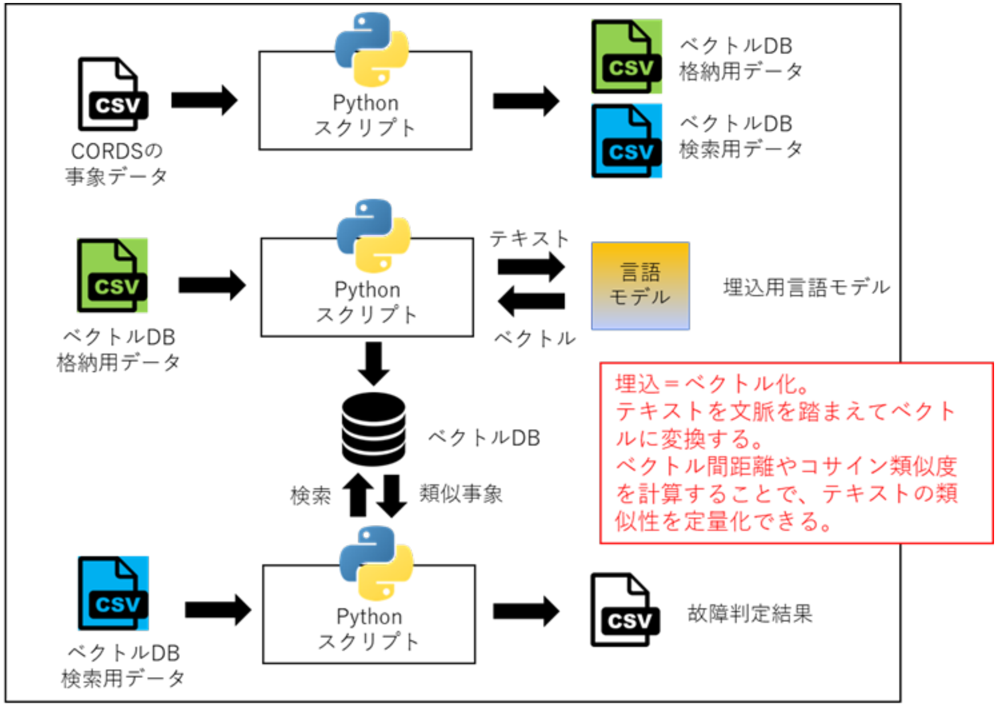


※R5～R6年分析手法の改良・高度化

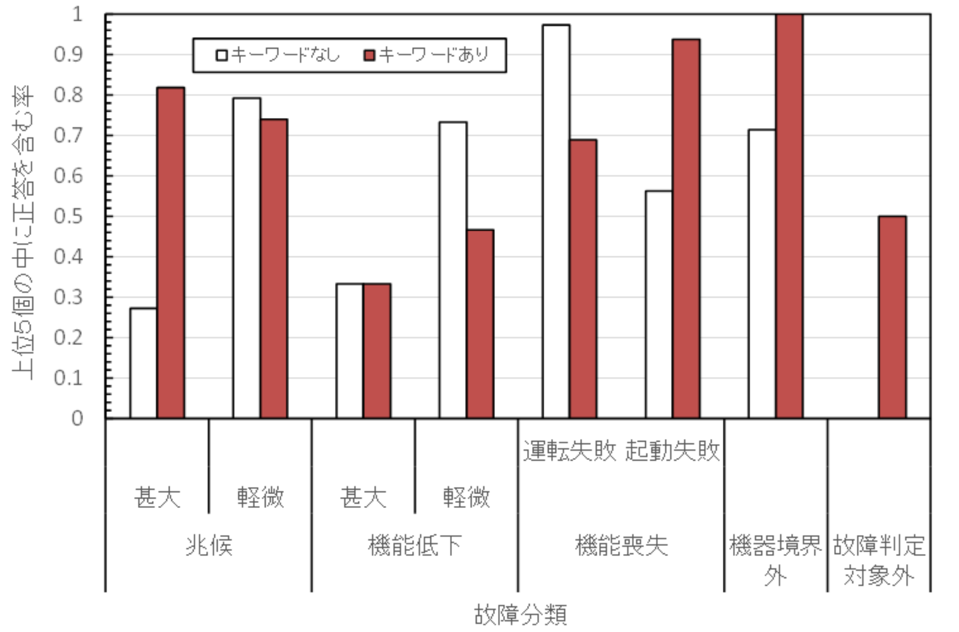
NUCIA用AIツールのイメージ

研究成果＜研究項目②　信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発＞

CORDS用AIツールについては、PRA用に整備してきた事象データベースの特徴から、高速炉の事象データの自動故障判定に特化したツールとして開発。具体的には、テキストを、文脈を踏まえてベクトルに変換し、ベクトル間距離やコサイン類似度を計算することで、テキストの類似性を定量化し、類似事象での判定結果を見て判断することによる自動故障判定手法を構築。高速炉データベースの根拠データの中から高速炉に特有でデータ数が比較的多い事象データに試適用し、その結果を人によるPRA故障判定済みデータと比較することにより妥当性を確認。



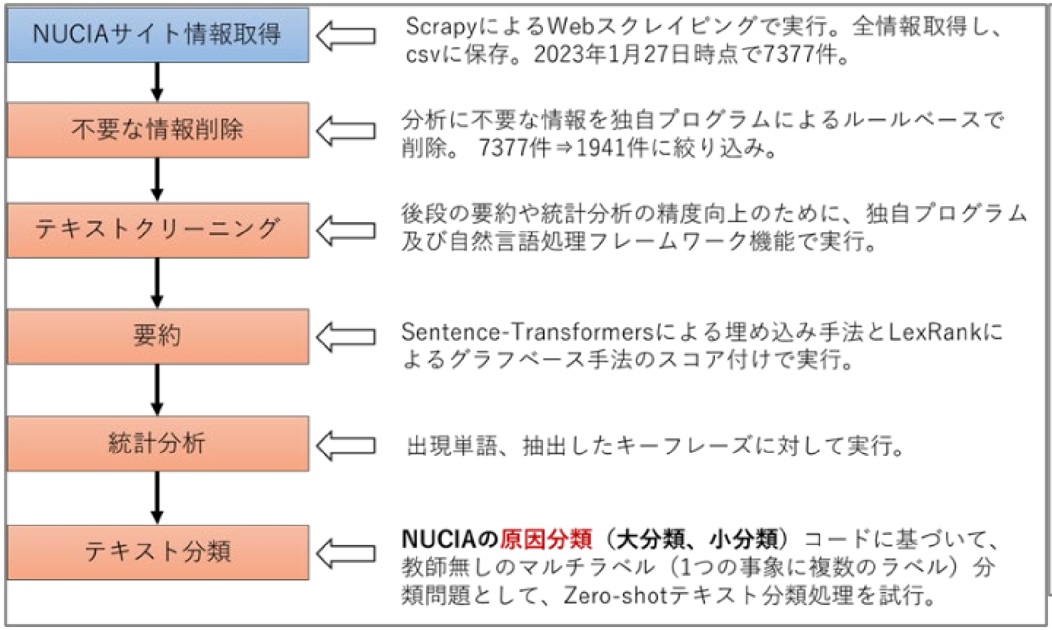
CORDS用AIツール



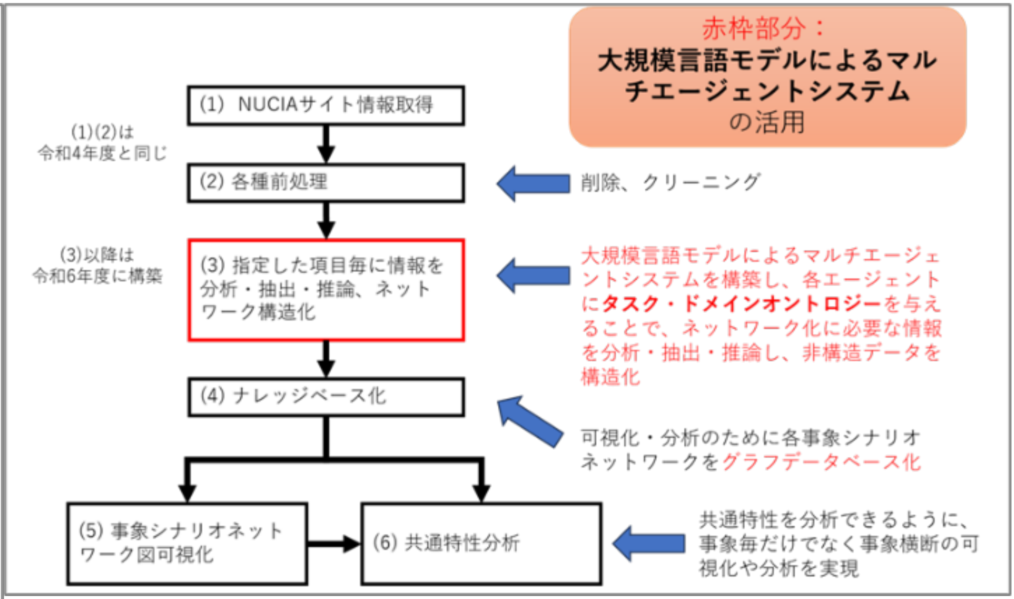
正答率の比較(上位5個で判定)

研究成果＜研究項目②　信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発＞

NUCIA用AIツールについては、汎用的な事象データベースであることから、信頼性データベース構築の効率向上（一次分析）、時間的・空間的特徴抽出の分析能力向上（二次分析）を可能とする手法として開発。開発の第1段階として、令和4年度に自然言語処理ベースの手法を試作、開発の第2段階として、令和5～6年度に大規模言語モデルによるマルチエージェントシステムを用いた手法に高度化。



自然言語処理ベースのAIツール



大規模言語モデルによるAIツール

研究成果＜研究項目②　信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発＞

自然言語処理を活用したテキストクリーニング等のAIツールについては、一般的な処理フローを採用し、ルールベースとテキストマイニングの両手法による手続きが妥当であることを専門家の事例分析により確認。

NUCIAデータの1件の記述例

通番	13525	報告書番号	2022−関西−M006 Rev.4
情報区分	保全品質情報	報告書状態	最終報告
事象発生日時	2022 年　07 月　13 日　09 時 50 分	事象発生日時(補足)	運転上の制限の逸脱を判断した日時
会社名	関西電力株式会社	発電所	高浜発電所 3 号
件名	高浜発電所3号機　原子炉水位計伝送器からの水のにじみ跡に伴う運転上の制限の逸脱		
国への法令報告根拠	なし	国際原子力事象評価尺度(INES)	評価不要

1　　発生箇所および発生時の状況

事象発生時の状況	高浜発電所3号機(加圧水型軽水炉　定格電気出力87万キロワット、定格熱出力266万キロワット)は、第25回定期検査中、原子炉格納容器内を点検していたところ、7月12日14時10分頃、原子炉水位計に信号を送る伝送器※1のフランジ部※2に水のにじみ跡を確認した。 確認時点において、当該フランジ部からの漏えいはなく、原子炉水位計の健全性に問題はないものの、原因調査を行うため、当該伝送器の点検を行うこととした。 当該伝送器の点検等に伴い、当該水位計を隔離したことで、水位計の機能が停止したことから、同日9時50分に保安規定の運転上の制限※3を満足していない状態にあると判断した。 (省略)
事象発生箇所	【設備】　原子炉冷却系統設備　【系統】　一次冷却系 【機器 1】計測装置＞レベル検出器・トランスミッタ　【部品 1】　その他(伝送器)

2　　原因

原因調査の概要	当該伝送器の点検等に伴い、当該水位計を隔離する。
事象の原因	当該伝送器フランジ部のシート面の部品を取り替え、漏えい試験等を行った結果、当該伝送器に異常がないことを確認した。
原因分類	不明＞不明
事象の種別	時間依存性のない事象(偶発事象を含む) 火災に該当しない事象

3　　再発防止対策

テキスト分類による分析結果及び既存の原因分類との一致率の評価例

全体の分類精度（値が小さいほど相対的に精度が高い）

metrics	大分類	小分類
Multilabel Ranking Loss	0.30289	0.18632

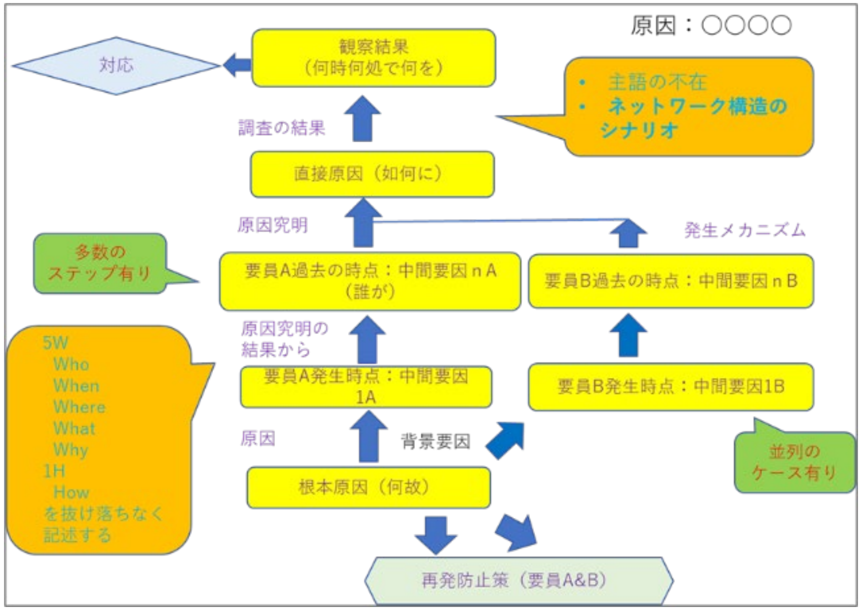
分類結果の一例：正解ラベルとして5つの原因分類が存在する場合（通番12504）
　スコアの値が大きいほど、Zero-Shot手法が該当すると判断した分類ラベル。

No.	正解ラベル（NUCIA登場順）		予測ラベル（スコア順上位5位）		専門家分析（NUCIA登場順）
	大分類	小分類	大分類	小分類	小分類
1	外部要因	風雨	外部要因：0.98485	他事故波及：0.99494	その他管理不良
2	保守・施工不良	保守不良	管理不良：0.97308	その他管理不良：0.98978	（設備管理不良） （）内は原因コードにない原因分類
3	管理不良	その他管理不良	偶発的要因：0.96327	水害：0.98019	施工不良
4	運転・操作不良	運転・操作不良	設計・製作不良：0.87077	保守不良：0.95275	（手順書不備）
5	保守・施工不良	施工不良	運転・操作不良：0.59652	施工不良：0.94825	（点検計画不備）

＊　予測ラベルの大分類と小分類は、それぞれ個別に予測した結果

研究成果＜研究項目②　信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発＞

大規模言語モデルによるAIツールについては、事象や時間の相違をAI技術により分析することにより、電力、プラント、職種の相違判断、1F事故前後の相違判断等を可能とするため、令和5年度に処理フローにタスクオントロジーを採用。さらに、令和6年度にタスク・ドメインオントロジーとマルチエージェントシステムを追加。

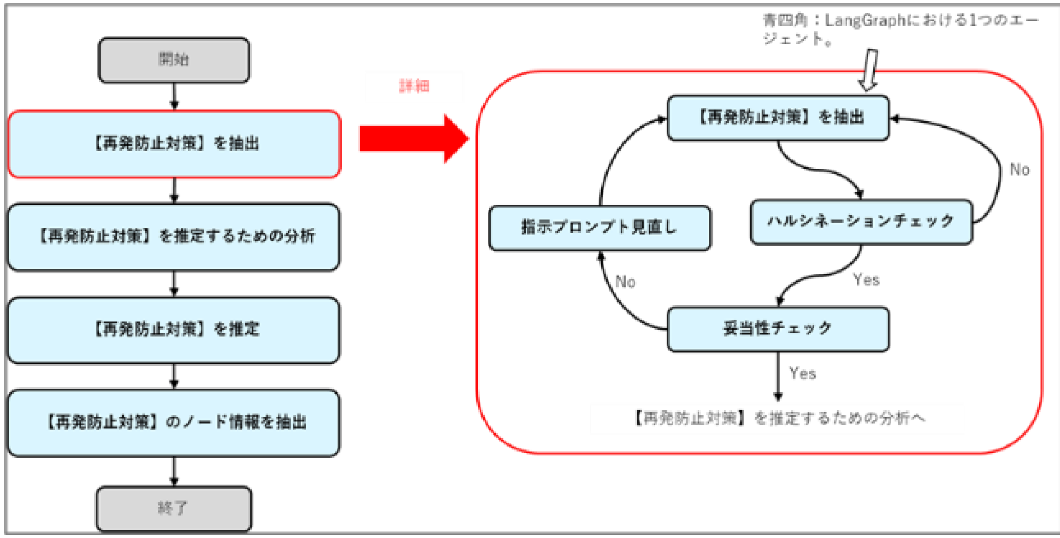


事象シナリオ分析の標準的なタスクオントロジー

原子力分野のドメインオントロジー

	担当者名称	担当内容
経営層	本店経営層	取締役会等において組織の経営戦略・将来予測を策定する
	原子力担当経営層	原子力担当の取締役で、原子力部門の経営戦略・将来予測を策定する
	プラントサイト経営層	プラント所長が、プラントの安全と経営のトレードオフ
現場管理者層	プラントサイト管理者	ユニット所長が、各ユニットの現場運用を図る
	安全・品証責任者	品証・安全部門が、プラントの安全や品質保証の活動 過去のトラブル事例分析から対策を立案し各部署に普及させる
	製造責任者	メーカーがプラントのシステムを開発・管理
	解析責任者	メーカーや電力会社による運転計画などの解析業務の管理
	中央操作室責任者	ユニット当直長（複数の当直が存在）が、中央操作室での運転の管理
	現場作業計画者-責任者	現場作業の計画作成者が現場作業を計画し責任者が現場で管理 作業前リスクマネジメントを実施する
現場担当者	運転員	中央操作室＋現場においてプラントの運転に係る作業を実施
	解析作業者	本館において解析業務実施
	保守（補修）員	プラントの現場において、機械品や電気品の保守・管理（機器の調整や補修）、機械と電気に分かれる場合もある
	現場作業員	現場監督の指示の下で現場の実作業を実施、下請け業者の場合が多い 作業前・中・後ヒューマンパフォーマンスツールの利用を図る

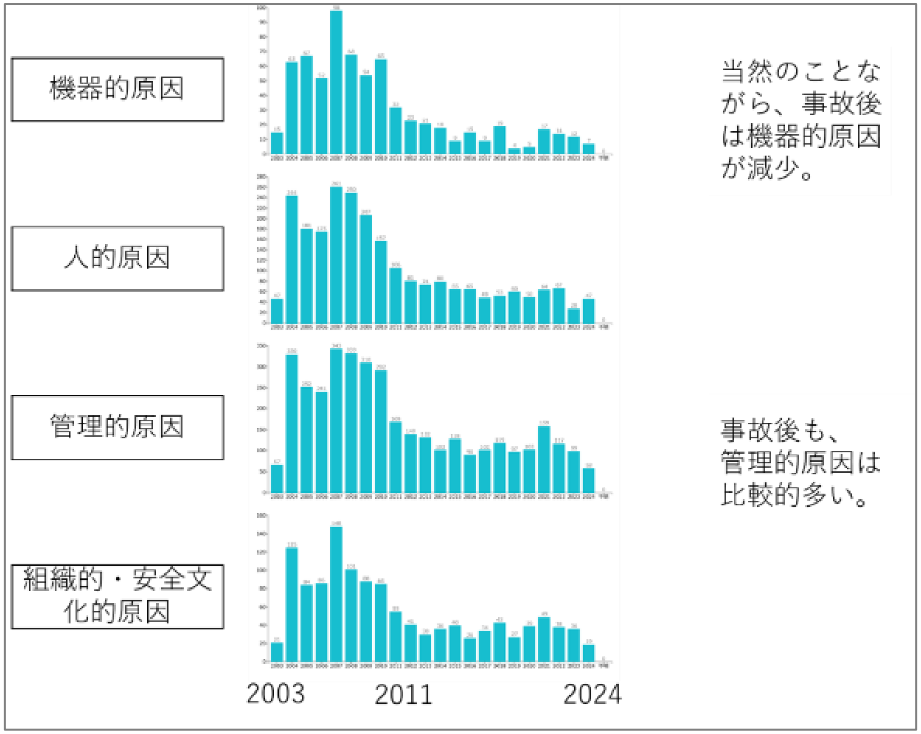
社員：現場作業員以外は基本的に電力会社の社員に属する、広い概念であるため主語（アクタ）を決める際はより詳細な職種を選ぶように
チーム：中央操作室の当直や現場作業の要員はチームと呼ばれることも多く、現場においては重要なまとまりである



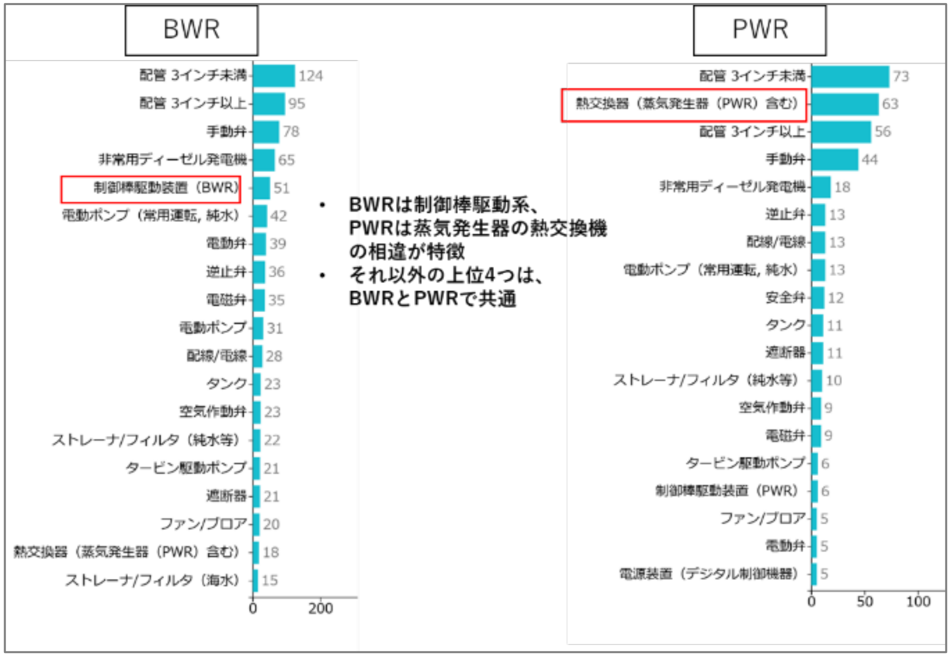
マルチエージェントシステムにおける
ハルシネーションチェックの例

研究成果＜研究項目②　信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発＞

本ツールを試適用し、事象シナリオネットワークから抽出した「直接原因」、「根本原因」に対して各種分析を実施。事象や時間の相違、電力、プラント、職種の相違、1F事故前後の相違を可視化。具体的には、事象横断の可視化・分析を可能とするためにグラフデータベースであるNeo4jをナレッジベースとして採用し、共通特性分析をグラフデータベース分析に落とし込むことを可能とした。軽水炉の事例分析により、事象シナリオの深い理解と効果的な対策立案への貢献が期待できることを確認。



時系列分析例（根本原因の分類）



頻度分析例(BWRとPWRの直接原因となった故障機器の特徴比較)

今後の課題･方向性

【FT自動作成手法】

○FT自動作成ツールによるFTモデル化に係る課題：
より複雑な関係の領域や電源系の遮断器の開閉状態等の取扱いのような故障モードの使い分け、人的過誤事象や試験アウテージ事象等の機器故障以外の事象への対応。

○CADデータとのインターフェースに係る課題：
現状は、紙ベースの図面にのみ対応しているが、CAD等の電子データとのインターフェースを整備していくことで、よりユーザー操作を必要としない自動的なFT作成の実現。

○PRA用解析コードとのインターフェースに係る課題：
SAPHIREコード以外のPRA用解析コードとのインターフェース整備。

○社会実装に向けての目指すべき姿：
ここ数年の急速なAI技術の進歩も踏まえて、あらためてPRAの各ステップに対して、デジタル化による自動化を前提としたモデル化方法を検討し、ユーザーの手作業が不要となるステップを抽出して、最大限の自動化の方策を検討することによる、さらなる省力化。

今後の課題･方向性

【信頼性データベース構築のための自動故障判定手法】

CORDS用のAIツール

○故障判定ルールの高度化：
含んではいけないキーワードの考慮、複数のキーワードを同時に含む場合の考慮等。

○教師データがなくても判定可能な方式への高度化：
故障判定ルールだけに基づいて判定する方式への改良。

○その他の課題：
記述情報以外の設計情報への拡張、文脈を読み取って判定することによる高度化等。

NUCIA用のAIツール

○AI技術・大規模言語モデルのさらなる高度化・高精度化への対応：
高精度な大規模言語モデルへの置換による、さらなる精度向上・信頼性向上。

○ベクトルデータベース等との連携：
事前に関係文書をベクトル化して保存したベクトルデータベース等との連携。

○強化学習の可能性：
教師あり学習、何らかの報酬を与えた強化学習のための教師データの用意に要する作業量の低減方策の検討。

成果の外部発表

＜論文発表＞計4件
令和6年度　計3件
令和7年度　計1件
森本　達也,氏田　博士,“AI 技術を活用した確率論的リスク評価手法の高度化研究　信頼性データベース構築のための自動故障判定手法の開発（2024年度）”，アドバンスシミュレーション 2025.7 Vol.32

＜口頭発表＞計14件
令和4年度　計1件
令和5年度　計6件
令和6年度　計5件
令和7年度　計2件（うち1件、差分情報）
Yuki KONDO, Satoshi FUTAGAMI, Kenichi KURISAKA, Hidemasa YAMANO, “Development and Evaluation of Automatic Tools of Fault Tree Creation Using Artificial Intelligence Technology with the Ability to Integrate Fault Tree Created from Multiple Design Documents to assist Probabilistic Risk Assessment Engineers” ASRAM2025, 27～29 August, 2025, (Pattaya , Thailand)
Yuki Kondo, Satoshi Futagami, Kenichi Kurisaka, Hidemasa Yamano, “Automatic Tools to assist Probabilistic Risk Assessment Engineers - Fault Tree Creation Using Artificial Intelligence Technology -“, Post SMiRT28 seminar, 1～2 December, 2025, (Abiko-shi, Chiba, Japan)（差分情報）