

令和 3 年 6 月 27 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14912

研究課題名（和文）人工知能による過酷事故対応のリアルタイム支援

研究課題名（英文）Real-time support for severe accident management using artificial intelligence

研究代表者

鈴木 正昭（Suzuki, Masaaki）

東京理科大学・理工学部経営工学科・講師

研究者番号：10431842

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、原子力発電所の過酷事故時に、プラントの機能喪失状態とその時点で活用可能な設備・要員の情報から、それ以降の最適な事故対応手順を提示できる人工知能システムを開発することを目的とした。事故シナリオを想定して検証を行い、最適な過酷事故時対応方針の策定のために重要となる情報について検討した。さらに、本研究で得られた成果の一部を、原子力発電所の保全スケジュール最適化問題へ応用し適用性を評価した。本研究の成果の応用により、原子力発電所のより合理的かつ効果的な保全の実現にも寄与することが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不完全・不確実な情報に基づき極高ストレス下で高度かつ迅速な意思決定を行うという人間にとって極めて困難なタスクを人工知能システムが支援することで、より確度の高い認知と適切な判断ができるようになり、放射性物質による人・環境への影響をより低く抑えられる事故対応の実現に貢献できる。また、様々な事故条件に対してコンピュータ上で人工知能による仮想事故対応を実験することで、事故対応に必要な資源の量や配分の合理化に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop an AI system that can derive optimal accident management procedures from information about the state of the plant and available equipment and personnel in the event of a severe accident at a nuclear power plant. We verified the system by assuming an accident scenario and discussed the critical information to formulate the optimal severe accident management policy. In addition, we applied some of the results obtained in this study to the problem of maintenance schedule optimization for nuclear power plants and evaluated their applicability. The application of the results of this research can also be expected to contribute to the realization of more rational and practical maintenance of nuclear power plants.

研究分野：計算工学

キーワード：原子力 過酷事故 事故対応 スケジュールリング 人工知能 機械学習 リスク レジリエンス

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故（福島事故）では、水位計などの誤動作やそれに起因する要員の誤判断などが原因でプラント状態を正しく認知することができず、結果として最適と言えるアクシデントマネジメントが実行されなかった。例として1号機の非常用復水器の稼働状況に対する誤認識が挙げられ、正しい認識とそれに基づく適切な判断・対応が為されていれば、炉心損傷の程度・放射性物質の漏洩量を抑えられた可能性があることが指摘されている。特に地震と津波を同時に被災するような複合災害の場合、大量・広域に渡るモニタリング情報の消失・誤表示が起り、また、要員は極めて高いストレス下におかれることになる。過酷事故対応では、極高ストレス下で不完全・不確実な情報からプラントの状態を正しく認知した上で、極めて高度かつ迅速な意思決定をすることが求められる。

福島事故以降、過酷事故に対するアクシデントマネジメント（AM）の実効性向上のための取り組みとして、事業者による可搬式設備等のハード整備や教育・訓練等のソフト整備などが、また、学会によるシビアアクシデントマネジメント標準の整備などが進められてきている。本研究では、原子力発電所で生じ得る全くの想定外事象に対して、過酷事故対応に関する意思決定を人工知能によってリアルタイムに支援するシステムの研究開発が必要であるとの着想に至った。

## 2. 研究の目的

過酷事故下のある時点での不完全・不確実なモニタリング情報から確率的に推定したプラントの機能喪失状態と、その時点で活用可能な設備・要員等の情報から、それ以降の最適なAM手順をリアルタイムで提示できる人工知能システムの開発を目的とした。また、開発した人工知能システムを平時に用い、任意のプラント状態に対して人工知能に仮想的に事故対応させることで、様々な局面に対する最適なAM手順の導出を可能にすることとした。

## 3. 研究の方法

本研究は以下の計画の下で遂行した：

- (1) 機械学習用AMデータベースの構築
- (2) 確定的なプラント状態に対する最適AM手順の導出手法の開発
- (3) 確率的に推定されるプラント状態に対する最適AM手順の導出手法の開発
- (4) 確率的に推定されるプラント状態に対する最適AM手順のリアルタイム導出手法の開発
- (5) 有効性の検証と知見の抽出

### (1) 機械学習用AMデータベースの構築

人工知能システムの教師データとするため、プラントの安全上重要な機能とそれらの状態、活用可能な設備・要員とそれらの状態、およびそのような局面で実行されるAM手順に関する情報を収集する。

### (2) 確定的なプラント状態に対する最適AM手順の導出手法の開発

機械学習手法により上記(1)で整備したAMデータベースを学習し、確定的なプラント状態に対して最適AM手順を導出する人工知能モデルを構築する。

### (3) 確率的に推定されるプラント状態に対する最適AM手順の導出手法の開発

上記(2)で構築した人工知能モデルをより現実的な問題へ拡張するため、モニタリング情報の不完全性・不確実性を考慮した最適AM手順を導出するモデルを構築する。

### (4) 確率的に推定されるプラント状態に対する最適AM手順のリアルタイム導出手法の開発

過酷事故時に実用的な時間内にリアルタイムで最適AM手順を導出するため、上記(3)までに構築した人工知能モデルを高速化する。

### (5) 有効性の検証と知見の抽出

上記(4)までに構築した人工知能システムの有効性を明らかにするために、事故シナリオを想定して検証を行う。また、リスクとレジリエンスの観点から合理的な過酷事故対応を明らかにするために、過酷事故に対するプラントのレジリエンス性の評価指標の適用性を評価する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 機械学習用 AM データベースの構築

人工知能システムの教師データとするため、電力事業者による重大事故等対策の有効性評価データなどを参考に、プラントの安全上重要な機能とそれらの状態（健全／機能喪失、機能喪失からの経過時間など）、活用可能な設備・要員とそれらの状態（使用可否、性能など）、およびそのような局面で実行される AM 手順を収集して整理した。

また、データ高品質化・データ拡張の観点から、数理計画法による教師データの算出についても検討を行った。

##### (2) 確定的なプラント状態に対する最適 AM 手順の導出手法の開発

機械学習手法により上記(1)で整備したデータベースを学習し、確定的なプラント状態に対して最適 AM 手順を導出する人工知能システムの基本モデルを構築した。一つ一つの意思決定がその後の大きなリスクの顕在化に強く寄与する過酷事故対応にあつては科学的根拠に基づく合理的な判断を下す必要があることから、なぜそのような結果が出力されるのか、といった結果の意味解釈・可読性の観点から機械学習手法の検討を行った。

また、教師データの高品質化・データ拡張の観点から、数理計画法による対応手順の算出について適用性を評価した。まず確定論に基づき、いつ、どの順序で、どの機器でどのような作業を行うかを決定するスケジューリングを数理計画問題として定式化し、手順作成を試行した。

##### (3) 確率論的に推定されるプラント状態に対する最適 AM 手順の導出手法の開発

上記(2)で構築した人工知能システムの基本モデルを拡張して、モニタリング情報の不完全性・不確実性を考慮した最適 AM 手順を導出するモデルを構築した。不完全・不確実情報から情報エントロピーに基づき確率的にプラント状態を推定し、人工知能への入力に用いた。

##### (4) 確率論的に推定されるプラント状態に対する最適 AM 手順のリアルタイム導出手法の開発

上記(3)までに構築した人工知能モデルの並列化・並列性能等を評価検討し高速化して、過酷事故時に実用的な時間内にリアルタイムで最適 AM 手順を導出するためのプロトタイプシステムを構築した。

##### (5) 有効性の検証と知見の抽出

上記(4)までに構築した人工知能システムの有効性を明らかにするために、福島事故を模擬したシナリオや原子力規制委員会新規規制標準審査ガイドに規定の事故シナリオなどを用いて検証を行った。その際、最適な AM 手順の導出をスケジューリング問題として捉えて数理計画法により定式化し、人工知能モデルとの比較評価を試行した。そして、最適な過酷事故時対応方針の策定のために重要となる情報について検討した。

また、リスクとレジリエンスの観点から合理的な過酷事故対応を明らかにするために、研究代表者が提案しているプラントのレジリエンス性の評価指標の適用性を評価した。そこでは軽水炉と高速炉に対してレジリエンス試評価を実施・比較することで、炉型の特性を反映した合理的評価など当該評価指標の有効性を明らかにした。

今後の展望として、人工知能システムをシビアアクシデントコードと連携させることが考えられる。人工知能システムより最善手として出力された AM 手順をシビアアクシデントコードに入力しプラント応答を評価することで、人工知能システムの出力の信頼性を担保することが可能となる。

さらに、本研究で得られた成果の一部を、原子力発電所の保全スケジュール最適化問題へ応用し適用性を評価した。現在、保全スケジュールの作成は人の手により行われており、点検項目の数が膨大であることに加えて各点検項目に応じた制約条件を満たさなければならないなど複雑であることから、多大な時間を要するプロセスとなっている。本研究の成果の応用により、安全性と効率の両観点から経年化管理を最適化し、原子力発電所のより合理的かつ効果的な保全の実現に寄与することも期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Mari Ito and Masaaki Suzuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Optimal Maintenance Scheduling in Nuclear Power Plants via Linear Programming Considering the Relationship between the Failure Cause and Maintenance Type	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 E-Journal of Advanced Maintenance	6. 最初と最後の頁 153--162
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Masaaki Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Power-Plant Resilience: Trial Evaluation of Response Reliability During Fast-Reactor Accident	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 Asian Conference of Management Science & Applications	6. 最初と最後の頁 109--114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -
1. 著者名 Mari Ito and Masaaki Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 A Mathematical Programing Model for Maintenance Scheduling Problem in Nuclear Power Plant	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 4th International Conference on Maintenance Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -
1. 著者名 Masaaki Suzuki, Kazuyuki Demachi, Shigeru Takaya and Yoshitaka Chikazawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation Method of Response Reliability During an Accident and its Applicability to Fast Reactor Plants	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 26th International Conference on Nuclear Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/ICONE26-82567	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 -

1. 著者名 Masaaki Suzuki, Kazuyuki Demachi, Hiroshi Miyano, Takao Nakamura, Masayuki Kamaya, Shigeki Arai, Atsunori Yamaguchi, Tatsuya Itoi, Kenta Murakami, Naoto Kasahara and Masaaki Matsumoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Development of Resilience Evaluation Method for Nuclear Power Plants (Part 3: Study of Evaluation Method and Applicability of Resilience Index)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 E-Journal of Advanced Maintenance	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Suzuki, Kazuyuki Demachi, Shigeru Takaya, Yoshitaka Chikazawa	4. 巻 7
2. 論文標題 Comparative evaluation of response reliability during accidents in light water reactors and fast reactors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 19-00570
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mari Ito, Masaaki Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Cost-optimal Scheduling of Nuclear Power Plant Maintenance Subject to Reliability Constraint	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 3rd IEEE/IIAI International Congress on Applied Information Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Masaaki Suzuki, Mari Ito, Ryuta Hashidate, Keita Takahashi, Hiroki Yada, Shigeru Takaya	4. 巻 -
2. 論文標題 Fundamental Study on Scheduling of Inspection Process for Fast Reactor Plants	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 9th International Congress on Advanced Applied Informatics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 鈴木正昭、伊藤真理、橋立竜太、高橋慧多、矢田浩基、高屋茂
2. 発表標題 高速炉の最適点検工程スケジューリングに関する基礎的検討
3. 学会等名 日本保全学会第16回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Suzuki
2. 発表標題 Evaluating Response Reliability of Power Plant During Severe Accident
3. 学会等名 19th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木正昭
2. 発表標題 故障原因と保全活動の関係性を考慮した保全活動スケジューリング
3. 学会等名 日本保全学会第15回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木正昭、出町和之、高屋茂、近澤佳隆
2. 発表標題 レジリエンス評価法の高速炉への適用性に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本保全学会第14回学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaaki Suzuki, Mari Ito, Ryuta Hashidate, Keita Takahashi, Hiroki Yada, Shigeru Takaya
2. 発表標題 Optimal Scheduling of Inspection Process for Fast Reactor via Integer Programming
3. 学会等名 ASME's Nuclear Engineering Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020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

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