

( 続紙 1 )

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                   |    |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----|-------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 博士（エネルギー科学）                                       | 氏名 | 新聞 大輔 |
| 論文題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 原子力発電所の運転・保全作業従事者への放射線情報の提示による<br>職業被ばく低減方法に関する研究 |    |       |
| (論文内容の要旨)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |    |       |
| <p>エネルギーの S+3E(Safety, Energy security, Economic efficiency, Environment)を達成するために、原子力発電は今後も必要になると考えられるが、2011 年に発生した福島第一原子力発電所の事故後、10 年以上に渡る運転停止の間に保全知識を備えた熟練者は退職し、若年層は稼働中のプラントの保全経験がない状況である。本研究では、このような状況下でも安全に保全作業を遂行するため、職業被ばくの一層の低減を達成するアプローチとしてデータドリブンの考えを適用している。具体的には、原子力発電所内の被ばく線量率分布データを取得する方法と、保全作業従事者の自発的な被ばく回避行動を促すために適切なインタフェースを使って線量強度に関する情報を提示する方法について研究しており、本論文は5章で構成されている。</p> <p>第1章は序論で、日本のエネルギー事情と原子力発電に関する近年の動向について述べた後、原子力発電所での保全作業における課題について述べている。特に放射線被ばくのさらなる低減に対して、現在の原子力発電所で取り組まれている ALARA(As Low As Reasonably Achievable)活動の具体例を挙げながら、保全作業従事者の経験に依存している被ばく低減を、人材不足などの状況下でも安定して達成させることを課題として提起している。これに対して、データドリブンで解決するアプローチを提案するとともに、本論文における研究の目的と本論文の構成について概説している。</p> <p>第2章では、原子力発電所の保全作業従事者の職業被ばくを低減するための前提となる、被ばく線量率分布情報を取得する方法を検討している。従来のように放射線管理者がサーベイメータで測定する手段ではなく、保全作業従事者が装着する位置計測デバイスと無線通信モジュール付き電子式個人被ばく線量計を使って場所ごとの放射線強度に関するデータを収集し、処理・分析することで保全現場の被ばく線量率分布を取得する。提案手法の実現可能性を確認するために、無線通信モジュール付き電子式個人被ばく線量計、位置計測デバイス、およびサーバから構成される線量計測システムを構築し、実際に放射線源を設置した放射線管理区域内で各種データを収集し、1m の分解能での被ばく線量率分布を生成した。この評価結果から、原子力発電所の保全現場を想定した状況で計測精度を推定した結果、被ばく線量率分布の誤差は 3%程度であり、提案手法は被ばく回避のために提示する被ばく線量率分布として十分な計測精度であることを確認した。</p> <p>第3章では、第2章で収集した被ばく線量率分布情報を、聴覚インタフェースにより保全</p> |                                                   |    |       |

作業従事者に提供する方法を検討した。この方法は、保全作業従事者が聴覚インタフェースを装着し、インタフェースから提示されるアラーム音を頼りに自分がいる場所付近の放射線強度を把握するものである。この聴覚インタフェースの有効性を検証するために、PCに構築した仮想空間での放射線場において、保全作業を模擬した計算タスクを実施した際の被ばく線量から評価する環境を考案し、被ばく低減に有効なアラーム音の形態を探る実験を実施した。アラーム音の形態の候補として、放射線強度に応じてアラームの音量を変更するアラーム振幅変更方式、アラームの間隔を変更するアラーム間隔変更方式、アラームの音の高さを変えるアラーム周波数変更方式の3種類を選定し、この3条件にアラームを提示しない場合を加えた4条件で24名が参加する被験者実験により被ばく線量低減効果を比較した。その結果、移動時間と作業時間の比率が1:50の、比較的移動時間よりも作業時間が長い場合を想定したケースにおいて、アラーム振幅変更方式およびアラーム周波数変更方式で有意な被ばく線量低減効果( $p<0.05$ )があることが示された。逆に、比較的移動時間が長い作業の場合には、放射線強度が低い場所を探すために時間をかけすぎてしまい、かえって放射線場の滞在時間が長くなり、それに伴って被ばく線量が増える傾向があることも確認された。

第4章では、第3章で示された聴覚インタフェースの欠点である保全現場での保全作業従事者同士の音声コミュニケーションの阻害を解決するために、触覚に振動を提示するインタフェースで放射線強度を提示する方法を検討し、聴覚インタフェースの時と同様に、PCで構築した仮想空間を用いて被験者実験を実施した。実験参加者は提示される振動を頼りに高放射線領域を避けながら移動と保全作業を模擬した計算タスクを実施した。振動の形態は、振動の大きさを変化させる振動振幅変更方式と、振動のオン/オフの間隔を変える振動間隔変更方式を候補とした。24名が参加する被験者実験により評価した結果、移動時間と作業時間の比率が1:10、1:50の場合に、振動振幅変更方式と振動間隔変更方式は振動なしの条件に比べて有意な被ばく線量低減効果( $p<0.01$ )があることが示され、振動提示インタフェースが有効であることが確認された。また、聴覚インタフェースの時と同様に、比較的移動時間が長い作業の場合に放射線強度の情報を提示すると、提示しない場合に比べて被ばく線量が増える可能性があることが分かった。

第5章は結論で、第2章から第4章で述べた内容をまとめ、それに基づいて本論文で提案したデータドリブンのコンセプトの有効性を述べ、さらに検討の過程で得られた複数の知見について言及している。また、聴覚インタフェースと触覚インタフェースの比較についても考察している。さらに、これらの成果を実際の発電所に適用する際の今後の課題と展望を3S (Safety, Security, Safeguards)の観点から考察しており、特に核防護の観点から Safety と Security の両立の課題を解決することが今後の研究として必要であり、原子力発電が国民に信頼され、受け入れられる電源となっていくために重要であることが述べられている。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

原子力発電はエネルギーの安定供給を実現するための重要な電源であり、その持続可能性を高めるためにもさらなる安全性や効率の向上が求められている。本研究では、データを収集し、それに基づいて施策を講じて様々な指標を改善していく手法である「データドリブン」を基本コンセプトに掲げ、原子力発電所の保全作業での職業被ばくのさらなる低減を課題として研究を実施した。具体的には、詳細な被ばく線量率分布を計測する手法と、計測された線量率分布情報を保全作業員へ提示する手法について、その有効性を評価した。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 原子力発電所内の被ばく線量率分布を計測して可視化する手法を提案した。  
位置と線量を同時に計測するシステムを構築し、実際に放射線源が存在する実験室において線量データを収集し、データ処理により被ばく線量率分布を算出する実験を実施した。その計測結果を線量分布シミュレーションと比較したところ、保全作業に適用可能な計測精度であることが分かった。
2. 保全作業員が装着する聴覚インタフェースを使って 1. で計測した被ばく線量率分布情報をアラーム音として提示することで被ばく回避行動を促す方法を提案した。また、その有効性を評価するため 24 人の実験参加者に線量率分布がある仮想空間で移動と作業を実施してもらい、聴覚インタフェースの有無による被ばく線量の違いを計測した。その結果、特に移動が少なく作業時間が長い場合に、有意な被ばく線量低減効果があることが示された。
3. 2. で検討した聴覚インタフェースにおいて生じる、アラーム音による保全現場の音声情報のマスキングに伴う作業への支障の課題を解決するため、手首への振動インタフェースによる放射線情報の提示手法を提案した。2. と同様の実験方法により有効性を評価した結果、作業時間が長い場合に被ばく線量低減効果があるが、短い場合にはかえって被ばく線量が増える可能性についても示された。

以上、本研究では、被ばく線量率分布データの収集と、それを保全作業員にリアルタイムに提示することが被ばく線量低減に資することを示しており、得られた成果は原子力発電所での運転・保全作業遂行の安全性向上に貢献するものである。また、データに基づいて合理的に発電所を運営するデジタルトランスフォーメーションの実現への展開も期待でき、学術上及び實際上、資するところが少なくない。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 11 月 27 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：            年    月    日以降