

# 感覚刺激を利用した原子力プラント作業者の 放射線被ばく低減支援に関する研究

新聞 大輔<sup>\*1</sup> 薛 丁銘<sup>\*1</sup> 原園 友規<sup>\*1</sup> 石井 裕剛<sup>\*1</sup> 下田 宏<sup>\*1</sup>

## Radiation Dose Reduction Support Method for Nuclear Power Plant Workers using Sensory Stimulations

Daisuke Shinma<sup>\*1</sup>, Xue Dingming<sup>\*1</sup>, Yuki Harazono<sup>\*1</sup>, Hirotake Ishii<sup>\*1</sup> and Hiroshi Shimoda<sup>\*1</sup>

**Abstract** - For the purpose of reducing the radiation exposure of workers for maintenance work in nuclear power plants, we are conducting research on interfaces that conduce exposure avoidance behavior. To evaluate and select the optimal sensation from the visual, auditory, and tactile senses and so on, and confirm the effects of exposure reduction in an actual plant environment, we are planning the appropriate method. In this presentation, we will also present the concrete method of preliminary evaluation experiments using VR.

**Keywords:** nuclear power plants, sensation, , VR and alarm

### 1. はじめに

原子力発電プラントでは、プラントを安全に運転するために日々、保全作業が実施されている。日本における職業被ばく線量は2010年の段階で沸騰水型炉で1.23人・Sv/基で米国並みから諸外国の2倍程度であり、加圧水型炉は1.51人・Sv/基と米国や諸外国の2倍以上となっている<sup>[1]</sup>。このように諸外国に比べて被ばく線量が多い理由はいくつか想定できるが、そのうちの一つは日本の保全物量が多いからであると考えられる。この点については保全物量を最適化する取り組みが今後進められていくと予想するが、一方で、2020年から施行された新検査制度<sup>[2]</sup>では、原子力発電事業者の一義的な責任の下で安全なプラントの実現を目指すことが示され、その中には従業員の被ばく低減も盛り込まれている。そのため今後は、職業被ばくの低減に対する継続的で実効的な活動による改善がより一層求められていくようになると考える。

現在の原子力発電プラントの現場での被ばく管理は主に電子式ポケット線量計を用いている。この線量計は所定の被ばく線量に接近した場合や、急激に被ばく線量が増大した場合に警告音を出して作業者に情報提供するものであり、その時の被ばく線量は数値で表示されるため目視確認すれば自身の現在の被ばく線量を把握することができる。被ばく線量低減は保全作業従事者(以下、作業員)が作業中に継続的な被ばく回避行動をとることによって実現できると考えている。よって現在と異なる手法でより適切に作業員に被ばく線量の情報を提供できれば、さらに改善できる可能性がある。

被ばく低減の難しさとして考えられる事柄の一つとし

て放射線がその場で身体に感じるできない点がある。例えば赤外線のような光線は放射線と同様に目で見ることができないが、それを熱さとして感じるができるため、回避行動をとることができる。このような例から放射線被ばくを低減させるためには、あたかも作業者が放射線を感じて自発的にそれを回避する行動をとることができるようになることが望ましい。

そこで本研究はインタフェースによる感覚刺激を利用して放射線情報を提供し、これによって被ばく低減に資する回避行動を促進できる手法を提案することを目的とする。なお本発表では、研究全体の構想とVR(Virtual Reality)を用いた事前実験の計画について報告する。

### 2. 研究構想

#### 2.1 検証対象とする感覚の絞り込みと前提条件

ヒトには、視覚、聴覚など複数の感覚がある。一般的に分類されている感覚種別を表1に示す。これらの感覚について、最適なインタフェースを実現するためには理想的にはすべてに対して評価すべきであるが、次に示す観点、または前提の下で予め検証対象を限定できると考える。まず、本研究は最終的に原子力発電プラントに適用することを想定している。そのため現在の技術で比較的容易に実装できる手段に限定した。この際、明確な判断基準を設けることは難しいが、例えばすべての作業員に実装するにはコストがかかりすぎるもの、人体に危険や苦痛が及ぶもの、放射線管理区域での取り扱いが現実的ではないもの、感覚の制御に困難が伴うものは除外することとした。

上記の観点をまとめて原発での実用性と表記し、それ

\*1: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

\*1: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

らで絞り込んだ結果を同じく表 1 に示す。この結果、視覚、聴覚、触覚、圧覚、温度覚、振動覚の 6 種類を予備的な絞り込み結果とした。これ以外の例えば嗅覚については、においを発生させたり停止させたりする機構が実現できても、におい成分が滞留するという理由で感覚器への刺激を即座に停止することは困難な場合があるため制御性の点で問題があると考えた。また味覚については放射線管理区域において放射性物質の経口取り込みの恐れがあるインタフェースは適切でないと判断した。上記以外についても苦痛を伴うものは労働環境として適切ではなく、深部圧覚などデバイスの実現が困難なものについても候補から除外した。

表 1 感覚の分類と絞り込み結果

Table 1 Candidate sensation and narrow down results

感覚 (大分類)	感覚 (中分類)	感覚 (小分類)	原発での 実用性
特殊 感覚		嗅覚	× (制御困難)
		視覚	○
		聴覚	○
		平衡覚	×(実現性)
		味覚	× (実現性、 放射線管理 区域での 安全性)
体性 感覚	表在感覚	触覚	○
		圧覚	○
		温度覚	○
	深部・ 固有感覚	痛覚	×(苦痛)
		位置覚	×(実現性)
		振動覚	○
		深部圧覚	×(実現性)
内臓 感覚	臓器感覚	深部痛覚	× (実現性、 苦痛)
		内臓痛覚	× (実現性、 苦痛)

## 2.2 提供する放射線情報の検討

作業者に放射線を回避する行動を促すために提供可能な放射線情報には 3 種類ある。①作業者の位置における放射線強度の情報、②作業者の位置における放射線の勾配に関する情報、すなわち線源がある方向の情報、そして、③作業者の周りの放射線分布の情報である。それぞれの情報を提供するために必要な情報と利用可能な感覚刺激の種類、およびその実現手段について表 2 にまとめ

た。①については自位置の情報さえわかれば提供可能であり、実現性が高く、また複数の感覚刺激を利用可能である。②については利用できる感覚刺激の種類は①と同じであるが、作業者の位置だけでなく向きの情報も取得する必要がある。向きの情報については代表的なデバイスとしてジャイロセンサがあるが、特に実際の原子力発電プラントの作業では複雑な動きをするため誤差が蓄積して大きくなり、実現には一定の困難が伴うと考えた。また③については、利用できる感覚刺激が視覚情報に限られる。

これら①②③のいずれの情報も最も有効であるかを検証することは興味深い。本研究においてはプラントでの実装の容易さを重視した。そのため①の自位置の放射線強度を提供情報とする方式に注目する。また、利用できる感覚は視覚、聴覚、触覚、圧覚、温度覚、振動覚であり、これらを評価対象の候補とする。

表 2 提供可能な放射線情報と利用できる感覚刺激

No.	提供情報	提供に 必要な 情報	利用できる 感覚	実現の方法
①	自位置の 放射線強度	自位置	視覚、 聴覚、 触覚、 圧覚、 温度覚、 振動覚	刺激の強度 の変化等
②	自位置での 放射線強度 の勾配 (線源方向)	自位置 と向き	視覚、 聴覚、 触覚、 圧覚、 温度覚、 振動覚	刺激の部位 の変化
③	周辺の 放射線分布	自位置 と向き	視覚	分布の グラフィカル 表示

## 2.3 放射線情報の提供方法

表 2 に示した放射線情報について、放射線の強度を数値で知らせる手段が考えられるが、このような言語情報は直感的ではないため本来の保全作業のタスクの障害になる可能性があると考え、本研究では非言語情報で統一することとした。ただし、言語情報を用いることでより被ばく回避を促進できる可能性もあるためこの点については今後の研究課題であるとする。

## 2.4 放射線情報への傾注状態の分類

原子力発電プラントでは、保全作業など何らかの理由によって必ずしも放射線に意識を向けていない状況がある。この場合でも感覚刺激を提供するインタフェースによって無意識に被ばく回避行動をとることができること

が理想であるが、それには習熟や経験が必要である。そのため本研究では、意識を放射線に向けるように仕向けることができる手段を検討の対象とする。ただしその際に、プラントで本来実施しなければならない作業を妨害しないことが必要である。例えば、インタフェースに強制的に意識を向けるためには強い感覚刺激を与えればよいが、その場合、保全作業の遂行に影響を与える可能性があるため、必ずしも適切なインタフェースではないと判断できる。

### 2.5 評価方法

実験では仮想的な分布を持った放射線場を想定し、その中で保全作業に相当する作業を実施する。その際、インタフェースから与えられる情報を参考にしながら被ばく回避行動をとる。作業完了後の合計の被ばく線量を評価指標とする。作業完了に要した時間については本来の保全作業への影響を確認するために用いる参考指標とした。

## 3. 感覚刺激による情報提示内容及び方法

### 3.1 聴覚

上記 6 種類の各感覚について今後その提供内容及び方法を詳細に検討していくが、まずは聴覚に関する検討から開始したのでその内容について述べる。

聴覚を利用した放射線状況提供手段としてアラーム音を用いる。その位置における放射線強度の情報は、アラーム音の大きさの違いで提供する。すなわち、放射線強度の高い位置ではアラーム音の音量を大きくし、低いエリアでは小さくする。他の手段、例えばピッチなども手段として考えられるが、音量はより直感的であると考えた。用意するアラームパターンについては以下に示す検討によって決定した。

アラームに用いる音響信号は、(1)式に示すように振幅、周波数、位相の要素で説明できる。

$$s(t) = A_1(t) \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) + A_2(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) + \dots \quad (1)$$

ここで、s:音響信号、t:時刻、A:振幅、f:周波数、 $\phi$ :位相である。これらの組み合わせは無限に存在する。そこで代表的なアラーム音を決めることで評価対象を削減する方針を取った。具体的には音響信号に関する ISO を参考にして選定した。ISO7731<sup>[3]</sup>では危険状態を音響的に知らせる方法、ISO24500<sup>[4]</sup>はコンシューマ製品の警報音に関する標準が示されている。これらを参照してアラーム音を決定した。

#### (i)周波数

ISO 標準によれば、アラーム音は単音またはハーモニクス、すなわち異なる 2 つ以上の周波数成分の合成とすべきであることが記されている。またその周波数は、500Hz から 1500Hz の範囲が望ましいと示されている。そ

こで、1200Hz の単音と、1000Hz と 1200Hz のハーモニクスの 2 種類について評価することとした。

#### (ii)振幅(レベル)

危険報知音に関しては環境雑音より 15dB 高くすることと示されている。しかし結論として実験においては環境雑音レベルとアラーム信号レベルを同一にした。原子力発電プラントでは、比較的環境雑音レベルが高い場合が多く、それよりも 15dB 高いレベルを設定すると、非常に大きな音となる。実際の現場に適用した際にこのような大きな音を作業者に聞かせるのは安全上の観点で懸念があるため、今回の実験では暫定的に同一レベルに設定して実施する。もしこの状態でも十分に放射線分布を把握でき、被ばく回避行動の促進に寄与することが確認できれば、さらに小さなレベルについても今後効果を検証していくことができる。なお、音響信号は A 特性で測定可能な騒音計を用いて同一レベルとなるように振幅を設定した。

#### (iii)振幅(時間パターン)

注意喚起用の信号として ON/OFF の振幅パターンは Strong Caution と Weak Caution に分類されている。Strong Caution と Weak Caution の違いを図 1 に示す。

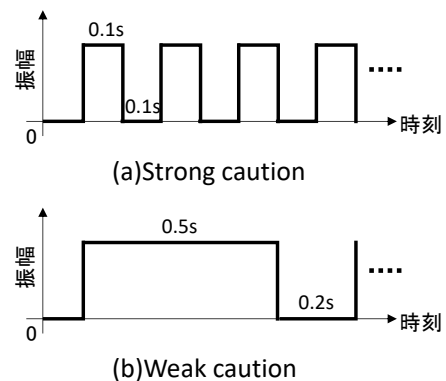


図 1 アラームの時間パターン<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Time pattern of alarm<sup>[4]</sup>

Strong Caution は放射線強度に対する情報を確実に提供できる可能性があるが、一方でメインタスクに悪影響を与える可能性がある。Weak Caution はそれとは逆の特徴があると考えられ、このようにそれぞれに利点と欠点があると予想したためこれらの両方について検証していく必要があると判断した。

以上についてまとめると、周波数について 2 種類、振幅の時間パターンについて 2 種類となり、これらを組み合わせた 4 種類のパターンを対象とする。一覧を表 3 にまとめた。

表 3 アラームパターン

Table 3 Alarm patterns

パターン	周波数	振幅時間パターン
1	1200Hz	Strong caution
2	1200Hz	Weak caution
3	1000Hz+1200Hz	Strong caution
4	1000Hz+1200Hz	Weak caution

#### 4. インタフェースの評価プロセス

2.2 節の検討から、対象とする感覚は 6 種類であり、最終的にはこの中から原子力発電プラントにおいて最も適切な感覚を決定することを目標とするが、検討対象が多いことから予備実験と実環境実験の 2 段階の絞り込みプロセスを適用する。実環境実験については、実際の原子力発電プラントまたはそれに相当する環境にて実施して最も結果が良いインタフェースを決定するものであり、詳細については今後検討していく。以下では予備実験の実施方法についての検討内容を示す。

#### 5. 予備実験

##### 5.1 概要

予備実験はインタフェース(感覚刺激提供手段)の候補の中から可能性がありそうな手段を比較的簡便な方法で実施して候補を絞り込む、いわばスクリーニングの実験である。具体的には、それぞれの感覚刺激を発生することができるデバイスを製作し、極力原子力発電プラントの環境を模擬した実験室において評価実験を実施する。実験では、実験参加者の位置をリアルタイムで測定し、模擬的に設定した放射線分布の強度に対応した感覚刺激を与えることができるインタフェースを構築する。これらの実験を通じてすでに示した評価方法に従って評価して、その結果が優れた複数の手段に対して実環境実験を実施する。

##### 5.2 プラント環境模擬方法

###### 5.2.1 保全作業の模擬

先述のように実際の原子力発電プラントでは保全作業を実施しながら放射線被ばくを回避するため、いわゆる二重課題となる。この状態を模擬するため、予め定めた領域において保全作業に見立てたタスクを実施する。保全作業では、常に作業手順や作業内容に思考リソースを使っているため、この状態を模擬し、被ばく回避のサブタスクへの継続的な意識の集中を低減させることができればよい。この観点で考えると実際の保全作業を完全に模擬する必要はなく、単純な計算をするタスク(計算タスク)でも良いと判断した。

保全作業はある領域を動き回ることが多いため、1 か所にとどまり続けて計算タスクを実施することがないような工夫を取り入れる必要がある。これを実現するために領域内の複数個所に計算タスクを獲得する場所(以下、

セクタと呼ぶ)を設けることにした。すべてのタスクを完了させるには何回かセクタに移動して計算タスクを獲得する必要がある。このようにすることで領域内を動き回らせるようにした。

###### 5.2.2 放射線環境の模擬

原子力発電プラントでの放射線環境は現場によって異なるが、比較的放射線の強度が高い場所では分布が様ではない場合が多い。そこで、領域内に放射線源が存在し、それによって形成される放射線場によって一様でない分布がある状態を模擬する。

実験に適用する放射線分布の一例を図 2 に示す。図 2 は上視図であり、白く示された部分は放射線強度が高く、黒い部分は低いことを示している。この図では放射線源は 2 か所に存在している。なお分布は PHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)<sup>[5]</sup>と呼ばれる、放射線源からの放射線の強度分布をシミュレーションできる解析コードを用いて作成した。実際の原子力プラントでは放射線分布は 3 次元となるが、実験では被ばく回避行動が促進できるか否かが評価できればよいため高さ方向は考慮しなくても問題なく、すなわち 2 次元分布で評価すればよいと判断した。実験では放射線分布を複数パターン用意しておき、実験を繰り返すたびにランダムで選択されるようにして、放射線分布に依存した因子を低減するようにする。



図 2 予備実験空間の放射線分布の例

Fig. 2 Radiation distribution for preliminary tests

##### 5.3 実験プロトコル

実験プロトコルを図 3 に示す。仮に聴覚インタフェースの試験を想定した場合、先述のようにアラームパターンは 4 種類としたため、4 条件をベースにした実験プロトコルとなる。この実験プロトコルは 1 条件に対して 3 セットで構成されている。セットごとに異なる放射線分布を適用する。3 セット実施することで、放射線分布の違いによる影響を低減させることを狙う。計算タスクは足し算の暗算とし、40 問実施するとタスク完了とする。なお、

1つのセクタでは5問計算問題を獲得できる。

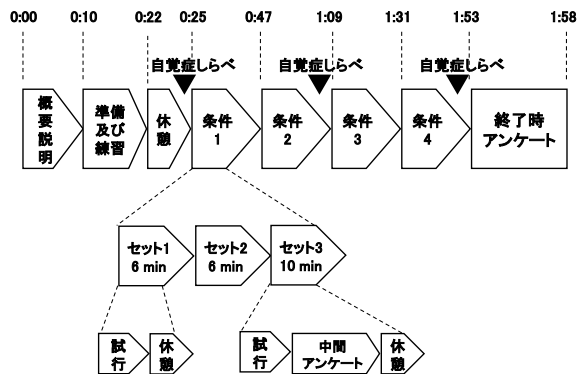


図 3 予備実験プロトコル  
Fig. 3 Preliminary test protocol

各条件が終了した時点で、インタフェースによる放射線分布の把握が容易であったかなどの主観を確認する中間アンケートを実施する。また4条件すべてが終了した時点でも、どのインタフェースが最も良いと感じたかを問う終了時アンケートを実施する。これに加えて、今後の実験プロトコルの見直しの参考とするために「自覚症しらべ」<sup>6)</sup>を実施する。自覚症しらべは実験参加者に疲労感などに関するアンケートを実施して疲労の程度を確認する手法である。なお、条件1~4、すなわち4種類のアラームパタンの実施順序は実験参加者によって変え、順序効果の影響を低減するように配慮している。

## 6. VR 利用事前実験

### 6.1 VR 利用事前実験の必要性

予備実験では感覚刺激を提供するインタフェースを実装するとともに、作業者の位置検出といったハードウェアの実現が必要である。また、先述の評価方法や保全作業に見立てたタスクの提供方法などが適切であるかどうかをあらかじめ明確にしておく必要がある。すなわち想定通りに評価ができるのであれば問題ないが、そうではない場合、実験方法の見直しや実装したハードウェアの再構築などの手戻りが発生する。これを避けるために、本研究では予備実験の一環としてより簡便な方法で実験計画に問題がないか確認する事前実験を実施することにした。事前実験では極力ハードウェアの実装を伴わずに進められるようにするために、PCをベースとした仮想現実(VR)で実施する方法を採用した。

### 6.2 実験の構成

#### 6.2.1 対象とする感覚刺激

VR利用事前実験の目的が評価方法や実験方法の検証・確立であるため、選定した6種類すべてについて実施する必要はなく、VRで実装が容易なもの1~2種類程度についてやればよい。そこで今回は聴覚に絞って実験体系

を構築した。

#### 6.2.2 VR 実験方法

VR実験空間の一人称視点での概観を図4に示す。空間サイズは8m x 8m相当で、この空間に放射線分布を与える。実験参加者はこの空間をPCの矢印キーを使って移動する。セクタに到達したときに課せられる計算タスクは左下に表示され、その答えをPCのキーボードで入力する。

VR実験空間では実際の原子力発電プラントの現場で発生している機器作動音をバックグラウンドノイズとして流している。聴覚インタフェースのためのデバイスはPCのスピーカやヘッドフォン等を利用する。

VR利用事前実験を実施するために製作したPCアプリケーションソフトウェアは、時間通りに実験プロトコルを進めるための時間管理を実施するほか、ログとしてタイムスタンプを伴った座標(位置)、その位置での放射線強度、メインタスク(計算タスク)の解答時刻、解答の正誤の情報を記録しており、後から定量的な分析が可能である。以上のシステムを用いて今後VR利用事前実験を実施していく計画である。

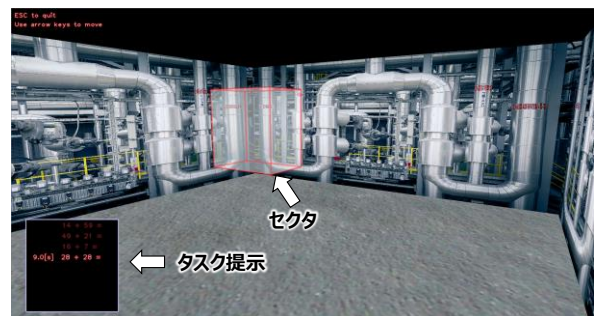


図 4 VR 利用事前実験空間  
Fig. 4 Overview of VR application for prior tests

## 7. まとめ

原子力発電プラントの従業員被ばくを低減させることを目的に、プラント内での保全作業を実施しつつ被ばく回避行動を促進可能とする、感覚刺激を利用したインタフェースを明確にする研究に取り組んでいる。人間が備える感覚のうち、原子力発電プラントで比較的容易にかつ安全に利用可能な視覚、聴覚、温度覚など6種類を検討対象とした。これらを用いて被ばく回避を促進するために提供する情報は、作業員位置における放射線強度に限定し、その情報を非言語で提供する手段に対して検討する。

放射線情報を提供するためのインタフェースとして聴覚を利用した方式の検討を開始しており、その中から最も優れたアラームパターンを決定するために候補を4種

類選定した。

6 種類の感覚刺激に対しては実験室で実施する予備実験で絞り込み、さらにそれらに対して実プラントの環境で実験を実施する方針を立てた。予備実験においては原子力発電プラントの環境を模擬するために保全作業に相当する計算タスクを設定し、これと被ばく回避タスクを実施する二重課題とした。予備実験実施に際して、実験方法や評価方法に関する問題点や課題を抽出することを目的に VR を使った事前実験を実施する。まずは聴覚インタフェースを例にして実験プロトコルを設計し、それを組み込んだアプリケーションソフトウェアの構築まで完了した。今後、事前実験を実施していく予定である。

### 参考文献

- [1]OECD/NEA;原子力発電所における職業被ばく,ISOE プログラム 第 20 回次年次報告書(2010)
- [2]原子力規制庁;検査制度の見直しについての説明,  
<https://www.nsr.go.jp/data/000181864.pdf> [cited 2020 Oct.]
- [3] ISO; Ergonomics — Danger signals for public and work areas — Auditory danger signals, ISO7731(2003)
- [4]ISO; Ergonomics — Accessible design — Auditory signals for consumer products, ISO24500(2010)
- [5] Sato T., Iwamoto Y., et al. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. J. Nucl. Sci. Technol.; 55, 684-690(2018)
- [6]産業疲労研究会; 自覚症しらべ,  
<http://square.umin.ac.jp/of/service.html> [cited 2020 Oct.]