

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360461

研究課題名（和文）脳科学的知見に基づく原子力プラント運転員のヒューマンファクタ研究

研究課題名（英文）Human Factor Study for Nuclear Power Plant Operator based on the Nero-Science

研究代表者

高橋 信（TAKAHASHI MAKOTO）

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00243098

研究成果の概要（和文）：

携帯型のNIRS装置を用いて、原子力発電所の制御室における運転員の脳活動測定を実現することを最終目標に研究を行い以下の成果を得た。

- ・実験用加速器制御室において運転操作中の操作員に対してNIRS装置による脳活動計測を行い、計測が可能であることを確認した。
- ・新たに開発された超小型NIRS装置により、フルスコープシミュレータにおいて当直長を含む四名の脳活動の同時計測を実施し、フルスコープシミュレータという実環境に極めて近い環境において、複数の運転員の脳活動を同時に計測できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

The experimental study was been performed to measure brain activity of nuclear power plant operator during operation.

- Preliminary experiment has been performed at the experimental accelerator facility to confirm that the NIRS device can be utilized during the actual operation.
- Brain activity of four real nuclear power plant operators was successfully measured using Ultra-small NIRS device.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|------------|
| 2009年度 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |
| 2010年度 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |
| 2011年度 | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |
| | | | |
| 総計 | 9,400,000 | 2,820,000 | 12,220,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：原子力,ヒューマンファクタ,脳機能計測,近赤外分光,NIRS

1. 研究開始当初の背景

原子力分野において安全性の更なる向上のためには、運転員のヒューマンファクタの問題は依然として重要な課題である。原子力プラントの運転制御盤のデザインにはヒューマンファクタの面からの知見が反映され、

ヒューマンエラーの発生率は他の産業分野と比較しても決して高いわけではないが、原子力プラントに対して要求される極めて高い安全性を考えると、ヒューマンエラーの更なる低減に向けた努力を怠るわけにはいかない。

脳科学の発展に伴い、人間の高次の認知的活動を高い時間分解能で脳内の局所的活動と結びつける手法が提唱され、基礎的な実験研究が盛んに行われている。機能的MRI（以下 fMRI）や近赤外線分光による脳機能測定装置（NIRS）を利用した Activation Study と呼ばれる研究分野では、様々な知的活動を行う際に、脳のどの部分が活性化するかという点に着目して解析を行い、脳の機能局在に関して多くの知見が既に得られている。しかしながら、現状では基礎的な認知実験による知見の集積が研究の主目的となっており、具体的な工学的応用を目指した研究例は少ない。本研究では、脳科学で行われている研究の方法論を、極めて現実的な環境でのヒューマンファクタ研究に応用し、その有効性を検証することを目的としている。

2. 研究の目的

- ・ 脳機能解析の手法が、現実的な作業環境（フルスコープシミュレータにおける原子炉運転訓練）における認知負荷の直接的な計測に応用可能であることを示す。
- ・ シミュレータを用いた運転訓練において運転員が感じているリスクのレベルを脳機能解析手法により推定可能であることを示す。
- ・ ヒューマンエラー発生時の特徴的な脳機能活動のパターンの同定可能性について明らかにする。

3. 研究の方法

研究の一年目においては、携帯型 NIRS を用いることで、脳活動に関する情報がどの程度詳細に獲得できるかを、fMRI 装置や固定型 NIRS 装置との結果を比較することで明らかにする。この Phase.1 においては、ディスプレイ上に表示される実験用加速器のインタフェースを対象として用いる。実際のフルスコープシミュレータと比較すると規模は小さいのだが、脳機能解析の有効性を評価するには十分な認知的な複雑性を有していると考えられる。

Phase.1 の結果を受けて、Phase.2 では携帯型 NIRS を用いた原子炉運転訓練用のフルスコープシミュレータでの計測を行い、現実性の高い環境における脳機能解析の有効性を明らかにする。実際の訓練で行われているシナリオを利用し、プラントに異常事象が発生しその対応を行う異常時対応訓練を研究の対象とする予定である。研究代表者は、これまでBWR運転訓練センターとの共同研究で、運転訓練シナリオの認知的な複雑性に関する研究を行ってきており、その結果としてそれぞれの訓練シナリオの認知的な複雑

性（訓練を受ける側にとってどれだけ難しいシナリオであるか）を評価する研究を行ってきている。本研究では、その研究から得られている知見を利用して、訓練の難しさと脳機能の活動の間の関係を明らかにする。更に、このシナリオの複雑さを構成する要素として「運転員が感じるリスク」に関する検討がなされており、本研究では、この結果と「脳が感じているリスク」の間の関係を明らかにする。被験者としては、実際のプラントの運転経験を有する運転訓練センターのインストラクターを用いる。

4. 研究成果

・現実的装置を利用した fNIRS による脳機能計測

最終的な対象であるフルスコープシミュレータで利用する可搬型 NIRS 装置は、可搬出来るという利点を有するが、固定式の装置に比べて、計測のチャンネル数が少なく、計測可能な脳の領域が限られているという欠点も有している。本研究では、現実的なタスクにおける可搬式 NIRS 装置の有効性を、実験用加速器のインタフェースを対象にして検証した。加速器を操作している最中の被験者の脳活動を携帯型 NIRS 装置を用いて測定し事象関連分析を行い、携帯型 NIRS 装置によりタスク実行中の被験者の脳活動の特徴を捉えることが可能であるかを検討した。



図1 実験用加速器制御室における計測



図2 測定に用いた小型 NIRS 装置

大規模システムとして実験用加速器制御室を、脳機能計測手法として携帯型 NIRS を選定し、(1) 主観的難易度評価を反映して活性化している部位が存在、(2) 熟練者と非熟練者で DLPFC において賦活の度合いの差が存在、という 2 つの仮説を立て実験による検証を行った。

本仮説を検証する事を目的とし、実験用加速器制御の操作においてイオン源立ち上げ課題から+30° ポートへのビーム輸送を対象とし、この課題を①イオン源立ち上げ課題②ビーム調整課題③ビーム偏向課題の 3 つに分割した。本課題を用いた実験を熟練者 2 名、非熟練者 2 名に対して実施した。

実験データの解析結果は「(1) 主観的難易度評価を反映して活性化している部位が存在」という仮説に対して、操作が類似しているもの同士の比較であれば活性化している部位を計測できる可能性を示唆している。この結果から、携帯型 NIRS を用いて大規模システム操作時の脳機能解析を実施する事は可能であることが示された。

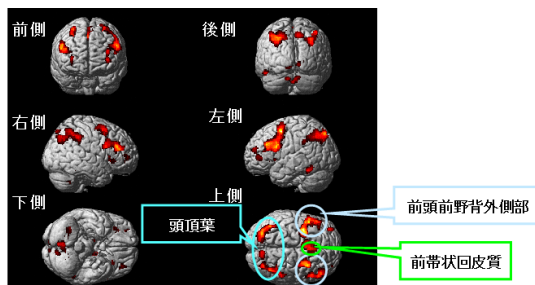
・ 作業負荷に着目した fMRI と fNIRS の測定の比較

プラントの運転時において重要な要素となる作業記憶に対する負荷に着目し、作業記憶の負荷を制御する認知課題 (Sternberg 課題) を行った場合の fMRI による測定結果と、fNIRS による測定結果の比較を行った。結果として作業記憶に関係する I-DLPFC の賦活が fMRI と fNIRS の双方で確認された。この結果は既往研究と整合するものであるが、特に作業負荷が高いときにこの領域の賦活が低下するという一部の知見を否定する結果が得られた。但し、被験者毎の差異が大きく、必ずしも全ての被験者において MRI と NIRS が同様の結果を得られるものではないことを明らかにした。

図 3 作業負荷の増加に伴い活性化する領域 (MRI による解析結果)

・ プラント異常発生シナリオの検討

原子力プラントシミュレータにおける携帯型 NIRS による脳機能測定の予備的な検討として原子力プラントシミュレータにお



ける携帯型 NIRS 実験を行う際に利用する異常シナリオの検討を行った。本研究では異なる難易度のシナリオを対象にしているときの脳活動の違いを明らかにすることが目標であり、そのためにはシナリオの難易度を定量的に評価する必要がある。これまでのシミュレータを用いた訓練ではインストラクタが主観的に難易度の判断を行っていたが、本研究ではシナリオの認知的複雑性を客観的に定義する手法を開発しその有効性を確認した。具体的にはシナリオの実行時のプラントのパラメータの挙動、警報の発生状態をもとにして、D (Dynamism), I (Interaction), U (Uncertainty), R (Perceived Risk) の四つの軸でシナリオの認知的複雑さを定義し、評価を行い、インストラクタの主観と概ね一致することを明らかにした。脳活動に関しては特に状況の不確定性 (I) と、主観的に感じられるリスク (R) が影響を与えることが予想される。

原子力発電所においては運転時間のほとんどは定常運転であるが、ヒューマンエラー等の発生可能性を考えるとヒューマンエラーの可能性が増大する異常発生時の運転員の脳活動に着目する必要がある。本研究では BWR 運転訓練センターにおける運転訓練において用いられる訓練シナリオの認知的な複雑度を考慮して脳機能測定に利用するシナリオを以下のように決定した。

- ①全交流電源喪失 (系統安定化装置作動→負荷遮断→D/G 起動失敗)
- ②APRM 下限+ATWS (系統動揺→M/S 水位高 Tb トリップ→1/2ATWS)
- ③Tb 第 1 段 PS 故障+H/W 水位低真空低 (LPCP 吸込破断)
- ④水位不明 (地震→格納容器内漏洩→水位不明)

・ 認知状態誘導実験

認知状態誘導実験は、実際のプラント運転員に想定される認知状態を誘導する課題を準備し NIRS による脳活動計測を行い、認知状態の弁別の可能性を検討する事を目的としている。この実験で明らかにした認知状態と対応する脳機能活動パターンは、二つの BTC シミュレータ実験における熟練運転員の脳活動パターンとの結果の対応付けを行いその妥当性を検証する。フルスコープシミュレータ実験を行う前に、実験室環境におけるマイクロワールドシミュレーション環境において認知状態誘導実験を実施し、「情報獲得」と「思考」という二つの状態に特徴的な脳活動のパターンを明らかにした。

・フルスコープシミュレータ測定実験(1)
 フルスコープシミュレータ予備実験では、携帯型 NIRS 装置を用いて実際の原子力プラントのフルスコープシミュレータ内で当直長一名を対象とした、四つの異常事象シナリオについて実際に測定を行い、実際の訓練実施中に問題なく携帯型 NIRS による脳活動計測が可能であることを確認した。更に、携帯型 NIRS 装置に装着した加速度センサーからのデータを使って、脳血流の変化がどのような影響を受けているかを検討した結果、今回の実験環境（被験者は着座状態）頭部の動きは脳血流に大きな影響を与えていないことを明らかにした。



図4 訓練センターでの計測風景

・フルスコープシミュレータ測定実験(2)
 二回目の携帯型 NIRS による測定予備実験では、新たに開発された超小型 NIRS 装置により、当直長を含む四名の脳活動の同時計測を実施した。その結果として、フルスコープシミュレータという実環境に極めて近い環境において、複数の運転員の脳活動を同時に計測できることを確認した。更に四名の脳活動の相関解析を行った結果、当直長役の被験者と他の被験者との相関係数が高いことが示されており、指揮命令関係にある被験者間に脳活動の同期が見られる可能性を示していると考えられる。



図5 超小型 NIRS 装置装着時の被験者

5. 主な発表論文等
 (研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計2件)

1. Makoto Takahashi, Characterization of Training Scenarios for BWR Operator Training(招待講演), JSPS-IVA Väst Sweden Joint Colloquium “Nuclear Energy and Nuclear Applications”, 2011年10月13日, イエテボリ (スウェーデン)

2. 一谷賢治, 鈴木創司, 高橋 信, 若林利男 BWR 運転訓練シナリオ作成支援システムの開発, 日本原子力学会 2011年春の年会, 2011年3月28日, 福井大学.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 信 (TAKAHASHI MAKOTO)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00243098

(2) 研究分担者

川島 隆太 (KAWASHIMA RYUTA)
 東北大学・加齢医学研究所・教授
 研究者番号：90250828

三浦 直樹 (MIURA NAOKI)

東北工業大学・工学部・講師
 研究者番号：70400463

松山 茂男 (MATSUYAMA SHIGEO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：70219525

(3) 連携研究者

()

研究者番号：