

原子力施設における防護服着用作業員のための リアルタイム暑熱負荷遠隔モニタリング装置の開発とその運用

高橋 直樹*, 李 珠英**, 若林 斉**, 枋原 裕**
*独立行政法人 日本原子力研究開発機構 **九州大学大学院芸術工学研究院

Development and operational results of a real-time remote biological information monitoring device for the workers wearing protective clothes at a nuclear facility

Naoki TAKAHASHI *, Joo-Young LEE **, Hitoshi WAKABAYASHI **, Yutaka TOCHIHARA **
*Japan Atomic Energy Agency, **Faculty of Design, Kyushu University

Abstract : Workers must wear a protective clothing to prevent contamination by radioactive materials when carrying out certain inspection and maintenance activities at nuclear facilities. Temperature and humidity increase with time within the protective clothing during such work. This is because the protective clothing is necessarily impermeable so that heat and perspiration caused by physical labor remain. Therefore, the worker's body temperature and related heatstroke risk gradually increase. We developed remote biological information monitoring device and use it under actual working conditions.

Key words : Protective clothing, Heat strain, Infrared tympanic temperature, Rectal temperature, Heart rate

要旨 : 原子力施設における保守・点検等に当たっては、放射性物質による身体の汚染を防止するために防護服を着用する。しかし、防護服は通気性、透湿性が悪く、筋労作により発生した熱や汗は、防護服内へと留まるため、防護服内は高温多湿となり、熱中症の発症リスクが高まる。これまで、防護服を着用する作業員の体調管理は、本人の自己申告と時間管理を基本としてきたが、本人の自己申告に基づく管理では、作業員の湿熱負荷等に起因する体調の変化を見逃す恐れがあった。そこで、我々は作業員の鼓膜温や心拍数と言った客観的な情報を遠隔かつリアルタイムで取得し、これまでの自己申告と組み合わせることにより、作業員の熱中症の発症リスクをより低減できるものと考え、リアルタイム暑熱負荷遠隔モニタリング装置を開発した。

キーワード : 防護服、熱中症、鼓膜温、直腸温、心拍数

1. はじめに

原子力施設では、その健全性を維持するために定期的な点検や保守作業が実施される。この際、作業員は放射性物質による身体の汚染を防止するため、定常的に防護服が着用されているにも関わらず、これまで防護服着用時における身体負荷等を定量的に評価した報告は極めて少ない（木内, 1990）。

人体は、筋労作により体温が上昇した場合、体温を一定に保とうとする恒常性を有しており、体温が上昇すると汗が分泌される。筋労作に伴う産熱の大半（80%以上）は、汗が気化する際に気化熱として体表面から奪われ、上昇した体温は下げられる。

しかし、一般的に防護服は、通常の作業服（綿服等）に比べて非常に通気性、透湿性が悪く、筋労作により

発生した熱や汗は防護服内に留まるため、体温を下げるために分泌された汗の蒸発は妨げられる。その結果、汗は体表面を流れ落ち、体温低下には寄与しない無効発汗状態となり、体温は下がることなく上昇し続ける。更に、体内からは水分と塩（ミネラル）が汗として、一方的に失われて行く。そのため、防護服はそれを着用する作業員に対して大きな生理的負担を与える（枋原, 2000）。

また、防護服を着用しなければならない作業環境中には、人体に有害な物質（アスベスト、放射性物質等）が存在しており、多くの場合、呼吸保護具（マスク等）が併用される。通常の作業環境であれば、汗により喪失した水分や塩を随時補給することは可能であるが、呼吸保護具着用中に水分等を補給することは出来ない。

そのため、防護服を着用する作業員の熱中症の発症リスクは、通常作業に比べて高まる。

原子力施設では作業終了後に放射性物質を所定のエリア外に持ち出すことがないように入念な汚染確認が行われるため、仮に身体的な不調を感じてから作業エリアからの退域行動を起こしても、基本的には直ぐに防護服を脱ぐことが出来ず、防護服を脱装し、作業エリアから退域した時には、既に熱中症が重篤化してしまう恐れが多分にあった。

これまで、作業員の体調管理は、本人の自己申告と時間管理を併用することによって行われてきたが、本人の自己申告にのみ頼った作業管理では、温熱負荷等に起因する体調の変化を見逃す恐れがあった。

そこで、我々は作業員の核心温や心拍数と言った客観的な情報をリアルタイムかつ遠隔で取得し、従来の主観的情報と組み合わせることによって、熱中症の発症の兆候を早期に捉え、休憩や退域指示等を適切に与えることができれば、より安全に留意した作業管理が行えるのではないかと考え、リアルタイム暑熱負荷遠隔モニタリング装置の開発を行った。

2. 方法

2.1 装置の概要

装置の開発にあたっては、下記に示す事項について留意した。①本装置の着用が作業員に大きな負担とならないこと、②評価に必要な情報をリアルタイムかつ遠隔で得られること、③複数台の装置から送られてくる個々人の情報を識別しつつ、個々に管理できること。

防護服着用時に受ける暑熱負荷の評価に当たっては、米国 ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) 等の勧告等に示されている様々な生理情報のうち、「核心温」と「心拍数」に着目することとした。ACGIH 等では、核心温として「直腸温」に基づく基準が提唱されているが、直腸温を実際の作業現場で定常的に測定することは極めて困難である。そこで、作業員がセンサーの着用を容易に受容でき、かつ、センサーの着用が容易である核心温の測定方法として鼓膜温に着目した。なお、核心温として鼓膜温を用いることについては賛否 (Heiner ら, 1989) あるが、装置の開発に当たっては作業現場で作業員が定常的に使用できることを優先した。(留意点①)

生理情報をリアルタイムかつ遠隔で取得し、更に複数の装置から転送されてくる情報を個人識別するため、我々はアパレル業界や流通・物流業界において急速に普及しつつある自動認識技術の一つである無線タグ (RFID: Radio Frequency Identification) にセンサー機能を付加した無線タグを開発した。(留意点②・③)

今回開発した装置を Fig.1 に示す。本装置は、①生

体情報測定部 (85×55×25mm)、②RFID 及びデータローガー部 (128×54×20mm)、③電源部 (単三電池 2 本で連続 12 時間駆動) の大きく 3 つの要素から構成されている。

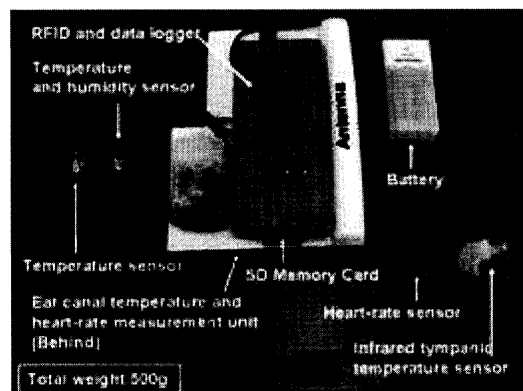


Fig.1 The developed device

①の生体情報測定部では、温熱負荷評価を行う上で必要な生理情報 (核心温と心拍数) の測定を行う。核心温については、前述した通り鼓膜温 (正確には赤外線方式による鼓膜温) を測定することとした。心拍数については、作業中の使用する電動工具からの電気的なノイズ等を考慮し、光電脈波式センサー採用した。②の無線タグ部には、同時に複数の装置を使用しても個々の測定装置を識別できるよう、それぞれ異なる ID が割り当てられている。③の電源部は、単三電池を使用し、連続 8 時間以上駆動できるよう設計した。

2.2 本装置を用いた作業管理の概念

本装置を用いた基本的な作業管理の概念は、従来の自己申告に頼っていた作業管理に客観的な情報を組み合わせることによって、①作業員自身が気付かない体調の変化を第三者が的確に把握し、②作業管理を行う責任者の知識や経験・ノウハウに頼ることなく、より安全な作業管理を行うことにある。

そこで、我々は防護服を着用する作業員の安全性を向上させつつ、作業効率を向上させると言った相反する条件を両立させるため、ACGIH 等の勧告に基づき温熱負荷の高まりを示す「警告レベル (37.5℃)」と熱中症リスク回避のための「警報レベル (38℃)」の 2 段階の管理値を設けるとともに体温の個人差を考慮し、所定の警報値 (38℃) に達しなくとも作業開始時の体温から 1℃上昇した場合 (Derrick ら, 2002) にも警報相当として警報表示を行なう機能を付加した監視システムを構築した。

具体的には、本装置において測定されたデータは、無線により監視用端末 PC へと遠隔転送され、時々刻々変化する作業員の状況を Fig.2 に示すように一目で把握できるように可視化 (計測データのトレンド

表示)した。更に、基準と比較し基準を超える継続的な変化があった場合、画面上に警告・警報表示を行うことによって、経験が少ない作業管理者であろうが経験豊富な作業管理者であろうが作業管理のレベルを統一化することができ、作業をより安全に進めることが可能となった。

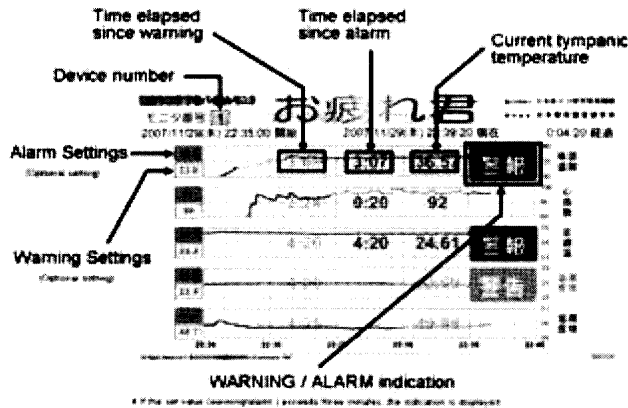


Fig.2 Visible of the measurement data

2.3 性能評価試験

熱中症対策において一般的に測定される核心温と言えば、「直腸温」であるが、本装置の開発に当たっては、先に記したように作業現場で作業員が本装置の使用を抵抗なく受容できることを前提に核心温の測定には、「鼓膜温」を採用することとした。従来、鼓膜温の測定といえば、鼓膜へと直接サーミスターを接触させることにより測定されていた。しかし、耳内へのサーミスターの設置や測定中にサーミスターによって鼓膜を傷つける恐れがあるため、測定には専門的な知識が必要であった。そのため、実験等において使用されることはあっても、実際の作業現場において定常的に測定を行うには現実的な測定方法であるとは言いがたい。

そこで、我々は医療機関や一般家庭において広く利用されている赤外線温度センサーを用いた非接触の鼓膜温測定に着目し、連続的に測定を行なうこととした。

しかし、赤外線温度センサーにより鼓膜温を正確に測定に適用するためには、①個人によって異なる形状を有する外耳道で赤外線温度センサーが確実に鼓膜面を捉え、②センサー部が外気温の影響を受けないようにする必要があった。

近年のエレクトロニクス及びセンサー技術の進歩は目覚ましく、小型かつ高感度・高精度の赤外線温度センサーが開発され、外耳道への外気の流入を遮断するとともに、センサー面を可能な限り鼓膜に向けることが可能な形状を有するシリコン製の耳栓内に測定デバイス完全に埋め込むことが可能となった。これにより、上記①及び②に示した課題を解決することが出来、当初の目的であった簡便な核心温の連続測定が可

能となった。

その後、今回採用した耳栓型鼓膜温測定センサーを装着し、運動を行った際の鼓膜温と直腸温の測定を同時に行い、実作業現場における作業員の熱中症のリスク管理に本装置を適用し得るものか否かについて評価を行った。

被験者は、成年男子1名(23歳、身長:178cm、体重:64kg)であった。試験に当たって、被験者に今回採用した耳栓型鼓膜温センサー及び直腸温測定プローブをそれぞれ装着した後、原子力施設における保守作業時における標準的な装備(木綿製作業服、不織布製防護服:2重、ゴム手袋:3重、靴カバー及び全面マスク)を着用させ、環境温度28℃、環境湿度50%に設定された人工気象室内へと入室した。その後、被験者は自転車エルゴメーター上にて10分間安静とした後、運動負荷80Wの運動を50分を行い、運動終了後、20分間安静状態で回復後、防護服等の脱装を行った。

2.4 実作業現場における測定

「2.3 性能評価試験」の後、実際に防護服を着用する作業現場へと当該装置を持ち込み、作業中における作業員の鼓膜温及び心拍数について作業モニタリングを行なった。本測定は、年齢36歳(身長:176cm、体重:69kg)の男性を被験者とし、2008年7月7日に実施された。なお、測定当日の作業エリアにおける気温及び湿度は、それぞれ26.6℃、77.1%であった。

本作業は、装置に組み込まれたフィルターをケーシングから1本ずつ抜き取った後、新しいフィルターをケーシングへ再設置するものであった。フィルターが設置されるケーシングは床面に存在しているため、ケーシングからフィルターを引き抜くためには、作業員はその都度体を屈伸しなければならず、作業に伴う身体負荷(筋負荷)が大きい作業であった。一方、新しいフィルターのケーシングへの再設置はフィルターの引き抜き作業のように何度も体を屈伸させる必要がなく、作業に伴う身体負荷は比較的小さい作業であった。

3. 結果と考察

3.1 性能評価試験結果

性能評価試験における鼓膜温及び直腸温の経時変化をFig.3に示す。本試験結果より、鼓膜温は、同時に測定された直腸温と比較して以下の特性を有することが分かった。

①鼓膜温(図-3 破線)は、安静時～運動初期においては直腸温(図-3 実線)よりも若干低い値を示し、②直腸温は、運動開始後、約10分経過した頃から穏やかに上昇するのに対して、鼓膜温は運動開始とともに上昇し始め、3～13分後には直腸温を上回る、③直腸温

は運動終了後（回復期）も引き続いて上昇し続けるのに対して、鼓膜温は運動終了とほぼ同時に下がり始めており、直腸温に比べて運動状態の変化をレスポンス良く捉えており、ACGIH等にて規定される直腸温に基づく管理基準に照らし合わせて管理を行うことにより、安全尤度を十分に持った作業管理が行なえることが示された。

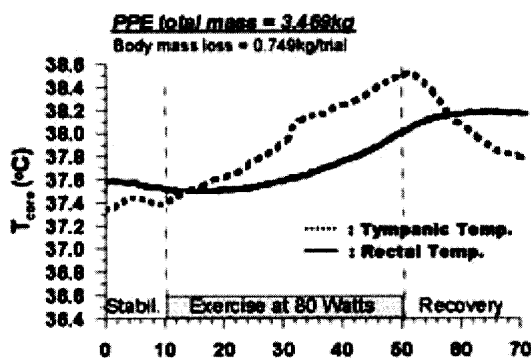


Fig.3 Change of rectal temperature and infrared tympanic temperature

3.2 実作業現場における測定結果

Fig.4に実際の作業現場における作業員の鼓膜温及び心拍数の変化を示す。

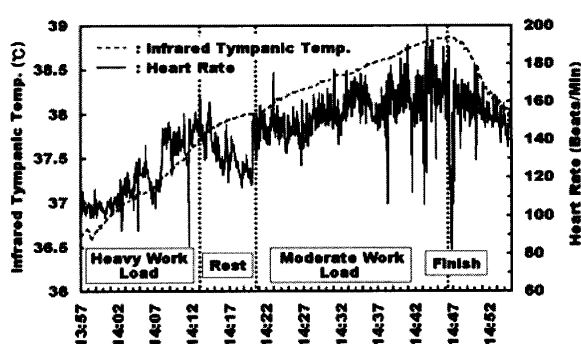


Fig.4 Actual measurements result in the workplace

作業エリアへと入域した後、床面のフィルターケーシングからのフィルターの引き抜き作業（約18分間）を行った後、防護服を着用した状態のまま同作業エリア内にて約7分間の休憩を行った。先に述べたようにフィルターの引き抜き作業は、その都度、体を屈伸させなければならない比較的負荷の大きい作業であるため、鼓膜温及び心拍数は作業の開始と伴に右肩上がりに上昇した。なお、休憩する直前の体温及び心拍数は、それぞれ37.7°C、150拍/分であり、本作業における体温の上昇率は0.066°C/分であった。休憩に伴い、心拍数は150拍/分から120拍/分まで下がったものの、鼓膜温は下がることはなく緩やかに上昇し続けた。

その後、新しいフィルターをケーシングに挿入する作業（中程度の負荷）を行ったところ、心拍数は再度

上昇に転じ、体温は上昇し続けた。この時の、心拍数及び鼓膜温の上昇の程度は、休憩前の作業に比べて緩やか（フィルター挿入作業時の体温上昇率：0.03°C/分）となった。ただし、途中から作業負荷が軽くなり、体温及び心拍数の上昇が緩やかになったとは言えども、作業終了直前の鼓膜温及び心拍数は、38.8°C、170拍/分にも達していた。

本結果より、①今回開発した装置は、作業負荷による体温上昇の変化等をレスポンス良く捉えることが可能なこと、②防護服着用時は休憩により体温上昇率は緩やかとなるものの下がることがないこと、③作業中の防護服内の温度及び湿度は、防護服着用直後から上昇し続け、作業終了直前には31~32°C及び約90%にも達し、熱中症の発症リスクが極めて高い環境であることが分かった。

4. まとめ

今回開発したリアルタイム暑熱負荷遠隔モニタリング装置にて測定される鼓膜温は、作業負荷の変化に伴う運動状態の変化を直腸温よりもレスポンス良く捉える事が可能であり、防護服を着用して作業する作業員の熱中症のリスクの高まりを適確に検知することが可能であることが示唆された。

5. 文献

- 木内伸幸 1990:セル内除染作業における作業負担調査 -腎外水分喪失量（発汗量）の測定-、保健物理、25 82/84
- 栃原裕 2000:密閉型防護服着用時の生理負担、織消誌、41(10) 801/804
- Heiner Brinnet, Michel Cabanac 1989:Tympanic Temperature is a Core Temperature in Humans, J. therm. Biol., 14(1) 47/53
- Derrick John Brake, Graham Peter Bates 2002:Deep Body Core Temperatures in Industrial Workers Under Thermal Stress, Journal of Occupational and Environmental Medicine, 44(2) 125/135

<連絡先>

著者名 高橋 直樹

住所 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

所属 独立行政法人 日本原子力研究開発機構

核燃料サイクル工学研究所

再処理技術開発センター 技術開発部

転換技術課

E-mail アドレス takahashi.naokill@jaea.go.jp