

ICNIRP STATEMENT ON FAR INFRARED RADIATION EXPOSURE

The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
Health Physics 91(6): 630-645; 2006

序論

国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) は、ここに、強い、広域帯赤外放射への人の曝露を制限するためのガイドラインを提案する。赤外放射 (IR) に関係したガイドラインは、最初、高強度の人工光源からの有害性を防護するためのガイダンスを提案するために、および暑熱産業の労働者を防護するために、開発された。より長い遠赤外波長 (IR-C とする) への曝露に対する詳細なガイダンスは、関心のある、ほとんどのランプおよび工業的な赤外光源からのより長い波長におけるエネルギーは、実際、全体の放射熱エネルギーのごく小さい部分しか寄与していないこと、および測定が必要がなかったことから、提供されなかった。工業的光源および高強度ランプの全光学的放射を基礎にして、制限された IR-C の寄与が、制限導入に組み込まれた。さらに、制限が開発された時、ほとんどのポータブル熱測定器に使われているガラスあるいは推奨の窓は $3\sim 4\mu\text{m}$ を超えるほとんどのエネルギーを阻止した。このように、赤外光源のフィールドでの適切な測定が、 $3\mu\text{m}$ より小さい波長のリスクアセスメントのための測定を制限することによって、最もよく行われていた。故に、IR-C 放射は、もし関心があるなら測定に含めるべきであるけれども、ICNIRP は、以前は IR-C ($3\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$) の放射に対する特別なガイドラインを出していなかった。

ガラス、鉄鋼およびアルミニウム産業のような、暑熱環境の産業労働者は、伝統的に過剰な赤外曝露を処理しなければならなかった。産業的な防護対策は、このような暑熱環境に関連する健康有害性に対処することに発展していった。熱ひずみと不快(熱痛)は通常、赤外放射レベルを皮膚の熱的損傷の閾値以下に制限する。そしてこれは、IR-C を大きく放射する光源に対して特に真実であった。さらに、長い赤外曝露に対する制限は、環境温度を考慮に入れなければならなかった。例えば、環境温度 5°C における $1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ($100\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$) の赤外放射照度は、早く加熱しうる。しかし、環境温度が 30°C では、この放射照度はひどい痛みを与え、深刻な熱ひずみを産生する。従って、ICNIRP は、波動光源の皮膚への曝露および、**熱的損傷が痛み反応時間よりも早く生じる、および環境温度と照射された皮膚の区域が重要な要因である、非常に短い曝露を制限するためのガイドラインを提供した。**皮膚に対する今日の曝露限界は、10 秒以下のみの曝露の熱傷から守るためのものである。すなわち、10 秒より長い曝露の曝露限界は提案されていない。10 秒より長い曝露時間では、熱傷以外の、過剰な熱ストレスから生じる熱ひずみ(深部体温上昇)のような、潜在的な健康リスクは、関連が出てくる可能性がある。それには、今日曝露限界が推奨されていない。

大きい曝露期間に対する限界は目の曝露には存在するが、環境温度が考慮されなければならない。

この生命の最初の契機は、人の曝露条件から起こった。そこでは、人は、相対的に強い赤外放射に曝露されることを、および、ある場合は、知覚された健康益に対して中程度の高熱症を誘発することを、個人的に選ぶ。近年、相対的に新しいタイプの赤外加熱

器具(例えば、放射加熱器、赤外暖房室、時々「赤外サウナ」と呼ばれる)が家庭やスパ一用に導入されてきた。IR-C はしばしば、赤外暖房室で見られる主たる分光放射である。しかし、IR-A あるいは IR-B 波長帯にピークを持つものもある。健康益について多くのクレームがあるにもかかわらず、赤外暖房室の健康影響に関する生理学的、医学的研究はほとんど、あるいは全くない。

この声明は、高熱症や皮膚の不快により制限がふつうに課されるにもかかわらず、皮膚へ長時間の赤外曝露が起こる、特別の条件に対するガイダンスを提供するために準備された。この声明は、人の赤外放射エネルギーへの反復曝露の潜在危険性を検査し、IR-C 曝露からの健康リスクを評価するための拡張したガイダンスを提供する。

背景

赤外放射分光帯

$780\text{nm}\sim 1\text{mm}$ の波長帯の光学放射は、赤外 (IR) 放射として知られている。上に記したように、赤外帯はしばしば IR-A ($0.78\sim 1.4\mu\text{m}$)、IR-B ($1.4\sim 3\mu\text{m}$)、IR-C ($3\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$) に細分される。可視放射 (VIS) の波長帯は通常、 $380\text{nm}\sim 780\text{nm}$ の波長帯内にあると考えられている。国際照明委員会により定義された、これらの分光帯は、主要な影響は分光学的な限界をきちんと定義しないが、光学放射の光化学的影響を議論する際に簡略表記として有用である。三つの赤外分光帯は、大まかに組織へ貫通する異なる深さを区別している。それは水の吸収に強く依存している。IR-A 放射は、組織へ数 mm 貫通する。IR-B は 1mm 以下の貫通で、波長 $3\mu\text{m}$ 付近では貫通深さ ($1/e$) は最も小さい(約 $1\mu\text{m}$)。そこでは、水が最も高い吸収ピークを持つ。IR-C は、最も上層の死んだ皮膚細胞、角質を通過しない。

より短い光学波長の放出に比べ、最も高強度の広域帯光源(例えば、アークおよび白熱光)は無視しうるレベルの IR-C を出す。このように、IR-C 放射は、これらのタイプの光源のリスクアセスメントを無視しうる。それ故、ICNIRP のガイドラインは、IR-C 放射に対しては明確な推奨曝露限界を含めていない。レーザーのみが、このスペクトル帯で重篤な潜在有害性を持っており、現在の ICNIRP ガイダンス (1996、2000) は、レーザー放射から目と皮膚を守るために 1mm まで拡張している。

1997 のガイダンスは、IR-A と IR-B ($780\sim 3000\text{nm}$) からのすべての赤外エネルギーは人の目にリスクを持つと仮定している。一方、白色光源の IR-C の寄与は、小さいか少なくとも多かれ少なかれ他の光源と同等である。 $3\mu\text{m}$ より大きい波長では、吸収に対する強い波長依存性はない。赤外放射エネルギーは、ほとんど全部吸収され、ほんの少しの分画が反射される。このように、 $10.6\mu\text{m}$ の放射を出す炭酸ガスレーザーは、皮膚の表面を加熱する最も少ない放射照度を要求する。

人工光源からの光学放射は、広範な産業、消費、科学および医学応用に使われる。ほとんどの場合、放出される可視および赤外エネルギーは、有害性はない。しかし、ある通常ではない状況で

は、潜在的な有害性レベルが起こりうる。過剰な赤外放射は、不快さを減じるためにたいいている過されるか邪魔される。十分な可視放射があるところでは、明るい光に対する目の自然な嫌悪反応が潜在的に有害の目の曝露を実質的に減じる。さらに、全放射照度が十分高ければ、皮膚や角膜で感じられる熱的不快がやはり嫌悪反応を起こし、それが数秒あるいはそれより少ない時間に曝露を制限する。にもかかわらず、ある曝露は潜在的に有害として残る。例えば、溶鋼や探索や加熱のための赤外ランプからのものがある。種々の電氣的に加熱された金属やセラミックの棒や板が、工業で、および医学、消費、事務機器に、放射加熱や乾燥に使われている。快適な必要があるところでは、これらの光源はしばしば、囲われるか邪魔され、めったに実際の有害性を出さない。発光ダイオード (LED) と同様に、通常のランプは、相対的にわずかの IR-C 放射を放出する。現在の赤外 LED の放射は、近赤外波長に限られている。

レーザー放射の光学的性質は、従来の、広域帯の光学放射とは著しく異なっている。故に、広域帯光源の曝露限界は、必然的にレーザーに適用するものとは異なる。さらに、レーザーのガイドラインは、従来の光源には適用できないという曝露を仮定している。ほとんどのレーザーは、一つかそれ以上の非常に狭い波長帯の放射を放出する。そして、有害性の評価のために詳細な分光出力の知識は要求されない。それに対して、広域帯の従来の光源の潜在的有害性の評価は、曝露幾何学に合わせて、紫外や可視の有害性の評価のために、いくつかの光生物学的な作用スペクトルに対する、分光計測学的なデータを要求する。光生物学的な作用スペクトルは、赤外には関係なく、分光計測学的な測定は、リスクアセスメントのための曝露ガイドラインに適用するために必要としない。

研究領域では、分光測定学的なデータは、特に、短い、および中間の波長帯 (IR-A と IR-B) では、異なる広域帯の赤外放射光源の相対的な影響を評価するために有用である。これは、組織への、分光吸収係数の強い依存性が波長にあるためである。さらに、組織への熱的影響が照射された区域とその照度の両方に依存しているため、曝露の幾何が考慮されなければならない。

熱的放射

すべての物体は、ケルビン (K) で表わされる絶対温度に依存する、および分光放射率 $\epsilon(\lambda)$ に依存する、光学放射の広域スペクトルを出す。(注: $K = ^\circ C + 273.15$)

分光放射率に基づいて、それは一般的に波長 λ と温度に依存しているが、すべての物体は三つのタイプに分類しうる。それは、

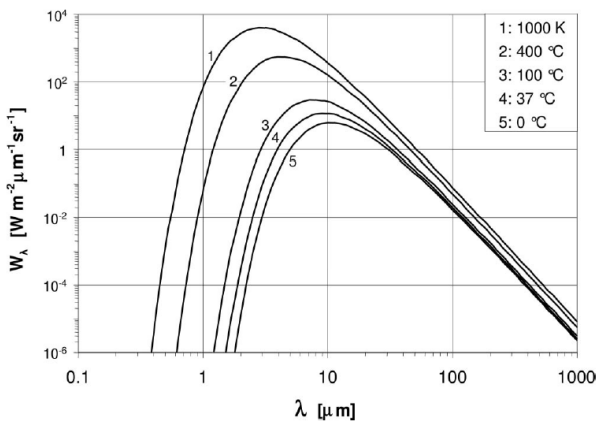


Fig. 1. Dependence of spectral radiant exitance W_λ (Planck's Law) for theoretically perfect blackbodies with temperatures between 273 K (~ 1°C) and 1,000 K (Planck's Law) as a function of wavelength λ in μm .

放射体のすべての温度で放射率 $\epsilon(\lambda) = 1$ という一定値を持つ完全黒体、(その表面温度に依存する) 小さいがやはり一定の放射率を持つ「灰色黒体」、および、所定の温度で完全黒体よりも小さく分光学的に異なる放射を示す分光学的に選択的放射体 [$\epsilon(\lambda) = f(\lambda, T) < 1$].

完全黒体に対して、分光学的放射発散度 spectral radiant exitance W_λ (単位: $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$) は、プランクの熱放射則 (式 1) により記述される。

$$W_\lambda = (2c^2h/\lambda^5) \times (ehc/\lambda kT - 1)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 $c = 2.997925 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ は真空中の光の速度、 $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{Js}$ はプランク定数、 $k = 1.380662 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ はボルツマン定数、および波長 λ の単位は m である。

プランクの法則から得られる図 1 は、理論的な理想黒体の分光放射輝度を波長別に 273.15K (0°C) から約 1000K (代表的な赤熱電気加熱コイル) の間について示したものである。黒体および灰色黒体の分光放射のピークは、温度がたくなるに従い波長が短い方へシフトしている。これは、ウィーンの変位則 Wien's Displacement Law として知られている (式 2)。

$$\lambda_{\text{max}} = 2898 / T$$

λ_{max} は最大分光放射輝度の波長で、単位は μm 、 T は絶対温度。代表的な環境温度 300K において、ピーク放射は約 $9.7 \mu\text{m}$ (IR-C) で、溶鋼の温度 (~1800K) ではピークは ~ $1.6 \mu\text{m}$ (IR-B) に変位する。しかし、太陽の表面温度 (~6000K) ではピークは約 $0.48 \mu\text{m}$ (VIS) に変位する。

図 2 は、いくつかの代表的な黒体温度の分光ピーク変位を示している。

分光的および半空間的な分光放射輝度の積分は、特異的な放射輝度 (すなわち、表面放射束密度) を示す。それは式 3 に示したステファン-ボルツマン則の絶対温度に関係している。

$$W = \epsilon \times \sigma \times T^4$$

ここで、 $\sigma = 5.6687 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ はステファン-ボルツマン定数、 ϵ は物体の全放射率 (完全黒体で最大値 1)。放出された熱放射エネルギーは、温度とともに急速に増大することを注意

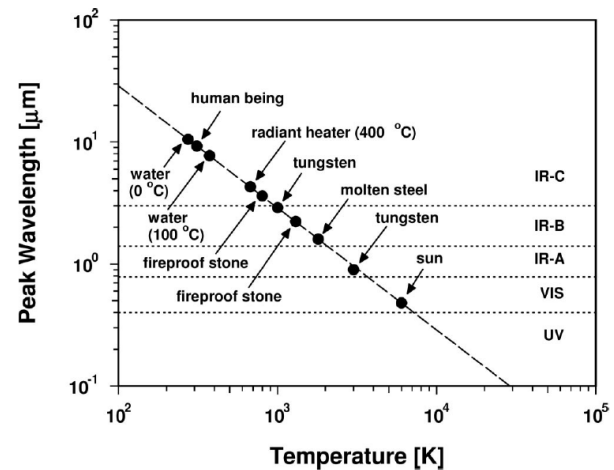


Fig. 2. The wavelength of maximal radiant exitance λ_{max} as a function of the absolute temperature for a perfect blackbody (dashed line) and for different bodies with temperatures between 273.15 K (0°C) and 6,000 K (Wien's Displacement Law).

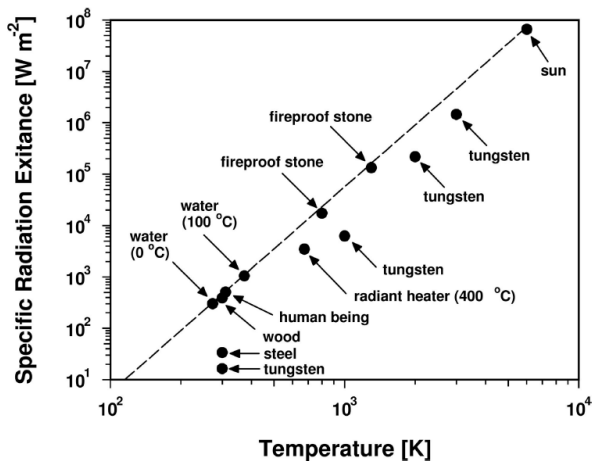


Fig. 3. Stefan-Boltzmann Law. The specific radiation exitance (W m^{-2}) as a function of the absolute temperature for a perfect blackbody (dashed line) and for bodies of different temperature and total emissivities (ϵ). Water and human skin ($\epsilon \cong 0.96-0.97$), wood ($\epsilon \cong 0.8-0.9$ at 300 K), steel ($\epsilon \cong 0.065$ at 300 K), tungsten ($\epsilon \cong 0.03$ at 300 K; $\epsilon \cong 0.111$ at 1,000 K; $\epsilon \cong 0.242$ at 2,000 K, and $\epsilon \cong 0.318$ at 3,000 K), fireproof stone ($\epsilon \cong 0.65-0.85$ at 800 K and $\epsilon \cong 0.75-0.90$ at 1,300 K), a radiant heater ($\epsilon \cong 0.3$ at 400°C), and the surface of the sun ($\epsilon \cong 1.0$ at about 6,000 K).

せよ。

図3は、300Kから約3000Kまでの温度で異なる全放射率の物質のデータと比較した、完全黒体の特異的な放射発散度を示す。例えば、太陽表面の全放射発散度は、それはほぼ6000Kの黒体と見なされ得るが、約 $7.348 \times 10^{-7} \text{Wm}^{-2}$ である。表面が600Kの黒体では、ステファン-ボルツマン則は $7.348 \times 10^3 \text{Wm}^{-2}$ と予測する。

特異的な応用

医学的応用

赤外放射の医学利用は、長い歴史がある。スポーツ傷害、筋肉痛、痛み、およびある種の慢性疾患の治療のための物理医学に広く使われてきた。近年では、癌の体温上昇治療のためのIR-A光源の利用に関心もたれている。IR-Aが深く貫通するので、これはほとんど排他的に使われていて、純粋なIR-Aを得るために赤外を水を通ることが治療に推奨されている。もう一つ、癌やレイノー症候群の体温上昇治療のために使われている、特別なIR-A治療装置がある。いくつかの治療的赤外装置の代表的治療照度は、 800Wm^{-2} は範囲に入る。ドイツ標準規格は、治療機器ではIR-Aを 1200Wm^{-2} までに制限している。直腸温のモニタリングは、深部体温の最も基本的な表示である。故に非常に暑い環境の場合、熱いずみの発生を決めるためにこの方法で、労働者は時々医学的にモニターされる。これはまた、IR-A治療を受けている患者にも使われる。

IR-Cは、癌の化学治療の後の解毒方としての利用が示唆されているが、治療応用には広く使われていない。

加温室

選択的な高体温(症)ー古典的な湿式サウナおよび高温浴であるがーは、1000年をさかのぼる。ドイツだけで約26百万人の常連のサウナ利用者がおり、遠赤外の加熱室の利用数が増加している。座った人が後ろおよび前から曝露されるような、電氣的に加熱されたセラミックか金属の放熱器が部屋の前あるいは後ろに

置かれたものを除く、サウナのような作りをした種々の赤外加熱室がある。IR-Cが主に放出するようにデザインされた場合、加熱素子は、たいてい約300~400°Cに加熱される。従来のサウナに比べ、IR-C加熱室において、皮膚の加熱と結果としての高体温は異なって作られるということが、いつも認識されているとは限らない。体と環境との間の熱交換は、赤外加熱室の場合は、ほとんど純粋に放射的である。考えるべき少なくとも三つの赤外加熱室がある。

1. 大きな部屋で低温加熱器：(基本的にすべての壁は暑くなる) 約50°Cから70°Cのより低い表面温度をしていて、皮膚の照度は相対的に低く、放射は純粋にIR-C(波長のピークは $\sim 7 \mu\text{m}$ にある)
2. IR-C加熱器を持つ部屋：加熱器は代表的には、セラミックか金属の、約50cmの長さの棒か、5cmx20cmの板。表面温度は一般的に、300~400°Cの範囲で、放熱器のハウジングの後ろに金属の反射板がある。後ろに置かれた放熱器は、代表的には10~15cmの背もたれのへこみがある。正面の加熱器から照射される人までの距離は通常50cmから1mのオーダーである。これらの放射器からハッサラレルIR-B分画は無視しうるもので、放射は主にIR-C帯にある。
3. いくつかの赤外暖熱室で、IR-BあるいはIR-Aを出する過処理されたフィラメントランプが使われているもの：ランプは基本的に長いフィラメントを持った石英-タングステンランプである。フィルタにより可視光成分がかなり減じられている。しかし、これらのランプはまた、どんな可視放射も出さない低温のIR-C放射器と簡単に区別されるために、少量の可視光を出す。IR-Aに最大放射を持つ放射器からの赤色光は、IR-Bに最大放射を持つ放射器よりも、より明らかである。IR-Aに主に放射させるために高い温度が必要なので、不快あるいは痛み反応を起こす曝露レベルを防ぐために、放射器の冷却が問題となる。

以下の議論は、主に、約300~400°Cの加熱素子温度を持つIR-C暖熱室に関するものである。従来のサウナの気温は、ほぼ約85~90°Cに保たれている。しかし、IR-C室の気温は、40°Cかそれより少ない温度であり得、主要な熱移動は、放射加熱によるものである。従来の加湿サウナのIR-Cの皮膚放射照度は、加熱された壁からの $110 \sim 200 \text{Wm}^{-2}$ であり、少なくとも、体の加熱全体の半分は対流によるものである。IR-C暖熱室の皮膚の加熱は、古い、従来のサウナより早い、従来のサウナにはふつう湿度がないので、皮膚のより高い放射照度が(通常使用者によって好まれる)顕著な発汗を生じさせるために、適用されなければならない。しかしながら、IR暖熱室では、熱対流により、無視しうるかわずかの熱交換があり、このように、IR-C放射照度値は、同様な体全体の高体温を達成するために、より高くなければならない。(大きな区域で低温の加熱板を除いて) IR暖熱室の壁は従来の加湿サウナの壁より低い温度にあるので、体に対する放射照度のパターンは、はるかにより少なく単一である(=複雑である?)。このような暖熱室で同じ温度の高体温を実現するために、皮膚表面の平均IR-C放射照度は、約 $200 \sim 400 \text{Wm}^{-2}$ で、 1kWm^{-2} のオーダーの熱点を持つ。多くのサウナ愛好家は、実際、元々のサウナとより早いセッションのための今日の赤外室の両方を持っている。

赤外放射の生物学的影響

光学放射は一般的に、皮膚と目の組織で表面的に吸収される。しかし、波長により貫通する深さが変化する。分光帯によっては、目の角膜、水晶体と網膜は危険な状態になり得る。放射エネルギーの吸収に続いて、組織との相互作用が熱的にもあるいは光化学的にも起こりうる（そこでは、個々の光子が直接個々の分子と相互作用を起こし、直接化学的変化を引き起こす）。体全体の熱ストレス（高体温）から細胞への影響まで、間接的な影響も可能で、そこでは上昇した細胞温度がまた DNA の修復を妨害する。慢性的な、反復した皮膚の温度上昇はまた、温熱性紅斑と呼ばれる色素変化を起こす。

一般

生物学的組織との相互作用のメカニズム。 目と皮膚は、自然環境からの光学放射に対して体を守るように適応している。人間は、適当な追加的防具を使うよう学習してきた。嫌悪反応は、正常に曝露期間を 0.25~10 秒より小さくなるよう制限する。これが、目や皮膚を太陽、白熱ランプおよび暑熱物体からの放射のようなものによる熱的損傷から守る。明るい光に対する嫌悪反応は、目の安全基準で 0.25 秒と形式化されているが、熱的回避反応に対しては、皮膚の熱受容体のために、そのように定式化されていない。皮膚の大きな面積は、同じ放射照度に対して、(レーザービームからのような) 小さな面積に比べ、より容易に高い温度に加熱されやすい。皮膚の熱痛感覚終末端の分布のために、熱の感覚は、照射された皮膚の面積がより大きい場合、より確かになる。

光学スペクトルの紫外と可視の部分における組織の相互作用は、熱的にも光化学的にも始まる。しかし、赤外光源に対しては、皮膚と光学組織の熱的損傷は、主要な相互作用メカニズムである。紫外放射のない光学放射源による皮膚癌は、重要なリスクとは考えられておらず、下のセクションでより細かく議論する。近年、細胞の活動性に影響する、赤および IR-A のスペクトル帯での光化学的相互作用を示す研究も出てきた。しかし、IR-B および IR-C と生物学的組織との相互作用に対して、熱的相互作用のみが知られている。

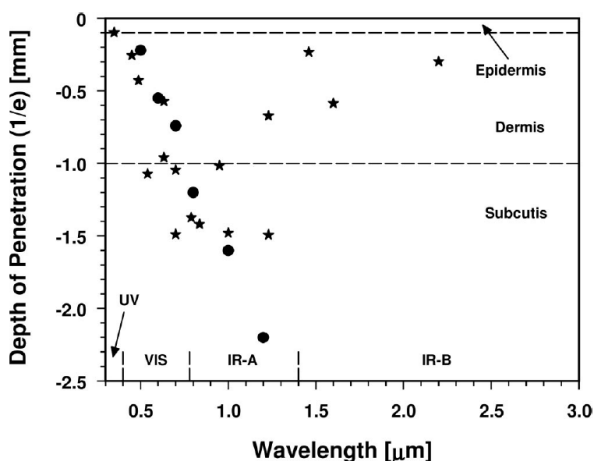


Fig. 4. Skin penetration depths of optical radiation to 37% (1/e) of the incident surface irradiance in the spectral range 0.3–3.0 μm into fair human skin as a function of wavelength, and compared with the order of thickness of the epidermis (0.1 mm) and of the dermis (1 mm). The calculated values by using spectral data of the absorption coefficient and of the reduced scattering coefficient published by different authors are shown as stars. These are compared with the data of Anderson and Parrish (1982) (circles).

IR-A は、IR-B や IR-C より深く (数ミリまで) 組織を貫通する。組織への IR-C の貫通は、ほんの表面的なものである。入射放射照度の、1/e (37%) で表される貫通深さは、0.1mm かそれより小さいオーダーである。約 0.25mm では、95%の入射放射は吸収と分散で減衰する。このために、IR-A は、よりしばしば、医学的に血管系や筋肉系へ熱エネルギーを配達するために応用されている。図 4 は、異なる IR の波長ごとに貫通深さを mm で示している。

熱的相互作用のメカニズムの特徴。 光化学的損傷と違って、熱的損傷は、放射照度と曝露時間の間に相反則を示さない。熱的損傷は、照射を受けた組織からの熱伝導に強く依存している。数秒以内に組織を凝固させるには、強い曝露が必要である。もし曝露が強くなければ、周辺組織は、曝露された部位から適切に熱を伝導により逃がすであろう。実験動物における角膜と網膜の両方の急性熱損傷に対する閾値は、フラッシュやけど事故データによって、人間の目のために、確認された。短時間の時間-温度経過が、主にレーザー波長で研究され、詳細なデータが、豚の皮膚や網膜上の小さな像に対して、得られた。放射照度は、周辺組織の温度や曝露された部位、あるいは照射されたスポットの大きさに依存する、これらの温度を達成することが必要である。

小さなスポットのより効果的な冷却のために、小さいスポットの損傷は、大きなスポットの損傷より、より高い放射照度が必要である。この小さい区域のより効果的な冷却はまた、光学曝露中止後の温度上昇の時間を制限する。故に、曝露された組織の、決定的に重要な時間-温度経過に影響を与える。このように、所定の曝露時間に対する、単純な臨界温度というものはない。スポットの大きさは、目あるいは皮膚の曝露を記述するために、特定されなければならない。

皮膚への影響

急性赤外曝露と皮膚の熱傷。 通常は、少なくとも 45°C の温度が、熱傷を生じさせるために必要である。より短い曝露時間で熱傷を生じさせるためには、より高い温度が必要である (例えば、約 47°C で 10 秒、57°C で 1 ミリ秒)。分光学的分布でも変化する、赤外線による皮膚の熱傷の産生に対する量-反応曲線について長い間議論があった。いくつかの報告は白色光源での傷害研究に関するものであり、別の報告はレーザーによる損傷で、しかし、どの場合も、損傷のメカニズムは純粋に熱的であると仮定している。可視や近赤外からのリスクを減じるには、皮膚の反射率が大きな役割を演じる。

IR-C (および IR-B) と IR-A を区別することが決定的に重要である。そこでは、赤外線は真皮、およびより深く皮下組織までもよく貫通する。真皮は約 1mm の厚さで、ほとんどの神経終末を含んでおり、一方、表皮は少なくとも 100 μm の厚さで、血管は持っていない。IR-B は、表皮および真皮で吸収される。しかし、IR-A 放射ほど深くは吸収されない。IR-C は、全部、上皮下層と表面の表皮で吸収される。このように、IR-C による深い加熱は、熱移動すなわち、組織での熱伝導と血流により、によってこそ達成される。結果として生じる表皮の温度は、皮膚が IR-C で照射された場合は、それより短い波長の同様な熱負荷より、高い。IR-C 曝露により生じた長期間続く紅斑応答は、おそらく、このタイプの放射での増大した表皮の温度の結果であろう。

組織学的分析により、以前に、熱痛より低いレベルの、赤外放射に曝露された皮膚に、検出可能な初期の変化が示された。これには、血管拡張、(紫外放射へ曝露された後に見られる防災ス

トレスのサインであるが、DNAの損傷には関係していない) 脱顆粒肥満細胞の血管周囲への蓄積がある。短時間で、単発の赤外曝露はまた、プロスタグランジン D2、E2、および F2 の表出を起こす。

遅延影響。赤外放射からの唯一広く報告されている遅延影響は、温熱性紅斑である。温熱性紅斑は、熱傷を負うには不十分な上昇した皮膚温に慢性的に繰り返し曝露された部位に現れる。外観は、網状、斑状（あるいは少し浸潤性）および赤みを帯びた茶色である（最初は赤く、後に赤黒くなる）。反復上昇した皮膚温の初期の影響は、表皮の萎縮、皮膚の混合型細胞巢の浸潤、メラノファージ、自由に存在するメラニン、ヘモシデリンに起因する、色素形成である。後に、弾性線維の変化と異角化を伴うおよび伴わない過角化を含む、結合組織の好塩基性変性、が観察された。

セントラルヒーティングが出現する前、熱性角化と温熱性紅斑は、暖炉の持ち主の裸のすねにかつてしばしば見られていた。今日では、胴体の上に乗せる温熱瓶の常用で生じた報告はあるが、温熱性紅斑は希である。温熱性紅斑は、いろいろな名前では呼ばれているが、かつて、18世紀の劇場で濾過されていないランプを使ったことによる、男優や女優、および鍛冶屋の間に、ふつうに見られた。

温熱性紅斑が、IR-Aは放射エネルギーをより深く運ぶので、IR-Aよりは遠赤外から起こりやすいかどうかは、明らかではない。どんな手段で熱が伝わるにしても、赤外放射に曝露されなくとも、暑い表面に接触することから起こる皮膚の加熱のケースで、温熱性紅斑がまた観察されているので、温熱性紅斑の誘導は、一般的に、上昇した皮膚温の繰り返し履歴に関係している。

もし加熱の行動が中断されれば、温熱性紅斑は数年後に消失する。しかし、慢性的な炎症が、皮膚癌の発現部位になり得るといふ、事例がある。実際、これは、「芝一火癌」あるいは「アイルランド農夫の妻の癌」あるいは「cangri cancer」と名付けられている。関連する癌は、だいたいいつも扁平上皮癌で、基底細胞癌は希である。赤外放射が癌原性であるという仮説を支持する証拠はない。赤外がDNAに影響することを示唆するいくつかの出版があるのみである。例えば、日焼け止めに、ミネラルの反射物質 (TiO₂, Zinc) の導入による、赤外光防護の研究で、赤外と熱は、紫外放射と相乗的に作用し、皮膚DNAの変性を起しうる、および、潜在的に光癌原性でもあろう、ということに、関心が持たれた。他の人々は、近赤外放射は、正常な人の皮膚の線維芽細胞を太陽の紫外光毒性から守る、と議論した。しかし、増大した温度が、存在するDNA損傷の修復効果を減じうるといふ証拠もあり、表皮の繰り返し加熱が、(紫外放射のような)他の動因によって誘発された、皮膚癌の形成を促進しうる、ということ是不合理ではない。Edwardsらは、IRに照射された皮膚の表皮の厚さの増大を、日光角化症に見られる変化、および紫外曝露に起因する前腫瘍性および腫瘍性組織に見られる変化と同様な、グルコース-6-フォスフェイト脱水素酵素の細胞化学的变化、と合わせて、報告した。おそらく、これらの観察のために、Doverらは、IR放射の光癌原性を示唆したが、増大した温度により生じたこれらの皮膚の変化は、直接的な熱的に誘発された曝露された組織のDNA損傷を確認しない。文献レビューでは、加熱単独では、正常細胞のDNA損傷を起こすことは期待されないという結論を支持している。しかし、過剰な表皮の温度は、紫外あるいは化学的曝露によって起こされた損傷から、DNA修復の効率を減じることによって、発癌補助物質(プロモータ)として振る舞う。上昇した温度が、紫外線により誘発された紅斑の閾値を、変えること

は知られている。上昇した温度は、ゲノム的にすでに形質が転換された細胞を不安定にし、癌の進行に導く。温度は、発癌補助剤と考え得る。しかし、強力な中圧の水銀アークの全分光放射よりも、280~340nmの紫外放射はより影響が小さいという、実験的な証拠がある。それには、可視および赤外による上昇した皮膚温による可能性があると推論されている。彼らは、35~38℃の室温において、(280~340nmの)紫外の癌原性は、(23℃付近の、3~5℃差はある)ふつうの室温に比べ、より強い率で進展する、ということを示した。Freeman and Coxは、後者の結果を室温(32℃対24℃)で、確かめた。総合的な結果は、紫外放射は、1℃につき3~7%高い効果を、示す。Van der Leun and de Gruijlは、気候の変化は皮膚癌の発生に予期しない影響を持っていると、推論した。これ故に、たつぷり太陽をあびた後、あるいは人工光源で日やけた後、少なくとも24時間までは、温暖室の利用を避けるように警告することが重要である。

温熱性紅斑の研究は、なにがしかの価値はあり得るが、しかし、これはもはや広く観察されていないので、最近の科学的研究は無く、多くの証拠は逸話的である。温熱性紅斑を動物に作り出そうという試みがあり、いくつかは成功した。Meffert and Piazenaは、(公刊されていないが)100Wm⁻²と1000Wm⁻²のIR-C放射による皮膚温上昇の時間経過を測定した。彼らは、1000Wm⁻²(すなわち、90Jcm⁻²の放射曝露に導く100mWcm⁻²)へ15分間曝露された後の紅斑の発現を記している。(45℃以下の皮膚温を示していた)ほとんどの被験者が痛みを報告しなかった。当初、紅斑は一律に現れ、しかし、数分後、網状になり、それは小皮膚血管のある場所に対応していた。これは、長期にわたって続く紅斑、すなわち、温熱性紅斑、の発現の、初期の段階である。持続する紅斑は、熱傷の閾値より低いIR-A曝露により生じた一過性の紅斑の特徴である、血管の直接的な拡張よりも、表皮の炎症性応答から、より多く結果しうる。第一度の皮膚熱傷は均質で、急速に現れる。小血管の漏れがあり、熱傷に持続的な発赤がある。第一度の熱傷の明らかなケースとIR-Cの持続的な紅斑との間の区別は明確に定義されていない。

温熱性紅斑は、それ単独では重篤な健康問題ではないが、より美容的な問題である。しかし、それは、発がん性のある化学物質、あるいは紫外放射曝露の下で、皮膚癌の進展のリスクを増加させうる、皮膚の熱的損傷を示している。温熱性紅斑を誘発する閾量は、熱痛の閾値より低い可能性があることに気をつけねばならない。現在利用できるデータは、閾曝露量の存在と皮膚の異常に持続的な紅斑を誘発する放射照度を示している。決定的な閾値を示すためのさらなる研究が必要である。

しかしながら、もし急性の紅斑が(少なくとも1~2時間は続き)持続的であるなら、それは異常であり、乱用の警告サインであると考えべきである、と考えるのが実践的な推奨である。同様に、網状のパターンが現れたら、それは未来の曝露を制限するための明確な兆候である。曝露が繰り返されない場合、しばらくすると紅斑は消失する、すなわち、持続的な紅斑に導く曝露がしばしば反復されないのであれば、遅延的な影響はないであろう。しかし、多くの赤外温浴室のデザインは、曝露はほとんど背中であり、皮膚の応答は使用者に容易に観察されない。痛みがないことは、副作用がないことを示すものではない。持続的な紅斑は、曝露時にその人が痛みを感じない時でさえ、現れる。

目への影響

強烈なインコヒーレントな光源からの潜在的な熱的有害性のどんな計算も、ふつうIR-AとIR-Bの寄与を考慮しているが、

IR-C は、IR-C の寄与がわずかであるために、太陽あるいは溶鋼を含む、ほとんどの光源について減多に考慮されていない。異なる赤外分光帯により、目の異なる構造が影響を受ける。1350～1400nm までの波長では、透光体はエネルギーを網膜に伝える。それより長い波長帯では、前眼部が入射エネルギーを吸収する。キセノンアークランプや核による火球のような非常に強烈な光源のみが、熱傷を生じうる、網膜曝露を起こしうる。前眼部（角膜、房水、水晶体）により吸収される赤外放射は、対応する閾値を超えれば、角膜と水晶体を曇らせ得る。曝露限界は、急性と慢性の両方の曝露から守るために設定されている。

赤外放射への前眼部の慢性的曝露に対する基本的曝露限界に関するデータは、非常に限られている。Slincy and Freasier は、太陽光の赤外放射からの平均的な角膜曝露は、 1mWcm^{-2} のオーダーであったと述べており、日の出や日の入りの時を除いて、目は直接的に太陽の方へは減多に向けないと考えている。毎日 10～15 年間にわたって $80\sim 400\text{mWcm}^{-2}$ までのオーダーの赤外放射照度へ暑熱環境で曝露された、ガラスおよび鉄鋼労働者が、報告によれば、水晶体混濁を発現した。角膜および水晶体の曝露は、光源との相対的な位置や目を閉じる程度により影響される。

Pitts and Cullen は、IR-A に起因する急性水晶体変化に対する閾値曝露は、1 時間かそれ以上の曝露時間で、 50MJm^{-2} (5kJcm^{-2}) のオーダーであることを示した。損傷に対する閾値放射照度は、少なくとも 40kWm^{-2} (4Wcm^{-2}) であった。Wolbarsht は、 1064nm で作動する ND:YAG レーザを使ってやや似たレベルを示した。Scott and Okuno は、計算された温度上昇は数度であることを示した。Vos and van Norren は、 1kWm^{-2} という放射照度は、 1°C 異常は目の前眼部の温度を上昇させず、このレベルは（平行レーザービームとしては）受容できる、と議論しているが、非コヒーレント光からの、**頭全体あるいは胴体のほとんどにわたる**、そのような放射照度は、拡張した時間に対しては受け入れられない。委員会は、故に、(35°C を超える) 非常に暖かい環境に対しては、目の放射照度は、長い曝露については、 100Wm^{-2} を超えるべきではないと、推奨した。しかし、より高い放射照度は、より短い時間では、安全に維持できる。より高い放射照度は、水晶体の温度が 37 度以下に保てるような、寒い環境では許される。冬の屋外環境での放射温暖化に対して、 300Wm^{-2} のオーダーの放射照度は日常使われている。角膜、房水および水晶体に吸収される放射エネルギーは、光学的な貫通深さにかかわらず、伝導により移動し、何らかの加熱が水晶体に起こる。貫通する深さは、IR-A と IR-B の分光帯で大きく変化するが、その変化 1.2 と $3\ \mu\text{m}$ の間は一、一端熱的へ移行が達成された連続的な光源への曝露からの、最終的な温度上昇には小さな影響しか持たない。水晶体の最終温度はまた、環境温度にも依存する。環境温度が 37°C を下回る温度では、少なくとも 6Wm^{-2} (0.6mWcm^{-2}) の追加的な放射曝露が、水晶体の温度を維持するために、要求される。

環境的な白内障と温度に向けられた、包括的な疫学研究はない。Miranda and Weale は、地理的に異なる地域で、白内障の発生率と白内障と老眼の発生時期が異なることを記述している。白内障と老視の両方の発生時期は、より温暖な環境でより早いことは明らかであった。最近では、白内障のタイプにおける緯度の変化が、Sasaki らによって示された。これと実験室の研究で、特に核性白内障の発生率と発生時期に関する、熱的因子を示唆する。

前に記したことであるが、急速に変化する光化学的な作用スペクトルは、紫外および短波長光の曝露に特徴的なものである。分光学的データは、故に、その波長帯では特に重要である。赤外の影響は主に熱的であると考えられているので、角膜と水晶体の慢

性的な赤外曝露は、分光学的感度で急速な変化に関わっていると信じられていない。

目の中の熱伝導を数学的にモデル化し、IR に曝露された目の温度上昇を計算しようとする、いくつかの努力があった。人間の目に対する計算は、目の温度は一般的に最初の 2 分の曝露で急速に上がり、それから、徐々に水平になり、約 5 分くらいで再考に達する、ことを示す。Scott もまた、曝露後目が冷えるには数分かかることを示した。目の IR-B あるいは IR-C 曝露に対して、Okuno は、温度上昇は角膜の表面で最大になり、そして網膜に向けて徐々に減少する、ことを示した。彼はまた、温度上昇は角膜表面で最も早く、目の深いところではやや遅れる、ことを示した。赤外放射に曝露されたウサギの目の目の温度測定を試みは、これらの傾向を全部示した。水晶体に**焦点が合った放射**が、ある種の眼科機器光源により起こる。角膜は大変熱刺激に敏感で、このことは、有害な赤外曝露を制限する傾向と持つであろう。

赤外曝露からの熱的損傷に対する角膜と水晶体の保護基準に加えて、熱損傷から網膜を守るために第二の基準が必要である。フィルターによって可視放射が取り除かれた、特殊化された IR-A 照明器具を見ることは、明るい光への回避反応を妨げることになる。網膜保護のためのこの基準は、Ham らの研究に大きく基礎を置いている。彼は、赤外分光帯に光化学的影響がないことを示した。

水晶体と網膜での、熱と光化学的影響の相乗作用は、多くの実験で研究されてきた。光化学的反應の熱による増加は、実験的に示されている。(ただし、その影響は、二つの内の一つの要因より小さい。このことは、安全により大きいマージンを導入することによって、曝露限界を導出に考慮されている。

熱制御

人の体は、深部で約 37°C のほぼ一定の体温でそれ自体を維持している。これを「**深部体温**」という。熱制御という用語は、約 37°C の所定の範囲内での深部体温を維持することをお記述するためにふつう使われる。実際の温度は人や 1 日の時間（概日リズム）によって幾分異なるが、わずか 1°C 以内である。激しい運動あるいは病的な状態では、深部体温は、最低の約 35.5 度から最高の約 40 度まで変化する。熱的負荷もまた、深部体温に影響する。熱的負荷は、環境条件の変化（気温、環境蒸気圧、気流、放射照度および衣類）、および体内の熱産生（内因性熱源）に由来する。エネルギー保存則は、熱制御研究の基礎を形成する。相対的に一定の体温を維持するために、環境との熱交換はバランスがとれていなければいけない。熱交換の主要な構成要素は：

- ・代謝による熱生産（大人で $\sim 100\text{W}$ ）；
- ・身体的活動—持続的な活動で 100W から 400W ；
- ・放射熱交換—皮膚と環境の温度の差に依存する（ステファン—ボルツマン則）；
- ・対流による熱交換—気温、気流、曝露される皮膚の表面等に依存する；
- ・蒸発による冷却—相対湿度、曝露される皮膚表面等に依存する；および
- ・体内の蓄熱—体の大きさ等に依存する

熱制御システムは、参照（あるいは、「セット」）温度を伴う、負帰還制御系として機能する。温度センサーが体全体に配置され、局部組織温度に関する情報を提供する。皮膚内にある温度センサーは、最も重要であるが、体深くに別のセンサーがある。熱スト

レスと熱制御の動物実験は、時々誤解を与える。特に小さい齧歯類に対して、熱ストレスが与えられ、熱歪みが生じた時回復力が弱い。

発汗は、環境熱交換に主要な役割を演じる。Ogawa は、汗腺に対して IR の直接的な影響はほとんどないと報告している。直接的な影響は小さく、波長に依存しない。

熱交換を記述するための定量的なアプローチが、目的に従って、いくつか行われた。熱交換の複雑な方程式、いくつかのタイプの熱ストレス指標、および、実効温度と熱快適指標がある。放射加熱は、屋内作業環境でより大きい役割を演じる傾向がある。というのは、屋外労働者に対しては、太陽光が主要な放射熱負荷であり、皮膚は顕著な、主には可視および IR-A である、太陽放射を反射するからである。それに対して、産業現場環境では優勢である IR-B、IR-C 放射は、表 5 に示すように、皮膚より顕著に反射されない。熱ひずみは放射熱負荷(すなわち、放射照度レベル)だけでなく、気温、湿度および空気に動きに依存するので、熱ストレス、およびその結果としての熱歪みを予防するための単純な放射照度限界を設定することは、かつて、マイクロ波の曝露限界の開発で使われた、最も悪いケースの値を推奨するものでなければ、不可能である。後者のタイプのガイダンスは、環境の赤外曝露あるいは寒冷環境での放射加熱に対して、多くの場合大変制限的である。赤外温熱室あるいはサウナの特別な場合に対して、あるレベルの熱歪みがしばしば意図されている。そして、熱歪みを予防するために熱ストレスを制限することは、過剰でありがちである。もし、強烈な IR-A 温室に対するような、深部体温に関心があるとすれば、特殊化した道具でモニターすることができる。体の熱容量の急速な増加は、身体能力を長期間にわたって衰えさせ、熱関連の疾病に罹患しやすくなる。

曝露限界

現在の ICNIRP(1997)の、赤外放射に対するガイドラインと、IR-C 波長帯へのその応用の推奨は次の通りである。

角膜および水晶体

角膜の熱的損傷と水晶体への遅延影響(白内障形成性)の可能性を避けるために、赤外放射(770nm<λ<3μm)は、長時間曝露(>1000s)に対しては 100Wm⁻²(10mWcm⁻²)、短時間曝露に対しては 1.8t-0.75Wcm⁻² に制限すべきである。

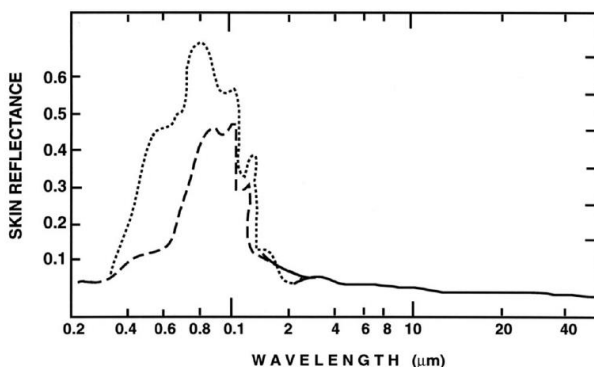


Fig. 5. Spectral reflectance of lightly (dotted line) and darkly (dashed line) pigmented human skin.

あるいは、

$$EIR < 18t - 0.75k \text{ Wm}^{-2} \quad (t < 1000s) \quad (4a)$$

$$EIR < 18t - 0.75 \text{ Wcm}^{-2} \quad (t < 1000s)$$

あるいは、

$$EIR < 100 \text{ Wm}^{-2} \quad (t > 1000s) \quad (4b)$$

$$EIR < 10 \text{ mWcm}^{-2} \quad (t > 1000s)$$

免除。寒冷環境では、0°Cで 40mWcm⁻²、約 10°Cで 30mWcm⁻²に増加できる。すなわち、これは、快適性のために赤外光源が放射加熱に利用されているところである。これらの限界が観察されれば、水晶体の温度は 37°Cを超えないだろう。もし、ガイドラインを IR-C 波長帯に適用する場合、IR-C 放射による過剰な加熱から水晶体と角膜を守るために、制限の適用が IR-C 放射を含むことに拡張されうる、といえる。すなわち、放射照度 EIR は、曝露制限と比較され、全積算放射エネルギーである。

網膜 (IR-Aのみ)

より高い温度源は、顕著な IR-A 放射を出しうる。強い可視刺激を出さない、赤外加熱ランプあるいは近赤外光源に対して、近赤外、すなわち IR-A (770~1400nm) は、次のように制限されるべきである。

$$\sum L \lambda \times R(\lambda) \times \Delta \lambda < (6000 \text{ W} \times \text{m}^{-2} \times \text{sr}^{-1}) / \alpha \quad (t > 10s) \quad (5a)$$

あるいは、

$$\sum L \lambda \times R(\lambda) \times \Delta \lambda < (0.6 \text{ W} \times \text{cm}^{-2} \times \text{sr}^{-1}) / \alpha \quad (t > 10s) \quad (5a)$$

個々に、Lλ は分光放射、これは、11mrad より小さい受光角では平均しない。R(λ)は ICNIRP が定義した網膜熱重み付け関数、α は単位 mrad の光源の対辺角。非常に大きい光源では、α は 100mrad までに限られていて、分光学的に重み付けされた放射は、60kWcm⁻²sr⁻¹、あるいは 6Wcm⁻²sr⁻¹ に減じられる。

10 秒より短い曝露に対しては、ICNIRP ガイドライン(1997)の式 4 が適用される。

1400nm より大きい波長は、網膜の有害性に寄与しないので、この限界は IR-C 曝露には関係しない。

皮膚への熱的損傷

波長帯が 400nm から 3μm の光学放射からの熱的損傷から皮膚を守るために、10 秒より小さい時間の放射輝度曝露は次のように制限されるべきである：

$$H = 20000t - 0.25 \text{ Jm}^{-2}$$

あるいは、

$$H = 2t - 0.25 \text{ Jcm}^{-2}$$

IR-C 波長帯への曝露に関するどんな関心をも **宣言する** ガイドラインは、保守的である。

IR-C 放射による熱的損傷から皮膚を守るために、曝露限界の適用は、IR-C 放射まで含めるよう拡張されうる。すなわち、放射照度 EIR は、曝露限界と比較され、可視の積算値と熱放射の合計である。

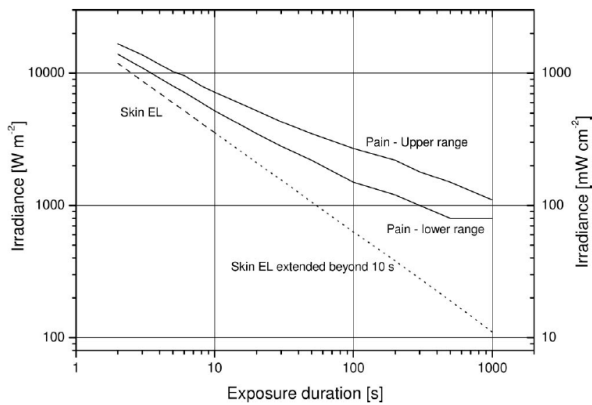


Fig. 6. Current ICNIRP exposure limit (EL) guidelines for IR-A and IR-B skin exposure are defined for exposure durations for up to 10 s. The function for the EL has been extended in the plot to exposure durations beyond 10 s for comparison with the change in slope of pain thresholds (top two curves) as adopted from the standard DIN 33403 (2001).

外部の熱環境条件に強く依存しているので、長い曝露時間に対しては正規化された曝露限界は提供されていない。最初の皮膚温や外部温度に依存して、通常の痛み応答や回避行動が曝露時間に制限を課す。さらに長い曝露時間では、熱ストレスや熱歪みが主な関心事である。長い曝露に対して、読者は、下記に議論している熱歪みを避けるための適当なガイドラインを参照されたし。

その他の基準

熱歪みを取りあつかっている多くの産業健康ガイドラインがある。その中に、ISO、ASHARE ハンドブック、ACGIH 閾限値および生物学的曝露指標、がある。これらは、WBGT インデックス、HSI、あるいは関連した式を使っている。

ドイツ標準規格 DIN33403 (part3 ; DIN2001) (「労働現場の気候とその環境；人間が耐えられる気候の評価」)は詳細な考察をしている。古典的な熱ストレス因子(気温、気流速度、湿度、熱放射、労働負荷、暖熱服因子)に加えて、DIN33403 標準は又、熱放射の隔離効果を扱っている。二つの条件が考察されている。

熱歪み。耐えられ、そして熱ストレスを制限する、最大の長期間放射照度値が、DIN33403 に公布されている。これらの値は、個人の労働負荷にも依存している。

痛応答。痛みを感じる点と感じない点の境界は、もし、皮膚が熱的放射に照射されていれば、図 6 に示すように、曝露時間の関数(節 5.2)として放射照度 (kWm^{-2} “実効照度”) のプロットとして示される。このように、所定の曝露時間に対して、痛み感覚を生じる放射照度は、決定しうる。同様に、所定の放射照度に対して、痛み感覚を生じる曝露時間を決定することができる。その境界は明確な線として提供されないが、それは広がった値として示される。このことは、熱放射への反応に個人的な変化があるという事実を反映している。その数字は、気候に順応した人、順応していない人に有効である。防護されていない皮膚に対しても有効で、その値は、照射された皮膚の面積に独立である。放射の波長帯は、特異的ではない。故に、放射曝露に顕著に寄与しているすべての波長をカバーすると仮定しうる。図 6 は、現在推奨されている皮膚曝露を制限する ICNIRP ガイドラインと DIN の痛み閾値を比較している。

赤外基準に使われている「実効照度は」、人の皮膚へ放射される放射束密度と皮膚により発せられる放射束密度との差である。

皮膚温は 32°C にあると仮定されているので、皮膚からの放射発散は、放射源の温度がより高ければ(例えば、数百 $^{\circ}\text{C}$) 役割は小さい。

結論

総合

(1) 熱ストレスの評価

ICNIRP の「広域帯非コヒーレント光放射の曝露限界に関するガイドライン」(ICNIRP 1997) で述べたように、現在知られているすべてのアークおよび白色光源に対して、IR-C 分光帯 (3~1000 μm) による寄与は、健康有害性という見地からは、通常実際に重要ではない。しかし、実質的な IR-C 曝露が存在し、熱ストレスに顕著に寄与し得るという状況があり得る。熱ストレスは、放射熱負荷と同様に、空気の移動、温度、および湿度のような他の環境因子に依存しているので、IR-C は、分離した因子としては評価できない。熱ストレスは、すべての寄与因子を考慮した適切なガイドラインを使って評価されるべきである。

(2) 加熱の発癌への影響

組織を加熱する赤外曝露は、癌原性、あるいは UV に対する促進因子、あるいは化学的な発がん性、と考えるべきではない。しかし、過去のいくつかの実験データによれば、皮膚の温度上昇は、UV 放射あるいは化学薬品のような発癌因子による皮膚癌の発現を加速しうる。このような影響は、しかしながら、赤外放射曝露に限られるものではなく、皮膚の温度上昇一般にあることである。温熱性紅斑に罹患した皮膚に皮膚癌が発現するリスクがより高いという過去の臨床的観察あるという、逸話的証拠がある。さらに、組織の加熱が、紫外線に誘発された皮膚の光化学的老化を促進するという、実験的証拠がある。

(3) IR-C の白内障への寄与

目の水晶体の温度上昇への IR-C 放射の相対的寄与は、より短い赤外波長帯による加熱と比べると、白熱の熱源を考えると、通常小さい。赤外の産業的熱白内障は、ほとんどが IR-A と IR-B の曝露の結果だと認識されている。

(4) 周囲温度、薬物の熱的損傷への影響

ICNIRP のガイドライン (1997) の IR-C 測定の前で示したように、IR-C 放射は、曝露レベル決定に含まれ、前眼部(角膜と水晶体)の保護と皮膚の熱的損傷のために、曝露限界と比較される。10 秒より長い曝露時間による、皮膚の熱的損傷(熱傷)からの保護のための曝露限界は、外部環境の温度が熱的損傷に対する閾値照度に大きく影響するので、提供されていない。熱痛は、熱傷を生じるに必要な温度より低い皮膚温度で生じる。そして、この痛みは、熱的損傷を予防するために曝露を制限する。しかし、ある種の薬物治療、薬物、アルコールは、痛覚を減じさせ、このような影響下にある人は、著しいレベルの光学放射に曝露されるべきではない、ということに注意しておかねばならない。

(5) DIN33403

もし、自然の回避反応(すなわち、痛覚)を経験したことない人に対して、可視および赤外放射への曝露を制限する必要があれば、DIN33403 の、長時間曝露に対する熱痛のための値が、曝露を制限するための参照ポイントとして、参考になる。連続曝露に

対する非常に保守的な照度のガイドラインが、 100Wm^{-2} の、全身の IR-C レーザ照度限界により、提供されている。そして、この限界は、より涼しい環境では過度に保守的である一方、温熱性紅斑のような遅延性の影響が起こらないようにする。このガイドラインの一般的な応用は、産業現場および涼しい環境で、多くの有用な IR-C の応用に、不利に影響する。連続曝露が、涼しい環境でさえも、有害な熱ストレスを起こす上限は、 1kWm^{-2} である。

(6) IR-C に関する今後の課題

ランプのデザインと赤外技術は、新しく、しばしばより強力な光学放射を使って、引き続き発展途上にある。新しいタイプの特別な目的を持つ放射ヒーターや温暖器の使用における、急速な進歩のために、赤外放射曝露限界の重要性が、増大している。赤白内障の損傷メカニズムと温熱性紅斑を生じる量-反応曲線に関する研究が直ちに必要である。IR-C 室の潜在的な遅延影響（および有益性）をさらに研究し、生産者は、局所的な照射を予防し、その照射を必要最小限にとどめ、使用者に対しては赤外温室を過剰に使用すべきでないことを適切に伝え、温熱性紅斑に発展する可能性のある、持続的紅斑の検査を自ら行う、ことが必要とされている。

赤外室

赤外温室は、特殊なタイプの曝露状況の代表である。その皮膚への照射レベルは、相対的に高くなり得て、しばしば、上昇した気温と結びついて、曝露は選択的となる。現在まで、IR 室の連続的な使用に関連した温熱性紅斑の事例報告はない。本当に、温熱性紅斑が IR 温室の代表的な使用パターンにより生じるということは、非常に起こりそうにない。温熱性紅斑は、毎日数時間の強い慢性赤外曝露により典型的に誘発される。大きな面積を占めるヒーターを持つ温室は、より表面温度が低く（約 $50\sim 70^{\circ}\text{C}$ ）、放射照度は、高い温度加熱素子を持つ温室に比べ、低い。

サウナ使用の長い歴史故に、伝統的なサウナからの有害健康影響はないと推定されている。しかし、統制された臨床試行はなく、あるいは、サウナの健康影響を明らかにする前向き疫学研究もない。赤外温室の有益性についての統制された研究もない。しかし、過剰な曝露のリスクの可能性への何らかの洞察が、生物システムに対する熱の影響のより一般的な研究から、引き出されるであろう。

推奨

熱ストレスおよびある程度の熱歪みを生じさせるルーチンの IR-C 曝露がリスクがないかどうか、を決定するための、さらなる研究が必要である。

実験的研究で示された潜在的な有害遅延影響に関して、人は、人工光源および日光浴により UVR 曝露後、同時あるいは 24 時間以内の、皮膚の加熱をやめさせるべきである。

心血管系の病気に罹患している人のように、高体温のリスクにある人は、赤外温室を使用する前に、医学的アドバイスを求めるべきである。

持続的な紅斑（1 日以上続く皮膚の発赤）および赤外放射への通常の曝露の後、網状の色の変化が続く時は、曝露は繰り返されるべきではなく、温熱性紅斑を予防するために医学的アドバイスが求められるべきである。

熱痛感受性の強い人は、赤外温室を使うべきではない。アルコール、トランキラーザーの影響下にある人も同様である。

（謝意）略

（文献）略