

01 紫外線・赤外線にさらされる業務

(1) 紫外線、可視光、赤外線の波長区分

可視光は、日本では赤、橙、黄、緑、青、藍、紫という虹の七色に表わされるように、我々に見える色のことをいうが、JIS Z8120 : 2001「光学用語」では次のように定義されている。

光	a) 目に入って視感覚を起こすことができる放射。可視放射ともいう。 b) 紫外放射から赤外放射までの波長範囲に含まれる放射。 c) 視覚系に生じる明るさ及び色の知覚・感覚。
可視放射、 可視光、 可視光線	目に入って、視感覚を起こすことができる放射。 光線という概念で用いる場合は可視光線という。 一般に可視放射の短波長限界は 360~400nm、長波長限界は 760 から 830nm にあると考えてよい。
紫外放射、 紫外線	単色光成分の波長が可視放射の波長より短く、およそ 1nm より長い放射。
赤外放射、 赤外線	単色光成分の波長が可視放射の波長より長く、およそ 1mm より短い放射。

国際照明委員会 (CIE Commission Internationale de L'éclairage) の用語集には次のように記述されている。(http://eilv.cie.co.at/)

17-1367 ultraviolet radiation 紫外放射	紫外放射とは、可視放射より短い波長領域での光放射である。 100nm から 400nm の間の放射は一般的に次の三つに細分される。 UV-A: 315 nm ~ 400 nm UV-B: 280 nm ~ 315 nm UV-C: 100 nm ~ 280 nm 400nm より短い波長領域の視覚は非常に明るい光源と記述されるので、可視と紫外の間の正確な境界は定義できない。いくつかの分野では、紫外領域は、「遠紫外」「真空紫外」「近紫外」と細分されることもある。しかし、その境界は応用分野により異なる(例: 気象学、光学デザイン、光化学、熱物理学、等)。省略形は、"UVR"である。
---	---

17-1402 visible radiation 可視放射	可視放射とは、直接に視覚を生じさせるすべての光学的な放射である。可視放射の限界は、網膜に到達する放射エネルギーの量と観察者個々の応答性に依存しているので、可視放射の正確なスペクトル幅はない。一般的に、下限は 360nm から 400nm、上限は 760nm から 830nm とされる。
17-580 infrared radiation 赤外放射	赤外放射は、波長が可視放射より長い放射で、780nm から 1mm まで放射である。赤外放射は、一般的に次の三つに細分されている。 IR-A: 780 nm ~ 1400 nm あるいは 0,78 μm ~ 1,4 μm IR-B: 1,4 μm ~ 3,0 μm IR-C: 3 μm ~ 1 mm 780nm 以上の波長の視覚性は、より波長の長い非常に明るい光源と記述されるので、「可視」と「赤外」の正確な境界は定義できない。いくつかの分野では、赤外スペクトルは、「近赤外」「中赤外」「遠赤外」の三つに区分されているが、その境界は応用分野により異なる（例：気象学、光化学、光学デザイン、熱物理学、等）。

国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection）は CIE の区分が光学放射の光生物学的影響を議論するのに有用だとして、その区分に沿った防護ガイドラインを発表している。

（ICNIRP Guidelines on limit of exposure to incoherent visible and infrared radiation: Health Physics 105(1): 74-91; 2013）

CIE の区分に波長 1mm 以上のマイクロ波、100nm 以下の X 線を合わせて図示すれば次のようになる。

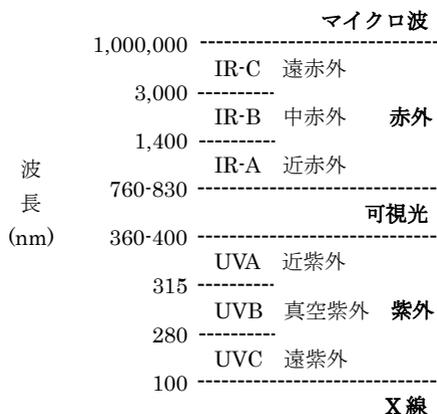


図 1 光の分類（CIE）

(2) 光の健康への悪影響

レーザーを除く LED を含むランプ、照明器具などのランプシステムにおける光生物学的安全性の試験項目及び試験方法について規定した「JIS C7550 : 2011 ランプ及びランプシステムの光生物学的安全性 (Photobiological safety of lamps and lamp systems)」は安全性のためのリスク評価試験項目を表 2 のように定めている。

表 2 「表 1-リスク評価試験項目及び記号」

リスク	リスク評価試験項目	リスク評価試験項目の記号
目及び皮膚に対する紫外放射傷害	目及び皮膚に対する紫外放射傷害の実効放射照度又は露光許容時間	E _S
目に対する近紫外放射傷害	目に対する近紫外放射傷害の放射照度又は露光許容時間	E _{UVA}
青色光による網膜傷害	青色光による網膜傷害の実効放射輝度又は露光許容時間	L _B
小形光源 a)の青色光による網膜傷害	小形光源の青色光による網膜傷害の実効放射照度又は露光許容時間	E _B
網膜の熱傷害	網膜の熱傷害の実効放射輝度又は露光許容時間	L _R
網膜の低可視光熱傷害	網膜の低可視光熱傷害の実効放射輝度又は露光許容時間	L _{IR}
目の赤外放射傷害	目の赤外放射傷害の放射照度又は露光許容時間	E _{IR}
注記 対応国際規格では皮膚の熱傷害の露光限界を規定しているが、リスク評価試験項目に該当しないため、この表から外した(附属書 JC 参照)。 注 a) 6.4 で規定した測定距離における視角が 0.011 rad 未満の光源とする。		

(3) 日本産業衛生学会の紫外放射の許容基準 (産業衛生学雑誌 54 巻 5 号 221-222 ページ、2012 年)

紫外放射 (波長 180 ~ 400nm) の許容基準を、実効照度の 1 日 8 時間の時間積分値として 30J/m² と定める。ただしこの値は、角膜、結膜、皮膚に対する急性障害の防止に関する許容値であり、またレーザー放射には適用しない。

実効照度は、次式によって定義される。

$$E_{eff} = \sum_{\lambda=180nm}^{400nm} E_{\lambda} S(\lambda) \Delta\lambda$$

ここで、E_{eff} は実効照度、E_λ は曝露面における紫外放射の分光放射照度、S(λ) は表 XII-1 に示す相対分光効果値 (略)、Δλ は積和をとる際の波長幅である。

紫外放射の生体影響は波長によりかなり異なるので、波長ごとの紫外照度を求め、それに「相対分光効果値」という数値をかけ、足し合わせたものが「実効照度」である。日本産業衛生学会が与えた相対分光効果値の表は省略したが、それを図示すると図 1-1 のようになる。可視光に近い近紫外と呼ばれる UVA の領域の効果値はほぼゼロで、通常の照射では健康影響もほぼないことを示している。

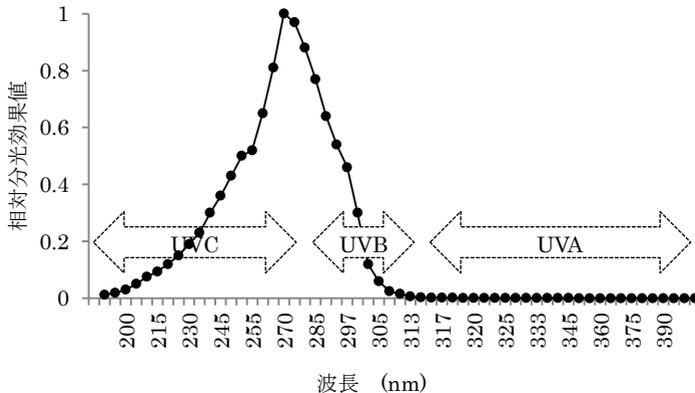


図 1-1 相対分光効果値
(日本産業衛生学会「許容濃度等の勧告」(2012 年度)より作図)

(4) ICNIRP のガイドライン

(ICNIRP Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelength between 100 nm and 400 nm (Incoherent optical radiation)、Health Physics 87(2): 171-186; 2004)

皮膚および目に対する 8 時間以内の紫外放射の一般のおよび職業的曝露限界は次の通りである。

1) 目への曝露

防護されていない目への 180nm から 400nm の波長の紫外放射	実効照度で < 30J/m ²
315nm から 400nm の間の波長の紫外放射	全放射曝露 (実効照度ではなく) で < 10000J/m ²

2) 皮膚への曝露限界

<p>最も敏感で、かつ病的ではない皮膚のタイプの (melano-compromised : 太陽光線でいつも日焼けするが、色素沈着はほとんどないか時々ある a)) 人で、かつ皮膚が防護されていない 180nm から 400nm の波長の紫外放射</p>	<p>実効照度で < 30J/m²</p>
<p>・この限界値は、長期間の皮膚への曝露のリスクを最小化するための望ましい値として考えるべきものである。この値は、太陽光線への曝露に対しては達成するのが難しく、判断は実際の適応の場でされること。</p> <p>・melano-competent (太陽光線の下での日焼けは時々するかほとんどしないが、その後ほぼいつも色素沈着が起こる a)) とされる人は、本質的に安全な要因を保持している。</p> <p>・以前に、あるいは繰り返し太陽光線を浴びて melano-adapted (自然に茶色あるいは黒い皮膚をしている a)) 人は、より一般的に安全な要因を保持している。</p>	

a) A joint recommendation of WHO, WMO, UNEP, ICNIRP “Global solar UV index: A practical guide 2002”

なお、1日あたりの曝露時間とその実効照度は、上記の曝露限界値を時間で割って得られる。

例えば、1日 8時間 (8×3600 秒) の実効照度の曝露限界は次のように計算される。

$30 \text{ J/m}^2 = 30 \text{ W} \cdot \text{s/m}^2$ であるので、

$$E_{\text{eff}}(8\text{h}) = 30\text{W} \cdot \text{s/m}^2 \div 8 \times 3600\text{s} = 0.001 \text{ W/m}^2$$

つまり、1m²あたり 0.001W のエネルギー量であれば、それを 8時間浴び続けても目にも皮膚にもほぼリスクはないと考えられる。この 0.001W というエネルギー量を考えてみよう。

$$1 \text{ W} = 0.860\text{kcal/h}$$

$$0.001 \text{ W} = 0.860/1000 \text{ kcal/h} = 0.860 \text{ cal/h}$$

細かな定義は横に置いて、1cal は「1g の水の温度を標準大気圧下で 1℃上げるのに必要な熱量」である。従って、0.001W というエネルギー量は、1g の水の温度を 1時間かけて 0.86℃あげる熱量に相当する。日常生活の中ではきわめて微々たるエネルギー量に思える。

3) 特に配慮を要すること

曝露限界値は労働者に対する紫外放射を念頭に置いたものであるが、一般の人に適用する場合に注意すべきことがある。

まれに光に過敏な人がいて、これらの人はこの曝露限界値でも有害作用を引き起こす。これらの人々は自分の過敏性については自覚している。同様に、もし光感作性の薬物に曝露されている人がいると、それらの人々に光感作作用が生じる。多くの人がこの光感作物質に曝露されていることを強調したい。例えば、化粧品、食品、薬、工業的化学品等、服用したり外部から塗布されたりする化学物質である。人はこのような化学物質による過敏性の高まりを自覚していない。光毒性反応はすべての人に適応できるが、その程度は光感作性化学物質と紫外放射曝露の量による。一方、光アレルギーのある人は、より少ない化学物質量でアレルギー反応を起こしうる。

紫外放射曝露により少し、およびひどく色素沈着の生じる人は、皮膚へのこの曝露限界値以上の曝露に対して耐えることができ、紅斑も生じない。しかし、日焼けを回復した場合、皮膚の老化の兆候が促進されたり、また皮膚がんの危険性も増加する。

以上のようなリスクは、紫外放射を光治療に用いる前に、あるいは化粧品を使う前に理解されておくべきである。

4) 防護的対策

対策は紫外放射の発生源が太陽光線か人工光線かで異なる。

太陽光線の曝露であれば、縁のある帽子・保護眼鏡の使用、衣服を着る、日陰に入る等が実際的な対策である。これらの対策が不適な場合は、皮膚に局所的な日焼け止めを塗る。ただし、日焼け止めの効果は疑問視されている。IARCは、皮膚悪性黒色腫、基底細胞癌に対して、動物実験では発がん予防の証拠が認められるが、人での疫学的な証拠は不十分であるとしている。

産業現場のように人工的曝露源では、防護服や保護眼鏡よりは工学的な制御対策および安全手順の確立が優先される。アーク灯のガラスの覆いはほとんどのUVBとUVCを除去する。高輝度のガラス被覆ランプや水晶ハロゲンランプのすぐ近くで長時間曝露されるような場所では、追加的なガラスフィルターが必要となる。物質の退色テスト、太陽シミュレーション、フォトレジストの応用、光硬化等の多くの産業分野で生じる紫外放射の有害性から人の曝露を予防するために、光が漏れない作業区画(light-tight cabinets)、囲い込み、紫外放射吸収ガラス、プラスチックシールドイングが工学的対策のキーとなる。アーク溶接に対して、キャビネットは実際的ではない。アーク溶接、アーク溶断、プラズマスプレーのような開放的なアーク作業による紫外放射から労働者を守るためには、シールド、カーテン、障壁、適当な分離距離が使わ

れる。動的除去フィルター付きの溶接ヘルメット、シースルーのカーテンにより、この10年くらいの間に溶接作業の安全性が改善された。

潜在的に曝露される労働者を守るための作業ルールが必要である。作業者はこのルールをきちんと守らねばならない。UVC放射により生成されたオゾンやその他の気中汚染物質を排気するための換気も必要である。

5) 測定

健康リスク評価のための紫外線の測定は室内曝露の程度を知るためには有用である。しかし、戸外の曝露に対しては、“the Global UV Index”の使用を除いては、一般的にルーチンとしては測定されていない。

直読式の紫外放射計測器はあるが、安価で相対分光効果値 $S(\lambda)$ を組み込み UVB や UVC 放射に応答する野外調査用の計測器はまだ開発されていない。しかし、高価なものはある。実効照度 (E_{eff}) を計算するには相対分光効果値 $S(\lambda)$ で波長成分を重み付けする必要があるが、簡単な直読式の安全計測器に比べ、より正確な光源の分光放射測定機が必要である。

どんな測定技術が使われるにしても、計測の幾何学的な面が重要である。上述の紫外放射曝露限界値は、コサイン応答特性を備えた検出器で計測されたものに適応される。検出器は、目への曝露を評価する時は曝露される人の視線の方向と同じ(平行)でなければならない。紫外フィルムバッジの使用により、紫外放射源とともに移動する体の特定部位に対する紫外曝露の積算値を得ることができる。しかし、そのようなバッジの分光特性は正確には $S(\lambda)$ に従っていない。

戸外の曝露に対しては、個人の暴露量を評価するためには環境紫外放射計測は多分限界がある。というのは、曝露条件が幾何学的に変化するし、人の行動への配慮があるからである。個人線量計は曝露場所、曝露時間、太陽との角度等が正しく考慮されていなければならない。

“The Global UV Index” は、頭上の紫外放射レベルが変化する戸外にいる人を教育するための有用な教材となり得る。しかし、それは、水平な表面への頭上紫外放射への対策であるので、目への曝露にはそんなに予報的ではない。目への曝露は地上からの反射要因にかなり依存しており、上まぶたと眉弓(びきゅう)でほとんどの頭上紫外放射を遮る。

6) まとめ

紫外放射の潜在的有害性について大いなる注意を払う必要である。社会的に日を浴びることの推進の増加は、人口紫外放射の利用の増加と合わせて関心を引き起こしている。多くの人々の間で皮膚癌の発症が増加し続けている。これは、人々の紫外線のリスクに対する評価が貧弱であることに多く起因している。不必要な太陽光線の曝露を避けることにより、および物理的な防護手段によりリスクを減ずることを公衆衛生上の重要な目的とすべきである。

7) 付属書：紫外放射曝露限界に対する理論的根拠

(APPENDIX: RATIONALE FOR THE LIMITS OF EXPOSURE TO UVR)

7-1) 背景 Background (略)

7-2) 一般的アプローチ General approach (略)

7-3) 皮膚の急性反応－紅斑－Acute response of the skin - Erythema

紅斑（日焼け時の皮膚の発赤）は、紫外放射の曝露に続いて観察される、最も一般的な直接的な影響である。紫外放射により引き起こされた紅斑は、（主に DNA への）光化学的損傷の結果生じる。光化学的損傷は分子現象をカスケード的に起こし、表面血管の拡張による皮膚の血液量が増加することによる発赤を生じさせる。熱の侵襲により生じた紅斑と違って、紫外放射による紅斑は曝露から 1-6 時間程度遅れて生じる。その遅れの時間は曝露量が多いほど短い。

紅斑を生じさせる作用スペクトルは、この 70 年来実験的、理論的な関心の的であった。最初のレビューは、多くの異なった、というかむしろ矛盾する作用スペクトルがあった。明白な違いは、評価の方法、光源の種類、臨床の終点、評価の時期等に関係していた。今日では、国際照明委員会（CIE）の基準作用スペクトル $E(\lambda)$ が、絶対的な紫外放射レベルを紅斑に影響する照度に変換するために用いられる。しかしこれは、特殊な基準状態に基づいている。公表された作用スペクトルの違いや、その違いの意味を歴史的に理解することは有意義なことである。

Hausser and Vahle が、1920 年代末に紅斑を波長に依存した影響であることを定量的に記録した最初の人である。1935 年までに、CIE は、いくつかの単色光線の水銀ランプを使った研究に基づいて、初期の「標準」紅斑作用スペクトルを推奨した。これは、全スペクトル的な詳細を制限するものであった。1960 年代にキセノンランプの開発とその単色計への利用により、いくつかのグループが欠落した波長の情報を埋める研究をした。しかしこれらの研究は、特に 300nm 以下の波長において、1930 年代の「古典的」な研究とは幾分異なっていた。短波長側の変化は終点が異なっていたためであった。単色計に高圧キセノンアークやキセノン-水銀アークを使うことにより、欠落していたスペクトル部分を補うことができた。しかし、新しい問題も生じた。5-10nm の波長幅を使ったために分光分解度を低下させてしまった。後に、レーザを

使って 300–320nm の波長帯で精細な研究がなされた。300–320nm の波長帯は作用スペクトルが急に変化する部分である。これらやその他の定量的な研究で、紅斑発症の閾値が解剖学的な部位や波長、曝露から評価までの時間に変化することが確認された。さらに、公開された閾値が異なるのは「細小の紅斑」の臨床的定義や評価の方法の違い、放射計測の技術的な違いによることが明らかになった。レーザーを使った研究で 300nm から 315nm の間に急激な変化が見つけられたが、Diffey は、短波長計やレーザーを使って得られた作用スペクトルを数学的に解析し、CIE の参考作用スペクトルが異なる波長の紫外放射による紅斑発症の影響の度合いを推定するのに有効であると結論した。

UVA 単独の曝露で紅斑は生じるが、10J/cm² (100kJ/m²) 以上の非常に高輝度の曝露の時のみ生じる。(太陽光線からのような広域スペクトル内にあるような) 多波長曝露は加算的に紅斑を発症させる。加算性からの変位は報告されており、光増強、あるいは相反効果、光防護と呼ばれるものである。しかし、これらは重要視されていない。

表 A1 に示したように、人は太陽光線に対する皮膚の反応性に関して 6 つの内のどれか一つに分類される。この 6 つの型はさらに 3 つのより意味のある型に分類される。急性および遅延性の影響に対する個人の感受性は、皮膚の光タイプと曝露歴により大きく変化する。皮膚の着色 (pigmentation, tanning) と「状態」(角質層の肥厚と黒化) は個人の MED (Minimum Erythema Doses 最少紅斑量) 増加させる可能性がある。

色素易着色性の皮膚を持つ人は、一回の曝露で日焼けと着色が起こり、日焼けのない着色は起こらない。しかし、色素応答性の皮膚を持つ人は、日焼けがなくてもひどい着色があり得る。これは UVA 領域の波長で最も顕著である。皮膚の色やその他の表現形 (髪の色、目の色、ソバカス) は日焼けに対する感受性に関連している。個々人の MED が異なるので、CIE の標準紅斑量 (SED: Standard Erythema Dose) の単位が皮膚の影響を調べる客観的に紫外放射線量計に導入された。

(tan, sunburn=以下、どちらも「日やけ」と訳す)

日やけていない、皮膚に少し色素沈着がある人々の紅斑閾値は、CIE の作用スペクトルで補正して 1.5~3 SED、すなわち、15~30mJcm⁻² の範囲であった。故に、ICNIRP のガイドラインの値は、MED 値に対して約 2~4 倍小さい。図 A1 は、また紅斑反応スペクトルの一つの変化形を示している。表 A1 に示した 6 つの太陽反応性の皮膚のタイプは、初夏の日中に 45~60 分の曝露に基づいたものであった。

紅斑感受性には解剖学的な差異がある。顔、首、胴体は、四肢に比べ 2~4 倍感受性が高い。日やけの感受性に性差はない。紅斑の感受性は年齢により変化し、子どもと老人は感受性が高いという報告があるが、このことは、この年代のグループに対する紅斑の感受性についての定量的な研究により確かめられていない。

Table A1. 皮膚の光タイプ

タイプ	太陽光線に対する皮膚の反応	典型的な症状
I	容易に日焼けし、かつ重篤である（痛みを伴う日焼け） 黒化はわずかかほとんどない 皮がむける	白い肌で目が青く、シミ・ソバカスのある人 曝露されていない皮膚は白い
II	通常、容易に日焼けし、かつ重篤である（痛みを伴う日焼け）、黒化はごくわずかか軽い 皮がむける	白い肌で赤かブロンズの髪のもで、青か赤褐色あるいは褐色の目をしている 曝露されていない皮膚は白い
III	ほどほどに日焼けし、色もつく	曝露されなければ皮膚の白い人、髪のもは一般的に黒である
IV	日焼けはごく少ないが、容易に黒くなる	曝露されていない皮膚は白か明るい茶色で、黒い髪のもと黒い目をしている
V	殆ど日焼けしないが容易に黒くなりかつ本質的である	茶褐色の皮膚を持つ人
VI	日焼けは決してしない、かつ色は十分黒い	黒い皮膚の人

(WHO 他、Global Solar UV Index : A Practical Guide(2002) より)

Skin type classification 皮膚の型の分類		Burns in the sun 太陽で日焼けする	Tans after having been in the sun 太陽光を浴びた後の皮膚の着色
I	Melano-compromised	Always いつもある	Seldom ない
II	色素易着色性	Usually 通常ある	Sometimes 時々ある
III	Melano-competent	Sometimes 時々ある	Usually 通常ある
IV	色素応答性	Seldom ほとんどない	Always いつもある
V	Melano-protected	Naturally brown skin 自然に茶色の皮膚をしている	
VI	色素防護性	Naturally black skin 自然に黒い皮膚をしている	

与えられた、および普通の人に対するスペクトル帯の MEDs は、正に尖った分布をしている。それで、MED の値は、算術平均 (arithmetic mean) ではなく中央値 (median) あるいは幾何平均値 (geometric mean) で表現されるべきである。表 A2 に MED の測定値を示す (n=252、皮膚のタイプ I、II、III)。

MED 以下のレベルでも細胞の損傷は検知しうる。約 0.1MED で、p53 タンパクの活性化と p21 遺伝子の発現を検知可能である。これは細胞の応答を示している。約 3 分の 1MED で日やけ細胞と免疫抑制効果が検知できた。表 A3 は異なる MED 別の細胞応答を示している。

皮膚に対する長期的な影響

太陽光線中の紫外放射に慢性的に曝露されると皮膚の老化を加速し、皮膚癌の発現リスクが増加する。太陽光線のスペクトルは地球のオゾン層でかなり減衰し、地球上の紫外線は約 290nm の波長以上に制限される。地上での UVB の照度は空の太陽の上昇角度の強い関数である。これは空中を通る紫外放射の減衰の変化による結果である (日時、季節)。いくつかの生態学的疫学研究によれば、皮膚癌の発生率は、緯度、高度および雲の量と強く相関していた。melanocompromised な、特にケルト人起源の皮膚の白い、人はより皮膚癌を発症しやすいが、正確な量-反応関係はまだ確立されていない。Valverde らによるアルファメラニン形成細胞刺激ホルモン (α -MSH) 受容体が赤い髪の毛の形質表現型と強い光感受性に関係しているという発見以来、受容体の多様性がすべてのタイプの皮膚癌の重要なリスク決定であることも示されてきた。

1970 年以前は、皮膚癌は農夫や漁夫のような日々太陽光線を浴びるような戸外労働者の典型的な病気であった。しかし、社会活動の変化により、レクリエーション活動による間欠的な曝露を受ける普通の人々の病気となった。この変化は、いろいろな曝露パターンがあるので、皮膚癌の疫学を理解する上で重要である。UVB の人口光源の慢性的な曝露を受ける屋内労働者について、このような労働環境で皮膚癌のリスクが増加するかどうかを定量的に検討したのは、わずか 2、3 しかない。屋外で働く人々の最も普通の癌のタイプは扁平上皮癌である。これは、手や首の後ろなど曝露部位が限局的であり、合計蓄積曝露量の重要性を示唆する。屋外労働者の黒色腫の発生率の研究では、屋内労働者の発生率に比して低いことが示されている。

皮膚癌のタイプ

重篤性が高くなるの順に三つの一般的な癌の型を上げると、基底細胞癌 BCC、扁平上皮癌 SCC、そして悪性黒色腫 MM である。扁平上皮癌は紡錘体細胞癌として知られている。皮膚癌の約 90% が非黒色腫 (基底細胞癌と扁平上皮癌) で、基底細胞癌は扁

扁平上皮癌の約4倍の頻度である。皮膚癌全体の生涯リスクは人種や地理により変わるが、しかし、例えば悪性黒色腫を発症する蓄積的生涯リスクは白人アメリカ人に対しては1:90である。このリスクは同じ人口で、扁平上皮癌と基底細胞癌については1:7に上昇する。

紫外放射への曝露は、三つの皮膚癌のタイプのすべてに対して主要な病因であると考えられている。基底細胞癌と悪性黒色腫に対しては、リスクとなる波長あるいは曝露形態のどちらも明確な確証は得られていない。一方、扁平上皮癌についてはUVBとおそらくUVAも発がんに関係があり、その主要なリスクファクターは生涯の紫外放射曝露とわずかの日焼け反応の蓄積によるようである。

扁平上皮癌

太陽放射への曝露が人の扁平上皮癌の主要な原因であるという証拠は非常に確信的である。この癌は、ほとんどが顔、首、腕のような太陽に曝露される部位に発症する。そして、その発症率は地理的な緯度に明らかに相関しており、赤道により近い国の白人に多い。最近の疫学研究と無作為化された試行によると、癌と診断される前の10年間の太陽曝露が扁平上皮癌の個人リスクを説明する上で重要であることが示唆されている。

基底細胞癌

基底細胞癌と太陽光との間の関係はあまり強くないが、太陽光曝露による結果だと強く考えさせるに十分な証拠はある。扁平上皮癌が太陽光曝露の生涯蓄積量に強く関係しているのに対し、この関係は基底細胞癌に対してはそれほど確信的ではない。そして、間欠的な太陽光曝露およびおそらく子ども、青年期の曝露が大人の基底細胞癌発症リスクの確立に決定的であろうと思われる。

非黒色腫の皮膚癌に対する作用スペクトル

現時点では、皮膚癌の作用スペクトルは動物実験から得られたものだけである。現在までの最も詳細な研究はUtrecht and Philadelphiaのグループによるものである。このグループは、約1100匹の無毛アルビノマウスに14の異なる広域帯紫外光源をあて、数学的な最適化によりthe Skin Cancer Utrecht-Philadelphia (SCUP)と呼ばれる作用スペクトルを導き出した。SCUP作用スペクトルは、人間より薄い表皮を持つ無毛マウスの皮膚腫瘍の誘発に対するものである。人間の表皮と無毛アルビノマウスの表皮の光学的な違いを考慮して、マウスの皮膚に誘発される腫瘍に対して実験的に決定された作用スペクトルを人間の皮膚癌に対する想定作用スペクトルとして修正して当てはめることができる。その作用スペクトルは、図1に示した紅斑に対する作用

スペクトルと類似している。CIE は最近この研究に基づいて「標準化された」作用スペクトルを発行した。

悪性黒色腫

過去 40 年くらいの間いくつかの国の白人の間の皮下黒色腫の発症率が各 10 年間で 2 倍に増加している。緯度と黒色腫の間には逆の関係がある。これは、プラス多くの他の要因も、悪性黒色の原因として太陽光の役割の可能性を示す証拠として採用された。しかし、このパターンは一定してはいない。ヨーロッパでは、例えば、スキャンジナビアの発症率と死亡率は地中海諸国よりもかなり高い。この不一致は体質や習慣における人種的な差異を反映しているかも知れない。そしてまた予期していなかった屋外労働者の低発症率、性別・年齢分布、解剖学的な分布などがより複雑な関連を持つと指摘されている。(主としてレクリエーション活動による)間欠的な太陽曝露が悪性黒色腫の発現リスクの増加に関連しているという証拠が示されつつある。いくつかの研究で、潜在的な記憶の偏りがあり、皮膚のタイプによる交絡があるものの、日やけの履歴が黒色腫の発現リスクに関連しているという事が示された。移民者の研究では、子どもと青少年の太陽曝露が黒色腫のリスクの見地から特に決定的な時期であるという示唆されている。

黒色腫の作用スペクトル

一時期、黒色腫を誘発する作用スペクトルといえば、小さな雑種の熱帯魚に異なる波長の紫外放射を照射して得られたデータだけであった。このサカナ作用スペクトルはすべての波長の紫外放射が、非黒色腫の皮膚癌と違って、黒色腫に重要であることを示唆した。しかし、この作用スペクトルを複製するための、少なくとも一回の試行はうまくいかなかった。遺伝形質転換マウスやハイイロネズミオポッサムを使った最近の研究では、新生児期の紫外曝露が最も重大であることを示している。少量の UVB と対照的に、Robinson らは新生児への大量の UVA は腫瘍を生じさせ得ない事を見いだした。黒色腫の発症率は色素性乾皮症患者も非常に高い。この患者は UVB により起こされた細胞損傷を修復する機能が欠けている。今日の証拠の重さから、UVB が悪性黒色腫に対して第一次リスクファクターである事を示唆している。

目への影響—光角結膜炎

短波長の紫外放射 ($\lambda < 300\text{nm}$) は角膜と結膜にかなり吸収される。これらの組織の過剰な曝露が光結膜炎を起こす。これは一般に、「welder's flash」「arc-eye」等といわれている。いくつかの研究グループは、普通の臨床的な光角膜炎の過程および目の細胞の変化を特徴付けた。潜伏期間は曝露の重篤性と逆に変化し 0.5~24 時間であるが、通常 6~12 時間以内に発症する。結膜炎はもう少し遅く発症する傾向があり、まぶた周辺の顔の皮膚に紅斑を伴うことがある。これを発症した人は、目に異物あるい

は砂が入ったような感じを訴え、程度は異なるが羞明、流涙、眼瞼痙攣を訴えることもある。急性症状は6〜24時間持続し、通常48時間以内には不快感は消失する。曝露により希に永久的な目の損傷を引き起こすが、この48時間の間視覚が不能となる。Pitts and Tredici は、波長幅10nm、波長220〜310nmに対する人の光線角膜炎の閾値を報告した。CIEの200〜305nmの曝露限界のガイドラインは、最少の変化に対応する彼らの閾値の値より約1.3〜4.6倍小さい。人の目の最大の感受性は270nmにあることが見いだされている。作用スペクトルの220〜310nmに対応するこの波長は、閾値4〜14mJcm⁻²の間を変化する紅斑の場合と大きくは変わらない。Sloneyらはえきしまレーザーを用いて、光線角膜炎の閾値は193nmにあると同定した。UVAによる角膜の損傷は10Jcm⁻²以上のエネルギーを必要とする。

白内障

295nm以上の波長は角膜を透過し、水晶体で吸収される。Pittsらは、295〜320nmの波長帯で一過性および永久的の両方の水晶体の混濁（白内障）がウサギおよび霊長類で発症しうることを示した。ラットについても同様の知見が報告されている。一過性の混濁に対する閾値は波長により0.15〜12.6Jcm⁻²の間を劇的に変化する。永久的な混濁に対する閾値は、一過性の閾値の概して2倍である。実験的な方法では簡単に閾値を示すことはできない。というのは、増加した分散を測定することは、バックグラウンドレベルの分散がある時は難しいからである。白内障を生じさせる紫外放射に対する作用スペクトルは、光分散に対する定量的な基準を用いることにより、最近確認された。低レベルの慢性曝露による混濁を実験的に示すことは非常に難しかった。しかし、いくつかの疫学的な研究により、野外のUVB曝露と角膜混濁の間の関連が示された。Sasakiは緯度により白内障のタイプが異なることを明確に示した。しかし、温度と紫外放射の両方が病因と見なされているが、紫外放射曝露の変化と緯度との間の関係を明確に示すことはできていない。水晶体タンパクの紫外照射の影響を調べる多くの生化学的な研究では、UVA放射はなくない症の原因因子であるという理論を導いた。しかし、疫学的あるいは実験的にUVA放射と白内障を結びつけることは難しい。

網膜への影響

角膜と水晶体は、紫外放射曝露による急性影響から網膜を通常十分に保護している。ふつう、網膜に到達するUVAは1%以下である。より波長が短いUVBは新生児を除いてはすべて減衰する。水晶体の除去について、Hamらは、網膜上で5Jcm⁻²のレベルで急性網膜損傷（光網膜炎）を示している。この波長における光網膜炎は、非コヒーレント光学放射への曝露に対するICNIRPのガイドラインによってカバーされている。

外被の作用スペクトル

明らかに、労働者や一般人への紫外放射の限界値の発展は二つのリスクを考えなければならない。それは、目と皮膚に対する急性と慢性のリスクである。文献では、障害に対する閾値は個々の影響を生じる波長によりかなり異なっている。最少紅斑量と角結膜炎に関する最近の研究から得られた急性影響に対して、UVB と UVC の帯域で、相反則の範囲内で放射暴露量に対する閾値データをおおう作用スペクトル曲線を描くことができる。相反則 **reciprocity** とは、照射 **E** と曝露時間 **t** は相反的關係を持っていることを意味しており、**E** と **t** の積は一定で、所定の影響を与えるという事である。この曝露限界曲線は、測定誤差や個人の応答の変化を考慮して集約した閾値と重大な差異はない。安全因子は角膜散乱の増加が検知できる最少の量であるが、急性角膜炎ではその値は 1.5~2.0 の範囲であると考えられている。曲線はまた、急性の UVB 白内障を誘発する閾値の下にある。(最近のいくつかの研究では閾値の変化が検知されているが) 潜在的に有害なレベルの紫外線への反復曝露は、皮膚の角質層の色素沈着や肥厚のように、角膜の防護能力を有意に増加させないとされている。このように、この曝露限界は目へ容易に適用でき、目に対する限界値だと考えるべきである。光角膜炎を起こす UVB と UVC の曝露の蓄積は、どんな曝露でも 48 時間までに限られるべきである。というのは、外部角膜上皮層は、角膜の正常な修復プロセスにより、約 48 時間で置き換えられるからである。UVA 光線はより深く透過するので、UVA では 48 時間を超える多少の加算性がある。この加算要因は、ガイドラインに組み込まれた安全因子を大きくしていると考えられている。急性影響を基にして、UVA ガイドラインの安全因子は大きく、320nm で 7~390nm で 100 の範囲で変動する。

閾値や個人的な曝露歴 (条件) が広い範囲で変化しているので、これらのガイドラインは皮膚への有害性を評価するための出発点としてのみ使用されるべきである。**envelope** ガイドラインは、最も感受性の高い人を除いてすべての人を防護するためのいくらかの安全の余地をもっている。この余地の正確な値は与えられていないが、少し着色した人 (すなわち、易着色性皮膚光タイプ I と II) では放射のスペクトル成分により 3~20 の範囲である。紅斑には一つ以上の標的分子 (発色団) (その故に、一つ以上の紅斑作用スペクトル) があると思われるので、180nm~315nm の範囲の二つの幅広く異なる波長の放射の影響は単純な加算性を持たないであろう。曝露限界値は、太陽光や 300~315nm で急激にスペクトル放射を増加する蛍光灯のような光源を注意深く評価して使われるべきである。この帯域でこのような光源の正確なスペクトル測定が難しいので、大きな誤差が生じる。

曝露限界は、光感受性の高い人、あるいは化学物質、薬剤、植物光増感剤に付随して曝露される普通の人への適切な保護法を示していない。これらの人々には特別な注意が必要である。

最新の知見に基づいて、曝露限界は重篤な急性影響を予防すべきであり、生涯の紫外曝露を制限することにより慢性的な皮膚への影響の大きさを減じなければならない。ほとんどの研究で、少なくとも扁平上皮癌は (直接的、または間接的の両方で) 紫外

線起因の DNA の損傷に関係していることが示唆されており、作用スペクトルは紅斑の作用スペクトルと類似しているが、それぞれのタイプの皮膚癌に対する作用スペクトルは依然議論中である。実際、CIE の技術委員会は光発がん性に対する試験的な作用スペクトルを提案している。オランダ健康委員会は、(10 年間までの) 急性の毎日曝露のために開発したガイドラインに類似した envelope 限界と慢性影響から守るためのより長期間に対する減じたレベルを最初に提案した。これらは、UVB と UVC で同じ作用スペクトルを持つべきである。多くの場合、UVB への職業的曝露が個人の被職業的太陽光 UVB 曝露に付け加えられている。

紫外放射の直接的な悪影響に加えて、非常に強い UVC 光源 (特に 230nm 以下の波長) により、脱脂剤の存在の下で空気やホスゲンガス (COCl₂) から有害な濃度でオゾンや窒素酸化物が生成される可能性がある。このことは注意しておくべき事である。このように、多くの初期の紫外殺菌灯は今は石英ガラスの外被をつけており、230nm 以下の波長をブロックしている。

UVA 放射の影響

UVA 波長領域 (314~400nm) における皮膚や目を傷害する作用スペクトルの研究 (図 A2) は、急性障害の閾値を非常に類似していることを示している。これらのデータは、400nm 以上の曝露ガイドラインに対する相対分光実効値 $S(\lambda)$ を定義するのに十分である。しかし、もし放射エネルギーが実質温度が増加するのに十分早く皮膚や目に照射されると、光化学的に引き起こされる障害に必要なエネルギーより少ない放射曝露により熱的影響が生じる。しかし、ほとんどの工業的光源は生物学的な有害作用を起こすに十分な UVA 領域の波長を放射しない。レーザーのみが組織に熱的リスクを起こしうる。1Jem-1 の制限でそのような影響から防護可能であるが。

太陽光やほとんどの屋内作業環境で経験される低いレベルの UVA (1~3mWcm⁻²、あるいはそれ以下) が皮膚かあるいは目に有害な影響を持つという証拠はない。しかし、UVA は白内障の起因子であるという生体外の研究による仮説があり、慢性的な低レベル UVA の目への曝露は注意を要することを示唆している。UVA の曝露限界は潜在的な光化学的な損傷から防護すべきであるが、実験的な閾値のデータが不足している。実験データがない下で、委員会は、目への慢性曝露に対してより注意深いアプローチを推奨している。

近年、白内障手術の一環として一つか両方の水晶体を外科的に取り除く人が急激に増えている。これらの患者の多くはプラスチック製の人工の眼内レンズを挿入している。(これらの人々はいしばしば“偽水晶体 pseudophakics”と呼ばれる。) 水晶体を模して UVA を吸収するようにデザインされていない人工眼内レンズをつけた人、あるいは人工眼内レンズをつけていない人 (無水晶体“aphakics”) は別として、すべてのこれらの患者は、曝露限界における UVA 曝露から網膜障害から適切に守られるであろう。

UVA を吸収しない眼内レンズをつけて人は、UVA 放射光源の下で仕事をする場合は UVA 防護の眼鏡を使用すべきである。

ICNIRP GUIDELINES

on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation

Health physics 105(1): 74-91; 2013

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

要約

可視および赤外放射の曝露に対するガイドラインは 1997 年はじめて ICNIRP が提案した。紫外放射およびレーザー放射への曝露限界に関するガイドラインは公刊されている。本ガイドラインは広域インコヒーレント放射に対するガイドラインの改訂版である。

はじめに

非干渉性の広域放射に対する紫外放射の網膜への有害性評価の寄与を考える必要性から、これらのガイドラインでは 300nm 以上の波長の網膜に対する作用スペクトルが推奨された。このように、これらのガイドラインと皮膚と角膜、水晶体のみを考えた紫外放射に対するガイドラインには波長幅でオーバーラップした部分がある。1997 年の広域帯非干渉性光学放射 (0.38~3 μ m) の曝露限界 ICNIRP ガイドラインの発行以来、網膜への熱的損傷に関する研究がさらに進められ、すでに発表されたガイドラインを改定する必要が生じた。特に、光源の大きさに依拠する曝露限界は、今では曝露期間の関数である。さらに、網膜の熱的有害関数が改定された。これらの改定についての特別な理論的な根拠が付属書 A に記載されている。

目的と適用範囲

これらのガイドラインの目的は、レーザを除く人口および自然光源からの非干渉性の光学放射の曝露の最大レベルを確立することである。この最大レベル以下の曝露では有害作用は起こらないと期待される。

このガイドラインは、光学放射の有害性に対して目や皮膚を守る原理を開発を助ける。レーザへの曝露に対しては別途ガイドラインを定める。このガイドラインは種々の専門家、および光学放射の潜在的な有害作用から労働者や一般人を守るために規制、推奨、あるいは行動規則を作る責任を負う国や国際団体が使うことを意図している。

与えられた曝露限界は、波長 380nm~1mm に対するものである。しかし、光化学的に光網膜炎に対しては紫外放射領域の 300nm まで波長幅を拡張しており、紫外放射

するであろう広域帯の光源の評価に対して応用されるべきである。紫外放射の皮膚や前眼部への曝露については 2004 年の別のガイドラインが使われる。

障害の閾値は、ガイドラインの中で取り上げられている影響に対してはよく定義されている。故に、一般的に光学放射に対するガイドラインは、職業的な曝露と一般的な曝露とを区別していない。光化学的に生じる光網膜炎の作用スペクトルに関してのみ例外がある。それは、2 歳以下の子どもに対して無水晶体の関数が用いられることである。

曝露レベルの決定は 3000nm 以下の波長域に限られているが、曝露限界は、1mm 以上の全波長域で適用される。非レーザー光源は、3000nm 以上の波長域では、熱ストレスの可能性以外の健康障害を引き起こすに十分なパワーを放射しない。

長期の慢性曝露に対する閾値データは不足している。故に、ガイドラインは、障害の発生から 48 時間までの短時間の遅れの閾値データのデータセットに基礎をおいている。しかし、今日の知識では、提供された曝露限界以下の赤外線慢性曝露では悪影響はないとされている。

ガイドラインは、診断や治療用の医療目的の計画的な曝露には適用しない。

詳細な測定手順や計算方法はガイドラインの範囲を超えており、別途示されている。

量、記号および単位

100nm から 1mm までの間の波長の電磁放射は、広く「光学放射」と言われている。このスペクトル帯の細分は CIE により定義されており、その主要な影響のスペクトル境界は明確に定義されていないが、光学放射の光生物学的な影響を議論するのに有益である。光学放射の波長帯は、紫外、可視、および赤外からなっている。CIE によれば、紫外放射 (UVR) の幅は 100~400nm である。400nm 以下の波長における視覚が非常に明るい光源で認められているので、UVR と可視の正確な境界は定義できない。同様に、非常に明るい光源の 780nm 以上の波長において視覚が認められているので、可視と赤外放射の間の境界も定義できない。赤外領域は、しばしば、IR-A (780~1400nm)、IR-B (1400~3000nm)、および IR-C (3000nm~1mm) に細分されている。

光学放射に対する曝露限界は、放射測定学的な量で表現されるが、それは組織と損傷機序に依存している (表 1)。使用される記号の完全な定義は付属書 B に記されている。

皮膚、眼前部あるいは「小さな光源」という条件下での潜在的な網膜への光化学的損傷に関連する曝露限界は、放射照度 irradiance E (Wm^{-2}) と放射曝露 radiant exposure H (Jm^{-2}) という放射測定学的量で表現される。放射曝露はまた、暴露量 dose として参照され、放射照度は曝露率 dose-rate として理解されている。放射輝度 radiance L ($Wm^{-2}sr^{-1}$) と時間積分された放射輝度として参照される放射輝度率

radiance dose D (Jm⁻²sr⁻¹) は、拡張された光源（網膜上に像を結ぶ光源）による網膜障害に関連する曝露限界として使われる。放射輝度は、網膜における放射照度に直接関係しているため便利である。完全を期するために、CIE の国際照明用語集では、積分された放射輝度は Lt で表され、記号 D は検出器の検出感度として記述されている。ICNIRP のガイドラインでは追加的な添え字を使っているため、放射輝度量 radiance dose に対して専用の単文字 D を使うのは利点がある。

相互作用の型により、有害作用を生じる実効性は強くは超依存的であり得る。この波長依存性は、個々の曝露量に対して分光学的に重み付けして用いられる作用スペクトルによって説明される。これらの重み付けされた曝露量は、「実効」値、例えば、効果的な放射照度として参照される。

光源と曝露条件

人工光源からの光学放射は、産業、消費、科学および医学的な応用の多方面にわたり使われており、多くの場合、放射される光および赤外エネルギーは一般人口に対して有害ではない。しかし、ある種の医学的条件をもつ人々には、他の人々には無害な曝露でもリスクになり得る。ある種の通常ではない曝露条件下では、潜在的に有害な曝露となり得る。例えば、アーク溶接、研究室でのある種のアークランプの使用、写真撮影での非常に強いフラッシュランプ、探索や加熱のための赤外ランプ、多数の医学診断的応用、そして印刷やフォトコピーがある。過剰光および赤外放射は、不快さを減じるために、概して除去されるか遮断される。十分な可視光があるところでは、明るい光に対する目の自然なおよび能動的な忌避反応により潜在的に有害な曝露を実質的に減じる。さらに、もし全放射照度が十分であれば、皮膚や角膜で感じられる熱的な不快感により通常忌避反応が生じ、数秒かそれ以下に曝露を制限する。

多くの強い光源はまた多量の紫外放射を生じ、それが目や皮膚に有害である。この有害性は、紫外放射ガイドラインを使って別に評価されるべきである。しかし、紫外放射ガイドラインは光網膜症に対して曝露限界を設定していないことを覚えておかなければならない。光化学的に発生する光網膜症に対するリスクは、紫外放射ガイドラインで与えられている青光光化学曝露限界を使って評価しうる。

多くの消費者やオフィスの備品でランプが使われているが、視的快適性のためにこれらの光源は真の有害性を減多に見せない。レーザー放射の性質は一般的にこれらの広域帯の非コヒーレントな光源と著しく異なっており、それ故に、広域帯の光源に対する曝露限界は、レーザーへの適用とは異なって表現される必要がある。さらに、レーザーガイドラインと生産安全性基準は、従来の光源には適用されない曝露の仮定を組み込んでいる。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発し、レーザーの波長を除くと有害性評価の目的では光学的な放出の詳細な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な有害性の評価には分光学的な測定データが要求され、曝露幾何学とともに、いくつかの異なる作用スペクトルが使われる。

作用スペクトルは、標的組織の前の光学放射の減衰と標的組織の相対的感度に依存して、目の外部から入ってくる光学放射の分光学的相対的生物学的な実効値 efficiency を表現している。作用スペクトルは、目の異なる組織に対して特異的である。

生物学的な影響

目と皮膚は光学放射に最も敏感な組織である。影響の型、損傷の閾値、および損傷のメカニズムは波長により著しく変わる（図 1）。

影響は重複しており、従属的に評価されなければならない。作用スペクトルはそれぞれに影響について存在する。

損傷の型の概要

可視および赤外放射によって、少なくとも 9 つの別の型の損傷が生じうる：

目

1. 角膜の熱的損傷、約 1400nm～1mm；
2. 虹彩の熱的損傷、約 380nm～1400nm；
3. 水晶体の近赤外熱的損傷、約 800nm～3000nm；
4. 網膜の熱的損傷（380nm～1400nm）；
5. 網膜の「青光」光化学的損傷、主には 380nm～550nm、無水晶体の目に対しては 300～550nm。これはまた、タイプ II 光化学的網膜損傷と呼ばれている。および
6. 輝く光への慢性的な曝露による光化学的網膜損傷、タイプ I 光化学的網膜損傷。

成人期前の光学放射による目の損傷の閾値は異なる分光学的透過と異なる感受性により変わる。

皮膚

1. 皮膚の熱的損傷、やけど、約 380nm～1mm；
2. 光感作性により皮膚の損傷。これは一般的に（380nm より小さい）紫外波長により多い。このような光感作性の反応は約 700nm まで広がるが、ある種の薬剤の副作用の可能性もある；および
3. 紫外放射で好発するが、光学放射への曝露により活性化される抗原がある光アレルギー反応は免疫反応の原因となる

紫外放射は皮膚癌の第一次的な環境リスク要因である。光学放射は皮膚癌リスクには寄与していない。

光化学反応メカニズムの特徴

閾値のある放射曝露は、相反則原理、光生物学のブンゼンーロスコウの法則に従う。それは、光の影響は放射曝露量（すなわち、放射照度と曝露時間の積）のみに従う、ということである。このように、青光網膜損傷（光化学的に生じた光網膜炎）は、非常に明るい光を短時間見ても、あるいは明るくない光を長時間見ても起こりうる。相反則の観察により、光化学的な影響と熱的な影響を区別できる。網膜の光化学的な損傷については、水晶体のある目、無水晶体の目で約 440nm にピークがある。

熱的反応のメカニズムの特徴

熱的損傷は、光化学的損傷とは違って、放射照度と曝露時間との間の相反則を示さない。熱的損傷は照射を受ける組織からの熱伝導に大きく依存している。それは組織を凝固させる強い曝露を要する。曝露が強くない場合は、周辺組織は曝露点からの熱を伝導発散させる。動物実験での網膜と角膜の両方の急性熱的損傷の閾値は、人の目の閃光やけど事故のデータに確証を与える。通常、熱的やけどを消磁させるには少なくとも 45 度の温度が必要である。短時間の曝露で熱的損傷を生じさせるにはより高い温度が必要である。例えば、55℃で 10 秒間、69℃では 1 ミリ秒である（図 2）。

小さな像と約 10ms 以上の曝露時間に対して、曝露時間中安定した状態の温度に達している。熱的損傷の程度が指数関数に依存しているために、曝露停止後の冷却相は臨界温度に影響しない。それ故、臨界温度は大きな像に対しては低くなる。その像に対して、ピーク温度は後にやってくる。

放射照度がこの温度になるには、組織の環境温度と曝露点（spot）の像の大きさに依存する。小さなスポットでは冷却が効果的であるために、小さなスポットの損傷は大きなスポットに比べより大きな放射照度が必要である。

網膜障害

明るい光源を見ることにより生じる主要な網膜の有害性は、光化学的に誘発される光網膜症である。例えば、太陽を見つめることで生じる暗点を伴った日光網膜炎（「日食盲」）、あるいは適切な目の保護具なしに溶接アークを見つめることで生じる網膜炎がある。実験室の研究では、10 秒から 1-2 時間の曝露で生じる光化学的損傷は、網膜色素上皮と脈絡膜による 380~520nm の短波長の光の吸収に関係していることが示されている。これは普通青光有害性と呼ばれているが、タイプ II 光化学的網膜損傷とも言われる。網膜での少しの温度上昇は光化学的過程に相乗的に作用する。

動物実験では、非常に明るい光へ数日間連続的に曝露して網膜損傷が生じることが示されており、これはまたタイプ I 網膜光化学的損傷と呼ばれている。このタイプの損傷は、ロドプシン（視紅；網膜ロッド中の赤い光色素）を長時間光にさらしたことによる光受容体の損傷に関係していることが示唆されている。

より短波長の可視光放射が網膜の老化を加速することが示唆されている。

キセノンアークフラッシュランプ、原子力光、あるいはレーザーのような非常に高い放射を伴う光源のみが、網膜の熱的損傷を産生する可能性がある。

波長域 380～1400nm での網膜上の像のサイズの間数である熱的網膜損傷に関わるメカニズムはよく理解されており、実験的閾値データ、網膜外植片データおよび熱的網膜損傷モデルにより支持されている。

損傷のメカニズムに明らかな境界はないが、分光領域と曝露時間に依存していることは確かである。約 10 秒を超える曝露時間で約 600nm 以下の波長域では熱的影響よりは光化学的影響が優位である。数秒より短い短時間では、損傷は熱によるものである。赤外波長域では、そこでは光化学的影響は検出されないが、10 秒より長い曝露でも熱的影響はまだ優位である。放射熱流により、網膜障害の閾値は網膜の像のサイズに強く依存することが示される。小さいか中程度の網膜上の像の大きさでは、目の動きが網膜放射曝露域を広い範囲に分散させる。以下（目の動きの影響）のさらなる議論を参照せよ。

前眼部損傷

目の前の部分では、角膜あるいは水晶体の混濁が赤外放射への曝露後の主要な影響である。しかし、角膜の損傷は強い放射が角膜に焦点が合った時のみ起こりうる。水晶体に対しては、高いレベルの赤外放射の慢性的曝露が白内障を強く引き起こす。目の近接での強い波動の光源の曝露について、虹彩の熱的損傷が問題となっている。

IR-A による水晶体変化の曝露閾値は 530MJm^{-2} のオーダーである。Nd-YAG レーザーを使い 1064nm で作動させて得られた同様なレベルの報告がある。水晶体の温度上昇は数度であると予測されている。毎日 $800\sim 4000\text{Wm}^{-2}$ の赤外放射へ 10～15 年間熱的環境で曝露されたガラスや鉄鋼労働者が水晶体混濁を発現させたと報告されている。

概日リズムの制御

光は人の神経内分泌系の概日制御に重大な影響を持っている。人網膜の非可視光受容体（光受容神経節細胞）がこの反応を媒介している。メラトニン（松果体によって分泌されるホルモン）の分泌が、短波長の可視放射へ網膜が曝露されると抑制される。概日リズムの制御逸脱による非健康的な影響に対する含意はいまだ推論的であるので、ガイドラインでは考慮されていない。

視覚障害

減能グレア、不快グレア、残像および「閃光盲」のような一時的な視力障害は、曝露限界以下のレベルの明るい光源に短時間曝露されることにより生じうる。一時的な視覚障害から発生する二次的な有害性に対して注意を払うべきである。

皮膚の損傷

可視光による皮膚の光感作性の障害はピリルビンやフェノチアジンのような内因性および外因性の両方の光感作物質の存在の結果として起こる。光によるこの影響は紫外放射によるよりはるかに少ないが、食料あるいは薬物中のある種の光感作性物質を摂取後と同じように、物質を服用しても典型的に生じうる。例えば、ポルフィリアに対する作用スペクトルは、しばしば約 400nm と 500nm に第二次のピークを持っている。

皮膚の熱的損傷の閾値は、曝露された領域の大きさ、灌流、色素沈着および初期の皮膚温（網膜が 37°C に対し皮膚は通常 22~25°C）に高く依存している。1 秒以内の痛覚反応時間を伴う熱的損傷を生じるには非常に強い放射照度が必要である。より短い時間の曝露で熱的損傷を生じるにはより高い温度が要求される（例えば、10 秒では 47°C、1 ミリ秒では 57°C）。代表的な産業現場では、体全体の熱ストレス光学放射への曝露時間を制限し、皮膚への熱的損傷を閾値以下に保とうとする傾向がある。故に、波動の、あるいは大変短い高放射照度への曝露のみが皮膚への熱的有害性を提示する。（光学放射によるものだけではなく）皮膚温の慢性的上昇は固着した皮膚の発赤、すなわち温熱性紅斑（火だこ）を生じさせることが知られている。

熱ストレス

目や皮膚への熱的損傷の閾値以下の長期間の体全体への曝露は、体の温度制御能力に対して過負荷となり、結果として熱ストレスを生じる。

曝露制限に対する生物物理学的な基礎

放射の有害影響は、理論的には全光学スペクトル領域で可能である。しかし、このガイドラインの性格上、380~1400nm 可視および赤外領域に関して特に関心が払われている。この領域の放射は網膜障害を起こしうる。皮膚や目に対する光生物学的な有害性は、波長によりかなり変化する。光や赤外放射エネルギーを出す（非レーザの）広域帯の光源への曝露は、いくつかの特異的な作用スペクトルを用いて評価されなければならない。

広域帯の光源に対する曝露限界を開発で、作用スペクトルが特定された。作用スペクトルは、曝露を分光学的に重み付けし「生物学的実効放射輝度あるいは放射照度」を求めるために使われる。これにより最も正確な有害性評価が得られる。それで、曝露限界は、光源のスペクトルによらずに、曝露時間やその他の関連指標で特定される。このことにより、すべての光源は同じリスク基準で評価できる。目や皮膚に所定の光源によって作られた、与えられた曝露に対して、いくつかの作用スペクトルが適用される。また、有害な青光に関する実効放射輝度を求める際に、ある立体角の放射輝度

を平均するために、実効放射輝度は実際の物理的放射輝度より小さくなる。実効曝露レベルは、故に、それに対応する曝露限界と比較される。

この処方学的な概念は、所定の光源からの放射輝度への曝露に対して、例えば、光化学的に生じる光網膜症と水晶体の熱的損傷のような、一つ以上の有害性があり得ることを反映している。

網膜

網膜の像の大きさと光源の大きさ。目の網膜の前の媒質が透明である波長帯（主には 380～1400nm）では、光学的放射は図 3 に示したように網膜に結像する。

人の大人の目の光学系（角膜と水晶体）の焦点距離は、もし空気中であれば、無限遠においては 17mm である。光源の張る平面角 α は、目の位置で実際に光源によって張られる角である。ラジアンで測られる光源の張る角は光源の大きさを距離で割れば得られる。空気に immersed された目の光学的な力を簡単にするために、光源によって張られる角度は像によって張られる角と等しいと仮定する。小さな平面角の光源からの網膜像に対して、網膜上の像の大きさ dr (mm) は直接的に光源の大きさ ds (mm)、実効的な目の焦点距離 f （すなわち、17mm）および光源からの視距離 r (mm) に関する（式 1）。

$$dr = ds * f / r \quad (1)$$

水晶体あるいはディフューザのような光学要素は光源から発される放射を光学的に透過する。対辺角 α は、明白な光源の対辺角であり、それは調節によって網膜上に最も小さな像を結ぶ。ある種の条件下（よく調節された光束や光源がランプ正面の光学系により無限遠に投射された時）ではそれは等価であるが、光源の対辺角は、サーチライトのような光束の広がり（発散）と混同してはならない。

人の目の光学的な媒介変数と光源の放射測定学的な媒介変数の知識により、下(式 2) に示すように、網膜における放射照度を計算することができる。生理学的な光学においては、「点光源」と「拡張された光源」を区別する必要がある。このガイドラインでは、光源は、対辺角 α が α_{min} (=1.5mrad) より小さいか等しいと考える。この角度は網膜上の像の大きさ 25 μ m に相当する。大きな光源を視距離を増大して見ると、それは点光源として振る舞う。そして、約 25～50 μ m より小さい像の大きさに対して式 (1) は有効でなくなる。簡単のために、大きな光源および小さい（あるいは“点”）光源に対する青光有害性の曝露限界は、異なる量で表現される。放射輝度 radiance

($Wm^{-2}sr^{-1}$) と放射輝度率 radiance dose（時間積分放射輝度、 $Jm^{-2}sr^{-1}$ ）が網膜保護の曝露限界に用いられる。放射照度 irradiance (Wm^{-2}) と放射輝度曝露 radiant exposure (Jm^{-2}) は皮膚、角膜水晶体の保護のための曝露限界に一般的に用いられ、そしてまた、最も小さい像が結ぶ網膜に対する曝露限界に使われる。受光角 γ_{mean}

は、放射輝度が平均化される検出器の正面の円形の開口により制限された平面角である。受光角を取り入れることで、網膜曝露率は放射輝度あるいは放射照度として表現されるようになる。放射輝度は、 γ mean に対応する立体角 Ω (すなわち、 $(\pi \times \gamma \text{ mean}^2)/4$) を乗ずることによって等価な放射照度に変換できる。測定条件を次に議論する。

網膜曝露の計算。網膜放射照度 E_r (Wm^{-2}) は、光源の放射輝度 (“明るさ、かがやき”) L_s ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)、光学媒体の透過率 τ (rel.)、瞳孔の直径 dp (mm)、および目の実効焦点距離 (Gullstrand の目によると $f=17\text{mm}$) の逆数に関係している。

$$E_r = (\pi \times L_s \times \tau \times dp^2) / (4 \times f^2)$$

あるいは、

$$E_r = a \times L_s \times \tau \times dp^2$$

ここで、 $a=2700\text{m}^{-2}$ 。放射輝度は角膜の放射照度に直接関係しない。

可視光に対しては、若い人およびほとんどの動物の光学媒体の透過率は 0.9 である。網膜の放射照度は、式 (2) で与えられ、 dp の単位は m である。

白皮症の人では、虹彩は非常に効力がなく、多少分散した光が網膜に届く。しかしながら、光源のイメージは生じる。故に、式 (2) は、全網膜に落とされた分散した光の寄与を加算すれば有効となる。

網膜組織の障害は、網膜放射照度だけでなく、非常に強い放射熱流と目の動きにも依存している。

網膜熱流の影響。網膜の熱的損傷は、網膜の像の大きさによって閾値が変わる。これは、曝露時間中の網膜上の像の中心の放射温度の流れの影響のためである。非常に小さいおよび大きい点では曝露中の曝露域の放射熱流の影響は無視できる。故に、非常に小さいおよび大きい網膜上の像の大きさに対しては一定値の放射輝度閾値が適用される。しかし、網膜の熱的損傷に対して数学モデルおよび実験的に決定された閾値は、放射熱流のために、1 秒のオーダーの曝露に対して、網膜放射照度の閾値は、約 $25 \mu\text{m}$ (1mrad) から約 $2000 \mu\text{m}$ (0.1rad) までの像の直径のおおよそ逆に変化する。この影響は曝露中の熱の流れに依存しているので、この影響は、長時間曝露に対しては大きくなり、 1μ 秒のオーダーの短時間曝露ではほぼ存在しない。

目の動きの影響。連続的な目の動きは、特に光化学的に生じる損傷に対して曝露ガイドラインの誘導に大きな意味を持ち、熱的損傷に対しては小さい影響しかない。目

の動きは、照射される網膜の面積を効果的に大きくし、網膜上のエネルギーの分配角を大きくする。目の動きの程度は見つめる時間に依存する。短時間の曝露では、非自発性の動きが主である。1000秒あるいはそれ以上の非常に長い曝露では、課題で決定された目の動きが主で、目の動きの角度の程度は少なくとも100mradである。故に、光化学的な網膜曝露限界と比較するために、空間的に小さい光源の放射輝度を平均するために要求される角度は、目の動きの角度に関係している。光化学的な網膜影響に対する曝露レベルを決定するために、および100秒より小さい曝露時間に対しては11mradの平均角度が推奨される。11mradという平均角は、ある点を見つめる（凝視する）ことに関連する最少の目の動きを代表している。10秒以上の長時間にわたる連続的凝視は、例えば、溶接の最中のように、通常特別な標的への集中が必要な時のみ起こるであろう。このように、11mradという平均角は保守的な値である。

長時間の曝露に対しては、目の動きの程度は一般的に特徴付けられていなく、課題と行動に強く依存する。非常に保守的な値として、110mradという平均角が10000秒（青光の有害性に対する最大の積分された時間）という曝露時間に対して特定されている。もし視覚課題と行動が特徴付けられていれば、安全分析は目の動きをよりリアルに説明できもっと大きな平均角が使われる。11mradと110mradの平均視野は、網膜上の、それぞれ、190 μ mと1.9mmという大きさの像に対応する。

低視覚刺激を伴う網膜の赤外曝露。赤外LEDあるいは可視光がフィルラーによって除去されているその他の特別な赤外照明を見る時は、網膜を熱的損傷から守るために特別な曝露限界が求められる。可視刺激の欠損は回避反応をなくし、瞳孔の収縮が起こらない。

低い可視刺激に対するこの曝露限界は、故に、7mmの瞳孔を想定することに由来し、そして、0.25秒以上の波動に対する曝露限界の傾向を大きくする。長期間の曝露期間の限界は、赤外分光帯の熱的損傷の研究に大きな基礎をおいている。

目の前部構造。

多くの光源について、前眼部への潜在的な熱的有害性の評価は、網膜を評価することに合わせて非常に重要なことである。IR-A (780~1400nm)とIR-B (1.4~3.0 μ m)の寄与が考えなければならない。赤外放射への前眼部の慢性的曝露に対する基礎的曝露限界に関するデータは限られている。Slincy and Freasierは、太陽光での赤外放射からの平均的角膜曝露は10Wm⁻²のオーダーであると言っている。

紫外および短波長光の曝露では、波長依存的な光化学反応スペクトルは特徴的であり、曝露限界には光源のスペクトルが考慮されなければならないことを示している。しかし、赤外放射の影響は主に熱的なものであると考えられているので、角膜と水晶体の慢性的赤外放射曝露への生物学的応答は、強く波長に依存するとは考えられていない。角膜、房水および虹彩に吸収される放射エネルギーは熱伝導で消失し、光学的

な通過の深さにかかわらず水晶体で幾分かの加熱が起こるのであろう。貫通の深さは 1.2 ~ 3 μm の幅で大きく変化する。しかし、これは、一端熱的平衡が達成されれば、連続的な波動源への曝露により生じる最終的な温度上昇には深刻な影響は持ち得ない。

水晶体の最終的な温度は、周囲の温度にも依存している。周囲の温度は 37°C 以下に下がり、少なくとも 6Wm⁻² の追加的放射照度が水晶体の温度を保つために必要である。Vos and van Norren は 1kWm⁻² の放射照度では前眼部の温度を 1°C 以上は上昇させないとした。しかし、顔面の 1kWm⁻² は痛いほど暖かく、暖かい環境では耐えられない。

相乗効果

水晶体と網膜での熱と光化学の相乗的影響は、いくつかの実験で研究されている。その影響は二つの内の一つの因子より少ないが、光化学反応の熱的増強は実験的に示されている。このことは、より大きい削減因子を導入することにより曝露限界の導出において考慮されている（下を見よ）。

皮膚の曝露

皮膚への熱的影響の現実的なリスクは、非常に高い放射照度が光源から放出される環境においてのみ存在する。ICNIRP は（経験的な保守的仮定に基づいて）10 秒より少ない曝露に対してのみガイドラインを出している。

より長い曝露に対しては、熱ストレスのガイドラインを参照せねばならない。熱ストレスをコントロールするほとんどのガイドラインは、深部体温を 38°C までに制限するようにデザインされており、空気の流れ、環境温度、および湿度を考慮することを求めている。

忌避反応

目は、自然環境からの過剰な光学的放射からそれ自身を守るよう適応している。そして、人間はもし有害作用が起これば追加的な保護装置を使うことを学んでいる。明るい光への曝露に対する自然の忌避反応には、瞳孔の収縮、目を動かす、目を細めるおよびある場合は瞬目する、がある。

Gerathewohl and Strughold は、フラッシュランプへの全視野曝露での瞬目反射を研究し、フラッシュの発光から完全にまぶたが閉じるまでの時間が最少で 180ms であることを示した。しかし、反射性の瞬目は人により大きく変わることが分かっており、行動的に抑制しうる。長時間曝露の潜在的な有害性は、光のエネルギーを網膜のより大きな面積に分散させる不随意の目の動きで和らげられる。さらに、頭を動かすような行動反応もまた網膜の与えられた面積の曝露を減ずる。熱的に引き起こされた損傷について、損傷閾値の弱い要因となる別の因子がある。それは放射照度で与えられ、

長時間の曝露時間を伴う。明るい光への曝露による瞳孔サイズの減少は、長時間の網膜曝露を動的に減じる（図 4）。

時間平均網膜放射照度に対する目の動きの影響は、Ness と Lund によって描かれている。

皮膚と角膜の温度上昇は数秒間の内に回避反応を起こさせる。痛覚を生じる温度は熱的損傷を起こさせる温度より低い。急激に皮膚を加熱する非常に高い放射照度を除いて、痛覚は通常数秒の内に回避反応を起こさせ、やけどを予防する。アルコールやある種の薬物の影響下で、痛覚は痛覚が減じられる可能性があり、結果として回避が起こらない。

理論的根拠

曝露限界は、損傷閾値に関する現在の知見に基づいており、ICNIRP の原則に呼応している。曝露限界は、減衰因子 reduction factor を適用することにより、損傷閾値の下のレベルに設定されている。損傷閾値にある不確実性の見地から、曝露限界を定めるに当たり少なくとも二つの減衰因子が適用されている。さらに、曝露限界の波長一、曝露時間一、および／あるいはスポットサイズ一依存性は、既知の損傷閾値に関して簡略化されている。これらの簡略化は、時としてより高い減衰因子を課しており、約 2 倍の高さになる場合もある。

目に対する曝露限界は、皮膚より目の方が感受性が高いので、最も制限的である。目の過曝露の結果は、皮膚の場合より一般的に重篤であり、レーザを含む光源の安全基準は、従って、目の防護を強調している。

ガイドラインは、動物の実験的曝露による損傷に主に基づいている。さらに、太陽や溶接アークを見ることにより生じた人網膜損傷の情報が考慮されている。網膜に対する曝露限界や角膜の波動 pulsed 曝露は、レーザ光源で得られた実験データに主に基づいている。

実験的な損傷閾値の決定について、個々の曝露を増加させ、それぞれ、眼底検査あるいはその他の検査法で評価し、障害の有無の二値で点数化した。暴露量の関数としての損傷に対する確率は、正規分布を仮定して当てはめた。損傷が生じる確率が 50% である実効暴露量 ED-50 は、閾値曝露率として普通に使われる。

閾値における損傷に呼応する曝露は、曝露と検査（障害は、生物学的に検知可能になるまで一定時間を要する）の時間間隔、検査の方法（生体内で眼底検査学的に検知可能、光学顕微鏡的变化）、および曝露部位（黄斑、傍黄斑）に依存する。一般的に、曝露後 24 時間に眼底検査が行われた時、曝露後 1 時間では見えなかった網膜障害が観察され、結果として、24 時間後の ED-50 は 1 時間後の E-50 より低くなる。このために、最近の網膜閾値データは 24 時間と 1 時間の観察と黄斑曝露に対して報告されてい

る。概して、24時間 ED-50は1時間 ED-50の2、3倍の係数が低い。光化学的に生じた網膜損傷に対する閾値は、曝露後1時間および48時間の間隔で報告されている。組織の光学および電子顕微鏡検査は、曝露24時間後の眼科的検査によるED-50付近の細胞の変化を示す。角膜および水晶体の閾値の決定に対して、スリットランプ顕微鏡が放射により生じた混濁を観察するために用いられる。水晶体に対しては、曝露と観察の時間間隔は24時間から48時間である。熱的に生じた角膜損傷に対しては通常1時間で閾値障害が観察され、一方、光化学的な閾値影響は曝露後24時間から48時間で観察される。

皮膚に対しては、閾値の基準は、曝露後48時間以内の直接観察により同定された放射に起因する紅斑に基づいている。いくつかの研究では、直接観察は組織病理学的に確認された。

曝露限界と特殊な曝露指標（波長、照射時間、網膜上の像の大きさ、等）に依存するその機能的依存性は、直接的な観察、すなわち、網膜曝露の場合は眼底検査に基いて決定された閾値データに基づいている。曝露原価の設定に際し、ICNIRPは減衰因子にこれらの配慮を取り入れた。

可視放射エネルギーの曝露限界はまた、ほとんどの屋外の環境での曝露は間接的、あるいは軸がずれている off-axis いて、雪や砂の表面からの反射があるような環境を除いて普通は目には無害である、という潜在的な仮定を含んでいる。

動物実験でタイプI網膜光化学的損傷を起こす曝露条件は、広域帯光源で人間が経験するものより極度にそしてかなり超えている。従って、タイプIの損傷を避けるための特別な曝露限界の推奨はない。

環境の照明は、概日性、神経内分泌、神経行動およびメラトニン応答を変化させることにより人間の健康や体調に影響する。これらの応答のいくつかに対する作用スペクトルが記述されており、潜在的な治療的応用が、睡眠障害、抑鬱あるいは概日リズムの狂いを治療するために評価されている。しかし、治療的レベルの照明の副作用が羞明、視覚不快、頭痛および増大したグレア感受性に表れている。ちょうど光学放射防護レベルがグレアからの視覚障害を防がないのと同じように、このガイドラインは、その影響は必ずしも有害な応答ではないので、生理学的なリズムの潜在的な光による変調を排除しない。

光感作性に続く皮膚の損傷は光感作性物質に強く依存しており、それは毒物学的な基準によって治療されなければならない。これはこのガイドラインの埒外である。

組織の機械的な破壊および超短波のレーザー照射によるその他の影響は、現行の非レーザー光源では生じず、故に、このガイドラインでは考慮されていない。

すべての現在知られているアークおよび白熱光源に対して、 $3\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ の遠赤外放射の寄与はふつう無いかあるいは実際に重要ではない。レーザーのみがこのスペクトル領域で潜在的な有害性を持つ。曝露されると有害な温度が十分高い放熱器 radiator については、 3000nm 以下の波長域の放射が重要である。このように、赤外

放射は、そのような光源が作られる時には大部分無視する。さらに、3000nm以上の波長帯で放射からの可能な寄与を説明するレベルまで曝露限界が設定される。ふつう、著しいIR-Cが存在する条件で熱ストレスへの考慮が主要なリスクアセスメントとなる。

前眼部（角膜と水晶体）の防護と皮膚の熱的損傷に対する防護のために、全赤外放射曝露が曝露限界と比較される時、曝露の決定にIR-C成分を含めることは、保守的なリスク分析を構成する。

曝露限界の変化に対するより詳細な理論的根拠が、以前のガイドラインと比較して、付属書Aに示されている。

曝露限界の正しい適用は、分光放射輝度 L_λ 、あるいは分光放射照度 E_λ の知識が必要であり、網膜の熱的曝露限界の決定に対しては目が知覚する光源の対辺角の知識が必要である。

白色光源に対して、そのような詳細な分光データは、一般的に輝度が 10000cdm^{-2} を超える時のみ要求される。この簡便法は、多くの単光源を除外した結果である。というのは、これらの光源では、網膜に対する曝露限界を超えないからである。

網膜の熱的損傷に対する防護限界の導出において、二つの異なる瞳孔径が仮定され、暗順応した目には7mm、明るい光源条件では3mmである。二つの制限は網膜を熱的損傷から守るために定義された。一般的な可視光を放射する非コヒーレント広域帯光源の場合には一つの曝露限界がある。これには、約0.5秒以上の曝露に対しては瞳孔径7mm、それより長い曝露では瞳孔が収縮するので3mmの瞳孔径が仮定されている。意識した視努力に結果するより長い曝露に関心があれば、長時間に対する曝露限界を適用する。7mmの瞳孔径を仮定した、強い視覚刺激がない赤外光源に対する二次的な曝露限界がある。光化学的な網膜の損傷に対する曝露限界は、約3mmの瞳孔径の仮定に由来している。

視感度が減じたり外科的な麻酔のために忌避反応が消失している曝露条件では、ICNIRPは曝露限界を調整することを推奨している。

変数に対する関連指標への曝露限界の依存性は、閾値データを変数へ当てはめることによる実験に由来している。しばしば、直線的な依存性が両対数でプロットすると観察される。次元の適切な処理のために、閾値とその変数は相対的な値へ変換し、無次元にする必要がある。結果として、曝露限界の関連変数への依存性を特定するための完全に次元的に正しい方法が、 t あるいは α のような変数が、それぞれ、1秒や1ラドのような $1\times$ 単位に等しい関連因子によって割られると、導出される。網膜の曝露限界に対する式(3)に例を示す。

$$L_R <= (20000 \times \alpha_{\text{ref}} \div \alpha) \times (t \times t_{\text{ref}}^{-1}) 0.75 \text{Jm}^{-2}\text{sr}^{-1} \quad (3)$$

ここに、 $\alpha_{\text{ref}} = 1\text{rad}$ 、 $t_{\text{ref}} = 1\text{秒}$

しかし、ガイドラインの式の煩雑さを減ずるために、次元因子は除外された。故に、式は次的には正しくなく、多くの変数が大きさの正しい順序で挿入されているということが重要である。すなわち、 α は rad で例えば mrad ではない。

生物学的重み付け関数は、網膜損傷から守るための効果の波長依存性を表すために使われる (図 5, 表 2)。

網膜への熱的有害性 (380~1400nm)

人の網膜を熱的損傷から保護するためには、分光学的に重み付けされた実効照度量が網膜の熱的障害の曝露限界を超えてはならない。実効的な網膜への熱的放射輝度 L_R ($Wm^{-2}sr^{-1}$) は、380~1400nm の波長幅 λ (nm) について、分光学的放射輝度 L_λ ($Wm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$) と網膜の熱有害性関数 $R(\lambda)$ (すなわち、網膜への熱的生物学的重み付け関数) (表 2) との積分 (積和) である (式 4)。

$$L_R = \sum_{380}^{1400} L_\lambda \times R(\lambda) \times \Delta\lambda \quad (4)$$

網膜熱的有害関数 $R(\lambda)$ は、閾値の網膜損傷を起こさせる分光学的実効性を示し、表 2 に与えられている。実効放射輝度 L_R は式 4 で与えられ、表 4 の曝露限界と比較される。

網膜の熱的 D_R ($Jm^{-2}sr^{-1}$) は、 L_R を曝露時間 t (s) で積分して得られる。もし、放射輝度が曝露時間 t の間一定であれば、放射輝度率は単に放射輝度 L_R と曝露時間の積となる ($D_R = L_R \times t$)。実効的網膜熱放射を決めるための波長幅 $\Delta\lambda$ は、放射の波長依存性に基づいて選択されるべきである。波長により生物学的分光学的効果 $R(\lambda)$ が急激に変化するところではより高い分光解像度が求められる。曝露時間中の放射が一定である光源では、実効放射輝度率 DR は式 5 で与えられる。

光源の対辺角。目の位置 (図 3) における光源によって張られる角度 α は、しばしば、「光源の大きさ」として参照される。光源の放射放出面が直径 ds の円形で、目 (図 3) からの距離を r とすれば、 α は光源の直径と光源への距離の比 ds/r となる。非円形の光源に対しては、 α は最短および最長の長さの算術平均である。算術平均を計算する前に、それぞれの長さの対辺角は、それぞれ、 α_{min} と α_{max} に制限される。1.5mrad より小さい対辺角の光源は、「点光源」として参照される。このような光源は、光学的な回折と収差を考慮して、ほぼ最も小さな網膜の像の大きさを結ぶ。さらに、網膜の熱損傷閾値は、 $\alpha < \alpha_{min}$ の光源に対して変化しない。故に、 α_{min} は 1.5×10^{-3} ラジアン (すなわち、 $\alpha_{min} = 1.5 \times 10^{-3} \text{rad}$) が割り振られる。大きな光源は、 $\alpha > \alpha_{max}$ で定義され、ここで α_{max} は、網膜の放射曝露で表現された網膜損傷の閾値はサイズが大きくなっても変化しない網膜の像の大きさである。

中間的な光源は、光源の大きさが α_{min} と α_{max} の間であるか、 $\alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max}$ である。中間的な大きさの光源に対しては、熱的網膜損傷閾値は光源の大きさ α (すなわち、網膜の照射の直径) および曝露 (あるいは「波動 pulse」) 時間 t に依存する。

放射輝度の決定。空間的に不規則な光源あるいは「暑い」点のある光源を評価する時は、放射輝度は受光角 γ_{th} について平均されるべきである。この受光角は、曝露 (あるいは波動) 時間 t に依存している。曝露時間が 0.25 秒より大きい曝露時間 ($t > 0.25s$) の連続的な波 (CW) 光源では、 $\gamma_{th} = 11 \times 10^{-3}$ ラジアン (11mrad) である。曝露時間が 0.25 秒より短い波動 ($t < 0.25s$) および熱い点がある光源では、放射輝度は、 5×10^{-3} ラジアンに等しい受光角 γ_{th} ($\gamma_{th} = 5mrad$) として決定されるべきである。もし、光源の大きさ α が受光角 γ_{th} より小さい、および放射輝度がこの受光角で平均化される時は、網膜熱損傷曝露限界の決定に用いられる α の値は、受光角 γ_{th} より小さくあってはならない。

基本的な網膜熱限界。網膜を熱的損傷から守るために、実効放射輝度 L_R 、あるいは実効放射輝度率 D_R (式 5) は、放射輝度で表した曝露限界 (EL) L_R^{EL} 、あるいは放射輝度率 D_R^{EL} を、それぞれ、超えてはならない (式 6, 7)。曝露限界 L_R^{EL} 、 D_R^{EL} は経験的な表現であり、 α がラジアン、 t が秒で代入される時のみ、それぞれの曝露限界値は $Wm^{-2}sr^{-1}$ および $Jm^{-2}sr^{-1}$ となる (表 3)。

$$L_R \leq L_R^{EL} \quad or \quad D_R \leq D_R^{EL} \quad (5)$$

$$L_R^{EL} = 2.0 \times 10^4 \times \alpha^{-1} \times t^{0.25} \quad Wm^{-2}sr^{-1} \quad (6)$$

$$D_R^{EL} = 2.0 \times 10^4 \times \alpha^{-1} \times t^{0.75} \quad Jm^{-2}sr^{-1} \quad (7)$$

式 6 と式 7 は、光源角の大きさ α が α_{min} と α_{max} に境を接し、および曝露時間 t が 1μ 秒と 0.25 秒に境を接している時に適用される。

光源の大きさ α が α_{min} より小さい時、曝露限界 EL は光源の大きさが α_{min} に等しいとして計算される。同様に、光源の大きさが α_{max} より大きい時は、光源の大きさ α は α_{max} に等しいとして計算される。 1μ 秒より小さい曝露時間に対しては、放射輝度率 radiance dose の曝露 (あるいは波動 pulse) 時間は 1μ 秒に等しいとして、定数の放射輝度率が適用される。もし曝露時間が 0.25 秒より大きい場合は、放射輝度の曝露率は曝露時間 t は 0.25 秒に等しいとして計算され (式 6)、表 4 に与えられた定数の放射輝度が適用される。

瞳孔が散大したり曝露時間が0.25秒を超える(例えば、ある種の眼科的検査の過程)のような特殊な個人的環境がありうる。このような通常ではない条件下では、式6で与えられる放射輝度率の基本的曝露限界は0.25秒以上の曝露時間が適用される(表4)。

7mmの瞳孔、すなわち、暗順応した瞳孔は、波動曝露、および約0.5秒までの曝露時間を伴う連続的な波(CW)光源に対して仮定されるので、網膜の熱的曝露限界は、正常な反応的な瞳孔に対して保守的 conservative である。昼光輝度の条件下では、通常の反応的瞳孔の直径は直径で7mmより小さい。故に、小さな瞳孔径が仮定される昼光条件では、それに応じて曝露限界は大きくなる。

$\alpha > \alpha_{\max}$ の大光源。大きな光源は、対辺角が α_{\max} より大きい光源として定義される(表3)。大光源に対する曝露限界もまた、より小さい光源($\alpha < \alpha_{\max}$)に対して保守的限界を提供し、 α が α_{\max} (表3)に等しいとして基本的限界(式6, 式7)から計算される。これらの曝露限界は表4にまとめられている。

$t < 1\mu$ 秒(波動時間が1 μ 秒より小さい)に対して、曝露限界 D_R^{EL} は表4に与えられている定数の放射輝度率である。

中間的および点光源。中間的な大きさの光源は、対辺角 α が α_{\min} より大きく、 α_{\max} より小さい、すなわち $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ として定義される(表3)。中間的な大きさの光源に対して、網膜の熱的損傷の曝露限界は、曝露時間 t (秒)と対辺角 α (ラジアン)の両方に依存する。点光源は、対辺角 α が α_{\min} 、すなわち 1.5×10^{-3} ラジアン(1.5mrad)より小さいか等しい光源として定義される。 $\alpha \leq \alpha_{\min}$ の時、曝露限界は、式6あるいは式7を使う曝露限界の決定に対して、光源角 $\alpha = 1.5 \times 10^{-3}$ ラジアンを使って計算される(表4)。

網膜：近赤外光源の弱い視覚刺激。赤外線加熱ランプ、あるいは強くない視覚刺激を持つどんな近赤外光源に対しても、重み付け放射輝度LRは式8および式9で与えられるように制限されるべきである。弱い視覚刺激の近赤外放射曝露で曝露時間が0.25秒より長い曝露では、式8と式9で与えられる基本的放射輝度と放射輝度率が適用される。

$$L_{WVS}^{EL} = 2.0 \times \alpha^{-1} \times t^{-0.25} \times 10^4 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1} \quad (8)$$

$$L_{WVS}^{EL} = 6300 \times \alpha^{-1} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1} \quad (t \geq 100 \text{ 秒}) \quad (9)$$

曝露制限 EL との比較のために、および熱い点を持つ光源の場合のために、放射輝度は $\gamma_{th} = 11\text{mrad}$ について平均されるべきで、この場合、曝露限界を決定する α の値は11mradより小さくあるべきではない。

前眼部の保護。目に接触するか近接の光源に対して、短い波動と熱の網膜曝露限界に近い曝露レベルの大きな光源に対して、前眼部の損傷は除外できない。しかし、追加的な研究なしで、特殊な曝露限界は述べられない。特殊なガイドランスが無いので、前眼部の赤外の曝露限界は、可視光の分光範囲が適用される時、保守的なガイドラインを提供する。

青光の光化学的網膜有害性（300～700nm）

急性の光化学的に生じる光網膜症から網膜を守るために、青光の実効放射輝度、あるいは青光の実効放射輝度率は制限される。実効青光放射輝度 LB ($Wm^{-2}sr^{-1}$) は、式 10 に与えられているが、光源の分光放射輝度 $L\lambda$ ($Wm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$) と表 2 に掲げた青光有害性重み付け関数 $B(\lambda)$ との積分（積和）で得られる。

$$LB = \sum_{300}^{700} L\lambda \times B(\lambda) \times \Delta\lambda \quad (10)$$

一定ではない放射輝度値間欠のあるいは波動の曝露に対しては、実効青光放射輝度率 DB ($Jm^{-2}sr^{-2}$) は、 LB を曝露時間 t で積分して得られる。もし、放射輝度が曝露時間 t の間一定であれば、青光実効放射輝度率 DB は式 11 で与えられる。

$$DB = LB \times t = \sum_{300}^{700} L\lambda \times t \times B(\lambda) \times \Delta\lambda \quad (11)$$

実効青光重み付け放射輝度、あるいは放射輝度率 radiance dose は、式 12 で示すように、それぞれの曝露限界 L_B^{EL} あるいは D_B^{EL} を超えてはいけない。

$$LB < L_B^{EL} \quad \text{あるいは} \quad DB < D_B^{EL} \quad (12)$$

0.25 秒 $< t < 10000$ 秒（約 2.8 時間）に対して、実効放射輝度率 DB は、式 13 で与えられる青光限界 D_B^{EL} ($Jm^{-2}sr^{-1}$) により制限される。

$$D_B^{EL} = 1 \times 10^6 Jm^{-2}sr^{-1}$$

$t > 10000$ に対しては、青光重み付け実効放射輝度 LB （すなわち、副作用を避けるために $LB < L \downarrow B \uparrow EL$ ）を制限する放射輝度限界 L_B^{EL} は式 14 で与えられる。

$$LD_B^{EL} = 100 Wm^{-2}sr^{-1} \quad (14)$$

放射輝度 LB は空間的に角 γ ph について平均。受光角 γ ph の平均は、表 5 で与えられるように、曝露時間 t の関数として変化する。像の平面にある視野絞り（受光角

の平均を定義する開口、あるいは視野)の位置は、最大の曝露の決定を確かにするために調整されるべきである。

もし視覚課題と行動が特徴付けられていれば、安全分析はより現実的な目の動きを説明できる。その場合、その分析が、網膜上のどんな点も、式 11 で与えられた基本的放射輝度率限界から得られた値より高いレベルの放射輝度曝露レベルを超えないように分析が行われる限り、より大きな平均角が用いられる。

明らかな光源の対辺角が γ_{ph} より小さい光源に対しては、放射輝度の限界は等価な放射照度あるいは与えられた時間 t の放射輝度曝露限界に変換しうる。その変換は、放射輝度率限界を平面角 γ_{ph} で定義される立体角に乗じてなされる。この限界は、実効放射輝度曝露あるいは「開いた」視野で定義される放射照度と比較される。これはしばしば、放射輝度を平均するより簡単である。実効放射照度 EB で重み付けされた青光有害性を得るための青光有害性関数に対して、その潜在的な有害性は、数学的に重み付けされた分光放射照度 E_{λ} で評価される。実効放射輝度曝露 HB は、実効放射照度 EB を曝露時間で積分して得られる。角膜における実効放射輝度曝露および実効放射照度として表現される青光有害性に対する曝露限界は、対辺角がより小さい光源にも適用できる (表 5)。

青光実効放射輝度曝露 HB 、あるいは青光放射照度 EB は、放射輝度曝露 $H_B^{EL}(\text{Jm}^{-2})$ 、あるいは放射照度 $E_B^{EL}(\text{Wm}^{-2})$ と比較される (式 15、式 16、式 17)。

$$EB <= E_B^{EL} \quad \text{あるいは} \quad HB <= H_B^{EL} \quad (15)$$

$$H_B^{EL} = 100 \text{Jm}^{-2} \quad 0.25 <= t < 100 \text{s} \quad (16)$$

$$E_B^{EL} = 1 \text{Wm}^{-2} \quad 100 <= t < 30000 \text{s} \quad (17)$$

実際、通常の視覚課題に関連した目の動きの故に、小さな光源に対して考慮されるべき最大曝露時間は、100 秒である。従って、100 秒より長い曝露時間に対して、放射照度で表される小さい光源の限界は 1Wm^{-2} である。

放射照度の測定が表 5 (放射照度の場合は角度を平均するのではなく、受光角を制限する) で特定された受光角で行われる場合、式 16 と式 17 で特定された限界は、特定の受光角より大きい光源にも適用でき、そして放射輝度として特定された限界に完全に等しい、ことに注意せよ。

無水晶体の目および幼児の目への網膜光化学的有害性 (300~700nm)。今日では希であるが、一時期、外科的に手術を受けた白内障患者は、眼内レンズの移植を受けていなかった。しかし、白内障を外科的に除去している間、そして眼内レンズが移植された後、患者は手術光からの約 300~400nm の近紫外の放射エネルギーに曝露される。

非常に希であるが、水晶体が無い状態で子どもが生まれることがある。無水晶体の光化学的網膜有害性が存在するという特別な条件である。これは青光の網膜有害性のより重篤なタイプである。無水晶体のケースでは、紫外放射曝露条件下で追加的な目の紫外放射防護が用いられる。さらに、紫外放射の水晶体透過性は2歳以下の幼児には、もっと年上の子どもや大人に比べより高くなる。このために、水に近いか雪の中では、目の防護が考慮されねばならない。

潜在的な網膜の有害性は、青光有害性関数に対して分光学的に放射輝度を重み付けして評価される。無水晶体の目では440nm以下の波長に変える。この変更した作用スペクトルは $A(\lambda)$ という記号で与えられる。表2の $B(\lambda)$ の代わりに $A(\lambda)$ を式18に適用して求める。

$t < 10000$ 秒に対しては、実効無水晶体有害放射輝度 L_{Aphake} は、分光放射輝度 L_λ から無水晶体有害関数 $A(\lambda)$ (図5、表2) で計算される (式18)。

$$D_{Aphake} = \sum_{300}^{700} L_\lambda \times A(\lambda) \times t \times \angle \Omega \leq 1.0 \text{ MJm}^{-2} \text{sr}^{-1}$$

2歳以下の幼児の水晶体は大人の水晶体に比べ紫外線をより多く通し、成長中の網膜をより多く保護する必要がある。このように、 $A(\lambda)$ 重み付け関数は、幼児が曝露される光源の保守的な有害性を評価するために用いられるべきである。

角膜と水晶体 (780nm~1mm)

角膜の熱的損傷と水晶体に遅れて現れる影響の可能性 (白内障発生) を避けるために、780nm~1mmの波長帯の赤外放射照度EIR (式19) は、式20と式21で与えられた曝露限界 E_{IR}^{EL} により制限されるべきである。

$$E_{IR} = \sum_{780}^{1000} 0.3E_\lambda + \sum_{1000}^{3000} E_\lambda \quad (19)$$

簡単のために、測定は温度検知器を用いて行うことができ、式19で定義した作用スペクトルは無視する。式19は保守的な曝露値の結果出てきたものである。作用スペクトルは、赤外LEDのような非熱的な放射物に応用されることを意図したものである。そこでは、分光放射輝度計が分光放射照度 E_λ を測定するためにいつも用いられる。

$$E_{IR}^{EL} = 18 \times t - 0.75 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2} \quad t < 1000\text{s} \quad (20)$$

$$E_{IR}^{EL} = 100 \text{ Wm}^{-2} \quad t = > 1000\text{s} \quad (21)$$

冷たい環境では、長時間の曝露限界は、0°Cで 400Wm⁻² まで増加し、10°Cでは、水晶体の温度が 37°Cを超えないで、約 300Wm⁻² である。限界の緩和は、頭部の環境熱交換に基づいており、水晶体の最終温度は環境温度から計算される。

可視および赤外の皮膚への熱的損傷

熱的損傷から皮膚を保護するために、3000nm 以下の波長で 10 秒以下の曝露にて決定された放射輝度曝露 H は、式 22 で制限されるべきである。

$$H_{skin}^{EL} = 2.0 \times t \cdot 0.25 \times 10^4 \text{ Jm}^{-2} \quad t < = 10\text{s} \quad (22)$$

正常な忌避行動が曝露に制限を課すので、長時間の曝露に対しては制限は設定されていない。より長い曝露時間には熱ストレス関連のことが主要であり、読者は他の適切なガイドラインを参照すべきである。

熱による痛みは、皮膚温が 45°C以上くらいで生じる。この温度はやけどが生じる温度よりは小さい。そしてこの痛みは、忌避反応により熱的損傷を予防するために曝露を制限する。

反復曝露

繰り返し波動に曝露される、間欠的な曝露、あるいは一定ではない曝露レベルについては、次のことが適用される。

基本的原理として、予期された最大曝露時間 T 内のどんな曝露でも、その時間の対応する曝露制限より低くあらねばならない。

波動の連続した曝露に対して、このことは、それぞれの放射輝度曝露あるいは放射輝度率 radiant dose は、個々の波動時間に対して適用できる曝露限界より小さくあらねばならない、ことを意味している。この基本的原理から、T 時間の間総和された曝露量は、放射輝度曝露あるいは放射輝度率として表され、T 時間について計算された、曝露限界より小さくあらねばならない。この後者の要請は、数学的に、平均放射照度あるいは平均放射輝度と、T 時間で計算された曝露限界および放射輝度あるいは放射輝度として表された曝露限界との、比較と等価である。不規則な波動パターンあるいは一定ではない曝露レベルに対して、波動時間と考えられた T との間の曝露時間（「一時的な分析窓」）のどんな曝露も、波動パターンの一部への曝露として、単波動への曝露あるいは時間 T について平均した曝露よりもよりクリティカルになり得る。曝露限界が一定の放射輝度あるいは放射照度レベルに到達する時間（光化学的に生じる網膜症は 10000 秒、前眼部への赤外曝露は 1000 秒、熱的に生じる網膜症は 0.25 秒）T_{max} に対して、予期される曝露時間 T が T_{max} より大きい場合は、T_{max} より長い曝露時間について、放射輝度曝露あるいは放射輝度率（あるいは、放射照度あるいは放射輝度の平均）の追加を考える必要は無い。言葉を変えて言えば、（前眼部に対する 1000

秒のような) T_{max} を超える曝露時間については、曝露の追加を考える必要は無いということである。すなわち、その 1000 秒の曝露は独立して処理される。不規則な曝露レベルのすべての場合について、(T_{max} あるいはより短い T まで変化しうる) 与えられた時間の分析時間窓は、異なる位置の時間軸に置かれるべきである。最もクリティカルなシナリオ、すなわち、曝露限界を超える曝露レベルの最も高い比が曝露を制限する。

T_{max} が 10 秒に等しい皮膚の繰り返し曝露について、曝露間の必要な冷却時間についてガイダンスを出すのは不可能である。それは、損傷の閾値が、曝露されるエリアの温度に合わせて環境の温度に依存しているからである。長くて 10 秒まで続く曝露後に皮膚が十分冷却される場合、反復曝露の生物学的追加性はほとんどなく、その曝露は根本的に独立したものと考え得る。そしてまた、(ふつうの痛み反応を想定して) 痛み応答が無い限り、損傷のリスクはない。広いエリアが曝露された場合、熱ストレスがしばしば制限因子となる。

網膜の熱的限界について、波動の反復が 5Hz を超える場合、光源の対辺角が 5mrad より大きい拡張した光源レジームにある光源の場合、追加的な要求がある。

曝露時間内の n 波動の連続の中の一つの波動に対する網膜の熱的限界は、次のように減じられなければならない：

- ・光源の対辺角が α_{max} より小さいか等しい場合、単波動の曝露限界 EL は、 $n \cdot 0.25$ ($n < 40$)、および 0.4 ($n \geq 40$)
- ・光源の対辺角が α_{max} より大きい場合、単波動の曝露限界 EL は、 $n \cdot 0.25$ ($n < 625$) および 0.2 ($n \geq 625$)
- ・光源の対辺角が 100mrad より大きい場合、単波動の曝露限界 EL は減ずる必要なし

予期される曝露時間の最大値は 100 秒を超えてはならない。これらの因子は簡略化され、少ない波数の波動に対しては過度に制限的であり、より少なく制限的な分析に対しては、 $\alpha \leq \alpha_{max}$ の場合、 $1/2.5$ までに制限されるファクター $n \cdot 0.25$ を乗じることで、おとび $\alpha > \alpha_{max}$ に対しては $1/5$ を乗じることで置き換えられる。ここで、 n は、100 秒より短い最大のよき曝露時間内の波動の数である。

限界の応用

曝露距離

一つの分析に対して、曝露位置における目と皮膚の曝露はそれぞれの曝露限界と比較される。

小径の光ファイバーのような小さい光源の網膜曝露の分析に対して、人間の目が鋭く焦点を合わせることができる最も近い距離は約 100~200mm である。100mm の距離のものを見るためにはかなりの近点の調節が必要であり、小さな子どもか近視の強い人でないとできない。故に、100mm の視距離は一般的に点光源の発散ビームレーザの最も悪いケースの評価に適用される。網膜の熱的損傷および青光の光化学的有害性の両方の評価に対して、最も悪いケースの曝露の代表として、光源から 200mm という最も近い視距離が想定しうる。

もっと短い距離では、光源の像は焦点外であり、かすんでいる。ほとんどの場合、そのような短視距離条件は非現実的である。(LED を含む) 従来のランプ光源に対しては、20cm の最も悪いケースの評価距離が現実的である。

前眼部の曝露の分析に対して、特別な応用で、顔の中のキセノンフラッシュランプへの接触曝露のような、より短い距離が考えられるべきであろう。

波動期間の決定

波動期間は半値幅として定義される。

曝露レベルの決定

不均一の放射照度像 profile に対して、ICNIRP は 7mm の口径開口を平均するように推奨している。均一な放射照度に対しては、開口測定は大きくなりうる。

皮膚の曝露限界との比較で、検出器は、光源が十分に小さくなければ、コサイン応答を持っているべきである。

放射輝度あるいは放射輝度率として特定された網膜の光化学的曝露限界との比較で、(放射輝度あるいは放射輝度率として決定された) 曝露限界は、適切な受光角で平均されなければならない。受光角の使用は、目の動きを説明する空間的に平均された放射輝度を提供する。特別な受光角(視野角)は、受光角を γ_{ph} に制限する機器で望遠的に受光することにより、あるいはまた光源を可能な限り近く、 γ_{ph} の対辺角の開口を持った不透明な隔壁を検出器から見えるように、置くことにより、成し遂げられる。例えば、口径 11mm の円形の開口をランプ光源の上に置くことにより、1m の距離で 11mrad の対辺角が得られる。受光角 γ_{ph} は、曝露期間により変化し、表 5 に定義されている。もし、特別な曝露シナリオのために、目の動きが時間の関数として特徴付けられていれば、曝露シナリオは、曝露限界の分析に使いうる。それで、網膜上のすべての点の、青光の実効、すなわち、 $B(\lambda)$ 重み付けされた、放射輝度曝露は(透過損失がないとして)、 $24kJm^{-2}$ を超えるべきではない。この網膜放射輝度曝露は、瞳孔の直径を 3mm として、基本的限界 $106Jm^{-2}sr^{-1}$ から導出されている。透過損失は、曝露レベルが測定により決定されるように、あるいは目の「外部」で計算するように、除外されている。例えば、実効放射輝度曝露は、撮像平面に撮像レンズと検出器を置いて測定される。制限は、それぞれのイメージの位置に適用され、目の動きが測定に

よって直接的に説明されるので、1.5mrad より大きい受光角での平均はなされるべきではない。

網膜の熱的曝露限界と比較するために、受光角は、光源が局所的な放射輝度ホットスポットを持っているかどうか、重要でありうる。ホットスポットがある波動光源に対して、5mrad の受光角が使われる。光源が 5mrad より小さい場合、および 5mrad の受光角の平均が曝露レベルの決定に使われる場合は、曝露限界を決めるための、光源の角度 α は 5mrad より小さくあるべきではない。CW (continuous wave 連続的波動) 光源に対しては、受光角は 11mrad より小さくしなければならない。もし、光源が 11mrad より小さく、受光角の平均が 11mrad であれば、光源の角 α は、曝露限界の決定に際して 11mrad にセットされる。波動光源で 5mrad より大きい光源、および連続波動光源 CW では 11mrad の光源にホットスポットがない場合は、受光角の平均はより大きくなる。しかし、受光角の平均は、光源より決して大きくなってはいけなない。ホットスポットのケースでは、平均化されない放射輝度の測定は保守的であるが、時折より簡単なアプローチとなる。

前眼部の保護のための限界を比較するために、受光角 80 度の外からの放射輝度はまぶたによる保護のために集める必要は無い。

すべての現在知られているアークおよび白熱光源について、IR-C 分光帯 (3~1000 μm) による寄与は、実際的な関心が通常無いかほとんど無い。皮膚と目の前眼部の曝露限界は、3000nm 以下の波長帯のほんの部分的な放射照度が、それぞれの曝露限界を比較するために、必要とするのであった。3000nm 以上の波長帯の部分的放射照度は、実際の物理的曝露に寄与することができ、この追加的曝露は、曝露限界をそれに対応するレベルにセットすることにより説明される。例えば、表面温度が 1000°C の暖房機について、全放射照度の約 50% が 3000nm 以上の波長帯に含まれており、そのために、3000nm 以下の部分を 100Wm² に制限すると、許容される全放射照度は約 200Wm² になる。これは、工業的な装置で白内障を起こすレベルよりずっと低い。制限的であるが簡単な曝露評価は、3000nm 以下の波長の放射輝度にも感度のある、フィルターをつけない熱検知器で行うことができる。その場合、放射照度は、長い曝露に対して 10~50mm の開口で平均される。

予防対策

予防対策は、一般的なリスクマネジメント原理に基礎を置いて考えられるべきである。このガイドラインは、特別な予防対策を宣言しない。

もし有害性が光源の選択により軽減できなければ、最も実効的な有害性制御は、光源やその放射をすべて囲い込むような工学的な制御である。そのような囲い込みが不

可能な環境では、部分的な光束囲い、管理的な制御、および強い光源への立ち入り禁止、目および／や皮膚の保護具が必要である。

溶接に対する安全基準は、世界中で発展している。

製品安全性基準

ランプの安全基準は発展してきた。それは、光源が持つリスクに基づいて、制御対策の特殊化を可能にする、リスクグループの分類体系を使用させる。製品安全基準における放出限度は、一般的に ICNIRP あるいは ACGIH のガイドラインに由来している。IEC あるいは ISO もまた、光学放射の放出の限度を含む特殊な製品グループの製品安全基準を発行している。

謝辞

文献

付属書 A

前のガイドライン以来の変化の根拠

広域帯コヒーレント光放射の ICNIRP ガイドラインの 1997 年の発行以来、時間的、空間的波長依存的な網膜の熱的損傷に関する研究がさらに進んだ。の

スポットサイズ依存性

曝露中の熱の流れのために、網膜の熱的閾値は網膜上の像の口径(スポットサイズ)に依存性がある。この影響はより長い曝露で最も大きく、 1μ 秒以下の短時間の波動ではほとんど影響はない。光源の平面上の対辺角 α の曝露限界の依存性に関して、二つの領域が区別される必要がある。臨界角より小さい値では、放射輝度あるいは放射輝度率で表される曝露限界は、平面上の光源の対辺角 α の逆数に直線的に依存する。この依存性は、より大きい網膜の放射照度の形は、より小さい形に比べ、減じられた放射状の冷却を示す、ということを反映している。この臨界角より大きい光源の平面の対辺角の値に対して、曝露限界は、もはや、光源の平面上の対辺角に依存しない。放射されたスポットの直径が波動の期間中熱拡散距離と比較して大きい場合、網膜の放射されたスポットの中心は、波動の期間中放射熱流の影響を受けない。

(熱流は波動の期間中無視できる) 短い波動に対してスポットサイズの依存性はないということは、物理学的原理および短い波動のレーザ閾値の研究から知られている。しかし、保守的な簡略化されたアプローチとして、以前の曝露限界における逆スポットサイズ依存性は、波動でさえも曝露時間に関わりなく、100mrad の臨界角まで適用される。最近の熱モデルおよび体外の研究は、波動の期間中網膜の熱的損傷のスポットサイズ依存性の変化のより完全な理解を提供している。これは、時間依存性の臨界角に対して、波動光源に対する網膜照射径依存性がよりよく反映していることを、許す。100mrad という値は、CW 光源への曝露、すなわち、曝露時間が 0.25 秒より大きい曝露、にまだ応用されている。

スポットサイズ依存性の今のトレンドのより完全な理解に、より正確に曝露限界を定義することが可能である。

波動光源の曝露に対する限界に、瞳孔反応は考慮されていない。低い周辺光レベルのフラッシュ曝露の潜在力を考慮するために、7mm という虹彩の径が適用された。しかし、より長い曝露に対して、瞳孔の閉は図 4 に示すように網膜の放射照度を減じ、それ故、損傷のリスクを減じる。0.25 秒より長い曝露に対して、瞳孔の閉は、網膜放射照度で表される損傷の閾値が減じられるより早く網膜の照度を減じる。目の動きと血液の流れもまた、熱的損傷のリスクを減じる。

網膜の熱的有害性関数の見直し

Lund らの研究により、正しい網膜の熱的有害性関数 $R(\lambda)$ の基礎が提供された。 $R(\lambda)$ が最初に導出された 20 年以上も前、500nm (青光) 以下の波長における、光化学的と熱的網膜損傷メカニズムの間の相乗作用の可能性に関して矛盾があった。二つの矛盾する閾値データポイントがある、青光波長に対する 441.6nm の波長と、曝露時間 1 秒と 16 秒との間に。その当期待されていた、さらなる研究がすぐにこれらの閾値が実際正しいか、あるいは、現存する理論の予想するところとして、これらの閾値が一桁低すぎる、かどうかの決定を導くであろうと。Lund らは、結論的に示した、最初に発行された閾値は、本当に一桁低すぎると。この不一致は、その当時行われた dose の計算のエラーに帰された。より最近の研究は、 $R(\lambda)$ 関数の保守的な調整を大きく与えて、1 以上の値を提供した、最初の研究よりはるかに包括的である。それはいつも、これらの値はリスクの過剰な状態になりやすい、と仮定していた。およびその理由のために $R(\lambda)$ 関数は最大値 ($R(\lambda)$ の値が (435nm および 440nm において) 10.0) で正規化されなかった。最初の研究のレビューおよび最近の研究の後で、ICNIRP は、1.0 以上の $R(\lambda)$ 関数の値は本当に正当化されないと結論した。 $R(\lambda)$ に対する調整は、445nm から 495nm までの波長に対して $R(\lambda)=1.0$ と置き、385nm から 440nm までのすべての $R(\lambda)$ の値に 0.10 を乗ずることを含んでいる。分光重み付け関数の改定値は、表 2 に示されている。無水晶体あるいは青光有害関数は変更の必要はなかった。

角膜および水晶体に対する作用スペクトル

赤外波長帯（式 20、21）の放射への曝露の場合の角膜と水晶体を保護するための曝露限界は、もともと波長依存性を考えることなく開発された。というのは、熱的放射および長時間曝露に対して、ほとんど結果がなかったからである。相対的に小さい波長帯に放射する赤外 LED に対して、前眼部における光学放射の吸収の波長依存性は、しかし、関係がある。780nm から約 1000nm の幅の波長における角膜に対する事故の光学放射の一部のみが、角膜は透過性で虹彩もまた部分的に赤外放射を通すので、前眼部に吸収される。一方、1400nm より大きい波長に対して、角膜へのすべての放射投射は、虹彩の前にある光学媒体に吸収される。

単純な作用スペクトルとして、ファクター0.3 で、780nm から 1000nm の間の波長帯に適用できる部分的な曝露を重みづけることが提案された。それは実際、ファクター約 3 で近赤外 LED に対する目への許された曝露を提案する。これは正当化される、というのは、虹彩は可視光帯をよく吸収するが、虹彩の表皮の発色団として（および、虹彩基質内にもある虹彩の色に依存している）、メラニンの吸収係数は、波長依存적であるとされている。780nm から 1000nm までの波長帯において、角膜上に投射される放射の約 30%は、虹彩を透過する（虹彩では、分散され、最終的には網膜に吸収される）。虹彩によって吸収された放射を通じた間接的な水晶体の加熱は、白内障発現のリスクファクターと考えられている。しかし、780~1000nm の波長帯に対して、角膜と眼房水に吸収されたエネルギーは、眼房水が吸収を始めるより長い波長よりも、少ない。

考えるべき別の点は、1000 秒より長い曝露時間に対する 100Wm^{-2} という曝露限界は、3000nm（これは曝露レベルの測定には含まれない）を超える波長帯からの曝露に対する寄与が曝露限界に考慮されるために設定されているということである。赤外 LED の場合、目の実際の放射照度に加える 3000nm 以上の放射照度はない。一方、熱放射器に対して、提案された作用スペクトルは、追加的に許された曝露レベルの小さい分画のみを加える。すなわち、1000°C の表面温度では 1%以下および 1500°C の表面温度に対しては 5%である。

レーザー放射に対する曝露限界との比較

すべてのタイプの光学放射により引き起こされた生物学的影響は、同じスペクトル対において、どんな曝露部位、領域、および曝露時間でも、同様であるべきである。所与の広域帯光源に対して、（異なる波長、波動期間、像の大きさの依存性をもつ）いくつかの可能な損傷のタイプを考えることが必要である。一方、単波長、曝露幾何、および曝露期間に対するレーザー放射には、最も制限的な損傷のタイプが定義されている。

レーザーの大変高い明るさ（輝度）の故に、多くのレーザーが（波長に依存して）皮膚、角膜あるいは網膜のやけどを生じさせる能力がある。一方、広域帯の光源がそのようなリスクを持つことは希である。

（広域帯および狭域帯のレーザー光源の曝露により得られた）生物学的な閾値に関して量的不確実性の程度は、広域帯の光源には不必要なレーザーの曝露限界の導出に、追加的減数因子をしばしば必要とする。

可能な範囲で、広域帯放射に対する曝露限界は、レーザーに対する曝露限界とかなりになっている。紫外波長帯における、および網膜の有害性に対して、二つのセットの曝露限界が本質的に等価である。しかし、ガイドラインの応用の便宜のために、網膜の限界は、限界の二つのセットに対して異なる単位で表現されている。それは、レーザー放射に対する既定の条件は、小さな光源であり、一方、非レーザー光源に対しては、拡張された光源のみが網膜の有害性を構成しうるからである。レーザーに対しては、超短い波長に対する特殊場限界を定義することも必要である。

労働基準法施行規則

別表第一の二(第三十五条関係)

- 1 紫外線にさらされる業務による前眼部疾患又は皮膚疾患
- 2 赤外線にさらされる業務による網膜火傷、白内障等の眼疾患又は皮膚疾患

○労働基準法施行規則の一部を改正する省令等の施行について

(昭和五三年三月三〇日)

(基発第一八六号)

イ 「紫外線にさらされる業務による前眼部疾患又は皮膚疾患」(第二号一)

〔要旨〕

本規定は、有害光線の一種である紫外線にさらされる作業環境下において業務に従事することにより発生する前眼部疾患又は皮膚疾患を業務上の疾病として定めたものである。

〔解説〕

(イ) 「紫外線」とは、可視光線より波長が短い電磁波をいう。紫外線は、物理的には若干の電離作用を有し、おおむね三〇〇ミリマイクロン($m\mu$)よりも短波長では人体に有害となる。

(ロ) 該当業務としては、例えば、アーク溶接・溶断、ガス溶接・溶断、殺菌、検査等の業務がある。

(ハ) 「前眼部疾患」とは、主として結膜又は角膜に起こる疾病をいい、これには結膜炎、角膜表層炎等の疾患がある。眼に紫外線が照射されると、大部分が角膜で吸収さ

れ紫外線眼炎をおこす。この紫外線眼炎のうち、電気溶接あるいは水銀灯などの特殊電球などによるものは電気性眼炎と呼ばれる。

(ニ) 「皮膚疾患」については、アーク溶接及びガス溶接で発生する紫外線は、ばく露の程度により、ばく露皮膚の皮膚火傷をきたすことがあるとされている。

ロ 「赤外線にさらされる業務による網膜火傷、白内障等の眼疾患又は皮膚疾患」(第二号二)

〔要旨〕

本規定は、光線の一種である赤外線にさらされる作業環境下において業務に従事することにより発生する網膜火傷、白内障等の眼疾患又は皮膚疾患を業務上の疾病として定めたものである。なお、旧第三号の「高熱に因る眼の疾患」はこの規定に吸収された。

〔解説〕

(イ) 「赤外線」とは、可視光線より波長が長い電磁波をいう。おおむね七六〇ミリミクロン($m\mu$)よりも長波長の強烈な赤外線照射による障害は、永久的であり蓄積的であつて、紫外線の眼に対する障害が一時的であるのと対照的である。

(ロ) 該当業務としては、例えば、製鉄、製鋼、ガラス等の炉前作業、造塊などの高熱物体取扱作業、赤外線乾燥作業等に係る業務がある。

(ハ) 「網膜火傷、白内障等の眼疾患」について

a 「等」には、眼瞼縁炎、角膜炎、調節障害、早期老眼、虹彩萎縮、黄斑変性等がある。

b 赤外線による白内障は、急性疾患である電気性眼炎と異なり、比較的長期間就労している者に発生する慢性疾患である。

(ニ) 「皮膚疾患」については、赤外線による皮膚障害が発生した場合には本規定が適用される。なお、第二号九に掲げる疾病に該当する皮膚疾患は除かれる。

紫外線対策：

●佐藤吉昭「5.6.4 紫外線対策」編集代表三浦豊彦「労働衛生ハンドブック」p.363 労働科学研究所出版部 神奈川 1988

- ・光源に近づかない
- ・直視しない
- ・皮膚を露出しない
- ・覆いきれない皮膚の部分には保護クリーム塗布
- ・遮光保護具 JIS T 8141 着用

●労働省安全衛生部環境改善室監修「労働衛生工学通論」(社)日本作業環境測定協会
東京 1992年

- ・紫外放射の有害作用は光化学的であり蓄積性がある
- ・壁面による散乱光や金属面からの反射光がある場合は注意する
- ・放射源から離れる
- ・放射源を遮蔽する
- ・ばく露時間を短くする
- ・実効照度は一般に距離の二乗に反比例するので放射源との間に距離を置く
- ・遮蔽は、ほとんどの物質が紫外放射を吸収するので利用できる、特にガラスは便利であるが、石英ガラスのように紫外放射を通過させるものがあるので要注意

●紫外放射の許容基準(日本産業衛生学会)

・紫外放射(波長180~400nm)の許容基準を、実効照度の1日8時間積分値として30J/m²と定める。ただしこの値は、角膜、結膜、皮膚に対する急性障害の防止に関する許容値であり、またレーザー放射には適用されない。

実効照度は、次式によって定義される。

$$E_{eff} = \sum_{\lambda=180nm}^{400nm} E_{\lambda} S(\lambda) \Delta\lambda$$

E_{eff} : 実効照度

E_{λ} : 曝露面における紫外放射の分光放射照度

$S(\lambda)$: 相対分光効果値

$\Delta\lambda$: 積和をとる際の波長幅

●JIS T8141:2003 遮光保護具(Personal eye protectors for optical radiations)による遮光保護具の使用基準(附属書1表1)

JIS T8141では、アーク溶接・切断作業の電流、ガス溶接・切断作業の1時間あたりのアセチレンガスガスあるいは酸素使用量を指標にして遮光保護具の使用基準を示している。

アーク溶接・切断作業	被覆アーク溶接		散乱光又は側射光を受ける作業
	ガスシールドアーク溶接		
	アークエアガウジング		
ガス溶接・切断作業	溶接及びろう付け	重金属の溶接及びろう付け	散乱光又は側射光を受ける作業
		放射フラックスによる溶接(軽金属)	

	酸素浴断 プラズマジェット切断	
高熱作業	高炉、鋼片加熱炉、造塊等の作業、電気炉の作業、転炉又は平炉などの作業	
その他の作業	雪、道路、屋根又は砂などから反射光を受ける作業、赤外線灯又は殺菌灯などを用いる作業、アークと又は水銀アーク灯などを用いる作業	

赤外線＝温熱

赤外線は、熱線とも呼ばれるように、その主要な生体作用は局所の温熱作用である。(佐藤吉昭、現代労働衛生ハンドブック、三浦豊彦編集代表 労働科学研究所出版部、1988 神奈川)

紫外線、赤外線の分類

●Cutaneous effects of infrared radiation: from clinical observations to molecular response mechanisms

Srefan M. Schieke, Peter Schroeder, Jean Krutmann

Photodermatology Photoimmunology & Photomedicine 2003; 19: 228-234

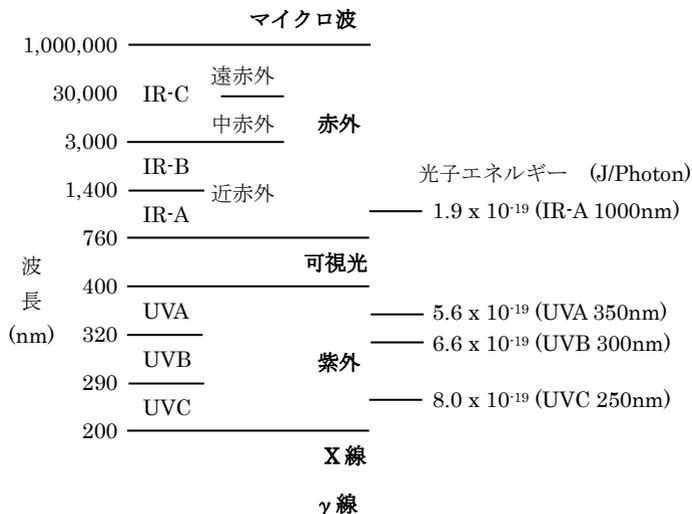


Fig.1 Electromagnetic spectrum with spectral regions and photo energy
波長帯域と光子エネルギー別電磁波スペクトル

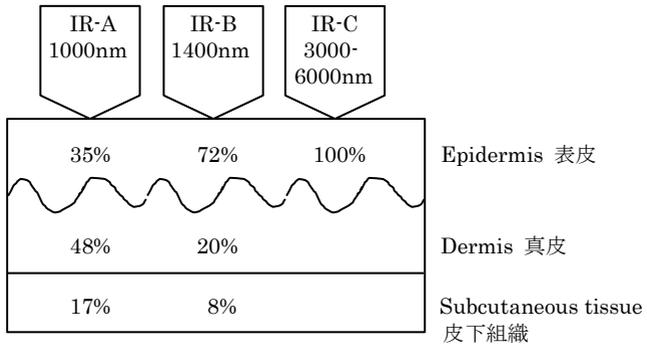


Fig.2 Wavelength-dependent absorption of IR by human skin
 人の皮膚による波長別赤外線吸収率