ICNIRP GUIDELINES ON LIMITS OF EXPOSUE TO INCOHERENT VISIBLE AND INFRARED RADIATION

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
Health physics 105(1): 74-91; 2013

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(0.38～3μm)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の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

Table 1. Radiometric quantities.

Quantity	Symbol	Unit
Power	Φ	W
Energy	Q	J
Irradiance	E	$W\ m^{-2}$
Radiant exposure	H	$J\ m^{-2}$
Radiance	L	$W\ m^{-2}\ sr^{-1}$
Radiance dose/Time-integrated radiance	D	$J\ m^{-2}\ sr^{-1}$

れている。放射輝度 radiance L（Wm-2sr-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ので便利である。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ので、放射輝度量 radiance dose に対して専用的な単文字 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、個々の暴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暴露量は、「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知っておかねばならない。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

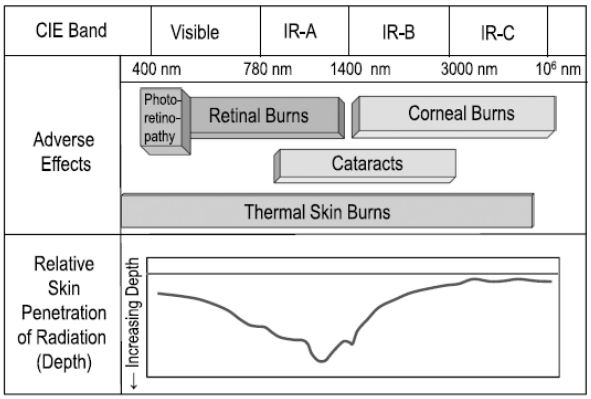

Fig. 1. Potential adverse biological effects and penetration depth of visible and infrared radiation (adapted from Sliney Wolbarsht 1980).

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、独立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の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な網膜損傷、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がある；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。可視光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、光の影響は放射暴露量（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。

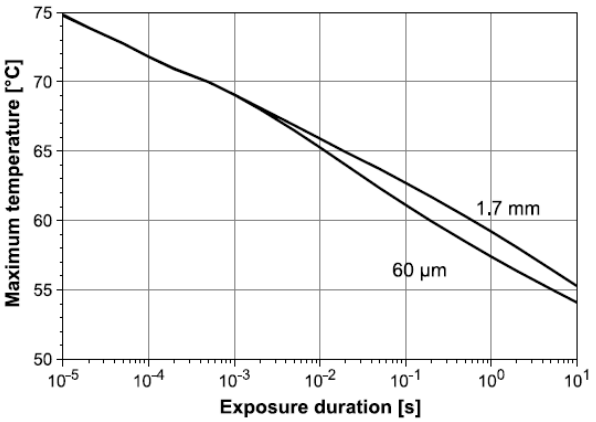

Fig. 2. The calculated peak temperature (at the lesion radius) required for retinal thermal injury in a 60 µm and 1.7 mm retinal image as a function of duration of light exposure (Schulmeister and Jean 2011).

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関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 800～4000Wm-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ビ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℃に対し皮膚は通常 22～25℃）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℃、1 ミリ秒では 57℃）。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）に関係する（式 1）。

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

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 25μm 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 25～50μm 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-2sr-1）と放射輝度率 radiance dose（時間積分放射輝度、Jm-2sr-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、

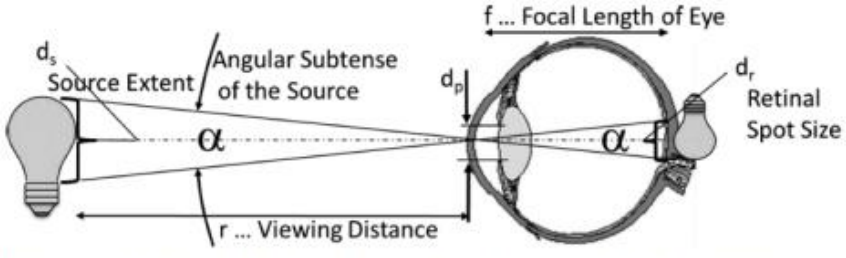

Fig. 3. Imaging of a broad band source on the retina showing the planar angular subtense, α, of the source.

γ mean に対応する立体角 Ω（すなわち、(π×γ mean2)/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 Er（Wm-2）は、光源の放射輝度（“明るさ、かがやき”）Ls（Wm-2sr-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=17mm）の逆数に関係している。

Er＝（π×Ls×τ×dp2）／（4×f2）
あるいは、
Er＝a×Ls×τ×dp2
ここで、a=2700m-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 μm（1mrad）から約 2000 μm（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、1 μ 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 μm 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。可視刺激の欠損は忌避反応をなくし、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 μm）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。Sliney 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であろう。貫通の深さは 1.2～3μm 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℃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℃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℃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、曝露限界の波長ー、曝露時間ー、および／あるいはスポットサイズー依存性は、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、光学顕微鏡的変化）、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 倍の係数で低い。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

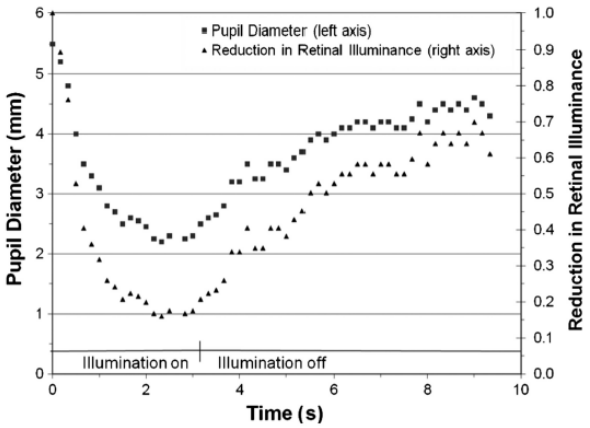

Fig. 4. Dynamics of the pupillary constriction and reopening (squares-left axis) after a 3-s exposure to a bright light and the reduction of the retinal illuminance due to pupil diameter change (triangles-right axis). The initial pupil diameter was 5.5 mm. Adapted from Stamper et al. (2002)

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照射によるその他の影響は、現行の非レーザ光源では生じず、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、3μm～1000μm の遠赤外放射の寄与はふつう無いかあるいは実際的に重要ではない。レーザ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しうる。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 Lλ、あるいは分光放射照度 Eλ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×単位に等しい関連因子よって割られると、導出されうる。網膜の曝露限界に対する式（3）に例を示す。

$L_R <= (20000 \times \alpha\,\mathrm{ref} \div \alpha) \times (t \times \mathrm{tref}\text{-}1)\ 0.75\mathrm{Jm}\text{-}2\mathrm{sr}\text{-}1$　(3)

ここに、αref＝1rad、tref＝1 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、式は次元的には正しくなく、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-2sr-1）は、380～1400nm の波長幅λ(nm)について、分光学的放射輝度 Lλ（Wm-2sr-1nm-1）と網膜の熱有害性関数 R(λ)（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）。

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

網膜熱的有害関数 R(λ)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 LR 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-2sr-1)は、LR 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 LR と曝露時間の積となる（DR＝LR×t）。実効的網膜熱放射を決めるための波長幅⊿λ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(λ)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

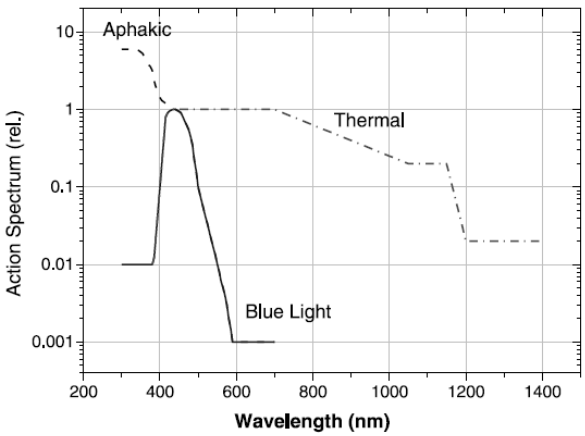

Fig. 5. Action spectra for blue-light photoretinopathy with lens (phakic) B(λ) and without lens (aphakic) A(λ), and for thermally induced photoretinopathy R(λ).

れる角度 α は、しばしば、「光源の大きさ」として参照される。

Table 2. Retinal hazard spectral weighting functions (aphakic and blue light hazard functions are the same as in ICNIRP (1997).

Wavelength (nm)	Aphakic[a] hazard function, $A(\lambda)$	Blue-light[a] hazard function, $B(\lambda)$	Retinal thermal hazard function $R(\lambda)$ (where λ is in nm)
300	6.00	0.01	—
305	6.00	0.01	—
310	6.00	0.01	—
315	6.00	0.01	—
320	6.00	0.01	—
330	6.00	0.01	—
335	6.00	0.01	—
340	5.88	0.01	—
345	5.71	0.01	—
350	5.46	0.01	—
355	5.22	0.01	—
360	4.62	0.01	—
365	4.29	0.01	—
370	3.75	0.01	—
375	3.56	0.01	—
380	3.19	0.01	0.01
385	2.31	0.0125	0.0125
390	1.88	0.025	0.025
395	1.58	0.050	0.05
400	1.43	0.100	0.1
405	1.30	0.200	0.2
410	1.25	0.400	0.4
415	1.20	0.800	0.8
420	1.15	0.900	0.9
425	1.11	0.950	0.95
430	1.07	0.980	0.98
435	1.03	1.000	1.0
440	1.000	1.000	1.0
445	0.970	0.970	1.0
450	0.940	0.940	1.0
455	0.900	0.900	1.0
460	0.800	0.800	1.0
460	0.800	0.800	1.0
465	0.700	0.700	1.0
470	0.620	0.620	1.0
475	0.550	0.550	1.0
480	0.450	0.450	1.0
485	0.400	0.400	1.0
490	0.220	0.220	1.0
495	0.160	0.160	1.0
500	0.100	0.100	1.0
505	0.079	0.079	1.0
510	0.063	0.063	1.0
515	0.050	0.050	1.0
520	0.040	0.040	1.0
525	0.032	0.032	1.0
530	0.025	0.025	1.0
535	0.020	0.020	1.0
540	0.016	0.016	1.0
545	0.013	0.013	1.0
550	0.010	0.010	1.0
555	0.008	0.008	1.0
560	0.006	0.006	1.0
565	0.005	0.005	1.0
570	0.004	0.004	1.0
575	0.003	0.003	1.0
580	0.002	0.002	1.0
585	0.002	0.002	1.0
590	0.001	0.001	1.0
595	0.001	0.001	1.0
600–700	0.001	0.001	1.0
700–1,050	—	—	$10^{(700-\lambda)/500}$
1,050–1,150	—	—	0.2
1,150–1,200	—	—	$0.2 \cdot 10^{0.02\ (1150-\lambda)}$
1,200–1,400	—	—	0.02

[a]The UVR extension of $A(\lambda)$ and $B(\lambda)$ at wavelengths below 380 nm are provided for the evaluation of optical spectra that may contain UVR. The aphakic hazard function, $A(\lambda)$, is normalized to correlate with the blue-light hazard function, $B(\lambda)$ for wavelengths above 440 nm.

Table 3.

Exposure duration	Limiting angles	
t	α_{min}	α_{max}
Seconds	Radians	Radians
$t < 625 \times 10^{-6}$	1.5×10^{-3}	0.005
$625 \times 10^{-6} \le t < 0.25$	1.5×10^{-3}	$0.2 \cdot t^{0.5a}$
$t \ge 0.25$	1.5×10^{-3}	0.1

[a] t is input in seconds to calculate the correct numeric value of α_{max} in rad.

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、α ＜＝ α 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、α min＝1.5×10-3rad）が割り振られる。大きな光源は、 α ＞＝ α 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 αmin と αmax の間であるか、αmin＜α＜＝αmax 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 a（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 γth 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、γth＝11×10-3 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 γth（γth＝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 γth 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 γth 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 LR、あるいは実効放射輝度率 DR（式 5）は、放射輝度で表した曝露限界（EL）$L^{EL}{}_R$、あるいは放射輝度率 $D^{EL}{}_R$ を、それぞれ、超えてはならない（式 6，7）。曝露限界 $L^{EL}{}_R$、$D^{EL}{}_R$ 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-2sr-1 および Jm-2sr-1 となる（表 3）。

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

$$L_R^{EL} = 2.0\times10^4\times\alpha^{-1}\times t^{-0.25}\ \mathrm{Wm^{-2}sr^{-1}} \qquad (6)$$

$$D_R^{EL} = 2.0\times10^4\times\alpha^{-1}\times t^{0.75}\ \mathrm{Jm^{-2}sr^{-1}} \qquad (7)$$

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 1 μ 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。1 μ 秒より小さい曝露時間に対しては、放射

Table 4. Retinal thermal exposure limits.

			Exposure limit (EL)		
	Exposure duration t (s)	Source size α radians	Radiance L_R^{EL} $W\,m^{-2}sr^{-1}$ (t in s and α in rad)	Radiance dose D_R^{EL} $J\,m^{-2}sr^{-1}$ (t in s and α in rad)	Reference note
Basic exposure limit	$1\times10^{-6}\ s \le t < 0.25\ s$	$\alpha_{min} \le \alpha \le \alpha_{max}$	$2.0\times10^4\cdot\alpha^{-1}\cdot t^{-0.25}$	$2.0\times10^4\cdot\alpha^{-1}\cdot t^{0.75}$	1, 2, 3, 4, 5
	$t < 1\times10^{-6}\ s$	$\alpha_{min} \le \alpha \le \alpha_{max}$	—	$0.63\cdot\alpha^{-1}$	1, 2, 3
	$t \ge 0.25\ s$	$\alpha_{min} \le \alpha \le \alpha_{max}$	$2.8\times10^4\cdot\alpha^{-1}$	$0.71\times10^4\cdot\alpha^{-1}$	1, 2, 4
Small sources	$t < 1\times10^{-6}\ s$	$\alpha \le \alpha_{min}$	—	420	2,3
	$1\times10^{-6}\ s \le t < 0.25\ s$	$\alpha \le \alpha_{min}$	$1.3\times10^7\cdot t^{-0.25}$	$1.3\times10^7\cdot t^{0.75}$	1, 2,3
	$t \ge 0.25\ s$	$\alpha \le \alpha_{min}$	1.9×10^7	—	2,4
Large sources	$t < 1\times10^{-6}\ s$	$\alpha \ge \alpha_{max}$	—	130	3, 5
	$1\times10^{-6}\ s \le t < 625\times10^{-6}\ s$	$\alpha \ge \alpha_{max}$	—	$4.0\times10^6\cdot t^{0.75}$	1, 5, 6
	$625\times10^{-6}\ s \le t < 0.25\ s$	$\alpha \ge \alpha_{max}$	—	$10\times10^4\cdot t^{0.25}$	1, 5, 6
	$t \ge 0.25\ s$	$\alpha \ge \alpha_{max}$	28×10^4	—	4, 5

Notes:
1. To calculate exposure limits, L_R^{EL} and D_R^{EL} must be in seconds and α must be in radians;
2. $\alpha_{min} = 0.0015$ radian. If $\alpha \le \alpha_{min}$, then $\alpha = \alpha_{min}$ for calculating the exposure limit;
3. If $t < 10^{-6}$ s, then $t = 10^{-6}$ s for calculation of the exposure limit in the radiance dose, D_R^{EL};
4. If $t > 0.25$ s, then $t = 0.25$ s for calculation of the exposure limit, L_R^{EL};
5. For $1\times10^{-6}\ s \le t < 625\times10^{-6}$ s, then $\alpha_{max} = 0.005$ radian. If 625×10^{-6} s $\le t < 0.25$ s, then $\alpha_{max} = 0.2\times t^{0.5}$. If $t \ge 0.25$ s, then $\alpha_{max} = 0.1$ radian; and
6. If 0.1 radian $> \alpha_{max}$, then $\alpha = \alpha_{max}$.

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）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。

大光源の α ＞ α max。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（α ＜ α 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＜＝1μ秒（波動時間が 1μ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 α min＜＝α＜α 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。α ＜＝α 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 α ＝1.5×10-3 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×α-1×t-0.25×104 Wm-2sr-1　　(8)

L_{WVS}^{EL}＝6300×α-1 Wm-2sr-1（t＞=100 秒）　　(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 γth＝11mrad 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。特殊なガイダンスが無いので、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-2sr-1）は、式 10 に与えられているが、光源の分光放射輝度 Lλ（Wm-2sr-1nm-1）と表 2 に掲げた青光有害性重み付け関数 B(λ)との積分（積和）で得られる。

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

一定ではない放射輝度値間欠的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-1sr-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。

$DB=LB\times t=\sum_{300}^{700} L\lambda \times t \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$　　(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}　　あるいは　　DB＜＝D_B^{EL}　　(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-2sr-1）により制限される。

D_B^{EL}＝1×106Jm-2sr-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↓B↑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}＝100Wm-2sr-1　　(14)

放射輝度 LB は空間的に角 γph について平均。受光角 γph 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 γph 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 γph 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。

Table 5.

Exposure duration (seconds)	Acceptance averaging angle γ_{ph}(radians)
$t < 100\ s$	0.011
$100 \le t < 10{,}000$ s	$0.0011 \cdot t^{0.5}$
$t > 10{,}000$ s	0.110

Note: t must be input in seconds to calculate γ_{ph} in radians

実効光放射照度 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 Eλ 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}(Jm-2)、あるいは放射照度E_B^{EL}(Wm-2)と比較される(式 15、式 16、式 17)。

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

H_B^{EL}＝100Jm-2　　0.25＜＝t＜100s　　(16)

E_B^{EL}＝1Wm-2　　100＜＝t＜30000s　　(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の条件である。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(λ)という記号で与えられる。表 2 の B(λ)の代わりに A(λ)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 Lλ から無水晶体有害関数 A(λ)（図 5、表 2）で計算される（式 18）。

$$D_{Aphake}=\sum_{300}^{700} L\lambda \times A(\lambda) \times t \times \Delta\lambda \leq 1.0 Jm^{-2}sr^{-1}$$

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(λ)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。

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

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 Eλ を測定するためにいつも用いられる。

E_{IR}^{EL}＝18×t-0.75×103 Wm-2　　t＜1000s　　(20)

E_{IR}^{EL}＝100 Wm-2　　t＝＞1000s　　(21)

冷たい環境では、長時間の曝露限界は、0℃で 400Wm-2 まで増加し、10℃では、水晶体の温度が 37℃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×t0.25×104 Jm-2　　t＜＝10s　　(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℃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暴露量は、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）Tmax に対して、予期される曝露時間 T が Tmax より大きい場合は、Tmax 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）Tmax 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、（Tmax 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。

Tmax 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αmax より小さいか等しい場合、単波動の曝露限界 EL は、n-0.25（n＜40）、および 0.4（n＞＝40）

・光源の対辺角がαmax より大きいが 100mrad より小さい場合、単波動の曝露限界 EL は、n-0.25（n＜625）および 0.2（n＞＝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、α＜＝αmax の場合、1/2.5 までに制限されるファクターn-0.25 を乗じることで、おとびα＞αmax 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γph 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、γph 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γph 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(λ)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-2sr-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、光源が局部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（3～1000μm）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℃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 100Wm-2 に制限すると、許容される全放射照度は約 200Wm-2 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暴露評価は、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。

防護対策

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）略

（文献）略

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(λ)の基礎が提供された。R(λ)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。その当時期待されて

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(λ)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(λ)関数は最大値（R(λ)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(λ)関数の値は本当に正当化されないと結論した。R(λ)に対する調整は、445nm から 495nm までの波長に対して R(λ)＝1.0 と置き、385nm から 440nm までのすべての R(λ)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、波長依存的であると言われている。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℃の表面温度では 1%以下および 1500℃の表面温度に対しては 5%である。

レーザ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。

レーザの大変高い明るさ（輝度）の故に、多くのレーザが（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、レーザに対する曝露限界とかなりにている。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。

APPENDIX B

Definition of symbols.

Symbol	Quantity	Units	Comment
$A(\lambda)$			Aphakic hazard function
$B(\lambda)$			Blue-light hazard function
D	Radiance dose or time integrated radiance	J m^{-2} sr^{-1}	Time integrated radiance
D_R	The effective retinal thermal radiance dose	J m^{-2} sr^{-1}	Time integrated radiance dose spectrally weighted for retinal thermal damage
D_B	The effective retinal blue-light radiance dose	J m^{-2} sr^{-1}	Time integrated radiance dose spectrally weighted for retinal blue-light damage
d_p	Pupil diameter	m	
d_r	Retinal diameter	m	
d_s	Diameter of a circular source	m	
E	Irradiance	W m^{-2}	Radiant flux or power (in watts) per unit area incident on a surface
E_B	Blue-light irradiance	W m^{-2}	Irradiance spectrally weighted for blue-light damage in the retina
E_{IR}	Irradianced in the infrared (IR)	W m^{-2}	Irradiance in the infrared for wavelengths from 780 nm to 3000 nm
E_v	Illuminance	lm m^{-2}	Luminous flux (in lumens) per unit area incident upon a surface
E_r	Retinal irradiance	W m^{-2}	
E_λ	Spectral irradiance	W m^{-2} nm^{-1}	
f	Focal length	m	
H	Radiant exposure	J m^{-2}	
H_v	Light exposure	lm s m^{-2}	Photometric dose
IRR			Infrared radiation
IR-A			Infrared radiation type A
IR-B			Infrared radiation type B
IR-C			Infrared radiation type C
L	Radiance	W m^{-2} sr^{-1}	
L_{Aphake}	Aphakic hazard radiance	W m^{-2} sr^{-1}	Spectrally weighted quantity
L_{IR}	Near infrared radiance	W m^{-2} sr^{-1}	
L_v	Luminance	lm m^{-2} sr^{-1} or cd m^{-2}	
L_R	Effective radiance weighted for thermal retinal injury	W m^{-2} sr^{-1}	Radiance spectrally weighted for thermal injury of the retina
L_B	Effective radiance weighted blue-light	W m^{-2} sr^{-1}	Radiance spectrally weighted for blue-light damage in the retina
L_λ	Spectral radiance	W m^{-2} sr^{-1} nm^{-1}	

(Continued on next page)

APPENDIX B (continued)

Symbol	Quantity	Units	Comment
Q	Energy	J	Radiant energy in joules
$R(\lambda)$			Retinal thermal hazard function
t	Exposure duration	s	
t_{max}	Maximum exposure duration	s	
UVR			Ultraviolet radiation
α	Planar angular subtense (of a source)	rad	
α_{min}	Minimal source planar angular subtense	rad	
α_{max}	Maximal planar angular subtense	rad	
γ	Planar angle of acceptance	rad	
γ_{meas}	Planar measurement angle of acceptance	rad	
γ_{th}	Planar angle of acceptance for assessing thermal hazards	rad	
γ_{ph}	Planar angle of acceptance for assessing photochemical hazards	rad	
λ	Wavelength	nm	
τ	Transmittance		
Φ	Radiant flux or Power	W	
Ω	Solid angle	sr	