

## 電磁界（100 kHz – 300 GHz）へのばく露の制限に関するガイドライン

国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）<sup>1</sup>

概要 – 無線周波数電磁界は、移動体通信インフラストラクチャと電話、Wi-Fi、Bluetooth など多くの最新デバイスを稼働させるために使用されています。十分に高い電力レベルの無線周波数電磁界は健康への悪影響を与える可能性があるため、ICNIRP は 1998 年に、300 GHz までの時間変化する電磁界への人体ばく露に関するガイドラインを公表し、そのガイドラインには無線周波数電磁界スペクトラムが含まれました。それ以降に、無線周波数電磁界と健康への悪影響との関連性にさらに取り組んだ数多くの科学研究、および無線周波数電磁界を利用する技術の著しい発展がありました。そのため、ICNIRP は 1998 年のガイドラインの無線周波数電磁界の部分を更新しました。この文書は、100 kHz から 300 GHz までの電磁界への人体ばく露に対する防護を提供するこれらの改訂ガイドラインを示します。Health Phys. 118(5):483-524; 2020

## 序論

本ガイドラインは、100 kHz から 300 GHz までの範囲の無線周波数電磁界（以降、“高周波電磁界”と称する）のばく露を受けた人体の防護のためのものです。この掲載文書は、ICNIRP の高周波ガイドライン（1998）の 100 kHz から 300 GHz までの部分、および ICNIRP の低周波ガイドライン（2010）の 100 kHz から 10 MHz までの部分に置き換わるものです。本ガイドラインは、現在入手可能な最善を尽くした科学に基づいていますが、この知識には限界があり、ばく露制限に影響を及ぼす可能性があり得ることは認識されています。したがって、関連する科学的知識の進歩に応じて、ガイドラインは定期的に改訂および更新されます。本文書はガイドラインとその根拠を説明します。附属書 A

<sup>1</sup> ICNIRP, c/o BfS, Ingolstaedter Landstr. 1, 85764, Oberschleissheim, Germany.  
国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）の共同作業者のリストは謝辞に記載する。

ICNIRP は利益相反のないことを宣言する。  
問い合わせ先: Gunde Ziegelberger, c/o Bfs, Ingolstaedter Landstr. 1, 85764 Oberschleissheim, Germany,  
または e メール: info@icnirp.org.

（原稿受諾 2019 年 9 月）

0017-9078/20/0

Copyright © 2020 The Author(s). Published by Wolters Kluwer Health, Inc. on behalf of the Health Physics Society.

これは、Creative Commons Attribution- Non Commercial-No Derivatives License 4.0 (CCBY-NC-ND) の条件の下で配布されるオープンアクセスの論文であり、適切に引用される場合には、ダウンロードして共有できます。論文の変更、ジャーナルからの許可なく商業的に使用することは禁じられています。

DOI: 10.1097/HP.0000000000001210

で、関連するドシメトリについての詳細説明を、また附属書 B で、文献に報告された生物学的影響および健康影響に関する詳細説明を提供します。

## 目的と範囲

この掲載文書の主な目的は、高周波電磁界への短期および長期の連続的および非連続的なばく露によって生じることが実証された健康への悪影響からの高度な防護をすべての人々に提供する電磁界ばく露制限のガイドラインを確立することです。ただし、一部のばく露シナリオは、本ガイドラインの範囲外と定義されています。医療処置では電磁界を利用しますし、金属製インプラントは体内の電磁界を変化または擾乱させる可能性があります。そのような電磁界が、順次、直接的に（電磁界と組織の間の直接相互作用を介して）および間接的に（介在する導電性物体を介して）、人体に影響を及ぼす可能性があります。例えば、高周波アブレーションおよびハイパーミアはどちらも医学的治療に用いられます。高周波電磁界は、能動的な植込み医療装置を意図せずに妨害することにより（ISO 2012 参照）、または導電性インプラントの存在が電磁界を変化させることにより、間接的に傷害を引き起こす可能性があります。医療処置は、意図する利益に対する潜在的な害を比較考量する医学的専門知識に信頼を置いていますので、ICNIRP は、資格のある医療従事者が管理するそのようなばく露（対象は、患者、介護者および付き添い者、関連する場合は胎児を含む）、および医療処置のための導電性材料の利用は本ガイドラインの範囲外にあると考えます（詳細については、UNEP/WHO/IRPA 1993 を参照）。同様に、ボランティアの研究参加者は本ガイドラインの範囲外であると見なされます。ただし、潜在的な害と利益を考慮した上で、それぞれの研究機関の倫理委員会が彼らの参加を承認することが前提条件です。一方、臨床シナリオおよび研究シナリオの両者において職業ばく露を受けた個人は、本ガイドラインの範囲内であると定義されています。美容的施術にも高周波電磁界が利用されます。ICNIRP は、資格のある医師による制御がない美容処置の結果として高周波電磁界ばく露を受けた人々は本ガイドラインの対象で

あると考えます。この場合、免責の可能性に関する決定は各国の規制機関の役割です。高周波電磁界は、もっと一般的に（つまり、植込み医療装置だけでなく）、電気機器と干渉する可能性もあり、機器に誤動作を引き起こすことによって間接的に健康に影響を与える可能性があります。これは電磁両立性と呼ばれ、本ガイドラインの範囲外です（詳細については、IEC 2014 を参照）。

## 高周波ばく露制限の原則

本ガイドラインは、個人ばく露における定量的電磁界レベルを規定します。これらのレベルを遵守することで、高周波電磁界ばく露によるすべての実証された有害な影響から人々を防護することを意図しています。これらのレベルを決定するために、ICNIRP は、まず、生体システムへの高周波電磁界ばく露の影響に関する公表された科学文献を特定し、この中のどの影響がヒトの健康<sup>3</sup>に有害であり、かつ科学的に実証されているかを明確にしました。後者のポイントが重要です。その理由は、ICNIRP は、一般的には、報告された高周波電磁界の健康への悪影響を「証拠」とみなしてばく露の制限値の策定に用いるためには、それらが独立に検証され、十分な科学的品質を持ち、現在の科学的理解と一致することが必要であると考えられるからです。このガイドラインの中では、「証拠」とはこのような意味で用いられます。また、「実証された影響」とは、この証拠の定義を満たす、報告された影響の記述に用います。健康への悪影響の判断がこのように定義された証拠に基づくことは、ばく露の制限値が、裏付けのない主張ではなく、本物の影響を根拠にすることを確実にします。ただし、合理的に考えて健康への悪影響の発生が予想されることを確認するのに十分な補足的知識（関連する生物学的相互作用メカニズムの理解など）がある場合、これらの要件は緩和される可能性があります。

次に、実証された影響それぞれについて、ICNIRP は「有害な健康影響の閾値」、すなわち、健康への影響を引き起こすことが知られている最低ばく露レベルを特定しました。これらの閾値は、典型的なばく露状況および人口集団に対して十分に安全側に立つように導き出されました。高周波の健康影響を報告した文献からそのような閾値が明示的

に得られない場合、または、高周波の健康影響についての文献と直接関係のない証拠が、「電磁界に由来する閾値」より低い電磁界レベルで傷害が発生する可能性があることを（間接的に）示した場合、ICNIRP は「運用上の閾値」を設定しました。このような閾値は、ばく露による主要な影響（例えば、加熱）と健康への影響（例えば、痛み）の関係についての補足的知識を根拠にしており、適切な防護レベルを達成するための制限値の導出に用いる運用上のレベルを提示できます。その次に、ICNIRP の以前のガイドラインと一貫して、結果として得られた閾値（または運用上の閾値）に低減係数を適用して、ばく露の制限値を提示しました。低減係数は、人口集団における生物学的変動（例えば、年齢、性別）、ベースライン条件の変動（例えば、生体組織の温度）、環境要因の変動（例えば、気温、湿度、衣服）、ばく露値の導出に関連するドシメトリ上の不確かさ、健康科学に関連する不確かさを考慮したものです。より一般的に言えば、安全側に立つための手段です。

これらのばく露制限値は「基本制限」と呼ばれます。これらは、高周波による健康への悪影響と密接に結び付く物理量に関連付けられています。これらの一部は、ばく露を受けた身体の内側の物理量であり、容易には測定できないものであるため、ガイドラインへの適合性を示すための実用性が高い一つの手段を提供する目的で、「参考レベル」と呼ばれるより簡単に評価できる物理量が基本制限から導出されています。参考レベルは、基本制限と同等の防護を提供するために導出されており、ばく露がそれに対応する基本制限または対応する参考レベルのどちらか一方を下回っていることが示されれば、そのばく露はガイドラインに適合しているとみなされます。基本制限の結果生じるばく露と参考レベルの結果生じるばく露の間の相対的な一致性は、さまざまな要因によって変動する場合があることに注意してください。安全側に立つ手段として、ワーストケースのばく露条件（実際にはほとんど起きる可能性がない条件）で、基本制限と同レベルのばく露をもたらすように参考レベルは導出されています。それにより、ほとんどの場合、参考レベルを遵守することは、結果として、対応する基本制限が許容するよりも相当程度低いばく露になるはずですが。詳細については、「参考レベル」のセクションを参照してください。

本ガイドラインでは、職業ばく露を受けた個々人と一般公衆の人々を区別します。職業ばく露を受けた個々人とは、職業上の義務に伴い、管理条件下でばく露を受け、潜在的

<sup>3</sup>（注）ここでは、世界保健機関（1948）の“健康”の定義を用いる。より正確には、“健康とは、肉体的、精神的及び社会的に完全に良好な状態であり、単に疾病または病弱の存在しないことではない。”[訳者注：厚生労働省のWHO憲章の和訳参照]

な高周波電磁界リスクへの認識および傷害の適切な軽減策の適用についての訓練を受け、そのような認識および傷害緩和への対応ができる感覚および行動上の能力を有する成人と定義されます。職業ばく露を受ける労働者は、上記の知識および防護を提供する適切な健康および安全プログラムを受けなくてはなりません。一般公衆とは、すべての年齢のさまざまな健康状態の個人と定義されます。このような人々の中には、身体がより脆弱なグループまたは個人が含まれます。また一般公衆は、電磁界への自分自身のばく露についての知識または制御手段を持たない場合があります。これらの違いは、一般公衆に対するより厳しい制限を含める必要を示唆します。なぜなら、一般公衆の人々は、傷害を軽減するための訓練を適切に受けていないであろうし、あるいはそのように行動する能力を持たないかも知れないからです。職業ばく露を受けた個人は一般公衆よりリスクが高いとは見なされません。ただし、すべての既知のリスクについて説明するために適切なスクリーニングと訓練が提供されていることが前提条件です。ここでは、胎児は、ばく露シナリオに関係なく、一般公衆の一員と定義され、一般公衆のための制限を受けることに注意してください。

上述からわかるように、ICNIRP のガイドラインを導き出すには、いくつかのステップが関与します。ICNIRP は、相当大きなマージンで超過した場合においてさえも、その制限が確実に防護に役立つようにするために、これらの各ステップに安全側に立ったアプローチを採用します。たとえば、健康への悪影響の選択、仮定されたばく露シナリオ、低減係数の適用、および参考レベルの導出はすべて安全側に立って行われます。したがって、ばく露レベルでの防護の程度は、低減係数だけを考慮した場合に想定されるものより大きくなります。低減係数はガイドラインが安全側に立つことを表す一要素にすぎません。追加的なプレコーションナリ措置が人口集団の健康に利益をもたらすという証拠はありません。

### 高周波ばく露の制限に関する科学的根拠

#### 100 kHz から 10 MHz までの電磁界周波数範囲: 本ガイドラインと他の ICNIRP ガイドラインとの関係

本ガイドラインは、ICNIRP (2010) ガイドラインの 100 kHz から 10 MHz までの電磁界周波数範囲を置き換えますが、高周波電磁界の神経刺激への直接的影響に係わる科学的知識およびそれに関連して ICNIRP (2010) ガイドライン

が定めた制限についてはここで再検討されませんでした。その代わりに、本ガイドラインの作成プロセスで、100 kHz から 10 MHz までの周波数における、神経刺激への直接的影響を除く健康への悪影響、および 10 MHz から 300 GHz までの周波数におけるすべての健康への悪影響を評価し、制限の設定を行いました。2010 年のガイドラインからの神経刺激の直接的影響に関連する制限は、本ガイドラインで導出された制限に追加され、それをもって最終的に制限が設定されるという形になりました。したがって、神経刺激への直接的影響に関連する健康およびドシメトリの検討はここでは提供されていません [詳細については、ICNIRP (2010) を参照してください]。

### 物理量、単位、および相互作用メカニズム

本書で使用する電磁気学的物理量と単位の簡単な概要、およびこれらの生体との相互作用のメカニズムをここで説明します。ガイドラインに関連するドシメトリのより詳細な説明は、附属書 A の「物理量と単位」のセクションに記載されています。

高周波電磁界は、振動する電界と磁界で構成されています。1 秒あたりの振動数は「周波数」と呼ばれ、ヘルツ (Hz) の単位で表されます。電磁界が発生源から遠くへ伝播するとき、電磁界は発生源からの電力を伝達します。これはワット (W) の単位で表され、単位時間 ( $t$ ) あたりのジュール (J、エネルギーの尺度) と等価です。電磁界が物質に強く影響すると、その物質内の原子や分子と相互作用します。生体が高周波電磁界のばく露を受けると、電力の一部は生体から反射され、一部は生体に吸収されます。その結果、生体内に電磁界の複雑なパターンが生じますが、これは電磁界の特性ならびに生体の物理的特性と寸法に大きく依存します。生体に影響を与える高周波電磁界の主な成分は電界です。生体内の電界は誘導電界 ( $E_{ind}$ 、ボルト毎メートル  $V m^{-1}$  で測定されます) と呼ばれ、潜在的に健康に関連するさまざまなかたちで生体に影響を与える可能性があります。

第一に、体内誘導電界は、極性分子 (主に水分子) および電子やイオンのような自由に動く荷電粒子の両方に力を及ぼします。どちらの場合も、電磁界エネルギーの一部が運動エネルギーに変換され、極性分子を回転させ、荷電粒子を移動させ、電流となります。極性分子の回転および荷電粒子の移動の際に、通常、それらは他の極性分子や荷電粒子と相互作用し、運動エネルギーが熱へと変換されます。この熱は、さまざまなかたちで健康に悪影響を与える

可能性があります。第二に、誘導電界が約 10 MHz 未満で十分に強い場合、神経を刺激するのに十分な電気力を及ぼすことが可能です。また、誘導電界が十分に強くて短い場合（低周波パルス電磁界の場合のように）、直流（DC）電気穿孔法の実施中に発生するような生体膜の絶縁破壊を引き起こすのに十分な電気力を及ぼすことが可能です（Mir 2008）。

健康リスクの観点からは、一般に、生体組織がどれだけの電磁界電力を吸収するかに関心が持たれます。これが上述した加熱効果をほとんど決定するからです。これは、通常、関連するばく露量の関数として記述されます。たとえば、電磁界が組織に深く浸透する（したがって、浸透の深さを考慮することが必要）約 6 GHz 以下の場合、単位質量あたりの吸収電力（ $W\ kg^{-1}$ ）である「比エネルギー吸収率」（SAR）を用いた記述が有用です。逆に、電磁界がもっと表面的に吸収される（深さの意味がなくなる）6 GHz を超える場合は、ある面積での吸収電力の密度（ $W\ m^{-2}$ ）を用いてばく露を記述するのが有用です。これは、「吸収電力密度」（ $S_{ab}$ ）と呼ばれます。本ガイドラインでは、特定の健康への悪影響によりよく合致するように、異なる質量についての SAR が指定されています。SAR<sub>10g</sub> は、質量 10 g の立方体に吸収される（kg あたりの）電力を表し、全身平均 SAR は、全身にわたり吸収される（kg あたりの）電力を表します。同様に、吸収電力密度は、電磁界周波数の関数で表されるさまざまな面積で指定されます。状況によっては、エ

ネルギー蓄積速度（電力）は、総エネルギー蓄積に比べ重要ではなくなります。熱拡散が起こるための十分な時間がないほど短時間のばく露がこれに該当する可能性があります。そのような状況においては、6 GHz 以下および 6 GHz を超える電磁界に対して、それぞれ、比エネルギー吸収率（SA、単位は  $J\ kg^{-1}$ ）および吸収エネルギー密度（ $U_{ab}$ 、単位は  $J\ m^{-2}$ ）が用いられます。SAR、 $S_{ab}$ 、SA、 $U_{ab}$ 、および  $E_{ind}$  は、本ガイドラインにおいて基本制限の規定に用いられる物理量です。

基本制限の規定に用いられる物理量は測定が困難であり得るので、より簡単に評価できる物理量も参考レベルとして規定されています。本ガイドラインで重要な参考レベルの物理量は、入射電界強度（ $E_{inc}$ ）および入射磁界強度（ $H_{inc}$ ）、入射電力密度（ $S_{inc}$ ）、平面波等価入射電力密度（ $S_{eq}$ ）、入射エネルギー密度（ $U_{inc}$ ）および平面波等価入射エネルギー密度（ $U_{eq}$ ）など体外で測定されるものと体内の電流  $I$ （単位はアンペア（A））です。基本制限および参考レベルの単位を表 1 に示し、関連するすべての用語の定義を附属書 A の「数量と単位」のセクションに記載します。

### 高周波電磁界と健康についての研究

安全なばく露レベルを設定するために、ICNIRP はまず、高周波電磁界が健康を傷害する証拠の有無を判定し、実証された有害影響それぞれについて、相互作用のメカニズムおよび傷害を引き起こすのに必要な最小ばく露の両方を

表 1 このガイドラインで用いる物理量およびその SI 単位

物理量	記号 <sup>a</sup>	単位
吸収エネルギー密度	$U_{ab}$	ジュール毎平方メートル ( $J\ m^{-2}$ )
入射エネルギー密度	$U_{inc}$	ジュール毎平方メートル ( $J\ m^{-2}$ )
平面波等価入射エネルギー密度	$U_{eq}$	ジュール毎平方メートル ( $J\ m^{-2}$ )
吸収電力密度	$S_{ab}$	ワット毎平方メートル ( $W\ m^{-2}$ )
入射電力密度	$S_{inc}$	ワット毎平方メートル ( $W\ m^{-2}$ )
平面波等価入射電力密度	$S_{eq}$	ワット毎平方メートル ( $W\ m^{-2}$ )
誘導電界強度	$E_{ind}$	ボルト毎メートル ( $V\ m^{-1}$ )
入射電界強度	$E_{inc}$	ボルト毎メートル ( $V\ m^{-1}$ )
誘導電界強度 <sup>※1</sup>	$E_{ind}$	ボルト毎メートル ( $V\ m^{-1}$ )
入射磁界強度	$H_{inc}$	アンペア毎メートル ( $A\ m^{-1}$ )
比エネルギー吸収量	SA	ジュール毎キログラム ( $J\ kg^{-1}$ )
比エネルギー吸収率	SAR	ワット毎キログラム ( $W\ kg^{-1}$ )
電流	$I$	アンペア (A)
周波数	$f$	ヘルツ (Hz)
時間	$t$	秒 (s)

<sup>a</sup> 斜体字で表記の記号は変数を表す。物理量はスカラー量で表す。基本制限または参考レベルの導出に電磁界の向きは用いられない。

【電磁界情報センター脚注】

※1：原文の表 1 において、Incident electric field strength（誘導電界強度） $E_{ind}$  は重複しているが、原文のまま記載した。

特定しました（必要な情報が入手可能な場合には）。この情報は主に、高周波電磁界と健康に関する文献の主要な国際的レビューから得られました。これらには、技術文書草案として公表された高周波電磁界ばく露と健康に関する世界保健機関による詳細なレビュー（WHO 2014）、新興および新規に同定される健康リスクに関する科学委員会の報告書（SCENIHR 2015）およびスウェーデン放射線安全庁の報告書（SSM 2015, 2016, 2018）が含まれました。これらの報告書は、実験的研究から疫学に至るまで広範な文献をレビューし、小児および高周波電磁界に敏感であると考えられる個人々の健康に関する考察を含んでいます。これらの報告書を補完するために、ICNIRP はこれらのレビュー以降に公表された研究も検討しました。この文献の簡単な要約は附属書 B に記載され、以下に記述する主な結論が得られました。

附属書 B に記載されているように、（ICNIRP 2010 に記載されている）神経刺激に加えて、高周波電磁界は、膜の透過性の変化および温度上昇という2つの主要な生物学的効果を介して生体に影響を与えることができます。高周波電磁界の文献とは無関係に、熱の影響と健康との関係に関する知識もまた重要であり、それを以下に説明します。高周波電磁界と健康についての研究の大部分が、健康への悪影響を生じさせることが示されているばく露より相当程度低いばく露を用いて実施されていること、合わせて、既知の相互作用メカニズムそのものによる健康への悪影響の閾値に取り組む研究は比較的少ないことを考えると、ICNIRP はこれが適切であると考えます。それゆえ、高周波の健康に関する文献は、正確な閾値を確認するのに十分には包括的でない可能性があります。逆に言えば、健康と主要な生物学的影響との関係を明確化するための、より広範な文献が入手できる場合は、これがガイドラインの設定に役立つ可能性があります。例えば、熱生理学文献が特定の大きさの局所的な温度上昇が傷害を引き起こすことを示したが、同様の温度上昇を生じさせることが知られている高周波ばく露はそのような傷害について評価されていなかった場合、この熱生理学文献も考慮することはおそらく合理的と考えられます。ICNIRP は、そのような補足的文献から導き出された閾値を、健康への悪影響の運用上の閾値と呼びます。

ICNIRP が制限の設定に運用上の閾値を使用するのは、高周波の文献において健康に悪影響を与えることが示されている閾値よりも運用上の閾値が低い（より安全側の）

場合、または高周波の文献が有害な健康影響の閾値を推定するのに十分な証拠を提供しない場合に限られることに注意することが重要です。閾値を決定するために、「低レベル」および「非熱的」と呼ばれるばく露、およびメカニズムが未だ解明されていない影響を含め、すべての高周波電磁界ばく露によって生じる健康への悪影響の証拠が検討されています。同様に、連続的（例えば、正弦波）電磁界および不連続的（例えば、パルス波）電磁界は異なる生物学的効果をもたらす証拠はないので（Kowalczyk et al. 2010; Juutilainen et al. 2011）、これらのタイプのばく露の間に理論的な区別はされませんでした（すべてのばく露は、健康に悪影響を及ぼすか否かに関して実験によって検討されました）。

### 高周波電磁界による健康影響の閾値

**神経刺激** 電磁界へのばく露は体内に電界を誘導することがあり、その電界が、最大 10 MHz までの周波数において、神経を刺激する可能性があります（Saunders and Jeffreys 2007）。この刺激効果は、周波数の関数として変化し、典型的には 100 kHz 前後の周波数における「チクチクする」感覚として報告されています。周波数が高くなるにつれて、加熱効果が優勢になり、神経刺激の生じやすさは低下します。この際、10 MHz では、電界の影響は典型的には「温かさ」として表現されます。誘導電界による神経刺激については、ICNIRP の低周波ガイドライン（2010）で詳述されています。

**細胞膜の透過性変化** （低周波）電磁界がパルス化されると、電力は高周波電磁界を含むある周波数範囲に分布します（Joshi and Schoenbach 2010）。パルスが十分に強く短い場合、そのパルスがもたらした電磁界へのばく露により細胞膜は透過可能になることがあり、それが順次、その他の細胞変化につながる可能性があります。ただし、（低周波成分を持たない）電磁界パルスからの高周波スペクトル成分が細胞膜の透過性に变化を引き起こすのに十分であるという証拠はありません。ICNIRP（2010）ガイドラインにおける（そして、本ガイドラインで採用する）神経刺激に対する制限は、透過性の変化が起きないことを保証するのに十分であるので、パルスがもたらす高周波電磁界に対しての追加的防護は必要ありません。また、膜透過性の変化が 18 GHz の連続波ばく露でも起きることが示されました（例えば、Nguyen et al. 2015）。これは細胞実験において示されたのみで、この影響を生じさせるには、熱による傷害を引き起こすのに必要なレベル（「温度上昇」のセク

ションを参照)をはるかに超えた非常に高いばく露レベル(何分間ものばく露時間にわたり 5 kW kg<sup>-1</sup> 程度)が必要です。したがって、この影響からの防護のために特別に制限を設定する必要もありません。なぜなら、「温度上昇」のセクションで説明されている、もっと小さな温度上昇から防護するように設計された制限が、これに対する防護も提供することになるからです。

**温度上昇** 高周波電磁界は体内で熱を発生することがあるため、この熱を安全なレベルに保つことが重要です。しかしながら、附属書 B からわかるように、熱による健康影響を引き起こすほど十分に大きな電力を使用した高周波ばく露の研究は不足しています。特に注意が必要なのは、ばく露(および結果として生じる温度上昇)が重度の傷害を引き起こすことを示した論文が時折ありますが、それに付随して示されるべき傷害に必要な最低ばく露についての証拠がその文献には欠落しています。非常に低いばく露レベル(ICNIRP(1998)の基本制限の範囲内のような)に関しては、発生する熱の量が傷害を引き起こすほど十分な大きさではないことを示す広範な証拠がありますが、ICNIRP(1998)の基本制限レベルを超過したばく露レベルに関しては、研究が限定的です。高周波電磁界ばく露によって健康が損なわれることが示されている温度よりも低い温度での健康障害を予測する正当な理由がある場合には、ICNIRPはそのようなより低い温度を制限の根拠に用います(「高周波電磁界と健康についての研究」のセクションを参照)。

健康への影響は一義的には絶対的な温度に関連しますが、本ガイドラインは、絶対的な温度ではなく温度上昇を制限するために高周波電磁界ばく露を制限していることに注意することが重要です。この方策が用いられる理由は、絶対的な温度を制限することは現実的ではないからです。絶対的な温度は、環境温度、衣服および作業量など、本ガイドラインの範囲外の多くの要因に依存します。ばく露が所定の温度上昇を引き起こしたとしても、ばく露開始前のその人の体温に応じて、その温度上昇は、健康を改善する、変化させない、または損なう可能性があることとなります。たとえば、寒いと感じている場合、軽めの加熱はおそらく快適でしょうが、すでに十分暑い場合は不快でしょう。したがって、制限は温度の“著しい”上昇を回避するように設定されています。この場合、“著しいか否か”は、潜在的な傷害および正常な生理学的体温変動の両者を照らし合わせて検討されます。本ガイドラインは、定常状態の温度

上昇(温度が緩徐に上昇する場合、大きな組織塊に熱が放散する時間および体温調節プロセスが温度上昇に対抗する時間が与えられる)と短時間での温度上昇(熱が放散するための十分な時間がない場合、高周波エネルギーの吸収量が同じであっても、結果として小さな領域により大きな温度上昇が生じる可能性がある)を区別します。このような相違は、定常状態と短時間のばく露時間を別々に考慮する必要性を示唆します。

#### 定常状態の温度上昇

**深部体温** 深部体温とは、腹部や脳などの体内の深部の温度を指し、性別、年齢、時刻、作業量、環境条件および体温調節などの要因の関数として相当程度大きく変動します。たとえば、平均深部体温は約 37 °C(「正常体温」の範囲内<sup>4</sup>)ですが、これは通常、生理学的ニーズを満たすために典型的には 24 時間にわたり変動し、その変動の大きさは 1 °C 程度です(Reilly et al. 2007)。熱負荷が増加すると、血管拡張や発汗などの体温調節機能を働かせて、深部体温の上昇は制限されます。これは重要で、深部体温の 1 °C 以上の上昇(「高体温」と称する)がひとたび起きるとさまざまな健康影響が生じる可能性があります。たとえば、高体温により事故のリスクが高まり(Ramsey et al. 1983)、深部体温が 40 °C を超えると熱中症になる可能性があります、それは致死的なことがあります(Cheshire 2016)。

職業環境での高体温に関連した有害な健康リスクを最小化するための詳細なガイドラインが利用できます(ACGIH 2017)。これらは、体温を正常体温の +1 °C 以内に保つために作業環境を修正することを目的とし、それに影響を与える可能性のあるさまざまな変数による特定の状況それぞれについて十分な知識を必要とします。附属書 B での説明の通り、高周波電磁界による深部体温上昇で傷害をもたらすものは、その温度上昇が +1 °C を超える場合にのみ見られますが、健康への悪影響に特異的な閾値についての明確な証拠はありません。入手可能な文献が限られているため、ICNIRP は、安全側に立った温度上昇の値を健康への悪影響の運用上の閾値に採用しています(ACGIH 2017 による 1 °C 上昇)。深部体温が 1 °C 上昇すると、かなりの生理学的変化が生じる可能性があることに注意することが重要です。このような変化は、身体の正常な体温調節反応の一部であり(例えば、Van den Heuvel et al. 2017)、それ自体は健康への悪影響を表すものではありません。

<sup>4</sup> 正常体温とは、能動的な体温調節プロセスが深部体温を上昇または低下させるために働くことのない体内の温度状態を指す。

さまざまな動物種にわたる実験研究に基づいた最新の理論的モデリングおよび一般化が予測するところでは、ヒト成人の深部体温を1℃上昇させるためには、熱的中性<sup>5</sup>条件（28℃、裸体、安静時）下で、100 kHz から6 GHzまでの範囲内では、少なくとも1時間にわたり全身平均SARが約6 W kg<sup>-1</sup>になるべく露が必要です。小児でこのような深部体温上昇に達するためには、小児での熱放散効率はより高いため、もっと高いSARが必要です（Hirata et al. 2013）。ただし、使用可能な測定データが限られているため、ICNIRPは安全側の立場をとって、深部体温の1℃上昇に対応する高周波電磁界ばく露レベルとして、30分間にわたる平均で4 W kg<sup>-1</sup>を採用しています。30分間の平均時間が用いられるのは、定常状態の温度に達するまでに要する時間を考慮に入れるためです（詳細については、附属書A「時間平均の検討」のセクションを参照）。比較として示しますと、ヒト成人は、安静時で総計約1 W kg<sup>-1</sup>（Weyand et al. 2009）、立位でおよそ2 W kg<sup>-1</sup>、ランニング中で12 W kg<sup>-1</sup>（Teunissen et al. 2007）を産生します。

電磁界周波数が高くなるにつれて、身体のおよび露およびその結果生じる加熱はより表面的になり、約6 GHzを超えると、この加熱の大部分は皮膚内部で生じます。たとえば、6 GHz および 300 GHz において、電力の86%はそれぞれ表面から8 mm および0.2 mm 以内で吸収されます（Sasaki et al. 2017）。深部組織での加熱に比べ、表面組織での加熱は、熱エネルギーが環境へ移動しやすいため、身体からより容易に取り除かれます。これが、深部体温上昇に対する防護のための基本制限が従来は10 GHz未満の周波数に限定されていた理由です（例えば、ICNIRP 1998）。しかし、研究により、300 GHzを超える電磁界周波数（例えば、赤外線）は、上記の1℃という健康への悪影響の運用上の閾値を上回る深部体温上昇を生じる可能性が示されました（Brockow et al. 2007）。これは、赤外線が、それから赤外線より低い本ガイドライン範囲内の周波数も同様に、真皮内部に加熱を引き起こし、この熱は真皮内の広範な血管網によって身体の深部へと輸送されるからです。したがって、6 GHzを超える周波数においても、深部体温上昇に対する防護を行うことは適切です。

ICNIRPの知る限りにおいて、6 GHz から300 GHzまでの電磁界が深部体温に及ぼす影響を評価した研究も、それが有害であることを示した研究もありません。しかしなが

<sup>5</sup> 熱的中性とは、皮膚血流を変化させるだけで深部体温が維持できる環境条件を指す。

ら、安全側に立つ手段として、ICNIRPは、6 GHzまでの周波数、それから6 GHzを超えて300 GHzまでの範囲の周波数も同様に、健康への悪影響の運用上の閾値に対応する4 W kg<sup>-1</sup>を採用します。これが安全側に立つ値であることの裏付けとして、身体の一部の表面への1260 W m<sup>-2</sup>（入射電力密度）の赤外線ばく露で、1℃の深部体温上昇が生じることが示されました（Brockow et al. 2007）。これを、ばく露表面積1 m<sup>2</sup>で皮膚反射のない70 kgの成人のおよび露に関連付けると、約18 W kg<sup>-1</sup>の全身ばく露になります。これは、6 GHz未満の電磁界において1℃の深部体温上昇を表すと考えられている4 W kg<sup>-1</sup>ばく露レベルよりもはるかに高いものです。Brockowらの研究では、保温効果の高い毛布を使用して熱放散を低減したために、通常の条件下で深部体温を上昇させるために必要なばく露をおそらく過小評価したと考えると、さらに安全側に立った値とみなされます。

**局所温度** 深部体温に加えて、過度の局所的加熱が痛みおよび熱的損傷を引き起こす可能性があります。42℃未満の温度での長時間の皮膚接触は、痛みも細胞損傷も引き起こさないことを示す広範な文献があります（例えば、Defrin et al. 2006）。附属書Bで説明されているように、これは、皮膚の高周波電磁界加熱についての入手可能な限定的データ（例えば、Waltersら（2000）は、94 GHzばく露を用いて43℃の疼痛閾値を報告した）と一致しますが、保護的な表皮を越えて、熱に敏感な表皮/真皮の境界面へと浸透する熱源について入手可能なデータはもっと少数です。ただし、組織損傷閾値の評価を行なったかなりの数の文献は、41℃を超えて43℃までの組織温度で損傷が発生し、そのような温度では損傷の発生確率および重症度が時間の関数で増加することを示しています（例えば、Dewhirst et al. 2003; Yarmolenko et al. 2011; Van Rhoon et al. 2013）。

本ガイドラインは、41℃以上の局所温度をもたらす高周波電磁界ばく露を潜在的に有害として扱います。体温は身体の領域の関数として変化するため、ICNIRPは異なる領域へのばく露を個別に扱います。本ガイドラインは、それらの領域に対応して健康への悪影響の運用上の閾値を区別して割り当てるため、正常体温条件下でのその領域の温度に基づいて2つの組織タイプを定義します。「タイプ1」組織（上腕、前腕、手、太もも、脚、足、耳介のすべての組織、眼の角膜・前房・虹彩、表皮・真皮組織、脂肪組織、筋組織、骨組織）、および「タイプ2」組織（タイプ1組織として定義されたものを除く、頭部、眼、腹部、背部、

胸部、骨盤部のすべての組織)。正常体温時の温度は、通常、タイプ1組織では33°C未満から36°Cまで、タイプ2組織では38.5°C未満です (DuBois 1941; Aschoff and Wever 1958; Arens and Zhang 2006; Shafahi and Vafai 2011)。これらの値は、局所的な加熱による健康影響の運用上の閾値の定義に用いられました。すなわち、41°Cを潜在的に有害な温度として採用した上で、ガイドラインは安全側に立ったアプローチをとり、高周波電磁界による温度上昇がタイプ1およびタイプ2の組織内でそれぞれ5°Cおよび2°Cを局所ばく露における健康への悪影響の運用上の閾値としています。

上述した組織タイプ分類の関数としてばく露制限を設定することは困難です。したがって、ICNIRPは2つの領域を定義し、これらの領域に関連がある場合には、これらの領域に別々のばく露制限を設定します。すなわち、「頭部および胴体」は、頭部、眼、耳介、腹部、背部、胸部、骨盤部を含み、タイプ1およびタイプ2の組織を含みます。「四肢」は、上腕、前腕、手、太もも、脚、足を含み、タイプ1組織のみを含みます。これらの領域それぞれのばく露レベルは、タイプ1およびタイプ2の組織でそれぞれ5°Cおよび2°Cを超える温度上昇を生じることがないように決定されました。四肢には、定義上、タイプ2組織が含まれていないため、四肢における健康への悪影響の運用上の閾値は常に5°Cです。

睾丸は、正常な生理学的温度変動を長期間維持していても、その変動内において可逆的で段階的な機能の変化が明らかでない閾値なしで生じる可能性があるという特殊な事例と見なされます。たとえば、座位などの通常の活動によって、立位に比べて最大2°Cの温度上昇が引き起こされる結果として、精子形成は可逆的に減少します (Micusset and Bujan 1995)。それゆえに、タイプ2組織における健康への悪影響の運用上の閾値は、精子機能に可逆的な変化をもたらす可能性があります。しかし、そのような影響が健康を損なうのに十分であるという証拠は現在ありません。したがって、ICNIRPは、タイプ2組織についての健康への悪影響の運用上の閾値である2°Cの温度上昇は、睾丸の場合、正常な生理学的範囲内であり、睾丸についても適切なものであると見なします。タイプ2組織は腹部を含み、それゆえに潜在的に胎児を含みますが、タイプ2組織についての健康への悪影響の運用上の閾値は、動物の催奇形性影響についての胎児の温度上昇閾値2°Cに対する防護とも一致していることに注意してください (Edwards et al. 2003;

Ziskin and Morrissey 2011)。

100 kHz から 6 GHz までの電磁界範囲においては、組織 10 g での平均 SAR が、組織内の高周波電磁界による定常状態の温度上昇の適切な指標となります。10 g の質量が用いられる理由は、初めに質量内に電磁界による温度の不均一が生じるものの、その後熱拡散により熱エネルギーは急速にあるより大きな体積へ行き渡り、その体積は質量 10 g の立方体で十分に表されるからです (Hirata and Fujiwara 2009)。それゆえに、ICNIRP は、健康への悪影響の運用上の閾値に対応するばく露の規定において、タイプ1およびタイプ2の組織それぞれでの温度上昇がそれぞれ5°Cおよび2°C未満に維持されると予想されるばく露を、質量 10 g の立方体での平均ばく露で規定します。さらに、ICNIRP は、無線通信発生源からの電磁界などによる現実的なばく露 (職業的なものも含め、日常生活で人々が遭遇する可能性があるばく露シナリオ) を想定しています。この方法は、「頭部および胴体」よりも「四肢」でのより高いばく露を規定します。健康への悪影響の運用上の閾値を超過するためには、定常状態の温度に達するのに十分な時間間隔 (数分から 30 分) にわたり、「頭部および胴体」では少なくとも 20 W kg<sup>-1</sup>、「四肢」では 40 W kg<sup>-1</sup> の SAR<sub>10g</sub> が必要です。この時間間隔については、運用上は 6 分間平均として扱われます。その理由は、6 分間局所ばく露の熱時定数と密接に一致するからです。

6 GHz を超え 300 GHz までの範囲においては、電磁界エネルギーの大部分は表層組織に蓄積されます。このため、この周波数範囲では、より深い組織を含む SAR<sub>10g</sub> は重要でなくなります。それに対し、吸収電力密度 (S<sub>ab</sub>) が、組織での吸収電力の指標、すなわち体表面の温度上昇を精密に近似する指標となります (Funahashi et al. 2018)。6 GHz から 10 GHz までの範囲で、皮下組織にかなりの吸収があることもあります。しかし、6 GHz から 300 GHz の範囲における最大の温度上昇、すなわちワーストケースの温度上昇は皮膚表面に近くで見られるため、タイプ1組織の温度上昇を健康への悪影響の運用上の閾値 (5°C) を下回るように制限するばく露はまた、タイプ2組織の温度上昇をも健康への悪影響の運用上の閾値 (2°C) を下回るように制限することになります。SAR から吸収電力密度への切り替えの正確な周波数に関しては不確かさがあることに注意してください。6 GHz が選択された理由は、この周波数において、吸収電力のほとんどが皮膚組織内にあり、皮膚組織は 10 g SAR を算出する立方体積 (一面 2.15 cm×2.15 cm



の立方体として表される)の上半分<sup>※2</sup>の中に入るからです。最近の熱モデリングおよび解析的解法は、6 GHz から 30 GHz までの周波数の場合、平均化面積 4 cm<sup>2</sup> の正方形でのばく露が、局所的な最大温度上昇の適切な推定値を提供することを示唆しています (Hashimoto et al. 2017; Foster et al. 2017)。周波数がさらに増加するにつれて、より小さなビーム径になる可能性を考慮に入れて、平均化面積を縮小する必要があるため、約 30 GHz から 300 GHz までの周波数ではその面積は 1 cm<sup>2</sup> になります。したがって、温度上昇に最もよく一致するようにするためには、平均化面積を、周波数が 6 GHz から 300 GHz まで増加するにつれて 4 cm<sup>2</sup> から 1 cm<sup>2</sup> へと徐々に変化させることとなりますが、ICNIRP は実用的な防護規定として、6 GHz を超え 300 GHz までの範囲での平均化面積に 4 cm<sup>2</sup> の正方形を用います。その上で、30 GHz を超え 300 GHz まで (焦点集束ビームのばく露が起きる可能性がある) においては、より小さな面積においても健康への悪影響の運用上の閾値を超過しないことを確実にするために、追加的に 1 cm<sup>2</sup> の空間平均を用います。

平均化時間として 6 分間が適切であり (Morimoto et al. 2017)、6 GHz を超え 300 GHz までの範囲において、タイプ 1 組織に健康への悪影響の運用上の閾値である 5 °C の局所的な温度上昇を生じさせるためには約 200 W m<sup>-2</sup> の吸収電力密度が必要であるので (Sasaki et al. 2017)、ICNIRP は、局所加熱の場合、6 分間平均された、平均化面積 4 cm<sup>2</sup> の正方形での吸収電力密度の値を 200 W m<sup>-2</sup> に設定します。ここで、周波数が 30 GHz を超える場合、面積 1 cm<sup>2</sup> の正方形での空間平均で 400 W m<sup>-2</sup> を追加の規定として設定します。

### 急速な温度上昇

ある種のばく露において、急激な温度上昇により「ホットスポット」、すなわち組織の塊にわたって不均一な温度分布、が生じることがあります (Foster et al. 2016; Morimoto et al. 2017; Laakso et al. 2017; Kodera et al. 2018)。このことは、特定のタイプのばく露については、より短い時間間隔で平均をとることを検討する必要があることを示唆します。ホットスポットは短時間のばく露で発生する可能性があります。なぜなら、熱を組織全体に散逸させる (または平均化する) ための十分な時間がないからです。この効果は、周波数が

高くなるにつれて浸透深さが小さくなるために、顕著になります。

このような不均一な温度分布を考慮するには、定常状態のばく露レベルに対する調整が必要です。この調整は、温度上昇を、健康への悪影響の運用上の閾値を下回るように制限するために、許容される最大ばく露レベルを時間の関数として規定することで達成されます。

400 MHz から 6 GHz までの場合、ICNIRP は、すべての 10 g 立方体質量での比エネルギー吸収量 (SA) に基づいて制限を規定します。この場合、SA は、「頭部および胴体」のばく露は  $7.2 [0.05 + 0.95(t/360)^{0.5}] \text{ kJ kg}^{-1}$  に、「四肢」のばく露は  $14.4 [0.025 + 0.975(t/360)^{0.5}]$  に制限されます。ここで、 $t$  は秒単位で表したばく露時間です (Kodera et al. 2018)。この規定において、 $t$  秒間に送達される、任意のパルス、パルス群、またはパルス列中の一群のパルスによるばく露、および (非パルス電磁界を含む) ばく露の総和によるばく露が、下記の式<sup>※3</sup>を超えてはならないことに注意してください (温度の閾値を超えないことを保証するため)。

400 MHz 未満の周波数の場合、浸透深さが大きいために、6 分間の局所 SAR の平均から算出される総計 SA は、健康への悪影響の運用上の閾値を超えるほど温度を上昇させることができないため、短時間のばく露レベルの規定はありません (パルスの特定のパターンまたは短時間のばく露にかかわらず)。

6 GHz を超える周波数の場合、ICNIRP は、「頭部および胴体」および「四肢」の両方についてのばく露レベルの規定に、平均化面積 4 cm<sup>2</sup> の任意の正方形での吸収エネルギー密度 ( $U_{ab}$ ) を用い、その結果、 $U_{ab}$  は  $72 [0.05 + 0.95(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  と規定されます。ここで  $t$  は秒単位で表したばく露時間です (Kodera et al. 2018 を拡張した)。

追加規定である平均化面積 1 cm<sup>2</sup> の正方形でのばく露レベルは、集束ビームばく露を考慮したもので、30 GHz から 300 GHz までの周波数の電磁界に適用され、 $U_{ab}$  は  $144 [0.025 + 0.975(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  で与えられます。

SA および  $U_{ab}$  の値は、タイプ 1 またはタイプ 2 の組織の温度をそれぞれ 5 または 2 °C 上昇させるほど十分に大きくないという点で安全側に立っています。

#### 【電磁界情報センター脚注】

※2：原文では the upper half となっており「上半分」と直訳しているものの、「入射面側の半分」と理解される。

#### 【電磁界情報センター脚注】

※3：原文では the below formulae となっているものの、下記に式が記載されておらず the above formulae と思われるので「上記の式」と理解される。

表2 100 kHz から 300 GHz までの電磁界ばく露（6分間以上での平均）に関する基本制限<sup>a</sup>

ばく露シナリオ	周波数範囲	全身平均 SAR [W kg <sup>-1</sup> ]	頭部/胴体の局所 SAR [W kg <sup>-1</sup> ]	四肢の局所 SAR [W kg <sup>-1</sup> ]	局所 S <sub>ab</sub> [W m <sup>-2</sup> ]
職業ばく露	100 kHz - 6 GHz	0.4	10	20	NA
	> 6 - 300 GHz	0.4	NA	NA	100
一般公衆ばく露	100 kHz - 6 GHz	0.08	2	4	NA
	> 6 - 300 GHz	0.08	NA	NA	20

<sup>a</sup> 注記:

1. “NA” は “not applicable” を意味し、適合性の判断において考慮の必要がない。
2. 全身平均 SAR は 30 分間で平均されている。
3. 局所 SAR および局所 S<sub>ab</sub> は 6 分間で平均されている。
4. 局所 SAR は質量 10 g の立方体で平均されている。
5. 局所吸収電力密度 S<sub>ab</sub> は身体表面の面積 4 cm<sup>2</sup> の正方形で平均されている。30 GHz を超える周波数では、身体表面の平均化面積 1 cm<sup>2</sup> の正方形でのばく露は、4 cm<sup>2</sup> で制限されるばく露の 2 倍に制限されるという追加的な制約が課せられる。

## 高周波電磁界ばく露の制限に関するガイドライン

「高周波ばく露の制限に関する科学的根拠」のセクションで説明されたように、健康への悪影響の運用上の閾値に対応する高周波電磁界レベルが特定されました。基本制限はこれらから導出されており、以下の「基本制限」セクションで説明されています。その次に、ICNIRP (2010) ガイドラインから、100 kHz から 10 MHz までの周波数における神経刺激に関連する基本制限はそのまま現在の基本制限に追加されました。その最終的な基本制限のセットを表 2~4 に示します。参考レベルは、これらの最終的な基本制限から導出されたもので、「参考レベル」セクションで説明されています。合わせて、「複数周波数の電磁界への同時

ばく露」のセクションにおいて、これらの制限に基づいて、複数周波数の電磁界の取り扱いの方法の詳細が説明されています。接触電流についてのガイダンスは「接触電流に関するガイダンス」に、職業ばく露における健康に関する検討は「職業ばく露におけるリスク低減に関する検討」のセクションに記載されています。本ガイドラインを遵守するためには、一つ一つのばく露物理量（例えば、電界、磁界、SAR）、それから時間的および空間的平均の条件について、基本制限または対応する参考レベルのどちらか一方に適合しなければなりません。つまり、両方に適合する必要はありません。制限が特定の平均化時間を規定している場合、どの平均化時間をとっても「すべて」が制限に適合する必要があることに注意してください。

表3 100 kHz から 300 GHz までの電磁界ばく露（0分より長く、かつ6分間未満の積分時間）に関する基本制限<sup>a</sup>

ばく露シナリオ	周波数範囲	頭部・胴体の局所 SA [kJ kg <sup>-1</sup> ]	四肢の局所 SA [kJ kg <sup>-1</sup> ]	局所 U <sub>ab</sub> [kJ m <sup>-2</sup> ]
職業ばく露	100 kHz - 400 MHz	NA	NA	NA
	> 400 MHz - 6 GHz	3.6[0.05+0.95(t/360) <sup>0.5</sup> ]	7.2[0.025+0.975(t/360) <sup>0.5</sup> ]	NA
	> 6 - 300 GHz	NA	NA	36[0.05+0.95(t/360) <sup>0.5</sup> ]
一般公衆ばく露	100 kHz - 400 MHz	NA	NA	NA
	> 400 MHz - 6 GHz	0.72[0.05+0.95(t/360) <sup>0.5</sup> ]	1.44[0.025+0.975(t/360) <sup>0.5</sup> ]	NA
	> 6 - 300 GHz	NA	NA	7.2[0.05+0.95(t/360) <sup>0.5</sup> ]

<sup>a</sup> 注記:

1. “NA” は “not applicable” を意味し、適合性の判断において考慮の必要がない。
2.  $t$  は秒で表される時間。ばく露自体の時間特性とは無関係に、0 秒より長く、かつ 360 秒未満の範囲の全ての  $t$  値において制限は満たされなければならない。
3. 局所比吸収エネルギー量 SA は質量 10 g の立方体で平均されている。
4. 局所吸収エネルギー密度 U<sub>ab</sub> は身体表面の面積 4 cm<sup>2</sup> の正方形で平均されている。30 GHz を超える周波数では、身体表面の平均化面積 1 cm<sup>2</sup> の正方形でのばく露を、職業ばく露では 72[0.025+0.975(t/360)<sup>0.5</sup>]<sup>※4</sup>に、一般公衆ばく露では 14.4[0.025+0.975(t/360)<sup>0.5</sup>]<sup>※4</sup>に制限する追加的な制約が課せられる。
5.  $t$  秒間に送達される、任意のパルス、パルス群、またはパルス列中の一群のパルスによるばく露、および（非パルス電磁界を含む）ばく露の総和によるばく露が、これらのレベルを超えてはならない。

【電磁界情報センター脚注】

※4：原文には記載されていないものの、72[0.025+0.975(t/360)<sup>0.5</sup>]と 14.4[0.025+0.975(t/360)<sup>0.5</sup>]の単位は、kJ m<sup>-2</sup>と思われる。

表4 100 kHz から 10 MHz までの電磁界ばく露（空間ピーク値）に関する基本制限<sup>a</sup>

ばく露シナリオ	周波数範囲	誘導電界；E <sub>ind</sub> [V m <sup>-1</sup> ]
職業ばく露	100 kHz - 10 MHz	2.70×10 <sup>-4</sup> f
一般公衆ばく露	100 kHz - 10 MHz	1.35×10 <sup>-4</sup> f

<sup>a</sup>注記：

1. fは Hz で表される周波数。
2. 制限値は身体の中の領域にも関連し、2 mm×2 mm×2 mm の連続する組織全体において二乗平均値 (rms) を用いて平均される (ICNIRP の 2010 年のガイドラインに規定されている通り)。

## 基本制限

基本制限の値を表 2~4 に示し、それらの導出の概要を以下に説明します。上述のように、100 kHz から 10 MHz までの周波数範囲に関する ICNIRP (2010) の基本制限をここで再評価しませんでした。これらは表 4 に記載されています。基本制限に関連する問題のより詳細な説明は、附属書 A の「関連する生物物理的メカニズム」セクションに記載されています。以下で説明する基本制限において、妊婦は一般公衆の一員として扱われることに注意してください。その理由は、最近のモデリング研究が、全身および局所ばく露シナリオの両方において、職業ばく露の基本制限での母親のばく露が、胎児に一般公衆の基本制限を超えるばく露をもたらす可能性を示唆しているからです。

### 全身平均 SAR (100 kHz から 300 GHz まで)

「深部体温」のセクションで説明したように、ガイドラインは、全身の質量で、かつ 30 分間で平均した全身平均 SAR として 4 W kg<sup>-1</sup> を、深部体温上昇についての健康への悪影響の運用上の閾値である 1° C に対応するばく露レベルとして採用します。科学的な不確かさ、ならびに人口集団全体を見渡したときの熱生理機能の違い、環境条件および身体活動レベルの変動性を考慮に入れて、職業ばく露におけるこの閾値には低減係数 10 が適用されます。深部体温調節能力の個人間変動は、ガイドラインでは制御できないさまざまな要因に依存するため、特に重要です。このような要因には、血液灌流および発汗率の中枢性および末梢性の変化（これらは、順次、年齢および特定の病状を含む他のさまざまな要因の影響を受けます）、ならびに行動および環境条件が含まれます。

それゆえ、職業ばく露の基本制限は、30 分間で平均した全身平均 SAR で 0.4 W kg<sup>-1</sup> とされます。たとえ、SAR はばく露時間が短くなればなるほど大きくなる可能性があるとしても、深部体温は 30 分間で、体内で「平均化」され、この時間平均された温度の上昇こそがここでは重要な意

味を持つため、このことは深部体温上昇にそれほど影響しません。さらに、全身と局所の両方の制限を同時に満たさなければならないため、局所的に有害とされるほど十分に高いばく露は、以下で説明する局所の制限によって防護されます。

一般公衆には、ばく露に気づくことを求めることはできないため、したがって、リスク低減対策をとることを求めることはできないので、一般公衆の基本制限は、低減係数 50 が適用されて、30 分間で平均した全身平均 SAR で 0.08 W kg<sup>-1</sup> とされます。

ICNIRP (1998) ガイドライン以降、全身の高周波ばく露に関するドシメトリおよび潜在的な健康影響の両方に関する科学的な不確かさがかなり大きく減少したことは注目に値します。このことは、安全側に立った低減係数を小さくすることを正当化するかもしれません。しかし、ICNIRP は、安定した基本制限を維持することの利点の方が、それらの僅かの変更がもたらすかもしれない利点を上回ると考え、ICNIRP は全身平均に関する基本制限に対し以前と同じ低減係数を保持しています。同様に、温度上昇は、周波数が増加するにつれてより表面的になる（それゆえ、結果として生じる熱が環境へ失われやすくなる）ものですが、6 GHz を超える周波数での全身平均 SAR の基本制限は、安全側に立って 6 GHz 以下と同じに設定されています。

### 局所 SAR (100 kHz から 6 GHz まで)

#### 頭部および胴体

「局所温度」のセクションで説明したように、100 kHz から 6 GHz までの範囲において、ガイドラインは、10 g の立方体質量で、かつ 6 分間平均した SAR として 20 W kg<sup>-1</sup> を、「頭部および胴体」についての健康への悪影響の運用上の閾値（タイプ 1 組織では 5° C、タイプ 2 組織では 2° C）に対応する局所ばく露レベルとして採用します。科学的な不確かさ、ならびに人口集団全体での熱生理機能の違い、環境条件および身体活動レベルの変動性を考慮に入れて、職業ばく露におけるこの閾値には低減係数 2 が適用されています。局所ばく露に対する低減係数は全身ばく露に対するものより小さくなっていますが、その理由は、局所ばく露に関連する健康影響の閾値が環境条件および高度に変化する中枢性体温調節プロセスにあまり依存しないこと、および局所ばく露に関連する健康影響が医学的にそれほど深刻ではないことです。それゆえ、職業ばく露の基本制限は、6 分間平均の SAR<sub>10g</sub> で 10 W kg<sup>-1</sup> とされます。一般公衆には、ばく露に気づくことを求めることはできないため、

したがって、リスク低減対策をとることを求めることはできないこと、また、一般人口集団では熱生理機能の違いもより大きくなると考えられることを理由に、一般公衆の基本制限は、低減係数 10 が適用されて、6 分間平均した SAR<sub>10g</sub> で 2 W kg<sup>-1</sup> に下げられています。

#### 四肢

「局所体温」のセクションで説明したように、ガイドラインは、10 g の立方体質量で、かつ 6 分間平均した SAR として 40 W kg<sup>-1</sup> を、四肢の局所温度についての健康への悪影響の運用上の閾値である 5° C の温度上昇に対応する局所ばく露レベルとして採用します。「頭部および胴体」の制限と同様に、科学的な不確かさ、ならびに人口集団全体での熱生理機能の違い、環境条件および身体活動レベルの変動性を考慮に入れて、職業ばく露におけるこの閾値には低減係数 2 が適用されています。これにより、職業ばく露の基本制限は、6 分間平均の SAR<sub>10g</sub> で 20 W kg<sup>-1</sup> とされます。一般公衆には、ばく露に気づくことを求めることはできないため、したがって、リスク低減対策をとることを求めることはできないこと、また、一般人口集団では熱生理機能の違いもより大きくなると考えられることを理由に、一般公衆の基本制限は、低減係数 10 が適用されて、6 分間平均の SAR<sub>10g</sub> で 4 W kg<sup>-1</sup> に下げられています。

#### 局所 SA (400 MHz を超え 6 GHz まで)

「急速な温度上昇」のセクションで説明したように、400 MHz を超え 6 GHz までの範囲においては、6 分間平均の SAR<sub>10g</sub> の基本制限で許容される累積エネルギーの組織での吸収が過度に急速に起きないことを保証するための追加の制約が必要です。したがって、ICNIRP は、6 分未満のばく露時間について、温度上昇が健康への悪影響の運用上の閾値を下回るように制限するために、時間の関数として SA レベルを設定します。この SA レベルは、10 g の立方体質量で平均したもので、「頭部および胴体」には 7.2 [0.05 + 0.95(t/360)<sup>0.5</sup>] kJ kg<sup>-1</sup>、および四肢には 14.4 [0.025 + 0.975(t/360)<sup>0.5</sup>] kJ kg<sup>-1</sup> で与えられます。ここで、t は秒単位で表したばく露時間です。

SAR<sub>10g</sub> の基本制限と同様に、職業ばく露における局所 SA ばく露レベルには低減係数 2 を適用することで、科学的な不確かさ、ならびに人口集団全体での熱生理機能の違い、環境条件および身体活動レベルの変動性が考慮されました。これにより、職業ばく露の基本制限は、「頭部および胴体」では 3.6 [0.05 + 0.95(t/360)<sup>0.5</sup>] kJ kg<sup>-1</sup>、および四肢では 7.2 [0.025 + 0.975(t/360)<sup>0.5</sup>] kJ kg<sup>-1</sup> とされます。一般公衆に

は、ばく露に気づくことを求めることはできないため、したがって、リスク低減対策をとることを求めることはできないこと、また、一般人口集団では熱生理機能の違いもより大きくなると考えられることを理由に、一般公衆の基本制限には、低減係数 10 が適用されました。これにより、一般公衆の基本制限は、「頭部および胴体」では 0.72 [0.05 + 0.95(t/360)<sup>0.5</sup>] kJ kg<sup>-1</sup>、および四肢では 1.44 [0.025 + 0.975(t/360)<sup>0.5</sup>] kJ kg<sup>-1</sup> とされます。

これらの短時間ばく露の基本制限においては、t 秒間に送達される、任意のパルス、パルス群、またはパルス列中の一群のパルスによるばく露、および（非パルス電磁界を含む）ばく露の総和によるばく露が、これらの局所 SA の値を超えてはならないことに注意してください。

#### 局所吸収電力密度 (6 GHz を超え 300 GHz まで)

「局所温度」のセクションで説明したように、6 GHz を超え 300 GHz までの範囲において、ガイドラインは、6 分間で、かつ身体表面の平均化面積 4 cm<sup>2</sup> の正方形での吸収電力密度として 200 W m<sup>-2</sup> を、「頭部および胴体」および「四肢」の健康への悪影響の運用上の閾値（タイプ 1 およびタイプ 2 の組織においてそれぞれ 5° C および 2° C の局所温度上昇）に対応する局所ばく露として採用しています。局所 SAR の制限と同様に、科学的な不確かさ、ならびに人口集団全体での熱生理機能の違い、環境条件および身体活動レベルの変動性を考慮に入れるために低減係数 2 が適用され、これにより、職業ばく露の基本制限は、6 分間で、かつ身体表面の平均化面積 4 cm<sup>2</sup> の正方形で 100 W m<sup>-2</sup> とされます。

一般公衆には、ばく露に気づくことを求めることはできないため、したがって、リスク低減対策をとることを求めることはできないこと、また、一般人口集団では熱生理機能の違いもより大きくなると考えられることを理由に低減係数 10 が適用されて、一般公衆の基本制限は、6 分間で、かつ身体表面の平均化面積 4 cm<sup>2</sup> の正方形で 20 W m<sup>-2</sup> に下げられています。

さらに、30 GHz を超え 300 GHz までの周波数では、焦点集束ビームばく露を考慮するために、労働者または一般公衆について、身体表面の平均化面積 1 cm<sup>2</sup> の正方形での吸収電力密度は、平均化面積 4 cm<sup>2</sup> での基本制限の 2 倍を超えてはなりません。

#### 局所吸収エネルギー密度 (6 GHz を超え 300 GHz まで)

「急速な温度上昇」のセクションで説明したように、6

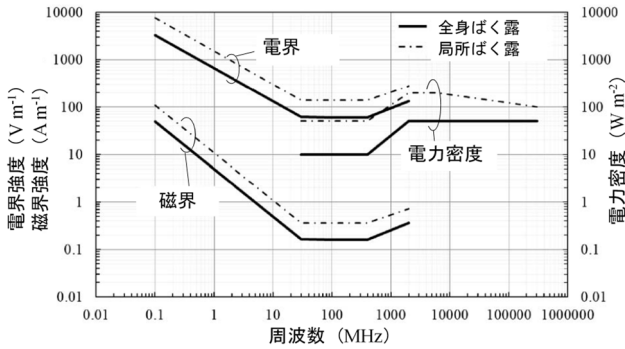


図 1 100 kHz から 300 GHz までの電磁界への時間平均された職業ばく露（6 分間以上での平均）に関する参考レベル（無擾乱 rms 値。完全な規定については表 5、6 を参照のこと）。

GHz を超え 300 GHz までの周波数では、6 分間平均の吸収電力密度の基本制限によって許容される累積エネルギーの組織での吸収が過度に急速に起きないことを保証するために追加の制約が必要です。したがって、ICNIRP は、「頭部および胴体」および「四肢」の両方について、タイプ 1 およびタイプ 2 の両方の組織での温度上昇が健康への悪影響の運用上の閾値を下回るように制限するために、6 分間未満のばく露時間における最大吸収エネルギー密度レベルを時間の関数として設定します。この吸収エネルギー密度レベルは、身体表面の平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  の任意の正方形において  $72 [0.05 + 0.95(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  で与えられます。ここで、 $t$  は秒単位で表したばく露時間です。30 GHz を超え 300 GHz までの周波数では焦点集束ビームへのばく露を考慮するために、健康への悪影響の運用上の閾値に対応する吸収エネルギー密度は、身体表面の平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  の正方形において  $144[0.025 + 0.975(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  で与えられます。短時間ばく露に関するこれらの基本制限において、 $t$  秒間に送達される、任意のパルス、パルス群、またはパルス列中の一群のパルスによるばく露、および（非パルス電磁界を含む）ばく露の総和によるばく露はこの式を満たすように使用されなければならないことに注意してください。

吸収電力密度の基本制限と同様に、科学的不確かさ、ならびに人口集団全体での熱生理機能の違い、環境条件および身体活動レベルの変動性を考慮するために、職業ばく露でのこのばく露レベルに低減係数 2 が適用されます。これにより、職業ばく露の基本制限は、身体表面の平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  の任意の正方形において、 $36 [0.05 + 0.95(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  とされます。30 GHz を超え 300 GHz までの周波数において、職業ばく露の追加の基本制限は、身体表面の平均化

面積  $1 \text{ cm}^2$  の任意の正方形において  $72 [0.05 + 0.95(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  とされます。一般公衆には、ばく露に気づくことを求めることはできないこと、したがって、リスク低減対策をとることを求めることはできないこと、また、一般人口集団では熱生理機能の違いもより大きくなると考えられることを理由に、一般公衆には低減係数 10 が適用され、一般公衆の基本制限は、身体表面の平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  の任意の正方形において  $7.2 [0.05 + 0.95(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  に下げられます。30 GHz を超え 300 GHz までの周波数において、一般公衆の追加の基本制限は、身体表面の平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  の任意の正方形において  $14.4 [0.05 + 0.95(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  です。

### 基本制限に関する諸表

基本制限に適合するためには、高周波電磁界ばく露は、表 2、3、または 4 においてその電磁界周波数について規定された制限を超過してはなりません。すなわち、全ての所定の高周波電磁界周波数、全身 SAR・局所 SAR・ $S_{\text{ab}}$ ・ $S_{\text{A}}$ ・ $U_{\text{ab}}$  および誘導電界<sup>6</sup>のうち、そのばく露が関連するものについての制限を同時に満たす必要があります。

### 参考レベル

参考レベルは、基本制限に比べより容易に評価が行える物理量を用いて適合性を示す手段を提供するために、計算研究および測定研究を組み合わせて導出されました。それでも、この参考レベルは、ワーストケースのばく露シナリオにおいて基本制限と同等の防護レベルを提供します。ただし、この導出において安全側に立った仮定をおいているため、ほとんどのばく露シナリオにおいて、参考レベルは

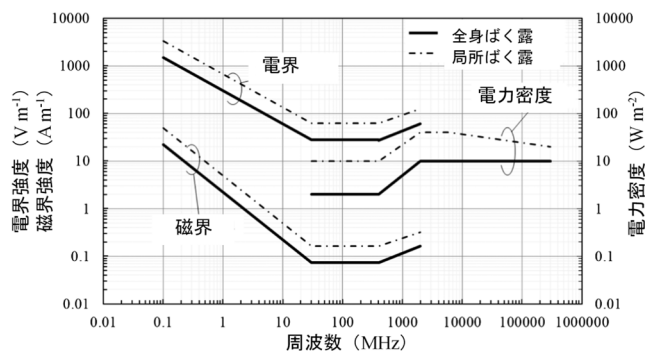


図 2 100 kHz から 300 GHz までの電磁界への時間平均された一般公衆ばく露（6 分間以上での平均）に関する参考レベル（無擾乱 rms 値。完全な規定については表 5、6 を参照のこと）。

<sup>6</sup> ICNIRP (2010)ガイドラインでは、“誘導”の代わりに“体内”が使用されているが、本文書内での一貫性を保つため、ここでは“誘導”を用いる。

表 5 100 kHz から 300 GHz までの電磁界へのばく露 (30 分間および全身での平均) に関する参考レベル (無擾乱 rms 値) <sup>a</sup>

ばく露シナリオ	周波数範囲	入射電界強度; $E_{inc}$ [ $V m^{-1}$ ]	入射磁界強度; $H_{inc}$ [ $A m^{-1}$ ]	入射電力密度; ( $S_{inc}$ ) [ $W m^{-2}$ ]
職業ばく露	0.1 - 30 MHz	$660/f_M^{0.7}$	$4.9/f_M$	NA
	> 30 - 400 MHz	61	0.16	10
	> 400 - 2000 MHz	$3f_M^{0.5}$	$0.008f_M^{0.5}$	$f_M/40$
	> 2 - 300 GHz	NA	NA	50
一般公衆 ばく露	0.1 - 30 MHz	$300/f_M^{0.7}$	$2.2/f_M$	NA
	> 30 - 400 MHz	27.7	0.073	2
	> 400 - 2000 MHz	$1.375f_M^{0.5}$	$0.0037f_M^{0.5}$	$f_M/200$
	> 2 - 300 GHz	NA	NA	10

<sup>a</sup> 注記:

- “NA” は “not applicable” を意味し、適合性の判断において考慮の必要がない。
- $f_M$  は MHz で表される周波数。
- $S_{inc}$ 、 $E_{inc}$  および  $H_{inc}$  は 30 分間で、かつ全身で平均すること。 $E_{inc}$  および  $H_{inc}$  それぞれの時間平均および空間平均は、関連する二乗値についての平均で行われなければならない (詳細は附属書 A の式 8 を参照)。
- 100 kHz から 30 MHz までの周波数の場合、遠方界/近傍界領域の区別に関わらず、 $E_{inc}$  および  $H_{inc}$  のどちらも上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。
- 30 MHz を超え 2 GHz までの周波数の場合: (a) 遠方界領域内では、 $S_{inc}$ 、 $E_{inc}$  または  $H_{inc}$  のどれかが上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される (1 つだけが必要とされる)。平面波等価入射電力  $S_{eq}$  を  $S_{inc}$  の代わりに用いることができる。(b) 放射近傍界領域内では、 $S_{inc}$  が上記の参考レベル値を超えないか、または  $E_{inc}$  と  $H_{inc}$  の両方が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。(c) リアクティブ近傍界領域では、 $E_{inc}$  と  $H_{inc}$  の両方が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。 $S_{inc}$  は適合性の証明に用いることができないので、基本制限を評価しなければならない。
- 2 GHz を超え 300 GHz までの周波数の場合: (a) 遠方界領域内では、 $S_{inc}$  が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。 $S_{eq}$  を  $S_{inc}$  の代わりに用いることができる。(b) 放射近傍界領域内では、 $S_{inc}$  が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。(c) リアクティブ近傍界領域内では、参考レベルを適合性の証明に用いられないので、基本制限を評価しなければならない。

対応する基本制限よりも安全側に立っています。参考レベルに関する詳細は、附属書 A 「参考レベルの導出」のセクションに記載されています。

参考レベルを表 5 ~ 9 に示します。図 1 および図 2 は、長時間 (6 分間以上) のばく露についての職業ばく露および一般公衆の参考レベルの値をグラフで表したものです。表 5 の参考レベルは、30 分間で平均した値であり、全身平均の基本制限に対応しています。表 6 (6 分間平均)、表 7 (0 分より長く、かつ 6 分間未満の時間にわたる積分値)、および表 8 (瞬時のピーク電界強度の測定値) はそれぞれ、全身より小さな身体の領域で平均された基本制限に関係するものです。人体の共振周波数付近における接地の影響 (Dimbylow 2001) を考慮するために、追加として四肢電流の参考レベルが設定されています (6 分間平均、表 9)。この影響を考慮しないと、特定の電磁界周波数において参考レベルは組織内のばく露を過小評価する可能性があるためです。現在の四肢電流の参考レベルは、人体が電氣的に絶縁されていないばく露シナリオにおいてのみ重要になります。

表 5 ~ 9 は、個人のばく露レベルがガイドラインに適合するかどうかを判断するために、関連するばく露量を平均および積分する時間を規定しています。これら平均化時間は、電界強度または他のばく露量を推定するために必要な

測定時間と必ずしも同じではありません。技術標準化機関からの情報によっては、ばく露量の適切な推定するために用いられる実際の測定時間は、これらの表に示された時間よりも短くできます。

参考レベルの適用において重要な考慮事項は、参考レベルへの適合性評価に用いられる物理量 (すなわち、 $E_{inc}$ 、 $H_{inc}$ 、 $S_{inc}$ 、 $U_{inc}$ 、 $S_{eq}$ 、 $U_{eq}$ 、 $I$ ) による基本制限の適合性評価に用いられる物理量の予測にどの程度の十分さがあるかです。参考レベルの物理量がより大きな不確かさに関連付けられている状況では、参考レベルはより慎重に適用されなければなりません。ガイドラインの便宜上、十分さの程度は、外部電磁界が遠方界領域にあると見なせるか、放射近傍界またはリアクティブ近傍界領域にあると見なせるかに大きく依存します。したがって、ほとんどの場合、電磁界が遠方界領域にあるか、放射近傍界またはリアクティブ近傍界領域にあるかの関数として、異なる参考レベルの評価ルールが設定されています。

このアプローチの難しさは、参考レベル物理量からの基本制限物理量の推定の十分さに他の要因も影響を及ぼす可能性があることです。これらの要因には、電磁界周波数、電磁界発生源の物理的寸法、評価される外部電磁界の発生源からの距離、人体占有空間にわたる電磁界の変動の大き

表 6 100 kHz から 300 GHz までの電磁界への局所ばく露（6 分間平均）に関する参考レベル（無擾乱 rms 値）<sup>a</sup>

ばく露シナリオ	周波数範囲	入射電界強度； $E_{inc}$ [ $V m^{-1}$ ]	入射磁界強度； $H_{inc}$ [ $A m^{-1}$ ]	入射電力密度； $S_{inc}$ [ $W m^{-2}$ ]
職業ばく露	0.1 - 30 MHz	$1504/f_M^{0.7}$	$10.8/f_M$	NA
	> 30 - 400 MHz	139	0.36	50
	> 400 - 2000 MHz	$10.58f_M^{0.43}$	$0.0274f_M^{0.43}$	$0.29f_M^{0.86}$
	> 2 - 6 GHz	NA	NA	200
	> 6 - < 300 GHz	NA	NA	$275/f_G^{0.177}$
	300 GHz	NA	NA	100
一般公衆 ばく露	0.1 - 30 MHz	$671/f_M^{0.7}$	$4.9/f_M$	NA
	> 30 - 400 MHz	62	0.163	10
	> 400 - 2000 MHz	$4.72f_M^{0.43}$	$0.0123f_M^{0.43}$	$0.058f_M^{0.86}$
	> 2 - 6 GHz	NA	NA	40
	> 6 - 300 GHz ※5	NA	NA	$55/f_G^{0.177}$
	300 GHz	NA	NA	20

<sup>a</sup> 注記：

- “NA” は “not applicable” を意味し、適合性の判断において考慮の必要がない。
- $f_M$  は MHz で表される周波数。 $f_G$  は GHz で表される周波数。
- $S_{inc}$ 、 $E_{inc}$ 、および  $H_{inc}$  は 6 分間で平均されている。また空間平均について注記 6 - 7 に規定がある場合は、関連する身体投影空間にわたって平均される。 $E_{inc}$  および  $H_{inc}$  それぞれの時間平均および空間平均は、関連する二乗値についての平均で行われなければならない（詳細は附属書 A の式 8 を参照）。
- 100 kHz から 30 MHz までの場合、遠方界/近傍界領域の区別に関わらず、全身投影空間における  $E_{inc}$  および  $H_{inc}$  の空間ピーク値のどちらもが上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。
- 30 MHz を超えて 6 GHz までの周波数の場合：(a) 遠方界領域内では、全身投影空間における  $S_{inc}$ 、 $E_{inc}$  または  $H_{inc}$  の空間ピーク値のうちの 1 つが、上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される（1 つだけが必要とされる）。平面波透過入射電力  $S_{eq}$  を  $S_{inc}$  の代わりに用いることができる。(b) 放射近傍界領域内では、全身投影空間における  $S_{inc}$  の空間ピーク値が上記の参考レベル値を超えないか、または  $E_{inc}$  と  $H_{inc}$  の両方の空間ピーク値が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。(c) リアクティブ近傍界領域内では、 $E_{inc}$  と  $H_{inc}$  の両方が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。 $S_{inc}$  を適合性の証明に用いることはできない。2 GHz を超える周波数においては、参考レベルを適合性の判定に用いることはできないので、基本制限を評価しなければならない。
- 6 GHz を超え 300 GHz までの周波数の場合：(a) 遠方界領域内では、身体投影空間表面の平均化面積  $4 cm^2$  の正方形での  $S_{inc}$  が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。 $S_{eq}$  を  $S_{inc}$  の代わりに用いることができる。(b) 放射近傍界領域内では、身体投影空間表面の平均化面積  $4 cm^2$  の正方形での  $S_{inc}$  が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。(c) リアクティブ近傍界領域内では、参考レベルを適合性の証明に用いることはできないので、基本制限を評価しなければならない。
- 30 GHz を超え 300 GHz までの周波数の場合、身体投影空間表面の平均化面積  $1 cm^2$  の正方形でのばく露は、 $4 cm^2$  で制限されるばく露の 2 倍を超えてはならない。

【電磁界情報センター脚注】

※5：表 6 一般公衆の周波数範囲「> 6 - 300 GHz」は、「> 6 - < 300 GHz」と思われる。

さが含まれます。このような不確かさの原因を考慮に入れて、ガイドラインは、遠方界領域よりも放射近傍界またはリアクティブ近傍界領域でのばく露に対してより安全側に立ったルールを用います。参考レベルが基本制限に十分に一致することを保証するに足るだけの、遠方界領域と放射近傍界またはリアクティブ近傍界領域の単純な境界の明示はないことに留意してください。したがって、これらの領域の定義は附属書 A の「参考レベルの一般的な検討」のセクションに記載されていますが、これはあくまでもガイドのためのものであり、参考レベルでの評価手順の改善には技術標準化機関からの情報を利用することが望ましいです。それらの情報は、基本制限により十分に一致させるために、電磁界発生源のタイプそれぞれにおける外部ばく露を詳しく記述するように策定されています。

近傍界と遠方界領域の区別に関連して、一部のばく露条件では、 $S_{inc}$  および  $U_{inc}$  の代わりに、それぞれ、より取り扱い易い物理量である平面波等価入射電力密度 ( $S_{eq}$ ) および平面波等価入射エネルギー密度 ( $U_{eq}$ ) を用いることができます。これが許容されている場合は、以下に詳しく記述されています。そのような場合、平面波等価入射エネルギー密度は、対応する入射電力密度に関して表 5 ~ 7 で説明されたものと同じ方法で平均化することになります。

遠方界領域の電磁界に関しては、次のルールが適用されます。30 MHz を超え 2 GHz までの周波数の場合、ICNIRP は、特定の参考レベルに適合するために、電界、磁界または  $S_{inc}$  のいずれか 1 つの物理量について適合性を示すことが必要とします。さらに、 $S_{inc}$  を  $S_{eq}$  に置き換えることができます。同様に、400 MHz を超える周波数の場合、ここ

表7 100 kHz から 300 GHz までの電磁界への局所ばく露（0分より長く、かつ6分間未満の積分時間）に関する参考レベル（無擾乱 rms 値）<sup>a</sup>

ばく露シナリオ	周波数範囲	入射エネルギー密度； $U_{inc}$ [kJ m <sup>-2</sup> ]
職業ばく露	100 kHz - 400 MHz	NA
	> 400 - 2000 MHz	$0.29f_M^{0.86} \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
	> 2 - 6 GHz	$200 \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
	> 6 - < 300 GHz	$275/f_G^{0.177} \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
	300 GHz	$100 \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
一般公衆ばく露	100 kHz - 400 MHz	NA
	> 400 - 2000 MHz	$0.058f_M^{0.86} \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
	> 2 - 6 GHz	$40 \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
	> 6 - < 300 GHz	$55/f_G^{0.177} \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
	300 GHz	$20 \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$

<sup>a</sup> 注記：

1. “NA” は “not applicable” を意味し、適合性の判断において考慮の必要がない。
2.  $f_M$  は MHz で表される周波数。  $f_G$  は GHz で表される周波数。  $t$  は秒で表されるばく露時間で、  $t$  秒間に送達される、任意のパルス、パルス群、またはパルス列中の一群のパルスによるばく露、および（非パルス電磁界を含む）ばく露の総和によるばく露が、これらの参考レベルを超えてはならない。
3.  $U_{inc}$  は時間  $t$  にわたり計算され、また空間平均について注記5-7に規定がある場合は、関連する投影身体空間にわたり計算される。
4. 100 kHz から 400 MHz の周波数の場合：0分より長く、かつ6分間未満という制限は必要なく、参考レベルは設定されていない。
5. 400 kHz を超え 6 GHz までの周波数の場合：(a) 遠方界領域内では、身体投影空間における  $U_{inc}$  の空間ピーク値が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。平面波等価入射エネルギー密度  $U_{eq}$  を  $U_{inc}$  の代わりに用いることができる。(b) 放射近傍界領域内では、身体投影空間における  $U_{inc}$  の空間ピーク値が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。(c) リアクティブ近傍界領域内では、参考レベルを適合性の判定に用いることはできないので、基本制限を評価しなければならない。
6. 6 GHz を超え 300 GHz までの周波数の場合：(a) 遠方界または放射近傍界領域内では、身体投影空間表面の平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  の正方形での  $U_{inc}$  が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。<sup>\*\*6</sup> (b) リアクティブ近傍界領域内では、参考レベルを適合性の証明に用いることはできないので、基本制限を評価しなければならない。
7. 30 GHz を超え 300 GHz までの周波数の場合：身体投影空間表面の平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  の正方形でのばく露は、職業ばく露については  $275/f_G^{0.177} \times 0.72[0.025+0.975(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$ 、一般公衆ばく露については  $55/f_G^{0.177} \times 0.72[0.025+0.975(t/360)^{0.5}] \text{ kJ m}^{-2}$  を超えてはならない。

【電磁界情報センター脚注】

※6：原文では記載されていないものの、本文と表6注記の記載内容から、表7注記6(a)の記載は、「遠方界領域内では、身体投影空間表面の平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  の正方形での  $U_{inc}$  が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。  $U_{eq}$  を  $U_{inc}$  の代わりに用いることができる。」と「放射近傍界領域内では、身体投影空間表面の平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  の正方形での  $U_{inc}$  が上記の参考レベル値を超えなければ、適合性が証明される。」に分けられると思われる。

では制限が  $U_{inc}$  で規定<sup>\*7</sup>されていますが、これを  $U_{eq}$  に置き換えることができます。100 kHz から 30 MHz までの周波数の場合、常に近傍界領域内にあるものとして扱われます。次のパラグラフを参照してください。

近傍界領域の電磁界に関しては、次のルールが適用されます。100 kHz から 30 MHz まで周波数の場合、現在利用されている高周波電磁界発生源に関して、本ガイドラインが本質的に関連するような比較的高強度な個人ばく露は、典型的には、近傍界領域内で起こります。本ガイドラインは、この周波数範囲のすべてのばく露を近傍界として扱い、参考レベルへの適合性を示すために、電界および磁界の両

【電磁界情報センター脚注】

※7：原文では the restrictions are specified in terms of  $U_{inc}$  となっているものの、the restrictions for brief exposures are specified in terms of  $U_{inc}$  と思われるので、「ここでは制限が  $U_{inc}$  で規定」は「短時間ばく露では制限が  $U_{inc}$  で規定」と理解される。

方の参考レベルへの適合を必要とします。30 MHz を超え 2 GHz までの周波数の場合、放射近傍界またはリアクティブ近傍界領域内の個人ばく露は、電界強度と磁界強度の両方が表の参考レベル値を下回るならば、適合しているとして扱われます。30 MHz を超え 300 GHz までの周波数の場合、放射近傍界領域内の個人ばく露は、 $S_{inc}$ （または、関連する場合は  $U_{inc}$ ）が参考レベル値を下回るならば、適合しているとして扱われます。ただし、2 GHz を超え 300 GHz までの周波数範囲におけるリアクティブ近傍界領域内のばく露については、参考レベルの値に適用される物理量は、基本制限への適合性を保証するには不十分として扱われます。そのような場合、基本制限への適合性を評価しなければなりません。

一部のばく露シナリオにおいて、以下に詳しく記述される参考レベルの高周波電磁界は、基本制限を超えるばく露をもたらす可能性があることを ICNIRP は認識しています。



そのようなシナリオが特定された場合には、ICNIRP は、結果として生じる組織ばく露と対応する基本制限との差の大きさを（関連するドシメトリの不確かさとの比較を含め）考慮して、参考レベルを下げる必要があるか否か、およびこの逸脱が健康に悪影響を及ぼす可能性があるか否か（関連する基本制限がどの程度安全側に立っているかの考慮を含め）を判断しました。差が小さい場合、および健康に悪影響をおそらく及ぼさないと判断された場合は、基本制限を超えるばく露をもたらす可能性があっても参考レベルはそのままに保たれました。

この状況は、全身平均 SAR の基本制限に対応する参考レベルに関して起きることが示されました。それは、人体の共振周波数（100 MHz まで）および 1~4 GHz の範囲で、基本制限を超える全身平均 SAR をもたらす可能性があります（ICNIRP 2009）。これが起きる可能性のあるばく露シナリオは、非常に特異的で、身体の小さな人（3 歳児など）が少なくとも 30 分間、身体を伸ばした（例えば、腕を頭部上方に挙げ、まっすぐ立っている）状態で、小児の前方から後方に向かって入射する上記の周波数範囲の平面波のばく露を受ける必要があります。結果として生じる SAR の上昇は基本制限に相対化して小さく（15~40%）、全身平均 SAR 測定の不確かさと同等かそれよりも小さいものでした（Flintoft et al. 2014; Nagaoka and Watanabe 2019）。また、基本制限の導出それ自体に何段階もの安全側に立つ考慮が組み込まれており、そして重要なことに、このような状況（小児の全身平均 SAR が基本制限を超過していること）は健康に影響を与える可能性がありません。後者の点は重要です。なぜなら、これに関連する基本制限は、深部体温の 1 °C を超える上昇からの防護のために設定されたものでありますが、小柄ゆえに身体の「表面積対質量比」が増加するために、この仮定されたばく露シナリオにおいて、より大柄な人に比べて、このような人は環境に熱をよ

り散逸しやすいと考えられるからです（Hirata et al. 2013）。小柄な人では、この「全身平均 SAR の増加」と「熱損失の増加」の正味の影響による温度上昇は、基本制限を超えなかった大柄な人に生じる温度上昇よりも小さくなります。ただし、どちらの場合も、1 °C よりかなり小さい値です。それゆえ、ICNIRP はこの状況を考慮するために参考レベルを変更することはしませんでした。

### 複数周波数への同時ばく露

異なる周波数の電磁界への同時ばく露の状況においては、これらのばく露がその影響において相加的であるかどうかを判断することが重要です。加法性は、熱的影響および電氣的刺激の影響について別々に調べられ、そのような加法性を考慮したのちに初めて制限は満たされることとなります。以下の式は、実際のばく露状況下で関連する周波数に適用されます。以下の参考レベルの総和の式は、複数の発生源からの電磁界におけるワーストケースの条件を仮定しているため、通常のばく露状況は、実際には、これらの参考レベルの式で示されるよりも低いばく露レベルをもたらす場合もあります。

以下の点に注意してください。参考レベルに関しては、適合性を示すために、対応する参考レベル値に対する電界強度、磁界強度、または電力密度の比率のうちの最大のもの进行评估します。参考レベルは、外部の物理量で定義され、指定の周波数帯において、その物理量は変わります。たとえば、30 MHz 未満では電界強度と磁界強度の両方が適用され、30 MHz から 2 GHz までにおいては電界強度と磁界強度の両方および入射電力密度が適用可能です。適用される物理量が変わる前後の周波数成分を含むばく露の場合、これを考慮して加法性を用いる必要があります。同じ原則が基本制限に適用されます。以下の式に入る電磁界の値は、基本制限および参考レベルの諸表で指定されているもの

表 8 100 kHz から 10 MHz までの周波数の電磁界（ピーク値）への局所ばく露に関する参考レベル（無擾乱 rms 値）<sup>a</sup>

ばく露シナリオ	周波数範囲	入射電界強度； E <sub>inc</sub> [V m <sup>-1</sup> ]	入射磁界強度； H <sub>inc</sub> [A m <sup>-1</sup> ]
職業ばく露	100 kHz - 10 MHz	170	80
一般公衆ばく露	100 kHz - 10 MHz	83	21

<sup>a</sup>注記：

- 遠方界/近傍界領域の区別に関係なく、全身投影空間における E<sub>inc</sub> の空間ピーク値または H<sub>inc</sub> の空間ピーク値のどちらもが上記の参考レベルを超えなければ、適合性が証明される。

表 9 100 kHz から 110 MHz までの周波数での四肢誘導電流（6 分間平均）に関する参考レベル<sup>a</sup>

ばく露シナリオ	周波数範囲	電流 I [mA]
職業ばく露	100 kHz - 110 MHz	100
一般公衆ばく露	100 kHz - 110 MHz	45

<sup>a</sup>注記：

- 電流の大きさの値は、関連する二乗値を平均することで決定しなければならない（詳細は附属書 A の式 8 を参照）。
- 四肢の電流の大きさは、四肢それぞれについて評価しなければならない。
- 四肢の電流の参考レベルは、他の周波数範囲にはついては示されていない。
- 四肢の電流の参考レベルは、人体が大地面から電氣的に絶縁されていない場合のみ必要である。

と同じ空間的および時間的制約を用いて導出されなければなりません。基本制限および参考レベルについての総和の式は、以下に個別に示されています。ただし、実際的な適合性評価のためには、基本制限および参考レベルによる評価を組み合わせることができます。たとえば、6 GHz を超える周波数成分について、式 (2) の第 2 項を式 (4) の第 4 項で置き換えることができます。ガイドラインに適合するには、式 (1) ~ (7) のそれぞれにおいて、総和の値が 1 未満でなければなりません。

### 6 分間以上のばく露時間についての基本制限

全身平均の基本制限の実際の適用においては、以下のよう  
に SAR が加算されます。

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_{\text{BR}}} \leq 1 \quad (1)$$

ここで、 $\text{SAR}_i$  および  $\text{SAR}_{\text{BR}}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における全身平均 SAR レベルおよび表 2 で与えられる全身平均 SAR の基本制限。

局所 SAR および局所吸収電力密度の基本制限の実際の適用においては、以下のように値が加算されます。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=100 \text{ kHz}}^{6 \text{ GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_{\text{BR}}} \\ & + \sum_{i>6 \text{ GHz}}^{30 \text{ GHz}} \frac{S_{\text{ab},4 \text{ cm},i}}{S_{\text{ab},4 \text{ cm},\text{BR}}} \\ & + \sum_{i>30 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \frac{S_{\text{ab},4 \text{ cm},i}}{S_{\text{ab},4 \text{ cm},\text{BR}}} \right), \left( \frac{S_{\text{ab},1 \text{ cm},i}}{S_{\text{ab},1 \text{ cm},\text{BR}}} \right) \right\} \leq 1 \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 $\text{SAR}_i$  および  $\text{SAR}_{\text{BR}}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における局所 SAR レベルおよび表 2 で与えられる局所 SAR の基本制限。 $S_{\text{ab},4 \text{ cm},i}$  および  $S_{\text{ab},4 \text{ cm},\text{BR}}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  での吸収電力密度レベルおよび表 2 で与えられる平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  での吸収電力密度の基本制限。 $S_{\text{ab},1 \text{ cm},i}$  および  $S_{\text{ab},1 \text{ cm},\text{BR}}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  での吸収電力密度レベルおよび表 2 で与えられる平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  での吸収電力密度の基本制限。ここで、身体内部では、 $S_{\text{ab}}$  の項はゼロとして扱われる。また、体表面での SAR および  $S_{\text{ab}}$  の総和を評価する場合、SAR を平均する空間の中心は、 $x,y$  面は体表面 ( $z=0$ ) に平行で、 $z=-1.08 \text{ cm}$  (10 g 立方体の一辺の長さの約半分) の点  $(x,y,z)$ 、 $S_{\text{ab}}$  を平均する面の中心は点  $(x,y,0)$  と定義される。なお、式 (2) は人体のあらゆる領域で満たされなければならない。

### 6 分間以上のばく露時間についての参考レベル

全身平均の参考レベルの実際の適用においては、以下のように入射電界強度、入射磁界強度および入射電力密度の値が加算されます。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=100 \text{ kHz}}^{30 \text{ MHz}} \left\{ \left( \frac{E_{\text{inc},i}}{E_{\text{inc,RL},i}} \right)^2 + \left( \frac{H_{\text{inc},i}}{H_{\text{inc,RL},i}} \right)^2 \right\} \\ & + \sum_{i>30 \text{ MHz}}^{2 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \frac{E_{\text{inc},i}}{E_{\text{inc,RL},i}} \right)^2, \left( \frac{H_{\text{inc},i}}{H_{\text{inc,RL},i}} \right)^2, \left( \frac{S_{\text{inc},i}}{S_{\text{inc,RL},i}} \right) \right\} \\ & + \sum_{i>2 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \left( \frac{S_{\text{inc},i}}{S_{\text{inc,RL},i}} \right) \leq 1 \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 $E_{\text{inc},i}$  および  $E_{\text{inc,RL},i}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、全身平均入射電界強度および表 5 で与えられる全身平均入射電界強度の参考レベル。 $H_{\text{inc},i}$  および  $H_{\text{inc,RL},i}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、全身平均入射磁界強度および表 5 で与えられる全身平均入射磁界強度の参考レベル。 $S_{\text{inc},i}$  および  $S_{\text{inc,RL},i}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、全身平均入射電力密度および表 5 で与えられる全身平均入射電力密度の参考レベル。なお、リアクティブ近傍界領域には、第 2 項は適切でないので、式 (3) において用いられないことに注意してください。

局所の参考レベルの実際の適用においては、以下のように入射電界強度、入射磁界強度および入射電力密度の値が加算されます。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=100 \text{ kHz}}^{30 \text{ MHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \frac{E_{\text{inc},i}}{E_{\text{inc,RL},i}} \right)^2, \left( \frac{H_{\text{inc},i}}{H_{\text{inc,RL},i}} \right)^2 \right\} \\ & + \sum_{i>30 \text{ MHz}}^{2 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \frac{E_{\text{inc},i}}{E_{\text{inc,RL},i}} \right)^2, \left( \frac{H_{\text{inc},i}}{H_{\text{inc,RL},i}} \right)^2, \left( \frac{S_{\text{inc},i}}{S_{\text{inc,RL},i}} \right) \right\} \\ & + \sum_{i>2 \text{ GHz}}^{6 \text{ GHz}} \left( \frac{S_{\text{inc},i}}{S_{\text{inc,RL},i}} \right) \\ & + \sum_{i>6 \text{ GHz}}^{30 \text{ GHz}} \left( \frac{S_{\text{inc},4 \text{ cm},i}}{S_{\text{inc},4 \text{ cm},\text{RL},i}} \right) \\ & + \sum_{i>30 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \frac{S_{\text{inc},4 \text{ cm},i}}{S_{\text{inc},4 \text{ cm},\text{RL},i}} \right), \left( \frac{S_{\text{inc},1 \text{ cm},i}}{S_{\text{inc},1 \text{ cm},\text{RL},i}} \right) \right\} \leq 1 \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 $E_{\text{inc},i}$  および  $E_{\text{inc,RL},i}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、局所入射電界強度および表 6 で与えられる局所入射電界強度の参考レベル。 $H_{\text{inc},i}$  および  $H_{\text{inc,RL},i}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、局所入射磁界強度および表 6 で与えられる局所入射磁界強度の参考レベル。 $S_{\text{inc},i}$  および  $S_{\text{inc,RL},i}$  はそ

それぞれ、周波数  $i$  における、局所入射電力密度および表 6 で与えられる局所入射電力密度の参考レベル。6 GHz を超える周波数の場合、身体内部では  $S_{inc}$  の項はゼロとして扱われる。なお、式 (4) は人体のあらゆる領域で満たされなければならない。

四肢電流の参考レベルの実際の適用においては、以下のように四肢電流の値が加算されます。

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{110 \text{ MHz}} \left( \frac{I_i}{I_{RL}} \right)^2 \leq 1 \quad (5)$$

ここで、 $I_i$  は四肢電流の周波数  $i$  の成分。 $I_{RL}$  は、表 9 で与えられる四肢電流の参考レベル。110 MHz を超える周波数において、四肢周辺の局所 SAR への無視できない寄与がある場合、これについて、式 (2) または (4) の対応する項を組み合わせて検討する必要があります。

#### 6 分間未満のばく露時間についての基本制限

ばく露時間  $t$  が 6 分間未満の場合の局所基本制限の実際の適用においては、以下のように SAR、SA および吸収エネルギー密度の値が加算されます。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=100 \text{ kHz}}^{400 \text{ MHz}} \int_t \frac{SAR_i(t)}{360 \times SAR_{BR}} dt \\ & + \sum_{i>400 \text{ MHz}}^{6 \text{ GHz}} \frac{SA_i(t)}{SA_{BR}(t)} \\ & + \sum_{i>6 \text{ GHz}}^{30 \text{ GHz}} \frac{U_{ab,4 \text{ cm},i}(t)}{U_{ab,4 \text{ cm},BR}(t)} \\ & + \sum_{i>30 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \frac{U_{ab,4 \text{ cm},i}(t)}{U_{ab,4 \text{ cm},BR}(t)} \right), \left( \frac{U_{ab,1 \text{ cm},i}(t)}{U_{ab,1 \text{ cm},BR}(t)} \right) \right\} \leq 1 \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、 $SAR_i(t)$  および  $SAR_{BR}(t)$  <sup>※8</sup> はそれぞれ、ばく露時間  $t$  にわたる、周波数  $i$  での局所 SAR レベルおよび表 2 で与えられる局所 SAR の基本制限。 $SA_i(t)$  および  $SA_{BR}(t)$  はそれぞれ、ばく露時間  $t$  にわたる、周波数  $i$  での局所 SA レベルおよび表 3 で与えられる局所 SA の基本制限。 $U_{ab,4 \text{ cm},i}(t)$  および  $U_{ab,4 \text{ cm},BR}(t)$  はそれぞれ、ばく露時間  $t$  にわたる、周波数  $i$  における平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  の吸収電力密度<sup>※9</sup> レベルおよび表 3 で与えられる平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  の吸収電力密度<sup>※9</sup> の基本制限。 $U_{ab,1 \text{ cm},i}(t)$  および  $U_{ab,1 \text{ cm},BR}(t)$  はそれぞれ、ばく露時間  $t$  にわたる、周波数  $i$  における平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  の吸収電力密度<sup>※9</sup> レベルおよび表 3 で与えら

れる平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  の吸収電力密度<sup>※9</sup> の基本制限。身体内部において、 $U_{ab}$  の項はゼロとして扱われる。体表面での SAR および/または SA、および  $U_{ab}$  の総和を評価する場合、SAR および/または SA を平均する空間の中心は、 $x, y$  面は体表面 ( $z=0$ ) に平行で、 $z=-1.08 \text{ cm}$  (10 g 立方体の一辺の長さの約半分) の点 ( $x, y, z$ )、 $U_{ab}$  を平均する面の中心は点 ( $x, y, 0$ ) と定義される。なお、式 (6) は人体のあらゆる領域で満たされなければならない。さらに、短時間ばく露と長時間ばく露の同時ばく露の場合、この式において、SAR、SA、および  $U_{ab}$  は全て考慮されなければならない。

#### 6 分間未満のばく露時間についての参考レベル

ばく露時間  $t$  が 6 分間未満の場合の局所参考レベルの実際の適用においては、以下のように入射電界強度、入射磁界強度、入射電力密度および入射エネルギー密度の値が加算されます。

$$\begin{aligned} & \sum_{i>100 \text{ kHz}}^{30 \text{ MHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \int_t \frac{E_{inc,i}^2(t)}{360 \times E_{inc,RL,i}^2} dt \right), \left( \int_t \frac{H_{inc,i}^2(t)}{360 \times H_{inc,RL,i}^2} dt \right) \right\} \\ & + \sum_{i>30 \text{ MHz}}^{400 \text{ MHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \int_t \frac{E_{inc,i}^2(t)}{360 \times E_{inc,RL,i}^2} dt \right), \left( \int_t \frac{H_{inc,i}^2(t)}{360 \times H_{inc,RL,i}^2} dt \right), \left( \int_t \frac{S_{inc,i}(t)}{360 \times S_{inc,RL,i}} dt \right) \right\} \\ & + \sum_{i>400 \text{ MHz}}^{6 \text{ GHz}} \frac{U_{inc,i}(t)}{U_{inc,RL,i}(t)} + \sum_{i=6 \text{ GHz}}^{30 \text{ GHz}} \frac{U_{inc,4 \text{ cm},i}(t)}{U_{inc,4 \text{ cm},RL,i}(t)} \\ & + \sum_{i>30 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \text{MAX} \left\{ \left( \frac{U_{inc,4 \text{ cm},i}(t)}{U_{inc,4 \text{ cm},RL,i}(t)} \right), \left( \frac{U_{inc,1 \text{ cm},i}(t)}{U_{inc,1 \text{ cm},RL,i}(t)} \right) \right\} \leq 1 \quad (7) \quad \text{※10} \end{aligned}$$

ここで、 $E_{inc,i}(t)$  および  $E_{inc,RL,i}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、ばく露時間  $t$  にわたる局所入射電界強度および表 6 で与えられる局所入射電界強度の参考レベル。 $H_{inc,i}(t)$  および  $H_{inc,RL,i}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、ばく露時間  $t$  にわたる局所入射磁界強度および表 6 で与えられる局所入射磁界強度の参考レベル。 $S_{inc,i}(t)$  および  $S_{inc,RL,i}$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、ばく露時間  $t$  にわたる局所入射電力密度および表 6 で与えられる局所入射電力密度の参考レベル。 $U_{inc,i}(t)$  および  $U_{inc,RL,i}(t)$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、ばく露時間  $t$  にわたる入射エネルギー密度レベルおよび表 7 で与えられる入射エネルギー密度の参考レベル。 $U_{inc,4 \text{ cm},i}(t)$  および  $U_{inc,4 \text{ cm},RL,i}(t)$  はそれぞれ、周波数  $i$  にお

#### 【電磁界情報センター脚注】

※9：6 分間未満のばく露時間についての基本制限において、原文では absorbed power density となっているものの、absorbed energy density と思われるので、「吸収電力密度」は「吸収エネルギー密度」と理解される。

※10：数式 (7) の第 4 項  $\Sigma$  の下限値  $i=6 \text{ GHz}$  は  $i>6 \text{ GHz}$  と思われる。

#### 【電磁界情報センター脚注】

※8： $SAR_{BR}(t)$  は  $SAR_{BR}$  と思われる。

る、ばく露時間  $t$  にわたる、平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  での入射エネルギー密度レベルおよび表 7 で与えられる平均化面積  $4 \text{ cm}^2$  での入射エネルギー密度の参考レベル。  $U_{ab,1cm,i}(t)$  および  $U_{ab,1cm,RL}(t)$  はそれぞれ、周波数  $i$  における、ばく露時間  $t$  にわたる、平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  での入射エネルギー密度レベルおよび表 7 で与えられる平均化面積  $1 \text{ cm}^2$  での入射エネルギー密度の参考レベル。なお身体内部では  $U_{inc}$  の項はゼロとして扱われる。さらに、式 (7) は人体のあらゆる領域で満たされなければならない。

### 接触電流に関するガイダンス

約 100 kHz から 110 MHz までの範囲において、人体が電界または磁界内に置かれた導電性物体に触れると接触電流が発生し、物体と人体の間に電流を生じさせます。高レベルでは、この電流は、電磁界の周波数に応じて、神経刺激または痛み（および潜在的な組織損傷）をもたらす可能性があります (Kavet et al. 2014; Tell and Tell 2018)。これは、30 MHz 未満および 87.5 ~ 108 MHz の放送用高出力アンテナの付近に設置される大型の高周波送信機の周囲など、痛みおよび熱傷が関係する事故の散発的な報告がある場所において特に懸念されます。接触電流は接触領域で発生し、接触領域が小さければ小さいほど、より大きな生物学的影響が生じます（電流量が同じ場合）。これは、電流密度 ( $\text{A m}^{-2}$ ) が大きくなり、その結果として体内の局所 SAR が大きくなるためです。

接触電流によるばく露は間接的であり、電界を変換するために介在する導電性物体が必要です。このため、接触電流ばく露は、行動要因（例えば、つかみ接触とタッチ接触の違い）および環境条件（例えば、導電性物体の構成）の両方により予測不能になるため、ICNIRP がそれを防護するためにできることは少なくなります。特に重要なのは、人体を貫通する電流密度および人体に吸収される電流密度の不均一性です。この不均一の原因は、接触面積だけではなく、電流が貫通する組織の導電率、密度、熱容量などです。そして最も重要な原因は、導電性物体と接触している組織との間の抵抗です (Tell and Tell 2018)。

したがって、本ガイドラインは、接触電流の制限を提供するのではなく、高出力の高周波電磁界を送信する責任者が、接触電流、その潜在的なハザード、およびそのようなハザードの軽減方法を理解するのを支援するための「ガイダンス」を提供します。明確化のために、ICNIRP はここで、高出力の高周波電磁界を、その発生源において 100 kHz ~ 100 MHz の周波数範囲で  $100 \text{ V m}^{-1}$  を超えるものと定義

します。

接触電流と健康との関係に関する入手可能な研究報告は限られています。最低レベルの接触電流で生じる健康影響である痛みについての主なデータは Chatterjee ら (1986) から得られます。この研究では、大規模な成人コホートにおいて、感覚および痛みを、接触電流の周波数および接触タイプ（つかみ接触とタッチ接触）の関数として評価しました。可逆的で痛みを伴う熱感覚は、試験された 100 kHz から 10 MHz までの範囲で、平均で 46 mA の誘導電流閾値で発生することが報告されました（タッチ接触の場合）。痛みが報告されるには最小でも 10 秒間のばく露が必要でした。この周波数範囲では、閾値に周波数依存性はなく、つかみ接触の場合の閾値はタッチ接触のものよりかなり高くなりました。

ただし、報告された閾値は参加者全体の平均であり、報告された閾値の標準偏差を考慮すると、ICNIRP はコホート全体での最低の閾値はおそらく約 20 mA であろうと考えます。さらに、そのデータからのモデリングでは、小児はより低い閾値を持つであろうこと示唆されます。つまり、Chatterjee ら (1986) および Chan ら (2013) から外挿すると、小児の最低閾値は 10 mA までの範囲にあると予想されます。傷害を引き起こす可能性のある接触電流の上限周波数も不明です。ICNIRP (1998) ガイドラインは、100 kHz から 110 MHz までの範囲で、接触電流を考慮するための参考レベルを規定しましたが、Chatterjee ら (1986) は 10 MHz までしか試験しておらず、Tell と Tell (2018) は、約 1 MHz から 28 MHz までにおいて、接触電流への感度が大幅に低下することを報告しました（そして、それより高い周波数は評価しませんでした）。それゆえ、100 kHz から 110 MHz までの範囲全体にわたって、接触電流が健康ハザードであるのかは明確ではありません。

ICNIRP は、潜在的な接触電流シナリオによるハザードの可能性および特質を判断するに当たり、上述の情報が 100 kHz から 110 MHz までの周波数範囲の接触電流に関連するリスクを管理する責任者にとって重要であると考えます。また、これは、接触電流が生じる可能性のある高周波電磁界環境への人の立ち入りに関連するリスクと便益の分析に役立つ可能性があります。上述の情報は、労働者に導電性物体との接触の回避を訓練することにより接触電流のハザードのリスクを最小化できること、しかし、接触が余儀なくされる場合には、以下の要因が重要であることを示唆します。すなわち、大きな金属製の物体は大地に

接続すること（接地）。労働者は、絶縁材（例えば、高周波防護手袋）を介して接触すること。労働者は、「驚愕」が生じる可能性も含め、リスクに注意を払うこと。接触により驚愕することが、生体組織への電流の直接的な影響とは別のかたちで（例えば、びっくりして事故が誘発されることにより）、安全性に影響を及ぼす可能性があります。

### 職業ばく露におけるリスク軽減に関する検討

職域での高周波電磁界ばく露を正当化するには、適切な衛生安全プログラムが必要です。そのようなプログラムの一部として、高周波電磁界ばく露に起因する生物学的影響が高周波電磁界とは関係のない他の生物学的影響につけ加わるかどうかを考慮することも含め、高周波電磁界ばく露の潜在的な影響への理解が必要です。たとえば、激しい身体活動など、電磁界とは関係のない要因により深部体温がすでに上昇している場合には、高周波電磁界による温度上昇を他の熱発生源と合わせて考慮する必要があります。同様に、その人が体温調節能力に影響を与える可能性のある病気や体調であるか、または環境的に熱の放散を妨げるものが存在するかを考慮することも重要です。

全身 SAR の制限が防護の対象とする重要な健康影響は、心臓血管系への負荷増加（深部体温上昇を抑えるために心臓血管系に課される仕事のため）、および温度上昇が安全レベルに抑えられない場合に生じるカスケード的な機能的変化です。この機能的変化は、組織（脳、心臓、腎臓を含む）に可逆的および不可逆的な影響をもたらす可能性があります。このような影響が生じるには、通常、深部体温が 40 °C を超える（または正常体温と比較して約 3 °C 上昇する）必要があります。それゆえ、高周波による温度上昇が 1 °C を超える可能性を極めて低くするために大きな低減係数が用いられました（正常体温条件下で、深部体温上昇が 0.1 °C 未満になるように職業ばく露の制限は設定されています）。しかし、深部体温に影響を与える可能性のある他の要因が存在する場合は注意しなければなりません。このような要因には、高い環境温度、高い身体活動、および通常の体温調節を妨げるもの（断熱性の衣服の着用または特定の病状など）が含まれます。他の発生源から相当大きな熱が予想される場合は、労働者が自分の深部体温を検証する適切な手段を持つことが推奨されます（詳細なガイダンスについては ACGIH 2017 を参照）。

局所の基本制限が防護の対象とする重要な健康影響は、痛みおよび組織の熱的損傷です。皮膚や四肢などのタイプ 1 組織での痛み（侵害受容器の刺激による）および組織損

傷（タンパク質の変性による）が生じるには、通常、約 41 °C を超える温度が必要です。四肢の職業ばく露が、局所温度を 2.5 °C 以上上昇させることはありそうもなく、また、四肢温度は通常 31~36 °C 未満であることを考えると、四肢の高周波電磁界ばく露それ自体が、痛みまたは組織損傷のどちらかを生じさせる可能性はなさそうです。タイプ 2 組織、例えば「頭部および胴体」の領域内のもの（表層組織を除く）でも、41 °C 未満の温度で傷害が起きることはありません。「頭部および胴体」の組織の職業ばく露が、温度を 1 °C 以上上昇させることはまずありえず、その深部体温は通常 37~38 °C 程度であることを考えれば、高周波電磁界ばく露がタイプ 2 の組織または組織機能を傷害するほど十分に大きな温度上昇につながる可能性はありそうもありません。

しかしながら、労働者が、深部体温に関連して上記で説明したような高周波電磁界ばく露の熱発生源に追加される他の熱発生源からのばく露を受ける場合は注意しなければなりません。体表面ばく露のシナリオでは、局所的な熱による不快感および痛みは、潜在的な組織の熱的損傷の重要な指標になります。それゆえ、他の熱的ストレスが存在する状況ではとりわけ、労働者が高周波電磁界ばく露は熱負荷の一因となる可能性があることを理解すること、そして労働者が潜在的な傷害を軽減するための適切な行動をとれるようにしておくことが重要です。

謝辞 - 共同作者: Rodney Croft, ICNIRP and Australian Centre for Electromagnetic bioeffects Research, Illawarra Health & Medical Research Institute, University of Wollongong, Australia; Maria Feychting, ICNIRP and Karolinska Institutet, Sweden; Adèle C Green, ICNIRP and QIMR Berghofer Medical Research Institute, Brisbane, Australia and CRUK Manchester Institute, University of Manchester, Manchester, UK; Akimasa Hirata, ICNIRP and Nagoya Institute of Technology, Japan; Guglielmo d'Inzeo, ICNIRP and La Sapienza University, Rome, Italy; Kari Jokela †, ICNIRP SEG and STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland; Sarah Loughran, ICNIRP SEG and Australian Centre for Electromagnetic Bioeffects Research, Illawarra Health & Medical Research Institute, University of Wollongong, Australia; Carmela Marino, ICNIRP and Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA), Italy; Sharon Miller, ICNIRP; Gunnhild Oftedal, ICNIRP and Norwegian University of Science and Technology (NTNU); Tsutomu Okuno, ICNIRP; Eric van Rongen, ICNIRP and Health Council, The Netherlands; Martin Rössli, ICNIRP and Swiss Tropical and Public Health Institute, Switzerland; Zenon Sienkiewicz, ICNIRP; John Tattersall,

ICNIRP SEG; Soichi Watanabe, ICNIRP and National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Japan.

この公表文書に共同作業者が表明した見解は、彼らが専門職として所属している組織の見解または方針を必ずしも反映するものではありません。商業製品、それらの製造元、またはそれら利用について、ここに報告されている資料に関連して言及があったとしても、それを、ICNIRP または ICNIRP メンバーの所属組織がその製品を実際または暗黙的に承認したと解釈すべきではありません。

ICNIRP は、the German Federal Ministry for the Environment (BMU), the European Union Programme for Employment and Social Innovation “EaSI” (2014-2020), the International Radiation Protection Association (IRPA), the Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), and the New Zealand Ministry of Health から受けた支援に深く感謝します。

EU からの資金に関する詳細は、以下を参照してください：  
<http://ec.europa.eu/social/easi>. この公表文書に含まれる情報は、必ずしも欧州委員会または他の資金提供者の公式の立場を反映するものではありません。ICNIRP が受けた支援に関するすべての情報は、[www.icnirp.org](http://www.icnirp.org) で入手可能です。

本ガイドラインは、ICNIRP の主委員会の委員および ICNIRP の RF プロジェクトグループの専門家によって作成されました：Rodney Croft (座長), Maria Feychting, Akimasa Hirata, Guglielmo d’Inzeo, Kari Jokela†, Sarah Loughran, Carmela Marino, Gunnhild Oftedal, Tsutomu Okuno, Eric van Rongen, Martin Röösli, Zenon Sienkiewicz, John Tattersall, and Soichi Watanabe.

本ガイドラインは、2018 年に公開協議を求めて提出され、2019 年 8 月に ICNIRP に承認されました。承認時点における ICNIRP の主委員会の委員は以下の通りです：Eric van Rongen (座長), Rodney Croft, Maria Feychting, Adèle C Green, Akimasa Hirata, Guglielmo d’Inzeo, Carmela Marino, Shron Miller, Gunnhild Oftedal, Tsutomu Okuno, Martin Röösli, and Soichi Watanabe.

## 参考文献

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. TLVs and BEIs: based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: ACGIH; 2017.

Arens E, Zhang H. Skin’s role in human thermoregulation and comfort. In: Pann N, Gibson P, eds. Thermal and moisture transport in fibrous materials. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd; 2006: 560–602.

Aschoff J, Wever R. Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen. *Naturwissenschaften* 20:477–487; 1958 (in German).

Brockow T, Wagner A, Franke A, Offenbacher M, Resch KL. A randomized controlled trial on the effectiveness of mild water-filtered near infrared whole-body hyperthermia as an adjunct to a standard multimodal rehabilitation in the treatment of fibromyalgia. *Clinical J Pain* 23:67–75; 2007.

Chan KH, Hattori J, Laakso I, Hirata A, Taki M. Computational dosimetry for grounded and ungrounded human models due to contact current. *Phys Med Biol* 58:5153–5172; 2013.

Chatterjee I, Wu D, Gandhi OP. Human body impedance and

threshold currents for perception and pain for contact hazards analysis in the VLF-MF band. *IEEE Trans Biomed Engineer* 33:486–494; 1986.

Cheshire WP Jr. Thermoregulatory disorders and illness related to heat and cold stress. *Autonomic Neurosci: Basic and Clinical* 196:91–104; 2016.

Defrin R, Shachal-Shiffer M, Hadgadg M, Peretz C. Quantitative somatosensory testing of warm and heat-pain thresholds: the effect of body region and testing method. *Clinical J Pain* 22: 130–136; 2006.

Dewhirst MW, Viglianti BL, Lora-Michiels M, Hanson M, Hopes PJ. Basic principles of thermal dosimetry and thermal thresholds for tissue damage from hyperthermia. *Internat J Hyperthermia* 19:267–294; 2003.

Dimbylow P. The relationship between localised SAR in the arm and wrist current. *Radiat Protect Dosim* 95:177–179; 2001.

DuBois EF. The temperature of the human body in health and disease. In: *Temperature: its measurement and control in science and industry*. New York: American Institute of Physics, Reinhold Publishing Corporation; 1941: 24–40.

Edwards MJ, Saunders RD, Shiota K. Effects of heat on embryos and fetuses. *Internat J Hyperthermia* 19:295–324; 2003.

Flintoft M, Robinson MP, Melia GCR, Marvin AC, Dawson JF. Average absorption cross-section of the human body measured at 1–12 GHz in a reverberant chamber: results of a human volunteer study. *Phys Med Biol* 59:3297–3317; 2014.

Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q. Thermal modeling for the next generation of radiofrequency exposure limits: commentary. *Health Phys* 113:41–53; 2017.

Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q. Thermal response of human skin to microwave energy: a critical review. *Health Phys* 111:528–541; 2016.

Funahashi D, Hirata A, Kodera S, Foster KR. Area-averaged transmitted power density at skin surface as metric to estimate surface temperature elevation. *IEEE Access* 6:77665–77674; 2018.

Hashimoto Y, Hirata A, Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster KR. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. *Phys Med Biol* 62:3124–3138; 2017. [www.health-physics.com](http://www.health-physics.com)

Hirata A, Fujiwara O. The correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in the human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6 GHz. *Phys Med Biol* 54:7171–7182; 2009.

Hirata A, Laakso I, Oizumi T, Hanatani R, Chan KH, Wiart J. The relationship between specific absorption rate and temperature elevation in anatomically based human body models for plane wave exposure from 30 MHz to 6 GHz. *Phys Med Biol* 58:903–921; 2013.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494–522; 1998.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP Statement on the “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”. *Health Phys* 97:257–58; 2009.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys* 99:818–836; 2010.

IEC. Medical electrical equipment—part 1–2: general requirements for basic safety and essential performance—collateral standard: electromagnetic disturbances—requirements and

- tests. Geneva: IEC; 60601-1-2:2014; 2014.
- ISO. Active implantable medical devices—electromagnetic compatibility—EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers, implantable cardioverter defibrillators and cardiac resynchronization devices. Geneva: ISO; 14117:2012; 2012.
- Joshi RP, Schoenbach KH. Bioelectric effects of intense ultrashort pulses. *Critical Rev Biomed Engineer* 38:255–304; 2010.
- Juutilainen J, Höytö, Kumlin T, Naarala J. Review of possible modulation-dependent biological effects of radiofrequency fields, *Bioelectromagnetics* 32(7):511–34; 2011.
- Kavet R, Tell RA, Olsen RG. Radiofrequency contact currents: sensory responses and dosimetry. *Radiat Protect Dosim* 162:268–279; 2014.
- Kodera S, Hirata A, Funahashi D, Watanabe S, Jokela K, Croft RJ. Temperature rise for brief radio-frequency exposure below 6 GHz. *IEEE Access* 6:65737–65746; 2018.
- Kowalczyk C, Yarwood G, Blackwell R, Priestner M, Sienkiewicz Z, Bouffler S, Ahmed I, Abd-Alhameed R, Excell P, Hodzic V, Davis C, Gammon R, Balzano Q. Absence of nonlinear responses in cells and tissues exposed to RF energy at mobile phone frequencies using a doubly resonant cavity. *Bioelectromagnetics* 31(7):556–565; 2010.
- Laakso I, Morimoto R, Heinonen J, Jokela K, Hirata A. Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz. *Phys Med Biol* 62:6980–6992; 2017.
- Mir LM. Application of electroporation gene therapy: past, current, and future. *Meth Molecular Biol* 423:3–17; 2008.
- Mieusset R, Bujan L. Review: testicular heating and its possible contributions to male infertility. *Internat J Androl* 18:169–184; 1995.
- Morimoto R, Hirata A, Laakso I, Ziskin M, Foster R. Time constants for elevation in human models exposed to dipole antenna and beams in the frequency range from 1 to 30 GHz. *Phys Med Biol* 62:1676–1699; 2017.
- Nagaoka T, Watanabe S. Development of voxel models adjusted to ICRP reference children and their whole-body averaged SARs for whole-body exposure to electromagnetic fields from 10 MHz to 6 GHz. *IEEE Access*, in press.
- Nguyen THP, Shamis Y, Croft RJ, Wood A, McIntosh RL, Crawford RJ, Ivanova EP. 18 GHz electromagnetic field induces permeability of Gram-positive cocci. *Nature: Scientific Reports* 16:10980; 2015.
- Ramsey JD, Buford C, Beshir M, Jensen RC. Effects of workplace thermal conditions on safe work behavior. *J Safety Res* 14:105–114; 1983.
- Reilly T, Atkinson G, Edwards B, Waterhouse J, Farrelly K, Fairhurst E. Diurnal variation in temperature, mental and physical performance, and tasks specifically related to football (soc-cer). *Chronobiol Internat* 24:507–519; 2007.
- Sasaki K, Mizuno M, Wake K, Watanabe S. Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz. *Phys Med Biol* 62:6993–7010; 2017.
- Saunders RD, Jefferys JG. A neurobiological basis for ELF guidelines. *Health Phys* 92:596–603; 2007.
- Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). Luxembourg: European Commission; 2015.
- Shafahi M, Vafai K. Human eye response to thermal disturbances. *J Heat Transfer* 133:011009–011009-7; 2011.
- SSM. Recent research on EMF and health risk. Tenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten; SSM Report 19; 2015.
- SSM. Recent research on EMF and health risk. Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten; SSM Report 15; 2016.
- SSM. Recent research on EMF and health risk. Twelfth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten; SSM Report 09; 2018.
- Tell RA, Tell CA. Perspectives on setting limits for RF contact currents: a commentary. *Biomed Engineer Online* 17:2; 2018.
- Teunissen LP, Grabowski A, Kram R. Effects of independently altering body weight and body mass on the metabolic cost of running. *J Experimental Biol* 210:4418–4427; 2007.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Electro-magnetic fields (300 Hz to 300 GHz). Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria 137; 1993.
- Van den Heuvel AMJ, Haberley BJ, Hoyle DJR, Taylor NAS, Croft RJ. The independent influences of heat strain and dehydration upon cognition. *Euro J Appl Physiol* 117:1025–1037; 2017.
- Van Rhooen GC, Samaras T, Yarmolenko PS, Dewhirst MW, Neufeld E, Kuster N. CEM43°C thermal dose thresholds: a potential guide for magnetic resonance radiofrequency exposure levels? *Euro Radiol* 23:2215–2227; 2013.
- Walters TJ, Blick DW, Johnson LR, Adair ER, Foster KR. Heating and pain sensation produced in human skin by millimetre waves: comparison to a simple thermal model. *Health Phys* 78:259–267; 2000.
- Weyand PG, Smith BR, Sandell RF. Assessing the metabolic cost of walking: the influence of baseline subtractions. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Minneapolis, MN: IEEE; 2009: 6878–6881.
- World Health Organization. Constitution of the World Health Organization 1948. Available at [https://www.who.int/governance/eb/who\\_constitution\\_en.pdf](https://www.who.int/governance/eb/who_constitution_en.pdf). Accessed 1 April 2019.
- World Health Organization. Radiofrequency fields. Geneva: WHO; Public Consultation Document; 2014.
- Yarmolenko PS, Moon EJ, Landon C, Manzoor A, Hochman DW, Viglianti BL, Dewhirst MW. Thresholds for thermal damage to normal tissues: an update. *International J Hyperthermia* 27: 320–343; 2011.
- Ziskin MC, Morrissey J. Thermal thresholds for teratogenicity, reproduction, and development. *International J Hyperthermia* 27:373–387; 2011.

## 附属書 A：ドシメトリに関する背景情報

### 序論

この附属書は、本ガイドラインの基礎をなす高周波ばく露の制限の導出に直接関係するドシメトリについて補足的知識を提供するものです。本文で説明されているように、最も低い高周波ばく露レベルで生じる、運用上の健康への悪影響は、加熱が原因で生じるものです（神経刺激については、ICNIRP 2010 低周波ガイドラインで説明されています）。したがって、この附属書では、温度上昇を本文で説明されている健康への悪影響の運用上の閾値までに制限することに関して、用いられる物理量の選択、これら制限の導出方法（関連する場合には、付随する不確かさを含めて）、温度上昇の記述で用いられる空間的および時間的平均の算出法、そして基本制限および参考レベルの導出（関連する場合には、付随する不確かさを含めて）について詳述します。考慮される健康への悪影響の運用上の閾値は、全身平均ばく露においては深部体温の 1°C 上昇、「タイプ 1」および「タイプ 2」の身体組織<sup>7</sup>においては、それぞれ局所的な領域にわたる局所温度の 5°C および 2°C 上昇です。

### 物理量およびその単位

基本的な物理量、例えば、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{I}$ 、 $T$ 、および  $t$  の詳細な説明は他でなされています（ICNIRP 1985、2009a、2009、2010 を参照）。このセクションでは、ガイドラインに用いられるその他の物理量（すなわち、SAR、SA、 $S_{inc}$ 、 $S_{ab}$ 、 $S_{eq}$ 、 $U_{inc}$ 、 $U_{ab}$ 、および  $U_{eq}$ ）について詳しく説明します。ベクトル量は太字で表わされます。

高周波の基本制限および参考レベルは、ある健康への悪影響を引き起こす可能性のある最も低い高周波ばく露レベルに基づくことに注意してください。健康への影響は、ばく露の結果生じた温度上昇に関連するため、高周波ばく露のエネルギーまたは電力により決定されます。したがって、時間または空間積分、または複数の周波数の総和が適用される場合には、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 、および  $\mathbf{I}$  の 2 乗値が考慮されます。次の式は、体積  $V$  全体での  $\mathbf{E}$  の空間平均の例です。

$$E_{spatial\ average} = \sqrt{\frac{1}{V} \int_V |\mathbf{E}|^2 dv} \quad (8)$$

ここで、 $V$  は積分する体積を表します（ $V = \int_V dv$ ）。

<sup>7</sup> タイプ 1 組織は、上腕、前腕、手、太もも、脚、足、耳介のすべての組織、眼の角膜・前房・虹彩、表皮・真皮組織、脂肪組織、筋組織、骨組織を指す。タイプ 2 組織は、タイプ 1 組織として定義されたものを除く、頭部、眼、腹部、背部、胸部、骨盤部のすべての組織を指す。

### 比エネルギー吸収率（SAR）および比エネルギー吸収量（SA）

SAR は、組織の質量密度  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) の体積要素  $\delta V$  に含まれる質量増分  $\delta m$  において吸収または散逸される熱によるエネルギー消費の増分  $\delta W$  の時間微分として定義され、キログラムあたりのワット ( $\text{W kg}^{-1}$ ) で表されます。

$$\text{SAR} = \frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{\delta W}{\delta m} \right) = \frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{\delta W}{\rho \delta V} \right) \quad (9)$$

生体組織または臓器の誘電特性は一般的に損失性のある誘電材料とみなされ、磁気的には、比透磁率 ( $\mu_r$ ) が 1 であることから透明とみなされます。したがって、SAR は以下の式で導かれます。

$$\text{SAR} = \frac{\sigma |\mathbf{E}|^2}{\rho} \quad (10)$$

ここで、 $\sigma$  は導電率 ( $\text{S m}^{-1}$ )、 $\mathbf{E}$  は体内電界（二乗平均平方根（rms）値）を表します。

温度上昇は SAR と強く関連します。伝導などのプロセスによる熱損失が大きくないとする条件下では、SAR と温度上昇は以下のような直接的関係になります。

$$\text{SAR} = C \frac{dT}{dt} \quad (11)$$

ここで、 $C$  は組織の比熱容量 ( $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )、 $T$  は組織の温度 ( $^\circ\text{C}$ )、 $t$  はばく露時間 (s) を表します。現実的なケースの多くでは、ばく露中に大量の熱エネルギーは急速に拡散します。したがって、式 (11) を広く一般的に人体ばく露シナリオに適用することはできません。ただし、式 (11) は、熱損失がそれほど大きくない場合の短時間のばく露シナリオには有用です。

本ガイドラインでは、基本制限に SAR を用います。基本制限の SAR は空間平均値として、すなわち、全身平均 SAR および SAR<sub>10g</sub> で定義されます。全身平均 SAR は、全身に吸収された総電力を全身の質量で割ったものです。

$$\text{Whole-body average SAR} = \frac{(\text{Total power})_{WB}}{(\text{Total mass})_{WB}} = \frac{\int_{WB} \sigma |\mathbf{E}|^2 dv}{\int_{WB} \rho dv} \quad (12)$$

SAR<sub>10g</sub> は、組織 10 g の立方体に吸収された総電力を 10 g で割ったものと定義されます（「空間平均規定の検討」のセクション参照）。

$$\text{SAR}_{10g} = \frac{(\text{Total power})_{V_{10g}}}{(\text{Total mass})_{V_{10g}}} = \frac{\int_{V_{10g}} \sigma |\mathbf{E}|^2 dv}{\int_{V_{10g}} \rho dv} \quad (13)$$

組織 10 g の体積 ( $V_{10g}$ ) は、組織が水と同じ質量密度すなわち  $1000 \text{ kg m}^{-3}$  をもつと仮定すると、約  $2.15 \text{ cm} \times 2.15 \text{ cm} \times 2.15 \text{ cm}$  の立方体と計算されます。

SA ( $\text{J m}^{-3}$ ) は、SAR の時間  $t_1$  から  $t_2$  までの時間積分



として導かれます。

$$SA = \int_{t_1}^{t_2} SAR(t) dt \quad (14)$$

### 吸収電力密度 ( $S_{ab}$ ) および吸収エネルギー密度 ( $U_{ab}$ )

6 GHz を超える周波数において、 $SAR_{10g}$  はもはや局所温度上昇の適切な代替指標ではなくなります。したがって、そのような周波数では、高周波の電力およびエネルギーの吸収が身体の極めて表層の領域にほぼ限定されるため、基本制限には吸収電力密度および吸収エネルギー密度が導入されます。例えば、6 GHz および 300 GHz での浸透深さはそれぞれ、約 8.1 mm および 0.23 mm です (表 10 参照)。吸収電力密度 ( $W m^{-2}$ ) は体表面で定義されます。

$$S_{ab} = \iint_A dx dy \int_0^{Z_{max}} \rho(x, y, z) \cdot SAR(x, y, z) dz / A \quad (15)$$

ここで、体表面は  $z=0$ 、 $A$  は平均化面積 ( $m^2$ )、 $Z_{max}$  はその領域における身体の深さ (この場合、 $Z_{max}$  は浸透深さに比べはるかに深く、 $Z_{max}$  の代わりに無限大も使用可) を表します。熱拡散を考慮して、2 cm × 2 cm の正方形の領域 (6 - 300 GHz の場合) を、吸収電力密度および吸収エネルギー密度の基本制限においての平均化面積に用います。

より厳密に吸収電力密度を定式化する場合、ポインティングベクトル ( $S$ ) を用います。

$$S_{ab} = \iint_A \text{Re}[S] \cdot ds / A = \iint_A \text{Re}[E \times H^*] \cdot ds / A \quad (16)$$

ここで、 $\text{Re}[X]$  および  $X^*$  はそれぞれ、複素数の値“ $X$ ”の実部および複素共役、 $ds$  は体表面の積分領域  $A$  に法線方向の積分変数ベクトルを表します。

$SAR$  と  $SA$  の関係と同様に、吸収エネルギー密度 ( $J m^{-2}$ ) は吸収電力密度の時間積分として導かれます。

$$U_{ab} = \int_{t_1}^{t_2} S_{ab}(t) dt \quad (17)$$

### 入射電力密度 ( $S_{inc}$ ) および入射エネルギー密度 ( $U_{inc}$ )

ガイドラインの参考レベルには入射電力密度および入射エネルギー密度を用います。入射電力密度は、複素ポインティングベクトルの大きさとして定義されます。

$$S_{inc} = |E \times H^*| \quad (18)$$

遠方界および電磁的横波 (TEM 波) モードの平面波の場合、入射電力密度は以下のように導かれます。

$$S_{inc} = \frac{|E|^2}{Z_0} = Z_0 |H|^2 \quad (19)$$

ここで、 $Z_0$  は自由空間の特性インピーダンス (すなわち、377Ω) です。上記の式は、平面波等価入射電力密度 ( $S_{eq}$ ) の

評価にも用いられます。

また、 $S_{inc}$  は、反射係数  $\Gamma$  を用いて  $S_{ab}$  と以下のような関係になります。

$$S_{ab} = (1 - |\Gamma|^2) S_{inc} \quad (20)$$

反射係数  $\Gamma$  は、組織の誘電特性、体表面の形状、入射角、および偏波によって導かれます。

$SAR$  と  $SA$  の関係と同様に、入射エネルギー密度は入射電力密度の時間  $t_1$  から  $t_2$  までの時間積分として導かれます。

$$U_{inc} = \int_{t_1}^{t_2} S_{inc}(t) dt \quad (21)$$

近傍界ばく露シナリオでは、ポインティングベクトルの成分は実数の値ではなく、複素数の値です。そのような場合、高周波の安全性に関連する入射電力密度を計算するために、ポインティングベクトル成分の詳細な吟味が必要になる場合があります。

## 関連する生体物理学的メカニズム

### 全身平均ばく露の詳細説明

**関連する物理量** 全身ばく露による健康への影響は、深部体温の上昇に関連します。しかしながら、人体の高周波電磁界ばく露に基づいて深部体温の上昇を予測することは困難です。

深部体温は、全身の熱エネルギー平衡に依存して決まるものです。人体に吸収された高周波エネルギーは血流を介して体深部に伝達され、これが深部体温を一定に保とうとする体温調節反応を活性化します (Adair and Black 2003)。このことは、エネルギー平衡の速さが深部体温のダイナミクスにとって最も重要であることを意味します。したがって、全身平均  $SAR$  が、深部体温上昇に関連する物理量として用いられます。

総エネルギー吸収と体温の関係は、一般的には周波数に依存しません。ただし、数 GHz を超える周波数では、対流または輻射、また皮膚の血管拡張の影響を介して、体表面から空気への熱の伝達が大きくなるため、これより低い周波数での同レベルの全身平均  $SAR$  ほどには深部体温は上昇しません (Hirata et al. 2013)。数 GHz を超える周波数での電力吸収は皮膚表面組織内に限定されて生じ、そこでの局所温度上昇の方が深部体温上昇より顕著になります (Laakso and Hirata 2011)。その一方で、赤外線 (IR) のばく露が深部体温の顕著な上昇を引き起こすことも報告されました (Brockow et al. 2007)。赤外線は、高周波電磁界と可視光の間の周波数を持つ電磁波です。このことは、赤外線の浸透深さは非常に小さい、もしくは GHz 帯の高域

の高周波電磁界（またはミリ波）と同程度であるにもかかわらず、赤外線ばく露には深部体温を顕著に上昇させる可能性があることを意味します。したがって、安全側に立つという理由から、ICNIRPは6 GHzを超える周波数と6 GHz以下の周波数の両方において、全身平均の基本制限を同じ値に設定しました。このことは、高い周波数帯と低い周波数帯の両方にまたがった複数の周波数ばく露の場合にとりわけ重要です。それゆえ、適用可能な周波数は、本ガイドラインで考慮される周波数範囲全体と定義されます。

**時間平均の検討** 深部体温についての時定数の定義は明確ではありません。しかしながら、時定数の合理的な推定値を得るために単純化された条件をおけば（たとえば、1次遅れを仮定すること）、温度ダイナミクスは次のように記述できます。

$$T(t) = T_0 + (T_\infty - T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (22)$$

ここで、 $T$ は時間 $t$ の関数としての温度、 $T_0$ および $T_\infty$ はそれぞれ、初期温度および定常状態の温度、 $\tau$ は時定数を表します。ここでの検討の場合、時定数は初期温度から定常状態の温度までの温度上昇全体の63%に達するまでの時間に相当します。本ガイドラインでは、初期温度から平衡温度の80~90%の定常状態に達するまでの時間を、ガイドライン設定において考慮しています。これは、式(22)の時定数のほぼ2倍です。

さらに、定常状態の深部体温に達するまでの所要時間は熱負荷のレベルに依存し、ここでの検討の場合、熱負荷は全身平均SARに関係します。Hirataら(2007)は、65 MHzおよび2 GHzの平面波のばく露を受けた裸の身体の深部体温上昇の数値シミュレーションを行い、両方の周波数において、6~8 W kg<sup>-1</sup>の全身平均SARの場合、1°Cの深部体温上昇に達するまでの所要時間は少なくとも60分であることを報告しました。この時間は発汗率にも依存し、強い発汗はこの時間を40~100分増加させます(Hirata et al. 2008; Nelson et al. 2013)。以上から、6 GHz未満の高周波電磁界への全身ばく露によって定常状態の温度上昇に達するまでの所要時間は30分またはそれより長くなります。

前述のように、6 GHz以上の周波数において、電力吸収は主に表面組織内に限定されます(表10を参照)。それゆ

表10 周波数範囲6GHzから300 GHzにおけるヒトの皮膚組織(真皮)の浸透深さ

周波数 (GHz)	比誘電率	導電率 (S/m)	浸透深さ (mm)
6	36	4.0	8.1
10	33	7.9	3.9
30	18	27	0.92
60	10	40	0.49
100	7.3	46	0.35
300	5.0	55	0.23

え、体温調節反応は、深部体温上昇ではなく、皮膚温上昇によって開始されます。ただし、このことが、定常状態の温度上昇に達するまでの所要時間に大きな影響を与えることはないため、考慮されていません。したがって、6 GHzを超えても平均化時間を6 GHz以下の値と同じにすることは妥当です。なぜなら、6 GHzを超える周波数での深部体温上昇の時定数に関する定量的研究は存在しないからです。

**深部体温の1°C上昇に必要な全身平均 SAR** 人体が大きな熱負荷を受けると体温調節機能が作動し、その結果として全身平均SARと深部体温上昇の間に非線形な関係が生じることがよくあります。

Adairと同僚は、全身ばく露中の(食道温度の測定を介した)深部体温を実験的に研究しました。彼らは、周囲温度24~28°Cの通常条件下で、100 MHz、220 MHz、および2450 MHzにおいて、全身平均SARが0.54~1 W kg<sup>-1</sup>の全身ばく露中に食道温度が上昇しない、またはわずかに上昇する(<0.1°C)ことを報告しました(Adair et al. 2001, 2003, 2005)。

彼らはまた、高温の周囲温度(31°C)条件下で、220 MHzで0.675 W kg<sup>-1</sup>の全身平均SARにおける比較的高い深部体温上昇(0.35°C)を報告しました。ただし、この上昇はたった1人の被験者で観察されたもので、被験者平均(6人)では深部体温上昇は認められませんでした。6 GHzを超える高周波電磁界への全身ばく露における深部体温上昇に関するデータはありません。入手可能な唯一のデータは、赤外線に関するものです(Brockow et al. 2007)。高い周波数帯での全身ばく露の安全側に立った考え方については本文中で説明しています。

高周波ばく露による深部体温上昇に影響を与える2つの主要因は、発汗と質量-体表面積比です。

発汗による蒸発熱損失は、深部体温を効率的に低下させるため、電磁界による深部体温上昇の推定において考慮する必要があります。たとえば、Hirataら(2007)は、高齢者などの発汗率の低い人では深部体温を1°C上昇させるには4.5 W kg<sup>-1</sup>が必要であるが、通常の発汗率の人では6 W kg<sup>-1</sup>が必要であると報告しました。高齢者での発汗率低下は、主に温冷感の低下によるものです(Dufour and Candau 2007)。

同様に、体表と外気との間の熱交換も非常に重要です。Hirataら(2009)は、全身高周波電磁界ばく露による定常状態の深部体温上昇は、体表面積に対する(全身)電力吸収の比に比例することを見出しました。体表面積に対する質量の比は、小児のように身体の寸法が小さくなればなるほど小さくなりますので、深部体温を上げるには、より大きな全身平均SARが必要になります。

これは、同じ全身平均 SAR で小柄な人ほど深部体温上昇が低いという知見と一致しています。例えば、Hirata ら (2008) は、8 か月児と 3 歳児の小児モデルでの深部体温上昇を数値的に評価し、同じ全身平均 SAR において、小児モデルの深部体温上昇は成人女性モデルに比べ 35 % 小さいことを見出しました。彼らは、小児の体質量に対する体表面積の比が高いことが環境への熱損失による冷却の効果を高める理由であると結論しました。以上から、小児の深部体温上昇は、同じ全身平均 SAR での成人のそれより小さくなります。

より広い取り組みとして、さまざまな動物種にわたる実験研究からの理論的モデリングと一般化により、100 kHz から 6 GHz までの範囲では、やや高い周囲温度 (28°C) において、少なくとも 1 時間のばく露時間で、少なくとも 6 W kg<sup>-1</sup> の全身平均 SAR が、健康な成人および小児の深部体温の 1°C 上昇させるために必要であり (Hirata et al. 2013)、高齢者のように発汗率がより低い人では少なくとも 4.5 W kg<sup>-1</sup> が必要であることを示しました (Hirata et al. 2007)。

**胎児ばく露の検討** 胎児の主な体温調節機構は、臍帯を通る血流を介した母体との体深部での熱交換です。したがって、胎児の体温は母体の体温によって緊密に制御されており、熱平衡に達する時間は成人より長くなります (Gowland and De Wilde 2008)。胎児の深部体温は、通常、母体の深部体温より 0.5°C 高いです (Asakura 2004)。この関係は、Hirata ら (2014) が報告しているように、妊娠 26 週の母体では高周波電磁界ばく露によって大きくは変化しません。彼らは、40 MHz ~ 500 MHz の周波数範囲で、母体と胎児との熱交換を考慮に入れて定常状態の胎児温度を計算し、電力吸収が胎児周辺に集中している場合でさえ、胎児の温度上昇は母体の深部体温上昇よりも 30 % 高くなるに過ぎないことを報告しました。周波数が低くなると、波長および浸透深さが長くなるため、SAR 分布はより一様になり、その結果、母体および胎児の全身にわたるより一様な温度上昇がもたらされます。周波数が高くなると、浸透深さが小さくなるため、SAR 分布はより表面的になります。このため、通常、母体の腹部の深い場所に位置する妊娠月齢の若い胎児または胚の SAR は小さくなります。また、妊娠月齢の進んだ胎児では、胎児のサイズが浸透深さより大きいため、その全身 SAR も小さくなります。このことは、この研究で調べられた周波数以外の周波数においても、母体への電磁界全身ばく露は、胎児に母体のものと同程度の深部体温上昇をもたらすことを示唆しています。

その結果、電磁界によって生じた母親の深部体温上昇は、胎児にも同程度の上昇をもたらすと考えられることから、職業上の全身平均 SAR の基本制限のレベルのばく露は、母親と胎児に同程度の深部体温上昇をもたらすかもしれません。したがって、胎児の体温を一般公衆に要求されたレベルに維持するために、全身平均 SAR 基本制限に関し

て、妊婦は一般公衆の一員と見なされます。

ICNIRP の妊婦の全身平均 SAR に関する決定は、催奇形性に関する確立された胎児温度閾値 (2°C : Edwards et al. 2003; Ziskin and Morrissey 2011) と比較して大きく安全側に立ったものです。ICNIRP はまた、胎児の深部体温、とりわけ妊娠初期段階の胎児または発達中の胚の体温は明確に定義されていないこと、および妊娠中の労働者の職業上の全身ばく露が胎児に傷害を与えるかもしれないことを明らかにする直接的な証拠はないことも認識しています。それゆえ、妊娠中の労働者を一般公衆の一員として扱うという決定は安全側に立ったものと認識されています。ICNIRP はまた、一般公衆の制限を超えることなく、妊娠中の労働者が高周波電磁界の職業ばく露の制限レベルにある区域へ立ち入ることを許可するために考慮できる緩和技術があることを指摘しています。例えば、30 分間の平均化時間以内であれば、妊娠中の労働者は 6 分間平均の職業ばく露制限レベルの区域内にすることができます。ただし、30 分間 (この 6 分間を含む) で平均した SAR が一般公衆の制限を超えないことが条件です。このようなばく露低減技術を検討する際には、妊娠中の労働者の局所ばく露の制限も重要であり、「局所ばく露の詳細説明 (100 kHz から 6 GHz まで)」および「局所ばく露の詳細説明 (6 GHz を超え 300 GHz まで)」のセクションの「胎児ばく露の検討」に記載されています。

### 局所ばく露の詳細説明 (100 kHz から 6 GHz まで)

**関連する物理量** 局所的な身体領域が高周波電磁界のばく露を受けた場合、深部体温を変えることなく身体の一部で温度が上昇することがあります。したがって、局所温度上昇も制限されなければなりません。最大の局所温度上昇は通常、身体の表面に現れ、局所 SAR は、局所的な高周波電磁界ばく露による局所温度上昇の有用な代替指標です。ただし、着衣、環境条件、および生理学的状態などの他の要因が、SAR 自体よりも大きく局所温度に影響を与える可能性があります。

局所 SAR と面積平均の吸収電力密度の間の移行周波数には 6 GHz が選択されています (Funahashi et al. 2018)。移行に最も当てはまる単一周波数が存在しないため、次のサブセクションで説明する空間的および時間的平均の条件に適した実用的な妥協案としてこの選択が行われました。移行周波数より低い周波数の場合、「空間平均の検討」のセクションで説明されているように、SAR は体内の組織 (脳など) と皮膚の両方を同時に防護するための指標です。移行周波数より高い周波数 (特に 10 GHz 以上) では、吸収電力密度が最大皮膚温度上昇の代替指標になります。

**空間平均の検討** 局所温度上昇を予測する能力の観点から、平均化方法 (例えば、立方体、球、連続した単一組織など) および質量が評価されました (Hirata and

Fujiwara 2009; McIntosh and Anderson 2011)。これらの結果は、平均化質量による影響の方が、平均化体積の形状による影響よりも決定的に重要であること、および平均化方法の違いにより SAR は約 2 倍変化することを示唆しています (Hirata et al. 2006)。また、単一組織で平均された SAR は、複数組織で平均された SAR に比べ、局所温度との相関がやや悪くなることも示されました。その理由は、生体組織に発生した熱は最大数センチメートル (すなわち、複数の組織タイプにまたがって) 拡散する可能性があるためです。以上から、すべての組織を含めて、質量 10 g の立方体での平均が、6 GHz までの周波数における適切な空間平均として用いられます。この質量で平均した場合、「頭部および胴体」、および「四肢」での局所温度上昇が SAR と相関するため、この指標は平面波ばく露にも適用可能であることが示されました (Razmadze et al. 2009; Bakker et al. 2011; Hirata et al. 2013)。

**時間平均の検討** 高周波電力蓄積の速度と熱拡散および伝導の速度のバランスを考えると、定常状態の温度に達するまでの所要時間は、温度上昇の時定数によって特徴付けられます。時定数は主として、血流による熱対流および熱伝導に依存します。Van Leeuwen ら (1999)、Wang と Fujiwara (1999)、Bernardi ら (2000) は、800 MHz~1.9 GHz において、定常状態の温度上昇の 80~90% に達するまでの所要時間は 12~16 分であると報告しています。本ガイドラインは、6 GHz までの局所ばく露における定常状態の温度上昇について、安全側に立った適切な平均化時間として 6 分を採用します。

**タイプ 1 およびタイプ 2 の組織それぞれの 5 °C および 2 °C の局所温度上昇に必要な SAR** 初期の研究は、ウサギの眼での 2.45 GHz ばく露と局所温度上昇の関係に関する有用なデータを提供しましたが (例えば、Guy et al. 1975; Emery et al. 1975)、より正確な技術を用いた研究により、ウサギはヒトの眼のモデルとして不適切であることが示されました (Oizumi et al. 2013)。しかし、高周波による眼への潜在的な悪影響についての懸念があることから、今では高周波によるヒトの眼の加熱に関するより正確な情報を提供する研究もいくつかあります。組織 10 g 平均 SAR に対する加熱係数 (単位質量あたりの吸収電力 (W) による温度上昇 (°C)) として表現された、ヒトの眼の加熱係数の計算値は比較的一貫しています [0.11 - 0.16 °C kg W<sup>-1</sup> : Hirata (2005); Buccella et al. (2007); Flyckt et al. (2007); Hirata et al. (2007); Wainwright (2007); Laakso (2009); Diao et al. (2016)]。ほとんどの研究において、加熱係数は、眼球 (連続的な組織) 全体で平均された SAR に対して算出されています。立方体体積 (他の組織を含む) で平均された SAR は、眼球全体で平均された SAR よりも高くなり (Diao et al. 2016)、結果として加熱係数は小さくなります。

また、携帯電話のハンドセットアンテナにばく露された

頭部の温度上昇に関するかなりの数の研究があります (Van Leeuwen et al. 1999; Wang and Fujiwara 1999; Bernardi et al. 2000; Gandhi et al. 2001; Hirata and Shiozawa 2003; Ibrahim et al. 2005; Samaras et al. 2007)。Hirata と Shiozawa (2003) は、耳介を含めた場合、あるいは含めない場合の 10 g の連続した体積で平均された局所 SAR に対する加熱係数をそれぞれ 0.24 あるいは 0.14 °C kg W<sup>-1</sup> と報告しました。耳介を含めた 10 g の立方体体積で平均された局所 SAR を検討した他の研究では、頭部の加熱係数として 0.11 ~ 0.27 °C kg W<sup>-1</sup> の範囲を報告しました (Van Leeuwen et al. 1999; Bernardi et al. 2000; Gandhi et al. 2001)。Fujimoto ら (2006) は、ダイポールアンテナにばく露された小児頭部の温度上昇を研究し、同じ熱パラメータを用いた場合には、小児の温度上昇は成人のものと同様であることを見出しました。脳内の加熱係数 (頭部内のピーク SAR に対する脳内の温度上昇の比) は 0.1 °C kg W<sup>-1</sup> またはそれ以下です (Morimoto et al. 2016)。身体装着型アンテナの場合について胸部の温度上昇を報告した研究は 1 件だけです (Hirata et al. 2006)。この研究は、皮膚の加熱係数が 0.18~0.261 °C kg W<sup>-1</sup> の範囲であることを示しました。加熱係数に関する不確かさの要因は、耳介 (携帯電話の場合) および他の周辺組織構造 (例えば、Foster et al. 2018 を参照) に吸収されるエネルギー、および SAR の空間平均方法に起因します。

以上の研究は一貫して、100 kHz から 6 GHz までの周波数では数値計算の推定値がある範囲に集まっており、少なくとも約 30 分のばく露の場合、最大の加熱係数は皮膚で 0.25 °C kg W<sup>-1</sup> 未満、脳で 0.1 °C kg W<sup>-1</sup> 未満であることを示しています。これらの加熱係数に基づいて、眼および脳 (タイプ 1) および皮膚 (タイプ 2) における健康への悪影響の運用上の閾値は、最大 20 W kg<sup>-1</sup> の局所 SAR を上回らないと考えられます。

**胎児ばく露の検討** 妊娠段階および胎児の姿勢と位置の関数としての胎児の局所 SAR に対する加熱係数は、母体と胎児の間の熱交換を考慮して決定されました (Akimoto et al. 2010; Tateno et al. 2014; Takei et al. 2018)。この研究は、妊娠 13 週、18 週、26 週の妊婦の数値モデルを用いました。ほとんどの場合、胎児の加熱係数は母体の加熱係数に比べ数倍小さいものでした。しかし、胎児の位置が腹部表面に非常に近い場合 (すなわち、妊娠中期および後期) に最も大きな加熱係数が見られました。以上から、安全側に立った胎児の加熱係数として、0.1 °C kg W<sup>-1</sup> が提示されます。

これらの知見に基づくと、職業上の基本制限 10 W kg<sup>-1</sup> に母親がばく露された場合、胎児に約 1 °C の体温上昇が生じます。これは、「頭部および胴体」における健康への悪影響の運用上の閾値より低くなるとはいうものの、一般公衆にとって適切と考えられる低減係数 (すなわち、10) よりも小さい低減係数 (すなわち、2) が適用されることになり

ます。その結果、母親の局所的な職業上の高周波電磁界ばく露が、胎児に、一般公衆にとって許容されるとみなされているレベルよりも高いレベルまでの体温上昇を引き起こす可能性があります。したがって、胎児の体温を一般公衆の局所 SAR の基本制限が要求するレベルに維持するために、局所 SAR の基本制限に関して、妊婦は一般公衆の一員と見なされます。

注意して欲しいのは、上述したようなケースは妊娠中期および後期（妊娠 18 週から 26 週）に限って出現し、妊娠初期（妊娠 12 週）の胎児の加熱係数は最大でも  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C kg W}^{-1}$  (Tateno et al. 2014; Takei et al. 2018) であることです。この 12 週の胎児の体温上昇は、動物の催奇形性影響の閾値 ( $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) に比べ 100 倍低いものです (Edwards et al. 2003; Ziskin and Morrissey 2011)。

### 局所ばく露の詳細説明 (6 GHz を超え 300 GHz まで)

**関連する物理量** 高周波電磁界のばく露を受けた人体において、電磁波は体表面からより深い方向へ指数関数的に減衰します。この現象は、浸透深さを用いて、以下のように記述されます。

$$S_{ab} = PD_0 \int_0^{Z_{max}} e^{-\frac{2z}{\delta}} dz \quad (23)$$

ここで、 $S_{ab}$  は吸収電力密度、体表面は  $z=0$ 、 $\delta$  は体表面から  $z$  方向の浸透深さ (体表面から、高周波電力の 86% が吸収される深さまでの距離と定義されます)、および  $Z_{max}$  はその領域における身体の深さ (この場合、 $Z_{max}$  は浸透深さに比べはるかに深く、 $Z_{max}$  の代わりに無限大も使用可) を表します。 $PD_0$  は、 $z=0$  での面積  $A$  で平均された比吸収電力であり、以下のように記述されます。

$$PD_0 = \iint_A \rho(x, y, 0) \cdot SAR(x, y, 0) dx dy / A \quad (24)$$

浸透深さは、媒質の誘電特性、および周波数に依存します。周波数が増加するにつれて、浸透深さは減少し、約 6 GHz より高い周波数での浸透深さの大部分は表面組織内にあります。表 10 は、Sasaki ら (2017) および Sasaki ら (2014) によって測定された、皮膚組織 (真皮) の誘電特性に基づく浸透深さの一覧です。

結果として、一辺の長さが 2.15 cm、質量 10 g の立方体で平均された局所 SAR は、局所温度上昇の適切な代替指標ではなくなりました。すなわち、電力の蓄積は表面組織の数ミリメートル以内に限られます。その代わりに、6 GHz から 300 GHz までにおいては、皮膚に吸収された電力密度が表面温度上昇のより良い近似値を提供します (Foster et al. 2016; Funahashi et al. 2018)。

**空間平均の検討** 熱モデリング (Hashimoto et al. 2017) および解析解 (Foster et al. 2016) は、面積  $4\text{ cm}^2$  またはそれ以下の正方形での平均が、6 GHz を超える周波数での高

周波加熱による局所的な最大温度上昇に密接な近似値を提供することを示しています。これは、現実的なばく露シナリオを用いた計算研究によって裏付けられています (He et al. 2018)。面積  $4\text{ cm}^2$  で平均することの重要な利点は、局所 SAR と吸収電力密度の 6 GHz における一貫性です。ちなみに、SAR の平均に用いる  $10\text{ g}$  立方体の面は約  $4\text{ cm}^2$  です。

通常、ビーム面積は波長のサイズまでにしか集束されないため、温度上昇に関連する吸収電力密度を平均する面積は周波数に依存します。つまり周波数が高くなると、より小さい平均化面積が必要です。したがって、より高い周波数での極端に集束したビームの場合、平均化面積をより小さくする必要があります。このため、30 GHz を超える周波数においては、平均化面積  $1\text{ cm}^2$  での吸収電力密度の空間ピーク (最大) 値が、平均化面積  $4\text{ cm}^2$  の場合の空間ピーク値の 2 倍を超えてはならないとする追加の基準が課されます (Foster et al. 2016)。

**時間平均の検討** 6 GHz より低い周波数での局所ばく露の場合と同様に、6 GHz を超える周波数の高周波電磁界への局所ばく露による温度上昇もある時定数で平衡状態を達成します。Morimoto ら (2017) は、局所 SAR の場合の平均化時間 (6 分) は、6 GHz から 300 GHz までの局所ばく露においても適切であることを示しました。定常状態の局所温度上昇に達するまでの所要時間は、周波数の増加とともに徐々に減少しますが、15 GHz を超える周波数で顕著な変化は観察されません (Morimoto et al. 2017)。最大温度上昇の 80~90% に達するまでの所要時間は、6 GHz で約 5~10 分、30 GHz で 3~6 分です。ただし、注意して欲しいのは、短時間または不規則なばく露を考慮した場合、時定数は短くなることです。これについては、「局所ばく露の詳細説明 (6 GHz を超え 300 GHz まで) のセクションで説明されています。本ガイドラインでは、平均化時間として 6 分が選択されていますが、安全側に立つ手段として、追加的な制約の対象となる短時間または不規則なばく露には、追加的な制限が設けられています。

**タイプ 1 の組織の  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  の局所温度上昇に必要な吸収電力密度** 6 GHz を超えると、電力吸収の大部分は表層組織に限定されますので、より表面に近いタイプ 1 の組織において健康への悪影響の運用上の閾値を超えない限り、タイプ 2 の組織が健康への悪影響の運用上の閾値を超える組織温度になることはありません (例えば、Morimoto et al. 2016)。したがって、より表面に近いタイプ 1 の組織における温度上昇が  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  という運用上の閾値を超えないことを確実にするように、ばく露レベルを選ばなければなりません。

6 GHz を超える周波数でも、それより低い周波数と同様に、吸収電力密度の関数である組織加熱はさまざまな要因の影響を受けます。吸収電力密度に対する加熱係数 [単位

吸収電力 (W) あたりの、単位面積 (m<sup>2</sup>) での温度上昇 (°C) で表す<sup>※11</sup>の包括的研究調査が、極めて一様なばく露条件として、多層平板モデルへの平面波入射の場合について行われました (Sasaki et al. 2017)。この研究は、加熱係数をモンテカルロ法により統計学的に推定し、吸収電力密度に対する加熱係数の最大値が 0.025 °C m<sup>2</sup> W<sup>-1</sup>であることを示しました。この値は、皮膚 (Alekseev et al. 2005; Foster et al. 2016; Hashimoto et al. 2017) および眼 (Bernardi et al. 1998; Karampatzakis and Samaras 2013) の温度上昇に関する他の研究の結果よりも安全側に立った (大きい) 値です。それゆえ、温度を 5°C 上げるには、200 W m<sup>2</sup> の吸収電力密度が必要となります。

**胎児ばく露の検討** 「局所ばく露の詳細説明 (100 kHz から 6 GHz まで)」のセクションの「胎児ばく露の検討」で、SAR 分布の周波数特性に関して説明されているように、胎児の体温上昇に対する 6 GHz を超える高周波電磁界ばく露による表面加熱の寄与はおそらく非常に小さい (そして、6 GHz 以下の場合よりもさらに小さい) ものです。このことは、胎児は 6 GHz を超える周波数での局所ばく露によって、感知できる加熱を受けないであろうことを示唆します。ただし、これを評価した研究は現在ありません。それゆえ、ICNIRP は、6 GHz を超える周波数でのばく露に関して安全側に立ったアプローチを採用し、胎児が一般公衆の基本制限を超えたばく露を受けないことを確実にするため、妊娠中の労働者を一般公衆の一員として扱うことを求めます。

### 局所的領域における短時間ばく露の詳細説明 (100 kHz から 6 GHz まで)

局所ばく露において 6 分間平均をとる方法では、ばく露時間がこの平均時間より短い場合、より大きな局所 SAR を許容することになります。その一方、ばく露時間が非常に短い場合、熱拡散メカニズムが十分に温度上昇を制限することはできません。このことは、ばく露時間が 6 分間より短い場合、6 分間平均した基本制限を用いることで、健康への悪影響の運用上の閾値よりも高い温度上昇が一時的に生じる可能性があることを意味します。

100 MHz から 6 GHz までの高周波電磁界への短時間ばく露についての多層モデルおよび解剖学的頭部モデルを用いた数値モデリング研究により、許容可能な温度上昇に対応する SA は、さまざまな要因の影響を受けて大きく変動することがわかりました (Kodera et al. 2018)。その研究

および皮膚に関する健康への悪影響の運用上の閾値 (5°C) に対応する SA の経験式に基づいて、「頭部および胴体」の場合、この温度上昇に対応するばく露は、次の式から導かれます。

$$SA(t) = 7.2(0.05 + 0.95\sqrt{t/360}) \text{ (kJ kg}^{-1}\text{)} \quad (25)$$

ここで、 $t$  は秒で表された時間で、 $t < 360$  で適用可能です。SA ( $t$ ) は、6 分間 SAR との連続性を考慮して、任意の立方体組織 10 g で空間平均されたものとします。SA の平均化手順は、式 (13) の SAR と同じです。

「四肢」については、次の式を満たすように求められません。

$$SA(t) = 14.4(0.025 + 0.975\sqrt{t/360}) \text{ (kJ kg}^{-1}\text{)} \quad (26)$$

上述の論理により、周波数が 6 GHz を超える場合と 6 GHz 未満の場合とにおいて、わずかに異なる時間関数になることに注意してください。結果として得られる 6 GHz 未満の場合の時間関数は、6 GHz を超える場合のもの (すなわち、式 27 および 28) より、より安全側に立っています。

Kodera ら (2018) による数値モデリング研究は、式 (25) で定義された SA の制限によって、タイプ 2 の組織 (例えば、脳) の温度上昇も 1°C 未満に維持されることを示しています。さらに、周波数が低くなるにつれて、許容可能な温度上昇に対応する SA が増加することを報告しました。400 MHz 以下では、局所 6 分間 SAR の基本制限から導かれる SA [ $10 \text{ (W kg}^{-1}) \times 360 \text{ (s)} = 3.6 \text{ (kJ kg}^{-1}\text{)}$ ] は、「頭部と胴体」における健康への悪影響の運用上の閾値に対応する温度上昇を超過する状態を引き起こしません。したがって、この SA 制限は、400 MHz を超えるばく露にのみ必要です。

式 (25) および (26) は、特定のパルスまたは非パルス連続波パターンにかかわらず、6 分間までのすべてのばく露時間で満たされなければならないことに注意してください。すなわち、 $t$  秒間に送達される、任意のパルス、パルス群、またはパルス列中の一群のパルスによるばく露、およびばく露の総和 (非パルス電磁界を含む) によるばく露は、式 (25) および (26) で指定された値を超えてはなりません。なぜなら、ばく露パターンのある一部分へのばく露が、単一パルスへのばく露あるいは  $t$  で平均されたばく露より重要になる可能性があるからです。例えば、1 秒の間隔をおいた 2 つの 1 秒パルスの場合、それぞれの 1 秒パルスについてだけでなく合計のばく露時間 3 秒についても、式 (25) および (26) によって提示されるレベルは満たされなければなりません。

脳の温度上昇に関する上述の議論は、胎児の温度上昇も同じく定常状態 (6 分間) ばく露で想定される温度上昇よ

#### 【電磁界情報センター脚注】

※11：原文では in terms of the temperature rise (°C) over a unit area (m<sup>2</sup>), per W of absorbed power となっているものの、in terms of the maximum temperature rise(°C) caused by absorbed power (W) per unit area (m<sup>2</sup>)と思われるので、「単位面積 (m<sup>2</sup>) あたりの吸収電力 (W) による最大温度上昇 (°C) で表す」と理解される。

り低いであろうことを示唆しています。すなわち、式 (25) を適用することにより、タイプ 2 の組織の温度上昇は健康への悪影響の運用上の閾値より低く維持されるように、短時間のばく露による胎児の温度上昇にもおそらく当てはまると考えられます。しかし、妊婦における職業上の限度値までの短時間のばく露の影響を検討した入手可能な研究はありません。それゆえ、ICNIRP は、6 分間より長いばく露に対するものと同様の安全側に立った方針を 6 分間未満のばく露に対しても維持し（「局所ばく露の詳細説明（100 kHz から 6 GHz まで）」セクションの「胎児ばく露の検討」を参照）、妊娠中の労働者は一般公衆の基本制限の対象とすることを求めています。

### 局所的領域における短時間ばく露の詳細説明 (6 GHz を超え 300 GHz まで)

6 GHz までの周波数と同様に、6 GHz を超える周波数でも、6 分間平均の吸収電力密度が同じであれば、連続的ばく露の場合に比べ、強い短パルスまたは不連続ばく露の場合の方が温度上昇は高くなる可能性があります。これは、30 GHz より高い周波数で顕著になります (Foster et al. 2016)。単純な多層モデルの構造安定性と一貫性を考慮して、短時間ばく露の基本制限は、単純なモデルを用いた研究に基づいて導かれます (Foster et al. 2016; Morimoto et al. 2017)。連続波ばく露とは異なり、回折すなわち身体の突出した部分で反射し皮膚へ戻る波の干渉による影響は、短いパルスの場合に顕著かもしれません。吸収電力密度に対する回折の効果はまだ完全には決定されていませんが、同じ吸収電力密度をパルス化した場合に結果として生じる温度上昇は、この吸収電力密度を 6 分間に均等に広げた場合のものより、最大 3 倍高くなると推定されます (Laakso et al. 2017)。

これらの要因を検討した上で、吸収エネルギー密度の基本制限 ( $U_{ab}$ ) は、温度上昇の非一様性を考慮して (Foster et al. 2016)、ばく露時間の平方根の関数として設定されています。これらは、タイプ 1 の組織の健康への悪影響の運用上の閾値に一致するように、また 360 秒間で吸収電力密度の基本制限から得られる吸収エネルギー密度に一致するように設定されています。6 GHz までの周波数での短時間ばく露の限度値についてと同様に、結果として生じる温度上昇は表面であるという性質により、タイプ 2 の組織の健康への悪影響の運用上の閾値を超過する温度は生じないと考えられるため、ここではタイプ 1 の組織の 5 °C の閾値のみを考慮する必要があります。

以上から、6 GHz までの周波数についての Kodera ら (2018) の式を拡張して、5 °C の温度上昇に対応する短時間ばく露の場合の最大吸収エネルギー密度レベルは次のように指定されます。

$$U_{ab}(t) = 72 (0.05 + 0.95 \sqrt{t/360}) \text{ (kJ m}^{-2}\text{)} \quad (27)$$

(2 cm × 2 cm での平均)

ここで、 $t$  は秒で表されたばく露時間で、 $t < 360$  で適用可能です。30 GHz を超える周波数の場合、追加的基準が与えられ、面積 1 cm × 1 cm で平均された吸収エネルギー密度は、式 (28) で指定された値を超過してはなりません。

$$U_{ab}(t) = 144(0.025 + 0.975 \sqrt{t/360}) \text{ (kJ m}^{-2}\text{)} \quad (28)$$

(1 cm × 1 cm での平均)

式 (27) および (28) の両方が、特定のパルスまたは非パルス連続波パターンに拘らず、6 分間までのすべてのばく露時間で満たされなければならないことに注意してください。すなわち、 $t$  秒間に送達される、任意のパルス、パルス群、またはパルス列中の一群のパルスによるばく露、およびばく露の総和（非パルス電磁界を含む）によるばく露は、式 (27) および (28) で指定された値を超えてはなりません。なぜなら、ばく露パターンのある一部分へのばく露が、単一パルスへのばく露あるいは  $t$  で平均されたばく露より重要になる可能性があるからです。例えば、1 秒の間隔をおいた 2 つの 1 秒パルスの場合、それぞれの 1 秒パルスについてだけでなく合計のばく露時間 3 秒についても、式 (27) および (28) によって提示されるレベルは満たされなければなりません。

SAR 分布の周波数特性に関連して上述したように、6 GHz を超える高周波電磁界による表面加熱の胎児温度上昇への寄与は、6 GHz 未満の場合よりも小さい可能性があります。これは、短時間ばく露においても同じです。ただし、6 GHz を超える高周波電磁界への妊婦のばく露に関連した胎児の研究はありませんので、ICNIRP は安全側に立ったアプローチを採用し、胎児ばく露が一般公衆のばく露を超えないことを確実にするため、妊娠中の労働者を一般公衆の一員として扱います。

## 参考レベルの導出

### 参考レベルに関する一般的考察

本ガイドラインの本文で説明されているように、参考レベルは、ガイドラインへの適合性を評価する実用的な手段として導き出されています。電界強度 ( $E$ )、磁界強度 ( $H$ )、および入射電力密度の参考レベルは、一般的にはワーストケースシナリオと考えられるような電磁界分布への全身ばく露を仮定したドシメトリ研究から導出されています。ほとんどのばく露シナリオにおいて参考レベルは非常に安全側に立っているため、対応する基本制限を超えることなく参考レベルを超えることがしばしば起こり得ますが、適合性の判断においてはこの点を常に確認することが望

まれます。

遠方界、放射近傍界、およびリアクティブ近傍界それぞれの領域内でのばく露に対して異なる参考レベルを適用するルールが設定されています。ICNIRP がこれらの領域を区別する意図は、参考レベルが基本制限より一般的に安全側に立つことを保証するためです。領域間の区別に関する限りは、電磁界が平面波条件にどの程度近いかが、この区別の主たる（それだけではないが）決定因子です。このアプローチの難しさは、参考レベル物理量からの基本制限物理量の推定の充分さに他の要因も影響を及ぼす可能性があることです。これらの要因には、電磁界周波数、電磁界発生源の物理的寸法、評価される外部電磁界の発生源からの距離、人体の占める空間における電磁界の変動の大きさが含まれます。このような不確かさの原因を考慮に入れて、ガイドラインは、遠方界領域よりも放射近傍界またはリアクティブ近傍界領域でのばく露に対してより安全側に立ったルールを用います。しかし、適合性評価のために、事前に簡単には特定できないさまざまな要因を考慮せずに、あるばく露をリアクティブ近傍界、放射近傍界または遠方界と見なせるかどうかについて明確に記述することは困難です。目安として、アンテナからの距離が  $2D^2/\lambda$  (m) を超える、 $2D^2/\lambda$  から  $\lambda/(2\pi)$  (m) までの間、および  $\lambda/(2\pi)$  (m) 未満がそれぞれ、遠方界、放射近傍界、およびリアクティブ近傍界におおよそ対応します。ここで、 $D$  および  $\lambda$  はそれぞれ、アンテナの最長寸法および波長をメートルで表したものです。ただし、遠方界/近傍界領域のどちらの参考レベルのルールを適用すべきかをより適切に決定して、参考レベルと基本制限とを適切に一致させるためには、技術標準化機関からの情報を利用することが望ましいと予想されます。

### 30 MHz までの電界および磁界の参考レベル

ICNIRP (1998) ガイドラインでは、この周波数領域の参考レベルは、平面波への全身ばく露における全身平均 SAR から導出されました。しかし、Taguchi ら (2018) は、平面波と異なり、電界に結合されていない磁界への全身ばく露は、同じ磁界強度をもつ平面波への全身ばく露で計算されたものに比べ大幅に低い全身平均 SAR を生じさせることを示しました。同様に磁界に結合されていない電界への全身ばく露も計算され、その全身平均 SAR は、電界がこれと同じ方向と強度を持つ平面波のものとはほぼ同じであることが示されました。したがって、本ガイドラインの 30 MHz 未満での全身平均 SAR の基本制限に関連する参考レベルは、独立した均一な電界および磁界それぞれへの全身ばく露における全身平均 SAR を別個に数値計算したものにに基づいています。また、Taguchi ら (2018) は、全身平均 SAR の基本制限が満たされた場合、足首を含めた局所 SAR の基本制限も満たされると結論しました。これは、この周

波数領域では、全身平均の参考レベルへの適合は、全身平均 SAR および局所 SAR の基本制限を超過しないばく露であることを意味します。

10 MHz までの周波数での参考レベルに対して、神経細胞の刺激から防護のために設定されている低周波ガイドライン (ICNIRP 2010) では、外部電界と誘導 (内部) 電界の関係の数値モデリングに付随する不確かさを考慮して低減係数 3 が適用されていました。この理由は、この低周波ガイドラインでは、(特定の組織内の) 2 mm の立方体で平均された値が評価されたためです。この値は計算アーチファクトによる影響を大きく受けます。

一方、本ガイドラインでは、全身平均 SAR および局所 SAR の評価に適用される空間平均手順での計算アーチファクトの不確かさが大幅に低下しているため、数値シミュレーションの不確かさは大きくありません。したがって、本ガイドラインの 30 MHz 以下での全身平均 SAR および局所 SAR の基本制限に関連する参考レベルの導出において、計算の不確かさによる追加の低減係数を考慮する必要はありません。

### 30 MHz を超え 6 GHz までの電界、磁界および電力密度の参考レベル

ICNIRP (1998) において、参考レベルに等しい電磁界強度へのばく露における全身平均 SAR は、全身共振周波数 (30 ~ 200 MHz) およびポスト共振周波数領域 (1,500 ~ 4,000 MHz) の付近で、基本制限に近くなります。

共振周波数は、自由空間中の半波長が自由空間中の人体の高さ (立っている人の垂直方向の寸法) に近い周波数、または自由空間中の 1/4 波長が地面に立つ人体の高さに近い周波数で見られ (Durney et al. 1986)、より高い全身平均 SAR をもたらします。全身共振は、垂直偏波平面波入射の場合にのみ出現します。異なる偏波を仮定した場合、結果として生じる全身平均 SAR は、全身共振周波数付近の垂直偏波の場合の値より大幅に (数桁) 低くなります (Durney et al. 1986)。全身共振は、数値計算によって確認されました (Dimbylow 1997; Nagaoka et al. 2004; Dimbylow 2005; Conil et al. 2008; Kühn et al. 2009; Hirata et al. 2010)。

全身共振周波数より高い、特に数 GHz を超える周波数では、偏波による全身平均 SAR の違いは、全身共振周波数の場合に比べ、大きくはありません。Hirata ら (2009) は、2 GHz ~ 6 GHz において、水平偏波平面波入射のばく露を受けた 9 ヶ月から 7 歳までの小児モデルでの全身平均 SAR は、垂直偏波平面波の場合に比べ、わずかに高い (最大 20%) と報告しました。他の研究でも同様の傾向が報告されました (Vermeeren et al. 2008; Kühn et al. 2009)。

ICNIRP は、同じ外部電磁界が与えられた場合、小児の全身平均 SAR は成人のものより 40% 高くなる可能性があ



るとの結論を出しました (ICNIRP 2009)。その ICNIRP ステートメントの後、Bakker ら (2010) は、小児の全身平均 SAR の同様の (しかしわずかに高い) 増加 (45%) を報告しました。組織および臓器の誘電特性の年齢依存性の影響も研究されていますが、全身平均 SAR に関連する顕著な影響は見出されませんでした (Lee and Choi 2012)。全身平均 SAR の増加の報告は、成人モデルからスケールされた非常に痩せた小児モデル、および非常に若い (幼児) モデルを用いた計算に基づくものであることに注意してください。これらの研究は、モデルの全身平均 SAR が基本制限を超えるようにするため、極端なケースの条件に合わせて、小児または幼児がかなり長時間、その姿勢を維持すると仮定しました。その上、成人モデルの縮尺版ではなく、国際放射線防護委員会 (ICRP) 指定の標準計法を採用した小児モデルを用いた最近の研究では、標準小児モデルにおける全身平均 SAR の増加は大きくありません (せいぜい 16%; Nagaoka et al. 2019)。同様に、全身平均 SAR と全身質量の関係が調べられ、低い体格指数 (BMI) の成人での全身平均 SAR は、小児の場合と同じように増加することが見出されました (Hirata et al. 2010, 2012; Lee and Choi 2012)。

「全身平均ばく露の詳細説明」セクションの「胎児ばく露の検討」で説明されたように、胎児の体温は母体の深部体温と同等です。深部体温上昇の制限に用いられる全身平均 SAR は、全身吸収電力を全身質量で割ったものと定義されます。そのため、この周波数領域で、非妊婦に比べ質量が大きい妊婦の全身平均 SAR は、非妊婦の全身平均 SAR に比べ、一般的には同じかそれよりも低くなります。Nagaoka ら (2007) は、10 MHz から 2 GHz までの垂直偏波平面波のばく露を受けた妊娠 26 週の妊婦モデルの全身平均 SAR は、同じばく露条件の非妊婦モデルのものと同様かそれよりも低いことを報告しました。

Dimbylow (2007) は、単純化された妊婦モデルを用いて、胎児および母体の全身平均 SAR の両方が、約 70 MHz で非接地状態の場合に最も高くなることを報告しました。同様の傾向が、妊娠中期および妊娠後期の解剖学的胎児モデルにおいても明らかにされ、妊娠 20、26、29 週の胎児の全身平均 SAR はそれぞれ、母体のそれのおよそ 80%、70%、60% でした (Nagaoka et al. 2014)。まだ胚の時期の胎児の全身平均 SAR は、胚は母体腹部の深い位置にあるため、母体の全身平均 SAR と同等か、それよりも低くなります (Kawai et al. 2009)。したがって、参考レベルに関して、妊婦は、胎児から独立とみなせないため、一般公衆の制限の対象とします。

上述のように、この周波数領域での全身ばく露における全身平均 SAR に関しては、多数のデータベースがあります。この中には、ICNIRP (1998) ガイドライン以降に報告されたものがかなりの数で含まれていますが、これらは、

ICNIRP (1998) ガイドラインの基礎として用いられたデータベースと概ね一致しています。ICNIRP は、以下で説明するいくつかの不一致を考慮に入れつつ、参考レベルを導き出すために古いデータベースと新しいデータベースを組み合わせて使用します。

ICNIRP (1998) ガイドラインの公表以降、小児または小柄な人々の参考レベルでのばく露において、全身平均 SAR の基本制限を超過する可能性が示されてきました。上述のように、全身平均 SAR の超過は 45% に過ぎず、非常に特別な小児モデルにおいてのみ示されたこと、国際標準化された現実的な小児モデルを用いた最近のモデリング研究ではせいぜい 16% のわずかな増加しか示されなかったこと (Nagaoka et al. 2019) がレビューされました。この逸脱は、数値計算で予想される不確かさと同程度です。例えば、Dimbylow ら (2008) は、全身平均の手順またはアルゴリズムの違いが 3 GHz での全身平均 SAR に 15% の変動をもたらすこと、また 1.8 GHz において、皮膚状態 (湿潤または乾燥) の誘電特性の報告値 (Gabriel et al. 1996) を割り当てると、全身平均 SAR に 10% の変動をもたらすことを報告しています。

「全身平均ばく露の詳細説明」セクションの「胎児ばく露の検討」<sup>※12</sup>でレビューしたように、小児の加熱係数は一般に成人の加熱係数より低いです。その結果として、上述した SAR の増加では、成人に許容される温度上昇より大きな温度上昇をもたらさないと考えられることから、健康に影響しないと考えられます。不確かさの大きさ、および小柄な人を考慮して参考レベルを下げることに健康上の利点がないことを考え、ICNIRP は 30 MHz を超え 6 GHz までの周波数範囲において参考レベルを変更しないことにしました。

また、全身平均の参考レベルが、基本制限を最大 35% 超過した全身平均 SAR をもたらす可能性がある状況が他にあることにも注意してください。これは、SAR の上昇を引き起こすために、十分な時間にわたり、通常は維持が難しい姿勢をとった人体モデルで発生します (Findlay and Dimbylow 2005; Findlay et al. 2009)。しかし、SAR の上昇は、関連する不確かさおよび基本制限それ自体の安全側に立った特質に比べて小さく、その姿勢は日常的によく使われる可能性がなく、その SAR 上昇が何らかの健康悪影響をもたらすことを示す証拠はありません。

## 6 GHz を超え 300 GHz までの全身ばく露の参考レベル

6 GHz を超えると、高周波電磁界は通常、平面波または

### 【電磁界情報センター脚注】

※12: 原文では “Considerations for fetal exposure” 「胎児ばく露の検討」となっているものの、“Whole-body average SAR needed to raise body core temperature by 1°C” 「深部体温の 1°C 上昇に必要な全身平均 SAR」と思われる。

遠方界のばく露条件の特性に従います。すなわち、入射電力密度または等価入射電力密度が、この周波数領域の参考レベルとして用いられます。リアクティブ近傍界は、この周波数領域では、発生源の非常に近くなります。リアクティブ近傍界と放射近傍界の典型的な境界は $\lambda(2\pi)$ （たとえば、6 GHz で 8 mm）と定義されます。6 GHz を超える周波数での参考レベルに用いられる入射電力密度は、リアクティブ近傍界領域での基本制限に用いられる吸収電力密度と適切に相関しないため、リアクティブ近傍界における適合性の判断に参考レベルを用いることはできません。そのような場合には、基本制限を評価する必要があります。

身体に吸収された高周波電力は、体表面からより深部に向かって指数関数的に減衰します（式 23 を参照）。したがって、6 GHz を超える周波数では、電力吸収は大部分が体表面内に限定され、総電力吸収または全身平均 SAR は体表面のばく露面積にほぼ比例します（Hirata et al. 2007; Gosselin et al. 2009; Kühn et al. 2009; Uusitupa et al. 2010）。例えば、反射箱を使用した実験的研究は、1 GHz~12 GHz において、全身平均 SAR と人体の表面積との間の強い相関関係を明らかにしました（Flintoft et al. 2014）。

全身平均 SAR は入射電力密度および体表面積にほぼ比例する（電磁界周波数には依存しない）ため、ICNIRP は 6 GHz 未満の全身ばく露の参考レベルを 300 GHz までに拡張しました。ICNIRP (1998) ガイドラインは、この周波数範囲（10 GHz まで）の全身ばく露の参考レベルを  $50 \text{ W m}^{-2}$  および  $10 \text{ W m}^{-2}$ （それぞれ職業ばく露および一般公衆ばく露の場合）に設定しました。これらのレベルが、6 GHz を超える周波数で、基本制限を超える全身ばく露をもたらすこと、またはそれらが傷害を引き起こすことを示す証拠はないため、当該ガイドラインとして、全身ばく露条件における ICNIRP (1998) 参考レベルを踏襲して用いています。

全身平均 SAR の基本制限と同じ時間平均および空間平均が、これらに対応する参考レベルにも適用されます。したがって、入射電力密度は、30 分間にわたって時間平均され、人体が占める空間（全身空間）にわたって空間平均されます。

#### 6 GHz を超え 300 GHz までの局所ばく露の参考レベル

6 GHz を超える周波数で、局所ばく露の場合、入射電力密度 ( $S_{\text{inc}}$ ) の参考レベルは基本制限（すなわち、吸収電力密度  $S_{\text{ab}}$ ）から導くことができます。

$$S_{\text{inc}} = S_{\text{ab}} T^{-1} \text{ (W m}^{-2}\text{)} \quad (29)$$

ここで、T は透過率 (Transmittance) を表し、以下のよう定義されます。

$$\text{Transmittance} = 1 - |\Gamma|^2 \quad (30)$$

反射係数  $\Gamma$  は、組織の誘電特性、体表面の形状、入射角、偏波から導かれます。TE 波入射の場合、最大の透過率となる入射角は体表面に垂直な角度ですが、TM 波入射の場合、この角度はブリュースター (Brewster) 角になります（この角度で TM 波が入射した場合、反射がありません）。さらに、Li 他 (2019) は、高周波電磁界波の斜め入射の場合、身体表面または境界面で平均された TE 波の入射電力密度および入射エネルギー密度は、吸収電力密度および吸収エネルギー密度を過大に見積もること、一方、ブリュースター角付近で入射した TM 波の吸収電力密度および吸収エネルギー密度は入射電力密度および入射エネルギー密度に近くなることを示しました。彼らはまた、温度上昇に関しては垂直入射が常にワーストケースのシナリオであることも見出しました（Li et al. 2019）。

本ガイドラインでは、基本制限および参考レベルは、多層人体モデルへの垂直入射を仮定した研究から導き出されています。これはほとんどの場合、ワーストケースのモデリングを表しているため、本ガイドラインに使用されている研究結果は一般的に安全側に立っていると考えられます。

垂直入射条件における透過率の変動および不確かさが研究されました（Sasaki et al. 2017）。周波数が 10 GHz から 300 GHz に増加すると、透過率は漸近的に 0.4 から 0.8 に増加します。同様の傾向は他の研究でも報告されました（Kanezaki et al. 2009; Foster et al. 2016; Hashimoto et al. 2017）。

透過率の周波数特性を考慮して、局所ばく露の参考レベルは、6 GHz での  $200 \text{ W m}^{-2}$  から 300 GHz での  $100 \text{ W m}^{-2}$  までを結んだ周波数の指数関数<sup>※13</sup>として導かれています（職業ばく露の場合）。同じ方法が、一般公衆の参考レベルの導出にも適用されています。「6 GHz を超え 300 GHz までの全身ばく露の参考レベル」セクションで述べられたものと同じ理由で、リアクティブ近傍界における適合性の判断に参考レベルを用いることはできません。そのような場合には、基本制限を評価する必要があります。

基本制限で考慮されるスケール、すなわち、6 分間、および  $4 \text{ cm}^2$  または  $1 \text{ cm}^2$ （30 GHz を超える周波数での追加的基準）のどちらかの人体表面積において、入射電力密度と吸収電力密度の時間的および空間的特性はほぼ同じです。したがって、吸収電力密度の基本制限については、平均のための同じ条件が入射電力密度の参考レベルに適用されます。

#### 四肢電流の参考レベル

四肢電流は、足首や手首を通り、四肢を流れる電流と定

##### 【電磁界情報センター脚注】

※13：原文では exponential functions となっているものの、power functions と思われるので、「べき関数」と理解される。

義されます。解剖学的組成が原因で、身体のこれらの部分に高い局所 SAR が出現することがあります。足首および手首では、低導電性組織に対する高導電性組織の体積比が小さいため、筋肉などの高導電性組織に電流集中が生じて SAR が大きくなります。この現象は、人体が全身共振条件で地面に立っている場合において特に顕著です。

四肢（足首および手首）の局所 SAR は、四肢を流れる電流と強く相関します。局所 SAR を直接測定することは一般的に困難ですが、四肢 SAR は、比較的簡単に測定できる四肢電流 (I) から以下のように導かれます。

$$\text{SAR} = \frac{\sigma E^2}{\rho} = \frac{J^2}{\sigma \rho} = \frac{I^2}{\sigma \rho A^2} \quad (31)$$

ここで、J および A はそれぞれ、電流密度および実効断面積を表します。

したがって、四肢電流の参考レベルは、足首と手首の局所 SAR、特に全身共振条件において接地された人体の足首周辺の局所 SAR を評価するために設定されています。接地状態の場合、周波数が全身の共振周波数を超えて増加すると、四肢での局在化は徐々に低下します。したがって、より高い周波数では、最大の局所 SAR は一般に四肢周りに出現しなくなるため、最大の局所 SAR と四肢電流との関連性はなくなります。

Dimbylow (2002) は、10 MHz から 80 MHz の 1 A の四肢電流が、接地された面に立つ成人男性モデルの足首に、組織 10 g で平均された局所 SAR で 530 W kg<sup>-1</sup> から 970 W kg<sup>-1</sup> を生じさせることを示しました。平均に用いた 10 g 組織は連続した組織であり、形状が立方体ではなかったため、立方体での SAR 値よりも高い SAR 値が得られることに注意してください。この研究に基づいて、ICNIRP は、四肢の局所 SAR の基本制限への適合性を安全側で見て確実にするために、職業ばく露および一般公衆ばく露における四肢電流の参考レベルをそれぞれ、100 mA および 45 mA に設定します（例えば、電流が 100 mA の場合、四肢での局所 SAR の最大値は 10 W kg<sup>-1</sup> に過ぎないと考えられます）。このような SAR と足首電流の関係を、Taguchi ら (2018) は、いくつかの異なる解剖学的モデルで確認しました。

同様に、Dimbylow (2001) は、100 mA の手首電流に対する（連続した組織の）10 g 局所 SAR を計算し、100 kHz では 27 W kg<sup>-1</sup> が 10 MHz では 13 W kg<sup>-1</sup> へと減少するという結果となりました。連続した形状に比べ、立方体での SAR は減少することを考慮すると、手首でも、100 mA の四肢電流は手首の局所 SAR の基本制限への適合性を安全側で見て確実にしています。これに基づいて、ICNIRP は、周波数範囲の下限値を、ICNIRP (1998) の 10 MHz から 100 kHz に修正しました。

式 (31) に示すように、局所 SAR は四肢電流の 2 乗値

に比例します。ただし、式 (31) において、実効面積は、四肢電流を 10 g 平均の局所 SAR に関連づけるための定数であり、実際の断面積だけでなく、組織の分布/比率および導電率にも依存します。周波数が 100 kHz から 110 MHz へ増加すると、導電率は漸近的に増加するため、この周波数範囲全体で局所 SAR と四肢電流の関係は一定ではありません。例えば、Dimbylow (2002) は、周波数が 10 MHz から 80 MHz に増加した場合、一定の四肢電流による局所 SAR は半分になることを示しました。これは、四肢電流の参考レベルの上限周波数を、ICNIRP (1998) の周波数範囲 10 MHz~110 MHz の上限に比べて、より低くすることが潜在的に可能なことを示唆しています。しかし、この問題に取り組む研究が不足しているため、ICNIRP は ICNIRP (1998) の周波数範囲の上限値と同じ上限値を維持しています。

四肢電流の参考レベルは局所 SAR の基本制限に関連しているため、同じ時間平均が適用されます（すなわち、6 分間）。さらに、四肢電流の 2 乗値は局所 SAR に比例するため、時間平均には四肢電流の 2 乗値を用いなければなりません（「物理量およびその単位」セクションで説明されたように）。6 分未満のばく露における温度上昇は、四肢電流の上限周波数よりも高い 400 MHz を超える周波数の場合にのみ問題になることに注意してください。したがって、6 分未満のばく露では、四肢電流の参考レベルは必要ありません。

### 短時間（6 分間未満）ばく露の参考レベル

短時間ばく露の参考レベルは、6 GHz までの周波数では SA、6 GHz を超える周波数では吸収エネルギー密度に基づき設定された短時間ばく露の基本制限に一致するように導出されています。

参考レベルは、平面波ばく露、あるいはダイポールアンテナなどの身体の近くで使用される典型的な発生源からのばく露を受けた多層人体モデルを用いた数値計算から導出されています。

参考レベルは、6 GHz を超える周波数では吸収エネルギー密度の基本制限に一致するようにばく露時間の関数として変化します。同様に、6 GHz 以下では、SA の基本制限に一致するように同様の関数が用いられます。吸収エネルギー密度の基本制限およびそれに対応する入射エネルギー密度の参考レベルの時間関数は、SA の基本制限およびそれに対応する入射エネルギー密度の参考レベルよりも安全側に立っていることに注意してください。これは、参考レベルが、6 GHz 以下に比べ、6 GHz を超える周波数においてより安全側に立っていることを意味します。

参考レベルは多層モデルに基づいているため、ドシメトリに含まれる不確かさはあまり重要ではありません。反対

に、このような単純なモデリングは、現実的な人体の形状と構造に対して過度に安全側になる可能性があります。この過剰見積もりは、周波数が増加するにつれて減少します。なぜなら、浸透深さが身体部分の寸法に比べて短くなるためです。形態学的なばらつきも重要ではありません。

### 参考文献

- Adair ER, Blick DW, Allen SJ, Mylacraine KS, Ziriaux JM, Scholl DM. Thermophysiological responses of human volunteers to whole body RF exposure at 220 MHz. *Bioelectromagnetics* 26:448-461; 2005.
- Adair ER, Mylacraine KS, Allen SJ. Thermophysiological consequences of whole body resonant RF exposure (100 MHz) in human volunteers. *Bioelectromagnetics* 24: 489-501; 2003.
- Adair ER, Mylacraine KS, Cobb BL. Partial-body exposure of human volunteers to 2450 MHz pulsed or CW fields provokes similar thermoregulatory responses. *Bioelectromagnetics* 22:246-259; 2001.
- Akimoto S, Kikuchi S, Nagaoka T, Saito K, Watanabe S, Takahashi M, Ito K. Evaluation of specific absorption rate for a fetus by portable radio terminal close to the abdomen of a pregnant woman. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 58:3859-3865; 2010.
- Alekseev S, Radzievsky A, Szabo I, Ziskin M. Local heating of human skin by millimeter waves: effect of blood flow. *Bioelectromagnetics* 26:489-501; 2005.
- Asakura H. Fetal and neonatal thermoregulation. *J Nippon Med Sch* 71:360-370; 2004.
- Bakker J, Paulides M, Christ A, Kuster N, Van Rhoon G. Assessment of induced SAR in children exposed to electromagnetic plane waves between 10 MHz and 5.6 GHz. *Phys Med Biol* 55:3115; 2010.
- Bakker JF, Paulides MM, Neufeld E, Christ A, Kuster N, Rhoon GCv. Children and adults exposed to electromagnetic fields at the ICNIRP reference levels: theoretical assessment of the induced peak temperature increase. *Phys Med Biol* 56:4967; 2011.
- Bernardi P, Cavagnaro M, Pisa S, Piuze E. SAR distribution and temperature increase in an anatomical model of the human eye exposed to the field radiated by the user antenna in a wireless LAN. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 46:2074-2082; 1998.
- Bernardi P, Cavagnaro M, Pisa S, Piuze E. Specific absorption rate and temperature increases in the head of a cellular-phone user. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 48:1118-1126; 2000.
- Brockow T, Wagner A, Franke A, Offenbacher M, Resch KL. A randomized controlled trial on the effectiveness of mild water-filtered near infrared whole-body hyperthermia as an adjunct to a standard multimodal rehabilitation in the treatment of fibromyalgia. *Clin J Pain* 23:67-75; 2007.
- Buccella C, De Santis V, Feliziani M. Prediction of temperature increase in human eyes due to RF sources. *IEEE Trans Electromagn Comp* 49(4):825-833; 2007.
- Conil E, Hadjem A, Lacroux F, Wong MF, Wiart J. Variability analysis of SAR from 20 MHz to 2.4 GHz for different adult and child models using finite-difference time-domain. *Phys Med Biol* 53:1511-1525; 2008.
- Diao Y, Leung SW, He Y, Sun W, Chan KH, Siu YM, Kong R. De-tailed modeling of palpebral fissure and its influence on SAR and temperature rise in human eye under GHz exposures. *Bioelectromagnetics* 37:256-263; 2016.
- Dimbylow P. The relationship between localised SAR in the arm and wrist current. *Radiat Protect Dosim* 95:177-179; 2001.
- Dimbylow P. Resonance behaviour of whole-body averaged specific energy absorption rate (SAR) in the female voxel model, Naomi. *Phys Med Biol* 50:4053-4063; 2005.
- Dimbylow P. SAR in the mother and foetus for RF plane wave irradiation. *Phys Med Biol* 52:3791-3802; 2007.
- Dimbylow PJ. FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. *Phys Med Biol* 42:479-490; 1997.
- Dimbylow PJ. Fine resolution calculations of SAR in the human body for frequencies up to 3 GHz. *Phys Med Biol* 47:2835-2846; 2002.
- Dimbylow PJ, Hirata A, Nagaoka T. Intercomparison of whole-body averaged SAR in European and Japanese voxel phantoms. *Phys Med Biol* 53:5883-5897; 2008.
- Dufour A and Candau V. Ageing and thermal responses during passive heat exposure: sweating and sensory aspects. *Eur J Appl Physiol* 100:19-26; 2007.
- Durney CH, Massoudi H, Iskander MF. Radiofrequency radiation dosimetry handbook. Fourth ed. Brooks AFB, TX: USAF School of Aerospace Medicine (USAFSAM-TR-85-73).
- Edwards MJ, Saunders RD, Shiota K. Effects of heat on embryos and fetuses. *Int J Hypertherm* 19:295-324; 2003.
- Emery A, Kramar P, Guy A, Lin J. Microwave induced temperature rises in rabbit eyes in cataract research. *J Heat Transfer* 97:123-128; 1975.
- Findlay R, Dimbylow P. Effects of posture on FDTD calculations of specific absorption rate in a voxel model of the human body. *Phys Med Biol* 50:3825-3835; 2005.
- Findlay R, Lee A-K, Dimbylow P. FDTD calculations of SAR for child voxel models in different postures between 10 MHz and 3 GHz. *Radiat Protect Dosim* 135: 226-231; 2009.
- Flintoft I, Robinson M, Melia G, Marvin A, Dawson J. Average absorption cross-section of the human body measured at 1-12 GHz in a reverberant chamber: re-sults of a human volunteer study. *Phys Med Biol* 59:3297-3317; 2014.
- Flyckt V, Raaymakers B, Kroeze H, Lagendijk J. Calculation of SAR and temperature rise in a high-resolution vascularized model of the human eye and orbit when exposed to a dipole antenna at 900, 1500 and 1800 MHz. *Phys Med Biol* 52:2691-2701; 2007.
- Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q. Thermal response of human skin to microwave energy: a critical review. *Health Phys* 111:528-541; 2016.
- Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q, Bit-Babik G. Modeling tissue heating from exposure to radiofrequency energy and relevance of tissue heating to exposure limits: heating factor. *Health Phys* 115:295-307; 2018.
- Fujimoto M, Hirata A, Wang J, Fujiwara O, Shiozawa T. FDTD-derived correlation of maximum temperature increase and peak SAR in child and adult head models due to dipole antenna. *IEEE Trans Electromagn Comp* 48:240-247; 2006.
- Funahashi D, Hirata A, Kodera S, Foster KR. Area-averaged transmitted power density at skin surface as metric to estimate surface temperature elevation. *IEEE Access* 6:77665-77674; 2018.
- Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys Med Biol* 41:2271-2293; 1996.
- Gandhi OP, Li Q-X, Kang G. Temperature rise for the human head for cellular telephones and for peak SARs prescribed in safety guidelines. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 49:1607-1613; 2001.
- Gosselin M-C, Christ A, Kühn S, Kuster N. Dependence of the oc-occupational exposure to mobile phone base stations on the

- properties of the antenna and the human body. *IEEE Trans Electromagnet Compat* 51: 227-235; 2009.
- Gowland P, De Wilde J. Temperature increase in the fetus due to radio frequency exposure during magnetic resonance scanning. *Phys Med Biol* 53:L15-L18; 2008.
- Guy AW, Lin JC, Kramar PO, Emery AF. Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 23:492-498; 1975.
- Hashimoto Y, Hirata A, Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster KR. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. *Phys Med Biol* 62:3124-3138; 2017.
- He W, Xu B, Gustafsson M, Ying Z, He S. RF compliance study of temperature elevation in human head model around 28 GHz for 5G user equipment application: simulation analysis. *IEEE Access* 6:830-838; 2018.
- Hirata A. Temperature increase in human eyes due to near-field and far-field exposures at 900 MHz, 1.5 GHz, and 1.9 GHz. *IEEE Trans Electromagnet Compat* 47:68-76; 2005.
- Hirata A, Asano T, Fujiwara O. FDTD analysis of human body-core temperature elevation due to RF far-field energy prescribed in the ICNIRP guidelines. *Phys Med Biol* 52:5013-5023; 2007.
- Hirata A, Asano T, Fujiwara O. FDTD analysis of body-core temperature elevation in children and adults for whole-body exposure. *Phys Med Biol* 53:5223-5238; 2008.
- Hirata A, Fujimoto M, Asano T, Jianqing W, Fujiwara O, Shiozawa T. Correlation between maximum temperature increase and peak SAR with different average schemes and masses. *IEEE Trans Electromagnet Compat* 48:569-578; 2006.
- Hirata A, Fujiwara O. The correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in the human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6 GHz. *Phys Med Biol* 54:7227-7238; 2009.
- Hirata A, Fujiwara O, Nagaoka T, Watanabe S. Estimation of whole-body average SAR in human models due to plane-wave exposure at resonance frequency. *IEEE Trans Electromagnet Compat* 52:41-48; 2010.
- Hirata A, Kodera S, Wang J, Fujiwara O. Dominant factors influencing whole-body average SAR due to far-field exposure in whole-body resonance frequency and GHz regions. *Bioelectromagnetics* 28:484-487; 2007.
- Hirata A, Laakso I, Ishii Y, Nomura T, Chan KH. Computation of temperature elevation in a fetus exposed to ambient heat and radio frequency fields. *Numerical Heat Transfer, Part A: Appl* 65:1176-1186; 2014.
- Hirata A, Laakso I, Oizumi T, Hanatani R, Chan KH, Wiart J. The relationship between specific absorption rate and temperature elevation in anatomically based human body models for plane wave exposure from 30 MHz to 6 GHz. *Phys Med Biol* 58:903-921; 2013.
- Hirata A, Nagaya Y, Ito N, Fujiwara O, Nagaoka T, Watanabe S. Conservative estimation of whole-body average SAR in infant model for 0.3-6 GHz far-field exposure. *Phys Med Biol* 129:2102-2107; 2009.
- Hirata A, Shiozawa T. Correlation of maximum temperature increase and peak SAR in the human head due to handset antennas. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 51:1834-1841; 2003.
- Hirata A, Sugiyama H, Fujiwara O. Estimation of core temperature elevation in humans and animals for whole-body averaged SAR. *Prog Electromagnet Res* 99:53-70; 2009.
- Hirata A, Watanabe S, Fujiwara O, Kojima M, Sasaki K, Shiozawa T. Temperature elevation in the eye of anatomically based human head models for plane-wave exposures. *Phys Med Biol* 52:6389-6399; 2007.
- Hirata A, Yanase K, Laakso I, Chan KH, Fujiwara O, Nagaoka T, Watanabe S, Conil E, Wiart J. Estimation of the whole-body averaged SAR of grounded human models for plane wave exposure at respective resonance frequencies. *Phys Med Biol* 57:8427-8442; 2012.
- Ibrahim A, Dale C, Tabbara W, Wiart J. Analysis of the temperature increase linked to the power induced by RF source. *Prog Electromagnet Res* 52:23-46; 2005.
- ICNIRP. Review of concepts, quantities, units, and terminology for non-ionizing radiation protection. *Health Phys* 49:1329-1362; 1985.
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494-521; 1998.
- ICNIRP. Review of scientific evidence on dosimetry, biological effects, epidemiological observations, and health consequences concerning exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Munich: International Commission on Non-ionizing Radiation Protection; 2009.
- ICNIRP. Statement on the “guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz).” *Health Phys* 97:257-258; 2009.
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys* 99:818-836; 2010.
- Kühn S, Jennings W, Christ A, Kuster N. Assessment of induced radio-frequency electromagnetic fields in various anatomical human body models. *Phys Med Biol* 54:875-90; 2009.
- Kühn S, Jennings W, Christ A, Kuster N. Assessment of induced radio-frequency electromagnetic fields in various anatomical human body models. *Phys Med Biol* 54:875-890; 2009.
- Kanezaki A, Hirata A, Watanabe S, Shirai H. Effects of dielectric permittivities on skin heating due to millimeter wave exposure. *Biomed Eng Online* 8:20; 2009.
- Karampatzakis A, Samaras T. Numerical modeling of heat and mass transfer in the human eye under millimeter wave exposure. *Bioelectromagnetics* 34:291-299; 2013.
- Kawai H, Nagaoka T, Watanabe S, Saito K, Takahashi M, Ito K. Computational dosimetry in embryos exposed to electromagnetic plane waves over the frequency range of 10 MHz–1.5 GHz. *Phys Med Biol* 55:N1; 2009.
- Kodera S, Hirata A, Funahashi D, Watanabe S, Jokela K, Croft RJ. Temperature rise for brief radio-frequency exposure below 6 GHz. *IEEE Access* 6:65737-65746; 2018.
- Laakso I. Assessment of the computational uncertainty of temperature rise and SAR in the eyes and brain under far-field exposure from 1 to 10 GHz. *Phys Med Biol* 54:3393-3404; 2009.
- Laakso I, Hirata A. Dominant factors affecting temperature rise in simulations of human thermoregulation during RF exposure. *Physics in Medicine and Biology* 56: 7449-7471; 2011.
- Laakso I, Morimoto R, Heinonen J, Jokela K, Hirata A. Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz. *Phys Med Biol* 62:6980-6992; 2017.
- Lee A-K, Choi H-D. Determining the influence of Korean population variation on whole-body average SAR. *Phys Med Biol* 57:2709-2725; 2012.
- Li K, Sasaki K, Watanabe S, Shirai H. Relationship between power density and surface temperature elevation for human skin exposure to electromagnetic waves with oblique incidence angle from 6 GHz to 1 THz. *Phys Med Biol* 64:065016; 2019.
- McIntosh RL, Anderson V. SAR versus VAR, and the size and shape that provide the most appropriate RF exposure met-

- in the range of 0.5–6 GHz. *Bioelectromagnetics* 32:312-321; 2011.
- Morimoto R, Hirata A, Laakso I, Ziskin MC, Foster KR. Time constants for temperature elevation in human models exposed to dipole antennas and beams in the frequency range from 1 to 30 GHz. *Phys Med Biol* 62:1676-1699; 2017.
- Morimoto R, Laakso I, De Santis V, Hirata A. Relationship between peak spatial-averaged specific absorption rate and peak temperature elevation in human head in frequency range of 1-30 GHz. *Phys Med Biol* 61:5406-5425; 2016.
- Nagaoka T, Niwa T, Watanabe S. Specific absorption rate in mothers and fetuses in the second and third trimesters of pregnancy. *Int J Microwave Opt Tech* 9:34-38; 2014.
- Nagaoka T, Togashi T, Saito K, Takahashi M, Ito K, Watanabe S. An anatomically realistic whole-body pregnant-woman model and specific absorption rates for pregnant-woman exposure to electromagnetic plane waves from 10 MHz to 2 GHz. *Phys Med Biol* 52:6731-6745; 2007.
- Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Taki M, Yamanaka Y. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Phys Med Biol* 49:1-15; 2004.
- Nagaoka T, Watanabe S. Development of voxel models adjusted to ICRP reference children and their whole-body averaged SARs for whole-body exposure to electromagnetic fields from 10 MHz to 6 GHz. *IEEE Access* 7:135909-135916; 2019.
- Nelson DA, Curran AR, Nyberg HA, Marttila EA, Mason PA, Zirriax JM. High-resolution simulations of the thermophysiological effects of human exposure to 100 MHz RF energy. *Phys Med Biol* 58:1947-1968; 2013.
- Oizumi T, Laakso I, Hirata A, Fujiwara O, Watanabe S, Taki M, Kojima M, Sasaki H, Sasaki K. FDTD analysis of temperature elevation in the lens of human and rabbit models due to near-field and far-field exposures at 2.45 GHz. *Radiat Protect Dosim* 155:284-291; 2013.
- Razmadze A, Shoshiashvili L, Kakulia D, Zaridze R, Bit-Babik G, Faraone A. Influence of specific absorption rate averaging schemes on correlation between mass-averaged specific absorption rate and temperature rise. *Electromagnetics* 29:77-90; 2009.
- Samaras T, Kalampaliki E, Sahalos JN. Influence of thermophysiological parameters on the calculations of temperature rise in the head of mobile phone users. *IEEE Trans Electromag Compat* 49:936-939; 2007.
- Sasaki K, Mizuno M, Wake K, Watanabe S. Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz. *Phys Med Biol* 62:6993-7010; 2017.
- Sasaki K, Wake K, Watanabe S. Measurement of the dielectric properties of the epidermis and dermis at frequencies from 0.5 GHz to 110 GHz. *Phys Med Biol* 59:4739; 2014.
- Taguchi K, Laakso I, Aga K, Hirata A, Diao Y, Chakarothai J, Kashiwa T. Relationship of external field strength with local and whole-body averaged specific absorption rates in anatomical human models. *IEEE Access* 6:70186-70196; 2018.
- Takei R, Nagaoka T, Nishino K, Saito K, Watanabe S, Takahashi M. Specific absorption rate and temperature increase in pregnant women at 13, 18, and 26 weeks of gestation due to electromagnetic wave radiation from a smartphone. *IEICE Comm Exp*: 2018XBL0026; 7(6):212-217; 2018.
- Tateno A, Akimoto S, Nagaoka T, Saito K, Watanabe S, Takahashi M, Ito K. Specific absorption rates and temperature elevations due to wireless radio terminals in proximity to a fetus at gestational ages of 13, 18, and 26 weeks. *IEICE Trans Comm* 97:2175-2183; 2014.
- Uusitupa T, Laakso I, Ilvonen S, Nikoskinen K. SAR variation study from 300 to 5000 MHz for 15 voxel models including different postures. *Phys Med Biol* 55:1157-1176; 2010.
- Van Leeuwen GM, Legendijk JJ, Van Leersum BJ, Zwamborn AP, Hornsleth SN, Kotte AN. Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone. *Phys Med Biol* 44:2367-2379; 1999.
- Vermeeren G, Joseph W, Olivier C, Martens L. Statistical multipath exposure of a human in a realistic electromagnetic environment. *Health Phys* 94:345-354; 2008.
- Wainwright P. Computational modeling of temperature rises in the eye in the near field of radiofrequency sources at 380, 900 and 1800 MHz. *Phys Med Biol* 52:3335-3350; 2007.
- Wang J, Fujiwara O. FDTD computation of temperature rise in the human head for portable telephones. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 47:1528-1534; 1999.
- Ziskin MC, Morrissey J. Thermal thresholds for teratogenicity, reproduction, and development. *Int J Hypertherm* 27:374-387; 2011.

## 附属書 B：健康リスク評価の文献

### 序論

世界保健機関 (WHO) は、高周波電磁界 (電磁界) と健康に関する文献の詳細なレビューを実施しました。これは、2014 年に公開協議の環境保健クライテリア文書として公表されました。この独立したレビューは、高周波電磁界の健康への悪影響について最も包括的かつ徹底的な評価です。さらに、欧州委員会イニシアチブである新興および新規に同定される健康リスクに関する科学委員会 (SCENIHR) も電磁界へのばく露による潜在的な健康影響に関する報告書 (SCENIHR 2015) を作成し、スウェーデン放射線安全庁 (SSM) もこの問題に関するいくつかの国際的報告書を作成しました (SSM 2015、2016、2018)。したがって、本ガイドラインは、個々の研究についてもう 1 つ別にレビューを作成することはせず、高周波電磁界へのばく露に関連する健康リスク評価の基礎としてこれらの文献レビューを利用しました。ただし、ICNIRP は、本ガイドラインの策定において完全を期すために、WHO、SCENIHR、および SSM からのレビューの後に公表されたより最近の研究を考慮しました (打切日 2019 年 9 月 1 日)。高周波電磁界の健康に関する文献の ICNIRP 評価について以下に説明しますが、その内容は、文献の簡潔な概要、その概要を説明するための限られた数の例示、および ICNIRP が到達した結論となっています。

以下に述べる高周波電磁界の生物学的影響および健康への影響に関する研究の要約は、身体のシステム、プロセス、または特定の疾患への影響を考慮しています。この調査が、ヒトの健康への悪影響の閾値の決定に大きく影響を与えました。考慮された研究領域は、高周波電磁界と多様な潜在的な健康関連の影響との関係性を評価した細胞、動物、およびヒトでの実験的試験、およびヒトでの観察研究です。実験的研究には、多数の潜在的な交絡因子を制御し、高周波電磁界ばく露を操作できるという利点があります。その一方、現実的なばく露環境との比較、および多くの疾患プロセスの評価に十分なばく露時間の採用という点において実験的研究にも限界があります。また細胞研究および動物研究の場合には、研究結果をヒトに関連付けることが難しいこともあります。疫学研究は、コミュニティ内の実際の健康とより密接に関連していますが、そのほとんどは観察研究であり、したがって、研究の方法に応じて、さまざまな種類の誤差およびバイアスが重要な問題になります。これらには、交絡、選択バイアス、情報バイアス、逆転した因果関係、およびばく露の誤分類が含まれます。一般に、前向きコホート研究はバイアスの影響が最も少ないです

<sup>8</sup> 用語“実証された”についての詳細は、ガイドラインの本文に述べられています。

が、稀少疾患の研究の場合、大きなサンプルサイズが必要です。したがって、高周波電磁界ばく露と健康への悪影響との関係について有用な結論に至るために重要なことは、さまざまな研究タイプにわたる研究を考慮することです。

ICNIRP は、“実証された”<sup>8</sup>健康への悪影響を ICNIRP ガイドラインの根拠としていることに注意することが重要です。このため、健康への悪影響に限定して人体防護のための制限が必要である場合、生物学的影響と健康への悪影響の相違は重要なこととして区別します。高周波電磁界の健康影響に関する研究は、特に関心および懸念がある少数の領域に集中する傾向があり、いくつかの他の領域はほとんどまたはまったく注目されていません。高周波電磁界と骨格器系、筋系、呼吸器系、消化器系、および排泄器系との間の潜在的な関係に取り組んだ十分な研究はないため、これらはこれ以上考慮されません。このレビューは、正弦波 (例えば、連続波) と非正弦波 (例えば、パルス波) の電磁界、および急性と慢性の両方のばく露を含むさまざまなタイプの高周波電磁界ばく露が健康に悪影響を与える可能性を検討します。

### 脳の生理学および機能

#### 脳の電氣的活動および認知タスク遂行成績

高次認知機能に取り組んだヒト研究は、主に ICNIRP (1998) の基本制限の値の範囲内で実施されました。これは、主に、認知タスク遂行成績、および脳電図 (EEG) および脳血流 (CBF) の指標 (それぞれ、脳の電氣的活動および血流/代謝の鋭敏な指標) によって評価されました。認知タスク遂行成績、CBF、または事象関連電位 (EEG の一種) などの認知機能指標に関する大半の二重ブラインド化されたヒト実験研究は、高周波電磁界ばく露との関連を報告していません。いくつかの散発的な知見が報告されていますが、これらは一貫性のあるまたは意味のある傾向を示していません。これは、多数の統計学的比較がもたらした結果および偶然の知見である可能性があります。したがって、高周波電磁界が認知タスク遂行成績、CBF、または事象関連電位 (EEG の一種) などの認知機能指標に悪影響を与えることを実証した報告はありません。EEG の周波数成分を分析した研究が、覚醒時 EEG の 8~13 Hz のアルファ帯および睡眠時 EEG の 10~14 Hz の「睡眠紡錘波」周波数範囲が、 $2 \text{ W kg}^{-1}$  未満の比エネルギー吸収率 (SAR) の高周波電磁界ばく露の影響を受けることを、信頼性をもって示しましたが、これらが健康への悪影響に関連することを示す証拠はありません (例えば、Loughran et al. 2012)。

げっ歯類およびヒト以外の霊長類はどちらも、ラットの場合は全身平均 SAR  $> 5 \text{ W kg}^{-1}$ 、ヒト以外の霊長類の場合は全身平均 SAR  $> 4 \text{ W kg}^{-1}$  の高周波数電磁界ばく露、これらは深部体温の約  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇に対応するばく露ですが、こ

のようなばく露による食餌強化記憶タスクの遂行成績低下を示しました。ただし、このような成績の低下が、通常よく見られる体温による動機づけ（食欲）の低下ではなく、認知能力そのものの低下によるという示唆は何もありません。このような動機づけの変化は、正常かつ可逆的な体温調節反応と見なされ、それ自体は健康への悪影響を表すものではありません。同様に、健康への悪影響とはみなされませんが、ヒト以外の霊長類において体温を下げるような行動変化も  $1 \text{ W kg}^{-1}$  の全身平均 SAR で観察されています。この全身平均 SAR で  $1 \text{ W kg}^{-1}$  という閾値は、急性ばく露、反復ばく露、および長期ばく露において同じでした。

限られた数の高次認知機能に関する疫学研究があります。高周波電磁界に伴う認知タスク遂行成績指標の僅かな変化についての報告（複数）がありましたが、研究知見は相反していました。報告された変化が高周波電磁界ばく露に関連しているという証拠、および観察された影響についてのいくつかの代替的説明がもっともらしいものであるという証拠はないままです。

要約すると、高周波電磁界へのばく露が健康に関連して高次認知機能に影響を与えることを実証した実験的または疫学的証拠はありません。

### 症状および安寧

高周波電磁界が気分、行動特性および症状に影響を与える可能性に取り組んだ研究があります。

安寧または症状の急性変化について試験したいくつかのヒトでの実験的研究報告が入手可能ですが、これらの研究はばく露による実証された影響を確認できませんでした。人口集団のごく一部の人々は、非特異的な症状の原因がさまざまなタイプの高周波電磁界ばく露にあると信じています。これは、電磁界に起因する本態性環境不耐症（IEI-電磁界）と呼ばれます。二重ブラインド化実験研究は、健常者集団からの抽出標本と同様に、IEI-電磁界集団からの抽出標本においても、そのような症状と高周波電磁界ばく露の関連を一貫して同定できませんでした。こうした実験的研究は、ばく露それ自体ではなく、「ばく露についての思い込み」（例えば、いわゆる「ノセボ」効果）が関連する症状の決定要因であるという証拠を提出しています（例えば、Eltiti et al. 2018; Verrender et al. 2018）。

疫学研究は、場所が固定された送信アンテナおよび身体の近くで使用される機器からの高周波電磁界ばく露が、症状および安寧の両方に及ぼす潜在的な長期影響に取り組んできました。いくつかの例外を除いて、これらの研究は症状およびばく露についての自己報告情報を用いた横断研究です。このような研究においては、選択バイアス、報告バイアス、不十分なばく露評価、およびノセボ効果が懸念されます。送信アンテナに関する研究では、ばく露の客

観的測定が実施された場合、または前向きにばく露情報が収集された場合には、ばく露と症状または安寧との間に一貫した関連は観察されませんでした。携帯電話の使用に関する研究では、症状および問題行動との関連が観察されました。ただし、これらの研究では、一般に、高周波電磁界ばく露による潜在的な影響とそれ以外の影響、例えば携帯電話の夜間使用による睡眠不足のような、携帯電話使用がもたらした結果を区別することはできません。全般的に言えば、疫学研究は、症状または安寧に対する高周波電磁界ばく露の因果的影響の証拠を提供していません。

その一方、十分に高いレベルの高周波電磁界は痛みを引き起こし得るという証拠があります。Walters ら（2000）は、背中への 94 GHz、3 秒のばく露における痛みの閾値が  $12.5 \text{ kW m}^{-2}$  であり、それは温度を  $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$  から  $43.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$  に（ $3.3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{秒}$  の速度で）上昇させることを報告しました。この絶対的な温度閾値は Torbjork ら（1984）と一致しています。彼らは、痛みの中央値閾値  $43 \text{ }^{\circ}\text{C}$  が、同時に測定された侵害受容器の反応閾値に従ったものであることを観察しました（ $41 \text{ }^{\circ}\text{C}$  と  $43 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。

高周波電磁界によって引き起こされる痛みについての別の例は、接触電流を介した間接ばく露によるものです。このような場合、環境中の高周波電磁界が導電性物体を介して人へと向かい、結果として生じる電流が周波数に応じて神経を刺激し、痛みを引き起こし、および/または組織を損傷します。接触電流から生じる誘導電流の閾値を決定することは非常に困難ですが、健康への影響の閾値の最良推定値は痛みの閾値です。それは、小児および成人それぞれについて約  $10 \text{ mA}$  および  $20 \text{ mA}$  です（Chatterjee et al. 1986 から推定）。

要約すると、症状および安寧に対する高周波電磁界ばく露の悪影響の報告は、痛みを除き、実証されていません。痛みは、高いばく露レベルでの温度上昇に関連します（直接的および間接的な高周波電磁界ばく露の両方による）。痛みに対する直接的な影響の閾値は、背中への 94 GHz のばく露において  $12.5 \text{ kW m}^{-2}$  付近であり、この値は熱生理学の知識と一致しています。間接的な影響（接触電流）の閾値は、 $100 \text{ kHz}$  から  $110 \text{ MHz}$  までの電磁界の場合、小児および成人それぞれについて  $10 \text{ mA}$  および  $20 \text{ mA}$  の付近にあります。

### その他の脳生理学および関連する機能

健康に悪影響を及ぼす可能性のある生理学的機能に対する高周波電磁界の潜在的な悪影響に関してかなりの数の研究が行われました。そのほとんどは細胞研究技術を用いています。こうした研究では、多くの種類の細胞株が用いられ、細胞内および細胞間シグナル伝達、膜イオンチャネル電流および入力抵抗、 $\text{Ca}^{2+}$  ダイナミクス、シグナル伝達経路、サイトカイン発現、神経変性のバイオマーカー、熱



ショックタンパク質、酸化ストレス関連プロセスなどの機能が評価されました。細胞の形態学的変化の報告はいくつかありますが、これらは検証が得られておらず、健康への関連性も示されていません。高周波電磁界がラットの血液脳関門を通過するアルブミン漏出を誘発するという報告もありましたが（例えば、Nittby et al. 2009）、研究の方法論的限界および結果が独立的に検証されていないため、影響の証拠は依然としてありません。いくつかの研究では、既知の毒性物質と高周波電磁界との組み合わせばく露の影響についても試験しましたが、現在、これが上述の結論に影響を与えることは示されていません。

（高周波成分を含む）強いパルス化低周波電界は、細胞膜に透過性を引き起こし、細胞内および細胞外の物質交換を可能にします（Joshi and Schoenbach 2010）。これは電気穿孔と呼ばれます。変調されていない 18 GHz 電磁界へのばく露も同様の影響を引き起こすことが報告されました（Nguyen et al. 2017）。どちらのばく露も非常に高い電界強度が必要です（例えば、低周波電界の場合は組織内で  $10 \text{ kV m}^{-1}$ （ピーク値）、18 GHz の場合は  $5 \text{ kW kg}^{-1}$ ）。このようなレベルは、人体の現実的なばく露シナリオにおいて健康に悪影響を与えることが示されておらず、また、それらの非常に高い閾値を考慮すれば、これらより低い閾値をもつ影響に基づく制限によって防護されています。したがって、電気穿孔についてはこれ以上議論しません。

要約すると、人体の健康を損なうような生理学的プロセスに対する高周波電磁界の影響の証拠はありません。

## 聴覚、前庭、および視覚機能

かなりの数の動物研究およびいくつかのヒト研究が、聴覚、前庭、および視覚系の機能および病理に対する高周波電磁界の潜在的な影響について試験しました。

高周波電磁界のサブミリ秒パルスは、可聴音をもたらす可能性があります。具体的には、電磁界周波数範囲 200 ~ 3000 MHz において、頭部への短い（約 35 ~ 100  $\mu\text{s}$ ）高周波パルスがマイクロ波ヒアリング（マイクロ波聴覚作用）を生じさせる可能性があります。そのような短パルスは熱弾性膨張を引き起こし、それが正常な聴覚作用に関与するものと同じプロセスを経て蝸牛内の感覚細胞で検出されます。この現象は、一瞬の低レベルノイズとして知覚され、しばしば「クリック音」または「ブンブンうなる音」と表現されます。例えば、Röschmann (1991) は、2.45 GHz の 10  $\mu\text{s}$  および 20  $\mu\text{s}$  パルスを実験に用いました。これによりパルス当たり  $4.5 \text{ mJ kg}^{-1}$  の比エネルギー吸収 (SA) が発生し、それがパルス当たり約 0.00001 °C の温度上昇をもたらすと推定されました。これらのパルスはかろうじて聴取可能であったことから、これが聴覚閾値の音に対応することを示唆しました。より高い強度の SA パルスはより顕著

な効果をもたらす可能性があります。現実的なばく露シナリオにおいて、マイクロ波ヒアリングが健康に影響を与える可能性があるという証拠はないため、本ガイドラインはマイクロ波ヒアリングを特別に考慮するための制限を提供していません。

携帯電話からの電磁界ばく露の悪影響を試験するために、実験的および観察的研究も行われました。少数の研究は、動物モデルで聴覚機能および細胞構造への影響を調査しました。しかし、これらの研究の結果には一貫性がありません。

上述された感覚処理に関する行動的および電気生理学的指標のほかに、かなりの数の研究が、ヒトの聴覚、前庭、および視覚の機能に対する高周波電磁界ばく露の急性影響を試験しました。これらの大部分は ICNIRP (1998) の基本制限レベルを下回るばく露レベルで、携帯電話に似た信号を用いて行われました。影響の報告がいくつかありますが、それらの結果は非常に変動しやすく、さらに規模を拡大し、方法論的な厳密性を高めた研究ではそのような影響は見出されていません。

高周波電磁界を発する機器による感覚への影響に取り組んだ疫学研究はほとんどありません。入手可能な研究は携帯電話の使用に焦点を当てていますが、耳鳴り、難聴、または前庭または視覚機能のリスク上昇との関連の証拠を提供していません。

動物研究は、ウサギにおいて高周波電磁界ばく露の結果で生じる加熱が白内障の形成につながる可能性があることも報告しました。この発生には、低い周波数 (< 6 GHz) の非常に高い局所 SAR レベル ( $100 \sim 140 \text{ W kg}^{-1}$ ) により数 °C の温度上昇を数時間維持する必要があります。ただし、ウサギモデルは霊長類よりも白内障形成の影響を受けやすく（霊長類はヒトの健康により強く関連する）、高周波電磁界のばく露を受けた霊長類において白内障は観察されていません。その他の眼の深部構造（例えば、網膜または虹彩）に対する実証された影響は見出されていません。しかしながら、ウサギは、より高い周波数 (30 ~ 300 GHz) における眼の表層構造（例えば、角膜）への損傷に適したモデルである可能性があります。角膜のベースライン温度は、眼の後部に比べて相対的に低いため、表面に傷害を引き起こすには非常に高いばく露レベルが必要です。例えば、Kojima ら (2018) は、角膜の健康への悪影響は、40 GHz から 95 GHz までの周波数にわたり、 $1.4 \text{ kW m}^{-2}$  を上回る入射電力密度で生じる可能性があるとして報告しました。ここで、 $500 \text{ W m}^{-2}$  以下では影響は見られませんでした。著者らは、ヒトのまばたき率 (3 ~ 10 秒に 1 回の範囲。それに対しウサギは 5 ~ 20 分に 1 回) が、ヒトにおけるそのような影響を排除するのかもしれないと結論しました。

要約すると、これまでに報告されたヒトの健康に関連す

る聴覚、前庭、または視覚の機能または病理学への影響で実証されたものはありません。表在性の眼の損傷に関するいくつかの証拠が、少なくとも  $1.4 \text{ kW m}^{-2}$  のばく露を受けたウサギで示されていますが、これのヒトへの関連性は示されていません。

## 神経内分泌系

少数のヒト研究が、内分泌系機能の指標が高周波電磁界ばく露によって影響を受けるか否かを試験しました。メラトニン、成長ホルモン、黄体形成ホルモン、コルチゾール、エピネフリン、およびノルエピネフリンを含むいくつかのホルモンが評価されましたが、ばく露による影響の一貫した証拠は観察されませんでした。

動物研究において、実証された変化は、全身 SAR が  $4 \text{ W kg}^{-1}$  のオーダーの急性ばく露によってのみ報告されており、この全身 SAR は深部体温の  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  またはそれ以上の上昇をもたらします。ただし、これが健康への影響に対応するという証拠はありません。いくつかの神経内分泌指標の電磁界に依存した変化を報告する少数の研究がありましたが、これらも実証されていません。文献は、全体として、多様な条件下のげっ歯類において、携帯電話信号への反復的な毎日のばく露が、メラトニンの血漿レベル、またはメラトニン代謝、エストロゲンまたはテストステロン、またはコルチコステロンまたは副腎皮質刺激ホルモンに影響を及ぼさないことを報告しています。

メラトニンレベルに対する高周波電磁界へのばく露の潜在的影響に関する疫学研究は、矛盾する結果を報告しており、方法論的な限界があります。その他のホルモンを影響評価項目とした報告については、十分な科学的品質を有する疫学的研究が確認されていません。

要約すると、神経内分泌系に対する高周波電磁界の影響が観察された最低レベルは  $4 \text{ W kg}^{-1}$  ですが（げっ歯類および霊長類において）、これがヒトに当てはまる、または人の健康に関連があるという証拠はありません。その他の報告された影響は実証されていません。

## 神経変性疾患

神経変性疾患への悪影響に関するヒトでの実験研究は存在しません。

パルス化高周波電磁界へのばく露がラットにおいて神経細胞死を増加させ、この神経細胞死は神経変性疾患のリスク増加に寄与する可能性があることが報告されましたが、他の研究はこの研究結果を確認できませんでした。いくつかの別の影響が報告されました（例えば、大脳皮質での神経伝達物質放出、海馬でのタンパク質発現、および神経細胞でのアポトーシスがなない場合の自食作用などの変化）が、

そのような変化が神経変性疾患につながることは示されていません。神経変性への影響を調べた他の研究は、方法論または他の欠点があるため、役立つ知識を提供していません。

デンマークの疫学的コホート研究は、携帯電話の使用が神経変性疾患に及ぼす潜在的な影響を調査し、アルツハイマー病、血管性およびその他の認知症、およびパーキンソン病のリスク推定値の低下を報告しました（Schüz et al. 2009）。疾患の前駆症状により初期症状のある人は携帯電話の使用を開始できなくなる可能性があるため、このような知見は、逆転した因果関係の結果である可能性が高いと考えられます。多発性硬化症に関する研究の結果は一貫性がありません。男性においては何の影響も見られず、女性ではボーダーライン付近のリスク上昇が見られたものの、一貫したばく露反応の傾向性はありませんでした。

要約すると、神経変性疾患に対する悪影響は実証されていません。

## 心臓血管系、自律神経系、および体温調節

上述したように、高周波電磁界は体内に加熱を引き起こす可能性があります。ヒトは非常に効率的な体温調節系を持っていますが、あまりにも過度の加熱は心臓血管系にストレスをかけ、健康への悪影響に結びつく可能性があります。

多数のヒト研究が、心拍数および心拍変動、血圧、体温、皮膚および指の温度、および皮膚の導電率を含む、心臓血管系、自律神経系、体温調節機能の指標を研究しました。ほとんどの研究は、自律神経系の調節を受けるような影響評価項目に対する影響はないことを示しています。比較的少数の報告された影響は小さく、健康への影響はないと考えられます。報告された変化も一貫性がなく、方法論的限界または偶然による可能性があります。全身 SAR が約  $1 \text{ W kg}^{-1}$  までのより高い強度のばく露の場合（Adair et al. 2001）、発汗および心臓血管系の反応は、他の発生源からの熱負荷が増加した状態で観察されたものと同じであることが報告されました。この時の深部体温の上昇は約  $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  未満でした。

動物研究では状況が異なり、はるかに高いばく露レベルが用いられ、体温調節が対応しきれず、死亡が起こるほどに体温が上昇するようなレベルまでがしばしば用いられました。例えば、Frei ら（1995）はラットに  $35 \text{ GHz}$  電磁界への  $13 \text{ W kg}^{-1}$  の全身ばく露を与え、深部体温を（ $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$  まで） $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇させ、死亡させました。同様に、Jauchem and Frei（1997）はラットに  $350 \text{ MHz}$  電磁界への  $13.2 \text{ W kg}^{-1}$  の全身ばく露を与え、熱的崩壊（すなわち、体温調節系が深部体温上昇に対処しきれなくなった状態）は約  $42 \text{ }^{\circ}\text{C}$  で発生することを報告しました。ヒトはげっ歯類よ

りも効率的な体温調節機能を持つため、これらの動物での知見をヒトに直接関連付けることは困難です。Taberski ら (2014) はジャンガリアンハムスターで、900 MHz 電磁界への  $4 \text{ W kg}^{-1}$  の全身ばく露を与えた後、深部体温の上昇は見られず、唯一の検出可能な影響は食餌摂取量の減少であったことを報告しました（食餌摂取量の減少は、ヒトにおいて深部体温が上昇した時の食事減少と一貫性があります）。

心臓血管系、自律神経系、または体温調節の結果に関する疫学研究はほとんどありません。入手可能な研究報告は、高周波電磁界ばく露と心臓血管の健康状態指標との関連を示しませんでした。

要約すると、ヒトの健康を損なうような心血管系、自律神経系、または体温調節への影響は、全身平均 SAR が約  $4 \text{ W kg}^{-1}$  未満のばく露では実証されておらず、全身平均 SAR が  $4 \text{ W kg}^{-1}$  より実質的にかなり高いばく露を受けた動物において傷害が示されているにすぎません。

## 免疫系および血液学

高周波電磁界ばく露の後で生じた免疫機能および血液学的機能の一過性の変化について、一貫性のない報告がありました。これらは大部分が細胞研究からの報告でしたが、いくつかの動物研究も実施されました。これらの報告は実証されていません。

実施された少数のヒト研究は、高周波電磁界が免疫系または血液学的機能を介してヒトの健康に影響を与えるという証拠を提供していません。

## 生殖能力、生殖、および小児期の発達

生殖および発達に対する高周波電磁界ばく露の潜在的な影響に取り組んだヒトでの実験的研究はほとんどありません。入手可能な研究報告は、生殖および発達に関連するホルモンに焦点を当てましたが、上述の神経内分泌系のセクションで説明したように、それらが高周波電磁界ばく露の影響を受けるといった証拠はありません。他の研究は、高周波電磁界への感受性が年齢の関数として高くなるか否かを明らかにするために、発達のさまざまな段階で（認知や脳の電気活動などの評価項目）を調べることでこの問題に取り組みました。現在、発達段階がこの問題に関連しているという証拠はありません。

多数の動物研究が、顕著な温度上昇を伴う高周波電磁界へのばく露は生殖および発達への影響を引き起こす可能性があることを示しました。それらの影響には、胚および胎児の喪失増加、胎児の奇形および異常の増加、出産時の胎児体重の減少が含まれます。そのようなばく露はまた、男性の生殖能力の低下を引き起こす可能性があります。し

かし、広範かつ完全に遂行された研究は、最大で  $4 \text{ W kg}^{-1}$  の全身平均 SAR レベルで発達への影響を同定できませんでした。特に、最大で  $2.34 \text{ W kg}^{-1}$  の全身 SAR レベルを用いたマウスの生殖能力および発達に関する大規模 4 世代研究は、悪影響の証拠を見出しませんでした (Sommer et al. 2009)。一部の研究は、この値を下回るばく露レベルでの男性の生殖能力への影響を報告しましたが、これらの研究は方法論的な限界を有しており、報告された影響は実証されていません。

疫学研究は、高周波電磁界ばく露との関連において、男性および女性の不妊および妊娠結果をさまざまな観点から調査しました。一部の疫学研究は、高周波電磁界と精子の質または男性不妊との関連を報告しましたが、総括すれば、入手可能な研究報告は全て、研究デザインまたはばく露評価の点で限界があるため、高周波電磁界ばく露との関連の証拠を提供していません。妊娠中の母親の携帯電話使用と子供の神経発達への潜在的影響については、少数の疫学研究報告が入手可能です。母親の携帯電話使用による高周波電磁界ばく露が子供の認知または精神運動性の発達に影響を与える、または発達の調査項目で遅延を引き起こすという実証された証拠はありません。

要約すると、ヒトの健康に関連する生殖能力、生殖、または発達への高周波電磁界ばく露の悪影響は実証されていません。

## がん

がんと特に関連する細胞および分子プロセスに関しては大量の文献があります。これには、細胞増殖、分化およびアポトーシス関連プロセス、がん原遺伝子発現、遺伝毒性、酸化ストレスの増加、および DNA 鎖切断などの研究が含まれます。いくつかのこれらの評価項目に対する高周波電磁界の影響の報告はありますが、健康に関連する影響の実証された証拠はありません (Vijayalaxmi and Prihoda 2019)。

高周波電磁界ばく露の発がんへの影響に関する少数の動物研究はポジティブな影響を報告しましたが、全般的に、これらの研究は方法論またはドシメトリに欠点があるか、研究結果が独立した研究で検証されませんでした。実際、大多数の研究は、さまざまな動物モデルにおいて発がん性がないことを報告しました。高周波電磁界ばく露が、発がん性物質 ENU (エチルニトロソ尿素) の出生前ばく露を受けた動物モデルの肝臓および肺の腫瘍の発生率を増加させた研究が再現されたことは、がんのプロモーション効果の可能性を示唆します (Lerchl et al. 2015; Tillmann et al. 2010)。用量反応関係の欠如、およびヒトとの関連性が不明な、肝臓および肺の腫瘍に対して未試験のマウスモデルを用いていること (Nesslany et al. 2015) が、これらの結果

の解釈およびヒトの健康への適用可能性を困難にしています。したがって、これらの結果をよりよく理解するためにさらなる研究が必要です。

携帯電話および携帯電話基地局に関連する高周波電磁界への長期ばく露による発がん可能性を調査した 2 件の最近の動物研究も、1 つは米国国家毒性プログラム (NTP 2018a, b)、もう 1 つは Ramazzini Institute (Falcioni et al. 2018) から公表されました。どちらの研究も、多数の動物、最良の実験実施基準<sup>※14</sup>、および生涯ばく露を受けた動物を使用しましたが、これらの研究は矛盾を有しており、その結果のばく露ガイドライン策定への有用性に影響を与える重要な限界も有しています。特に重要なことは、採用された統計的手法が、処置条件間の高周波に関連する差異と偶然による差異を区別するには十分ではなかったことと、採用した非常に高いばく露レベルに起因する高い深部体温の変化のため、データの解釈が困難であること、および、これら 2 つの研究にわたる一貫性が示されなかったことです。それゆえ、これらの研究のみを単独に検討しても (例えば、ICNIRP 2019)、他の動物およびヒトの発がん性研究との関連で検討しても (HCN 2014, 2016)、2 つの研究の知見は高周波電磁界に発がん性があるという証拠を提供していません。

携帯電話の使用とがんのリスクに関する多数の疫学研究も行われました。ほとんどの研究は、脳腫瘍、聴神経鞘腫、耳下腺腫瘍に焦点を当てましたが、その理由は、これらの腫瘍が携帯電話における典型的ばく露発生源のすぐ近くで発生するからです (Röösli et al. 2019)。しかし、一部の研究は、白血病、リンパ腫、ブドウ膜黒色腫、下垂体腫瘍、精巣がん、および悪性黒色腫など、他の種類の腫瘍について行われました。少数の例外を除き、研究は症例対照デザインを用い、携帯電話の使用履歴についての遡及的に収集された自己報告情報に依存しました。前向きばく露情報を用いたコホート研究報告は 2 件のみが入手可能です。いくつかの研究は、追跡期間が短すぎて長期ばく露の潜在的影響を評価することができず、より長い追跡期間を設けた症例対照研究から得られた結果は一貫していません。

国際がん研究機関がコーディネートした大規模なインターフォン研究は、通常の携帯電話ユーザにおける脳腫瘍、聴神経鞘腫、または耳下腺腫瘍のリスク上昇の証拠を提供しませんでしたし、リスク推定値は最初の携帯電話使用以降の期間の増加につれて上昇しませんでした (Interphone 2010, 2011)。聴神経鞘腫および神経膠腫の場合、累積通話時間の最高レベルでいくらか上昇したオッズ比が観察

#### 【電磁界情報センター脚注】

※14:原文では best laboratory practice となっているものの、good laboratory practice (GLP)と思われるので、「医薬品安全性試験実施基準 (GLP)」と理解される。

されましたが、それより累積通話時間が低いばく露カテゴリのいずれにおいても傾向性が観察されず、特に、最後から 2 番目のばく露カテゴリで最小のリスク推定値が見られたことに注目してください。この研究は、この種の研究で本質的に生じる想起バイアスと相まって、リスク上昇の証拠を提供していません。同様の結果が、聴神経鞘腫に関するスウェーデンの症例対照研究において観察されました (Pettersson et al. 2014)。これとは対照的に、スウェーデンの Hardell グループによる一連の症例対照研究は、携帯電話の使用開始から 5 年未満で既に、および累積通話時間の非常に低いレベルにおいて、聴神経鞘腫および悪性脳腫瘍の両方のリスクの有意な上昇を報告しています。それらの知見は、多くの国や地域における脳腫瘍発生率の傾向、すなわち、発生率は携帯電話の導入以降にいかなる増加も示していないという傾向と一致していません。

さらに、コホート研究 (症例対照研究とは異なり、想起バイアスおよび選択バイアスの影響を受けない) で、携帯電話加入者において、または前向きに収集された質問票から携帯電話の使用を推定した場合に、神経膠腫、髄膜腫、または聴神経鞘腫について高リスクを報告したものはありません。他の種類の腫瘍の研究も、携帯電話の使用に関連した腫瘍リスク上昇の証拠を提供していません。小児の携帯電話使用と脳腫瘍のリスクに関してはただ 1 件の研究が入手可能です (Aydin et al. 2011)。脳腫瘍のリスク上昇は観察されませんでした。

例えばラジオおよびテレビの放送アンテナからのような環境高周波電磁界へのばく露の研究は、小児または成人のいずれにおいても、がんリスク上昇の証拠を提供していません。職業的高周波電磁界ばく露に関連したがんの研究は、かなり大きな方法論上の限界を有しているため、高周波電磁界の発がん性の評価についての十分な情報を提供していません。総括すれば、疫学研究は、一般人口集団において遭遇するレベルの高周波電磁界ばく露による発がん性影響の証拠を提供していません。

要約すると、がんの誘発または進行に対する高周波電磁界の影響は実証されていません。

## 要約

限られた数の実証された高周波電磁界ばく露による健康への悪影響は、神経刺激、細胞膜の透過性の変化、および温度上昇による影響です。ICNIRP (1998) ガイドラインの制限レベルを下回るばく露レベルでの健康への悪影響の証拠はなく、これらの制限を下回る高周波電磁界ばく露により健康への悪影響が発生する可能性があることを予測させる相互作用メカニズムの証拠はありません。

## 参考文献

- Adair ER, Mylacraine KS, Cobb BL. Human exposure to 2450 MHz CW energy at levels outside the IEEE C95.1 standard does not increase core temperature. *Bioelectromagnetics* 22:429-439; 2001.
- Aydin D, Feychting M, Schüz J, Tynes T, Andersen TV, Schmidt LS, Poulsen AH, Johansen C, Prochazka M, Lannering B, Klæboe L, Eggen T, Jenni D, Grotzer M, Von der Weid N, Kuehni CE, Rööslı M. Mobile phone use and brain tumors in children and adolescents: a multicenter case-control study. *J National Cancer Inst* 103:1264-1276; 2011.
- Chatterjee I, Wu D, Gandhi OP. Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazard analysis in the VLF-MF band. *IEEE Trans Biomed Engineer* 33:486-494; 1986.
- Eltiti S, Wallace D, Russo R, Fox E. Symptom presentation in idiopathic environmental intolerance with attribution to electromagnetic fields: evidence for a nocebo effect based on data re-analyzed from two previous provocation studies. *Frontiers Psychol* 9:1563; 2018.
- Falcioni L, Bua L, Tibaldi E, Lauriola M, De Angelis L, Gnudi F, Mandrioli D, Manservigi M, Manservisi F, Manzoli I, Menghetti I, Montella R, Panzacchi S, Sgargi D, Strollo V, Vormoli A, Belpoggi F. Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. *Environment Res* 165:496-503; 2018.
- Frei MR, Ryan KL, Berger RE, Jauchem JR. Sustained 35-GHz radiofrequency irradiation induces circulatory failure. *Shock* 4:289-293; 1995.
- Health Council of the Netherlands. Mobile phones and cancer: part 2. Animal studies on carcinogenesis. The Hague: Health Council of the Netherlands; Publication 22; 2014.
- Health Council of the Netherlands. Mobile phones and cancer: part 3. Update and overall conclusions from epidemiological and animal studies. The Hague: Health Council of the Netherlands; Publication 06; 2016.
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494-522; 1998.
- ICNIRP. ICNIRP note: critical evaluation of two radiofrequency electromagnetic field animal carcinogenicity studies published in 2018. *Health Phys* 118(5):525-532; 2020.
- Interphone Study Group. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *International J Epidemiol* 39:675-694; 2010.
- Interphone Study Group. Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Cancer Epidemiol* 35:453-464; 2011.
- Jauchem JR, Frei MR. Body heating induced by sub-resonant (350 MHz) microwave irradiation: cardiovascular and respiratory responses in anesthetized rats. *Bioelectromagnetics* 18:335-338; 1997.
- Joshi RP, Schoenbach KH. Bioelectric effects of intense ultrashort pulses. *Critical Rev Biomed Engineer* 38:255-304; 2010.
- Kojima M, Susuki Y, Sasaki K, Taki M, Wake K, Watanabe S, Mizuno M, Tasaki T, Sasaki H. Ocular effects of exposure to 40, 75 and 95 GHz Millimeter Waves. *J Infrared, Millimeter-ter and Terahertz Waves*. 39(9):912-925; 2018.
- Lerchl A, Klose M, Grote K, Wilhelm AF, Spathmann O, Fiedler T, Streckert J, Hansen V, Clemens M. Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans. *Biochem Biophys Res Comm* 459:585-590; 2015.
- Loughran SP, McKenzie RJ, Jackson ML, Howard ME, Croft RJ. Individual differences in the effects of mobile phone exposure on human sleep: rethinking the problem. *Bioelectromagnetics* 33:86-93; 2012.
- Nagaoka T, Watanabe S. Development of voxel models adjusted to ICRP reference children and their whole-body SARs for whole-body exposure to electromagnetic fields from 10 MHz to 6 GHz. *IEEE Access* 7:135909-135916; 2019.
- Nesslany F, Aurengo A, Bonnet-Belfais M, Lambrozo J. Comment on Lerchl study: "Tumor promotion in mice by exposure to radiofrequency electromagnetic fields still waiting evidence." *Biochem Biophys Res Comm* 467:101-102; 2015.
- Nguyen THP, Pham VTH, Baulin V, Croft RJ, Crawford RJ, Ivanova EP. The effect of a high frequency electromagnetic field in the microwave range on red blood cells. *Sci Rep* 7:1-10; 2017.
- Nitby H, Brun A, Eberhardt J, Malmgren L, Persson BR, Salford LG. Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone. *Pathophysiol* 6:103-112; 2009.
- NTP. Technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in Hsd:Sprague Dawley SD rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. National Toxicology Program. Research Triangle Park, NC: NTP TR 595; 2018a.
- NTP. Technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (1900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. National Toxicology Program; NTP TR 596; 2018b.
- Pettersson D, Mathiesen T, Prochazka M, Bergenheim T, Florentzson R, Harder H, Feychting M. Long-term mobile phone use and acoustic neuroma risk. *Epidemiol* 25:233-241; 2014.
- Rööslı M, Lagorio S, Schoemaker MJ, Schüz J, Feychting M. Brain and salivary gland tumors and mobile phone use: evaluating the evidence from various epidemiological study designs. *Annual Rev Public Health* 40:221-238; 2019.
- Röschmann P. Human auditory system response to pulsed radiofrequency energy in RF coils for magnetic resonance at 2.4 to 170 MHz. *Magnetic Resonance Med* 21:197-215; 1991.
- SCENIHR. Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). Luxembourg: Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks; 2015.
- Schüz J, Waldemar G, Olsen JH, Johansen C. Risks for central nervous system diseases among mobile phone subscribers: a Danish retrospective cohort study. *PLoS One* 4:e4389; 2009. DOI 10.1371/journal.pone.0004389.
- Sommer AM, Grote K, Reinhardt T, Streckert J, Hansen V, Lerchl A. Effects of radiofrequency electromagnetic fields (UMTS) on reproduction and development of mice: a multi-generation study. *Radiat Res* 171:89-95; 2009.
- SSM. SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Recent research on EMF and health risk—tenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Luxembourg: Publication 19; 2015.
- SSM. SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Recent research on EMF and health risk—eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Stockholm: SSM; Publication 15; 2016.
- SSM. SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. recent Research on EMF and health risk—twelfth report from

- SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Publication 09; 2018.
- Taberski K, Klose M, Grote K, El Ouardi A, Streckert J, Hansen VW, Lerchl A. Noninvasive assessment of metabolic effects of exposure to 900 MHz electromagnetic fields on Djungarian Hamsters (*Phodopus sungorus*). *Radiat Res* 181:617-622; 2014.
- Tillmann T, Ernst H, Streckert J, Zhou Y, Taugner F, Hansen V, Dasenbrock C. Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model. *International J Radiat Biol* 86:529-41; 2010.
- Torebjork HE, LaMotte RH, Robinson CJ. Peripheral neural correlates of magnitude of cutaneous pain and hyperalgesia: simultaneous recordings in humans of sensory judgments of pain and evoked responses in nociceptors with C-fibers. *J Neurophysiol* 51:325-339; 1984.
- Verrender A, Loughran SP, Dalecki A, Freudenstien F, Croft RJ. Can explicit suggestions about the harmfulness of EMF exposure exacerbate a nocebo response in healthy controls? *Environ Res* 166:409-417; 2018.
- Vijayalaxmi, Prihoda TJ. Comprehensive review of quality of publications and meta-analysis of genetic damage in mammalian cells exposed to non-ionising radiofrequency fields. *Radiat Res* 191:20-30; 2019.
- Walters TJ, Blick DW, Johnson LR, Adair ER, Foster KR. Heating and pain sensation produced in human skin by millimetre waves: comparison to a simple thermal model. *Health Phys* 78:259-267; 2000.
- World Health Organization. Radiofrequency fields; Public Consultation Document, released October 2014. Geneva: WHO; 2014.



〔翻訳について〕

このガイドラインの日本語訳は、ICNIRP から正式な承認を得て、電磁界情報センターが原文（英文）にできるだけ忠実に作成いたしました。日本語訳に関する文責は電磁界情報センターにあります。文意は原文（英文）が優先されますので、日本語訳における不明な箇所等につきましては原文（英文）でご確認下さい。

日本語訳に際し、ICNIRP の Main Commission 元メンバーの多氣昌生先生（東京都立大学名誉教授、システムデザイン学部特別先導教授）、現メンバーの渡邊聡一先生（国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所電磁環境研究室長）、平田晃正先生（国立大学法人名古屋工業大学教授、先端医用物理・情報工学研究センター長）からご指導を仰ぎました。特に渡邊聡一先生には、詳細にご高閲を賜りました。ここに先生方へ心からの御礼を申し上げます。（2020年7月）