

# 人体の電磁界への曝露の制限

—ICNIRP ガイドライン、IEEE C95.1、電波防護指針などについて—

## 株式会社e・オータマ 佐藤智典

## 2021年8月2日

目	次
—	// \

#### 1 概要 1 $\mathbf{2}$ 電磁界の人体への影響 2.1 確立された影響 ...... 2.2 癌や生殖異常への影響の疑い . . . . . . . **3 ICNIRP** ガイドライン 3.1 職業的曝露と一般公衆の曝露 . . . . . . . 3.2 基本制限の設定 ......... 3.3 参考レベルの設定 . . . . . . . . . . . . . . . . 3.4 ICNIRP 1998 . . . . . . . . . . . . . . . . . 3.4.1 基本制限 . . . . . . . . . . . . . . . . 4 3.4.2 参考レベル ....... 4 3.5 ICNIRP 2010 . . . . . . . . . . . . . . . 3.5.1 基本制限 . . . . . . . . . . . . . . . . 参考レベル ........ 3.6 ICNIRP 2020 . . . . . . . . . . . . . . . . 3.6.1 基本制限 . . . . . . . . . . . . . . . . 3.6.2 参考レベル ....... 4 IEEE C95.1-2019 7 4.1 制限環境と非制限環境...... 4.2 ドシメトリック参照限度 (DRL) ..... 4.3 曝露参考レベル (ERL) . . . . . . . . . . . . . 5 FCC 規則 47 CFR 1.1310 9 6 電波防護指針 10 7 EU 理事会勧告 1999/519/EC 11 EU 指令 2013/35/EU **12** 9 TCO Certified **12** 10 補足 **13** 10.1 複数の周波数への同時曝露 ...... 13 14 10.3 試験法を含む規格の例...... 15 10.4 磁界強度、磁束密度 . . . . . . . . . . . 16 10.6 意図的な曝露 ...... 16

10.7 関連する書籍 ...... 17

# 1 概要

X線などの電離放射線 $^{11}$ が生体に重大な悪影響を与え得ることは良く知られている。

また、紫外線が紫外線角膜炎 (雪目など)、日焼け、皮膚癌の誘発などの生体への悪影響を引き起こし得ること、レーザー光などの強力な可視光や赤外線が眼の損傷 (例えば網膜損傷) や皮膚の熱傷などの障害を容易に引き起こし得ることも良く知られている。

無線通信などで用いられる電波やより低い周波数の (例えば 50 Hz の) 電磁界の影響はこれほど明白ではないかも知れないが、例えば電子レンジがマイクロ波を食品に照射することで加熱を行なうのと同様、強力な電磁波を人体に照射すれば有害なレベルの加熱効果を引き起こし得る。また、生体は導電性で、電磁界に曝されると体組織内に電流が誘起されるが、このような電流は筋肉や神経を刺激し、感知可能な影響を引き起こし得る。

電気機器はその動作に伴って例えば無線送信機や 高周波加熱装置などのように意図的に、また多くの 電気/電子機器のように意図せずに電磁界を放出す ることがあり、そのような電磁界が人体に悪影響を 与えないように制限することが必要となる。

本稿ではそのような電磁界 (EMF) への曝露の制限に関するガイドラインや規定の例を紹介する。本稿の記載は情報のごく一部を抜き出してまとめ直したもので、充分に正確なものであるとも限らないので、正確な情報はそれぞれの文書そのものを参照していただきたい。

 $<sup>^{\</sup>dagger 1}$   $\alpha$  線や  $\beta$  線などの高エネルギーの粒子線、また  $\gamma$  線、X 線、遠紫外線の一部のような周波数が 3000 THz 程度以上 (波長が 100 nm 程度以下) の電磁波のように、原子を電離する能力を持つ放射線。電離放射線は DNA の損傷などを引き起こすことができ、また累積的な性質を持ち、低い強度であっても人体に有害である。より低い周波数の電磁波 (可視光や電波を含む) は電離作用を持たず、非電離放射線と呼ばれる。「放射線」という用語は電離放射線だけを指して用いられることも多い。



# 2 電磁界の人体への影響

## 2.1 確立された影響

電磁界 (EMF) は、例えば次のような形で人体に 影響を与え得ることが知られている:

#### • 直接的影響

- 電磁界によって誘導された電流が神経系 や筋肉を刺激し、知覚や筋肉の反応を引 き起こす (刺激作用)<sup>†2</sup>
- 電磁界のエネルギーが体組織で吸収され、 体組織の温度の上昇を引き起こす (熱作用)

#### • 間接的影響

- 電磁界からの誘導によって異なる電位に ある人体と物体<sup>†3</sup>との接触に伴う接触電流 に伴う電撃や熱傷
- 人体に装着されたり埋め込まれたりしている医療機器などへの電磁界の結合に伴う影響<sup>†4</sup>

### 2.2 癌や生殖異常への影響の疑い

上記のような影響を引き起こさない低レベルの超低周波 (ELF) 磁界への長期的な曝露による癌などのリスクの増加の可能性を示唆する調査結果も報告されており $^{\dagger 6}$ 、IARC (国際がん研究機関) は電磁放射による発癌性を表1のように分類している。 $^{\dagger 7\dagger 8}$ 

だが、ICNIRP ガイドラインなどで示されている 曝露の制限の決定では、電磁界が癌などに影響する という一貫した証拠はない<sup>†9</sup>と判断され、その影響 は考慮されていない。<sup>†10†11</sup>

なお、WHO (世界保健機関) は、超低周波磁界への曝露に関して、曝露の低減に健康上の便益があるかどうかは不明であり、恣意的に低い曝露限度を採用すべきではないとしつつ、設備の建設や装置の設計に際して曝露低減のための低費用の方法が探索されることは良いことだろうと述べている。†12

# 3 ICNIRP ガイドライン

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; 国際非電離放射線 防護委員会) が発行した人体の電磁界への曝露の制限に関するガイドラインは、しばしば各国の規定のベースとして用いられている。

変動電磁界に関しては、ICNIRP は 1998 年に 300 GHz までの変動電磁界をカバーするガイドラインを発行し、2010 年には  $1~\rm{Hz}\sim100~\rm{kHz}$  ( $10~\rm{MHz}$  までが扱われている) に対する新しいガイドラインを、また  $2020~\rm{f}$  年には  $100~\rm{kHz}\sim300~\rm{GHz}$  に対する新しいガイドライン (以下、それぞれ ICNIRP 1998、ICNIRP 2010、及び ICNIRP 2020 と呼ぶ)を発行している:

- 1. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), 1998<sup>†13</sup>
- 2. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to

<sup>†2</sup> 例えば頭部を 5 mT 程度以上の低周波磁界に曝した時の磁 気閃光のような。この効果を用いると非侵襲で神経を刺激する ことが可能で、神経系の検査などの目的でパルス磁界による神 経の刺激が意図的に用いられることもある。

<sup>†3</sup> 例えば金属のフェンスのような。

<sup>†4</sup> 電磁界の機器の機器の機能への影響は EMC (電磁両立性) で扱われる。そのようなものと電磁界との相互作用に伴う人体への有害な影響 (例えば体内や体表に埋め込まれたり留置されたりした物体の発熱や体内での移動のような)†5 の可能性は別途考慮が必要となるかも知れない。

 $<sup>^{\</sup>dagger 5}$  例えば MRI では 1 T (0.8 MA/m) を超える強力な静磁 界による磁性体の吸引や RF による金属製インプラントなど (金属を含む刺青のようなものも含む) の発熱が懸念となる。

<sup>†6</sup> 様々な研究者や機関が調査研究を行なっているが、その結果は一貫しておらず、否定的な結果も多く報告されている。

 $<sup>^{\</sup>dagger7}$  Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-129 (https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/) & 9.

 $<sup>^{\</sup>dagger 8}$  IARC による発癌性の分類はヒトに対する発癌性の根拠に基づくもので、発癌性の強さやリスクの大きさを示すものではない。また、グループ  $^2$  A や  $^2$  B への分類は発癌性があると判断されたことを示すものではない。

<sup>†9</sup> IARC でのグループ 2B への分類はそれらの電磁界がヒトへの発癌性を持つという限定的な証拠があるが実験動物の発癌性の充分な証拠も作用機序の強い証拠もないことによるもので、ヒトへの発癌性の充分な証拠があると判断されればグループ 2A に分類される。

 $<sup>^{\</sup>dagger 10}$  ICNIRP ガイドライン (§3) ではこれに関連する文献の分析についても述べられており、その影響を曝露の制限で考慮していない理由が説明されている。

<sup>†11</sup> ガイドラインで示された曝露の制限を下回るような電磁界への長期間の曝露が人体への悪影響 (例えば癌のリスクの上昇)をもたらさないことが証明されているわけではないが、一般に、そのような悪影響はないか、あるいはあったとしてもその影響は相当限定的であろうと考えられている。

<sup>†12</sup> https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/elff

<sup>†13</sup> https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf



グループ1	ヒトに対する発癌性がある	X 線とガンマ線、紫外線放射
グループ 2A	ヒトに対しておそらく発癌性がある	
グループ 2B	ヒトに対する発癌性がある可能性がある	超低周波磁界、無線周波電磁界
グループ 3	ヒトに対する発癌性について分類できない	静磁界、静電界、超低周波電界
グループ 4	ヒトに対する発癌性がない	

表 1: IARC による電磁放射の発癌性の分類

Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz),  $2010^{\dagger 14}$ 

 ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz), 2020<sup>†15</sup>

これらの文書ではその文書で述べられた制限の決 定の背景となる情報も詳しく述べられている。

## 3.1 職業的曝露と一般公衆の曝露

労働者は労働環境において比較的強い曝露を受けることがある<sup>†16</sup>が、そのような曝露を受ける集団は概ね健康な成人で、通常はそのような曝露は既知の条件下で限られた時間のあいだ受け、また必要に応じて適切な予防措置を取ることができると考えられる。<sup>†17</sup>

これに対して、一般公衆は様々な人(幼児や妊婦を含む)を含み、曝露を受けていることやそのリスクを認識していないことが予期され、曝露を受ける条件も時間も未知で、また曝露に対する予防措置が行なわれることも期待できそうにない。

このため、労働者 (特に曝露について認識している労働者) の曝露よりも一般公衆の曝露を厳しく制限することが適当と考えられ、ICNIRP ガイドラインでは前者を職業的曝露 (occupational exposure)、後者を一般公衆の曝露 (general public exposure) としてそれぞれの制限を示している。

## 3.2 基本制限の設定

ICNIRP は多数の文献のレビューに基づき、確立 された健康影響を根拠として曝露の制限を定めてお り、これを「基本制限 (basic restriction)」と呼ん でいる。

基本制限の設定で考慮される生理学的影響、また基本制限をどのパラメータで示すかは周波数範囲やガイドラインの版によって異なるが、例えばICNIRP 1998 では、

- 1. 10 MHz から数 GHz の範囲での健康影響は主 に電磁界のエネルギーの体組織での吸収に伴う 体温上昇と関連し、体温の 1°C 以上の上昇は 有害な影響を引き起こし得る。
- 2. 電磁界のエネルギーの体組織での尺度として、 単位質量の体組織が単位時間に吸収するエネル ギーの量を示す SAR (specific absorption rate; 比吸収率) の使用が選択された。
- 3. 1°C 以上の体温上昇は SAR が約 4 W/kg と なる電磁界に全身を約 30 分曝露した時に生じ 得る。
- 4. 職業的曝露については 10 倍の安全係数を取り、 $0.4~\mathrm{W/kg}$  を全身平均  $\mathrm{SAR}$  の基本制限とした。 $^{\dagger 18}$
- 5. これに加えて、局所的な加熱を引き起こし得る 局所的な曝露 $^{\dagger 19}$ に対する制限として、同質の 組織  $10~{\rm g}$  の平均で、頭部と体幹は  $10~{\rm W/kg}$ 、 四肢は  $20~{\rm W/kg}$  を職業的曝露での局所 SAR の基本制限とした。
- 6. 一般公衆の曝露に対する基本制限では SAR に 関してはさらに 5 倍 (50 倍) の安全係数が採用

 $<sup>^{\</sup>dagger 14} \quad \mathtt{https://www.icnirp.org/cms/upload/publications} \\ \mathtt{/ICNIRPLFgdl.pdf}$ 

<sup>†15</sup> https://www.icnirp.org/en/publications/article/rf-guidelines-2020.html

<sup>†16</sup> 例えば工業用の高周波加熱装置の近くで作業する人はその加熱装置が用いる周波数の比較的強い電磁界に曝される可能性が予期される。

<sup>†17</sup> 例えば、それが必要な場合、高いレベルの曝露を受けるかも知れない領域を明確に識別し、所定の教育を受けた者のみが所定の規則に従ってその領域に立ち入るようにすることもできるだろう。

<sup>†18</sup> 基本制限の設定の段階で安全係数が取られており、後で述べる参考レベルはさらに安全側に評価されるようになっている。 従って、ICNIRP ガイドラインで示された基本制限や参考レベルに対してさらに安全余裕を取る必要はないとされている。

<sup>†19</sup> 例えば、携帯電話を頭部の近くで使用する際、脳の一部が強く加熱される可能性が懸念される。



され、全身平均 SAR は  $0.08~\rm{W/kg}$ 、局所 SAR は頭部と体幹で  $2~\rm{W/kg}$ 、四肢は  $4~\rm{W/kg}$  に設定された。

7. 低い周波数範囲では誘導などに伴って人体を流れる電流に伴う刺激作用などが主な要因となると、また高い周波数範囲では電磁界のエネルギーの吸収は主に体表付近で生じることから単位質量当たりではなく単位面積当たりで考えた方がより適切となると判断され、これらの要因についても同様に分析が行なわれ、それぞれの職業的曝露と一般公衆の曝露に対する基本制限が決定された。

## 3.3 参考レベルの設定

基本制限の多くは体組織を流れる電流や体組織でのエネルギー吸収のようなパラメータで示され、その評価は一般にかなり煩雑で、特にフィールドでの評価には適さない<sup>†20</sup>ため、より簡便な評価の手段を利用できることが望まれる。

このため、ICNIRP ガイドラインでは、基本制限 に加えて、比較的容易に測定できるパラメータでの 参考レベル (reference level) を設定している。

参考レベルは空間での電界や磁界の強度のように 比較的容易に測定できるパラメータで示されており、 曝露 (例えば人が占める可能性がある空間での電界 と磁界の強度) が参考レベルを超えなければ基本制 限も超えないように設定されているため、曝露が参 考レベルを超えないことを確認できれば基本制限に 対する確認は不要となる。だが、参考レベルを超え ても基本制限を超えるとは限らず、そのような場合 は基本制限に対する評価が必要となる。また、高周 波電磁界の放射源の近傍など、参考レベルでの評価 に適さない状況もあり、そのような場合も基本制限 に対する評価が必要となることがある。

#### 3.4 ICNIRP 1998

#### 3.4.1 基本制限

ICNIRP 1998 では以下の基本制限が定められて いる (図1):

- 頭部と体幹の電流密度 (mA/m²) ~10 MHz
- 全身平均 SAR (W/kg) 100 kHz~10 GHz
- 頭部と体幹の局所 SAR (W/kg) 100 kHz~ 10 GHz
- 四肢の局所 SAR (W/kg) 100 kHz~10 GHz
- 電力密度 (W/m<sup>2</sup>) —10~300 GHz

電流密度は体組織内を流れる電流 (このような電流 は例えば神経や筋肉の刺激を、またジュール熱による発熱を引き起こし得る) で、電流の方向と直交する  $1~{\rm cm}^2$  の面積で平均できるが、時間平均は行な わない。

SAR (specific absorption rate; 比吸収率) は電磁界に曝された体組織が単位時間に吸収するエネルギーの単位質量当たりの量、すなわち単位時間内に単位質量の体組織が電磁界のエネルギーを熱に変換する量を示す。これらの基本制限に関しては、全身平均 SAR は全身での、また局所 SAR は体組織 10 gでの平均で、これらの制限はいずれも 6 分間の時間平均を行なった値に適用される。

これらの基本制限の中で電力密度のみは体内ではなく空間での現象での表現となっている。 $^{\dagger 21}$ この電力密度の制限は  $20~{\rm cm}^2$  当たりの  $(1~{\rm cm}^2$  当たりで平均した最大電力密度はその 20 倍を超えるべきではない)、かつ  $68/f_{\rm GHz}^{-1.05}$  分  $(10~{\rm GHz}$  で約 6 分、 $300~{\rm GHz}$  で約  $10~{\rm P}$ )での平均に対するものとなる。

#### 3.4.2 参考レベル

ICNIRP 1998 では参考レベルは以下のパラメータで示されている (図 2):

- 電界強度 (V/m) 1 Hz~300 GHz
- 磁界強度 (A/m), 磁束密度 (μT) ~300 GHz
- 等価平面波電力密度  $S_{\rm eq}$  (W/m²) 10 MHz ~300 GHz

<sup>†20</sup> 例えば SAR の測定は人体を模擬するファントム (人体の形状を模した容器に生体組織と同様の電気的特性を持つように調整された溶液を満たしたもの) 内の電磁界の強度などを小型のプローブを掃引して測定することを伴う。他のパラメータも、例えば体内の電磁界の強度、体内の電流密度のように、容易に測定できないものが多い。

<sup>†21</sup> これは ICNIRP 2020 (§3.6) で見直された。



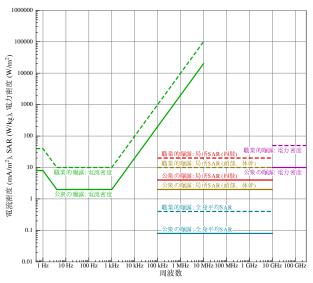


図 1: ICNIRP 1998 基本制限

- 接触電流 (mA) ~110 MHz
- 四肢への誘導電流 (mA) 10~110 MHz

このうち、電界強度、磁界強度や磁束密度、及び電力密度は人が曝される電磁界の強度を示すもので、人が占めることになる空間内のこれらの最大値が参考レベルを超えなければ基本制限にも適合するものとみなすことができる。これらは  $100~{\rm kHz}\sim 10~{\rm GHz}$ では  $6~{\rm 8}/f_{\rm GHz}^{1.05}$ 分  $(10~{\rm GHz}$ で約  $6~{\rm 9}$ 分、 $300~{\rm GHz}$ で約  $10~{\rm 9}$ )での所定の方法での時間平均を行なうことができるが、ピーク値に対しては別に定められた限度 (電界強度と磁界強度についてのみ図 2で図示した) が適用される。

四肢への誘導電流は曝露を受けている人の四肢、 例えば足首を流れる電流で、これも6分間での所定 の方法での時間平均を行なうことができる。

### 3.5 ICNIRP 2010

ICNIRP 2010 は ICNIRP 1998 の  $1 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$  の周波数範囲の規定を置き換えるもので、その基本 制限は 図 3 に、また参考レベルは 図 4 に図示したようなものとなる。

基本制限と参考レベルは 10 MHz まで示されているが、ここでは ICNIRP 1998 で 100 kHz 以上で考慮されている熱的影響 (基本制限では SAR と電力密度で示されている) は考慮されておらず、100 kHz 以上については ICNIRP 1998 を置き換えることは意図されていない。

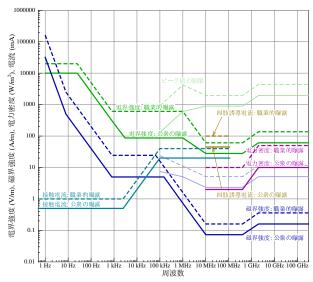


図 2: ICNIRP 1998 参考レベル

#### 3.5.1 基本制限

ICNIRP 2010 では ICNIRP 1998 では電流密度 で示されていた 10 MHz までの基本制限が体内の 誘導電界強度での表現に変更された (図 3)。この電 界強度の制限は  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  の連続的な 組織での平均に対するものである。

また、ICNIRP 1998 の基本制限の設定では考慮されていなかった網膜閃光現象の回避 $^{122}$ のために頭部中枢神経系に対して  $10\sim25$  Hz で最小となる厳しい基本制限 (図3 の緑のカーブ) が身体の他の部分とは別に設定されるなどの変更も行なわれている。

## 3.5.2 参考レベル

ICNIRP 2010 の参考レベルは ICNIRP 1998 と 同様に以下のパラメータで示されている (図 4):

- 電界強度 (kV/m) 1 Hz~10 MHz
- 磁界強度 (A/m), 磁束密度 (T) ~10 MHz
- 接触電流 (mA) ~10 MHz

ICNIRP 1998 と ICNIRP 2010 の参考レベル (一般公衆の曝露) の比較を図 5に示すが、50 Hz 以下の電界強度の参考レベルが引き下げられ、一方 25 Hz 以上の磁界強度の参考レベルは引き上げられているのがわかる。

†22 網膜閃光現象は健康への有害な影響とはみなさないが、一部の作業環境において作業を妨害するかも知れないので回避するのが良いと、また網膜閃光現象の回避のための制限は脳機能に対する一過性の他の影響も防げる筈と判断されている。



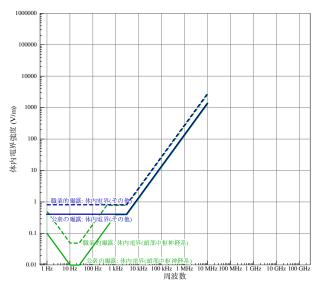


図 3: ICNIRP 2010 基本制限

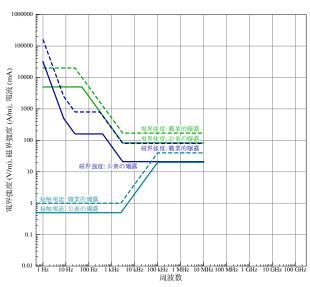


図 4: ICNIRP 2010 参考レベル

## 3.6 ICNIRP 2020

ICNIRP 2020 は ICNIRP 1998 の 100 kHz~300 GHz の周波数範囲の規定を置き換えるもので、ICNIRP 2010 と組み合わせることで 1 Hz~300 GHz の範囲がカバーされるようになる。

## 3.6.1 基本制限

ICNIRP 2020 では、SAR の基本制限の値は従来通りだが、 $10\sim300~{\rm GHz}$  について空間の電力密度で示されていた基本制限が体表付近の体組織で吸収される電力の指標となる局所  $S_{\rm ab}$  (吸収電力密度) での表現に変更され、局所的な曝露に対する基本制限

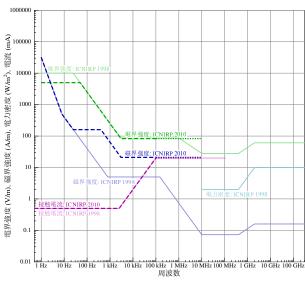


図 5: ICNIRP 1998 と ICNIRP 2010 の参考レベル (一般公衆の曝露) の比較

は 100 kHz~6 GHz は局所 SAR、6~300 GHz は 局所  $S_{\rm ab}$  で示されるようになった (図 6)。

また、ICNIRP 1998 では SAR の基本制限は  $10~{\rm GHz}$  までについて示されていたが、全身平均 SAR の基本制限が  $300~{\rm GHz}$  まで適用されるように なっている。

体内の誘導電界に対する  $100~\mathrm{kHz}\sim10~\mathrm{MHz}$  の基本制限は ICNIRP  $2010~\mathrm{c}$  同様である。

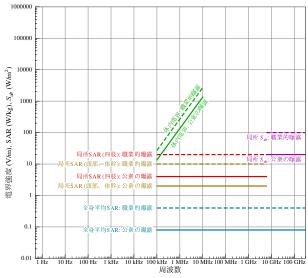


図 6: ICNIRP 2020 基本制限



#### 3.6.2 参考レベル

ICNIRP 2020 では ICNIRP 1998 と異なり接触電流の参考レベルは示されていない $^{\dagger 23}$ が、その他はICNIRP 1998 と同様に 100 kHz $\sim$ 300 GHz の周波数範囲の参考レベルが電界強度 (V/m)、磁界強度(A/m)、電力密度  $(W/m^2)$ 、及び四肢への誘導電流(mA) で示されている  $(\boxtimes 7, \boxtimes 8)$ 。

図7で示した全身曝露での制限は30分平均、図8で示した局所的曝露と誘導電流は6分平均での値に適用されるが、ICNIRP 2020では、この他に6分未満の積分時間での入射エネルギー密度  $(kJ/m^2)$ 、また電界強度や磁界強度のピーク値に対する制限 (本稿では示していない)も示されている。

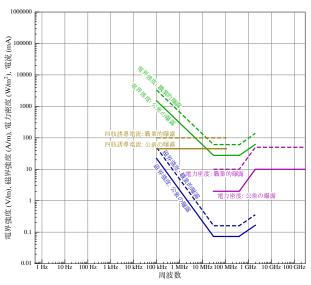


図 7: ICNIRP 2020 参考レベル (全身の曝露 (30 分平均)、誘導電流)

ICNIRP 1998 と ICNIRP 2020 の参考レベル (一般公衆の曝露) の比較を図 9に示すが、30 MHz 以下の電界強度と磁界強度の参考レベルが引き上げられているのがわかる。

一方、四肢への誘導電流と電力密度は、周波数範 囲の違いはあるものの従来と同様のレベルとなって いる。

ICNIRP 1998 にあった 2~300 GHz の電界強度と磁界強度の参考レベルはなくなっているが、遠方界 (平面波とみなせる領域)であれば電界強度、磁界強度、また電力密度は一定の関係 (§10.5)を持つ

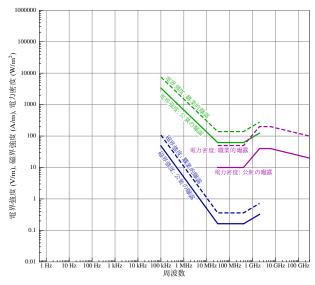


図 8: ICNIRP 2020 参考レベル (局所的曝露 (6 分平均))

とみなすことができ、それらのあいだでの換算も可能である。

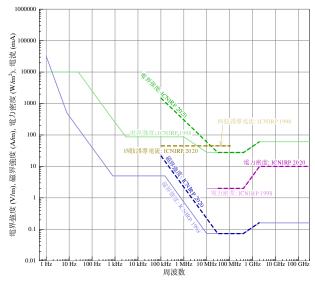


図 9: ICNIRP 1998 と ICNIRP 2020 の参考レベル (一般公衆の曝露) の比較

### $4 \quad \text{IEEE} \ \text{C95.1-2019}$

IEEE C95.1-2019, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0~Hz to 300~GHz は曝露の制限を定める IEEE 規格である。 $^{\dagger 24}$ 

<sup>†23</sup> ICNIRP 1998 では接触電流での参考レベルは 110 MHz まで示されている (図 2) ものの、接触電流は主に ICNIRP 2020 で扱われているよりも低い周波数で懸念となる。

<sup>†24</sup> 以前は IEEE C95.1-2005 が 3 kHz~300 GHz、IEEE C95.6-2002 が 0~3 kHz をカバーしていたが、これらは IEEE



### 4.1 制限環境と非制限環境

ICNIRP ガイドラインでの職業的曝露と一般公衆の曝露の代わりに、IEEE C95.1-2019 では制限環境 (restricted environment) と非制限環境 (unrestricted environment) という区分が用いられている。 $^{\dagger 25}$ 

非制限環境の制限は「安全プログラム開始レベル」で、該当する安全プログラムのガイダンスと手続きに従った者のみが制限環境(非制限環境の限度は超えるかも知れないが、制限環境の限度は超えない領域)に入ることが許容されるように、またそのような安全プログラムに従わない労働者の曝露は一般公衆と同様に非制限環境の制限を超えないようにすることが意図されている。

## 4.2 ドシメトリック参照限度 (DRL)

ドシメトリック参照限度 (dosimetric reference limit; DRL) $^{\dagger 26}$ は体内の電界強度、SAR、あるいは上皮電力密度で示された限度 (図 10) で、概ね IC-NIRP ガイドラインの基本制限に相当すると考えて良いだろう。

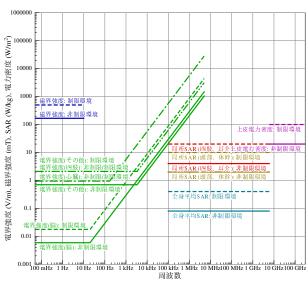


図 10: IEEE C95.1-2019 ドシメトリック参照限度 (DRL)

## 4.3 曝露参考レベル (ERL)

曝露参考レベル (exposure reference level; ERL) $^{\dagger 27}$ はより容易に測定可能な体外の電界や磁界、電力密度、四肢への誘起電流、接触電流などで示されたレベル (図 11) で、概ね ICNIRP ガイドラインの参考レベルに相当すると考えて良いだろう。

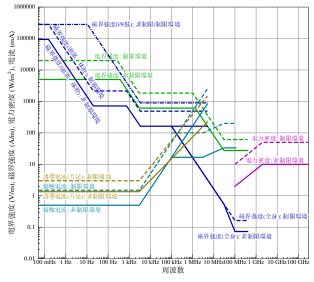


図 11: IEEE C95.1-2019 曝露参考レベル (ERL)

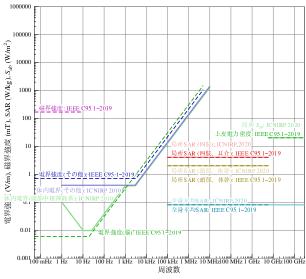


図 12: ICNIRP 2010 と 2020 の基本制限 (一般公衆の曝露) と IEEE C95.1-2019 のドシメトリック参照限度 (非制限環境) の比較

C95.1-2019 に統合された。

<sup>†25</sup> これらは IEEE C95.1-2005 で管理環境 (controlled environment) と非管理環境 (uncontrolled environment) と呼ばれていたものに相当する。

<sup>†26</sup> これは IEEE C95.1-2005 で基本制限 (basic restriction; BR) と呼ばれていたものに相当する。

<sup>†27</sup> これは IEEE C95.1-2005 で最大許容曝露 (maximum permissible exposure; MPE) と呼ばれていたものに相当する。



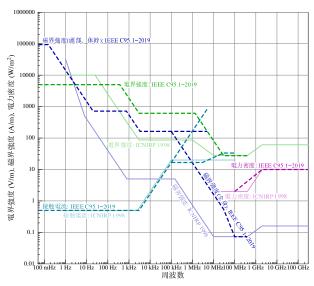


図 13: ICNIRP 1998 の参考レベル (一般公衆の曝露) と IEEE C95.1-2019 の曝露参考レベル (非制限環境) の比較

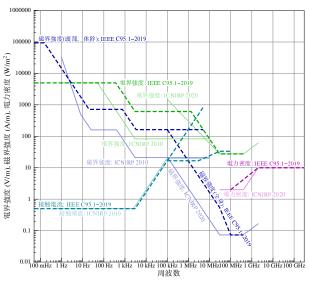


図 14: ICNIRP 2010 と 2020 の参考レベル (一般公衆の曝露) と IEEE C95.1-2019 の曝露参考レベル (非制限環境) の比較

# 5 FCC 規則 47 CFR 1.1310

FCC 規則 47 CFR 1.1310 では曝露の制限は図 15 と図 16 に図示するように SAR と最大許容曝露 (maximum permissible exposure; MPE) として規定されている。 $^{\dagger 28}$ 

100 kHz~6 GHz の曝露評価には SAR を使用するが、ポータブル・デバイス (放射構造が人体から

20 cm 以内で使用するように設計されたデバイス) 以外の  $6~{\rm GHz}$  以下で動作するデバイスは MPE で評価することもできる。

6 GHz を超える周波数の曝露は MPE で評価する。

SAR は、ICNIRP ガイドラインなどと制限レベルが異なるだけでなく、手、手首、足、足首、耳介などの突出部のピーク空間平均 SAR は 10~g ではなく 1~g の体組織での平均で評価する、一般公衆の(管理されない) 曝露は 30~分までの平均で評価できるが職業的な(管理された) 曝露は <math>6~分までの平均となるなど、様々な違いがある。

この MPE のカーブは ICNIRP ガイドラインの 参考レベルのものなどとはかなり異なり、特に低い 周波数で一般公衆の (管理されない) 曝露の制限と 職業的な (管理された) 曝露の制限が同レベルとなっているのが目に付く。

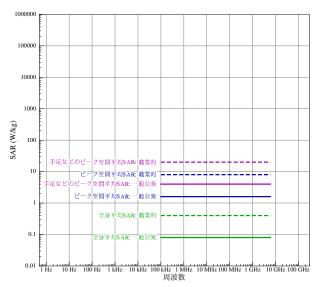


図 15: 47 CFR 1.1310 の SAR 限度

47 CFR 2.1091 (radiofrequency radiation exposure evaluation: mobile devices) と 47 CFR 2.1093 (radiofrequency radiation exposure evaluation: portable devices) ではモバイル・デバイスやポータブル・デバイスに対する要求が一部は 47 CFR 1.1310 を参照する形で規定されている。

これと別に、OHSA (Occupational Safety and Health Administration) は労働者の保護の観点から 10 MHz~100 GHz について 10 mW/cm² 以下というガイドを 29 CFR 1910.97(a)(2) で示している。

<sup>†28</sup> 要求事項は規格などを参照せずに直接示されているが、SARや MPE の限度が ANSI/IEEE C95.1-1992 に基づく旨の記載がある。



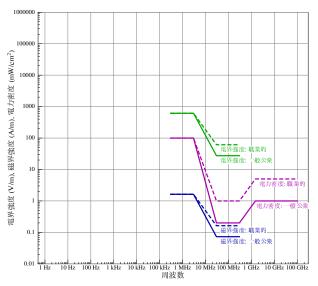


図 16: 47 CFR 1.1310 の最大許容曝露 (MPE)

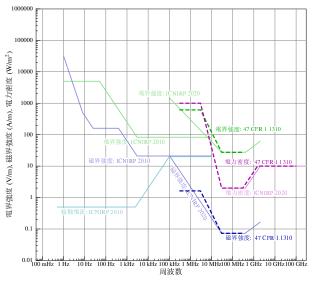


図 17: ICNIRP 2010 と 2020 の参考レベルと 47 CFR 1.1310 の最大許容曝露の比較 (一般公衆の曝露)

# 6 電波防護指針

「電波利用における人体の電波防護指針」(電気通信技術審議会答申 諮問第 38 号, 平成 2 年 6 月)<sup>†29</sup> には図 18 で図示したような基礎指針 (ICNIRP ガイドラインでの基本制限に相当する)、また図 19 で図示したような管理指針 (ICNIRP ガイドラインでの参考レベルに相当する) が含まれ、電波法施行規則 別表第二号の三の二 電波の強度の値の表では100 kHz~300 GHz について条件 G の管理指針の値が採用されている。

上記の平成 2 年の答申の他、下記のような答申も出されており、例えば平成 23 年と平成 27 年の答申では ICNIRP 2020 と同様の局所 SAR の指針が示されている: $^{\dagger 29}$ 

- 電気通信技術審議会答申 諮問第89号「電波利用における人体防護の在り方」(平成9年4月)
- 電気通信技術審議会答申 諮問第 2030 号「局所 吸収指針の在り方」に関する答申(平成 23 年 5 月)
- 情報通信審議会答申 諮問第 2035 号「電波防護 指針の在り方」のうち「低周波領域(10 kHz 以 上 10 MHz 以下)における電波防護指針の在り 方」(平成 27 年 3 月)
- 諮問第 2035 号「電波防護指針の在り方」のう ち「高周波領域における電波防護指針の在り方」 に関する一部答申

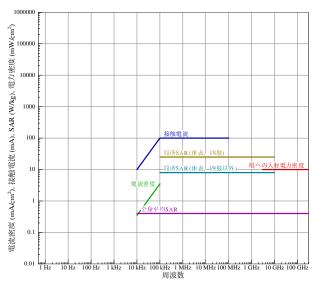


図 18: 電波防護指針 (平成 2 年) 基礎指針

電波防護指針は電波の領域のみを扱っており、例 えば 50 Hz や 60 Hz の電源周波数の電界や磁界は カバーしていない。

だが、例えば「電気設備に関する技術基準を定める省令」 $^{\dagger 30}$  では、特別高圧架空線の下での電界強度を  $3~\rm kV/m$  以下 (ICNIRP 2010 の一般公衆に対する参考レベルの  $5~\rm kV/m$  よりも低い)、変電所などの付近での磁束密度を  $200~\rm \mu T$  以下 (ICNIRP 2010

<sup>†29</sup> https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/medical/protect/

 $<sup>^{\</sup>dagger30}\, \texttt{https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=409M500}$  00400052



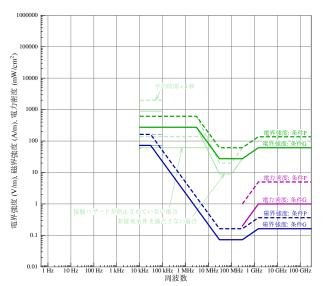


図 19: 電波防護指針 (平成 2 年) 管理指針

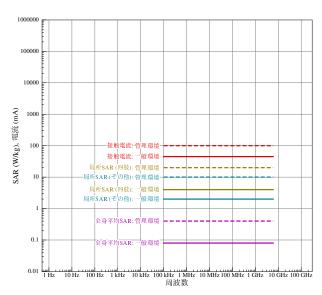


図 20: 電波防護指針 (平成 9年, 平成 23年) 局所吸収指針

の一般公衆に対する参考レベルと同一) とすること などが定められている。

# 7 EU理事会勧告 1999/519/EC

EU 理事会勧告 1999/519/EC、Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) は一般公衆の電磁界への 曝露に関する勧告であり、ICNIRP の 1998 年版の ガイドラインを参照している。

EU の勧告 (recommendation) は指令 (directive) や規則 (regulation) のような形で効力を持つわけ

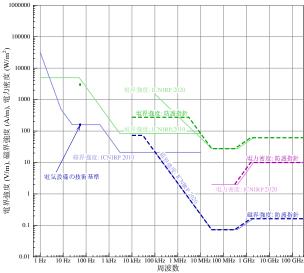


図 21: ICNIRP 2010 と 2020 の参考レベル (一般公衆の曝露) と電波防護指針 (平成 2 年) の管理指針 (条件 G) の比較

ではないが、この勧告に基づいた規格が低電圧指令 2014/35/EU や無線機器指令 2014/53/EU などの もとで整合化されており、一般公衆が使用する、あるいはその近傍での使用が予見される機器<sup>†31</sup>の EU への供給に際しては通常はこの勧告で示された制限 に適合させることが必要となっている。

本稿の執筆の時点で、低電圧指令 2014/35/EU<sup>†32</sup> では以下の規格が整合化されている:

- EN 50364 Limitation of human exposure to electromagnetic fields from devices operating in the frequency range 0 Hz to 300 GHz, used in Electronic Article Surveillance (EAS), Radio Frequency Identification (RFID) and similar applications
- EN 50445 Product family standard to demonstrate compliance of equipment for resistance welding, arc welding and allied processes with the basic restrictions related to human exposure to electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)
- EN 62233 Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure
- EN 62311 Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure

<sup>†31</sup> 例えば万引き防止装置は事業者向けのものであるが、一般公衆が接近するような形で使用されるため、当然、一般公衆の保護が必要となる。

<sup>†32</sup> https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/low-voltage\_en



restrictions for electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)

- EN 62479 Assessment of the compliance of low power electronic and electrical equipment with the basic restrictions related to human exposure to electromagnetic fields (10 MHz to 300 GHz)
- EN 62493 Assessment of lighting equipment related to human exposure to electromagnetic fields

また、無線機器指令 2014/53/EU<sup>†33</sup> では以下の規格が整合化されている:

- EN 50360 Product standard to demonstrate the compliance of wireless communication devices, with the basic restrictions and exposure limit values related to human exposure to electromagnetic fields in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz: devices used next to the ear
- EN 50385 Product standard to demonstrate the compliance of base station equipment with radiofrequency electromagnetic field exposure limits (110 MHz – 100 GHz), when placed on the market
- EN 50401 Product standard to demonstrate the compliance of base station equipment with radiofrequency electromagnetic field exposure limits (110 MHz – 100 GHz), when put into service
- EN 50566 Product standard to demonstrate the compliance of wireless communication devices with the basic restrictions and exposure limit values related to human exposure to electromagnetic fields in the frequency range from 30 MHz to 6 GHz: hand-held and body mounted devices in close proximity to the human body

# 8 EU指令 2013/35/EU

欧州指令 2013/35/EU、Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) は労働者の電磁界への曝露の制限を定めるもので、欧州の労働環境に適用される。

この指令は主に雇用者に関係するものとなるが、 労働環境で使用される機器の製造業者は、その機器 からの電磁放射が労働者に過剰な曝露を生じさせな いようにすることが、及び/もしくは起こり得る電 磁放射や曝露のリスクに関する情報や過剰な曝露を 防ぐための手段(例えば機器の動作中の接近限界)な どのその機器の安全な使用のための情報を明らかに することが必要となるだろう。

この指令では曝露の制限が ELV (exposure limit value; 曝露制限値) と AL (action level; アクション・レベル) という形で示されており、ELV はさらに知覚影響 ELV と健康影響 ELV に分けられている。また、AL は Low AL と High AL として規定されている場合があり、これらはそれぞれ知覚影響 ELV と健康影響 ELV に対応する (図 22、図 23)。

労働環境の評価は通常は AL を用いて行なうことができ、労働者が曝されるかも知れない環境の電磁界のレベルが AL を超えなければ ELV に適合するとみなせるが、労働者の曝露が健康影響 ELV を超えない<sup>†34</sup>ならば AL を超えることも許容される。

指令 2013/35/EU の曝露制限値は ICNIRP 1998 と ICNIRP 2010 の職業的曝露の基本制限に基づい ており、これらを比較したものを図 24に示す。

また指令 2013/35/EU のアクション・レベルは ICNIRP 1998 と ICNIRP 2010 の職業的曝露の参考レベルに基づいており、これらを比較したものを図 25に示す。

## 9 TCO Certified

TCO Certified Generation 8, for displays<sup>†35</sup> では、コンピュータなどのディスプレイ (VDU) からの放射に関して、5 Hz~2 kHz で 10 V/m と 200 nT ( $0.2 \mu\text{T}, 0.159 \text{ A/m}$ )、 $2\sim400 \text{ kHz}$  で 1 V/m と 25 nT ( $0.025 \mu\text{T}, 0.0196 \text{ A/m}$ ) という極度に厳しい制限<sup>†36</sup>が示されている (図 26)。<sup>†37</sup>

<sup>†33</sup> https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/red.en

<sup>†34</sup> ICNIRP ガイドラインの基本制限と参考レベルの関係と同様、電磁界のレベルが AL を超える環境での曝露が ELV を超えるとは限らない。また、それが適切であれば、必要に応じて防護服などを用いて曝露を低減することもできる。

<sup>†35</sup> https://tcocertified.com/files/certification/tco-certified-generation-8-for-displays.pdf

<sup>†36</sup> 例えば ICNIRP 2010 (§3.5) の 50 Hz における一般公衆 に対する磁束密度の参考レベルは 200  $\mu$ T で、200 nT はその 1/1000 となる (図 27)。これは地磁気 (日本では 46,000 nT 程度) と比較しても著しく低い。

<sup>†&</sup>lt;sup>37</sup> IEC 60945:2002 もこれと同等の要求を含む。また、JEITA



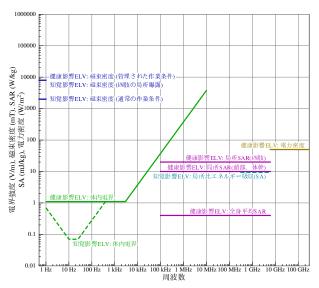


図 22: 指令 2013/35/EU ELV (曝露制限値)

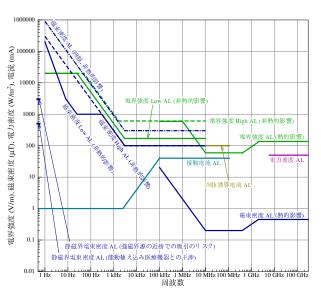


図 23: 指令 2013/35/EU AL (アクション・レベル)

この制限は、確認された健康影響に基づいて設定されたものではなく、VDT 作業者の健康への影響の懸念†38を除くために実際的に達成可能な範囲でできる限り低くすることを目指したものと考えられる。

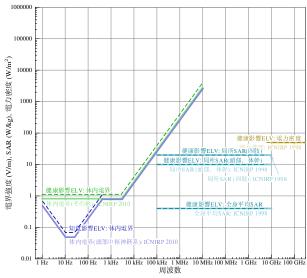


図 24: ICNIRP 1998 と 2010 の基本制限 (職業的曝露) と指令 2013/35/EU の ELV (曝露制限値) の比較

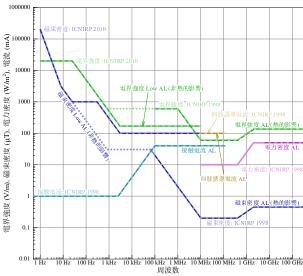


図 25: ICNIRP 1998 と 2010 の参考レベル (職業的曝露) と指令 2013/35/EU の AL (アクション・レベル) の 比較

# 10 補足

### 10.1 複数の周波数への同時曝露

ICNIRP ガイドラインなどで示された制限は単一の周波数の電磁界への曝露に基づいて設定されており、複数の周波数に同時に曝露される場合はその合成を考えることが必要となる。

この際、一般に、刺激作用に基づいて設定された制限については電流や電界などに関して加算的に作

ITR-3004 (情報処理機器用表示装置の低周波電磁界に関するガイドライン) も、磁界についてはこれよりもやや緩い、電界についてはかなり緩い、これと同じ周波数範囲をカバーする要求を含む。

<sup>†38</sup> 調査の結果は一貫していないものの、VDU からの電磁界が様々な健康影響をもたらす可能性が疑われたことがある。



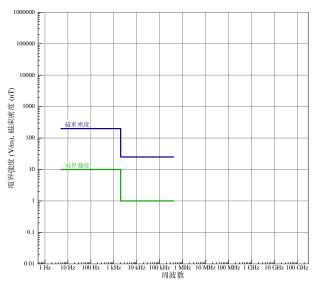


図 26: TCO Certified Generation 8, for displays の制限レベル

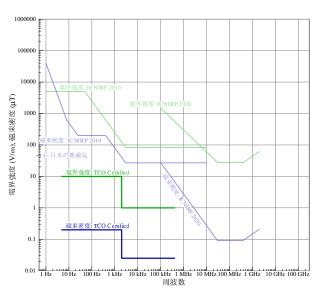


図 27: ICNIRP 2010 と 2020 の参考レベル (一般公衆の 曝露) と *TCO Certified Generation 8, for displays* の 制限レベルの比較

用すると考え、例えば

$$\sum_{i} \frac{J_i}{J_{L,i}} \le 1$$

のようにそれぞれの周波数における値  $(J_i)$  をその周波数における制限レベル  $(J_{L,i})$  で正規化した上でそのまま合成し、それが1を超えるかどうかで曝露の制限を超えるどうかを判断することができる。

一方、熱作用に基づいて設定された制限について はエネルギーに関して加算的に作用すると考えられ、 SAR や電力密度などは、例えば

$$\sum_{i} \frac{SAR_i}{SAR_{L,i}} \le 1$$

のように制限レベルで正規化した上でそのまま合成 できるが、電界強度や磁界強度などは、例えば

$$\sum_{i} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2 \le 1$$

のように合成に先立って自乗することが必要となる。

通常、具体的な方法はそれぞれの文書で示されて おり、例えば電界と磁界を別々に扱うか合成するか などを含めて、それぞれ該当する規定に従うことに なるだろう。

## 10.2 適合性評価

ICNIRP ガイドラインなどは曝露の制限を示しているが、一般に具体的な評価方法は規定しておらず、通常、適合性評価は別の規格やその他の文書を参照して行なうことが必要となる。

評価は、状況に応じて、例えば以下のような手段 で行なうことができる:

- 単純な計算<sup>†39</sup>
- 単純化された、あるいは詳細な人体モデルを用いてのシミュレーション
- SAR などの基本制限 (基礎指針、ドシメトリック参照限度、ELV) に対する測定
- 電界強度や磁界強度 (磁束密度) などの参考レベル (管理指針、曝露参考レベル、MPE、AL) に対する測定

測定での評価を行なう場合も、全周波数範囲 (通常は 300 GHz 以下) について該当する全てのパラメータ (電界、磁界、...) を測定するのは実際的ではないため、どのパラメータをどの周波数範囲について測定する必要があるかを事前に検討することが必要となるだろう。

<sup>†39</sup> 例えば送信アンテナが人体から距離 r (m) (通常は  $r \geq 0.2$  m) 以上離れる位置で使用される、実効等方放射電力 EIRP (W) の無線 LAN や Bluetooth などからの送信の電力密度 S (W/m²) の、 $S = EIRP/4\pi r^2$  による計算。



## 10.3 試験法を含む規格の例

#### 10.3.1 EN 62233

EN 62233:2008, Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure は家電品の 10 Hz~400 kHz の磁界に対する曝露の評価に関する規格で、低電圧指令の元で整合化された規格 (§7) のひとつともなっており、低い周波数の磁界の影響のみの考慮が必要となりそうな機器の曝露評価でしばしば用いられる。

EN 62233:2008 は IEC 62233:2005 に基づく $^{\dagger40}$ が、IEC 62233 は磁界の制限レベルは ICNIRP 1998 と IEEE C95.6-2002 のもの (図 10 の、IEEE C95.1-2019 の非制限環境の頭部や体幹の磁界強度に関するドシメトリック参照限度と同一) が参考として記載されているだけであるのに対し、EN 62233 では 1999/519/EC (§7) の制限レベルが要求事項の一部となっている。 $^{\dagger41}$ 

IEC/EN 62233 では他の評価方法も示されているが、最も基本となるのはタイム・ドメイン評価で、これは次のような処理を伴う:

- 1. 互いに直交するように配置された直径 10 cm のループ3つを用い、直交するそれぞれの方向 の磁界を検出する;
- 2. 50 Hz での値を 1 とした 1999/519/EC (§7) の 参考レベルのカーブを反転させた形の伝達関数 (周波数特性) のフィルタを通して信号を正規化 する:
- 3.3軸の信号を自乗し、加算する;
- 4. 加算された信号を時定数 1 秒のフィルタに通し、平均化する;
- 5. 平均化された出力の平方根を求める;
- 6. 結果を 50 Hz における参考レベルと比較する。

この測定法に対応した専用の測定器 (例えば 図 28 のような) が市販されており、この種の測定器では、磁界の曝露の強さの 1999/519/EC (§7) の参考レベルに対する割合をリアルタイムで直読することが可能である。 $^{†42}$ 

この規格では、様々な家電品についての評価対象機器の動作条件、評価対象機器からコイルまでの距離 (典型的には 30 cm か 0 cm)、そして測定結果に乗ずることができる結合係数 (機器の周囲での磁界の非均一性などを反映する)、また結合係数が規定されていない場合のその求め方なども規定されている

このような測定器を用いての機器や環境の評価は、 基本的には、実際の使用に際して人体が占めるであ ろう空間を規定された距離を保って磁界プローブで 掃引して測定結果が最大となる場所を探すことで行 なえる。



図 28: EN 62233 に対応した測定器の例 (Narda ELT-400)

#### 10.3.2 EN 62311

EN 62311:2008, Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0~Hz-300~GHz) は他の特定の規格でカバーされない機器の  $0~Hz\sim300~GHz$  の周波数範囲の曝露評価について述べており、EN 62233 と同様、制限レベルは 1999/519/EC ( $\S7$ ) で示されたものが参照されている。

ここでは詳細は述べないが、評価方法としては以 下のものが示されている:

 $<sup>^{\</sup>dagger 40}$  IEC 62233:2005 は EN 50366:2003(+A1:2006) に基づくもので、EN 62233:2008 は EN 50366:2003(+A1:2006) と技術的に概ね同等である。

<sup>†41</sup> EN 62233:2008 Annex B ( $Exposure\ limits$ ) は IEC 62233:2005 と同様に参考扱いのままとなっているが、伝達関数 (下で簡単に触れる) が 1999/519/EC の参考レベルに対応した Figure Z1 に置き換えられている。IEC 62233:2005 と EN 62233:2008 にはその他にも多くの違いがある。

<sup>†42</sup> この結果からは、どの周波数の成分が大きく寄与しているかも、また磁界強度や磁束密度そのものも知ることはできない。



- 遠方界での計算
- 近傍界での計算
- ファントムありでの、あるいはなしでのシミュ レーション
- 数値モデルによる計算
- ボディー/四肢電流の測定か計算
- SAR の測定か計算
- 電界や磁界の測定
- 発生源のモデル化による予測
- 接触電流の測定

また、この規格は 300 GHz までの全周波数範囲をカバーするが、無線送信機器以外の電界や磁界の評価は、対象の機器の最大内部周波数が 100 MHz 以下であれば 1 GHz まで、 $100\sim400$  MHz であれば 2 GHz まで、400 MHz $\sim1$  GHz であれば 5 GHz まで、1 GHz を超える場合はその 5 倍までについて行なうように述べている。

EN 62311:2008 の元となる国際規格である IEC 62311:2007 の内容もほぼ同一であるが、 IEC 62233:2005 と同様、評価の方法のみが定められており、曝露限度は規定されていない。

## 10.4 磁界強度、磁束密度

磁界の強さは、通常、磁界強度 H (A/m)、あるいは磁束密度 B (T) で表現される。

磁束密度 B(T)と磁界強度 H は

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

の関係を持ち、 $\mu_0$  は真空の透磁率で  $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$  (H/m)、また  $\mu_r$  は媒体の比透磁率で真空中や空気中では  $\mu_r\simeq 1$  である。

磁束密度 B の単位はテスラ (T) であるが、古い単位であるガウス (G) が用いられることもあり、1 G は 0.1 mT (100  $\mu$ T) に相当する (表 2)。

磁東密度 B		磁界強度 H
$0.1~\mu\mathrm{T}$	1 mG	$0.07958 \; A/m$
$1~\mu\mathrm{T}$	10  mG	$0.7958 \; A/m$
$1.257~\mu\mathrm{T}$	$12.57~\mathrm{mG}$	1 A/m
$0.1~\mathrm{mT}$	1 G	$79.58 \; \mathrm{A/m}$
$1~\mathrm{mT}$	10 G	$795.8 \; \mathrm{A/m}$
1 T	10 kG	795.8  kA/m

表 2: 磁束密度と磁界強度

### 10.5 電力密度

高い周波数での曝露の制限が電力密度で示される ことがある。

電磁界の電力密度は単位面積を通過する電力であり、遠方界 (放射源から充分に離れた、電磁波を平面波とみなせる領域) の空間では、電界強度を E、磁界強度を H、電力密度を S として、

$$S = EH \simeq E^2/377 \simeq 377H^2$$

となる。

本稿で触れた範囲で、電力密度が  $W/m^2$  で示されているもの (ICNIRP ガイドライン、IEEE C95.1 など) と  $mW/cm^2$  で示されているもの (47 CFR 1.1310、電波防護指針など) があり、これらは  $1~mW/cm^2=10~W/m^2$  で換算できる。  $^{\dagger43}$ 

近傍界では上の式のような関係は成り立たず、例 えば電界強度の測定結果だけから磁界強度 (磁束密 度) や電力密度を算出することはできない。

また、低い周波数範囲では電界の影響と磁界の影響は異なり、電界と磁界を別々に扱うことが必要となる。

## 10.6 意図的な曝露

医療上の目的で、例えば神経や筋肉の刺激、あるいは組織の加熱 (例えばハイパーサーミアでは対象の組織の温度を  $40^{\circ}$ C 程度以上まで加熱する) などのために、患者を電磁界に意図的に曝露させることがある。

そのような曝露は本稿で触れたような曝露の制限を大きく超えるかも知れないが、医療上の目的のための専門家の管理のもとでの意図的な曝露については一般に通常の曝露の制限は適用されない。

<sup>†43</sup> mW/cm² は 1 cm² 当たりの電力であるが、これは 1 cm² での平均を意味しているわけではない。



このような曝露が患者に有害な影響を与える可能性も予期されるかも知れないが、それが許容されるかどうかは主にベネフィットとリスクのバランスから判断することになるだろう。†44

勿論、このような場合も不必要な曝露は抑える必要があるし、対象の患者の意図的な曝露以外、例えば医療従事者や他の患者の曝露は制限の対象となる。

## 10.7 関連する書籍

本稿で参照している資料は本文やその脚註で示している。

和書で電磁界の人体への影響を扱っているものと しては、例えば次のようなものがある:<sup>†45</sup>

- 電磁気と生体, 大森 豊明, 日刊工業新聞社, 1987, ISBN: 4526022810
- 電磁界の生体効果と計測, 電気学会 高周波電 磁界の生体効果に関する計測技術調査専門委員 会 編, コロナ社, 1995, ISBN: 4339006254
- 電磁波白書, 大朏 博善, ワック, 1997, ISBN: 4756117325
- 生体と電磁界, 上野 照剛・岩坂 正和・重光 司, 学会出版センター, 2003, ISBN: 4762230111
- 電磁界の健康影響 工学的・科学的アプローチの必要性、三浦 正悦、東京電機大学出版局、 2004、ISBN: 4501324007
- 電波と生体安全性 基礎理論から実験評価・ 防護指針まで (設計技術シリーズ), 野島 俊雄・ 大西 輝夫, 電波産業会電磁環境委員会編, 科学 情報出版株式会社, 2019, ISBN: 4904774795

© 2021 e-OHTAMA, LTD.

All rights reserved.

免責条項 — 当社ならびに著者は、この文書の情報に関して細心の注意を払っておりますが、その正確性、有用性、完全性、その利用に起因する損害等に関し、一切の責任を負いません。

<sup>†44</sup> これは明らかに人体に有害な影響を与え得るレントゲン検査(癌のリスクを増大させる)や放射線治療(しばしば著しい副作用を伴う)などの受け入れの判断と同様である。

<sup>†45</sup> 書籍は他にもあるが、科学的な根拠なしに不安を煽るような書籍が多く出版されているので注意していただきたい。