

電波防護指針の見直しの方向性について

(「吸収電力密度の指針値の導入等」に関する論点整理)

令和5年7月26日

電波防護指針の在り方に関する検討作業班事務局
(総務省総合通信基盤局電波部電波環境課)

電波防護指針の在り方に関する検討作業班の検討内容について

1 検討内容

2020年ICNIRPガイドラインやIEEE規格C95.1-2019といった国際的動向や電波利用環境の変化を踏まえた電波防護指針の在り方について

2 検討項目

(1) 電波防護指針の在り方

【主な論点】

- ・ 吸収電力密度の指針値の導入 (6GHz～300GHz)

(2) その他関連する事項

これまでの主な検討項目

1. 電波防護指針の在り方に関する検討作業班（第12回）【令和4年12月26日】

* 電力密度評価方法作業班（第7回）との合同会議

- (1) 各作業班の検討事項及び検討の進め方について
- (2) 電波防護指針の概要について
- (3) 国際動向について
- (4) 6GHz帯無線LAN適合性評価の事例と課題について

2. 電波防護指針の在り方に関する検討作業班（第13回）【令和5年3月10日】

- (1) 近年の健康リスク評価について
- (2) 皮膚に対する研究動向について
- (3) 吸収電力密度について

3. 電波防護指針の在り方に関する検討作業班（第14回）【令和5年5月15日】

- (1) 眼球に関する研究動向について
- (2) 基礎指針4(b)について
- (3) 吸収電力密度の平均化面積について
- (4) 電波ばく露によるストレス応答マーカーの変動について

4. 電波防護指針の在り方に関する検討作業班（第15回）【令和5年7月26日】

- (1) 適用除外となる電力について
- (2) 電波防護指針の見直しの方向性について

吸収電力密度の指針値の導入の検討の経緯等

1. 検討の経緯

出典: 電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第12回)資料12-3

- 我が国における電波の安心・安全な利用の促進に資するため、人体の健康に好ましくない影響を及ぼさない電波の強さの指針値等(以下「電波防護指針」という。)が定められている。また、当該指針値の一部を電波法令における規制値とすることにより、我が国における電波の安全性が確保されている。
- 電波防護指針については、平成2年の当初指針の作成後も、その時々最新の科学的知見に基づき、また、国際ガイドラインを踏まえながら、順次見直されてきた。
- 直近の国際的な動向としては、令和元年に、米国電気電子学会(IEEE)の国際電磁界安全委員会(ICES)が、C95.1規格(0Hz~300GHzの電界、磁界及び電磁界への人体のばく露に関する安全レベル)を改定したほか、令和2年に、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)が、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を改定している。
- 現行の電波防護指針においては、6GHz~300GHzの局所吸収指針について、入射電力密度(電磁波伝搬の方向に垂直な単位面積当たりの通過電力)の指針値が定められているが、新たな国際ガイドラインにおいて、6GHz超の入射電力密度は、体表面の温度上昇を精密に近似する指標となる吸収電力密度(身体表面における単位面積当たりの吸収電力)とアンテナ近傍では必ずしも適切に相関しないとの見解が示され、吸収電力密度を用いた評価が推奨されている。
- これらを踏まえ、国際ガイドラインとの調和を念頭に、電波防護指針の在り方について検討を開始するものである。

2. 局所入射電力密度の課題

出典: 電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第13回)資料13-4

- 2GHzを超え300GHz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。【ICNIRPガイドライン(2020)】
- 参考レベル(ERL)は、均一なばく露の仮定に基づいており、等価平面波入射電力密度で表される。リアクティブ近傍界領域内では、その関係は成り立たない。【IEEE/ICES規格(2019)】

3. 局所吸収電力密度の有用性

出典: 電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第13回)資料13-4

- 6GHz超ではSARと温度上昇が必ずしも適切に相関せず、吸収電力密度は6GHz以上で温度上昇とより優れた相関関係を示唆
- 単位吸収電力密度の温度上昇は、ばく露条件にあまり依存せず、入射電力密度と比較して一貫性のある特性

論点整理 (1) 吸収電力密度の定義

出典: 電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第13回)資料13-4

吸収電力密度(Absorbed Power Density)/上皮電力密度(Epithelial Power Density)
: 単位面積当たりにおいて吸収される電力密度 [W/m²]

ICNIRPガイドライン(2020)

$$S_{ab} = \frac{1}{A} \iint_A \int_0^{z_{max}} \rho \cdot SAR \, dz \, dx \, dy$$

$$S_{ab} = \frac{1}{A} \iint_A \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot d\mathbf{s}$$

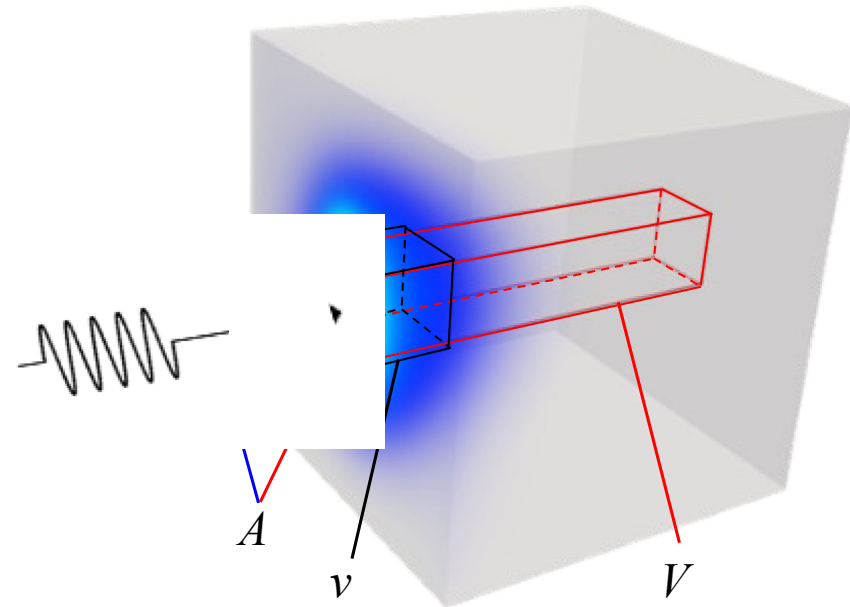
$$SAR = \frac{\sigma |\mathbf{E}|^2}{\rho}$$

注) z_{max} は電波の侵入長に対して十分に長い深さとする

IEEE/ICES規格(2019)

The power flow through the epithelium per unit area directly under the body surface (i.e., in stratum corneum of the skin or corneal epithelium of eyes).

局所SAR, 入射電力密度, 吸収電力密度の概念図



σ	: 導電率(電気伝導率)	[S/m]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
A	: 体表の平均化面積	[m ²]
V	: A に対する積分領域	[m ³]

第2式の意味するところは、体内方向に身体表面を垂直に通過する単位面積当たりの電力であり、6GHz超では電力のほとんどが身体表面で吸収されることを踏まえれば、「吸収電力密度」を「身体表面における単位面積当たりの吸収電力」と考えることができる。

論点整理 (2) 吸収電力密度の基本制限の考え方

出典: 電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第13回)資料13-3

表 組織タイプと基本制限

組織タイプ	ばく露部位	正常体温時 温度	運用上の 閾値	左記温度上昇に必要なAPD値		低減係数 (安全率)	基本制限			
				6-300 GHz	> 30 GHz		局所ばく露		全身ばく露 (30 min)	
				(/6 min · 4 cm ²)	(/6 min · 1 cm ²)		職業ばく露	一般公衆 ばく露	職業ばく露	一般公衆 ばく露
タイプ1	上腕	33°C未満～ 36°C	dT = 5°C	200 W/m ² (20 mW/cm ²)	400 W/m ² (40 mW/cm ²)	職業ばく露： x 1/2 一般公衆 ばく露： x 1/10 ※職業レベル のさらに x 1/5	100 W/m ² (10 mW/cm ²)	20 W/m ² (2 mW/cm ²)		
	前腕									
	手									
	太も									
	脚									
	足									
	耳介									
	眼の角膜・前房・虹彩									
	表皮・真皮組織									
	脂肪組織									
筋組織										
骨組織										
タイプ2	頭部	38.5°C未満	dT = 2°C							
	眼									
	腹部									
	背部									
	胸部									
骨盤										
全身	平均深部 体温37°C	dT = 1°C	全身平均SARで4 W/kg	職業：x1/10 公衆：x1/50			0.4 W/kg	0.08 W/kg		

ICNIRPガイドライン(2020)では、高周波電磁界による温度上昇が、タイプ1及びタイプ2の組織内で、それぞれ5°C及び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る。

これらの温度上昇を生じさせるために必要な局所吸収電力密度について、6～300GHzにおいては、6分間平均され、かつ、平均化面積4cm²の正方形での値を200W/m²と設定している。また、30～300GHzにおいては、より小さな面積においても健康への悪影響を運用上の閾値を超過しないことを確実にするために、追加的に平均化面積1cm²の正方形での値を400W/m²と設定している。

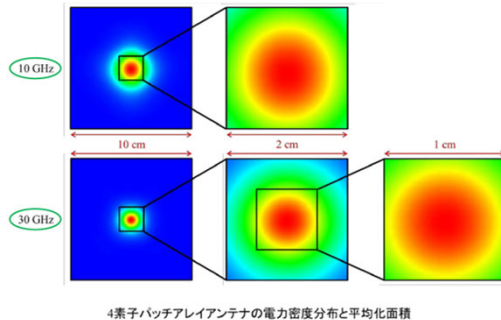
基本制限については、職業ばく露には低減係数2を適用し、一般公衆ばく露には低減係数10を適用している。

論点整理 (3)平均化面積 ①平均化面積の基本的考え方

出典:電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第14回)資料14-3

- 吸収電力密度と入射電力密度において、平均化面積の基本的考え方は同じ

電波防護指針の在り方に関する検討作業班
(第9回)資料9-4より抜粋。



4素子パッチアレイアンテナの電力密度分布と平均化面積

都合により図は非掲載としています。

図:異なる平均化面積(a)1cm²(b)4cm²(c)9cm²(d)20cm²で正規化した入射電力密度における体表温度上昇^[1]

1. Hashimoto Y, Hirata A, Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster K R. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. Phys. Med. Biol. 2017; 62(8): 3124-38.
2. Foster K R, Ziskin M C, Balzano Q. Thermal modeling for the next generation of radiofrequency exposure limits: commentary. Health Phys. 2017; 113(1): 41-53.

Hashimotoら [1]は、4素子からなるダイポールアンテナを、均質媒質の人体頭部を模擬した多層直方体モデル近傍(15-40 mm)に配置した場合の異なる平均化面積に対する入射電力密度と皮膚温度上昇値の関係を調査

左図:平均化面積を4cm²とした場合に、温度上昇を面積平均の入射電力密度で除した割合は、平面波が均質媒質に入射する状態を想定した1次元解析の値に比べて、約30GHzまでは小さい

Fosterら[2]は、2次元の皮膚単層モデルを用いて理論解析を行い、皮膚温度上昇と相関の取れる電力密度の空間平均値は、血流の影響を受けばらつきがあるものの、1-4cm²の範囲にあると算出

最大温度上昇とよく相関する4 cm²の平均化面積(6-300 GHz)が提案された。

30 GHz以上で、狭ビームのばく露を考慮し、1cm²の平均化面積に対する指標が追加で設定された

論点整理 (3)平均化面積 ②平均化面積と吸収電力密度許容量の関係

出典:電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第14回)資料14-3

- Fosterら[2]は、理論的熱モデルに基づき、電波の照射面積を小さくし局所化した場合の最大表面温度上昇が、生体内熱拡散により面積が大きい場合よりも小さくなることを示した(局在化したばく露に対し、温度上昇は平均化面積の平方根で小さくなる)
- Funahashiら[4]は3次元人体およびアンテナモデルによる数値計算から、2倍の許容出力が可能であることを確認
- これらが、平均化面積 1cm^2 とした場合の閾値2倍の根拠となっている

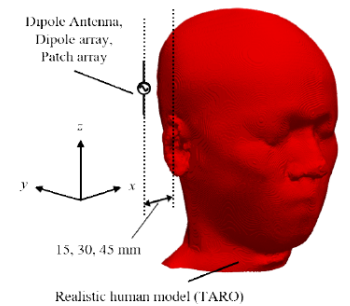


FIGURE 1. Exposure conditions of bird's-eye view for a dipole antenna, four-element dipole and patch antenna arrays. The distance between the neighboring antennas in the array is one half-wavelength corresponding to the respective frequencies.

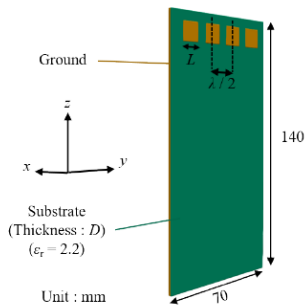


FIGURE 2. Geometry of patch antenna array on the dielectric substrate. The distance between the neighbouring antennas in the array is one half-wavelength corresponding to the respective frequencies.

3次元評価モデル

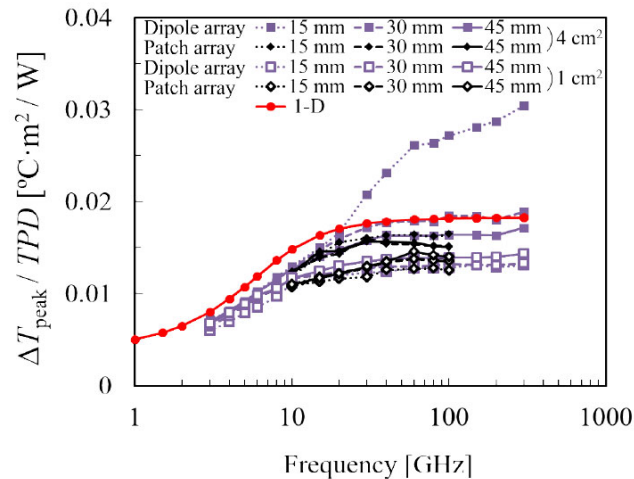


FIGURE 5. The ratio of the surface temperature elevation to the TPD averaged over 4 cm^2 and 1 cm^2 for the four elements dipole antenna and patch antenna array.

*TPD(透過電力密度)は、吸収電力密度と等価。
 *塗りつぶしマーカは平均化面積 4 cm^2 中の特性、
 白抜きマーカは平均化面積 1 cm^2 の温度上昇特性を示す。

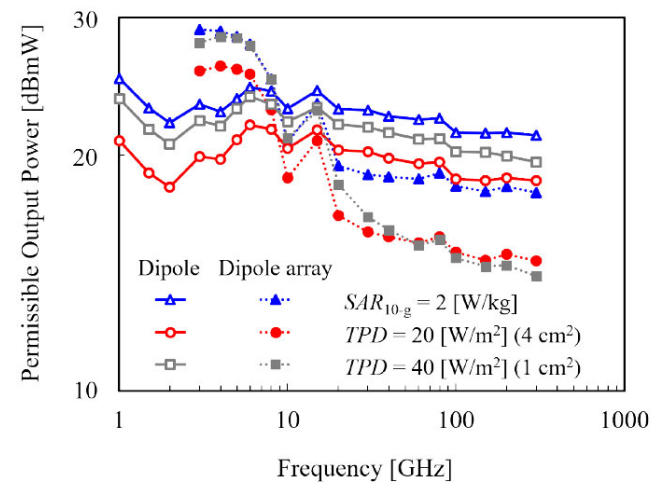


FIGURE 8. Permissible output power for dipole antenna and dipole antenna array when SAR or TPD restricted to the exposure limit.

*SAR(局所比吸収率).
 *実線はダイポールアンテナ、点線はアレーアンテナの許容出力特性。

4. D. Funahashi et al., IEEE Access, vol.6, pp. 77665-77674, 2018. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2883733 (ICNIRP 2020にて引用).

生体内熱拡散のため、電波ばく露を局在化すると、平均化面積の平方根で、最大温度上昇が小さくなる。
 6~300GHzでの 4cm^2 の平均化面積の許容値に対して、30GHz超でのビームばく露(平均化面積 1cm^2)は2倍の出力を許容可能。

論点整理 (4) 指針値の妥当性 ① 人体皮膚の事例

出典: 電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第13回)資料13-3

- ◆ 対象: 人体前腕皮膚 (第1選択肢として)
- ◆ 電波: 周波数 28 GHz
吸収電力密度 (APD) 0-900 W/m²
- ◆ 時間: 12分間
- ◆ 環境: 温度 26.5±0.5°C, 湿度 45±10%

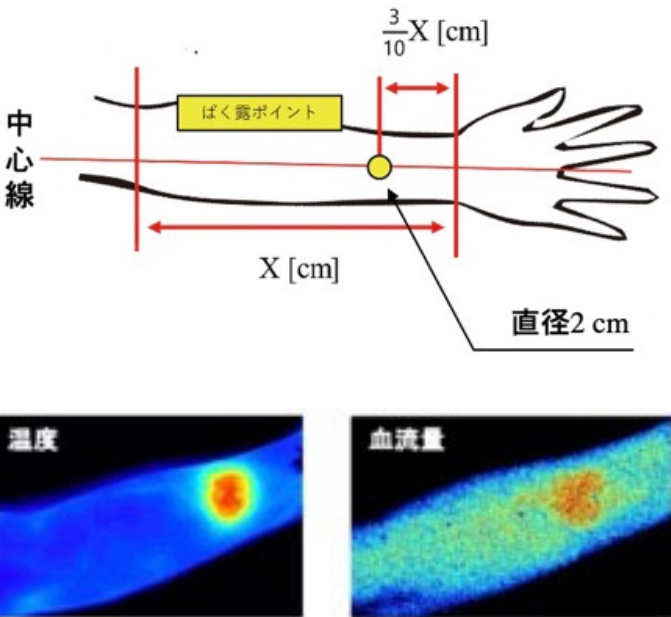


図 人体前腕局所電波ばく露実験方法

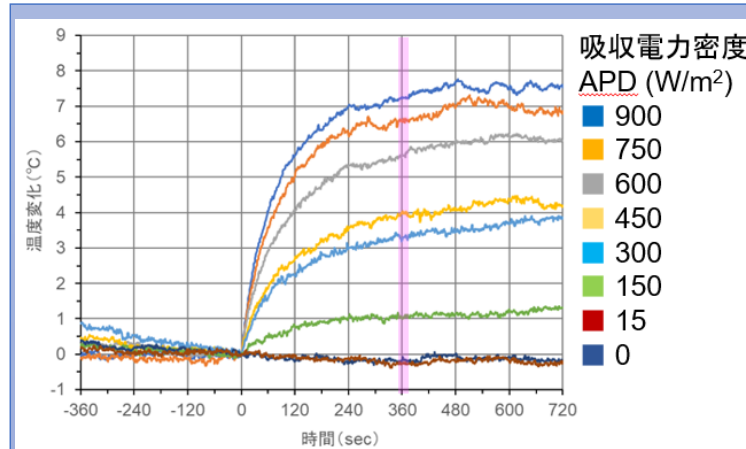


図 28GHz電波局所ばく露時の成人前腕皮膚の温度変化

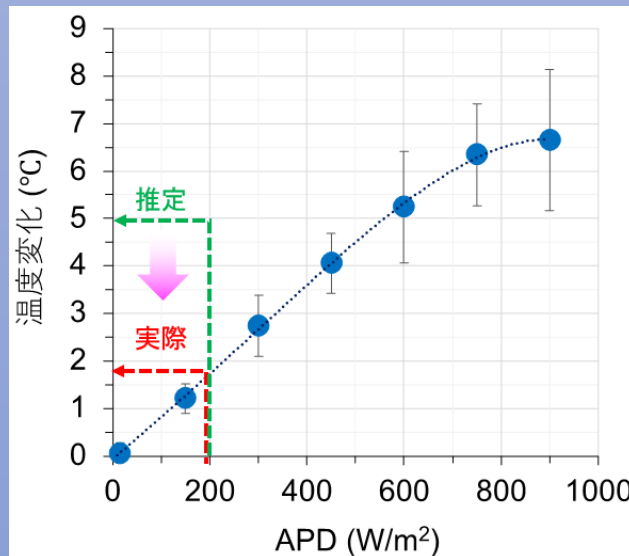


図 ばく露6分後の温度変化とばく露強度との関係

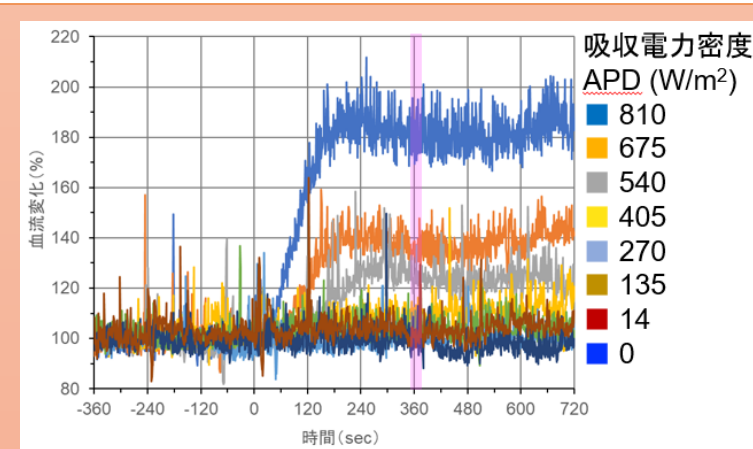


図 28GHz電波局所ばく露時の成人前腕皮膚の血流変化

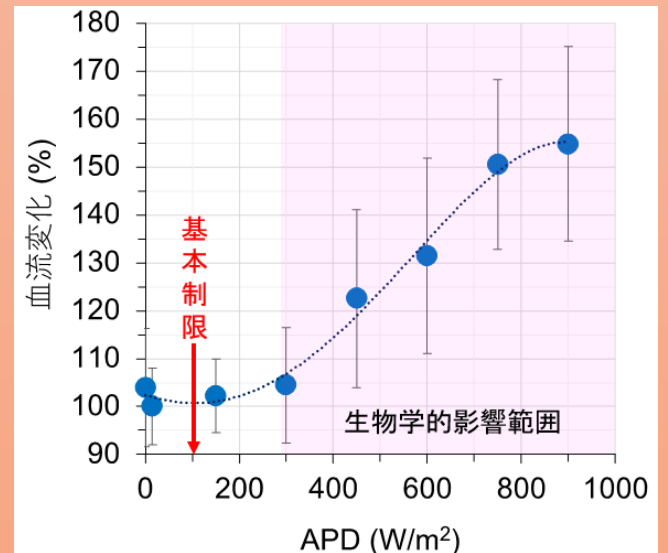


図 ばく露6分後の血流変化とばく露強度との関係

久留米大学における人体前腕皮膚のばく露実験では、吸収電力密度と温度上昇の関係について、人体モデルを用いた数値解析による推定値よりも実測値が下回る可能性が示唆された。

皮膚血流を評価した結果、ばく露強度が基本制限よりも下まわっていれば影響惹起の可能性は低いことが示唆された。

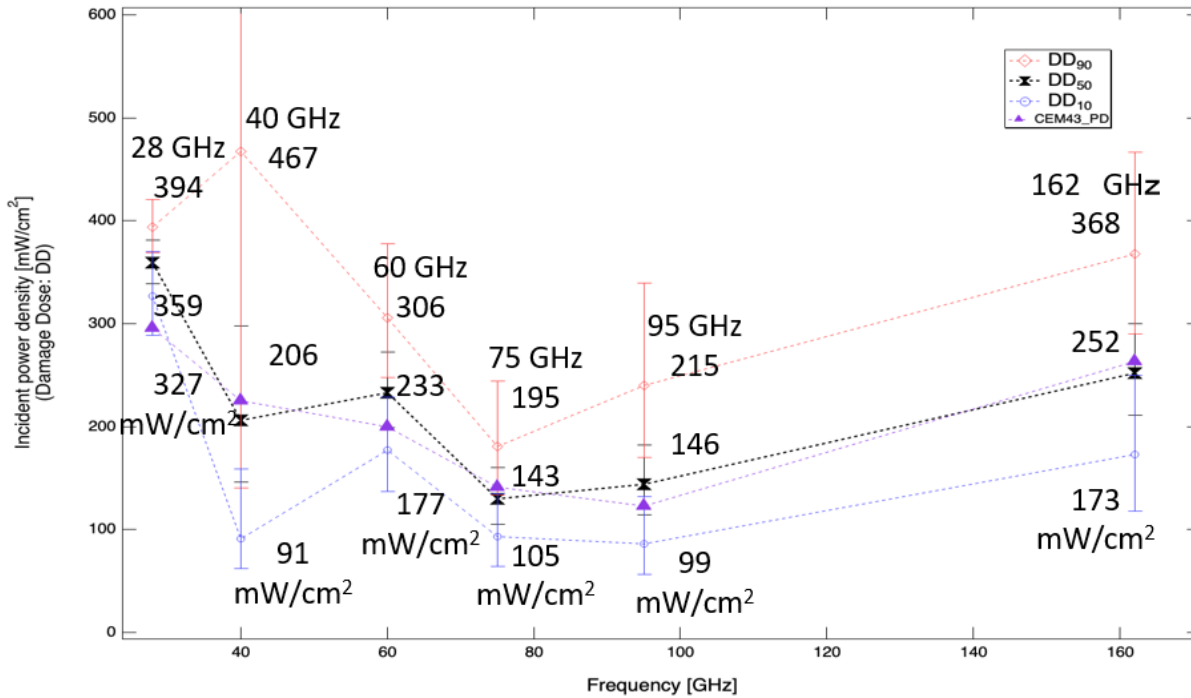
人体 (皮膚温度と血流) について、性・年齢による差異を考慮しても基本制限が妥当であることを示すデータも存在 (引用省略)。

このほか、同大での動物実験 (ラット皮膚) では、基本制限100 W/m²では組織変化は生じないことなどが示唆された。

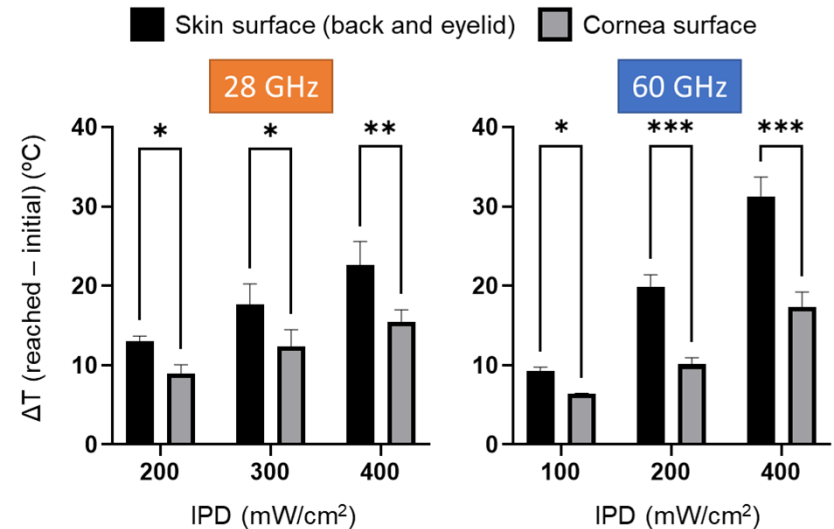
論点整理 (4) 指針値の妥当性 ②家兎眼球の事例

出典：電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第14回)資料14-1

◆ 6分間ミリ波ばく露による眼障害閾値



ミリ波帯閾値の周波数特性 (28 GHz-162 GHz)



周波数(GHz)	障害閾値 (mW/cm ²)	
	眼部 (角膜)	皮膚 (上眼瞼、背部)
28	350 - 380	200 - 300
60	200 - 300	100 - 200

角膜より皮膚のほうが障害閾値が低い

金沢医科大学における家兎眼球へのミリ波 (28~162GHz) の電波ばく露による眼障害閾値の研究によれば、閾値 (Damage Dose 50%) が極小となった事例 (周波数: 75GHz) であっても、入射電力密度で100~200mW/cm²の範囲にあり、また、瞬目など、眼が鋭敏な忌避反応を持つことから、現行の電波防護指針は十分に安全側にあると考えられる。

さらに、電波ばく露による眼部、眼瞼皮膚及び体部皮膚の表面温度変化や障害閾値を比較したところ、28GHz及び60GHzのばく露による表面温度上昇は、角膜より皮膚が高く、障害閾値については角膜より皮膚が低いという結果が得られた。

論点整理 (5) 吸収電力密度の指針値の位置付け

今般導入を検討している吸収電力密度の指針値は、身体に近接して使用される無線機器等から発射される電波の評価に用いることを目的としており、局所吸収指針に組み込まれるべきものである。

他方、吸収電力密度は、生体内（6GHz超では主に体表面）で吸収される単位面積当たりの電力であり、「生体内現象と直接関連する物理量」という基本制限の定義にも当てはまることから、基本制限にも位置付けることが適当であると考えられる。

この場合、「基本制限」や「基礎指針」の全体像についても改めて整理が必要。

平成27年3月12日付け一部答申「低周波領域（10kHz以上10MHz以下）における電波防護指針の在り方」においては、電波防護指針に「基本制限」が導入され、その考え方は次のとおり整理されている。

<電波利用環境委員会報告（平成27年3月12日）より>

ICNIRP ガイドライン 2010 において、「基本制限」（Basic Restriction）とは、“Mandatory limitations on the quantities that closely match all known biophysical interaction mechanisms with tissue that may lead to adverse health effects.”（健康への有害な影響に至る可能性のある、全ての、既知の、身体組織との生物物理学的相互作用メカニズムに直結する物理量に関する、守ることが義務づけられた制限値）と定義されている。この「基本制限」は、人体に生じる生体作用に基づいて示された人体防護に関する指針値であるという点では、従来の電波防護指針における「基礎指針」と共通の概念である。

従来の電波防護指針における「基礎指針」は、適合性が管理指針により確認できない場合に適用される例外的措置のための指針と位置付けられている。一方、ICNIRP ガイドライン 2010 における「基本制限」は、積極的に適合性確認に用いられることが想定されており、この点では電波防護指針における「基礎指針」とは位置づけが異なるものである。ただし、低周波領域における基本制限は、実際に測定することが困難な体内電界で定められており、体内電界による基本制限に対する適合性確認方法についての国際規格等は未だ十分に整備されていないのが現状である。

以上により、低周波防護指針においては、ICNIRP ガイドライン 2010 に倣い、従来の「基礎指針」に代えて、「基本制限」という概念を導入することとする。

具体的には、電波防護指針において「基本制限」を「健康への有害な影響に至る可能性のある電波ばく露による生体内現象と直接関連する物理量についての制限値」と定義する。

電波防護指針における吸収電力密度(6~300GHz)の位置付け

電波防護指針は、社会・経済的に需要の高まっている電波利用の健全な発展を図ることを目的に、電磁波が人体の健康に好ましくない影響を及ぼさない安全な状況であるか否かを判断する際の基本的な考え方や、それに基づく指針値などを示しており、「基礎指針」、「基本制限」及び「管理指針」から構成されている。

刺激作用 (10kHz ~ 10MHz) 熱作用 (100kHz ~ 300GHz)

安全率：～10倍

基礎指針

全身平均SAR (熱作用)、接触電流 (熱作用)、局所SAR (熱作用)

基本制限

体内電界 (刺激作用)

管理指針 (管理環境・一般環境 (付加的な安全率：～5倍))

電磁界強度指針

6分間平均値 (100kHz - 300GHz)

瞬時値 (10kHz - 10MHz)

注意事項

1. 接触ハザード
2. 非接地条件
3. 時間変動
4. 複数の周波数成分

補助指針

不均一又は局所的なばく露

接触電流に関する指針

誘導電流に関する指針

局所吸収指針

(100kHz - 300GHz)

全身平均SAR

局所SAR (100kHz - 6GHz)

入射電力密度 (6GHz-300GHz)

接触電流 (100kHz - 100MHz)

体内電界 (100kHz - 10MHz)

基礎指針: 人体が電磁界にさらされるととき人体に生じる各種の生体作用(体温上昇に伴う熱ストレス、高周波熱傷等)に基づいて、人体の安全性を評価するための指針

基本制限: 健康への有害な影響に至る可能性のある電波ばく露による生体内現象と直接関連する物理量についての制限値

管理指針: 基礎指針及び基本制限を満たすための実測できる物理量(電界強度、磁界強度、磁束密度、電力密度、電流及び比吸収率)で示した、実際の評価に用いる指針

論点整理 (6)適用除外となる電力

出典:電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第15回)資料15-1

ICNIRPガイドライン(2020)における吸収電力密度の指針値の導入を仮定し、適用除外となる電力の最大値を算出

- ✓ 30 GHz超で、現行の局所吸収指針の適用除外となる電力の最大値とギャップ有
 - ⇒ 現行の局所吸収指針の規定の方がより安全側
 - ⇒ ただし、吸収電力密度の指針値を導入することにより見直しの余地あり

ICNIRPガイドライン(2020)における吸収電力密度の指針値から計算した適用除外となる電力

	Occupational (職業ばく露)		General public (一般公衆ばく露)	
	>6-30 GHz	>30-300 GHz	>6-30 GHz	>30-300 GHz
周波数範囲	>6-30 GHz	>30-300 GHz	>6-30 GHz	>30-300 GHz
適用除外となる電力	40 mW以下	20 mW以下	8 mW以下	4 mW以下

局所吸収指針の適用除外となる電力(総務省諮問第2035号答申(2018))

	管理環境		一般環境	
	6-30 GHz	30-300 GHz	6-30 GHz	30-300 GHz
周波数範囲	6-30 GHz	30-300 GHz	6-30 GHz	30-300 GHz
適用除外となる電力	40 mW以下	10 mW以下	8 mW以下	2 mW以下

- 局所吸収指針では、「適用除外となる電力」(適合性評価を必要としない空中線電力の平均電力)が示されている。
- 空中線電力の平均電力が適用除外となる電力以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、指針値を満たす。

論点整理 (7) 複数周波数への同時ばく露

電波防護指針の局所吸収指針においては、複数の周波数の電波にばく露する場合について、各周波数成分の指針値に対する割合の総和が1を超えてはならないと定められている。

$$TER = \sum_{n \leq 6\text{GHz}} \frac{SAR_n}{SAR_{n,limit}} + \sum_{6\text{GHz} \leq m \leq 300\text{GHz}} \frac{S_m}{S_{m,limit}} < 1$$

TER: Total Exposure Ratio (総合照射比)
 $SAR_{n,limit}$: SARの指針値
 SAR_n : SAR
 $S_{m,limit}$: 入射電力密度の指針値
 S_m : 入射電力密度
 n, m : 周波数帯域

吸収電力密度の指針値についても、同様の考え方が適用されるように取り扱う必要があると考えられる。この場合において、同一の周波数帯であれば、入射電力密度と吸収電力密度の両方を評価する必要はないため、次式のような場合分けを設けることが適当と考えられる。

$$TER = \sum_{n \leq 6\text{GHz}} \frac{SAR_n}{SAR_{n,limit}} + \sum_{6\text{GHz} \leq m \leq 300\text{GHz}} \frac{S_m}{S_{m,limit}} < 1$$

$$\frac{S_m}{S_{m,limit}} = \begin{cases} \frac{IPD_m}{IPD_{m,limit}} & \text{(入射電力密度で評価する場合)} \\ \frac{APD_m}{APD_{m,limit}} & \text{(吸収電力密度で評価する場合*)} \end{cases}$$

TER: Total Exposure Ratio (総合照射比)
 $SAR_{n,limit}$: SARの指針値
 SAR_n : SAR
 $S_{m,limit}$: 電力密度の指針値
 S_m : 電力密度
 $IPD_{m,limit}$: 入射電力密度の指針値
 IPD_m : 射電力密度
 $APD_{m,limit}$: 吸収電力密度の指針値
 APD_m : 吸収電力密度
 n, m : 周波数帯域

* 30~300GHzについては、平均化面積1cm²と4cm²のいずれも評価を行い、指針値に対する割合が高い方を適用する。ただし、令和5年7月時点において、10~300GHzについて、標準的な評価(測定)方法が確立されるまでには至っていないことに留意が必要である。

論点整理 (8)基礎指針における眼に関する注意事項

- 1 全身平均SARの任意の6分間平均値が、0.4W/kg以下であること。
- 2 (削除)
- 3 100kHzから100MHzまでの周波数において、接触電流など対外からの流入電流が100mA以下(平均時間6分間)であること。
- 4 上記の(1)(2)及び(3)に加え、次の点に関して注意事項として考慮すること。
 - (a) 全身平均SARの任意の6分間平均値が0.4W/kg以下であっても、任意の組織1g当りのSAR(6分間平均値)が8W/kg(体表と四肢では25W/kg)を超えないことが望ましい。
 - (b) 3GHz以上の周波数においては、眼への入射電力密度(6分間平均)が10mW/cm²以下とすること。

出典:電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第14回)資料14-2

留意点 (抜粋)

- ICNIRP(2020)ガイドラインおよびIEEE国際規格(2019)において、眼球への記述は限定的となる
- 皮膚と角膜の閾値を同じ扱いとし、ICNIRP1998と比べて、低い入射電力密度を設定(1cm²の場合5倍差)
- Health Canada Safety Codeにおいて、眼球に関する記述は削除

論点整理 (9)健康リスク評価関連

出典:電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第13回)資料13-2

周波数	主な評価・レビュー結果	今後必要とされる研究
超低周波	<ul style="list-style-type: none"> 超低周波磁界へのばく露と小児白血病の発症については、疫学研究の結果、関連性が認められているが、因果関係は確立されていない。(疫学的には超低周波電磁界へのばく露と小児白血病の発生率の増加に一貫した関連があることは広く認められているが、実験モデルでの観察から因果関係を裏付けるものはなく、もっともらしい生物物理学的な作用機序も不明) スウェーデンSSM (2022)	低周波磁界へのばく露と小児白血病に関連する実験研究
中間周波	<ul style="list-style-type: none"> この周波数帯の研究は殆ど行われていない。 ばく露評価、特に内部誘導電界の評価が困難。 現行のガイドラインを下回るばく露による健康への悪影響は示されていないが、研究の数が限定されるため、結論は導き出せない。 スウェーデンSSM (2022)	研究が不足しているため特に研究が必要 <ul style="list-style-type: none"> WPTなどの新しいアプリケーションによる局所的に強いばく露による影響の研究
高周波 主に2G-4G周波数	<ul style="list-style-type: none"> 高周波電磁界へのばく露と健康影響の間に新たな因果関係は示されていない。特に、高周波電磁界による腫瘍形成や発がんとの間に新たな因果関係は示されていない。 ただし、高周波電磁界による健康影響の可能性自体を排除することはできない。 米国FDA (2020)、オランダ保健評議会 (2020)、フランスANSES (2022)、スウェーデンSSM (2022)	携帯電話、特に5Gで使われる周波数帯に対する研究 <ul style="list-style-type: none"> 発がん、認知機能、生殖機能、電磁過敏症など 動物研究で観察されているばく露と酸化ストレスの関係が人間においても存在するのかについての研究 5Gも含む、現在/将来の電波のばく露状況に関する研究
高周波 主に5Gのsub6帯 (例:3.5GHz帯)	<ul style="list-style-type: none"> この周波数に特化した研究は非常に少ない。 ただし、2G-4GやWi-Fiなど近い周波数帯を対象にした健康影響やばく露量に関する研究を評価した結果、新たな健康リスクがある可能性は低い。 フランスANSES (2022)、オランダ保健評議会 (2020)	
超高周波 (6GHz超) 主に5Gのミリ波帯	<ul style="list-style-type: none"> 電磁界のばく露と健康影響の因果関係について、結論を示すには研究データが不十分である。 フランスANSES (2022)、オランダ保健評議会 (2020)、オーストラリアARPANSA (2021)	研究が不足しているため特に研究が必要 <ul style="list-style-type: none"> 皮膚や眼など体表の器官への影響(免疫・神経系の影響も含む) 新しいコホート研究 5Gも含む、現在/将来の電波のばく露状況に関する研究

ICNIRPガイドライン (2020) の附属書 B『健康リスク評価の文献』では、「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。」と整理されている。

また、諸外国の電波の人体防護に関わる機関により、主に過去3年以内に公表された研究評価・系統的レビューについて調査を実施したところ、結果は次のとおり。

中間周波については、基準値以下のばく露による健康への悪影響は示されていないが、研究の数が限定される。高周波については、基準値以下のばく露と健康影響の間の因果関係を示す新たな根拠は示されていない。超高周波については、健康影響の因果関係に関する研究データが少なく、今後も研究が必要。

論点整理 (10) 今後の検討課題 (電磁界ばく露による健康影響の研究など)

作業班で報告があった研究の例 (佐賀大学: ストレス応答)

出典: 電波防護指針の在り方に関する検討作業班(第14回)資料14-4

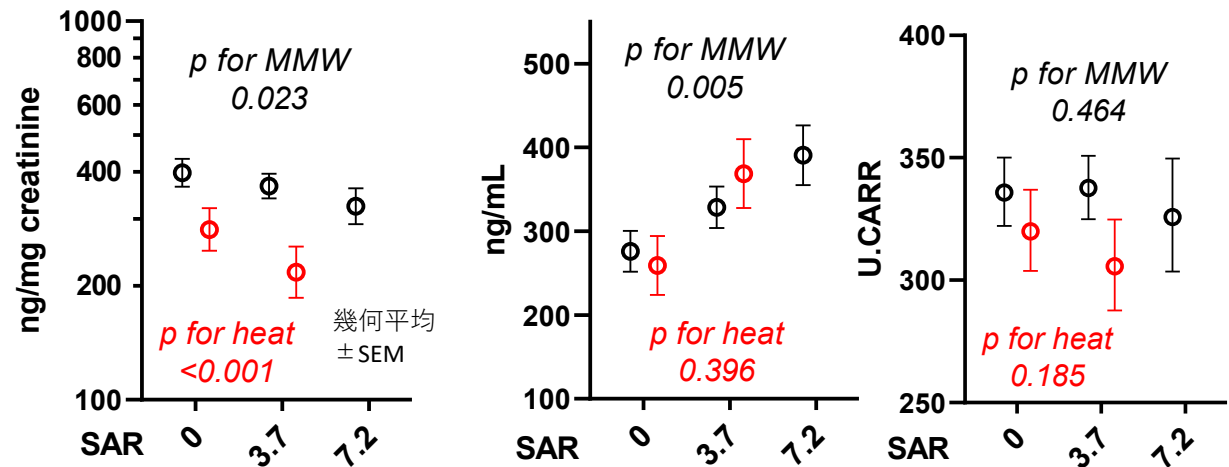
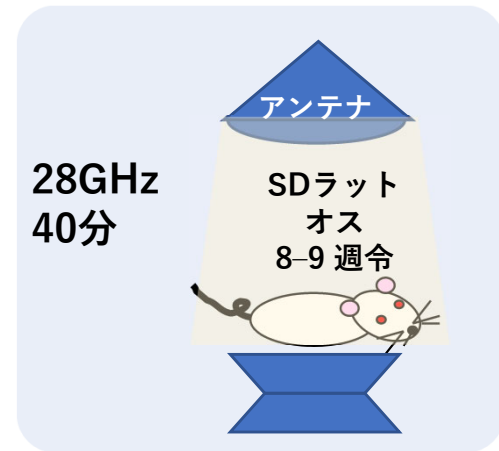
目的:

5Gシステムで用いられる準ミリ波 (MMWと略します) がどのようなストレスか、ストレス応答マーカーを用いて検証する

- ストレス応答のパターンを調査
- 熱的影響で説明できるか考察
- 暑熱環境の重なりが影響するか調査
- 深部体温 1°C 上昇と関連するか考察

表. MMW 曝露条件

	温度	湿度	全身平均SAR (W/kg bodyweight)
通常	≈22.5°C	45-55%	0/ 3.7/ 7.2
暑熱	≈32°C	≈70%	0/ 3.7



MMWと暑熱によって拘束ストレスに対する応答が減弱

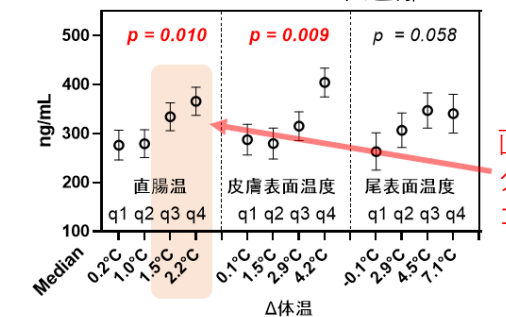
MMWによって拘束ストレスに対する応答が増加

MMWの影響なし
暑熱の影響なし

ばく露直後の尿中遊離ノルアドレナリン

1~3日後の血中遊離コルチコステロン

1~3日後の血清d-ROMs (酸化ストレス度)



直腸温度の変化が1°Cを超えるグループ(q3とq4)でコルチコステロンの後日値が高い

体温変化(4分位) vs 血中遊離コルチコステロン(後日値)

佐賀大学におけるストレス応答に関する研究では、ばく露直後の尿中遊離ノルアドレナリンについて、ミリ波ばく露と弱い負の関連を示し、これに対する暑熱による加算的影響が顕著であった。

血中遊離コルチコステロンについては、1~3日後にミリ波ばく露と容量反応関係にあるピークが認められ、1°C以上の直腸温上昇と強い正の関連が示されたことから、ばく露に伴う体温の上昇に対するストレス応答が検出された可能性がある。

血清d-ROMsテストについては、ミリ波ばく露又は暑熱との関連は推定されなかったものの、1~3日後の値がばく露による体温上昇の影響を受けていることが示唆された。

これらから、ストレス応答マーカーの変動の主たる要因が熱であることが推測される。

電波防護指針（平成30年9月12日最終改定）

1. 定義
2. 1 防護指針の性格と構成
 2. 1. 1 防護指針の基礎とする電磁界の生体作用
 2. 1. 2 防護指針の評価対象量の問題点
 2. 1. 3 防護指針の構成
 2. 1. 4 基本制限と管理指針の2段階構成
 2. 1. 5 防護指針の適用手順
2. 2 管理指針
 2. 2. 1 電磁界強度指針
 2. 2. 2 補助指針
 2. 2. 3 局所吸収指針
2. 3 基礎指針
2. 4 基本制限
2. 5 注意事項

付属書 非正弦波へのばく露

現行の定義(抄)

1. 定義

電波防護指針の解釈に関しては、次の各号の定義に従うものとする。

- (3)「電波防護指針」とは、電波利用において人体が電磁界(周波数の範囲は10kHzから300GHzまでに限る。)にさらされると、その電磁波が人体に好ましくないと考えられる生体作用を及ぼさない安全な状況であるために推奨される指針のことをいう。
- (4)「基礎指針」とは、人体が電磁界にさらされるととき人体に生じる各種の生体作用(体温上昇に伴う熱ストレス、高周波熱傷等)に基づいて、人体の安全性を評価するための指針をいう。
- (5)「基本制限」とは、健康への有害な影響に至る可能性のある電波ばく露による生体内現象と直接関連する物理量についての制限値をいう。
- (6)「管理指針」とは、基礎指針及び基本制限を満たすための実測できる物理量(電界強度、磁界強度、磁束密度、電力密度、電流及び比吸収率)で示した、実際の評価に用いる指針のことをいう。管理指針は、さらに電磁界強度指針、補助指針及び局所吸収指針から構成される。
- (7)「電磁界強度指針」とは、対象とする空間における電界強度、磁界強度、電力密度及び磁束密度によって、当該空間の安全性を評価するための指針をいう。
- (8)「局所吸収指針」とは、主に身体に極めて近接して使用される無線機器等から発射される電磁波により、身体の一部が集中的に電磁界にさらされる場合において、基礎指針に従った詳細評価を行うために使用する指針をいう。
- (9)「補助指針」とは、電磁界強度指針を満足しない場合において、基礎指針に従った詳細評価を行うために使用する指針をいう。電磁界にさらされる状況(不均一、局所、表面など)、対象とする生体作用(接触電流及び誘導電流)、電波発射源の属性(空中線電力及び周波数帯)が明らかな場合、これらの状況に基づき電磁界強度指針の適用を緩和又は除外する形で表した指針である。
- (12)「比吸収率(SAR:Specific Absorption Rate)」とは、生体が電磁界にさらされることによって単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量をいう。SARを全身にわたり平均したものを「全身平均SAR」、人体局所の任意の組織1g又は10gにわたり平均したものを「局所SAR」という。
- (16)「電力密度」とは、電磁波伝搬の方向に垂直な単位面積当たりの通過電力をいう。入射電力密度の評価は、人のいない状態で人の存在する可能性のある全空間を対象とすることを原則とする。
- (26)「遠方界」とは、電磁波源からの距離が、 $2D^2/\lambda$ 又は $\lambda/2\pi$ のいずれよりも遠い領域にあり、反射又は散乱がない状態の電磁界をいう。ここで、Dはアンテナの最大寸法、 λ は自由空間波長とする。
- (27)「近傍界」とは、遠方界とならない領域の電磁界をいう。

2. 2. 3 局所吸収指針

(a) 適用範囲

本指針は、周波数100kHzから300GHzまでに適用する。

局所吸収指針の主な対象は、携帯電話端末等の小型無線機であり、電磁放射源に寄与するアンテナや筐体が人体に極めて近接して使用される場合を想定している。

具体的には、本指針は、電磁放射源(主にアンテナ)や放射に関わる金属(筐体等)と人体との距離が20cm以内の場合に適用される。また、それ以外の距離においても、電磁界強度指針、補助指針又は局所吸収指針のいずれか1つを満たせば基礎指針を満たしていると判断できる。ただし、300MHzから300GHzまでの周波数において、10cm以上20cm以内の距離における電磁界強度指針又は補助指針の適用は排除されない。

なお、100kHz以上6GHz以下の周波数において、空中線電力の平均電力が20mW以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、局所SARの電波防護指針を満たしており、評価の必要性はないものと考えられる。また、管理環境においては、同100mW以下の無線局については、評価の必要性がないものと考えられる。

6GHz以上30GHz以下の周波数において、空中線電力の平均電力が8mW以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、入射電力密度の電波防護指針を満たしており、評価の必要性はないものと考えられる。また、管理環境においては、同40mW以下の無線局については、評価の必要性がないものと考えられる。

30GHz超300GHz以下の周波数において、空中線電力の平均電力が2mW以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、入射電力密度の電波防護指針を満たしており、評価の必要性はないものと考えられる。また、管理環境においては、同10mW以下の無線局については、評価の必要性がないものと考えられる。

(b) 管理環境

次の要件を全て満たすこと。

- 〈1〉 全身平均SARの任意の6分間平均値が、0.4W/kg以下であること。
- 〈2〉 6GHz以下の周波数では、任意の組織10g当りの局所SAR(6分間平均値)が10W/kg(四肢では20W/kg)を超えないこと。
- 〈3〉 6GHz以上30GHz以下の周波数では、任意の体表面(人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積)4cm²当りの入射電力密度(6分間平均値)が10mW/cm²を超えないこと。
- 〈4〉 30GHz超300GHz以下の周波数では、任意の体表面(人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積)1cm²当りの入射電力密度(6分間平均値)が10mW/cm²を超えないこと。
- 〈5〉 複数の周波数の電波に同時にばく露する場合には、前項〈2〉、〈3〉及び〈4〉の各周波数成分の指針値に対する割合の総和が1を超えてはならない。
- 〈6〉 接触ハザードが防止されていない場合は、100kHzから10MHzまでの周波数において接触電流が40mA以下(実効値)であり、100kHzから100MHzまでの周波数において接触電流が100mA以下(平均時間6分間)であること。
ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、100kHzから10MHzまでの周波数については、その各周波数成分の指針値(40mA(実効値))に対する割合の和の総和を求めるか、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均を求める。これらの総和が1を超えてはならない。さらに、100kHzから100MHzまでの周波数については、その各周波数成分の指針値(100mA(平均時間6分間))に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。
- 〈7〉 100kHzから10MHzにおいて体内電界強度が $2.7 \times 10^{-4} \times f(\text{Hz})\text{V/m}$ を超えないこと。
ただし、体内電界強度がこの指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の和を求めるか、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均(付属書参照)を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

なお、周波数100MHz以上の無線局は、〈6〉に述べた接触電流に関する指針に基づく評価を行う必要はない。また、周波数10MHz以上の無線局は、〈7〉に述べた体内電界強度に関する指針に基づく評価を行う必要はない。

(c) 一般環境

次の要件を全て満たすこと。

- <1> 全身平均SARの任意の6分間平均値が、0.08W/kg以下であること。
- <2> 6GHz以下の周波数では、任意の組織10g当たりの局所SAR(6分間平均値)が2W/kg(四肢では4W/kg)を超えないこと。
- <3> 6GHz以上30GHz以下の周波数では、任意の体表面(人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積)4cm²当りの入射電力密度(6分間平均値)が2mW/cm²を超えないこと。
- <4> 30GHz超300GHz以下の周波数では、任意の体表面(人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積)1cm²当りの入射電力密度(6分間平均値)が2mW/cm²を超えないこと。
- <5> 複数の周波数の電波に同時にばく露する場合には、前項<2>、<3>及び<4>の各周波数成分の指針値に対する割合の総和が1を超えてはならない。
- <6> 接触ハザードが防止されていない場合は、100kHzから10MHzまでの周波数において接触電流が20mA以下(実効値)であり、100kHzから100MHzまでの周波数においては接触電流が45mA以下(平均時間6分間)であること。
ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、100kHzから10MHzまでの周波数については、その各周波数成分の指針値(20mA(実効値))に対する割合の和を求めるか、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均を求める。これらの総和が1を超えてはならない。さらに、100kHzから100MHzまでの周波数については、その各周波数成分の指針値(45mA(平均時間6分間))に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。
- <7> 100kHzから10MHzまでにおいて体内電界強度が $1.35 \times 10^{-4} \times f(\text{Hz})\text{V/m}$ を超えないこと。
ただし、体内電界強度がこの指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の和を求めるか、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均(付属書参照)を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

なお、周波数100MHz以上の無線局は、<6>に述べた接触電流に関する指針に基づく評価を行う必要はない。また、周波数10MHz以上の無線局は、<7>に述べた体内電界強度に関する指針に基づく評価を行う必要はない。

2.3 基礎指針

基礎指針を表5-1に示す。基礎指針は、熱作用からの人体防護についての管理指針の根拠となる概念であるとともに、生体作用発生の可能性を判断するための基礎を与えるものである。

表5-1 基礎指針

- 1 全身平均SARの任意の6分間平均値が、 0.4W/kg 以下であること。
- 2 (削除)
- 3 100kHz から 100MHz までの周波数において、接触電流など対外からの流入電流が 100mA 以下(平均時間6分間)であること。
- 4 上記の(1)(2)及び(3)に加え、次の点に関して注意事項として考慮すること。
 - (a) 全身平均SARの任意の6分間平均値が 0.4W/kg 以下であっても、任意の組織 1g 当りのSAR(6分間平均値)が 8W/kg (体表と四肢では 25W/kg)を超えないことが望ましい。
 - (b) 3GHz 以上の周波数においては、眼への入射電力密度(6分間平均)が 10mW/cm^2 以下とすること。

2.4 基本制限

低周波領域における刺激作用からの人体防護について、基本制限を表5-2に示す。基本制限は、健康への有害な影響に至る可能性のある電波ばく露による生体内現象と直接関連する物理量についての制限値と定義する。基礎指針による適合性確認が、管理指針により適合性確認できない場合の例外的措置と位置付けているのに対し、基本制限は積極的に適合性確認に用いることを想定している。

表5-2 刺激作用からの人体防護に係る基本制限(実効値)

ばく露特性	周波数範囲	管理環境	一般環境
		体内電界(V/m)	体内電界(V/m)
頭部と体部の全組織	10kHz - 10MHz	$2.7 \times 10^{-4} \times f$	$1.35 \times 10^{-4} \times f$

(注1) fは周波数【Hz】

(注2) 100kHz以上の周波数範囲では、熱作用の指針値についても考慮することが必要

(注3) 電磁界が指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、電界強度、磁界強度及び磁束密度に関して、各周波数成分(10kHz以上10MHz以下)の指針値に対する割合の和を求めるか、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均を求める(付属書参照)。これらの総和が1を超えてはならない。