

吸収電力密度について

第8回 電力密度評価方法作業班

小寺 紗千子(名古屋工業大学)
佐々木 謙介(NICT)

はじめに

- ICNIRPガイドラインおよびIEEE/ICES規格の内容および根拠を精査し、電波防護指針の見直しについて検討が必要となった
 - 6GHz以上における吸収電力密度の指針値(基本制限)および入射電力密度の指針値(参考レベル)はICNIRPおよびIEEE/ICESにおいて改定
- これらの指針値は、電波ばく露による体表での温度上昇に基づいて定められている

	ICNIRPガイドライン(2020) IEEE/ICES規格(C95.1-2019)	総務省諮問 第2035号答申(2018)
入射電力密度 (参考レベル)	>6-300GHz 20-40 W/m ² @4cm ²	6-30GHz 20W/m ² @4cm ²
	>30-300GHz 40-80 W/m ² @1cm ²	>30-300GHz 20W/m ² @1cm ²
吸収電力密度 (基本制限)	>6-300GHz 20 W/m ² @4cm ²	—
	>30-300GHz 40 W/m ² @1cm ²	—

高周波領域においては、再現性のある生体影響の最低閾値は、(痛み、熱的損傷を引き起こす)温度上昇に起因するものと考えられている

局所ばく露の指針値の根拠

- ICNIRPガイドラインおよびIEEE/ICES規格における6GHz超の**吸収電力密度**の指針値およびその根拠は整合

- 電波防護指針管理指針局所吸収指針*の根拠とも整合

*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(2018年)

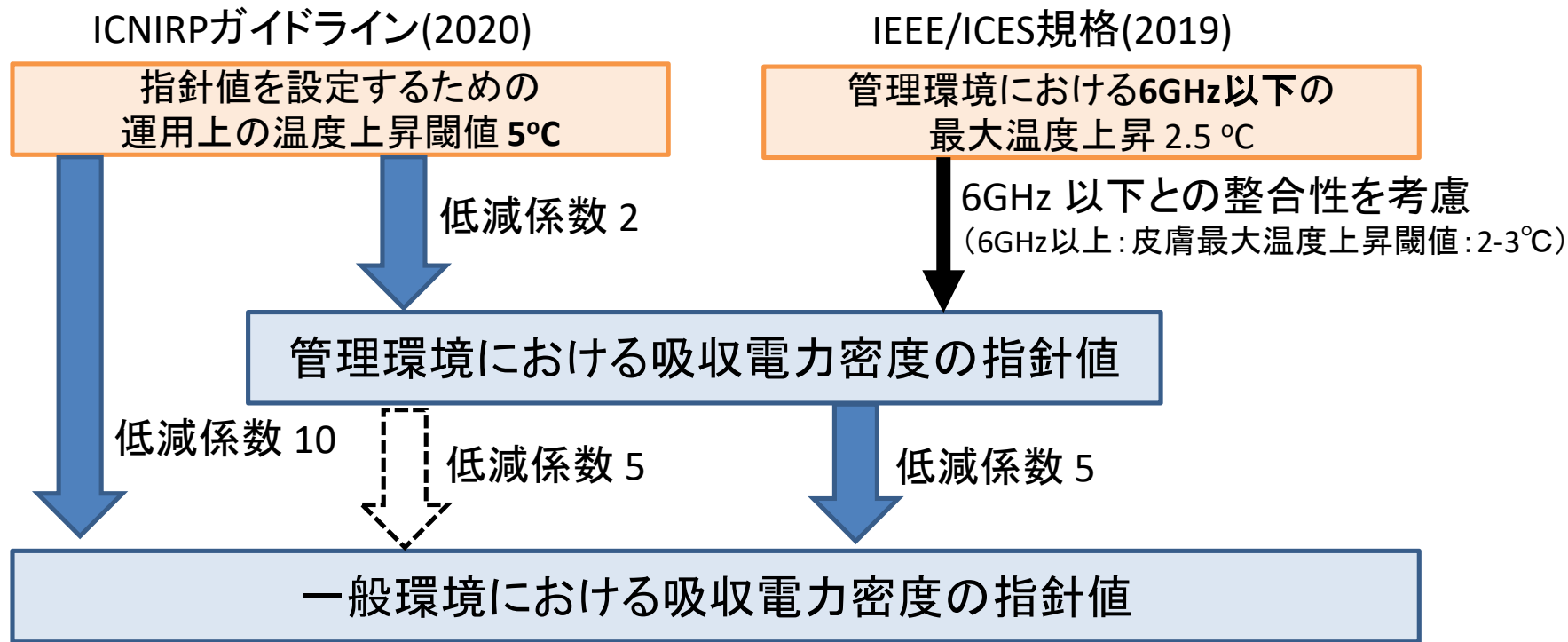


図. 6GHz超の吸収電力密度の指針値の根拠の概要

吸収電力密度の定義

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)

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

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

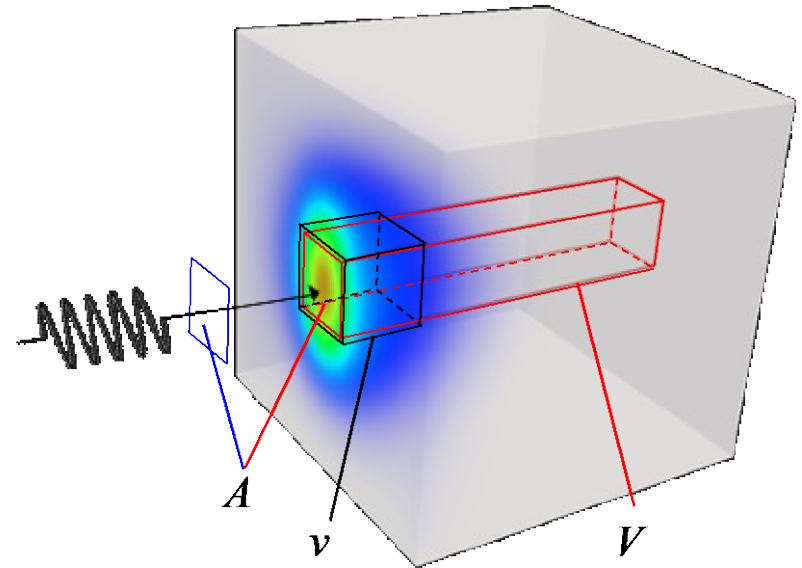
$$SAR = \frac{\sigma |\mathbf{E}|^2}{\rho}$$

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

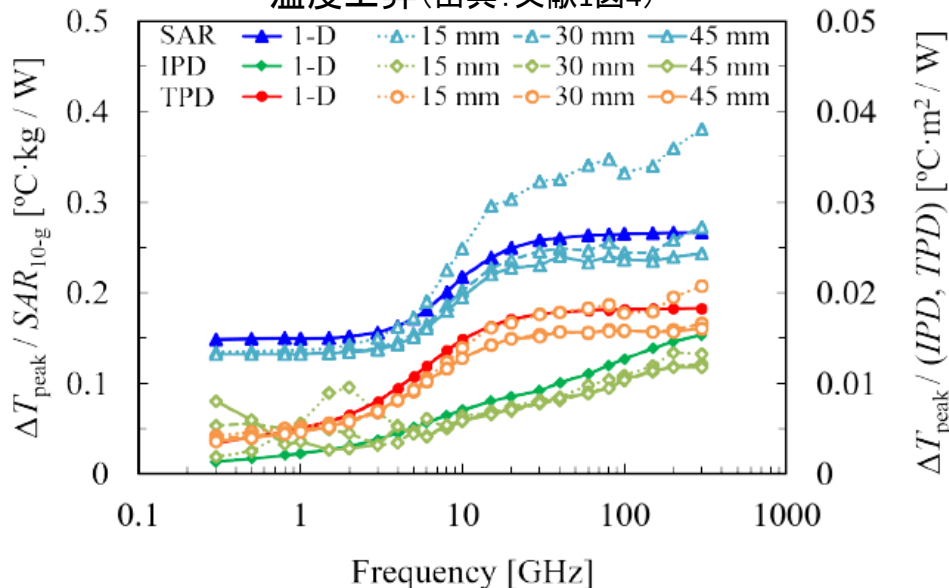


σ	: 導電率(電気伝導率)	[S/m]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
A	: 体表の平均化面積	[m ²]
V	: A に対する積分領域	[m ³]

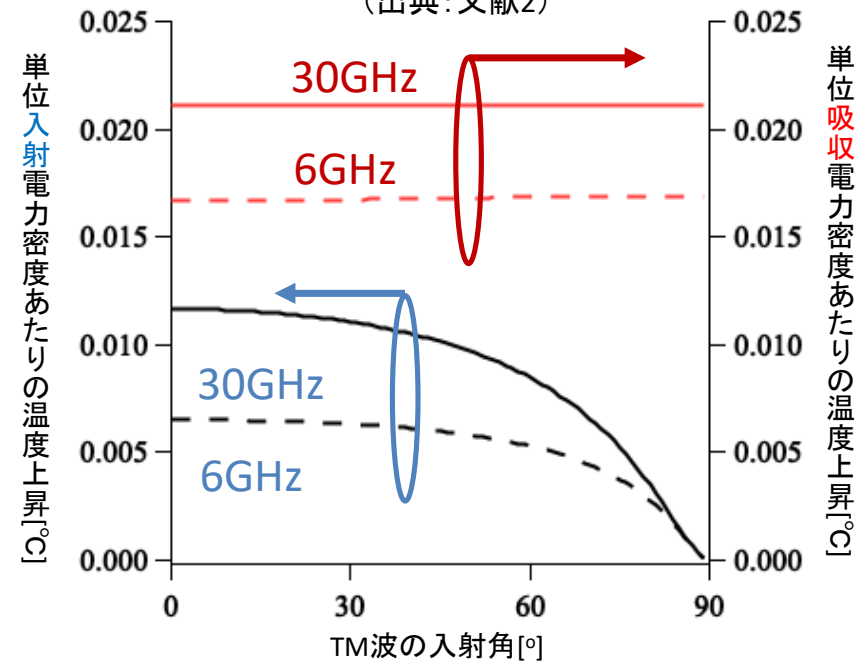
吸収電力密度の体表温度上昇との相関

- 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

ダイポールアンテナからの近傍ばく露における
温度上昇(出典:文献1図4)



多層平板へTM波が入射する場合の温度上昇
(出典:文献2)



*TPD(透過電力密度)は、吸収電力密度と等価。

*IPD(入射電力密度)、SAR(局所比吸収率)。

*実線(1-D)は、1次元解析結果。点線はアンテナモデル間距離を変化させた場合の3次元解析結果。

入射電力密度の指針値の適用範囲

ICNIRPガイドライン(2020)

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。(ICNIRPガイドライン2020(電磁界情報センター翻訳版))

原文(抜粋)

For frequencies >30 MHz to 300 GHz, personal exposure within the radiative near-field zone is treated as compliant if S_{inc} (or, where relevant U_{inc}) is below the reference level value. However, for exposure within the >2 to 300 GHz range, **within the reactive near-field** the quantities applied for the reference level values are treated as inadequate to ensure compliance with the **basic restrictions**. In such cases, compliance with the basic restrictions must be assessed.

IEEE/ICES規格(2019)

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。

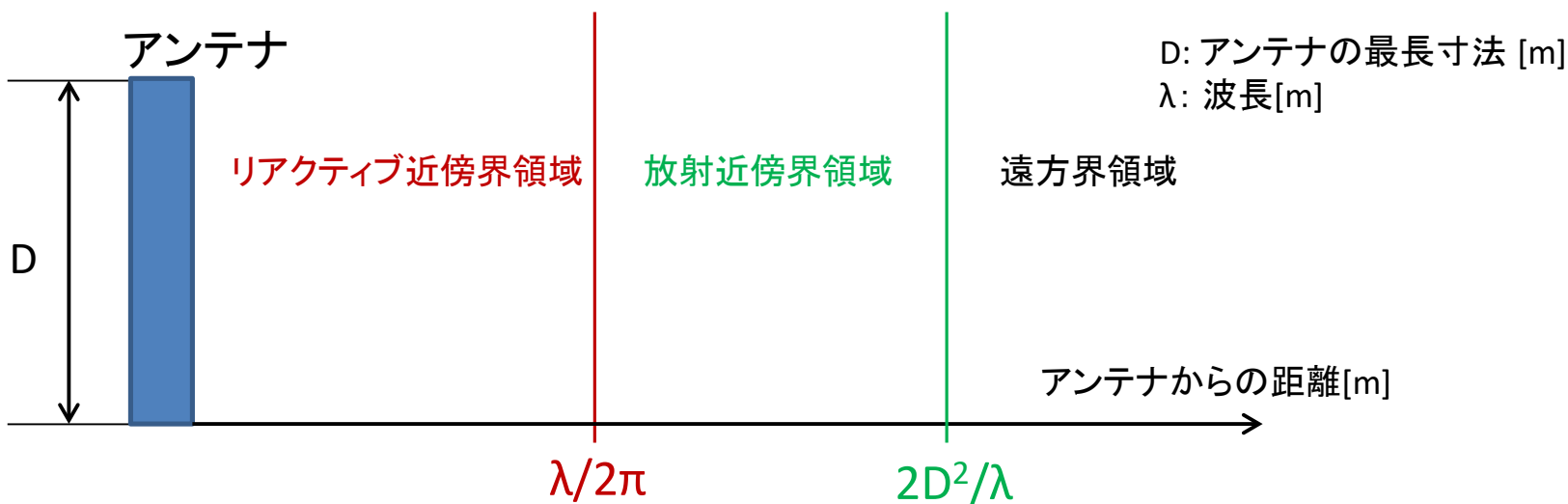
原文(抜粋)

The ERLs are based on the assumption of uniform exposure and are expressed in terms of **field strength** or **plane-wave-equivalent power density of the incident field** (i.e., the electric field strengths and magnetic field strengths that correspond to a plane-wave field with the same values and uniformly distributed in planes transverse to the direction of propagation).

In the **reactive near-field region**, there is no simple relationship between the electric field strength (E) and the magnetic field strength (H); the impedance (E/H) differs from 377 Ω . The linear decrease in field strength with distance and the decrease in power density with distance squared that is characteristic of the far field do not apply in the near-field region.

入射電力密度の指針値の適用範囲

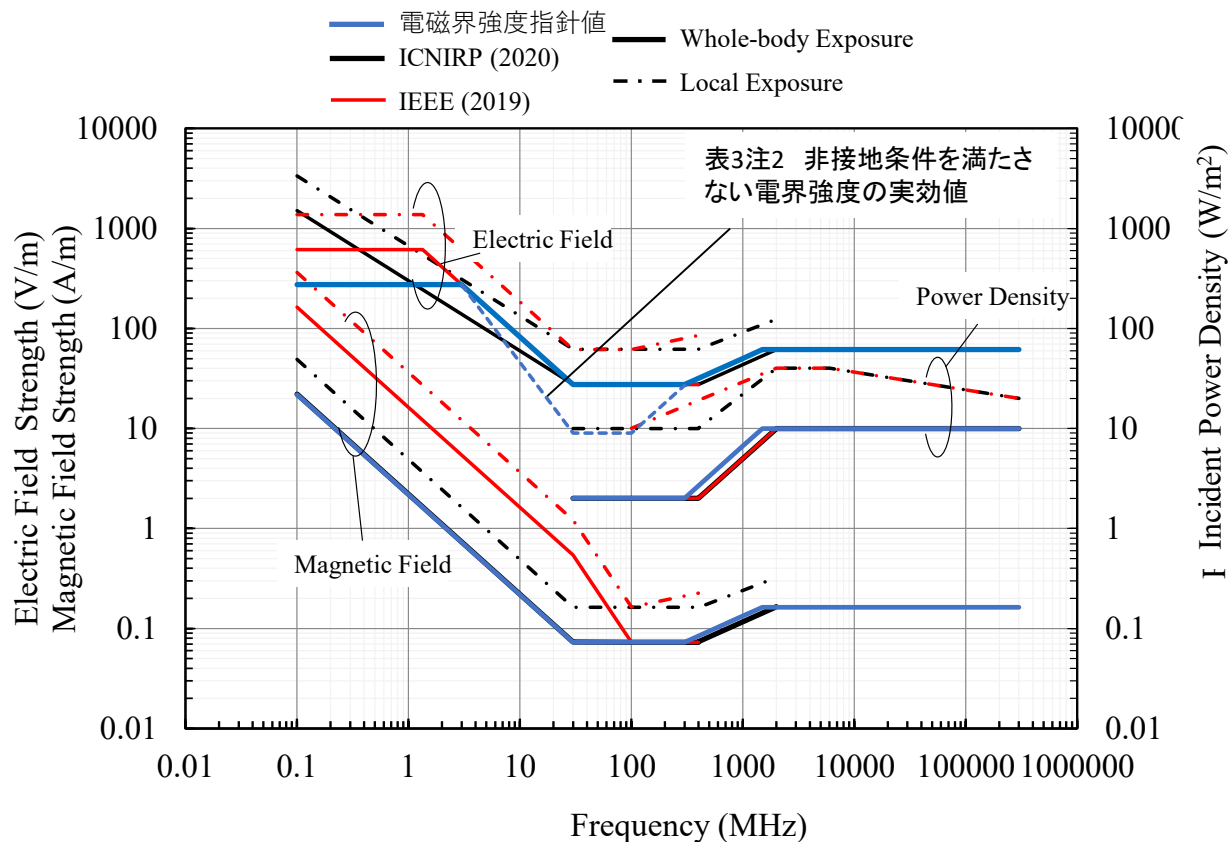
代表的な近傍界領域の目安(ガイド)



- 遠方界領域/放射近傍界領域/リアクティブ近傍界領域の単純な境界の明示はない。
- 様々な不確かさの要因(周波数、波源の物理的寸法、距離、人体占有空間中の電磁界の変動の大きさなど)から、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ある。
- 参考レベルでの評価手順の改善は、標準化機関からの情報を利用することが望ましい。
- 局所吸収指針は、電磁放射源と人体との距離が20cm以内に適用。

国際ガイドラインとの比較(電磁界強度指針)

- 国際ガイドライン/規格における入射電力密度の指針値は、最新の科学的知見に基づいて、吸収電力密度の指針値を満足するように定められている。
- 6 GHz以上では、国際ガイドライン間において参考レベルも整合が取れている。
- 6 GHz以下では、国際ガイドライン間で参考レベルが異なっている部分がある。

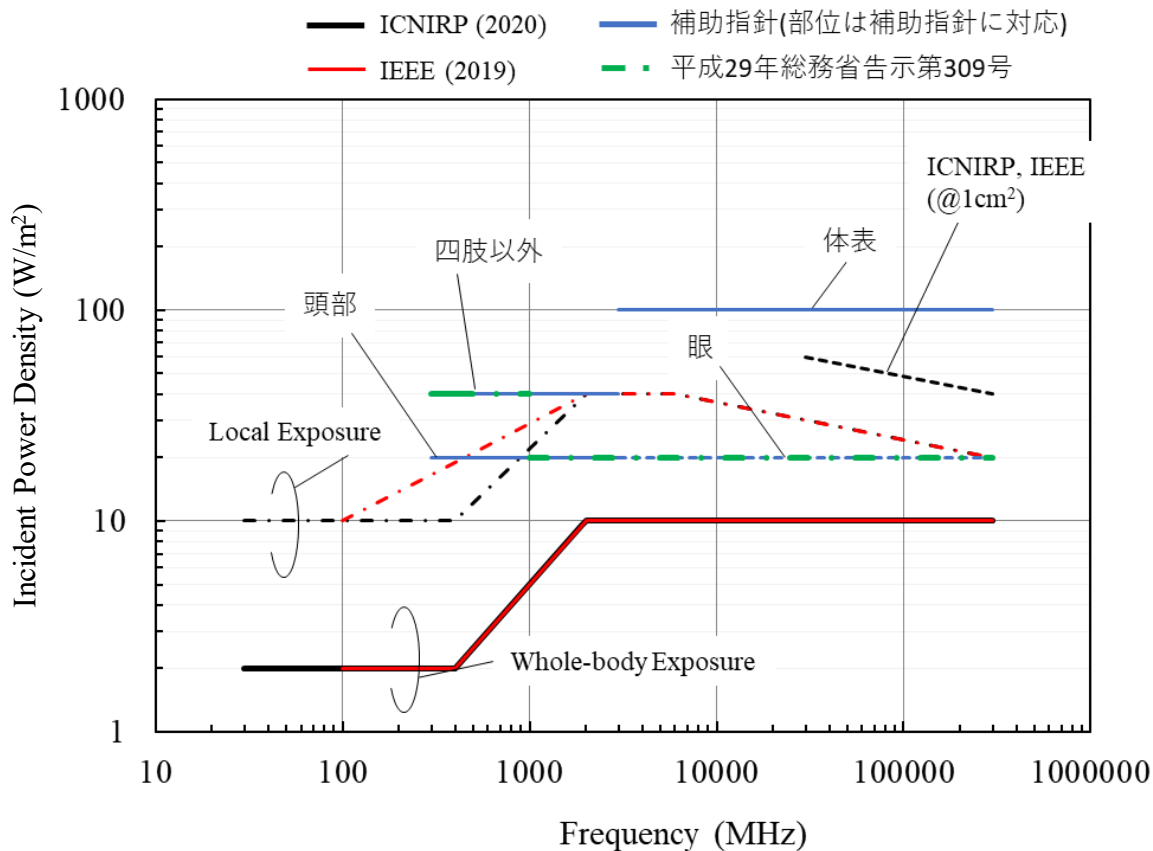


出典)

- 電波防護指針管理指針補助指針
- ICNIRP 2020: Reference levels for local exposure
- IEEE C95.1-2019: ERLs for local exposure

国際ガイドラインとの比較(補助指針)

- 6GHz以上周波数において、人体が不均一な電磁界に、あるいは局所的な電磁界にさらされる場合の入射電力密度の指針値は、国際ガイドライン/規格と比較して安全側(低い)の指針値となっている



出典)

- 電波防護指針管理指針補助指針(一般環境)
- ICNIRP 2020: Reference levels for local exposure (General public)
- IEEE C95.1-2019: ERLs for local exposure (Unrestricted environments)

補助指針: 人体から 20cm以上(300 MHz以上の周波数では10 cm以上)離れた空間を対象。

まとめ

- ICNIRPガイドラインおよびIEEE/ICES規格では、6GHz超の電波ばく露の指針値は、体表での温度上昇に基づいて定められている
 - 再現性のある電波ばく露による生体影響の最低閾値が温度上昇によるものであるとの見解を示した
- 電力吸収が表層組織のみになる周波数領域では、吸収電力密度が最大温度上昇と相関がよい
- 参考レベルは、等価平面波入射電力密度として仮定されており、リアクティブ近傍界ではその関係性は成り立たない
- 局所吸収指針の適用範囲については、適合性評価の観点から検討が必要。ただし、国際ガイドライン/規格と比較して安全側（低い）の指針値となっている

参考：ICNIRP, IEEE引用関連論文

1. K. R. Foster, M. C. Ziskin, and Q. Balzano, “Thermal modeling and the next generation of radiofrequency limits: Commentary,” *Health Physics*, vol. 113, pp. 41–53, 2017.
2. D. Funahashi, A. Hirata, S. Koderu, and K. R. Foster, “Area-averaged transmitted power density at skin surface as metric to estimate surface temperature elevation,” *IEEE Access* vol.6, pp.77665-77674, 2018.
3. K. Sasaki, M. Mizuno, K. Wake, and S. Watanabe, “Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 62, pp. 6993–7010, 2017.
4. S. Alekseev, A. Radziewsky, I. Szabo, and M. Ziskin, “Local heating of human skin by millimeter waves: effect of blood flow,” *Bioelectromagnetics*, vol.26, pp.489-501, 2005.
5. Y. Hashimoto, A. Hirata, R. Morimoto, S. Aonuma, I. Laakso, K. Jokela, and K. R. Foster, “On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 62, pp. 3124–3138, 2017.
6. P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, E. Piuzzi, “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.*, vol.46, pp.2074-2082, 1998.
7. A. Karampatzakis and T. Samaras, “Numerical modeling of heat and mass transfer in the human eye under millimeter wave exposure,” *Bioelectromagnetics*, vol.34, pp.291-299, 2013.
8. I. Laakso, R. Morimoto, J. Heinon, K. Jokela, and A. Hirata, “Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz,” *Physics in Medicine and Biology*, vol.62, no.17, pp.6980–6992, 2017.
9. K. Li, K. Sasaki, S. Watanabe, and H. Shirai, 2019 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 *Physics in Medicine and Biology*, vol.64, pii:065016, 2019.