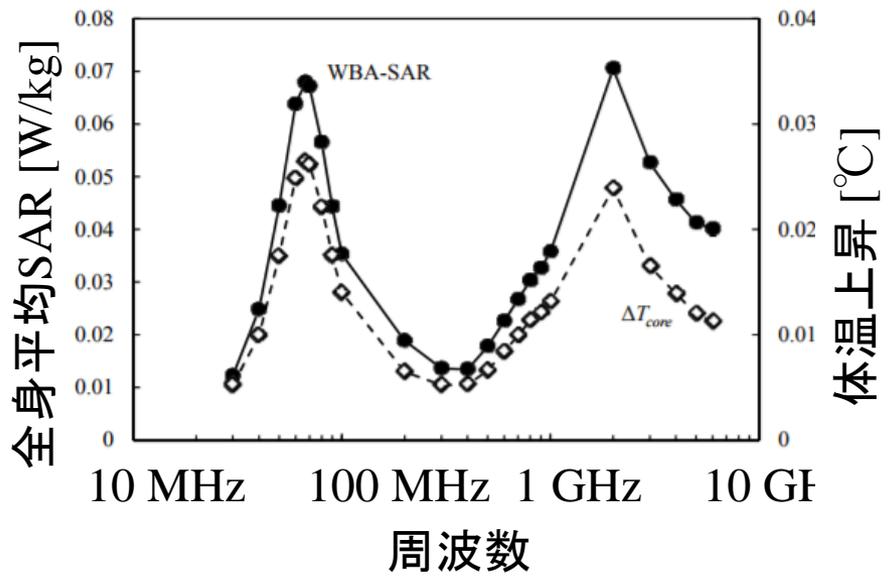


6 GHz以上の人体ばく露評価 について

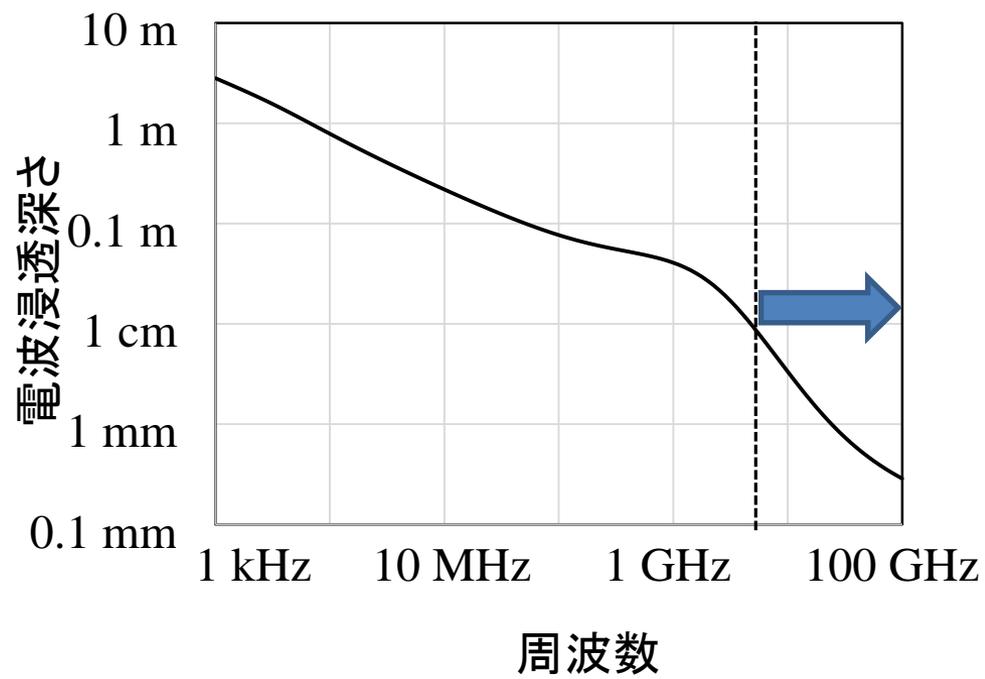
平田 晃正
名古屋工業大学

✓ 100 kHz～100GHz帯における電波による体内吸収電力の特徴

- 周波数65 MHz～130 MHzにおける共振(左下図)。身長が波長の0.4-0.45倍に相当
- 数百MHz帯～GHz帯に至るまで、体の部位で弱い共振現象を生じる場合がある。
- GHz帯以上では、吸収は比較的浸透は小さい。ミリ波帯では体表に限定(右下図)。



ICNIRP参考レベルの電磁界強度による全身平均SARの周波数特性



周波数が高くなるにつれ、電波の浸透深さは小さくなる

6 GHz超における電波影響は、主に、体表面加熱に起因

✓ 第5世代移動通信方式(5G)などに関する防護

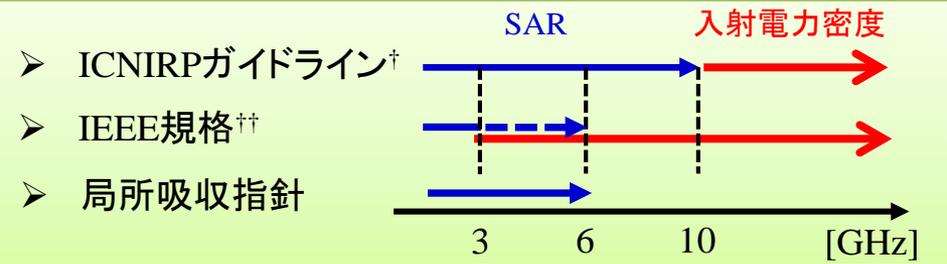
■ 6 GHz超(特に、26 GHz帯など)の周波数利用が想定

熱作用における安全性の評価指標

■ **SAR** Specific Absorption Rate [W/kg]
単位質量当たりの吸収電力量
→ 局所の10 gの組織で平均化

■ **入射電力密度** Incident Power Density [W/m²]
単位面積当たりの電力量
→ 照射領域を一定面積で平均化

① 適用上限周波数



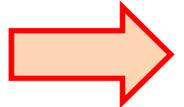
② 入射電力密度平均化面積 (基本制限 10 [W/m²])

- ICNIRPガイドライン†
- IEEE規格††
- 20 [cm²] (10 - 300 GHz)
- 100λ² [cm²] (3 - 30 GHz)
(λ[cm]: 自由空間での波長)
- 100 [cm²] (30 GHz超)

国際ガイドライン／規格によって定義が異なる

国際ガイドライン(約20年前)が決められたには6 GHz超の電波利用が十分想定されていなかった

＝ 科学的根拠に基づく国際規格

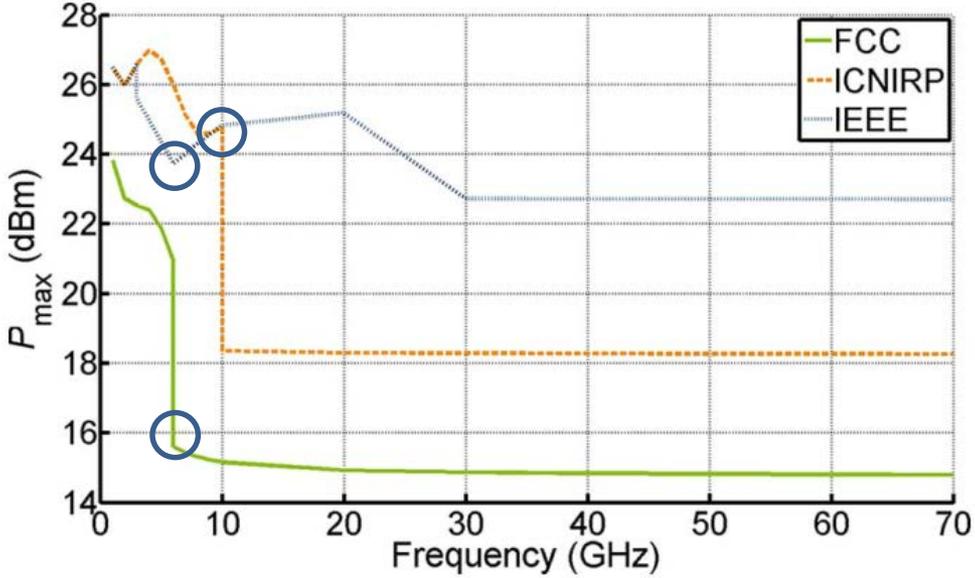
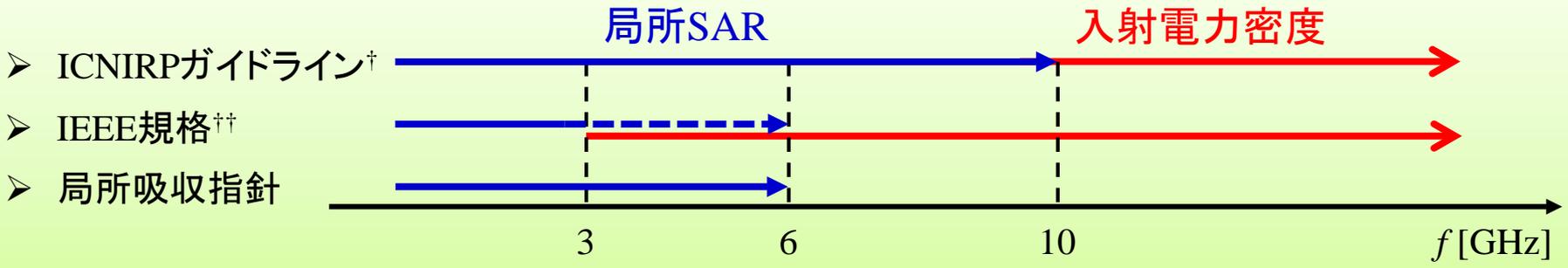


6 GHz超における評価指標の有効性について検討を行なう必要性

† ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)", Health Phys., vol.74, pp.494-522, 1998.
†† IEEE C95-1: "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz", 2005.

✓ 局所SARと入射電力密度とのギャップ

- ・SARは体内誘導物理量である一方で、入射電力密度は体外物理量
- ・SARと比較して、入射電力密度の規定に関する根拠は十分ではない



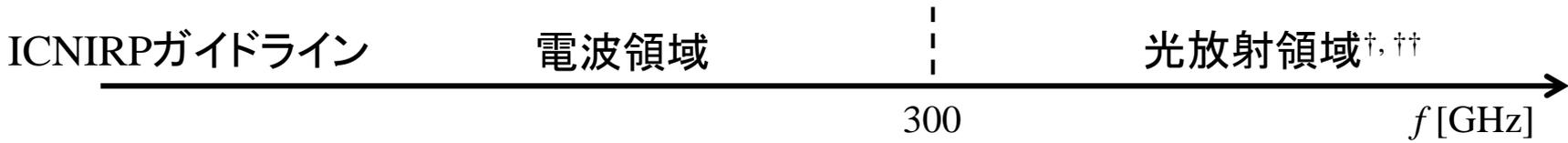
入射電力密度および平均化面積を、科学的根拠に基づいて検討する必要性

D. Colombi et al, IEEE Antenna & Wireless Propagat. Letts., 2015.

† ICNIRP: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)”, Health Phys., vol.74, pp.494-522, 1998.
 †† IEEE C95-1 : “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz”, 2005.

✓ 電波領域と光領域のギャップ

- ・ICNIRPは、電波領域 (~ 300 GHz) と光放射領域 (300 GHz ~) のガイドラインを有する
- ・光放射領域のガイドラインには、通常光 (レーザー光以外) とレーザー光に対するもので細分される



- ### 電波領域
- ・職業環境と一般環境の設定がある
 - ・平均化時間が設定されている

- ### 光放射領域
- ・環境の区別がない^{†, ††}
 - ・平均化時間の定義がない
 - ・10秒以下の高強度短時間パルス (レーザー) に対するガイドラインが設定^{††}

電波領域と光領域の境界 (300 GHz超) における相違を考慮の上、ガイドラインを規定することが望ましい

[†] ICNIRP. Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1,000 μ m. Health Phys. 2013; 105(3): 271-95.
^{††} ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. Health Phys. 2013; 105(1): 74-96.

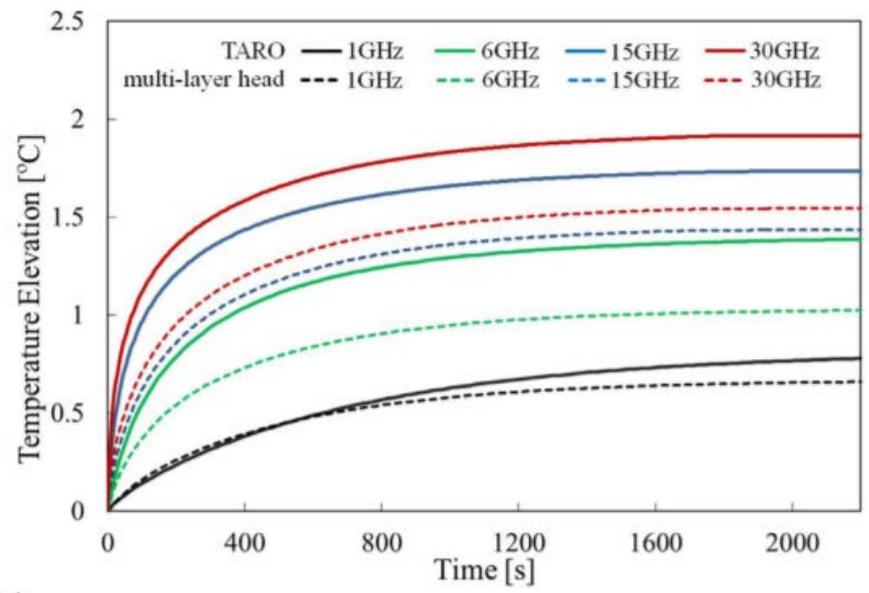
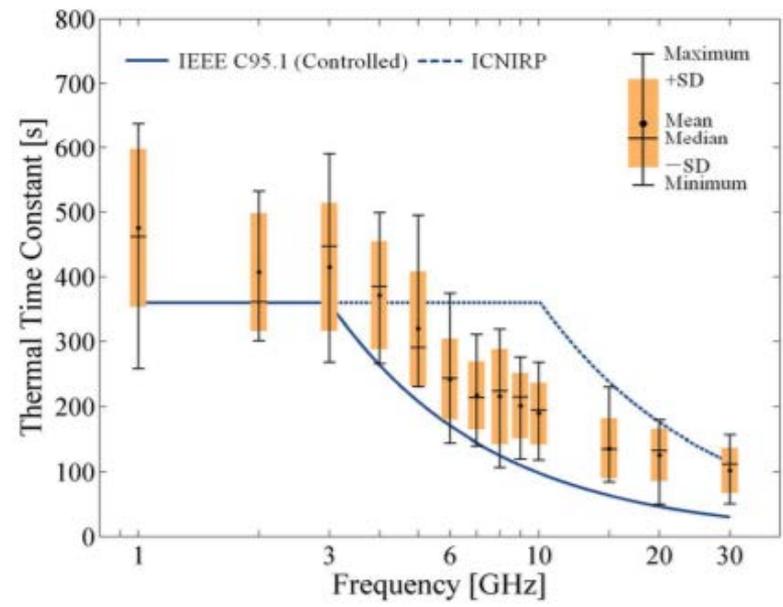
✓ 入射電力密度の平均化時間(1)

電波がヒトに入射→吸収された電波エネルギーが熱に変換→体温上昇

熱時定数: 電波がヒトに吸収されてから**体温上昇**(定常状態の63%)に要する時間
 ・熱時定数は**ばく露部位**や**周波数**に依存して変化する

熱時定数はばく露部位の**血流**に依存
 →血流の多い部位では時定数は小さくなる。
 (体温上昇も小さくなる)

周波数が高くなると、電波の浸透深さが小さくなる
 →体表面における熱時定数は、周波数が高くなるにつれて小さくなる。



† Morimoto R, Hirata A, Laakso I, Ziskin M C, and Foster K R. 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. 2016; 62 (5): 1676-99.

✓ 入射電力密度の平均化時間(2)

体温上昇の熱時定数(ICNIRPガイドライン, IEEE規格)

およそ3 GHzで6分, 30 GHzで3分程度, それより高い周波数では大きく変化しない

入射電力密度の平均化時間(ICNIRPガイドライン, IEEE規格)

3 GHz~10 GHzまでは6分, それより高い周波数では周波数に依存して小さくなる

300 GHzでは10秒(レーザーガイドラインの**パルス持続時間**と合致するように規定)

入射電力密度の持続時間(ICNIRPレーザーガイドライン†)

10秒以内(時間依存)

入射電力密度の持続時間(ICNIRP通常光ガイドライン††)

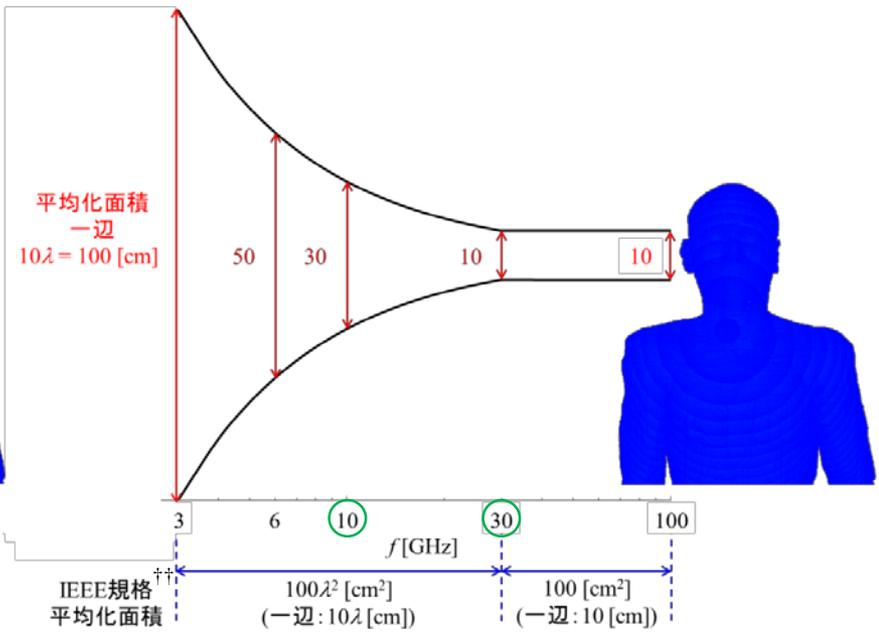
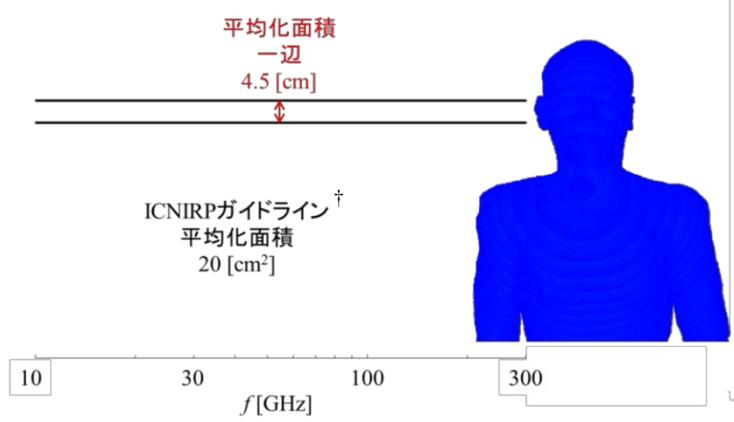
眼球に対して1000秒(皮膚については規定なし)

熱時定数は傷害の原因となる温度上昇の時定数であり、傷害の時定数というわけではない。レーザーガイドラインは、障害に対する防護

入射電力密度の平均化時間に関して、
①熱時定数, ②光領域のガイドライン の観点から検討する必要がある

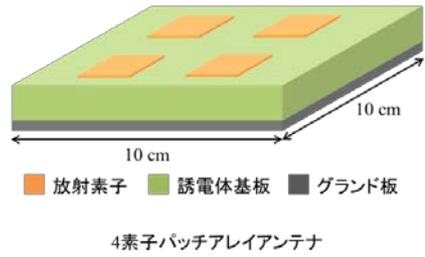
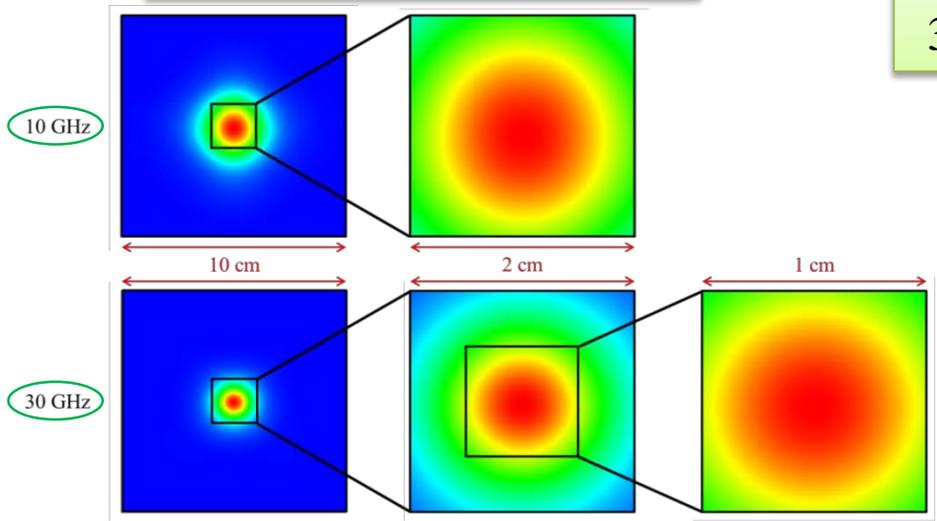
† ICNIRP. Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1,000 μm. Health Phys. 2013; 105(3): 271-95.
†† ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. Health Phys. 2013; 105(1): 74-96.

✓ 入射電力密度の平均化面積(1)



ICNIRPガイドライン†
周波数に依存せず一定

IEEE規格††
3 ~ 30 GHzにおいて周波数に依存



入射電力密度の平均化面積
周波数に依存せず、温度上昇と相関のある平均化面積を検討する必要性

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

† ICNIRP: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)”, Health Phys., vol.74, pp.494-522, 1998.
 †† IEEE C95-1: “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz”, 2005.

✓ 入射電力密度の平均化面積(2)

ICNIRPガイドライン

20cm²(許容電力10 W/m²)。 但し, 1cm²では許容電力20倍(200 W/m²)。

IEEE規格

3-30 GHz: $100\lambda^2$ [cm²] (λ : 自由空間での波長[cm])

30 GHz以上では100 cm²

近年の研究成果

30 GHzまで: 4 cm², より高い周波数では1 cm²程度[†]

1.5 cm × 1.5 cm 程度(生体内における熱の拡散長)^{††}

入射電力密度の平均化面積:

国際ガイドライン, 近年の研究より, 1 – 20cm²程度の大きさが示唆

[†] 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.

^{††} 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.