

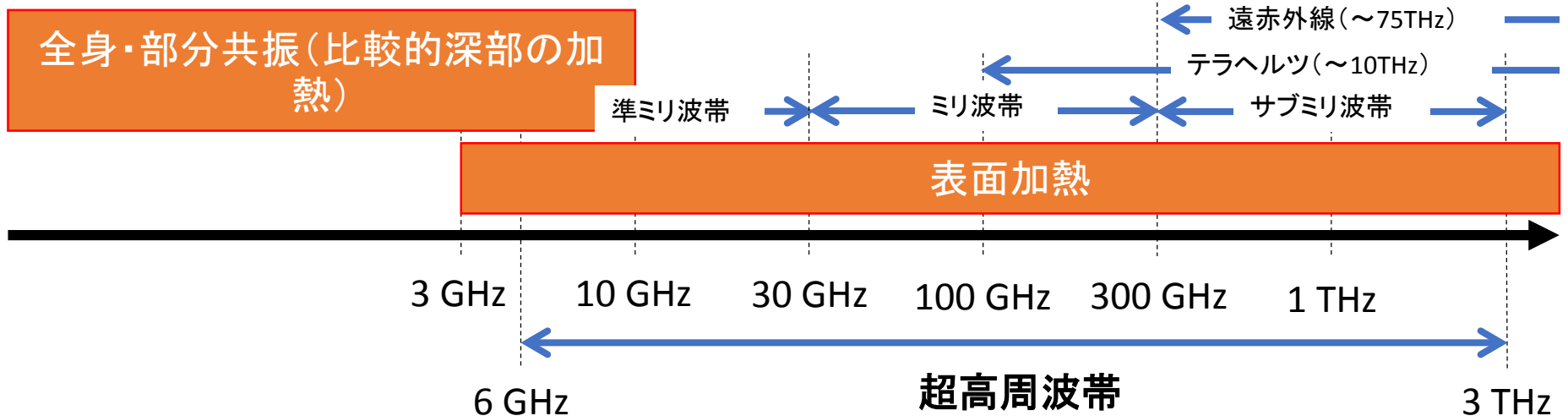
工学分野 (領域: 超高周波)

国立研究開発法人情報通信研究機構

渡辺 聡一

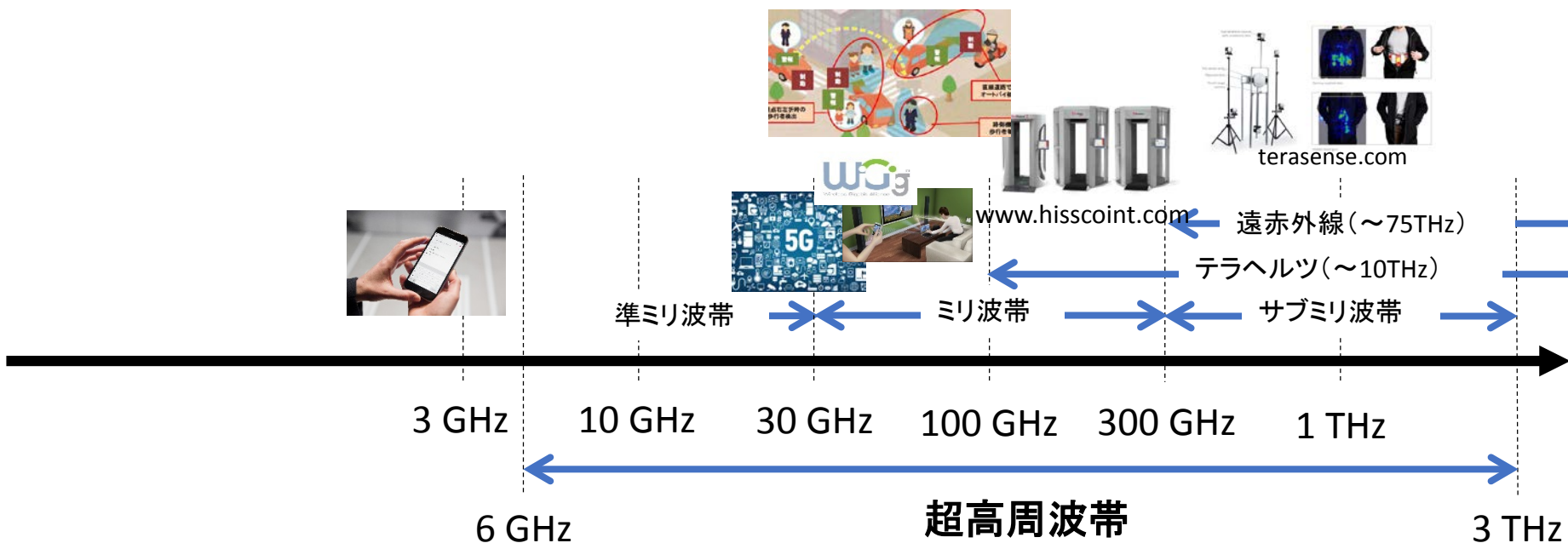
超高周波帯

- 「超高周波帯」の明確な定義は無いが、電波ばく露の分野においては、ミリ波帯を中心に体表面に集中した電力吸収による表面加熱の熱作用が支配的な周波数範囲を指すことが多い。
- 本発表では高周波ガイドラインの根拠が表面加熱となる6GHzから電波法上限の3THzまでを対象とする。



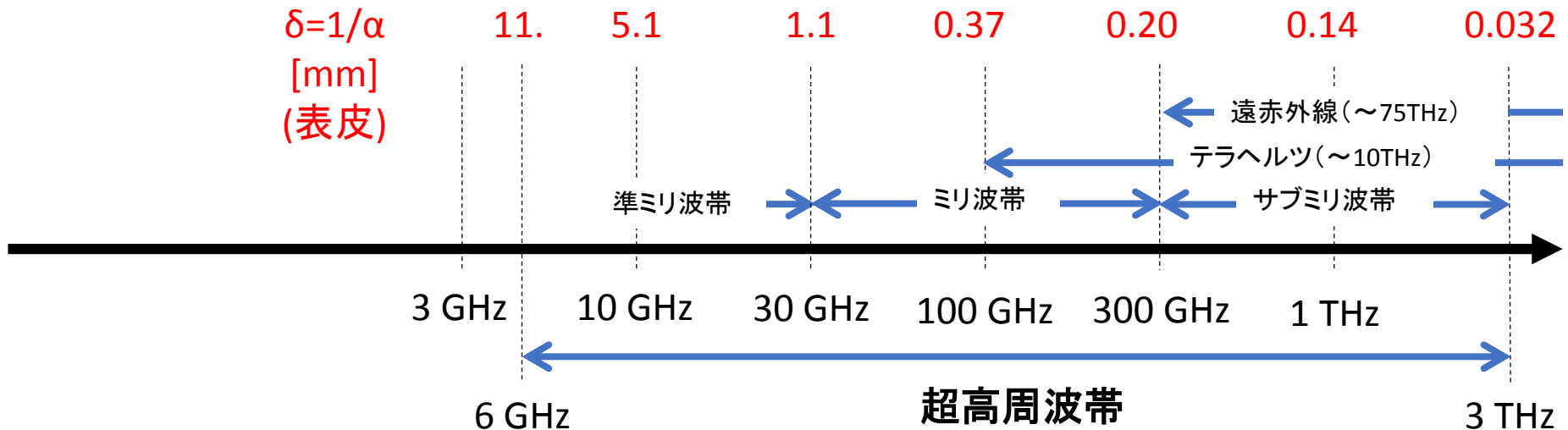
超高周波帯の電波利用システム

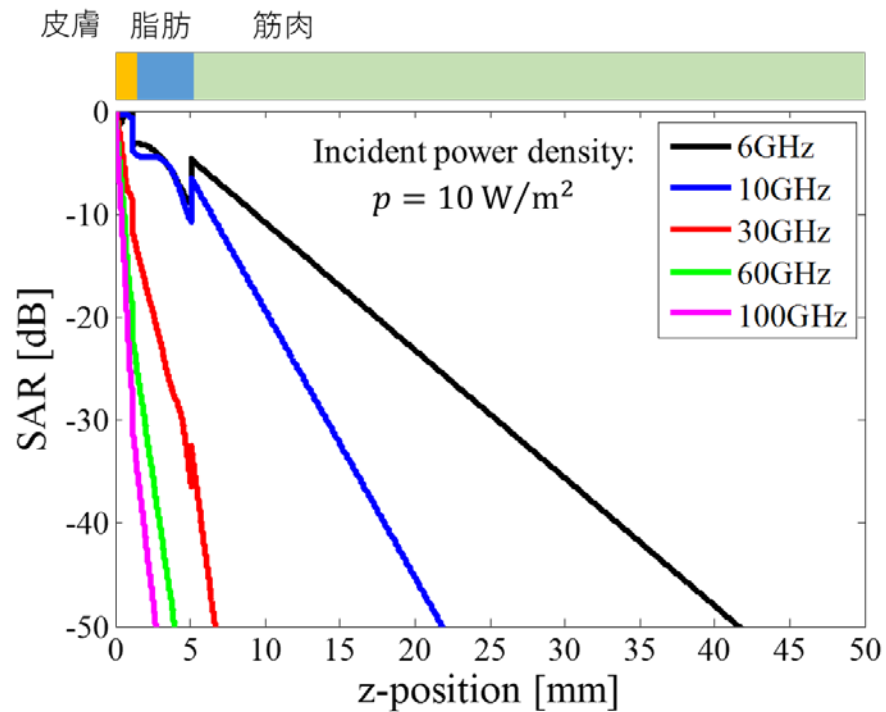
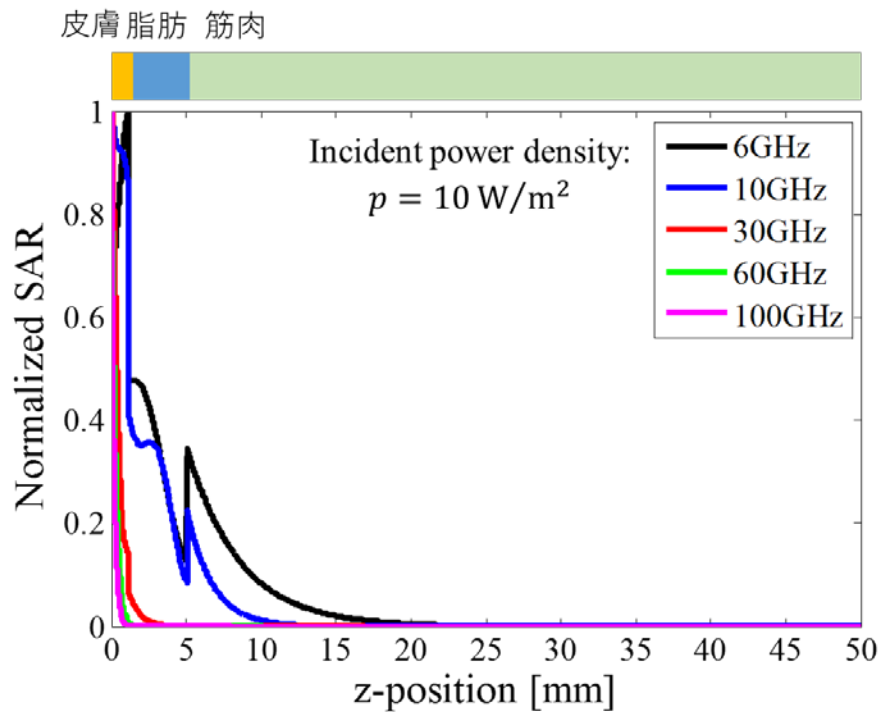
- 従来は衛星通信やレーダー等に利用
- 近年ではWiGig (60GHz) や5G (28GHz) 等の携帯無線通信に利用が拡大
- 空港セキュリティ装置で超高周波帯電波を利用



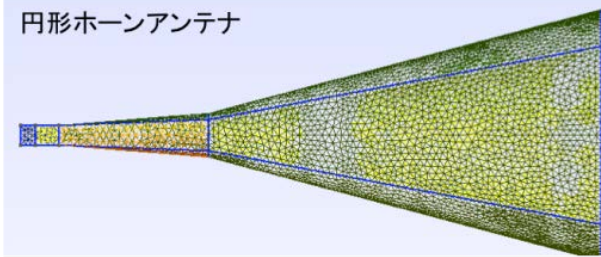
超高周波帯のばく露特性

- 超高周波数帯の波長(自由空間中)は5cm~0.1mm。
- 生体組織の浸透深さ(体表面に入射した電波が指数関数的に減衰して、86%($1-1/e^2$)の電力が吸収される深さ)は11mm~0.032mm。

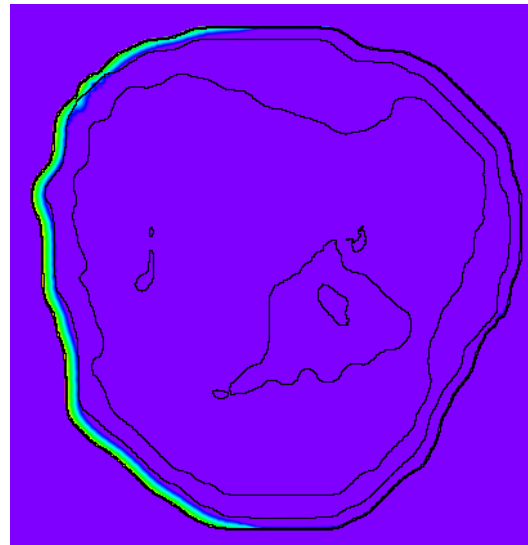
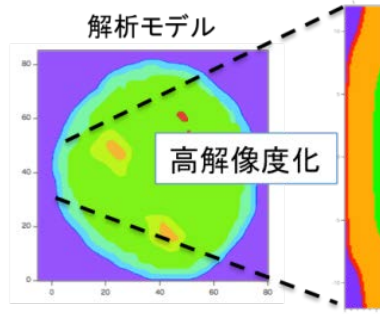




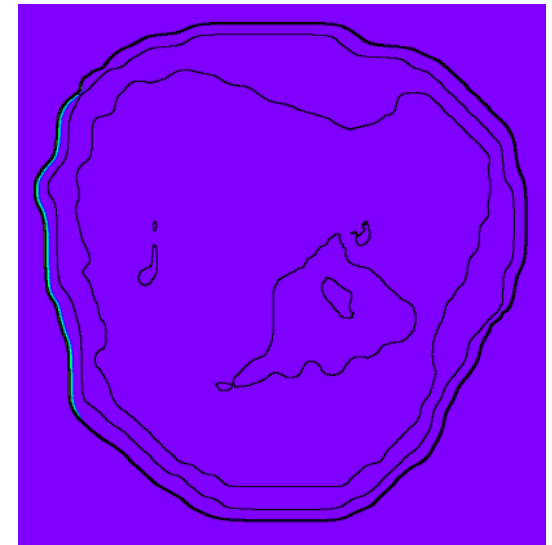
円形ホーンアンテナ



解析モデル



120 GHz



300 GHz

これまでの超高周波数帯の工学研究

- これまでのリスク評価研究は主に商用周波数(50/60 Hz)と携帯電話の周波数(700 MHz ~ 6 GHz)であり、超高周波数帯における研究は少ない。



周波数範囲: 高周波 (10MHz以上)
トピックス: 技術/ドシメトリの研究
キーワード: ミリ波・テラヘルツ

↓
140件ヒット

※高周波では2400件ヒット

これまでの超高周波数帯の工学研究(1)

- 1982年の米国ANSI規格で超高周波数帯を含む1.5GHz～100GHzについて、 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ の安全許容値が示される。
- 当時の安全許容値はミリ波帯の電波ばく露研究ではなく、遠赤外線による熱感の研究(被験者実験)結果から外挿されている。

これまでの超高周波数帯の工学研究(2)

- 1980年代にユタ大によるドシメトリー研究(平面多層モデル)
- 1990年代よりテンプル大によるミリ波温熱治療(被験者実験)に関する研究
- 1990年代後半より米軍によるミリ波熱感に関する研究

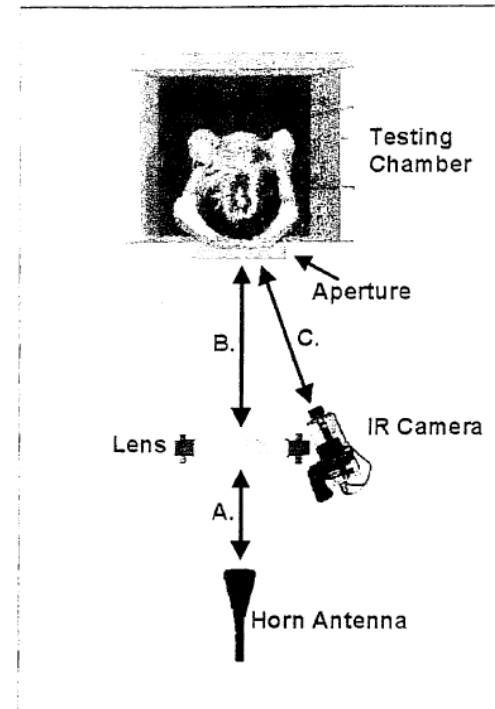


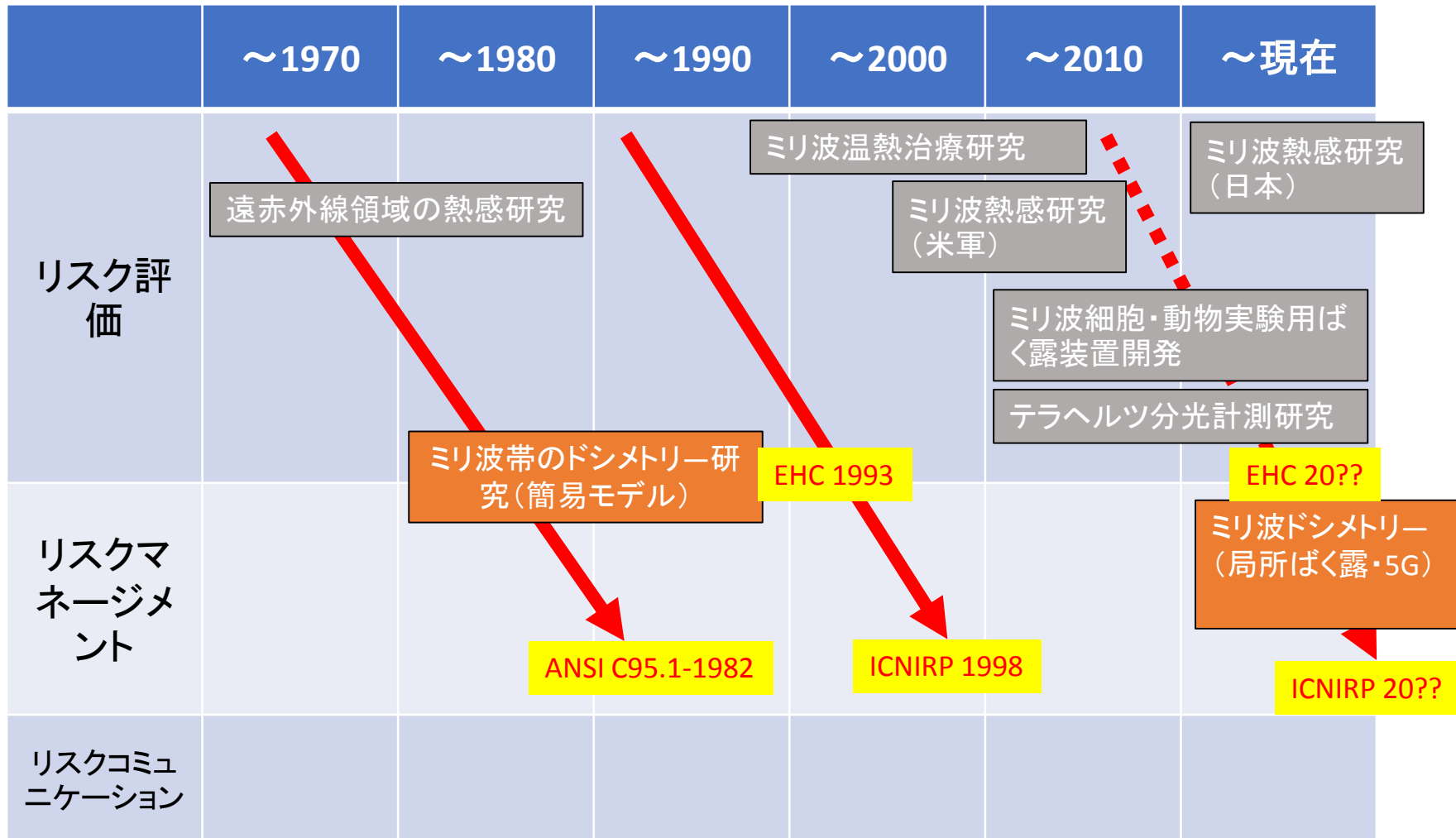
Fig. 3. A schematic diagram of the experimental setup viewed from above. The following distances are: A) 90 cm; B) 188 cm; and C) 190 cm. The dimensions of the exposure chamber were: 90 cm (w) × 90 cm (l) × 180 cm (h).

Walters et al., Health Phys., 2000

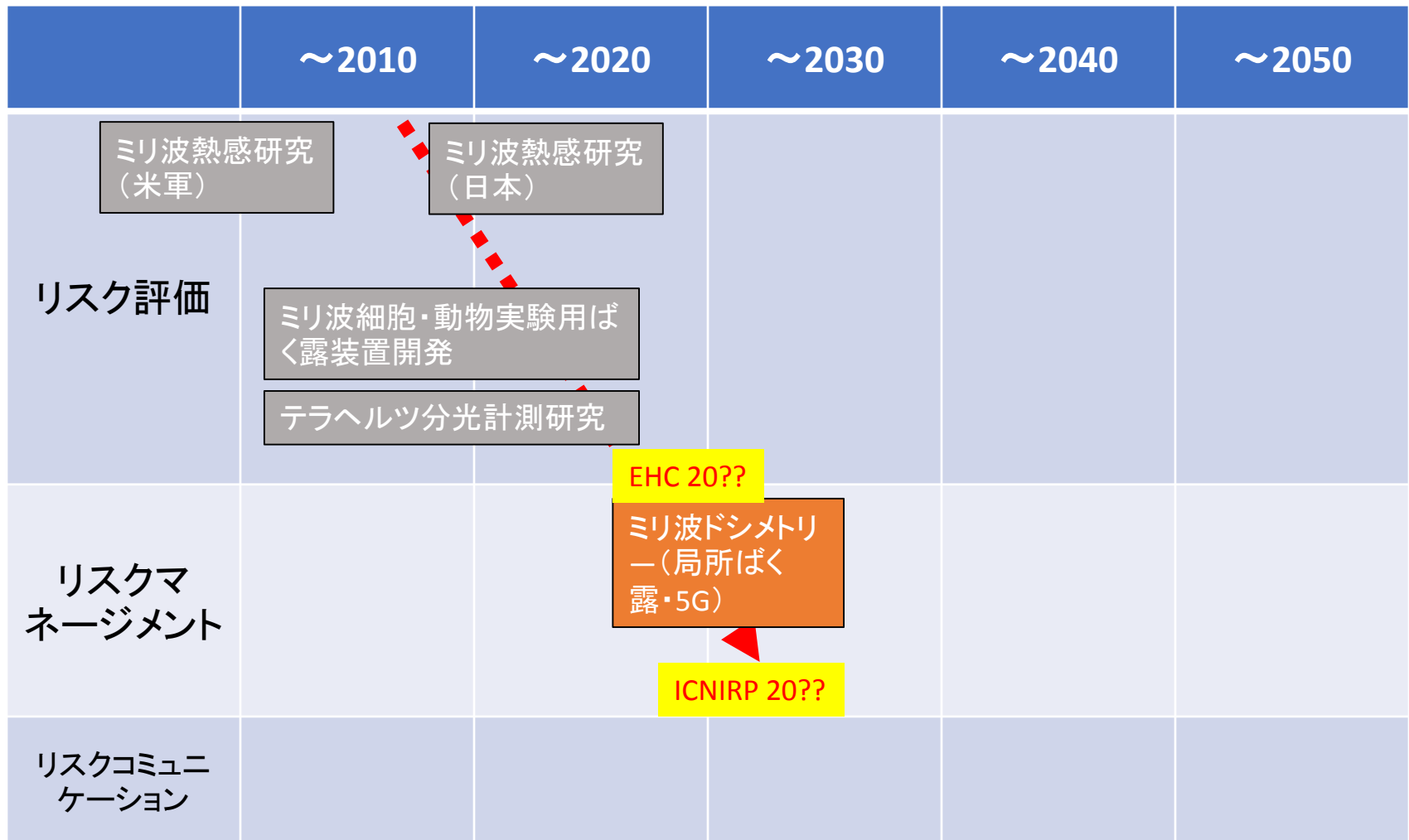
これまでの超高周波数帯の工学研究(3)

- 2000年頃からテラヘルツ波を用いた生体試料の分光計測の研究
- 2000年以降、ミリ波帯の細胞・動物実験のばく露評価の研究(総務省委託研究を含む)
- 2015年から、ミリ波帯温熱知覚実験(総務省委託研究)を実施中
- 2016年頃から、5Gを対象としたばく露評価の研究
- **疫学研究は無い？**
- **適合性評価方法に関する研究は皆無！**

これまでの工学研究の経緯



今後の工学研究は？



最近・今後の電波利用状況

- 今後、5Gシステムを中心とした超高速無線通信システムでの利用が拡大する見込み。
 - 一般の生活環境中で、ミリ波帯電波を発射する電波放射源が人体の極近傍で利用されるという状況はこれまでになかった。
 - ミリ波帯におけるビームフォーミングは空間的に局在したばく露となり、さらに体表に集中した加熱となる。
- レーダー(車載・歩道)による一般生活中のばく露の機会も増大すると予想される。
 - パルスレーダーの場合、短時間の間欠ばく露となる。
- 将来的にはテラヘルツ帯を用いた近未来無線通信システムの導入が想定される。

超高周波数帯に対する最近のレビュー(1)

- 生体電磁環境に関する検討会一次報告(2015.6)
 - テラヘルツ帯電磁界の健康影響に関しては、現状では研究データの蓄積が非常に少ない状況である。
 - この周波数帯の研究においては、電磁界の周波数、入射電力密度、ばく露時間等の物理的パラメータだけでなく、屈折率、吸収率、散乱等の生物学的なパラメータについても重要な要素となることが指摘されている。
 - テラヘルツ波が人体に侵入する深さは100 μ m程度であるため、**皮膚と眼の角膜への影響が研究の最も重要なターゲット**となる。
 - 基本的に水分がテラヘルツ波の吸収体となるが、DNA、タンパク質、炭水化物など、多くの生物学的分子も吸収に関与すると考えられる。これらがテラヘルツ波を吸収することから、強い入射電力密度のテラヘルツ電磁界は大きな**熱作用**を示す要因となり得る。そのため、その影響に関する**定量的な分析が早期に実施されることが期待される**。
 - 一方、弱いテラヘルツ電磁界ばく露の生物学的影響を調べた研究例は少ないが、近年、テラヘルツ波源と検出器が広く使用できるようになったことを背景に、研究は増加傾向にあり、今後の研究推進が期待される。

超高周波数帯に対する最近のレビュー(2)

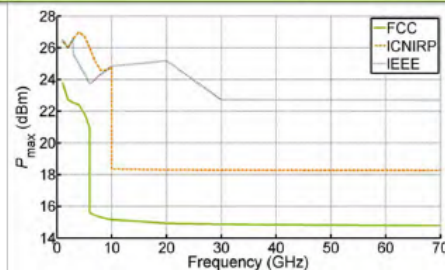
- 生体電磁環境に関する検討会「先進的な無線システムに関する電波防護について」報告書案(2018.1パブリックコメント版)
 - **超高周波数であるミリ波(30～300GHz)およびサブミリ波(300GHz～3THz)においては今後利用が拡大する可能性のある周波数帯であるが、非熱作用に基づく超高周波数帯の健康影響に関しては、現状では研究データの蓄積が少ない状況である。したがって現時点の見解としては一次報告書の時点と変わらず、超高周波数帯の健康影響については、現時点では結論を出せる段階にない。今後、体系的でかつ幅広い周波数帯を対象とした研究の早急な実施が望まれる。**

超高周波数帯に対する最近のレビュー(3)

3.2.1. 局所SARと入射電力密度とのギャップ

23

- 我が国では、6 GHzから300 GHzまでの周波数において、電波放射源より10 cm未満における指針値はない。
- 高い周波数帯については、電波の体内部への浸透が減って体表の吸収となるため、ICNIRP等で入射電力密度が用いられている。
- 各国際ガイドライン間で規定する入射電力密度の平均化面積も異なっており、当該の文献もない。即ち、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。
- 科学的根拠に基づき、適切な面積で平均化した入射電力密度の指針値を定める必要がある。



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.

例えば、ICNIRPは、10GHz以下ではSARを用いて24dBm以上となっているが、10GHz以上では入射電力密度を用いて約18dBmとなり、ギャップが生じている。

¹ 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.

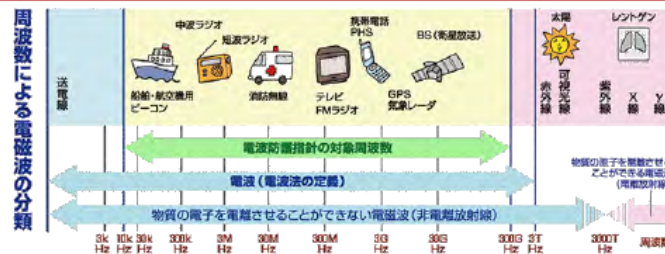
出所)先進的な無線システムに関するワーキンググループ(第7回)名工大資料に基づき作成

超高周波数帯に対する最近のレビュー(4)

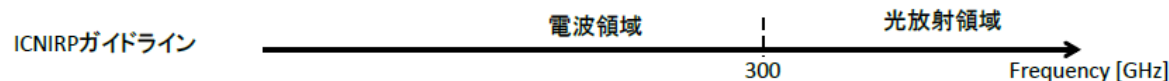
3.2.2. 電波領域と光領域のギャップ

24

- ICNIRPは、電波領域(300 GHz以下)^(※1)と光放射領域(300 GHz以上)^(※2,3)のガイドラインを有し、光放射領域のガイドラインは、レーザ光以外とレーザ光に対するものに細分される
- 電波領域のガイドラインには、
 - ・職業環境と一般環境の区別
 - ・平均化時間の設定
 があるが、光放射領域のガイドラインにはそれらの設定がなく、両者に相違がある
- 電波領域と光領域の境界における相違を考慮し、ガイドラインを規定することが望ましい



出所)総務省「電波と安全な暮らし」(http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/emf_pamphlet.pdf)



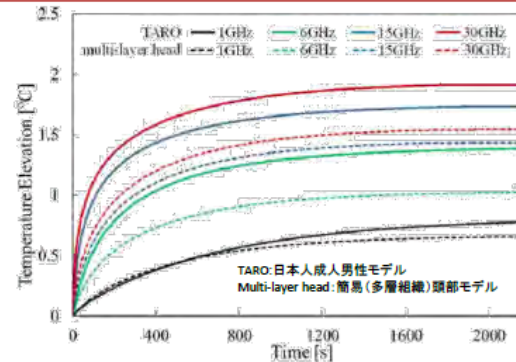
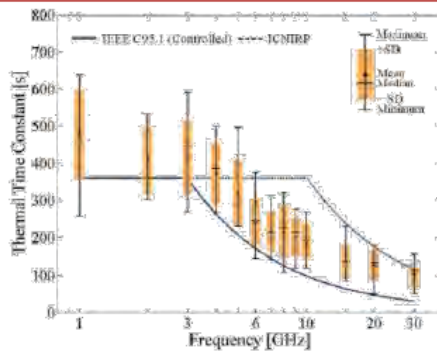
出所) (※1) ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz). Health Phys., vol.74, pp.494-522, 1998.
 (※2) ICNIRP. Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1,000 μm. Health Phys. 2013; 105(3): 271-95.
 (※3) ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. Health Phys. 2013; 105(1): 74-96.

超高周波数帯に対する最近のレビュー(5)

3.2.3. 入射電力密度の平均化時間

25

- ヒトに入射した電波の一部は人体内で吸収、熱に変換され、体温上昇を引き起こす
- 体温上昇の熱時定数(定常状態の体温上昇の63%の値までに要する時間)は、部位や周波数などにより大きく変化する(※1)
- ICNIRPガイドライン、IEEE規格によって入射電力密度の平均化時間が定められており、3/10 GHzまでは6分、それより高い周波数では周波数が高くなるにつれ小さくなる(※2,3)
- 体温上昇の特性を考慮し、平均化時間を規定することが望ましい



ICNIRPガイドライン、IEEE規格によって入射電力密度の平均化時間が定められている。

熱時定数の周波数依存性と平均化時間

周波数が高くなると、熱時定数が小さくなる。

出所) (※1) 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.

(※2) ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)", Health Phys., vol.74, pp.494-522, 1998.

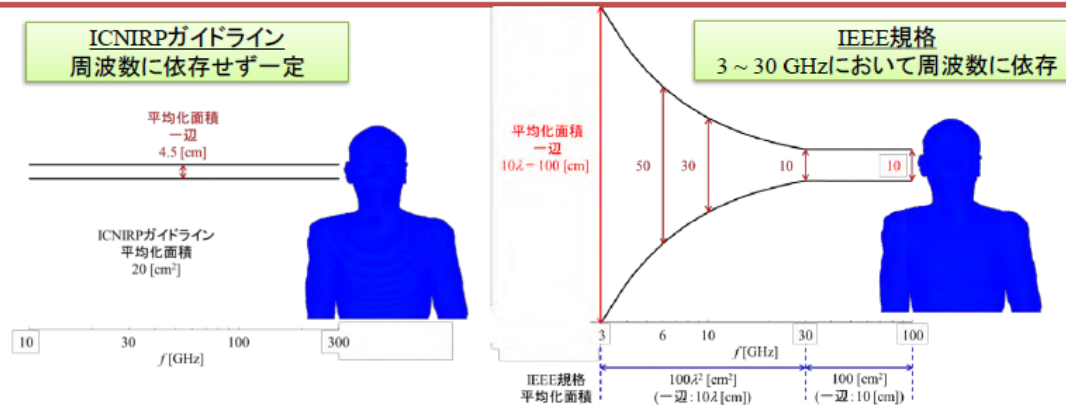
(※3) IEEE C95-1: "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz", 2005.

超高周波数帯に対する最近のレビュー(6)

3.2.4. 入射電力密度の平均化面積

26

- 入射電力密度の平均化面積がICNIRPガイドライン、IEEE規格によって定められている一方、我が国の局所吸収指針には6GHz以上は規定がない。(※1,2)
- ICNIRPガイドライン、IEEE規格における平均化面積の定義は異なる。
- 近年の研究において、1 cm²から4 cm²(一辺1cm~2cm)の領域が適当であると報告されている。(※3,4)
- 科学的根拠に基づいた入射電力密度の平均化面積を定義することが望ましい。



ICNIRPガイドライン、IEEE規格による入射電力密度の平均化面積

- 出所) (※1) ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)", Health Phys., vol.74, pp.494-522, 1998.
(※2) IEEE C95-1: "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz", 2005.
(※3) 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.
(※4) 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.

今後の工学研究のポイント(高精度ばく露評価技術)

- 中期的課題

- 生体組織電気定数の不確かさ改善
→リスク評価・リスクマネージメント
- 数値人体モデルの超高精細化(体表・眼球等)
→リスク評価
- ミリ波帯数値解析技術・測定技術の開発
→リスク評価・リスクマネージメント

- 長期的課題

- 新たな電波利用システム(5G、WiGig、レーダー等)のばく露レベルモニタリング技術の開発
→リスク評価・リスクマネージメント・リスクコミュニケーション
- テラヘルツ帯ばく露評価人体モデルの開発
→リスク評価・リスクマネージメント
- テラヘルツ帯数値解析技術・測定技術の開発
→リスク評価・リスクマネージメント

今後の工学研究のポイント(適合性露評価技術)

- 中期的課題

- 5G・WiGig等のミリ波帯携帯無線システムの適合性評価方法
→ リスクマネジメント
- ミリ波帯レーダー(車載・歩道等)の適合性評価方法
→ リスクマネジメント

- 長期的課題

- 数値シミュレーションによる適合性評価技術
→ リスクマネジメント
- テラヘルツ帯電波利用システムの適合性評価技術
→ リスクマネジメント

今後の工学研究のポイント(医学・生物学的研究)

- 中期的課題

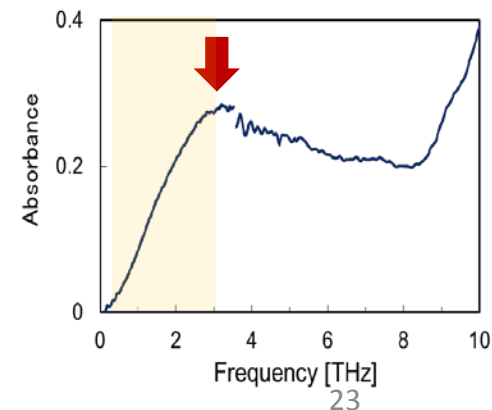
- ミリ波帯における熱知覚のメカニズム解明のための被験者／動物／細胞実験用ばく露装置の開発
 - リスク評価
- 低レベル(熱作用以下)動物／細胞実験用ばく露装置の開発
 - リスク評価

- 長期的課題

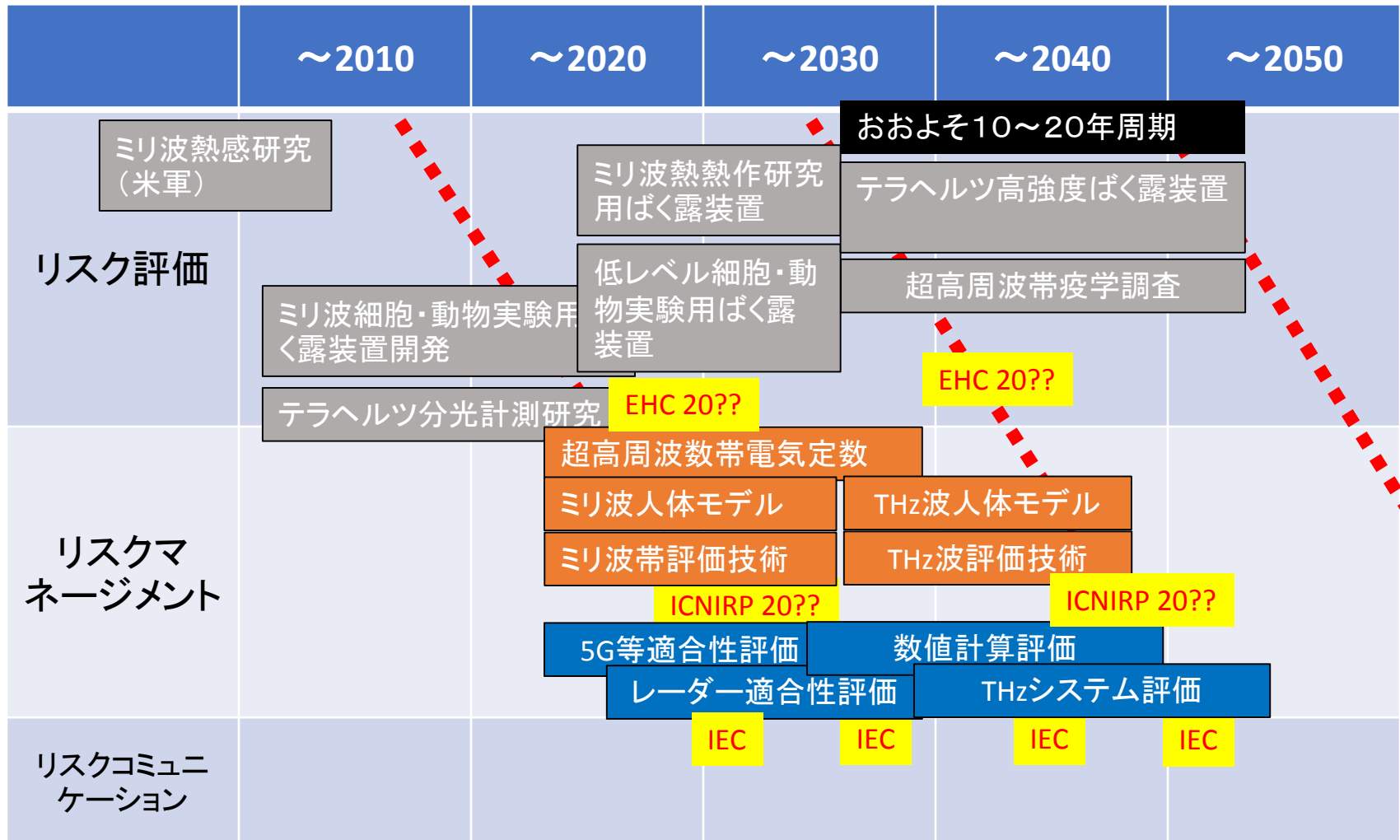
- テラヘルツ帯の防護指針策定のための高強度ばく露実験(被験者／動物／細胞)用ばく露装置の開発
 - リスク評価
- ミリ波帯・テラヘルツ帯を対象とした疫学調査のためのばく露評価技術
 - リスク評価

今後の工学研究のポイント(テラヘルツ帯の共鳴現象)

- マイクロ波・ミリ波帯の生体組織の電気的特性は水分子の配向分極(緩和周波数は約20GHz)で決定付けられている。
 - 水分子の回転運動に起因する熱作用が支配的
- 数100GHz以上のテラヘルツ領域では、生体内高分子の共鳴現象が影響してくる。
 - 熱作用以外の影響についての探索が必要



今後の工学研究の提案



まとめ(1)

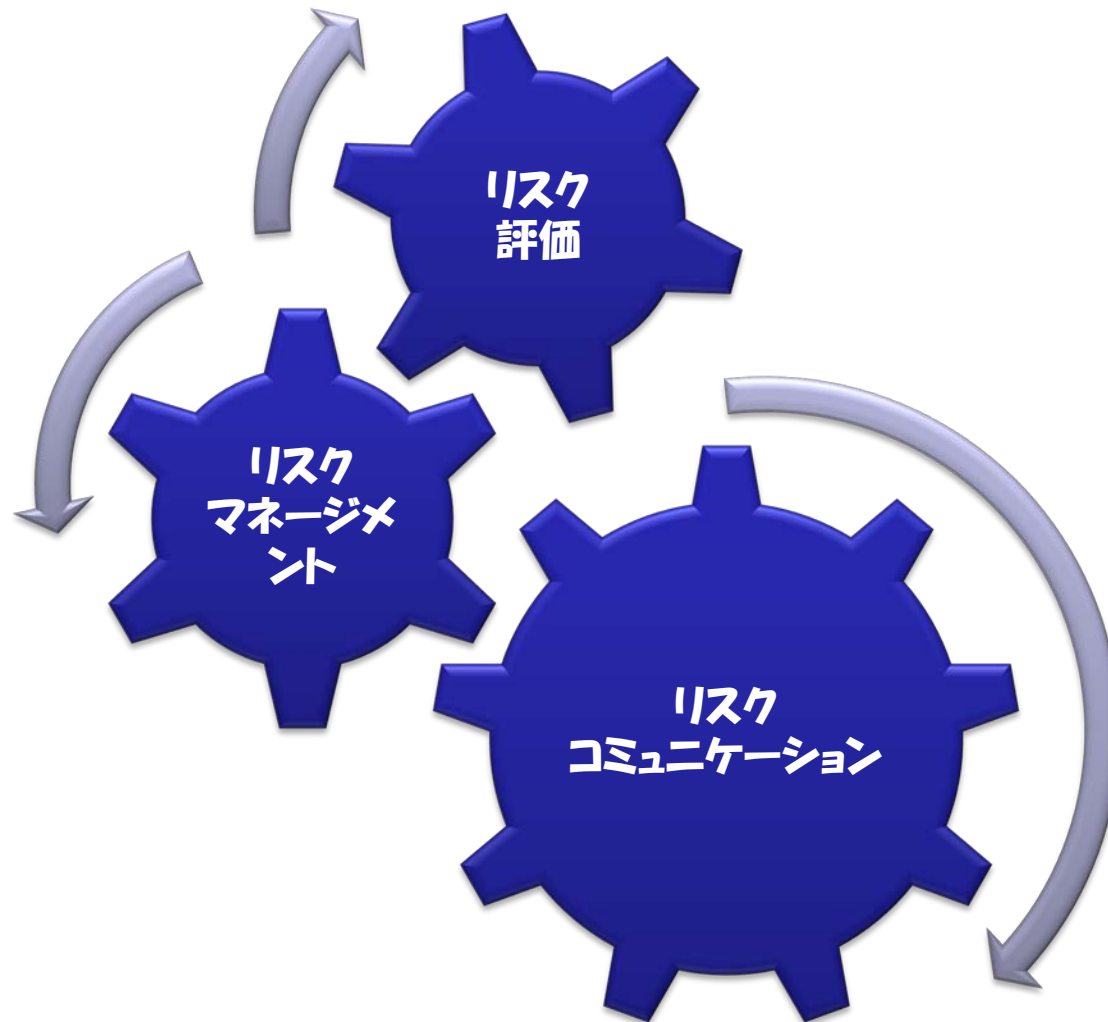
- これまでの工学研究では、高周波および光領域からの拡張による検討が行われていた。
- 今後の工学研究では、中期的には高品質なリスク評価のための医学・生物学的研究と**新たな電波利用システム(5G等)の適合性評価技術に関する研究が必要**。
- ばく露評価技術の高精度化のための取り組み(電気定数の不確かさ改善や数値計算・計測技術の開発)も必要。
- 将来の300GHz～3THzにおける電波利用に対応するための**電波防護指針策定(上限周波数の拡張)に向けた研究が必要**。

まとめ(2)

- 新しい電波利用のリスク問題への対応には、工学研究が重要であり、人材育成の視点からの研究推進も必要。
- 電波利用が高度化する5G/IoT社会においては、人体防護原則に関する検討も必要。
 - 体内植え込み機器装着者の人体防護
 - 医療・ヘルスケアにおける人体防護
 - 電波の有効利用とリスクのバランスを考慮した柔軟な人体防護

以下、補足資料

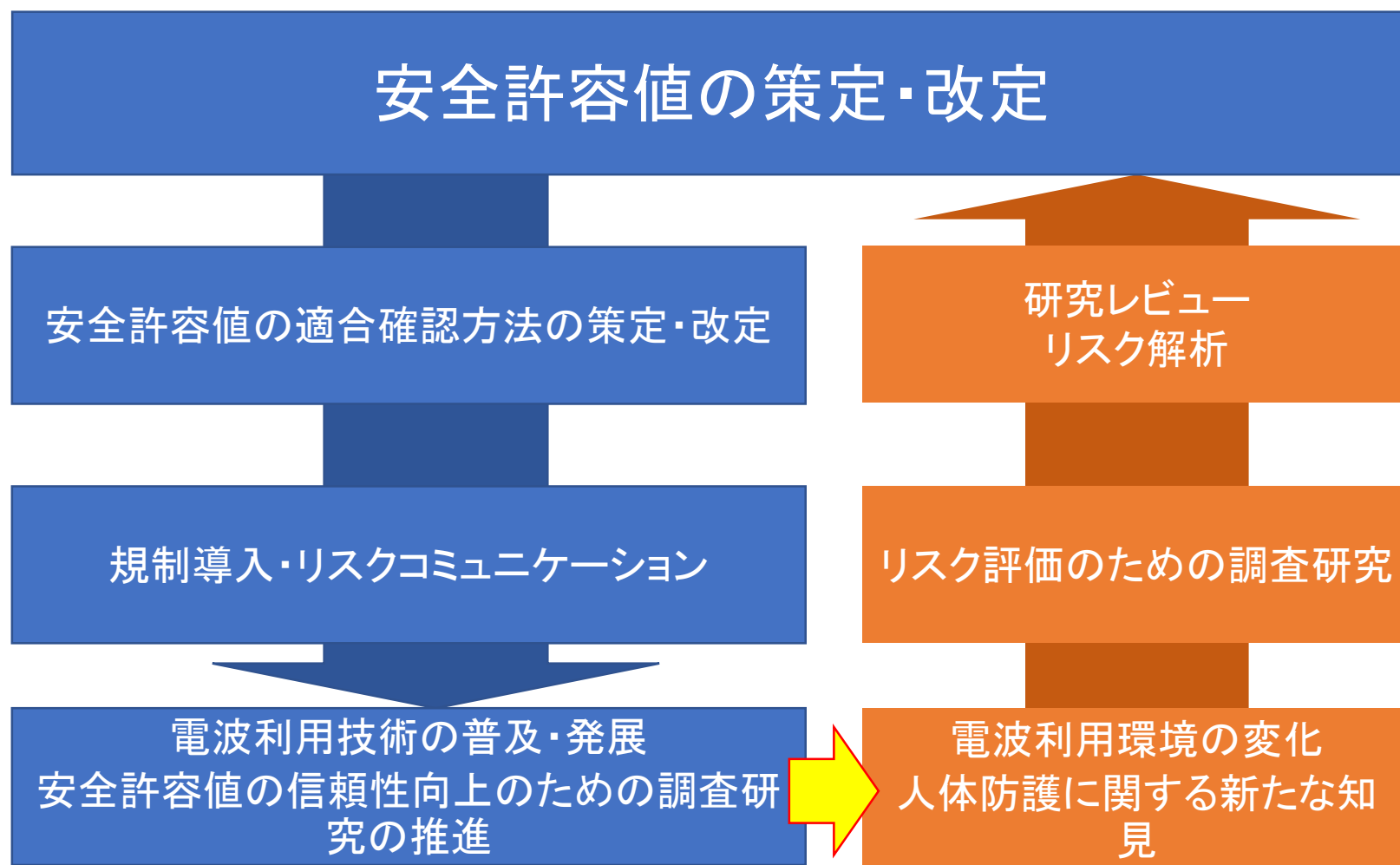
リスク管理の3ステップ



電波のリスク管理

- リスク評価
 - 医学・生物研究を通じて、電波の健康影響の閾値や量－反応特性を明らかにする。
- リスクマネジメント
 - 健康影響の閾値に適切な低減係数を考慮した安全許容値(基本制限値)を策定する。
 - 実際の人体防護管理に適した安全許容値(参考レベル)を策定する。
 - 安全許容値への適合性を確認するための方法を策定する。
- リスクコミュニケーション
 - 過度な不安を抱かずに、安全かつ安心して、便利に電波を利用する環境の構築。
 - 電波の安全性を過信せず、電波利用システムの安全許容値を適切に順守することで、適正に電波を利用する環境の構築。

電波のリスク管理のサイクル



工学分野の主要3研究課題



高精度

人体の電波ばく露量計測
技術



高精度

再現性

医学・生物実験の
ためのばく露装置
及びばく露量評価

電波防護指針適
合性評価技術

信頼性

再現性

簡便性

電波のリスク管理と工学研究の例

- リスク評価

医学・生物研究のためのばく露装置開発とばく露評価

⇒健康影響の閾値と量－反応特性の把握

電波利用環境における人体のばく露量特性を解明

- リスクマネジメント

医学・生物研究におけるばく露量の不確かさ評価

人体のばく露量の変動量(合理的な最悪値)の評価

⇒低減係数の決定(閾値×低減係数＝安全許容値)

体内電磁界強度で示された基本制限値に対応する対外入射電磁界強度(参考レベル)の導出

適合性評価方法の開発・改良

- リスクコミュニケーション

- 人体のばく露量モニタリングデータの取得・提供
- 簡便かつ効果的な人体のばく露低減手法の開発